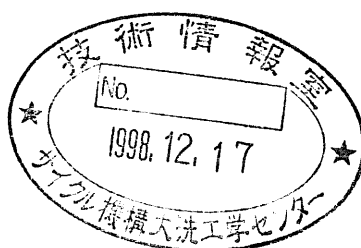


ナトリウム中コネクタの開発

(総集編)

1998年7月



動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki-gun, Ibaraki-ken 311-1393 Japan.

©動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

ナトリウム中コネクタの開発 (総集編)

片岡 一*, 野口 好一*
高津戸 裕司*, 宮川 俊一*

要 旨

高速実験炉「常陽」の炉心におけるオンライン計装照射のためには、計測線付き集合体 (INTA) で代表されるように、配線上の制約から照射集合体とその上部機構を一体構造にした長尺な装置が用いられている。もし、照射集合体の頂部にナトリウム中コネクタを設けて照射装置を分離構造にできれば、上部機構を再利用することにより照射試験の経済性が向上し、原子炉燃料交換時の装置退避が容易になって作業期間の短縮が期待できる。このため、ナトリウム環境中に適用できるコネクタ機構を動燃独自で考案し、昭和63年度から平成7年度にかけて、実用化のための開発研究を進めてきた。

先行例のないコネクタ機構であるため、要素試験、水中部分モデル試験と手順を踏みつつ設計仕様を固め、ナトリウム中部分モデル試験では、ナトリウムのブロー除去等の基本的な成立性が実証できるほどに開発が進んだ。しかし、ナトリウムと高温環境の影響により、電気絶縁材であるセラミックスと電極金属の間で剥離が生じ、構造上のバウンダリーが確保できないという問題も明らかになった。

この問題解決のため、セラミックスにはナトリウムとの共存性が期待できるサファイヤ、高純度アルミナ、窒化珪素等を選択し、電極材料にはステンレス鋼、コバル (Fe-Ni-Co 合金) 他、数種の材料を選択してそれらを組み合わせ、ロー付け材料やメタライズ材料、さらにはロー付け部の形状を変えて性能評価を行ったが、満足できる結果は得られなかった。

以上の開発は、大手セラミックスメーカーの最新技術による協力を得て進めてきたものであるが、ナトリウム中コネクタにおけるセラミックスの接合技術を確立する見通しが立たず、ここに考案したナトリウム中コネクタの開発は、1997年での本報告書のまとめをもって中断することとなった。

* 動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター 実験炉部照射課

Development of an Electrical Connector for Liquid Sodium Environment

— Final Report —

Hajime Kataoka* , Koichi Noguchi*

Hiroshi Takatsudo*, Shun-ichi Miyakawa*

Abstract

The Instrumented irradiation Test Assembly (INTA) has been used to conduct precision on-line instrumented irradiation tests in the experimental fast reactor JOYO. In INTA, direct instrumentation wiring between the irradiation test section in the core and the upper structure section in the rotating plug makes INTA structurally complex and expensive. Instead of direct wiring, if an electrical connector capable of withstanding a heated liquid sodium environment could be used between the irradiation test section and the upper structure section, the upper mechanism of INTA could be reused and testing costs would be drastically reduced. Moreover, the reactor load factor would be improved because of reduced handling time for INTA. In an attempt to gain this advantage, research and development of an electric connector in a sodium environment was carried out from 1988 to 1996 at PNC.

As no previous R&D had been conducted in this area, this development activity was conducted in a boot strap manner. The first test was carried out for a small model fabrication, the second was for a water partial model, and the third was for a sodium partial model. Based on those tests, a prototype design specification of the connector was determined. In the sodium partial model test, the resilience of the electrical connector insulation to the sodium environment was investigated. However, severe cracking in the ceramic insulator caused by the high temperature sodium environment was discovered at the junction of ceramic insulator and metallic electrode. This was recognized to be a critical problem because the boundary on the structure could not be secured. To address the problem, additional sodium partial tests were performed for various material combinations of ceramic insulators, metallic electrodes, brazing materials and metallization materials. However for insulator cracking, the results of the tests were unsatisfactory.

After all although the newest technology of main ceramics manufacturers were incorporated, a special junction technique between ceramics and metal constituting a precise connector in sodium could not be established. Therefore, it was decided that the development of the connector in sodium should cease at PNC in 1997.

* Irradiation Section, O-arai Engineering Center, PNC.

目 次

1. 緒 言	1
2. 考案したナトリウム中コネクタの概要	2
2.1 接続装置の基本原理	2
2.2 ナトリウム中コネクタの特徴	2
2.3 接続装置の構造概念と各種の工夫	3
3. 開発方針と実績工程	8
3.1 課題と対応	8
3.2 実績工程	8
4. 要素試験	12
4.1 破壊刃刃先角度、破壊板厚み選定試験	12
4.2 ガスブローダウン試験	12
4.3 コネクタ密着シール試験	13
4.4 液面変動試験	14
4.5 付着ナトリウム乾燥試験	18
4.6 セラミックスの耐ナトリウム性試験	20
4.7 セラミックス材料の照射試験	22
4.8 水中部分モデル試験	23
5. 部分モデルナトリウム中試験	29
5.1 供試体と試験装置	29
5.2 開放型コネクタの試験結果	30
5.3 密閉型1コネクタの試験結果	32
5.4 密閉型2コネクタの試験結果	34
6. 部分モデル試験体の解体検査	47
6.1 コネクタ供試体のナトリウム洗浄と洗浄後の観察結果	47
6.2 解体検査における検査項目と要領	48
6.3 開放型コネクタの検査結果	49
6.4 密閉型1コネクタの検査結果	51
6.5 密閉型2コネクタの検査結果	52

6.6 本解体検査におけるまとめ	53
7. セラミックス-金属ロウ付け試行試験	69
7.1 ロウ付け試行試験（その1）：平成3年度実施	69
7.2 ロウ付け試行試験（その2）：平成7年度実施	71
8. 評価	78
9. 結言	81
10. 謝辞	82
11. 参考文献	83

<付録>

ロウ付け試行試験（その2）用試験片製作に関する経緯	84
---------------------------------	----

表 リ ス ト

表3. 1 ナトリウム中コネクタの開発工程	10
表4. 1 セラミックスの物性	26

図 リ ス ト

図2.1 考案したナトリウム中接続装置の概要	5
図2.2 ナトリウム中コネクタ 3種類の構造	6
図2.3 ナトリウム中接続装置の構造概念	7
図3.1 開発課題と対応	11
図4.1 部分モデル水中試験装置	27
図4.2 ガス供給設備	27
図4.3 電極部の絶縁回復（開放型コネクタ）	28
図5.1 密閉型 1 甲コネクタ	36
図5.2 密閉型 1 乙コネクタ	37
図5.3 密閉型 2 甲コネクタ	38
図5.4 密閉型 2 乙コネクタ	39
図5.5 開放型甲コネクタ	40
図5.6 開放型乙コネクタ	41
図5.7 ナトリウム中コネクタ試験部	42
図5.8 ナトリウム中試験装置フローシート	43
図5.9 開放型コネクタの絶縁特性	44
図5.10 密閉型 1 コネクタの絶縁特性	45
図5.11 密閉型 2 コネクタの絶縁特性	46
図6.1 開放型甲コネクタ気密度試験切断位置、断面観察箇所	55
図6.2 開放型乙コネクタ気密度試験切断位置、断面観察箇所	56
図6.3 密閉型 1 甲コネクタ気密度試験切断位置、断面観察箇所	57
図6.4 密閉型 1 乙コネクタ気密度試験切断位置、断面観察箇所	58
図6.5 密閉型 2 甲コネクタ気密度試験切断位置、断面観察箇所	59
図6.6 密閉型 2 乙コネクタ気密度試験切断位置、断面観察箇所	60
図6.7 開放型甲コネクタ気密度試験、断面観察結果	61
図6.8 開放型乙コネクタ気密度試験、断面観察結果	61
図6.9 密閉型 1 甲コネクタ気密度試験、断面観察結果	62
図6.10 密閉型 1 乙コネクタ気密度試験、断面観察結果	62

図6.11 密閉型2甲コネクタ気密度試験、断面観察結果	63
図6.12 密閉型2乙コネクタ気密度試験、断面観察結果	63
図7.1 接合試験片（ロウ付け試行試験(その1)）	75
図7.2 形状模擬試験片（ロウ付け試行試験(その1)）	76
図7.3 ロウ付け試行試験(その2)用試験片	77

写 真 リ ス ト

写真6.1 開放型乙コネクタ外観観察結果	64
写真6.2 開放型コネクタナトリウム中浸漬試験結果 (XMA)	65
写真6.3 密閉型2甲コネクタ外観観察結果	66
写真6.4 密閉型2乙コネクタ外観観察結果	67
写真6.5 密閉型2乙コネクタハードクロムメッキ断面観察写真	68
写真6.6 密閉型2乙コネクタ接点板断面観察写真	68

1. 緒 言

高速実験炉「常陽」は、我が国唯一の高速炉照射施設として、高速炉の燃料・材料開発を中心とした様々な研究開発に活用されている。ここで、「常陽」における照射装置は、計測線付集合体(INTA)や温度制御型材料照射装置(MARICO)で代表される熱電対等の計測線が装備された 12 m 近い長尺のオンライン計装照射装置と、計測線を持たない全長 3 m 弱の小型のオフライン計装照射装置とに大別され、特にオンライン計装照射装置では、その計測線の配線技術について改良が望まれている。つまり、照射装置の計測線は、試料部集合体内部まで一体物のシースケーブルで配線せざるを得ないのに対し、試料部集合体頂部のナトリウム中で、通常のコネクタを用いるが如く感覚で、この配線を接・断できれば、照射装置の上部機構を何度も再利用できるから経済性が向上し、また、原子炉燃料交換時の装置退避が容易になって作業期間を短縮することができる。

このため、ナトリウム中コネクタを考案して特許^{1)~3)}を取得し、昭和 63 年から開発研究に取り組んできた。⁴⁾⁵⁾

主な開発成果としては、試作したナトリウム中コネクタ部分モデルを用いて、高温ナトリウム中の環境下において原理的な成立性を実証したものの、実用化のためには電気絶縁材であるセラミックスと金属の間に生じる気密不良を解決しなければならないことを明らかにした。専門メーカーの技術協力を得、当該部のロウ付け条件等を種々変えて解決を図ったが、現状技術では有効な対応法が見つからず、結局、考案したナトリウム中コネクタの開発は中断することとなった。

本報告書は、最後に実施した”セラミックス-金属ロウ付け試行試験”での成果を含め、開発研究全体を要約して総集編にまとめたものである。

2. 考案したナトリウム中コネクタの概要

2.1 接続装置の基本原理

考案したナトリウム中接続装置（以下、装置全体をナトリウム中コネクタと呼ぶ場合もある）の概要を図 2.1 に示す。便宜的にコネクタの一方を甲コネクタ(上部機構側:上側)、他方を乙コネクタ(試料部集合体側:下側)と呼ぶことにし、甲コネクタは、下部のみ開放した保護筒内に保持しておく。保護筒内に、ナトリウムの水頭圧に打ち勝つ十分なガス圧をかけて、保護筒をナトリウム中に沈めていっても、甲コネクタはガス中に保持されたまま沈んでいく。保護筒が沈むにつれて乙コネクタは保護筒内のガス中に露出し、最終的に甲乙コネクタの電極は、導電性のナトリウムに濡れることなく接続される。常に、保護筒に十分なガス圧を供給しておけば、甲コネクタはナトリウムに濡れることがないから、繰り返して使用することができる。

ここで、コネクタそのものの構造としては、3種類の概念を考案した。

2.2 ナトリウム中コネクタの特徴

3種類のナトリウム中コネクタの構造は、図 2.2 に示すとおりであり、それぞれ下記の特徴を持つ。

(1) 密閉型 1 コネクタ

ナトリウム中に晒される乙コネクタの電極を保護するため、乙コネクタの頂部に破壊板を設け、乙コネクタ内部を気密空間とする。コネクタ結合時には甲コネクタ先端に設けた破壊刃で破壊板を破り、電極同士を接続する。なお、破壊刃が破壊板に接触する寸前に甲コネクタの下降を停止し、甲コネクタ先端からガスをブローして、破壊板表面に微量残っているかもしれないナトリウムを吹き飛ばし、乾燥させる。また、コネクタの結合が完了すれば、甲コネクタに設けたガス管により、電極空間内に背圧をかけてナトリウムペーパーの浸入を防止する。この甲コネクタに設けたガス管は、他の2種類のコネクタについても同様に機能させる。

ところで、密閉型 1 の乙コネクタでは破壊板を再生することができないから、再使用することはできない。

(2) 密閉型 2 コネクタ

甲コネクタではナトリウムペーパーから、乙コネクタでは周囲のナトリウムから電極を確実に保護するため、それぞれ蓋で密閉空間を形成する。コネクタ結合時には両者の機械的な接触により、バネの反力で密閉していた蓋をそれぞれのコネクタの内部に退避させ、電極を露出して接続する。

密閉型 2 では、甲・乙コネクタとも再使用が可能である。

(3) 開放型コネクタ

乙コネクタ電極部にドレン孔を設け、そこに溜まったナトリウムは、保護筒が下降してきてガス中に露出した際に、自重で排出する。コネクタ結合後は、甲コネクタに設けた 2 本のガス管により、電極空間内にガスを循環して微量残るナトリウムを乾燥させる。

開放型でも甲・乙コネクタの再使用は可能であるが、正常な電気回路として機能させるまでには、残留ナトリウムの乾燥時間が必要である。

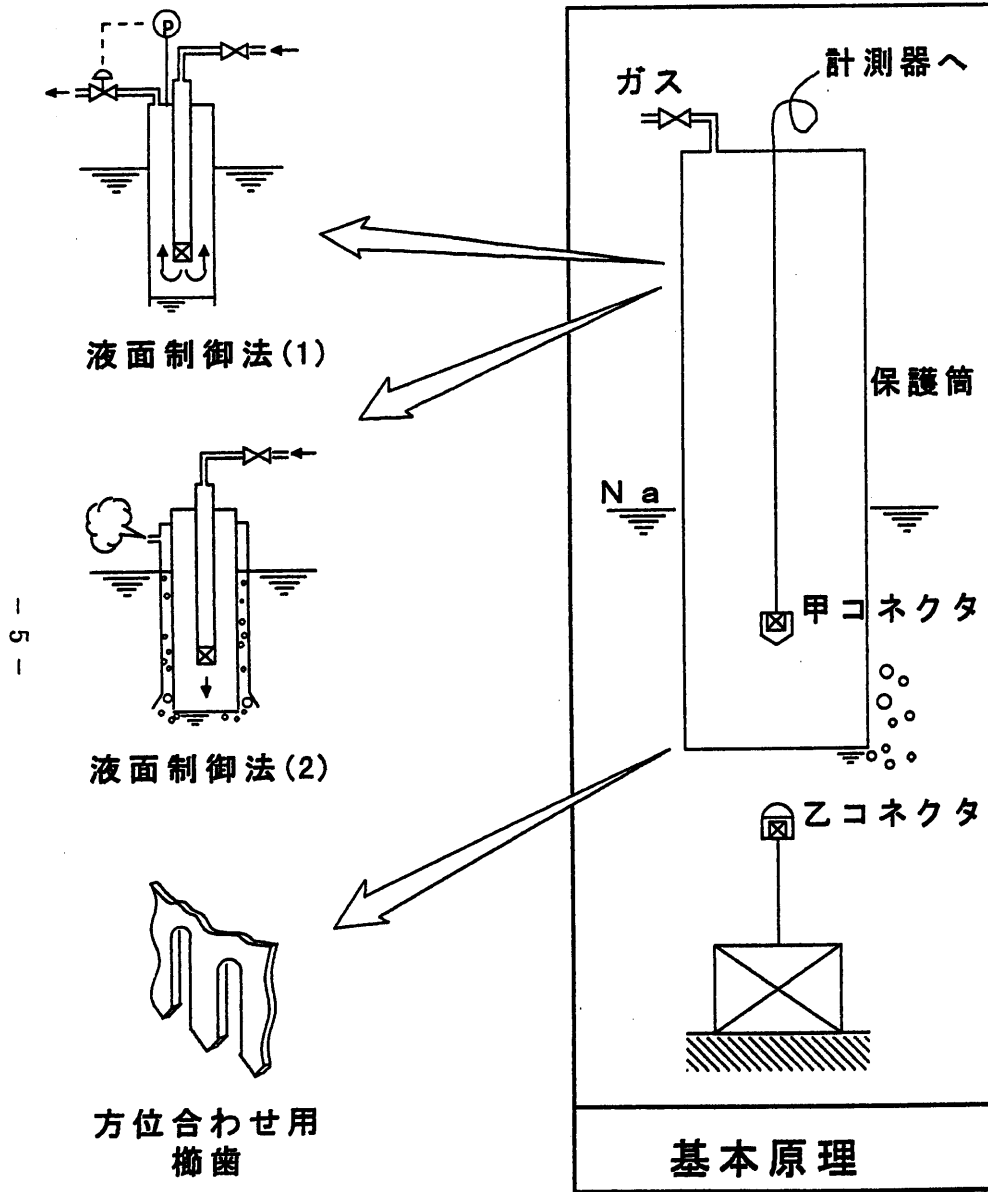
2.3 接続装置の構造概念と各種の工夫

ナトリウム中コネクタを用いた接続装置の構造概念を図 2.3 に示す。

接続装置は、内部に甲コネクタを有する保護筒、および甲コネクタと保護筒を上下動作させるための各種検出器を有する駆動装置、で成る上部機構と、乙コネクタを有する試料部集合体で構成する。また、保護筒や甲コネクタにはガス管を配管しておく。本装置は、前記基本原理に基づいて機能させるが、構造具体化のためには、さらに以下の点を考えた。

- (1) 甲・乙コネクタの接触面にテーパ形状のシール面を設け、乙コネクタシール面の下端には保護筒に取り付けた爪が掛かる突起部を設けた構造とする。コネクタ結合後、突起部に爪を掛けて相対的に甲コネクタを押し込むようにすれば、よりシール面の密着がよくなり、ガス供給を止めてナトリウム液面が保護筒内で上昇してきても、コネクタ内部がナトリウムに濡れることはない。
- (2) コネクタ結合の確認、シール面押し付けの確認は、駆動装置に設けた位置検出器の指示値とトルクメータのトルク減少で行えるようにする。
- (3) 供給ガス圧がナトリウムの水頭圧に打ち勝っていることは、位置検出器の指示値に基づく理論計算や、さらにガス供給を行ってもガス配管に設けた圧力計の指示値が上昇しないことで確認できるようにする。

- (4) 保護筒内部へ送気したガスが原子炉冷却材中に巻き込まれることを防止するためには、保護筒内部の圧力を監視して排気弁を制御する方法や、保護筒の外側にガス収集筒を設けて、かつ、カバーガス空間部に連通孔を開けておく方法で対処する。
- (5) 接続装置の上部機構と試料部集合体の大雑把な角度合わせは、保護筒下端を櫛歯形状にして、それを試料部集合体内に工作した角度ズレ矯正ガイド片と噛み合わせることで行うようにする。精密な角度合わせは、コネクタ同士の内部にも同様原理の機構を組み込むことを行うようにする。
- (6) 試料部集合体外形が六角形である性格上、コネクタ接続時に電極ピン同士の接続が 60° 毎の単位でずれることが考えられるが、コネクタ内の電極2本を犠牲にしてその間に既知抵抗をつなぎ、かつ配線を規則的に施工しておくことにより、外部から抵抗出力の線を探れば容易に各線を特定できるようにする。
- (7) 密閉型1コネクタにおける破壊板は、上側に膨らんだドーム形状とし、中心から放射状に破壊ガイド傷を設けておく。また、水頭圧が高い場合は、密閉空間内に予め内圧を封入することにより座屈破壊を防ぐようにする。
- (8) 密閉型1コネクタにおいて、乙コネクタの内側に溝を掘っておくことにより、破られた破壊板から微量のナトリウムが滴下しても溝に溜めておけるようにする。また、電極の根本は保護絶縁材を盛り上げて、微量のナトリウムが流れてきても電極との接触を避けるようにする。
- (9) 甲コネクタに設けたガス管は、次のように機能させる。
- ・ コネクタ結合直前の位置でガスをブローし、乙コネクタ頂部のナトリウムを吹き飛ばして排除する。
 - ・ コネクタ結合後は、ガス管に圧力をかけておくことにより、コネクタ内部へのナトリウム浸入防止とシール部健全性の連続監視を行う。
 - ・ 保護筒内のナトリウム液面を押し下げるためのガス供給に、甲コネクタのガス管を利用してよい。



3 概念
考案

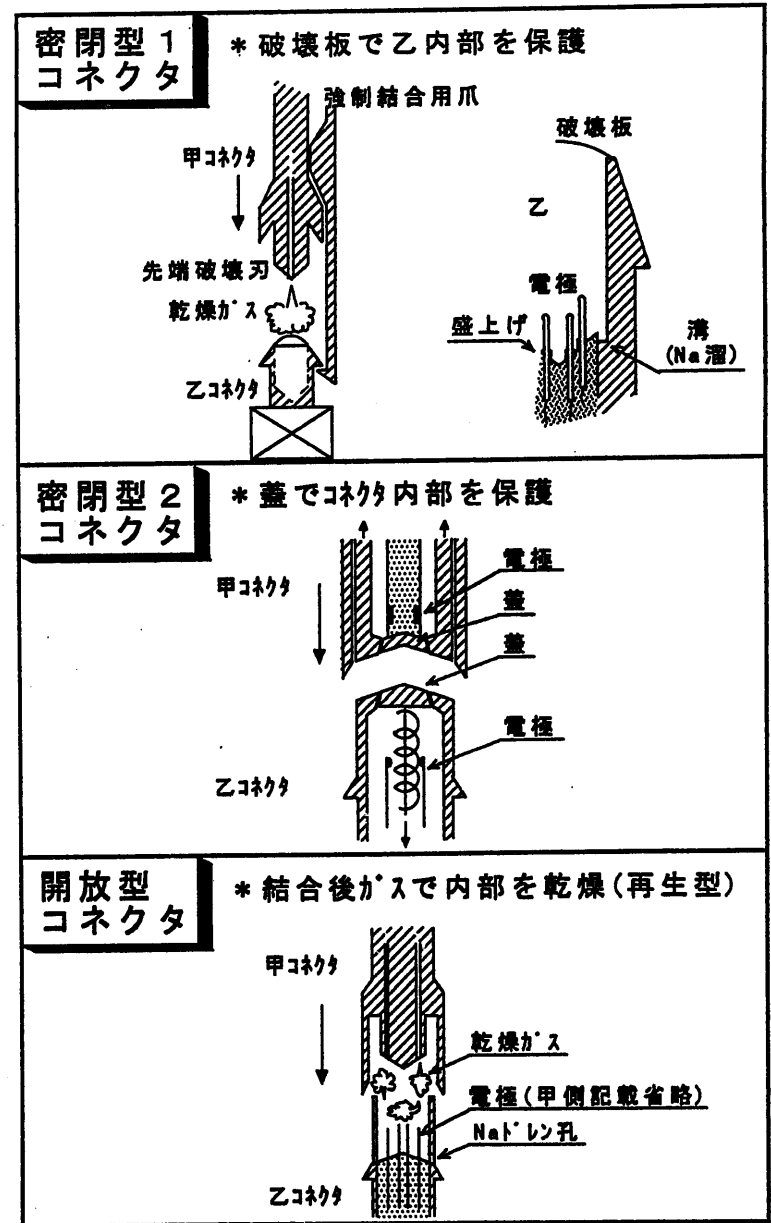


図2.1 考案したナトリウム中接続装置の概要

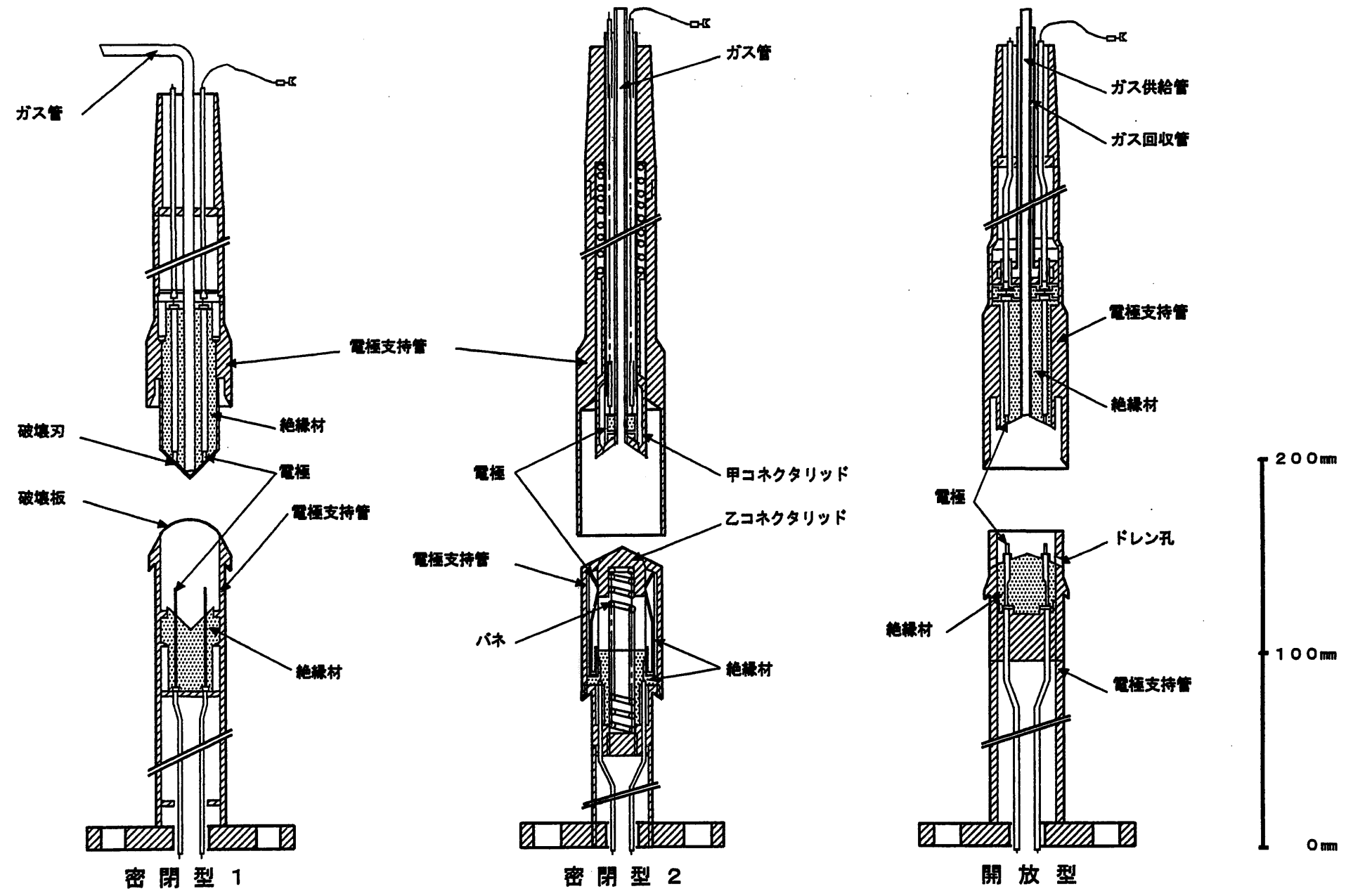


図2.2 ナトリウム中コネクタ 3種類の構造

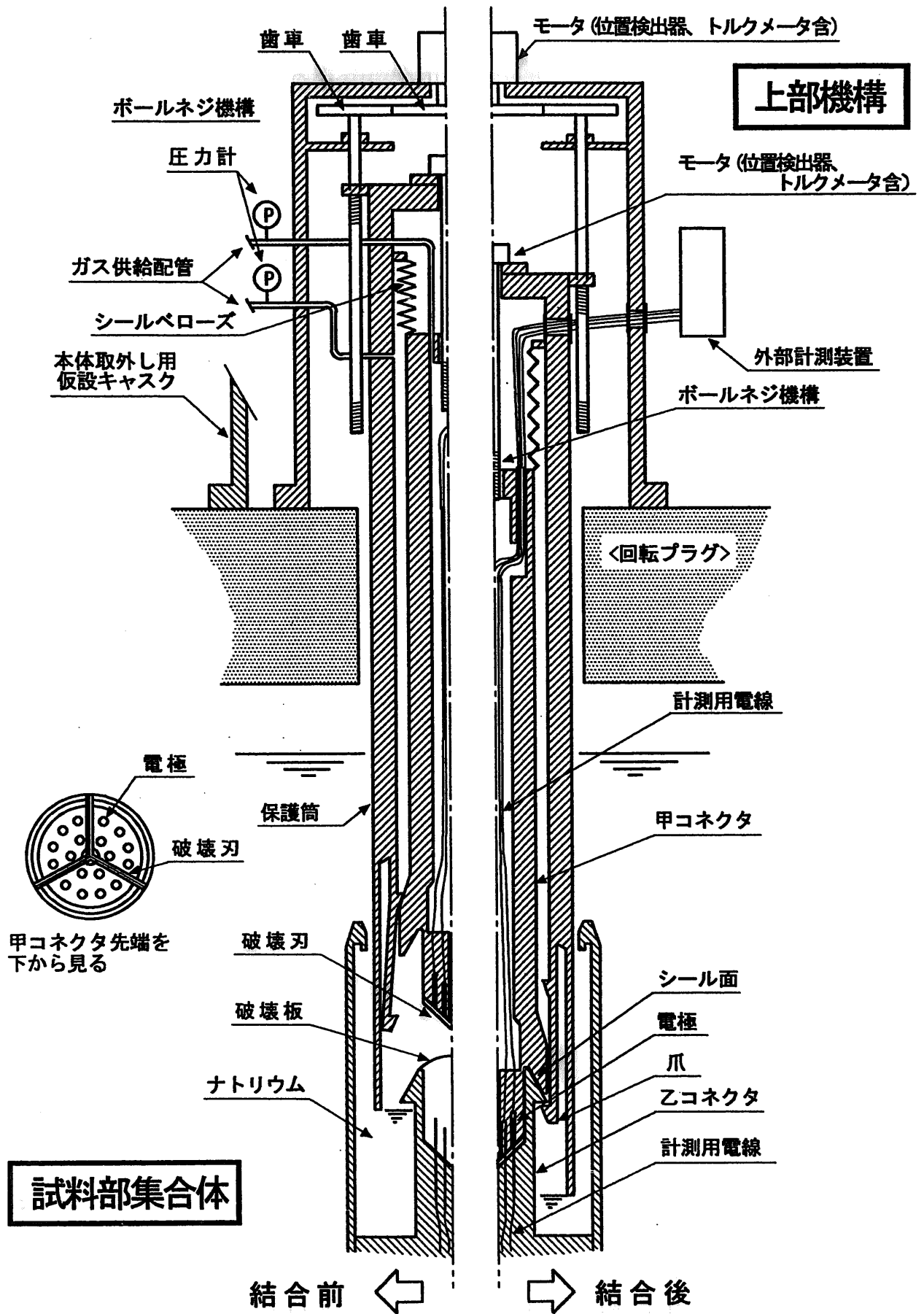


図2.3 ナトリウム中接続装置の構造概念

3. 開発方針と実績工程

3.1 課題と対応

ここに考案したナトリウム中コネクタについて、世界的にみても開発実績が認められず^{*}、参考情報が入手できなかったため、極めて基礎的な事項についても自ら試作・実験しながら設計仕様を固めていく必要があった。このため、開発手順として大きく3段階のステージを設定した。まず、期待どおりに機能するように具体的構造を設定するための要素試験を行い、次いで、コネクタ部のみの部分モデルによる試作体を用いて、水中やナトリウム中における基本性能を試験し、最終的には、接続装置フルモックアップを用いたナトリウム中試験によりシステムとして完成させる、という手順を考えた。

開発にあたり設定した開発課題と、その対応方法を図 3.1 に示す。

*注): 唯一、液体金属中で用いる電気コネクタが米国の特許⁹⁾に認められたため、駐在員を經由して参考情報を入手したところ、詳細不明ながら、ナトリウムの除去がうまくいかず開発を断念したとのことであった。

3.2 実績工程

ナトリウム中コネクタの開発工程を表 3.1 に示す。

開発の予備段階として、昭和 62 年度は構造検討を行い、昭和 63 年度から構造等を具体的に決定するための要素試験を開始した。また、絶縁材であるセラミックスを選定するためには、「常陽」を利用した照射試験と、炉外でのナトリウム中浸漬試験を実施した。ほぼ同時期に実施したコネクタ部分のみのモックアップ試験（部分モデル試験）では、コネクタとしての原理的成立性を実証した。しかし、その後に実施したモデルの解体検査において、金属体である電極ピンおよびコネクタボディと、セラミックスとの間のシール部に割れや剥離を生じていることが発見された。ナトリウム中コネクタのような小型、精密な構造に適用できるセラミックスと金属を接合する技術を、セラミックスメーカー各社の協力のもとに調べたところ、現状技術ではもっぱらロウ付け法に頼らざるを得ないという結論であった。

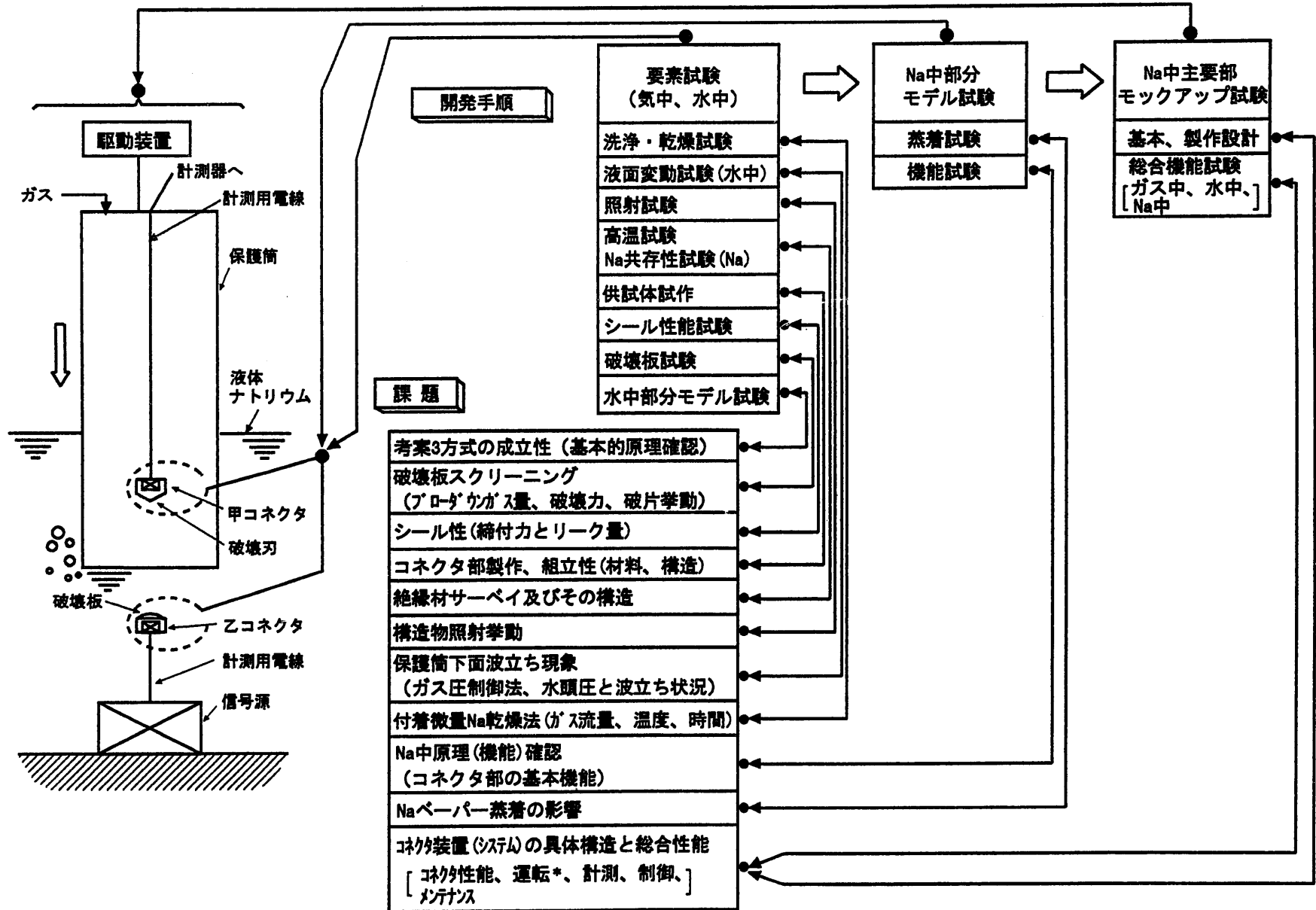
このため、平成 5 年からセラミックスや金属の材料の組合わせを変え、また、施工法も工夫して、コネクタとしての最適なロウ付け技術を模索したが、上記の不具合を解決

するには至らなかった。結局、平成9年に開発計画の中断を決定した。

この間に実施した各種試験の詳細と、得られた成果を次章以降に示す。

表3. 1 ナトリウム中コネクタの開発工程

項目 \ 年度	昭和62年	昭和63年	平成元年	平成2年	平成3年	平成4年	平成5年	平成6年	平成7年	平成8年
構造検討	検討	全体 試験設計								
要素試験		製作	試験							
セラミックス サーベイ			照射 (SMIR-16)	照射後試験	Na中 浸漬	分解 検査				
部分モデル試験			製作	Na中試験(3種類)		分解検査				
セラミックス-金属 ロー付け試行試験							調査・検討	製作	Na中 浸漬	分解 検査
評価										総合評価



* 据付け後の熱膨張吸収機構、結合時の位置決め機構

図3.1 開発課題と対応

4. 要素試験

4.1 破壊刃刃先角度、破壊板厚み選定試験

<目的>

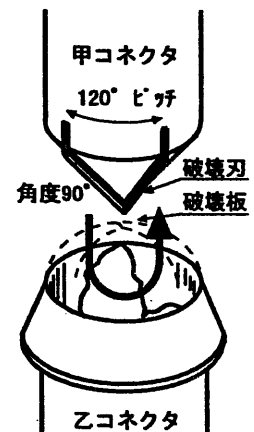
密閉型 1 コネクタの刃先角度と、破壊板の厚みを決定する。

<方法>

模擬甲コネクタの先端に 3 枚で成る破壊刃を取り付け、下方には治具で固定した破壊板を設置し、両者を卓上ボール盤に組み込むことによって相対的に上下運動ができるようにし、実際に破壊板を破る際の特性を試験した。

○ 条件

- | | |
|--------------|--------------------------|
| ・ 雰囲気 | 常温大気中 |
| ・ 寸法 | 主要部実寸大 |
| ・ 材質 | 主要部ステンレス鋼 |
| ・ 甲コネクタ刃先角度 | 70°、90° の 2 種類 |
| ・ 乙コネクタドーム半径 | 17mm |
| ・ 破壊板厚み | 0.2、0.3、0.4、0.5mm の 4 種類 |



<結果>

刃先角度 90° の破壊刃では、0.2mm 厚みの破壊板しか破れなかったが、刃先角度 70° の破壊刃では、0.2mm および 0.3mm 厚みの破壊板を破ることができた。破壊板切断中の荷重は鋭角な 70° の方が少ないが、切断を完了して破片を乙コネクタ内部に延ばし込むような状態になると、70°、90° とともに 170kg 程度の最大荷重を示す。

結局、設計上は、刃先が傷みにくい点を考慮して、刃先角度 90°、破壊板厚み 0.2mm を採用し、200kg を駆動荷重値とした。

4.2 ガスブローダウン試験

<目的>

破壊板表面にドレンされずに残るであろう微量のナトリウムを、破壊板を破る前にガスで吹き飛ばすため、ブローによる吹き飛ばしの状況を観察する。

<方法>

前記試験で用いた模擬甲・乙コネクタを利用し、甲コネクタにはガス系を接続して、また、乙コネクタの破壊板には予め模擬液体を吹き付けて付着させ、両者の距離とガス流量を変えて状況を観察した。

○ 条件

- | | |
|---------|----------------------|
| ・ 使用ガス | 窒素ガス |
| ・ ブロー流量 | 30、50NI/min |
| ・ ブロー距離 | 1～10cm |
| ・ 付着液体 | 着色した水、液体浸透探傷試験用赤色浸透剤 |

ここで、付着液体に赤色浸透剤を選んだのは、詳細物性は不明ながら、水に比べて粘り感があること、乾燥しにくいこと、表面張力が小さいように見受けられること等の理由により、ナトリウムの物性は水と赤色浸透剤の間におさまるであろうと、感覚的に判断したことによる。

<結果>

試験条件がナトリウムそのものを模擬していないので定性的な表現にとどめるが、破壊板表面に付着した液滴、もしくは薄膜を除去するのにガスブローは効果的であった。ただし、噴出ガスによる液体の吹き飛ばし除去効果が有効なのは数秒から十数秒程度であり、この間は風圧によって液滴が動くが、それ以降は蒸発乾燥によって除去されるように観察された。

設計上は、破壊板の数 cm 上に精度良く甲コネクタを停止させるための制御や、数 10NI/min のガス流量を確保できる配管系を検討していくことにした。

4.3 コネクタ密着シール試験

<目的>

考案したナトリウム中コネクタでは、甲・乙コネクタ構造体の外側にお互いに密着し合うテーパ（円錐）形状のシール部を設けていて、より確実な接触を保つため爪で締め付ける工夫をしている。このシール機構により、コネクタ結合後は、もし誤操作により保護筒内部のナトリウム液面が上昇しても、内部電極が外のナトリウム雰囲気から完全に隔離されるし、結合した内部電極空間内に流体を流す等の工夫が安心して行えるわけである。ここでは、爪の締め付け力と密封性の関係を調べた。

また、密閉型 2 コネクタ自身が持つリッド部のシール性についても調べた。

<方法>

模擬甲・乙コネクタのシール面を接触させ、両面が密着するように爪を掛けてジャッキボルトで締め上げる。そして、密着内部空間に前述のガス設備より窒素ガスを供給して加圧し、コネクタを水中に浸してシール面からのガス漏れ量を計測した。

密閉型 2 コネクタについても同様に、コネクタ内部に加圧してリッド部からのガス漏れ量を計測した。

○ 条件

- | | |
|-------------|-------------------------|
| ・ 雰囲気 | 常温、水中 |
| ・ 寸法 | 主要部実寸大 |
| ・ シール面仕上げ程度 | ▽▽▽ |
| ・ 材質 | ステンレス鋼 |
| ・ 加圧圧力 | ～ 2kg/cm ² G |
| ・ 締め付けトルク | ～ 30kgcm |

<結果>

爪の締め付けトルクを大きくするに従ってシール部からのガス漏れ量は減少し、30kgcm のトルクを与えればガス漏れは認められなくなった。30kgcm のトルクを試験体系での荷重に換算すれば、約 110kg となることから、設計上の爪駆動荷重値としては 200kg を採用することにした。

密閉型 2 コネクタのリッド部については、0.1 ～ 0.2kg/cm² 程度の内外圧力差で、どちらの方向に対してもガス漏れが認められた。リッドを押しつけるバネの反力を強めてみても（リッド部の面圧に換算して、0.65kg/cm² → 2.7kg/cm²）、漏れ量がやや少なくなる程度であり、漏れそのものを止めることはできなかった。結局、リッド部については、片側の面の硬さを変えてリークを止める等、バネ力とは別の対策が必要となることが分かった。

4.4 液面変動試験

<目的>

保護筒内にガスを充満しておくにしろ、甲コネクタの先端からガスをブローするにしろ、保護筒内には適度な量のガスを供給することになる。この時、余剰のガスを排

気しなければならないが、一つの形態として、保護筒下端から周囲のナトリウム中へ溢れさせる排気法が考えられる。

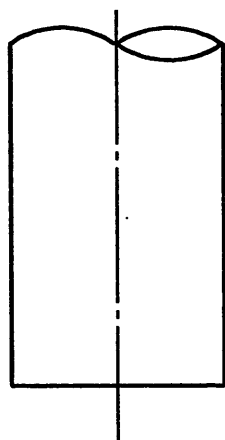
ところで、この方法では、保護筒下端から泡が放出される際、保護筒内の液面が波立ち、場合によっては液面からシブキが飛んで、コネクタ部に付着することが懸念される。また、実機において保護筒下端からオーバーフローするガスは、原子炉内冷却材中に放出されることになるが、主循環ポンプのキャビテーションや気泡付着による燃料ピンの局部加熱等の心配をしないためにも、このガスを冷却材中から積極的に分離開放することが望ましい。このため、ガス排気時の液面変動挙動と、オーバーフローするガスの回収挙動を観察した。

<方法>

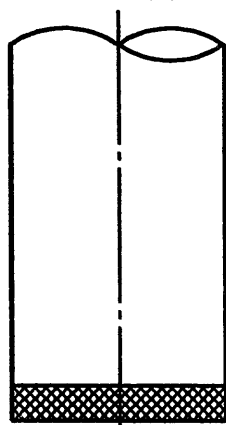
可視化のため、保護筒はアクリル、流体は窒素ガスと水で模擬し、保護筒内に一定流量でガスを流しながら保護筒を上下動させて、保護筒先端（内径φ 50mm）からオーバーフローするガスにより、跳ね返る液面の高さおよびオーバーフローするガスの回収率を目視により観察した。

○ 条件

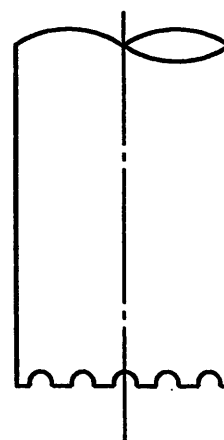
- ・ 水深 1, 2, 3 m
- ・ ガス流量 10, 20, 30, 40, 50 l/min
- ・ ガス回収管の保護筒先端からの高さ 100, 200 mm
- ・ 保護筒先端形状 下図の3通り



A. 円柱状のまま



B. メッシュ付き
(10, 17, 40)
(メッシュ付替え)



C. 半円切欠き付き
(穴数 12ヶ)
(穴径 2, 4, 6mm)

<結果>

(1) 液面の波立ち現象の観察

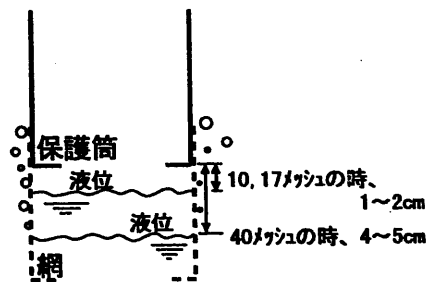
以下に保護筒先端が円筒状の場合の、ガス流量に対する保護筒先端からの液面の

跳ね返り高さを示す。

流量(l /min)	10	20	30	40	50
保護筒先端からの液面跳ね返り高さ (c m)	最大 1 平均 0	最大 2 平均 0	最大 3 平均 1	最大 5 平均 1	最大 5 平均 3

保護筒先端が円筒状の場合、先端部から表面張力によりガスは大きな塊となって間欠的に排出された。このため、流量の増加とともに液面の跳ね返りは大きなものとなった。また、跳ね返り高さは水深に関係なく、同程度の高さとなった。

保護筒先端に網を取り付けた場合は液面が網の中に下がり（次図参照）、ガスは小さな気泡となって均一的に連続して排出されるため、液面の跳ね返りはほとんど観察されなかった。



保護筒先端に多数の切り欠きをつけた試験では、都合上、塩ビ管に切り欠きを工作して取り付けため、跳ね返り状態は詳細に観察できなかったものの、切り欠き部からガスが少量ずつ分散して排出されるため跳ね返りが緩和され、円筒状のままよりも跳ね返り高さは明らかに減少していた。

[考察]

液面の跳ね返り高さは、先端が円筒状のままの場合で最大 5cm となった。また、保護筒先端に網あるいは切り欠きを設けると、この高さを小さくすることができた。

ところで、ナトリウム中接続装置の概念検討によると、保護筒先端から甲コネクタ先端までの高さは、コネクタの上下動時で約 15cm、コネクタ結合直前におけるブロー乾燥時で約 10cm となっており、これらの値は上記の 5cm を満足する値となっている。

ここで、水と液体ナトリウムの相違による液面変動の違いは、両者の粘性の違いを考慮すればよいと思われるが、水の粘度は常温で 1×10^2 ポイズ、ナトリウムは 200℃ で約 5×10^3 ポイズであり、ナトリウムの方が粘性は小さく、液面変動幅は

大きくなると考えられる。しかしながら、保護筒先端への網の取り付けや切り欠きを設けることにより、液面の跳ね返り高さを小さくできることから、甲コネクタの保護筒内の収納高さは十分であると判断されるので、液面の跳ね返りによるコネクタ絶縁劣化の現象は防止できると考える。

(2) オーバーフローガスの回収

保護筒からオーバーフローしたガスの回収率に関する観察結果を下表に示す。

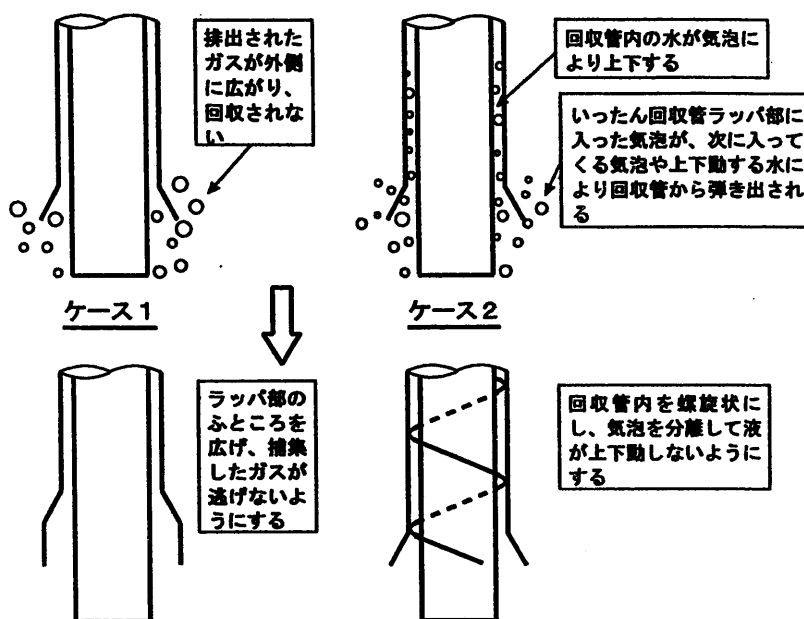
先端形状・ 回収管高さ	流 量 (l/min)	流 量				
		8	10	15	20	30
円筒状	$l=100$	90 ~ 100	70 ~ 90	60 ~ 70	40 ~ 60	30 ~ 50
	$l=300$	50 ~ 60	50 ~ 60	40 ~ 50	30 ~ 40	20 ~ 30
10 メッシュ 網付き	$l=100$	ほぼ 100	95 ~ 100	80 ~ 90	70 ~ 80	50 ~ 60
	$l=300$	60 ~ 80	60 ~ 80	50 ~ 70	40 ~ 60	30 ~ 50
17 メッシュ 網付き	$l=100$	ほぼ 100	約 95	約 90	約 80	約 70
	$l=300$	80 ~ 90	約 80	約 70	60 ~ 70	50 ~ 60
40 メッシュ 網付き	$l=100$	ほぼ 100	ほぼ 100	95 ~ 100	90 ~ 95	約 80
	$l=300$	80 ~ 90	約 70	約 60	約 50	約 40
$\phi 4$ 半円 $\times 12$ 切り欠き付き	$l=150$	90 ~ 95	80 ~ 90	約 70	約 60	約 50
	$l=350$	80 ~ 90	70 ~ 80	約 60	約 50	約 40
2mm 幅 $\times 10$ mm $\times 12$ 切り欠き付き	$l=150$	95 ~ 100	90 ~ 95	約 90	約 80	60 ~ 70
	$l=350$	約 90	約 80	約 70	60 ~ 70	50 ~ 60

l : 保護筒先端からの回収管先端の高さ(mm)

保護筒先端に網や切り欠きを設けると、オーバーフローする気泡を細泡化して横

への広がりを防止できるため、回収効率を高めることができた。

また、回収管で気泡を十分に回収できないケースとしては、
 ・気泡が回収管先端のラッパ管の外側に広がって改修できないケース、
 ・一度回収管に入りながら次に入ってくる気泡や、回収管内を上下動する



る水により弾き出されるケース、が観察されたので、図のような対策案を考えた。

4.5 付着ナトリウム乾燥試験

<目的>

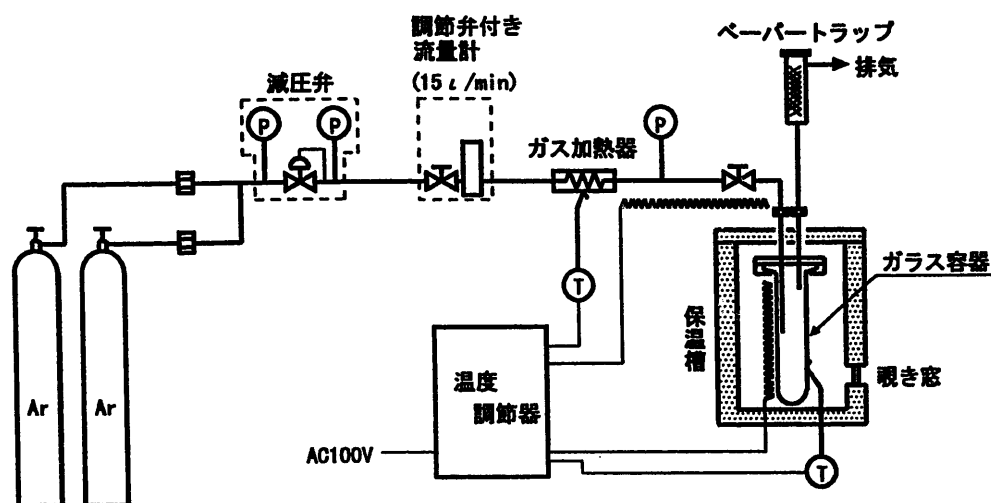
密閉型1および密閉型2コネクタでは、コネクタ結合前に乙コネクタ頂部を保護筒内のガス空間に露出させ、破壊板やリッドの表面に残存するであろう微量付着ナトリウムを、甲コネクタ先端のノズルからガスブローして取り除く必要がある。また、開放型コネクタでは、コネクタ結合後に電極部空間内に乾燥ガスを循環して、絶縁回復を図る必要がある。本試験では、これらのナトリウム除去、乾燥時の挙動を調べた。

密閉型1コネクタでは、既に4.2項ガスブローダウン試験として除去挙動を観察したが、ここでは付着液体を実際のナトリウムとして試験したものである。

<方法>

観察のためには耐熱用のガラス容器を用い、予め不活性ガスに置換したグローブボックス内においてナトリウム、もしくはナトリウムを載せた破壊板を容器内にセットし、次いで、ガラス容器を下図の構成で成る試験装置に取り付け、昇温、ガスブローして挙動を観察した。

ナトリウム除去、乾燥の評価のため、目視の他に試験前後の重量も測定した。



○ 条件

- ・ 乾燥ガス アルゴンガス
- ・ 流量 5 ～ 15 l/min
- ・ ガス温度 200 ～ 300 °C
- ・ ガス通気時間 最長 166 時間

<結果>

破壊板へのガスブロー試験では、所定の温度に昇温した後 0 ～ 170min の範囲で一定時間保持し、破壊板とガス吹き出しノズルとの距離を、8 ～ 45mm の範囲で変化させて試験した。温度が 200 °C の場合は、ガスブローする距離および昇温後の保持時間に関係なく、ガス流量 10 ～ 15 l/min で破壊板上に付着したナトリウムが除去できた。破壊板上に付着したナトリウムは、ガスブロー開始後すぐに風圧により吹き飛ばされ、ほぼ 1 分以内で除去された。ガス管を破壊板中心より偏芯してガスブローすると、ナトリウムは吹き出しの反対側に移動し、除去されずに残った。

300 °C における試験では、ナトリウムが破壊板に濡れるようになるため、保持時間を長くするとナトリウムは除去され難くなった。

ガラス容器の中にナトリウムの粒を入れて昇温し、最長 166 時間程度その蒸発状況を観察した結果では、200 °C、300 °C いずれの温度でも蒸発によるナトリウムの減量は認められなかった。しかしながら、300 °C における試験では、ガラス容器の壁に極薄くナトリウムのペーパーが付着しており、わずかに蒸発した跡が見られた。

これを考察するに、200 °C におけるナトリウムの飽和蒸気圧は約 1.4×10^4 mmHg で、300 °C でも 1.4×10^2 mmHg 程度と非常に低く、500 °C でやっと 3.9 mmHg になって、

水の 0℃の飽和蒸気圧 4.6mmHg とほぼ同値になることから、200～300℃の低温では蒸発によるナトリウムの乾燥効果が期待できないものと思われる。

結局、乙コネクタ頂部表面の付着ナトリウムは除去できることが確認できたものの、乾燥させるためには、乾燥対象部を高温にしなければならないことが分かった。

4.6 セラミックスの耐ナトリウム性試験

<目的>

ナトリウム中コネクタにおいて、ステンレス鋼等の構造材と電極の間には絶縁材が必要となり、これにはセラミックスを適用することで計画した。コネクタの使用環境を考慮し、適用可能なセラミックスの具体的材質を選定するための予備調査を行ったが、判断するのに十分なデータが得られなかったので、適用候補材数種を実際にナトリウム中に浸漬してナトリウムとの共存性を調べた。

<予備調査>

ナトリウム中コネクタに適用するセラミックスは、単にナトリウムと相性が良い他に、電気絶縁性、耐高温性、耐熱衝撃性(30℃/sec程度)、製作・加工性、耐放射線性に優れていることが求められる。

表 4.1 に示す過去にまとめた情報や、各種の文献を調べた結果²⁾、絶縁性が期待できないものとして、ホウ化物セラミックス、黒鉛を、また耐放射線性が期待できないものとして、酸化ベリリウム、酸化トリウム、ジルコニアを除外し、適用可能かもしれないセラミックスには、

- ・酸化物セラミックス：アルミナ、マグネシア、スピネル
- ・炭化物セラミックス：炭化硅素、炭化チタン
- ・窒化物セラミックス：窒化硅素、窒化チタン

を候補に挙げた。

<方法>

入手可能であったアルミナ、窒化硅素、スピネルについて、ナトリウム中浸漬試験を実施した。

○ 条件

- ・ ナトリウム温度 530℃
- ・ ナトリウム純度 コールドトラップ温度 150℃

- ・ 浸漬時間 1,100 時間（「常陽」1 運転サイクル以上）

ナトリウムに浸漬後、外観、曲げ強さ、硬さ、絶縁性（体積および表面抵抗率）を試験した。この時の試験方法は、JIS R1601「ファインセラミックスの曲げ強さ試験方法」および JIS C2141「電気絶縁用セラミックス材料試験方法」に基づいた。また、コネクタ特有の形状に対する影響を試験するために形状試験片を、ニッケルロウの健全性を試験するためにニッケルロウ付け試験片も浸漬した。

なお、現状技術では同じ呼び名のセラミックスでも、メーカーによって製品の性状が微妙に異なると言われており、ここでの試験片は、京セラ、東芝セラミックス、日立原町電子工業の 3 社の製品である。

<結果>

(1) アルミナ

- ・ 外観は純度の悪いものほど黒く変色し、純度の良い 99.5 %や 99.9 %のものでも若干曇ったような色となった。表面の損傷（ヒビ割れ等）についても同様に、純度の良いものほど損傷を受けておらず、99.5 %以上のものは無傷であった。
- ・ 曲げ強さは、99.9 %の純度では浸漬前後で変化がなかったが、99 %の純度ではスジ状にヒビ割れが生じ、曲げ強さは約 1/10 になった。
- ・ 硬さについても 99.9 %のものは浸漬前後で変化なく、95 %の試験片は破損し、92 %のものは破損しなかったものの、表面に曇りができ測定できなかった。
- ・ 絶縁性についても同様に、99.9 %のものは浸漬前後で変化なく、95 %のものは破壊して試験ができなかった。92 %のものは絶縁性がかなり落ちており、ナトリウムによる浸食を受けていることが分かった。
- ・ アルミナと金属材料のニッケルロウ付け試験片は、浸漬後でも気密性が確保されていた。

(2) 窒化硅素

- ・ 窒化硅素は、外観において若干変色したものがあつたが、曲げ強さ、硬さ、絶縁性のすべての点で、ナトリウム浸漬前後で変化は見られず、魅力的なセラミックスであると言える。しかし、窒化硅素は成形技術と金属との接合方法に課題があり、ナトリウム中コネクタで使うには無理がある。

(3) スピネル

- ・ スピネルは、ナトリウムに浸漬したら破壊してしまい、予備調査の結果とは全然

異なった結果となった。

4.7 セラミックス材料の照射試験

<目的>

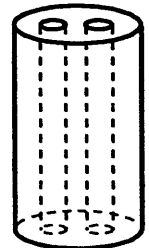
ナトリウム中コネクタは放射線環境で使用されることになるため、電気絶縁材料であるセラミックスの耐放射線性を調べた。

<方法>

「常陽」を照射炉として用い、下記条件でセラミックスに照射した。照射後試験では、外観観察、寸法測定、硬さ測定を行って健全性を評価した。

○ 条件

- | | |
|----------|---|
| ・ 照射リグ | SMIR-16 |
| ・ 供試材 | 窒化珪素(Si_3N_4)、[参考照射：アルミナ、スピネル] |
| ・ 寸法、数量 | $\phi 5 \times 10\text{mm}^t$ ($\phi 0.9$ の貫通孔 2 本付き)、1 個 |
| ・ 照射位置 | Mk-II 炉心、5F5 番地 |
| ・ 照射期間 | 第 19 サイクル：EFPD 69.8 日 |
| ・ 中性子照射量 | $4.6 \times 10^{20} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{MeV}$) |
| ・ 照射温度 | 500 °C (目標値) |



供試材

なお、アルミナおよびスピネルについては、ナトリウム中浸漬試験の結果により耐食性に劣ることが明らかになったので参考照射とし、照射後試験では外観観察のみを行った。

<結果>

照射後の外観観察によれば、割れ、欠け、目視で確認できる程度の変形（反りなど）は、3 供試材いずれにも認められなかった。また、表面には色ムラもなく、コールド材に近い色感であった。

窒化珪素の寸法測定の結果によれば、上記程度の照射ではスエリングをおこさず、むしろ極くわずかに収縮することが分かった。収縮率は、長さ方向に 0.1 ~ 0.3 %、径方向に 0.6 ~ 0.8 % 程度であった。直径値については、直交方向でほぼ同じ値であり、異方性は認められなかった。

窒化珪素の硬さ測定結果は、非照射材で Hv1310、照射材で Hv1640 であった。市販の窒化珪素成形体の硬さは、Hv900 ~ Hv2000 程度の範囲にあるから、この照射に

よる変化は極端に大きな変化ではない。よって、強度、破壊靱性等の他の機械的特性についても、大きな影響はないのではないかとの予想ができた。

以上の結果、耐放射線性という観点では、ナトリウム中コネクタの絶縁材として窒化珪素を使用できることが明らかになった。

4.8 水中部分モデル試験

<目的>

3方式のコネクタを実際に試作することにより製作上の問題点を摘出し、また、コネクタに要求される基本機能を確認するために、目視観察可能で、ナトリウムほど過酷な環境でない水中において一連のコネクタ着脱動作を行い、意図したとおりに機能するか、その原理的成立性を確認した。

<方法>

○ 供試体

密閉型1，密閉型2，開放型コネクタについて前出の図2の範囲を、つまりコネクタ要素部のみを試作して供試体とした。信号線用の電極数は、密閉型1が18本、他の2式については12本とした。

○ 試験装置

試験装置は、図4.1に示す水中試験装置と、図4.2に示すガス供給設備とで成り、水中試験装置における保護筒および水槽は、内部を目視するために透明アクリル材で製作した。また、水槽の中には乙コネクタを取り付け、2つの駆動部の内の1つの先端に甲コネクタを取り付けて両者を着脱できるようにし、さらにもう1つの駆動部の先端には爪を取り付けて、コネクタ結合部の密着力を強められるようにした。

○ 試験項目

一連のコネクタ着脱動作に注目した試験の他、保護筒内水面の変動挙動観察、乙コネクタ表面の乾燥試験、シール性能試験を実施した。

<結果>

○ 水面の変動

50 l/min のブローガスを流した時、保護筒内水面の波打ち高さは最高5cm程度（目視）であった。水面からコネクタ結合部までの距離は10cm以上確保されているので、水滴がコネクタ結合部に付着することはなかった。

○ 乙コネクタ表面の乾燥

密閉型 1 および密閉型 2 コネクタの表面、つまり破壊板表面やリッド部に付着した水の粒、薄膜を除去するのにガスブローは有効であることが観察された。

また、開放型コネクタにおいても、図 4.3 に示すとおり、甲コネクタに設けたガス供給管および回収管を用いて、コネクタ結合後に電極部を乾燥させ、回路の絶縁を回復させることができた。

○ シール性能

密閉型 2、および開放型コネクタについて、甲乙コネクタ結合後の結合面のシール性は良好であった。密閉型 1 では甲乙コネクタが完全に結合できなかったため、電極部を加圧しているガスが結合面から漏れ出した。漏れ量は小さな気泡が間欠的に出る程度であった。

また、結合前に密閉型 1 と密閉型 2 の乙コネクタは水中にあって、その電極部が水と接触しない構造であり、密閉型 1 については期待どおりの性能を示した。しかし、密閉型 2 については、水中浸漬後まもなく絶縁値が下がってしまい、リッド構造ではシールできないことが明らかになった。なお、改良のヒントを得るためリッドの接触面にグリースを塗ってみたところ、絶縁低下を止めることができた。

○ 動作試験

・ 爪の開閉動作

甲コネクタを上下させることにより、甲コネクタのテーパ面が爪の突起部を押し広げて爪を開閉させる動作は、3 方式のコネクタについて良好に機能することが確認できた。

・ コネクタの結合動作

密閉型 1 コネクタは、結合時に角度ズレが生じてしまい、内側 6 本、外側 12 本のピンのうち、正常なのは内側の 5 本だけであった。コネクタ分離後、乙コネクタ電極ピンを観察したところ、外側 12 本のピンは甲コネクタにより放射状に押し曲げられており、内側ピン 1 本も曲がっていた。また、結合できたピンも 1 本若干曲がっていた。さらに、結合時に電極ピンが曲がってしまったため、破壊板が完全に乙コネクタ内部空間に延ばし込まれず、甲乙、両コネクタのシール面が密着する位置まで結合することができなかった。

密閉型 2 および開放型コネクタの場合は、電極の破損等、問題は生じなかった。

- ・ コネクタ分離動作

3方式のコネクタとも、コネクタ電極の分離、乙コネクタからの爪の放し、甲コネクタの上昇の各動作は、問題なく行えた。

- その他

その他、次章の部分モデル試験に反映すべき、いくつかの課題が明らかになった。

表4. 1 セラミックスの物性

		BeO	Al ₂ O ₃	MgO	ZrO ₂ (安定化,部分安定化)	ThO ₂	MgO·Al ₂ O ₃ (ルチル)	SiC (BeO 添加)	SiO ₂ (石英ガラス)
Na 耐食性		◎	△ (>600℃)	△ (>600℃)	△ (>500℃)	◎	○ (815℃>)	△*) (>815℃)	×
抵抗率 (Ω·cm)	室温	10 ¹¹⁻¹⁴	10 ¹⁵	>10 ¹⁴	10 ^{8 **}	10 ¹³⁻¹⁴	—	4 × 10 ¹³	>10 ¹⁶
	800℃	10 ⁸	10 ⁸	10 ⁸⁻⁹	10 ^{4 **}	10 ⁴⁻¹¹	10 ^{5(1000℃)}	—	—
耐熱衝撃性		◎	○	△(-)	△(-)	△(-)	△	◎	◎
使用温度(℃)		1900	1900	2300	2200	2500	1950	1650 *)	1050
機械強度		△	○	△	○	△	△	○*)	△
熱膨張率(10 ⁻⁶ /deg)		9	8	13	(10)	9	8	4 *)	0.5
耐放射線性		×	○	△ Mg(n, α)Ne ^{β-} → Na	×	×	△(○)	○	○
価 格		×	◎	○	△	×	△	×	◎
特 記 事 項		有毒				放射性			

注：① *) ; BeO 添加品については、不明。

② **) ; 安定化、部分安定化により絶縁性能が低下する(純 ZrO₂ は相変化を起こすため使用不可)。

③ 添加物、結晶粒径、密度等が変化すると性質が異なる。

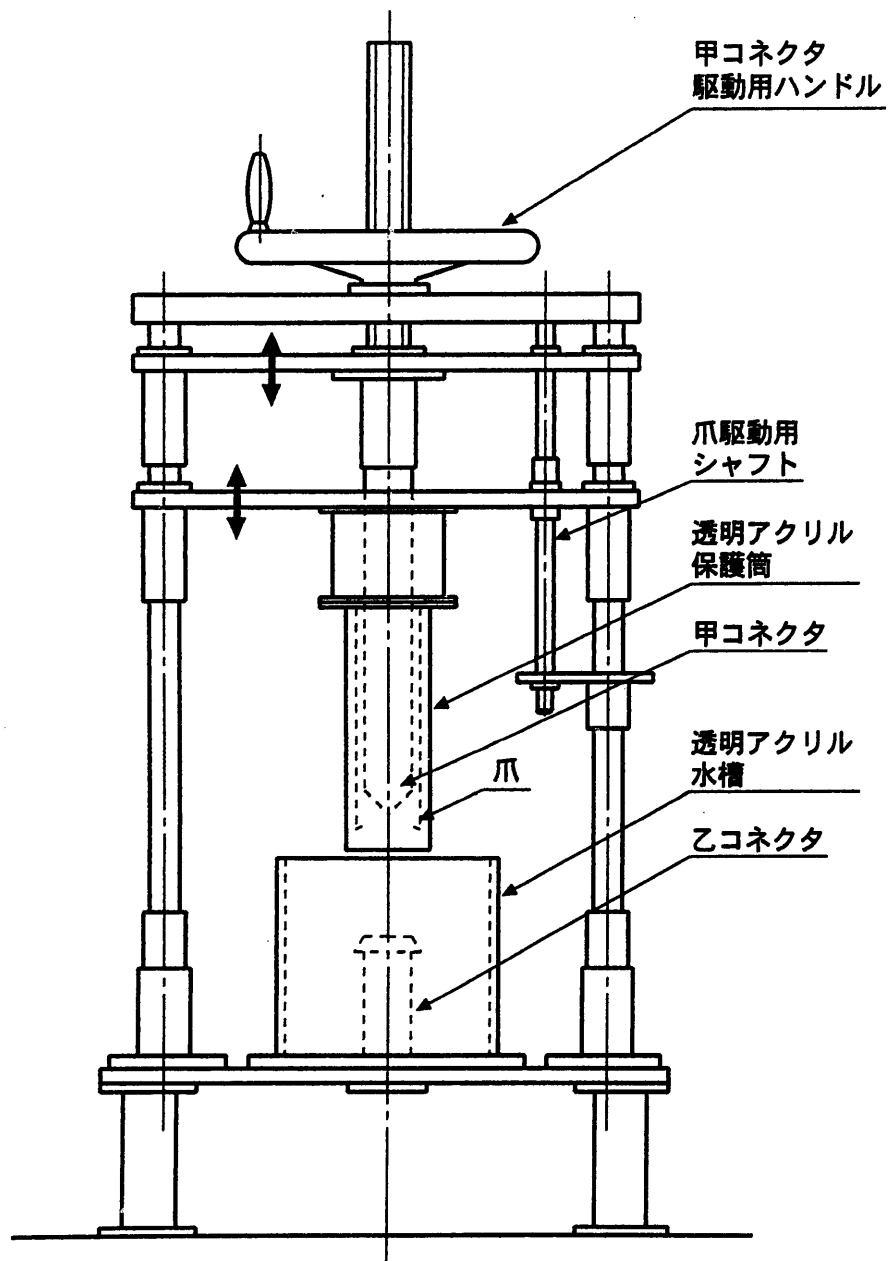


図4.1 部分モデル水中試験装置

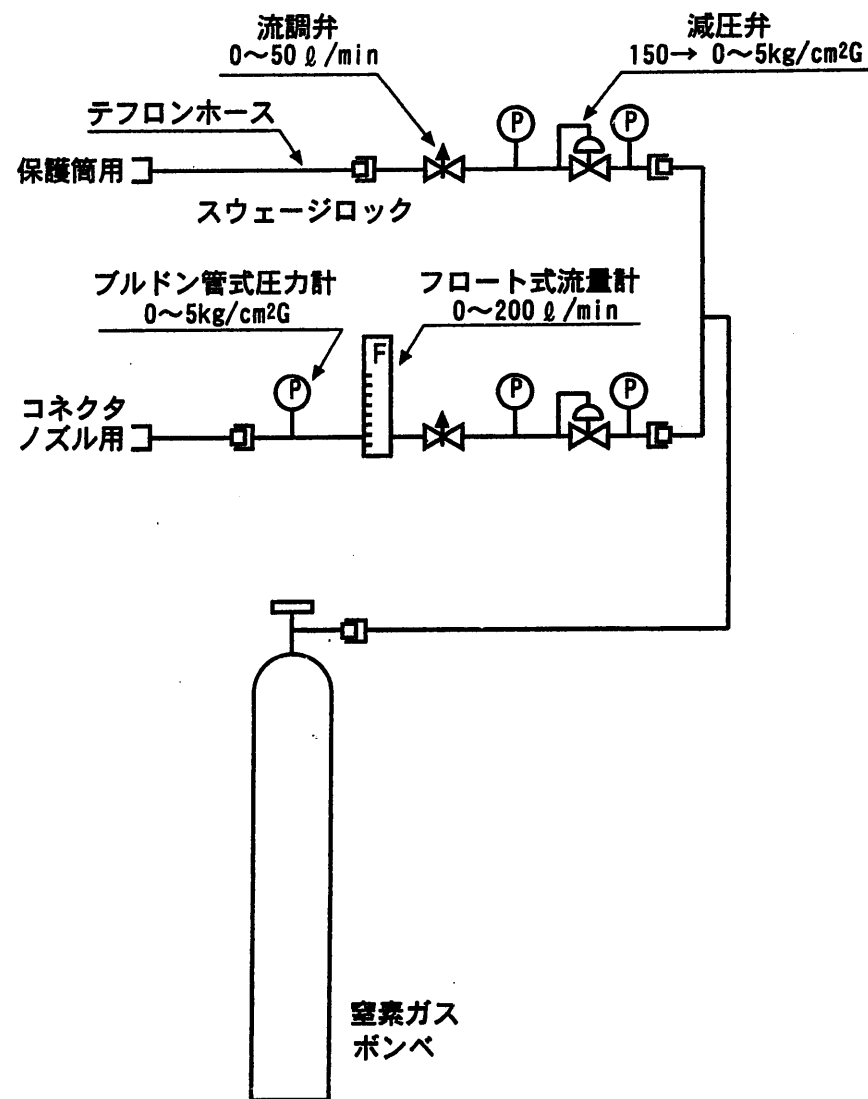


図4.2 ガス供給設備

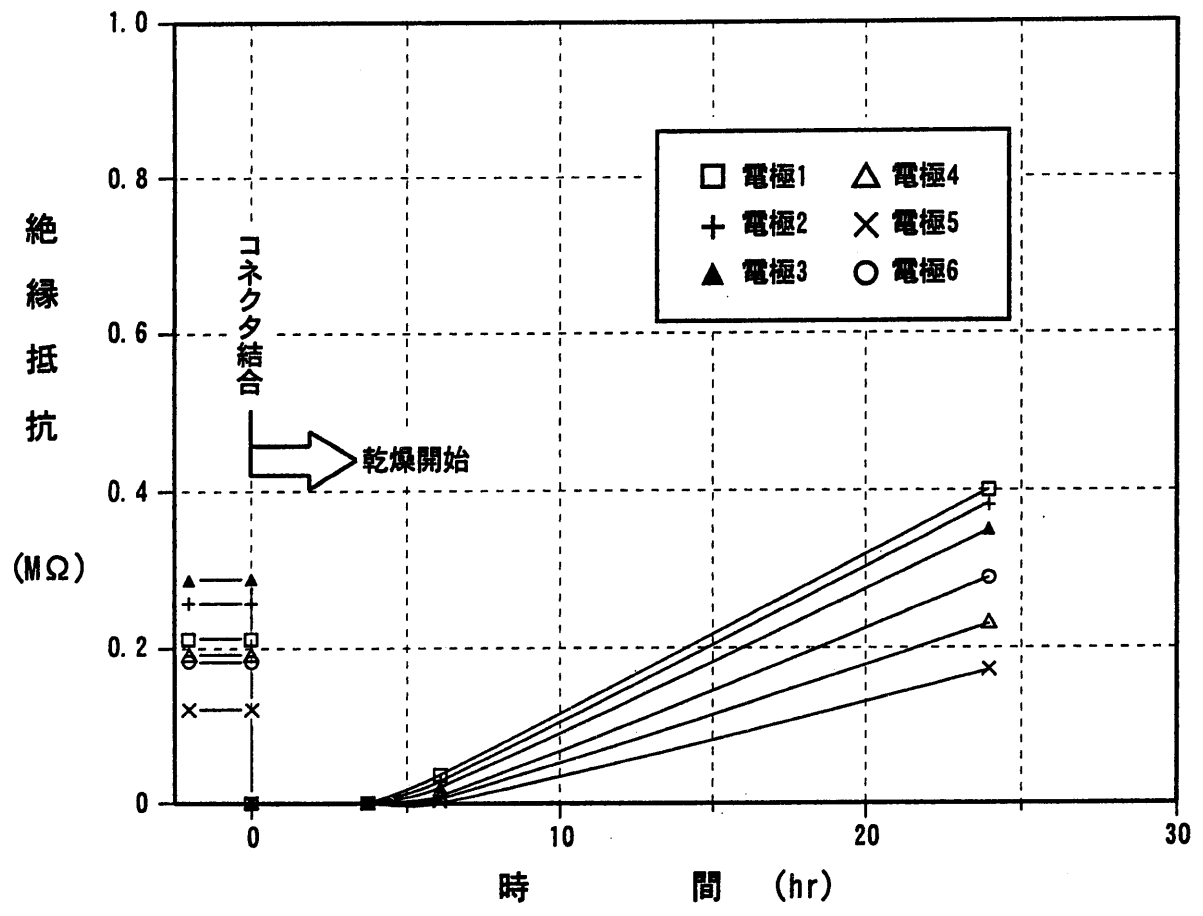


図4.3 電極部の絶縁回復 (開放型コネクタ)

5. 部分モデルナトリウム中試験

5.1 供試体と試験装置

(1) コネクタ供試体

ナトリウム中試験のために試作した供試体は、コネクタ部のみを模擬した実寸大の要素モデルであり、密閉型1コネクタを図5.1、5.2に、密閉型2コネクタを図5.3、5.4に、また、開放型コネクタを図5.5、5.6にそれぞれ示す。

(2) 駆動装置

供試体を操作するための駆動装置は、図5.7に示すとおりである。駆動装置は試験容器の上部に据付け、コネクタ供試体は試験容器の中でナトリウムに接液している。

駆動装置は、ナトリウム中でガス空間を形成するための保護筒と、甲コネクタをそれぞれ独立して動かすため、2系統のモータによる駆動系を有する。保護筒には下端開放面までナトリウム液面を下げるために、そして先端からガスブローを行う（開放型ではガス供給、回収する）ために、甲コネクタ本体にはガスを配管している。また、保護筒下端付近内面には、甲乙コネクタの結合およびシールを確実にするための爪が取り付けられている。爪は、それを開く場合には、甲コネクタテーパ構造との斜面干渉によって開き、閉じる場合は、爪部材の持つ弾性力で復帰する機構としている。甲コネクタと保護筒のナトリウムバウンダリ貫通部には、パッキン多段方式のシール機構を設けている。甲コネクタと乙コネクタから引き出した導線は、計測盤まで配線し、導通抵抗と絶縁抵抗が計測できるようになっている。

(3) ナトリウム試験装置

ナトリウム試験装置としては、自己作動型制御棒駆動機構試験装置（SASS ループ：大洗工学センター機器構造開発部機器システム開発室設置）を流用した。SASS ループのフローシートを図5.8に示す。SASS ループは、補助タンクに接続されており、加熱器と循環回路を有している。このため、ナトリウムの降温は自然放冷で行い、ナトリウムの純化はきれいにした補助タンクのナトリウムと入れ替えることによって行うことが特徴となっている。ただし、ナトリウムの入れ替えは温度的な制約により、SASS ループのナトリウム温度が200℃の時にのみ実施可能である。

(4) ナトリウム試験装置の運転条件

- ① ナトリウム温度 200 ~ 530 ℃
- ② ナトリウム純度 ナトリウム受け入れ時、プラグ温度 150 ℃相当
試験期間中に数度入れ替え
- ③ ナトリウム循環流量 30 l/min
- ④ カバーガス圧力 アルゴンガス、100mmAq
- ⑤ 保護筒からの
ブローダウンガス流量 アルゴンガス 4 ~ 5 l/min (試験期間中常時)

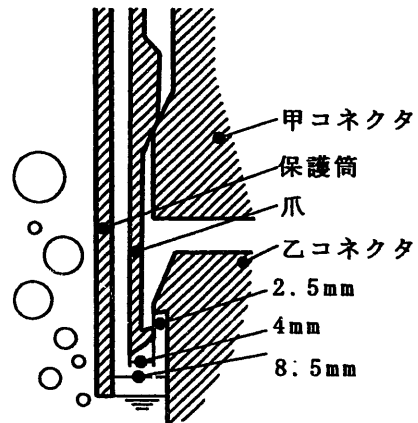
なお、試験期間中は、保護筒からのガスブローを常時行っているため、コネクタを分離した時に乙コネクタのみナトリウム液中に浸ることになる。

5.2 開放型コネクタの試験結果

(1) 着脱動作試験

保護筒やコネクタを上下させるための駆動装置は、単に上下動機能を与えるだけの R/D 特有の装置であり、必ずしも実機の参考にならないが、動作は円滑であった。電極同士の結合もピンが曲がることなく、正常に結合できた。

爪について、開方向はコネクタ駆動軸のテーパ構造部との接触により、強制力を働かせるようになっているが、閉方向は爪部材の持つ弾性力回復に頼っている。ここで、爪が配置されているコネクタと保護筒の間の隙間は片側で 8.5 mm と狭く、爪の厚みを考えると、弾性力回復で確実な開閉動作ができるか不安であったが、結果は満足できるものであった。



(2) シール性能試験

ナトリウム中コネクタは、結合後の電極空間内に導電性のナトリウムが浸入しないよう、保護管内にガスを充満して使用するが、最悪、ナトリウムが浸入してきてもバウンダリが形成されるよう、次ページ挿絵のとおりシール面を設けてある。つまり、甲乙コネクタを結合すれば、電極外部にある円錐状のテーパ面が密着してシールを形成するわけである。ここで、その密着を確実にするため、乙コネクタに爪を掛けて強

制力を加えられるように工夫してある。また、コネクタ内部の電極空間内には、そこにフレッシュアルゴンガスを流して、差圧をつけてナトリウムの浸入を防止したり、電極空間内部に付着したナトリウムを乾燥したりするため、ガス配管が2本甲コネクタ側に設置してある。本試験は、爪の締付け力を変えて、その時の電極空間の圧力降下からリーク量を算出したものである。なお、シール面には SUS304 地肌の高温での自己融着防止のため、ハードクロムメッキを施工してある。また蛇足ながら、乙コネクタと甲コネクタを爪で一体化するという構造は、結合長尺構造物に横荷重がかかった場合にも、コネクタ取扱機と照射集合体の結合部が「くの字」型に曲がりにくいという長所を有する。

試験結果としてのリーク量は、爪の締付け力 160 ~ 180kg (設計値 200kg)、ガス加圧力 $1\text{kg/cm}^2\text{G}$ において、0.3 ~ 0.6 atomic cc/sec であった。リーク量については漏れがないことが望ましいが、その値はいくらでなければならぬという制限値はなく、通常的设计で良好なシール性能を示すことが確認された。

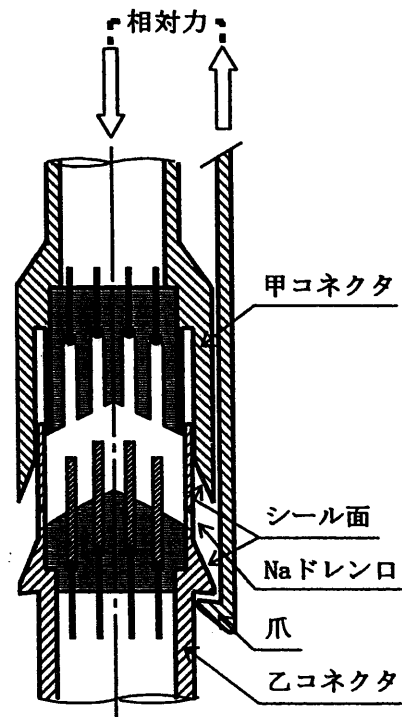
もちろん、後述の電極絶縁の結果から判断して、シール面を介してのナトリウム浸入は認められなかったし、シール面の自己融着も認められなかった。

(3) 絶縁抵抗特性試験

開放型コネクタの試験期間中における絶縁抵抗の変化を図 5.9 に示す。12 電極のデータを概観的に捉えるため、図では最大値、最小値、および算術平均を記号化している。以降の文章で特に断わらない限り、数値は平均値を示す。

<温度による絶縁特性>

乙コネクタをナトリウムに濡らす前に、両コネクタを結合してナトリウムに対するシールを形成し、電極回路の温度による絶縁抵抗変化を調べた。図から分かるように、200℃では $10\text{M}\Omega$ 近くの絶縁値を示すが、530℃では $10\text{k}\Omega$ オーダーまで低下する。さらに温度を 200℃に降温すれば、再び $10\text{M}\Omega$ 近くの絶縁値に戻るといった特性を示し



た。ここで、昇温すると回路の絶縁抵抗値は低下するが、降温するとほぼ元の値に回復していることから、電極空間内にナトリウムは浸入していないと判断することができる。

＜ナトリウム接液後の絶縁回復特性＞

ナトリウムに濡れたコネクタを結合すればその絶縁抵抗は低下するが、200℃程度の温度での結合では全ての電極がゼロ MΩになるわけではない。ナトリウムがはじかれて粒形状になり、ブリッジされずに絶縁が確保されている電極も認められる。ここで、20 l/min 程度の乾燥ガスを流し、かつ、周囲温度を昇温していくとナトリウムに濡らす前の絶縁値に乾燥することができた。

結局、乾燥ガス流量 20 l/min の場合、530℃での絶縁回復に 120 時間強（6～7日）の時間を要するものの、ナトリウムに濡れた電極を乾燥ガスで乾かして、コネクタを再生する原理の成立性が確認された。

(4) ナトリウムペーパー蒸着による絶縁低下

当初、コネクタ分離時にはカバーガス中におかれる甲コネクタの、ペーパー付着による絶縁低下が心配された。このため、分離時には保護筒や甲コネクタ先端からブローダウンガスを流すように工夫しているが、試験では甲コネクタ先端からガスを流さなかったにもかかわらず、良好な絶縁データを示し、絶縁低下は全く認められなかった。図 5.9 の分離時における四角表示の記号がそれを示す。

5.3 密閉型 1 コネクタの試験結果

(1) 着脱動作試験

コネクタの着脱動作は円滑であり、破壊板の破断荷重は設計値の 200kg を満足するものであった。爪開閉動作は良好で、自己融着も認められなかった。また、電極同士の結合もピンが曲がることなく、正常に結合できた。

しかし、試験時、甲コネクタ側の 12 本の導線中に断線、もしくは接触不良と思われる線が 2 本認められた。これは、まだ精密構造であるコネクタ組立の経験が乏しく、未熟練組立作業中に断線、接触不良を起こしたものと考えられる。やむなく、正常回路の 10 回路を用いて試験を進めることにした。

(2) シール性能試験

SUS 母材が温度上昇によって軟化し、形状に馴染みやすくなることを示している

思われるが、リーク量はナトリウム温度が高温になるほど減少する傾向を示した。結局、爪の締付け力 110 ~ 200kg (設計値 200kg)、ガス加圧力 $1\text{kg/cm}^2\text{G}$ において、0.8 ~ 12 atomic cc/sec のリーク量という結果が得られた。密閉型 1 乙コネクタは開放型に比べて、シール面の上端に破壊板がロウ付けで取付けられており、端部材質の硬化や、コネクタ結合時におけるシール面端部の形状倣いが充分でない等の理由で、開放型コネクタに劣るシール特性を示すと考えられる。なお、シール面での自己融着は認められなかった。

(3) 絶縁抵抗特性試験

密閉型 1 コネクタの試験期間中における絶縁抵抗の変化を図 5.10 に示す。

- ① 通算日数 0 ~ 14 日のコネクタ分離期間のデータを見ると、つまり、乙コネクタはナトリウム中に置かれ、甲コネクタはカバーガス中に置かれている期間であるが、乙コネクタの絶縁値は約 $10\text{M}\ \Omega$ の一定値を示している。これによって、電極保護のために設けた破壊板は、有効に機能していることが分かる。
- ② コネクタ結合状態において、結合初期は約 $10\text{M}\ \Omega$ ($200\text{ }^\circ\text{C}$) の良好な絶縁値を示すものの、時間の経過と共に徐々に低下傾向を示し、「常陽」出力運転の区切りである 45 日（「常陽」Mk-I 炉心時代の運転日数）を待たずに、絶縁値は $0\text{M}\ \Omega$ ($530\text{ }^\circ\text{C}$) に低下した。この時、参考までに 100VDC メガーから 9V テスターに替えて計測してみたところ、その値は数 $100\ \Omega$ のオーダーであった。
- ③ ナトリウム温度を下げると、絶縁値は回復の兆しを示した。

以上の特性が試験によって明らかになった。このうち、絶縁値が $0\text{M}\ \Omega$ に低下する現象は、開放型コネクタの試験で明らかになったコネクタの温度変化による絶縁劣化を差引いても、異常な現象である。原因を次のように考えてみたが、現象を論理的に説明することができず、結局、原因を特定することはできなかった。

- シール性能が悪く、ナトリウムやそのベーパーが電極空間内に侵入したのなら、それは電極空間内に存在したままであるから、ナトリウム温度を下げても絶縁値は回復しないはずである。
- 電極部以外の回路バウンダリが劣化したのなら、同様の理由でナトリウム温度を下げても絶縁値は回復しないはずである。
- 甲コネクタから送り込むガスに不純物が含まれているのなら、開放型コネクタで

も同様に絶縁値が 0M Ω まで低下するはずである。

- 温度によってセラミックスの絶縁が低下するのなら、同種セラミックスを用いている開放型コネクタでも、同様に絶縁値が低下するはずである。
- MI ケーブル自体の乾燥が不十分であれば、経験上、200℃で数 10M Ω の絶縁値は示さない。

以上を通じた試験結果は、現状構造の密閉型 1 コネクタに関し、そのままでは実機に適用できないという事実を示した。

(4) ナトリウムベーパー蒸着による絶縁低下

ナトリウムベーパーに晒された期間において、甲コネクタは数 10M Ω の良好な絶縁特性を示し、その先端からガスを流さなかったにもかかわらず、絶縁低下は全く認められなかった。

5.4 密閉型 2 コネクタの試験結果

(1) 着脱動作試験

保護筒やコネクタを上下させるための駆動装置は、離脱不能不具合時を除き、動作は円滑であった。コネクタ駆動は± 3kgm (結合時は除く)、および保護筒駆動は+30kgm の運転目安値に対して、ほぼ満足するトルク値で動作した。また、爪の開閉動作も良好であった。

ここで、試験中に発生した甲乙コネクタの離脱不能不具合は、次のような状況であった。

試験中に乙コネクタから甲コネクタを引抜こうとしたところ、オーバートルクとなって離脱不能の不具合が発生した。

駆動系、もしくは警報系の故障、両コネクタ接触面の自己融着、爪掛け部の解除不良等、考えられる要因は幾つかあったが、種々のチェックの結果、コネクタ部で機械的に拘束している感触が強かった。たぶん温度履歴が影響していると見当をつけて、ナトリウム温度を変化させ不具合再現試験を実施した。その結果、

- ・ 350℃以上の高温に晒し、そのまま 200℃に冷却する(「常陽」燃料交換温度)とコネクタ離脱不能現象を起こす。

- ・ 昇温過程、降温過程いずれにおいても、350℃程度の温度ではコネクタ離脱が可能である。

こと等が分かったが、明確な原因を特定するに足る事実は得られなかった（6章参照）。

(2) シール性能試験

密閉型2コネクタのシール特性は、爪の締付け力 120～150kg（設計値 200kg）、ガス加圧力 $1\text{kg/cm}^2\text{G}$ において、0.8～50 atomic cc/sec のリーク量であった。シール性能は、特に 200～300℃の低温域において悪い特性を示した。

(3) 絶縁抵抗特性試験

密閉型2コネクタの試験期間中における絶縁抵抗の変化を図 5.11 に示す。

まず、乙コネクタをナトリウムに濡らす前（保護管の外部にはナトリウムが充填されている）に、両コネクタを結合してナトリウムに対するシールを形成し、電極回路の温度による絶縁抵抗変化を調べたところ（横軸 14 日目ぐらいまでの期間）、概ね 200℃では数 10M Ω の絶縁抵抗を示すが、530℃では 100k Ω オーダーまで低下し、温度を 200℃に降温すれば、再び数 10M Ω 近くの絶縁値に回復するという特性を示した。

この絶縁抵抗の平均値そのものは、既に試験した開放型コネクタや密閉型1コネクタに対して、およそ1桁良い絶縁性を示しているが、すでに短絡して 0M Ω を示す電極があったり、正常な導通抵抗を示さない電極があったりして、結局、全体としてみれば良い絶縁性能を示しているとは言えなかった。

ここでの試験では、不具合再現試験を含み、ナトリウム中で3回の分離、結合動作を行なっているが、横軸 16～29 日の初回の分離、結合データに注目すると、結合当初は数 10M Ω の絶縁値を示すものの、ナトリウム温度の上昇に伴って低下し、530℃では数 k Ω の絶縁値になっている。さらに、ナトリウム温度を降温して 200℃に戻すと、数 100k Ω 程度までには絶縁回復する、という特性を示しており、14 日目までの絶縁試験結果と比較すれば、ナトリウム温度降温時の絶縁回復性が悪いことから、内部にナトリウムが浸入したと考えられる。なお、初回の分離期間中は乙コネクタの絶縁が確保されていたことから、この浸入は結合時に生じたものと考えられる。つまり、乙コネクタ頂部にドレンできずに残ったナトリウムが、結合時に巻き込まれたものと思われる。また、その後の分離時の甲コネクタの絶縁値が低下していることから、甲コネクタ側にもナトリウムは浸入したものと考えられる。

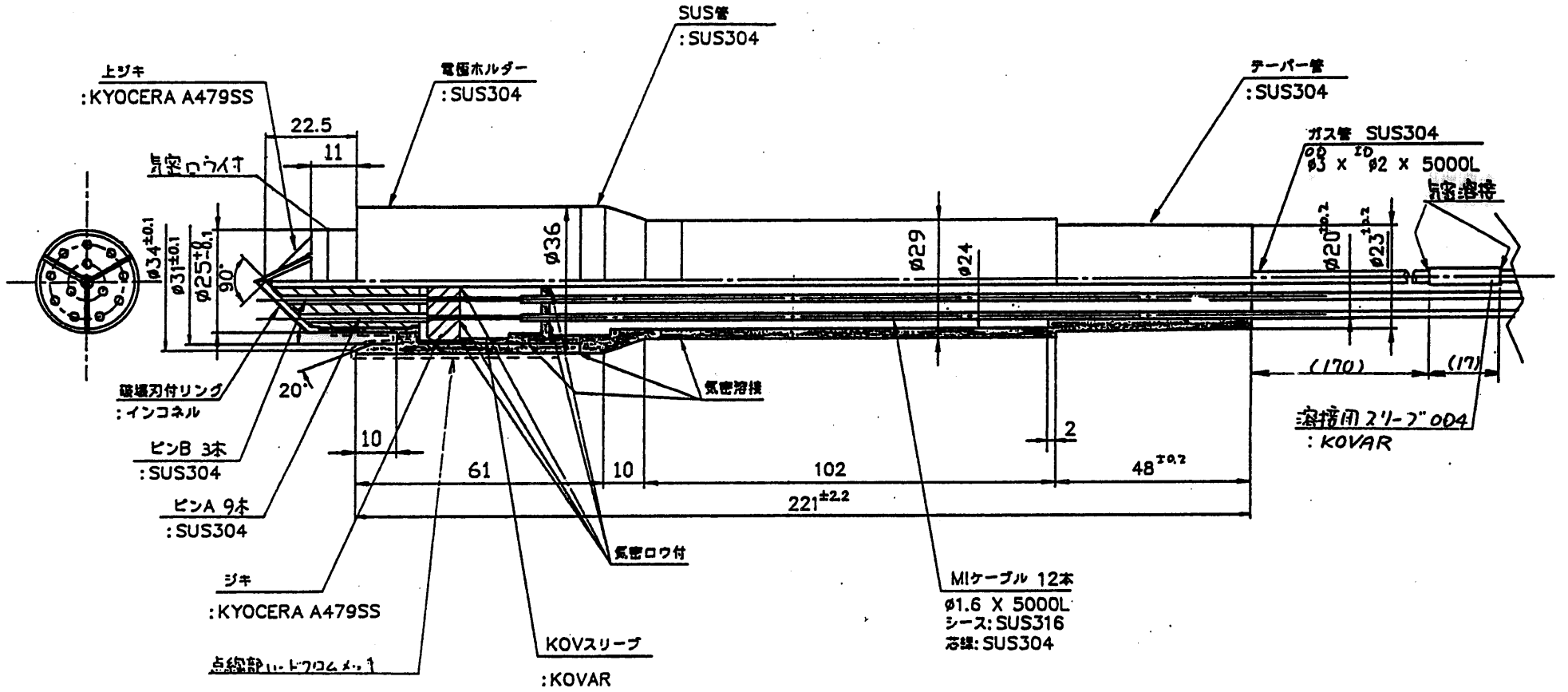


図5.1 密閉型1甲コネクタ

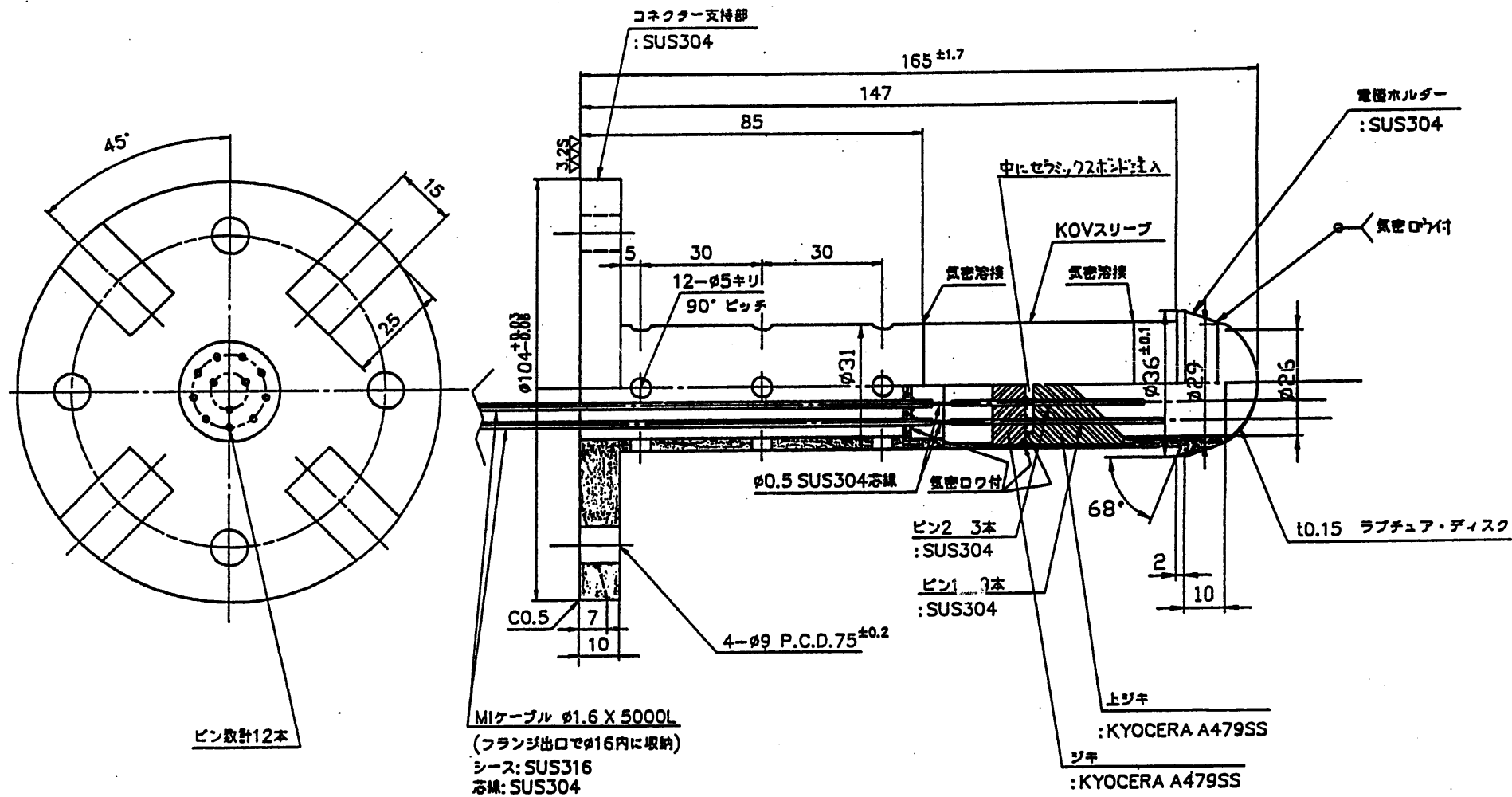


図5.2 密閉型1乙コネクタ

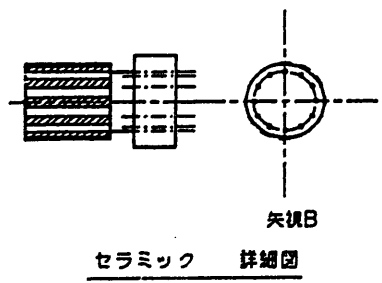
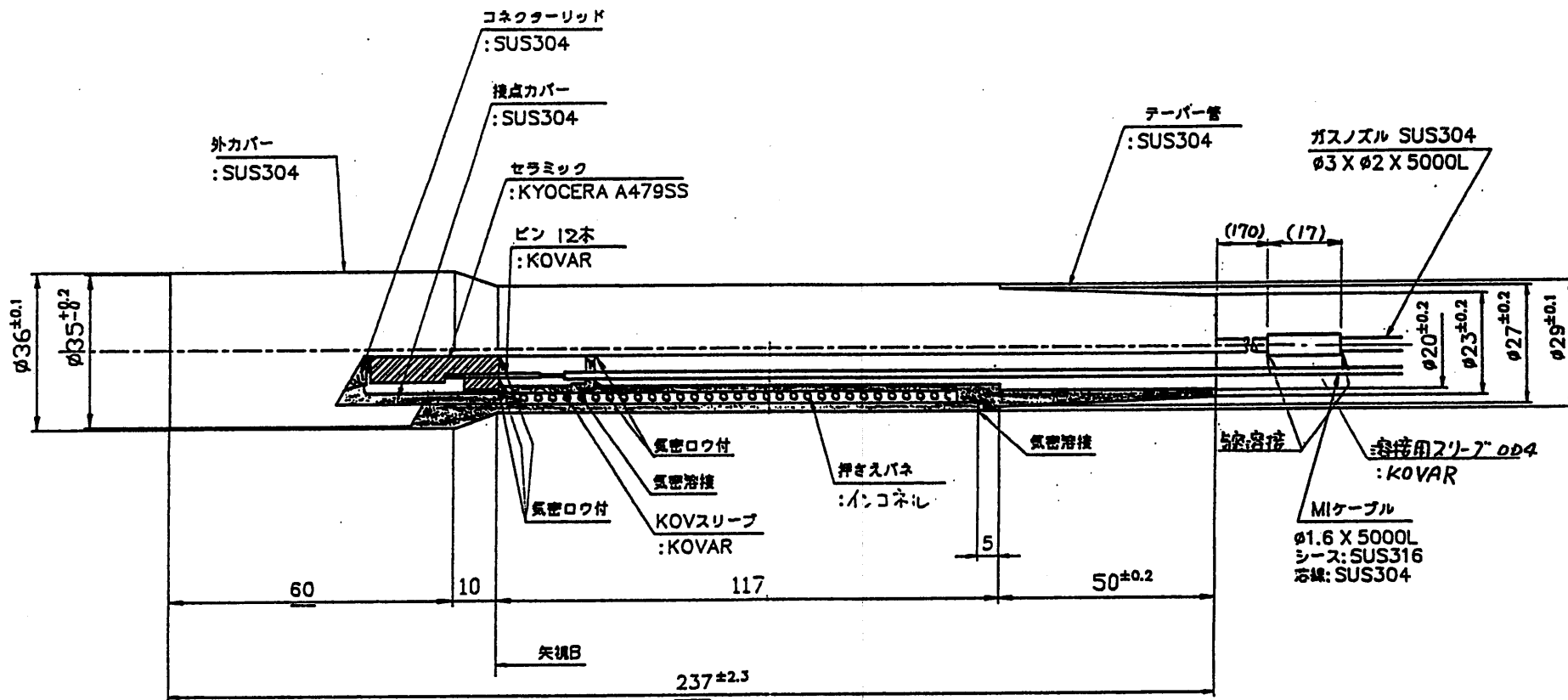


図5.3 密閉型2甲コネクタ

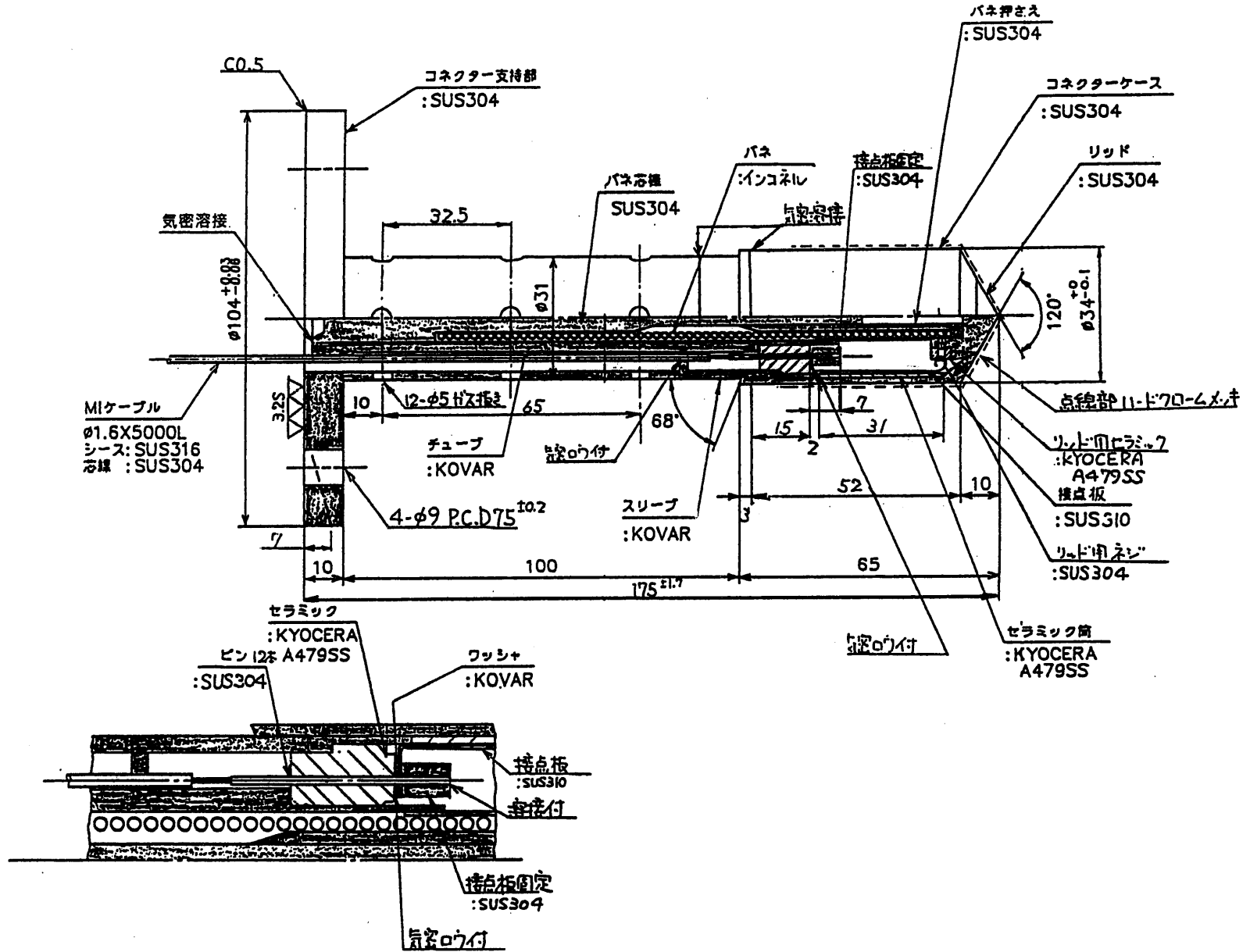


図5.4 密閉型2ピンコネクタ

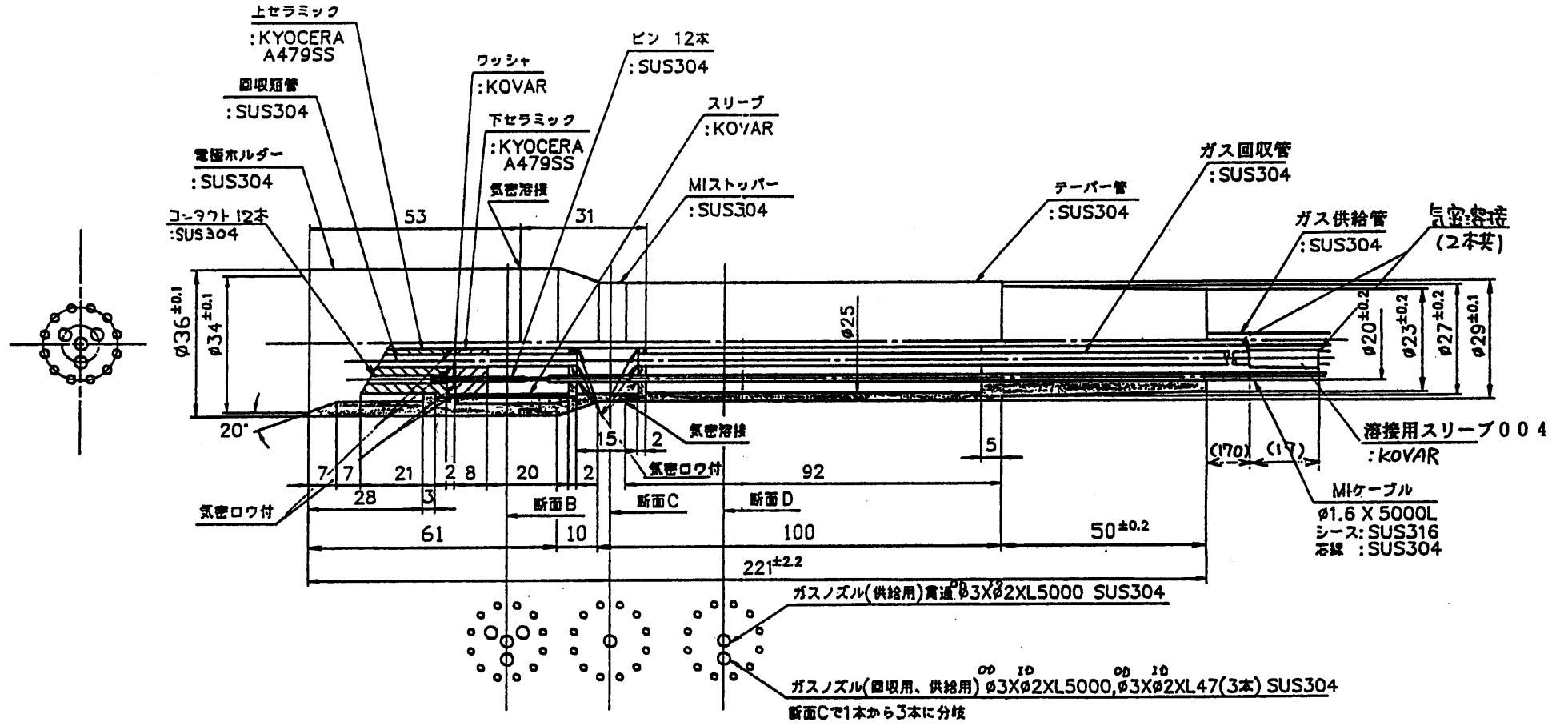


図5.5 開放型甲コネクタ

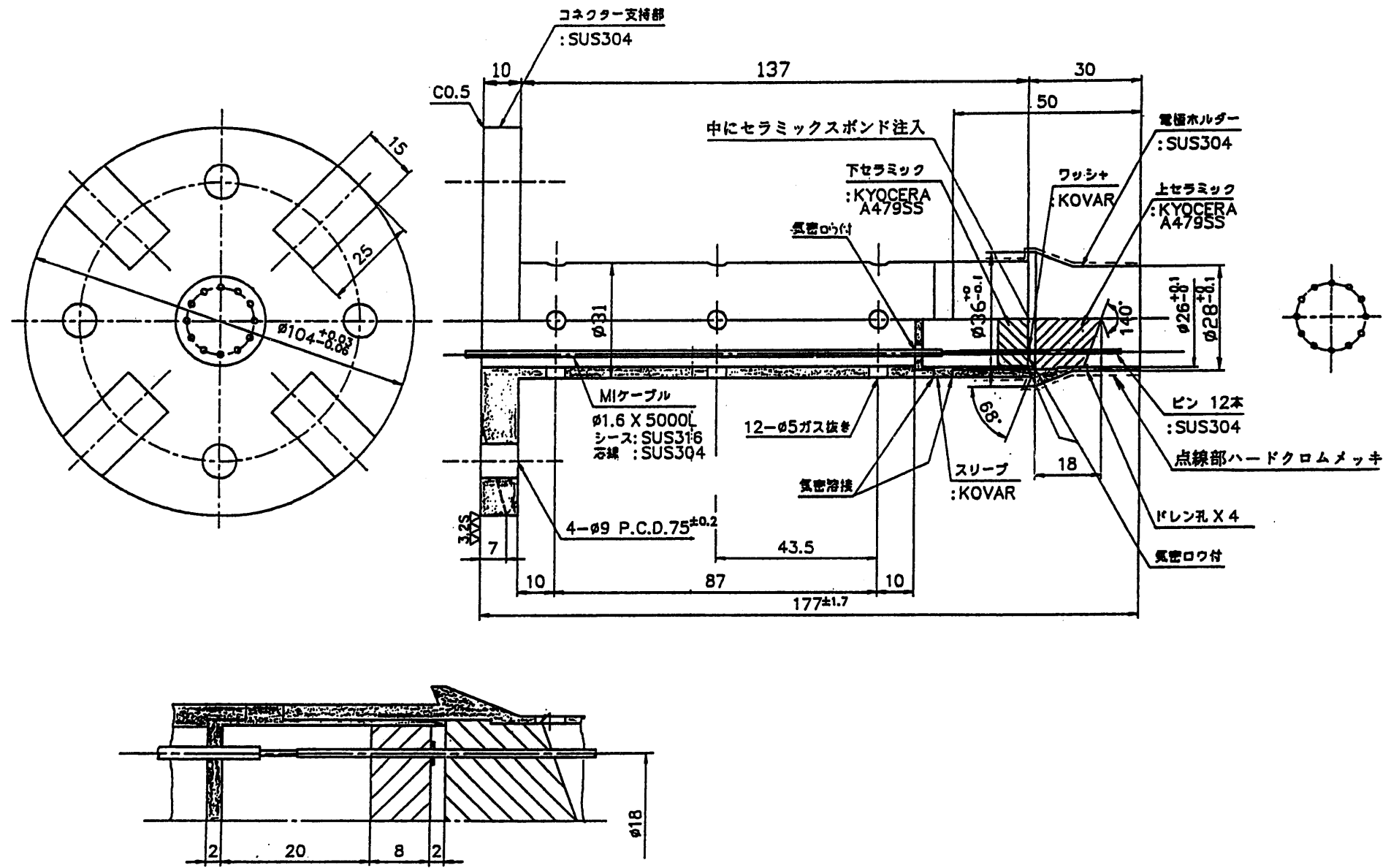


図5.6 開放型乙コネクタ

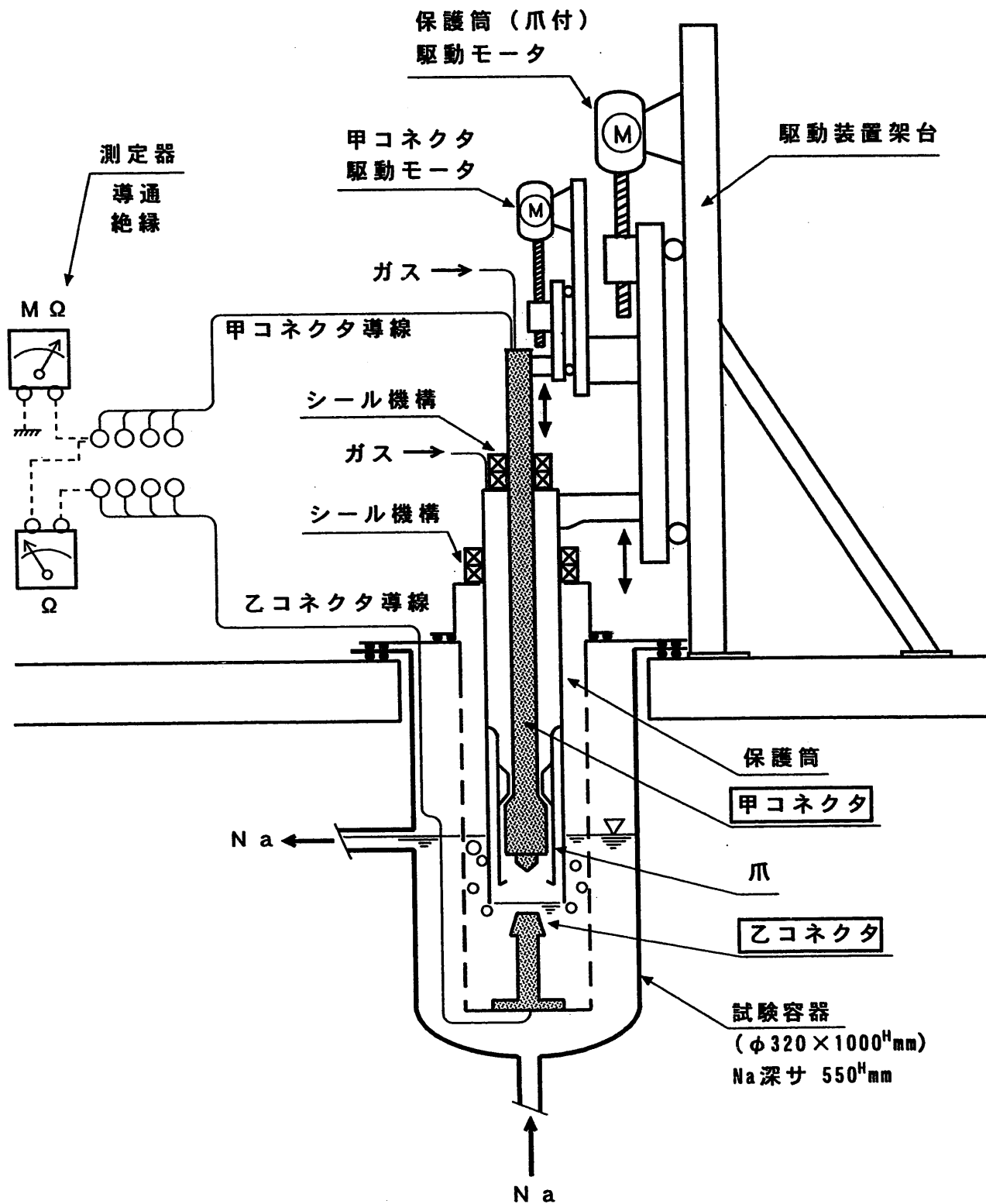


図5.7 ナトリウム中コネクタ試験部

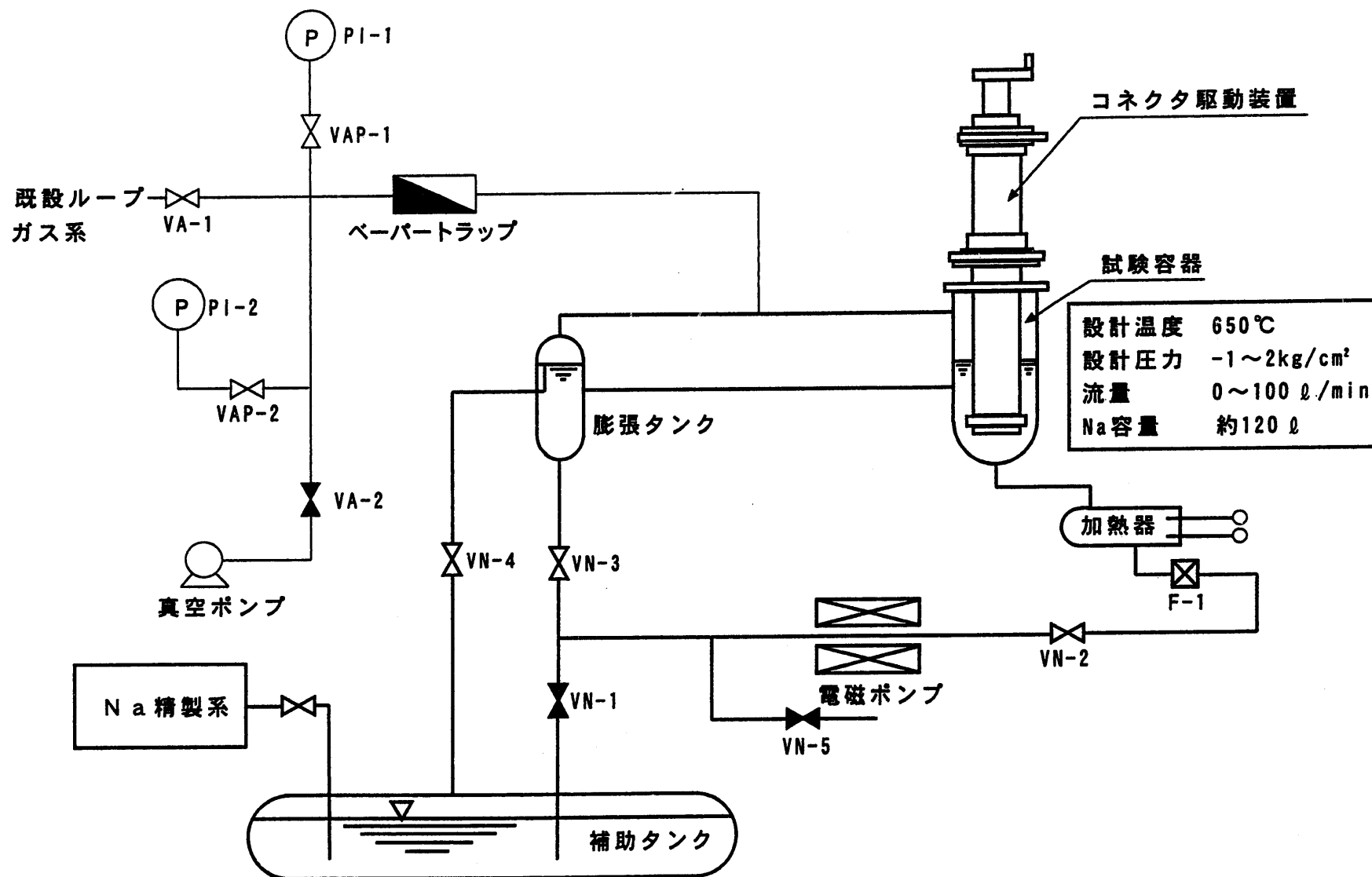


図5.8 ナトリウム中試験装置フローシート

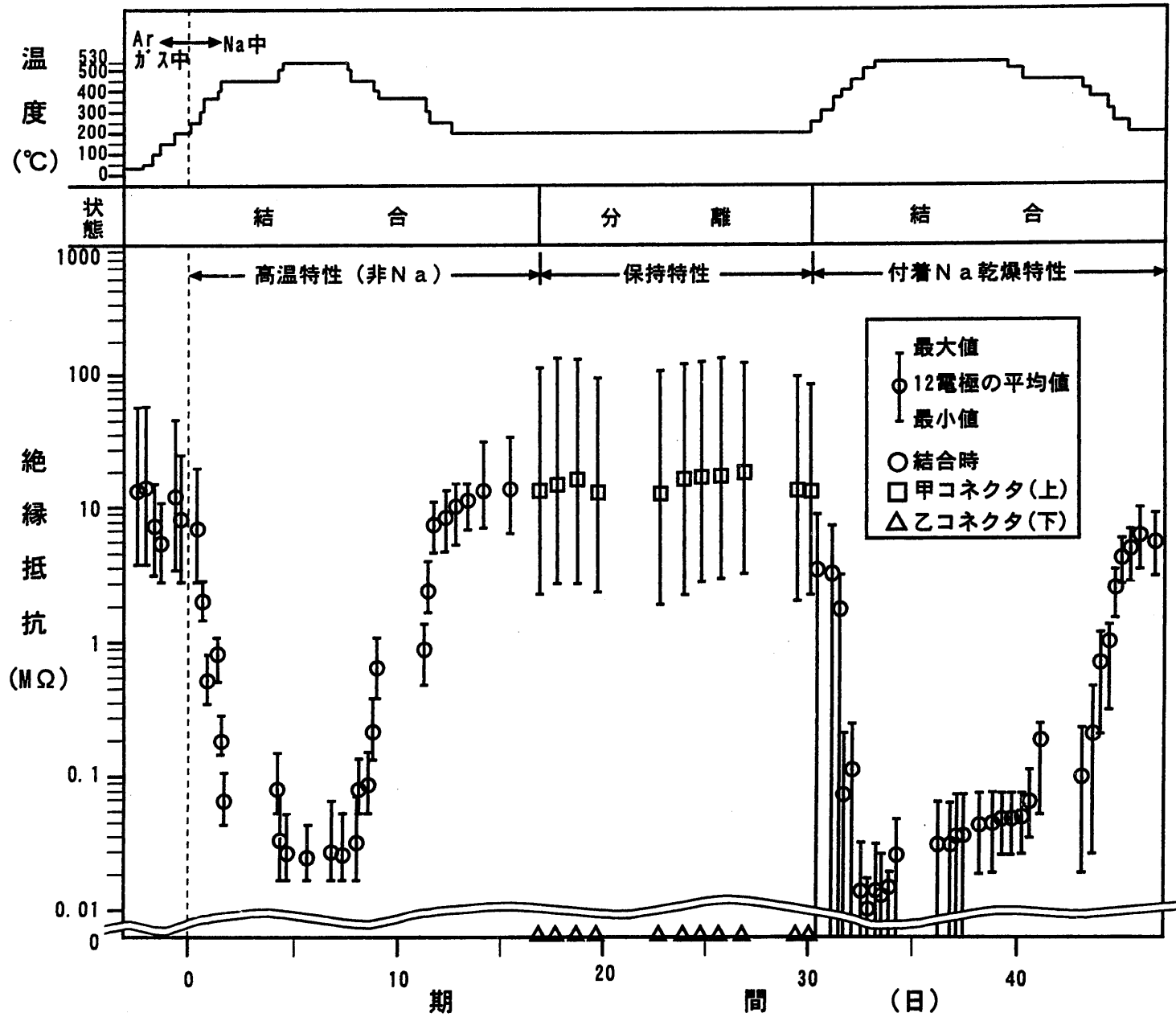


図5.9 開放型コネクタの絶縁特性

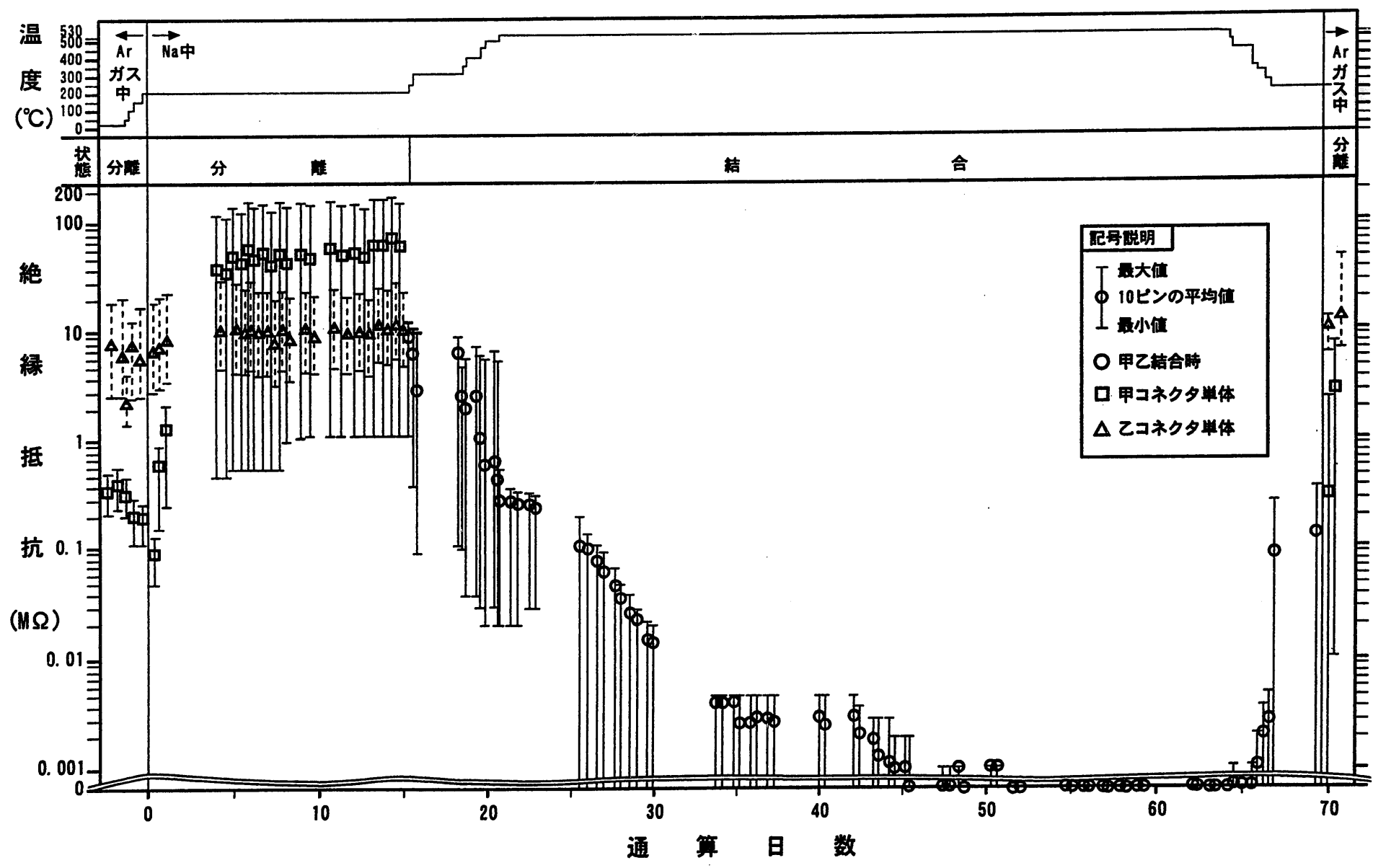


図5.10 密閉型1コネクタの絶縁特性

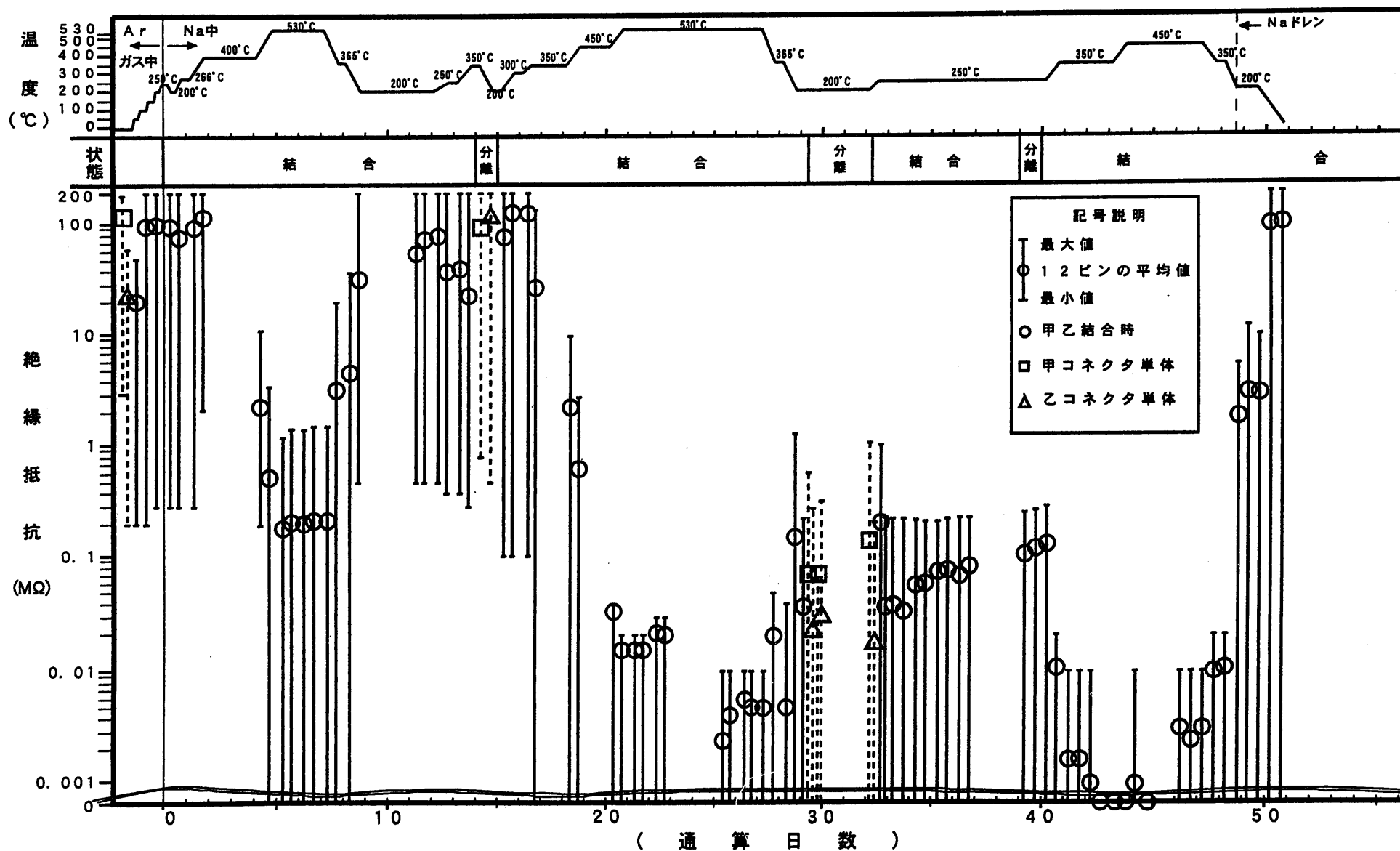


図5.11 密閉型2コネクタの絶縁特性

6. 部分モデル試験体の解体検査

6.1 コネクタ供試体のナトリウム洗浄と洗浄後の観察結果

解体検査に先立ち、ナトリウム中試験を終了した3種類のコネクタ試験体を洗浄した。いずれの試験体についても洗浄はスチームで行い、その後、外観を観察した。

(1) 開放型コネクタ

洗浄による除去ナトリウム量は、330グラムであった。

開放型の乙コネクタは、スリーブと電極ホルダ間で破断し、乙コネクタの先端電極部が甲コネクタに結合した状態で試験容器から取出されたが、両者は洗浄後分離することができた。破断面を観察したら、溶接の溶け込み寸法が0.1mmしかなく、十分な寸法が確保されていなかった。

また、結合部に自己融着は認められなかった。

試験中のほとんどの期間、アルゴンガス雰囲気になされた乙コネクタ電極部、および甲コネクタは、あたかも一般炭素鋼の地肌のように赤錆ていた。これは、ブローしていたアルゴンガスに含まれる微量不純物が、高温によりステンレス鋼と反応して錆を形成し、スチーム洗浄後の高湿度保管が錆を助長したものと考えられた。

(2) 密閉型1コネクタ

洗浄による除去ナトリウム量は、約400グラムであった。

試験中アルゴンガス雰囲気になされた部分は、開放型コネクタと同様に赤錆が認められた。

また、甲コネクタ先端には黒い異物が付着していた。これは、過去のR/D経験からカーボンとみられ、ナトリウムの純度管理が十分に行えなかったことによるものと考えられた。

なお、破壊板は期待通り正常に破れていた。

(3) 密閉型2コネクタ

洗浄による除去ナトリウム量は、約500グラムであった。

密閉型2コネクタは、最後に甲乙コネクタが分離できなかったため、爪を掛けた状態で取出し、洗浄を実施した。洗浄後、爪を外してコネクタを取出したところ、甲コネクタ延長管部に、試験容器とのシール機構部まで全体にわたってナトリウムが付着

していた。保護筒内のアルゴンガスブローを常時行っていたにもかかわらず、このような状態が観察されたことは、ブローガスの流れに逆らってナトリウムペーパーが侵入している可能性を示している。開放型や密閉型1コネクタの場合は、甲乙コネクタが分離した状態で洗浄していることから、スチームの循環が良く、きれいに洗浄できたものとも考えることもできる。

また、密閉型2コネクタの場合は、他のコネクタと異なり、外面に赤錆が見られなかった。

6.2 解体検査における検査項目と要領

解体検査においては、以下の項目について検査した。

(1) 外観観察

目視により、金属部、絶縁セラミックス部等の状態を観察した。先の洗浄時に観察できなかった試験体内部を対象とした。

(2) 気密度試験

供試体の内部を真空にして大気側より気密バウンダリーにヘリウムガスを流し、ヘリウムリークディテクターにより結合部と延長管側との間のリークの有無を調べた。

(3) 部分気密度試験

各コネクタには複数の気密バウンダリーがあることから、気密バウンダリーを保存する位置で供試体を切断し、ヘリウムリークディテクターを用いて気密ロウ付け部、気密溶接部でのリークの有無とリーク箇所を調べた。各コネクタにおける切断位置を図6.1から図6.6に示す。

(4) 絶縁性試験

絶縁抵抗計にて、電極ピンとスリーブ間、および隣接する電極ピン間にDC 100Vを印加して絶縁抵抗を全数測定した。

(5) 導通試験

各電極ピンと、それに接続されているMIケーブル端末間との導通を確かめるため、テスターを用いて導通抵抗を測定した。

(6) 断面観察

- ・ セラミックスと金属、および金属と金属間の気密ロウ付け部の健全性を、各コネクタについて確認した。

- ・ 電極ピンの状態を、ナトリウム中で最も保持時間の長かった開放型乙コネクタを対象に観察した。
- ・ 試験後の取り出しで溶接部が破断した開放型乙コネクタについて、破断近傍溶接部の健全性を調べた。
- ・ 離脱不能現象および電気導通不良を起こした密閉型2コネクタについて、自己融着防止のためのハードクロムメッキ、接点板等、関連する箇所の状態を調べた。

(7) ナトリウム浸透試験

セラミックス絶縁材にどの程度ナトリウムが浸透し絶縁に影響を与えていないか、ナトリウム中で最も保持時間の長かった開放型コネクタを対象に、X線マイクロアナライザーによって調べた。

6.3 開放型コネクタの検査結果

(1) 外観観察

乙コネクタについて、外枠は写真 6.1 に示すように、スリーブと電極ホルダー間の溶接部で外れ、上セラミックスは電極ホルダー側、下セラミックスはスリーブ側の所定の位置にそれぞれ付着していた。電極ピンは MI ケーブルとの接続部付近で切断し、下セラミックスから抜けて上セラミックス側に付いていた。

甲コネクタ先端セラミックス部に白色付着物が、甲乙コネクタ金属部、MI ケーブル表面には赤錆が見られた。

(2) 気密度試験

乙コネクタの図 6.8 に示すスリーブとコネクタ支持部間の気密溶接部(i)から、 10^6 atomic cc/sec オーダーのリークがあった。甲コネクタについては、リークは認められなかった。

(3) 部分気密度試験

図 6.7、図 6.8 に気密ロウ付け部、気密溶接部でリークの発生した箇所を●印で、リークの無かった箇所を○印で示す。

金属とセラミックスとのロウ付けのある箇所は全てリークが生じ、真空状態に達しなかった。金属と金属のロウ付け部および溶接部は、(2)の気密度試験でリークの観察された乙コネクタのスリーブ(KOVAR)とコネクタ支持部(SUS)間の溶接部以外にリークは無かった。

(4) 絶縁性試験

絶縁抵抗は、平均値が約 3M Ω 、最小値が 0.4M Ω であった。これらの値はナトリウム液中試験時の 200 $^{\circ}\text{C}$ での値と比べると約 1/2 であった。

(5) 導通試験

乙コネクタに関する導通抵抗は、電極ピンと MI ケーブル間で切断しているため意味がないため、測定を省略した。甲コネクタに関しては、0.8 Ω から 2.3 Ω 程度の抵抗値を示したことから、電極末端での接続不良は無かったことが分かる。

(6) 断面観察

図 6.1、図 6.2 の a から o 部の断面を観察した。

① 金属と金属間の気密ロウ付け部 (a,a',h) については、健全なロウ付け状態を維持していた。セラミックスと金属(SUS)間のロウ付け部 (d,e) では、接合部にすきまが生じていた。また、セラミックスと KOVAR (Fe-Ni-Co 合金) のロウ付け部は、スリーブ部 (c,g) は健全であったが、電極ピン部 (b,f) は接合部にすきまが生じていた。

② ナトリウム液中への浸漬時間が最も長かった乙コネクタ電極ピン (m,n,o) を観察した結果、表面に施したニッケルメッキ全体に割れ、剥離が見られ、また、本体のステンレス鋼の先端部に欠損が生じていた。なお、甲コネクタ電極 (j,k,l) は、本体の欠損はなく、メッキの割れ、剥離は僅かに見られた。

なお、ニッケルメッキは、腐食防止とロウ付けの際に結晶粒界へのロウの拡散を防止するために、金属部に施されているものである。

③ 試験後の取り出しで溶接部が破断した乙コネクタについて、破断近傍溶接部 (i) の健全性を調べた。溶接の溶け込みは、約 0.3mm と少なく、溶け込み部の中に亀裂が生じていた。

断面観察の結果をまとめて、図 6.7、図 6.8 に示す。

(7) ナトリウム浸透試験

ナトリウム中で最も保持時間の長かった開放型甲乙コネクタを対象に、図 6.1、図 6.2 のセラミックス部 (p,q) にどの程度ナトリウムが浸透しているかを、X線マイクロアナライザーによって調べた。結果を写真 6.2 に示す。写真は、1000 倍で分析を行った結果であるが、セラミックス内部からナトリウムは検出されず、ナトリウムによるセラミックスの損傷も見られなかった。

6.4 密閉型1コネクタの検査結果

(1) 外観観察

甲コネクタは、先端部、MI ケーブル端部、SUS 管内壁に白色付着物が、MI ケーブル表面、SUS 管内壁に酸化、赤錆が見られた。

乙コネクタ B(*)は、先端部に白色付着物が見られたが、内部に発錆等はなかった。乙コネクタ Aは、先端セラミックス表面が黒色に変色していた。電極ピン、電極ホルダー内面に発錆が見られたが、他の内面はきれいであった。

*注) 密閉型1の乙コネクタは、電極部を破壊板で保護した構造だから、一度破壊板を破いてしまえば、繰返し試験することができない。したがって、ナトリウム中試験では再現性を調べるため、同一仕様の乙コネクタを2体用意した。

(2) 気密度試験

甲乙コネクタ計3体、いずれにもリークは認められなかった。

(3) 部分気密度試験

図 6.9、図 6.10 に気密ロウ付け部、気密溶接部でリークの発生した箇所を●印で、リークの無かった箇所を○で示す。

ここで、甲コネクタ、乙コネクタ Bについては、部分気密度試験のため図 6.3、図 6.4 の図中③に示す切断を行った際に、内部にナトリウムが浸入しているのが発見されたので、再度水洗いしてから、本試験を行った。

金属とセラミックスのロウ付け部のある箇所は全てリークが生じ、真空状態に達しなかった。金属と金属とのロウ付け部および溶接部については、乙コネクタ A、Bのスリーブ (KOVAR) と電極ホルダー (SUS) 間の溶接部で、リークが観察された他は健全であった。

(4) 絶縁性試験

甲コネクタおよび乙コネクタ Bについては、内部にナトリウムが浸入していたため、絶縁が無くなっていた。

乙コネクタ Aは、平均値約 $1\text{M } \Omega$ 、最小値 $0.3\text{M } \Omega$ の絶縁抵抗があった。これは、ナトリウム中試験時の初期、 200°C での値と比べると約1桁低い値である。

(5) 導通試験

いずれのコネクタも導通は完全であった。甲コネクタおよび乙コネクタ Bにはナト

リウムが浸入していたにもかかわらず、乙コネクタ A には浸入していなかったことから、電極端末接続の施工不良は、少なくとも乙コネクタ A にはなかったと言える。

(6) 断面観察

図 6.3、図 6.4 の a から g に示す気密ロウ付け部の断面観察を行った。図 6.9、図 6.10 に示すように、金属間 (a,g) は健全なロウ付け状態を維持していた。また、セラミックスと KOVAR のロウ付け部は、乙コネクタ A のスリーブ部 (f) が健全であった他は、接合部 (b,c,e) にすきまが生じていた。

6.5 密閉型 2 コネクタの検査結果

(1) 外観観察

密閉型 2 コネクタは、ナトリウム中試験において甲乙コネクタが結合したまま取出されて洗浄されていたが、解体検査ではまず写真 6.3 の①で切断した。写真 6.3 の左側に切断した甲コネクタの写真を、右にコネクタリッドのテーパ部を削り取って甲コネクタの電極部セラミックスとスリーブを引抜いた写真を示す。また、乙コネクタを写真 6.4 に示す。

続いて、乙コネクタのコネクタケースが結合した状態の甲コネクタを水洗いしたが、この時、ボンという音と共に乙コネクタのコネクタケースが甲コネクタから外れた。甲コネクタの接点カバーは内部に押込まれたままであった。

甲コネクタの接点カバーと外カバーは、断面観察のために長手方向に 2 分割する過程で離脱した。

観察の結果、甲コネクタ外カバーの乙コネクタとの接触部、接点カバーとの接触部に著しい腐食が生じており、また、電極接点部のメタライズ層は剥離状態となっていた。乙コネクタについても結合部内面および接点板が著しく腐食していた。

(2) 気密度試験

甲、乙コネクタともリークは認められなかった。

(3) 部分気密度試験

図 6.11、図 6.12 に気密ロウ付け部、気密溶接部でリークの発生した箇所を●印で、リークの無かった箇所を○で示す。

甲コネクタの金属とセラミックスのロウ付け部ではリークが生じ、真空状態に達しなかった。乙コネクタの金属とセラミックスのロウ付け部は、バネの設置スペースも

気密部の一部となっている構成のため試験不可能であった。

金属と金属とのロウ付け部および溶接部については、いずれのコネクタも全てリークは無かった。

(4) 絶縁性試験

甲コネクタの絶縁は、平均約 $1\text{M } \Omega$ 、最小値 $20\text{k } \Omega$ であった。乙コネクタの絶縁は、一部の電極ピンと外枠間に $300\text{k } \Omega$ 以上の絶縁があったが、その他の電極ピンと外枠間、および隣接電極ピン間は $4\text{k } \Omega$ 以下となっていた。乙コネクタの絶縁の平均は約 $0.4\text{M } \Omega$ であった。

絶縁の平均値を、ナトリウム中試験終了直前の $200\text{ }^\circ\text{C}$ での値と比較すると、約 $1/2$ となっている。

(5) 導通試験

乙コネクタの1本を除き、導通抵抗は完全であった。

(6) 断面観察

図 6.5、図 6.6 の a から g に示す気密ロウ付け部の断面を観察した。

- ・気密ロウ付け部については、金属と金属間のもの (a,f) は健全なロウ付け状態を維持していた。セラミックスと KOVAR のロウ付け部は、甲コネクタの電極ピン部 (b) が健全で、その他の部分 (c,d,e) は接合部にすきまが生じていた。観察結果を図 6.11、図 6.12 に示す。
- ・離脱不能現象にかかわる箇所の観察では、乙コネクタ外面のハードクロムメッキ (g) は甲コネクタと接触していなかった部分は比較的健全であったが、甲コネクタと接触していた先端部では著しく損傷していた。これらを写真 6.5 に示す。
- ・結合時の電気導通現象に関し、乙コネクタ接点板の断面を写真 6.6 に示す。外観観察で見られたように接点板は著しく腐食していたが、その腐食は電極板深部まで存在していた。

6.6 本解体検査におけるまとめ

本解体検査で得られた主要な結果を挙げると、密閉型 1 コネクタでは、内部の気密ハウジングにナトリウムが浸入しており、これが絶縁低下をもたらしていた。密閉型 2 コネクタでは、乙コネクタリッド上のナトリウムが結合時に電極部に浸入して内部の空気と反応し、燃焼した形跡が認められ、この燃焼により生じたナトリウム化合物による腐

食が離脱不能現象、絶縁低下、導通抵抗不安定現象を発生させたものと推測された。

これらの現象に関連して、ナトリウム液中では保護筒内ガスブローを行っても、保護筒内にはナトリウムペーパーが存在することがほぼ明らかになった。また、コネクタ内部の一部気密溶接部に溶接深さ不足による割れが生じ、大部分の金属とセラミックス間気密ロウ付け部において熱膨張係数の差による剥離が生じていることが分かった。これらが上記不具合の原因、もしくは不具合を助長したものと見なされた。

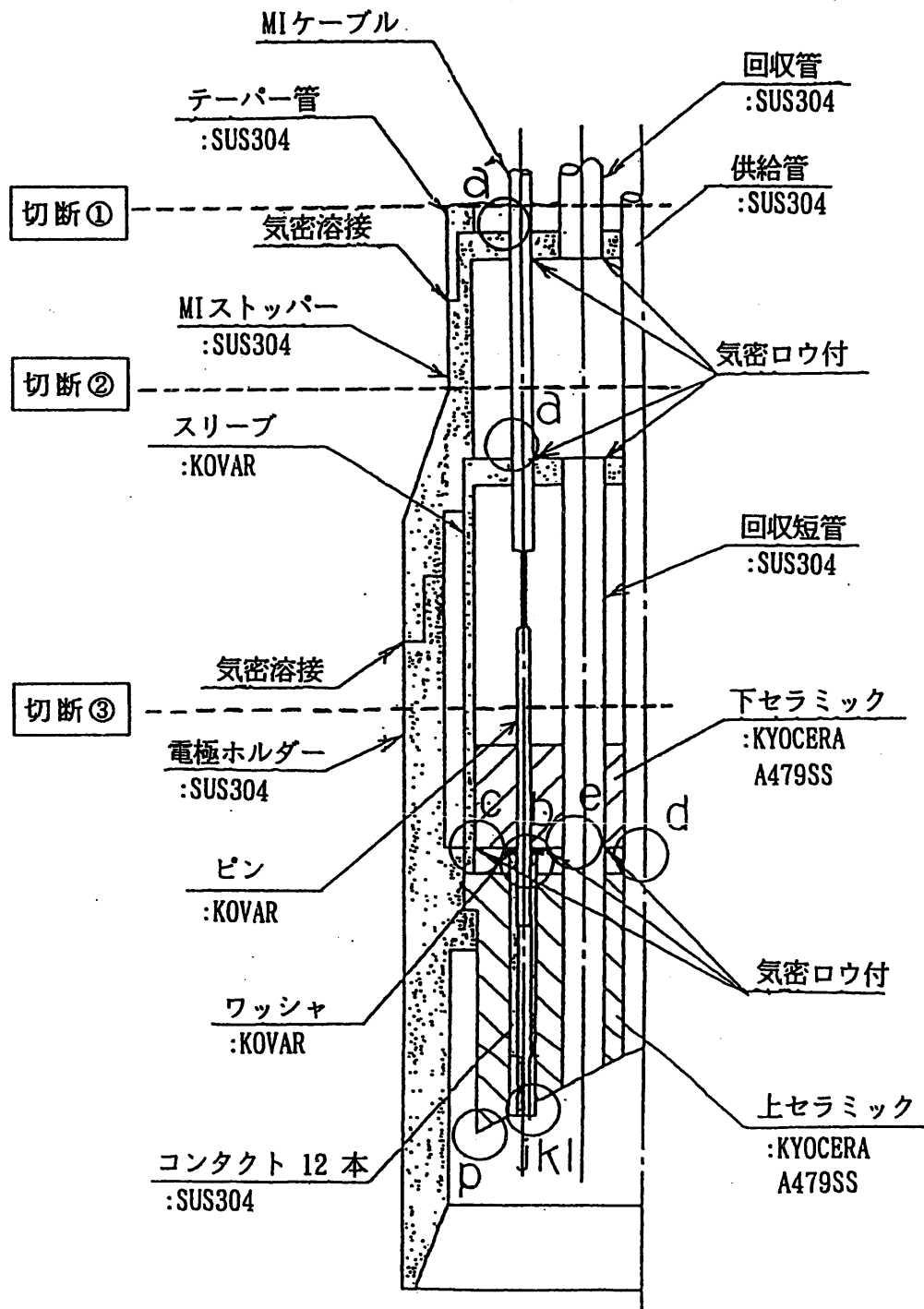


図6.1 開放型αコネクタ気密度試験切断位置、断面観察箇所

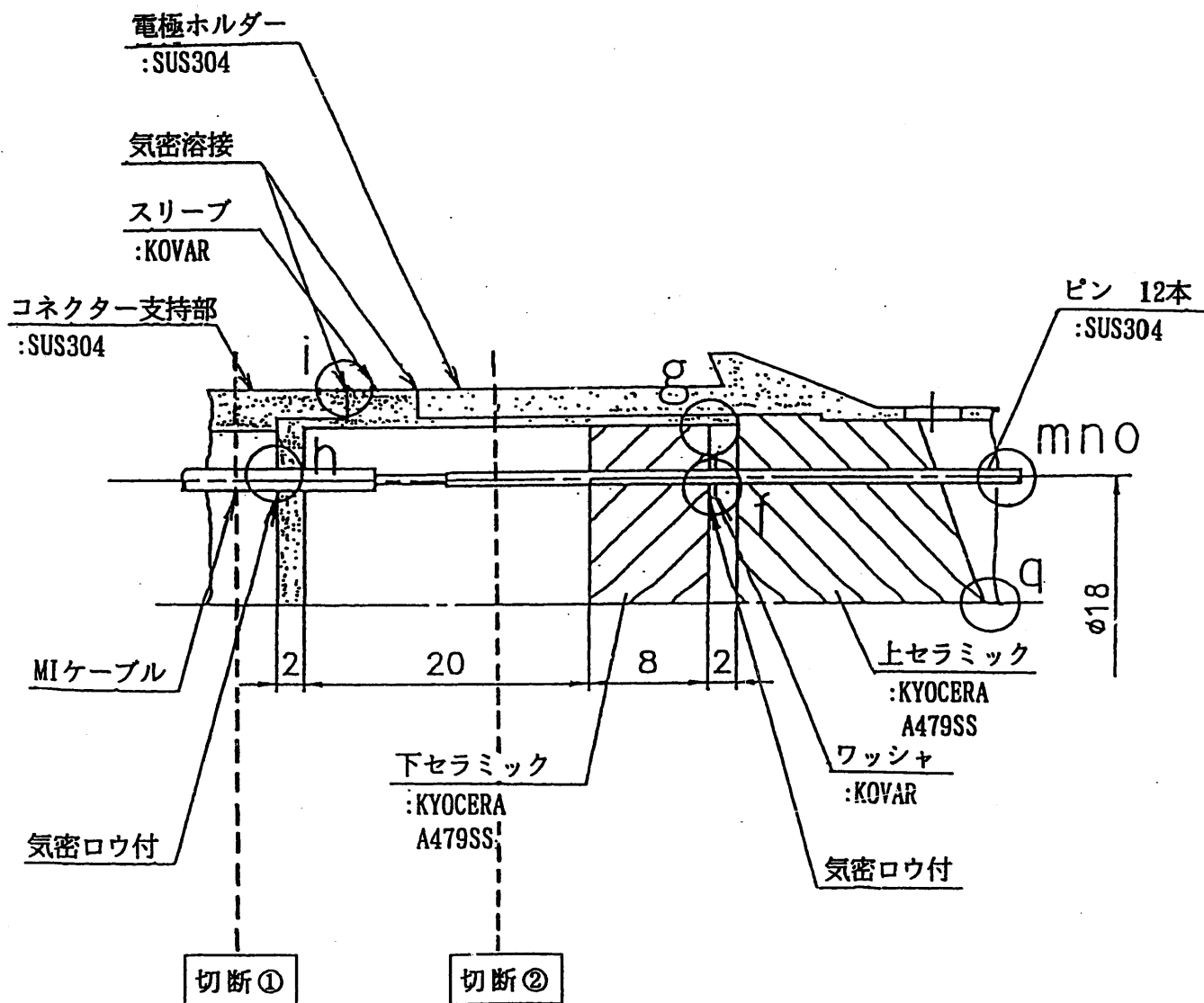


図6.2 開放型乙コネクタ気密度試験切断位置、断面観察箇所

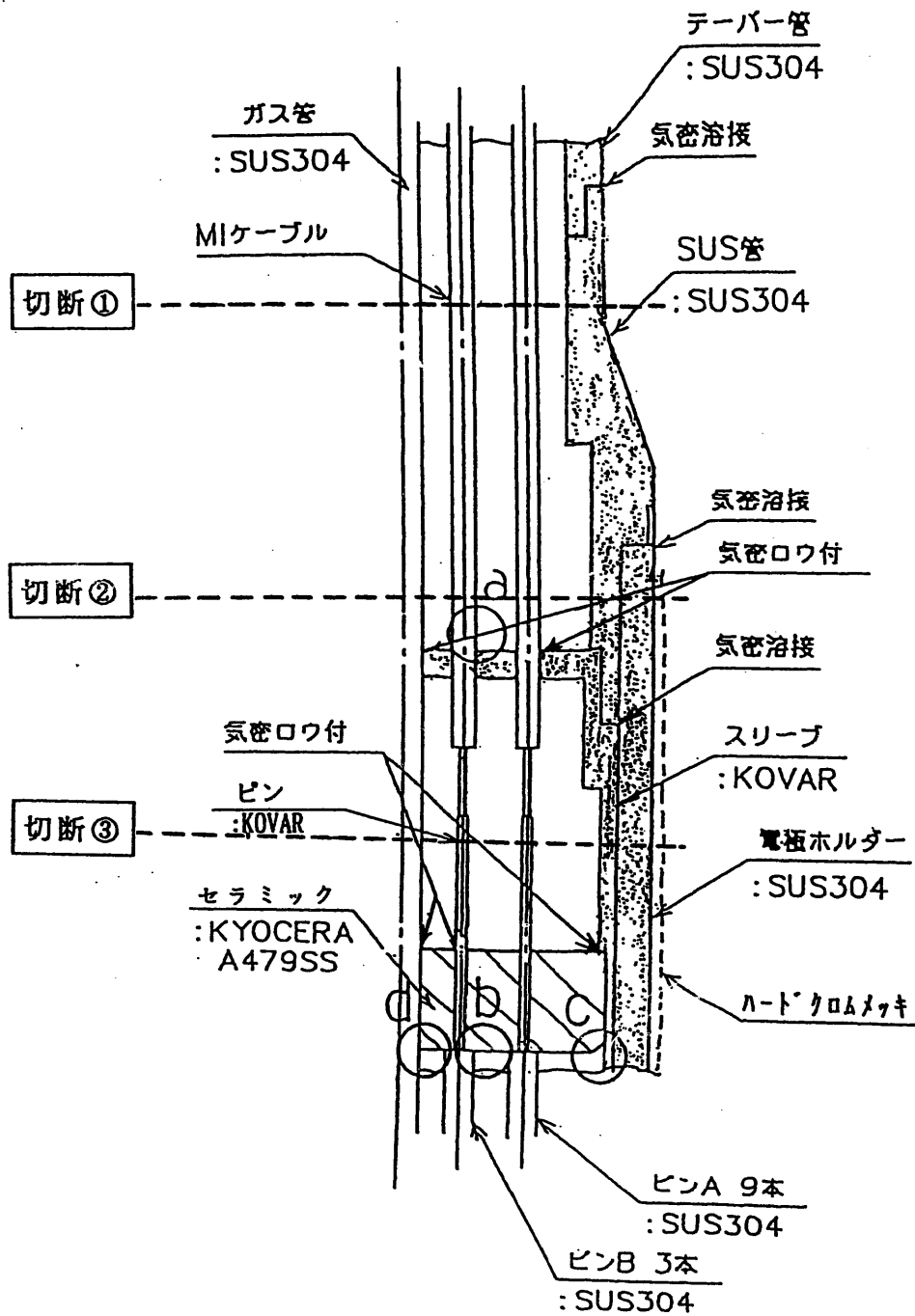


図6.3 密閉型1甲コネクタ気密度試験切断位置、断面観察箇所

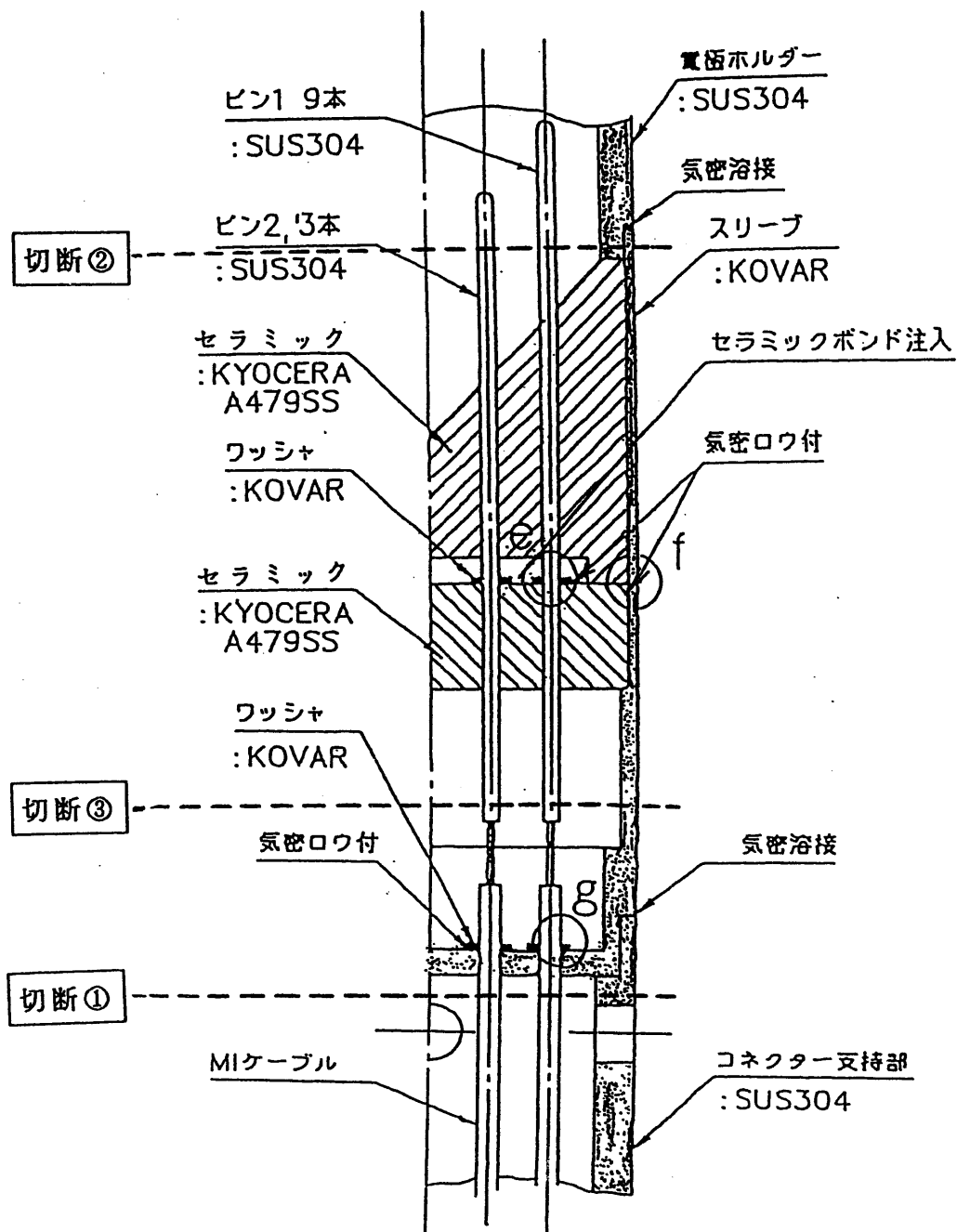


図6.4 密閉型1乙コネクタ気密度試験切断位置、断面観察箇所

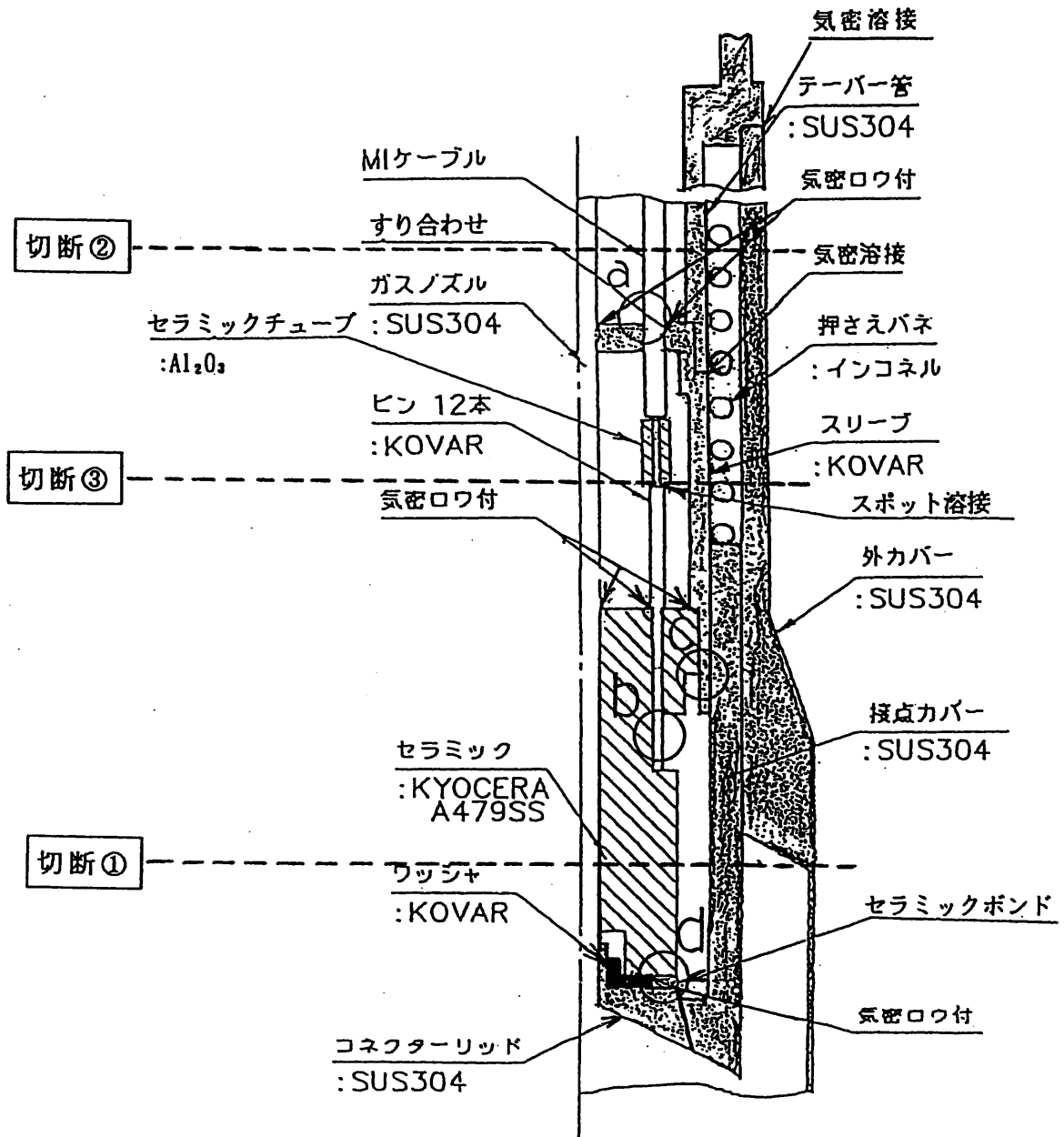


図6.5 密閉型2甲コネクタ気密度試験切断位置、断面観察箇所

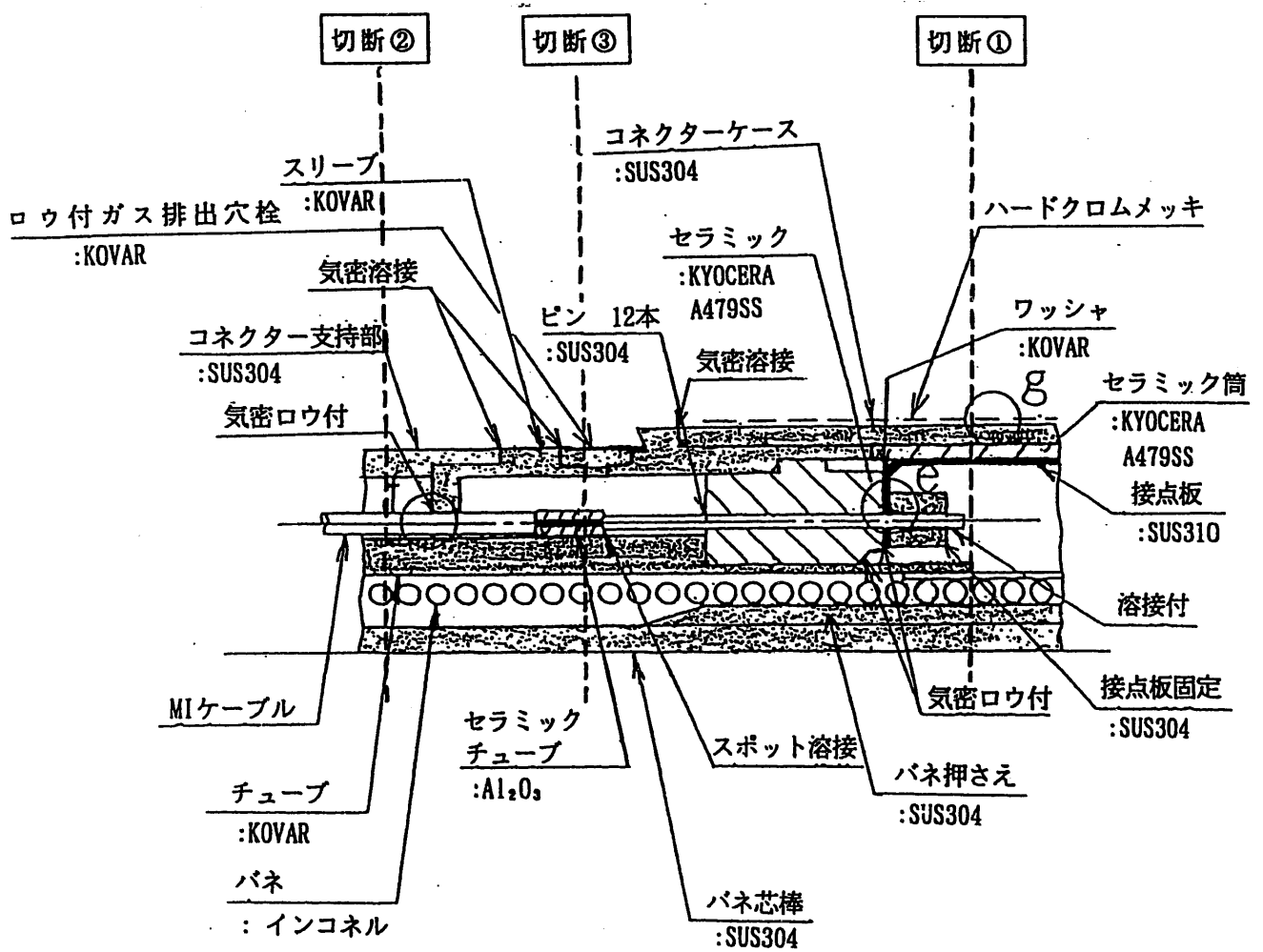


図6.6 密閉型2乙コネクタ気密度試験切断位置、断面観察箇所

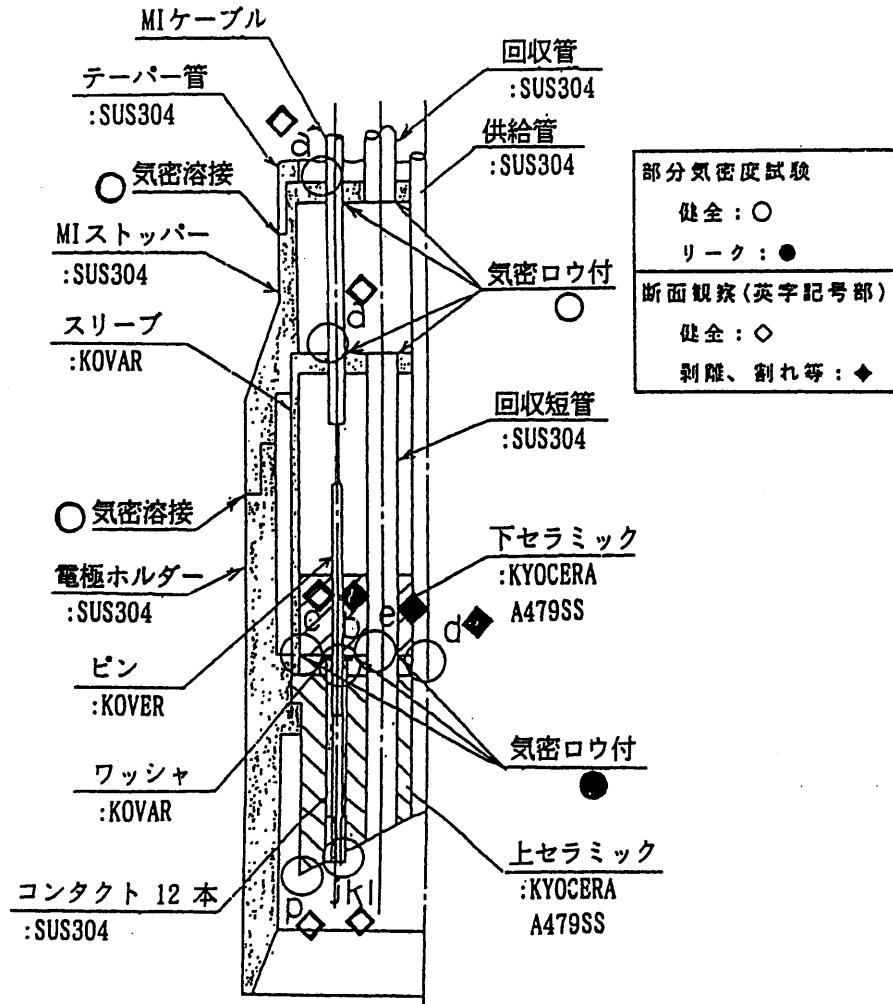


図6.7 開放型甲コネクタ気密度試験、断面観察結果

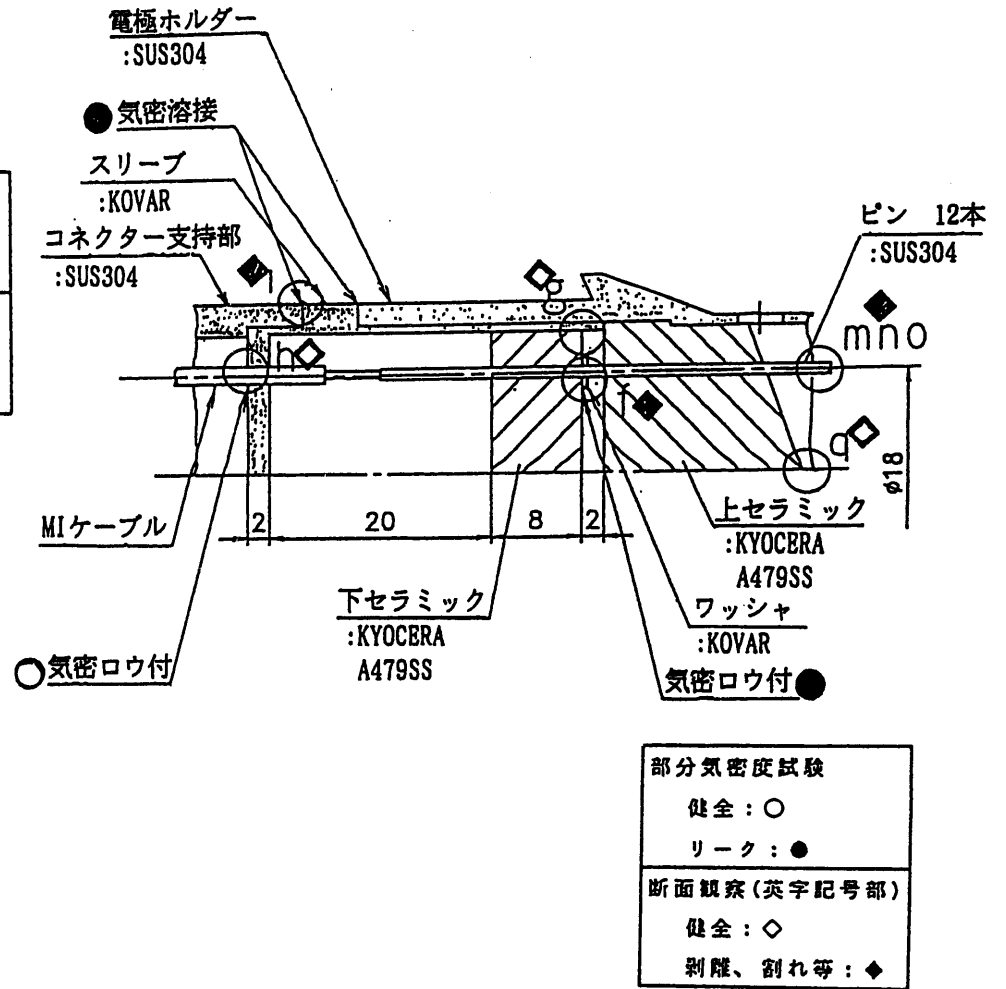


図6.8 開放型乙コネクタ気密度試験、断面観察結果

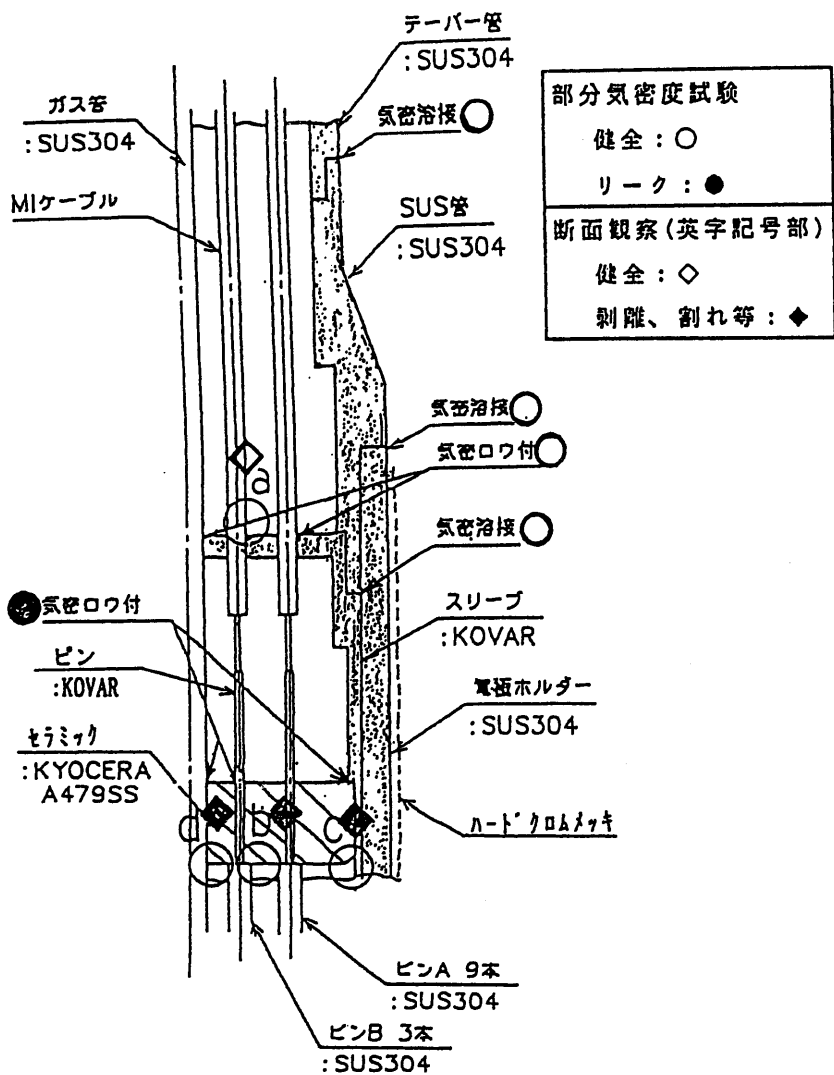


図6.9 密閉型1甲コネクタ気密度試験、断面観察結果

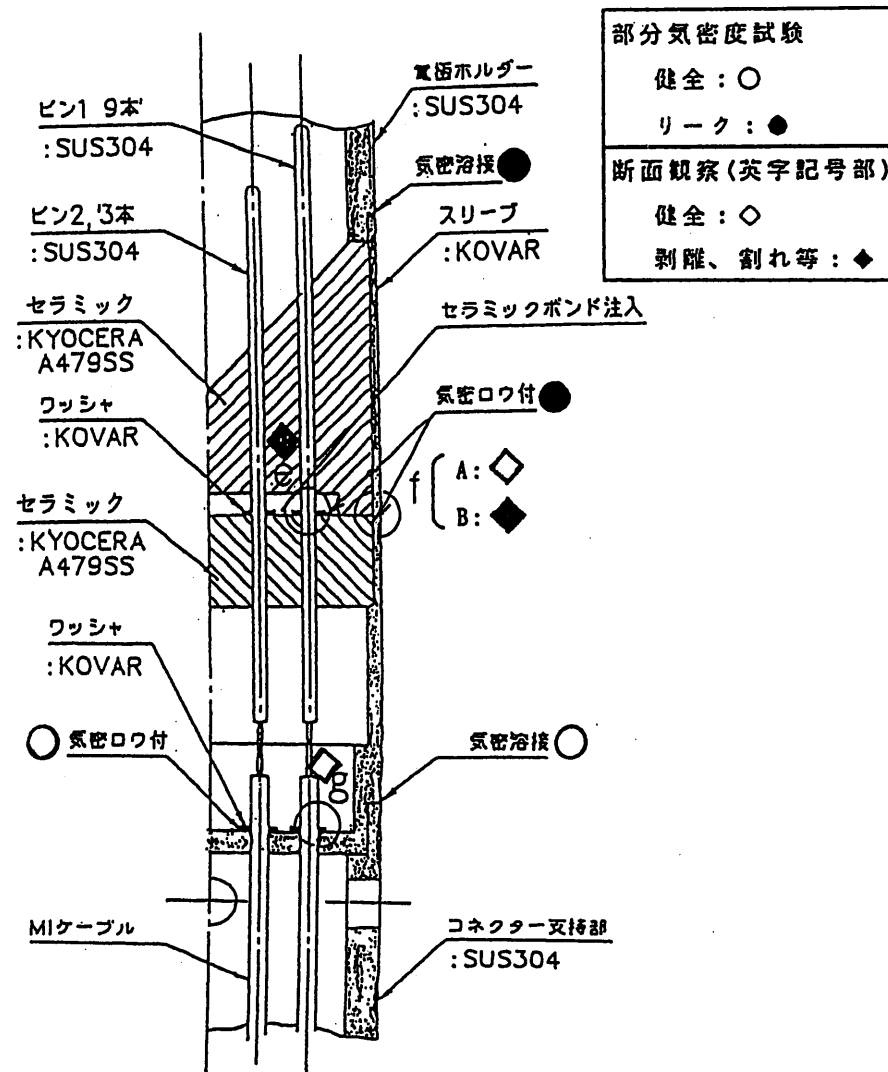


図6.10 密閉型1乙コネクタ気密度試験、断面観察結果

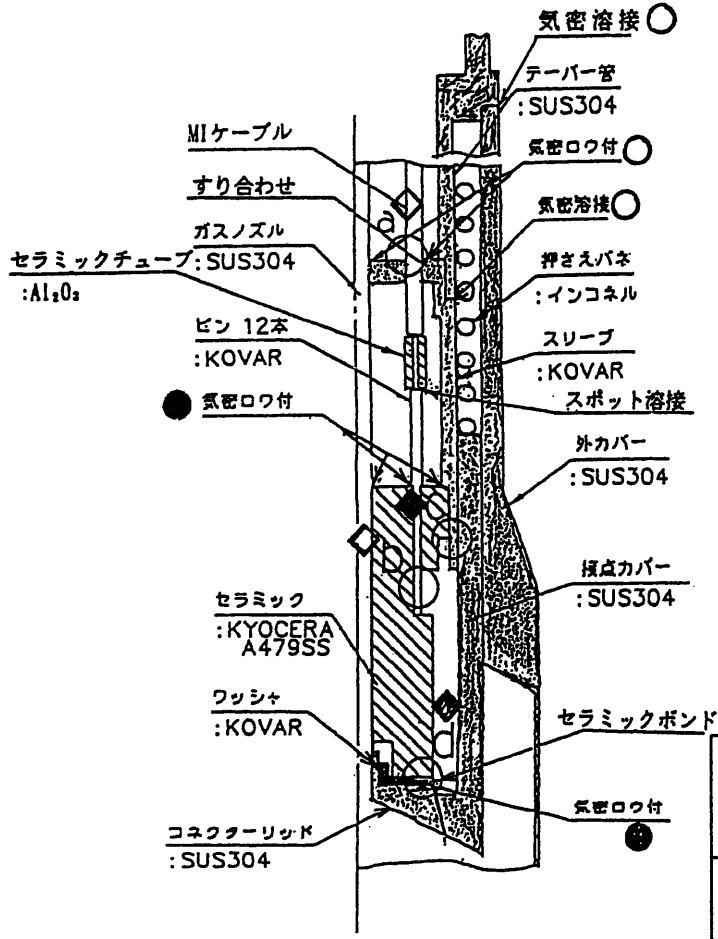


図6.11 密閉型2甲コネクタ気密度試験、断面観察結果

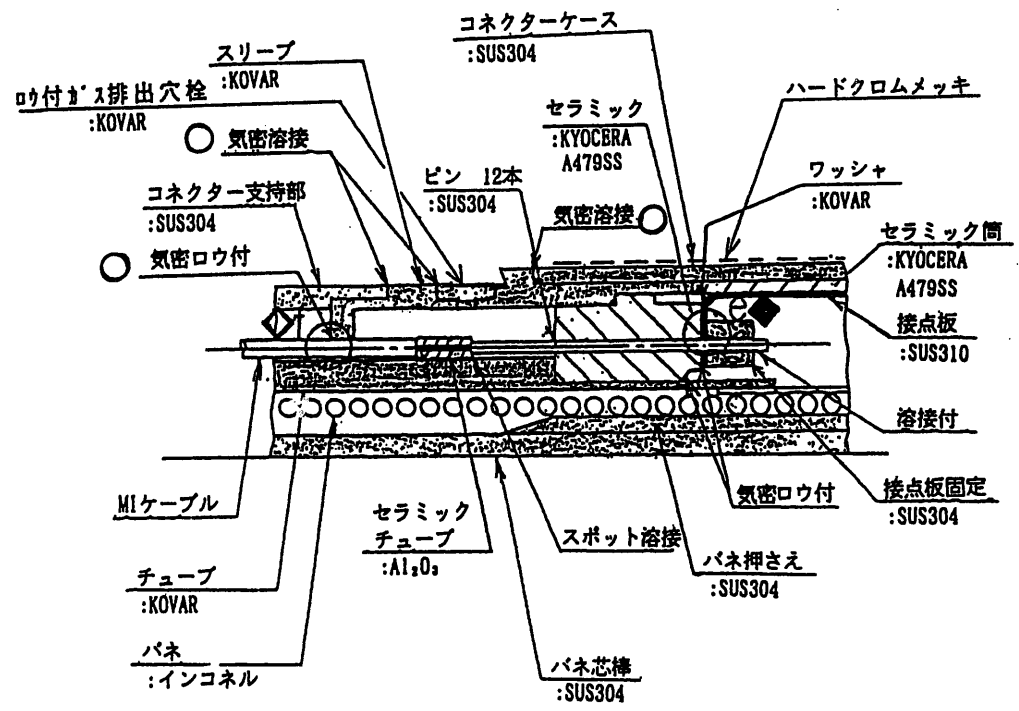
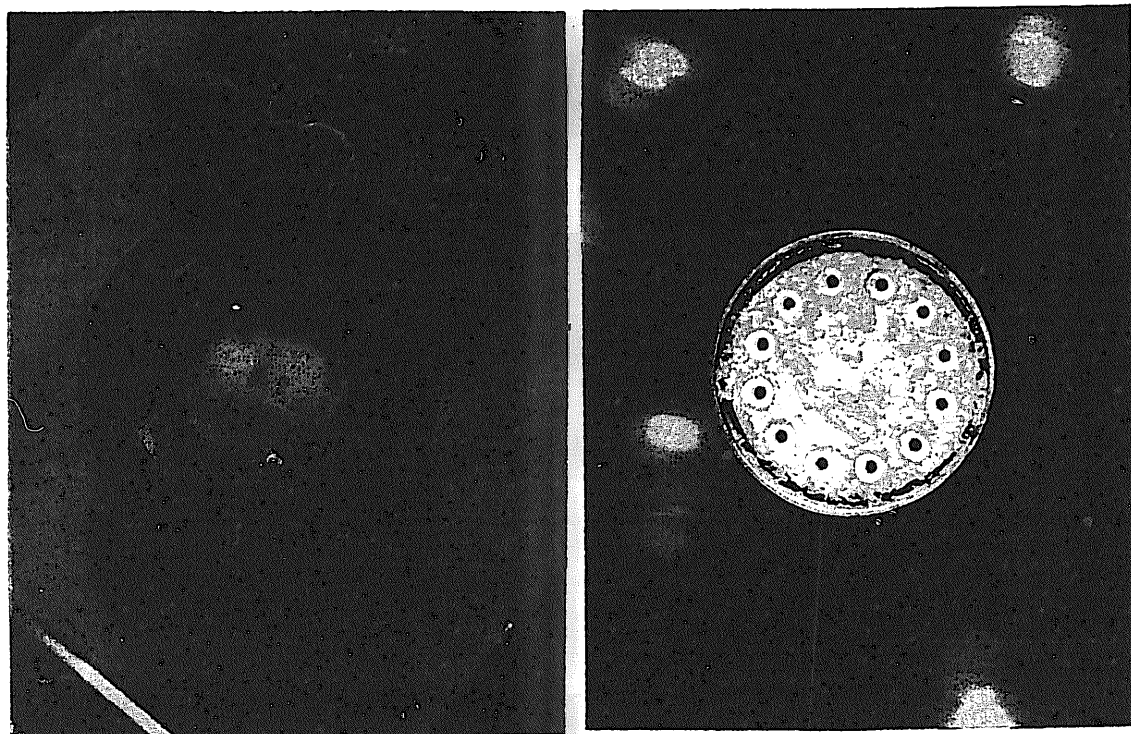


図6.12 密閉型2乙コネクタ気密度試験、断面観察結果

部分気密度試験
健全 : ○
リーク : ●
断面観察(英字記号部)
健全 : ◇
剥離、割れ等 : ◆

部分気密度試験
健全 : ○
リーク : ●
断面観察(英字記号部)
健全 : ◇
剥離、割れ等 : ◆



先端セラミック部

下セラミック (下図右から)

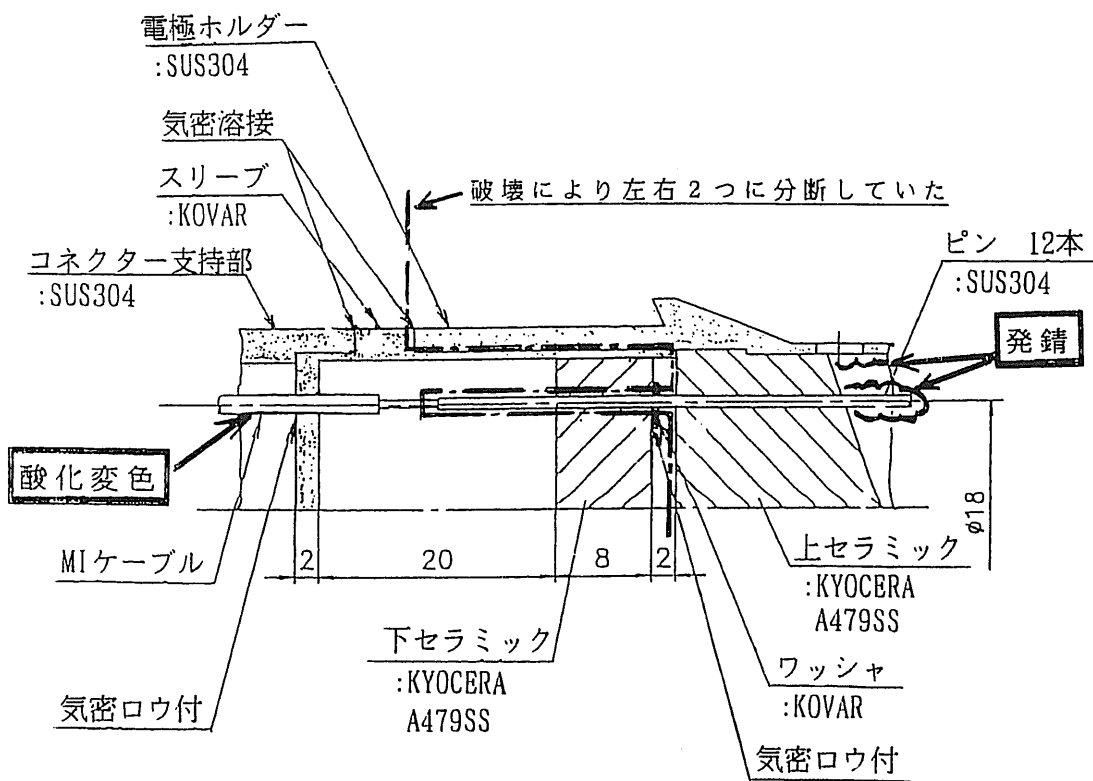
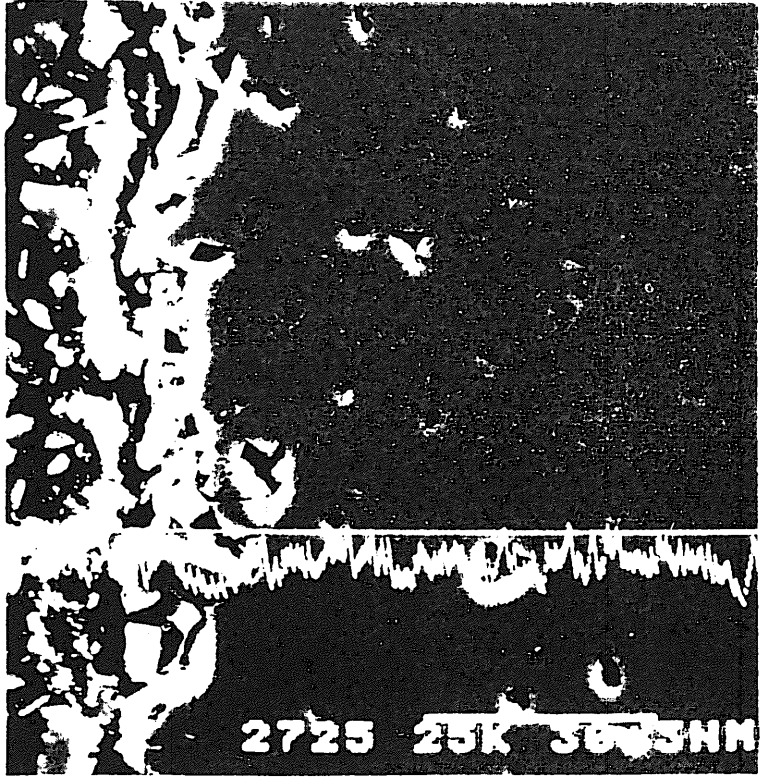


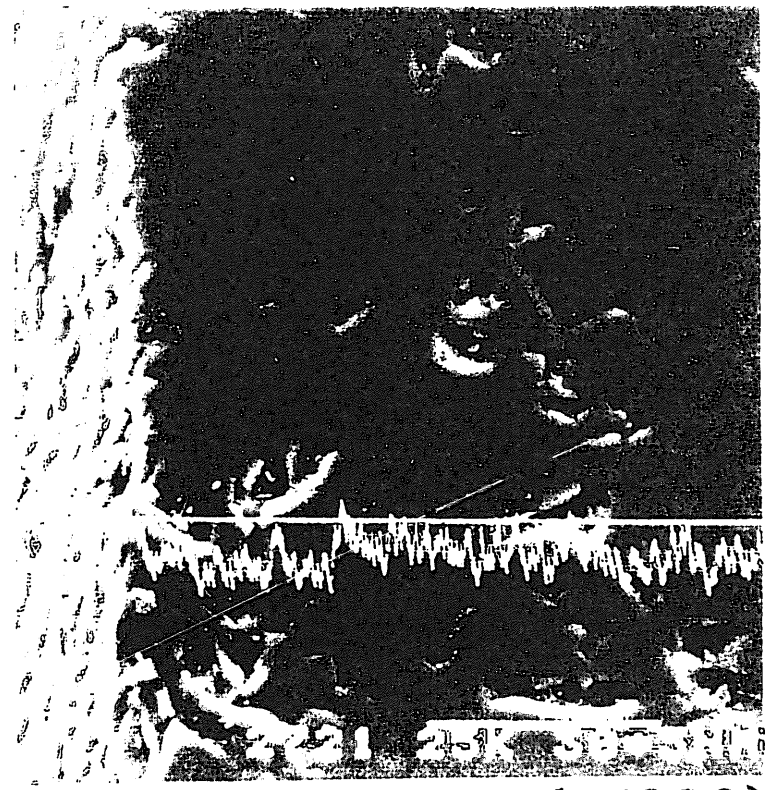
写真6.1 開放型乙コネクタ外観観察結果



Na

(x 1000)

甲コネクタ

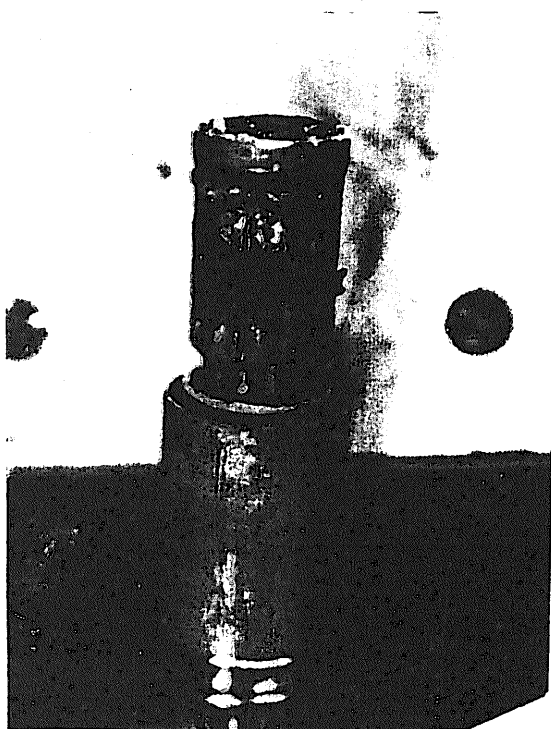


Na

(x 1000)

乙コネクタ

写真6.2 開放型コネクタナトリウム中浸漬試験結果 (XMA)



切断①にて切断したもの



左の状態から電極部セラミック
及びスリーブを抜き出したもの

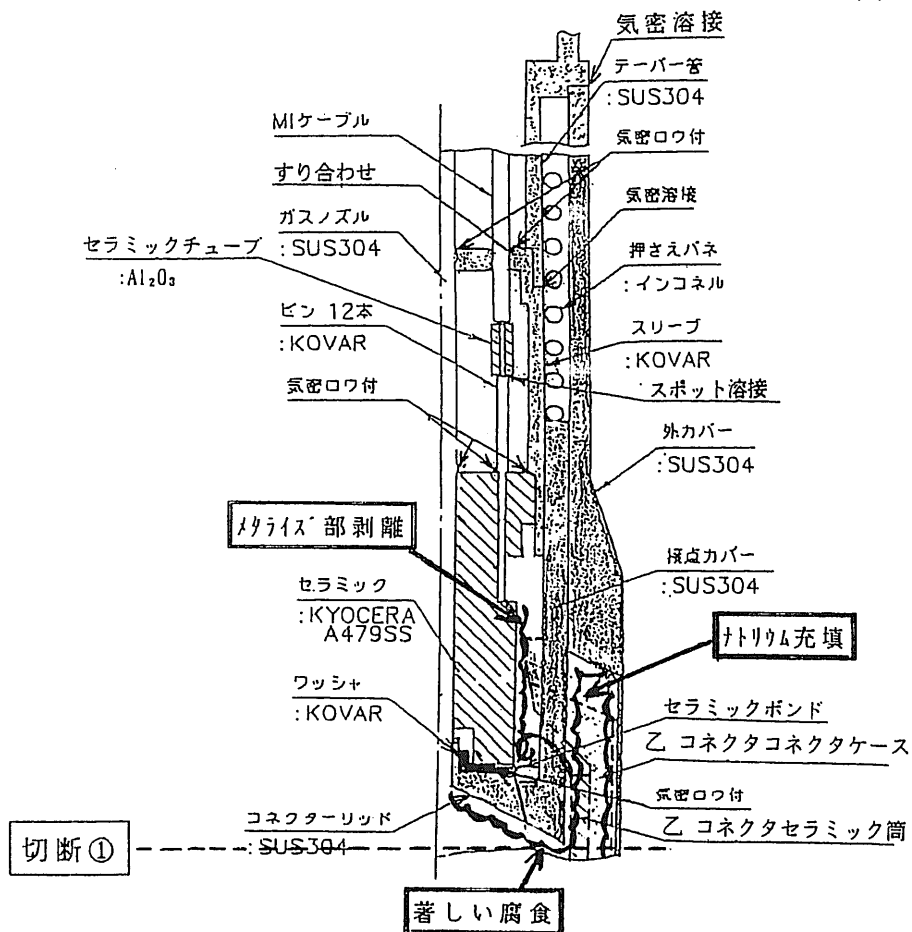
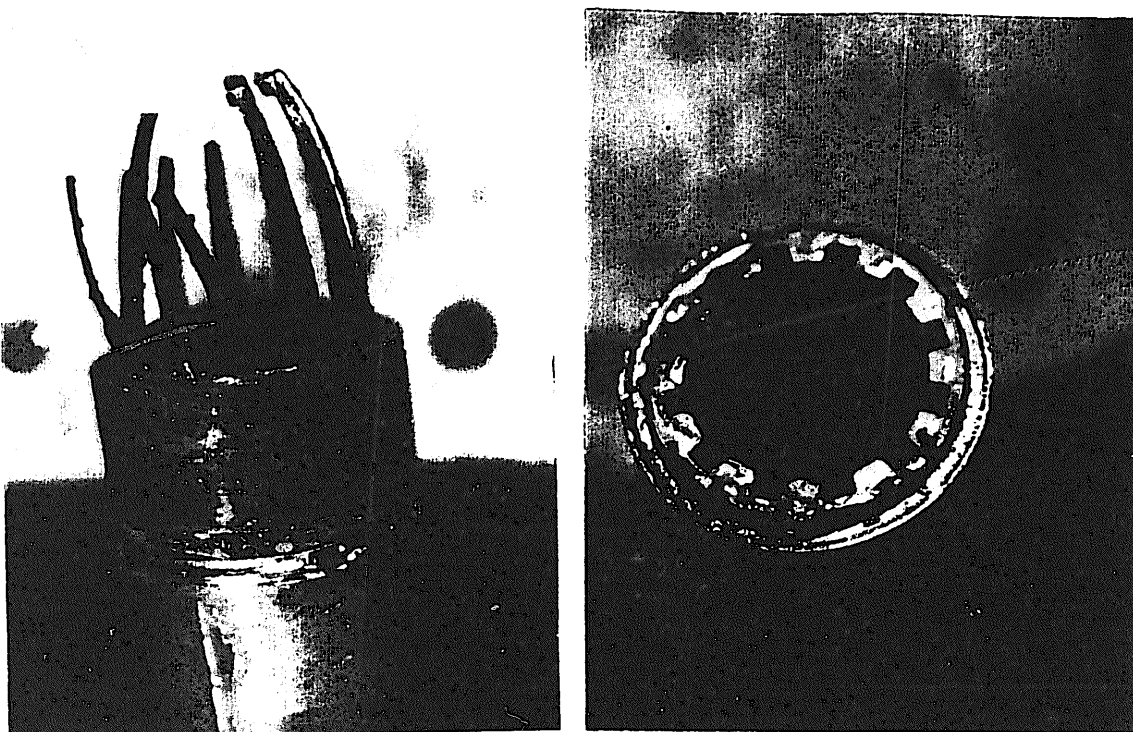


写真6.3 密閉型2甲コネクタ外観観察結果



切断①にて切断したもの

セラミック筒先端部

写真4.8の切断①にて切断したもので、
歯車状のものは電極板ガイド用のセラ
ミックの切り込み

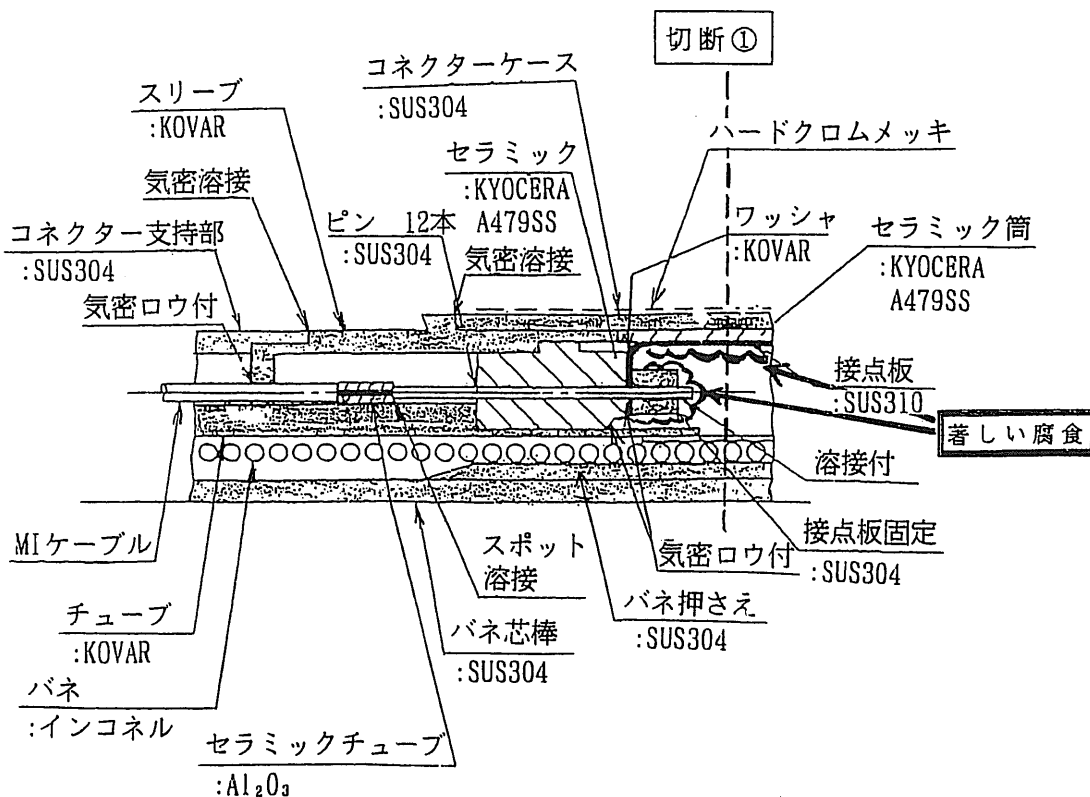
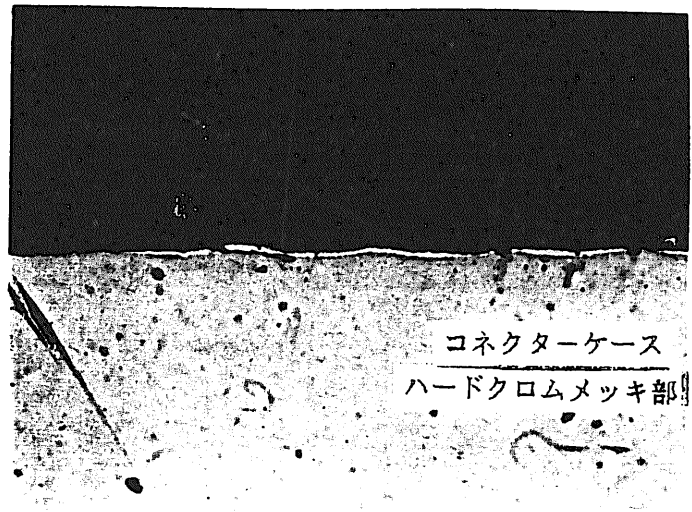


写真6.4 密閉型2乙コネクタ外観観察結果



(×50)

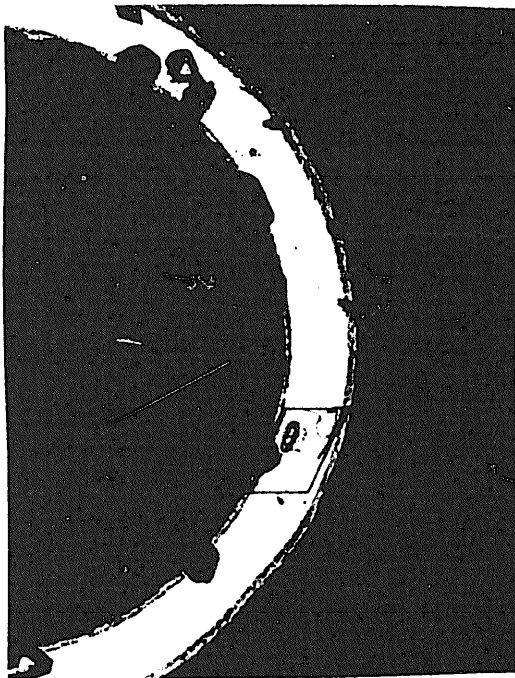
コネクタケース先端部
ハードクロムメッキ



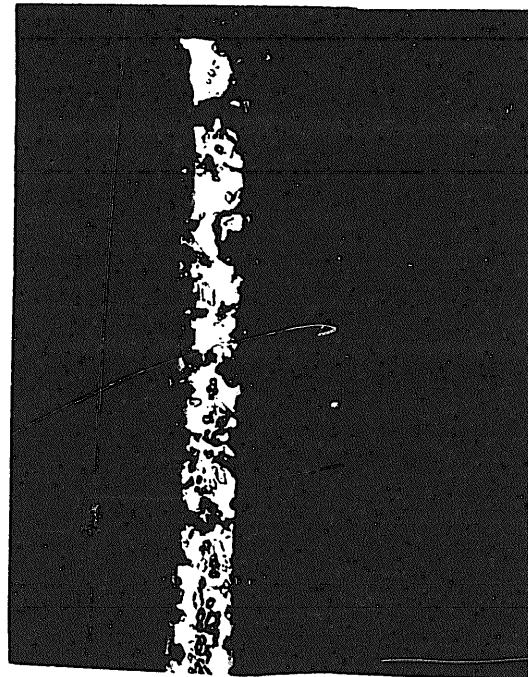
(×400)

コネクタケース側面
ハードクロムメッキ
(甲コネクタとの非接触部)

写真6.5 密閉型2乙コネクタハードクロムメッキ断面観察写真



(×50)



(×50)

写真6.6 密閉型2乙コネクタ接点板断面観察写真

7. セラミックスー金属ロウ付け試行試験

7.1 ロウ付け試行試験（その1）：平成3年度実施

部分モデル試験体（絶縁用セラミックスはいずれもアルミナ）を用いたナトリウム中試験において、気密ロウ付け部のセラミックスに割れやロウの剥離が認められたため、接合技術を改善すべくセラミックスと金属のロウ付け試行試験を実施した。

<セラミックス材料>

- 単結晶アルミナ（サファイヤ：京セラ SA100）
- 窒化硅素（ Si_3N_4 ：京セラ SN220）

<試験片形状・寸法>

試験片の種類は、異種材料の接合部に注目した接合試験片と、形状・寸法効果に注目した形状模擬試験片とを準備した。それぞれの試験片の形状・寸法を図 7.1、図 7.2 に示す。

<ナトリウム中浸漬条件>

- ・ ナトリウム温度 530 ℃
- ・ ナトリウム純度 CT 温度 150 ℃
- ・ 浸漬時間 約 1,000 時間

<検査項目と結果>

ナトリウム中浸漬後の健全性評価のため、・材料検査、・外観、重量および寸法検査、・絶縁性試験、・硬さ試験、・曲げ強度試験、・高温熱伝導率試験、・体積固有抵抗試験、・接合体試験（気密試験、引張強度試験）、・構造体試験（気密試験、電極ピン間導通抵抗測定、絶縁抵抗測定）を実施した。その結果、特筆すべき事項として以下が明らかになった。

(1) 絶縁抵抗の低下

ナトリウム浸漬後では下表のように、明らかに体積固有抵抗値に変化が見られた。これについてセラミックスのミクロ観察を実施したところ、500 倍に拡大したサファイヤ表面はピンホール状の孔が多数発生しており、2,000 倍に拡大すると表面はカサカサになっていることが分かった。この深さは $1 \mu\text{m} \sim 2 \mu\text{m}$ と観察された。絶縁抵抗の低下は、このような欠陥に付着したナトリウム、もしくはその化合物に

よるものと考えられた。

窒化硅素についても同様に欠陥が観察され、しかもその程度は窒化硅素の方が大きかった。

	体積固有抵抗値(Ω cm)の変化	
	Na 浸漬前	Na 浸漬後
サファイヤ		
室温	1.0E+14 以上	1.0E+14 以上
200 °C	1.0E+14 以上	1.0E+14 以上
400 °C	1.1E+13	2.4E+12
600 °C	5.2E+10	3.7E+10
窒化硅素		
室温	1.0E+14 以上	1.0E+14 以上
200 °C	1.0E+14 以上	1.0E+14 以上
400 °C	1.4E+12	3.4E+11
600 °C	9.0E+ 9	4.7E+ 9

(2) 異材料接合部での破壊（接合試験片）

接合試験片の製作においては、ナトリウムの影響うんぬん以前に、接合部自体の強度に問題があった。つまり、製作完了後の試験片に多少のショックが加わっただけでも接合部付近で破壊してしまうのである（窒化硅素タイプ、サファイヤタイプとも）。このような状態では実用に耐えないのは承知しながらも、貴重な機会であることから、良品を慎重に取扱って試験に供した。

接合試験片のナトリウム浸漬後の状況について、窒化硅素タイプはセラミック部で破壊し、サファイヤタイプは接合層の間で破壊していた。原因として、接合部の強度自体がばらついていることは否めないものの、現象の本質は接合材同士の熱膨張特性の差によるものと考えられた。

(3) 異材料接合部での割れ、はがれ（形状模擬試験片）

接合部の断面を観察した結果、セラミックスに割れやメタライズ層にはがれが見られ、気密性を有している状態ではないと判断できた。しかし、試験片を検査のために受け入れた時点での気密試験では、付着残留物（スチーム洗浄後に残るナトリ

ウム化合物)により異常が認められなかった。

また、電極ピンと金属間の絶縁抵抗も付着残留物のため劣悪な状態であった。

(4) スリーブ接合部からの脱落 (形状模擬試験片)

窒化硅素乙コネクタタイプ (メタライズ材: Ni-Ti 系) を除く全てのタイプで、断面試料作成時の外力により、セラミックスはスリーブ接合部から脱落した。接合部の詳細観察によれば、セラミックス表面から割れが入り、それが進行して剥がれていることが分かった。これらの原因は、高温下での熱的ストレス、ナトリウムの浸食の両方による影響と考えられた。

また、窒化硅素の試験片の場合、割れの進行は Cu-Ti 系メタライズ材の方が顕著であること、ロウ材の表面はナトリウム浸漬によりピンホール状態となっているが、表層のみで止まっていることが分かった。

<まとめ>

以上のことから、さらに、

- 接合部の熱的ストレスの改善
- バウンダリー構造の改善

について課題が残ることが明らかになった。

7.2 ロウ付け試行試験 (その2): 平成7年度実施

絶縁材として、サファイヤ、窒化硅素を用いた前回の接合体における課題、つまり、

- 接合部の熱的ストレスの改善
- バウンダリー構造の改善

を解決すべく、

○ ピンの熱膨張とセラミックスの熱膨張を近づけるため、ピン材質を Mo および Nb とする。

○ スリーブの耐食性を考慮し、SUS304 (以前は KOVAR) をスリーブに使用する。

○ SUS304 スリーブとセラミックスは熱膨張差により直接ロウ付けできないため、Nb の中継金具を介し、両者をロウ付けする。

という改善を加えた試験片を製作し、ナトリウム中浸漬後にロウ付け部の健全性を検査した。

<試験片の製作および形状・寸法>

試験片の製作を完了するまでには、巻末の付録 に示すように若干の試行錯誤があり、結局、次の材料組合わせで成る試験片を製作した。試験片の形状・寸法をアルミナの場合を例として、図 7.3 に示す。

セラミックス本体	メタライズ	ピン
アルミナ	Mo-Mn	Nb
サファイヤ	Mo-Mn	Mo
窒化硅素	Ni-Ti	Mo

<ナトリウム中浸漬条件>

- ・ ナトリウム温度 530 ℃
- ・ ナトリウム純度 CT 温度 150 ℃
- ・ 浸漬時間 約 1,400 時間

<検査項目と結果>

(1) 外観検査

どの試験片においても、ロウ材および一部メタライズの剥離が見られた。

(2) 重量測定

どの試験片においても、4 ~ 5 グラム程度の重量増加が見られた。これは、セラミックスとスリーブとの間の空間に浸入して溜まったナトリウムによるものであった。

(3) 気密試験

どの試験片においても、気密は保たれていなかった。ナトリウム浸漬前は 10^{-9} atomic cc/sec 以下のリーク量が、 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ オーダーにまで低下していた。

(4) 絶縁抵抗試験

いずれの試験片も、浸漬前の絶縁抵抗は 1,000M Ω 以上 (DC500V 印加) であったが、浸漬後は 1 Ω 以下に低下した。これは、構造体内部に浸入したナトリウムによるものであり、試験片から SUS スリーブを外し、アルコールで付着していたナトリウムを洗浄した後に、ピン間の絶縁抵抗値を測定したら 1,000M Ω 以上に回復していた。

(5) 断面観察

どの試験片においても、試料作成の際にピンおよび中継金具が外れてしまった。

各試験片接合部のメタライズおよびロウ材は、侵食、剥離していた。しかし、各試験片のピンおよび中継金具には異常が見られなかった。

アルミナについては、セラミックス表面が $5\mu\text{m}$ 程度、メタライズ部分では 0.3mm 程度にわたって侵食され、変質していた。この変質については、変質層中のアルミナ成分が減少していたことから、多結晶のアルミナ成分が溶出しピンホール状になったものと考えられた。

窒化硅素についても、セラミックス表面に微細な荒れが確認され、ピンロウ付け部にはクラックが見られた。

サファイヤのピンロウ付け部にもクラックが見られ、中継金具ロウ付け部では、外形が一段大きくなっている部分をえぐるようにクラックが発生していた。

(6) ナトリウム浸透試験

各試験片の洗浄後断面のナトリウム分布状況を確認するため、SEM、XMA 観察を実施した。ナトリウムが浸透、残留していればナトリウム成分が検出されるはずであるが、ナトリウムは検出されなかった。

ただし、アルミナについては、前述のとおりセラミックス成分が溶出したと考えられることから、変質層程度まではナトリウムが浸透していたものの、洗浄によって除去された可能性がある。

<まとめ>

(1) ピン部熱ストレス対策の効果について

アルミナに対してニオブピンはクラックなし、窒化硅素に対してモリブデンピン、およびサファイヤに対してモリブデンピンにはクラックありという結果になった。

セラミックスとピンの熱膨張係数を近づけたものの、ロウ材の熱膨張係数が大きく、かつ硬いため、クラックの発生したサファイヤ、窒化硅素に対しては、熱ストレスが期待したほど軽減されなかったものと思われる。

(2) バウンダリー構造の改善効果について

3種のセラミックスに対して、中継金具はニオブの1種類で対応した。アルミナと窒化硅素についてはクラックが見られなかったものの、サファイヤにおいて中継金具とのロウ付け部にクラックが見られた。これは、サファイヤとニオブ、ロウ材との熱膨張差によるものと考えられた。窒化硅素でクラックが入らなかったのは、窒化硅素の圧縮強度が高いためと思われる。

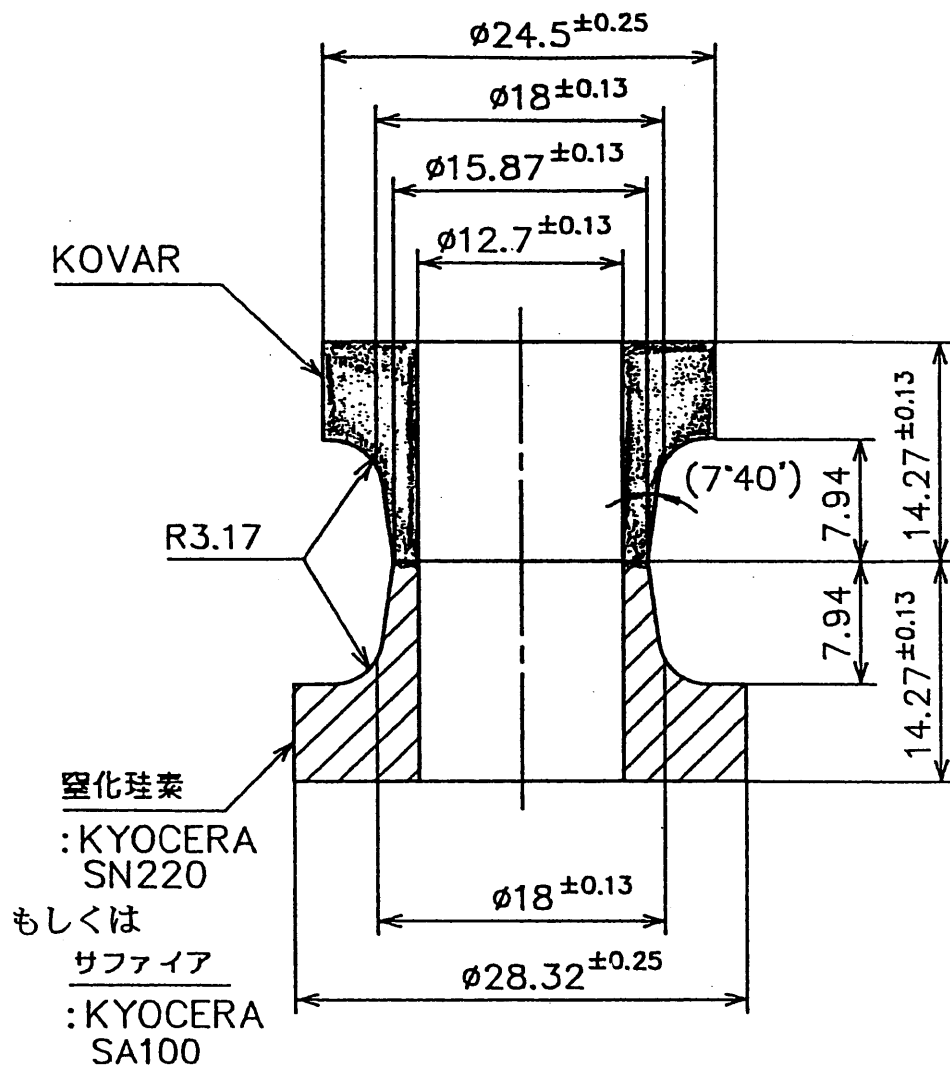
(3) ロウ材の侵食について

ロウ付け試行試験（その2）では、各試験片ともロウ材の剥離が見られた。ニッケルロウ材については、動燃事業団内でのナトリウム中使用において既に実績があることから、ロウ材自体がナトリウムに侵食されて剥離したというより、メタライズ部分の侵食が進んで剥離した時、表層のロウ材も共に剥離した可能性が高い。

(4) メタライズの侵食について

Mo-Mn メタライズを施したアルミナ、サファイヤではメタライズ層の剥離が見られ、また、アルミナではメタライズ部での変質が見られた。これから、Mo-Mn メタライズの反応層はナトリウムに対して弱いと推測され、ナトリウムに曝される部分への使用は不適と判断される。

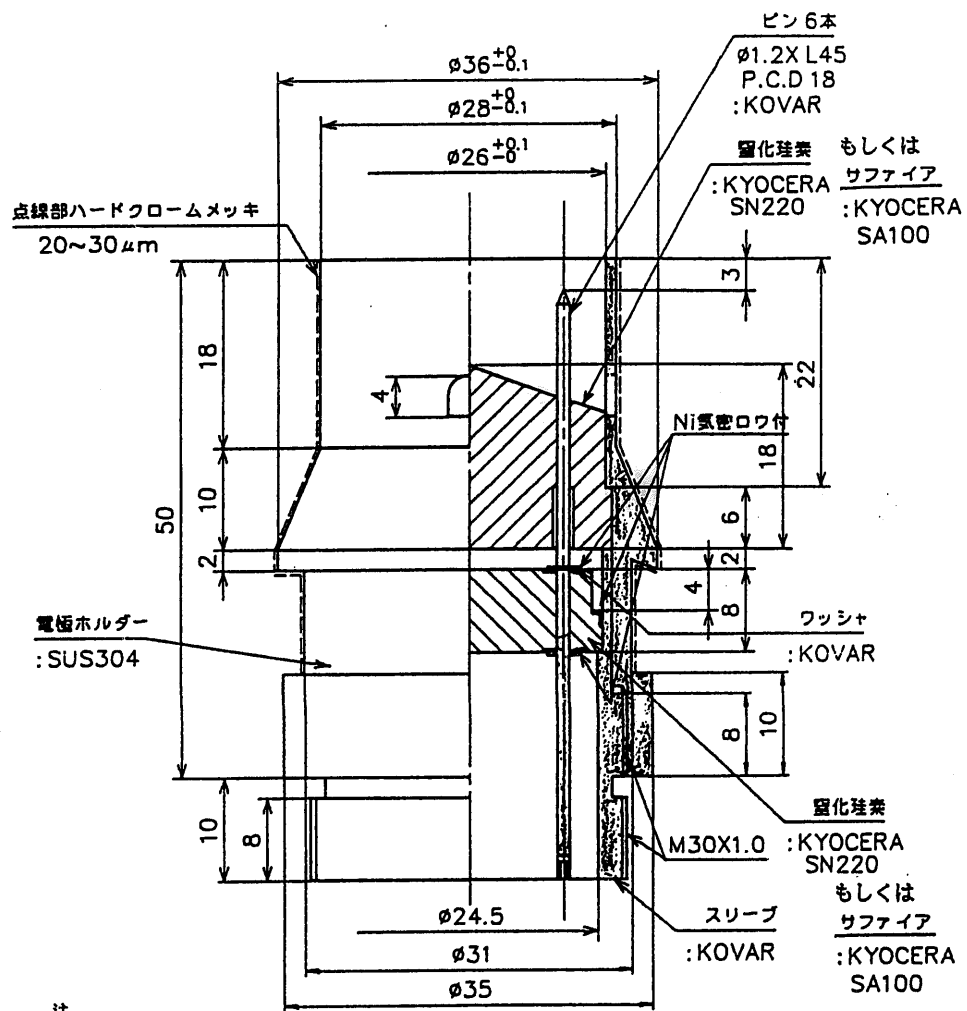
Ni-Ti メタライズを施した窒化硅素でも同様に、メタライズ層の剥離が見られた。このメタライズ材もナトリウムに曝される部位では成分が侵食され、実用に耐えないと判断される。



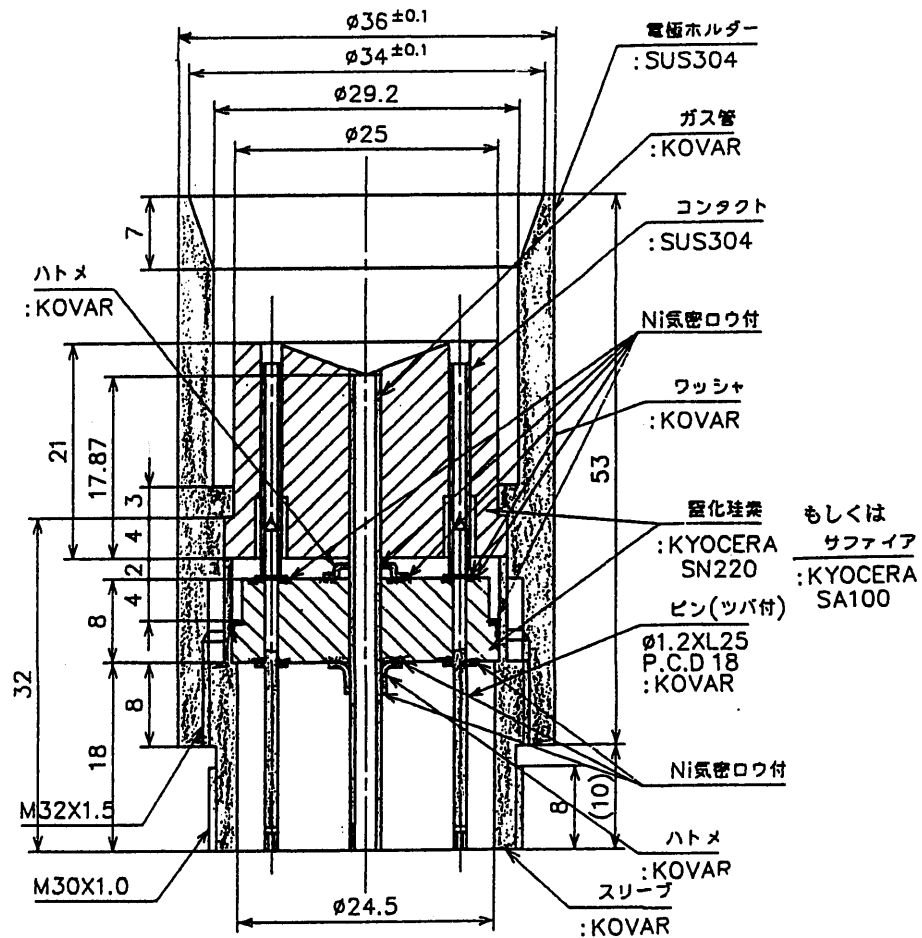
注

1. 接合部は Ni ロウ付とする。
2. 気密度は Heリークディテクターにて 1.0×10^{-8} atm · cc/sec. 以下。

図7.1 接合試験片 (ロウ付け試行試験(その1))

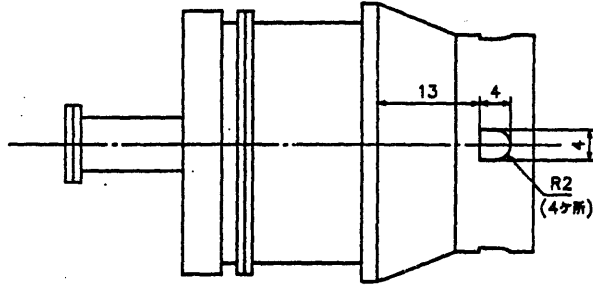


注
1. 気密度はHeリークディテクターにて $1.0 \times 10^{-8} \text{ atm} \cdot \text{cc/sec}$.以下。

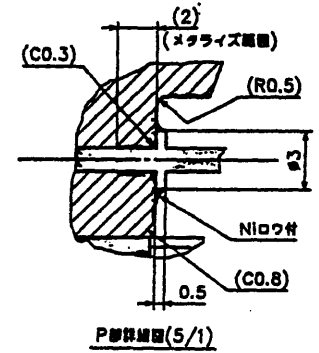
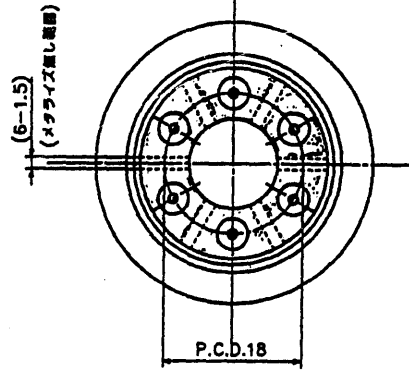
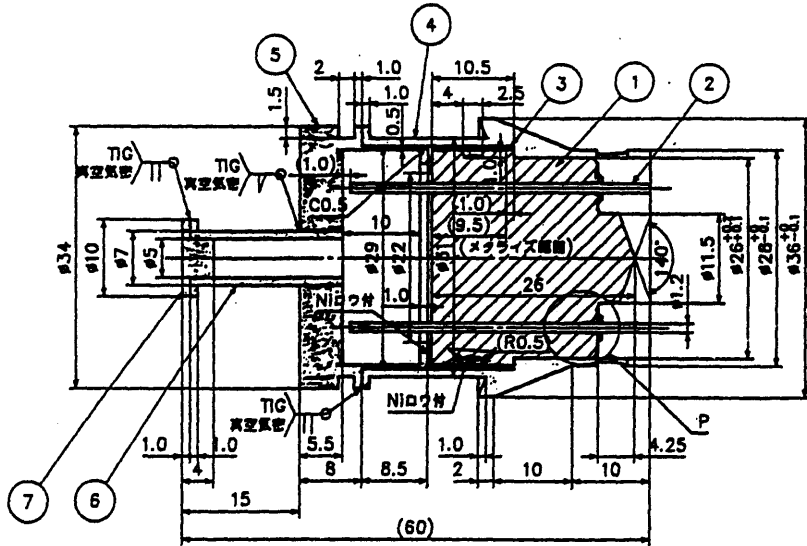


注
1. 気密度はHeリークディテクターにて $1.0 \times 10^{-8} \text{ atm} \cdot \text{cc/sec}$.

図7.2 形状模擬試験片 (ロウ付け試行試験(その1))



品番	部品名称	数量	材質	備注
1	セラミック	1	Al ₂ O ₃	KYOCERA A479SS
2	ピン-Nb	6	Nb	
3	中間金属	1	Nb	t0.5
4	電極ホルダー	1	SUS304	
5	スリーブ	1	SUS304	
6	パイプ	1	SUS304	
7	栓	1	SUS304	



- 注
- ②, ③, ⑤ にはロウ付前にNiメッキを施すものとする。
 - ① の 部分はメタライズ(Mo-Mn + Niメッキ)を示す。
 - 気密度はHeリークディテクターにて 1.3×10^{-10} Pa·m³/sec. (1.0×10^{-9} Torr·l/sec.) 以下とする。
 - 指示線を角部は0.3以下の面取り可とする。

図7.3 ロウ付け試行試験(その2)用試験片

8. 評 価

以上、試験結果をまとめてきたとおり、ナトリウム中コネクタ開発のためには、絶縁材であるセラミックスと金属の接合技術、およびナトリウム液滴やペーパーのコネクタへの付着効果等が、当面の本質的な開発課題として浮かび上がってきた。その中でも、まずセラミックスの接合技術を確立することが最優先課題として位置づけられる。

ここでは、ナトリウム環境中へのセラミックス材の適用という観点で、現状技術を整理してみた。

まず、本ナトリウム中コネクタ開発試験で得られたセラミックスナトリウム中浸漬試験の結果を整理すると、以下のようになる。

(1) セラミックス材質について

ナトリウム環境下にあっては、アルミナ焼結体はたとえ高純度であっても、その使用は好ましくない。サファイヤ、窒化硅素については使用できると考えられる。

(2) ロウ付け構造について

ロウ付け時の熱ストレスを軽減して、セラミックスへのクラック発生を防止するためには、

- ① ピン、中継金具ともにセラミックス材質（サファイヤ、窒化硅素）に熱膨張率の近いモリブデン製が好ましい。
- ② ロウ付け形状は、ピン部、中継金具ともにセラミックスに圧縮応力がかかるような形状とすることで（セラミックスは圧縮強度が高いため、セラミックスの外周に金具をロウ付けする形状とする）、さらなる改善は期待できる。

(3) メタライズについて

これまでの試験により、セラミックスと金属部材の接合に用いるメタライズ部分が、ナトリウムの侵食により剥離していることが確認された。Mo-Mn 法、Ni-Ti 法とも現在実用的なメタライズ方法として使用されている、最も信頼性のある方法であり、これに変わるものは見あたらない。よって、新たなメタライズ技術を開発する必要がある。

ところで、この他にもセラミックスとナトリウムの共存性に関し、動燃事業団社内にお

いて、それぞれ記載の内容が報告されている。

(1) 非鋼製ライナの安全性試験

高速増殖炉発電プラントにおける建屋鋼製ライナの代替材料として、セラミックスに注目し、動燃事業団が耐ナトリウム性スクリーニング試験を実施したものである。試験では、不特定のセラミックス小片を用い、ナトリウム中への急速浸漬による耐熱衝撃試験、ナトリウム火炎への曝露試験等が行われた。その結果、非鋼製ライナ材として有力なセラミックス材料が選定できたと報告されている。

(2) 高温ナトリウム環境下におけるエンジニアリングセラミックスの腐食特性試験⁷⁾

FBR プラントの高温化による経済性の向上を図る観点から、新素材としてのエンジニアリングセラミックスについて、動燃事業団が高温ナトリウム中で腐食試験を行ったものである。試験では、酸化物系セラミックス (Al_2O_3 、 ZrO_2) と非酸化物系セラミックス (Si_3N_4 、 SiC 、 $Si\cdot Al\cdot O\cdot N$) について、550℃ないし 650℃のナトリウム環境下で、1,000～4,000時間におよぶ腐食試験が行われた。その結果、

- ① ほとんどのセラミックスの表面は、灰黒色あるいは褐色に変色すること。
- ② Al_2O_3 では純度による影響が見られ、99%以下の低純度では、ナトリウム浸漬に伴う割れや破損が多く見られること。
- ③ ZrO_2 はナトリウム浸漬により重量増加を起こすものの、他のセラミックスは重量損失を起こし、その損失量は高温の方が大きいこと。かつ、非酸化物系セラミックスの方が大きいこと。
- ④ ナトリウムによるセラミックスの腐食は主に粒界腐食が支配的であるが、その詳細や要因は個々の材質によって異なること。

等が分かり、粒界腐食抑制のためのポイントが明らかになったと報告されている。

(3) 超伝導電磁ポンプの設計研究

高速炉の実用化に向け、革新技術の導入により安全性、信頼性を確保するとともに徹底した経済性の改善を図るため、動燃事業団がメーカーに委託して実施した設計研究である。ここでは、セラミックス電気絶縁材のナトリウム中要素試験を実施し、 $Al/SUB2/O/SUB3$ 系セラミックスダクトの電気絶縁特性は、高温ナトリウム中 700時間浸漬後においても十分良好であったと報告されている。

(4) FBR へのセラミックス適用性に関する研究⁸⁾

高速炉の実用化に際し、コスト低減の可能性について検討するため、メーカー独自

でセラミックスのナトリウム共存性試験を実施し、得られた基礎知見を公開したものである。

試験では、各種材質のセラミックス小試験片を用い、530℃、100時間規模のナトリウム中浸漬試験が行われている。ここでは、

- ① 高純度のセラミックスほど、ナトリウム中共存性が良好であること。
- ② 高純度のアルミナ、ジルコニア、窒化珪素等は、高温ナトリウム浸漬後も健全であったこと。
- ③ SiO₂ をやや多く含むセラミックスは、破損に至るケースがほとんどであること。
- ④ 高純度ナトリウム中の方が、概してセラミックスは健全であったこと。

等が成果として紹介されている。

さらに、セラミックスメーカー（京セラ株）からは、一般論として次の情報も入手できた。

- ① セラミックスの特性はその純度によって大きく異なり、メーカー間においても品質に差が認められる。
- ② セラミックスの成分、製法はメーカーの企業秘密であり、容易に開示されない。
- ③ セラミックス品質管理のための、例えば JIS のような公的規格はまだ制定されていない（但し、試験片や試験法は JIS に規定されている）。
- ④ セラミックスと金属の接合技術については、材質がアルミナとステンレスの関係においてのみ、コパールと呼ぶ金属を仲介に入れてニッケルロウ付け技術が確立されている。窒化珪素に関しては、まだ接合技術が完成していない。また、アルミナとステンレスの間の接合においても、お互いの熱膨張係数を完全に一致させられないことから、形状によってはロウ付け部で剥離現象を起こしクラックが発生する場合がある。

上記事情を考え合わせると、絶縁材にセラミックスを用いるコネクタの構造に関する結論として、現状技術ではコネクタを早期に製品化することは困難であると判断される。

9. 結 言

高速実験炉「常陽」における計測線付集合体 (INTA) のように、炉心で用いる長尺なオンライン計装照射装置において、その上部機構を何度も再利用することができれば、照射試験の経済性が向上し、原子炉燃料交換時の装置退避が容易になって、作業期間を短縮できる。このため、試料部集合体の頂部に計測線用ナトリウム中コネクタを設けるべく、独自の機構を考案し、昭和 63 年から平成 8 年にかけて開発研究を進めてきた。

しかしながら、このナトリウム中コネクタの開発においては、試作部分モデルを用いてナトリウムのブロー除去等の基本的な成立性が実証できたものの、実用化にあたっては高温ナトリウム環境中での使用であること、精密・複雑構造であること等により、電気絶縁材であるセラミックスと電極金属やコネクタ構造材金属との間で気密が確保できない問題が明らかになった。

問題解決のため、専門メーカーの技術協力を得つつ、セラミックスにはナトリウムとの共存性が見込めるサファイヤ、高純度アルミナ、窒化珪素等を選択し、また電極材料としてステンレス鋼、コバルト(Fe-Ni-Co 合金)他、数種の材料と組み合わせて、ロウ付け材料やメタライズ材料、さらにはロウ付け部の形状を変えて性能評価を行ってきたが、気密を確保するに足る最適な組み合わせを見つけることができなかった。

結局、セラミックスと金属の接合技術について、現状技術では有効な対応法が見つからないことから、考案したナトリウム中コネクタの開発は中断することとなった。

10. 謝 辞

ここに報告したナトリウム中コネクタの開発においては、実に多くの方々から御支援、御指導、御協力を戴いた。

特に、ナトリウム中コネクタ機構に関する基本概念の考案では、軍司 稔 副主任研究員（現、科学技術振興事業団出向）、試験の実施担当としては、濱崎 茂幸 氏（現、宇部興産株）、根本 兼吉氏（常陽産業株）、井川 博 氏（常陽産業株）の各位に、直接的に関係戴いた。

また、試験途中の結果評価につき、自己融着現象では、吉田 英一 副主任研究員（現、機安室）に、セラミックスの耐ナトリウム性については、加納 茂機 主任研究員（現、安全管理部）に御指導戴いた。

コネクタやセラミックス供試体の製作では、京セラ株、小林理化器械株、コスモ・テック株の関係各位に、試験装置の製作では、東芝プラント建設株、日立設備エンジニアリング株の関係各位にお世話になった。

最後に、ナトリウム中コネクタの開発を主体となって推進した当時の機器構造開発部機器システム開発室、および実験炉部照射課の多くの皆様には多大の御協力を戴いた。

ここに記して厚くお礼を申し上げます。

11. 参考文献

- 1) 片岡 一 他：特許 第 1561894 号，液体中接続方法及び接続装置
- 2) 高橋 健二 他：特許 第 1792363 号，連続使用型液体中接続装置
- 3) 片岡 一 他：特許 第 2056941 号，液体中接続装置の保護管構造
- 4) 榎戸 裕二 他：原子炉を利用した燃料・材料の照射技術の現状と将来
日本原子力学会誌 Vol.31, No. 7, p766 (1989年7月)
- 5) 揃 政敏 他：原子力学会「1994秋の大会」予稿集, P2, (1994)
- 6) E.HUTTER ET AL : ELECTRICAL CONNECTOR FOR USE IN LIQUID METAL
Patented Oct. 7, 1969: 3,471,826
Filed Apr. 4,1966, Ser.No. 540,092
- 7) 加納 茂機 他：原子力用新素材の創製に関する研究
動燃技報 No.91, p39 (1994年9月)
- 8) 佐野 保 他：FBR へのセラミックス適用性に関する研究
三菱原子力技報 No.59 三菱重工 (1991年)

<付録>

ロウ付け試行試験（その2）用試験片製作に関する経緯

ロウ付け試行試験（その1）での試験結果を反映して改良を図るべく、（その2）用の試験片製作に着手したが、その製造過程において諸々の困難に直面した。ここでは、最終試験片に至るまでの経緯を記す。

1. 初期設計タイプ

この時点の設計で採用した改良点は、以下のとおりである。

- (1) スリーブの耐食性を高めるため、KOVAR（Fe-Ni-Co 合金）から SUS304 に変更した。
- (2) SUS304 スリーブとセラミックスとは、熱膨張差により直接ロウ付けすることができないので、熱膨張係数がセラミックスに近い Nb の中継金具をセラミックスとロウ付けし、Nb 中継金具と SUS304 スリーブをロウ付けする構造とした。
- (3) ピン接合部の耐食性を高めるため、セラミックスに設けたザグリ穴内部でピンをロウ付けし、その上にセラミック S をさらにロウ付けして、ロウ付けパスを長くした。
- (4) セラミック S をピンのツバにロウ付けすることにより、ツバ部がロウ付けの冷却時に収縮するのを抑制し、残留応力を緩和する働きも持たせた。
- (5) ピン自体のロウ付け冷却時の収縮を抑えるため、熱膨張の小さい Mo ピンを一部採用した。
- (6) 積極的に以下の異材を組み合わせ、最適な組み合わせを調べることにした。

セラミックス本体	メタライズ	ピン	セラミック S
アルミナ	Mo-Mn	KOVAR	アルミナ(A)
			サファイヤ(SA)
		Nb	サファイヤ(SA)
			窒化硅素(SN)
		Mo	アルミナ(A)
			窒化硅素(SN)
サファイヤ	Mo-Mn	KOVAR	サファイヤ(SA)
			窒化硅素(SN)
		Nb	アルミナ(A)
			窒化硅素(SN)
		Mo	アルミナ(A)
			サファイヤ(SA)
窒化硅素	Ni-Ti	KOVAR	アルミナ(A)
			窒化硅素(SN)
		Nb	アルミナ(A)
			サファイヤ(SA)
		Mo	サファイヤ(SA)
			窒化硅素(SN)

2. 初期設計タイプの試作結果

(1) アルミナタイプ

セラミック S に窒化硅素を用いた部分 2 箇所ではアルミナ側にクラックが発生した。また、ピンロウ付け部のロウ流れも不十分であった。

(2) サファイヤタイプ

アルミナタイプと同様に、セラミック S に窒化硅素を用いた部分 2 箇所ではアルミナ側にクラックが発生し、ピンロウ付け部のロウ流れも不十分であった。しかし、中継金具のロウ付け部分は健全であった。

3. 初期設計タイプの不具合の原因

(1) クラック

セラミックス本体（アルミナ、サファイヤ）とセラミック S である窒化硅素との熱膨張差による応力で、本体にクラックがはいったものと推測された。ロウ付け後の残留応力には、

$$(\text{残留応力}) \propto (\text{熱膨張率の差}) \times (\text{材料のヤング率}) \times (\text{接合温度}) \times (\text{接合長さ})$$

という関係が成り立つが、アルミナと窒化硅素とのロウ付けでは、アルミナと金具のロウ付けに比べ、(熱膨張率の差)と(材料のヤング率)が大きくなる。したがって、アルミナが残留応力に耐えられず、クラックが発生したと考えられた。

(2) ロウ流れ

製品の構造上、十分にロウ材を置けるだけのスペースが考慮されておらず、結果として、ピンとセラミックスの間を十分に満たすだけのロウ材が供給されなかったものと判断された。

4. 2次設計タイプ

上記不具合に鑑み、次の対策案が考えられた。

- (1) 例えば、セラミックス同士のロウ付けは大きな残留応力を発生させるため、セラミック S をやめ、ピンだけのロウ付けとする。
- (2) 例えば、ピンの下のセラミックスにガス抜き穴を設け、ピンとセラミックスとの間の隙間をつくる空気の残留をなくす。
- (3) 例えば、セラミック S にロウ溜まりを設け、ロウの十分な供給量を確保する。
- (4) 例えば、ピンとセラミック S のロウ付けを二度に分け、各々のロウ付けを確実にする。
- (5) セラミック S をよりヤング率の低い金属に変え、セラミックスに加わる残留応力を小さくする。

以上の 5 案について、製造技術を加味して評価したところ、(2)はセラミックスの加工が複雑になる、(4)は二度の熱処理によりロウ付け部に加わるストレスが増加する、という理由から、(1)(3)(5)の折衷案を採用することになった。

また、KOVAR は電気抵抗が大きいことから、その採用を見合わせることにし、各セラミックスとピンとの熱膨張係数を考慮して、アルミナと Nb、サファイヤと Nb、窒化硅素と Mo、の組み合わせが選ばれた。

5. 2次設計タイプの試作結果

(1) アルミナタイプ

ロウ付けの外観上は問題のないロウ付けに見えたが、ヘリウムリークテストの結果、気密性に問題が認められた。ロウ付け部断面を拡大して観察してみると、Mo-Mn メタライズ層がセラミックスから剥がれているのが確認された。

サファイヤについても、同様であった。

(2) 窒化硅素タイプ

アルミナタイプと同様に、外観上は問題のないロウ付けに見えたが、気密性に問題が認められた。同じく、Ni-Ti メタライズ層がセラミックスから剥がれていた。

6. 2次設計タイプの不具合の原因

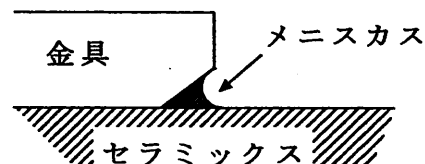
各セラミックスの熱膨張係数にくらべると、ピンの熱膨張係数の方が少し大きく、この熱膨張差と Ni ロウ材自体のヤング率とによって生じる残留応力により、メタライズ層がセラミックスから剥がされる結果になったと判断された。

7. 3次設計タイプ

3次設計タイプでは、さらに下記の工夫が加えられた。

- (1) ピンのセラミックスと接する部分にC面（面取り部）を付け、ロウ材をメニスカス形状*に溜め、ロウ付けの応力を緩和する。

*注) メニスカス形状：ロウ材の表面形状が下図のように曲面になっていること。残留応力が曲面で分散され、角部への応力集中が避けられる。



- (2) Ni ロウ材はヤング率が大きく熱膨張率も大きいため、多く溜まると応力も増すと考えられることから、ピンのロウ溜まりの空間を小さくすることにより、ロウ材の量を減らす。

- (3) サファイヤについては、ピン材質を Nb から Mo に変える。

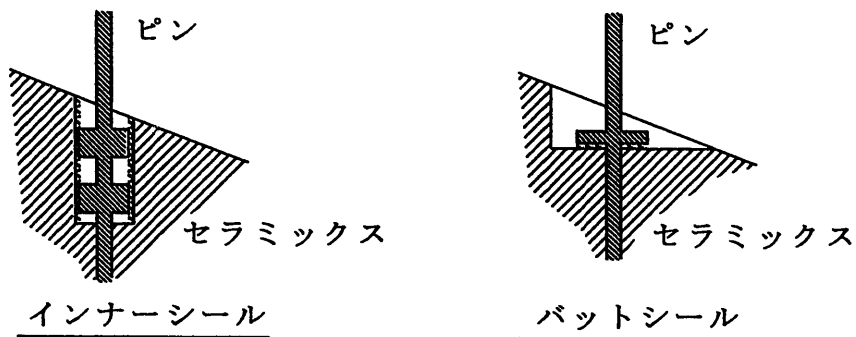
8. 3次設計タイプの試作結果

アルミナタイプ、窒化硅素タイプとも、ヘリウムリークテストの結果、気密性に問題が認められた。それぞれ、Mo-Mn、Ni-Ti メタライズ層が剥離していた。結局、この構造変更では応力緩和に対して効果がないことが判明した。

9. 4次設計タイプ

3次設計の結果を受けて、以下の変更が行われた。

ピンとセラミックスとのロウ付け構造をインナーシールからバットシールに変え、応力を大幅に緩和する。



インナーシールでは、ピンの収縮による応力をメタライズ層に垂直に受ける。これに対し、バットシールでは、応力をピンのツバ部分でメタライズ層に平行に受けるため、メタライズ部分が剥がれにくいという利点がある。ただし、ロウ付けパスをセラミックスの径の制約上、長くとることができないという欠点もある。

しかし、ここではメタライズ面積を広くすることにより、メタライズパスを長くとるよう努力した。また、メタライズ表面は、Ni メッキおよび Ni ロウ材で覆われるため、ナトリウムとの直接の接触は避けられるものと考えた。

この4次設計タイプの試験片については、良好にロウ付けができた。

<材料特性>

	アルミナ	サファイヤ	窒化硅素
	Al ₂ O ₃ 99.5%	Al ₂ O ₃ 単結晶	Si ₃ N ₄
曲げ強度(kg/mm ²)	33	70	60
ヤング率(kg/mm ²)	37,000	48,000	30,000
膨張係数(× 10 ⁻⁶ /°C)	7.9	4.5	3.2
圧縮強度(kg/mm ²)	240	300	390
ピッカース硬さ	1,800	2,300	—

	KOVAR	モリブデン	ニオブ	Ni ロウ材
	(Fe-Ni-Co)	Mo	Nb	B3-Si5-Ni(Fe1)
引張強度(kg/mm ²)	50 ~ 52	70 ~ 100	40 ~ 60	130 ~ 150
ヤング率(kg/mm ²)	14,000	33,000	11,000	30,000
膨張係数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	5.7 ~ 6.2	5.7	8.0	13
電気抵抗($\mu \Omega \text{ cm}$)	48	5.8	14.5	—
ビッカース硬さ	—	100	—	600