

JAERI-Tech
2004-043



JP0450386



均一照射キャプセル開発のための試験報告

2004年 3月

菊地 泰二・石川 和義・松井 義典・板橋 行夫

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, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2004

編集兼発行 日本原子力研究所

均一照射キャプセル開発のための試験報告

日本原子力研究所東海研究所工務・技術室
菊地 泰二・石川 和義・松井 義典⁺¹・板橋 行夫⁺¹

(2004年2月20日受理)

JMTRにおける原子炉材料の照射試験は、照射温度、中性子照射量など高精度の制御が要求される。一般的な要求は、JMTRの最良な照射孔を選びことで対応している。しかし、より正確に行うためには、特殊な機構を持ったキャプセルを開発する必要がある。

反射領域におけるJMTR照射の場合、中性子照射量は、キャプセル近傍の炉内中性子分布により、炉心側と反対側では20~30%の差が生じる。この照射量の不均一を緩和するため、サイクル間で遠隔による試料容器を反転させる構造とした。

期待する中性子スペクトル（高速中性子／熱中性子の比）を得るために、核計算コードによってカドミウムの厚さを計算した。カドミウムは熱中性子を吸収する材料である。そのため、試料容器外側に必要な厚さのカドミウムめっきを施した。

本報告では、反転機構を設けた均一照射キャプセルについて、(1) 各種基礎試験、(2) その結果及び(3) 実際の照射試験の評価結果について報告する。

Evaluation report on Capsule Development for Uniform Irradiation

Taiji KIKUCHI, Kazuyoshi ISHIKAWA, Yoshinori MATSUI ⁺¹ and Yukio ITAHASHI⁺¹

Division of Engineering Service
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura,Naka-gun,Ibaraki-ken

(Received February 20, 2004)

In the JMTR, the irradiation examinations for nuclear reactor material are usually requested high accurate irradiation temperature, neutron fluence and neutron spectrum. The general demands satisfy to choice the best irradiation hole in the JMTR. However, for more accuracy, it is necessary to produce capsule with special mechanisms.

When the capsule is irradiated in the reflector area, neutron fluence has difference of 20-30% by comparing the reactor core side with the other side by spatial gradient of capsule parts. Therefore, the specimen container was structured to be reversed for the easement of the neutron fluence by remote control in the joint interval of next cycle.

To get the expectant neutron spectrum (ratio of fast neutron and thermal neutron), the thickness of cadmium is calculated by nuclear calculation code. Cadmium is the material to absorb the thermal neutron. Therefore, the necessary thickness was plated the outside of the specimen container with the cadmium.

This paper is reported (1) the various base examinations for the development, (2) the result of the evaluations and (3) the evaluation result of an actual irradiation examination about uniform irradiation capsule of the reversing mechanism.

Keywords: Irradiation Test, Irradiation Capsule, Uniform Irradiation

⁺¹ Department of JMTR, Oarai Research Establishment

目 次

1. はじめに	.....	1
2. 作動試験	.....	2
2. 1 構造と作動試験項目	.....	2
2. 2 作動試験の結果	.....	2
2. 3 評 價	.....	4
3. かごミクロン層の製作試験	.....	5
3. 1 かごミクロン層の形成試験	.....	5
3. 2 かごミクロン層の加工試験	.....	6
3. 3 評 價	.....	7
4. 照射試験の評価結果	.....	8
4. 1 照射温度	.....	8
4. 2 中性子照射量及び中性子スペクトル	.....	8
5. まとめ	.....	9
謝 辞	.....	9

Contents

1 . Introduction	.....	1
2 . Operation Test	.....	2
2 . 1 Structure and Items of Operation Test	.....	2
2 . 2 Results of Operation Tests	.....	2
2 . 3 Evaluation	.....	4
3 . Confirmation Test for Production of Cadmium Plating	.....	5
3 . 1 Production Test of Cadmium Plating	.....	5
3 . 2 Formation Test of Cadmium Plating	.....	6
3 . 3 Evaluation	.....	7
4 . Evaluation Result of Irradiation Examination	.....	8
4 . 1 Result of Irradiation Temperature	.....	8
4 . 2 Result of Neutron Fluence and Neutron Spectrum	.....	8
5 . Conclusion	.....	9
Acknowledgement	.....	9

1. はじめに

J MTRにおける原子炉材料の照射試験においては、照射温度、中性子照射量及び中性子スペクトル（高速中性子／熱中性子の比）について、特別に高い精度での照射が求められる場合がある。この要求に応えるためには、特殊な機構を持ったキャップセルを製作する必要がある。しかしながら、これらの要件は照射試料の大小及び材質、炉心特有の核加熱率、中性子束分布・スペクトル等により大きく影響される。このため、照射温度等の精度向上への取り組みとして、伝熱上の不確定要因を出来る限り排除し、温度計測を行う熱電対は可能な限り試料に直接取り付ける等の基本原則に立って、温度予測及び評価制度の向上に3次元計算コード（連続エネルギーモンテカルロコード）を導入する等の改善を図っている。

本反転機構を設けた均一照射キャップセルの開発は、照射温度と中性子照射量及び中性子スペクトルの3点について、それぞれ以下の方法により最適な改良と調整を試みたものである。

照射温度の制御は、多段ヒータ及び真空温度制御併用方式で行い、照射試料の雰囲気は真空温度制御の影響を受けないようにヘリウムガスを密封した容器構造とした。また、中性子照射量については、炉内中性子束分布に起因する照射試料内部の照射量の不均一（キャップセル内部に装荷した照射試料の中性子照射量に炉心側と反対側では20～30%の差が生じる場合がある。）を緩和するように、照射試料を装荷した内部容器を反転させ、炉内での照射試料の位置を変える方法を採用した。さらに、中性子スペクトル（高速中性子／熱中性子の比）については、カドミウムめっきを施したステンレス製の筒で照射試料を装荷した内部容器を取り囲むことにより、熱中性子を吸収させきめ細かな調整を行った。照射試料の照射目標温度の観点から、寸法精度及び熱除去を考慮して電気めっき法によりカドミウム被覆を行った。

本報告では、反転機構を設けた均一照射キャップセル開発のための各種試験とその結果及び結果を基にした実際の照射試験の評価について報告する。

2. 作動試験

2. 1 構造と作動試験項目

反転機構作動確認試験体の構造を Fig.2-1 に示す。

本試験体は、別途検討を進めている当該均一照射キャップセルの構造を模擬する構造とした。外筒内部には、反転を行う内部容器（以下内筒と称す。）を設け、その内筒の上下には反転をスムーズに行うためにペアリングを設けた。反転を行う動力機構にはステッピングモータと減速機を使用した。また、反転体内筒内部には、実機キャップセルの重量を模擬するために、鉛の粒を約 1.2 Kg 詰め込んだ構造である。更に、照射中の試料温度の制御を行う必要から、内筒と熱電対の一体構造とした。

内筒を反転させると熱電対に使用しているケーブルが捻れによる塑性変形を起こす。ケーブルは捻れに弱いため、内筒に取り付ける熱電対ケーブルの取り出し本数を模擬して 5 本取り付け、内筒から取り出してからコイル状にカールし、反転時に撓みやすくして回転トルクの減少に努めた。反転時のトルク測定を行うために、反転する内筒と連結されたシャフトを延長しトルク測定用ソケットを設けた構造である。

各熱電対ケーブルのコイル状にカールした部分の組立形状は、コイル中心径が 3.2 mm で 10 ターンとした。

試験体を組み立てた後、以下に示す項目の作動確認試験を実施した。

- (1) 反転時に熱電対ケーブルの状態変化を観察する。
- (2) 反転に必要とされるトルクの測定を行う。
- (3) 热電対ケーブルの反転による耐久性を確認する。

2. 2 作動試験の結果

(1) 反転時の熱電対ケーブルの状態変化観察

反転試験状態の外観写真およびケーブルのコイル状にカールした部分の試験前の外観写真を Photo.2-1 に示す。Photo.2-2 は、反転試験前・後の熱電対ケーブルの状態変化を示した外観写真である。

写真から、180° 反転後はケーブルのコイル状にカールした部分が反転前に比べて各段とも一様に捻れていることが判る。しかも、当初懸念したコイル状にカールした部分の曲げ R 部には異常が無く、反転による付加荷重はコイル状にカールした部分で吸収されると思われる。

(2) 反転に必要とされるトルクの測定

本試験は、180° 反転を行って反転回数 10 回毎に、その時のトルク測定を行

った。その際、反転による熱電対ケーブルの破損状況も同時に観察するため、反転体の胴体部にリボンヒータを巻き付け、内部に装荷した熱電対5本(T/C1~T/C5)の温度を約100°C迄昇温して測定を行い、温度記録等から断線の有無を確認することにした。また、同時に熱電対ケーブルのコイル状にカールした付近の温度測定(T/C6~T/C7)も行った。

更に、約100°C迄昇温試験後に、室温程度(43°C)に温度を下げて同様の試験方法によりトルク測定を行った。

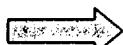
反転試験時におけるリボンヒータでの昇温チャートをFig.2-2に示す。

反転試験のトルク測定試験時の外観写真をPhoto.2-3に示す。

180°反転時のトルク測定結果をTable.2-1に示す。

Table.2-1 180°反転時のトルク測定結果

(試験温度: 105°C)		(試験温度: 43°C)	
通算回数	トルク (Nm)	通算回数	トルク (Nm)
0	0. 5	60	0. 5
10	0. 5	70	0. 5
20	0. 5	80	0. 5
30	0. 45	90	0. 5
40	0. 45	100	0. 5
50	0. 45	110	0. 5
60	0. 45	120	0. 5



今回行った反転試験におけるトルク測定結果は、180°反転時で0.5Nm程度であった。

実機のキャップセルでは、照射試験での熱電対ケーブルのコイル状にカールした部分に加わる影響を更に低くするため、180°の反転角度をフリー状態から±90°

(照射開始前に反時計方向に90°回転(-90°の位置)にセットし、反転時はそこから時計方向に180°回転(+90°の位置)とする。)

で反転して照射試験を行うことにしており、照射試験時は測定結果0.5Nm以下のトルクで十分反転可能と判断した。

(3) 热電対ケーブルの反転耐久性確認

内部回転体(内筒)に取り付けた熱電対ケーブルの反転耐久性については、先に実施したトルク測定結果に示したとおり、通算回数120回の反転試験後における全ての熱電対ケーブルのシーズ及び素線部にも何ら問題はなかった。

実機での反転回数を予測すると、20回程度である。

$$\text{組立中 (10回)} + \text{照射中 (5回)} + \text{予備 (5回)} = \text{合計 (20回)}$$

よって、熱電対ケーブルの反転耐久性は、本構造で十分な健全性を有している。

加えて、通算回数120回の180°反転試験後に更に360°1回転を5回実施した後においても、熱電対ケーブルのシース及び素線部に異常はなかった。

2. 3評価

今回実施した反転機構作動試験は、熱電対ケーブル取り出し部の構造により、所定の熱電対ケーブルをコイル状にカールを行うことにより、反転におけるケーブルの耐久性と健全性を確認した。この事から、本構造を当該キャプセルに適用しても問題の無いことを確認した。

3. カドミウム層の製作試験

J M T R の炉心での照射で高速中性子束と熱中性子束の比を発電炉の圧力容器付近に相当する 0.2~0.3 になるようにするには、中性子スペクトルの調整を行う必要がある。

キャップセル照射試験において調整材としては、本キャップセルの寸法、熱除去の観点から回転体（内筒）の外表面にカドミウムを電気めっきで被覆することにした。また、電気めっきは、メッキ層が厚くなると電流密度の関係から、一定な厚さが得られないで、最終的にはメッキ表面を加工する必要が出てくるため、加工性の検討も行った。

3. 1 カドミウム層の形成試験

照射試験片の照射目標温度（280°C）の観点から、寸法精度及び熱除去を考慮して電気めっき法を採用することにした。電気めっきの原理は、素材を陰極としてメッキ浴に浸せきし、直流電流によって素材表面に金属膜を電解析出させるものである。

本キャップセルで必要とするカドミウムめっき層の厚さは、核計算から 70 μm~80 μm と評価された。

(1) メッキ施工の実績調査とメッキ法の検討

- カドミウムは有害物質であり、人間の体内に入ると代謝されずに蓄積するため発ガン性などの症状を示し、半減期は数十年と長い。また、鉱山活動に伴い排出されたカドミウムが米に蓄積して発生したイタイイタイ病があり、その取扱いに当っては作業環境管理を厳密に行う必要がある。一方、用途としては、航空機を始めとする産業機械部品の防錆対策等に広く使用されている。

メーカーにおけるカドミウムの電気めっきによる施工実績については、メッキの排水処理対策等の問題から全国でも数社しか行われていない状況であるが、通信機部品および航空機部品等に用いられている。また、メッキ層厚さの調査を行った結果、今までのメッキ層厚さの厚いものでも 20 μm~30 μm の実績しかないことが判った。

カドミウムの電気めっきの確認試験として、1) メッキ層厚さの不均一性、2) 密着性 3) 最適時間、4) メッキ層厚さの測定方法の各項目について検討した。

厚付メッキを行うための検討を行った結果、まず基本となるメッキ電流とメッキ時間の諸条件を決定することにした。また、製品の長さが長くなるとメッキは付きやすい部分だけが多量に付きやすい傾向がある。このため製品全体が均一にメッキされるように、メッキが付きやすい両端部表面にマスキング処理を施し、中央部付近をメッキが付きやすくすることにした。更に、外周方向における均一厚さのメッキについては、メッキ時に所定の時間毎に製品を回転する等の工夫を行つことにした。

今回のメッキ形成試験は、最低メッキ厚さの目標を 80 μm として行つことにした。

下記にカドミウム素材の物理化学的性質を記す。

- ・ 密 度 : 8. 65 g r / cm³ (20°C)
- ・ 融 点 : 320. 9 °C
- ・ 热 伝 導 率 : 0. 98 W/cm · deg (0°C)
- ・ 電 気 抵 抗 率 : 6. 73 (10⁻⁶ deg⁻¹)
- ・ 硬 さ : モース硬度 2. 0

(2) メッキの形成試験結果

本試験により製作した試験体のカドミウムめっき層厚さの測定結果を Fig.3-1 に示す。

結果から、メッキ条件は電流密度 1 A/dm² (DK1) で 80 分間のメッキでは目標とするメッキ層厚さは得られないので、更に電流密度を上げて 1.3 A/dm² (DK1.3) で再度 80 分間（通算 160 分間）のメッキを行い良好な結果が得られることを確認した。また、径方向についてのメッキ層厚さは、X 方向では 70 μm ~ 119 μm (平均 89 μm) の厚さであり、Y 方向では 82 μm ~ 90 μm (平均 87 μm) の厚さでありバラツキが生じた。

試験体のメッキ層厚さは、製品全体が均一厚さにメッキされるようにマスキング処理と製品の回転を行ったことにより、多少両端部が厚くメッキされたが、ほぼ必要とするめっき層厚さと均一性が得られた。

3. 2 カドミウム層の加工試験

メッキ層が厚くなると電流密度の関係から、一定しためっき層厚さは得られないの で、なるべく厚くメッキを行ってから、最終的にはメッキ表面を機械加工仕上げを行 い所定の寸法とする必要が出てくる。よって、本試験においては、めっき層が一般的な機械加工に耐えうることを確認した。

(1) 機械加工における保安対策

加工に際しては、加工により有害物質であるカドミウムの切粉等を作業者が体内に 吸い込まないように、また大気中に拡散することを防止するための対策を行った。

対策は、切粉を飛散させないように加工部にアルコールを流しながら加工し、強力 吸引機で局部吸引し、吸引ホースの途中にトラップを備えた簡易の加工治具を設けて 行った。

Fig.3-2 に機械加工の系統図を示す。

(2) 加工試験の結果

加工治具を使用して機械加工を行った結果、加工によるめっき層の剥離等の発生は 見受けられず、カドミウムめっき層は加工及び使用に耐えうることを確認した。

加工試験結果については、メッキ表面及び加工後のめっき層表面の外観写真を Photo.3-1 に示す。また、カドミウム加工時の状況写真を Photo.3-2 に示す。

3. 3評 價

カドミウムめっき層の施工試験は、当初に目標としたメッキ層厚さのカドミウムめっきが行えることを確認すると共に、メッキ後の機械加工についても、耐加工性が確認された。この事から、中性子の調整方法としてカドミウムめっきを適用しても問題無いと判断した。

4. 照射試験の評価結果

本照射用実機キャップセルは、前述の各種試験の結果を反映させて製作した。

Fig.4-1 に実機キャップセルのカドミウムめっき層厚さの測定結果を、Fig.4-2 に実機キャップセルの構造概略図を示す。

また、Fig.4-3 に均一照射キャップセルの照射試験結果の一例を示す。

照射試験における照射温度及び中性子照射量と中性子スペクトルの評価結果は以下の通りである。

4. 1 照射温度

照射試料 ($10 \times 10 \times 55\text{mm}$) は、Fig.4-2 に示すように 6 個×2 段を 1 ブロックとして、熱電対指示値が目標照射温度 (280°C) になるように粗調整を真空温度制御で、更に微調整をヒータ制御で行った。熱電対指示値を基準にした 3 次元熱計算の結果から、全照射試料について照射温度 $280 \pm 2.5^\circ\text{C}$ の範囲で照射されたことを確認した。

なお、Fig.4-3 図から内部容器を反転させると熱電対を取り付けた B 照射試料は、E 照射試料位置に移動するが、熱電対位置温度は微々たる差 (0.5°C) であるため制御温度を変更する必要はなかった。

4. 2 中性子照射量及び中性子スペクトル

中性子照射量及び中性子スペクトル（高速中性子束/熱中性子束の比）の核的評価結果を Table.4-1 (次ページ) に示す。

同一水平面に配置された 6 個の照射試料についての中性子照射量のばらつきは、調整しない場合の $\pm 17\%$ (高速中性子束) から $\pm 3.5\%$ になった。さらに、高速中性子束/熱中性子束の比は調整しない場合の約 0.07 から 0.24~0.29 となるなど、きめ細かな中性子スペクトル調整を可能とした。

以上から、JMTR 炉心の核加熱率の低いアルミニウム反射体領域の照射孔においては、種々の技術を組み合わせることで主要な照射要件を満たし、その精度も十分高いことが技術的に確証された。

Table.4-1 中性子照射量及び中性子スペクトルの調整効果

	照射試料を装荷した内部容器の反転の有無	
	無	有
高速中性子照射量	±17%	±3.5%
熱中性子照射量	±23%	±3%
高速中性子/熱中性子の比	カドミウムめっき層の有無	
	無	有
	0.07	0.24~0.29

5. まとめ

照射条件の中で照射温度と中性子照射量及び中性子スペクトルの高い精度での照射試験が求められ、最適な改良を行うための各種の試験を実施した。種々の機能を組み合わせた反転機構を設けた均一照射キャップセルを開発し、主要な照射要件を満たすと共に、その精度についても十分であることを確認した。

謝 辞

均一照射キャップセルの各種試験に当たり、原子力エンジニアリング(株)機工課の方々にご支援をいただきました。また、本書作成に当たり、HTTR技術開発室 島川聰司氏および武山友憲工作技術グループリーダーにご指導をいただきました。

以上記して謝意を表します。

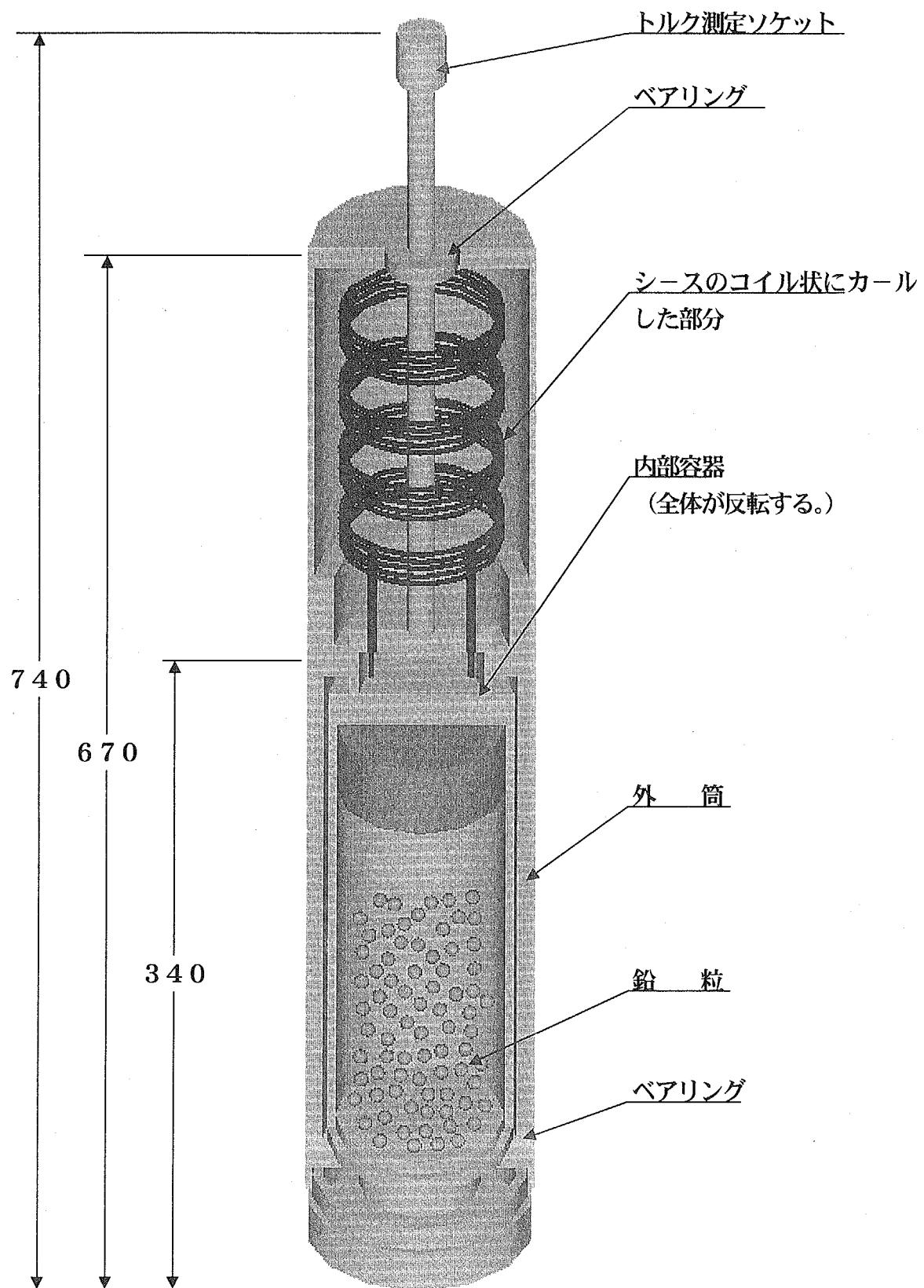
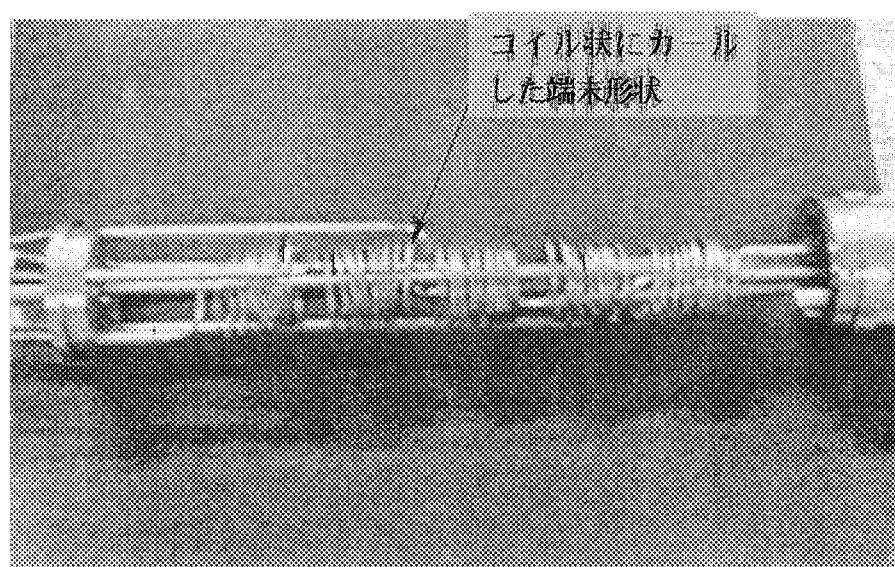
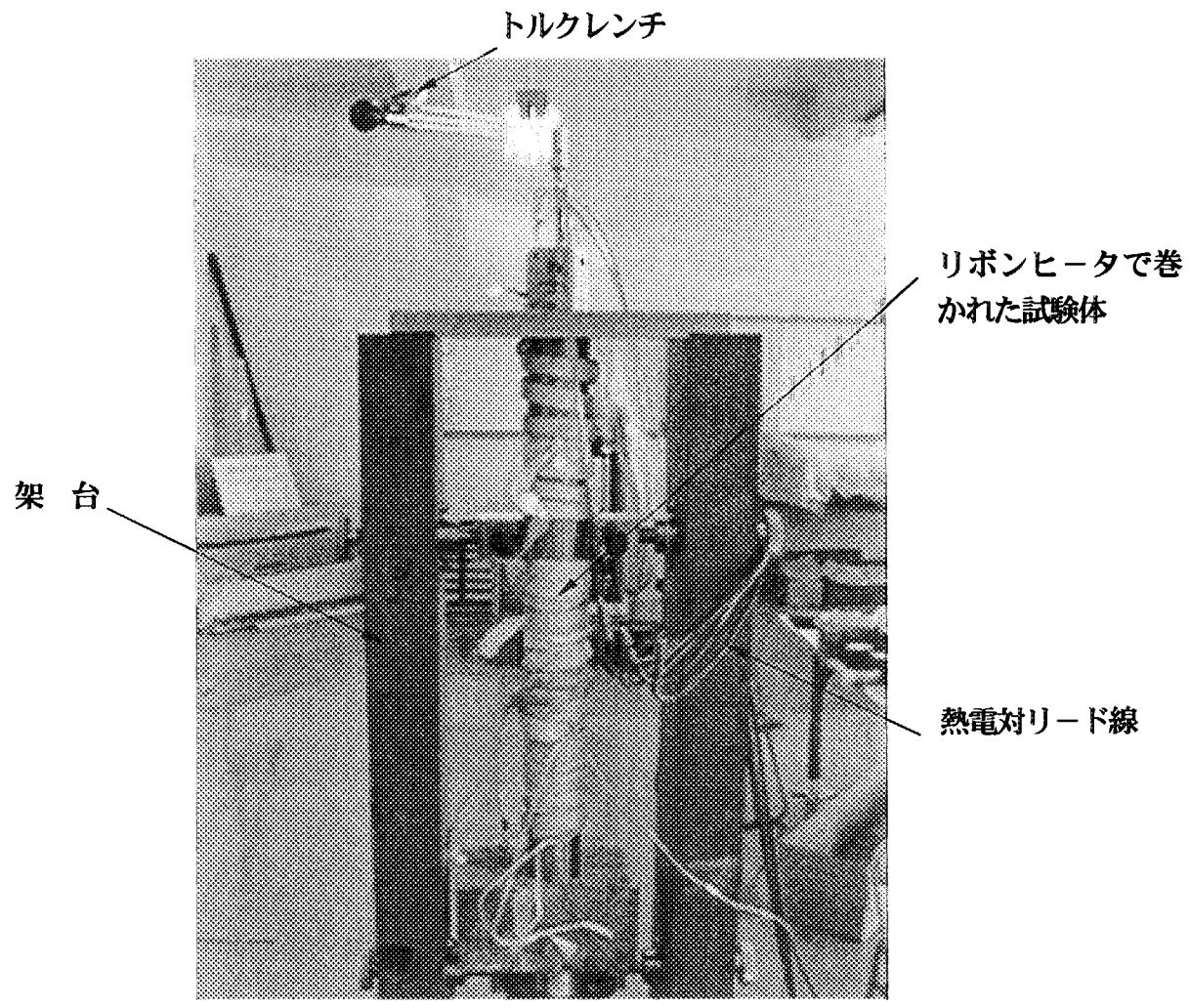
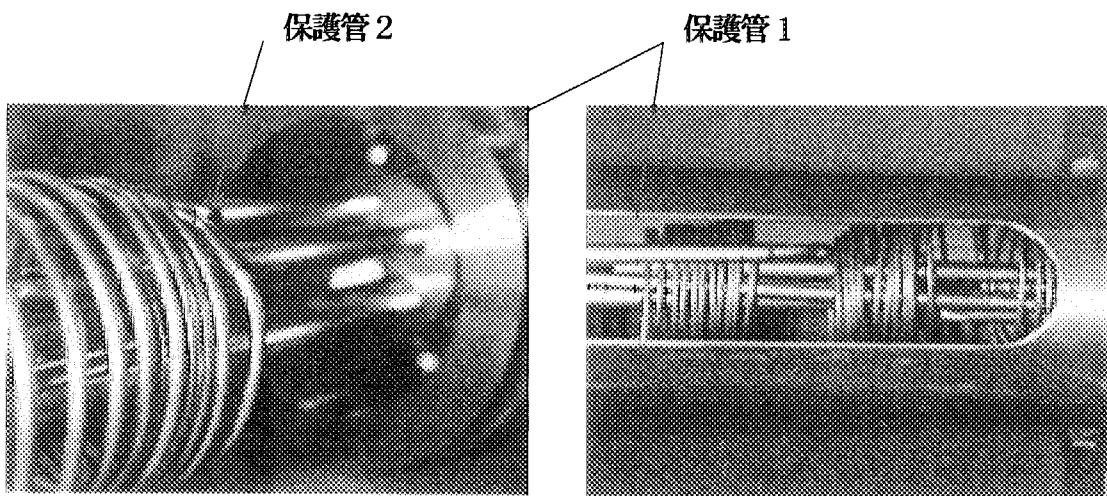


Fig.2-1 反転機構作動確認試験体



(コイル状にカールした部分の試験前外観写真)

Photo2-1 反転試験状態とコイル状にカールした部分の外観写真

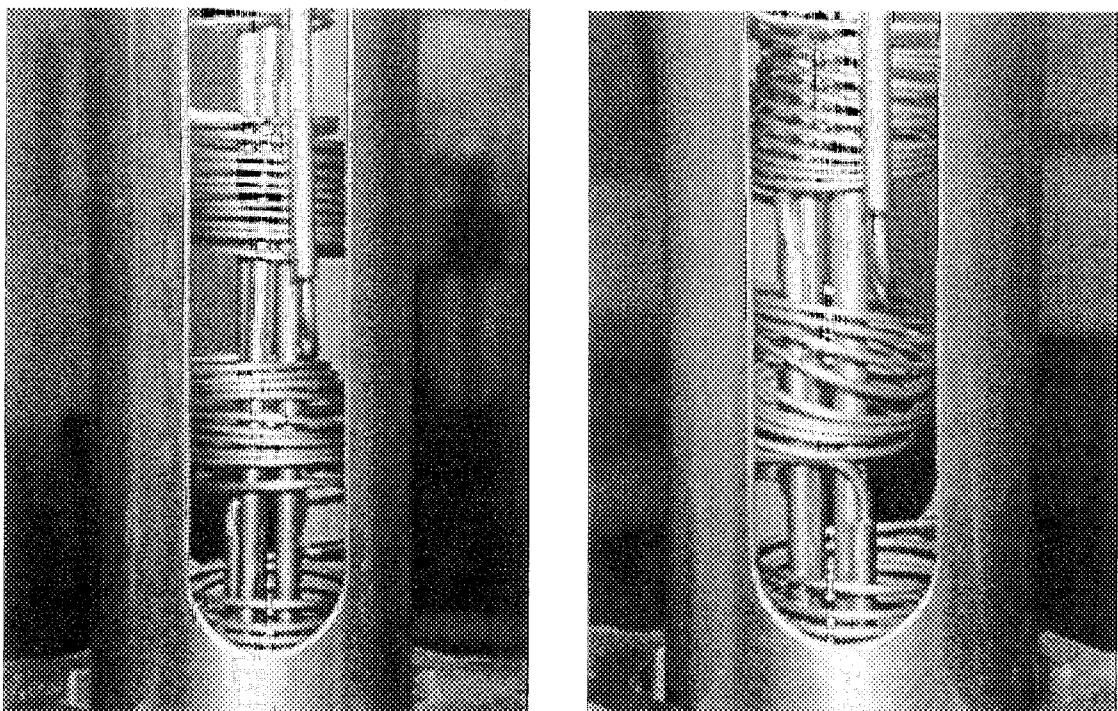


(シース取出部写真)

(試験前ケーブル外観写真)

端栓部から保護管 1 を取出し、その中に保護管 2 を挿入する。

保護管 2 の中にシースを入れて、保護管 2 で曲げる。

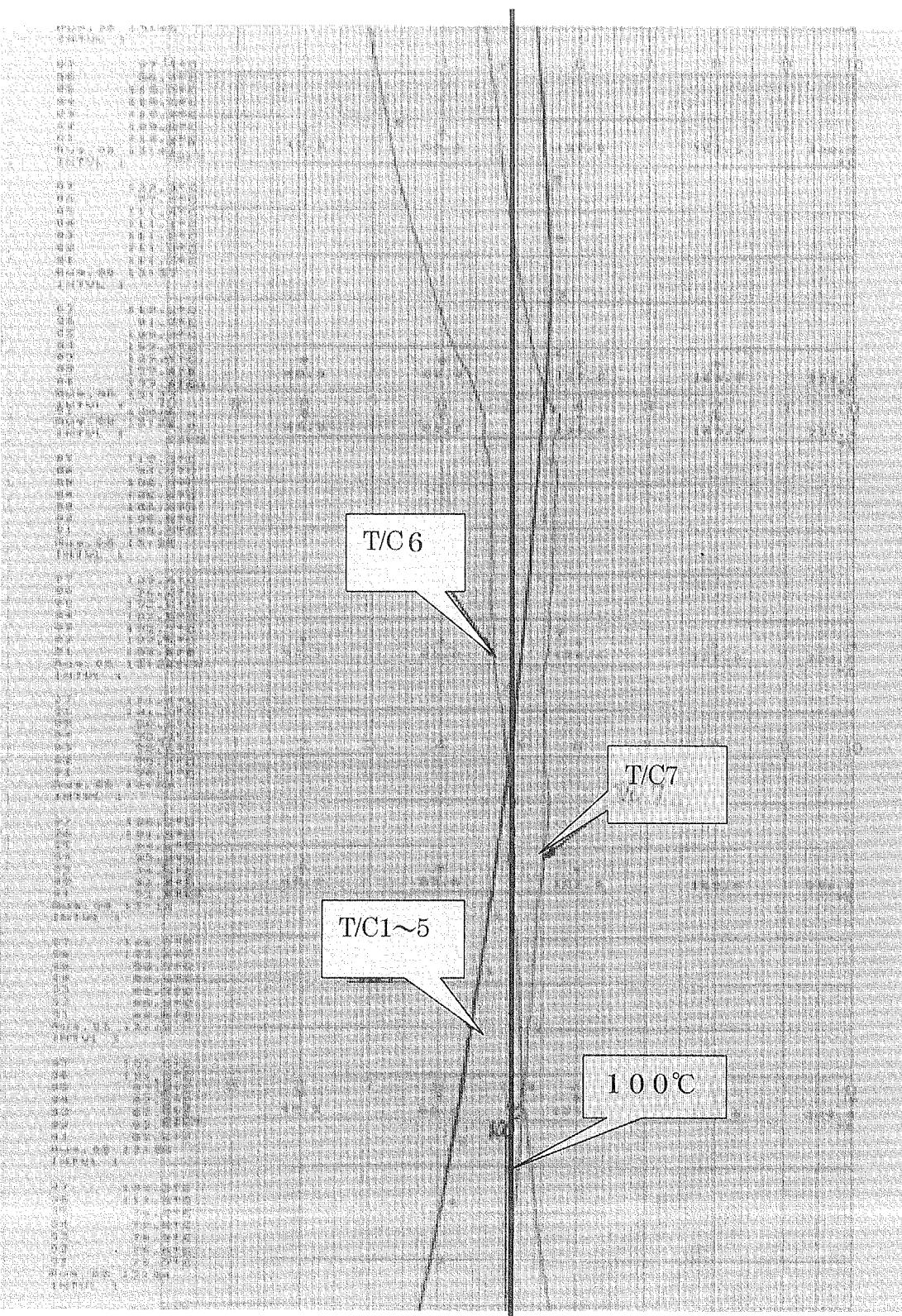


(0° 反転前外観写真)

(180° 反転前外観写真)

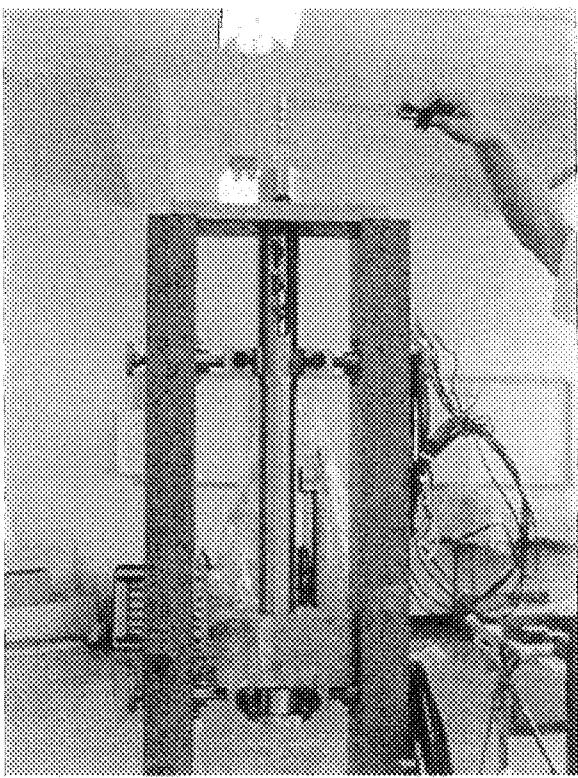
下部側は反転容器と連結し、上部側は外筒上部端栓に固定されている。
よって、反転するとケーブルのコイル状にカールした部分が捻れる。

Photo.2-2 反転試験時のコイル状にカールした部分の状態外観写真



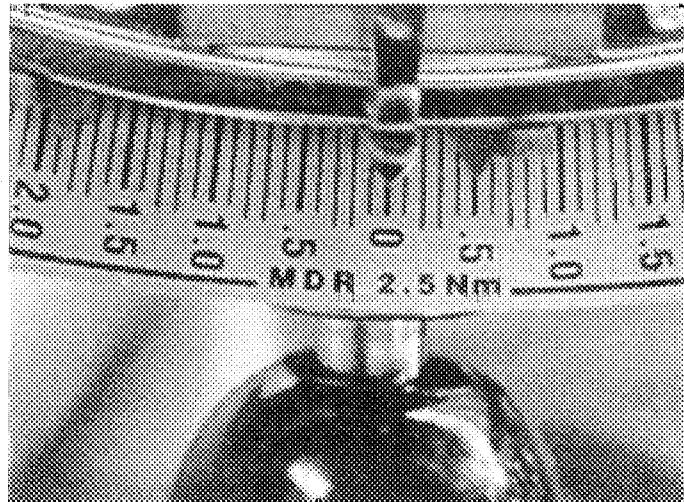
(T/C1~5 は容器内部温度であり、T/C6 及び T/C7 はコイル状にカールした部分の
 温度である。リボンヒータにより、100°Cを目標に昇温した。)

Fig.2-2 反転試験時におけるリボンヒータでの昇温チャート



(反転試験時のトルク測定外観写真)

[試験温度43℃において、反転試験におけるトルク測定を実施した。]



(トルク測定 (トルクレンチ指示値0.5Nm))

[トルクレンチは、型式T3 FN 2. 5 (前田金属製) である。]

Photo.2-3 反転試験のトルク測定時の外観写真

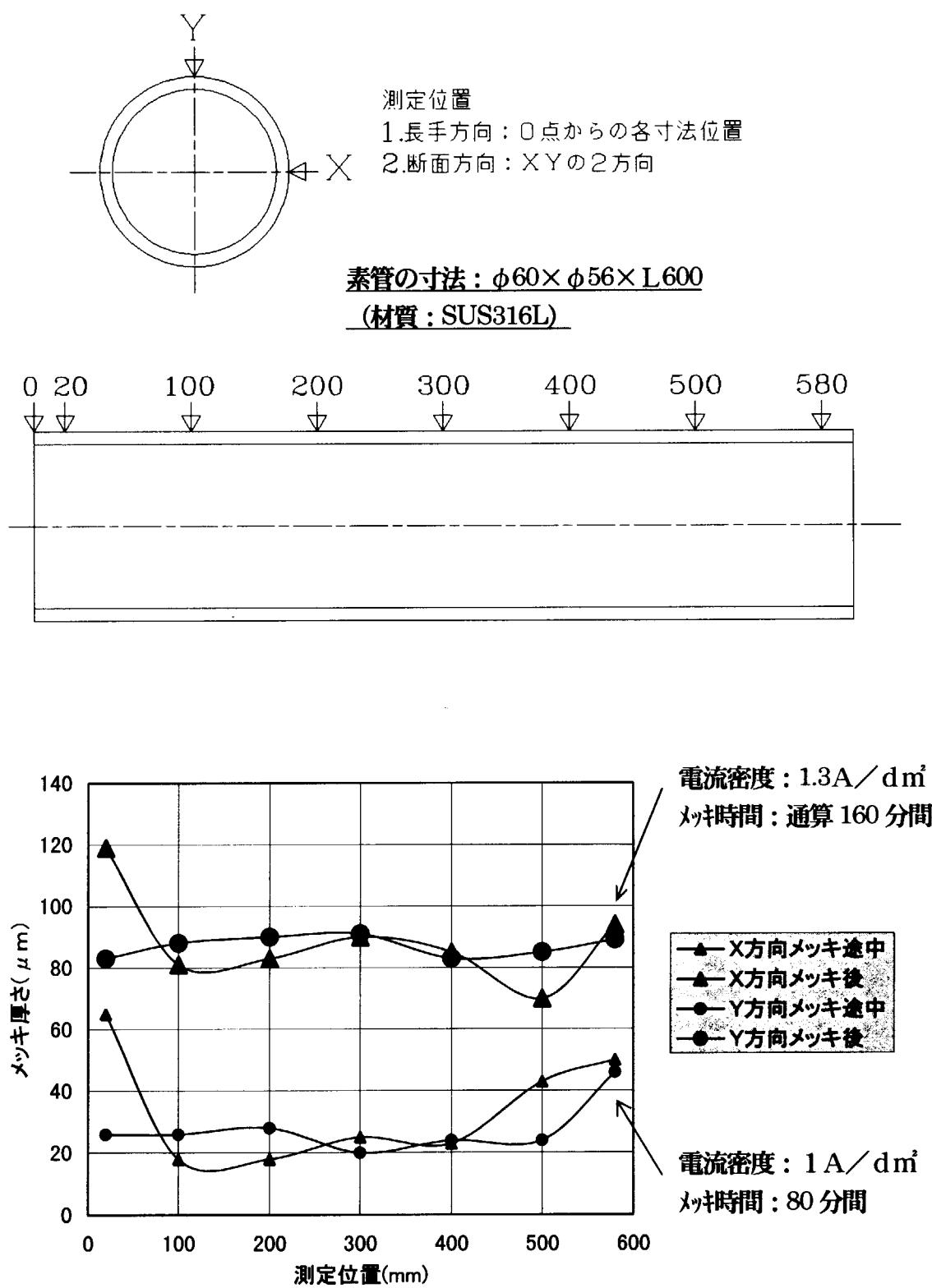


Fig.3-1 試験体のカドミウムメッキ層厚さの測定結果

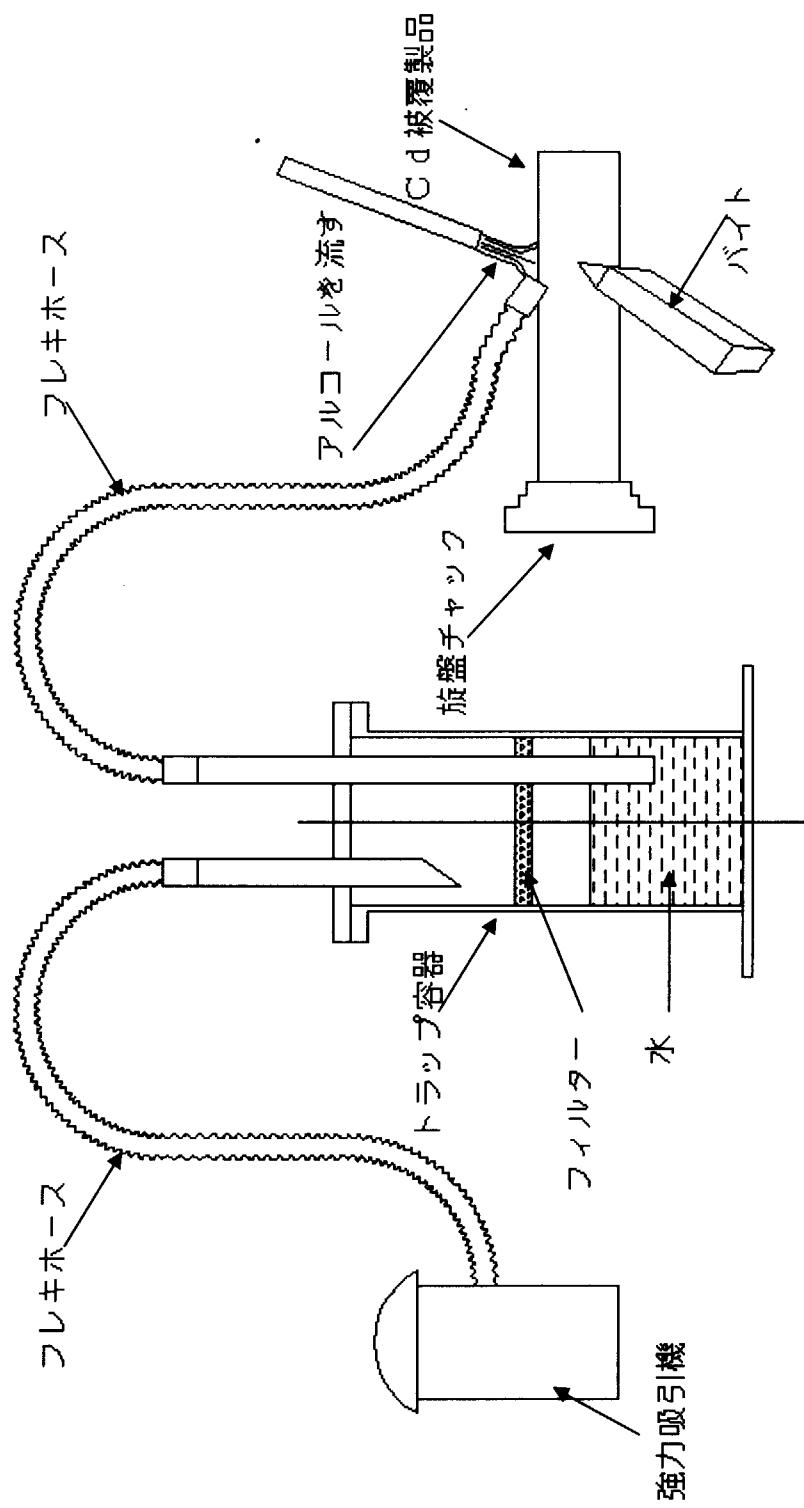
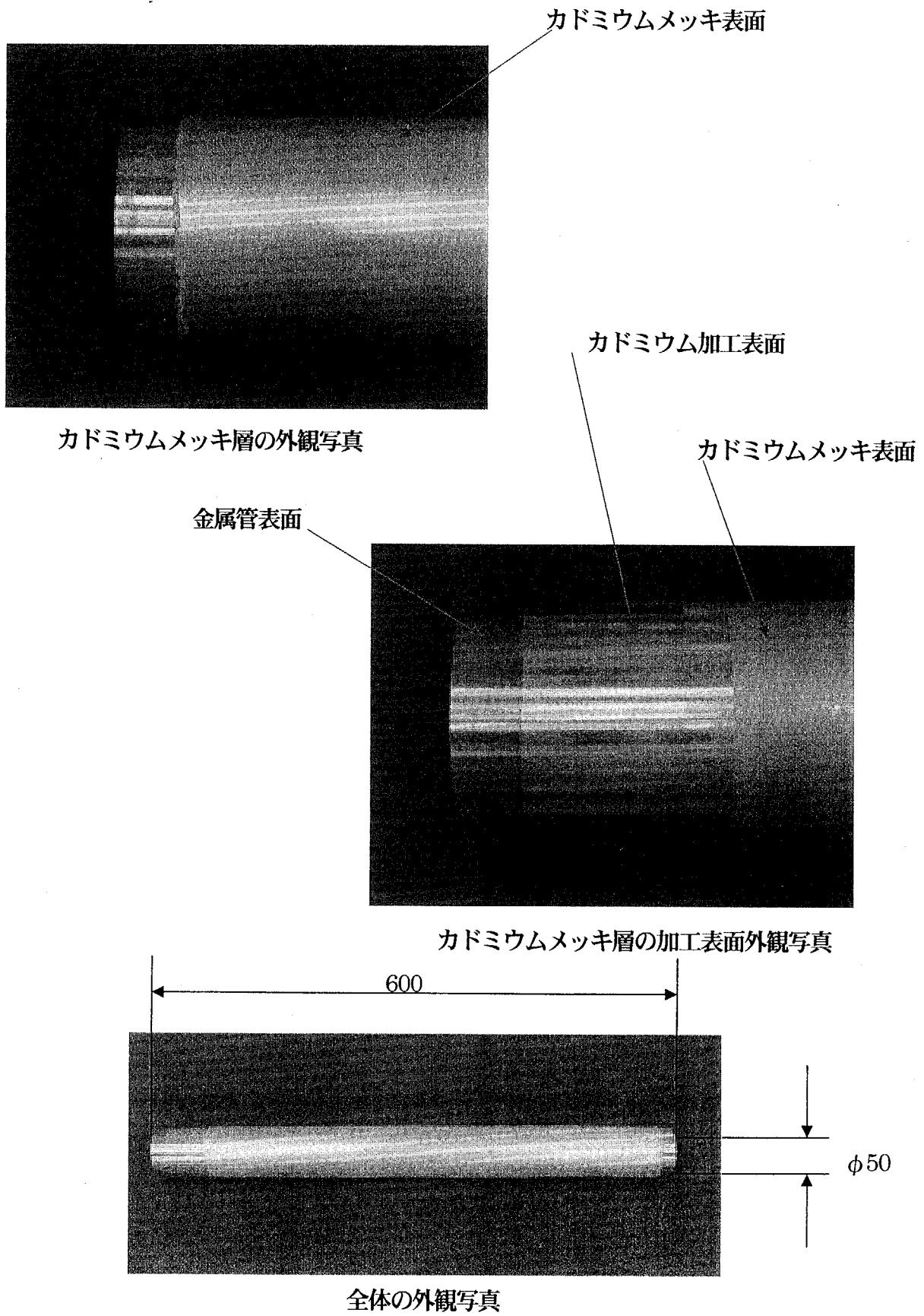


Fig.3-2 機械加工の系統図



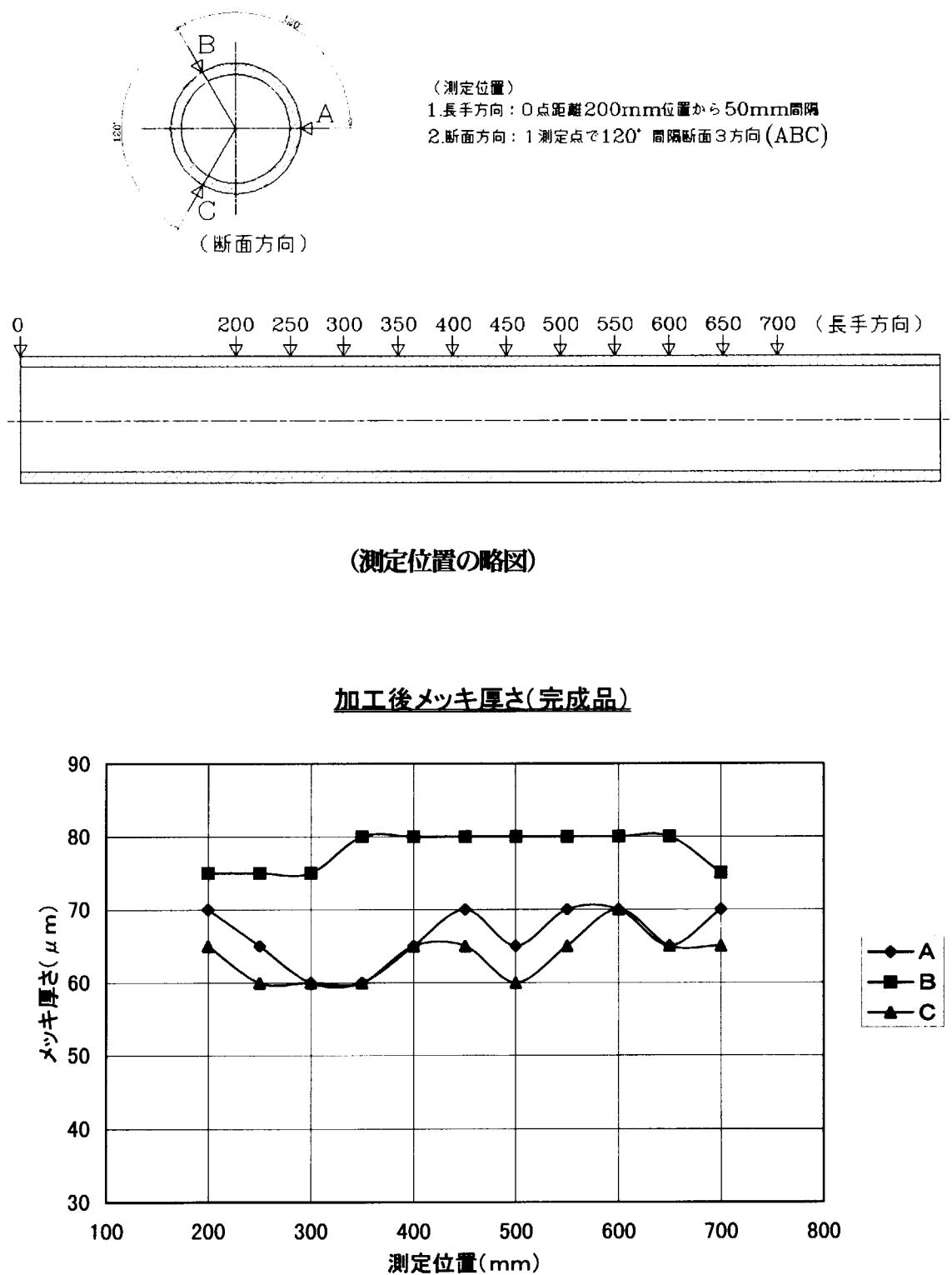


Fig.4-1 実機キャプセルのカドミウムメッキ層厚さの測定結果

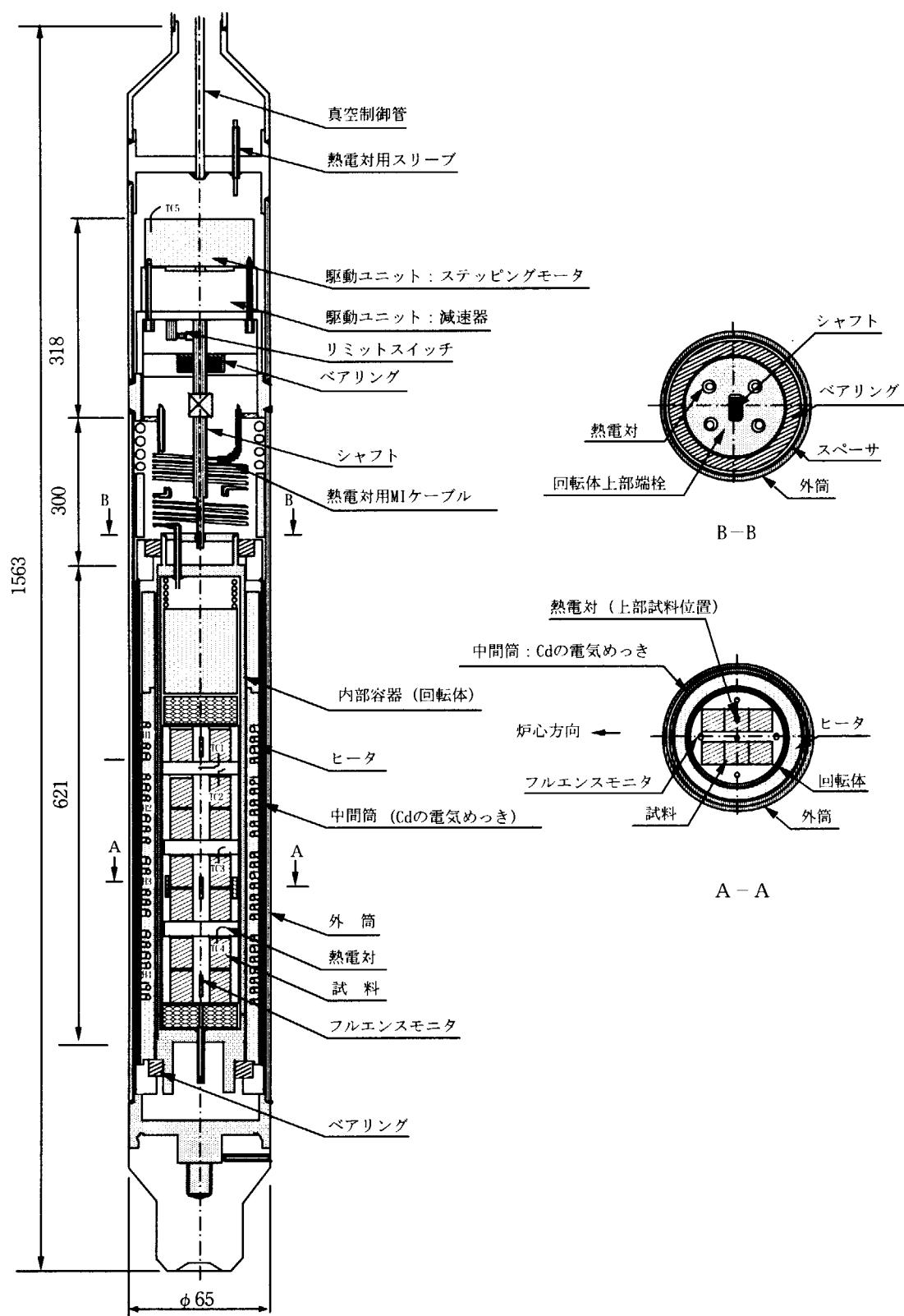


Fig.4-2 実機キャプセルの構造概略図

This is a blank page.

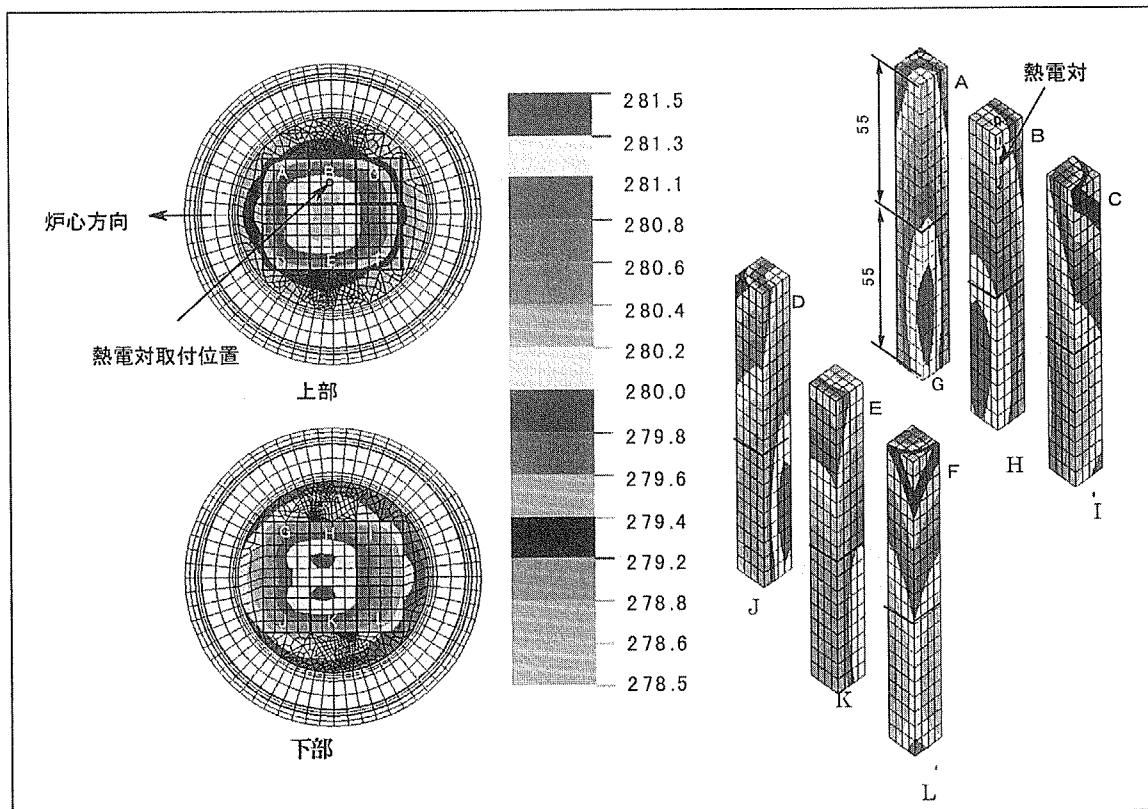


Fig.4-3 均一照射キャップセルの照射試験結果の一例

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 ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、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	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
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	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
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

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	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、ヘクタ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のカテゴリに入れている。

換算表

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

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

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

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

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100
	3.7 × 10 ¹⁰	1		0.01	1

照度	C/kg	R	照度線量	1	3876
	2.58×10^{-4}	1		2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

均一照射キヤップセル開発のための試験報告

R100

古紙配合率100%
白度70%再生紙を使用しています