

JAERI-Tech  
2002-060



JP0250400



光ファイバ貫通部のシール技術の開発  
(ハンダ付けシール及び銀ロー付けシール)

2002年8月

松井 義典・菊地 泰二・角田 恒巳

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、  
お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡  
東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division,  
Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-  
gun, Ibarakiken 319-1195, Japan.

光ファイバ貫通部のシール技術の開発  
(ハンダ付けシール及び銀ロー付けシール)

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部  
松井 義典・菊地 泰二<sup>+</sup>・角田 恒巳<sup>++</sup>

(2002年5月31日受理)

JMTR における最近の照射では、計装線に光ファイバを利用した照射試験が増加しつつある。これは、光ファイバの信号伝達が原子炉内のノイズの影響を受けにくいこと、最近の研究により耐放射線性に優れたものが開発されていることが大きな要因である。

照射キャプセルでは計測線を取り出す場合、キャプセル本体の貫通部を完全にシールする必要があり、光ファイバも例外ではない。

光ファイバ貫通部のシールについては信頼性の問題があったので、信頼性の向上のため、深海用光ケーブルのシールに使用されているハンダ付けシール及びその応用である銀ロー付けシールについて炉外試験を実施し、良好な結果が得られた。

このため、実際の照射キャプセルにハンダ付けシールを用い、JMTR で 5 サイクル (約 3000 時間) の照射を実施した。この結果、シール性能の劣化は見られず、シールの信頼性が確認された。

---

大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607  
+ 東海研究所工務・技術室  
++ 東海研究所エネルギーシステム研究部

Development of Seal Technique for Optical Fiber  
(Soldering Seal and Silver Alloy Brazing Seal)

Yoshinori MATSUI, Taiji KIKUCHI<sup>+</sup> and Tunemi KAKUTA<sup>++</sup>

Department of JMTR  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received May 31, 2002)

Recently, the number of in-situ tests using optical fibers as signal transmission lines is increasing in the JMTR, because of their noise-tolerant capability and recent development of irradiation proof type fibers.

The conventional seal methods, however, have the problem of reliability when they applied to the penetration of the irradiation capsule using optical fibers.

As the solution of the problem, we selected soldering seal method that was already applied to the deep-sea optical fiber cables and, as its modification, the silver alloy brazing method. From the result of the out-of-pile test, it was confirmed that both soldering seal and silver alloy brazing seal would be applicable to the plug seal of irradiation capsules.

Then the soldering seal was applied to a capsule with optical fibers and was irradiated for 5 operation cycles of the JMTR (about 3000 hours). No deterioration was found at the seal after irradiation. This suggested that in-core use of optical fiber was thought to be promising.

Keywords : Optical Fiber ; Soldering Seal ; Silver Alloy Brazing Seal ; JMTR ; Irradiation Capsule

---

<sup>+</sup> Division of Engineering Services, Tokai Research Establishment

<sup>++</sup> Department of Nuclear Energy System, Tokai Research Establishment

## 目次

1. はじめに	1
2. 光ファイバ貫通部のシール方法	1
2.1 従来のシール方法	1
2.2 ハンダ付けシール方法と銀ロー付けシール方法	2
3. 炉外光透過率試験	3
3.1 光ファイバの種類	3
3.2 光ファイバとNi コートの種類	4
3.3 炉外光透過率試験	4
4. 照射及び照射後試験	7
4.1 照射キャプセルへの組込み	7
4.2 照射	7
4.3 照射後試験	8
5. 結 論	8
謝辞	9
参考文献	9
付録	22

## Contents

1. Introduction	1
2. Seal Method of Optical Fibers	1
2.1 Conventional Seal Methods	1
2.2 Soldering Seal and Silver Alloy Brazing Seal Methods	2
3. Out-of-pile Test of Light Transmittance	3
3.1 Kinds of Optical Fibers	3
3.2 Kinds of Optical Fibers and Ni-coat	4
3.3 Out-of-pile Test of Light Transmittance	4
4. Irradiation and Post Irradiation Tests	7
4.1 Optical Fibers Assembly into Capsule	7
4.2 Irradiation Tests	7
4.3 Post Irradiation Tests	8
5. Conclusions	8
Acknowledgements	9
References	9
Appendix	22

## 1. はじめに

JMTR における最近の照射試験では、照射装置である計装型照射キャプセルの測定信号取出し媒体として光ファイバを利用した照射下試験が増加しつつある。光ファイバの信号伝達は原子炉内のノイズの影響を受けにくく、照射情報の拡大も期待できることから、有効なデータ伝達媒体として以前より注目されていた。また、最近の研究により耐放射線性に優れた光ファイバが開発<sup>1)</sup>されたこともあって、照射下試験の増加に大きな役割を果たしている。

しかしながら JMTR で照射する計装型照射キャプセルはほとんどの場合、内部のヘリウムガスギャップの真空度を調整することにより、照射試料の温度調節を行っているため、キャプセルの光ファイバ貫通部を完全にシールする必要がある。このシール方法として新たにハンダ付けシール方法と、この技術の応用の耐熱性を向上させた高温用の銀ロー付けシール方法の 2 種類を実験し、有効性があることを確認したので以下に報告する。

## 2. 光ファイバ貫通部のシール方法

### 2.1 従来のシール方法

JMTR では照射試料の温度制御に照射キャプセル内のヘリウムガスギャップの真空度を変化させて、外部への熱伝達を制御することにより照射温度を制御している。これを JMTR では真空温度制御と呼んでおり、照射試料部を含むキャプセル本体を光ファイバの貫通部を含めて完全にシールする必要がある。JMTR に使用されている代表的な照射キャプセルの構造図を図 2-1 に示す。通常のキャプセルは熱電対等の計測線を上部端栓に溶接したスリーブ管を通して、銀ロー付けでシールを行っている。

しかし、光ファイバは熱により光透過率及び被覆材の強度等に影響を受けやすいという性質があるため、通常の照射キャプセルの熱電対や MI ケーブルに用いている、直接に銀ロー付けしてシールする方法は、光ファイバには適用できない。このため、従来は貫通するシールの処理に熱影響を与えない方法を採用している。この方法は、(1) 有機系樹脂によるシール方法、(2) シーラント材に金属を使用したコナックスシール方法（以下、「金属シール方法」という。

図 2-2 参照) の 2 種類がある。

有機系樹脂によるシール方法は樹脂を流し込むだけなので熱の問題はないが、炉内に装荷した場合にガンマ線による照射損傷によってシール性能が劣化し、真空度を一定に維持できなくなる問題がある(付録参照)。このため、シール部を炉心領域からやや離れたガンマ線の弱くなる位置に配置できるようキャプセルを設計しているが、それでも照射期間が数サイクル以上と長くなると、やはりシール性能の劣化の問題が生じる。

金属シール方法では光ファイバの被覆材及びコナックスシールのシーラント材に金属(アルミニウム)を使用することで、熱影響及び照射損傷の問題は解決できるが、アルミニウム被覆の光ファイバは製作数量が少なく、製作時間がかかり、価格が高くなるなどの問題がある。また、シール部の形状が大きくなり、照射キャプセルに装着できる光ファイバの本数に制約が生じる等の問題があった。このため、新たなシール方法の技術の確立が急がれていた。

## 2.2 ハンダ付けシール方法と銀ロー付けシール方法

これらの問題の解決策として、深海用光ケーブルのシールにも使用されているハンダ付けシール方法と、この技術の応用の耐熱性を向上させた高温用の銀ロー付けシール方法の 2 種類を検討した。

このハンダ付けシール方法及び銀ロー付けシール方法は、(1) ハンダ材及び銀ロー材が耐放射線性を持つこと、(2) シールの取扱いが一度に数本同時に行えること等の点で優れたシール方法である。しかし、ハンダまたは銀ローを溶かし込んでシールするため、この際に加わる熱が光ファイバの光透過性に悪影響を及ぼす可能性がある。そこで熱影響の有無を検討するため、模擬シール部に対して実際の照射キャプセルと同じ組立方法でシールを行い、炉外にてシール前後の光透過率試験を実施した。

次に炉外試験の結果から、これら 2 つのシール方法が照射キャプセルに適用できる見通しが見られたので、このうちハンダ付けシールを用いた照射キャプセルを JMTR で 5 サイクル照射(1 サイクル: 原子炉出力 50MW 換算で約 25 日)した結果、シール性能の劣化は見られなかった。また、照射後のシール部の外観を観察した。

これらの光透過率試験、照射及び照射後試験について実施した方法・結果を以下に示す。



### 3. 炉外光透過率試験

#### 3.1 光ファイバの種類

炉外透過率試験に使用した光ファイバの種類等を表 3-1 に示す。シングルモードファイバは SM、マルチモードファイバは MM と表記した。頭文字の K、S、F、C はファイバを区別するために任意に付けた記号である。

シングルモードファイバは光通信ケーブルとして多く使用されている。このため、一般的に光ファイバと言う場合はシングルモードファイバを指すことが多い。

マルチモードファイバは一般的には使用されていないが、波長や偏波方向の異なる光信号を同時に伝達可能であるため、1 本で多種の情報が得られる可能性があり、今後の利用が期待されているものである

表 3-1 光ファイバの種類

種類	コア径/材質	クラッド径/材質	被覆外径/材質
K-SM ファイバ (シングルモード)	10.8 $\mu\text{m}$ / 純石英	125 $\mu\text{m}$ / フッ素添加石英	250 $\mu\text{m}$ / ポリイミド
S-SM ファイバ (シングルモード)	10.8 $\mu\text{m}$ / 純石英	125 $\mu\text{m}$ / フッ素添加石英	250 $\mu\text{m}$ / UV コート
F-MM ファイバ (マルチモード)	400 $\mu\text{m}$ / 純石英	500 $\mu\text{m}$ / フッ素添加石英	550 $\mu\text{m}$ / ポリイミド
C-MM ファイバ (マルチモード)	400 $\mu\text{m}$ / 純石英	440 $\mu\text{m}$ / フッ素添加石英	470 $\mu\text{m}$ / ポリイミド
S-MM ファイバ (マルチモード)	400 $\mu\text{m}$ / 純石英	440 $\mu\text{m}$ / フッ素添加	570 $\mu\text{m}$ / シリコン

今回の試験では、全て耐放射線性が高いとされるコア材が純石英でクラッド材にフッ素添加を施した光ファイバ<sup>1)</sup>を使用した。長さは全て 1m とし、両端には FC コネクタを使用した。

S-SM ファイバ、C-MM ファイバ、S-MM ファイバは市販品を、K-SM ファイバ及び F-MM ファイバは耐放射線性用として製作した特注品を使用した。

市販品は、カタログ上では純石英ファイバ（フッ素添加）と記されているものでも、透過率を良くするため微量元素を添加していたり、不純物が残っていたりする場合が多々ある。これは通常の使用の場合問題ないが、炉内のような放射線環境で使用する場合には光透過率を低下させる黒化の原因になり得る。

一方、今回使用した特注品についてはクラッド材にフッ素を添加しただけのものであることを確認している。

### 3.2 光ファイバとNi コートの種類

光ファイバは熱の影響を受けやすいことから、作業時の熱影響をなるべく受けにくくするため、メッキによるNi コートを施した。

ハンダ付けシールは作業時の熱量が比較的 low、メーカーでの使用実績から判断して、被覆材上からNi コートを施し、厚さを20 $\mu$ mとした。

銀ロ付けシールについては作業時の熱量が比較的高いので、光ファイバへの影響を小さくするため、Ni コートの厚さをハンダ付けシールの10倍の200 $\mu$ mとした。また、耐熱性の低いUV被覆材とシリコン被覆材を用いたS-SMファイバとS-MMファイバについては、被覆材を取り除いた後、直接クラッド材にNi コートを施した。耐熱性の比較的高いポリイミド被覆材を用いているK-SMファイバとF-MMファイバについては、作業時の熱がポリイミド被覆材に与える影響の有無を調べるため、被覆材上からNi コートしたものと被覆材を取り除いた後からNi コートしたものの2種類を用意した。また、Ni は銀ロ付けが行いにくいことから、更にこの上からメッキにより薄く金コートを施した。

表 3-2 ファイバとNi コートの種類

項目	ハンダ付けシール	銀ロ付けシール
K-SM ファイバ	1 本	被覆材有、無 : 各 1 本
S-SM ファイバ	1 本	被覆材無 : 1 本
F-MM ファイバ	1 本	被覆材有、無 : 各 1 本
C-MM ファイバ	1 本	被覆材有 : 1 本
S-MM ファイバ	1 本	被覆材無 : 1 本

### 3.3 炉外光透過率試験

炉外光透過率試験は次の手順で進めた。

- (1) シール作業前光透過率測定
- (2) シール作業の実施
- (3) シール作業後光透過率測定
- (4) (1) と (3) の測定結果を比較し、シール作業の熱影響の有無を判断する。

### 3.3.1 シール作業前光透過率測定

シール作業前の特性を調べるため、各ファイバの光透過率を測定した。

光源は安藤電気製の白色光源（AQ-4303B：400～1800nm）を使用し、測定装置には安藤電気製の光スペクトルアナライザ（AQ-6315A）を使用した。

測定結果の一例として最も作業時に熱影響を受けやすいと考えられる K-SM ファイバの被覆材を取り除いて Ni コート（200  $\mu$ m）したものについての測定結果を図 3-1 に実線で示す。

### 3.3.2 シール作業

ハンダ付けシール作業及び銀ロー付けシール作業の工程を図 3-2、3-3 に示す。

#### (1) ハンダ付けシール作業

準備したものは、光ファイバ、Ni 管、Ni スリット管である。Ni 管は照射キャプセルの上部端栓スリーブを模擬している。光ファイバはシール部分にメッキによる Ni コートを施し、Ni 管に挿入後、FC コネクタを取り付けたものである（この状態で 2.4.1 に述べたシール作業前光透過率測定を実施した）。

ハンダ付けシール作業は Ni スリット管に Ni コート付の光ファイバを入れ、スリット部分をハンダで塞ぐ（この時、光ファイバにハンダによる熱が加わる）。この Ni スリット管を Ni 管に挿入し、Ni 管と Ni スリット管の隙間をハンダでシールする。ハンダ付けシール作業後の状態を図 3-4 に示す。

#### (2) 銀ロー付けシール作業

銀ロー付けシール作業の手順はハンダ付けシール作業とほぼ同様であるが、管の材料については銀ロー付けしやすいように SUS 管と SUS 製のスリット管を用いた。また、光ファイバについても銀ロー付けしやすいように Ni コート後、薄く金コートを施した。準備したものは、光ファイバ、SUS 管、SUS 製のスリット管で、光ファイバは Ni コート+金コートをを行った後、SUS 管に挿入して FC コネクタを取り付けたものである。

銀ロー付けシール作業はスリット管に光ファイバを入れスリット部分を銀ローで塞ぎ（この時、光ファイバに銀ローによる熱が加わる）、SUS 管とスリット管の隙間を銀ローでシールする。銀ロー付けシール作業後の状態を図 3-5 に示す。

### 3.3.3 シール作業後光透過率測定結果

上記の作業で作成した試料について、光ファイバの光透過率をシール作業前光透過率測定と同じ方法で測定した。測定結果の一例を図 3-1 の薄線で示す。測定結果はシール作業前光透過率測定と同じく K-SM ファイバの被覆材除去後に Ni コート (200  $\mu\text{m}$ ) を施した試料に対するものである。

シール作業前後の光透過率を比較してみると、図 3-1 では作業後の光透過率の方が若干良くなっているところもある。これは、装置へのコネクタの接続及び測定誤差と考えられる。他の試料の測定結果についても、シール作業前後とほとんど変化がなかった。以上のことから、光透過率測定結果からシール作業の熱影響はないと判断できる。

### 3.3.4 耐圧試験結果

照射するキャプセルの上部端栓 (光ファイバシール部) は、キャプセル外筒のバウンダリが破損した場合を想定し、JMTR 原子炉 1 次冷却系の設計圧力の 1.76 MPa まで耐えられる必要があるとされているが、今後予定されている高圧水中での照射における測定を考慮に入れて、10 MPa 程度までの耐圧性能についても確認することとした。

耐圧試験方法は光透過率測定に用いた光ファイバの片端を FC コネクタごと切断し、切断した側から耐圧試験用の配管を通し、ハンダ付けシールの Ni 管あるいは銀ロー付けシールの SUS 管に機械的継ぎ手 (スエジロック) で接続した。ガス抜きを実施後、耐圧試験用の配管から水圧ポンプにより水圧を徐々に加えて行った。図 3-6 に耐圧試験状態を示す。

ハンダ付けシール部については圧力を約 2MPa、5MPa、7MPa、10MPa と徐々に上昇させ、各圧力で 5 分以上保持して、シール部の状態を観察した。

銀ロー付けシール部については約 12MPa で 10 分以上保持して、シール部の状態を観察した。

これらの観察では各シール部の漏えい及び異常な変形は認められなかった。

また、JMTR において材料照射キャプセルの基準とされている漏洩率  $10^{-7}$  ( $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ) を十分満足することも確認した。

## 4. 照射及び照射後試験

### 4.1 照射キャプセルへの組込み

光ファイバを使用した炉内計測を行うために設計された照射キャプセル 2 本（互いに同じ構造（図 4-2 参照））に、上記シール方法を採用することを検討した。

シール方法については、シール部分の使用温度環境が低いこと及び炉外光透過率試験の際、銀ロー付けシールよりシール作業が容易であることが確認されたハンダ付けシール方法を選択した。また、シールの多重化のため、炉外光透過率試験の際に行ったハンダ付けシール作業手順に加え、更に外側にカバー管を付け、この部分にもハンダ付けシールを実施した。これらの取付け作業行程を図 4-1 に示す。

各キャプセルについてシール部を含むキャプセル本体のヘリウム漏洩検査を行った。ヘリウム漏洩試験装置に真空制御管を接続し、キャプセル本体を真空引きし、真空引き後、シール部分を覆ってヘリウムガスを吹き付ける真空外覆法で漏洩率を測定した。漏洩率は 1 本目のキャプセルに対して  $6 \times 10^{-10}$  (Pa · m<sup>3</sup>/s)、2 本目のキャプセルに対して  $2.1 \times 10^{-10}$  (Pa · m<sup>3</sup>/s) と測定された。この値は JMTR において材料照射キャプセルの基準とされている漏洩率  $10^{-7}$  (Pa · m<sup>3</sup>/s) を十分下まわっていた。

### 4.2 照射

本照射キャプセル 2 本は、JMTR の反射体領域の第 1 層目の M-6 孔（図 4-3 参照）で照射した。1 本目の照射キャプセルは 1 サイクル（原子力出力 50MW 換算で約 25 日）照射し、2 本目は 5 サイクル照射した。ハンダ付けシール部は照射キャプセルの下端から約 2100mm（炉心上端から約 1250mm）の高さに位置する。この位置での推定ガンマ線量率は約  $4 \times 10^4$  Gy/h である。中性子の影響については中性子束が炉心上端の位置でも中性子束ピーク値 ( $5.3 \times 10^{17}$  m<sup>-2</sup>) の約 25% ( $1.3 \times 10^{17}$  m<sup>-2</sup>) に低下するので、炉心上端から約 1250mm の位置では十分無視できる。

照射期間中、各照射キャプセルはキャプセル本体内のギャップを真空に引いて真空温度制御し、保護管内は 0.2MPa のヘリウムガスで加圧した。照射期間を通じて 2 本のキャプセル（1 サイクル照射： $2.4 \times 10^7$  Gy 及び 5 サイクル照

射： $1.2 \times 10^8$ Gy) 共、真空温度制御に問題は発生せず、保護管内のヘリウムガス圧の変動もなかった。このことから、ハンダ付けシール部分の健全性は十分保たれ、漏洩はなかったものと判断した。

#### 4.3 照射後試験

照射終了後、キャプセルのうち、5 サイクル照射したハンダ付けシール部分をホットセル内で外観観察したが、外観の異常は認められなかった。外観写真を図 4-4 に示す。

### 5. 結 論

照射キャプセルに使用する計測用光ファイバの上部端栓部の取り出しに用いるシール方法として、ハンダ付けシール及び銀ロー付けシールは光ファイバの透過率特性に影響を与えないことを炉外光透過率試験により確認した。また、照射キャプセルのハンダ付けシール結果から、照射（ガンマ線量で約  $1.2 \times 10^8$ Gy）に対してシール性能には問題がないことを確認した。

なお、JMTR で使用されている代表的な照射キャプセルでは、上部端栓の熱電対取り出し部のシールに銀ロー付けを採用しており、今までこの部分のシール性には問題ないことから、今回の光ファイバ貫通部の銀ロー付けシールについてもハンダ付けシール（シール時の作業温度が異なる）と同等な耐放射線性を有するものと考えられる。

以上のことから、光ファイバ貫通部のシール方法は使用環境温度によって上記 2 方式のうち 1 方式を選択することが有効である。特に放射線環境下で使用する照射キャプセルのシール方法に関しては有効と考える。

耐圧試験結果から耐圧性能について問題がないことを確認できたことから、今後は、BWR 環境を模擬した高温高压水中下における照射試験に光ファイバを適用するため、高温高压水中に材質が溶出しないシール方法を検討する予定である。

## 謝辞

今回の光ファイバのシール方法について有効な助言及び指導を頂きました協和電線株式会社の黒羽敏明氏、長岡修三氏に深く感謝致します。また、光ファイバシール部の炉外試験に協力して頂いた工作技術課職員及び照射後観察を実施して頂きましたホットラボ課の清水道雄氏に深く感謝致します。また、本報告書の作成にあたり、御指導頂きました高橋秀武氏（材料試験炉部長）、伊藤治彦（材料試験炉部次長）、藤木和男氏（材料試験炉部次長）、小森芳広氏（照射第1課長）に深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 角田、山岸、田畑、浦上：“光技術を利用した原子炉計装システム”、日本機械学会[No.00-11]第7回動力・エネルギー技術シンポジウム2000講演論文集[2000-10-31,11-1,・東京]、B107

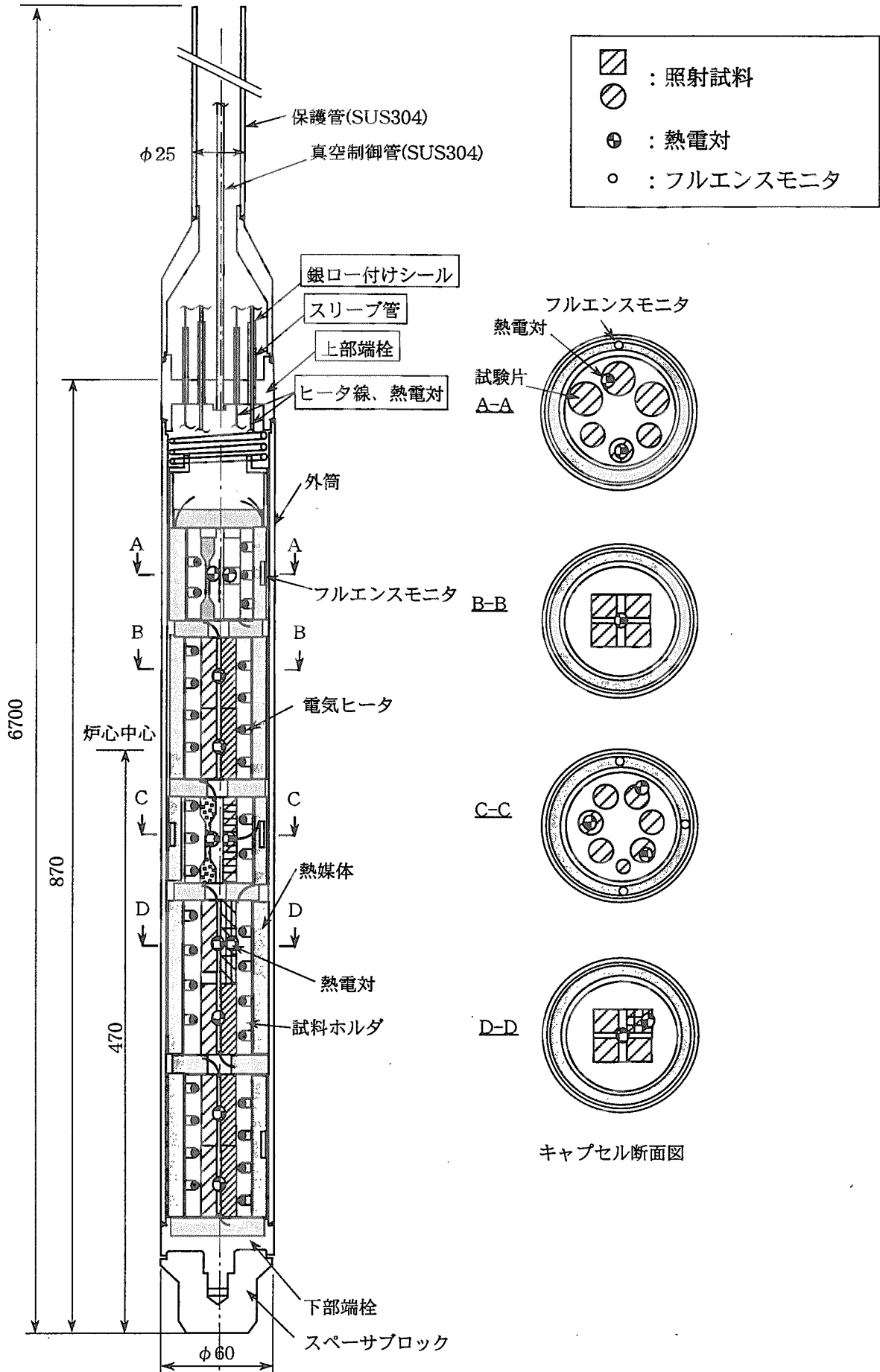


図2-1 代表的な照射キャプセルの構造



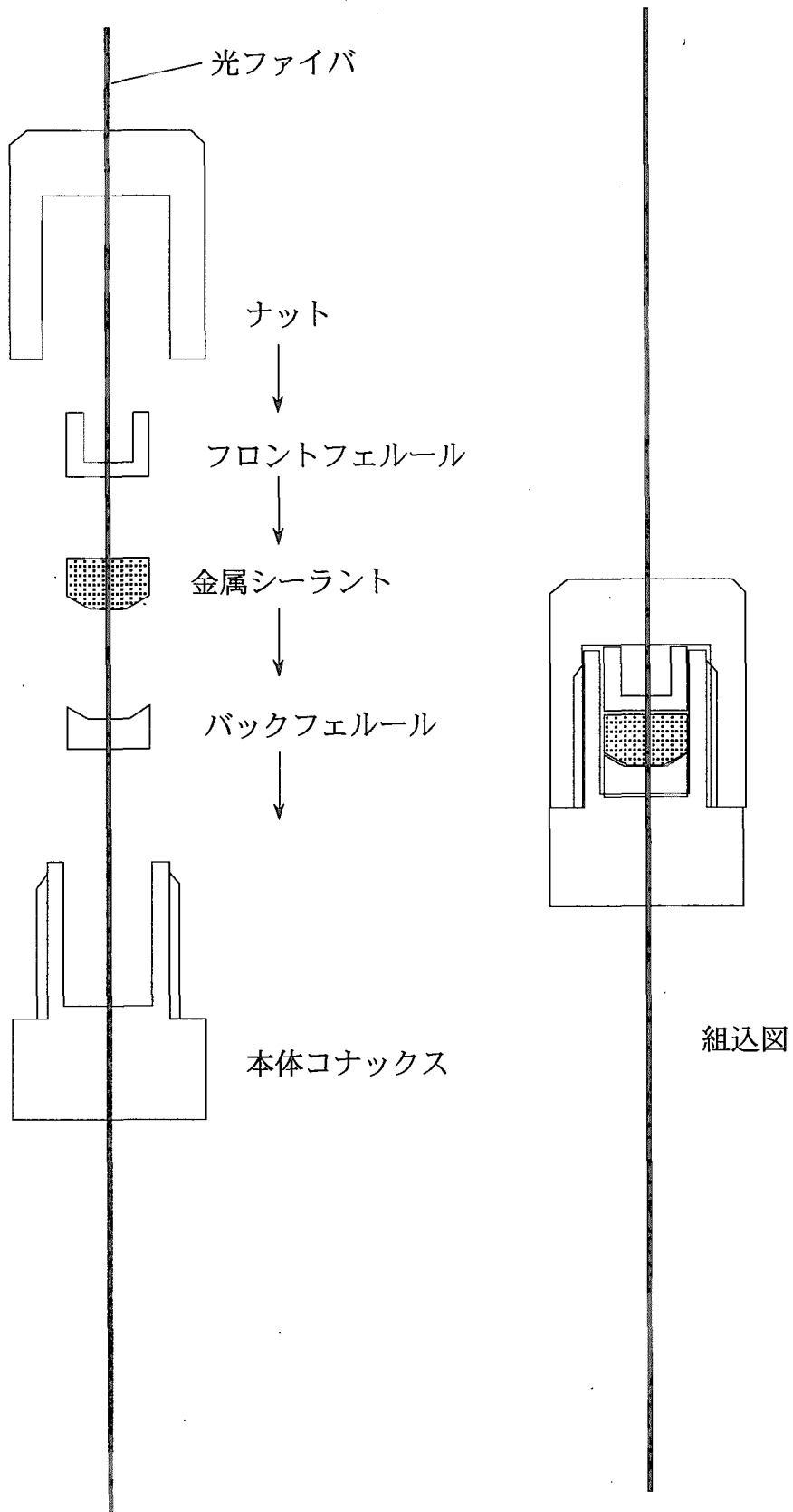


図2-2 金属シール方法（コナックス法の概要）

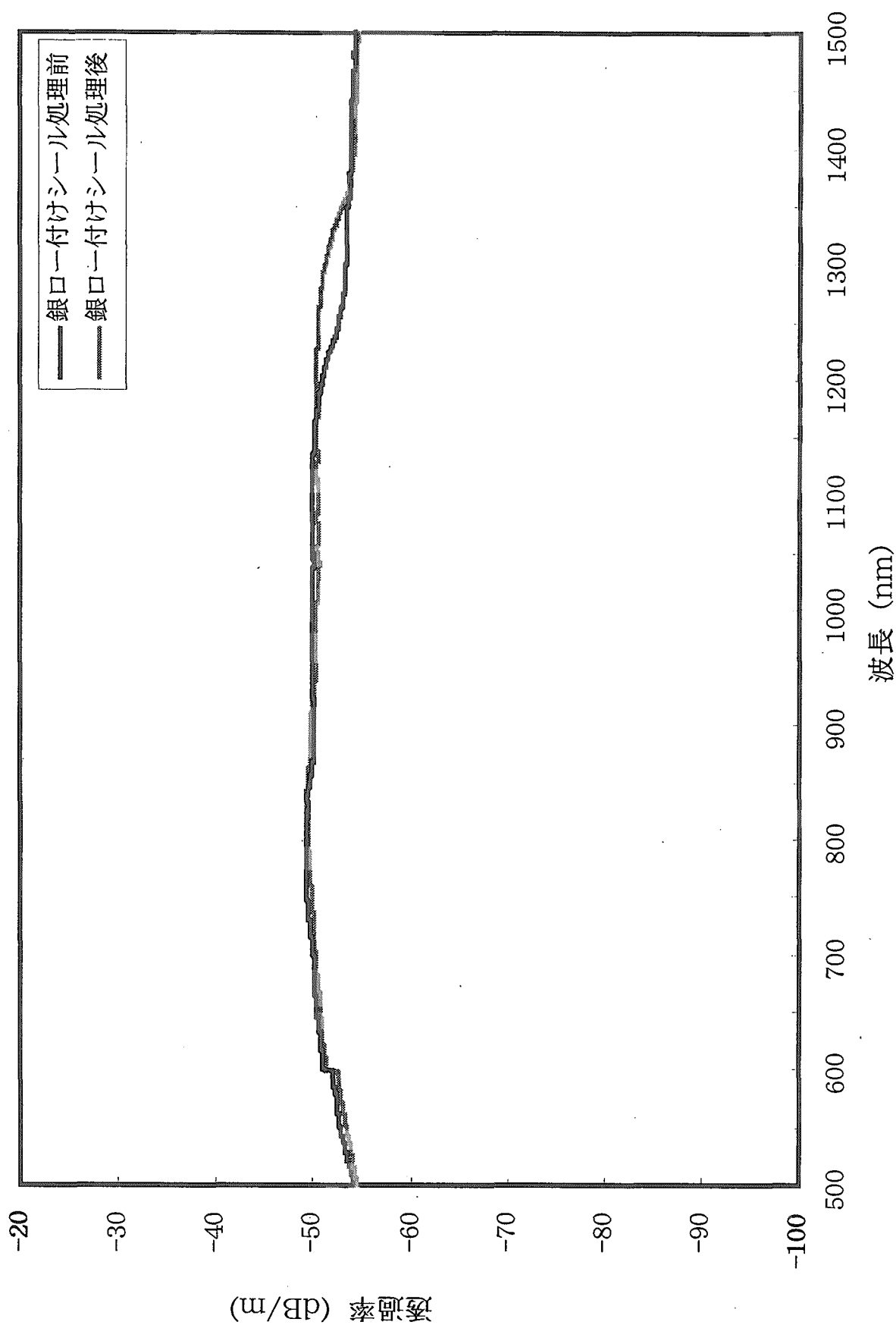
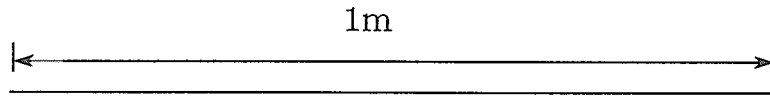


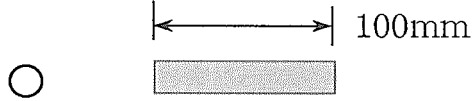
図3-1 炉外光透過率測定結果 (K-SMフアイバ (被覆無) )

1. 部品

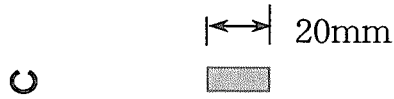
①光ファイバ：K-SM、S-SM、F-MM、C-MM、S-MM：1m×5本



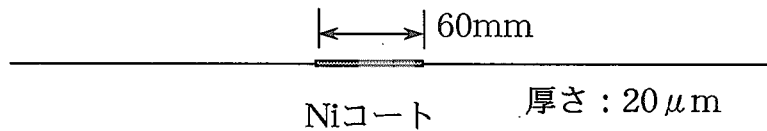
②Ni管：φ5×0.5t×100L：1個



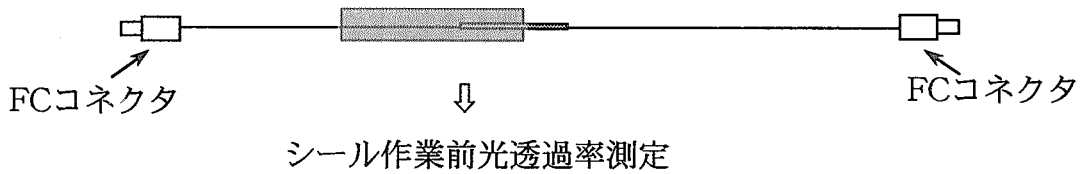
③Niスリット管：φ3.5×0.5t×20L：1個



2. Niコート作業



3. Ni管挿入後コネクタ付け



4. ハンダ付け作業

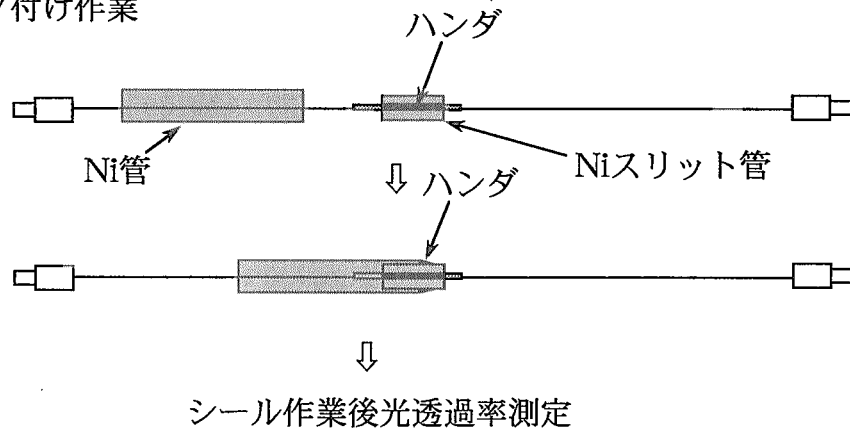
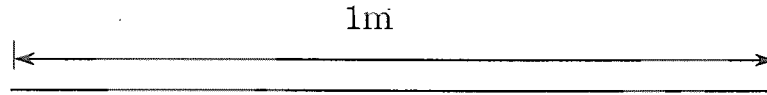


図3-2 光ファイバシール作業行程  
ハンダ付けシール作業

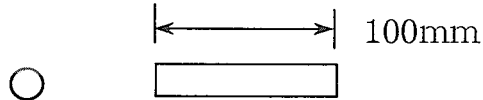
1. 部品

①光ファイバ:

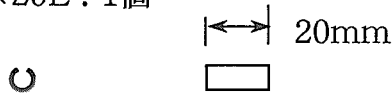
K-SM(被覆有、無)、S-SM、F-MM(被覆有、無)、C-MM、S-MM: 1m×7本



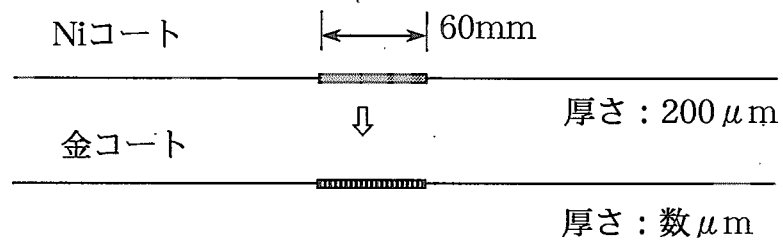
②SUS304管:  $\phi 5 \times 0.5t \times 100L$ : 1個



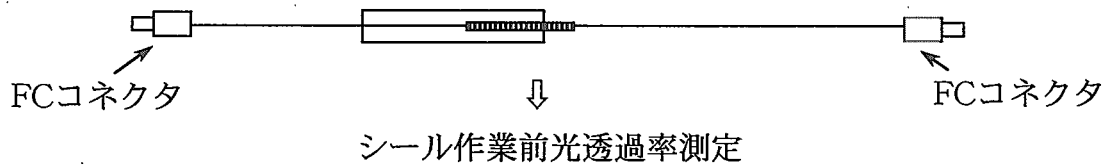
③スリット管:  $\phi 3.5 \times 0.5t \times 20L$ : 1個



2. Niコート+金コート作業



3. SUS304管挿入後コネクタ付け



4. 銀ロー付け作業

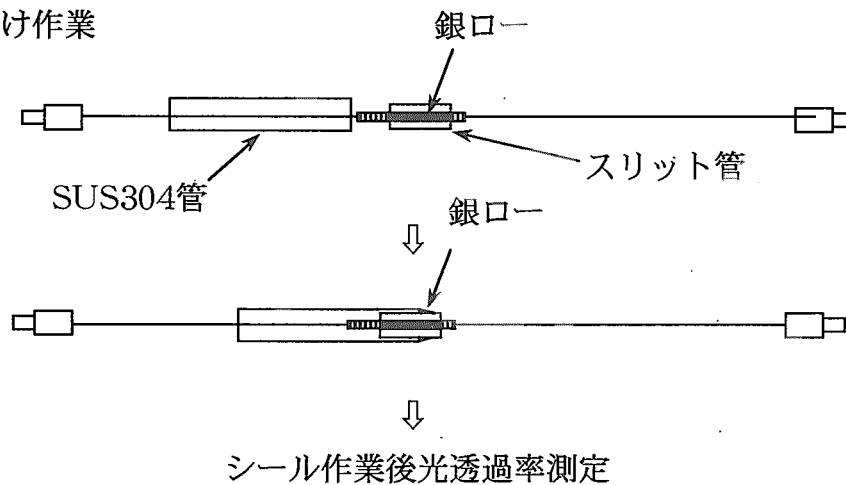


図3-3 光ファイバシール作業行程  
銀ロー付けシール作業

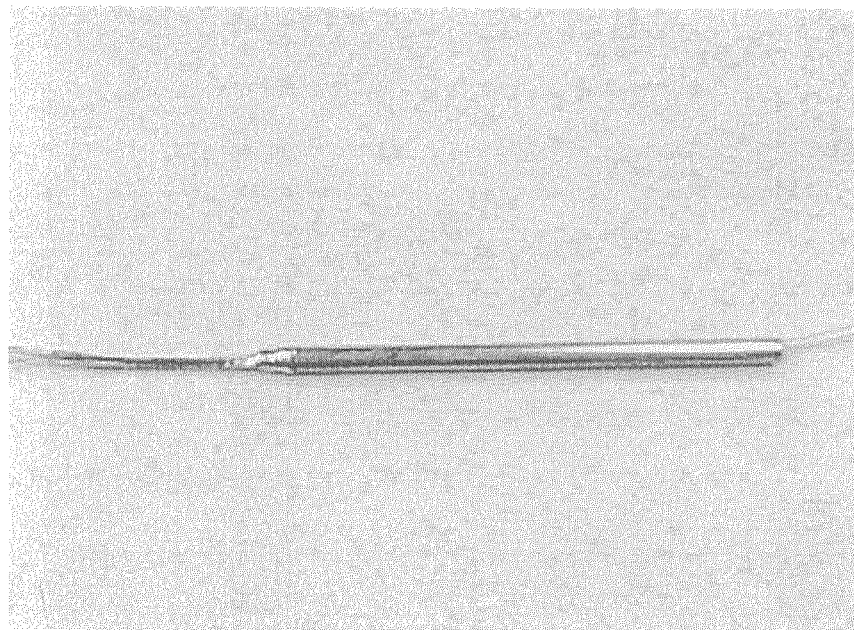
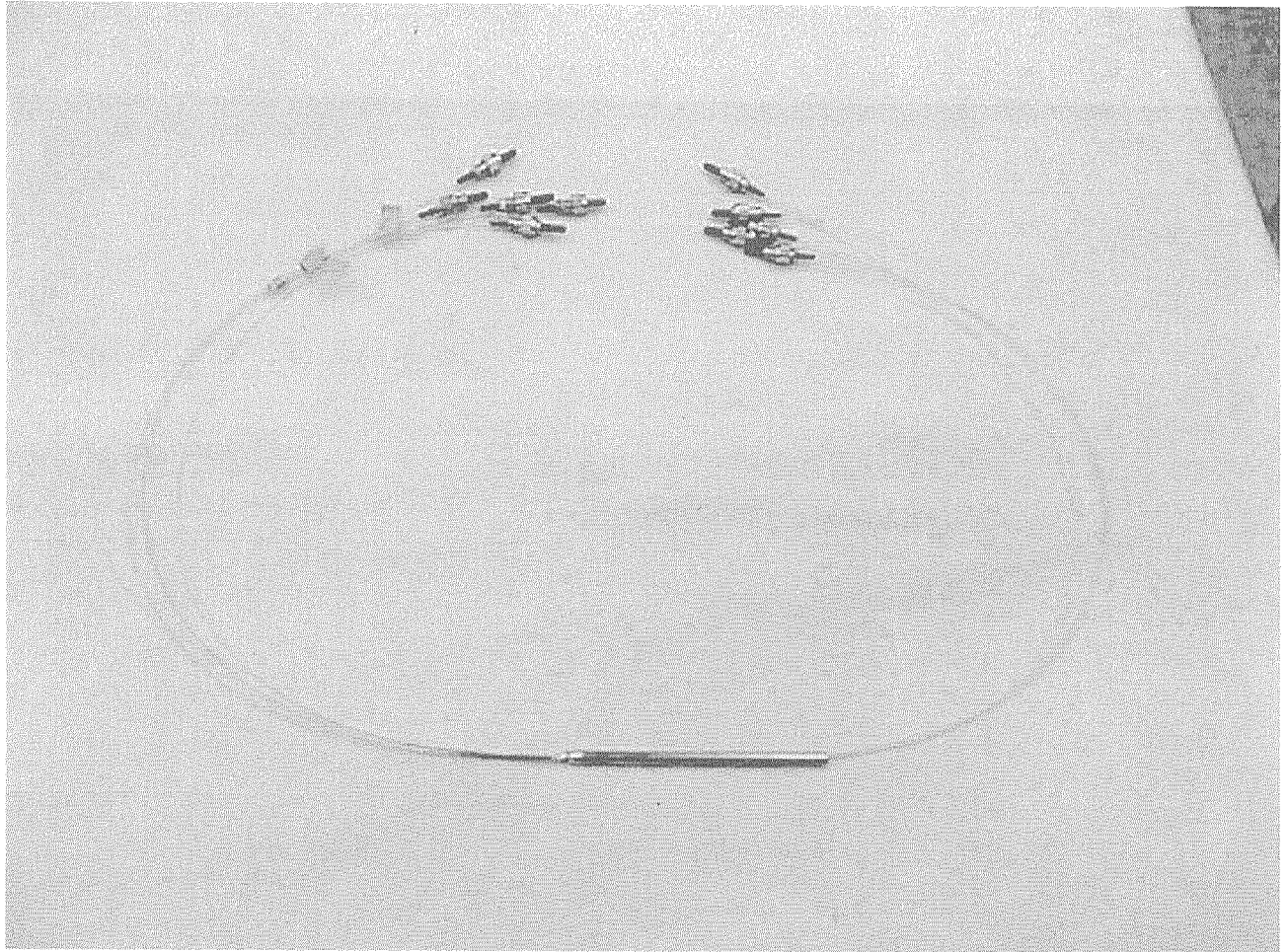


図3-4 光ファイバ貫通部のハンダ付けシール状態

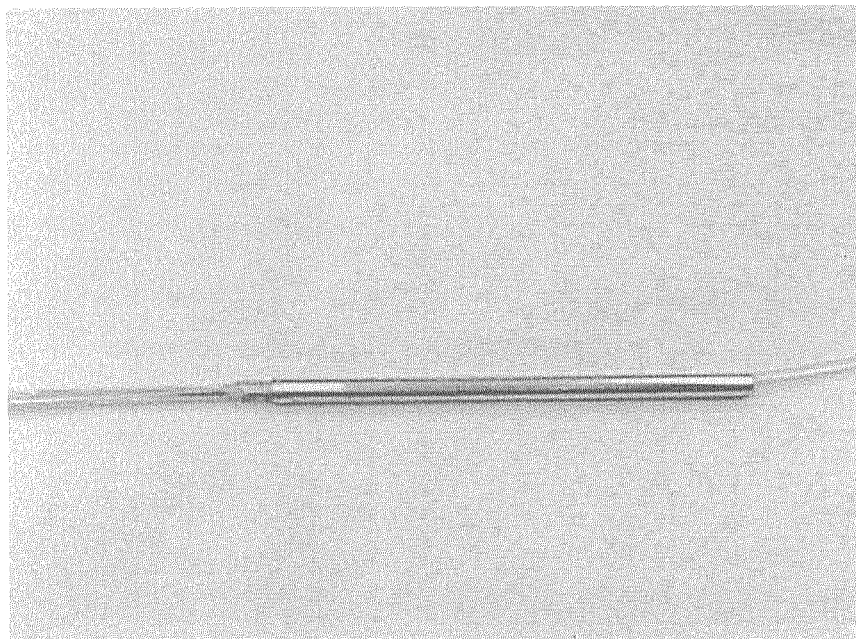
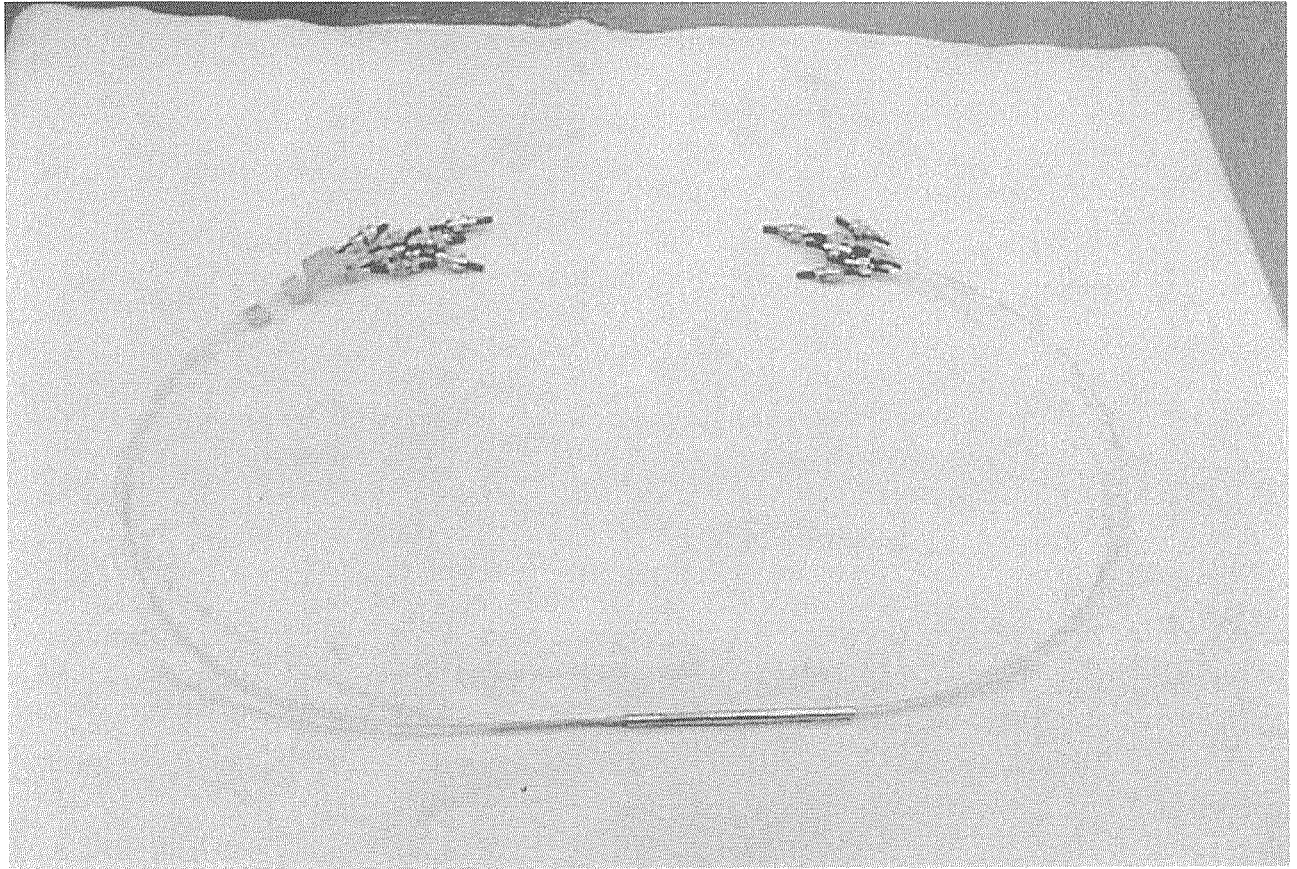
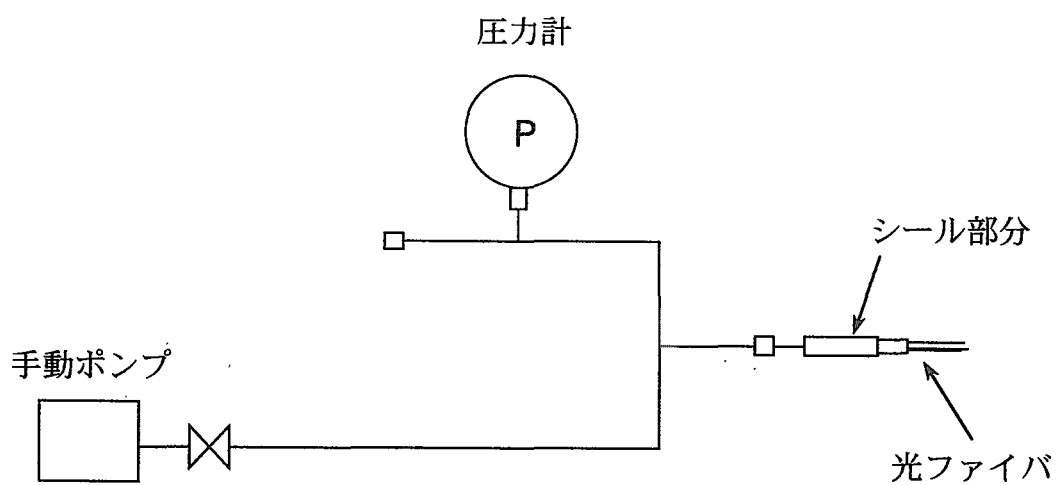
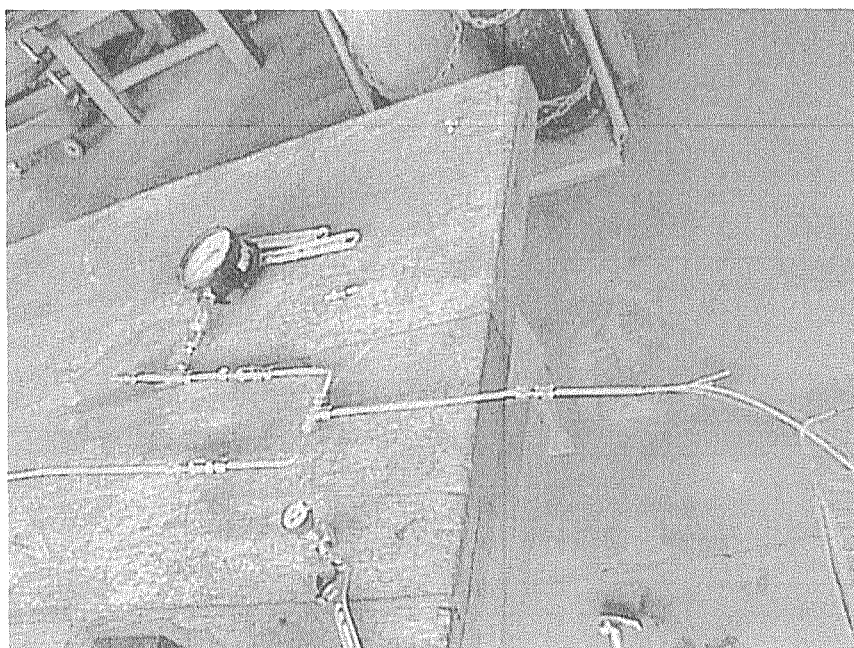


図3-5 光ファイバ貫通部の銀ロー付けシール状態



耐圧試験配管図



光ファイバシール部取付け状態

図3-6 光ファイバ炉外耐圧試験



1. 部品

①ファイバ：全7本：長さ約5m

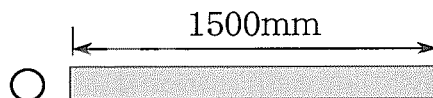
：K-SM：4本

：F-MM、C-MM、S-MM：各1本

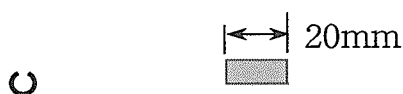
Niコート



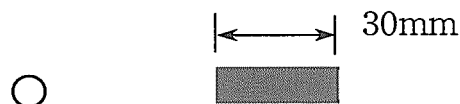
②ファイバ保護管（シール部Niコート処理）：φ5×0.5t×1500L：1本



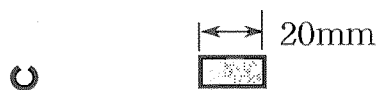
③Niスリット管1：φ3.5×0.5t×20L：1本



④Niカバー管：φ6×0.5t×30L：2本



⑤Niスリット管2：φ4.5×1t×20L：2本



2. ハンダ付け作業

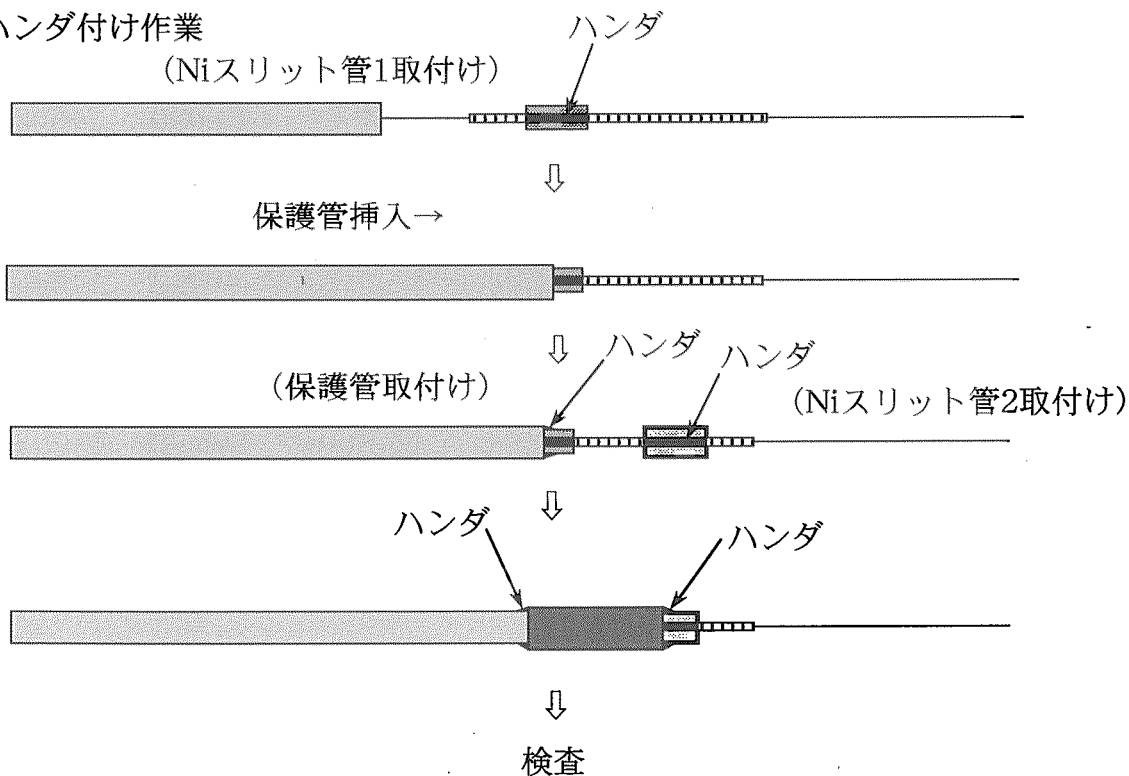


図4-1 キャプセル組込み光ファイバシール作業  
(ハンダ付けシール作業)



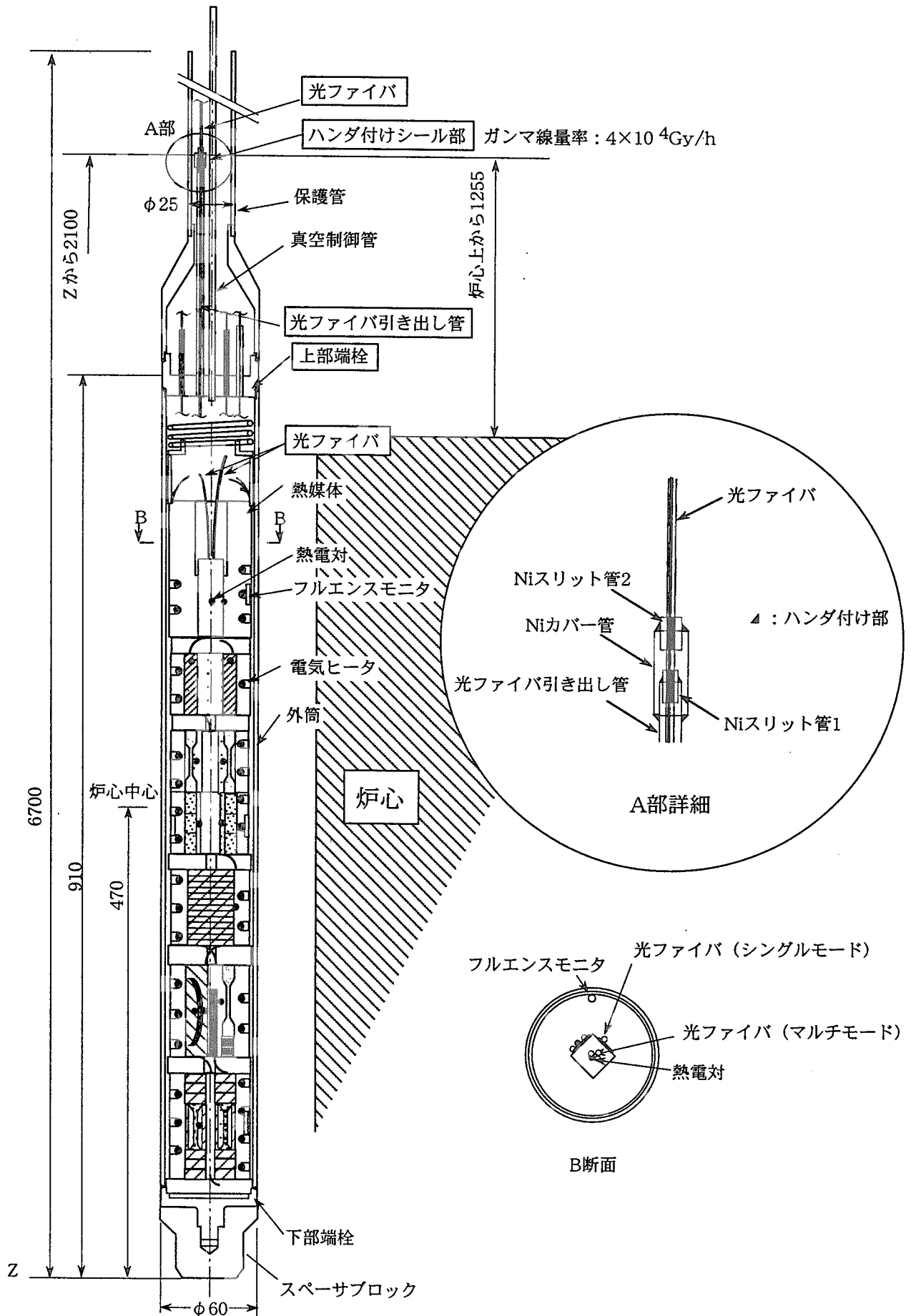


図4-2 光ファイバ用照射キャプセルの構造

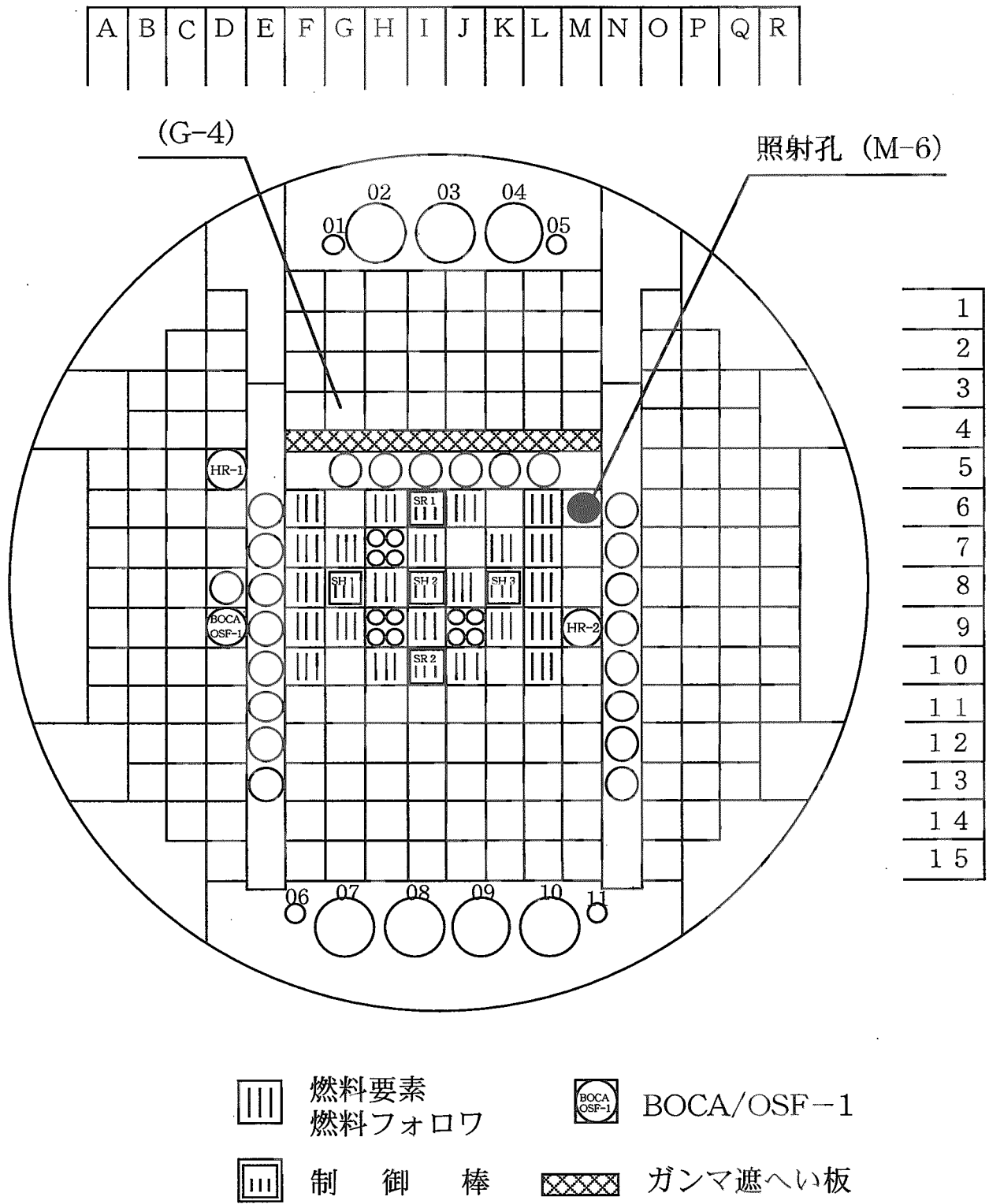


図4-3 キャプセル装荷位置

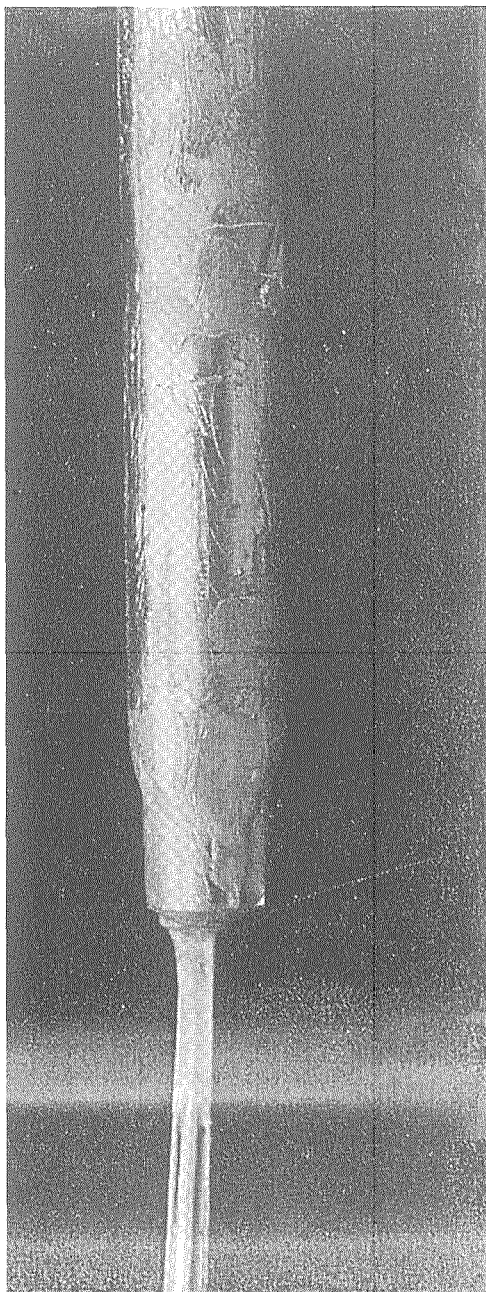


図4-4 照射後の外観写真

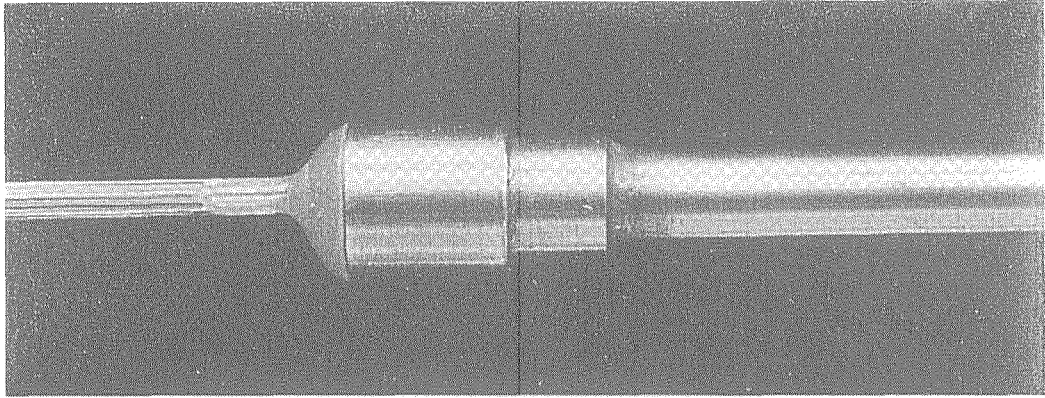
## 付録

JMTR で使用する一般的な照射キャプセルでは、計装線類の上部端栓の取り出し部は銀ロー付けでシールを行っている。しかし、熱影響を受けやすい光ファイバ貫通部は有機系樹脂によるシール方法を使用することがこれまでは一般的であった。有機系樹脂の場合、炉内のガンマ線、中性子線による劣化が問題となる。そのような一例として、照射試験中にシール部からの漏洩が発生した例について概要を以下に記す。

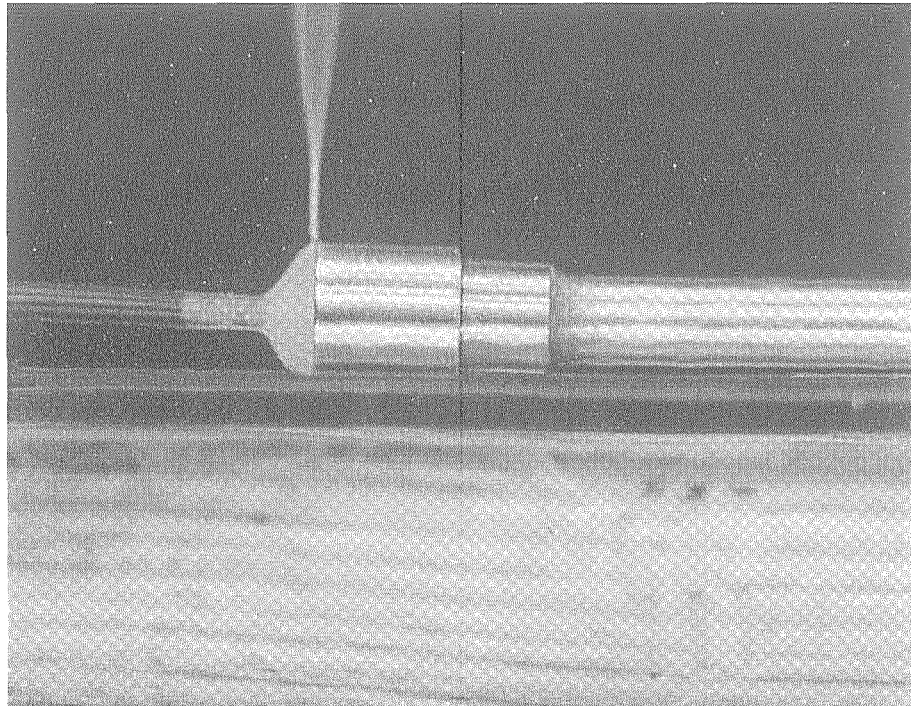
本キャプセルは JMTR のガンマ遮へい板の背後にあたる G-4 孔で照射した。光ファイバは炉心上端から約 1m 離れた部分に位置に配置し、照射下試験に使用したものである。キャプセル内は気密構造であり、光ファイバ貫通部のシール部分はガンマ線の影響を避けるため、光ファイバの配置位置より更に約 1m 上部である。この位置のガンマ線量率は推定値約  $2 \times 10^3 \text{Gy/h}$  である。

計画に従い 3 サイクルの照射を行い、特に問題なく終了した。その後、利用者の依頼により更に 2 サイクルの追加照射を行うこととなったが、4 サイクル目の途中でキャプセル内の真空度が低下し、予め設定した照射温度を保てなくなる現象が生じた。原因として、キャプセル気密部のリークが考えられ、リーク場所としては光ファイバ貫通部の樹脂シールが最も疑われた。このため、照射終了後にホットラボにて樹脂シール部の漏洩試験を行った。照射期間中の推定積算ガンマ線量は 3 サイクル終了時で約  $3.6 \times 10^6 \text{Gy}$ 、4 サイクル終了時で約  $4.8 \times 10^6 \text{Gy}$  である。

リーク試験は、10kPa の圧力によるリークローション法で行った。その結果、リーク場所が樹脂シール部であることを確認した。漏洩試験前の外観とリークローション法で漏洩している状況を付図-1、付図-2 に示す。



付図-1 照射後の外観写真（樹脂シール）



付図-2 照射後のリークローケーション結果（樹脂シール）

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J  
1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m  
1 b = 100 fm = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>  
1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>  
1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq  
1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg  
1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy  
1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」 mmHg を表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N (=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg (Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法) = 4.184 J (熱化学) = 4.1855 J (15 °C) = 4.1868 J (国際蒸気表)
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>	
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>	仕事率 1 PS (仏馬力) = 75 kgf·m/s = 735.499 W
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

光ファイバ貫通部のシール技術の開発（ハンダ付けシール及び銀ロー付けシール）



材料配合率100%  
環境にやさしい材料を使用しています