

本資料は 年 月 日付で登録区分、
変更する。 2007. 6. -6

[技術情報室]

軽水炉用燃料被覆管の強度延性および 水素化物のふるまいに関する試験研究

(IV) ジルカロイ-2 被覆管の高温耐圧変形挙動

Mechanical Properties and Hydrogen Effects of Fuel Cladding
Tube for Water Reactor.

(IV) High Temperature Burst Strength and Deformation Behavior
of Zircaloy-2 Cladding.

1976年8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

す
の

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

T
SN841-76-36
1976年8月

軽水炉燃料被覆管の強度延性および
水素化物のふるまいに関する試験研究



(4) ジルカロイ-2 被覆管の高温耐圧変形挙動

実施責任者 三 浦 信 (技術部検査開発課)
報告者 永 木 裕 (")
神 谷 和 明 (")

期 間 ; 1976年2月2日~5月31日

目 的 ; 軽水炉用燃料の被覆材であるジルカロイ-2 被覆管の高温耐圧変形挙動を調べECC
Sに関する安全性研究の基礎資料とする。

要 旨 ; ジルカロイ-2 管の高温強度をみるために1000℃までの高温内圧破裂試験を大気
中とヘリウムとに雰囲気を変えた場合と加圧速度を変えた場合の2つの方法で行な
い、それぞれの高温耐圧変形挙動について検討した。

も く じ

1. 諸 言	1
2. 供試材料と試験方法	1
3. 結果と考察	3
4. 結 論	17
5. あとがき	17
6. 参考文献	20
7. 付 録	21

1 諸 言

軽水炉の冷却材喪失事故時における燃料被覆管の温度はおよそ1,200℃まで上昇すると考えられ、これは定格運転時温度の3倍以上の値である。したがってこの様な高温でのジルコニウム被覆管の強度やECCS作動時のふるまいを知ることは安全解析上、非常に重要な問題となっている。

本試験ではジルカロイ-2被覆管について、その高温強度をみるために1,000℃までの高温内圧破裂試験を大気中とヘリウムとに雰囲気を変えた場合と、加圧速度を変えた場合の2つの方法で行ない、それぞれの高温耐圧変形挙動について検討した。

このうち大気中での内圧破裂試験の結果はすでに技術メモ(SN843-74-69)として中間報告した。

2 供試材料と試験方法

2-1 供試材料

昭和47年2月10日付で検査開発課に納入した住友金属工業製のジルカロイ-2被覆管試作品の歪取り焼鈍材(管 ϕ S653, S666, S677, S679)で公称寸法が外径16.46mm内径14.70mm,長さ4,150mmの管を使用した。化学組成値および性質をメーカー提出のミルシートにより表1に示す。

2-2 試験片

上記の供試材料からそれぞれ200mmの長さに切断した管の寸法を、その両端について肉厚は45度毎に8点、外径は90度毎に2方向をマイクロメータで測定した(付録表2)。そして管の両端に圧力封入端栓をTIG溶接し、管の曲り拘束と内容積を減らすための中子を入れたクローズドエンド試験片($\sigma_a/\sigma_t=0.5$)とした。

なお、試験に際しては端栓溶接部からの破裂を防止するために1mm ϕ のSUSの針金を巻いて溶接ビード部と熱影響部を保護した。

2-3 試験方法

(1) 1,000℃までの内圧破裂試験

試験条件は大気中試験とヘリウム雰囲気試験で若干異なり試験温度は大気中試験が300℃~1,000℃まで100℃毎に行なったのに対して、ヘリウム雰囲気試験では150℃~

表1 供試材の諸性質(ミルシート値)

製作番号 CW144144 ロット番号 5076 (S581 S680)
 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 ²)	常 温	≥ 49	68.3	67.4	
	耐 力 (Kg/mm ²)		≥ 42	54.2	53.9	
	伸 び (%)		≥ 15	32	32	
	抗 張 力 (Kg/mm ²)	343℃	≥ 29	40.2	40.8	
	耐 力 (Kg/mm ²)		≥ 23	33.4	32.4	
	伸 び (%)		≥ 15	31	30	
バ ー ス ト 試 験	破 裂 圧 力 (Kg/cm ²)	常 温	≥ 450	800	810	
	周 伸 び (%)		≥ 15	36.0	34.1	
	0.2%耐圧 (Kg/cm ²)			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		900~1,500	1,310	1,320	
	H		≤ 25	14	15	
	N		≤ 80	22	24	
項 目		規 格 値	成 績			
化 学 成 分 分 析 値 イ ン ゴ ッ ト № 1168	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	0.18~0.38	0.30	0.29	0.29
	不 純 物 元 素 (ppm)	O	900~1,500	1,320	1,300	1,330
		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		

1,000℃までの温度範囲を50℃毎に行なった。

加圧速度はヘリウム雰囲気試験では毎分100 Kg/cm²を目標としたが、大気中試験ではコントロールせずに自由加圧にしたので毎分30 Kg/cm²～200 Kg/cm²と温度によって異なり、破裂圧の低下する高温側で遅くなっている。

加圧媒体は大気中試験がアルゴン、ヘリウム雰囲気試験はヘリウムである。

(2) 加圧速度を変えた試験

この試験は雰囲気、加圧媒体共にヘリウムで行なった。試験温度は α 相、 $\alpha + \beta$ 相、 β 相の各変態領域に相当する⁽¹⁾と思われる、800℃、900℃、1,000℃とした。また加圧速度はそれぞれ毎分10 Kg/cm²、100 Kg/cm²、1,000 Kg/cm²の3段階とした。

以上、2つの試験共加熱は抵抗線加熱横型環状炉で行なった。温度は熱電対による非接触の雰囲気测温で試験片の中央部と両端に対応する3点について測定した。

試験装置のフローシートを図1に示す。

昇温速度は平均して約300℃/時間である。そして試験片への加圧は試験温度に30分以上保持してから行なった。また、ヘリウム雰囲気にするには炉を昇温する前にチャンバーと試験片内を一担10⁻³ Torr程度に真空引きしてからヘリウム置換した。

3 結果と考察

3-1 温度と破裂応力

試験の結果から得られた温度と破裂応力の関係を図2に示す。図中参考のためにのせた、引張り試験の値は同一ロットの管について行なった結果である。

圧力の応力換算は内径の式($\sigma = PD/2t$)を用いて行なった。ヘリウム雰囲気での破裂応力が850℃以上で大きく低下しているのに対して大気中試験ではその傾向はなく一様に低下している。これはこの温度範囲($\alpha + \beta$ 相、 β 相領域)で、酸化が破裂強度を高めているためと思われる。一方750℃～800℃ではヘリウム雰囲気の値が大気中の値よりも高くなっているのは加圧速度の違いが大きく影響しているためと考えられるが、これについては「加圧速度の影響」の項で述べる。

3-2 温度と同伸び

図3から試験温度による周伸びの変化をみると、まず大気中試験での傾向は400℃で最小の値を示し、その後は温度と共に上昇する。特に再結晶を起す600℃までの増加は大きい。そして700℃で約60%と最大となり、900℃へと一様に低下している。引張り伸び

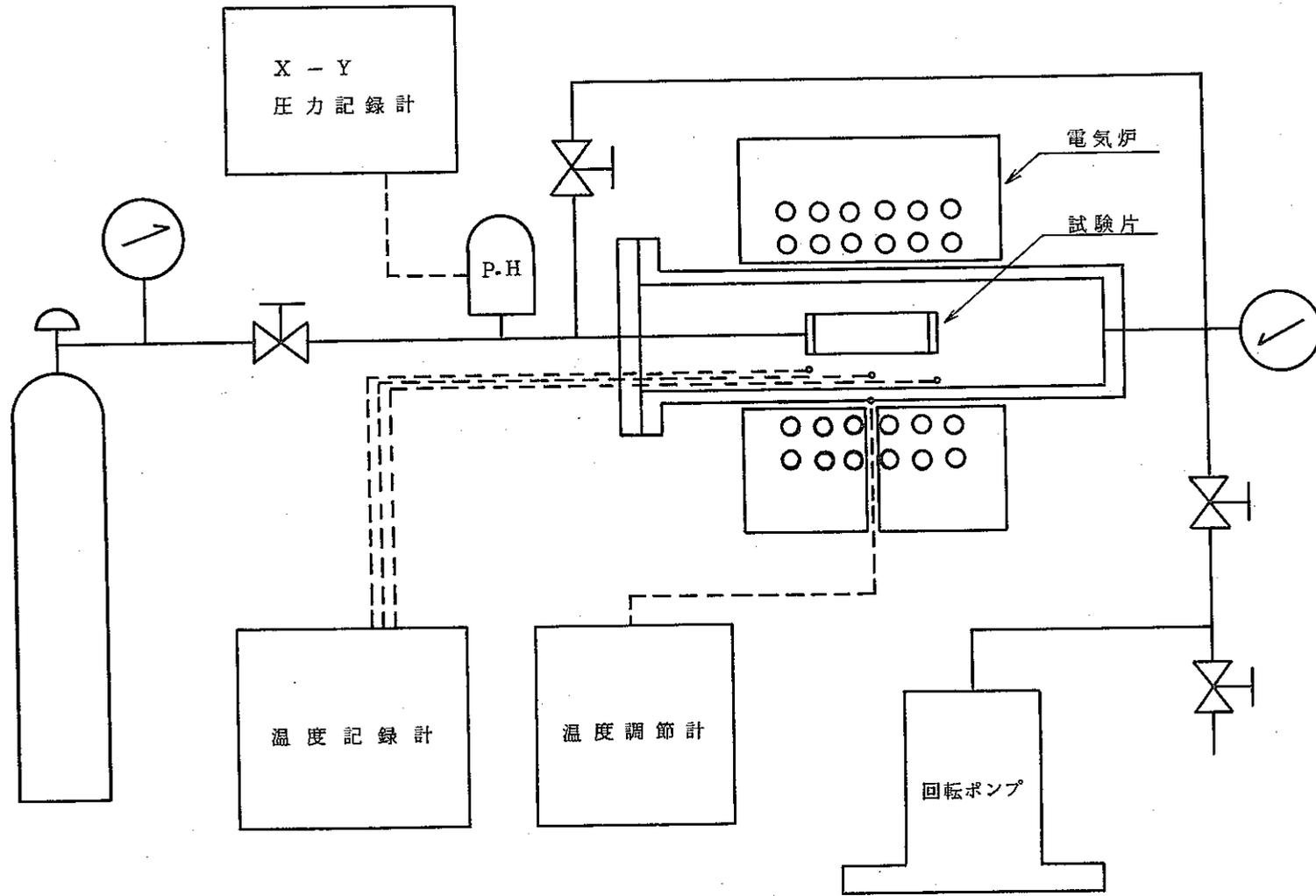


図1 被覆管高温内圧破裂試験装置フローシート

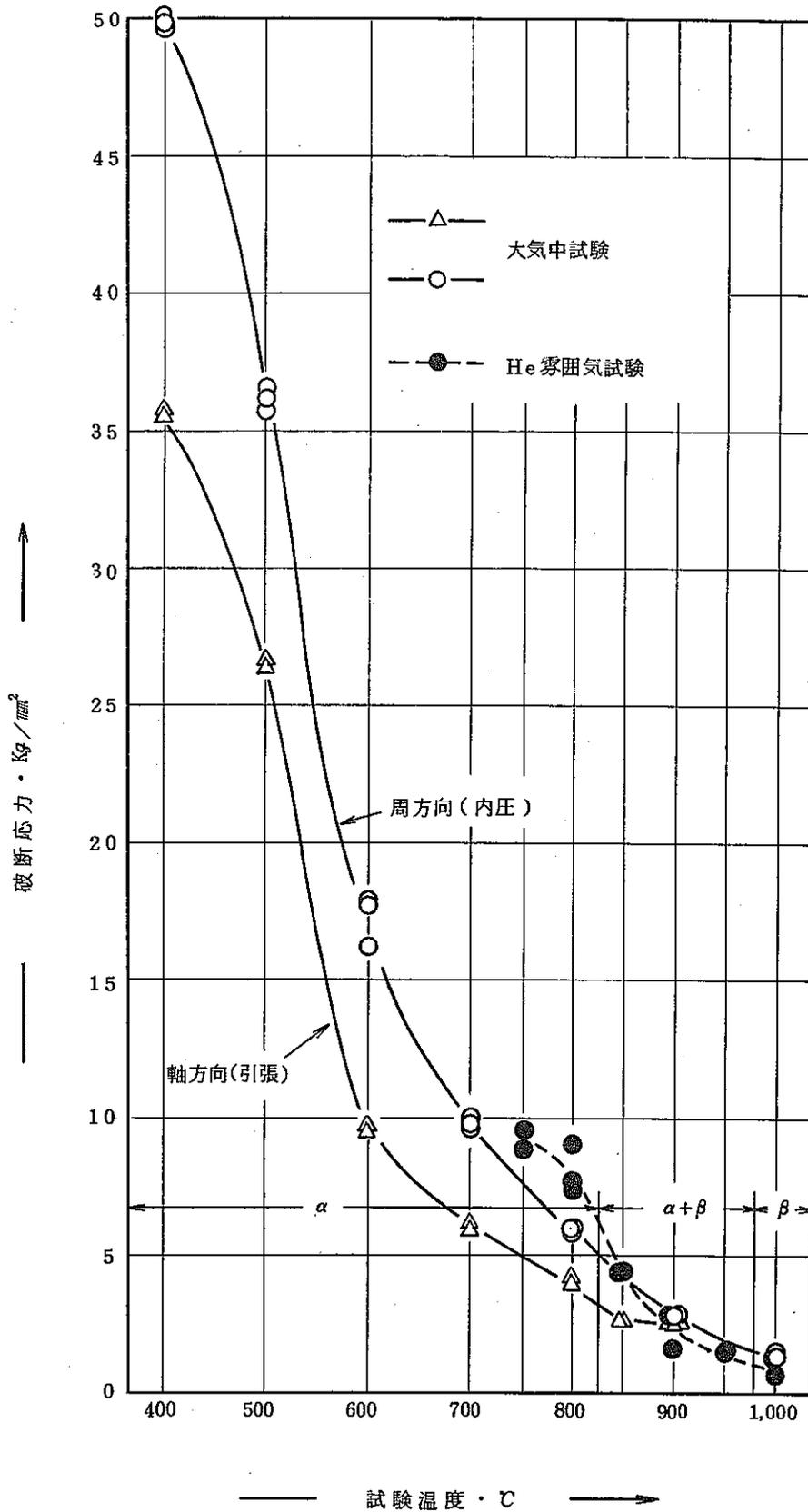


図2 試験温度による破断応力の変化

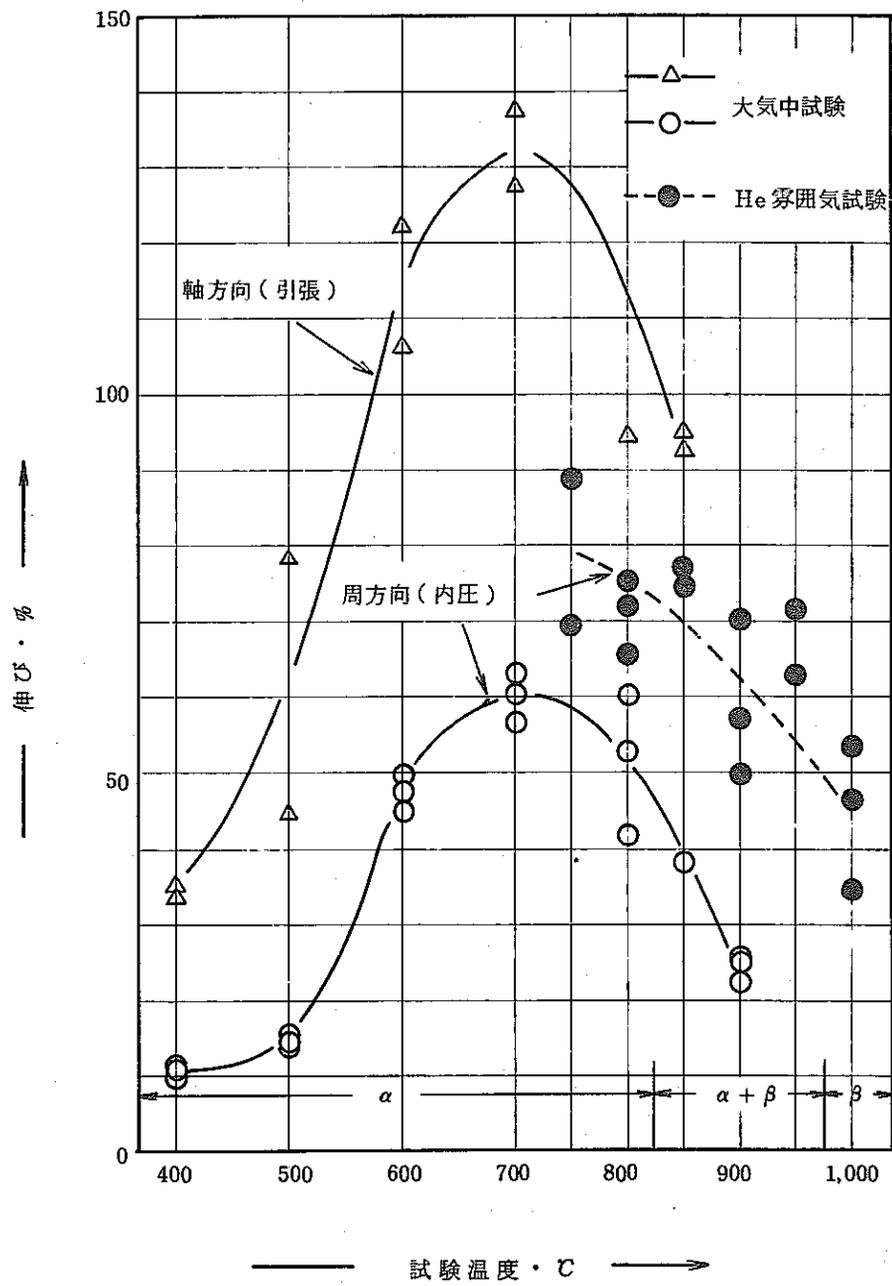


図3 試験温度による伸びの変化

もほぼ似た傾向を示す。

一方、ヘリウム雰囲気試験での伸びは大気中よりも大きな値を示すが、各温度共試験毎に値が変動して、相変態の影響が大きいと思われる。この様に750℃～1,000℃の温度範囲にみられる値のバラツキは破裂応力よりも周伸びの方が大きい。したがって、周伸びは酸化によって低下し、また相変態の影響と思われる値のバラツキは酸化によって小さくなる。

3-3 試験片の外観

1,000℃までの内圧破裂試験後の試験片外観を写真1に示す。大気中試験では800℃から表面の酸化被膜が白色化し、1,000℃になるとそれがさらに著しくなり、また剝離を起すので周伸びや肉厚減少などが測定出来ない。

ヘリウム雰囲気試験では、破裂圧の低下する高温になるにしたがって破裂開口は小さく成っており、破裂部形状が加圧ガスの蓄積エネルギーに依存することがわかる。

また、1,000℃では表面がかなりあれた状態になる。

3-4 破裂応力に及ぼす加圧速度の影響

800℃、900℃、1,000℃の各試験温度における破裂応力と加圧速度の関係を図4に示す。

この試験では加圧速度を開始から破裂までほぼ一定の速度で行なったので、破裂直前でのびずみ速度はかなり大きいと思われる。各温度共破裂応力は加圧速度が大きくなると上昇し、1,000Kg/cm²/minで加圧した場合は10Kg/cm²/minで加圧した時の約2倍の値になる。おそらく他の試験温度でもこの傾向は同様と思われる。そこで〔3-1項〕で述べた試験温度が750℃～800℃でヘリウム雰囲気試験での破裂応力が大気中試験の値よりも大きくなった点に加圧速度の影響をあてはめてみたのが図5である。大気中試験の800℃における加圧速度は約40Kg/cm²/minであるからヘリウム雰囲気試験も同じ速度で行なつたと仮定すると応力は大気中の値にほぼ近くなる。このことから800℃までの大気中における酸化は破裂応力を僅かに上昇させるが、大きくは影響しないと思われる。

Busby⁽²⁾やWaddell⁽³⁾らがそれぞれ異なる加圧速度で行なつた内圧破裂試験の結果と比較して加圧速度が100Kg/cm²/minの場合の結果を図6に参考として示す。

3-5 周伸びに及ぼす加圧速度の影響

周伸びと加圧速度の関係を図7に示す。周伸びは各試験温度毎にそれぞれの加圧速度で値が異なり、とくに10Kg/cm²/minと1,000Kg/cm²/minでの変化が大きい。800℃と1,000℃では加圧速度の増加とともに周伸びは低下する。しかし900℃にその傾向はなくほぼ一定である。

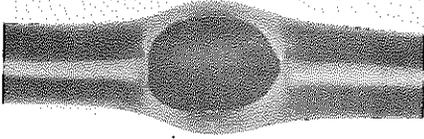
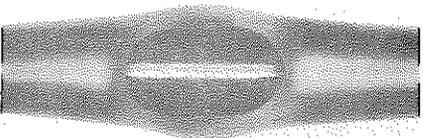
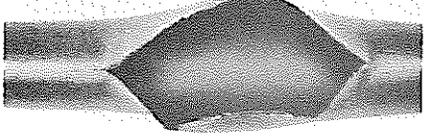
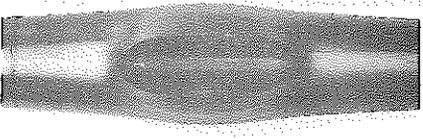
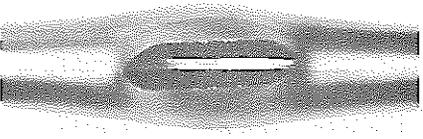
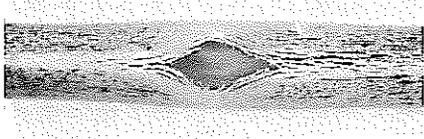
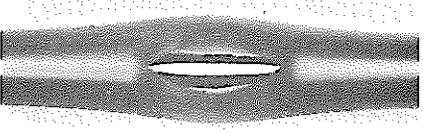
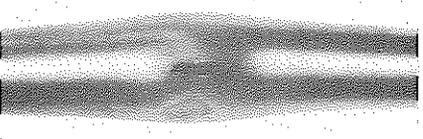
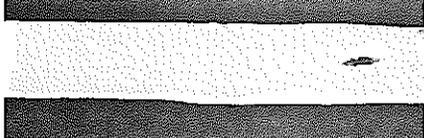
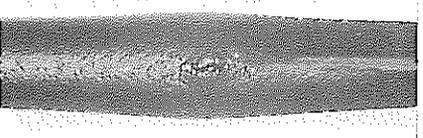
大 気 中 試 験 片	試 験 温 度	He 雰 囲 気 中 試 験 片
	700 ℃	
	750 ℃	
	800 ℃	
	850 ℃	
	900 ℃	
	950 ℃	
	1,000 ℃	



写真1 試験雰囲気を変えた試験片の破裂形状(700℃~1,000℃)

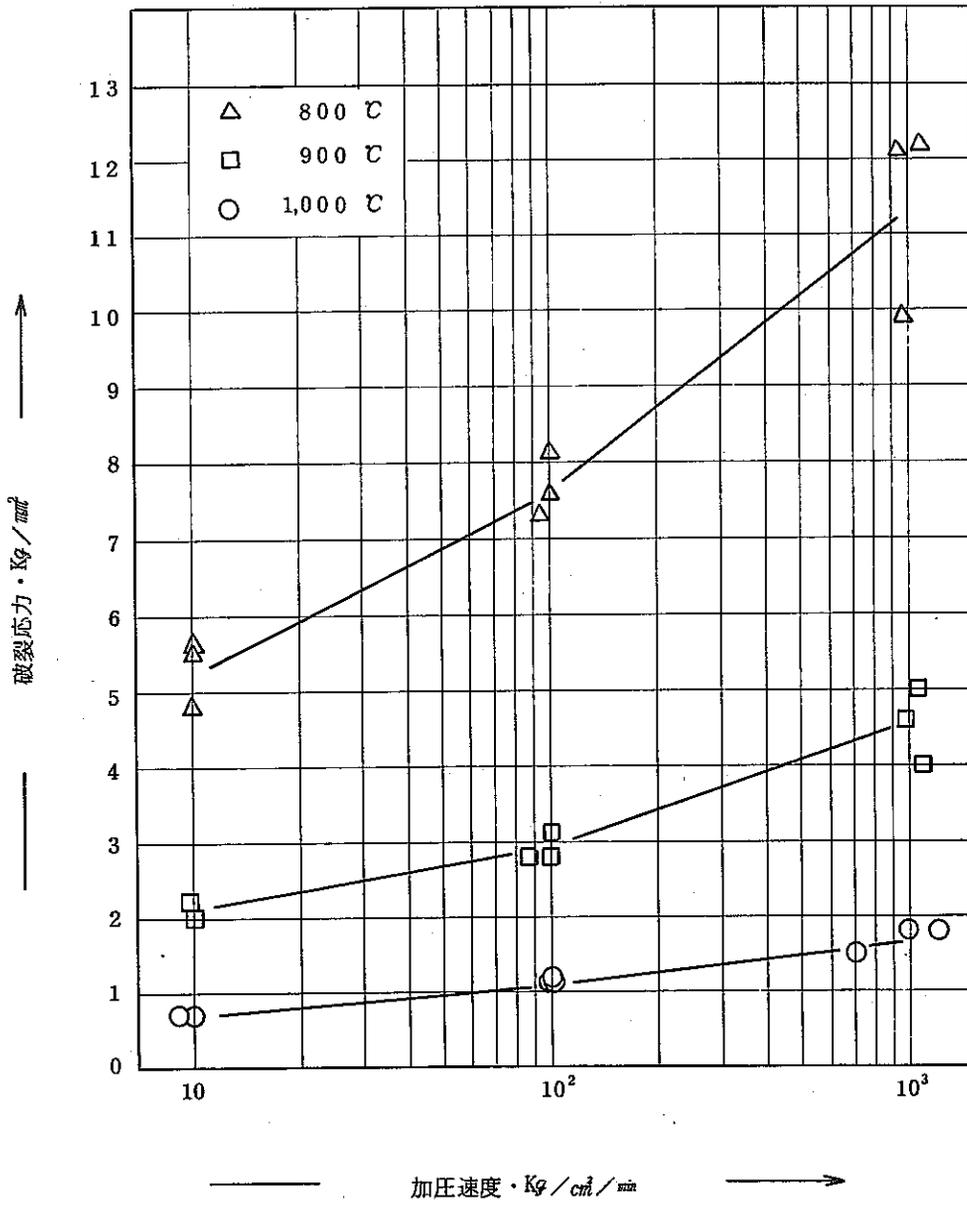


図4 破裂応力に及ぼす加圧速度の影響

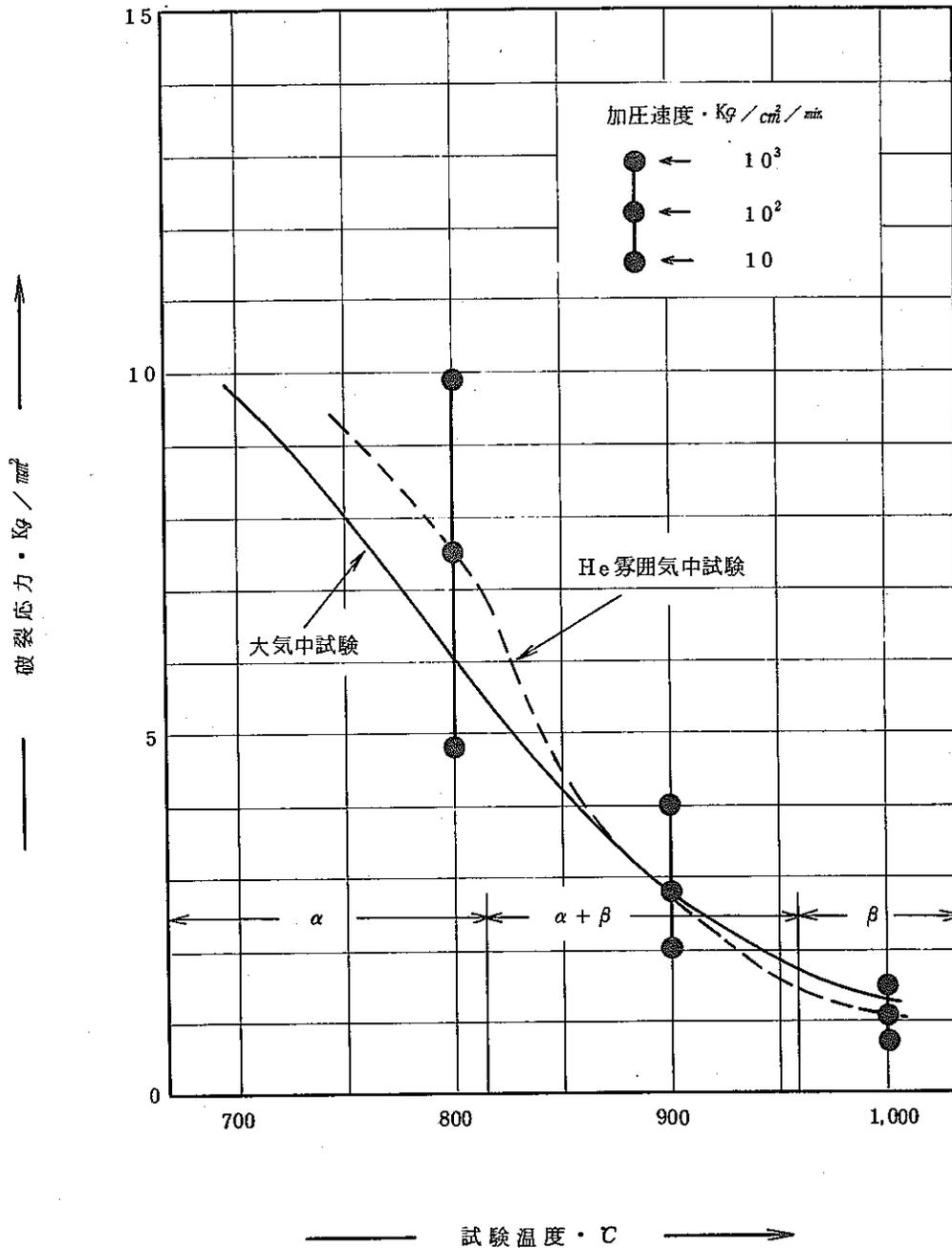


図5 加圧速度と破砕応力の関係

- △ Busby . 30~300Kg/cm²/min. Ar加圧/Ar雰囲気. ジルカルイ-4
- Waddell. 3.5~4.0Kg/cm²/min. " " "
- 神谷 . 100Kg/cm²/min. He加圧/He雰囲気. ジルカルイ-2

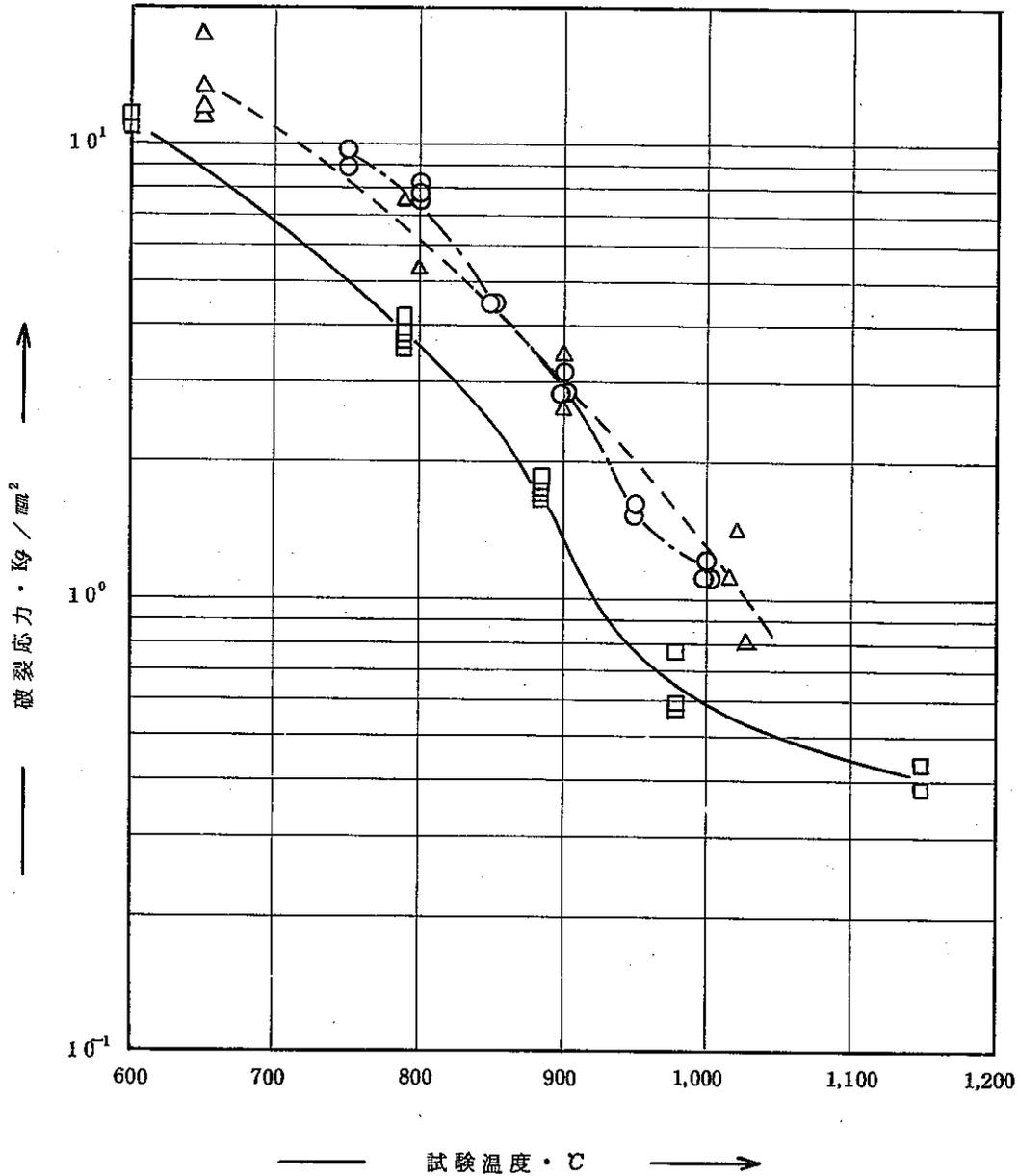


図6 静的内圧破裂試験における温度と応力の関係

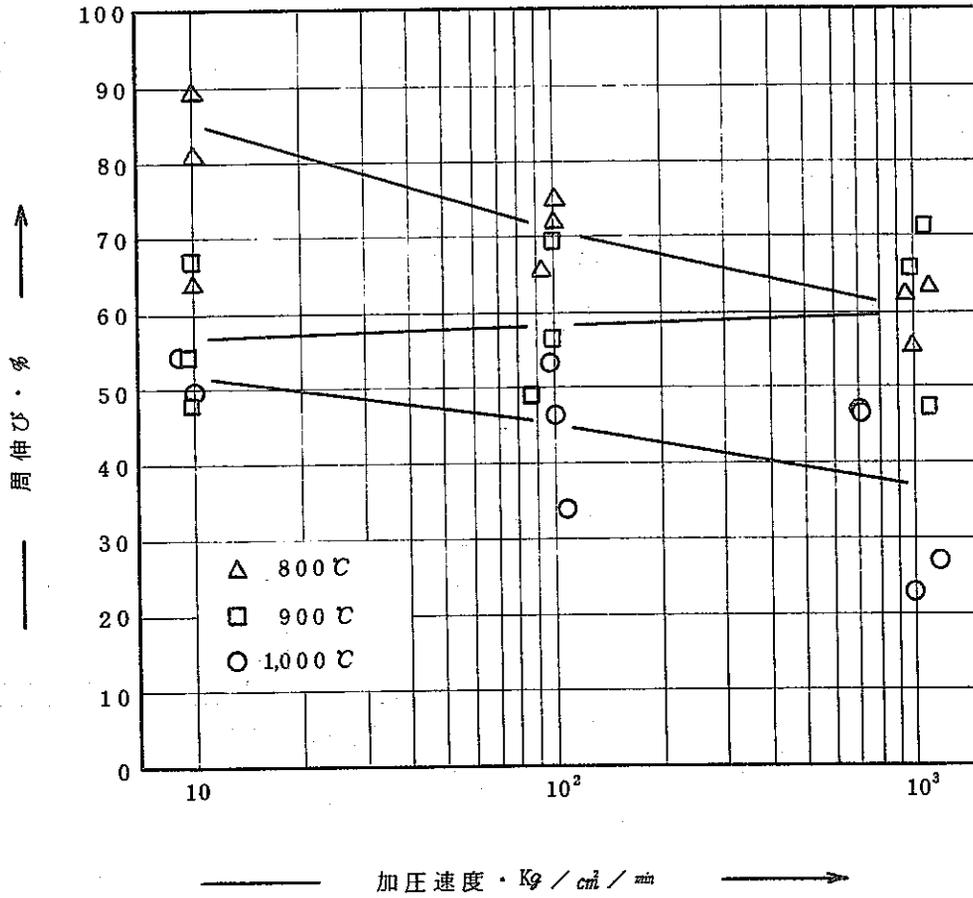


図7 周伸びに及ぼす加圧速度の影響

図 8 に Busby・Waddell らの結果と比較して周伸びの変化を示す。それぞれ、温度毎に値はバラついているが大きくは 40%~80% の範囲に分布しておりほぼ似た傾向を示している。

3-6 破裂後の試験片外観

加圧速度を変えた試験の破裂後の試験片外観を写真 2 に示す。加圧速度が増加すると破裂圧力が上昇して加圧ガスの蓄積エネルギーが大きくなるために破裂開口も大きくなる。また、試験温度が高くなるほど破裂圧は低くなるので破裂開口も小さくなっている。しかし、1,000℃、1,000 Kg/cm²/min 加圧で試験したものはかなり大きな開口を示す。

3-7 肉厚分布と加圧速度の関係

破裂部横断面の肉厚減少を 9 点について測定し、その分布と加圧速度の関係を図 9 に示す。各試験温度とも肉厚の分布は試験毎に異なっており加圧速度の違いによる傾向はみられない。しかし 900℃では 800℃、1,000℃に比べると破裂部に近い位置での減少に対して、その反対側にあたる部分はあまり減少しない局部変形となっている。これも $\alpha + \beta$ 相領域温度での変形挙動の特長と思われる。

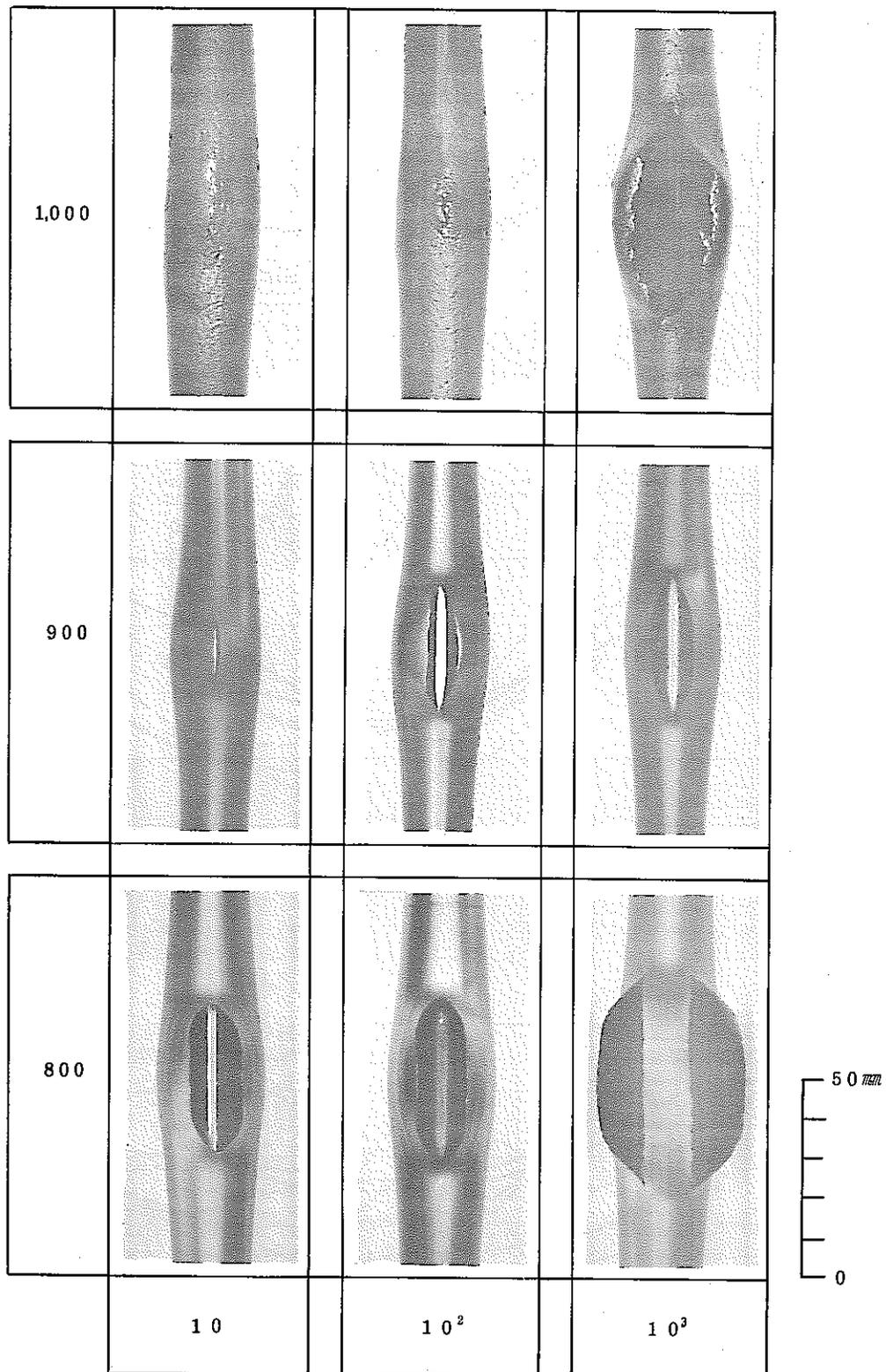
3-8 肉厚減少と周伸びの関係に及ぼす加圧速度の影響

肉厚減少の平均値と周伸びの関係を図 10 に示す。その分布をみると、温度ごとにおよそ 3 つの帯域(斜線部)に分れ、それぞれが 1/2 の線の近くに位置している。800℃と 1,000℃では加圧速度が大きい程、周方向と肉厚方向の変形量は小さくなるが 900℃にその傾向はない。しかし、900℃では周伸びに対する肉厚減少の割合は常に他の 2 つの温度の場合よりも大きい。また 800℃ではほとんどが 1/2 の線よりも下方に分布しているが、これはジルカロイ管のもつ異方性により周方向変形に対する肉厚減少の寄与率が小さいためと考えられる。 α 相領域である 800℃までの試験片は破裂による変形で長手方向に収縮している。

3-9 肉厚減少と伸びの関係

試験雰囲気や加圧速度を変えて行なった試験の試験片の肉厚減少と周伸びの関係をまとめて図 11 に示す。破線を引いてその分布した状態をみると周伸びに対する肉厚減少の割合は周伸びが 50%前後で最大となっているように見える。

試験温度・℃



加圧速度・Kg/cm²/min

写真2 加圧速度を変えた試験片の破裂形状(800℃~1,000℃)

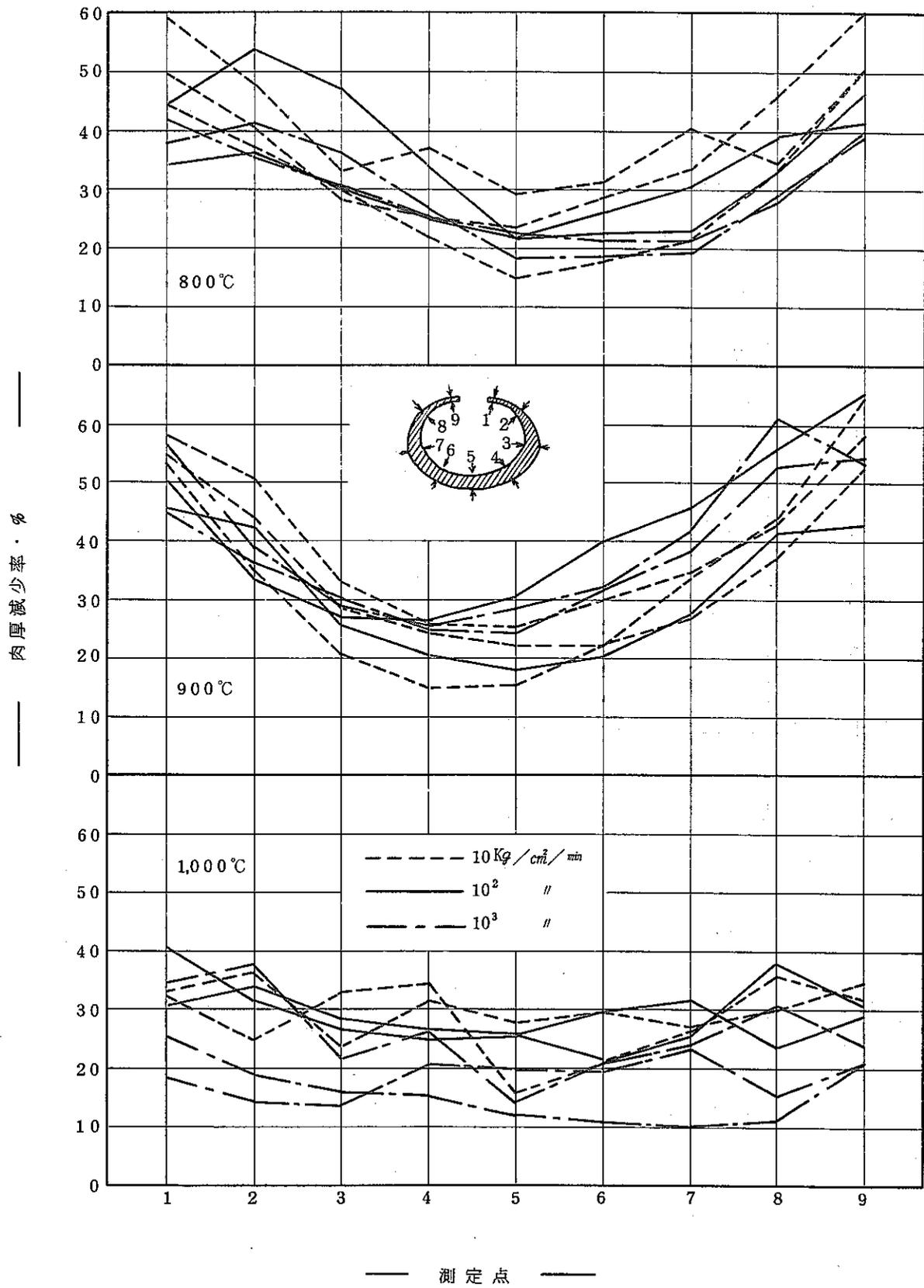


図9 肉厚分布と加圧速度の関係

4 結 論

今回の試験結果から次の知見が得られた。

- (1) ジルカロイ-2被覆管の破裂応力はヘリウム雰囲気において800℃から900℃までの温度で大きく低下する。しかし、大気中の試験では生成した酸化被膜の影響で、急激な低下は見られずほぼ一定の割合で低下する。
- (2) ジルカロイ-2被覆管の周伸びは異方性材料であるために同一条件で試験しても、ヘリウム雰囲気における750℃から1,000℃までの温度で約20%のバラツキが生じる。しかし、大気中の試験では生成した酸化被膜の影響で周伸びは大きく減少し、バラツキも小さくなる。
- (3) 加圧速度の破裂応力におよぼす影響は800℃(α 相)900℃($\alpha+\beta$ 相), 1,000℃(β 相)の各温度において、加圧速度の増加と共に破裂応力は大きくなり1,000 Kg/cm²/minの破裂応力は10 Kg/cm²/minのその約2倍である。
- (4) 加圧速度の周伸びに及ぼす影響は800℃, 1,000℃の各温度において加圧速度の増加と共に周伸びは減少し、1,000 Kg/cm²/minでの周伸びは10 Kg/cm²/minのときよりも約20%減少する。しかしながら、900℃における周伸びは加圧速度に影響されずほぼ一定である。
- (5) 試験片破裂部の開口面積は温度が高くなると小さくなる。そして加圧速度が違っても、この傾向は変わらないが、速度が大きい程、同一温度での開口面積は大きい。
- (6) 破裂部横断面の平均した肉厚減少率は、その部分の周伸びのおよそ半分程度である。これはHobson⁽⁴⁾らの試験から推定できる結果と一致する。
- (7) 900℃($\alpha+\beta$ 相)の試験温度で破裂した管の横断面の肉厚分布は他の温度の場合とは異なり、破裂部近くでの減少が大きい局部変形である。

5 あ と が き

ジルカロイ-2被覆管の高温での耐圧挙動を見るために前回の大気中試験の結果から、とくに周伸びに対する酸化の影響が大きい800℃~1,000℃について不活性雰囲気での内圧破裂試験を加圧速度などの条件を変えて行ない、他の文献と比較してもほぼ納得できる結果が得られた。しかしながら、装置の性能などの制限から1,000℃までの試験にとどまった。今後は機会あるごとに、より高温での試験を行ない、内容の充実をはかる必要があると思われる。

おわりに本試験を行なうに当たり資料の提供と助言を頂いた、小原勝昭氏(計画管理部)と試験片の作製や金属組織写真撮影などに多くの協力を頂いた照沼宏明、鈴木善四郎、坪茂、吉村光彦、田中康正、小幡真一の各氏に厚く御礼申し上げます。

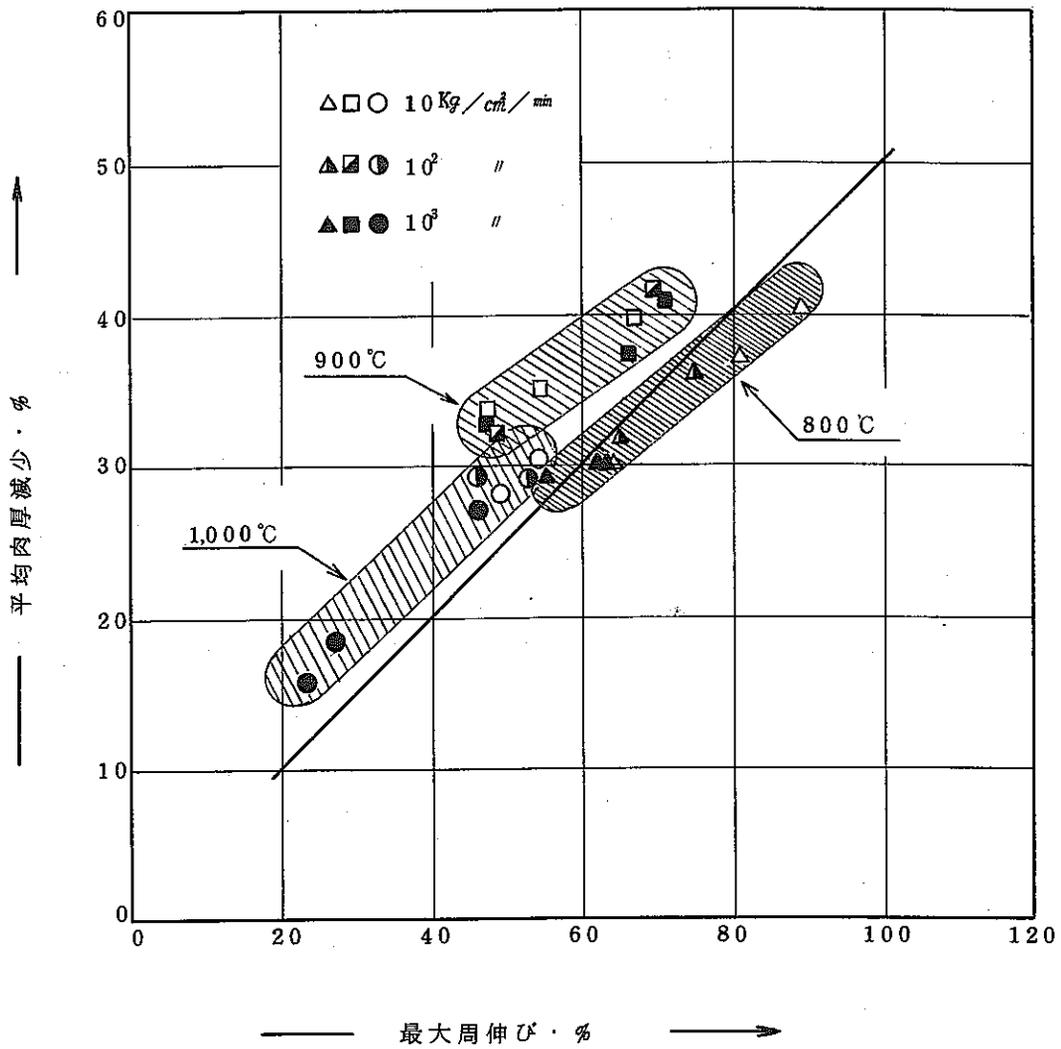


図10 平均肉厚減少と周伸びに及ぼす加圧速度の影響

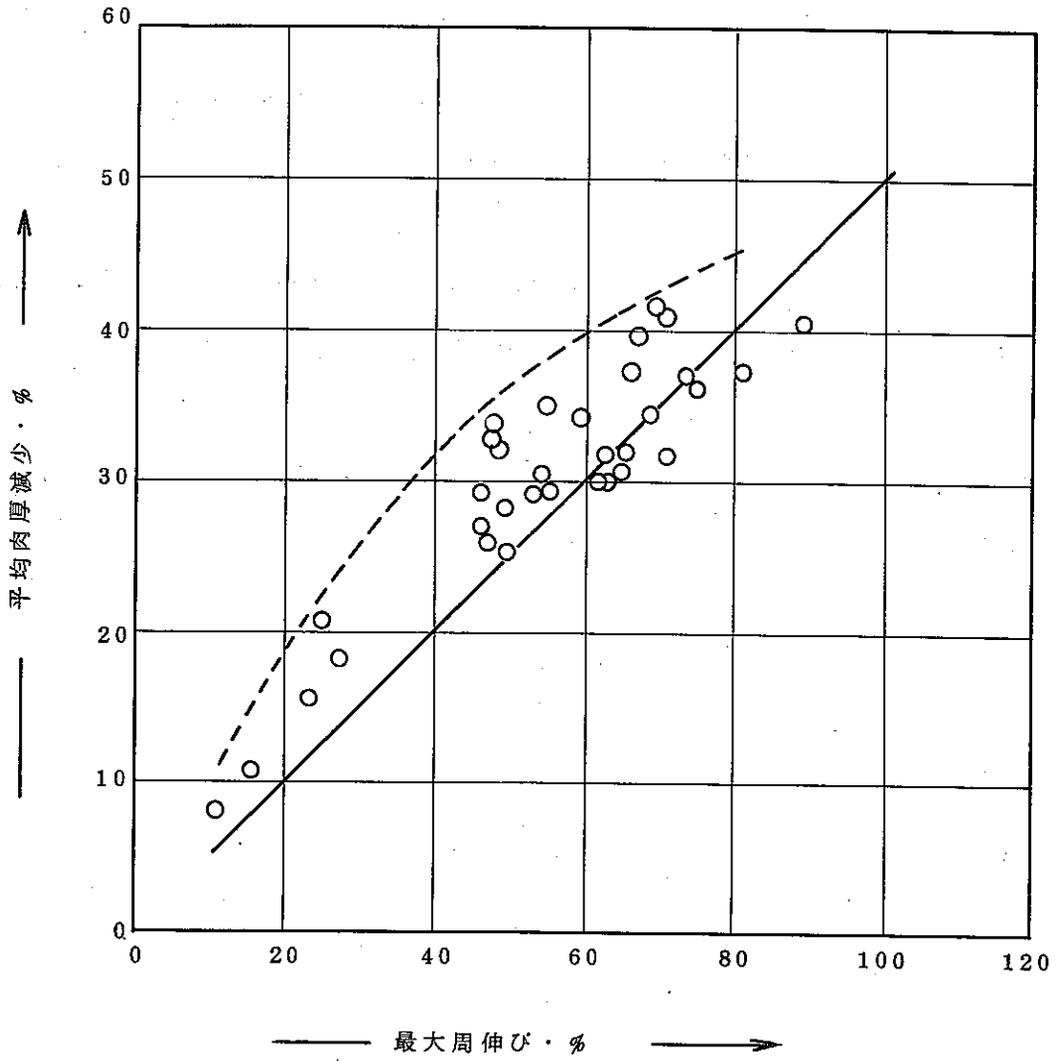


図11 平均肉厚減少と周伸びの関係

6 参 考 文 献

- (1) J. Intrater, "Dilatometric Investigation of Vacuum Melted Zircaloy-2", Zirconium Highlights, WAPD-ZH-7, May 1958.
- (2) C.C. Busby, K.B. Marsh, "High Temperature Deformation and Burst Characteristics of Recrystallized Zircaloy-4 Tubing", WAPD-TM-900 January 1970.
- (3) R.D. Waddell and P.L. Rittenhouse, "High-Temperature Burst Strength and Ductility of Zircaloy Tubing", ORNL-TM-3289, March 1971.
- (4) Hobson, D.O and P.L. Rittenhouse, "Embrittlement of Zircaloy-Clad Fuel Rods by Steam During LOCAL Transients", Paper: ORNL: 4758, Jan. 1972.

7 付 録

表2 試験試料の外径および肉厚寸法

試料番号	外 径 (mm)			肉 厚 (mm)		
	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値
S653-2	16441	16430	16437	0.906	0.862	0.882
S653-4	16435	16432	16434	0.901	0.863	0.882
S653-5	16437	16427	16433	0.910	0.850	0.881
S653-6	16434	16430	16433	0.910	0.855	0.882
S653-7	16437	16431	16434	0.911	0.850	0.881
S653-8	16435	16431	16434	0.902	0.858	0.878
S653-9	16434	16426	16430	0.891	0.858	0.876
S653-10	16429	16424	16427	0.891	0.855	0.877
S653-11	16429	16423	16426	0.892	0.861	0.878
S653-12	16429	16427	16430	0.888	0.868	0.879
S653-13	16434	16430	16431	0.891	0.870	0.880
S653-14	16435	16432	16434	0.899	0.860	0.880
S653-15	16435	16425	16432	0.900	0.858	0.879
S653-16	16435	16424	16428	0.900	0.857	0.878
S653-17	16431	16417	16424	0.891	0.860	0.876
S653-18	16428	16417	16423	0.885	0.860	0.874
S666-1	16421	16409	16418	0.885	0.858	0.872
S666-3	16430	16426	16429	0.900	0.853	0.876
S666-4	16429	16424	16426	0.900	0.855	0.877
S666-5	16430	16425	16427	0.898	0.860	0.880
S666-6	16428	16424	16426	0.899	0.850	0.877
S666-7	16427	16424	16425	0.892	0.861	0.877
S666-8	16429	16423	16427	0.890	0.862	0.877
S666-9	16431	16427	16430	0.900	0.863	0.878
S666-10	16436	16428	16432	0.901	0.863	0.880
S666-12	16433	16428	16430	0.900	0.854	0.878
S666-13	16435	16425	16430	0.918	0.839	0.877
S666-14	16435	16426	16431	0.913	0.849	0.879
S666-15	16437	16426	16433	0.916	0.844	0.880
S666-16	16433	16426	16429	0.911	0.842	0.879
S666-17	16431	16425	16429	0.914	0.845	0.880
S666-18	16435	16428	16432	0.906	0.854	0.879
S666-19	16432	16430	16431	0.911	0.843	0.880

表3 ジルカロイ-2管の高温内圧破裂性質(He加圧/He雰囲気)

(応力比; σ 軸方向/ σ 周方向=0.5)

試験片番号	試験温度 ℃	加圧速度 Kg/cm ² /min	破裂圧力 Kg/cm ²	破裂応力 Kg/mm ²	周伸び %	肉厚減少 %
S653-2	750	98	1125	9.6	88.5	—
S666-1	750	94	1028	8.8	68.9	34.2
S666-3	800	93	840	7.3	65.3	31.8
S666-14	800	99	555	4.8	63.7	30.1
S653-4	800	10	580	5.5	89.1	40.2
S653-5	800	10.1	57.5	5.6	80.6	37.3
S653-6	800	101	838	8.1	74.8	36.1
S653-7	800	943	1255	12.1	62.2	29.6
S653-8	800	1,090	127.5	12.2	62.7	29.6
S666-15	800	960	1128	9.9	55.2	29.3
S666-4	850	92	50.8	4.4	73.7	36.7
S666-5	850	92	51.3	4.4	76.2	—
S653-9	900	9.6	23.0	2.2	54.4	34.8
S653-10	900	9.8	22.5	2.2	66.7	39.6
S666-16	900	9.8	22.5	2.0	47.7	33.7
S666-6	900	86	31.8	2.8	48.8	31.9
S666-7	900	98	32.5	2.8	56.4	—
S653-11	900	99	32.8	3.1	69.5	41.5
S653-12	900	1,050	52.5	5.0	71.3	40.7
S653-13	900	970	48.5	4.6	65.7	37.3
S666-17	900	1,095	46.0	4.0	47.3	32.7
S653-14	1,000	9.0	7.0	0.7	54.0	30.4
S666-18	1,000	10	8.3	0.7	49.2	28.2
S666-10	1,000	107	12.5	1.1	33.9	—
S666-12	1,000	96	12.5	1.1	52.9	29.1
S653-16	1,000	100	12.5	1.2	46.3	29.2
S653-15	1,000	1,190	19.0	1.8	27.2	18.4
S653-17	1,000	975	18.8	1.8	22.7	15.7
S653-18	1,000	700	21.9	2.1	46.4	27.0
S666-19	1,000	700	17.5	1.5	46.9	25.9