UDC 621.314.214.332

東北電力・秋田火力発電所納入 154kV 390MVA 負荷時タップ切換変圧器

154kV 390MVA On-load Tap-changing Power Transformer Delivered to Akita Thermal Power Station, Tōhoku Electric Power Co., Inc.

藤本匡昭* 雨宮勇男* 富塚善朗*
Tadaaki Fujimoto Isao Amemiya Yoshirō Tomizuka

I. まえがき

電力需要の急激な増加により新設される新鋭火力発電所は，その高効率化を目的として，単器容量増大の傾向をたどっており，これと並行して発電所用昇圧変圧器の容量増加の度合いも毎年著しいものがある．また負荷時タップ切換変圧器は，従来，超高圧系統からその下の電圧系統への連系用・逓降用としてもっぱら用いられてきたが，大容量発電所の運用，あるいは関連系統運用上の要求から，負荷時タップ切換器の信頼性向上とあいまって発電所用昇圧変圧器にも多用されてきており，今後この傾向は，ますます増加の一途をたどるものと思われる．ここに紹介する東北電力・秋田火力発電所納入 390MVA負荷時タップ切換変圧器は，昭和40年度新産都市として指定を受けた秋田地区のその後の臨海工業開発に伴う急激な電力需要に対処するため建設された新鋭大容量火力発電所の昇圧用主変圧器である．当社は発電所用昇圧用変圧器を第1表のように製作してきたが，本器は電源開発・磯子火力発電所用変圧器 280MVA をしのぐ大容量変圧器である．また，本変圧器は当社の DSF1 形負荷時タップ切換器を 154kV 巻線の中性点側に各相1個ずつ取付けた直接式負荷時タップ切換方式を採用し，巻線構造および漂遊損低減対策などに当社の誇る最新技術を駆使して完成した変圧器であり，ここにその概要を紹介して各位の参考に供したい。

II. 仕様および諸元

この変圧器の主な仕様および諸元は下記のとおりである。

形　　式　屋外用　三相　送油風冷式　内鉄形

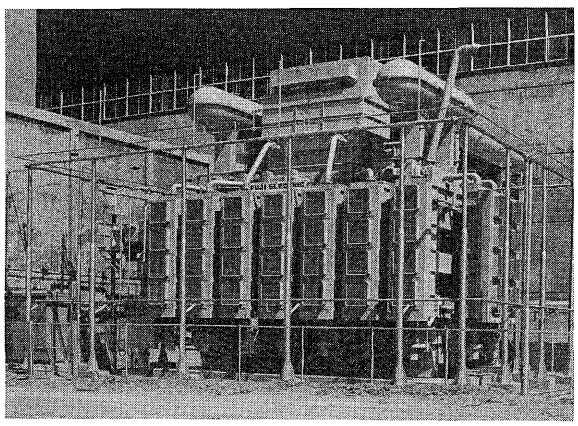
第1表　火力発電所用変圧器，製作納入表（200MVA以上）
Table 1. Supply list of large power transformer for thermal power station (above 200 MVA)

納入先	納入年度	台数	相数	周波数 (Hz)	容量 (MVA)	電圧 (kV)	冷却方式	タップ切換	その他
東京電力・川崎火力 No. 5	1965	1	3	50	210	11.7 / 150.5-147-143.5R-140	送油風冷	無電圧タップ切換	
常磐共同・勿来火力 No. 6	1965	1	3	50	210	11.4 / 69-67.5R-66	送油風冷	無電圧タップ切換	冷却器別置
電源開発・磯子火力 No. 1	1967	1	3	50	280	13.5 / 150.5-147R-143.5	送油風冷	無電圧タップ切換	エレファント付 65ホン防音壁付
電源開発・竹原火力 No. 1	1967	1	3	60	265	12.3 / 115-110R-105	送油風冷	無電圧タップ切換	80ホン防音壁付
東京電力・川崎火力 No. 6	1967	1	3	50	210	11.7 / 150.5-147-143.5R-140	送油風冷	無電圧タップ切換	
電源開発・高砂火力 No. 1	1968	1	3	60	265	19 / 287.5～250R～237.5	送油風冷	負荷時タップ切換	エレファント付 80ホン防音壁付
電源開発・高砂火力 No. 2	1968	1	3	60	265	19 / 287.5～250R～237.5	送油風冷	負荷時タップ切換	エレファント付 80ホン防音壁付
電源開発・磯子火力 No. 2	1969	1	3	50	280	13.5 / 150.5-147R-143.5	送油風冷	無電圧タップ切換	エレファント付 65ホン防音壁付
常磐共同・勿来火力 No. 7	1969	1	3	50	270	15 / 161-157.5R-154-150.5	送油風冷	無電圧タップ切換	冷却器別置
東北電力・秋田火力 No. 1	1970	1	3	50	390	19.4 / 168～154R～140F	送油風冷	負荷時タップ切換	エレファント付
苫小牧共発　No. 1	1970	1	3	50	267	14.8 / 195.5-191.25-187R	送油風冷	無電圧タップ切換	エレファント付
四国電力・坂出火力 No. 1	1970	1	3	60	210	16.6 / 69-67.5-66R-64.5	送油風冷	無電圧タップ切換	エレファント付 75ホン防音壁付 *
苫小牧共発　No. 2	1971	1	3	50	267	14.8 / 195.5-191.25-187R	送油風冷	無電圧タップ切換	エレファント付 *

* 印は製作中

* 千葉工場

	無圧密封式　負荷時タップ切換変圧器
周波数	50Hz
定格容量	390,000kVA
電圧	一次 19.4kV
	二次 154R±8×1.75kV（17 タップ）
結線	一次 △結線
	二次 人結線
絶縁階級	一次 20 号
	二次 線路側 140 号　中性点側 100 号
インピーダンス電圧	
	一次～二次間 15%（390MVA 基準）
総重量	414 t



第1図　変圧器外観
Fig. 1.　Outer view of transfomer

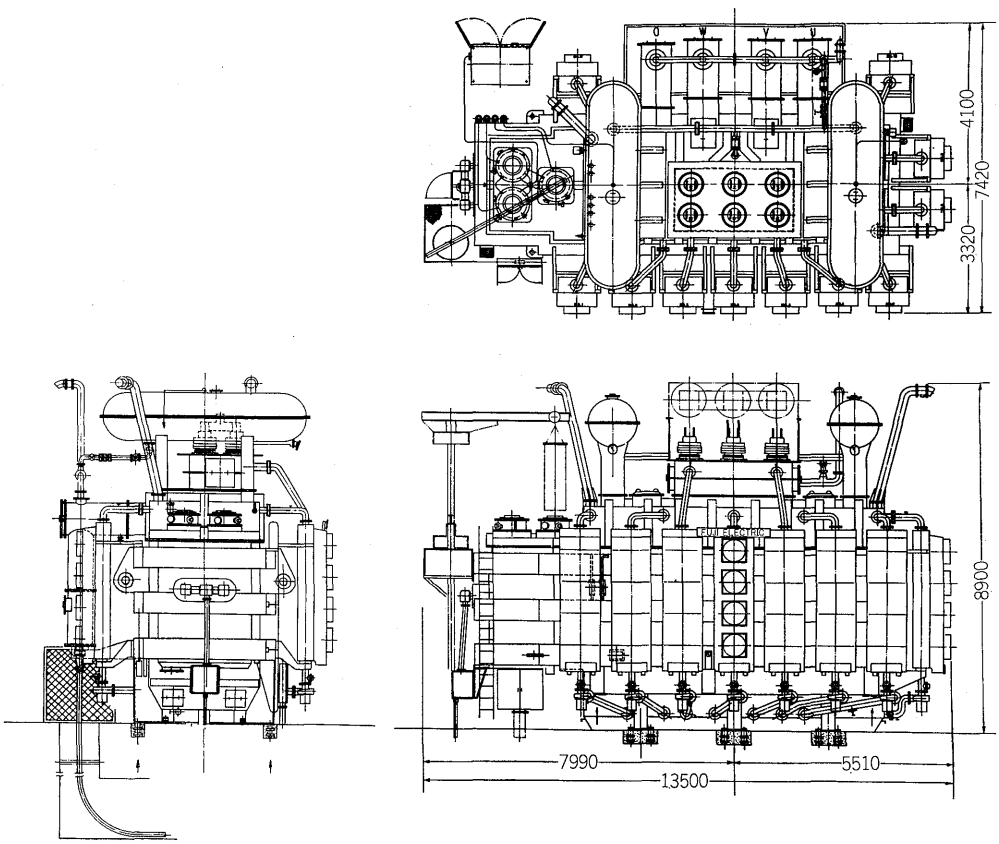
輸送重量	274 t
総油量	107 kl

第1図に本変圧器の現地における外観を示し，第2図にその外形図を示す。

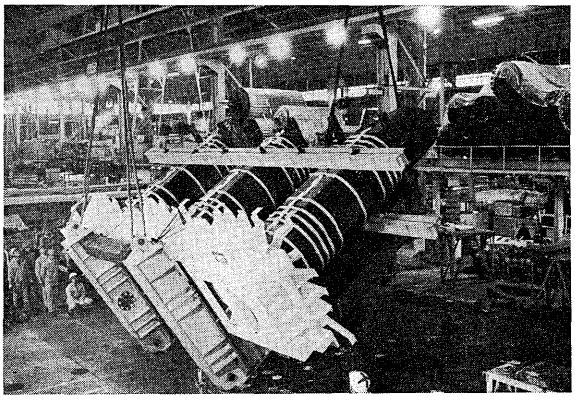
III. 構造上の特長

1. 鉄心

一般に，大容量器では，鉄道輸送する場合，鉄道車両限界に制限されるため5脚鉄心となるのが普通であるが，本変圧器は海上輸送なので輸送上の制限を受けず，軽量かつ高効率の3脚鉄心を採用した．鉄心の締付方式は，鉄心中央部の冷却ダクトを貫通するボルトによりけい素鋼板を締付ける「センタクランプ方式」を採用し，さらに鋼板端部を充分に締付け鉄心を一体化する目的で，エポキシ樹脂含浸ガラステープで鉄心周囲を締付ける「バンド締付方式」を併用している．この結果，高効率でしかも振動・騒音の低い鉄心を得ることができた．鉄心用けい素鋼板は，国産最高級品であるG9を使用し，高度な励磁特性を保つため，加工・組立・運搬時の機械的ストレスには細心の注意を払った．その具体的例が第3図の鉄心起こし装置であり，大形鉄心を起こす際，けい素鋼板にストレスがかからぬように配慮した．またけい素鋼板加工後のひずみ取り焼鈍は，現在最新技術とされている連続焼鈍炉により行なった．この結果騒音を例にとると，特に低騒音対策を施さずともJEM規格値に



第2図
変圧器外形図
Fig. 2.
Outline of transformer

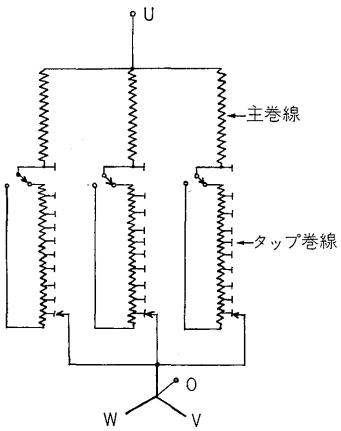


第3図　鉄心起こし作業
Fig. 3. Erection of iron core

対し，15ホン程度も低くすることができ，送油風冷式冷却器を含めた合成騒音は 78 ホンと，きわめて低い値となった。

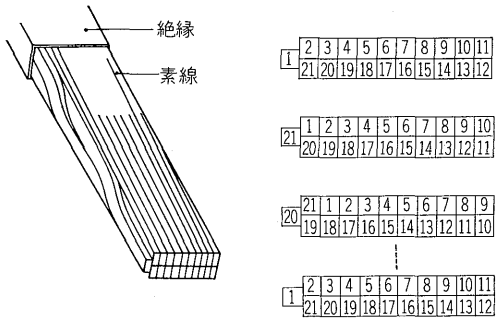
2. 巻　　線

高圧巻線（二次巻線）には，当社が超高圧段絶縁変圧器に標準としている無振動形円筒成層巻線を採用した．無振動形円筒成層巻線には，各層の接続方式に関してU接続方式とN接続方式の二種があり，本変圧器では，外部に接続リードを引きまわさないU接続方式を採用した．無振動形円筒成層巻線が衝撃電圧特性・絶縁信頼度・冷却特性・耐短絡強度などに関してすぐれた特性を有することは，すでに幾多にわたり紹介されているので本稿では詳述を省く．なお後述のように，負荷時タップ切換器の並列回路間の電流分布を均等化させるため，各相とも線路端から3並列構成の巻線を採用した．タップ巻線は高圧巻線の外側に配置し，多並列円板形の構成とし，

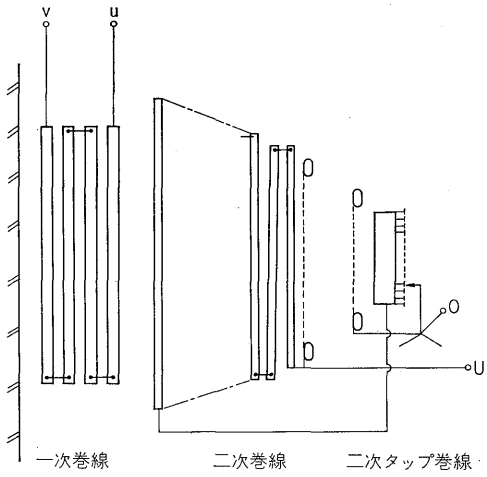


第4図
二次巻線結線図
Fig. 4.
Connection diagram of secondary winding

各相3並列回路とするため3ブロックに分ける構造とした．この3並列回路はそれぞれ第4図に示すように高圧主巻線の3並列回路と接続した．低圧巻線には，低圧大電流に最適な当社標準である多並列円筒U接続巻線を採用した．この巻線は両端口出しリードがともに上部に引出せるので，これを近接させて配置することにより大



第5図　転位導体電線
Fig. 5. Transposed conductor



第6図　巻線配置図
Fig. 6. Arrangement of windings

電流アンペアターンを正負打消し，大電流アンペアターンによる漏れ磁束を極小におさえて，一次ブッシングまで導いている．一次，二次およびタップ巻線とも巻線内うず電流損低減のため，転位導体を使用している．転位導体はすでに紹介されているように，ポリビニルホルマール被覆を焼付けた素線導体を多数本2段積みにし，この導体を一定のピッチで転位しながら撚り合わせ，その上に共通紙絶縁を施したものである．この導体は巻線の連続巻き作業が可能であり，信頼性が高く，作業性もすぐれており，大容量変圧器の巻線導体には不可欠のものである．第6図に巻線配置を示す。

3. 外 装 関 係

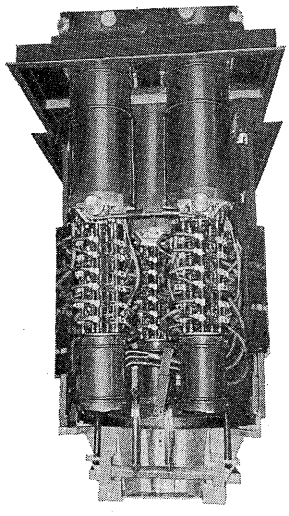
本変圧器のタンクは比較的大形であるのでタンク溶接の自動化を図るためタンク側板，主強めおよび補助強めとも直線的な構造とした．また変圧器運転時のタンク壁各部の振動の抑制には細心の注意を払って対処した．油劣化防止装置は当社標準の無圧密封方式「隔膜式コンサベータ」を2個使用した．タンク内部異常圧力上昇を外部に放出させる放圧装置は，タンク隅の対角線上に2個配置した．冷却器は耐食アルミフィン管を用いた当社標準の送油風冷式冷却器を使用した．この冷却管は，フィン表面積あたりの空気抵抗が他の冷却管に比して小さい

ため大きな風量が得られ，冷却器中で最も大きい温度差を示す空気側の温度上昇を低減することができるので，冷却性能の向上に著しい効果があるものである。

4. 負荷時タップ切換器

本変圧器の負荷時タップ切換器には 1,800A 用 DSF1 形を各相に1個，合計3個使用し，154kV 側巻線の中性点側で切換える構造とした．DSF1 形は，単相用定格通過電流 1,800A 定格ステップ電圧(相電圧) 1,900V であり，超高圧変圧器 800MVA 程度まで適用できるものである．このDSF1形は同一構成で三相用として使用の場合DSF3形と称し，定格通過電流 600A，定格ステップ電圧（相電圧）1,900V として使用するものであって，DSF3 形としてはすでに十数年の使用実績を有し，2抵抗式・二重四節リンク機構・長寿命形接触子を特長とした当社の主力負荷時タップ切換器である。

本変圧器にはこのDSF1形を3相分として3個使用し，1個の電動操作機構により駆動する方式を採用した．第7図にその配置を示す。



第7図
3×DSF1 形
負荷時タップ切換器
Fig. 7.
Arrangement of three DSF1 type on-load tap-changer

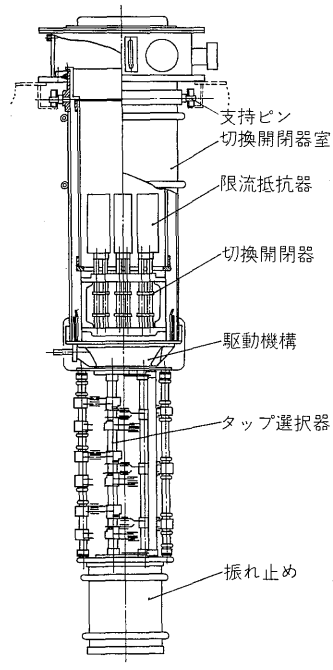
このDSF1形負荷時タップ切換器には，より一層信頼性の向上を図る目的で，次のような改良が施されている。

(1) 切換開閉器の四節リンクに針状ころ軸受を使用し，運動抵抗の低減と安定化を図った。

(2) 負荷時タップ切換器の取付構造を従来の頭部固定式から頭部回転支持式として上下・前後・左右に可調整の構造とした．これによって変圧器への組込みを容易かつ確実にさせ，品質の安定を達成させるとともに輸送時の過酷な振動加速度に対する機械的強度を向上させた。

この負荷時タップ切換器の構造（1相分）を第8図に示す。

1相分タップ切換器の接触子は，数群の並列回路に分割されており，これら並列群の電流を均等にするため，各群に接続されるタップ巻線も対応して分割した．切換開閉器の各群の接触子は，さらに数個の並列接触子から構成されているが，切換時にのみ通電する電流バランサまたは限流抵抗により切換時の電流の均等化を図っている。



第8図
DSF1 形負荷時タップ切換器断面図
Fig. 8.
Section of DSF 1 type on-load tap-changer

切換開閉器室絶縁油は，浄油能力 100 l/min の大形活線浄油装置1台により，3相分同時に循環浄油する．各相の浄油が一様に行なわれるように油配管に関しては充分な配慮を施し，かつ切換開閉器室相互間に均圧管を設けている．製品完成後の試験の結果，各相の浄油状況は満足すべきものであった。

形式試験は，電気協同研究会LRT委員会の試験要項，および電気学会LRT標準特別委員会で現在審議中のJEC案「負荷時タップ切換装置」を加味して実施した．3相分としての供試器で，機械的 80 万回および電気的 20 万回の寿命試験を行ない，電動操作機構を含む駆動装置関係は実器と同等のトルクを負荷させ試験した．電気的寿命試験は1相について行ない，電源としては不平衡三相変圧器で，その巻線を実変圧器と同様に並列分割したものを使用し実負荷時と試験時の切換責務を一致させた。

さて，一般に三相用切換開閉器の場合は各相の切換電流は 120° の位相差をもって零点を通過し，順次にアークが消滅する．一方，同じ切換開閉器を単相3並列×(三相用の1相分電流相当値）で使用する場合は，各並列接触子間の電流均等化を完全になし得たとしても，理論上はしゃ断能力的に多少つらい側にあると考えられる．しかし寿命試験の結果，この切換開閉器の十数個に分割した各接触子はいずれも均等な消耗状態を示しており，

所期の電気的寿命を確認することができたので前記の所論についてはなんら問題とならないことが判明した．さらに寿命試験後，定格通過電流の2倍の過電流切換試験を実施し，この際各並列接触子の切換電流の平衡およびアーク消滅が所定の時間内で同時に行なわれていることをオシログラムによって検証した．過電流試験について電協研の試験要項は「寿命試験終了後の切換開閉器および汚損油を使用して，1.5×定格通過電流で行なう」とある．またIECの Publication : 214 "On-load tap-changer" では「新しい切換開閉器を使用して，2×定格通過電流で行なう」とあり，これらと比較して，前述の過電流切換試験はさらに一段と責務の大きいものであった。

今回の電気的寿命試験および過電流切換試験の成果から，当社切換開閉器のブロックシステム構成による多並列接触子の合目的的性が再確認されたわけである．当社のこのブロックシステムは，四節リンク機構を用いて全並列接触子を一軸上に直線的に並べる構造が基盤になっており，他方式の切換開閉器と比較して，並列接触子の動作の同時性が得やすいことが立証された。

このほか，定格通過電流の 10 倍の短絡電流通電試験などを行ない，所期の成果を得た。

IV. 漂遊負荷損低減対策

漂遊負荷損は大別すると，

(1) 漏れ磁束により巻線導体内に発生するうず電流損

(2) 巻線以外の構造物に発生する漂遊損

に分類できる．一般に変圧器の漏れ磁束量 ϕ_l は

変圧器　%インピーダンス：Z

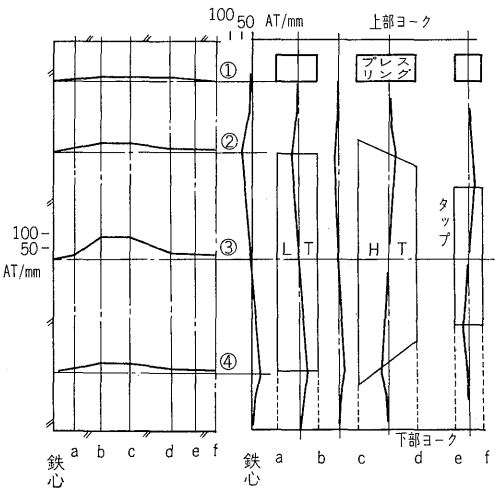
変圧器鉄心内主磁束　　：ϕ_m

とすると，

$$\phi_l \propto Z \cdot \phi_m \propto Z \cdot (\mathrm{kVA})^{1/2}$$

すなわち変圧器の磁気装荷と%インピーダンスの積に比例し容量とともに増加するのは周知のとおりである．この漏れ磁束は漂遊負荷損の増加を招き，局部過熱の原因となるものであるから可能な限り少ない方が望ましい．しかし変圧器容量が大容量になると%インピーダンスは系統上の特別な理由のない限り，短絡容量・装荷比などにより一般に標準インピーダンスより大きくした方が経済的である．このことは漏れ磁束対策の点からみればますますきびしい条件となってくる．したがって大容量変圧器では漏れ磁束対策にきわめて慎重を期す必要がある。

変圧器の漏れ磁束の分布計算は電子計算機により相当精度の高い値を得ることができる．さらに，当社は多くの経験と種々の実験の積み重ねにより，種々の事例についての計算式を確立している．本変圧器の設計に当たっては漏れ磁束分布および発生損失をもとめたことはもちろん，発生損失を低減させる材料の選定と，構成上の配慮を行ない，さらに損失発生部分の温度上昇値をもとめ，あらゆる部分の局部過熱を防止するよう配慮した。



(a) 軸方向漏れ磁界分布　(b) 半径方向漏れ磁界分布

第9図　漏れ磁界分布

Fig. 9. Distribution of leakage flux

以下本変圧器で実施した諸対策のうち主なものについて述べる．第9図は本変圧器の主要部分の漏れ磁束分布を示す。

巻線導体は一次，二次および二次タップ巻線ともすべて転位導体を使用し，うず電流損を減少せしめた．各巻線を締付けるプレスリングは，ガラス繊維を基材とする非金属材料を使用した．また巻線端部の電界緩和用シールドリングは非金属材料と金属箔から構成したものを用いた。

鉄心けい素鋼板を締付けているエンドプレートは，特に漏れ磁束が集中して鎖交する巻線上下端部の対向部分の材質に配慮し，かつこの部分のけい素鋼板締付についても他の部と異ならしめた。

巻線をささえる上下フレームの巻線対向面は，その位置を巻線から充分離し，かつ，漏れ磁束の鎖交面を細分割することにより漂遊損の低減を図った．また各巻線端部から引出されるロ出しリードも，その位置の漏れ磁束分布の値により適切な導体構成とした。

巻線内に生ずる漂遊損と対比され，特に発生損失の大きさで問題になるのはタンク壁に生ずる漂遊損である．これを低減するには，すでに幾度か紹介されているように，タンク壁内側にアルミ板シールドを設ける方法と，透磁率が高くて発生損失の少ないけい素鋼板をタンク壁内側に置く方法がある．当社は過去に大容量変圧器に両方法を適用して比較実験を行ない，けい素鋼板しゃへい鉄心を用いる方法が非常にすぐれていることを確認しており，現在標準構造としてこれを採用している。

上述のとおり漂遊負荷損低減対策として，漏れ磁束分布計算のみならず，漂遊負荷損の分布状態にいたるまで適確に掌握し，巻線の導体寸法，配置，タンク・フレーム・プレスリングなどの構造物個々につき充分検討した結果，期待以上の効果をあげることができた．これによってさらに 700～1,000MVA 級大容量変圧器に対する設計・製作の自信を深めた。

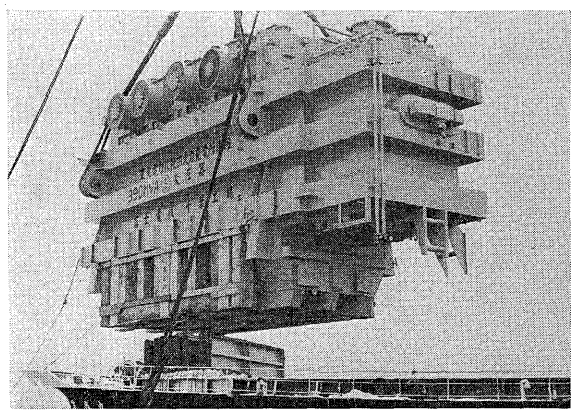
V. コロナ試験と品質管理

変圧器コロナ試験の目的は，常時運転時の絶縁信頼性を確認するためのものである．いいかえれば高電圧部の絶縁構造が適切であるか否か，かつ製作過程における品質管理が充分であったか否か確認する試験でもある．この観点から当社では，140 号，50MVA 以上の変圧器にはすべてコロナ試験を社内的に実施して，絶縁信頼性を確認することを工場規格として定めている。

コロナ発生防止の手段としては，高電圧部の電界強度の集中を防ぐため，各電極に丸みをつけるなどにより，電位傾度を低く押えるなどの配慮は当然であるが，さらに，製作途中における品質管理がきわめて重要である．前者については電子計算機により二次元の電界算出を行なうとともに，各構造部のフィールドマッピングにより電界状態を検討し適切なる構造を選択した．また後者の品質管理の問題に対しては，防じん壁内での中身製作，作業場および製品の真空掃除機による清掃，入念な油洗いなどの製作現場における品質管理の徹底による製品の清浄度の維持，また組立時の吸湿，気泡ボイドの残留を防ぐための入念な乾燥および油含浸などに注意を払った．特に本変圧器は当社にとって記録品であり，コロナ発生防止対策には万全を期した．この結果コロナの発生は一切認められなかった。

VI. 輸　　送

本変圧器は海上輸送のため，輸送上の寸法制限はないが，冬期の日本海航路であるため船の動揺に起因する振動加速度に対して充分耐えるよう鉄心および中身の固定方法に注意を払った．変圧器の海上輸送は，中部電力・知多火力発電所連系用 345MVA変圧器，アメリカ，ボンネビル電力庁向け 500kV 300MVA 変圧器など多数の経験を有しており，輸送時の変圧器各部振動加速度の測定なども多数実施しているので，その実測結果を参考にして充分な強度を保持させた．負荷時タップ切換器は前述のように本体内部組込みであり，本カバー輸送なので現地において，変圧器中身を外気にさらすことがなく，変圧器に対する信頼度は著しく高められている．第 10 図に本変圧器の船積み状況を示す。



第 10 図　船積み荷姿
Fig. 10.　Outline of transportion at shipment

VII. む　す　び

当社の記録品であるこの 390MVA 負荷時タップ切換変圧器が，きわめてすぐれた成績で完成されたことは，周到かつ高信頼性を旨とする設計，入念かつ品質の安定を第一とする工作，厳格かつ精密な試験・検査の賜であって，これらの総合力を維持し一層強化することにより将来出現すべき 700～1,000MVA 級の大容量変圧器の製作は充分可能であるとの自信を深めた．本器の製作にあたり，ご指導賜った東北電力の関係各位，ご協力いただいた社内外各位に厚くお礼申しあげる次第である。

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。