

燃料照射試験用再計装機器の メカニカルシール機構の開発

Development of Mechanical Seal Structure for Reuse of Re-instrumentation
Device Used in Fuel Irradiation Test

井上 修一 山浦 高幸 斎藤 隆 石川 和義
菊地 泰二 相沢 静男 土谷 邦彦

Shuichi INOUE, Takayuki YAMAURA, Takashi SAITO, Kazuyoshi ISHIKAWA
Taiji KIKUCHI, Shizuo SOZAWA and Kunihiko TSUCHIYA

大洗研究開発センター
照射試験炉センター

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

燃料照射試験用再計装機器のメカニカルシール機構の開発

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター
照射試験炉センター

井上 修一・山浦 高幸・斎藤 隆・石川 和義⁺・菊地 泰二⁺・相沢 静男・土谷 邦彦

(2009年12月18日受理)

材料試験炉（JMTR）では、シュラウド照射装置「OSF-1」や沸騰水キャプセルを用い、発電炉で使用された燃料試料の出力急昇を伴う照射試験を数多く行った。同燃料照射に用いる燃料試料には、遠隔で行う溶接により、再計装機器を直接取付け、照射試験中オンラインで燃料試料の中心温度及びFPガス圧力を計測していた。

本開発では、再計装機器の利用効率の向上を図ることを目的に、従来の溶接の代わりに当該機器の再使用を可能にする機械的な接続方法、すなわち「メカニカルシール機構」を考案し、その構造の設計、試作及び確証試験を行った。

その結果、試作したメカニカルシール機構の試験体は、各種確証試験において良好な結果を示し、再計装機器の再利用が可能となる見通しを得た。

Development of Mechanical Seal Structure for Reuse of Re-instrumentation Device Used in Fuel Irradiation Test

Shuichi INOUE, Takayuki YAMAURA, Takashi SAITO, Kazuyoshi ISHIKAWA⁺,
Taiji KIKUCHI⁺, Shizuo SOZAWA and Kunihiko TSUCHIYA

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi,Higashibaraki-gun,Ibaraki-ken

(Received December18, 2009)

In Japan Material Testing Reactor (JMTR), there were a lot of experiments of fuel irradiation with the power ramping tests by using the shroud irradiation facility and the Boiling Water Capsule (BOCA). The fuel samples used in this irradiation tests were welded to a re-instrumentation device by remote handling and it becomes possible to measure fuel center temperature and FP gas pressure during the irradiation tests.

In this development, the mechanical connection method as "Mechanical seal structure", that enables the re-use of a re-instrumentation device, was adopted in order to improve the utilization efficiency of the device. The test samples with mechanical seal structure were fabricated and the confirmatory tests such as He leakage test, thermal cycle test, autoclave test, etc. were carried out.

As a result, the test samples with the mechanical seal structure made for trial production in this development showed an excellent result in various confirmatory tests, and obtained the prospect that re-use of the re-instrumentation device becomes possible.

Keywords : Mechanical Seal Structure, Power Ramping, Boiling Water Capsule,
Re-instrumentation Device

+ Engineering Services Department, Nuclear Science Research Institute,
Tokai Research and Development Center

目 次

1.はじめに	1
2.設計検討	1
2.1 シール材	2
2.2 初期型試験体と改良型試験体	3
2.3 締付け機構	3
3.試験方法	4
3.1 初期型試験体	4
3.2 改良型試験体	5
4.結果と考察	7
4.1 初期型試験体	7
4.2 改良型試験体	8
5.結論	9
謝 辞	9
参考文献	10

Contents

1. Introduction	1
2. Design study	1
2.1 Sealing materials	2
2.2 Initial type test sample and improvement type test sample	3
2.3 Fastening structure	3
3. Method of inspection and examination	4
3.1 Initial type test sample	4
3.2 Improvement type test sample	5
4. Result and consideration	7
4.1 Initial type test sample	7
4.2 Improvement type test sample	8
5. Conclusions	9
Acknowledgements	9
References	10

This is a blank page.

1. はじめに

軽水炉燃材料の健全性の調査に関する研究のうち、燃料に関するものについては、異常過渡時における燃料のふるまいについて評価することを目的に、JMTR に設置しているシュラウド照射装置（以下「OSF-1」という）、沸騰水キャプセル（以下「BOCA」という）等が利用されてきた^[1-2]。平成 23 年度から実施を予定している異常過渡試験は、これらを活用して燃料試料の線出力の急昇等を模擬し行うものであり、これに供する燃料試料は、発電炉等で高燃焼度まで照射された軽水炉燃料である。

同試料は、ホットラボコンクリートセル等で短尺化され再計装機器が取付けられた後、BOCA の内部へ装荷され、原子炉圧力容器内に設置した OSF-1 炉内管の内部において、異常過渡条件下の基、燃料ペレットの中心温度や被覆管内に蓄積する FP ガス圧力についてオンライン計測される。

従来、再計装機器は、溶接により燃料試料被覆管に直接取り付けていたため、当該試料の試験終了とともに利用・使用も終了していた。しかしながら、本計装機器の製作費用は非常に高価であり、燃料試料一体分の試験のみで廃棄することは非常に非効率であると言わざるを得ない。このため、同計装機器利用の効率化を図るための活用方法等について模索した結果、従来の溶接による取り付け方を改め、これにとて代わる接続方法として再利用が可能となるような機械的なシール機構が有効であるとの結論に達し、実用化に向け考案したメカニカルシール機構の開発を進めることとした。本機構を取り入れた再計装技術が確立し実用化の見通しが得られれば、再計装機器を繰返し使用することが可能となり、一体あたりの利用回数が増えることから、製作コストが大幅に削減できる上、廃棄物発生の抑制が期待できる。

本報告書は、メカニカルシール機構の考案、試験体の設計検討及び試作を行うとともに、これらを用い炉外において健全性等に係る確認、特性等を調べるための試験検査を実施し、それにより得られた結果、データについてまとめたものである。

2. 設計検討

再計装機器は、燃料ペレット中心温度を計測する W-Re の熱電対、FP ガス圧力を計測するための差動トランス、ベローズアセンブリ等から構成され、異常過渡試験に供する燃料試料の被覆管へ直接取り付けられる。ここで、BOCA 及び再計装機器の概略構造を Fig. 2-1 に示す。また、本計装機器と燃料試料被覆管との接続部に関し、従来実施してきた溶接による接続構造とメカニカルシール機構の比較について表したものを Fig. 2-2 に示す。

再計装機器を取り付けた燃料試料は、BOCA 型の燃料異常過渡試験キャプセルの外筒内に装荷するため、中間端栓開口部から挿入され、当該開口部にメタル O リングを供し下部端栓を締め

つけて格納される。その後、同キャップセルは、OSF-1 炉内管に挿入され、外筒内が BWR 条件（圧力約 8MPa、温度約 300°C）の水環境下に維持された状態で出力急昇を伴う照射試験が行われる。

このような過酷な環境下で使用されることを想定して構造を検討し、試作したメカニカルシール機構は、再計装機器側の接続部を模擬した試験体（以下「計装機器側接続管」という）と燃料被覆管側を模擬した試験体（以下「燃料被覆管」という）から成り、両者の間にメタル O リングを供し締付けナットで互いを押さえながら接続しシールする構造とした。

本機構の開発にあたっては、次の二点が主要な課題となった。一つは、燃料試料がホットラボコンクリートセルでの遠隔操作により燃料異常過渡試験キャップセルの中間端栓の開口部（最小内径 15mm）を通して外筒内へ格納されるため、その最大外径が 14.5 ミリ以下に制約されることである。もう一つは、計装機器側接続管（SUS304）、燃料被覆管（Zry-2）、締付けナット（SUS630）等、互いに接触し機構を構成する各接続パーツがそれぞれ異なる金属材料で製作されているため、各々の熱膨張係数の違いから出力急昇等による温度変化等にもたらされる伸びの挙動が一様にならないことがシール性に著しく影響することである。これらを踏まえ、詳細設計及び検討、各種試験検査を進めた。

2.1 シール材

メカニカルシール機構の設計において要となる部品はメタル O リングであり、使用条件に合わせ適切に選定することが重要となる。シール部周囲の流体の種類、温度、圧力等に応じた材質・表面被覆・形状（穴の有無等）寸法を検討し、過去の使用実績も合わせて考慮した結果、三菱電線社製のメタル O リングを採用することとした。メタル O リングの仕様データ^[5]を Table. 2-1 に示す。

一方、メタル O リングを装着する溝の設計も重要であり、溝寸法、シール面表面仕上げは、三菱電線社の推奨値を遵守した。メタル O リング装着溝の仕様^[5]を Table. 2-2 に示す。

メタル O リングの締付けトルクは、メーカによる推奨値が O リングの規格ごとに設定されている。今回採用したメタル O リングの規格は、外径 8.80 mm、チューブ径 0.89 mm、肉厚 0.25 mm、標準つぶし量 0.25 mm であり、単位長さ当たりの標準締付力は 1716N/cm である。メカニカルシール機構の嵌合部は、締付けナットの回転により締付応力を加える構造であり、実作業では、トルクレンチにより締付けられるものと想定される。そのため、単位長さあたりの締付力をネジの回転トルクに換算する必要がある。換算値は、以下の数式から求めることができるが、締付け係数（k）等の不確定な要素があるため、今回は、標準つぶし量から締付けトルクを実測する方法を考案し実行した。測定方法は、あらかじめメタル O リングを供しない状態で試験体を組立てその全長を測定し「基準寸法」を求め、その後メタル O リングを装着し、この状態から基準寸法まで徐々に締付けながら締付け量と締付けトルク値を実測した。

試験体締め付け寸法と締付けトルクの値を Table. 2-3 に、試験体の放射線透過写真を Photo. 2-3 に示す。

【単位長さあたりの締付力を回転トルクに換算する計算式】

$$T_f = K \times d \times F_f$$

T_f : 回転トルク値

K : 締付け係数

d : ネジの呼び径 (cm)

F_f : 単位長さ当たりの締付けトルクを実際の長さに換算した値

なお、本開発では、締付けトルクの強弱による優劣を判定するため、メーカ推奨の適正締付けトルク値以外に、適正締付けトルク値の2割減、2割増しの値を設け、合計3通りの締付けトルクを設定し、それらを各試験体に振り分けシール性を確認する試験を行った。

2.2 初期型試験体と改良型試験体

開発当初に考案した試験体（以下、「初期型試験体」という）は、各種性能試験を重ねるにつれ、熱サイクル負荷を与えた時に課題があることが明らかとなった。原因是、メカニカルシール機構を構成する各部品が同一の金属材料で製作されていないため、熱膨張係数※の違いから温度変動によって接触面に僅かな隙間が生じてシール性が損なわれると推測され、機械的な要因が支配的であると考えられた。このことから、本事象を解決するため新たに設計検討を加え、「改良型試験体」を試作して試験開発を進めることとした。

改良型試験体は、それぞれ異なった金属材料で製作した部品を機械的に接続する場合でも、それぞれの熱膨張係数の差により発生するゆるみ等を防止するため、締付けナット内側に「熱膨張緩和リング」を追加したものである。

初期型試験体の詳細図をFig. 2-3に、改良型試験体の詳細図をFig. 2-4に、また、初期型試験体の外観をPhoto. 2-1に、改良型試験体の外観をPhoto. 2-2に示す。

※at 600K/300Kにおける熱膨張係数^[3]

SUS304 : 17.2×10^{-6} (/K)

Zry-2 : 5.67×10^{-6} (/K)

(伝熱工学資料 改訂第4版/ 日本機械学会より)

※at 300°Cにおける熱膨張係数^[4]

SUS630=オーステナイト系ステンレス鋼(区分2) : 10.66×10^{-6} (/°C)

(発電用原子力設備規格 2005年版〈第1編 軽水炉規格〉より)

2.3 締付け機構

メカニカルシール機構は、計装機器側接続管(SUS304)と燃料被覆管(Zry-2)の間にメタルOリングを供し、締付けナット(SUS630)で互いを締付け接続する構造である。締付けナットは、締付抵抗の低減及びネジ部のかじり防止のため、ネジ部にデフリックコート処理を施し

ている。また、締付けナット内部には、締付けの際、燃料被覆管（Zry-2）の共回りによってメタルOリングの表面に傷が付くことを防止するため、2枚のワッシャー（SUS304）を設けている。

改良型試験体では、2枚のワッシャーの間に熱膨張緩和リングを供し、締付けナットの緩み防止措置を講じている。熱膨張緩和リングは、メタルOリングが適正なつぶし量が得られるようしなければならいため、メタルOリングと同等あるいはそれ以上の締付け力で機能するものでなければならない。よって、当該リングは、メタルOリングよりも外径の大きいもの（線径は同一）を採用した。

3. 試験方法

以上の設計検討を行い、試作を完了したメカニカルシール機構の初期型試験体及び改良型試験体について、そのシール部分の健全性及び耐久性を確認した。

3.1 初期型試験体

考案したメカニカルシール機構を忠実に模擬した試験体を設計製作し、以下の試験検査を行った。試験条件は、実際に燃料異常過渡試験キャップセル外筒内で燃料試料の出力急昇等を伴った異常過渡試験を想定した。また、再計装機器の再利用の成立性を確認するため、繰り返し嵌合及び分解を行い、その都度試験体接触面のシール性を確認した。

① 締付けトルクの設定

締付けトルクの強弱による優劣の判定を行うことを目的に、試験体の締付けトルクを標準値、標準値の2割減、標準値の2割増しの3通りに設定した。これに伴い各試験検査で使用する試験体数を3とした。

② ヘリウム漏れ試験

試験体に設けた「接続管」をヘリウム漏れ試験機に接続し、真空外覆法にてヘリウム漏れ量を測定し、漏れ量が $1 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下であることを確認した。ヘリウム漏れ試験方法の概略図をFig. 3-1に、またPhoto. 3-1及び3-2にヘリウム漏れ試験状況を示す。

③ 热サイクル試験

試験体を密閉した不活性ガス容器を電気炉に装荷し、室温 \Rightarrow 380°C \Rightarrow 340°C \Rightarrow 380°Cの温度変更を3回繰り返し行った後、同容器から試験体を取り出し、ヘリウム漏れ試験により気密の維持、シール部の健全性の確認を行った。判定基準を3.1 ②項に示す。熱サイクル試験方法の概略図をFig. 3-2に、熱サイクル試験状況をPhoto. 3-3に、電気炉及び不活性ガス容器をPhoto. 3-4に、不活性ガス容器内の試験体配置をPhoto. 3-5に示す。

④ 耐圧漏洩試験（内圧）

試験体を水中に沈め、接続管から窒素ガスで 10MPa まで加圧し、試験体のシール部から放出される気泡により漏洩の有無を確認した。耐圧漏洩試験（内圧）方法概略図を Fig. 3-3 に、また、耐圧漏洩試験（内圧）状況を Photo. 3-6 に示す。

⑤ 耐圧漏洩試験（外圧）

接続管を止栓で密閉した試験体を耐圧容器に収納し 15MPa の水圧で 30 分間加圧し、その後、耐圧容器より試験体を取り出し、変形等の有無を目視にて確認した。また、シール部を開放し試験体内部への浸水の有無を確認した。耐圧漏洩試験（外圧）方法概略図を Fig. 3-4 に、耐圧漏洩試験（外圧）状況を Photo. 3-7 に、耐圧漏洩試験容器内の試験体配置を Photo. 3-8 に示す。

⑥ 繰返し嵌合試験

試験体シール部の接続・解放を 4 回繰返し、接続毎にヘリウム漏れ試験を行う。実践の使用条件を模擬するため、メタル O リング及び燃料被覆管は、その都度新品に交換するが、計装機器側接続管は、同一品を繰り返し用い O リングとの接触面の耐久性について確認した。ヘリウム漏れ試験の判定基準を 3.1 ②項に示す。繰返し嵌合試験方法の概略図を Fig. 3-5 に、繰返し嵌合試験体の締付け状況を Photo. 3-9 に示す。

⑦ オートクレーブ試験

接続管を止栓で密閉した試験体をオートクレーブ試験装置の試験容器内に装荷し、容器内の圧力を大気圧から 8MPa まで昇圧、温度を常温から 300°C まで昇温し、一定時間（約 30 分間）保持した。その後、再び大気圧及び常温まで降圧及び降温を行い、オートクレーブ試験装置の試験容器より試験体を取り出し、止栓部を開封して浸水の有無を目視により確認した後、ヘリウム漏れ試験を行い、気密の健全性を確認した。ヘリウム漏れ試験の判定基準を 3.1 ②項に示す。なお、本試験で接続管の止栓に使用したスエージロックとその接続部の密封に係る機能の健全性確認を行うため、別途模擬試験体を製作し検証を行った。

オートクレーブ試験方法の概略図を Fig. 3-6 に、オートクレーブ試験装置外観及び試験体装荷状態を Photo. 3-10 に、接続管止栓（スエージロック）の模擬試験体を Photo. 3-11 に示す。

3.2 改良型試験体

初期型試験体の試験結果では、高温高圧水条件下で実施したオートクレーブ試験から、締付けトルク量をパラメータに割り当てた 3 種類の試験体の内、2 体（標準値、標準値の 2 割減）に浸水が確認されたが、それ以外の試験検査については、良好な結果が示された。

これを改善するために新たに試作された改良型試験体には、材料が異なることによる熱膨張

率差によってもたらされるシール部のゆるみを解消するため、熱膨張緩和リングを追加した。よって、本試験体については、オートクレーブ試験装置を用いた熱サイクル負荷を与える試験等に重点を置いて行った。

なお、接続管への止栓をより確実に行うため溶接にて密封した。

試験体の溶封状態と溶封部の放射線透過写真を Photo. 3-12 に示す。

① 締付けトルクの設定

初期型試験体について実施した各試験検査の結果、オートクレーブ試験を除き良好な健全性等が示されたため、改良型試験体について以下の各試験検査を行うにあたっては、締付けトルクを標準値のみに設定した。

② オートクレーブ試験（熱サイクル1回）

メカニカルシール機構を構成する互いの部材の材質が異なることにより、熱膨張係数差によって接続部にゆるみが生じ、これが原因で本機構のシール性に影響を及ぼすと考えられることを明らかにするため、本試験では、計装機器側接続管と燃料被覆管を SUS304 で製作した「比較用試験体」を別途準備し、新たに試作した改良型試験体と同一の条件で比較試験を行い検証することとした。

試験内容は、双方の試験体の接続管を溶封し、これらを水で満たした試験容器内に沈め、オートクレーブ装置により高温・高圧（295°C、8MPa）で一定時間（約 30 分間）保持した後、常温、大気圧に戻し、その後取出した両試験体について浸水の有無を調べるとともに、ヘリウム漏れ試験により気密の維持、シール部の健全性の確認を行う。ヘリウム漏れ試験の判定基準を 3.1 ②項に示す。

③ オートクレーブ試験（熱サイクル3回）

上記②の試験結果から、熱膨張係数の違いにより本機構に発生するゆるみを解消するには、締付けナットの内部に弾性効果を持たせた熱膨張緩和リングを追加することが効果的であることが明らかとなった。

本試験では、以上の改良を加えた本機構に関し、更なる有効性を確認するため、異常過渡試験と同等の水環境条件下で行うこととし、100°C⇒300°C⇒100°C の熱サイクルを連続 3 回繰り返し上記②と同様の圧力条件でオートクレーブ試験を実施した。その後、試験装置から試験体を取り出し、浸水の有無を調べるとともに、ヘリウム漏れ試験により気密の維持、シール部の健全性の確認を行った。ヘリウム漏れ試験の判定基準を 3.1 ②項に示す。なお、試験体は、改良部分の信頼性を確認するため 2 体用いることとする。

4. 結果と考察

「3. 試験方法」に従い、初期型試験体及びその後メカニカルシール機構の一部に改良を加えた改良型試験体について、当該シール部分の健全性、耐久性を確認する各種試験検査を行った結果及びその考察について以下に記す。

4.1 初期型試験体

① ヘリウム漏れ試験結果

締付けトルクをそれぞれ標準値、標準値の2割減、標準値の2割増に設定した各試験体のヘリウム漏れ量を測定した。試験結果をTable. 4-1に示す。その結果、全ての試験体について、 $1 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下であり、本締付けトルクで気密性を確保できることが明らかになった。

② 熱サイクル試験結果

締付けトルクを標準値、標準値の2割減、標準値の2割増に設定した各試験体に所定の熱サイクル負荷を加え、その後それぞれヘリウム漏れ量を測定した。ヘリウム漏れ試験結果をTable. 4-1に、熱サイクル試験温度履歴をFig. 4-2に示す。その結果、全ての試験体について、 $1 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下であり、気密性を確保できることが明らかになった。

③ 耐圧漏洩試験（内圧）結果

試験体を水中に沈め、窒素ガスにて内部を10MPaまで加圧した結果、締付けトルクをそれぞれ設定した全ての試験体について、シール部からの気泡の放出は観測されなかった。試験結果をTable. 4-1に示す。このことから、全ての締付けトルク条件で気密性を確保できることが明らかになった。

④ 耐圧漏洩試験（外圧）結果

試験体を耐圧容器内に装荷し水圧15MPaで30分間加圧した結果、締付けトルクをそれぞれ設定した全ての試験体について、外観上のつぶれ等の変形は無く、試験体内部への浸水は認められなかった。試験結果をTable. 4-1に示す。このことから、全ての試験体が気密性を確保できることが明らかになった。

⑤ 繰返し嵌合試験結果

試験体シール部の接続・解放を4回繰返し、接続毎にヘリウム漏れ試験を行った結果、それぞれのトルク量で締付けを繰り返した試験体について、ヘリウム漏れ量は全て $1 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下であり、気密性を確保していることを確認した。試験結果をTable. 4-1

に示す。このことから、少なくとも4回の着脱に対しては、0リング溝のリング当り面を修正することなく健全な気密状態を確保できることが明らかとなり、繰返し接続、分解できることを確認した。

⑥ オートクレーブ試験結果

オートクレーブ試験装置の試験容器内に試験体を装荷し、容器内の圧力を8MPa、温度を295°Cまで昇温昇圧して一定時間（約30分間）保持し、その後取出して諸々調べた結果、標準値の2割減のトルク値で締付けた試験体は、浸水は認められなかったものの、他の2つの異なるトルク値（標準値、標準値の2割増）で締付けた試験体についてはシール部からの浸水が認められた。一方、それらの試験体すべてについてヘリウム漏れ試験を行った結果からは、全ての試験体についてヘリウム漏れ量が $1 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下であり、気密性が維持されていることを確認した。試験結果をTable. 4-2に、本試験において使用した接続管止栓（スエージロック）の健全性確認試験結果をTable. 4-3に示す。

以上のことから、初期型試験体については、周囲の水環境が高温、高圧へ変化していく過程で、材質の違いから生じる熱膨張係数差によりメカニカルシール機構のシール部接触面に隙間が生じ、一旦気密状態が破壊されるものの、その後、常温、大気圧の初期状態に戻ると当該熱膨張係数差が解消し気密性が回復していくと推定された。

4.2 改良型試験体

① オートクレーブ試験（熱サイクル1回）

初期型試験体に改良を加えるため熱膨張緩和リングを追加した「改良型試験体」と、計装機器側接続管と燃料被覆管と共にSUS304で製作した「比較用試験体」について、「初期型試験体」と同様、高温及び高圧（300°C、9MPa）の水環境下でオートクレーブ試験を行った結果、両試験体共にシール部からの浸水は認められなかった。また更に、両者についてヘリウム漏れ試験を行い、漏洩量が $1 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下であったことから、気密性が維持されていることを確認した。試験結果をTable. 4-4に示す。

本試験の結果、双方の試験体は、高温高圧の水環境下に置かれてもシール性が確保され共に浸水が無かったことから、予想通り、シール部からの浸水の原因は、メカニカルシールを構成する計装機器側接続管と燃料被覆管が異なる金属材料で製作されているため、熱膨張係数差が起因して機構内にゆるみが生じ互いの接触面に隙間が生じることによるものであることが分かった。更に、本機構に熱膨張緩和リングを追加することで、高温高圧へ変化する過酷な水環境にも対応可能となり、シール性の向上が確認できた。

② オートクレーブ試験（熱サイクル3回）

異常過渡試験と同等の水環境条件下でメカニカルシール機構の有効性を確認するため、改良型試験体を2体準備し、 $100^\circ\text{C} \Rightarrow 300^\circ\text{C} \Rightarrow 100^\circ\text{C}$ の熱サイクルを連続で3回繰り返し上記①と同様の圧力下でオートクレーブ試験を実施した結果、オートクレーブ装置

から取出した後、両試験体共にシール部からの浸水は認められず、また、ヘリウム漏れ試験を行い、ヘリウム漏れ量が $1 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下であったことから、熱サイクル負荷を加えている時及び加えた後において、試験体シール部の気密性が健全であることを確認した。

試験結果を Table. 4-5 に圧力及び熱サイクル温度履歴 Fig. 4-6 に示す。

5. 結論

燃料異常過渡試験キャップセルに装荷し、異常過渡試験に供する燃料試料に直接接続して使用する再計装機器の再利用を実現するため、メカニカルシール機構を考案し、これを反映した初期型試験体及び改良型試験体を試作するとともに、これらを用いた各種試験検査を実施した結果、以下のことが分かった。

メカニカルシール機構を構成する計装機器側接続管（SUS304）と燃料被覆管（Zry-2）は異なる材質であるため、熱膨張係数が異なることによって環境温度が変化する過程では一様な熱膨張とならず、これにより本機構の締付けネジ部に緩みが発生するとともに、シール部である両者の接触面に隙間が生じることが明らかとなった。また、試験体の締付けトルク値をパラメータとして実施したヘリウム漏れ試験、繰返し嵌合試験等の結果から、メカニカルシール機構で適切に接続するには、0 リングの適正な潰し量を確保する締付け力の 0.8 倍から 1.2 倍の間のトルク値によって締付けを行えば十分可能であることが確認された。

一方、改良型試験体について実施したオートクレーブ試験等により、異常過渡試験のような熱サイクル負荷を加えられる高温、高圧の水環境下では、気密保持を担うメタル 0 リングの他に、熱膨張係数差を緩和するためのリングを本機構の締付けネジ部内側に追加することで、締付けネジ部の緩みや接触面に生ずる隙間を解消できることが分かった。

以上より、本開発で考案し試作したメカニカルシール機構は、炉外環境に限定されるものの、各種試験検査によって異常過渡試験と同様の水環境下でもシール部の健全性及び耐久性が示され、燃料試料の再計装技術として採用できる見通しを得た。

今後は、再計装機器の再利用の実現に向け、炉内環境において改良型試験体をベースに同様な試験検査を行うこととし、照射による影響を確認して異常過渡試験におけるメカニカルシール機構の更なる実現化を目指す計画である。

謝 辞

本開発にあたり、照射試験炉センター 河村 弘センター長及び石原正博副センター長、原子炉施設管理部 新見素二部長及び神永雅紀次長に有意義なご指導及びご助言を頂きました。また、本報告書をまとめる上で齋藤順市技術主幹のご助言を頂きました。さらに、長尾美春

JMTR 原子炉主任技術者には、本メカニカルシール機構の原子炉内の利用についてのご助言、ご指導、及びメカニカルシール機構の特性評価試験にあたり、照射試験開発課諸氏には多大なご協力を頂きましたことを深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 日本原子力研究所 大洗研究所 材料試験炉部 編、「JMTR 照射ハンドブック」, 1994 年 4 月第 5 版改訂.
- [2] JAERI-Review 2002-007 「JMTR を利用した研究成果」2002 年 3 月.
- [3] 伝熱工学資料 改訂第 4 版/ 日本機械学会.
- [4] 発電用原子力設備規格 2005 年版 〈第 1 編 軽水炉規格〉.
- [5] 三菱電線工業株式会社 メタル 0 リングカタログ No.76 制定 1996 改 1999.

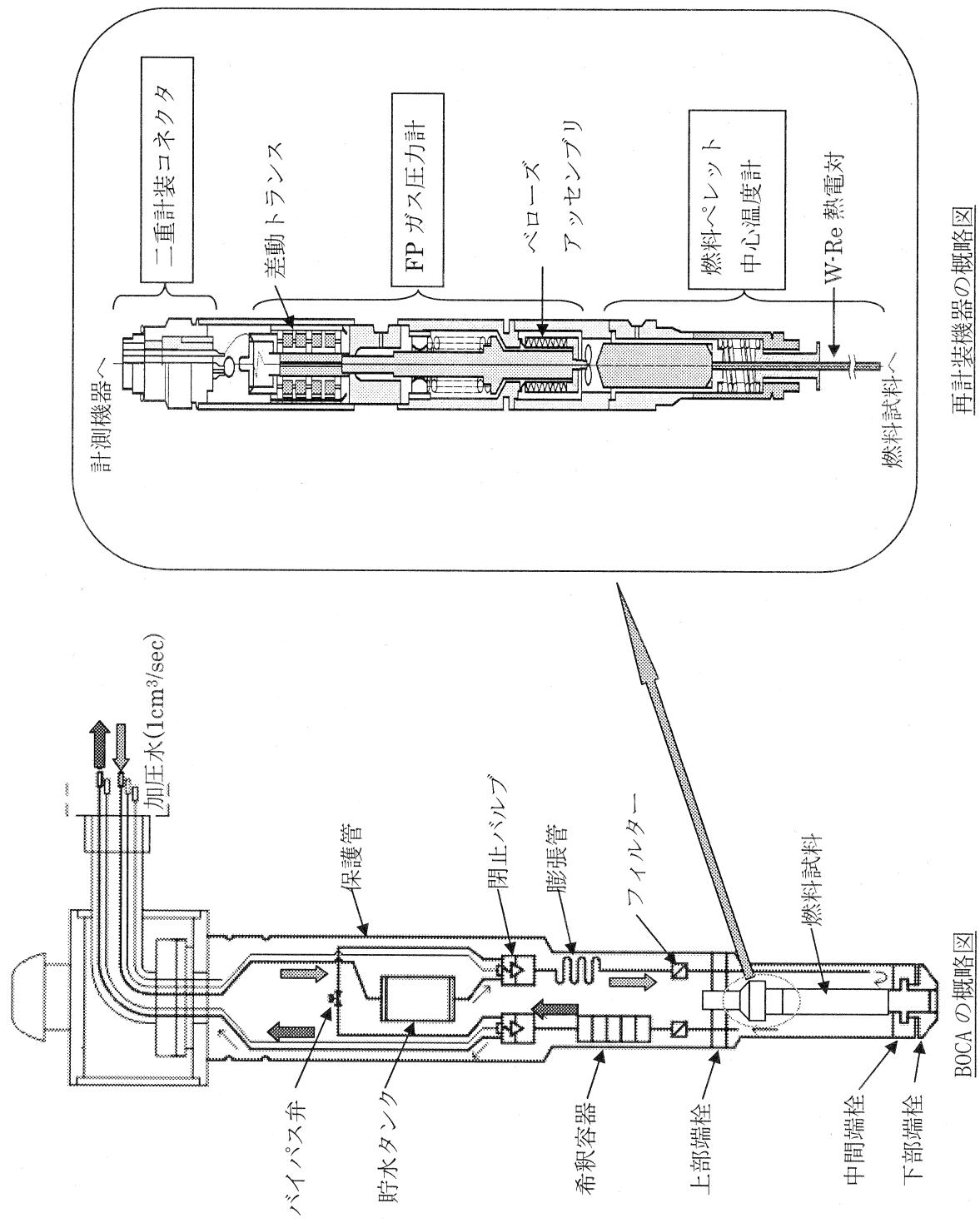


Fig. 2-1 BOCA 及び再計装機器の概略構造

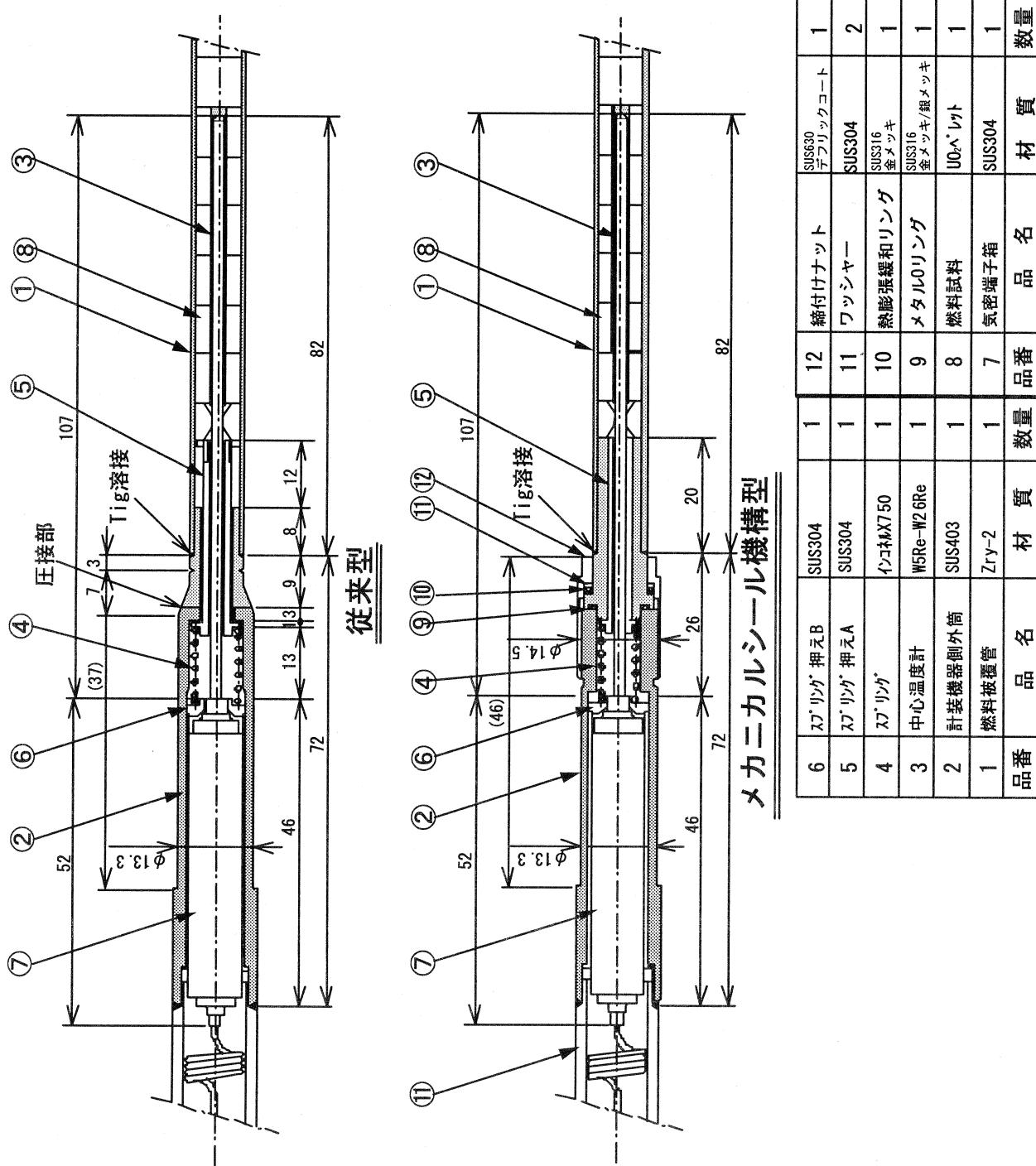


Fig2-2 従来型とメカニカルシール機構型の比較図

Table 2-1 メタルOリングの仕様データ

メタルOリングの種類						使用条件:	
材質 (表面被覆材)	寸法			標準潰し量 [mm]	密封対象流体	圧力 [Pa]	温 度 [°C]
	Wa・Wb [mm]	OD [mm]	t [mm]				
SUS316L (金/銀)	0.89	8.80 (シール用)	0.25	1716	0.25 ・高压ガス ・高温高压水	39M~1.3×10 ¹⁰	-270~-+500
	1.037 (熱膨張緩和用)						

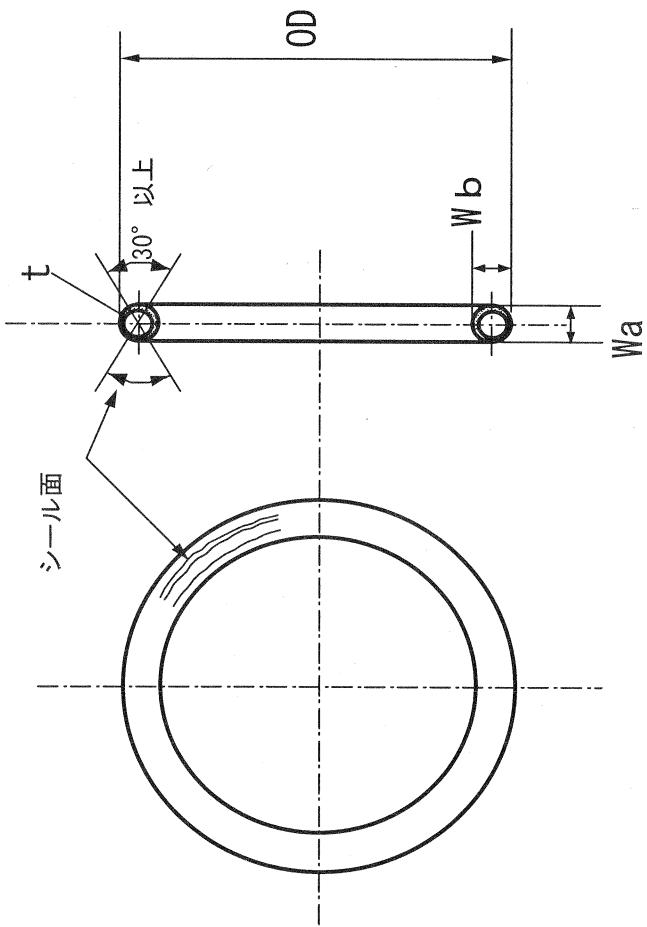


Table.2-2 メタルOリング溝仕様データ

Oリング寸法[mm]		Oリング溝寸法[mm]			
チューブ径	Oリング外径	ID	K	L	R
0.89	8.80(シール用)	0	0.65° ±0.05	1.8(1.4以上)	0.25以下 1.6S
	10.37(熱膨張緩和用)	(Dmin-1.86)-0.15			

Dmin=Oリング外径下限値

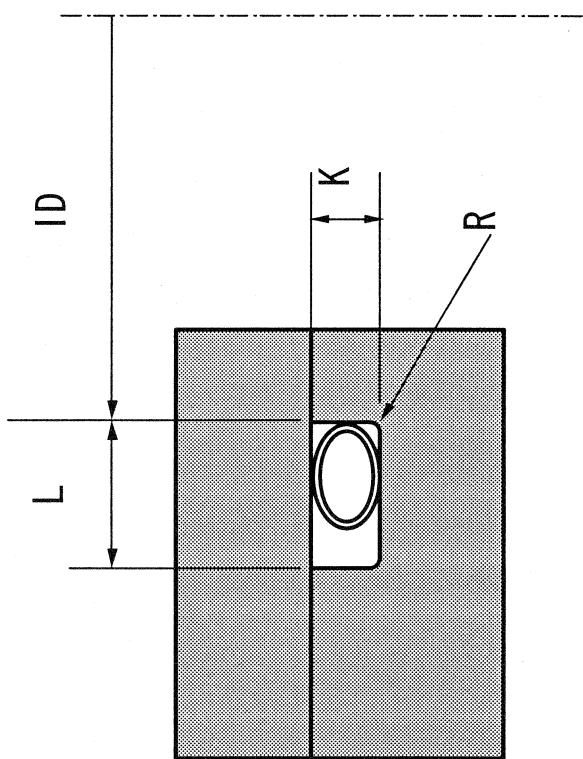


Table. 2-3 試験体締め付け寸法と締付けトルク値

試験体タイプ	初期型試験体					
	標準トルク			標準トルクの2割減		
○ リング未装荷状態の 試験体嵌合寸法[mm]	X	41.80	平均	X	41.80	平均
	Y	41.79		Y	41.82	
○ リング装荷状態の締付け前試験体 嵌合寸法[mm]	X	42.15	平均	X	42.20	平均
	Y	42.15		Y	42.18	
○ リング装荷状態の締付け後試験体 嵌合寸法[mm]	X	41.80	平均	X	42.01	平均
	Y	41.82		Y	42.01	
実測値[N/cm]	15.5			—		
計算より導いたトルク[N/cm]	—			12.4	18.6	

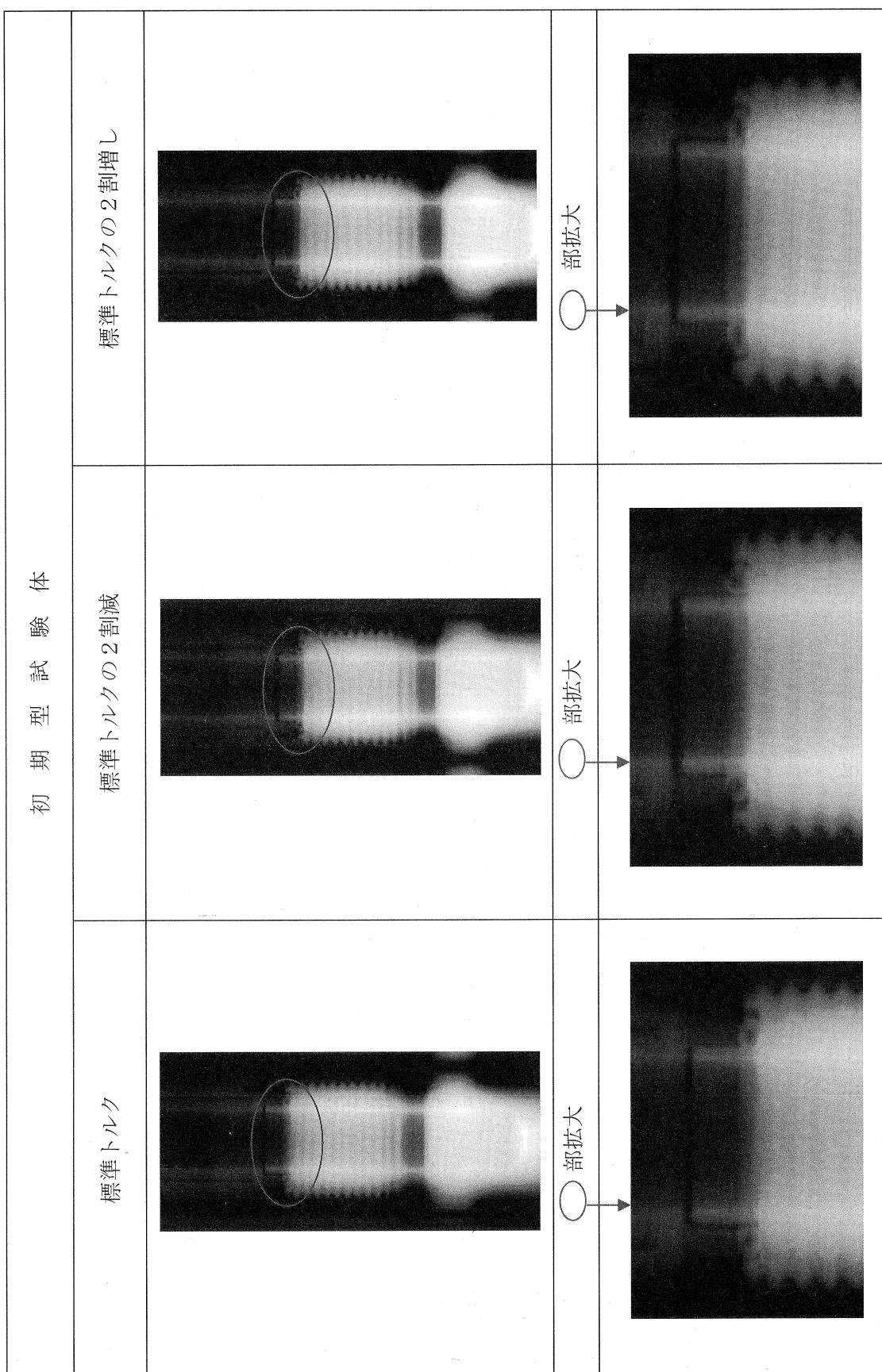


Photo. 2-3 試験体の放射線透過写真

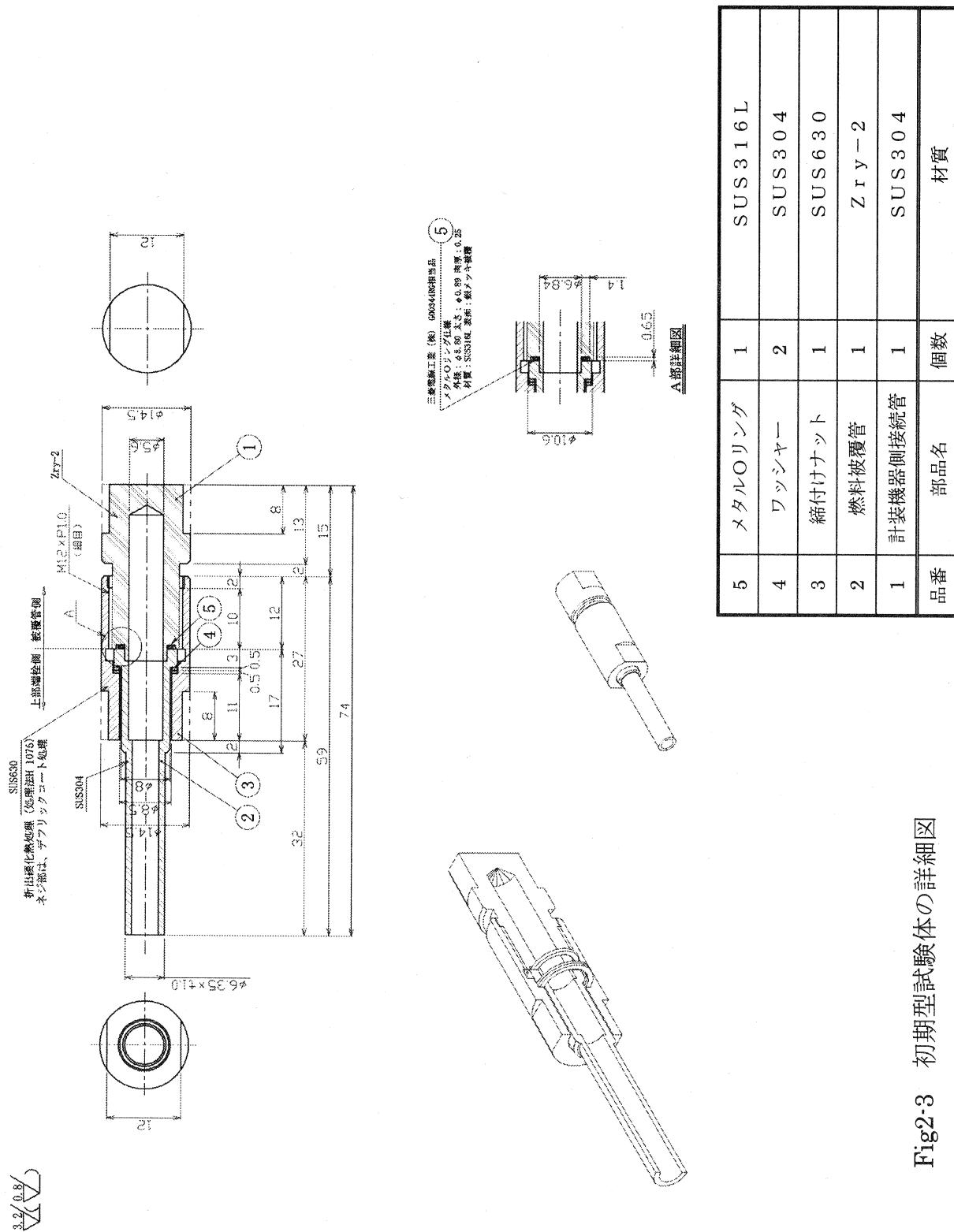


Fig2.3 初期型試験体の詳細図

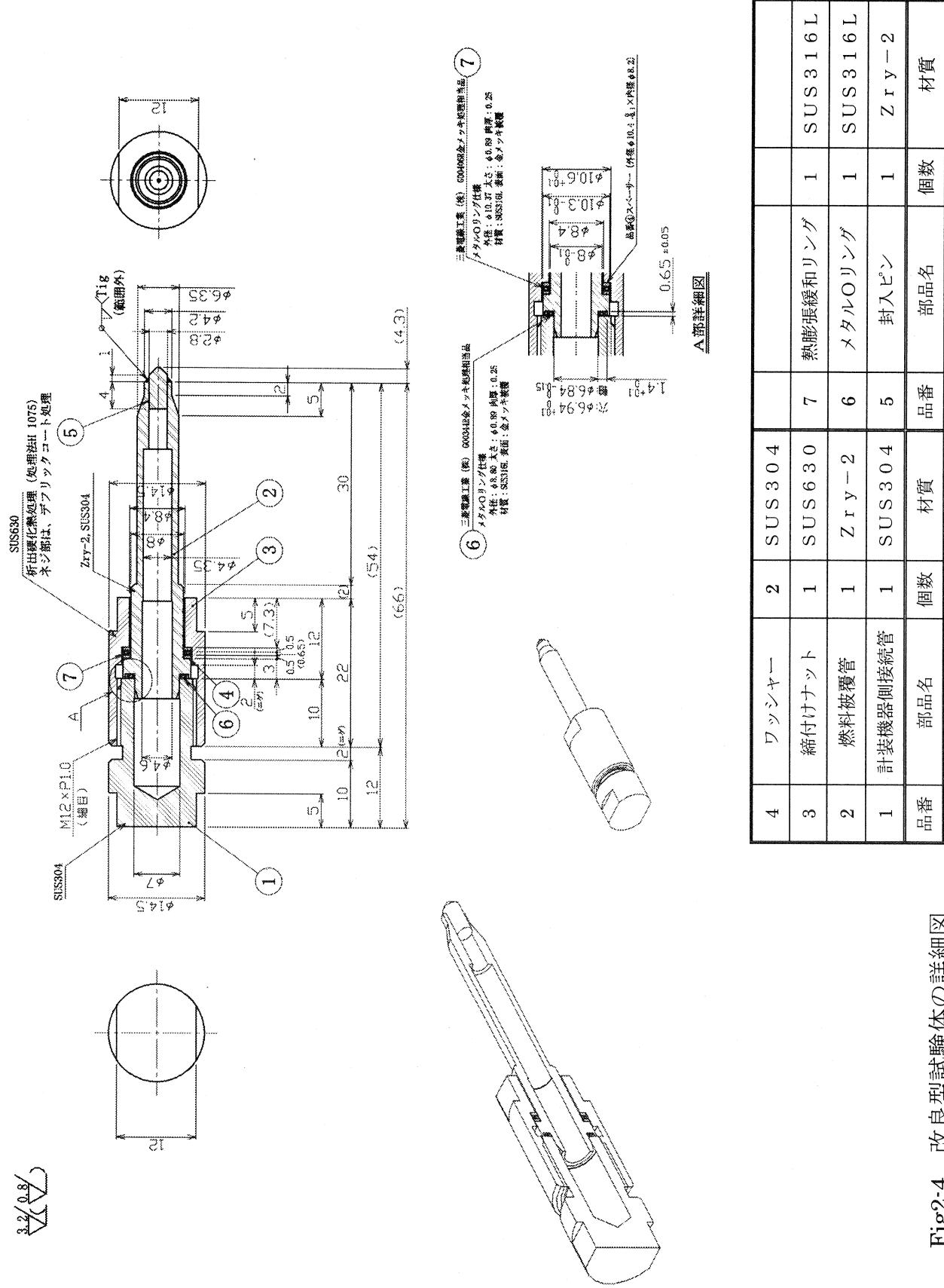


Fig2-4 改良型試験体の詳細図



Photo.2-1 初期型試験体

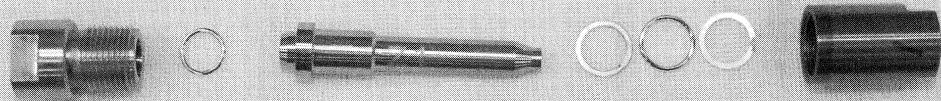


Photo.2-2 改良型試験体

ヘリウム漏れ試験

- ①試験体
- ②ポリシート
- ③He リーク試験器

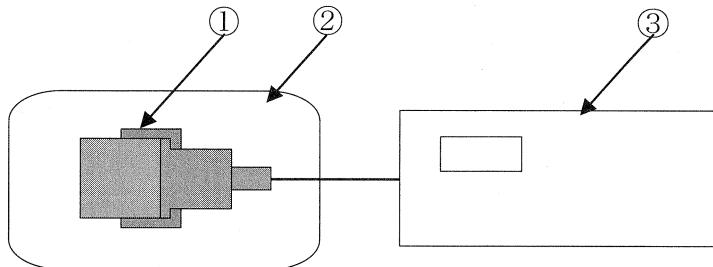


Fig.3-1 ヘリウム漏れ試験方法概略図



Photo.3-1 ヘリウム漏れ試験状況

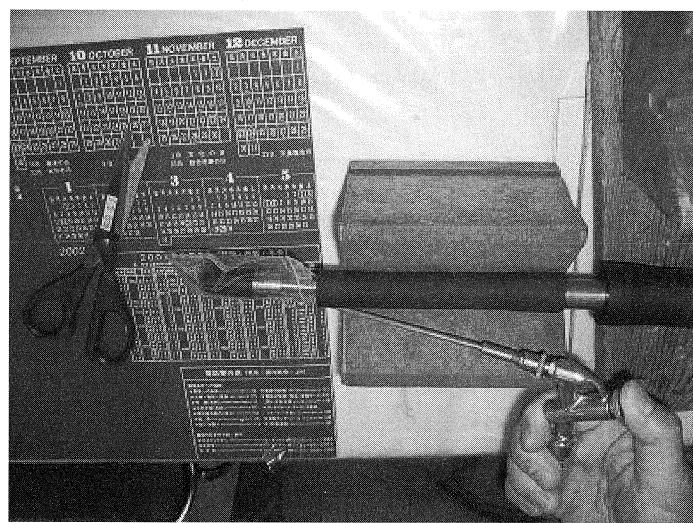


Photo.3-2 ヘリウム漏れ試験状況

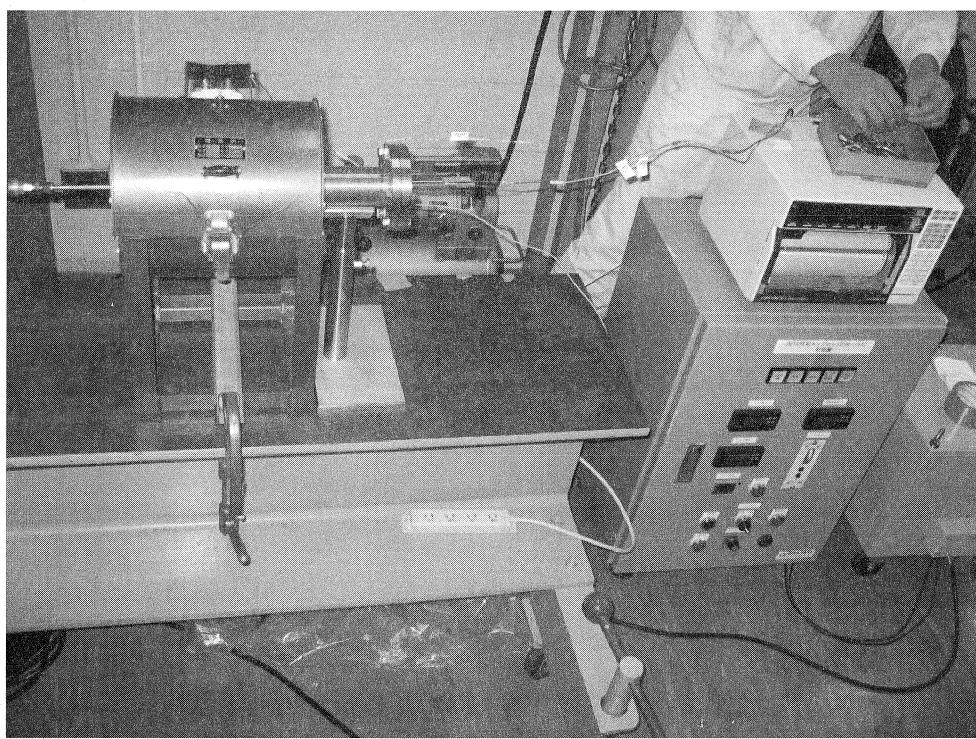
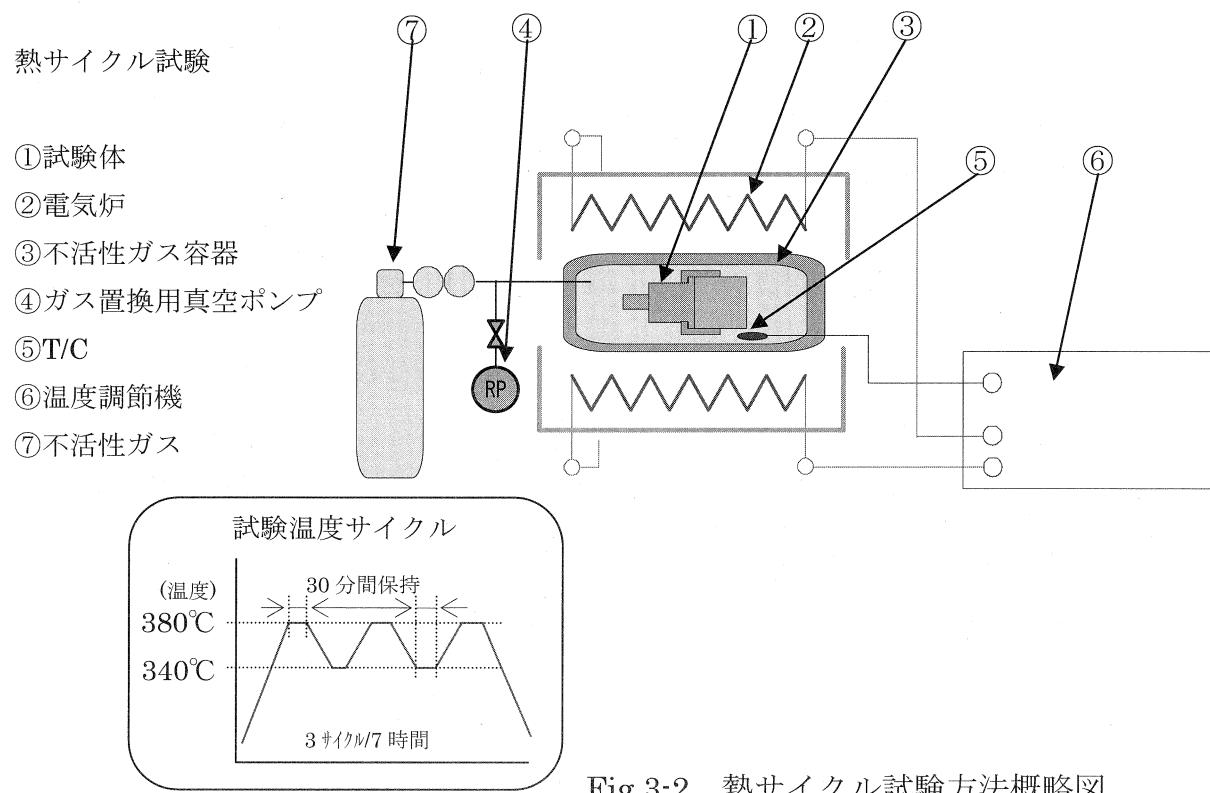


Photo.3-3 热サイクル試験状況

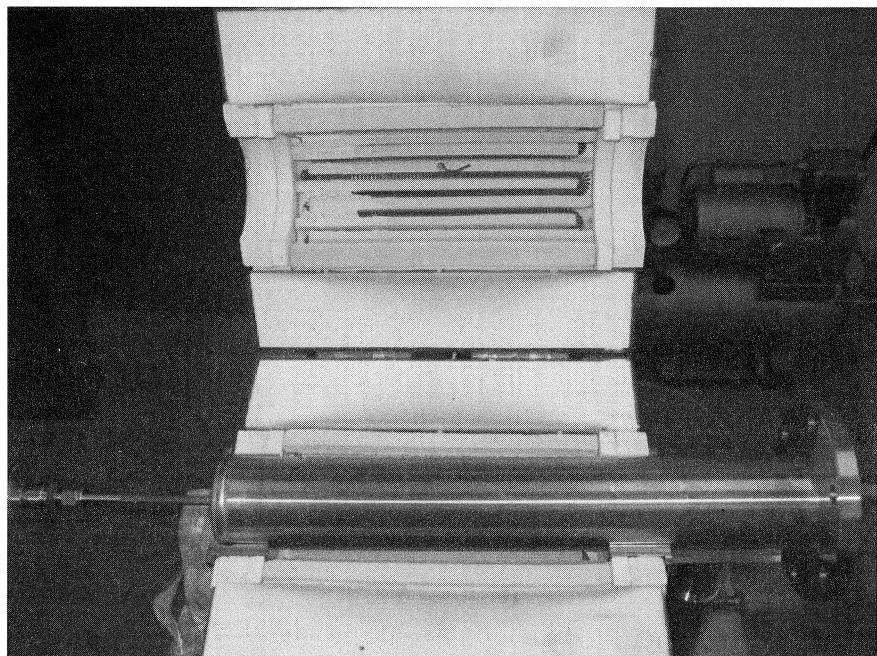


Photo.3-4 電気炉、不活性ガス容器

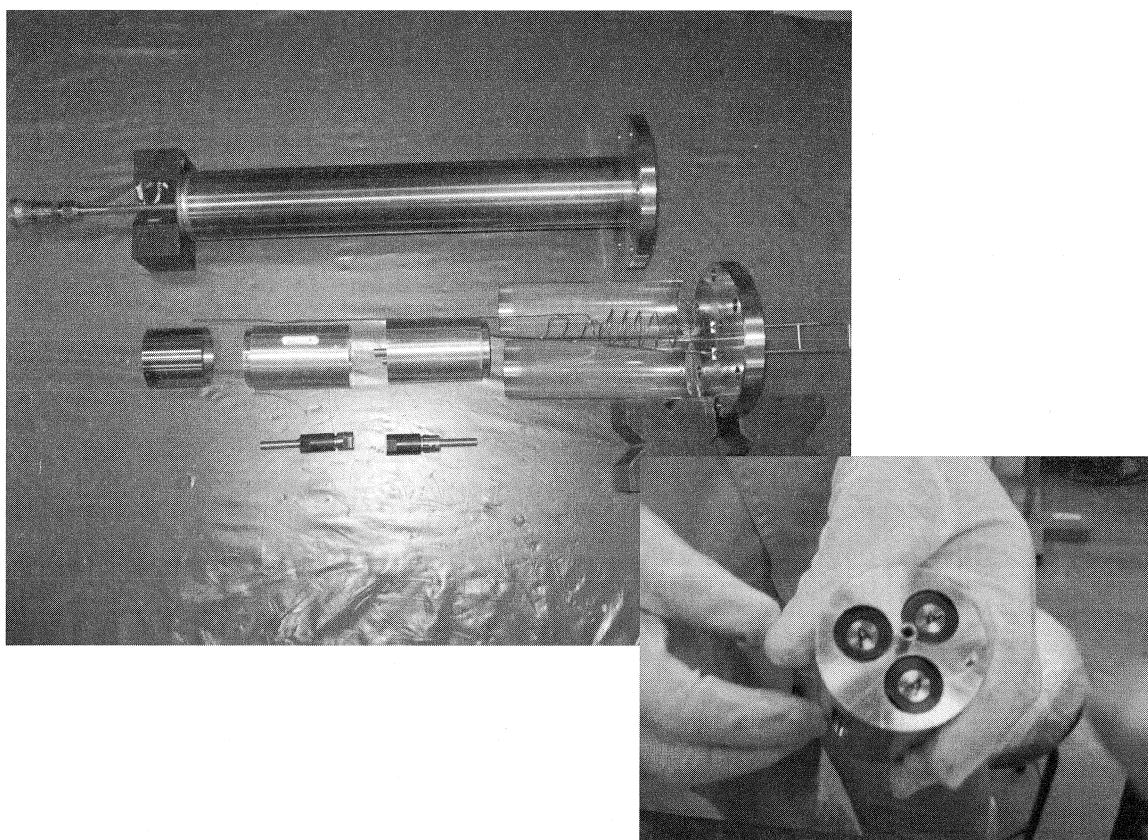


Photo.3-5 不活性ガス容器内の試験体配置

耐圧漏洩試験（内圧）

①試験体

②圧力計

③加圧用ガス（窒素）

④純水

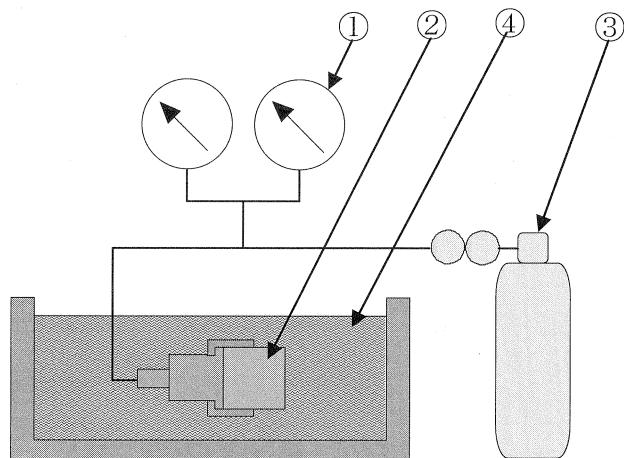


Fig.3-3 耐圧漏洩試験（内圧）方法概略図

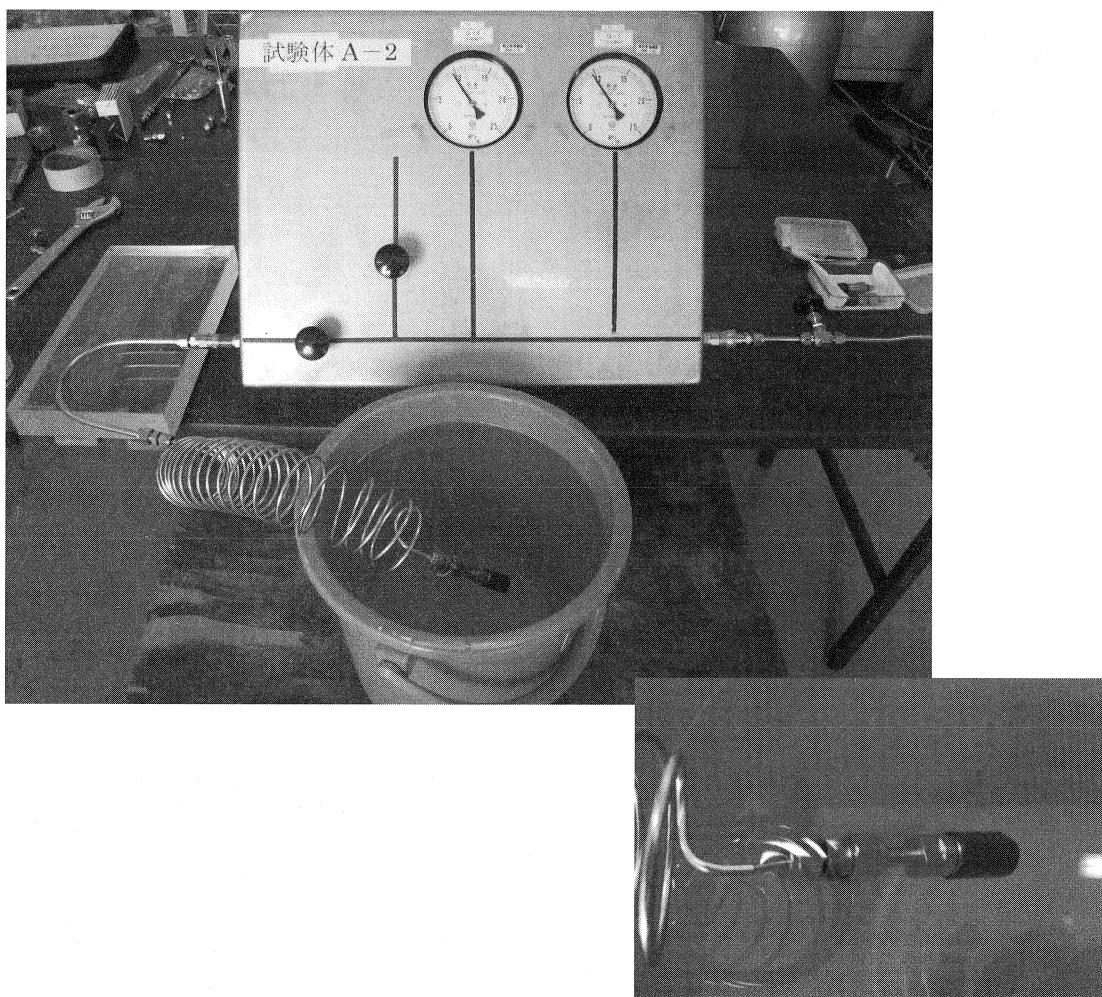


Photo.3-6 耐圧漏洩試験（内圧）状況

耐圧漏洩試験（外圧）

- ①試験体
- ②耐圧容器
- ③圧力計
- ④加圧ポンプ
- ⑤閉止バルブ
- ⑥純水

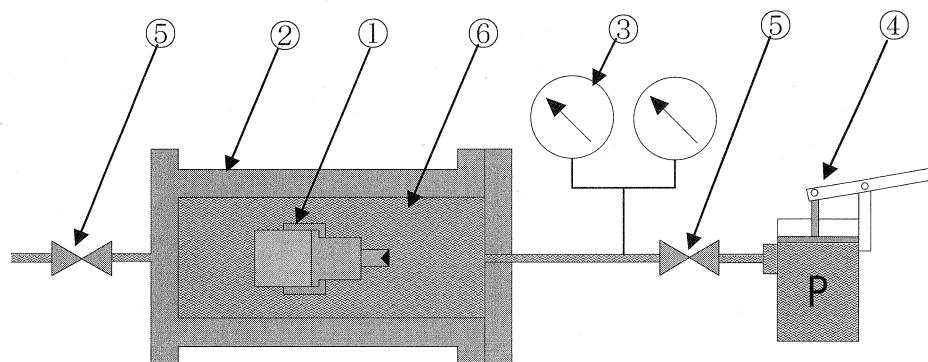


Fig.3-4 耐圧漏洩試験（外圧）方法概略図



Photo.3-7 耐圧漏洩試験（外圧）状況

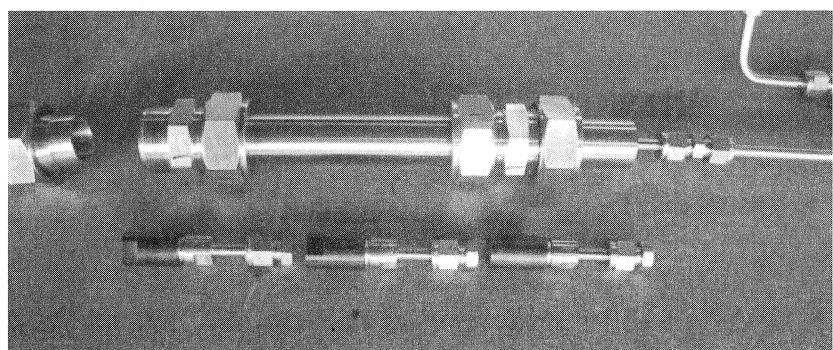


Photo.3-8 耐圧漏洩試験容器内の試験体配置

繰返し嵌合試験

- ①計装機器側接続管
- ②燃料被覆管
- ③接続ナット
- ④メタルOリング
- ⑤繰返し嵌合交換部品

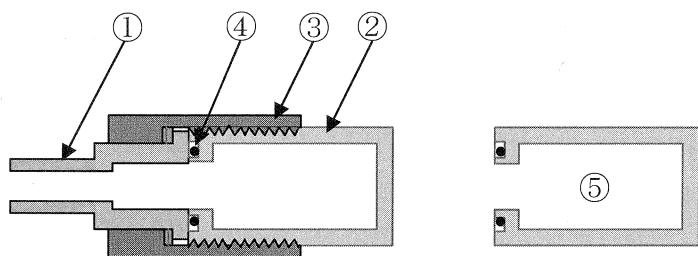


Fig.3-5 繰返し嵌合試験方法概略図

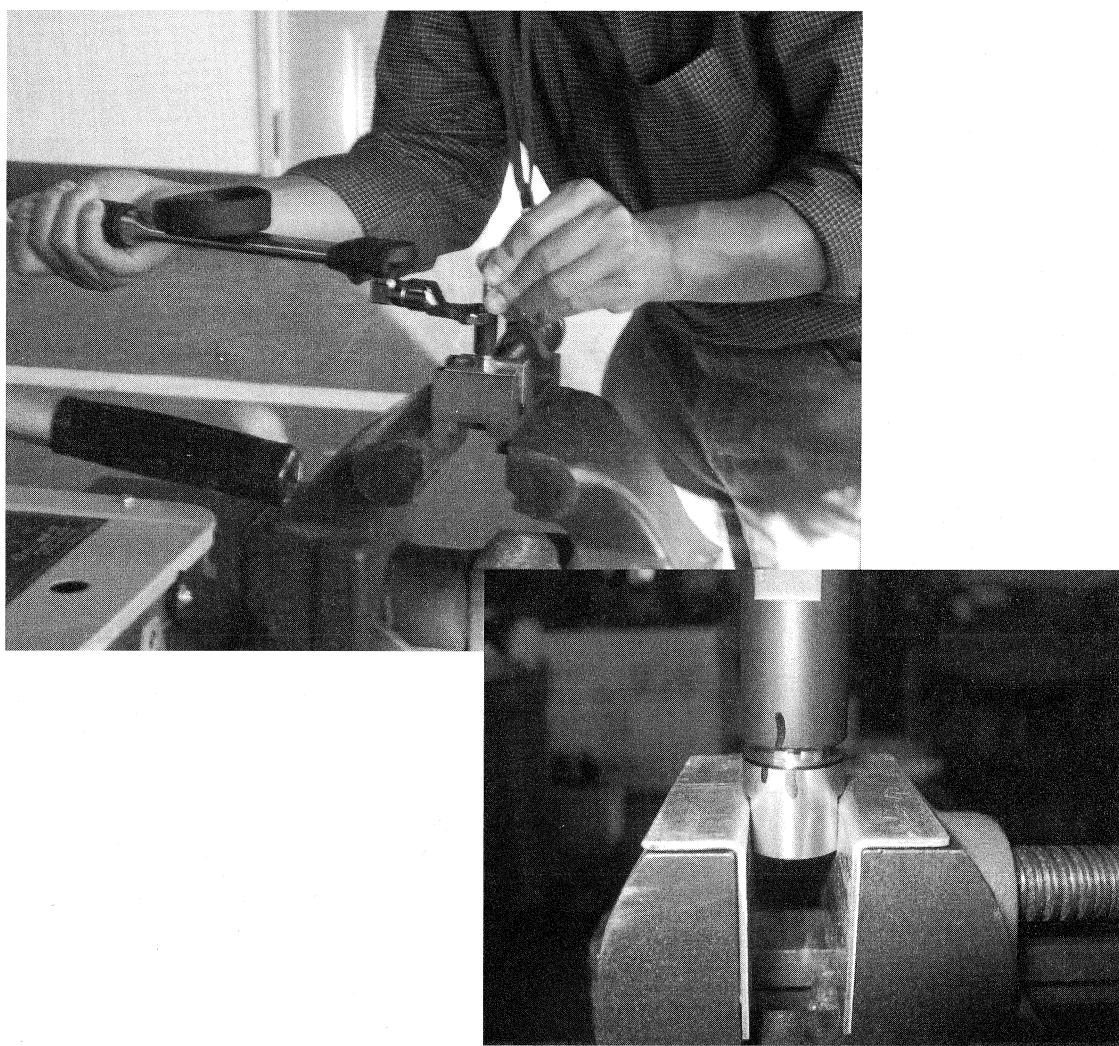


Photo.3-9 繰返し嵌合試験体の締付け状況

オートクレーブ試験

①試験体

②オートクレーブ試験装置

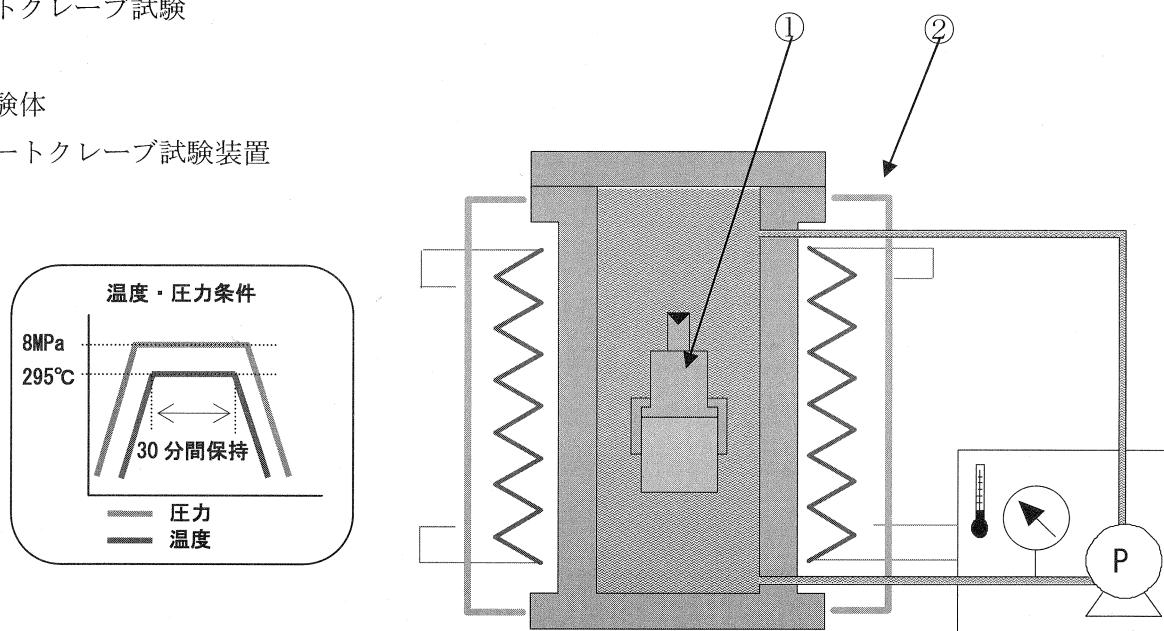


Fig.3-6 オートクレーブ試験方法概略図

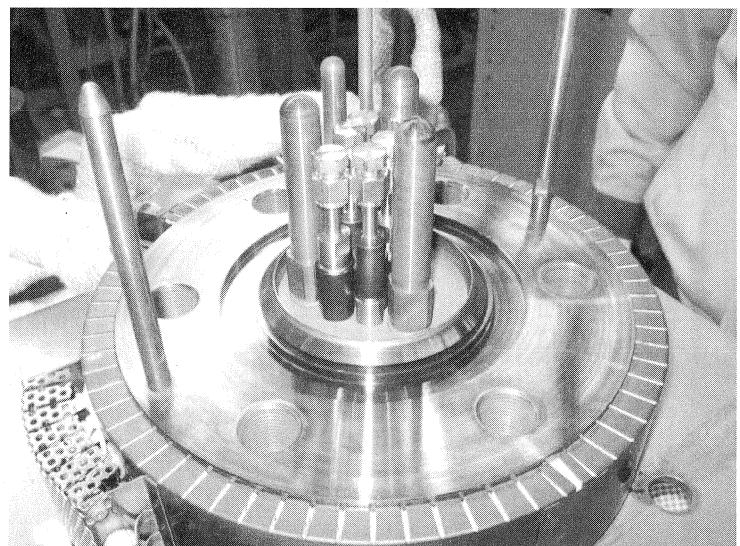
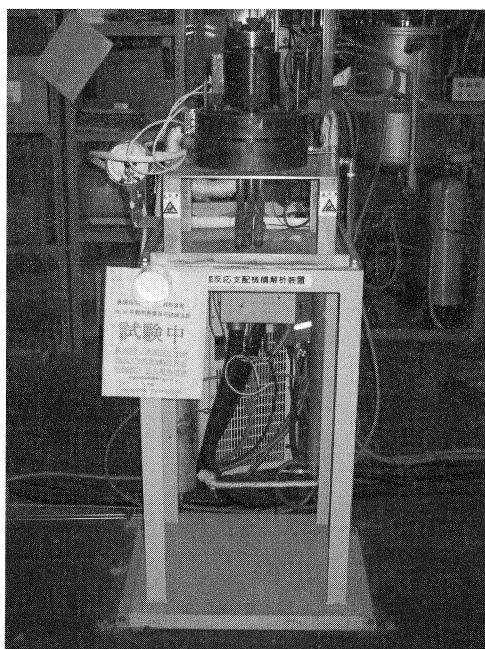


Photo.3-10 オートクレーブ試験装置外観及び試験体装荷状況

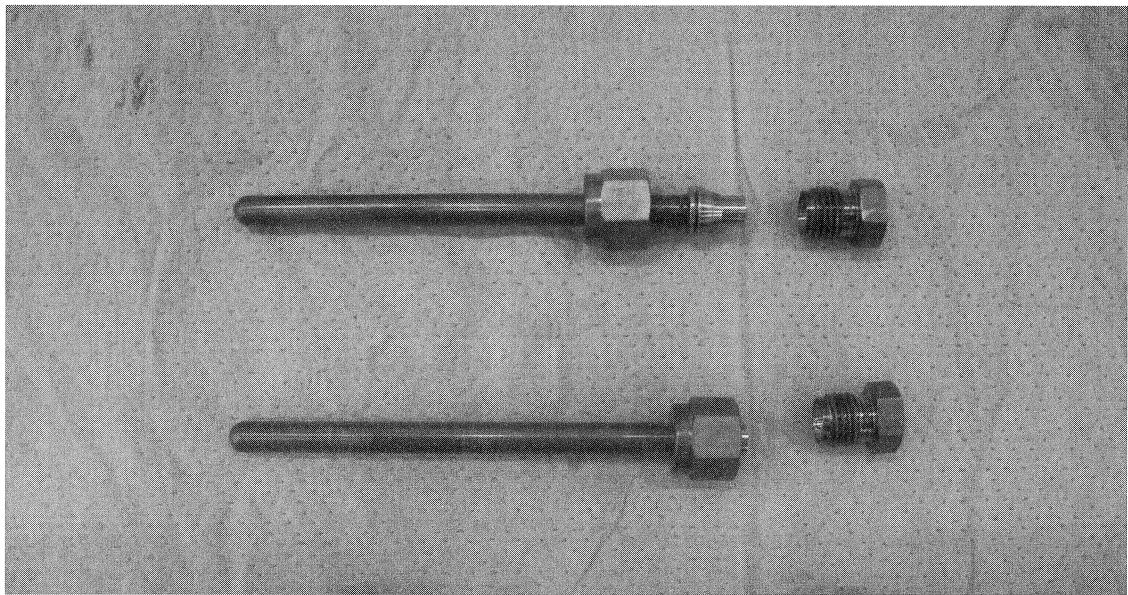


Photo.3-11 接続管止栓（スエージロック）の模擬試験体

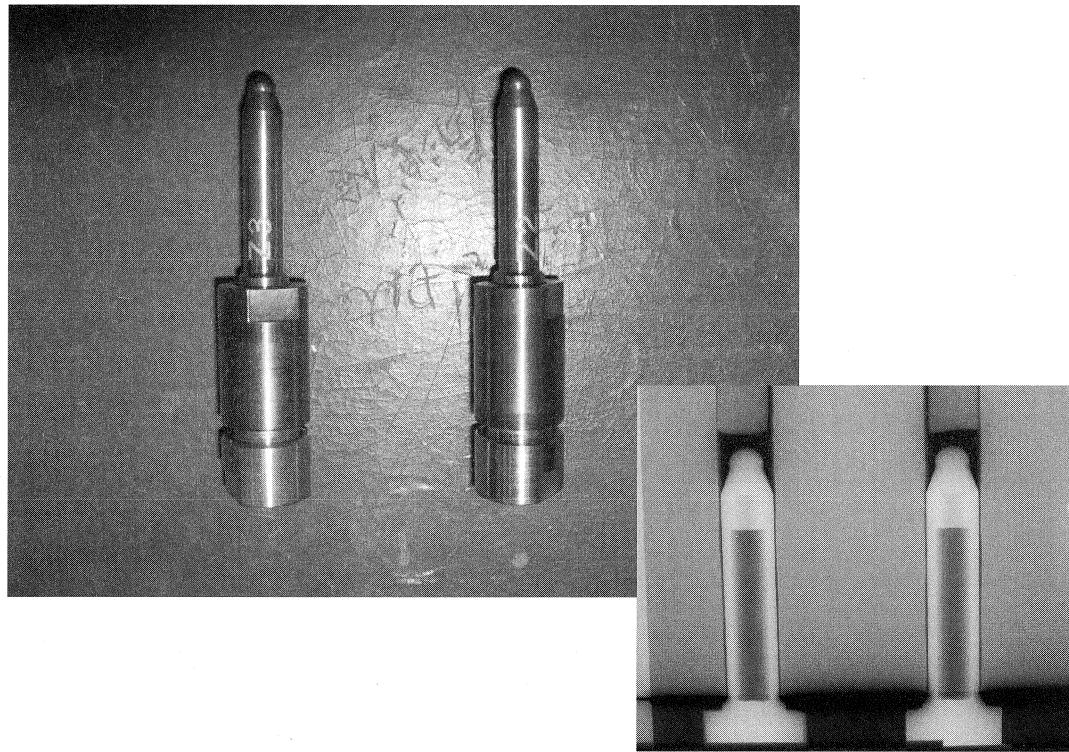


Photo.3-12 試験体の溶封状態と溶封部の放射線透過写真

Table 4-1 初期型試験体の試験結果 (1)

試験項目	判定基準	標準締付けトルク 2割減	標準締付けトルク	標準締付けトルク 2割増し
ヘリウム漏れ試験	1×10^{-9} (Pa・m ³ /sec)以下	6.7×10^{-11} (Pa・m ³ /sec)	8.2×10^{-11} (Pa・m ³ /sec)	7.2×10^{-11} (Pa・m ³ /sec)
熱サイクル試験後のヘリウム漏れ試験		5.6×10^{-11} (Pa・m ³ /sec)	4.9×10^{-11} (Pa・m ³ /sec)	4.8×10^{-11} (Pa・m ³ /sec)
耐圧漏洩試験 (内圧)	目視による 気泡有無の確認	無し	無し	無し
耐圧漏洩試験 (外圧)	目視による 試験体の変形及び 漏水有無の確認	変形、漏水無し	変形、漏水無し	変形、漏水無し
繰返し嵌合試験後の ヘリウム漏れ試験	1回	2.7×10^{-10} (Pa・m ³ /sec)	2.4×10^{-10} (Pa・m ³ /sec)	2.6×10^{-10} (Pa・m ³ /sec)
	2回	5.2×10^{-10} (Pa・m ³ /sec)	6.1×10^{-10} (Pa・m ³ /sec)	4.6×10^{-10} (Pa・m ³ /sec)
	3回	5.1×10^{-10} (Pa・m ³ /sec)	5.7×10^{-10} (Pa・m ³ /sec)	5.4×10^{-10} (Pa・m ³ /sec)
	4回	5.4×10^{-10} (Pa・m ³ /sec)	6.5×10^{-10} (Pa・m ³ /sec)	5.8×10^{-10} (Pa・m ³ /sec)

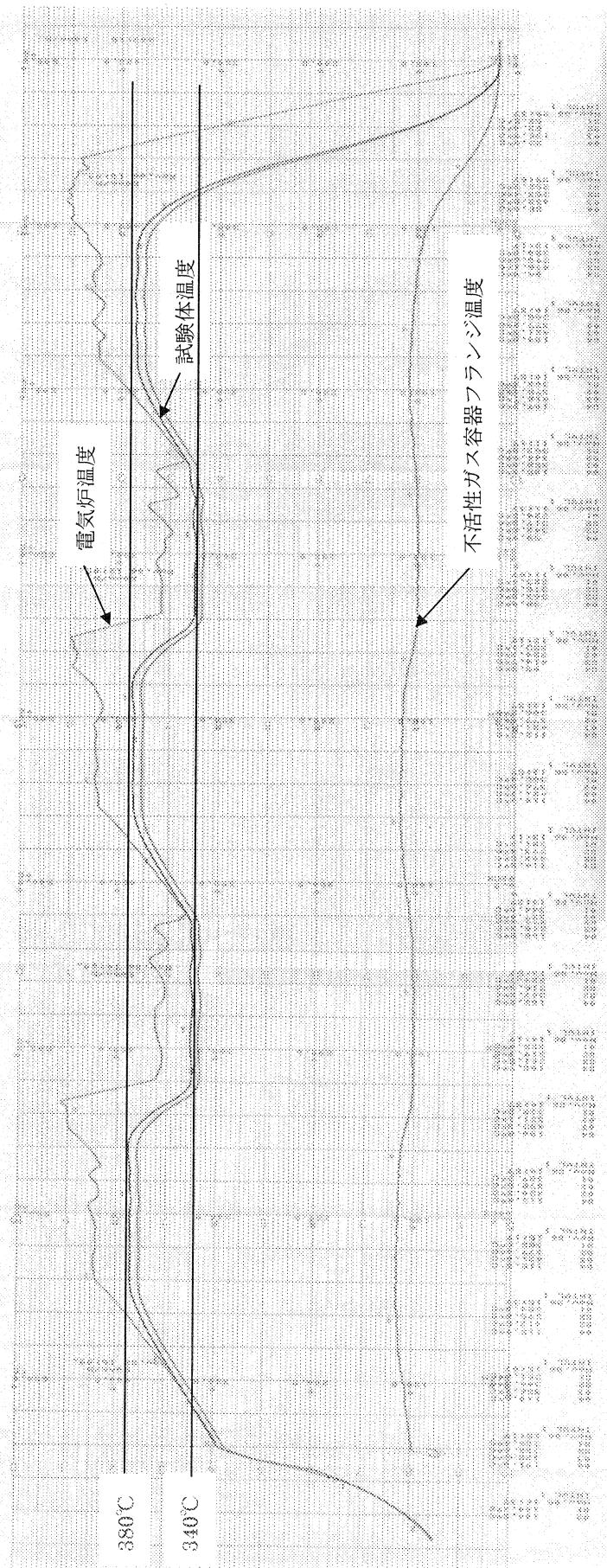


Fig. 4-2 热サイクル試験温度履歴

Table. 4-2 初期型試験体の試験結果（2）

試験項目	判定基準	標準緒付けトルク 2割減	標準緒付けトルク	標準緒付けトルク 2割増し
装置荷前の ヘリウム漏れ試験	1×10^{-9} (Pa・m ³ /sec 以下)	1.1×10^{-10} (Pa・m ³ /sec)	1.0×10^{-10} (Pa・m ³ /sec)	9.7×10^{-11} (Pa・m ³ /sec)
装置取出後の 浸水の有無	目視による 浸水有無の確認	無し	有り	有り
装置取出後の ヘリウム漏れ試験	1×10^{-9} (Pa・m ³ /sec 以下)	2.0×10^{-10} (Pa・m ³ /sec)	7.5×10^{-11} (Pa・m ³ /sec)	2.3×10^{-10} (Pa・m ³ /sec)

Table. 4-3 接続管止栓（スエージロッカ）の健全性確認試験結果

試験項目	判定基準	プラグ漏洩試験体 1	プラグ漏洩試験体 2
オートクレーブ試験	目視による浸水 有無の確認	無し	無し

Table. 4-4 改良型試験体及び比較用試験体の試験結果

項目	試験体タイプ		改良型試験体 (異種金属 : Zry-2/SUS304 + 热膨張緩和リング)	比較用試験体 (同種金属 : SUS304/SUS304)
	試験名	判定基準		
オートクレーブ試験 熱サイクル1回	装置装荷前の He リーク検査	1×10^{-9} (Pa · m ³ /sec 以下)	2.7×10^{-10} (Pa · m ³ /sec)	2.6×10^{-10} (Pa · m ³ /sec)
	装置取出後の 浸水の有無	目視による浸水 有無の確認	無し	無し
	装置取出後の He リーク検査	1×10^{-9} (Pa · m ³ /sec 以下)	2.6×10^{-10} (Pa · m ³ /sec)	2.3×10^{-10} (Pa · m ³ /sec)

Table. 4-5 改良型試験体の試験結果

項 目	試験体タイプ		改良型試験体-1 改良型試験体-2
	試験名	判定基準	
装置装荷前の He リーク検査	1×10^{-9} (Pa · m ³ /sec 以下)	2.8×10^{-10} (Pa · m ³ /sec)	2.8×10^{-10} (Pa · m ³ /sec)
装置取出後の 浸水の有無	目視による浸水 有無の確認	無し	無し
オートクレーブ試験 熱サイクル 3 回			
装置取出後の He リーク検査	1×10^{-9} (Pa · m ³ /sec 以下)	5.2×10^{-10} (Pa · m ³ /sec)	6.2×10^{-10} (Pa · m ³ /sec)

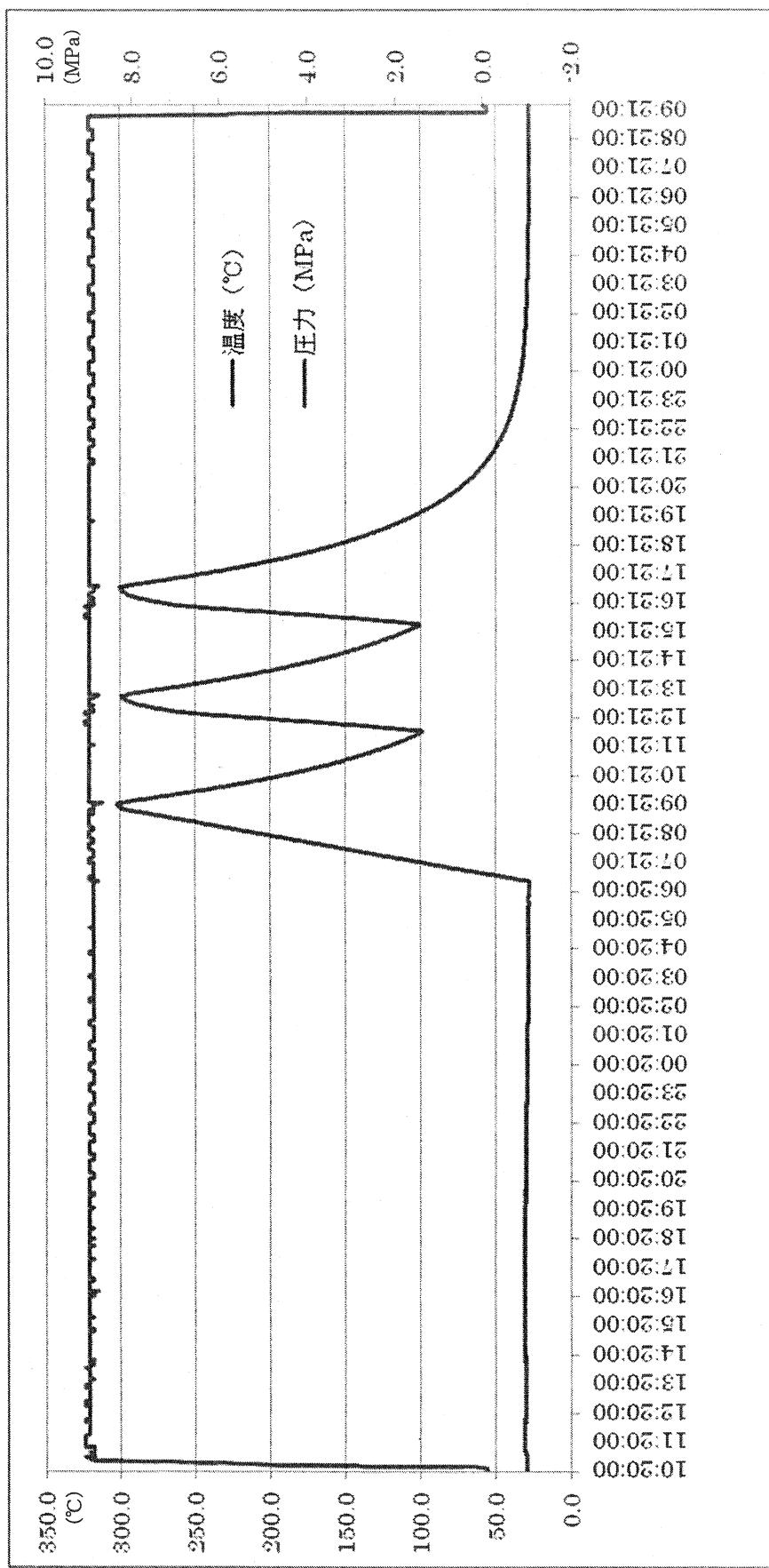


Fig. 4-6 圧力及び熱サイクル温度履歴

This is a blank page.

