

本資料は 年 月 日付けで登録区分、  
変更する。 2001. 6. 6

[技術情報室]

# ジルカロイ-2管の急速加熱試験

The Rapid Heating Test of Zircaloy-2 Tubes

1978年3月

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2001



## ジルカロイ-2 管の急速加熱試験

実施責任者	三 浦 信	技術部検査開発課
報告者	宮 野 純 三	〃
	日 高 康 雄	〃
	大 森 拓 郎	〃

期 間 1975年9月29日～1977年4月22日

目 的 軽水炉燃料被覆材であるジルカロイ-2 被覆管の LOCA 時の破裂およびふくれ挙動を急速加熱試験で調べ軽水炉の安全性研究の資料とする。

要 旨 ジルカロイ-2 被覆管を高周波誘導加熱および、直接通電加熱により急速加熱し、内圧破裂およびふくれ限界試験を行った。試験片の加圧はアルゴンガスを使用し、試験雰囲気は窒素中と水蒸気中の2つの条件で行った。この試験から燃料被覆管は約900℃以上の温度で水蒸気の影響を受け、水蒸気雰囲気は窒素雰囲気より破裂温度が高くなる。また円周伸びは窒素雰囲気と比べ900℃以上で大巾に減少する等が確認された。

# 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 供試材および試験片 .....	1
3. 試験方法 .....	1
4. 結果と考察 .....	3
5. 結 論 .....	7
6. 謝 辞 .....	8
7. 参考文献 .....	8
8. 付 録 .....	31

# 1. 緒 言

軽水炉における冷却材喪失事故時の燃料被覆管は初期充填ガスおよび、FPガス等による内圧の上昇と崩解熱による温度の急激な上昇によって、ふくれもしくは破裂に至る可能性がある。

このような状態における燃料被覆管のふくれおよび破裂挙動を知ることは安全性研究上重要な問題である。

本試験では特に高温での強度に主眼をおき窒素および、水蒸気雰囲気中で、高周波誘導加熱と直接通電加熱による急速加熱内圧破裂試験を実施し、破裂温度、円周伸び、破裂部の形状等を調べた。また窒素雰囲気中800~1000℃の温度でふくれ限界試験を行い燃料被覆管の変形挙動を調べた。

## 2. 供試材と試験片

供試材はS社製のジルカロイ-2被覆管を使用した。使用管材は歪取り焼鈍処理を行ったもので、公称寸法が外径16.46mm, 14.72mm, 9.70mmの3種類である。化学組成値および各性質のミルシート値を表1.2.3に示す。

これらの供試材を高周波誘導加熱用は400mmに、直接通電加熱用は350mmに切断し、その内部に破裂時の曲りを防止することと空間容積を減らす目的のステンレス棒とアルナペレットを中子として入れ、片端は盲の端栓を反対部にはガス封入用穴のあいた端栓を溶接したものを試験片とした。図1に試験片の形状と各部の寸法を示す。また、被覆管内容積に対する空間容積の比率を表4に示す。

## 3. 試験方法

### 3.1 試験装置

高周波誘導加熱装置のフローシートを図2に示す。試験片の上端はガス導入管に取り付け、下部は自由な状態にある試験片にアルゴンガスを封入し高周波誘導により急速加熱する。

直接通電加熱装置のフローシートを図3に示す。上、下端部を電極で固定された状態の試験片にアルゴンガスを封入し低電圧大電流を供給し加熱する。温度測定と昇温の制御は高周波誘導加熱および直接通電加熱のいずれも試験片にスポット溶着した白金-白金13%ロジウム熱電対で行なう。また高周波誘導加熱では赤外線温度計を、直接通電加熱では2色高

温計の非接触温度計を熱電対法の補助として併用する。試験中の圧力はいずれの場合もひずみゲージを用いた圧力変換器を使用し、加熱開始から試験終了までをレコーダに温度と同時に記録する。試験雰囲気は窒素雰囲気の場合は大気圧とし、また水蒸気雰囲気の場合は約  $0.2 \text{ kg/cm}^2$  とした。なお水蒸気流量は  $20 \text{ cc/min}$  である。円周伸びは内圧破裂試験では破裂箇所の最大ふくれ部に非伸縮性のテープをはり付けこれをノギスで測定した。また、ふくれ限界試験では最大ふくれ部を  $45^\circ$  毎に 4 箇所測定しその平均値を用いて円周伸びを求めた。

### 3.2.1 加熱と圧力封入方法

加熱方法と圧力の封入方法を図 4 に示す。加熱方法と圧力の封入方法は、内圧破裂試験 1. 内圧破裂試験、2. ふくれ限界試験のいずれの場合も同じである。所定の雰囲気にした後、 $300^\circ\text{C}$  まで加熱し、その温度で一旦保持して、試験片に試験圧力を封入し再び規定の昇温速度で加熱する。その後内圧破裂試験では燃料被覆管が破裂するまで加熱し破裂した後加熱停止する。またふくれ限界試験では、封入内圧  $5\sim 13 \text{ kg/cm}^2$  で、ふくれが開始すると思われる  $800^\circ\text{C}$  の温度から破裂直前までを、 $25^\circ\text{C}$  昇温毎に円周伸びを測定するために、設定温度に達したら直ちに加熱を停止する方法をとった。

### 3.2.2 試験条件

内圧破裂試験 1. (昇温速度一定)、内圧破裂試験 2. (昇温速度変動)、と、ふくれ限界試験の試験条件を表 5. に示す。

内圧破裂試験 1. は昇温速度が  $50^\circ\text{C/s}$ 、封入内圧は  $5\sim 70 \text{ kg/cm}^2$  の間で行なった。加熱方法は高周波誘導と直接通電で行なった高周波誘導加熱ではアルゴンやヘリウム雰囲気では、放電を起し、昇温が困難なため窒素を用いた。また直接通電加熱では水蒸気雰囲気と高周波誘導加熱 - 窒素雰囲気との比較のため窒素中における試験も行なった。

試験に使用した試験片は外径  $16.46 \text{ mm}$ ,  $14.72 \text{ mm}$ ,  $9.70 \text{ mm}$  の 3 種類とした。

内圧破裂試験 2. では昇温速度が  $1.7\sim 50^\circ\text{C/s}$ 、封入内圧は  $15\sim 70 \text{ kg/cm}^2$  の間で行なった。加熱方法は高周波誘導で、また雰囲気は窒素中で行なった。試験片は外径  $16.46 \text{ mm}$  を使用した。

ふくれ限界試験では昇温速度が  $50^\circ\text{C/s}$ 、封入内圧は  $5\sim 13 \text{ kg/cm}^2$  の間で行なった。試験片は外径  $14.72 \text{ mm}$  のものを各試験温度毎に使用した。加熱方法と雰囲気は今回は高周波誘導加熱と窒素中のみで試験したが、今後は直接通電加熱・水蒸気雰囲気・高封入内圧での試験を行なうことを計画している。

## 4. 結果と考察

### 4.1 フープ応力と破裂温度

外径肉厚の異なる3種類の被覆管を使用したので、封入内圧は次式を用いて、フープ応力に換算した。

$$\sigma = \frac{P (D - 2t)}{2t}$$

ここで

P : 封入内圧

D : 外 径 (実測値の平均)

t : 肉 厚 (実測値8点中の最小値の平均)

各条件に対するフープ応力と破裂温度の関係を図5, 6, 7, 8, 9に示す。フープ応力が約  $6.5 \text{ kg/mm}^2 \sim 2.5 \text{ kg/mm}^2$  まではフープ応力が低下しても破裂温度差は小さく直線的に増加するが、 $2.5 \text{ kg/mm}^2$  以下になると、フープ応力の低下と共に破裂温度は上昇し、特にフープ応力が約  $1 \text{ kg/mm}^2$  より以下では急激に上昇する。この傾向は加熱方式や雰囲気の違い、また中子の影響などによる差は見られず、いずれの条件でも同様の傾向を示す。

被覆管の外径、肉厚の異なる3種類の被覆管を用いた試験結果から、被覆管の外径が変わっても外径と肉厚の比に大きな違いがなければフープ応力と破裂温度の関係はほぼ同じであることが図5, 6, 7からわかる。

加熱方式の違いによる破裂温度の違いについては、同じ条件で試験した窒素雰囲気中での結果からは図7に示すように明らかな違いは認められなかった。また試験雰囲気の影響については、約  $700 \sim 900^\circ\text{C}$  では破裂温度がほぼ同じで雰囲気の違いによる影響はみられない、しかし約  $900^\circ\text{C}$  以上の高温になると被覆管の酸化が進み破裂温度は水蒸気中の方が窒素中より約  $100 \sim 150^\circ$  高く、明らかに水蒸気の影響があることが図9からわかる。顕著な例では封入内圧が  $5 \text{ kg/cm}^2$  の場合、窒素中では  $1200^\circ\text{C} \sim 1400^\circ\text{C}$  で破裂したが、水蒸気中では装置の加熱限度である  $1500^\circ\text{C}$  まで加熱しても破裂しなかった。また中子の材質による違いは高周波誘導加熱ではアルミナペレットを中子として用いた試験片の破裂温度はステンレス棒より全体的に低く、特にフープ応力  $1.3 \text{ kg/mm}^2 \sim 3.5 \text{ kg/mm}^2$  の範囲で約  $60 \sim 80^\circ\text{C}$  低い。なお、図5の高周波誘導加熱、窒素雰囲気中で試験した内、内圧破裂試験2の結果が、内圧破裂試験1の結果と比べ約  $70 \sim 100^\circ\text{C}$  低い破裂温度を示しているが、これは内圧破裂試験2では熱電対の線径が太く、先端の玉の部分が大きくなったため、応答速度が遅くなり、温度指示が低くなったのではないかと考えられる。

## 4.2 円周伸びと破裂温度の関係

円周伸びと破裂温度の関係を図10, 11, 12, 13, 14に示す。円周伸びは破裂温度が約750℃~910℃の範囲で小さく、この範囲以上の破裂温度では大きくなる。ただし直接通電加熱-水蒸気雰囲気中に行なった試験では約910℃以上での円周伸びは窒素雰囲気中ほど大きくなる。750℃~910℃で円周伸びが小さくなる傾向を示すものは、 $\alpha + \beta$ 変態領域に関連すると考えられる。

加熱方法の違いによる円周伸びの差は直接通電加熱-窒素雰囲気中に行なった試験結果と高周波誘導加熱-窒素雰囲気中の結果を比較すると、図12に示すように直接通電加熱で試験した結果は、高周波誘導加熱での結果の範囲に含まれており加熱方法による著しい違いは観察されなかった。

雰囲気の違いによる影響は、高周波誘導加熱-窒素雰囲気中で中子アルミナペレットを使用したものを除き、800℃~1400℃の範囲で、直接通電加熱-水蒸気雰囲気は高周波誘導加熱および直接通電加熱-窒素雰囲気に比べ円周伸びが小さく、特に900℃以上の高温側でこの差が大きい。高周波誘導加熱-窒素雰囲気中で中子にアルミナペレットを使用した試験結果は図11に示すように窒素雰囲気であるのに、直接通電加熱-水蒸気雰囲気と同程度の小さい伸びを示しているが、これは被覆管にステンレス棒中子を使用した場合の被覆管-中子間隙が各々被覆管外径対し約16.46mm; 1.3mm, 14.72mm; 0.5mm, 9.70mm; 0.2mm位あるのに対して、アルミナペレットを使用した場合は、その間隙が3種類とも約0.1mmと非常に少ないために、被覆管が中子と円周の一部で接触し吸熱されて温度斑が出来て、伸びが抑制されて小さくなったのではないかと推定される。さらに急速加熱であるため、この現象が著しい。また、このことは直接通電加熱-水蒸気雰囲気中で中子にアルミナペレットを入れて試験したものについても同様に考えられるので、被覆管に中子が接触しない方法で、試験する必要があると考える。

## 4.3 国内外研究機関との比較

### 4.3.1 破裂温度

各研究機関の封入内圧と破裂温度についての試験結果と本試験結果との比較を図15に示す。データは内圧破裂試験1の結果を用いた。封入内圧が約5 kg/cm<sup>2</sup>~20 kg/cm<sup>2</sup>では封入内圧の増加と共に破裂温度は急激に低下するが、封入内圧が約20 kg/cm<sup>2</sup>以上では封入内圧が増加しても破裂温度の急激な低下はなく徐々に低くなる。また破裂温度のパラッキは約700℃~950℃の低温側では小さく、950℃以上の高温側では大きい。これらの傾向は、MAPI, JAERI, Emery, Chung, Hobson および本試験結果の全てに見られる。



本試験の高周波誘導加熱と直接通電加熱の破裂温度範囲は高周波誘導加熱—窒素雰囲気の場合は、各研究機関の中間に位置し、また加熱方法が同じである。MAPI JAERI Emery と比べると、本試験はMAPI Emery より若干高く、JAERIより約100℃高い。直接通電加熱—水蒸気雰囲気の場合は、各研究機関の上部に位置し、また加熱方法が同じである。Chung と比べると約950℃以上の温度ではChung より高く、950℃以下の温度ではほぼ一致する。

#### 4.3.2 円周伸び

各研究機関の破裂温度と円周伸びについての試験結果と本試験結果との比較を図16に示す。データは内圧破裂試験1, 2の結果を用いた。この図から高周波誘導加熱—窒素雰囲気で行った試験結果は $\alpha$ 相領域の低温側において、Chungの結果は約700℃~850℃付近で、Hobsonの結果は約820℃~850℃付近で大きい伸びを示しているが、本試験結果は670℃~740℃と他に較べ約100℃程低い温度になる。また伸びの減少する温度範囲は、Chung, Hobsonでは860℃~940℃付近であるが、本試験の結果は、750℃~910℃で低温側に広がる。また910℃以上の高温側では、Chung, Hobsonと同様、再び大きい伸びを示す。しかしChungの結果は1050℃, 1200℃での極大と1040℃での極小が存在し、さらにその温度が曲線で結ばれているのに対し、本試験結果は主に50~70%の伸びを示し、中には100%を超えるものもあるが、Chungのようなカーブにはならない。

また直接通電加熱—水蒸気雰囲気の結果は $\alpha + \beta$ 変態領域での伸びの減少は、同じ水蒸気雰囲気のChungの試験結果とわずかな温度差はあるが類似している。また900℃以上の高温において、Chungの試験結果は伸びが著しく減少するが、真空雰囲気と同様に、1050℃, 1200℃の極大と1130℃での極小が存在するのに対し、本試験の結果は極大と極小の存在は明らかではなく、Chungの伸び量の平均にほぼ等しい25~35%の伸びを示す。

#### 4.4 昇温速度と破裂温度, 円周伸び(内圧破裂試験2)

昇温速度と破裂温度および円周伸びの関係を、図17, 18に示す。破裂温度は、封入内圧、15~50kg/cm<sup>2</sup>で昇温速度が1.7~5.0℃/sの間では昇温速度に影響されず、ほぼ同一の温度となる。しかし封入内圧が70kg/cm<sup>2</sup>では、昇温速度が3.0℃/sでピークとなり、それより以上および以下では低くなり、傾向がはっきりしない。

円周伸びは、封入内圧、30~70kg/cm<sup>2</sup>で昇温速度が1.7~5.0℃/sの間では、昇温速度が遅いと、比較的大きい伸びを示し、早くなると減少する。しかし封入内圧が15kg/cm<sup>2</sup>では一定の傾向を示さず、30~55%の範囲でバラツク。

#### 4.5 円周伸びとフープ応力，温度（ふくれ限界試験）

円周伸びとフープ応力，温度の関係を図19に示す。この図はふくれが進行する状態を，フープ応力と温度で調べたものである。円周伸びはフープ応力が低い場合には，温度が上昇するにつれ徐々に上昇し破裂に至る。しかしフープ応力が高くなると円周伸びは急激に上昇し破裂する。この試験でフープ応力が0.41, 0.66, 1.1 kg/mm<sup>2</sup>で行ったものは，温度上昇に伴って円周伸びも増加したが，0.86 kg/mm<sup>2</sup>では同じ試験温度であっても，円周伸びが大巾に違い，再現性に乏しかった。この原因については，明らかではないが，試験温度の850～950℃の範囲が $\alpha + \beta$ 変態領域に入っており，特にこの領域ではふくれが不安定であるため円周伸びにバラツキが生じたと考えられる。

円周伸びとフープ応力・温度の関係図（図19）から円周伸びが顕著となる2%をふくれ開始点とみなし，また急激に上昇し始める5%をふくれ限界点とみなして，それぞれのフープ応力時の温度を図に表わしたのが，図20である。この図から各応力時の2%および5%の円周伸びは直線で表わされ，この2本の線から，他の応力時のふくれ開始温度およびふくれ限界温度を予測することが可能である。

#### 4.6 破裂後の試験片外観

内圧破裂試験後の試料の中から被覆管外径，14.72 mm で高周波誘導加熱—窒素雰囲気—中子ステンレス棒，および直接通電加熱—水蒸気雰囲気—中子アルミナペレットの破裂部外観を写真1に示す。破裂開口は直接通電加熱—水蒸気雰囲気です試験した試料は，高周波誘導加熱—窒素雰囲気に比べ，全般的に小さく特に，封入内圧が7.5～10 kg/cm<sup>2</sup>では著しく，ピンホールのように小さい。表面状態は，30～70 kg/cm<sup>2</sup>までは，高周波誘導加熱—窒素雰囲気，直接通電加熱—水蒸気雰囲気のいずれも大体同じで，水蒸気雰囲気で試験した試料が，酸化により色が違う程度である。しかし，封入内圧が5～15 kg/cm<sup>2</sup>では高周波誘導加熱—窒素雰囲気で試験した試料は，破裂部周辺がザラザラになるのに対し，直接通電加熱—水蒸気雰囲気で試験した試料は縞状にヒビが入る。これは加熱方式の違いによるものではなく，雰囲気の違いによる影響と考えられる。

#### 4.7 破裂部の金相

破裂後の破裂部外観写真に用いた試料の横断面組織を写真2に示す。撮影部分は，破裂部と180°反対部である。この写真から封入圧力が5～10 kg/cm<sup>2</sup>と50～70 kg/cm<sup>2</sup>では，破裂部と180°反対部とで結晶粒度は同程度であるので，破裂部と反対部とで温度の大きな違いはないと考えるが，封入内圧が15 kg/cm<sup>2</sup>，30 kg/cm<sup>2</sup>では，破裂部は封入内圧が低いものに類似し，結晶粒度が大きい，反対部は封入内圧の高いものと類似し，結晶粒度が小さい。このことから封入内圧が15～30 kg/cm<sup>2</sup>の範囲では，破裂部と反対部とで温度差があることが考えられる。

## 5. 結 論

軽水炉の冷却材喪失事故時における、ジルカロイ-2 被覆管のふくれおよび、破裂挙動を調べる目的で、試験雰囲気は窒素と水蒸気、加熱方法は高周波誘導と直接通電で行なった。内圧破裂およびふくれ試験の結果から次の結論が得られた。

- (1) 被覆管の破裂温度曲線はフープ応力が約  $1\sim 2.5\text{ kg/mm}^2$  が屈曲部となり、それより以上および以下のフープ応力では直線的である。その時のフープ応力低下による破裂温度上昇は高い圧力では小さく低い応力では大きい。
- (2) 被覆管の外径が変わっても、外径と肉厚の比に大きい違いがなければ、破裂温度に大きな差はなく、フープ応力と破裂温度の関係はほぼ同じである。
- (3) 加熱方式の違いによる明らかな破裂温度の差は認められない。また試験雰囲気による影響は水蒸気雰囲気は窒素雰囲気と比べ  $900^\circ\text{C}$  以上で破裂温度が高い。
- (4) 国内外研究機関と本試験結果とを比較すると、本試験結果の高周波誘導加熱-窒素雰囲気中の破裂温度は、各研究機関における試験結果のほぼ中間に位置する。また直接通電加熱-水蒸気雰囲気中の結果は各研究機関における試験結果の上部に位置する。
- (5) 円周伸びは破裂温度が  $750\sim 900^\circ\text{C}$  の範囲で減少する。これは  $\alpha + \beta$  変態領域と関連するものと考えられる。この範囲より低温側および高温側では大きい伸びを示す。
- (6) 加熱方法の違いによる、円周伸びの差は、窒素雰囲気中で試験した結果からは大きな違いはみられない。また試験雰囲気による影響は、水蒸気雰囲気、の円周伸びは窒素に比べ、約  $910^\circ\text{C}$  以上の高温で大巾に小さい。
- (7) 円周伸びについて、国内外研究機関の結果と、本試験結果とを比較すると、本試験結果は、 $\alpha + \beta$  変態領域での円周伸びの減少は約  $50\sim 75^\circ\text{C}$  低温側に移動するが、各研究機関の結果と同様に存在する。またこの減少する範囲より、低温および高温側で大きくなる傾向も同様である。
- (8) 破裂温度は封入内圧が、 $15\sim 50\text{ kg/cm}^2$  の間では昇温速度に影響されない。また円周伸びは封入内圧が  $30\sim 70\text{ kg/cm}^2$  では昇温速度が遅いと円周伸びが大きく、早いと小さくなる。
- (9) 被覆管の変形の推移は、フープ応力が  $0.4\sim 1.1\text{ kg/mm}^2$  の低応力では、ふくれが顕著となる時の円周伸びは約  $2\%$  で、 $5\%$  以上になると急激に上昇し、その後短時間で破裂する。

## 6. 謝 辞

本試験を行うに当り、資料の提供と助言を頂いた、永木裕（技術部開発研究室）、小原勝昭（計画管理部）、太田猛男（ATR本部）の各氏、また試験片の製作で多くの協力を頂いた、照沼宏昭、鈴木善四郎、坪茂、吉村光彦の各氏に厚く御礼申し上げます。

## 7. 参 考 文 献

- (1) H.N. Chung "Deformation and Rupture Behavior of Zircaloy Cladding Containing Oxygen under Simulated Loss-of-Coolant-Accident Conditions" Conference on Zirconium in the Nuclear Industry, ASTM, Aug. 1976.
- (2) D.O. Hobson "Comparison of Rupture Data from Irradiated Fuel Rods and Unirradiated Cladding" Nuclear Technology Vol. 11, Oak Ridge National Laboratory, Aug. 1971.
- (3) A.D. Emery "Effects of heating Rate and pressure on Expansion of Zircaloy Tubing during Sudden heating conditions" Nuclear Technology Vol. 11 Combustion Engineering Inc.: Aug. 1971.
- (4) Working group on review of the behavior of fuel cladding under a loss-of-coolant accident, JAERI "Behavior of Zircaloy Cladding under a Postulated Loss-of-Coolant Accident condition" Aug. 1977.

表1 供試材の諸性質(ミルシート値)

公称寸法・外径 16.46 内径 14.70 肉厚 0.80  
 製作番号 CW 144144 ロット番号 5076  
 最終冷間加工度 61.1% 歪取焼鈍温度 480℃

項 目		試験温度	規 格 値	成 績		
引張試験	抗張力(kg/mm <sup>2</sup> )	常 温	≥ 49	68.3	67.4	
	耐力(kg/mm <sup>2</sup> )		≥ 42	54.2	53.9	
	伸び(%)		≥ 15	32	32	
	抗張力(kg/mm <sup>2</sup> )	343℃	≥ 29	40.2	40.8	
	耐力(kg/mm <sup>2</sup> )		≥ 23	33.4	32.4	
	伸び(%)		≥ 15	31	30	
バースト試験	破裂圧力(kg/cm <sup>2</sup> )	常 温	≥ 450	800	810	
	周伸び(%)		≥ 15	36.0	34.1	
	0.2%耐圧(kg/cm <sup>2</sup> )			675	680	
押 拡 げ 試 験		常 温	≥ 15	53.5	54.0	
結 晶 粒 度	横 断 面		ASTM#7より細粒	# 11	# 11	
水 素 化 物 方 位			≤ 0.35	< 0.1	< 0.1	
製品分析	O		900~1500	1310	1320	
	H		≤ 25	14	15	
	N		≤ 80	22	24	
項 目			規 格 値	成 績		
化 学 成 分 分 析 値	合 金 元 素 (%)	Sn	1.20~1.70	1.47	1.46	1.47
		Fe	0.07~0.20	0.15	0.13	0.13
		Cr	0.05~0.15	0.09	0.10	0.10
		Ni	0.03~0.08	0.06	0.06	0.06
		Fe + Cr + Ni	0.18~0.03	0.30	0.29	0.29
	不 純 物 元 素 (ppm)	O	900~1500	1320	1300	1330
		Al	< 75	49	51	52
		B	< 0.5	0.5	0.5	0.5
		Cd	< 0.5	0.5	0.5	0.5
		C	< 270	50	60	60
		Co	< 20	5	5	5
		Cu	< 50	10	10	10
		Hf	< 200	88	83	88
		Mn	< 50	10	10	10
		Si	< 200	20	20	20
		Ti	< 50	10	10	10
		W	< 100	10	10	10
		U	< 3.5	3.5	3.5	3.5

表2 供試材の諸性質（ミルシート値）

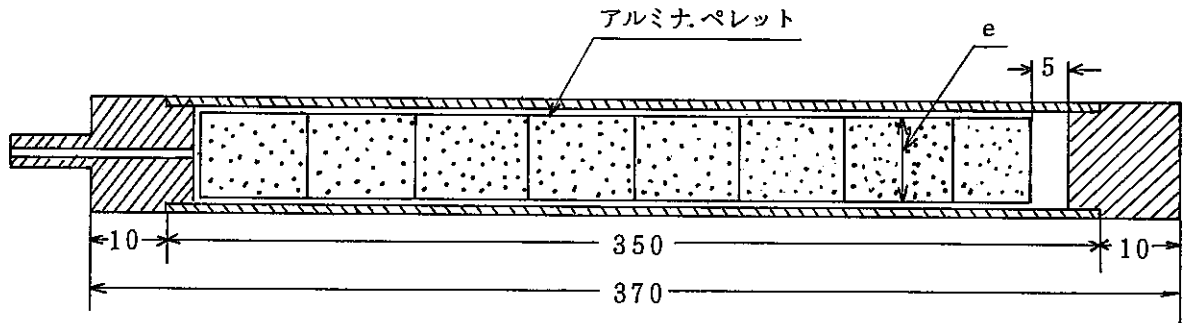
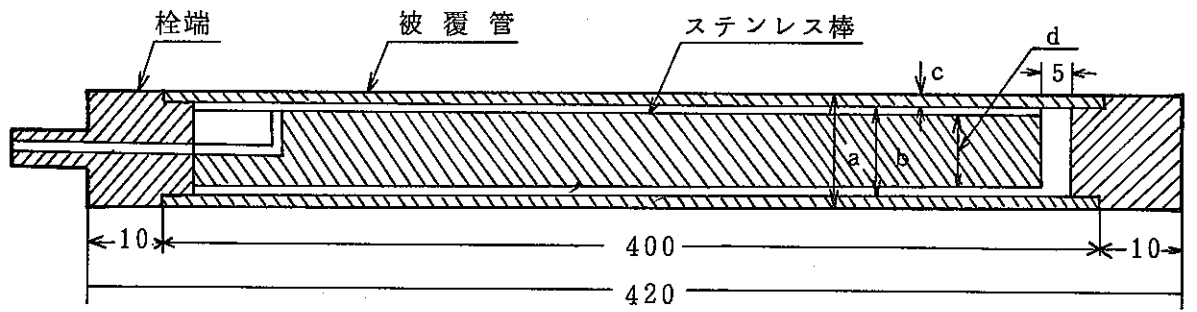
公称寸法 外径 14.72 内径 13.04 肉厚 0.76  
 製作番号 CW 231231 ロット番号 5183  
 最終冷間加工度 56.4 % 歪取り焼鈍温度 480 °C

項 目		試験温度	規 格 値	成 績		
引張試験	抗張力(kg/mm <sup>2</sup> )	常 温	≥ 49	66.0	66.4	
	耐力(kg/mm <sup>2</sup> )		≥ 42	52.0	53.3	
	伸び(%)		≥ 20	28	28	
	抗張力(kg/mm <sup>2</sup> )	343°C	≥ 30	42.2	41.9	
	耐力(kg/mm <sup>2</sup> )		≥ 23	34.1	34.1	
	伸び(%)		≥ 20	29	27	
バースト試験	破裂圧力(kg/cm <sup>2</sup> )	open	≥ 510	700	680	
	周伸び(%)		≥ 20	52	52	
	0.2%耐力(kg/cm <sup>2</sup> )					
押 拡 げ 試 験		常 温	≥ 15	規格に適合	規格に適合	
結 晶 粒 度		横 断 面	ASTM No.9より細粒	No.11	No.11	
水 素 化 物 方 位			≤ 0.35	0.1	0.1	
製品分析	O		900~1500	1150	1180	
	H		≤ 25	10	12	
	N		≤ 80	22	18	
項 目		規 格 値	成 績			
化 学 成 分 分 析 値	合 金 元 素 (%)	Sn	1.20~1.70	1.49	1.45	1.49
		Fe	0.07~0.20	0.15	0.15	0.15
		Cr	0.05~0.15	0.10	0.10	0.09
		Ni	0.03~0.08	0.06	0.06	0.06
		Fe + Cr + Ni	0.18~0.38	0.31	0.31	0.30
	不 純 物 元 素 (ppm)	Al	≤ 75	50	51	46
		B	≤ 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
		Cd	≤ 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
		C	≤ 270	70	110	70
		Co	≤ 20	< 5	< 5	< 5
		Cu	≤ 50	10	10	10
		Hf	≤ 100	76	77	78
		Mn	≤ 50	<10	<10	<10
		Si	≤ 120	30	30	30
		Ti	≤ 50	10	20	20
		W	≤ 100	<10	<10	<10
		U	≤ 3.5	< 3.5	< 3.5	< 3.5
Pb	≤ 130	10	10	10		

表3 供試材の諸性質（ミルシート値）

公称寸法 外径 9.70 内径 8.46 肉厚 0.54  
 製作番号 CW 232232 ロット番号 5186  
 最終冷間加工度 63.4% 歪取り焼鈍温度 480℃

項 目		試験温度	規 格 値	成 績			
引張試験	抗張力(kg/mm <sup>2</sup> )	常 温	≥ 49	66.9	69.9		
	耐力(kg/mm <sup>2</sup> )		≥ 42	52.6	54.6		
	伸び(%)		≥ 20	22	23		
	抗張力(kg/mm <sup>2</sup> )	343℃	≥ 30	42.4	43.9		
	耐力(kg/mm <sup>2</sup> )		≥ 23	33.5	34.6		
	伸び(%)		≥ 20	23	23		
バースト試験	破裂圧力(kg/cm <sup>2</sup> )	open	≥ 510	910	980		
	周伸び(%)		≥ 20	44	35		
	0.2%耐力(kg/cm <sup>2</sup> )						
押 拡 げ 試 験		常 温	≥ 15%	規格に適合	規格に適合		
結 晶 粒 度	横 断 面		ASTM №9より細粒	№ 10.5	№ 10.5		
水 素 化 物 方 位			≤ 0.35	0.1	0.1		
製 品 分 析	O		900~1500	1160	1170		
	H		≤ 25	17	14		
	N		≤ 80	14	15		
項 目		規 格 値		成 績			
化 学 成 分 分 析 値	合 金 元 素 (%)	Sn	1.20~1.70	1.49	1.45	1.49	
		Fe	0.07~0.20	0.15	0.15	0.15	
		Cr	0.05~0.15	0.10	0.10	0.09	
		Ni	0.03~0.08	0.06	0.06	0.06	
		Fe + Cr + Ni	0.18~0.38	0.31	0.31	0.30	
	不 純 物 元 素 (ppm)	Al	≤ 75	50	51	46	
		B	≤ 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	
		Cd	≤ 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	
		C	≤ 270	70	110	70	
		Co	≤ 20	< 5	< 5	< 5	
		Cu	≤ 50	10	10	10	
		Hf	≤ 100	76	77	78	
		Mn	≤ 50	< 10	< 10	< 10	
		Si	≤ 120	30	30	30	
Ti	≤ 50	10	20	20			
W	≤ 100	< 10	< 10	< 10			
U	≤ 3.5	< 3.5	< 3.5	< 3.5			
Pb	≤ 130	< 10	< 10	< 10			



外径 a mm	内径 b mm	肉厚 c mm	外径 肉厚	ステンレス 中子 d mm	アルミナ ペレット e mm
1646	1470	0.80	2057	120	144
1472	1304	0.76	1937	120	128
970	846	0.54	1796	80	83

※ 外径・内径・肉厚は公称寸法

図1 試験片形状と各部寸法

外径 mm	空間容積の比率%	
	ステンレス棒	アルミナペレット
1646	36	7
1472	20	7
970	28	14

表4 管内容積に対する空間容積の比率



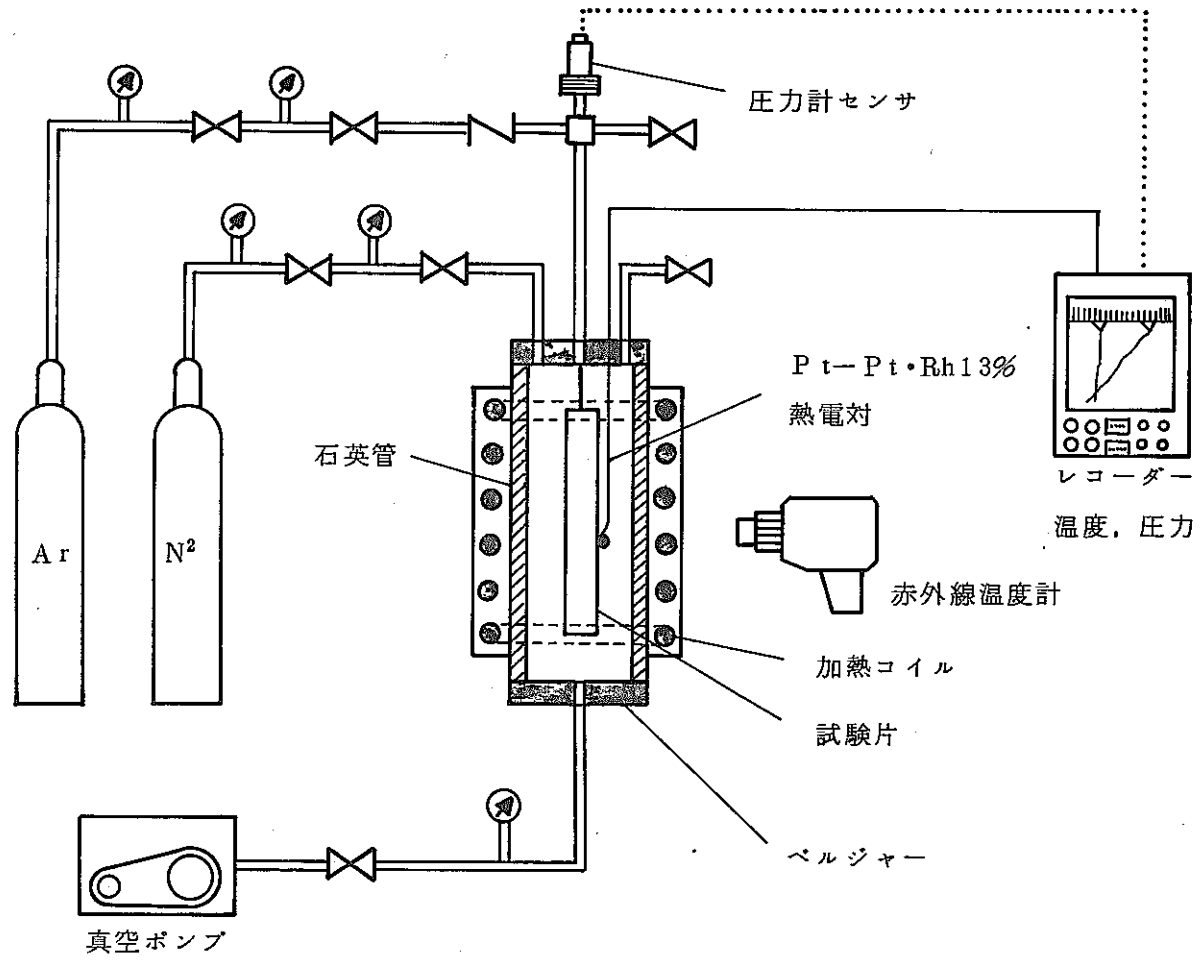


図2 高周波誘導加熱，内圧破裂試験装置フローシート

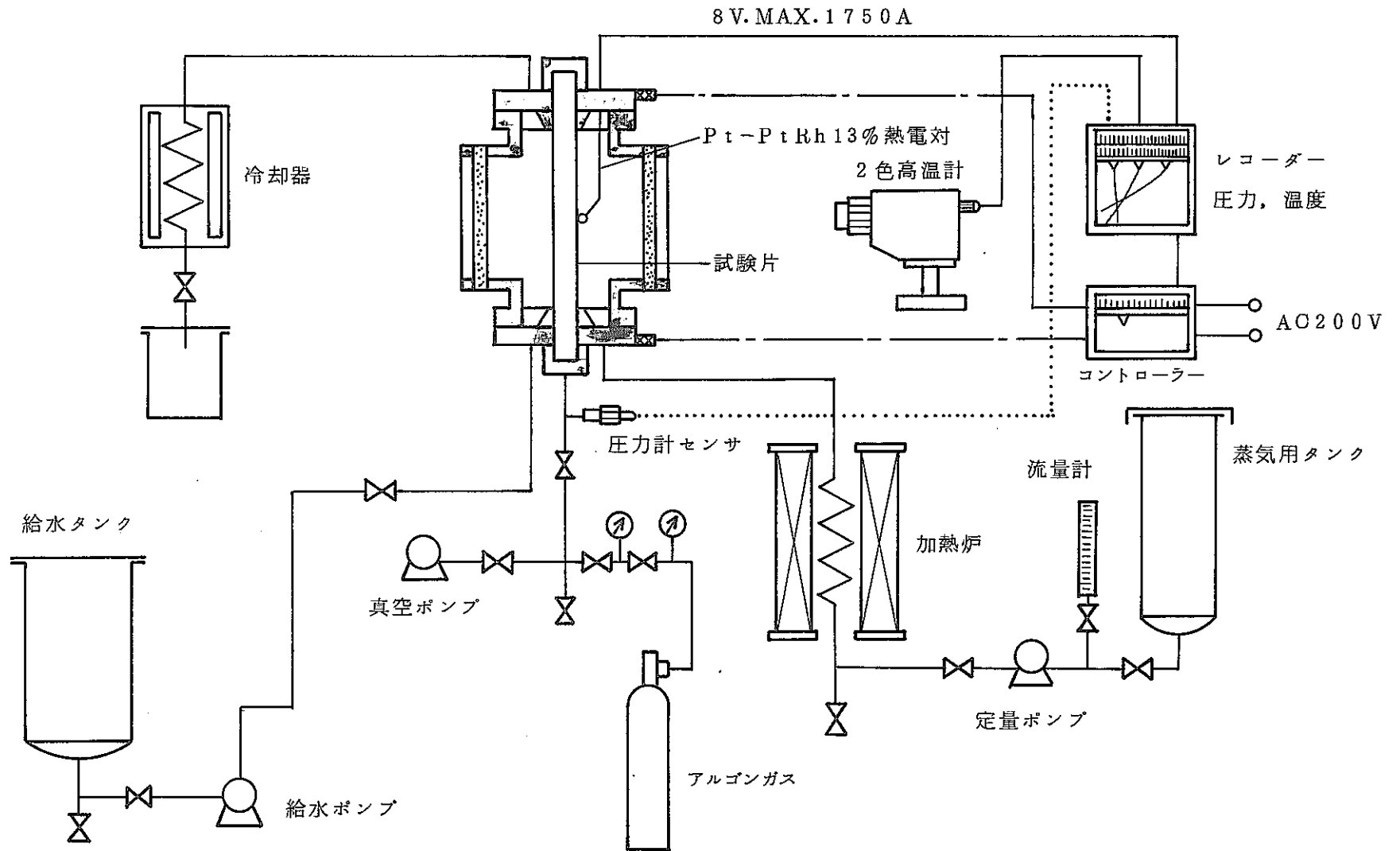


図3 直接通電加熱内圧破裂試験装置フローシート

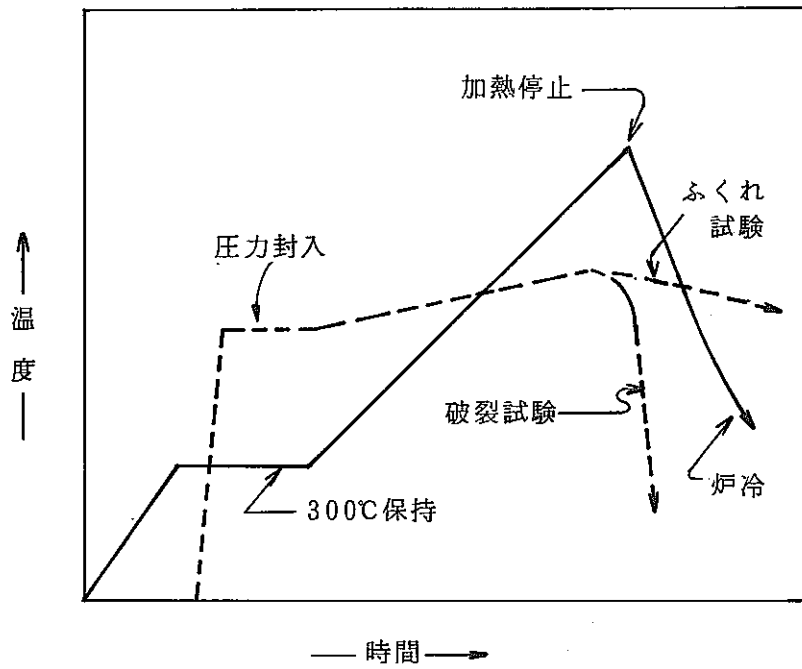


図4 試験方法

破裂試験1 (昇温速度一定)

昇温速度 (°C/s)	50
封入内圧 (kg/cm <sup>2</sup> )	5, 7.5, 9, 10, 15, 21, 30, 50, 70

破裂試験2 (昇温速度変動)

昇温速度 (°C/s)	1.7, 5, 15, 30, 50
封入内圧 (kg/cm <sup>2</sup> )	15, 30, 50, 70

ふくれ限界試験

昇温速度 (°C/s)	50
封入内圧 (kg/cm <sup>2</sup> )	5, 8, 10.5, 13
試験温度 (°C)	800°Cより25°C間隔で破裂前まで

表5 試験条件

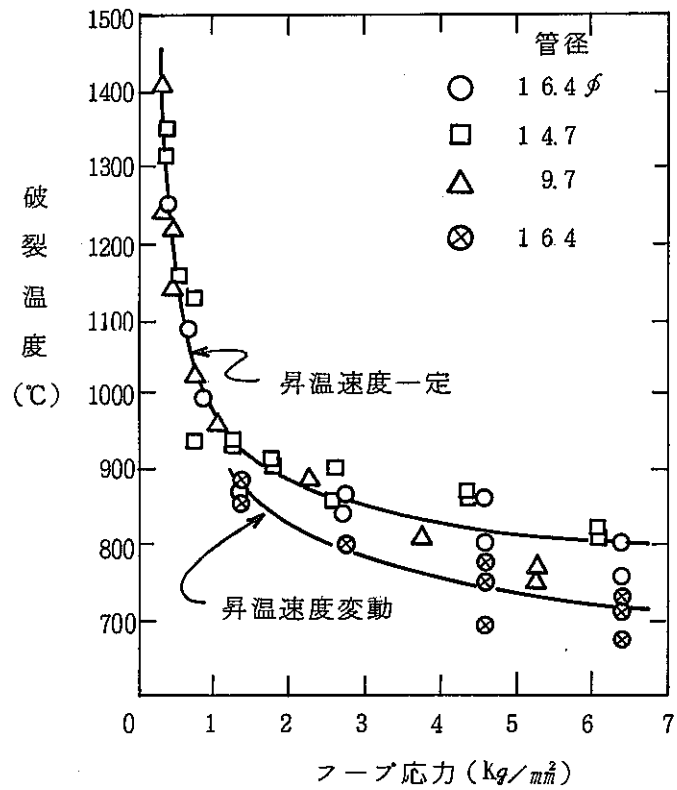


図5 フープ応力と破裂温度の関係

(高周波加熱, 窒素雰囲気, 中子ステンレス棒)

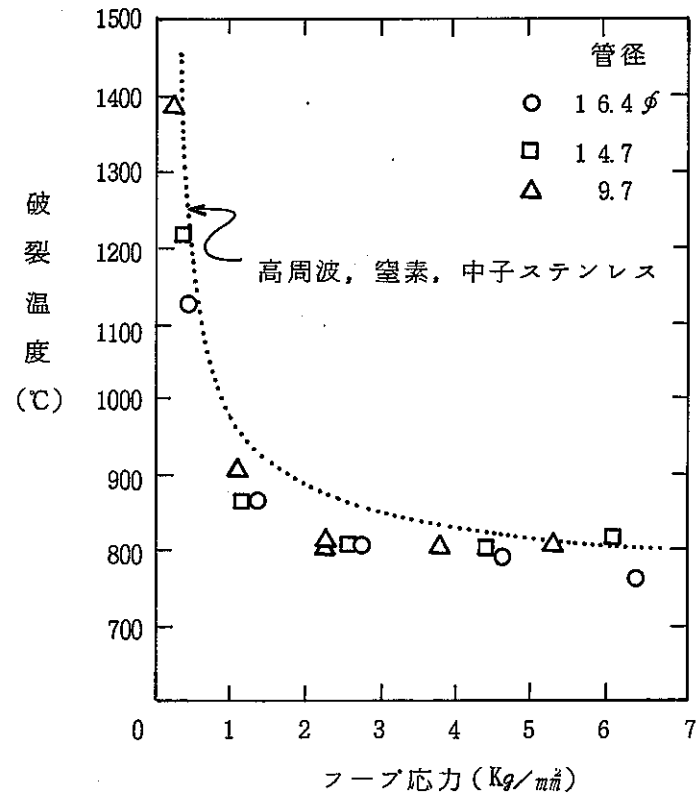


図6 フープ応力と破裂温度の関係

(高周波加熱, 窒素雰囲気, 中子アルミナ, ペレット)

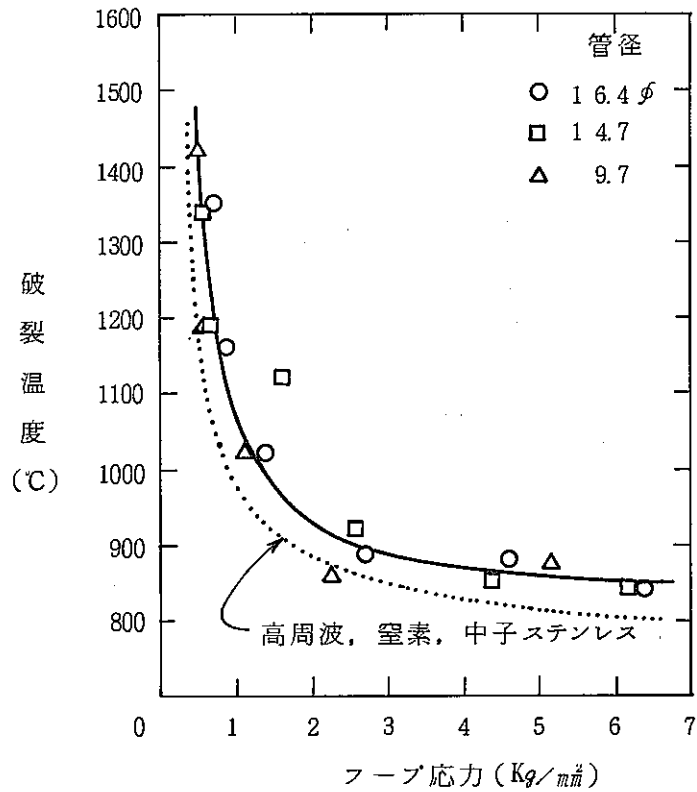


図7 フープ応力と破裂温度の関係

(直接通電加熱, 水蒸気雰囲気, 中子アルミナ, ペレット)

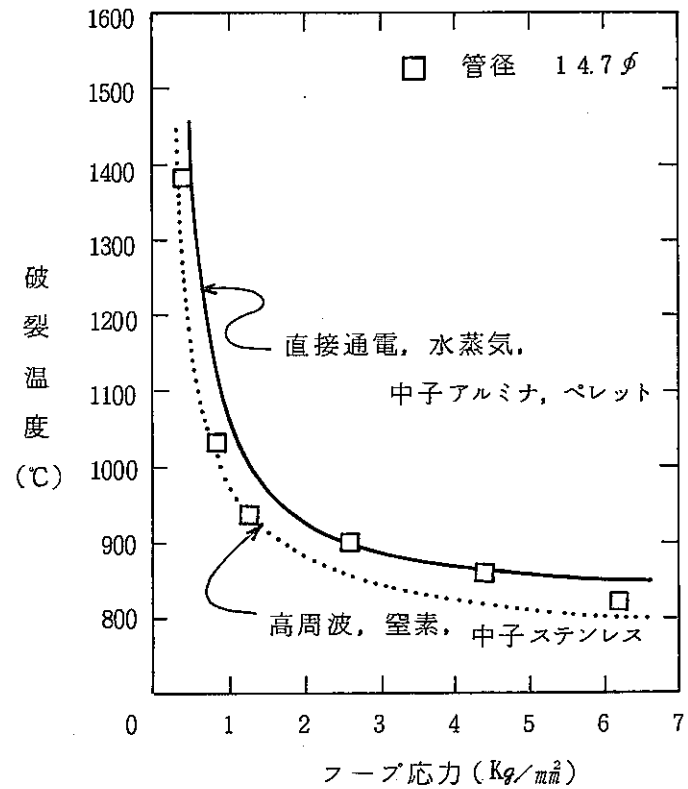


図8 フープ応力と破裂温度の関係

(直接通電加熱, 窒素雰囲気, 中子ステンレス棒)

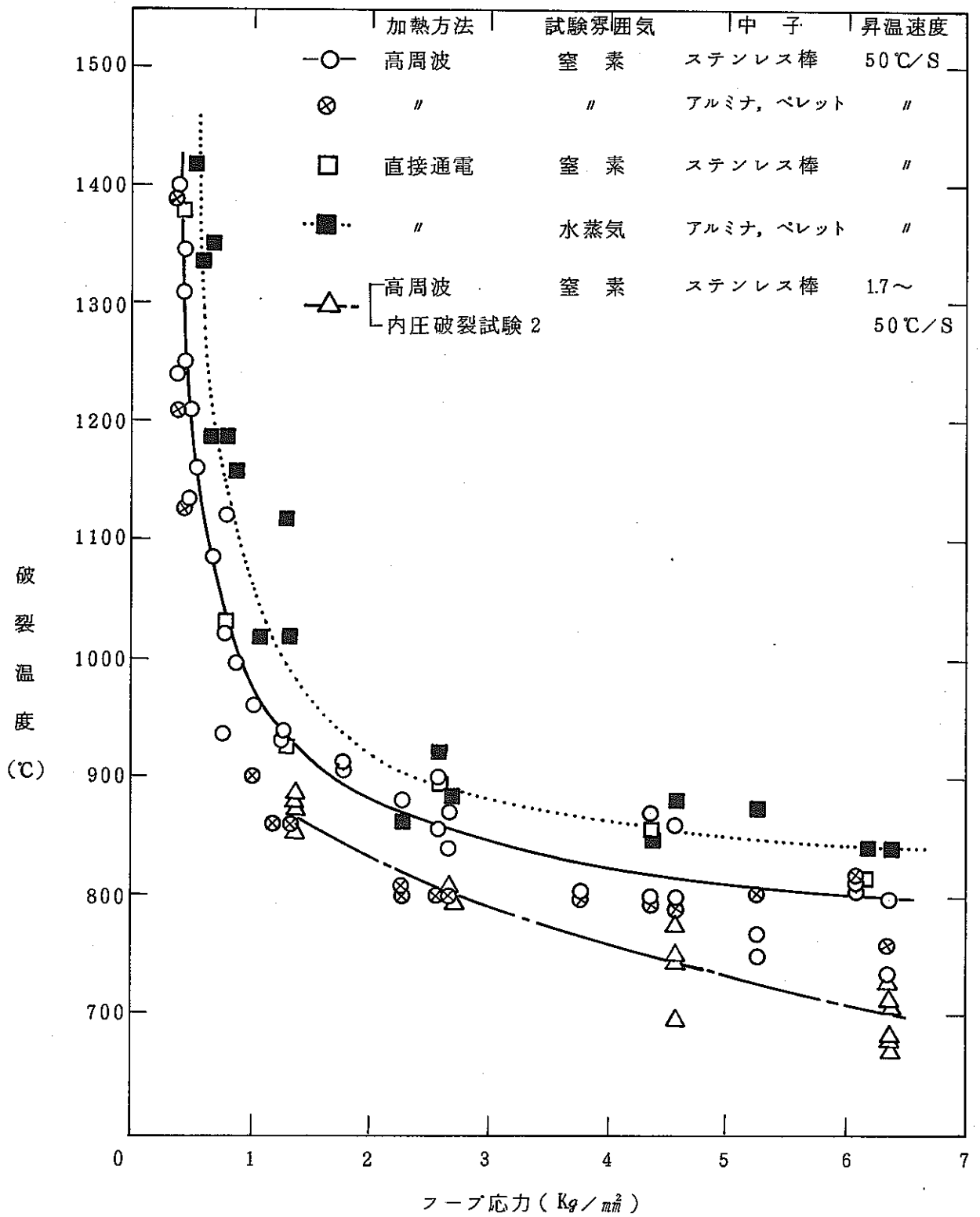


図9 フープ応力と破裂温度の関係

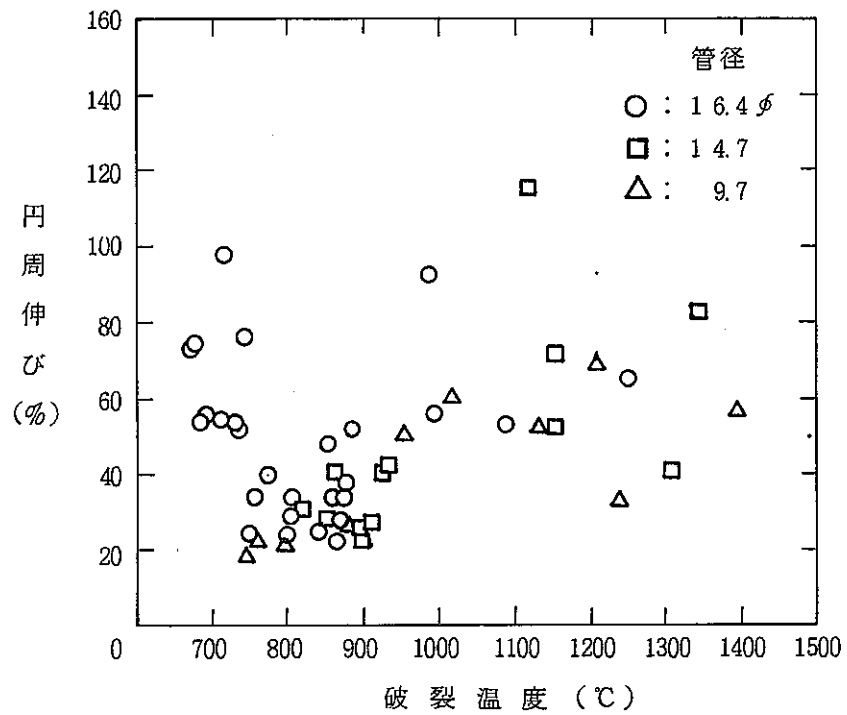


図 10 円周伸びと破裂温度の関係  
(高周波加熱, 窒素雰囲気, 中子ステンレス棒)

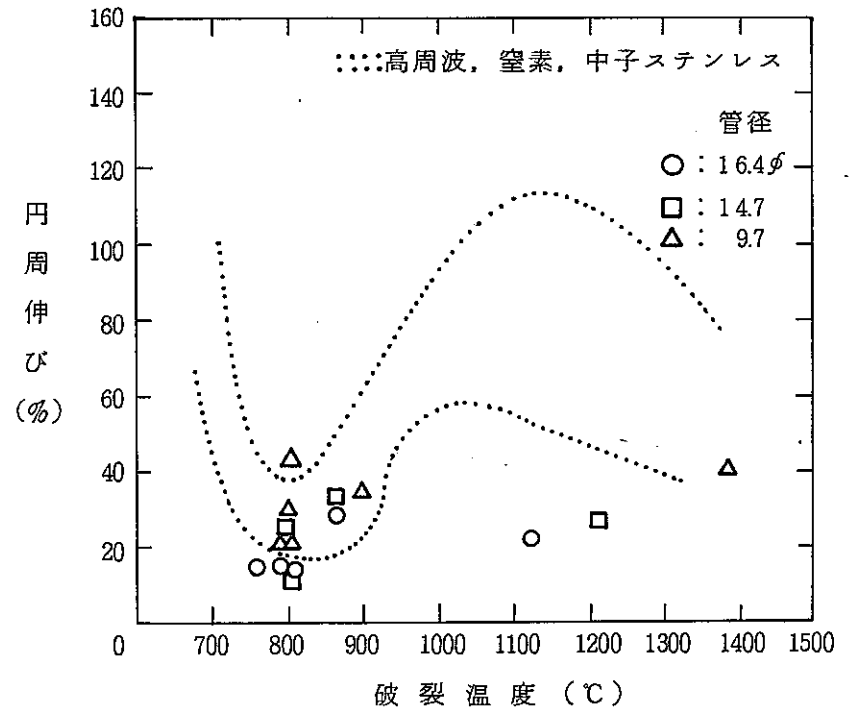


図 11 円周伸びと破裂温度の関係  
(高周波加熱, 窒素雰囲気, 中子アルミナ, ペレット)

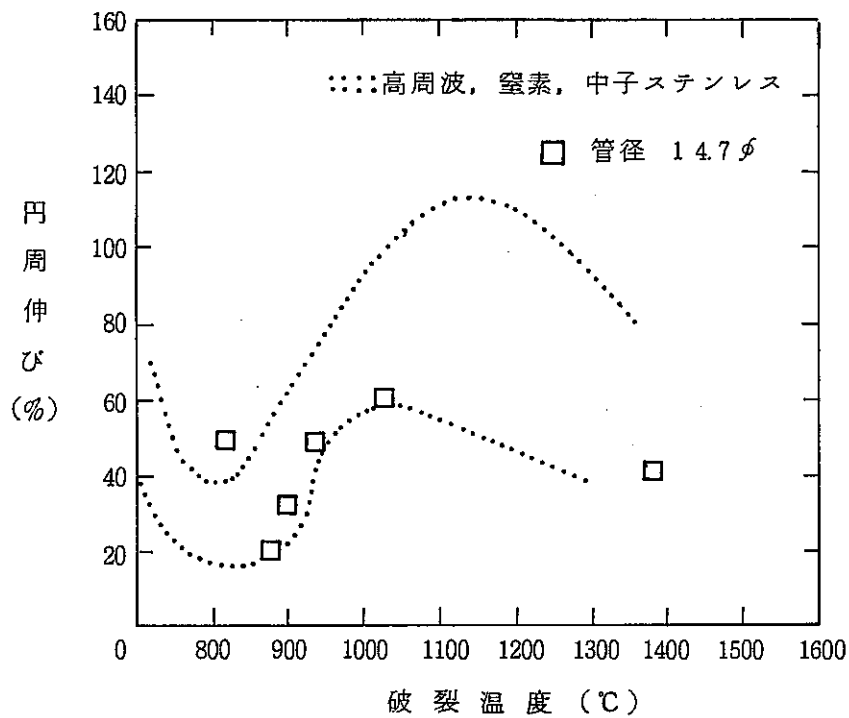


図 12 円周伸びと破裂温度の関係  
(直接通電加熱, 窒素雰囲気, 中子ステンレス棒)

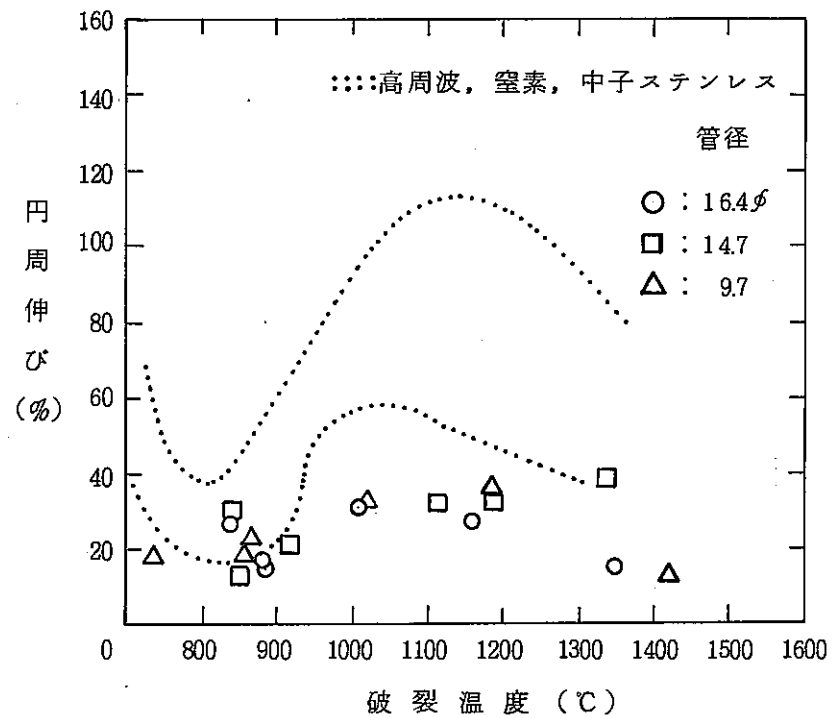


図 13 円周伸びと破裂温度の関係  
(直接通電加熱, 水蒸気雰囲気, 中子アルミナ, ペレット)



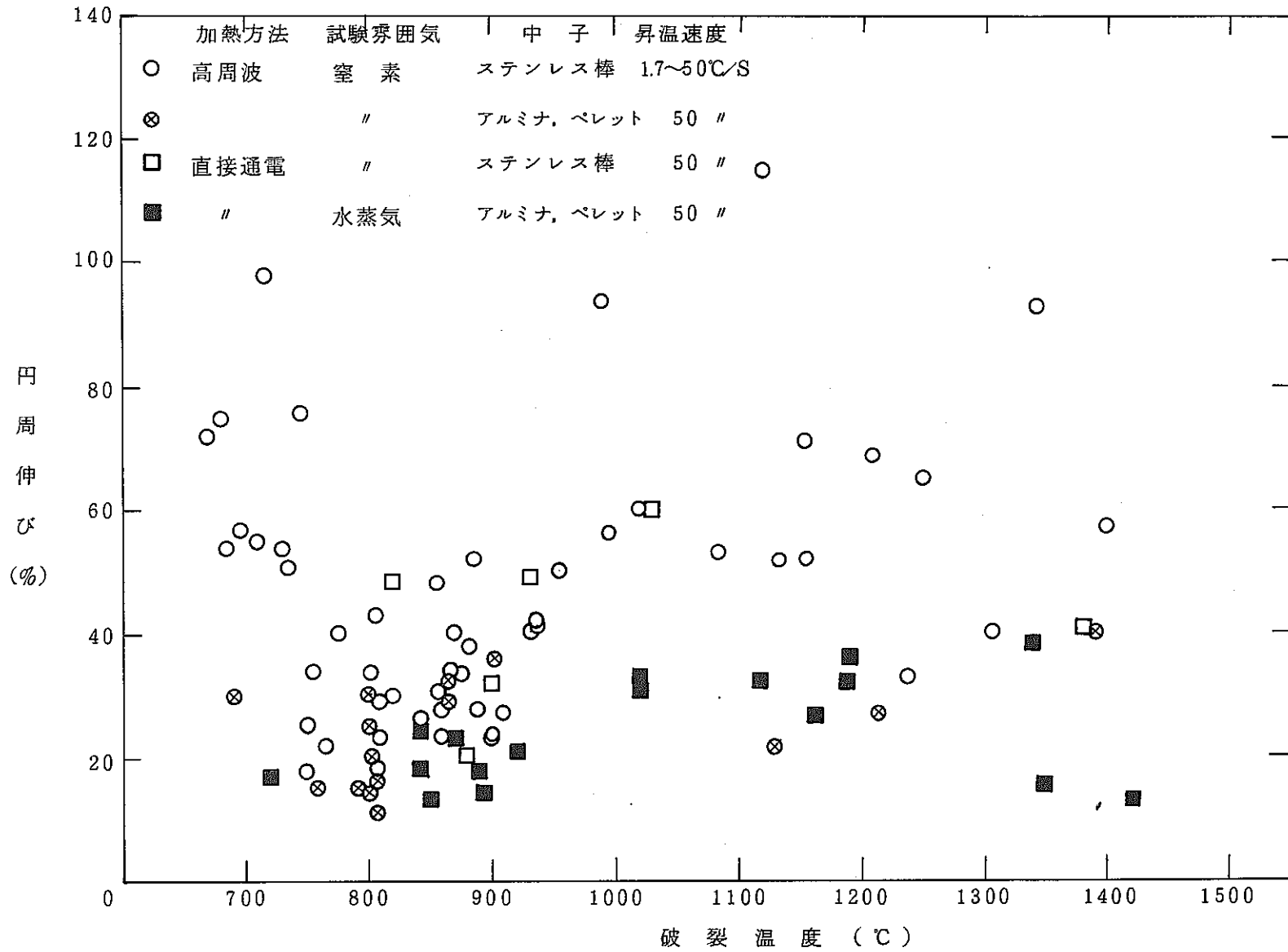


図14 円周伸びと破裂温度の関係

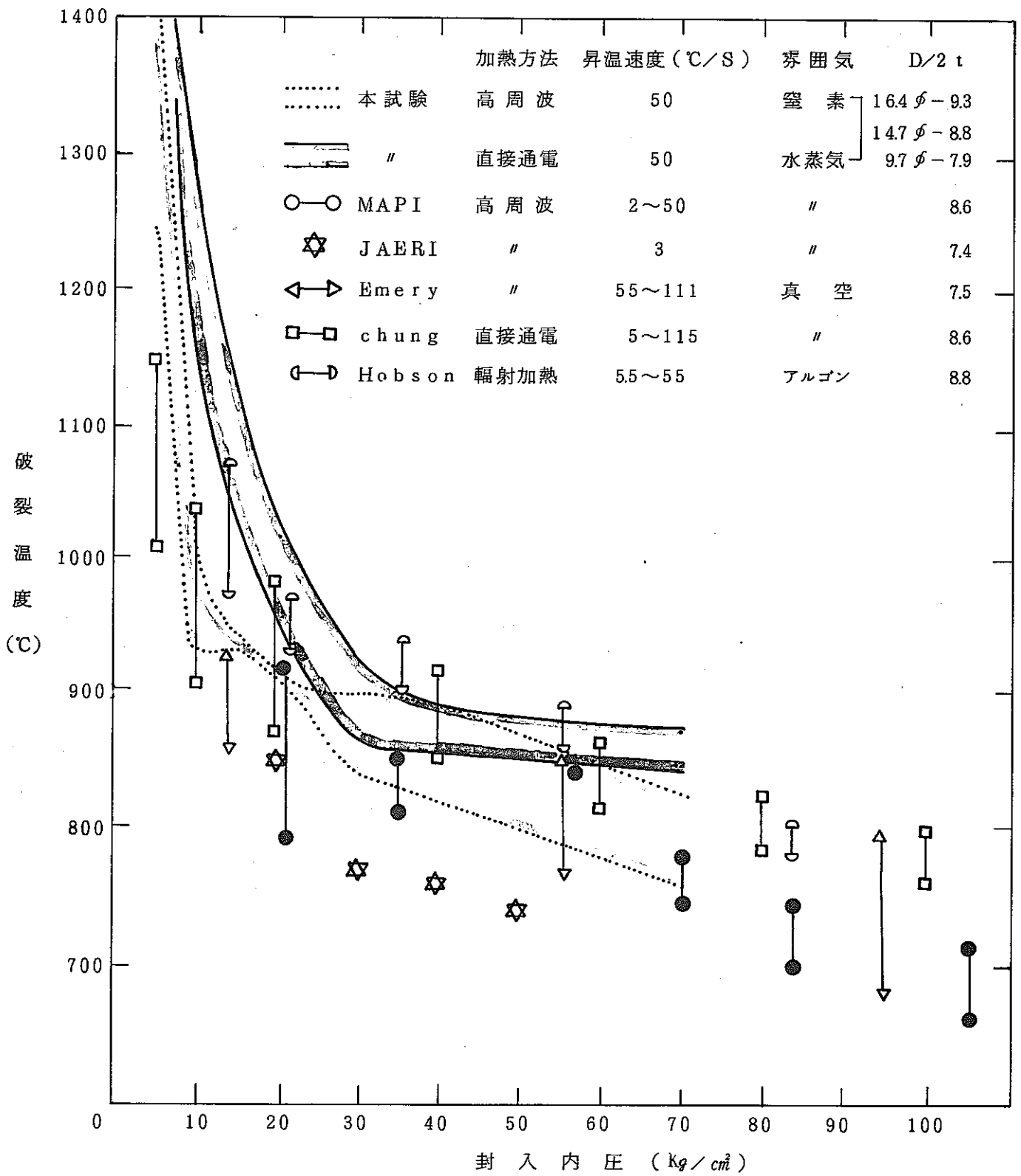


図 15 封入内圧と破裂温度の関係

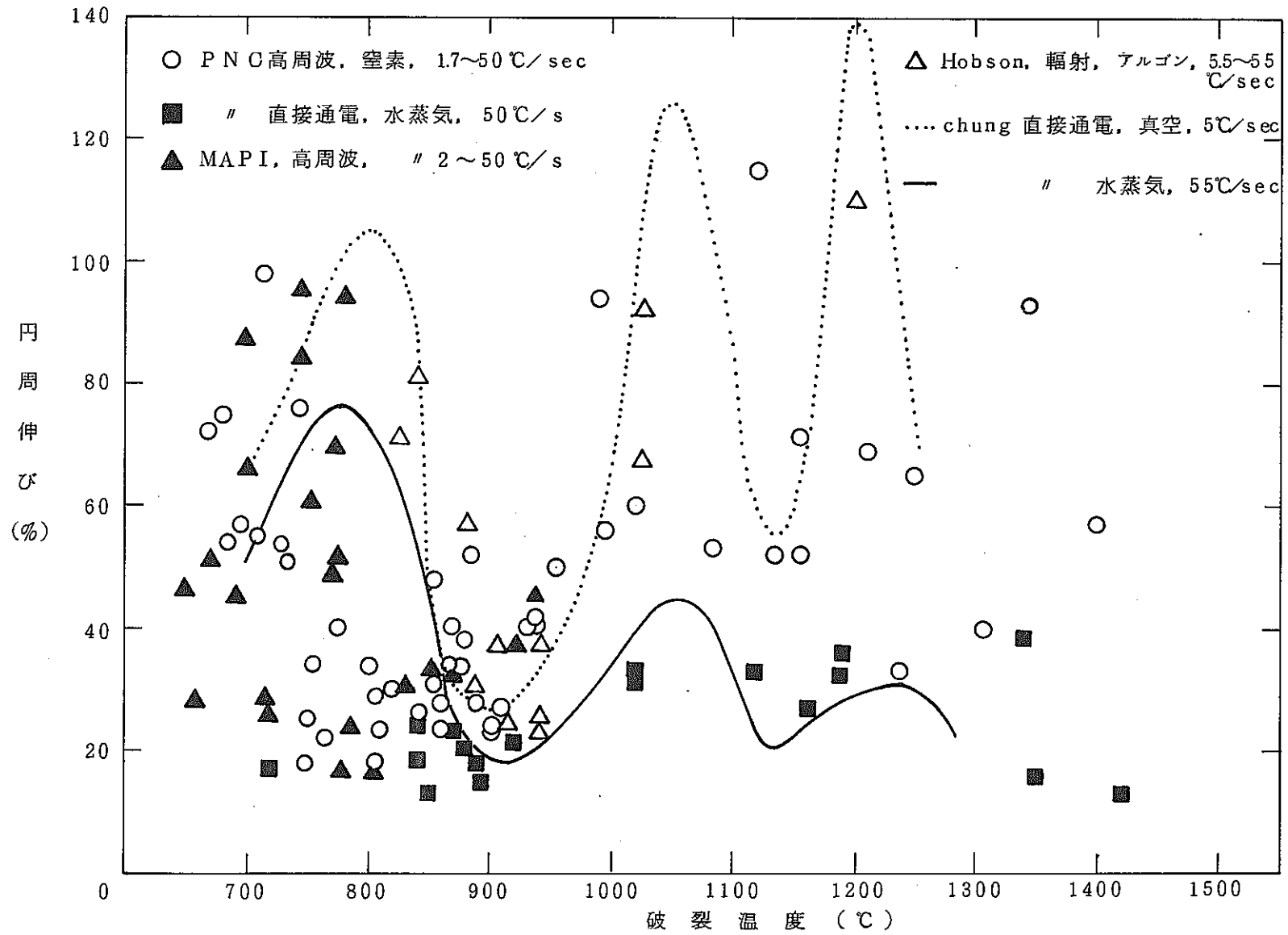


図16 破裂温度と円周伸びの関係

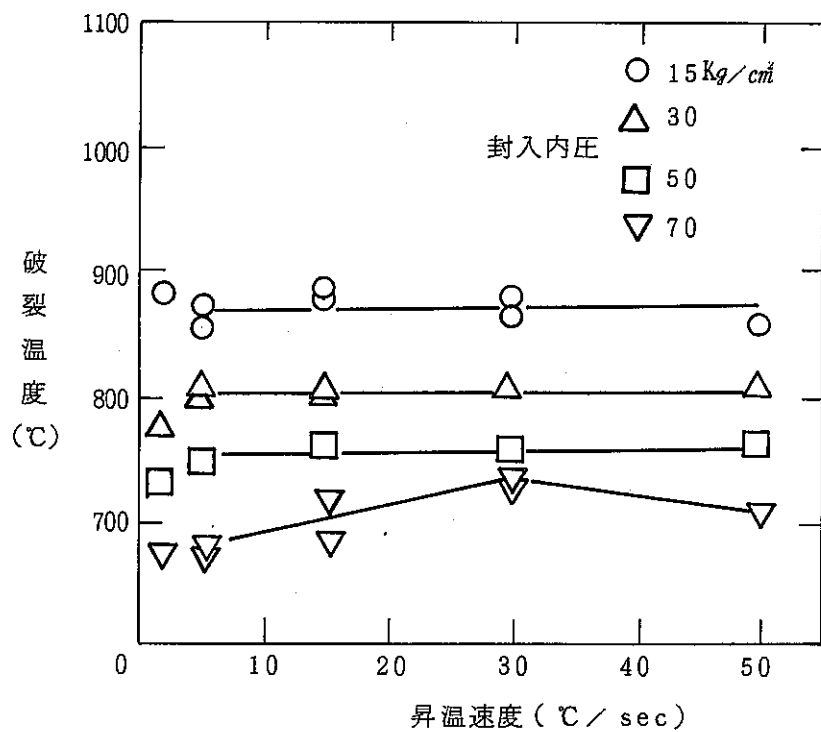


図 17 昇温速度と破裂温度の関係

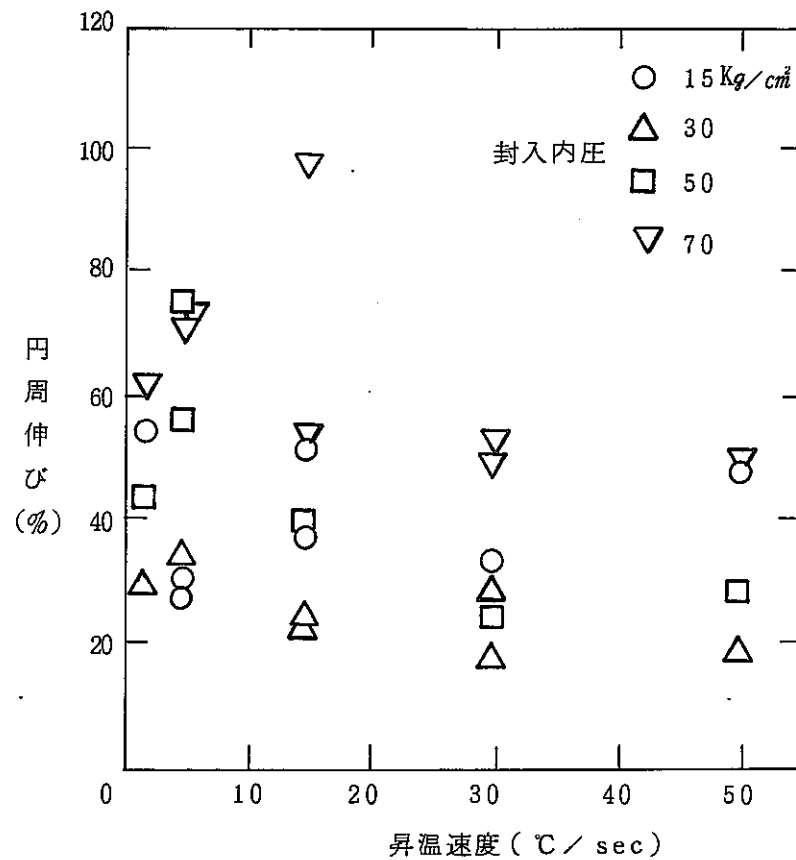


図 18 昇温速度と円周伸びの関係

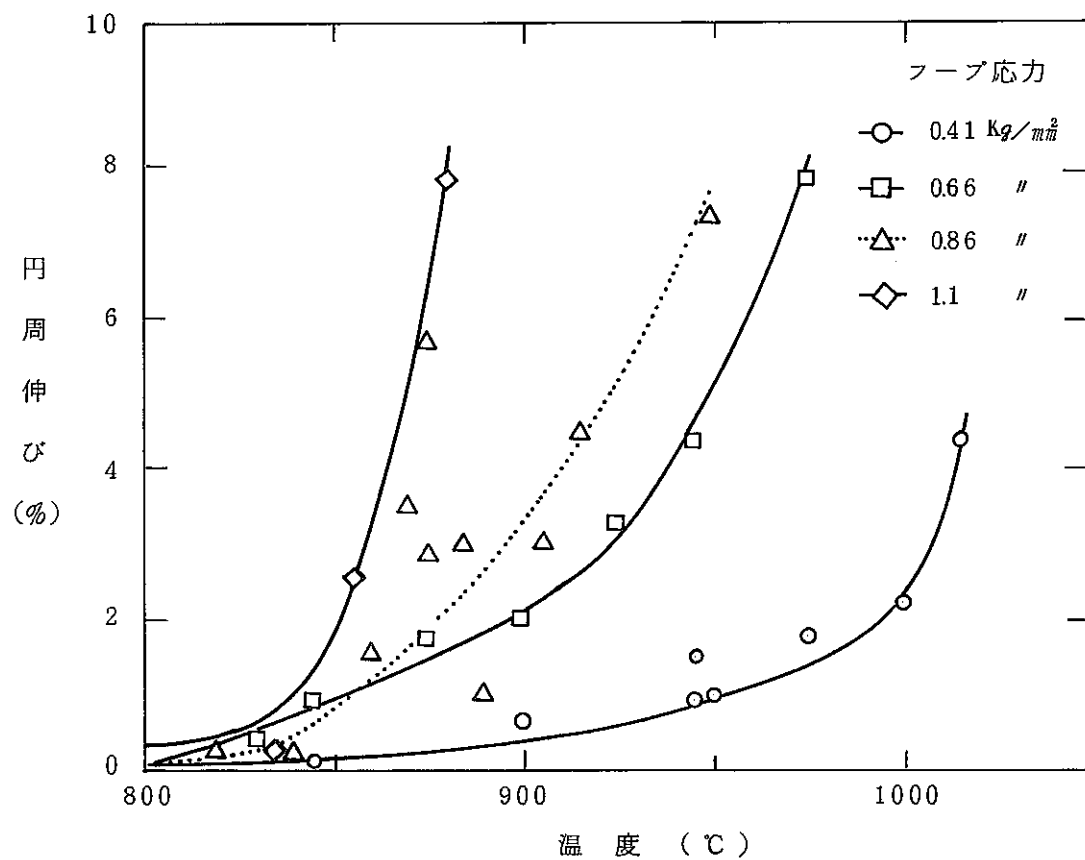


図 19 温度と円周伸びの関係

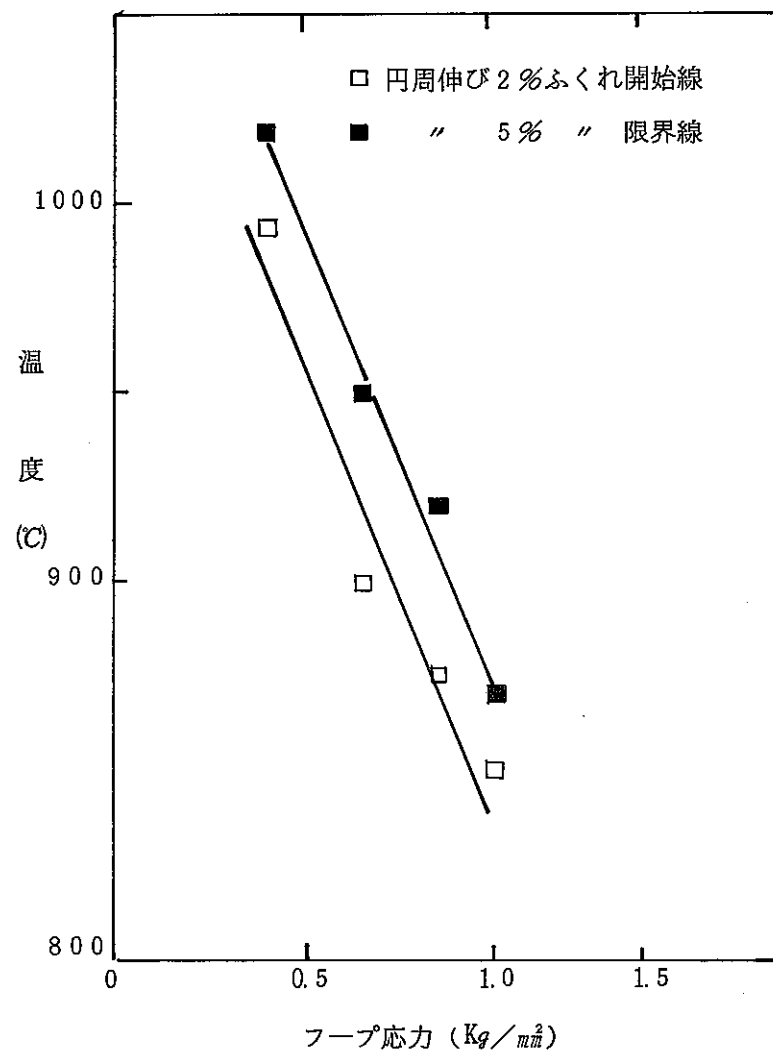


図 20 ふくれ開始および限界線

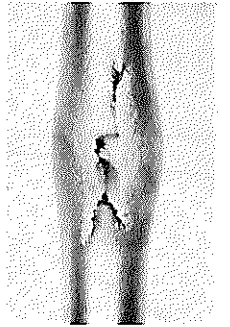
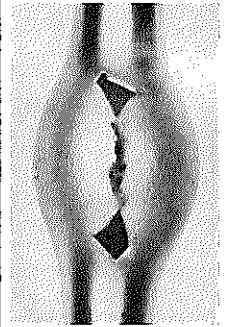
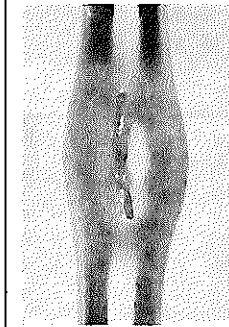
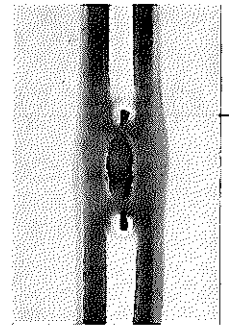
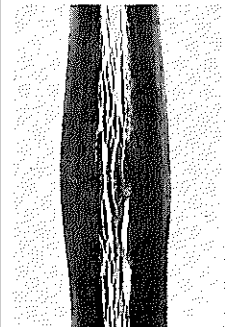
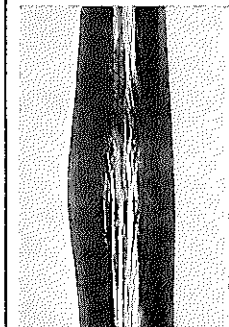
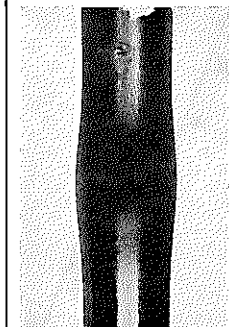
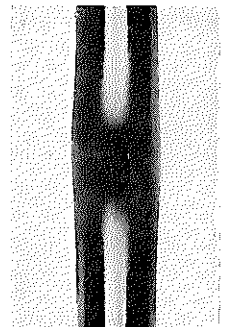
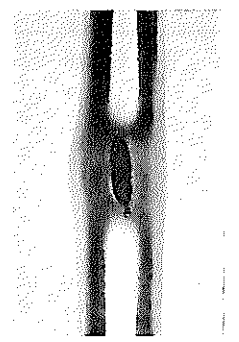
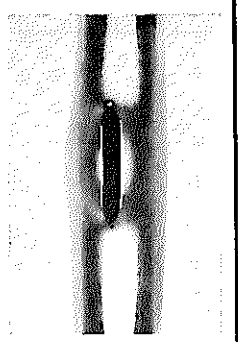
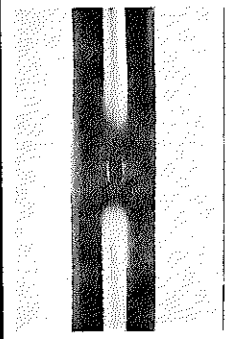
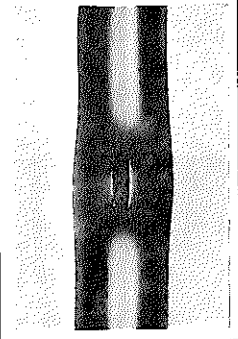
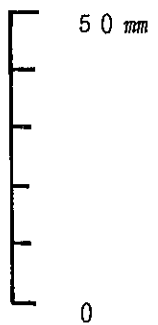
封入内圧 $Kg/cm^2$	5	7.5	9	10	15	30
試験条件						
高周波加熱 窒素雰囲気						
破裂温度 $^{\circ}C$ 円周伸び %	1310 40		1120 115		935 42	855 24
直接通電加熱 水蒸気雰囲気						
破裂温度 $^{\circ}C$ 円周伸び %		1340 38		1190 33	1120 33	920 21

写真1 破裂部の形状 (被覆管外径 14.70mm)

50	70
	
860 28	820 30
	
850 13	840 29



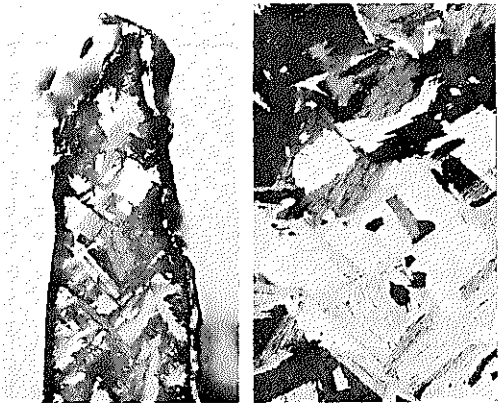
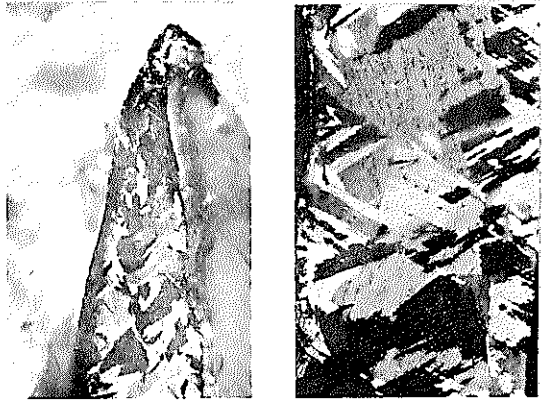
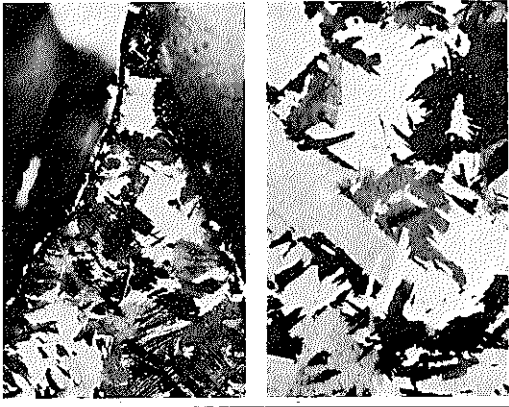
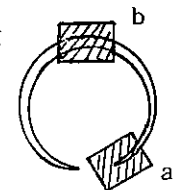
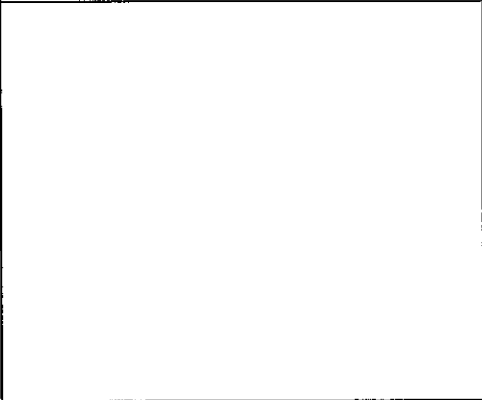
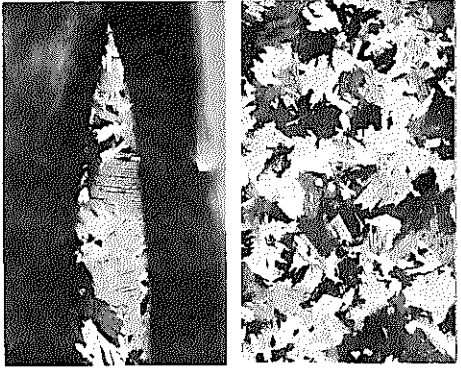
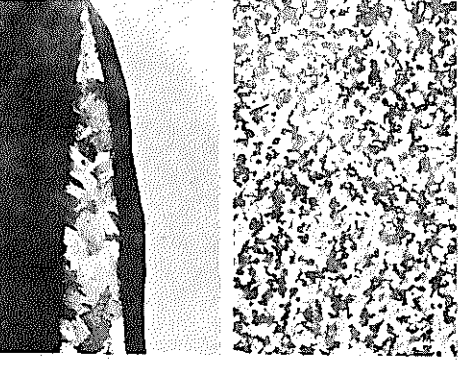
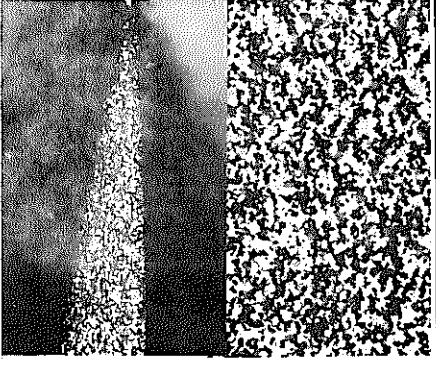
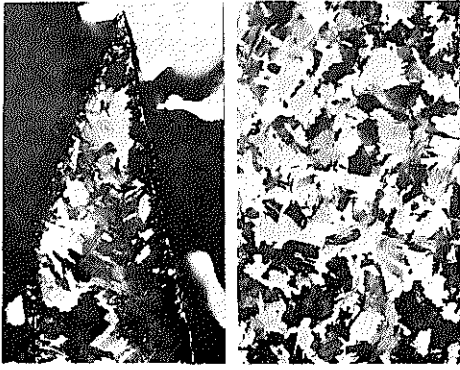
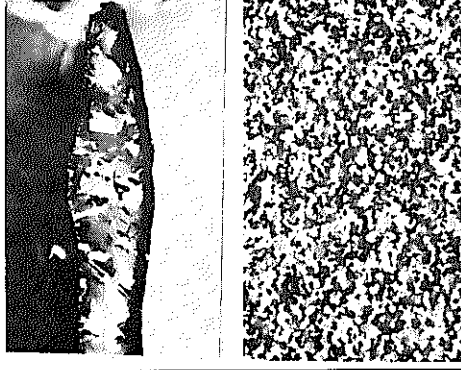
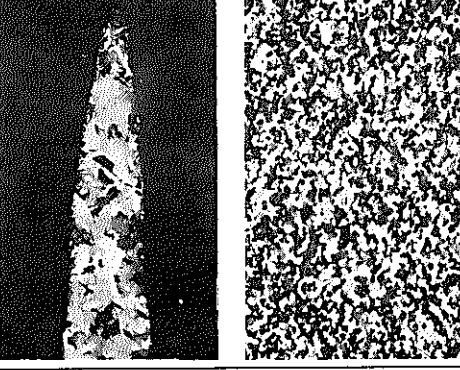
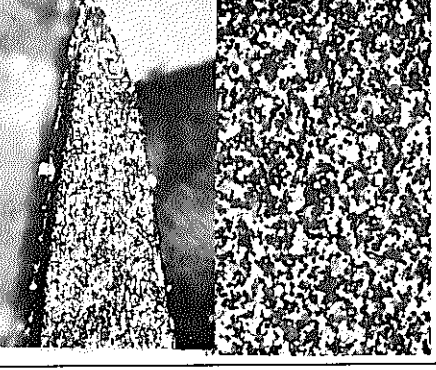
封入内圧 $Kg/cm^2$	5	7.5	9
試験条件	a b	a b	a b
高周波加熱 窒素雰囲気			
破裂温度 $^{\circ}C$ 円周伸び $\%$	1310 40		1120 115
直接通電加熱 水蒸気雰囲気			
破裂温度 $^{\circ}C$ 円周伸び $\%$		1340 38	

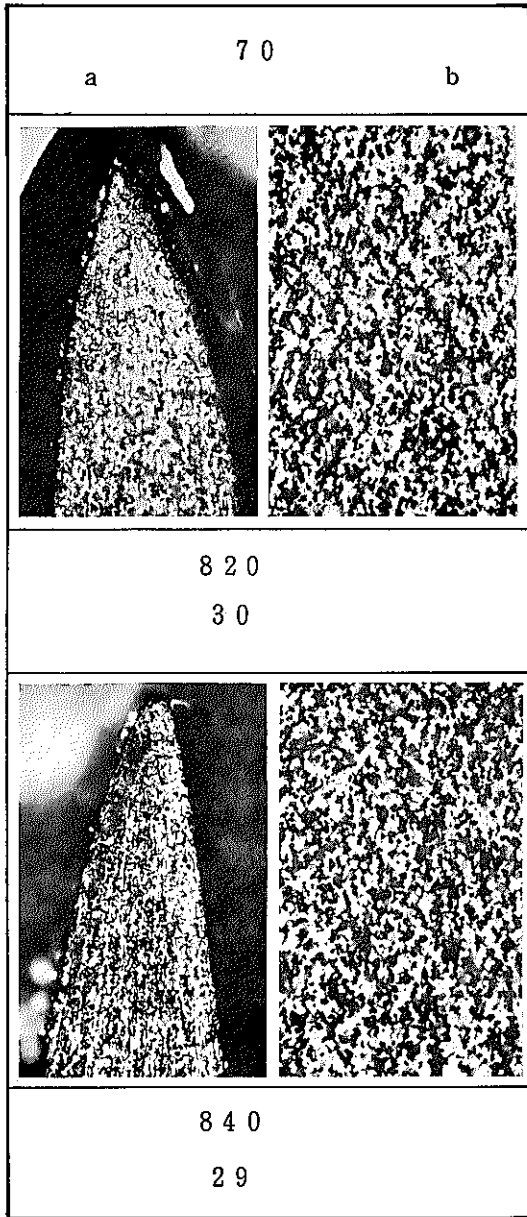
写真2 破裂部と反対部の組織 ( $\times 100$ )

写真位置





a 10 b	a 15 b	a 30 b	a 50 b
			
	935 42	855 24	860 28
			
1190 33	1120 30	920 21	850 13



## 8. 付 録

### 付録 1 試験結果数値表

#### 1. 内圧破裂試験 1 (昇温速度一定)

高周波誘導加熱・窒素雰囲気・中子ステンレス棒

試験片 外 径	封入内圧 kg/cm <sup>2</sup>	昇温速度 ℃/sec	破裂温度 ℃	最大圧力 kg/cm <sup>2</sup>	破裂圧力 kg/cm <sup>2</sup>	円周伸び %
16.4	5	50	1250	6.0	5.0	65
	7.5	"	1085	9.0	8.0	53
	10	"	995	12.5	11.0	56
	30	"	840	36.0	34.5	25
	30	"	865	36.5	35.5	23
	50	"	800	58.0	53.5	29
	50	"	860	59.0	55.0	23
	70	"	800	81.0	71.0	34
	70	"	755	78.0	67.5	34
14.7	5	50	1310	5.0	3.7	40
	5	"	1345	5.0	4.0	93
	7	"	1155	7.5	6.3	52
	7	"	1155	7.5	6.3	71
	9	"	1120	10.0	8.0	115
	15	"	930	16.5	15.0	40
	15	"	935	16.5	14.0	42
	21	"	910	22.5	21.5	27
	21	"	900	22.0	21.0	23
	30	"	855	34.5	33.0	24
	30	"	900	32.0	31.5	24
	50	"	870	56.0	-	40
	50	"	860	52.0	47.0	28
	70	"	820	73.5	66.0	30
70	"	805	74.0	66.0	29	
9.7	5	50	1400	5.5	5.3	57
	5	"	1240	5.3	4.7	33
	7	"	1210	7.5	7.0	69
	7	"	1135	7.5	7.5	52
	10	"	1020	10.5	10.0	60
	15	"	955	15.5	15.0	50
	30	"	885	31.0	31.0	28
	50	"	805	51.5	50.5	23
	70	"	750	71	71.0	18
	70	"	765	71	71.0	22

高周波誘導加熱・窒素雰囲気・中子アルミナ・ペレット

試験片 外 径	封入内圧 kg/cm <sup>2</sup>	昇温速度 ℃/sec	破裂温度 ℃	最大圧力 kg/cm <sup>2</sup>	破裂圧力 kg/cm <sup>2</sup>	円周伸び %
16.4	5	50	1125	5.5	4.5	22
	15	"	865	15.5	14.5	29
	30	"	805	30.2	29.0	16
	50	"	790	50.3	49.0	15
	70	"	760	70.5	67.0	15
14.7	5	50	1215	5.0	4.7	27
	15	"	865	15.0	14.5	33
	30	"	800	30.0	29.0	25
	50	"	800	50.0	43.5	14
	70	"	805	71.0	68.0	11
9.7	5	50	1385	5.0	4.5	40
	15	"	900	15.2	14.5	36
	30	"	800	30.0	29.0	30
	30	"	805	30.0	29.0	21
	50	"	800	50.0	49.5	20
	70	"	690	70.0	67.5	30
	70	"	805	70.0	67.0	43

直接通電加熱・水蒸気雰囲気・中子アルミナ・ペレット

試験片 外 径	封入圧力 kg/cm <sup>2</sup>	昇温速度 ℃/sec	破裂温度 ℃	最大圧力 kg/cm <sup>2</sup>	破裂圧力 kg/cm <sup>2</sup>	円周伸び %
16.4	7.5	50	1350	8.0	5.5	15
	10	"	1160	10.5	7.0	27
	15	"	1020	16.0	12.0	31
	30	"	890	31.0	28.0	15
	50	"	880	51.0	41.0	17
	70	"	840	70.5	52.0	26
14.7	7.5	50	1340	8.0	5.0	38
	10	"	1190	10.5	6.0	33
	15	"	1120	15.5	12.5	33
	30	"	920	30.5	29.0	21
	50	"	850	50.0	49.0	13
	70	"	840	71.0	55.0	29
9.7	7.5	50	1420	7.5	—	13
	10	"	1190	10.0	8.5	36
	15	"	1020	15.5	14.0	32
	30	"	860	30.3	29.7	20
	70	"	870	71.0	63.0	23

直接通電加熱・窒素雰囲気・中子ステンレス棒

試験片 外 径	封入内圧 kg/cm <sup>2</sup>	昇温速度 ℃/sec	破裂温度 ℃	最大圧力 kg/cm <sup>2</sup>	破裂圧力 kg/cm <sup>2</sup>	円周伸び %
14.7	5	50	1380	5.8	4.0	41
	10	"	1030	11.0	7.0	60
	15	"	930	16.5	13.5	49
	30	"	900	32.5	30.5	32
	50	"	880	54	46.0	20
	70	"	820	74.5	52.0	49

2. 内圧破裂試験2 (昇温速度変動)

高周波加熱・窒素雰囲気・中子ステンレス棒

試験片 外 径	封入内圧 kg/cm <sup>2</sup>	昇温速度 ℃/sec	破裂温度 ℃	最大圧力 kg/cm <sup>2</sup>	破裂圧力 kg/cm <sup>2</sup>	円周伸び %
16.4	15	1.7	885	18.0	13.5	55
	"	5	855	18.5	18.0	31
	"	5	870	19.5	19.0	28
	"	15	880	18.0	17.5	38
	"	15	885	18.5	18.0	52
	"	30	875	18.5	17.5	34
	"	30	865	"	18.0	34
	"	50	855	"	16.5	48
	30	1.7	770	38.3	36.5	28
	"	5	805	36.5	34.5	34
	"	5	805	37.5	36.5	34
	"	15	800	36.0	35.0	24
	"	15	805	36.0	34.5	23
	"	30	805	35.5	34.0	18
	"	30	805	36.0	35.0	29
	"	50	805	34.5	34.0	19
	50	1.7	730	62.5	60.0	43
	"	5	745	56.5	49.0	76
	"	15	775	56.0	50.0	40
	"	30	750	56.5	50.0	25
	"	50	765	59.0	52.0	30
	70	1.7	670	84.5	78.0	62
	"	5	670	84.0	75.0	72
	"	5	680	82.0	69.0	75
	"	15	715	80.5	66.0	98
	"	15	685	82.0	75.0	54
	"	30	735	81.0	71.0	51
"	30	730	79.0	70.0	54	
"	50	710	83.0	66.5	55	

3. ふくれ限界試験

高周波加熱・窒素雰囲気・中子ステンレス棒

試験片 外径	封入内圧 kg/cm <sup>2</sup>	昇温速度 ℃/s	試験温度 ℃	最大圧力 kg/cm <sup>2</sup>	円周伸び %	フープ応力 kg/mm <sup>2</sup>
14.7	5	50	800	6.0	0.2	0.41
"	"	"	845	6.3	0.1	"
"	"	"	900	6.3	0.6	"
"	"	"	945	6.3	0.9	"
"	"	"	"	6.5	1.5	"
"	"	"	950	6.5	1.0	"
"	"	"	975	6.5	1.8	"
"	"	"	1000	6.5	2.2	"
"	"	"	1015	6.5	4.4	"
"	8	"	800	10.0	0.3	0.66
"	"	"	830	10.2	0.4	"
"	"	"	845	10.0	0.9	"
"	"	"	875	9.8	1.7	"
"	"	"	900	10.0	2.0	"
"	"	"	925	10.0	3.3	"
"	"	"	945	10.0	4.3	"
"	"	"	975	10.0	7.5	"
"	10.5	"	800	11.5	0.2	0.86
"	"	"	820	13.0	0.3	"
"	"	"	840	13.2	0.3	"
"	"	"	860	12.0	1.5	"
"	"	"	870	12.0	3.5	"
"	"	"	875	13.0	5.7	"
"	"	"	875	13.0	2.9	"
"	"	"	885	12.5	3.0	"
"	"	"	890	13.0	1.0	"
"	"	"	905	12.0	3.0	"
"	"	"	915	12.0	4.5	"
"	"	"	950	13.5	7.4	"
"	13	"	800	16.0	0.4	1.1
"	"	"	835	16.0	0.4	"
"	"	"	855	16.0	2.6	"
"	"	"	880	16.0	7.9	"

付録2 本試験と国内外研究機関の試験条件

	試 験 片				プレナム 容 積 ( $cm^3$ )	試 験 方 法					
	被 覆 管					試験片 支持方法	加熱方法	雰 囲 気	温度測定法	初期内圧 ( $kg/cm^2$ )	昇温速度 ( $^{\circ}C/sec$ )
	材 質	外 径 ( $mm$ )	肉 厚 ( $mm$ )	全 長 ( $mm$ )							
本 試 験	Zry-2	16.46 14.72 9.70	0.80 0.76 0.54	420 (高周波) 370 (直接通電)	23 11 6	一端固定 一端自由 (高周波) 両端固定 (直接通電)	高周波  直接通電	窒 素 ( $1kg/cm^2$ ) 水 蒸 気	熱 電 対 (溶 接) 2色高度計 赤外線温度計	5~70	1.7~50
JAERI	Zry-4	10.75	0.725	222	140	一端自由 一端固定	高周波 抵抗炉	水 蒸 気 ( $1kg/cm^2$ ) 真 空	熱 電 対 (接 触) 光高温計	10~50	3~47
MAPI	Zry-2	10.72	0.62	500	19	一端固定 一端自由	高周波	ヘリウム 水 蒸 気 ( $1kg/cm^2$ )	熱 電 対 (溶 接) 赤外線温度計	20~105	2~50
Chung	Zry-4	10.9	0.635	152	3.4 12.5	一端固定	直接通電	真 空 水 蒸 気	熱 電 対	3.5~140	5~115
Emery	Zry-4	10.7	0.71	177.5	-	両端自由	高周波	ヘリウム	熱 電 対	14~176	5.6~93.3
Hobson	Zry-4	14.3	0.81	-	-	-	赤 外 線	アルゴン	熱 電 対	3.5~70	5.6~37.8