

大容量タンデムコンパウンド蒸気タービン

Large Tandem Compound Reheat Turbines

桑野幸三*
Kōzō Kumeno

内容梗概

戦後わが国火力の歩んできた経路のうち、特に再熱タービン登場以来の大容量タンデムコンパウンド蒸気タービンのすう勢を、アメリカおよびヨーロッパの実情を参照しつつ、その容量、効率、材料ならびに構造の角度から概説し、あわせて日立製作所の記録を記載した。

1. 緒言

周知のように、戦後わが国の火力の進歩はめざましく 88kg/cm²g, 510°C, 66 MW 級のあとをうけて再熱タービンが登場して以来、すでに運転にはいったものに、75 MW を皮切りとして、125, 156, 175, 220 MW 級のタービンがあるが、これらはすべてタンデムコンパウンド形である。

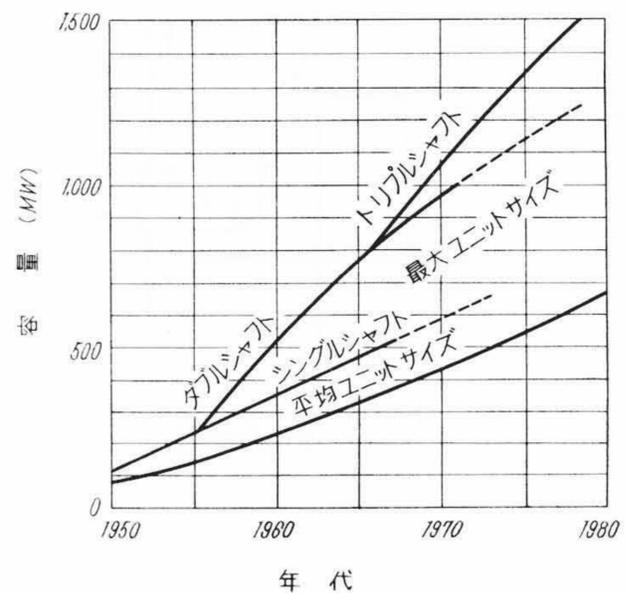
蒸気条件も 102 kg/cm²g, 538°C/538°C: 127 kg/cm²g, 538°C/538°C から最近では 169 kg/cm²g, 566°C/538°C 級まで達しており、短期間に飛躍的進歩をとげつつあるが、現状はさらにクロスコンパウンド形 265 MW 級の発電所建設も進められ、169 kg/cm²g, 566°C/566°C という出力ならびに蒸気条件ともに世界的最高水準に到達した設計が行われており、今後もこの発展の過程は、今までの経験に基づいて、ますます続くものと思われる。こうした発展途上において、日立製作所として、常に念頭に置いてきたことは、その容量、効率および信頼度の増進ということであって、そのために金属材料の研究、製鋼技術の進歩、設計ならびに製作技術の改善、試験、検査の徹底などによって、高度の技術的研究を鋭意実施してきたわけであるが、ここでは特に現在わが国で建設され、または計画されている大容量タンデムコンパウンド蒸気タービンの現状と、将来の進展方向について、アメリカならびにヨーロッパの実情を参照しつつ、容量、効率、材料および構造の角度から概説する。

2. 単位容量

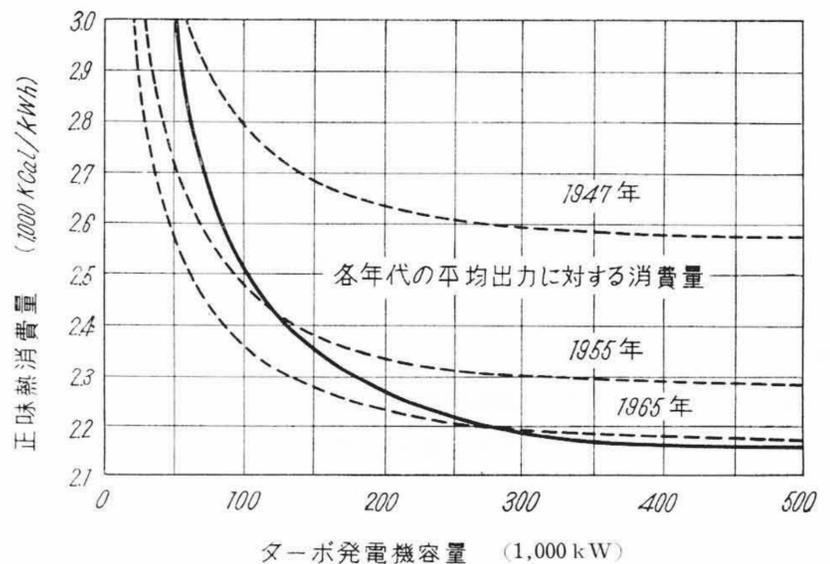
2.1 単位容量と発電原価

一般に蒸気タービンが大容量化されると、設備出力が確保でき、建設費、燃料費が割安になって、発電原価が低減することになる。第1図⁽¹⁾はアメリカの蒸気タービン-発電機ユニットの容量増大の傾向を示したもので、最大と平均値をあらわしたものである。この図の中には、タンデムコンパウンド形、クロスコンパウンド形、および3軸クロスコンパウンド形という工合に、タービン形式をパラメータにしてあらわされているが、その中でタンデムコンパウンド機の容量増大の傾向は、ほとんど直線的に上昇し、1973年には 650 MW に到達する勢いである。

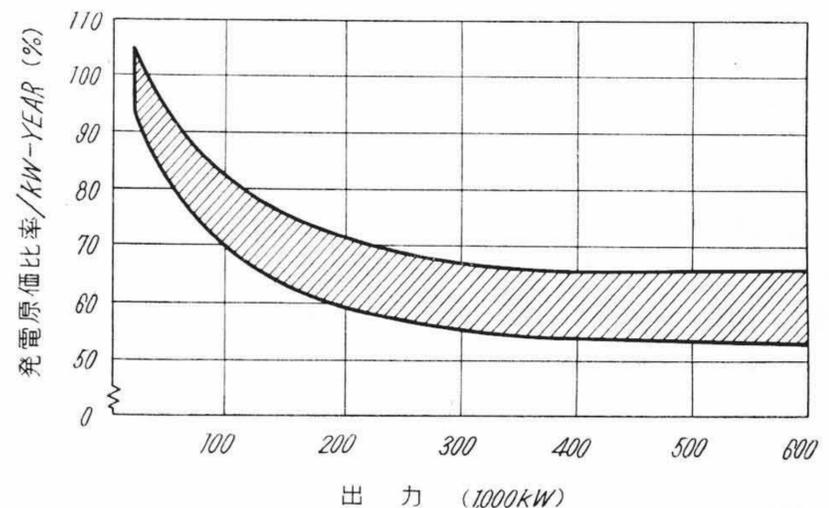
第2図⁽²⁾はアメリカにおける代表的発電所正味熱消費量と容量との関係を示したもので、高圧高温の蒸気を使用することにより、25 MW 機から 50 MW ないし 100 MW 機の間で、正味熱消費量の減少は著しいものがある。しかしながら 100 MW 機以上になると、その利得は比較的少なくなるが、単位容量を増大することによって徐々に発電原価を低下せしめている。たとえば第3図⁽²⁾は年間の発電原価と容量との関係を示すもので、25 MW を 100% とした場合の比率であらわしたものである。また、1947年代を 100% とした場合、アメリカにおける各年代における発電原価のすう勢を示したのが



第1図 蒸気タービン-発電機ユニットの容量増大の傾向 (アメリカ)



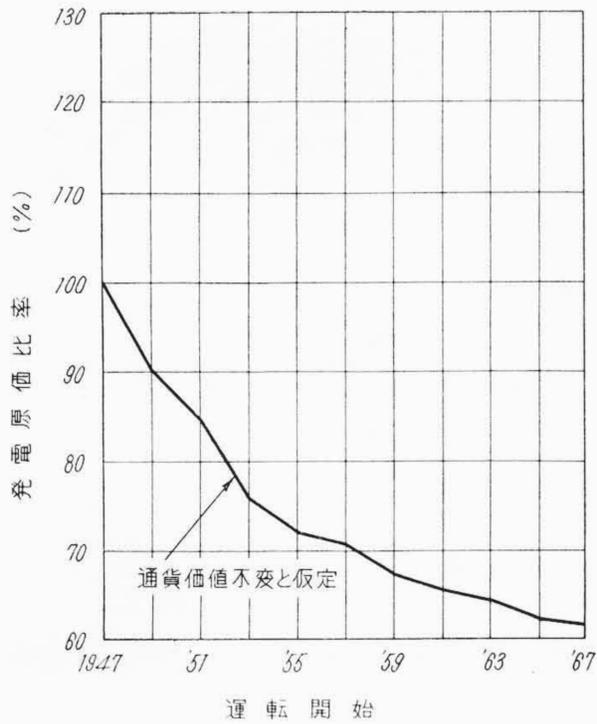
第2図 代表的発電所正味熱消費量と容量との関係 (アメリカ)



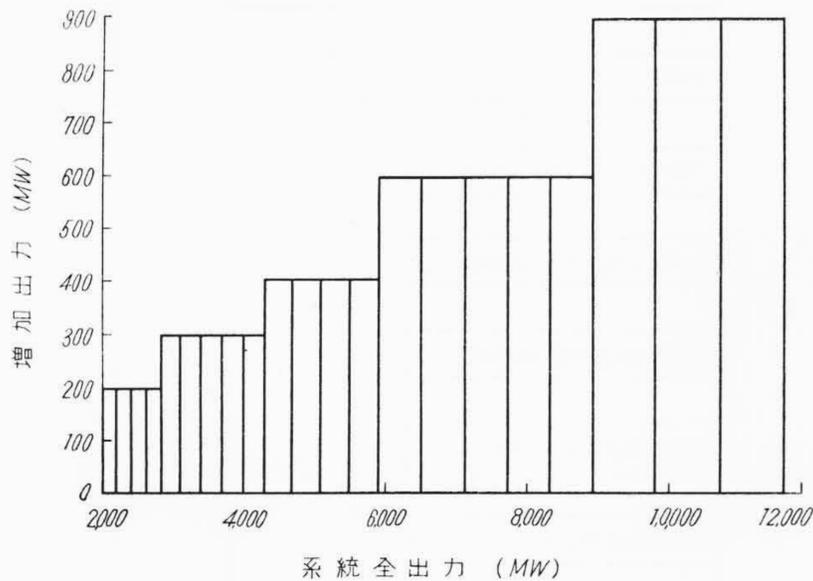
第3図 年間の発電原価と容量との関係

第4図である。ただしこれは1947年以降の通貨価値の下りを考慮しない場合の線図である。これから見ても、少なくとも今後10年また

* 日立製作所日立工場



第4図 平均の容量機に対する発電原価の比較 (アメリカ)



第5図 経済的な出力増加法

はそれ以上引き続いて、発電原価の低減が可能であることを示している。かかる発電原価の低減を実現するために、超臨界圧力の採用が必然的に発生してくるわけである。

2.2 単位容量の決定

この単位容量の決定にあたっては、その発電所が結合される全体の電力系統ならびに予想される負荷率によって、経済的に決定されるべきで、通常最初の全系統容量の10%を増加し、それが増加後の全系統の7%になるまで、増加を続ける方法を最も合理的としている⁽³⁾。第5図⁽³⁾にその経済的な出力増加法を示す。したがってこの増加容量を単位容量とするのが、理想的であるが、これもその系統の容量、電力需要、立地条件、送電設備などによって、異なってくることはまぬがれない。ただ系統の容量が小さい場合は、単位容量の増加率を高くとって建設費を著しく低下させることはできる。

2.3 タービン形式と単位容量

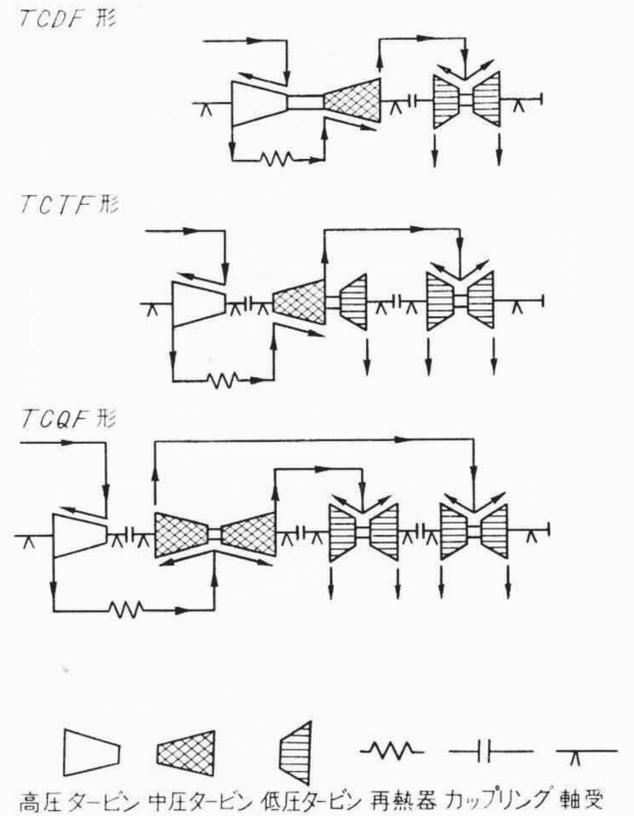
大容量タンデムコンパウンド蒸気タービンの形式は、次のように分類される。

(a) 最終段排気流による分類

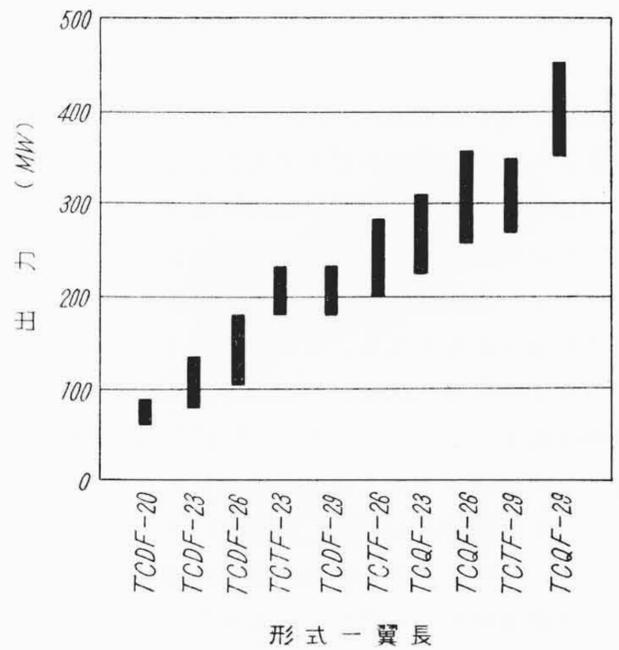
- (1) タンデムコンパウンド2流排気式再熱タービン (TCDF)
- (2) タンデムコンパウンド3流排気式再熱タービン (TCTF)
- (3) タンデムコンパウンド4流排気式再熱タービン (TCQF)

この三つの形式の全体配置図を第6図に示す。

(b) 最終段翼長による分類



第6図 タンデムコンパウンド2流、3流、4流排気式の全体配置図



第7図 タービン形式と単位容量との関係

(1) 3,600 rpm 機に対して 20", 23", 25", 26", 28", 29"

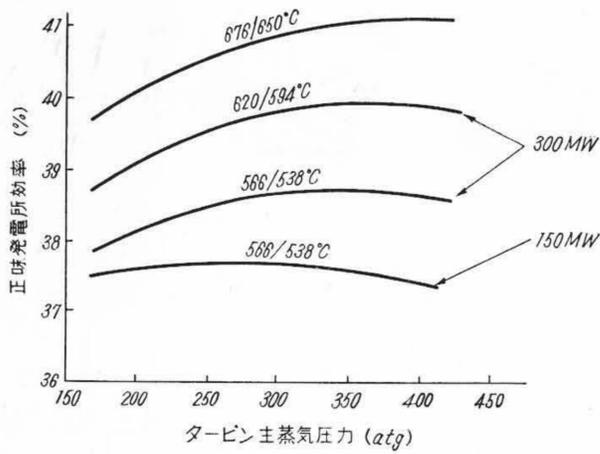
(2) 3,000 rpm 機に対して 20", 23", 26", 28", 29"

上記の二つの分類を併記して、たとえば TCTF-23, TCQF-26 などとあらわす。すなわち前者はタンデムコンパウンド3流排気式23"翼、後者はタンデムコンパウンド4流排気式26"翼を示すことになる。このようなタービン形式と単位容量との関係を第7図に示す。排気流の数が増加しかつ最終段翼長が長くなればなるほど、単位出力は増大することになる。

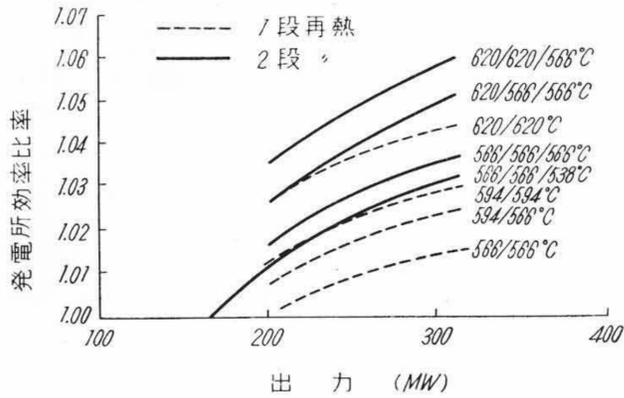
3. サイクルの熱効率

3.1 蒸気条件と熱効率

タービンサイクルの熱効率は、主として主蒸気圧力、主蒸気温度、再熱温度、排気圧力、抽気段数、給水温度、ボイラ給水ポンプ効率などによって変化するが、この中で特に大きな要素は、主蒸気圧力と温度である。正味発電所効率と主蒸気圧力との関係を、単位容量、主蒸気温度ならびに再熱温度をパラメータとしてあらわしたものが第8図⁽²⁾であって、今かりに単位出力300 MW、566°C/538°C、1段再熱の場合について検討してみると、熱力学上からのみいえば、圧



第 8 図 圧力、温度と正味発電所効率との関係

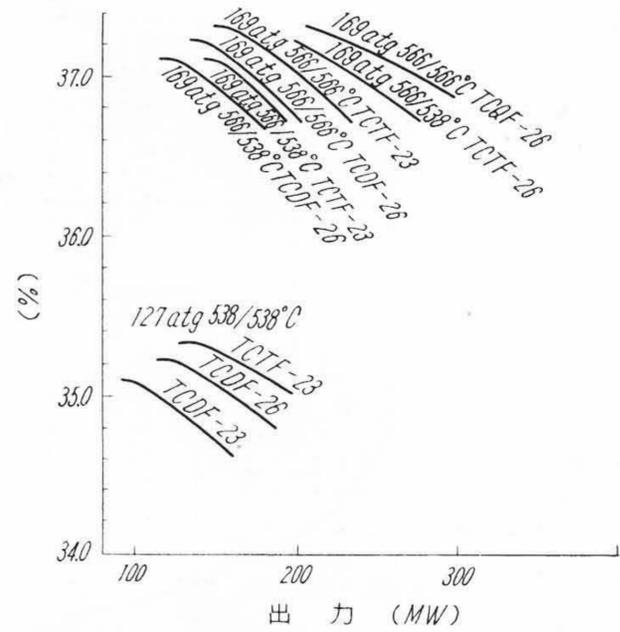


第 9 図 一段および二段再熱効率比較図

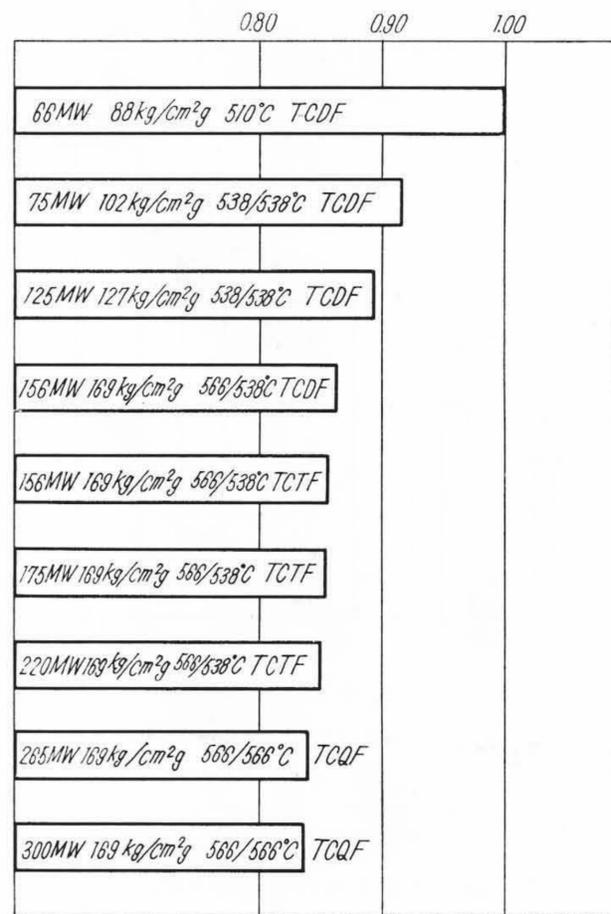
力 352 kg/cm²g の点が最高効率を示しており、それ以上圧力を高くすると、高圧タービンの効率が低下することならびにボイラ給水ポンプ動力が増加するために、熱効率は逆に低下する。超臨界圧力になると、タービンを流れる蒸気容積が極端に少なくなり、小容量の高圧タービンでは、蒸気通路部のノズル、動翼寸法が小さく、それらの壁面の摩擦損失が大となる。また一方ダイヤフラムパッキンや動翼頂部のすきまからのもれ損失の割合が多くなって、全体としてタービン効率は低下してしまうので、主蒸気圧力温度を高くすれば、当然出力もそれに追随させて大きくする必要がある。

ところが圧力が高過ぎるために、蒸気管、タービン車室、ノズルボックス、弁類、そのほか高圧部品の肉厚が増加して、建設費が増大し、ひいては発電原価の点で必ずしも有利にならなくなる。したがって今日では超臨界圧力としても、246 kg/cm²g 程度を実用機としては最高としている。次に発電所の経済性に決定的影響を及ぼす主蒸気温度について考えてみると、300 MW 機、352 kg/cm²g のときの温度 566°C/538°C をそれぞれ 55°C 上昇させて、621°C/593°C にすると、3% 熱効率は上昇するが、566°C をこえるとタービン耐熱材料に、オーステナイト系耐熱鋼を採用せざるを得ないのが今日の蒸気動力界における世界の現状である。その結果建設費の中で、材料費の占める割合がきわめて大きくなる。したがって一般にフェライト系耐熱鋼で経験の多い 566°C が、現在の最高温度となっている。将来新しい低価格のフェライト系耐熱鋼が開発されて、566°C 以上の温度に対し十分な強度を有するようになれば、その様相はまったく違って来るが、当面の間は、621°C または 649°C の主蒸気温度はしばらくは経済性はないであろう。

566°C の第 1 段再熱温度は、今日採用されているが、これは大容量機とか燃料費の高い地域に適しているのものであって、低燃料費のところでは、一般に 538°C のほうが経済的でひろく使用されている。また 2 段再熱について考察してみると、第 9 図に示すように、1 段再熱に対して 2 段再熱は約 2% 熱効率が上昇する。しかし建設費が逆に増加するので、その両方から発電原価を計算して、その最も経済的なところを見出す必要がある。通常 566°C または 538°C の第 2 段再熱温度は、非常に大きな容量にのみ、たとえば 325 MW とか



第 10 図 正味発電所効率比較図 (3,600 rpm の場合)



第 11 図 タービンプラント熱消費量の比較図

450 MW といった大出力についてのみ経済的であって、しかも燃料費が高く、負荷率の高い場合にのみ適合する。現在のところ、タンデムコンパウンド機として、この 2 段再熱方式を計画したものは、ドイツで一つ現われている。

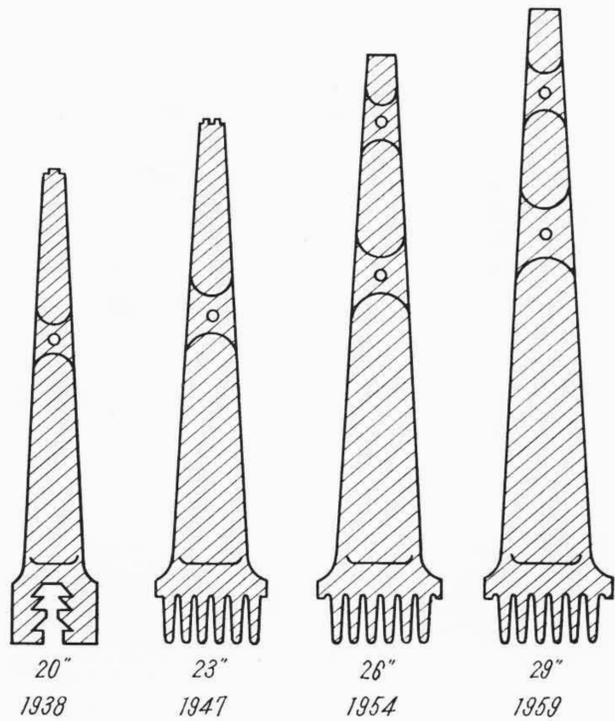
3.2 タービン形式と熱効率

主蒸気圧力 127 kg/cm²g, 169 kg/cm²g: 主蒸気温度 538°C, 566°C: 再熱温度 538°C, 566°C の種々な場合の熱効率の比較を第 10 図に⁽⁴⁾示す。これは 3,600 rpm タンデムコンパウンド機について計算したもので、下記の条件に従って計算方式を一定にしている。

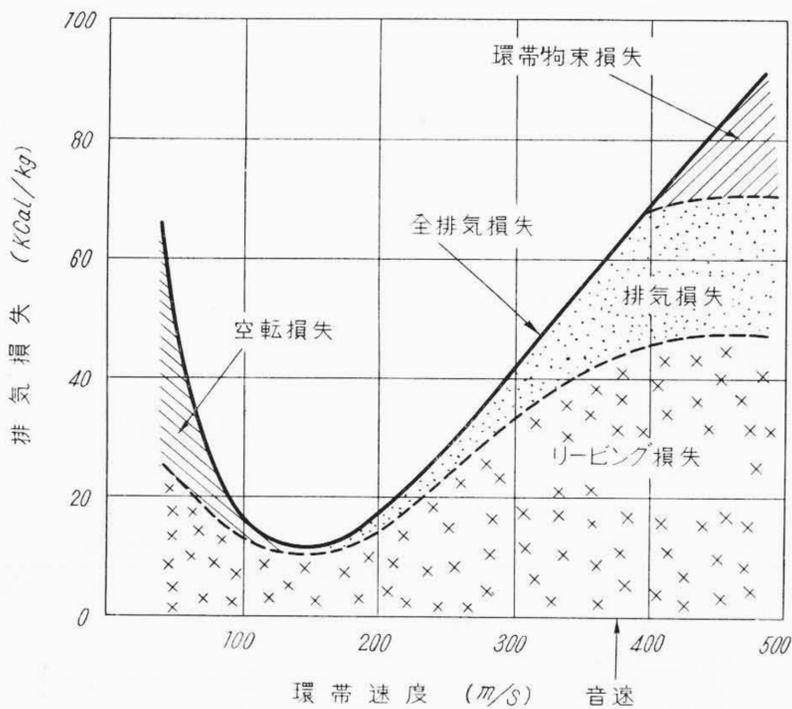
- (1) 連続ブロー量はボイラ蒸発量の 1%
- (2) 補給水は 20°C の補給水を復水器に、連続ブロー量と同量だけ入れる。
- (3) 復水器真空は 722 mmHg とする。

この熱効率は送電端熱効率で、発生電力から所内動力を差し引いた残りの出力による値である。

またわが国で、現在までに運転されているもの、ならびにこれから運転されようとしているものについてのタービンプラント熱消費率



第12図 長翼開発年代



第13図 排気損失の機構図 (3,600 rpm 23 in 翼)

の比較を第11図に示す。数年前に運転に入った66MW非再熱タービンと、現在運転にはいっている175MW再熱タービンとを比較すると、主蒸気圧力で2倍、主蒸気温度は56°C上昇し、かつ再熱式にしたために、前者の熱消費量率を1とすると、後者は0.85となっており、実に15%の効率上昇となる。

4. 低圧タービン翼列

4.1 最終段長翼

高圧部のタービン翼列は、通過蒸気容積が非常に小さいので、かなり大容量機でも、翼の有効長さは短くなる。

したがって翼加工上の製作誤差をできるだけ少なくし、各段に対する熱落差の適正配分を十分考慮して、効率低下を防止している。高圧第1段では温度が高く、かつ軽負荷時の部分噴射により、ある程度の振動応力が生ずるが、日立製作所においては、かかる高温領域における内部減衰率のきわめて高い翼材を使用し、同時に耐振強度の強い翼形を採用しているため、過大な応力は無く、あまり問題にならない。

ところが蒸気がタービン翼列中を次第に膨脹し、最終段落に到達して蒸気容積が著しく大きくなるので、出力が増大して復水器への通過蒸気量が増すと、排気損失を最小限にいとめて、有効にこの蒸気量を通過させるためには、最終段に長翼を採用して環帯面積を

第1表 記録的な最終段長翼の一覧表

回転数 (rpm)	翼の有効長 (in)	環帯面積 (ft ²)	先端周速度 (m/s)
3,000	20	26.6	323
	23	36.4	380
3,600	20	26.2	369
	23	32.9	420
	26	41.1	473

第2表 175 MW タービン主要部品材料表

部品名	材質
ロータ	CrMoV 鍛鋼
車室	CrMoV 鋳鋼
翼	12CrMoWV 鋼および12Cr 鋼
ノズル	13CrCb 鋼および15CrMo 鋼
ダイヤフラム本体	CrMoV 鋼
車室用ボルト	13CrMoWV 鋼
ラビリンス	15CrMo 鋼および鉛入 Ni シン中
弁弁座	CrMoV 鋼, ステライト盛
弁棒ブッシュ	19Cr12NiWCB ステンレス鋼
主蒸気管	2 1/4 Cr 1 Mo 鋼

大きくしなければならぬ。第12図はアメリカGE社における長翼開発年代を示すもので、現在すでに日立製作所では、この中20", 23" および 26" 翼までは、わが国の実用機に採用しているが、たとえば23" 翼から26" 翼を開発するのに7年かかり、さらに29" 翼を開発するまでに5年経過しているのは、いかに長翼の研究開発が慎重を要するかを物語っている。

排気損失は、最終段から流出する蒸気速度によるエネルギー損失と、最終段動翼出口と排気室接手間に生ずる圧力損失、ならびに非常に少ない蒸気容積または高い排気圧力の場合、圧力比が低下して、段落が十分な膨脹を行うことができないときに生ずる空転損失から成っている。

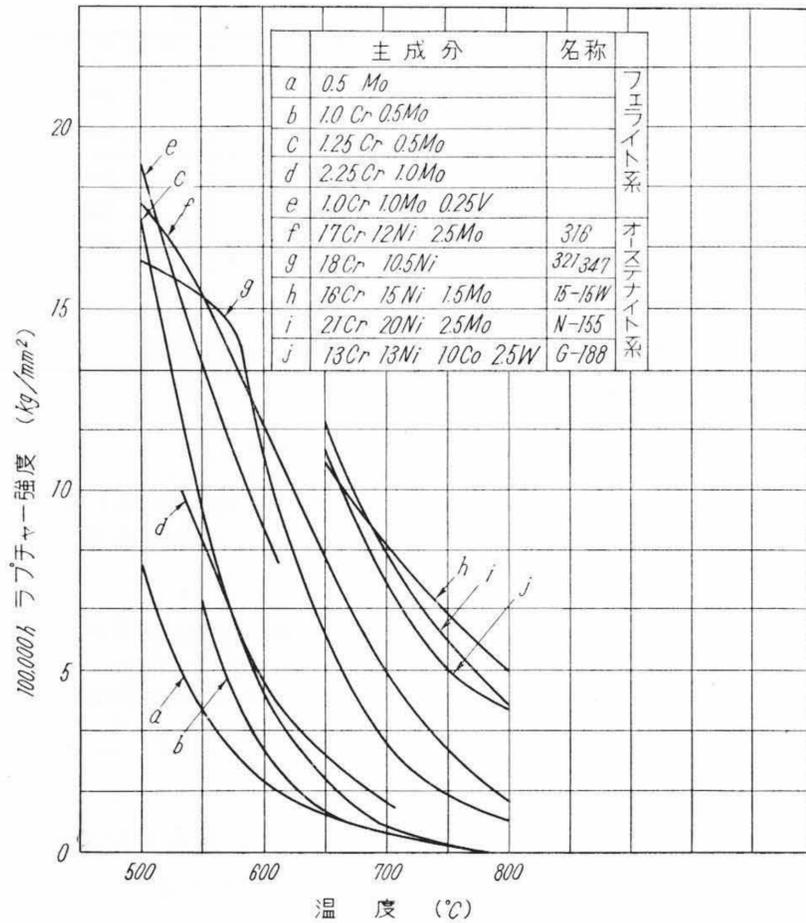
第13図は3,600 rpm, 23" 翼の排気損失の機構と環帯速度との関係を示したもので、排気損失の大部分を占める蒸気流出損失をできるだけ減少させる一つの方法として、軸流排気式があり、復水器をタービン床面のタービン後部に直接連絡するようにし、デヒューザによって排気速度エネルギーを有効に静圧に変え、最終段出口圧力を復水器の圧力より低くすることによって、効率を上昇させるものである。単流排気式にのみ実現することができ、発電機はタービン前方に配置される。

日立製作所で製作した最終段長翼の記録品を第1表に示す。

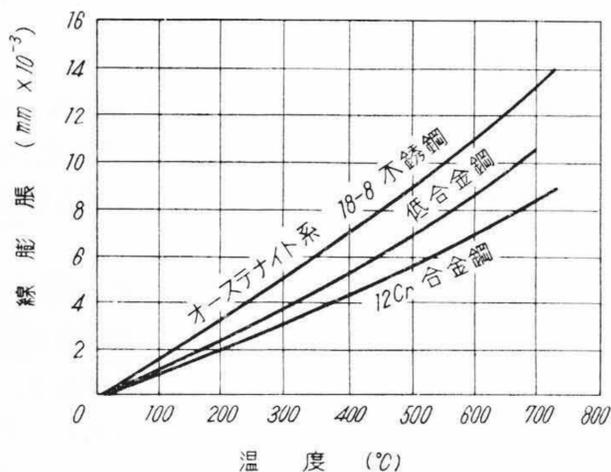
4.2 三次元翼列の設計

タービン内部効率の向上に最も留意しなければならない点は、低圧タービン翼列の設計にある。大容量再熱タービンの場合、中圧タービン翼列までは比較的翼長が短く、従来のフリーボルトテックス理論によるねじり勾配翼を採用しうるが、低圧タービン部の翼列になると、翼長が大きくなり、蒸気流の旋回運動による半径方向の運動を無視できなくなる。また低圧タービン入口部における蒸気流の方向変換による旋回運動の影響を十分考慮して翼列を設計する必要がある。したがってもはやこの領域では、フリーボルトテックス理論は適用できない。三次元翼列設計によらなければ最高効率は期待しえない。

50 サイクル用長翼として、すでに国内では28" 翼が完成されている現状であるが、日立製作所では、早くから50 サイクル用26" および29" 翼の研究を行っており (60 サイクル用26" 翼はすでに実用機に採用済み)、上述のような三次元翼列の理論を適用して、すでに理論的解明を完成し、一部風洞実験を行っているが、さらに並行して実物大試験機によって、実際に3,000 rpm に回転させ、通過蒸気の状態、効率、振動、強度などについて鋭意研究中である。長翼の設



第 14 図 各種フェライト系耐熱鋼およびオーステナイト系耐熱鋼の 100,000 時間ラプチャー強度曲線

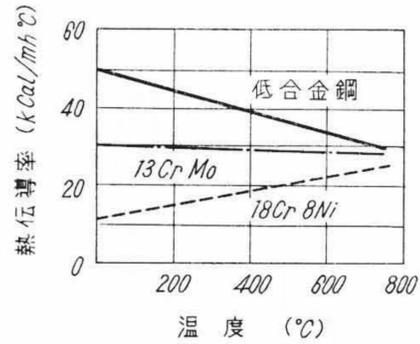


第 15 図 フェライト系鋼とオーステナイト系鋼の線膨脹係数比較図

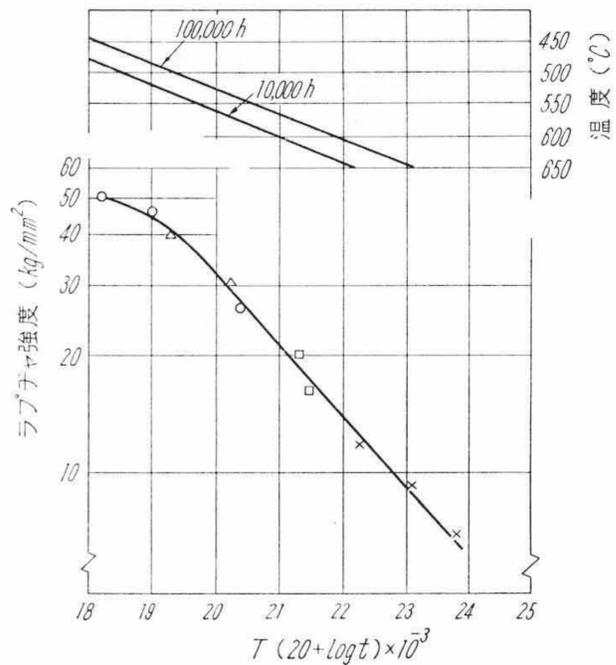
計は、熱力学ならびに流体力学的見地からのみでなく、超音速の蒸気衝撃力による振動応力、ノズルおよび動翼間に生ずる蒸気衝撃力の不ぞろいによる共振の問題、翼プロファイルの半径方向における重心の移動の影響などを考えて、あらゆる角度から最も合理的な形状とすべきで、しかも精度高く、ならい削りのできるものでなければならない。

5. 材 料

主蒸気温度が 566°C の 175 MW タービン材料を第 2 表に示す。今日最も信頼度が高く、鍛造性、鋳造性、熔接性ならびに加工性がよく、ひろく使用されているものである。ところが、このような実績のある経験の深いフェライト系耐熱鋼の使用温度範囲は最高 566°C までであって、これ以上になるとオーステナイト系耐熱鋼を採用せざるをえないのが今日の現状である。第 14 図⁽²⁾は数種のフェライト系耐熱鋼とオーステナイト系耐熱鋼の、100,000 時間ラプチャー強度を示すもので、これからわかるように、566°C をこえた高温領域では、もはやフェライト系鋼は使用しえない。耐熱強度の非常にすぐれたオーステナイト系鋼を使用せざるを得ない理由はここにある。しかしながらオーステナイト系鋼は、今日のわが国の技術水準



第 16 図 フェライト系鋼とオーステナイト系鋼の熱伝導率比較図



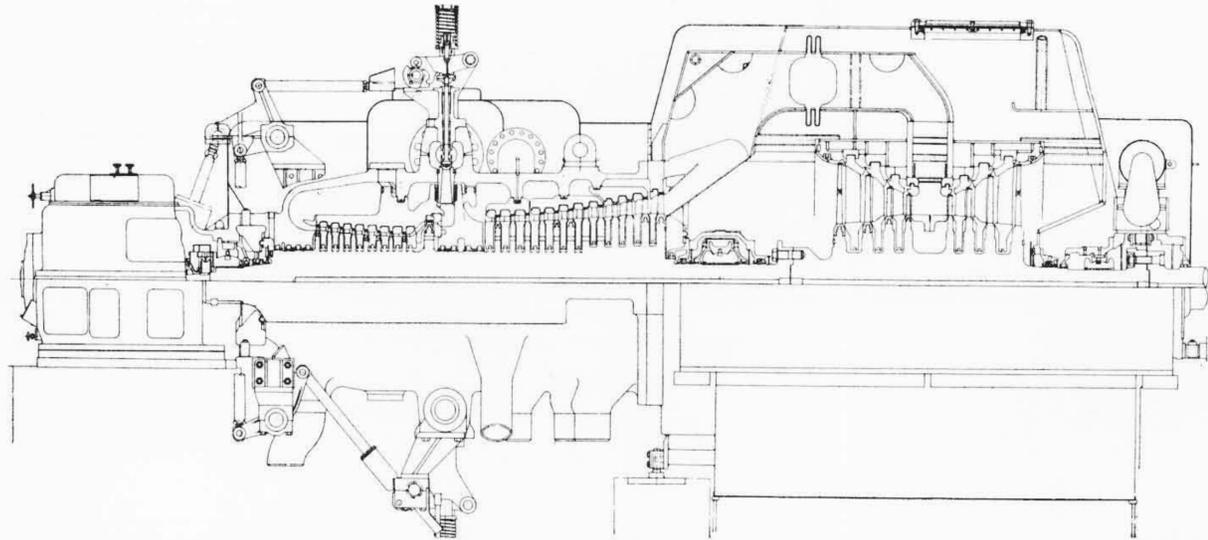
第 17 図 TAF 材の高温における 100,000 時間ラプチャー強度

第 3 表 運転または製作中の大容量再熱タービン一覧表

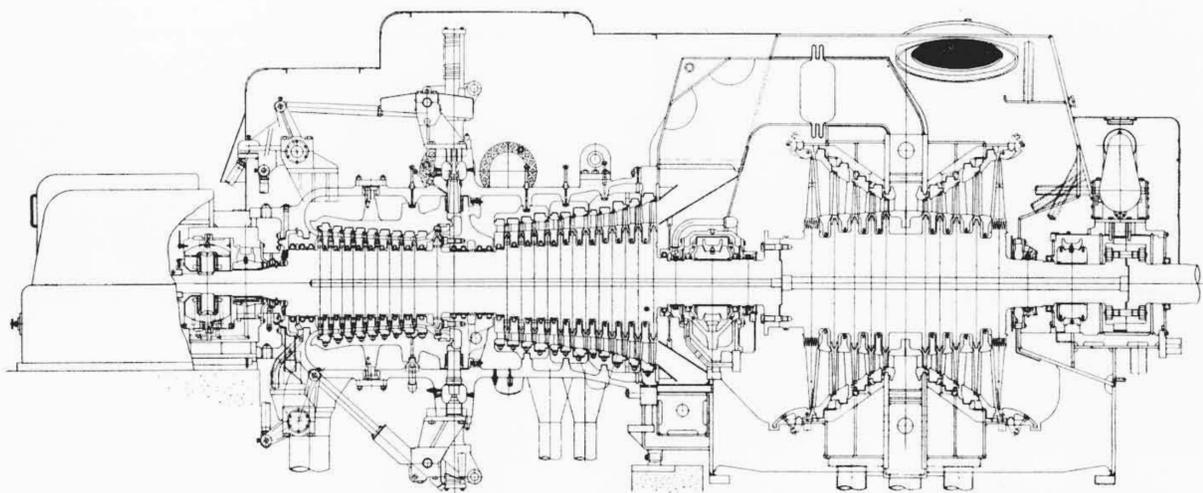
納入先	発電所名	出力 (kW)	主蒸気		再熱温度 (°C)	真空度 (mm Hg)	タービン形式	回転数 (rpm)	運転開始年月
			圧力 (kg/cm²g)	温度 (°C)					
東京電力	新東京 #3	75,000	102	538	538	722	TCDF-20	3,000	32-11
東北電力	八戸 #1	75,000	102	538	538	728	TCDF-20	3,000	33- 7
東京電力	新東京 #5	75,000	102	538	538	722	TCDF-20	3,000	33-10
国有鉄道	川崎 #2	75,000	102	538	538	722	TCDF-20	3,000	35- 1
北海道電力	滝川 #1	75,000	102	538	538	722	TCDF-20	3,000	35- 3
東京電力	品川 #2	125,000	127	538	538	722	TCDF-23	3,000	35- 4
東北電力	仙台 #2	175,000	169	566	538	722	TCTF-23	3,000	35- 5
常盤共同火力	勿来 #3	75,000	102	538	538	727	TCDF-20	3,000	35-10
東京電力	川崎 #2	175,000	169	566	538	722	TCTF-23	3,000	35- 8
常盤共同火力	勿来 #4	75,000	102	538	538	727	TCDF-20	3,000	36- 8
中国電力	岡山 #1	125,000	127	538	538	722	TCDF-26	3,600	36-11
東京電力	品川 #3	125,000	127	538	538	722	TCDF-23	3,000	36-11

では、大形品製造に対してはまだ十分とはいえない。かつ第 15 図に見られるように、熱膨脹係数がフェライト系鋼に比較して高く、一方第 16 図に示すように熱伝導率が悪いので、設計上十分考慮しておかぬと、高温に対して大きな熱応力を生じ、タービン構造上不利になる恐れがある。

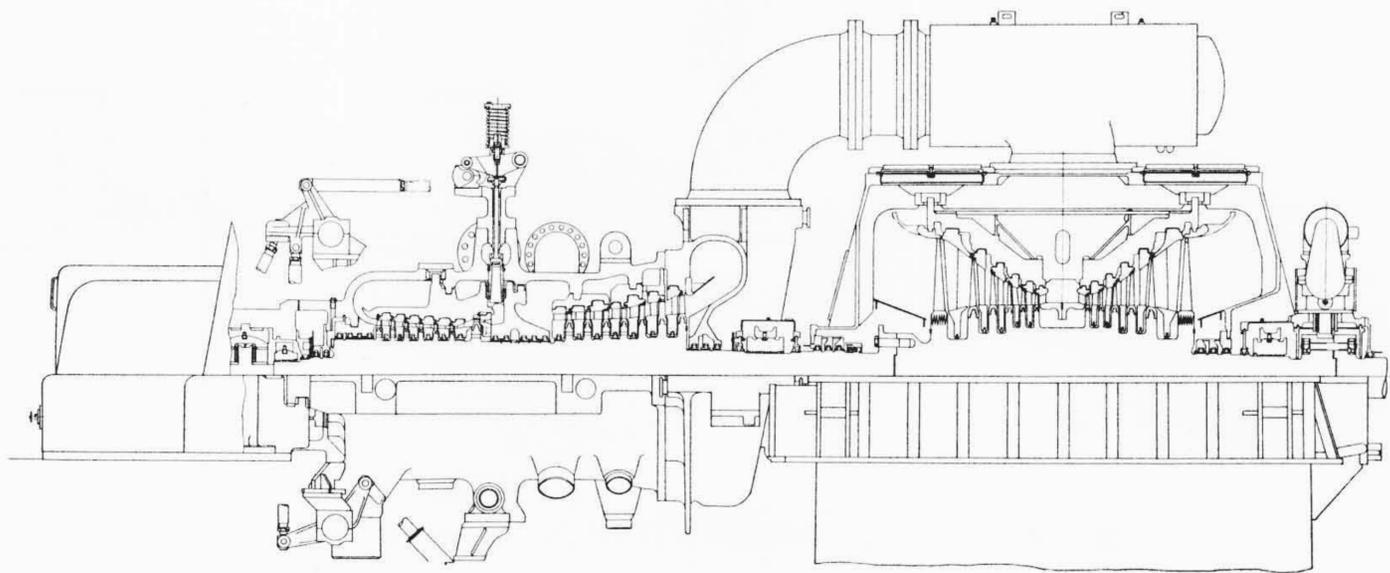
近年ガスタービンの耐熱鋼として、イギリスで研究されひろく各国で実用化されているフェライト系鋼で H46 というものがあるが、これに似て少量のボロンと窒素を入れた TAF と呼称する新しい低価格のフェライト系耐熱鋼の研究が、東京大学ならびに日立製作所で行われており、基礎的研究を終了して、現在は長時間のラプチャー強度の研究を実施中で、これが完了すれば、実際の設計に必要な 100,000 時間の高温ラプチャー強度が推定しうるようになっている。この材料のラプチャー強度を第 17 図に示す。これからみても、620~630°C の温度で十分な強度を有することがわかるであろう。将来



第 18 図 新東京発電所 #3, 3,000 rpm, 75,000 kW, TCDF-20 再熱タービン断面図



第 19 図 品川発電所 #2, 3,000 rpm, 125,000 kW, TCDF-23 再熱タービン断面図



第 20 図 岡山発電所 #1, 3,600 rpm, 125,000 kW, TCDF-26 再熱タービン断面図

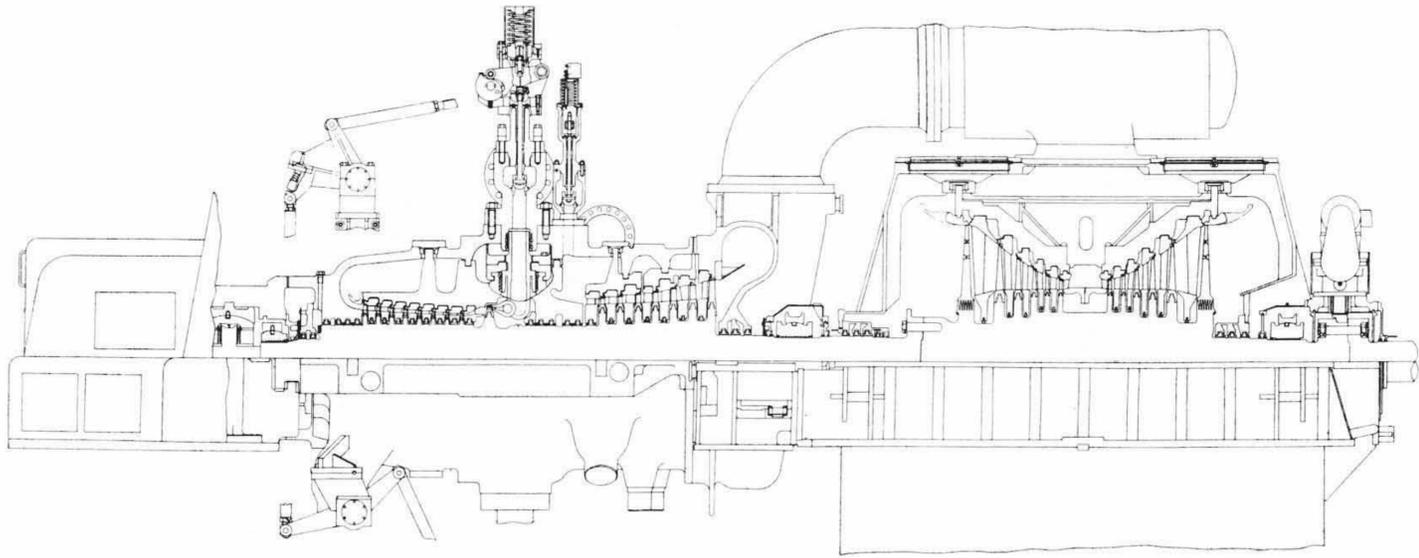
大形鋼塊による実物大試験を含めて研究するだけの価値があり，新材料という点では今日のフェライト系耐熱鋼のトップであろう。フェライト系鋼を使用して，この 566°C の壁を破り， 600°C から 630°C の温度範囲まで進むためには，モリブデン，バナジウム，ならびにボロンの組み合わせを上手に使わせる必要がある。

6. 蒸気タービンの構造

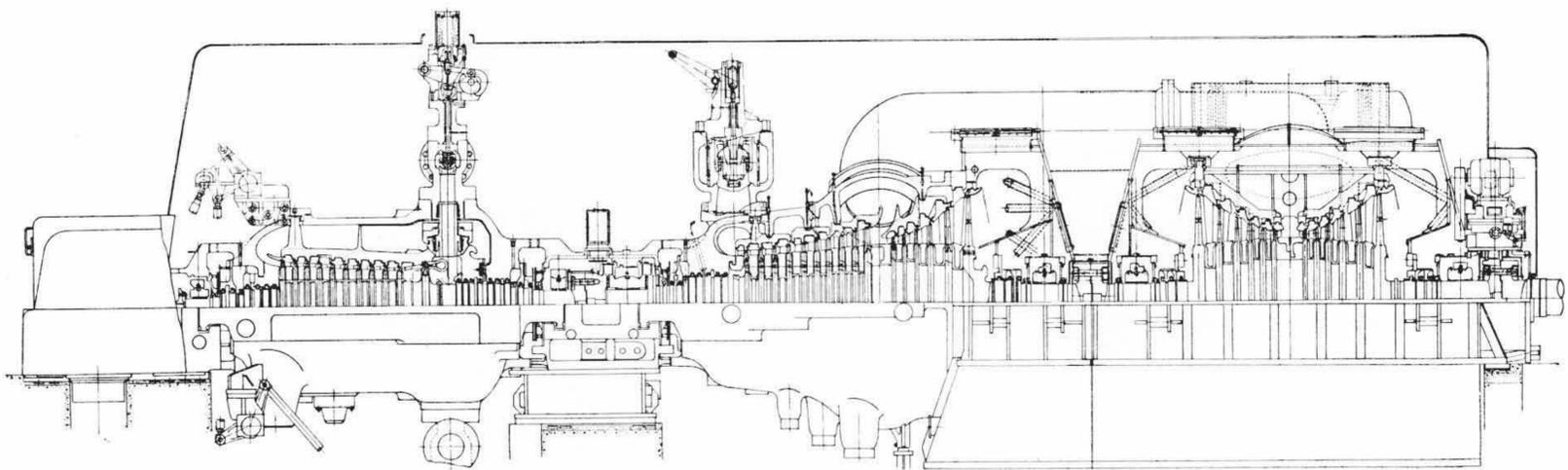
タンデムコンパウンド蒸気タービンとして，日立製作所がすでに納入または製造中の各種大容量再熱タービンの一覧を第3表に示す。最近各部設計構造の飛躍的進歩改善によって，500 MW まで製造しうるまでになっているが⁽⁵⁾，さし当り 75 MW から始めて 500 MW の範囲の蒸気タービンの代表的構造について述べる。

6.1 75 MW 以上 100 MW まで

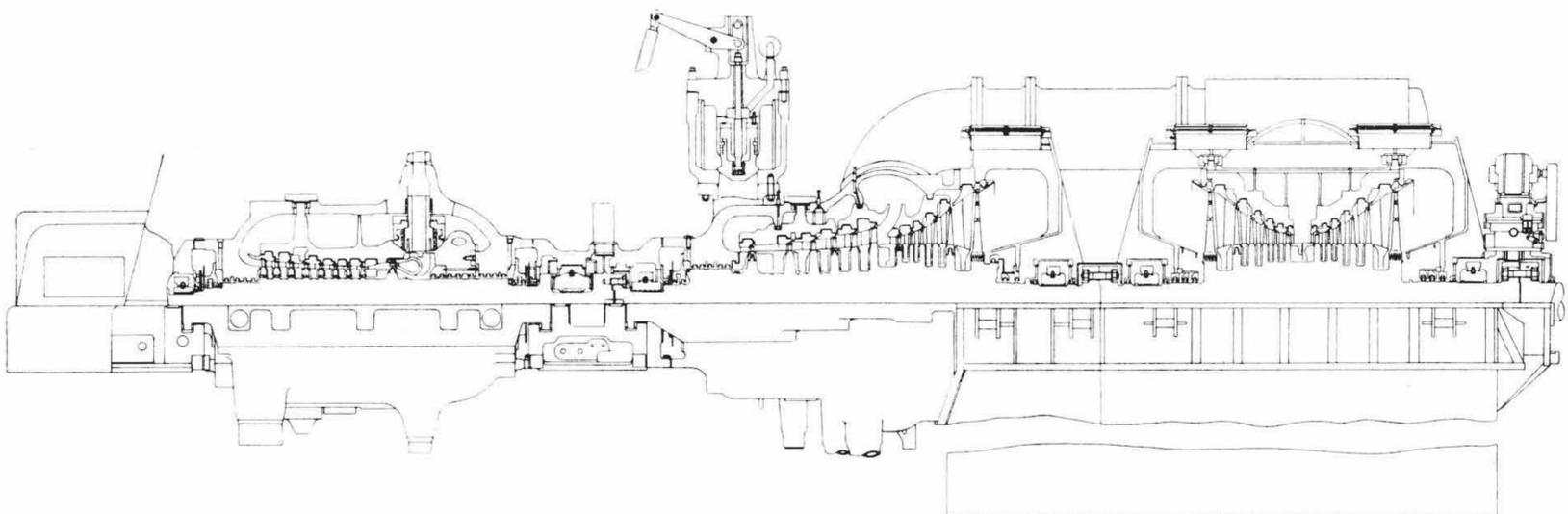
タンデムコンパウンド2流排気式再熱タービンとして最終段に20"翼を有するものが標準である。わが国にはじめて設置され運転されてきた 3,000 rpm 75 MW 再熱タービンの，最も代表的な基本構造を第18図に示す。この構造はアメリカGE社の標準形で，1950年にはじめてすえ付けられ，1958年までに実に98機のタービンが運転されている。その効率，信頼度はすこぶる高いものである。蒸気条件は， $102\text{ kg/cm}^2\text{g}$ ， $538^{\circ}\text{C}/538^{\circ}\text{C}$ が標準で，構造簡単にして小形である点はその一大特色である。高圧車室およびロータの中央部に高温高圧部を設置し，高圧部は互に背向流にしてタービン推力を軽減している。中圧部から低圧部への連絡は，内側連絡管によって連結し構造を小形化している。



第 21 図 3,600 rpm, 156,000 kW, TCDF-26, 再熱タービン断面図



第 22 図 仙台発電所 #2, 3,000 rpm, 175,000 kW, TCTF-23, 再熱タービン断面図



第 23 図 3,600 rpm, 220,000 kW, TCTF-26, 再熱タービン断面図

6.2 100 MW 以上 175 MW まで

(a) TCDF-23

タンデムコンパウンド 2 流排気式として最終段に 23" 翼を有する構造で、第 19 図は 3,000 rpm, TCDF-23, 125 MW のタービン断面図を示している。これは上述の TCDF-20, 75 MW とほとんど同じ構造で、蒸気条件は $127 \text{ kg/cm}^2\text{g}$, $538^\circ\text{C}/538^\circ\text{C}$ を標準としている。

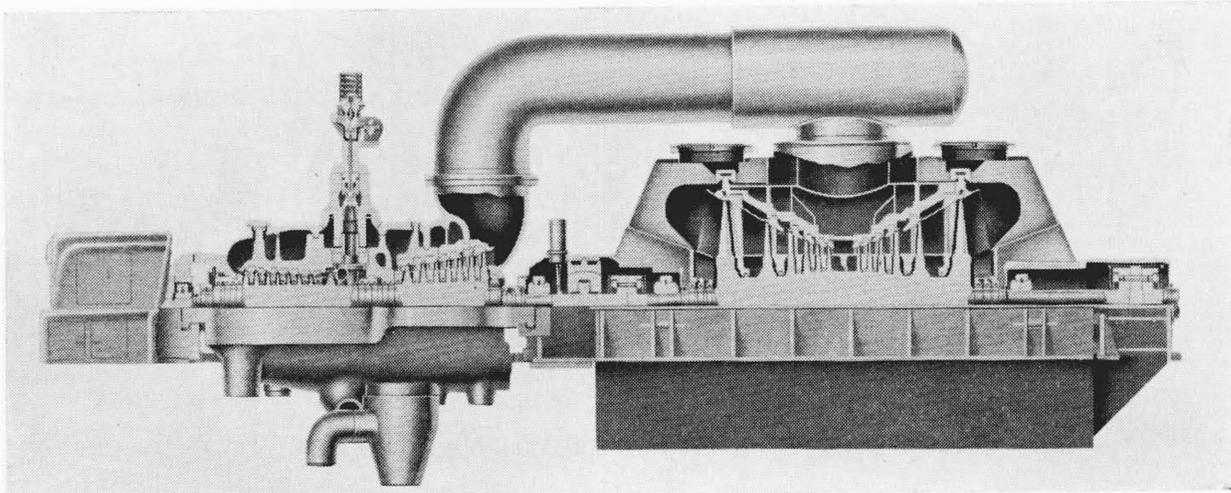
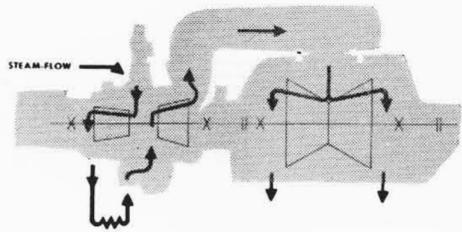
(b) TCDF-26

最終段に 26" 翼を有する構造で、第 20 図は 3,600 rpm, TCDF-26, 125 MW のタービン断面図を示している。構造は前述の 75 MW と酷似しているが、特に異なるところは、低圧入口温度上昇を考慮して、外側連絡管を装備し、運転中の熱膨脹ならびに蒸気内圧による低圧内部車室に対する反力を零にしている。低圧車室が完全に二重車室になっていることも特色の一つである。蒸気条

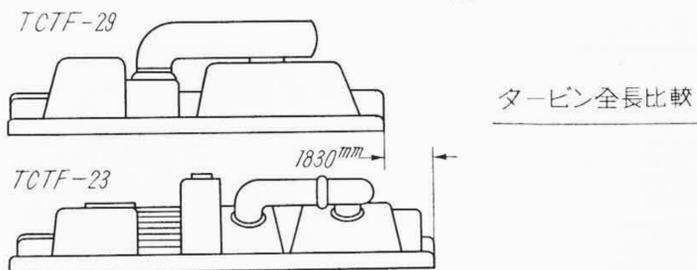
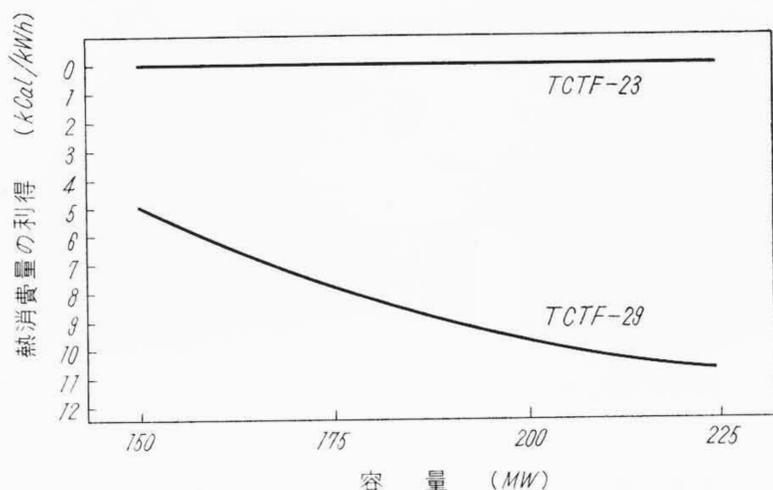
件は $127 \text{ kg/cm}^2\text{g}$, $538^\circ\text{C}/538^\circ\text{C}$ を標準としている。

次に 156 MW 級の出力になると、従来は TCTF-23 を採用していたが、アメリカ GE 社においては、26" 翼の開発が完成した 1954 年より以降、TCDF-26 を採用標準とし、現在までの統計は、TCDF-26 が 13 機、TCTF-23 が 10 機という割合になっており、今後はすべて 156 MW には TCDF-26 を採用したほうが発電原価が安くなるという理由で、もっぱらこの形式が使用されるようになっている。

第 21 図はこの 3,600 rpm, TCDF-26, 156 MW のタービン断面を示すもので、蒸気条件は、 $169 \text{ kg/cm}^2\text{g}$, $566^\circ\text{C}/538^\circ\text{C}$ を標準としている。第 1 段ノズルは、いわゆるセパレートノズルボックスを採用し、肉厚を極力薄くして、熱応力を低くし、かつ車室に対する相対的熱膨脹を自由にとれるようになっている。これは $169 \text{ kg/cm}^2\text{g}$, 566°C という主蒸気条件になると、どうしてもこの形式の構造が必要となる。また高低圧二つの車室を、同一中心線上で支持し、いわ



第24図 3,600 rpm, 200,000 kW, TCDF-29, 再熱タービン断面図



第25図 TCDF-29とTCTF-23のタービンの大きさならびに熱消費量比較図

ゆるセンターラインサポート方式を採用して、運転中の車室の熱膨脹による偏心を無くしている。このような構造にすれば TCDF-26で175 MWまでの設計が可能で、すでにアメリカGE社では1956年にはじめてすえ付け、1958年までに実に50機のタービンを製作納入している。

6.3 175 MW以上275 MWまで

(a) TCTF-23

タンデムコンパウンド3流排気式として、最終段に23"翼を使用することにより、175 MWから225 MWまでの出力範囲に適合する。第22図は、3,000 rpm, TCTF-23, 175 MWのタービン断面を示すもので、標準蒸気条件は169 kg/cm²g, 566°C/538°Cである。

(b) TCTF-26

同じ3流排気式でも、最終段に26"翼を採用すれば、出力区分は200 MWから275 MWまでとなる。第23図は3,600 rpm, TCTF-26, 220 MWのタービン断面であって、標準蒸気条件は169 kg/cm²g, 566°C/538°Cである。

TCTF-23, TCTF-26ともに中圧車室の上部に、インターセプト弁を取付け、出力が大きい割合に、タービンロータの慣性モーメントが小さく、全負荷遮断時に蒸気管内に残留する蒸気エネルギーを、できるだけ小さくしてタービンロータの過速を防止するようになっている。上記の形式のタービンは、1958年の中頃にGE社によって初めてすえ付けられ運転されており、現在運転中

および製造中を合計すると9機に及んでいる。

(c) TCDF-29

1959年にGE社によって29"翼が開発され、最終段に29"翼を使用すると、2流排気式で175 MWから225 MWの出力範囲に適合し、ちょうどTCTF-23と同じになる。第24図はその断面であるが、たとえばこのTCDF-29とTCTF-23のタービンの大きさおよび熱消費量を比較すると、第25図に示すようになり、非常に経済的なものとなる。このタービンの特長は、TCTF-23に比べて中圧ロータが1本無く高圧ロータと一体になっており、したがって中圧車室も高圧車室と一体構造になっている。軸受数も6個が4個で済み、外側連絡管は2本が1本になって、車室の中央真上に装備されている。また従来の2流排気式(第17, 18, 19, および20図)の構造と比較すると、推力軸受部が高圧と低圧の中間にあり、したがってロータの車室の熱膨脹差を小さくすることができ、それだけノズルと動翼間のすきまをせまくして効率を向上できる。また同時にタービン前部の軸受台が推力軸受の分だけ短くなり、軸受数は3個が4個に増加して、高低圧ロータが別々のスパン内に入って、振動的に非常に安定した構造になっている。

(d) TCTF-29

29"翼を使って3流排気式にすれば、260 MWから340 MWの出力範囲に適合することになる。

6.4 250 MW以上350 MWまで

単位容量が250 MWをこえると、現状ではクロスコンパウンド形再熱タービンを多く採用しているのが実情であるが、最近大容量タンデムコンパウンドの開発と、使用者側が一軸で大容量のタービンのほうが運転操作に便利であるという意向から、ここ一年間に急速に超大容量タンデムコンパウンド機が注目されるようになった。

タンデムコンパウンド4流排気式にして、最終段に23"翼, 26"翼, 29"翼を使用することにより、出力範囲はさらに増大する。

(a) TCQF-23

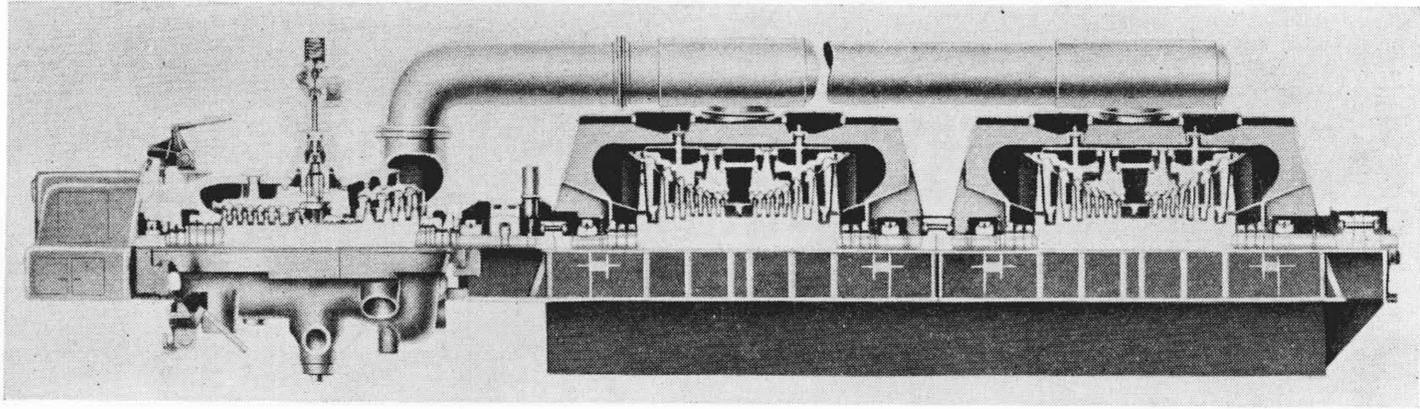
出力区分としては225 MWから300 MWまでとし、265 MW程度が最も経済的な出力となる。蒸気条件は169 kg/cm²g, 566°C/566°Cを標準とする。

(b) TCQF-26

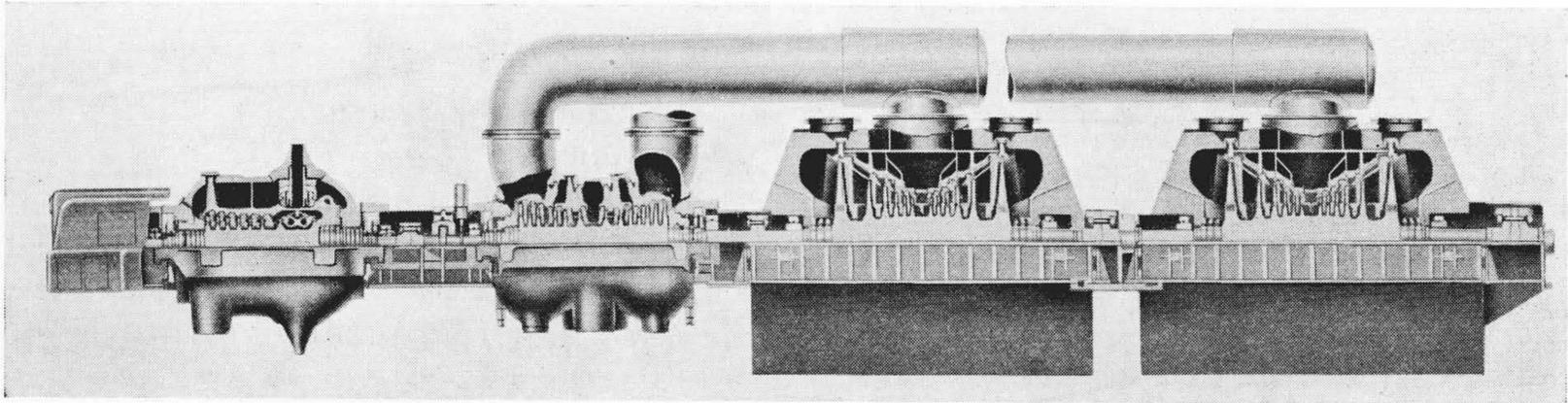
(1) 250 MWから300 MWまで

高圧部と中圧部が同一車室内にあり、互に背向流となり、また1個の高圧車室と2個の低圧車室が、同一中心線上で支持されたいわゆるセンターラインサポートを採用し、中圧部から低圧部への連絡は、外側連絡管によってそれぞれ連結されるといったきわめて簡単な構造である。

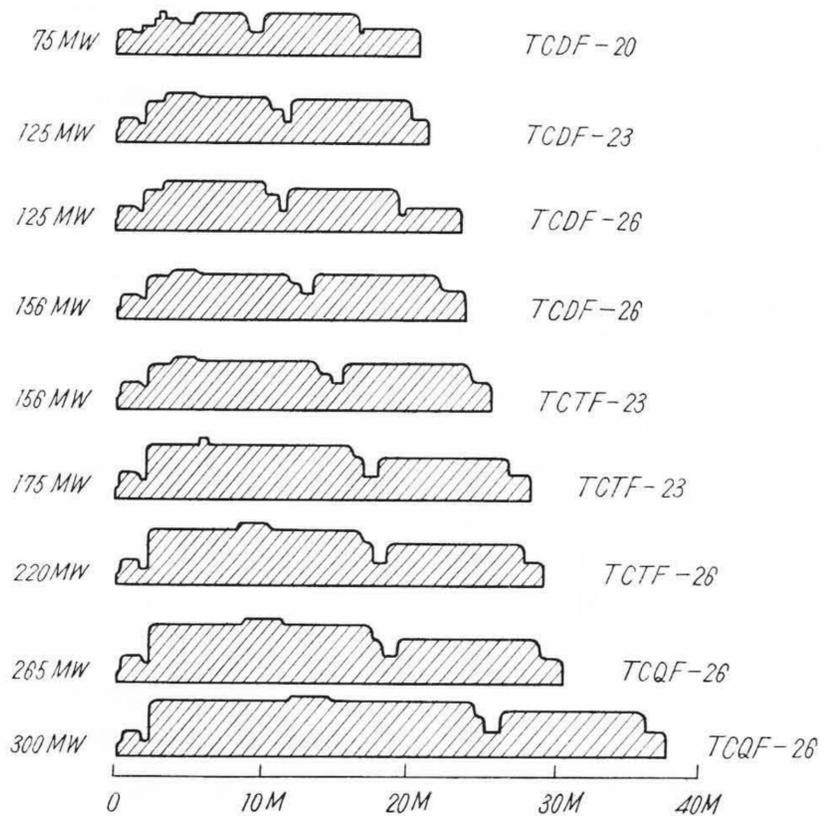
第26図にタービン断面を示す。これは最高246 kg/cm²g, 538°C/538°Cの蒸気条件に適合するものである。



第 26 図 3,600 rpm, 250,000 kW~300,000 kW, TCQF-26, 再熱タービン断面



第 27 図 3,600 rpm, 300,000 kW~350,000 kW, TCQF-26, 再熱タービン断面図



第 28 図 タンデムコンパウンド再熱タービン発電機の全長比較図

(2) 300 MW から 350 MW まで

この出力範囲に対しては、中圧部すなわち再熱部を 2 流式にして、翼長を短かくしかつ通過蒸気量を半分にして翼荷重を減少させ、翼根の応力を従来の経験値以内におさえた設計となっている。第 27 図にその断面構造を示しているが、この特長は 4 個の車室が一行に並んでセンターラインサポートになっており、運転中の熱膨脹に対し、きわめて安定した設計となっている。蒸気条件は、 $169 \text{ kg/cm}^2\text{g}$, $566^\circ\text{C}/566^\circ\text{C}$ を標準とする。この構造は非常に将来性のある構造で、従来の大容量クロスコンパウンド形にとって代るものとして大いに関心をもたれている。現在一般に公開されているものとしては、アメリカにおいて 1961 年 3 月初運転予定に、 $3,600 \text{ rpm}$, 325 MW , $141 \text{ kg/cm}^2\text{g}$, $538^\circ\text{C}/538^\circ\text{C}$, 722 mm Hg が

第 4 表 ヨーロッパにおける大容量タンデムコンパウンド蒸気タービンの計画一覧表

国	発電所名	出力 (kW)	主蒸気		第 1 段再熱温度 ($^\circ\text{C}$)	第 2 段再熱温度 ($^\circ\text{C}$)	タービン形式	回転数 (rpm)
			圧力 ($\text{kg/cm}^2\text{g}$)	温度 ($^\circ\text{C}$)				
イギリス	C.E.A. Blyth "B" Station	275,000	162	566	566	—	TCQF-36	3,000
	C.E.A. West Throck Station	200,000	165.6	566	538	—	TCQF	3,000
	C.E.G.B. High Marnham Station	200,000	165.6	566	538	—	TCTF	3,000
	C.E.G.B. Willington "B" Station	200,000	165.6	566	538	—	TCTF	3,000
ドイツ		250,000	199	570	570	—	TCTF	3,000
		250,000	300/330	600/620	560/570	523/535	TCTF-23.6	
		175,000	170/180	565/670	540/545	—	TCTF	3,000
	Frimmersdorf #1 & #2	150,000	170	525/535	525/535	—	TCTF	3,000
		150,000	185/210	530/535	530/535		TCTF	

1 機あるが、次第にその数を増してゆくものと考えられる。

6.5 350 MW 以上 500 MW まで

タンデムコンパウンド 4 流排気式にして、最終段に 29" 翼を使用することにより、最高 500MW までの出力が可能になるが、実際の経済的な出力は 400MW 程度となる。このような大きな容量になると、主蒸気圧力も極端に高くなり、いわゆる超臨界圧力を採用することになる。現在では種々の経済性の比較からみて、最高圧力は $246 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ が実用上最も高いと考えられている。また温度はフェライト系耐熱鋼の使用しうる 566°C が、価格の点からいって最適である。再熱の形式は 2 段再熱をとった $566^\circ\text{C}/566^\circ\text{C}/566^\circ\text{C}$, TCQF-29 となろう。

6.6 タービン—発電機全長の比較

タンデムコンパウンド再熱タービン—発電機の全長を各容量について比較すると、概略第 28 図のようになり、この中で同じ容量の 156 MW でも、TCDF-26 と TCTF-23 では、かなり前者のほうが短くなっていることがわかる。また 300 MW 級になると、TCQF 形となり非常に全長が長くなり、建屋の長さが長くなるが、その代りクロスコンパウンド形に比較して建屋の横幅は縮少しうる。

7. ヨーロッパにおける大形タンデムコンパウンド機

ヨーロッパにおける再熱タービンの単位容量は、80MW から 100 MW 程度のもので非常に多く、まだそれをこえる大容量機の運転経験はとぼしく、現在計画中のものが大多数である。これはヨーロッパにおける給電網が比較的小規模の電力会社に細分化されているためであるが、最近に至って急速に大容量化への傾向が強くなってきた。現在までにヨーロッパのタービン製造業者によって、設計計画された大容量タンデムコンパウンド機の概略を示すと第4表のようになる。

ヨーロッパでの現在の最大容量は 120MW から 150MW 程度であるが、近い将来には 250MW がタンデムコンパウンドの最大出力になるであろうと考えられている。特にドイツにおける 250 MW, タンデムコンパウンド2段再熱タービンの計画は注目すべきである。

8. 結 言

以上最近ならびに将来の大容量のタンデムコンパウンド蒸気ター

ビンについて述べたが、すでに国産最大の 175MW タービンは運転に入らんとしており、日立製作所は今までの設計製作によって得た貴重な経験をもとにして、さらに多くの研究の推進とその成果により、高効率の大容量機製造になおいっそうの努力を傾注し、多数の新設設備の整備と相まって顧客の需用に応ずる所存である。

参 考 文 献

- (1) H.R.Reese, "Advance Development in Component Design for Large Steam Turbines" Westinghouse Engineer, 1959-7
- (2) 桑野, 超臨界圧力タービンの問題点, 電気公論, 昭34-10
- (3) L.K.Kirchmayer, A.G.Meller, J.F.O'Mara, J.R.Stevenson, "An Investigation of the Economic Size of Steam-Electric Generating Units," AIEE, Vol. 74, 1955-8, P. 600-601
- (4) 浦田, 大容量火力発電所の経済性について, 電気公論, 昭34-10
- (5) 桑野, 将来の大形蒸気タービンを推測する, 電気雑誌 OHM, 昭34-10



新 案 の 紹 介



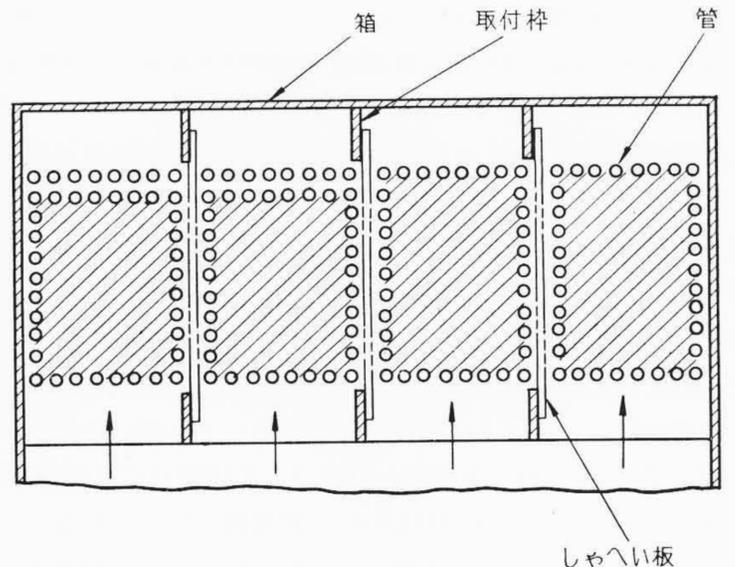
実用新案登録第 486887 号

小 堀 与 一

熱 交 換 器

断面長方形なる箱の中に多数の管が均一に配列されている間接式の熱交換器において箱内を通る流体によって熱交換器全体が振動を起すことがある。これはたとえばボイラの空気予熱器などにおいて経験されるのであって激しい騒音乃至は破損にすら至りかねない現象である。これを防止するためには箱をしゃへい板によって区切れればよいのであって考案者の実験究明の結果その区切るべき位置は長手方向を四等分した位置であることがわかった。そこで本考案はもしそのような振動現象が起きるときには簡単にその部分にしゃへい板をとりつけて防止策を講じうるように四等分された位置にしゃへい板のとりつけの邪魔にならぬような管の配列を行い、かつ箱にはしゃへい板をとりつけるに便利なわくをあらかじめ設けたものである。

(高橋記)



実用新案登録第 443623 号

桑 野 幸 三

回 転 軸 の パ ッ キ ン グ

スチームタービンの軸端に直結して駆動される油ポンプの軸封部は半径方向の偏心が大きいため軸封部構造にもくふうがいる。従来そのためにパッキングリングをケーシングに設けられた環状の溝内に大きな遊隙をもたせてとりつけパッキングリングの内外周両側から緩衝用の流体を作用させていた。このように遊隙が大きいとパッキングリングには必然的に回り止めをほどこさなければならないが本案はこの回り止めを機械的に行わずパッキングリングの外周から内周に噴出する圧力流体の流体力で行わせるようにしたものである。そのために前記噴出部には第2図に見られるようなリングに反作用を与えるための噴出溝を設けた。これによってリングは常時一方向に回転力が与えられることになりそれが軸の回転にともなうリングの回動力に対抗してリングの移動を阻止することになるのである。

本考案の効果は回り止めピンなどのような機械的手段をとらないので従来それによって往々生じたこじれなどの事故や機械効率の低下が回避されることになった点にある。(高橋記)

