

# 産業用タービンに関する考察

## Some Considerations on Steam Turbines in Industrial Plants

加藤 正 敏\* 北川 祐 司\*  
Masatoshi Katō Yūji Kitagawa

### 内 容 梗 概

自家用火力設備を計画するに当っては、工場の生産方式に従って条件が広範に変化するが、いかにして条件に最も適合した経済的なプラントとするかがきわめて重要な問題となる。本文は、特に最近、著しく高温高圧化の傾向にある産業用タービンの国内外におけるすう勢を述べ、あわせて今後のあり方についての検討を加え、さらに最近日立製作所で製作した高温高圧産業用タービンの設計上の特長について述べたものである。

### 1. 緒 言

近代産業の企業合理化が進むにつれて、自家用火力設備に対する新たな需要が急速に伸びつつある。自家消費電力の増大がこれに拍車を加え、熱エネルギーの経済的利用と安価な電力を自給する体制が各産業にわたり真剣に討議せられている事実はけだし当然の成行と考えられる。

最近の産業用タービンは、この傾向を反映し、特に効率高く、種々の条件の変化に十分耐えうる信頼度の高い設計とせられ、事業用新鋭火力にも匹敵する高温高圧蒸気条件を採用するものも現れている。これは既に数多く製作せられた100気圧級以上の蒸気条件を有する大形タービンの設計、製作、特に耐熱特殊鋼に関する基礎研究の成果と、その運転実績から得られた貴重な経験に基いていることはいままでもないが、さらに産業用タービンに必要な各種の制御ならびに保安装置の完全自動化により運転保守が従来に比して格段と容易になった事実も見のがすことはできない。

日立製作所においては現在 88 kg/cm<sup>2</sup>g 以上の高温高圧産業用タービンを4台製作中であるが、これらはいずれもすでに世界の最高水準を行くものと考えられている。

以下、これらの産業用タービンを計画するに当って考慮すべき問題点と、最近の産業用タービンの特長について考察を加えてみたい。

### 2. 産業用タービンの動向

#### 2.1 需要の推移

わが国における産業用タービンの需要動向を昭和26~33年度間に見ると、その台数および容量は、第1図に示す傾向で、産業種別新設容量は第2図のようになっている。これらの内訳は、30年度までは金属セメント関係の増設が顕著であったが、その後、製紙、化学、繊維部門などの大きな需要が加わって、図示のような変遷をしたものと見られる。

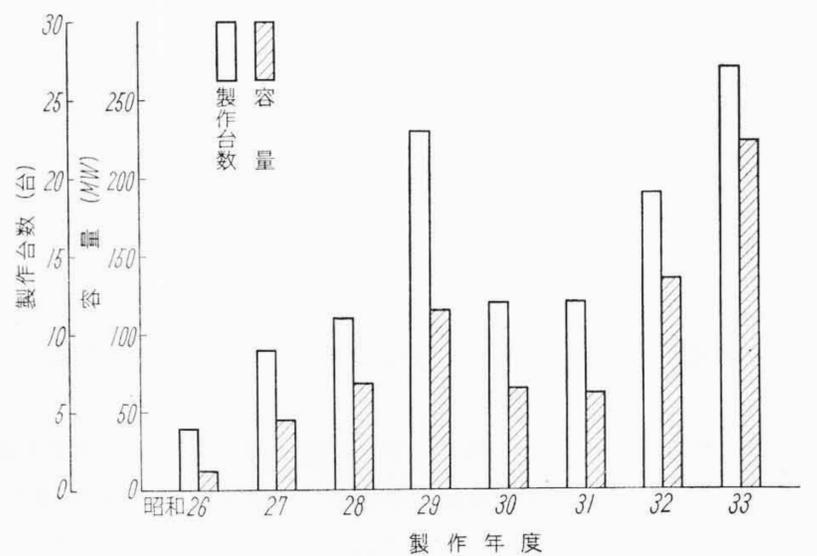
次に、将来の各産業の構造と成長率を検討した結果によれば、産業別電力ならびに全電力需要想定は第3図のようになる。すなわち、第二次および第三次産業の需要増加率が特に大きく、全国平均にて、昭和50年度の電力需要は昭和33年度の約3倍になると予想されている。

したがって、各産業の発展規模に応じて、自家発電設備の激増が見込まれているが、次に、これらの需要に対処する産業用タービンの動向をさぐってみたい。

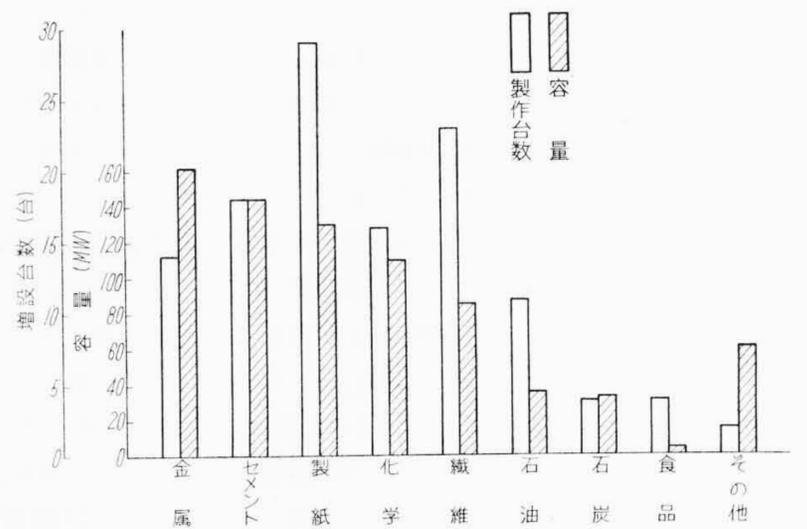
#### 2.2 産業用タービンの動向

まず、タービンの発達水準の判定基準の一つと目される蒸気条件の変遷を、わが国、アメリカおよび西ドイツについて、第4図で比

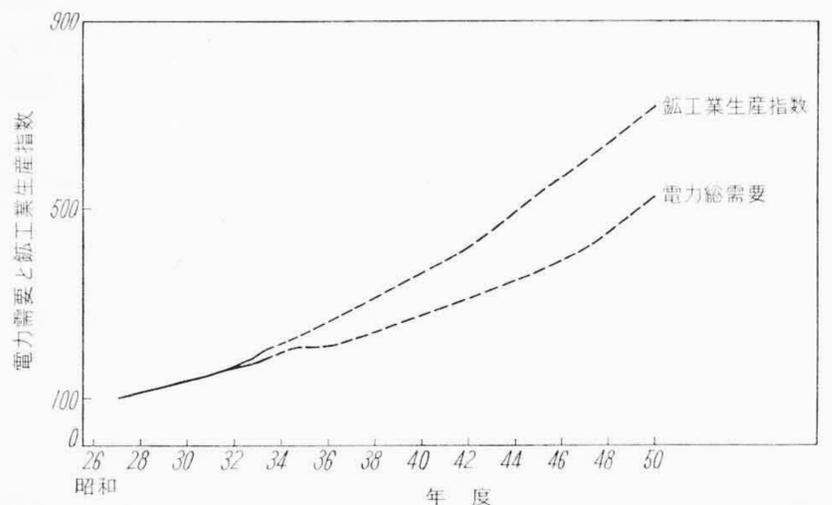
\* 日立製作所日立工場



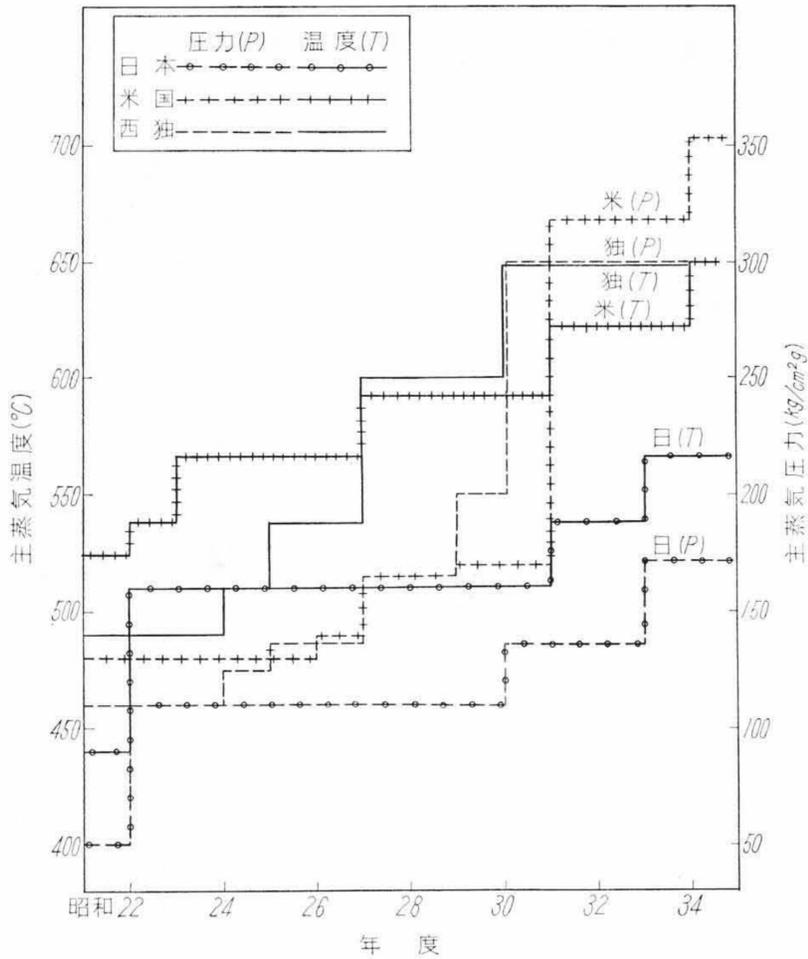
第1図 年度別産業用タービン新設実績



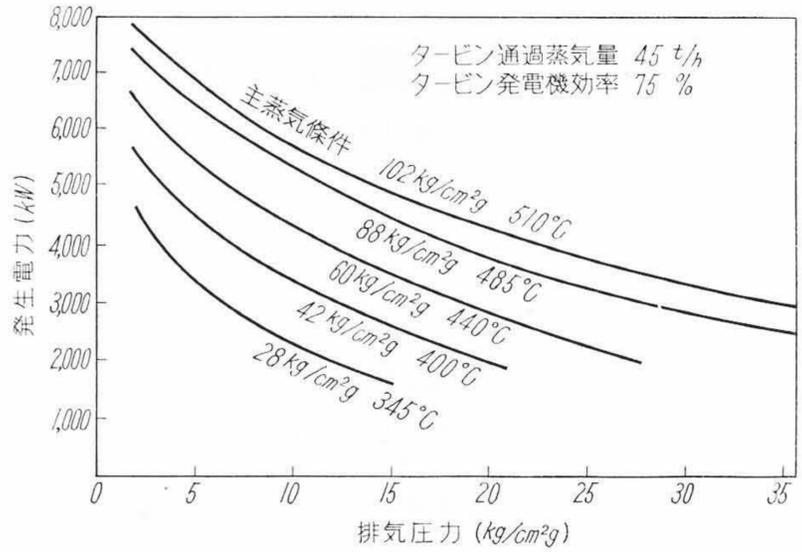
第2図 業種別産業用タービン新設実績



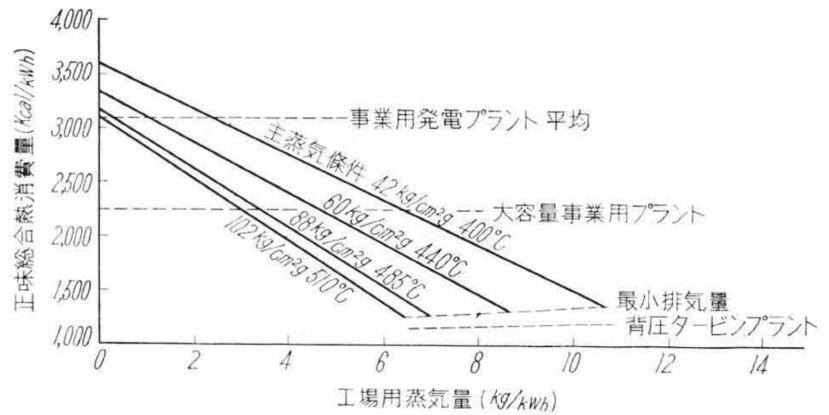
第3図 電力需要と鉱工業生産指数の増加予想



第 4 図 日本, 米国, 西独におけるタービン蒸気条件の変遷



第 5 図 背圧タービンにおける背圧と発生電力の関係



(注: 工場用蒸気内訳 10.5kg/cm²; 50%, 3.5kg/cm²; 50%)

第 6 図 二段抽気復水タービンの主蒸気条件に対する熱消費量

較検討してみた。ここで、西ドイツが戦後一時アメリカの水準を越えた時があったが、現在はほぼ同じ程度で平衡を保っており、また、わが国の水準が急速に欧米のそれに迫っている事が明らかである。このような、諸国における産業用タービンの動向の差異は、各国の産業構成や電力会社の規模などに関連している。すなわち、アメリカでは大規模な公共事業用発電会社が多く、大容量電力のほかに、多量の工場用蒸気を供給する発電所も転運されており、自家発電用としての超高温高圧タービンプラントの需要は、西ドイツほど切実ではなく、その発電容量も一部の特例(アルミニウム工場用, 125 MW など)以外はおおむね 50 MW 以下である。

一方、西ドイツでは、給電網が比較的小規模の電力会社に細分化されているので、単機容量はアメリカに比して小さく、また、公共用発電設備でも、抽気復水、前置および背圧などの特殊形式タービンを用いて、工場用蒸気を提供するものが多い。ただし、西ドイツの産業用発電設備の主流をなす、石炭・鉄鋼および化学工業では、自家所要電力のほかに、電力会社にも逆に送電している場合が多い。たとえば、炭鉱においては低品位炭を燃料として発電し、鉄鋼業では高炉ガスなどによる安価な電力を自家用に消費し、余剰分をそれぞれ売電している。特に西ドイツ産業用火力の特色とするところは、大化学会社が高温高圧タービンの開拓的役割を果たしている点であり、多量の工場用蒸気の需要をまかなうため、大容量の抽気または背圧タービンを設置しプラント効率を高めるとともに、余剰電力の売電を行っている点である。

以上、各国とも、それぞれの産業の特殊事情に応じて、工場用電力および蒸気の需要に対して最良の熱効率・発電コストを検討し、発電設備の経済性を高めるよう合理的な計画を行っている。

次に、産業用タービンの基本的な計画条件について、考察を加えてみた。

### 3. タービン計画条件のプラント効率に及ぼす影響

産業用プラント効率に対して影響を及ぼすタービン基本計画条件には、主蒸気圧力・温度、抽気ならびに排気圧力および、ボイラ給水

温度などがあり、これらについて以下順次考察を加えて見たい。

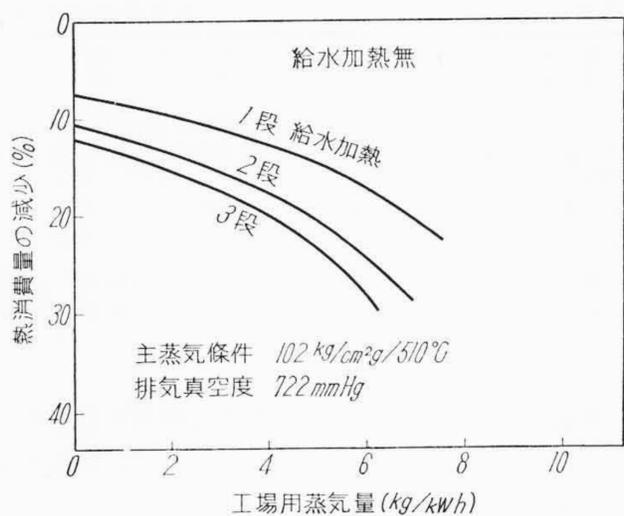
#### 3.1 主蒸気圧力とタービン形式

背圧一定のタービンでは、主蒸気圧力を高めれば、有効熱落差が増大し、蒸気消費率が減少するので、限られた工場用蒸気量で多量の電力が要求される場合は、必然的に蒸気圧力を上げねばならなくなる。第 5 図は 45,000 kg/h の蒸気が通過する背圧タービンにおいて、種々の主蒸気条件に対する発生電力の変化を示すもので、背圧 15 kg/cm²g の場合、主蒸気圧力を 102 kg/cm² とすれば、28 kg/cm²g の場合の 3 倍の出力となることがわかる。

しかし、タービン高圧部では、ノズル高さを小さくすると、漏えい蒸気損失が相対的に増加し、内部効率が低下するので、この高温部の蒸気体積流量の関係で、主蒸気圧力にはおのずから上限がある。また後述するように、発電原価の点からもプラントとしての経済圧力が定まってくる。

なお、復水タービンサイクルでは、復水器において多量の熱量を冷却水に捨て去るが、背圧タービンでは排気エネルギーがすべて有効に利用されて、上記復水器損失がないため、サイクルの熱消費率がきわめて良くなる。たとえば、第 6 図では二段抽気復水タービンと種々のタービンプラントの熱消費量の比較をしているが、背圧タービンプラントの正味総合効率は約 1,150~1,200 kcal/kWh で主蒸気圧力の影響は比較的少なく、事業用大容量タービンの約半分の値となる。

もし、背圧タービンを計画し、工場用蒸気量および背圧が定まると、上述の理由により主蒸気圧力の上限がおおむね定まり、タービンの出力が限定される。ゆえに、それ以上の電力需要があるときは、外部から買電するか、復水タービンサイクルを併用しなければならない。この場合抽気復水タービンを用いると、復水蒸気量の分だけ出力が増加するが、サイクルとしては、復水器で奪われる熱量と、冷却水ポンプ駆動動力がマイナスとなる。したがって熱消費量は、上記背圧タービンより大きい、通常の復水タービンよりも抽出蒸



第7図 給水加熱による熱消費量の減少

気のみだけ効率が良く、第6図に見るように、大容量事業用タービンの熱消費量に匹敵する値となる。すなわち、この図では、抽気復水タービンの一般的な4種の主蒸気条件における特性が明らかとなっている。たとえば、工場用蒸気が4.5 kg/kWh 必要な場合、主蒸気圧力 60 kg/cm<sup>2</sup>g では熱消費量が約 2,300 kcal/kWh であるが、102 kg/cm<sup>2</sup>g では約 1,850 kcal/kWh となり、約 20%の減少となる。なお、本図より主蒸気圧力を上げることによる熱消費量の改善効果は、比較的高圧においては、低圧における場合ほど大きくないことも容易にうかがえる。

### 3.2 主蒸気温度

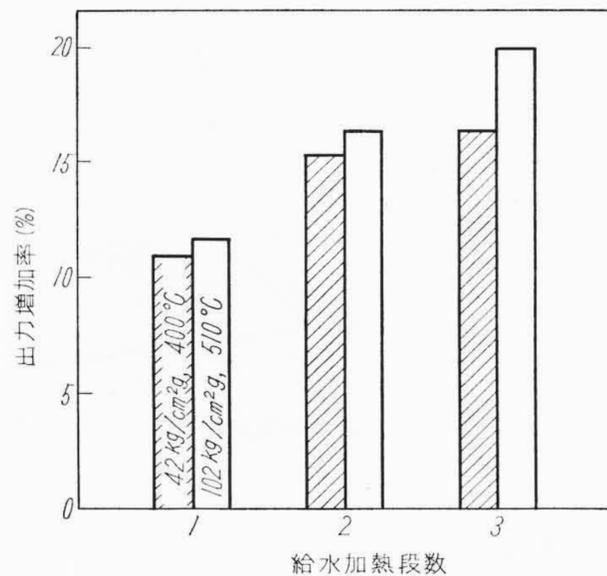
主蒸気温度を上昇させると、熱落差が増すとともに、蒸気の比容積も大きくなりタービン内部効率が向上するため、蒸気消費率を大幅に減少せしめうるが、主蒸気温度の上昇に伴い、工場用の抽気または排気の温度も上昇しがちとなる。ところで、一般に工場用蒸気としては飽和温度近くのものが要求される場合が多いので、工場用蒸気の圧力を選定すると、おのずからそれに対応する適正温度も決ってくる。

ゆえに、もしタービンからの抽気または排気が、大幅に過熱されているときは、これを減温しなければならない。一方、工場用に要求される蒸気の全熱量は定まっているので、減温用冷却水の使用分だけタービン通過蒸気量が減少し発生電力が減ずるため、主蒸気温度の上昇による出力増加分の一部が消去される。したがって、この減温量をできるだけ少なくするために、主蒸気圧力に適応した主蒸気温度を選ばなければならない。一般の工場用蒸気圧力の範囲では、主蒸気温度との標準組み合わせは次のとおりであり、復水タービンの場合よりも 30°C~40°C 低くなっている。

主蒸気圧力	主蒸気温度	
	抽気または背圧タービン	復水タービン
42 kg/cm <sup>2</sup> g	400°C	440°C
60 kg/cm <sup>2</sup> g	440°C	480°C
88 kg/cm <sup>2</sup> g	480°C	510°C
102 kg/cm <sup>2</sup> g	510°C	538°C

### 3.3 工場用蒸気圧力の影響

抽気または背圧タービンでは、主蒸気条件を高くするほかに、工場用蒸気圧力を低くすれば、当然発生電力は増加し、燃料消費量が減少する。たとえば、主蒸気圧力が 42 kg/cm<sup>2</sup>g のタービンで、工場用乾燥飽和蒸気を 7 kg/kWh 必要な場合、工場用蒸気圧力を 3.5 kg/cm<sup>2</sup>g から 10.5 kg/cm<sup>2</sup>g にすると、熱消費量は約 1,850 kcal/kWh から約 2,550 kcal/kWh に増加する。したがって、工場用蒸気として二種以上の圧力蒸気を要求するときは、多段抽気復水タービンを採用すれば、電気出力が増加するとともに、電力量および工場用蒸気系統の制御範囲が広がる。



第8図 給水加熱段数と出力増加率 (ボイラ燃料消費量一定の場合)

### 3.4 給水加熱

以上の蒸気条件の選択に加うるに、給水加熱を行うことによって、プラント熱効率は向上する。すなわち、給水加熱用として、タービンの抽気または排気を使用すれば、その分だけタービン通過蒸気量が増し、タービン内部効率が上昇するとともに、発生電力が増加する。

抽気復水タービンにあっても、出力一定のまま給水加熱用に抽気すれば、復水流量が減少して、復水器にて失う熱量が減るので、プラント効率は大幅に向上する。

第7図の例によれば、給水加熱によって熱効率が10~30%上昇することがわかる。

産業用発電プラントの蒸気消費率は、一般に事業用復水タービンよりも大きく、ために給水加熱用蒸気量も発生電力に比べて多くなるので、ボイラ給水量は一般復水タービンの場合に比べて2~4倍になることもある。

なお、給水加熱器の数を増して最終給水温度を上げると、熱消費率は向上するが、その改善率は第7図に示すように、抽気段数を増すに従い次第に減ずる。

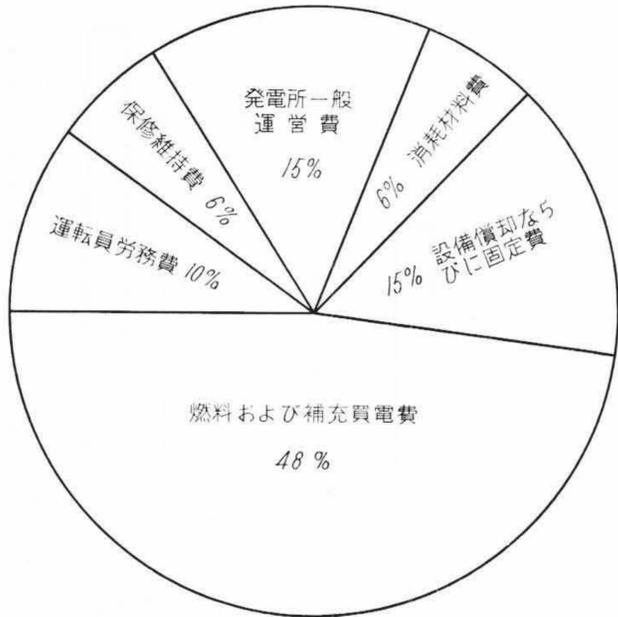
また、ボイラの消費燃料を一定とした場合でも、給水加熱することによって第8図にみるとおり、出力が16~20%増加する。すなわち工場用蒸気 16,000 kg/h のプラントで、無抽気にて発電出力 25,000 kW のものを基礎とすれば、二段抽気(3.5 kg/cm<sup>2</sup>g と 10.5 kg/cm<sup>2</sup>g) 給水加熱することによって、主蒸気圧力 102 kg/cm<sup>2</sup>g の場合は4,000 kW、42 kg/cm<sup>2</sup>g では 3,800 kW の出力増加となる。

## 4. 計画条件の発電原価に及ぼす影響

### 4.1 蒸気条件

産業用発電設備の計画に当たっては、以上述べた熱効率関係の諸特性値のほか、それぞれの計画条件に応じて、全設備の建設費、燃料費、運転費などを、総合的に考慮しなければならない。たとえば、主蒸気条件を上げると、タービンは耐高圧高温用の複雑な構造および高級材料を取り入れなければならない、また給水加熱によって熱消費率を下げんとすれば、加熱系統の補機装置のために建設費が増大する。また、産業用タービンプラントで排気の大部分を工場用蒸気として消費する場合、多量の補給水を必要とすることになり、この給水処理装置の設備費および運転費も考慮する必要がある。

まず、発電プラントの経済比較に際しては、発電原価の構成要素の分析をしなければならぬが、これは、各プラントの計画条件によって設備費、燃料費、人件費などがおのおの変ってくるので単純にはきめにくく具体的な計画に対してその特殊条件を加味して算定すべきものである。



第9図 発電原価構成要素の一例

いま一例としてアメリカの標準産業用発電設備における発電原価の一般的構成要素を示すと第9図のようになっている。また、主蒸気条件の変化によって、燃料費率や発電原価の変化割合を示したのが第1表である。

第1表 抽気復水タービンにおける蒸気条件の影響

主蒸気圧力 (kg/cm <sup>2</sup> g)	42	60	88
主蒸気温度 (°C)	400	440	480
発電出力 (kW)	10,000	10,000	10,000
工場用抽気量 (kg/h)	80,000	80,000	80,000
(抽気圧 10.5 kg/cm <sup>2</sup> g)			
主蒸気流量比 (%)	100	92	85
燃料消費量比 (%)	100	90.1	81.2
建設費比較 (\$)		+300,000	+500,000
年間燃料費節減 (\$/year)		75,000	143,000

以上にて蒸気条件選定についての基本的な検討を行ったが、次に、産業用タービンプラントにおいて、重要視されている給水処理装置について若干述べてみたい。

4.2 給水処理方式

産業発電プラント用の給水処理法には、二つの方式がある。すなわち、イオン交換樹脂を用いる純水装置により全補給水をまかなうオープンサイクルと、タービンよりの抽気をコンバータに導き凝縮させ、その凝縮水をふたたび汽罐給水として用い、一方プロセス蒸気として脱アルカリ軟水化の前処理をした低級な給水をコンバータを通して工場へ送るというクローズドサイクルを用いる場合である。

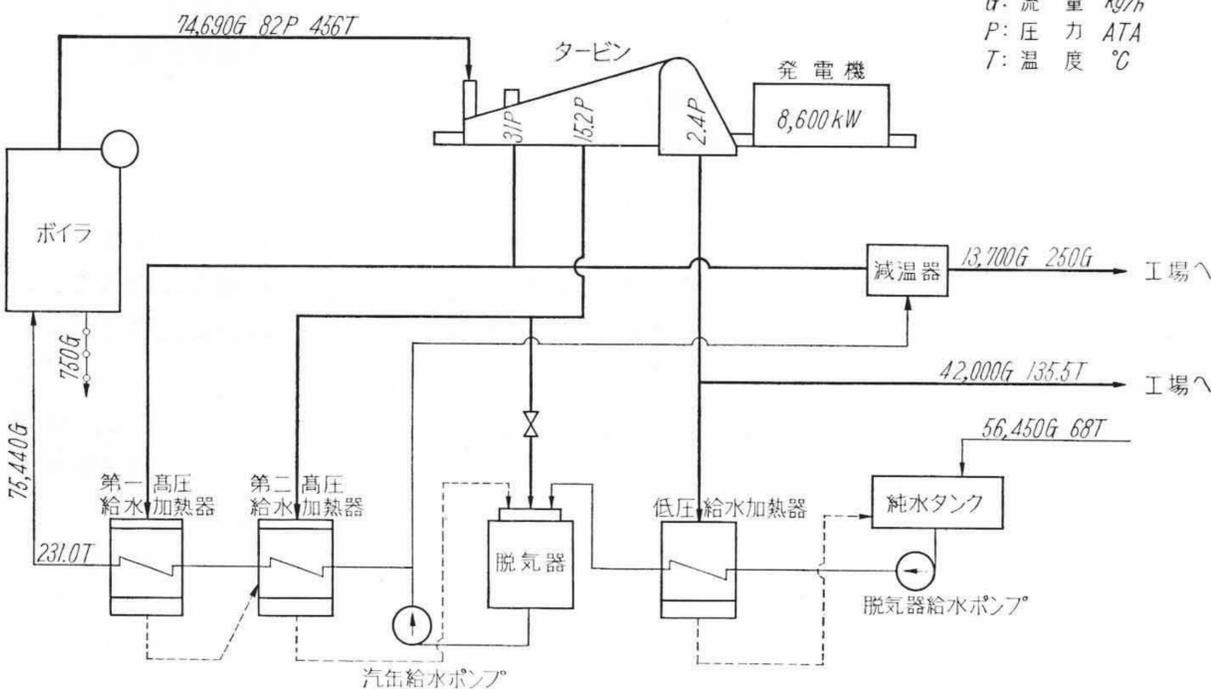
この両プロセスの利害損失は次のような条件によって、その評価が変わってくるので、各計画条件にしたがって適宜選定しなければならない。

1. 補給水の最大および平均所要量
2. 原水の純度
3. 所要蒸気または給水の純度
4. 現在および将来の燃料費
5. 発電所のヒートバランス など

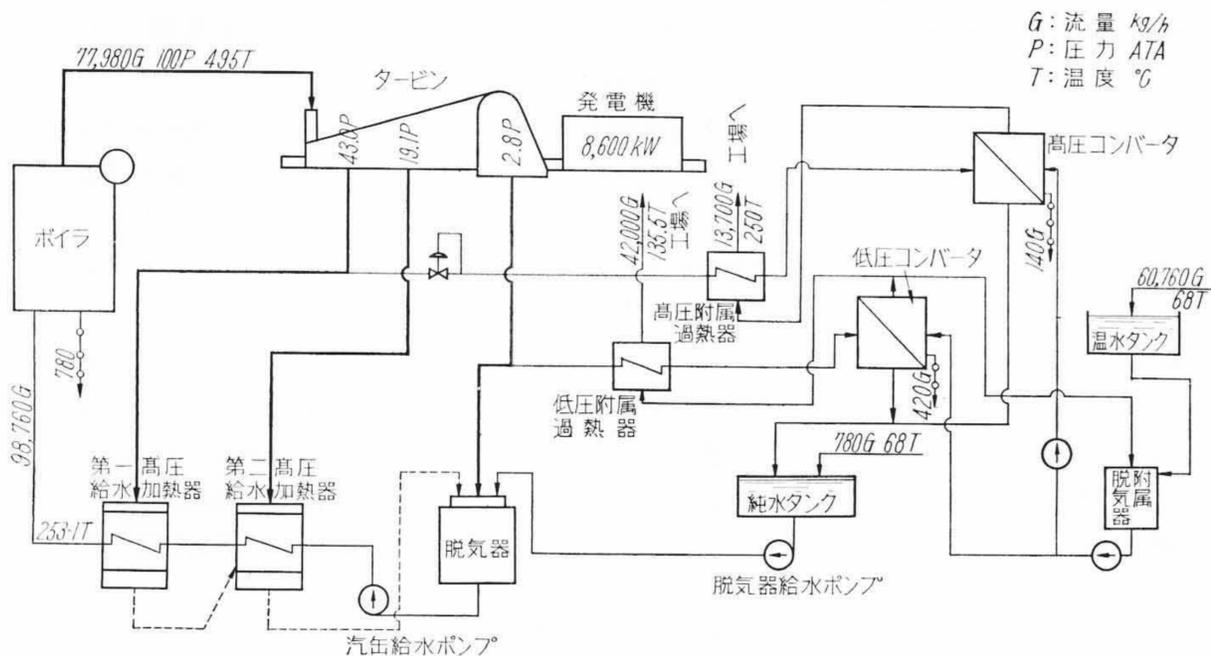
わが国およびアメリカなどの一般的傾向としては、純水装置のほうの利用度のほうがやや高くなってきている。

純水装置はコンバータに比べて、処理水の質および量がタービン負荷変動に関係なく任意に運転できること、およびボイラの運転開始時、所要水量の増加に対して、短時間なら定格出力以上に処理水を増すこともできるというコンバータにはみられない安定性と柔軟性をもっている。また、コンバータでは加熱面に生ずるスケール除去のため運休時間が要求されるなどの欠点がある。

この両者の比較のために、タービン発電機出力 8,600 kW で、工場用蒸気として 30 kg/cm<sup>2</sup>g, 250°C の蒸気を 13.7 T/h, 1.4 kg/cm<sup>2</sup>g, 135.5°C の蒸気を 42 T/h 必要とするサイクルに適用した場合の検討結果を例示すると、両者のヒートバランスは第10図および第11図のようになり、その経済比較は第2表となる。すなわち、コンバータ方式では諸設備費が高くなる上に、コンバータの特性上、過熱用蒸気エネルギーが余分に必要のため、これを熱サイクル上燃料費に換算した分



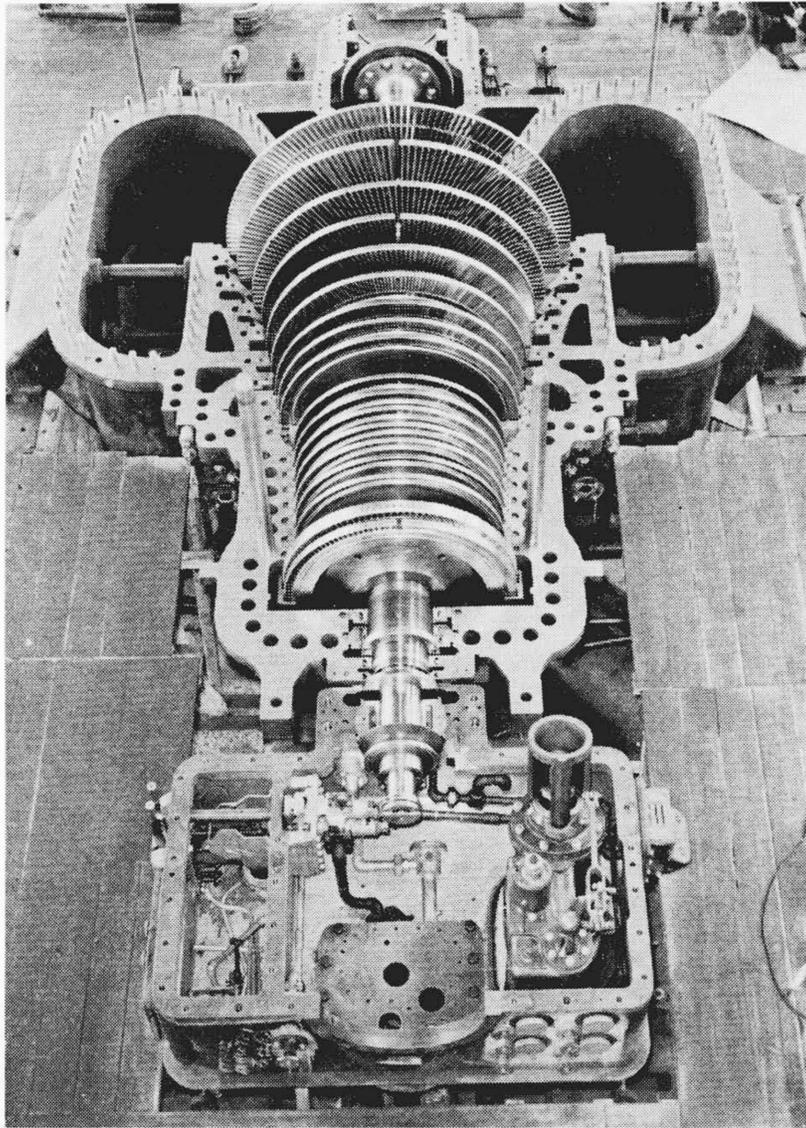
(純水装置使用の場合)  
第10図 背圧タービンプラント熱平衡線図



(コンバータ使用の場合)  
第11図 背圧タービンプラント熱平衡線図

第2表 純水装置とコンバータとの年間経費の比較例

所要設備		純水装置	コンバータ
設備費合計		25,000k ¥	89,500k ¥
年間経費	固定費	4,250k ¥	14,900k ¥
	薬品費	6,500k ¥	3,931k ¥
	樹脂補給費	514k ¥	85k ¥
	燃料費の増加	0k ¥	6,664k ¥
年間経費合計		11,264k ¥	25,580k ¥



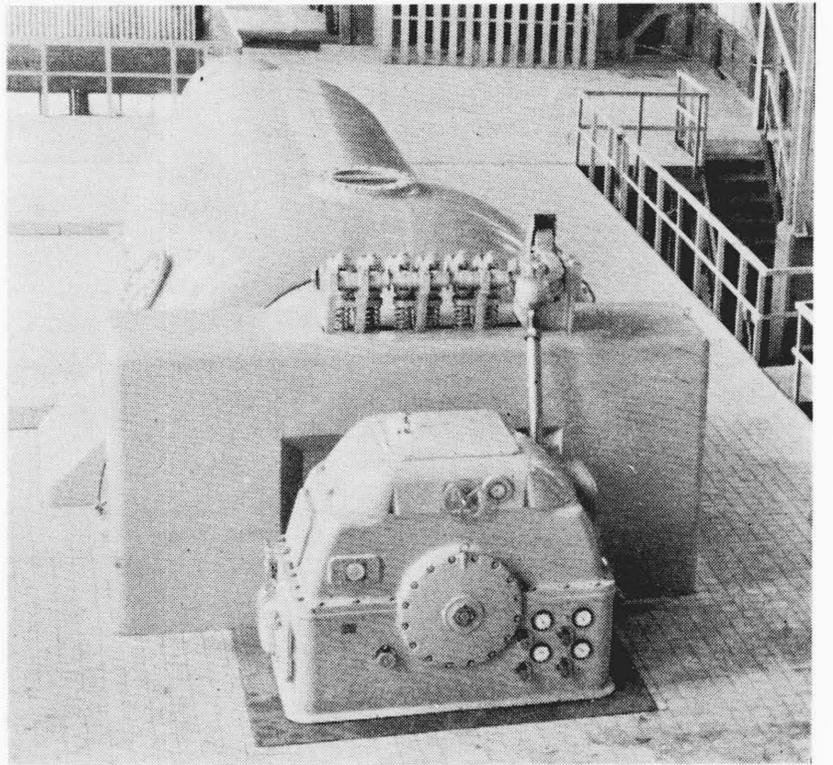
第12図 15,000 kW 復水タービンの組立状況

だけ年間経費が高くなっている。

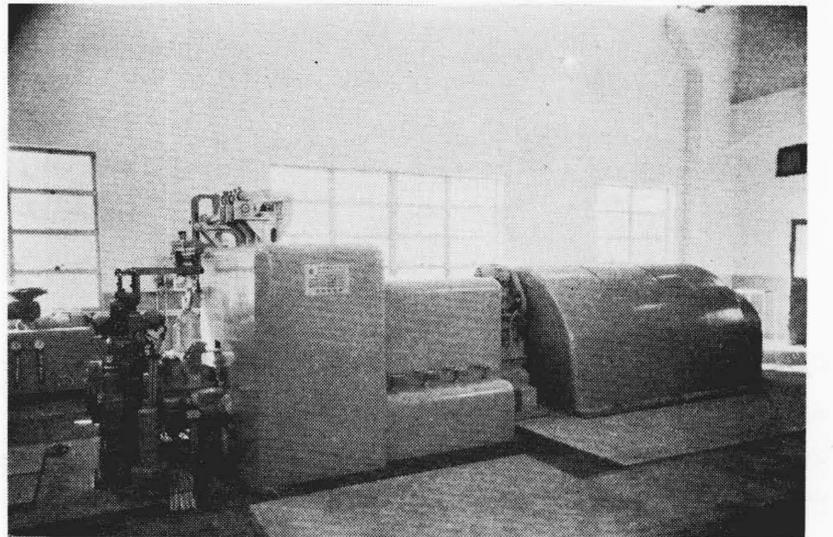
### 5. 最近の蒸気タービン

作業用蒸気を必要とせず、電力のみ確保したい場合は、内部効率の良い復水タービンが用いられる。第12図は最近製作せられた15,000 kW 復水タービンを示し、特に激しい負荷変動に耐えうるよう設計上種々の考慮が払われたものである。また特記すべきこととしてはこれと同じ容量で、60サイクルおよび50サイクルのいずれにも簡単なレバー切換えにより運転することができるタービンがきわめてすぐれた運転実績をあげていることである。第13図は本タービンの運転状況を示す。

次に背圧タービンとしては、まず、A社(石油精製)に納入した3,800 kW タービンの運転状況を第14図に示してあるが、これは限られた量の工場蒸気によってできるだけ発電出力を増し、発電所効率の向上を計らんとした顧客の要望にこたえ、この種のタービンとしては記録的な88 kg/cm<sup>2</sup>g, 445°Cという蒸気条件を採用している。タービンロータは一体鍛造削出し形とし、車室は二重構造にす



第13図 15,000 kW 復水タービン



第14図 3,800 kW 背圧タービン

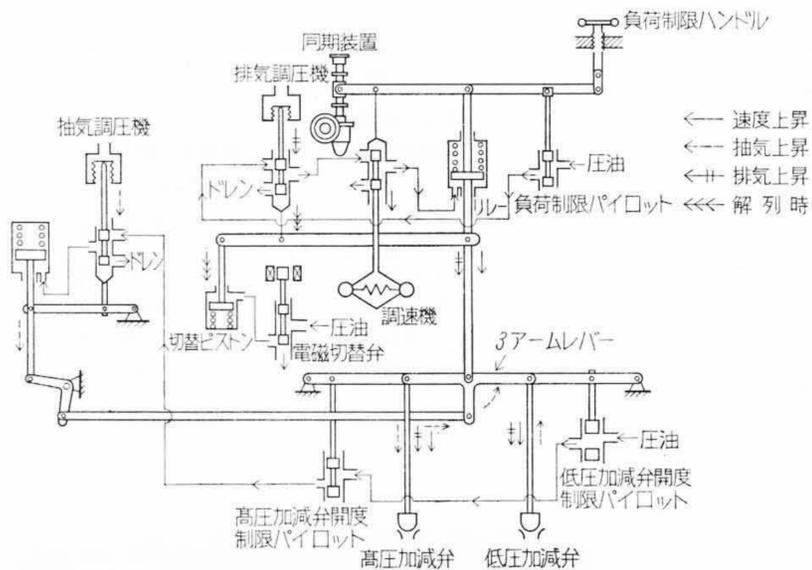
るなど、設計上各種の考慮が払われている。特に外部電力網との並列運転時、工場作業用蒸気の増減に応じて、タービン発生電力は変動するが、この発生電力も工場所要電力と一致せしめ、出力の過不足を自動的に平衡させる装置を設けたことも本タービンの特長である。

また、B社(製紙)に納入するものとして、出力17,000 kW, 回転数3,000 rpm, 主蒸気圧力97 kg/cm<sup>2</sup>g, 主蒸気温度537°C, 排気圧力3 kg/cm<sup>2</sup>gの背圧タービンを目下製作中である。

抽気背圧タービンでは、第15図に示すものをC社(繊維)納入用として製作した。これは出力10,700 kW, 主蒸気条件140 kg/cm<sup>2</sup>g, 温度538°C, 工場用抽気圧力16 kg/cm<sup>2</sup>g, 排気圧力3 kg/cm<sup>2</sup>gで、主蒸気条件では、国産の産業用プラントの最高記録をいくもので、構造材質とも、事業用大容量タービンに匹敵するものである。すなわち、主蒸気を上下の加減弁より流入せしめ、車室を二重車室として、高温高圧に対して信頼性の高いものにするとともに、ロータを一体鍛造削出し式とし、翼、噴口の形状には最も効率の良いものを採用し、第3表に示すような高級材料を用いた。また、高温高圧部からの蒸気漏れの減少に意を用いるとともに、タービンの高温蒸気が外部に漏れる際、高温蒸気の熱伝導による軸受部への熱影響を極力小さくするため、この高温蒸気をほかの比較的低温の蒸気と入れかえることにより、軸受部での熱伝達エネルギーを極力下げる手段を講

第 3 表 10,700 kW, 140 kg/cm<sup>2</sup>g 538°C 抽気背圧タービン  
主要部品材質表

品名	材質
タービンロータ	Cr-Mo-V 鋼
翼	Cr-Mo-W-V 鋼 13Cr-Mo 不銹鋼
噴口	Cr-V-W 鋼 15Cr-Mo 不銹鋼 13Cr 不銹鋼
仕切板	Cr-Mo-V 鋳鋼 Cr-Mo 鋳鋼 Mo 鋳鋼 規格鋼板
外部車室および内部車室 高圧車室および内部車室締付ボルト	Cr-Mo-V 鋳鋼 Cr-Co-W-V 鋼



第 16 図 抽気背圧タービン制御系統図

じている。

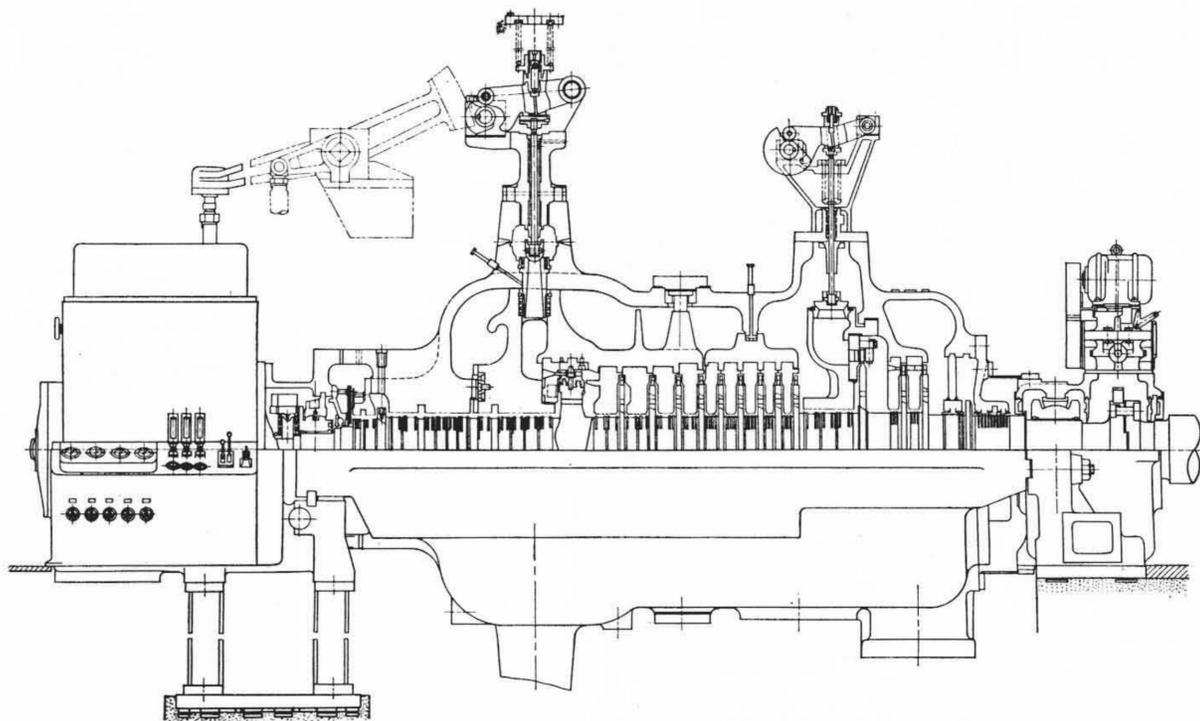
さらに調整系統も第 16 図に示すような機構を採用し、きわめて信頼性のある確実な調整機構となっている。

一方、蒸気タービンとガスタービンの併用サイクルを用いてプラントの熱消費率を改善する方法についても研究が盛んとなり（別紙論文「ガスタービンの火力プラントへの応用」参照）、将来の各産業規模の拡大に伴う特殊需要に応じた多種多様のプラントの計画が進められている。

いずれにしても、産業用プラントの具体的な計画に当っては、漸進する技術革新の動きを取り入れつつ、発電所効率、発電原価、信頼性、運転保守の容易性などを総合的に検討してその設備の選定をすべきものとする。

## 6. 結 言

以上、産業用タービンを計画する上に問題となる事項について検討を試みたわけであるが、なにぶん、事業用火力と異なり産業用火力設備にあっては、要求される条件が工場の生産設備と相まって、そのつど変化するのが常であるので、われわれは最新の技術を駆使してこれに対処すべく不断の研究を進めているものである。使用者側とわれわれ製造者とが常に一体となって今後の産業用タービンの発展に寄与してゆくことを念願するものである。



第 15 図 10,700 kW 抽気背圧タービン断面図

## 参 考 文 献

- (1) M. M. Patterson, E. V. Pollard & W. B. Wilson: Proceedings of the American Power Conference 19, 122 (1957)
- (2) W. B. Wilson, D. L. E. Jacobs: Proceedings of the American Power Conference, 20, 301 (1958)
- (3) W. B. Wilson: Proceedings of the American Power Conference, 19, 222 (1957)
- (4) John S. Cole, P. E.: Power Engineering 68 (April 1959)
- (5) J. E. McConnell: Power Engineering 72 (October 1959)
- (6) 綿森: 機械学会誌 468, 23 (昭 33)
- (7) 飯島: 火力発電の現状と将来
- (8) 中崎: 火力発電 53, 1 (昭 34)