

500kV大容量制動抵抗器の開発

Development of 500kV Large Capacity Breaking Resistor

550kV、1,500/3MW(3秒間)の500kV大容量制動抵抗器を開発、試作した。

この制動抵抗器は複数台の組合せ接続により増容量を行ない、最終段階では三相550kV、4,500MW(3秒間)の装置を構成する。

この装置によれば、大容量長距離送電の系統過渡安定度を大幅に向上することができるので、500kV、10,000MWという大電力を安定に送電することが可能となる。

この制動抵抗器の規模は世界的にも例を見ないものであり、特に小形軽量化と高信頼度化を重視して設計した。

抵抗器本体は、絶縁紙を被覆した鋼帯を無誘導に巻回して円板巻線としたもので、500kV変圧器と類似の絶縁構造をもっている。冷却方式は油入自冷式で、温度上昇限度は210degである。外部は耐塩害構造として、保守、点検を容易にしている。

試作した550/√3kV、1,500/3MW(3秒間)の実規模ユニットモデルに対して、絶縁試験、温度上昇試験、過電流(短絡)強度試験などを実施し、その実用性能を確認した。

安森雅一* Masakazu Yasumori
長屋恒彦** Tsunehiko Nagaya
池本徳郎** Norio Ikemoto
森山昌和** Masakazu Moriyama
平野三百里** Mihori Hirano
加子泰彦*** Yasuhiko Kako

1 緒 言

制動抵抗器は系統事故時、発電機の加速エネルギーを熱の形で消費し、発電機加速を抑制して過渡安定度を向上するために投入するもので、国内外ともその適用実績はまだ少なく^{(1)~(3)}、特に500kV系統用としては初めてのものである。

従って、その開発に当たっては小形軽量化と高信頼度化に重点を置き、抵抗体の材料の選択などの基礎検討を進めるとともに、導体や絶縁紙の短時間温度特性、無誘導構造、絶縁特性、短絡強度、耐震性、現地での増設方法など500kV変圧器の設計・製作技術を基に多方面にわたって検討した。更に実用器相当のユニットモデルを製作し、破壊限界試験を含む可能な限りの試験を実施し、所期の性能を確認した。以下、この500kV大容量制動抵抗器の開発、試作及び試験の概要につき紹介する。

2 仕 様

制動抵抗器の主な仕様を表1に示す。電流容量、及び経済性を考慮して、制動抵抗器は500kV母線に設置される。送電規模10,000MWに対する適正な制動抵抗器の容量は4,200~4,500MWであるが、この規模に達するまでの途中過程で2~3回の増設ステップを考慮する必要があること、各相が独立した構造のため三相化のメリットがないこと、更に製作、及び輸送の容易性なども勘案し、制動抵抗器単体ユニットは単相550/√3kV、1,500/3MW(3秒間)とした。

3 構 造

3.1 全体構造

図1に制動抵抗器一相分の外形寸法図を示す。ブッシング別置方式により、現地での増容量が安全、且つ容易に行なえるようにしている。この方式は各単体ユニットとは絶縁油を

隔離した別置タンクに1本の共通ブッシングを設け、増設時は接続ダクト部分だけで各単体ユニット間を並列接続する構造としてある。共通の基礎への設置、及び伸縮継手による寸法差吸収で地震時の位置づれに対処している。エアシール密封方式、油入自冷式の採用などにより無保守、無点検化を図るとともに、500kV側には耐塩害設計の油浸紙コンデンサ形ブッシングを使用して高信頼度化を図っている。

3.2 内部構造

図2に単体ユニットの内部構造図を示す。抵抗体は絶縁紙を被覆した冷間圧延鋼帯を無誘導に巻回し、絶縁筒を中心に

表1 500kV制動抵抗器の仕様 送電規模10,000MWに対する適正容量は4,500MWであるが、増設ステップを考え、単体ユニットは550/√3kV、1,500/3MW(3s)としている。

項 目	仕 様
形 式	屋外用油入自冷式
定 格 電 圧	550kV (単相 550/√3 kV)
定格容量 (平均)	三相 4,500MW (単相 500MW×9台)
定 格 通 電 時 間	3 s
定 格 入 力 量	13,500MW・s (単相4,500MW・s×3台)
温 度 上 昇 限 度	210deg (最高周囲温度 40℃)
定 格 力 率	99%以上
定 格 周 波 数	50Hz
定 格 電 流	定格電圧/40℃における抵抗実測値
所 要 絶 縁 強 度	線路側: BIL 1,800kV
	接地側: 絶縁階級 60号
過電流(短絡)強度	定格電流波高値の2倍

* 東京電力株式会社技術開発研究所系統研究室 副主査 ** 日立製作所国分工場 *** 日立製作所日立研究所 工学博士

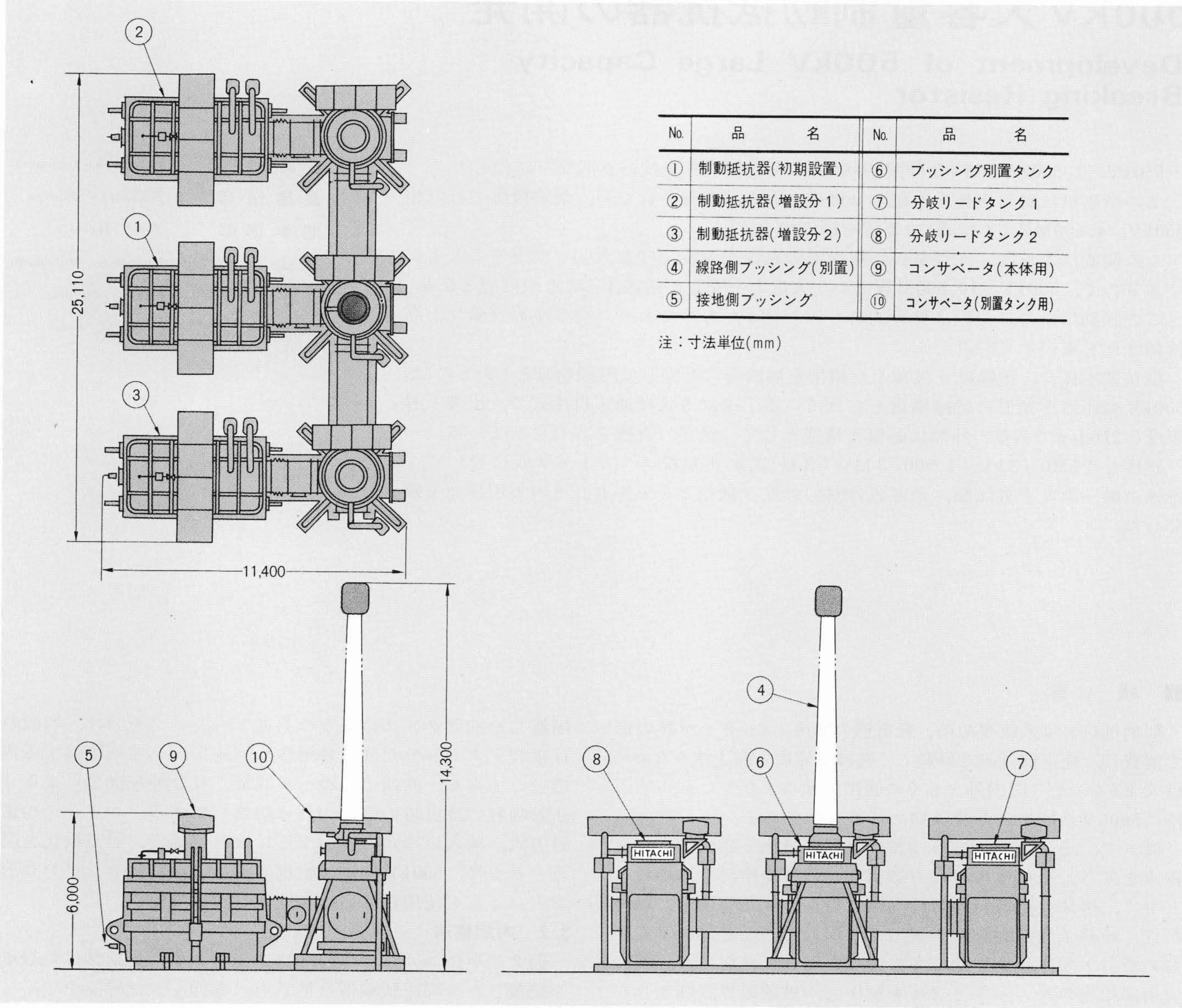


図1 500kV制動抵抗器外形寸法図 別置ブッシング方式により増設の高信頼度化を図っている。

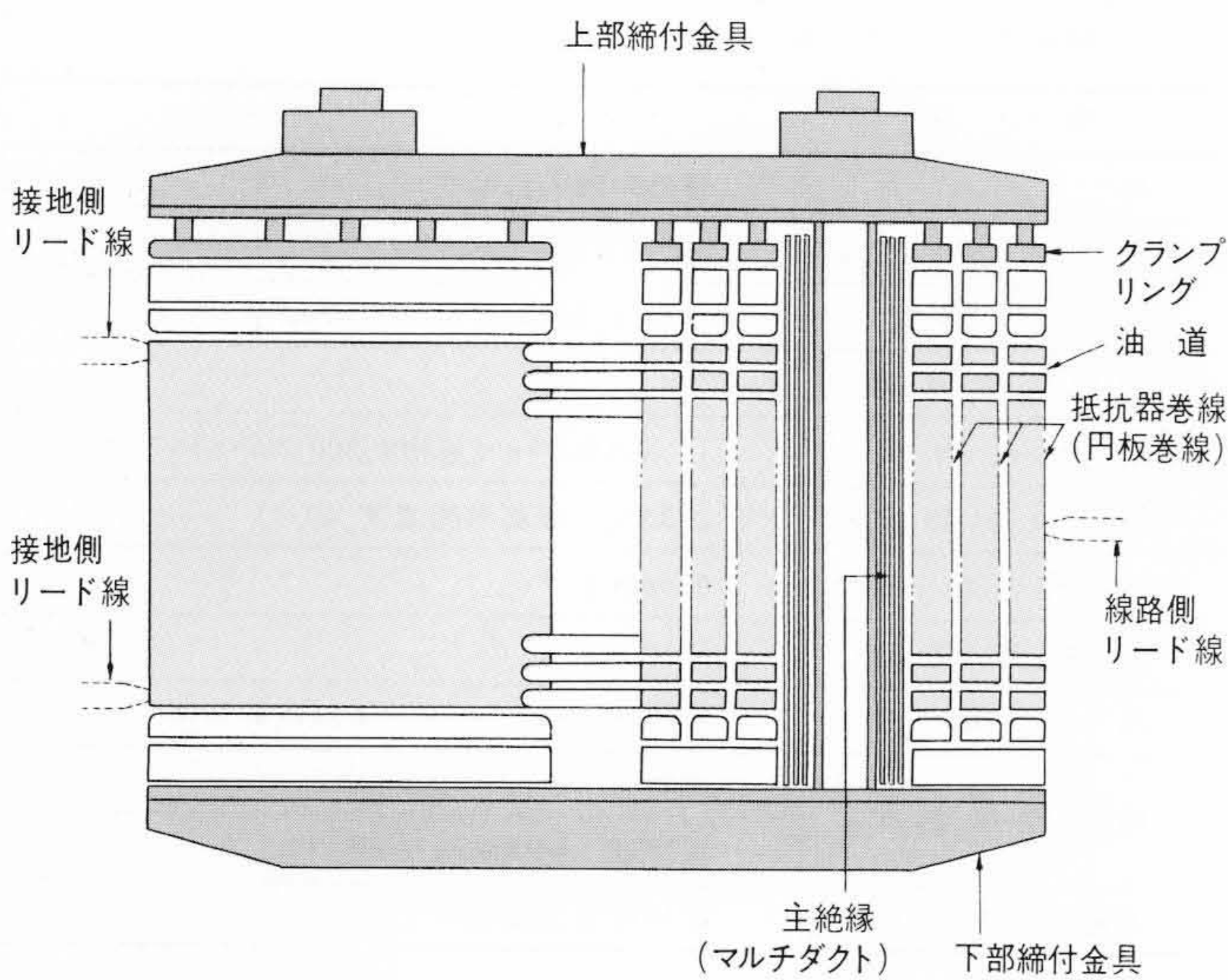


図2 500kV制動抵抗器の内部構造図(単体ユニット) 冷間圧延鋼帯の無誘導円板巻線を2脚に配置し、上下締付金具で軸方向に強固に締め付けて一体化している。

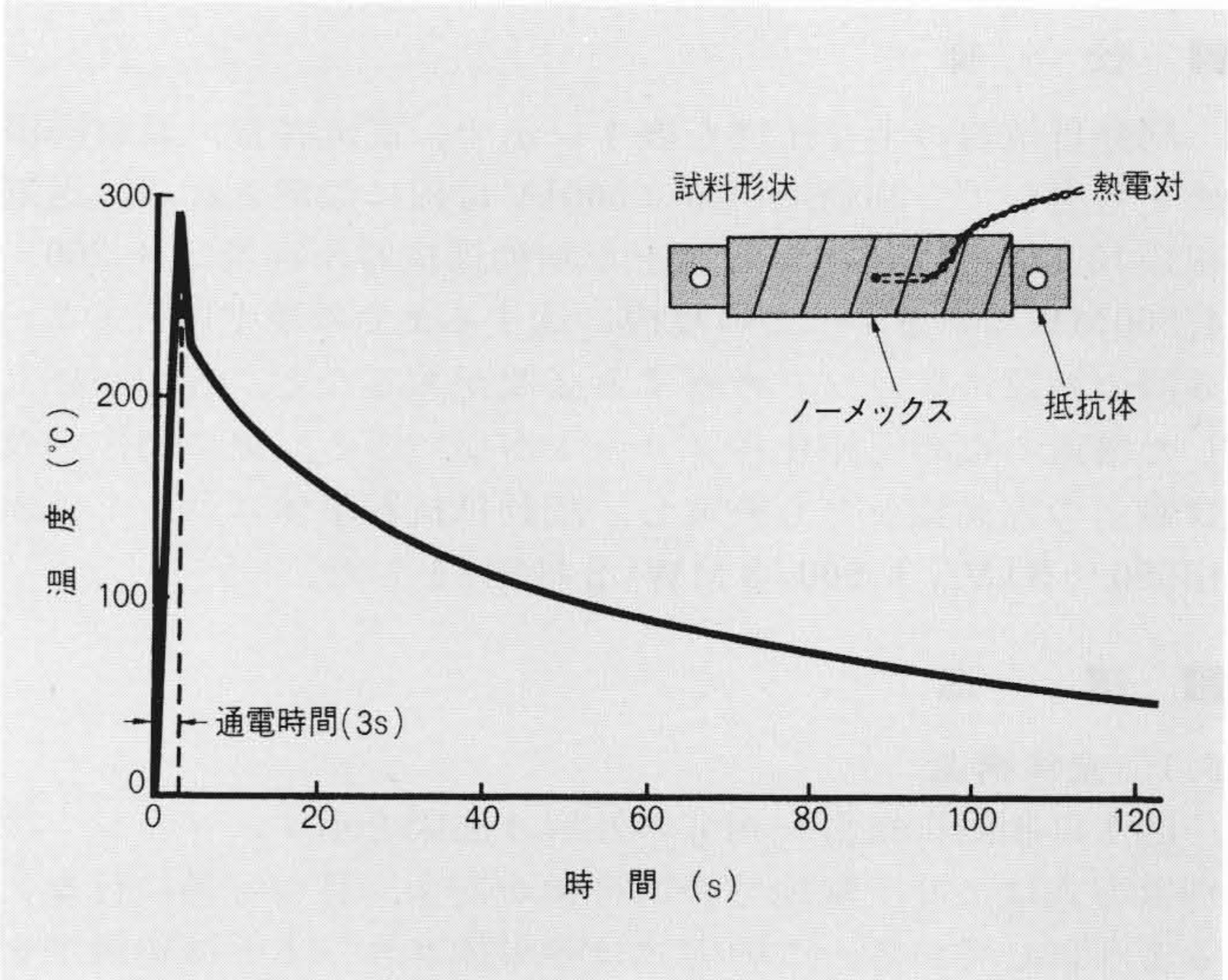
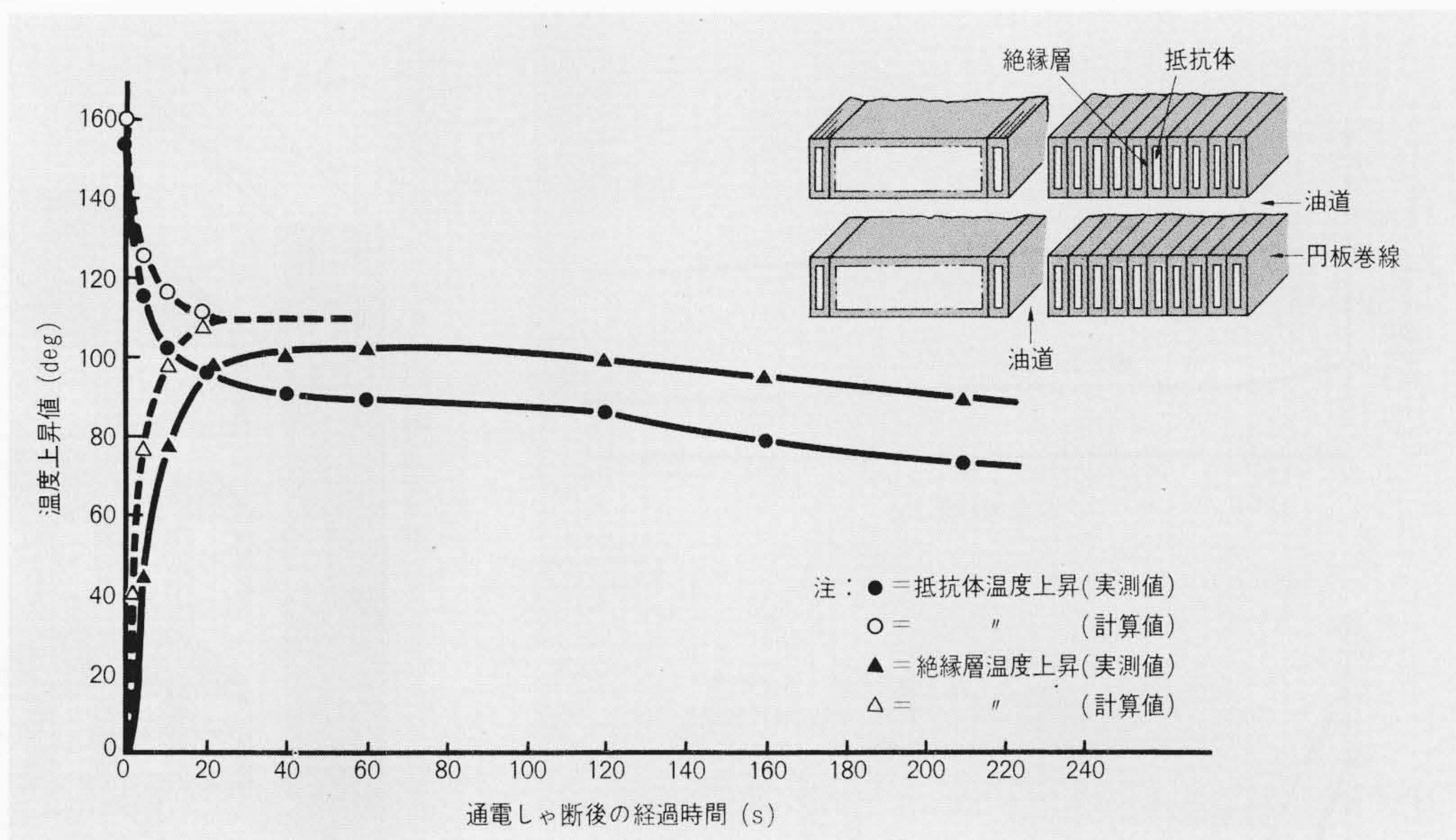


図3 耐熱モデルの時間—温度特性(1サイクル) 実用器に近い条件で短時間通電試験(通電時間3秒、抵抗体最高温度250°C)を360回(12回/年×30年)繰り返し行ない、絶縁紙の引張強度の低下を調査した。

図4 短時間通電時の巻線の熱放散特性 実用器と同一寸法、巻数の円板巻線よりなる電流ユニットに定格時間通電し、詳細な熱放散特性を基に絶縁紙の熱劣化を検討した。



所定個数積み重ねた円板巻線である。巻線は2脚の間で交互接続し、全体を上下並列として中央より500kVリード線を引き出すようにしている。巻線の内側には中心パイプを設けて巻線の心を構成し、この間の主絶縁は絶縁筒と油浸紙絶縁層から成るマルチダクト構造⁽⁴⁾として油隙を細分化し、コロナ特性を向上させている。巻線はサージ電圧に対する電圧分担が均等となるよう設計し、巻線内には積み重ね方向のみでなく、半径方向にも油道を設けて冷却効果を高めるようくふうしている。

・機械的強度は、内的条件として定格電流の2倍の過電流による電磁力を、外的条件として0.3G共振正弦3波の地震力、及び輸送時の衝撃による力を考慮し、これらに対し十分な安全性を図った。抵抗体の断面形状を適切に選定し、巻線の寸法、口出し部の固定、及び配置方法を検討した。巻線全体を所定の面圧で均一に締め付けておくため、上・下部の締付金具の剛性を考慮した。更に、現地へ輸送時の機械的衝撃に対しても中身の固定金具を設けて対処するなど、大容量変圧器と同等の機械的強度をもたせるよう配慮した。

4 基礎検討

4.1 抵抗器の方式と抵抗体材料の選定

抵抗器の方式には、(1)グリッド抵抗器方式、(2)液体抵抗器方式、(3)金属抵抗器方式などが考えられるが、冷却方式とも組み合わせて各種方式を比較検討した結果、短時間使用であること、及び汚損、耐候性、保守、公害などの面から総合的に判断して、油入自冷巻線方式による金属抵抗器方式に決定した。

抵抗体の材料としては、(1)銅系、(2)鉄系、(3)アルミニウム系などの各種を比較検討した結果、抵抗特性、重量、加工性、及び経済性を勘案して冷間圧延鋼帯を使用することとした。

4.2 小形軽量化

抵抗体の最高許容温度の向上と、無誘導化についてそれぞれ次のように検討し、小形軽量化を図った。

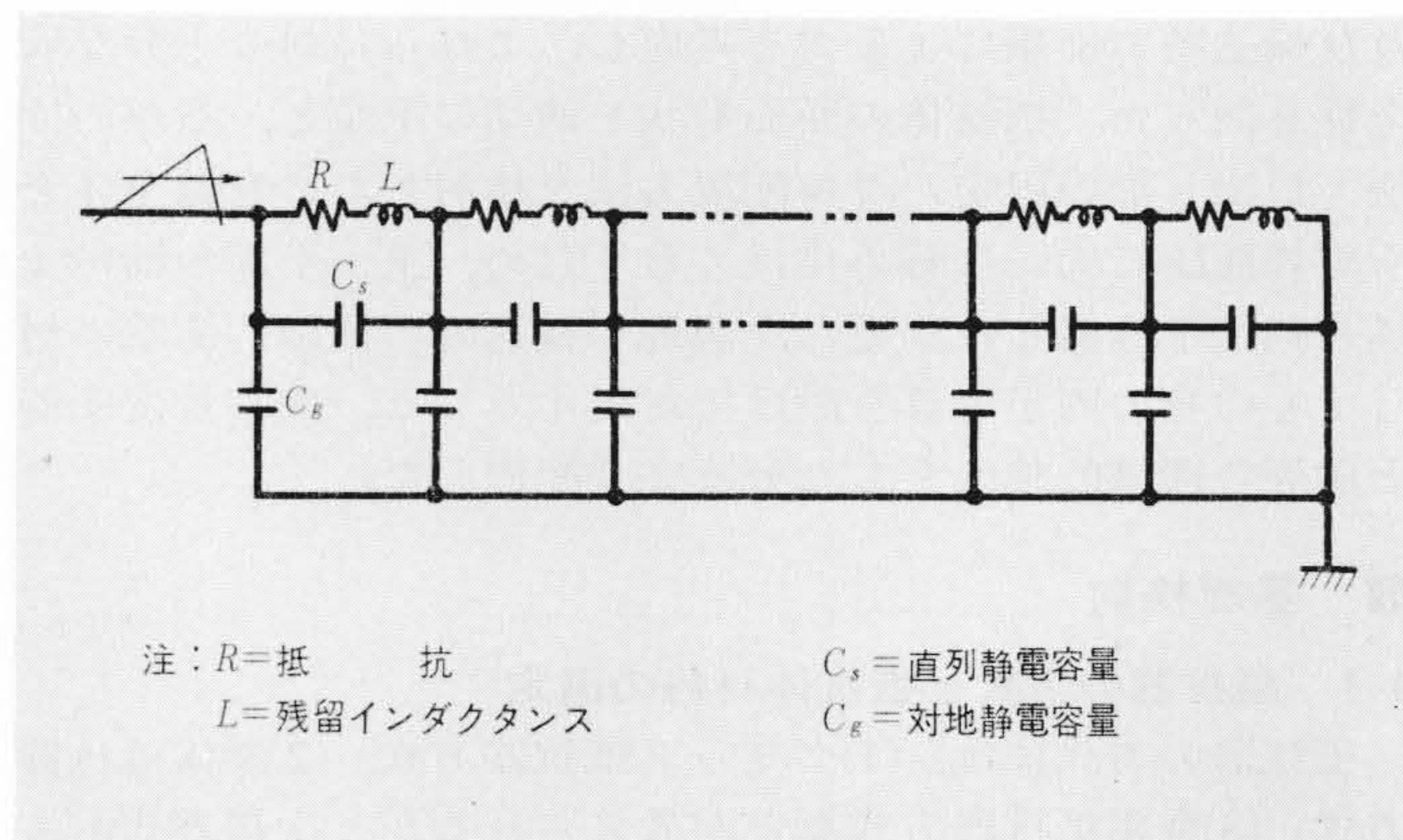
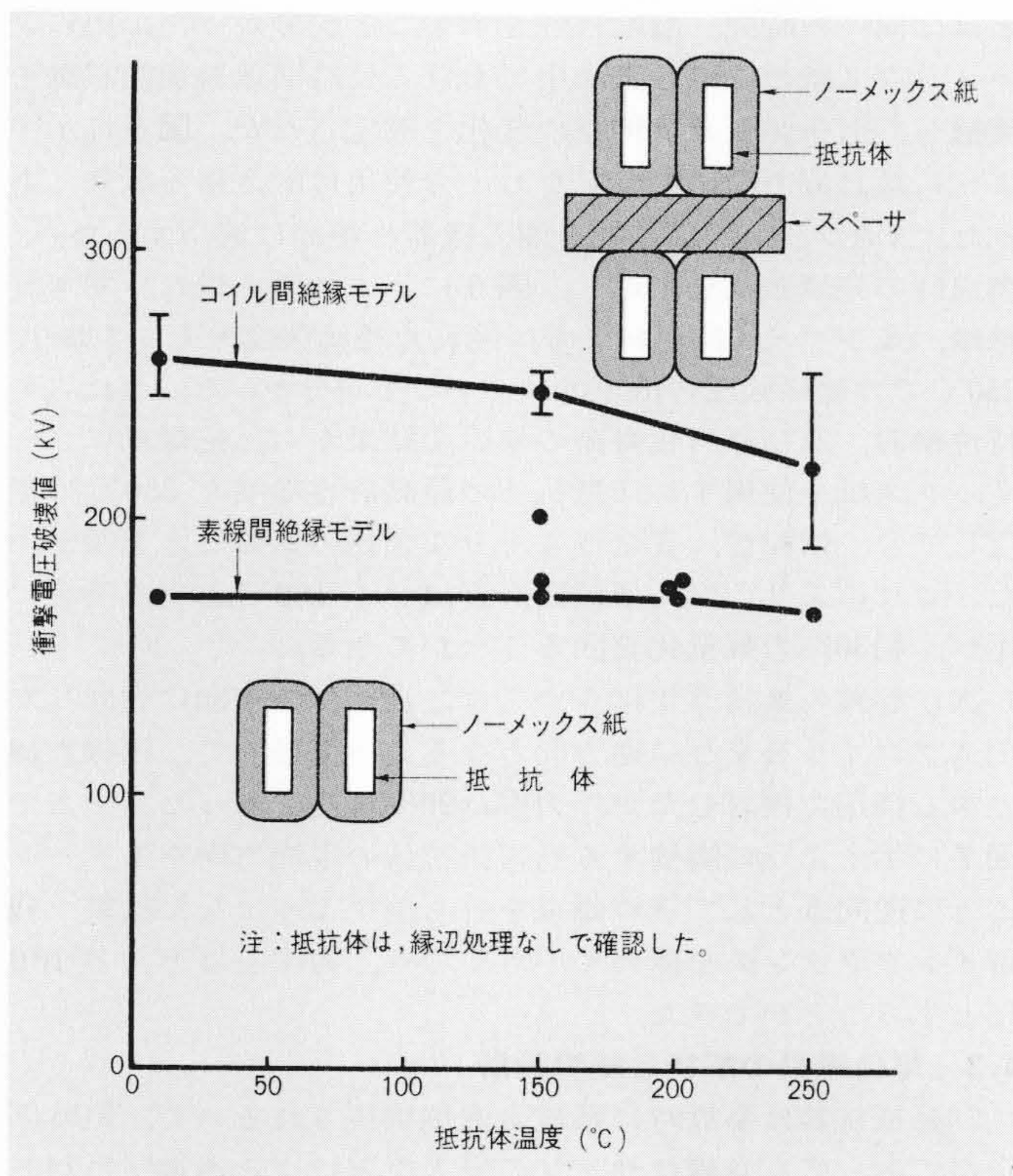
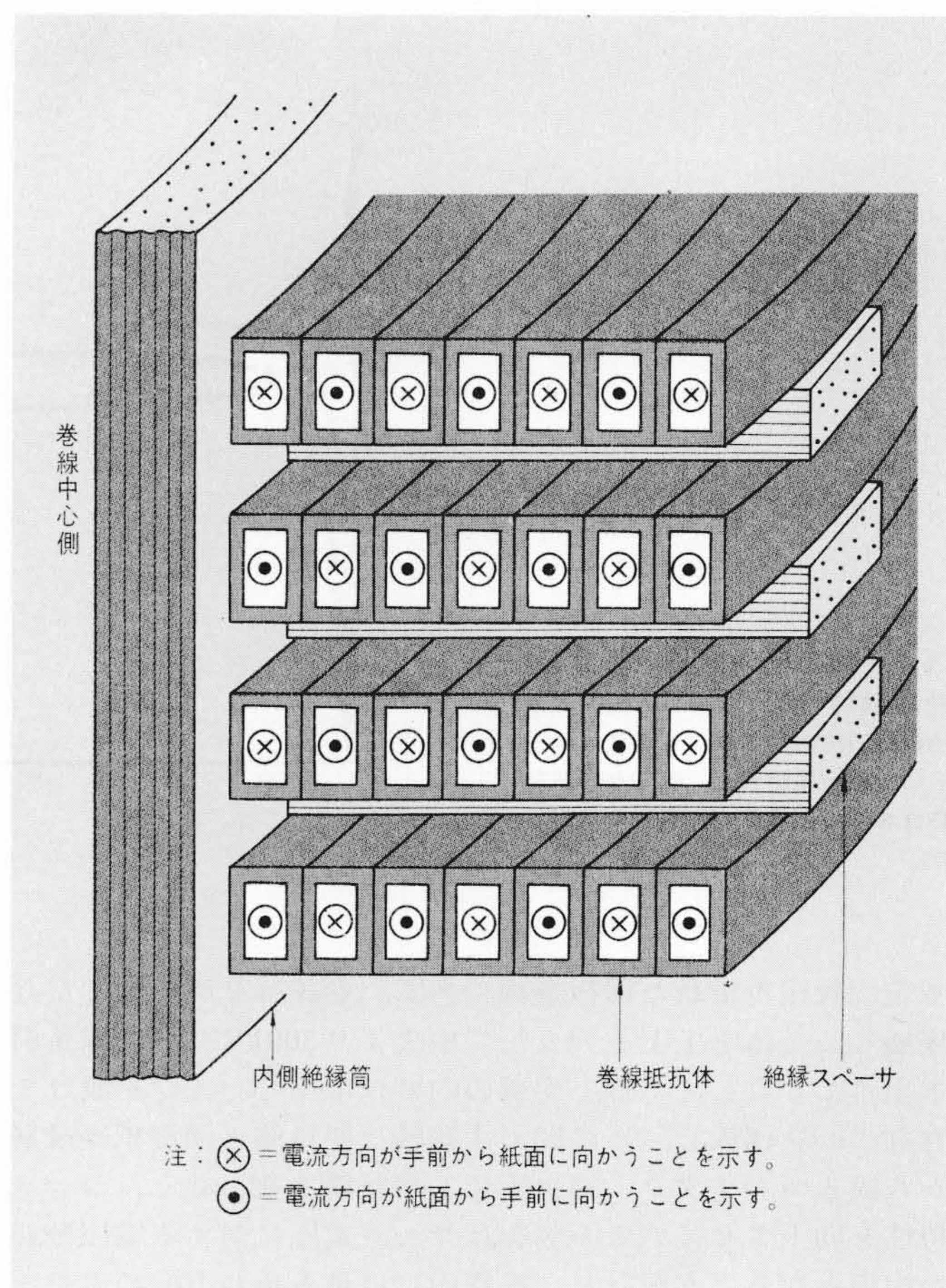
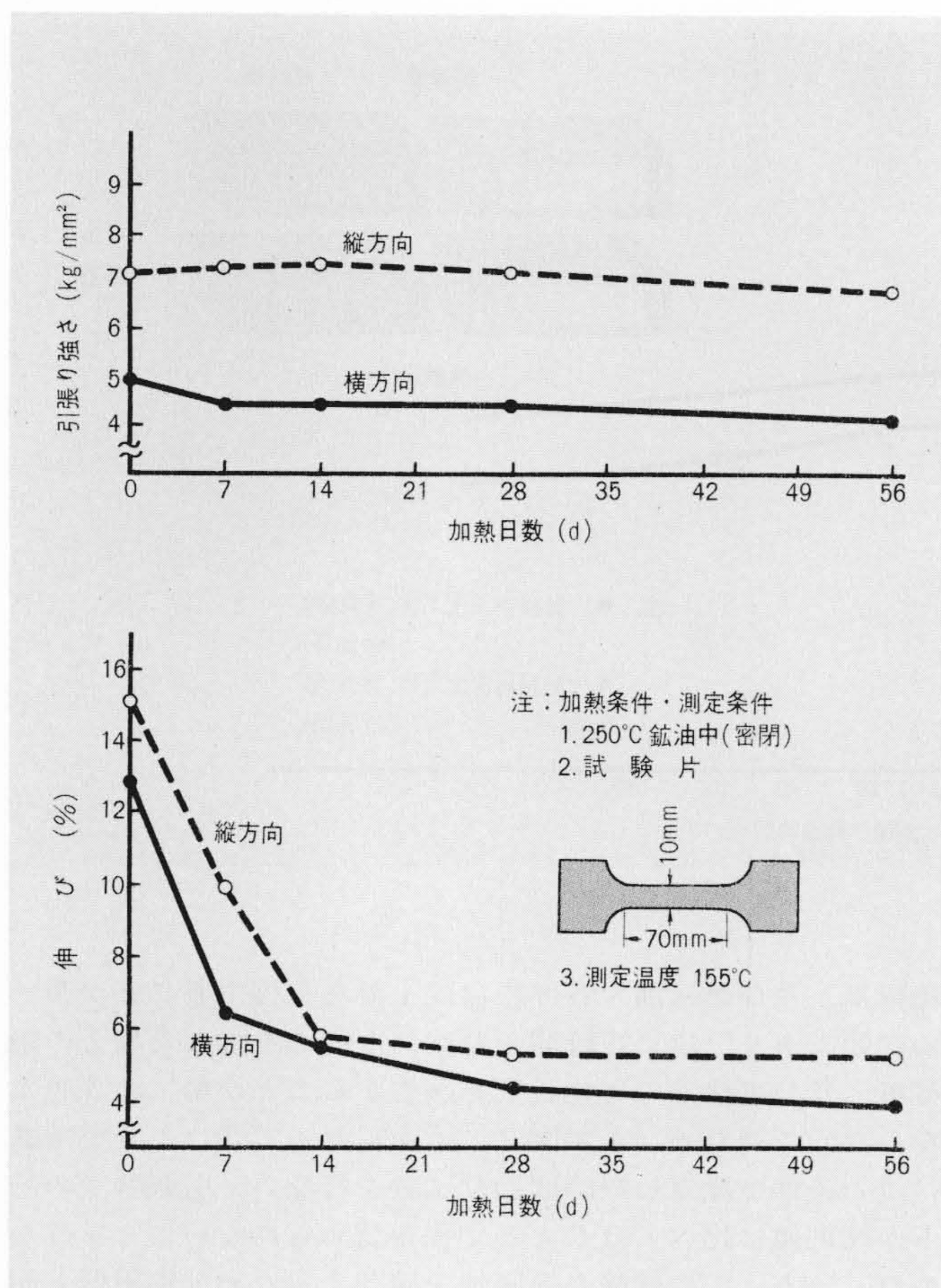
抵抗体の最高許容温度は、絶縁紙の耐熱性により決定されるが、制動抵抗器は系統のじょう乱時のみ極めて短時間大電流が流れるという特殊な状態で使用される。従って、抵抗体の最高許容温度を決めるためには、短時間通電時の抵抗体、

絶縁紙、及び絶縁油の各部の温度上昇を把握することが第一の課題であり、次に短時間の熱的ストレスを加えた場合の絶縁紙、及び絶縁油の劣化状況を調査することが第二の課題となった。このため、まず図3に示す耐熱モデルにより実用器に近い条件で繰返し短時間通電試験を行ない、引張強度の低下が初期値に比べてほとんど変化が認められないことを確かめた。一方、この試験の等価性を確認するため、実用器と同一寸法、及び巻数の円板巻線数層よりなる電流ユニット(後述)を製作し、定格時間通電時の巻線の詳細な熱放散特性を測定した。その結果、図4に示すように絶縁紙の寿命に最も大きな影響を与える最高温度(250℃)付近では、上記の耐熱モデルとはほぼ同一の時間-温度特性を示すことが分かった。更にノーメックス紙の250℃鉱油中における長時間連続加熱試験を実施し、引張強さ及び伸びの変化を測定したが、図5に示すように数日間を経過してもなお十分使用に耐え得る状態であった。またノーメックス紙を油入機器の絶縁に適用するため、高温時の絶縁強度を測定し、図6に示す結果を得た。素線間絶縁、及びコイル間絶縁ともに優れた絶縁強度をもっており、250℃での絶縁強度の低下も小さいことが分かった。これらの特性検討、及び熱劣化寿命の検討の結果から、絶縁紙にノーメックス紙を使用すれば抵抗体の最高許容温度を250℃に選定しても、信頼性、安全性に十分な余裕のあることを確かめた。これにより、例えば最高許容温度を180℃とする場合に比べ、約30%の軽量化を図ることができた。

次に巻線の無誘導化については、当初は一方向に巻回したデスクコイルを交互に逆方向となるよう接続して、円板巻線とする構造で検討したが、力率は96%程度であった。そこで図7に示すように隣接する巻線抵抗体の電流方向を1ターンごとに逆向きとして誘導磁束を打ち消すようにした結果、残留インダクタンスを極めて小さくでき、力率をほとんど100%とすることができた。

4.3 電位振動の解析と絶縁設計

制動抵抗器は事故時に系統へ直接接続されるので、短時間定格であっても巻線はサージの侵入などによる過電圧に対し十分な絶縁強度が要求される。サージによる電位振動の計算は変圧器と同様に、図8に示す等価回路を解けばよいが、抵抗体に鋼帯を使用しており、且つ無誘導構造であることから、



巻線諸定数の把握が必要となった。静電容量は巻線寸法と対地絶縁距離などから等価エネルギー法で求められることを確認し、サージに含まれる高周波成分に対する鋼帯の残留インダクタンス特性は電子計算機による磁界解析、及びモデル巻線の実験で確認した。

5 製作及び品質管理

製作に当たっては、500kV変圧器で確立されている“EHV” (Extra High Voltage) 標示で同一の品質管理体制⁽⁴⁾を適用し、これに制動抵抗器特有の作業管理を補足してその拡充を



図9 500kV制動抵抗器電圧ユニット 線路側250kV部分を製作し、接地側は外部で分圧抵抗器を接続し衝撃電圧試験を行なった。

図った。

巻線の接続には専用機を使用し、作業者の教育をも兼ねて実地に多数の試験片を作製させ、顕微鏡による接合組織の検査、及び静的強度試験、更に油中における常温から250℃の間で繰返し通電加熱試験を実施して出来ばえ及び強度低下をチェックした。その結果、接合部は600回を超えるヒートサイクル経過後も強度低下は見られず、破断はすべて母材で生じており、組織的にも良好な結果を得た。

抵抗体は縁辺処理により切断時に生じた帰り(return)を除去するとともに、半製品時点でのさびの生じを確実に防止するため、表面処理を施し絶縁上の問題を起こさないようにした。

抵抗体と並ぶ主要材料である絶縁物に対しては、加工時のけば立ち除去、隅角部のかど取りを行ない、絶縁物の接着は部分、構造ごとに接着方法を明確に区別してボイドなどによるコロナ発生を防止した。

巻線、及び中身の組立は、500kV変圧器と同じ防塵空調室内で行ない、締付金具及びタンクには特殊塗装を施して組立時の防塵に対する注意を喚起した。

組立後の絶縁処理は、乾燥条件、水分管理などを500kV変圧器に準じて行なった。

6 部分モデルの製作及び試験

この抵抗器の工場試験には、

(1) この抵抗器が一端を接地した段絶縁構造、及び無誘導構造であるため、従来の変圧器における加圧試験や誘導試験の

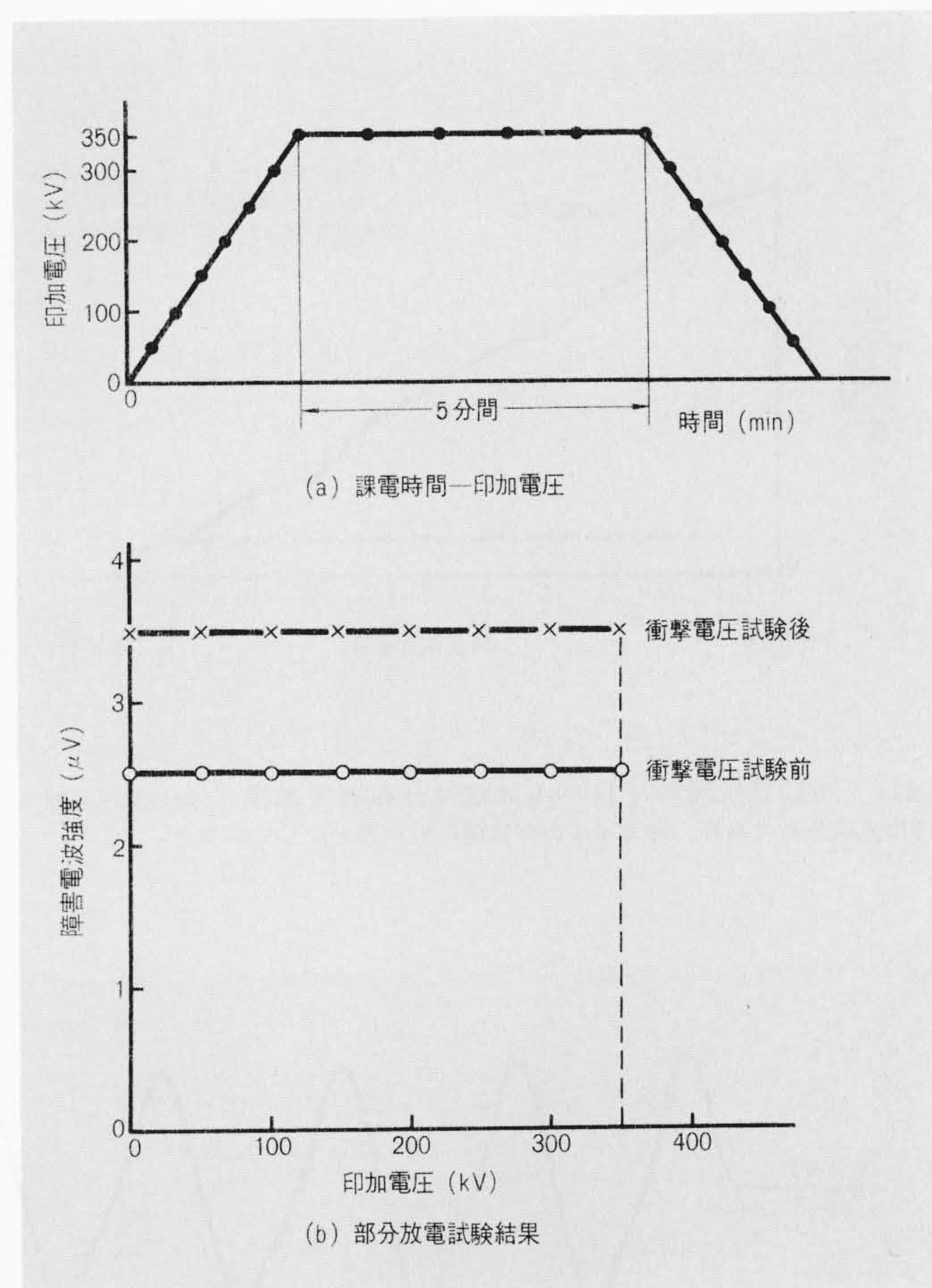


図10 部分放電試験結果 常規対地電圧×1.1倍の対地電圧を5分間印加し、コロナの発生がないことを確認した。

実施が実際上不可能であること。

(2) 短絡発電機の容量上からの制約により定格電流を1秒間程度通電するのが現状で限界であり、温度特性や過電流(短絡)強度特性の限界試験は実施困難であること。などの問題点があった。

従って、実装置の性能を十分に確認できる規模の部分モデル(電圧ユニット、電流ユニット)を製作し、破壊限界試験を含む可能な限りの試験を行ない、その安全性、信頼性を確認することとした。

電圧ユニットは、無誘導構造と絶縁構造に対する実規模での製作経験を積むとともに、絶縁破壊限界を検証することを目的とし、巻線寸法、タンクとの絶縁距離関係などを実用器一相1ユニットと同一とした。常規対地電圧での部分放電試験をも実施するため、巻線は線路端から全体の $\frac{1}{2}$ に相当する部分を製作し、引出し部分は200号絶縁とした。衝撃電圧試験時は残り $\frac{1}{2}$ 相当部分を外部の分圧抵抗器に置き換えて試験を行なった。図9に電圧ユニットの外観を示す。

電流ユニットは温度上昇と過電流(短絡)破壊強度の検証とを主目的とし、実用器と同一寸法、巻数の円板巻線を既存の短絡発電機で定格の2倍の過電流を通電し得るように構成した。

各種試験の結果、部分放電試験は図10に示すように、350kV($550/\sqrt{3}$ kV×1.1倍)5分間でコロナの発生はなく、衝撃電圧試験は2,340kV(1,800kV×1.3倍)に耐え得た。インパルス電位分布も、図11に示すように均等であった。温度上昇試験、及び過電流(短絡)強度試験は、図12に示す回路で短絡発電機の GD^2 エネルギー放出により通電した。巻線温度上昇値は

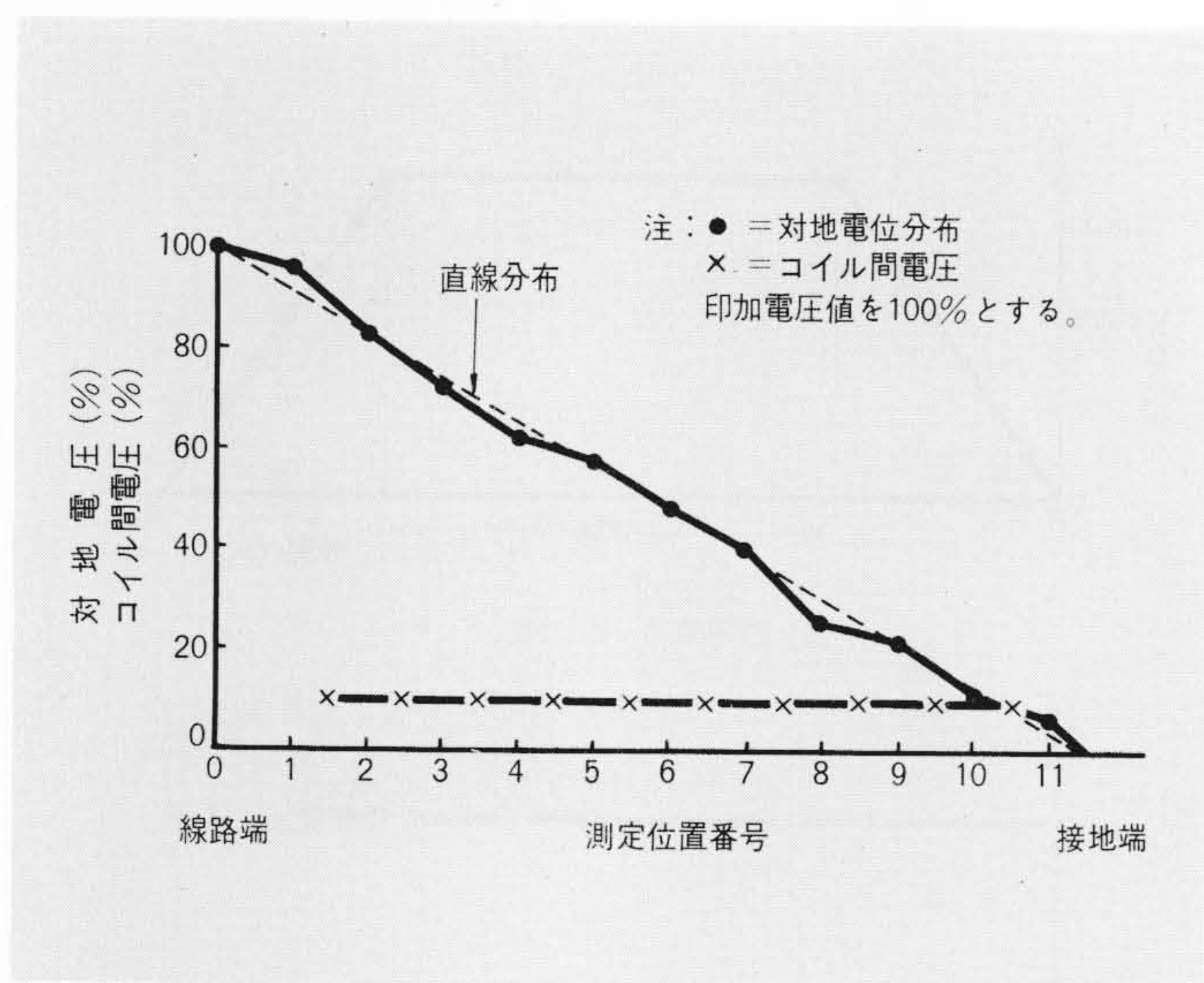


図11 制動抵抗器のインパルス電圧分布測定結果 対地電圧分布はほぼ直線分布であり、各コイルの分担電圧も均等となっている。

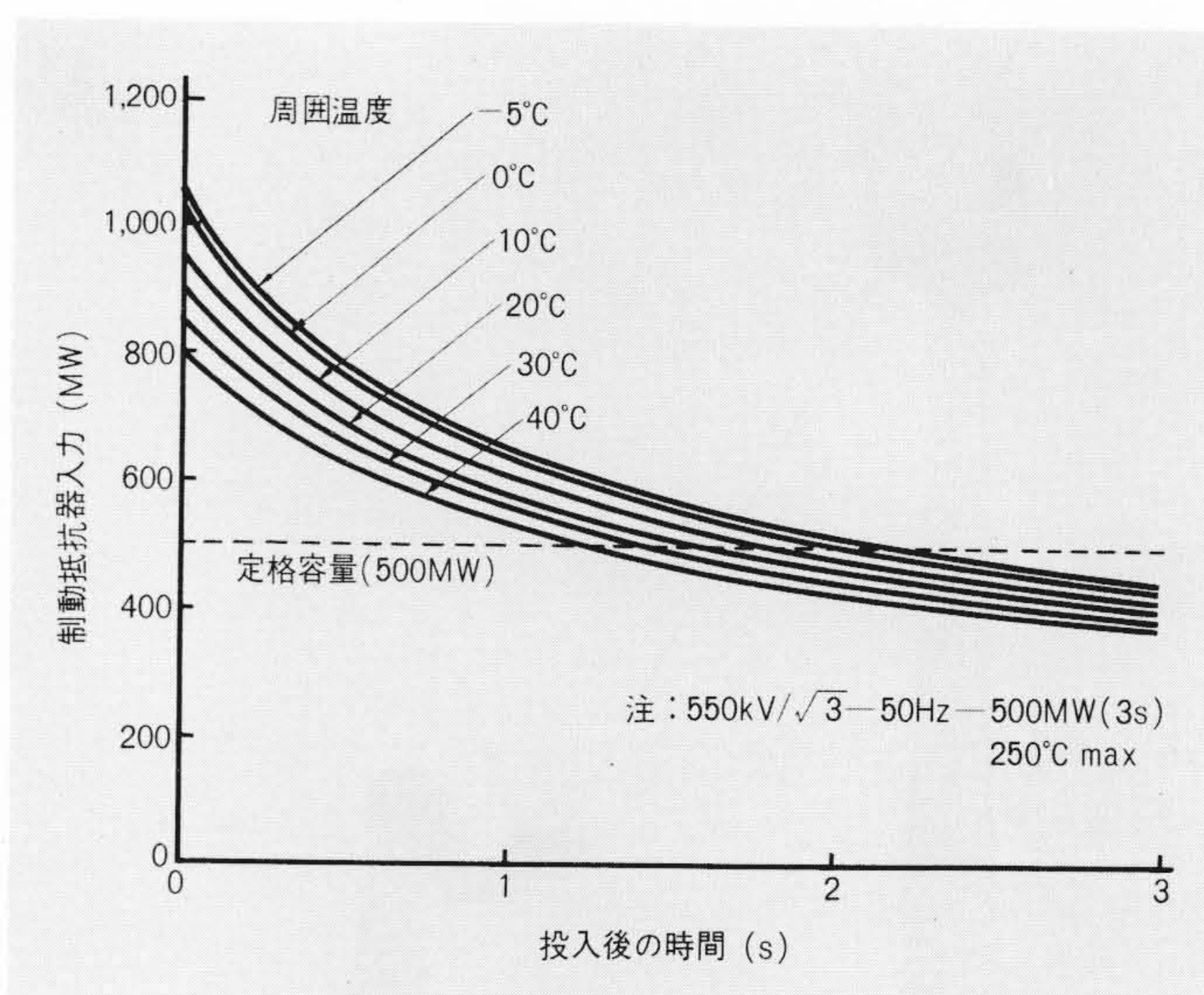


図13 500kV制動抵抗器時間—入力特性 抵抗体の温度上昇による抵抗値の増加のため、制動抵抗器の入力はしだいに減少する。定格容量は3秒間の平均容量である。

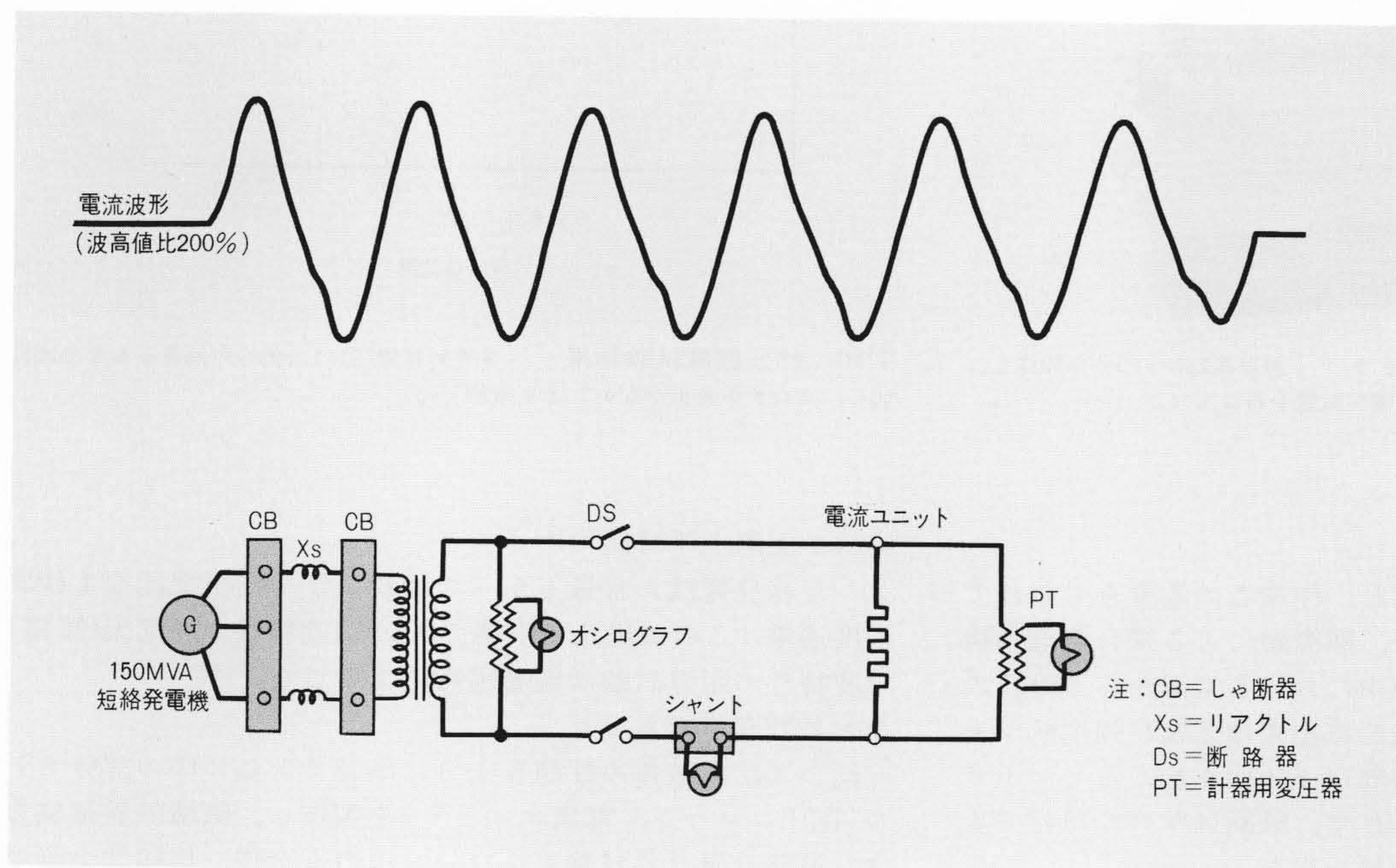


図12 温度上昇試験、及び過電流(短絡)強度試験回路 短絡発電機を定格周波数にて駆動し、蓄積した GD^2 のエネルギーを電流ユニットへ放出して3秒間通電した。

146.2degで、電流値として約15%の余裕があり、過電流(短絡)強度は定格電流の2倍に異常なく耐え得た。抵抗器力率は99.8%ではば無誘導の結果を得た。図13にこの抵抗器の時間—入力特性を示す。

なお、上記のほかには絶縁油のガス分析試験、及び試験後の解体点検を行ない、異常のないことを確かめた。更に絶縁紙の機械的強度の劣化を試験し、500kV大容量制動抵抗器として十分に実用化し得る見通しを得た。

7 結 言

国内外ともその実用例が少なく、我が国でも初めての500kV大容量制動抵抗器を開発試作し、実用性能を確認した。

制動抵抗器は、今後ますます大容量・長距離化する傾向にある電源系統の過渡安定度に対し増大効果が大きく、且つ経済性にも優れているので今後の需要増加を期待するとともに、更に製品の信頼度向上についてもいっそう努力していきたい。

終わりに、この500kV制動抵抗器の開発に際し種々御指導、御厚配をいただいた東京電力株式会社の藤本主査をはじめとする大容量制動抵抗方式ワーキンググループの各位、並びに関係者のかたがたに対し厚くお礼を申しあげる次第である。

参考文献

- (1) H. M. Ellis, J. E. Hardyほか "Dynamic Stability of the Peace River Transmission System", IEEE Trans. PAS-85, No. 6, (June 1966)
- (2) M. L. Shelton, W. A. Mittelstadtほか "Bonneville Power Administration 1400-MW Braking Resistor", T74 433-9, IEEE PES Summer Meeting & Energy Resources Conf., (July, 1974)
- (3) 吉田ほか、電気学会誌「巨大電力輸送に伴う系統安定用制動抵抗装置(SDR)の開発研究について」、91, 5 (昭46-5)
- (4) 鹿島ほか、「500kV 1,000/3MVA単巻変圧器」日立評論 55, 219 (昭48-3)