

中容量シングルフロー蒸気タービン

Medium Capacity Single-flow Steam Turbines

柴田 祐作*

Yūsaku Shibata

内 容 梗 概

最近大容量火力機器用として開発されている長大な最終段翼を適用することによって、従来ダブルフロー形式の分野とされていた30~100 MW級の蒸気タービンをシングルフローとし構造を大幅に単純化し、しかも効率を同程度に維持し得るといふ魅力的な配置が実現可能となった。

本稿ではこの新形式タービンについて従来の形式と比較しつつ、性能ならびに構造上の差異を考察し中容量シングルフロータービンのすぐれた将来性を述べたものである。

1. 緒 言

火力発電技術の進歩は最近特にめざましく、事業用火力発電機器はすでに単位出力800 MWの製作が開始されており、1,000 MWをこえるのも近い将来のことと考えられている。このような大容量火力発電所ほどに注目されていないが、一般産業用あるいは輸出用タービンの単位容量も最近加速度的に増大している。第1図⁽¹⁾は最近国内の自家用火力発電所に設置された復水タービン単位出力増大の傾向を示すもので、数年前までは20 MW程度であったものが、現在計画されている発電所では30 MW級が普通となっており、近い将来には30~100 MW級が主流を占める情勢にある。輸出用のタービンについても大体同様の傾向がみられる。

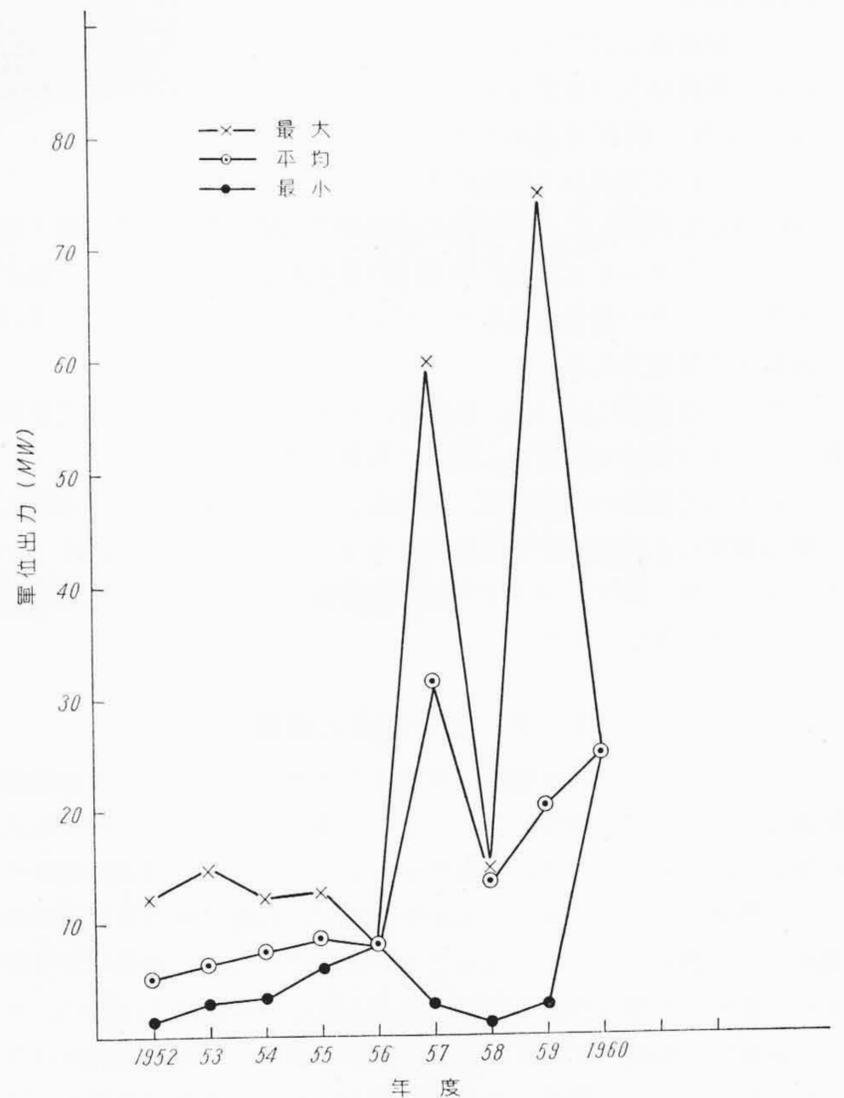
中容量の発電所として重要な条件は、熱効率の向上はもちろんであるが、機器の大きさを小さくして設置面積を節約し、また構造を簡単にして取扱を容易にし、機器の信頼性を高めることがそれにもまして重要である。

従来この程度の出力範囲に適したタービン形式は、タービン低圧部を二つに分けて複流としたタンデムコンパウンド複流形（以下TCDFと略す）が標準として採用された。しかし最近の長足の技術進歩により構造をさらに簡単にし、しかも同程度の性能を確保できるというきわめて魅力的な配置が実現可能となった。それは大容量タービン用として開発された長大な最終段翼をこの種タービンに適用することによって、これにより単気筒（以下SCと略す）の最も単純な構造とし、しかも2気筒の場合と同等の性能が得られるのであって、需要家の要望に答える有力な方策と考えられる。本報告はこの点に着目して中容量シングルフロータービンの具体的な適用例ならびに適用にあたっての問題点につき紹介するものである。

2. 長翼開発とその適用条件

蒸気タービンの大容量化を制限する一つの大きな条件は、最終段翼車の蒸気通路面積（これを環状面積と呼ぶ）である。タービン最終段から流出する排気蒸気は大きな速度エネルギーをもっており、このエネルギーの大部分は回収されることなく摩擦および渦損失によって熱となり、復水器中で冷却水に奪い去られる。ある一定の環状面積に対してタービンの出力を増加し、排気蒸気量を増していくと排気損失は蒸気量のほぼ二乗に比例して増大し、タービンの熱効率が低下し経済的に不利となる。したがって性能を妥当な値に保つためには、排気速度をある限度内に押えねばならず、大容量蒸気タービンの膨大な蒸気量を消化するには、どうしても大きな環状面積が必要になる。これを実現するにはまず第一に最終段翼長および節円径を大きくすることであるが、これには強度的な制約がある。第二

* 日立製作所日立工場



第1図 産業用自家発電プラント単位出力の増加 (復水タービン)

には低圧段落を二流以上に分けて多流排気形とし、一流当たりの蒸気量を制限することである。しかしこの結果構造が複雑になるという欠点がある。

より長い最終段翼を開発するという第一の方法は直接的であって、タービン全体の構造を複雑化することなく単位容量の増加を可能にするものであるから世界各国で精力的な研究が進められているのは当然である。

日立製作所においては、かねてよりこの点に着目し長翼の流体力学、振動、強度ならびに製作法を研究し、翼列風洞試験による基礎実験および翼の静的振動試験などを進めて来た。第2図に長翼静的振動試験装置を示す。しかしタービン最終段翼が実機で運転される場合には、蒸気速度は音速の1.5倍(1.5マッハ)以上に達するので衝撃波などによる複雑な流れの状況を解明しなければならず、しかも速度三角形は翼の場所によってすべて異なるので理論および基礎実験だけで完全な設計を達成することは困難である。また翼の振動

も実機で運転される場合には、前方から流入する蒸気流のアンバランスによって不規則な衝撃力を受けこれと同時に翼の共振振動数自体も遠心力の影響によって変化するので、最終的な信頼度は実機の運転によって確かめられなければならない。しかしタービン翼は蒸気タービンの中でも重要な部品であるので、新製品を実機に適用して、発電所において各種試験を行なうことはほとんど不可能である。したがって日立製作所では実機と全く同一の条件で運転される最終段長翼研究用の実物大低圧タービン試験装置を試作することにし従来の基礎研究の成果を全面的に採り入れて製作を進めてきたが、最近これが完成して運転に入り

各種測定を開始した。第 3 図に運転中の試験装置を示す。第 3 図の中央は低圧タービン本体、手前は負荷用発電機であり、右に見える配管はボイラの蒸気を低圧タービン入口で必要な圧力温度に下げる減温減圧装置である。

本装置には各部に圧力計、温度計、ピトー・トラバース装置を設置して長翼の性能を研究し、同時に長翼にはり付けたストレン・ゲージによって運転中の振動数、振動応力ならびに遠心応力を測定して翼の強度および信頼性を確認できるようになっており、26 インチ、29 インチ、32 インチ等の性能、信頼性ともにくれた長翼を次々に完成する予定である。

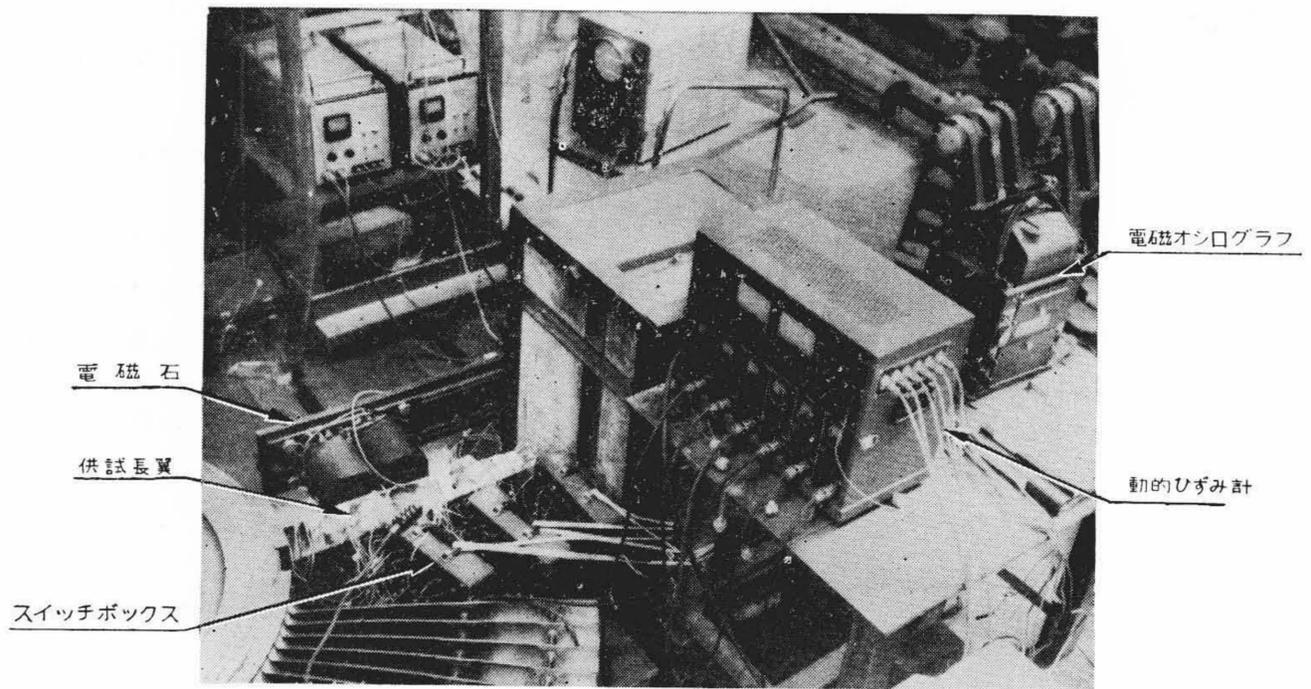
3. タービン形式と性能

タービンプラントの性能は、蒸気条件と熱サイクル（給水加熱器配置など）および各機器の効率によって決定される。タービン形式の選定にあたっては、ほかの条件を一定としたとき、形式の差異によって熱効率がいかに変化するかを検討し、最適な経済点を選ぶ必要がある。熱効率としては定格出力の点だけでなく、負荷率を考慮する必要があり部分負荷の効率も検討しなければ厳密ではない。さらに経済的に最高にするには建設費や維持費まで考慮しなければならないが、ここでは簡単のため定格出力における熱消費率についてのみ考えることにする。

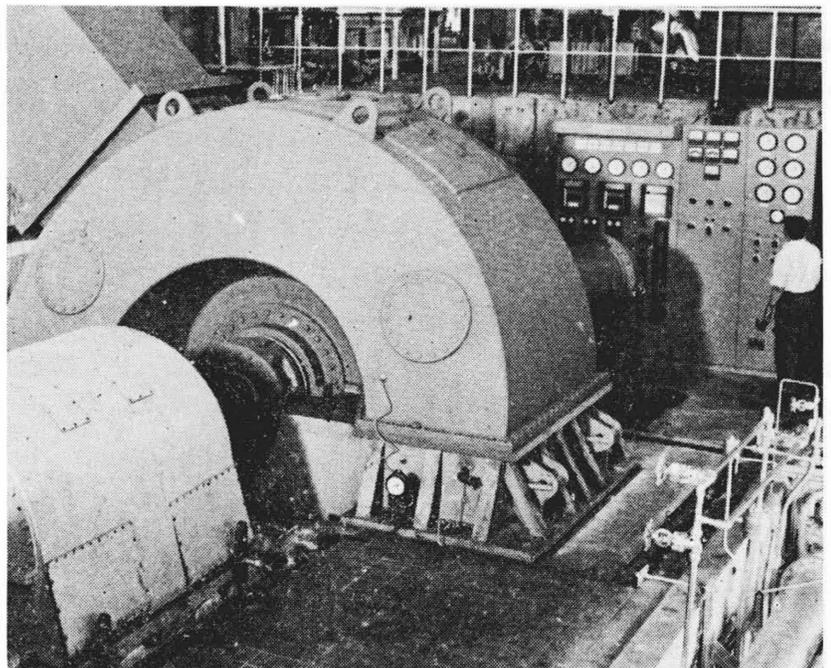
3.1 タービン形式および排気損失

タービンの形式としては低圧段落を複流に分けた (TCDF) 形と、単車室単流排気 (SC) 形とに分類される。同一出力の蒸気タービンの効率は主として先に述べた排気損失によって決定される。排気損失は排気速度にしたがって環状面積に支配されるところが大きい。日立製作所の最終段動翼は一定の標準が決められており、それ以外の最終段動翼長は原則として使用しない。これら標準最終段翼の排気損失特性の一例を第 4 図に示す。翼長によって若干の差異はあるが、排気速度と損失の関係はほぼ一定の形となっている。したがって蒸気量と環状面積の比率を一定にすれば、排気損失もほぼ同一であると考えてよい。長翼の開発による大出力タービン実現の可能性はこの点にあり、本報告は新しく実用化された、または開発中の長翼を使用することによって、従来複流形式の分野とされていた出力範囲のタービンを単流化する可能性を論じたものである。ここで注意しておかなければならないのは、環状面積を過度に大きくとって排気速度を小さくすると、第 4 図に示すようにかえって損失が増す

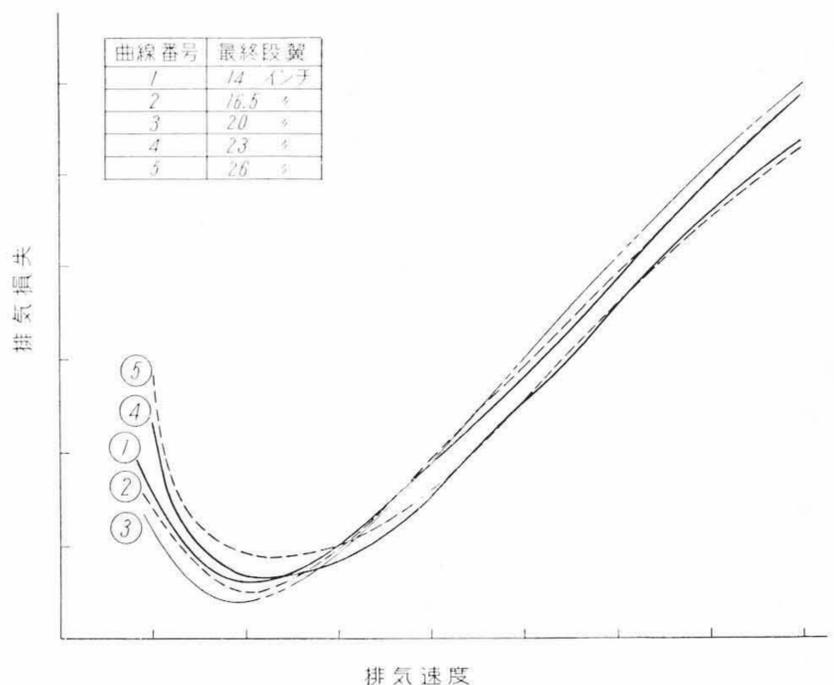
2 現像ブラウン管オシログラフ



第 2 図 長翼静的振動試験装置



第 3 図 運転中の実物大低圧タービン試験装置



第 4 図 排気損失曲線 (標準最終段翼)

ことであって、これは風損が増すことに基因するものであり、したがってある出力に対して最適の環状面積が存在することになる。

3.2 30~50 MWタービン

第5図はこの出力範囲のタービン形式と相対的な熱消費率の関係を示すもので、仕様は

蒸気圧力	60 kg/cm ² g
蒸気温度	482°C
真空度	722 mmHg
回転数	3,600 rpm
抽気段数	4 段
給水温度	231°C

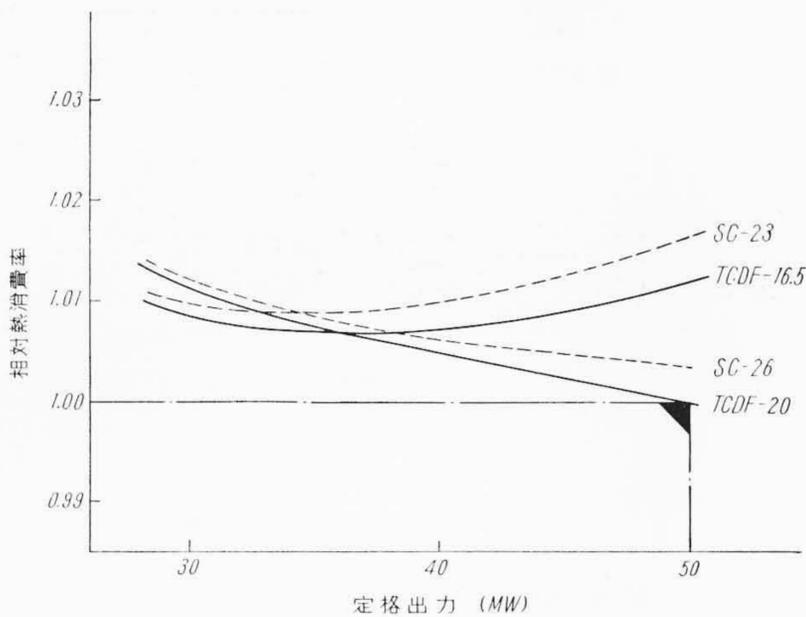
と一定とし、形式は TCDF 最終段 16.5 および 20 インチおよび SC 最終段 23 および 26 インチについて比較した。第5図では TCDF-20, 50 MW の熱消費率を 1.00 とした。30 MW 付近では SC-23 および 26 は TCDF 形とほぼ同程度の効率を有し、50 MW 付近でも TCDF に対してほとんど遜色のない性能が得られる。本図は定格出力における熱消費率だけを比較したものであるから、部分負荷での運転時間を考慮すれば、SC形がもっと有利になる。したがって 30~40 MW に対して SC-23, 40~50 MW に対しては SC-26 が適当な形式である。

3.3 50~100 MWタービン

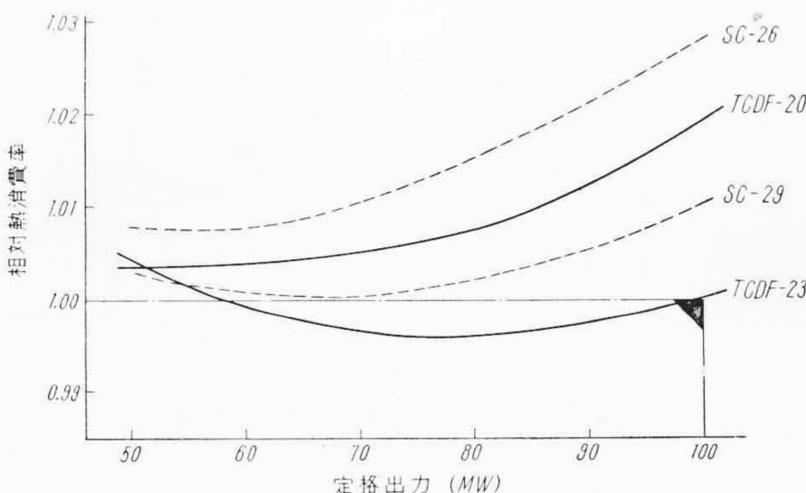
第6図はこの出力範囲の比較で、仕様は

蒸気圧力	102 kg/cm ² g
蒸気温度	538°C
真空度	722 mmHg
回転数	3,600 rpm
抽気段数	5 段
給水温度	265°C

とし、TCDF-20, TCDF-23, SC-26 および SC-29 の各形式について



第5図 タービン形式と性能 (30~50 MW)



第6図 タービン形式と性能 (50~100 MW)

比較した。第6図では TCDF-23, 100 MW の熱消費率を 1.00 とした。50 MW 付近ではどの形式ともほぼ同程度の性能となっているが、100 MW に近づくとも TCDF-20 と SC-26 および TCDF-23 と SC-29 の間にそれぞれ 1% 弱の性能の差があらわれ、TCDF 形が若干良くなっている。しかしこの程度の差であれば、他の経費まで考慮した発電原価では SC 形の方が有利となり、50~75 MW に対しては SC-26, また 75~100 MW に対しては SC-29 が推奨できる。

3.4 50~100 MW再熱タービン

第7図はこの出力範囲の再熱タービンを比較したもので、仕様は

蒸気圧力	102 kg/cm ² g
蒸気温度	538°C
再熱温度	538°C
真空度	722 mmHg
抽気段数	5 段
給水温度	221°C

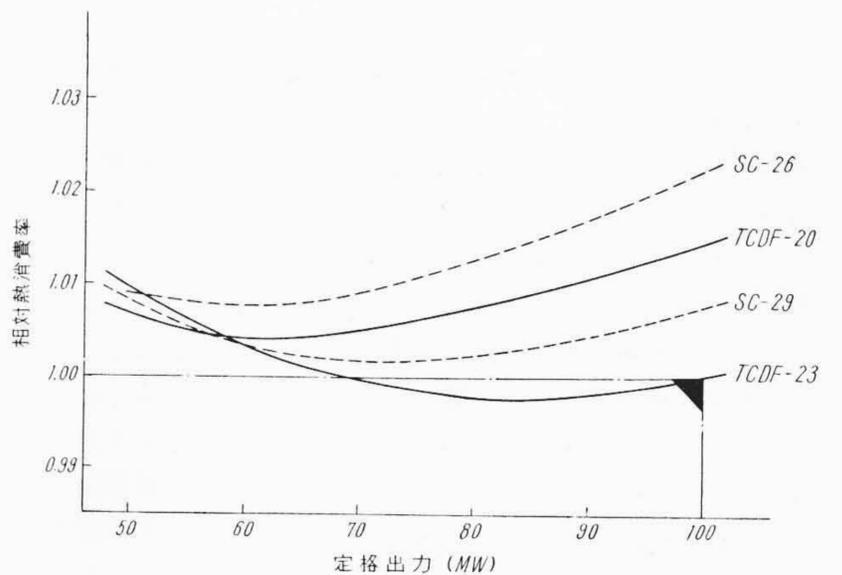
とし、TCDF-20, TCDF-23, SC-23 および SC-29 の各形式の相対的な熱消費率を示したものである。(TCDF-23, 100 MW を 1.00 とした) 再熱タービンでは、非再熱タービンよりも蒸気量が少なくなるのでタービン形式による性能の差は小さくなる。しかし傾向はほぼ同様で、50~75 MW に対して SC-26, 75~100 MW に対しては SC-29 が推奨できる。

4. 単車室単流形タービンの実施例

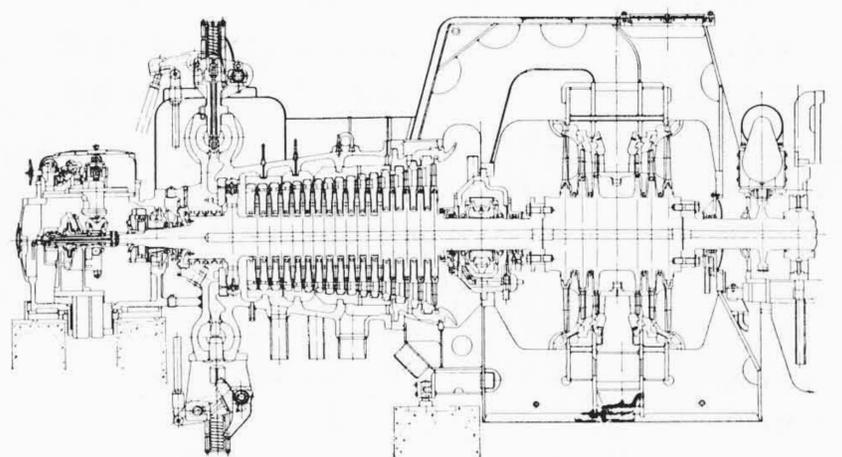
最近実際に計画および製作された単流形タービンの構造について、従来の複流形タービンとの差異を対比しつつ、特長および問題点を概説する。

4.1 30 MW 級タービン

第8図および第9図は実際に製作された単流形および複流形ター



第7図 タービン形式と性能 (50~100 MW 再熱)



第8図 35 MW 複流形蒸気タービン

ビンの構造を示すもので その主要目は第 1 表のとおりである。

顧客購入仕様によって、若干設計条件の相違はあるが、全体として見れば十分比較の対象になり得るものであり、以下構造上の相違点および計画上の問題点について検討する。

4.1.1 全体構造

最終段には 16.5 インチ複流の代りに 20 インチ単流を採用した。この結果環状面積は低下したが、真空度が悪くなっているので排気容積流量も小さくなり排気速度は十分妥当な数値に押えられ、内部効率ほぼ同等となっている。タービンロータは高低圧一本となって合計構造段落数は二段落減り、軸受はロータの両端で支持するという振動的に安定な配置になっている。前側軸受およびタービン高圧部は第 8, 9 図のような同一の構造が採用されているが、低圧部は連絡管も不要となり一体鋳造品として単純化されている。

4.1.2 タービンロータの危険速度

従来のくし形タービンロータの危険速度(各軸受スパン単独)は 3,000 rpm 機に対して約 2,000 rpm 以上の値となるよう計画されているが、単流形にしてロータを一本にすると、どうしても軸受スパンは長くなり危険速度は低下する傾向になる。低い危険速度をもつロータの運転中の振動特性は、従来製作された 30 MW 以下の多数の単一流タービンの実績によって確認されているが、それらを考慮して第一次危険速度を定格速度の 1/2 以上になるよう選定した。しかし、危険速度が定格速度の 1/2 に近づくと定格速度運転中にその 1/2 週期のいわゆる“油ホイップ”による振動発生危険が生ずる。特に軸受荷重が比較的小さい場合には、軸受の形式選定に慎重な考慮が必要であり、油ホイップを抑制するような形式たとえば円形軸受の採用により、振動に対して安定な計画がなされている。

危険速度は軸の太さとスパンに関連して決定されるが、軸の太さは同時にロータの熱容量を支配するものであり、ケーシングとロータの熱容量のバランスがくずれると起動、停止および負荷変動に際してケーシングとロータの温度変化に対する応答に差があらわれ異常伸び差などによって運転が困難になるから、ロータ軸径ならびに車室の肉厚の選定にあたっては、この面の十分な考慮が必要である。

4.1.3 ロータの推力

タービン低圧部を複流から単流に変更することによって、低圧段落の翼および車盤にかかる蒸気圧力差に基づく推力はバランスしなくなる。低圧段落は、流体力学的な考慮から一般に反動度を大きくとっており、したがって翼前後の圧力差が大きいから、タービン全体の推力に及ぼす影響は相当大きい。推力の値はタービン全体の計画によっても左右されるものであり、各車盤のバランスホール加工あるいは軸径の合理的な選定によってある程度軽減できるが、それでも単流化によってこの推力増加は避けがたいようである。本タービンは詳細な設計計画によって極力推力を減少させるとともに、負荷能力が大きいテーパランド形推力軸受を採用して信頼度の確保を達成した。

4.1.4 調速性能

単流化にともなうロータ重量(慣性モーメント)の減少により、タービンおよび発電機ロータ合成の時定数が小さくなり被制御体の感度が上昇するから、たとえば全負荷遮断時の瞬時最大速度上昇率が大きくなる傾向にある。しかし日立油圧レバー式調速装置は、単流形タービンよりもずっとロータが軽い背圧タービンに対してさえ十分な感度と安定度をもっており、本タービンについては標準形日立ガ

バナで確実な制御がなされている。

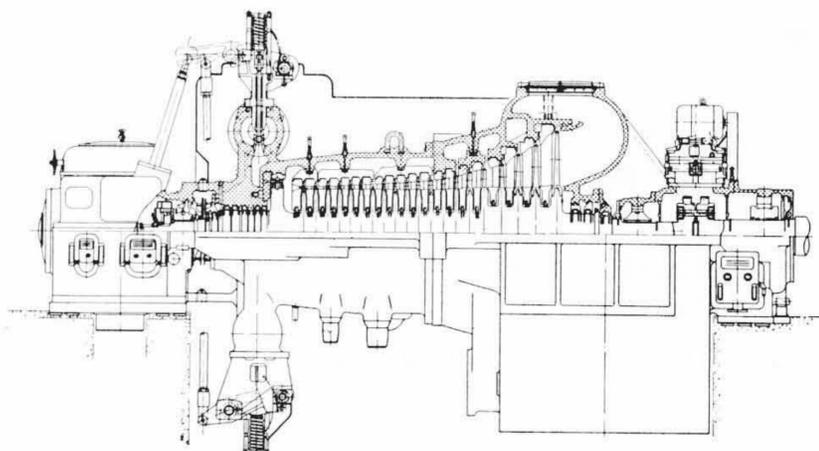
4.2 60 MW 級タービン

第 10 図はすでに運転に入っている複流形タービンを示し、第 11 図は同一仕様の単流形タービンの構造を示す。両者の主要目は第 2 表のとおりである。

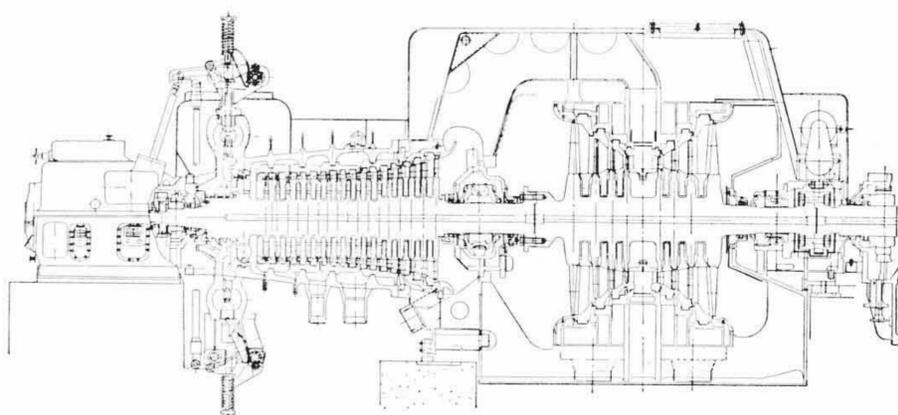
最終段には 20 インチ複流の代りに新しく開発された 26 インチ翼単流を採用し環状面積は約 15% 低下したが、もともと余裕のある設

第 1 表 30 MW 級復水タービンの主要目比較

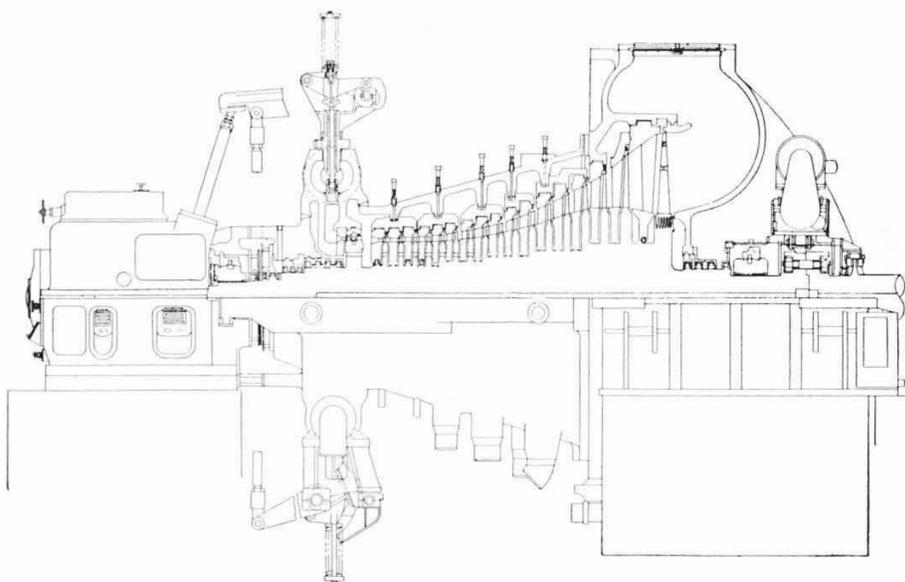
	単流形	複流形
形 式	SC-20	TCDF-16.5
定 格 出 力 MW	33	35
蒸 気 圧 力 kg/cm ² g	59.8	60
蒸 気 温 度 °C	482	485
真 空 度 mmHg	705.5	727
回 転 数 rpm	3,000	3,000
抽 気 段 数	4	5
給 水 温 度 °C	235	205
最 終 段 翼 長 mm(in)	508 (20)	419 (16.5)
段 落 数	21	20
合 計 構 造 段 落 数	21	23



第 9 図 33 MW 単流形蒸気タービン

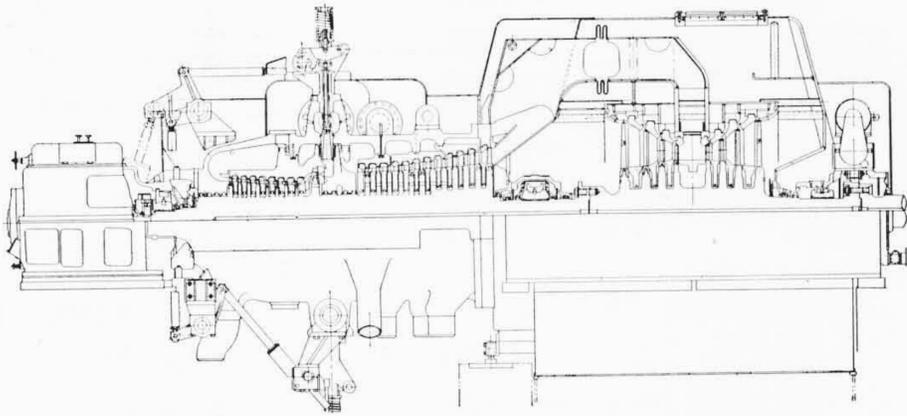


第 10 図 60 MW 複流形蒸気タービン

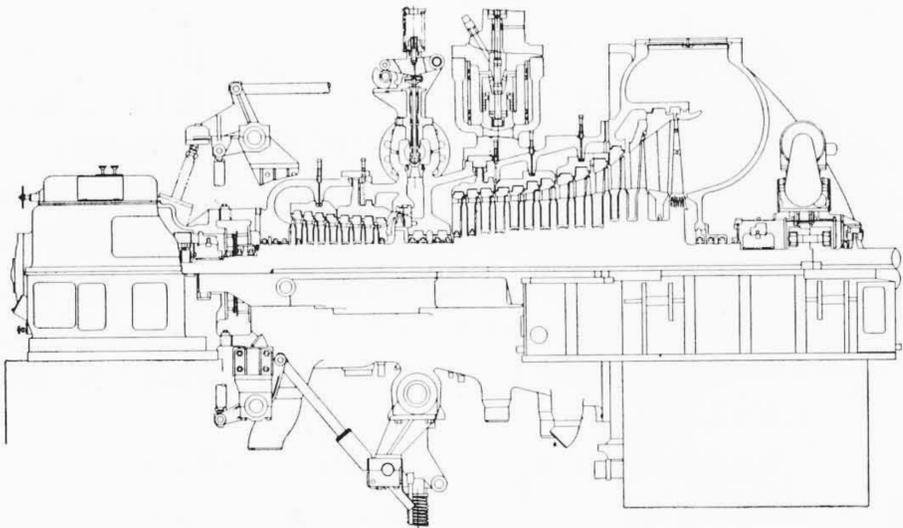


第 11 図 60 MW 単流形蒸気タービン

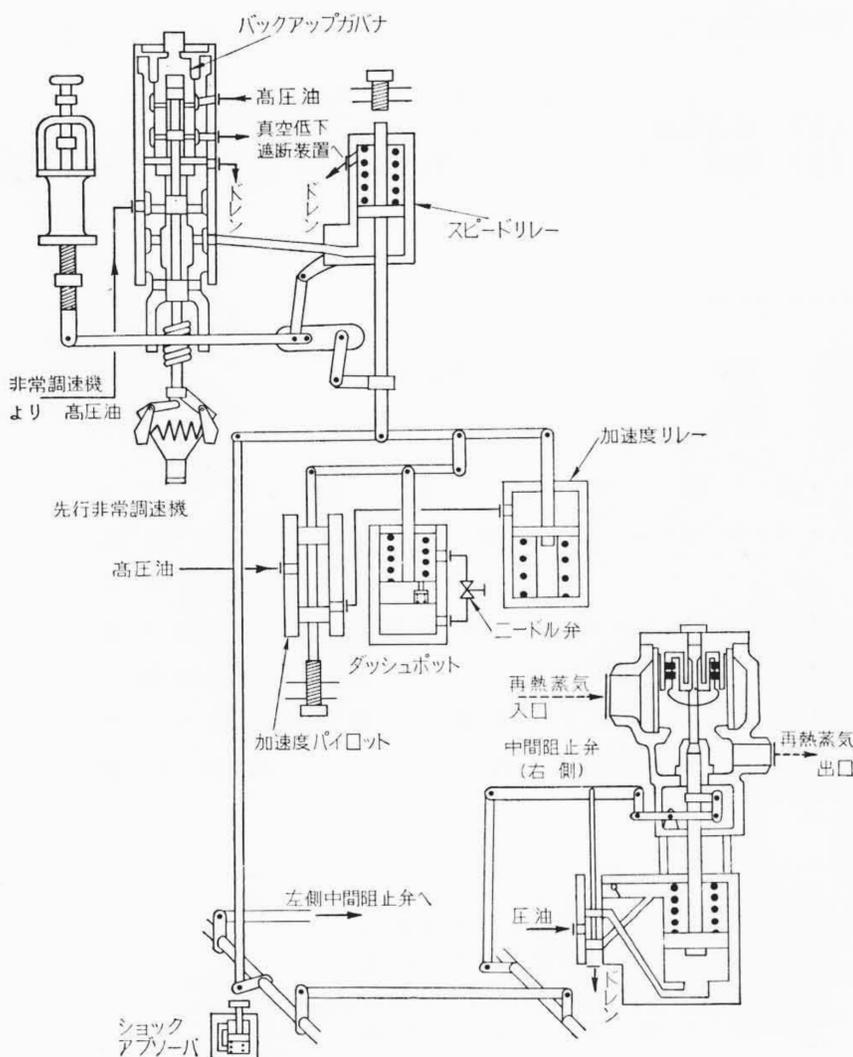
計であるので効率は相対的に0.1%弱しか低下せず、実用的には同等の性能を確保している(真空度が悪いので第6図の傾向よりも差が小さい)。 低圧段翼長の増加とともに翼の節円径も増しているために、単流化とあいまって合計構造段落数は26段から18段に減少し、



第12図 75 MW 複流形再熱蒸気タービン



第13図 75 MW シングルフロー再熱蒸気タービン



第14図 加速度ガバナ系統図

タービン全長は複流形に比べて80%弱に短縮され、重量も大幅に軽減された。

4.3 75 MW 級再熱タービン

再熱タービンは非再熱タービンに比べて排気蒸気量が減少するので、同一出力について比較すれば、一般に再熱タービンの方が単流化は容易である。第12図はすでに多数運転に入っている標準形75 MWタービンを示し、第13図は同一仕様で計画した単流形タービンの構造を示す。主要目は第3表のとおりである。

最終段翼の組み合わせは60 MWの場合と同様であるが、真空度が上がっているため、効率の低下は約0.4%となっている。設備費その他を考慮すればこのままでも発電原価は単流形のほうが、低減されるが、将来29インチ翼が開発されれば効率の面でも複流形以上になり得る。

段落数の減少も60 MWの場合と同様で第13図を見れば直ちにわかるように非常にコンパクトにおさまっており、運転も容易できわめて信頼度の高いことがわかるであろう。

再熱タービンでは主蒸気と再熱蒸気を高圧車室の中央部から送入し、高低圧の蒸気は反対方向に流れる構造をとっているため、ロータの推力は本質的にバランスしやすくなっており、先に述べたような推力増大の傾向は再熱タービンについてはほとんど問題にならない。さらに、非再熱タービンでは高圧初段から最終段の長大な翼にいたるまでの翼列の節円径の移り変りをどうするかが一考を要する点であるが、再熱タービンでは高圧段と低圧段の間で節円径を段階的に変化できるので構造的な設計も容易である。

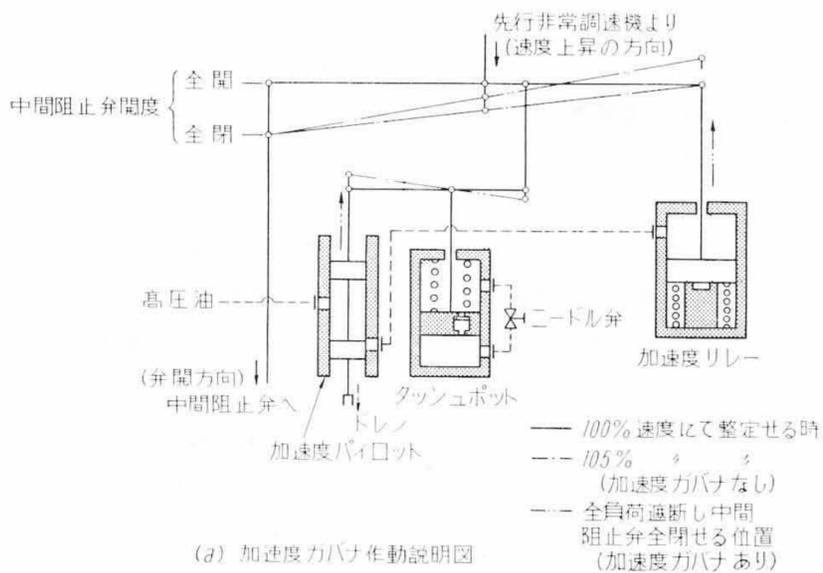
再熱タービンでは、再熱系統残留蒸気の影響により、一般に全負荷遮断時の瞬時最大速度上昇率が非再熱タービンより大きい。シングルフロー化によってタービンロータが軽くなるから、速度上昇率はさらに増加する傾向にある。第14図はこのような危険を防止するために開発された加速度ガバナの系統を示すものであって、再熱蒸気量を制御する先行非常调速機から中間阻止弁にいたるレバー機構に、ダッシュポットを使用した加速度

第2表 60 MW 級タービンの主要目比較

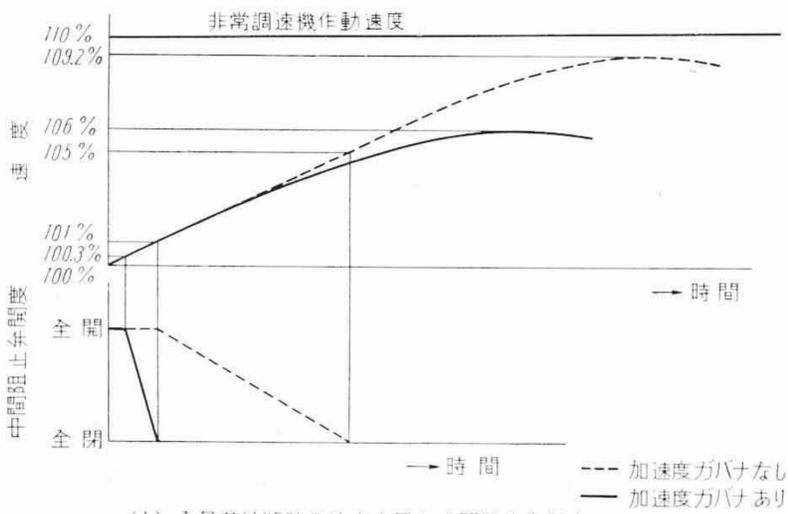
	単流形	複流形
形 式	SC-26	TCDF-20
定 格 出 力 MW	60	60
蒸 気 圧 力 kg/cm ² g	88	88
蒸 気 温 度 °C	510	510
真 空 度 mmHg	709	709
回 転 数 rpm	3,000	3,000
抽 気 段 数	5	5
給 水 温 度 °C	200	200
最 終 段 翼 長 mm(in)	663.6(26.125)	508 (20)
段 落 数	18	22
合 計 構 造 段 落 数	18	26

第3表 75 MW 級再熱タービンの主要目比較

	単流形	複流形
形 式	SC-26	TCDF-20
最 大 出 力 MW	75	75
蒸 気 圧 力 kg/cm ² g	102	102
蒸 気 温 度 °C	538	538
再 熱 蒸 気 温 度 °C	538	538
真 空 度 mmHg	722	722
回 転 数	3,000	3,000
抽 気 段 数	5	5
給 水 温 度 °C	232.2	232.2
最 終 段 翼 長 mm(in)	663.6 (26.125)	508 (20)
段 落 数	22	25
合 計 構 造 段 落 数	22	29



(a) 加速度ガバナ作動説明図



(b) 全負荷遮断時の速度上昇と中間阻止弁開度

第15図 加速度ガバナ作動説明図

検出装置を設けたものである。第15図(a)にその作動機構を示し、第15図(b)に全負荷遮断時の作動を示す。先行非常调速機単独では回転数が定格の101%まで上昇した時中間阻止弁を閉じ始め、105%にて全閉するよう計画されている。しかし加速度がある値をこえると加速度ガバナのダッシュポットが固定点として作用し、加速度リレーは中間阻止弁の閉鎖を助ける方向に動作するので中間阻止弁ははるかに急激に全閉し、速度上昇率を低い値に押えることができる。第15図(b)の例では、中間阻止弁全閉時の回転数

出力 MW	形式	タービン全長比較					タービン効率比較				
		60	70	80	90	100(%)	60	70	80	90	100(%)
30	TCDF-16.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	SC-20	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
60	TCDF-20	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	SC-26	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
75	TCDF-20	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	SC-26	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

(ダブルフローを100%としてある)

第16図 シングルフローとダブルフロータービンの全長および効率比較

は通常105%であるのを、この加速度ガバナによって101.0%に低下せしめ、したがって瞬時最大速度上昇率は、一般に109.2%であるところを106%と実に3.2%も低下し、過速度に対する安全性が著るしく高まっている。

5. 結 言

以上中容量シングルフロー蒸気タービンの特長について述べたが、これを従来のダブルフロー蒸気タービンと比較すると、第16図に示すようにタービン全長において実に約80%まで短縮され、タービン全重量も軽減でき、ほとんど効率を同一に維持して大幅な原価低減ができることになる。同時に発電所建家の大きさも縮減できるので、最終的には大きく発電原価を低減できることになる。長大な最終段長翼を使用した中容量シングルフロー蒸気タービンは、このように画期的な利点をもっており、今後ますます発達し広く採用されるであろう。

なお本稿で述べた考え方は、100 MW以上の大形蒸気タービンにも適用できるものであって、従来23インチ翼を使用したタンデムコンパウンド3流排気(TCTF-23)形175 MW蒸気タービンを、新しく開発された26ないし29インチ翼の使用によってタンデムコンパウンド複流排気(TCDF-26またはTCDF-29)形に変更することが可能であり、大幅な全長短縮の計画⁽²⁾も着々と進行中である。

参 考 文 献

- (1) 火力発電 昭28~昭36
- (2) 桑野：日本機械学会誌 Vol.64, No.508 (昭36-5), p.469

Vol. 44

日立評論
(次号予告)

No. 4

絶縁材料寿命試験小特集

- ・絶縁材料の寿命試験の現状
 - ・マグネットワイヤの寿命試験に関する二、三の問題
 - ・3.3kV級形巻コイルの耐熱寿命評価試験
 - ・各種積層板および成形品の熱劣化
- 論 文
- ・大容量再熱タービン用全周噴射起動装置
 - ・高出力トランジスタ電力線搬送電話装置

- ・直視形蓄積管 7448
- ・ブラウン管の静電的偏向拡大方法
- ・タングステン線の粗大結晶発生
- ・OFケーブル系統の絶縁油漏えい点検出方法
- ・交流高電圧ブリッジによる絶縁不良点の検出
- ・バリウムフェライト磁石の熱的性質について
- ・Al合金溶着金属の割れと添加元素

発行所 日立評論社
取次店 株式会社 オーム社書店

東京都千代田区丸の内1丁目4番地
振替口座 東京 71824 番
東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
振替口座 東京 20018 番