

JAERI - M
92-055

ALPHA 計画電線貫通部リーク定量化試験
シリコン樹脂実験 (SLB001, SLB002)
—樹脂の挙動に対する熱的影響の評価—

1992年3月

山野 憲洋・杉本 純・丸山 結
日高 昭秀・早田 邦久

JAERI-M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、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 (株)原子力資料サービス

ALPHA 計画電線貫通部リーク定量化試験シリコン樹脂実験 (SLB001, SLB002)

— 樹脂の挙動に対する熱的影響の評価 —

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

山野 憲洋・杉本 純・丸山 結

日高 昭秀・早田 邦久

(1992年3月10日受理)

事故時格納容器挙動試験 (ALPHA) 計画では、軽水炉シビアアクシデント時の格納容器健全性に影響を及ぼす諸現象を明らかにするために幾つかの試験を行っている。そのうちの電線貫通部リーク定量化試験では、2回目の実験シリーズとしてシリコン樹脂部分を模擬する試験体を用いた実験を実施した。この実験の目的は、シビアアクシデント時の格納容器内熱水力条件下において電線貫通部のシリコン樹脂の挙動及び金属部分が樹脂の挙動に及ぼす影響について実験データを取得することである。そのため、電線貫通部のシリコン樹脂、電線ケーブル、シュラウドや端板を含む小型の試験体を製作し、試験容器内に設置して実験を実施した。

その結果、試験容器高温側雰囲気温度を室温から約1 K/分で上昇させた2回の実験では、温度がそれぞれ約410 Kと430 Kの時リーク開始が検知された。また、試験体内の温度分布からシュラウド等の金属部分での熱伝導が樹脂の挙動に大きく影響することがわかった。なお、実験後の試験体検査及び実験中の試験体内温度分布の測定結果から、リーク開始時のリーク経路はシュラウドに沿って形成されたと推定される。

Silicone Resin Experiments of EPA Leak Characterization
Test in the ALPHA Program (SLB001, SLB002)
- Evaluation of Thermal Effect on Silicone Resin Behavior -

Norihiro YAMANO, Jun SUGIMOTO, Yu MARUYAMA
Akihide HIDAHA and Kunihiya SODA

Department of Fuel Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 10, 1992)

In the ALPHA (Assessment of Loads and Performance of a Containment in a Hypothetical Accident) program, several tests are conducted to clarify phenomena which influence the integrity of a containment in LWR severe accidents. One of the tests in the ALPHA program is the EPA (Electrical Penetration Assembly) leak characterization test which includes silicone resin experiments. Purposes of the silicone resin experiments are; 1) to obtain database on melt progression of the silicone resin under thermal-hydraulic conditions in a containment during a severe accident, 2) to investigate influence of metal part on the silicone resin behavior in the EPA. The experiments have been performed using the small-scale test section which simulates silicone resin, cable conductor, shroud and header plate of an EPA of a nuclear power plant.

Two experiments were so far performed increasing the temperature in the atmosphere of a leak test vessel at a rate of 1 K/min from room temperature. Leakage initiation was detected at about 410 K and 430 K in the two experiments. Temperature distribution in the test section showed that heat conduction along the metal portion such as the shroud and the cable conductor has a strong effect on the silicone resin behavior. Post-test observation of the test section in the second

experiment and temperature distribution measured in the both experiments indicated that the initial leak path was formed along the shroud.

Keywords: Severe Accident, Containment, ALPHA, Electrical Penetration Assembly (EPA), Silicone Resin

目 次

Executive Summary	0
1. はじめに	1
2. 実験概要	2
2.1 実験目的	2
2.2 試験装置	2
2.3 試験体	3
2.4 実験条件	3
2.5 実験方法	3
3. 実験結果	3
3.1 リーク検知	3
3.2 試験体内温度分布	4
3.3 試験体の実験後検査	4
4. まとめ	5
謝 辞	5
参考文献	5

Contents

Executive Summary	0
1. Introduction	1
2. Overview of Experiments	2
2.1 Purposes	2
2.2 Test Apparatus	2
2.3 Test Section	3
2.4 Experimental Conditions	3
2.5 Procedures	3
3. Results	3
3.1 Leak Initiation	3
3.2 Temperature Distribution	4
3.3 Post-test Observations	4
4. Conclusions	5
Acknowledgement	5
Reference	5

Executive Summary

In the ALPHA (Assessment of Loads and Performance of a Containment in a Hypothetical Accident) program, several tests are conducted to clarify phenomena which influence the integrity of a containment in LWR severe accidents. One of the tests in the ALPHA program is the EPA (Electrical Penetration Assembly) leak characterization test which includes silicone resin experiments. Purposes of the silicone resin experiments are; 1) to obtain database on melt progression of the silicone resin under thermal-hydraulic conditions in a containment during a severe accident, 2) to investigate influence of metal part on the silicone resin behavior in the EPA.

The silicone resin experiments were performed using the small-scale test section which simulated silicone resin, cable conductor, shroud and header plate of an EPA of a nuclear power plant. The small-scale test section was welded on to the partition wall in the test vessel which separated the vessel into two regions. One region simulated the inner atmosphere of a containment (referred to as the high-temperature region) and the other region simulated the outer atmosphere of a containment (referred to as the low-temperature region). The high-temperature region was heated by the electric heaters surrounding the test vessel and by superheated steam injection. The low-temperature region was maintained at room temperature throughout the experiment by supplying dry nitrogen gas.

The test section was separated into two parts by the header plate, and one side of the test section was sealed with the silicone resin. The cable conductor penetrated the header plate; one end of the cable conductor was embedded in the silicone resin and the other end was exposed in gaseous atmosphere. The test section was installed in the test vessel so that silicone resin portion was located in the high-temperature region and bare end of the cable was exposed to the low-temperature region. Therefore one end of the test section was heated in the high-temperature atmosphere and the other end was cooled in the low-temperature region.

Although pressure in the both regions was nearly atmospheric pressure, pressure in the high-temperature region

was maintained slightly higher than that in the low-temperature region. When leakage path was formed in the resin, steam in the high-temperature region flowed into and mixed with the nitrogen in the low-temperature region. Therefore leak path formation was detected by the increase of dew point of the gas in the low-temperature region. Thirty-seven pairs of thermocouple were located in the test section to measure temperature distribution and detect melting of the resin during the experiments.

Two experiments were performed increasing the temperature in the high-temperature region at a rate of 1 K/min from room temperature. Leakage initiation was detected at about 410 K and 430 K in the two experiments. Temperature distribution in the test section showed that heat conduction along the metal part such as shroud and cable conductor has a strong effect on the silicone resin behavior. In the experiment which was terminated at 640 K in the high-temperature region, most of the resin was melted and relocated. In the experiment which was terminated at 515 K, residue of foamed resin was found in the neighborhood of the cable conductor. Post-test observation of the test section in the second experiment and temperature distribution measured in the both experiments indicated that the initial leak path was formed along the shroud. These data will be valuable for developing a computer model which predicts EPA's behavior in various accident conditions.

1. はじめに

原子炉の格納容器はシビアアクシデント時に環境へのFP放出を防ぐ最後の障壁であり、その健全性が損われた場合の破損形態、破損口からのFPの漏洩量を評価することは、シビアアクシデント時の環境への影響を評価するうえから必要不可欠である。原研では、シビアアクシデント時に格納容器の健全性を脅かすような現象について、その機構を解明し、格納容器に及ぼす負荷とそれに対する格納容器の応答を評価し、アクシデントマネジメント方策を立案することを目的として、事故時格納容器挙動試験 (ALPHA: Assessment of Loads and Performance of a Containment in a Hypothetical Accident) を実施している。具体的には、シビアアクシデント時に格納容器の健全性を脅かす負荷を発生する現象として、溶融炉心冷却材相互作用と溶融炉心コンクリート相互作用を、負荷に対する格納容器の応答として貫通部からのリーク挙動を取上げ、さらに格納容器内のFPエアロゾル挙動を調べることを計画している。

このうち格納容器貫通部におけるリーク挙動を調べるリーク定量化試験では、電線貫通部を対象とした実験と解析を行っている。電線貫通部からのリークを調べる実験は1985年から1986年にかけて米国サンディア国立研究所 (SNL) で実施された¹⁾。SNLの実験では、米国の原子力発電所で用いられている種々の電線貫通部のうちから3種類を選び、解析コードによる種々のシビアアクシデントシーケンスにおける格納容器内熱水力状態の予測結果に基づいて格納容器内の温度圧力履歴を設定して、実機相当の電線貫通部試験体を用いてリーク挙動を調べた。SNLの実験結果では、いずれの電線貫通部についても実験中にはリークは発生せず、実験終了後の室温において僅かなリークが測定された結果が1例あるにすぎない。しかしながら、1) 我国の原子力発電所で用いられている電線貫通部は、これら3種類のものと異なる構造をもっていること、2) 格納容器内の熱水力状態の予測値は解析コードによりかなり幅があり、想定された温度圧力履歴そのものに不確実性があること、3) 電線貫通部の真の安全裕度を評価するためにはより厳しい条件でのデータを取得する必要があること、等の理由から、我国で用いられている電線貫通部を対象にしてより厳しい条件を含む実験を行う必要があるとあり、原研では1990年より電線貫通部リーク定量化試験を開始した。研究目的は以下の通りである。

- (1) 軽水炉のシビアアクシデント時に生ずると考えられている格納容器内の高温、高圧条件下の電線貫通部の熱的及び機械的挙動を明らかにする。
- (2) リークが生じる場合について、リーク発生機構を明らかにするとともにリーク経路の同定及びリーク量を定量化する。
- (3) リーク経路でのFPエアロゾル挙動を明らかにする。
- (4) 電線貫通部からのリーク挙動を解析する手法を開発する。

以上の目的を達成するため、リーク定量化試験では、実験と解析手法の開発を並行して、かつ段階的に実施している。始めに、実際の原子力発電所で用いられている電線貫通部構成要素のうち、リーク発生の観点から重要と思われる要素を取り出した試験体を用いて小規模実験を実施する。この実験からは重要要素の挙動についてデータを取得する。次に実規模の電線貫通部試験体を用いた実規模総合実験を実施する。この実験からは、機能も含めた電線貫通部全体の挙動についてデータを取得する。一方、解析手法については、始めに小規模実験を対象に重要要素についての解析モデルを作成し、続いてそれらを含む、実際の電線貫通部にも適用可能な総合解析モデルを作成する。作成した総合解析モデルは、実規模総合実験を解析することにより検証/改良

を実施する。なお、小規模実験及び実規模総合実験において生ずるリーク経路でのF Pエアロゾル挙動についてもデータを取得し、解析モデルを開発する。最後に、検証済みの総合解析モデルを用いて、種々のシビアアクシデントシナリオにおける実炉の電線貫通部でのリーク挙動を予測する。

本報告書は、以上の研究段階のうち、シリコン樹脂の挙動に対する熱的影響を調べるために行った小規模実験の結果をまとめたものである。

2. 実験概要

2.1 実験目的

図2.1に軽水炉の格納容器に用いられている電線貫通部の概念図の1例を示す。この型の電線貫通部は格納容器壁に対して内外対称の構造を持ち、スリーブを介して格納容器壁に溶接されている。電線貫通部の内部は、事故時に発生する圧力負荷を支える端板、端板に銀ろう付けされたアルミナ磁器モジュール、絶縁材としてのシリコン樹脂、両端で電線の相互の間隔を保持するエポキシ積層板から構成されている。電線が端板を貫通する箇所にはアルミナ磁器モジュールが用いられており、電線はアルミナ磁器モジュール内の導体と銀ろうで繋がれている。

シビアアクシデント時の格納容器内の雰囲気によっては、アルミナ磁器モジュールそのものや、端板との銀ろうによる接続部が破損し、リークを生ずる恐れがある。また、シリコン樹脂の溶融/分解の進展は、アルミナ磁器モジュールの挙動に対する熱的境界条件を与える。そこで、本実験ではシリコン樹脂と電線や端板の一部を取り出して、シリコン樹脂試験体を製作し、樹脂の挙動に対する格納容器内雰囲気の熱的影響を評価するための実験を行った。実験の目的は、シビアアクシデント時の格納容器内熱水力条件下で、電線貫通部のシリコン樹脂の挙動及び電線貫通部の金属部分が樹脂の挙動に及ぼす影響についての実験データを取得することである。

2.2 試験装置

図2.2に試験装置の概要を示す。ALPHA試験装置の一部であるリーク定量化試験装置は、実規模総合実験に用いる大型リーク試験容器、小規模実験用の小型リーク試験容器と、これらに水蒸気や窒素ガスを供給/排出する配管、およびリーク発生を検知、測定する露点計や流量計から構成される。水蒸気や窒素ガスはALPHA試験全体で共用する蒸気発生器や窒素ガス供給設備により供給される。大型リーク試験容器、小型リーク試験容器の内部はともに、シビアアクシデント時の格納容器内雰囲気を模擬する高温高圧部と、格納容器外に相当する低温低圧部に分れている。装置の基本構想や測定原理は大型リーク試験容器と小型リーク試験容器ともに同様である。

図2.3に本実験で用いた小型リーク試験容器の概要を示す。試験容器の高温高圧部には加圧された水蒸気を供給し、周囲を覆うマントルヒータによって水蒸気を加熱する。小型リーク試験容器に水蒸気を供給する配管には電気ヒータが巻いてあり、蒸気発生器から供給される水蒸気に過熱度を与えることが可能である。高温高圧部雰囲気の温度は蒸気発生器の設定温度と容器のヒータの出力により、圧力は蒸気発生器の圧力と弁の開閉操作によって、所定の値に設定する。低温低圧部には乾燥した窒素ガスを一定流量で供給する。試験体には仕切板と呼ばれるフランジを付け、仕切板が高温高圧部と低温低圧部の境界になるように試験容器内に設置する。試験体にリーク経路ができると試験容器高温高圧部の水蒸気が低温低圧部に流れ出し窒素ガスと混合さ

を実施する。なお、小規模実験及び実規模総合実験において生ずるリーク経路でのF Pエアロゾル挙動についてもデータを取得し、解析モデルを開発する。最後に、検証済みの総合解析モデルを用いて、種々のシビアアクシデントシークエンスにおける実炉の電線貫通部でのリーク挙動を予測する。

本報告書は、以上の研究段階のうち、シリコン樹脂の挙動に対する熱的影響を調べるために行った小規模実験の結果をまとめたものである。

2. 実験概要

2.1 実験目的

図2.1に軽水炉の格納容器に用いられている電線貫通部の概念図の1例を示す。この型の電線貫通部は格納容器壁に対して内外対称の構造を持ち、スリーブを介して格納容器壁に溶接されている。電線貫通部の内部は、事故時に発生する圧力負荷を支える端板、端板に銀ろう付けされたアルミナ磁器モジュール、絶縁材としてのシリコン樹脂、両端で電線の相互の間隔を保持するエポキシ積層板から構成されている。電線が端板を貫通する箇所にはアルミナ磁器モジュールが用いられており、電線はアルミナ磁器モジュール内の導体と銀ろうで繋がれている。

シビアアクシデント時の格納容器内の雰囲気によっては、アルミナ磁器モジュールそのものや、端板との銀ろうによる接続部が破損し、リークを生ずる恐れがある。また、シリコン樹脂の溶融/分解の進展は、アルミナ磁器モジュールの挙動に対する熱的境界条件を与える。そこで、本実験ではシリコン樹脂と電線や端板の一部を取り出して、シリコン樹脂試験体を製作し、樹脂の挙動に対する格納容器内雰囲気の熱的影響を評価するための実験を行った。実験の目的は、シビアアクシデント時の格納容器内熱水力条件下で、電線貫通部のシリコン樹脂の挙動及び電線貫通部の金属部分が樹脂の挙動に及ぼす影響についての実験データを取得することである。

2.2 試験装置

図2.2に試験装置の概要を示す。ALPHA試験装置の一部であるリーク定量化試験装置は、実規模総合実験に用いる大型リーク試験容器、小規模実験用の小型リーク試験容器と、これらに水蒸気や窒素ガスを供給/排出する配管、およびリーク発生を検知、測定する露点計や流量計から構成される。水蒸気や窒素ガスはALPHA試験全体で共用する蒸気発生器や窒素ガス供給設備により供給される。大型リーク試験容器、小型リーク試験容器の内部はともに、シビアアクシデント時の格納容器内雰囲気を模擬する高温高圧部と、格納容器外に相当する低温低圧部に分れている。装置の基本構想や測定原理は大型リーク試験容器と小型リーク試験容器ともに同様である。

図2.3に本実験で用いた小型リーク試験容器の概要を示す。試験容器の高温高圧部には加圧された水蒸気を供給し、周囲を覆うマントルヒータによって水蒸気を加熱する。小型リーク試験容器に水蒸気を供給する配管には電気ヒータが巻いてあり、蒸気発生器から供給される水蒸気に過熱度を与えることが可能である。高温高圧部雰囲気の温度は蒸気発生器の設定温度と容器のヒータの出力により、圧力は蒸気発生器の圧力と弁の開閉操作によって、所定の値に設定する。低温低圧部には乾燥した窒素ガスを一定流量で供給する。試験体には仕切板と呼ばれるフランジを付け、仕切板が高温高圧部と低温低圧部の境界になるように試験容器内に設置する。試験体にリーク経路ができると試験容器高温高圧部の水蒸気が低温低圧部に流れ出し窒素ガスと混合さ

れるので、低温低圧部から流れ出るガスの露点の増加からリークの開始を検知できる。また、供給される窒素ガスの流量と露点からリーク量が算出される。露点計は極めて鋭敏でリーク開始の検知には適しているが、測定範囲が限られているため、リーク量が増した場合には使用できない。その場合には、低温低圧部への窒素ガス供給を止め、流量計によりリークして来る水蒸気流量を直接測定する。

2.3 試験体

図2.4にシリコン樹脂試験体の構造を示す。シュラウドと呼ばれるステンレス円筒(SUS304製)を端板(SUS304製)で仕切り、端板の中央部にアルミナ磁器モジュールを取り付けた。アルミナ磁器モジュールの導体と電線を銀ロウによって繋ぎ、端板の高温側領域にシリコン樹脂を流し込んで固めた。試験体各部の温度分布を測定し、温度挙動から樹脂の熔融挙動を推定するため、図中の●印で示す位置にタイプK熱電対を5本を1組として試験体の軸方向と平行な直線上に4組取り付けた。これにより、シュラウド内面、樹脂内、電線ケーブルに沿う温度分布を測定した。樹脂の熔融/分解によるリーク経路の形成を早期に検知するため、端板には直径16mmの穴を8ヶ所、仕切板には直径24mmの穴を2ヶ所あらかじめ開けておいた。なお、実際の電線貫通部の両端にはエポキシ積層板が取り付けられているが、積層板にはもともと穴が開いていることと、比較的低い温度で熔融する(473K以下)とされていることから、雰囲気ガスの侵入時の障害にならないと考えられるので、この実験では模擬しなかった。

2.4 実験条件

シリコン樹脂試験体を用いて表2.1に示す2回の実験(SLB001, SLB002)を実施した。試験体の端板にはリーク検知用に孔を開けてあるので、試験容器の高温高圧部にかける圧力が高過ぎると樹脂を機械的に破損する恐れがある。そこで、本実験ではリーク経路が形成された時に試験容器高温高圧部にある水蒸気が低温低圧部に流れるのに必要な程度の圧力勾配ができるように、高温高圧部の圧力を低温低圧部圧力より0.01MPaだけ高く設定した。

2.5 実験方法

シリコン樹脂試験体を小型リーク試験容器に設置した後、高温高圧部の雰囲気窒素ガスを窒素ガスで置換した。低温低圧部に窒素ガスを流しながら、高温高圧部雰囲気温度をマントルヒータで383Kまで昇温した後、水蒸気を供給して窒素ガスを置換した。その後、高温高圧部圧力が低温低圧部圧力より0.01MPa高くなるように水蒸気供給量を調節しながら、1K/分の上昇速度で高温高圧部雰囲気温度を上げていった。低温低圧部から流れ出すガスの露点は常時監視を続けた。実験予定では、露点の変化が検出された場合には、その時の状態を維持しながら露点を測定することになっていたが、実際にはリーク開始検知の直後に露点計の測定範囲を越えてしまったので、露点計を隔離するとともに、流量計による測定に切り換えた。その後、高温側雰囲気温度を1K/分でさらに上げてゆき、目標温度に達した時点で実験を終了した。

3. 実験結果

3.1 リーク検知

SLB001では、試験容器高温高圧部雰囲気温度が430Kになった時に低温低

れるので、低温低圧部から流れ出るガスの露点の増加からリークの開始を検知できる。また、供給される窒素ガスの流量と露点からリーク量が算出される。露点計は極めて鋭敏でリーク開始の検知には適しているが、測定範囲が限られているため、リーク量が増した場合には使用できない。その場合には、低温低圧部への窒素ガス供給を止め、流量計によりリークして来る水蒸気流量を直接測定する。

2.3 試験体

図2.4にシリコン樹脂試験体の構造を示す。シュラウドと呼ばれるステンレス円筒(SUS304製)を端板(SUS304製)で仕切り、端板の中央部にアルミナ磁器モジュールを取り付けた。アルミナ磁器モジュールの導体と電線を銀ろうによって繋ぎ、端板の高温側領域にシリコン樹脂を流し込んで固めた。試験体各部の温度分布を測定し、温度挙動から樹脂の熔融挙動を推定するため、図中の●印で示す位置にタイプK熱電対を5本を1組として試験体の軸方向と平行な直線上に4組取り付けた。これにより、シュラウド内面、樹脂内、電線ケーブルに沿う温度分布を測定した。樹脂の熔融/分解によるリーク経路の形成を早期に検知するため、端板には直径16mmの穴を8ヶ所、仕切板には直径24mmの穴を2ヶ所あらかじめ開けておいた。なお、実際の電線貫通部の両端にはエポキシ積層板が取り付けられているが、積層板にはもともと穴が開いていることと、比較的低い温度で熔融する(473K以下)とされていることから、雰囲気ガスの侵入時の障害にならないと考えられるので、この実験では模擬しなかった。

2.4 実験条件

シリコン樹脂試験体を用いて表2.1に示す2回の実験(SLB001, SLB002)を実施した。試験体の端板にはリーク検知用に孔を開けてあるので、試験容器の高温高圧部にかける圧力が高過ぎると樹脂を機械的に破損する恐れがある。そこで、本実験ではリーク経路が形成された時に試験容器高温高圧部にある水蒸気が低温低圧部に流れるのに必要な程度の圧力勾配ができるように、高温高圧部の圧力を低温低圧部圧力より0.01MPaだけ高く設定した。

2.5 実験方法

シリコン樹脂試験体を小型リーク試験容器に設置した後、高温高圧部の雰囲気窒素ガスを窒素ガスで置換した。低温低圧部に窒素ガスを流しながら、高温高圧部雰囲気温度をマントルヒータで383Kまで昇温した後、水蒸気を供給して窒素ガスを置換した。その後、高温高圧部圧力が低温低圧部圧力より0.01MPa高くなるように水蒸気供給量を調節しながら、1K/分の上昇速度で高温高圧部雰囲気温度を上げていった。低温低圧部から流れ出すガスの露点は常時監視を続けた。実験予定では、露点の変化が検出された場合には、その時の状態を維持しながら露点を測定することになっていたが、実際にはリーク開始検知の直後に露点計の測定範囲を越えてしまったので、露点計を隔離するとともに、流量計による測定に切り換えた。その後、高温側雰囲気温度を1K/分でさらに上げてゆき、目標温度に達した時点で実験を終了した。

3. 実験結果

3.1 リーク検知

SLB001では、試験容器高温高圧部雰囲気温度が430Kになった時に低温低

圧部を流れるガスの露点に急激な上昇がみられ、リーク経路が形成されたことが検知された。露点は上昇開始後すぐに露点計の計測範囲を越えてしまった。そのため、露点計を隔離して、さらに高温高圧部雰囲気温度を上昇し続けたところ、640 Kになった時に、試験容器の高温高圧部と低温低圧部の圧力差が急になくなり、以後圧力差を維持できなくなった。これは、この時に大きなリークが生じたことを示している。

SLB002では、高温側雰囲気温度が410 Kになった時にリーク発生が検知され、その後すぐに露点が測定範囲以上になった。SLB001と同様に露点計を隔離して、高温高圧部雰囲気の昇温をそのまま続け、515 Kに到達後実験を終了した。SLB002では、試験容器の高温側と低温側の圧力差は0.01MPaに保たれ、大きなリークは発生しなかった。

3.2 試験体内温度分布

図3.1は、試験容器高温高圧部の雰囲気温度の経時変化を4ヶ所に取り付けた熱電対で測定した結果を示したものである。雰囲気温度は一様ではなく最大で50 K程度の相違がある。シュラウド内面に沿った温度分布の経時変化を図3.2に示す。雰囲気温度に較べると少し低めではあるが、良く追随していることがわかる。また、シュラウドに沿って、雰囲気側から端板方向への温度低下がみられるが、これはシュラウドによって雰囲気から端板方向への熱の流れがあることを示している。

図3.3にシリコン樹脂内温度分布の経時変化を示す。高温高圧部雰囲気温度と較べると、樹脂内の温度は実験の大部分の時間で雰囲気よりかなり低いことがわかる。樹脂内各部の温度では、樹脂表面に近いA点で高くなり、続いて端板表面上E点でも温度が高くなり、20,000秒付近ではE点の温度が最も高くなっている。この事はシュラウドから端板への熱の流れがあったことを示している。22,000秒付近で、A点の温度が急激に上昇し、続いて同様な温度上昇がB、C、D点で起きているが、E点ではこの温度上昇は見られない。この急激な上昇で到達した温度が雰囲気温度とほぼ等しいことから、これは樹脂の溶融によって熱電対が雰囲気中に露出したことにより引き起こされたと考えられる。また、このことは、樹脂は雰囲気側表面の方から溶けてきたが、E点の付近は未だ樹脂内であったことを示している。

図3.4に電線に沿って取り付けられた熱電対により測定した温度分布を示す。シリコン樹脂内の温度分布と比較すると、試験体軸方向の温度差は小さい。これは電線が熱の良導体であることを示している。電線に沿った5ヶ所の測定温度の平均値は、電線と平行な線上にある樹脂内の5ヶ所の測定温度の平均値とほぼ等しい。但し、熱電対の高温高圧部雰囲気への露出によると思われる急激な温度上昇の開始時刻は、樹脂内温度に較べて遅い。このことは、電線によって熱が端板を越えて低温低圧部側に移動することによる樹脂の冷却効果があったためと推定される。

3.3 試験体の実験後検査

目視による試験体の実験後検査の結果、640 Kまで加熱したSLB001では、写真3.1に示すように樹脂の大部分が溶融移動していたので、初期のリーク経路を同定することはできなかった。樹脂は粘度の高いゼリー状の液体と内部に気泡を閉じ込めたような発泡した固体になっていた。515 Kまで加熱したSLB002では、写真3.2に示すようにかなりの樹脂が溶融移動していたが、ケーブルの周囲に発泡した固体状樹脂が残っていた。試験体の実験後検査と、試験体各部における温度分布から、リーク経路は始めシュラウドに沿って形成され、次にそこに侵入した高温の水蒸気により周囲の樹脂が溶融/分解されリーク経路が拡大されていったと推定できる。

4. まとめ

事故時格納容器挙動試験 (ALPHA) 計画電線貫通部リーク定量化試験の一部として、シリコン樹脂試験体を用いて実験を実施し、シビアアクシデント時の格納容器内雰囲気条件下における電線貫通部内のシリコン樹脂の挙動について、実験データを取得した。試験体への熱的影響を実験結果に基づいて評価した結果、シリコン樹脂の熔融挙動に対して、電線、シュラウド等金属部分を介しての熱移動の影響が大きいことが明らかになった。なお、得られたデータは電線貫通部の挙動解析モデルの検証・改良に用いる予定である。

謝 辞

実験準備及び実験中の装置の運転や実験データの計測、実験後の後処理等は安全試験技術室（炉心損傷安全研究室兼務）の伊藤秀雄、小森慶一、園部久夫、八木岡隆一の各氏及び原子力エンジニアリング株式会社の石井正、野上稔、大内晴夫、小島正弥の各氏によってなされました。また、実験データの処理ではエイ・エス・アイ株式会社の鳥喰博美氏にお手伝い戴いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Clauss D. B.: Severe Accident Testing of Electrical Penetration Assemblies, NUREG/CR 5334, SAND89-0327 (1989)

表2.1 試験条件

	<u>SLB001</u>	<u>SLB002</u>
<u>高温高圧部</u>		
初期温度	285 K	287 K
最高温度	640 K	515 K
昇温速度	1 K/分	1 K/分
圧力	0.15 MPa	0.13 MPa
<u>低温低圧部</u>		
N ₂ 温度	290 K	290 K
圧力	0.14 MPa	0.12 MPa

4. まとめ

事故時格納容器挙動試験 (ALPHA) 計画電線貫通部リーク定量化試験の一部として、シリコン樹脂試験体を用いて実験を実施し、シビアアクシデント時の格納容器内雰囲気条件下における電線貫通部内のシリコン樹脂の挙動について、実験データを取得した。試験体への熱的影響を実験結果に基づいて評価した結果、シリコン樹脂の溶融挙動に対して、電線、シュラウド等金属部分を介しての熱移動の影響が大きいことが明らかになった。なお、得られたデータは電線貫通部の挙動解析モデルの検証・改良に用いる予定である。

謝 辞

実験準備及び実験中の装置の運転や実験データの計測、実験後の後処理等は安全試験技術室（炉心損傷安全研究室兼務）の伊藤秀雄、小森慶一、園部久夫、八木岡隆一の各氏及び原子力エンジニアリング株式会社の石井正、野上稔、大内晴夫、小島正弥の各氏によってなされました。また、実験データの処理ではエイ・エス・アイ株式会社の鳥喰博美氏にお手伝い戴いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Clauss D. B.: Severe Accident Testing of Electrical Penetration Assemblies, NUREG/CR 5334, SAND89-0327 (1989)

表 2.1 試 験 条 件

	<u>SLB001</u>	<u>SLB002</u>
<u>高温高圧部</u>		
初期温度	285 K	287 K
最高温度	640 K	515 K
昇温速度	1 K/分	1 K/分
圧力	0.15 MPa	0.13 MPa
<u>低温低圧部</u>		
N ₂ 温度	290 K	290 K
圧力	0.14 MPa	0.12 MPa

4. まとめ

事故時格納容器挙動試験 (ALPHA) 計画電線貫通部リーク定量化試験の一部として、シリコン樹脂試験体を用いて実験を実施し、シビアアクシデント時の格納容器内雰囲気条件下における電線貫通部内のシリコン樹脂の挙動について、実験データを取得した。試験体への熱的影響を実験結果に基づいて評価した結果、シリコン樹脂の熔融挙動に対して、電線、シュラウド等金属部分を介しての熱移動の影響が大きいことが明らかになった。なお、得られたデータは電線貫通部の挙動解析モデルの検証・改良に用いる予定である。

謝 辞

実験準備及び実験中の装置の運転や実験データの計測、実験後の後処理等は安全試験技術室（炉心損傷安全研究室兼務）の伊藤秀雄、小森慶一、園部久夫、八木岡隆一の各氏及び原子力エンジニアリング株式会社の石井正、野上稔、大内晴夫、小島正弥の各氏によってなされました。また、実験データの処理ではエイ・エス・アイ株式会社の鳥喰博美氏にお手伝い戴いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Clauss D. B.: Severe Accident Testing of Electrical Penetration Assemblies, NUREG/CR 5334, SAND89-0327 (1989)

表 2.1 試 験 条 件

	<u>SLB001</u>	<u>SLB002</u>
<u>高温高圧部</u>		
初期温度	285 K	287 K
最高温度	640 K	515 K
昇温速度	1 K/分	1 K/分
圧力	0.15 MPa	0.13 MPa
<u>低温低圧部</u>		
N ₂ 温度	290 K	290 K
圧力	0.14 MPa	0.12 MPa

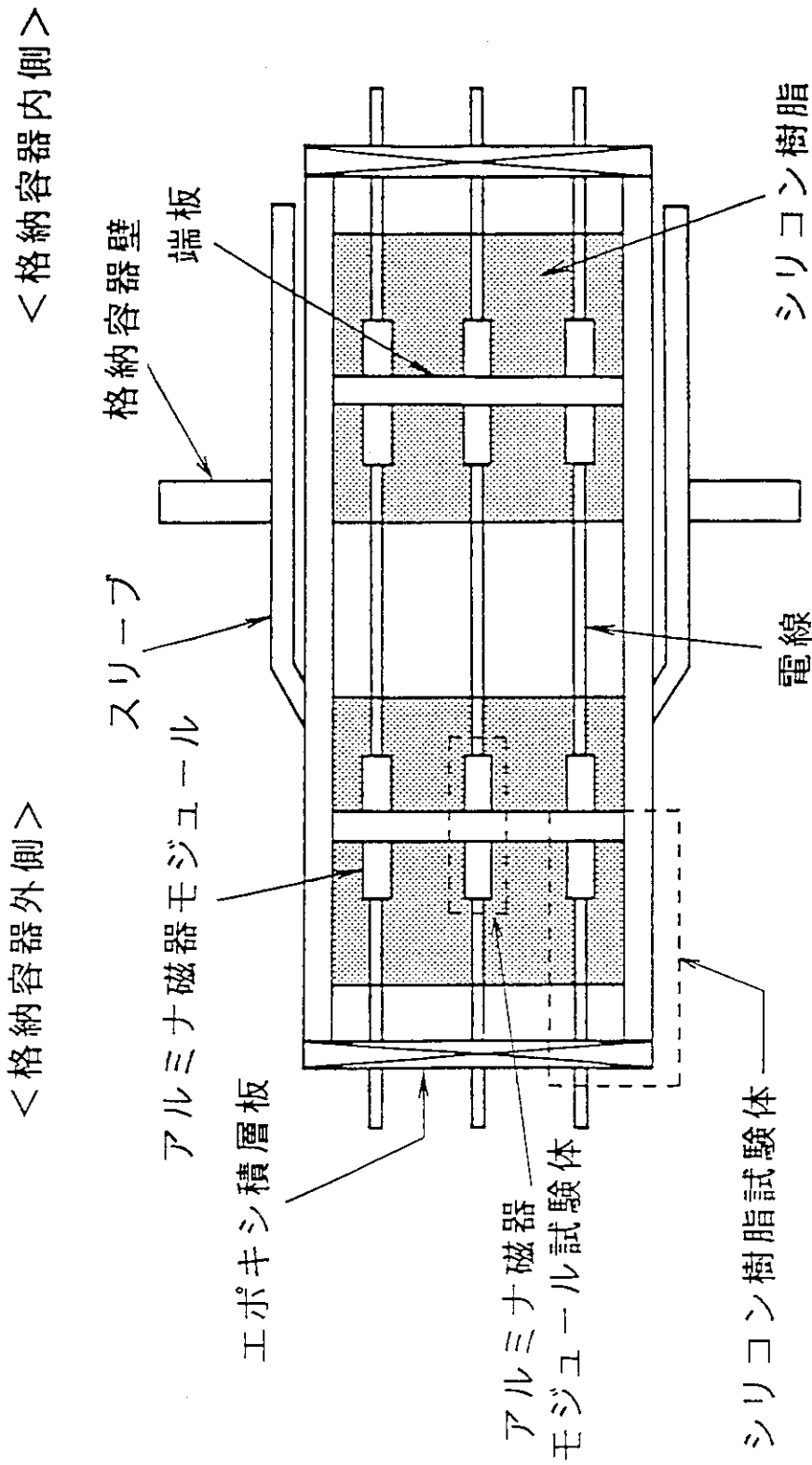


図2.1 電線貫通部概念図

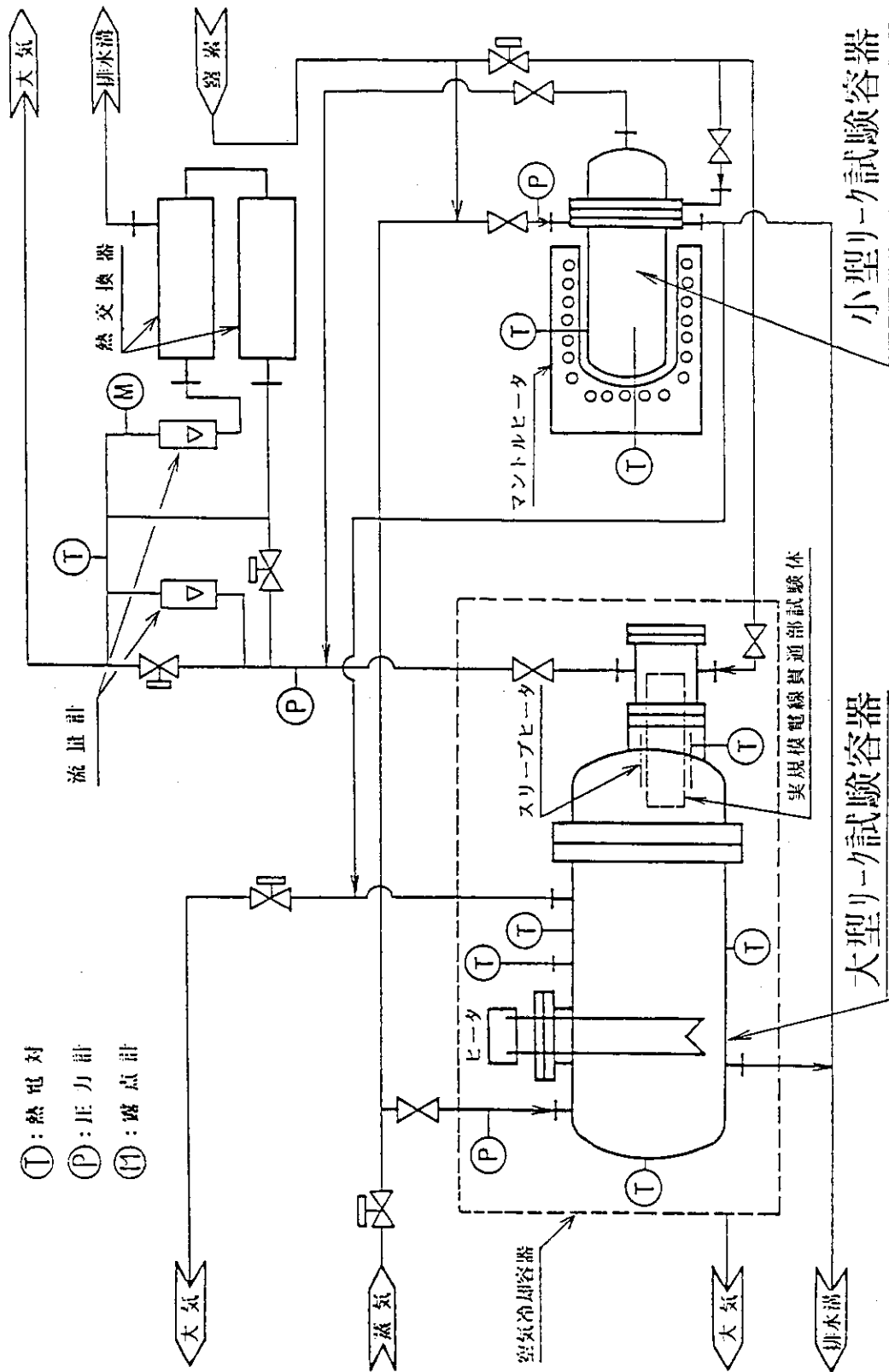


図 2.2 リーク試験容器廻り配管系統図

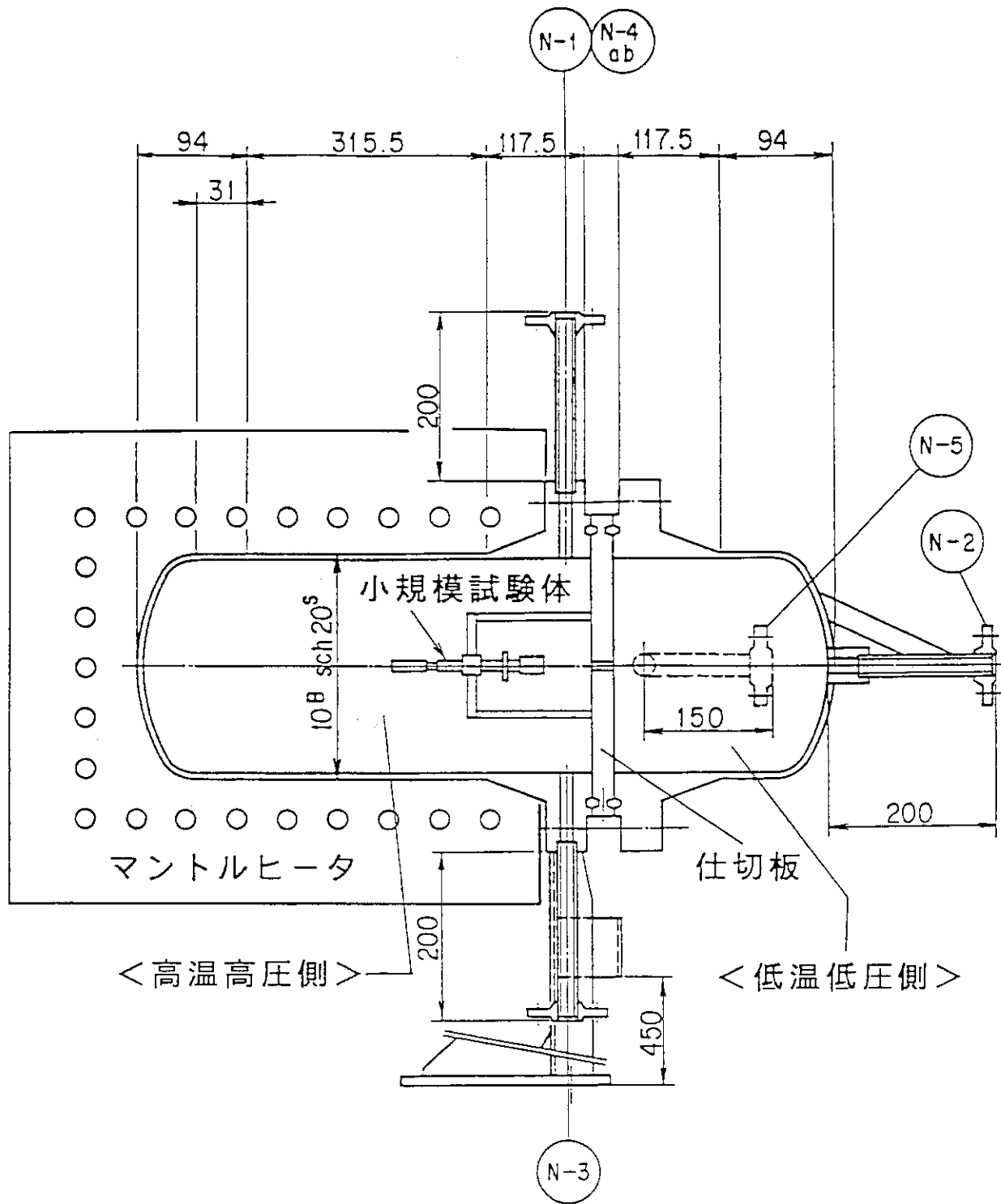
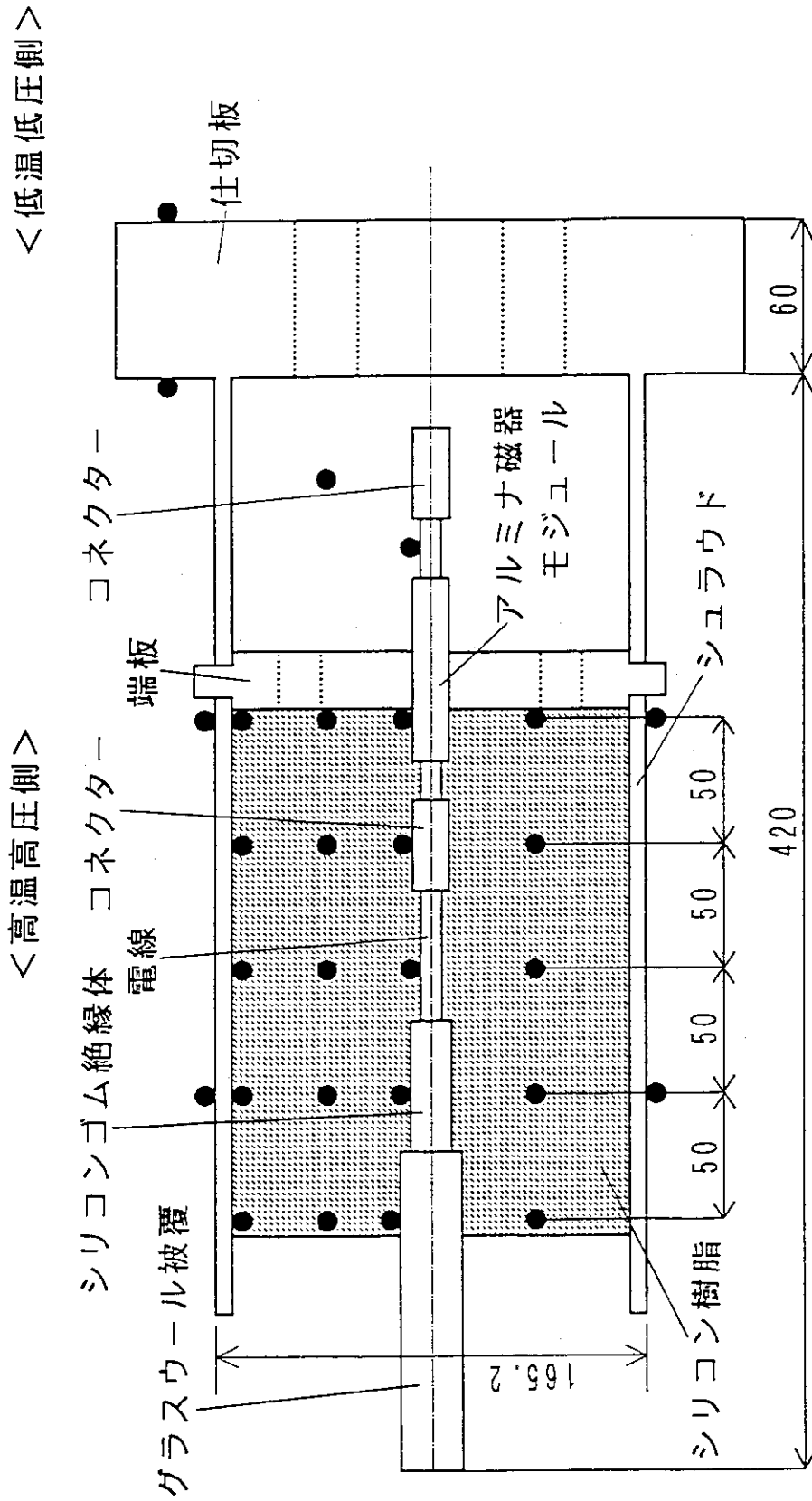


図2.3 小型リーク試験容器



● : タイプK熱電対

図2.4 シリコン樹脂試験体の概念図

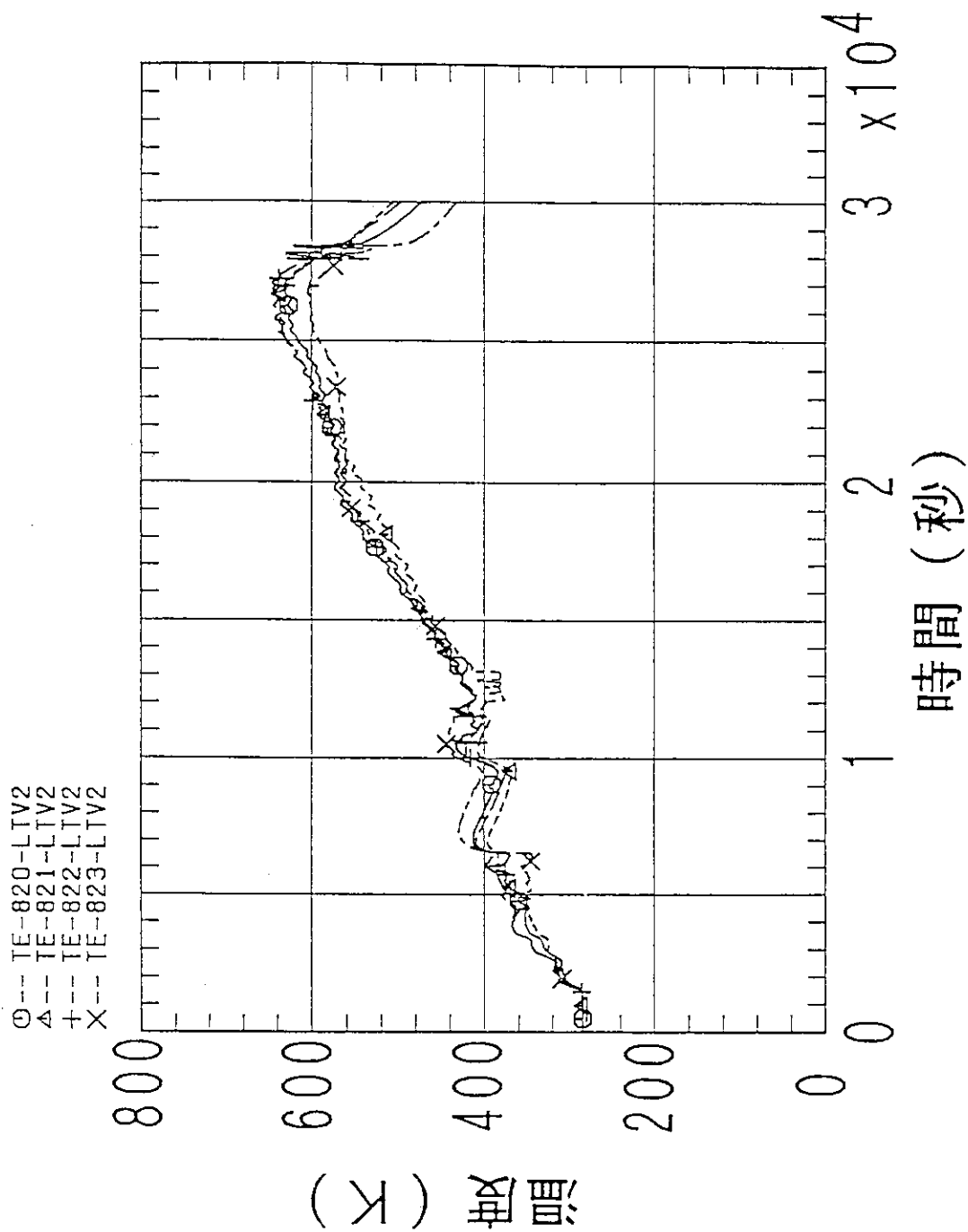


図3.1 試験容器高温側温度の経時変化 (SLB001)

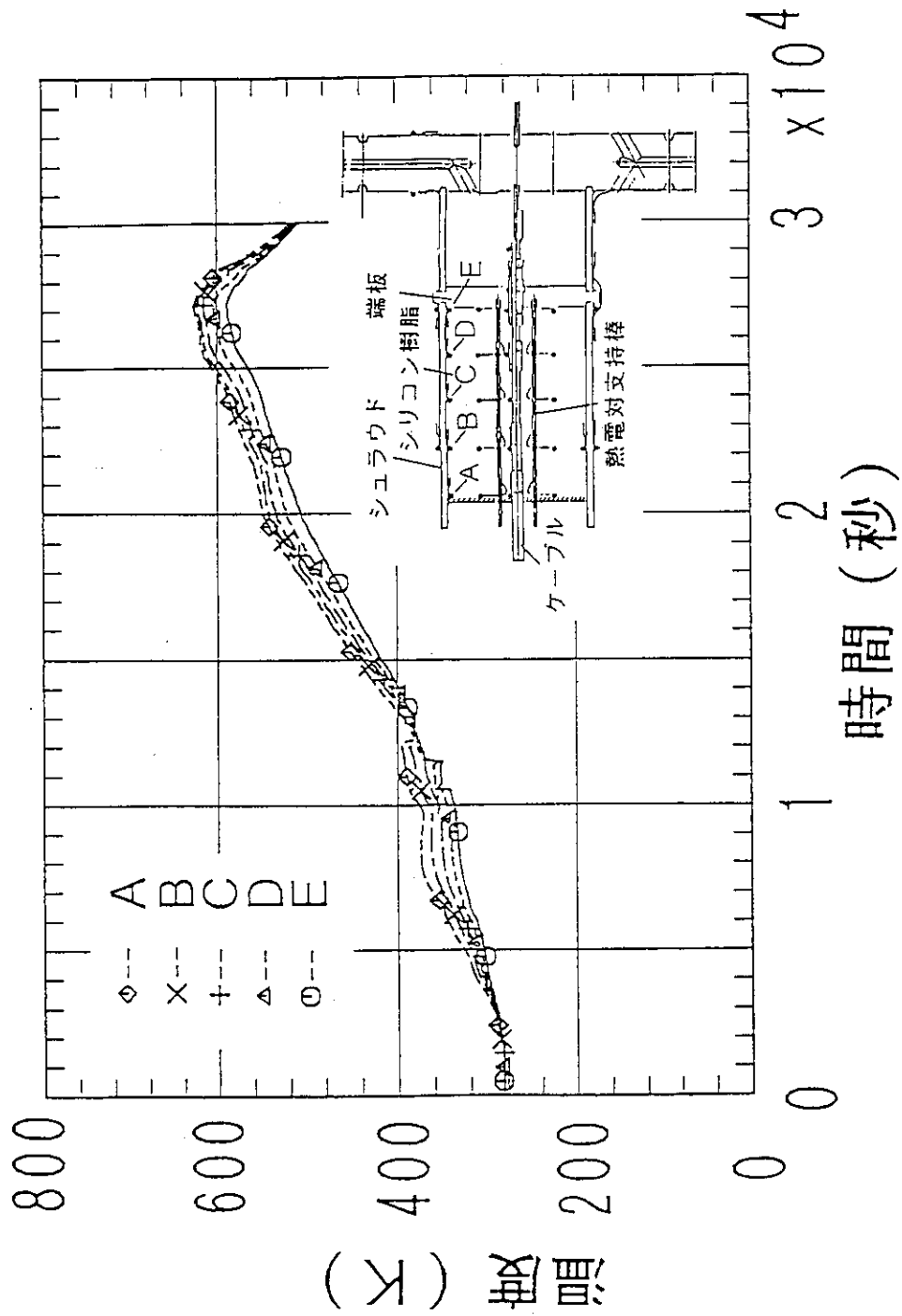


図3.2 シユラウド内面温度分布の経時変化 (SLB001)

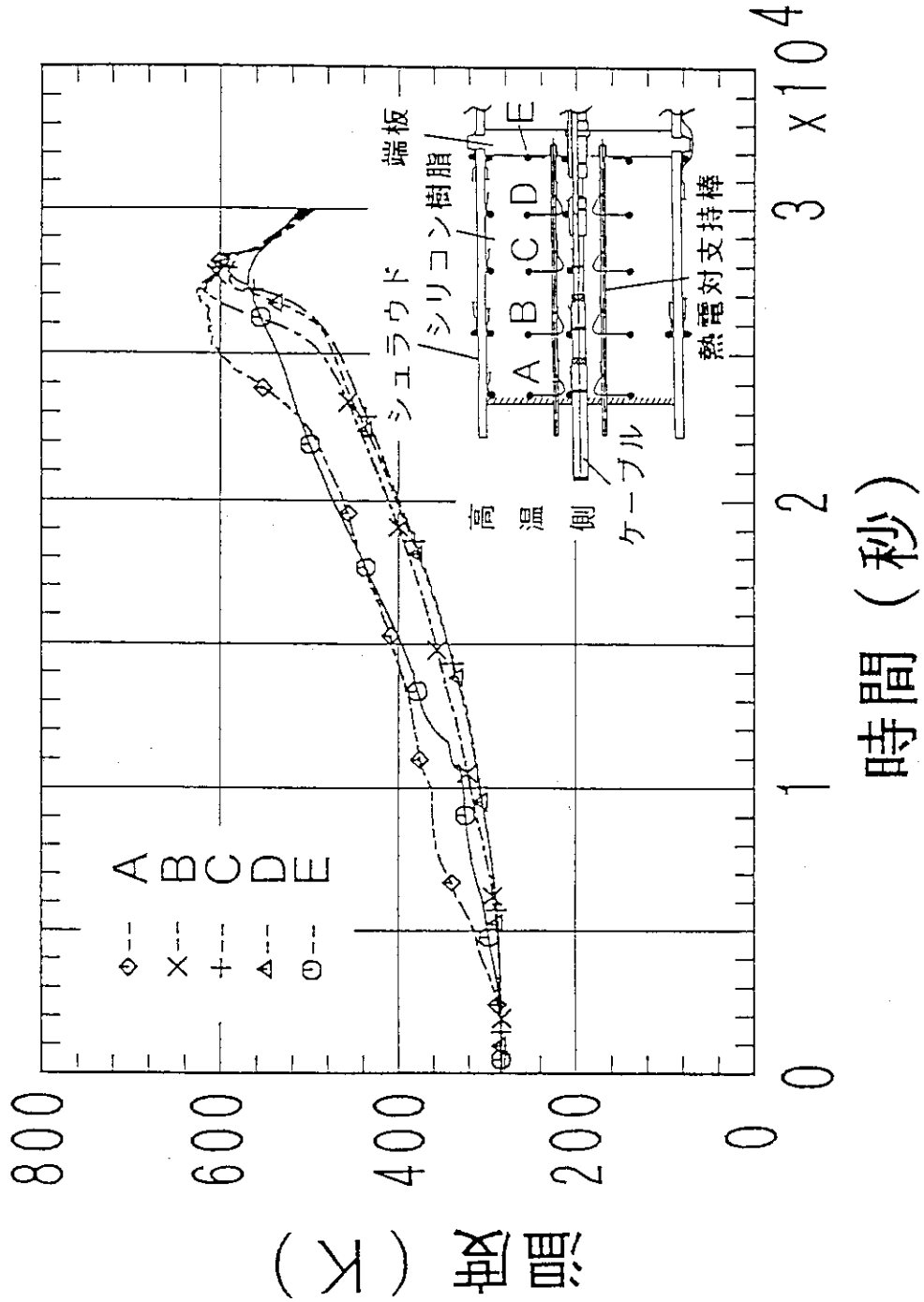


図3.3 樹脂内温度分布の経時変化 (SLB001)

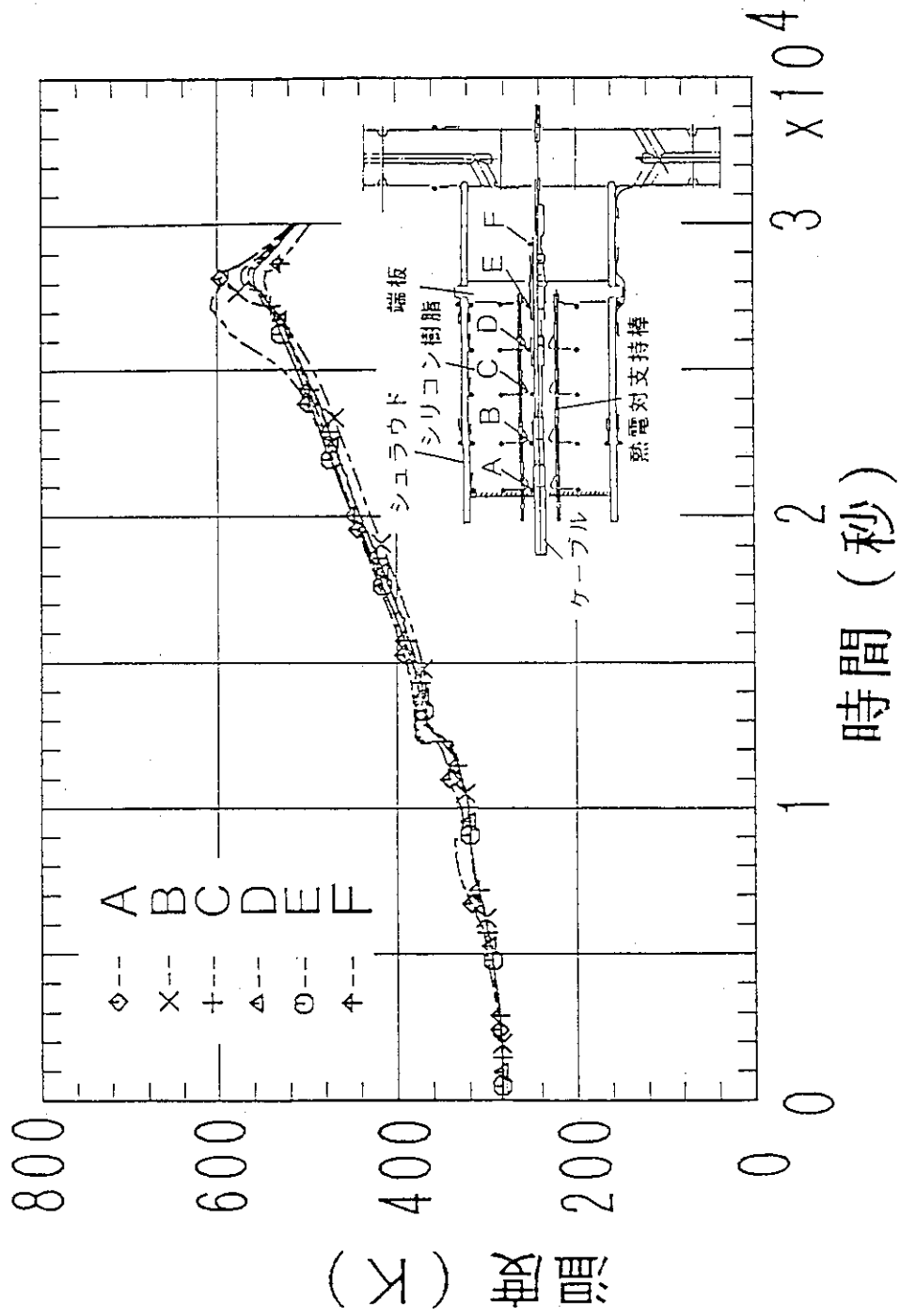


図3.4 導体に沿う温度分布の経時変化 (SLB001)

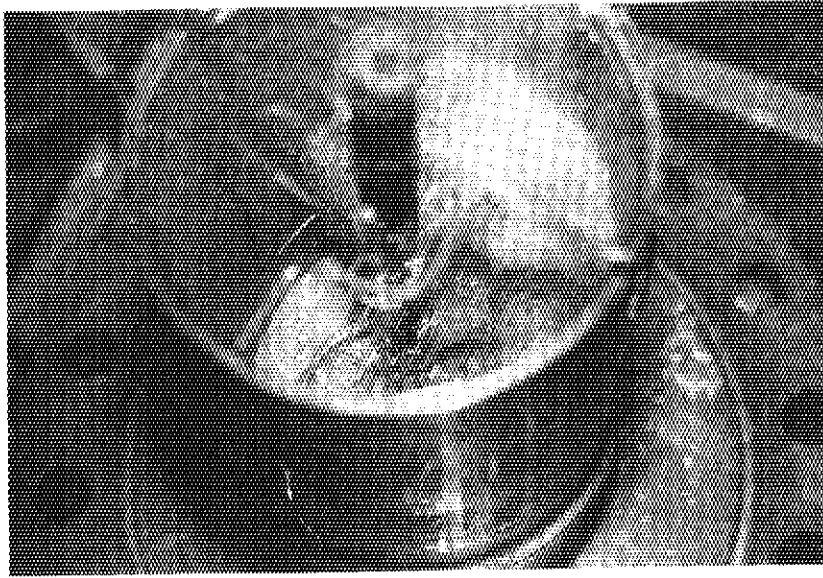


写真 3.1 実験後の試験体 (SLB 001)

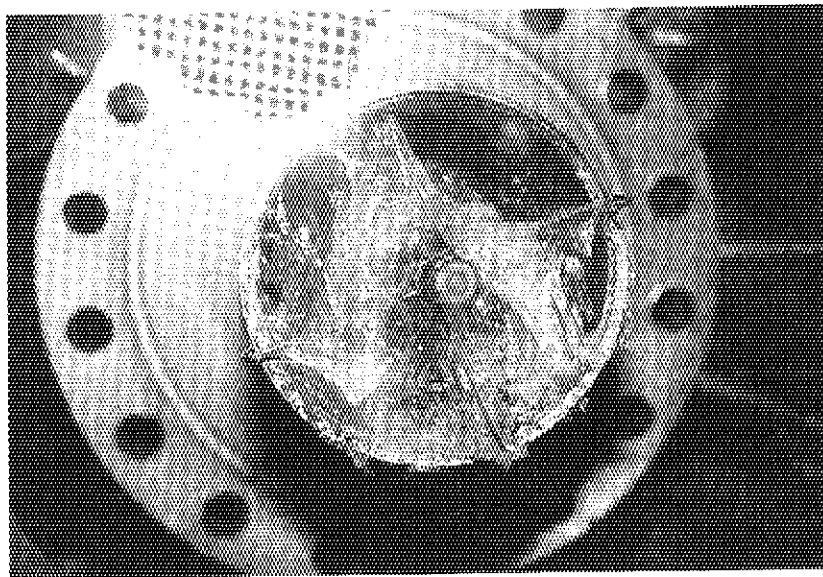


写真 3.2 実験後の試験体 (SLB 002)