

275 kV 350,000 kVA 変圧器の組立輸送

Transportation of 275 kV 350,000 kVA Transformer

栗田 健太郎*
Kentarô Kurita

栗山 卓*
Takashi Kuriyama

内 容 梗 概

中部電力株式会社西名古屋変電所用として、等価容量 350,000 kVA 変圧器を製作中であったが、このほど完成しすでに現地据付も完了した。

本変圧器は貨車輸送変圧器として、また変電所用変圧器として、わが国最大であるばかりでなく、三巻線の超高圧変圧器として世界有数のものである。

ここに、貨車輸送の問題点と巻線、鉄心および冷却構造などの特長を中心に解説した。

1. 緒 言

電力輸送の近代化に伴ない、発電所機器の単機容量は増大化の一途をたどっている。わが国においても火力発電所の単機出力は 200~400 MW となり、さらに 600 MW も計画されている。

変電所用としても、300 MVA 級の変圧器が続々製作されようとしている現状であり、また 500 kV 級送電の技術的検討も着々進み、近く実現されようとしている。

これら超高圧大容量機器の製造工場から現地への輸送にあたって、火力発電所用は、主として海上輸送によるため、機器の設計、製作にあたって輸送上の寸法、重量の制約はまずないが、変電所用機器のほとんどは鉄道による組立輸送となり、輸送上の寸法、重量が制約されるので、変圧器の組立輸送限界拡大についての研究が望まれている。(以下、鉄道による組立輸送を単に組立輸送と呼ぶ。)

今回、中部電力株式会社西名古屋変電所に納入した変圧器は、等価容量 350,000 kVA の超大形器にもかかわらず、巻線、鉄心および冷却構造などに新技術の成果を取り入れ、わが国最大の私有貨車シキ-700 号を使用して完全三相組立輸送に成功した。

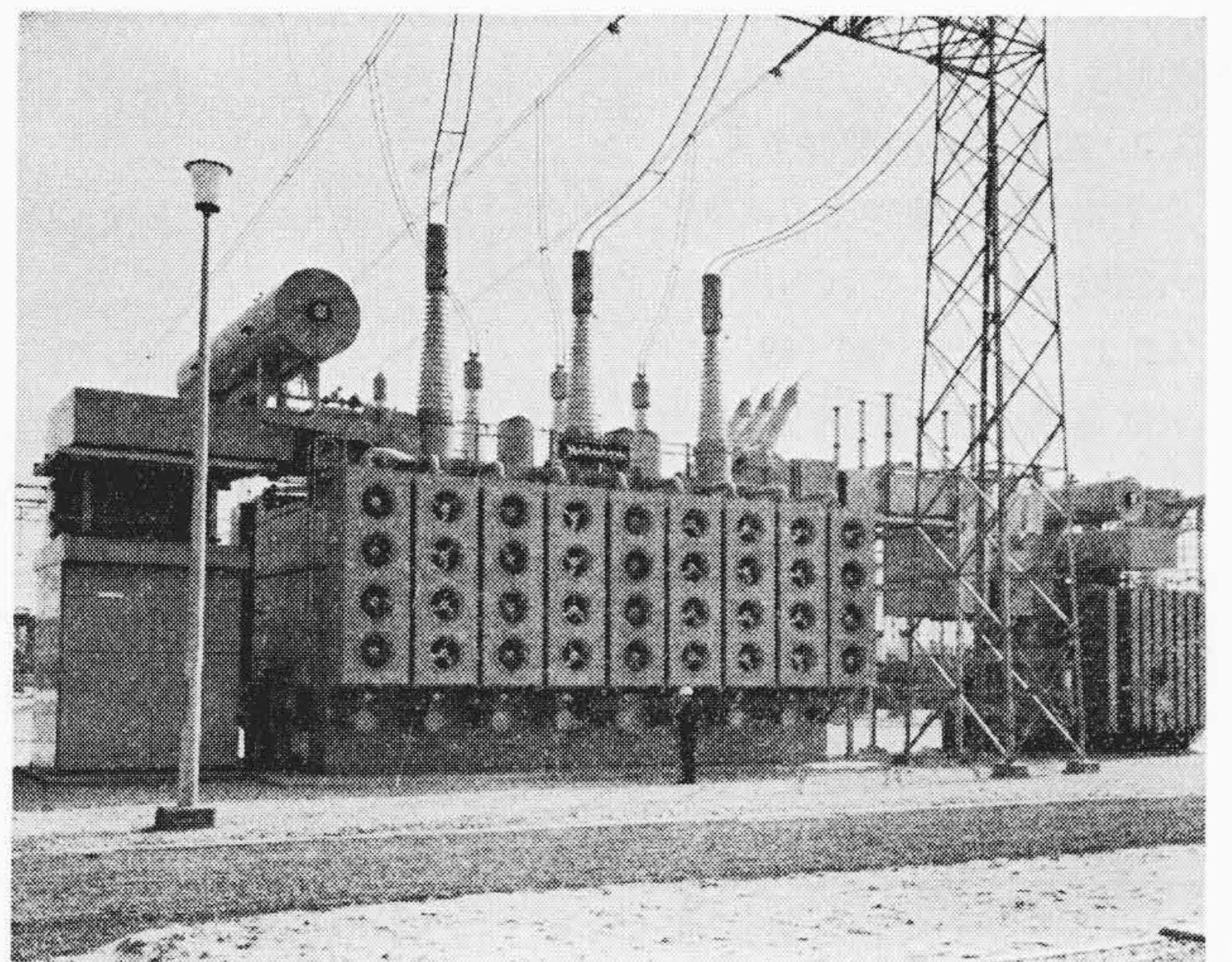
なお、引き続いて東名古屋変電所用として、同一仕様のものを製作中である。

おもな仕様および諸元

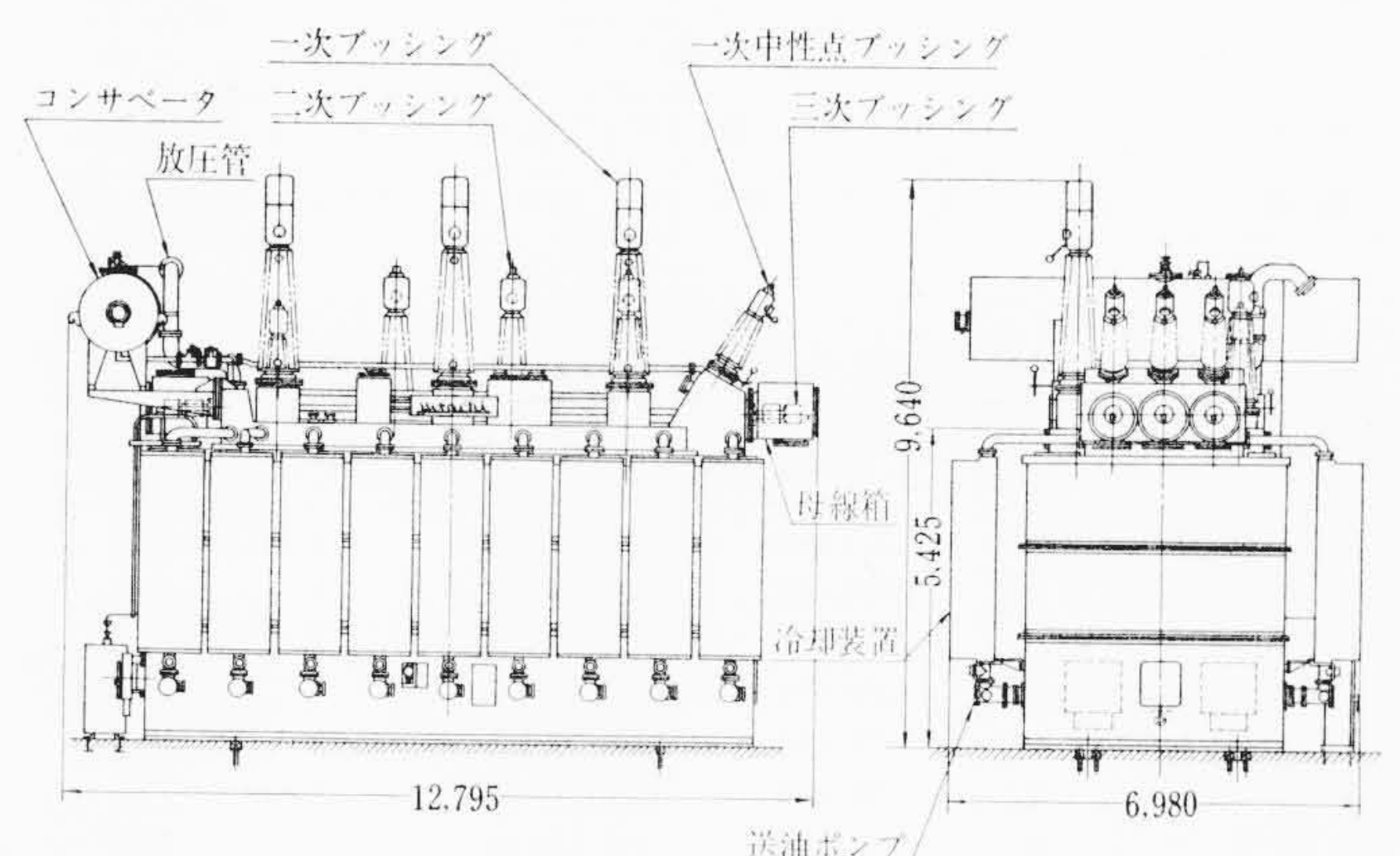
形 式	三相三巻線内鉄形 屋外用送油風冷式
等 価 容 量	350,000 kVA
出 力	一次 300,000 kVA 二次 300,000 kVA 三次 100,000 kVA
電 圧	一次 F275-R262.5-F 250 kV 二次 154 kV 三次 33 kV
騒 音	80 ホン以下
総 重 量(油含)	395,000 kg
油 量	84,000 l

なお、一次中性点側には負荷時電圧調整装置が接続され、その仕様は次のとおりである。

形 式	三相内鉄形 自冷式
出 力	線 路 容 量 300,000 kVA 自 己 容 量 30,000 kVA
電 圧	一次 33 kV 二次 調整電圧 +12.5 kV~-25 kV 3125 V ステップ 13 タップ



第 1 図 完成した 350,000 kVA 変圧器



第 2 図 350,000 kVA 変圧器外形図

2. 組 立 輸 送

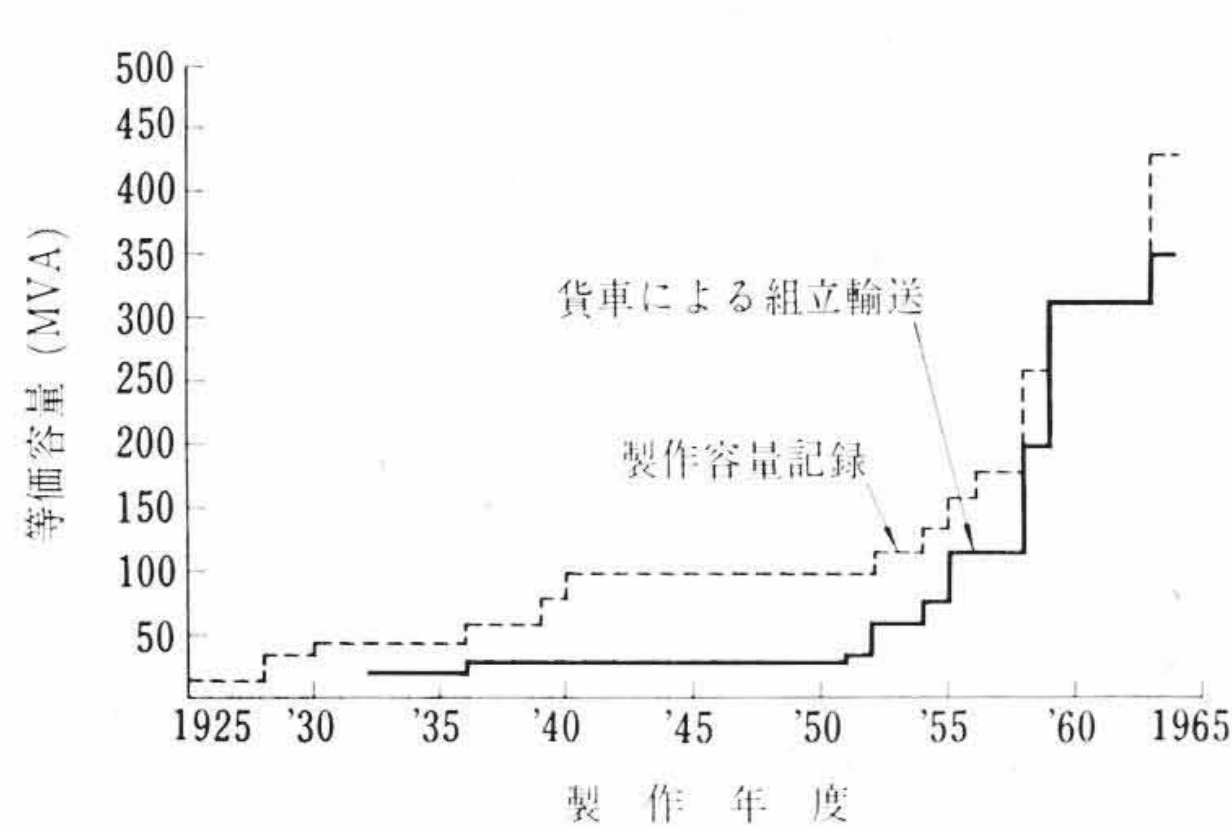
2.1 組立輸送の発達

変圧器の輸送は絶縁の信頼度向上、据付工事期間の短縮、経費の節減などの点から組立輸送が望ましい。

諸外国においては早くから大容量変圧器の組立輸送が実施され、特にドイツにおいては 1952 年に、245/10.5 kV, 200,000 kVA 変圧器をコンサベータのみはずした組立輸送を行なっている⁽¹⁾。

わが国の鉄道は狭軌であること、トンネルが多いことなどから輸送条件が極度に制約されているが、輸送技術の研究発達により、超大形の変圧器輸送専用貨車もでき⁽²⁾、一方、変圧器製造技術面でも、良質の方向性けい素鋼帯の使用、作業方法や処理の改善、絶縁の合

* 日立製作所国分工場



第 3 図 わが国における変圧器組立輸送の進歩

理化による巻線その他の縮小により、組立輸送の限界が拡大され、350,000 kVA 変圧器の組立輸送を可能とするまでに至った。

いま、わが国における組立輸送の進歩のあとをみると第 3 図のとおり、ここ数年来の技術革新による輸送限界容量の拡大は驚くべきものがある。

2.2 組立輸送の問題点

変圧器を組立輸送するに当たって問題となるのは、寸法および重量の制限であり、これらについて概説する。

2.2.1 寸法制限

鉄道輸送の寸法制限は、幅および高さ寸法であり、長さ（進行方向）寸法はほとんど考えなくてもよい。したがって国鉄の建築限界、車両限界および輸送限界すべて幅、高さ寸法についてのみ規定し、長さの制限は特にない。しかし曲線通過時の偏倚に関係があるので、長さを無制限にとることは許されないわけである。

第 1 表 国鉄の線路区分による基準						
基準		1 級線	2 級線	3 級線	4 級線	簡易線
最小半径 曲線(m)	本 線	400	300	250	200	160
	分 岐 点	240	160	160	100	100
	駅 ホ ー ム	500	500	400	300	200
軌 道 の 負 担 力		K-18	K-17	K-15	K-14	K-11
橋 梁 の 負 担 力		KS-17	KS-17	KS-15	KS-14	KS-10

第 2 表 組立輸送された各電力会社の代表変圧器				
納 入 先	等 価 容 量 (kVA)	電 圧 (kV)	台 数	最 初 の 納 入 年
電 源 開 発 (西 東 京)	312,000	275/147/12.6	1	1959
東 北 電 力 (新 新 潟)	290,000	268.8/154/31.5	1	1961
東 京 電 力 (北, 東 東 京)	260,000	275/147/15.75	6	1959
中 部 電 力 (西, 東 名 古 屋)	260,000	275/154/77	2	1960
関 西 電 力 (伊 丹)	230,000	275/147/15.4	2	1960
九 州 電 力 (西 谷)	200,000	220/110/66	2	1958
中 国 電 力 (広 島)	195,000	232/110/66	1	1961
四 国 電 力 (香 川)	140,000	187/66/21	1	1963
北 海 道 電 力 (西 札 幌)	115,000	187/66/21	1	1962
北 陸 電 力 (富 山)	95,000	161/77/10.5	1	1957

第 3 表 変圧器輸送貨車の諸元				
形 式 (シキ)	700	300B	140B	190
積 載 重 量 (t)	280	210	150	73
貨 車 重 量 (t)	110	60	61	30
全 長 (m)	48.8	37.7	34.9	20.8
車 軸 数	28	20	16	8
積 載 寸 法 (m)	幅	3.3	3.3	2.9
	高 さ	4.0	4.0	4.0
	長 さ	10.0	10.0	6.6
積 載 法	つりかけ式	つりかけ式	つりかけ式	落 込 式

曲線の最小半径は第 1 表に示すとおりであるが、建築限界においては、(1)式に示すように W 寸法だけ緩和されているので、修正偏倚として輸送限界を見込めばよいわけである。

$$W=22500/R \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 W： 拡大する寸法 (mm)

R： 曲 線 半 径 (m)

しかし、実際の輸送限界は単純なものでなく、変圧器輸送モデルを事前に運行して慎重に輸送限界を検討しておき、輸送限界いっぱいを有効に活用することが、輸送限界容量の拡大と経済設計を行なううえに重要である。

日立製作所においてはすでに、第 2 表に示すとおり、本土はもちろん、北海道、四国、九州にわたる各電力会社到大形変圧器の組立輸送を行なった貴重なデータをもっているの、今回の 350,000 kVA 変圧器の組立輸送についても有利に計画を進めることができた。

2.2.2 重量制限

重量制限としては、第 1 表に示した軌条の許容負担荷重および使用する特大貨車の積載荷重により決まるものである。すなわち、KS 荷重と呼んでいる橋の強度、単位長さ当たりの軌条の負担荷重、軸の負担荷重などであるが、第 3 表に示す変圧器輸送用貨車はいずれもこれら規定を満足するものであり、国鉄に車籍を編入してある。

今回の 350,000 kVA 変圧器輸送には 280 t 積シキ-700 号を使用したしたので、重量制限に対してはなお十分余裕があった。

3. 内 部 構 造

前述のように、輸送上における重量制限は問題なかったが、輸送寸法については、輸送限界寸法の有効な活用と、本体の合理的縮小が要求されたのでこれらを中心に内部構造について述べる。

3.1 鉄 心

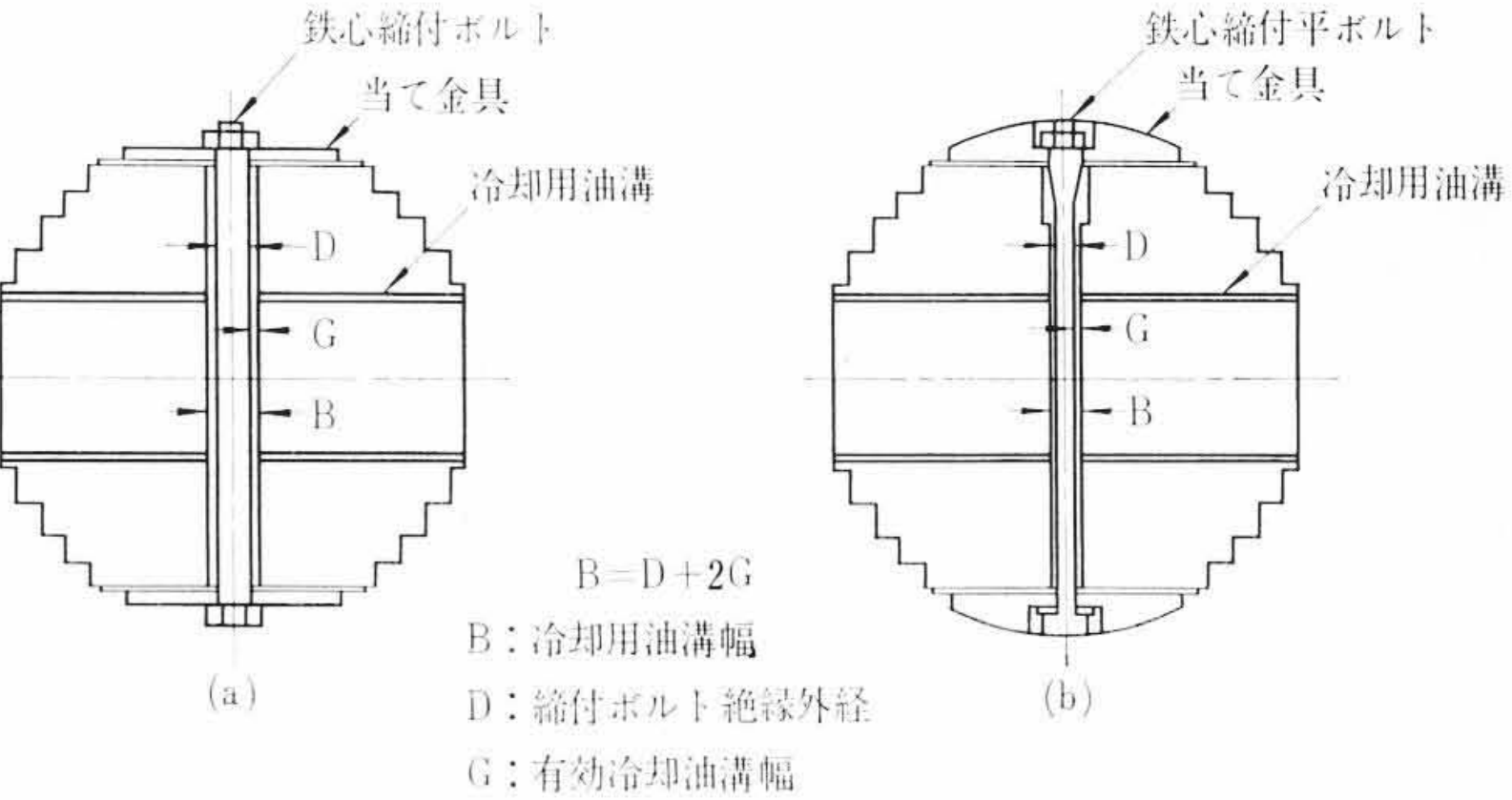
輸送上、不利な制限をうけるのは高さ方向であるため、鉄心は三相五脚構造とし⁽³⁾、国産方向性けい素鋼帯を使用した。また幅切り、長さ切断、焼鈍など一貫した流れ作業と、厳密な品質管理により性能の改善に努めた。

(1) 損失、励磁電流の減少

方向性の磁気特性を有効にいかした。すなわち鉄心締付用貫通ボルト穴による磁束偏歪をなくし、損失、励磁電流の減少を図るため、冷却用油みぞを利用した締付方法および主脚と継鉄との接合部を額縁ラップジョイント構造とした。

(2) 鉄心外径の縮小と重量の軽減

冷却用油みぞを利用して鉄心を締め付ける方法は、磁気特性の向上には有効であるが、第 4 図(a)に示すように、普通の締付ボルトを採用すると、鉄心油みぞ幅の B 寸法は必要以上に大きくなり、



第 4 図 鉄 心 脚 の 締 付 図

鉄心断面積を減少させる結果となって、せっかく有利な締付構造も実質的效果をあげることが少なくなる。本変圧器に採用した鉄心締付構造は、第4図(b)に示すように平ボルトを使用することにより⁽⁴⁾、鉄心油みぞ幅B寸法が縮小され、鉄心断面積を拡大することができて、相対的には鉄心外径が小さくなり、重量を軽減することができた。

(3) 締付圧力の均等化

組立用の金具を介して積鉄作業を完了したけい素鋼板は、油圧により適正な締付圧力で均一に締め付けられ、この状態で前述の平ボルトと交換をすることにより、締付圧力を均等に保つことができる。

3.2 巻 線

(1) 輸送限界に適合した巻線の配置

一次、二次巻線はデスクコイルとし、電流の比較的大きい三次巻線はヘリカルコイルとした。巻線の配置は内側より三次(低圧)、二次(中圧)、一次(高圧)巻線とし、高、中圧巻線には段絶縁を採用し、中性点側を低減絶縁とした。高圧巻線の線路側は絶縁上有利な巻線の中央におき、上下並列接続として中性点側を鉄心継鉄部側とした。これにより第5図に示すとおり駅ホームに相当する輸送限界の縮小部分を低減絶縁を行なった中性点側とし、タンクの形状を輸送限界に適合するよう縮小することができた。

なお、高、中圧巻線には、コイル内部に遮へい導体を巻き込んで直列静電容量を飛躍的に大きくした制振遮へい⁽⁵⁾⁽⁶⁾方式とし、衝撃電圧に対する信頼度を高めている。

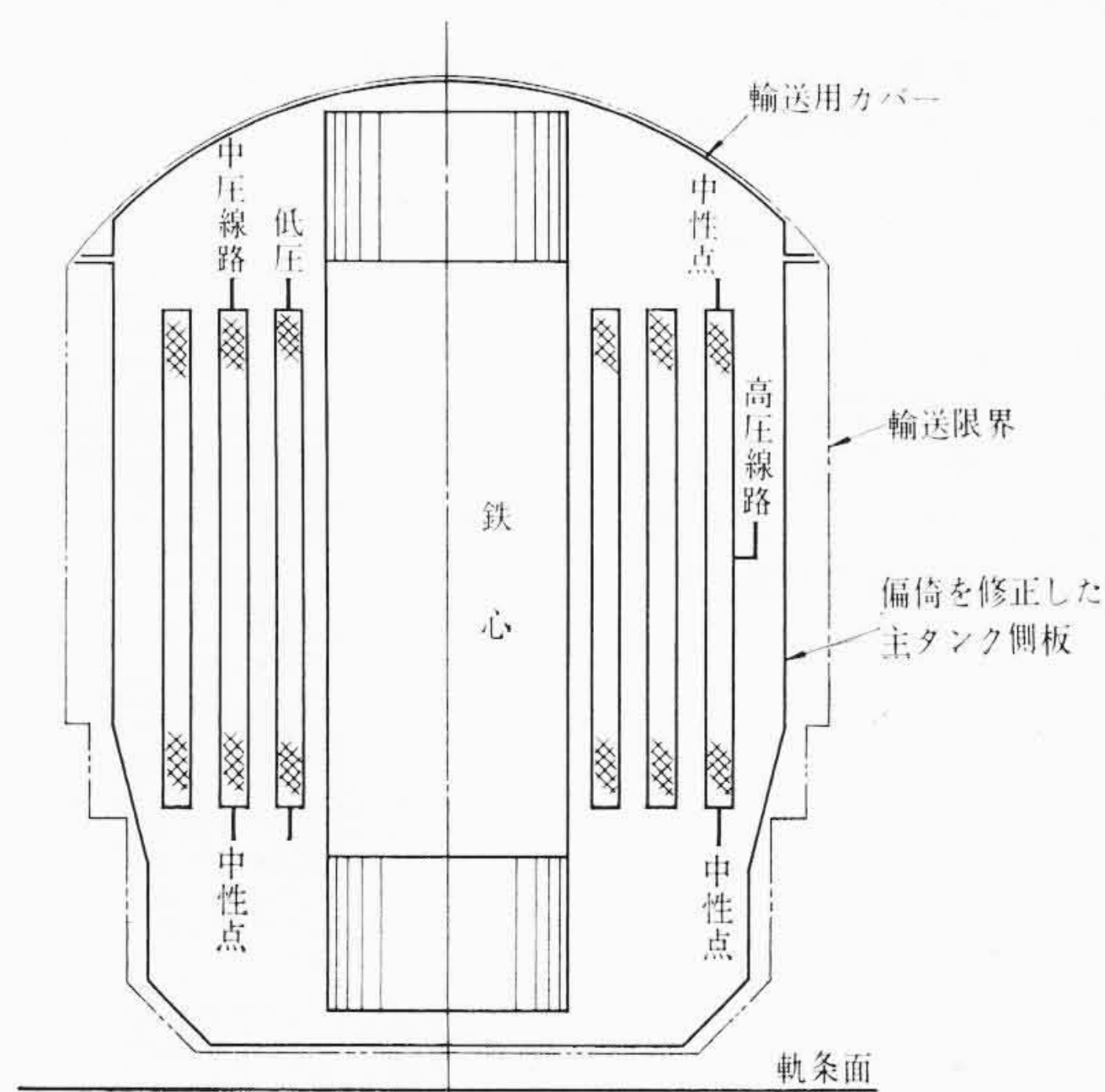
(2) 占積率をよくした巻線構造

組立輸送限界を拡大するには、第5図よりもわかるように、巻線寸法を縮小することが肝要である。巻線の占積率を高め、小形化を図るには、並列導体間に渦電流防止のために必要なわずかの絶縁を行ない、並列導体を一括して絶縁する多導体電線⁽⁷⁾とすることが、合理的かつ有効な方法である。この多導体巻線は特殊巻線機により導体を絶縁しながら巻線作業を行なっている⁽⁸⁾。

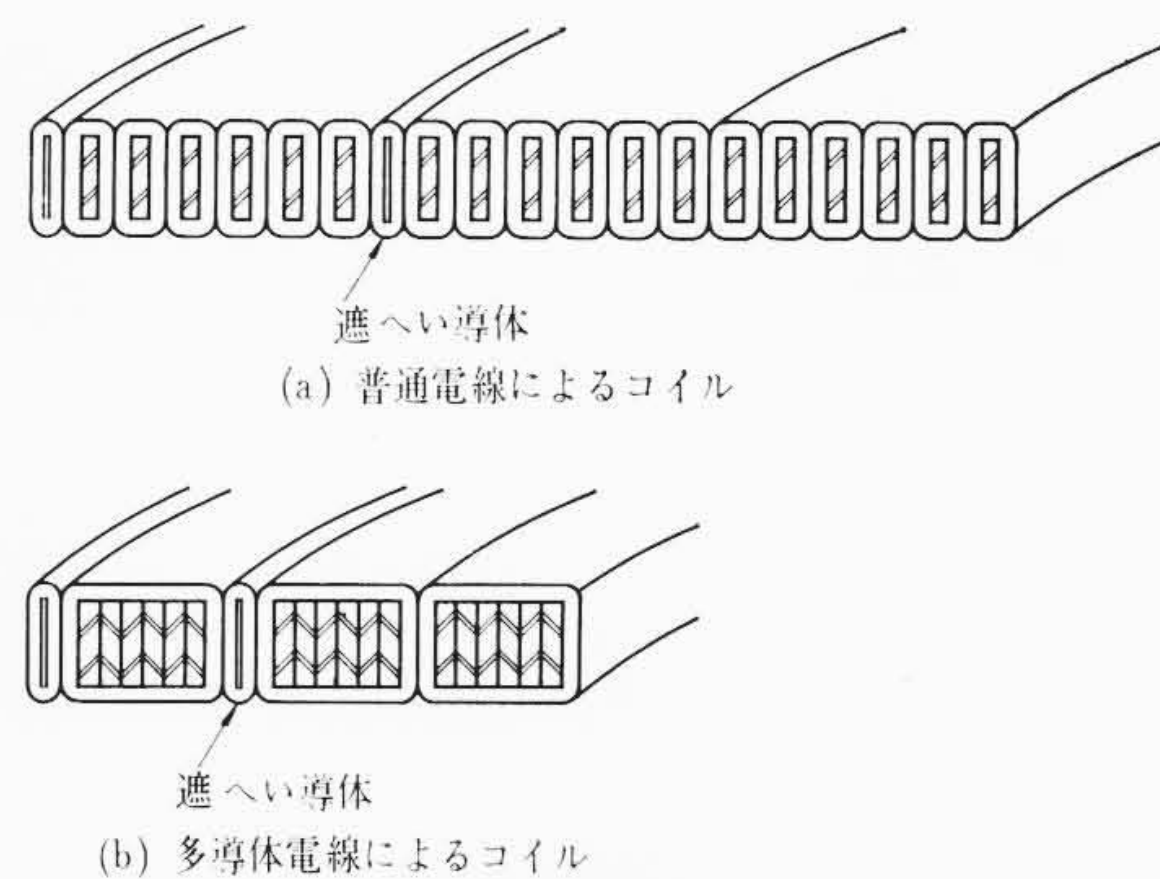
普通導体による巻線のコイルでき上がり寸法と多導体による巻線のコイルでき上がり寸法を比較すると第6図に示すように、大容量高電圧のものほど効果が大きく、コイル幅は約60%程度まで縮小され、本変圧器の組立輸送に最大の効果をあげた。

(3) 漂遊負荷損の低減

容量の増加に伴い、漏えい磁束の量も大きくなるので、磁束分布を電解液槽法⁽⁹⁾、および電子計算機により解析を行なって電線寸法および電線の転移を適切に行なって巻線導体に生ずる渦流損



第5図 巻線配置図



第6図 普通電線と多導体電線の比較(例)

失の低減を図った。

また、中身構造物には必要に応じ非磁性材料の採用、タンク内側の一部に磁気遮へい板などを取り付けて漂遊負荷損の低減を図った。

4. 冷 却 構 造

容量が大形になるに従って、冷却が重要な問題となってくる。すなわち、発熱体の冷却を考える場合に、その単位体積当たりの発生損失がほぼ一定のとき、全損失は寸法のほぼ3乗に比例し、冷却面積は寸法のほぼ2乗に比例する。したがって、単位表面積から放散される熱放散密度は大きくなるので有効な強制冷却が必要になってくる。

4.1 巻線の強制冷却

巻線の温度上昇 θ_c は

$$\theta_c = \theta_0 + \Delta\theta_c \dots\dots\dots (2)$$

となる。ただし

$$\Delta\theta_c = \Delta\theta_i + \Delta\theta_f + \Delta\theta_o \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 θ_0 : 油の空気に対する温度差 (°C)

$\Delta\theta_c$: 巻線の油に対する温度差 (°C)

$\Delta\theta_i$: 絶縁物中の温度降下 (°C)

$\Delta\theta_f$: 油の境界層の温度降下 (°C)

$\Delta\theta_o$: 巻線出入口における温度差

$\Delta\theta_i$ は巻線の絶縁物からの熱伝導度により決まるものであり、強制冷却に関係のある $\Delta\theta_f$ 、 $\Delta\theta_o$ についてとりあげてみる。

$$\Delta\theta_f = \frac{W}{\alpha v^n} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 W : 熱放散密度 (Watt/m²)

α : 常 数

v : 巻線表面を洗う油速 (m/s)

n : 指 数

$$\Delta\theta_o = \frac{W_c}{c \cdot \rho \cdot S \cdot V} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 W_c : 巻線内の発生損失 (kW)

c : 油の比熱 (kW·s/kg °C)

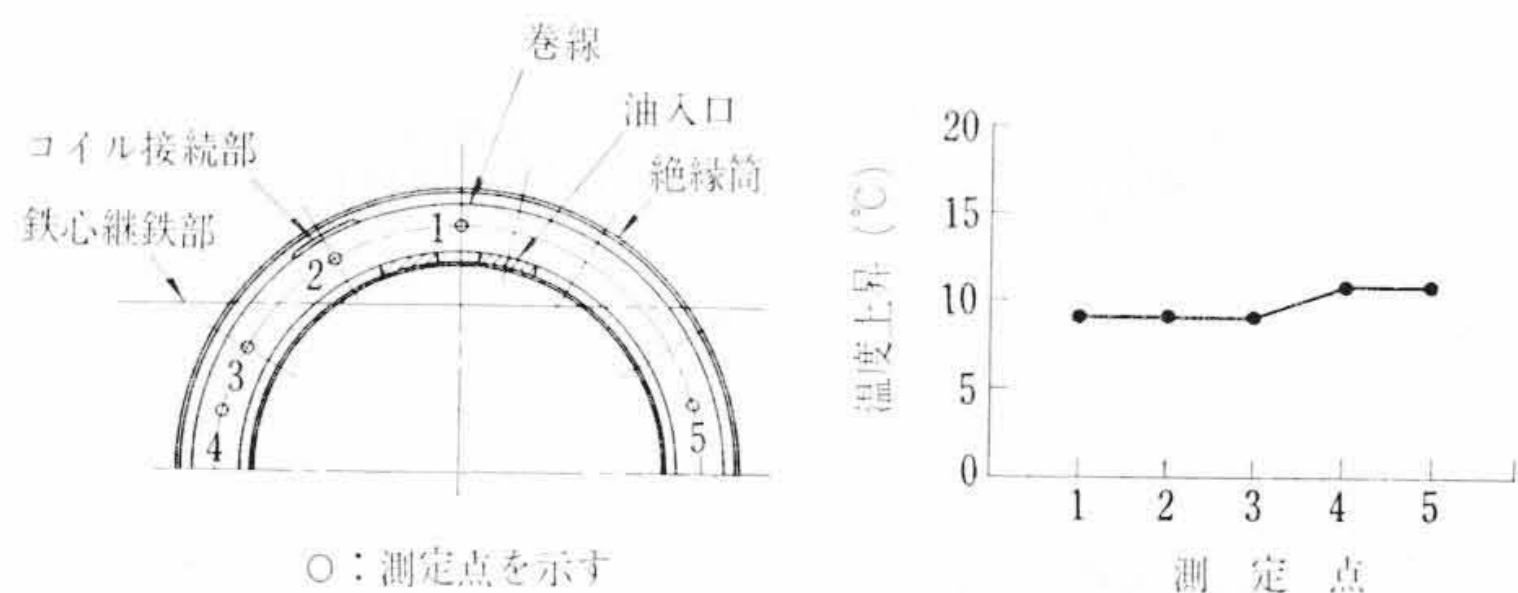
ρ : 油の密度 (kg/m³)

S : 油の流路断面積 (m²)

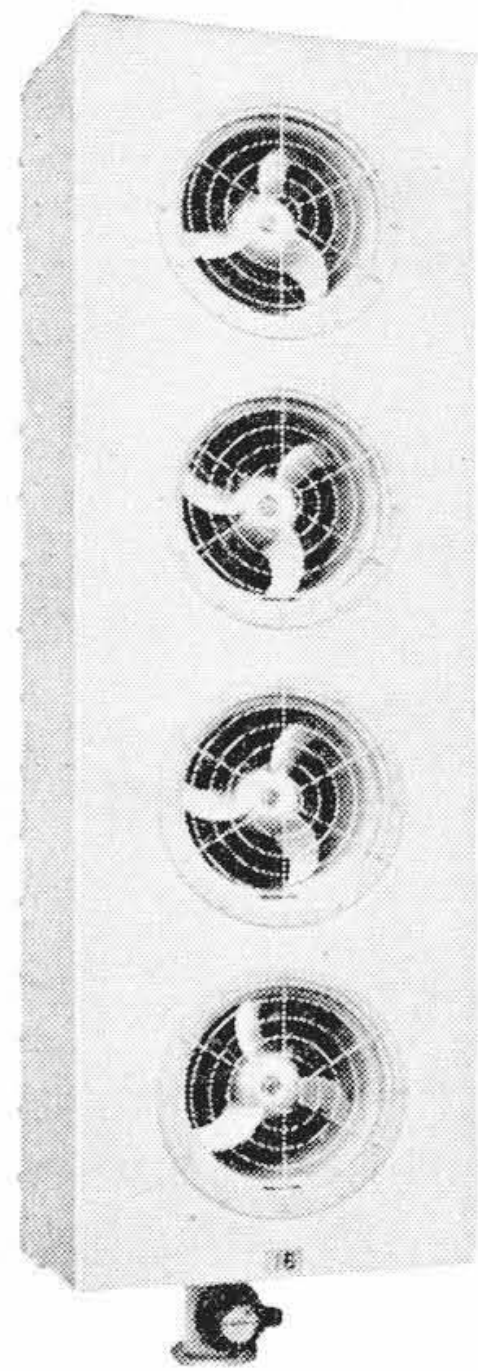
V : 油の流速 (m/s)

巻線の温度上昇は(4)(5)式からわかるように油の流れに関係あり、流速が大きく、各コイル表面を一様に洗って流れることが冷却効果をよくする条件である。この観点から大形変圧器においては巻線の強制冷却方式を採用し、よい結果を得ている⁽¹⁰⁾。

今回は記録的大容量であるので特に三次元の実物と全く同一の巻線を製作し、油流の状態と供給損失を種々変えて、各部の温度上昇



第7図 三次元実物大模型による巻線の温度上昇



第8図 ファン

を測定して計算値との比較検討を行なうなど慎重を期した。

測定結果の一例を第7図に示す。

4.2 油冷却装置

油冷却装置としては、送油風冷式のユニットクーラ18組をタンクの前後に分散配置して取り付け、うち1組は取付予備である。

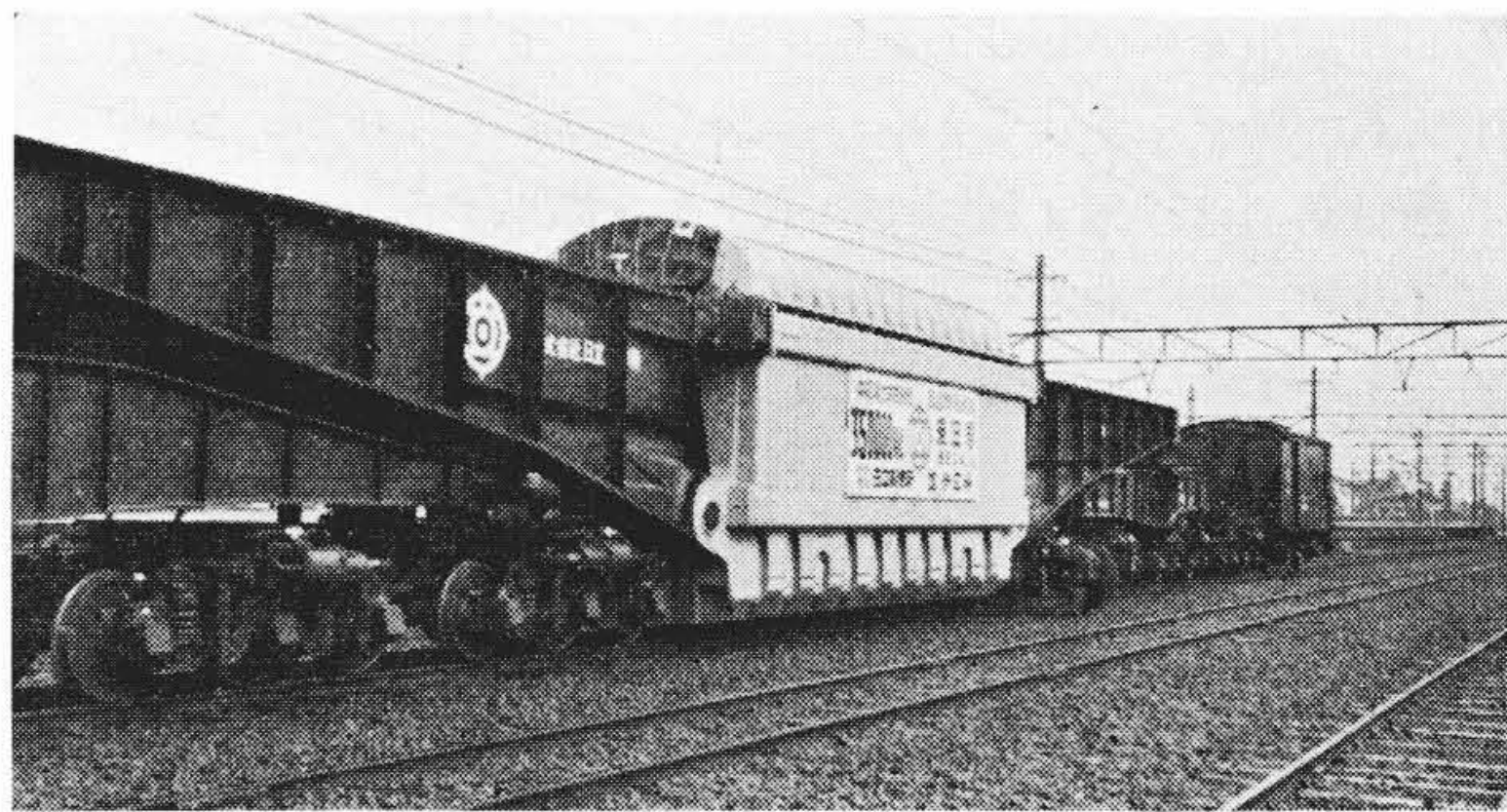
クーラは負荷に応じてグループ運転が自動、手動いずれでも可能となっている。軽負荷のとき特定のクーラのみ運転しないよう二つのグループが反転切換できるようにしてある。

送油ポンプは出力を従来の約2倍とし、流量、揚程を増してクーラ管内の流速を増し、冷却効率をあげ、ファンを低圧力のものとして騒音の低減に努めた。第8図に新形ファンの外観を示す。

5. 外部構造

騒音の低減には適当な磁束密度の選定、良好な鉄心構造および中身の支持方法などにより発生源を小さくすることが根本であるが、外部の構造に対しても次のような考慮を払い保証値80ホンを超えない低騒音のものとすることができた。

タンクは輸送中、車両の一部をなすものであり、輸送強度を重視しなければならない。なおこのほかに耐真空強度、振動などに対する剛性をも考慮した総合したタンク設計が必要となる。しかし、タンクに補強材を過度に入れることは、タンク重量を増加するばかり



第9図 350,000 kVA 変圧器の貨車輸送

でなく溶接構造物として考えた場合好ましくないので、タンク胴まわりはリブ入れの板による二重タンク構造として補強材を極力減らしたタンク構造とした。

輸送時は前述のように車両の一部をなす重要な役割を果たすので完成後輸送に先立ち、日立製作所が考案した簡易荷重試験装置⁽¹¹⁾を使用して十分な荷重試験をした。

タンクの周囲には簡易防音壁を取り付け、この防音壁にクーラを取り付ける構造としているので、防振支持となっている。

以上のような構造とすることにより、外部構造においても重量軽減と寸法縮小ができ外観は既設のものとはほとんど同一である。

本変圧器と高圧中性点側に接続される30 MVA 負荷時電圧調整装置間の励磁用接続導体は母線箱で保護し、その上に一次中性点側の導体をとおり、ポストがい子で支持しているので、コンパクトに併置することができた。

6. 結 言

超高圧変電所において、はじめて単器容量350,000 kVAの変圧器が中部電力株式会社において計画され、この変圧器を組立輸送形として設計製作しこのほど完成をみたことは、今後の超高圧送電計画に意義深いものがある。

なお、引き続いて東名古屋変電所納のものを製作中で、近いうち完成の見込みであるが、これを布石としてさらに新技術の開発に努め、超高圧送電の発展に貢献したい所存である。

終わりにあたり、種々ご支援を賜わった中部電力株式会社の関係各位に深甚の謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) R. Elsner: ETZ-A Heft. 20, 736 (1955)
- (2) 大江, 永弘: 日立評論 44, 624 (昭 37-4)
- (3) 栗山: 日立評論 38, 1457 (昭 31-12)
- (4) 特許出願中
- (5) 首藤: 日立評論 別冊 7, 15 (昭 29-7)
- (6) 特許 第208018号
- (7) 特許 第219478号
- (8) 特許 第267480号
- (9) 奥山, 乾, 工藤: 電気四学会論文集 737 (昭 38)
- (10) 小川, 栗田: 日立評論 40, 796 (昭 33-7)
- (11) 実用新案 第560353号