

高速増殖原型炉「もんじゅ」一次収納構造電力用電線貫通スリーブの開発

Development of Low-Voltage Power Cable Penetration Sleeve Assembly for Primary Cell Structure of Prototype Fast Breeder Reactor "MONJU"

高速増殖炉の一次収納構造を貫通する電線貫通スリーブには、気密性、耐熱性、耐放射線性、耐ナトリウム性及び放射線しゃへい性能などの点で、軽水炉と比較し過酷な条件に耐えることが要求される。本開発では、これらの要求条件に耐える新型電線貫通スリーブを原型炉「もんじゅ」の設計条件に基づき製作し、更に通電性能、ヒートサイクル性能、耐震性能、耐ナトリウム火災性能などの各種特性を確認することを目的とした一連の性能試験を実施した。

これらの確認試験の結果、電力用電線貫通スリーブは気密性能、電気性能ともに十分な性能をもっていることが確認された。

遠藤秀俊* Hidetoshi Endô
 浅川直記* Naoki Asakawa
 近藤嶺一** Ryôichi Kondô
 城市久徳*** Hisanori Jôichi
 木樽 博**** Hiroshi Kogure

1 緒 言

高速増殖炉の一次冷却系では、冷却材として使用される金属ナトリウムの子熱用の電力や計測制御用の信号を、一次収納構造壁を貫通させて一次冷却系周辺へ供給したり、取り出したりする必要がある。

一次収納構造内部は軽水炉に比べ放射線レベルが高く、貫通スリーブ(一次収納構造電力用電線貫通スリーブ)自身に放射線(γ線)しゃへい性能が要求される。また、壁貫通面積の制限から一貫通孔へ多数本の電力線を貫通させる必要があり、一次収納構造内部で想定される配管破断によるナトリウム火災事故時の温度、雰囲気条件も軽水炉と異なったものとなる。貫通スリーブに要求される性能は、気密性能、電気性能はもとより表1に示す環境条件に耐える必要がある。

本開発は動力炉・核燃料開発事業団の研究開発テーマの一つとして実施されたもので、従来の軽水炉用ペネトレーションの技術を基とし「もんじゅ」設計条件をベースに、高速増殖炉特有の要求仕様を満足させるため新型の壁貫通スリーブを開発したものである。ここに、その構造、特性及び性能試

表1 貫通スリーブと軽水炉用貫通スリーブとの要求仕様の比較
 貫通スリーブには、軽水炉用貫通スリーブに比べてナトリウム火災、放射線及び放射線しゃへいの点で厳しい条件が要求される。

主要項目	要 求 ・ 仕 様	
	貫通スリーブ	軽水炉用貫通スリーブ
通常時温度	10~50°C	10~66°C
想定事故時	ナトリウム火災	水蒸気
1. 最高温度	290°C	171°C
最高圧力	0.56atg	4.34atg
2. 最高温度	420°C	
最高圧力	0.48atg	
放射線(総線量)	2.0×10^{10} rad	7.6×10^7 rad*
耐震クラス	A	As
ナトリウムスプレー	あり	
放射線しゃへい	γ線 10^{-6} 以上の減衰	

注：* IEEE(米国電気電子学会)規格323-1974 Appendix AのBWRの条件
 軽水炉用貫通スリーブに比べ、想定事故時条件、放射線、ナトリウムスプレー、放射線しゃへいなどの条件が厳しい。

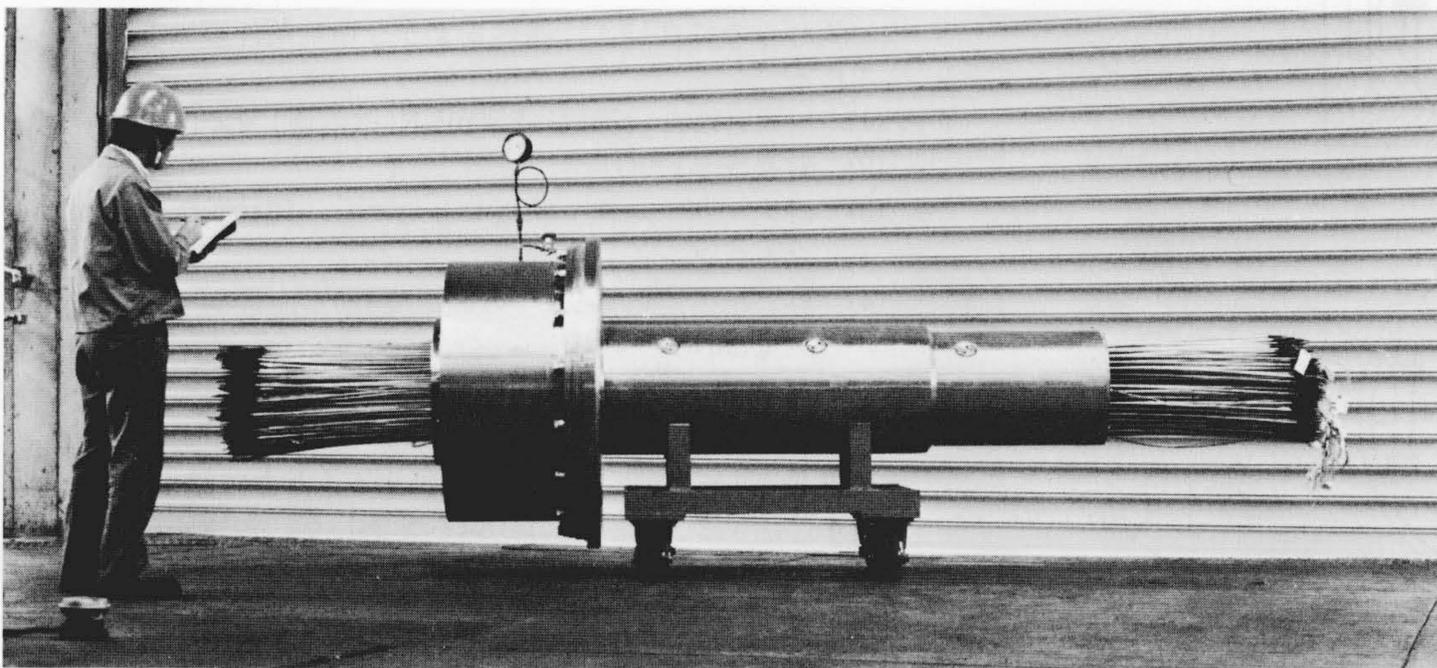


図1 貫通スリーブ(一次収納構造電力用電線貫通スリーブ)の外観 右側が一次冷却系側(一次収納構造壁内側)となる。

* 動力炉・核燃料開発事業団高速増殖炉開発本部 ** 日立製作所日立工場 工学博士 *** 日立製作所原子力事業部
 **** 日立電線株式会社日高工場

験について述べる。

図1に貫通スリーブの外観を、図2に貫通スリーブの典型的な据付位置例を示す。

2 構造

貫通させるケーブルは、耐放射線性の点からMIケーブル(無機絶縁ケーブル)を使用し、気密シールは電力ケーブルの多条布設による発熱とナトリウム火災時の温度の点から一次収納構造壁の外側でエポキシ樹脂を用い一括シールした。シール部は軸方向の二重シールとし、二重シールにより作られる閉空間は窒素ガスなどを加圧することにより、リーク発生をモニタできるものとした。

放射線しゃへいは、鉛粒とステンレス粉をケーブル間に充填する方式とし、ナトリウム火災発生時に鉛粒が溶融するおそれがあるため、ナトリウム火災発生側にはステンレス粉を使用した。

MIケーブルはケーブルに沿ってのγ線のストリーミングを防止するため貫通スリーブ内部でオフセットをとった。また、貫通スリーブと壁孔との空間のストリーミングを防止するため、貫通スリーブの筒体には異径の継ぎ目を作り空間のオフセットをとった。

電線の貫通部面積の制限と膨大な予熱ヒータの数から、貫通心数は外径18in(457mm)の大きさに450本とした。

貫通スリーブ筒体などは、耐ナトリウム性を考慮しステンレス鋼製とし、ステンレス粉、鉛粒と同様に非磁性体材料を

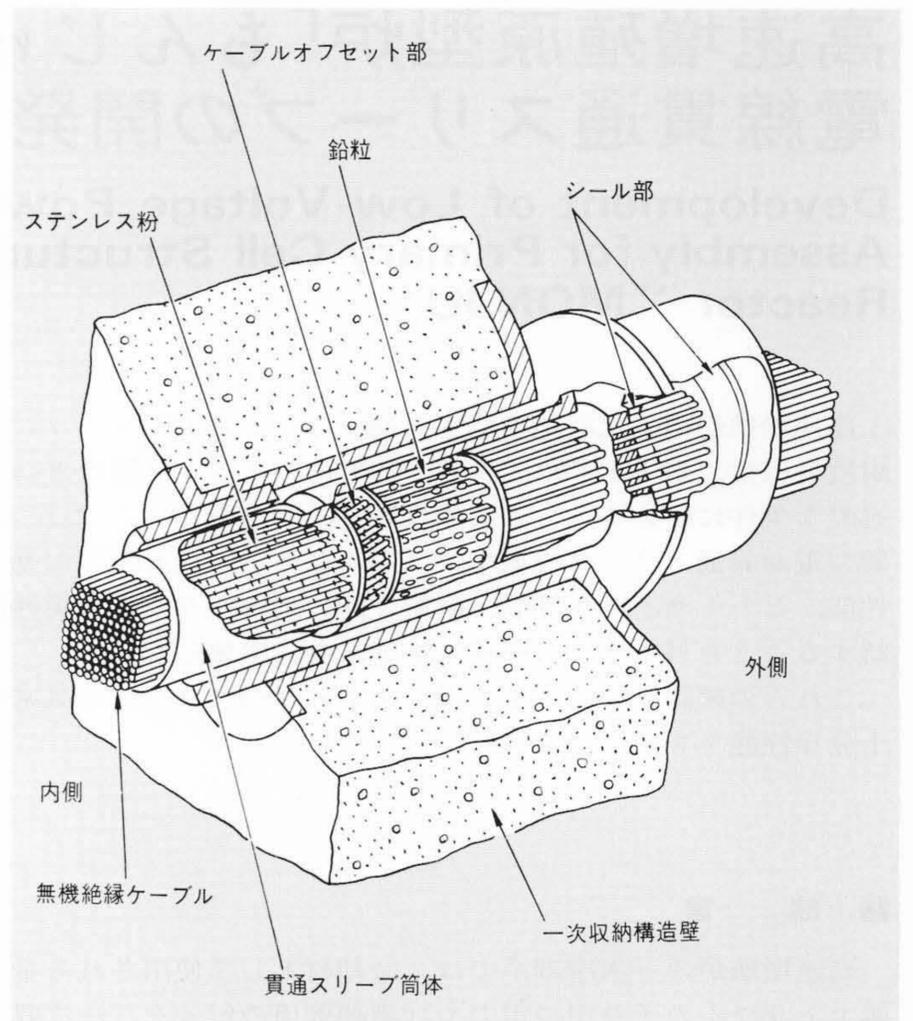


図3 貫通スリーブの構造 貫通スリーブが一次収納構造壁に据え付けられた状態を示す。

選び通電時の渦電流損の発生を防止した。

図3に貫通スリーブの構造を示す。

3 基本特性

貫通スリーブは次に述べる各特性を備えている。

- (1) 電気特性：貫通するケーブルと同等の耐電圧、絶縁抵抗、導通特性
 - (2) 耐圧力特性：窒素ガス0.5atg、30分間の圧力保持
 - (3) 気密特性：窒素ガス0.4atg、48時間の圧力保持
 - (4) ガスリーク特性：リーク量が0.05Ncm³/s以下(通常時)、リーク量が50Ncm³/s以下(事故時)
 - (5) しゃへい特性：貫通スリーブ本体で10⁻⁶のγ線の減衰*
- これらの特性は次に述べるような環境条件のもとでも維持される。

- (1) 耐放射線性：総線量 2×10¹⁰R(壁内側)、2×10⁴R(壁外側)
- (2) 耐震性：1.5G
- (3) 耐ナトリウム性：鉄板などのカバー(540℃、10秒間のナトリウムスプレー)
- (4) 耐ナトリウム火災性：最高温度420℃、最高圧力0.48atg、リーク量50Ncm³/s以下

4 性能試験

貫通スリーブが要求性能を満足することを確認するために、図4に示すような一連の試験を実施した。各性能試験の前後に特性試験として気密特性(耐圧力、気密、ガスリーク)及び

※) しゃへい計算により、ステンレス粉と鉛粒の充填厚さを求めた。計算モデル化による不確定度を考慮し、計算上10⁻⁷の減衰が得られる厚さを採用した。

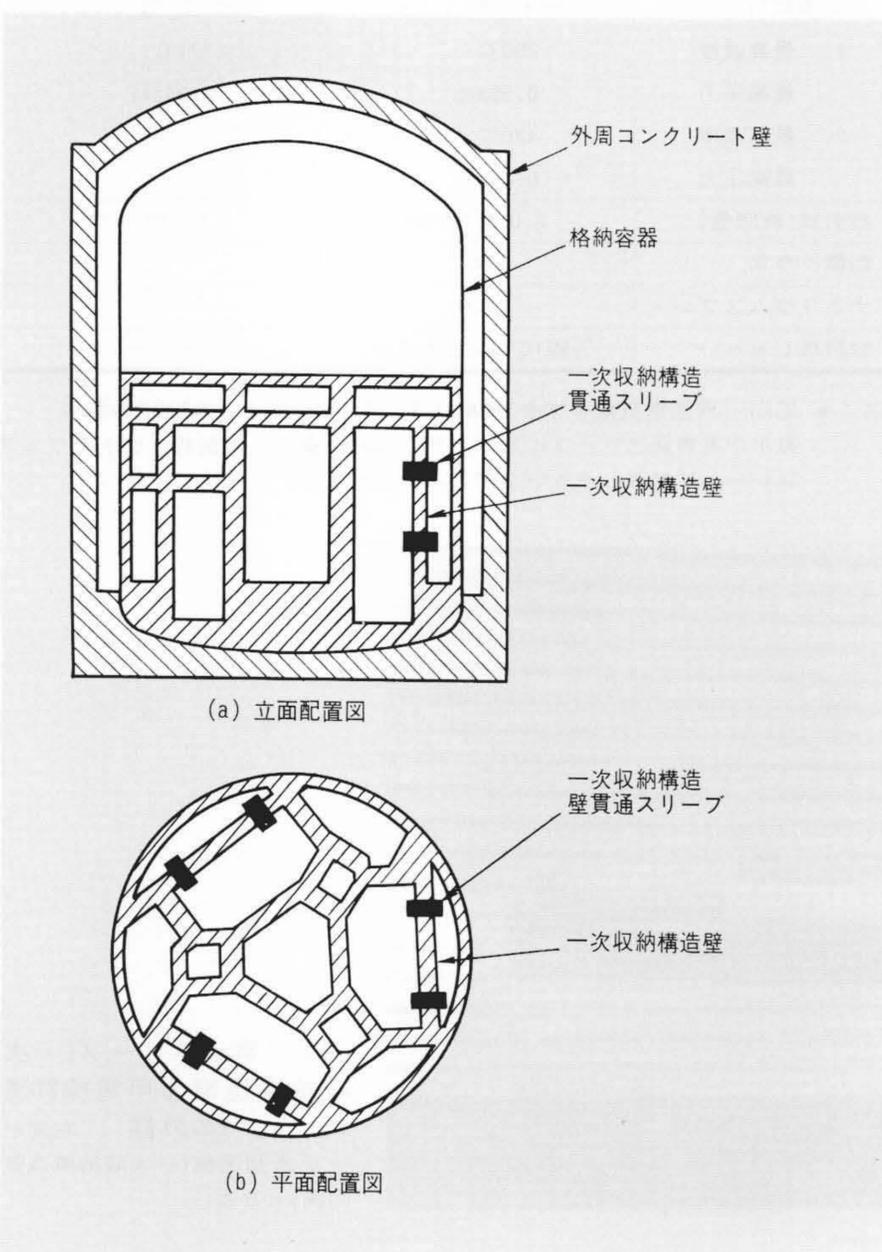


図2 貫通スリーブの据付位置例 貫通スリーブは、一次収納構造の壁を貫通して据え付けられる。

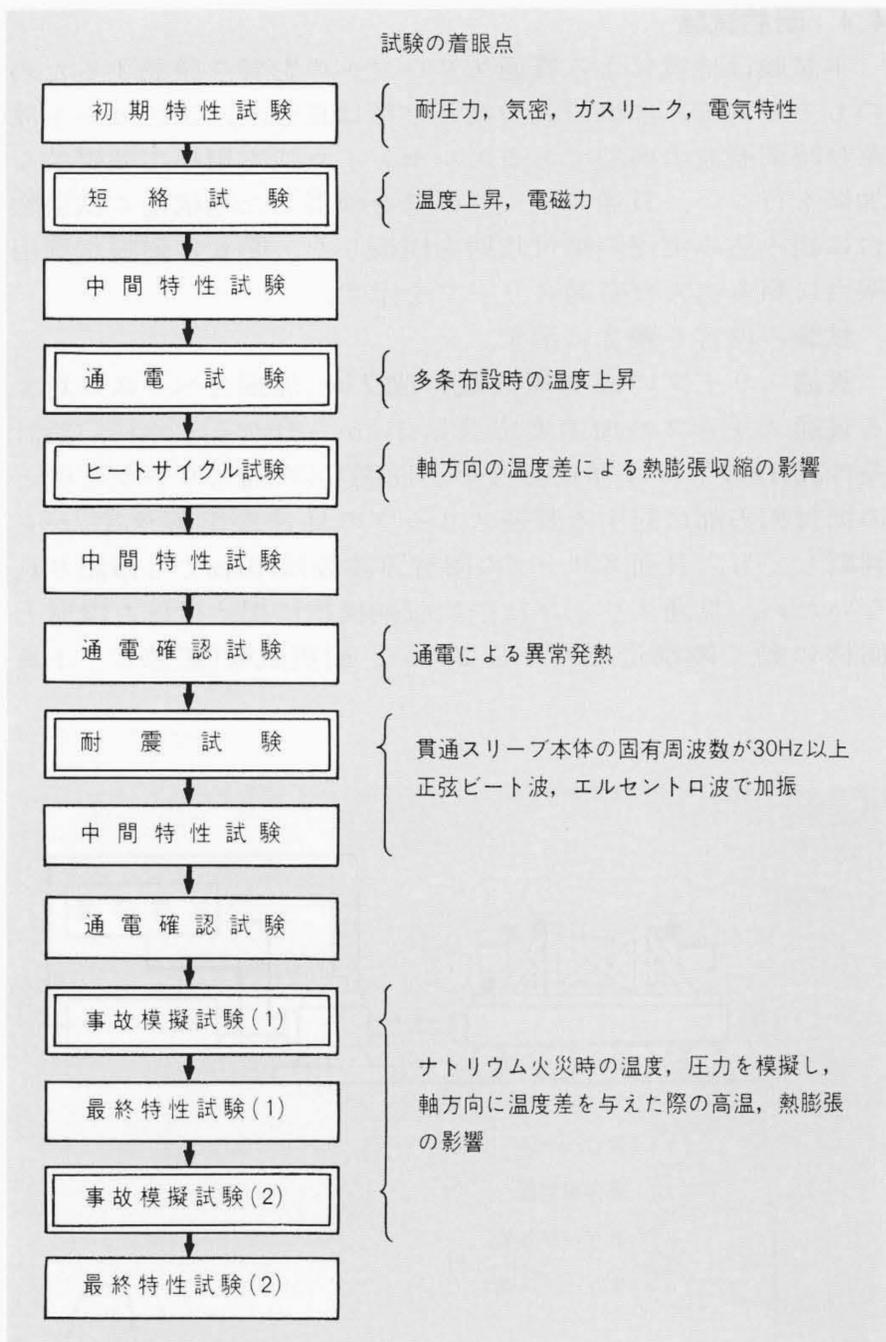


図4 性能試験の流れと着眼点 短絡、通電・ヒートサイクル、耐震、事故模擬(ナトリウム火災事故模擬)試験の前後で、特性試験を実施した。

電気特性を確認し、性能試験が各特性に与える影響の有無を確認した。主な試験の結果を以下にまとめて述べる。

4.1 短絡試験

隣接した2導体を1対とし、交流3,500Aの電流を0.1秒間通電して各部の温度上昇と電磁力が電線及びシール部に与える影響を確認した。温度上昇は5度であり、貫通スリーブの気密・電気性能の低下は認められなかった。

4.2 通電試験

貫通スリーブの電線は主としてナトリウム予熱ヒータの電源供給用として使われ壁18in部に450本を収納する狭所多条布設となる。この試験は電源供給時の通電電流によるジュール発熱が、どの程度の貫通スリーブの温度上昇となって現われるかを確認したものである。

実際の運転時には各部のヒータが様々なモードで運転されるため、実機を模擬して試験することが困難である。そこで、貫通スリーブを通過する電流を変化させて、貫通スリーブの温度上昇を把握した。

通電電流の二乗に対する各部の温度上昇値は比例関係を示し、直流と交流の通電による温度上昇値も同じ値を示した。通電電流が110%定格、100%定格値(16A, 14.5A)のときの温度上昇値の軸方向分布を図5に示す。この分布からみると、貫通スリーブの幾何学的中心部の温度上昇が一番高い。貫通

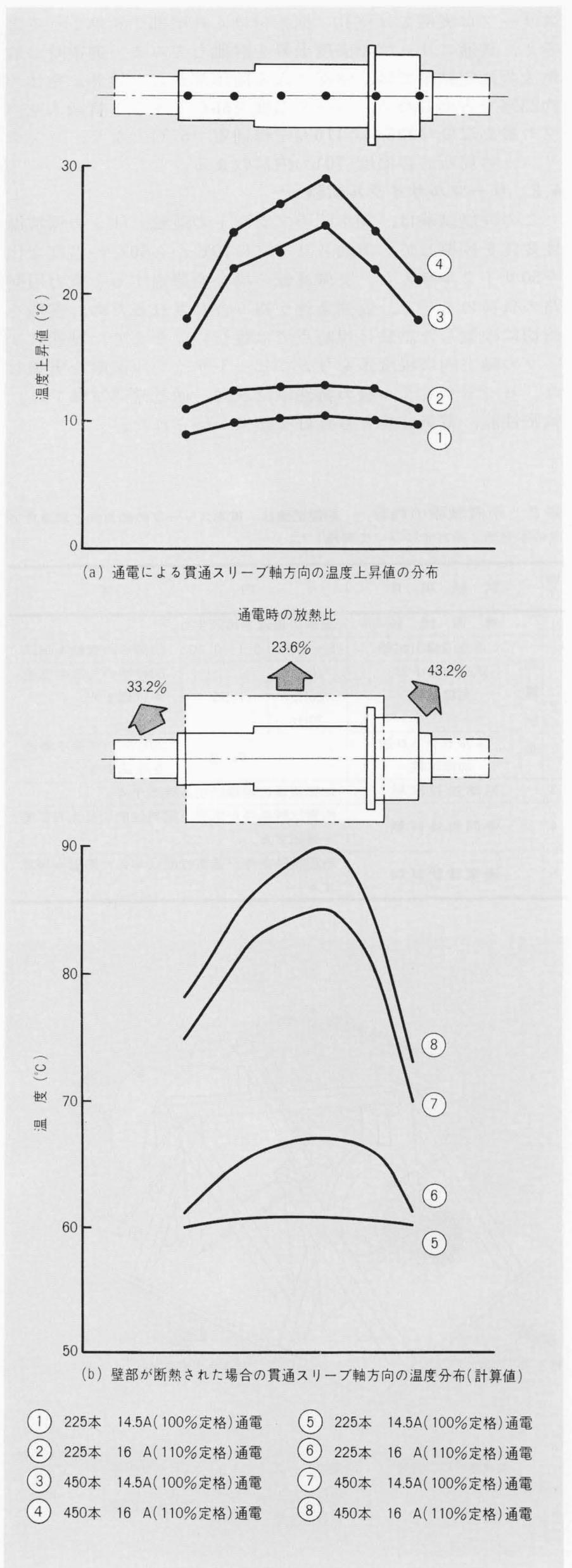


図5 通電試験による貫通スリーブ軸方向の温度 温度上昇値の試験結果を(a)に示す。ベース温度を50℃とし壁部の放熱分23.6%が断熱された場合の各部の温度上昇を計算した結果を(b)に示す。

① 225本 14.5A(100%定格)通電	⑤ 225本 14.5A(100%定格)通電
② 225本 16 A(110%定格)通電	⑥ 225本 16 A(110%定格)通電
③ 450本 14.5A(100%定格)通電	⑦ 450本 14.5A(100%定格)通電
④ 450本 16 A(110%定格)通電	⑧ 450本 16 A(110%定格)通電

スリーブは実機では壁孔に据え付けられ壁部で断熱されると考え、貫通スリーブの温度上昇を評価してみる。通電時の放熱流の測定結果では、壁部に入る筒体部からの放熱が全体の約23%を占めるため、ベース温度を50℃とすると貫通スリーブの最高温度は225本の110%定格通電で67℃となり、コンクリートの局所許容温度(70℃)内に収まる。

4.3 サーマルサイクル試験

この性能試験は、30年間のプラントの運転、休止の環境温度変化を模擬して、貫通スリーブに10℃から50℃の温度変化を50サイクル与えた。実機運転の場合を想定すると電力用回路の負荷のモード、周囲条件が組み合わされるため、実機を適切に模擬した試験は現時点では難しい。そこで、貫通スリーブの軸方向に温度差を与えてヒートサイクル試験を実施した。ヒートサイクル後の特性確認試験、通電確認試験では、気密性能、電気性能とも良好な結果が得られた。

表2 耐震試験の内容 耐震試験は、貫通スリーブの軸方向と軸直角方向の水平面2軸方向について実施した。

順序	試験項目	内容		
1	導通試験	電線の導通を確認する。		
2	正弦波掃引試験	5~30Hz	0.1~0.2G	共振点の有無を確認
	正弦ビート波加振試験	10Hz 20Hz 30Hz	1.5G	60秒間の加振中導通を確認する。
	エルセントロ波加振試験		0.33G	30秒間の加振中導通を確認する。
3	絶縁抵抗試験	加振直後に絶縁抵抗を確認する。		
4	中間特性試験	耐震試験条件が気密、電気性能に与えた影響を確認する。		
5	通電確認試験	耐震試験条件が通電性能に与えた影響を確認する。		

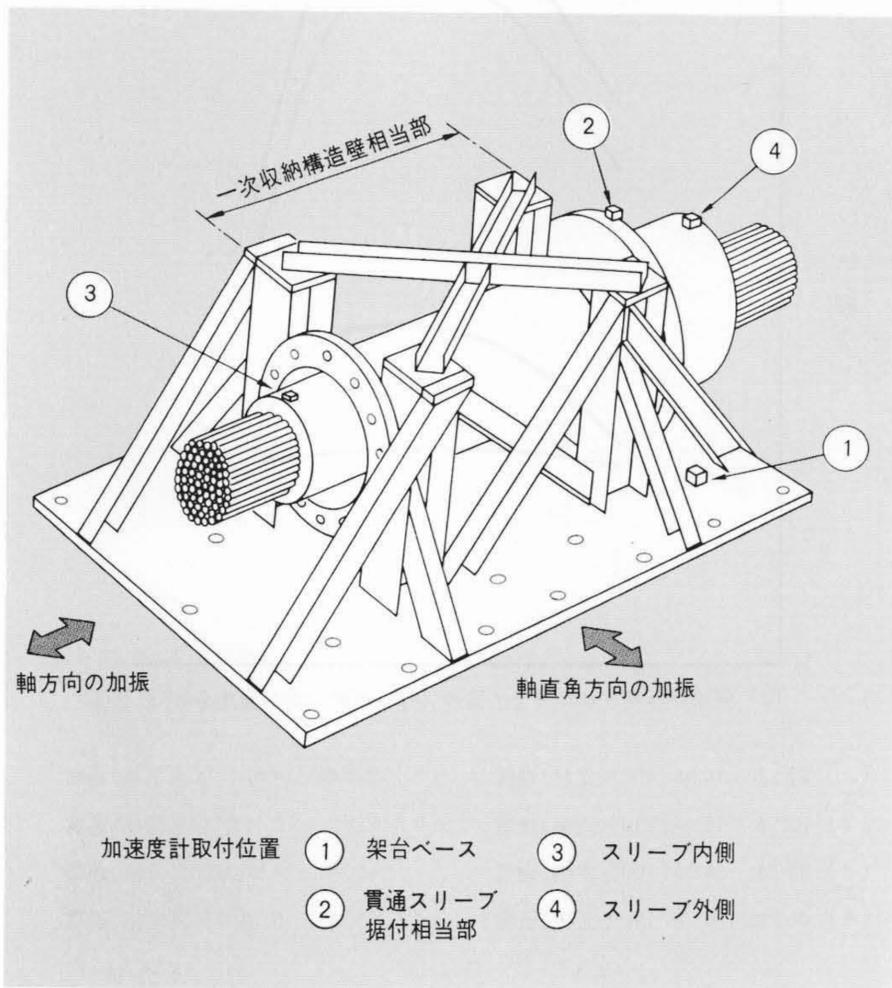


図6 耐震試験用架台に組み込んだ貫通スリーブ 実機据付状態をできるだけ模擬した形状にした。一次収納構造壁相当部は、H形鋼とみぞ形鋼を組み剛構造とした。

4.4 耐震試験

本試験は地震による貫通スリーブへの影響を確認するためのものである。加振の入力波としては正弦波、正弦ビート波及び時刻歴波の典型であるエルセントロ波を用いて基礎的な加振を行ない、貫通スリーブは壁を模擬した剛構造の試験架台に組み込み実際の据付状態を模擬した。図6に耐震試験用架台に組み込んだ貫通スリーブを示す。

試験の内容を表2に示す。

貫通スリーブの固有周波数は図7(a)(加振台ベースに対する貫通スリーブの加速度応答倍率)から分かるように、設計条件30Hz以下には存在しない。同図(b)(貫通スリーブと壁との据付相当部に対する貫通スリーブの加速度応答倍率)から判断しても、貫通スリーブの固有周波数は70Hzでも確認されないため、貫通スリーブは一次収納構造に据え付けた際壁と同様に動く剛構造とみなしてよい。耐震試験(正弦ビート波

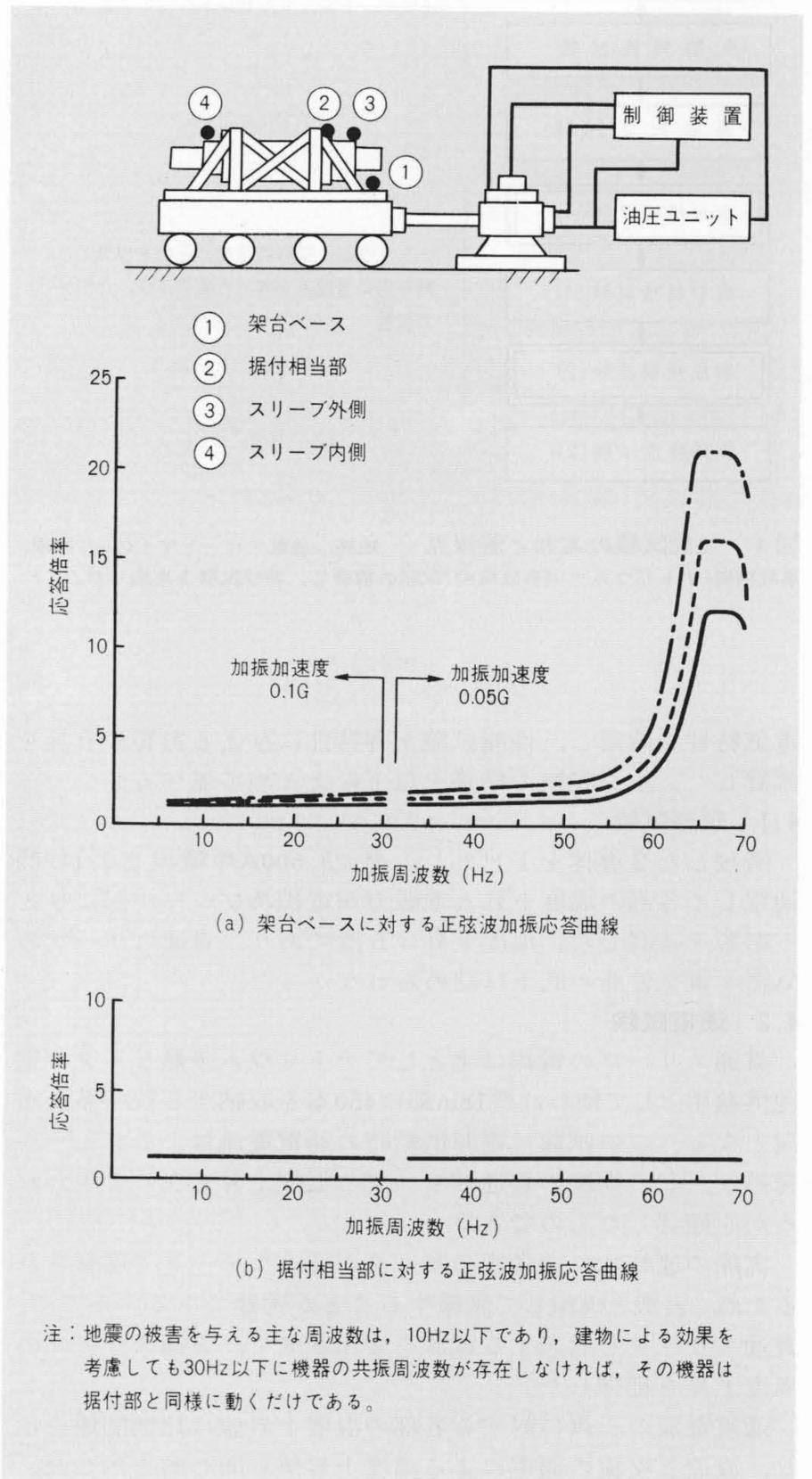


図7 正弦波掃引試験結果 正弦波掃引により貫通スリーブが共振する固有周波数を調査した。5~30Hz(設計条件)の間には共振点は存在しない。参考として70Hzまで掃引した結果、65Hz近傍に架台の共振点が認められた。

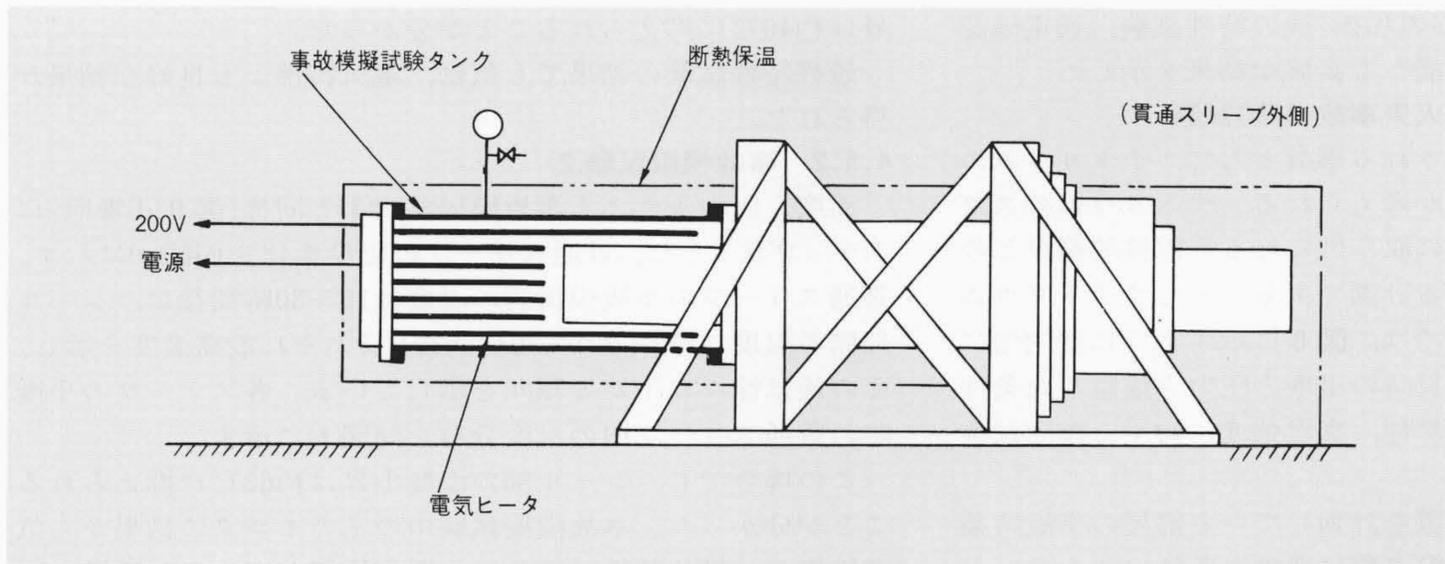


図8 事故模擬試験装置
耐震試験時に用いた架台の貫通スリーブ内側相当部(図中左側)に、事故模擬試験タンクを接続した。熱源には電気ヒータを使用し、装置全体を断熱材で保温した。

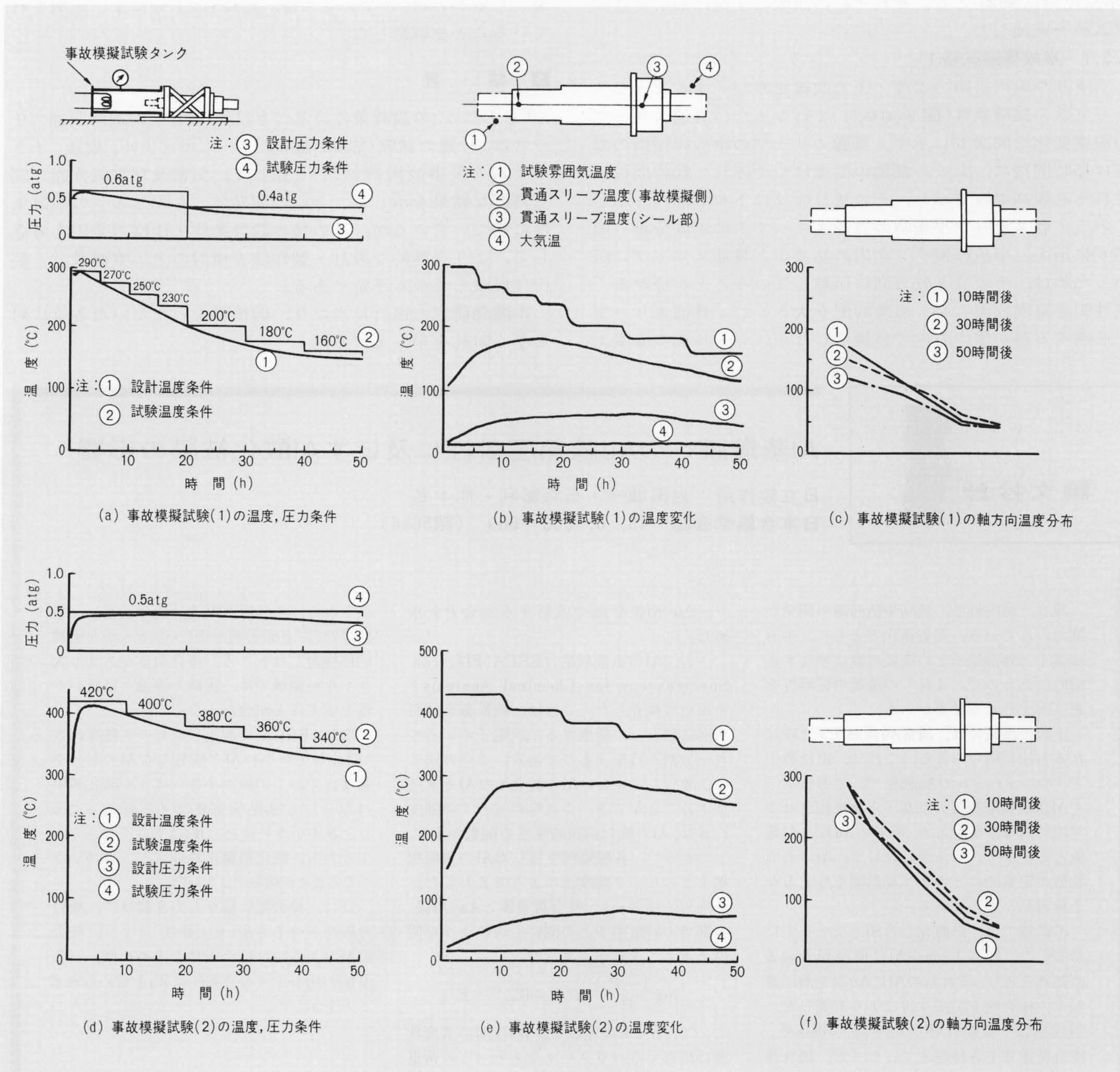


図9 事故模擬(ナトリウム火災事故模擬)試験結果 貫通スリーブの壁内側相当部を試験タンクに据え付け、設計温度・圧力条件をステップ状でカバーする試験条件を与えた。貫通スリーブの各温度は徐々に高くなり、15~30時間で最高値を示し徐々に低くなる。試験雰囲気側の熱は貫通スリーブを通して壁外側相当部へと放熱される。

1.5G, エルセントロ波0.33Gの加振)後の特性試験, 通電確認試験では気密性能, 電気性能とも良好な結果を示した。

4.5 事故模擬(ナトリウム火災事故模擬)試験

一次収納構造内側で想定される事故として, ナトリウムの漏洩によるナトリウム火災が考えられる。ナトリウムのスプレーなどは, 貫通スリーブに取り付られる電線接続箱などの鉄鋼製の構造物で受け止める計画である。そこでナトリウム火災事故時を模擬した試験では, 図8に示すように壁内側に相当する側にナトリウム火災時の温度と圧力を模擬した条件を作り, 貫通スリーブの耐熱性, 高温強度に対する確認試験を行なった。

試験は貫通スリーブの設置を計画している部屋の事故時条件及び今後の設計の裕度として更に過酷な条件にさらされた場合を考慮して2回行ない, ナトリウム火災による雰囲気温度条件を1回目は290°C〔事故模擬試験(1)〕, 2回目は420°C〔事故模擬試験(2)〕とし, それぞれの試験終了後に最終特性確認試験を実施した。

4.5.1 事故模擬試験(1)

ナトリウム火災時の温度・圧力曲線をカバーするようなステップ状の試験条件〔図9(a)参照〕で行なった。貫通スリーブの温度変化を同図(b)に示す。貫通スリーブの事故模擬側の温度は15時間後に, シール部側の温度はやや遅れて20時間後にそれぞれ最高温度を示し, その後は徐々に下がる傾向を示している。各ステップ平衡時の貫通スリーブ内の温度分布を同図(c)に示す。事故模擬タンク内の熱源から貫通スリーブに伝わった熱は, そのまま軸方向に伝熱していることが分かる。壁外側を室温放置として温度勾配を大きくし, 貫通スリーブを通過する熱が増す方向で試験をしたが, シール部の温度上

昇は約40°Cに抑えられることが分かった。

最終特性試験の結果でも気密, 電気特性とも良好な結果が得られた。

4.5.2 事故模擬試験(2)

温度, 圧力条件とも事故模擬試験(1)と同様〔図9(d)参照〕にステップ状とした。貫通スリーブの温度変化を同図(e)に示す。貫通スリーブの事故模擬側の温度は15~30時間後に, シール部側の温度はやや遅れて30時間後にそれぞれ最高温度を示し, その後は徐々に下がる傾向を示している。各ステップの平衡時の貫通スリーブ内の温度分布を同図(f)に示す。

この場合でも, シール部の温度上昇は約63°Cに抑えられることが分かった。事故模擬試験中の圧力モニタの結果から気密性能が, 最終特性試験(2)から電気性能がそれぞれ維持されていることが確認された。

最終特性試験(2)終了後, 貫通スリーブの筒体を解体した結果, シャヘイ材(ステンレス粉, 鉛粒)は十分によく充填されていることを確認した。

5 結 言

「もんじゅ」の設計条件に基づき設計・製作した電線貫通スリーブは, 一連の試験(短絡, 通電, ヒートサイクル, 耐震, ナトリウム火災事故模擬試験)を通して, 気密及び電気性能に関し良好な結果を示した。今回の開発は「もんじゅ」の設計条件に基づいているが, その後の設計条件・仕様の変更を考慮して, より合理的な設計・製法を検討の上, 実機設計・製作に反映してゆく予定である。

本開発研究の遂行に当たり, 御指導をいただいた各位に対し厚くお礼を申し上げます。

論文抄録

Al蒸着膜へのAu線熱圧着性に及ぼすAl酸化被膜の影響

日立製作所 岩田誠一・石坂彰利・他1名
日本金属学会誌 45, 6, 603—609 (昭56-6)

現在, 国内外で, 超高集積回路の開発が進められている。高集積化とともに, 半導体素子と外部端子との接続の数は増加する傾向にあるので, これらの接続の信頼性を更に向上させる必要がある。

上記の接続には, 通常Au線熱圧着と呼ばれる方法が用いられる。これは, 直径数十ミクロンメートルのAu細線で, 半導体素子のAl蒸着膜電極と外部端子とを接続させる方法である。本論文は, 前者のAu線とAl電極との接合で, 接合性に対して, Alの表面状態が定量的にどのような影響を与えるかを検討したものである。

本研究では, 熱酸化したSiウェーハ上に蒸着した, 厚さ1μmのAlに何種類かの表面処理を施し, それらのAlにAu線を熱圧着して, 接合性を引張り法により評価した。熱圧着は, 温度573K, 加圧時間50msで, 接合荷重Wを各種変えて行なった。接合性の評価には, 接続されたAu線を上に引っ張

り, Au-Al接合部で破断する割合Pを求めた。

一方, Alの表面状態はESCA(Electron Spectroscopy for Chemical Analysis)を用いて検査した。これは, 軟X線を試料表面に照射し, 発生する二次電子のエネルギー分析を行なうものである。この方法では, 酸化していないAlと酸化したAlとを区別することができ, これらのピークの強度比Sは, Alの酸化被膜の厚さの関数となる。したがって, 各種処理を施したAlの表面状態をこのピーク強度比によって表わした。

理論的検討から, 接合荷重WとAu-Al接合部での破断率Pとの間に, 次のような関係のあることが予測された。

$$\log \frac{1-P}{P} = K(W-W_0)^{3/2} + E$$

ここで, KとEは定数で, W₀はAlの表面状態に依存するパラメータである(この荷重W₀よりも低い荷重ではほとんど接合しない

ことから, この荷重W₀を「臨界荷重」と名付けた)。上記予測が正しいかどうかを実験的に検討したところ, 接合荷重があまり大きくない領域では, 実験と理論とは良い一致を示すことが分かった。

次に, ESCAで測定したピーク強度比S(酸化していないAlと酸化したAlのピーク強度比で, この値が小さいほうが酸化被膜は厚い。)と臨界荷重W₀との関係を求めると, Sが小さいほど, W₀は大きくなった。すなわち, 酸化被膜が厚いほど, W₀が大きくなることが明らかになった。

更に, 接合部に横から力を掛けて, 接合を破断させる方法(せん断法)により, 接合破断力あるいは接合面積を求めれば, 引張り法の場合よりも直接的にW₀を求められることを示した。