

報告番号 乙 第 4692 号

直流送電用がいしの汚損湿潤下  
における絶縁特性に関する研究

松岡 良輔





①

直流送電用がいしの汚損湿潤下  
における絶縁特性に関する研究

松岡 良輔



## 目 次

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第1章 緒言                         | 1  |
| 1.1 直流送電の動向                    | 1  |
| 1.2 直流用がいし                     | 2  |
| 1.3 がいしの直流汚損フラッシュオーバー電圧特性研究の経緯 | 4  |
| 1.4 がいしの直流汚損試験設備               | 6  |
| 1.5 がいしの直流汚損に関する国際的な研究の動向      | 12 |
| 1.6 本研究の目的                     | 13 |
| 1.7 本研究の内容                     | 14 |
| 第2章 汚損湿潤がいし装置の部分フラッシュオーバー現象    | 22 |
| 2.1 まえがき                       | 22 |
| 2.2 部分フラッシュオーバー現象              | 23 |
| 2.3 供試がいし                      | 24 |
| 2.4 試験配置                       | 25 |
| 2.5 部分フラッシュオーバーの試験方法           | 27 |
| 2.6 部分フラッシュオーバー試験結果            | 29 |
| 2.6.1 湿潤条件の影響                  | 31 |
| 2.6.2 印加電圧の影響                  | 31 |
| 2.6.3 がいし形状の影響                 | 32 |
| 2.6.4 塩分付着密度の影響                | 33 |
| 2.7 部分フラッシュオーバーの防止技術           | 34 |
| 2.8 部分フラッシュオーバー防止技術の評価試験結果     | 37 |
| 2.9 むすび                        | 38 |



|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 第3章 直流壁貫ブッシングのフラッシュオーバー現象           | 41 |
| 3.1 まえがき                            | 41 |
| 3.2 交直変換所の直流側壁貫ブッシングのフラッシュオーバー事故の実態 | 43 |
| 3.3 円筒状がいしの水平配置における汚損耐電圧            | 48 |
| 3.4 円筒状がいしの注水耐電圧試験                  | 52 |
| 3.4.1 注水試験に用いた供試がい管と模擬ブッシング         | 52 |
| 3.4.2 不平等注水耐電圧試験                    | 58 |
| 3.4.3 がい管の平等注水耐電圧試験                 | 63 |
| 3.5 模擬ブッシングを用いた不平等注水耐電圧試験           | 66 |
| 3.5.1 供試模擬ブッシング                     | 66 |
| 3.5.2 不平等注水耐電圧試験方法                  | 67 |
| 3.5.3 模擬ブッシングの不平等注水耐電圧試験結果          | 67 |
| 3.6 むすび                             | 70 |
| 第4章 円筒状がいしの汚損設計に及ぼす胴径の影響            | 74 |
| 4.1 まえがき                            | 74 |
| 4.2 供試円筒状がいしと汚損試験方法                 | 75 |
| 4.3 円筒状がいしの有効長と汚損耐電圧との間の比例関係        | 80 |
| 4.4 円筒状がいしの平均直径と汚損耐電圧の関係            | 84 |
| 4.5 円筒状がいしの平均直径と海岸近傍における汚損付着量の関係    | 86 |
| 4.6 設計基準                            | 90 |
| 4.7 むすび                             | 90 |

|   |     |
|---|-----|
| 第5章 がいし装置の汚損湿潤時におけるラジオ、テレビ雑音および可聴雑音特性     | 94  |
| 5.1 まえがき                                  | 94  |
| 5.2 試験設備と試験方法                             | 96  |
| 5.3 各種雑音特性の測定方法                           | 99  |
| 5.4 供試懸垂がいし連                              | 100 |
| 5.5 局部火花放電発生時の各種雑音特性の測定結果                 | 102 |
| 5.5.1 雑音の発生機構について                         | 103 |
| 5.5.2 ラジオ、テレビ雑音特性                         | 104 |
| 5.5.3 可聴雑音特性                              | 112 |
| 5.5.4 各種雑音特性の交流課電時の特性との比較                 | 115 |
| 5.6 部分フラッシュオーバー発生時の可聴雑音測定結果               | 117 |
| 5.7 むすび                                   | 120 |
| 第6章 総括                                    | 123 |
| 6.1 まえがき                                  | 123 |
| 6.2 コールドウェットスイッチオン条件下における部分フラッシュオーバー      | 124 |
| 6.3 直流壁貫ブッシングのフラッシュオーバー                   | 125 |
| 6.4 円筒状がいしの汚損設計に及ぼす胴径の影響                  | 126 |
| 6.5 がいし装置の汚損湿潤時におけるラジオ、テレビ雑音<br>および可聴雑音特性 | 128 |
| 6.6 本研究に関する今後の課題                          | 129 |



## 第1章 緒言

### 1.1 直流送電の動向

近年、電力の需要が大幅に増大し、全エネルギーに占める電気エネルギーの割合はますます高くなってきている。また、情報化時代を迎え一瞬の停電も許されず、電力供給の信頼性はますます重要になってきている。さらに、原子力発電所や大容量水力発電所などの建設地は消費地からますます遠くなり、大電力の長距離輸送の必要性が世界各地で高まってきている。直流送電は、交流送電に比べ、変換所は高価であるが線路の建設費が安いので、大電力の長距離輸送に適している。直流送電は、この他、周波数の異なる系統間の電力融通や系統の非同期安定運用の面、あるいは海峡横断などにおけるケーブルの送電容量や耐電圧の面などからも、その必要性が高まっている。

従来、直流送電は、水銀整流器などの交直変換機器の信頼性が低く価格も高かったため、余り採用されなかった。しかし、近年、サイリスタ技術の進歩が著しく、変換装置の信頼性が改善されコストも下がってきたため、大電力長距離送電の必要性とあいまって、直流送電が各地で実施されるようになってきた。日本では、±250kV北海道-本州直流幹線がすでに稼働しているが、今後±500kV級直流送電線の建設も検討されている。海外では、1954年にスウェーデンで100kVの単極直流送電線が運転を開始している。その後、ドーバー海峡を横断する英仏直流連系や、ニュージーランドの南北両島を結ぶ送電線など次々と各地で直流送電線が建設されてきた。最近ではブラジル/イタイプ±600kV、中国の葛洲壩-上海±500kV、インドのリハンドーデリー±500kV、など±500kV級直流送電線が多数建設され運転に入っている。



## 1.2 直流用がいし

がいしは、電気エネルギーが発電所で作られてから家庭や職場などで使われるまであらゆる所で、充電部を接地部から電氣的に絶縁し機械的に支持するために使われている。それは膨大な数に上り、何れか1個のがいしが機械的荷重や電氣的絶縁に耐えなくても、電力の供給に支障を来すことになる。直流送電が開始された当初は、交流送電用に長年用いられてきたがいしがほとんどそのまま直流送電にも用いられた。その後、実験室での研究や実際の送電線での運転実績の積み重ねによって、直流固有の種々の問題が明らかにされ、それらに対する対策が検討されてきた。直流用がいしに固有の問題は以下の通りである。

### (1) がいしの汚損特性

電圧の極性や大きさが交番する交流の場合と異なり、直流の場合には一定の極性の電圧がいしに加わる。このため、集塵効果によりがいし表面に付着する汚損量は交流の場合より一般に多くなる。また、汚損層が湿潤し漏れ電流が流れ局部火花放電が発生すると、直流の局部火花放電は消滅しにくく伸展しやすいため、フラッシュオーバー電圧は交流の場合より低くなる。交流用と直流用の耐塩用懸垂がいしの笠形状の比較を図1.1に示す。図に示すように、直流用がいしの場合には、局部火花放電が伸展しにくく消滅し易いように、笠間やリブ間の間隔を拡げる工夫がなされている。

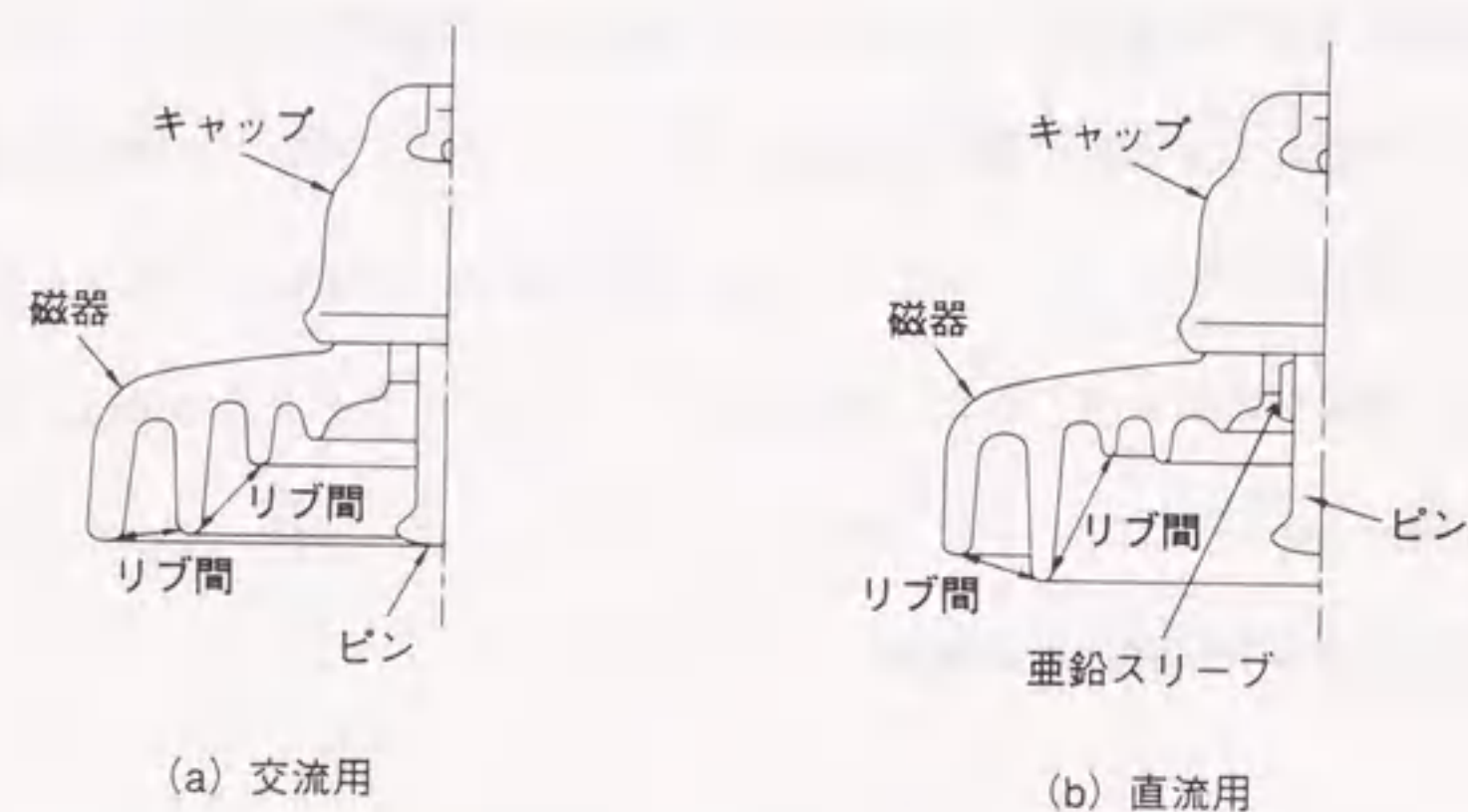


図1.1 交流用、直流用耐塩用懸垂がいしの笠形状の比較

### (2) がいし金具の電食

直流送電に用いられるがいしには、通常、一定の極性の電圧が印加されることとなる。このため、がいし表面が汚損湿潤し漏れ電流が流れると電気分解の原理に従って、陽極側の電極に相当するがいし金具の溶出が生ずる。特に、懸垂がいしのピン側が陽極の場合、ピン金具表面の亜鉛メッキの消失が加速されピン本体の腐食が進展する。このため、図1.1 (b)に示すように、直流送電用懸垂がいしには、ピンのセメントと空気境界部に犠牲電極として亜鉛スリーブが取り付けられている。

### (3) 磁器中のイオン移動

がいしに一定極性の直流電圧が長年月印加されると、絶縁物体中の極く微小なイオンの移動の蓄積により絶縁物が劣化する恐れがある。ガラスがいしを直流送電に用いると、交流課電の場合に比べ、1桁~2桁高い劣化率を示すことが報告されている<sup>(1)</sup>。これはガラスではこの種のイオン含有率が高いためである。幸い磁器がいしの場合には、交流の場合も直流の場合も劣化率に差は見られない。

### (4) 部分フラッシュオーバー

直流課電がいし連は、主としてがいし表面の湿潤の極度の不均等に起因して、1~2個のがいしのみが連続してフラッシュオーバーを繰り返すことがある。このような現象を「部分フラッシュオーバー」と称する。部分フラッシュオーバーが発生すると、騒音や電波障害の面から環境問題となる場合もあると考えられるので注意を要する。なお、交流の場合には、がいし連の電圧分担は、表面抵抗のみならず、がいしの自己静電容量などにも左右される。このため、湿潤がどれ程不均等になっても、特定の1~2個のがいしに印加電圧の大部分が分担されることはなく、従って、部分フラッシュオーバーは発生しない。



### 1.3 がいしの直流汚損フラッシュオーバ電圧特性研究の経緯

がいしの電氣的絶縁性能の中で最も重要なものは、がいしの表面が汚損湿潤した時の絶縁性能である。特に、わが国は四方が海で囲まれた島国で、島の中央部には山脈が連なっており、主な発電所も需要家の大部分も海岸に近い平野部に集中している。このため、台風や季節風などにより送配電線や発電所のがいしは著しい海塩汚損を受ける。わが国では、長年にわたって汚損がいしのフラッシュオーバ電圧特性やフラッシュオーバ防止対策の研究が各所で行われてきた。しかし、がいしの汚損に関する研究は、国内はもとより海外においても、これまで、主として交流電圧が対象とされてきた。

前述のように、近年、内外で直流送電が次々と実施に移されているが、汚損がいしの直流課電下における絶縁特性に関する研究についてはまだ日が浅い。当初、直流の場合にも、汚損がいしのフラッシュオーバを左右するのは、漏れ電流によって生ずる乾燥帯の形成にあると考えられた。このため、乾燥帯の形成に必要な熱エネルギーは、直流の場合も交流の場合も同じであり、直流のフラッシュオーバ電圧は交流のフラッシュオーバ電圧の実効値にほぼ等しいと考えられた。

直流送電が始まった当初、汚損がいしの直流フラッシュオーバ電圧試験に用いた世界各地の直流試験電源の容量は全般に小さかった。従って、初期の直流汚損試験電源はフラッシュオーバ直前に流れる大きな漏れ電流によって電源内部で電圧降下を起こしていたと考えられる。それにもかかわらず、大きな漏れ電流が流れる以前の発生電圧をもって汚損がいしの耐電圧としていた。このため、実際の送電線では、実験室で求めたフラッシュオーバ電圧よりも低い電圧でフラッシュオーバすることになる。事実、直流送電線が各地で建設され運転に入ると、送電線や交直変換所でがいしの汚損フラッシュオーバ事故が多発し問題となった。このため、各所でがいしの直流汚損フラッシュオーバのメカニズムや性能につい

て精力的な研究が行われることになった。その結果、直流の場合には以下のように交流の場合と著しく異なる状況が明らかにされた<sup>(2)</sup>。

- (1) がいし表面に付着する汚損量は集塵効果のため交流の場合よりも多くなる。
- (2) 印加電圧の大きさや極性が交番しないためがいし沿面で発生した局所的な火花放電が消滅しにくく伸展し易い。
- (3) 直流の場合、がいしの笠形状の面から汚損耐電圧特性を改善するには、交流の場合に比べ、表面漏れ距離は多少犠牲にしても、笠間やリブ先端間のクリアランスを拡げる方が効果的である。

図1.1 (b)に示す直流用懸垂がいし、図1.2 (b)に示す直流用円筒状がいしの笠形状は、このような成果を踏まえて開発されたものである<sup>(2) (3)</sup>。たとえば、図1.1 (b)に示す直流用懸垂がいしは、リブの長さが交互に長短となっている。図1.2 (b)ではリブ先端が斜め配置となっている。これによりリブ先端間やリブ先端から下の笠上面への距離は両図の(a)に示す交流用耐塩がいしの場合に比べ大きくなっている。

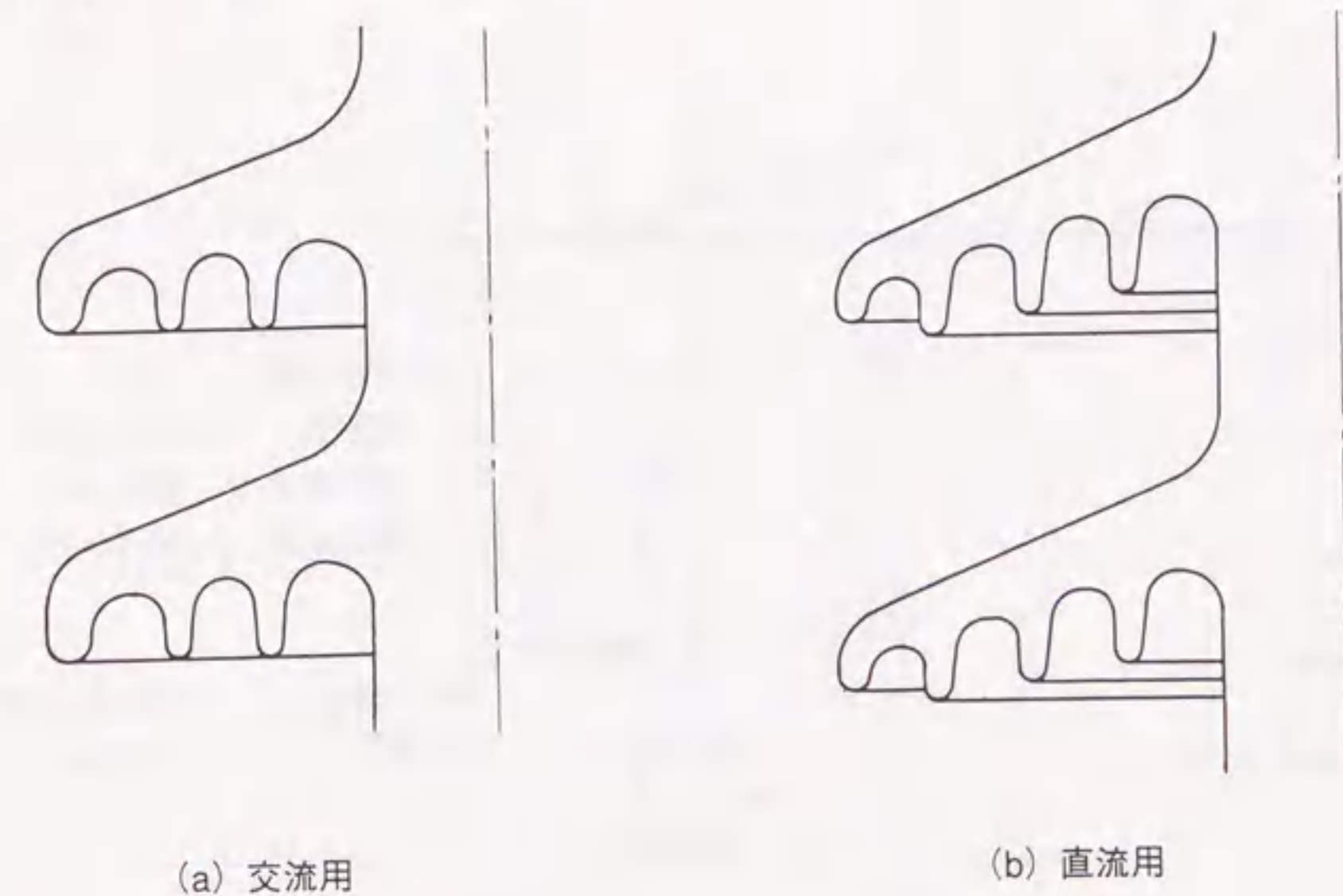


図1.2 交流用、直流用円筒状がいしの耐塩用笠形状



#### 1.4 がいしの直流汚損試験設備

前述のように、汚損湿潤がいしのフラッシュオーバー電圧試験においては、フラッシュオーバー直前に大きな漏れ電流が流れる。がいしの人工汚損試験では、このように大きな漏れ電流を充分供給でき、しかもそれが流れても供試がいしに印加される電圧が電源の内部インピーダンスによって低下しない電源すなわち容量の大きい電源を用いる必要がある。がいしの直流汚損試験電源については、当初 IEC(国際電気標準会議)の規格にて、波高値0.5A、パルス幅0.5秒の漏れ電流が1秒間に1回の割合で流れても、電圧低下率を5%以下とすることが推奨されていた<sup>(4)</sup>。しかし、直流の場合には、交流の場合と異なり、印加電圧の大きさや極性が変化しないため、汚損がいしの表面で発生した局部火花放電は消滅しにくく伸展し易い。このため、がいしの直流汚損試験における局部火花放電発生時の漏れ電流は、交流の場合に比べて、一般に継続時間が長くなる。750 kV大容量直流汚損試験電源を用いて太径のがい管について測定した直流汚損試験における漏れ電流の波形例を図1.3に示す<sup>(5)</sup>。波高値は1A程度であ

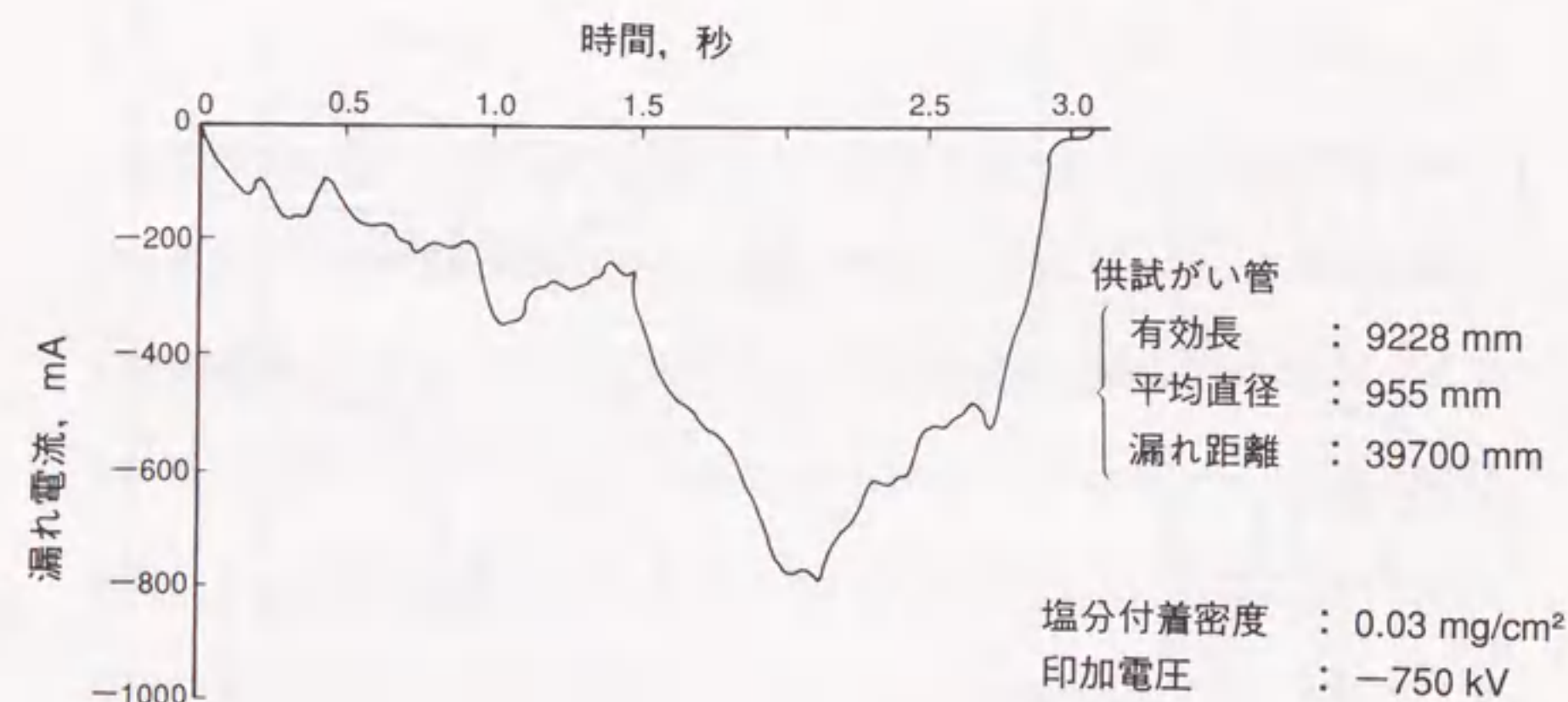


図1.3 がい管の定印霧中直流汚損耐電圧試験における漏れ電流波形例

るが、継続時間は1.5~3秒のものが観測されている。このように、波高値、継続時間の大きい漏れ電流が、がいしの直流汚損試験の場合に流れることは、当初知られていなかった。このため、初期の汚損がいしの直流フラッシュオーバー電圧を求める試験に用いた電源の容量は必ずしも充分ではなかった。日本ガイシ(株)においても、当初図1.4に示す定格500kV、5000kVAの試験用変圧器を用い、200kV、0.5Aのシリコン整流器と1.5 $\mu$ Fの平滑コンデンサで半波整流して、直流200kVを得ていた。しかし、このように小容量の直流電源でも、第5章の汚損がいし装置からの各種雑音特性の研究には用いることができる。雑音特性の研究の場合には、試験中の漏れ電流の最大値は10mA程度であり、その時の電源の電圧降下はこの電源を用いても1%以下であり問題はない。しかし、汚損がいしの直流フラッシュオーバー電圧特性を研究する場合には適当ではない。がいしの直流汚損フラッシュオーバー電圧(または耐電圧)を求めるために、上述のような、波高値、継続時間の大きい漏れ電流が流れても、電源電圧が降下し

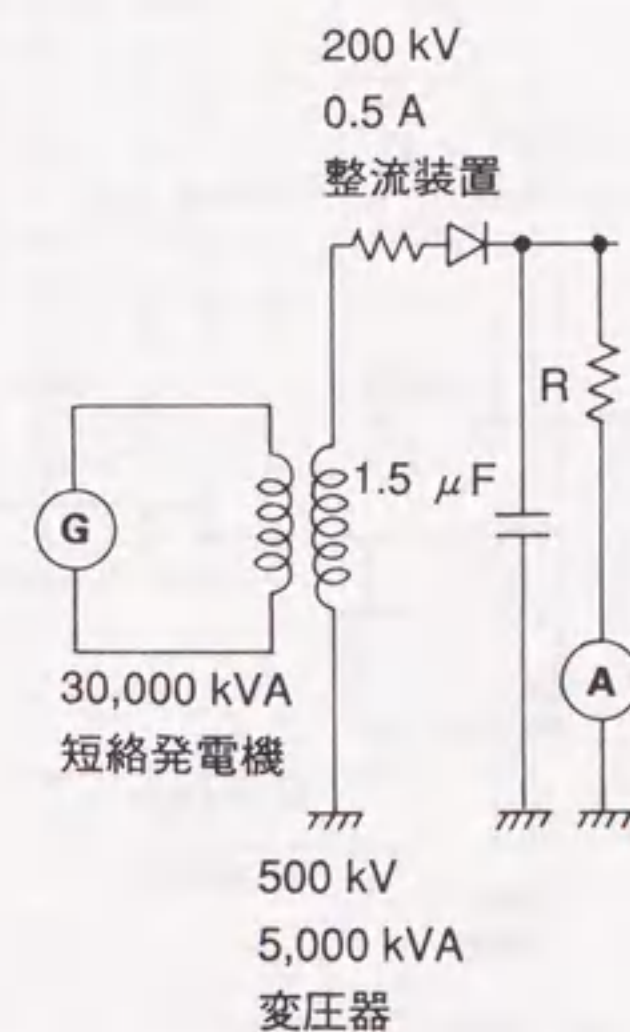
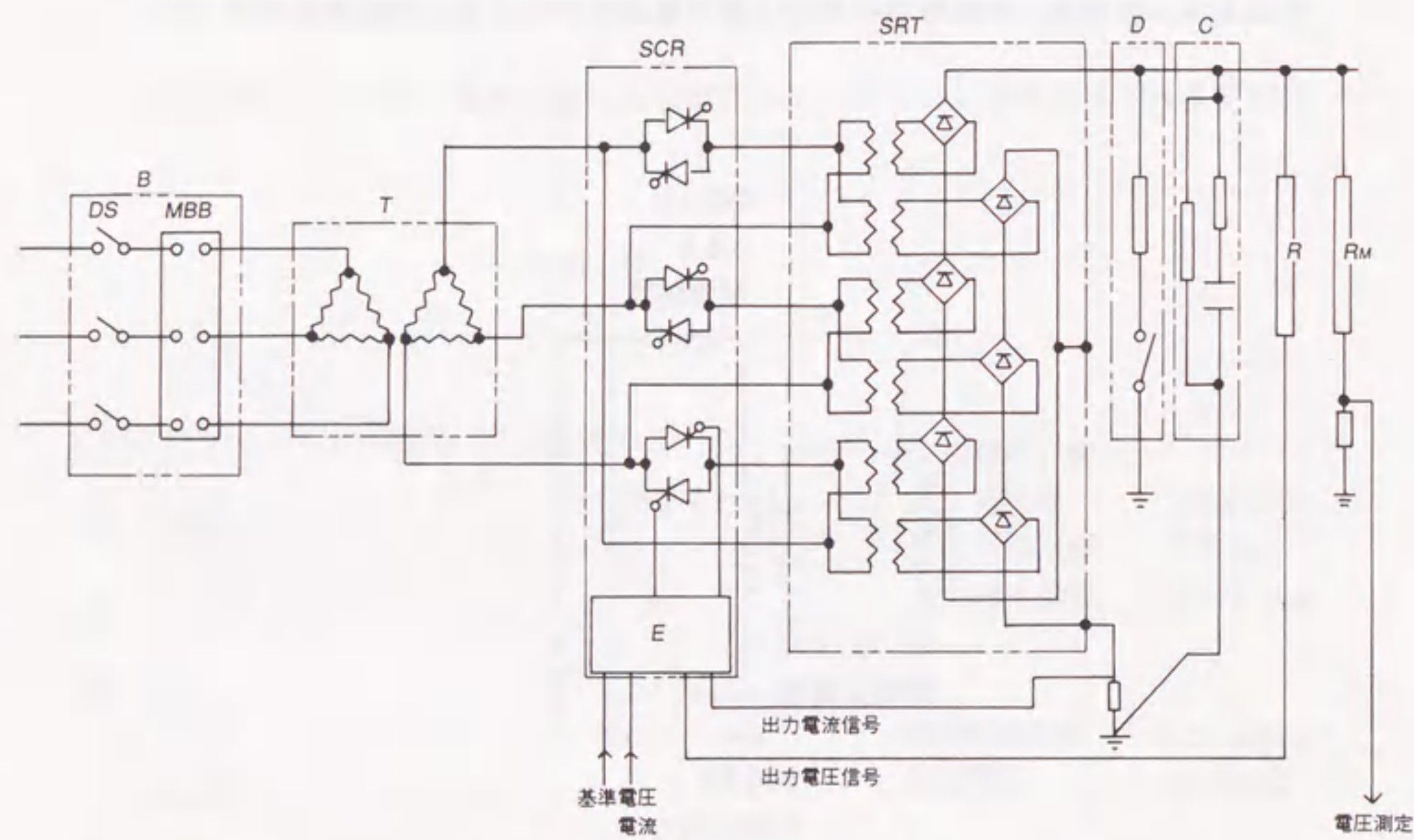


図1.4 200 kV半波整流直流汚損試験電源の回路構成



ないよう、試験電源の増強を図っている。まず、200kV直流汚損試験電源の大容量化のため<sup>(6)</sup>種々の整流方式を検討し、最終的に図1.5と表1.1に示すサイリスタ制御による単相全波整流3相カスケード接続方式を採用している。漏れ電流を模擬するため、二次側に負荷抵抗を挿入し2.5Aの負荷電流を連続して流した場合のオシログラムを2種類の出力電圧に対して図1.6に示す。いずれの場合にもこのように大きな負荷電流を連続して流しても電圧降下は5%以下であることがわかる。

近年、世界各地で±500kV級直流送電線の建設が計画され実施に移されるようになり、国内でも首都圏の大需要地と下北半島、福島県、新潟県の大電源地帯にわたるUHV直流送電が検討されている。このため、±500kV級直流送電用がいし、がいし装置について、実規模での汚損フラッシュオーバ電圧試験の必

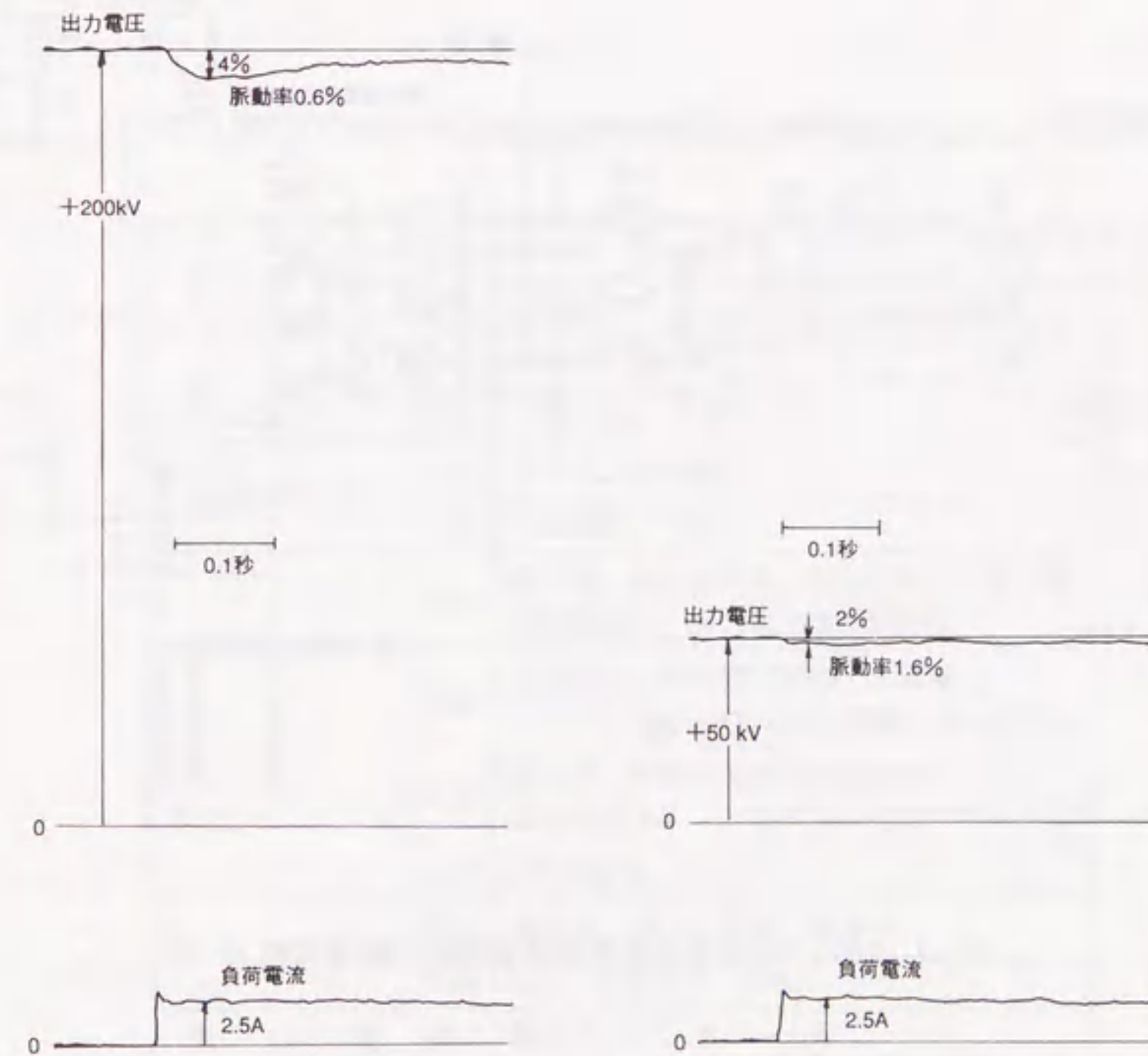


B : 受電盤 T: 変圧器 6600/440V, 320kVA SCR: 制御盤 E: 制御器  
SRT: 直流発生装置200kV, 1A連続, 2.5A 1分 D: 接地装置 C: 出力コンデンサ 6 $\mu$ F/200kV, 24 $\mu$ F/100kV  
R: 電圧変動検出抵抗 250M $\Omega$  RM: 電圧測定抵抗 2000M $\Omega$

図1.5 200kV大容量直流汚損試験電源の回路構成

表1.1 200kV大容量直流汚損試験電源の仕様

|               |  |
|---------------|--|
| 入 力           | 三相, 60Hz, 6.6kV  |
| 出 力           | DC $\pm$ 200kV : 1.0A (連続)<br>: 2.5A (1分)<br>: 20A (0.17秒) |
| 整 流 方 式       | 三相全波整流方式<br>(単相全波整流三相カスケード接続方式)                            |
| 電 圧 制 御 方 式   | サイリスタ制御方式<br>(20kV~200kVの範囲で任意の電圧に設定)                      |
| 出 力 コ ン デ ン サ | 6 $\mu$ F (フルタップ使用時)<br>24 $\mu$ F (中間タップ使用時)              |
| 電 圧 変 動 率     | 出力電圧 $\pm$ 50kV~ $\pm$ 200kVにおいて<br>負荷電流2.5A通電時5%以内。       |
| 脈 動 率         | 出力電圧 $\pm$ 50kV~ $\pm$ 200kVにおいて<br>無負荷時~2.5A通電時2%以内。      |



(a) 出力電圧 +200kV

(b) 出力電圧 +50kV

図1.6 200kV大容量直流汚損試験電源の電圧降下特性の測定例



要性が生じている。このような動きに合わせて、日本ガイシ(株)では、± 750kV 直流汚損試験電源を新設している。前述の± 200kV直流汚損試験電源が、期待通りの優れた性能を発揮していることを踏まえて、図1.7、表1.2、表1.3 に示すように、単相全波整流3相カスケード接続方式を採用した<sup>(1)</sup>。本設備についても、±200～±750kVにおいて、漏れ電流 2.5A時の電圧降下は5%以下である。

第2章から第4章の研究には、この± 200kV, 1.0A(連続) および± 750kV, 1.0A(連続)の出力を得る大容量直流汚損試験電源を用いている。

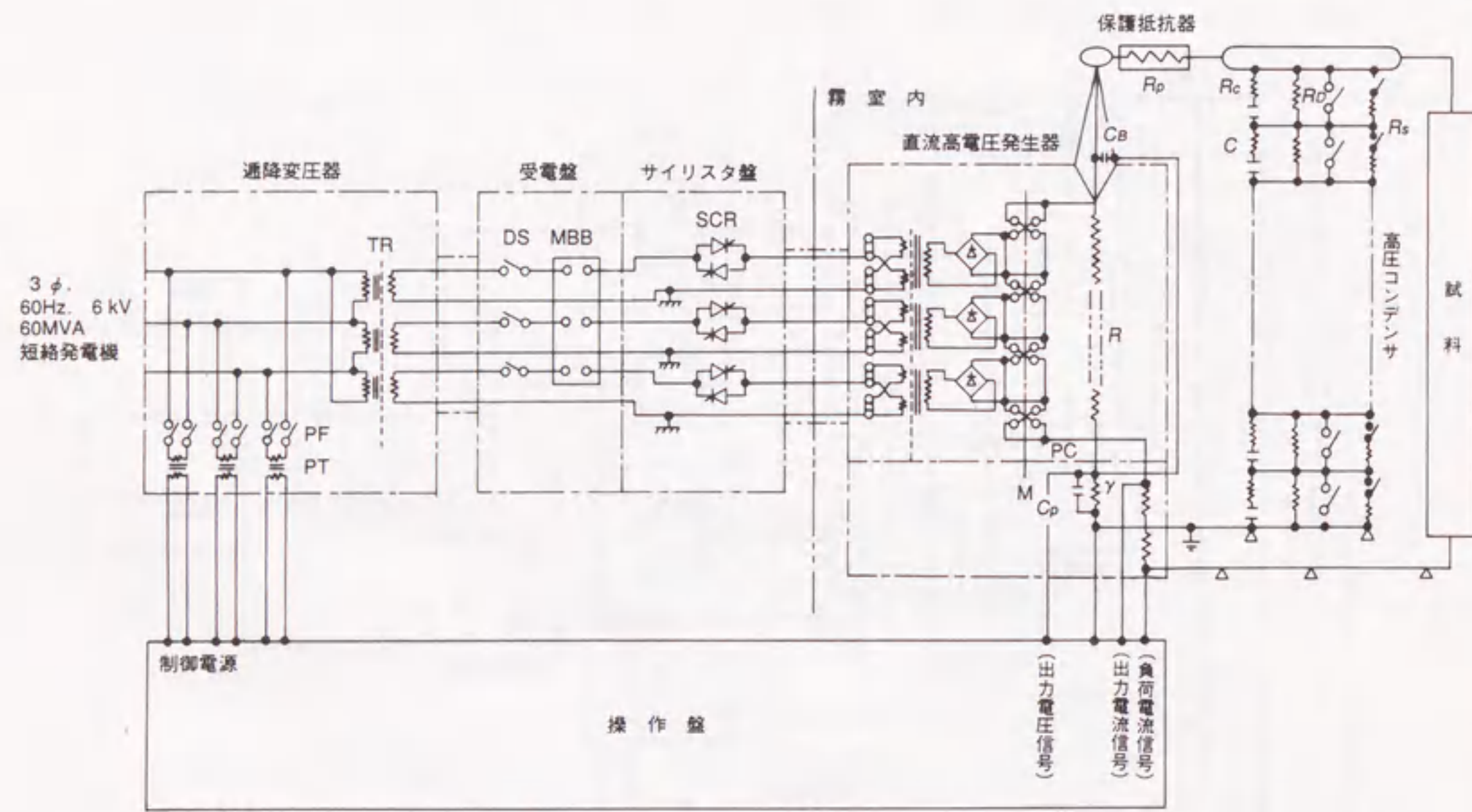


図1.7 750kV大容量直流汚損試験電源の回路構成

表1.2 750kV大容量直流汚損試験電源の仕様

|             |   |
|-------------|---|
| 入 力         | 三相, 60Hz, 6.6kV   |
| 出 力         | DC±800kV : 30mA (30分)<br>DC±750kV : 1.0A (連続)<br>: 2.5A (1分)<br>: 15A (0.17秒) |
| 整 流 方 式     | 三相全波整流方式<br>(単相全波整流三相カスケード接続方式)   |
| 電 圧 制 御 方 式 | サイリスタ制御方式   |
| 電 圧 変 動 率   | 出力電圧±200kV～±750kVの範囲で、<br>負荷電流2.5A時5%以内。                                      |
| 脈 動 率       | 出力電圧±200kV～±750kVの範囲で、<br>負荷電流2.5A時2%以内。                                      |

表1.3 750kV大容量直流汚損試験電源用機器の定格

|                 |    |  |
|-----------------|----|--|
| 通 降 変 圧 器       | 形式 | 屋外用, 油入自冷式, Δ/人  |
|                 | 定格 | 三相60Hz, 6kV/1.3kV, 1,200kVA  |
| 受 電 盤           | 形式 | 屋外用, 閉鎖盤   |
|                 | 定格 | 三相60Hz, 1.3kV  |
| サイリスタ盤          | 形式 | 屋外用, 閉鎖盤   |
|                 | 定格 | 三相60Hz, 750V   |
| 直 流 高 電 圧 発 生 器 | 形式 | 屋外用, 油入自冷式, 無電圧時出力電圧極性切換器付, 出力電圧測定装置付                                  |
|                 | 定格 | 三相60Hz, 750V/DC 750kV-1A(連続)<br>2.5A(1分)15A(10分以内), DC 800kV-30mA(30分) |
| 高 圧 コ ン デ ン サ   | 形式 | 屋外用, 移動式絶縁架台搭載形,<br>放電スイッチ・コンデンサ短絡スイッチ付                                |
|                 | 定格 | DC 750kV, 1.5μF  |
| 保 護 抵 抗 器       | 形式 | 屋外用, 油入自冷式, 懸垂形  |
|                 | 定格 | Imp. 1,000kV, 1.5kΩ  |
| 操 作 盤           | 形式 | 屋内用, デスクボード形   |



### 1.5 がいしの直流汚損に関する国際的な研究の動向

以上のように、汚損がいしの直流フラッシュオーバ電圧特性に関する研究は各所で行われてきたが、まだ未解明の点も多い。最近、著者もメンバーの一員である CIGRE (国際大電力システム会議) のがいし汚損に関する作業会で、がいしの直流人工汚損試験についての現状を取りまとめている。その結果は CIGRE の機関誌である ELECTRA に掲載されたが、以下の課題を今後の研究に待っている<sup>(8)</sup>。

- (1) 汚損物のがいし表面への付着に及ぼす印加電圧の影響
- (2) 汚損がいしのフラッシュオーバ電圧に及ぼす印加電圧の極性の影響
- (3) 汚損がいしのフラッシュオーバ電圧に及ぼすがいしの平均直径の影響
- (4) 汚損がいしのフラッシュオーバ電圧に及ぼすがいし表面の初期電圧分布とキャパシタンスの影響
- (5) がいしの人工汚損フラッシュオーバ電圧に及ぼす不溶性物質の種類の影響
- (6) がいしの人工汚損フラッシュオーバ電圧に及ぼすがいし表面の洗浄、コンデューショニングの影響
- (7) 汚損がいしのフラッシュオーバ電圧に及ぼすがいし表面の不平等汚損付着の影響
- (8) 汚損がいしのフラッシュオーバ電圧に及ぼす周囲温度や空気密度の影響

これらの課題を究明するため、CIGRE と IEEE (米国電気電子学会) のがいし汚損に関する作業会は、持ち廻りテストを共同で計画している<sup>(9) (10)</sup>。現在、著者の所属する研究所を含め世界の代表的な研究所が、この計画に基づいて、がいしの直流人工汚損試験を実施している。IEC のがいしの試験法に関する分科会では、未だ上述のように種々の課題はあるが、がいしの直流人工汚損試験法について、現時点での標準試験法を規定すべく努力が続けられている<sup>(11)</sup>。

### 1.6 本研究の目的

汚損がいしの直流絶縁特性については各所でフラッシュオーバ電圧特性が研究され、直流汚損フラッシュオーバ電圧特性に優れた笠形状が開発されてきた。その結果、実際の直流送電系統における直流課電がいしの汚損に起因するフラッシュオーバ問題はひととおり解決している。

しかしながら、直流課電がいしの汚損湿潤時の絶縁特性については、未だ解決されていない種々の課題がある。そこで本論文では、直流送電用がいしの汚損設計の合理化を目的とし、また雑音障害に対する適切な防止技術を確立するため、以下の問題を取り上げている。

直流特有の現象として、がいし連の中の 1~2 個のがいしのみがフラッシュオーバを繰り返す「部分フラッシュオーバ」現象が見出されている。とりわけ、直流送電線でがいしが汚損湿潤状態にあって電圧を突然印加する場合にこの現象は発生し易い。このような電圧印加をコールドウェットスイッチオンといっている。そのような条件下での部分フラッシュオーバについて研究した。

また、交直変換所では、直流側壁貫ブッシングにおけるフラッシュオーバの発生頻度が他の部位のがいしに比べて高いという異常現象があり、この解明に取り組んでいる。がいしの汚損フラッシュオーバ電圧特性の中でも、円筒状がいしの汚損特性に及ぼす胴径 (笠のない部分の直径を示す) の影響ははっきりとは把握されていない。円筒状がいしは変電所あるいは変換所で数多く使われており、この基本特性を明確にすることは重要である。

上述の絶縁特性とは別に、直流課電がいしが汚損湿潤して沿面で局部火花放電が起きるような場合には、可聴雑音、ラジオ雑音およびテレビ雑音を生ずる可能性があり、その実態について解明している。



## 1.7 本研究の内容

本論文は6章からなり、第2章以降の内容は以下の通りである。

第2章は、直流がいし特有の現象である「部分フラッシュオーバー」について、コールドウェットスイッチオンの条件におけるその発生確率と防止技術に関するものである<sup>(12)</sup>。直流の場合には、がいし連の電圧分布は主としてがいし表面の抵抗の分布によって決まる。がいし表面の湿潤の不均等が原因で、場合によってはがいし連全体に印加されている電圧の大部分ががいし連中の1~2個のがいしに集中することがある。そのような場合に、1~2個のがいしのみがフラッシュオーバーを繰り返し発生し、高い可聴雑音などを発生する。

すでに、部分フラッシュオーバーの実験室での再現に成功し、連続課電時の各種がいしの部分フラッシュオーバーの発生確率、部分フラッシュオーバー発生時の各種雑音特性、などについて研究がなされている<sup>(13)~(16)</sup>。その結果、笠径が大きく乾燥時の直流フラッシュオーバー電圧の高いがいしは、部分フラッシュオーバーの発生確率が低くなることが確認されている<sup>(15) (16)</sup>。

実験室での成果を踏まえ、笠径の大きいがいしを北海道一本州直流幹線の一部で試験的に用いてみた。しかし、笠径の小さいがいしと比べ、部分フラッシュオーバーの発生を防止する顕著な効果は認められなかった。実験室での再現試験結果と実際の送電線での実績とが異なる原因を検討した。その結果、北海道一本州直流幹線は当時毎日課電が停止されており、部分フラッシュオーバーは再課電直後の早朝に主として発生していることがわかった。このため、ここでは無課電時にがいし表面が湿潤した後課電される過程、すなわち「コールドウェットスイッチオン」の条件下の、部分フラッシュオーバー特性を研究対象に取り上げている。

一連の研究の結果、次のような成果を得ている。

(1) 連続課電条件下に比べ、コールドウェットスイッチオン条件下の方が部分

フラッシュオーバーは発生し易い。このことが実験室においても確実に再現、確認できている。

(2) 部分フラッシュオーバーの発生を防止するには、シリコングリースやRTV (Room Temperature Vulcanizedの略) シリコンゴムを表面に塗布したがいしを、がいし連の中に何個か入れれば防止できる。

(3) その挿入個数は、シリコングリースなどで表面処理したがいし1個当たりの霧中における耐電圧と挿入個数の積が、がいし連全体の印加電圧以上となるようにすればよい。

第3章は、世界各地の交直変換所で多発している直流側壁貫ブッシングのフラッシュオーバーの原因と防止技術について述べている<sup>(17)~(19)</sup>。

交直変換所では種々のがいしが使われているが、各地の変換所で直流側壁貫ブッシングでフラッシュオーバーが多発している<sup>(20)</sup>。この原因としてまず、壁貫ブッシングは、通常他のがいしに比べ表面漏れ距離など汚損設計は同等以上であるのにフラッシュオーバーし易いのは、水平取り付けが原因ではないかと推定される。大部分のがいしは垂直配置で使われるので、通常、がいしの汚損特性は垂直配置で試験されその結果に基づいてがいしの汚損設計は決められている。このため、まず、がいしが水平配置と垂直配置で直流汚損フラッシュオーバー電圧に差異があるか否かの研究から開始している。その結果、水平配置の場合には垂直配置の場合に比べ特定の笠形状のがいしで汚損フラッシュオーバー電圧が5%程度低下することが判明した。しかし、フラッシュオーバー時に測定した汚損度や同じ変換所で使われている他のがいしの汚損設計との比較から、壁貫ブッシングのフラッシュオーバー多発の原因を汚損のみに帰することはできないことがわかった。

長尺がいしの交流汚損フラッシュオーバー電圧が、不均等湿潤が原因で均等湿潤時のフラッシュオーバー電圧を大幅に下廻ることがある。事故実績では、直流側壁



貫ブッシングのフラッシュオーバー事故は降雨時、特に降り始めに多発している。壁貫ブッシングは一般に建物の壁面に水平に近い状態で取り付けられている。降雨時、特に降り始めには建物によって遮蔽され、ブッシングの壁面に近い部分は湿潤しにくく、ブッシングは長さ方向に不均等湿潤状態になる。このような観点から模擬実験を重ね、比較的清浄な壁貫ブッシングの場合にも、降雨時に基部が比較的湿潤しないような不均等湿潤となり易く、このため大幅にフラッシュオーバー電圧が低下することを明らかにしている。

第4章では、変電所用支持がいし（SPがいし）やがい管など円筒状がいしの汚損特性に及ぼす胴径の影響について解明している<sup>(21)</sup>。

円筒状がいしは笠形状や表面漏れ距離が同じであれば、がいしの胴径が大きくなればなるほど、汚損耐電圧が低くなることは周知の事実である<sup>(22) (23)</sup>。交流の場合の円筒状がいしの胴径と笠形状から決まる平均直径と汚損耐電圧の関係は、IECや電気協同研究の報告書などに示されている<sup>(22) (23)</sup>。ここで、平均直径 $\bar{D}$ の定義はIECの報告書の中で規定されており、(1-1)式の通りである。

$$\bar{D} = \frac{\int_0^{l_1} D(l) dl}{l_1} \quad (1-1)$$

ここで、 $l_1$ はがいしの総漏れ距離、 $D(l)$ はがいしの方の金具端から漏れ距離 $l$ の点におけるがいしの直径である。しかしながら、IECと電気協同研究の報告書に示されている平均直径と交流汚損耐電圧の関係には大きな差が見られる。また、両者共、直流の場合の平均直径と汚損耐電圧の関係については何も示していない。

円筒状がいしの汚損特性については、このほか汚損物の付着特性に及ぼす平均直径の影響がある。同じ環境条件下では、一般に平均直径が大きくなるほど

汚損付着量は低減することが確認されている<sup>(23)</sup>。それにもかかわらず、これまで、円筒状がいしの汚損設計にこの平均直径による汚損付着量低減の効果は反映されていない。

このように、がいしの汚損設計に及ぼす胴径の影響については、未だ十分には研究がなされていないのが現状である。今回、がいし表面への汚損物の付着特性に及ぼす胴径の影響も考慮した円筒状がいしの平均直径と汚損耐電圧特性の関係を直流についても研究し、交流のデータと比較検討を加え設計基準(案)を提案した。

第5章では、汚損湿潤した直流課電がいしの沿面で発生する局部火花放電に起因する可聴雑音、ラジオ雑音、テレビ雑音特性に関する実験的研究について述べている<sup>(24) (25)</sup>。

直流送電線の雑音特性のうち、電線および架線金具と、がいしが清浄な場合の乾燥時および注水時の雑音特性については既に研究がなされている<sup>(26) (31)</sup>。これらについては、いずれも交流の場合よりも雑音のレベルが低く、問題にならないことが確認されている。第2章で紹介した部分フラッシュオーバー発生時も含め、汚損湿潤した直流課電がいしの沿面放電に基づく各種雑音が環境問題となることが懸念される。交流の場合にも、汚損条件が厳しく、ラジオやテレビの信号電界強度の特に弱い地域では一部問題となっている。

ここでは±125kV級直流送電用がいし装置を用い、がいしが汚損湿潤した時のがいし装置からのラジオ、テレビ雑音特性および可聴雑音特性について研究を実施している。その結果、部分フラッシュオーバー発生時を除けば、これらの各種雑音レベルはいずれも、交流の場合と同等である。交流の場合には、がいし、電線、架線金具を含む送電線全体からのラジオ、テレビ雑音は、電線からのコロナ雑音特性に左右される。これに対し、直流の場合には、電線のコロナ雑音特性は交流の場合よりも低く、汚損がいしからのラジオ、テレビ雑音が送電線



全体の雑音特性を左右することがわかった。

コールドウェットスイッチオン条件下で、直流課電に特有の部分フラッシュオーバー発生時には、連続課電条件下と同等の高いレベルの可聴雑音を発生する。これは、部分フラッシュオーバーの発生が防止されれば自動的に解決する問題であり、その防止技術を早急に確立する必要がある。

部分フラッシュオーバーのような特殊な現象を技術的に排除することができれば、放送電界強度の特に弱い地域以外では、直流送電の場合にも、汚損がいしの局部火花放電によって発生するラジオ、テレビ雑音は、実用上問題にならないことが確認できた。

第6章は、本研究を総括している。

#### 文 献

- (1) CIGRE SC33 Task Force 33-04-02: " Failure of cap-and-pin insulators subjected to HVDC ", CIGRE WG33.04 Document, No.33-93(WG04)16 IWD, 1993.
- (2) I.Kimoto, T.Fujimura and K.Naito: " Performance of insulators for direct current transmission line under polluted condition ", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-92, pp.943~949, 1973.
- (3) K.Naito, S.Kunieda, Y.Hasegawa and S.Ito: " DC contamination performance of station insulators ", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 23., pp.1015~1023, 1988.
- (4) IEC Pub. 60-2: " High voltage test techniques Part 2 : Test procedures ", 1973.

- (5) K.Naito, R.Matsuoka, S.Ito and S.Morikawa: " Voltage source requirement for DC pollution tests ", CIGRE SC33 Colloquium, No.33-87 (Coll.)15.01 IWD, 1987.
- (6) 内藤, 入江, 坂西: 「200kV大容量直流汚損試験設備」, NGK レビュー, No.39, pp.21~31, May, 1978.
- (7) 内藤, 川口, 伊藤: 「750kV直流汚損試験設備」, NGK レビュー, No.44 pp.1~9, Oct., 1983.
- (8) CIGRE Task Force 04.04 of Study Committee 33: " Artificial pollution testing of HVDC insulators: analysis of factors influencing performance ", ELECTRA, No.140, pp.99~113, Feb., 1992.
- (9) H.M.Schneider: " Specifications for a comparative evaluation of the clean fog test for HVDC insulators ", CIGRE WG33.04 document, No. 33-90(WG04)21 IWD, 1990.
- (10) P.J.Lambeth: " Specifications for comparative evaluation of the salt fog test and fast methods for HVDC insulators ", CIGRE WG33.04 document, No.33-88(WG04)13 IWD, 1988.
- (11) IEC TC36: " Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on DC systems ", IEC Committee Draft 36 (Secretariat) 75, May, 1992.
- (12) 松岡, 伊藤, 坂西: 「直流課電がいし連の部分フラッシュオーバーに関する研究」, 電気学会論文誌B, Vol. 112-B, pp.36~41, Jan., 1992.
- (13) 福島, 須永: 「直流送電線の雑音と騒音(第3報), がいし連の部分せん絡による騒音と雑音の実験的検討」, 電中研技術第1研究所報告, 73075, 昭和49年。
- (14) 福島: 「送電線のコロナ騒音」, 電中研総合報告: T01, 昭和61年。



- (15) M. Yasui, Y. Takahashi, A. Takenaka, K. Naito, Y. Hasegawa and K. Kato :  
" RI, TVI and AN characteristics of HVDC insulator assemblies  
under contaminated condition ", IEEE Trans. on Power Delivery,  
Vol. 3, pp. 1913~1921, 1988.
- (16) 内藤, 長谷川, 加藤, 小川: 「直流がいし装置の汚損湿潤時のRI, TVI  
およびAN特性」, NGKレビュー, No. 48, pp. 1~9, Aug., 1988.
- (17) K. Naito, R. Matsuoka, S. Ito, and S. Morikawa: " An investigation  
of the horizontally mounted insulators for HVDC stations ", IEEE  
Trans. on Power Delivery, Vol. 4, pp. 653~666, Jan., 1989.
- (18) 内藤, 松岡, 伊藤, 森川: 「壁貫ブッシングの直流注水耐電圧特性」,  
電気学会高電圧研究会資料, No. HV-88-6, pp. 47~53, 昭和63年2月。
- (19) 松岡, 伊藤, 森川: 「交直変換所における壁貫ブッシングのフラッシュオ  
ーバに関する研究」, NGKレビュー, No. 50, pp. 29~36, May, 1990.
- (20) H. M. Schneider: " Behaviour of HVDC wall bushing in different  
wetting conditions ", CIGRE SC 14 コロキウム論文, VII-04, 1989.
- (21) R. Matsuoka, S. Ito, K. Sakanishi and K. Naito: " Flashover on  
contaminated insulators with different diameters ", IEEE Trans. on  
Electrical Insulation, Vol. 26, pp. 1140~1146, Dec., 1991.
- (22) IEC Publication 815: " Guide for the selection of insulators in  
respect of polluted conditions ", 1986.
- (23) 電気協同研究会変電設備耐塩設計専門委員会: 「変電設備の耐塩設計」,  
電気協同研究, 第35巻第3号, 昭和54年9月。
- (24) 松岡, 長坂, 坂西: 「直流送電用がいし装置の汚損湿潤時における各種  
コロナ雑音特性」, 電気学会論文誌B, Vol. 101-B, pp. 595~602, Oct.,  
1981.

- (25) T. Fujimura, K. Naito, R. Matsuoka and Y. Suzuki: " A laboratory  
study on RI, TVI and AN of insulator strings for DC transmission  
line under contaminated condition ", IEEE Trans. on Power  
Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, pp. 815~824, April, 1982.
- (26) 内藤, 坂西, 藤田: 「がいしおよび電線の直流注水コロナ特性」, 昭和  
47年電気四学会東海支部連合大会講演論文集, No. 18P-D-11, 昭和47年。
- (27) 峰村, 磯, 内藤, 藤田: 「がいし装置および電線の直流コロナ雑音特性」,  
昭和52年電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, No. 161, 昭和52年。
- (28) B. M. Bailey: " Progress report on BPA HVDC test line, radio noise  
and corona loss ", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems,  
Vol. PAS-86, pp. 1141~1145, 1967.
- (29) N. Knudsen, H. Bergqvist and P. Forsgren: " Results from 3-year  
operation of the HVDC-test station in Anneberg ", CIGRE Paper,  
No. 31-04, 1970.
- (30) G. C. Kakoti, M. Phil, B. Salvage and R. B. Turner: " Radio  
interference from high voltage insulator under direct voltage  
condition ", Proc. IEE, Vol. 116, pp. 415~421, 1969.
- (31) W. Mosca, P. Ostano and G. Rumi: " HVDC visual corona and RIV  
testing on insulators and conductor samples ", IEEE Trans. on  
Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, pp. 138~145, 1971.



## 第2章 汚損湿潤がいし装置の 部分フラッシュオーバー現象

### 2.1 まえがき

直流課電がいし装置においては、がいし連の中の1～2個のがいしのみが青白く電離した放電チャンネルによって繰り返し橋絡される「部分フラッシュオーバー」が発生する場合がある<sup>(1)～(5)</sup>。この現象は汚損湿潤の不均等、特に湿潤の極度の不均等が原因で発生し、大きな放電音を伴う。部分フラッシュオーバー発生時の可聴雑音(騒音)は、がいし装置が汚損湿潤した時通常観測される乾燥帯での局部火花放電発生時に比べレベルが非常に高く伝搬範囲も広い。このため、場合によっては送電線路沿の住民に対し騒音や電波障害が問題となる恐れもある。

部分フラッシュオーバー現象は、1971年(財)電力中央研究所(以下「電中研」と略す)塩原実験場の500kV直流送電実験線において初めて観測された。その際、清浄がいしや自然汚損がいしは勿論、人工汚損がいしも含め、霧などの自然湿潤条件下で種々部分フラッシュオーバーについて基礎研究が行われた<sup>(1)</sup>。その後部分フラッシュオーバー現象を体系的に評価するため、長年にわたって実験室内で部分フラッシュオーバー現象を再現するための努力が払われてきた。その結果、がいし連が通常の人工汚損試験の場合より薄い霧に包まれる場合にがいし連に沿って湿潤の不均等が生じ易いことがわかった。このような薄い霧のもとで部分フラッシュオーバー現象を実験室内でも再現できることが確実になってきた<sup>(3) (4)</sup>。そして、実験室内で人工汚損がいしを用いて部分フラッシュオーバーの研究が種々実施された。その結果、清浄乾燥時の直流フラッシュオーバー電圧の高い大型がいしが、部分フラッシュオーバーの発生確率を低く抑えるのに有効であるという傾向



が認められた<sup>(3) (4)</sup>。

そのような実験室での成果を踏まえ、笠径の大きいがいしが北海道-本州直流幹線の一部で試験的に用いられた。しかし、意外にも、実線路では部分フラッシュオーバーの発生を防止する顕著な効果は認められなかった。実験室での再現試験結果と実フィールドでの実績が異なる原因を検討した。その結果、北海道-本州直流幹線は当時毎日課電が停止されており、部分フラッシュオーバーは再課電直後の早朝に主として発生することがわかった。これまでの部分フラッシュオーバーに関する研究は、がいしが連続して課電されている状態で湿潤の不均等を生じ、部分フラッシュオーバーが発生する場合に限られていた。このため、ここでは無課電時に汚損がいし表面が湿潤した状態にある時課電される過程、すなわち「コールドウェットスイッチオン」の条件下の部分フラッシュオーバー特性を研究することとした。

## 2.2 部分フラッシュオーバー現象

部分フラッシュオーバー現象は、がいし連の中の1~2個のがいしの分担電圧ががいし単体のフラッシュオーバー電圧を上廻るために発生すると考えられる。その発生過程は以下のように考えられる。

- (1) がいし連が霧や小雨などにより湿潤する。がいし表面の汚損度あるいは湿潤の度合いの不均等が原因で個々のがいしの表面抵抗にバラツキを生ずる。
- (2) がいし連の表面が汚損され湿潤すると、がいし表面を漏れ電流が流れる。

この漏れ電流によってがいし表面にはジュール熱が発生する。漏れ電流はがいし連に沿って流れるので、がいし表面の任意の円周上を流れる電流の和はどのがいしのどの部分でも同じである。したがって各がいしで発生するジュール熱は表面抵抗の高いがいしほど大きくなる。

(3) このような過程を通じて、表面抵抗の大きいがいしほどジュール熱によるがいし表面の乾燥が著しく、個々のがいしの表面抵抗値の差はますます大きくなる。直流電圧課電下のがいし連の電圧分布は、がいし表面湿潤時には表面抵抗値の分布によって決まる。このため、表面抵抗値の大きいがいしの分担電圧は、ますます大きくなる。

(4) 分担電圧ががいし単体のフラッシュオーバー電圧を上廻ると部分フラッシュオーバーが発生する。

交流電圧課電下では部分フラッシュオーバー現象の発生は確認されていない。交流の場合には、特定のがいしの表面抵抗が大きくなっても、がいしの自己静電容量によって、高抵抗がいしへの電圧分担の集中が抑えられる。このため、直流の場合ほど電圧分担の極度の不均等は生じないと考えられる。

## 2.3 供試がいし

供試がいしとして北海道-本州直流幹線や海外の直流送電線で広く用いられている笠径320mmの16.5ト直流がいし(以下320DCと略す)を選んでいる。これと共に、実験室の研究により連続課電条件下で部分フラッシュオーバーの発生確率が320DCよりも低かった笠径460mmの33ト直流がいし(以下460DCと略す)も供試がいしに選んでいる。供試がいしの形状を図2.1(a), (b)に示す。これらの直流用懸垂がいしは、1.2節でも説明したように、隣接するリブ先端間の間隔を拡げるため、リブの長さが交互に長、短となっている。250kV用がいし装置を320DCを用いて構成する場合、設計塩分付着密度 $0.25\text{mg}/\text{cm}^2$ を想定すると連結個数は34個となる。460DCを用いて構成する場合には320DCを用いて構成したがいし連と長さがほぼ同じになる連結個数を選び、この場合29個となる。500kV用がいし装置については、設計塩分付着密度を $0.06\text{mg}/\text{cm}^2$ と想定すれば320DCの



連結個数は46個となる。460DCの場合には、320DCとの1個当たりの汚損耐電圧の関係から33個となる。供試がいし装置はすべて1連懸垂吊とした。ここで述べた懸垂がいし装置の寸法、諸元をまとめて表2.1に示す。

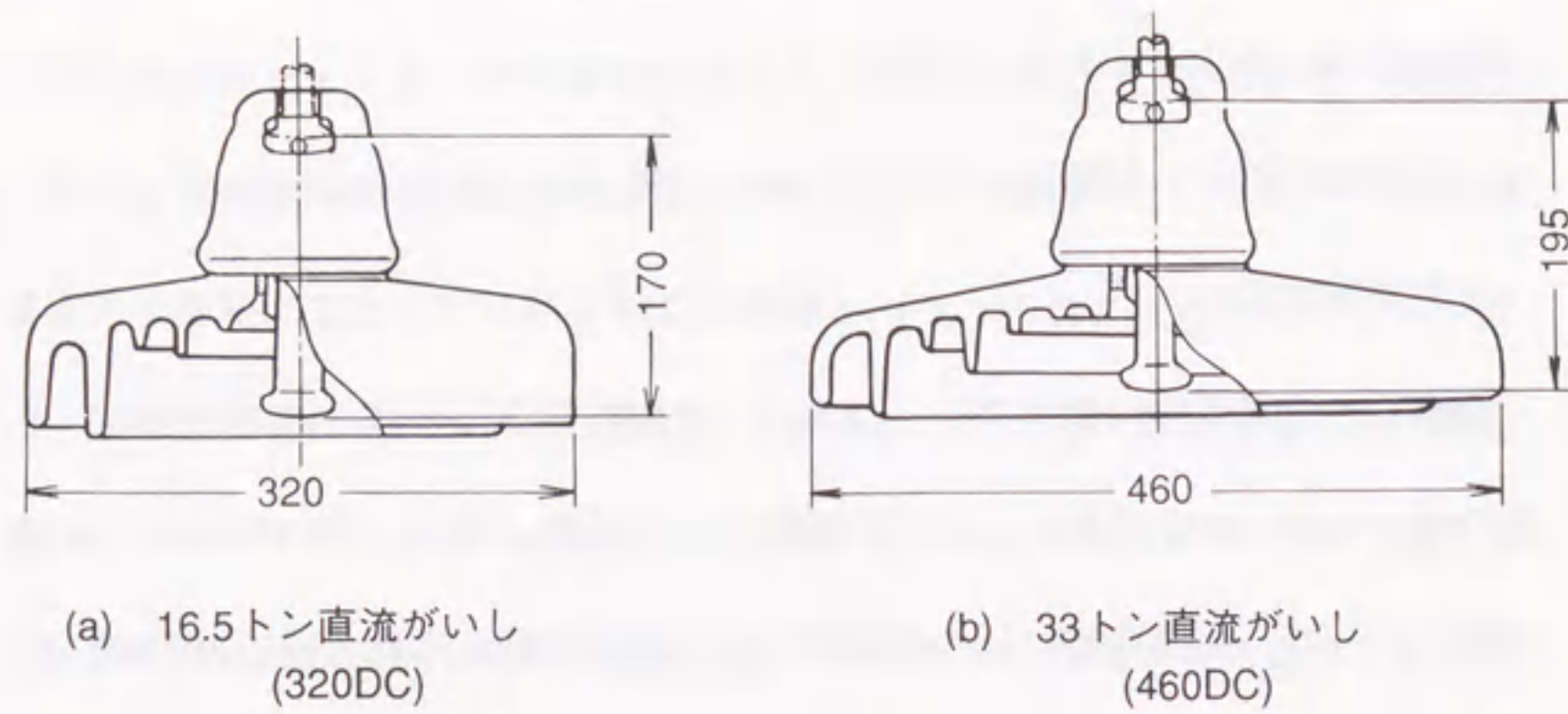


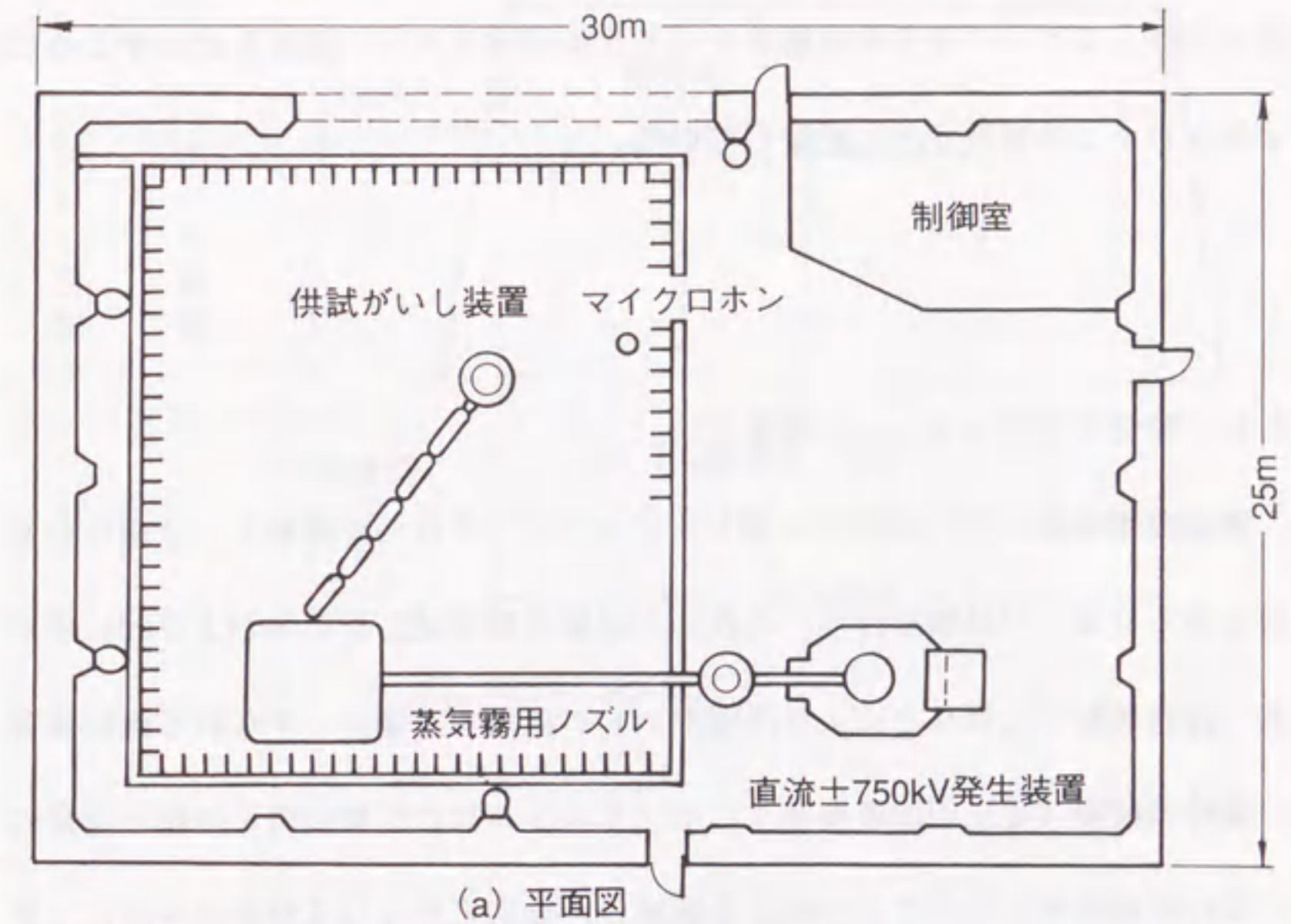
図2.1 供試懸垂がいし

表2.1 供試がいし装置

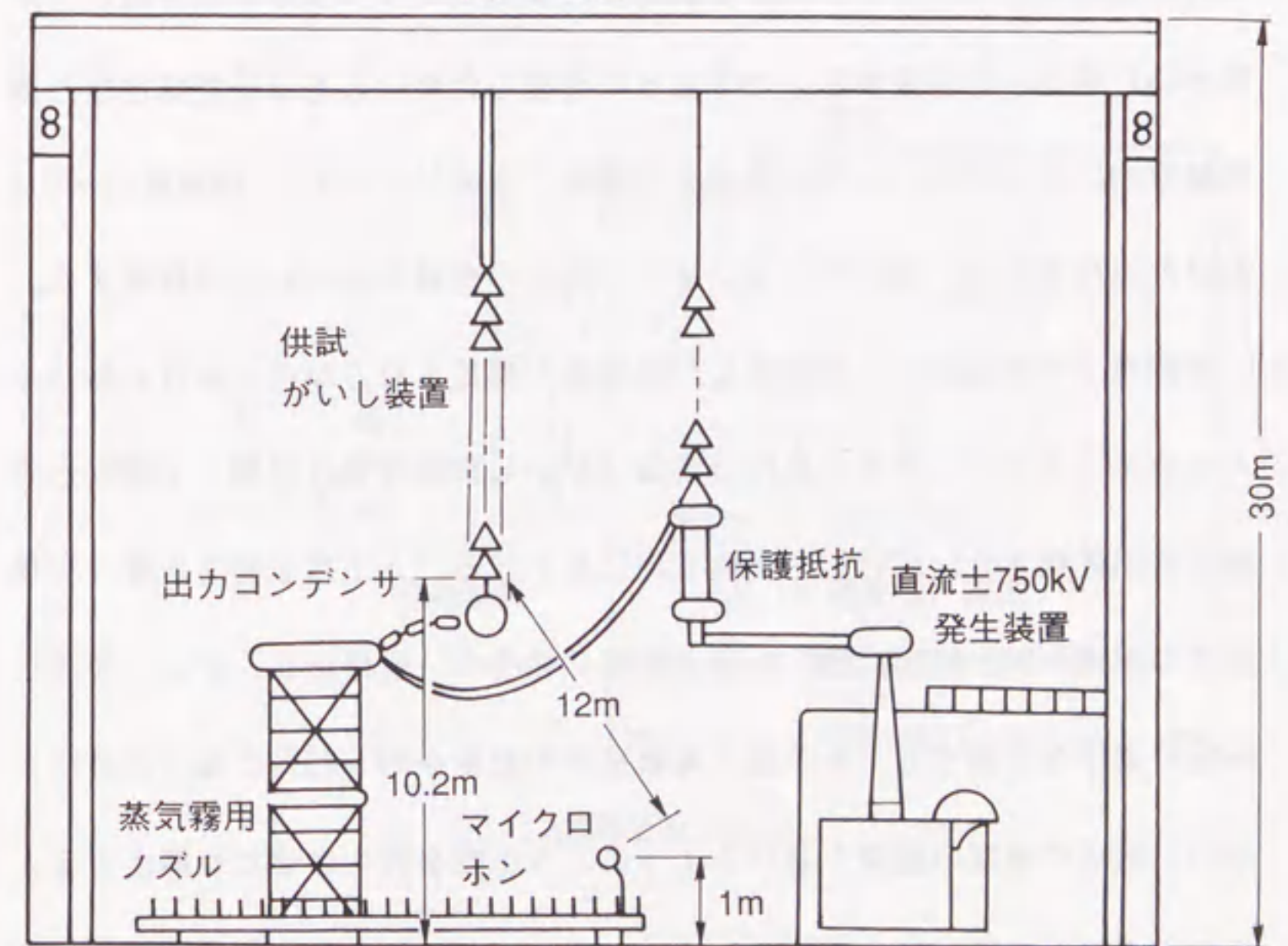
| 適用電圧    | がいし品名              | 連結個数 | 連結長(m) |
|---------|--------------------|------|--------|
| ±250 kV | 320 mm 16.5トン直流がいし | 34   | 5.78   |
|         | 460 mm 33トン直流がいし   | 29   | 5.66   |
| ±500 kV | 320 mm 16.5トン直流がいし | 46   | 7.82   |
|         | 460 mm 33トン直流がいし   | 33   | 6.44   |

#### 2.4 試験配置

供試がいし装置、±750kV大容量直流汚損試験電源、人工霧発生用ノズルなどの配置を平面図と立面図を用い図2.2に示す。±750kV直流汚損試験電源は、表1.2と表1.3に示すものである。実験室は、縦25m、横30m、高さ30mの規模を有し、±500kV級がいし装置の試験においても、壁面など周囲接地物の影



(a) 平面図



(b) 立面図

図2.2 供試がいし装置と試験設備の配置



響が無視できるものである。また、人工霧発生用ノズルは、床面から約50cmの高さで図2.2に示すように水平に配置されており、ボイラーで発生させた蒸気を配管を通して実験室内に噴出させるものである。なお、第5章で報告するが、部分フラッシュオーバー発生時の騒音レベルを測定するため、図2.2に示すように、マイクロホンを実験室内に配置している。

## 2.5 部分フラッシュオーバーの試験方法

連続課電条件とコールドウェットスイッチオン条件とを模擬し、2通りの部分フラッシュオーバー試験を行う。これらの試験手順を図2.3の(a)および(b)に示す。

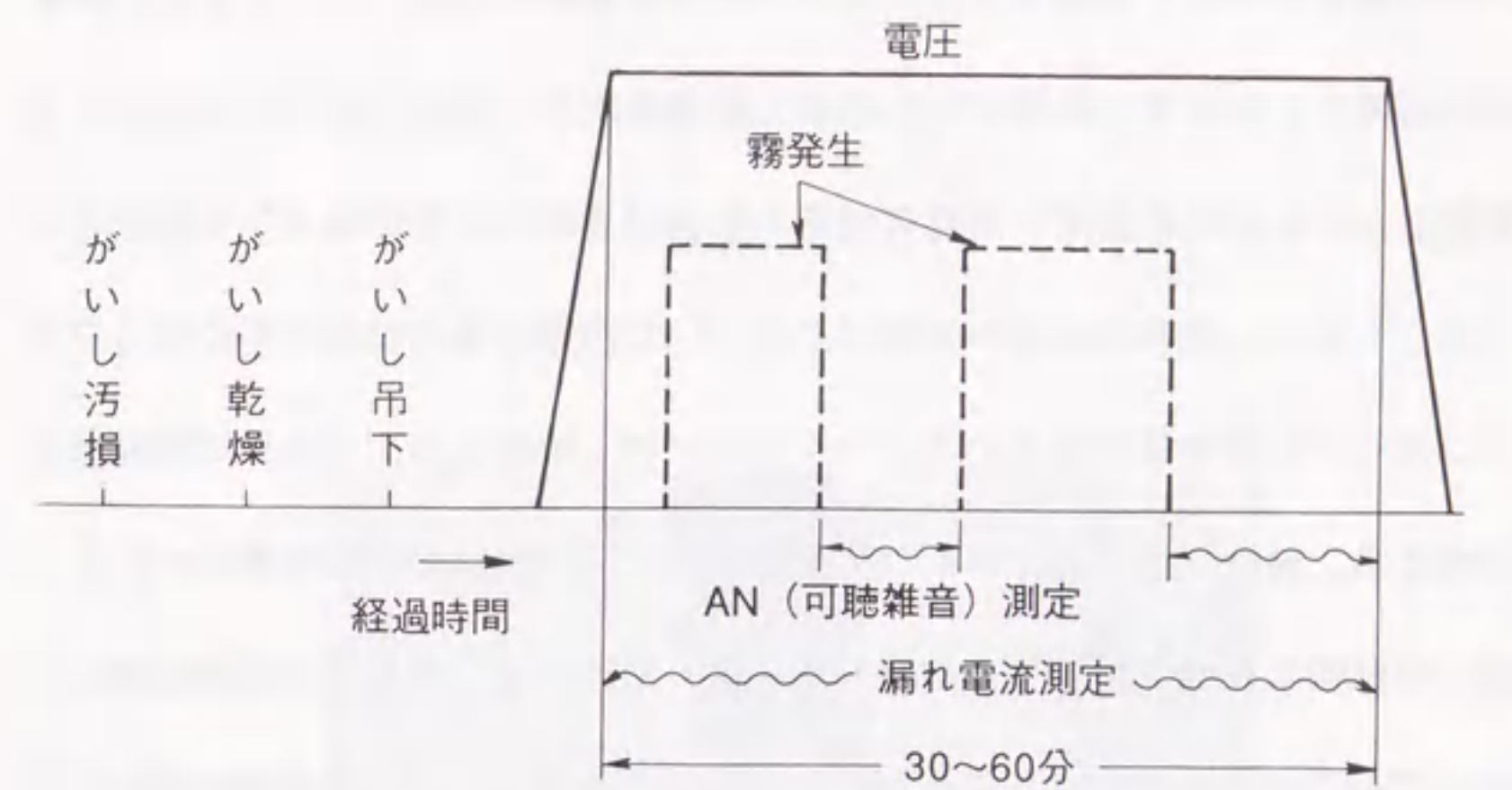
(a) 線路運転中に霧などにより汚損がいしが湿潤する場合、すなわち連続課電

条件の模擬(電圧印加後霧発生):水1リットル当たり40gのとの粉と所定の塩分付着密度となるよう予め量を調整した食塩とからなる懸濁液を用いて供試がいしを均一に汚損する。このように汚損したがいしを充分乾燥させた後実験室内に吊下げる。一定の電圧を印加後、湿度90~100%、霧濃度0~0.4g/m<sup>3</sup>の条件を保ち、部分フラッシュオーバー発生の有無を30~60分間観察する。

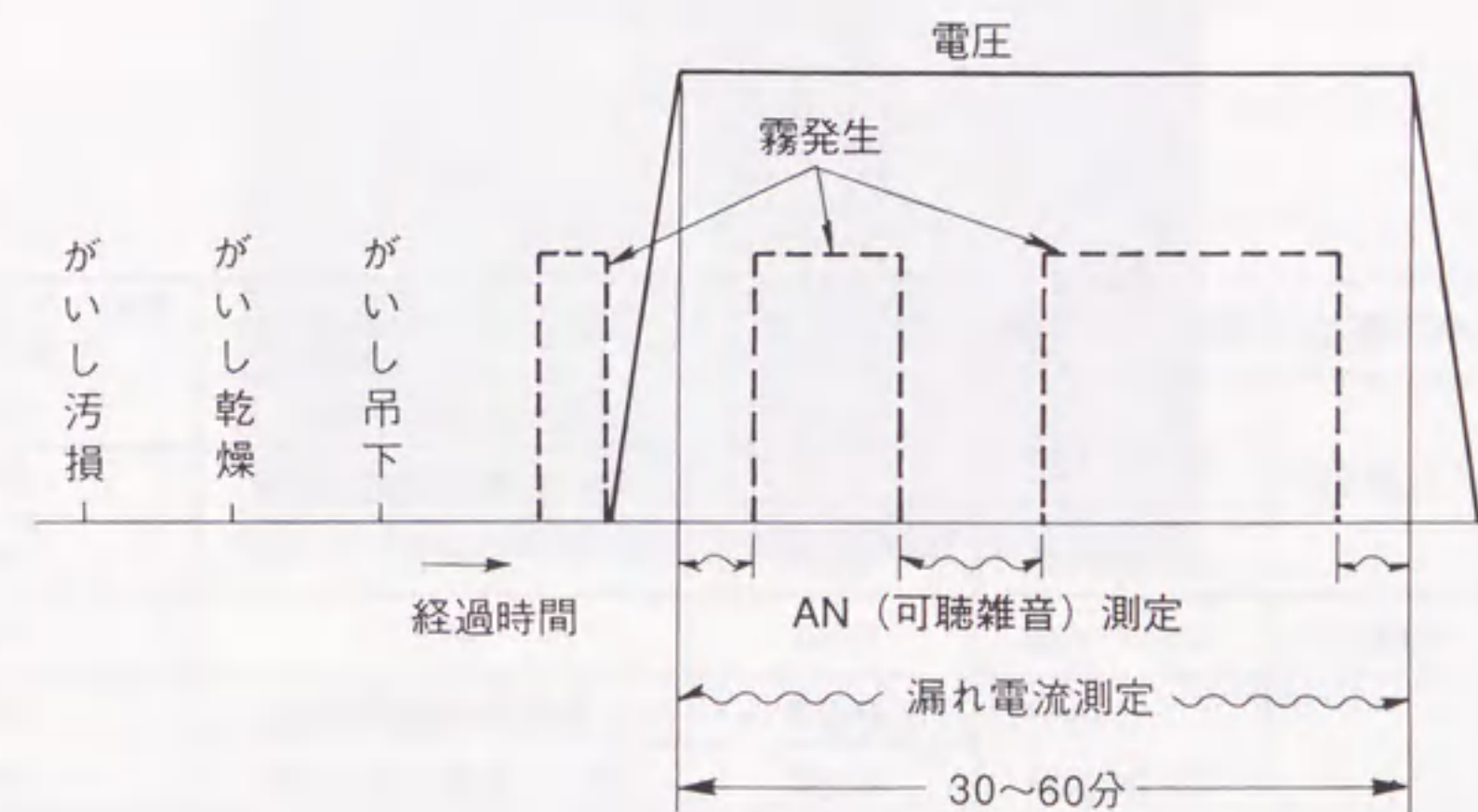
(b) 無課電下で汚損がいしが湿潤した後線路が課電される場合、すなわちコールドウェットスイッチオン条件の模擬(がいし湿潤後電圧印加):上記(a)と同様に汚損乾燥させたがいしを実験室内に吊下げる。人工霧を発生させ、実験

室内の湿度が90~95%に達した時点で霧の発生を一旦停止し、がいし装置に所定の電圧を印加する。その後、実験室内の湿度を90~95%に保つと共に、がいし表面の過度の湿潤を避けるように、人工霧を発生させたり停止する。

このようにして30~60分間部分フラッシュオーバー発生の有無を観察する。試験は、同一供試がいし装置、同一試験条件について、複数回繰り返し部分フラッシュオーバーの発生確率を実験的に求める。



a) 電圧印加後霧発生



b) がいし湿潤後電圧印加

図2.3 部分フラッシュオーバー試験手順



## 2.6 部分フラッシュオーバー試験結果

2.4に示す試験配置で、2.5に示す試験方法に従って、2.3に示す種々の供試がいし装置について部分フラッシュオーバーの発生確率を実験により求めた。試験結果を表2.2に示す。汚損がいしの塩分付着密度は $0.06\text{mg}/\text{cm}^2$ と $0.25\text{mg}/\text{cm}^2$ を意図したにもかかわらず、実際に付着した値は全般的に目標値よりも若干低かった。しかし、それらの値の変動は小さく、中汚損と重汚損条件下の部分フラッシュオーバーの発生確率を求めるといった目的に対してはこのような値で問題ないと考えられる。部分フラッシュオーバーの発生確率は、同一供試がいし装置について、同一の試験条件（印加電圧、塩分付着密度）で繰り返し実施した試験回数に対する部分フラッシュオーバーが発生した試験回数の比率を示す。具体的な部分フラッシュオーバーの発生状況の一例を図2.4に示す。汚損湿潤がいしで通常見られる局部火花放電と異なり、青白く輝度の高い線状の放電が特定のがいしを完全に橋絡する形で繰り返し発生するのが特徴である。

表2.2 部分フラッシュオーバー試験結果

| 試験番号 | 印加電圧    | 供試がいし装置   | 塩分付着密度                        | 湿潤と電圧印加の関係 | 部分フラッシュオーバー発生率 |
|------|---------|-----------|-------------------------------|------------|----------------|
| 1    | -500 kV | 320 DC×46 | 0.054 $\text{mg}/\text{cm}^2$ | 電圧印加後霧発生   | 0/2            |
| 2    |         |           |                               | がいし湿潤後電圧印加 | 5/8            |
| 3    |         | 460 DC×33 | 0.055                         | 同上         | 1/4            |
| 4    | +500 kV | 320 DC×46 | 0.053                         | 同上         | 4/7            |
| 5    | -250 kV | 320 DC×34 | 0.227                         | 電圧印加後霧発生   | 0/4            |
| 6    |         |           | 0.229                         | がいし湿潤後電圧印加 | 0/4            |
| 7    |         |           | 0.058                         | 同上         | 3/5            |
| 8    |         | 460 DC×29 | 0.213                         | 電圧印加後霧発生   | 0/3            |
| 9    |         |           | 0.224                         | がいし湿潤後電圧印加 | 0/3            |
| 10   |         |           | 0.055                         | 同上         | 0/5            |

注) 部分フラッシュオーバーの発生率は、繰り返し試験回数に対する部分フラッシュオーバー発生試験回数の比を示す。

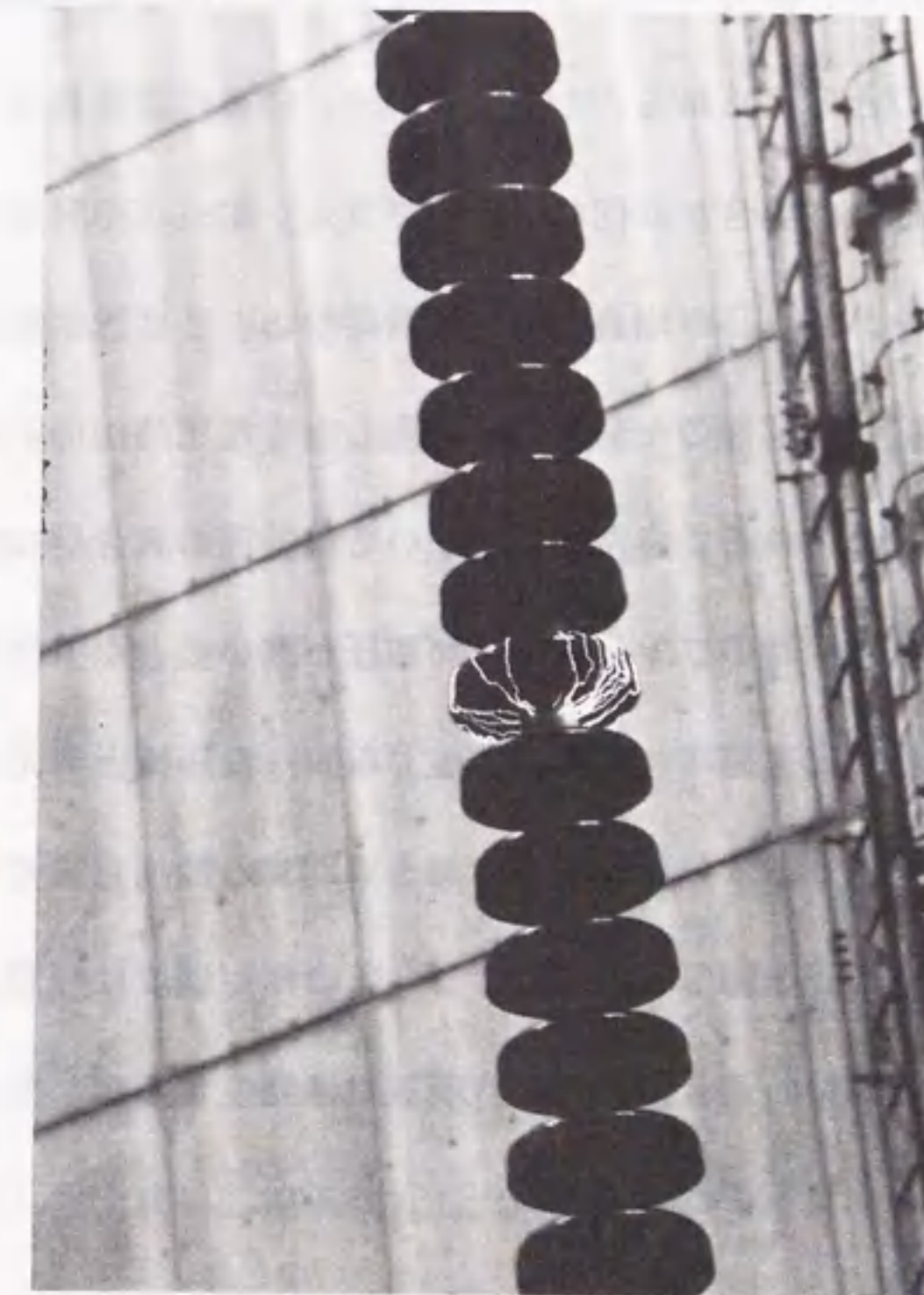


図2.4 部分フラッシュオーバーの発生状況の一例



### 2.6.1 湿潤条件の影響

表2.2の試験番号1と2は塩分付着密度が $0.054\text{mg}/\text{cm}^2$ の中汚損の実験結果である。この両者を比較すると、連続課電下で汚損がいし表面が湿潤する場合よりも、無課電下で湿潤したがいしに電圧を印加する場合の方が部分フラッシュオーバーの発生確率が高い。連続課電条件下では、霧によりがいし表面が湿潤し始めると漏れ電流が流れ、そのジュール熱により湿潤した表面を乾燥させる作用が働く。このため、部分フラッシュオーバーを生ずるのに必要な湿潤度合に容易には達しないものと考えられる。しかしながら、同表の試験番号5と6、ならびに試験番号8と9の場合には何れも部分フラッシュオーバーを発生せず発生確率に差は見られない。これらの場合には、試験番号1、2に比べ塩分付着密度が4倍程度高く、塩の潮解性のため表面が湿潤し易く電圧分担の不均一が生じにくかったためと考えられる。また、供試がいしは笠径の大きい460DCであり、がいし単体の清浄乾燥時のフラッシュオーバー電圧が高いことも、部分フラッシュオーバーを全く発生せず発生確率に有意差を生じなかった一因と考えられる。この種の現象で部分フラッシュオーバー発生の有無を判別する際注意を要するのは、がいし表面が湿潤後電圧を印加する場合、がいし表面が過度に湿潤していると、電圧を印加した時がいし連全体に局部火花放電は発生するが、部分フラッシュオーバーは発生しにくくなることである。

### 2.6.2 印加電圧の影響

部分フラッシュオーバーの発生に及ぼす印加電圧の極性の影響については、表2.2の試験番号2と4に示すように、正極性と負極性で差は見られなかった。

次に、がいし連全体に印加される電圧値の部分フラッシュオーバーの発生に及ぼす影響については、表2.2より一般的には、印加電圧500kVの場合の方が250kVの場合より発生確率は高いように見える。しかし、塩分付着密度が $0.054 \sim$

$0.058\text{mg}/\text{cm}^2$ の場合、表2.2の試験番号2と7に示すように、がいし1個当たりの平均分担電圧は-250kVの方が-500kVの場合よりも約30%低いにもかかわらず、部分フラッシュオーバーの発生確率に差は見られない。なお、人工汚損がいしの自然湿潤条件下での試験では、がいし連全体に印加される電圧が高いほど部分フラッシュオーバーは発生し易いと報告されている<sup>(2)</sup>。部分フラッシュオーバーの発生原因が、分担電圧の極度の不均等によることを考えると、がいし連全体への印加電圧が高い程発生し易くなると考えられる。

### 2.6.3 がいし形状の影響

表2.2の試験番号2と3の結果より、コールドウェットスイッチオン模擬の条件においても、460DCの方が320DCよりも部分フラッシュオーバーの発生確率は低くなる傾向が見られる。乾燥がいし単体の直流フラッシュオーバー電圧と、そのがいしを用いてがいし連を構成した時のコールドウェットスイッチオン条件下の部分フラッシュオーバーの発生確率との関係を図2.5に実線(黒丸印および黒三角印)で示す。図2.5にはこれまでに報告されている電圧印加後霧を発生させた場合の部分フラッシュオーバーの発生確率についての試験結果も破線(白丸印)で記した<sup>(3)</sup>。この図より、がいし単体の乾燥条件下の直流フラッシュオーバー電圧の高いがいし程、がいし連を構成した時の部分フラッシュオーバーの発生確率は低くなるのがわかる。なお、部分フラッシュオーバーを発生するがいしは、必ずしも完全に乾燥しているわけではない。したがって、部分フラッシュオーバーを発生するがいしの分担電圧値はそのがいしの清浄乾燥時の直流フラッシュオーバー電圧値と必ずしも同等であるとはいえない。



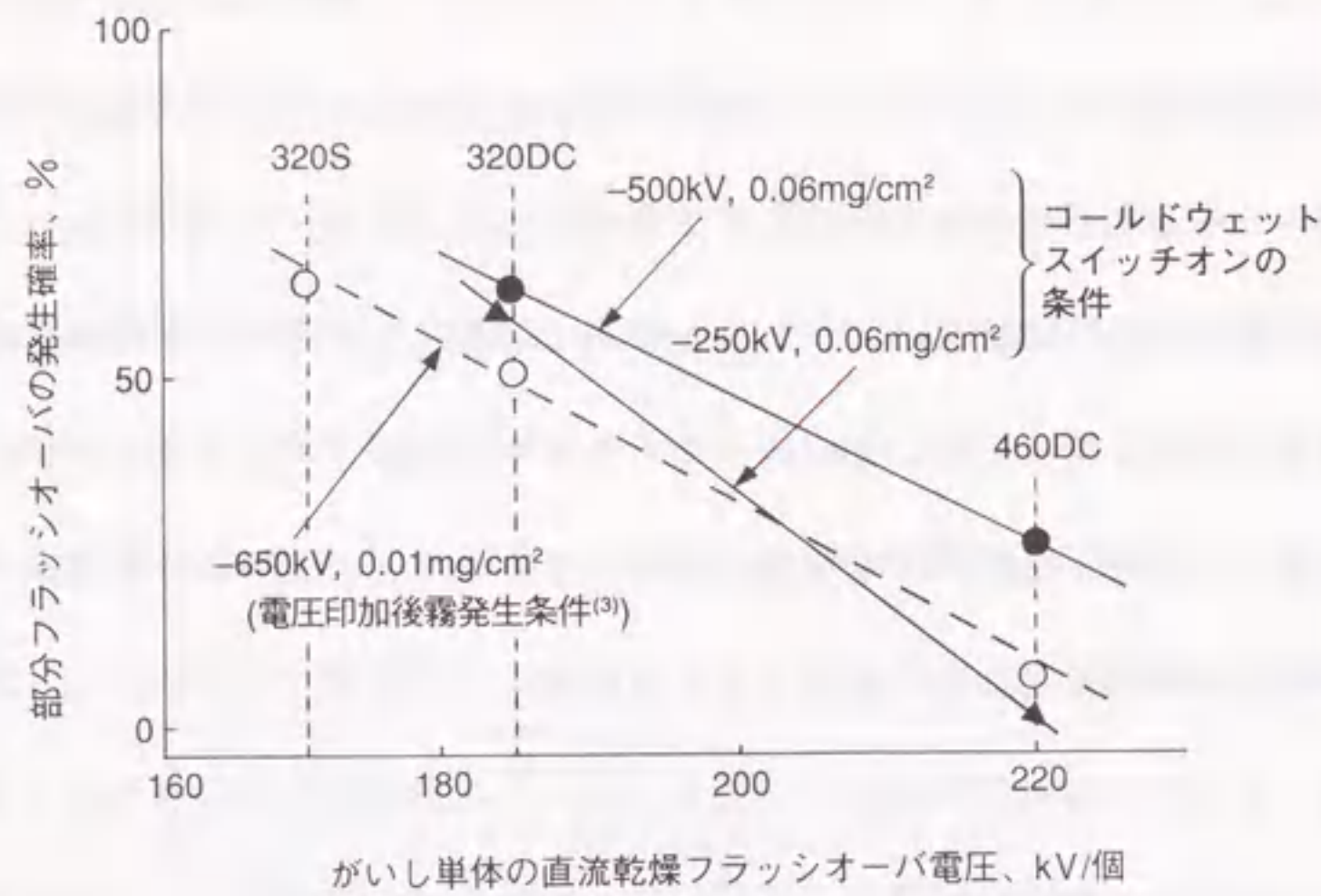


図2.5 乾燥がいし単体のフラッシュオーバー電圧と部分フラッシュオーバー発生確率の関係

#### 2.6.4 塩分付着密度の影響

表2.2の試験番号5、6、8および9に示すように、塩分付着密度が高い場合には320DCも460DCも部分フラッシュオーバーを発生しなかった。これは電中研塩原実験場で人工汚損したがいし連について、連続課電して自然湿潤条件下で研究された結果とは異なっている<sup>(2)</sup>。自然湿潤条件下では、塩分付着密度があるレベルを越えると部分フラッシュオーバーは急激に発生し易くなると報告されている。

このように自然湿潤条件下と人工湿潤条件下で、塩分付着密度に対する部分フラッシュオーバーの発生確率の傾向が大きく異なる原因としては以下の点が考えられる。まず、部分フラッシュオーバー発生時のがいし表面の漏れ電流は通常数mA以下である。漏れ電流がこのような値を越える条件下では部分フラッシュオーバーは発生しにくく、通常の汚損試験時に観察される局部火花放電が発生し易くなる。実験室内で部分フラッシュオーバーの再現試験を行う場合には、がいし表面が

過度に湿潤し漏れ電流が数mAを越えないよう、人工霧の注入量を通常の汚損試験の場合の1/10以下に抑えている。このように実験室では人工霧の注入量を少なく抑えても、塩分付着密度が高い場合湿潤過多となり易く、部分フラッシュオーバーは発生しにくくなると考えられる。

これに対し屋外の試験では、地形や気象条件によって湿潤条件は大きく左右される。電中研塩原実験場は内陸部の山麓に位置し霧が発生し易い。しかし、一般に自然界における霧の濃度は実験室に比べ密度が低く、時間的にも場所的にも不均一である。また、実験室内とは異なり湿度は必ずしも常に高くない。このような条件下でも、がいし表面の塩分付着密度が高い場合には、塩の潮解性によってがいし表面汚損層は湿潤し易く、湿潤の不均等を生じ部分フラッシュオーバーが発生し易くなると考えられる。電中研横須賀研究所の曝露試験場における汚損条件は塩原の実験場よりもはるかに厳しい。それにもかかわらず横須賀の試験場での部分フラッシュオーバーの発生確率は塩原実験場よりも低いようである。横須賀は塩分付着密度は高いが乾燥していることが多く、これに対し塩原は霧による湿潤がもたらされることが多いためと考えられる。

#### 2.7 部分フラッシュオーバーの防止技術

部分フラッシュオーバーの発生を防止するには、次のような方法が考えられる。

- (1) 分担電圧の不均等を生じないようにする方法、たとえば全面導電釉がいしの採用など。
- (2) たとえ電圧分担の不均等が生じて、がいし単体がフラッシュオーバーしないようがいし単体のフラッシュオーバー電圧を高くする。

全面導電釉がいしは、部分フラッシュオーバーを防止するには優れているが、直流送電に用いると、漏れ電流が常時半導電性の釉薬層を流れ金具の電食が加速



される。このため実線路で採用することは困難である。

そのような理由で、汚損湿潤の不均等により電圧分担の不均等が生じて、がいし単体がフラッシュオーバーしない技術を開発することが重要である。このような方法の一つとして、湿潤条件下でもがいし表面に連続した水の膜が形成されず、高いフラッシュオーバー電圧を示すシリコングリース塗布を考える。がいし連のすべてのがいしの表面にシリコングリースを塗布すれば、全面導電軸がいしの場合と同様、分担電圧の極度の不均等は生じなくなる。しかし、全数のがいしにシリコングリースを塗布しなくても、数個のがいしを塗布すれば部分フラッシュオーバーは防止できると考えられる。湿潤条件下でシリコングリース塗布がいしは無塗布がいしより高い表面抵抗を示す。がいし連全体に印加される直流電圧の大部分を、これら数個のシリコングリース塗布がいしで分担し、部分フラッシュオーバーの防止を図ろうとするものである。なお、シリコングリース塗布がいしが分担する電圧は、塗布がいしの挿入個数によって変わるので、挿入個数を種々変えて防止効果を実験によって確かめる必要がある。

全線にわたるシリコングリースの塗布は多大の労力を要する。したがって、これにかわる方法として実験室で連続課電時の部分フラッシュオーバーの発生確率が320DCよりも低かった460DCを数個だけ、320DCからなるがいし連に挿入することが考えられる。320DCと460DCは、笠径や表面漏れ距離など笠形状が異なり、湿潤の度合いや湿潤時のフラッシュオーバー電圧が異なる。笠径や表面漏れ距離が大きくフラッシュオーバー電圧が高い460DCに、部分フラッシュオーバーの発生が限定され、その発生確率が低減できる可能性がある。

上述の2種類の部分フラッシュオーバーの防止技術の効果を評価するため2.4の試験配置と2.5の部分フラッシュオーバー試験方法でもって部分フラッシュオーバーの発生確率低減の有無を実験により確認する。供試がいし連は表2.3に示す構成となっている。

表2.3 部分フラッシュオーバー防止技術評価試験結果

| 印加電圧                 | -500 kV                 |  |                          |  |
|----------------------|-------------------------|--|--------------------------|--|
|                      | 0.06 mg/cm <sup>2</sup> |  |                          |  |
| 塩分付着密度               | 320 DC × 46             |  |                          |  |
| 供試がいし連               | シリコングリース塗布がいし5個挿入       |  | シリコングリース塗布がいし4個挿入        |  |
| 対策                   | シリコングリース塗布がいし5個挿入       |  | シリコングリース塗布がいし5個挿入        |  |
| 霧濃度                  | 0~0.2 g/m <sup>3</sup>  |  | 3~5 g/m <sup>3</sup>     |  |
| 部分フラッシュオーバーの発生率      | 0/5                     |  | 2/3                      |  |
| シリコングリース塗布がいし単体の耐電圧* | 120 kV/個                |  | 60 kV/個                  |  |
|                      |                         |  | 320 DC × 41 + 460 DC × 5 |  |
|                      |                         |  | 460 DCを5個挿入              |  |
|                      |                         |  | 0~0.2 g/m <sup>3</sup>   |  |
|                      |                         |  | 2/3                      |  |
|                      |                         |  | -                        |  |

部分フラッシュオーバー発生率は、繰返し実施した試験回数に対する部分フラッシュオーバーが発生試験回数の比を示す。  
\*：それぞれの霧濃度の人工霧室内での繰返し定印霧中試験法による耐電圧を示す。



## 2.8 部分フラッシュオーバー防止技術の評価試験結果

前節で述べた部分フラッシュオーバー防止技術の評価試験結果を表2.3に示す。

この表から以下のことが指摘できる。

- (1) 実験室への人工霧の注入量が少なくがいし表面汚損層の湿潤度が全般に低い条件では、シリコングリースを塗布したがいしをがいし連に5個以上挿入した場合に部分フラッシュオーバーの発生は防止できている。しかし、人工霧の注入量が多い場合には、シリコングリースを塗布したがいしを5個挿入してもかえってそのがいしのいずれか1個に部分フラッシュオーバーが発生する結果となった。部分フラッシュオーバーの防止効果が霧濃度によって異なるのは、表2.3最下段に示すように、シリコングリースを塗布したがいし単体の霧中における耐電圧が霧の濃度に左右されるためである。具体的には、薄い霧の中でのシリコングリースを塗布した320DCの耐電圧は120kV/個である。ところが、汚損耐電圧試験に通常用いられる濃い霧の中における同じがいしの耐電圧は60kV/個と大幅に低下している。薄い霧の場合にも、濃い霧の場合にも、シリコングリースを塗布した5個のがいしに印加電圧の大部分が分担される。しかし、この分担電圧に薄い霧の場合には耐えるが、濃い霧の場合には耐えないため、部分フラッシュオーバーが発生することとなる。
- (2) 一定条件の霧中におけるシリコングリース塗布がいしの1個当たりの耐電圧と塗布個数の積ががいし連への印加電圧以上であれば部分フラッシュオーバーは防止できるようである。
- (3) 320DCからなるがいし連の一部に460DCがいしを5個挿入したが部分フラッシュオーバーの発生は防止できなかった。部分フラッシュオーバーは320DCがいしで発生した。これは、シリコングリース塗布がいし挿入の場合とは異なり、笠径や漏れ距離などの異なるがいしを数個挿入しても、がいし連全体に加わる電圧をこれら数個の特定のがいしに分担させ耐えさせることができないた

めである。

以上より、シリコングリース塗布がいしを数個がいし連に挿入することにより部分フラッシュオーバーの発生を防止できる目安を得た。この場合、実験室内の人工霧においては、シリコングリース塗布がいしを挿入しない場合には薄い霧の時に部分フラッシュオーバーが発生し易かったのに反して、シリコングリース塗布がいしを数個挿入した場合には、濃い霧の時に発生し易かった。実際の送電線で遭遇するどんな湿潤条件下においても部分フラッシュオーバーを発生しない最少のシリコングリース塗布がいしの個数を今後フィールド試験などによって見極めていく必要がある。また、シリコングリースは、通常1~2年で塗り替えが必要であり保守が煩わしい。従って、今後、長期間撥水性が維持される表面コーティング材を研究する必要がある。シリコングリース塗布がいしには、湿潤条件下では高い分担電圧が加わることになる。そのように高い分担電圧のがいし磁器部への影響などについても今後検討する必要がある。

## 2.9 むすび

250kVおよび500kV級直流がいし連において、がいし表面が湿潤した状態にある時電圧が印加される過程を実験室で模擬し、部分フラッシュオーバーの発生する確率を実験的に求めた。また、部分フラッシュオーバーの防止技術についても実験によりその効果を確認した。主な研究の成果は以下の通りである。

- (1) 部分フラッシュオーバーの発生確率は、がいしが湿潤後電圧が印加される条件の方が、電圧印加後がいしが湿潤する場合より高くなる。
- (2) がいしが湿潤後電圧を印加する場合にも、清浄乾燥条件下で直流フラッシュオーバー電圧の高いがいしほど（笠径やフラッシュオーバー距離の大きいがいしほど）一般に部分フラッシュオーバーの発生確率は低くなる。



(3) 清浄乾燥条件下で高い直流フラッシュオーバー電圧を示す 460DCを、数個だけ 320DCのがいし連に入れても部分フラッシュオーバーの発生は防止できない。

(4) シリコングリース塗布がいしをがいし連に何個か挿入することにより部分フラッシュオーバーの発生は防止できる。単に清浄乾燥時のフラッシュオーバー電圧が高いがいしを挿入しても効果は低いが、シリコングリース塗布によって湿潤条件下でも表面抵抗が高く保たれ、したがって湿潤条件下でもフラッシュオーバー電圧が高く保たれることが有効と考えられる。

部分フラッシュオーバーは、一旦発生すると数時間以上継続して発生する場合があります、その時発生する可聴雑音はレベルが高く広範な地域へ伝搬する。これは海外の± 500kV級直流送電線では、特に深刻な環境問題にはなっていない。しかし、国土が狭く人口密度の高いわが国では、部分フラッシュオーバーが万一発生した場合周囲に及ぼす影響が心配される。今回提案した部分フラッシュオーバーの防止技術の効果について今後実フィールドで検証を進める必要がある。

#### 文 献

- (1) 福島, 須永: 「直流送電線の雑音と騒音(第3報)、がいし連の部分せん絡による騒音と雑音の実験的検討」, 電中研技術第1研究所報告, 73075, 昭和49年.
- (2) 福島: 「送電線のコロナ騒音」, 電中研総合報告:T01, 昭和61年.
- (3) M. Yasui, Y. Takahashi, A. Takenaka, K. Naito, Y. Hasegawa and K. Kato: "RI, TVI and AN characteristics of HVDC insulator assemblies under contaminated condition", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, pp. 1913 ~ 1921, No. 4, 1988.
- (4) 内藤, 長谷川, 加藤, 小川: 「直流がいし装置の汚損湿潤時のRI, TVIお

よびAN特性」, NGKレビュー, No. 48, pp. 1~9, Aug., 1988.

- (5) K. Naito, R. Matsuoka and Y. Matsuura: "RI, TVI and AN characteristics of insulator assemblies for DC transmission line under contaminated condition", Proceedings of the 1988 US-Japan Seminar on Electromagnetic Interference in Highly Advanced Social Systems, pp. 5-47~pp. 5-58, Aug., 1988.



### 第3章 直流壁貫ブッシングの

#### フラッシュオーバ現象

##### 3.1 まえがき

本章は、交直変換所における直流側壁貫ブッシングのフラッシュオーバの原因を実験を中心に解明したものである。交直変換所で使われている通常のがいしについては、以下に示すように汚損フラッシュオーバのメカニズムが解明され対策がとられ事故率が低減してきたにもかかわらず、壁貫ブッシングについてはフラッシュオーバが多発し未だ原因が究明されていない。

直流送電が始まった初期の段階においては、送電線で使われる懸垂がいしについても変換所で使われるがい管や支持がいし（SPがいし）についても、がいし表面への汚損物の付着密度が交流課電の場合よりも大きくなること、同一汚損付着密度のがいしは交流課電の場合よりも直流課電の場合の方がフラッシュオーバ電圧や耐電圧が低くなること、は知られていなかった。このため、初期の直流送電に用いられた懸垂がいしやSPがいし、がい管などの汚損設計は、全般的に不十分であった。したがって、当初世界各地の交直変換所では、種々のがいしで多数の汚損フラッシュオーバが発生した<sup>(1) - (3)</sup>。多数とはいっても、汚損フラッシュオーバ事故の直流送電系統全体の事故に占める割合は、2～3%に過ぎなかった。しかし、近年、交直変換機器の信頼性が大きく改善され系統全体の事故率が大幅に低減してきたため、この汚損によるフラッシュオーバ事故は無視できなくなってきた。

このような問題に対し以下に示すような対策が採られてきた。

- (1) 表面漏れ距離の大きい長尺がいしや直流用笠付がいしの採用
- (2) がいしの活線洗浄、または停止洗浄



(3) がいし表面への撥水性物質シリコングリースの塗布

(4) がいし表面への撥水性物質RTVシリコンゴムの塗布

(RTV はRoom Temperature Vulcanized の略で室温硬化タイプの意味)

(5) 表面漏れ距離を増やすため磁器がいしの笠先端へのプラスチック製笠の取付け

これらの対策は、がいしの汚損フラッシュオーバを防止するのにそれなりの効果を上げている。しかし、活線洗浄の場合、過汚損になってから洗浄したり、洗浄条件が充分管理されていないため、洗浄することによってかえってフラッシュオーバ事故を起こす恐れもある。シリコングリースの定期的な塗り替えについては、その作業が極めて煩わしく、また膨大な費用を要し、送電を長時間停止する必要がある。RTVシリコンゴムの塗布やプラスチック製笠の取付けについては、そこで用いる有機絶縁物の長期信頼性が問題となる。

その後、各所の研究により次のようなことが明らかにされてきた<sup>(4)</sup>。

(1) 直流の場合には集塵効果があるため、交流の場合よりも汚損物の付着量が多くなる場合がある。

(2) 直流の場合がいし浴面で一旦局部火花放電が発生すると、局部火花放電は消滅しにくく、局部火花放電は電磁力や浮力によってがいし浴面から離れ笠と笠やリブ間を橋絡し易い。このため笠間やリブ間が狭いとがいし表面の漏れ距離は有効に働かない。

(3) 直流のフラッシュオーバ電圧は汚損度の増大により交流の場合より大きく低下する。

このような研究成果に基づき、懸垂がいしや交直変換所の機器用がいしについては局部火花放電が笠間やリブ間を橋絡しにくく、直流送電に適した図1.1(b)や図1.2(b)に示すような笠形状が開発されてきた<sup>(5)-(7)</sup>。

この章では、交直変換所で多発している壁貫ブッシングのフラッシュオーバの

原因の基礎的究明について研究を行なっている。原因としては、壁貫ブッシングの取付基部の雨などによる湿潤が建物によって妨げられ、ブッシングの軸方向に不平等湿潤となるためであること、ブッシングの耐電圧を上げるためには、深ひだ笠のようにそれぞれの笠が湿潤されにくい個所を有するのが有効であること、などを解明している。

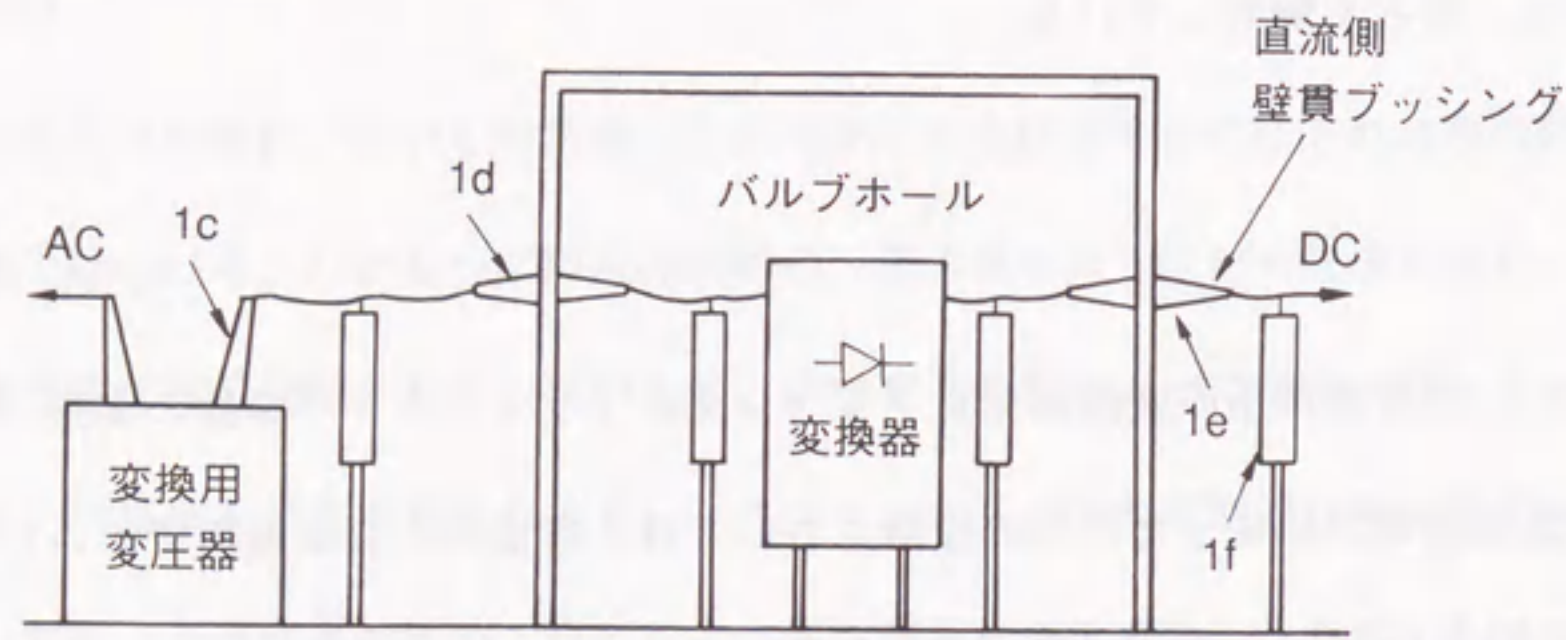
### 3.2 交直変換所の直流側壁貫ブッシングのフラッシュオーバ事故の実態

直流送電が始まった初期の段階においては、各地の交直変換所でがいしの汚損によるフラッシュオーバ事故が多発した。しかし、その後フラッシュオーバ現象の研究と種々の対策により、がいしの汚損フラッシュオーバ問題は解決されてきた。1984年のW. Lampe 等のCIGRE 論文では、大部分の交直変換所ではフラッシュオーバ事故は年1回以下に減ったと報告されている<sup>(8)</sup>。

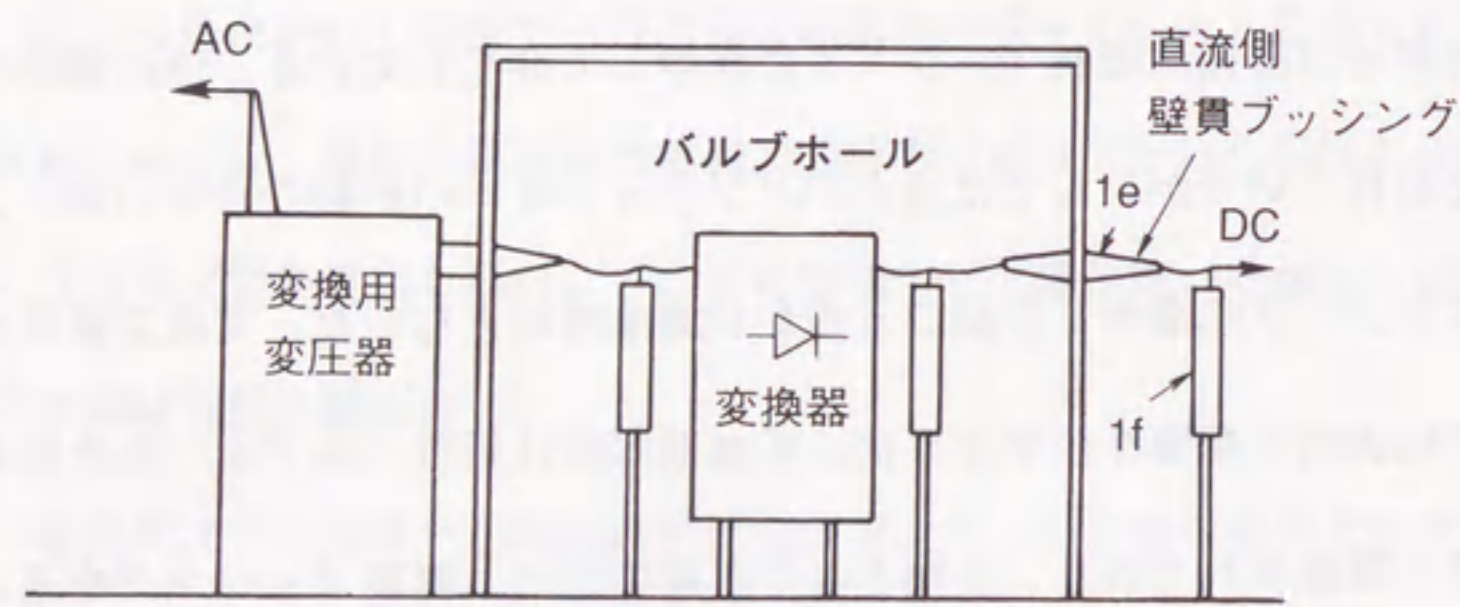
それにもかかわらずその2~3年後に、交直変換所におけるがいしのフラッシュオーバ事故率が大幅に上昇するという報告が相次いだ。しかも、フラッシュオーバの大部分は直流側壁貫ブッシングに集中して発生している。他の機器や母線用に使われているがいしではほとんどフラッシュオーバが起こらないのに、なぜ壁貫ブッシングに集中して起こるのかが議論的となった。交直変換所では、図3.1に代表的な配置を示すように、変換器本体は通常バルブホールと称する建物の中に設置されており、変換された直流電圧は、壁貫ブッシングを通して外部に引き出される。

交直変換所の直流側壁貫ブッシングのフラッシュオーバ事故実績を表3.1に示す<sup>(8)</sup>。1984年以降交直変換所で直流側壁貫ブッシングのフラッシュオーバ事故が多発している。これは、±400kV以上の直流送電システムの多くが、ほぼこの時期に集中して運転を開始していることと一致している。パシフィックインター





(a) 変換用変圧器バルブ側ブッシングが屋外に設置されている場合



(b) 変換用変圧器バルブ側ブッシングが屋内に設置されている場合

図3.1 交直変換所の代表的配置例

表3.1 交直変換所における直流側壁貫ブッシングのフラッシュオーバー事故実績

| プロジェクト                      | 電圧 (kV) | 運転後のフラッシュオーバーバ件数 - 変換所名      | 運転開始 |
|-----------------------------|---------|------------------------------|------|
| Nelson River                | -450    | 8-Dorsey ; 0-Radisson        | 1975 |
| Nelson River                | +450    | 2-Dorsey ; 2-Radisson        | 1977 |
| Nelson River                | -500    | 1*-Dorsey ; 1-Henday         | 1985 |
| Nelson River                | +500    | 1*-Dorsey ; 0-Henday         | 1984 |
| Pacific Intertie            | -500    | 4-Sylmar ; 0-Cello           | 1985 |
| ITAIPIU                     | -600    | 10-Foz ; 3** -Sao Roque      | 1985 |
| ITAIPIU                     | +600    | 0-Foz ; 2-Sao Roque          | 1985 |
| Intermountain Power Project | -500    | 4-Adelanto ; 3-Intermountain | 1986 |
| Phase I Quebec/New England  | -450    | 12-Comerford ; 0-Des Cantons | 1986 |
| Phase I Quebec/New England  | +450    | 11-Comerford ; 0-Des Cantons | 1986 |

注) \* ブッシングの貫通を示す。 \*\* 1件はブッシングの爆発を示す。



タイは1985年2月1日に500kVに昇圧されている。昇圧されてから1986年10月1日までに、壁貫ブッシングを中心に7件のフラッシュオーバー事故がシルマーの変換所で主として小雨時に発生している<sup>(2)</sup>。カナダの±450kVネルソンリバープロジェクトのドルシー変換所では、-450kVの壁貫ブッシングで8件のフラッシュオーバー事故を経験している。フラッシュオーバー事故を防ぐため、-450kVの壁貫ブッシングにシリコングリースが塗られた。にもかかわらず、その後も幾本かが強雨時に、またシリコングリース未塗布のがいしにおいても、軽雨や霧の条件下でフラッシュオーバー事故が発生している<sup>(1)</sup>。ブラジルのフルナス/イタイプの変換所でも、1985年9月から1986年5月までに、21件のフラッシュオーバー事故が起こっており<sup>(9)</sup>、そのうち表3.1に示す15件のフラッシュオーバー事故は水平取付けの壁貫ブッシングで起こっている。

このように、交直変換所の直流側壁貫ブッシングのフラッシュオーバー事故の一部は霧や着氷時にも発生しているが、大部分が降雨時に発生しているのが特徴である。特に、比較的小雨時に多くのフラッシュオーバー事故が発生しており、また、突風など強風を伴った降雨時にもかなり発生しているようである。フラッシュオーバー事故の直後に、ブッシング表面の汚損度を測定した例もあるが、実測された汚損度は設計汚損度に比べ低い値が記録されている。しかし、事故は降雨時に発生しており、汚損度は通常事故後に測定されている。したがって、測定時にはすでに降雨などによりがいし表面の汚損物の一部が洗い流されている場合もある。このため、報告されている汚損度の測定結果が低いから汚損がフラッシュオーバー事故の原因ではないと言い切ることはできない。また実測された件数も限られており、原因の解明を難しくしている。

各所の壁貫ブッシングの表面漏れ距離の設計値を表3.2に示す<sup>(10)</sup>。壁貫ブッシングの表面漏れ距離は、同じ変換所の他のがいし類の表面漏れ距離に比べ同等またはそれ以上となっている。したがって、汚損設計の面から壁貫ブッシ

表3.2 交直変換所における各種がいしの表面漏れ距離

| 直流プロジェクト                   | 系統電圧 (kV) | BIL (kV) | BSL (kV) | がいしの表面漏れ距離 (cm/kV) | ブッシングの表面漏れ距離 (cm/kV) |                      |
|----------------------------|-----------|----------|----------|--------------------|----------------------|----------------------|
|                            |           |          |          |                    | 変圧器 (バルブ側) 1c        | 壁貫 (DC側) 1e (AC側) 1d |
| Skagerrak (Tjele)          | ±250      | 1,050    | 850      | 3.8                | —                    | —                    |
| Skagerrak (Kristiansand)   | ±250      | 1,050    | 850      | 3.4                | 4.8                  | —                    |
| Vancouver Island           | ±260/280  | 900      | 750      | 2.9                | 4.8                  | —                    |
| Pacific Intertie (Sylmar)  | ±400      | 1,300    | 1,050    | 2.5                | 2.9                  | 2.5                  |
| Pacific Intertie (Celilo)  | ±400      | 1,300    | 1,050    | 2.82               | 3.2                  | 2.32                 |
| Pacific Intertie (Celilo)  | ±500      | 1,425    | 1,175    | 2.87               | 2.23                 | —                    |
| Nelson River-1             | ±450      | 1,550    | 1,120    | 2.7                | 3.4                  | 3.4                  |
| Nelson River-2             | ±500      | 1,550    | 1,300    | 2.7                | 4.4                  | 4.4                  |
| Eel River                  | 2×80      | 350      | 290      | 2.6                | —                    | —                    |
| Kontiskan (Vester Hassing) | 250       | 1,050    | 550      | 2.3                | 2.3                  | 1.83                 |
| Cabora Bassa (Apollo)      | ±533      | 1,425    | 1,300    | 3.2                | —                    | —                    |
| Square Butte               | ±250      | 750      | 622      | 2.6                | 3.2                  | —                    |
| David Hamil                | 50        | 200      | 不明       | —                  | —                    | —                    |
| C-U (Dickinson)            | ±400      | 1,050    | 950      | 3.5                | —                    | —                    |
| C-U (Coal Creek)           | ±400      | 1,050    | 950      | 3.5                | 4.0                  | —                    |
| Hokkaido-Honsyu (Kamikita) | 250       | 900      | 780      | 4.6                | 6.3                  | —                    |
| Hokkaido-Honsyu (Hakodate) | 250       | 900      | 780      | 3.5                | 3.7                  | —                    |
| Sakuma                     | ±125      | 550      | 480      | 3.6                | 3.3                  | 3.8                  |
| Inga shaba (Kalwezi)       | ±459      | 1,300    | 1,050    | 4.3(P), 3.5(S)     | —                    | —                    |
| Inga shaba (Inga)          | ±500      | 1,425    | 1,175    | 3.0(P), 2.5(S)     | —                    | —                    |
| Oklaunion                  | 82        | 200      | 190      | —                  | —                    | —                    |
| Miles City                 | 82        | 200      | 190      | —                  | —                    | —                    |
| IPP (Adelanto)             | ±500      | 1,550    | 1,290    | 3.8(P), 3.2(S)     | 4.8                  | 4.8                  |
| Duemrohr                   | 145       | 500      | 380      | —                  | —                    | —                    |
| Black water                | 56.8      | 200      | 170      | 3.6                | 4.8                  | —                    |
| Itaipu (foz do Iguacu)     | ±600      | 1,800    | 1,390    | 2.7                | 3.5                  | 3.5                  |
| Itaipu (Sao Roque)         | ±600      | 1,800    | 1,390    | 2.7                | 3.5                  | 3.5                  |
| Gotland II (Ygne)          | 150       | 550      | 420      | 4.6                | —                    | —                    |
| Gotland II (Vastervik)     | 150       | 550      | 420      | 5.1                | —                    | —                    |

注1. S:懸垂がいし

P:支持がいし

注2. がいし、ブッシングの表面漏れ距離欄の記号については図3.1参照



ングが他のがいし類に比べフラッシュオーバーし易いとはいえない。

このように、等価塩分付着密度の測定データや変換所の立地条件と表面漏れ距離を併せ考えると、各所の壁貫ブッシングのフラッシュオーバー事故の主原因を全て汚損に帰することはできない。むしろ、別の原因が存在するのではないかという疑問からここでの研究を進めた。

### 3.3 円筒状がいしの水平配置における汚損耐電圧

図1.2 (b)に示す深ひだ笠が、直流用円筒状がいしに最も適した笠形状として近年開発され一部採用されている。円筒状がいしは大部分が垂直配置で使用されるので、開発時汚損耐電圧特性は通常垂直配置で調べられている。汚損がいしの交流耐電圧特性は、垂直、水平配置によってほとんど変わらない。これから類推すると、直流の場合にもがいしの配置による汚損耐電圧の差はほとんどないと予想される。しかし、交直変換所で使われる他のがいしと壁貫ブッシングの大きな違いの一つとして壁貫ブッシングの水平配置を無視することはできない。そこで、表3.3 に示す3種類の笠形状をもつ円筒状がいしについて、水平配置と垂直配置における汚損耐電圧を定印霧中法により求めた。

タイプAの笠形状は、海外の交直変換所で直流用円筒状がいしにこれまで広く使われており、タイプBとCの笠形状は、我々が直流用に開発したものである。試験には第1章に述べた750kV直流汚損試験電源を用いるものとする。

表3.3 に示した3種類の笠形状を持つ直流用円筒状がいしについて、塩分付着密度 $0.02\text{mg}/\text{cm}^2$ における直流汚損耐電圧試験を行った。結果を表3.4 に示す。ここでは実測された耐電圧値をがいしの有効長で除して示している。有効長とはがいしの高さから金具部分の高さを差し引いたもので、磁器などの絶縁部の高さであり、単位有効長あたりの耐電圧値をもって形状の異なる円筒状がいし

表3.3 円筒状がいしの笠形状と寸法諸元

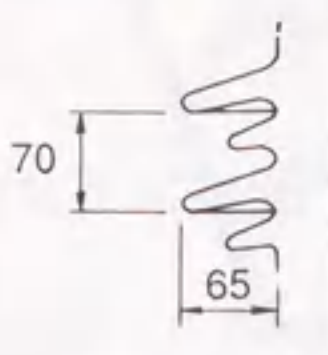
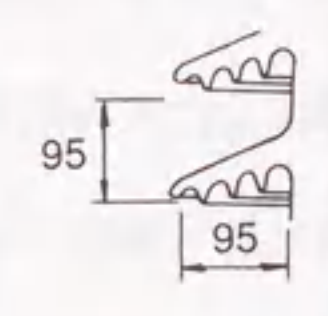
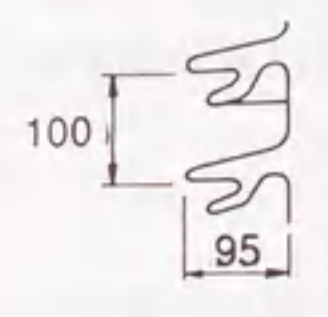
| タイプ            | 笠形状  | 胴径 (mm) | 平均直径 (mm) | 笠1枚当り漏れ距離/笠ピッチ |
|----------------|--|---------|-----------|----------------|
| タイプA<br>(段違い笠) |   | 356     | 410       | 3.43           |
| タイプB<br>(深ひだ笠) |   | 356     | 438       | 3.82           |
| タイプC<br>(外ひだ笠) |  | 356     | 438       | 3.64           |

表3.4 円筒状がいしの水平、垂直配置における直流汚損耐電圧

| 笠形状                          | タイプA |    | タイプB |     | タイプC |     |
|------------------------------|------|----|------|-----|------|-----|
|                              | 70   | 65 | 95   | 95  | 100  | 95  |
| 塩分付着密度 (mg/cm <sup>2</sup> ) | 0.02 |    | 0.02 |     | 0.02 |     |
| 試料配置                         | 垂直   | 水平 | 垂直   | 水平  | 垂直   | 水平  |
| がいしの単位有効長当りの耐電圧 (kV/m)       | 82   | 83 | 108  | 102 | 108  | 108 |



の特性を比較してみる。段違い笠タイプAのがいしの有効長1m当たりの耐電圧は垂直配置、水平配置共ほぼ82~85kVである。直流用に開発した深ひだ笠タイプBの耐電圧は、垂直配置の場合105kV、水平配置の場合100kVである。タイプBは、タイプAより格段に優れた汚損耐電圧を示すが、水平配置の場合には、垂直配置の場合よりやや低くなる。

水平配置における耐電圧低下の原因としては以下の点が考えられる。一般に円筒状がいしの胴部は笠部に比べ直径が小さいので、汚損がいしの表面が湿潤した時流れる漏れ電流の密度が高く乾燥し易い。従って局部火花放電は胴部で発生し易い。水平配置の場合、この胴部で発生した火花放電は図3.2に示すように笠先端部へ容易に移行し垂直配置の場合に比べ隣接する笠間を容易に橋絡する。また、がいし表面の湿潤が過度になると表面の汚損物は洗い流されるが、図3.3に示すように、深ひだ笠のリップ間は汚損液の滴下によって橋絡され易いという傾向がある。

表3.3に示すタイプCの笠は、特に水平配置用に開発したものである。上述の深ひだ笠の水平配置の場合の局部火花放電の動きや汚損液の流れを妨げるような形状を目指したものである。表3.4に示すように、水平配置の場合直流用深ひだ笠タイプBよりも5%程度優れた汚損耐電圧を示す。このため水平配置専用の笠としている。タイプCの笠をもつ円筒状がいしは、垂直配置の場合にもタイプBの笠と同等の汚損耐電圧を示す。しかし、垂直配置の場合には、タイプCの笠はひだによる遮蔽が少ないために、タイプBの笠に比べ、台風などの急速汚損時にはがいし表面全体が汚損され易いのが若干の欠点である。

円筒状がいしの垂直と水平配置における直流汚損耐電圧を人工汚損試験により求めた結果、笠形状によっては水平配置にすることによってやや耐電圧が低下することが分かった。しかし、現在交直変換所の直流側壁貫ブッシング用がい管に広く使われているタイプAの笠形状の場合には、配置による差はほとん

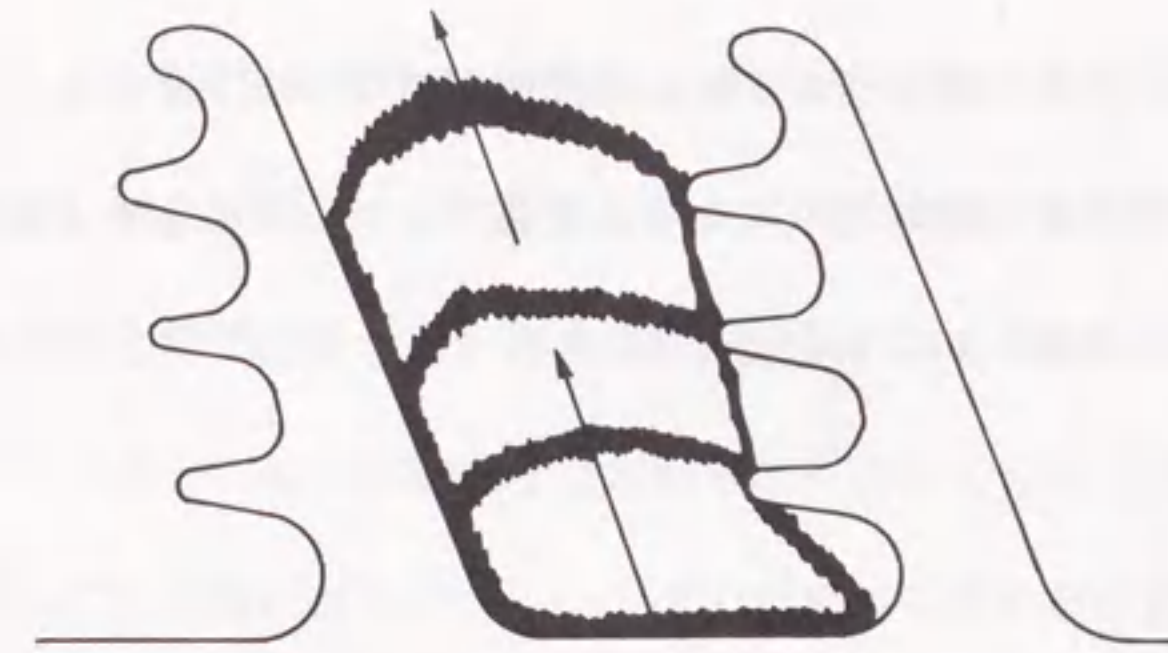


図3.2 局部火花放電の伸展状況

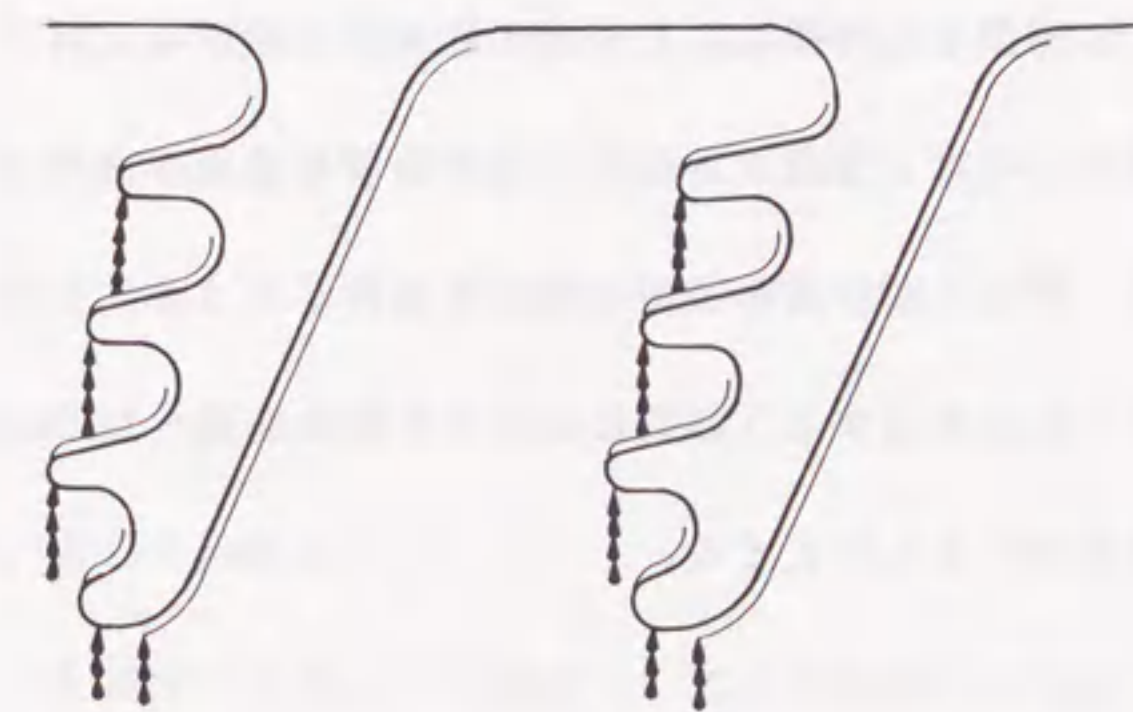


図3.3 水平配置における汚損液のひだ間橋絡状況



ど見られない。また、汚損耐電圧の値そのものも、ブッシングが取付けられている実際の変換所で測定された汚損度において充分高い値を示すことが確認できた。以上の研究結果を併せ考えると、直流側壁貫ブッシングのフラッシュオーバー事故多発の主要原因を汚損状態下における壁貫ブッシングの水平あるいは垂直配置に帰することは難しいことが分かる。

### 3.4 円筒状がいしの注水耐電圧試験

前述のように、交直変換所におけるがいしのフラッシュオーバー事故には次のような傾向が見られる。

- (1) 水平取付けの直流側壁貫ブッシングに集中している。
- (2) フラッシュオーバー事故は、ほとんど降雨時に発生している。

汚損がいしのフラッシュオーバー電圧は、がいしの表面の湿潤がいしの長さ方向に不平等であると平等湿潤時に比べ大幅に低下することが知られている。したがって、汚損度は必ずしも高くないが不平等湿潤が直流側壁貫ブッシングのフラッシュオーバー事故多発の主要原因ではないかと考えられる。この原因を確認するため、意図的に湿潤を不平等とした場合の耐電圧の測定を試みている。併せて、平等注水条件における壁貫ブッシング用がい管の表面が清浄な時の耐電圧特性を測定する。また、がい管の笠形状が注水条件下のフラッシュオーバー電圧に及ぼす影響についても測定する。試験には表1.2, 表1.3, 図1.7に示す±750kV直流汚損試験電源を用いるものとする。

#### 3.4.1 注水試験に用いた供試がい管と模擬ブッシング

交直変換所の直流側壁貫ブッシングのフラッシュオーバー事故多発の原因を究明するための注水試験には、壁貫ブッシングそのものを供試するのが望ましい。

一般に使われている壁貫ブッシングの屋外部分の構造の一例を図3.4に示す。がい管の中心に軸方向に導体を通っており、その周りに円錐状のコンデンサコアを配し、がい管内部の残りの空間には絶縁油が充填してある。種々の笠形状や寸法のがい管を用意してこのような構造を持つ壁貫ブッシングを製作するには膨大な費用と時間を要する。標準の注水試験の場合には供試試料全体に均一に注水してフラッシュオーバー電圧または耐電圧を求めている。交流の場合にはコンデンサコアを内部に有するブッシングと内部が中空のがい管単体でフラッシュオーバー電圧または耐電圧に差のないことが確認されている。直流の場合にも平等注水ならばブッシングを用いなくてもがい管単体を供試試料に用いてフラッシュオーバー電圧を実験的に求めればよいと考えられる。

しかし、壁貫ブッシングが不均等に注水される場合のフラッシュオーバー電圧を求めるには、中空がい管で試験するとしても注水を始める前のがい管外表面の電位分布をできる限り実際の壁貫ブッシングと同等にする必要がある。がい管の外表面の電位分布は内部のコンデンサコアや中心導体の設計や配置で決まってくる。そこで、中空がい管表面の電位分布をできるだけ内部にコンデンサコアや中心導体を有する壁貫ブッシングの電位分布に近づけることを試みる。本実験においては、中空がい管に簡単な補正電極を付加して模擬する技法を考案している。すなわち、がい管の内部に絶縁油を満たし、がい管の両端から内部へ棒電極を突き出し、その寸法や位置を調整することにより、実際の壁貫ブッシングに近い電位分布を実現できることがわかった。そのようなものを「模擬ブッシング」として供試する。

ブッシングを製作する際、がい管については汚損設計に合わせて適切な寸法のがい管を選んで組み立てる。ブッシングの絶縁設計においてがい管表面の電位分布を緩和することは汚損地区用ブッシングの場合にも有効である。しかし経済性の観点から一般地区用ブッシングに用いられるコンデンサコアをそのま



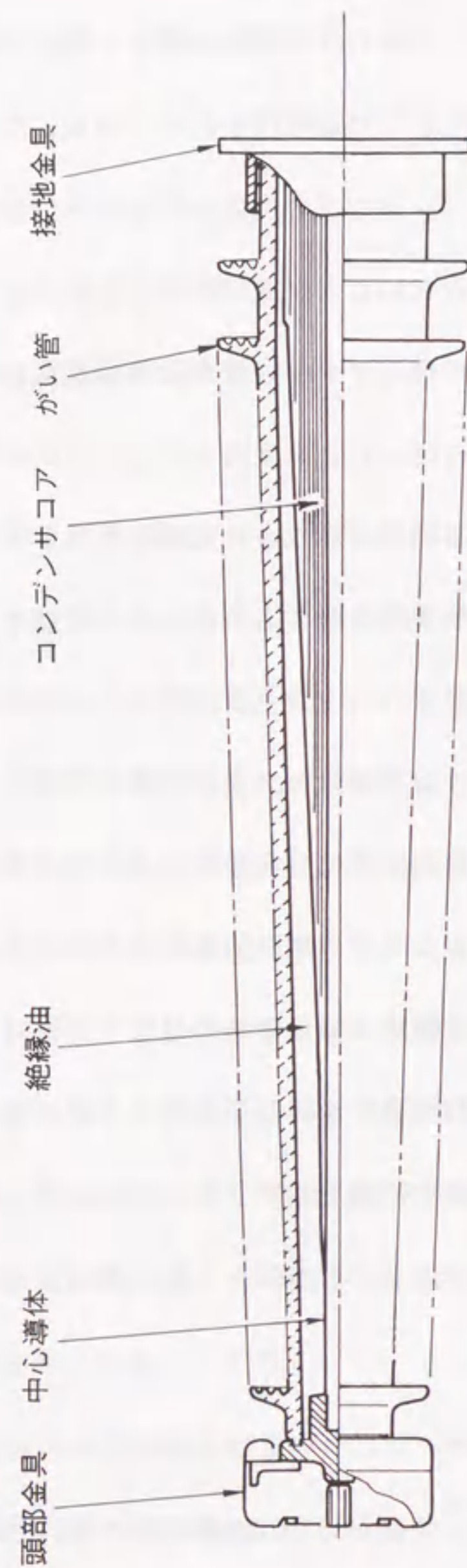


図3.4 壁貫ブッシングの構造図の一例

ま使うことが少なくない。このため、内部コンデンサコアの長さは、がい管の長さよりはるかに短くなる場合がしばしば見られる。特に直流の場合には、汚損設計の面からがい管の長さはコンデンサコアの長さに比べ非常に長大となる。フラッシュオーバー事故が報告されている交直変換所で使われている直流側壁貫ブッシングのコンデンサコアの長さもがい管全長に比べればかなり短い。したがってコンデンサコアが存在しない部分で表面電界の均一性が損なわれてくる。これを模擬するために図3.5のように高電圧側から電極を挿入している。これはコンデンサコアのない部分は中心導体が露出しているのを模擬しているといってもよい。図3.5は全長の約50%にコンデンサコアがあるものを模擬しており、有効長の約50%の長さの高圧電極を高圧側から挿入している。がい管部分には、±500kV級壁貫ブッシングに一般に使われる全長6～8mの実際のがい管を用いる。

図3.6は、このような模擬ブッシングの直流電圧印加時の電位分布を、実ブッシング、中空がい管と比較計算したものである。(a)に示す単なる中空がい管の場合、がい管表面の電位分布はほぼ均等になっている。一方、(b)(c)に示す実ブッシングの場合には、内部のコンデンサコアの長さにより表面の電位分布が異なる。コンデンサコアの長さがほぼがい管の長さに等しい(b)の場合には、中空がい管の場合に比べやや電位分布は悪くなるが、それでも比較的均等である。これに対し、コンデンサコアの長さががい管の有効長の約50%の(c)の場合には、表面の電位分布は非常に不均一になる。ここでは、この(c)のブッシングを模擬してがい管の有効長の約50%の長さの高圧電極を高圧側から挿入して作った模擬ブッシングの表面の電位分布を図3.6(d)に示す。(c)に示す実ブッシングの電位分布にほぼ等しいことが分かる。この模擬ブッシングに用いる供試がい管の笠形状、寸法諸元を表3.5に示す。



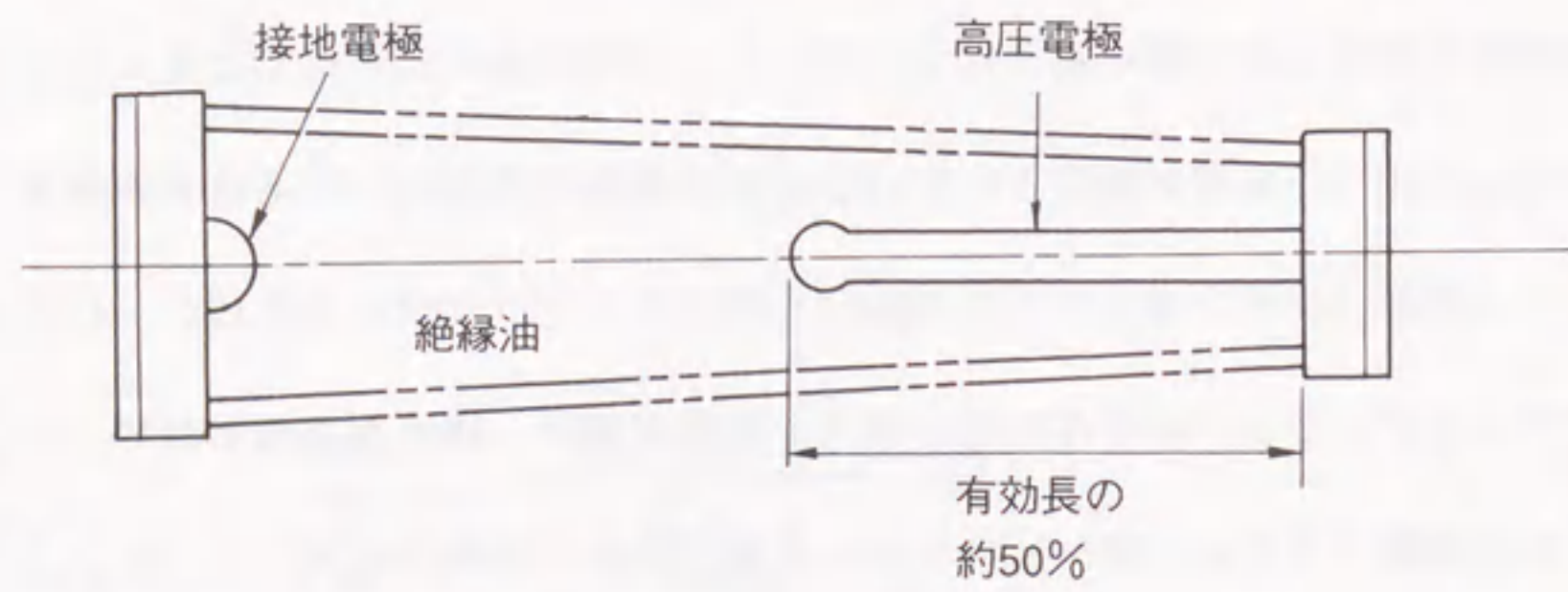


図3.5 模擬ブッシング

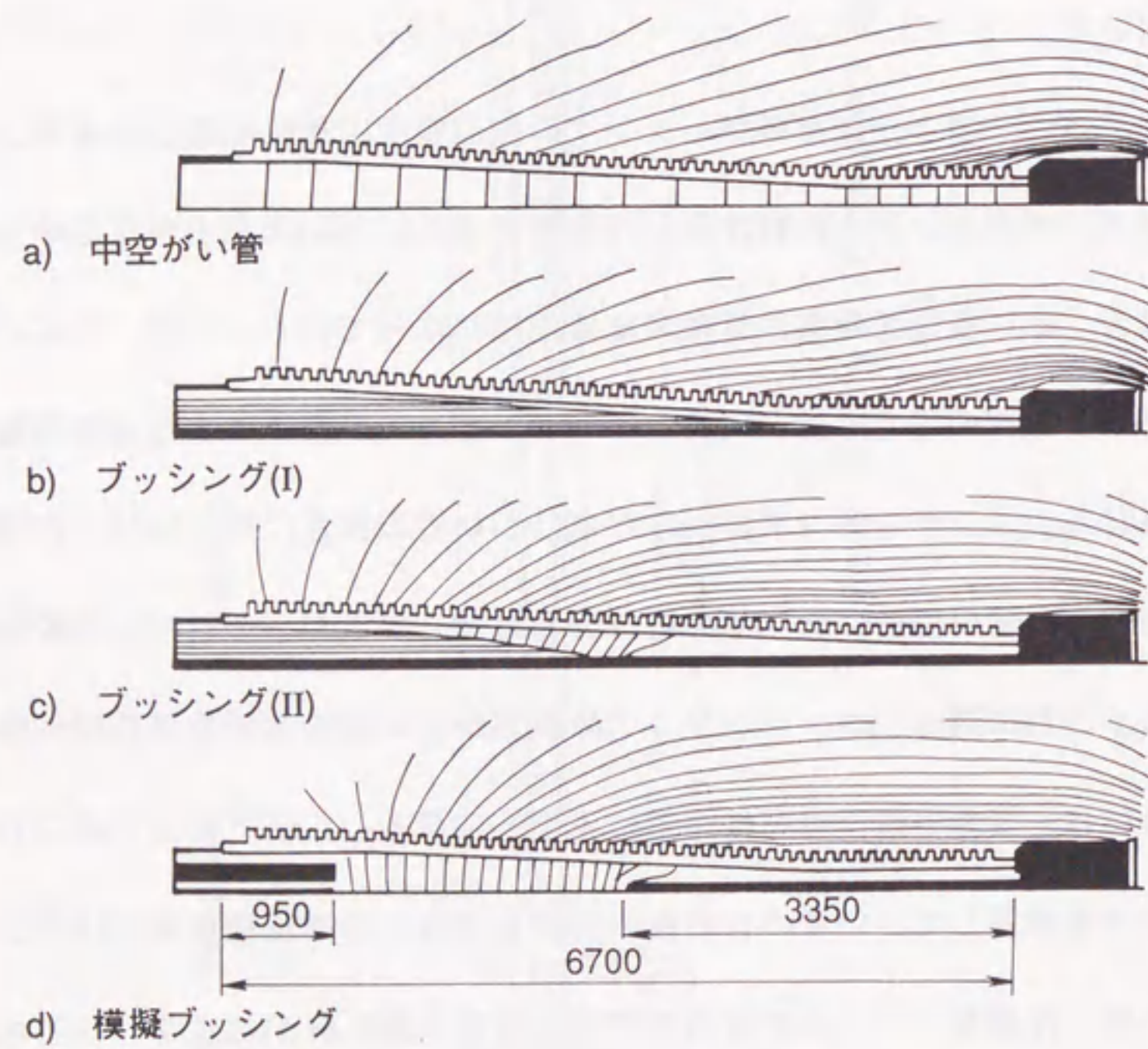


図3.6 がい管、ブッシングの直流課電時の電位分布

表3.5 供試がい管の寸法諸元

| 笠形状          | 胴径 (mm) | 平均直径 (mm) | 有効長 (m) | 笠ピッチあたりの漏れ距離と笠ピッチの比 |      |
|--------------|---------|-----------|---------|---------------------|------|
| タイプA<br>段違い笠 |         | 300       | 354     | 4.0                 | 3.43 |
|              |         | 445-700   | 687     | 6.25                |      |
|              |         |           |         | 6.69                |      |
| タイプB<br>下ひだ笠 |         | 165       | 247     | 1.0                 | 3.82 |
|              |         | 571       | 653     | 0.72                |      |
|              |         |           |         | 478                 |      |
| タイプC<br>外ひだ笠 |         | 125       | 207     | 0.82                | 3.64 |
|              |         | 356       | 438     | 0.81                |      |
| タイプD<br>下ひだ笠 |         | 630       | 685     | 2.0                 | 2.64 |
|              |         | 440-800   | 675     | 6.25                |      |
| タイプE<br>下ひだ笠 |         | 356       | 462     | 0.79                | 4.5  |
|              |         | 571       | 677     | 2.0                 |      |



### 3.4.2 不平等注水耐電圧試験

#### (1) 試験方法

通常、清浄がいしの注水条件下のフラッシュオーバー電圧は、汚損がいしの湿潤条件下のフラッシュオーバー電圧に比べると非常に高い。したがって、交直変換所の直流側壁貫ブッシング多数が、降雨条件下で直流の運転電圧によってフラッシュオーバーするのは、何等かの原因で不平等湿潤となっているのではないかと考えられる。壁貫ブッシングでフラッシュオーバー事故が多発しているのに、同じ変換所の他の機器用がいしはほとんどフラッシュオーバーしていない。壁貫ブッシングは、降雨時風向きによっては、図3.7に示すようにブッシングの壁面への取付基部のがい管表面の湿潤が建物により妨げられる。このような場合、ブッシングのがい管表面には湿潤部分と乾燥部分が生じ、がい管表面の電位分布は極度に不均一となる。電位が集中した乾燥部のがい管と気中の沿面でまず部分的に絶縁が破壊し、続いて湿潤部に印加電圧の大部分が加わってフラッシュオーバーが発生すると考えられる。そこで、このような状態を模擬するため図3.8に示す配置で不平等湿潤時の耐電圧を測定する。この図に示すように、供試試料の上方にしゃへい板を置き、接地端部のがい管表面の湿潤を妨げる。しゃへい長さLを1.5m～3mの範囲で変化させている。人工霧室内における試験設備と供試試料の配置を図3.9に示す。10分間一定の電圧を印加し、耐圧またはフラッシュオーバーに応じて印加電圧を約10%ステップで上げ下げし、最高の耐電圧レベルを求める。その他の試験条件は以下の通りである。

- ・注水量 : 5mm/分
- ・注水抵抗率 :  $3k\Omega - cm$
- ・がいしの配置 : 水平より $15^\circ$  上向き

#### (2) 試験結果

不平等注水耐電圧試験結果を図3.10に示す。供試試料の構造、寸法も同図に

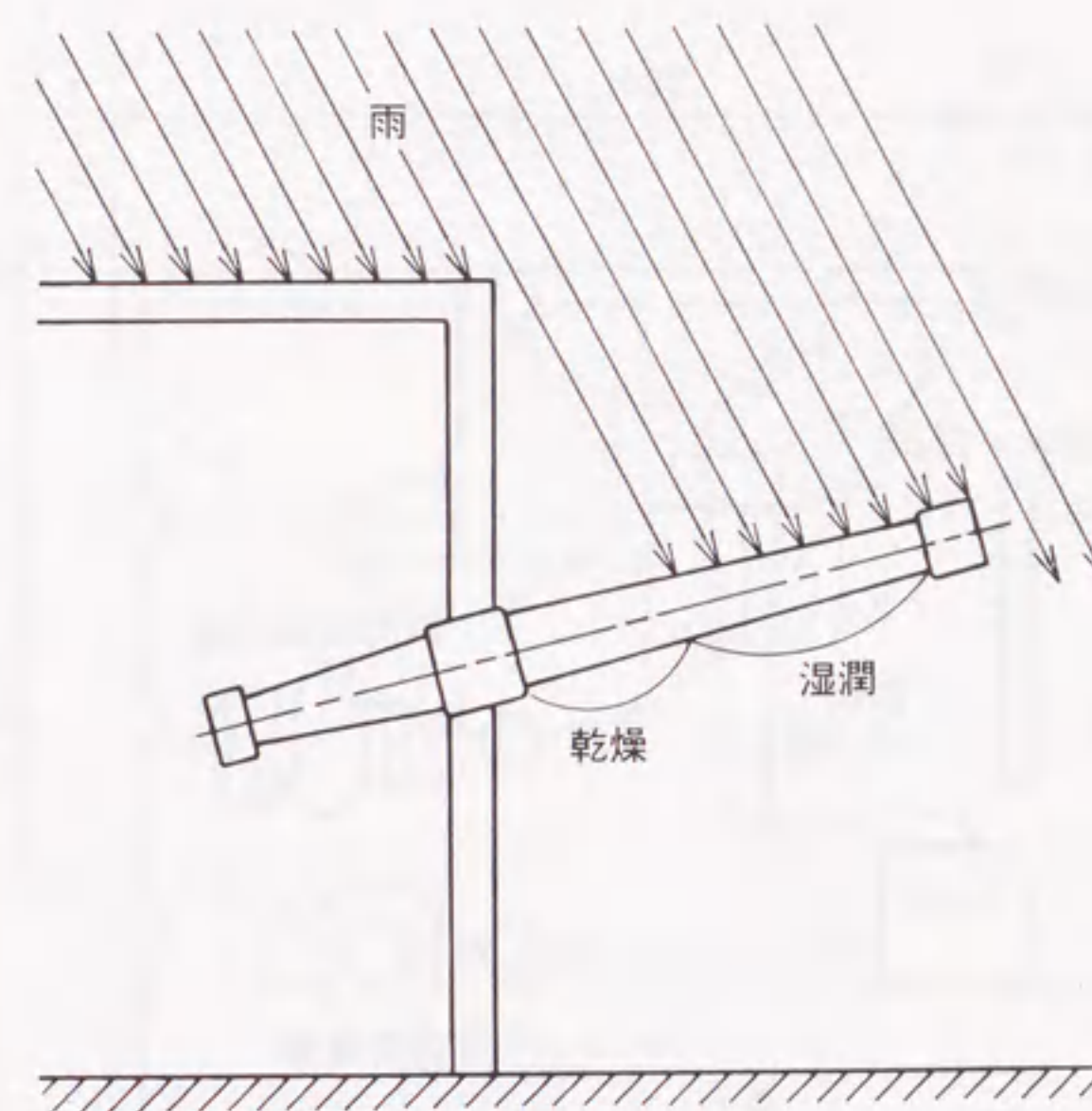


図3.7 降雨時の壁貫ブッシング表面の不平等湿潤発生原理

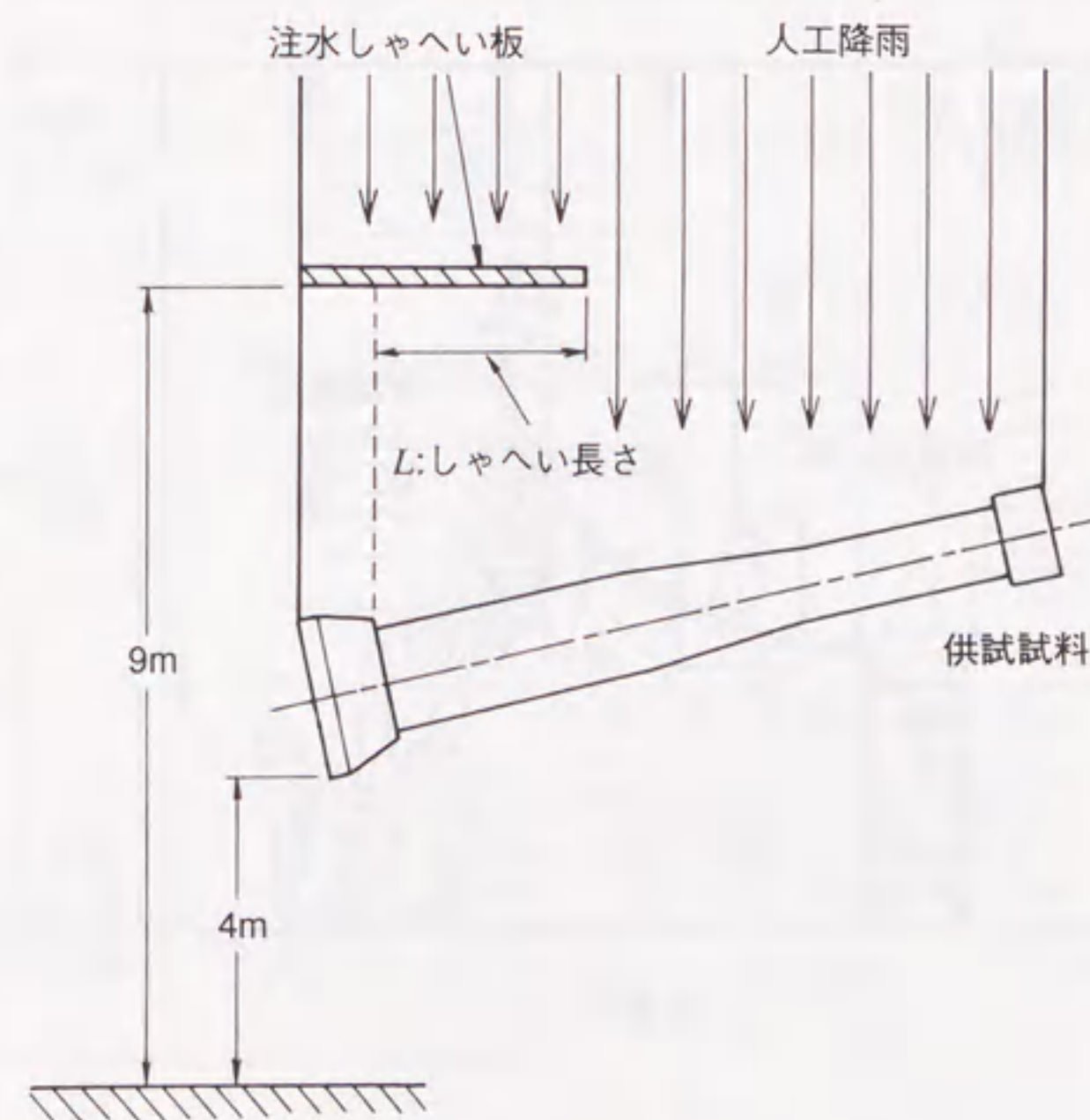
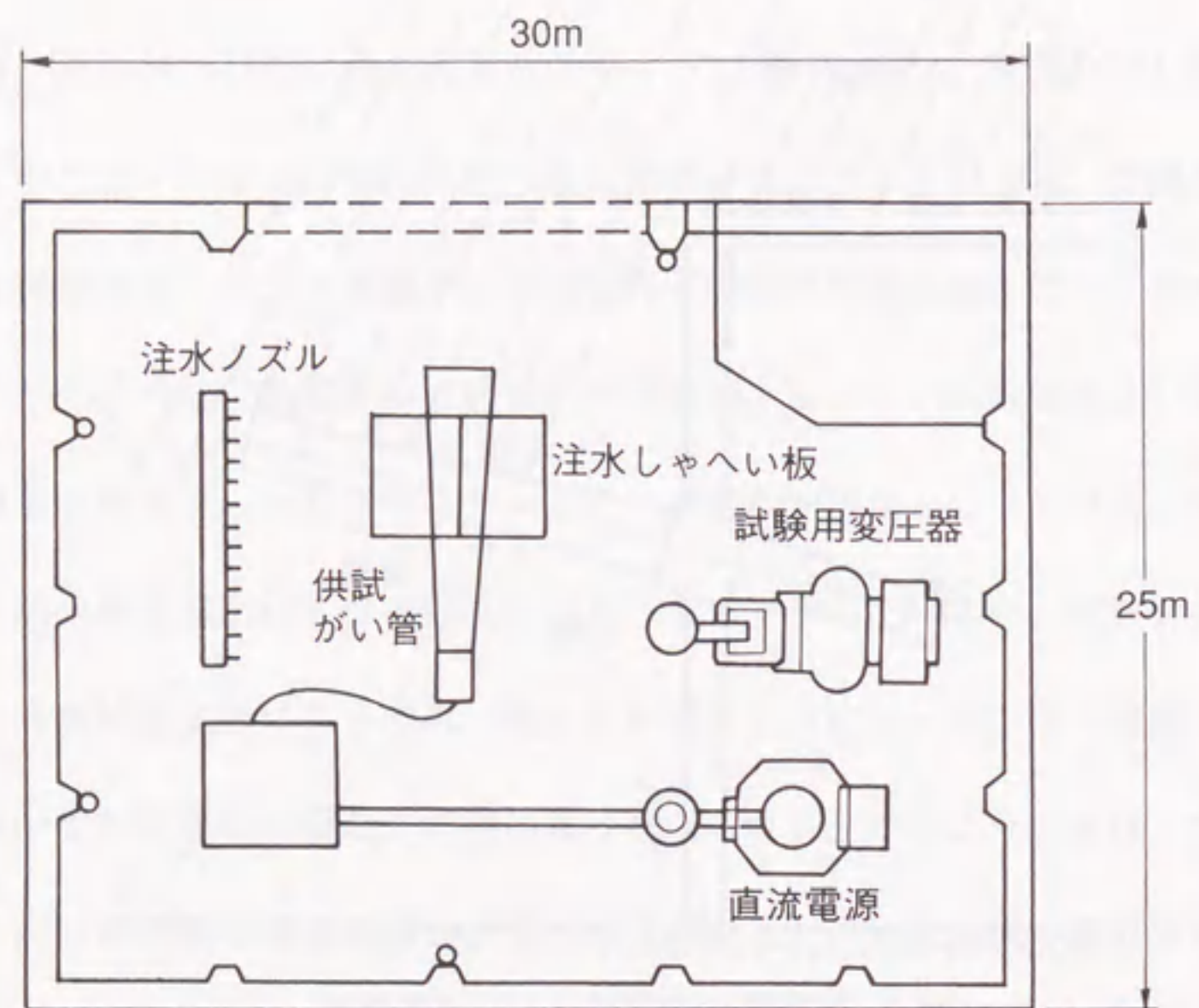
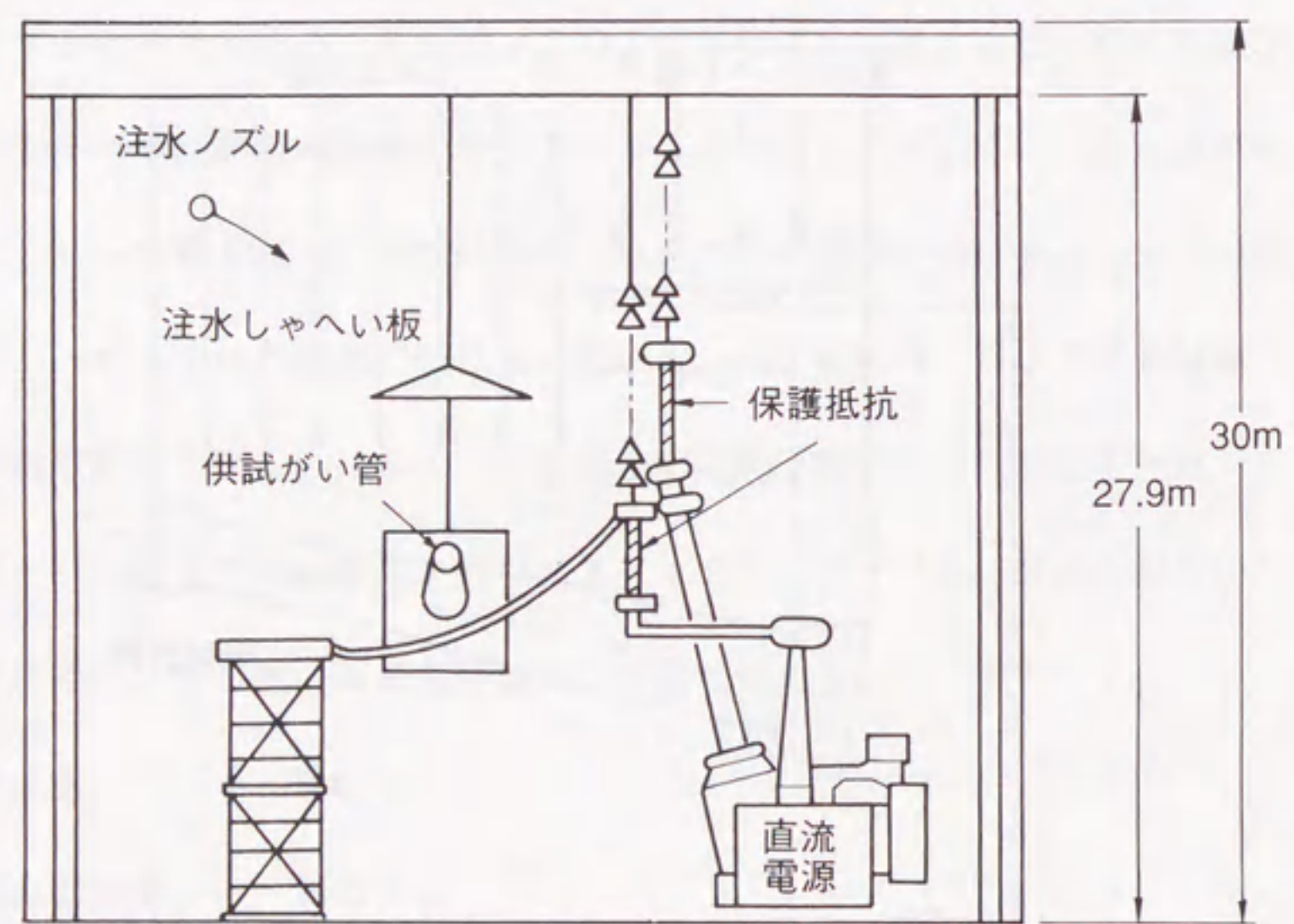


図3.8 不平等注水試験配置



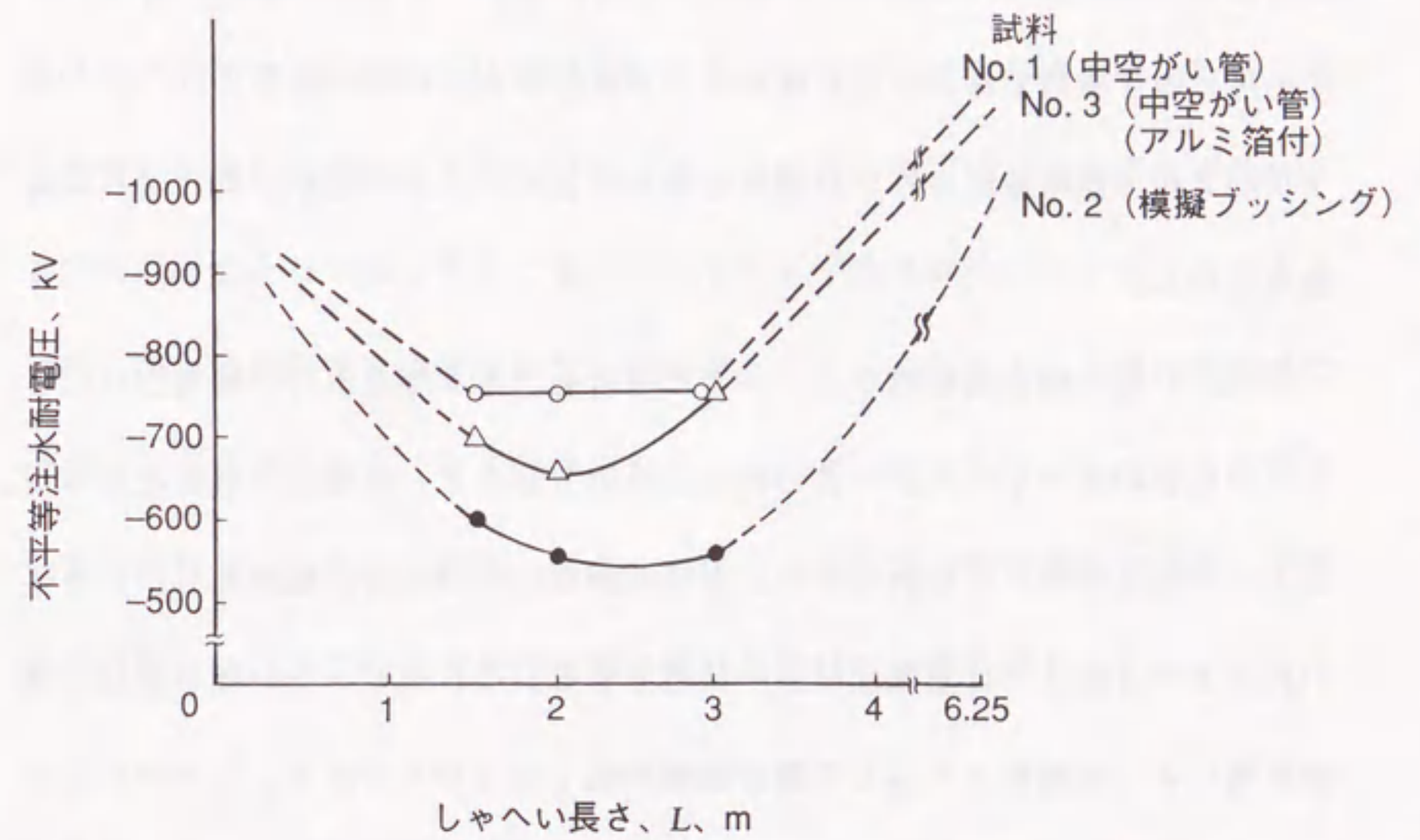


(a) 平面図



(b) 立面図

図3.9 直流汚損試験設備を用いた不平等注水試験



| 試料No.                         | 概形  | 笠形状              |
|-------------------------------|---|------------------|
| No. 1<br>中空<br>がい管            | 水切り笠 (4枚)<br>中空<br>6250<br>6700                 | タイプD<br>70<br>70 |
| No. 2<br>模擬<br>ブッシング          | 300 3100 2850<br>油<br>6250<br>6700<br>水切り笠 (4枚) | タイプD<br>70<br>70 |
| No. 3<br>中空<br>がい管<br>(アルミ箔付) | 中空<br>6250<br>7900<br>アルミ箔                      | タイプA<br>70<br>65 |

図3.10 不平等注水耐電圧試験結果



示す。供試試料は、笠形状がタイプDの中空がい管、同一がい管で内部電極と絶縁油を内部に詰めた模擬ブッシング、笠形状がタイプAの中空がい管（アルミ箔付）の3種類である。笠形状がタイプAの中空がい管の場合には、ドーナツ状のアルミ箔電極によりがい管の有効長をタイプDの中空がい管と同じに調整している。

中空がい管の場合も模擬ブッシングの場合も、不平等注水時の耐電圧は、しゃへい長さが2～3m（がい管の有効長の約3分の1）の場合に最低となった。しゃへい長さゼロ、すなわち平等注水時の耐電圧約900kVに端を發し、しゃへい長さ2～3mまでは耐電圧は徐々に低下する。これはしゃへい部が容易に局部放電によって橋絡され残りの絶縁距離が短くなるからである。しゃへい長さがさらに長くなると、しゃへい部分の耐電圧が次第に高くなり全体の耐電圧も高くなっていく。本実験ではコンデンサコアの長さががい管の有効長の50%程度の模擬ブッシングを用いるので、同一笠形状、同一寸法のがい管でも、中空がい管に比べ模擬ブッシングの方が耐電圧の低下が顕著である。模擬ブッシングの接地端の乾燥部では図3.11に示すような強い局部放電が発生する。この時、この局部放電の先端と内部電極との間には全電圧が加わることとなる。これによって生ずる高電界が局部放電の伸展を促し、全面フラッシュオーバーに至らしめると考えられる。このことから、不平等注水時の耐電圧はブッシングの内部コンデンサコアの長さが長い方が高くなることがわかる。

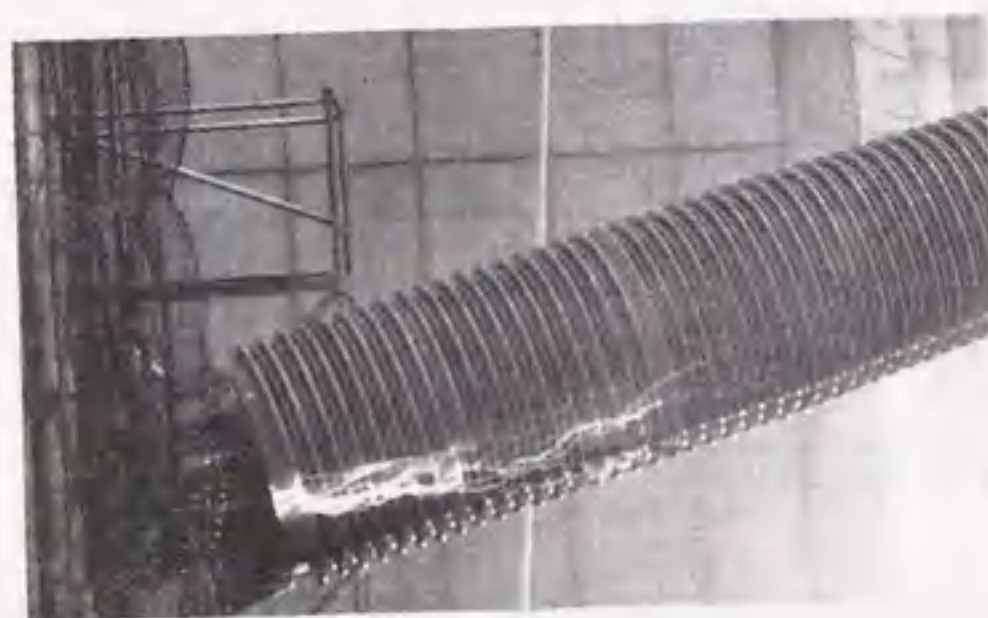


図3.11 不平等注水試験時の局部放電の発生状況（模擬ブッシング）

同じ中空がい管でも、表3.5に示す笠形状のうち、下ひだ笠タイプD（図3.10、No.1）と段違い笠タイプA（図3.10、No.3）とでは、前者の方が耐電圧が若干高い。下ひだタイプの笠形状のがい管の場合には、笠の外径が隣接する笠よりも一廻り大きい水切り用の笠が4個ついている。この水切り笠は、変電所などのがいしの汚損対策として日本で広く採用されている注水活線洗浄時の落下水による笠間の橋絡に起因する耐電圧の低下を防ぐためのものである。今回の試験では模擬ブッシングは水平に取り付けられているので、水切り笠がなくても水切り効果に差はないと考えられる。しかし、局部火花放電が笠先端部を橋絡して伸展する際、この水切り笠が火花放電の伸展を妨げる可能性がある。

### 3.4.3 がい管の平等注水耐電圧試験

#### (1) 試験方法

不平等湿潤条件下では直流側壁貫ブッシングの耐電圧は大幅に低下することが分かったが、笠形状面から不平等注水時の耐電圧が改善できるか否かを調べる。まず、表3.5に示す各種笠形状の空がい管を用い、笠形状の影響を平等注水条件下で実験により調べることにした。

注水量、注水抵抗率、試料取付配置、電圧印加手順は全て、前節の不平等注水試験と同一である。なお、がい管の有効長を種々変えるため、直径約100mmの円筒状の伸縮アルミ箔を、がい管胴部に巻き付け課電側の電極とする。

#### (2) 試験結果

各種笠形状を有するがい管の平均直径と平等注水時の耐電圧の関係を図3.12に示す。耐電圧は単位有効長あたりに換算し、有効長が異なるがいしの特性を相互比較できるようにしてある。試験期間が4回にわたっておりばらつきも大きい。汚損耐電圧の場合と同様、がい管の平均直径が大きくなるにつれ耐電圧は低下する傾向を示す（平均直径の定義は(1-1)式参照）。また、笠ピッチの



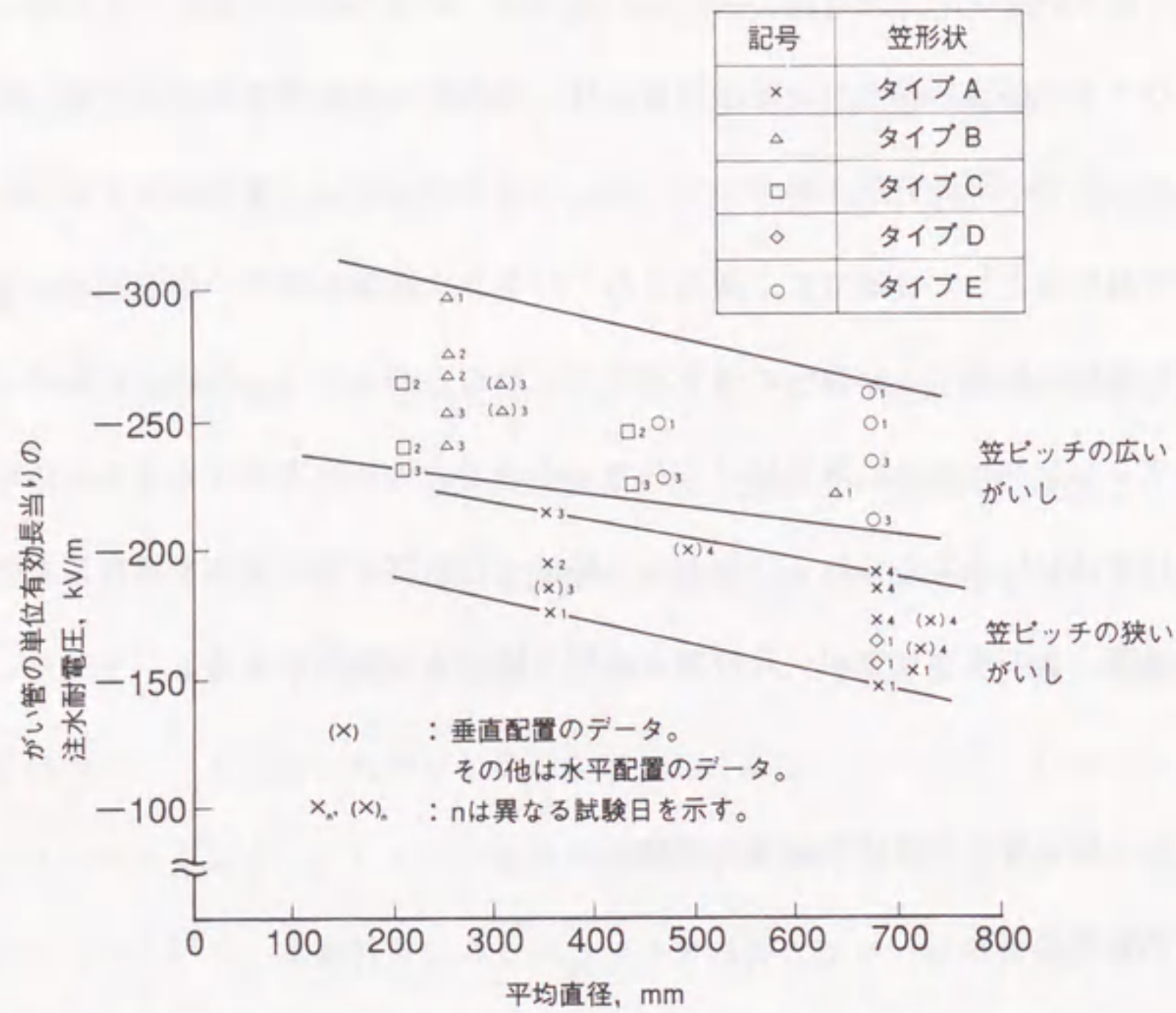


図3.12 がいがの平均直径と平等注水耐電圧の関係

広い(95~100mmの)がいがは、笠ピッチの狭い(70mm程度の)がいがに比べ、同じ平均直径でも耐電圧は高くなるのがわかる。注水条件下でも笠ピッチが狭いほど局部火花放電が笠先端間を橋絡し易く、耐電圧が低下するためと考えられる。笠間が局部火花放電によって橋絡されると、その間の表面漏れ距離が絶縁性能に有効に寄与しなくなるからである。

図3.13は、同じ笠形状をもつがいがの、有効長と平等注水時の耐電圧の関係を示す。有効長4 mまで、注水耐電圧は有効長にほぼ比例して直線的に上昇する。なお、垂直配置と水平配置の比較をタイプAの笠形状について行ったが、この図に示すように両者に顕著な差異は認められなかった。

今回の実験では、がいがの有効長と平等注水時の耐電圧の間には比例関係の成り立つことが確認され、また、水平配置と垂直配置の差は認められなかった。

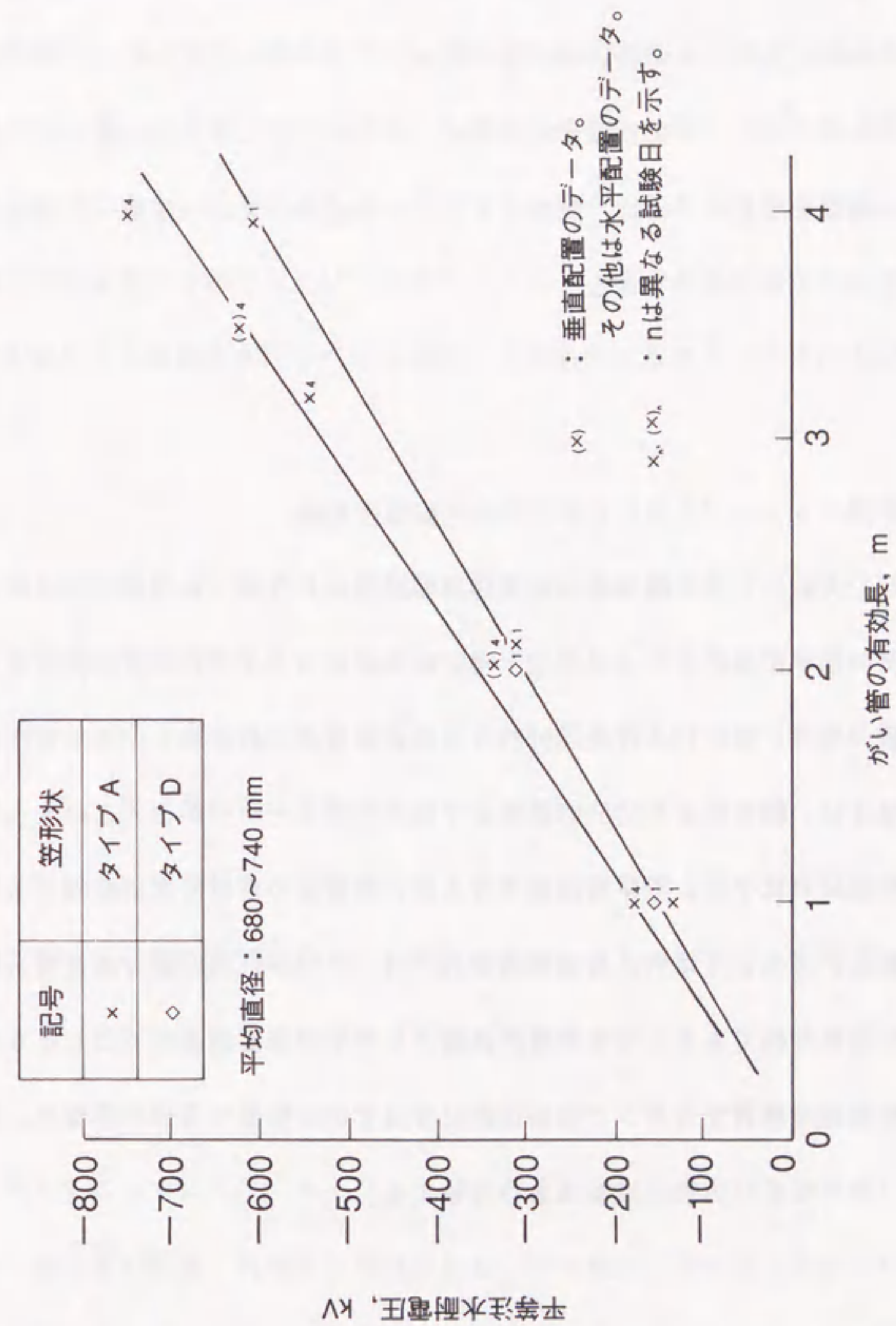


図3.13 がいがの有効長と平等注水耐電圧の関係



しかし、より長尺のがい管について垂直配置で注水試験を行えば、がい管の下部では、上方から笠を伝って流れ落ちる水の量が増える。このため、笠先端間が落水水によって橋絡されることとなり、注水耐電圧はがい管の有効長に比例して上昇しなくなると考えられる。このような現象は、表3.5 に示す笠形状タイプAのように笠ピッチの狭いがい管の場合、タイプBのように笠ピッチの広いがい管の場合に比べ、より顕著に現れる。したがってこのような落水水による笠間の橋絡を防止するには、隣接する笠よりも直径の大きい笠を一定間隔で取り付けることが効果的である。

### 3.5 模擬ブッシングを用いた不平等注水耐電圧試験

3.4節で実施した予備的な注水耐電圧試験結果によれば、有効長6.25mのブッシングの水平配置における平等注水時の耐電圧は、タイプDの笠形状を有するがい管の場合、図3.13より約900kVと外挿される。これに対し、不平等注水時の耐電圧は、図3.10より550kV程度まで低下することが分かる。このように大きな耐電圧の低下は、不平等湿潤条件とがい管表面の電位分布に起因すると考えられる。このように大きな耐電圧の低下は、±500~600kV級直流送電系統においては致命的である。そこで最終段階として不平等湿潤条件下における水平取付け直流用壁貫ブッシングの耐電圧に及ぼすがい管の笠形状の影響を、模擬ブッシングを用い実規模試験により実験する。

#### 3.5.1 供試模擬ブッシング

前節と同様の模擬ブッシングを供試試料に用いる。供試模擬ブッシングの構造、寸法とがい管の笠形状を図3.14の中に示す。笠形状がタイプBとCの場合には、がい管の長さ方向に約700mm間隔で、がい管と一体に焼成された笠径が

他の笠よりも100mm大きい水切り笠が付いている。

#### 3.5.2 不平等注水耐電圧試験方法

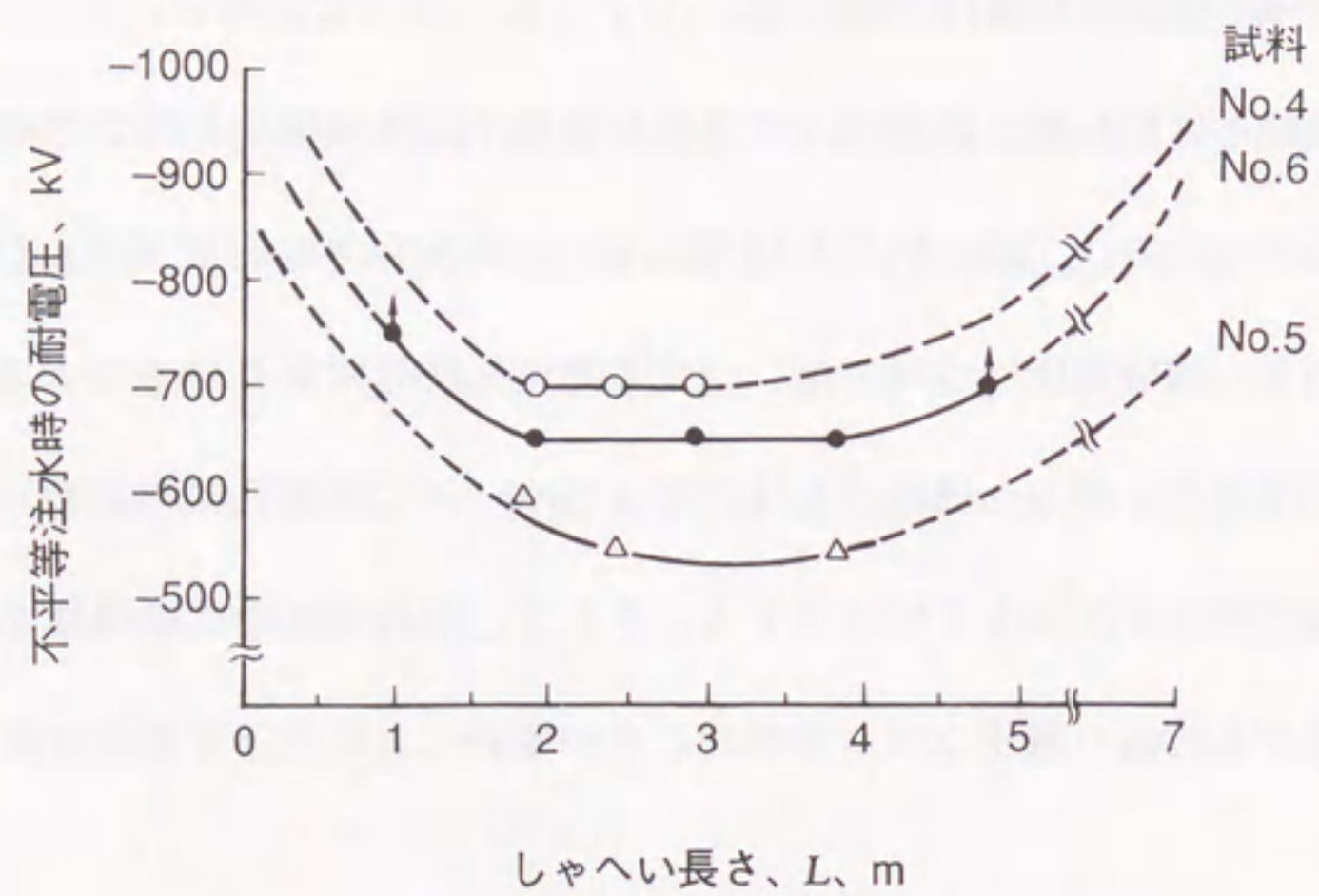
試験設備と試料配置は前節の不平等注水耐電圧試験の場合と同じである。不平等注水については、図3.8においてしゃへい長さを1mから4.8mまで変化させている。試験電圧については、一定の電圧を60分間またはフラッシュオーバーするまで印加し、耐えた場合またはフラッシュオーバーした場合に応じて、次の試験では印加電圧を約10%上げ下げする。そして、それぞれの供試模擬ブッシングが耐圧する最高の電圧レベルを求め、その条件における不平等注水耐電圧とする。

#### 3.5.3 模擬ブッシングの不平等注水耐電圧試験結果

不平等注水時の耐電圧値をしゃへい長さに対して示したものを図3.14の上部に示す。不平等注水時の耐電圧は、しゃへい長さが2~4mの時ほぼ最低となる。また、供試がい管の笠形状によって耐電圧レベルに差が見られる。図3.15は、しゃへい長さが約3mの場合の不平等注水耐電圧とがい管の笠形状の関係を、がい管の単位有効長当りの耐電圧で比較したものである。不平等注水条件下でも、今回直流送電用に開発した表3.4の深ひだ笠および外ひだ笠(タイプB, C)が、段違い笠(タイプA)に比べ、20~30%高い耐電圧を示す。

表3.5に示すように、タイプB, Cの直流用笠は、タイプAの段違い笠に比べ、表面漏れ距離/有効長の比はせいぜい10%程度しか大きくない。しかし、不平等注水耐電圧は20~30%高くなっている。これは、図3.12に示すように、タイプB, Cの笠形状がタイプAの笠形状に比べ、笠ピッチが大きく局部火花放電が笠間を橋絡しにくいためと考える。また笠形状の違いによるがい管表面の注水時の濡れ易さ、すなわち表面の絶縁抵抗率の違いも影響していると考え





| 試料No. | しゃへい長さ、L、m | 笠形状      |
|-------|------------|----------|
| No. 4 |            | タイプB<br> |
| No. 5 |            | タイプA<br> |
| No. 6 |            | タイプC<br> |

図3.14 不平等注水耐電圧試験の供試試料と結果

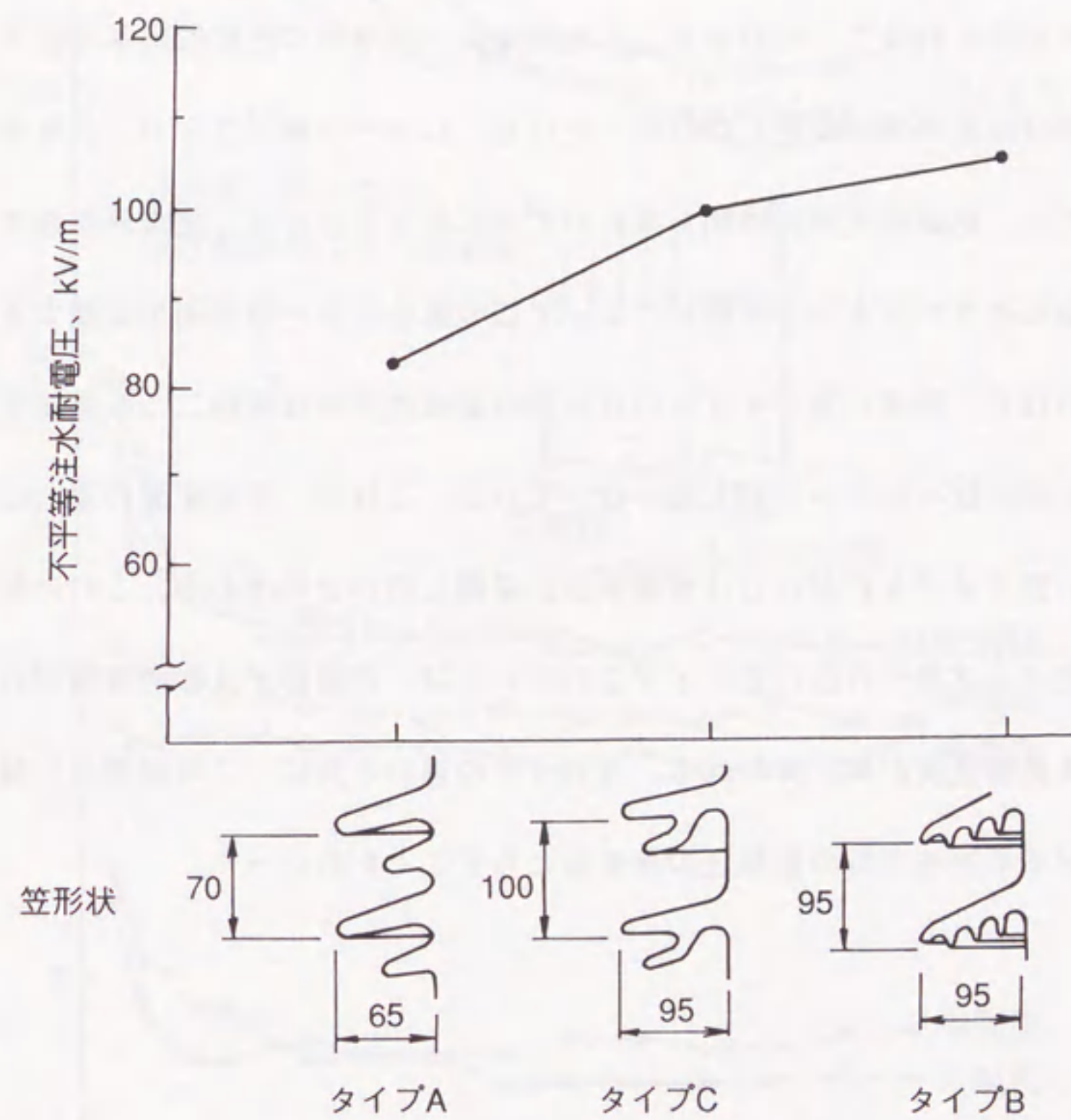


図3.15 笠形状とがい管の有効長1m当りの不平等注水耐電圧の関係 (しゃへい長さ3m)



られる。

タイプA, B, Cの笠形状について、水平配置で不平等注水条件下におけるがい管表面各部の絶縁抵抗率（平均値）を測定し、この観点から不平等注水耐電圧との関係を検討する。図3.16は、注水開始後の経過時間に対するがい管表面各部の絶縁抵抗率の変化を示す。しゃへい部の絶縁抵抗率は、注水部の絶縁抵抗率に比べ、10~100倍以上となっており、課電時印加電圧の大部分がこの部分で分担されることがわかる。注水開始後、注水部の絶縁抵抗率は低下するが、20分程度ではほぼ安定したレベルとなる。しゃへい部（ブッシング基部）においても、絶縁抵抗率が時間と共にわずかに低下するのは、注水部からの落下水の跳ね返りや注水が一部霧状になってこの部分のがい管表面を湿潤するためと思われる。段違い笠タイプAの注水部の絶縁抵抗率は他の二つの直流笠の絶縁抵抗率に比べ1/5~1/10と低くなっている。これは、水平配置の場合にも、段違い笠タイプAのがいしは表面全体が湿潤し易いためである。これに対し深ひだ笠タイプBや外ひだ笠タイプCのがいしは、笠裏部が比較的湿潤されにくいいため絶縁抵抗が高く保たれる。笠ピッチの違いと共に、この湿潤のし易さの違いが不平等注水時の耐電圧の差をもたらすことがわかった。

### 3.6 むすび

主な研究成果は以下の通りである。

- (1) 交直変換所の水平に取付けられた直流側壁貫ブッシングの降雨時における直流耐電圧の大幅な低下は、建物のしゃへい効果によってブッシング基部が比較的乾いた状態に保たれ、それによってその部分のがい管表面の軸方向の電圧分担が著しく大きくなることに起因することを究明した。
- (2) 水平配置の円筒状がいしの直流汚損耐電圧は、笠形状によっては垂直配置

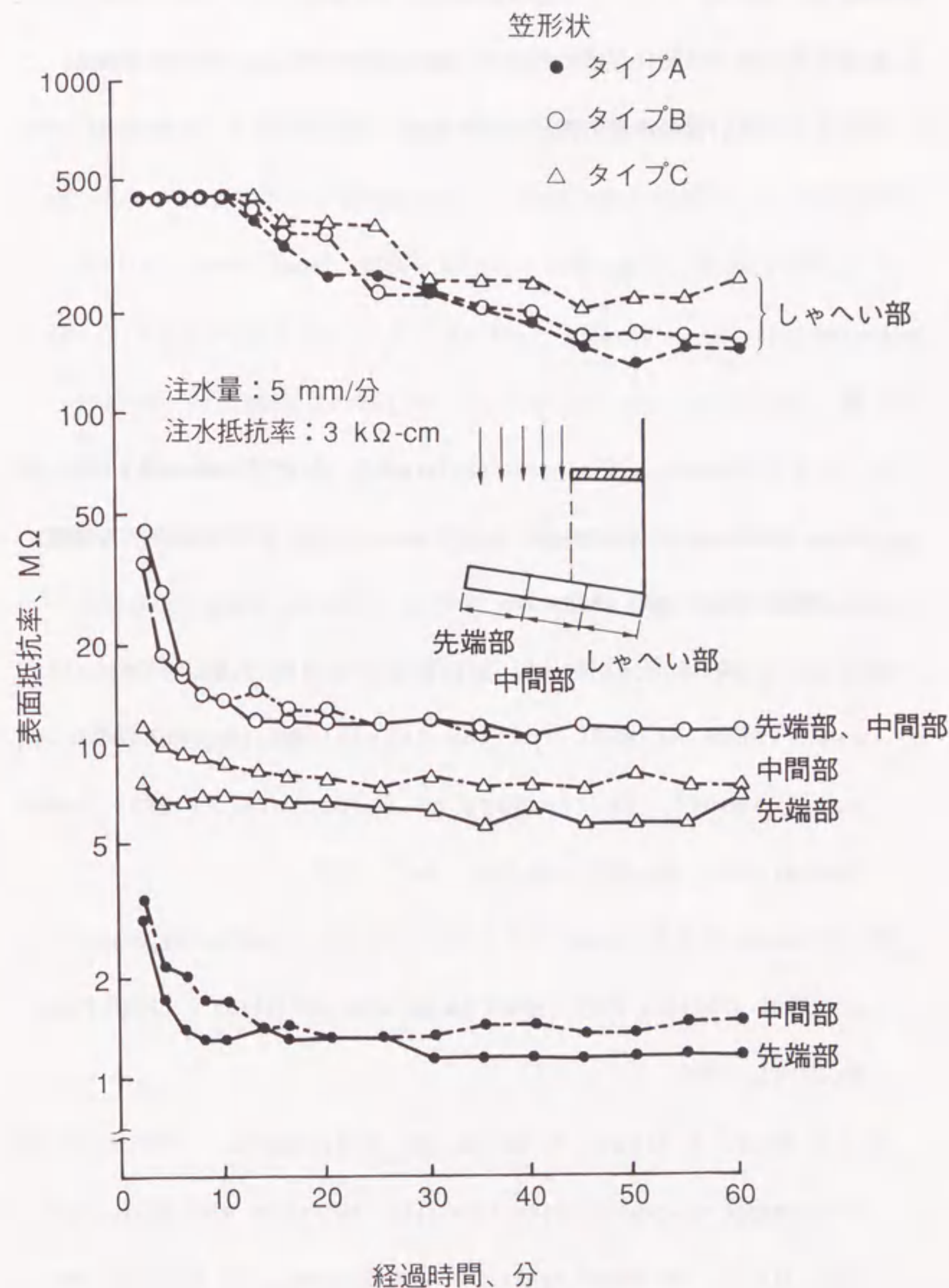


図3.16 不平等注水条件下の表面抵抗率の時間変化



の場合よりも低くなることを明らかにした。

- (3) 水平配置の直流側壁貫ブッシングの不平等注水条件下における耐電圧は笠間隔を広くとることにより改善される。さらに形状を工夫することにより注水条件下で個々の笠に湿潤されにくい個所を持たせることが有効である。これにより、がい管の沿面の電圧分担の極度の不均等を防ぐことが効果的である。

#### 文 献

- (1) C. A. O. Peixoto : "Flashover performance of HVDC converter station insulators under polluted conditions", CIGRE SC33コロキウム論文, 33.83(SC)03.4 IWD, 1983.
- (2) S. S. Low, D. J. Melvold, S. K. Mogri and C. T. Wu : "Operating experience of HVDC station insulators in contaminated environment", Proceedings of Conference on HVDC Power Transmission, pp. 185~188, Sept.-Oct., 1986.
- (3) W. Lampe, K. A. Eriksson and C. A. O. Peixoto : "Operating experience of HVDC stations with regard to natural pollution", CIGRE Paper, No. 33-01, 1984.
- (4) T. Seta, K. Nagai, K. Naito and Y. Hasegawa : "Studies on performance of contaminated insulators energized with DC voltage", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 2, pp. 518~527, 1981.
- (5) 内藤, 坂西: 「送電線路用碍子の直流汚損特性」, 碍子レビュー, No. 31, pp. 33~51, June, 1971.

- (6) 内藤, 国枝, 長谷川, 伊藤: 「ステーションポストがいし、がい管の直流汚損耐電圧特性」, NGKレビュー, No. 47, pp. 1~9, Jan., 1988.
- (7) K. Naito, S. Kunieda, Y. Hasegawa and S. Ito : "DC contamination performance of station insulators", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 23, No. 6, pp. 1015~1023, December, 1988.
- (8) H. M. Schneider : "Behaviour of HVDC wall bushing in different wetting conditions", CIGRE SC14コロキウム論文, VII-04, 1989.
- (9) C. A. O. Peixoto and J. G. C. Barros : "ITAIPU HV-DC transmission system progress report on the project implementation", CIGRE SC14 Document, 1986.
- (10) T. L. Ong, T. C. Cheng and N. G. Hingorani : "Survey of creepage distances and clearances in HVDC converter stations", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 8, pp. 2255~2265, August, 1985.



## 第4章 円筒状がいしの汚損設計に

### 及ぼす胴径の影響

#### 4.1 まえがき

変電所などで、母線の支持などに使われるSPがいし、ブッシングや種々の機器に使われるがい管類は、本質的に円筒状の胴部に多数の笠が一定間隔で張り出した形状をとっている。そのような形状のがいしを総称して円筒状がいしとっている。このような円筒状がいしの胴部の外径を胴径と称し、がいし表面が汚損湿潤した時の耐電圧にこの胴径が大きな影響を及ぼすことは交流についてはよく知られている<sup>(1) - (3)</sup>。円筒状がいしの胴径が大きくなればなるほど、同一の汚損環境下でがいし表面に付着する汚損物の付着密度が低くなるという事実が確認されているにもかかわらず、円筒状がいしの笠形状や高さが同じであれば、胴径が大きくなればなるほど、汚損耐電圧は低くなる。

これらの二つの事実を組み合わせた結果が国際的な標準規格であるIEC(International Electrotechnical Commissionの略)のPublication 815の中に示されている<sup>(4)</sup>。なお円筒状がいしの胴径が汚損性能に及ぼす影響については、笠形状が異なるがいしや胴部がテーパ状となっているがいしも含めて評価できるように、通常胴径の代わりに「平均直径」が定義され用いられている。この平均直径は(1-1)式のようにIEC Pub. 815の中で定義されている。この平均直径は、笠部と胴部を含めた円筒状がいし全体の平均的な外径である。IEC Pub. 815では円筒状がいしの平均直径に対する汚損性能の補正についての推奨値として示されている。しかし、交流についてもこの推奨値の根拠は明確ではない。これらの関係について研究された論文の数はそれ程多くない。特に直流用がいしについてはほとんど研究がなされていない<sup>(5) (6)</sup>。



このような状況において、円筒状がいしの交流および直流汚損設計に及ぼす平均直径の影響を、定量的に究明する必要があると考える。すなわち、定量的なデータに基づいて、円筒状がいしへの汚損物の付着特性と汚損物が付着した円筒状がいしの耐電圧特性に及ぼす平均直径の影響を明確にする必要がある。そうすれば、円筒状がいしの汚損設計の合理化と信頼性の向上を図ることができる。もちろん、将来 IEC Publication 815を改定する際、その裏付けを与えることにもなる。

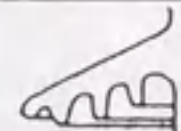
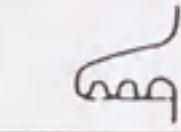
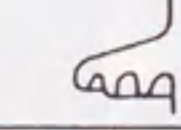
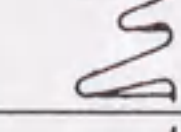
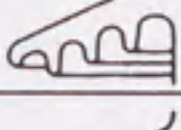
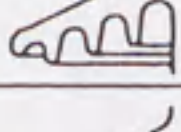
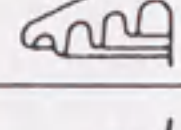
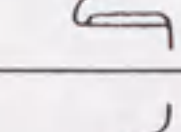
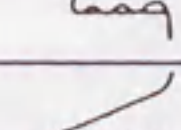
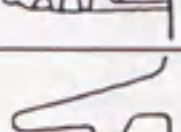
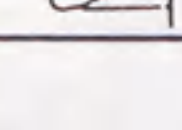
#### 4.2 供試円筒状がいしと汚損試験方法

これまで各種汚損試験に供試してきた円筒状がいしの笠形状を表4.1 に示す。交流、直流用に実用化されている各種笠形状を網羅し、有効長が1 mから13.5 m、平均直径が115mm から1350mmの円筒状がいし類が供試試料に含まれている。なお、有効長はすでに3.3 にて説明したが、円筒状がいしの高さから金具部分の高さを差し引いた磁器絶縁部の高さである。

種々の有効長を有する円筒状がいしが供試試料に含まれているので、まず円筒状がいしの有効長と汚損耐電圧との間に比例関係（直線性）が成り立つか否かを検討する。比例関係が確認できれば、耐電圧特性を円筒状がいしの単位有効長当りの汚損耐電圧、あるいは汚損耐電圧1 kV当りに必要な円筒状がいしの有効長または表面漏れ距離で評価することができる。

がいしの人工汚損試験は、特に断らない限り、図4.1 および図4.2、表1.2、表1.3および表4.2に示す直流± 750kV汚損試験設備、交流1000kV汚損試験設備を用い、定印霧中法（略して霧中法ともいう）によって行う<sup>(7)-(9)</sup>。定印霧中法は、IEEEやCIGRE で「Clean fog method」と呼ばれるがいしの人工汚損試験方法とほぼ同じであり、その手順は以下の通りである。

表4.1 供試円筒状がいしの笠形状

| タイプ | 笠形状   | 笠ピッチ<br>P(mm) | 笠出張<br>(mm) | 笠1枚当り<br>表面漏れ距離<br>L (mm) | L/P |
|-----|---|---------------|-------------|---------------------------|-----|
| A   |    | 95            | 95          | 366                       | 3.9 |
| B   |    | 70            | 70          | 238                       | 3.4 |
| C   |    | 65            | 65          | 250                       | 3.8 |
| D   |   | 27.5<br>42.5  | 36<br>65    | 240                       | 3.4 |
| E   |  | 95            | 105         | 383                       | 4.0 |
| F   |  | 105           | 105         | 393                       | 3.7 |
| G   |  | 80            | 95          | 351                       | 4.4 |
| H   |  | 70            | 70          | 190                       | 2.7 |
| I   |  | 70            | 70          | 203                       | 2.9 |
| J   |  | 92            | 120         | 407                       | 4.4 |
| K   |  | 100           | 95          | 364                       | 3.6 |



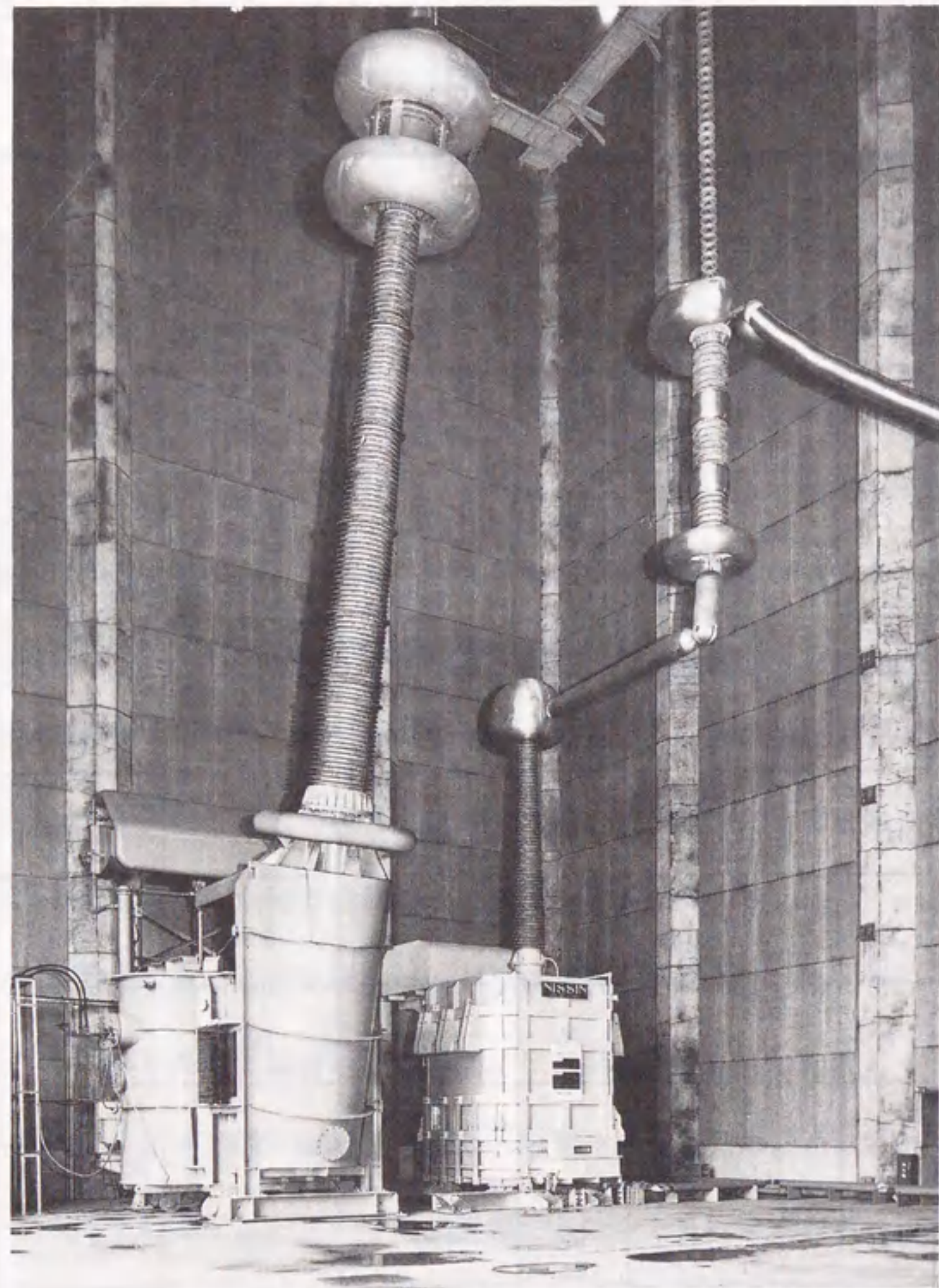
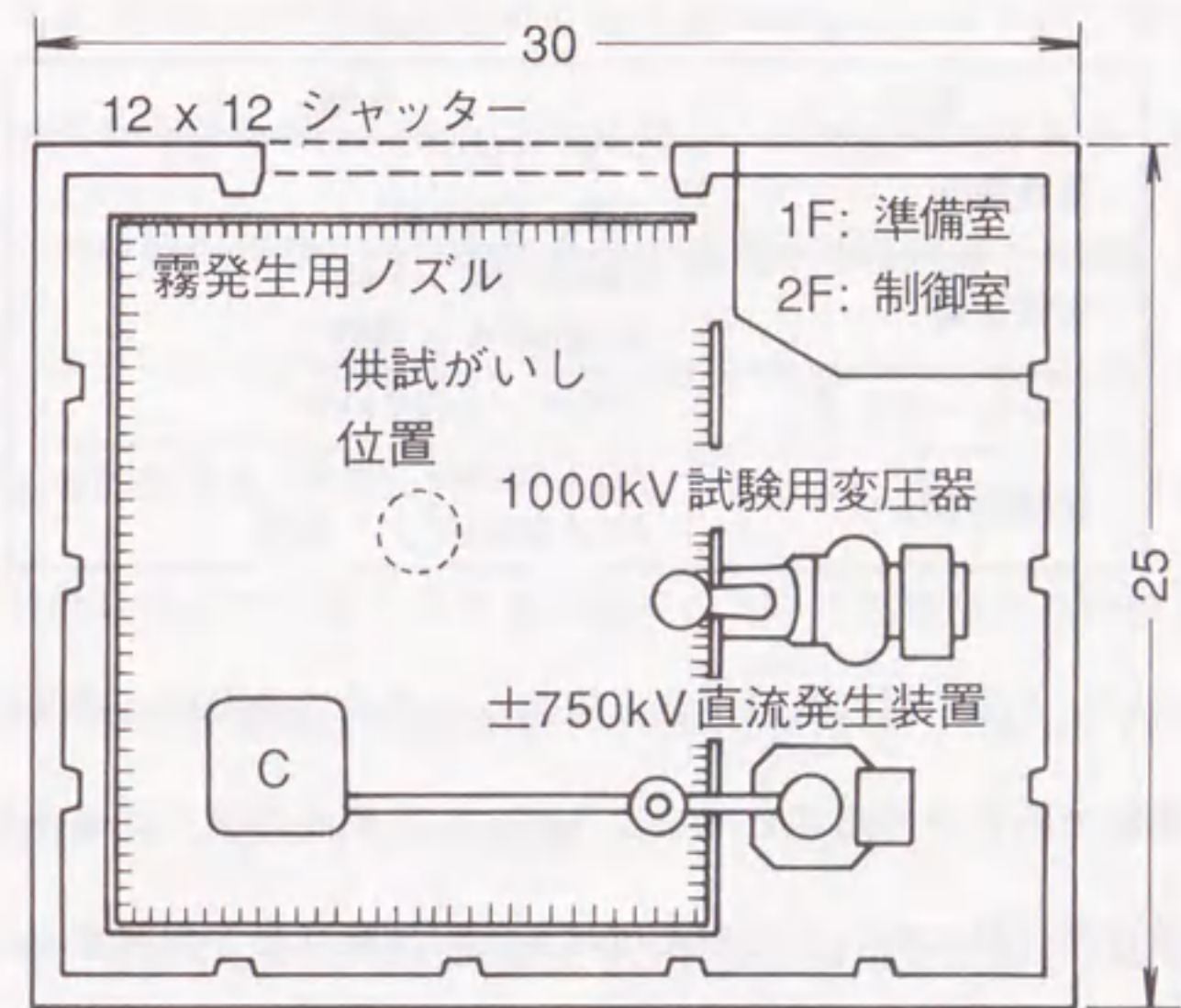
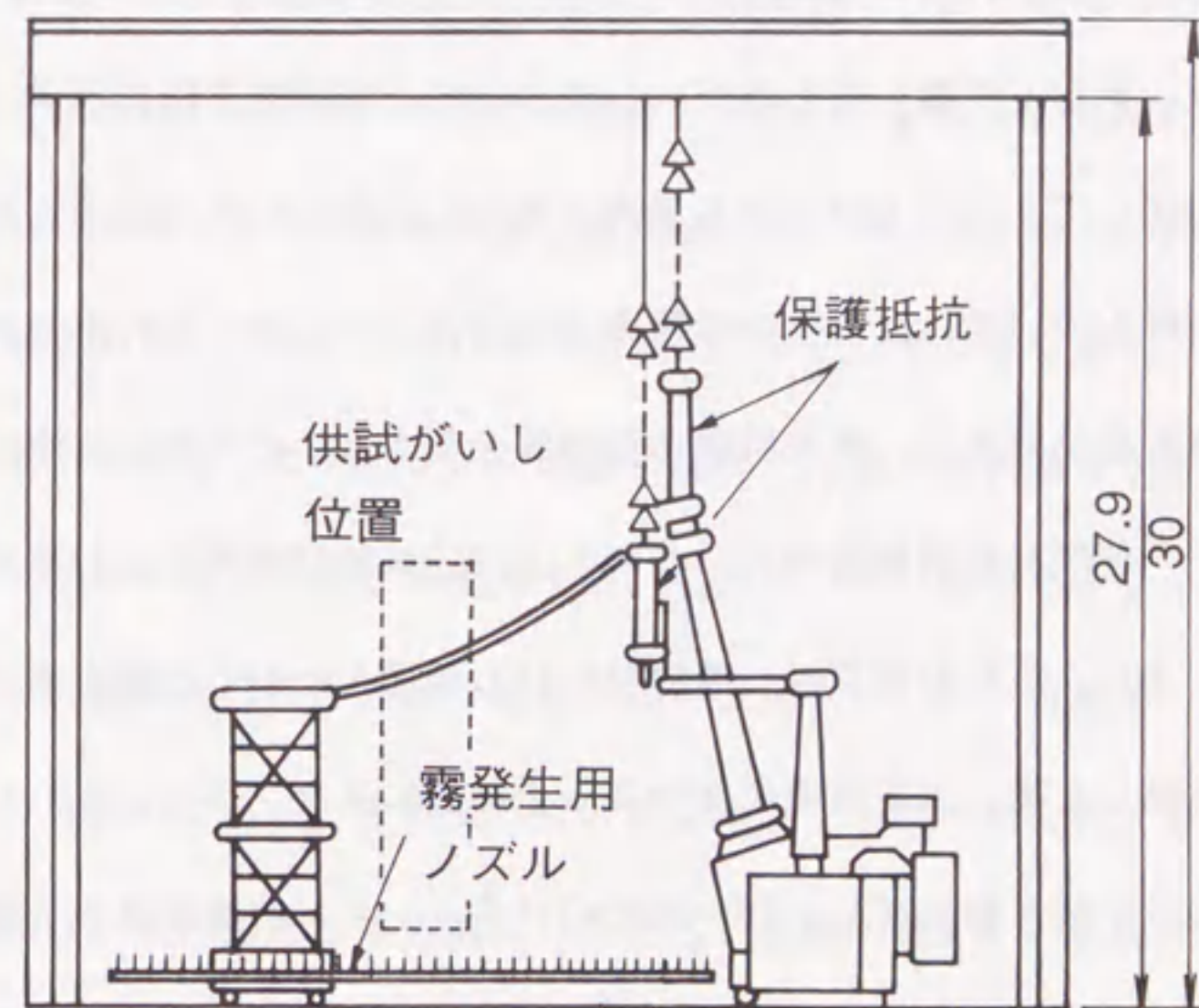


図4.1 交流1,000 kVと直流±750 kV汚損試験電源



(a) 平面図



(b) 立面図 単位: m

図4.2 がいしの汚損試験設備と配置



表4.2 1000 kV交流汚損試験用変圧器の仕様

| 項目      | 仕様                                    |
|---------|---------------------------------------|
| 定格電圧    | 一次、6 kV<br>二次、1,000 kV                |
| 定格容量    | 5,000 kVA / 1分<br>4,000 kVA / 連続      |
| インピーダンス | 4.08% / 5,000 kVA                     |
| 試験耐電圧   | AC 1,400 kV / 1分<br>AC 1,200 kV / 1時間 |

まず、がいし表面の汚れや撥水性を除去し、とのこまたはカオリンと食塩からなる懸濁液で所定の汚損度となるようがいし表面を汚損し乾燥させる。乾燥後、人工霧室内に供試がいしを据え付け所定の試験電圧を印加する。その後、霧室内に人工霧を発生させ一定時間内にフラッシュオーバーするか否かを調べる。フラッシュオーバーすれば印加電圧を5~10%下げ、フラッシュオーバーしなければ5~10%上げ、新しく汚損し直したがいしについて上記手順を繰り返す。同一電圧を4回印加して3回以上耐圧する最高の電圧レベルをその汚損度における霧中耐電圧と呼んでいる。なお、定印霧中法は供試がいしの寸法に応じた大きさの人工霧室が必要であり、また試験に長時間を要する。このため日本では「等価霧中法」と呼ばれる試験法ががいしの人工汚損試験の簡便法として古くから用いられてきた。この方法では、清浄ながいし表面をとのこと塩を水に混ぜた懸濁液で汚損した後、直ちに電圧を印加し上昇法によりフラッシュオーバー電圧を求める。この手順を繰り返し、10~20回のフラッシュオーバー電圧値から統計的に5%のフラッシュオーバー確率を与える電圧値を求める。交流の場合、円筒状がいしの定印霧中耐電圧値と5%フラッシュオーバー電圧値はほぼ同じ値になることが確かめられており、両者を合わせて汚損耐電圧と呼んでいる。

#### 4.3 円筒状がいしの有効長と汚損耐電圧との間の比例関係

表4.1に示す各種の笠形状のうちUHV送電に用いるがい管用に試作されたタイプJの笠と998mmの平均直径を有する中空がい管と、同じがい管で内部にコンデンサコアを有するブッシングについて、人工汚損試験により、塩分付着密度を変え、がい管の有効長と交流ならびに直流の汚損耐電圧の関係を求める。試験に用いるブッシングの構造と寸法を図4.3に示す。これはUHV送電用機器開発の途上で製作されたプロトタイプブッシングである。がい管およびブッシングの有効長は、がい管の途中に円筒状のアルミ箔電極を巻付けて調整している。このアルミ箔電極は頂部電極と電氣的に接続されており、図示のように有効長に応じてシールドリングの位置も上下している。

交流課電の場合中空がい管の汚損耐電圧特性は有効長に対し図4.4のような特性を示すことが確認されている<sup>(10)</sup>。がい管表面の塩分付着密度が0.03mg/cm<sup>2</sup>以上では、がい管の有効長が13.5mまでの範囲で、がい管の有効長に対し比例関係(直線性)を示す。塩分付着密度が0.01mg/cm<sup>2</sup>以下の清浄に近い場合には、600kVを越えると汚損耐電圧は飽和傾向を示すことがある。図では破線で示す領域である。しかし、がい管の内部にコンデンサコアを備え、がい管頂部の電界集中を緩和したブッシングの場合には、汚損耐電圧は600kV以上でもがい管の有効長にほぼ比例して上昇する。これは、がい管内部のコンデンサコアによりがい管表面の長さ方向の電位分布が改善され、がい管頂部の電界強度が緩和されるためである。このように内部にコンデンサコアを有するブッシングの場合には、軽汚損から重汚損にいたる広い範囲で図4.4の実線で示すように、がい管の有効長と汚損耐電圧の間には比例関係(直線性)が成り立つ。

交流の場合と同じ供試がい管について、中空がい管の有効長と直流汚損耐電圧の関係を人工汚損試験により求めた。試験結果を図4.5に示す<sup>(10)</sup>。直流の場合には、中空がい管についても、有効長が11.5mまでの範囲でがい管の有効



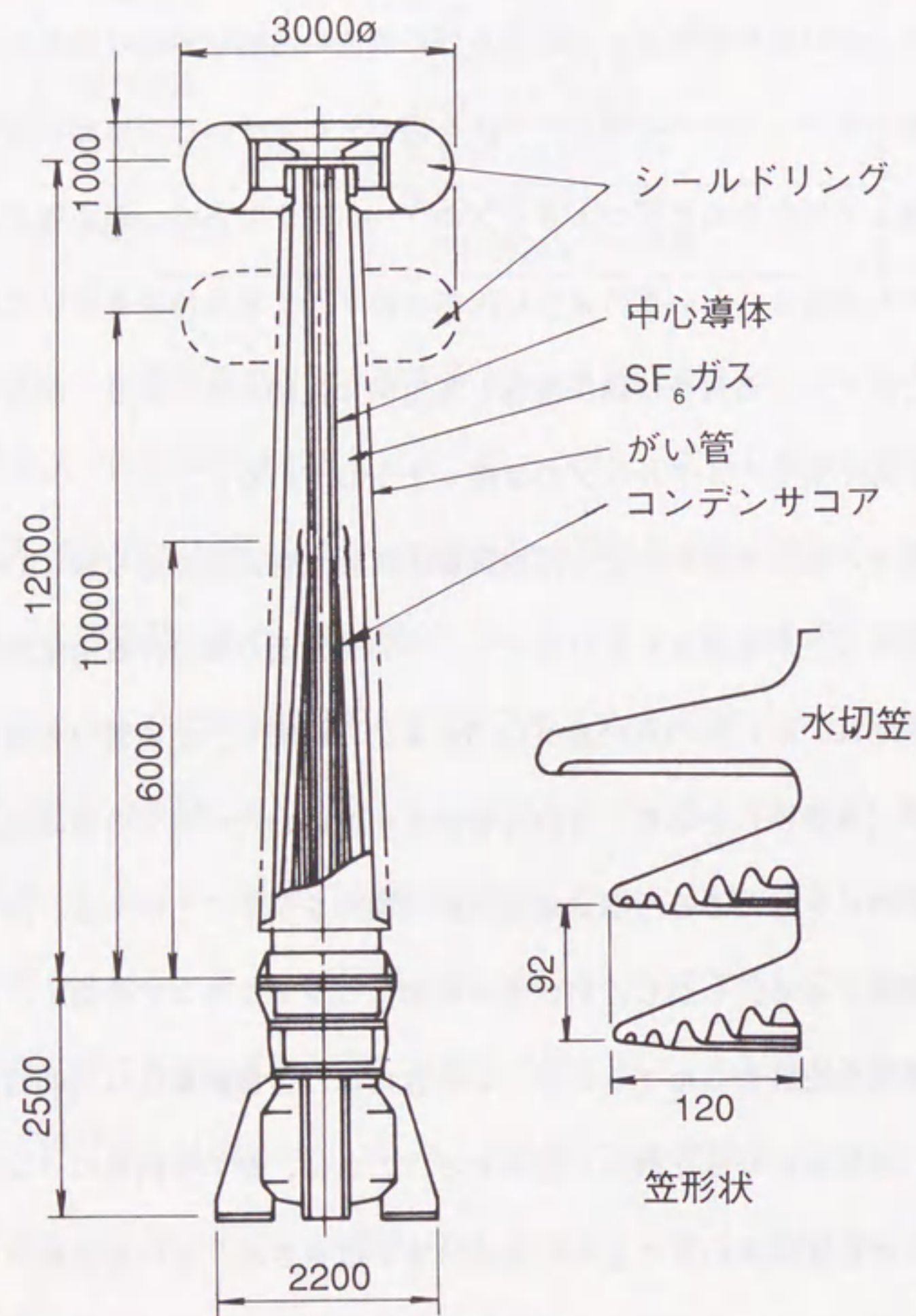


図4.3 プロトタイプUHVガスブッシングの概略構造と寸法

| 供試々料  | 記号  | 塩分付着密度 |
|-------|-----|--------|
| ブッシング | —●— | 0.01   |
|       | —○— | 0.03   |
| がい管   | —□— | 0.01   |
|       | —○— | 0.03   |
|       | —●— | 0.06   |
|       | —△— | 0.12   |
|       | —▲— | 0.35   |

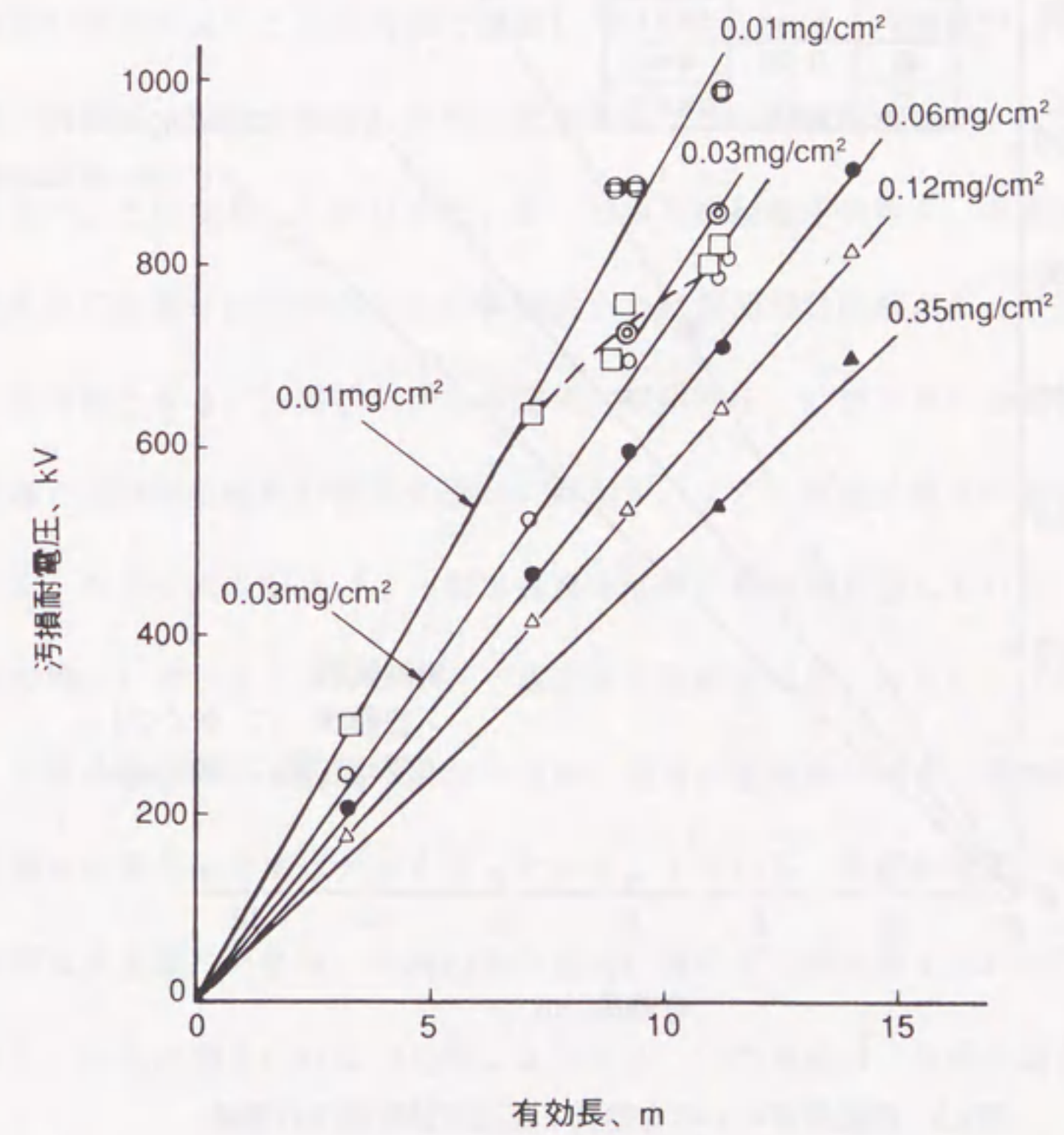


図4.4 平均直径が998 mmの円筒状がいしの有効長と汚損耐電圧（交流、実効値）との関係



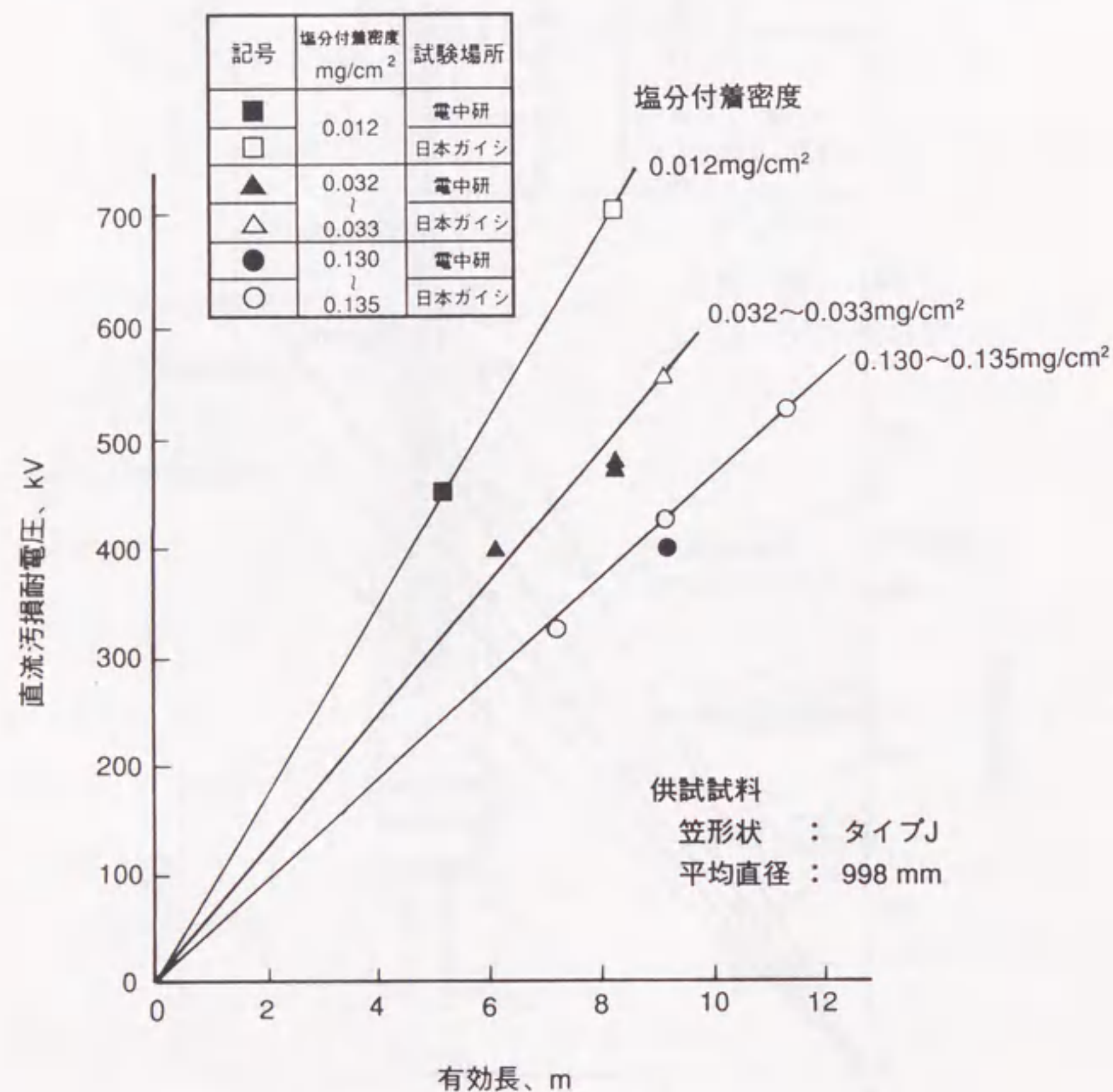


図4.5 円筒状がいしの有効長と直流汚損耐電圧の関係

長と汚損耐電圧間に比例関係が成り立つ。直流の場合、耐電圧値そのものは交流の場合よりも低い、塩分付着密度が 0.012mg/cm<sup>2</sup>においても、± 700kVまで有効長と汚損耐電圧の間に比例関係の成り立つことがわかる。直流の場合には交流の場合のように特別の配慮をしなくても直線性がみられる。

#### 4.4 円筒状がいしの平均直径と汚損耐電圧の関係

円筒状がいしの有効長と汚損耐電圧の間には、基本的には比例関係（または直線性）が成り立つことを前節で確認した。したがって、円筒状がいしの汚損耐電圧特性は、円筒状がいしの単位有効長当たりの汚損耐電圧によって議論すればよいことになる。これはまた、がいしの汚損耐電圧特性を、汚損耐電圧 1 kV 当たりに必要な円筒状がいしの有効長または表面漏れ距離によって評価することを可能とする。円筒状がいしの交流汚損耐電圧 1 kV 当たりに必要な表面漏れ距離と塩分付着密度の関係を図4.6 に示す。また、直流の場合の関係を図4.7 に示す。なお交流の場合には一部等価霧中法の試験結果も含んでいる。等価霧中法の場合には 5% フラッシュオーバー電圧値を汚損耐電圧とみなしてプロットした。交流の場合よりも直流の場合の方が、塩分付着密度が増えた場合に必要な表面漏れ距離の増加率は大きくなっている。すなわち、汚損耐電圧 1 kV 当たりに必要な表面漏れ距離は、交流の場合塩分付着密度(SDDと略す)のほぼ1/5乗に比例し、直流の場合にはほぼ 1/3乗に比例する。この乗数は、交流の場合も直流の場合も、円筒状がいしの平均直径には無関係にほぼ一定である。以上の関係は以下のようにいいかえることもできる。すなわち、表面漏れ距離が一定の円筒状がいしの汚損耐電圧は、交流の場合(SDD)<sup>-1/5</sup>に、直流の場合(SDD)<sup>-1/3</sup>にそれぞれ比例して低下する。



汚損耐電圧1kV当りに必要な表面漏れ距離、L/E、mm/kV

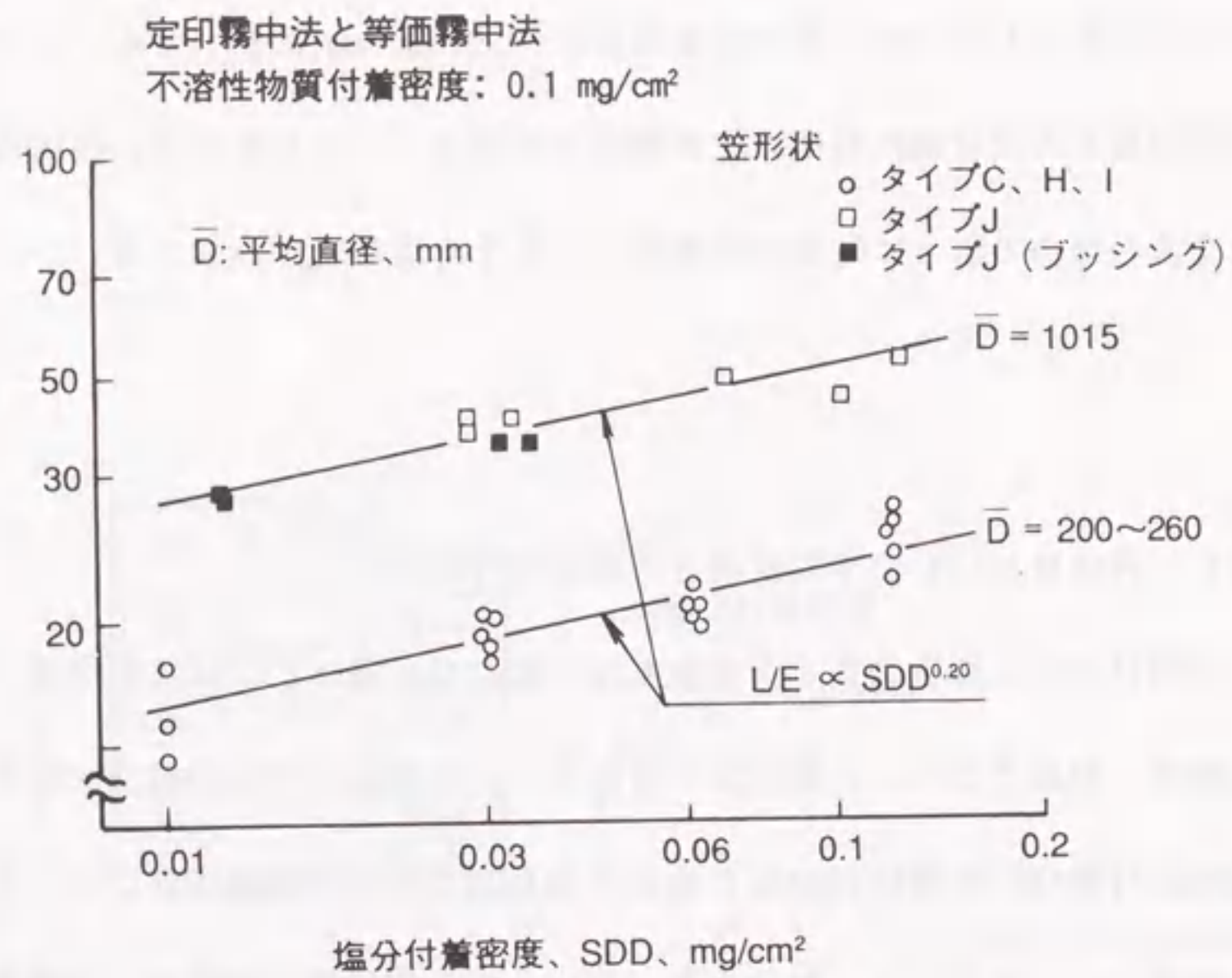


図4.6 交流の汚損耐電圧1kV当りに必要な円筒状がいしの表面漏れ距離と塩分付着密度の関係

汚損耐電圧1kV当りに必要な表面漏れ距離、L/E、mm/kV

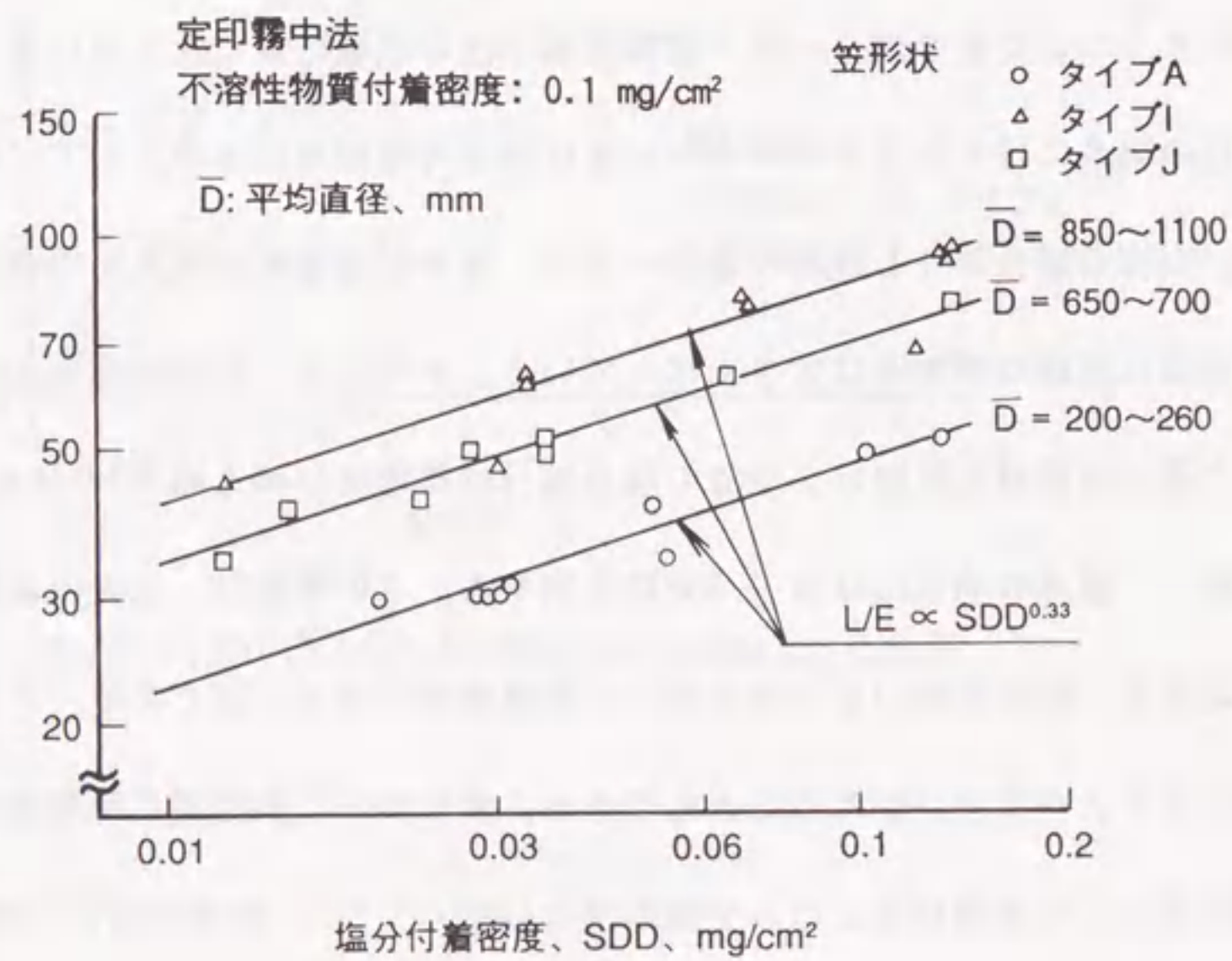


図4.7 直流の汚損耐電圧1kV当りに必要な表面漏れ距離と塩分付着密度の関係

塩分付着密度が0.03mg/cm<sup>2</sup>の場合の円筒状がいしの交流汚損耐電圧1kV当りに必要な表面漏れ距離と円筒状がいしの平均直径の関係を図4.8に示す。なお、図中には、図4.6の場合と同様、等価霧中法による5%フラッシュオーバー電圧値も含まれている。交流の汚損耐電圧1kV当りに必要な表面漏れ距離は、円筒状がいしの平均直径の0.43乗に比例することがわかる。

塩分付着密度が0.03mg/cm<sup>2</sup>の場合の各種円筒状がいしの直流汚損耐電圧1kV当りに必要な表面漏れ距離と円筒状がいしの平均直径の関係を図4.9に示す。直流の汚損耐電圧1kV当りに必要な表面漏れ距離は、円筒状がいしの平均直径の0.30乗にほぼ比例することがわかる。文献2と3に示された乗数は0.34~0.35と0.32であり、今回得られた値はこれらの値に非常に近いが若干低い値となっている。

#### 4.5 円筒状がいしの平均直径と海岸近傍における汚損付着量の関係

海岸近傍の曝露試験場において、急速汚損条件下で種々の平均直径を有する円筒状がいしの等価塩分付着密度が測定され、その結果が電気協同研究会にて図4.10のようにまとめられている<sup>(3)</sup>。ここで「等価塩分付着密度」とは、屋外曝露されたがいしの電解性付着密度を等価な塩分付着密度として表した量である。曝露試験に供試した円筒状がいしの笠形状は表4.1に含まれている。試験は無課電で実施したものである。曝露試験の結果であるのでデータのばらつきは非常に大きいものの、全体的にみても傾向が見られる。すなわち、等価塩分付着密度の平均値は円筒状がいしの平均直径が大きくなるにつれ小さくなっている。図4.10には、最小二乗法で求めた回帰曲線も点線で示されている。平均直径 $\bar{D}$ (mm)に対する等価塩分付着密度の比率RESDD (Relative Equivalent Salt Deposit Density)は、



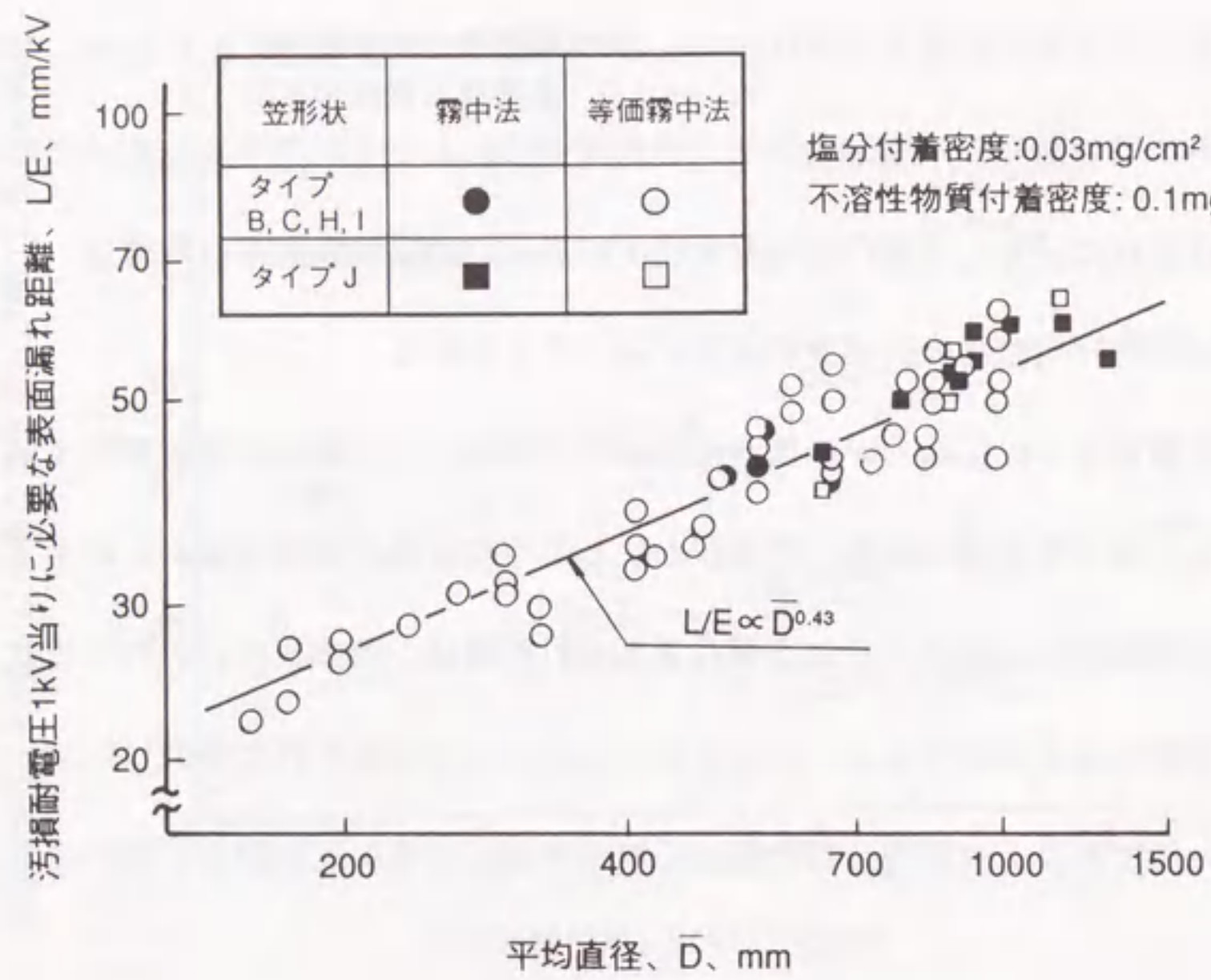


図4.8 交流の汚損耐電圧1 kV当りに必要な表面漏れ距離と平均直径の関係

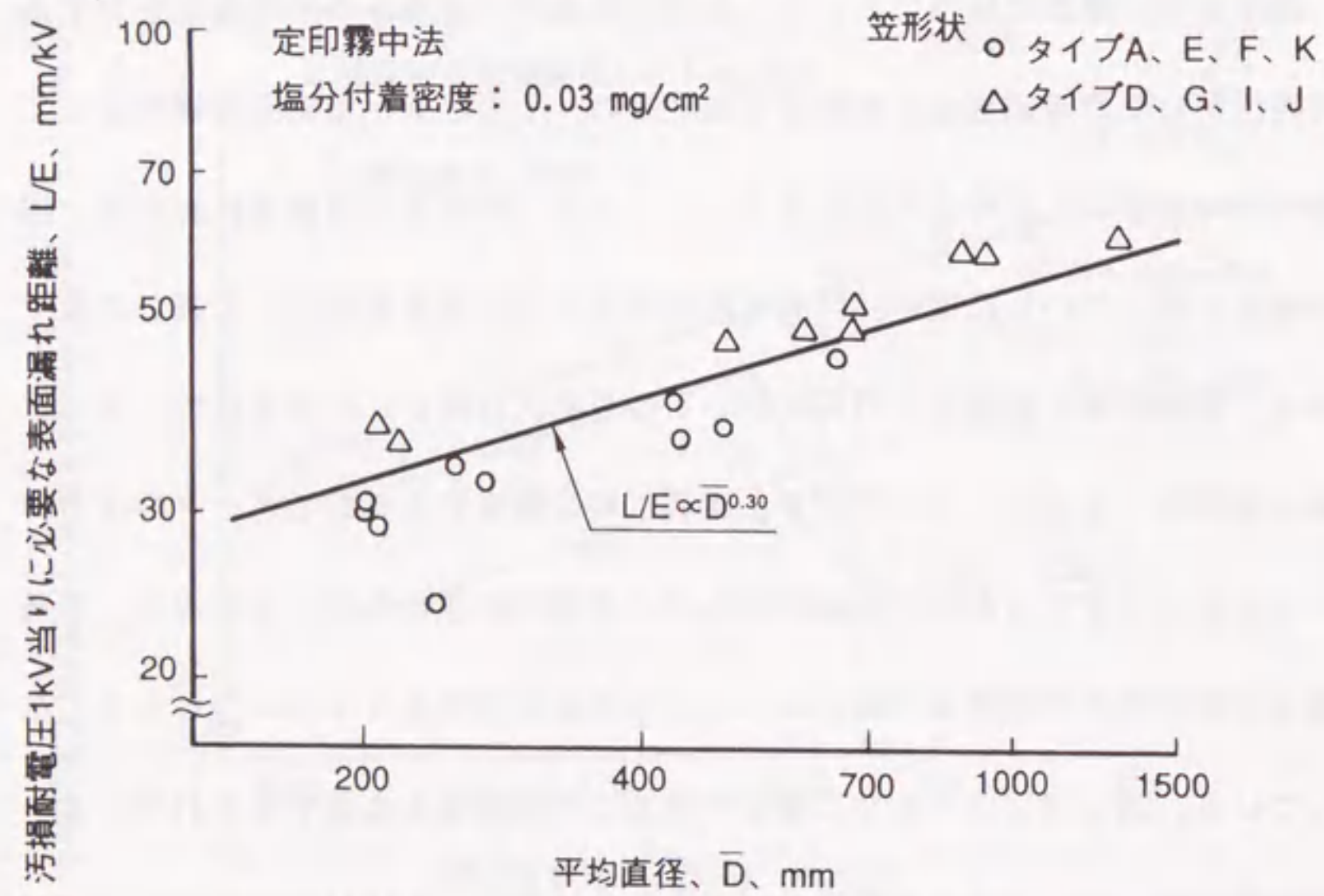


図4.9 直流の汚損耐電圧1 kV当りに必要な表面漏れ距離と平均直径の関係

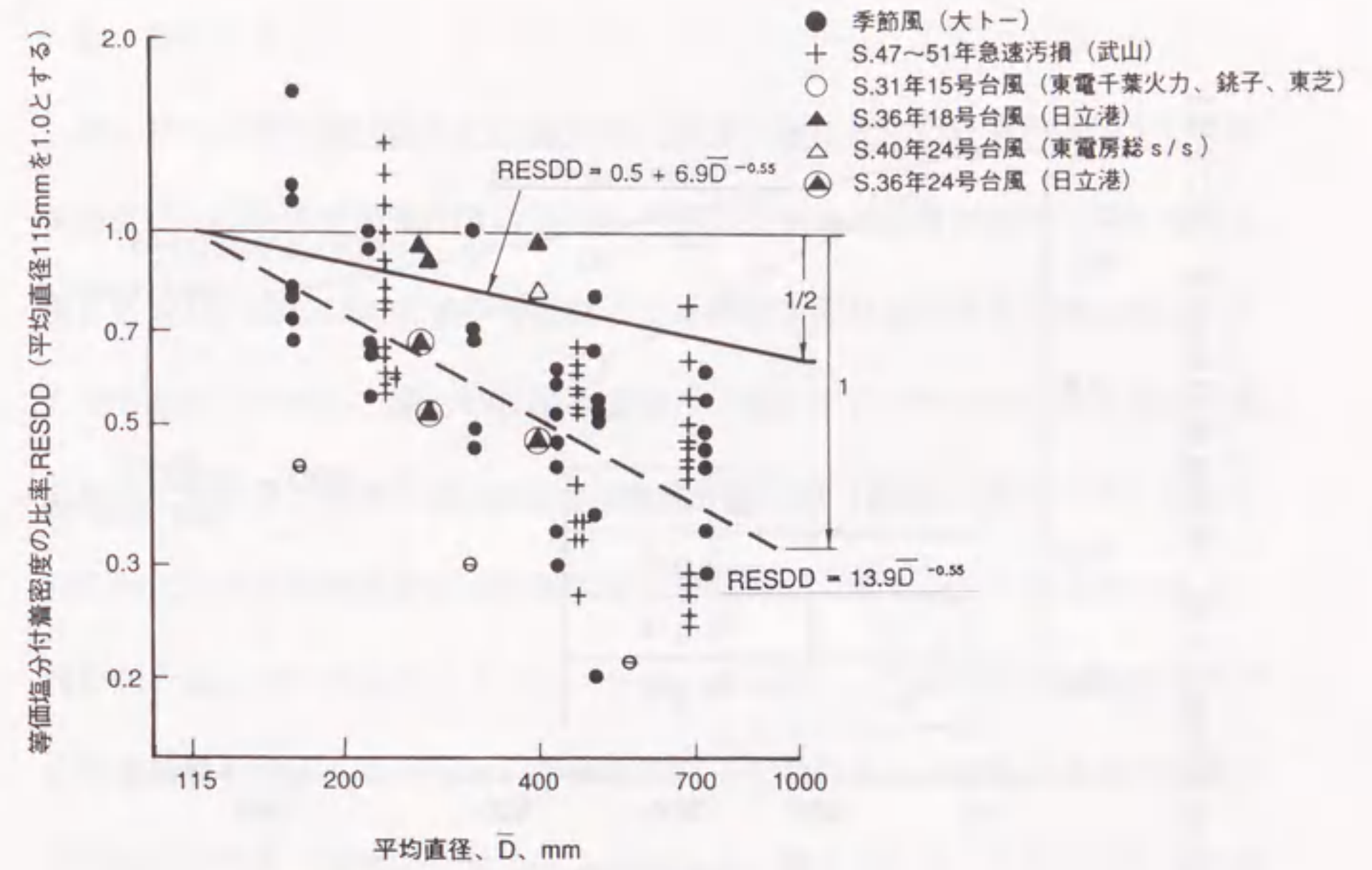


図4.10 曝露試験場における円筒状がいしの平均直径と等価塩分付着密度の関係 (急速汚損時)

$$RESDD \propto \bar{D}^{-0.55} \quad (4-1)$$

と表わされる。但しRESDDは平均直径115mmの場合の等価塩分付着密度に対する比率を示す。

この曝露試験場における測定結果と比較するため、種々の平均直径を有する円筒状がいしについて急速汚損条件を模擬し人工汚損付着試験を実施した。大型送風機を用いて強風を発生し、送風機の前で塩水をスプレーノズルを用いて噴霧し、風下に円筒状がいしを一定時間曝露しその後塩分付着量を測定する。試験結果を図4.11に示す。塩分付着密度と円筒状がいしの平均直径の関係は図4.10に示す曝露試験の結果に比べ平均直径が大きくなった場合の付着量の低減はやや少なくなっている。

文献6は種々の平均直径を有する円筒状がいしのダストチャンバー内での直流電圧課電下における塩分付着特性の調査結果を報告したものである。この文献6の結果も図4.10に示す曝露試験の結果とほぼ同様の傾向を示しており、平均直径 $\bar{D}$ の $-0.75$ 乗に比例している<sup>(6)</sup>。



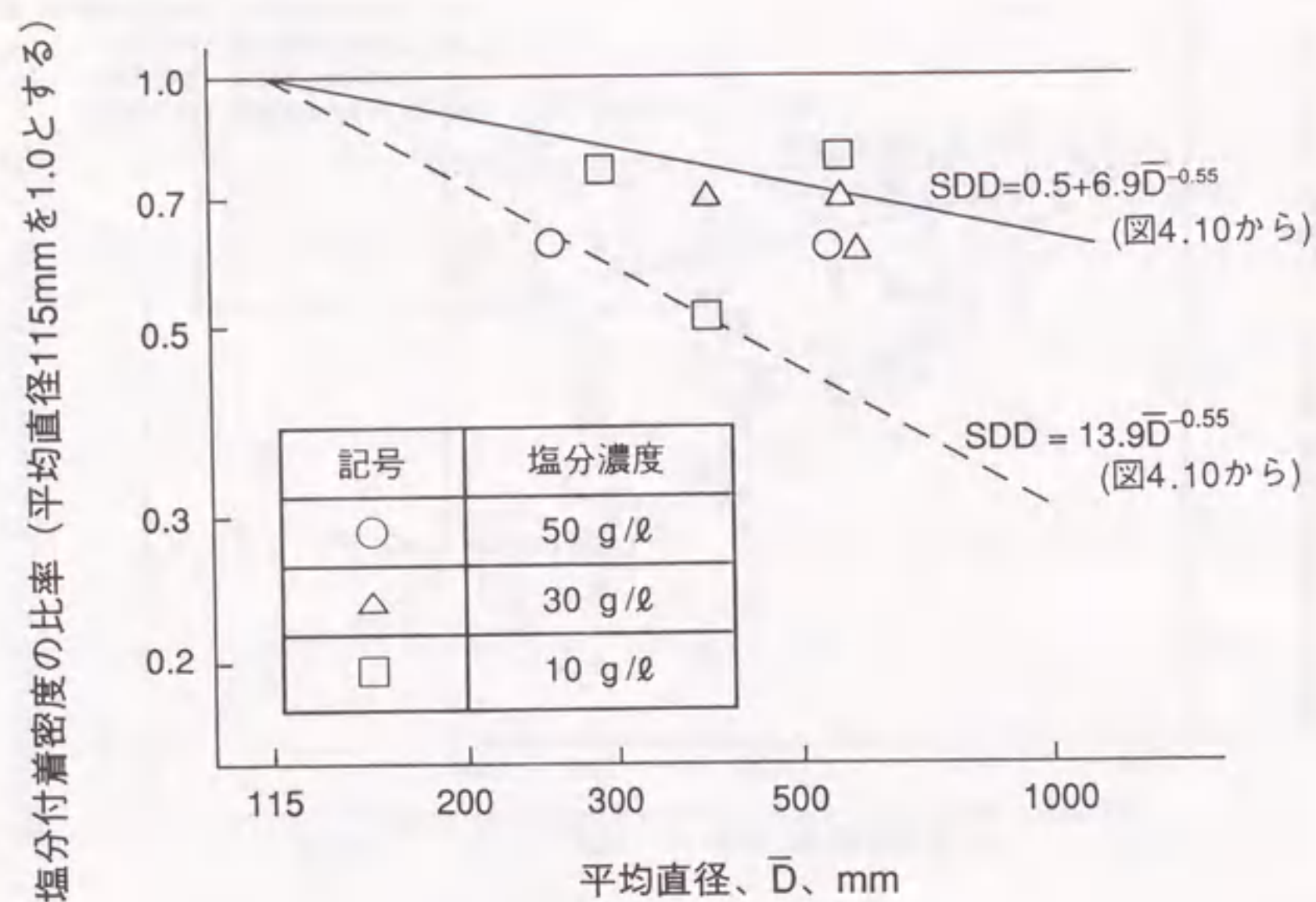


図4.11 人工汚損付着試験における円筒状がいしの平均直径と塩分付着密度との関係

曝露試験の実測結果や人工模擬試験の結果より、円筒状がいしの汚損設計をする際、円筒状がいしの平均直径に対し汚損付着量の低減を考慮に入れることができる。以上の結果を実際の設計に適用するに当たっては、データのばらつきが大きいことと設計の安全性を考慮する必要がある。設計には、図4.10の実線で示されているように、等価塩分付着密度の低減量として回帰曲線そのものを使うかわりにその1/2を見込むのが妥当と考えられている<sup>(3)</sup>。この関係式は次のように与えられる。

$$RESDD = 0.5 + 6.9\bar{D}^{-0.55} \quad (4-2)$$

なお、この関係は、無課電条件下で得られた試験結果に基づくものである。しかし、汚損度がある程度高くなれば、無課電、交流課電、直流課電のいずれの条件においても、円筒状がいしに付着する汚損度に差異はほとんど見られていない<sup>(11)</sup>。したがって、交流のみならず直流の汚損設計にもこの関係をそのまま適用して差し支えない。

#### 4.6 設計基準

図4.12に示す実線は図4.8に示す同一塩分付着密度における円筒状がいしの平均直径と交流汚損耐電圧1kV当りに必要な表面漏れ距離の関係(図4.12の点線)に対し、図4.10に示す平均直径による汚損物の付着低減を考慮し補正したものである。同様に、図4.13に示す実線は、図4.9に示す平均直径と直流汚損耐電圧1kV当りに必要な表面漏れ距離の関係(図4.13では点線で示す)に対し図4.10に示す平均直径による汚損物の付着低減を考慮し補正したものである。図4.12と図4.13に見られるように、交流、直流共に、汚損物の平均直径に対する付着低減を補正してもなお、汚損耐電圧1kV当りに必要な表面漏れ距離は平均直径が大きいくほど大きくなるのがわかる。図4.12には、比較のため、交流の場合の現行IEC Publication 815に推奨されている値も一点鎖線で示している。IECの推奨している平均直径の影響についての補正值は、不充分であることが明らかになった。

#### 4.7 むすび

円筒状がいしの汚損設計に及ぼすがいしの平均直径の影響について、交流課電の場合と直流課電の場合について検討した。いずれの場合についてもおよその傾向は共通で、主な結論は以下のとおりである。

- (1) 円筒状がいしの汚損耐電圧は、平均直径が大きくなるにつれ、大きく低下する。
- (2) 同一汚損環境条件下で円筒状がいし表面に付着する急速汚損時の汚損度(等価塩分付着密度)は、平均直径の0.55乗に逆比例して低減する。
- (3) 任意の汚損環境に対し上記二つの要因を組み合わせても、円筒状がいしの平均直径が増大すると、そのがいしの汚損耐電圧はなお大幅に低下する。



汚損耐電圧1kV当りに必要な表面漏れ距離の相対値、  
L/E、(D̄ = 115mmの時1.0)

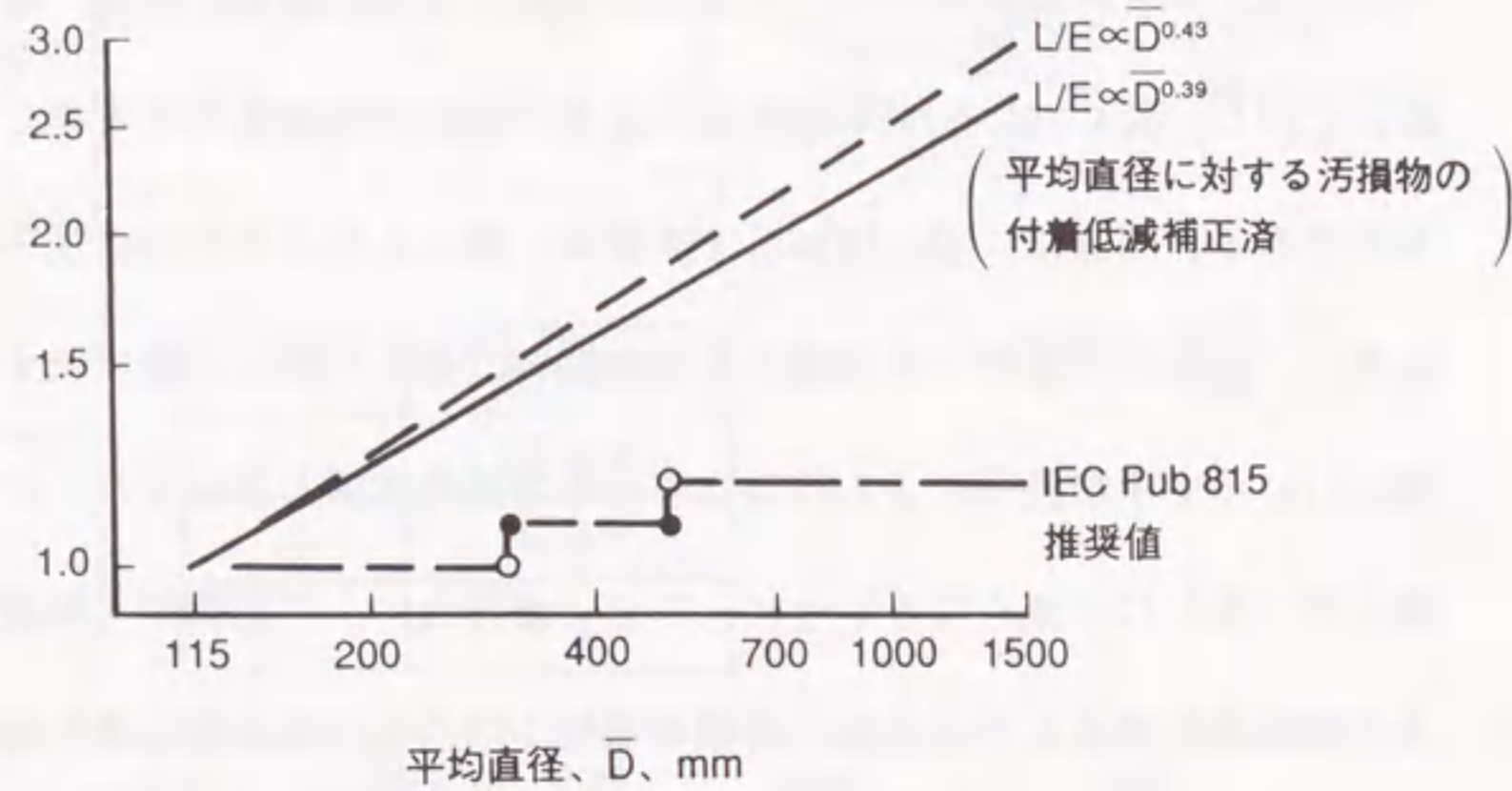


図4.12 交流の汚損設計耐電圧1kV当りに必要な円筒状がいしの表面漏れ距離の平均直径に対する補正の推奨値

汚損耐電圧1kV当りに必要な表面漏れ距離の相対値、  
L/E、(D̄ = 115mmの時1.0)

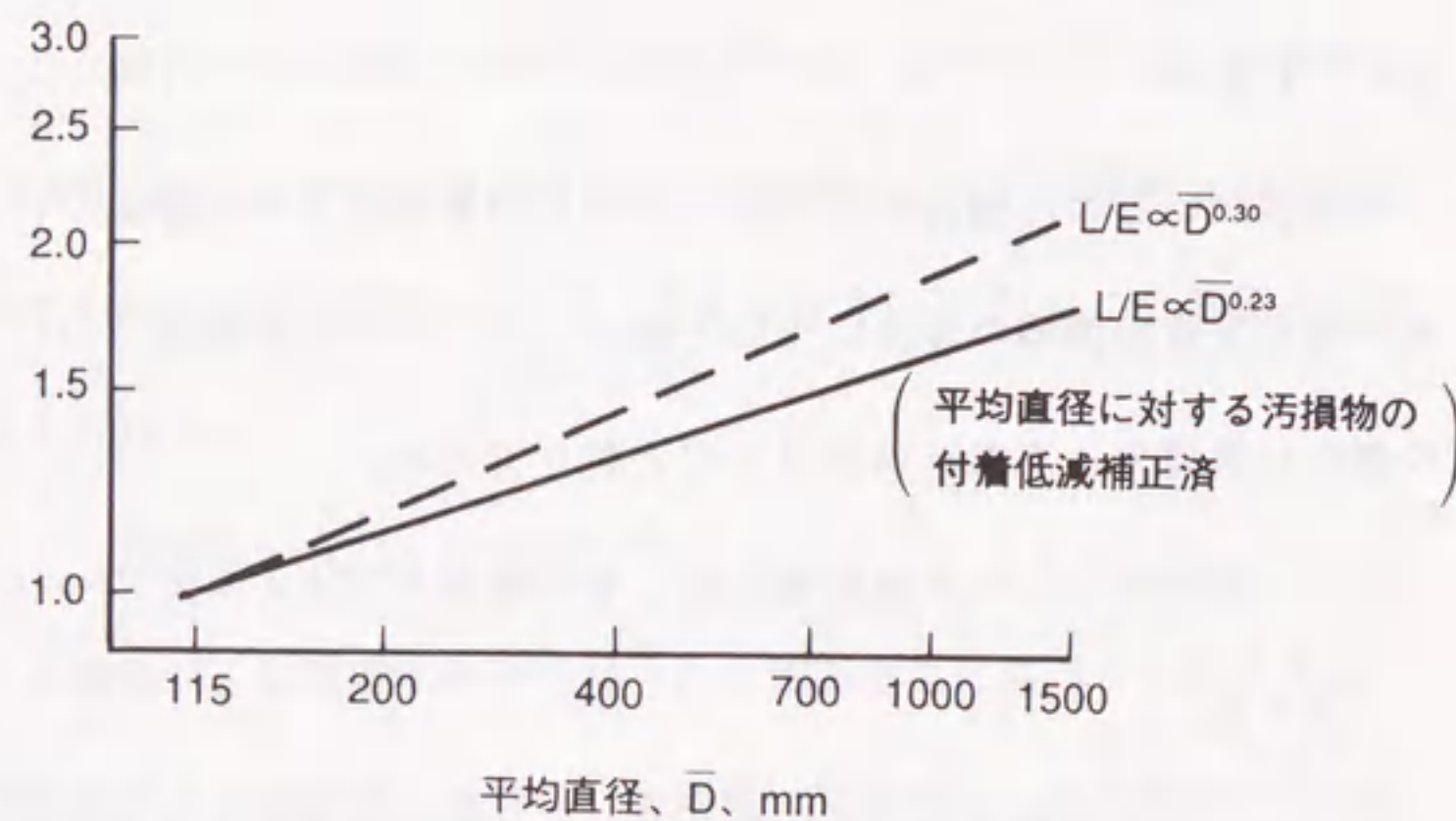


図4.13 直流の汚損設計耐電圧1kV当りに必要な円筒状がいしの表面漏れ距離の平均直径に対する補正の推奨値

この低下の度合は、現行の国際規格 IEC Publication 815 が推奨している値よりもはるかに大きい。

今回の研究は、日本のように台風や季節風などの急速汚損条件によってがいしの汚損設計が左右される場合を検討の対象とした。しかし降雨の少ない砂漠汚損地区などのように、長期間にわたる累積汚損によってがいしの汚損設計が左右されるような場合はここでの条件と異なる。今後このような地区での円筒状がいしの汚損設計についても研究していく必要がある。

#### 文 献

- (1) I. Kimoto, K. Kito and T. Takatori : "Anti-pollution design criteria for line and station insulators", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, No. 1, pp. 317 ~ 327, 1972.
- (2) T. Kawamura, T. Seta, M. Tanabe and K. Naito : "Performance of large bushing shells for UHV transmission system under polluted conditions", CIGRE Paper, No. 33-03, 1988.
- (3) 電気協同研究会変電設備耐塩設計専門委員会 : 「変電設備の耐塩設計」, 電気協同研究, 第35巻 第3号, 昭和54年9月.
- (4) IEC Publication 815 : "Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions", 1986.
- (5) M. P. Verma : "Insulation performance of DC apparatus-housing under pollution", ETZ Archiv., Vol. 5, No. 9, pp. 269 ~ 275, 1983.
- (6) A. Pignini, D. Perin, F. Zagliani, M. Ramamoorthy, C. S. Lakshminarasimha and V. B. Rammohan : "Performance of insulators for EHVDC systems under polluted conditions", CIGRE Paper, No. 33-11, 1988.



- (7) K. Naito, T. Kawaguchi, M. Ito, H. Katsukawa and Y. Suzuki: "Influence of fog parameters on withstand voltage of contaminated insulators", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 3, pp. 729 ~ 737, 1983.
- (8) T. Fujimura, K. Naito, T. Irie and T. Kawaguchi : "UHV contamination test facility", NGK Review Overseas Edition, No. 4, pp. 1~13, 1980.
- (9) K. Naito, T. Kawaguchi and Y. Goino : "DC  $\pm$  750-kV testing equipment for contamination test of UHV class DC insulators", 4-th ISH Paper, No. 51.02, 1983.
- (10) K. Naito, R. Matsuoka and S. Ito : "Linearity in the pollution flashover voltage of large bushing", CIGRE SC33 コロキウム論文, No. 33.87 (Coll.)12.01 IWD, 1987.
- (11) Task Force 04.04 of Study Committee 33 : "Artificial pollution testing of HVDC insulators : analysis of factors influencing performance", Electra, No. 140, pp. 99 ~ 113, February, 1992.

## 第5章 がいし装置の汚損湿潤時に おけるラジオ、テレビ雑音 および可聴雑音特性

### 5.1 まえがき

直流送電における外部絶縁設計は、主として、運転電圧に対するがいしの汚損設計によって決まっている。このため、直流送電用がいし、がいし装置の設計にあたっては汚損は重要な問題であり、各所でがいしの直流汚損特性の研究が精力的に行われてきた<sup>(1) - (5)</sup>。このような研究の一つの成果として、直流電圧が印加された状態においても優れた汚損耐電圧特性を示す直流用懸垂がいしが開発されている<sup>(1) (2)</sup>。しかしながら、そのようながいしを用いても避けることができず、まだ解明されていない重要な課題がある。それは、汚損湿潤した状態におけるがいしの沿面で発生する局部火花放電および部分フラッシュオーバーに起因するラジオ、テレビ雑音および可聴雑音の問題である。

実際の送電線では、がいしが汚損湿潤すると漏れ電流が流れるが、流れる電流は課電端から接地端まで同じ大きさである。このためがいしの直径が小さい個所では電流密度が高く、また、笠形状によっては湿潤の程度が異なり、比較的乾燥した部分と湿潤した部分が生ずる。局部的な乾燥帯では電圧分担が大きくなり、局部火花放電が生じ、可聴雑音や電氣的な雑音を発生する。直流送電用がいし連では、汚損湿潤の極度の不均等が生じると、1~2個のがいしの金具間のみでフラッシュオーバーを繰り返す。これを「部分フラッシュオーバー」と称し、非常に高いレベルの可聴雑音を発生する。

直流電圧課電下における電線からのコロナによる各種雑音特性については、これまで種々研究が行われてきた<sup>(6) - (11)</sup>。その研究結果によれば、直流課電



下では、注水時には交流課電下の雑音レベルより低くなることが確かめられており、むしろ乾燥時の低レベルながら持続するコロナ雑音が検討されている。がいし装置についても、がいしが清浄な場合の乾燥時および注水時の雑音特性についてはすでに研究がなされている<sup>(6)-(11)</sup>。その場合には電線の場合と同様、交流の実効値と同じ大きさの直流電圧を印加したときのラジオ雑音のレベルは、交流電圧を印加したときよりも低くなる。

このため汚損湿潤時のがいし装置からのラジオ、テレビ雑音や可聴雑音の問題についても楽観されてきた。しかし、がいしのフラッシュオーバ電圧特性がそうであるように、清浄がいしの雑音特性は交流の場合よりも優れていても、汚損湿潤時の雑音特性は、交流の場合よりも直流の場合の方が悪くなることも懸念される。このため、人工霧室内でがいしが汚損湿潤した時にがいし沿面で上述のように部分的に発生する放電による各種電波雑音と可聴雑音を測定する必要がある。

直流送電用がいし装置特有の現象として局部火花放電のほかに、かなり限られた条件下のみで発生するとは考えられるものの、上述の「部分フラッシュオーバ」現象が観測されている。部分フラッシュオーバ発生時には、非常に高いレベルの可聴雑音を発生する。連続課電条件下で部分フラッシュオーバが発生する場合の可聴雑音やラジオ、テレビ雑音については、すでに種々研究がなされている<sup>(12)(13)</sup>。すでに第2章で、連続課電条件下に比べコールドウェットスイッチオン条件下の方が、部分フラッシュオーバの発生確率が高いことを究明した。そのように課電条件によって部分フラッシュオーバの発生確率は異なるが、部分フラッシュオーバ発生時の可聴雑音のレベルに両条件下で差があるか否かは未だ研究されていない。今回、コールドウェットスイッチオン条件下で、主として500kV級がいし装置が部分フラッシュオーバを発生する場合の可聴雑音レベルを、模擬実験によって測定している。

## 5.2 試験設備と試験方法

送電線路のがいし装置には、通常連続して運転電圧が印加されている。実際の送電線路では通常がいし表面に長期間または短期間に汚損物が付着し、霧や露あるいは小雨などによってこれら汚損物が湿潤する。汚損物が湿潤するとがいし沿面の導電性が増し、漏れ電流が流れることになり局部火花放電が発生することがある。この時ラジオ、テレビ雑音や可聴雑音などを発生する。

このような状況を模擬するため、まず塩とこの粉の懸濁液でがいし表面を均一に汚損しこれを十分乾燥させる。このように作成した汚損乾燥がいしを用いて一連の懸垂がいし装置を構成し、それを霧室内に吊り下げる。所定の電圧を印加後清浄な水を使って人工霧を霧室内に発生させる。霧発生後、がいし表面の漏れ電流とラジオおよびテレビ雑音、ならびに可聴雑音の時間経過特性を測定する。なお、途中印加電圧を下げた時の特性や、コールドウェットスイッチオンの状態を模擬した時の特性についても測定する。コールドウェットスイッチオンの場合には、送電が停止され無課電時にがいし表面汚損物が湿潤した後電圧が印加され送電が再開される。霧発生装置はかなりの騒音を発生するので、可聴雑音測定時には暗騒音レベルを低く抑えるため、同装置を止めている。これらの測定手順をまとめて図5.1に示す。霧室内における、供試がいし装置、直流電源、霧発生装置などの配置を図5.2に示す。なお、がいし装置の課電側には直径約40mmで、長さ約5mのアルミパイプを懸垂クランプを介して取り付け、できるだけ実がいし装置に近い形で各種雑音特性を測定する。霧室内に供試がいし装置を吊り下げた状況の一例を図5.3に示す。人工霧は $10,000\Omega\cdot\text{cm}$ の冷水を用い約100個の細孔をもつノズルから発生させ、供試がいしには直接霧があたらないようにする。霧は約10分で霧室内に充満し、霧水量は約 $3.5\text{g}/\text{m}^3$ に保つ。

直流電源としては、図1.4に示すように定格500kV、5,000kVAの試験用変圧



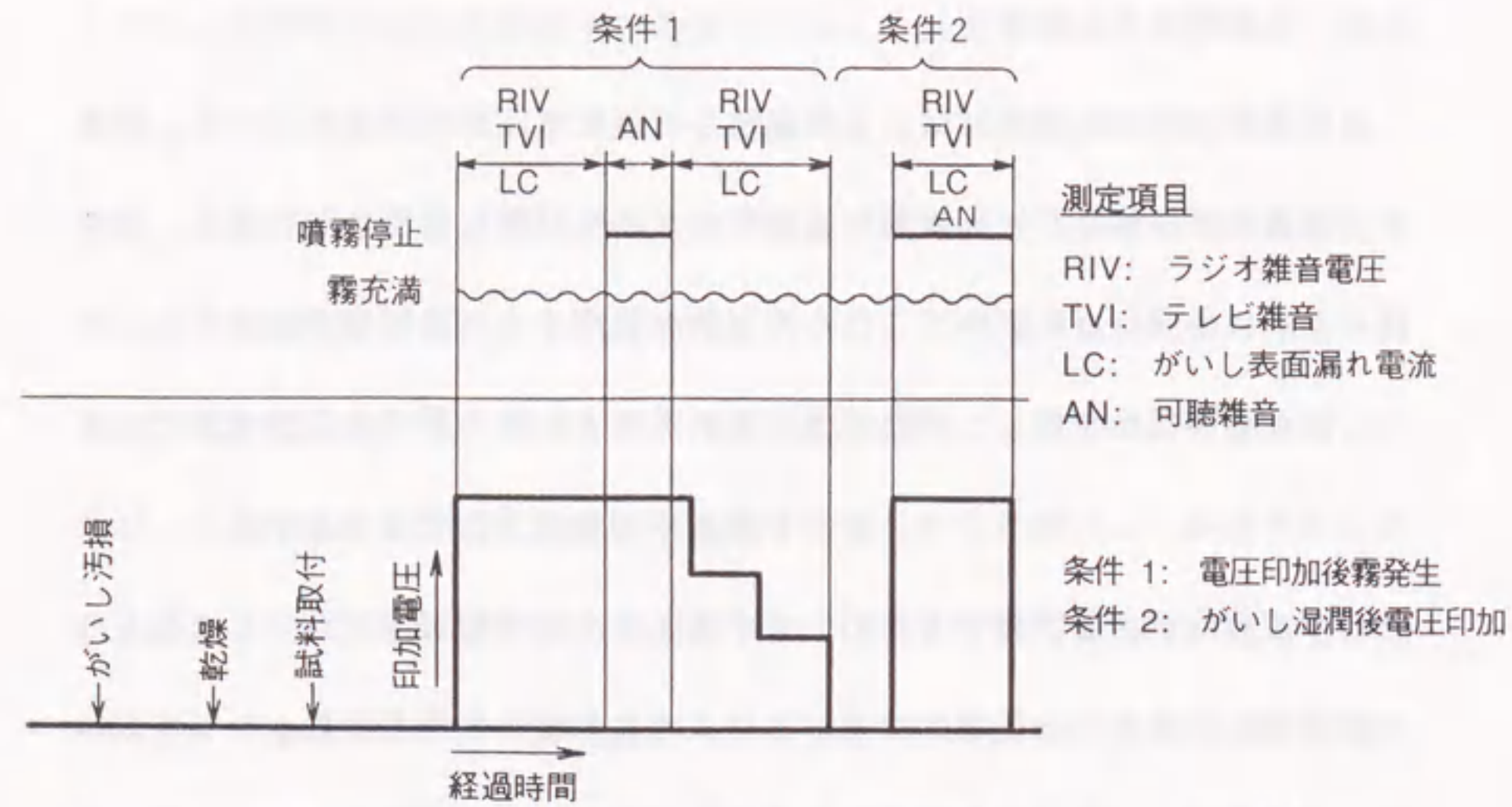


図5.1 汚損がいし装置の各種雑音測定試験手順

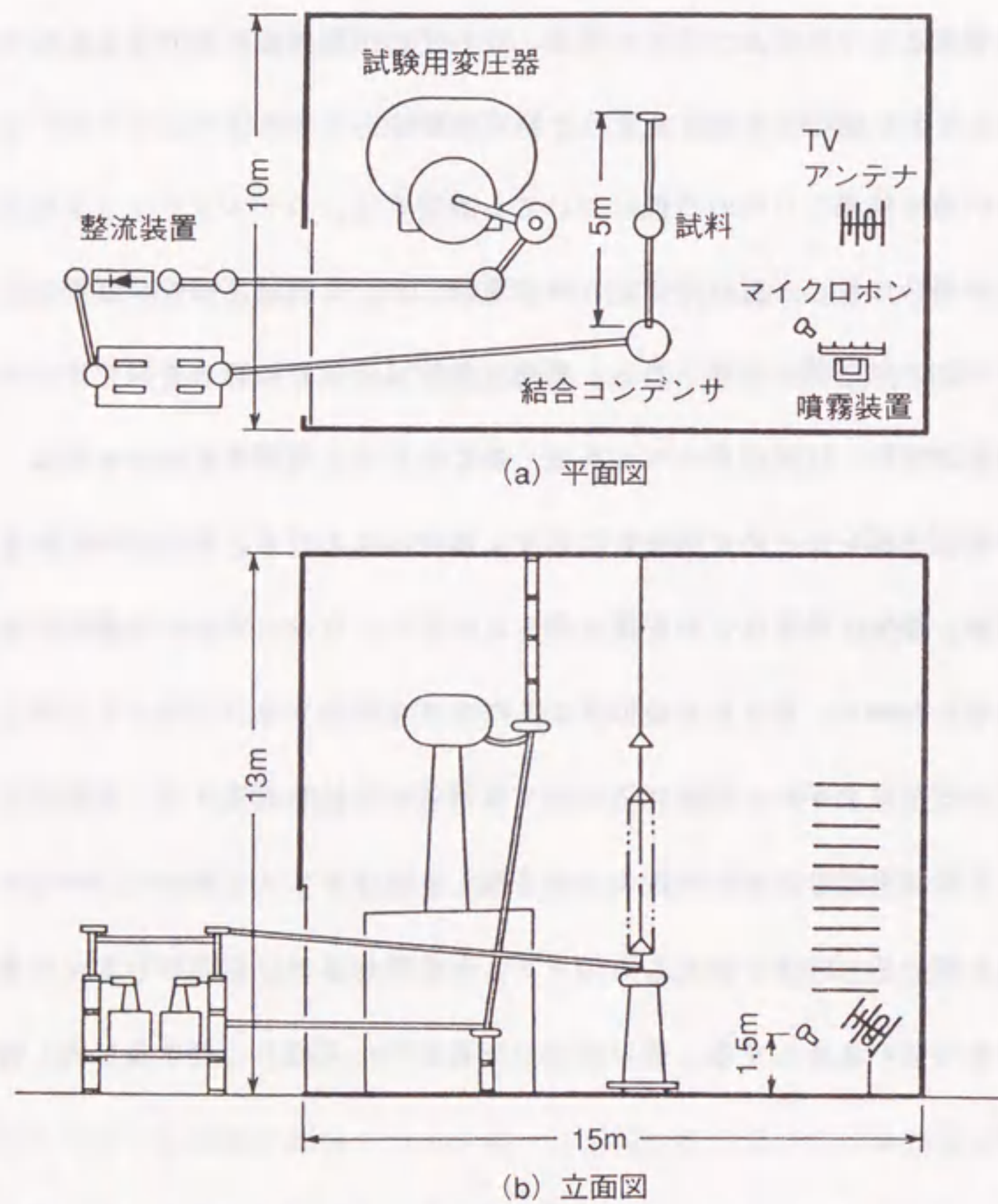


図5.2 供試懸垂がいし連と試験設備の配置

器の出力電圧を200kV、0.5Aのシリコン整流器で半波整流し、負荷側に1.5 $\mu$ Fの平滑コンデンサを入れている。試験中の漏れ電流の最大値は10mA程度であり、それによる電圧降下は1%以下であり、試験の目的からみて、その電圧変動は十分許容し得るものである。

なお、コールドウェットスイッチオン条件下における部分フラッシュオーバ試験の試験設備と試験方法については、2.4 および 2.5節に述べている。

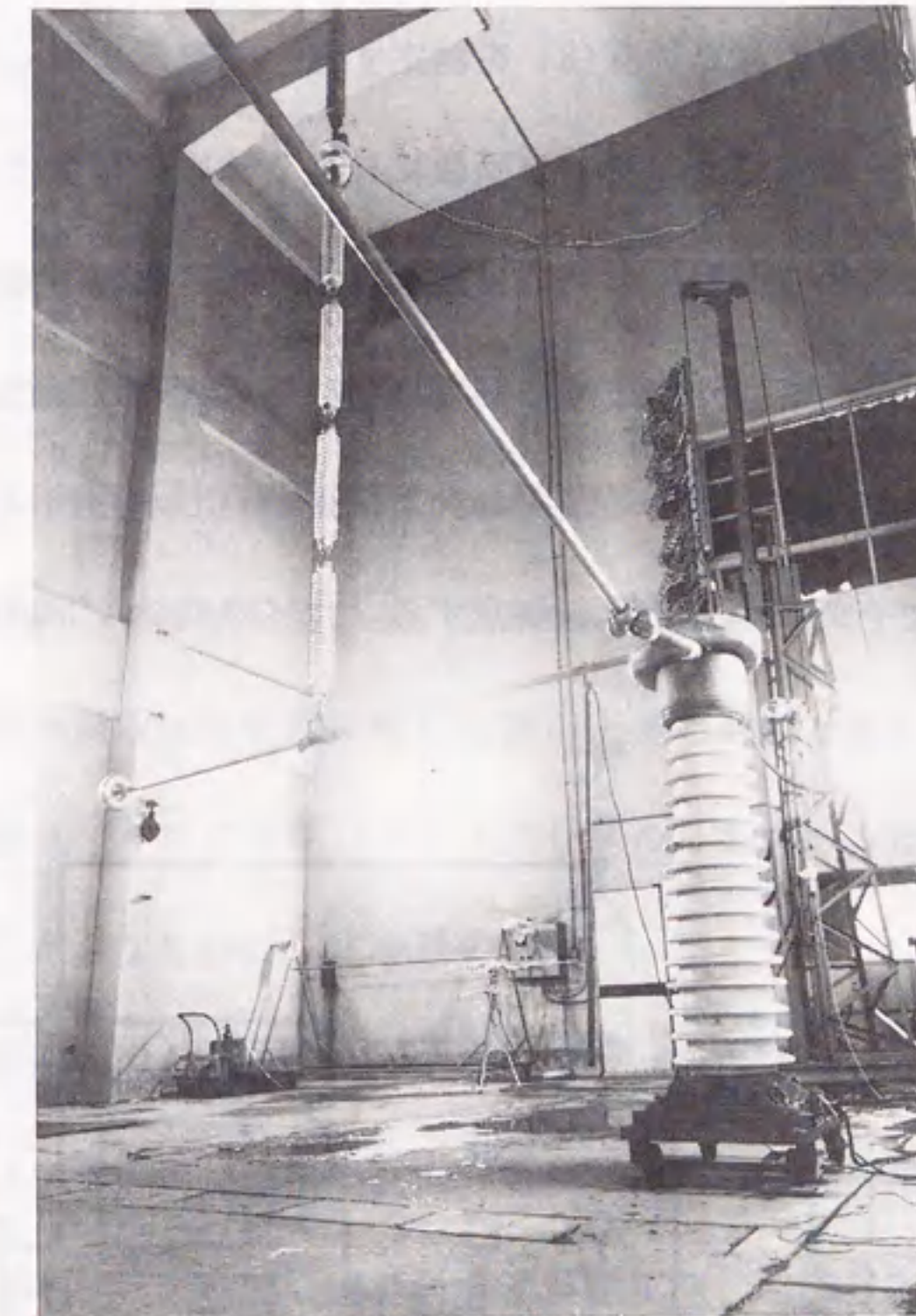


図5.3 供試がいし装置取付状況



### 5.3 各種雑音特性の測定方法

各種雑音特性の測定系を図5.4に示す。ラジオ雑音については、ANSI C63.2-1963に適合する妨害波強度測定器を用い、NEMA規格のPub. 107(1964)に従い、がいし装置の両端に生ずる1MHzの周波数における発生電圧(Radio Influence Voltage, 以下 RIVと略す)を測定する<sup>(14)</sup>。テレビ雑音の測定については、特に定められた規格がない。このため、霧室内に7素子のテレビ受信屋外アンテナを置き、周波数94MHzにおける汚損がいしからのテレビ雑音の電界強度(N)を測定し、これをもってテレビ雑音とした。それと共に屋外にも同じアンテナを置きテレビ放送波の電界強度(S)を測定する。減衰器によって両者の電界強度の比(SN比)を種々変えてテレビ画像に与える障害の程度について観察を行う。なおテレビ雑音の反射については試験室内の伝搬時間が極めて短く、機器が複雑な配置となっているので特に影響はないものとみなした。

可聴雑音については、供試がいし装置の課電端のがいしから約4.5m、床から1.5mの位置にマイクロホンを置き測定する。マイクロホンは直径1インチ

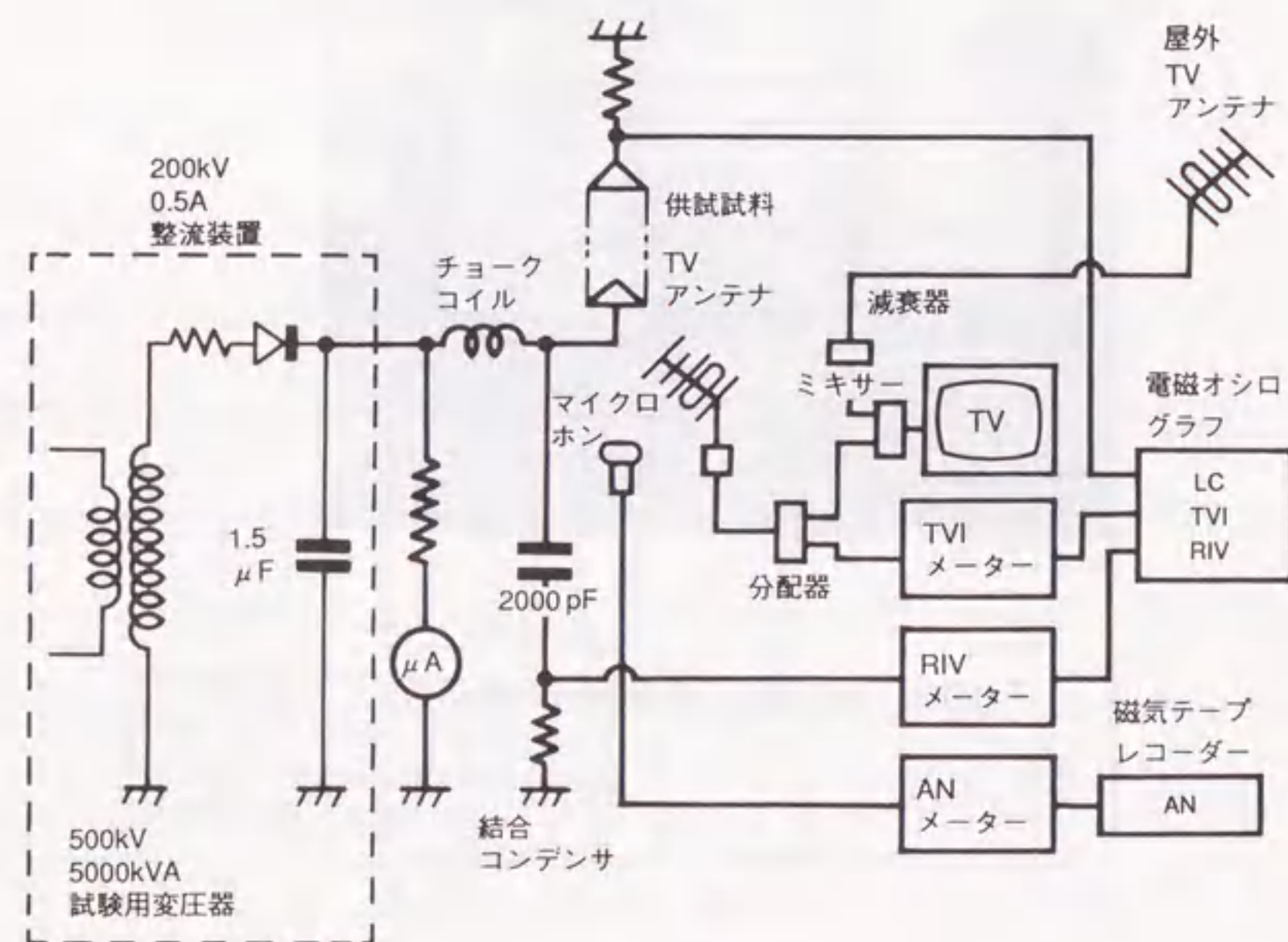


図5.4 試験回路および測定系

のコンデンサタイプで、JIS Z 8731 (1966)に従ってパルス性可聴雑音のピーク値をA特性で測定する<sup>(15)</sup>。霧室は天井、床、壁全てがコンクリート製で音響学的には残響室とみなせる。今回はパルス性可聴雑音のピーク値に注目し測定を行うので、側壁や天井などからの反射波はあってもピーク値への影響は少ないと考えた。音源は点音源とみなし、音源の音響パワーレベルを求めた上で、自由空間における音源から30m地点の音圧レベルを計算により求める。漏れ電流(図5.1と図5.4ではLCと略す)はがいし連のアース側に検出抵抗を挿入し電磁オシログラフで測定記録する。

### 5.4 供試懸垂がいし連

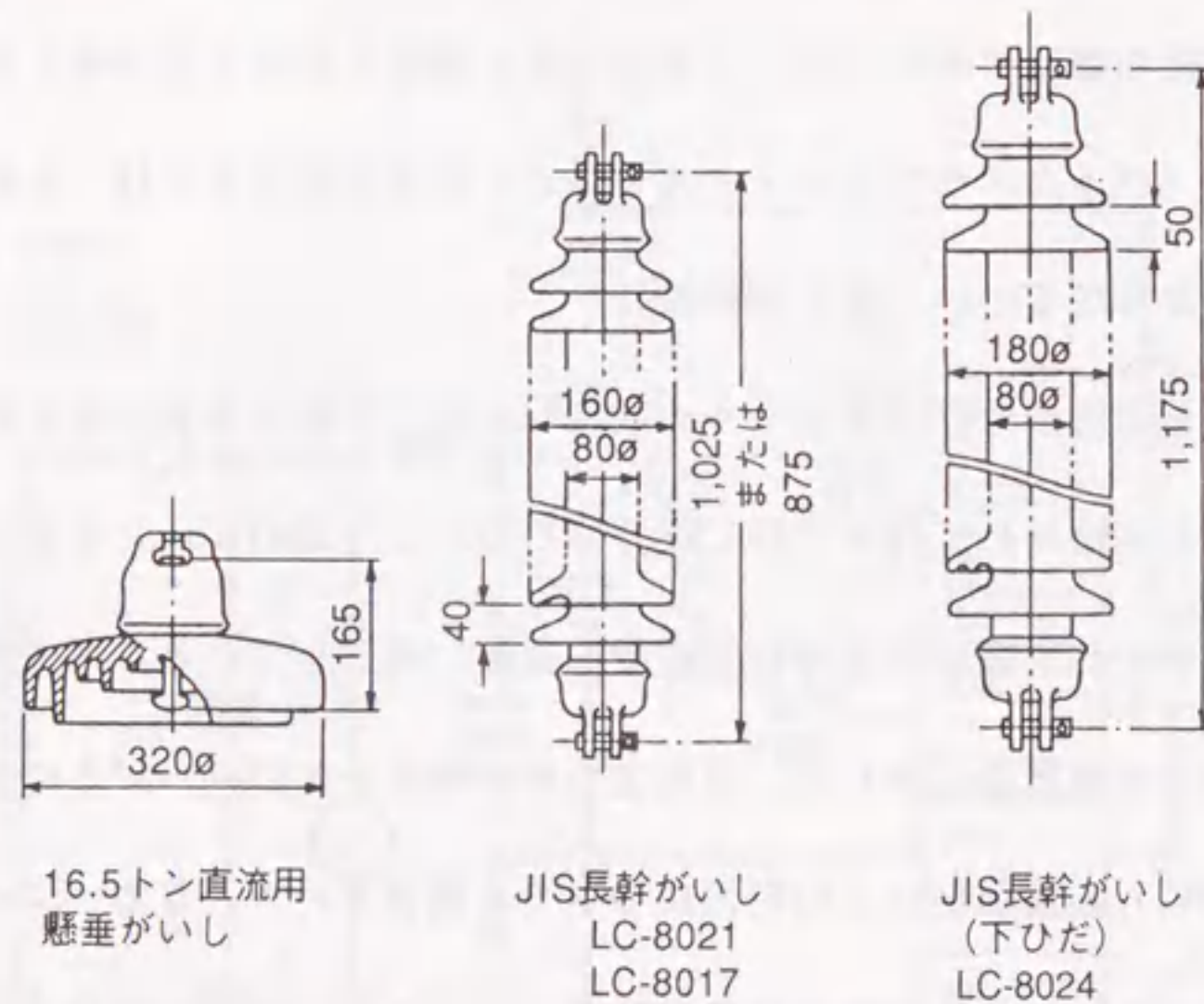
本試験に供試するがいし連の寸法、諸元を表5.1に示す。構成がいしとしては、同表の下に示す笠径320mm、課電破壊荷重16.5トンの直流用懸垂がいしと、JIS長幹がいし3種類を用いる。供試がいし装置はすべて一連懸垂吊りとし、がいしの連結個数は汚損度に応じて実用上最も適切と考えられる値とする。なお、暗騒音(バックグラウンドノイズレベル)を求めるときには、全面導電釉懸垂がいしからなるがいし連を用いる。

がいし表面の汚損は、1リットルの水に40gのとの粉と適量の塩を加えた懸濁液をスプレー掛けして行う。同じ条件で汚損した予備のがいしを用い、筆洗い法によってがいし表面の塩分付着密度を実測、確認している。汚損度は軽汚損地区と重汚損地区を代表して、目標塩分付着密度を0.03mg/cm<sup>2</sup>と0.12mg/cm<sup>2</sup>とし、参考のため清浄がいしの特性についても調査を行う。なお、コールドウェットスイッチオン条件下における部分フラッシュオーバー試験に供試するがいし装置については2.3節に従う。



表5.1 供試懸垂がいし連および試験条件

| 試料 No. | 供試懸垂がいし連               |      |          |           | 試験条件                         |           |
|--------|------------------------|------|----------|-----------|------------------------------|-----------|
|        | がいし品名                  | 連結個数 | 連結長 (mm) | 漏れ距離 (mm) | 塩分付着密度 (mg/cm <sup>2</sup> ) | 印加電圧 (kV) |
| 1      | 16.5トン直流用懸垂がいし         | 11   | 1,815    | 5,632     | 清浄                           | ±125      |
|        |                        |      |          |           | 0.032                        |           |
| 2      | ◇                      | 15   | 2,475    | 7,680     | 0.093                        | ±125      |
| 3      | ◇                      | 18   | 2,970    | 9,216     | 0.031                        | ±200      |
| 4      | ◇                      | 24   | 3,960    | 12,288    | 0.126                        | ±200      |
| 5      | JIS長幹がいし LC-8017       | 3    | 2,745    | 5,250     | 清浄                           | ±125      |
| 6      | JIS長幹がいし LC-8021       | 4    | 4,280    | 8,560     | 0.129                        | ±125      |
| 7      | JIS長幹がいし LC-8024 (下ひだ) | 3    | 3,645    | 8,910     | 0.028                        | ±200      |



5.5 局部火花放電発生時の各種雑音特性の測定結果

部分フラッシュオーバを発生せず、がいしの汚損湿潤時に通常観察されるがいし沿面での局部火花放電に基づく各種雑音特性の測定結果をまとめて表5.2に示す。この表から、清浄がいしの場合0.1mA程度のベース電流しか流れていないが、汚損がいしの場合1mA程度のベース電流と数mAから10mA程度のパルス電流が流れていることがわかる。これより、がいし表面に乾燥帯が形成され、局部的な沿面の絶縁破壊が生じ、局部火花放電に基づく電波雑音や可聴雑音を発生していることがわかる。これは同表にて、がいしの清浄時に比べ汚損時に各種雑音レベルが高くなっていることから裏付けられる。

表5.2 各種雑音特性測定結果

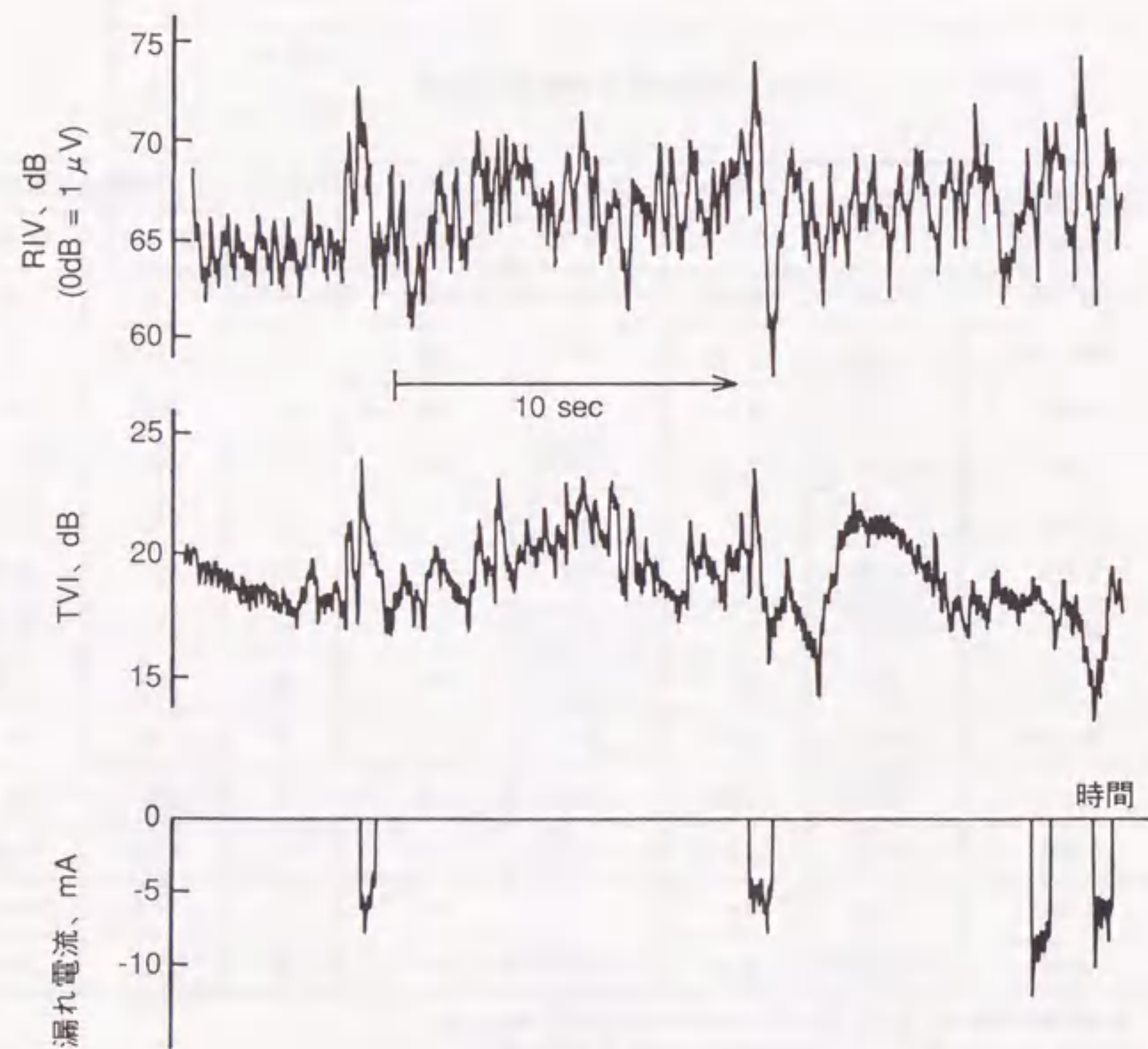
| 試料 No. | 塩分付着密度 (mg/cm <sup>2</sup> ) | 印加電圧 (kV) | 漏れ電流 (mA) |     | RIV (dB) (0dB=1μV) | TVI (dB) | 可聴雑音 (dB(A)) |      |
|--------|------------------------------|-----------|-----------|-----|--------------------|----------|--------------|------|
|        |                              |           | ベース       | パルス |                    |          | 条件1          | 条件2  |
| 1      | 清浄                           | +125      | 0.05      | N   | 59                 | B        | B            | B    |
|        | 清浄                           | -125      | 0.10      | N   | 38                 | 13       | B            | B    |
| 1      | 0.032                        | +125      | 0.5       | N   | 87                 | 22       | 48.5         | 54.5 |
|        | 0.032                        | -125      | 0.9       | 1.2 | 93                 | 38       | 49.5         | 52.5 |
| 2      | 0.093                        | +125      | 0.9       | 5.0 | 77                 | 18       | 53.5         | 51.5 |
|        | 0.093                        | -125      | 1.1       | 6.0 | 77                 | 26       | 52.5         | 49.5 |
| 3      | 0.031                        | +200      | 0.6       | N   | 79                 | 31       | 47.5         | 50.5 |
| 4      | 0.126                        | -200      | 0.5       | 9.2 | 83                 | 28       | 53.5         | 56.5 |
| 5      | 清浄                           | +125      | 0.12      | N   | 57                 | B        | B            | B    |
|        | 清浄                           | -125      | 0.05      | N   | 38                 | B        | B            | B    |
| 6      | 0.129                        | +125      | 0.8       | 12  | 73                 | 36       | 50.5         | 53.5 |
|        | 0.129                        | -125      | 0.6       | 10  | 57                 | 20       | 44.5         | 49.5 |
| 7      | 0.028                        | +200      | 0.38      | N   | 67                 | 29       | 47.5         | 47.5 |

注 (1) 表中の測定結果は、すべてそれぞれの条件における最大値を示す。  
 (2) Nはパルス性漏れ電流なし、Bは暗騒音レベルをそれぞれ示す。  
 (3) 可聴雑音の条件1、条件2は図5.1試験手順に示す。



### 5.5.1 雑音の発生機構について

直流電圧は交流電圧と異なり電圧の極性の交番がないので、一旦がいし表面で発生した局部火花放電は消滅しにくく伸展し易い。その先端部では局部火花放電によって電離が進んでいる。この時高周波の雑音電波を発生すると考えられる。極性による差異はあまり認められず、一例として図5.5 に負極性電圧を印加した場合のRIV、TVI、漏れ電流の典型的な波形を示す。最下段の漏れ電流波形によれば、一旦サージ性電流が現れると、0.5秒程度の間ほぼ一定レベルの電流が継続することがわかる。サージ性の漏れ電流が流れると、通常ラジオおよびテレビ雑音レベルは5~10dB高くなっている。サージ性漏れ電流の急峻



供試試料：No. 2、印加電圧：-125kV  
塩分付着密度：0.093mg/cm<sup>2</sup>

図5.5 漏れ電流とRIV、TVIの波形の一例

な立ち上がり部で高い雑音を発生することが多い。しかし、漏れ電流が継続して流れる場合には、たとえその値は大きくてもラジオおよびテレビ雑音レベルは上がらない。これは局部火花放電が発生しても、一旦アークチャンネルが成立し定常状態に達すると、漏れ電流値は大きくてもそのチャンネルからは高周波の雑音は発生しないからである。電圧が交番する交流の場合と異なり、直流の場合には火花放電の点滅がなく、がいしの一部を火花放電が短絡した形で漏れ電流が流れているにすぎないからである。図5.5の波形を調べると、サージ性の漏れ電流が流れても、そのサージの立ち上がり時においてさえラジオおよびテレビ雑音レベルがほとんど増大しない場合がある。また、サージ性の漏れ電流は測定されなくても雑音レベルが高まる場合や、RIVレベルは増大するがテレビ雑音レベルはほとんど増大しない場合などが見られる。これらは沿面火花放電の伸展が比較的緩やかであるとか、局部火花放電によって高電界ストレス部が橋絡されそれまで発生していたコロナ放電が止むためと考えられる。mAレベルの電流は検出されなくても、がいし表面汚損層の湿潤の不均等に基づく電界の集中部で局部コロナ放電を生じ高いレベルの雑音を発生する場合があると考えられる。このように、ラジオおよびテレビの雑音レベルは、漏れ電流の大きさに単純には比例しない。

### 5.5.2 ラジオ、テレビ雑音特性

直流用懸垂がいしあるいは長幹がいしから構成したがいし装置の汚損湿潤時におけるラジオおよびテレビ雑音の時間経過特性を図5.6と図5.7にそれぞれ示す。懸垂がいしの場合も長幹がいしの場合も、一定電圧印加後霧を発生させた場合、ラジオ、テレビ雑音とも噴霧開始後徐々にそれらのレベルは増大する。通常、10~20分程度で雑音レベルは飽和する傾向を示すが、中には30~60分経過後、立ち上がる場合も見られる。これは供試がいしの汚損層の霧による湿潤



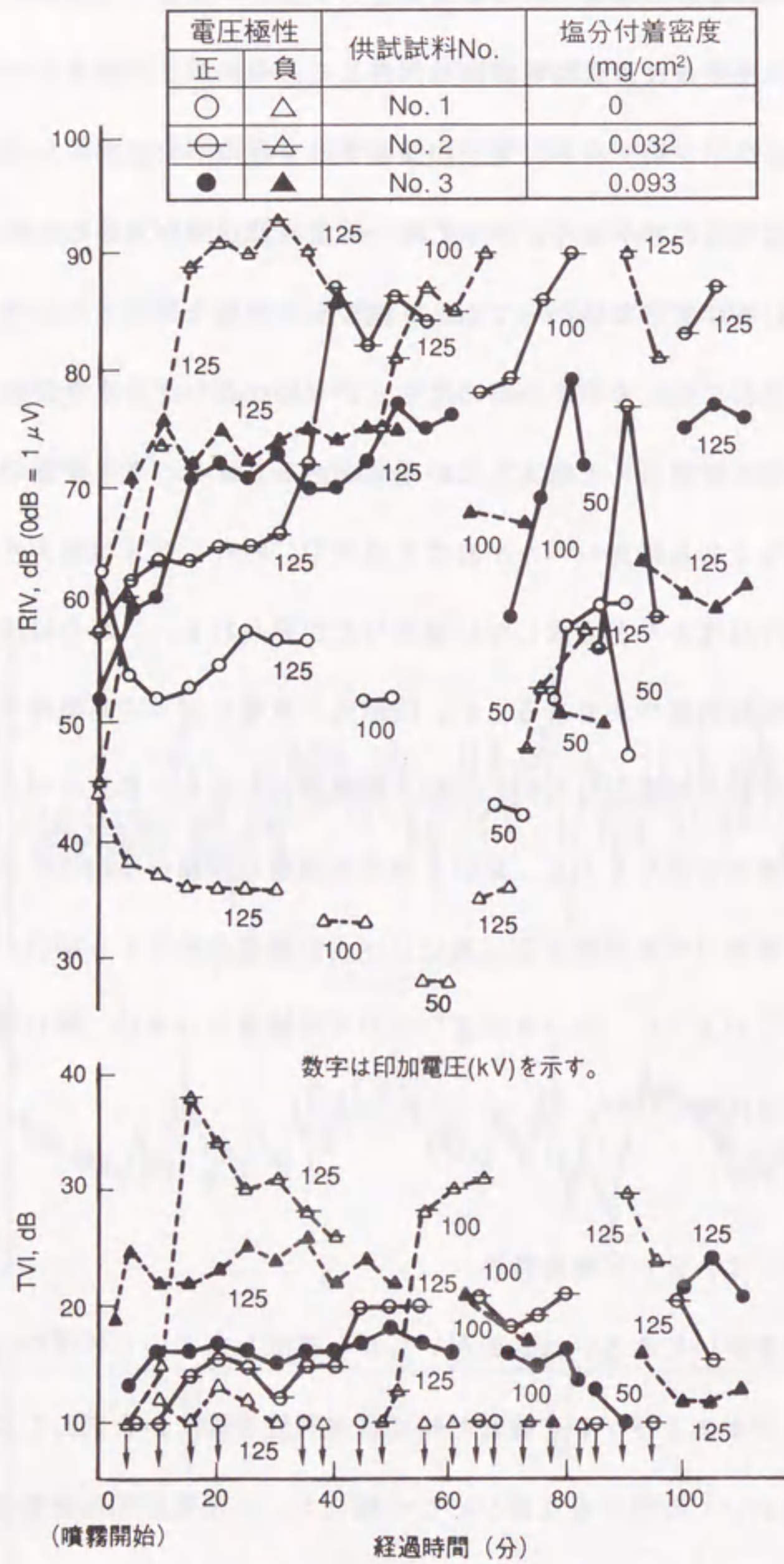


図5.6 直流用懸垂がいし装置のRIV、TVIの時間特性

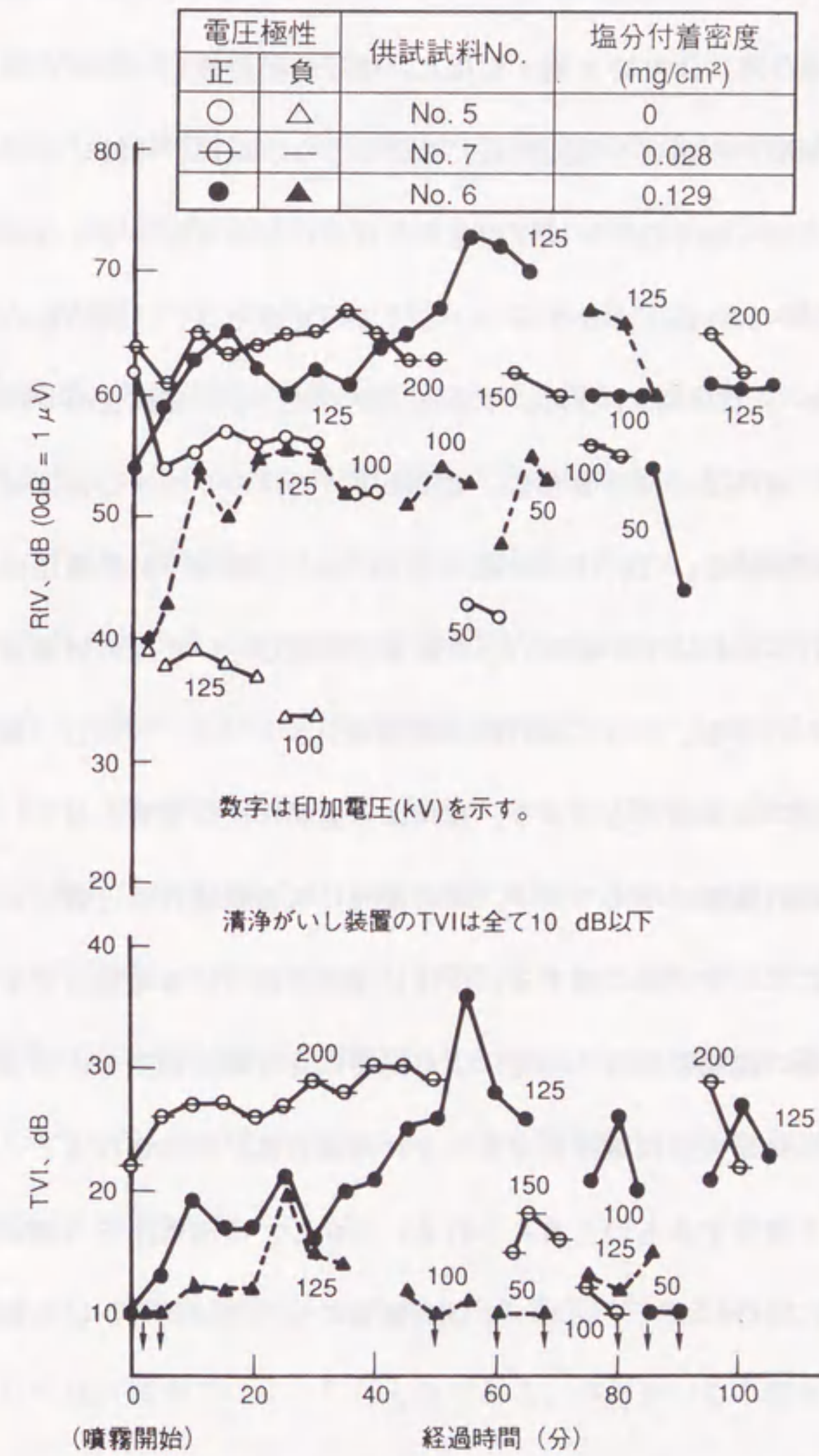


図5.7 長幹がいし装置のRIV、TVIの時間特性



の進行の微妙な差異に起因するためと考えられる。しかし、1時間程度経過すれば、これらのレベルの最大値はほぼ出現する。霧の中でがいし表面は徐々に湿潤が進み漏れ電流が増大する。漏れ電流が増えると表面汚損層はジュール熱による乾燥作用と霧による湿潤作用を同時に受ける。がいし表面の電圧分布は湿潤作用と乾燥作用により時々刻々変化し、電圧分担の厳しい個所や局部的な気中絶縁破壊個所から雑音を発生する。このような状況が、一般には10~20分程度、遅くとも30~60分程度でほぼ定常的な状態になるものと考えられる。

印加電圧を20~30%低下させてみた。ここでの実験では、125kVから100kVまたは200kVから150kVに下げた。すると、ラジオ、テレビ雑音のレベルは一旦は下がるが、短時間で再び増大し、電圧を下げる前のレベルとほぼ同程度のレベルにまで回復する。これは印加電圧を下げると、各部の分担電圧は下げた電圧の割合だけ平均的に下がるため、それまで発生していた局部放電は弱くなったり消滅したりする。そして漏れ電流の値も小さくなる。しかし、漏れ電流による乾燥作用が弱まることにより、霧による湿潤作用が優勢となり、湿潤が進むと徐々に漏れ電流は増えてくる。漏れ電流による乾燥作用と霧による湿潤作用により新たな平衡状態に達する。全体に印加されている電圧は多少低くなくても、汚損層の湿潤乾燥の不均等による局部火花放電の発生を止めることはできない。一旦局部火花放電が発生したり、高電界部が形成されると、ほぼ同レベルの雑音を発生するものと考えられる。しかし、印加電圧を当初の値の半分以下に下げた場合には、ラジオ、テレビ雑音のレベルは明らかに大幅に低下する。

コールドウェットスイッチオンの条件を模擬した場合のラジオ、テレビ雑音レベルは、電圧印加後霧発生(図5.1に示す条件1)の場合のレベルとほぼ同等であった。コールドウェットスイッチオンの条件を模擬した試験(図5.1に示す条件2)は、噴霧開始後延1時間程度経った後に実施した。このため、が

いし表面の汚損物が一部流失していることも考えられる。しかし、後に述べるように、汚損度が多少変化しても、ラジオ、テレビ雑音のレベルにはほとんど変化が認められない。これを勘案すると、がいしが充分湿潤した後電圧を印加しても、電圧印加後霧を発生しがいしを湿潤させても、ラジオおよびテレビ雑音特性に大きな差はないといえる。

次にがいしの種類によっても特性が若干相違することがわかった。長幹がいしの場合、各種条件におけるRIVレベルの最大値は65~75dBであり、直流用懸垂がいしの場合の75~90dBに比べ明らかに低い値となった。懸垂がいしの場合には金属ピンの周辺が高い電流密度のため乾燥して高電界となり、間歇的に局部火花放電を発生しレベルの高い雑音電波を発生する。これに対し、長幹がいしの場合には、両端がキャップ金具でその径は大きく、磁器の胴部と笠部の直径の差も比較的小さく電流密度の不均等が比較的少ない。このため、電圧分担の極端な不均等が生じにくく雑音電波を発生しにくいと考えられる。

図5.8は、直流用懸垂がいし1個当りの平均分担電圧に対するラジオおよびテレビ雑音レベルの各種条件における最大値をプロットしたものである。RIVレベルは分担電圧が大きくなるにつれ漸増するが、6~8kV/個以上では80~90dB程度の値ではほぼ飽和する傾向がみられる。これに対しテレビ雑音電界強度はRIVレベルの1/4~1/3であるが、ほぼ分担電圧に比例して増大し、6~8kV/個で20~30dBとなっている。

図5.9は、直流用懸垂がいしの場合の汚損度に対するRIVとテレビ雑音電界強度TVIの最大値をプロットしたものである。清浄がいしの霧中におけるRIV特性は、注水時と同様がいし連の線路側が正極性の場合の方が負極性の場合よりも20dB程度高く、その最大値は約60dBである。これに対し汚損がいしのRIV特性には印加電圧の極性による差はほとんど認められない。汚損がいしの霧中におけるRIVレベルは80~90dBと清浄時に比べ20~30dB高くなっている。また汚



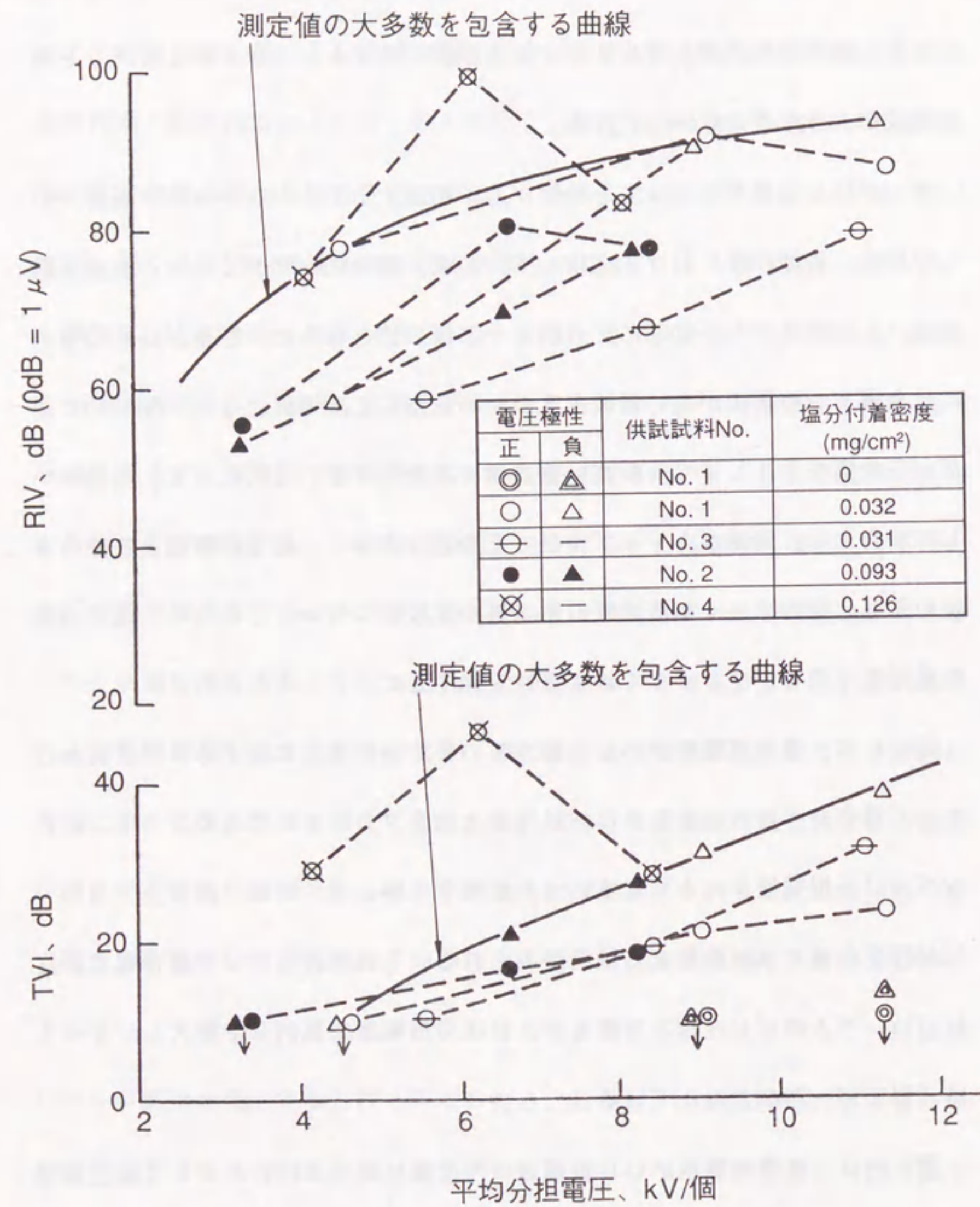


図5.8 直流用懸垂がいしの分担電圧とRIV、TVI特性の関係

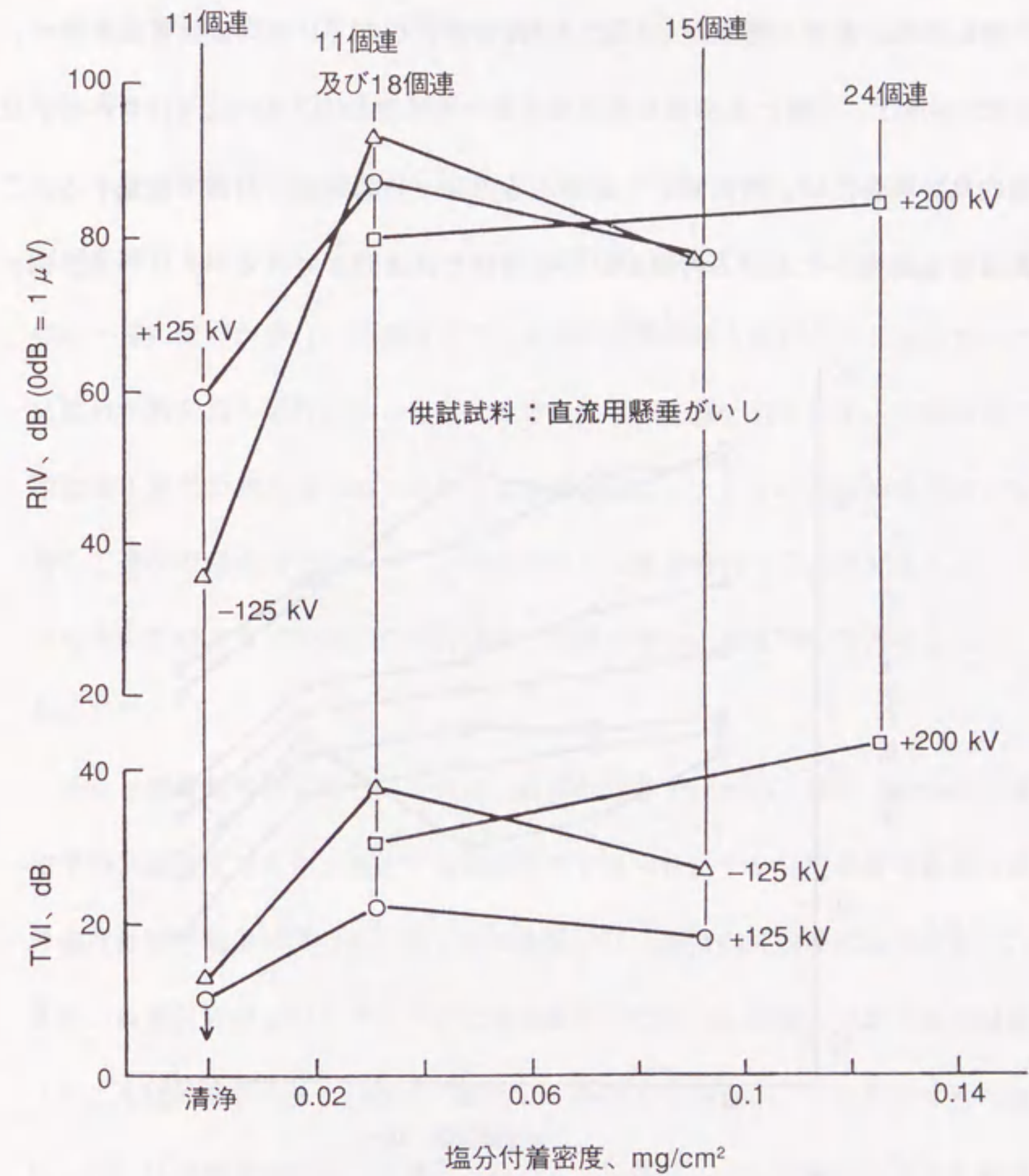
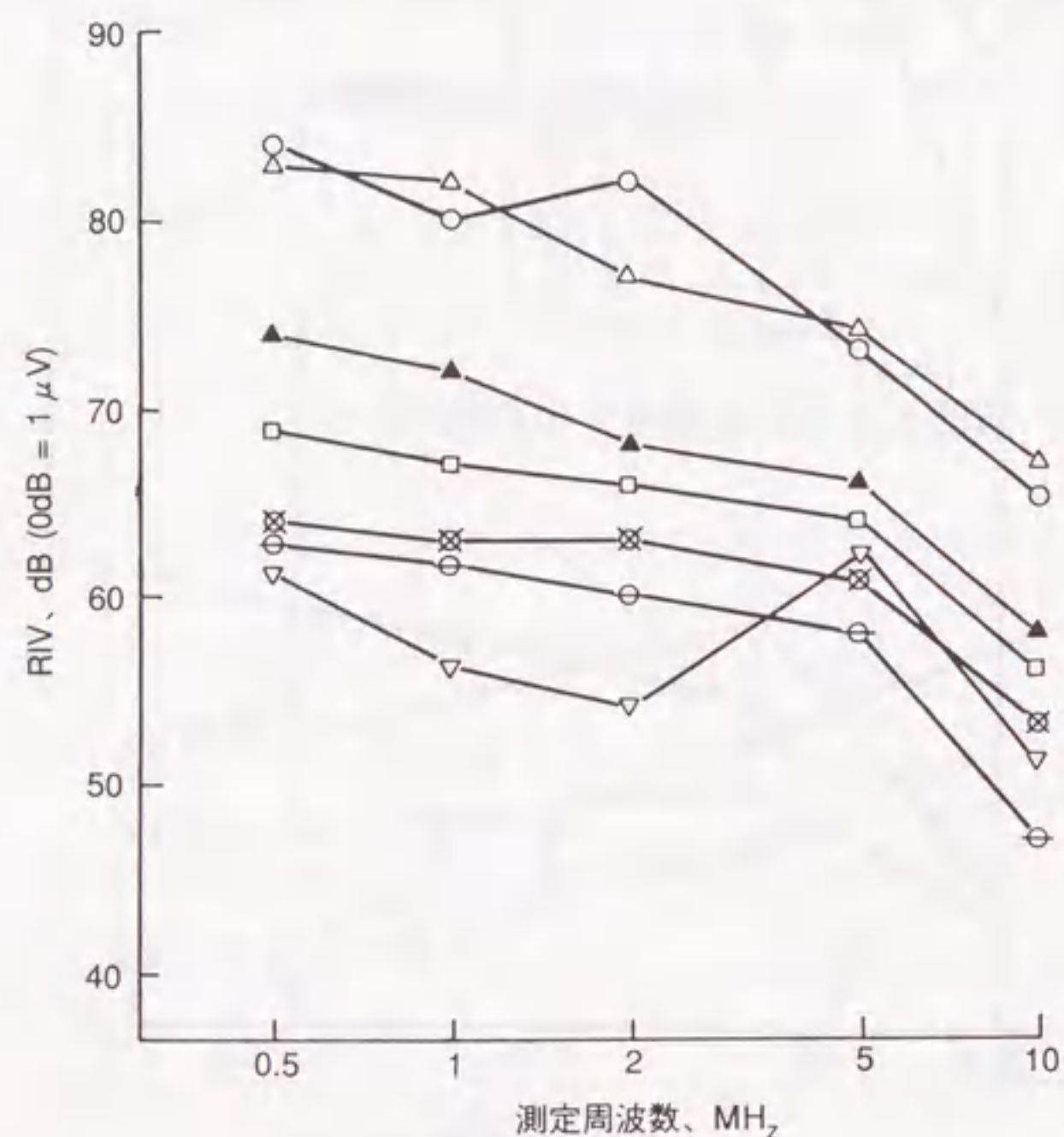


図5.9 RIV、TVIの塩分付着密度に対する特性



損度が0.03mg/cm<sup>2</sup>程度と0.09~0.12mg/cm<sup>2</sup>では RIVレベルにほとんど有意差は認められない。テレビ雑音電界強度は RIVに比べ大きさは約1/2 であるが、汚損度が0.03mg/cm<sup>2</sup>以上では、汚損度および印加電圧の極性による有意差は認められない。

図5.10は、直流用懸垂がいしと JIS長幹がいしの RIVの周波数特性を示す。RIVレベルは、一般に周波数が高くなるにつれ次第に低くなる。RIVレベルが比較的高い場合には、周波数が1桁増えると10~15dB程度の割合で低減する。これは交流課電下における汚損がいしの特性とほぼ同じである<sup>(16)</sup>。一方、RIV



| 極性 |   | 供試試料    | 塩分付着密度<br>(mg/cm <sup>2</sup> ) | 印加電圧<br>(kV) |
|----|---|---------|---------------------------------|--------------|
| 正  | 負 |         |                                 |              |
| ○  | △ | 直流懸垂×11 | 0.032                           | 125          |
| ⊖  | — | ◇×18    | 0.031                           | 200          |
| —  | ▲ | ◇×15    | 0.093                           | 125          |
| ⊗  | — | ◇×24    | 0.126                           | 200          |
| □  | ▽ | JIS長幹×4 | 0.129                           | 125          |

図5.10 RIVの周波数特性

レベルが比較的低い場合には、周波数が5MHz程度まで、周波数が1桁増えても3~5dB程度低減するだけである。しかし、5MHz以上ではいずれの場合にも低減の割合は大きくなっている。なお、印加電圧の極性による周波数特性の差異は認められない。

直流課電がいし連の汚損湿潤時の局部火花放電が具体的にテレビ画面に及ぼす障害を、減衰器を用い信号電界強度を変えることによってSN比を変え実測した。テレビ画像障害の代表例を図5.11に示す。SN比が40dB以上であればほとんど何の障害も認められない。しかし、30dB程度(同図(a))になると、画面全体に一様に斑点が現れ、20dB以下では画面の同期が時々崩れることがわかった。比較のため交流の場合のテレビ画像障害の代表例を図5.12に示す。交流の場合、印加電圧波形の波高値近辺で発生する放電のため、テレビの垂直掃引周期と同期して帯状の斑点群となる<sup>(16)</sup>。SN比とテレビ画像障害の以上の関係をまとめると表5.3のようになる。この関係は、交流の場合とほぼ同じであることがわかる<sup>(16)</sup>。

テレビ雑音電界強度のピーク値は、今回の実験ではがいし連から約5mの位置で平均30dB程度であり、最大でも40dB程度であった。テレビ放送信号電波の電界強度は信号電界強度の特に弱い地域を除けば、通常60dB程度は期待できる。また、各受信者のテレビアンテナと送電線鉄塔のがいし装置との間の距離減衰(たとえば雑音源から40m地点で約20dB)が考えられる。これらを併せ考えれば、S/N比は通常40dB以上は確保されることになり、テレビ画面に及ぼす障害は実用上大きな問題にはならないと考えられる。

### 5.5.3 可聴雑音特性

負極性電圧印加時の可聴雑音の時間特性の一例を図5.13に示す。この図は、比較的パルス性の可聴雑音が発生している場合の実測波形例である。こ





(a) S / N = 30 dB



(b) S / N = 20 dB



(c) S / N = 10 dB

供試々料: No. 3、印加電圧: +125 kV  
塩分付着密度: -0.031 mg/cm<sup>2</sup>

図5.11 TV画像障害の例

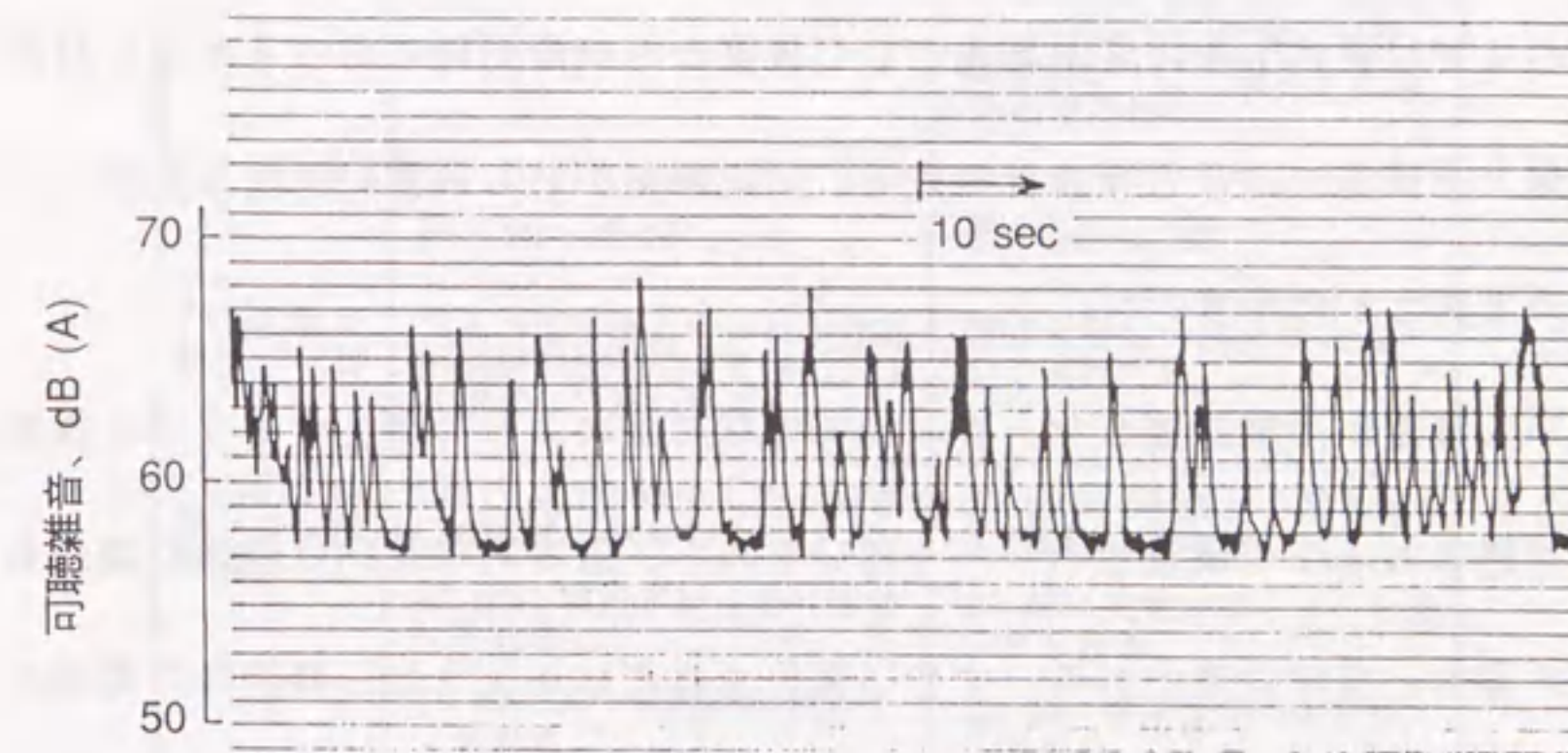


供試々料: JIS 長幹がいし(LC-8021 x 3)  
印加電圧: 160 kV (交流)  
塩分付着密度: 0.12 mg/cm<sup>2</sup>

図5.12 交流の場合の画像障害の例

表5.3 テレビの画像障害の程度とSN比

| SN比      | 障害の程度                       |
|----------|-----------------------------|
| 40 dB 以上 | 何等障害が認められない。                |
| 35 dB    | 雑音が少し認められるが、ほとんど画面の質を悪くしない。 |
| 30 dB    | 雑音がはっきりと認められる。              |
| 20 dB    | 時々画面の同期がくずれる。               |
| 10 dB    | しばしば画面の同期がくずれる。             |



供試々料: No. 2、印加電圧: -125 kV  
塩分付着密度: 0.093 mg/cm<sup>2</sup>

図5.13 可聴雑音の時間変化の一例



ここでは、58dB程度の定常的な音圧レベルと繰り返し発生する高レベルのパルス性の音圧レベル（以下、「パルス音」と略す）とが記録されている。今回は比較的音圧レベルが高く、また高周波成分を含み人間にとって著しく耳ざわりなパルス音のみに着目するものとする。表5.2の可聴雑音の値は、実験室内で測定したパルス音(A特性)に基づいて、自由空間における音源から30m地点の音圧レベルに換算したものである。計算にあたっては、音源を点音源とみなし、パルス音のピーク値は音源から直接伝播する音のみであると考え、音圧レベルの測定にあたっては、室内での天井や側壁などからの反射波も録音されているが、反射パルス音は元のパルス音のピーク値には重畳しないので、それは無視できるとする。

表5.2に示すように、清浄がいしの場合には、がいしの種類や印加電圧の極性にかかわらず可聴雑音は全く測定されていない。これに対し、汚損湿潤がいしの場合には30m地点換算値で50dB(A)程度の可聴雑音を発生することがわかる。この値は交流の場合の汚損がいし装置からの可聴雑音よりやや高いレベルとなっている<sup>(16)</sup>。

#### 5.5.4 各種雑音特性の交流課電時の特性との比較

これまでに述べてきた直流課電がいし装置の汚損湿潤時におけるがいし浴面の局部火花放電による各種雑音特性を、交流課電がいし装置の特性と比較し、まとめて表5.4に示す<sup>(16)</sup>。

がいし装置が汚損湿潤したときの局部火花放電によって発生するラジオ雑音、テレビ雑音および可聴雑音のレベルはいずれも、基本的な傾向は直流の場合も交流の場合とほぼ同等である。すでに報告されているように、降雨時の電線からのコロナや清浄がいし装置からの局部火花放電による雑音レベルは、交流課電下よりも直流課電下の方が大幅に軽減される<sup>(6)(7)</sup>。また、交流の場合には、

送電線全体からのラジオ、テレビ雑音は、電線からのコロナによる特性に主として左右されることがわかっている<sup>(16)</sup>。これに対し、直流送電線の場合には、汚損湿潤したがいし装置からのラジオ、テレビ雑音および可聴雑音が送電線全体の雑音特性に大きな影響を与えるのではないかと懸念されていた。

しかし±125kVおよび±200kV級直流課電がいし装置の汚損湿潤時のラジオ、テレビおよび可聴雑音レベルはいずれも、交流課電がいし装置の場合と大差はないことが分かった。したがって、交流送電線路の運転実績からみて、放送信号電界強度の特に弱い地区などを除けば、直流送電用がいし装置からのラジオ、テレビおよび可聴雑音は、実用上大きな問題にはならないと考える。

表5.4 交流電圧と直流電圧課電下における  
汚損がいし装置からの各種雑音障害の比較  
(部分フラッシュオーバーを発生しない場合)

| 項目             | 交流電圧課電 (500 kVまで)  | 直流電圧課電 (±200 kVまで)   |
|----------------|--|--|
| サージ性漏れ電流       | 短時間しか継続して流れない。   | 比較的長時間継続して流れる。   |
| RIVレベル         | 懸垂がいしの場合<br>最大70~90 dB<br>長幹がいしの場合<br>最大60~70 dB   | 懸垂がいしの場合<br>最大80~90 dB<br>長幹がいしの場合<br>最大65~75 dB   |
| RIVの周波数特性      | 周波数が1けた増えると、RIVは10~20 dB下がる。   | 5 MHz以下でRIVレベルが比較的高い場合には、周波数が1けた増えるとRIVは10~15 dB下がるが、RIVレベルが低い場合には3~5 dB下がるのみである。しかし、5 MHz以上の領域では、周波数が1けた増えると20 dB程度下がる。 |
| TVIレベル         | 最大 30~35 dB  | 最大 30~40 dB  |
| TV画像の障害の様相     | 交流印加電圧とテレビの垂直掃引周期が同期して帯状のはん点として現われる。   | 画面全体に一樣なはん点として現われる。  |
| TV画像障害とSN比の関係  | SN比 40 dB以上：何ら障害が認められない。<br>30 dB：雑音ははっきり認められる。<br>20 dB：時々画面の同期がくずれる。<br>10 dB：ひんぱんに画面の同期がくずれる。 | SN比 40 dB以上：何ら障害が認められない。<br>30 dB：雑音ははっきりと認められる。<br>20 dB：時々画面の同期がくずれる。<br>10 dB：しばしば画面の同期がくずれる。                         |
| 音源から30m地点の可聴雑音 | 最大 55~60 dB(A)   | 最大 50~55 dB(A)   |



5.6 部分フラッシュオーバー発生時の可聴雑音測定結果

コールドウェットスイッチオンを模擬した条件下で、部分フラッシュオーバーが発生した時の可聴雑音の波形の一例を図5.14に、測定結果を表5.5に示す。

図5.14より1分間に数回の割合で高いレベルのサージ性の可聴雑音が発生していることがわかる。表5.5のうち、上から4段目までは、部分フラッシュオーバーの防止対策を施さない場合の測定結果であり、同表の5段目以降は防止対策のため、シリコングリース塗布がいしまたは460DCがいしを数個がいし連に挿入した場合の結果である。

ここでの一連の実験では、可聴雑音は、IEC Pub. 651-1971に規定の騒音計と直径1インチのコンデンサマイクロホンで測定している。マイクロホンは、図2.2に示すように供試がいし連から12mの位置に置き、騒音レベルをA特性の音圧レベルの実効値により表現している。この測定においてはピーク値についても次のような補正を行っている。すなわち、試験を実施した実験室の壁面などでの反射および吸収に対する補正を行っている。具体的には、正弦波発信器と無指向性スピーカをがいし連の中央部において各周波数毎に音響パワーレベ

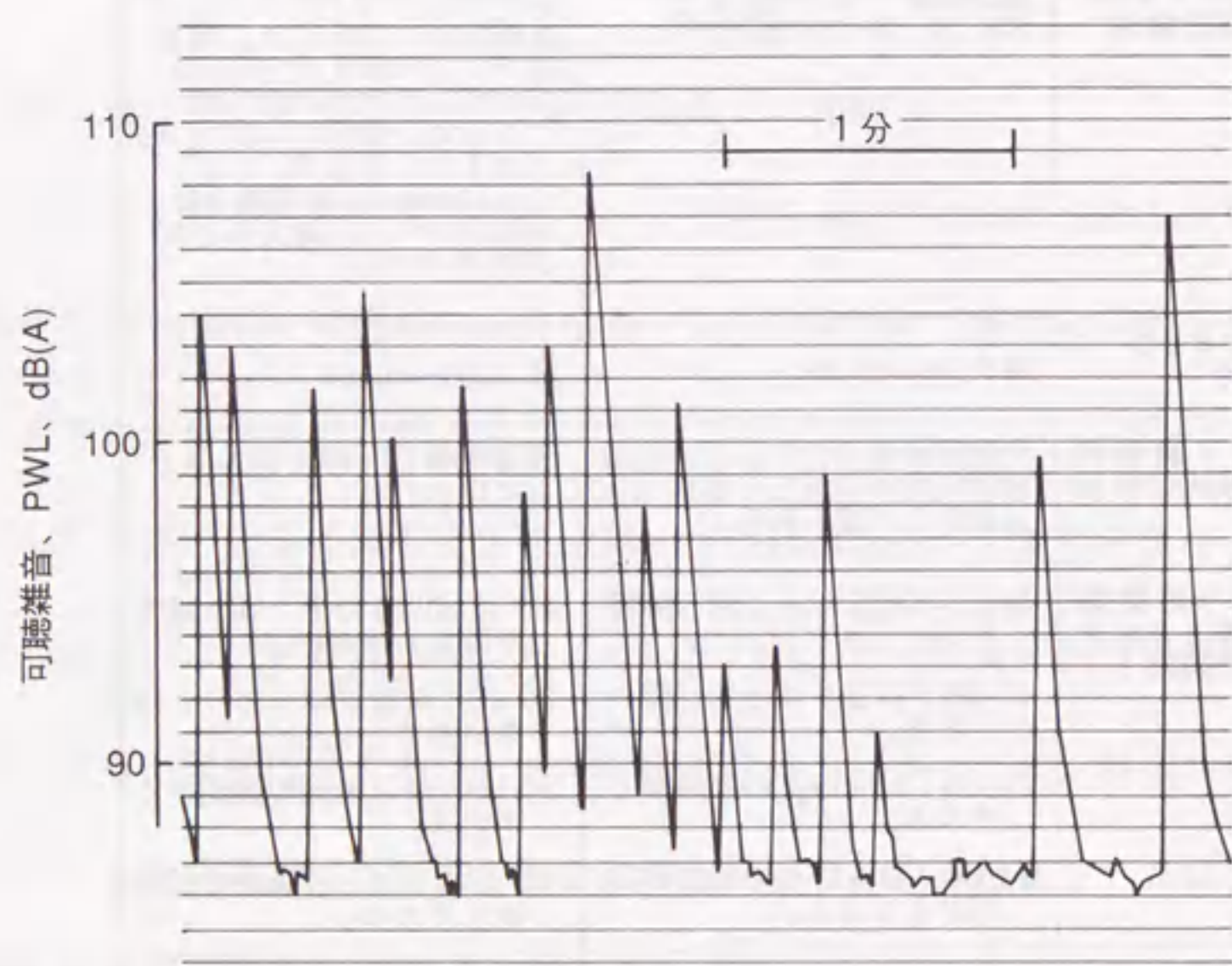


図5.14 部分フラッシュオーバー発生時の可聴雑音の波形例

表5.5 コールドウェットスイッチオン条件下における部分フラッシュオーバー発生時の可聴雑音測定結果

| 印加電圧 (kV) | 供試がいし装置                            | 塩分付着密度 (mg/cm <sup>2</sup> ) | 部分フラッシュオーバー発生時の可聴雑音の最大値 PWL (dB (A)) |
|-----------|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| -500      | 320DC × 46                         | 0.054                        | 105                                  |
|           | 460DC × 33                         | 0.055                        | 99                                   |
| +500      | 320DC × 46                         | 0.053                        | 111                                  |
| -250      | 320DC × 34                         | 0.058                        | 96                                   |
| -500      | 320DC × 46<br>(シリコングリース塗布がいし4個挿入)  | 0.052                        | 102                                  |
|           | 320DC × 46*<br>(シリコングリース塗布がいし5個挿入) | 0.054                        | 99                                   |
|           | 320DC × 41<br>+<br>460DC × 5       | 0.053                        | 93                                   |

\*: 霧水量 3 ~ 5 g/m<sup>3</sup>, 他の試験は 0 ~ 0.4g/m<sup>3</sup>

PWL (dB (A)): 雑音源の音響パワーレベルのA特性

ル一定の標準波を発生させた。これを音源から12mの位置のマイクロホンで測定し残響時間を求め、次式により音響パワーレベルPWL(dB(A))を算出した。

$$PWL = (SPL)_r + C_1 - C_2 \quad (5-1)$$

ここで、

(SPL)<sub>r</sub> : 実験室内の音源から12m地点で測定した音圧レベル、dB(A)

C<sub>1</sub> : 音源から12m地点の音圧レベルと音源のPWLの比

C<sub>2</sub> : 部屋の音響特性により定まる補正值

測定の結果、C<sub>1</sub>=33dB(A)、C<sub>2</sub>=10dB(A)であった。

なお、音響パワーレベルがPWL(dB(A))の音源からL(m)離れた自由空間における任意の地点の音圧レベル(SPL)<sub>r</sub>は、次式により求められる。

$$(SPL)_r = PWL - 20 \log L - 11 \quad (5-2)$$



表5.5 に示す可聴雑音の測定結果から以下のことが考察される。

(a) 部分フラッシュオーバーの防止対策を施さない場合、部分フラッシュオーバー発生時の音源の音響パワーレベルは96~111dB(A)の範囲にある。連続課電下でがいし連が不均等に湿潤し部分フラッシュオーバーが発生する場合の可聴雑音についても、音源の音響パワーレベルは96~112dB(A)が測定されており<sup>(17)(18)</sup>、連続課電下での湿潤条件あるいはコールドウェットスイッチオン条件の違いによる騒音レベルの差は見られない。なお、局部火花放電のみ発生時の音源の音響パワーレベルは最大 95dB(A)であり、このレベルも電圧印加後霧発生条件下で測定されている騒音レベルと差は見られない<sup>(17)(18)</sup>。

送電線から線路に直角方向に50m離れた地点の騒音レベルを、音源を点音源と見なし自由空間における距離による減衰を仮定して求めてみた。それによれば部分フラッシュオーバー発生時は最大 66dB(A)となるが、局部火花放電発生時は最大 50dB(A)にまで低下する。なお、交流 500kV送電線における降雨時の電線コロナによる可聴雑音は、線路から直角方向に50m離れた地点において約 50dB(A)である<sup>(19)</sup>。部分フラッシュオーバー発生時の騒音レベルは非常に高いことがわかる。

がいしの種類により部分フラッシュオーバー発生時の騒音レベルに明確な差は見られなかった。

(b) シリコングリースを塗布したがいしをがいし連の中に数個挿入した場合の部分フラッシュオーバー発生時の音源の音響パワーレベルは99~102dB(A)であった。これは、シリコングリースを塗布したがいしをがいし連に含まない場合の同一がいしからなるがいし連の部分フラッシュオーバー発生時のレベル105~111dB(A)より若干は低い。これは、がいし連全体に印加されている電圧の一部が、シリコングリースを塗布した他のがいしによって分担されるためと考えられる。すなわち、部分フラッシュオーバーが発生するがいしに加わ

る電圧は、他のシリコングリース塗布がいしで分担される分だけ、通常がいし連の場合より低くなるためと考えられる。

## 5.7 むすび

直流課電がいし装置の汚損湿潤時にがいしの沿面で通常発生する局部火花放電に起因する各種雑音特性は、電線のコロナ雑音特性よりも高く、送電線全体の雑音特性を左右することがわかった。しかし、それらのレベルは、交流課電がいしの汚損湿潤時の雑音特性とほぼ同等である。

極めて稀ではあるが、コールドウェットスイッチオン条件下で部分フラッシュオーバーが発生すると、連続課電条件下とほぼ同じ高いレベルの可聴雑音が発生する。したがって、部分フラッシュオーバーの発生を防止する対策を早急に確立する必要がある。部分フラッシュオーバーの発生さえ防止されれば、直流送電の場合にも、汚損がいしの局部放電によって発生するラジオ、テレビ雑音、および可聴雑音は実用上問題にならないと考えられる。

## 文 献

- (1) 内藤, 坂西: 「送電線路用碍子の直流汚損特性」, 碍子レビュー, No. 31, pp. 33~ 51, June, 1971.
- (2) I. Kimoto, T. Fujimura and K. Naito: "Performance of insulators for direct current transmission line under polluted condition", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, No. 3, pp. 943 ~ 949, 1973.
- (3) Y. Nakajima, T. Seta, K. Nagai, H. Horie and K. Naito: "Performance



- of contaminated insulators energized by DC voltage", CIGRE Paper, No. 33 -07, 1974.
- (4) T. Seta, N. Arai and T. Udo: " Natural pollution test of insulators energized with dc high voltage", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, No. 3, pp. 878~883, 1974.
- (5) T. Seta, K. Nagai, K. Naito and Y. Hasegawa: " Studies on performance of contaminated insulators energized with DC voltage", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, pp. 518~527, 1981.
- (6) 内藤, 坂西, 藤田: 「がいしおよび電線の直流注水コロナ特性」, 昭和47年電気四学会東海支部連合大会講演論文集, No. 18p-D-11, 昭和47年.
- (7) 峰村, 磯, 内藤, 藤田: 「がいし装置および電線の直流コロナ雑音特性」, 昭和52年電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, No. 161, 昭和52年.
- (8) B. M. Bailey: " Progress report on BPA HVDC test line, radio noise and corona loss", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, No. 10, pp. 1141~1145, 1967.
- (9) N. Knudsen, H. Bergqvist and P. Forsgren: " Results from 3-year operation of the HVDC-test station in Anneberg", CIGRE Paper, No. 31-04 1970.
- (10) G. C. Kakoti, M. Phil, B. Salvage and R. B. Turner: "Radio interference from high voltage insulator under direct voltage condition", Proc. IEE, Vol. 116, No. 3, pp. 415~421, 1969.
- (11) W. Mosca, P. Ostano and G. Rumi: " HVDC visual corona and RIV testing on insulators and conductor samples ", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, No. 1, pp. 138 ~145, 1971.

- (12) 福島, 須永: 「直流送電線の雑音と騒音(第3報) -がいしの部分せん絡による騒音と雑音の実験的検討-」, 電中研技報, 73075, 昭和49年.
- (13) Fukushima, Y. Sunaga, T. Sasano and Y. Sawada: " AN, RI and TVI from single unit flashover of HVDC suspension insulator strings", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, No. 4, pp. 1233~1241, 1977.
- (14) NEMA: " Methods of measurement of radio influence voltage (RIV) of high voltage apparatus", NEMA Publication, 107, 1964.
- (15) 日本工業標準調査会: 「騒音レベル測定方法」, JIS Z 8731, 1966.
- (16) Y. Sawada, M. Fukushima, M. Yasui, I. Kimoto and K. Naito: "A laboratory study on RI, TVI and AN of insulator strings under contaminated condition", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, No. 2, pp. 712~719, 1974.
- (17) M. Yasui, Y. Takahashi, A. Takenaka, K. Naito, Y. Hasegawa and K. Kato: "RI, TVI and AN characteristics of HVDC insulator assemblies under contaminated condition", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, pp. 1913~1921, 1988.
- (18) 内藤, 長谷川, 加藤, 小川: 「直流がいし装置の汚損湿潤時のRI, TVI およびAN特性」, NGKレビュー, No. 48, pp. 1~9, Aug., 1988.
- (19) UHV交流送電実証委員会: 「UHV交流送電に関する実証研究, 285801」, 昭和60年.



## 第6章 総括

### 6.1 まえがき

1954年にスウェーデンで100kVの単極直流送電が運転を開始してちょうど40年になる。特にこの十数年の間に世界の各地で多数の±500kV～600kV級UHV直流送電線が建設され運転を開始しているが、交流送電においては経験されなかった問題が種々起っている。これを線路絶縁におけるがいしについてみれば、次のようになる。

- (1) 交流の汚損設計基準に準じて設計されたがいし類が、設計が不適切なために各地の直流送電線や交直変換所で頻繁にフラッシュオーバを生ずる。
- (2) 直流送電線におけるガラスがいしの劣化率は交流送電線の10倍以上高い。
- (3) がいし連の中の1～2個のがいしのみが長時間にわたって、フラッシュオーバを繰り返して高い可聴雑音を発生する場合がある。
- (4) 交直変換所の直流側壁貫ブッシングでしばしばフラッシュオーバ事故を生ずる。
- (5) 懸垂がいしピンの腐食を防止するには通常亜鉛スリーブが有効であるが、汚損湿潤条件の厳しい地域ではそれでもピンの腐食による磁器破壊を生ずることがある。

このような状況の中で、筆者は、約30年間主として汚損がいしの絶縁特性に関する研究を行ってきた。今回上記のがいしの直流課電下における種々の課題のうち、直流特性を特徴づける最も重要なポイントであると考えられる汚損湿潤下における絶縁特性に関する研究の成果をとりまとめた。



## 6.2 コールドウェットスイッチオン条件下における部分フラッシュオーバ

直流課電下では、がいし連の中の1～2個のがいしのみがフラッシュオーバを繰り返し、高い可聴雑音などを発生することが知られている。これを「部分フラッシュオーバ」と称し、その発生のメカニズム、防止技術が研究され、清浄乾燥時に直流フラッシュオーバ電圧の高い大型のがいしとその防止に有効であることが実験室で確かめられている。しかし、北海道一本州直流幹線の一部でそのようながいしを実際に試用してみたところ、部分フラッシュオーバの発生を防止する顕著な効果を示さなかった。

このため、本研究では、(1)実験室で効果が認められた大型のがいしが実際の送電線において効果を示さなかった原因、(2)実線路における汚損湿潤条件の模擬方法とその評価方法、(3)部分フラッシュオーバの抜本的防止技術、などについて検討を行った。

研究の成果は以下の通りである。

- (1) これまで、実験室における部分フラッシュオーバの再現は連続課電条件下で行なってきたが、北海道一本州直流幹線においては、当時送電が毎日停止されており、事故発生時期の分析から部分フラッシュオーバは早朝の再課電直後に起っていることが見出された。無課電時に汚損がいし表面が湿潤した後再課電される過程、すなわち「コールドウェットスイッチオン」の条件を模擬して再現試験を繰り返した結果、連続課電条件下よりも部分フラッシュオーバが発生し易いことを明らかにした。
- (2) コールドウェットスイッチオン条件下においても、大型のがいしの方が部分フラッシュオーバの発生確率は低くなる。しかし、そのようながいしを用いても部分フラッシュオーバを完全に防止することは困難である。
- (3) 部分フラッシュオーバを防止するには、霧や降雨などの湿潤条件下で高い直流フラッシュオーバ電圧を示すシリコングリース塗布がいしなどをがいし連

の中に何個か挿入することが効果的である。部分フラッシュオーバを防止するのに必要なシリコングリース塗布がいしの個数は、湿潤条件下でのそのがいしの直流フラッシュオーバ電圧と挿入するがいし個数の積が、がいし連への印加電圧以上となるようにすることが有効である。

## 6.3 直流壁貫ブッシングのフラッシュオーバ

全世界の交直変換所では種々のがいしが使われているにもかかわらず、特に直流壁貫ブッシングに集中的にフラッシュオーバが多発するという特異現象が起きている。

壁貫ブッシングでのフラッシュオーバの発生状況は以下の通りである。

- (1) 霧や着氷時にも発生しているが、大部分が降雨時に発生している。特に、比較的小雨時に多くのフラッシュオーバが発生している。また、突風や強風を伴った降雨時にもかなり発生している。
- (2) フラッシュオーバ事故前後に測定した壁貫ブッシング表面の汚損度はブッシングの設計汚損度に比べ低いにもかかわらずフラッシュオーバを起こしている。
- (3) 変換所で使われている他のがいし類に比べて、壁貫ブッシングの表面漏れ距離などの汚損設計が不十分とはいえない。

以上のような状況のもとでの壁貫ブッシングでのフラッシュオーバの発生機構を解明しがいし設計面からフラッシュオーバ防止技術を開発した。

まず、壁貫ブッシングと交直変換所で使われている他のがいし類との大きな相違は、壁貫ブッシングが水平に取付けられていることである。したがって同一がい管について水平、垂直配置で汚損耐電圧試験を実施した。その結果、一部の笠形状については、垂直配置の場合に比べ水平配置にすると5%程度耐電圧が低下する場合も見られたが、測定されている汚損度や他のがいしとの汚損



設計などを併せ考えると、この程度の低下でフラッシュオーバー多発の原因を水平配置の汚損特性に帰することは難しい。

次に、壁貫ブッシングにおける上記フラッシュオーバー事故状況から、フラッシュオーバー事故の原因として、ブッシングの軸方向の不平等湿潤について検討している。壁貫ブッシングは建物の壁面に取り付けられているため、降雨条件によっては、ブッシングの先端部は湿潤されるが壁面への取付け基部の湿潤は建物によって妨げられ、軸方向に不平等湿潤状態となる可能性がある。このような状況を実験室で模擬し、耐電圧試験を行った。試験には、ブッシングそのものを供試するのが望ましいが、種々の笠形状や長さのブッシングを用意するのは容易ではない。このため、清浄乾燥時のがい管表面の電位分布が実際のブッシングの分布に近い模擬ブッシングを考案し実験を実施した。

試験の結果以下の成果を得た。

- (1) 不平等注水条件下では、平等注水時に比べ耐電圧が大幅に低下し、通常の直流の運転電圧でも充分フラッシュオーバーの起る可能性のあることを確認した。
- (2) 水平取付け壁貫ブッシングの不平等注水条件下における耐電圧は、笠形状を工夫し、降雨にさらされても個々の笠に湿潤されにくい個所を持たせることにより、不平等注水条件下におけるがい管沿面の電圧分担の極度の不均等を防ぐことにより改善できることを見いだした。

#### 6.4 円筒状がいしの汚損設計に及ぼす胴径の影響

発電所で用いる支持がいしやがい管などの円筒状がいしの汚損耐電圧は、その胴径または平均直径の影響を受けることは、交流についてはよく知られている。また、同一汚損環境下でがいし表面に付着する汚損物の密度は胴径が大きくなるほど低くなることも知られている。IEC Pub. 815には、円筒状がいし

の胴径に対する汚損性能の補正についての推奨値が示されているが、交流についてもその根拠は明確ではない。

今回、これまでに各地の曝露試験場で測定された汚損物の付着特性も考慮し、各種円筒状がいしの直流、交流汚損耐電圧試験結果にもとづき、胴径または平均直径の汚損設計に及ぼす影響について研究した。まず、種々異なる寸法の供試がいしについて比較検討を容易にするため、がいし長さと汚損耐電圧の間の比例関係（直線性）を実測した。交流の軽汚損域で中空がい管の場合一部飽和傾向が見られるが、直流の場合には、軽汚損域においても比例関係の成り立つことが確認できた。

同一汚損付着密度の場合、がいしの汚損耐電圧1kV当りの表面漏れ距離は、交流の場合も直流の場合も平均直径が大きくなるにつれ大きくする必要がある。直流の場合平均直径の0.30乗に比例して増大するが、交流の0.43乗に比べて小さい値となっている。平均直径が大きくなる場合の汚損耐電圧1kV当りの表面漏れ距離の増分は直流の方が交流よりも少なくてすむ。

次に、円筒状がいしの胴径による汚損付着密度への影響について研究した。電気協同研究第35巻第3号には、曝露試験場での測定結果が示されている。曝露試験であるのでデータのばらつきは大きいですが、胴径が大きいほど付着密度は低下する傾向が見られる。実験室で急速汚損条件を模擬し、胴径の異なる円筒状がいしについて人工汚損付着試験を実施し、曝露試験とほぼ同じ結果を得るに至っている。

同一汚損付着密度における円筒状がいしの平均直径と汚損耐電圧の関係と、平均直径が大きくなるにつれ汚損付着密度が低減する関係を考慮し、円筒状がいしの平均直径に対する汚損設計基準の推奨案を、直流、交流について提案した。これは直流について、世界で初めての提案である。交流についても、IEC Pub. 815 が推奨している値は全く不十分であることを指摘した。直流について



は、平均直径の影響は交流の場合よりもやや少ないことも明らかにした。

## 6.5 がいし装置の汚損湿潤時におけるラジオ、テレビ雑音

### および可聴雑音特性

交流の送電線では、がいしが汚損湿潤し沿面で局部火花放電が発生すると、ラジオやテレビの信号電界強度の低い一部地域では電波障害あるいは可聴雑音などを発生し、問題となることがある。このような局部火花放電の発生を防止することは容易ではない。直流送電用がいし装置についても、がいしが汚損湿潤し局部火花放電が発生する場合の各種雑音特性を充分研究しておく必要がある。今回±125kV級がいし装置について、これらの特性を実験により求めている。また、±500kV級がいし装置については、特に、第2章で研究したコールドウェットスイッチオン条件下で部分フラッシュオーバーが発生する時の可聴雑音特性についても実験により測定し、連続課電条件下で部分フラッシュオーバーが発生する時の特性と比較した。

種々の汚損、湿潤条件を模擬して試験を行い各種雑音特性について以下の点を明らかにした。

- (1) がいし装置が汚損湿潤し局部火花放電が発生する時のラジオ雑音、テレビ雑音および可聴雑音のレベルはいずれも、直流の場合も交流の場合とほぼ同等である。
- (2) 直流課電の場合には、降雨時には交流課電の場合と異なり、かえって電線からのコロナ放電あるいは清浄がいし装置からの局部放電によるラジオ雑音および可聴雑音のレベルは大幅に軽減される。このため送電線全体の雑音特性は、直流の場合には汚損湿潤時のがいし装置からの局部火花放電によって決まる。これは交流の場合には電線からのコロナ放電によって決まる

ことと対照的である。

- (3) コールドウェットスイッチオン条件下で部分フラッシュオーバーが発生する時の可聴雑音レベルは、連続課電下で発生する時のレベルとほぼ同じである。しかし、この種の可聴雑音レベルは非常に高いので、コールドウェットスイッチオン条件下にかぎらず部分フラッシュオーバーの発生を防止する必要がある。
- (4) 部分フラッシュオーバーが防止されれば、直流送電線全体の雑音は汚損湿潤がいしからのものによって決まる。しかし、その時の各種雑音のレベルは交流送電線での汚損湿潤がいしからの特性とほぼ同じであり、ラジオやテレビの信号電界強度の特に弱い地域を除けば、実用上大きな問題にはならないと考えられる。

## 6.6 本研究に関する今後の課題

直流送電用がいしの汚損湿潤時の絶縁特性に関する今後の課題としては、以下の諸点が考えられる。

### (1) 部分フラッシュオーバーの防止技術

今回提案した部分フラッシュオーバーの防止技術の効果について、今後実際の送電線あるいは実規模での課電曝露試験により検証を進める必要がある。また、今回シリコングリース塗布を具体的な防止技術として示したが、シリコングリースは定期的な塗り替えを要するため、撥水性を有し寿命の長い表面処理材の開発が望まれる。

### (2) 直流壁貫ブッシングのフラッシュオーバーの防止技術

フラッシュオーバーの原因、メカニズムを明らかにしたので、今後不平等注水条件を避けるような種々の方策を検討する必要がある。たとえば、壁貫ブッシングの代りに屋根貫ブッシングとしたり、ケーブルにて引き出すことも考えられ



る。なお、壁貫ブッシングを用いる場合でも、がい管の笠形状の改善と、内部コンデンサコアの長さを長くすることによって、実用上問題にならないレベルに耐電圧を上げることも可能であると考える。

#### (3) 円筒状がいしの汚損設計に及ぼす胴径の影響

直流はもとより交流の場合にも、海外ではブッシングなどの汚損設計に胴径または平均直径の影響が充分考慮されていない。このため、実際の変電所や変換所でフラッシュオーバーが多発し問題となっている。今後、CIGREやIECなどの国際会議や国際規格の委員会で問題を提起し、適切な汚損設計がされるよう努力していく必要がある。

#### (4) がいし装置の汚損湿潤時におけるラジオ、テレビおよび可聴雑音特性

ラジオやテレビの信号電界強度の弱い地域においては、汚損湿潤がいしからの局部火花放電による雑音が問題となる場合もあるので、その防止技術を研究する必要がある。全面導電釉がいしやシリコンゴム製ポリマーがいしの採用、あるいはシリコンゴムやシリコングリースの塗布などが有効だが、直流課電下での半導電性釉薬の劣化の加速、有機絶縁物のアークや紫外線などによる劣化、シリコングリースの塗り替えなど、実用上種々の問題があり、決定的な防止技術は確立されていない。今後、経済性の面や信頼性の面からより実用的な防止技術を研究する必要がある。

## 謝 辞

本論文の作成に当たり、懇切なる御指導と御鞭撻を賜った名古屋大学（工学部）教授 鬼頭幸生先生に深く感謝いたします。また、本論文の作成にあたり、有益なる御助言と御指導を賜った名古屋大学（工学部）教授 水谷照吉先生、同 大久保 仁先生に厚く感謝いたします。

本研究は、筆者が日本ガイシ㈱においてほぼ一貫して携わったがいしの高電圧絶縁試験研究業務の中で得られた成果をまとめたものであり、この論文の作成を許可され、暖かい励ましを頂いた当社専務取締役 山口直樹氏、常務取締役電力事業本部 小林正爾本部長ならびに取締役電力事業本部技術本部 森田健児本部長に厚く御礼申し上げます。また、本研究の遂行、論文の作成に当たり、長年にわたり懇切なる御指導と御鞭撻を賜った中部大学（工学部）教授 藤村哲夫先生（元当社専務取締役）、名古屋工業大学教授 内藤克彦先生（元当社技師長）に厚く御礼申し上げます。

末筆ながら、本研究の遂行にあたり御協力いただいた、電力技術研究所の伊藤進課長、坂西健治主任をはじめとする職場の多くの関係の方々に感謝いたします。



本研究に関連して公表した論文

| 章   | 論文題目   | 掲載誌   | 著者  |
|-----|--|---|---|
| 第2章 | 直流課電がいし連の部分<br>フラッシュオーバーに関する研究   | 電気学会論文誌B,<br>Vol.112-B, No.1,<br>pp.36~41(1992)                                       | 松岡 良輔<br>伊藤 進<br>坂西 健治                          |
| 第3章 | An Investigation of the<br>Horizontally Mounted Insulators<br>for HVDC Stations  | IEEE Trans. on Power<br>Delivery, Vol.4, No.1,<br>pp.653~666(1989)                    | K.Naito<br>R.Matsuoka<br>S.Ito<br>S.Morikawa    |
| 第4章 | Flashover on Contaminated<br>Insulators with Different<br>Diameters  | IEEE Trans. on Electrical<br>Insulation, Vol.26, No.6,<br>pp.1140~1146(1991)          | R.Matsuoka<br>S.Ito<br>K.Sakanishi<br>K.Naito   |
| 第5章 | 直流送電用がいし装置の汚損湿潤時<br>における各種コロナ雑音特性  | 電気学会論文誌B,<br>Vol.101-B, pp.595~602<br>(1981)  | 松岡 良輔<br>長坂 広美<br>坂西 健治                         |
|     | A Laboratory Study on RI, TVI<br>and AN of Insulator Strings for<br>DC Transmission Line under<br>Contaminated Condition | IEEE Trans. on Power<br>Apparatus and Systems,<br>Vol.101, No.4, pp.815~824<br>(1982) | T.Fujimura<br>K.Naito<br>R.Matsuoka<br>Y.Suzuki |



