

原子炉用ケーブル ペネトレーション アセンブリ

Electrical Cable Penetration Assembly for Primary Containment Vessel of Nuclear Reactor

The electrical cable penetration assembly for primary containment vessels for nuclear reactors needs to be capable of preventing the leakage of radioactive substances under normal operating conditions as well as emergency conditions of the reactor. For the purpose of research in this connection we manufactured three different types of electrical cable penetration assembly in actual scale, including: Medium voltage cable penetration assembly for large (5,000V) power cables, low voltage cable penetration assembly for 600V power control and instrumentation cables, and shielded signal cable penetration assembly for shielded and unshielded signal cables.

In a series of tests which were carried out under normal operating conditions (66°C) and emergency conditions (171°C, 4.5 kg/cm²G, 6 hours; 138°C, 4.5 kg/cm²G, 10 days) of the reactor, they proved good performance.

五十嵐 高* *Takashi Igarashi*

加藤勇次郎** *Yûjirô Katô*

太組 健児*** *Kenji Takumi*

1 緒 言

原子炉一次格納容器Primary Containment Vessel(以下、PCVと略す)内へは原子炉運転に必要な各種制御ケーブル、中性子計装用ケーブル、熱電対、再循環ポンプ用高圧動力ケーブル、低圧動力ケーブルなどが必要である。しかし、この原子炉PCVは通常運転時はもちろん、万一の事故に対しても外部に放射性物質を漏れさせないように、高度の信頼性ある気密度が要求される。

原子炉用Electrical Cable Penetration Assembly(以下、ECPAと略す)は上述したケーブル類が、この原子炉PCVを貫通する部分である。したがって、原子炉用ECPAは耐圧容器の一部を構成するとともに原子炉の長期運転期間気密が保持されること、また原子炉事故時においても放射性物質を外部に飛散させない気密が要求される。

このためエポキシ樹脂を真空注形することによりケーブル貫通部の気密性をもたせる構造としている。

今回このような構造のECPAを試作し、予想される過酷な条件下における各種試験を行ない、種々検討を加えるとともに実用性を十分確認した。

2 原子炉用ECPAの構造

原子炉用ECPAは、同軸ケーブルを主体とした中性子計装用、5,000Vポリサーマ電力ケーブル(充てん材入り架橋ポリエチレンケーブル)を主体とした再循環ポンプ高圧動力用、難燃性架橋ポリエチレン絶縁の0.5~5.5mm²程度の細い導体より成る低圧動力及び制御用の3種に大別される。

原子力発電所用ECPAは総計21本のECPAが使用される予定で、原子炉PCVには直径12in及び14inのノズルと称せられる鋼管が取り付けられ、このノズルに外径10, 12inのECPAが現地溶接されることになっている。

図1は再循環ポンプ用高圧ECPAの外観を示したものである。前述した3種の原子炉用ECPAはいずれもその基本

的構造は同一であり、図2~4は、これらの内部構造を示すものである。これらの図で分かるとおり最も重要な気密シール部は原子炉PCVの内外面で2個所でシールされる構造であり、炉心側が万一気密漏れを起こしても二次シールにより安全は保たれる。また2個所のシール間にガスを圧力封入し、この部分の圧力を監視することによって気密漏れの有無を長期にわたって保守点検できる利点がある。

気密シール部の構造について以下に詳しく説明する。図2は、図1に示した高圧動力用ECPAであるが、まず導体は、

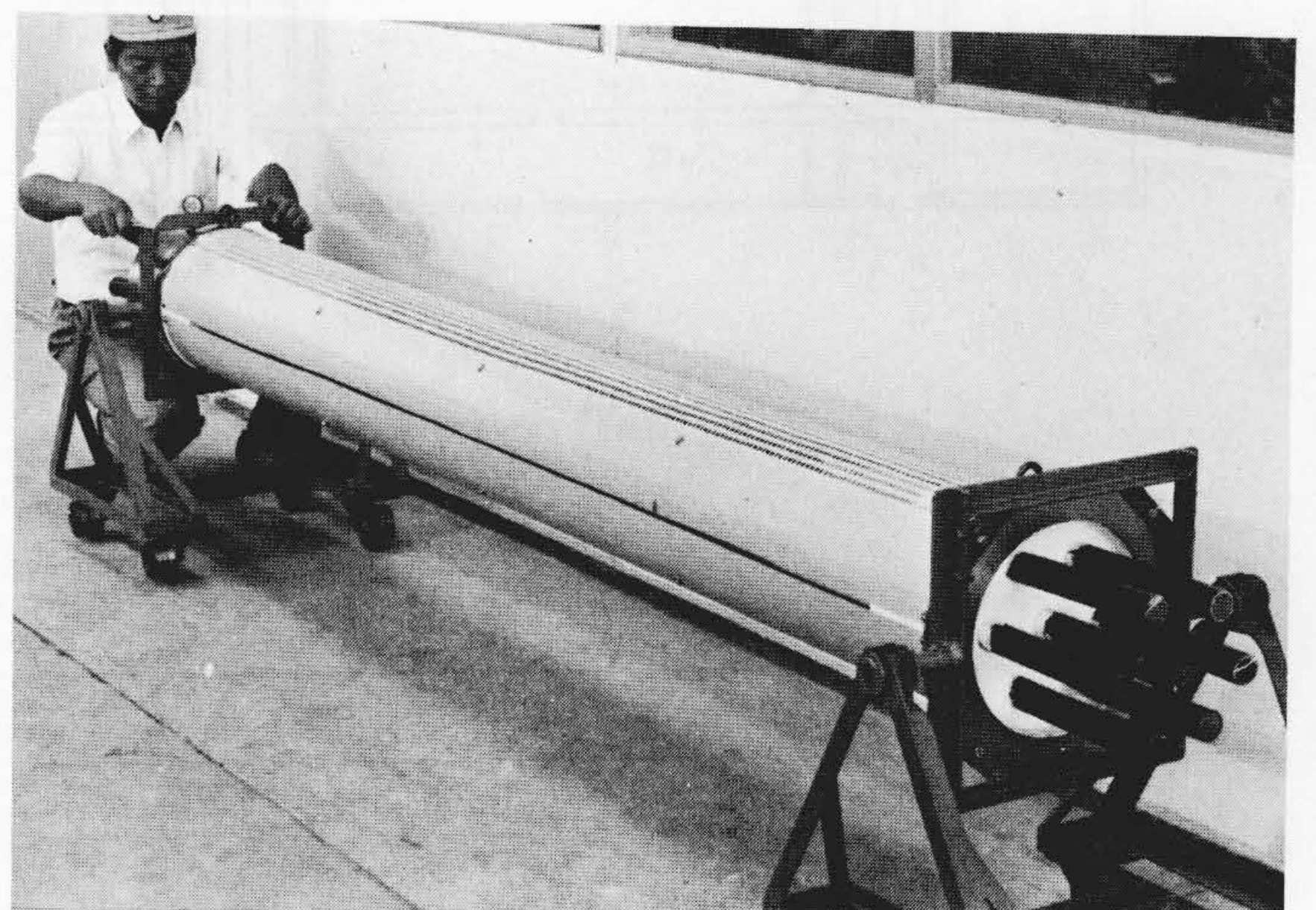
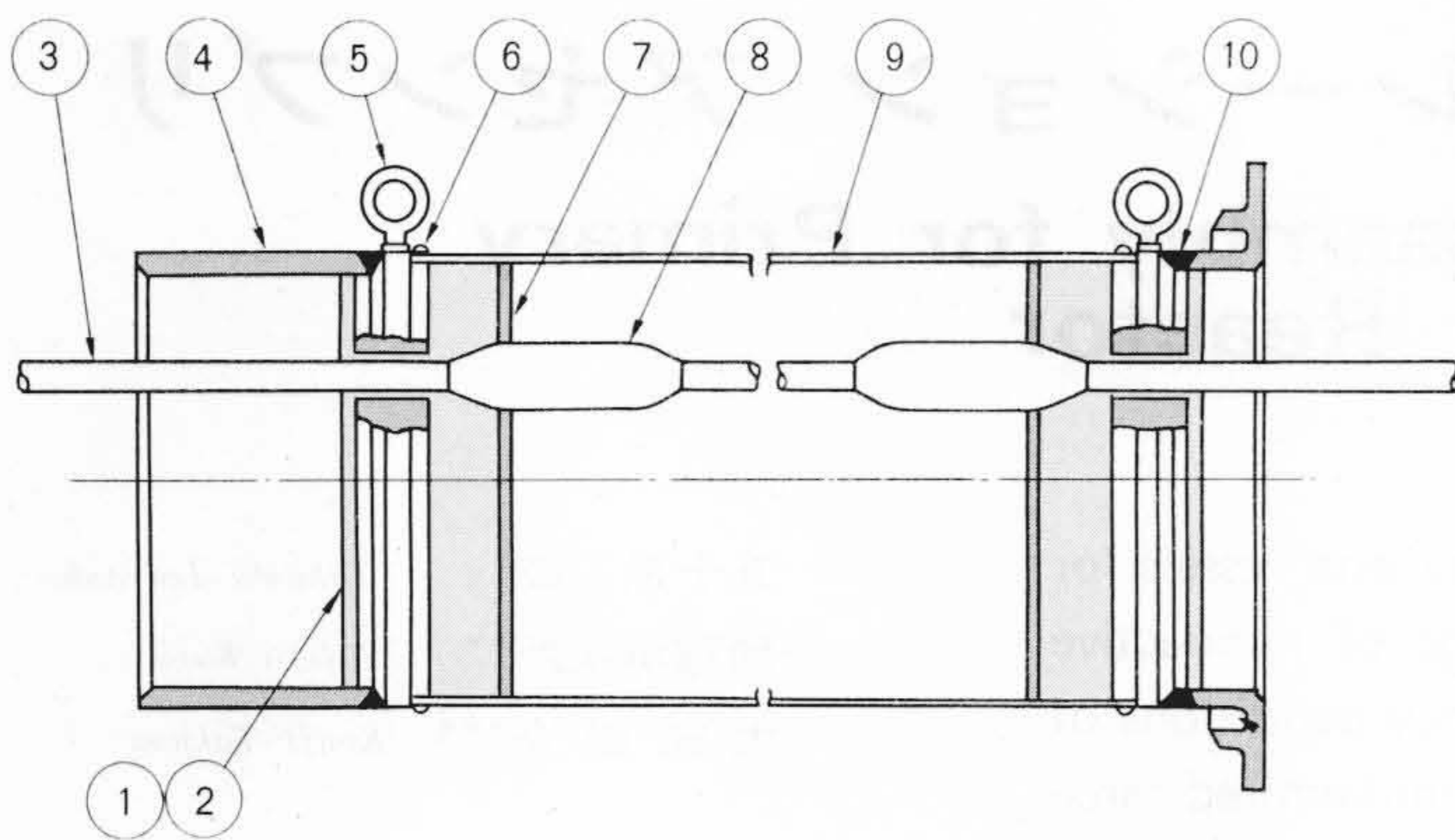


図1 高圧動力用ケーブル ペネトレーション アセンブリ

5,000Vポリサーマ電力ケーブルを主体としており、格納容器のノズル長に合わせて、ケーブル ペネトレーション アセンブリの長さが決まる。制御用 信号用ケーブル ペネトレーション アセンブリも外観上は類似している。

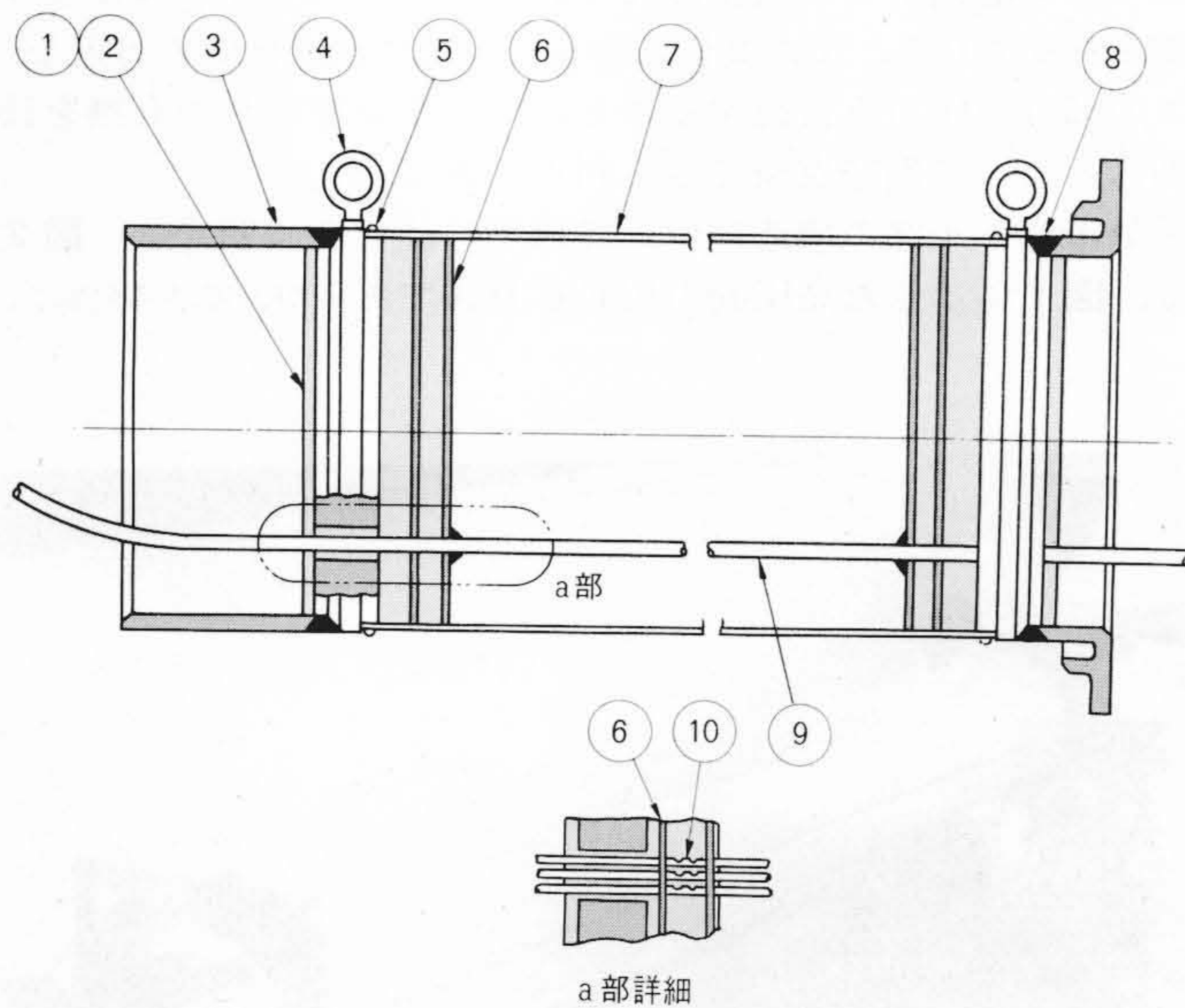
Fig. 1 Medium Voltage Cable Penetration Assembly for Large (5,000V) Power Cables

* 日立電線株式会社研究所 工学博士 ** 日立電線株式会社日高工場 *** 日立製作所原子力技術本部 工学博士



項 番	名 称	項 番	名 称
①	エポキシ コンパウンド	⑥	カバー止めねじ
②	コーティング	⑦	絶 縁 板
③	電力用ケーブル	⑧	スプライス
④	シェルヘッダ	⑨	カ バ ー
⑤	アイボルト	⑩	ヘッダリング

図2 高圧動力用ケーブル ペネトレーション アセンブリの構造概略図 5,000Vポリサーモ電力ケーブルを主体としているが他のケーブルでも製造可能である。また左側が炉心側となり放射線シールドが取り付けられる。
Fig. 2 Structure of Medium Voltage Cable Penetration Assembly for Large (5,000V) Power Cables



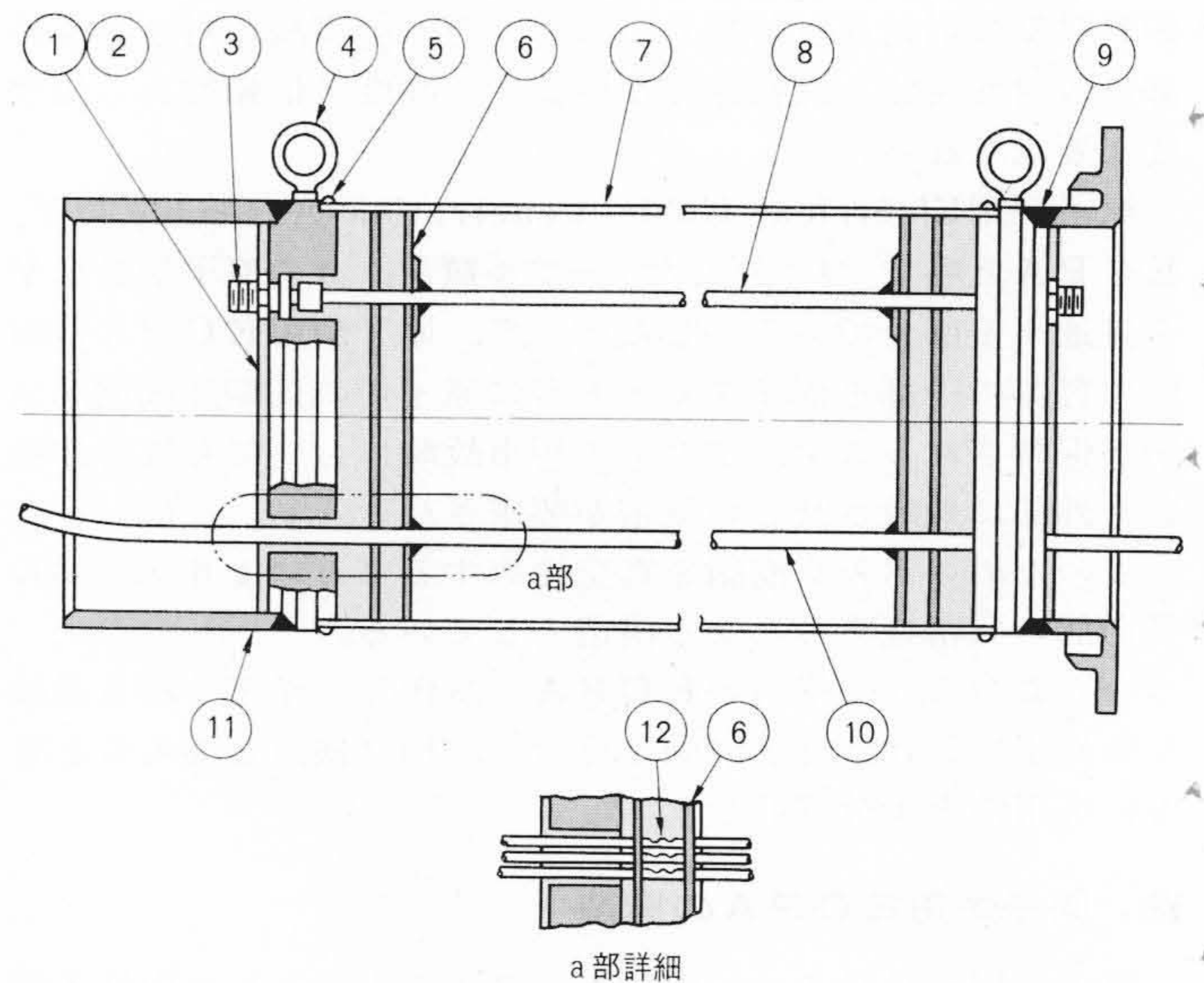
項 番	名 称	項 番	名 称
①	エポキシ コンパウンド	⑥	ポッティングボード
②	コーティング	⑦	カバー
③	シェルヘッダ	⑧	ヘッダリング
④	アイボルト	⑨	ポリサーモ絶縁線
⑤	カバー止めねじ	⑩	スプライス

図3 低圧動力及び制御用ケーブル ペネトレーション アセンブリの構造 600Vポリサーモケーブルが主体となる。左側が炉心側であり放射線シールドが取り付けられる。
Fig. 3 Structure of Low Voltage Cable Penetration Assembly for 600V Power Control and Instrumentation Cables

より線中を漏れることを防ぐため中央に隔壁をもった導体接続スプライスにより圧縮接続される。この周囲は難燃性、耐放射線性の優れた特殊なエポキシ樹脂で真空注形する。気密シール部はまた耐圧力容器の一部であるため、ヘッダプレートと称する軟鋼、またはステンレス鋼(動力用のみ)によって補強され、これに溶接されたヘッダリング、あるいはシェルを利用して原子炉PCVのノズルに現地溶接で取り付けられる。したがって、気密シール部は導体スプライス表面及びヘッダプレートと接着しているエポキシ樹脂によりシールする構造である。なお、両側のシール部間のケーブルには適当な間隔ごとにスペーサを入れ、短絡電磁力によりケーブルが曲げられるのを保護し、この両ヘッダプレート間に穴あきカバーを取り付けECPAの運搬据付けに便利な構造にしてある。

図3は低圧動力及び制御用ECPAの構造を示すものであるが、貫通するケーブルが多心細線化された以外本質的に高圧動力用ECPAと差異はない。すなわち、導体は細いスプライスにより圧縮接続されるが、このスプライス間の接触を起こさせぬようにFRP(ガラス繊維強化プラスチック)板でできたポッティングボードと称するエポキシ樹脂補強を兼ねた隔壁板が設けられ、これらが一体となってエポキシ樹脂中に真空注形される。

図4は、中性子計装用ECPAの構造であるが、この場合、同軸コネクタが使用されるためヘッダプレートに取り付けられた同軸コネクタ部がガラスハーメチックシール構造となっている。



項 番	名 称	項 番	名 称
①	エポキシ コンパウンド	⑦	カ バ ー
②	コーティング	⑧	同軸ケーブル
③	同軸コネクタ	⑨	ヘッダリング
④	アイボルト	⑩	ポリサーモ絶縁線
⑤	カバー止めねじ	⑪	シェルヘッダ
⑥	ポッティングボード	⑫	スプライス

図4 中性子計装用ケーブル ペネトレーション アセンブリの構造 ガラスハーメチックシールを用いた同軸コネクタ、同軸ケーブルが主体である。左側が炉心側となり、放射線シールドが取り付けられる。
Fig. 4 Structure of Shielded Signal Cable Penetration Assembly for Shielded and Unshielded Signal Cables

表1 通常運転時の周囲条件 通常運転時、ケーブル ペネトレーションは格納容器内側で66℃、格納容器外側で-10～40℃の条件下にある。この条件下でケーブル ペネトレーションは電気特性、気密特性を維持しなくてはならない。

Table 1 Environment Conditions for Cable Penetration Assembly at Normal Operation

項目	格納容器内	格納容器外
温度	66℃	-10～40℃
圧力	-0.14～+0.14kg/cm ² G	0 kg/cm ² G
湿度	20～100%	20～100%
放射線*	10r/h	<0.1r/h

注：*シールドのない状態

表2 模擬した事故時周囲条件(格納容器内) 事故時には、ケーブル ペネトレーション炉心側の一次シールは171℃、4.35kg/cm²G、RH100%という厳しい条件にさらされる。この条件下でも、電気特性、気密特性は維持されなければならない。

Table 2 Emergency Environment Conditions for the Inside Seal of Cable Penetration Assembly

項目	区分	第1段階	第2段階
接続時間		2時間以下	10日間
温度		171℃	138℃
圧力		4.35kg/cm ² G	4.35kg/cm ² G
湿度		100%	100%

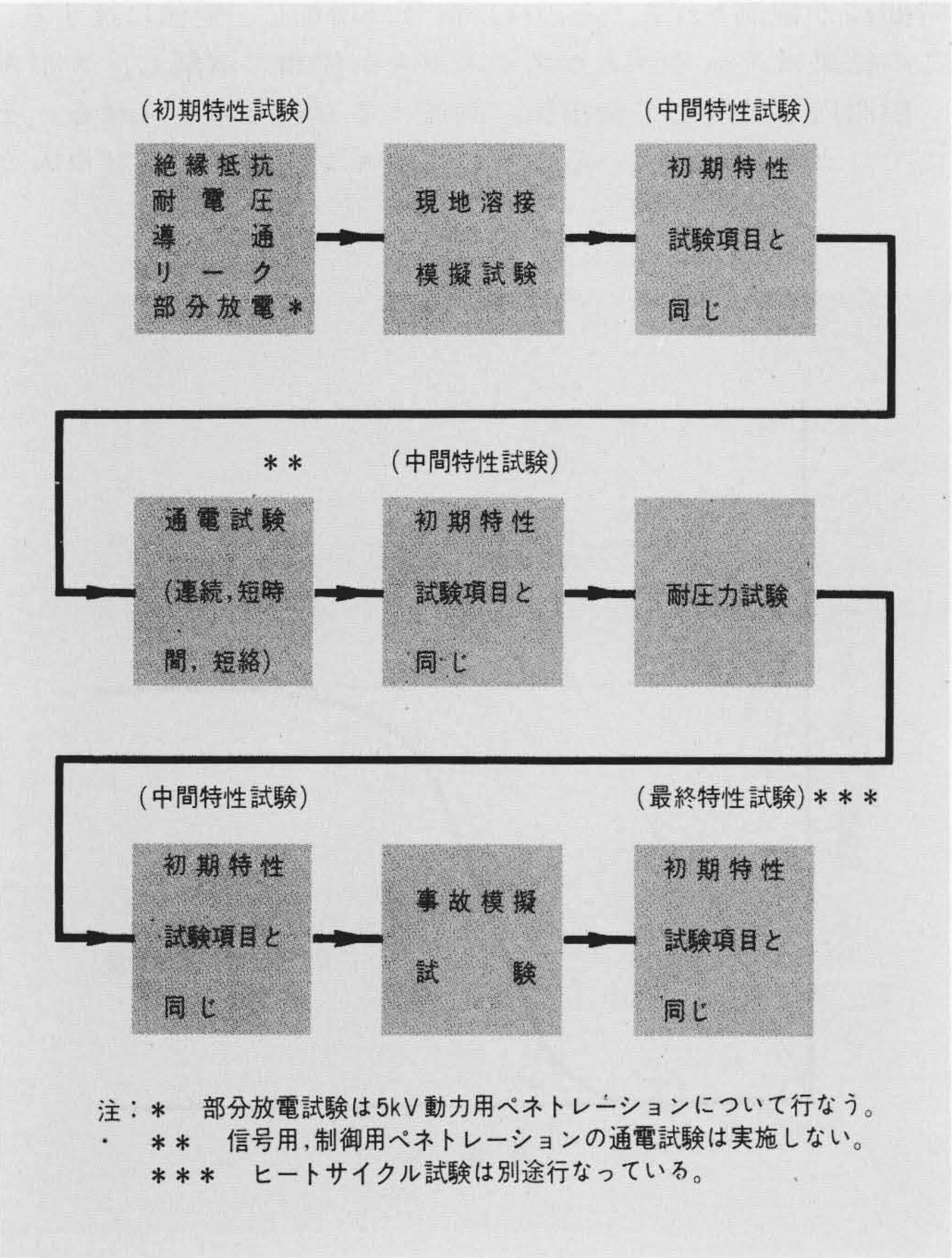


図5 原子炉用ケーブル ペネトレーションの試験フローダイアグラム 各種模擬試験の電気特性、気密特性に与える影響を調べるために、各模擬試験終了ごとに初期特性試験の項目について試験する。

Fig. 5 Test-flow-diagram of Cable Penetration Assembly for Primary Containment Vessel

3 原子炉用ECPAに要求される性能

耐用年数は原子炉と同様40年以上の使用を考慮しており、この間リークは後述する規定量以下でなければならない。したがって、この間に受ける温度、圧力による気密シールの劣化が問題となる。

まず原子炉PCVには前述したように、ヘッダプレートが現地溶接によりノズルに取り付けられる。この際、溶接熱によりエポキシ樹脂のシール部分が損なわれてはならない。

表1に通常運転時の周囲条件の一例を、表2に模擬した事故時の周囲条件の一例を示す。

最も重要な性能である気密シール部の漏れ量は圧力4.5kg/cm²Gにおいて、10⁻⁶cc・Std/s(乾燥ヘリウムで測定)以下に規定され、表2に示された原子炉事故時においても、許容リーク量は24cc/h(6.7×10⁻³cc・Std/s)と規定されている。

次に重要な問題として耐炎性と耐放射線性があげられる。耐炎性は原子炉用ECPAに用いられる材料はすべて難燃性かつ自己消炎性であること、また耐放射線性についても炉心側で最高10r/hと規定されており、この条件で、すべての材料が問題のないことがわかっている。

このほかケーブルの種類に応じた耐電圧特性、絶縁抵抗特性が規定されているが、特に中性子計装用回路では10¹²Ω以上の絶縁抵抗が必要である。また、高圧動力用ケーブルでは短絡容量が大きく、回路計算によってケーブル1条当たり最大635A/5s及び9,300A/10サイクルと規定し、この短絡によって気密シール及びケーブルの異常の有無を検証することにした。

以上これらの要求規定値に対して今回試作した原子炉用ECPAがどの程度の裕度があるかも併わせ検討することにした。

4 試作、試験結果

原子炉用ECPAは前述したように3種類に大別され、その構造はほとんど同一である。したがって、試作試験にはこの3種類(中性子計装用、再循環ポンプ高圧動力用、低圧動力及び制御用)各1本について実施した。図5はこれら試験のテストフローダイアグラムを示すものである。以下、これらの試験についておもな項目を説明する。

4.1 溶接試験

原子炉用ECPAは、原子炉格納容器に取り付けられたノズルに3個所の溶接により接続される。このうち気密シール部への熱影響を与えやすい2個所について、模擬ノズルを使用して溶接試験を行なった。溶接は現地での条件と全く同一に行ない、気密性にとって重要なエポキシ樹脂と鋼材との界面付近の温度を測定した。溶接部近辺の鋼材の温度は急激に上昇するが、熱伝導率が低いエポキシ樹脂部分の温度は70℃以下にとどまった。

溶接熱の電気特性、気密特性への影響を調べるために、絶縁抵抗、耐電圧、部分放電、気密漏れなどについて試験し、溶接前の特性と比較した結果、溶接熱による影響は認められなかった。

4.2 通電試験

再循環ポンプ高圧動力用ECPAにおいては、再循環ポンプの特性及び配線から考え400Aの連続電流、635A/5sの短時間電流及び9,300A/10サイクルの短絡電流をそれぞれケーブル1条当たりに流し得るものでなければならない。このとき、導体温度がケーブル絶縁体許容温度を超えてはならず、また、短絡電磁力により機械的損傷を受けてはならない。そこで、前記の電流を通電し温度上昇を測定した結果、通電の影響は

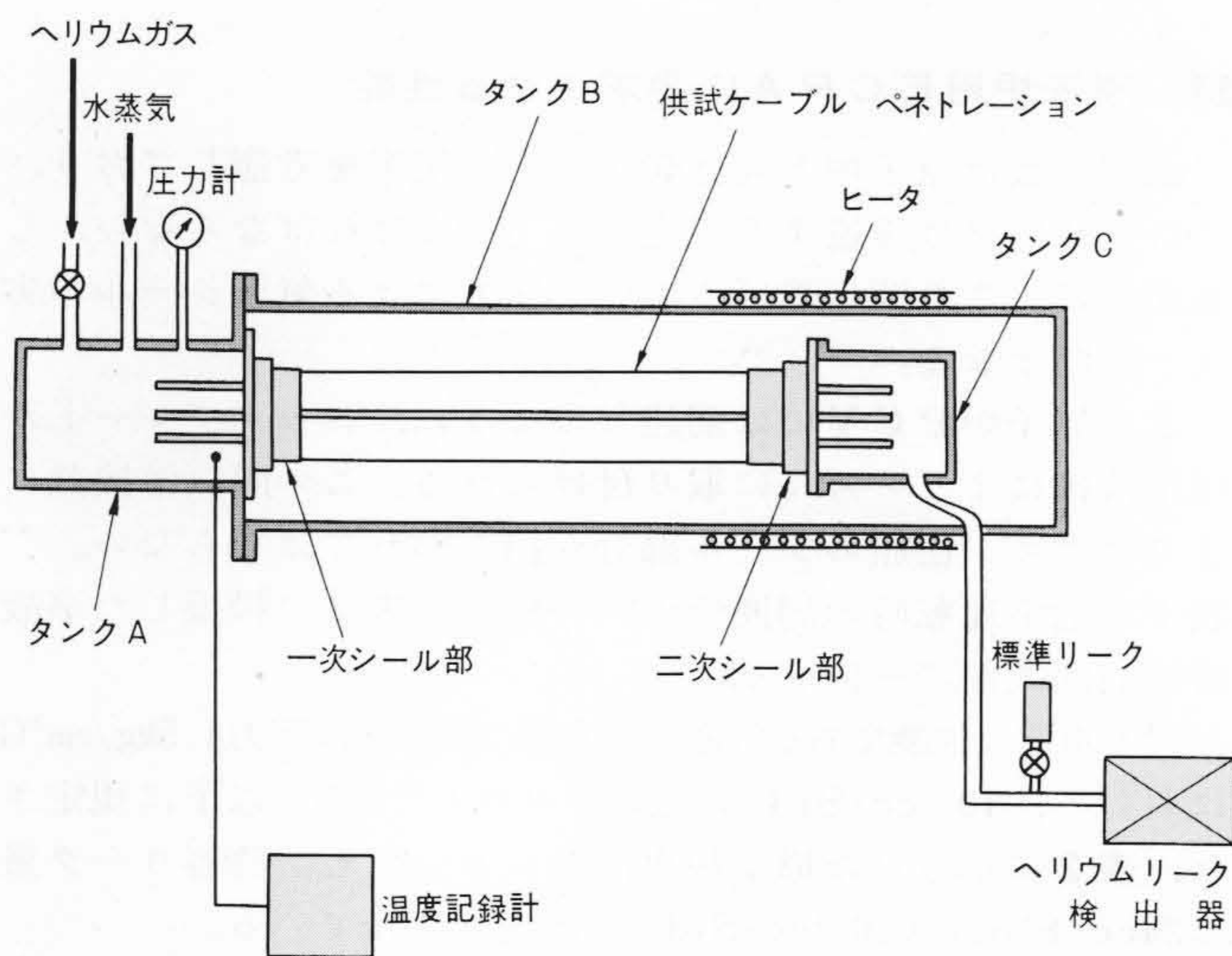


図6 事故模擬試験装置 タンクAを事故時条件に設定し、タンクAからタンクCに漏れてきたヘリウムガスを検出する。

Fig. 6 Equipment for Emergency Test

確認されなかった。また、電磁力が他の電気特性、気密特性に影響を与えていないかも調査したが、特性に変化は認められず、影響はなかったものと考えられる。

4.3 耐圧力試験

原子炉用ECPAを現地で据え付けた後、 $4.9\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$ の耐圧力試験が行なわれる。このとき、加圧によりシール部に働く応力によって、気密特性、電気特性が損なわれてはならない。この確認を行なった結果、気密特性、電気特性ともに加圧前の特性に対して変化は認められず、満足できるものであった。

4.4 事故模擬試験

前述した事故時の条件下においても、シール機能は保持していなければならない。そこで図6に示すような試験装置を組み立て、タンクA内に 171°C 、 $4.5\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$ 、 $100\%\text{RH}$ のふんい気を6時間、 138°C 、 $4.5\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$ 、 $100\%\text{RH}$ のふんい気を10日間再現させ、一次シール部及び二次シール部から漏れてくる漏れ量を、タンクCにおいてヘリウムリーク検出器を用いて適時測定した。また、二次シール部も運転時の温度になるように加熱した。その結果、事故模擬試験中においても、更に、試験終了後、室温にもどしてから漏れ量は、規格値($1 \times 10^{-6}\text{cc}\cdot\text{Std}/\text{s}$)を十分に満足するものであった。

5 気密シールに対する検討

5.1 エポキシ樹脂の気密特性(気体の透過性)

原子炉用ECPAは約40年間、気密シール特性を維持しなければならない。したがって、短期間ではその影響を無視できた高分子材料一般のもつ、微量な「気体の透過」も等価漏れとして考慮する必要がある。

そこで、以下に述べるようなモデル実験を行なった。この実験結果より、気体透過のオーダを知り、ECPAの気密シール部について、等価的な漏れ試算を行なった。

図7に示すように、厚さ一様の平行平板状のエポキシ樹脂サンプル(真空注形)の片側より乾燥ヘリウムガスを加圧し、エポキシ樹脂を透過したヘリウムを、ヘリウムリーク検出器で検出する。図8はその結果を図式的に示したものである。ヘリウムガス加圧後、ヘリウムガスが検出されるまでに潜伏時間 t_θ が観測される。その後、信号は増加し一定値に達する。この結果は、ヘリウムガスがエポキシ樹脂に溶解し、エポキシ樹脂内を拡散して検出側に到達するものと考えられる。そこで、よく知られているようにエポキシ樹脂へのヘリウムガ

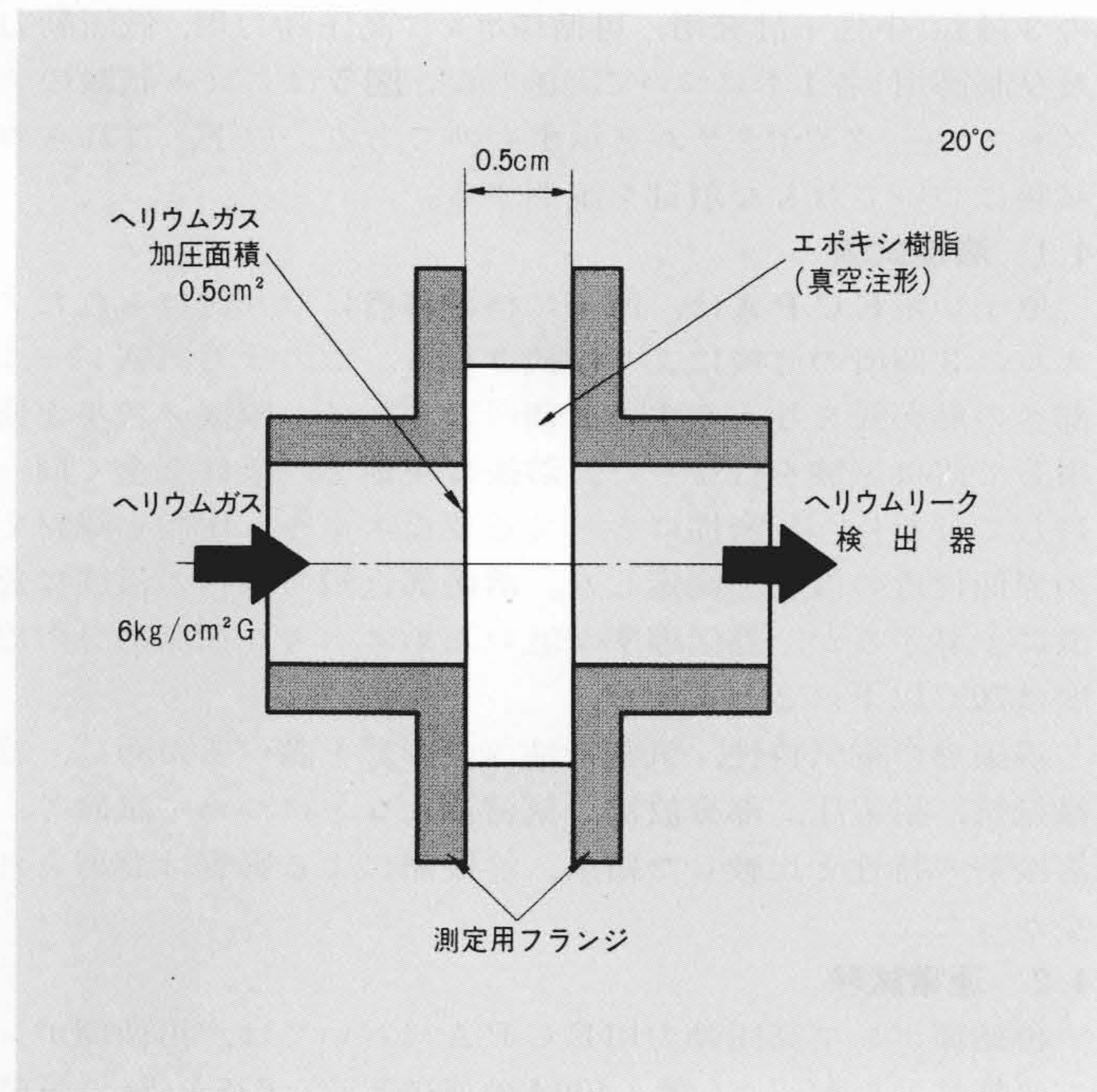


図7 ヘリウムガス透過モデル実験概略図 真空注形した平行平板状のエポキシ樹脂サンプルの片側より乾燥ヘリウムガス $6\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$ を加圧し、エポキシ樹脂を透過したヘリウムガスをヘリウムリーク検出器で検出する。

Fig. 7 Cross-section of Test Sample for Measurement of Permeation of Helium Gas

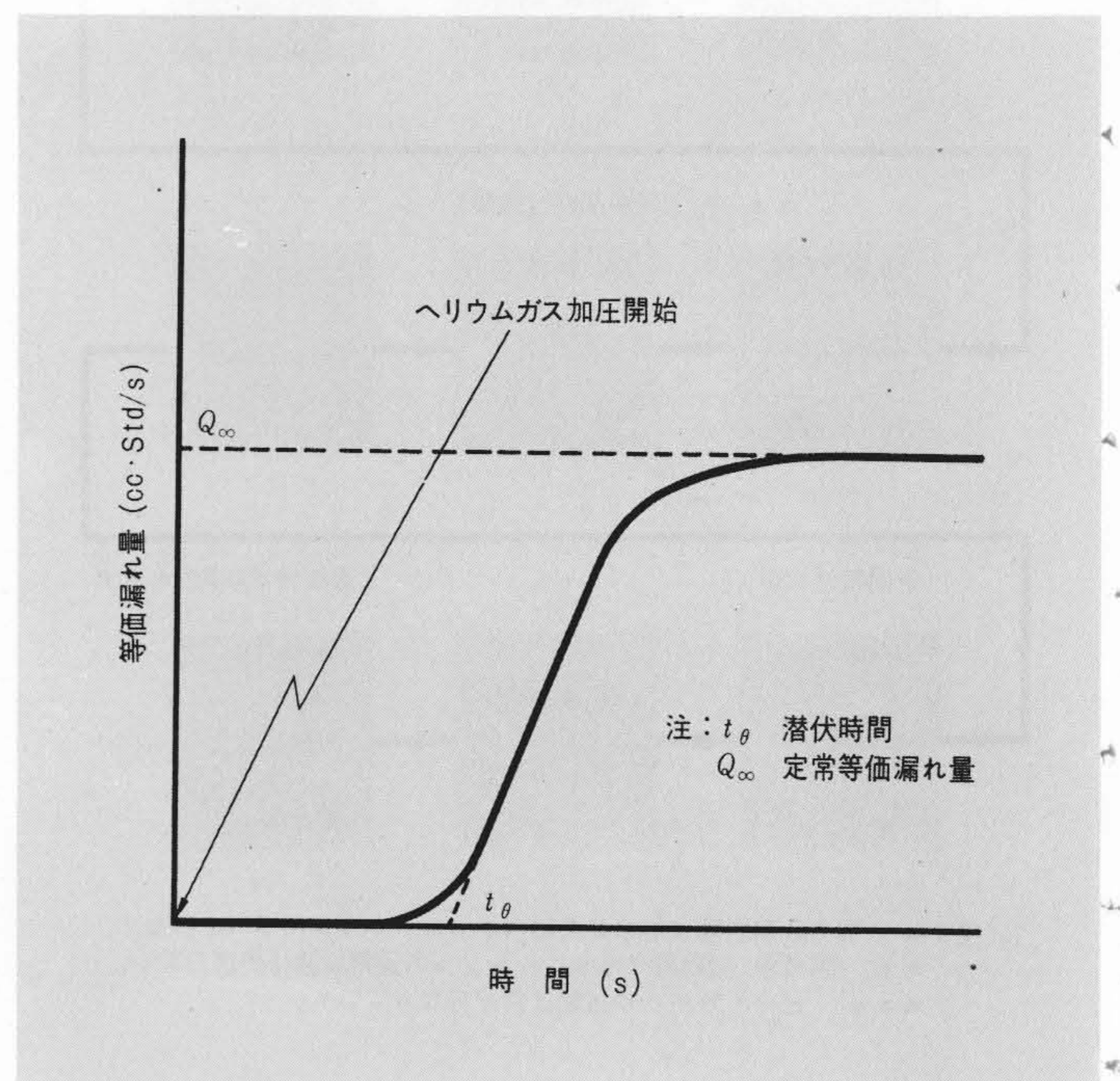


図8 ヘリウムガス透過モデル実験結果(等価漏れ量の時間的变化) 図7の結果を図式的に示した。ヘリウムガス加圧後、潜伏時間が観測される。 t_θ は信号増加直線部の内挿点として求められる。

Fig. 8 Time Dependence of Equivalent Leak (Permeation of Helium Gas)

スの溶解に「ヘンリーの法則」、エポキシ樹脂内でのヘリウムガスの拡散に「フィックの法則」(濃度による拡散)を仮定する⁽¹⁾と、潜伏時間 t_θ 、定常等価漏れ量 Q_∞ は次のように示すことができる。

$$t_\theta = l^2 / 20D \dots\dots\dots (1)$$

$$Q_\infty = PA \cdot \Delta p / l \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 t_θ : 潜伏時間 (s)

Q_∞ : 定常等価漏れ量 (cc·Std/s)

l : 気体透過の有効距離 (cm)

A : 気体透過の有効面積 (cm²)

Δp : 透過隔壁両側の透過気体の分圧差 (atm)

D : 拡散係数 (cm²/s)

P : 透過係数 (cc·Std/cm·atm·s)

実験結果より、乾燥ヘリウムガス-真空注形エポキシ樹脂系で、

透過係数 $P = 2 \times 10^{-10}$ cc·Std/cm·atm·s (20°C)

拡散係数 $D = 2 \times 10^{-6}$ cm²/s (20°C)

と妥当な値が得られた。

この値を用いてECPAの気体拡散経路について、気体透過量を試算する。

試算の条件は平常運転時を考え、PCV内側の透過気体(透過しやすいヘリウムガスを考える)の分圧を1 atmと仮定する。(2)式に下記の値を代入して一次シール単独の気体透過量を求める。

$\Delta p = 1$ atm

$l = 2$ cm

$A = 100$ cm²

$P = 8 \times 10^{-10}$ cc·Std/cm·atm·s (66°C)

(2)式より、

$$Q_\infty = 4 \times 10^{-8} \text{ cc} \cdot \text{Std/s} \dots\dots\dots (3)$$

したがって、40年間(1.3×10^9 s)で一次気密シール部を透過してノズル容積(180 l)に出てくるヘリウムガス容量 Q は、

$$Q = 4 \times 10^{-8} \times 1.3 \times 10^9 \div 50 \text{ cc}$$

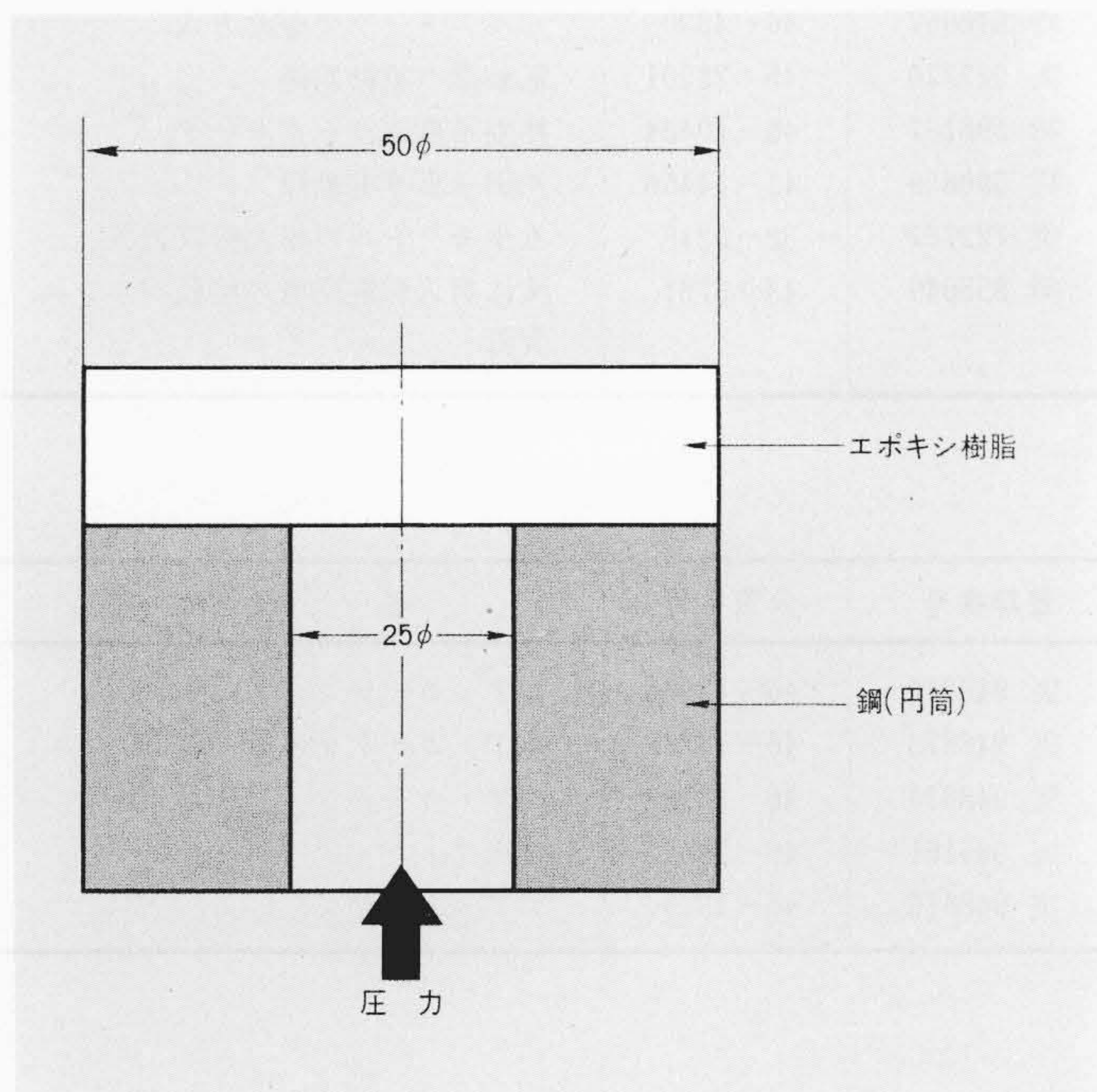


図9 ヘッドプレート上のエポキシ樹脂のはく離モデル試験鋼円筒に圧力を加え、鋼円筒上に注形したエポキシ樹脂をはく離させる。

Fig. 9 Cross-Section of Fracture Test Sample

表3 設計応力とエポキシ樹脂の引張り強さ、はく離強さ(66°C) エポキシ樹脂シール部に4.35kg/cm²G加圧されたときの設計応力に比べ、エポキシ樹脂の引張り強さ、はく離強さは十分に大きいことが分かる。

Table 3 Comparison of Design Stress with Tensile Strength and Fracture Strength at 66°C

設計応力(kg/cm ²)	エポキシ樹脂の* 引張り強さ(kg/cm ²)	はく離強さ**(kg/cm ²)
0.6~1.9	20	10

注:* 3号ダンベル

** 図9のモデル試験結果

となり、気体透過によるノズル内のヘリウムガス分圧は約 3×10^{-4} atmとなる。

次に、二重の気密シールを透過する等価漏れ量を求める。40年間のノズル内ヘリウムガス分圧が約 3×10^{-4} atmとなるので、この値を Δp に代入して(3)式を求めた場合と同様に計算すると、

$$Q_\infty = 1.2 \times 10^{-11} \text{ cc} \cdot \text{Std/s} \dots\dots\dots (4)$$

となる。

したがって、以上の試算から長期間にわたる気体の透過を考慮しても、(4)式よりECPA全体では規格値(1×10^{-6} cc·Std/s)を十分に満足することが分かる。万一、炉心側で気密漏れが生じて(3)式より、規格値を十分に満足することが分かる。

5.2 エポキシ樹脂の強度と耐圧力特性

PCV開口部シール部に設計最高使用圧力4.35kg/cm²Gが加圧された場合を考える。この圧力は、ヘッドプレート中の小孔を埋めているエポキシ樹脂を通して力が伝わり、エポキシ樹脂と鋼板との界面で、両者をはく離させる力として働くものとする。このとき、ECPAのシール部に加わるはく離の応力は、信号用、制御用、動力用の各種ECPAに対して、0.6~1.9kg/cm²となる。

運転時温度(66°C)におけるエポキシ樹脂自体の引張り強さ、はく離強さ(図9参照)は、表3に示すとおりである。

表3より、設計最高使用圧力4.35kg/cm²Gに対しても、エポキシ樹脂の強度、気密シール部の強度は十分に余裕をもっていることが分かる。

6 結 言

原子炉用ECPAの概要について述べたが、特に各種の試験において十分な特性を示し、高い信頼性を要求される原子炉への使用に当たり十分に実用性があるものとする。今後エネルギー事情から原子力発電はますます多くなるものと考えられ、原子炉国産化に対し微力ながら寄与し得るものとする。

参考文献

- (1) W.Jost: "Diffusion in Solids, Liquids, Gases" Chap. I. VII (1960, Academic Press Inc.)

本書は拡散問題一般について詳述してある。

本論文では、透過ヘリウムガスはヘリウムリーク検出器を通して系外へ排気されるため、検出側はopen-spaceとして取り扱っている。