# 車両用主変圧器および高圧タップ切換器

Main Transformers and High Voltage Tap Changers for Electric Locomotives and Electric Cars Service

前 川 愛 Aiichi Maekawa 益 富 文 与 Fumio Masutomi

# 内 容 梗 概

交流電化発足以来,車両用変圧器の製作をかさねるたびに,単器容量の増大,小形軽量化,信頼性の向上,および保守の簡易化などの要求によって,新方式,新設計の採用,部品,材料の統一がはかられてきた。たとえば、ラジアルコアータイプの採用による小形軽量化,ガス封入密封形による絶縁性の向上と保守の簡易化などである。さらに高圧タップ切換方式の採用と、同装置の集約一体化による小形軽量化など、多くの開発、改良を施し、ED71形機関車用変圧器をはじめ各種電車用変圧器を完成した。

# 1. 緒 言

日立製作所は、国産第1号ED441交流電気機関車に引続き、当時わが国唯一の高圧タップ切換式のエクサイトロン式機関車ED4521を完成した。変圧器は3脚の内鉄形で、タップ切換器を内蔵し、気中開閉器は別置形であった。その後、ラジアルコアータイプを開発し、さらに高圧タップ切換器にいくたの改良を加え、変圧器本体に装備して、きわめて小形軽量化された幹線向けED71形交流電気機関車の高圧タップ切換器付変圧器を完成した。これが量産設計として採用になり、現在30両が営業運転され、引続き製作中である。また最近2形式の電車用変圧器を完成し、そのうち1形式は、量産中である。

# 2. 車両用変圧器の器種と形式

# 2.1 変 圧 器

車両用変圧器は、負荷の特異性、高ひん度の動作、振動などの過酷な条件が加わり、寸法と重量に、きびしい制限を受ける。日立製作所は、これらの条件に適するような各種の製品を完成した。第1表に最近の製作例を示す。本格的な量産期を迎えるに当り、その経過と、主要製品の概要について述べ、参考に供する次第である。

# 2.1.1 H種絶緣乾式変圧器

車両用変圧器としてH種絶縁乾式変圧器を使用することは、構造、保守ともに簡単になるので、耐熱、耐湿性はもちろん、ワニス皮膜の耐振性について、モデルコイルの走行振動試験を試み、その結果は良好であったが、温度上昇と絶縁耐力の点に難点がある。すなわち、容量の増加にともなう損失の増加はほぼ¾乗に、また冷却面積はほぼ½乗に比例する。このため許容温度が拡大しても冷却面積に不足をきたし、大形化は免れない。また、じんあいが冷却効果を阻害することも考えられる。絶縁上では、衝撃比が、油入器の2.2~2.4 に対し、乾式器は1.0~1.2 程度で、衝撃電圧に対する宿命的な弱点と、車両特有の導電性のじんあいによる絶縁性の低下が懸念される。以上の2点により、車両用としての乾式器は、低圧回路用を除き完全な収じん法または冷却媒体として有効な非爆発性ガスを利用しない限り、不適当と考える。

## 2.1.2 油入変圧器

油入器の使用をためらわせるものは、絶縁油に関する保守と大形 重量化に対する思惑によるものと思う。最近の絶縁油は、きわめ て良好な絶縁特性を有し、密封構造とすることによって、初期の

第1表 最近の日立車両用変圧器

仕様	車両	ED 461 形 交直両用機関車	ED 71 形 交流機関車	401 系 交直両用電車	493 系 交直両用電車	
主変圧器仕	定格容量	1,540/2,170 kVA	2,490/3,320 kVA	807 kVA	1,300 kVA	
	定 格	連続定格	連続定格	連続定格	連続定格	
	定格電圧	20 kV/2,080 V	20 kV/ 1,205~57V	20 kV/ 1,820 V	20 kV/1,832 V	
	相数,周波数	単相 50∼	単相 50∼	単相 50∼	単相 50/60∼	
	形 式	油入,密封形ラジアルコアータイプ	油入, 密封形 ラジアルコアー タイプ	不燃性油入, 密封形 ラジアルコアー タイプ	不燃性油入, 密封形 ラジアルコアー タイプ	
	冷却方式	送油風冷式	送油風冷式	送油風冷式	送油風冷式	
	その他	三次容量 460 kVA	単巻容量805kVA 三次容量146kVA 四次容量420kVA		三次容量 50 kVA 四次容量 10 kVA	
様	内蔵品, 付属品	20 kVA 変圧器 変流器	変 流 器	7kVA 変圧器 変流器	変流器	
	変圧器総重量	4,300 kg	7,390 kg	3,200 kg	4,200 kg	
	おもな取付製品	1	高圧タップ切換器 全装置			
	整備総重量	同上	8,490 kg	同上	同 上	
	動力方式	エクサイ トロン式	エクサイ トロン式	シリコン整流器式	整 流 子電 動機式	
車	電気方式	単相交流 20 kV 50∼	単相交流 20 kV 50∼	単相交流 20 kV 50∼	単相交流 20kV 50/60∼	
両の方式	電圧制御方式	抵抗制御	高圧タップ切換	抵抗制御	抵抗制御	
	整流回路方式	単相全波形	単相全波形	二相ブリッチ形	<u> </u>	
	連続定格出力	1,400 kW	1,900 kW	720 kW	1,160 kW	
	機関車総重量	64 t	64 t			

注:変圧器総重量には、冷却器、送風機、ポンプおよび油を含む。

状態が長期間維持され、保守の手数はほとんどかからない。とくに不燃性油は耐酸化性が大きく、安定性においては鉱油以上である。ただ鉱油に比べ、高価であることと比重の大きいことが欠点である。

油入形は乾式に比し絶縁設計が容易で、強制冷却の採用によって効果的な冷却ができるので、小形軽量化に大きな効果をもたらす。以上のように絶縁、冷却、寸法重量の諸点より車両用には、油入変圧器が適すると考える。

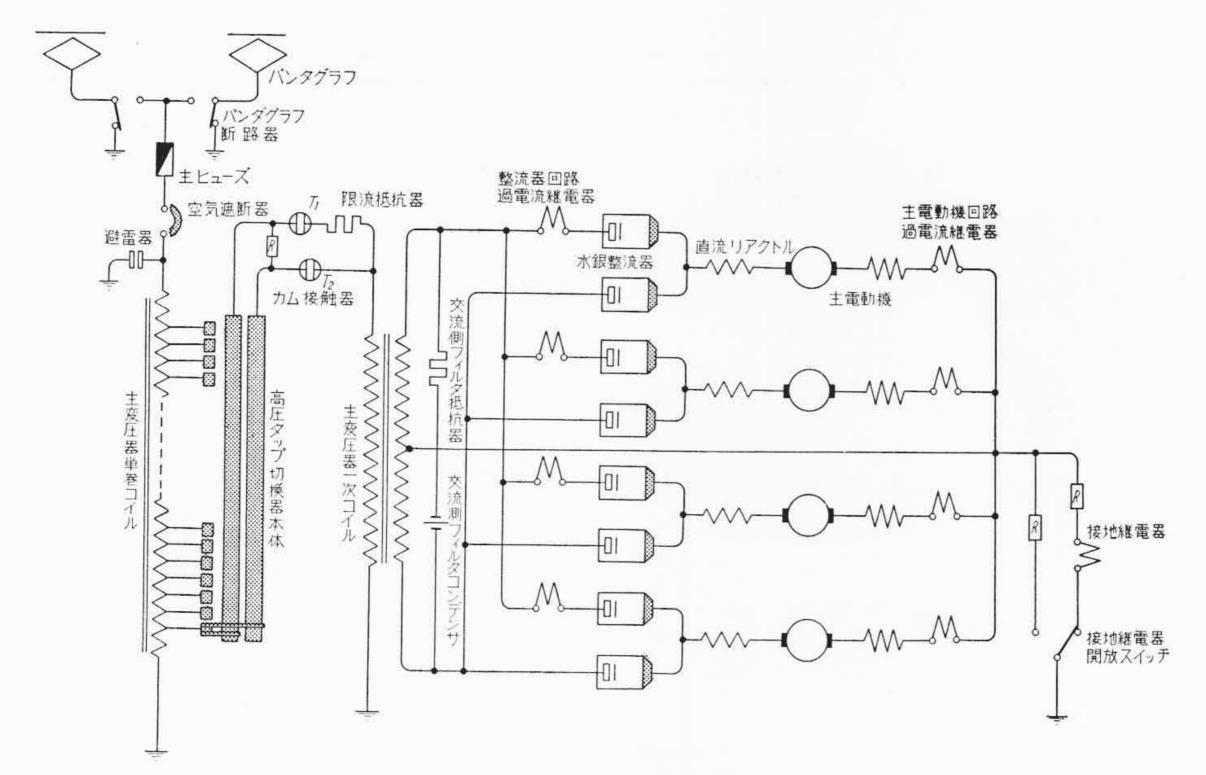
## 2.1.3 冷 却 方 式

小形軽量化の目的で、主として送油風冷式が用いられるが、吸 気、排気は、対車風速の小さい場所を選び、走行気流の干渉を避 けなければならない。これは車両の高速化の程度によっては今後 検討を要する問題である。

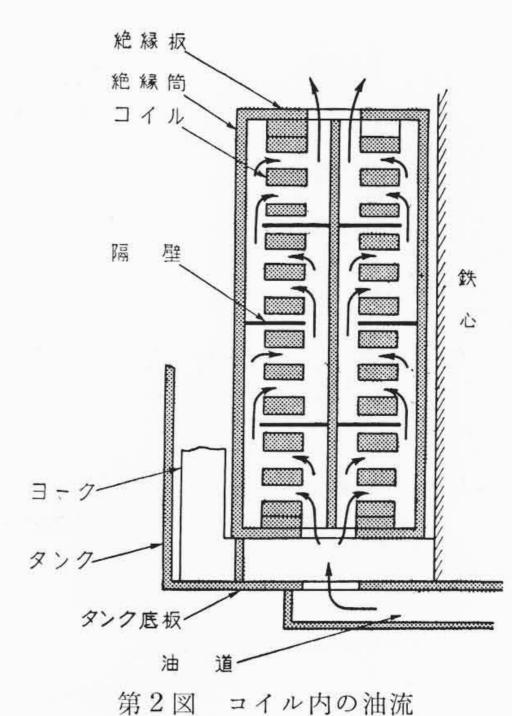
送風機を省略し、走行風を冷却に利用する送油自冷式を採用し、 補機損と騒音の低減、軽量化をはかることも一策ではあるが、実 施に当っては、車体周辺の対車風速、走行抵抗と風の取入れ効率 などの関係について、今後の研究にまつところが多い。

<sup>\*</sup> 日立製作所国分工場

<sup>\*\*</sup> 日立製作所水戸工場



第1図 路 主 線 口 結



第2図

## 2.2 タップ切換方式

高圧タップ切換方式は,第1図のように,主コイルのほかに単巻コ イルを必要とする。したがって寸法重量が若干増すが高圧巻線で密 調整を行いうるので変圧器の設計と,加速特性の選定上,大きな自 由度がある。一方低圧タップ切換方式においてはノッチ電圧は,低 圧巻線の巻数に左右され、また大電流の二次コイルから多数のタッ プを引出すことは、構造的に占積率の悪い変圧器となる欠点があ る。タップ切換器自体は,高圧小電流のほうが,油中絶縁の採用によ って、構造、配線、保守の簡易化と小形化に効果的である。

車両出力増大化のおり, 高圧タップ切換方式が, 広く用いられる ゆえんは, これらの点にあると考える。

#### 2.3 内部構造の形式

ラジアルコアータイプは、各コイルが同心円筒状に配置され、第 2図のように油が流れるので、コイル全面が冷却に有効である。ま た, 円筒状鉄心に, 全周均一にコイルが内接するので, 電位傾度が 良好になり、コイル間は絶縁筒を使用できるので絶縁が容易であ る。

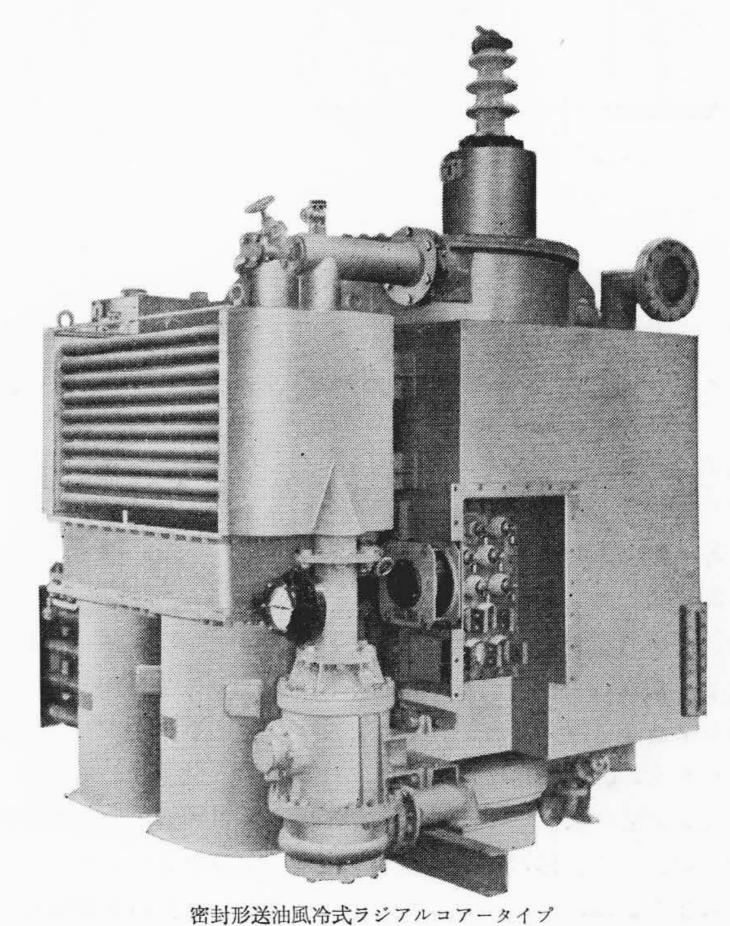
機械的強度は, 円板状コイルのため放射方向に強いことはいうま でもなく、軸方向も、放射状ヨークにより全周等間隔に締付けられ るので、十分な強度を有している。

## 3. 機関車用変圧器

すでに述べたところにしたがって製作された代表的製品のED71 形機関車用変圧器について, 設計, 製作上の概要について述べる。 本器の外観を第3図に示す。

## 3.1 設計条件

- (1) 変圧器の温度上昇の時定数は、主電動機のそれより大きい ことと、実際には変化の多い間歇負荷のため、RMS電流値によ り連続定格容量を決定すべきで、その換算定数を 0.7 とした。
- (2) 周囲温度は、従来の車両用機器にならって、25°Cとした。 ただし冬期は10°Cとし、暖房負荷による温度上昇分を吸収した。
- (3) 絶縁階級は,標準規格 JEC-120 に準拠した。ただし衝撃波 耐圧値は全波 (1×40 μs) 120 kV 裁断波 140 kV と定められた。
- 電圧調整方式は、第1図の高圧タップ切換方式とした。
- 架線の定格電圧は 20 kV, 変動範囲 22~16 kV とし、単巻 コイルの出力側最高タップ電圧は18kVとした。
- (6) 定格容量は、架線電圧が18kVに低下したときも、機関車



第3図 ED71形機関車用 2,490/3,320/146 kVA 主変圧器

出力を保証するため、定格タップ電圧の90%において全出力をう るような容量に, 補機巻線容量を加算した値を定格容量とした。 (7) 寸法, 重量は, ぎ装上より床面積 1,650 mm×2,390 mm (タ ップ切換器を含む)高さカバー下 1,950 mm,変圧器全装備重量 7,400 kg タップ切換器 1,100 kg の制限を定めた。

#### 3.2 仕

式 屋内用油入密封形送油風冷式 ラジアルコアー形 定格容量 2,490/3,320/146 kVA

相 数 単相

周 波 数 50~

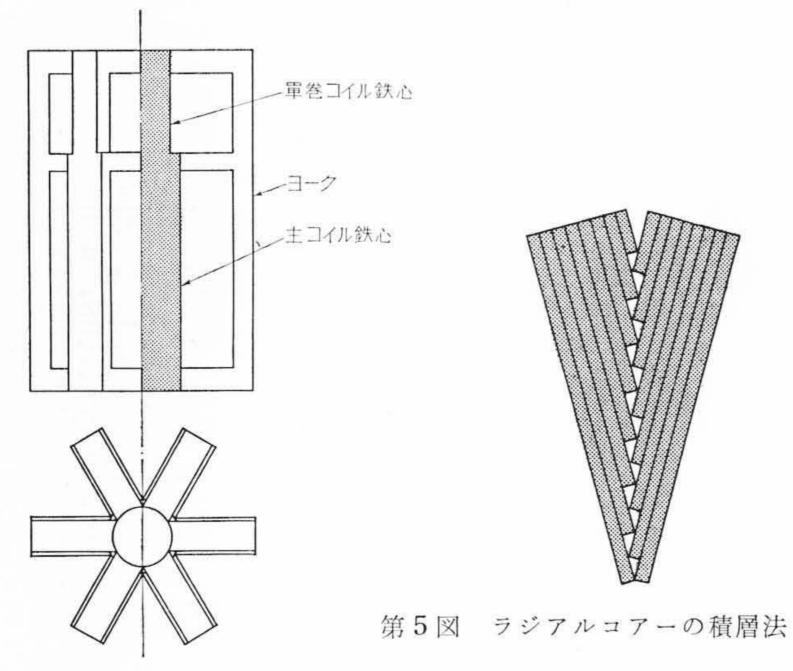
圧 定格一次電圧 電  $20 \,\mathrm{kV}$ 

> 一次電圧変動範囲  $16 \sim 22 \, \text{kV}$

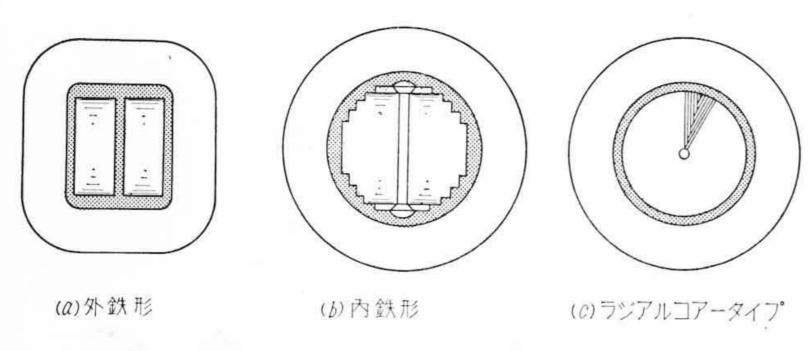
定格二次電圧

 $1,075\,\mathrm{V}\times2$ 

定格三次電圧 465V(補機電源用)



第4図 ラジアルコアーの構造



第6図 各形式の鉄心とコイルの関係

定格四次電圧 1,570V(暖房電源用) 420 kVA

定 格 連続

周囲温度 25℃

総 重 量 7,390 kg(タップ切換器不含)

#### 3.3 構 造

#### 3.3.1 鉄心構造

鉄心構造は第4図に示すとおり放射状積層法により円形の断面をもった鉄心を中心とし、周囲に平行積層のヨークを放射状に配置し、上下2段に分れている。上段は単巻コイルを、下段には主コイルをおさめるもので、それぞれの容量に合理的な断面積とするため、直径または積厚みをかえている。すべて方向性珪素鋼帯を用い、鉄心自体の軽量化とコイル径の縮小をはかっている。鉄心の積層法は、第5図のように、幅の異なる数種の珪素鋼板をY字形に重ね合わせた扇形素子を、多数組合わせて円形に成形する。成形後締付けたまま接着剤を真空注入し固着して構造の強化と騒音の防止をはかっている。

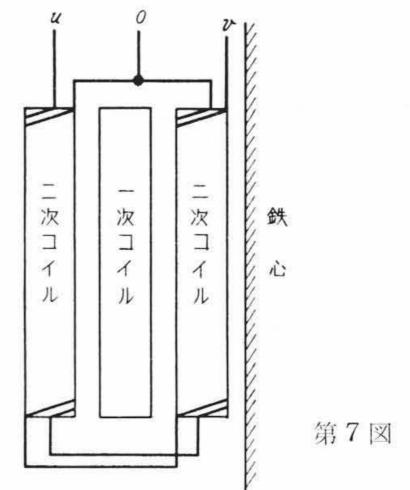
鉄心とコイルは、第6図のような関係にあるので、コイル内法面積を基準とし、形状の適否を含めた占積率で比較すれば、第2表のようになり、ラジアルコアータイプがすぐれていることがわかる。鉄心とヨークは、バットジョイントで、衝合面に、絶縁紙をはさみ、接着剤を塗布したうえヨークを鉄心の中心に向って締付けている。

#### 3.3.2 巻 線 構 造

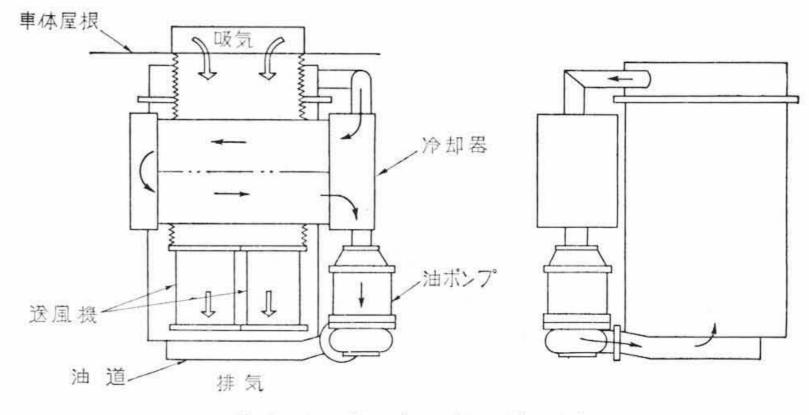
紙巻平角電線を用い、単巻コイルは、edgewise 円筒状巻き、主コイルの一次側は円板状コイル、二次側はら旋状コイルである。 絶縁油は第2図のように、必ずコイル水平面を流れるので、全表面が冷却に寄与し、効率はよい。コイルの配置は、第7図のように、二次コイルを2分割し一次コイルを挟む形として、電圧変動率を小さくするよう考慮を払った。また二次コイルの内外層を図

第2表 コイル内法面積を基準とした鉄心の各形式 における幾何学的占積率の比較

形		式	幾何学的占積率			
外	鉄	形	$0.74{\sim}0.76$			
内	鉄	形	$0.74 {\sim} 0.82$			
ラジフ	ルコアー	タイプ	$0.84 {\sim} 0.9$			



第7図 主コイルの配置図



第8図 冷 却 経 路 図

示のように直列に結び、0-u 相と 0-v 相の転流リアクタンス、および抵抗値を等しくし陽極電流の平衡をはかっている。

#### 3.3.3 冷 却 構 造

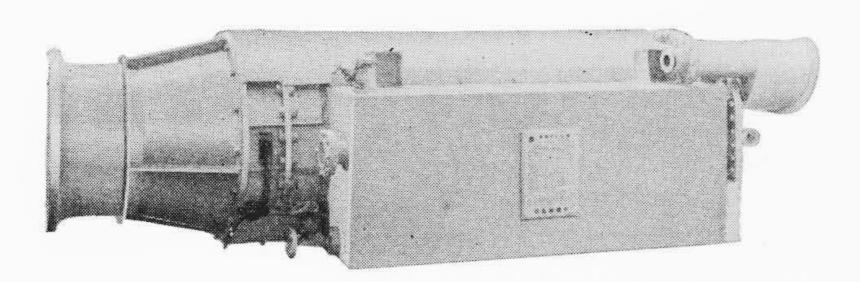
絶縁油は、 $0.75 \,\mathrm{m}^3/\mathrm{min}$ 、三相  $440 \,\mathrm{V}$ 、 $2.2 \,\mathrm{kW}$  の電動油ポンプで、タンク下部に流入し、コイル間を上昇して上部より冷却器、ポンプを経てふたたびタンクに送り込まれる。タンクに送り込まれた油は、コイルを包む絶縁筒内に集中する構造のため、全油量がむだなく冷却効果をあげている。冷却器はフインつきパイプで構成され、 $70 \,\mathrm{m}^3/\mathrm{min}$  三相  $440 \,\mathrm{V}$   $1.5 \,\mathrm{kW}$  の送風機  $2 \,\mathrm{ch}$  とより、車体屋上より吸気して冷却し、床下に排気する。第8 図にその経路を示す。

#### 4. 電車用変圧器

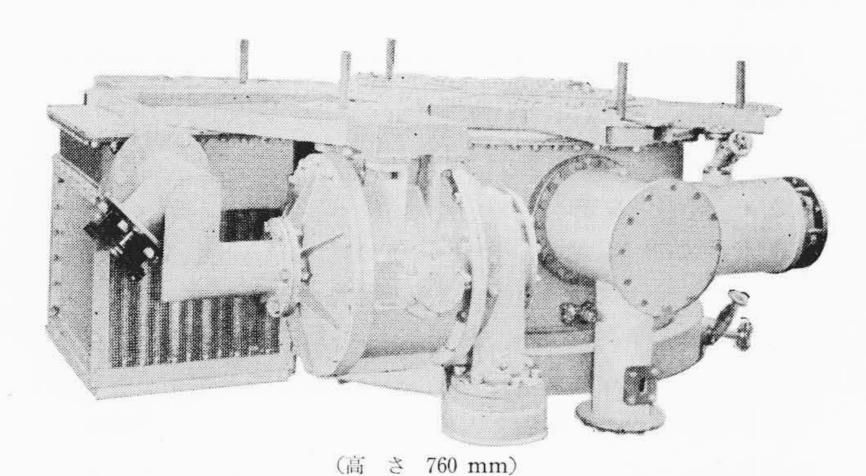
電車用変圧器は機関車用と、負荷特性が異なるため容量決定のRMS値換算定数は、0.9~1.0である。床下に架設されるので高さの制限がきびしく、乗心地の点から防振防音が要求され、安全上防火性が重視される。

#### 4.1 高さの制限と変圧器の形式

高速,安全運転には低床車が好ましく,高さの低い床下機器が要求される。これに適する形式は,横形にしたセンタコアー形と,ラジアルコアー形である。一例をそれぞれ 第9,10 図 に示す。容量増大に伴う寸法増加は,前者はおもに長さの方向に延び後者は直径が大きくなる。したがって両形式は,容量により,性能ぎ装上の配置を考慮して,使い分けすることが必要である。



第9図 単相20kV,632kVA直接式交流電車用変圧器



第10図 単相20kV, 1,300kVA直接式交直両用電車用変圧器

# 4.2 構 造

電車用変圧器の高圧側引出しは、高圧ケーブルを用い、ケーブル ヘッドをタンクと一体の油入接続箱内に差し込む構造である。接続 箱は本体と隔離されているので、本体の密封を破ることなく、ケー ブルヘッドの抜差しができる。この方式はがい管と裸帯電部が露出 していないので破損のおそれもなく、安全である。

防振,防音に対しては磁束密度を適度に選び,変圧器自体の振動, および騒音を低下したうえ,防振ゴムを用いて,車体への振動の伝 達を遮断する構造とした。

絶縁油は日立不燃性油, ヒタフネンを用い, 低温においても安定 な塩酸抑制剤を添加していることが特長である。

### 5. 高圧タップ切換器

車両の出力増大にともない,高圧タップ切換方式が有利なことは, 既述のとおりである。日立製作所は,既納のED4521号車で,この 方式を開発し,好成績を納めた経験と,合理的な設計を用い,ED 71形機関車用タップ切換器を完成し,3項の変圧器に取付けてある。

#### 5.1 仕 様

主要諸元はつぎのとおりである。

定格電圧

 $20 \,\mathrm{kV}$ 

定格電流

150 A

タップ数

25

タップ切換時間

制御回路電圧 100V において

1 タップ切換え 0.6 秒

重量

1,100 kg(油量 300 l を含む)

限流抵抗器

 $4.6 \Omega$ 

操作電動機

MH96形

100V 750W 1,500 rpm 直流分卷 補極付閉鎖自己通風形, 15分定格

#### 5.2 構 造

第1図の主回路結線略図に示すとおり、車両用の高圧タップ切換器は主変圧器単巻コイルの各タップに接続されるセグメントと集電部よりなる本体と、本体のタップ切換えに際し、交互に開閉して負荷時電圧切換を行う2個の気中遮断器  $T_1$ ,  $T_2$ および電圧切換に際

しタップ間の短絡電流を制限する限流抵抗器を取りまとめる必要 がある。

本器は1タップの切換時間を速くするために,気中遮断器には油中本体と機械的に連動されたカム接触器を用いた。機械室床面から天井までの高さ、床面積、重量、主変圧器への取付け方法および保守点検などを総合して検討した結果、第11図に示すとおり、本体は油入縦形直線スライダ式とし、本体側面に3個のブッシングおよび2個の支持がい子を設けてカム接触器と抵抗器用のフレームを支持し、上部に駆動装置、コンサベータおよび放圧弁を置き、本体前面にシリカゲルブリーザおよびノッチ追従制御用補助抵抗器を配置した。

またカム接触器と反対の廊下に面して,点検蓋,ノッチ指示板を おき,手回しハンドルも取付くようにした。

車両用タップ切換器は切換速度の速いこと,堅ろうな耐振構造であることは勿論,動作ひん度が著しく大きいことが特長である。タップ切換え回数は力行だ行ごとに約50回の切換えが行われるので,年間には200万回から300万回程度に達するものと考えられる。従って,特に油中部分は常時点検できないから経年変化のない支持方法とするほか,組立調整,浄油清掃作業が容易に行える構造とした。

油中接触子には種々の方式のものがあるが,タップ間ピッチを最も短く設計できる分割刷子形を採用した。

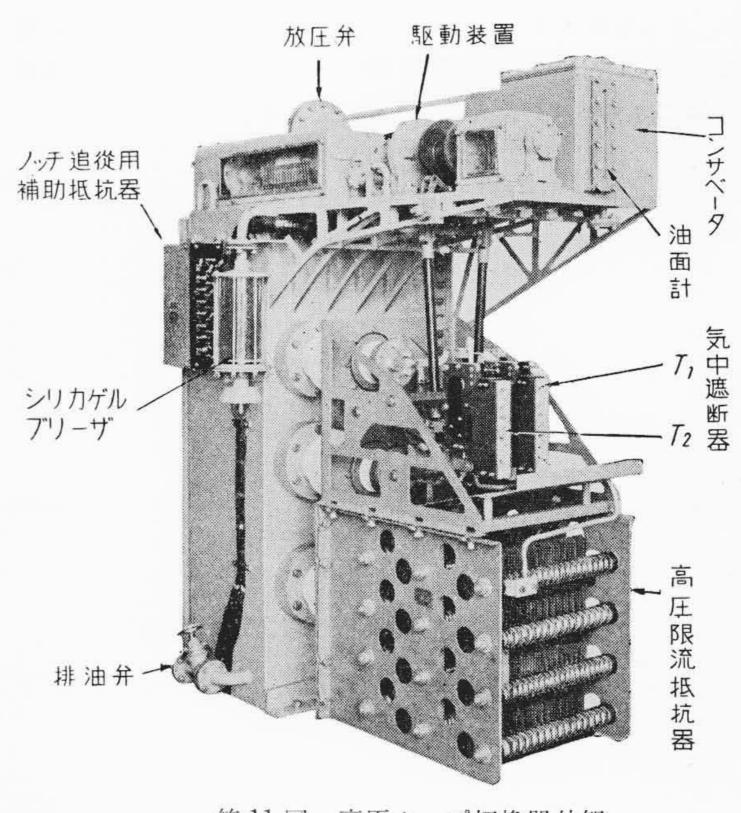
# 5.2.1 対 地 絶 縁

油中部分および気中フレームの対地絶縁にはすべてがい子絶縁を採用した。なおカム接触器および高圧限流抵抗器組立品の重量約200 kg を片持支持するブッシングおよび高圧支持がい子は車両振動に対して安全のためがんじょうな構造にするとともに剪断応力の高い生地を用いた。

#### 5.2.2 タップ間絶縁

単巻コイルの各タップに接続され摺動されるセグメントの絶縁 支持方法は、簡易な構造にするためセグメントを埋込み成形した セグメントモールドを用いた。セグメントモールドはおのおの両 端および中央をがい子に固定し、取付けを強固にした。

第3表は試験のため特に数箇月間気中に放置したセグメントモールドのタップ間耐電圧試験結果を示す。第12回は種々の条件で試験したタップ間の電圧波頭長曲線を示す。これらはいずれも寿命試験後の廃油を用いて実測した値を示す。

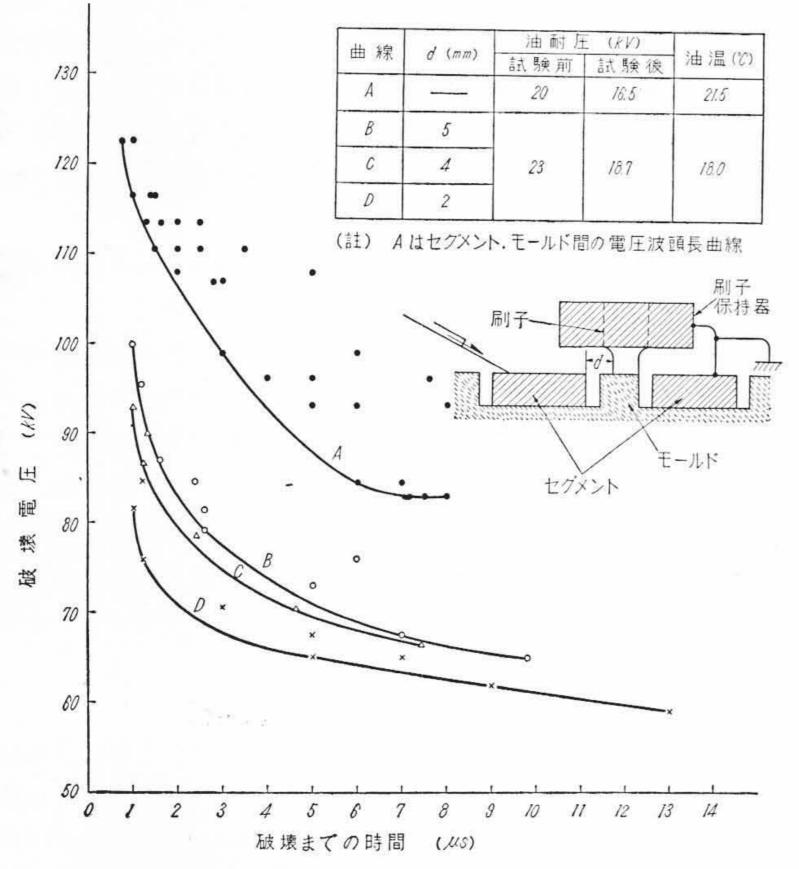


第11図 高圧タップ切換器外観

第3表 モールドのタップ間耐電圧試験結果

セグメントNo.	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8
油中破壊電圧 (kV)	20.0	27.0	28.0	26.0	26.5	27.0	30.0

注: 温度 12°C, 湿度 52%, 油耐圧 25 kV

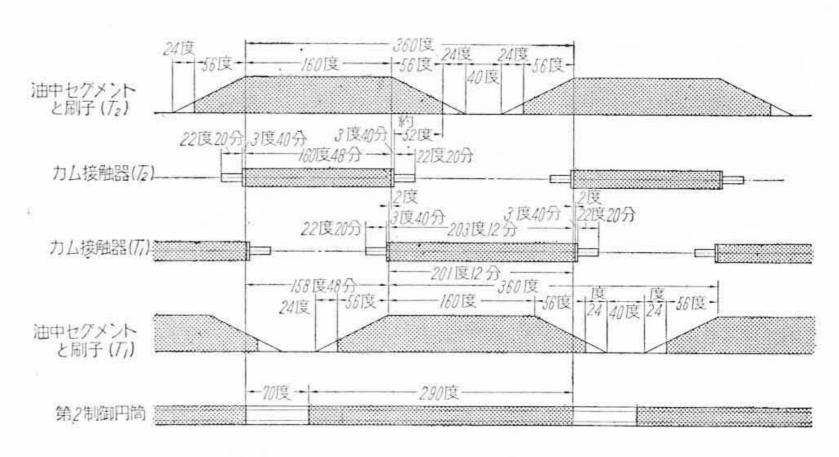


第12図 種々の条件で試験した電圧波頭長曲線 (曲線は実測値中の最小値を結んだものである)

#### 5.2.3 油中接触子

刷子の摺動面材質には変圧器油中の摺動摩耗が少なく熔着かじりを発生しない特殊銅合金を用いた。摺動部分の摩耗は刷子と被摺動セグメント間,刷子と導電板間,およびスライダ機構の操作ネジと雌ネジ間の工作精度,仕上面の状態と材質の選定の良否にかかる問題である。これらにつき十分検討を加えたほかタップ切換器組立後の刷子保持器と被摺動セグメント面との平行度は 0.3 mm以下とした。以上のような工作により製作した結果,摺動部分の摩耗はきわめて少なく所期の成果をあげることができた。

なお、カム接触器  $T_1$  あるいは  $T_2$  の単巻コイル側の回路は、電気的にフロートしないよう、第1図に示したようにカム接触器  $T_1$ ,  $T_2$  間に適当な外部抵抗をそう入してある。



第13図 カムダイヤグラム

#### 5.2.4 気中遮断器

制御円筒の回転角度で示したカムダイヤグラムが 第13 図 であり、カム接触器は開極後油中接触子が離れるまでの52度 4.3~(1タップ切換え 0.6秒)以内に遮断完了するよう計画した。機関車完成後主変圧器と組合わせ種々の条件で試験した結果、遮断時間は 0 ないし 1.2~ 間に分布するという結果を得た。カム接触器はノルマルクローズ形を用い、可動子は軽量化し絶縁ロッドを通じてカムと連動せしめた。またアークシュートの一部にはジルコン板を用いるなど高ひん度使用に対処している。

#### 5.2.5 高圧限流抵抗器

抵抗値はカム接触器の遮断責務を軽減するとともにノッチ進めに対しての  $T_1$  側集電時の電圧降下を小さくするように選んだ。 容量は上り10%起動繰返し2分間隔3回および平坦線における起動5分間隔無限回の仕様を満足するよう設計されている。

#### 5.2.6 駆 動 装 置

動作速度を速くするため 750W 電動機を用いたほか主要部分は 平歯車およびかさ歯車を用い、すべての軸端にはボールベアリン グを用いて効率を高め長寿命化をはかっている。

## 6. 結 言

試作開始以来数年,多くの製作実績を経て車両用変圧器の方向が 定り,東北本線において,着々貴重な実績があげられている。今後 はさらに合理的,経済的な仕様のはあくに努め,いっそうの小形軽 量化と信頼性の向上をはからなければならない。ことに高ひん度の 動作をするタップ切換器の使用実績および保守については,今後の 営業運転の結果にまつべきもの多いと考える。終りに臨み,ご指導 をたまわった日本国有鉄道臨時車両設計事務所,工作局,運転局, ならびに現地のご関係各位に深甚な謝意を表する次第である。