

地中配電用ケーブル，接続部および機器の開発

Development of Cables, Joints and Apparatuses for Underground Distribution Systems

配電の地中化を推進するに当たって，種々のニーズが発生している。ここでは，高信頼度化，小形化，不熟練化など，広い意味でのコストダウンを志向したケーブル接続部，および機器の開発状況を紹介する。また，今後重要課題となる劣化診断技術についても，その一端を述べる。

ケーブル・接続部および機器は，あらゆる面で有機的に結合しており，例えば，小形化を進める上でも，接続部～機器間が直結・一体化の方向へ進んでおり，一方の変化は，必ず他へ影響を及ぼすことになるため，互いに協調をとったシステム的な検討を行うことが必要である。

寺部 聡実* *Satomi Terabe*
春日井 汎** *Hiroshi Kasugai*
杣 謙一郎*** *Ken'ichirô Soma*

1 緒 言

近年，都市化が進むなかで，防災，交通障害，景観など多方面の社会的要請によって，配電線の地中化が強力に推進されている。この動きに対応するため，ケーブル，接続部および各機器は，信頼性向上，環境調和をはじめとし，さらに作業環境の改善，自動化・情報化対応を目標にして，改良・開発が進められている。しかし，配電設備の地中化は，架空に比べてその建設には10～15倍の費用を要する。地中化を実現，拡大していくためには，全体としてのコストダウンが必須(す)となってきている。ここでは，ケーブル・接続部および気中多回路開閉器について，その動向と開発の具体例を紹介する。

2 ケーブル

CVケーブル(Cross-Linked Polyethylene Insulated Polyvinyl Chloride Sheathed Power Cable)が浸水状態で長期間使用された場合，XLPE(Cross-Linked Polyethylene)絶縁体中に発生する水トリーによって絶縁性能が低下し，不測の事故に至る場合があることが明らかとなり，各所でその現象解明と対策の研究がなされてきた¹⁾。本章では，CVケーブルの信頼性向上のための最大の課題である水トリー対策と劣化診断技術について述べる。

2.1 水トリー対策

水トリーの発生・進展の主要因は，ケーブル絶縁体への水の浸入と電界集中であることから，これらを防止することが対策の基本となる。

2.1.1 3層同時押出

絶縁層と半導電層の界面の電極不整による電界集中を避けるため，内部半導電層および外部半導電層の界面が平滑な押出形の半導電性材料を用いた3層同時押出形ケーブルが開発され，実用化されている。

また，配電用ケーブルとしては，接続および端末処理の作業時間短縮と不熟練化を目的とし，図1に示すような容易に絶縁体からはぐことができるフリーストリッピング形の外部半導電層を開発し，適用している。

2.1.2 乾式化

PE(ポリエチレン)の化学架橋のための熱媒体として用いら

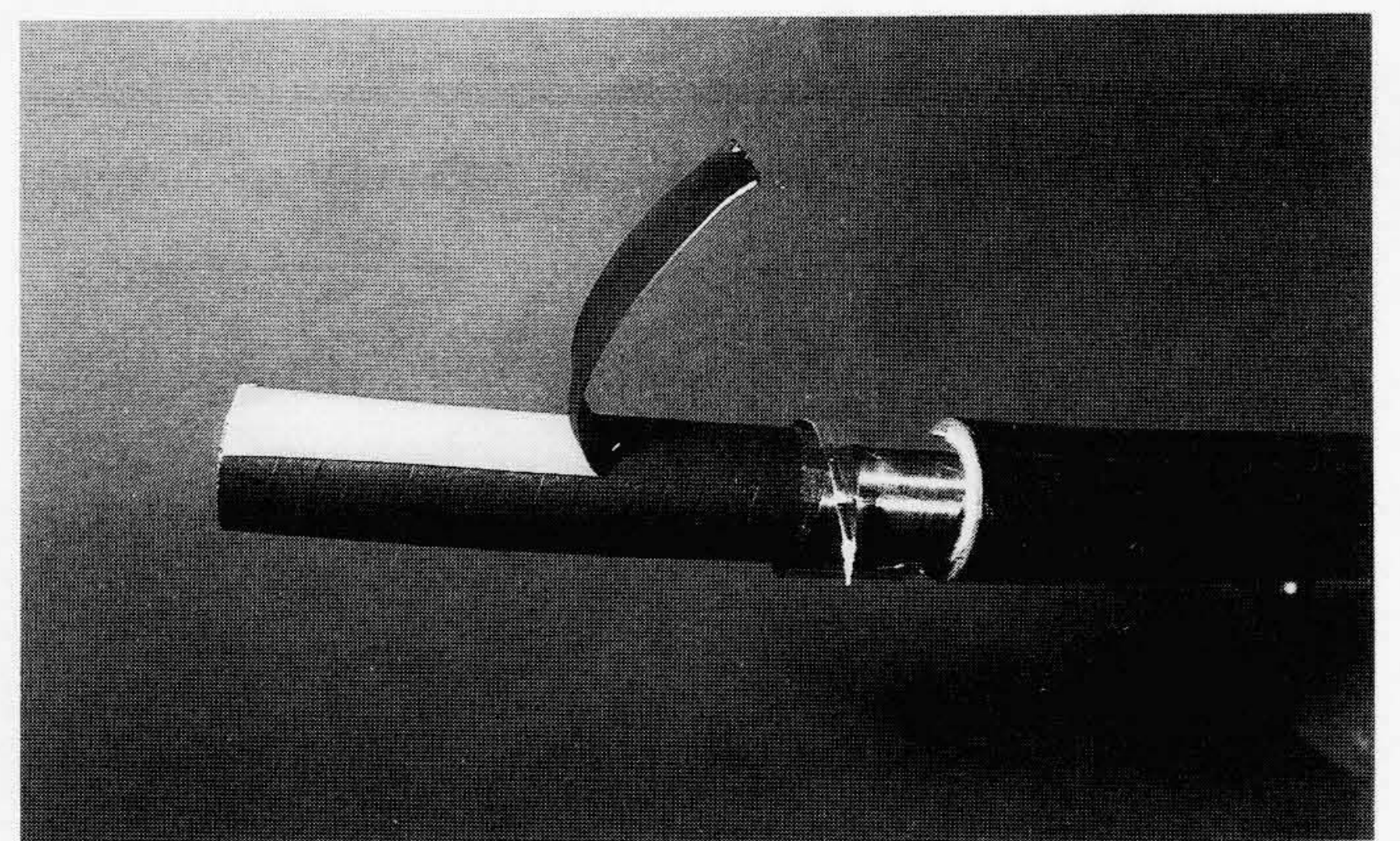


図1 フリーストリッピング形外部半導電層 33 kV用以下では今後主流となる(6,600 V CVI50 mm²で直径約30 mm)。

* 東京電力株式会社配電部地中配電課

** 日立電線株式会社日高工場

*** 日立電線株式会社電線研究所

れる約200℃の加圧水蒸気は、架橋時にPE中に拡散し、冷却時に凝縮して水ボイドの状態でXLPE中に2,000～3,000 ppmの過飽和水分として残存する²⁾。特に、超高压ケーブルで、初期および長期性能をさらに向上させるための一方法として、昭和47年に絶縁体中の残留水分を100 ppm程度にできるガス架橋法による乾式架橋方式が開発、実用化された³⁾。

配電用ケーブルでも、信頼性をよりいっそう向上させるために、乾式架橋ケーブルを用いるようにしている。

2.1.3 金属ラミネートシース

CVケーブルの使用量の増大につれて、布設環境も多岐にわたり、油や薬品などによって汚染された環境に布設されるケーブルには、従来の金属シースによる完全密閉構造を適用してきた。このシースの短所である取り扱い性と経済性を改善した図2に示すような種々の金属ラミネートシースが開発されている⁴⁾。

特に、厚さ200 μm 以下の金属はくとプラスチックをラミネートしたシースが耐薬品性・耐水性ケーブルに適用されており、配電用ケーブルの水トリー対策の一つになるであろう。

2.1.4 水トリー抑止材料

数多くの水トリー抑止剤が提案されており、その内容は電界集中部の電界緩和と親水基の導入による水分の局部集中防止に大別できる。現在、わが国では、水トリー抑止絶縁体はCVケーブルには適用されていないが、ケーブルの長寿命化を考えると一考に値する。

XLPEに親水性を付加した抑止剤を導入したケーブルの加



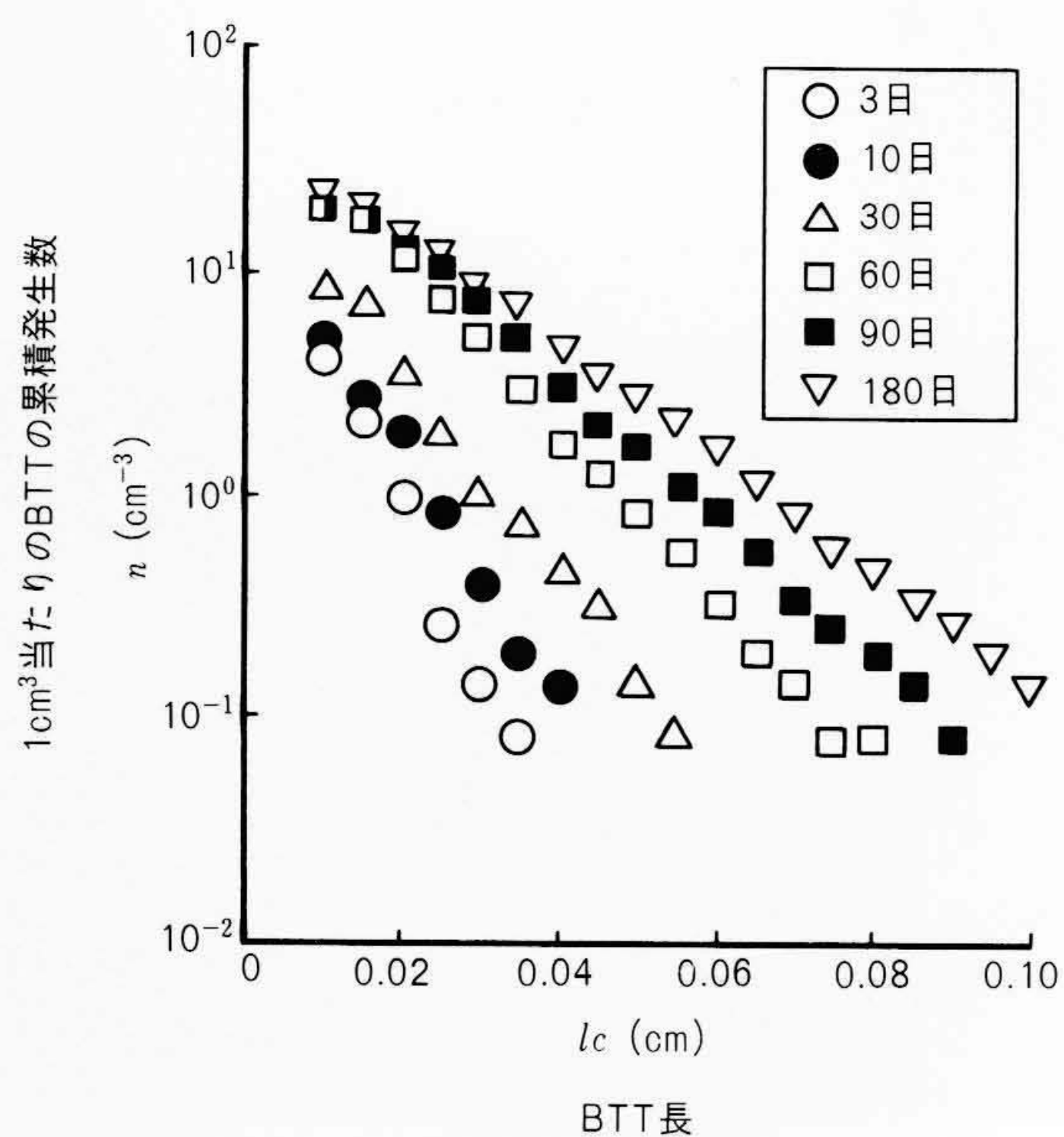
図2 金属ラミネートシース付きケーブル ラミネートシースの金属材料は、用途によって銅、鉛、アルミニウムが使い分けられる。

速劣化試験による実験結果を図3に示す^{5), 6)}。

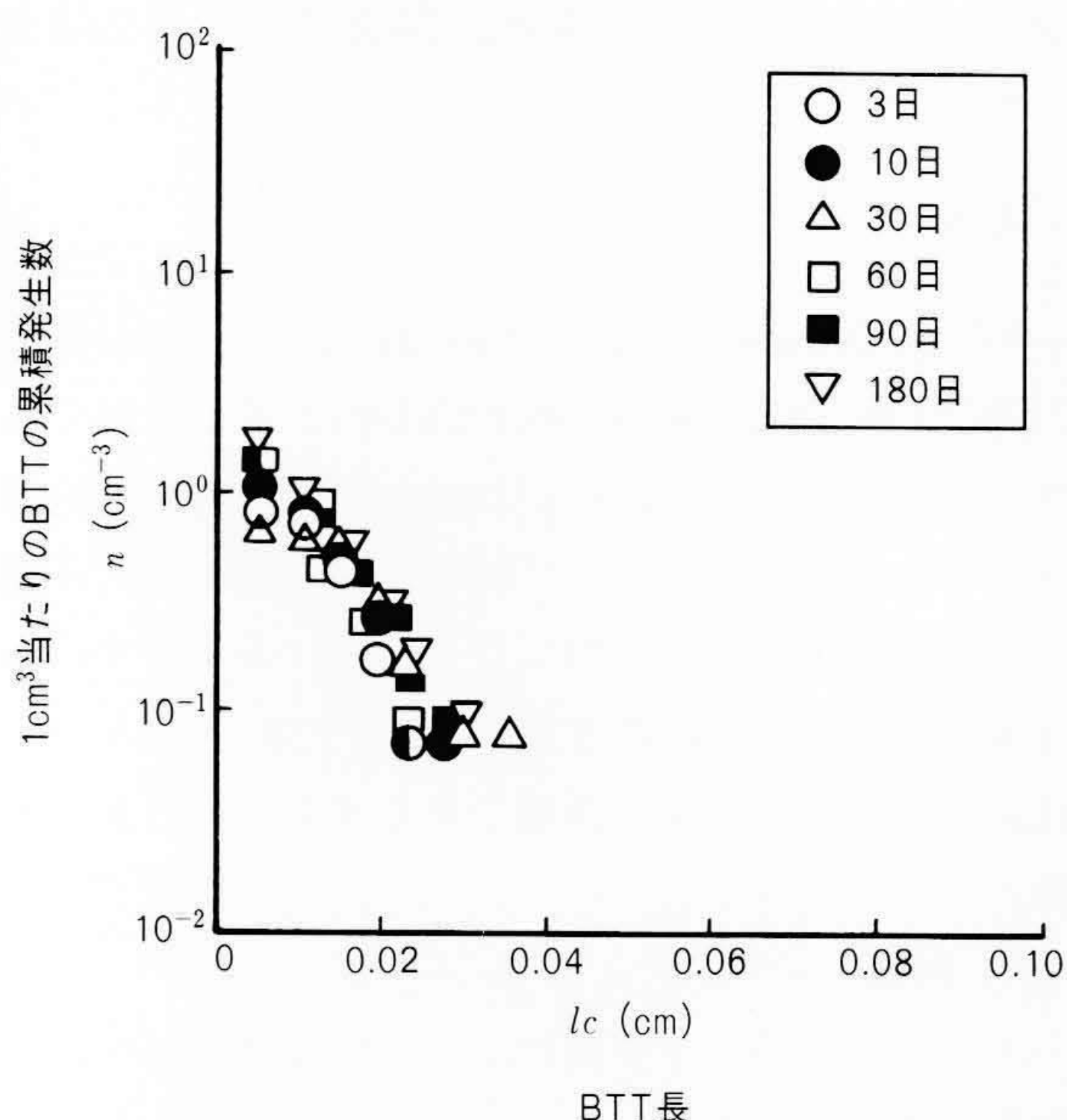
2.2 CVケーブルの絶縁劣化診断

CVケーブルの設備量が膨大であること、送電停止業務や作業に多大な労力を要すること、および社会的要求による停電の困難さから、運転中に簡易かつ正確にケーブルを診断できる技術の開発が望まれている。以下に、実用化している交流充電電流中の直流成分に着目したCVケーブル活線診断法について述べる⁷⁾。

CVケーブルの絶縁体であるXLPEが水トリー劣化すると、



(a) BTS剤無添加



(b) BTS剤添加

注：略語説明 BTT (ボウタイ状水トリー), BTS剤 (ボウタイトリー抑止剤)

図3 加速試験による水トリー抑止剤の評価 異物を混入させたCVケーブルによって、水トリー抑止剤の効果を調べた。BTS剤添加ケーブル(b図)のBTT発生数のほうがBTS剤無添加ケーブルより少なく、かつBTTの発生数および長さの経時変化がほとんどない。

その交流充電電流の正サイクルと負サイクルの波形はピーク値近傍でひずみ、かつ非対称となる。したがって、この充電電流をローパスフィルタに通すことによって直流成分が検出される。

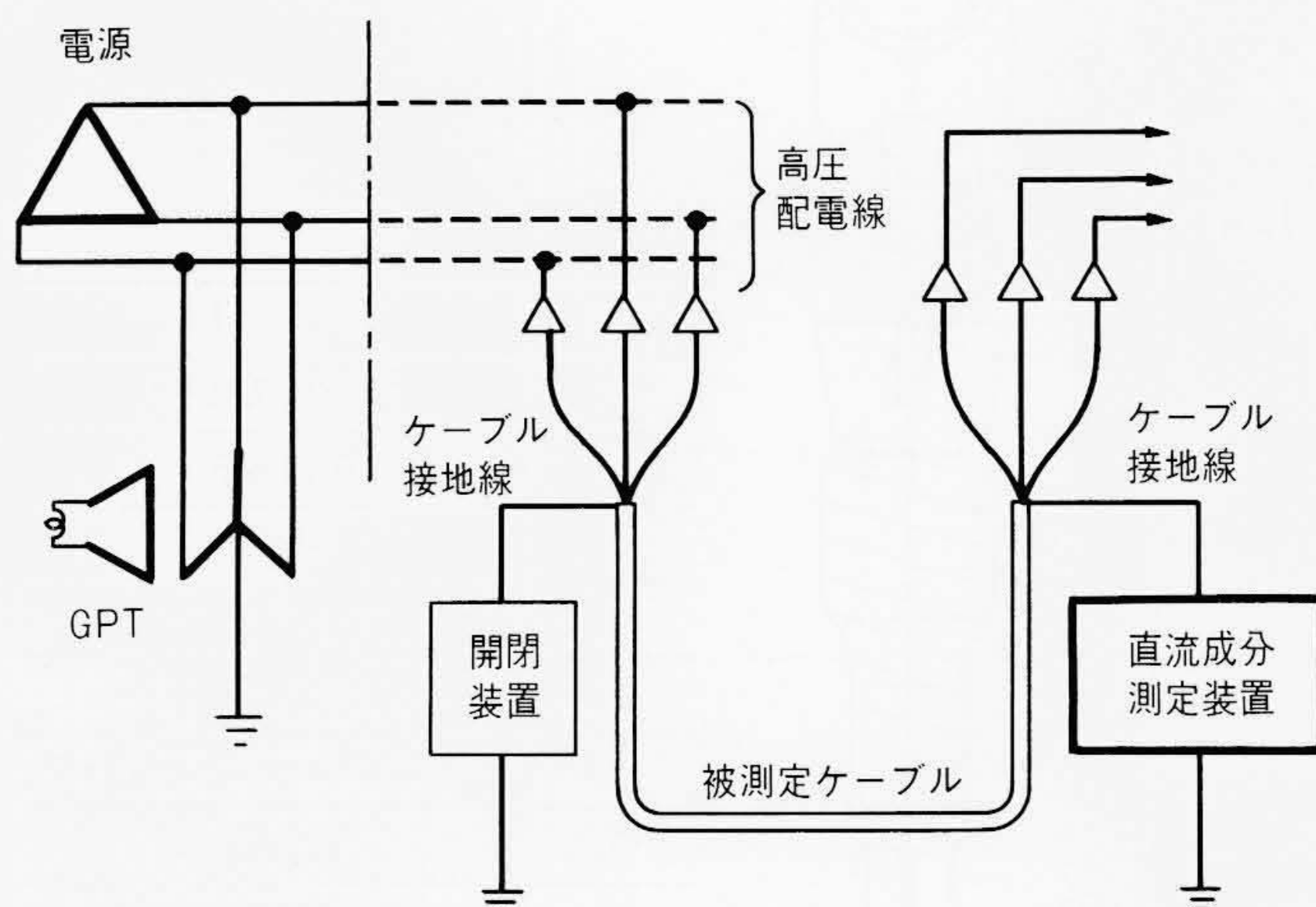
この充電電流中に含まれる直流成分は、運転中のケーブルの接地回路を利用して測定できる。実線路での直流成分の測定回路構成を図4に示す。

診断装置は、図5に示すように安全装置と測定器から構成されている。安全装置は、測定中に単相地絡あるいは異相地絡事故が発生した場合、測定器に高電圧が加わるか、大電流が流れるおそれがあるため、測定者や測定器を事故時の高電圧あるいは大電流から保護するものであり、事故時に瞬時にケーブル金属遮へい層を強制的に接地するものである。

測定器は、充電電流から直流成分だけを取り出すローパスフィルタ、微小電流測定回路、A-D変換部、液晶表示部、キーボード、演算処理部およびプリンタから構成されている。内蔵しているマイクロコンピュータによる制御によって、測定手順指示、自動測定および演算処理が行われ、測定が終了すると劣化判定結果を含む測定結果がプリントされる。

また、直流成分測定時の誤差要因として、シース絶縁抵抗測定時にケーブルからの真の直流成分に重畳される大地からの迷走電流が挙げられる。この迷走電流の値は地域によって大幅に異なるため、測定のつど迷走電流分を測定する必要がある。そこで、大地からの迷走電流を測定する方法が検討され、前述した活線診断装置に迷走電流弁別回路が付加されている。

実配電線路での数多くの測定と被測定ケーブルを撤去して調査した結果が図6である。この結果から設定した絶縁劣化判定基準を表1に示す。また、これらの測定を通して、現地



注：略語説明 GPT (Ground Potential Transformer：接地用変圧器)

図4 直流成分測定回路 直流成分測定時には、他端の金属遮へい層からの接地線を切り離すことによって、GPT、高圧配電線、被測定ケーブル、直流成分測定装置および大地により閉回路が構成される。

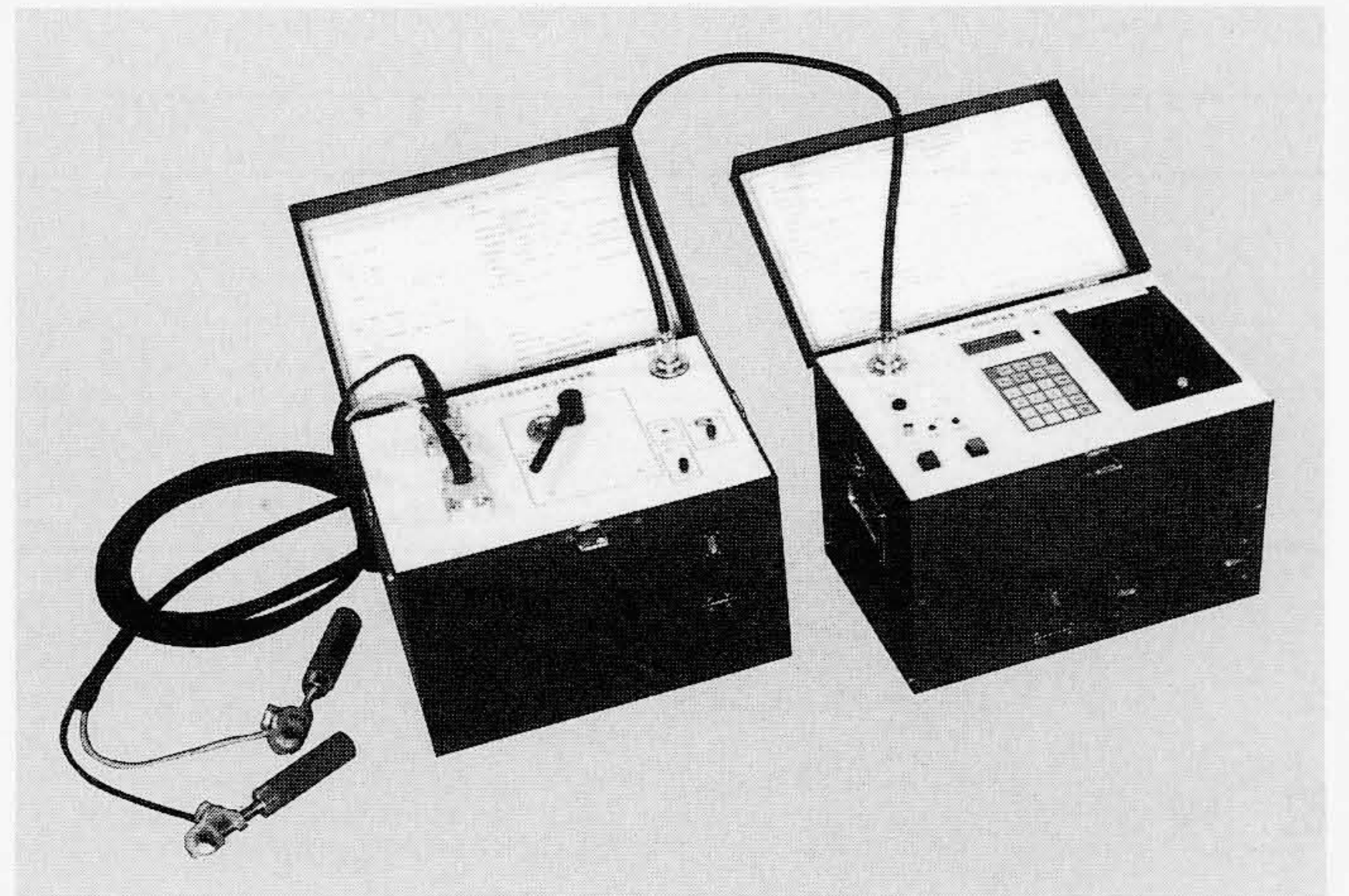


図5 活線診断装置 本装置は、安全装置(左側)と測定装置(右側)から構成されている[幅380×奥行260×高さ260(mm)]。

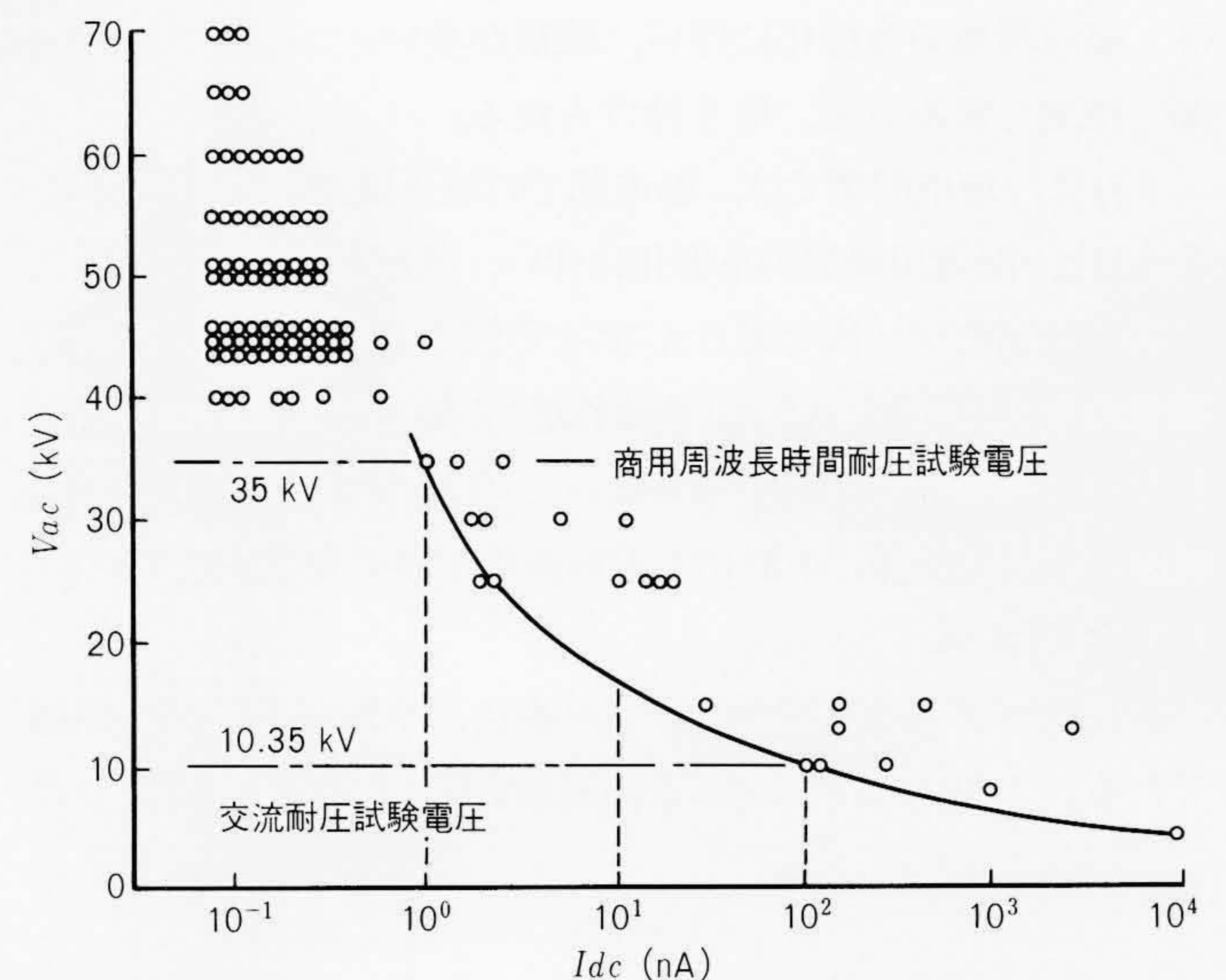


図6 直流成分 I_{dc} と交流破壊電圧 V_{ac} の関係

(1) 不良判定

6.6 kV電路の交流耐電圧試験電圧は、10.35 kVであり、これに対応する直流成分は約100 nAである。したがって、100 nA以上ではこの耐圧試験で不良となる。

(2) 要注意判定

直流成分が1～100 nAの場合、交流破壊電圧が低下しており、1～10 nAの領域を軽度要注意、10～100 nAの領域を重度要注意とした。

(3) 良判定

直流成分が1 nA未満の場合、交流破壊電圧は商用周波長時間耐圧試験電圧の35 kV以上である。

作業性の良いこと、1線路当たりの装置取り付け作業を含めて、従来の直流漏れ電流測定時間の約 $\frac{1}{5}$ の20分でケーブルを診断できることを確認している。

表 1 絶縁劣化判定基準 6.6 kV, CVケーブル用の判定基準を示す。

判 定	表 示	直 流 成 分
不 良	A	● 100 nA以上 ● 変動波形
重度要注意	B ₁	10以上100未満
軽度要注意	B ₂	1 以上10未満
良	C	1 未満

3 接 続 部

ケーブルの接続部は、配電系統を形成する上で欠くことのできない重要な役割を持っている。その特徴は、以下のとおりである。

- (1) 大量のケーブル接続点がある。
- (2) 布設環境の多様化に伴い、種類が多い。
- (3) 現地で組み立て、取り付けられる。

さらに、地中配電では、都市部での地下埋設物の輻輳(ふくそう)化、配電用機器の小形化に伴い、接続部の設置スペースに関する制約が一段と厳しくなっている。また、接続工事量の増大に伴い、スキル(熟練技能)を持つ作業者の確保は、しだいに困難になってきている。このような環境下では、接続部に対しては特に小形化と不熟練化が強く要求されている。

3.1 小 形 化

所要スペースを有効活用するために、小形化は重要な課題である。このため、接続部は関連機器と直結、一体化した差

し込みプレハブ方式の構造を主として使用している。その具体例として、機器直結L形およびT形ケーブル接続部を図7に示す。これらは、後述するコンパクト形気中多回路開閉器などの小形機器用として開発したものである。その特徴は下記のとおりである。

- (1) 端末処理を機器の前面で行うことができ、機器との着脱も容易である。
- (2) 電気特性に優れたEPゴムを使用し、接続には信頼性のあるチューリップコンタクトを採用した。
- (3) 適用ケーブルサイズが、60～325 mm²と大サイズについても対応可能である。
- (4) 開閉器に接続部を取り付けた状態で、ケーブルの接地や試験課電が行える(T形接続部だけ)。

3.2 不熟練化

不熟練化対応としては、プレハブ化や構造の単純化によって現地での作業軽減、簡易化を図っている。このため、前述の差し込みプレハブ方式の接続部は、EPゴムモールド成形品やエポキシモールド成形品が多用されている。もう一つの不熟練化の例として、ストレスコントロールチューブ式端末が挙げられる。チューブ式端末の基本構造を図8に、外観を図9に示す。チューブ式端末は、高誘電材料を用いたストレスコントロール層によって電界緩和を図っていることが特徴である。電界緩和の原理を図10に示す。この応用によって、小形かつ不熟練な直線接続部も構築できる。

不熟練の最終目標は、自動工具による無人接続であるが、上記の差し込み式・チューブ式接続部は、構造が単純であり、

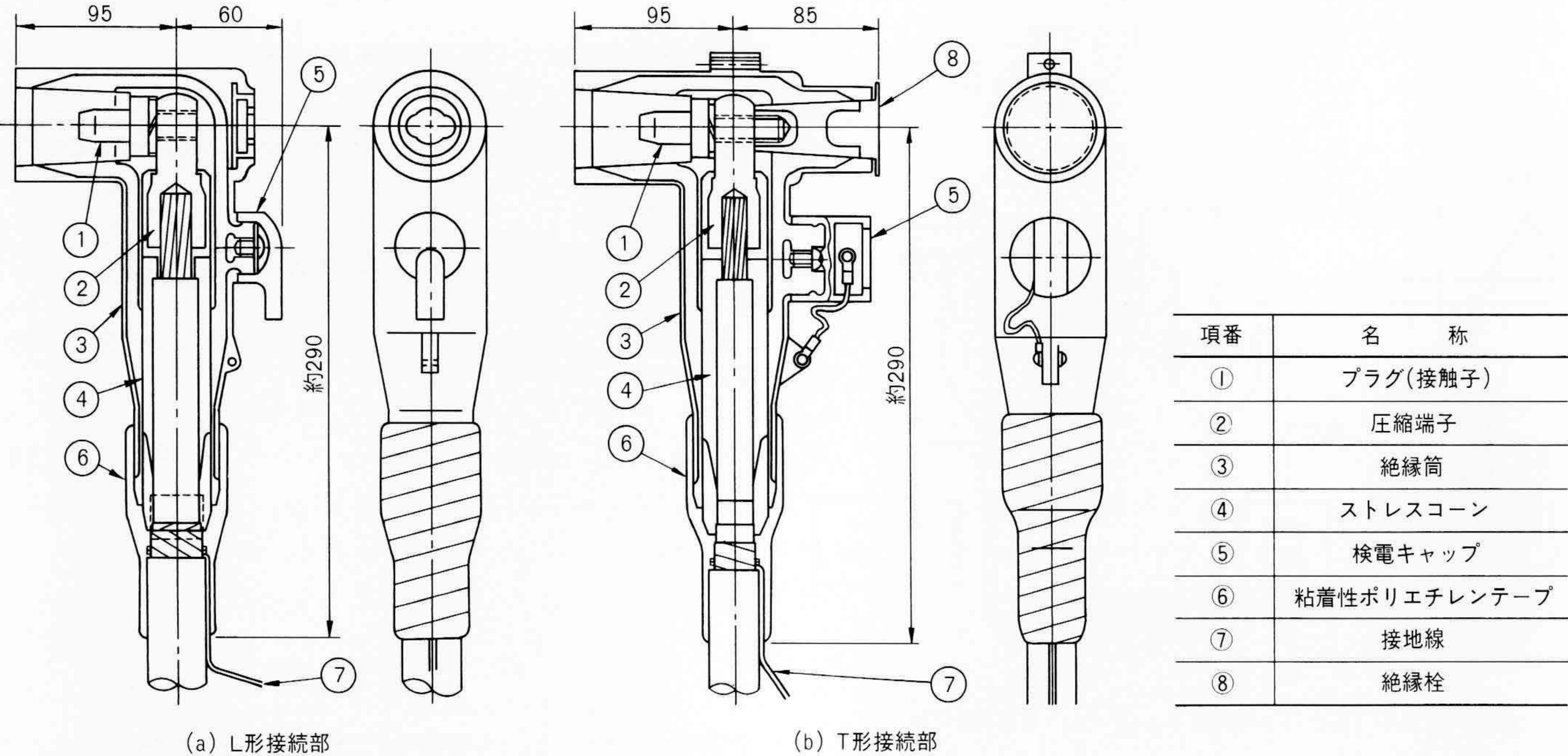


図 7 コンパクト形機器直結L形およびT形ケーブル接続部 コンパクト形気中多回路開閉器およびコンパクト形地上用変圧器用として開発した。

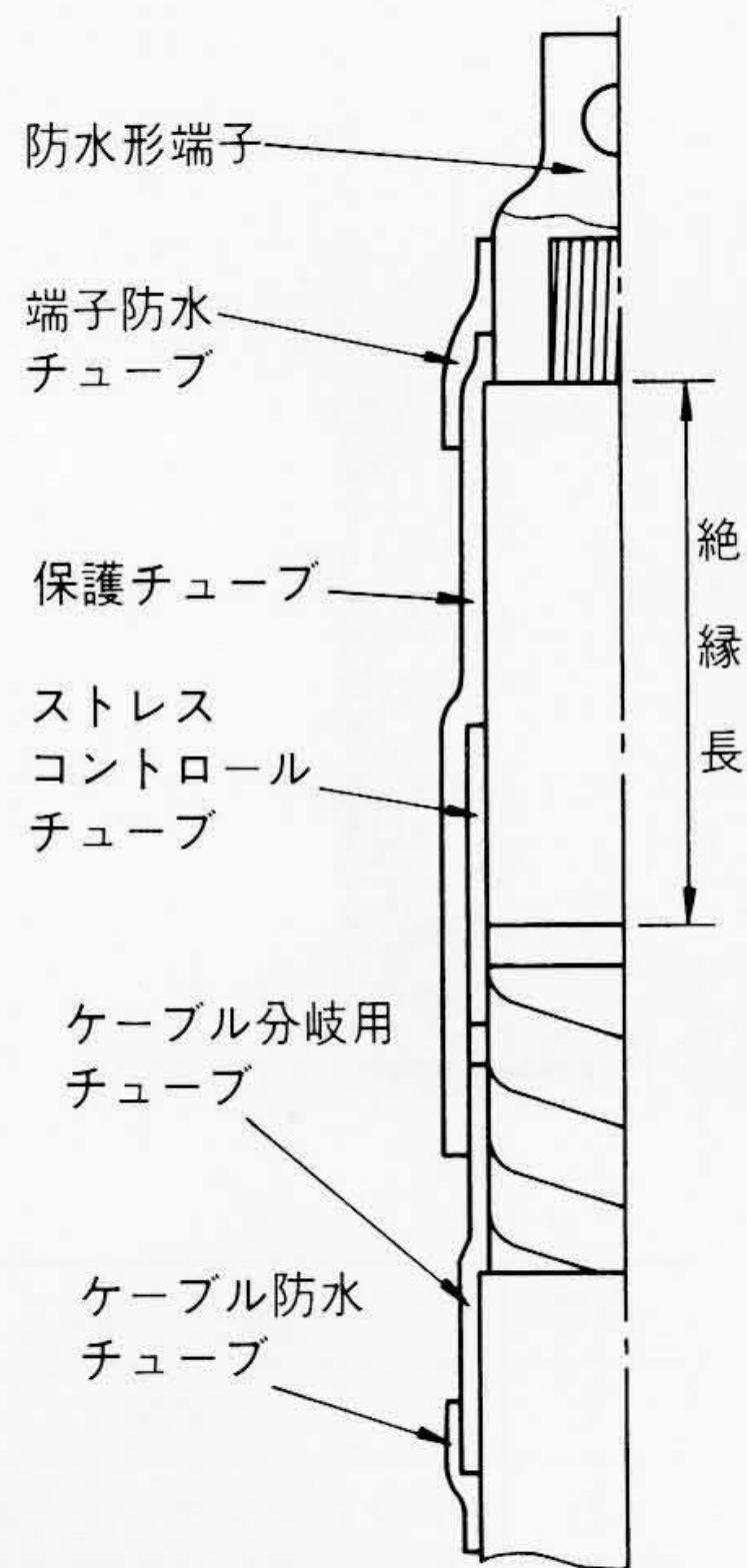


図8 チューブ式端末の基本構造 6,600 V～33 kV用である。

将来の自動工具への適用も可能な特徴を備えていると言える。このほかにも、コンパウンド注入方式、モールド方式なども同様に、自動接続工具への適用の可能性があると思われる。

3.3 自動化・無停電化

電力供給の高信頼性確保のため、配電システムの自動化が進められている。また、工事作業停電をなくすための無停電工法の推進も重要な課題である。これらに対応するための一つの方式として、予備系統を備えた幹線選択システムがあるが、これに対応するケーブル接続部の例として、幹線選択システム用高圧T分岐を開発した。その構造を図11に示す。また、その特徴は下記のとおりである。

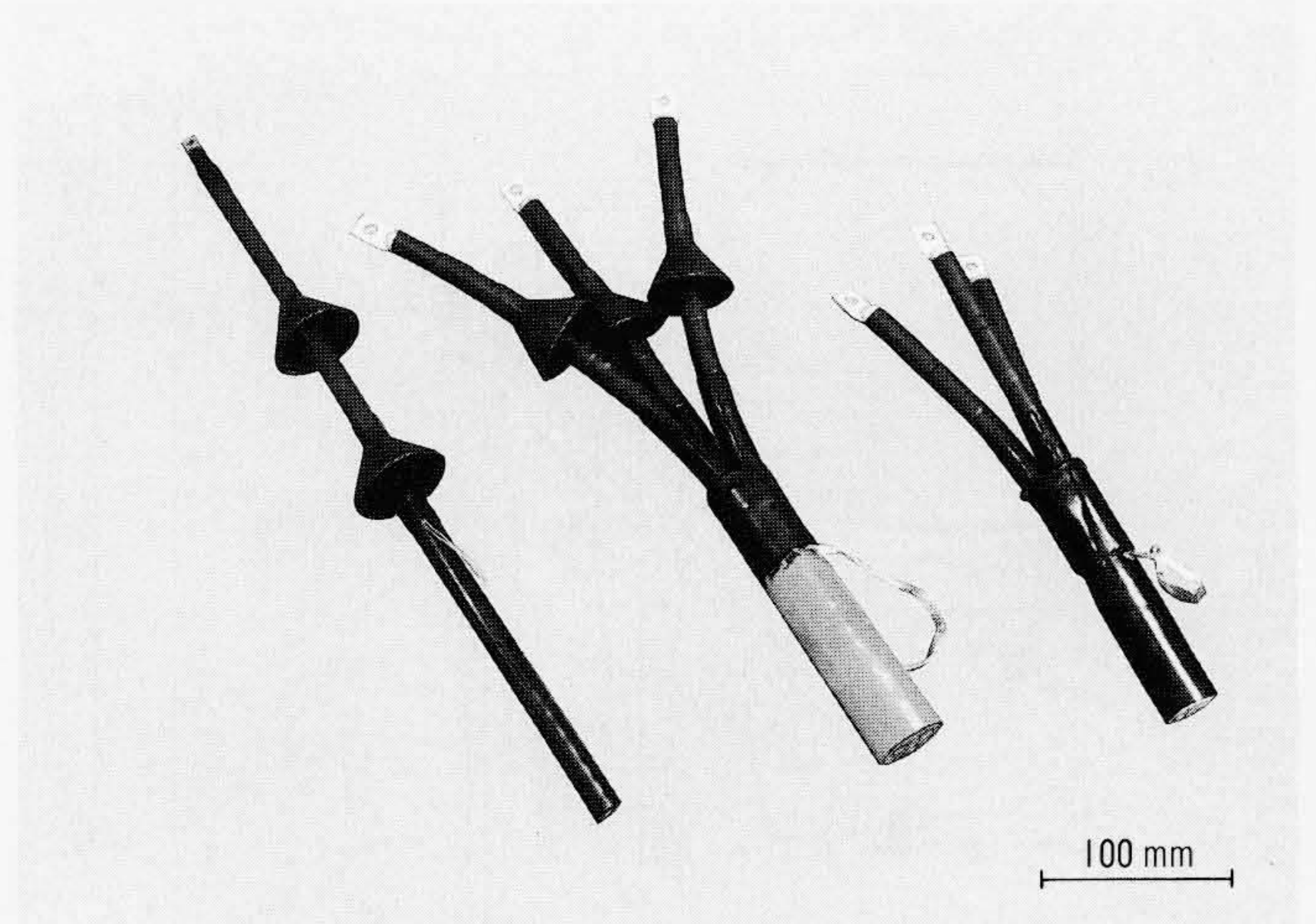


図9 チューブ式端末の例 6,600 V～15 kV用である。

- (1) 導体接続には、ソケットコンタクトを採用し、ケーブル端末は充電電流開閉機能を持つL形接続部とした。
- (2) 本体部とクリート部を分離可能とし、組立作業性を向上させた。
- (3) 電気特性に優れたEPゴムを使用し、マンホール内水没状態での使用が可能である。
- (4) 系統の絶縁劣化診断が可能となるように、接地線接続部の絶縁化が図られている。
- (5) 安全に充電電流開閉操作が行えるように、着脱工具を準備している。

これらは、マンホールなどの狭いスペースに収納するため、特に小形性や水密性を考慮している。また、充電電流開閉作業を容易かつ安全に行うための着脱工具についても、合わせて検討中である。

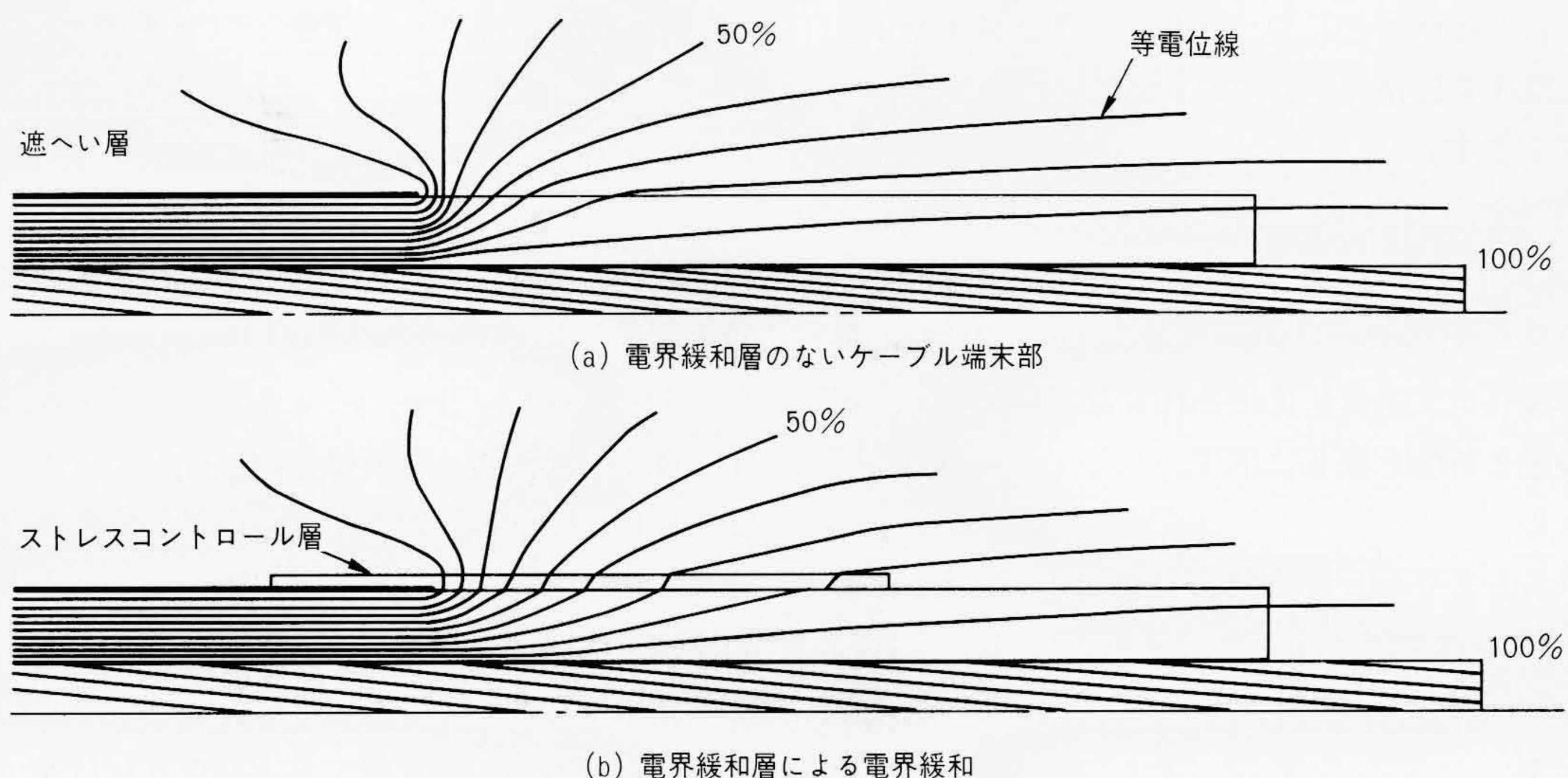


図10 ストレスコントロール層による電界緩和の原理 等電位分布線を示す。

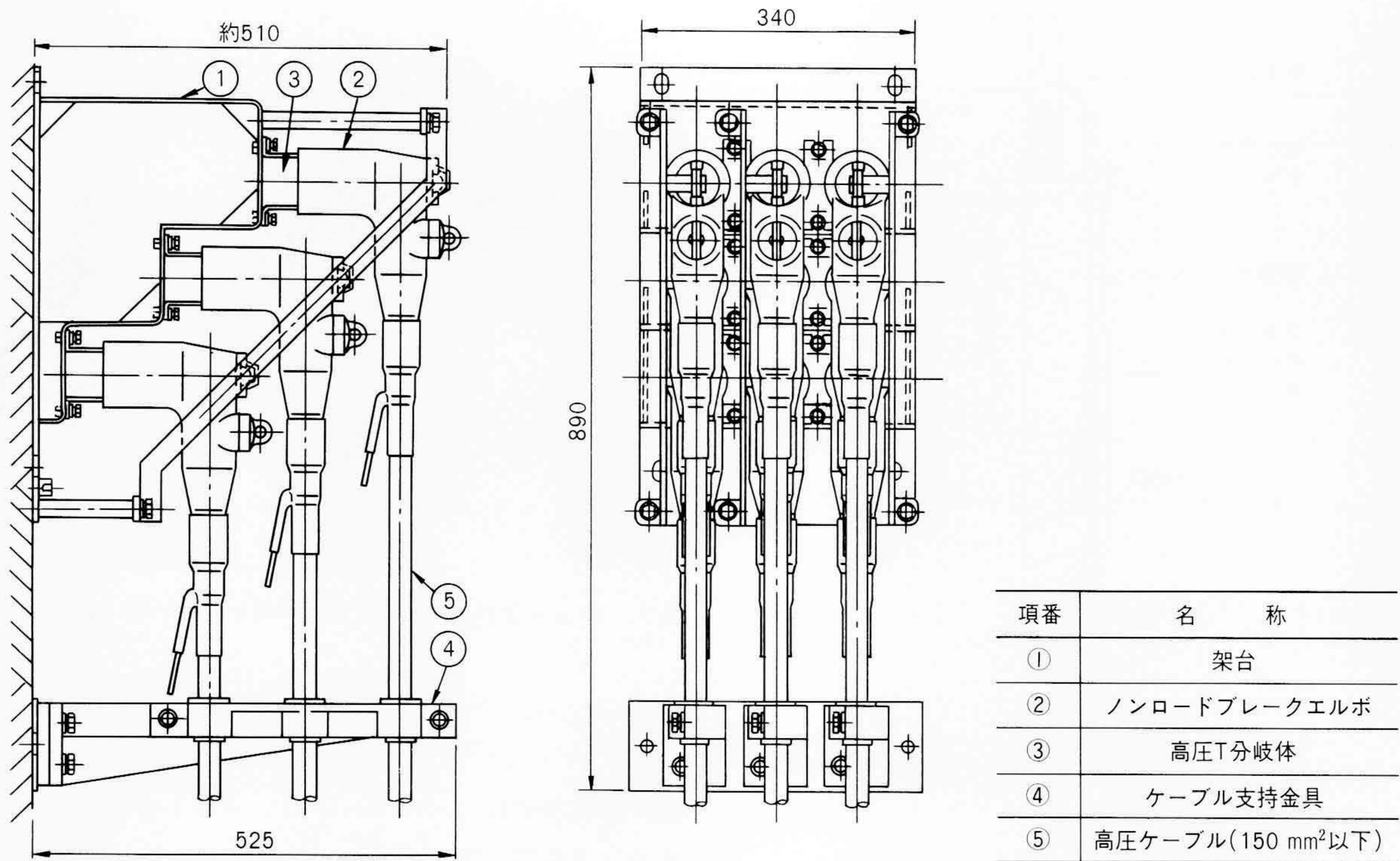


図11 幹線選択システム用高圧T分岐 最大適用サイズは、6,600 V CVT 3 × 150 mm²である。

3.4 高機能化

接続部は、上述のような基本的な機能のほかに、下記のような機能を付加し、高機能化を図っている。

- (1) 作業時の死活確認のための検電端子
- (2) 自動化に対応するための電圧、電流センサ
- (3) 絶縁劣化診断に関連した接地線接続部の絶縁化

4 配電機器

配電線地中化に伴い、多回路開閉器、高圧分岐装置、地上用変圧器および低圧分岐装置といった各種の地上設置機器が開発、使用されている。本章では、6 kV地中配電システムのうち、系統切り換えを行う開閉器として、各フィーディングポイントに設置される気中多回路開閉器について述べる。

4.1 気中多回路開閉器

気中多回路開閉器は、保守点検が容易であること、5回路それぞれが負荷開閉能力を持つという高機能化が図られていること、などの点から、昭和44年ごろから使用を開始し、各種改良を重ね、現在まで大量に使用されてきている。その定格を表2に、機能と特徴を表3に示す。

4.2 小形化

地中配電のコストダウンとしての地上設置面積の縮小、および都市環境の面から小形化が強く要求されている。

現行前の気中多回路開閉器と現行品を図12に示し、その小形化の推移を示す。

最近では、さらに1.1 m以下に地上高を低くする要望が出さ

表2 気中多回路開閉器の定格・仕様 従来形、薄形、コンパクト形の共通仕様を示す。

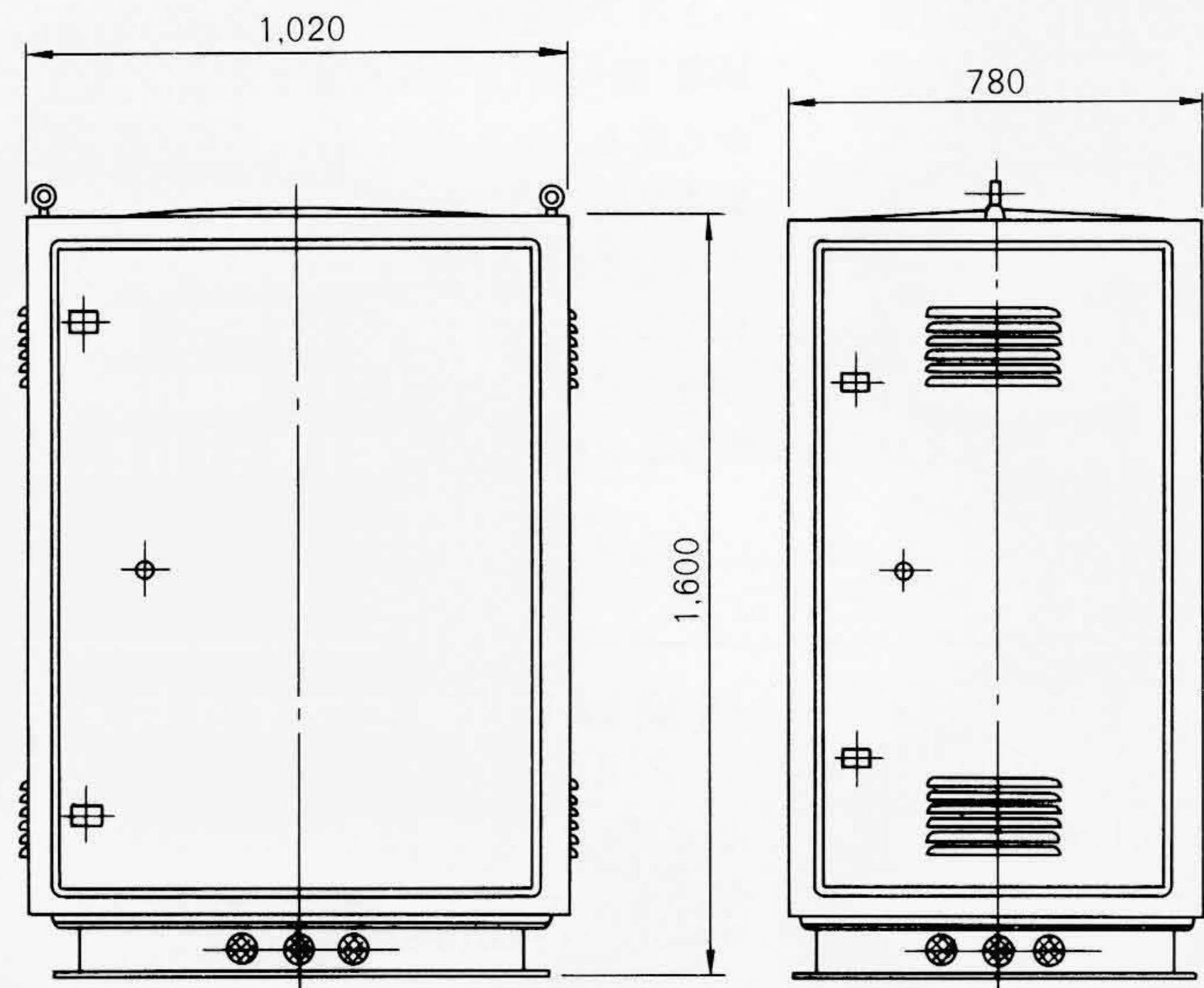
項 目	仕 様
定 格 電 圧	7.2 kV
定格電流(回路数)	600 A, 1 回路 400 A, 4 回路
極 数 ・ 回 路 数	3 極, 5 回路
定格短時間電流	125 kA(実効値) 1 秒間, 1 回
定 格 投 入 電 流	31.5 kA(波高値) 10サイクル 3 回
絶 縁 階 級	6 号A相当
消 弧 方 式	2 点切り, 細隙(げき)消弧
操 作 方 式	手動ハンドル操作(トグルばね機構)
設 置 場 所	屋外, 自立形

れており、それにこたえる形でコンパクト形気中多回路開閉器を開発した。その外観を図13に示す。この特徴は次のとおりである。

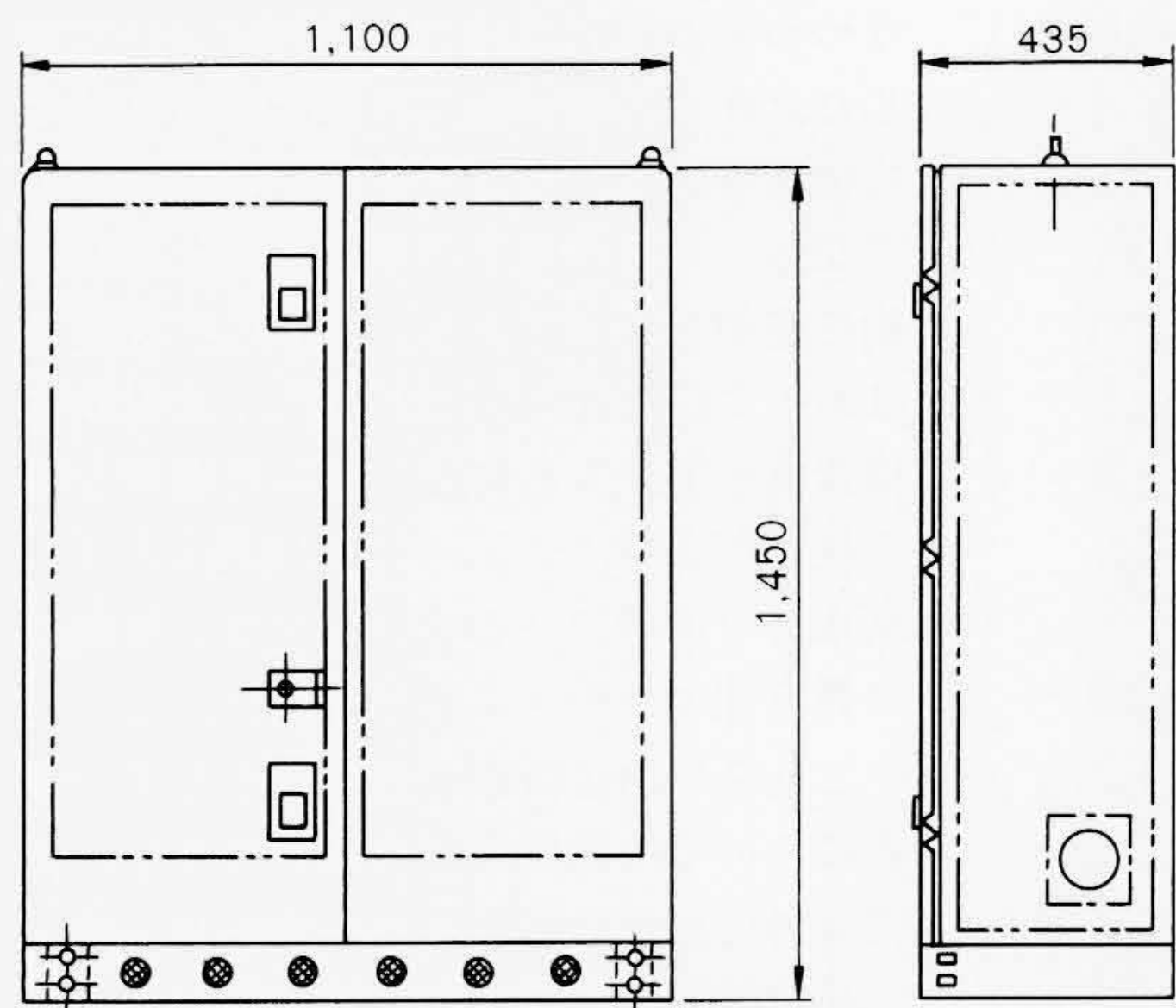
- (1) 従来と同様に、前面操作が可能である。
- (2) 操作機構部を電極から下側へ配置することによって、ケーブル接続部を上部に配置し、地上高を低くしたにもかかわらず端末作業性を改善した。
- (3) 端末構造をL形とすることによって、400 A用の第2～第4回路は、前面で端末施工および取り付けができるようにした。なお、600 A用の第1回路だけ側面から取り付ける。

表3 気中多回路開閉器の機能と特徴 従来形、薄形、コンパクト形の共通事項を示す。

目 的	機 能 と 特 徴
安全性、信頼性	1. 絶縁部はエポキシ樹脂モールドによる機械的、電氣的に優れた固体絶縁方式である。
	2. 充電部非露出方式による耐汚損構造である。
	3. 各相分離方式、表面接地層(Znメタリコン)により、地絡優先構造である。
	4. 作業の安全性が高い。
	5. 2点切り、細隙消弧方式で信頼性の高い負荷開閉能力を持つ。
	6. 開閉状態が直視でき、作業確認が容易である。
高機能化、作業改善	1. 多回路方式による機能向上
	2. 耐汚損性改善による信頼性向上、保守コストの低減
	3. 接地、検電、検相が容易で安全である。



(a) 多回路開閉器 (現行前の形)



(b) 多回路開閉器 (現行品)

図12 気中多回路開閉器の小形化の推移 6,600 V, 5 回路用である。

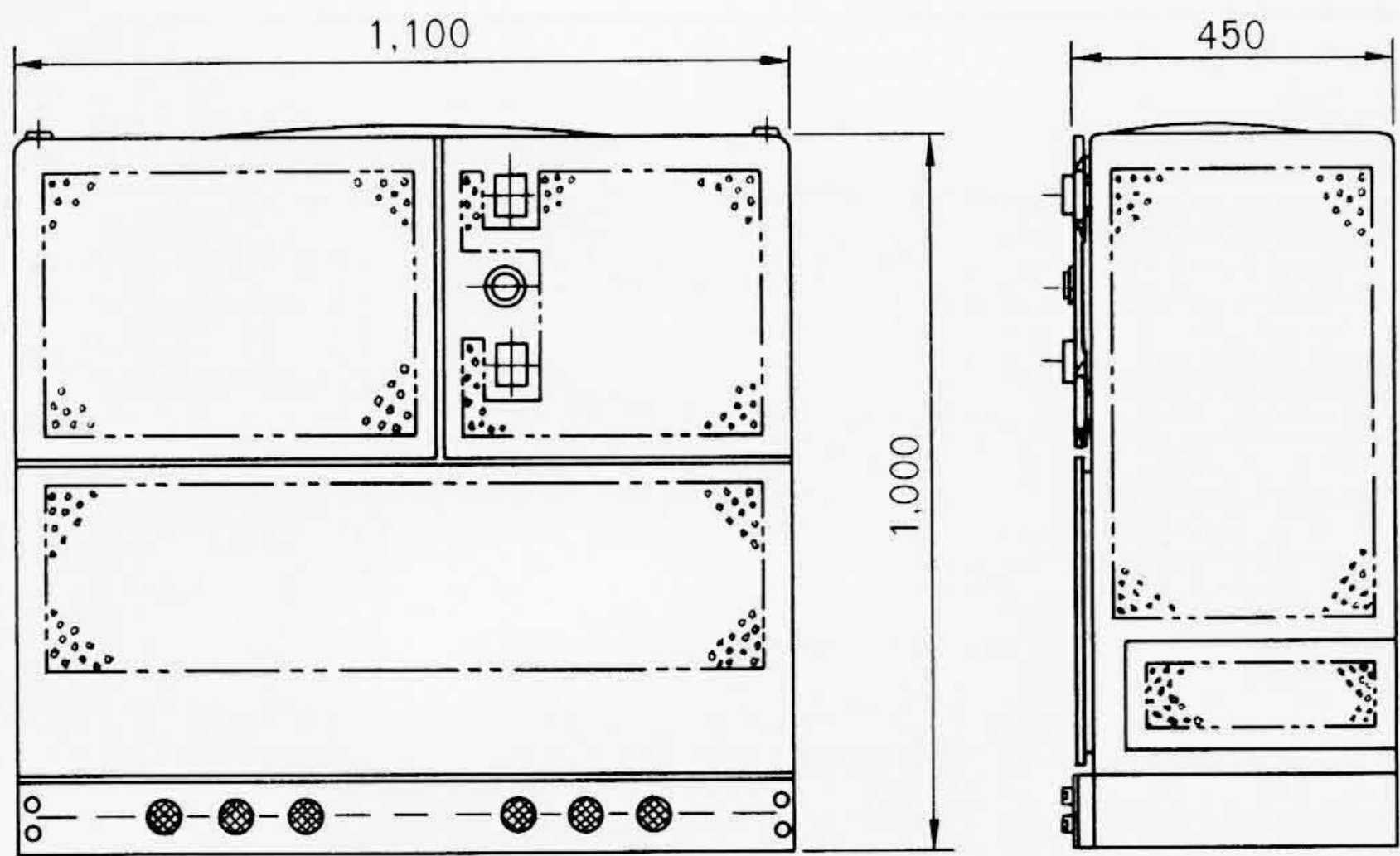


図13 コンパクト形気中多回路開閉器の構造 6,600 V, 5 回路用である。

(4) 前面扉を上下2段とし、保守作業時は上半分だけの開放で、ハンドル操作ができる。

5 結 言

配電地中化に関連するケーブル・接続部および機器について、高信頼度化、小形化および不熟練化の観点から開発状況の紹介を行った。

今後、コストダウンやいっそうの小形化が指向されているが、狭いスペースでの組み立てなど、施工面についても十分考慮しながら、システム的な発想で開発を進める必要がある。

また、総合自動化に関連した光技術の応用や工法の自動化などが、よりいっそう進められるとみられる。さらに、絶縁劣化診断から一步進んだ劣化予知への技術開発も、かなり進むものと思われる。配電用機材についても、これらに対応できるように新たな改善、開発への取り組みが必要である。

参考文献

- 1) 電気学会：絶縁劣化診断試験法，電気学会技術報告(Ⅱ)，第182号(昭59-12)
- 2) 杣，外：ガス架橋・水蒸気架橋ポリエチレンケーブルの吸水現象，日立評論，57，10，893～898(昭50-10)
- 3) 水上，外：ガス架橋法による架橋ポリエチレンケーブルの絶縁性能，電気学会誌，94-A，7，281(昭49-7)
- 4) 花野，外：遮水性・耐薬品性シース架橋ポリエチレン電力ケーブルの開発，日立電線，No.2(昭57-12)
- 5) 隈，外：ボウタイトリー長の経時変化の統計的解析，昭和54年電気学会東京支部大会講演論文集，No.55(昭54-11)
- 6) 杣，外：n-lc分布解析手法によりボウタイトリー抑止剤の評価，昭和54年電気学会東京支部大会講演論文集，No.56(昭54-11)
- 7) 大西，外：CVケーブルの水トリートメント装置，電気学会絶縁材料研究会資料，EIM-86-35(昭61-5)

論文抄録

スプール弁の流体力軽減法に関する実験的研究

東京工業大学 中野和夫・日立製作所 渡辺春夫・他1名

油圧と空気圧
18, 6, 475~482(昭62-9)

油圧用スプール弁のスプールは流量制御時に流体力を受ける。流体力はスプールの操作力を損失させ、制御性の低下を招くので、その軽減が望まれている。流体力の軽減法としてスプールにバケットを設け、旋回流によって流体力を補償する方法がある。しかし、その補償効果の解明が十分でなかった。そこで最適な流体力補償バケット形状を見いだすため、流体力測定実験とバケットでの流れの可視化により、バケット形状の諸パラメータが流体力補償効果に与える影響を明らかにした。実験の結果、バケットの隅は丸みを設けたほうがよいこと、スプールのバケットの角度は50度と69度の付近が効果が大きいこと、スリーブのバケットの流入角度は69度から90度で差はないことなどを定量的に把握した。さらに、可視化実験での流れパターンの観察から、これらの裏づけを得ることができた。

フレットینگ疲労の破壊力学的解析

日立製作所 服部敏雄・中村真行・他2名

日本機械学会論文集A
53, 492, 1500~1507(昭62-8)

はめ合い部など接触条件下で使用される部材の強度設計では、フレットینگによる疲労強度低下の正確な予測が必要である。本論文では繰り返し負荷中の接触条件の変化(面圧分布、相対滑りなど)をも考慮に入れた応力解析、滑り挙動解析および接触端部き裂の破壊力学解析を試み、これらをもとに汎(はん)用的なフレットینگ強度評価法を開発した。すなわち、各解析結果に基づいて接触端部に発生した微小き裂の停留性、進展性の判定を行い、任意接触条件下でのフレットینگ疲労限を予測可能にした。これにより、フレットینگ疲労特有の微小き裂の早期発生と遅い進展速度、停留性、著しい平均応力依存性を理論的に明らかにすることができた。本予測結果は、実測結果ともよい一致が見られ、評価法の妥当性が確認された。

磁路付きマグネトロンアノードの鍛造・圧接複合加工法

日立製作所 今井邦典・高橋壮治・他1名

塑性と加工
28, 322, 1199~1205(昭62)

家庭用電子レンジに用いるマグネトロンアノードの量産加工法として、鉄鋼円筒の内側で12枚の放射状ベインを持つ銅共振空洞を温間鍛造し、同時にその内側に強固に圧接するという複合加工法を開発した。まず、銅の素材にポンチを押し込むことによって、銅共振空洞の高精度成形と信頼性の高い圧接とを両立するための必要条件を追及し、銅円筒の盛り上がりと一緒に、鉄鋼円筒がポンチ後方に移動する必要があることを見いだした。またそれを実現するために、(1)鉄鋼円筒の内側にテーパを付け、銅素材の流れによって押し上げる、(2)高速・大容量の油圧サーボを適用した特殊な金型で強制的に移動する、という二つの手法を確立した。加工品を拡散焼なましすれば、電子レンジの長期使用にも十分に耐えられる200 MPaを超える接合強さを得ることができる。

高温純水中における鉄鋼材料の腐食と微量金属イオンの析出

日立製作所 本田 卓・樫村栄二・他2名

防食技術
36, 5, 267~274(昭62-5)

BWR(沸騰水型原子炉)環境での鉄鋼材料の腐食と⁶⁰Coに代表される微量金属イオンの蓄積機構について検討した。その結果、304鋼の表面には主としてFe₃O₄を主体とするスピネル型酸化物(M^{II}O・M^{III}₂O₃)皮膜が皮膜・金属界面で内方向に成長し、水中に溶存するコバルトイオンは同界面で酸化物のM^{II}の位置に析出することを明らかにした。また、鋼中のクロムは腐食に伴う放出率が大きく、皮膜は主に鉄とニッケルから構成され、OH基の存在比率が外層ほど高いことも認めた。一方、炭素鋼の皮膜はFe₃O₄と α -Fe₂O₃で構成されるが、コバルトの蓄積機構は304鋼と同様であった。以上の知見は、BWRプラント一次冷却系配管の腐食と放射線量の低減対策に反映されている。

FET型酸素センサ

日立製作所 宮城宏行・宮原裕二

センサ技術
7, 10, 43~46(昭63-9)

固体電解質のジルコニア膜をFET(電界効果形トランジスタ)と組み合わせた新しい構造の酸素センサを開発した。ジルコニア膜の酸素イオン伝導性は、室温付近では著しく低い値となるため、従来の酸素センサは、動作温度を500℃以上とする必要があった。しかし、FETのインピーダンス変換作用を利用することによって、室温付近で動作する酸素センサが可能となると考え、センサを試作した。このセンサは、FETのゲート絶縁膜上にイットリア安定化ジルコニア(YSZ)薄膜と極薄(50 Å)の白金電極膜を形成した構造から成る。センサ出力は、室温付近でも酸素分圧に比例し、二酸化炭素、可燃性ガスなどに対する選択性が高いことが特長である。このセンサは小形で、電解質溶液などを用いないため、環境計測や医療などへの応用が可能と考えられる。

微細加工技術とマイクロメカニクス

日立製作所 佐藤一雄

油圧と空気圧
18, 5, 359~362(昭62-8)

微細加工技術の発達によって可能になりつつある微小機械の実現性について論じた。在来 of 機械加工の微細化の限界を打破するには、リングラフィ、エッチングなど、半導体産業の中で育った加工技術の応用が有望である。しかし、微細ではあっても平面的なLSIに対し、立体的な構造体を加工するには、さらに特殊な加工技術が必要になる。その具体例として、SORリソグラフィおよびシリコン単結晶の異方性エッチングを解説した。

これらの加工技術の適用例として、前者については金属製の微細ノズルを、また後者については、メカニカルセンサ、バイオ機器、計算機実装部品など、さまざまな分野での試作例を述べた。今後の課題として、微小機械のためのマイクロアクチュエータの開発の必要性を挙げている。