

JAERI-M
85-016

NSRRカプセル強度確認試験における
評価方法の検討

1985年3月

山崎 利

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

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

NSRRカプセル強度確認試験における評価方法の検討

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

山崎 利

(1985年1月25日受理)

本資料は火薬類を用いて行なうNSRRのカプセル強度確認試験の評価方法についてまとめたものである。

NSRRで使用するカプセルを新しく設計した時は、その使用前に火薬類を用いた強度確認試験を行なうことになっている。現行の強度確認試験における評価方法は、多くの安全余裕を有する方法であるため、その考え方の各項目に検討を加え、安全余裕の少ない改善した評価方法を提案したものである。

A Study on Evaluation Methods of
Explosive Proof Tests of NSRR Capsule

Toshi YAMAZAKI

Department of Nuclear Safety Research
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 25, 1985)

This report describes the methods of evaluation of chemical explosive tests results in NSRR.

The report is composed of the requirements for NSRR capsule design, the methods for chemical explosive tests, the existing evaluation method and a proposal for a new method of evaluation of explosive proof test results.

Keywords: Stress, Strain, Impulse, Strain Energy, Pressure Pulse,
Explosive Proof Test, Capsule, Evaluation Method, Safety.

目 次

1. 概要および目的	1
2. カプセル強度設計の考え方	4
2.1 応力およびひずみ量の制限値	4
2.2 カプセル各部の強度設計	4
2.2.1 試験部容器	4
2.2.2 その他の容器	5
2.2.3 その他の機器または構造物	5
3. 強度確認試験	5
3.1 試験の概要	5
3.2 装置の概要	6
3.2.1 供試材	6
3.2.2 火薬類	7
3.2.3 計測器類	7
3.2.4 試験手順	7
4. 現行の評価方法	12
4.1 許容変形量における現行の評価方法	12
4.2 限界変形量における現行の評価方法	14
5. 評価方法の改善案	16
5.1 改善案の考え方	16
5.2 許容変形量における評価方法の改善案	17
5.3 限界変形量における評価方法の改善案	19
6. 検討事項	23
6.1 評価方法の検討	23
6.2 応力とひずみ	25
6.2.1 応力～ひずみ曲線の近似	25
6.2.2 静的荷重の応力と動的荷重の応力	27
6.2.3 単純引張応力と薄肉円筒の応力	28
6.3 力 積	29
6.3.1 力 積	29
6.3.2 力 積 値	30
6.4 単位体積当りのひずみエネルギー	31
6.4.1 単位体積当りのひずみエネルギーと力積	31
6.4.2 本資料で考えている単位体積当りのひずみエネルギー	33
6.4.3 単位体積当りのひずみエネルギー値	34

7. ま と め	43
7.1 許容変形量の評価について	43
7.2 限界変形量の評価について	43
7.3 そ の 他	43
謝 辞	43
付 録	
付 1 累積塑性ひずみと爆薬量	44
付 2 容器の固有周波数	45
付 3 安全率または安全余裕	46

Contents

1.	Introduction	1
2.	Strategy of capsule intensity design	4
2.1	Limitation of stress and strain for capsule design	4
2.2	Design of capsule	4
2.2.1	Test vessel	4
2.2.2	Auxiliary components	5
2.2.3	Other structure	5
3.	Explosive proof tests	5
3.1	Outline	5
3.2	Test apparatus	6
3.2.1	Test capsule	6
3.2.2	Chemical explosive	7
3.2.3	Instruments	7
3.2.4	Test procedure	7
4.	Existing evaluation method	12
4.1	Allowable strain	12
4.2	Limited strain	14
5.	Proposal of new evaluation method	16
5.1	Proposal method	16
5.2	Allowable strain	17
5.3	Limited strain	19
6.	Discussion	23
6.1	Study of evaluation method	23
6.2	Stress and strain	25
6.2.1	Approximation of stress-strain curve	25
6.2.2	Static and dynamic stress	27
6.2.3	Simple tension and hoop stress	28
6.3	Impulse	29
6.3.1	Impulse	29
6.3.2	Value of impulse	30
6.4	Strain energy in unit volume	31
6.4.1	Strain energy and impulse in unit volume	31
6.4.2	Derivation of strain energy in unit volume	33
6.4.3	Strain energy in unit volume	34

7. Conclusions	43
7.1 Evaluation method of allowable strain	43
7.2 Evaluation method of limited strain	43
7.3 Others	43
Acknowledgements	43
Appendix	
App.1 Relation between cumulative plastic deformation and the extent of explosive..	44
App.2 Natural frequency of capsule	45
App.3 Safety factor and margin	46

1. 概要および目的

NSRR (Nuclear Safety Research Reactor) で実験燃料棒破壊実験に供するカプセル類は、第 1.1 図に示すような手順で設計製作している。

はじめに実験の目的があり、目的に応じたカプセルの種類やカプセルの最大使用条件等が決定される。弾性設計とするか弾塑性設計とするかについては、最大使用条件や規格基準を考慮し遅くとも強度計算に入る前までに決定しなければならない。

規格基準としては、昭和40年通商産業省令第62号に基づく通商産業省告示第501号、昭和45年通商産業省令第81号、昭和50年資源エネルギー庁長官通達第9683号、日本工業規格 (JIS) および ASME, Sec. III 等を適用または準用している。通常は規格基準を適用し構造設計、強度計算および使用材料の選定を行なう。規格外の材料を使用する時は規格基準を準用したかたちで強度試験を行なう必要がある。

工事認可申請を行ない、認可後製作に入る。試験検査は通常規格基準を適用するが、特別指定した方法がある場合は規格基準を準用したかたちで指示した方法による。

カプセルの完成後使用前検査を受けて合格後使用する。なお、弾塑性設計のカプセルについては使用前検査を受ける時までに、さらに追加してカプセルの強度確認試験 (許容変形量および限界変形量の確認) を行なうこととなっている。

NSRR で使用しているカプセルには、現在、大気圧水カプセル、高温高圧水カプセル、流動水カプセルおよび可視カプセルの4種類がある。そのうち、弾塑性設計のカプセルは、大気圧水カプセル、高温高圧水カプセルおよび流動水カプセルである。弾塑性設計のカプセルであっても、実際に弾塑性設計となっているカプセルの部分は、試験部容器 (以下単に容器という) だけであって、その他の容器は弾性設計となっている。したがって強度確認試験は容器だけについて行なっている。

NSRR における初期のインパイル実験段階では大気圧水カプセル実験が中心であったため、カプセルの最大使用条件が低かったことおよびカプセル取扱いの経験が無かったこと等により、カプセルの強度設計に際し、安全余裕^{※1)}を多くとっていた。それでも実験には支障が無かった。

その後、高温高圧水カプセルや流動水カプセルが製作されると、それらのカプセルの最大使用条件は高温高圧 (一般に云う高温高圧でなく、圧力 $p = 180 \text{ kg/cm}^2$ 、温度 $T = 350^\circ\text{C}$ を指す。以下同じ) ときびしくなってきたのであるが、カプセル強度設計の安全余裕に対する考え方が大気圧水カプセルの場合と同じであったため、当然カプセルの肉厚は厚くなり重量も増加し、作業性が大へん悪くなってしまった。また放射化が著しく、使用回数も数回で取扱いできない程 (NSRR の取扱い設備の関係上) であった。このことよりカプセルを最大使用条件範囲内であって安全に取扱いができるように軽くし、作業性の改善、放射化の軽減をはかれるように努めている。

※1) 付録3参照

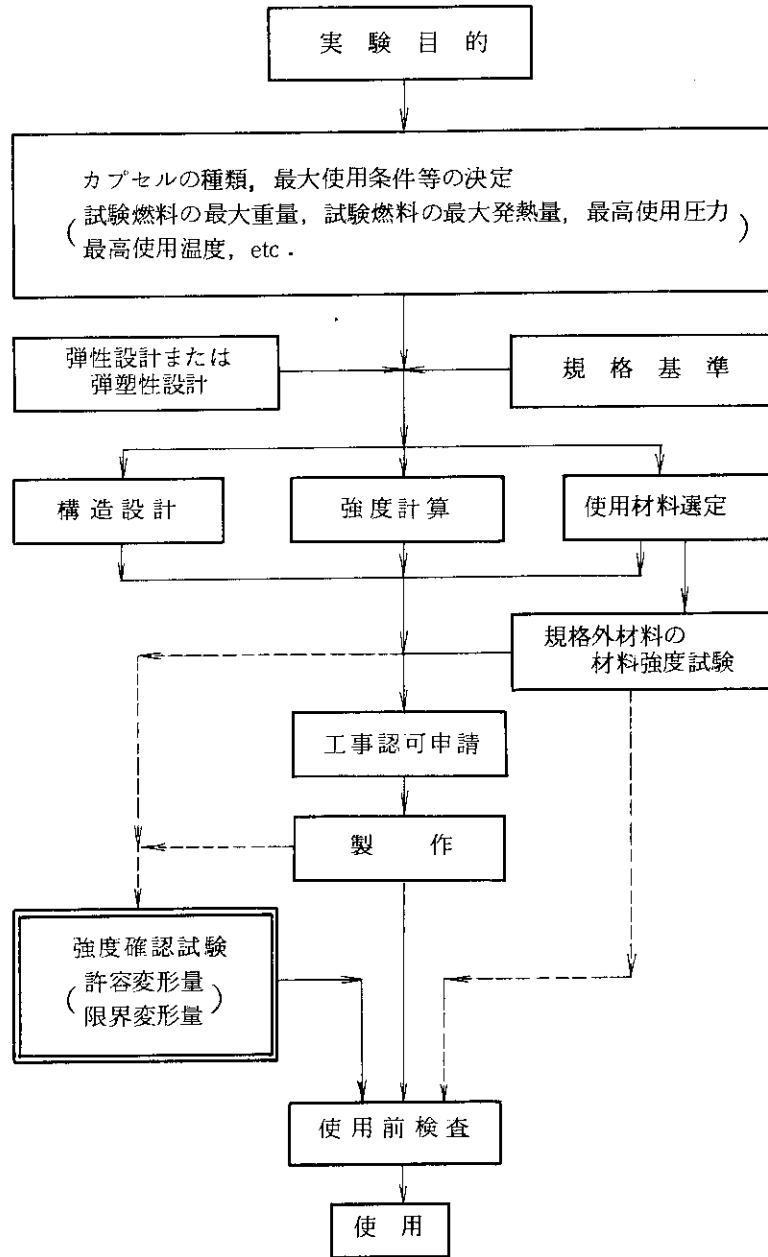
カプセルは実験の度に組立、実験、解体、保管そして次の実験のための再組立と繰り返し使用され、その途中必要な試験検査が常に行なわれる。このようにカプセルは一般の実験機器より大へん良く管理されていることにより一般の機器とは別の見方で十分に安全が保てるはずである。

もし、試験検査の結果不都合が生じた場合は廃棄することになっている。廃棄の条件は機械的に不都合が生じた場合（ひずみ量が基準値を超えた場合または修理できない場合等）および放射化が著しく作業者の被曝管理上取扱いができなくなる場合である。これまでに廃棄した容器はすべて放射化によるものであった。容器の寿命からみれば機械的でも放射化でも容器が使用できない点ではまったく同じである。この事実より容器の肉厚は厚すぎると云える。

たとえば、容器を薄くしたことにより最大実験条件の実験1回で容器が使用できなくなったとしても、全実験回数のうち最大条件による実験は20%以下と見積られるため、残り80%の実験回数で容器の寿命が伸びれば全体として経済的であると云える。

したがって、容器の肉厚をもっと薄くすること（安全余裕を小さくすること）により、作業性の改善、放射化の減少およびカプセル寿命の長期化等現在より良くなるはずである。しかし、薄くする場合であっても規格、基準や制限値は守らなければならない。そのためには、カプセル強度設計に対する安全余裕の考え方、強度確認試験に対する安全余裕の取り方、インパイル実験で発生する力（圧力等）の正確な値と容器に対する影響等の再検討が必要である。

本資料はこれらのうちの強度確認試験だけについて検討し、評価方法の改善案を提案したものである。改善点は、応力とひずみの関係をバイリニア法から近似曲線へ変更し、なるべく実際の値に近づけたこと、近似の応力～ひずみ曲線を使用した単位体積当りのひずみエネルギーから評価しようとするひずみ量を求めるようにしたこと等である。



第 1.1 図 カプセル設計製作の手順の概要

2. カプセル強度設計の考え方

2.1 応力およびひずみ量の制限値

カプセルの設計に当って、応力およびひずみ量は次のように制限している。

(1) 静的荷重

- ① 静的設計荷重（実験の初期条件とする静的な最大使用圧力に設計余裕を見込んだ圧力等）

$$1 \text{ 次一般膜応力強さ} \leq S_m$$

$$1 \text{ 次局部膜応力強さ} \leq 1.5 S_m$$

$$1 \text{ 次膜応力} + 1 \text{ 次曲げ応力} \leq 1.5 S_m$$

② 運転状態

$$1 \text{ 次応力} + 2 \text{ 次応力強さ} \leq 3 S_m$$

$$\text{実際の繰返し回数} \leq \frac{\text{疲れ解析による繰返しピーク応力強さに対応する許容繰返し回数}}{\text{数}}$$

ただし、 S_m : 設計応力強さ

(2) 動的荷重

動的設計荷重は動的荷重 + 静的荷重とする。

動的荷重は衝撃圧力 + 水撃力とする。

① 許容変形量 (ϵ_{01})

$$\left. \begin{array}{l} \text{板厚平均ひずみ} \leq 2\% \\ \text{表面ひずみ} \leq 2\% \end{array} \right\} \text{または限界変形量の } 1/10 \text{ 以下}$$

$$\text{局部ひずみ} \leq 5\% \quad \text{または限界変形量の } 1/4 \text{ 以下}$$

② 限界変形量 (ϵ_{02})

限界変形量 \geq 板厚平均ひずみの10倍のひずみ量または局部ひずみの4倍のひずみ量
(通常は20%を考える)

例 もし、限界変形量が16%のときの板厚平均ひずみは $\leq 1.6\%$ となる。

ここで、弾塑性設計のときは、上記の(1)および(2)のすべてが適用され、弾性設計のときは、(2)の許容変形量と限界変形量が無く、すべて弾性範囲となる。

2.2 カプセル各部の強度設計

2.2.1 試験部容器

試験部容器^{※2)}はスカート部、底部、薄肉胴部、厚肉胴部、フランジ部、蓋およびボルトより構

※2) 本資料では試験部容器を単に容器と呼ぶことにしているが、ここでは他の容器と区別するためにフルネームを用いた。

成される。大気圧水カプセルではさらにキャップとカラーが追加される。

カプセルの強度設計で弾塑性設計を採用した場合、すべての部分について、2.1の制限値が適用される。しかし、実際の設計では次のようになっている。

① スカート部

原子炉実験孔内に設置されたカプセル固定装置（グリッピングデバイス）のかみ合いを考慮して弾性範囲とする。

② 底部

カプセル内圧力を測定する圧力センサーとの取り合いを考慮して弾性範囲としている。カプセル内圧力をまったく測定しない場合、弾性とする必要はないが現在までに設計した例がない。

③ 薄肉胴部

試験部容器のうち最も薄肉としなければならない部分であり、弾塑性設計を適用する。

④ 厚肉胴部

水撃力の発生する大気圧水カプセルにだけにある部分で、高温高圧水カプセルや流動水カプセルには無い。弾塑性設計を適用する。

⑤ フランジ部

実験中のシール性や解体時のボルトゆるめ等を考慮して弾性範囲とする。

⑥ 蓋およびボルト

解体時を考慮して弾性範囲とする。さらに大気圧水カプセルだけはキャップが追加されるが、通常弾性範囲となっている。

2.2.2 その他の容器

高温高圧水カプセルには加圧タンクと圧力抑制タンク、流動水カプセルには加圧器容器、加熱器容器、圧力抑制タンク、試験部容器の上部へ接続する圧力管および機器を接ぐ配管、V型カプセルには上部容器（ペリスコープ格納部）および上部容器（カメラ格納部）等あるがすべて弾性設計としている。

2.2.3 その他の機器または構造物

NSRRで使用されるすべてのカプセルについて、試験部容器およびその他の容器をのぞく、その他の機器または構造物についてはすべて弾性設計としている。

3. 強度確認試験

3.1 試験の概要

カプセル設計に際し弾塑性領域の設計をする場合は、カプセルの強度確認試験を実施することが義務づけられている。強度確認試験は許容変形量と限界変形量の評価である。容器に変形

成される。大気圧水カプセルではさらにキャップとカラーが追加される。

カプセルの強度設計で弾塑性設計を採用した場合、すべての部分について、2.1の制限値が適用される。しかし、実際の設計では次のようになっている。

① スカート部

原子炉実験孔内に設置されたカプセル固定装置（グリッピングデバイス）のかみ合いを考慮して弾性範囲とする。

② 底部

カプセル内圧力を測定する圧力センサーとの取り合いを考慮して弾性範囲としている。カプセル内圧力をまったく測定しない場合、弾性とする必要はないが現在までに設計した例がない。

③ 薄肉胴部

試験部容器のうち最も薄肉としなければならない部分であり、弾塑性設計を適用する。

④ 厚肉胴部

水撃力の発生する大気圧水カプセルにだけにある部分で、高温高圧水カプセルや流動水カプセルには無い。弾塑性設計を適用する。

⑤ フランジ部

実験中のシール性や解体時のボルトゆるめ等を考慮して弾性範囲とする。

⑥ 蓋およびボルト

解体時を考慮して弾性範囲とする。さらに大気圧水カプセルだけはキャップが追加されるが、通常弾性範囲となっている。

2.2.2 その他の容器

高温高圧水カプセルには加圧タンクと圧力抑制タンク、流動水カプセルには加圧器容器、加熱器容器、圧力抑制タンク、試験部容器の上部へ接続する圧力管および機器を接ぐ配管、V型カプセルには上部容器（ペリスコープ格納部）および上部容器（カメラ格納部）等あるがすべて弾性設計としている。

2.2.3 その他の機器または構造物

NSRRで使用されるすべてのカプセルについて、試験部容器およびその他の容器をのぞく、その他の機器または構造物についてはすべて弾性設計としている。

3. 強度確認試験

3.1 試験の概要

カプセル設計に際し弾塑性領域の設計をする場合は、カプセルの強度確認試験を実施することが義務づけられている。強度確認試験は許容変形量と限界変形量の評価である。容器に変形

を生じさせるのはインパイル実験時の荷重である。インパイル実験時の荷重の種類は、実験燃料棒破壊時に生じる衝撃圧力、急激な蒸気の発生により水塊を上方へ飛び上げた時の水撃力、運転圧力およびホールドダウン機構による押し付け力等である。

衝撃圧力はNSRRのすべてのカプセルで発生する。水撃力は大気圧水カプセルの場合のように容器の蓋付近に空間がある時だけ発生し、満水状態の容器には発生しない。運転圧力は高温高圧水カプセルおよび流動水カプセルのときに有り、大気圧水カプセルおよびV型カプセルには無い。ホールドダウン機構による押し付け力は流動水カプセルをのぞき存在するが、容器に対して軸方向の圧縮力であるため、座屈強度の計算時だけ考慮し、その他はすべて無視している。

衝撃圧力による荷重と水撃力による荷重はともに、容器に働く動的荷重である。これに対して運転圧力による荷重は静的荷重である。第3.1図にインパイル実験時に発生すると想定している最大の圧力（容器に働く荷重）を示す。なお、火薬の爆発により発生する水撃力は衝撃圧力に比べ波高値が小さいため現在の強度確認試験では水撃力の影響を無視できる。ただし、カプセル強度設計では最大水撃力値の2倍の値に耐えるようにしている。強度確認試験には許容変形量の評価と限界変形量の評価があり、許容変形量の評価は、インパイル実験で容器に加わる最大の荷重と同等またはそれ以上の荷重を容器に加え、内容物（主に容器内の冷却水）が完全に密封されていることを確認することである。

限界変形量の評価は、許容変形量の10倍以上のひずみを容器に生じさせたとき、容器の破断や割れ等の生じないことを確認することである。

強度確認試験時の容器へ荷重を加える方法としては、原則的に火薬類を利用することとなっている。しかし、火薬類で評価できないときは水圧等を併用しても良いこととなっている。

許容変形量の確認試験において、できるだけインパイル実験時の波形に近い圧力波形を火薬類で発生させるため、低爆速の火薬類を選定しているがそれでもなお、インパイル実験時の衝撃圧力より、波高値、作用時間幅ともに数倍以上大きくなっている。圧力波の立上り速度については火薬類の爆発にバラツキがあって一定しないが、オーダーとして、インパイル実験時と同じ位である。

限界変形量確認試験に使用する火薬類は、許容変形量の10倍のひずみを生じさせるものであるならば、低速とか高速とか種類を問わないこととしている。

3.2 装置の概要

3.2.1 供試材

強度確認試験の供試材である容器は、外径200mm以下、内径120mm前後、内深さ（長さ）800mm前後の円筒状容器で中央胴部を薄肉とし、底側にカプセル固定用スカート付き、上側フランジ構造となっている。材料はSUS304系である。第3.2図にI型高圧水カプセルの例を示す。

3.2.2 火薬類

強度確認試験は低爆速火薬と高爆速火薬の二種類を使用している。低爆速火薬としては、初期の項MEまたはLEPであったが、現在はSk火薬を使用している。高爆速火薬はペントライトを使用している。

3.2.3 計測器類

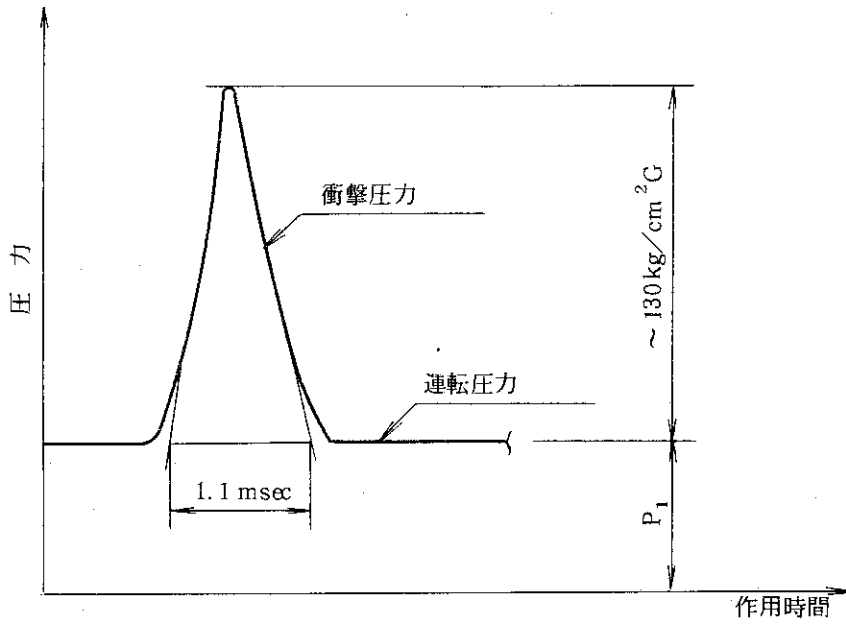
計測器類としては、圧力センサー用動ひずみアンプ、ひずみゲージ用ひずみアンプ、アナログデータレコーダー、オシロスコープ、ペンオシログラフ、ノギス、直定規およびマイクロメーターを使用している。

3.2.4 試験手順

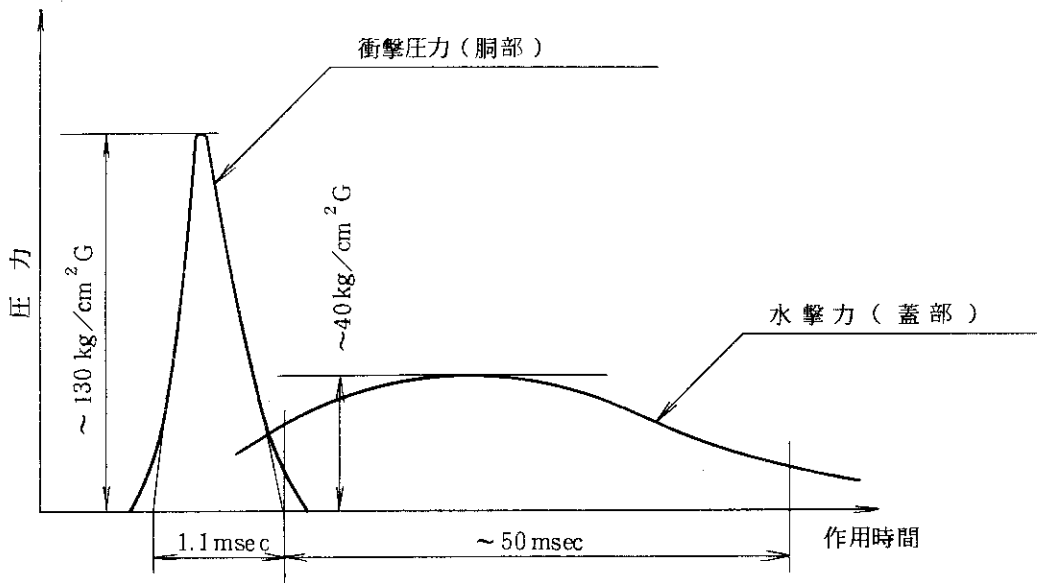
火薬類は容器内のほぼ中央部で核燃料棒の置かれる位置と同じとし、電気信号によって発破する。なお、容器内に水を入れるが、条件によって、満水の場合と空間のある場合の二通りがある。

計測点としては薄肉胴部の動ひずみ3個所以上、同じく塑性ひずみ3個所以上、(なるべく動ひずみの位置と合せる。発破前後の寸法測定により行なう)容器内圧力1個所以上としている。

第3.3図にII型1号流動水カプセルの例、第3.4図に計装の一般的なフローチャートの例を示す。

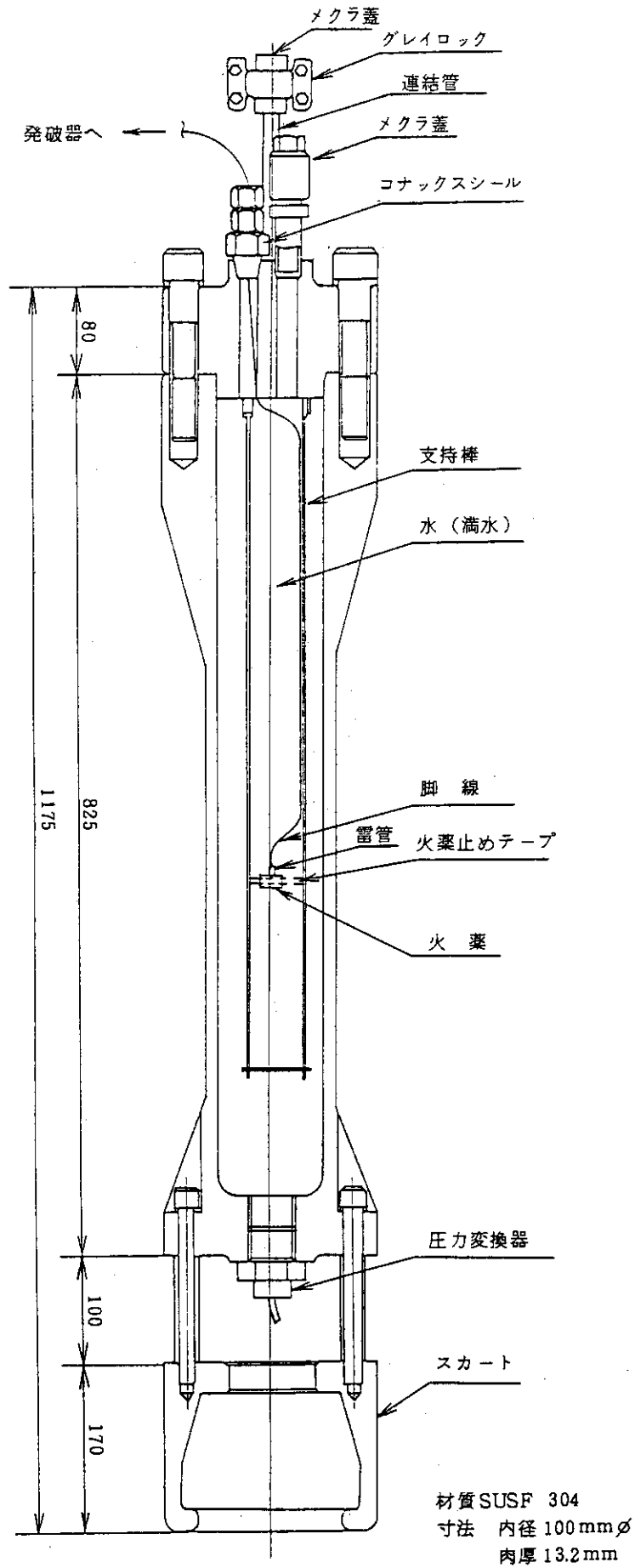


(b) 満水で運転圧力のあるとき

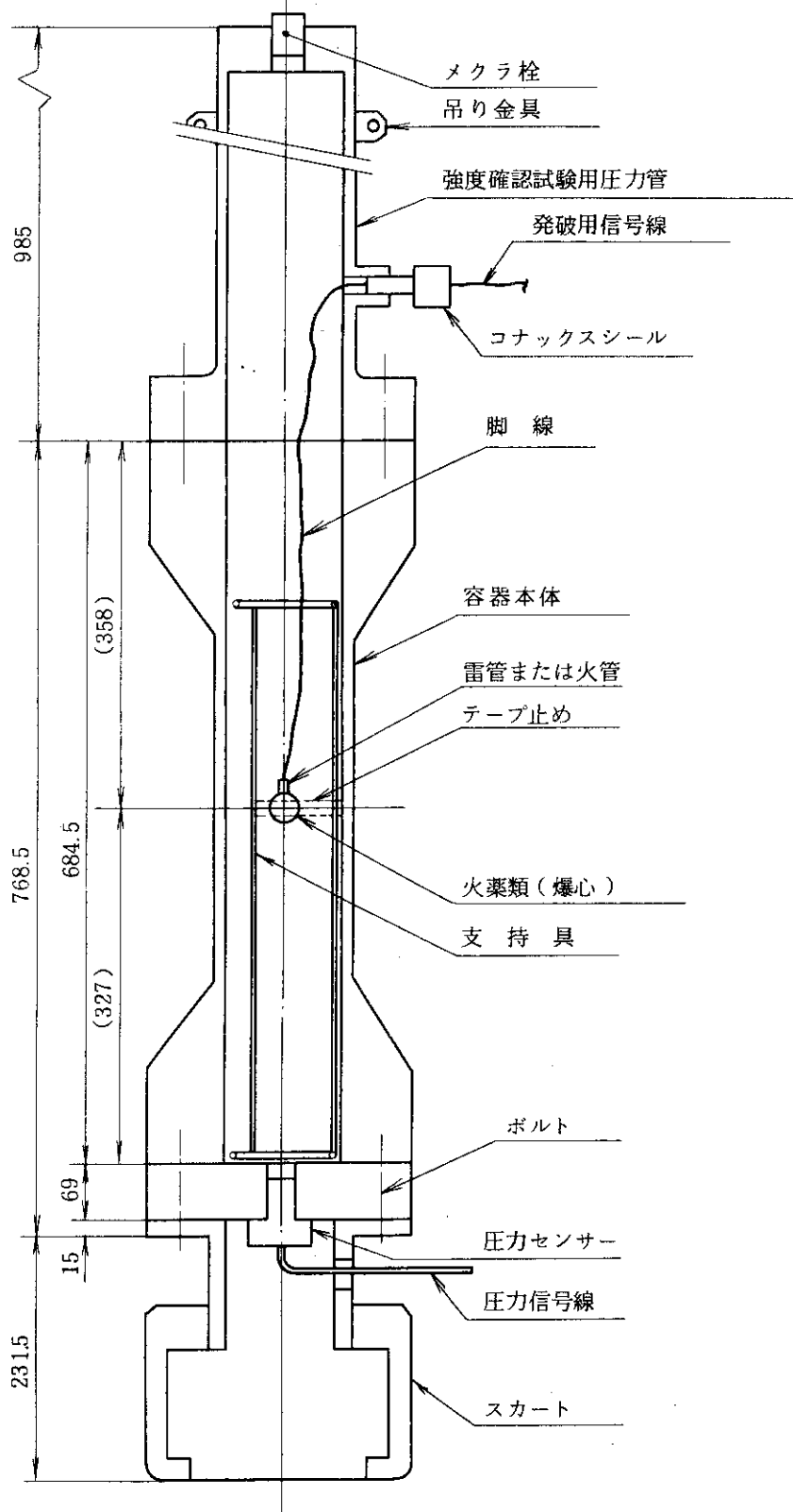


(a) 蓋周辺に空間を有するとき

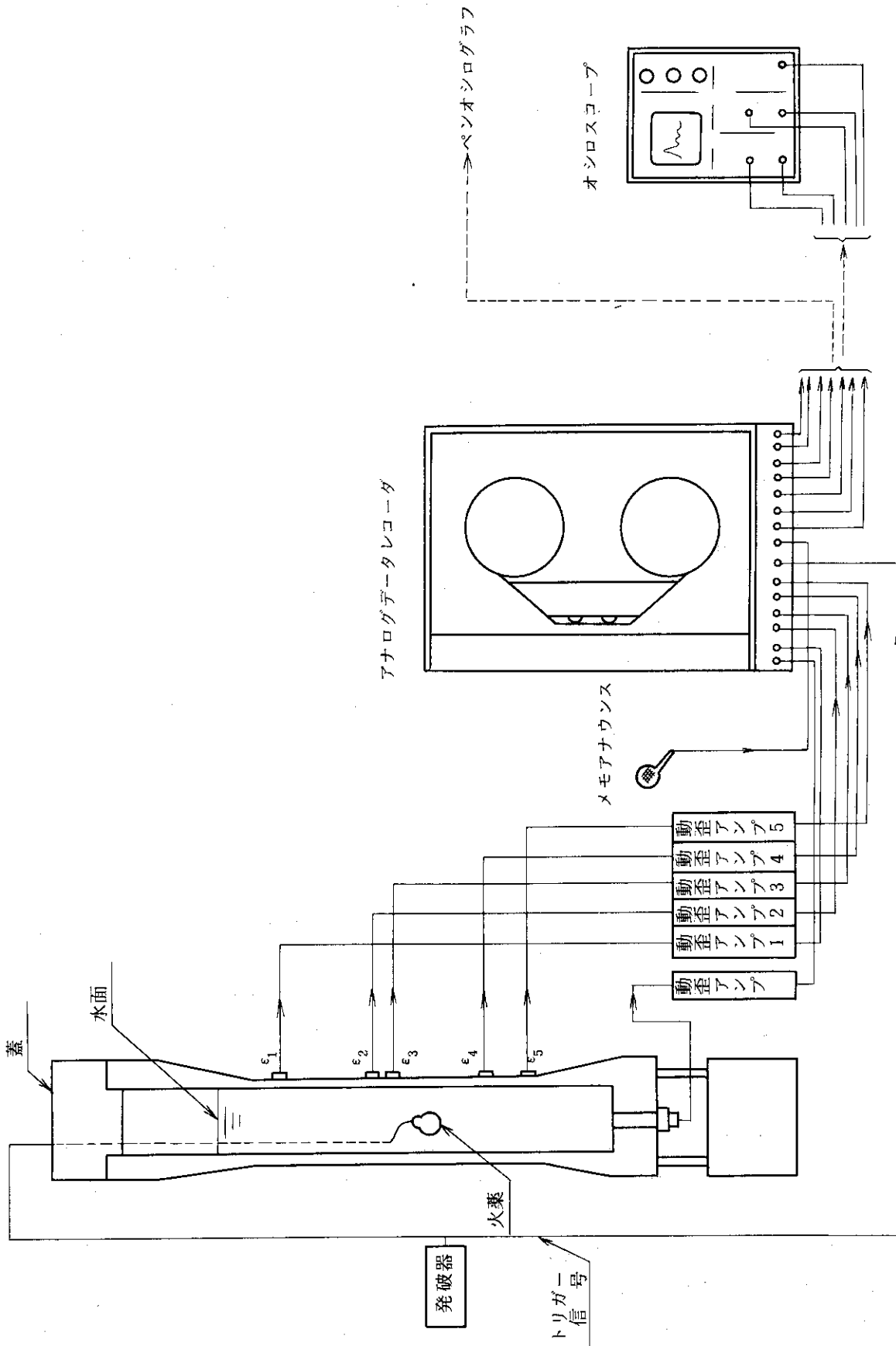
第 3.1 図 インパイル実験で発生すると想定した最大圧力



第 3.2 図 I 型高温高圧水カプセル



第 3.3 図 II 型流動水カプセル



第 3.4 図 強度確認試験の計装 (一般的なフロッピーチャート)

4. 現行の評価方法

4.1 許容変形量における現行の評価方法

(1) 常温常圧下で使用するカプセルの場合

カプセルの最大使用条件である圧力は大気圧であり、温度は 100℃以下を指すものとする。すなわち容器を構成する材料が SUS 304 であるため、室温時と 100℃時の強度に変化が無いものとしている。容器に加わる荷重は衝撃圧力による荷重を考える。

許容変形量の強度確認試験の考え方により、使用する火薬類の圧力はインパイル実験時に発生する最大の衝撃圧力と同等またはそれ以上でなければならないから、火薬類による圧力とインパイル実験時に発生する最大の衝撃圧力の比較として、

火薬類による荷重 \geq インパイル実験時の荷重
であることを確認しておく。すなわち、

$$p_{mk} \geq p_{mi} \quad , \quad t_k \geq t_i \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

ただし、 p_{mk} : 火薬類による圧力の最大波高値〔kg/cm²G〕

p_{mi} : インパイル実験時に発生すると想定した最大衝撃圧力の波高値〔kg/cm²G〕
(設計上の値、以下同じ)

t_k : 火薬類による圧力の作用時間幅〔msec〕

t_i : インパイル実験で発生すると想定した衝撃圧力の作用時間幅〔msec〕
(設計上の値、以下同じ)

とする。

この条件で強度確認試験を行なったとき、容器の最大ひずみを ϵ_{mk} とする。

許容変形量 (ϵ_{01}) と最大ひずみ (ϵ_{mk}) の比較を行ない、

$$\epsilon_{01} \geq \epsilon_{mk} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

であって、漏れ等の無い時、容器は許容変形量に対して十分な強度を有すると評価する。

(2) 高温高圧で使用するカプセルの場合

高温高圧で使用するカプセルの強度確認試験は、容器を高温高圧にして評価するのが望ましいが、火薬類を使用するため、常温常圧の下で強度確認試験を行ないこれを高温高圧の条件に換算して評価しなければならない。

換算するに当りひずみエネルギーの考え方を導入して行なう。すなわち、インパイル実験時に発生すると想定した衝撃圧力と火薬類による衝撃圧力の比較を行ない、火薬類の衝撃圧力が大きいときの単位体積当りのひずみエネルギー (W_k) を求め、これをインパイル実験で発生するひずみエネルギーと等価またはそれ以上と考える。

W_k の値は室温時であるが、その絶対値は高温時でも変化しないものとする。

一方、高温時の許容変形量 (ϵ_{01}) である 2%ひずみに相当するひずみエネルギーを求めておき、ひずみエネルギーの比較を行ない、2%ひずみに相当するひずみエネルギーの方が大きい

ときに、インパイル実験で発生するひずみは2%より小さいと評価する。

具体的には次のように行なう。

まずはじめに、

インパイル実験時に発生すると想定した荷重 \leq 火薬類による荷重
 であるとする。すなわち、容器へ加わる荷重を運転圧力+衝撃圧力として

$$p_1 + p_{mi} \leq p_{mk} \quad , \quad t_i \leq t_k \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

ただし、 p_1 : 運転圧力

とする。

一般に物体へある荷重を加えたとき、その物体が吸収(または消費)する単位体積当りのひずみエネルギーは

$$W = \int \sigma d\epsilon \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

で与えられる。すると、4.3式の条件によるひずみエネルギーの関係は、 $W_i \leq W_k$ となる。

また、物体の温度が室温であっても高温であっても、ひずみエネルギーの絶対値には変化がないとして

$$W \text{ at RT} = W \text{ at ET} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

と置く。すなわち、

$$W_k = W_{BT} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

とする。

ここで容器の材料はSUS 304であることより、その応力とひずみの関係を第4.1図のように仮定したとき、室温時の単位体積当りのひずみエネルギー(W_k)は

$$W_k = \frac{\sigma_{YRT} \epsilon_{IRT}}{2} + \sigma_{YRT} (\epsilon_{mk} - \epsilon_{IRT}) \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

- ただし、 σ_{YRT} : 室温における耐力値〔kg/mm²〕
- ϵ_{IRT} : σ_{YRT}/E_{RT} より求めた値
- E_{RT} : 室温におけるヤング率〔kg/mm²〕
- ϵ_{mk} : 火薬類による容器の最大ひずみ量

である。

一方、高温時の許容変形量(ϵ_{01})を生じさせる単位体積当りのひずみエネルギー(W_{a1})は

$$W_{a1} = \frac{\sigma_{YET} \epsilon_{IET}}{2} + \sigma_{YET} (\epsilon_{01} - \epsilon_{IET}) \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

- ただし、 σ_{YET} : 高温時における耐力値〔kg/mm²〕
- ϵ_{IET} : σ_{YET}/E_{ET} より求めた値
- E_{ET} : 高温時のヤング率〔kg/mm²〕

であるから、比をとって

$$\frac{W_{a1}}{W_{ET}} \geq 1.0 \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

であるならば、高温時の最大ひずみ量(ϵ_{mET})は

$$\epsilon_{mET} \leq \epsilon_{01} \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

となる。

別法として、高温時の単位体積当りのひずみエネルギー (W_{ET}) は

$$W_{ET} = \frac{\sigma_{YET} \epsilon_{IET}}{2} + \sigma_{YET} (\epsilon_{mET} - \epsilon_{IET}) \quad \dots\dots\dots (4.11)$$

であるから、4.6式、4.7式および4.11式より ϵ_{mET} を算出できる。いずれにしても、4.10式が成立するとき、容器は高温高圧下で安全に使用できると評価する。

4.2 限界変形量における現行の評価方法

(1) 常温常圧で使用するカプセルの場合

強度確認試験における最大塑性ひずみを ϵ_{mk} 、限界変形量を ϵ_{02} とした時

$$\epsilon_{02} \leq \epsilon_{mk} \quad \dots\dots\dots (4.12)$$

が成立するまで火薬類により変形させ、容器の破断や割れの生じないとき、容器は限界変形量を満足していると評価する。

(2) 高温高圧で使用するカプセルの場合

高温高圧条件でも限界変形量は許容変形量の10倍である20%ひずみである。強度確認試験は常温常圧下で行なうため、換算が必要である。すなわち、室温時の破断伸びを ϵ_{BRT} 、高温時の破断伸びを ϵ_{BET} 、強度確認試験の最大伸びを ϵ_{mk} とすれば、強度確認試験で確認できた結果は、 $\epsilon_{BRT} > \epsilon_{mk}$ である。次にこの両辺に試験片の引張り試験で得た破断伸び比を乗じ

$$\epsilon_{BRT} \frac{\epsilon_{BET}^*}{\epsilon_{BRT}^*} > \epsilon_{mk} \frac{\epsilon_{BET}^*}{\epsilon_{BRT}^*}$$

(ただし、*印は単軸引張の場合を示す)

とする。また、

$$\frac{\epsilon_{BET}}{\epsilon_{BRT}} \approx \frac{\epsilon_{BET}^*}{\epsilon_{BRT}^*}$$

と近似すると、これらの関係は次のように表わすことができる。

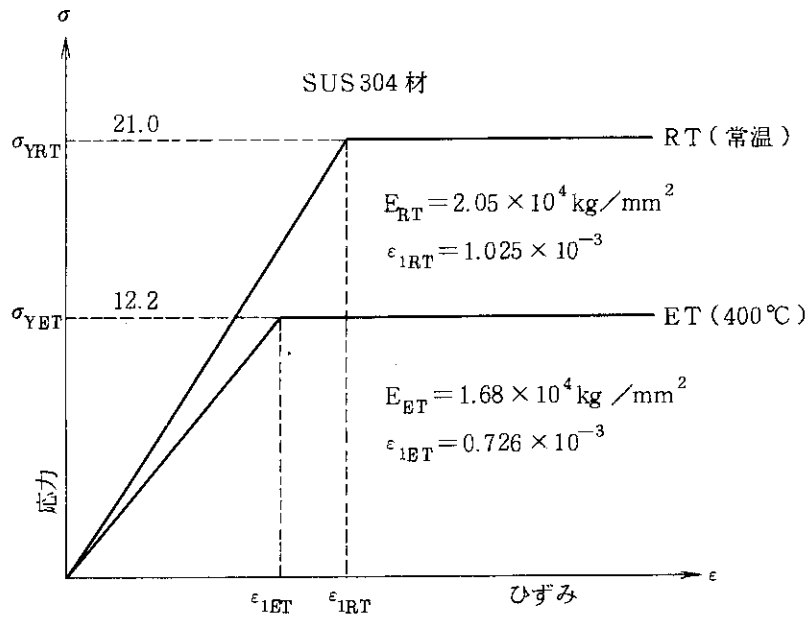
$$\epsilon_{BET} > \epsilon_{mk} \frac{\epsilon_{BET}^*}{\epsilon_{BRT}^*} \quad \dots\dots\dots (4.13)$$

そして、4.13式の右辺を限界変形量 (ϵ_{02}) と比較し、

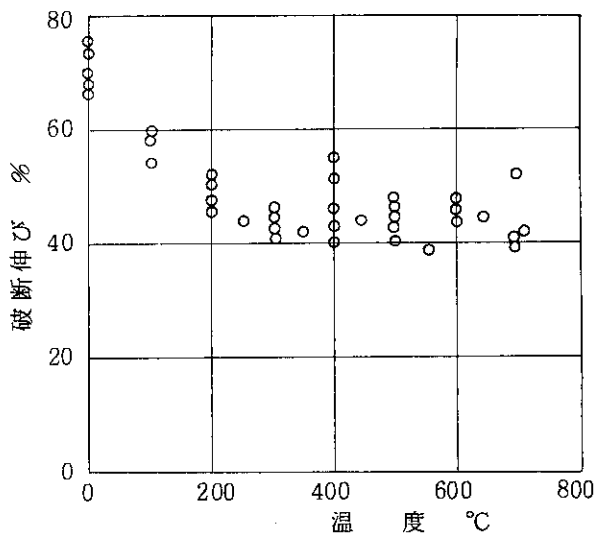
$$\epsilon_{mk} \frac{\epsilon_{BET}^*}{\epsilon_{BRT}^*} \geq \epsilon_{02} \quad \dots\dots\dots (4.14)$$

が成立する場合、 $\epsilon_{BET} > \epsilon_{02}$ となるので高温時において容器は限界変形量を満足していると評価する。

ここで、 $\epsilon_{BET}^* / \epsilon_{BRT}^*$ の値は第4.2図より求める。容器の最高使用温度は350°Cであるが、評価するときは400°Cと読み替えている。(以下同じ) SUS304材で、 $\epsilon_{BET}^* / \epsilon_{BRT}^* = 41/70 = 0.586$ としている。



第 4.1 図 仮定した応力～ひずみ線図



(JIS G4303~15, 4317-1977 解説より)

第 4.2 図 SUS 304 材の破断伸び

5. 評価方法の改善案

5.1 改善案の考え方

(1) 許容変形量の評価の場合

許容変形量における評価方法の改善案の考え方を第 5.1 図にしたがって説明する。基本的には、衝撃圧力の持つ力積（荷重側）と容器の受けるひずみエネルギー（負荷側）がある一定の関係にあるとする考え方である。すなわち、第 5.1 図(a)に示すように強度確認試験を行なうことによって、室温時における容器の最大ひずみ量（ ϵ_{mk} ）と力積値（ I_k ）が判る。この ϵ_{mk} と容器材料の室温時の応力～ひずみ曲線の近似式より室温時における単位体積当りのひずみエネルギー（ W_k ）が求められる。インパイル実験時に発生すると想定した力積（ I_i ）（設計上の値、以下同じ）はカプセル使用条件により与えられるから、力積と単位体積当りのひずみエネルギーがある一定の関係にあることを利用し、室温時のインパイル実験に生じると想定した単位体積当りのひずみエネルギー（ W_i ）（設計上の値、以下同じ）が求められる。ここで、容器を室温で使用するときは、 W_i 値と室温時の応力～ひずみ曲線の近似式より W_i 値による最大ひずみ（ ϵ_{mi} ）が求められる。さらに容器を高温で使用するときは、室温時の単位体積当りのひずみエネルギーの絶対値と高温時の単位体積当りのひずみエネルギーの絶対値が等しいとして、高温時の応力～ひずみ曲線の近似式より、 W_i 値による高温時の最大ひずみ（ ϵ_{mi} ）を求める。

求められた最大ひずみと許容変形量を比較して

$$\epsilon_{mi} \leq \epsilon_{01} \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

であるとき、容器は使用温度において許容変形量の制限値を満足していると評価する。5.1 式を満足するだけでは現行とあまり変わらないので安全余裕を次のように指定する。

$$\text{安全余裕} = \frac{\epsilon_{01}}{\epsilon_{mi}} - 1 \quad \dots\dots\dots (5.2) \text{ (付3参照)}$$

$$0 \leq \frac{\epsilon_{01}}{\epsilon_{mi}} - 1 \leq 1.0 \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

とする。

本資料では運転圧力の有無によって計算行程が変わるため、第 5.1 図(b)の考え方で記述してある。運転圧力の有る時は、容器が運転圧力（ p_1 ）によって ϵ_1 までひずんでいるとし、さらに動的荷重によって、 $\epsilon_1 \sim \epsilon_{mi}$ までひずむものとした。運転圧力値（ p_1 ）は容器の温度に関係なく一定とし、容器のひずみ（ ϵ_1 ）は温度によって変化するものとした。

(2) 限界変形量の評価の場合

常温常圧で使用するカプセルの場合は説明するまでもなく、

$$\epsilon_{mk} \geq \epsilon_{02} \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

であり、この条件でカプセルに破断や割れ等が無いことが確認できれば良いとする。

ただし、

ϵ_{mk} : 強度確認試験による最大ひずみ量

ϵ_{02} : 限界変形量

とする。

高温高圧で使用するカプセルの場合は、限界変形量の20%とカプセル使用温度時の近似応力～ひずみ曲線より高温時の単位体積当りのひずみエネルギー (W at ϵ_{02}, E_T) を求め、室温時の単位体積当りのひずみエネルギー値と等しいと置き、室温時のひずみ値を算出する。このひずみ値を特にカプセル使用温度時の限界変形量20%に相当する室温時のひずみ (ϵ_{0k}) とする。

強度確認試験時の最大ひずみを ϵ_{mk} とすれば、

$$\epsilon_{mk} \geq \epsilon_{0k} \quad (5.5)$$

が成立するまで強度確認試験を続行し、容器の破断や割れ等の生じない時、限界変形量を満足していると評価する。ただし、現行のように、

$$\epsilon_{mk} \gg \epsilon_{0k} \quad (5.6)$$

とする必要はない。

5.2 許容変形量における評価方法の改善案

(1) 運転圧力の無い時

力積と単位体積当りのひずみエネルギーの関係から

$$\frac{I_i}{I_k} = \frac{W_i}{W_k} \quad (5.7) \quad (6.4.1 \text{ 参照})$$

と置いて、 W_i を求める。

$$\therefore W_i = \frac{I_i}{I_k} W_k \quad \text{at RT} \quad (5.8)$$

である。ただし、

I_i : インパイル実験で発生する衝撃圧力波の力積

I_k : 火薬類による圧力波の力積

W_i : インパイル実験で発生する衝撃圧力波による単位体積当りのひずみエネルギー

W_k : 火薬類の圧力波による単位体積当りのひずみエネルギー

とする。また、インパイル実験で発生する衝撃圧力波の力積は

$$I_i = \frac{p_{mi} t_i}{2} \quad [\text{kg sec/mm}^2] \quad (5.9) \quad (\text{第 6.9 図参照})$$

p_{mi} : インパイル実験で発生する衝撃圧力波の最大波高値

t_i : インパイル実験で発生する衝撃圧力波の時間幅

$$I_k = \frac{p_{mk} t_k}{2} \quad [\text{kg sec/mm}^2] \quad (5.10) \quad (\text{第 6.9 図参照})$$

p_{mk} : 火薬類による圧力波の最大波高値

t_k : 火薬類による圧力波の時間幅

$\sigma_s = C_1 \epsilon^{n_1}$ および $\sigma_d / \sigma_s = 1.2$ at RT (6.2.2 参照) より

$$W_k = \frac{1.2 C_1}{n_1 + 1} \epsilon_{mk}^{n_1 + 1} \quad (5.11) (6.4.3 \text{ 参照})$$

ϵ_{mk} : 強度確認試験によって生じた円周方向の最大ひずみ量

C_1, n_1 : 静的応力ひずみ曲線の近似式の係数

とする。このようにして、5.8式から室温時のインパイル実験条件を代表する荷重による単位体積当りのひずみエネルギーの絶対値 (6.4.2 参照) が判る。次に室温時と高温時の絶対値が等しいとして (6.4.3 参照)

$$W_i \text{ at RT} = W_i \text{ at ET} \quad (5.12)$$

とする。また、6.53式より

$$W_i \text{ at ET} = \frac{0.9 C_2}{n_2 + 1} \epsilon_{mi}^{n_2 + 1} \quad (5.13)$$

C_2, n_2 : 高温時の静的引張試験の応力ひずみ曲線の近似式の係数

であるから、高温時の最大ひずみは

$$\epsilon_{mi} \text{ at ET} = \left\{ \frac{W_i \text{ at RT} (n_2 + 1)^{\frac{1}{n_2 + 1}}}{0.9 C_2} \right\} \quad (5.14)$$

と求められる。そして

$$\epsilon_{mi} \text{ at ET} \leq \epsilon_{01} \quad (= 2\%) \quad (5.15)$$

を満足する $\epsilon_{mi} \text{ at ET}$ であるとき、容器はその使用温度 (ここでは 400°C を考えている) において使用可能であると評価する。ただし、安全余裕は

$$0 \leq \frac{\epsilon_{01}}{\epsilon_{mi} \text{ at ET}} - 1 \leq 1.0 \quad (5.16)$$

で充分であるとする。

(2) 運転圧力の有る時

運転圧力 (p_1) に対する円周方向のひずみ (ϵ_1) を薄肉円筒の式から求める。

$$\epsilon_1 = \frac{2 - \nu}{2E} \frac{p_1 r}{t} \quad (5.17)$$

ただし、 ν : ポアソン比

E : ヤング率 (at RT & at ET)

p_1 : 運転圧力

r : 容器内半径

t : 肉厚

とする。 $\epsilon_1 \text{ at RT}$ と $\epsilon_1 \text{ at ET}$ を求めておく。次に、 $I_i / I_k = W_i / W_k$ より W_i を求める。

$$W_i = \frac{I_i}{I_k} W_k \text{ at RT} \quad (5.18)$$

ただし、

$$I_i = \frac{p_{mi} t_i}{2} \quad (5.19)$$

$$I_k = \frac{(p_{mk} - p_1) t_k'}{2} \quad (5.20)$$

$$W_k = \frac{1.2C_1}{n_1+1} (\epsilon_{mk}^{n_1+1} - \epsilon_{ik}^{n_1+1}) \quad (5.21)$$

$$\epsilon_{ik} = \epsilon_1 \text{ at RT} \quad (5.22) \quad (6.3.2 \text{ 参照})$$

とする。このようにして室温時のインパイル実験による単位体積当りのひずみエネルギーが求められる。そして、

$$W_i \text{ at RT} = W_i \text{ at ET} \quad (5.23)$$

と置き、 $W_i \text{ at ET}$ はまた次の式で与えられるから

$$W_i \text{ at ET} = \frac{0.9C_2}{n_2+1} (\epsilon_{mi}^{n_2+1} - \epsilon_{1ET}^{n_2+1}) \quad (5.24)$$

より、高温時の最大ひずみ ($\epsilon_{mi} \text{ at ET}$) を

$$\epsilon_{mi} \text{ at ET} = \left\{ \frac{(n_2+1)W_i \text{ at RT}}{0.9C_2} + \epsilon_{1ET} \right\}^{\frac{1}{n_2+1}} \quad (5.25)$$

として求める。許容変形量と比較して

$$\epsilon_{mi} \text{ at ET} \leq \epsilon_{01} \quad (= 2\%)$$

を満足するとき、容器は使用温度で使用可能であると評価する。ただし、安全余裕は、

$$0 \leq \frac{\epsilon_{01}}{\epsilon_{mi} \text{ at ET}} - 1 \leq 1.0 \quad (5.26)$$

とする。

5.3 限界変形量における評価方法の改善案

容器の使用温度時における限界変形量 ($\epsilon_{02} = 10 \epsilon_{01}$) から $W \text{ at } \epsilon_{02}$ & ET を求める。
(at $ET = 400^\circ\text{C}$)

$$W \text{ at } \epsilon_{02} \text{ \& } ET = \frac{0.9C_2}{n_2+1} \epsilon_{02}^{n_2+1} \quad (5.27)$$

より、 $W \text{ at } \epsilon_{02}$ & ET の絶対値を求める。また、

$$W \text{ at } \epsilon_{02} \text{ \& } ET = W \text{ at } \epsilon_{02} \text{ \& } RT = W_{0k} \quad (5.28)$$

と置く。 W_{0k} はまた次の式より

$$W_{0k} = \frac{1.2C_1}{n_1+1} \epsilon_{0k}^{n_1+1} \quad (5.29)$$

より、

$$\epsilon_{0k} = \left\{ \frac{(n_1+1)W_{0k}}{1.2C_1} \right\}^{\frac{1}{n_1+1}} \quad (5.30)$$

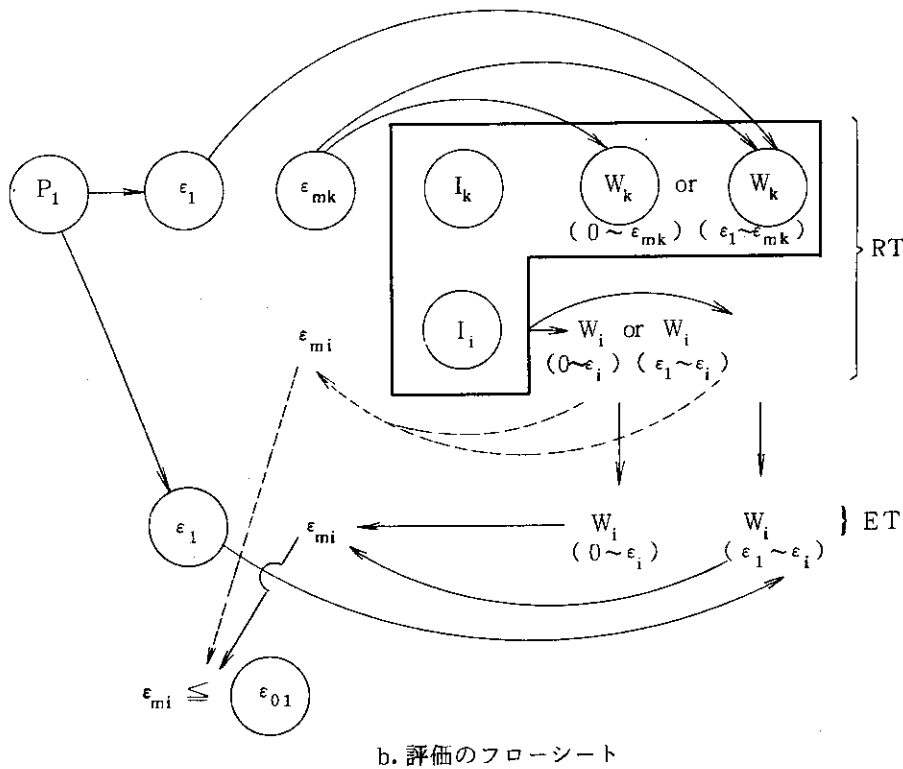
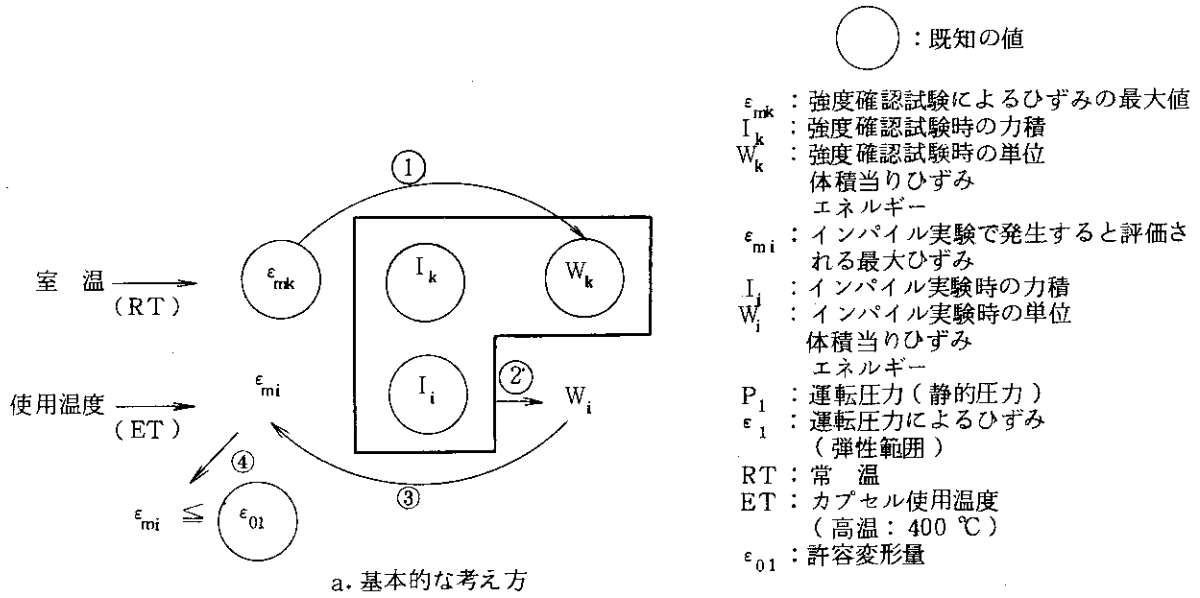
となる。この ϵ_{0k} は $\epsilon_{02} \text{ at ET}$ に対応する常温時のひずみ量であるから、強度確認試験による

最大ひずみを ϵ_{mk} として

$$\epsilon_{0k} \leq \epsilon_{mk}$$

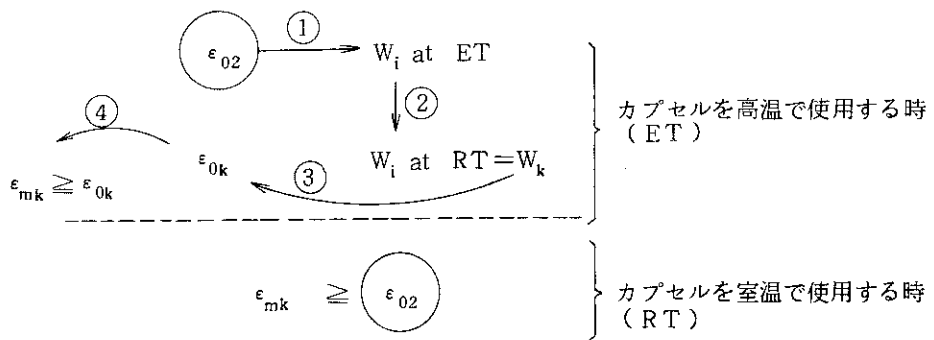
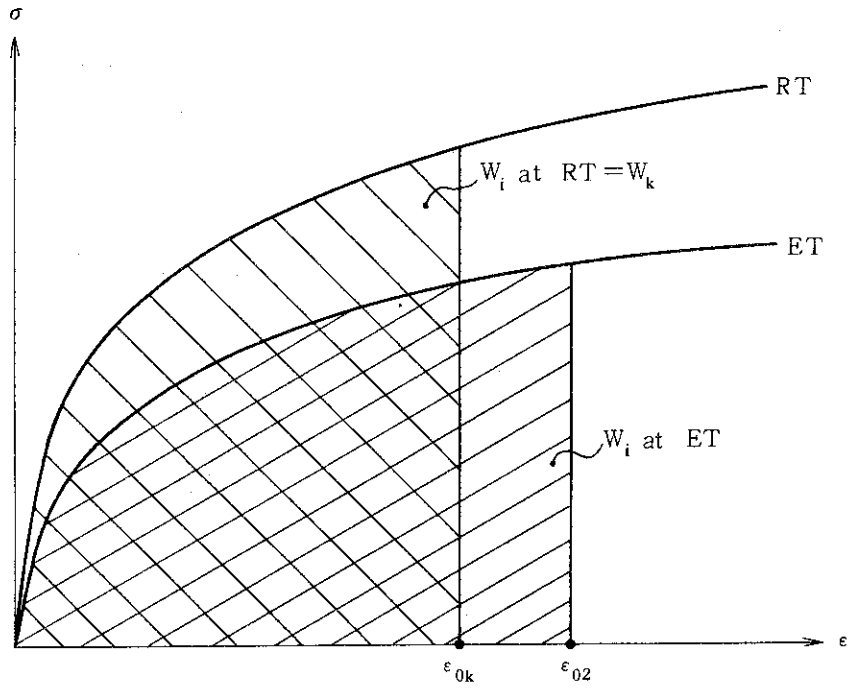
を満足するひずみであって、容器の破損の無いとき、容器は、 $\epsilon_{01} \times 10$ 倍の安全余裕を持っていると評価する。

ただし、 $\epsilon_{0k} \ll \epsilon_{mk}$ とする必要はない。



第 5.1 図 許容変形量評価手順

○ : 既知の値



第 5.2 図 限界変形量評価手順

6. 検 討 事 項

6.1 評価方法の検討

(1) 許容変形量評価の場合

許容変形量の強度確認試験はインパイル実験で発生する最大の衝撃圧力波と同一の大きさとなるような火薬類の圧力波を選ぶようにしているが、現在入手できるどのような火薬類でもインパイル実験の衝撃圧力波より大きな圧力波となってしまう同一の模擬は困難である。ちなみに火薬類の圧力波とインパイル実験の圧力波を比較すると波高値で数倍以上、作用時間幅でも数倍以上となっている。波高値と作用時間幅より求められる面積、すなわち力積で比較するとさらに倍率は大きく、インパイル実験による力積を1とした場合、火薬類による力積は、50倍から100倍となっている。

現行の評価方法はインパイル実験の衝撃圧力波と火薬類の圧力波を直接比較（波高値と作用時間幅）して、火薬類の圧力波がいくら大きくても

$$\text{インパイル実験の衝撃圧力波} \leq \text{火薬類の圧力波}$$

を満足し、その時の容器のひずみが

$$\text{火薬類による容器のひずみ} \leq \text{許容変形量}$$

であるなら安全側であるという定性的な方法である。

確かにインパイル実験に充分耐えられることは判るが、50倍以上の力積までとなるとあまりに丈夫すぎると云える。もちろんここで一般的な構造物の強度だけを考えるならば問題としない。NSRRの場合のように機械的強度と放射化の減少の両方について考えたときに云えることである。

そこで改善案では、力積(I)が単位体積当りのひずみエネルギー(W)と一定関係にある（6.4.1参照）ことを利用し、火薬類とインパイル実験の力積比からインパイル実験時の単位体積当りのひずみエネルギーを求め、この単位体積当りのひずみエネルギーよりひずみ量を算出し評価することとした。

また、火薬類を利用するため、高温高圧で使用するカプセルの強度確認試験は現行と同じに室温下で行なっているが、その換算方法（計算方法）を改善している。

今後も火薬類の性質からみて容器を高温にして強度確認試験を行なうことはできないと考えられる。

(2) 限界変形量の場合

現行の限界変形量の場合の考え方は、許容変形量の10倍以上の最大変形量または最大伸び量を限界変形量として、荷重の大小や応力値の大小を考えずに、単に変形量（または伸び量）だけに注目し評価したものである。

通常の弾性設計であるならば、安全率または安全余裕で示される値であるが、塑性をゆるした設計では、一般的表示方法がないため現行のような評価方法としたものである。

今、荷重や応力値の大小を考えないとしているが、仮に第 4.1 図のように伸び量に対して応力値が一定であっても許容変形量の 10 倍以上の限界変形量は 10 倍以上の安全率に相当する強度を有するし、実際使用している SUS 304 材の場合は伸び量の増加にしたがって応力値も増加することが判っているので暗黙の承解で荷重や応力値もさらに大きな値を有することが判る。

しかし、カプセル使用条件がきびしくなってくると、このような余裕を多くとる考え方は見直す必要があると云える。

ここで、現行の高温高压の限界変形量評価に使用している式

$$\epsilon_{\text{BET}}^* > \epsilon_{\text{xET}} = \left(\frac{\epsilon_{\text{BET}}^*}{\epsilon_{\text{BRT}}^*} \right) \epsilon_{\text{mk}} \geq \epsilon_{02} \quad (6.1)$$

を第 6.1 図のようにプロットして検討することとする。

A 点を室温における破断伸び ϵ_{BRT}^* に対応する点、B 点を高温における破断伸び ϵ_{BET}^* に対応する点、E 点を強度確認試験における最大ひずみ ϵ_{mk} に対応する点としたとき、F 点が求めようとしている高温時のひずみ ϵ_{xET} であるとしている。しかし、一般的な応力～ひずみ線図の見方からすれば、A 点、B 点および E 点が判っても F 点を指定することができない。E 点は単に ϵ_{mk} を与えたとき、 σ_{RT} が判るだけ（逆に σ_{RT} を与えれば ϵ_{mk} が判る）である。これは式の考え方からして当然で、室温時の破断点（A 点）が与えられているときに E 点で破断しないから、高温時の破断点（B 点）を与えたとき、F 点では破断しないと云うだけにすぎないことにある。すなわち、容器がある基準より丈夫であるならば、いくら丈夫であっても良いという考え方に立っていることによる。

塑性設計の安全率に相当する限界変形量の値が許容変形量の 10 倍で良いかどうかとも検討しなければならないが安全審査の関係で簡単に変更できないため、現在のまゝの値として、評価方法を検討する。

許容変形量の評価はひずみエネルギー法で行なっているため、限界変形量の評価もひずみエネルギー法で行なっても良いと考えられる。

容器材料の変形に消費したひずみエネルギーで考えながら第 6.1 図を見ると、

OE ϵ_{mk} で囲まれた面積が限界変形量確認試験時のひずみエネルギーであり、OG ϵ_{02} で囲まれた面積が限界変形量のひずみエネルギーである。 $\epsilon_{\text{mk}} > \epsilon_{02}$ だから明らかに限界変形量確認試験時のひずみエネルギーが大きい。

NSRR の容器に対する負荷荷重は 1 回の動的荷重であって、その荷重の持つエネルギーを容器のひずみエネルギーとして消費すれば、残りの荷重はまったく存在しないことを念頭に置いて、

OG ϵ_{02} で囲まれた面積 = OE' ϵ_{mk} ' で囲まれた面積であるようなひずみ ϵ_{mk}' として、評価しても良いのではないかと考えられる。すなわち、

限界変形量のひずみエネルギー = 強度確認試験のひずみエネルギー
を指す。

そのため以下に、応力とひずみの関係、ひずみエネルギー、動的荷重とひずみの関係など関連する事項を検討することとした。

なお、提案した評価方法はひずみエネルギー法で記述してある。

6.2 応力とひずみ

動的な荷重に対する応力とひずみの関係を知りたいのであるが、まず一般的な静的荷重による応力とひずみの関係から始める。静的荷重による応力～ひずみ曲線は、引張試験機を用い、引張試験片の温度を一定として求められ、第 6.1 図の OE' ECA の線または OGFDB の線のよう曲線となる。この曲線は一般的に近似法で表わすことができる。

6.2.1 応力～ひずみ曲線の近似

引張試験機により求められた応力～ひずみ曲線の近似としては、一般に次の三通りの方法があり、それぞれ使用目的によって使い分けられている。

(1) バイリニア法-1

NSRRにおいて従来の許容変形量で使用していた近似法で、耐力値(σ_Y)とヤング率(E)よりひずみ(ϵ_1)を求め、 σ_Y と ϵ_1 の交点と0間に直線を引き、 ϵ_1 より大きなひずみ(ϵ)に対しては応力を一定(σ_Y)とする方法。この近似法は弾性範囲と塑性ひずみの非常に小さいときだけ使用できる。作図例は第 4.1 図の通りである。一般には次のバイリニア法-2が用いられるが、本資料では使用していない。

(2) バイリニア法-2

バイリニア法-2は、0.2%耐力値と0間に直線を引き、次に引張強さと破断伸びの交点を求め、0.2%耐力値と交点間に直線を引く。作図例を第 6.2 図に示す。

(3) 近似曲線法

この近似曲線法は本資料で主要な役目を持っているため、特にくわしく説明する。また、この近似に用いた原式は塑性ひずみ範囲であるため、弾性範囲でも使用できるかどうか検討する。

塑性ひずみ範囲における真応力(σ_T)と真ひずみ(ϵ_T)との関係を表わす実験式は

$$\left. \begin{aligned} \sigma_T &= Y + H \epsilon_T^n && \text{(Ludwick の式)} \\ \sigma_T &= C (a + \epsilon_T)^n && \text{(Swift の式)} \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

等がある。ただし、Y, H, n, C, a は定数とする。

一般に上式を簡単化して

$$\sigma_T = C \epsilon_T^n \quad (6.3)$$

の近似式としている。本資料では公称応力と公称ひずみで表現したいため、

$$\sigma = C \epsilon^n \quad (6.4)$$

とする。ただし、C, n は定数とする。

定数のCとnの値を求めるために容器材料のミルシートに記載された0.2%耐力値、引張り強さ値、破断伸び値を採用する。求められたC値とn値を使って作図すると第 6.3 図の②線となった。①線は引張試験結果から○点のようにプロットして引いた線である。比較すると②の

近似曲線はひずみの小さい方で実測線の①を上廻り、強度評価上不都合となる。少なくとも近似曲線は実測曲線と同一かまたは近傍の下側でなければならぬ。ひずみの大きい方でも近似曲線は実測線より下側へ離れ過ぎる。もう少し近づける必要がある。なお、評価用の近似曲線は引張り強さ点までとし、それ以上は評価するとき不安全側になる恐れがあるため削除する。

近似曲線をひずみの小さい方で実測曲線の下側へ、また、ひずみの大きい方で実測曲線へ近づけるため、0.2%耐力値を2/3倍し、破断伸び値を0.8倍して、Cとnの値を求め作図すると、③の線となり評価用として適当な近似の応力～ひずみ曲線となった。ここで、0.2%耐力値の係数2/3は設計許容応力値を考えた値であり、破断伸び値の係数0.8は引張り強さに対応するひずみ値を考えた値である。

近似曲線と実測曲線の応力値の誤差はひずみが20%付近で最大となり-5%位である。ただし、ひずみ範囲は2%～35%位とする。

さらにこの近似曲線が2%以下のひずみ範囲で適用できるかどうか検討する。0～1.0%ひずみ範囲で作図すると第6.4図となった。ただし、線OACDは350°Cの引張試験結果をプロットしたもの、線OABは350°Cのバイリニア法-1によるもの、線OGは350°Cの近似曲線、線OEIJは26°Cの引張試験結果をプロットしたもの、線OEFは26°Cのバイリニア法-1によるもの、線OHは26°Cの近似曲線とする。

実測線と近似曲線を比較すると、0.2%ひずみ付近の応力値の誤差が最大となり-36%程度ある。バイリニア法-1でも大体同じ程度の誤差となっている。バイリニア法-2では作図していないが、0.2%ひずみと耐力値の交点に線を引いたと仮定して考えると、これもまた、同じ程度の誤差であることが判る。すると今考えている近似法のすべてについて、誤差は同じ程度で大きいと云える。

ひずみが1.0%付近では、バイリニア法-1の誤差が大きく、近似曲線の誤差が小さくなっている。

(4) 近似曲線法の定数の算出

近似の応力～ひずみ曲線の定数は次のように算出する。

応力～ひずみ曲線の近似式、 $\sigma = C \epsilon^n$ を $\sigma = C_1 \epsilon^{n_1}$ と置く。ただし、 C_1 と n_1 は室温時の定数とする。容器材料のミルシートまたは引張試験により、0.2%耐力値、引張り強さ値、破断伸び値を求める。

$$\sigma_A = C_1 \epsilon_{0.2}^{n_1} \tag{6.5}$$

$$\sigma_B = C_1 \epsilon_s^{n_1} \tag{6.6}$$

とする。ただし、

- σ_A : 0.2%耐力値の2/3倍の値
 - $\epsilon_{0.2}$: 0.2%ひずみ ($\epsilon_{0.2} = 0.002$)
 - σ_B : 引張り強さ値
 - ϵ_s : 破断伸びの0.8倍の値
- } at RT

とする。両辺の対数をとって

$$\ln \sigma_A = \ln C_1 + n_1 \ln \epsilon_{0.2}$$

$$\ln \sigma_B = \ln C_1 + n_1 \ln \varepsilon_s$$

二式から、 C_1 を消去して、

$$\ln \sigma_B - \ln \sigma_A = n_1 (\ln \varepsilon_s - \ln \varepsilon_{0.2})$$

n_1 を求める。

$$\therefore n_1 = \frac{\ln \sigma_B - \ln \sigma_A}{\ln \varepsilon_s - \ln \varepsilon_{0.2}}$$

n_1 を元の式に戻して、 C_1 を求める。

$$C_1 = \frac{\sigma_A}{\varepsilon_{0.2}^{n_1}} \quad \text{or} \quad \frac{\sigma_B}{\varepsilon_s^{n_1}}$$

となる。

容器の使用温度（高温）における定数も、 C_2 、 n_2 とにおいて室温時同様に求める。すなわち、

$$\sigma = \sigma_s = C_1 \varepsilon^{n_1} \quad \text{at RT} \quad (6.7)$$

$$\sigma = \sigma_s = C_2 \varepsilon^{n_2} \quad \text{at ET} \quad (6.8)$$

である。

6.2.2 静的荷重の応力と動的荷重の応力

静的な荷重に対する応力は前述のように知ることができる。しかし、動的な荷重に対する応力は一般的な例が少ない。NSRRのように火薬類を使用した実験として磯崎等^{※3)}の報告があり、本資料ではこの報告の値を使用する。

報告によれば、室温時の衝撃引張試験の応力は静的な引張試験の応力に対し、ひずみが6%から50%の範囲で、 $\sigma_d/\sigma_s = 1.1 \sim 1.2$ であるという。

ただし、 σ_d : 動的荷重による応力

σ_s : 静的荷重による応力

とする。

0.2%ひずみ付近で特異点が生じ、静的な応力より動的な応力は70%増加する。なおこのデータは塑性ひずみ範囲であるから、弾性ひずみ範囲ではどうなるか検討しなければならない。NSRRにおけるII型2号流動水カプセルの強度確認試験の結果（実験番号1）、圧力波のピーク値は 350 kg/cm^2 であった。その時の容器周方向ひずみは、 $677 \mu \text{ strain}$ であった。

他方静的圧力による薄肉管のひずみは

$$\varepsilon_\theta = \frac{(2-\nu)}{2E} \frac{pr}{t} \quad (6.9)$$

で与えられるから、これより測定値と同じひずみを生じさせる圧力は

$$\begin{aligned} p &= \frac{2Et}{(2-\nu)_r} \varepsilon_\theta = \frac{2 \times 1.99 \times 10^4 \times 9.5}{(2-0.3) \times 50} \times 677 \times 10^{-6} \\ &= 3.01 \text{ kg/mm}^2 \quad \rightarrow \quad 301 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

※3) 日本機械学会論文集 42巻359号(昭51-7)p2034「オーステナイト系ステンレス鋼の高温衝撃引張試験」

となる。同一ひずみに対する動的圧力と静的圧力の比は $350/301 = 1.16$ となり、これはまた、

$\sigma = pr/t$ より、 r/t を乗じて

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_s} = 1.16$$

である。したがって、 1000μ strain 以下のひずみ範囲でも磯崎等の結果と一致する。すると弾性ひずみから塑性ひずみの全範囲について、0.2%ひずみ付近の特異点をのぞき、

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_s} = 1.1 \sim 1.2 \quad \text{at RT} \quad (6.10)$$

として良いと云える。また、 400°C ではひずみが5%から30%の範囲で

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_s} \doteq 0.9 \quad \text{at } 400^\circ\text{C} \quad (6.11)$$

である。弾性範囲についても室温時のときと同じと考え、ここでは、6.10式と同じに全ひずみ範囲で適用できるものとした。

さらに、 600°C では、ひずみが $5\% < \epsilon < 30\%$ で

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_s} \doteq 0.92 \quad \text{at } 600^\circ\text{C} \quad (6.12)$$

である。なお、動的荷重の性質は磯崎等の実験とNSRRの強度確認試験について同じとした。磯崎等の使用した火薬類の爆速は $2,000 \sim 3,000 \text{ m/sec}$ であり、NSRRの火薬類の爆速は約 $2,000 \text{ m/sec}$ (低爆速の時)であった。

第6.5図および第6.6図に磯崎等のデータを示す。

6.2.3 単純引張応力と薄肉円筒の応力

これまで述べて来た応力やひずみは引張試験片による単純引張応力とひずみの関係である。NSRRの容器は中央胴部において薄肉円筒であるから、単純引張応力と薄肉円筒の応力の違いについて検討する必要がある。

静的荷重による単純引張のひずみは、弾性範囲において、

$$\epsilon_s = \sigma_s / E \quad (6.13)$$

である。一方薄肉円筒の周方向応力(σ_θ)は、

$$\sigma_\theta = pr/t \quad (6.14)$$

であり、またその時の周方向ひずみ(ϵ_θ)は、

$$\epsilon_\theta = \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu \sigma_z) = \frac{(2-\nu)}{2E} \sigma_\theta \quad (6.15)$$

である。ここで、ポアソン比を0.3とすれば

$$\epsilon_\theta = 0.85 \frac{\sigma_\theta}{E}$$

となる。単純引張りのひずみと周方向のひずみの比は

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_\theta} = \frac{\sigma_s}{0.85 \sigma_\theta} \quad (6.16)$$

となり、 $\varepsilon_s = \varepsilon_\theta$ の場合には

$$\sigma_s = 0.85 \sigma_\theta \quad (6.17)$$

となる。

塑性範囲においても弾性範囲と同じ関係にあると考えると

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E'} \quad (6.18)$$

$$E' = \frac{C \varepsilon^n}{\varepsilon} = C \varepsilon^{n-1} \quad (6.19)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E'} (\sigma_\theta - \nu' \sigma_z) \quad (6.20)$$

である。ただし、

E' : 弾性範囲のヤング率(E)に相当する塑性範囲の係数

ν' : 弾性範囲のポアソン比(ν)に相当する塑性範囲の係数

とする。

ポアソン比は、 $\nu = \text{横ひずみ} / \text{縦ひずみ}$ であるから ν' も同様に考えて、 $\nu' = \text{軸方向ひずみ} / \text{周方向ひずみ}$ とする。

II型2号流動水カプセルの強度確認試験結果を例にとると、周方向ひずみが39.9%の時、第6.7図の見かけ軸ひずみは測定できない位小さい。容器外壁面に沿って伸びた長さ(4ℓ)を求めると約2mmと算出される。これより $\varepsilon_z = 0.38\%$ となる。 $\varepsilon_\theta = 39.9\%$ であるから、見かけのポアソン比に相当する係数 ν' は

$$\nu' = \frac{0.38}{39.9} = 0.0095$$

となった。すなわち、大きな塑性範囲における ν' は、極めて小さいことが判る。

6.16式を弾性ひずみ範囲から塑性ひずみ範囲まで拡大すると

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_\theta} \doteq \frac{\sigma_s}{0.85 \sigma_\theta} \sim \frac{\sigma_s}{\sigma_\theta} \quad (6.21)$$

になる。 $\varepsilon_s = \varepsilon_\theta$ の時は

$$\sigma_s = 0.85 \sigma_\theta \sim \sigma_\theta$$

となる。評価上弾性範囲のようにひずみの小さい方で誤差が大きくなるが

$$\sigma_s \doteq \sigma_\theta \quad (6.22)$$

として、薄肉円筒の周方向応力と単純引張りの応力を取り扱うものとする。

6.3 力 積

6.3.1 力 積

インパイル実験は容器中へ純水を入れ、純水中に実験燃料棒を置いて原子炉からの中性子を当て実験燃料棒を発熱させ破損させているものである。

強度確認試験は容器中へ水道水を入れ、実験燃料棒の替りに火薬類を置いて爆発させ容器の変形（ひずみ量）を調べているものである。両方とも容器に対する負荷荷重は1回の動的な圧力波である。

動的圧力波の大小を表す1つの方法として力積があり、力積は圧力波の波高値とその作用時間で囲まれた面積で表わされる。しかし、同一の力積値であっても波高値が大きく時間の短い場合と波高値が低く時間の長い場合ではその性質が異なる。

一般に物体の動的な負荷荷重に対するひずみ量は負荷荷重の大きさとその速さによって左右されることが知られている。強度確認試験の場合、負荷荷重の大小は力積の大小であり、負荷荷重の速さは圧力波の立上り速さで表わすことができる。

インパイル実験で発生する動的圧力波の最大波高値（ p_{mi} ）は、 $p_{mi} \doteq 130 \text{ kg/cm}^2$ であり、その作用時間は、 $t_i \doteq 1.1 \text{ msec}$ である。力積（ I ）は、 $I = \int p dt$ よりその値が求められる。また、速さについて検討すると、動的圧力波が最大に達するまでの時間は作用時間の半分またはそれ以下の時間であることより圧力波が零から最大に達するまでの時間を仮に 0.5 msec とすると、圧力が 1 kg/cm^2 上昇するために必要な時間は $3.85 \mu\text{sec}$ となる。

これに対して、火薬類による圧力波が 1 kg/cm^2 上昇するために必要な時間は、 $0.8 \sim 13.4 \mu\text{sec}$ であった。このことよりバラツキはあるがインパイル時の圧力波と火薬類の圧力波の各々の立上り速さは大体同じであると云える。

本資料では第 6.8 図に示すように立上りの勾配をまったく同一と考えた。すなわち、 I_i をインパイル実験の力積としたとき、 I_k を火薬類による力積とした。このように考えることによりインパイル実験時の力積と強度確認試験時の力積による容器への影響は同一性質の荷重であるとした。

また、動的な負荷荷重に対して、容器は共振せず、特異現象は無いものとする。すなわち、インパイル実験時の圧力波作用時間を t_i 、強度確認試験時の圧力波作用時間を t_k とすれば、 t_i および t_k は動的負荷荷重の半サイクルと考えられる。すると負荷荷重の周波数（ f ）は

$$\begin{aligned} t_i &\doteq 1.1 \text{ (msec)} \rightarrow f_i = 454 \text{ (Hz)} \\ t_k &\doteq 10 \sim 40 \text{ (msec)} \rightarrow f_k = 50 \sim 12.5 \text{ (Hz)} \end{aligned}$$

となる。これに対して容器のひずみ方向（ここでは薄肉胴部の周方向を指す）に対する固有周波数（ f_0 ）は $4,000 \text{ Hz}$ 前後（大気圧水カプセルおよび流動水カプセルで）であるため、インパイル実験時、強度確認試験時のいずれの場合でも、容器は動的な負荷荷重に対して共振しない。もし負荷荷重が固有周波数に共振すると、振幅が特別に大きくなり、それにしたがって容器のひずみが大きくなる特異現象となる。

6.3.2 力積値

(1) 運転圧力の無いとき

運転圧力の無いときのインパイルの力積は衝撃圧力を三角波とみなして（第 6.9 図(a)参照）

$$I_i = \frac{p_{mi} t_i}{2} \quad \text{[kg sec/cm}^2 \text{]} \quad (6.23)$$

とする。

これに対して火薬類による力積は、同様に三角波とみなして（第 6.10 図参照）

$$I_k = \frac{p_{mk} t_k}{2} \quad [\text{kg sec/cm}^2] \quad (6.24)$$

とする。

(2) 運転圧力の有るとき

運転圧力の有るときは運転圧力 (p_1 : 静的圧力) に衝撃圧力 (p_{mi} : 動的圧力) を加算する。(第 6.9 図(b)参照) 運転圧力によるひずみを ϵ_1 , 衝撃圧力によるひずみを ϵ_{mi} と別々に求め、全ひずみ(ϵ)は $\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_{mi}$ と考える。したがって、負荷荷重である衝撃圧力の力積は運転圧力の高低に関係なく、

$$I_i = \frac{p_{mi} t_i}{2} \quad [\text{kg sec/cm}^2] \quad (6.25)$$

とする。

これに対して火薬類による力積は、動的圧力から運転圧力と同じ値を差し引き、残りの三角波より求める。(第 6.10 図参照) 算出式は、

$$I_k = \frac{(p_{mk} - p_1) t_k'}{2} \quad [\text{kg sec/cm}^2] \quad (6.26)$$

とする。

ここで、第 6.10 図の ABCD で囲まれた圧力波 (台形圧力波) によるひずみ (ϵ_{1k}) と運転圧力によるひずみ (ϵ_1) の関係は、台形波形を動的圧力とみて、わずかに $\epsilon_{1k} > \epsilon_1$ となるが、ほとんど等しいため、これを

$$\epsilon_{1k} = \epsilon_1 \quad (6.27)$$

として取り扱う。

6.4 単位体積当りのひずみエネルギー

6.4.1 単位体積当りのひずみエネルギーと力積

圧力波の横軸に時間をとった波形の全面積が力積(I)であり、圧力波の横軸に距離をとった波形の全面積がエネルギー密度(D)である。すなわち

$$I = \int p dt \quad [\text{kg sec/cm}^2] \quad (6.28)$$

$$D = \int p da \quad [\text{kg cm/cm}^2] \quad (6.29)$$

である。圧力波の時間幅を t , 波長を a , 進行速度を U とすると, $a = Ut$ が成立する。インパイル実験の衝撃圧力波の進行速度と火薬類による圧力波の進行速度は近似的に同じ (一定) であるから, エネルギー密度(D)は、

$$D = \int p da = U \int p dt \quad [\text{kg cm/cm}^2] \quad (6.30)$$

の関係にある。波面の全面積 [cm^2] で考えれば [kg cm] となり、圧力波の有する全エネルギーとなる。全エネルギーのうちの一部が単位体積で消費すれば [kg cm/cm^3] の単位である。すなわち単位体積当りのひずみエネルギー $W = \int \sigma d\epsilon$ [kg mm/mm^3] に等しい。しかし、実際問題として、力積値が判っても単位体積当りのひずみエネルギー(W)の値を正確に云うことは

むづかしい。

そこで仮に

$$I = kW \quad (6.31)$$

ただし、 k は定数とする。

と置いて、定数(k)について検討する。さらに定数を分割して

$$k = k_1 \times k_2 \times k_3 \times \dots \times k_n \quad (6.32)$$

と置く。そして強度確認試験で考えられるすべての係数を列記すると

k_1 : 全力積のうち本資料でいう単位体積当りのひずみエネルギーに消費される割合係数

k_2 : 強度確認試験における試験体系の形状に依存する係数

k_3 : 材質による係数

k_4 : 圧力波の立上り速度によって変化すると考えられるひずみ速度による係数

k_5 : 圧力波の伝播する媒体の係数

k_6 : 材質の温度による係数

以下省略

等がある。

磯崎等の実験について検討すると

k_1 はテストピースの端効果を見ればテストピースのどの部分の単位体積を考えても同じひずみエネルギー値になるはずであるから問題としなくてよい係数と云える。

k_2 はテストピースであるため考える必要のない係数である。

k_3 は SUS 304 による係数である。

k_4 は実験に使用した火薬類の爆速が 2,000 ~ 3,000 m/s であるからその爆速に応じたひずみ速度による係数を考える。

k_5 は SUS 304 による係数を考える。

k_6 は室温時および 400°C 時の係数を考える。

等であり、強度確認試験について検討すると

k_1 は単位体積当りのひずみエネルギーを考える微小部分ごとに異なり、ある場所を指定しない限りまったく手のつけようがない。本資料では薄肉胴部の最大ひずみの生じる部分としている。またこの k_1 は次の k_2 との分離をどこで行なうかはっきりしない。

k_2 は薄肉円筒による二次元の係数を考え、半径方向 (r 方向) は無視するものとする。なお、磯崎等の実験は一次元と考える。

k_3 は SUS 304 による係数とする。

k_4 は使用した火薬類の爆速が約 2000 m/s であるからその爆速に応じたひずみ速度による係数を考える。

k_5 は容器中の水道水と SUS 304 による係数を考える。

k_6 は室温時による係数を考える。

等である。

これらの係数に関して、磯崎等の実験と強度確認試験を室温時の場合について比較すると大

きな違いは k_1 と k_2 であることが判る。強度確認試験時の k_1 を考えるある個所を指定(固定)すれば、その比(磯崎等の実験の k_1 と強度確認試験時の k_1 の比)は一定になると考えられる。また k_2 は片方が単軸の引張りであり、他方が薄肉円筒の二次元(半径方向は無視する)引張りであることより同一になることは無い。本資料ではポアソン比を0.3(弾性範囲)としたときに約3割の誤差を含むものとして考えている。さらに塑性域では3割以下になるとしている。(6.2.3参照)

このように考えることによって、磯崎等の実験と強度確認試験はある一定値(約3割の誤差を含んで)であるとした。

はじめに戻って、 $I = kW$ であるとき、同じ実験体系であるなら定数 k は変化しないとして、

$$I_1 = kW_1, \quad I_2 = kW_2, \quad \dots \quad (6.33)$$

とする。また、

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{W_1}{W_2} \quad (6.34)$$

とすることができる。

磯崎等の実験と強度確認試験の連結ができたところでインパイル実験との連結を行なわなければならない。インパイル実験のうち室温で使用するものは、強度確認試験時の条件と同じであるため、定数 k を変化させることが無い。したがって、力積比は単位体積当りのひずみエネルギー比に等しいから

$$W_i = \frac{I_i}{I_k} W_k \quad \text{at RT} \quad (6.35)$$

となる。

6.4.2 本資料で考えている単位体積当りのひずみエネルギー

一般に三軸(x, y, z)の単位体積当りのひずみエネルギーは、各軸の応力とひずみおよび各軸に対するせん断応力とせん断ひずみの計6要素で与えられる。

NSRRの容器も同様に三軸を円周方向(θ)、半径方向(r)、軸方向(z)として、単位体積当りのひずみエネルギーは計6要素から与えられることになる。

単位体積当りの全ひずみエネルギー(W_{total})は、

$$W_{total} = \underbrace{W_\theta + W_r + W_z}_{\text{応力による項}} + \underbrace{W_{\theta r} + W_{rz} + W_{z\theta}}_{\text{せん断応力による項}} \dots \quad (6.36)$$

応力による項 せん断応力による項

である。

本資料で考えている単位体積当りのひずみエネルギーの場所は、第6.11図のように最大円周ひずみの生じているところである。この点について見かけ上のひずみ量を調べると、一番大きいのは円周方向の伸びすなわち内半径の増加に伴う伸び量であり、次に半径の増加によって生じる肉厚の減少である。軸方向の変化はほとんど無い。各せん断ひずみも軸方向と同じ程度である。

そこで、ひずみの一番大きい円周方向について考える。

Wtotal = 1.0 として、各軸に対するひずみエネルギーの分配比率を α_n とすれば、

$$\sum_{n=1}^{n=6} \alpha_n = 1.0, \quad 0 < \alpha_n < 1.0 \quad (6.37)$$

$$W_\theta = \frac{\alpha_1}{\sum_{n=1}^{n=6} \sigma_n} \cdot W_{total} = \alpha_1 W_{total}$$

となる。ここで、円周方向のひずみエネルギーが大きくなれば、その他のひずみエネルギーも大きくなるため、

$$\alpha_1 \doteq \text{一定}$$

として考える。そして、

$$W_\theta = W \quad (6.38)$$

と置き、Wを本資料で云う単位体積当りのひずみエネルギーとしている。したがって、常に $W < W_{total}$ であって、真の単位体積当りのひずみエネルギーではなく、単にあるエネルギーの大小を比較するための仮数と考えている。

6.4.3 単位体積当りのひずみエネルギー値

(1) 単純引張り荷重の単位体積当りのひずみエネルギー値

単純引張り荷重によって材料の変形に消費した単位体積当りのひずみエネルギー(W)は

$$W = \int_0^{\epsilon_m} \sigma d\epsilon \quad (6.39)$$

である。

応力～ひずみ曲線の近似式(6.4式)を使って表示すると

$$W = \frac{C}{n+1} \epsilon_m^{n+1} \quad [\text{kg mm/mm}^3] \quad (6.40)$$

となり、さらに6.7式および6.8式を使って表示すれば

$$W_s = \frac{C_1}{n_1+1} \epsilon_m^{n_1+1} \quad \text{at RT} \quad (6.41)$$

$$W_s = \frac{C_2}{n_2+1} \epsilon_m^{n_2+1} \quad \text{at ET} \quad (6.42)$$

となる。

ここで通常の静的な引張り試験で、同一ひずみまたは同一応力まで引張った場合に $W_s \text{ at RT} = W_s \text{ at ET}$ になることがない。6.1の検討で述べたように、ある応力値を一定としたときの応力、ひずみおよびエネルギーの関係は

$$\left. \begin{aligned} \sigma_s \text{ at RT} &= \sigma_s \text{ at ET} \\ \epsilon_s \text{ at RT} &< \epsilon_s \text{ at ET} \\ W_s \text{ at RT} &< W_s \text{ at ET} \end{aligned} \right\} \quad (6.43)$$

であり、もし仮に同一ひずみで試験器を止めたとすれば

$$\sigma_s \text{ at RT} > \sigma_s \text{ at ET}$$

$$\left. \begin{array}{l} \epsilon_s \text{ at RT} = \epsilon_s \text{ at ET} \\ W_s \text{ at RT} > W_s \text{ at ET} \end{array} \right\} \quad (6.44)$$

となる。このことは荷重側のエネルギーがある一定量でないことによるものである。

ここで荷重側のエネルギー量がある一定量と指定し、エネルギーが無くなるまでの試験片に吸収されたひずみエネルギーは試験片の温度に関係なく同一となるはずである。別の表現をすれば、応力を動力に対する負荷抵抗とし、ひずみ量を移動距離とすると、室温時の試験片の負荷抵抗は大きいため、一定量の動力で移動する距離は小さくなる。これに対して高温時の試験片の負荷抵抗は小さいため、同一量の動力に対し移動距離が大きくなる。すなわち、負荷抵抗と移動距離によって表示できる仕事量は同一となるはずである。このように荷重側の持つエネルギー量を一定量としたときのひずみエネルギーは

$$W_s^* \text{ at RT} = W_s^* \text{ at ET} \quad (6.45)$$

となる。ただし、 W_s^* は荷重側のエネルギーをある一定量としたときのひずみエネルギーとする。

NSRRの場合のように容器に加わる荷重がある一定量（動的荷重で）であるから静的な荷重に換算できたとして、

$$W_s^* = W_s \quad (6.46)$$

とすることができる。しかし、上式（6.46式）が成立するからと云って、 W_s の値から W_s^* の値を指定できない。このことは、 W_s^* がある荷重の動力量を一定としたとき、ある一定値となり、 W_s は荷重の動力量を指定していないので任意となることによる。

本資料では、6.46式が成立するような特別の条件だけを考慮して記述してある。

(2) 衝撃荷重による単位体積当りのひずみエネルギー値

磯崎等の実験に使用した火薬類の爆速は、2,000~3,000m/secであり、本確認試験に使用した火薬類の爆速は約2,000m/secであることにより、供試材のひずみ速度は同じとして検討するものとする。

第6.5図に示す応力~ひずみ曲線について、ひずみを一定とした時の面積をプランメーターで測定し、その比を求めると第6.1表のようになった。ひずみが30%以下の範囲で同一ひずみに対し、

第6.1表 図より求めたひずみエネルギー比

ひずみ 〔%〕	W_d / W_s	
	RT	400°C
5	1.20	0.93
10	1.23	0.92
20	1.29	0.92
30	1.23	0.91

$$\frac{W_d}{W_s} \doteq 1.2 \quad \text{at RT} \quad (6.47)$$

$$\frac{W_d}{W_s} \doteq 0.9 \quad \text{at ET}=400^\circ\text{C} \quad (6.48)$$

が成立する。また、6.41式および6.42式から静的な $W \sim \epsilon$ の関係を、 C_1, n_1 を用いて動的な $W \sim \epsilon$ の関係で表わすと

$$W_d = \frac{1.2C_1}{n_1+1} \epsilon_m^{n_1+1} \quad \text{at RT} \quad (6.49)$$

$$W_d = \frac{0.9C_2}{n_2+1} \epsilon_m^{n_2+1} \quad \text{at ET} \quad (6.50)$$

となる。他方、6.4式、6.10式および6.11式から ϵ_m まで積分して求めても

$$W_d = \frac{1.2C_1}{n_1+1} \epsilon_m^{n_1+1} \quad \text{at RT} \quad (6.51)$$

$$W_d = \frac{0.9C_2}{n_2+1} \epsilon_m^{n_2+1} \quad \text{at ET} \quad (6.52)$$

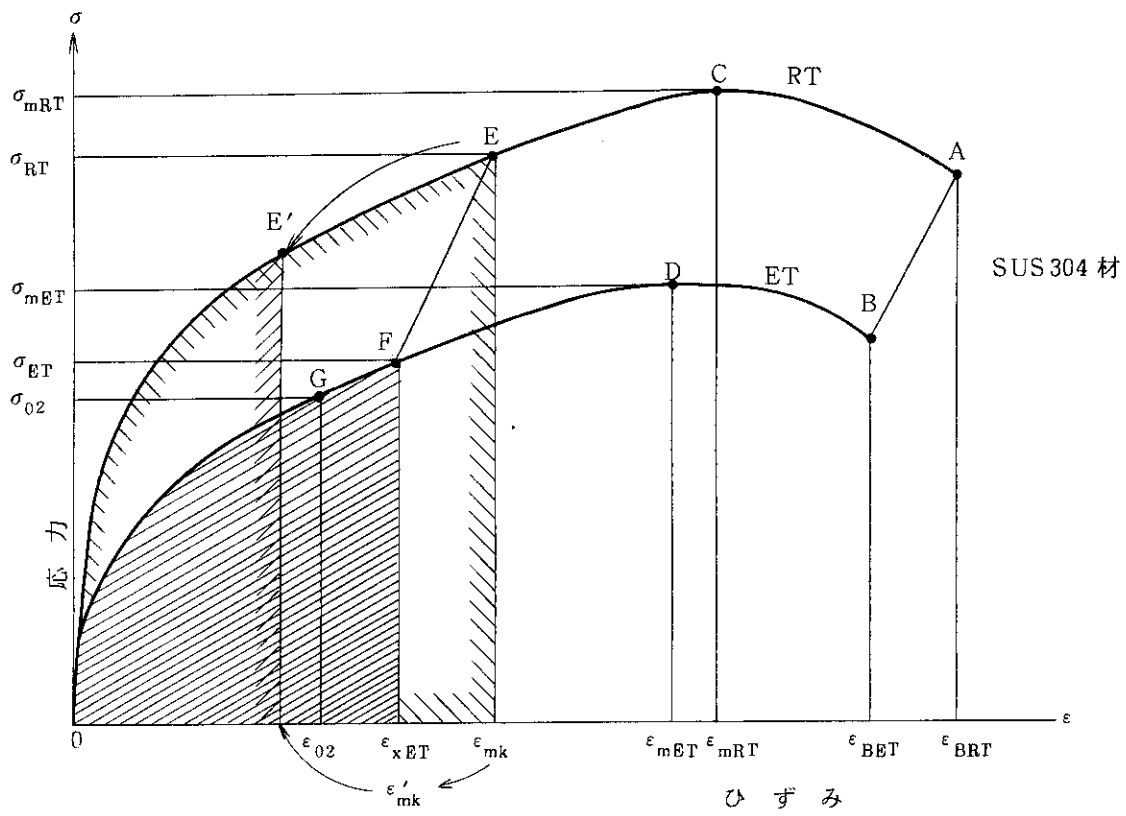
となり、図から求めても積分で求めても一致することが判る。また、一般には成立しないが、6.45式や6.46式が成立する条件の下では

$$\frac{W_d}{1.2} \quad \text{at RT} = \frac{W_d}{0.9} \quad \text{at ET} \quad (6.53)$$

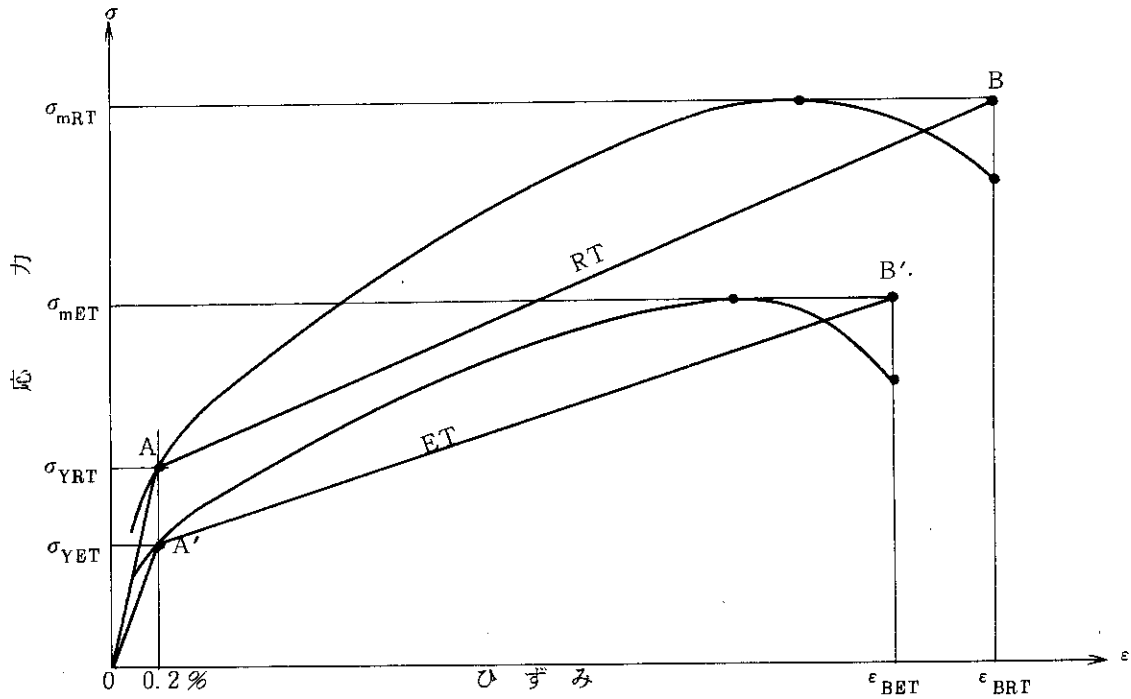
となり、

$$\frac{W_d \text{ at RT}}{W_d \text{ at ET}} \doteq 1.34 \quad (6.54)$$

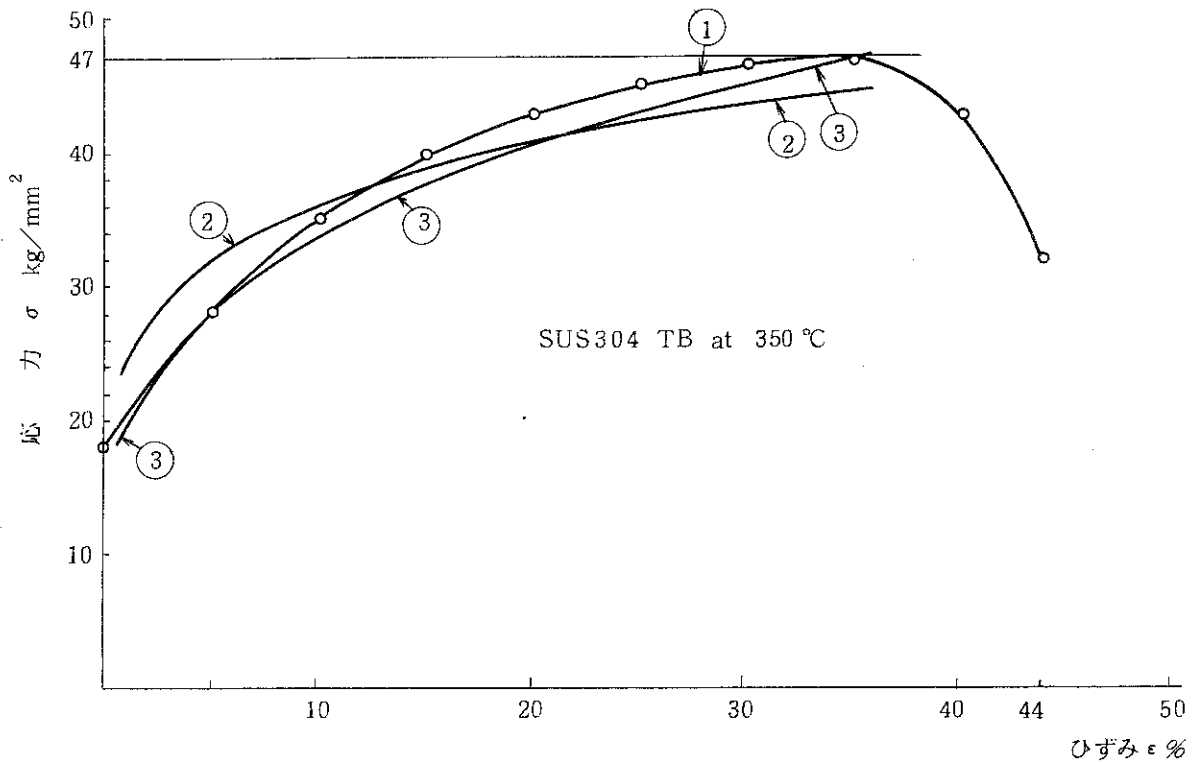
となる。したがって、動的荷重の下では室温時のひずみエネルギーと高温時のひずみエネルギーが等しくならない。



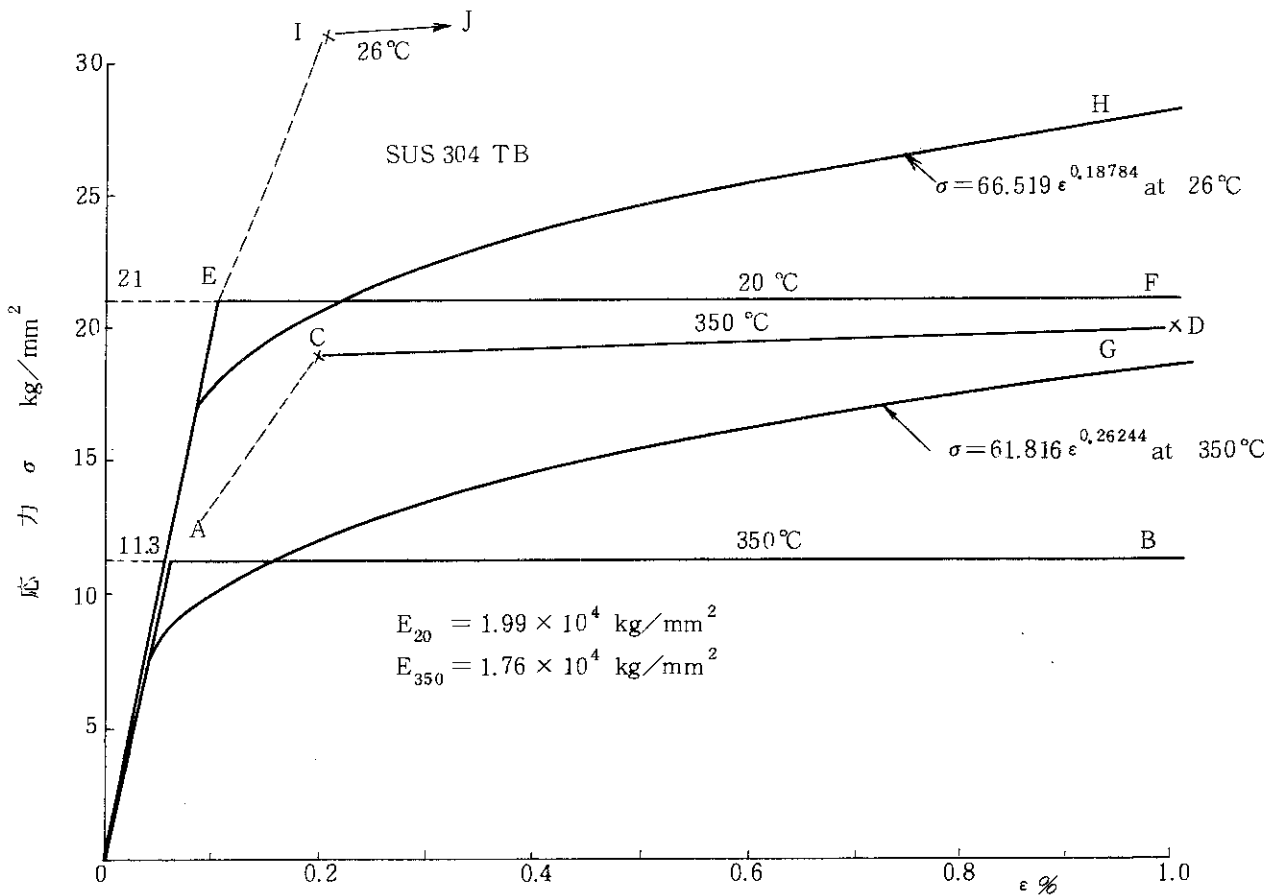
第 6.1 図 限界変形量評価方法の検討



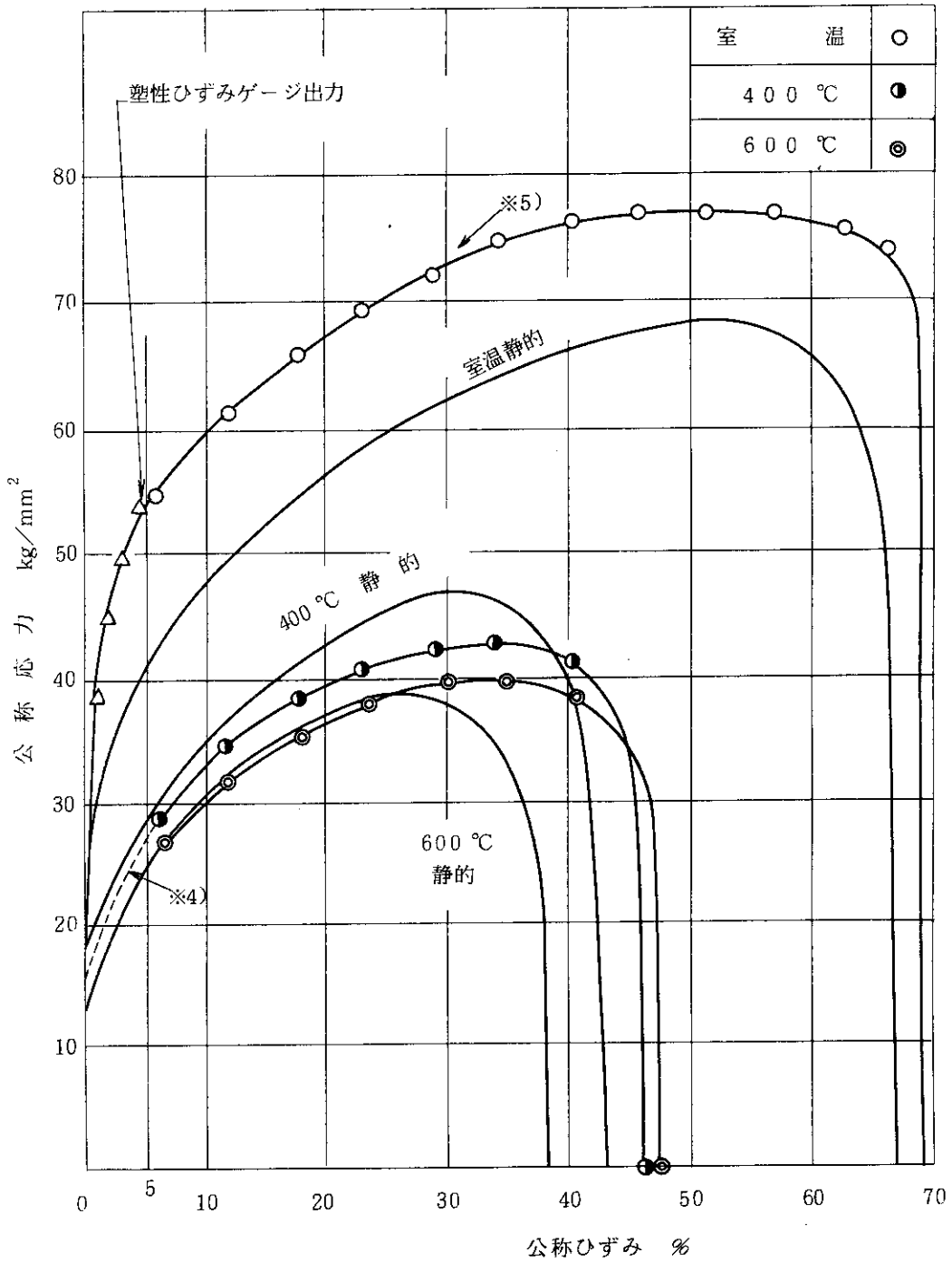
第 6.2 図 バイリニア法の例



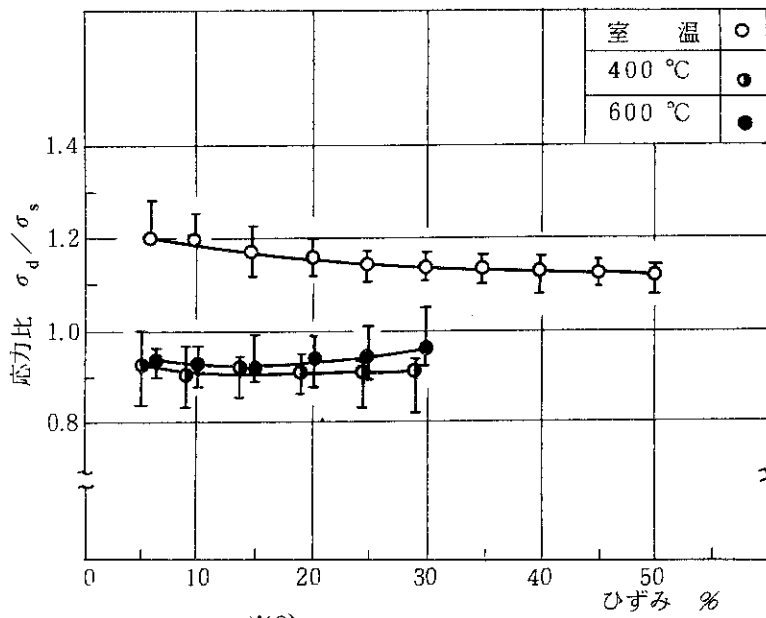
第 6.3 図 実測曲線と近似曲線の比較



第 6.4 図 近似応力～ひずみ線図と曲線の比較 (流動水カプセルⅡ型2号の例)

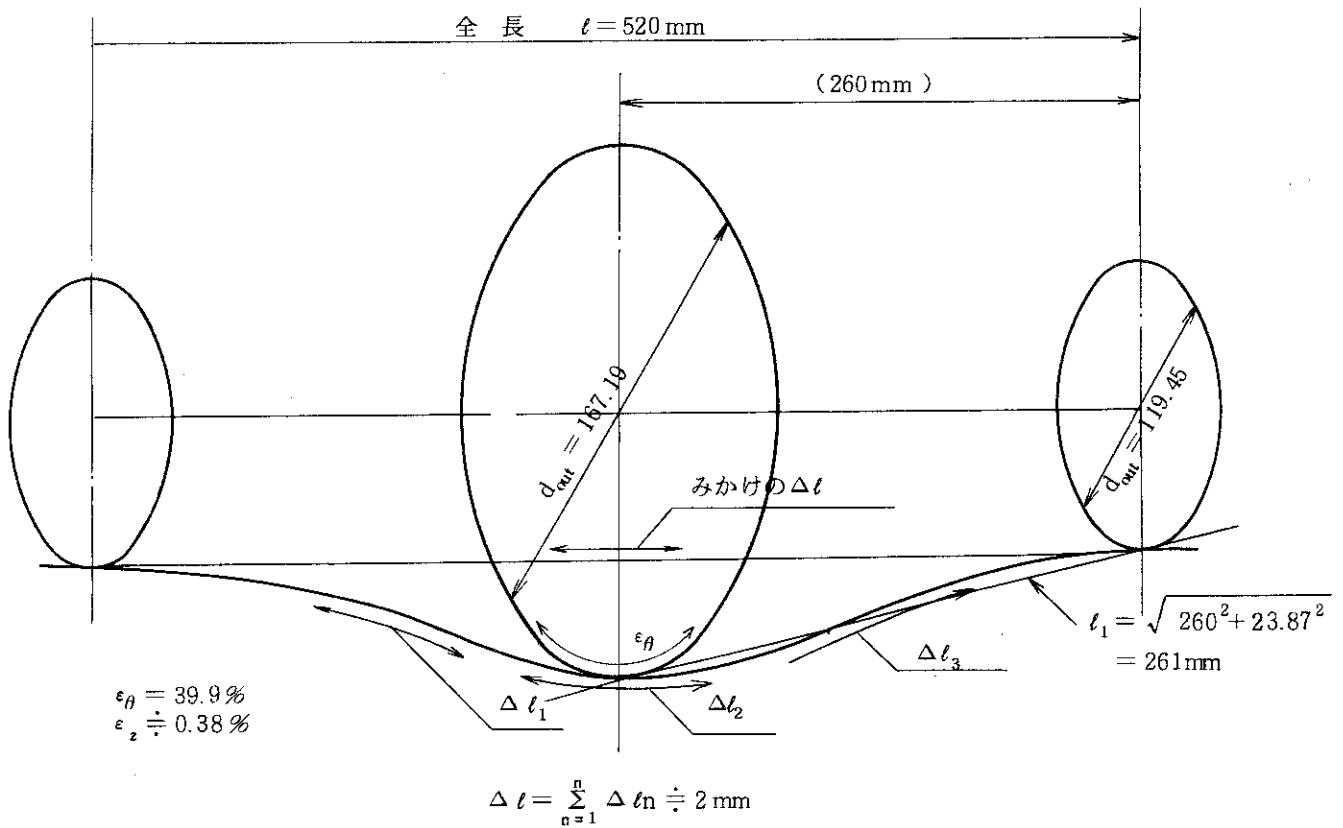


第 6.5 図 ※³⁾ 衝撃引張り，静的引張りにおける応力とひずみの関係

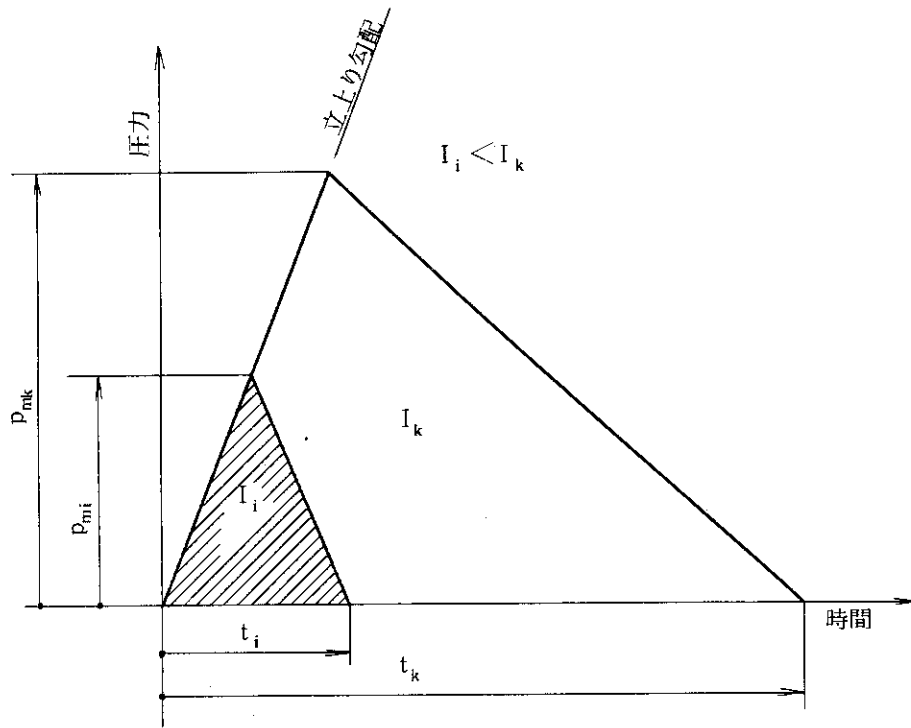


第 6.6 図 ※3) 応力比とひずみの関係

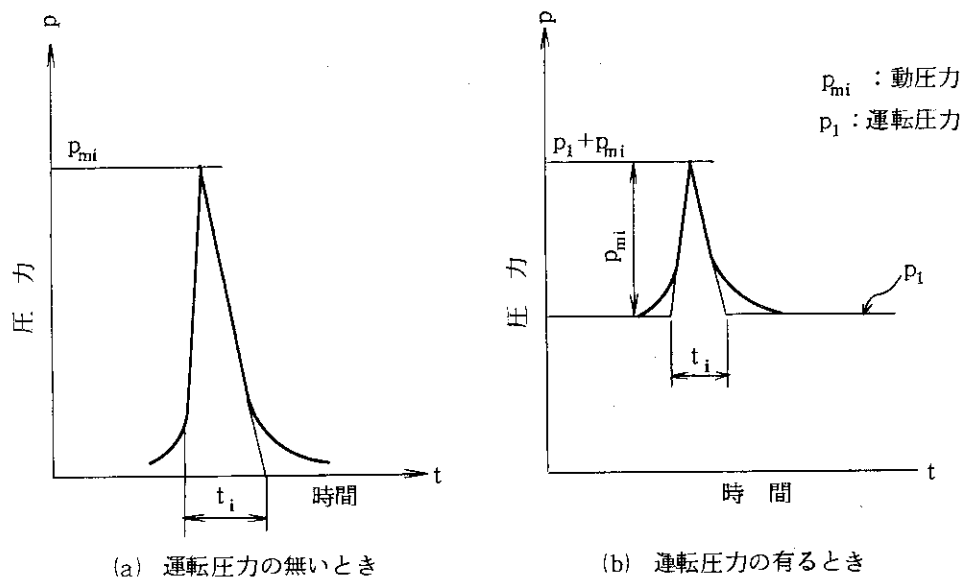
- ※ 3) 日本機械学会論文集 42 巻 359 号 (昭 51-1) p2034 「オーステナイト系ステンレス鋼の高温衝撃引張試験」より引用
- ※ 4) 元図にないため外そうした。(点線部分)
- ※ 5) ひずみ速度を省略した。



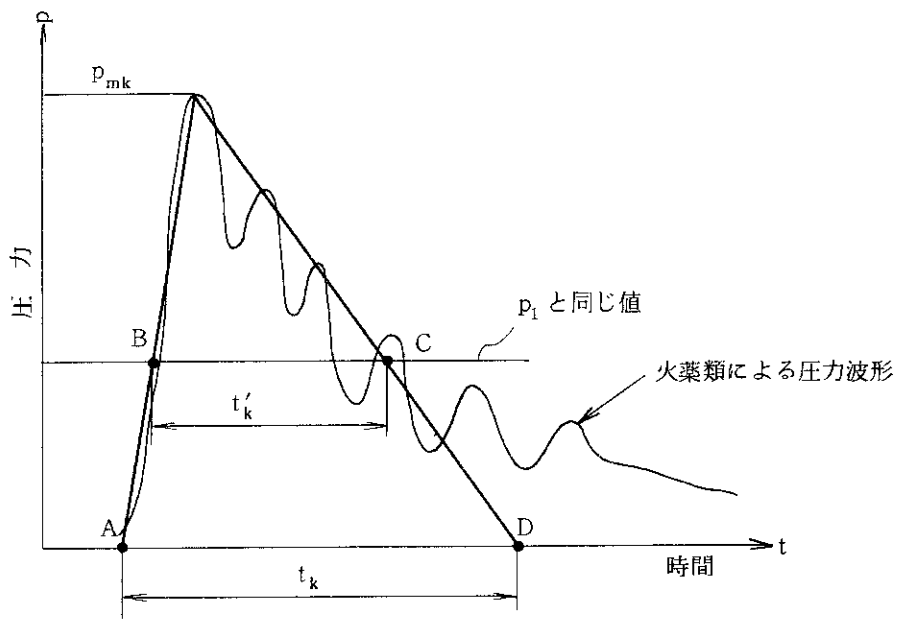
第 6.7 図 軸方向のひずみ



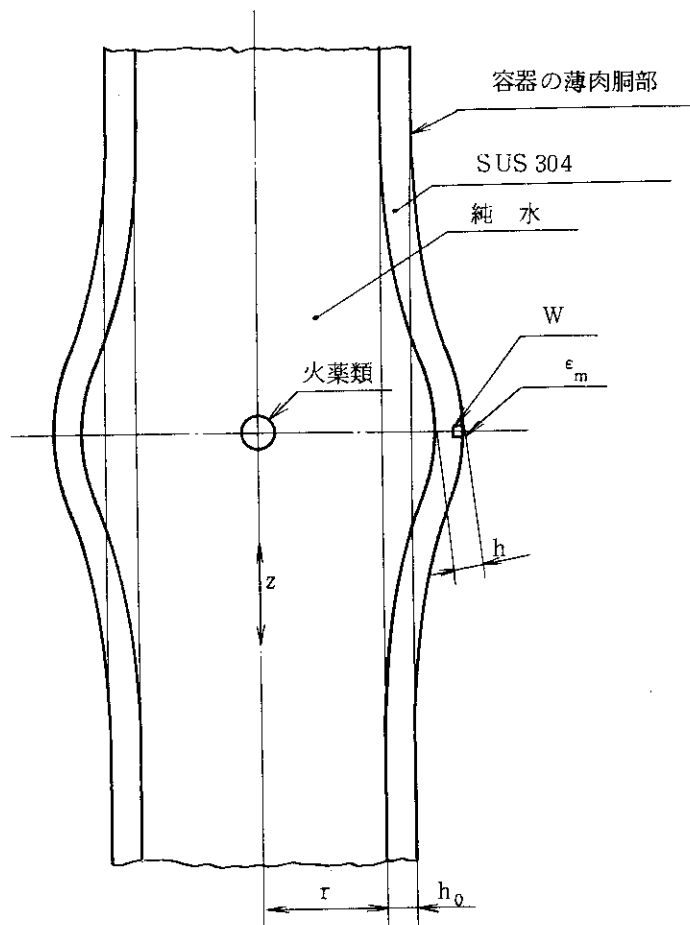
第 6.8 図 圧力波の立上り勾配と力積



第 6.9 図 インパイルに発生すると想定した力積を求める波形
(設計上の値, 以下同じ)



第 6.10 火薬類の力積を求める波形



第 6.11 図 単位体積当りのひずみエネルギーを求める位置

7. ま と め

7.1 許容変形量の評価について

- (1) 力積比を考えた評価としたため、従来より改善できた。
- (2) 応力～ひずみ曲線をバイリニア法-1から近似の曲線に変更した。しかし、1%ひずみ付近でわずかに改善されただけで、それ以外の範囲は従来と同じ程度の大きな誤差となっている。
本資料で記述した3通りの近似法では、どれを使っても改善されない。特に0.2%ひずみ付近の誤差が大きい。
- (3) 運転圧力の有する場合の評価方法が確立されていないため、新しく付け加えた。

7.2 限界変形量の評価について

- (1) ひずみ～ひずみ法からひずみ～ひずみエネルギー法としたため、従来より大幅に改善された。

7.3 そ の 他

- (1) 応力～ひずみ曲線の近似方法で、近似曲線法は、弾性範囲から塑性範囲まで使用可能である。ただし、0.1%～1%ひずみ範囲ではバイリニア法と同じ程度の誤差となる。

謝 辞

本資料をまとめるに当り反応度安全研究室の藤城俊夫氏ならびにNSRR原子炉主任技術者（現NSRR管理室長）の堀木欧一郎氏には全般にわたり大へんお世話になりました。ここに感謝致します。

7. ま と め

7.1 許容変形量の評価について

- (1) 力積比を考えた評価としたため、従来より改善できた。
- (2) 応力～ひずみ曲線をバイリニア法-1から近似の曲線に変更した。しかし、1%ひずみ付近でわずかに改善されただけで、それ以外の範囲は従来と同じ程度の大きな誤差となっている。
本資料で記述した3通りの近似法では、どれを使っても改善されない。特に0.2%ひずみ付近の誤差が大きい。
- (3) 運転圧力の有する場合の評価方法が確立されていないため、新しく付け加えた。

7.2 限界変形量の評価について

- (1) ひずみ～ひずみ法からひずみ～ひずみエネルギー法としたため、従来より大幅に改善された。

7.3 そ の 他

- (1) 応力～ひずみ曲線の近似方法で、近似曲線法は、弾性範囲から塑性範囲まで使用可能である。ただし、0.1%～1%ひずみ範囲ではバイリニア法と同じ程度の誤差となる。

謝 辞

本資料をまとめるに当り反応度安全研究室の藤城俊夫氏ならびにNSRR原子炉主任技術者(現NSRR管理室長)の堀木欧一郎氏には全般にわたり大へんお世話になりました。ここに感謝致します。

付 録

付 1. 累積塑性ひずみと爆薬量

限界変形量確認試験の測定値から、累積の周方向最大塑性ひずみ量と使用した累積のペントライト爆薬量の関係を次の式でまとめると大へん良く一致した。

$$\epsilon_{mp} = k_p G_p^{n_p}$$

ただし、 ϵ_{mp} : 周方向累積最大塑性ひずみ量
 k_p : 定数
 G_p : 累積ペントライト爆薬量
 n_p : 定数

とする。

II型流動水カプセルでは、 $n_p \doteq 0.72$ 、 $k_p = 0.011536$ であった。

他方、NSRRで云う単位体積当りのひずみエネルギーは

$$W = \frac{C}{n+1} \epsilon_m^{n+1}$$

より、

$$\epsilon_m = \left\{ \frac{(n+1)W}{C} \right\}^{\frac{1}{n+1}}$$

である。ここで

$$k_w = \frac{n+1}{C}, \quad n_w = \frac{1}{n+1}$$

と置きかえると

$$\epsilon_m = (k_w W)^{n_w}$$

となる。両式の ϵ_{mp} と ϵ_m は周方向の最大ひずみ量であるから同一であり

$$k_p G_p^{n_p} = (k_w W)^{n_w}$$

である。

SUS 304材について、ひずみ量が零から引張り強さ点に対応するひずみ量までを考えたとき、 $n > 0$ であるから、 $n_w < 1$ となる。

II型流動水カプセルのミルシート値は、

$$\sigma_Y = 26 \text{ kg/mm}^2 \text{ at } 0.2\%, \quad \sigma_m = 60 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_B = 68\%$$

であった。これより、Cとnを算出すると、

$$C = 68.662, \quad n = 0.2215$$

である。また、

$$k_w = \frac{0.2215+1}{68.662} = 0.01779 \rightarrow \doteq 0.018$$

$$n_w = \frac{1}{0.2215+1} = 0.8187 \rightarrow \doteq 0.82$$

となる。元の式に代入すると

$$\varepsilon_m = 0.011536 G_p^{0.72} = (0.018W)^{0.82}$$

となる。

ここで、 n_p は加工硬化を含んだ定数であり、 n_w は加工硬化を考えない定数であるため、 $n_p < n_w$ になったと考えられる。いずれにしても n_p 、 $n_w < 1$ であって、 $n_p \doteq n_w \doteq 0.8$ 位と判断される。

付2 容器の固有周波数

容器の薄肉胴部を無限に長い管と仮定し、その単位長さ ($h=1$) の円周方向の固有周波数を求める。

薄肉管の応力と円周方向のひずみは

$$\sigma_\theta = \frac{pr}{t}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu \sigma_z) = \frac{(2-\nu)}{2E} \sigma_\theta$$

より

$$\varepsilon_\theta = \frac{(2-\nu)}{2E} \frac{pr}{t}$$

である。受圧面積を A とすれば、 $A = 2\pi rh$ 、 $p = P/A$ また、円周方向の伸びを δ 、円周の長さを ℓ_θ とすれば

$$\ell_\theta \doteq 2\pi r \quad \varepsilon_\theta = \delta / \ell_\theta$$

より

$$\delta = \ell_\theta \varepsilon_\theta = \frac{(2-\nu)}{2E} \cdot \frac{Pr}{th}$$

である。バネ定数を K とすれば

$$\frac{1}{2} K \delta^2 = \frac{1}{2} P \delta$$

より

$$K = \frac{P}{\delta} = \frac{2E th}{(2-\nu)r}$$

となる。

薄肉管の金属の質量を M とすれば

$$M = 2\pi (r_0^2 - r^2) h \gamma / g$$

であり、一方角速度を ω とすれば

$$\omega^2 = \frac{K}{M}, \quad \omega = \sqrt{\frac{K}{M}}$$

となり、固有周波数(f)は、 $f = \omega / 2\pi$ より

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E t g}{\pi (2-\nu) (r_0^2 - r^2) r \gamma}} \quad [\text{Hz}]$$

となる。

$E = 1.99 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$, $g = 9.8 \times 10^3 \text{ mm/sec}^2$, $\pi = 3.14$, $\nu = 0.3$, $\gamma = 8.03 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ とすれば、

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{4.55 \times 10^{12} \times \frac{t}{(r_0^2 - r^2) r}} \quad \text{となる。}$$

例1 (大気圧水カプセル)

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{4.55 \times 10^{12} \times \frac{7}{(67^2 - 60^2) \times 60}}$$

$$= 3.89 \times 10^3 \quad [\text{Hz}]$$

例2 (II型流動水カプセル)

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{4.55 \times 10^{12} \times \frac{9.7}{(59.7^2 - 50^2) \times 50}}$$

$$= \frac{1}{2\pi} \times 2.88 \times 10^4$$

$$= 4.584 \times 10^3 \quad [\text{Hz}]$$

となる。これに対して、インパイルで発生すると想定した圧力波の周波数(f_i)は、 $T/2 = 1.1 \text{ msec}$ であるから、 $f_i = 1/2.2 \text{ msec} = 455 \text{ Hz}$ となる。

容器の固有周波数(f)を $f \doteq 4000 \text{ Hz}$ として

$$f_i / f \doteq 0.1 \text{ 倍}$$

となり、インパイルの圧力波に対して、容器の周方向は共振しない。

付3 安全率または安全余裕

設計応力を σ 、引張り強さを σ_B としたとき、安全率(S)は、 $S = \sigma_B / \sigma$ で表示される。安全率の取り方は荷重の種類によって変化し、静的荷重のとき、4~5、動的荷重のとき、10またはそれ以上としている。もちろん材質や材料の使用方法によって変わるため、はっきり云うことはむづかしい。

ここでNSRRで使用したSUS 304材の室温時について考えると許容応力(σ_{a1})は $\sigma_{a1} = 2\sigma_y / 3 = 14.0 \text{ kg/mm}^2$ であり、引張り強さは、 $\sigma_B = 53 \text{ kg/mm}^2$ 以上であることより、設計応力(σ)を許容応力(σ_{a1})とすれば一般的な静的荷重に対する安全率は、 $S = 53/14 = 3.79 \rightarrow$ 約4倍である。しかし、弾塑性設計の容器については別の考え方で表示しなければならない。現行の表示は容器の許容変形量が2%であり、限界変形量が20%であることより、単純なひずみ比

で10倍ある。この値を安全率と等価な値としている。通常の設計では塑性を含んだ設計を行わないため、このような一般的表示方法がない。そこで、別法として、ひずみエネルギーで比較してみると（Ⅱ型2号，流動水カプセルの例）

$$W \text{ at } 2\% = \frac{0.9 \times 61.816}{0.26244 + 1} \times 0.02^{0.26244 + 1}$$

$$= 0.3157$$

$$W \text{ at } 20\% = \frac{0.9 \times 61.816}{0.26244 + 1} \times 0.20^{0.26244 + 1}$$

$$= 5.7773$$

$$\frac{W \text{ at } 20\%}{W \text{ at } 2\%} = 18.3$$

となり，非常に大きな値となっている。

容器が消耗品であることおよび全実験のうち最大実験条件の実験が2割以下の頻度であること等より，ひずみエネルギー比が5程度で充分であり，この表示の方が正確であると考えられる。

最近では安全率という言葉そのものがあまり使用されていないようである。NSRRでもなるべく次の安全余裕は通常または安全裕度で表示する。

$$\text{安全余裕} = \frac{\text{基準値}}{\text{解析値}} - 1$$

で定義される。一般に基準値は許容応力値を用い，解析値は強度設計上の解析値を用いる。

しかし，今回の場合のように塑性ひずみまで考えた表示方法は一般に無いため，本資料では基準値は許容変形量を用いて表示した。

また，安全裕度で表示する時は，

$$\text{安全裕度} = \frac{\text{基準値}}{\text{解析値}}$$

として

$$1.0 \leq \text{安全裕度} \leq 2.0$$

となる。