

JAERI-M

5899

アルミニウム外筒計測キャプセル
の開発

1974年11月

竹下 功・関 晋・井上 利昭

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、複製などのお問い合わせは、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プセルの開発

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

竹下 功・関 晋⁺¹・井上利昭⁺²

(1974年10月22日受理)

炉内照射キャプセルにアルミニウムを外筒容器として用いれば、ステンレスを用いる場合に比して照射中の熱伝達に勝れ、照射後の廃棄物処理においても放射化量の小さいことから経済性、安全性で非常に有利である。アルミニウムをキャプセル外筒に使用する場合には、ステンレスとアルミニウムの接合が避けられない。電子ビーム溶接、摩擦圧接、爆発圧接の三種類の接合法によるアルミニウムとステンレスの接合材について炉内使用上必要と考えられる諸性質を調べた。また実際にこの接合材を使った燃料照射キャプセルを設計、製作し、J M T Rで約2ヶ月間（炉出力50 MW）照射試験を行なってトラブルなくこの試験を終了した。

本開発によりアルミニウムをキャプセルの外筒に用いる見透しが得られたが、本報告書は、これら一連の試験結果をまとめ、考察を加えたものである。

+1. 日本原子力研究所東海研究所保健物理安全管理部

+2. " " 技術部

Development of an Instrumented Aluminum Outer
Tube-Capsule

Isao TAKESHITA, Susumu SEKI^{†1} and Toshiaki INOUE^{†2}

Division of JMTR Project, Oarai, JAERI

(Received October 22, 1974)

The aluminum outer tube-capsule is excellent in heat transfer and inexpensive, and safe for disposal after irradiation, compared with the stainless steel one. Characteristics of the joined elements of both aluminum and stainless steel have been studied for the design of an instrumented aluminum outer tube-capsule.

An aluminum outer tube-capsule with the element was constructed in trial and irradiated successfully in JMTR for about two months at 50 MW.

The test results of the element and irradiation of the capsule are described.

^{†1} Division of Health Physics and Safety, Tokai, JAERI

^{†2} Division of Engineering Service, Tokai, JAERI

目 次

1	まえがき	1
2	A1 外筒計測キャプセルの設計	5
2.1	SUS 外筒と A1 外筒の特性比較	5
2.2	A1 外筒キャプセルの設計例	6
3	A1 と SUS との接合方法	15
3.1	摩擦圧接	15
3.2	爆発圧接	15
3.3	電子ビーム溶接	15
4	接合材についての各種試験	18
4.1	気密性，溶接性に関する試験	18
4.1.1	カラーチェック	18
4.1.2	ヘリウムリーク試験	18
4.2	強度に関する試験	18
4.2.1	引張試験	18
4.2.2	バースト試験	19
4.2.3	硬さ試験	19
4.3	接合近傍のミクロ観察	19
4.3.1	接合面の拡大写真による観察	19
4.3.2	EMPA による観察	20
4.4	静止純水中における腐食試験	20
4.5	接合材の各種試験結果の考察	20
5	試作キャプセルの炉内照射	30
6	結 論	35
7	あとがき	36
8	付録 1 Ai-A1 の合金組成について	37
9	参考文献	39

1 ま え が き

従来JMTRでの燃料照射用キャプセルでは、内筒、外筒容器の材料としてほとんどステンレススチール（SUS）が用いられてきた。これは、燃料試料から発生する多量の熱エネルギーの冷却、および核分裂生成物（F.P.）の封じ込めの必要から、耐圧、耐食性、耐高温強度等について優れた特性を持ち、溶接、ろう接、加工性等でも信頼できる技術の確立されている材料としてSUSが選択されてきたものと考えられる。

照射実績を見ても、SUSの材料としての性質、加工性に起因したと考えられるトラブルは特になく、炉内使用でのSUSの優れた特性は否定できないが、一方SUSは比較的熱伝導率が小さいこと、および照射後の放射化量が高く、しかも半減期の長い核種が多いことが欠点とされている。

これに対して、アルミニウム（Al）はSUSに比して、熱伝導率は10倍以上であり、照射後の放射化量については、不純物も含くめて長半減期核種も少ないというSUSと大きく異なる長所を持っている。また従来からもAlは、RI製造用、材料試料照射用の容器として、あるいは、燃料照射用キャプセルにも熱媒体等として炉内で使用されてきた実績がある。

このようなAlを、燃料照射用キャプセルの外筒に用いた場合、SUSに比して主な特徴、利点をTable.1-1, 1-2, 1-3のSUS, Alの諸物性値を参照しながら利点を整理すると、

- (1) Al自体の熱伝導率が大きいため、外筒の持つ熱抵抗を小さくすることができる。
- (2) キャプセル外筒と熱媒体を一体にすることができるので、大きな熱抵抗を持つ「ガスギャップ層」を一つ無くすることができる。
- (3) Alが低密度金属であるため、SUSに比して、炉内ガンマ線による外筒の自己発熱は、約3分の1に減少する。
- (4) Alの熱中性子に対する吸収断面積が小さいために、外筒によるneutron flux depressionは小さく、したがって、同一の炉内照射条件の下では、SUS外筒キャプセルより大きい出力を得ることができる。
- (5) 照射後の放射化量は、SUSに比してAlは長半減期核種が少ないため、不要な放射性廃棄物の放射能レベルを低減させることになる。

(1)~(5)の総合された効果として、Al外筒キャプセルでは、従来技術的に困難とされている「高出力でしかも燃料表面温度（被覆管温度）の低い照射」が可能となる。例えば、2章で検討されているように、PWR, BWR用燃料の炉内運転条件を、燃料温度、被覆管温度、出力等で比較的容易にJMTR炉内で模擬し、あるいは加速した照射が実現できる。

しかし、計測付燃料照射キャプセルで、外筒をAlにするためには、Al自体のキャプセル外筒としての強度の検討と同時に、「F.P. (fission products) の封じ込め」をどのようにするか技術的な課題となる。

Fig.1-1の(A)は、従来のSUS外筒キャプセルで、外筒の両端および計測線と外筒端栓はそれぞれ溶接（TIG）、高温ろう接（ニクロブレーズ）により、継手としての強度およびシーリングを確保している。外筒をAlにした場合、Fig.1-1の(B), (C)の2種類の構造が考えられる

が、(B)、(C)それぞれにまた技術的な難題が付随する。

(B)の場合外筒両端はA1-A1間の溶接であるが、計測線の外筒貫通部は、異種金属相互(A1とSUS、インコネル、Ta等の計測線シース材)のロウ接であり、このロウ接技術を確立する問題が主テーマとなる。また、保護管と称している外筒上部の管を従来のSUSからA1に変更できるか、という問題も生じる。

(C)の場合、外筒両端は、A1-A1およびSUS-SUSの溶接であり、計測線の外筒貫通部は、(A)と同じ高温ロウ接であるが、外筒胴部でSUSとA1を接合する必要があり、このSUS-A1接合技術を確立する問題が主テーマとなる。

(B)のA1ロウ接は、仮りに炉外で耐圧、漏洩の面で信頼し得る技術が確立されたとしても、使用限界温度は、あまり高温は望めず、しかも炉内の高放射線下での気密性には十分な照射試験を行なって、信頼性を確立しなければならない。(C)のSUS-A1接合については、爆発圧接法による接合材料の炉内使用例もあり、比較的容易に開発できるであろうとの期待から、(C)方式の開発が選択された。

開発の内容はつぎのように大別できる。

- (1) A1外筒計測キャプセルの設計、製作。
- (2) A1とSUSを接合(爆発圧接、摩擦圧接、電子ビーム溶接の三種類の方法によった)した継手について、強度、気密性、耐食性等を調べる。
- (3) A1外筒キャプセルの炉内照射により、A1外筒の特性の確認と、A1-SUS接合部の健全性の確認をする。

Table 1-1 Physical properties of Al and SUS

Property \ alloy	SUS-304	AlBI
density (g/cc)	7.93	2.7
melting point (°C)	~1400	~660
thermal conductivity (cal/cm/°C/sec)	0.039	0.53
coefficient of linear thermal expansion (1/°C)	17.3×10^{-6}	73.8×10^{-6}
thermal neutron absorption cross section (barn)	2.9	0.23

Table 1-2 Chemical compositions of Al and SUS (JIS)

	composition (%)							
AlBI	Al	Fe	Si	Mn	Mg	Cu	Zn	Ti
	>99.5	<0.40	<0.25	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.03
SUS-304	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	C	P	S
		8~11	18~20	<2.00	<1.00	<0.08	<0.04	<0.03

Table 1-3 Mechanical properties of Al and SUS

alloy	T.S.	0.2% Y.S.	elongation	Brinell hardness	Modulus of elasticity
AlBI (1100~0)	9.1 kg/cm ²	3.5 kg/cm ²	45%	23 Bhn	7×10^5 kg/cm ²
SUS-304	5.6 "	2.1 "	50%	160 "	2.03×10^6 "

(at room temperature)

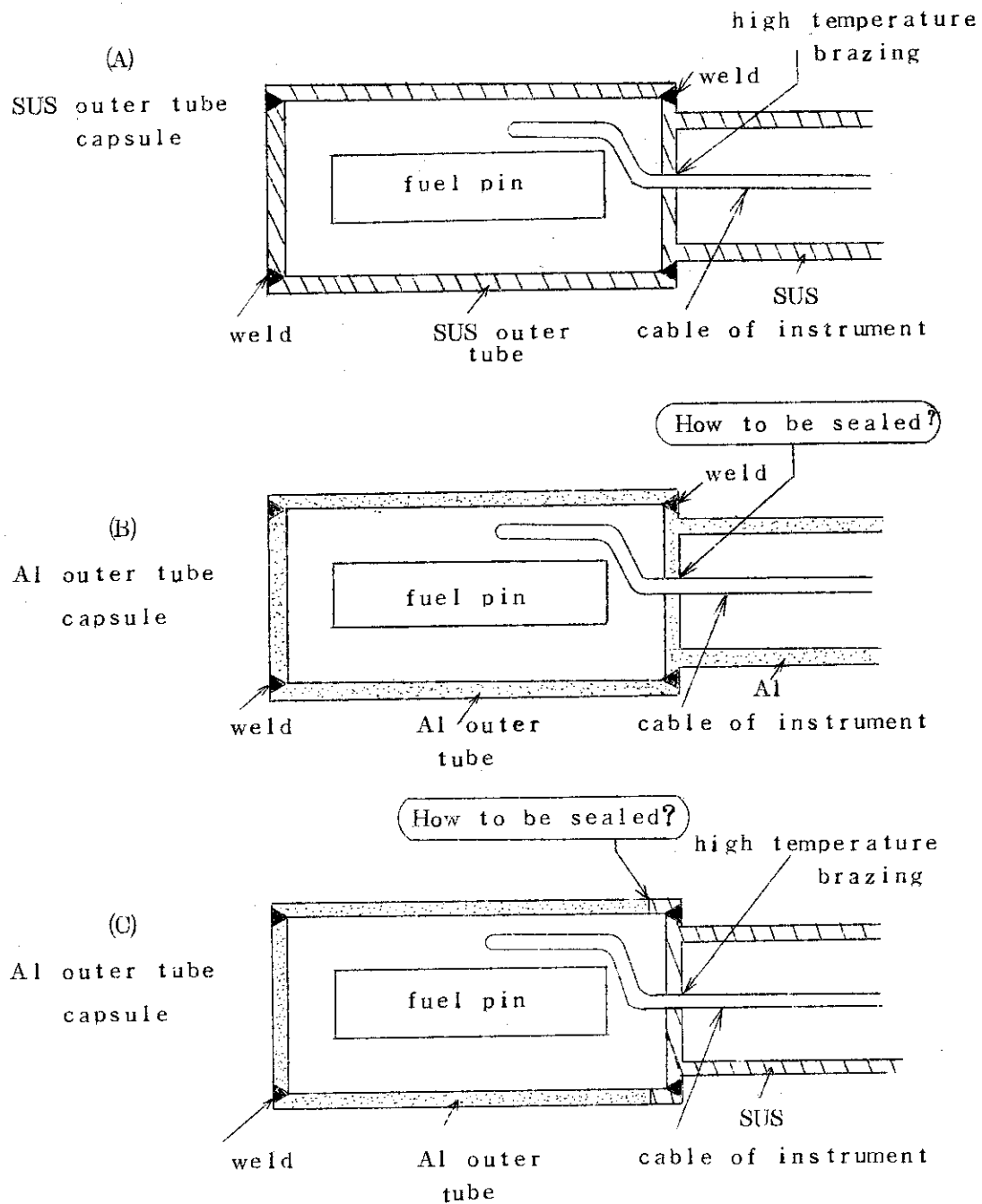


Fig. 1-1 Illustration of the parts which must be joined and sealed in SUS outer tube capsule and in Al one.

2 Al外筒計測キャプセルの設計

2.1 SUS外筒とAl外筒の特性比較

(1) 出力，温度

Fig.2-1に示されるモデルについて，SUS外筒とAl外筒の燃料キャプセルの線出力と温度（冷却水から燃料試料表面温度までの $4T$ ）の比較計算をした。使用コードは，現在JMTRで使用されている「GENGTC」で，本コードは，各材質の膨張係数，熱伝導率等を温度依存とし，また各層毎にガンマ発熱も考慮できる一次元円筒熱計算コードである。モデルは，キャプセル外径 $29\text{mm}\phi$ でSUS外筒の肉厚は 1.5mm^t ，燃料試料は外径約 $17\text{mm}\phi$ の UO_2 ，SUS-32被覆のものである。

Fig.2-1で明らかなように $4T=300^\circ\text{C}$ （冷却水のバルク温度は，JMTRの場合約 50°C だから，燃料試料表面温度は約 350°C になる）の場合SUS外筒では出力が 200w/cm であるのに対し，Al外筒では 500w/cm と，約2.5倍の出力である。

燃料試料表面温度で $300\sim 350^\circ\text{C}$ ，燃料試料出力で $300\sim 500\text{w/cm}$ という値はほぼBWR，PWRあるいはATR等の燃料の運転条件に対応し，JMTRでの照射条件が，Al外筒キャプセルで容易に含包できるといえる。さらにSUS外筒キャプセルに比しても，明らかに高出力で，しかも燃料試料表面温度を下げた照射が可能であることをFig.2-1の計算結果が示している。

(2) 熱中性子束に対する歪

Fig.2-1のモデルについて，THERMOSコードにより熱中性子束分布の比較計算を行った。THERMOSコードは，一次元熱中性子輸送方程式を解いた核計算コード（セル定数計算に汎用されている）であり，JMTRでも，炉心設計，照射条件推定等に常時使用されている。セル内熱中性子スペクトル調整のために，セルを囲っているベリリウム層で規格化した熱中性子束分布計算結果をFig.2-2に示す。

Fig.2-2によれば，SUS外筒の方がAl外筒に比して熱中性子束の歪量は大きく，キャプセル外筒表面で約20%の差を示している。つまり，Al外筒の方が明らかに熱中性子吸収量は小さく，したがって，同一熱中性子束の中に装荷すれば，SUS外筒より大きい出力を得ることになる。また，炉心全体への影響も当然Al外筒の方が小さく，JMTRの炉心設計には好都合である。

(3) 照射後の放射能強度

熱中性子によるAl(52S)とSUS-27の放射化量を算出し，90日冷却後の放射能強度を比較すると，Fig.2-3のようにSUS-27 1grで約 $3.2\times 10^{-2}\text{Ci}$ ，Al 1grで約 $6.2\times 10^{-4}\text{Ci}$ と推定され，Alの方がSUSより約2桁低い。さらに冷却時間を長くすれば，Al中の不純物で放射化される ^{51}Cr ， ^{65}Zn はほとんど放射能はなくなる。一方，SUSの方は ^{60}Co が微量ながら半減期が長いので放射能の減衰速度は遅い。

このことから，照射後のいわば不要なキャプセル構造材としては，放射性廃棄物の処理の経済性，安全性の観点から，SUSよりもAlの方がはるかに望ましい材料であることがわかる。

2.2 Al 外筒計測キャプセルの設計例

(1) 構造

アルミニウムを外筒とし、熱媒体を兼ねさせた燃料照射キャプセルの設計例を Fig. 2-4 に示す。試料として用いた燃料は外径 15.03mm^{ϕ} 、スタック長 150mm 、濃縮度天然、密度 $95\%T/D$ の UO_2 ペレットであり、これをギャップクリアランス 0.12mm (直径)、肉厚 0.75mm の SUS 316 被覆管に封入したものである。キャプセル外筒は肉厚 6mm^t 、外径 29mm^{ϕ} の Al を使用している。

本キャプセルは、燃料の中心温度測定をもう一つの目的としているため、 UO_2 ペレットは中空のものも使用し、中にタンタルシースのタングステンレニウム熱電対を装荷させている。

アルミニウム外筒内にクロメルアルメル熱電対を装荷し、上端栓部で、CA および W-Re 熱電対をニクロブレースによりシールをした JMTR で使用されているごく一般的なキャプセルと類似の構造である。

JMTR 炉心内で高出力を目標とすれば、反射体一層目または二層目での照射されることが想定されるので、いわゆるガンマ発熱も大きい。アルミニウムとステンレスの接合部は、そのため垂直方向炉中心からできるだけ遠ざけるようにしている。

上部端栓から上の保護管は通常のキャプセルと同一であるが、このように、いわゆる炉心内でのキャプセル構成材は、試料を除いてほとんどアルミニウムを使用することができることになった。

(2) 熱的検討

本キャプセルの各構成材に対する試料出力と温度の計算結果の一例を Fig. 2-5 に示す。このように試料からの核分裂による出力 $700\text{W}/\text{cm}$ 、ガンマ発熱 (一様発熱としている) $6\text{W}/\text{g}$ でアルミニウム外筒の平均温度は、約 150°C と低い。この出力では、計算上 UO_2 の中心温度は、融点 2800°C を越えて溶融することになるが、被覆管平均温度は 370°C と低く、外筒、被覆管共に、温度上は問題のないことがわかる。

(3) 強度の検討

被覆管は、出力 $690\text{W}/\text{cm}$ (UO_2 中心温度が 2800°C に対応する) で、十分余裕のある評価となった。

アルミニウム外筒の強度評価を以下に検討する。

(a) アルミニウムの許容応力

アルミニウムを原子炉内での耐圧容器として用いる場合の許容応力の一般的な基準は、ASME, CODE SECTION VIII が参考になる。この TABLE UNF-23 にアルミニウムおよびその合金について、 $100^{\circ}\text{F} \sim 400^{\circ}\text{F}$ ($38^{\circ}\text{C} \sim 205^{\circ}\text{C}$) の範囲で許容応力値が示されており、Fig. 2-6 にその一部を抜粋した。

軽金属協会 (1966 年) も、Al 合金を用いた圧力容器、貯蔵タンク類の許容応力基準 LLS-SW④ に円筒形または球形の圧力容器貯蔵タンク類の溶接構造物に対して、常温または低温に適用する場合許容応力として $\frac{\sigma_B + \sigma_{0.2}}{5}$ または $\frac{2\sigma_{0.2}}{3}$ の小さい方をとるように決めており¹⁷⁾、(σ_B ; 引張り強さ、 $\sigma_{0.2}$; 耐力) これらが許容応力の目安として採用できそうであるが、「常温」の適用範囲が狭いこと、高温時は規準にならないという不便さがある。

(b) 強度評価

外筒としての使用条件では，JMTR一次系圧力，キャプセル内圧力，試料からの発生熱による熱応力，照射，一次冷却水による腐食等に外筒が耐えることが必要と考えられる。このうち照射効果については，アルミニウムは引張り強さ，耐力共に強くなり，伸びは多少減少するが，脆化は起らないとされており，非照射の評価で良いことになる。

腐食については，1年間連続で200℃の精製流動純水中での腐食量を計算すると¹⁶⁾，～0.1mmとなり，十分な肉厚を確保しておけば，問題はない。

内，外圧および熱応力についての評価は，下記のように考えた。

(1) 外圧による応力

$$\text{円周方向応力 } \sigma_1 = \frac{2 P_2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \text{ で}$$

$$P_2 = 1.8 \text{ Kg/cm}^2, R_1 = 8.5 \text{ mm}, R_2 = 14.5 \text{ mm とすれば}$$

$$\sigma_1 \doteq 0.55 \text{ Kg/mm}^2$$

(2) 内圧による応力

$$\text{円周方向応力 } \sigma_2 = \frac{P_1 D}{2 t} \text{ で, } P_1 = 5 \text{ Kg/cm}^2, t = 6 \text{ mm}, D = 17 \text{ mm とすれば}$$

$$\sigma_2 \doteq 0.07 \text{ Kg/mm}^2$$

(3) 熱応力

$$\text{円周方向熱応力 } \sigma_t = \frac{\alpha E \Delta T}{2(1-\nu)} \text{ で}$$

$$\alpha = 25.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}, \nu = 0.33, E = 0.65 \times 10^4 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\Delta T = 35^\circ\text{C} (Q = 690 \text{ W/cm に対応する}) \text{ とすれば}$$

$$\sigma_t = 4.38 \text{ Kg/mm}^2 \text{ となる。}$$

以上(1),(2),(3)の各応力をASME SECTIONIIIの考えで許容応力との比較をする。例えば許容応力として，Fig.2-6の1100-0を採れば150℃で

$$\sigma_1, \sigma_2 < \sigma_a = 1.3 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_t + \sigma_1 = 4.38 \text{ Kg/mm}^2 > 3 \sigma_a = 3.9 \text{ Kg/mm}^2$$

となり，強度十分とはいえない。

同じく第2-6図の6061-T6-Weldedを採用すれば，

$$\sigma_1, \sigma_2 < \sigma_a = 3.5 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_t + \sigma_1 = 4.38 \text{ Kg/mm}^2 < 3 \sigma_a = 10.5 \text{ Kg/mm}^2$$

となり強度は十分であるといえる。

すなわち外筒容器としては，特に高出力キャプセル（外筒の温度も高くなる）の場合，純アルミニウム（1種）よりは高温強度の大きいアルミニウム（例えば耐食アルミニウム（2種））を使用すべきである*。

本キャプセルの場合，熱応力は，主として，試料ピン相当胴部に生じ，溶接部およびその近

* 耐食アルミニウムは，溶接性に問題があるとされている。

傍は、応力としては上記の値より十分小さいことが予想され、強度は確保されると考えた。

(4) A1-SUS 接合部の強度評価

A1-SUS 接合部が、ガンマ発熱によって加熱され、一次冷却水で冷却される場合に生じるせん断応力について検討する必要がある。Fig.2-7 の体系について

ガンマ発熱	5 W/g
一次冷却水による表面熱伝達率	2×10^4 Kcal/m ² h°C
" バルク温度	50°C
円筒内径 (半径)	0.85 cm
" 外径 (半径)	1.45 cm

で、一次元円筒系での一様発熱温度計算を行なうと、

$$\text{ステンレス外面温度 } t_1 = 57.1^\circ\text{C}$$

$$\text{" 内温度差 } \Delta T_1 = 64.8^\circ\text{C}$$

$$\text{アルミニウム外面温度 } t_2 = 52.4^\circ\text{C}$$

$$\text{" 内温度差 } \Delta T_2 = 1.8^\circ\text{C}$$

したがって SUS 側での熱応力 σ_{SUS} は

$$\sigma_{\text{SUS}} = \frac{\alpha E \Delta T}{2(1-\nu)} = 16.2 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\text{ただし } \alpha = 17.4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$E = 2 \times 10^4 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\nu = 0.303$$

$$\Delta T_1 = 64.8^\circ\text{C}$$

である。A1 側での熱応力 σ_{A1} は 0 である。

この σ_{SUS} が、円筒内、外面の円周方向応力として、アルミニウムを圧縮、引張することになり、あきらかにアルミニウムの許容応力を越えてしまう。したがって、接合部は、極力炉心から離れた位置にしてガンマ発熱を下げる、接合部の肉厚はできるだけ薄くすること、等、使用時、接合部にできるだけ応力のかからないような工夫が必要である。

本キャプセルの場合、接合部の肉厚は 3mm として、アルミニウムの許容応力 σ_a の 3 倍以内に σ_{SUS} を収めるようにしたが、SUS-A1 の接合部について強度試験を行なう必要のあることがわかる。

Calculation model

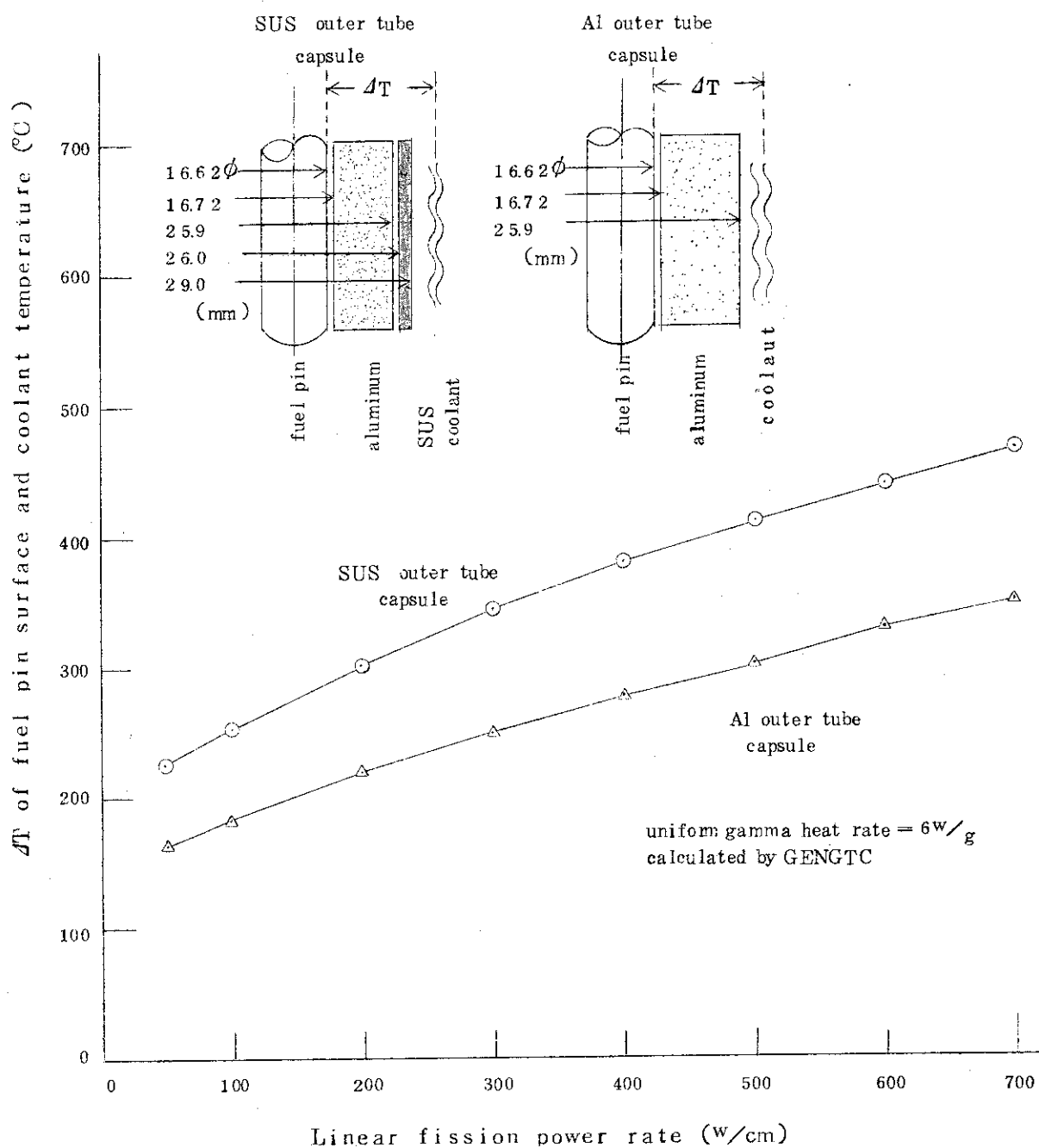


Fig. 2-1 Comparison of temperature v.s. power about Al and SUS outer tube capsule.

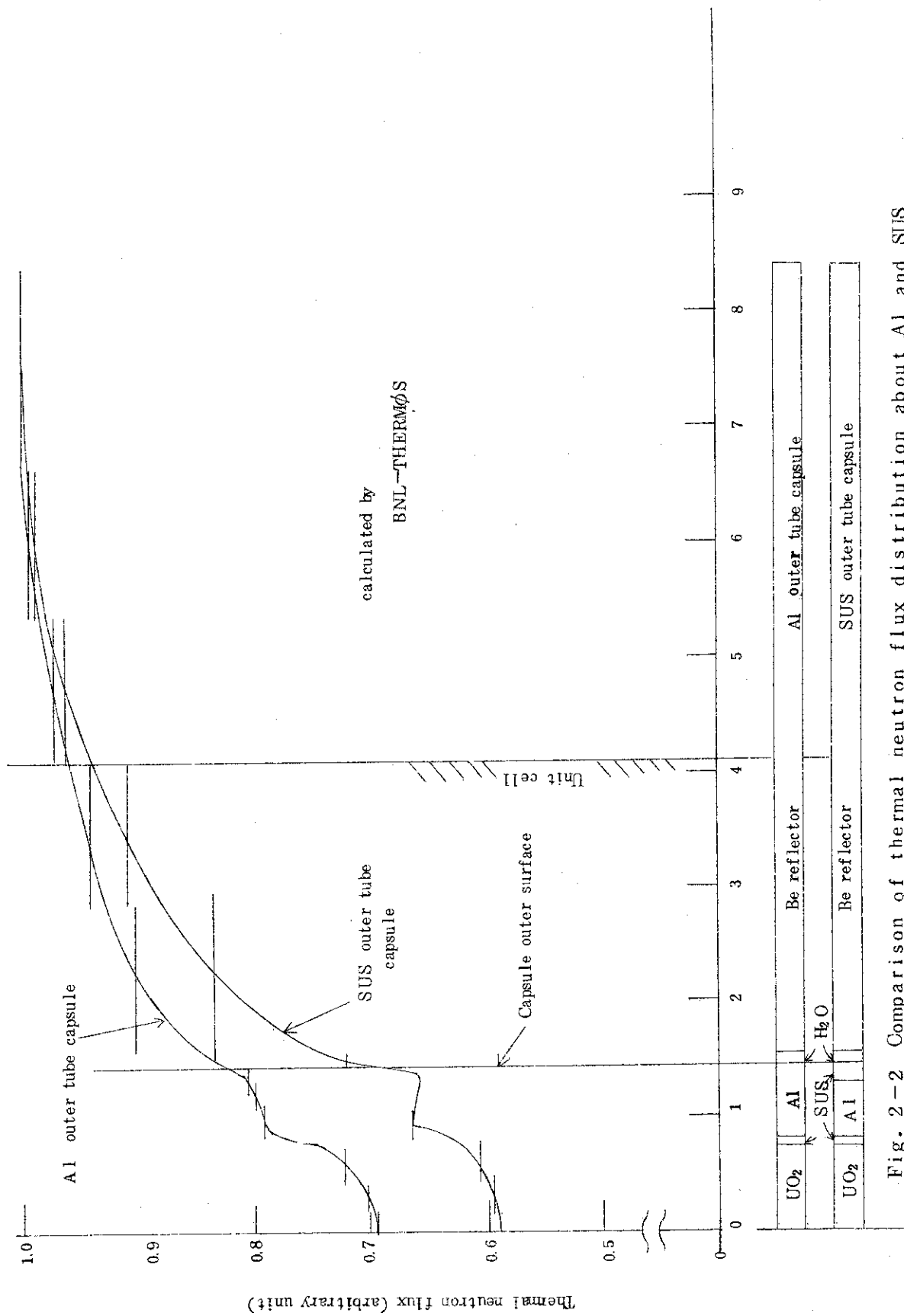


Fig. 2-2 Comparison of thermal neutron flux distribution about Al and SUS outer tube capsule.

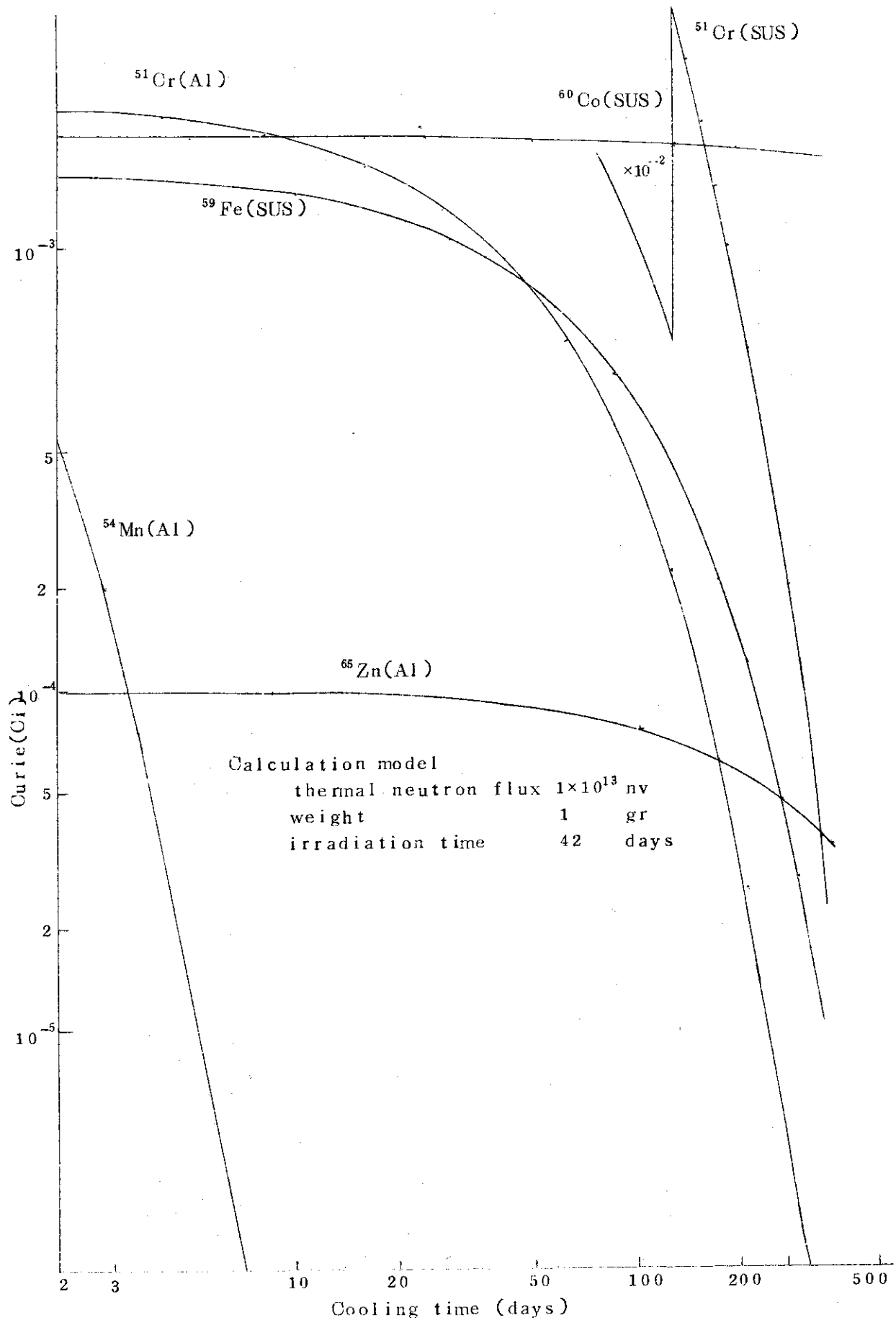


Fig. 2-3 Decay of activities for Al (52S) and SUS-27

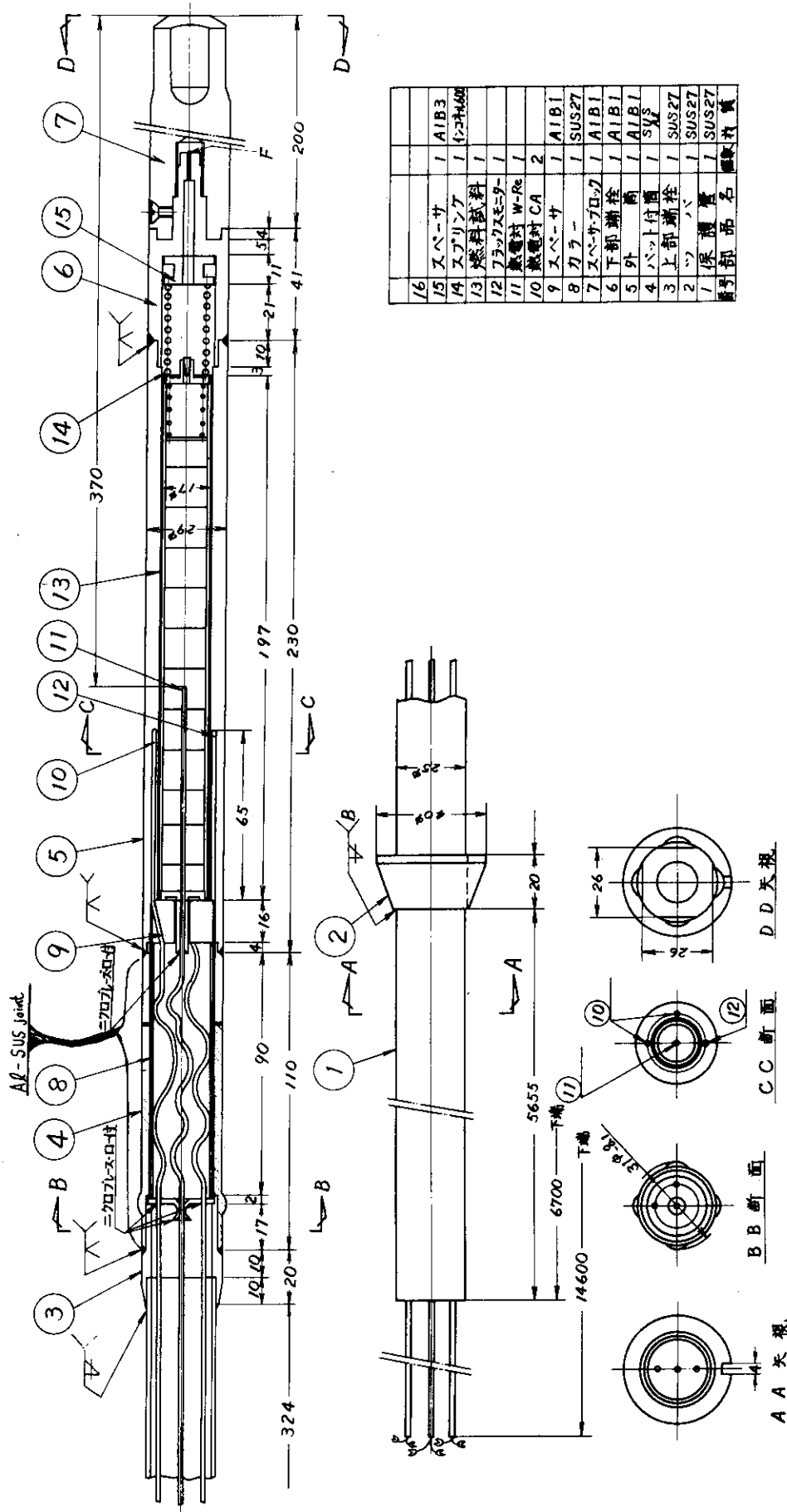


Fig. 2-4 69F-7J capsule Assembly

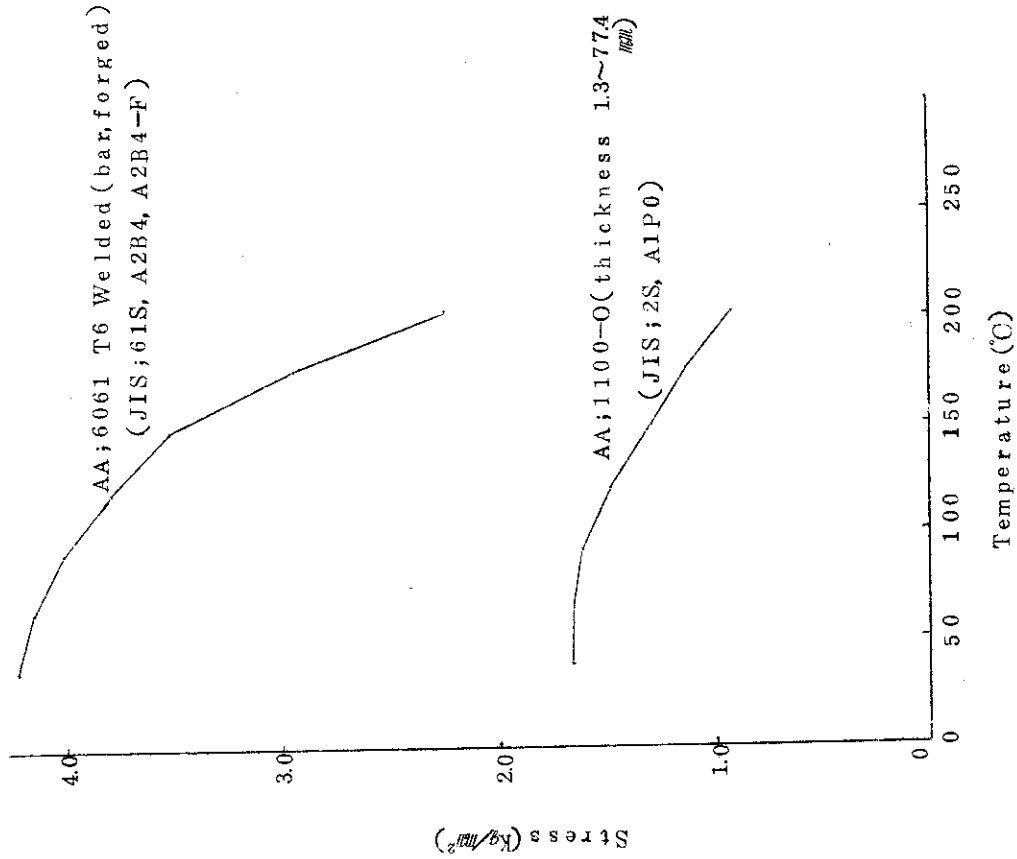
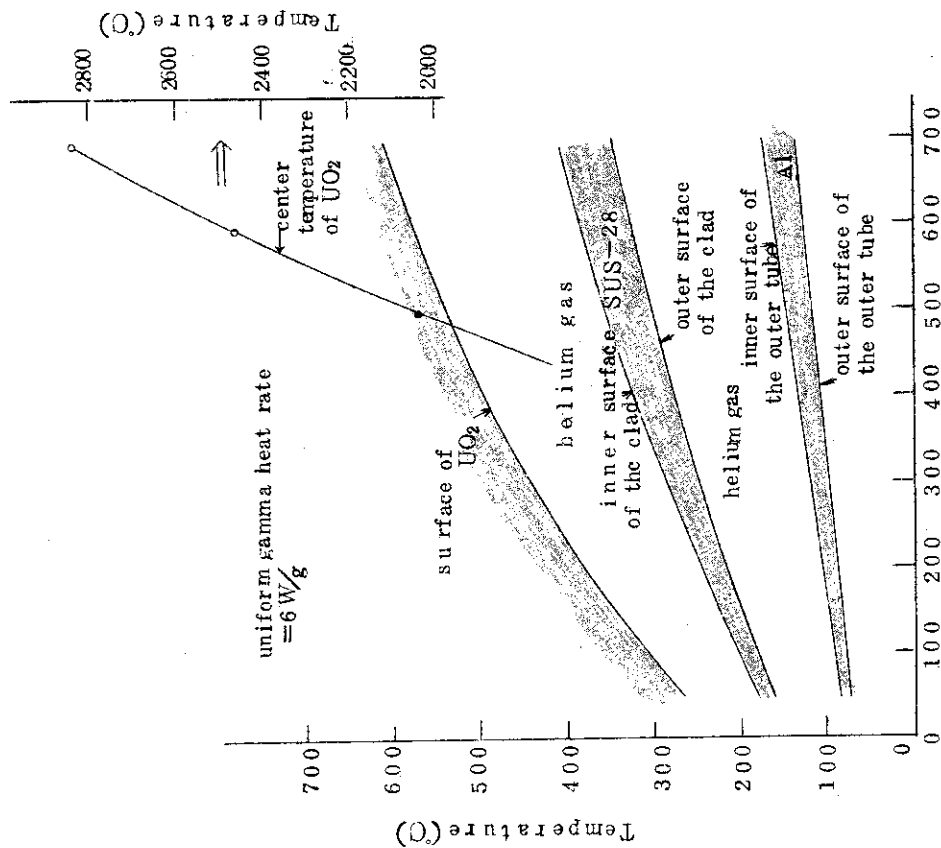


Fig. 2-6 Allowable stress of Al (ASME SECTION III)



Linear fission heat rate (W/cm)

Fig. 2-5 Temperature profile of each nodes of 69F-7J capsule

Table.2-1 Allowable stress of Al.

aluminum	allowable stress	
A1PS-0	1.4 kg/mm^2	b
A1P0	1.4	b
A1P1	1.4	b
A1P3	2.0	a
A2P3	2.0	b
A2P8	2.0	b
A2P1	4.0	b
A2P9	4.7	b
A2P7	8.0	a

$$a = \frac{\sigma_B + \sigma_{0.2}}{5}, \quad b = \frac{2}{3} \sigma_{0.2}$$

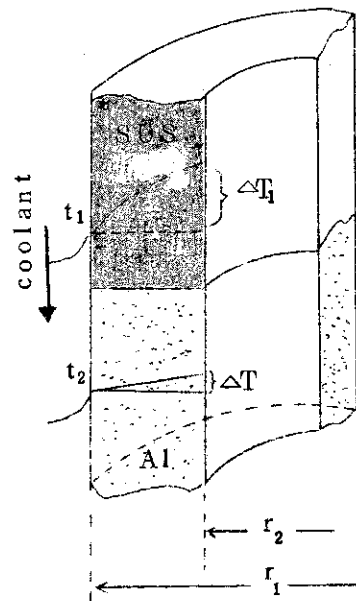


Fig.2-7 Temperature profile of joined element of both Al and SUS.

3 AlとSUSとの接合方法

AlとSUSとの接合の方法として(1)摩擦圧接(2)爆発圧接(3)電子ビーム溶接の3種を選択し、それぞれについて接合部の強度等を比較して、最も炉内での使用に適切なものを選ぶこととした。各接合法の詳細は以下のようなものである。

(1) 摩擦圧接

○ 使用母材

ステンレス	SUS 304
アルミニウム	AlB1 (Al050BE-F)

○ 圧接条件

回転数	1800 rpm
摩擦発熱圧力	4 Kg/mm ²
加熱時間	2秒

○ 製作工場

T社

なお圧接状態をFig.3-1に、また圧接後の断面をFig.3-2に示す。

(2) 爆発圧接

○ 使用母材

ステンレス	SUS 304
アルミニウム	AlP1 (99.5%Al)
チタン	99.88%Ti (KOBE TITANIUM)

○ 圧接条件

火薬の種類、量、ギャップ、配置等不明。^{*}
AlとSUSの間に純チタンを使用。

○ 製作工場

A社

○ 板材の寸法	SUS-27	40mm ^t ×1000mm×1000mm
(母材)	AlP1	15mm ^t ×1000 ×1000
	Ti	2mm ^t ×1000 ×1000

Fig.3-3に爆発圧接母材から一部を切り出したものを示す。

(3) 電子ビーム溶接材

○ 使用母材

ステンレス	SUS-27 棒材
アルミニウム	AlB1

○ 溶接時の形状

Fig.3-4に示す。

○ 溶接条件

加速電圧	30KV
------	------

* D社との契約上、A社より外部には出せないとのことである。

ビーム電流	32, A
溶接速度	400 mm/min
溶接時間	13.6 sec
使用フィラメント	Hair pin
治具等	水平回転メカ
	Program Timer 使用

ビーム電流, 溶接速度を5段階に分けて, 最良の溶接条件としたものが上記の値である。

○ 製作工場 N社

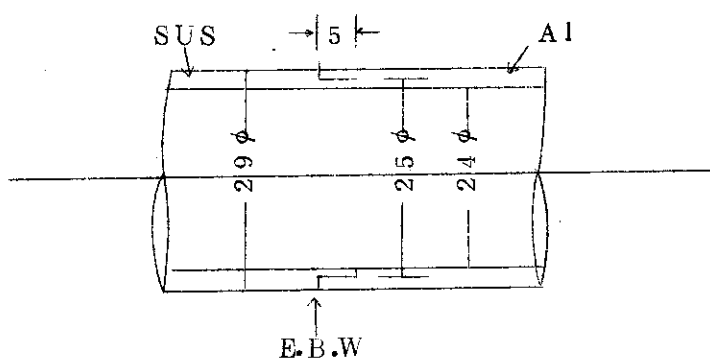


Fig. 3-4 Configuration of both Al and SUS piece at Electron Beam Welding(E.B.W.)

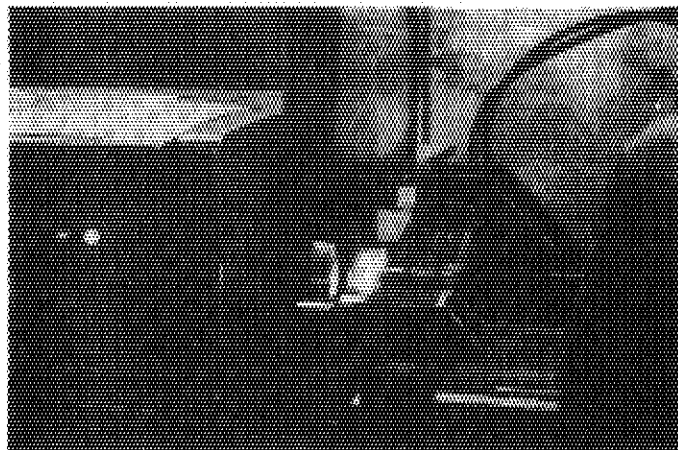


Fig. 3-1 Friction Welding (F.W.)
(photograph taken approved by T company)

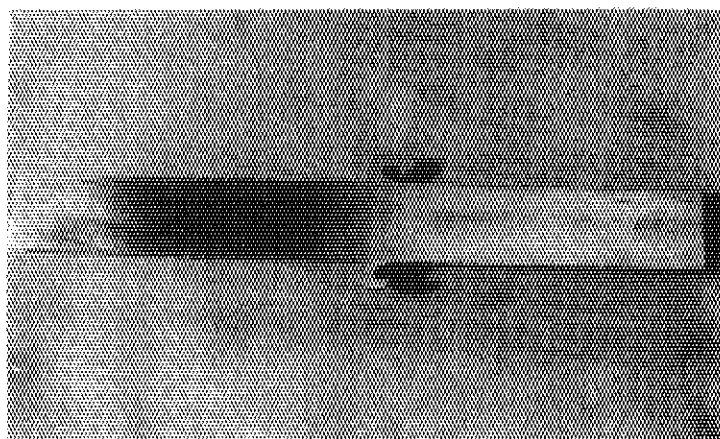


Fig. 3-2 Cross section of joined element by
Friction Welding (F.W.)

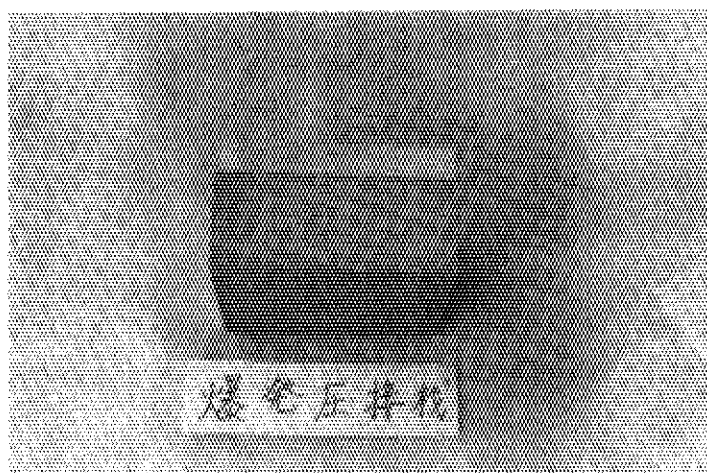


Fig. 3-3 Cross section of joined element by
Explosive welding (E.W.)

4 接合材についての各種試験

4.1 気密性，溶接性に関する試験

4.1.1 カラーチェック

Table.4-1 に3種類の圧接材についての検査結果を示す。これから，電子ビーム溶接材については，欠陥が多く，使用に耐えないことが明らかになったため，金相を除いて，以後の試験からは除外した。

4.1.2 ヘリウムリーク試験

Table.4-2 爆発，摩擦圧接材のヘリウムリーク試験結果を Fig.4-1 に試験中の写真を示す。

試験機器	質量分析型リークディテクター
検出感度	3.1×10^{-10} atm cc/sec.
試験方法	真空法
試験片	Fig.4-6 に示す。各3体を試験した。

このように現在 JMTR キャプセル検査基準で定めている許容リーク量 1×10^{-6} atm cc/sec と比して，両圧接材共に問題ないことが判明した。

4.2 強度に関する試験

4.2.1 引張試験

Fig.4-2 に示す試験片を接合母材より切り出し，下記の条件で常温～高温までの引張試験を行ない，Fig.4-3 および Fig.4-4 に示す応力歪線図，および引張強さを得た。

(試験条件)

試験片数	各圧接材につきそれぞれ8ヶ
昇温時間	所定温度まで15～30 min. 昇温到達後20 min 保持
試験温度	常温，100℃，200℃，300℃
装置	インストロン万能試験機

破断の生じた個所は，両接合材共に接合面近傍のアルミニウム部分であった。このことは，接合面自体は，母材のアルミニウムより強度は大きいことを示している。また Fig.4-3 および Fig.4-4 から爆発圧接の方が摩擦圧接と比較して各温度共引張り強さは大きい。伸びについては，試験片のA_L部の長さが異なるため，比較にはならない。

なお引張試験後のアルミニウム破断面の結晶組織を較べてみた。Fig.4-5 のように爆発圧接の結晶粒が摩擦圧接のそれに比して小さい。このことは，引張試験の結果と対応するが，爆発圧接時の圧接温度が高く，かつ圧接が短時間で行なわれて急冷するのではないかと考えられる。

なお両圧接材共に試験片切出し中に，それぞれ1個折れてしまった。折れた個所は，ちょうど接合面（爆発圧接材の場合はTiとSUS接合面）である。

4.2.2 パースト試験

Fig.4-6の試験片について、パースト試験を行なった結果をTable.4-3に示す。またそれぞれのパーストした試験片をFig.4-7に示す。

これによれば爆発圧接は、円周方向に破断し、摩擦圧接は軸方向にそれぞれA1部分で破断している。薄肉円筒に内圧をかけた場合の円周方向の応力は $\sigma_z = \frac{Pr}{t}$ ，軸方向応力は、 $\sigma_z = \frac{Pr}{2t}$ で表わされるが、これにそれぞれ破断した内圧と寸法を入れて計算すると、

$$\text{爆発圧接材では} \quad \sigma_z = \frac{123 \times 13.5}{2 \times 1} \approx 830 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\text{摩擦圧接材では} \quad \sigma_t = \frac{65 \times 13.5}{1} \approx 880 \text{ Kg/cm}^2$$

となり破断した応力はほぼ等しいことになる。

爆発圧接材の σ_t は当然 σ_z より大きいはずであるが、これは試験片の形状からアルミニウム部分の長さが10mmで、両端をTi円筒部および鏡板で拘束されているために、応力 σ_t は、上式では必ずしも表わされず、 $\sigma_t < \sigma_z$ となったものと考えられる。

この試験結果では、両接合材共に接合面そのものでの破断はなかったので、継手強度はA1母材よりも強いことが、引張試験の結果と合わせて結論される。

4.2.3 硬度試験

接合面境界および近傍での脆さおよび接合力の基になっているものを探るためにヴィッカース硬さの分布を調べた。Fig.4-8にその結果を示す。

これによれば、両圧接材共にステンレスが接合面近傍で硬くなっている。顕著に硬さが大きくなっている領域は接合面からそれぞれ約50μである。

A1層およびTi層では、特に硬さの変化は見られないが、A1については、純A1とほとんど変らない⁽¹⁸⁾一方Tiについては、純チタンより40~100%程度硬くなっている⁽¹⁹⁾。

両圧接材共に、SUS層またはSUS層とTi層が硬化していることは、薄い引張試験片加工中折損したと符号していると考えられ、衝撃、曲げ等が使用条件に入る場合、十分考慮する必要があると思われる。

4.3 接合面近傍のミクロ観察

4.3.1 接合面の拡大写真による観察

Fig.4-9~Fig.4-12に、それぞれ電子ビーム、摩擦、爆発の各接合材の接合面近傍を研磨した面の拡大写真(×100)を示す。

Fig.4-9の電子ビーム溶接による接合面は、A1とSUSの境界が不鮮明で、さらに境界近傍には空孔が多く見られる。この空孔がカラーチェックの欠陥に対応すると考えられる。

Fig.4-10の摩擦圧接による接合面は、A1とSUSの境界が鮮明で直線的である。

爆発圧接材のうち、Fig.4-11のA1-Tiの境界は、波形をしており、その先端部には、小さな空孔が見られることおよびTi層内に白く見える部分があることが特徴である。

Fig.4-12のTi-SUSの境界は山状で、鮮明である。

4.3.2 EMPAによる境界の観察

摩擦圧接材の接合境界をEMPAで調べた結果をFig.4-13に示す。これによれば、境界面を境にAl層にはFeが、Fe層にはAlが存在しないこと、および境界がはっきりしていることがわかる。

爆発圧接材の接合境界のうちTi-SUS接合面のEMPAの結果をFig.4-14に示す。これもTi, Fe相互に拡散していないこと、および境界はシャープであることを示している。Ti-Al接合面については、二種類、すなわち、Ti-Al合金が生じていると考えられるFig.4-15と、特にそれが認められないFig.4-16の結果が得られた。Fig.4-15のTi-Al混合層とTi層、Al層との境界は、他のSUS-Al, Ti-SUS等と同様に鮮明である。なおAl-Ti混合層に関して、Ti-Al合金による極端な物性変化が心配されるため、合金とすればどのようなものかを付録-1で検討した。

4.4 静止純水中における腐食試験

Fig.4-17に示すような試験片を各2本、JMTRカナル水中に、157日間(1972年3月8日~1972年8月11日)保持し、表面状態の観察および重量変化の測定を行なった。(表面状態の観察)

摩擦圧接材では、アルミニウム部分が黒灰色に変色したが、特に剥離するような状態ではなく、極く表面のみの変化のようである。

爆発圧接材では、アルミニウム部分の変色は、摩擦圧接材と同様であるが、チタン層が、やゝ白色化(純水中に浸す前は、やゝ銀白色)している。

なおステンレス層は両圧接材共に変化は見られない。

(重量変化)

腐食試験前後の重量測定結果をTable.4-4に示す。重量測定精度以上の変化はなかったことがわかる。

4.5 接合材の各種試験結果の考察

爆発圧接材のAl-Ti接合部のカラーチェックによる欠陥は、ヘリウムリーク試験での「No Leak」という結果と合わせると、特に内部まで貫通している欠陥ではなく、金相写真で見られる波形の接合部の一部に生じた空孔であると推定される。

機械的強度のうち引張強さは、爆発、摩擦圧接材共に母材のアルミニウムの強さとほぼ同じである。爆発圧接の方が摩擦圧接に比してやゝ大きい引張り強さを示すことは、圧接に使用したアルミニウム母材の加工度の違い、および圧接条件の違いに起因するものと考えられる。

接合のされ方に関しては、爆発圧接のAl-Ti間の接合部を除いて、金相、EMPAの結果からは、いわゆる「拡散層」とか「合金層」とか云われる結合層は見られなかった。

静止純水中での腐食試験から、主としてキャプセル照射後の水中での冷却保管中の接合部の挙動を推定すると、両圧接材共に、大きく腐食されるとかの恐れはないと考えられる。

流動純水中でのAlの腐食については、本稿2.2の(3)の(b)のAl腐食量の検討、および本試験結果からも、特に炉内使用に支障を生じる程の腐食は生じないものと考えられる。

試作キャプセルに用いる SUS-Al 接合材は，以上の試験結果から，爆発圧接，摩擦圧接のどちらによるものでも問題はないと考えられるが，爆発圧接は，若干引張強さが大きいものの，圧接時の条件（爆薬の種類，Al-Ti または Ti-SUS 間への薬材の有無等）が不明であるために，炉内での化学反応等の心配のない摩擦圧接による接合材を選択した。

Table 4-1 Colour check test results of each joined elements

element by F.W.	no defect
element by E.W.	a few shallow pin holes between Al and Ti layer
element by E.B.W.	many pin holes

F.W. = Friction Welding

E.W. = Explosive Welding

E.B.W. = Electron Beam Welding

Table 4-2 He leak test results of each joined elements

	detected value	B.G.	majority of standard leak	detected leak rate
element by F.W 1	0	0	10×10	31×10^{-10} atmcc/sec
" 2	"	"	"	"
" 3	"	"	"	"
element by E.W 1	"	"	"	"
" 2	"	"	"	"
" 3	"	"	"	"

Table 4-3 Burst test results of each joined elements

test piece	Pressure at the beginning of strain change	Pressure at Burst
element by F.W 1	60 kg/cm ²	65 kg/cm ²
" 2	60 "	65 "
" 3	60 "	63 "
element by E.W 1	105 "	124 "
" 2	100 "	123 "
" 3	—	121 "

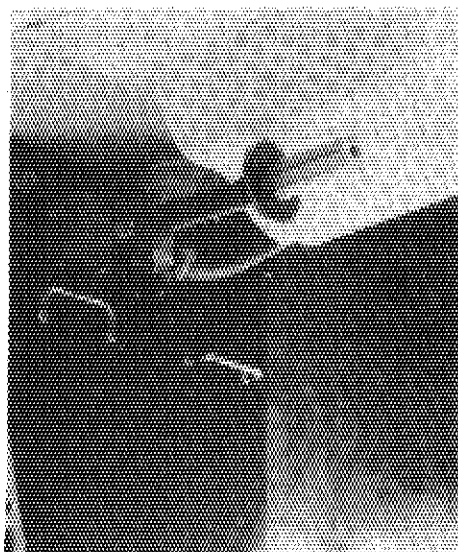
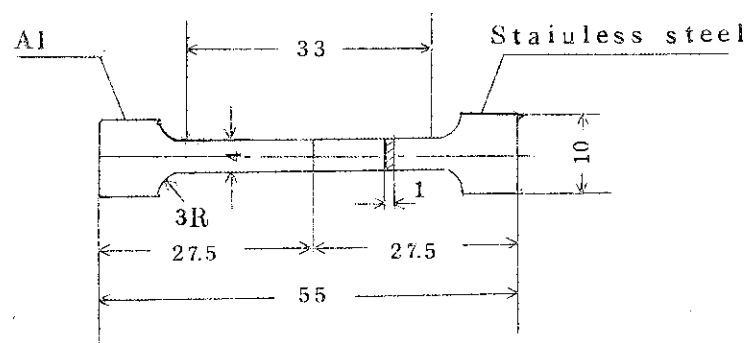
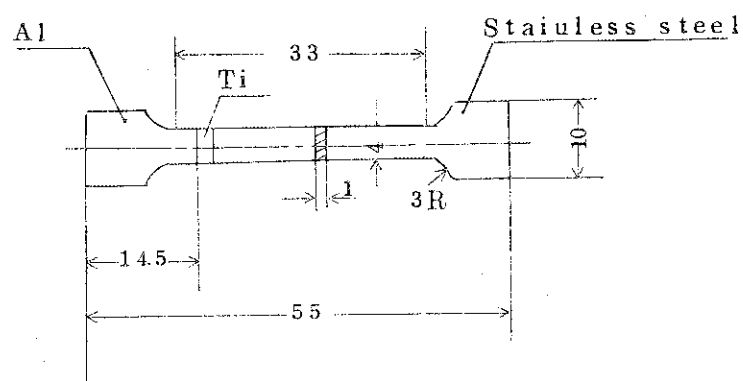


Fig. 4-1 He leak test (test of joined element by Explosive Welding)



(a) Element by F.W.



(b) Element by E.W.

Fig. 4-2 Tensile test pieces

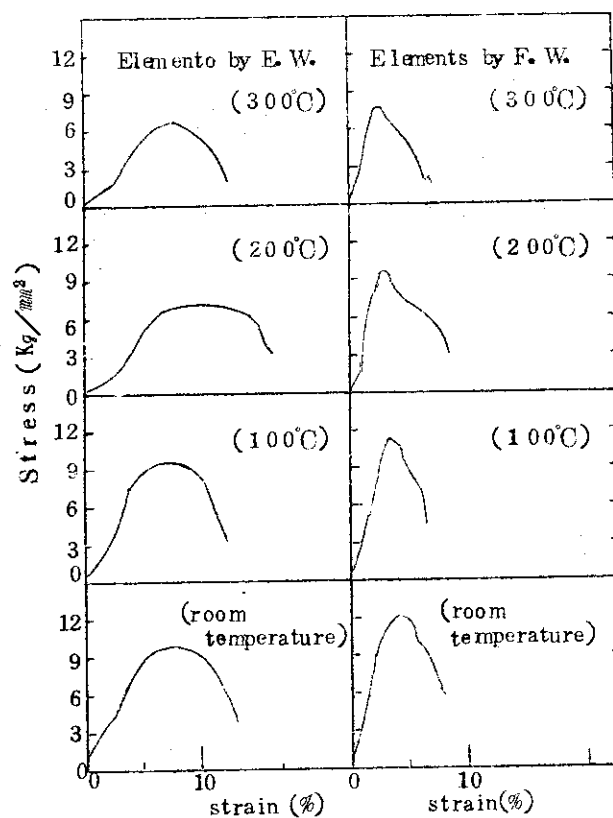


Fig. 4-3 Stress-strain curves under the elevated temperature of each joined elements by Friction Welding and by Explosive Welding.

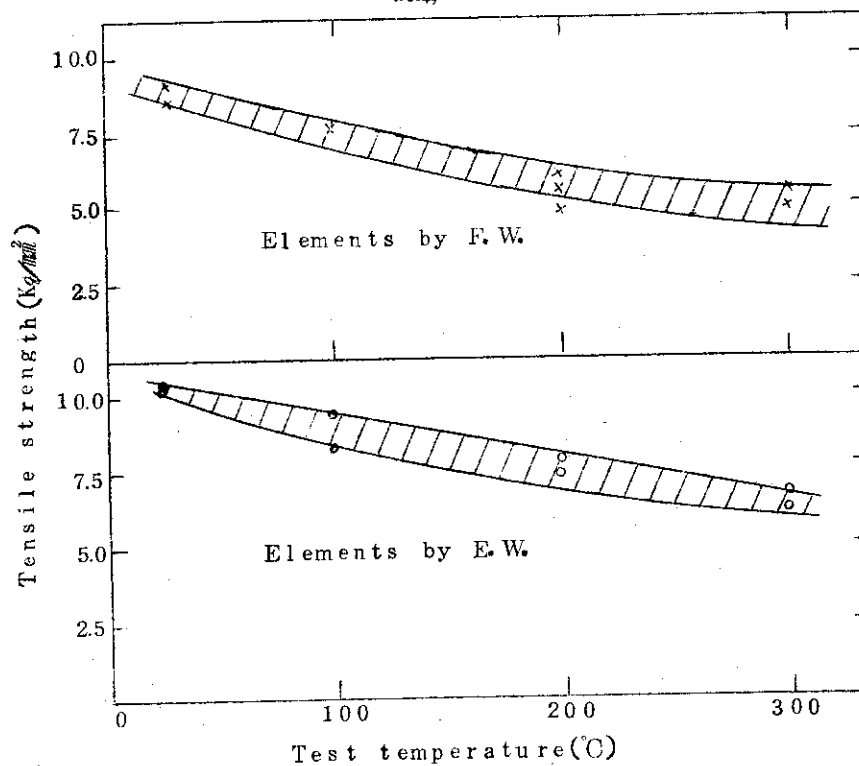
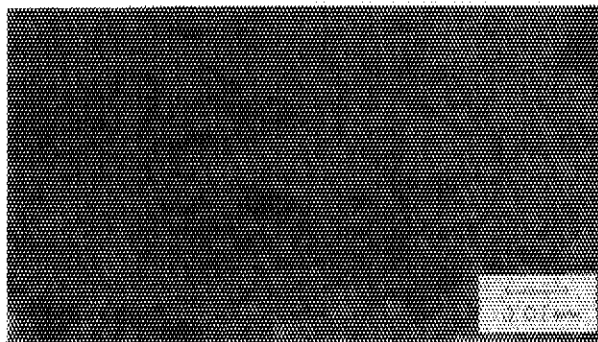
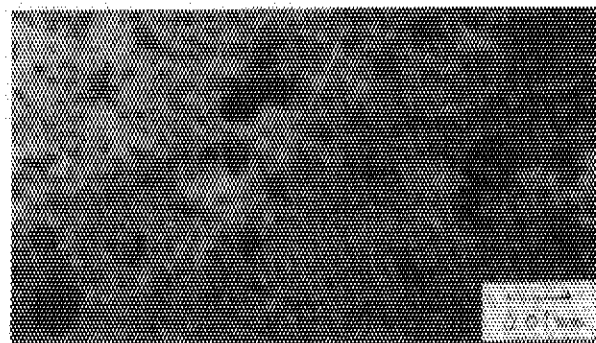


Fig. 4-4 Tensile strength (from room temperature to 300°C range)



a) Joined element by F.W.



b) Joined element by E.W.

Fig. 4-5 micro photograph of burst cross sections
of each tensile test pieces ($\times 800$ etched)

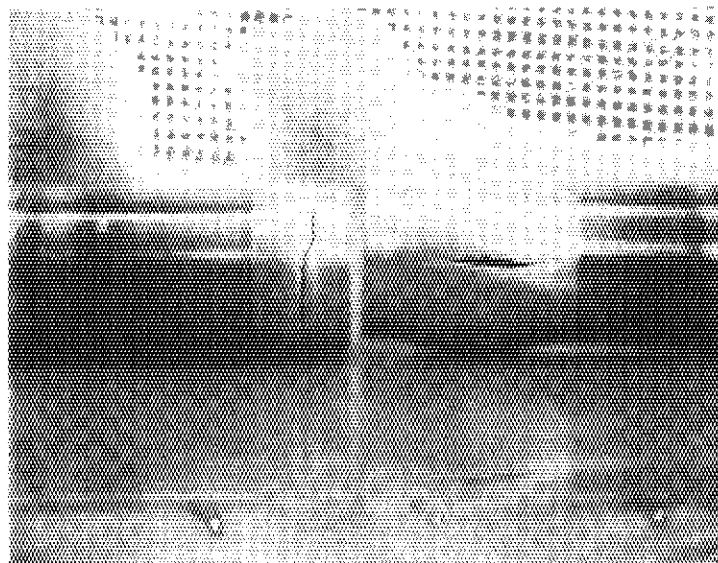


Fig. 4-7 Burst test pieces
(left; by E.W., right; by F.W.)

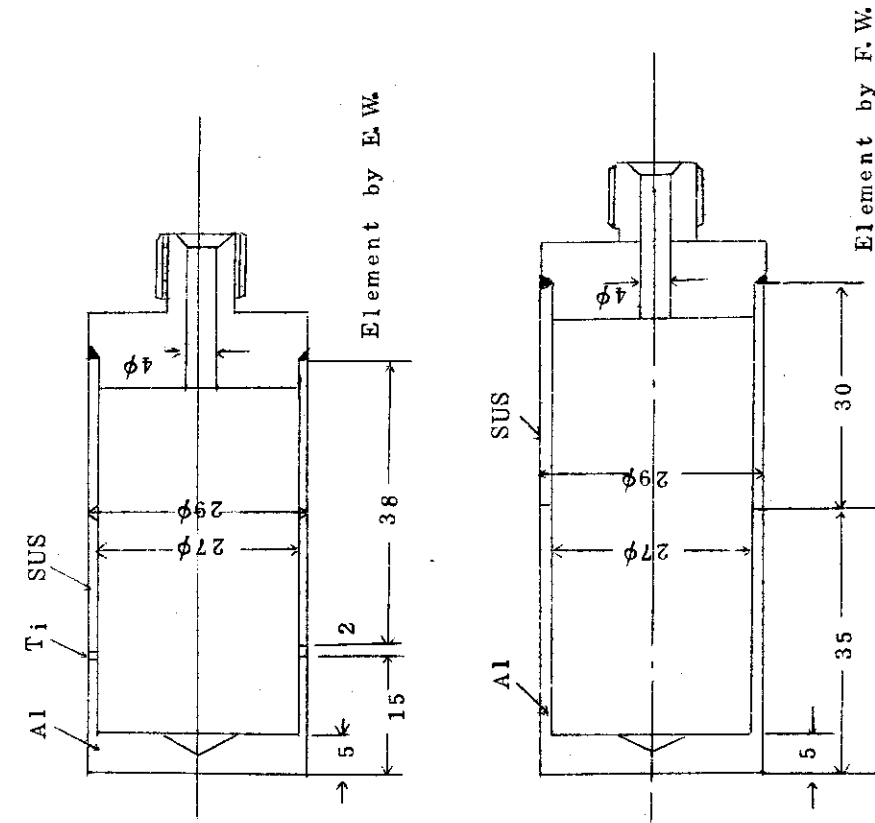
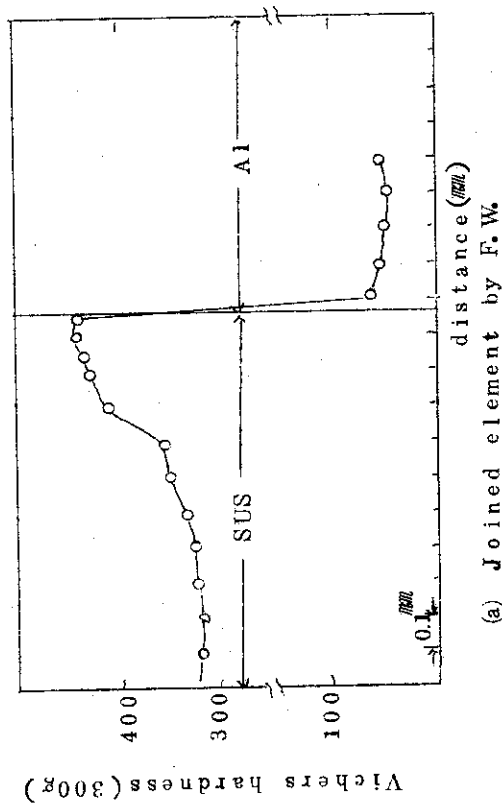
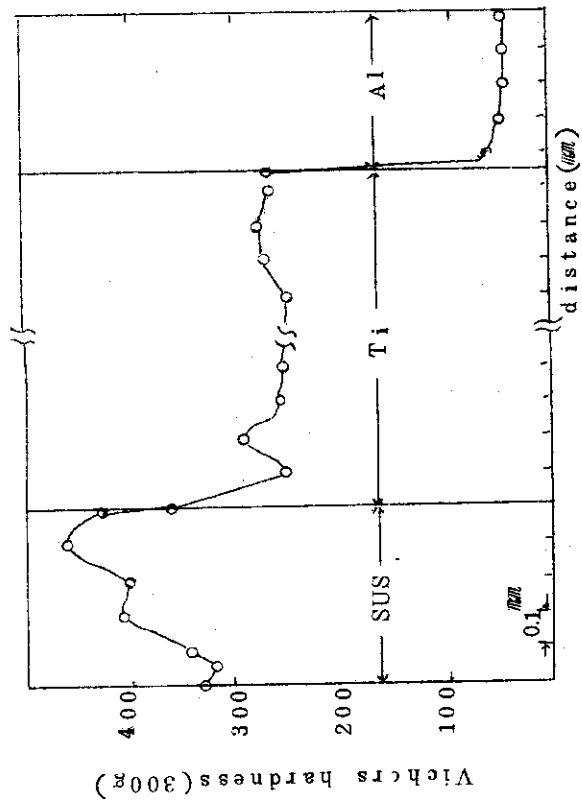


Fig. 4-6 Test pieces used for both He leak test and Burst test.



(a) Joined element by F.W.



(b) Joined element by E.W.

Fig. 4-8 Distribution of hardness near the each bonded layers.

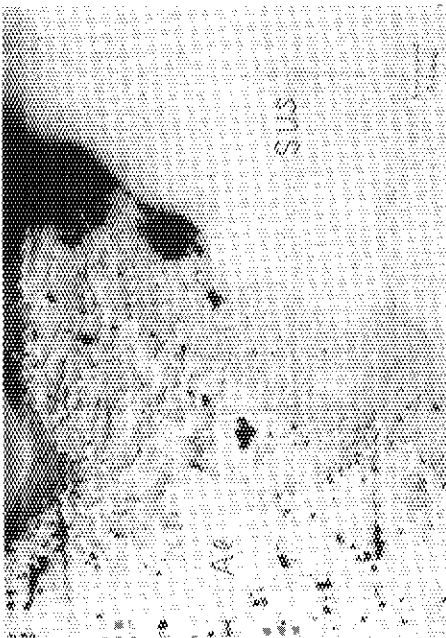


Fig. 4-9 Photograph of polished cross section of joined element by E.B.W. (Al and SUS, X100, not etched)

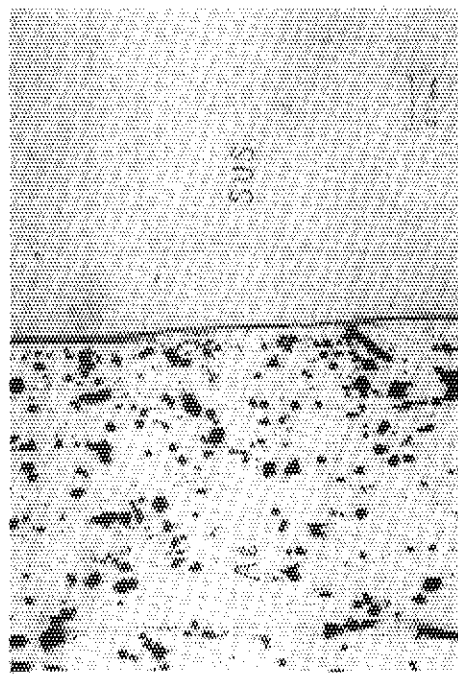


Fig. 4-10 Photograph of polished cross section of joined element by F.W. (Al and SUS, X100, not etched)

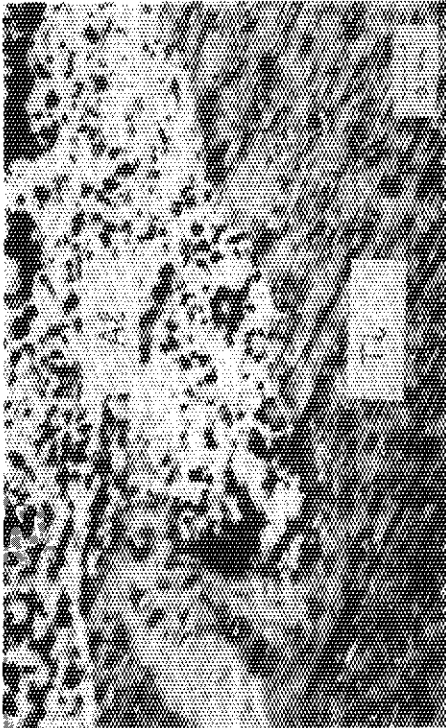


Fig. 4-11 Photograph of polished cross section of joined element by E.W. (Al and Ti layer, X100, not etched)

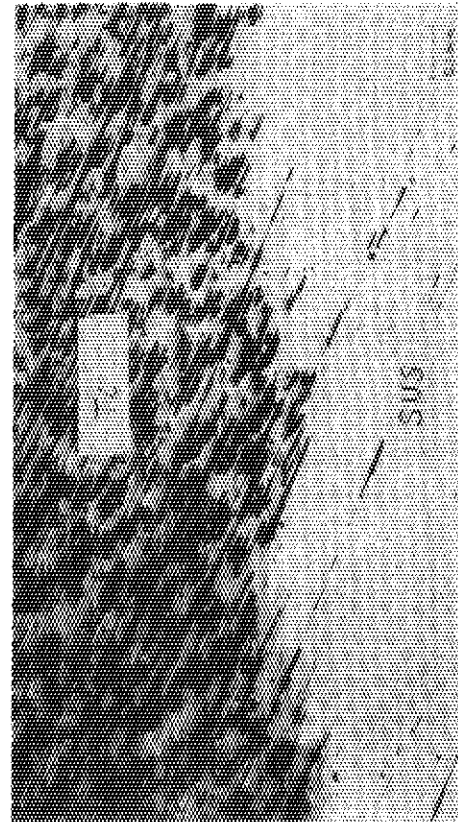


Fig. 4-12 Photograph of polished cross section of joined element by E.W. (Ti and SUS layer, X100, not etched)

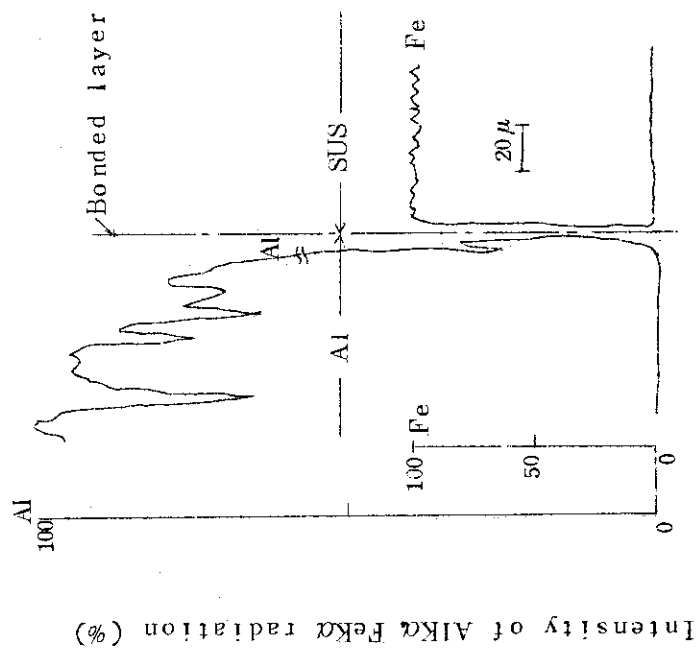


Fig. 4-13 Distributions of intensity of $\text{K}\alpha$ from Fe and Al by EMPA near the bonded layer of the joined element by F.W.

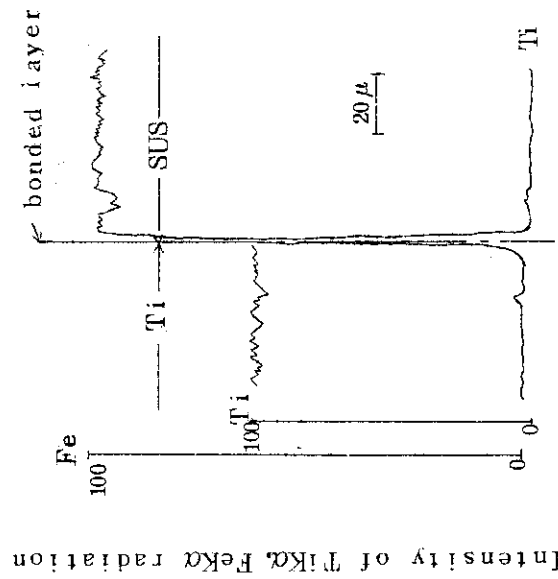
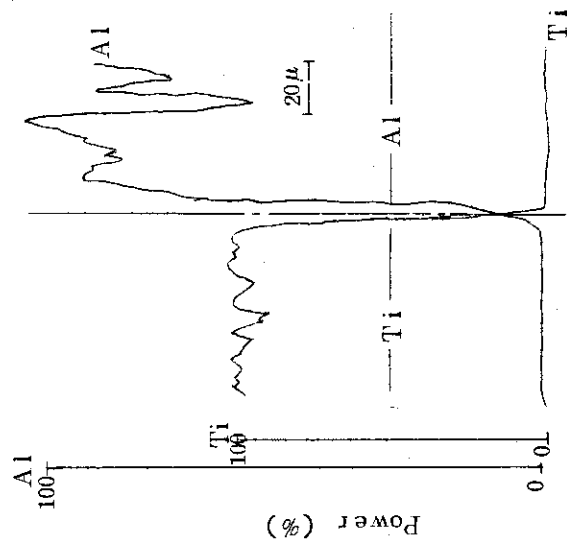


Fig. 4-14 Distributions of intensity of $\text{K}\alpha$ from Ti and Fe by EMPA near the bonded layer of the joined element by E.W.



Intensity of Ti K α AlK α radiation

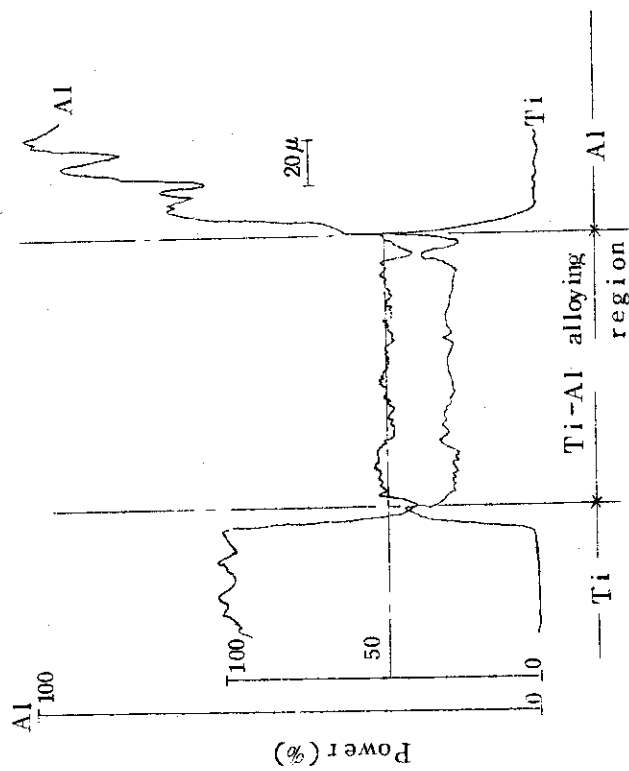


Fig. 4-15 Distribution of intensity of K α from Al and Ti by EMPA near the bonded layer of the joined element by E.W.(1)

Fig. 4-16 Distributions of intensity of K α from Ti and Al by EMPA near the bonded layer of the joined element by E.W.(2)

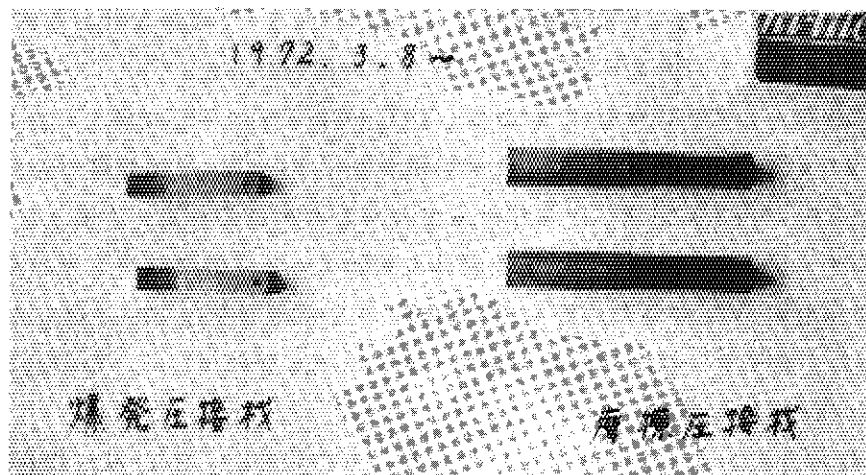


Fig. 4-17 Samples for corrosion test

Table 4-4 Corrosion test results

No. of test pieces	Weights before immersing in water	Weights after Preserved in water
Element by F.W. 1	89.795 gr	89.796 gr
" 2	92.362	92.361
Element by E.W. 3	34.683	34.682
" 4	35.243	35.240

5 試作キャプセルの炉内照射

摩擦圧接による接合材を Fig.2-4 に示すように外筒上部に使用した Al 筒燃料照射計測キャプセル (69F-7J) を JMTR の運転サイクル No.14 (1972 年 3 月 10 日開始), No.15, No.16 (1972 年 7 月 22 日終了) の 3 サイクル間照射した。

Fig.5-1 に試料として用いた UO_2 および, UO_2 ベレットの中心に挿入したタンタルシースの W-5%Re-26%Re の熱電対を封入した燃料試料を, Fig.5-2 に保護管を除くキャプセル構成部材を, Fig.5-3 に完成した試作キャプセル (スケジューリング前) を示す。

照射中の計測データのうち, Al 外筒 (熱媒体を兼ねている) 内に装荷した CA 熱電対, および中心温度測定用 W/WRe 熱電対の照射中全期間の測定記録を Fig.5-4 に, また, 同期間中の原子炉熱出力, 原子炉一次冷却水 (キャプセルの冷却も兼ねている) の炉心出入口平均温度の記録を Fig.5-5 に示す。

Al 外筒 (熱媒体) 温度は, 全期間を通して 60~70℃ を示し, UO_2 試料中心温度は, 1400~1600℃ を示した。Al 外筒の照射期間中の温度変化 ($\sim 10^\circ C$ *) は, Fig.5-4 と Fig.5-5 を対応させれば明らかなように原子炉一次冷却水の温度変化にほぼ一致している。

UO_2 中心温度のうち, No.16 サイクル後半のデータについては, 熱電対の絶縁劣化 (No.16 サイクル第 11 日の測定で $\sim 70\Omega$ であった) のため参考値である。

原子炉出力 50MW 時の積算照射時間は 58.4 日, キャプセルの炉内の延べ滞在時間は約 5 ヶ月で, この間, キャプセルの原子炉一次冷却系への破損 (外筒あるいは, Al-SUS 接合部が破損すれば, 燃料試料が付随して破損し, 炉一次系への F.P. 漏洩を引き越すと考えられる) もなく, また, キャプセル保護管への D.P. 漏洩 (中心温度測定用熱電対のタンタルシースが試料内で破損し, 保護管内での同熱電対のシース破損あるいは, 外筒端栓部の計測線シース部分 (ニクロブレース) の破損を併発すれば生じる) もなかった。

燃料試料の照射中の出力は, Table.5-1 のように推定されており, この程度 (460~630 W/cm) の出力で外筒の温度は $\sim 60^\circ C$ であったことになり, 設計段階での強度評価は, 使用条件に比べて十分余裕を持っている。このデータから 1000W/cm の出力でも外筒の温度は $\sim 90^\circ C$ と十分に低い値が推定され, 試料出力の限界が Al 外筒の温度条件から押さえられるようなことはないと考えられる。

また燃料試料の表面温度は, これらの照射中のデータおよび GENGTC コードによる熱計算結果から, 試料出力 $\sim 500W/cm$ で約 $300^\circ C$ と推定される。この値は, 燃料試料と外筒 (熱媒体) とのギャップ, ギャップ内の媒質 (ガス, Nak 等), 被覆管材質等で左右されるが, 本開発で意図した「高出力でかつ被覆管の低温度」の照射が, Al 外筒キャプセルで十分達成できることが確認できたといえる。

* JMTR 2 次冷却系で支配される季節的な変化である。

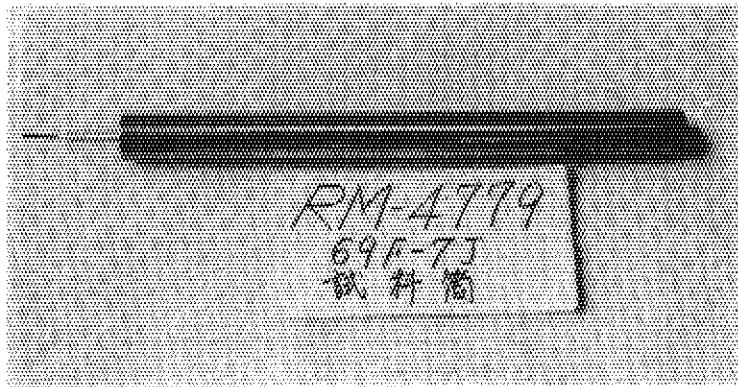


Fig. 5-1 Fuel pin used for the irradiation of 69F-7J capsule

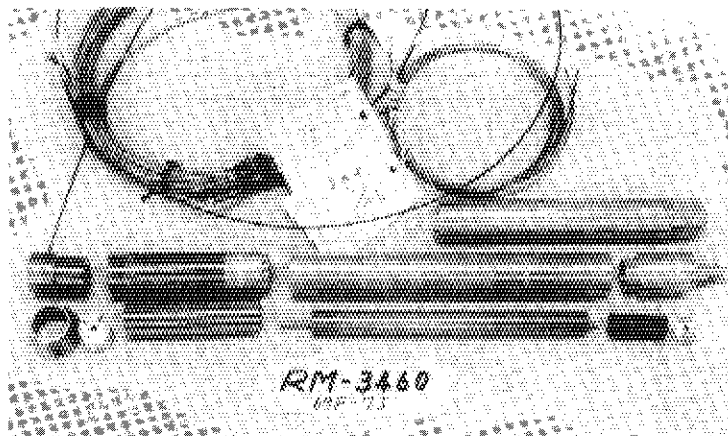


Fig. 5-2 Components of 69F-7J capsule

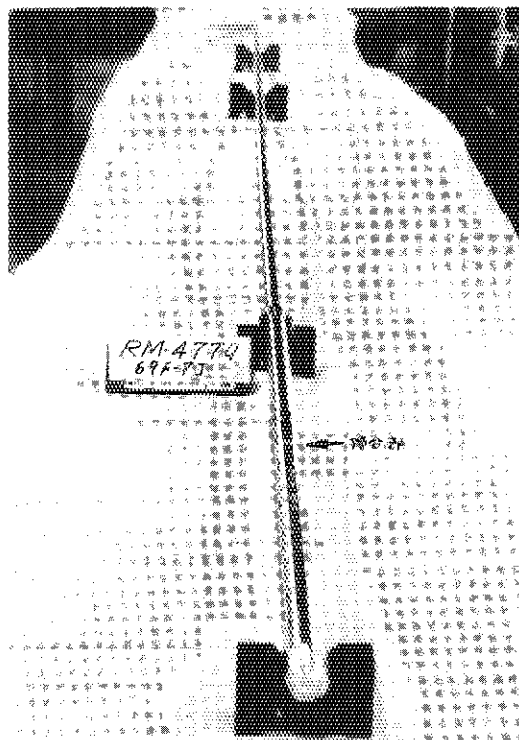


Fig. 5-3 Fabricated capsule 69F-7J

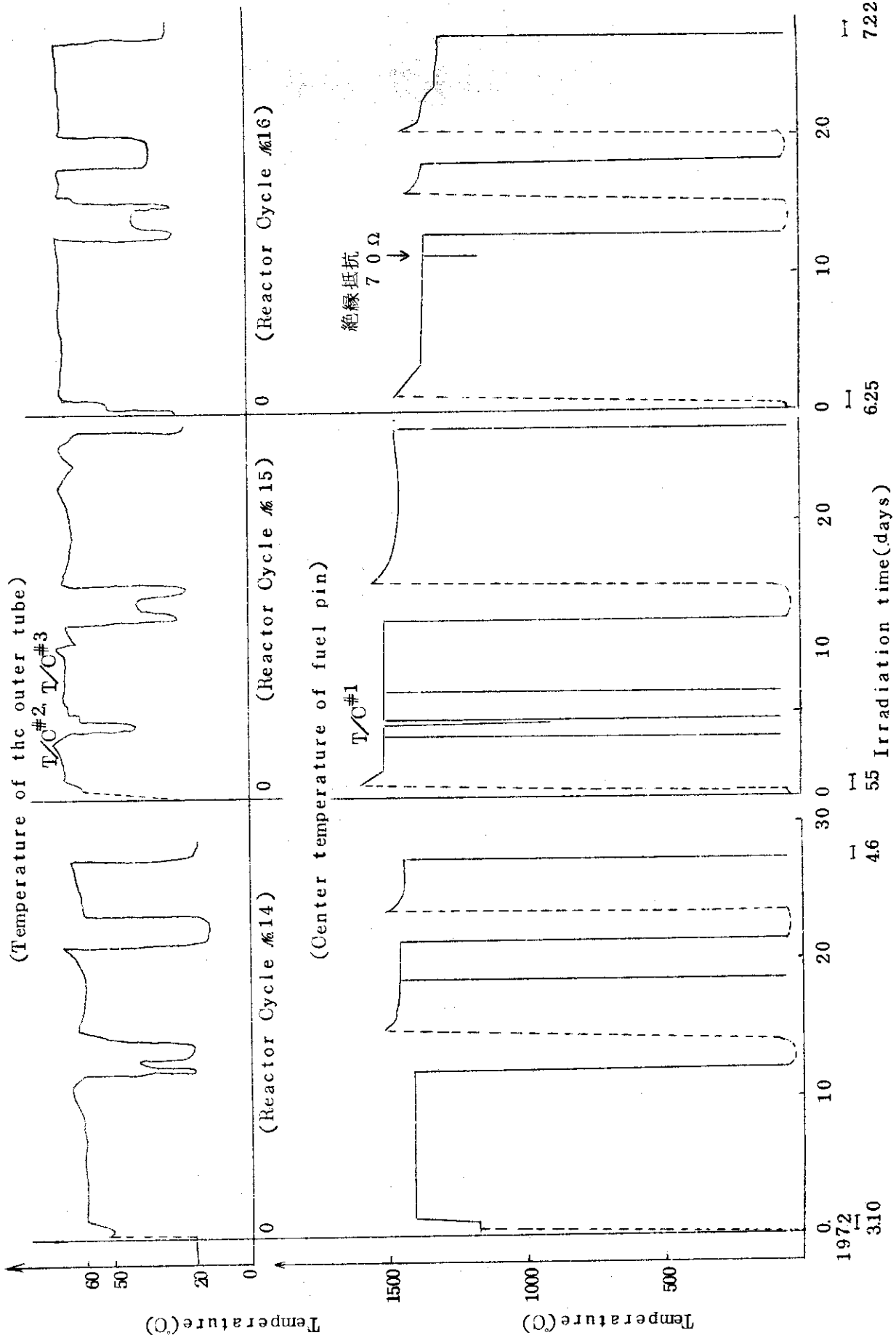


Fig.5-4 Temperature records of 69F-7J capsule under irradiation in JMTR

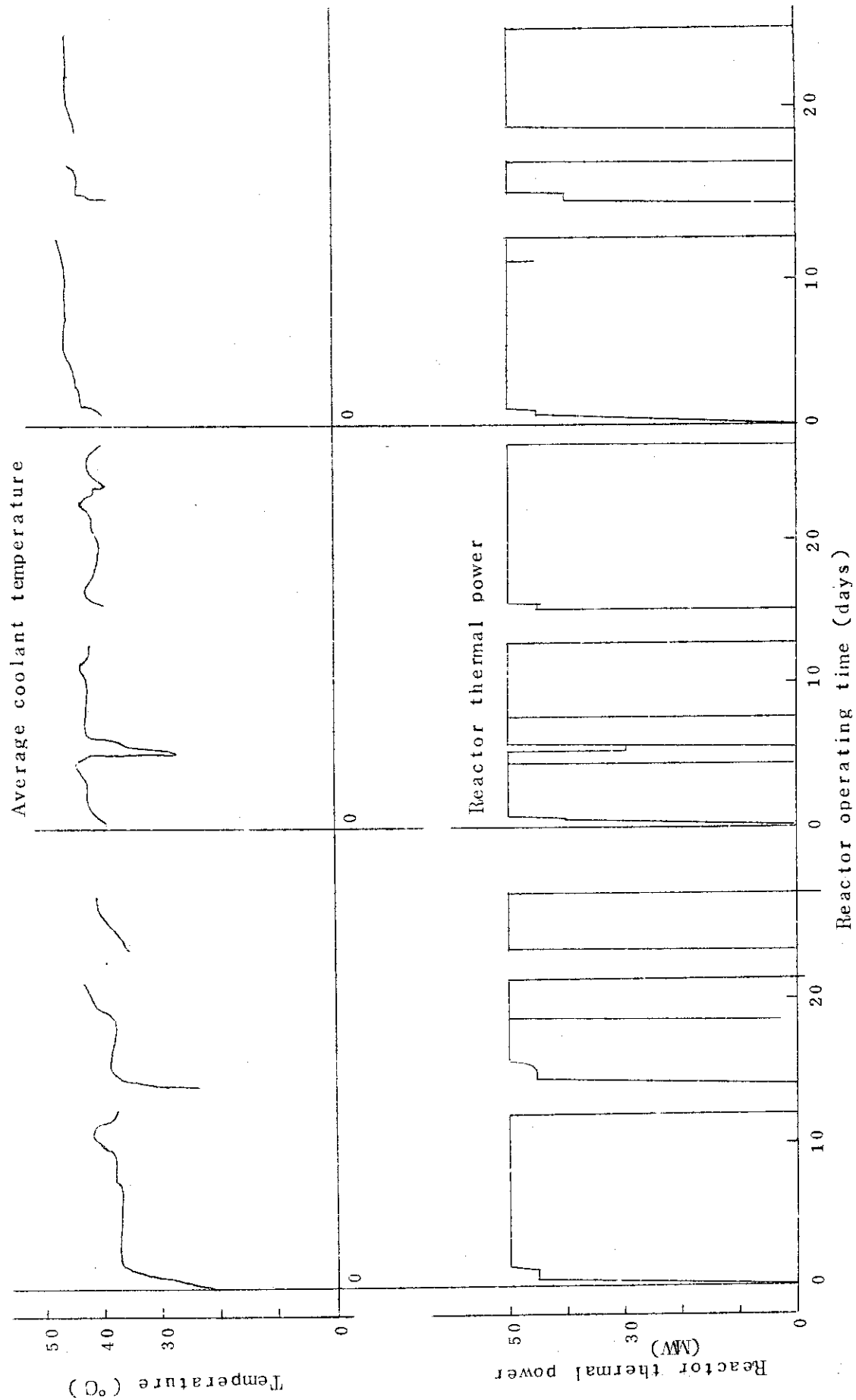


Fig. 5-5 The operating records of Reactor thermal power and coolant temperature of JMTR

Table 5 - 1 Assumed thermal power rate (w/cm)
of 69F-7J capsule

Reactor cycle	Q_{CF} 1)	Q_{cal} 1)	Q_G 2)
1 4	460 w/cm	520 w/cm	550 w/cm
1 5	—	535 "	530 "
1 6	626 "	518 "	475 "

1) Q_{CF} and Q_{cal} are quoted from JMTR Data166(1973.Dec.)—unclassified—
These value are the maximum during the Reactor Cycle and involve
61w/cm of gamma heat rate

2) Q_G is the maximum value during the Reactor Cycle calculated from
one-dimensional cylindrical heat transfer code GENGTC.
This value does not involve the gamma heat.

6 結 論

従来 SUS が用いられてきた燃料照射用計測キャプセルの外筒に Al を用いる利点を検討し、Al 外筒化のために SUS と Al の接合継手をキャプセル外筒の一部に使用方法を選択した。爆発圧接と摩擦圧接による SUS と Al の継手について、気密性、溶接性、強度、耐食性等を（電子ビーム溶接についてはこの一部を）調べ、また実際に摩擦圧接による継手を使った燃料照射計測キャプセルを設計、試作し、JMTB での炉内照射を炉出力 50MW で約 60 日間、トラブルなく行なった。結論として

(1) SUS-Al の接合継手のうち、電子ビーム溶接によるものは、溶接性が悪く、外筒用継手としての使用は無理である。摩擦圧接、爆発圧接による継手は、溶接性、気密性、耐食性共に炉内使用上の問題はなく、強度も Al 母材部よりも大きい。接合境界近傍の硬度は SUS 領域、 T_1 部の圧接によるものと思われる硬化があるが、Al 領域には硬化は認められない。これらから両圧接材共にキャプセル外筒での継手として十分採用できるものと考えられる。

(2) SUS 外筒燃料照射キャプセルに比べて Al 外筒では、高出力で、しかも燃料表面温度の低い照射が可能である。試作したキャプセルでは $\sim 500\text{W}/\text{cm}$ の燃料試料推定出力で、燃料推定表面温度 $\sim 300^\circ\text{C}$ 、燃料試料中心温度計測値 $\sim 1500^\circ\text{C}$ の照射結果を得た。さらに Al 外筒部の温度計測値は $\sim 60^\circ\text{C}$ と、冷却水温度より約 20°C 上まわる程度であった。これらの結果から、BWR、PWR、ATR 等の原子炉燃料の温度、出力に関する使用条件を十分カバーし得る炉内照射試験を、Al 外筒キャプセルによって安全に実施し得るようになった。

(3) Al 外筒キャプセルは、SUS 外筒キャプセルに比して、炉内中性子利用上の経済性、照射後の放射性廃棄物処理上の安全性、経済性の面でもより有利であることが期待できる。

等が挙げられる。

なお、今後の課題として

(1) SUS-Al 接合部の強度評価に関し、曲げ、衝撃、熱サイクル等の試験を行なえば、さらに明確な接合部の使用条件が得られよう。

(2) 炉内照射を完了した試作キャプセル (69F-7J) について、SUS-Al 接合部の状態観察、燃料試料として用いた UO_2 の全相推定、Al 外筒の放射能強度測定等を照射後試験で行なうことができれば、炉内照射までに得られた Al 外筒燃料照射計測キャプセルの諸特性よりはっきりしたものになる。

(3) SUS-Al 接合材を定常的に炉内使用するにあたっての検査法、合否判定基準を明確にすること。

等が残される。

7 あ と が き

JMTRにおける燃料照射以外の、例えばRI製造用、無計測材料試料用の照射容器としてはアルミニウムは多く用いられている。

本開発によって燃料照射用の耐圧、密封容器としても使用できる見透しができた。

しかし炉内使用の為に材料としての満足すべき条件については、一般的基準というものは必ずしも明確でなく、経験を積み重ねて、次第に明らかになってくる性質のものと考えられる。そういう意味で本開発で試験、検討した項目がアルミニウムを炉内照射用容器として使用するための必要十分条件であるとは考えない。ただ本報告書が今後の使用に際しての参考資料として用いられれば幸いである。

本開発のうち、接合材料に関する各種試験（腐食、全相は除く）およびキャプセル製作は、関、井上および工作課工作係の諸氏が、その他の試験、炉内照射および全体まとめは竹下が分担した。

なお計画には計画課安藤弘栄氏、照射第1課高橋秀武氏が参画した。

各種試験にあたっては材料工学研究室および、分析センターの機器を貸していただいた。また照射にあたっては材料試験炉部の諸氏の御協力をいただいた。ここに深く感謝する次第です。

8 付 録 - 1

Ti-Al の合金組成について

爆発圧接による Ti-Al の接合境界における合金の組成は次の方法で求めた。

EMPA によって測定した Ti の X 線相対強度から Ti の濃度を求めるために先ず吸収補正を行なう。^(注-1)^(注-2)

Ti 金属に対する Ti の質量吸収係数を $\mu_{Ti Ti}$ とすると質量係数表から

$$\mu_{Ti Ti} = 104 \dots\dots\dots (1)$$

Al 金属に対する Ti の質量吸収係数を $\mu_{Al Ti}$ とすると

$$\mu_{Al Ti} = 275 \dots\dots\dots (2)$$

が得られる。

合金中の Ti の濃度 W を 55% と仮定すると Ti-Al 合金に対する Ti K α 線の質量吸収係数 μ'_{Ti} は

$$\begin{aligned} \mu'_{Ti} &= \mu_{Ti Ti} \cdot W + \mu_{Al Ti} (1-W) \\ &= 104 \times 0.55 + 275 (1-0.55) = 180.95 \end{aligned}$$

Ti-Al 合金中の Ti の X 線強度関数 (F 関数) は次式が必要となる。

$$\mu'_{Ti} \cdot \operatorname{cosec} \phi = 180.95 \times 3.86 = 698.5$$

ただし, ϕ は, X 線取出し角; 15° (日本電子製 JXA3 型の場合) $\operatorname{cosec} \phi = 3.86$

F 関数表から合金の場合の F 関数 $F_{Ti} = 7.6$ が得られる。100% Ti の場合の F 関数 F を求めると質量吸収係数は (1) 式より $\mu_{Ti Ti} = 104$

$$\mu_{Ti Ti} \cdot \operatorname{cosec} \phi = 104 \times 3.86 = 401$$

F 関数表から $F_{100Ti} = 8.5$

以上から Ti 合金と純 Ti との相対強度は

$$\frac{I_{Ti}}{I_{100Ti}} = \frac{W_{Ti} \times F_{Ti}}{F_{100Ti}} \dots\dots\dots (3)$$

ただし

I_{Ti} ; Ti-Al 合金の X 線の強さ

注-1) 同じ測定条件の下で純 Ti から得られた X 線強度と Ti 合金から得られた X 線強度の比をいう。

注-2) Ti の K α に対する Al と Ti の吸収が異なるから, Ti における X 線の相対強度と Ti の濃度が比例しない。従って, より正しい濃度を求めるためにこのような補正を行なう。

$I_{100\text{Ti}}$: 100% Ti の X 線の強さ である。

ここで $I_{\text{Ti}}/I_{100\text{Ti}}$ は Fig. 4-15 より 0.5 と測定されているので, (3)式より

$$W_{\text{Ti}} = \frac{0.5 \times F_{100\text{Ti}}}{F_{\text{Ti}}} = \frac{0.5 \times 85}{76} = 0.55$$

したがって Ti-Al 合金中の Ti の濃度 W を 5.5% と最初に仮定したことは正しいことがわかる。

Ti の原子量は 47.90, Al の原子量は 26.97 であるから Ti-Al 合金中の Ti と Al の原子数の比は

$$\frac{1-W_{\text{Al}}}{W_{\text{Ti}}} = \frac{0.45/26.97}{0.55/47.90} = 1.5$$

ゆえに Ti-Al 合金は「 $\text{Ti}_2 \text{Al}_3$ 」と推定される。

参 考 文 献

- 1) NASA TECH BRIEF (Brief 67-104/)
"Aluminum and Stainless Steel Tubes joined by simple Ring and Welding Process" Nov. 1967
- 2) ASME CODE SECTION VIII
- 3) 岡村;"摩擦圧接〔I〕-〔IV〕"溶接技術 VoL. 18 No.6~No.9 (1970)
- 4) 蓮井;"わが国における摩擦圧接の進歩" VoL. 18 No. 9 (1970)
- 5) 蓮井;"摩擦圧接"溶接学会誌 VoL. 32 No.9 (1967)
- 6) 中村孝;"圧接とろう接"日刊工業新聞社(1964)
- 7) A.S. Bahrani et al;"The mechanics of wave formation in explosive welding" Proc. roy Soc.A VoL. 296(1963)
- 8) 中村;"摩擦圧接の問題点"日本機械学会誌 VoL. 64 No. 564 (1966)
- 9) 石井;"爆発圧接"溶接学会誌 VoL. 36 No. 12 (1967)
- 10) 石井他;"爆発圧接境界の溶融層の研究(第1報),(第2報)溶接学会誌 VoL. 38 No.6, No.12 (1969)
- 11) 福井他;"アルミニウムと異種金属の爆発圧接材のTransition Pieceへの適用性について"(第1報)溶接学会誌 VoL. 39 No. 12
- 12) 蓮井;"摩擦圧接の現状"溶接学会誌 VoL. 39 No. 6 (1970)
- 13) Birks;"Electron Probe microanalysis" chemical analysis VoL.17
- 14) Hansen;"Constitution of Binary alloys" Metallurgy and metallurgical engineering series
- 15) アルミニウムハンドブック(軽金属協会) P. 1281
- 16) 野村末雄;"純水中におけるアルミニウムの腐食(I),(II) 日本金属学会会報 第3巻第4号
- 17) 機械設計 第14巻第6号第2-4表
- 18) 金属材料および試験法(コロナ社) 104頁,160頁
- 19) 金属便覧(日本金属学会編) 1017頁