

JAERI-M  
88-121

CAPSTAR : 照射用キャプセル外筒・内筒の  
安全性強度評価プログラム

1988年7月

小林 敏樹\*・星屋 泰二・新見 素二  
染谷 博之・原山 泰雄

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, 1988

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 日立高速印刷株式会社

CAPSTAR：照射用キャプセル外筒・内筒の  
安全性強度評価プログラム

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部  
小林 敏樹\*・星屋 泰二・新見 素二  
染谷 博之・原山 泰雄

(1988年6月8日受理)

試験材料を格納し、照射試験のため原子炉炉心に装荷されるキャプセルの外筒（内筒）は、炉心とキャプセル内容物との境界である。キャプセルが炉心に損傷を与えないため、キャプセル外筒（内筒）については安全上の強度評価が必ず要求される。これらのキャプセル設計の効率化を図るため、キャプセル外筒（内筒）の強度評価を行う計算機プログラム、CAPSTARを作成した。

この報告書は、プログラムCAPSTARで行う計算内容、プログラム入／出力についての説明を記載している。

CAPSTAR: A Program to Evaluate Safety Strength for  
Outer/Inner Tubes of Capsules

Toshiki KOBAYASHI\*, Taiji HOSHIYA, Motoji NIIMI  
Hiroyuki SOMEYA and Yasuo HARAYAMA

Department of JMTR Project  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received June 8, 1988)

The outer/inner tube of a capsule, which contains test specimens in and is loaded in a reactor core for irradiation experiments, is a boundary between its internal materials and the reactor core. Therefore, not to be a injure to the reactor core, the tube is required to calculate induced stresses and to evaluate the safety on its strength.

A computer program, named CAPSTAR, to calculate the strength of the outer/inner tubes on safety evaluation was compiled, as a step of improving the efficiency of capsule designs.

The present report describes the calculation method and input/output guides of the CAPSTAR program.

Keywords: CAPSTAR, Capsule, Outer Tube, Inner Tube, JMTR, Safety  
Evaluation, Stress Calculation, Allowable Stress,  
End Plug, Internal/External Pressure

---

\* On leave from Nippon Kokan K.K.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. キャプセル外筒（内筒）の応力計算および強度評価 .....	2
2.1 応力計算 .....	2
2.1.1 内・外圧力 .....	2
2.1.2 応力計算 .....	4
2.2 強度評価 .....	5
2.2.1 許容応力 .....	5
2.2.2 強度評価 .....	6
3. プログラム解説 .....	10
3.1 プログラムの構成 .....	10
3.2 物性値等について .....	10
3.2.1 許容応力および降伏応力 .....	10
3.2.2 物 性 値 .....	11
3.3 入力について .....	11
3.3.1 入力方法 .....	11
3.3.2 入力変数の説明 .....	12
3.4 出力について .....	14
謝 辞 .....	27
参考文献 .....	27
付 録 A サーマルラチェットの検討 .....	28
付 録 B 円筒形耐圧容器の不連続部に発生する応力 .....	30
付 録 C J M T R キャプセル等設計基準（抜粋） .....	36

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Stress calculation and safety evaluation on strength of capsule outer/inner tubes .....	2
2.1 Stress calculation .....	2
2.1.1 Internal and external pressure .....	2
2.1.2 Stress calculation .....	4
2.2 Safety evaluation on strength .....	5
2.2.1 Allowable stress .....	5
2.2.2 Safety evaluation .....	6
3. Guide to program .....	10
3.1 Construction of program .....	10
3.2 Allowable stress and material properties .....	10
3.2.1 Allowable stress and yield stress .....	10
3.2.2 Material properties .....	11
3.3 Guide to input .....	11
3.3.1 How to input to the program .....	11
3.3.2 Explanation of input variables .....	12
3.4 Guide to output .....	14
Acknowledgements .....	27
References .....	27
Appendix A Study of thermal ratchet .....	28
Appendix B Stress generated at a discontinuity of the structure in the cylindrical pressure vessels .....	30
Appendix C Design standard for JMTR capsules (excerpts) .....	36

Table List

Table 1	Subroutines contained in CAPSTAR and their functions .....	16
Table 2	Fitting parameters for allowable stresses .....	17
Table 3	List of error messages .....	17
Table B1	Stress limits for cylindrical pressure vessels which generate on the discontinuity of the structure.....	34
	—— axial and tangential stresses (maximum values) on the inner and outer surfaces near flat end closures ——	

Figure List

Fig. 1	Schematic diagram of capsules used in program .....	8
Fig. 2(a)	Allowable stress of type 304 stainless steel .....	9
Fig. 2(b)	Allowable stress of type 316 stainless steel .....	9
Fig. 3	Outline flow of the CAPSTAR program .....	18
Fig. 4	Yield strength of type 304 and type 316 stainless steel ....	19
Fig. 5	Tensile modulus of elasticity of type 304 and type 316 .....	20
	stainless steel	
Fig. 6	Construction of overall input cards .....	21
Fig. 7	Output group (1) .....	22
Fig. 8	Output group (2) .....	23
Fig. 9	Output group (3) .....	24
Fig. 10	Output group (4) .....	25
Fig. 11	Output group (5) .....	26
Fig. A1	Stress limits for thermal stress ratchet .....	29
Fig. B1	Calculation model for a cylindrical pressure vessel with a flat end closure .....	35

## 1. は じ め に

材料試験炉部では、照射用キャプセルを設計する際にその健全性を確保するため、「JMTRキャプセル等設計基準」を定めている。キャプセルの具体的な設計、すなわち、使用材料の物性値、応力計算、強度評価のための手法等は、「JMTRキャプセル等設計基準」に従って作成された「キャプセル設計マニュアル」に記載されている。「キャプセル設計マニュアル」に基づくキャプセル設計を効率的に処理するため、キャプセル外筒、内筒および燃料棒照射試験の場合の燃料被覆の応力計算および強度評価を同時に行うプログラムCAPSTARを作成した。

プログラムで計算対象とする照射用キャプセルの概略構造をFig.1に示す。キャプセルの本体部は照射試料を装荷した部分である。本体には計測線等の保護管が接続される。キャプセル本体部の最も外側の管を外筒、外筒の内部の密閉された空間の境界となるものを内筒、外筒や内筒、燃料棒試料の被覆管の上・下に取付けられた部品等を端栓と呼ぶ。

プログラムの応力計算には、「キャプセル設計マニュアル」による計算の他、外筒等の非円形性(ovality)および外圧が作用するときの限界挫屈圧力の両者を考慮した円周方向応力の計算、外筒の端栓取付け部に発生する局所応力の計算を追加した。

このプログラムは、キャプセル温度設計用プログラムGENGTCと結合すれば、さらに効率的になる。将来、このプログラムをGENGTCに結合することを考慮し、キャプセル使用材料の物性値、入力のインターフェイス等にはGENGTCと統一がとれるよう特に留意して作成した。

この報告書は作成したプログラムCAPSTARの応力計算法とその強度評価法およびプログラム使用法を記述している。



## 2. キャプセル外筒(内筒)の応力計算および強度評価

材料試験炉部におけるキャプセルの具体的な設計は、「JMTRキャプセル等設計基準」<sup>1)</sup>に従って作成された「キャプセル設計マニュアル」<sup>2)</sup>によっている。このため、プログラムに採用した応力の計算方法は「キャプセル設計マニュアル」に概ね従ったが、外筒にかかる外圧による円周方向応力の算出に非円形性(ovality)を考慮した計算と外筒の端部の端栓取付け部における応力計算を追加した。

キャプセル設計において、算出した応力の設計基準に対する強度評価は、ASME Section IIIを準用した「キャプセル設計マニュアル」に従っている。このプログラムの強度評価もこれによることにした。なお、「キャプセル設計マニュアル」では、必要に応じサーマルラチェットが生じないことをチェックすることになっているが、最大熱応力を $\sigma_{tmax}$ 、一次膜応力を $\sigma_{PL}$ 、許容応力を $\sigma_a$ とすると、応力評価判定基準 $\sigma_{tmax} + \sigma_{PL} < 3\sigma_a$ が満足されれば、付録Aに述べる如くサーマルラチェットは生じないのでプログラムの評価項目より除外した。

### 2.1 応力計算

#### 2.1.1 内・外圧力

通常のキャプセルの外筒において、外部荷重として考えねばならない荷重はその内外面にかかる圧力である。以下、これらの内外圧力についてプログラムにおける取扱い方を記載する。

このプログラムの第一の計算対象はキャプセル外筒である。しかし、燃料棒等が照射試料として用いられる場合があり、その際燃料棒の被覆についても各種の強度評価を必要とする。また、同様な事項はNaK封入管についても発生する。燃料被覆やNaK封入管はキャプセル外筒と同様な形状であり、その解析、評価は外筒と同じ方法で行える。

そこで、このような燃料被覆やNaK封入管についても、このプログラムが適用できるようにしている。しかし、そのような部材の強度評価を行うにはそれぞれの内圧の推定を必要とする。そのため、プログラムではこれら燃料棒等の内圧について推定計算が行える機能をも組込んでいる。

#### (1) 内 圧

##### a) キャプセル外筒(内筒)にかかる内圧

キャプセル外筒(内筒)に関しては、通常初期にヘリウムHeが1気圧封入され、それが運転温度になることにより、内圧が上昇するものとして評価する。すなわち、

$$P_i = P_0(T_g + 273)/273$$

で評価する。封入ガス圧の温度上昇による圧力上昇は、初期温度を0℃にとり、保守側に計算する。ここに、 $P_0$ ：初期封入内圧(kg/cm<sup>2</sup>)、 $T_g$ ：運転温度(℃)である。この内圧は高々10kg/cm<sup>2</sup>G以下である。

## b) 燃料棒の内圧

燃料棒の内圧，すなわち被覆にかかる圧力  $P_i$  は，FPガスによる内圧  $P_{FP}$ ，蒸発性物質による内圧  $P_v$  と He ガスによる内圧  $P_{He}$  の総和，すなわち，分圧の法則に従うとして

$$P_i = P_{FP} + P_v + P_{He} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

による。ここで

$$P_{FP} = R \frac{Y a_r Q_F L_s t}{22.4 \times 10^3} (T_g + 273) / V_p$$

$$P_v = R \frac{V_v M}{22.4 \times 10^3} (T_g + 273) / V_p$$

$$P_{He} = P_o (T_g + 273) / 273$$

とする。圧力の単位は， $\text{kg/cm}^2$  である。なお，上記の計算においてFPガス，蒸発性物質の生成量は標準気体状態（STP：0℃ at 1 atm.）における値である。また，封入ガス圧の温度上昇による圧力上昇は，初期温度を0℃にとり，保守側に計算する。使用記号および数値は，

R : ガス定数 (= 84.78) (kgf·cm/g-mol/K)

$T_g$  : 運転状態におけるガス温度 (℃)

$a_r$  : FPガス放出率

$V_p$  : 燃料棒内プレナム体積 ( $\text{cm}^3$ )

$Q_F$  : 核分裂による発熱量 (W/cm)

$L_s$  : 試料長さ (cm)

t : 照射時間 (d)

Y : FPガス生成率 ( $\times 10^{-5} \text{cm}^3/\text{W}\cdot\text{d}$ )

U-233 について, 3.09

U-235 について, 4.66

Pu-239 について, 3.61

とする。<sup>2)</sup>

$V_v$  : 蒸発性物質の量 ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ) で，その種類により

UO<sub>2</sub> について, 0.08  $\text{cm}^3/\text{g}$  (UO<sub>2</sub>)

UC について, 2.2  $\text{cm}^3/\text{g}$

(U-Pu)C について, 1.4~2.7  $\text{cm}^3/\text{g}$

とする。<sup>2)</sup>

M : 燃料全重量 (g)

$P_o$  : 初期封入ガス (He) 圧力 ( $\text{kg/cm}^2$ )

である。

c) NaK封入部の温度上昇による内圧,  $P_i$ 

NaK封入部の温度上昇による内圧,  $P_i$  は，

$$P_i = P_o (T_g + 273) / (T_o + 273) \cdot V_o / V_g \quad (\text{kg/cm}^2)$$

で評価する。ここで、 $T$ ：温度（℃）、 $V$ ：体積（ $\text{cm}^3$ ）、 $P$ ：圧力（ $\text{kg}/\text{cm}^2$ ）とし、添字  $o$ ：NaK封入時、添字  $g$ ：実験時とする。

## (2) 外筒にかかる冷却水による外圧

外筒部に J M T R 原子炉一次冷却水の圧力が外圧として作用する場合、外筒にかかる設計外圧は  $18\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$  とする。

### 2.1.2 応力計算

応力計算としてプログラムは円筒部分と円筒の端部に取付けられる端栓を対象としている。キャプセル外筒（内筒）の如く薄肉密封容器には円周方向と軸方向の応力が発生するが、一般的に軸方向の応力は円周方向応力に比較し小さいので円周方向応力についてのみ計算する。以下、プログラムで計算している応力評価式について記載する。式中の使用記号は次の通りである。

$P_i$ ：内 圧（ $\text{kg}/\text{mm}^2$ ）	$P_o$ ：外 圧（ $\text{kg}/\text{mm}^2$ ）
$D_i$ ：円筒内径（mm）	$D_o$ ：円筒外径（mm）
$T_i$ ：円筒内面温度（℃）	$T_o$ ：円筒外面温度（℃）
$t$ ：円筒の肉厚（mm）	$\alpha$ ：線膨脹係数（ $1/^\circ\text{C}$ ）
$E$ ：ヤング率（ $\text{kg}/\text{mm}^2$ ）	$\nu$ ：ポアソン比（-）

#### (1) 内圧による発生応力

##### a) 円筒部の応力

###### i) 円筒の円周方向応力， $\sigma_i$

薄肉円筒とし、内圧による膜応力とする。

$$\sigma_i = P_i D_i / 2t$$

###### ii) 端栓取付け部（円筒不連続部）の円周方向応力， $\sigma_{ei}$

円筒の端部が端栓で固定されるとき、円筒は不連続部を持つことになり局所的な曲げによる応力が発生する。この応力を付録Bに導出した式により、

$$\sigma_{ei} = -(1-\nu/2) \left\{ 1 + \frac{\sqrt{3}\nu}{\sqrt{1-\nu^2}} \right\} \frac{P_i D_i}{2t}$$

で計算する。これは外表面に発生する最大応力で表面応力である。

##### b) 端栓に発生する最大応力， $\sigma_{ep}$

端栓を円板と考え、均等な荷重がその一面に作用するとし、円板の周辺部が固定されている条件の最大応力は次のようになる<sup>3)</sup>

$$\sigma_{ep} = 3P_i D_i^2 / 16t_p^2$$

これは、周辺固定部に発生する応力で、内圧が作用する面で引張り、反対の面で圧縮応力である。ただし、 $t_p$ は、端栓の厚さ（mm）とする。

#### (2) 外圧による応力

##### a) 円筒部の応力

###### i) 円筒の円周方向応力， $\sigma_o$

耐圧容器で外圧が作用する場合、内圧と異なり管は挫屈することがある。このため、安

全上注意した取扱いが必要となる。そこで、円筒の外圧による円周方向応力に関しプログラムは、二種の方法による計算を行う。一つは厚肉円筒の式を適用しより正確な応力評価を行うもので、

$$\sigma_{o1} = -2P_o D_o^2 / (D_o^2 - D_i^2)$$

による。これは、外圧が作用する場合の最大円周方向応力で、発生位置は内表面である。

上記のほかに、扱いは薄肉円筒であるが、管の非円形性 (ovality) を考慮した時の円周方向応力を計算する<sup>4)</sup> すなわち、

$$\sigma_{o2} = -\frac{P_o D_o}{2t} \left\{ 1 + \frac{6\mu/t}{(1 - P_o/P_{cr})} \right\}$$

による。ここに、 $\mu = (\text{最大直径} - \text{最小直径})/4$  であり、 $P_{cr}$  は、円筒管の限界座屈圧力で

$$P_{cr} = 2E(t/D_o)^3 / (1 - \nu^2)$$

で与えられる。一般のキャプセルでは、厚肉円筒による応力の方が、大きく計算されるので、プログラムの強度評価においては、前者の応力 $\sigma_{o1}$ を外圧による応力 $\sigma_o$ として代表させる。

ii) 端栓取付け部 (不連続部) の円周方向応力,  $\sigma_{eo}$

付録Bに導出した式により、

$$\sigma_{eo} = (1 - \nu/2) \left\{ 1 + \frac{\sqrt{3}\nu}{\sqrt{1 - \nu^2}} \right\} \frac{P_o D_o}{2t}$$

とする。

(3) 熱応力,  $\sigma_t$

薄肉円筒に発生する最大熱応力は、平板に関する熱応力で計算しても十分な精度で近似可能なので、平板に関する熱応力式で近似する<sup>5)</sup>

$$\sigma_t = E\alpha(T_i - T_o)/2/(1 - \nu)$$

この最大応力は、円周方向、軸方向とも等しく、内面で圧縮、外面で引張り応力である。

## 2.2 強度評価

### 2.2.1 許容応力

キャプセルの外筒材料は、ほとんどステンレス鋼である。ステンレス鋼 sus 304, sus 316 に対する許容応力は、Fig. 2 (a), (b) に示した値とする。その他の材料に対しては、次のうち最も小さい値をもって許容応力,  $\sigma_a$  とする。

- i) 引張強さの最小規定値 (規格値) の 1/3,
- ii) 使用温度での引張強さの 1/3,
- iii) 降伏値の最小規定値 (規格値) の 2/3,
- iv) 使用温度での降伏値の 9/10, ただし、上記 iii) (降伏値の最小規定値の 2/3) の値を越えてはならない。

また、クリープ現象を考慮しなければならない場合は、以下の通りとする。sus 304 と sus

316 に対しては上記の許容応力に折込み済みとする。その他の材料のクリープに対しては、機械的応力のみを考え、材料のクリープ曲線から求めること。許容応力、 $\sigma_{ac}$  として次のうち最も小さい値を採用する。

- i) 使用温度，使用時間でラプチャーを生じる応力の 2/3，
- ii) 使用温度，使用時間で歪が 1% となる応力，
- iii) 使用温度，使用時間で三次クリープを開始する応力の 0.8 倍

もし上記の i), ii), iii) のデータが全部揃わない時は，得られたうちのいずれかの値をもって許容応力とする。

## 2.2.2 強度評価

### (1) 応力のカテゴリーによる分類

キャプセルの設計の詳細は「キャプセル設計マニュアル」に従っており，マニュアルの応力評価法は ASME Section III を準用している。この結果，発生する応力をその発生の要因となるカテゴリーで分類する。このプログラムの強度評価においては先に記載した応力を次のようにそのカテゴリーに区分した。

- 内外圧力による応力…………… 一次膜応力 (PL)
- 端栓取付け部応力…………… 二次応力 (Q)
- 熱 応 力…………… 二次応力 (Q)

ここで，端栓取付け部の応力を二次応力 (Q) に分類しているが，これは原子炉圧力容器の形状不連続部に発生する応力を二次応力 (Q) に分類していることに従った。<sup>6)</sup>

### (2) 強度評価法

強度評価の判定基準として，次の方法を採用している。ここで，添字 PL，Q 等は上記の一次膜応力，二次応力などを指示する。

$$|\sigma_{PL}| < \sigma_a, \quad |\sigma_{PL}| + |\sigma_Q| < 3\sigma_a$$

上記の判定基準に対し，先に 2.1 節で算出した応力を使って，プログラムでは具体的に次のように判定する。

- a) 温度 427℃ 以下の材料 sus 304，sus 316 およびその他の材料に対しては次の式を満足すること。

$$\begin{aligned} \sigma_i &< \sigma_a \\ |\sigma_o| &< \sigma_a \\ \sigma_i + \sigma_t + |\sigma_{ei}| &< 3\sigma_a \\ |\sigma_o| + \sigma_t + \sigma_{eo} &< 3\sigma_a \\ \sigma_i &< \sigma_{ac} \quad (\text{sus 304, sus 316 に対しては適用外}) \\ |\sigma_o| &< \sigma_{ac} \quad (\text{sus 304, sus 316 に対しては適用外}) \end{aligned}$$

- b) 温度 427～704℃ で材料 sus 304，sus 316 を使用する場合は次の式を満足すること。

$$\begin{aligned} \sigma_i &< \sigma_a \\ |\sigma_o| &< \sigma_a \\ \sigma_t + \sigma_i &< \sigma_a \end{aligned}$$

$$\sigma_t + |\sigma_o| < \sigma_a$$

ただし、 $\sigma_a$  は、使用温度、使用時間に対する値であって、

(使用温度および  $10^4$  時間に対する  $\sigma_a$ )  $\times$  1.25

または

使用温度における降伏応力  $\sigma_y$

のうちの小さい方の値をとる。

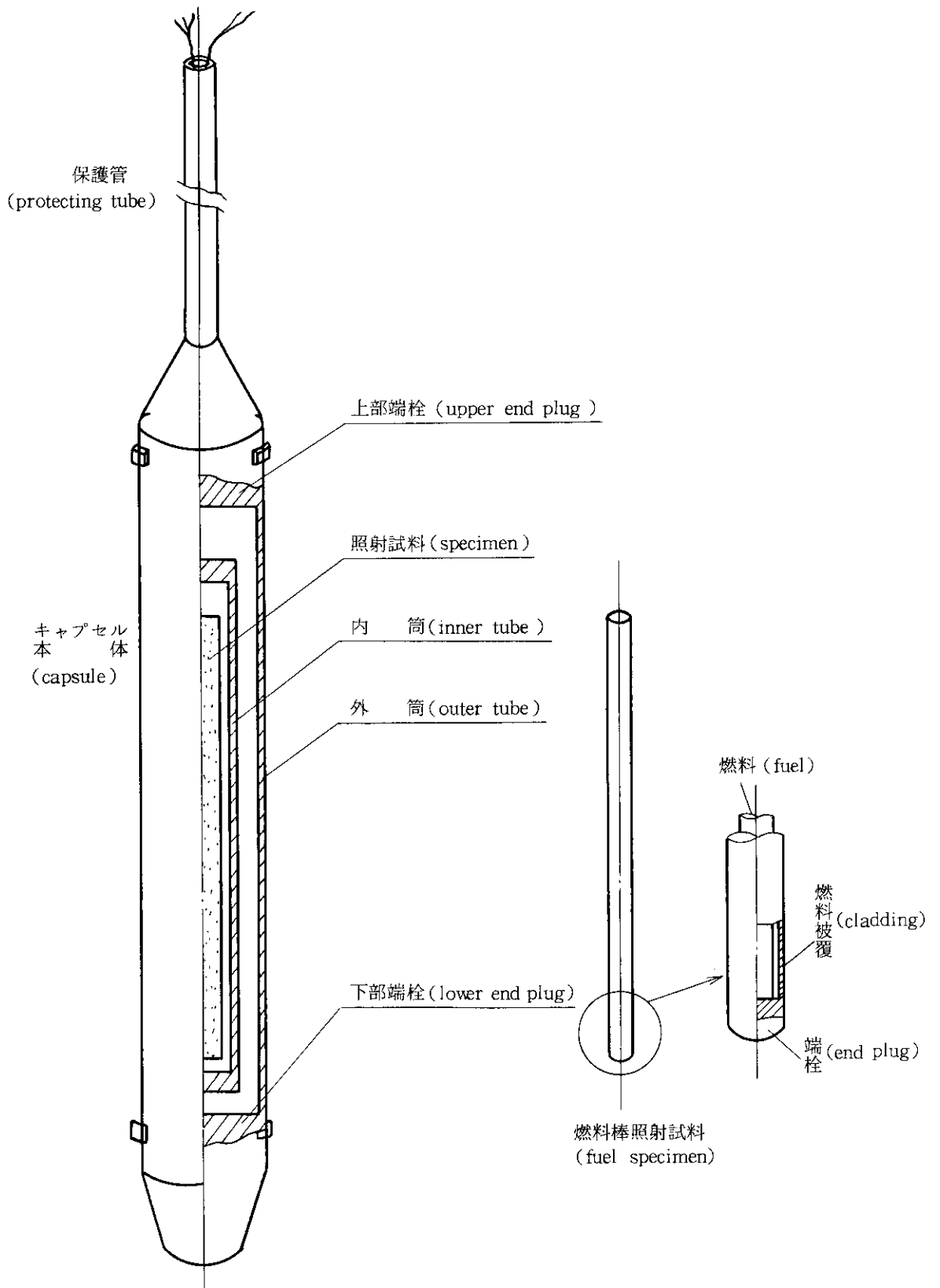


Fig.1 Schematic Diagram of Capsule used in Program

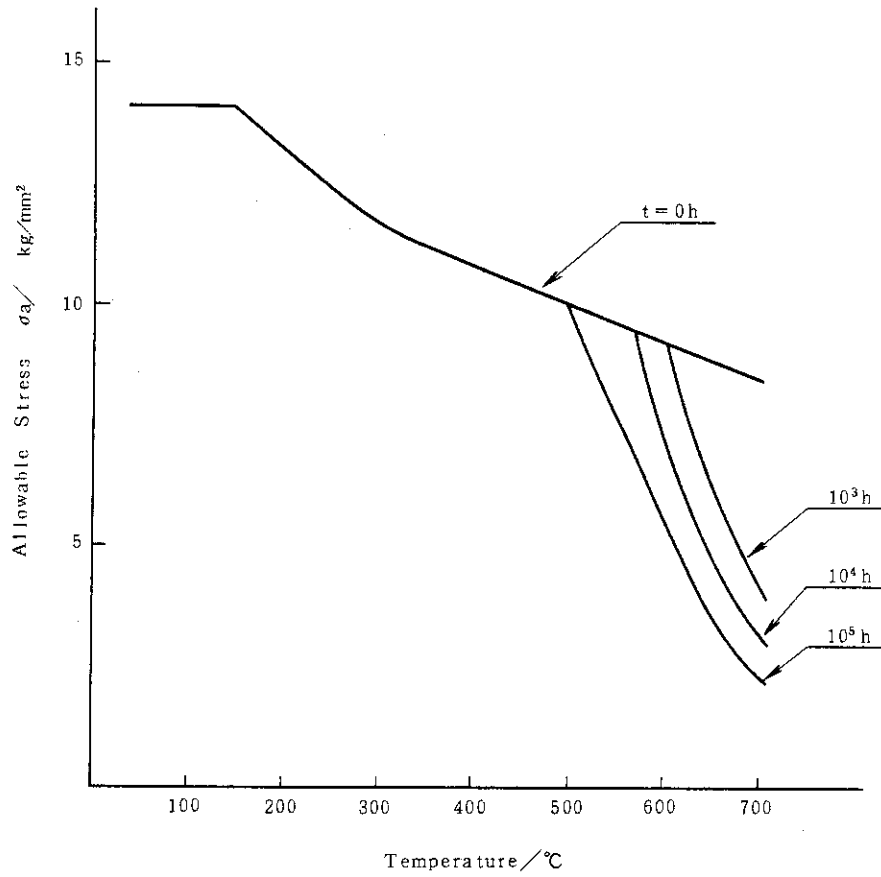


Fig.2(a) Allowable stress of type 304 stainless steel

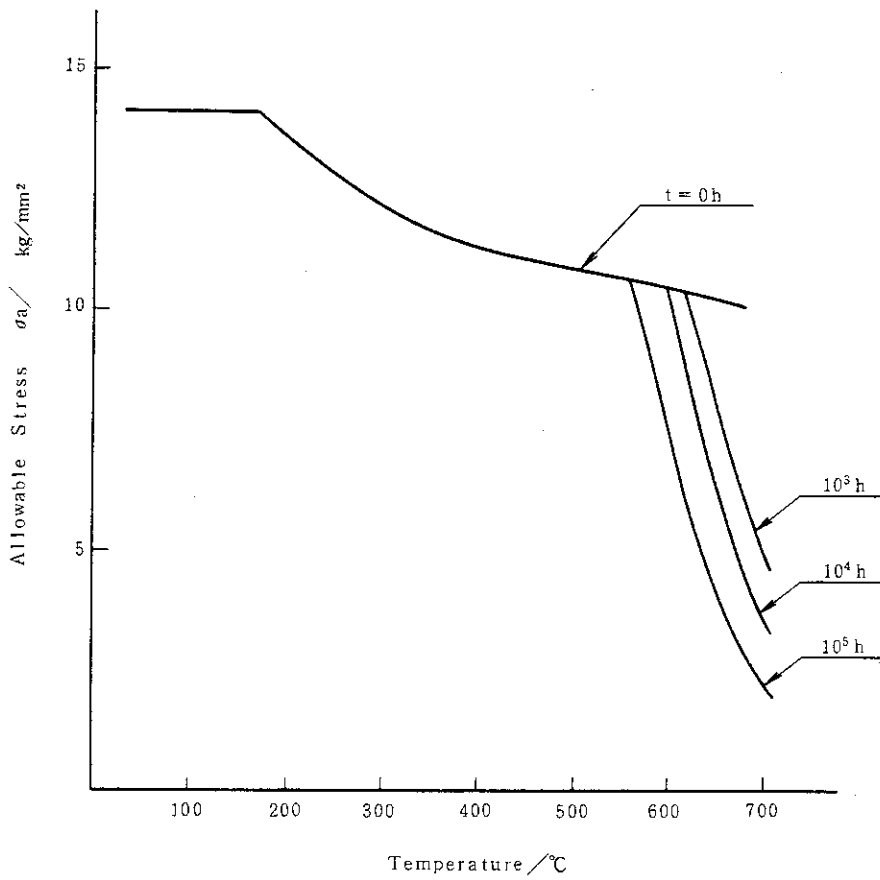


Fig.2(b) Allowable stress of type 316 stainless steel



### 3. プログラム解説

#### 3.1 プログラムの構成

このプログラムに含まれるサブルーチンの主要機能を Table 1 に、またサブルーチン単位でのプログラムにおける処理の流れを Fig. 3 に示す。

通常のキャプセルでは、疲労破壊に対する安全性評価を行う必要がないので、このプログラムの中では考慮していない。プログラムでは、

温度：(℃)                      重量：(kg)                      寸法(長さ)：(cm)

圧力：(kg/cm<sup>2</sup>)                  応力：(kg/mm<sup>2</sup>)                  時間                  : (h)

の単位が使用される。また、入力時の内径・外径寸法指定は、直径で与えられる。

#### 3.2 物性値等について

キャプセルの外筒材はほとんど sus 304, sus 316 が用いられている。そこで、プログラムではこの二者についてはその物性値をプログラム組込みとした。他の材料を使用するキャプセルでは、必要な物性値を入力しなければならない。また、この場合でクリープをも考慮したいときには、第 2.2.1 項の許容応力で述べたところの各許容応力値を入力する必要がある。

##### 3.2.1 許容応力および降伏応力

###### (1) 許容応力, $\sigma_a$

sus 304, sus 316 の許容応力は、Fig. 2 (a),(b)に示す如く温度の関数として与えられる。プログラムに組込むに当たり、図に示す値を二次式でフィティングして使用することになっている。すなわち、T in ℃として、

$$\sigma_a = AT^2 + BT + C \quad (\text{kg/mm}^2)$$

としている。ここで、必要な係数、A, B, C は最少二乗法を用いて定めた。その係数の値を Table 2 に示す。

###### (2) 降伏応力, $\sigma_y$

降伏応力に関しても Fig. 4 に示す値を最少二乗法で係数を定め、二次式でプログラムに組込んだ。すなわち、T in ℃として、

###### i) sus 304 について

$$\sigma_y = 2.952 \times 10^{-5} T^2 - 3.620 \times 10^{-2} T + 21.00 \quad (\text{kg/mm}^2)$$

###### ii) sus 316 について

$$\sigma_y = 3.083 \times 10^{-5} T^2 - 3.588 \times 10^{-2} T + 21.31 \quad (\text{kg/mm}^2)$$

とした。

### 3.2.2 物性値

#### (1) ヤング率, E

Fig.5 に示す sus 304, sus 316 に対するヤング率<sup>7)</sup>を使用することにし, 温度依存性が小さいことを考慮しこれらの値を一次式で近似して, プログラムに組込んだ。すなわち, T in °C として,

##### i) sus 304 について

$$E = -8.705T + 2.043 \times 10^4 \quad (\text{kg/mm}^2)$$

##### ii) sus 316 について

$$E = -8.333T + 2.050 \times 10^4 \quad (\text{kg/mm}^2)$$

とした。

#### (2) ポアソン比

ポアソン比については, sus 304, sus 316 とも 0.3 を使用することになっている。

#### (3) 線膨脹係数, $\alpha$

このプログラムを将来キャプセルの温度評価用プログラム GENGTC と結合することを考慮して, GENGTC に組み込みの線膨脹係数を組込んでいる。すなわち, T in °C として,

##### i) sus 304 について

$$\alpha = (17.040 + 0.00272 \times T) \times 10^{-6} \quad (1/^\circ\text{C})$$

##### ii) sus 316 について

$$\alpha = (15.564 + 0.00270 \times T) \times 10^{-6} \quad (1/^\circ\text{C})$$

とした。

## 3.3 入力について

### 3.3.1 入力方法

入力はカード形式で行う。入力データ群の全体構成を Fig.6 に示す。一つの入力データ群は, タイトルカードと変数入力カード(複数)で成立する。タイトルカードの先頭(1~4桁)が "STOP" の場合, 入力データの完了を指示する。タイトルカードは, FORMAT(18A4)で読込まれる。

入力変数読込みの各入力カードの先頭5桁には, 入力番号を必要とする。この入力番号が, 999 の場合, 一つの計算ケース群の入力データの終了を指示する。各入力番号における入力変数の値は, 6 から72桁の範囲で入力する。この変数入力は, FORMAT(I5, free format)で読込まれる。各入力変数は, 入力番号とその入力番号のカードの変数入力順番のフィールドで識別される。入力変数の値は, free format 形式なので各変数値の区切りには, 必ずblank桁を一つ以上入れる必要がある。変数の入力に際し, integer や floating についての区別をする必要はない。

入力データは, 全体として先頭がタイトルカード, 最後がSTOPカードとなる。数ケースの計算を行う時には, 各計算ケースの終わりを指示する入力番号999をカードで区切られる。なお, 入力番号が指定番号以外の番号が読込まれるとエラーメッセージが出力されプログラム

計算は終了する。その他、エラーメッセージについては Table 3 を参照されたい。

### 3.3.2 入力変数の説明

入力番号 100 - 計算オプションの選定 -

- 第 1 フィールド, I D A 1 : = 0, 外筒の応力計算を行わない。  
= 1, 外筒の応力計算を行う。
- 第 2 フィールド, I D A 2 : = 0, 保護管の応力計算を行わない。  
= 1, 保護管の応力計算を行う。
- 第 3 フィールド, I D A 3 : = 0, 端栓部の応力計算を行わない。  
= 1, 端栓部の応力計算を行う。
- 第 4 フィールド, I P R E S : = 0, 内圧をプログラム内で計算する。  
= 1, 内圧は入力データとして与える。

入力番号 200 - 設計内外圧力等の入力 -

入力番号 100 の第 4 フィールドの I P R E S = 1 の場合, この入力を必要とする。

- 第 1 フィールド, P H I N : キャプセル設計内圧 ( $\text{kg}/\text{cm}^2 \text{ abs}$ )
- 第 2 フィールド, P H O U T : キャプセル設計外圧 ( $\text{kg}/\text{cm}^2 \text{ abs}$ )
- 第 3 フィールド, T I M E : クリープ変形を考慮した照射時間\* (h), 0,  $10^3$ ,  $10^4$ ,  $10^5 \text{ h}$  のいずれかの値を入力する。

入力番号 250 - 設計内外圧力等の入力 ( I P R E S = 0 の場合 ) -

入力番号 100 の第 4 フィールドの I P R E S = 0 の場合, この入力番号による値を必要とする。

- 第 1 フィールド, P H O U T : キャプセル設計外圧 ( $\text{kg}/\text{cm}^2 \text{ abs}$ )
- 第 2 フィールド, P H E : ヘリウム (He) ガスによる内圧 ( $\text{kg}/\text{cm}^2 \text{ abs}$ )
- 第 3 フィールド, P F P : 核分裂生成 (FP) ガスによる内圧 ( $\text{kg}/\text{cm}^2 \text{ abs}$ )
- 第 4 フィールド, P V : 蒸発性物質による内圧 ( $\text{kg}/\text{cm}^2 \text{ abs}$ )

\* ここでの照射時間は実際の照射時間とは異なり, クリープ変形を考慮した値を入力する。

(1) sus 304, sus 316 の場合

- (a) クリープが生じない温度範囲 ( $427^\circ\text{C}$  以下) :  $t = 0$
- (b) クリープが生じる温度範囲 ( $427 \sim 704^\circ\text{C}$ ) :  $t = 10^3, 10^4, 10^5 \text{ (h)}$  のうち, 実際の照射時間と比較し, 保守的になる値を選ぶ。

(2) sus 304, sus 316 以外の場合

- (a) クリープが生じない温度範囲 :  $t = 0$  ただし, クリープを考慮しない物性値を入力番号 551, 651, 751 で入力する。
- (b) クリープが生じる温度範囲 :  $t = 0$  ただし, クリープを考慮した許容応力値  $\sigma_a$  を入力番号 551, 651, 751 で入力する。

入力方法は, 外筒 (内筒), 保護管, 端栓において共通である。上記以外の値を入力した場合はエラーとなる。( Table 3 のエラーメッセージ一覧表参照のこと。)

第5フィールド, TIME :クリープ変形を考慮した照射時間(h), 0,  $10^3$ ,  $10^4$ ,  $10^5$  のいずれかの値を入力する。

入力番号 500 -計算対象のキャプセル外筒(内筒)の寸法および設計温度-

第1フィールド, MATOP5 : = 0, 外筒(内筒)材料はsus 304である。  
 : = 1, 外筒(内筒)材料はsus 316である。  
 : = -1, 外筒(内筒)材料は上記以外である。

第2フィールド, RADIN5 :外筒(内筒)内径(cm)

第3フィールド, RAOUT5 :外筒(内筒)外径(cm)

第4フィールド, OVAL5 :外筒(内筒)外径製造公差(cm)

第5フィールド, TEPIN5 :外筒(内筒)内面温度(°C)

第6フィールド, TEPOT5 :外筒(内筒)外面温度(°C)

入力番号 550 -外筒(内筒)材料がsus 304, 316以外(MATOP5 = -1の場合)の場合, MATNM5 :使用材料の名称(20文字以内)を入力する。-

入力番号 551 -外筒(内筒)材料がsus 304, 316以外(MATOP5 = -1の場合)の場合, 使用材料のデータを入力する。-

第1フィールド, POISN5 :外筒(内筒)材料ポアソン比

第2フィールド, YOUNG5 :外筒(内筒)材料ヤング率(kg/mm<sup>2</sup>)

第3フィールド, THEX5 :外筒(内筒)材料の線膨脹係数(1/°C)

第4フィールド, ASIG5 :許容応力(kg/mm<sup>2</sup>)

第5フィールド, YSING :降伏応力(kg/mm<sup>2</sup>)

入力番号 600 -保護管の寸法, 設計温度-

第1フィールド, MATOP6 : = 0, 保護管の材料はsus 304である。

: = 1, 保護管の材料はsus 316である。

: = -1, 保護管の材料はsus 304, 316以外である。

第2フィールド, RADIN6 :保護管内径(cm)

第3フィールド, RADOT6 :保護管外径(cm)

第4フィールド, OVAL6 :保護管外径製造公差(cm)

第5フィールド, TMPIN6 :保護管内面温度(°C)

第6フィールド, TMPOT6 :保護管外面温度(°C)

入力番号 650 -保護管材料名(MATOP6 = -1の場合)-

第1フィールド, MATNM6 :保護管材料名(20文字以内)

入力番号 651 - 保護管の物性値 (MATOP6 = -1 の場合) 寸法, 設計温度 -  
 保護管材料が sus 304, 316 以外 (MATOP6 = -1 の場合) の場合, 使用材料のデータを  
 を入力する。

- 第1フィールド, POISN6 : 保護管材料ポアソン比
- 第2フィールド, YOUNG6 : 保護管材料ヤング率 (kg/mm<sup>2</sup>)
- 第3フィールド, THEX6 : 保護管材料の線膨脹係数 (1/°C)
- 第4フィールド, ASIG6 : 保護管許容応力 (kg/mm<sup>2</sup>)
- 第5フィールド, YSIG6 : 保護管降伏応力 (kg/mm<sup>2</sup>)

入力番号 700 - 端栓部の寸法および設計温度 -

- 第1フィールド, MATOP7 : = 0, 端栓部の材料は sus 304 である。  
 : = 1, 端栓部の材料は sus 316 である。  
 : = -1, 端栓部の材料は sus 304, 316 以外である。
- 第2フィールド, DIA : 外筒 (内筒) 内径 (cm)
- 第3フィールド, THCKP : 端栓板厚 (cm)
- 第4フィールド, TMPIN7 : 端栓部内面温度 (°C)
- 第5フィールド, TMPOT7 : 端栓部外面温度 (°C)

入力番号 750 - 端栓部材料名 (MATOP7 = -1 の場合) -

- 第1フィールド, MATNM7 : 端栓部材料名 (20文字以内)

入力番号 751 - 端栓部の物性値データ (MATOP7 = -1 の場合) -

- 第1フィールド, POISN7 : 端栓材料ポアソン比
- 第2フィールド, YOUNG7 : 端栓材ヤング率 (kg/mm<sup>2</sup>)
- 第3フィールド, THEX7 : 線膨脹係数 (1/°C)
- 第4フィールド, ASIG7 : 端栓材許容応力 (kg/mm<sup>2</sup>)
- 第5フィールド, YSIG7 : 端栓材降伏応力 (kg/mm<sup>2</sup>)

### 3.4 出力について

このプログラムの出力は5グループより成立っている。出力の一例を Fig. 7 ~ 11 に示す。

第1グループは, Fig. 7 に示す通りで, 出力の先頭に

- INPUT DATA CARD IMAGE LIST -

と表示される。この出力は, 入力データ・カード・イメージをそのまま出力している。ただし, 各行の先頭の CARD・NO. は入力番号でなく, 出力のための整理番号である。

第2グループは, Fig. 8 に示す通りで, 出力の先頭に

- INPUT PARAMETER IN THIS ANALYSIS -

と表示される。この出力は, 入力データに説明を付して出力している。

第3グループは、Fig.9に示す通りで、出力の先頭に

—ANALYSIS INFORMATION—

と表示される。この出力は、計算に使用した主要数値を出力している。ここで、入力されていない数値は、プログラム内で設定した数値である。

第4グループは、Fig.10に示す通りで、出力の先頭に

—CAPSULE STRESS ESTIMATION—

と表示される。この出力は、応力計算結果を計算対象の箇所毎に出力している。ここで、各部材 (LOCATION) について、応力の分類 (STRESS TYPE)、荷重の種類 (LOADING TYPE)、計算結果の応力 (STRESS) および許容応力 (ALLOWABLE STRESS) の順に出力表示している。

第5グループは、Fig.11に示す通りで、出力の先頭に

—SAFETY EVALUATION RESULTS—

と表示される。この出力は、応力計算結果の応力を ASME Section III を準用して、各部材毎にその安全性評価結果を表示する。

Table 1 Subroutines contained in CAPSTAR and their functions

Name	Function
MAIN	main routine. 全routineの制御。
BLDATA	ブロック・データ、初期組込みデータの設定。 ステンレス鋼、sus304、316に関する物性値を設定する。
SLITE	入力データのカード・イメージのプリント。
TUBEOT	このルーチンは、材料の照射量に応じたヤング率等を設定する等キャプセル外筒部についての応力計算を制御する。
TUBEGD	このルーチンは、キャプセル保護管部についての応力計算を制御する。
ENDPLG	このルーチンは、端栓部に関する応力計算を制御する。
INPUT1	入力データの読み込みを行う。データはカード形式であるが、入力変数の読み込み法はfree format方式である。ただし、1つの入力データ・カードは、入力番号付きである。また、入力エラーのチェックをも行う。
ERROR	このルーチンは、入力データにエラーがある場合、エラーを検出し、エラー内容をプリントする。
YOUNG	sus304、sus316材について設計上与えられた温度の平均温度からヤング率を設定する。
THEREX	sus304、sus316材について設計上与えられた温度の平均温度から熱膨張係数を設定する。
YSIG	sus304、sus316材について設計上与えられた温度の平均温度から降伏応力を設定する。
ASIG	このルーチンは、sus304、sus316材について設計上与えられた温度の平均温度から許容応力を設定する。ただし、温度が427(°C)を越える場合は、クリープを考慮した値を設定する。
AXIS (II)	このルーチンは、キャプセルの各部材(外筒、保護管、端栓)に発生する応力を計算する。解析対象の部材の識別は、引数(II)による。II=1:外筒、II=2:保護管、II=3:端栓とする。
INPRNT	このルーチンは、入力データを入力番号順に簡単な説明を付してプリントする。入力変数には、簡単な説明、入力時の単位等を付してある。
SUMARY	入力データをもとに計算に用いる温度、寸法、物性値等の計算条件を出力する。
TABLE1	ルーチンAXISで計算した応力計算結果を整理して出力する。
SAFETY	計算した応力をその応力カテゴリー毎に区別し、安全性上の強度評価を行い、その結果を出力する。

Table 2 Fitting parameters for allowable stresses

Materials	Irradiation Periods (h)	Temperature (°C)	A	B	C
SUS 304	0	20 ~ 150	0	0	1.4110 E+1
		150 ~ 300	0	-1.6200 E-2	1.6530 E+1
		300 ~ 704	0	-7.7800 E-3	1.4000 E+1
	10 <sup>3</sup>	500 ~ 704	1.6780 E-4	-2.6560 E-1	1.0800 E+2
	10 <sup>4</sup>	570 ~ 704	2.2510 E-4	-3.3590 E-1	1.2800 E+2
	10 <sup>5</sup>	500 ~ 704	7.3640 E-5	-1.2840 E-1	5.6000 E+1
SUS 316	0	20 ~ 166.7	0	0	1.4110 E+1
		166.7 ~ 300	0	-1.5830 E-2	1.6750 E+1
		300 ~ 422.2	0	-7.2800 E-3	1.4180 E+1
		422.2 ~ 704	0	-3.5486 E-3	1.2610 E+1
	10 <sup>3</sup>	612 ~ 704	0	-6.3120 E-2	4.9070 E+1
	10 <sup>4</sup>	600 ~ 704	0	-6.5240 E-2	4.9333 E+1
	10 <sup>5</sup>	560 ~ 704	1.6400 E-4	-2.6560 E-1	1.0800 E+2

Table 3 List of error messages

Error No	Level	Contents	Subroutines
100	ERROR	入力番号 100 のカードがない。	INPUT 1
110	ERROR	計算位置の指定に誤りがある。	INPUT 1
120	ERROR	圧力計算オプションの指定に誤りがある。	INPUT 1
130	ERROR	内圧が 0 以下である。	INPUT 1
140	ERROR	内圧または外圧 0 以下である。	INPUT 1
150	ERROR	材料選択オプションの指定に誤りがある。	INPUT 1
170	ERROR	入力した温度が照射時間に対して低すぎる。	ASIG
180	ERROR	照射時間の指定に誤りがある。	ASIG
1999	ERROR	入力番号 999 のカードがない。	INPUT 1
2000	ERROR	タイトル・カードがない。	INPUT 1
2001	ERROR	STOP のカードがない。	MAIN
800	WARNING	入力した温度が 20°C 未満である。	THEREX YOUNG, YSIG
810	WARNING	入力した温度が 704°C を越えた。	THEREX, YOUNG, YSIG



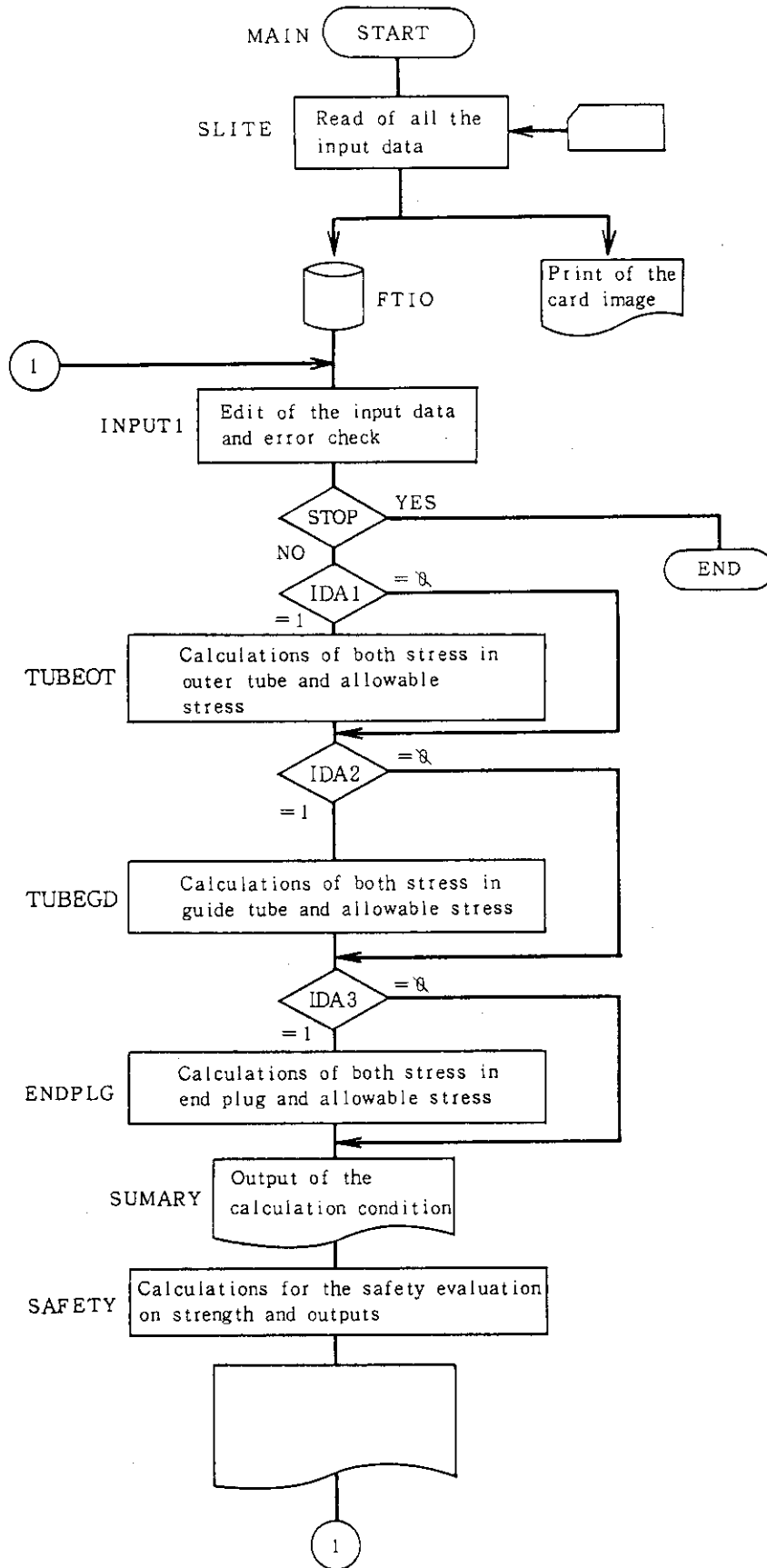


Fig. 3 Outline flow of the CAPSTAR program

(From ASME Code Case 1331-5)

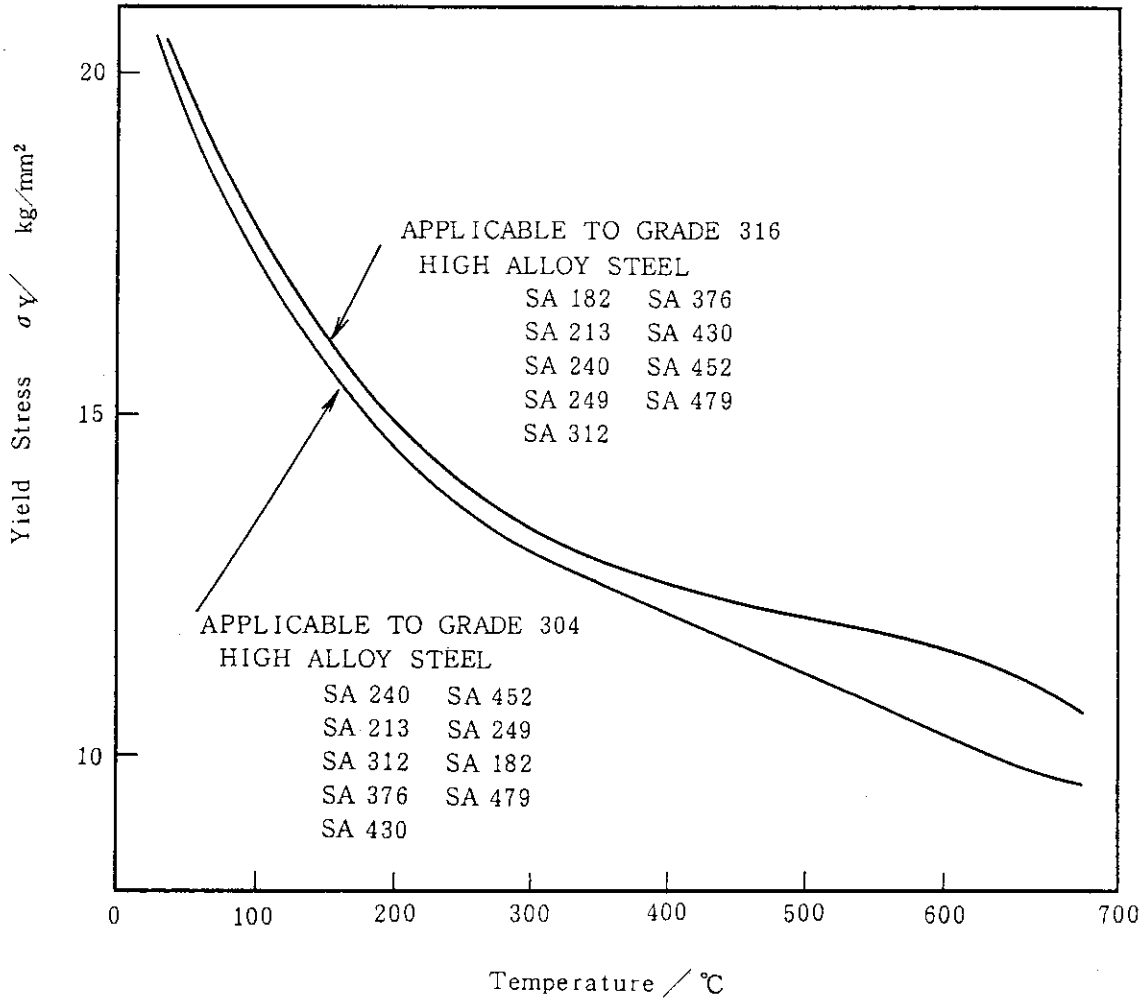


Fig.4 Yield strength of type 304 and type 316 stainless steel

Tensile Modulus of Elasticity of Type 304, 316, 347 SS, Uniloy 19-9 DL and Inconel Alloy X-750 vs. Temperature

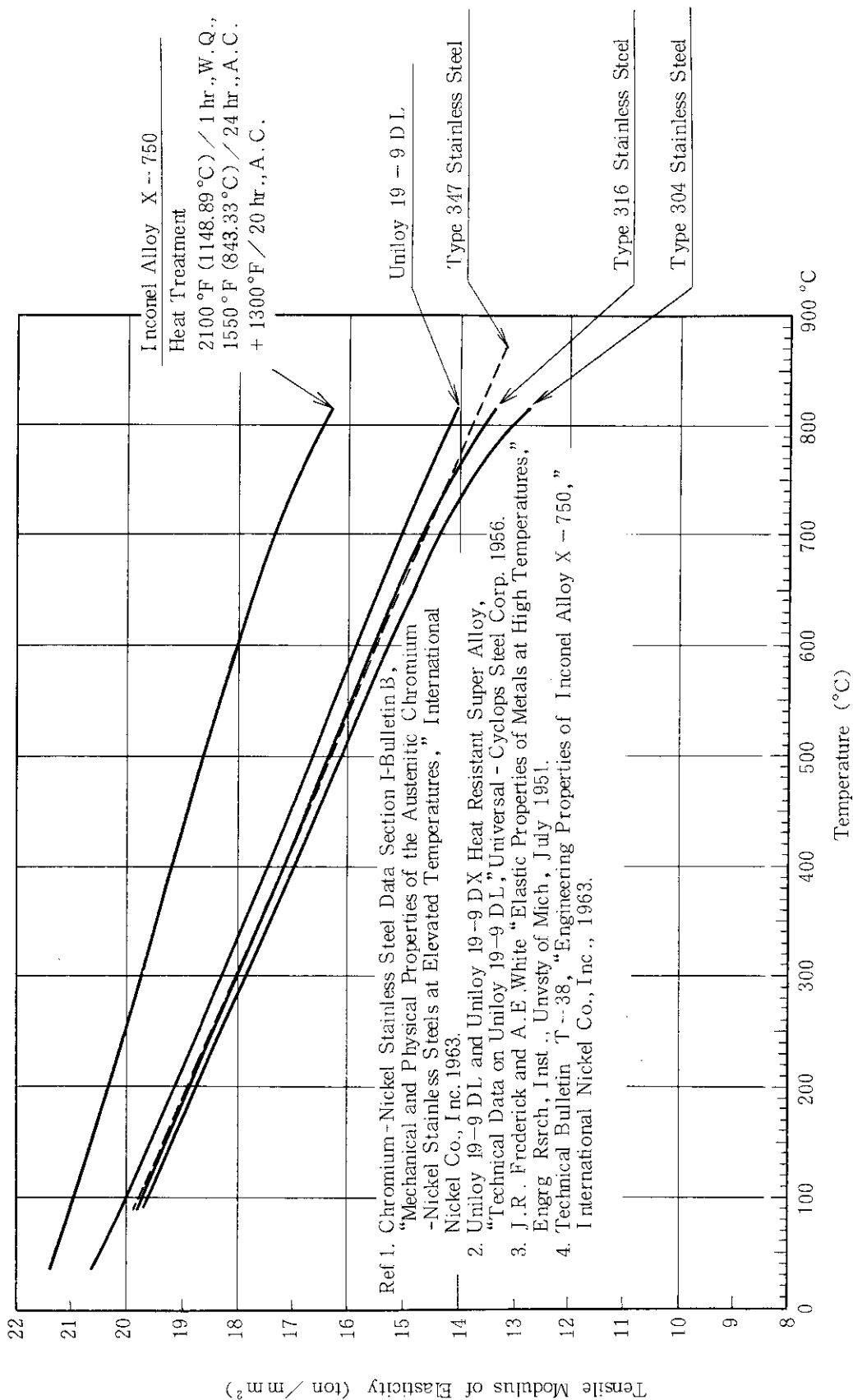


Fig. 5 Tensile modulus of elasticity of type 304 and type 316 stainless steel

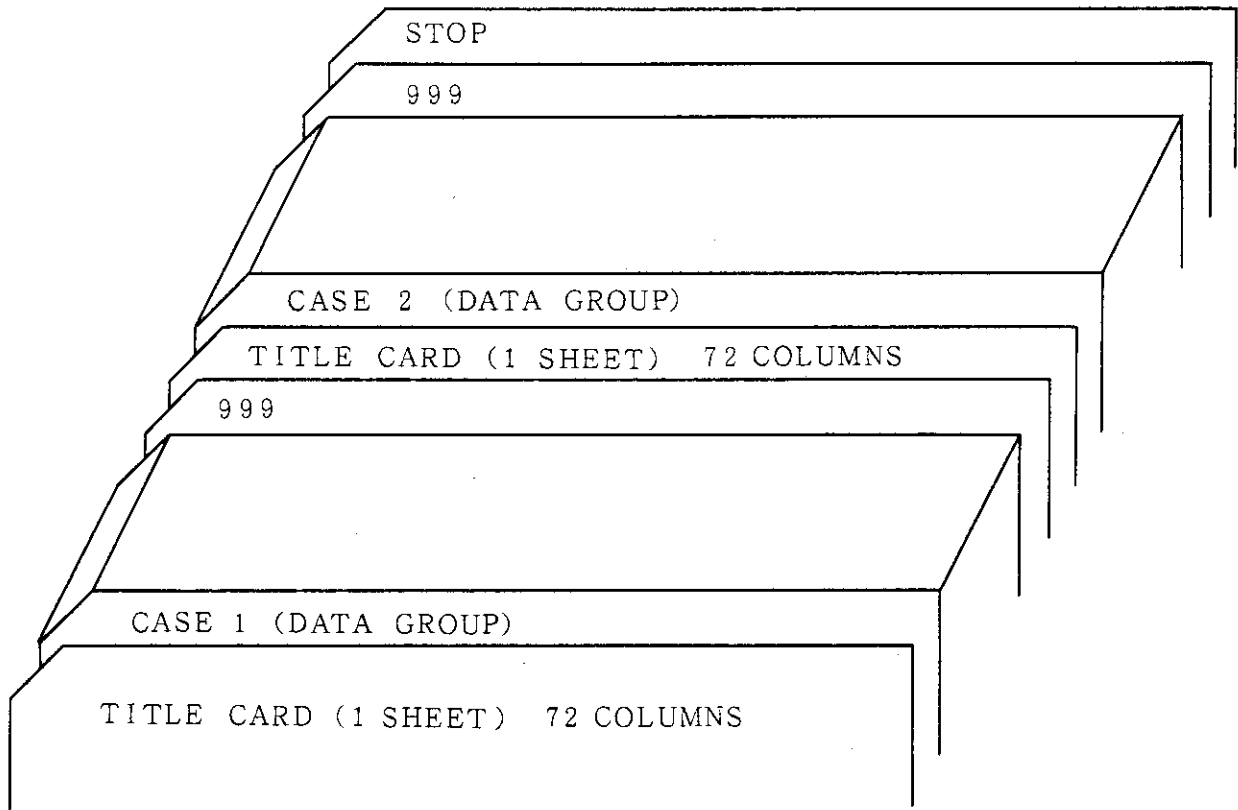


Fig. 6 Construction of overall input cards

```

          INPUT DATA CARD IMAGE LIST
          -----
CARD NO.  .....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
1.  SAMPLE INPUT DATA(1)
2.  100 1 1 1 1
3.  200 1.77 18.0 0.0
4.  500 0 3.7 4.0 1.0E-3 66.0 50.0
5.  600 0 2.2 2.5 1.0E-3 55.0 50.0
6.  700 0 3.7 0.5 66.0 50.0
7.  999
8.  86M-43J, SATCAP-1
9.  100 1.0 0 1
10.  200 76 16 0
11.  500 1 5.4 6.0 0.001 155 60
12.  999
13.  STOP
          .....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
          END OF CARD
    
```

Fig.7 Output group ( 1 )

INPUT PARAMETER IN THIS ANALYSIS

```

-----
TITLE ; SAMPLE INPUT DATA(1)
NO.(100)--- MECHANICAL ANALYSIS POSITION
IDA1 = 1 ; POSITION TO "OUTER TUBE" (YES=1/NO=0)
IDA2 = 1 ; POSITION TO "GUIDE TUBE" (YES=1/NO=0)
IDA3 = 1 ; POSITION TO "END-PLUG" (YES=1/NO=0)
IPRES = 1 ; CAPSULE INNER GAS PRESSURE OPTION
          = 0 ; HELIUM AND F.P. GAS PRESSURE ARE CALCULATED.
          = 1 ; PRESSURE DATA ARE REQUESTED FROM INPUT CARD.
NO.(200)--- PRESSURE AND IRRADIATION INPUT DATA (IPRES=1)
PHIN = 1.77 ; INNER GAS PRESSURE (KG/CM2)
PHOUT = 18.00 ; COOLANT PRESSURE (KG/CM2)
TIME = 0.0 ; IRRADIATION TIME (HR)
NO.(500)--- CAPSULE "OUTER TUBE" DATA (IDA1=1)
MATOP5 = 0 ; MATERIAL SELECTION
          = 0 ; SUS304
          = 1 ; SUS316
          = -1 ; OTHER
RADIN5 = 3.7000 ; INSIDE DIAMETER (CM)
RADOT5 = 4.0000 ; MEAN OUTSIDE DIAMETER (CM)
OVAL5 = 1.000E-03 ; OVALITY (CM)
TMPIN5 = 66.00 ; INNER SURFACE TEMPERATURE (DEG-C)
TMPOT5 = 50.00 ; OUTER SURFACE TEMPERATURE (DEG-C)
NO.(600)--- CAPSULE "GUIDE TUBE" DATA (IDA2=1)
MATOP6 = 0 ; MATERIAL SELECTION
          = 0 ; SUS304
          = 1 ; SUS316
          = -1 ; OTHER
RADIN6 = 2.2000 ; INSIDE DIAMETER (CM)
RADOT6 = 2.5000 ; MEAN OUTSIDE DIAMETER (CM)
OVAL6 = 1.000E-03 ; OVALITY (CM)
TMPIN6 = 55.00 ; INNER SURFACE TEMPERATURE (DEG-C)
TMPOT6 = 50.00 ; OUTER SURFACE TEMPERATURE (DEG-C)
NO.(700)--- CAPSULE "END-PULG" DATA (IDA3=1)
MATOP7 = 0 ; MATERIAL SELECTION
          = 0 ; SUS304
          = 1 ; SUS316
          = -1 ; OTHER
DIA = 3.7000 ; INSIDE DIAMETER OF THE "OUTER TUBE" (CM)
THCKP = 0.5000 ; MIDDLE PLANE THICKNESS OF THE "END-PLUG" (CM)
TMPIN7 = 66.00 ; INNER SURFACE TEMPERATURE (DEG-C)
TMPOT7 = 50.00 ; OUTER SURFACE TEMPERATURE (DEG-C)

```

Fig. 8 Output group ( 2 )

ANALYSIS INFORMATION ( MATERIAL PROPERTIES AND TEMPERATURE )

INNER GAS PRESSURE(KG/CM2) = 1.770  
 COOLANT PRESSURE (KG/CN2) = 18.000  
 IRRADIATION TIME(HR) = 0.0

INSIDE DIAMETER	(CM) =	3.700E+00	END PLUG
MEAN OUTSIDE DIAMETER	(CM) =	4.000E+00	3.700E+00
MAX. OUTSIDE DIAMETER	(CM) =	4.001E+00	0.0
MIN. OUTSIDE DIAMETER	(CM) =	3.999E+00	0.0
POISSONS RATIO	=	3.000E-01	0.0
MODULU OF ELASTICITY(KG/MM**2)	=	1.993E+04	3.000E-01
THERMAL EXPANSION(1/DEG-C)	=	1.720E-05	1.993E+04
YIELD STRENGTH (KG/MM**2)	=	1.900E+01	1.720E-05
INNER SURFACE TEMP. (DEG-C)	=	6.600E+01	1.900E+01
OUTER SURFACE TEMP. (DEG-C)	=	5.000E+01	6.600E+01
EFFECTIVE MEAN TEMP. (DEG-C)	=	5.800E+01	5.000E+01
MATERIAL		SUS304	5.800E+01

( C A P S U L E L O C A T I O N )

OUTER TUBE	GUIDE TUBE	END PLUG
3.700E+00	2.200E+00	3.700E+00
4.000E+00	2.500E+00	0.0
4.001E+00	2.501E+00	0.0
3.999E+00	2.499E+00	0.0
3.000E-01	3.000E-01	3.000E-01
1.993E+04	1.997E+04	1.993E+04
1.720E-05	1.718E-05	1.720E-05
1.900E+01	1.918E+01	1.900E+01
6.600E+01	5.500E+01	6.600E+01
5.000E+01	5.000E+01	5.000E+01
5.800E+01	5.250E+01	5.800E+01
SUS304	SUS304	SUS304

OUTER TUBE TEMPERATURE	
OUTSIDE SURFACE =	50.000(DEG-C)
INSIDE SURFACE =	66.000(DEG-C)
GUIDE TUBE TEMPERATURE	
OUTSIDE SURFACE =	50.000(DEG-C)
INSIDE SURFACE =	55.000(DEG-C)
END PLUG TEMPERATURE	
OUTSIDE SURFACE =	50.000(DEG-C)
INSIDE SURFACE =	66.000(DEG-C)

Fig.9 Output group ( 3 )

CAPSULE STRESS ESTIMATION

---

LOCATION	STRESS TYPE	LOADING TYPE	STRESS(KG/MM**2)	ALLOWABLE STRESS(KG/MM**2)
1. OUTER TUBE ( SUS304 )	(1) CIRCUMFERENTIAL STRESS	INNER PRES.	0.2183	14.110
	(2) CIRCUMFERENTIAL STRESS	OUTER PRES.	-2.4935	14.110
	(3) CIRC. STRESS (OVALITY)	OUTER PRES.	-2.4516	14.110
	(4) MAX. THERMAL STRESS		3.9162	14.110
	(5) LOCAL STRESS AT WELD		3.1512	14.110
2. GUIDE TUBE ( SUS304 )	(1) CIRCUMFERENTIAL STRESS	OUTER PRES.	-1.5957	14.110
	(2) CIRC. STRESS (OVALITY)	OUTER PRES.	-1.5305	14.110
3. END PLUG ( SUS304 )	(1) MAXIMUM STRESS	INNER PRES.	0.1817	14.110

Fig.10 Output group ( 4 )



SAFETY EVALUATION RESULTS

\*\*\*\*\* STRESS REPORT POSITION NO.1 \*\*\*\*\*

\*\*\* POSITION : OUTER TUBE MATERIAL TYPE : SUS304  
 \*\*\* OP. CONDITION : NORMAL CONDITION TIME : 0.0 (HR)

CASE OF STRESS	PM	PL	PQ	UNITS : (KG/MM**2)
(1) HOOP STRESS BY INTERNAL PRESSURE (PM)	0.218			
(2) HOOP STRESS BY COOLANT PRESSURE (PM)	-2.493			
(3) MAX. THERMAL STRESS (Q)				3.916
(4) LOCAL STRESS AT END PLUG WELD (Q)				3.151
PM	-2.493			
(PM OR PL) + PB			-2.493	9.561
PM + PB + Q				
STRESS CATEGORY	STRESS	TEMP. (DEG-C)	ALLOWABLE STRESS	DESIGN RATIO
PM	-2.493	58.000	14.110	0.177
(PM OR PL) + PB	-2.493	58.000	21.165	0.118
PM + PB + Q	9.561	58.000	42.330	0.226

PM : GENERAL PRIMARY MEMBRANE STRESS / PB : PRIMARY BENDING STRESS  
 PL : LOCAL PRIMARY MEMBRANE STRESS / Q : SECONDARY STRESS

RESULT OF JUDGE \*\*\*\*\* THIS CALCULATION GOOD CASE \*\*\*\*\*

Fig.11 Output group ( 5 )

## 謝 辞

このプログラムのプログラミング等は、若林新七、柳沢隆の両氏（ニュークリア・データ株）の努力によるところである。白石忠男氏からは計算機システムの使用法についての援助を得た。畔野松一、市橋芳徳の両氏（JMTR）には、業務遂行に関し種々のご配慮を戴いた。ここにその氏名を記して謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 材料試験炉部, 「JMTR キャプセル等設計基準」(昭和60年1月)
- 2) 照射第1課, 「キャプセル設計マニュアル」, (昭和48年3月編)
  - a) FPガス生成率, Nucleonics 18(11), (Nov.1960)およびORNL-21277による。
  - b) 蒸発性物質質量, UNC-5153による。
- 3) 日本機械学会編, “機械工学便覧(新版, 1987年)”, p. A4-53。
- 4) 森島淳好 他5名, “燃料設計, 第2集・計算式”, JAERI-memo第3352号(公開), (1969年1月), p.55。
- 5) S.チモンシェンコ著, 鶴戸口英善, 岡村弘之訳, 「材料力学」(中), p.82, 212, 東京図書(昭和42年6月)。
- 6) 通商産業省資源エネルギー庁・公益事業部原子力発電安全管理課編, 「解説 原子力設備の技術基準」, p.92, 電力新報社, (昭和56年2月)。
- 7) 森島淳好, 栗山 実, 原山泰雄, “第1集, 燃料設計に必要な物性値及び計算図表(改訂第2版)”, JAERI-M 4881, D-686, (1972年7月)。
- 8) 山本善之著, 「弾性・塑性」, p.p.235~242, 朝倉書店, (昭和38年8月)。
- 9) カルマン・ビオ共著, 村上勇一郎, 武田晋一郎, 飯沼一男訳, 「工学における数学的方法」(下), p.p.318~322, 法政大学出版局, (昭和39年2月)。

## 謝 辞

このプログラムのプログラミング等は、若林新七、柳沢隆の両氏（ニュークリア・データ株）の努力によるところである。白石忠男氏からは計算機システムの使用法についての援助を得た。畔野松一、市橋芳徳の両氏（J M T R）には、業務遂行に関し種々のご配慮を戴いた。ここにその氏名を記して謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 材料試験炉部, 「J M T R キャプセル等設計基準」(昭和60年1月)
- 2) 照射第1課, 「キャプセル設計マニュアル」, (昭和48年3月編)
  - a) F P ガス生成率, Nucleonics 18(11), (Nov.1960) および ORNL-21277 による。
  - b) 蒸発性物質, UNC-5153 による。
- 3) 日本機械学会編, “機械工学便覧(新版, 1987年)”, p. A4-53。
- 4) 森島淳好 他5名, “燃料設計, 第2集・計算式”, JAERI-memo第3352号(公開), (1969年1月), p.55。
- 5) S.チモンシェンコ著, 鶴戸口英善, 岡村弘之訳, 「材料力学」(中), p.82, 212, 東京図書(昭和42年6月)。
- 6) 通商産業省資源エネルギー庁・公益事業部原子力発電安全管理課編, 「解説 原子力設備の技術基準」, p.92, 電力新報社, (昭和56年2月)。
- 7) 森島淳好, 栗山 実, 原山泰雄, “第1集, 燃料設計に必要な物性値及び計算図表(改訂第2版)”, JAERI-M 4881, D-686, (1972年7月)。
- 8) 山本善之著, 「弾性・塑性」, p.p.235~242, 朝倉書店, (昭和38年8月)。
- 9) カルマン・ビオ共著, 村上勇一郎, 武田晋一郎, 飯沼一男訳, 「工学における数学的方法」(下), p.p.318~322, 法政大学出版局, (昭和39年2月)。

## 付録A サーマルラチェットの検討

ASME Section III のNB-3222.5では、サーマルラチェットの発生限界がFig. A 1の実線または破線で規定されている。

一方、

$$\sigma_{PL} < \sigma_a \quad \text{及び} \quad \sigma_{tmax} + \sigma_{PL} < 3\sigma_a$$

の範囲は、同図の斜線部の領域であり、実線または、破線で示されるサーマルラチェットの発生限界領域の外側に対応する。

よって、応力評価式

$$\sigma_{PL} < \sigma_a \quad \text{及び} \quad \sigma_{tmax} + \sigma_{PL} < 3\sigma_a$$

が満足されれば、サーマルラチェットは生じない。

ここで、 $\sigma_{PL}$  : 1次膜応力

$\sigma_{tmax}$  : 最大熱応力

$\sigma_a$  : 許容応力

である。

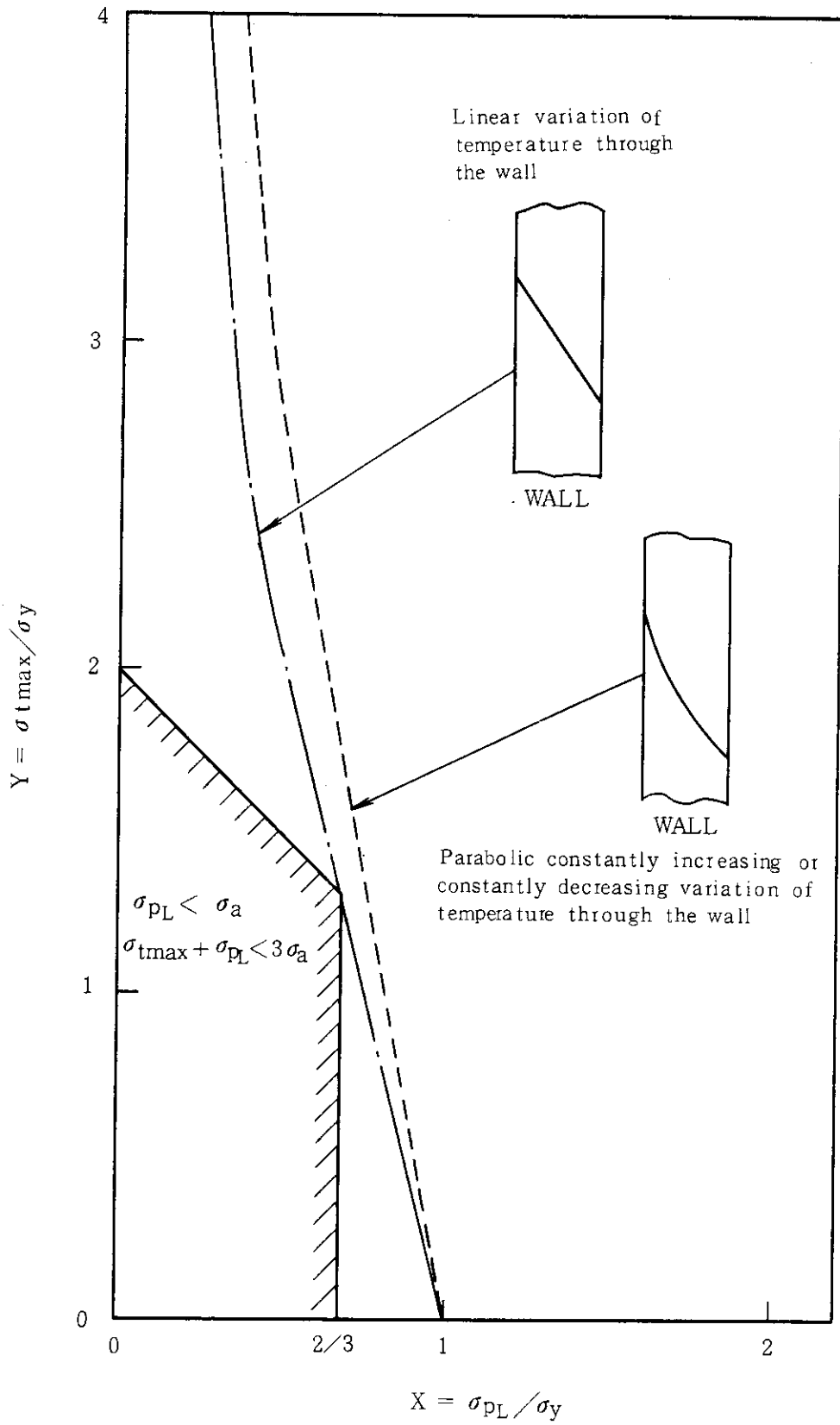


Fig. A1 Stress limits for thermal stress ratchet

## 付録 B 円筒形耐圧容器の不連続部に発生する応力

## 使用記号

D : 曲げ剛性  $\left( D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \right)$

E : 管のヤング率

t : 管の肉厚

a : 管の半径

p : 管に作用する圧力

$N_x$  : 管の軸方向に作用する単位周長当たり荷重 (= ap/2)

$\nu$  : 管材のポアソン比

$$\beta^4 = \frac{Et}{4a^2D} = \frac{3(1-\nu^2)}{a^2t^2}$$

## 1. 基礎方程式

キャプセル外筒の如く、内・外圧を受ける円筒容器で、その端部が端栓で固定されている容器は、その端部が「構造上不連続」となっているため、端部近傍に局所的な応力の変動が発生する。

内圧が作用する薄肉管と考え、軸対称変形として取扱えるものとするれば、円筒管の径方向変位に関する基礎方程式は、次のように表わされる。<sup>8)</sup> ( Fig. B.1 参照 )

$$D \frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{Et}{a^2} w = p - \frac{\nu N_x}{a} \quad (\text{B.1})$$

ここに、 $N_x$  は x 方向 ( 管の軸方向 ) に作用する単位周長当たりの荷重である。Fig. B.1 に示す如く、管端が閉じているものでは、管端にも圧力 p が加わり、x 方向の荷重  $N_x$  は

$$2\pi a N_x = \pi a^2 p \quad \text{より、} \quad N_x = ap/2$$

である。

## 2. 解

方程式 ( B.1 ) の右辺は、p が x に関係しない一定値のときは、定数となる。故に、その特解  $w_s$  は

$$w_s = \frac{a^2}{Et} \left( p - \frac{\nu N_x}{a} \right) = \text{const.} \quad (\text{B.2})$$

である。

方程式 ( B.1 ) の右辺を 0 とした斉次方程式の解  $w_h$  は

$$w_h = e^{\beta x}(C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x}(C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) \quad (\text{B.3})$$

である。ここに、

$$\beta^4 = \frac{Et}{4a^2D}$$

とし、 $C_1 \sim C_4$  は任意定数とする。

故に、式 (B.1) の解  $w$  は

$$w = \frac{a^2}{Et} \left( p - \frac{\nu N_x}{a} \right) + e^{\beta x}(C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x}(C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) \quad (\text{B.4})$$

と表わされる。<sup>9)</sup>

### 3. 境界条件

考えている容器の境界条件は、

(1) 管端において、端栓は剛性が高く、円筒端の変位はないとする。すなわち、

$$w = 0 \quad \text{かつ} \quad dw/dx = 0 \quad \text{at} \quad x = 0 \quad (\text{B.5})$$

とする。

(2) 円筒部はその直径に比較し十分に長いとする。すなわち、

$$w = \text{finite} \quad \text{at} \quad x = \infty \quad (\text{B.6})$$

とする。

上記の条件(2)より、解 (B.4) 式中の  $C_1$ 、 $C_2$  は

$$C_1 = C_2 = 0 \quad (\text{B.7})$$

でなければならない。また、条件(1)の  $dw/dx=0$  (at  $x=0$ ) を適用することにより、

$$C_3 = C_4 \quad (\text{B.8})$$

が得られる。さらに、 $C_3$  と  $C_4$  を  $C$  と書き、条件(1)の  $w=0$  (at  $x=0$ ) の条件より

$$C = -\frac{a^2}{Et} \left( p - \frac{\nu N_x}{a} \right) \quad (\text{B.9})$$

が得られる。

故に、管端が端栓で固定された円筒形容器の径方向変位  $w$  は

$$w = \frac{a^2}{Et} \left( p - \frac{\nu N_x}{a} \right) \left\{ 1 - e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) \right\} \quad (\text{B.10})$$

と表わされる。

### 4. 応力計算式

円筒管部における軸方向応力  $\sigma_z$ 、円周方向応力  $\sigma_t$  は、次式によって計算される。<sup>8)</sup>

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \frac{N_x}{t} - \frac{E}{1-\nu^2} \zeta w'' \\ \sigma_t &= \frac{\nu N_x}{t} + \frac{Ew}{a} - \frac{\nu E}{1-\nu^2} \zeta w'' \end{aligned} \right\} \quad (\text{B.11})$$

ここで、 $\zeta$  は管の平均半径からの径方向の距離とする。

#### 4.1 軸方向応力 (axial stress)

(B.11) 式に (B.10) 式を代入し、かつ  $N_x = ap/2$  を考慮することにより、軸方向応力は、

$$\sigma_z = \frac{ap}{2t} \left[ 1 - \frac{2\sqrt{6}(1-\nu/2)}{\sqrt{1-\nu^2}} \left( \frac{2\zeta}{t} \right) e^{-\beta x} \cos\left(\beta x + \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (\text{B.12})$$

となる。この式の右辺〔 〕内の第2項は  $x$  の無限点では0となる。そのとき、応力は既知の値  $ap/2t$  に一致している。端栓固定による変動応力は〔 〕の第2項によって表わされる。この変動応力を  $\sigma'_z$  で表わすと

$$\frac{\sigma'_z}{(ap/2t)} = - \frac{2\sqrt{6}(1-\nu/2)}{\sqrt{1-\nu^2}} \left( \frac{2\zeta}{t} \right) e^{-\beta x} \cos\left(\beta x + \frac{\pi}{4}\right) \quad (\text{B.13})$$

となる。

変動応力  $\sigma'_z$  の最大値は、 $x \geq 0$  の範囲で  $x = 0$ 、すなわち、固定端である。このとき、最大応力は

$$\frac{\sigma'_{z,\max}}{(ap/2t)} = - \frac{2\sqrt{3}(1-\nu/2)}{\sqrt{1-\nu^2}} \left( \frac{2\zeta}{t} \right) \quad (\text{B.14})$$

となる。 $\zeta$  は平均半径からの距離で、最大値は表面で  $\zeta = \pm t/2$  (+ : 外表面, - : 内表面) である。

なお、以上の導出において、圧力  $p$  は、内圧として考えてきたが、外圧の場合は  $p$  の代りに  $-p$  を代入すればここまでの式はすべて成立する。<sup>8)</sup>

#### 4.2 円周方向応力 (tangential stress)

先の軸方向応力と同様な取扱いをすることにより、円周方向応力は、

$$\sigma_t = \frac{ap}{t} \left[ 1 - \frac{\sqrt{2}(1-\nu/2)\sqrt{1-\nu^2+3\nu^2}(2\zeta/t)^2}{\sqrt{1-\nu^2}} e^{-\beta x} \sin(\beta x + \alpha) \right] \quad (\text{B.15})$$

である。ただし、

$$\sin \alpha = \frac{\sqrt{1-\nu^2} + \sqrt{3}\nu(2\zeta/t)}{\sqrt{2}\sqrt{1-\nu^2+3\nu^2}(2\zeta/t)^2}$$

とする。

先の軸方向応力と同様に、変動応力  $\sigma'_t$  は

$$\frac{\sigma'_t}{(ap/t)} = - \frac{\sqrt{2}(1-\nu/2)\sqrt{1-\nu^2+3\nu^2}(2\zeta/t)^2}{\sqrt{1-\nu^2}} e^{-\beta x} \sin(\beta x + \alpha) \quad (\text{B.16})$$

となる。先の軸方向応力の最大応力評価位置が、 $x = 0$  の固定端であったので、この円周方向応力の評価位置も固定端とすると、その固定端における最大変動応力  $\sigma'_{t,\max}$  は、



$$\frac{\sigma'_{i, \max}}{(ap/t)} = -(1-\nu/2) \left\{ 1 + \frac{\sqrt{3}\nu}{\sqrt{1-\nu^2}} (2\zeta/t) \right\}$$

となる。 $\zeta = \pm t/2$ を考慮すると、最大値は、常に外表面の応力となる。

## 5. まとめ

円筒の端部が端栓により固定したときの局所的な応力を導出した。この結果をまとめると Table B.1 の如くなる。いま、 $\nu = 0.3$  とすると、

$$\frac{2\sqrt{3}(1-\nu/2)}{\sqrt{1-\nu^2}} \cong 3.09, \quad (1-\nu/2) \left\{ 1 + \frac{\sqrt{3}\nu}{\sqrt{1-\nu^2}} \right\} \cong 1.31$$

である。これより推測すると、軸方向応力は、固定端においてかなり大きくなる。

Table B1 Stress limits for cylindrical pressure vessels which generate on the discontinuity of the structure

-----axial and tangential stresses ( maximum values ) on the inner and outer surfaces near flat end closures-----

Nondimensional Stress		Nondimensional Axial Stress $\sigma'_a, \max / (ap/2t)$		Nondimensional Hoop Stress $\sigma'_t, \max / (ap/t)$	
Type of pressure	Type of surface	Internal Pressure	External Pressure	Internal Pressure	External Pressure
	Outer surface	$\frac{2\sqrt{3}(1-\nu/2)}{\sqrt{1-\nu^2}}$	$\frac{2\sqrt{3}(1-\nu/2)}{\sqrt{1-\nu^2}}$	$-(1-\nu/2) \left\{ 1 + \frac{\sqrt{3}\nu}{\sqrt{1-\nu^2}} \right\}$	$(1-\nu/2) \left\{ 1 + \frac{\sqrt{3}\nu}{\sqrt{1-\nu^2}} \right\}$
	Inner surface	$\frac{2\sqrt{3}(1-\nu/2)}{\sqrt{1-\nu^2}}$	$-\frac{2\sqrt{3}(1-\nu/2)}{\sqrt{1-\nu^2}}$	$-(1-\nu/2) \left\{ 1 - \frac{\sqrt{3}\nu}{\sqrt{1-\nu^2}} \right\}$	$(1-\nu/2) \left\{ 1 - \frac{\sqrt{3}\nu}{\sqrt{1-\nu^2}} \right\}$

NOTE : - : compression , + : tension

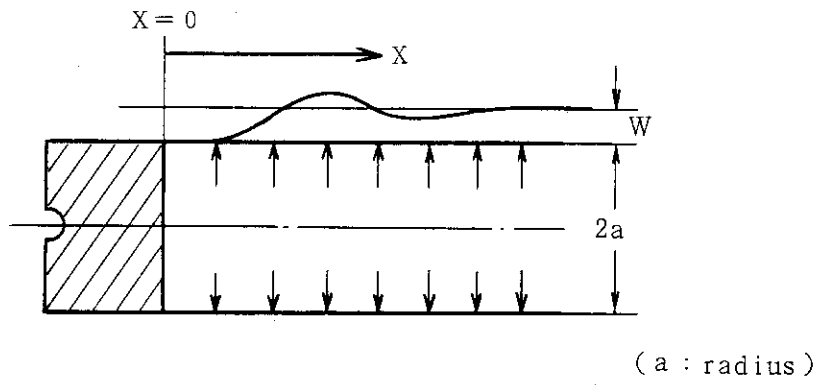


Fig. B1 Calculation model for a cylindrical pressure vessel with a flat end closure

## 付録C J M T R キャプセル等設計基準(抜粋)

第7条 キャプセルの主要部について、内圧に対する強度、熱応力の検討を行ない、機械的応力及び熱応力に対し、十分な強度を有していなければならない。

2 強度設計上、十分な強度を有することは、次に掲げる各号を満足することをいう。

- (1) 機械的応力は許容応力以下であること。
- (2) 熱応力と機械的応力の総和は、許容応力の3倍をこえないこと。
- (3) 繰返し熱応力のため、疲労破壊、サーマルラッチェットを生じないこと。
- (4) クリープ現象により、破壊したり、応力分布に大きな変化を生じないこと。

3 使用材料の許容応力は次に掲げる各号の最も小さい値とし、主要材料の許容応力は別に定める設計マニュアルの定めるところによる。

- (1) 引張り強さの最小規定値(規格値)の3分の1の値
- (2) 使用温度での引張り強さの3分の1の値
- (3) 降伏値の最小規定値の3分の2の値
- (4) 使用温度での降伏点の10分の9の値。ただし、降伏点の最小規定値の3分の2の値をこえてはならない。