

電気車用新形リボン抵抗器

New Ribbon Type Resistor for Electric Rolling Stock

山崎 佐喜之*
Sakishi Yamasaki

内 容 梗 概

連続带状抵抗材料を角渦巻形あるいは波形にフラットワイズに加工して抵抗エレメントとし、特殊耐熱性がい子によりささえる構造とした新形リボン抵抗器二種を開発した。この抵抗器は従来のものより高温での使用が可能で、軽量で大容量とすることができて、従来のマイカ絶縁物を使用せず最少部品数で構成されたものとなっている。

1. 緒 言

電気車の出力が増大し高速化すればするほど、発電ブレーキのための抵抗器を主体としたいいわゆる主抵抗器の熱容量が増大する。

従来主抵抗器としては、グリッドやエッジワイズリボンが使用されている。グリッド形は抵抗体自身さらに高温で使用できるにもかかわらず機械的接触部分を通電することと、電気的絶縁にマイカを使用しているために、小形軽量化が不可能であった。またエッジワイズリボン形は、構造上リボン抵抗体内の温度上昇が不平衡となり占積率も悪く、比較的寸法の大きな抵抗材料の加工が困難で、大容量のものとしては不適當であった。

今回開発した新形リボン抵抗器は、前述の欠点を解決した構造と性能を有するもので、機械的接触部分がない連続带状抵抗材料を角渦巻形か波形にフラットワイズに加工して抵抗体とし、それを特殊耐熱がい子によって支持する構造とした。したがって抵抗体はさらに高温で使用でき、温度上昇も平衡し、大容量に適するものとなし得た。以下にその特長について述べる。

2. 電気車用抵抗器としての負荷

電気車用抵抗器の主体をなす起動あるいは電気ブレーキ抵抗器の熱容量は次の諸条件によって決定される。

- (1) 線路条件—駅間距離、こう配とその距離および曲線など
- (2) 運転条件—運転スケジュール、最高電気ブレーキ初速度と終速度、抑速ブレーキのときの速度と時間あるいは距離
- (3) 車両条件—車両編成と重量、最大けん引荷重あるいは乗客、主電動機の容量、加減速度、主電動機の制御方式（直並列制御の有無、自動か非自動か、そのほか特殊条件）

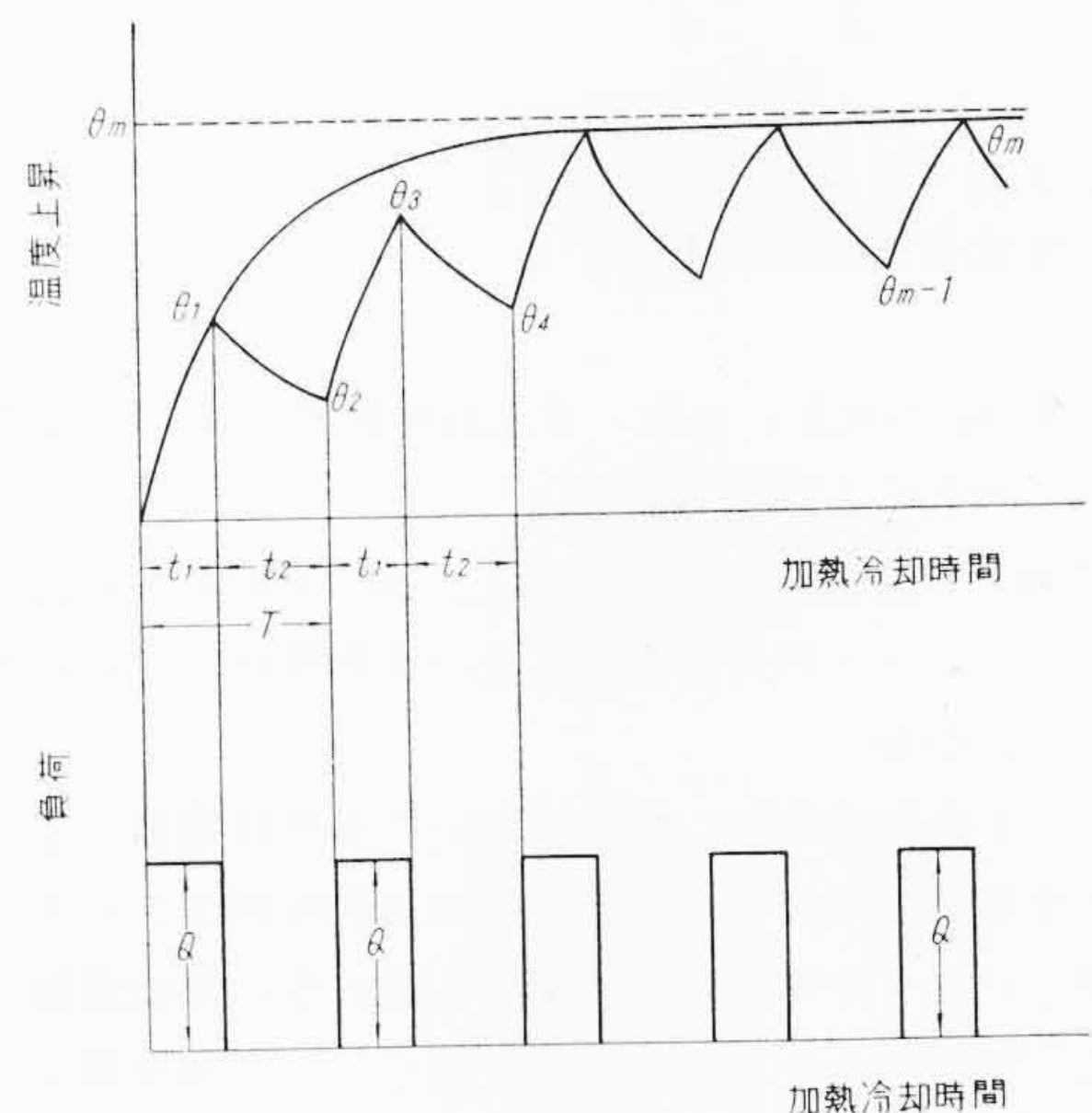
さらに冷却方式、設置場所などを考慮して製作する必要がある。

主抵抗器の熱容量は実際には車両の運転される時間に比べて、主抵抗器の熱時定数が短いために、最も苛酷な特定の線路区間での運転と等価な一定負荷で一定の時間ピッチで使用した場合とほぼ等しいと考えてよい場合が多い。もちろんこのほかに車両の入換えや特定ノッチにおける保持などの特殊条件を満足する必要がある。

抵抗器が一定負荷で一定の時間ピッチの間欠負荷で使用されたときの所要重量は、一般に第1図を参照して(1)式により示される。

$$G = \frac{Q t_1}{J C \theta_m} \cdot \frac{z}{t_1} \left(1 - e^{-\frac{t_1}{z}} \right) \frac{(1 - e^{-\frac{t_1+t_2}{z} \cdot \frac{m+1}{2}})}{(1 - e^{-\frac{t_1+t_2}{z}})} \quad (1)$$

* 日立製作所水戸工場



第1図 温度上昇曲線

G : 抵抗エレメントの所要重量

Q : 抵抗エレメントでの損失

J : 熱の仕事当量

C : 抵抗エレメントの比熱

θ_m : 最終温度上昇

z : 抵抗エレメントの熱時定数

t_1 : 加熱時間

t_2 : 冷却時間

m : 奇数

(1)式より $t_1 = \infty$, $m=1$ および $m=\infty$ のときは(2)~(4)式と与えられる。

$$t_1 = \infty \text{ のとき } G = \frac{Q}{J C \theta_m} z \quad (2)$$

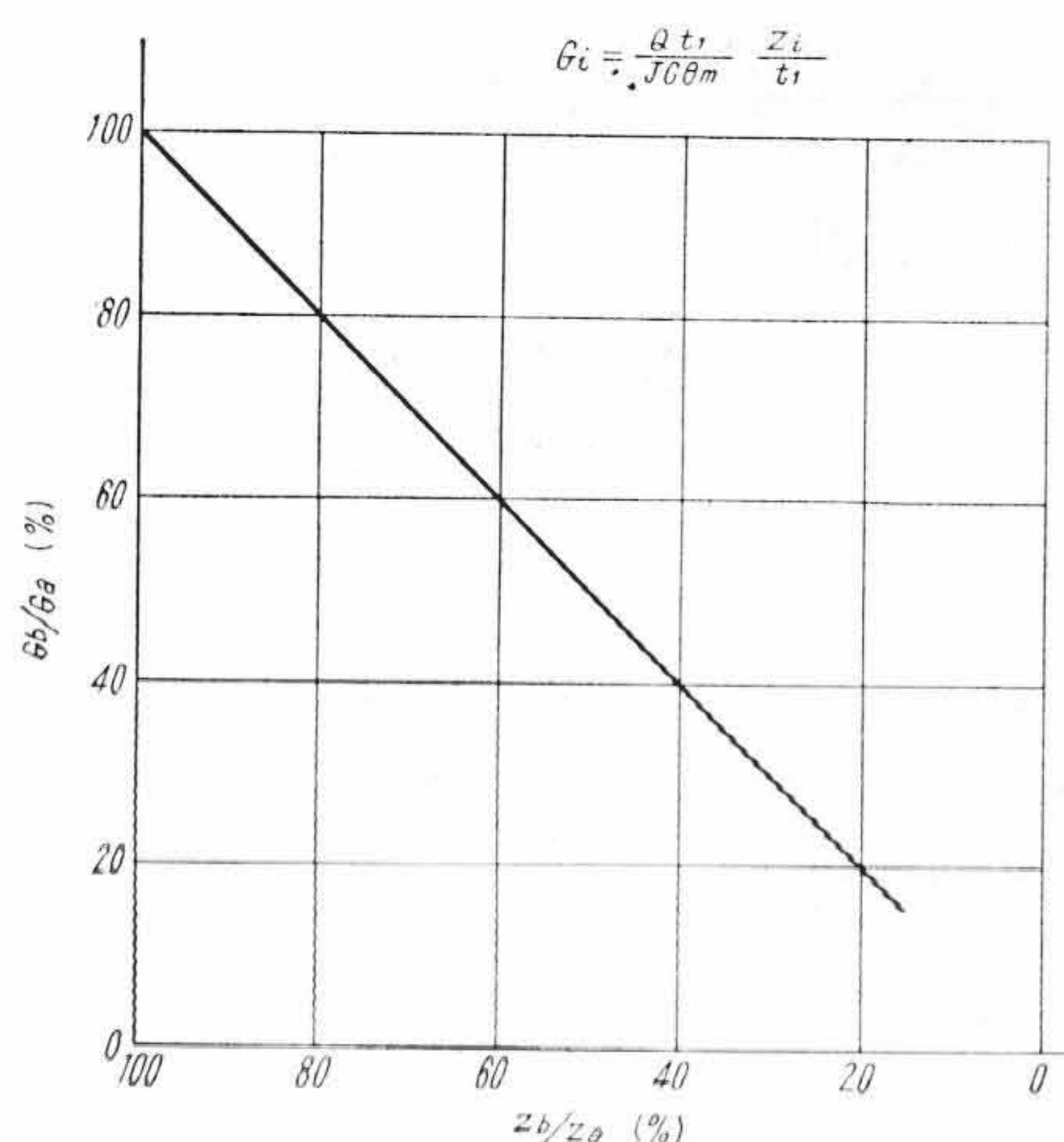
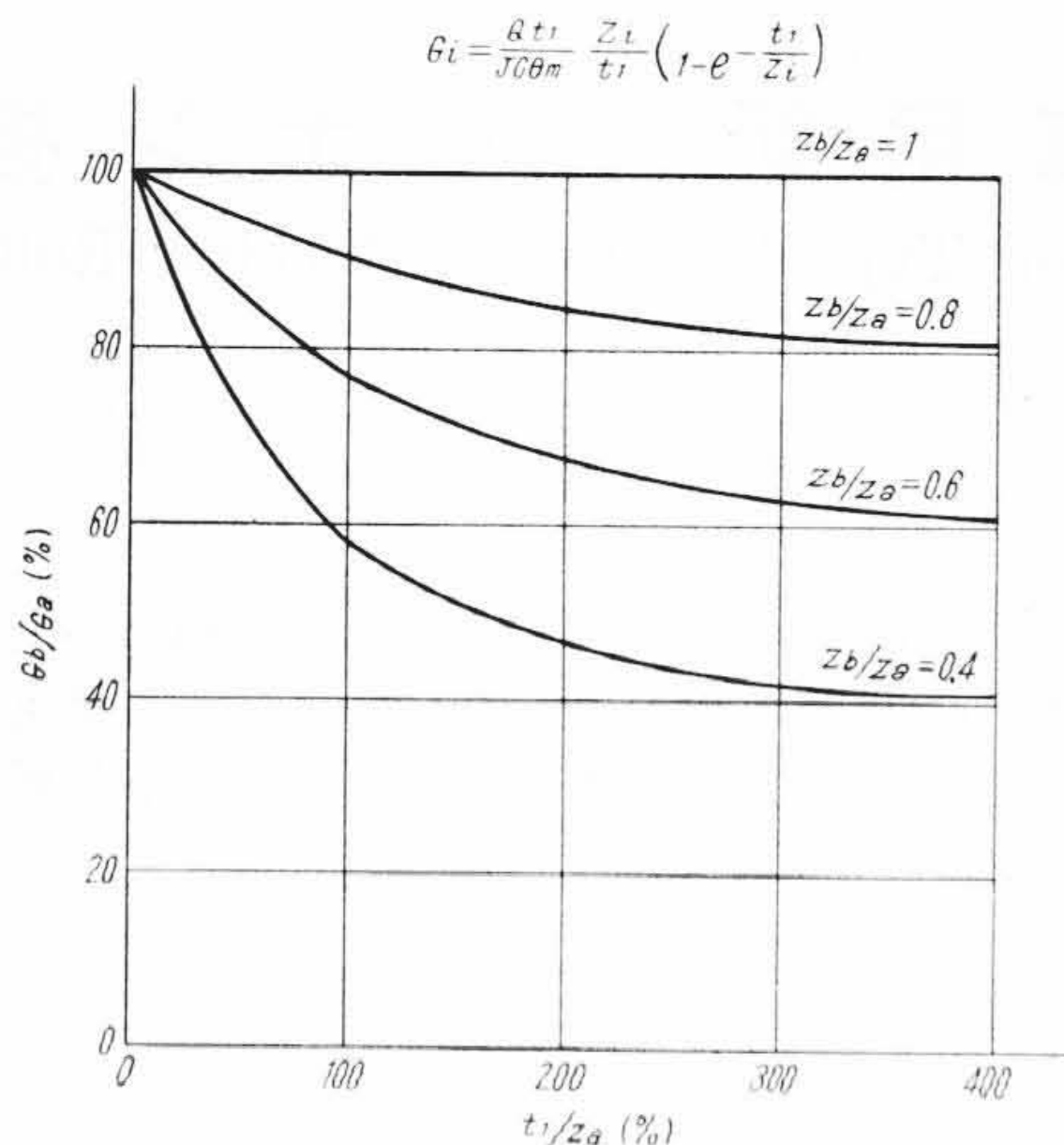
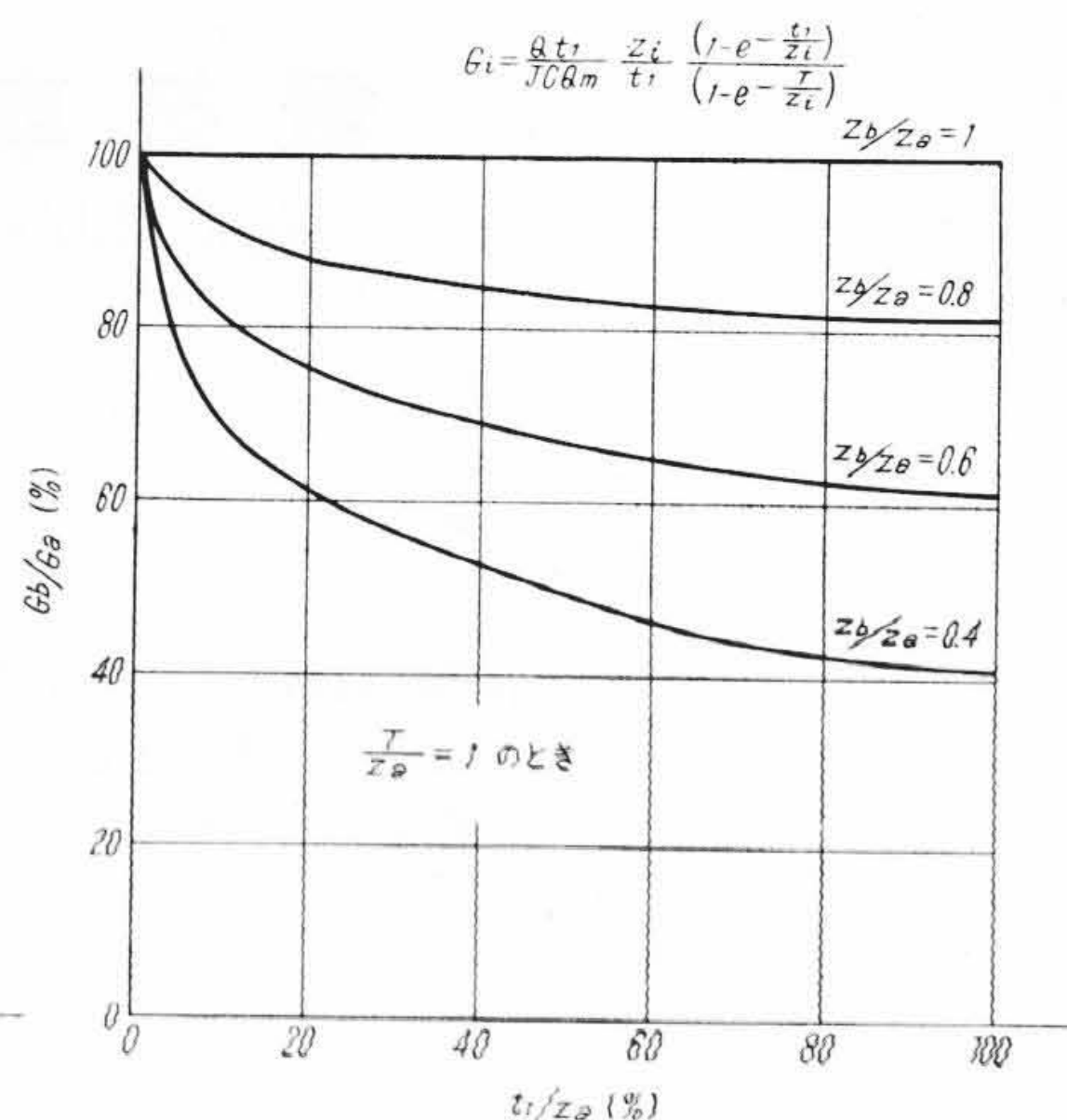
$$m = 1 \text{ のとき } G = \frac{Q t_1}{J C \theta_m} \cdot \frac{z}{t_1} (1 - e^{-\frac{t_1}{z}}) \quad (3)$$

$$m = \infty \text{ のとき } G = \frac{Q t_1}{J C \theta_m} \cdot \frac{z}{t_1} \cdot \frac{(1 - e^{-\frac{t_1}{z}})}{(1 - e^{-\frac{t_1+t_2}{z}})} \quad (4)$$

いま熱時定数が z_a から z_b に変化したとき、抵抗器の使用条件をまったく同一とすれば、そのときの抵抗エレメントの重量 G_a は G_b になり(2)~(4)式より第2~4図をうることができる。

第2図で $t_1 = \infty$ すなわち連続加熱に使用するとき、抵抗エレメントの所要重量は、熱時定数が小になればなるほど小となり比例して変化する。換言すれば抵抗器の重量が一定のときの連続熱容量は熱時定数に反比例して変化するを示す。

第3図は $m=1$ すなわち1回の短時間加熱のとき、熱時定数が小になれば抵抗エレメントの所要重量も小にできるが、

第 2 図 エレメントの重量と
時定数の関係 (1)第 3 図 エレメントの重量と
時定数の関係 (2)第 4 図 エレメントの重量と
時定数の関係 (3)

その効果は t_1/z_a が大きいとき、すなわち加熱時間 (t_1) が熱時定数 (z_a) に比べて大きいときに著しい。

第 4 図は $m = \infty$ のときの場合を示し、 $m = 1$ のときに比べて熱時定数が抵抗エレメントの所要重量に及ぼす影響は、さらに大となっていることがわかる。

以上のことから抵抗器はいずれにおいても熱時定数を小さくすればするほど小形軽量になり、その効果は加熱時間 (t_1) が大であればあるほど著しいことを知りうる。実際に抵抗器の熱時定数を小にするためには、抵抗エレメントの板厚を薄くし、冷却面積をできるだけ大きくできる構造とし、さらに冷却しやすい形状としなければならない。

以下に述べるように新形リボン抵抗器は十数メートル以上の連続抵抗エレメントであるにもかかわらず、板厚を極度に薄くし高温で使用が可能であり機械的にも、電氣的にも、そして熱的にもなんら支障がない構造となっている。

3. 新形リボン抵抗器の特長

従来使用されてきたグリッド抵抗器は、機械的接触部分を通電する構造であり、熱時定数を小にするため薄いグリッドにすると並列使用枚数が増し、機械的接触面数が増加し、抵抗体自身はさらに高温で使用できるにもかかわらず、比較的低温で使用せねばならなかった。

また電氣的絶縁にマイカ絶縁物を使用しているため、それ自身約 300°C 以上に長時間さらすことができないうえに、機械的に弱いという欠点がある。

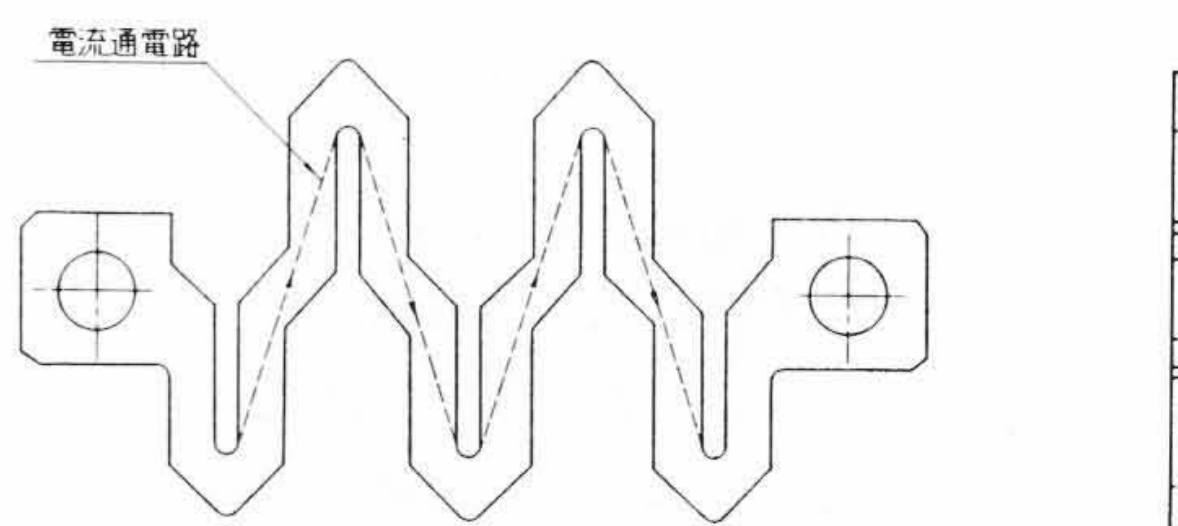
さらに通電時には第 5 図に示すように、電流は最短通電路をたどるため、抵抗体内での温度上昇が不平衡となりがちである。

グリッドをスチールにすると、軽量で折損しない特長を有しているが、グリッド間隔を維持するためにジスタンスピースを必要とし部品数も比較的多くなる。

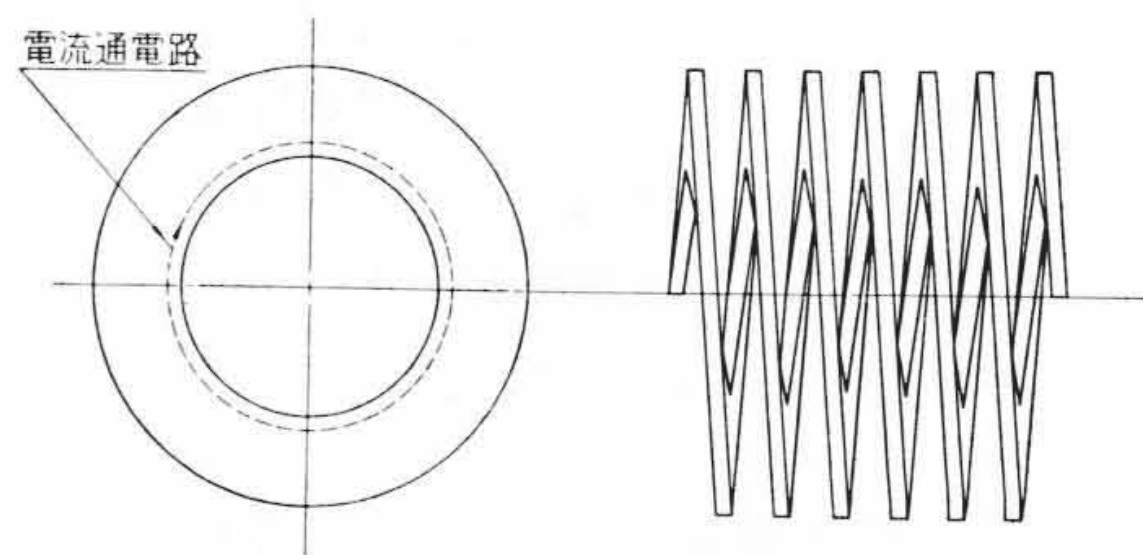
従来のエッジワイズ形リボン抵抗器は、第 6 図のようにグリッドと同様に電流は最短距離を流れるため内径側が高温となり、また抵抗帯をエッジワイズに加工できる寸法にも限度があつて、大きな容量のものは並列枚数が増すか、鋳鉄製とせざるを得ない状態である。さらにスペース、ファクタも悪く連続抵抗帯で抵抗エレメントを構成しているにもかかわらず使用部品数も多い。

今回開発した新形リボン抵抗器はこれらをすべて解決したもので角渦巻形と波形の 2 種を標準としている。

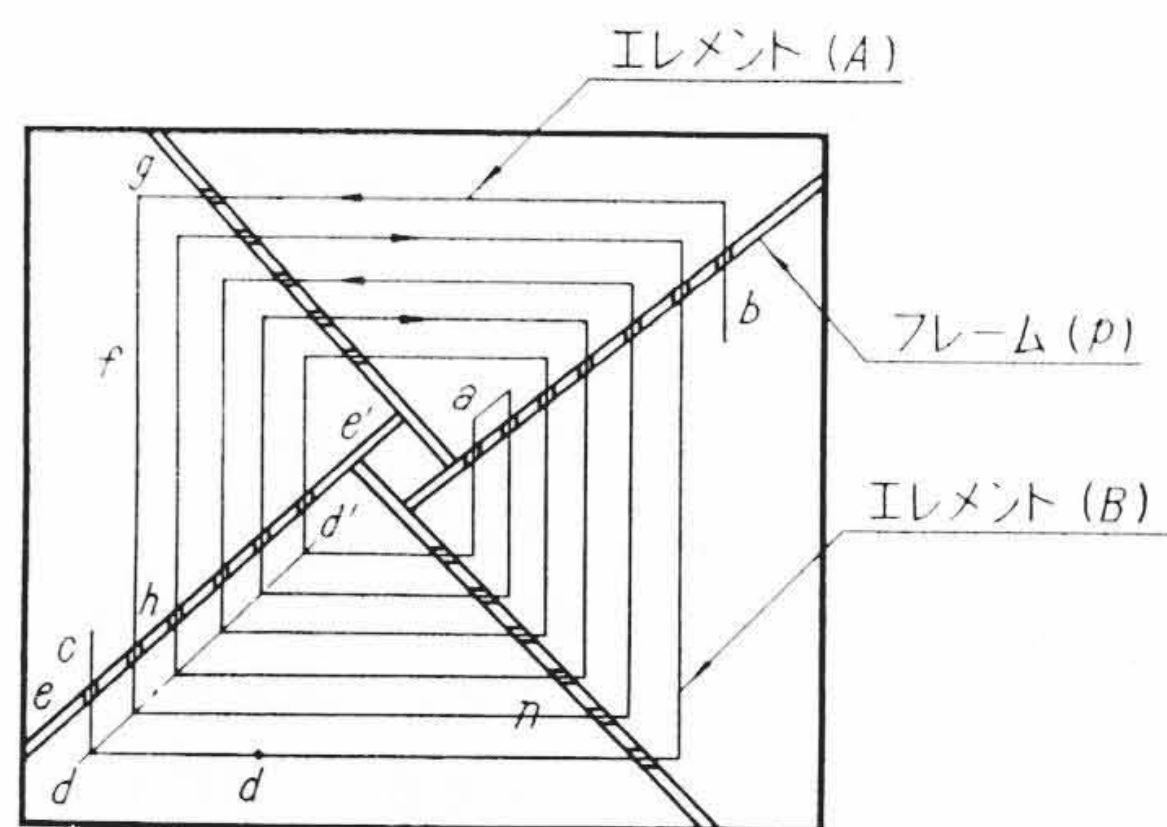
抵抗帯は日立金属株式会社にて製作されている Fe-Cr-Al の特殊



第 5 図 グリッド抵抗器



第 6 図 エッジワイズリボン抵抗器

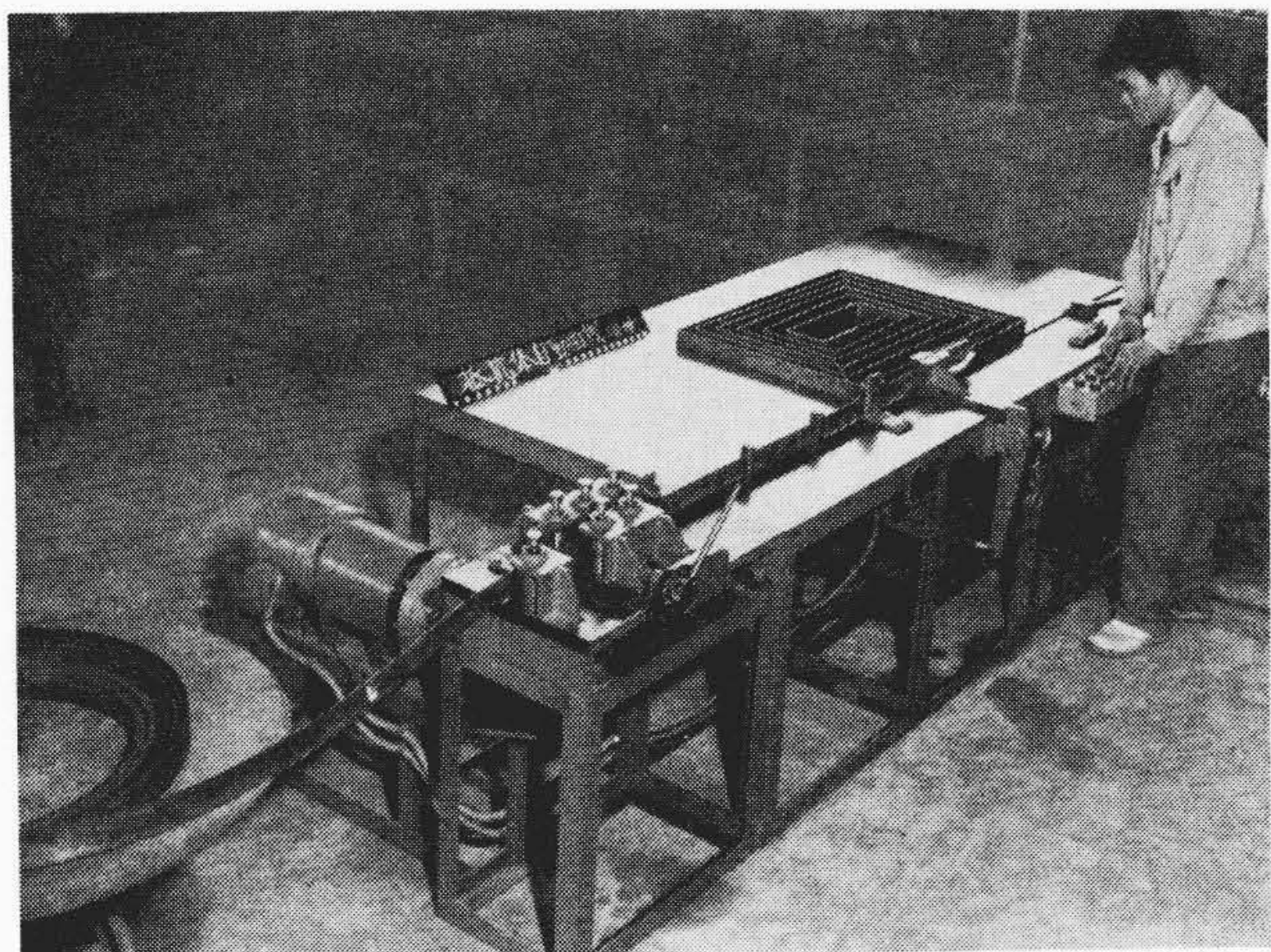


第 7 図 角渦巻形リボン抵抗器

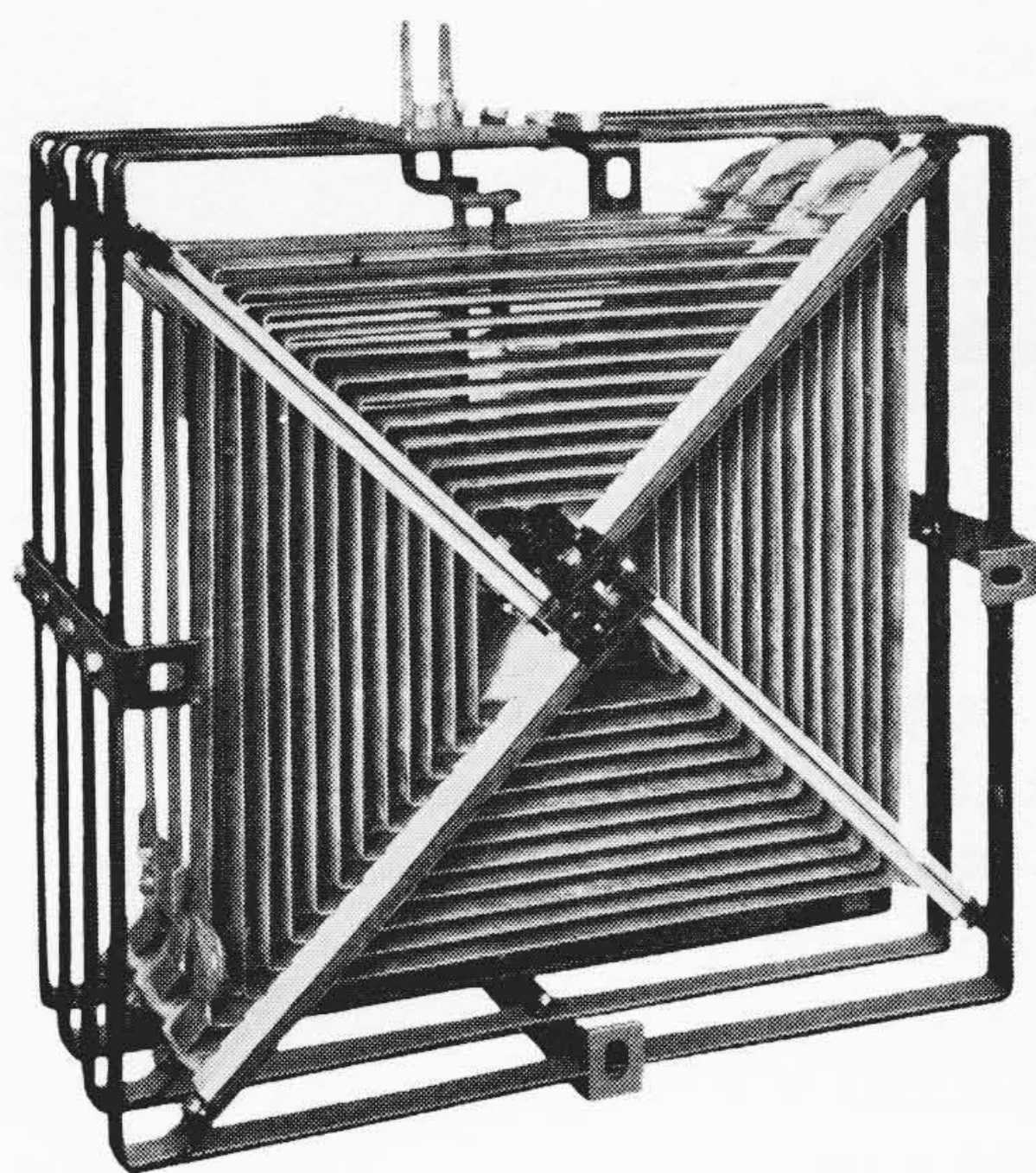
鋼で比較的高価な Ni を使用せず、加工性を高度に改善した黒熱用抵抗材料クラールを使用している。比抵抗は $90 \mu\Omega\text{cm}$ が標準で、高比抵抗のものに比べ断面積を小にし、断面積に対する表面積の比率を大きくして熱時定数を小にするようにし、大容量抵抗器に適する値を選定している。

抵抗帯の寸法は板厚板幅ともに $\sqrt{2}$ ピッチのものを標準としている。このとき許容電流は同一板厚で板幅を変えたときは約 $\sqrt{2}$ 倍ごとに、また同一板幅で板厚を変えたときは約 $\sqrt{2}$ 倍ごとに自由に選定できるようになっている。

抵抗帯は後述されるように定められた寸法に角渦巻形あるいは波形に自動曲げ機械によって連続的に加工される。



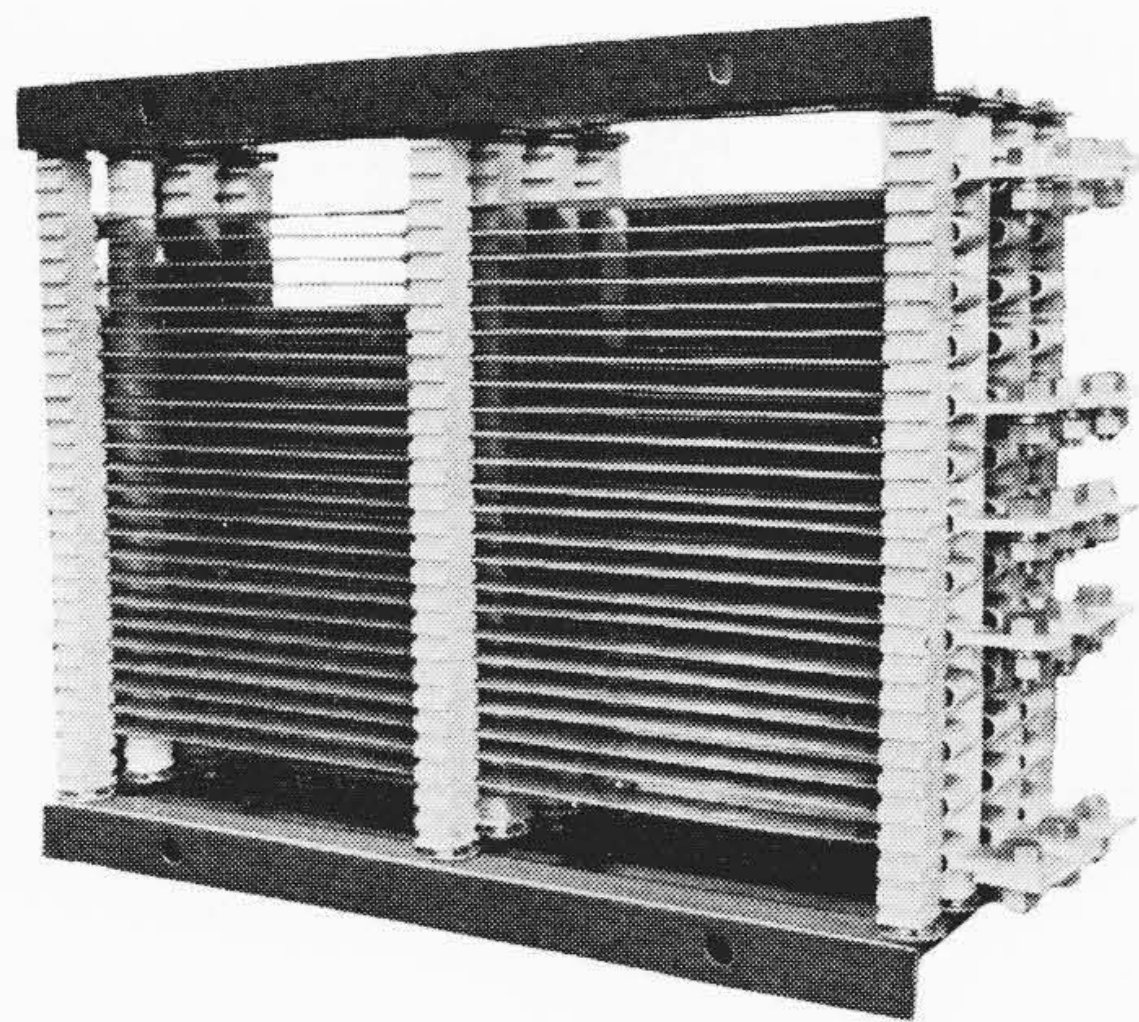
第8図 自動曲げ機械による加工



第9図 角渦巻形リボン抵抗器

3.1 角渦巻形抵抗器

連続带状抵抗材料を第7図に示すように角渦巻形に加工し抵抗エレメントとする。エレメントは360度の1回転で一定ピッチで渦巻形に形成されているから、一つのエレメント(A)に対しまったく同一寸法で成形されたほかのエレメント(B)を同一平面内で180度回転させて重ね合わせれば、BエレメントはAエレメントに対し $1/2$ ピッチずつずれているので、図示のとおりABエレメントは同一平面上で交互に組み合わされて1列の抵抗体を構成する。いまa点で特殊熔接をすれば、b点からの入力電流はa点を経由してc点に至るので隣接せる抵抗エレメントを流れる電流に反対方向となり、いわゆる無誘導抵抗器となる。また同様に他の列の抵抗体との接続は、いずれもbあるいはc点の外部で接続できるから、分解組立てはもちろん保守も容易となる(特許実用新案申請中)。第8図に自動曲げ機械による加工状況を示すが連続的に容易に加工される。抵抗体は第8図に見られるとおりの歯状特殊がい子によって両側面から支持され、しかもがい子は第7図あるいは第9図に示されるように長方形あるいは正方形の角のd-d'線上を避けe-e'線上に設置されるため、抵抗体の加熱冷却時に問題となる連続抵抗体の伸縮は、各辺ごとに自由に処理できる。たとえばf辺の抵抗体はg点を支点としてh方向に伸縮し、同様にj辺はhを支点としn方向に伸縮できるように、各辺ごとに伸縮自由となっている(特許実用新案申請中)。



第10図 波形リボン抵抗器

がい子はフレーム(p)1個につき数個がくらは形にささえられ、抵抗体、がい子およびフレームの数列で一つの抵抗器箱を構成する。

抵抗器は前述のとおり抵抗帯、がい子およびフレームの主要部品のほか、締付ボルト、端子などの最少部品の種類と員数から構成される。

角渦巻形抵抗器は構造上、上下方向に数箱を積み重ねて自然冷却か強制冷却にする場合と左右方向に配列して片側より他の側へ強制冷却する場合に適している。

3.2 波形抵抗器

波形抵抗器の基本的な特長と構造は、角渦巻形抵抗器とまったく同様である。すなわち第10図に示したとおり連続带状抵抗帯を波形に加工してエレメントとし、その両側面よりがい子によって支持する構造で数列をもって抵抗器を構成する。がい子はその中を貫通するボルトによってフレームにささえられ、抵抗列間の渡りコネクタならびに端子は、抵抗エレメントの両側面より自由に出せる。加熱冷却はエレメントの長手方向に自由に伸縮できる構造となっている。

角渦巻形と同様、抵抗エレメント、がい子、フレーム、がい子用ボルトのほか、渡りコネクタならびに端子の最少部品の種類と員数から構成され、分解、組立て、および保守ともに簡単である。

抵抗エレメントの熱による脆化は約 840°C 前後で実用上なら問題とされないが、支持がい子は高温時における熱特性、電気特性にすぐれ、また加熱冷却の繰返しによるヒートサイクル、特に熱衝撃に対する強度が要求される。車両床下に設置され従来のものよりさらに高温で使用可能なものでなければならない。

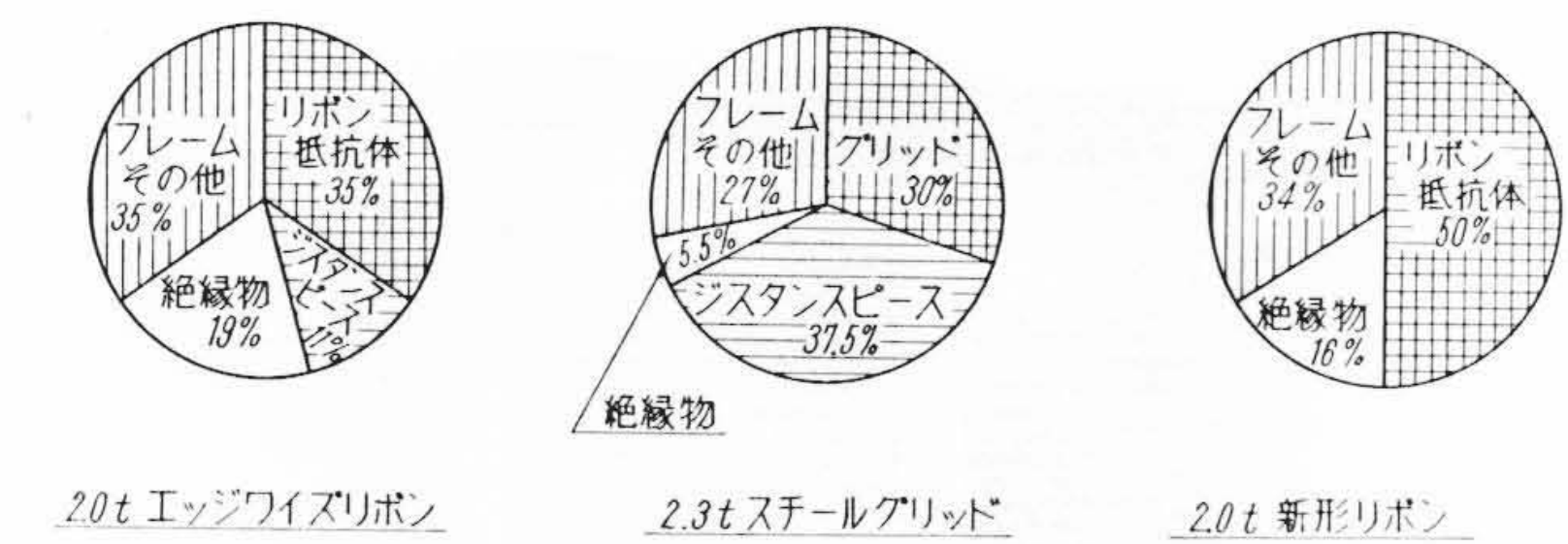
成分、焼成方法、冷温時における絶縁抵抗、絶縁耐力、機械的強度、そして熱的衝撃に対する耐力などの面から検討した結果、特殊がい子を選定した。抵抗体の温度上昇 500°C までの急熱急冷にも耐えそして車両床下設置にも問題ないことの確信を得たものとなっている。

4. 試 作 結 果

4.1 抵抗器の重量構成

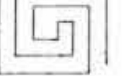
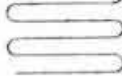
抵抗器の重量を構成するおもな部品は抵抗エレメント、抵抗エレメント取付用フレームならびに取付ボルト、抵抗体支持がい子あるいはジスタンスピースなどに大別されるが、エッジワイズリボン、スチール製のグリッド、および新形リボン抵抗器についての重量構成成分を示すと第11図のとおりになる。

全重量に対して抵抗体の占める%は高いほど当然良いが、スチールグリッド30%に対し、今回開発された新形リボン抵抗器では50%にも達し、飛躍的に改善されていることがわかる。



第 11 図 重 量 比 較

第 1 表 抵 抗 器 の 性 能

項 番	抵抗器の種類		エッジワイズ形 リボン抵抗器 (2.0 t)	スチールグリ ッド抵抗器 (2.3 t)	角渦巻形新リ ボン抵抗器 (2.0 t)	波形新リボン 抵抗器 (2.0 t)
	性能項目					
1	熱容量	%	(75)	(100)	(113)	(127)
	抵抗器重量					
2	熱容量	%	(55)	(100)	(132)	(136)
	抵抗器体積					
3	抵抗器重量	%	(74)	(100)	(116)	(107)
	抵抗器体積					
4	部 品 数	%	(75)	(100)	(22)	(20)
5	抵抗エレメ ント体積	%	13	16	20	22
	抵抗器体積					

備考： 1. 抵抗エレメントの温度上昇はいずれも 350℃一定のときの数値を示す。
2. 抵抗エレメントの寸法が変わると諸数値もいくぶん変動する。
3. ()内％はスチールグリッド抵抗器を 100% としたときの相対的な％を示す。
4. 部品数はネジ類を除いた数値を示す。

抵抗エレメントについてフレームその他が 34% を占め、残りの 16% が絶縁物となっている。絶縁物が 16% と増加したのは従来のジスパンスペースの機能も有する構造となっているためである。

4.2 抵抗器の体積構成

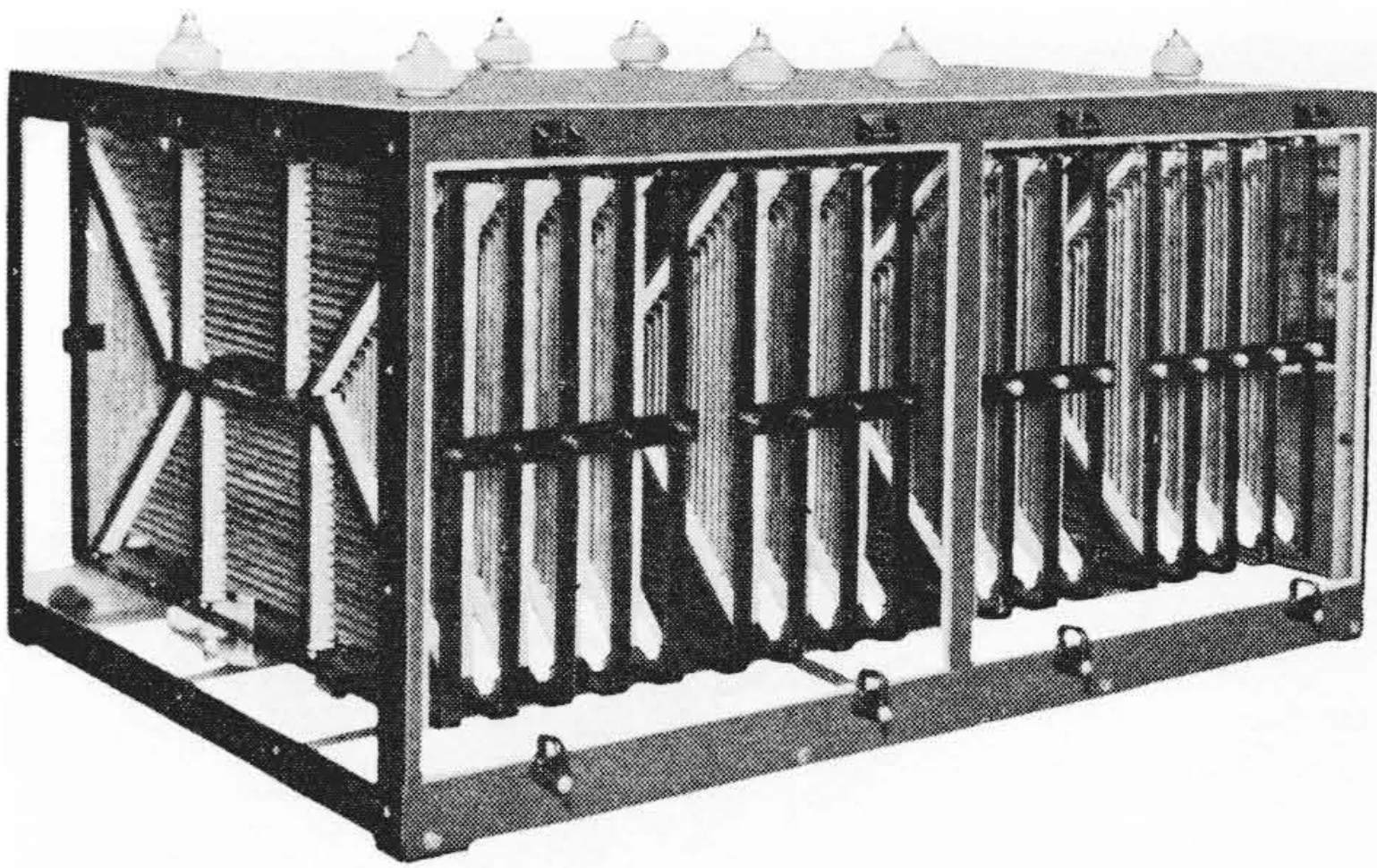
抵抗器全体の体積中、抵抗エレメントの占める体積が大であることが望ましい。これにより抵抗器単位体積あたりの熱容量も大になる傾向を有する。エッジワイズリボン、スチールグリッド、新形リボンについて算出すると第 1 表 5 のようになる。ただし抵抗エレメントの占める体積としては、エレメント自身と幅方向のエレメント間の空間をも考慮したものである。新形リボン抵抗器が最良で、次いでスチールグリッド、エッジワイズリボン抵抗器の順になっていることを知ることができる。

4.3 抵抗器としての性能

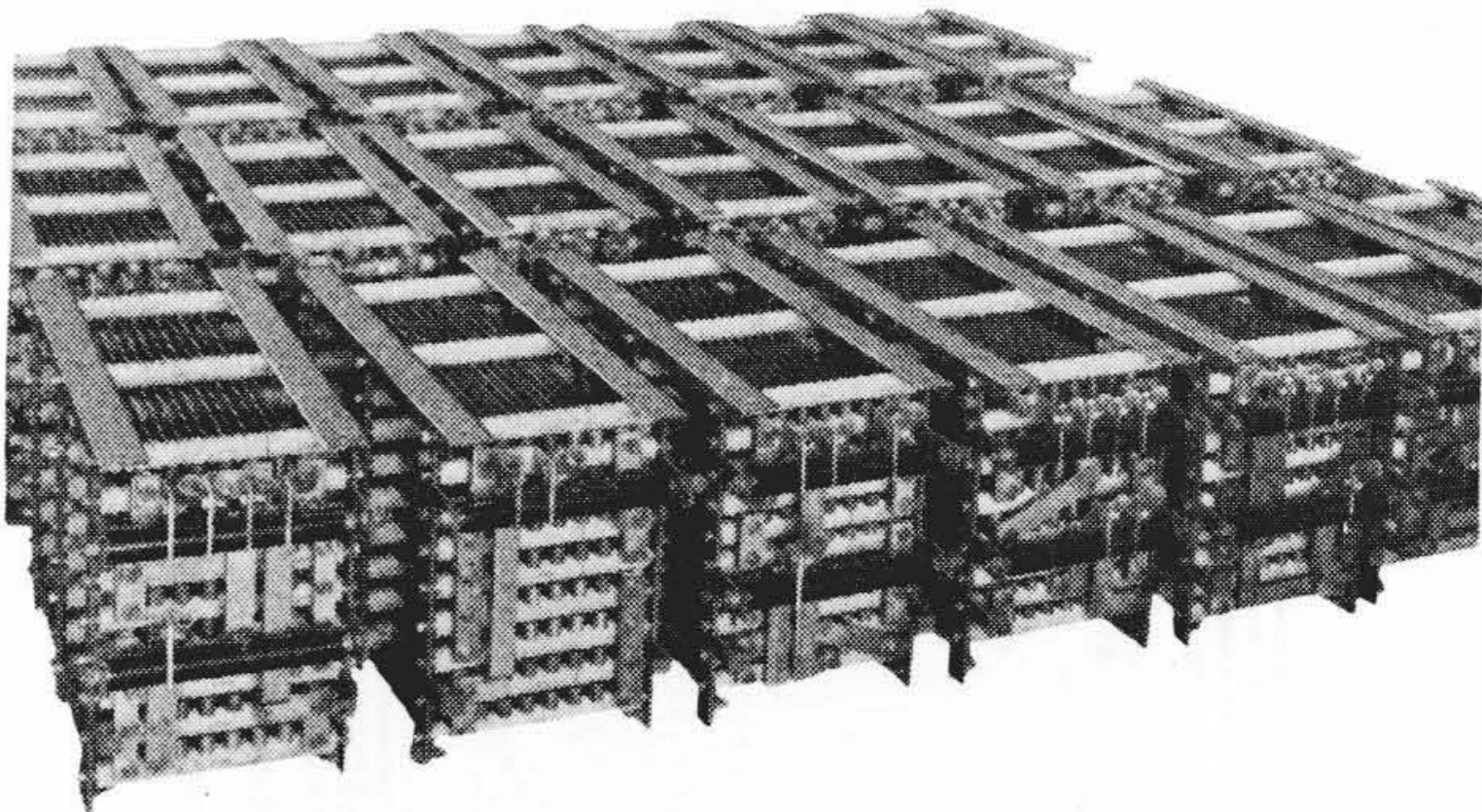
抵抗器としての性能は、抵抗器の総重量あたりの熱容量、総体積あたりの熱容量などをもって比較することも一つの方法である。

エッジワイズリボン、スチールグリッド、角渦巻および波形新リボン抵抗器のおおのについてそれらを算出すると第 1 表 1 ～ 3 のようになる。

抵抗器の単位重量あたりの熱容量は、従来のエッジワイズ形リボン抵抗器より飛躍的に増大し、またスチールグリッド抵抗器に比べても一段と進歩した抵抗器であることがいえる。さらに新形リボン抵抗器自身としては前述してきたとおり温度上昇 500℃ までは問題なく使用できるので、周囲条件さえ許せば第 1 表はそれに比例して



第 12 図 国鉄新幹線交流電車用ブレーキ抵抗器（試作品）



第 13 図 大阪地下鉄（4 号線）直流電車用主抵抗器

新形リボン抵抗器の優位性を増す数値となる。

4.4 抵抗器の構成部品

抵抗器の構成部品数の多寡は、分解組立て、および保守の難易に直接関連することであり、極力最少にとどめなければならない。

また同一構造でも、抵抗値、熱容量、端子の数ならびにその構造などによって大幅に変化するが、いまそれらを同一条件としたときの部品数の比率は第 1 表 4 に示すとおりである。新形リボン抵抗器はスチールグリッドに比べ約 22% 以下でエッジワイズ形リボン抵抗器に比べ約 30% 以下となっている。このことは使用する側からみて格段の進歩といえる。

5. 結 言

前述したとおり今回開発された新形リボン抵抗器は端子を除いて通電部分に機械的接触面をなくしたこととマイカ絶縁をやめて、特殊がい子にしたことなどによりさらに高温で安全に使用できる抵抗器となし得た。またフラットワイズとなっているから抵抗エレメント内の温度上昇が平衡し、大容量のものの製作が容易である。抵抗エレメントを両側面から支持する構造としたので、エレメントの板厚を極度に薄くでき連続熱容量を飛躍的に増大し得た。さらに最少部品数で構成しているため、分解組立ては容易であるばかりでなく、使用する立場からも画期的なものとなし得たと信ずる。実用されている角渦形および波形抵抗器を第 12、13 図に示す。

終りにご指導いただいた各位に敬意を表するとともに、ご使用になっている方々からのご批判をいただければ幸甚である。

参 考 文 献

- (1) 藤間、竹村、豊田：日立評論 36, 2 スチールグリッド抵抗器