

新標準中容量全閉外扇かご形三相誘導電動機

New Standard Totally Enclosed Fan Cooled Cage Rotor Type
Three-Phase Induction Motors

今 井 利 秀* 中 村 皓 一*
Toshihide Imai Koichi Nakamura

内 容 梗 概

全閉外扇形三相誘導電動機の小型化のためには、放熱のための各部の熱抵抗を最小におさえ、むだな空間の少ない冷却構造とする必要がある。そこで従来比較的小容量の全閉形に採用していたリブ冷却方式に注目し、電動機発生熱の熱等価回路を作成して各部の冷却構造を全面的に再検討した。温度分布を求める方程式はHIPAC 103を利用して解いたが、この結果は実測値と十分な精度で一致し、小型化を図ったリブ冷却中容量全閉外扇かご形三相誘導電動機の新標準シリーズを完成することができた。

本稿ではその構造および特長を中心にして紹介する。

1. 緒 言

全閉形誘導電動機の需要は石油化学を中心とするプロセス工業の発展に伴い増加の一途をたどっており、一方 IEC (International Electrical Commission) においては、国際的に全閉外扇形誘導電動機の寸法統一を図るための規格制定、改訂を行なっている。国内においては現在のところ小容量のものについてのみ IEC に準拠した小形軽量化を具体化しており、この傾向が中容量の電動機にまで発展するのは時間の問題である。

現在の中容量以上の日立製作所全閉外扇形電動機にはパイプ冷却方式を採用しているが、固定子鉄心外径と固定子わく外径との比が大きな値となり、外観は大形となっている。小容量のものに採用しているリブ冷却方式ではこの欠点がなく、また最近需要が増加しつつある防食形電動機としても好適であるので、このリブ冷却方式を改良して中容量にまで適用範囲を拡大し、小形軽量化を図ることを計画した。

その基になる冷却方式の改良には電動機内に発生する損失の流れを知る必要がある。そのためには最高温度部(コイル)より放熱表面(リブ)への熱流回路を既知の数値(熱伝導率、熱伝達係数)を基に熱等価回路網に変換し、各発生損失、固定子鉄心内外径、回転子鉄心内外径、スロット寸法、固定子わく表面などすべてのディメンジョンを入力として与えた温度上昇計算のプログラムを作成した。

初めに従来のリブ冷却方式に改良を加えた新標準中容量全閉外扇かご形三相誘導電動機の構造、寸法、特長について述べた後熱回路の計算方式につき詳述する。

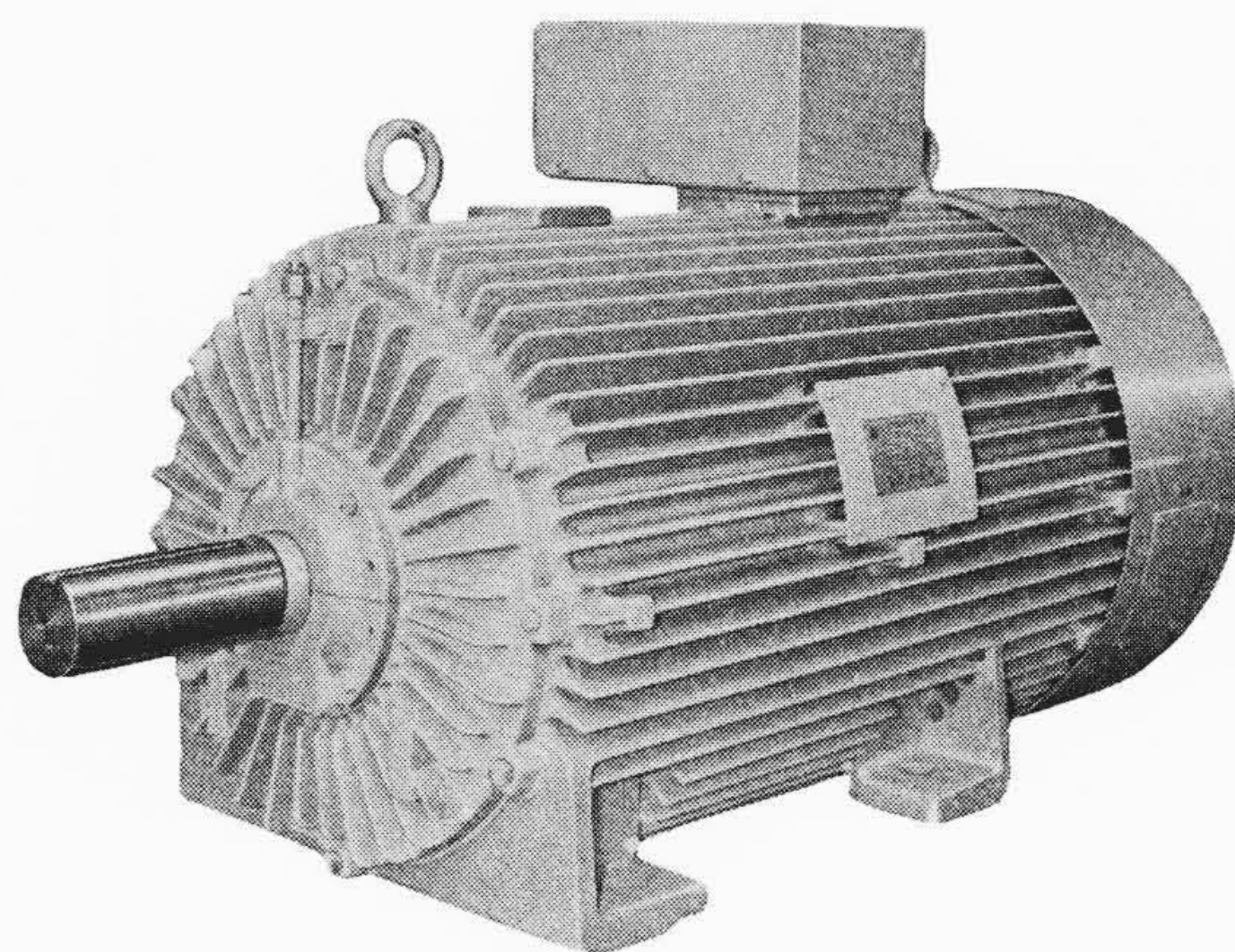
2. 新形電動機の構造

新標準全閉外扇形電動機は出力 60~315 kW、極数 4~12、3 kV 級および 6 kV 級のかご形を対象としたもので第 1 図にその外観を示す。

2.1 冷 却 方 式

新形電動機の構造は第 2 図に示すとおりであり、外扇で強制冷却を行ない固定子わくリブ表面、エンドブラケットリブ表面より内部発生熱を放散する。内扇は両扇式で、固定子コイル端部、回転子導体の発生熱を内部空気かくはんにより固定子わく内面およびエンドブラケットの内側リブ面に伝え、それぞれの外側リブより放熱する。一方、鉄心スロット内部にそう入されている部分の固定子コイルに発生する熱は固定子鉄心を通して固定子わくリブ表面で放熱する構造となっている。

* 日立製作所日立工場



第 1 図 新標準リブ冷却方式全閉外扇かご形電動機

2.2 各 部 構 造

(1) 固 定 子 わ く

固定子わくにはリブ付鋳物構造を採用した。固定子わくの設計は冷却に最も影響を与えるため、その外周のリブ本数、厚み、高さはわく長を考慮して最適なものに決定した。

(2) 巻 線

固定子コイルには 3 kV 級は A 種、6 kV 級は B 種を標準に採用しており、全閉形が使用される周囲の環境を考慮して耐湿性と耐食性の高い絶縁法となっている。

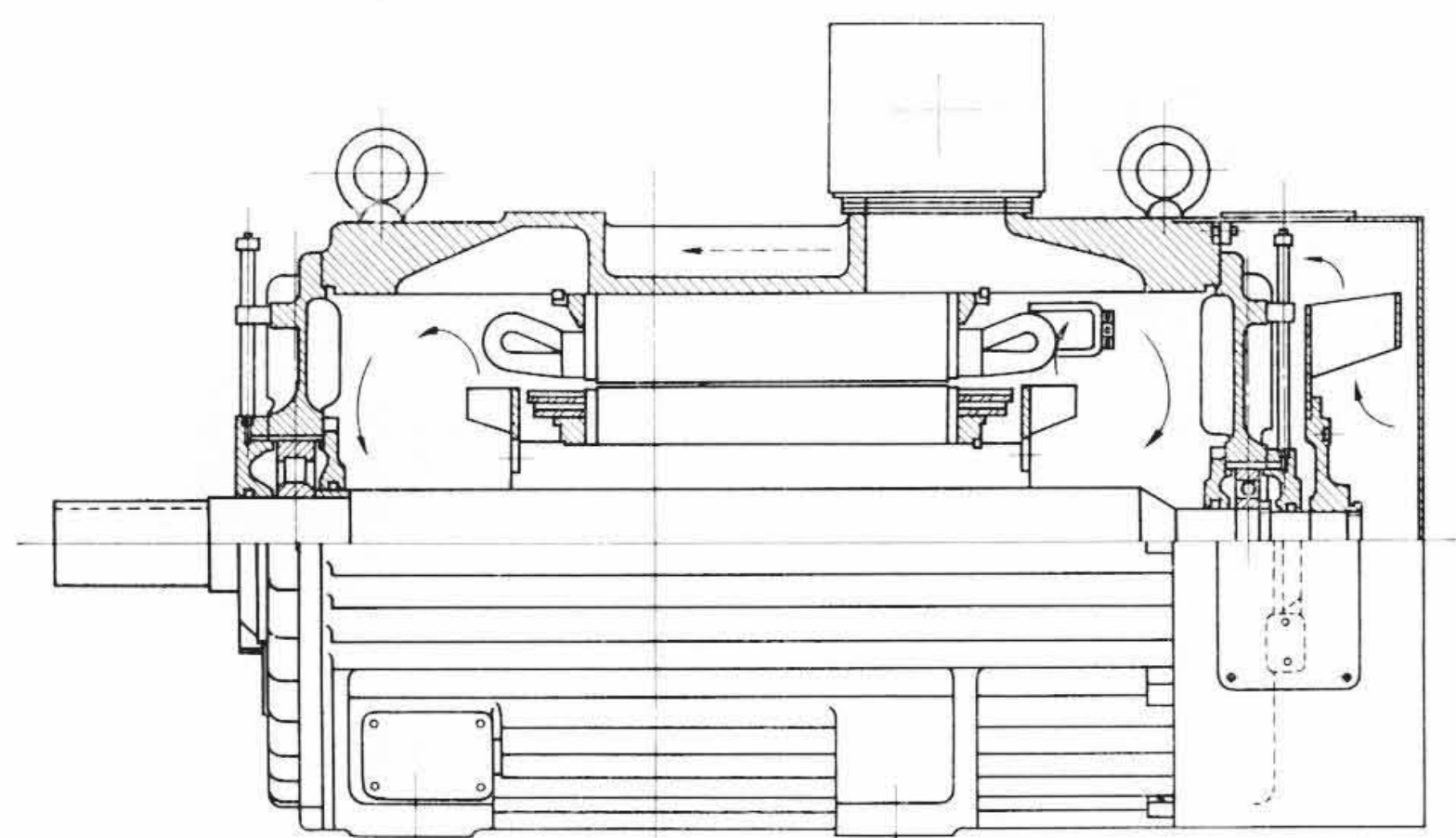
かご形回転子には重負荷起動やひん繁な起動に適する二重かご形構造を採用し、上側バーには特殊銅合金を使用して起動電流を極力おさえると同時に起動トルクを大きくし、下側バーには電気銅を使用して運転中の損失を極力小さくするように設計製作している。

(3) 鉄 心

鉄損が少なく磁気特性のすぐれた冷間圧延ケイ素鋼板を積層し、効率および力率の向上をはかっている。

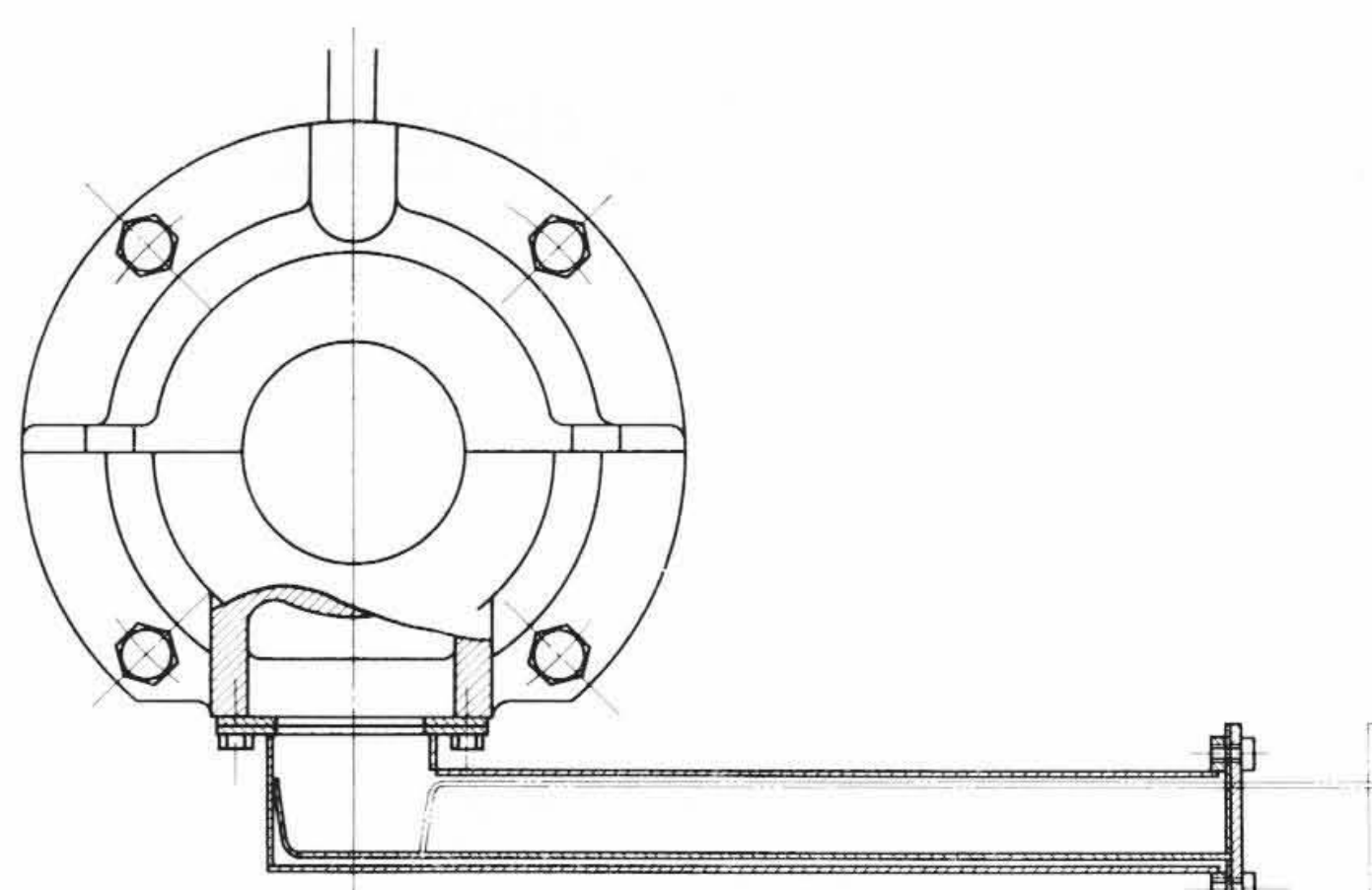
(4) 軸 受

軸受には全面的にころがり軸受を採用し、負荷側はローラベアリング、反負荷側はボールベアリングとしている。第 3 図に負荷側軸受構造を示す。軸受カバーは二つ割としている(実用新案出願中)ので負荷と連結した状態でカバーを取りはずすことができ、軸受の点検を容易に行なうことができる(第 4 図)。グリース注入口はベアリングカバーに取り付けた給油パイプに設けてあるので運転中にグリース注入が可能であり、また排出口を大きくしてあるので劣化グリースの排出が容易である。反負荷側軸受は第 2 図



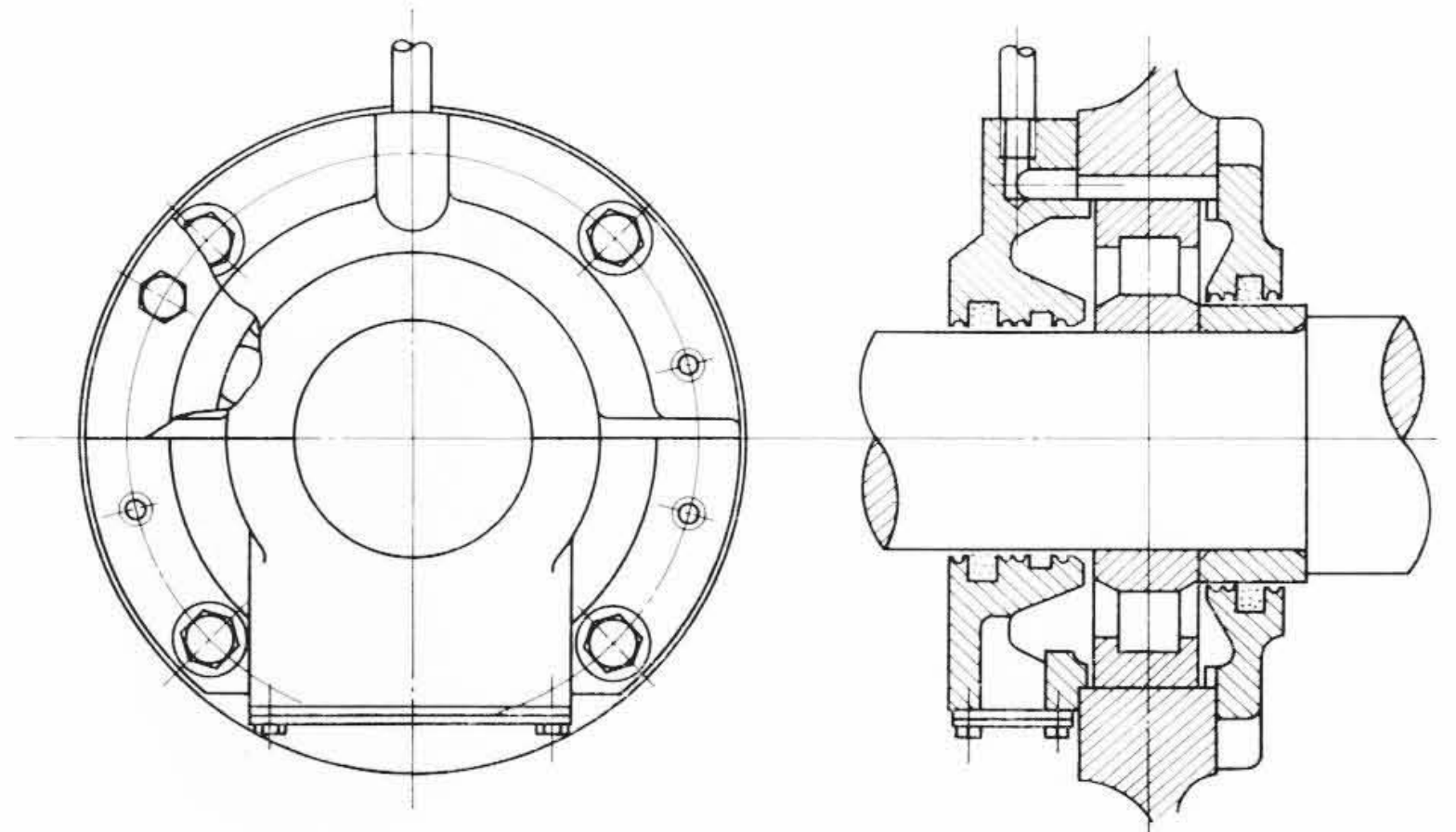
355 フレーム以下 (400 フレーム以上はエンドブラケット二つ割としカートリッジタイプベアリングを採用している。)

第2図 リブ冷却方式全閉外扇形電動機構造図



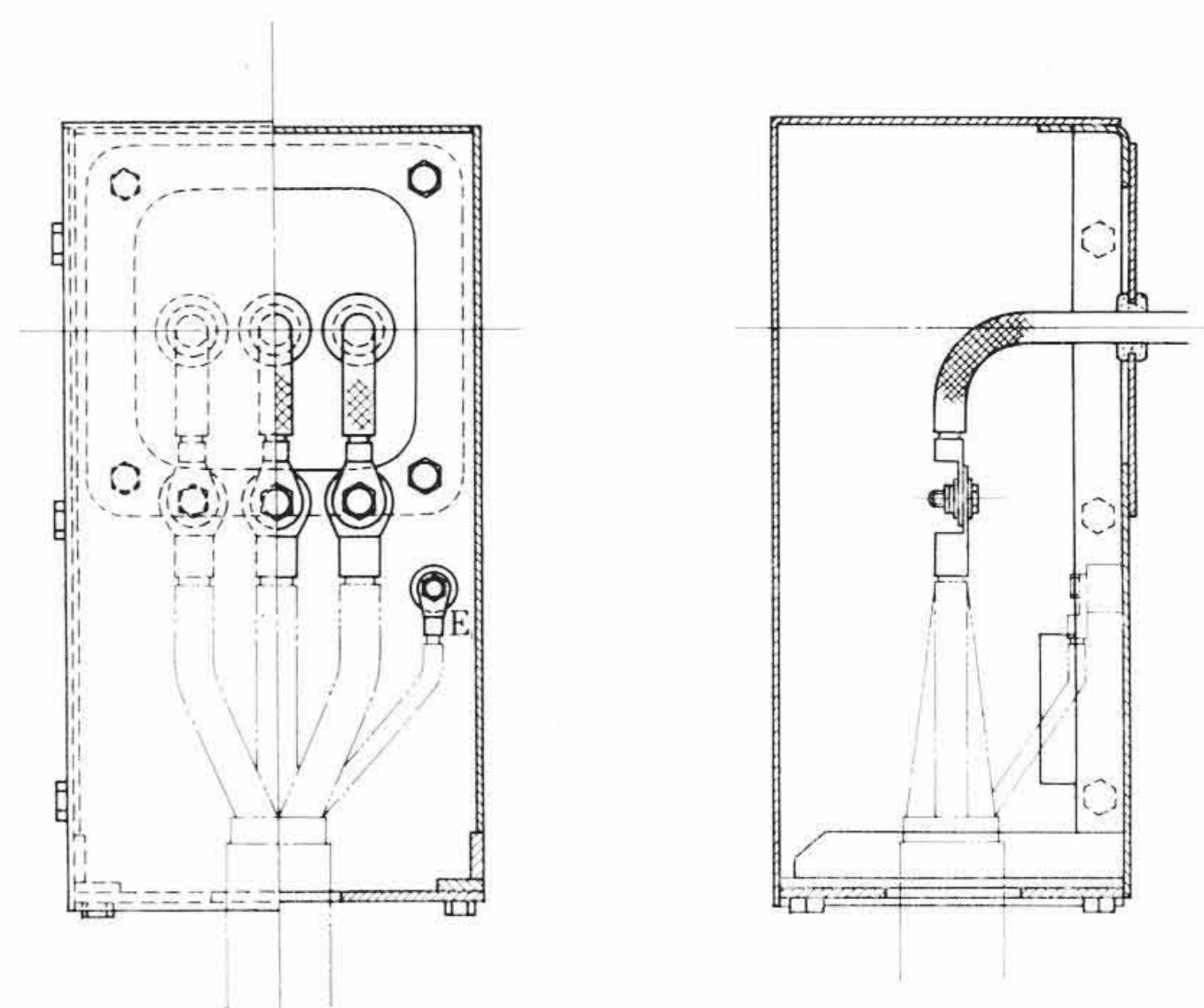
(劣化グリースの抜き出し装置がついているのでグリースの排出を簡単に行なえる。)

第5図 反負荷側のグリース給排出装置構造図

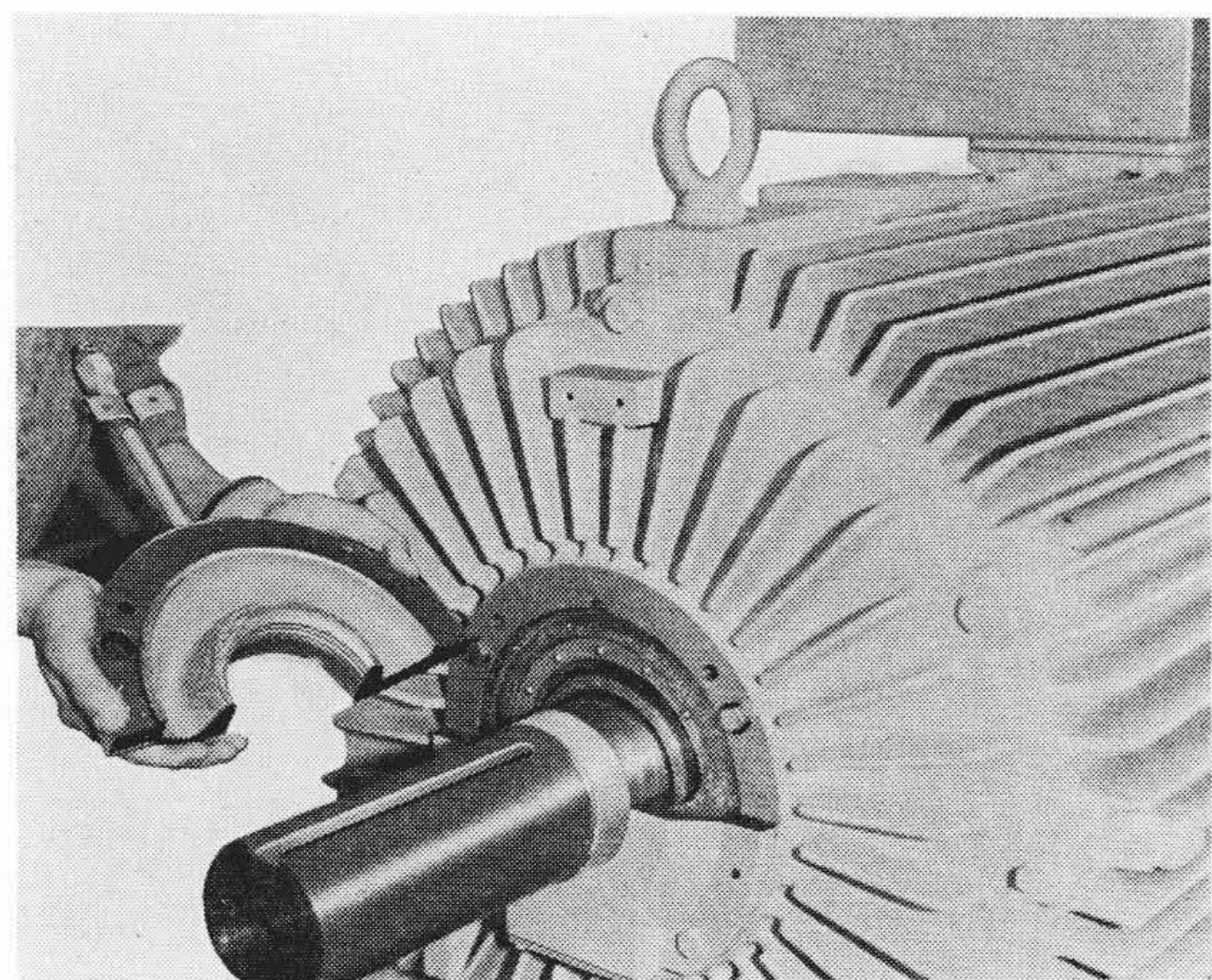


(ベアリングカバーは二つ割となっているので負荷との直結を分解せずにベアリングカバーを取りはずし軸受の点検ができる。)

第3図 負荷側軸受構造図



第6図 端子箱構造図



(2つ割ベアリングカバーを採用しているので連結を分解せずにベアリングカバーを取りはずしベアリングの点検を行なうことができる。)

第4図 軸受部

に示すとおり外扇の内側についており、劣化グリースの排出が非常に困難となるので、第5図に示すグリース排出装置をもうけている。なお400フレーム以上ではカートリッジ構造の軸受を採用し、エンドブラケットを二つ割としているので、分解ごとにエンドブラケットとのめあいがあまくなることもなく、また負荷と連結のままエンドブラケットを取りはずし電動機内部の点検が可能である。

(5) 端子箱

端子箱は第6図に示すように箱内でケーブルの端末処理ができるよう十分なスペースをとってある。また固定子わく上部に取り付けられ、取付座を正方形としてあるので電動機の両側面いずれ

第1表 新標準全閉外扇かご形電動機わく番号適用表 (3kV級, 6kV級共通)

IECわく番号	日立わく番号	4極	6極	8極	10極	12極
T280L	4780	60				
T315S	5380	75	60			
T315L	5395	90	75	60		
T355L	60100	132	90	75	60	
T400S	6795	160	132	90	75	60
T400L	67112	200	160	132	90	75
T450S	75106	250	200	160	132	90
T450L	75125	315	250	200	160	132

にも配線ができ、配線の自由度が大きい。

3. 新形電動機の方法

電動機の取付け寸法としては国際標準 IEC 推奨寸法を採用したほか、各部寸法には大幅に標準数を導入して標準化をはかった。IEC 推奨寸法についてはすでに日立評論簡易分解形新開放防沫シリーズ三相誘導電動機 (40年7月号) に説明済みであるので本稿では省略する。

第1表に新形電動機のわく番号適用表を示す。従来採用していたパイプ冷却方式全閉外扇形電動機との比較をセンタハイトで示すと第7図のとおりであり大幅に小形化されていることがわかる。第2表は新形電動機の寸法例である。

4. 新形電動機の特長

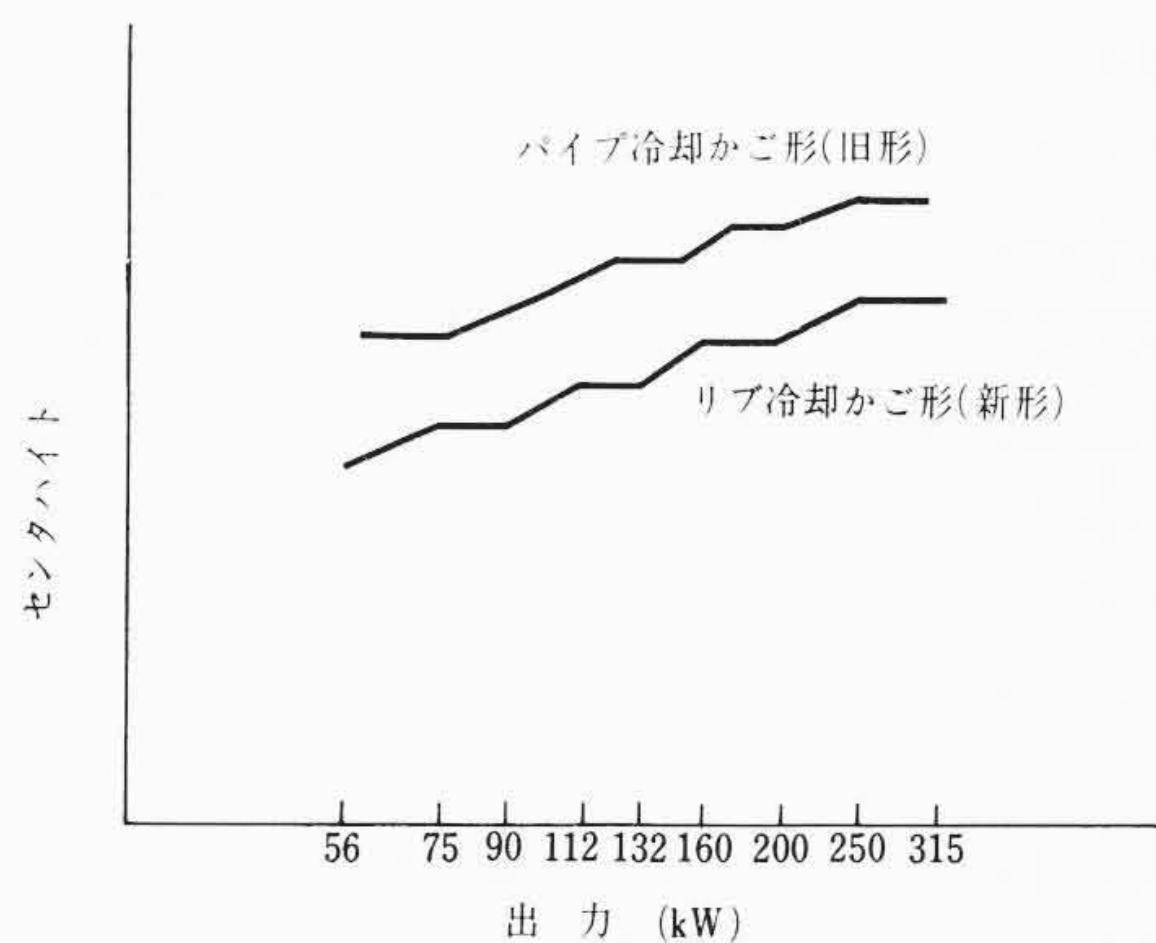
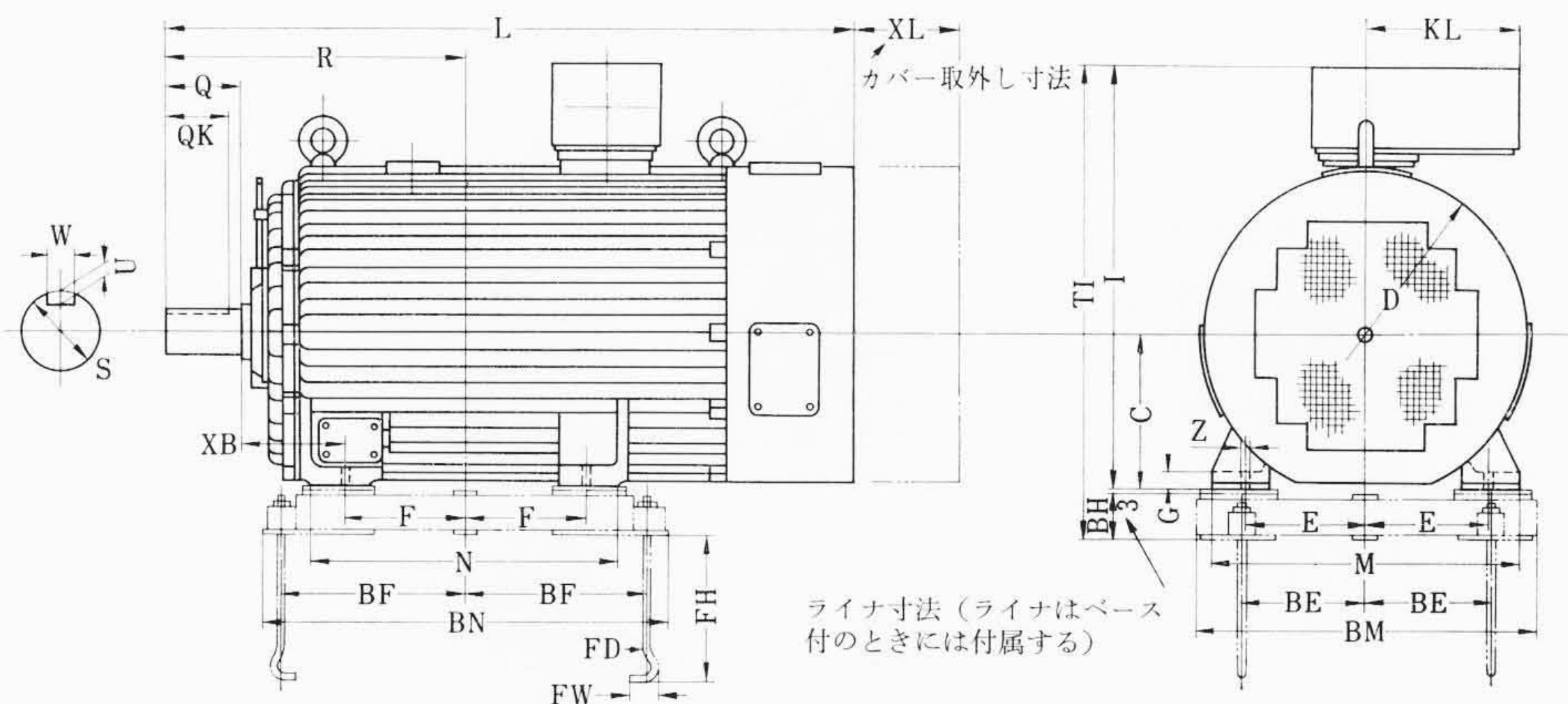
新形電動機の特長は次のように要約することができる。

(1) 小形軽量

従来標準のパイプ冷却方式に比べデッドスペースが非常に小さ

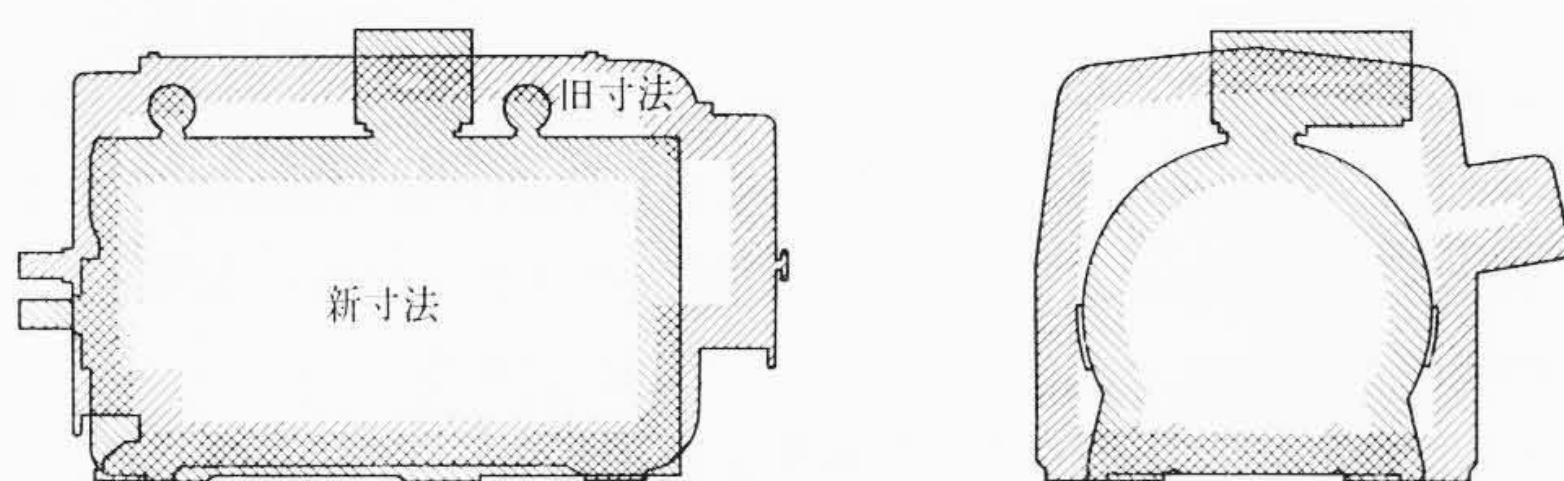
第2表 新標準全閉外扇かご形寸法表 形式TFO-KK(直結用)

わく番	IEC 当社	本 体 寸 法																	ベ ー ス 寸 法											使 用 軸 受	
		L	R	C	D	2E	2F	M	N	G	XB	S	Q	QK	W	U	I	Z	KL	XL	2BE	2BF	BH	BM	BN	FD	FH	FW	T I	負 荷 側	反 負 荷 側
T280L	4740	1,225	524	280	622	457	457	580	569	35	190	65	105	90	18	6	795	20.5	325	250	450	670	100	630	730	W ^{5/8}	325	59	898	NU314CM	6,314CM
T315S	5380	1,245	524	315	687	508	406	650	532	35	216	65	105	90	18	6	865	20.5	325	265	500	645	100	710	710	W ^{5/8}	325	59	968	NU314CM	6,314CM
T315L	5395	1,395	575	315	687	508	508	650	634	35	216	65	105	90	18	6	865	20.5	325	265	500	745	100	710	810	W ^{5/8}	325	59	968	NU314CM	6,314CM
T355L	60100	1,515	641	355	772	560	560	730	702	40	241	75	120	100	20	7	945	24	325	310	560	835	125	800	920	W ^{3/4}	405	69	1,073	NU316CM	6,316CM
T400S	6795	1,505	680	400	857	636	534	825	694	40	273	85	140	125	24	8	1,035	24	325	320	630	830	125	900	920	W ^{3/4}	405	69	1,163	NU318CM	6,318CM
T400L	67112	1,675	731	400	857	636	636	825	796	40	273	85	140	125	24	8	1,035	24	325	320	630	930	125	900	1,020	W ^{3/4}	405	69	1,163	NU318CM	6,318CM
T450S	75106	1,660	770	450	947	712	610	925	790	50	305	95	160	140	24	8	1,145	31	420	340	710	935	125	1,000	1,035	W 1	490	90	1,273	NU320CM	6,320CM
T450L	75125	1,850	840	450	947	712	712	925	892	50	305	95	160	140	24	8	1,145	31	420	340	710	1,045	125	1,000	1,140	W 1	490	90	1,273	NU320CM	6,320CM
IEC 規格 指定寸法記号				H		A	B				C	D	E																		



(形式TFO-KK 4極につき示す)

第7図 出力とセンタハイトの関係

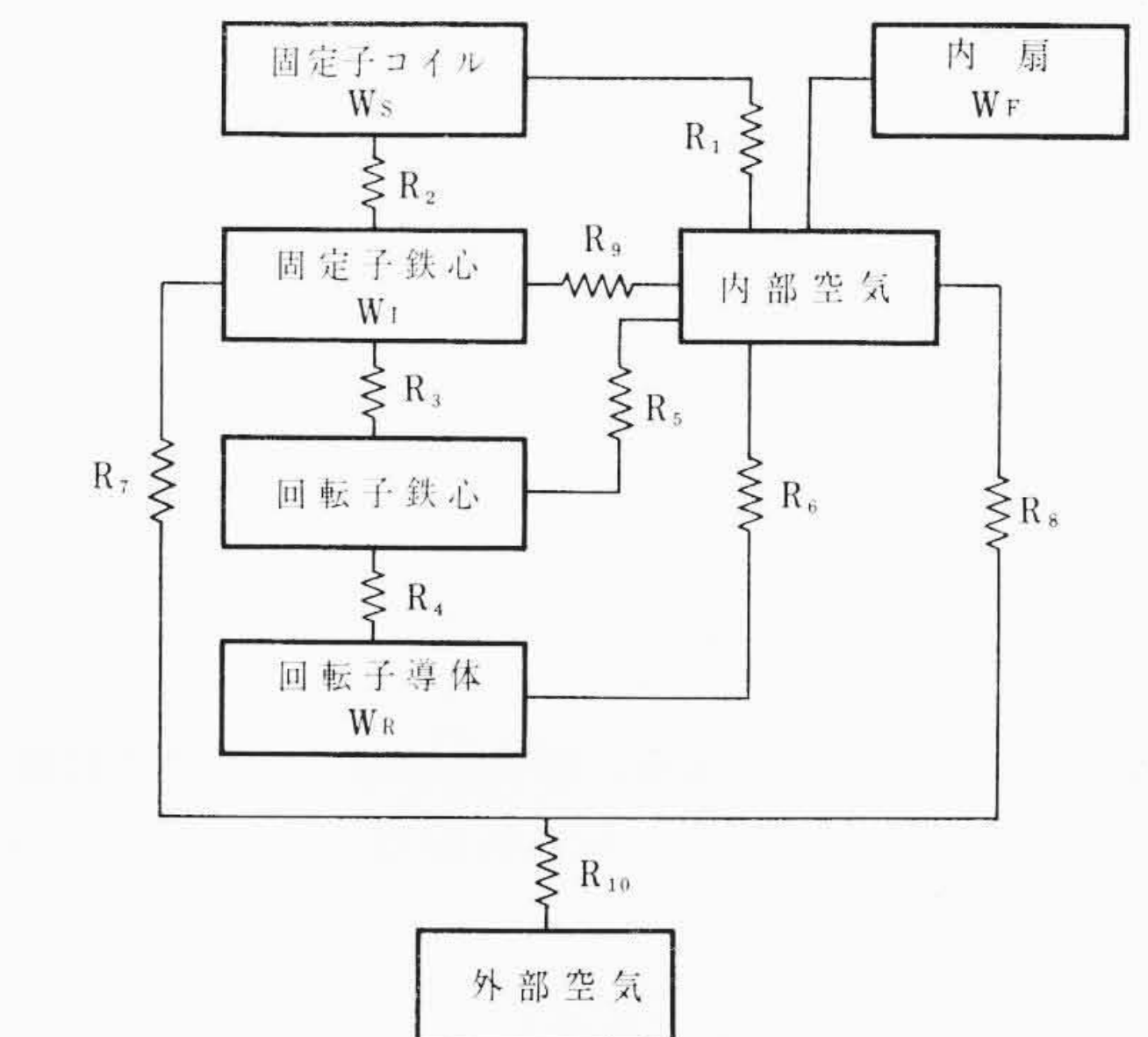


第8図 75 kW 4極電動機の新旧寸法比較

く製作できるのでたいへん小形となる。第8図は75 kW 4極電動機の新旧寸法比較図の一例を示したものである。

- (2) 3 kV 級, 6 kV 級いずれも同一取付け寸法である。
- (3) 将来標準の IEC 推奨寸法を採用しているので国際的に互換性をもち海外進出を容易とする。
- (4) リブ冷却方式のため, 鋳物性ハウジング, エンドブラケットを採用しているので需要増加の傾向にある防食電動機として好適である。
- (5) 構造が簡単で分解組立が容易であり, 清掃点検, 軸受保守などに便利な構造である。
- (6) 配線作業が容易

端子箱をハウジング上部に設け取付け座を正方形としているの



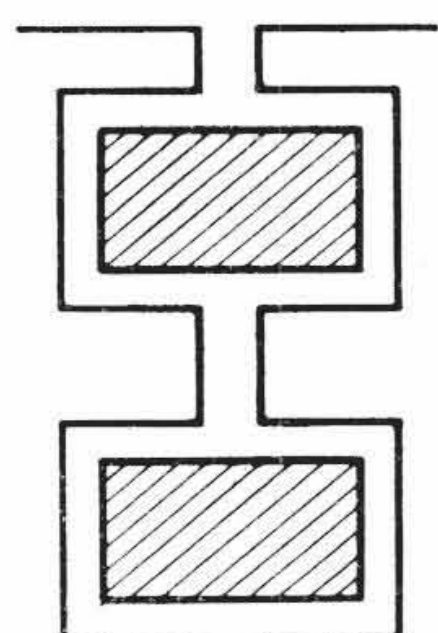
- R_1 : 固定子コイル端部の導体と内部空気との間の熱抵抗 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
 R_2 : スロット内固定子コイルの導体と固定子鉄心との間の熱抵抗 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
 R_3 : 固定子鉄心と回転子鉄心との間の熱抵抗 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
 R_4 : 回転子鉄心と回転子導体との間の熱抵抗 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
 R_5 : 回転子鉄心と内部空気との間の熱抵抗 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
 R_6 : 回転子導体と内部空気との間の熱抵抗 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
 R_7 : 固定子わくと固定子鉄心との間の熱抵抗 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
 R_8 : 内部空気と固定子わくとの間の熱抵抗 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
 R_9 : 固定子鉄心と内部空気との間の熱抵抗 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
 R_{10} : 固定子わくと外部空気との間の熱抵抗 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
 W_S : 固定子コイル銅損 (W)
 W_L : 固定子鉄損 (W)
 W_R : 回転子導体銅損 (W)
 W_F : 内扇の損失 (W)

第9図 リブ冷却方式全閉外扇形電動機の熱伝達回路

で配線の自由度が大きい。

5. 温度上昇計算

電動機内部の熱損失は固定子鉄心に発生する一次鉄損, 固定子コイルに発生する一次銅損, 回転子鉄心に発生する二次鉄損, 回転子導体に発生する二次銅損, および内扇の損失から構成されている。本電動機の冷却方式は2.1で述べたとおりであって, 電動機の放熱経路は一般に第9図のような熱伝達回路網で考えることができる。



第10図 かご形回転子のスロット形状

(同期速度近辺では回転子の鉄損は少ないから、熱伝達回路網においては回転子鉄損は無視する)。固定子コイルが最高温度になると仮定すると、ここで発生する熱の一部はコイル導体内を直接伝導によって移動し、固定子コイル端から循環する内部空気に伝達する。他の一部は固定子鉄心を経て、固定子鉄心の発生損の一部とともに固定子わくと鉄心との間の空けきを通してわくに伝達する。それぞれの熱抵抗を $R_1, R_2, \dots, R_{10}$, 発生損失を W_s, W_r, W_i, W_f とすると、 $R_1, R_2, \dots$ は従来の実験理論式より求められるし、 $W_s, W_r, \dots$ は既知につき各要素の平均温度上昇を $\theta_1, \theta_2, \dots$ とすれば、これらの平均温度上昇は次の式より求められる。

$$\theta = W \cdot R \quad (^\circ\text{C}) \quad (1)$$

$$R = \frac{L}{\lambda A} \quad (^\circ\text{C/W}) \quad (\text{熱伝導}) \quad (2)$$

$$R = \frac{1}{\alpha A} \quad (^\circ\text{C/W}) \quad (\text{対流}) \quad (3)$$

ここに、 θ : 温度差 ($^\circ\text{C}$)
 R : 熱抵抗 ($^\circ\text{C/W}$)
 W : 発生損失 (W)
 L : 熱通過の長さ (m)
 A : 熱通過断面の面積 (m^2)
 λ : 熱伝導率 ($\text{W}/^\circ\text{C m}$)
 α : 熱伝達係数 ($\text{m}/^\circ\text{C m}^2$)

5.1 おもな各部分の熱伝導率、熱伝達係数、熱抵抗の計算

(1) 固定子コイル絶縁物の合成熱伝導率は次の式より求められる。

$$\lambda_m = \frac{t}{\frac{t_1}{\lambda_1} + \frac{t_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{t_m}{\lambda_m}} \quad (4)$$

$$t = \sum_{n=1}^m t_n \quad (5)$$

ここに、 λ_m : 合成熱伝導率 ($\text{W}/^\circ\text{C m}$)
 $t_1 \sim t_m$: 各絶縁物の厚み (m)
 $\lambda_1 \sim \lambda_m$: 各絶縁物の熱伝導率 ($\text{W}/^\circ\text{C m}$)
 t : 各絶縁物の厚みの和 (m)

よって熱抵抗は(2)式より求められる。

(2) 固定子コイル端部絶縁物と電動機内部空気との間の熱伝達係数は風速を仮定すれば

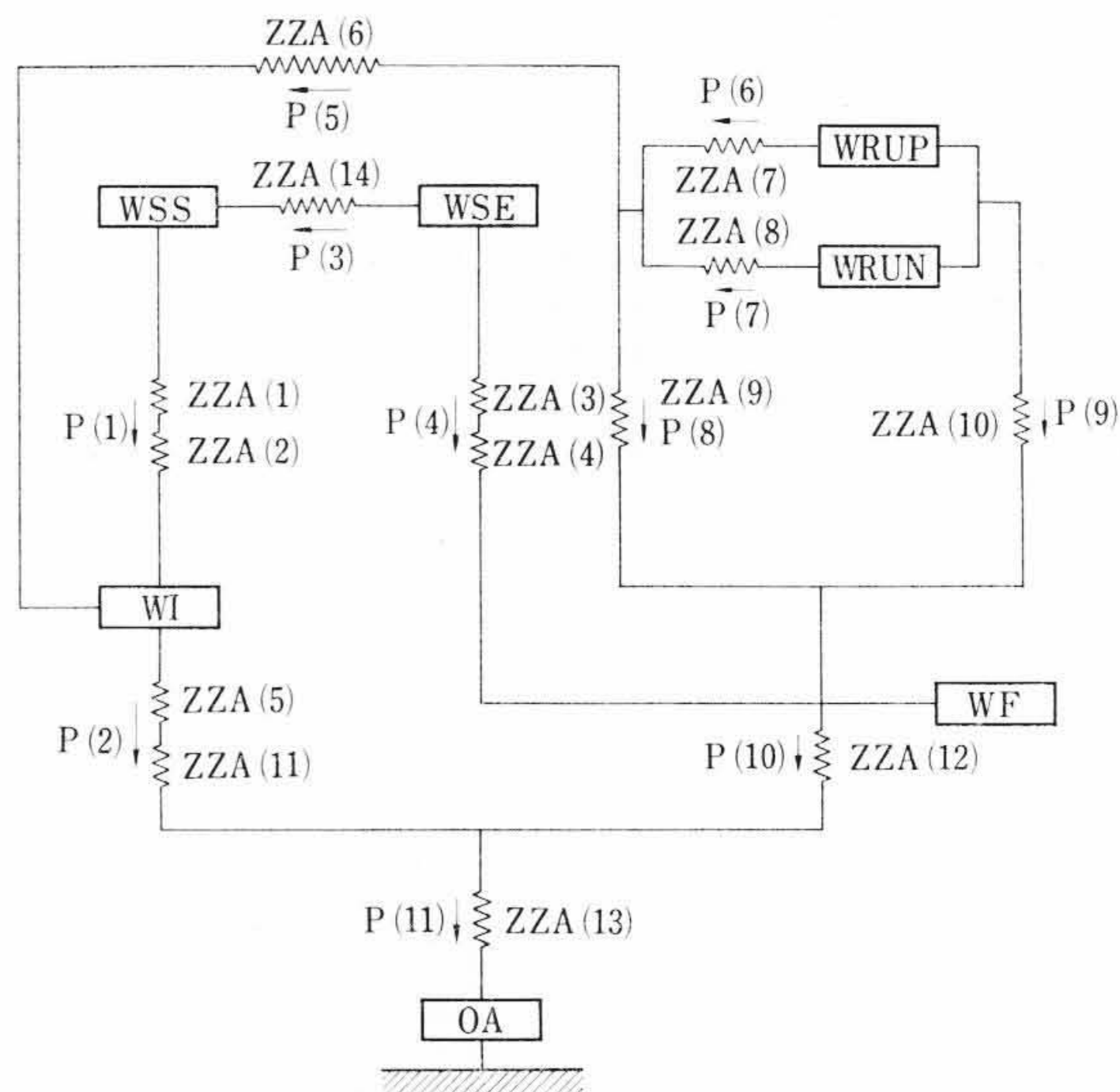
$$\alpha = 16.5 V^{0.65(1)} \quad (6)$$

ここに、 α : 熱伝達係数 ($\text{W}/^\circ\text{C m}^2$)
 V : 固定子コイル端部における風速 (m/s)

よって熱抵抗は(3)式より求められる。

(3) 回転子鉄心と回転子導体との間の熱抵抗はスロット形状が第10図に示すとおりであるとすれば、(2)式より求められる。

(4) 固定子鉄心と回転子鉄心との間の熱伝達係数は実験によって決定される。これは固定子鉄心と回転子鉄心との間のエアギャ



第11図 電子計算機に使用したリブ冷却方式全閉外扇形電動機の熱等価回路網

ップ、回転子半径、回転子の周速、エアギャップの熱伝導率などから求めることができる。

(5) 固定子わくと固定子鉄心との間の熱抵抗

固定子わくに単に鉄板を順々に積む方法では固定子わくと鉄心との間のエアギャップ、すなわち、鉄板の lamination による凸凹を考慮しなければならない。この点を慎重に検討して、鉄板外径と固定子わく内径の寸法公差、鉄板の積み方などを決定した。

(6) 回転子導体と内部空気との間の熱伝達係数は一般に回転子外径と回転数との一次方程式であらわすことができる。すなわち

$$\alpha = k_1 + k_2 V \quad (7)$$

ここに、 α : 熱伝達係数 ($\text{W}/^\circ\text{C m}^2$)
 V : 内部空気の風速 (m/s)

(7) 固定子わくと外部空気との間の熱抵抗

固定子わくの温度分布は固定子わくの鉄心背面とそうでない部分において温度差が現われ、熱流が鉄心背面よりコイル端部の固定子わくに流れるが、計算の簡単化のために、固定子わく、エンドブラケットの外部空気の接する温度は均一なものと仮定する。

そうすると固定子わくのリブの熱伝達係数は F. Heiles 氏の理論をもちいて求めることができ⁽²⁾、風速の関数としてあらわされる。

(8) 内部空気と固定子わくとの熱伝達係数は一般に固定子わく内の風速の一次方程式にて現わすことができる。

5.2 電子計算機を使用した温度上昇計算

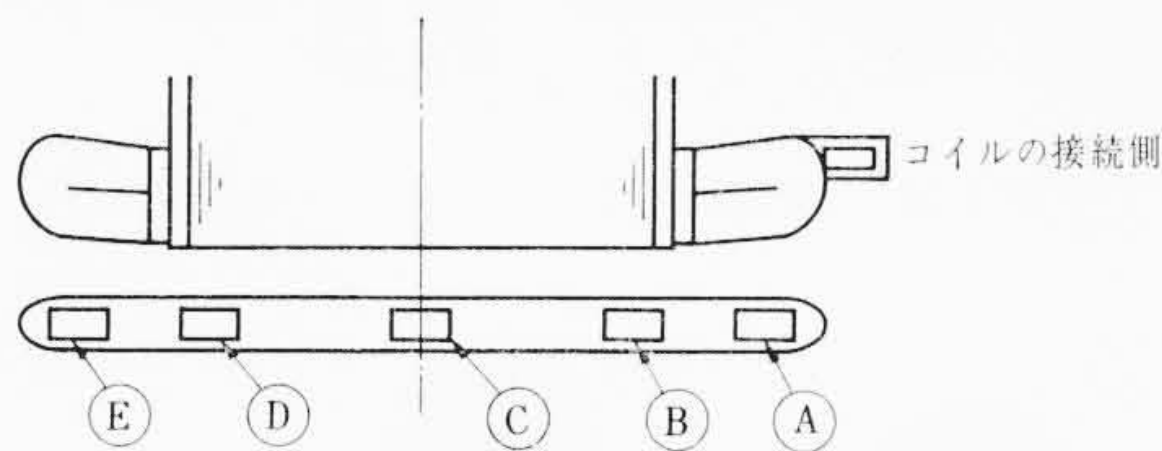
実際に電子計算機に使用した電動機の熱等価回路網は第11図に示すようなものである。

ここに、WSS: 固定子コイルのスロット内損失 (W)
WSE: 固定子コイルのコイル端部の損失 (W)
WRUP: 回転子の上バーおよび上エンドリング部の損失 (W)
WRUN: 回転子の下バーおよび下エンドリング部の損失 (W)
WI: 固定子鉄心の損失 (W)
OA: 外部空気の温度上昇 ($^\circ\text{C}$)

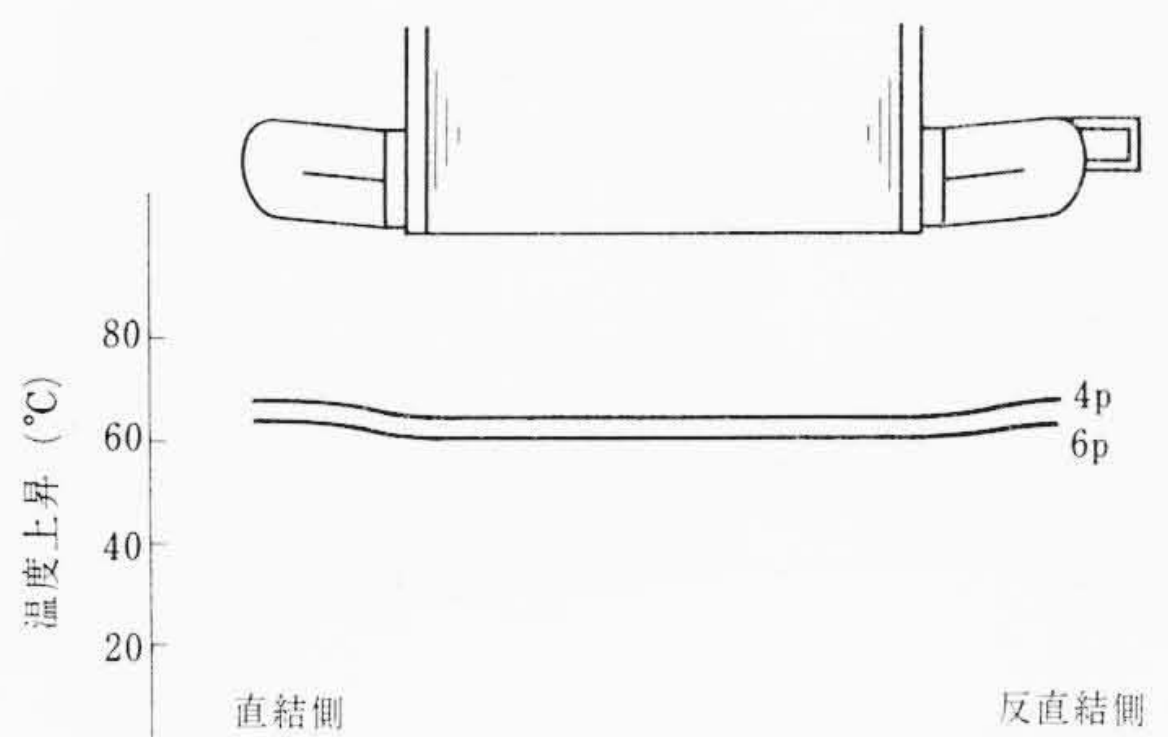
各部の熱抵抗とそこを流れる熱損失はそれぞれ第11図に示すとおり、ZZA(1)~ZZA(14), および P(1)~P(11) であり、ZZA(1)~ZZA(14) を決定すれば、未知数である P(1), P(2), ..., P(11) は下記のように11元1次連立方程式として解くことができる。

0	0	0	0	-1	1	1	-1	0	0	0	P(1)	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	P(2)	0
0	0	0	1	0	0	0	1	1	-1	0	P(3)	-WF
-1	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	P(4)	WI
1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	P(5)	WSS
0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	P(6)	WSE
0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	P(7)	WRUP +WRUN
{ZZA(1) +ZZA(2)}	{ZZA(5) +ZZA(11)}	ZZA(14)	-{ZZA(3) +ZZA(4)}	0	0	0	0	0	-ZZA(12)	0	P(8)	0
0	{ZZA(5) +ZZA(11)}	0	0	ZZA(6)	0	0	-ZZA(9)	0	-ZZA(12)	0	P(9)	0
0	0	0	0	0	ZZA(7)	-ZZA(8)	0	0	0	0	P(10)	0
0	0	0	0	0	0	-ZZA(8)	-ZZA(9)	ZZA(10)	0	0	P(11)	0

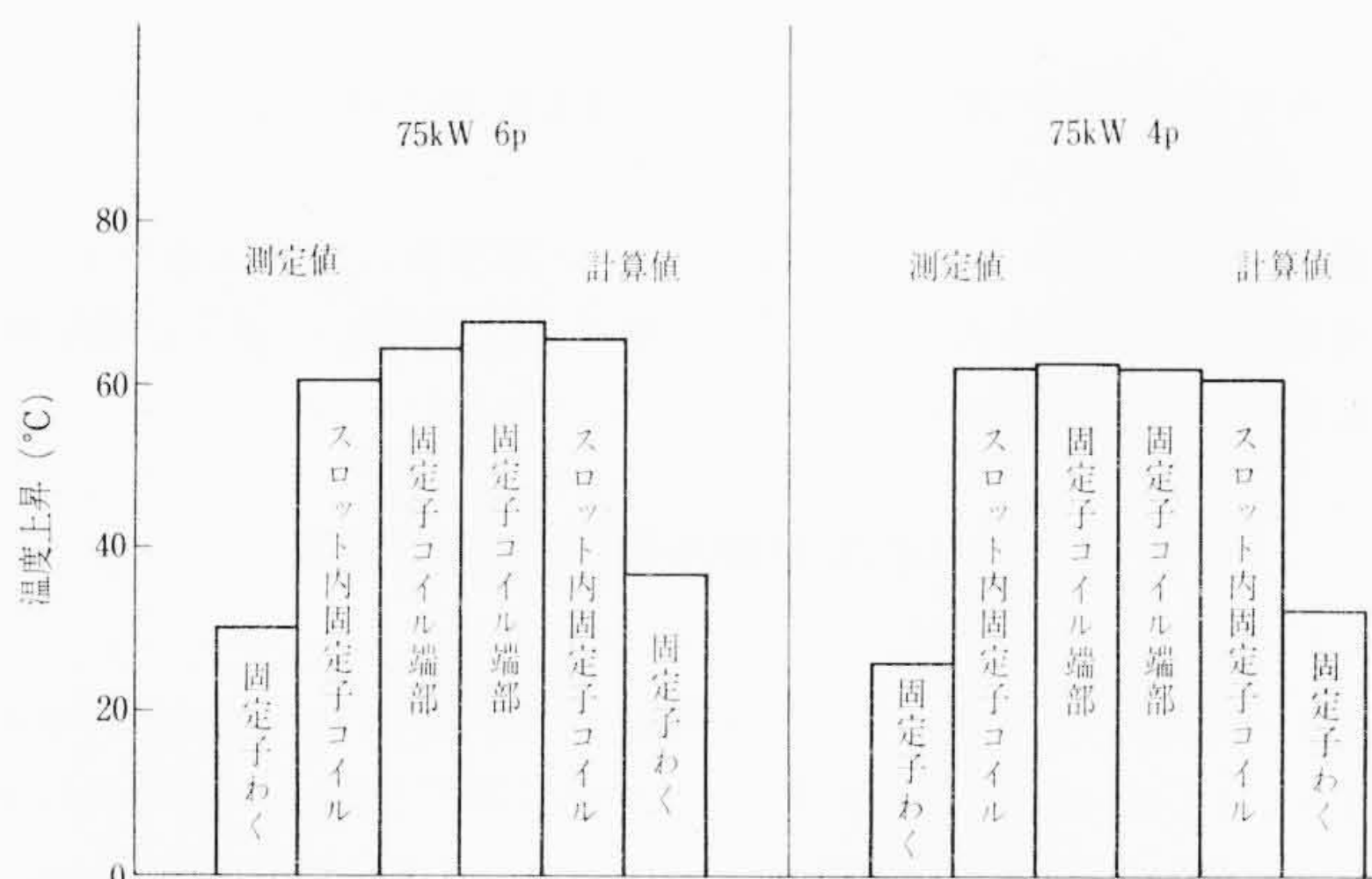
上式より P(1), P(2), ……P(11) を求め、同時に固定子わく、固定子鉄心、スロット内固定子コイル、コイル端部、内部空気、回転子鉄心、および回転子導体などの温度上昇が求められる。



第12図 固定子コイルのサーミスタ素子埋込箇所



第13図 固定子コイル内部温度分布



第14図 温度上昇値における測定値と計算値との比較

5.3 実測値と計算値との比較

固定子コイルの温度測定はサーミスタ素子により行なった。素子は電動機1台に対して10個使用した。素子の固定子スロット内の埋込は上層コイルと下層コイルとの間にそう入し、コイル端部は支持テープにより絶縁物の上に取り付けた。その測定箇所は第12図のとおりである。第13図は全負荷時運転における固定子コイルの温度分布測定結果を示したものである。スロット内温度分布は一様であり、固定子鉄心よりの熱放散の良好であることがわかる。

温度上昇計算式において、固定子わくの平均風速が外扇の径、幅に対してどのような関係になるかが問題であるが一般に次のような実験式が考えられる。

$$V_2 = V_1 - k_1 L \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$V_1 = \frac{k_2 \cdot \phi \cdot W \cdot V_0}{S} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 V_2 : 固定子わく中央部のリブ間の平均風速 (m/s)
 V_1 : 固定子わくの外扇側のリブ間の平均風速 (m/s)
 L : 固定子わく長 (m)
 ϕ : 外扇の径 (m)
 W : 外扇の幅 (m)
 V_0 : 外扇の周速 (m/s)
 S : 固定子わくのリブ間の断面積 (m²)
 k_1, k_2 : 定数

以上のような計算経過によって得た計算値と測定値との比較の一例を示せば第14図のとおりであり、実用上十分な計算式である。

6. 結 言

以上、小形標準化の一環である3kV級全閉外扇かご形電動機の構造および特長について述べるとともに、電子計算機を利用した熱等価回路網による温度上昇計算法を述べた。

今後も関係各位のご要望にそえるように製品の改良開発に不断の努力を重ねていく所存である。

参 考 文 献

- (1) M. Liwsihitz: Electrische Maschine
- (2) F. Heiles: EUM Wien 15 Juli 1952
- (3) IEC Publication 72-1
- (4) 今井: 日立評論 47, 1233 (昭40-7)