

PNC TJ9055 95-006

# 高温ラブチャ基礎試験

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1995年 3月

川崎重工業株式会社

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

1995年 3月

# 高温ラプチャ基礎試験

吉江 伸二\*、岩崎 守弘\*  
前川 勇\*\*、高田 孝\*\*  
矢野 和隆\*

## 要 目

FBR蒸気発生器(SG)内で、万が一、ナトリウムー水反応事故により伝熱管が局所的に高温化すると、強度が急速に低下し破損するいわゆる「高温ラプチャ」が起こる可能性がある。そこでナトリウムー水反応時のリークジェットを火薬トーチにて模擬し、伝熱管内の蒸気流動条件をパラメトリックに変化させた試験を行うことで、高温ラプチャ挙動を把握し、以下の基礎的なデータを取得した。

試験は、予備試験と本試験から成り、それぞれ以下の知見を得た。

1. 予備試験火薬トーチ燃焼確認のため、静特性試験を実施し、本試験における燃焼条件(ロケットチャンバー内圧 約  $6 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ 、火炎持続時間 約 10 sec)を設定した。
2. 本試験

### 2.1 热流束を算定するための中実棒を用いた試験

伝熱管内面の温度履歴を計測しない他の試験の参考とすることを目的とし、管肉厚を貫流する熱量計算から、管外熱伝達率算定の基礎となるデータを得た。

(本要旨は、次頁に続く)

---

本報告書は、川崎重工業株式会社が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。

契約番号：06C4526

事業団担当部課室：大洗工学センター、安全工学部、プラント安全工学室

事業団担当者：栗原 成計

\*川崎重工業株式会社、原子力本部、開発部 \*\*同 技術部

## 2.2 伝熱管内部流体としてN<sub>2</sub>ガスを封入した試験

試験体外表面の温度は、最大 650°Cで、火炎側とは 180° 反対の試験体外表面の温度は、 500°Cであり周方向に 150°Cの温度差を約 20 sec 継続した。試験体は、破損しなかった。

## 2.3 伝熱管内部流体として飽和蒸気を封入した試験

試験体は、火炎温度立ち上がり後、約 6.5 secで大破損（ギロチン破断および大変形メクレ）した。火炎最大温度1200°C、試験体外表面温度は、平均約 1150°Cであった。

## 2.4 伝熱管内部流体として飽和蒸気を流し、管内を冷却した試験

直径約 2 mm の開口が生じた。2.3 項に述べた試験の破損状況と比較して、伝熱管内の蒸気流による冷却効果が破損に与える影響は、顕著であることが確認できる貴重なデータを取得できた。

以上の試験に基き、実験により取得した試験体外表面を再現するような管外熱伝達率 ( $\alpha_o$ )を汎用伝熱解析コード TRUMPを用いて解析し推定した結果、1000～5000 kcal/m<sup>2</sup>hK であった。ナトリウム－水反応時のリークジェットの場合と比較してやや低めと予測されるものの同一オーダーであり、火薬トーチによる模擬性は、成立することが今回の実験で確認された。今後は、試験体内外面の1200°C近傍の時間履歴を精度良く計測する必要のあることがわかった。

## 目 次

	頁
要　旨	i
1. 序	1
2. 試験の目的	1
3. 実験装置	2
4. 計測位置	3
5. 実験パラメータ	4
6. 実験結果と考察	4
6.1 予備試験	4
6.2 本試験の結果と考察	5
7. 伝熱管表面熱伝達率の推定	10
7.1 概　要	10
7.2 計算体系・条件	10
7.3 計算結果	12
8. まとめと今後の課題	13
謝　辞	14
参考文献	14
写真集	

## 1. 序

FBR 蒸気発生器(SG)内で、万一、ナトリウムー水反応事故により伝熱管が局所的に高温化すると、強度が急速に低下して破損するいわゆる「高温ラプチャ」が起こる可能性がある。伝熱管の高温ラプチャ挙動を把握し、この種の事故時の評価および評価手法を確立するための有効なデータを蓄積していく必要がある。とりわけ、ナトリウムー水反応時のリークジェット（高温水素火炎）による伝熱管温度上昇と内部圧力条件下の伝熱管構造の強度低下に伴う歪上昇および伝熱管内部の蒸気が伝熱管破損に寄与するエネルギーとの相関性を把握することが基本となる。このためには、火炎と伝熱管内の蒸気流を実験で再現し、可視化を含めた基本的な挙動の把握が第一に必要となる。

本試験は、ナトリウムー水反応時の火炎を火薬トーチにて模擬することによって、伝熱管内の蒸気流動条件をパラメトリックに変えて試験を実施し、実機の冷却管を対象に高温ラプチャ挙動を把握し、基礎的なデータを取得することを目的とする。

## 2. 試験の目的

ナトリウムー水反応時に発生する火炎温度としては、約 1200°Cとなることが確認されているが、これを火薬トーチにて実現し、伝熱管試験体のラプチャ挙動の基礎データを取得することを目的として、高温ラプチャ基礎試験を実施する。

今回の実験は、火薬トーチと蒸気を組み合わせた初めての実験であり、挙動の基本を把握することを第一の目的とし、試験の進捗によって、定量化を計って行くものとした。以下に具体的な目的を掲げる。

- (1) 火炎と内部に蒸気流を有する実機伝熱管の組み合わせにおいて、火炎温度が1200°C以下で破損するか否かの把握
- (2) 伝熱管温度履歴と破損時の内圧履歴の取得
- (3) 項目(2) と伝熱管破損モードの相関性の把握
- (4) 伝熱管構造健全性評価に必要な火炎の伝熱管への入熱を評価する

- (5) 伝熱管内の流動条件の変化による伝熱管の高温ラプチャによる破損状況の違いを把握
- (6) 今後の伝熱管破損実験のために、火薬トーチの噴出ノズル径、火炎持続時間および火炎と伝熱管外表面との相対位置の把握

### 3. 実験装置

#### (1) 装置と安全防護

実験装置は、既設の蒸気発生装置と今回の実験に合わせるために改造した試験部とからなる。実験装置の系統概念図をFig.3.1、蒸気系統図をFig.3.2、主要部分の装置図をFig.3.3にそれぞれ示す。伝熱管内の蒸気流は、系統に設けたオリフィス付き空気作動弁および電磁弁にて制御し、所定の蒸気条件が得られるようにした。試験体の支持は、火薬トーチからの火炎噴流反力に十分耐え得るようにし、装置との取り合いはフランジ構造にて行うものとする。火薬トーチと試験体設置状況を写真集のPhoto 1に示す。

実験の安全遂行上の措置として、系統内の異常な圧力上昇に対しては、設定圧の7%を越えた時点で安全弁が作動するようにし、伝熱管破損により万が一、破損部が碎片となり飛翔することを想定して、試験体部全体を鋼製ネットによって防護することとし、かつ試験時には総員が退避することを義務付けた。

今回の実験は、火薬トーチを使用した初めての実験となるので、実験実施上の安全に対し、万全を期した。

#### (2) 試験体

試験体としての伝熱管は、 $^{OD} 31.8 \times ^{I.D.} 3.8 \text{ mm}$  (Mod.9 Cr-1Mo)を一貫して使用した。試験体全長は、別に実施された高周波加熱試験と合わせて800 mmとした。試験体のうち試験部の領域としては、火薬トーチ・火炎の直径を約100 mm（実績）として、その倍を想定し約200 mmと設定し、熱電対設置計画等に反映した。

伝熱管の肉厚は、実機は、3.8 mmが想定されるが既設蒸気発生条件の制限から最高圧力  $100 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$  にて実機の破損相当となるように伝熱管外形を減肉し、1.3 mm（動燃殿指示）とした。本肉厚は、破損しうることを想定したもので、周方向応力が等価として算定した破損圧力は、約  $290 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$  ( $\sigma = PD/2t$  が等しいことから、 $P=P_0 \times t/t_0 = 100 \times 3.8/1.3 = 290 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ ) 相当となるので、実機圧力が  $175 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$  とした場合は 1.7 倍の裕度で破損しやすい条件設定となる。

試験体外観を Photo 2 に、減肉試験体部を Photo 3 に示す。

### (3) 火薬トーチ

試験体外表面に約  $1200^\circ\text{C}$  にて噴射することのできる火薬トーチを設計、製作する。噴射継続時間は、予備試験により実際に伝熱管が破損する時間を参考して定めるのが通常であるが、今回は、実績のある構造とした。火薬本体は、ロケット用固体燃料、コンポジット推進薬で予備試験によって、燃焼速度  $1 \sim 2 \text{ mm/s}$ 、内圧  $6 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ 、持続時間 約 10 sec とした。尚、火炎噴出形状は、トーチ噴出ノズルにて制御可能な構造とした。

火薬トーチにはトリガ信号により着火し、試験体の対象領域に火炎を噴射させて計測を行う。また、火薬トーチの火炎温度は、約  $1200^\circ\text{C}$  を基準とするように、実験で定めて行くものとした。

## 4. 計測位置

試験体部の計測位置を Fig.3.4 に示す。火炎温度  $T_1$ 、伝熱管外表面温度  $T_2$  および管内蒸気温度  $T_5$  は、試験部中央部にて固定バンドにて熱電対を設置した。固定バンドは、伝熱管が破損する場合、破損後に火薬トーチ、火炎により溶融した。今後、長時間加熱を行う場合は、熱電対をスポット溶接する必要がある。

Fig.4 中の表に示すように、火炎に対しては、シース R 型  $1.6 \text{ mm}$  にて測定し、最大  $1300^\circ\text{C}$ 、応答時間 約  $0.9 \text{ sec}$  である。試験体表面および蒸気温度は、シース K 型  $1.0 \text{ mm}$  にて測定し、最大温度  $1000^\circ\text{C}$ 、応答時間 約  $0.5 \text{ s}$  である。シース熱電対の構造を Fig.3.5、3.6 に示す。

試験体部の熱電対取り付け状況をPhoto 3 に、試験体の装置取り付け状況をPhoto 4 に示す。

データは、トリガ信号を起点として、全チャンネルを同時にレコーダに収録する。計測ポイントは、7 ポイントとした。

## 5. 実験パラメータ

実験は、火薬トーチを設計するための予備試験と本試験があり、本試験は4 ケース実施した。各試験条件を Table 5.1に示す。今回の実験では管内条件としてN<sub>2</sub> ガス（流れなし、室温）、飽和蒸気（流れなし、飽和温度 310°C）および飽和蒸気（流速；13 m/s、飽和温度 310°C）の3 種とした。管内圧力は、100kg/cm<sup>2</sup>.g に固定した。（Test No.C502～C504）

N<sub>2</sub> ガス試験においては、伝熱管外表面と火薬トーチ間距離を設定可能な最大に引き離し、伝熱管最小温度を見極めることとした。

また、今回の実験では、伝熱管内面に熱電対の埋め込みによって破損を促進させないように、内面温度を測定しないこととした。一方、管外熱伝達率のオーダーを試算するため、熱流束を評価する必要があり、管内表面温度に相当する温度を中実棒を用いて、測定する実験(Test No.C501)を別に実施した。(Table 5.1参照)

## 6. 実験結果と考察

### 6.1 予備試験

火薬トーチ燃焼状況を確認するため、計2回の静特性試験を実施する。静特性試験の結果により、火炎の噴出速度、放射状況等を調べ、高温ラブチャ試験に使用する火薬量およびロケット成型形状の設計に反映した。今回の試験ではロケット成型構造を実績のあるものとし、ロケット・チャンバー内圧を約 6 kg/cm<sup>2</sup>.g とし、火炎持続時間は、約 10 sec を基準とした。

予備試験で得たロケット・チャンバー内圧と燃焼速度の相関関係を Fig.6.1に、内圧の平均時間変化を Fig.6.2に示す。

火炎持続時間を今よりも長くするに当たっては、推進薬成型殻の厚みと長さを大きく取れば良いが、燃焼特性を確認することが必要となる。

## 6.2 本試験の結果および考察

総員退避後、秒読みを開始し、「ゼロ」の合図により電磁弁（開）のスイッチを作動させ、火薬トーチのイグナイターに電気信号を入れる。データの保存は、この電気信号をトリガーとして時刻統一をして保存するが、データ出力時は、現象の説明をわかりやすくするため、起点として火炎温度（T<sub>1</sub>）の立ち上がりを持って時刻ゼロとした。

以下に各試験ごとに説明する。

### (1) 熱流速を設定するための中実棒を用いた試験 (Test No.C501)

計測点は、Table 5.1 に示す。この試験により管肉厚を貫流する熱量を計測し、他の伝熱管内面の温度履歴を計測していない試験の参考とすることが目的であり、最終的に管外熱伝達率算定の基礎となるものである。内圧100 kg/cm<sup>2</sup>.gでの等価破損肉厚は、想定により 1.3 mm としており、本来中実棒内の熱電対埋め込み深さも肉厚 1.3 mmを残して挿入すべきところ、1.3 mmの機械加工精度と測定精度に限界があって、今回は、暫定的に深さ、すなわち、肉厚相当分を2.35 mm（機械加工後の測定結果による）として実施することとした。

各点の温度履歴をFig.C501-1に示す。中実棒表面には温度センターを示す縞模様が現れ、ディンプル状のくぼみは現れていない。試験体管外表面写真をPhoto 5 に示す。

火炎温度は 10 sec後に1600°Cに到達し、13 secで火薬トーチの噴射は終了した。肉厚 2.35 mmを隔てた T<sub>6</sub>点では、約 14 sec後に過渡現象が飽和しており、肉厚 1.3 mmでは、少なくとも 10 ~ 12 secの時間帯では飽和すると思われる。すなわち、この時刻帯において準定常的な温度差 (T<sub>2</sub>-T<sub>6</sub>)により熱量算定が可能となる。

この第1回目の試験において、火薬トーチと伝熱管外表面距離を初期設定(100 mm)し、伝熱管外表面において1200°Cを越えたため、この次の試験では距離を最大、すなわち伝熱管外表面温度の最小値を定める試験に移行した。

### (2) 内部ガスとしてN<sub>2</sub> ガスを封入した試験 (Test No.C502)

この試験では火薬トーチを試験体外表面より 350 mm 離して試験することにより試験体表面温度が 1200°Cを越えないことを確認し、蒸気試験時の最適間隙（火薬トーチ～試験体間の距離）を設定するため実施した。

各点の温度および圧力履歴を Fig.C502-1 および 2に示す。この試験で、試験体外表面の温度は最大 650°Cで、試験体は破損していない。火炎側とは180 ° 反対の試験体表面温度は約 500°Cで周方向に 150 deg. の温度差が約20 secの間、呈することが示される。

試験体は破損していないので、管内圧力履歴は、100 kg/cm<sup>2</sup>.g で一定である。（圧力履歴は、Fig.C502-3 参照）

この試験結果により試験体表面温度が1200°Cを越えない火薬トーチ～試験体間の距離が存在することが把握できた。試験回数の少ないとによるリスクはあるが、今後の試験では、この距離を内挿的に 150 mm と設定することとした。

### (3) 内部流体として飽和蒸気を封入した試験 (Test No.C503)

本試験において、試験体の伝熱管は、大破損した。各点の温度、圧力履歴を Fig. C503-1～5 に示す。また、試験状況を大破損時点を含み、Photo 6 に、試験後の試験体の破損（ギロチン破断および変形メクレ）状況を Photo 7に示す。更に破損状況のスケッチを概略変形寸法と共にFig.C503-6に示す。

この試験により、破損時刻が明確に取得できた。破損時刻は、火炎温度立ち上がり後、約 6.5 secであった。（Fig.C503-2、管内圧力履歴の突変時刻）大破断後、大気圧に減少するまでの時間は、約 6 secで

ある。火炎温度は最大約1200°C、試験体外表面温度は、最大平均約1150°Cで、火薬トーチ～試験体間距離が150 mmと設定したことは、ほぼ理想に近いことを示した。

#### (4) 内部流体として飽和蒸気を流し、管内を冷却した試験 (Test No.C504)

実験結果は、直径約 2 mm の開口が生じた。各点の温度、圧力履歴をFig.C504-1～4 に示す。試験後の試験体表面の外観を Photo 8に示す。前述のTest No.C503と比較することにより、伝熱管の管内の蒸気流による冷却効果が大きいことが把握できる貴重なデータが取得できた。

ただし、肉厚を実機 3.8 mm に対し1.3 mmに減肉したことが破損挙動に対して等価な現象とは言いにくいため、内圧、肉厚共に実機条件に合わせて実施し、上記2つの試験比較が一般化できるように再現性を含めて、複数の試験を実施することが必要である。

この実験で示されたように、大破損に比べ、2 mm程度の開口では、管内圧力の顕著な低下現象が見られず、圧力履歴のデータからでは試験体破損時刻を見極めにくいことがわかった。一方温度履歴は、圧力に比べ応答が遅れるために、判断を見誤る恐れがあるので今後は、管内の破損域近傍に圧力センサーを設置するか、可視化あるいは音響センサーを外部に設ける等の工夫をして破損時刻を取得することとしたい。

#### (5) 热通過量の算定

Test No.C501の中実棒を用いた試験結果から伝熱管長さ当たりおよび1 時間当たりの熱通過量  $q$  は：

$$q = \frac{\lambda}{\ln(d_o/d_i)} \Delta T$$

$\lambda$  : 热伝導率 ( 30 kcal/mhK [炭素鋼 850°C相当] )

$d_o$  : 外径 ( 26.8 mm )

$d_i$  : 内径 ( 22.1 mm )

$\Delta T$  : ( 700 °C )

ここで管内外の温度差は、Fig.C501-1より準定常として判断した  
10 sec 時点の温度差を読み、約 700 °C と設定した。

これより、

$$q = 7 \times 10^5 \text{ kcal/mh}$$

と算定された。

#### (6) 管内の熱伝達率の算定

管内の熱伝達率  $\alpha_i$  は、Test No. C504の結果を用いて以下のように  
算定される。

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

$$\alpha_i = \frac{\lambda}{d} Nu$$

ここでレイノルズ数  $Re$  は、

$$Re = \frac{v \times d}{\nu}$$

$$= \frac{12.7 \times 3600 \times 24.2 \times 10^{-3}}{1265 \times 10^{-7} \times 3600} \\ = 2.4 \times 10^6$$

プラントル数  $Pr$  は、

$$Pr = \frac{C_p \times g \times \eta}{\lambda} \\ = \frac{1.362 \times 1.27 \times 10^8 \times 904 \times 10^{-6}}{0.468 \times 3600 \times 98} \\ = 0.94$$

以上より

$$Nu = 0.023 \times (2.4 \times 10^6)^{0.8} \times 0.94^{0.4} \\ = 2850$$

$$\alpha_i = \frac{2850 \times 0.468}{24.2 \times 10^{-3}} = 5 \times 10^4 \text{ kcal / m}^2 \text{ hK}$$

## (7) 管外熱伝達率の簡易算定（1次元評価）

相当肉厚が2.35 mm、火薬トーチ～試験体表面間距離が 100 mm  
で本試験条件と異なる条件での算定ではあるが熱通過率は、ほぼ同じ  
と仮定すれば、以下のように管外熱伝達率  $\alpha_o$  が求められる。

すなわち、

$$q = \pi \times d_o \times \alpha_o \times \Delta T$$

これより、

$$\begin{aligned}\alpha_o &= \frac{7 \times 10^5}{\pi \times 26.8 \times 10^{-3} \times 150} \\ &= 5.5 \times 10^4 \text{ kcal / m}^2 \text{ hK}\end{aligned}$$

以上、1次元的に  $\alpha_o$  を算定したものの、伝熱管の代わりに中実棒を用いた実験では、1次元的伝熱状況ではないこと、定常状態となっていないこと更に、火薬トーチ～試験体表面管距離が100 mmの実験結果を同150 mmの実験にも同様に適用したことが評価を過大にした。そこで、定常計算ではなく、現実の伝熱管外表面温度の履歴になるように、管外熱伝達率を可変に振って、過渡解析し管外熱伝達率を絞り込んで行く必要があり、汎用解析コードを用いて、 $\alpha_o$  を推定することとした。これを次章より述べる。

## 7. 伝熱管表面熱伝達率の推定

### 7.1 概要

本資料は平成6年度に行われた高温ラプチャ基礎試験で得られたデータとともに火薬トーチと伝熱管試験体間の管外熱伝達率を汎用伝熱ネットワークコード「TRUMP」にて推定したものである。

その結果管外熱伝達率は 1000~5000(kcal/m<sup>2</sup> h K)であり、他の試験結果(2700 kcal/m<sup>2</sup> h K)とほぼ同じオーダであった。

### 7.2 計算体系・条件

#### (1) 計算体系

Fig.7.1に試験体系を示す。試験は中実棒(SS400,  $\phi$  26.8)に 100mm の距離から火薬トーチ(ノズル径  $\phi$  13)を燃焼させている。今回計算に使用した温度はガス温度として中実棒表面近傍の温度(T2)、中実棒表面から 2.35mm 内面の温度(T6)である。また内面の熱電対は反対面より穴( $\phi$  1.6)をあけ挿入している。

次に解析体系を Fig.7.2 に示す。火薬トーチによる中実棒への入熱は、ガス温度の分布別に設定した外部境界からの管外熱伝達によりおこなわれる。他の表面は全て断熱条件として計算した。また入熱は熱伝達のみとし放射の影響は無視した。

#### (2) 計算条件

##### a. 物性値

中実棒の物性値を以下に示す。中実棒は SS400 であるため物性値は Fe(800K)の値を与えた。(伝熱工学資料 第4版 p.314)

密度	7700	kg/m <sup>3</sup>
比熱	0.163	kcal/kg K
熱伝導率	37.24	kcal/m h K

## b. 温度境界条件

### (a) ガスによる熱伝達

本計算ではパラメータとして管外熱伝達率の他にガス温度分布、伝熱面積が考えられる。そこで、ガス温度一定条件で伝熱面積について事前に検討した（添付資料A 1）。その結果、伝熱面積が大きい方がより試験結果に近い温度特性が得られた。このことから伝熱面積はジェットの広がり全てと仮定し、ガス温度に分布を持たせることとした。

#### [設定範囲]

基礎試験では中実棒表面上のジェットの広がりは測定していない。そこで文献(「the theory of turbulent jets」 G.N.Abravich , The M.I.T. Press , 1963 [63-21743] )より軸方向流速分布からジェットの広がりを推定した。

中実棒表面でのジェットの広がり幅 : 約  $\phi$  45

以上の範囲に対して、全て同じ管外熱伝達率( $\alpha$ )を与えた。

#### [温度設定]

ジェット内部の温度は、中心温度を試験結果(T2)としジェットの広がりの幅のエンドで周辺温度とし、その間は正規分布を仮定した。ジェット中心温度(T2)の時刻歴を Fig.7.3 に示す。

以上のように範囲を設定したが、軸方向のジェットの広がりの末端部では設定した外部温度が低すぎるため熱伝達パスを通じて構造セルから熱が逆流することが考えられるため、ジェット内部にもかかわらず熱伝達パスを設けていないところがある。熱伝達パスの概念を Fig.7.4 に示す。

### (b) その他

その他の境界条件は全て断熱条件とした。

## (3) 計算コード

本計算に使用したコードは汎用伝熱ネットワークコード「TRUMP」である。

### 7.3 計算結果

全ての時刻歴において一定の管外熱伝達率( $\alpha$ )を与えて計算した結果を Fig.7.5 に示す。なお点線が試験結果である。初期の段階(～約6秒)では $\alpha = 1000$ が試験結果と非常に良く一致していた。6秒以後で計算結果と大きくずれた原因としては次のことが考えられる。基礎試験ではこの時刻付近で急激にジェット温度が上昇しており(Fig.7.3)、ジェットの流れも大きく変動したものと考えられる。このため $\alpha$ も時刻と共に変化し、一定とした計算結果と異なったと考えられる。

そこで6秒以後、 $\alpha$ の値を設定し直して計算をおこなった。結果を Fig.7.6 に示す。「TRUMP」では $\alpha$ の値を時間変化で指定できないため設定を変えた直後の計算結果は試験結果とは異なっているが、最終的には $\alpha$ の値は～5000 kcal/m<sup>2</sup> h K で計算結果と試験結果がほぼ一致した。

今回解析により得られた管外熱伝達率( $\alpha$ )は1000～5000(kcal/m<sup>2</sup> h K)であった。同様にロケットの排出燃焼ガスの衝突点熱伝達係数を試験した結果(当社)では $\alpha = 2700$ (kcal/m<sup>2</sup> h K)で今回の結果とほぼ同じであり、本計算結果は妥当性があるものと考えられる。

## 8. まとめと今後の課題

今回、初めて火薬トーチを用いてナトリウムー水反応時のリークジェットを模擬し、伝熱管内に蒸気を流した実験を実施したことにより以下の貴重な実験データと知見を得た。

すなわち、

- (1) 火炎が約1200°Cとなるように火薬トーチ側の条件を設定し、これを実現できることを確認した。
- (2) 伝熱管内が蒸気でこれが停滞している場合と蒸気流で伝熱管が冷却されている場合の両方の実験を実施し、結果を比較したことによって、試験体の破損状況が顕著に違い、蒸気冷却効果が破損に与える影響が大きいことがわかった。蒸気が停滞すなわち、伝熱管が蒸気により冷却されない場合、試験体部は、大破損（ギロチン破断および蒸気噴出時の大変形メクレ）し、一方冷却される場合は、直 径 2 mm 程度のピンホール開口であった。
- (3) 実験で得た伝熱管外表面の温度履歴を再現するような管外熱伝達率( $\alpha_o$ )を汎用伝熱解析コードTRUMP を用いて計算した結果、 $\alpha_o$ は、1000 ~ 5000kcal/mhKと予測され、ナトリウムー水反応時の火炎を火薬トーチにて模擬できる範囲であることがわかった。火薬トーチによる実験は、むしろ伝熱管の急速加熱による破損挙動を解析で可能かを調べるための検証データとして比較的容易に取得できるメリットがある。また、境界条件としての火炎状況は、火薬トーチ側で調整可能である。

今後の問題点として以下の各項を解決する必要がある：

- a. 今回は、伝熱管内面の温度履歴を測定せず、中実管を用いて管内面の温度履歴に相当するものを測定したが、多次元非定常熱伝導となり簡単ではなく、次回は、実際の伝熱管内面の温度履歴を測定し、精度の良い熱伝達率を算定しなければならない。
- b. 今回の実験では、火炎および伝熱管外面温度を試験体回りに熱電対を金属帯にて固定して測定を試みたが、火炎により金属帯が溶融し、特に試験体外面温度が計測しきれなかった。次回は、試験体内外共

に熱電対を埋め込みスポット溶接で固定し計測する必要がある。埋め込み等による試験体破損の加速の影響は、別途、比較により評価し、温度履歴の再現性が確認された時点で、破損実験は、熱電対埋め込みの無い状況で実施すべきことがわかった。

- c. 今回の実験では、火炎の伝熱管への放射状況を確認していないが、蒸気流によって冷却された場合の試験体の破損がピンホール開口になるメカニズムを調べるため、放射状況との関係を可視化等で把握する必要がある。
- d. 今回は、伝熱管を減肉加工して実機条件に相当させたが試験体破損状況には肉厚効果があると予測され、実際の肉厚で確認しておく必要がある。
- e. 試験体外面の温度立ち上がりから高温ラプチャするまでの時間を精度良く計測するため、試験体内部の圧力降下および破損時の音響効果等を計測する必要があり、特に圧力の計測は、破断部近傍にて極力実施すべきことが分かった。

## 謝 辞

国内で初めての火薬トーチを用いた高温ラプチャ試験を実施するに当たり、適切な実験方針をいただいた大洗工学センター、安全工学部、プラント安全工学室の田辺 裕美 室長、浜田 広次 副主任研究員ならびに栗原 成計殿に熱く謝意を表します。

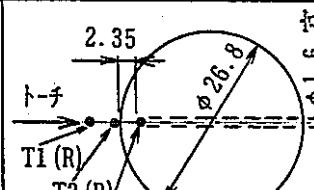
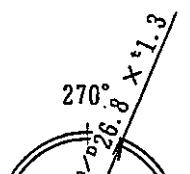
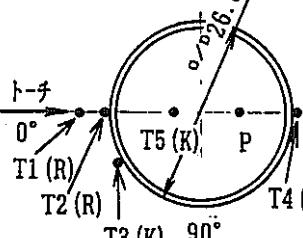
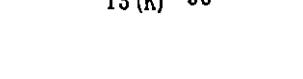
## 参考文献

H.Tanabe,Tests and analysis on steam generator tube failure propagation,  
IAEA IWGFR/78 156-164 France 1990

G.N.Abravich,The theory of turbulent jets, The M.I.T.Press,1963[63-21743]

ロケット・ブースター火炎温度分布、川重社内資料

Table 5.1 Trial Tests for Tube Rupture under High Temperature

試験番号	試験	管内条件	試験体	計測点	トーチ～試験体表面間距離 mm	火炎温度 °C	噴破穴径 mm	備考
C501*	本試験	—	中実棒 Φ26.8×SS400		100	1570	—	T1; 火炎温度 T2; 試験体表面温度 T3; 表面軸方向分布(80mm) T4; 表面周方向分布(180°) T5; 蒸気温度 T6; 内壁温度 P; 蒸気圧力
C502		N <sub>2</sub> ガス 100kg/cm <sup>2</sup> g	素材; Φ31.8 × t3.8 × Mod. 9Cr-1Mo 加工後; Φ26.8 × t1.3		350	670	—	
C503		100kg/cm <sup>2</sup> g 310°C 飽和蒸気 (流さない)			150	1270	大噴破 (切断)	
C504		100kg/cm <sup>2</sup> g 310°C 飽和蒸気 (流す)			150	1115	1.5	出口オリフィス 口径; Φ5mm 蒸気速度; 12.7m/s

\* Test No. C501は、本試験を開始するに当たって、火薬トーチ校正試験である。

この結果と Test No. C502 により、火薬トーチ、火炎温度を 1200 °C (目標) となるように火薬トーチ～試験体表面間の距離を設定した。

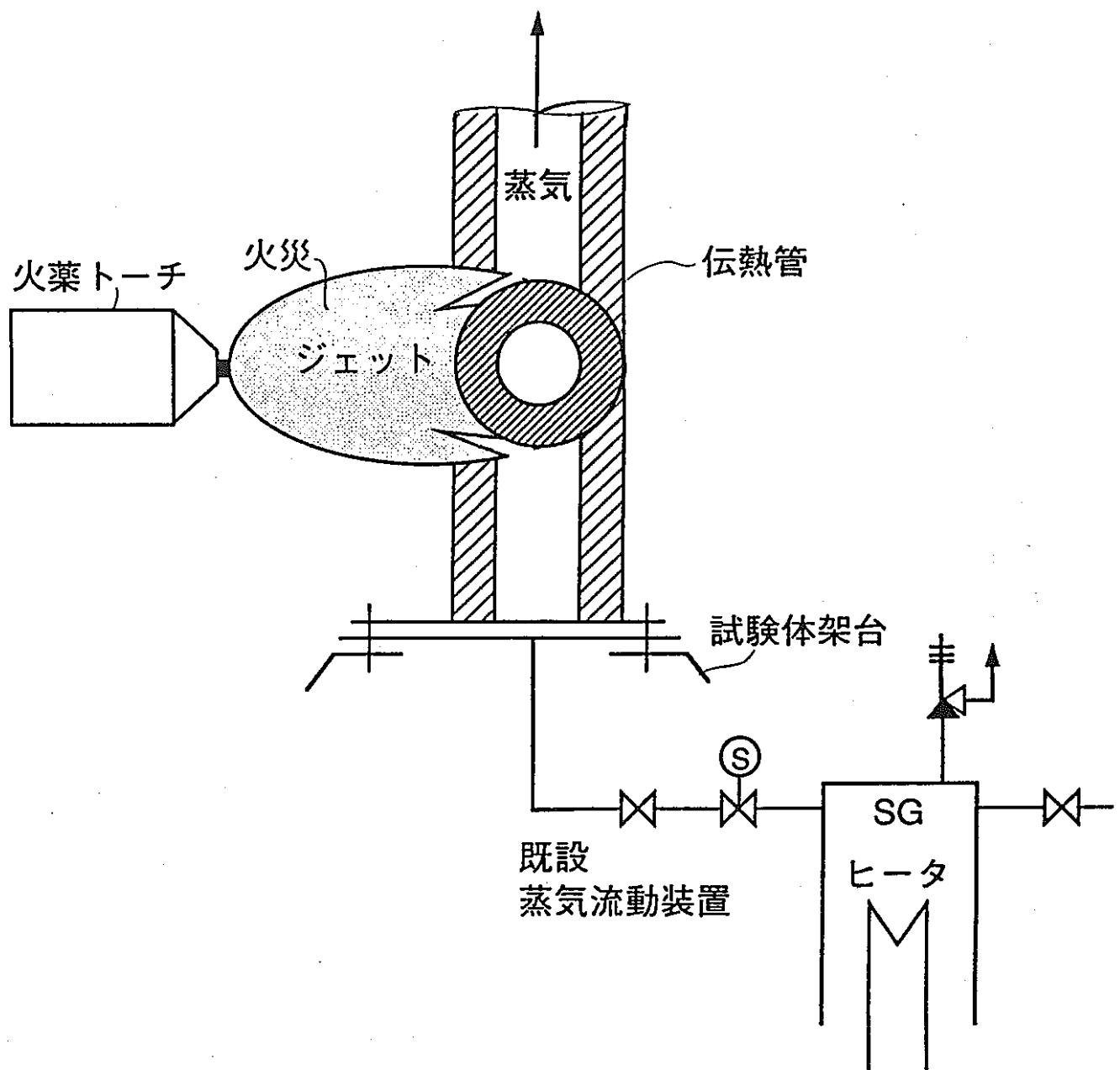
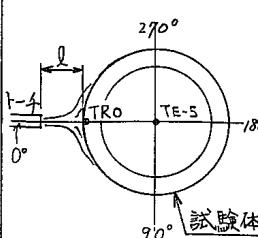
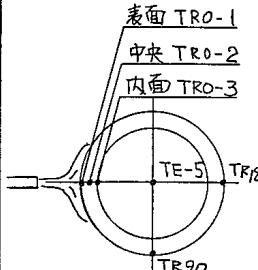
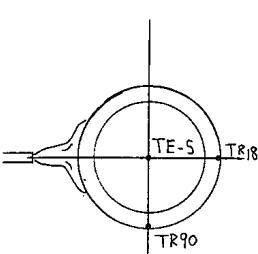
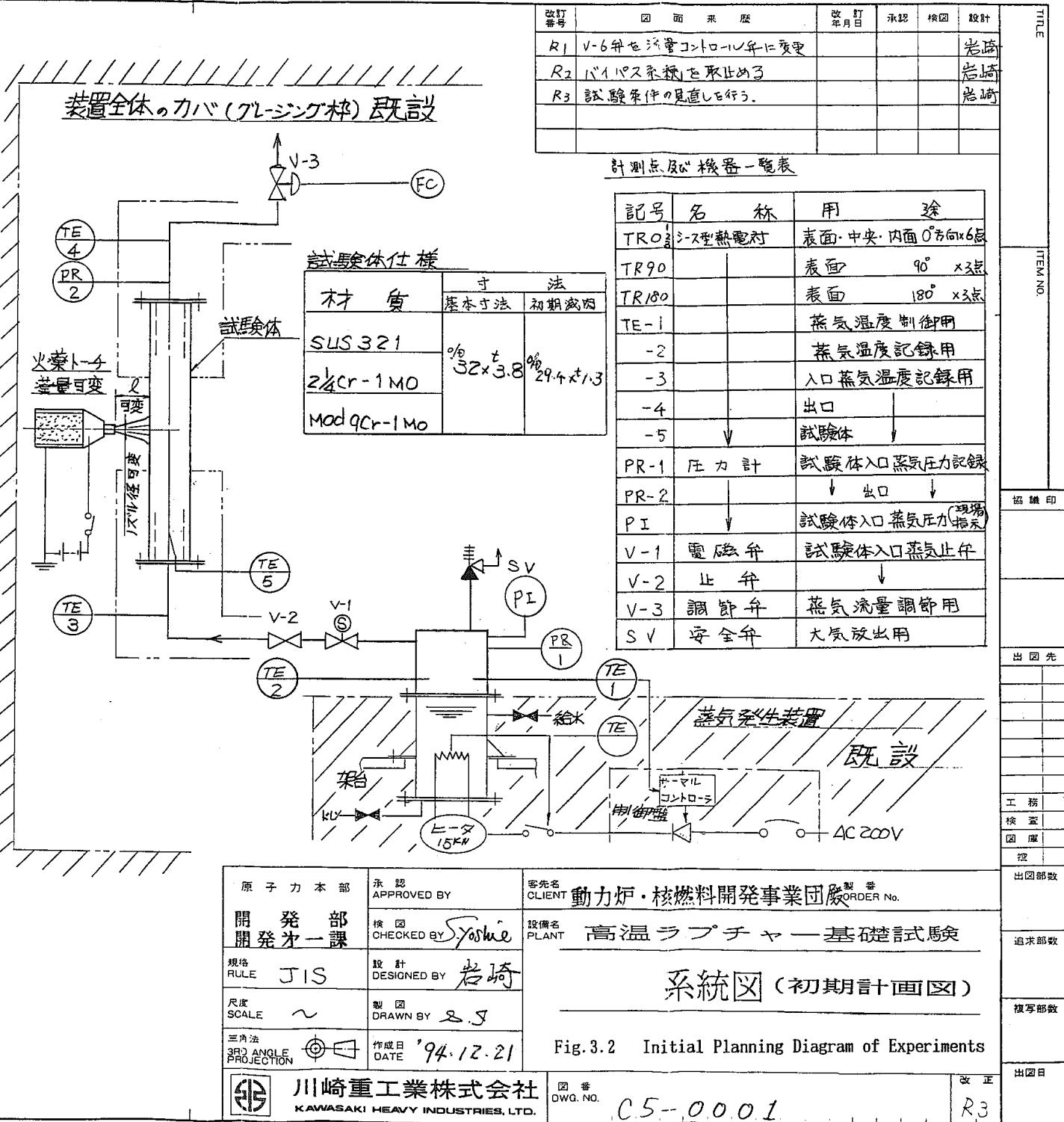


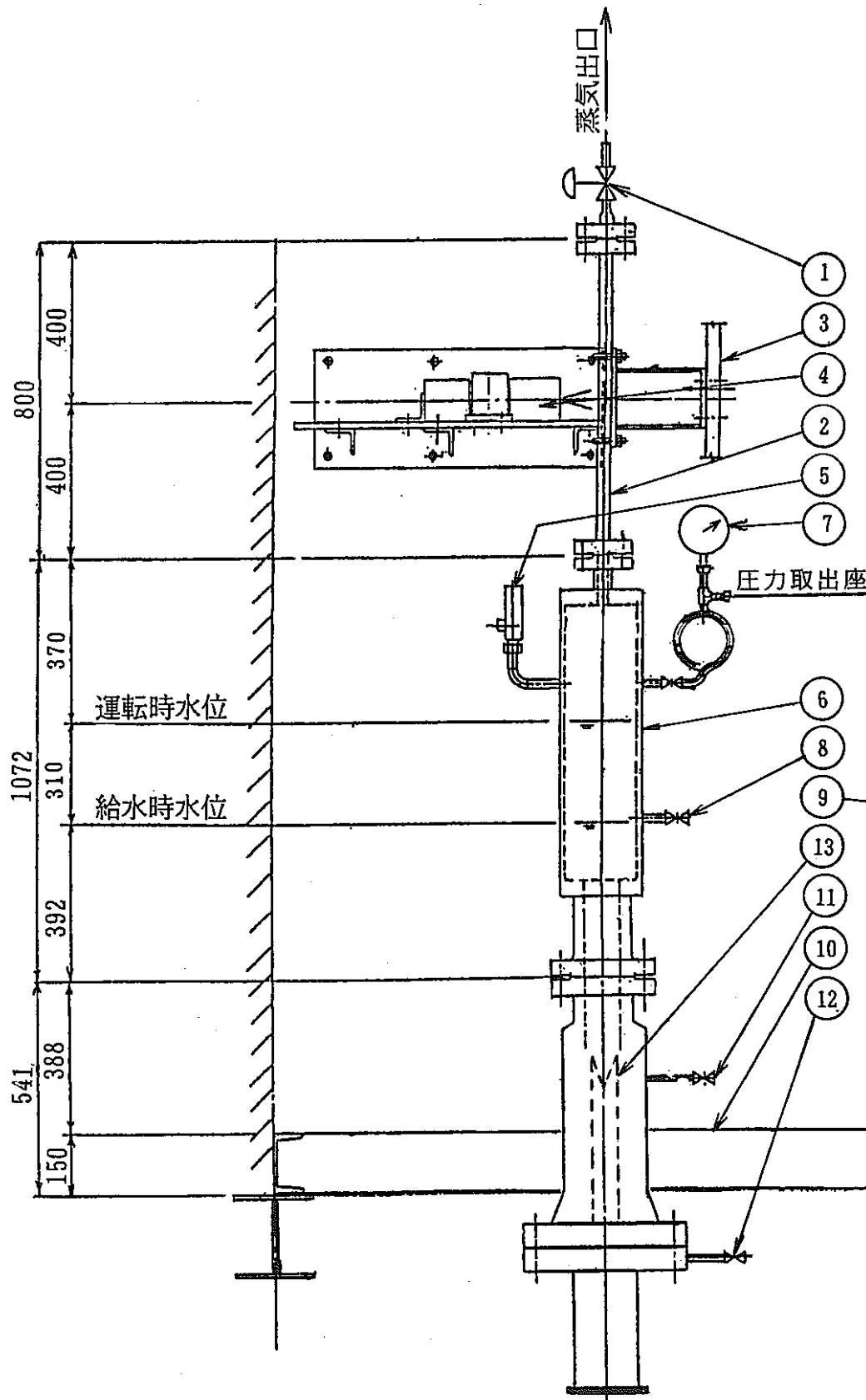
Fig. 3.1 Conceptual Diagram of Experiments

## 試験条件

試験目的	試験体形状	作業項目	試験体
予加熱昇温速度の調整	 試験体	(1) 材料毎の昇温速度の特定	SUS 321
		(2) 火薬種類の特定	2 1/4 Cr - 1 Mo
		(3) 薬量の調整	
		(4) 距離(l)の調整	
		(5) 管表面温度履歴の計測	Mod 9Cr - 1 Mo
本熱伝達率(α)の特定	 試験体	(1) 材料毎に表面・中央・内面の温度履歴を計測して、αの特定を行なう。	SUS 321
		(2) 再現性試験	2 1/4 Cr - 1 Mo
			Mod 9Cr - 1 Mo
*噴破試験(II)	 試験体	(1) 再現性の良い上-4を用いて噴破試験を行なう。 (2) 確認のためTR90, TR180を計測 (3) 噴破時の圧力履歴計測	SUS 321 2 1/4 Cr - 1 Mo Mod 9Cr - 1 Mo

\* 噴破試験には初期減肉効果試験を含む





番号	名 称
1	蒸気出口弁
2	試験体
3	固定金物
4	火薬トーチ
5	安全弁
6	蒸気溜
7	圧力計
8	水位弁
9	防護壁
10	架台
11	給水入口
12	ドレン
13	ヒータ

Fig. 3.3 Configuration of Test Apparatus

計測点記号	計測位置	熱電対型式
T1	火炎温度	R φ1.6
T2	試験体表面温度	R φ1.6
T3	試験体表面軸方向分布温度	K φ1.0
T4	試験体表面周方向分布温度	K φ1.0
T5	蒸気温度	K φ1.0
T6	試験体内壁温度	R φ1.6
P	蒸気圧力	—

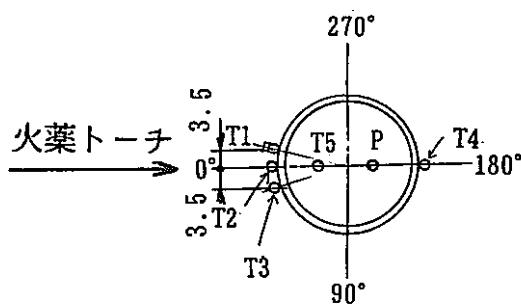
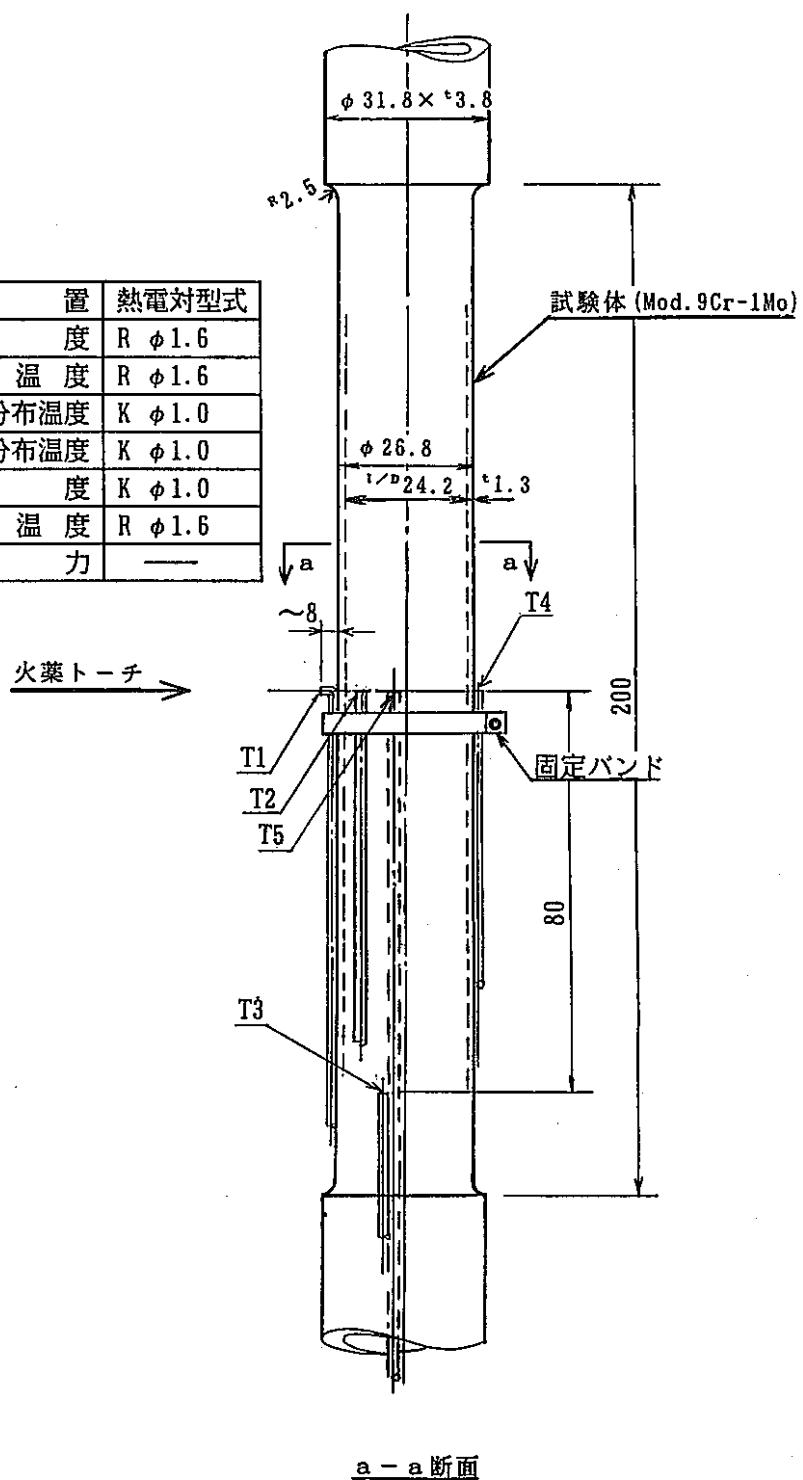
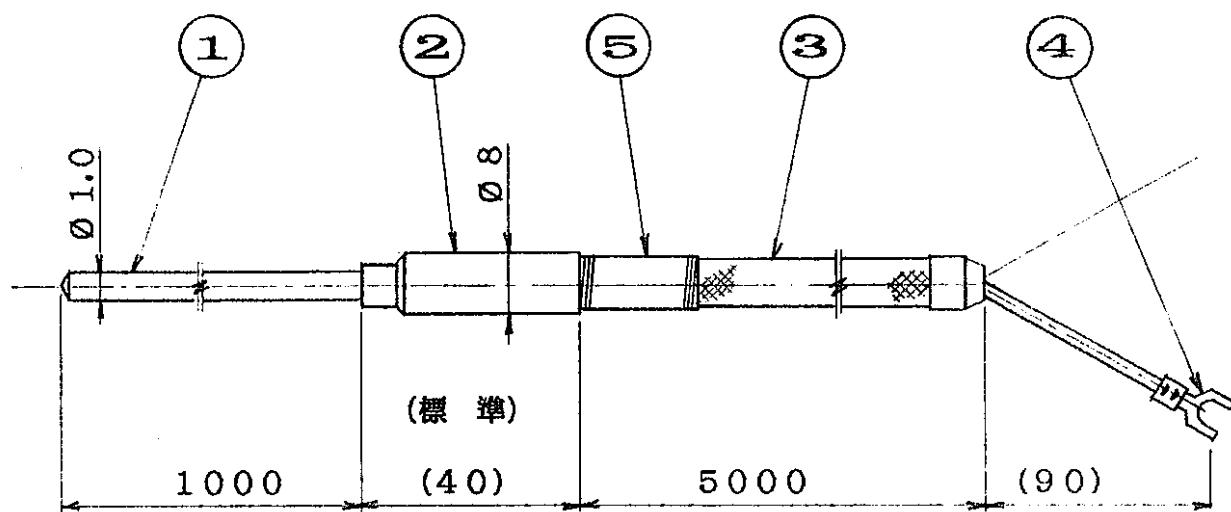


Fig. 3.4 Location of Temperature Measurements



### 仕 様

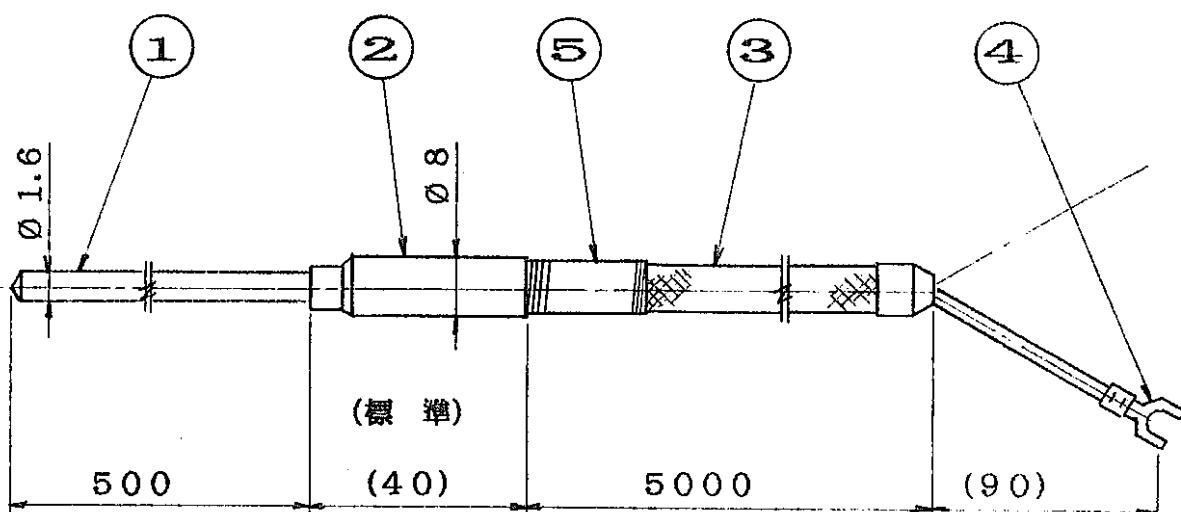
種 別	K
階 級	JIS 0.75級
芯線対数	シングル
温接点	UG(非接他)

### 試 験 檢 査

絶縁抵抗	10 MΩ以上
導通	(抵抗測定)
極性確認	⊕. ⊖ 確認
校正検査	—
その 他	

品 番	名 称	材 質	數 量	備 考
5	補強スプリング	SUS304	1	
4	圧着端子	1.25-4-Y	2	
3	補償導線	E×A	1	⊕赤 ⊖白 (カバー付)
2	スリーブ	SUS304	1	
1	熱電対シース	SUS316	1	
承 認		第三角法		殿向
審 査		尺 度		
製 図		NOT		高溫ラプチャ一基礎試験
規 格	J I S	單 位	mm	シース熱電対 Type K

Fig. 3.5 Specification of Sheath Thermocouple / Type K



### 仕 様

種 別	R
階 級	JIS 0.4級
芯線対數	シングル
温接点	UG(非接他)

### 試 験 檢 査

絶縁抵抗	10 MΩ以上
導通	(抵抗測定)
極性確認	⊕, ⊖ 確認
校正検査	
その 他	

品番	名 称	材 質	数 量	備 考
5	補強スプリング	SUS304	1	
4	圧着端子	1.25-4-Y	2	
3	補償導線	E×A	1	⊕赤 ⊖白 (カバー付)
2	スリーブ	SUS304	1	
1	熱電対シース	インコネル600	1	
承認		第三角法		殿向
審査		尺度		
製図		NOT		高温ラブチャ一基礎試験
規格	単位	/ S		シース熱電対 Type R
J I S	mm			

Fig. 3.6 Specification of Sheath Thermocouple / Type R

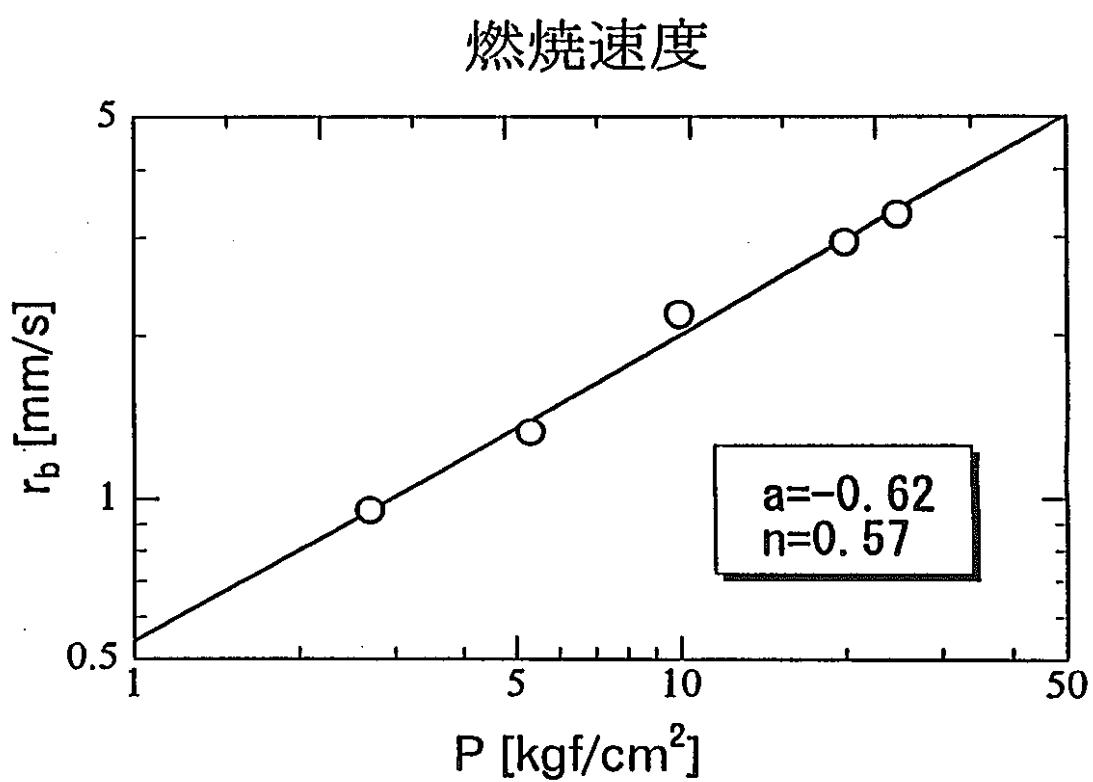


Fig. 6.1 Preliminary Test Result for Rocket Propellant

## 形状

外径	80 mm
内孔径	40 mm
長さ	140 mm
燃焼方式	両端面内面燃焼
ノズルストローク径	13 mm

## 諸元

平均圧力	6.879 kgf/cm <sup>2</sup>
最大圧力	8 kgf/cm <sup>2</sup>
平均推力	10.956 kgf
最大推力	12.742 kgf
比推力	152.2 sec

主点火薬	12個	5mm角
補助薬	41g	

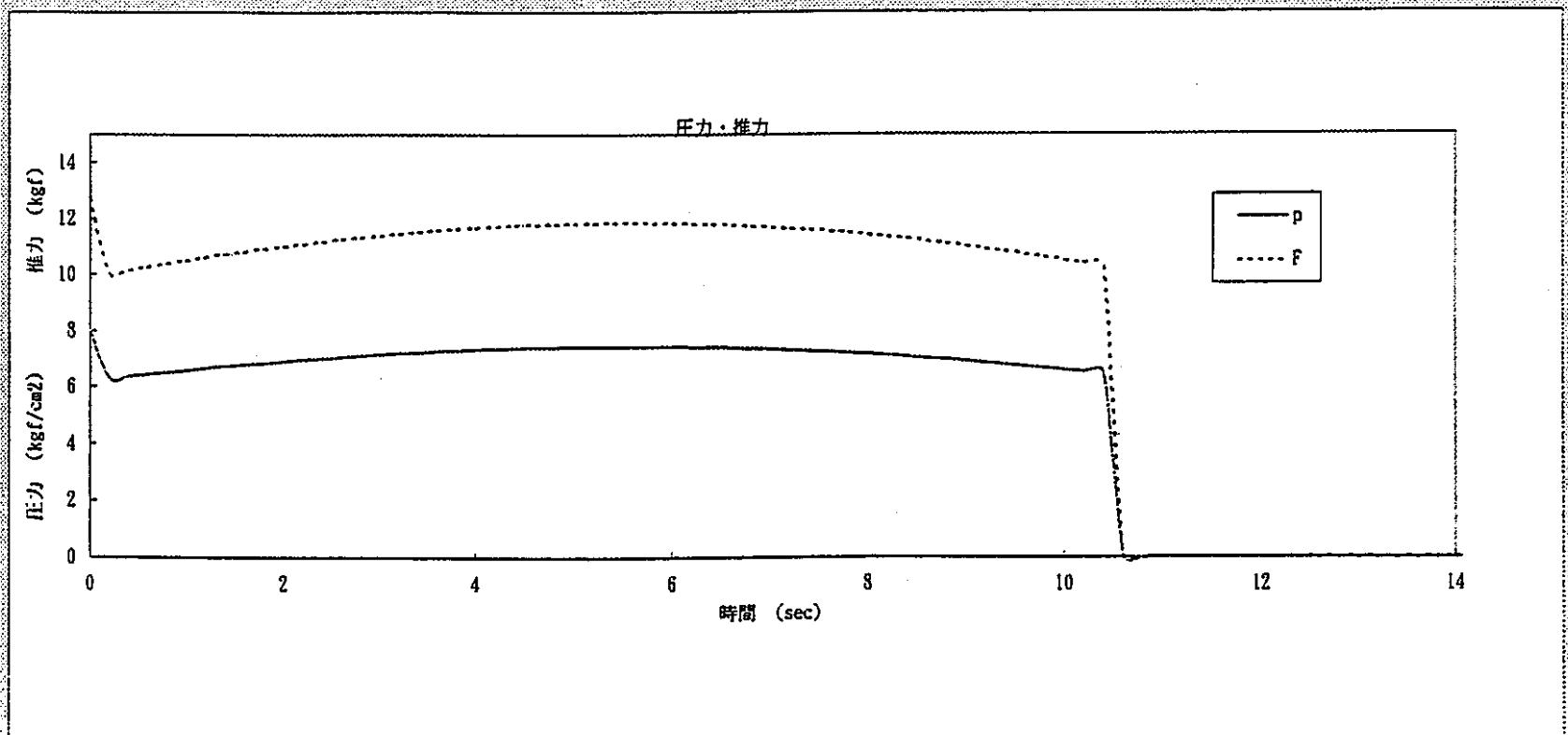


Fig. 6.2 Preliminary Test Result for Checking Duration

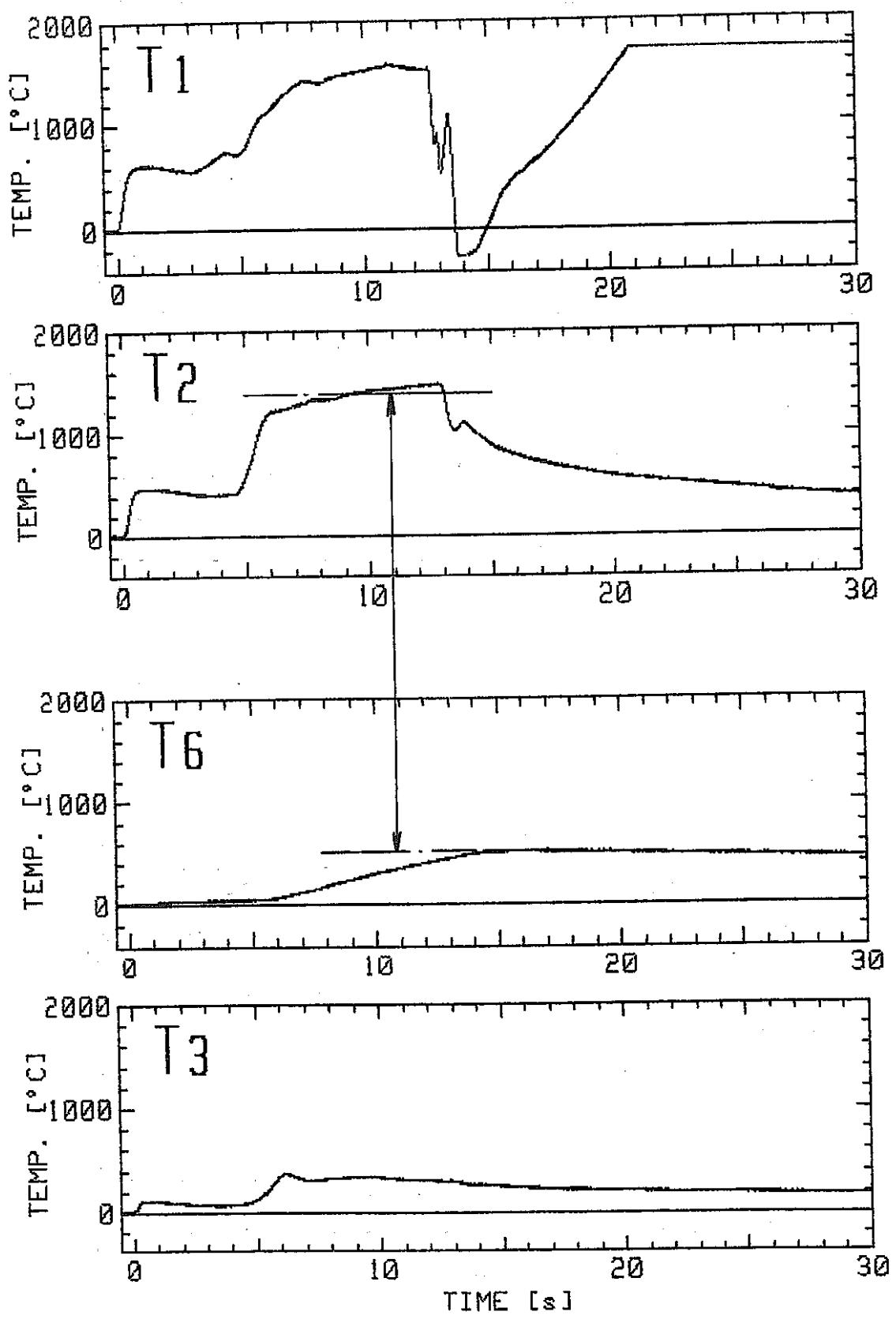


Fig.C501- 1 Temperature History of Test Using Bar [Test No.C501]

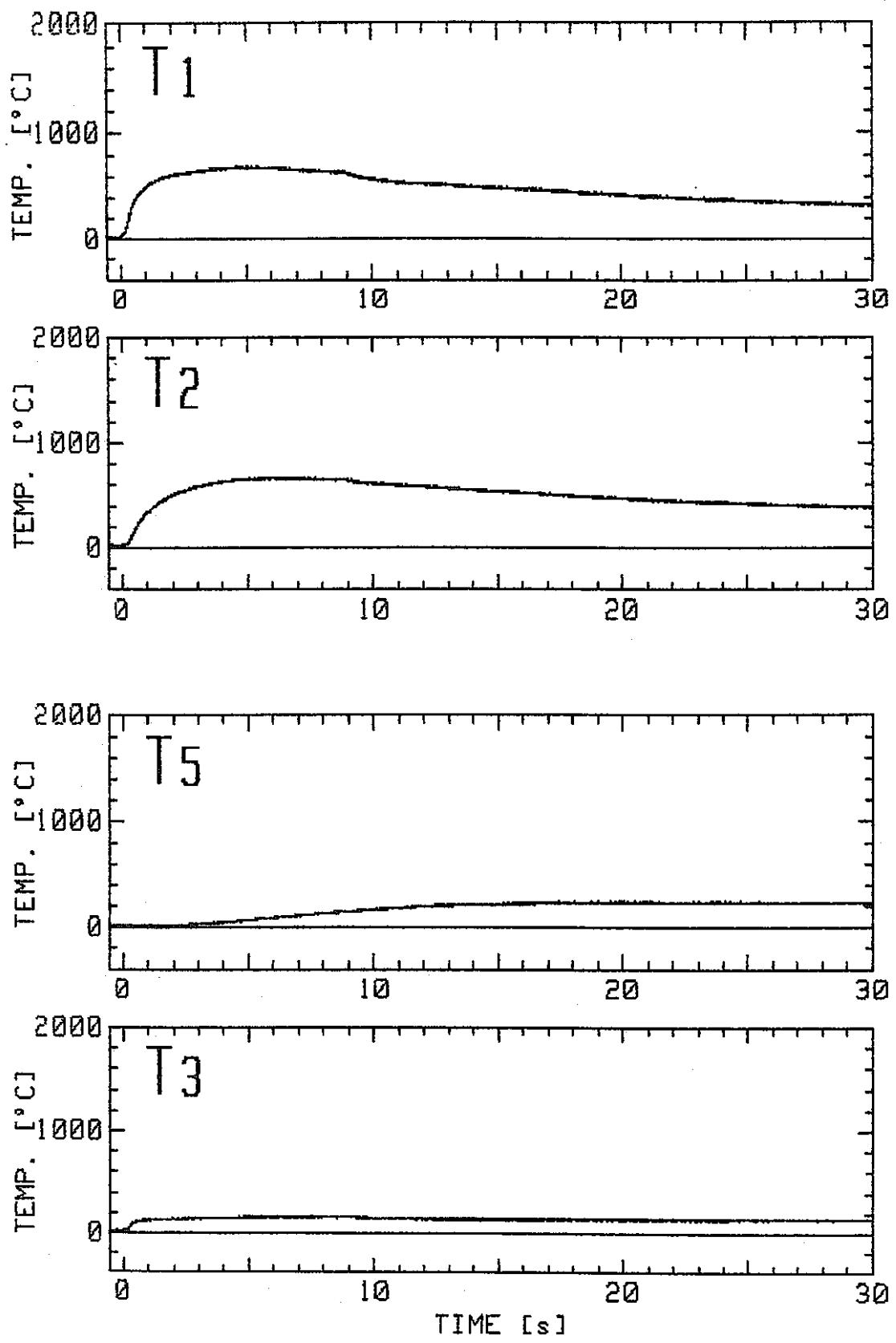


Fig.C502- 1 Temperature History of Test Using Tube / N<sub>2</sub> gas [Test No.C502]

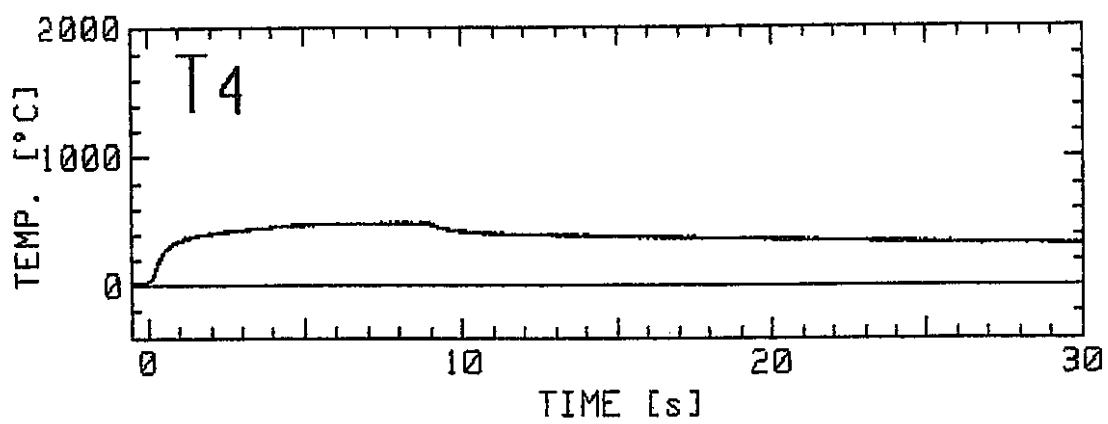


Fig.C502- 2 Temperature History of Test Using Tube / N<sub>2</sub> gas [Test No. C502]

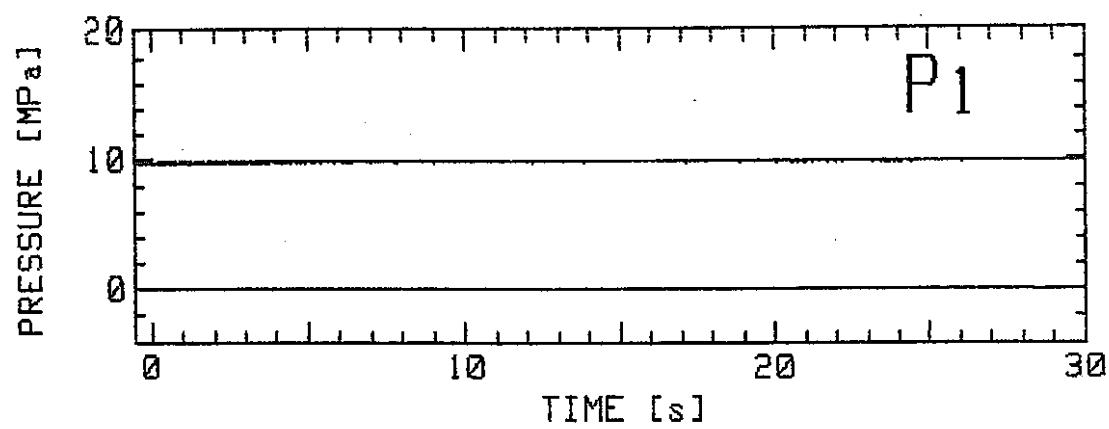


Fig.C502- 3 Pressure History of Test Using Tube / N<sub>2</sub> gas [Test No. C502]

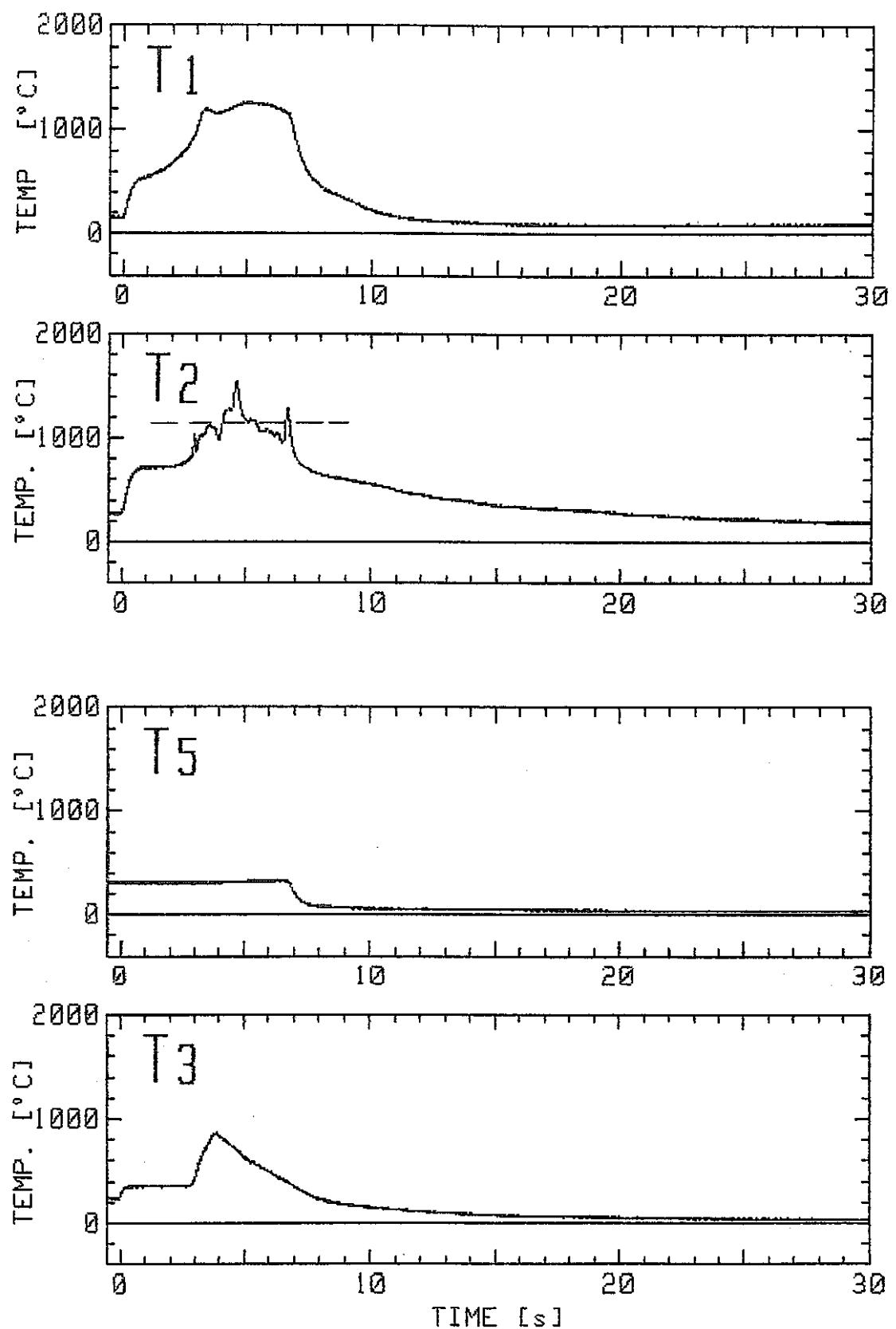


Fig.C503- 1 Temperature History of Test Using Tube / Steam Stagnation  
[Test No.C503]

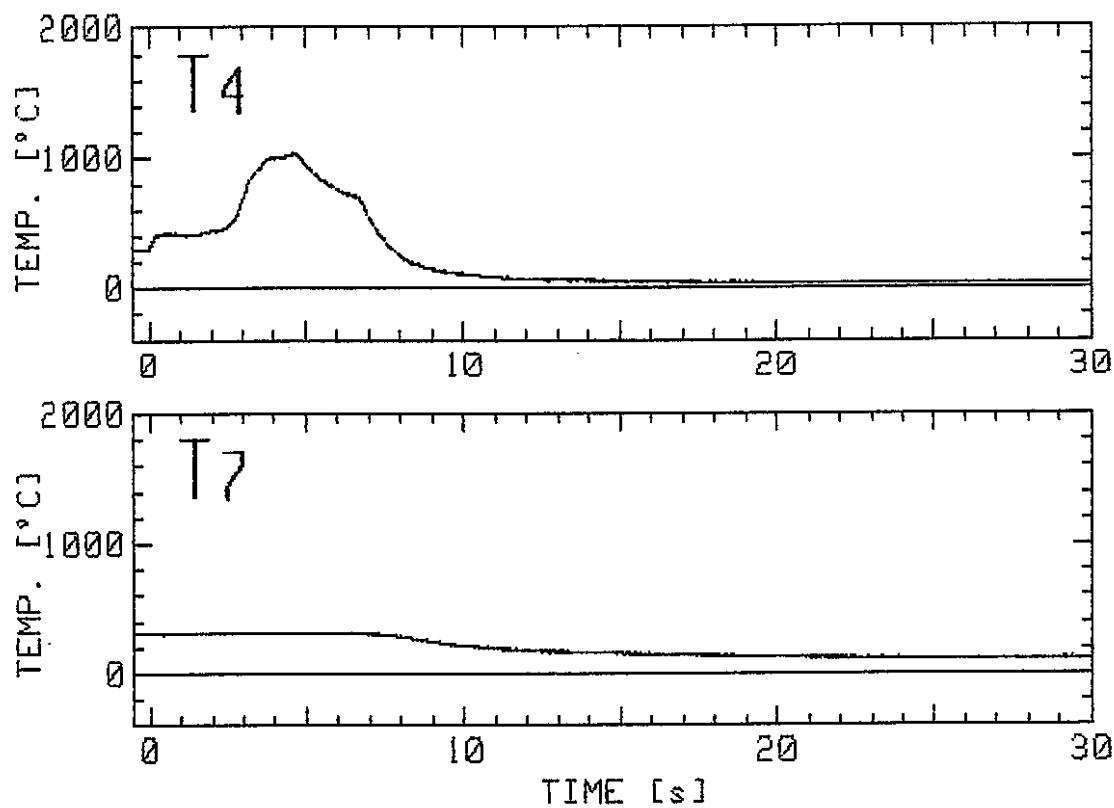


Fig.C503- 2 Temperature History of Test Using Tube / Steam Stagnation  
[Test No. C503]

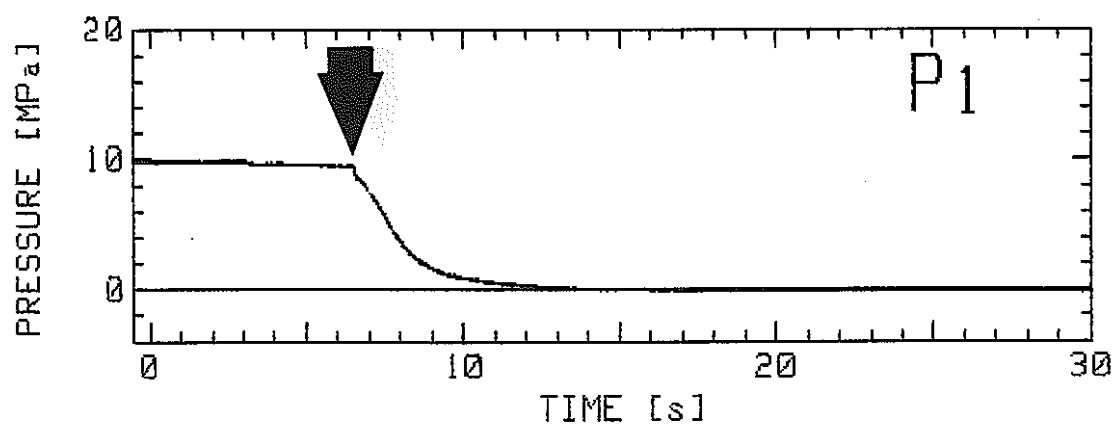


Fig.C503- 3 Pressure History of Test Using Tube / Steam Stagnation  
[Test No. C503]

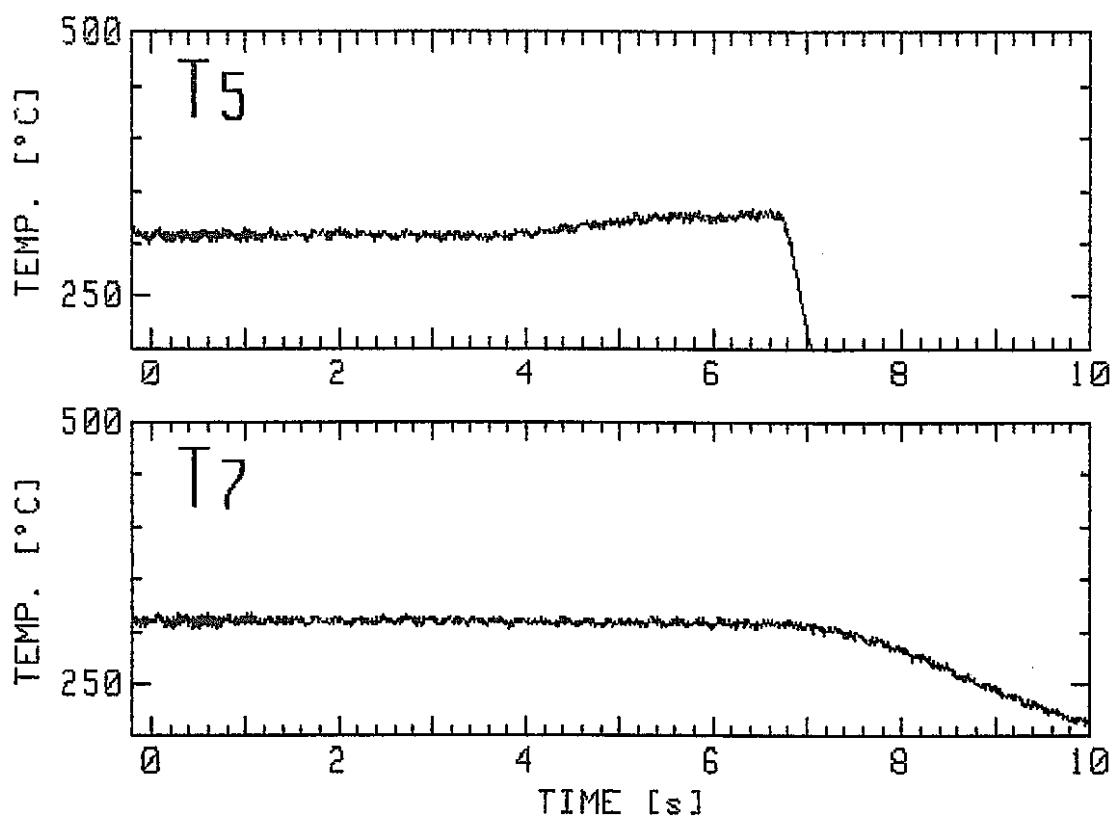


Fig.C503- 4 Detail of Temperature History of Test No.C503 / T<sub>5</sub>

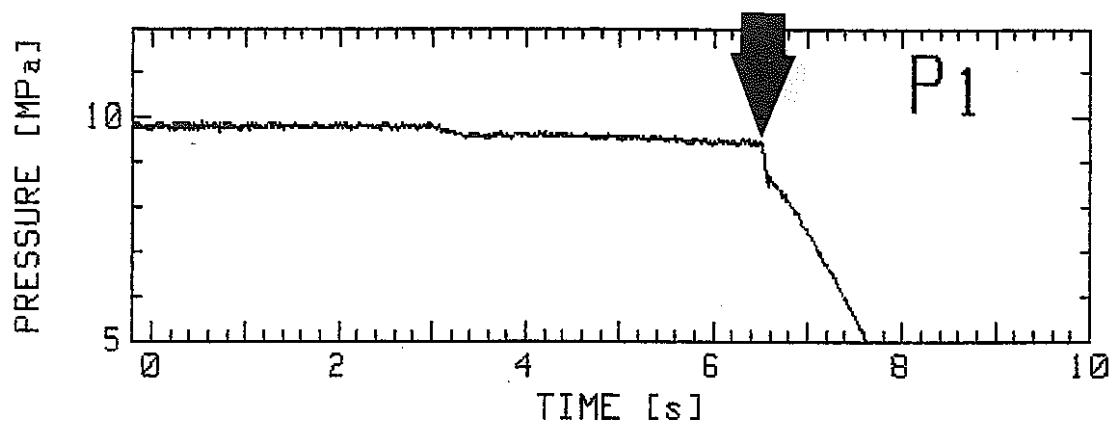


Fig.C503- 5 Detail of Pressure History of Test No.C503 / P<sub>1</sub>

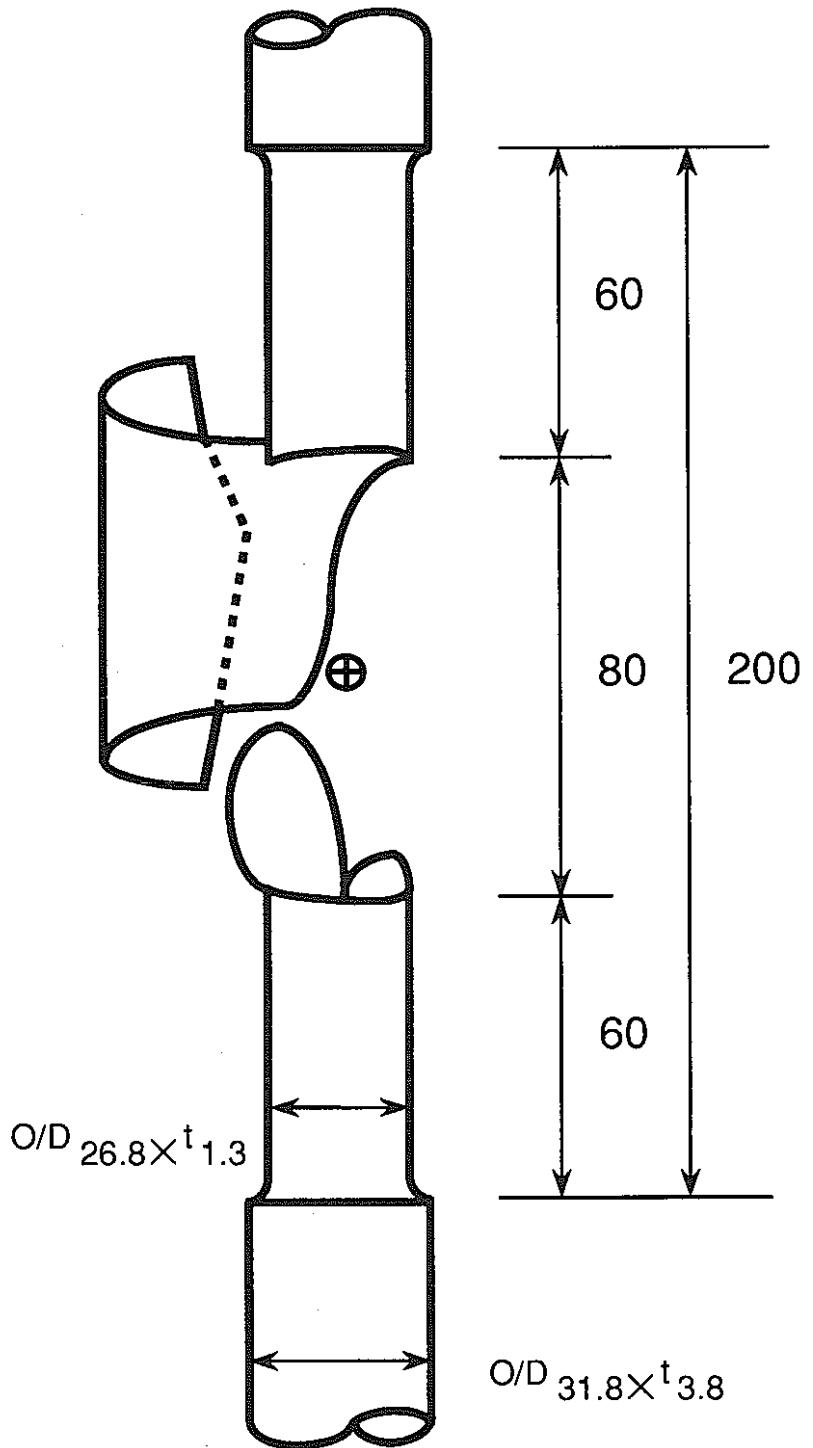


Fig.C503- 6 Schematic Configuration of Test Body after Test  
[Test No.C503]

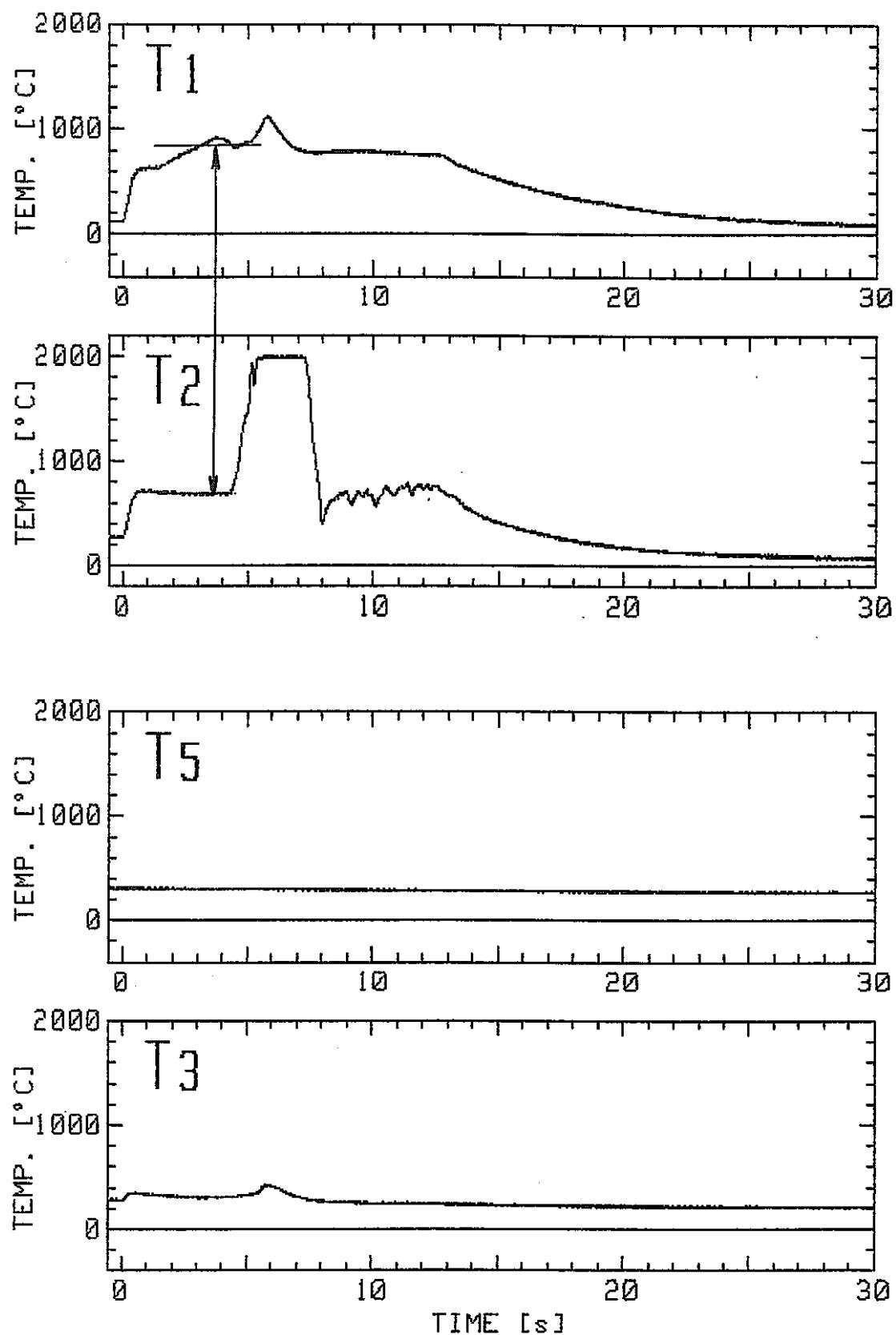


Fig.C504- 1 Temperature History of Test Using Tube / Steam Flow  
[Test No.C504]

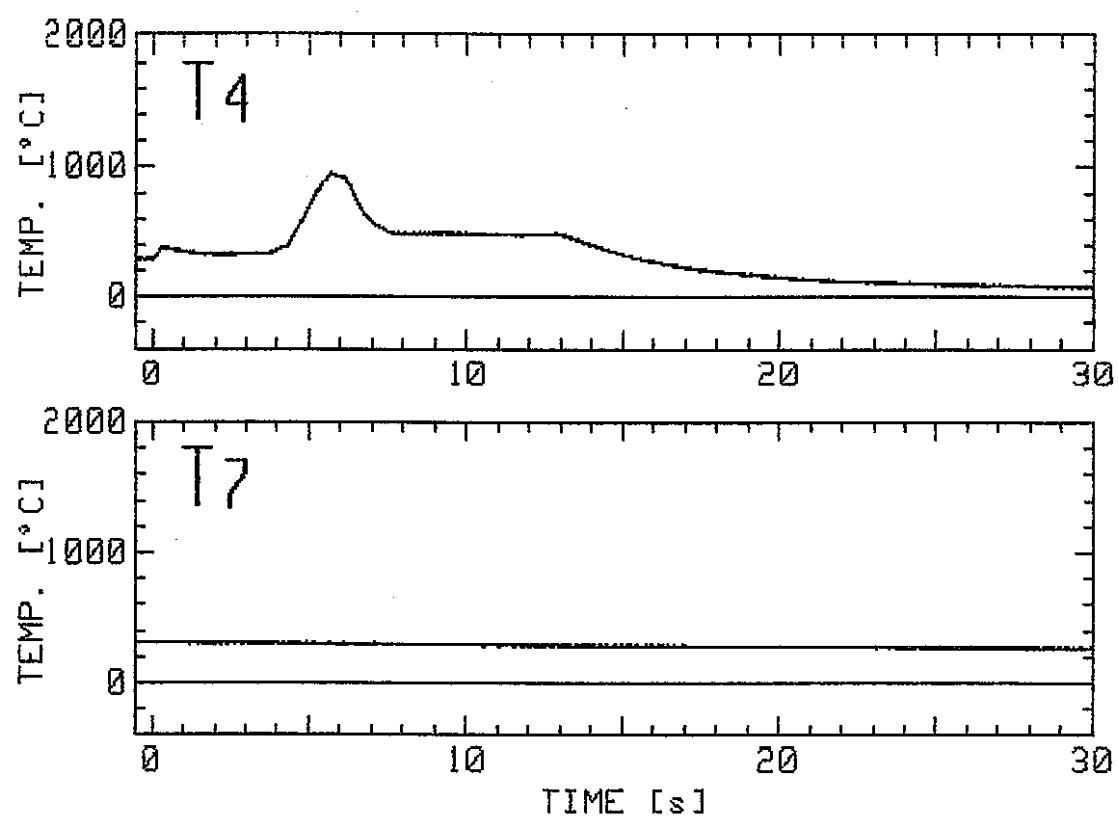


Fig.C504- 2 Temperature History of Test Using Tube / Steam Flow  
[Test No. C504]

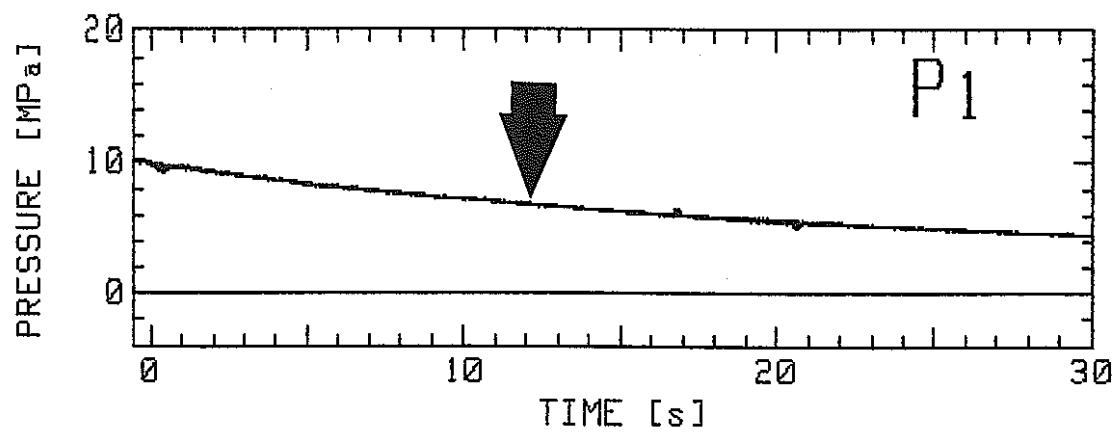


Fig.C504- 3 Pressure History of Test Using Tube / Steam Flow  
[Test No. C504]

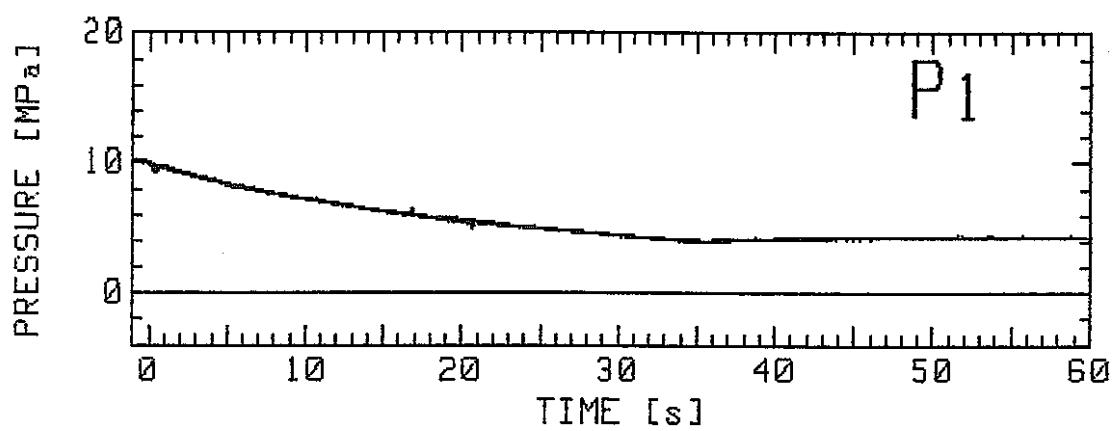


Fig.C504- 4 Pressure History in Long Range of Test No. C504

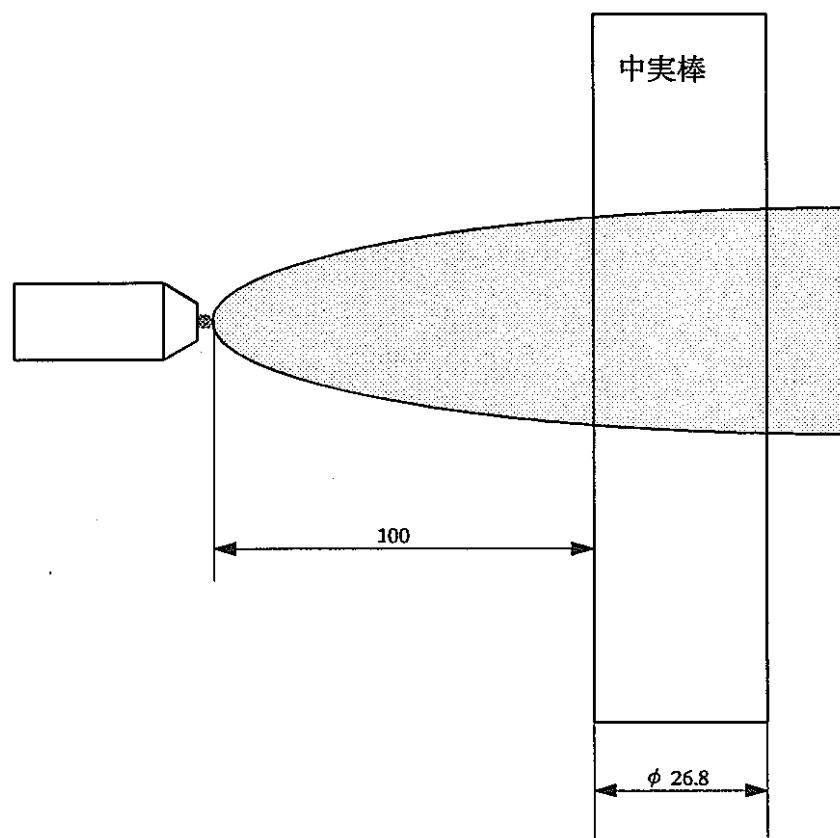
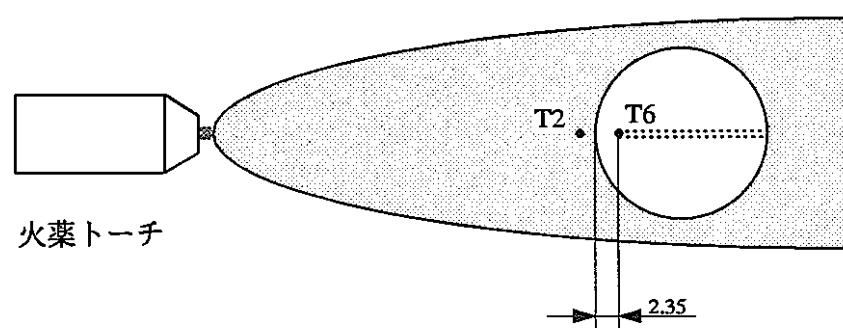


Fig.7.1 Analytical Model

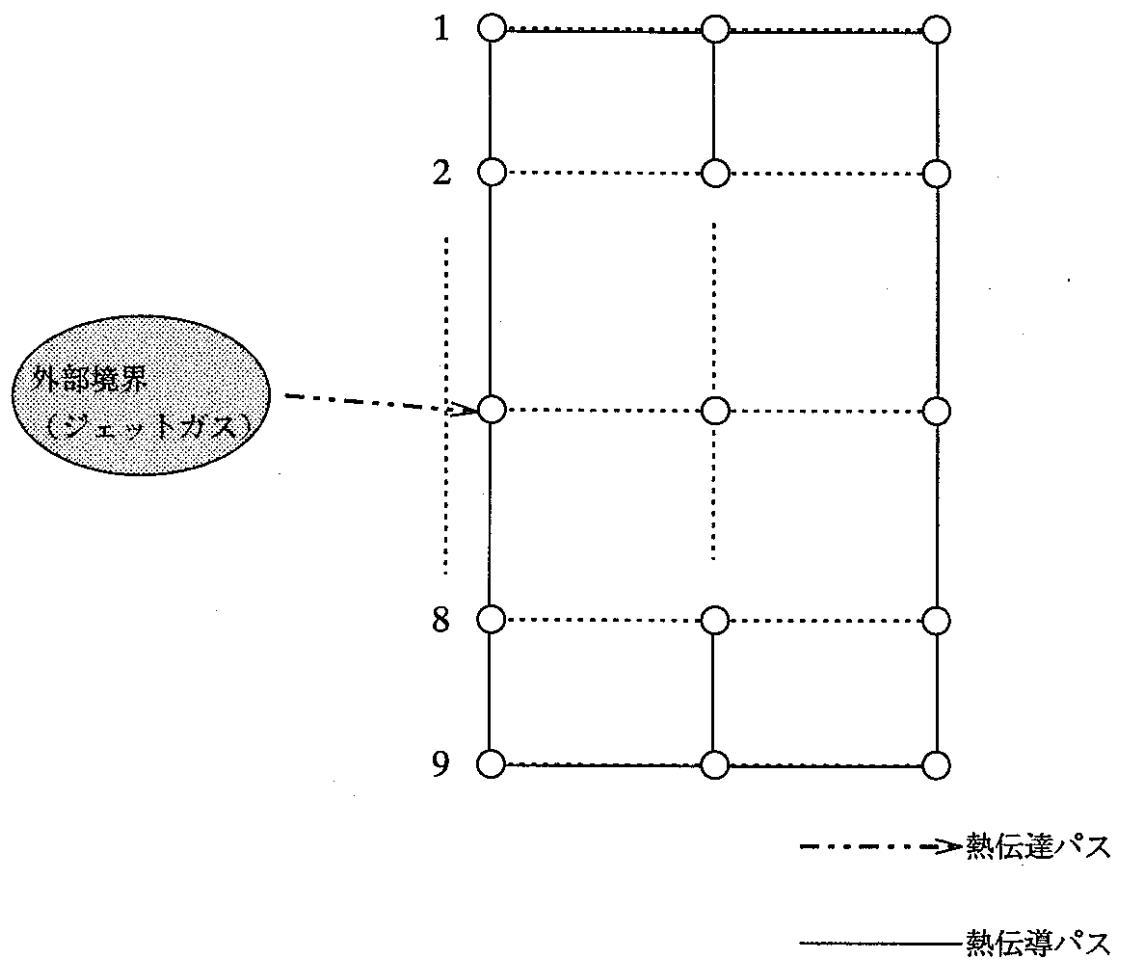
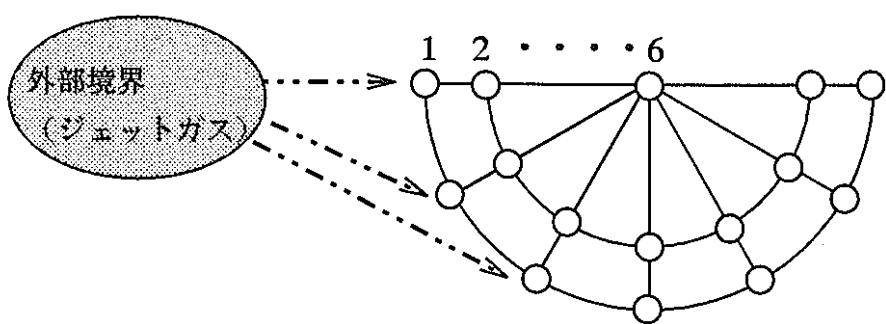


Fig.7.2 Initial Mesh (Node No : 549、 $(12 \times 5 + 1) \times 9$ )

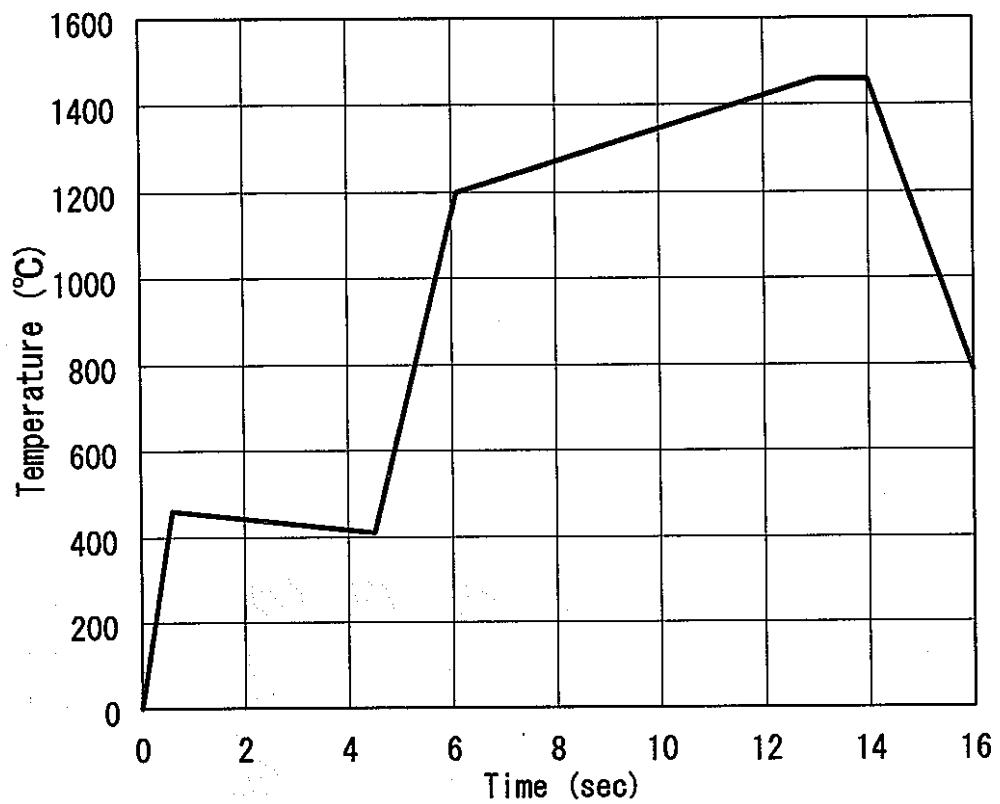


Fig.7.3 Experimental Results as Input (T2)

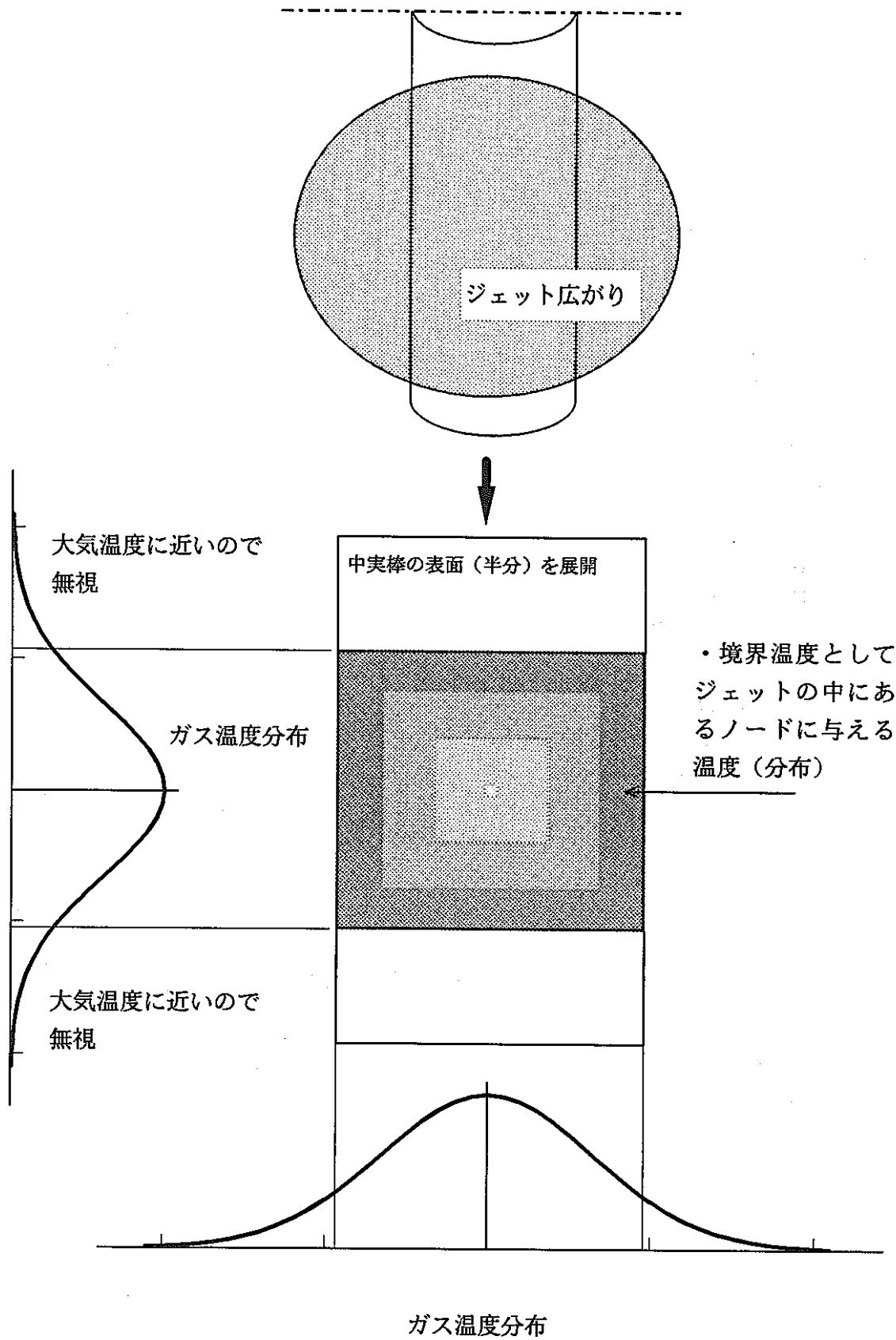


Fig.7.4 Boundary Condition

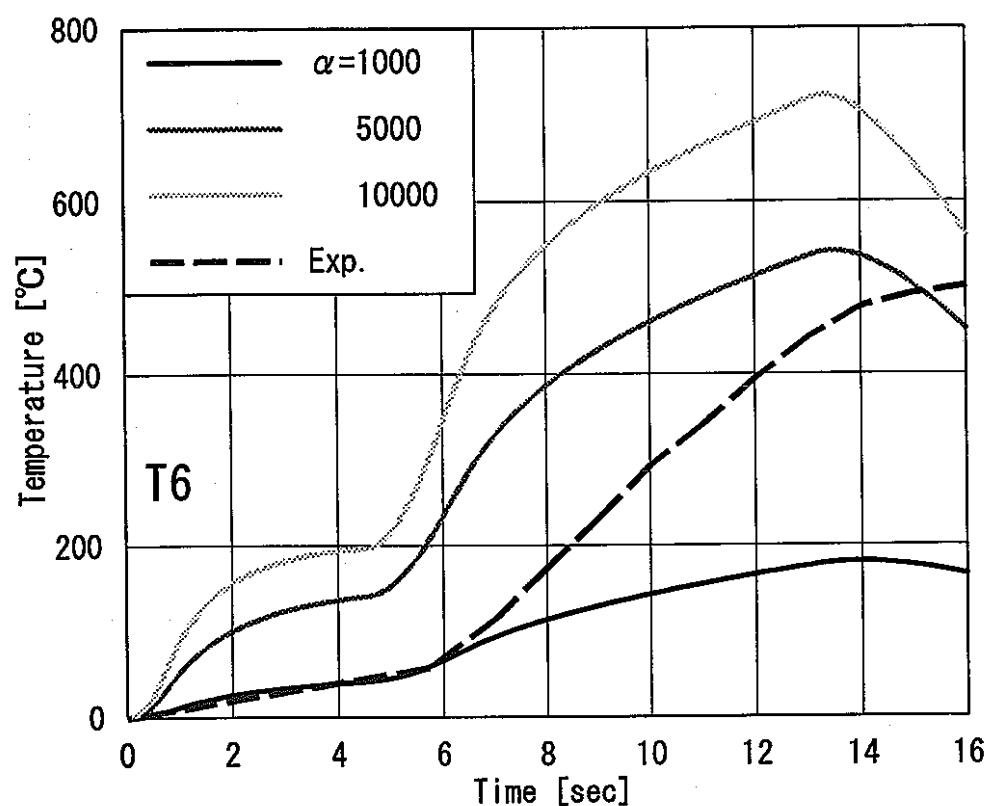


Fig.7.5 Analytical Results( $\alpha$  :const.)

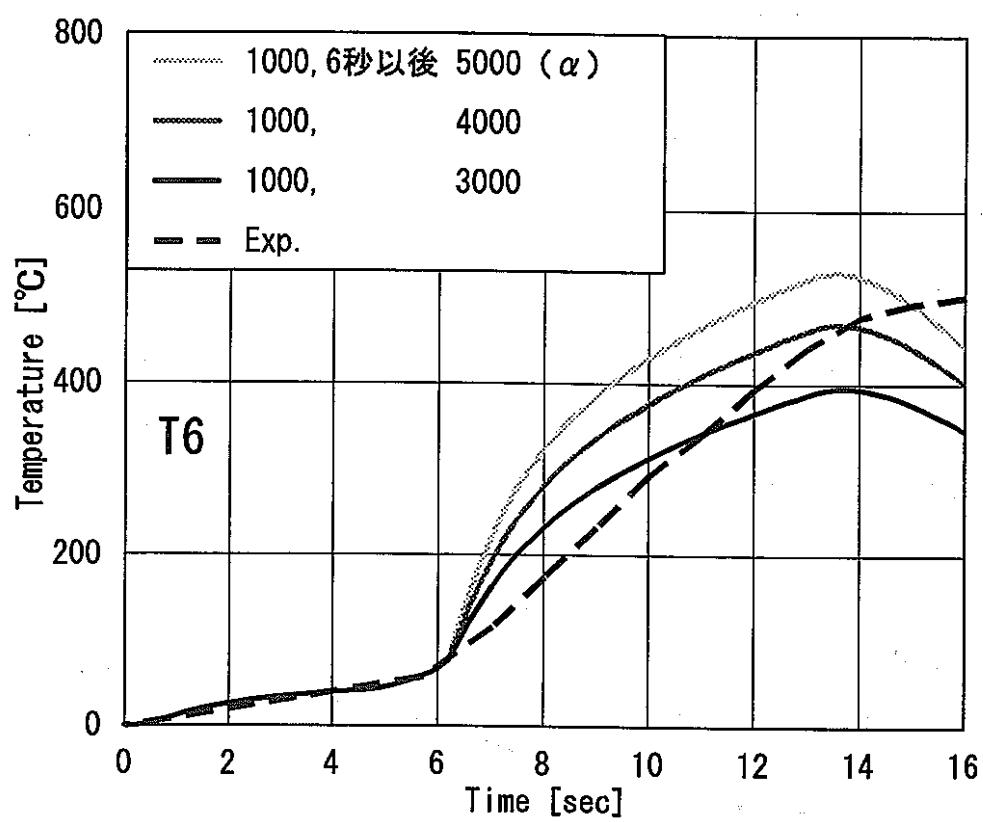


Fig.7.6 Analytica Results( $\alpha$ :two steps changing)

# 添付資料 A 1

## A 1. 概要

本資料は高温ラプチャ基礎試験における管外熱伝達率の推定に際しておこなった予備検討である。本資料ではガス中温度一定とし、伝熱面積による内部温度特性の影響を検討した。その結果、伝熱面積を大きく仮定した方がより試験結果に近い特性を示すことが分かった。

## A 2. 計算体系・条件

### (1) 計算体系

本文 7 章と同じ

### (2) 計算条件

#### a. 物性値

本文 7 章と同じ

#### b. 温度境界条件

##### (a) ガスによる熱伝達

###### [設定範囲]

基礎試験後の状況よりジェットの広がりを直径 ( $\phi$  26.8) と仮定しこれを基準に以下の 3 つに設定した。また管外熱伝達率 ( $\alpha$ ) はそれぞれ  $\alpha=1000, 5000, 10000$  とした。

(i)  $\phi$  26.8 相当

(ii)  $\phi$  20.0 相当

(iii)  $\phi$  8.9 相当

###### [温度設定]

ガス中の温度は全て一定とした。

#### (b) その他

前述資料と同じ

### A 3. 計算結果

計算結果を Fig.A1～A3 に示す。計算の結果、伝熱面積が大きい方がより試験結果に近い温度特性を示すことが判明した。ただし、温度一定条件では伝熱面積の増加と共に内部温度を上昇するため、本計算では温度分布を与えた方がよいと考えられる。実験でも同様に火炎の温度分布を計測する事が必要である。

以上

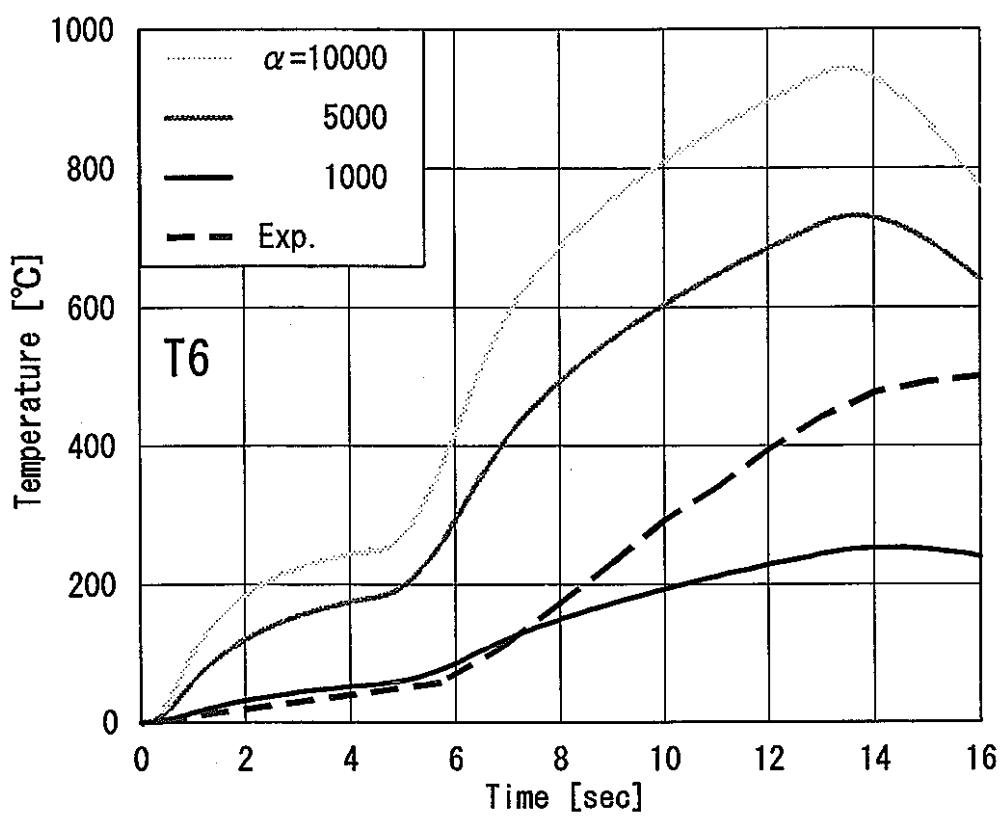


Fig.A1 Analytical Results(Equivalent Area:  $\phi$  26.8)

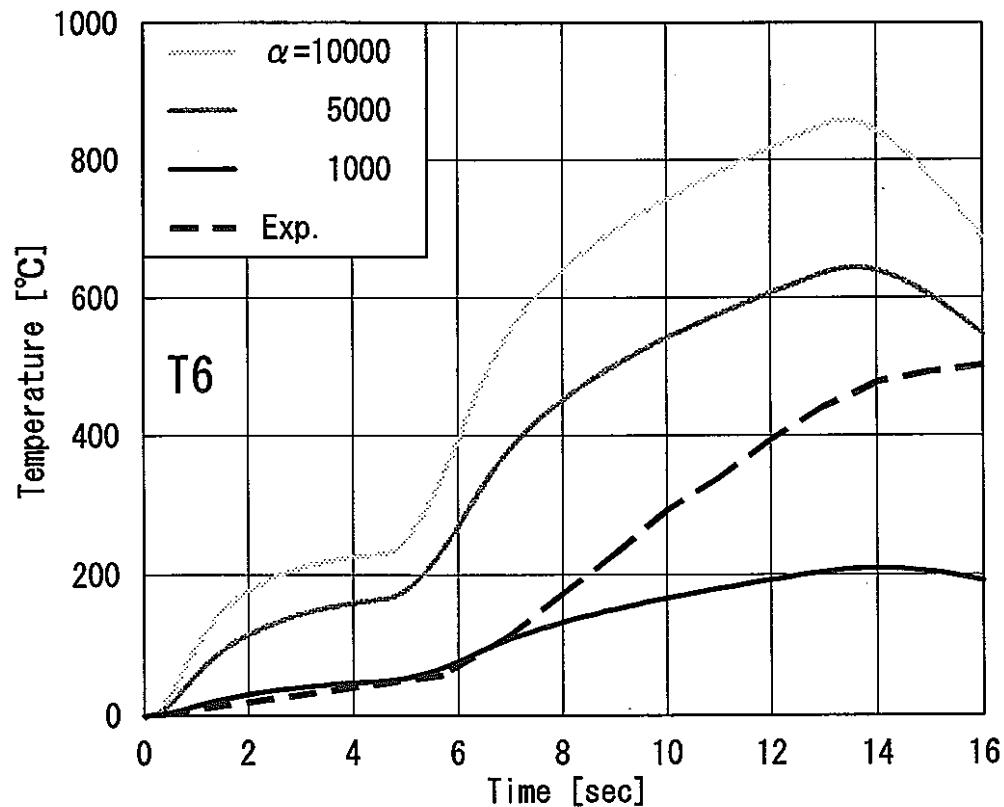


Fig.A2 Analytical Results(Equivalent Area:  $\phi$  20.0)

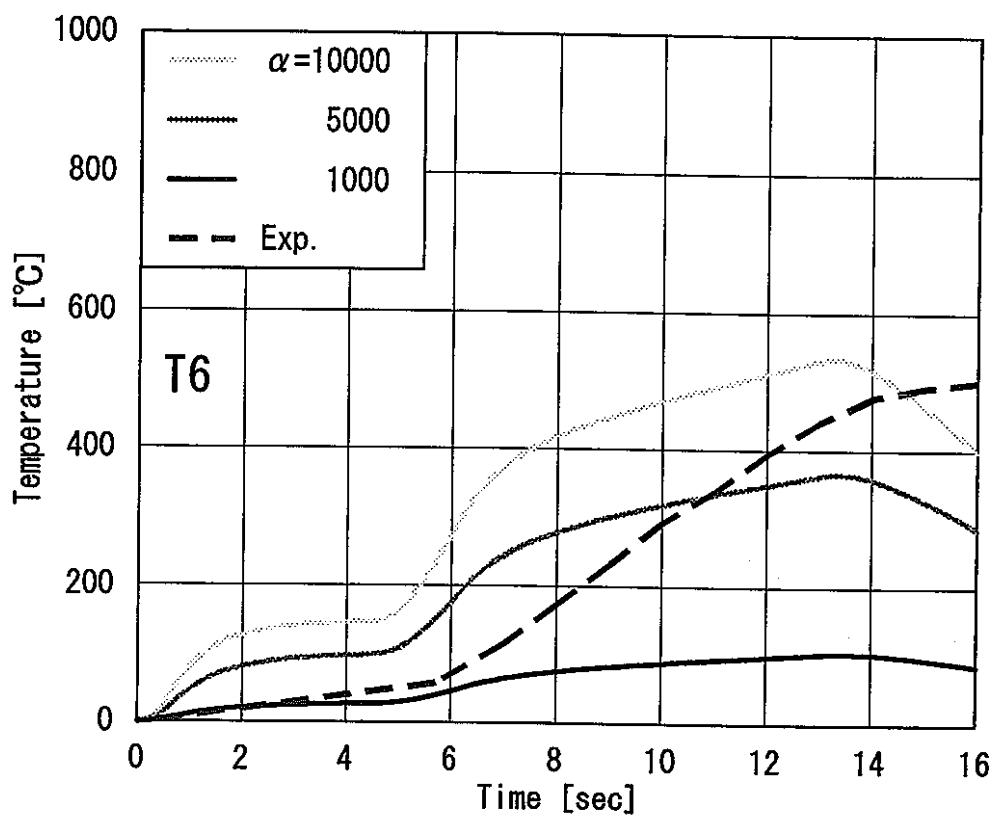
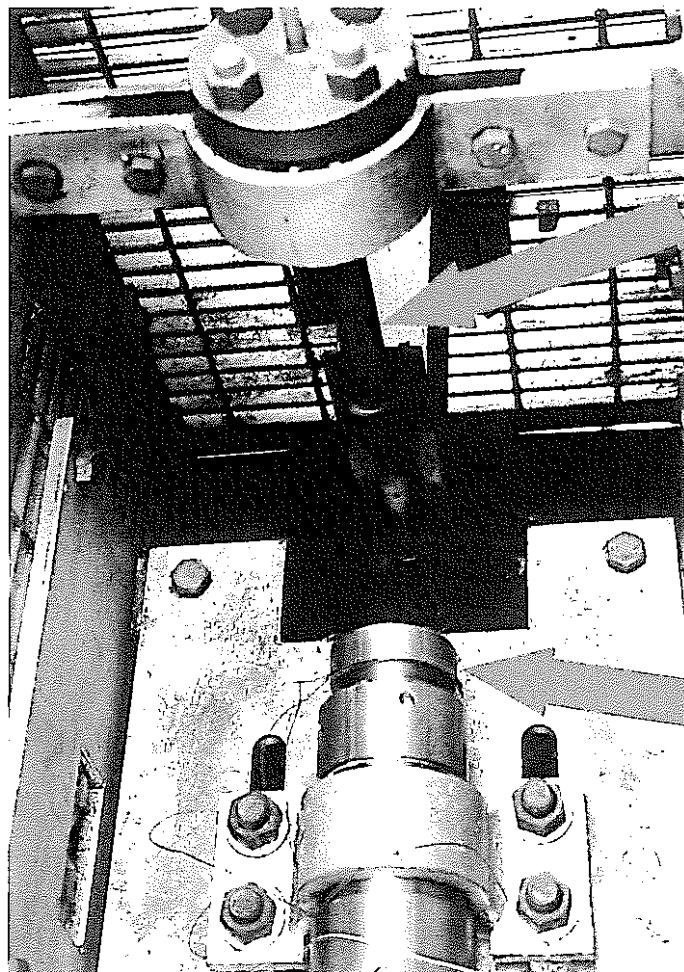


Fig.A3 analytic Results(Equivalent Area:  $\phi$  8.9)

# 写 真 集



Test body (SG Tube)

Explosive torch

Photo 1  
Outer appearance of testing

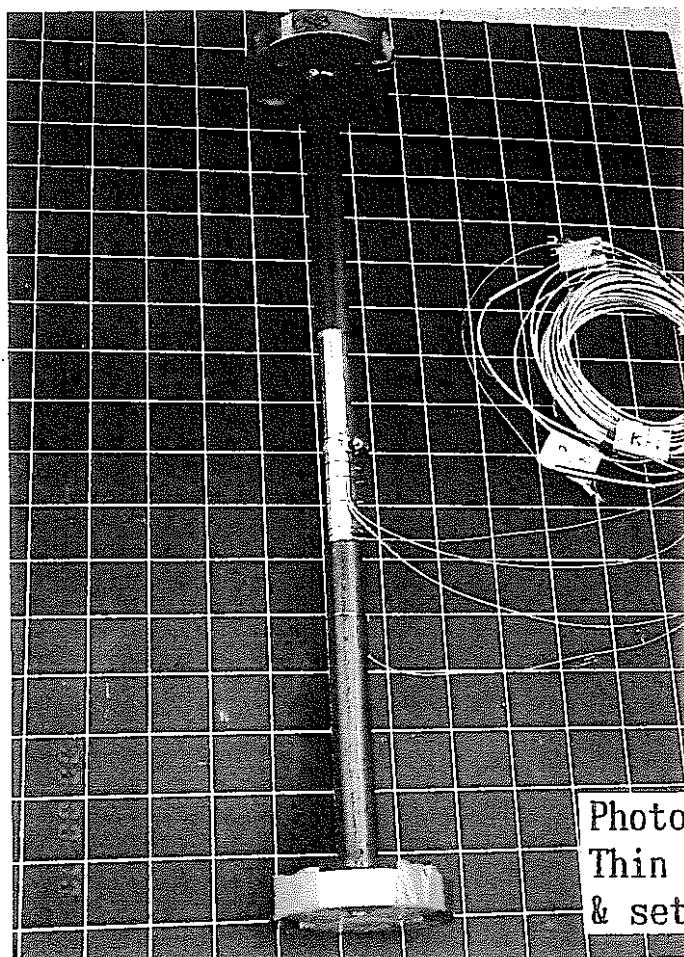


Photo 2  
Thin walled part of test body  
& setting condition of T/C

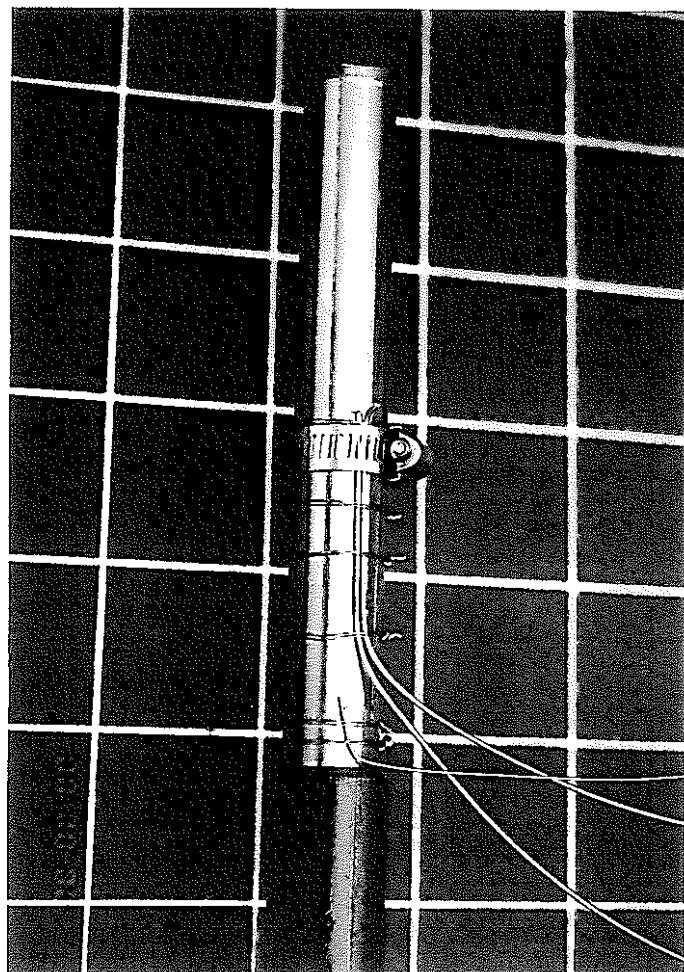


Photo 3  
Detail of test body

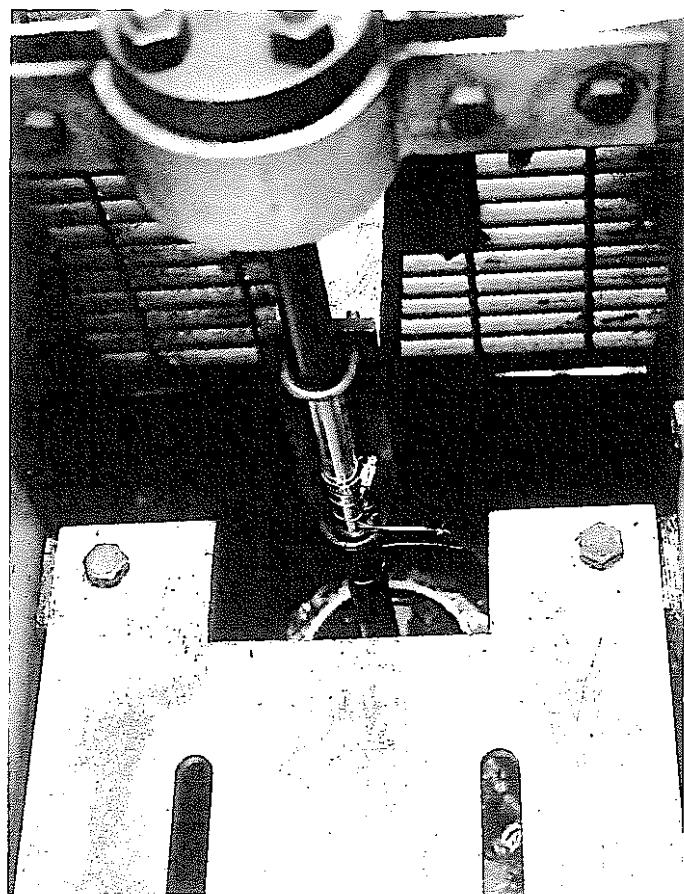
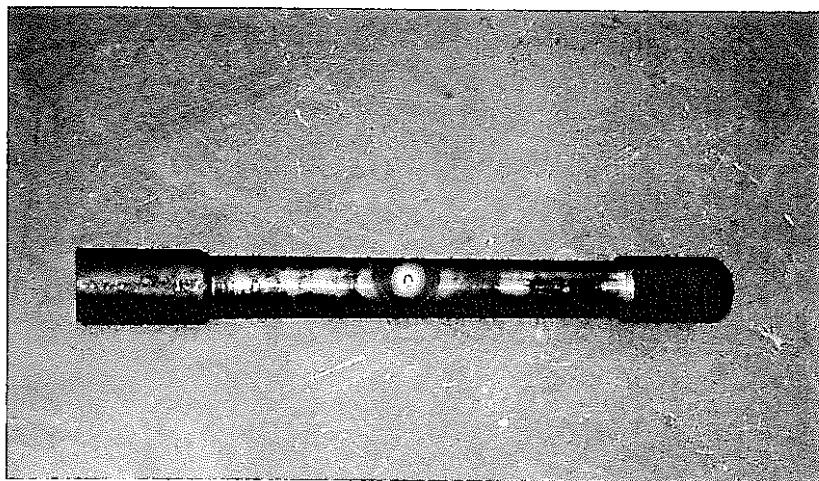
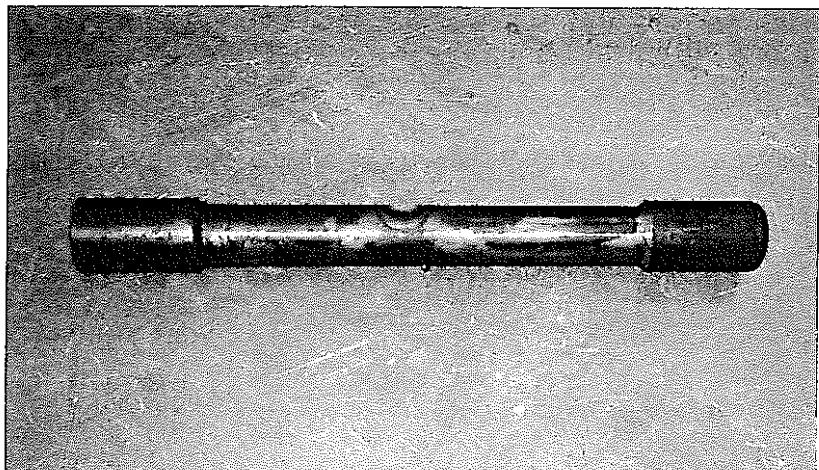


Photo 4  
Test body before test



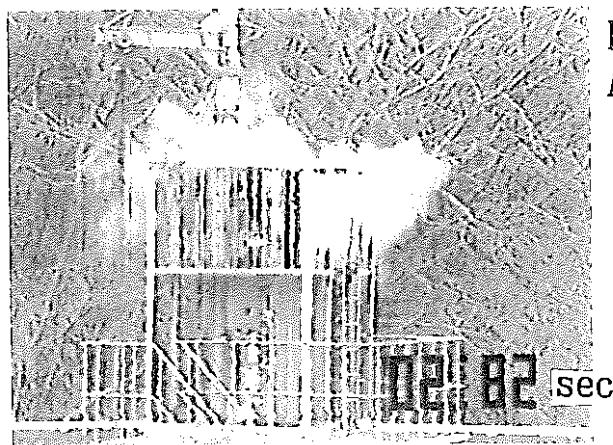
Front view



Side view

Photo 5 Test result of dummy bar instead of tube  
for quantifying heat flux

Photo 6  
Appearance under test



Starting of steam flow



Starting of torch blow



Tube failure point  
with bursting sound



End of test

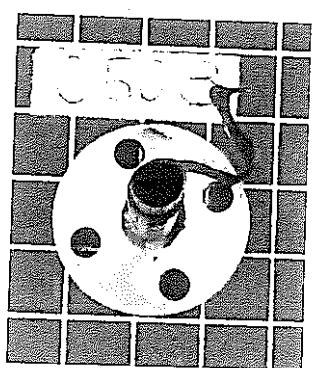
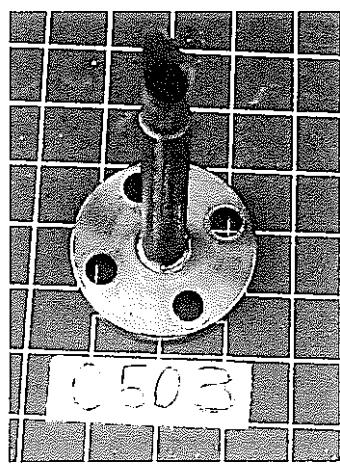
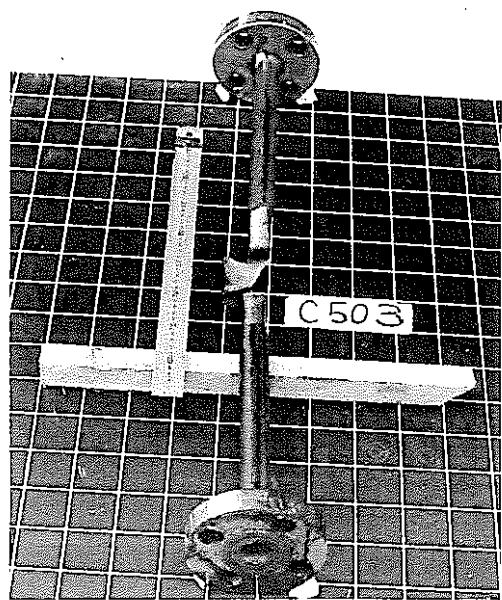


Photo 7 Appearance of tube failure in case of steam stagnation  
[ Test No. C503 ]

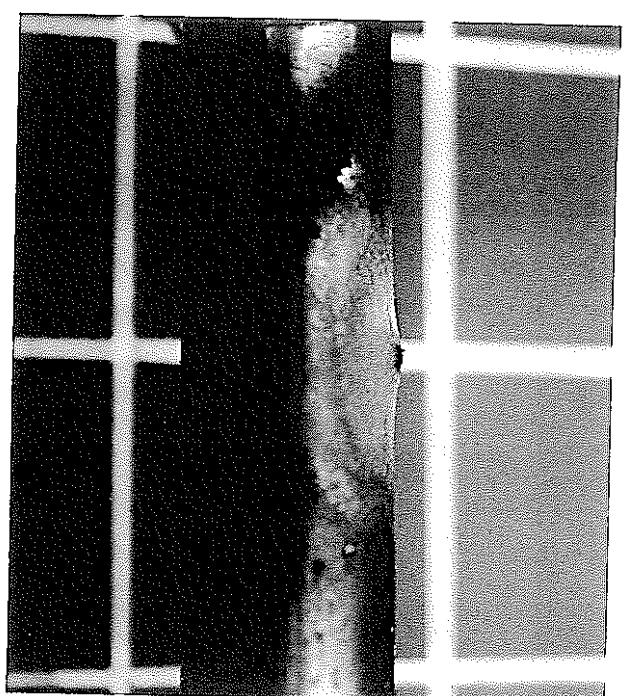
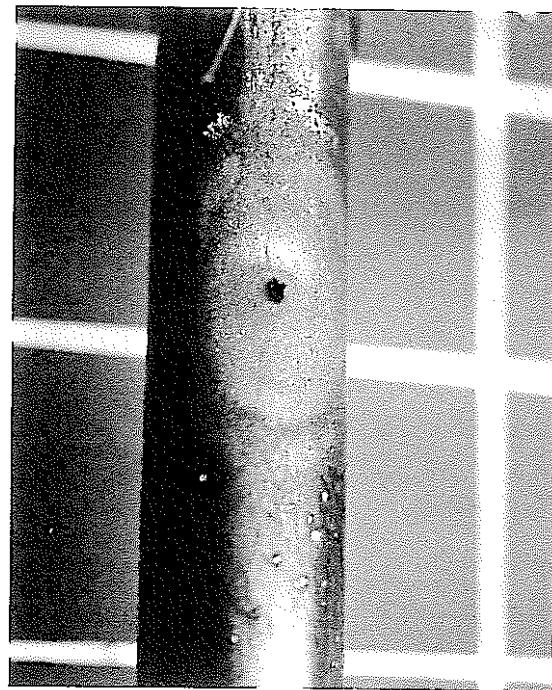
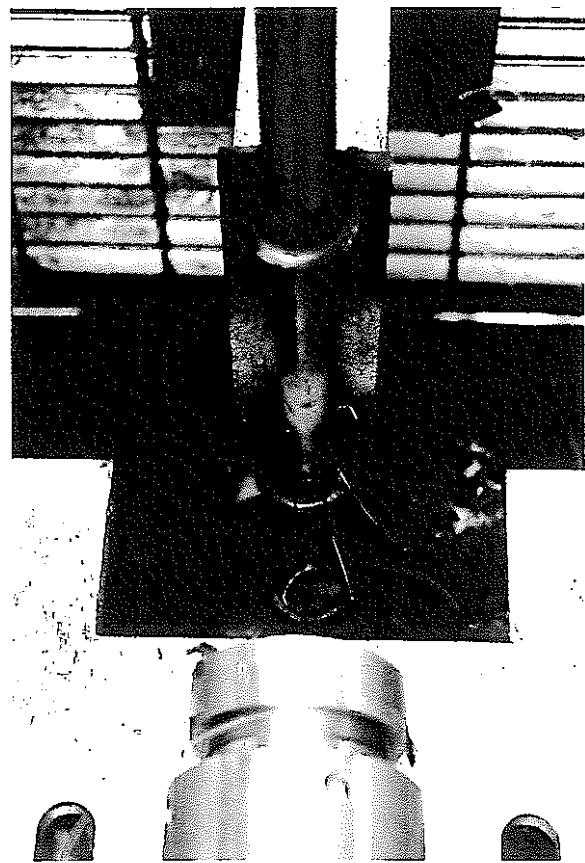


Photo 8 Appearance of pin hole failure in case of steam flow  
[ test No. C504 ]