

JAERI-M

6 7 9 9

アルミニウム外筒計測キャップセルの開発(第2報)  
(A1100-0-SUS-304摩擦圧接管の温度勾配下における  
熱サイクル試験)

1976年11月

田中 熊・伊藤 治彦・青山 芳夫\*・二松 敬治\*

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問合せは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

アルミニウム外筒計測キャップセルの開発（第2報）  
(A1100-0—SUS-304摩擦圧接管の温度勾配  
下における熱サイクル試験)

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部  
田中 真・伊藤治彦・青山芳夫\*・二松敬治\*

(1976年10月29日受理)

アルミニウム外筒計測キャップセルを実用化するにあたって、アルミニウムとステンレス鋼の摩擦圧接による接合部の強度評価を行った。A1100-0とSUS-304の摩擦圧接管の接合部に、原子炉内の状態を模擬した温度勾配を与えた、50回の熱サイクル試験を実施した。温度勾配は、この接合管をガンマ発熱率約10w/gの原子炉内雰囲気に装荷したとき、管の自己発熱によって生ずる値であり、管の内側に電気ヒータを装荷して与えた。熱サイクルを実施したサンプルについて、寸法検査、ヘルムリーク試験、引張試験、水圧バースト試験および金相試験を実施した。その結果と熱サイクル試験を実施しないサンプルについての同種試験結果との比較検討の結果、両者の間にとくに有意な差は見られなかった。

本実験により、アルミニウムを JMTR の計測キャップセルの外筒に使用できるとの結論が得られた。  
本報告書は、この試験結果をまとめたものである。

JAERI - M 6799

Development of an Instrumented Aluminum Outer-Tube Capsule, (2)  
- Thermal-cycle test on the Aluminum-Stainless Steel transition joint -

Isao TANAKA, Haruhiko ITO, Yoshiro AOYAMA\*  
and Keiji FUTAMATSU\*

Division of JMTR Project, Oarai, JAERI

(Received October 29, 1976)

Mechanical properties of aluminum-stainless steel friction-welded transition joints were investigated to realize an instrumented aluminum outer-tube capsule. Dimensional change, helium leak, tensile strength, burst strength and microstructure have been studied comparatively between the transition-joint tube subjected to 50 thermal cycles and that without heating. In the thermal-cycle tests, a temperature gradient due to about 10 w/g of gamma heat generation was simulated by an electric heater pin placed in the tube. There were observed no significant differences between the two tubes.

The instrumented aluminum outer-tube capsule may thus be employed usefully for irradiation in JMTR.

---

\* Japan Oxygen Co., Ltd.

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. A 1100-0 アルミニウムと SUS 304 ステンレス鋼の接合方法 .....	2
3. 接合材についての各種試験 .....	3
3-1 各種試験の位置づけ .....	3
3-2 熱サイクル試験 .....	4
3-3 外観および寸法検査 .....	4
3-4 ヘリウムリーク試験 .....	5
3-5 引張試験 .....	5
3-6 バースト試験 .....	6
3-7 金相試験 .....	7
4. 結 論 .....	8
5. あとがき .....	9
附録 1 予備熱サイクル試験および熱計算 .....	10
附録 2 热サイクル試験方法 .....	12
参考文献 .....	13

## Contents

1. Foreword .....	1
2. Joined method to Al100-0 with SUS-304 .....	2
3. Tests of joined elements .....	3
3-1 Purpose of tests .....	3
3-2 Thermal cycling test .....	4
3-3 Appearance and dimensional measurement test .....	4
3-4 Helium leak test .....	5
3-5 Tensile test .....	5
3-6 Burst test .....	6
3-7 Metalographic test .....	7
4. Conclusion .....	8
5. Postscript .....	9
6. Addition 1 Preliminary thermal cycling test and heat transfer computation .....	10
7. Addition 2 Procedure for the thermal cycling test .....	12

## 図 目 次

Fig. 1	アルミニウム外筒計測キャップセル概念図	19
Fig. 2	接合管の外観写真	20
Fig. 3	接合棒の外観写真	20
Fig. 4	接合管の熱サイクル試験片およびヘリウムリーク試験片の形状	21
Fig. 5	熱サイクル試験装置	22
Fig. 6	接合管の寸法検査測定位置	23
Fig. 7	熱サイクル試験を加えた接合管の外観写真	23
Fig. 8	アルミニウム母材の引張試験片形状	24
Fig. 9	接合棒の引張試験片形状	24
Fig. 10	接合管の引張試験片形状	24
Fig. 11	アルミニウム母材の引張試験後の外観写真	25
Fig. 12	接合棒の引張試験後の外観写真	25
Fig. 13	接合管の引張試験後の外観写真	25
Fig. 14	バースト試験片の形状	26
Fig. 15	熱サイクル試験を加えた接合管のバースト試験後の外観写真	27
Fig. 16	熱サイクル試験を実施しない接合管のバースト試験後の外観写真	27
Fig. 17	バースト試験を行った接合管の外観写真	27
Fig. 18	「技術資料」 <sup>4)</sup> より抜粋したアルミニウム-ステンレス接合管 のバースト試験片形状	28
Fig. 19	「技術資料」 <sup>4)</sup> より抜粋した、アルミニウム-ステンレス接合管 のバースト試験後の外観写真	29
Fig. 20	接合棒の接合部拡大写真	30
Fig. 21	熱サイクル試験を加えた接合管の接合部拡大写真	31
Fig. 22	熱サイクル試験後にバースト試験を行った接合管の接合部拡大写真	32
Fig. 23	熱サイクル試験を実施しない接合管のバースト試験後の接合部 拡大写真	33
Fig. 24	熱サイクル予備試験における接合管の温度分布測定位置	34
Fig. 25	熱サイクル試験における接合管の温度分布計算モデル	35
Fig. 26	熱サイクル試験における接合管の温度分布計算結果	36
Fig. 27	熱サイクル試験における接合管の接合面からの距離と接合管 内外壁温度差	37

## 表 目 次

Table 1	A 1100-0 および SUS-304 母材の成分表	14
Table 2	熱サイクル試験条件	14
Table 3	寸法検査結果	15
Table 4	ヘリウムリーク試験結果	16
Table 5	引張試験結果	16
Table 6	バースト試験結果	17
Table 7	「技術資料」 <sup>4)</sup> より抜粋した、アルミニウムーステンレス 接合管のバースト試験結果	17
Table 8	熱サイクル予備試験の接合管温度分布測定結果	18

## Contents of Figure

Fig. 1	Drawing of an instrumented aluminum outer-tube capsule assembly .....	19
Fig. 2	Photograph of Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tubes .....	20
Fig. 3	Photograph of Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint rods .....	20
Fig. 4	Specimen of Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tube for thermal cycling and helium leak tests ....	21
Fig. 5	Apparatus for thermal cycling test .....	22
Fig. 6	Dimensional measurement positions of Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tube .....	23
Fig. 7	Photograph of Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tube subjected to thermal cycling test .....	23
Fig. 8	Specimen of Al100-0 for tensile test .....	24
Fig. 9	Specimen of Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint rod for tensile test .....	24
Fig. 10	Specimen of Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tube for tensile test .....	24
Fig. 11	Photograph of tensile tested Al100-0 .....	25
Fig. 12	Photograph of tensile tested Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint rods .....	25
Fig. 13	Photograph of tensile tested Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tubes .....	25
Fig. 14	Specimen of Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tube for tensile test .....	26
Fig. 15	Photograph of burst tested Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tubes subjected to thermal cycling test .....	27
Fig. 16	Photograph of burst tested Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tubes subjected to thermal cycling test .....	27
Fig. 17	Photograph of crack in burst tested Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tube subjected to thermal cycling test .....	27

Fig. 18 Specimen of Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tube for burst test from ref. 4) .....	28
Fig. 19 Photograph of burst tested Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tube from ref. 4) ....	29
Fig. 20 Micrograph of Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint rods .....	30
Fig. 21 Micrograph of Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tubes subjected to thermal cycling test .....	31
Fig. 22 Micrograph of Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tubes subjected to thermal cycling and burst test ..	32
Fig. 23 Micrograph of Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tubes subjected to burst test .....	33
Fig. 24 Measuring positions of temperature distribution in Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tube in preliminary thermal cycling test .....	34
Fig. 25 TAC2D thermal model of Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tube of thermal cycling test .....	35
Fig. 26 Temperature distribution in Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tube by heat transfer computer code TAC2D .....	36
Fig. 27 Temperature difference between inner and outer surface of the tube wall (on SUS-304 side) vs. distance from the joint face .....	37

#### Contents of Table

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of used materials .....	14
Table 2 Condition of thermal cycling test .....	14
Table 3 Dimensional measurement results of Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tubes .....	15
Table 4 Helium leak test results of Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tubes .....	16
Table 5 Tensile test results of Al100-0 metal and Al100-0—SUS-304 friction welded transition joints .....	16
Table 6 Burst test results of Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tubes .....	17

Table 7 Burst test results of Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tubes from ref. 4) .....	17
Table 8 Temperature distribution measuring result in Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tube in preliminary thermal cycling test .....	18

## 1. まえがき

JMTRにおける計測キャップセルの外筒材として、現在 SUS-304 ステンレス鋼が使用されている。この理由は、第一に、ステンレス鋼が強度、耐食性（純水に対する）などの点で原子炉構造材として優れた性質を保有しているためである。計測キャップセルには、熱電対により代表される計測線および温度制御用配管によって代表される配管が使用されている。これらの配線配管の材質（計測線についてはシース材）は、多少の例外（高温測定用熱電対など）はあるが、おもにステンレス鋼あるいはその相当材である。一般に、これらの配線配管のキャップセル端栓貫通部をシールする方法としては、ロウ付けおよび溶接が適用されるので、キャップセル端栓材をステンレス鋼とすれば、シール施工が技術的に容易であり、結果として十分な性能（気密性、強度など）が得られる。この端栓をステンレス鋼製の外筒に溶接で接続することは容易なことである。これがステンレス製外筒を使用している第二の理由である。

しかしきステンレス鋼には、下記の欠点もある。

- ① 中性子吸収断面積が比較的大きい（アルミニウムの約20倍）。
- ② 照射後の誘導放射能が高いので廃棄物としての取扱いが厄介である。

一方アルミニウムは、強度、耐食性についてステンレス鋼に劣るが、ステンレス鋼に比べて下記のような利点を有する。

- ① 中性子吸収断面積が小さい（ステンレス鋼の約1/20）。したがって原子炉に対しては余剰反応度を稼げるので原子炉全体から観て中性子経済に寄与することができる。キャップセルに対しては flux depression を小さくできるので試料にあたる中性子照射量を大きくできる。
- ② 照射後の誘導放射能が小さく減衰も速いので、廃棄物としての取扱いが容易である。
- ③ キャップセル外筒の内側にアルミニウム熱媒体を設ける場合、外筒と熱媒体を一体とすることが可能である。これによって不必要的ガスギャップを無くすことができる上にアルミニウムの熱伝導率はステンレス鋼に比べて15倍弱であるため、試料の発熱量を比較的高出力にした燃料照射が可能であり、また材料照射の場合には、高い中性子束の照射位置（この位置では、一般にガンマ発熱率が高い）でも比較的低い温度で試料を照射できる。
- ④ アルミニウムはステンレス鋼に比べて柔らかいのでキャップセル照射後、ホットラボでの解体が容易である。

一方さきに述べたように、計測線のシース材および温度制御用配管類はステンレス鋼あるいはその相当材であるため、キャップセル端栓貫通部のシール（ロウ付けまたは溶接）のためには、端栓にはステンレス鋼を用いなければならない。したがってアルミニウムを外筒とする計測キャップセルを実現するには、Fig. 1 の例に示すようにアルミニウムとステンレス鋼を接合する必要がある。この両材を通常の溶接で接合させる場合、気密性および強度などについて十分な性能を得ることはできない。したがってこのような異種金属の接合を実現させる手段として、現状では拡散溶接（diffusion bonding）、爆発圧接（explosive welding）、摩擦圧接（friction welding）などが考えられる。拡散溶接による方法はその実績がみあたらない。爆発圧接についてはアルミニウムとステンレス鋼を直接接合する方法や中間にチタンなどの別金属をサンドイッチする方法<sup>1)</sup>などが実現され、JMTRでも使用実績が

ある<sup>2)</sup>。また摩擦圧接についても、JMTRすでにアルミニウム外筒計測キャップセルを照射した実績があり、JAERI-Mレポートに報告されている<sup>3)</sup>。ただしこの報告書において問題点が指摘されており、これを評価することが今回の実験の目的である。

なおこの報告書<sup>3)</sup>では爆発圧接による接合法の評価も行っており、摩擦圧接と同等の強度が得られたことが報告されている。

ここでは接合方法として摩擦圧接を使用した。この理由は下記のとおりである。

① 前掲報告書<sup>3)</sup>で指摘しているように、爆発圧接の場合、爆薬の種類、Al-Ti または Ti-SUS 間への薬材の有無など圧接時の条件が不明であるために、炉内での化学反応などの心配のない摩擦圧接法を使用する。

② 加工方法上、一般に爆発圧接は比較的大きい板を接合するのに使用される。したがってキャップセルに適用するにあたっては、摩擦圧接法による接合棒（あるいは管）の方がキャップセル用部品として適している。

③ 最近アルミニウムとステンレス鋼の接合棒および管が市販されるようになってその入手が容易になり、しかもその技術資料<sup>4)</sup>も公開されている。ただしこの技術資料には、接合管を原子炉内で使用する際に、炉内のガンマ線発熱により、接合管の内外壁に温度勾配が生ずるが、この温度勾配下における強度評価を行う必要がある。温度勾配下で使用する際の問題点は下記のとおりである。なおこの問題点については爆発圧接法によって製作した場合についても同様である。

アルミニウムの熱伝導率はステンレス鋼のそれに比べて 1.5 倍弱であり、したがって接合管のステンレス鋼側に生ずる温度勾配はアルミニウムのそれよりかなり大きいものとなる。さらにアルミニウム熱膨張率はステンレス鋼より約 4 倍大きい。一方アルミニウムはステンレス鋼に比べてその比重が約 1/3 なので、炉内で使用する際に生ずるガンマ発熱率はステンレス鋼に比べて小さくなるが、いずれにしても接合管の応力分布は接合面で不連続になっていると考えられる。

したがってこの点について実験を行ない、接合部の強度の評価を行わなければ、アルミニウム外筒計測キャップセルの本格的実施に踏み切ることはできない。なお、前述した技術資料<sup>4)</sup>には温度勾配下での評価試験を除いてほとんどすべての試験が網羅され問題ないと判断されるので、今回の実験は温度勾配下での評価試験のみに絞って実施した。

この報告書はアルミニウムとして A1100-0、ステンレス鋼として SUS-304 を使用し摩擦圧接法によって製作した接合管について温度勾配下で熱サイクル試験を行ない、そのサンプルについて引張、水圧バーストおよび金相試験を実施したのでその結果について述べたものである。

## 2. A1100-0 アルミニウムと SUS-304 ステンレス鋼の接合方法

A1100-0 アルミニウム（以下 Al と略記する）と SUS-304 ステンレス鋼（以下 SUS-304 と略記する）の接合方法としてフライホイル式摩擦圧接法を採用した。使用した母材および圧接条件など下記する。母材の化学成分および機械的性質を Table 1 に示す。

### ・ 使用母材

ステンレス鋼 SUS 304 (5.0 mmφ)

ある<sup>2)</sup>。また摩擦圧接についても、JMTRすでにアルミニウム外筒計測キャップセルを照射した実績があり、JAERI-Mレポートに報告されている<sup>3)</sup>。ただしこの報告書において問題点が指摘されており、これを評価することが今回の実験の目的である。

なおこの報告書<sup>3)</sup>では爆発圧接による接合法の評価も行っており、摩擦圧接と同等の強度が得られたことが報告されている。

ここでは接合方法として摩擦圧接を使用した。この理由は下記のとおりである。

- ① 前掲報告書<sup>3)</sup>で指摘しているように、爆発圧接の場合、爆薬の種類、Al-Ti または Ti-SUS 間への薬材の有無など圧接時の条件が不明であるために、炉内での化学反応などの心配のない摩擦圧接法を使用する。
- ② 加工方法上、一般に爆発圧接は比較的大きい板を接合するのに使用される。したがってキャップセルに適用するにあたっては、摩擦圧接法による接合棒（あるいは管）の方がキャップセル用部品として適している。
- ③ 最近アルミニウムとステンレス鋼の接合棒および管が市販されるようになってその入手が容易になり、しかもその技術資料<sup>4)</sup>も公開されている。ただしこの技術資料には、接合管を原子炉内で使用する際に、炉内のガンマ線発熱により、接合管の内外壁に温度勾配が生ずるが、この温度勾配下における強度評価を行う必要がある。温度勾配下で使用する際の問題点は下記のとおりである。なおこの問題点については爆発圧接法によって製作した場合についても同様である。

アルミニウムの熱伝導率はステンレス鋼のそれに比べて 1.5 倍弱であり、したがって接合管のステンレス鋼側に生ずる温度勾配はアルミニウムのそれよりかなり大きいものとなる。さらにアルミニウム熱膨張率はステンレス鋼より約 4 倍大きい。一方アルミニウムはステンレス鋼に比べてその比重が約 1/3 なので、炉内で使用する際に生ずるガンマ発熱率はステンレス鋼に比べて小さくなるが、いずれにしても接合管の応力分布は接合面で不連続になっていると考えられる。

したがってこの点について実験を行ない、接合部の強度の評価を行わなければ、アルミニウム外筒計測キャップセルの本格的実施に踏み切ることはできない。なお、前述した技術資料<sup>4)</sup>には温度勾配下での評価試験を除いてほとんどすべての試験が網羅され問題ないと判断されるので、今回の実験は温度勾配下での評価試験のみに絞って実施した。

この報告書はアルミニウムとして A1100-0、ステンレス鋼として SUS-304 を使用し摩擦圧接法によって製作した接合管について温度勾配下で熱サイクル試験を行ない、そのサンプルについて引張、水圧バーストおよび金相試験を実施したのでその結果について述べたものである。

## 2. A1100-0 アルミニウムと SUS-304 ステンレス鋼の接合方法

A1100-0 アルミニウム（以下 Al と略記する）と SUS-304 ステンレス鋼（以下 SUS 304 と略記する）の接合方法としてフライホイル式摩擦圧接法を採用した。使用した母材および圧接条件などを下記する。母材の化学成分および機械的性質を Table 1 に示す。

・使用母材

ステンレス鋼 SUS 304 (5.0 mmφ)

アルミニウム A1100-O (50 mm $\phi$ )

・圧接条件

フライホイル式摩擦圧接法

初期回転数 1850 rpm

圧接機の最大推力 35 ton

・製作工場

日本酸素(株)東京製作所

この圧接条件で圧接し加工製作した Al-SUS 304 摩擦圧接管(以下、接合管と略記する)および Al-SUS 304 摩擦圧接棒(以下、接合棒と略記する)の外観をそれぞれ Fig. 2 および 3 に示す。なお、接合管は接合棒と同じ素材を使用した。

### 3. 接合材についての各種試験

#### 3.1 各種試験の位置づけ

本接合管を JMTR のキャップセル端栓として使用するにあたっての技術的検討で残されている課題は、温度勾配下での評価試験のみである。

JMTR は通常、1サイクル(28日間)、出力 50 MW で運転されるが、その中間で燃料交換などの作業のために、約 2 日間の運転停止期間がある。またキャップセルは、数サイクル間照射されるものが多く、3 サイクル照射としても最少 6 回の熱サイクルを加えられる。したがって、この接合管を JMTR で使用するにあたって、熱サイクル試験を行い、接合管の気密性および強度にかかわる、熱サイクルの影響に関して確認しておく必要がある。ここで、温度勾配のない熱サイクル試験に関しては、すでに行われており、満足な結果が得られている<sup>4)</sup>。そこで、今回の実験では、この接合管を原子炉内に装荷したときに生ずる接合管の温度勾配を、ヒータによって付加した。

本接合管を用いたキャップセルの接合部は、Fig. 1 の例に示したように、キャップセルの上端部に近いところになり、炉心との相対位置は、炉心上端部付近になる。一方、接合部近傍に加えられる熱は、そのほとんどが、キャップセル外筒自身のガンマ線による発熱のみである。さらに、JMTR の炉心上端部におけるガンマ発熱率は、燃料領域の照射孔で最も大きいが、その値は、せいぜい 5 w/g である。そこで、本実験においては、十分な余裕を考慮し 10 w/g のガンマ発熱があるときに相当する温度勾配を、接合管の接合部近傍に与えた状態で熱サイクル試験を実施した。また、熱サイクルの回数は、前述したように、JMTR で加えられる熱サイクル数を考慮して 50 回とした。そして、熱サイクル試験を実施したサンプルについて、下記のような検査および材料試験を行い、熱サイクルを加えないサンプルの試験結果との比較検討を行った。

#### 行った検査および材料試験

- ① 外観・寸法検査
- ② ヘリウムリーク試験
- ③ 引張試験
- ④ バースト試験

アルミニウム A1100-O (50mm $\phi$ )

・圧接条件

フライホイル式摩擦圧接法

初期回転数 1850 rpm

圧接機の最大推力 35 ton

・製作工場

日本酸素(株)東京製作所

この圧接条件で圧接し加工製作した Al-SUS 304 摩擦圧接管(以下、接合管と略記する)および Al-SUS 304 摩擦圧接棒(以下、接合棒と略記する)の外観をそれぞれ Fig. 2 および 3 に示す。なお、接合管は接合棒と同じ素材を使用した。

### 3. 接合材についての各種試験

#### 3.1 各種試験の位置づけ

本接合管を JMTR のキャップセル端栓として使用するにあたっての技術的検討で残されている課題は、温度勾配下での評価試験のみである。

JMTR は通常、1サイクル(28日間)、出力 50 MW で運転されるが、その中間で燃料交換などの作業のために、約 2 日間の運転停止期間がある。またキャップセルは、数サイクル間照射されるものが多く、3 サイクル照射としても最少 6 回の熱サイクルを加えられる。したがって、この接合管を JMTR で使用するにあたって、熱サイクル試験を行い、接合管の気密性および強度にかかわる、熱サイクルの影響に関して確認しておく必要がある。ここで、温度勾配のない熱サイクル試験に関しては、すでに行われており、満足な結果が得られている<sup>4)</sup>。そこで、今回の実験では、この接合管を原子炉内に装荷したときに生ずる接合管の温度勾配を、ヒータによって付加した。

本接合管を用いたキャップセルの接合部は、Fig. 1 の例に示したように、キャップセルの上端部に近いところになり、炉心との相対位置は、炉心上端部付近になる。一方、接合部近傍に加えられる熱は、そのほとんどが、キャップセル外筒自身のガンマ線による発熱のみである。さらに、JMTR の炉心上端部におけるガンマ発熱率は、燃料領域の照射孔で最も大きいが、その値は、せいぜい 5 w/g である。そこで、本実験においては、十分な余裕を考慮し 10 w/g のガンマ発熱があるときに相当する温度勾配を、接合管の接合部近傍に与えた状態で熱サイクル試験を実施した。また、熱サイクルの回数は、前述したように、JMTR で加えられる熱サイクル数を考慮して 50 回とした。そして、熱サイクル試験を実施したサンプルについて、下記のような検査および材料試験を行い、熱サイクルを加えないサンプルの試験結果との比較検討を行った。

#### 行った検査および材料試験

- ① 外観・寸法検査
- ② ヘリウムリーク試験
- ③ 引張試験
- ④ バースト試験

### ⑤ 金相試験

#### 3.2 热サイクル試験方法

接合管の熱サイクル試験片の形状寸法をFig. 4に示す。また熱サイクル試験装置の概略図をFig. 5に示す。熱サイクル試験装置は試験片の内側に熱源を置き、外側を流水で冷却することにより、試験片壁に温度勾配が生じるようにした。この温度勾配によって接合部より少し離れた位置のSUS 304壁(厚さ、3mm)に生ずる温度差を約20degとなるように熱源の出力を調節した。20degの値は、ガンマ線による接合管の自己発熱を約10w/gとしたときに、SUS 304壁に生ずる温度差に相当する。熱サイクル試験は、温度勾配付加時間10分、冷却時間5分とし、サイクル数は50回とした。なお、SUS 304壁に20degの温度差が生じているときには、Al壁には約3degの温度差があった。ここで熱サイクル試験にあたって、ヒータ出力などの熱サイクル条件は、予備試験および熱計算の結果により決定した。その値はTable 2に示す。予備試験および熱計算に関する詳細は、付録2で述べる。

#### 3.3 外観および寸法検査

試料No.1～9の熱サイクル試験を行った接合管の熱サイクル試験前後の外径、内径および肉厚の寸法検査結果をTable 3に示す。また、測定位置をFig. 6に示す。Al側およびSUS 304側ともに端面より約10mm内側で、互いに約90°離れた2ヶ所の位置を測定した。測定機具は±0.01mmの精度のマイクロメータを使用した。測定結果は、Table 3に示すように、いずれの試験片も、熱サイクル試験前後の内径、外径および肉厚ともに有意な差がない。測定値が異なる場合でもその差は、せいぜいマイクロメータの精度範囲の程度である。したがって、熱サイクル試験による寸法の変化はないといえる。また、この結果から、熱サイクル試験時にAlとSUS 304の熱膨張係数の違いによって生じる熱応力、AlおよびSUS 304の加熱部と非加熱部との間に生じる熱応力および温度勾配によって生じる熱応力は、いずれもAlの耐力あるいはSUS 304の降伏応力よりも低い値であり、したがって、試験片に変形が生じなかったと考えられる。

つぎに、試料No.1～3の熱サイクル試験前後の接合管の外観をそれぞれFig. 2とFig. 7に示す。熱サイクル試験前はFig. 2に示すようにいずれも外観の異常はなかった。熱サイクル試験後は、No.1～9の試験片すべてにFig. 7に示すように、Al側の外面で冷却水に接する面に軽度の孔食と変色が生じた。変色した後はうすい灰色を呈しており、光沢がなくなっていた。一般に、アルミニウムとその合金の孔食は、多くの自然水および水道水中で生じるが、その程度は用いた水によって大いに異なる<sup>5)</sup>。なお、熱サイクル試験装置の冷却水系に使用したA5083アルミニウム合金製の冷却水溜槽の冷却水に接する内壁には、深さ0.5～1mmの試験片以上の大きな孔食が多数生じていた。また、接合管のAlの孔食はほぼ均一に分布しており、とくにAlとSUS 304との境界、すなわち、接合部近傍のAlのみが著しく腐食しているということはなかった。それゆえ、AlとSUS 304との異種金属接触による腐食は生じなかったと考えられる。したがって、Alの外面の腐食および変色は冷却水に使用した水道水に原因があるといえる。なお、試験片のAl側の内面およびSUS 304側の内外面に腐食は認められず、外観には異常がなかった。

### 3. 4 ヘリウムリーク試験

No. 1 ~ 9 の熱サイクル接合管試験片を熱サイクル試験前後にヘリウムリーク試験した。試験結果を Table 4 に示す。なお、ヘリウムリーク試験の方法は下記のとおりである。

#### ・ヘリウムリーク試験方法

試験方法	: フード吹付真空法
ヘリウムディテクタ	: MS-E 質量分析型(島津製作所製)
リークディテクタ感度	: $2.63 \sim 4.77 \times 10^{-10} \text{ atm cc/sec}$

Table 4 に示すように、接合管の熱サイクル試験前後のヘリウムリーク量は  $10^{-9} \sim 10^{-10} \text{ atm cc/sec}$  のオーダーであり、熱サイクル試験後でも十分な気密性を有していた。すなわち、熱サイクル試験を行っても試験片の気密性が低下することはなかったといえる。なお、JMTR のキャップセルのヘリウムリーク量に関する合格基準は、材料照射キャップセルの場合で、 $1 \times 10^{-6} \text{ atm cc/sec}$ 、燃料照射キャップセルの場合で、 $1 \times 10^{-8} \text{ atm cc/sec}$  以下であり、今回の試験結果は、十分に満足できるものである。

### 3. 5 引張試験

摩擦圧接に使用した Al 母材、試料 No. 3 6, No. 3 7, No. 4 0 の接合棒および熱サイクル試験を行った No. 4 ~ 6 の接合管の引張試験を行った。使用した引張試験機は下記のとおりである。

#### ・引張試験機

型 式	: アムスラー式油圧堅形
最 大 荷 重	: 50 ton
試験時のレンヂ	: 10 ton
検 定	: 日本海事協会検定
試 験 温 度	: 室温

Al 母材の試験片形状を Fig. 8 に、接合棒の試験片形状を Fig. 9 に、接合管の試験片形状を Fig. 10 に示した。また、引張試験の結果を Table 5 に示した。引張試験における破断位置は、Al 母材引張試験片では Fig. 11 に示すように平行部中央であり、破断は典型的な Cup and cone 状を呈していた。接合棒引張試験片では Fig. 12 に示すように接合部より離れた Al 母材であり、破面は Al 母材と同じく、3 本とも Cup and cone 状を呈していた。接合部には、はく離、割れなどは認められなかった。接合管引張試験片では、Fig. 13 に示したように、破断が Al 母材側のチャックのつかみの部分で生じており、破断は全周に及ばなかった。チャックのつかみの部分で破断した原因は、Al 母材にチャックの爪がくい込んだために、その部分の肉厚が減少したことによると考えられる。接合部近傍の Al 母材はかなり大きな変形をしていた。なお、接合部には、はく離、割れなどは認められなかった。つぎに、引張強さの値は、Table 5 に示すように、接合棒引張試験片が最も高かった。これは、接合棒引張試験片の場合、試験片の Al 部分の平行部の長さが、Al 母材引張試験片に比べてかなり短かかったために、Al 母材引張試験片よりも高い値となったと考えられる<sup>6)</sup>。また、引張試験では Al 母材の引張強さよりも SUS 304 の 0.2% 耐力の方がはるかに大きいので SUS 304 はほとんど変形しない。このために、接合部近傍の Al の変形が SUS 304 に拘束されたことも原因と考えられる<sup>7)</sup>。しかし、接合棒引張試験片と Al 母材引張試験片の引張強さの差異は非常に小さい。接合管引張試験片は前二者よりもや

や低い値となつたが、これは、上述したように破断位置がチャックのつかみの部分であり、しかも全周にわたって破断が生じなかつたためであると考えられる。したがつて、接合管の引張強度は、実際は接合棒引張試験片あるいはAl母材引張試験片と、今回の実験結果ほどの差違は無いと考えられる。本実験中、接合管の引張試験は、前述したように、引張試験機のチャックが接合管のAl部にくい込んだために、引張応力を正確に評価することができなかつた。そこで、引張応力の評価では、少くとも過大評価にならないように、チャックのくい込みによる接合管の断面積の減少を考慮に入れないで行つた。その結果、Table 5に示したように、所定の熱サイクルを加えた接合管で、 $9.5 \text{ kg/mm}^2$  以上の引張強度が確認された。この値は A 1100-0 の引張強度に関する ASTM 基準 (ASTM B 221-1100-0) の最小値  $7.7 \text{ kg/mm}^2$  に比べて大きく、また、Table 1 に示したミルシートのアルミニウムの引張強度  $10.0 \text{ kg/mm}^2$  と比べても、ほとんど差がない。以上のことから、本接合管を約  $10 \text{ w/g}$  のガンマ発熱率の雰囲気の原子炉中に装荷しても、引張応力に対して、十分に耐えられるということがわかつた。

### 3. 6 バースト試験

熱サイクル試験を行なわない試料 No 16, No 17, No 19 の接合管および熱サイクル試験を行なつた試料 No 1 ~ 3 の接合管についてバースト試験を行つた。バースト試験は、Fig. 14 に示したように、接合管の両端に端栓を TIG 溶接して行つた。

バースト試験の方法は、下記のとおりである。

- バースト試験の方法

バースト試験機：水圧ポンプ（最高使用圧力  $500 \text{ kg/cm}^2$ ）

圧 力 計：ブルドン管式圧力計（最高使用圧力  $500 \text{ kg/cm}^2$ ）

試 験 温 度：室温

バースト試験の結果を Table 6 に示す。Table 6 における接合管の破壊強さは薄肉円筒の式  $\sigma = Pd / 200t$  を適用して求めた。ここで、 $\sigma$  は破壊強さ  $\text{kg/mm}^2$ ,  $P$  は破壊圧力  $\text{kg/cm}^2$ ,  $t$  は肉厚 mm である。接合管の破壊強さの値は Table 6 に示すように、熱サイクル試験を行なわないものと、行なつたもので、特に有意な差はなかつた。

破壊強さの値は接合管あるいは接合棒の引張強さの値よりやや低いものも認められたが、全体的にはかなり高く、A 1100-0 の母材の引張強さの ASTM 基準値 (ASTM B 221-1100-0) を十分に満足した。それぞれの試験後の試験片の外観を Fig. 15 と Fig. 16 に示す。破壊の生じた位置は一つの試験片では一箇所であったが、試験片により Al 母材、Al 側 TIG 溶接部あるいは接合部とまちまちであった。しかし、Table 6 より明らかのように、熱サイクル試験の実施による破壊強度の低下は認められなかつた。また、Al-SUS 304 接合部での破壊は、熱サイクル試験を実施した接合管、熱サイクル試験を行なわない接合管の相方で生じておりこの結果、熱サイクルの影響に関して、接合部と母材で特に差がないと思われる。

つぎに、接合部で破壊した試験について接合部で破壊した原因を調べるために、試験片を切断して内側の接合部の外観を検査した。この結果、破壊した位置の内側の接合部には Fig. 17 に示すように特徴的な亀裂が認められた。また、亀裂は破壊した位置以外の接合部にも認められた。破壊した位置の Al 母材は、径方向外側にずれており、接合部は Al と SUS 304 に分割されていた。これらのこと

から、接合部で破壊した試験片では、ある内圧力で接合部に亀裂が発生し、この亀裂が加圧とともに  $A\ell$  側に拡大して  $A\ell$  を変形させながら進展し、また、亀裂の先端では接合部の剥離が生じ、ついに接合部が内圧力に耐えられなくなり、接合部で  $A\ell$  が径方向外側にずれて破壊に至ったと考えられる。なお、接合部以外で破壊した試験片についても検査したところ、No 17 の試験片を除いて 1 箇または数箇の亀裂が存在していた。

接合部内側の亀裂の発生原因は一つには試験片の形状すなわち、試験片の  $A\ell$  側の径に対する平行部の長さが短かいこと<sup>7)</sup>と引張試験の場合と同じく、接合部近傍の  $A\ell$  が SUS 304 に拘束されることより接合面にせん断応力、曲げ応力などが加えられるためであると考えられる<sup>7)</sup>。薄肉円筒では円周方向の応力は綫方向の約 2 倍であるので破壊は綫方向に生じるが、 $A\ell$  母材で破壊した No 3 の試験片では破壊の方向はほぼ円周方向であった。このことは上述した考えを裏づけている。さらに、上述した考えを裏づける根拠として以前に行なったバースト試験の結果を Table 7 に示す<sup>4)</sup>。バースト試験片は Fig. 18 に示すように  $A\ell$  側の平行部は十分に長かった。また、本試験片の場合、熱サイクル試験は行っていない。破壊強さは Table 7 に示したように十分に高い値であった。破壊は Fig. 19 に示したように  $A\ell$  母材で綫方向に生じており、また接合部内側には亀裂は存在しなかった。この結果は今回のバースト試験で接合部に亀裂が発生した原因が試験片の  $A\ell$  側の平行部が短かいためであったことを示唆している。つぎに、もう一つの原因として接合部に生じる金属間化合物などの中間相が考えられる。接合部には圧接時の摩擦熱により中間相が生じるが、この厚みは 3.7 項で示すように 1.5  $\mu$  程度であった。また接合部は熱サイクル試験のときに約 80 °C の温度に加熱されるが、この程度の低い温度では中間相は全く成長しない<sup>8), 9)</sup>。接合部の中間相の厚さが 2  $\mu$  程度までであれば接合部の引張強さは低下しないことが知られてる<sup>8)</sup>。したがって、バースト試験の場合では、中間相の厚さが 2  $\mu$  程度までであれば接合部の破壊強さは低下せず、接合部に亀裂あるいは割れなどは生じないと考えられる。なお、圧接時にたまたま  $A\ell$  の酸化膜などの異物が接合部に残留し、バースト試験でこの異物から微小な亀裂が発生し成長したとも考えられるが、Fig. 20～Fig. 23 に示すように、そのような異物あるいは微小な亀裂は認められなかった。これらのことから、接合部に亀裂が生じた原因是接合部の中間相などではなかったと考えられる。

以上の結果を総合的に判断すると、バースト試験では接合管の破壊強さは熱サイクル試験の影響はほとんど受けずしかも十分に高い値であったと評価できる。

### 3. 7 金相試験

接合棒および接合管について接合部近傍のミクロ組織の金相試験を行なった。No 30 と No 32 の接合棒、No 7～9 の熱サイクル試験後の接合管、No 1～3 の熱サイクル試験後にバースト試験した接合管および No 16, No 17, No 19 の熱サイクル試験を行わないバースト試験した接合管の接合部のミクロ組織をそれぞれ Fig. 20～Fig. 23 に示した。接合棒および接合管の検鏡位置は外径約 3.9 mm の位置とした。なお、バースト試験において接合部で破壊した接合管については破壊した位置の近傍の検鏡を行った。ミクロ組織検鏡では接合部の機械的性質に影響を与える中間相に注目した。Fig. 20～Fig. 23 に示したように、いずれも接合部には接合部に沿ってほぼ一定の厚みの中間相が存在していた。中間相には割れあるいは亀裂は認められなかった。中間相の厚みはおよそ 1.5  $\mu$  程度であり、局部的に厚いところでも 2  $\mu$  程度であった。また、熱サイクル試験を行った接合管と熱サイ

クル試験を行わなかった接合管のミクロ組織を比較した場合、中間相の厚みはとくに変わらない。このことは、本熱サイクル試験における加熱時の試験片の温度が約80°Cの低い温度であり、したがって中間相が成長しない<sup>8)</sup>ことからうなづける。この中間相は  $\text{Fe Al}_3$  および  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  などの金属間化合物が主体となっており硬くて脆い<sup>9)</sup>。しかし、中間相の厚みが2μ程度までであれば中間相による圧接部の引張強さの低下はないといわれている。なお、SUS 304とAlの両母材のミクロ組織は熱サイクル前後で変らなかった。

以上の結果、接合管接合部近傍のミクロ組織は熱サイクル試験を行っても変化はなく圧接のままの状態と同じく健全であり、したがってミクロ組織はまったく熱サイクル試験の影響を受けなかったといえる。

#### 4. 結論

Al-SUS 304摩擦圧接管をAl外筒キャップセルの外筒として使用するにあたって、その気密性、強度に関して、今回は温度勾配下における、熱サイクルの影響について確認実験を行った。

実験にあたって、接合管の形状は、実際にJMTRのキャップセル端栓として使用するものと等しくし、熱サイクル試験の条件は、Table 2に示したように、実際に炉内に挿入したときに加えられる熱的条件に、十分な余裕を考慮したものである。このような条件で、接合管に50回の熱サイクルを加えたのち、外観、寸法検査、ヘリウムリーク試験、引張試験、バースト試験そして金相試験を行った。また熱サイクルを加えないものについても同様の試験検査を行った。その結果、3.2～3.7で述べたように、外観、寸法検査、ヘリウムリーク試験および金相試験に関しては、熱サイクルを加えたものと、加えないものとに何ら有意な違いは見られなく、また欠陥などもなく、その結果は十分に満足のできるものであった。バースト試験結果については、その破断位置（一部、圧接面で破断したものがある）に問題を残したものの、熱サイクルを加えたものと、加えないものとの間に有意な差は見られなかったこと、JMTRの炉心に挿入したときに加えられる内圧および外圧（14kg/mm<sup>2</sup>G）に比べ、破壊強度が十分に大きいことから、JMTRのキャップセル外筒として使用するのに十分な強度を有するといえる。つぎに引張試験に関しては、実際にキャップセル外筒として使用する形状での強度評価を目的としたために、試験片の形状を管にした。このために、引張強度に関して、必ずしも厳密な評価はできなかった。しかし、キャップセル外筒として用いるには、十分な強度を有することは確認できた。

以上、Al-SUS 304摩擦圧接管に関し、JMTRの炉内で、約10w/gのガンマ発熱率を加えられたときに相当する、接合管内外壁温度差が得られる条件で、50回の熱サイクルを加え、各種の材料検査および試験を行った結果、本接合管は JMTR の炉内で加えられる熱サイクルに対して十分に耐えられることがわかった。

したがって、竹下らの検査結果<sup>3)</sup>と合わせて、本Al-SUS 304摩擦圧接管は、JMTRのキャップセル外筒としての仕様に十分なものであると結論できる。

クル試験を行わなかった接合管のミクロ組織を比較した場合、中間相の厚みはとくに変わらない。このことは、本熱サイクル試験における加熱時の試験片の温度が約80°Cの低い温度であり、したがって中間相が成長しない<sup>8)</sup>ことからうなづける。この中間相はFeAl<sub>3</sub>およびFe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>などの金属間化合物が主体となっており硬くて脆い<sup>9)</sup>。しかし、中間相の厚みが2μ程度までであれば中間相による圧接部の引張強さの低下はないといわれている。なお、SUS 304とAlの両母材のミクロ組織は熱サイクル前後で変らなかった。

以上の結果、接合管接合部近傍のミクロ組織は熱サイクル試験を行っても変化はなく圧接のままの状態と同じく健全であり、したがってミクロ組織はまったく熱サイクル試験の影響を受けなかったといえる。

#### 4. 結論

Al-SUS 304摩擦圧接管をAl外筒キャップセルの外筒として使用するにあたって、その気密性、強度に関して、今回は温度勾配下における、熱サイクルの影響について確認実験を行った。

実験にあたって、接合管の形状は、実際にJMTRのキャップセル端栓として使用するものと等しくし、熱サイクル試験の条件は、Table 2に示したように、実際に炉内に挿入したときに加えられる熱的条件に、十分な余裕を考慮したものである。このような条件で、接合管に50回の熱サイクルを加えたのち、外観、寸法検査、ヘリウムリーク試験、引張試験、バースト試験そして金相試験を行った。また熱サイクルを加えないものについても同様の試験検査を行った。その結果、3.2～3.7で述べたように、外観、寸法検査、ヘリウムリーク試験および金相試験に関しては、熱サイクルを加えたものと、加えないものとに何ら有意な違いは見られなく、また欠陥などもなく、その結果は十分に満足のできるものであった。バースト試験結果については、その破断位置（一部、圧接面で破断したものがある）に問題を残したものの、熱サイクルを加えたものと、加えないものとの間に有意な差は見られなかったこと、JMTRの炉心に挿入したときに加えられる内圧および外圧（14kg/mm<sup>2</sup>G）に比べ、破壊強度が十分に大きいことから、JMTRのキャップセル外筒として使用するのに十分な強度を有するといえる。つぎに引張試験に関しては、実際にキャップセル外筒として使用する形状での強度評価を目的としたために、試験片の形状を管にした。このために、引張強度に関して、必ずしも厳密な評価はできなかった。しかし、キャップセル外筒として用いるには、十分な強度を有することは確認できた。

以上、Al-SUS 304摩擦圧接管に関し、JMTRの炉内で、約10w/gのガンマ発熱率を加えられたときに相当する、接合管内外壁温度差が得られる条件で、50回の熱サイクルを加え、各種の材料検査および試験を行った結果、本接合管はJMTRの炉内で加えられる熱サイクルに対して十分に耐えられることがわかった。

したがって、竹下らの検査結果<sup>3)</sup>と合わせて、本Al-SUS 304摩擦圧接管は、JMTRのキャップセル外筒としての仕様に十分なものであると結論できる。

## 5. あとがき

Al-SUS 304 接合管に、ガンマ発熱率約 10w/g に相当する加熱下で 50 回の熱サイクルを与えるも接合管の強度に変化を与えないことがわかった。したがってこのような条件に対応する原子炉雰囲気で、この接合管を使用することは可能であると考えられる。

今後はこの接合管を適用したアルミニウム外筒の計測キャップセルを設計製作し、試照射して実績を積み上げ、徐々にその数を増してゆきたいと考えている。

原子炉内にアルミニウム外筒のキャップセル数が増えると、炉心に与える反応度効果も無視できなくなると考えられるので、この点について今後検討してゆく必要があろう。

おわりにあたって、本接合管の試験に御協力を戴いた技術部工作課の諸氏に感謝する次第である。

## 付録 1 予備熱サイクル試験および熱計算

### 1. 目的

A 1100-0 — SUS 304 摩擦圧接管をアルミニウム外筒キャップセルの端栓とし, JMTRの炉心内に装荷したときに加えられる温度勾配を条件とした熱サイクル試験を, 本接合管に実施するのに先立って, 予備試験と熱計算を行った。これは, 前記温度勾配を実現するために必要な冷却水流速, ヒータの発熱量などの熱的条件を, あらかじめ確認するためである。

### 2. 予備熱サイクル試験方法

Fig. 24 に示したように, 接合管の接合面から SUS - 304 方向に 3.5 mm から 8 mm の位置に, 径方向に横穴を開け, 3 ~ 4 ケの熱電対を, 適当な間隔を置いて挿入した。ヒータは, 銅の熱媒体を介して, 接合管の内側に装荷している。冷却水温度は室温とし, 流速は 5 cm/sec で一定とした。そしてヒータ出力を 130 ~ 930 W の範囲で変え, 接合管の内外壁の温度差が 20 °C になるヒータ出力を求めた。ここで, 接合管の温度差 (20 °C) は, 本接合管に, 10 w/g のガンマ発熱が加えられたときに相当する温度差である。

### 3. 热計算方法

前記, 予備熱サイクル試験結果, 冷却水温度 22 °C, 冷却水流速 5 cm/sec そしてヒータ出力 400 W で, 接合管の内外壁温度差が 20 °C になった。そこで実際の熱サイクル試験では, ヒータ出力および冷却水流速を, この予備試験結果を踏えて行った。ところが, 実験方法上, 冷却水温度が 10 °C ~ 22 °C の範囲で変動した。そこで, この冷却水温度の変動が, 热サイクル試験条件にまで, 影響を及ぼすか, 否かを確認するために, 2 次元熱計算を行った。

#### 1) 計算コード

TAC 2D (2次元熱計算コード)<sup>10)</sup>

#### 2) 計算モデル

Fig. 26 に示したように, 同軸円筒形モデルとした。

#### 3) 境界条件

上下端面 - 断熱条件

冷却水に接する径方法の外面 - 热伝達条件

#### 4) 入力データ

接合管と冷却水間の热伝達率

$$\alpha_m = 0.586 \quad [\text{W}/\text{cm}^2 \text{ °C}]$$

(自然対流を供う二重管低流速(層流)の場合の実験式により計算)

ヒータの発熱量

$$H = 400 \quad [\text{W}]$$

冷却水温度

$$22^\circ\text{C}, 10^\circ\text{C}$$

热伝導率

① アルミニウム

$$\lambda_{Al} = 117.0 + 0.309 \times 10^{-2} T + 0.163 \times 10^{-4} T^2 + 0.813 \times 10^{-7} T^3$$

$$-0.596 \times 10^{-10} T^4 \quad [\text{BTU}/\text{ft} \cdot \text{hr} \cdot {}^\circ\text{F}]$$

(2) ステンレス

$$\lambda_{\text{SUS}} = 8.5 + 0.410 \times 10^{-2} T \quad [\text{BTU}/\text{ft} \cdot \text{hr} \cdot {}^\circ\text{F}]$$

(3) 銅

$$\lambda_{\text{Cu}} = 3.88 - 0.466 \times 10^{-3} T + 0.97 \times 10^{-5} T^2 \quad [\text{W}/\text{cm} \cdot {}^\circ\text{C}]$$

(4) ヒータ

$$\lambda_H = 3.88 - 0.466 \times 10^{-3} T + 0.97 \times 10^{-5} T^2 \quad [\text{W}/\text{cm} \cdot {}^\circ\text{C}]$$

(5) 空気

$$\lambda_A = 0.0136 + 0.234 \times 10^{-4} T + 0.411 \times 10^{-8} T^2$$

$$(N_2 \text{ガスの熱伝導率}) \quad [\text{BTU}/\text{ft} \cdot \text{hr} \cdot {}^\circ\text{F}]$$

各材料間のガスギャップ厚

ヒータ — スペーサ間: 0.1 mm

スペーサ — 接合管間: 0.02 mm

ここで、ヒータと空気の熱伝導率およびスペーサと接合管の間のギャップ厚の評価は、厳密に行わなかった。しかし、このことは今回の目的である管継手の温度分布の評価には影響がない。

#### 4. 予備熱サイクル試験および熱計算結果

Table 8 に、予備熱サイクル試験結果を、そしてFig. 26 に、熱計算によるヒータ、スペーサおよび接合管の温度分布を示した。また Fig. 27 に接合管の接合面からのSUS 304 側への距離と接合管内外壁温度差との関係を、それぞれ示した。

Fig. 27 より明らかなように、実験値に比べて計算値は温度差が大きい。また、実験値の場合、計算値にみられるような、内外壁温度差と接合面からの距離に、有意な関係がなく、さらにデータのバラツキが大きい。接合管内外壁温度の計算値が、実験値に比べて、小さくなった原因には、つぎのようなことが考えられている。すなわち接合管の径方向の温度分布の測定は、それぞれの間隔を、あらかじめ測定した、3 ~ 4 本の熱電対を、ひとつの横穴に挿入して行ったものであるが、挿入時に熱電対が曲るなどの原因で、装荷されたときの、各熱電対間の間隔は、あらかじめ測定した間隔よりも、せまくなりその結果内外壁温度差を小さく評価したと考えられる。いずれにしても、ヒータ出力400 W、冷却水温度 22 °C、そして冷却水流速 5 cm/sec で、熱サイクル試験の温度公配に関する条件は満足されることがわかった。

なお、熱サイクル試験のとき、冷却水温度が 10 °C ~ 22 °C の範囲で変動があったが、Fig. 27 より明らかなように、この程度の水温の変化では、温度公配に与える影響がないことも確認できた。

## 付録 2 热サイクル試験方法

### 1. 热サイクル試験装置

Fig. 5に热サイクル制御装置を示した。本体の冷却水槽には透明な円筒形のアクリル樹脂を使用した。热サイクルにおいて、接合管はSUS 304側を下方にして冷却水槽の中心に設置した。試験片の外側を冷却する冷却水は冷却水槽の上部より入れ、その大部分は底部排水口より排出したが、一部は常に上部のブロー管より排出した。冷却水の冷却水槽における速度は冷却水入口管側と排水管側のバルブで調節した。また、冷却水の速度を一定に保つために冷却水入口管側に冷却水溜槽を設置して冷却水の水頭を一定にした。なお、接合管の内側に冷却水が侵入するのを防ぐために接合管のSUS 304側の端面を銅製の盲板を接着してふさぎ、A側にはステンレス鋼管をさし込み、その継目はコンパウンドでふさいだ。

つぎに、試験片の内側の中心に円筒形のヒータを設置した。また、ヒータと試験片との間にはヒータの外側と試験片の接合部近傍の内側の両側に密着する銅製のスペーサを挿入した。このスペーサによりヒータに発生する熱の大部分を接合部近傍のみに伝導することができた。なお、この熱が盲板に逃げるのを防止するために盲板とヒータおよびスペーサとの間には熱伝導率の小さな耐火レンガを設置した。また、スペーサと試験片の圧接部近傍との間には空気より熱伝導率の大きいシリコン油をみたした。

### 2. 湿度測定

热サイクル試験ではスペーサ、接合管のSUS 304壁の外側および冷却水の温度を測定し記録した。スペーサの温度はスペーサの上部の位置で測定した。なお、あらかじめSUS 304機内側に接する位置のスペーサの温度とスペーサの上部の位置の温度がほぼ同じであることを確認した。SUS 304壁の外側の温度は接合部より4～5 mm離れた位置で測定した。また、冷却水の温度は冷却水入口管の先端の位置で測定した。なお、これらのはかに热サイクル時間制御装置を作動さすためにFig. 5に示すように、スペーサと接合管との間の2箇所の位置の温度を測定した。

### 3. 热サイクル試験の手順

热サイクル試験は次に示す手順に従がって行った。

- ① 接合管の内径と外径およびスペーサの外径を測定する。
- ② 接合管を热サイクル試験装置に設置し、Table 2に示す热サイクル条件で热サイクル試験を行う。最初の数回の热サイクルの後、加熱時の各温度がほぼ平衡状態に達したときから热サイクルの回数を数える。热サイクルは50回行う。
- ③ 試験終了後、再び接合管の内径と外径およびスペーサの外径を測定する。

## 参考文献

- 1) 伊妻猛志; “爆着アルミニウムクラッドの物性および工業的利用” Al-ある vol. 2 P 28 (1976)
- 2) 材料試験炉部; “JMTR 試用期間照射報告書 第1部 総論” JAERI-M 5518 (1974)
- 3) 竹下 功他; “アルミニウム外筒計測キャプセルの開発” JAERI-M 5899 (1974)
- 4) 日本酸素(株); “JOX JOINT 技術資料(未公開)”
- 5) 伊藤伍郎; “腐食科学と防食科学” P. 310 (1973)
- 6) 佐藤邦彦, 豊田政男; “機械的性質の不連続部をふくむ材の静的引張強度に関する基礎的研究” 溶接学会誌 vol. 40 No. 9 P. 885~900 (1971)
- 7) 野原石松; “圧力容器” P. 83 (1972)
- 8) M. H. Scott, M. A., I. F. Squires, B. Met.; Metallurgical examination of aluminium - stainless steel friction welds” B. W. R. A. REPORT MARCH (1966)
- 9) 青山芳夫; “トランジション継手(AISI 304+ASTM A1100)の加熱による影響” 日本酸素(株)第二工場技術報告第51-1号 (1976) (未公開)
- 10) 梶山武義, 安野武彦; “汎用二次元伝熱計算コード(TAC 2D)の整備”

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of used materials

Material	Chemical composition (%)								Mechanical properties	
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
Al100-0 (99.00%Al)	99.15	0.13	0.53	0.11	0.02	0.02	0.02	0.02	10.0	41.0
SUS 304 (Stainless steel)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
	0.06	0.54	0.84	0.034	0.024	8.60	18.50	Val.	59	68

Table 2 Conditions of thermal cycling test

Items	Condition
Power of heater	400 W
Temperature difference induced at stainless steel SUS-304 wall	20 deg
Temperature difference induced at Al100-0 wall	3.0 deg
Heating time	about 10 min.
Cooling time (room temperature)	about 5 min.
1 cycle time	about 20 min.
Temperature of cooling water	12 ~ 20 °C
Velocity of cooling water	5.0 cm/sec
Length of spacer contacted with SUS 304 wall	10 mm
Length of spacer contacted with Al100-0 wall	7 mm
Number of heat cycle	50

Table 3 Dimensional measurement results of Al100-0—SUS-304  
friction welded transition joint tubes before and  
after thermal cycling test

Specimen No.	Al100-0 or SUS-304	Before thermal cycling test (average)			After thermal cycling test (average)		
		ID (mm)	OD (mm)	Thickness (mm)	ID (mm)	OD (mm)	Thickness (mm)
1	Al100-0	33.97	39.99	3.01	33.98	39.99	2.99
	SUS-304	37.00	39.99	1.49	36.99	39.99	1.50
2	Al100-0	34.02	40.00	2.99	34.01	40.01	3.00
	SUS-304	37.02	39.98	1.48	46.99	40.00	1.49
3	Al100-0	33.99	39.99	3.00	33.99	39.96	3.02
	SUS-304	37.01	39.98	1.48	36.97	39.98	1.51
4	Al100-0	34.01	39.91	2.95	34.01	39.91	2.95
	SUS-304	36.97	39.92	1.47	37.01	39.91	1.45
5	Al100-0	33.96	40.00	3.02	33.98	39.99	3.01
	SUS-304	36.96	39.99	1.51	36.98	39.98	1.50
6	Al100-0	33.98	40.00	3.01	33.98	40.00	3.01
	SUS-304	36.97	39.99	1.51	36.98	40.01	1.52
7	Al100-0	33.96	39.98	3.01	33.97	39.98	3.01
	SUS-304	36.97	39.97	1.50	36.97	39.97	1.50
8	Al100-0	33.97	40.00	3.01	33.97	40.00	3.02
	SUS-304	36.96	39.99	1.51	36.97	39.99	1.51
9	Al100-0	33.97	39.97	3.00	33.95	39.96	3.01
	SUS-304	36.94	39.96	1.51	36.95	39.97	1.51

Table 4 Helium leak test results of Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tube before and after thermal cycling test

Specimen No.	Leakage (atm cc/sec)	
	Before thermal cycling test	After thermal cycling test
1	$<1.43 \times 10^{-9}$	$<2.63 \times 10^{-10}$
2	"	"
3	"	"
4	"	"
5	"	"
6	"	"
7	"	"
8	"	"
9	"	"

Table 5 Tensile test results of Al100-0 parent metal and Al100-0—SUS-304 friction welded transition joints

Specimen No.	Material	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Fractured Position	Thermal cycling test
1	Al100-0 parent metal	10.8	41.0	—	—
36	Al100-0 - SUS-304 transition joint rod	11.3	—	Al100 parent metal	Not subjected
37		"	—	"	
40		"	—	"	
4	Al100-0 - SUS-304 transition joint tube	10.3	—	Al100 parent metal at chuck	Subjected
5		9.7	—	"	
6		9.5	—	"	

Table 6 Burst test results of Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tubes

Specimen No.	Stress at burst kg/mm <sup>2</sup>	Bursted position	Number of crack in friction welded zone	Thermal cycling test
16	10.2	Friction welded zone	1	
17	10.7	Al100 TIG welded zone	0	Not subjected
19	8.5	"	2	
1	9.9	Friction welded zone	2	Subjected
2	8.8	"	9	
3	10.7	Al100 parent metal	1	

Table 7 Burst test results of Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tubes from ref. 4)

Specimen No.	Stress at burst kg/mm <sup>2</sup>	Bursted position	Number of crack in friction welded zone	Thermal cycling test
1	8.9	Al100 parent metal	0	
2	8.8	"	0	Not subjected
3	8.8	"	0	

Annotation: Figure of the burst test piece is shown to Fig. 18.

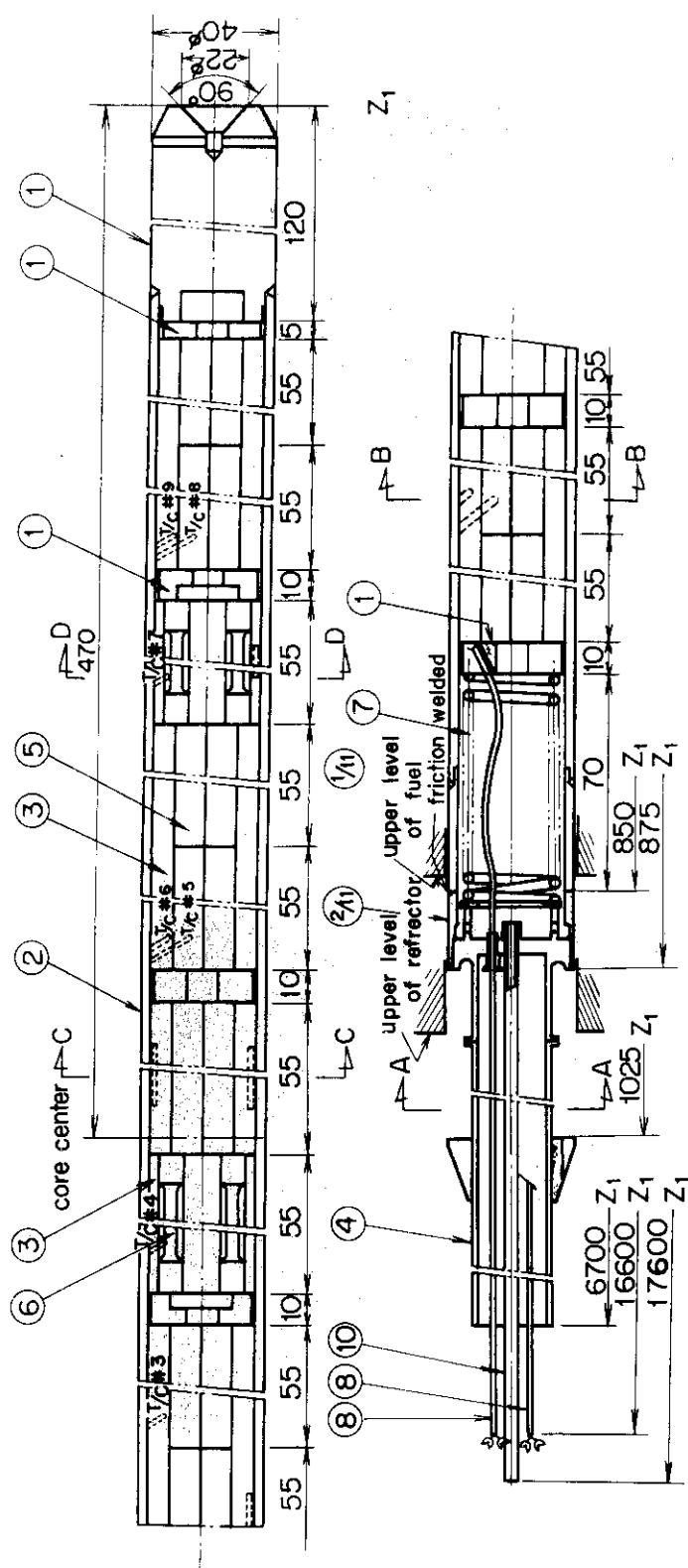
Table 8 The results of temperature distribution measurement on  
Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint  
tubes at pre-thermal cycling test

(1) Measuring position	Interval of thermocouples (mm)	Power of heater (W)	Temperature (°C)			
			1 (2)	2 (2)	3 (2)	4 (2)
3.7 mm	1 ~ 2 (2) 0.35mm	930 ~ 940	84.1	81.8	74.7	59.2
	2 ~ 3 1.0 mm	770 ~ 780	77.1	74.6	68.3	55.5
		530 ~ 540	76.6	75.4	68.3	57.3
		300 ~ 320	61.9	60.7	57.2	49.3
4.0 mm	3 ~ 4 0.6 mm	130 ~ 150	47.9	47.0	45.5	39.0
	1 ~ 2 (2) 0.7mm	900 ~ 930	97.1	83.0	74.7	-
	1 ~ 3 1.3mm	770 ~ 780	88.4	77.5	70.2	-
	2 ~ 3 0.6mm	525 ~ 530	79.8	68.8	63.0	-
4.0 mm	1 ~ 2 (2) 1.6mm	330 ~ 350	63.5	55.1	51.7	-
		900 ~ 930	90.6	78.9	-	-
		770 ~ 780	78.5	68.8	-	-
		525 ~ 530	73.2	64.0	-	-
4.3 mm	330 ~ 350	60.7	54.6	-	-	-
	1 ~ 2 (2) 1.1mm	900 ~ 930	101.3	98.5	97.9	-
	1 ~ 3 1.2mm	770 ~ 780	99.6	98.6	97.2	-
	2 ~ 3 0.1mm	525 ~ 530	83.9	82.5	76.2	-
4.5 mm	330 ~ 350	68.3	66.9	61.6	-	-
	1 ~ 2 (2) 0.8mm	930 ~ 960	90.6	68.0	63.0	33.9
	2 ~ 3 1.2mm	760 ~ 790	83.2	71.9	59.2	32.0
	3 ~ 4 1.0mm	520 ~ 540	71.1	61.1	49.8	29.3
5.2 mm	300 ~ 330	61.6	54.6	46.3	29.0	-
	1 ~ 2 (2) 0.9mm	130 ~ 150	47.4	41.9	38.6	25.5
	2 ~ 3 1.2mm	930 ~ 940	102.8	91.0	-	53.6
	3 ~ 4 1.1mm	770 ~ 780	93.5	83.3	-	49.3
6.8 mm	530 ~ 540	79.6	71.4	-	43.9	-
	300 ~ 320	64.5	58.2	-	38.0	-
	1 ~ 2 (2) 0.5mm	130 ~ 150	45.1	41.5	-	30.0
	2 ~ 3 0.5mm	930 ~ 940	72.4	64.0	58.2	43.5
8.0 mm	530 ~ 540	66.4	59.9	56.0	38.0	-
	300 ~ 320	53.2	47.6	44.0	37.0	-
	1 ~ 2 (2) 1.4mm	130 ~ 150	41.5	38.0	36.0	28.0
	3 ~ 4 1.4mm	31.5	29.7	27.5	23.0	-
	900 ~ 930	87.0	71.4	-	-	-
	770 ~ 780	79.8	68.8	-	-	-
	525 ~ 530	71.4	63.0	-	-	-
	330 ~ 350	60.2	54.6	-	-	-

## Annotation

(1) distance from friction welded position (on SUS-304 side)

(2) number of thermocouple



241	transition joint	SUS-304
1/1	transition joint	A100-O
10	vacuum control tube	SUS-304
9	fluence monitor	—
8	thermocouple	—
7	spring	—
6	tensile test piece	—
5	impact test piece	—
4	protector tube	SUS-304
3	thermal bond	A1050
2	outer tube	A1100-O
1	spacer	A1050
No	description	material

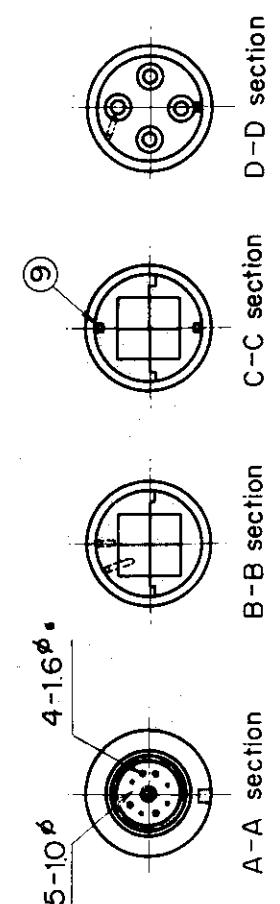
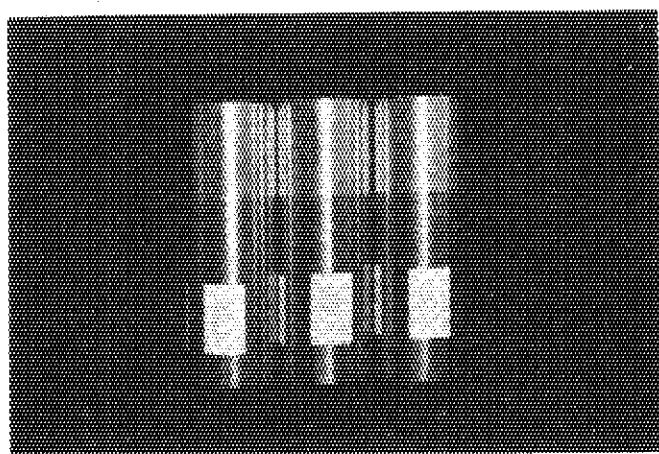
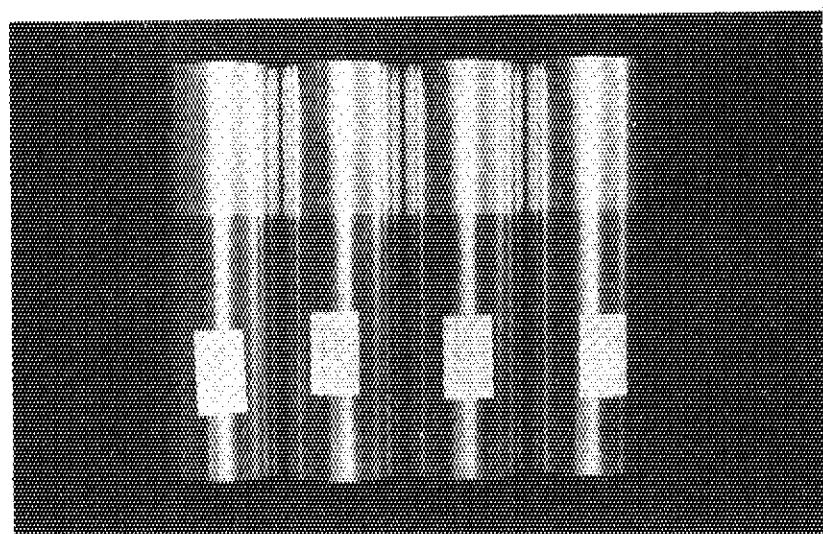


Fig.1 Drawing of an instrumented outer-tube capsule assembly



No.1    No.2    No.3

Fig.2 Photograph of Al100-0-SUS-304 friction welded  
transition joint tubes  
(No.1, No.2 and No.3 specimens)



No.29    No.30    No.31    No.32

Fig.3 Photograph of Al100-0-SUS-304 friction welded  
transition joint rods  
(No.29, No.30, No.31 and No.32 specimens)

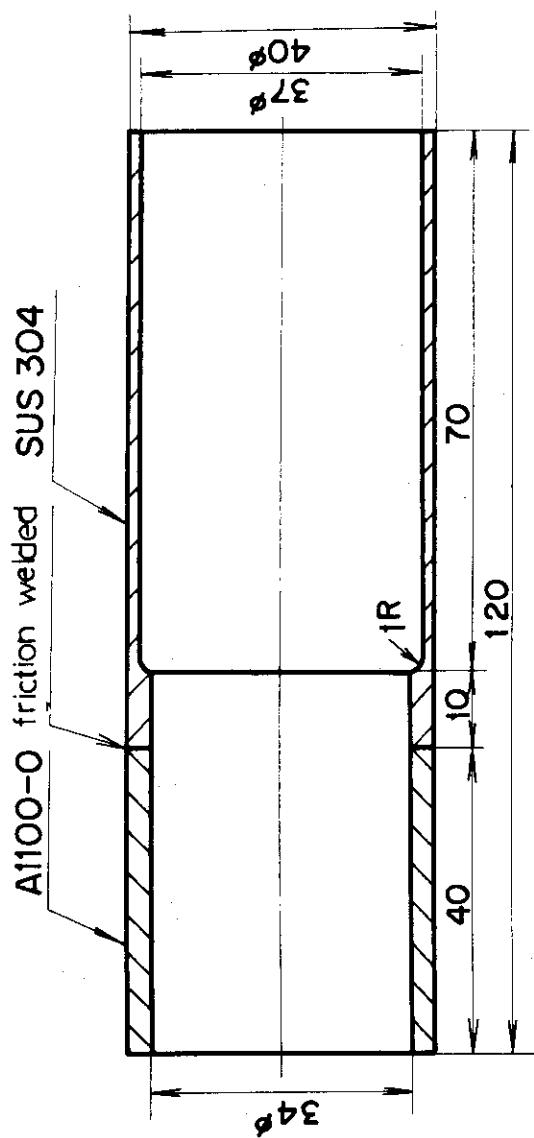
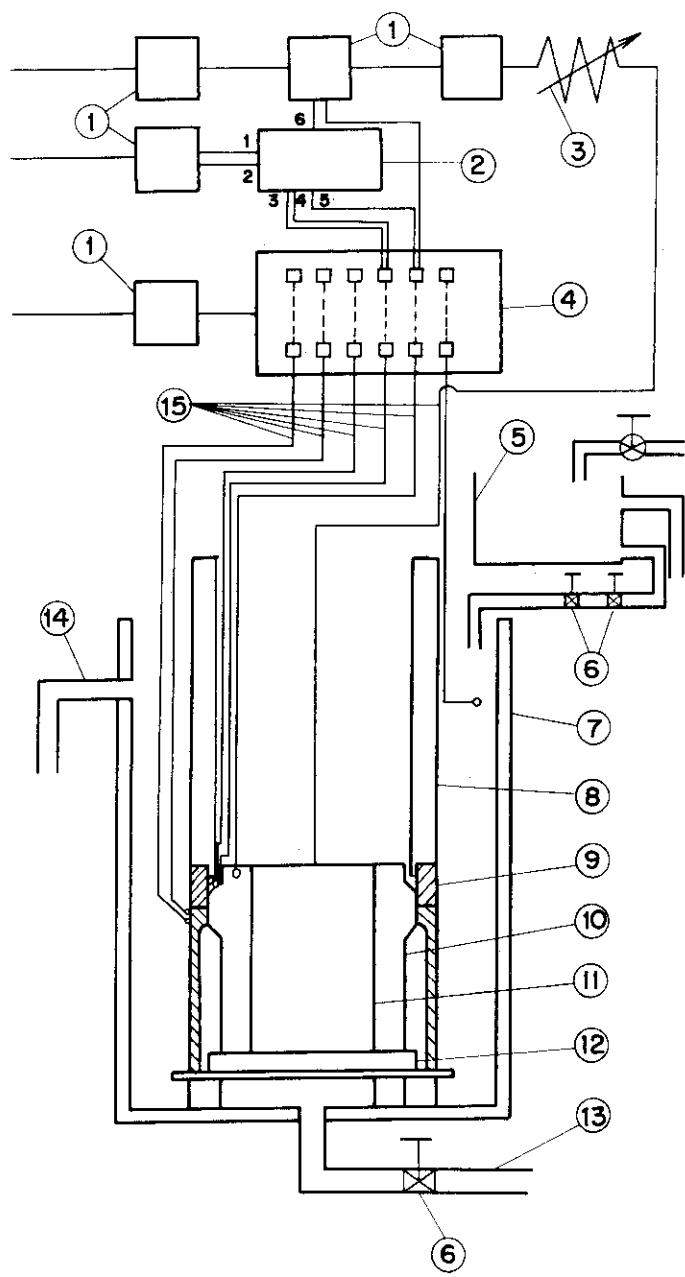


Fig. 4 Specimen of Al1100-O-SUS-304 friction welded transition joint tube for thermal cycling and helium leak tests



No	description
15	thermocouple
14	blow-pipe
13	drain pipe
12	ceramics
11	heater
10	spacer
9	specimen
8	stainless steel tube
7	water tank
6	stop-valve
5	sub-water tank
4	temperature controller and recorder
3	magnet switch
2	thermal cycling time controller
1	switch
No	description

Fig. 5 Apparatus for thermal cycling test

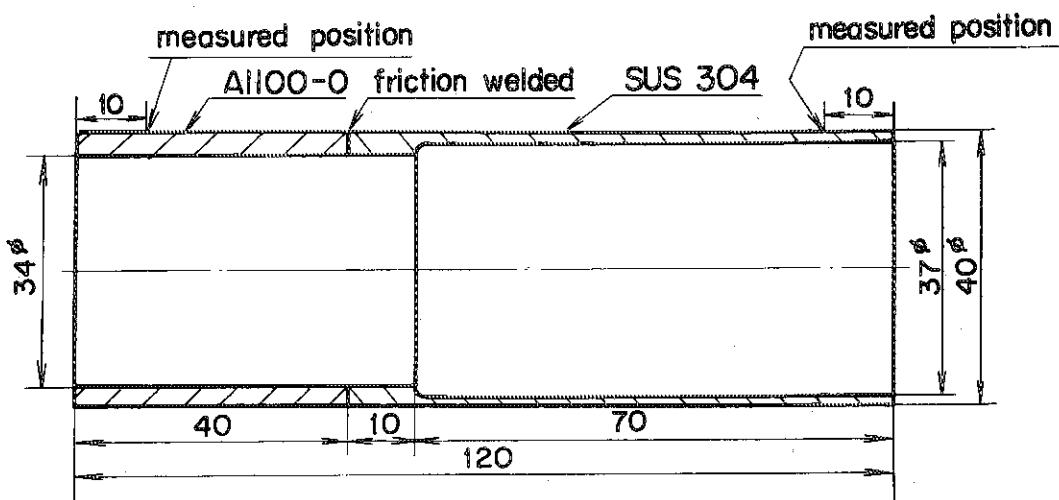
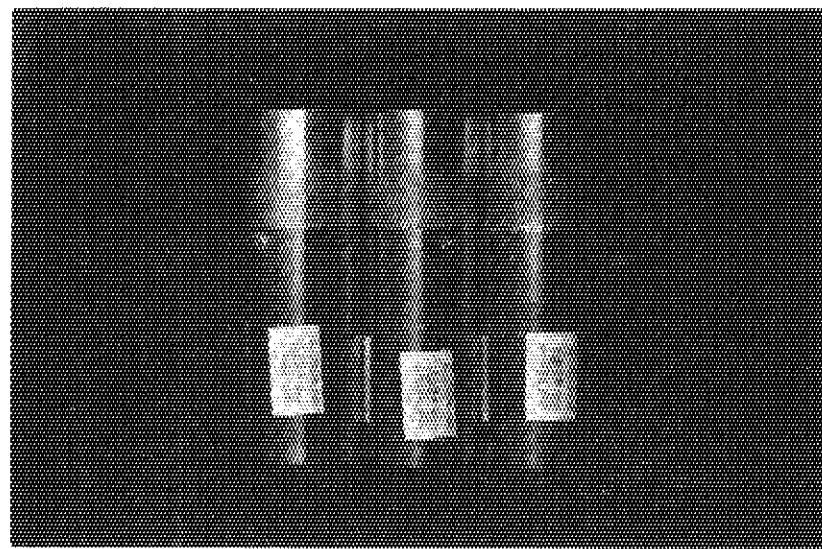


Fig.6 Dimensional measurement positions of Al100-O-SUS-304 friction welded transition joint tube



No.1      No.2      No.3

Fig.7 Photograph of Al100-O-SUS-304 friction welded transition joint tube subjected to thermal cycling test  
(No.1, No.2 and No.3 specimens)

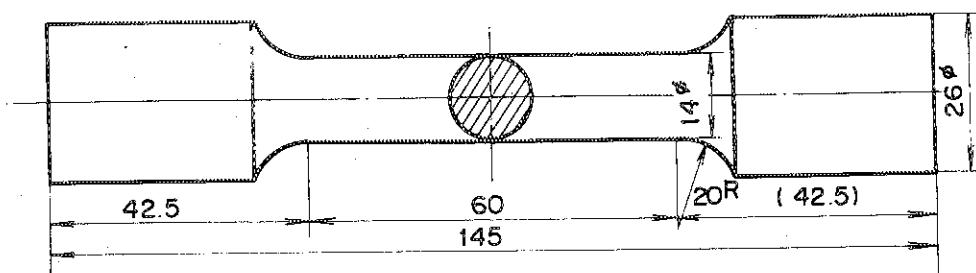


Fig.8 Specimen of Al100-0 for tensile test

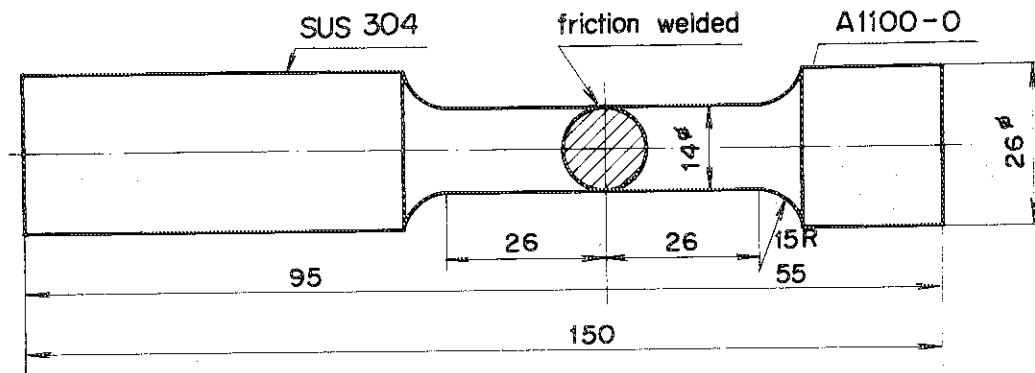


Fig.9 Specimen of Al100-0-SUS-304 friction welded transition joint rod for tensile test

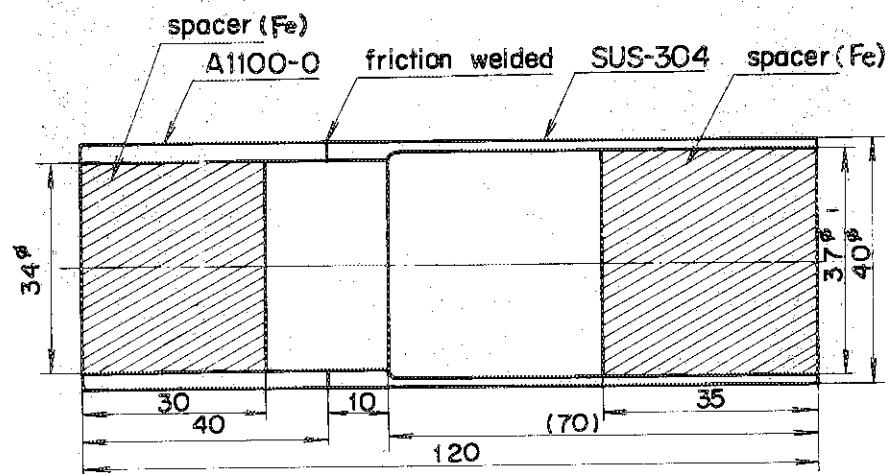


Fig.10 Specimen of Al100-0-SUS-304 friction welded transition joint tube for tensile test

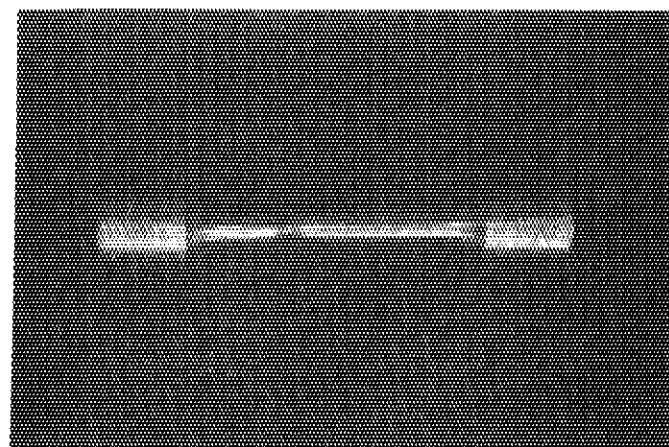


Fig.11 Photograph of tensile tested Al100-0

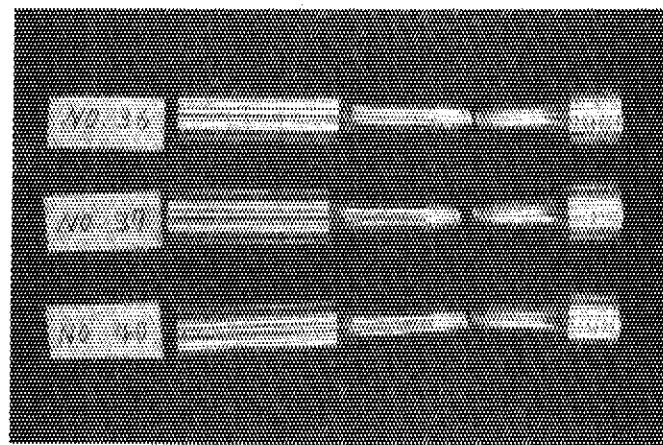


Fig.12 Photograph of tensile tested Al100-0-SUS-304  
friction welded transition joint rods  
(No.36, No.37 and No.40 specimens)

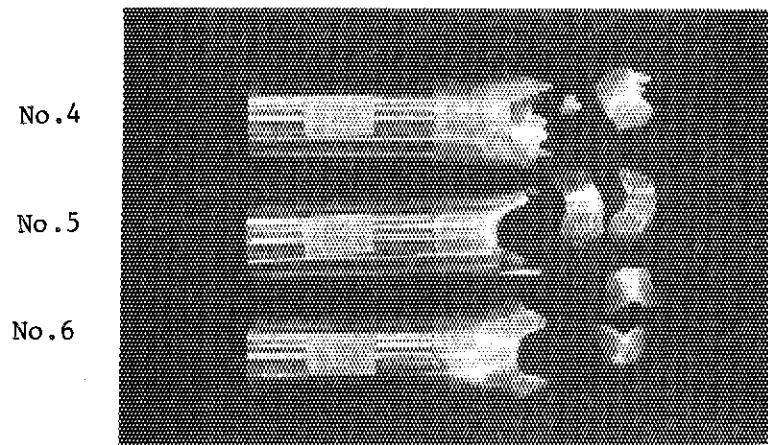


Fig.13 Photograph of tensile tested Al100-0-SUS-304  
friction welded transition joint tubes  
(No.4, No.5 and No.6 specimens)

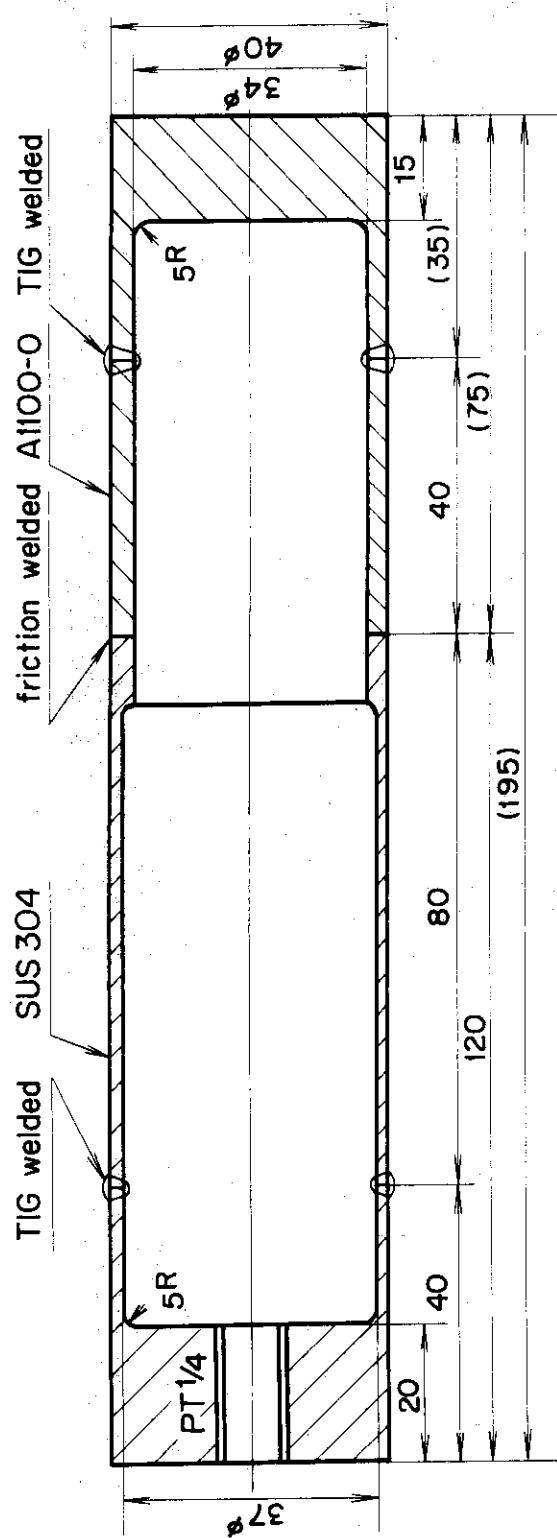


Fig. 14 Specimen of Al100-O-SUS-304 friction welded transition joint tube for burst test

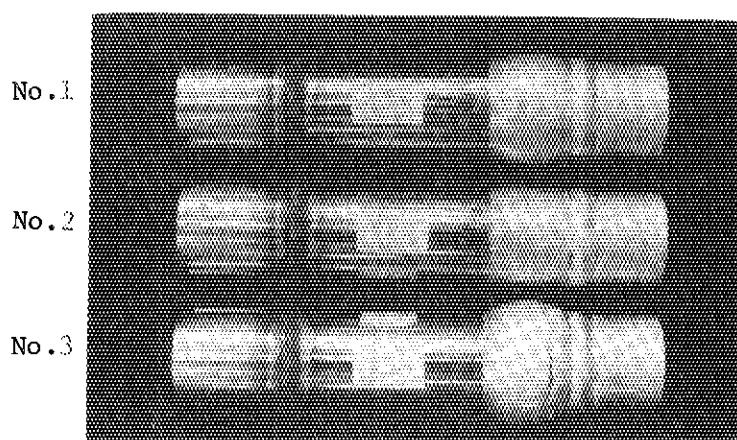


Fig.15 Photograph of burst tested Al100-0-SUS-304 friction welded transition joint tubes subjected to thermal cycling test (No.1, No.2 and No.3 specimens)

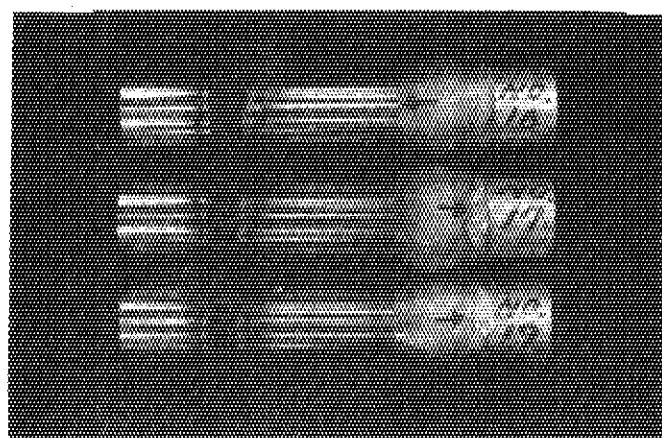


Fig.16 Photograph of burst tested Al100-0-SUS-304 friction welded transition joint tubes subjected to thermal cycling test (No.16, No.17 and No.18 specimens)

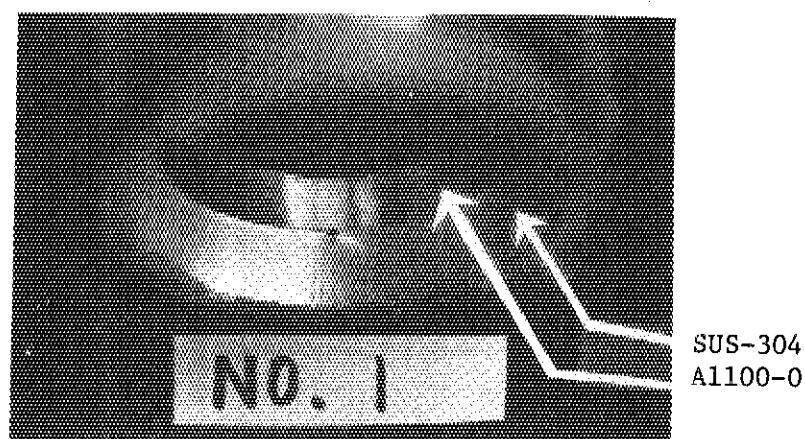


Fig.17 Photograph of crack in burst tested Al100-0-SUS-304 friction welded transition joint tube subjected to thermal cycling test (No.1 specimen)

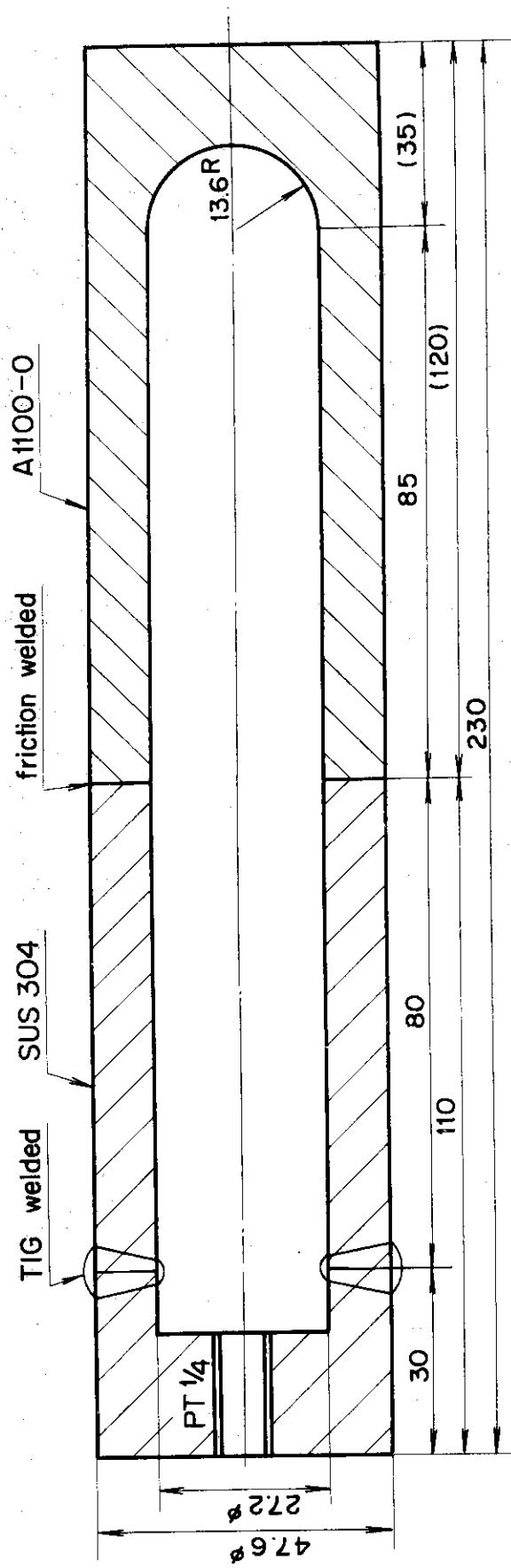


Fig. 18 Specimen of A1100-O-SUS-304 friction welded transition joint tube for burst test from Japan Oxygen Co., Ltd.

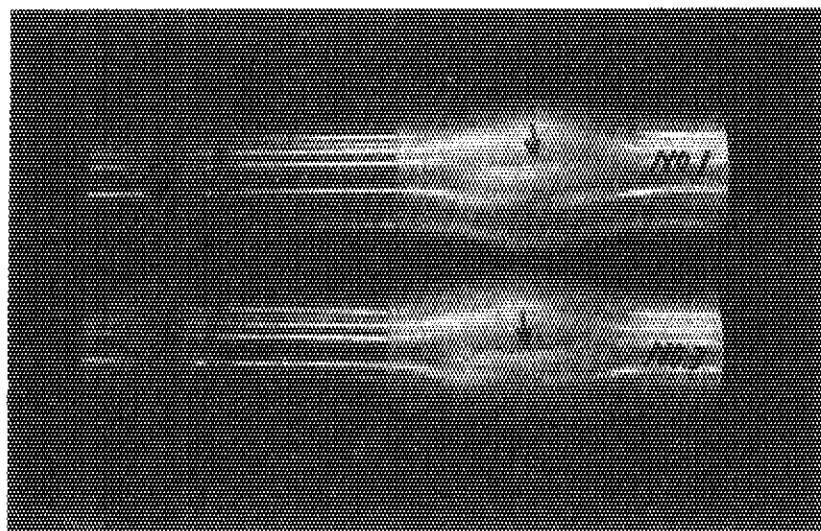


Fig.19 Photograph of burst tested Al100-0-SUS-304 friction welded transition joint tubes from ref. 4)

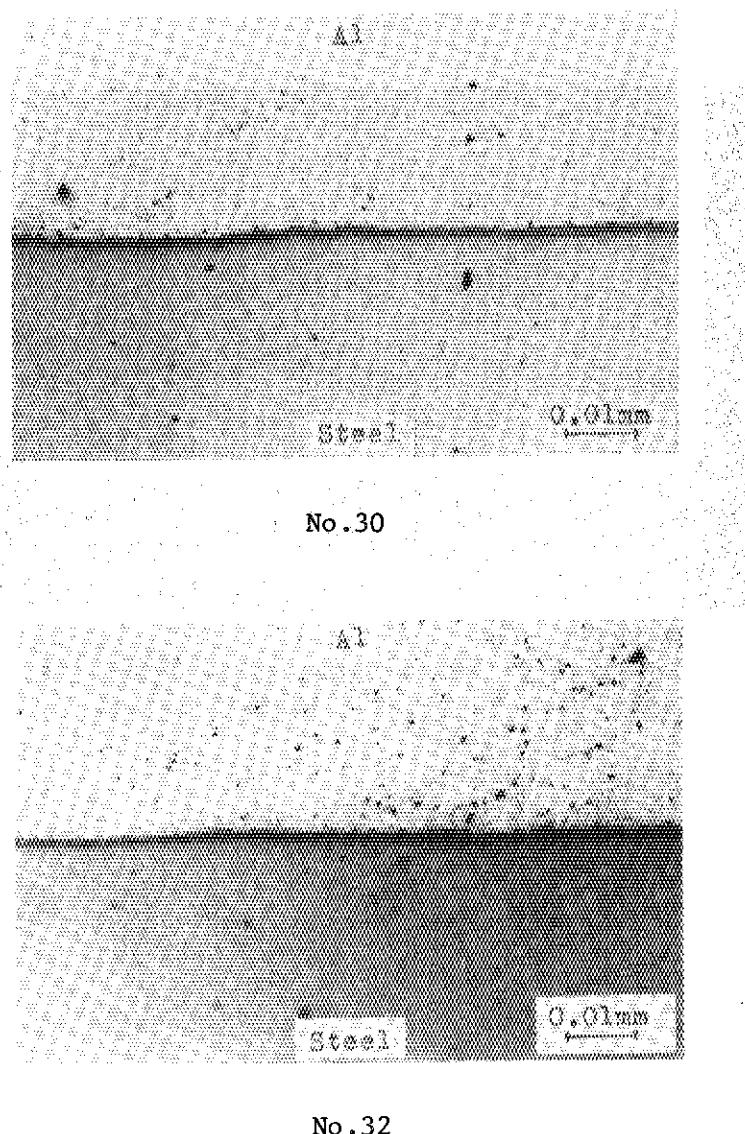
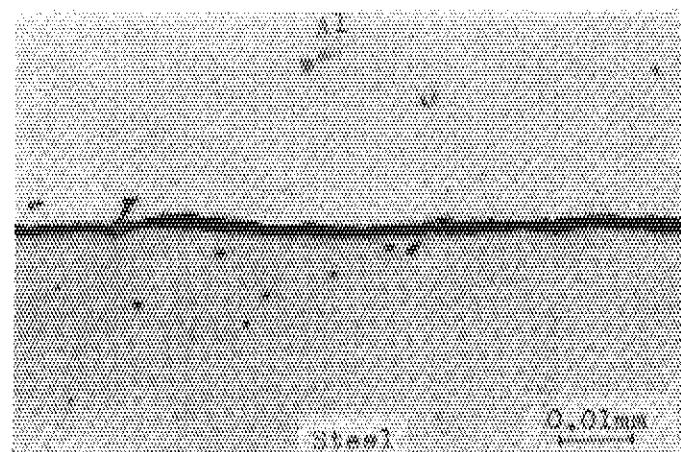
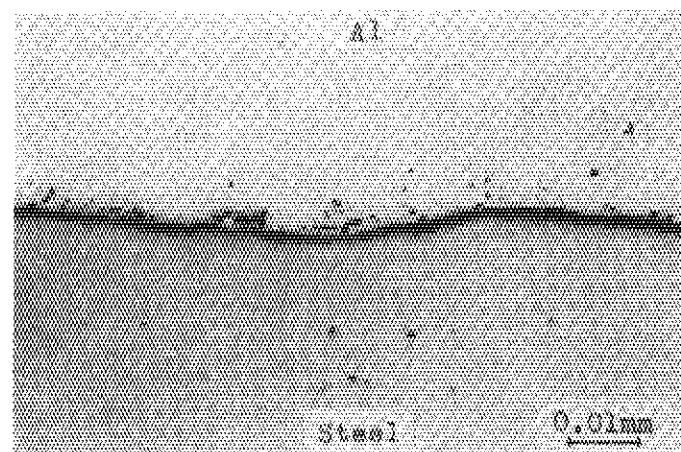


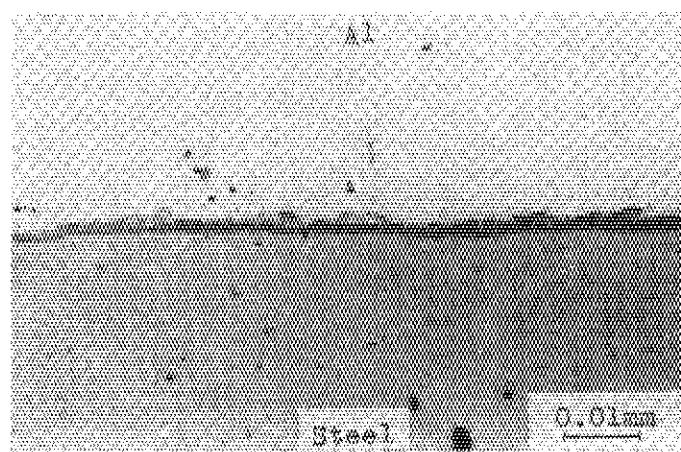
Fig.20 Micrographs of Al100-0-SUS-304 friction welded transition joint rods (not etched 280 3.37)  
(No.30 and No.32 specimens)



No. 7

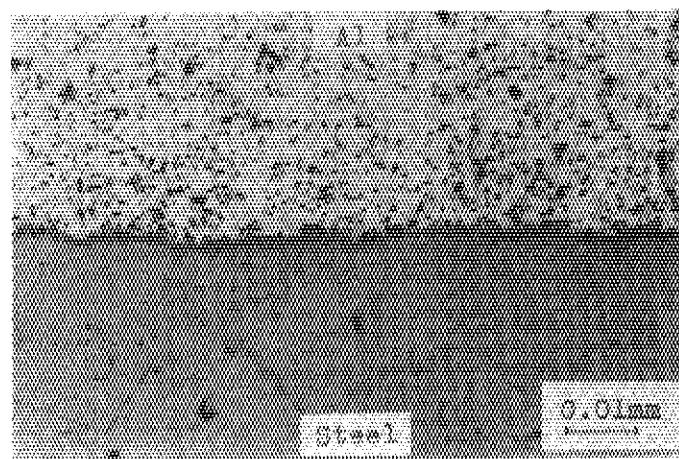


No. 8

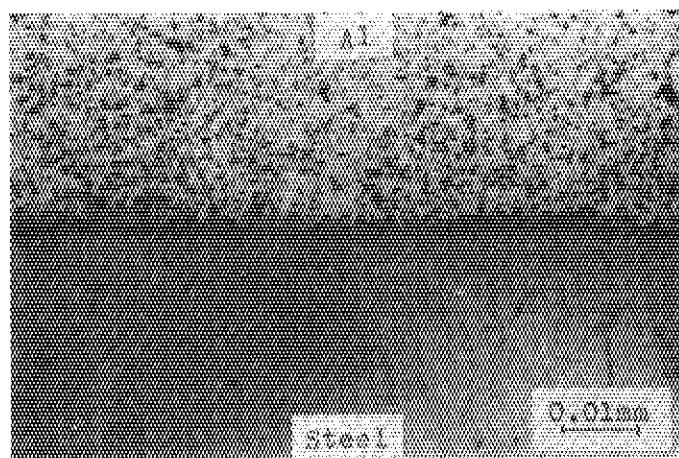


No. 9

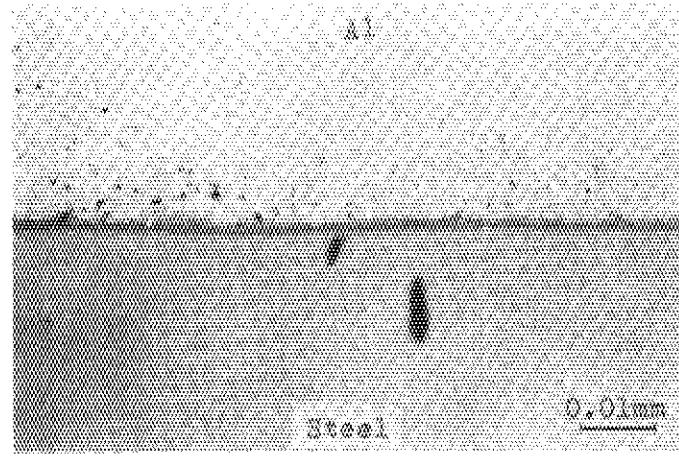
Fig.21 Micrographs of Al100-O-SUS-304 friction welded transition joint tubes subjected to thermal cycling test (not etched 280 3.37)  
(No.7, No.8 and No.9 specimens)



No.1

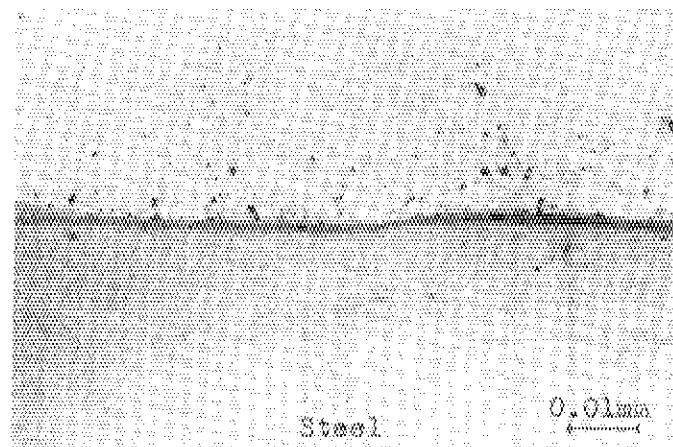


No.2

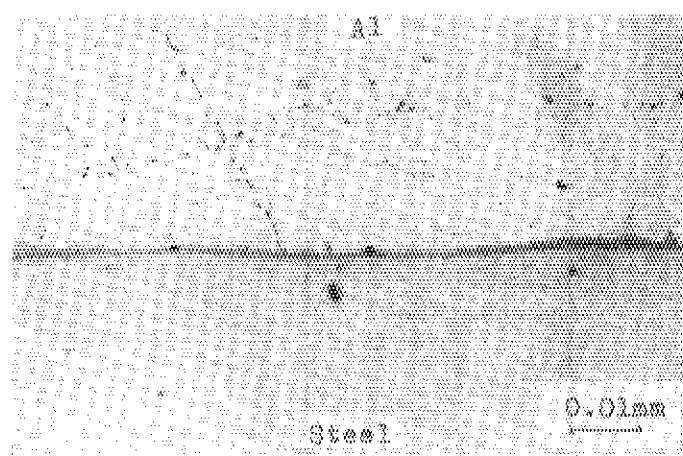


No.3

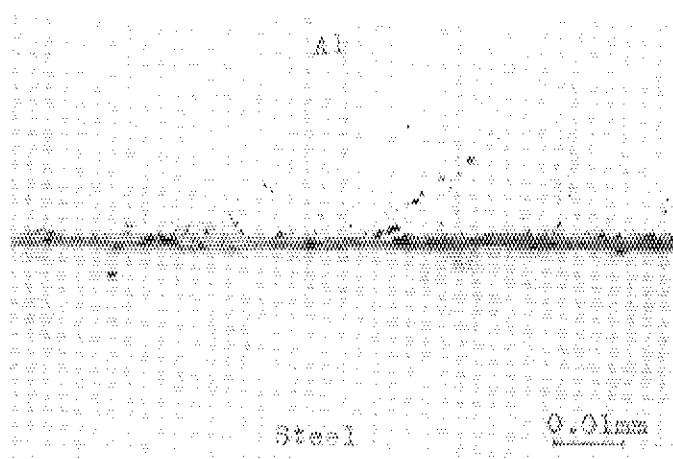
Fig.22 Micrographs of Al100-0-SUS-304 friction welded transition joint tubes subjected to thermal cycling and burst test (not etched 280 3.37)  
(No.1, No.2 and No.3 specimens)



No.16



No.17



No.19

Fig.23 Micrographs of Al100-O-SUS-304 friction welded transition joint tubes subjected to burst test (not etched 280 3.37)  
(No.16, No.17 and No.19 specimens)

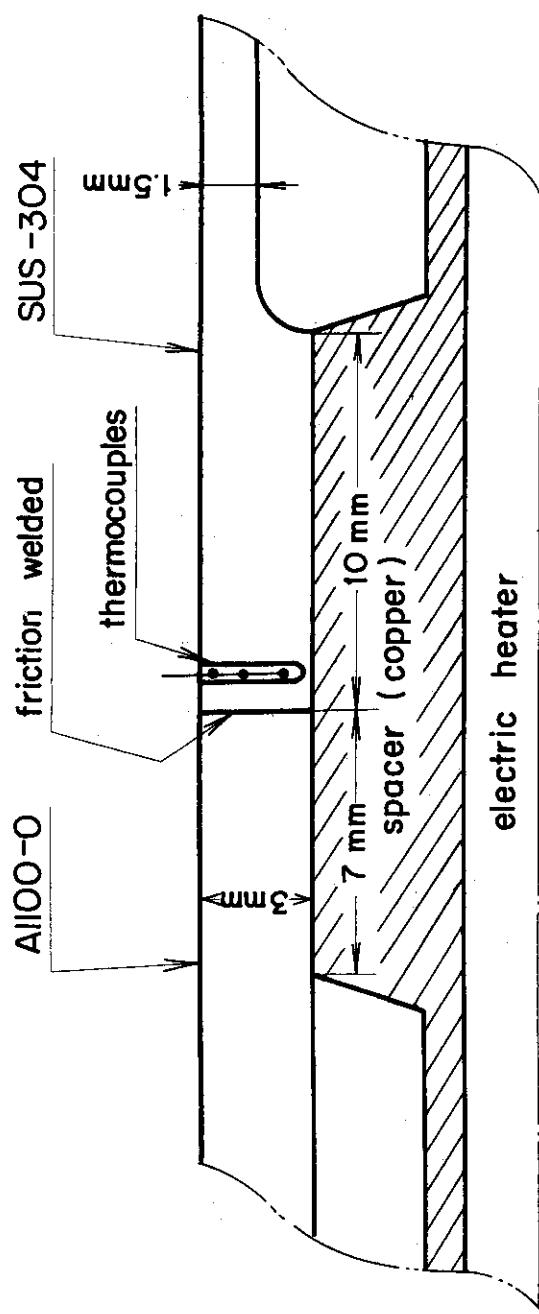


Fig. 24 Measuring positions of temperature distribution in Al100-O—  
SUS-304 friction welded transition joint tube in preliminary  
thermal cycling test

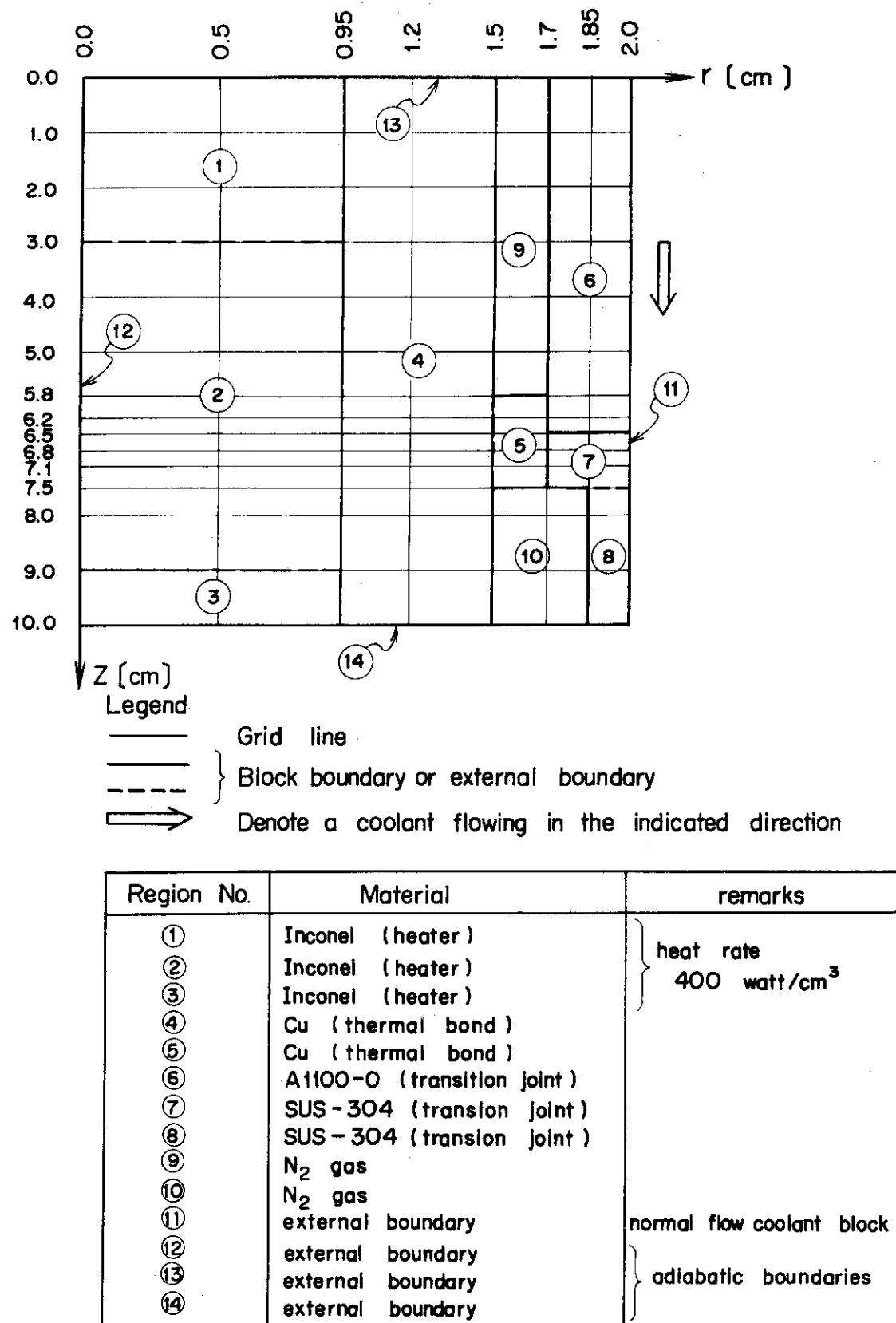


Fig. 25 TAC2D thermal model of A1100-O-SUS-304 friction welded transition joint tube of thermal cycling test

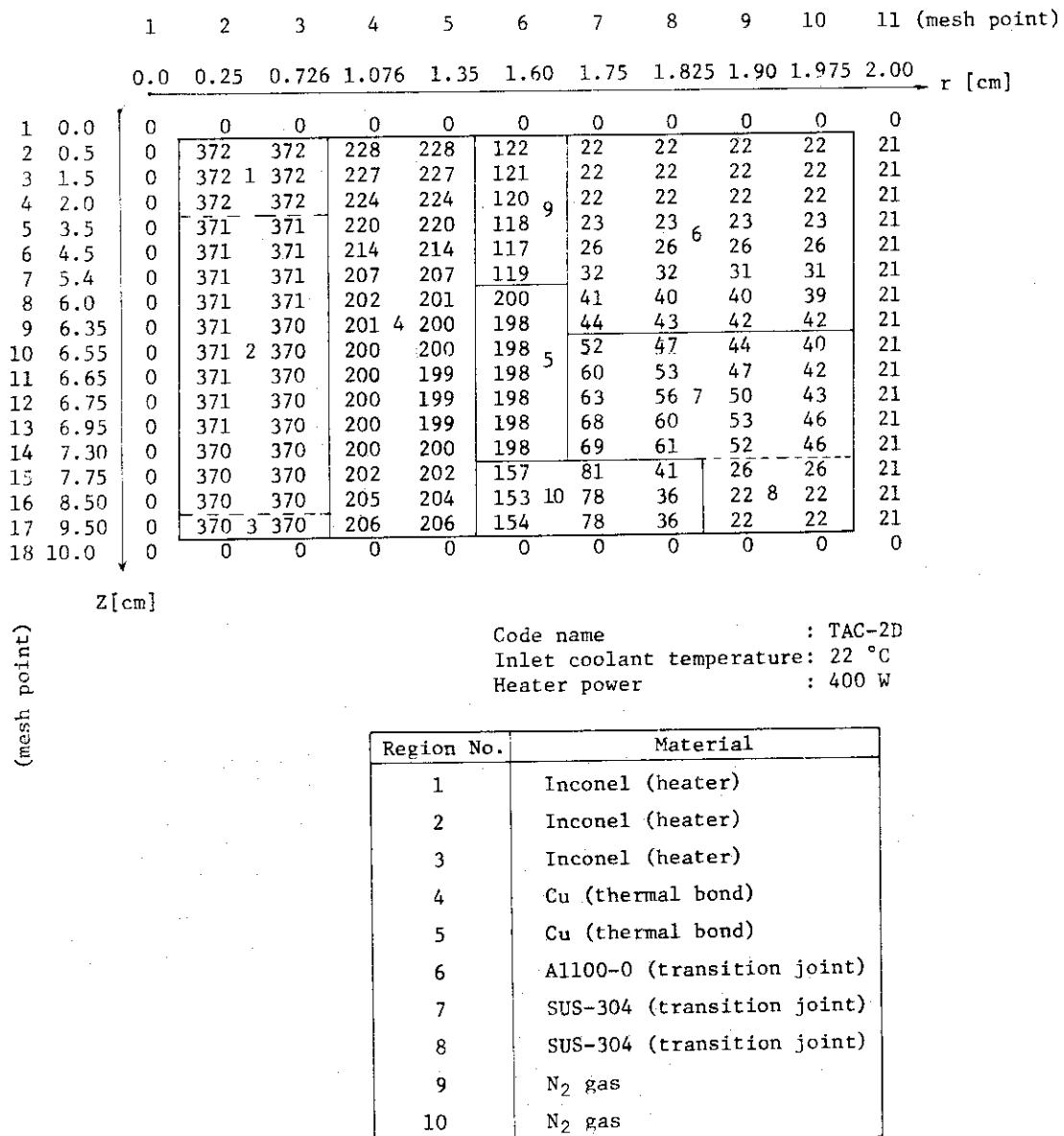


Fig. 26 Temperature distribution in Al100-0—SUS-304 friction welded transition joint tube by heat transfer computer code TAC2D

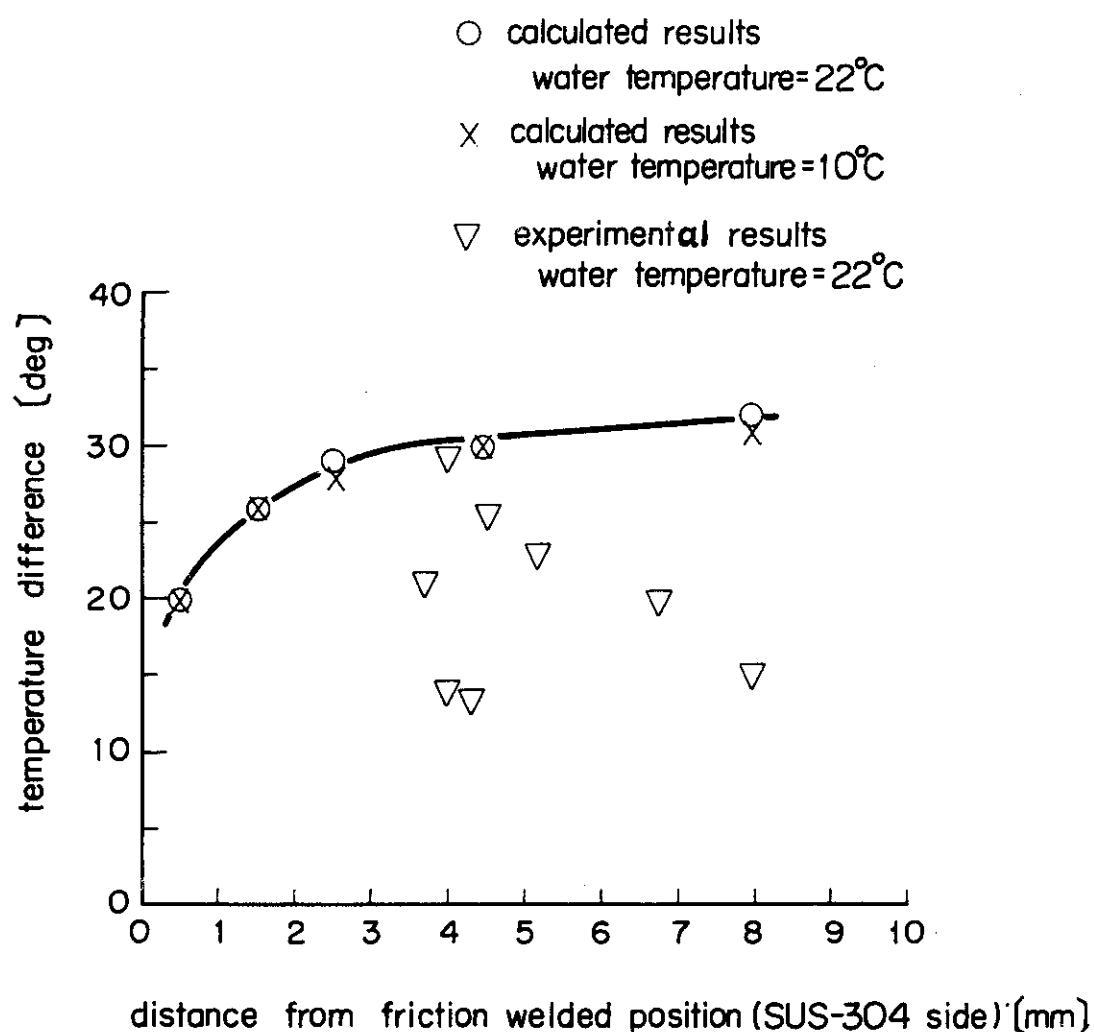


Fig. 27 Temperature difference between inner and outer surface of the tube wall (on SUS-304 side) vs. distance from the joint face