

154kV OFケーブル用改良形普通接続部

Development of Reformed Normal Joint for 154kV OF Cable

金子輝雄* 佐藤英男** 安藤順夫**
Teruo Kaneko Hideo Satô Nobuo Andô

熊沢武寿*** 井出成夫**** 沼尻文哉*****
Takeju Kumazawa Shigeo Ide Fumiya Numaziri

要 旨

作業時間の短縮と性能の安定化を目標として154kV OFケーブル用の改良形普通接続部の開発を試みた。この目標を達成するため、成形スリーブ、エポキシベルマウス、油浸紙絶縁筒などによる接続部部品のプレハブ化を図るとともに油単独部分と油浸紙部分との組合せによる電界調整を図った。また、接続部内部の詳細な電界解析を行ない、その結果を絶縁設計に反映させた。

各部寸法と破壊電圧の関係、汚損油の性能に及ぼす影響などを明らかにしたのち、最終的には、従来の接続部と比較して、電気性能が同等以上で、寸法が若干小さく、作業時間が約 $\frac{1}{2}$ の改良形普通接続部を開発することができた。現在実負荷試験により長期性能を確認中である。

1. 緒 言

われわれはすでに66kV級接続部に関してその性能の安定化、作業の簡易化および寸法の縮小を目的として改良形接続部の開発を行ない、従来の接続部と比較して電気性能は同等以上で作業性のすぐれた簡易形接続部を開発することができた⁽¹⁾。これに引き続いて154kV級普通接続部についても同様の改良と開発を行ない、じゅうぶんな性能のものが得られたので、その経過と結果を報告する。なお、154kV級接続箱は66kVの場合に比べてストレスが高くなり、部分的な高電界が全体の性能低下に結びつくため接続部内部の詳細な電界解析を行ない、その結果を絶縁設計に反映させたのでその内容についても記述する。

2. 改良形普通接続部の構造と特徴

開発された普通接続部（以下NJBと略す）の内部構造は図1に示されたもので、以下の特徴を持っている。

(1) 導体接続

切断された両側ケーブルの導体は圧縮スリーブ①により電氣的、機械的に接続され、さらにその上に圧縮スリーブの削り仕上げを省略し、電界を緩和するための成形スリーブ②がかぶせられる。導体とは内在スプリングによって密着される。この成形スリーブ

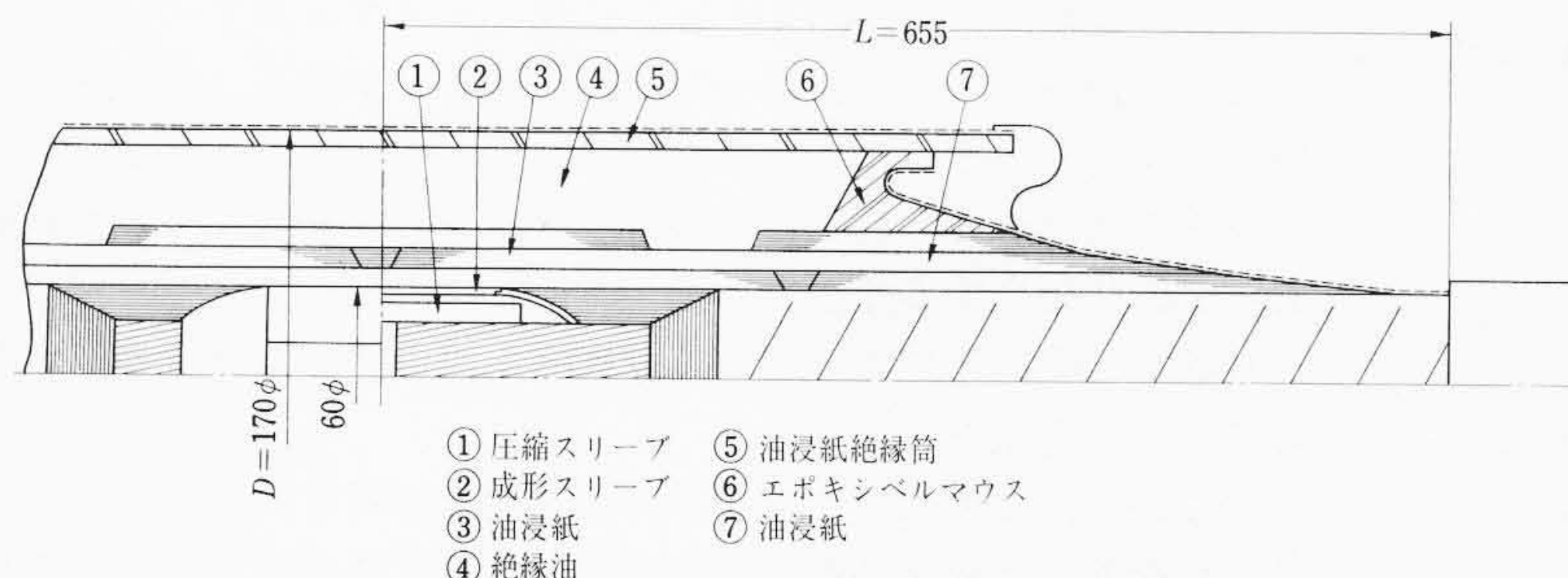


図1 154kV改良形NJBの内部構造

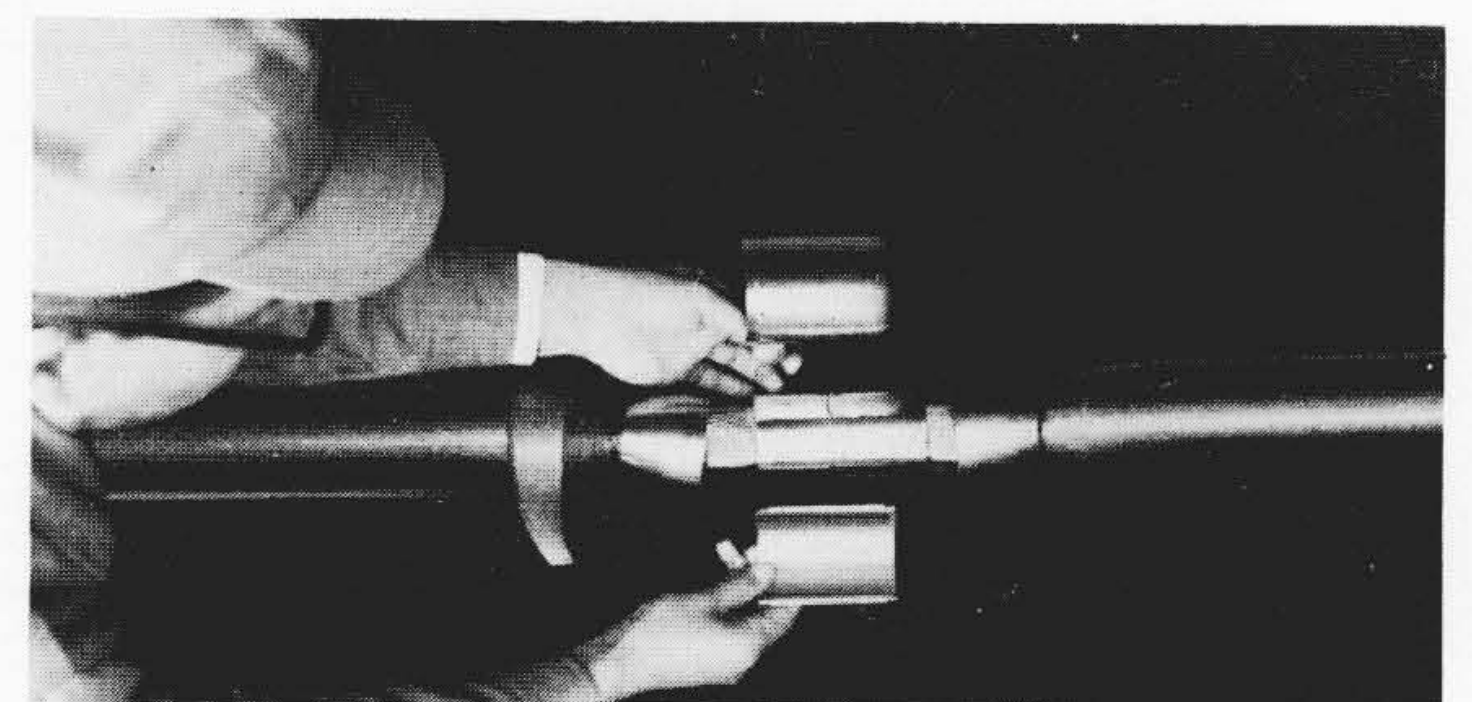
の採用により銅の削り粉による汚損が防止され、熟練を要する成形作業が省略され、これにより性能の安定化が達成される。なお大幅な作業時間の短縮もできる。

(2) 中央部の絶縁

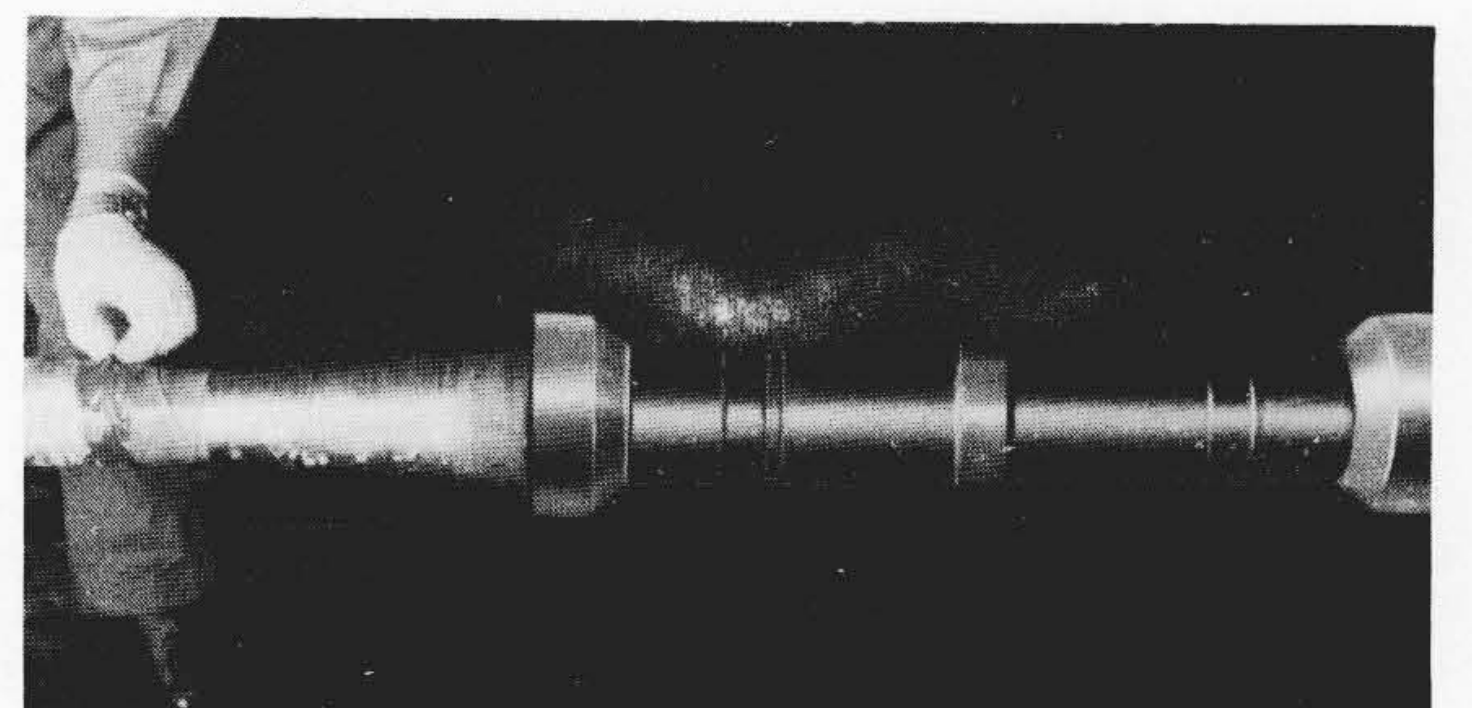
中央部の絶縁は、成形スリーブ上に巻かれた広幅油浸紙③と充填(てん)されたOF油④および外部遮蔽(しゃへい)層を兼ねた成形油浸紙絶縁筒⑤によって構成されている。このような絶縁構成体のため、誘電率の大きい油浸紙部の分担電圧は軽減され、スリーブ上の電界が緩和される結果、接続作業時の若干の誤差が接続部の電気性能に大きな影響を与える危険が除かれることになる。

(3) 両端ストレスコーン部の絶縁

ケーブル部と接続部の絶縁体の継目となるストレスコーン部は、従来の接続部では油浸紙により形成されていたが、今回のNJBでは、エポキシベルマウス⑥の採用により長さ方向の短縮ができた。エポキシベルマウスの下に巻かれる油浸紙⑦はストレスコーン立上り付近の絶縁補強とともにケーブルコアとエポキシベルマ



(a) 圧縮、成形スリーブ



(b) 内部絶縁の外観

図2

* 東京電力株式会社
** 日立電線株式会社研究所
*** 日立電線株式会社大阪営業所
**** 日立電線株式会社日高工場
***** 日立電線株式会社研究所 工学博士

ウス間の密着のためのものである。

組立て中のNJBの内部を示したのが図2である。図2(a)は圧縮スリーブと成形スリーブを、図2(b)はエポキシベルマウス取付状況を示したものである。

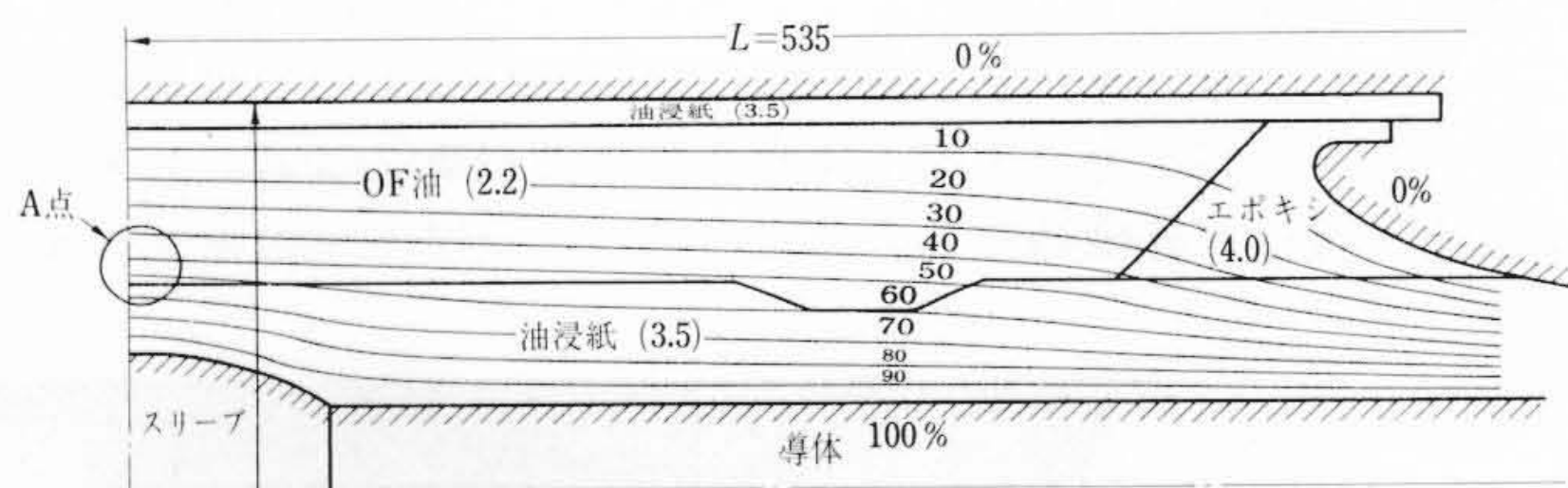
3. 接続部の理論解析

接続部の絶縁体が全体にほぼ均質とみなせる油浸紙によって構成されている場合には、各部の概略の電界は比較的簡単に求められる。しかし、今回開発した接続部のように、油、油浸紙それにエポキシ絶縁筒の組み合わさった複合絶縁体で、電極構造も複雑な場合にはその電界を簡単に求めることはできず、また実用的な結果を得るにはある程度の厳密な解析を必要とする。そこで筆者らは今回の開発を機会に電子計算機を用いた接続部の詳細な電界解析を試み、その結果を絶縁設計に反映させるとともに実験結果との対比を行なった。

3.1 接続部の電界計算法

接続部の電界解析は一般に導電液を用いた解析槽(そう)あるいは半導電紙による簡易法などにより実施されている。これらの方法は概略の等電位線などを求めるには便利な方法であるが、部分的な電界強度を求めるには複雑な繰り返し実験が必要で誤差を生じる可能性も大きく、不適当な方法と言える。そこで筆者らは電子計算機を用いたより厳密な解析を試みた。その方法はポテンシャル場の解析法としてしばしば用いられる方法であり、電子計算機の普及とともに広く用いられ始めたものである。すなわち、解析したい空間を格子状に分割し、各格子点においてラプラスの式に基づく差分方程式を導き、両電極側の境界条件を与えたのち、各点の電位が所定の誤差内に収まるまで繰り返し計算させる方法である。

なお、開発段階では接続部以外で破壊することのないようケーブルとしては275kV 1×1,000mm² OFケーブルを用い、接続部のみ154kV用とした。このため以下の計算ではそれに対応する諸寸法が用いられている。



注：()内の数値は絶縁材料の比誘電率

図3 接続部の等電位分布

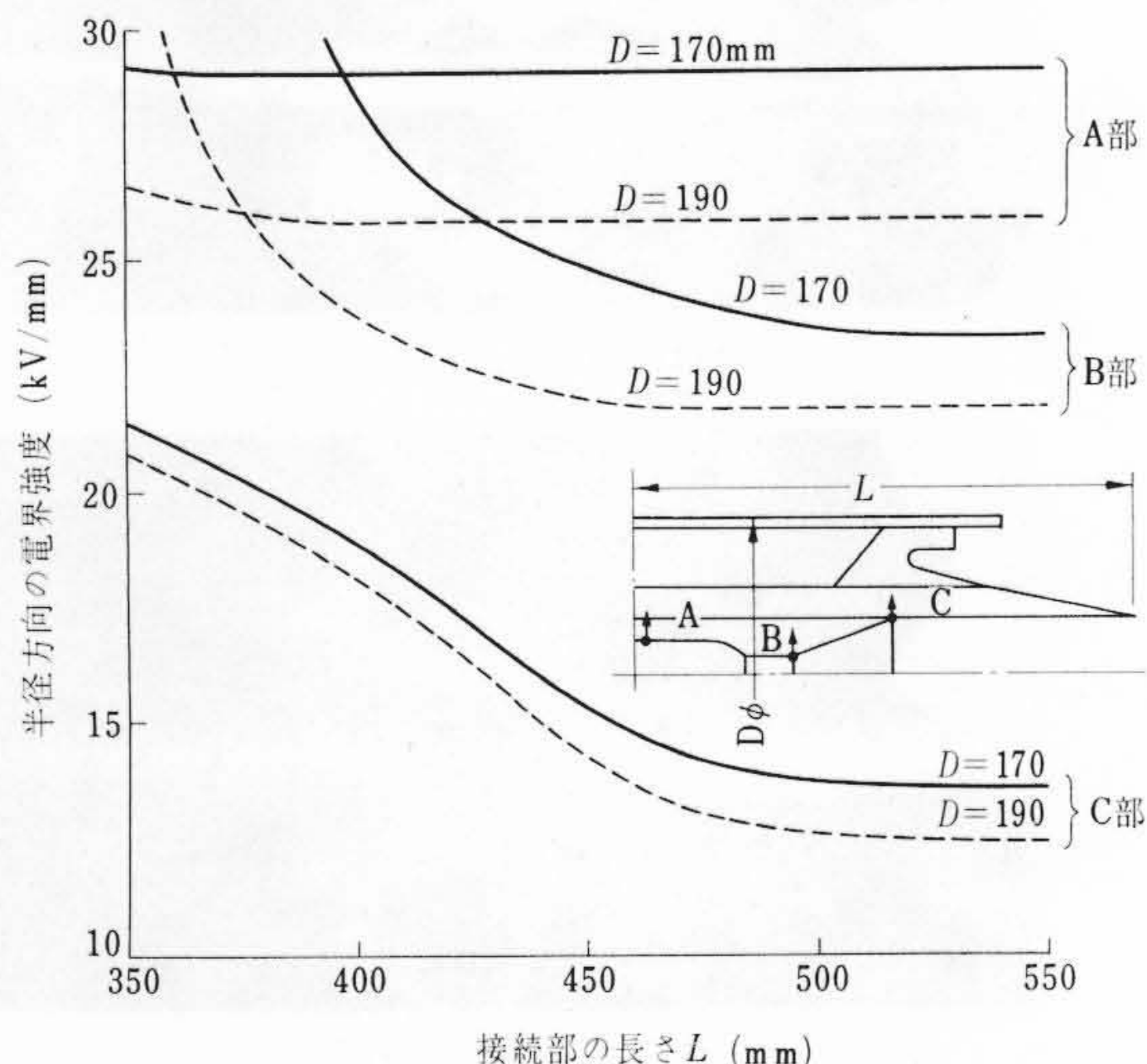


図4 接続部の寸法と各部電界強度の関係(1,000kV印加時)

3.2 接続部の電界解析結果とその検討

接続部の寸法と各部の電界強度の関係をj知るため、外部遮蔽層の直径Dとストレスコーン立上りから中央までの長さLを種々変えて絶縁体内部の電界を求めた。

図3は計算途中で得られる各部の電位から求められる等電位分布を示したものである。この等電位分布図からも絶縁構成の特長を知ることができる。すなわち、図3中のA点付近で等電位線の間隔が狭くなって油絶縁部の電界が高くなっていること、またその分だけスリーブ上の電界が低くなっていることなどである。しかし、明確な差は各部の電界を求めることにより明らかになる。

図4は接続部の径と長さを変えた場合の代表的な点の径方向の電界強度を示したものである。ただし印加電圧としてはインパルス1,000kVを想定した。

図4およびその他の点の電界を見て以下の諸点が明らかになる。

- (1) かりに絶縁体がすべて油浸紙で形成されているものとする、最高電界はスリーブ上に生じ29~32kV/mmとなるのに対し複合絶縁を取り入れた改良形NJBでは25.7~28.8kV/mmに低減される。
- (2) 接続部遮蔽層の直径Dが190mmから170mmへ減少することにより各部の半径方向の電界は2~3kV/mm程度高くなる。
- (3) 接続部遮蔽層の直径D=170の場合は接続部の長さL=500以下で、またD=190の場合はL=450以下でB部の電界が急に上昇する傾向にある。ただし、C部の電界は値は小さいがD=170, 190の場合ともL=500以下で上昇するが、これはベルマウスが近づくことによるものである。

接続作業中の多少の寸法上のばらつきがあっても安定した性能を確保するには、全般的なストレスの緩和を図ることも重要であるが、上記(3)項に述べたような寸法の変化による電界の急な上昇を示す領域は避けるべきであろう。

このような観点からわれわれは改良形NJBの設計寸法としてD=170の場合はL=535、D=190の場合はL=485を選ぶことにした。このとき油絶縁部の最高電界はそれぞれ25.7、22.5kV/mmとなりこれを運転時のストレスに換算すると2.3、2.0kV/mmとなる。

4. 電気破壊試験結果と検討

接続部の寸法を変えて電氣的破壊試験を実施し、先の理論的な電界解析結果と対比させた。表1がその結果をまとめたものである。交流破壊(耐压)電圧は寸法の小さい場合にも目標値400kVが満たされたのでインパルス破壊に重点をおいて試験した。

これら一連の試験結果は先の計算結果とも一致し、D=170の場合はL>535、D=190の場合はL>435であれば1,000kV以上の安定した破壊値に達すると言える。

また、破壊路は先の図4のB、C部(ケーブルコアベンシリング部)を通してストレスコーン部へ進むことが多く、この点を考慮すればLが大きいほうがより安定していると考えられる。

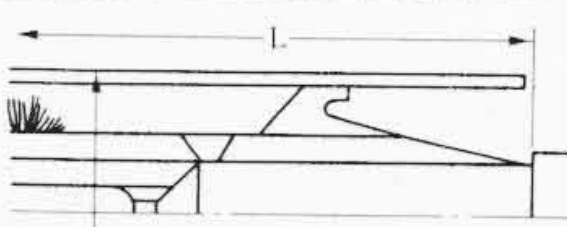
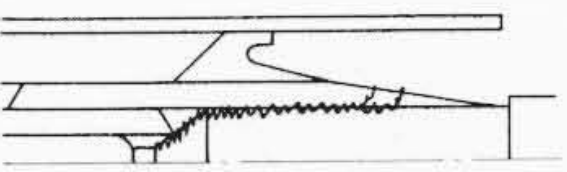
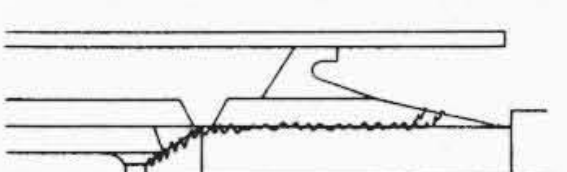
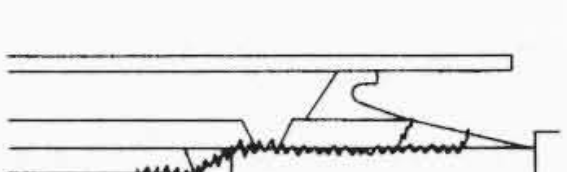
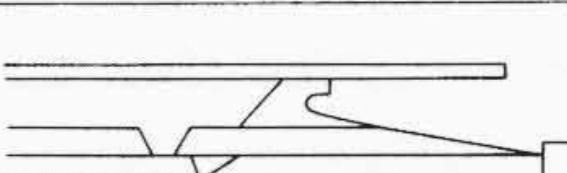
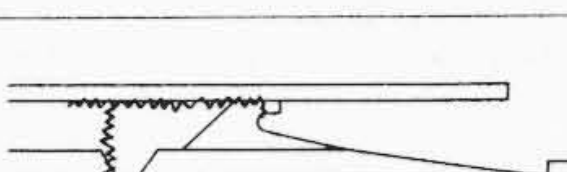
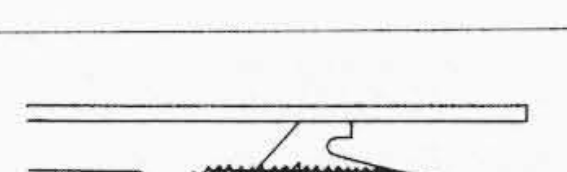
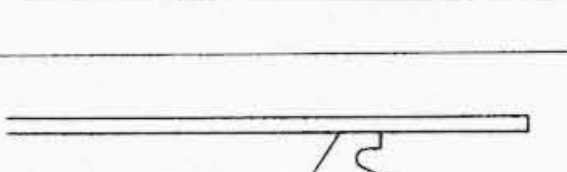
以上の諸点からわれわれは154kV級改良形NJBとしてD=170、L=535に相当する寸法を採用することに決定した。

154kV OFケーブルを用いて最終的な諸性能を確認する前にさらに以下の追試を行なった。

すなわち、この改良形NJBは油絶縁を採用しており、油污損時の性能低下は致命的な欠陥となる。これを防止するため、スリーブの成形仕上げの省略、エポキシベルマウスと油浸紙絶縁筒の使用による現地工事の簡易化などの汚損防止策をとっている。しかし、万一の場合を想定して油污損時の破壊電圧の低下の度合いを調べた。

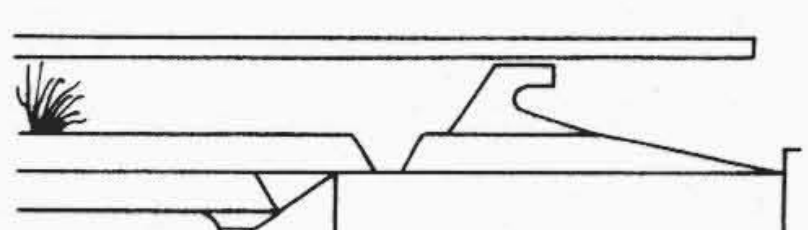
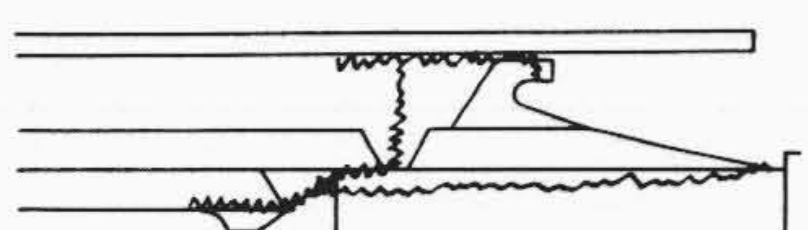
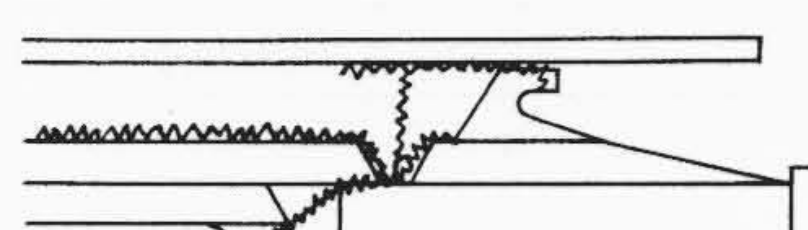
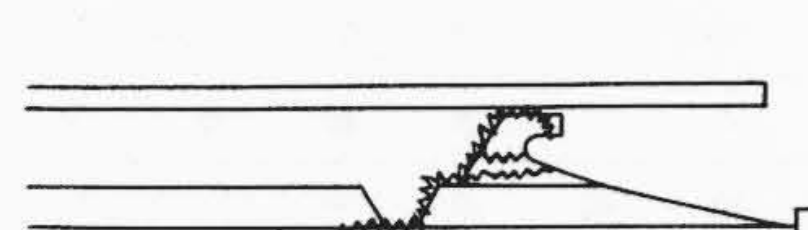
接続作業中に考えられる汚損条件で人工的な汚損状態を作り出し、交流長時間破壊試験を主体に試験した。表2がこれらの試験

表1 154kV改良形NJBの寸法と破壊電圧の関係

試験 No.	耐圧, 破壊電圧 (kV)		寸 法		破 壊 路
	交 流	インパルス	D	L	
1	440 (2h 15min)	—	170	535	
2	—	−800(10回OK) +800 (1回目)	"	435	
3	—	−800(10回OK) +800 (1回目)	"	485	
4	—	−1,050(10回OK) +1,050 (1回目)	170	535	
5	420以上 (3h)	—	190	435	
6	—	−900(10回OK) +900 (1回目)	"	385	
7	—	−1,100 (7回目)	"	435	
8	—	−1,050(10回OK) +1,050 (1回目)	190	535	

注：(1) 課電法 交 流：300kV/3hから20kV/3hで昇圧。
インパルス：−800kV/10回，+800kV/10回から±50kV/10回で昇圧。
(2) 試験No.1は明確な破壊路はなく，油中放電の痕跡(こんせき)のみ。
また試験No.5は耐圧のみで終了し，試験No.7に流用した。

表2 油污損時の破壊試験結果

試験 No.	油 汚 損 法	汚損粉混合時の油の特性	オーバフロー油の特性	耐圧あるいは破壊電圧		破 壊 路
				交 流	インパルス	
1	(清 淨 油)	$\rho = 4 \times 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$ $\tan \delta = 0.0016\%$ B.D.V.=55.4kV/1.5mm	$\rho = 1 \sim 4 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ $\tan \delta = 0.01\%$ B.D.V.=51~52kV/1.5mm	440kV (2h 15min)	—	
2	はんだ用ペースト 5g (ソルダン) (約 0.1g/l)	$\rho = 7 \times 10^{13}$ $\tan \delta = 0.07$ B.D.V.=24.6	$\rho = 3 \times 10^{15}$ $\tan \delta = 0.03$ B.D.V.=53	400kV (3h O.K)	1,260kV (1回目)	
3	銅粉 5g (100メッシュのエミリー) クロスで削ったもの (約 0.1g/l)	$\rho = 1 \times 10^{14}$ $\tan \delta = 0.01 \sim 0.27$ B.D.V.=12~18	$\rho = 3 \times 10^{15}$ $\tan \delta = 0.01$ B.D.V.=45.4	380kV (1h)	—	
4	エポキシ粉 2g OF紙粉 1g C.B紙粉 0.5g (200メッシュのエミリー) クロスで削ったもの	$\rho = 9 \times 10^{13}$ $\tan \delta = 0.05 \sim 0.12$ B.D.V.=16~25	$\rho = 2 \times 10^{15}$ $\tan \delta = 0.03$ B.D.V.=50	400kV (3h O.K)	1,080kV (2回目)	

注：課電法 交 流 300~320kV/3hから20kV/3hで昇圧。
インパルス ⊖800kV/3回から⊖20kV/3回で昇圧

結果をまとめたもので、比較のため清浄油の場合のデータも併記した。寸法は $D=170$ 、 $L=535$ である。表2に示したように、注入した油のB.D.V.は $10\sim 25\text{kV}/1.5\text{mm}$ であるが、接続箱へ注入後の溢油(いつゆ)は $45\text{kV}/1.5\text{mm}$ 以上となっている。このように、いわばろ過された状態となったのはよごれがすべて接続部内に残留したことを示しており、事実、破壊試験後の接続部内部には、ケース内はむろんのこと油浸紙絶縁筒内部にもよごれが多量に見られた。しかし、交流、インパルス破壊電圧には異常な低下は全くなく、当改良形NJBの安定した性能が裏づけられた。

5. 改良形NJBの諸性能

前章までに述べたようにわれわれは何回かにわたる試作、試験により154kV級改良形NJBを開発した。最終段階として154kV、 $1\times 800\text{mm}^2$ アルミ被OFケーブルを用いて諸性能を確認した。

先に得られた寸法： $D=170$ 、 $L=535$ は275kV、 $1\times 1,000\text{mm}^2$ OFケーブルを用いた場合であり、これを154kV、 $1\times 800\text{mm}^2$ アルミ被OFケーブルに対応させると、 $D=170$ は変わらず、 L はストレスコーン部の長さの伸び分だけ長くなり、655となる。これが先の図1に示した構造寸法である。なお、このとき接続箱の外径は180mm、長さは1,450mm程度となる。現在の規格では外径160mm、長さ1,450mmである。

5.1 作業時間

ケーブル切断から鉛工までの作業時間の分析結果が表3に示されている。成形スリーブ、油絶縁およびエポキシベルマウスの採用による圧縮スリーブの仕上げ作業および紙巻き作業の大幅な短縮がそのまま作業全体の時間短縮に結びついており、従来約6時間を要した作業が2時間余となった。作業時間の短縮は単に労力の節減になるのみでなく、作業ミスを防止し、汚損の入り込む可能性を小さくする効果があり、性能の安定化に結びついている。

5.2 初期電気性能

組立てを終えた改良形NJBの初期電気性能は表4に示されたとおりである。交流、インパルス電圧による耐圧あるいは破壊試験はむろんのこと、コロナ開始電圧、誘電正接、直流耐電圧とも154kV級NJBとしてじゅうぶんな初期性能である。

5.3 長期実負荷試験

改良形NJBの初期性能を確認したのち、長期の安定性を知るため実負荷試験を開始した。試験条件は、誘電電圧が対地200kV($154/\sqrt{3}\text{kV}\times 2.25$)、通電電流が1,200A(16h ON, 8h OFF)、であり、現在まで約3ヶ月を経過しているが、約1ヶ月ごとに測定している誘電正接の値はほとんど変化がなく、初期性能が保たれていると考えられる。実負荷試験状況は図5に示されている。

今後さらに試験を継続して長期の安定性を確認したい。

表3 組立て施工時間測定結果

項 目	時 間 (min)
ケ ー ブ ル 切 断	7
導 体 む き 出 し	6
ケース、ベルマウス、絶縁筒そう入	3
導 体 接 続	14
セ ミ ス ト ッ プ 作 業	20
油 浸 紙 巻 き	28
ベ ル マ ウ ス セ ッ ト	3
め っ き 線 巻 き	18
絶 縁 筒 セ ッ ト	4
ケ ー ス セ ッ ト	8
鉛 工	24
計	2h, 15min

表4 154kV改良形NJBの初期電気性能

試 験 項 目	試 験 結 果
コ ロ ナ 開 始 電 圧 (1)	154kV以上
誘 導 正 接 (1)	15 ℃
	80 ℃
交 流 長 時 間 耐 電 圧 (2)	400kV/3h O.K.
イ ン パ ル ス 破 壊 電 圧 (3)	1,040kV/1回以上
直 流 耐 電 圧	400kV/10min O.K.

注：(1)ケーブル約15mを含む。コロナ測定感度18pC。
(2)300kV/3hから20kV/3hで昇圧
(3)⊖800kV/3回から20kV/3回で昇圧、試験用CHがB.D.

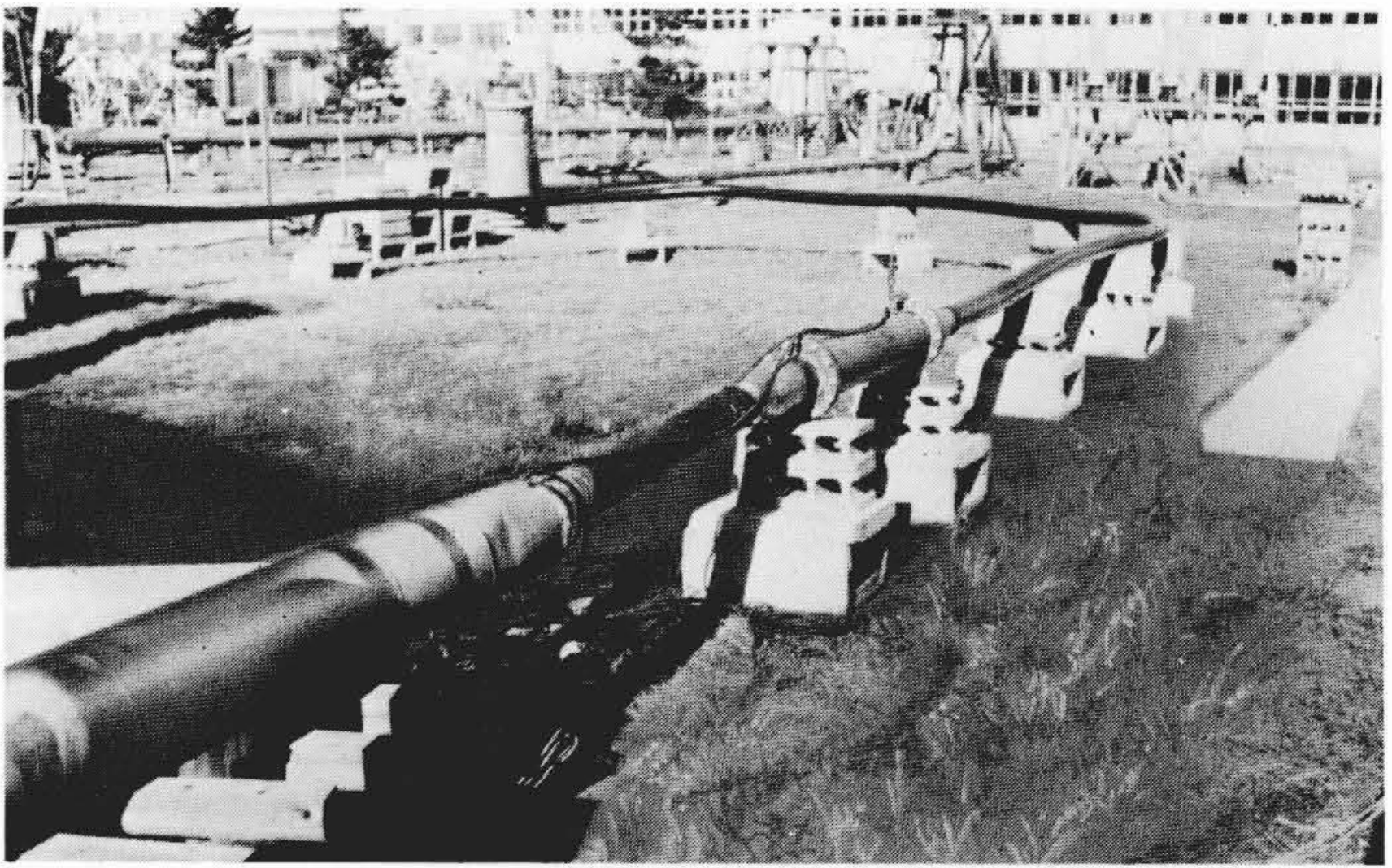


図5 154kV改良形NJBの実負荷試験状況

6. 結 言

66kV簡易形接続部を基本として154kV改良形NJBの開発に着手し、予期以上の性能のものを開発することができた。得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 従来の154kV普通接続部と比較すると、電気性能が同等以上で、寸法が若干小さく、施工時間が約1/2である。
- (2) 本改良形接続部の特長は、成形スリーブ、油浸紙絶縁筒およびエポキシベルマウスなどの部品を現地で組み立てるプレハブに近い方式をとっていることと、油と油浸紙の組み合わせ絶縁を採用していることである。
- (3) 改良形接続部の開発にあたり、接続部内部の詳細な電界解析を行ない、その結果を絶縁設計に応用した。また、各部の寸法を変えた場合の電界解析と破壊実験の結果を対比させ、両者がほぼ一致することを確認した。

今後は開発品の長期の性能を確認するとともに実線路への適用を図りたい。

最後に、本改良形接続部の開発にあたり、終始ご指導とご協力をいただいた東京電力株式会社および日立電線株式会社日高工場ならびに研究所の関係各位に厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 金子、深沢ほか：日立評論 53, 576 (昭46-6)