

シンガポール パシールパンジャン “B” 発電所 60,000 kW タービン

60,000 kW Turbine for Pasir Panjang “B” Power Station of Singapore

北 川 祐 司*
Yûji Kitagawa

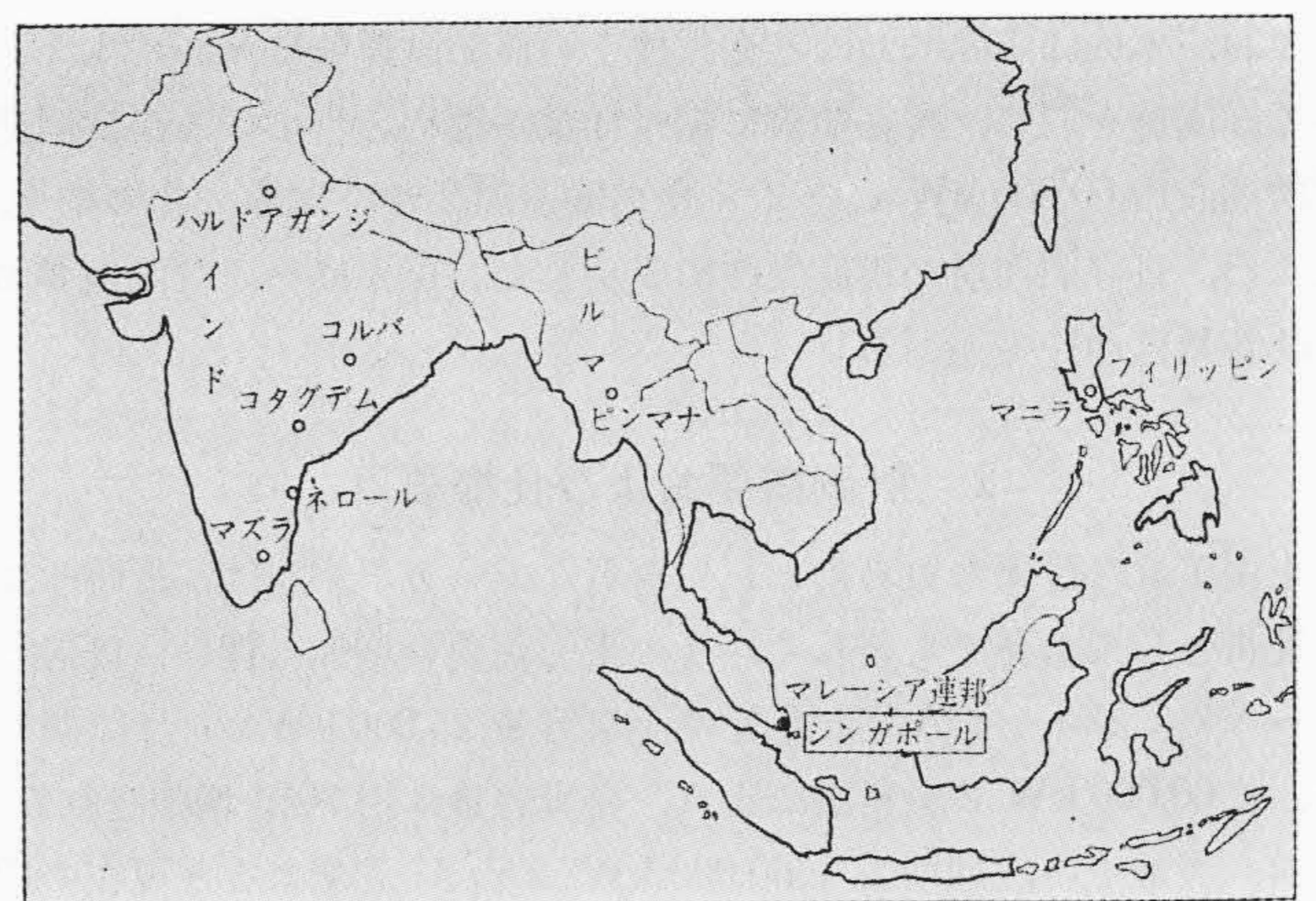
内 容 梗 概

マレーシア連邦シンガポール公益事業局パシールパンジャンB発電所納60,000kW蒸気タービン2台は、その容量性能において、わが国火力発電設備として輸出記録品であるばかりでなく、中容量汽機として単車室構造を用いるなど、多くの新しい設計を取り入れ完成したもので、目下順調に現地据付中である。本稿はこの60,000 kW タービンの特長および概要を紹介するものである。

1. 結 言

近時激化する世界的開放経済の動きに対処して、われわれは火力発電機器に関しても独自の技術開発により国際的競争力を着実に伸長し、1950年以降の輸出用発電設備としては第1表のような実績をあげているが、東南アジアに対しても第1図に示すように多くの輸出用機器を製作している。ここにその一端として紹介するシンガポール市納60,000 kW タービン2台は、イギリス最大の技術コンサルタント会社マーツアンドマクレランの審査する国際入札において、さる1962年欧米各社との激しい技術競争の末、受注に成功したものである。

なお、本プラントのボイラ設備はイギリスのミッチェル社が受注した。従来、国内で求められる新鋭大形汽機はほとんどアメリカ系の仕様形式であったが、本汽機の計画においては、欧州系の技術コンサルタントから、アメリカ系とは異なる種々の特殊仕様が求められた。日立製作所は従来の技術実績および基礎研究に基づきこれらの条件を満足する設備を製作し、欧米系いずれの国情、需要家にも応じうる設計製作技術を確立したばかりでなく、日立製作所独自の技術開発により60,000kW級としては初めての単気筒形のタービンを完成し、国内はもとより国際的にも画期的なタービンを開発した。本機は第2図に示すように汽機全体構造を単車室にコンパクトにまとめ、機器全長を短くすることにより設置面積を節約し、取扱いを容易にした。最終段翼には26インチ長翼を用いて、その効率を



(○印は発電所地点を示しその設備内容は第1表参照)

第1図 東南アジアにおける蒸気タービン輸出実績地点 (1950年以降)

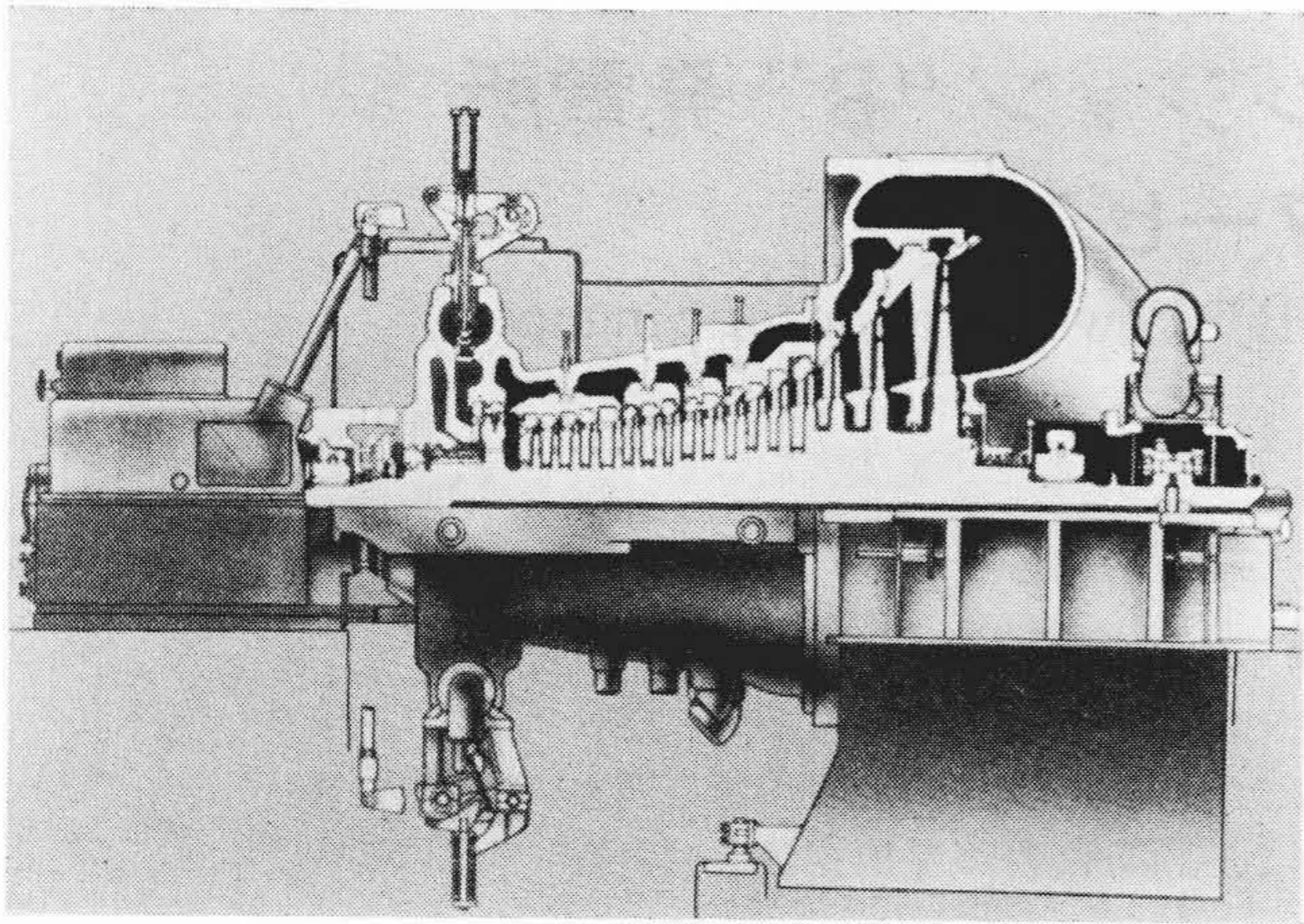
従来のタンデムコンパウンドの複流式汽機と同水準に保ちうるようにすることにより、国際的な需要家の要望に答え、中容量タービンにおける新しい進路を示すものとして画期的な実績を築いたといえることができる。

従来、ともすれば、新製品開発をまず国内市場に求めていた火力業界の動向の域を脱し、技術革新の成果を広く国際市場の域に求める態度は、今後ますます激化する国際競争における先駆者をめざすものとして注目されるべきものと思う。

第1表 1950年以降の輸出タービン発電機設備実績

納 入 先 顧 客 名	場 所	運転開始 年 度	台 数	タービン 出 力 (kW)	蒸 気 条 件			発電機容量 (kVA)	ボイラ蒸発量 (t/h)×台数
					蒸気圧力 (kg/cm ² g)	蒸気温度 (°C)	回 転 数 (rpm)		
インド・マズラ政府	インド・マズラ	1951	1	10,000	18.3	382	3,000	12,500	—
ビルマ・ビンマナ精糖	ビルマ・ビンマナ	1955	2	1,000	16.2	327	6,000/1,200	1,250	18×2
インド・マデイヤ州電気局	インド・コルバ	1963	1	10,000	28	400	3,000	12,500	36.3×2
インド・ウッターール州電気局	インド・ハルドアガンヂ	1964	1	30,000	59.7	483	3,000	37,500	90.8×2
韓国電力株式会社	韓国, 三陟	1964	1	30,000	63	482	3,600	35,294	150×1
アンゼンチン・水利電力局	アルゼンチン・ バランケラス	据付中	3	10,000	40	435	3,000	14,286	—
マレーシア連邦・シンガポール公益事業局	シンガポール・ パシールパンジャン	据付中	2	60,000	88	510	3,000	75,000	—
マレーシア連邦・シンガポール公益事業局	シンガポール・ パシールパンジャン	製作中	2	60,000	88	510	3,000	75,000	—
フィリッピン・マニラ電力株式会社	マニラ・テーゲン	据付中	1	100,000	127	538/538	3,600	128,000	327×1
インド・アンドラ州電気局	インド・ネロール	据付中	1	30,000	59.7	483	3,000	35,295	90.8×2
インド・アンドラ州電気局	インド・コタグデム	製作中	4	60,000	88	510	3,000	66,666	—
南アフリカ共和国・ケープタウン市	ケープタウン・アスロン	製作中	1	30,000	42	482	3,000	37,500	—

* 日立製作所日立工場



第2図 単気筒形 60,000 kW タービン断面図

なお、本機は工場における発電機との直結試運転においてもきわめて好成績を収め、現在順調に据付作業が進められているが、同発電所増設用 60,000 kW タービン発電機追加2台の国際入札の結果、先ごろ、日立製作所が再度受注に成功した。以下にその計画概要および特長について述べる。

2. 計画概要および仕様要目

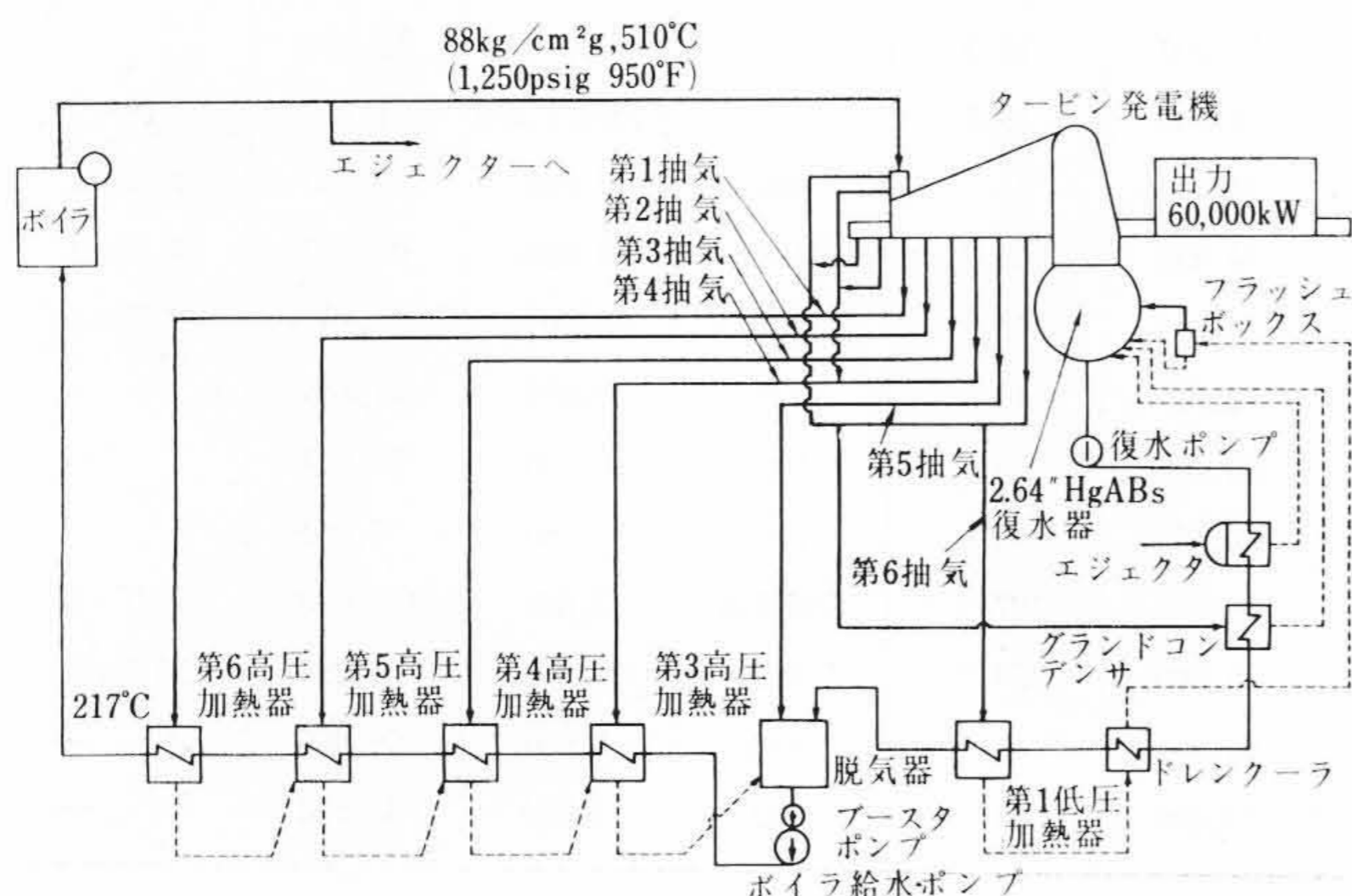
東南アジア最大の貿易港として著名なシンガポールは、近時、工業地帯としての発展も著しく、その電力需要の増加に伴い、既設パシールパンジャン“A”発電所の発電容量 25,000 kW × 7 台に対して、本 60,000 kW 2 台新設により、発電容量は約 70% 増強される。なお、当地点の次期増設分 60,000 kW 2 台が完成すると現在の約 2.4 倍に達することになる。

パシールパンジャン“B”発電所はシンガポール市の西方5哩の所にあり、赤道直下の高温多湿の気象条件下であるため、タービン発電機をはじめ復水器、油冷却器などの設計に対しては、酷暑においても十分その能力を発揮するように考慮されている。

本タービンプラントの熱サイクル系統は第3図に示すとおりである。

タービン本体計画仕様要目は次のとおりである。

形	式	単流単気筒形復水タービン (SC-26)
最大連続定格出力		60,000 kW
経済出力		48,000 kW
回	転	数 3,000 rpm
主	蒸	気 圧 力 88 kg/cm ² g (1,250 Lb/in ² g)
主	蒸	気 温 度 510°C (950°F)
排	気	圧 力 (経済出力時) 703 mmHg (2.25 in Hg abs)



第3図 60,000 kW 発電プラント熱サイクル系統図

抽	気	段	数	5 段
給	水	温	度 (経済出力時)	204°C (400°F)
ター	ビン	段	落	数 18 段
最	終	段	翼	長 663.6 mm (26.125 in)

なお、本タービンに直結される発電機の計画要目は次のとおり水素冷却式にて運転保守が容易なものであるが、標準形であるので詳述は省略する。

発電機計画要目

発	電	機	出	力	75,000 kVA
水	素	圧	力	15 psig	
力	率			0.8	
出	力			60,000 kW	
電	圧			11,000 V	
回	転	数		3,000 rpm	

3. 中容量タービンに対する単気筒形の採用

最近、火力発電技術の発展により⁽¹⁾、事業用大形火力発電機器が、500,000~1,000,000 kW 級のものまで計画されるすう勢につれて、一般産業用タービンの単位容量も加速度的に増大し、数年前までは単機容量 20,000~30,000 kW 程度であったものが、現在では 30,000~100,000 kW 級のものがある主流を占める状況となっている⁽²⁾。

従来、この種の中容量タービンの標準形としては、低圧部を複流としてタンデムコンパウンド複流形 (TCDF 形) が採用されていたが、最近の急速な技術進歩に伴い、日立製作所は構造をさらに簡易化し、しかも従来と同程度の性能を確保するため最終段に長翼を用いた単気筒タービンの開発を進めてきた。

本シンガポール 60,000 kW タービンの計画においては、従来の TCDF-20 形に対して、最終段 26 インチ翼を採用した単気筒形 SC-26 を実現したが、その経過につき若干説明したい。

3.1 最終段用長翼の開発

一般にタービンの発電容量増加に伴い、排気蒸気量は増加するが、タービン熱効率を妥当な値に保つために、排気損失をある限度内に抑えるには、大きな最終段翼車の蒸気通路面積 (環状面積) が必要とされる。この大きな環状面積を確保する方法としては、第一に最終段翼長および翼車節円径を大きくする手段があるが、これには回転数の関係で強度的な制約がある。第二には低圧部段落を二流以上に分けて多流排気形として、単流当たりの蒸気量を制限することである。しかし後者の場合は汽機構造が複雑になるという欠点がある。

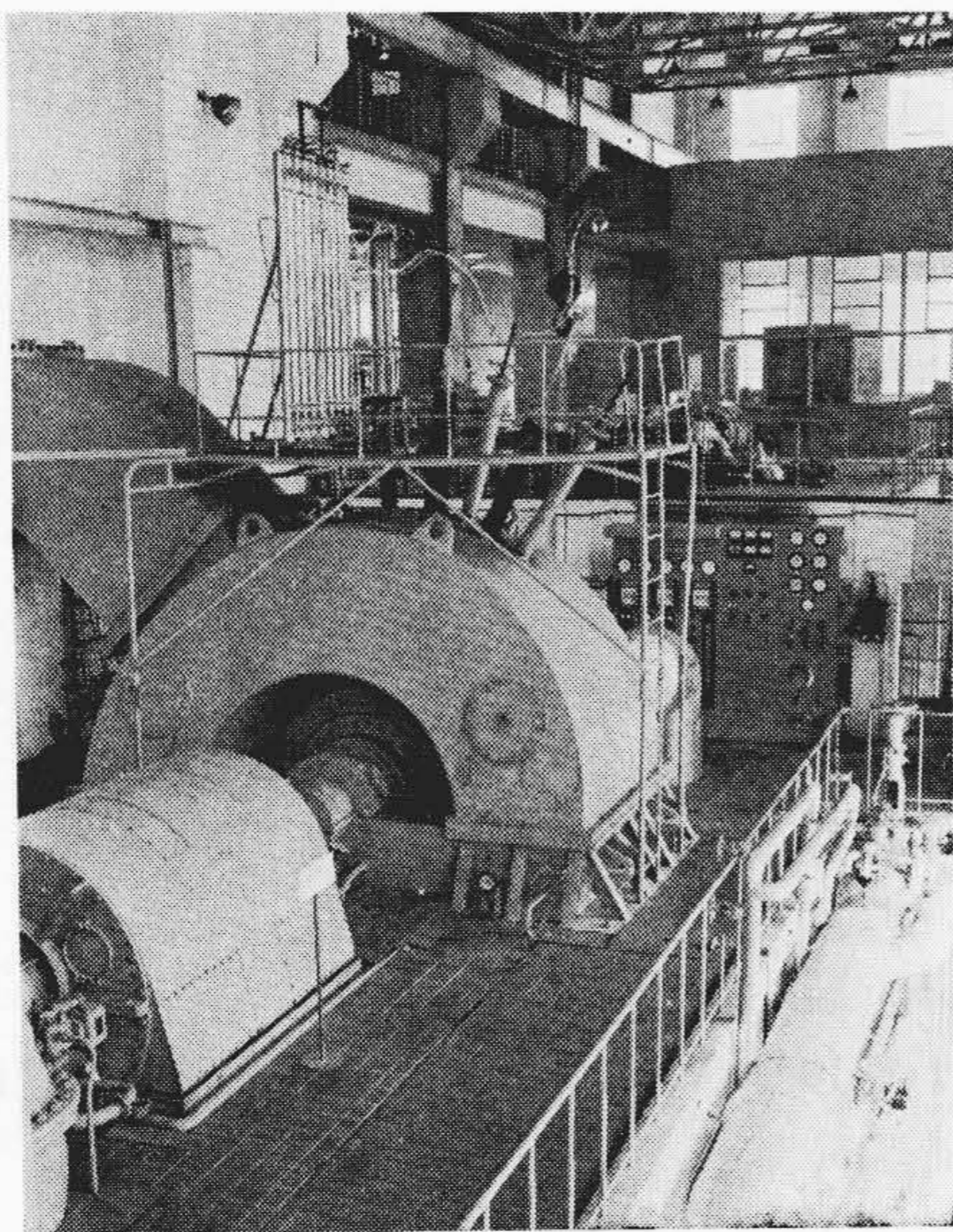
前者の、より長い最終段翼を開発する方法は、タービン全体の構造を複雑化することなく単位容量の増加を可能にするものであるから、世界各国で活発な研究が進められている。このようなタービン最終段翼が実機で運転される場合には、蒸気速度は音速の 1.5 倍 (1.5 マッハ) 以上に達するので流体熱力学的に複雑な流れの状況を解明しなければならず、しかも三次元的流れについては理論および基礎実験だけで完全な設計を達成することは困難である。また翼の振動も実機で運転する場合には、翼流入蒸気衝撃力と翼の共振振動数の関係も遠心力の影響によって変化するので、最終的な信頼度は実機の運転によって確認することが重要である。

そこで日立製作所では長翼の流体力学、振動、強度ならびに翼列風洞試験などの基礎研究のほか、実機と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より、従来の基礎研究の成果を生かすことができた。実機による諸試験測定は第4図のような試験装置で 26、30 および 33.5 インチ翼などにつき多角的に実施している。

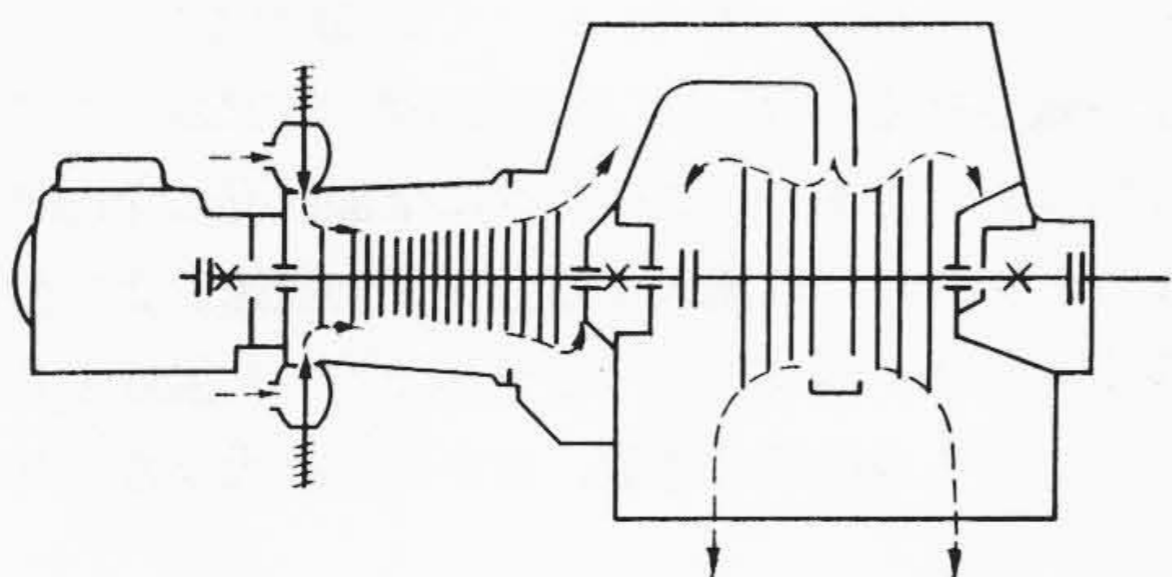
シンガポール 60,000 kW タービン用 26 インチ最終段翼も、3,000 rpm 用として、顧客の要望する運転保証周波数 47~51 c/s という過

第2表 60,000 kW タービンの主要目比較例

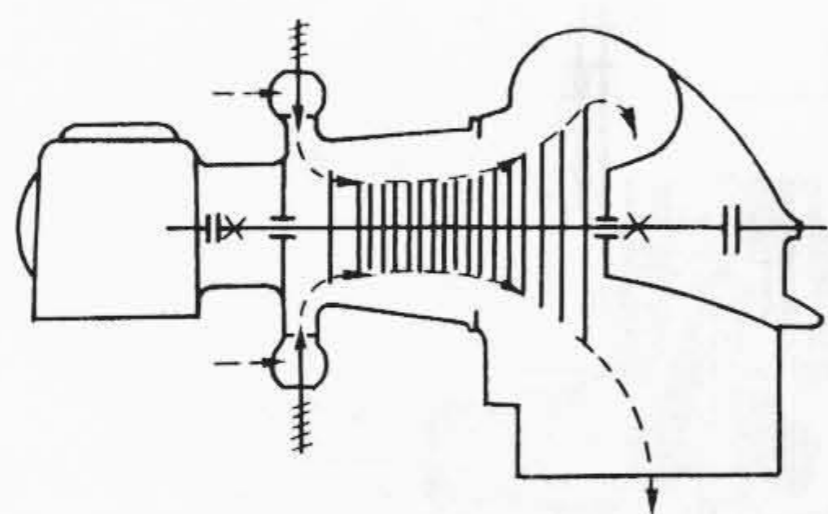
	単流形	複流形
形式	SC-26	TCDF-20
定格出力 kW	60,000	60,000
主蒸気圧力 kg/cm ² g	88	88
主蒸気温度 °C	510	510
排気真空度 mmHg	703	703
回転数 rpm	3,000	3,000
抽気段数	5	5
給水温度 °C	200	200
最終段翼長 mm (in)	663.6 (26.125)	508 (20)
段落数	18	22
合計構造段落数	18	26



第4図 実物大低圧タービン試験装置



TCDF-20形 60,000kW タービン



SC-26形 60,000kW タービン

第5図 60,000 kW タービン形状比較 (TCDF-20形とSC-26形)

酷な条件を満足するよう試験結果を基礎として設計されたものである。

3.2 単気筒 60,000 kW タービン

第2図は本タービンの断面図であって、これを従来の TCDF-20 形 60,000 kW タービンと比較すると第2表および第5~6図のとおり

比較項目	タービン形式	TCDF 基準比較 (%)				
		60	70	80	90	100
タービン全長	TCDF-20	[Bar chart showing 100%]				
	SC-26	[Bar chart showing approximately 80%]				
タービン効率	TCDF-20	[Bar chart showing 100%]				
	SC-26	[Bar chart showing approximately 99.9%]				

第6図 60,000 kW タービンの全長と効率比較 (TCDF-20形とSC-26形)

りである。効率低下は相対的に 0.1% 弱であり、実用的には同等の性能を確保している。SC-26 形ではロータが高低圧一本となり、かつ低圧段翼長の増加により翼の節門径も増しているため、単流化とあいまって構造段落数は 26 段から 18 段に大幅に減少し、タービン全長は複流に比べて 80% 弱に短縮され、重量も大幅に軽減された。次に、本タービン各部の構造上の特長について述べる。

4. タービン構造上の特長

4.1 タービン本体

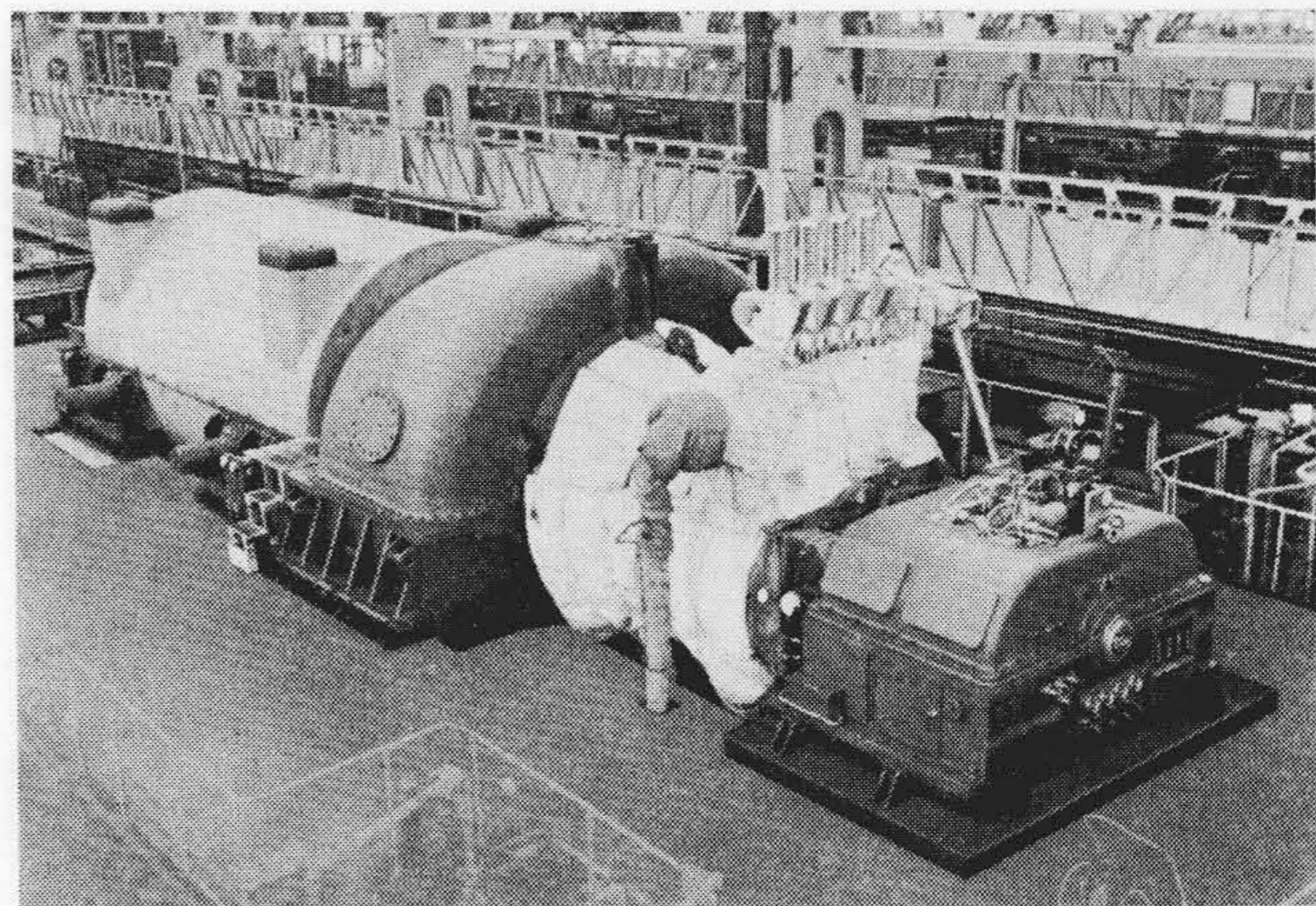
4.1.1 全体構造

本タービンの全体構造は第2図および第7図に示すとおり単気筒筒形にて、前側軸受箱内に制御関係装置をコンパクトに内蔵しており、車室は高圧部と低圧部が垂直フランジによりボルト締めされた単流形である。主蒸気はタービンの前側の運転床下に設けられた主さい止弁を通して、高圧車室の上部および下部にそれぞれ4個ずつ設けられた加減弁にて流量制御されてタービン内に流入し、18段落の動翼に対して熱膨張による仕事を与えて、後方の発電機側に流れ最終段 26 インチ翼から排出され、低圧車室の下半に接続された復水器にて復水する。

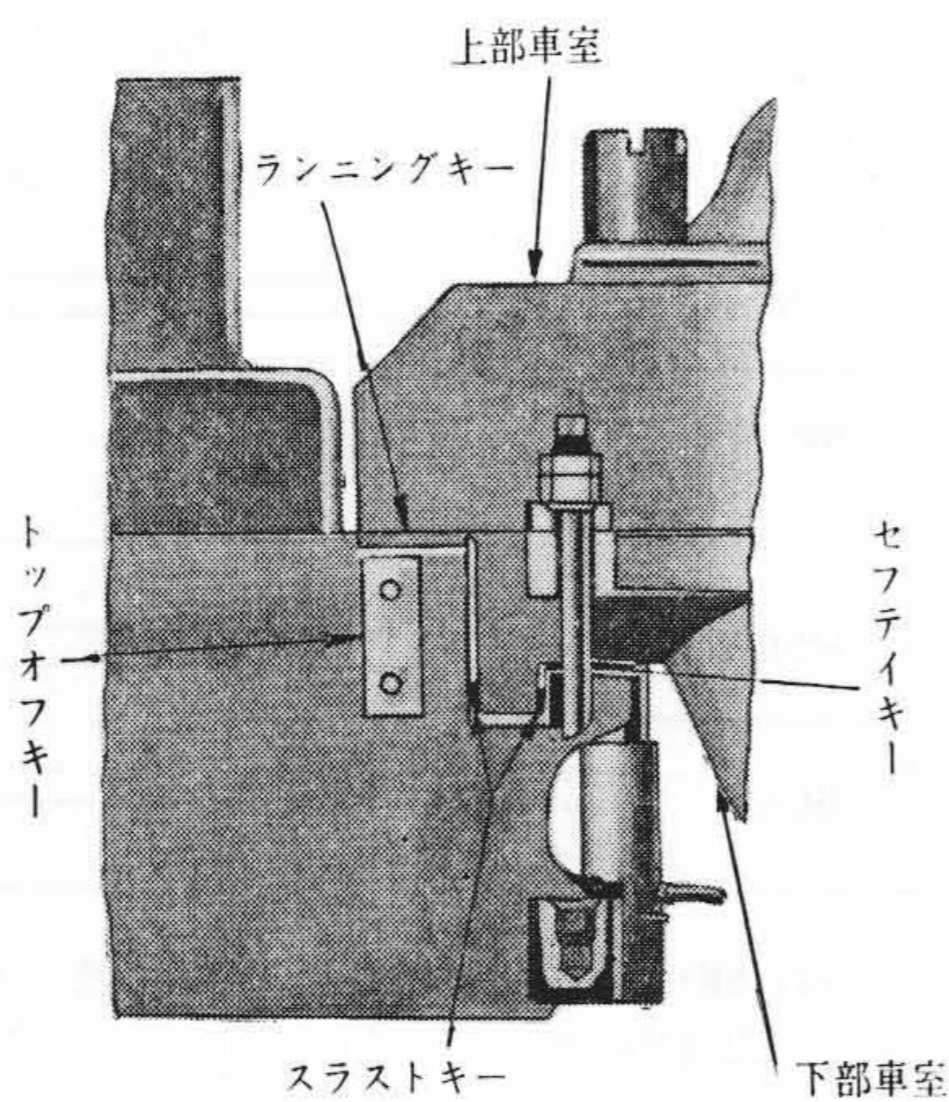
ロータは両端二軸受支持方式で安定した配置である。

4.1.2 車室

車室は Cr-Mo 鋳鋼 および Mo 鋳鋼からなる高圧車室と、特殊鋳鉄および鋼板製よりなる低圧車室とで構成される。低圧車室はタービン基礎に固定し、高圧側は前側軸受下部にセンターラインサポート方式にて支持されている。これは第8図に示すように高圧車室上下の接合フランジ面を常に回転軸と同一水平線上に維持するようにして、車室の熱膨張を上下および軸方向に適当に吸収される構造となっている。また、高圧と低圧両車室の垂直継手面部は車室内部の蒸気圧力を適当に選定するとともに、継手面に特



第7図 60,000 kW タービン発電機の直結工場試運転状況



第 8 図 センターラインサポート

殊な蒸気シール構造を採用し、外部へは絶対に蒸気が漏れないようにしてある。

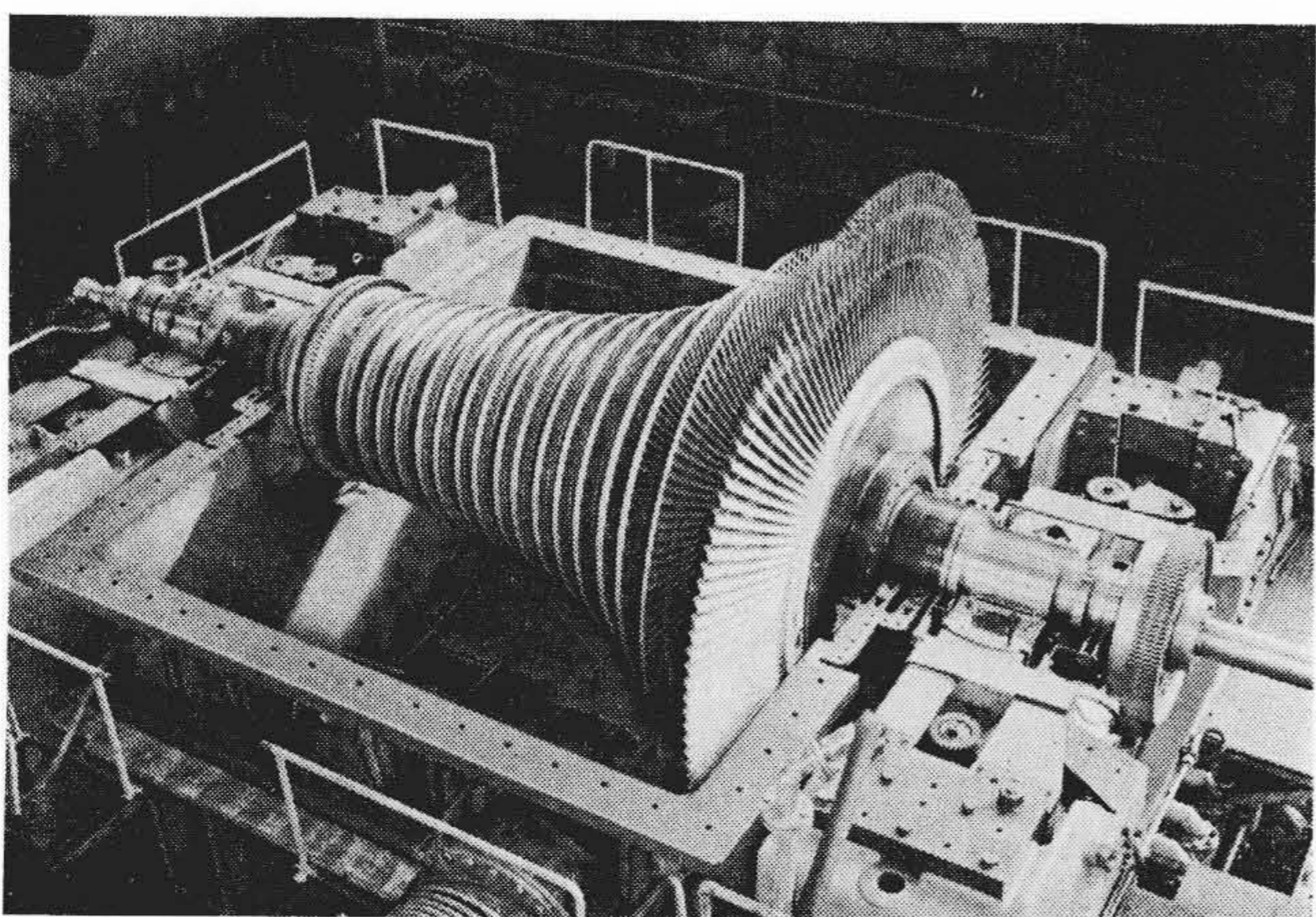
高圧車室は二重車室構造で内部車室が抽気点にて適宜に分割され、外部車室との間に抽気室を形成し、車室全体の圧力および温度分布を調整している。特に加減弁から第一段ノズルに至る蒸気通路の部分は外部車室と別体に熱膨張しうる構造として、後述する全周噴射装置の使用とあいまって、これら高温高圧部に過大な熱応力の発生が防止されている。

低圧車室には、起動および低負荷運転時における排気室の異常温度上昇を防止するため排気室水噴射装置が設けられ、26 インチ翼を内蔵する大形低圧車室の熱変形、アライメント変化などに対して万全な防護が施されている。

4.1.3 車 軸

次にタービンロータは Cr-Mo-V 鍛鋼の一体鍛造削り出し式の車軸であり、各段落動翼はそれぞれ大形タービンで長期運転実績のある信頼性の高い翼設計を基本としている。特に本機においては顧客要求によって 47c/s までの周波数低下運転においても安全なように各翼の振動数について綿密なる検討が加えられている。ことに、最終段翼については前述第 4 図の試験装置で、運転中の振動数、振動応力ならびに遠心応力を測定して本翼の特性を確認済みである。なお、最終段動翼の蒸気入口部にはエロージョン防止のためにステライト板の銀ロー付が施されている。

タービンロータの振動については特に慎重な考慮が払われ、危険速度は発電機と直結した状態で各軸受のたわみ性を検討したうえで電子計算機により厳密に計算し、その結果により適切な軸寸法が選定されている。車軸のバランスは第 9 図のような高速バランス装置で定格回転数以上の過速域まで回転させてバランス調整



第 9 図 タービン車軸の高速バランス試験装置

に万全を期している。その結果、工場における発電機との直結試運転時の軸受部振動は両振幅にて 0.01 mm 以下できわめてすぐれた運転成績を収めている。

タービン内の推力に関しては各段落の圧力分布を考慮して、高圧部車盤にはバランスホール加工を施すとともに、車軸各部の軸径の合理的な選定によって総合推力を軽減し、さらに推力負荷能力の大きいテーパランド形推力軸受を採用している。

車軸のパッキングには高低圧部の両側ともに完全なる蒸気シール方式を採用し、タービンの高速起動停止に対する応答性を高めている。

車軸回転用のターニング装置は顧客要求により 20 rpm の設計としたが、車軸起動回転時の衝撃トルクに対しても十分考慮した計画となっている。

4.2 潤 滑 装 置

主油ポンプはタービン車軸前側に直結された遠心式である。主油ポンプの吸込圧力を確保する油タービン駆動ブースターポンプおよび AC モータ駆動の補助油ポンプ、DC モータ駆動非常用油ポンプならびに AC モータ駆動の低圧(ターニング用)油ポンプが油タンク内に設けられている。

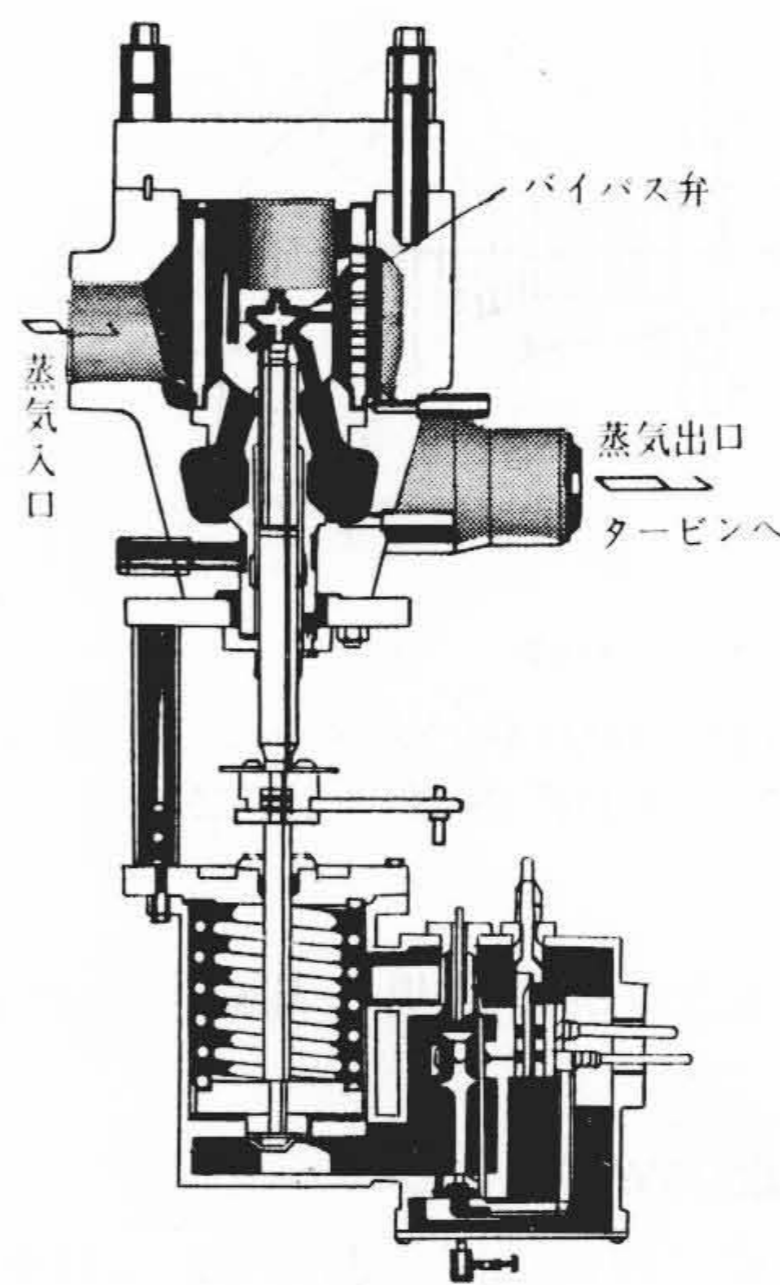
また本タービンでは前述のようにターニング装置の回転数を 20 rpm とする顧客要求に関連して、起動時の回転所要トルクを低減するために、各軸受にターニング起動時に高圧油を送るジャッキング油ポンプを設けている。

4.3 制 御 装 置

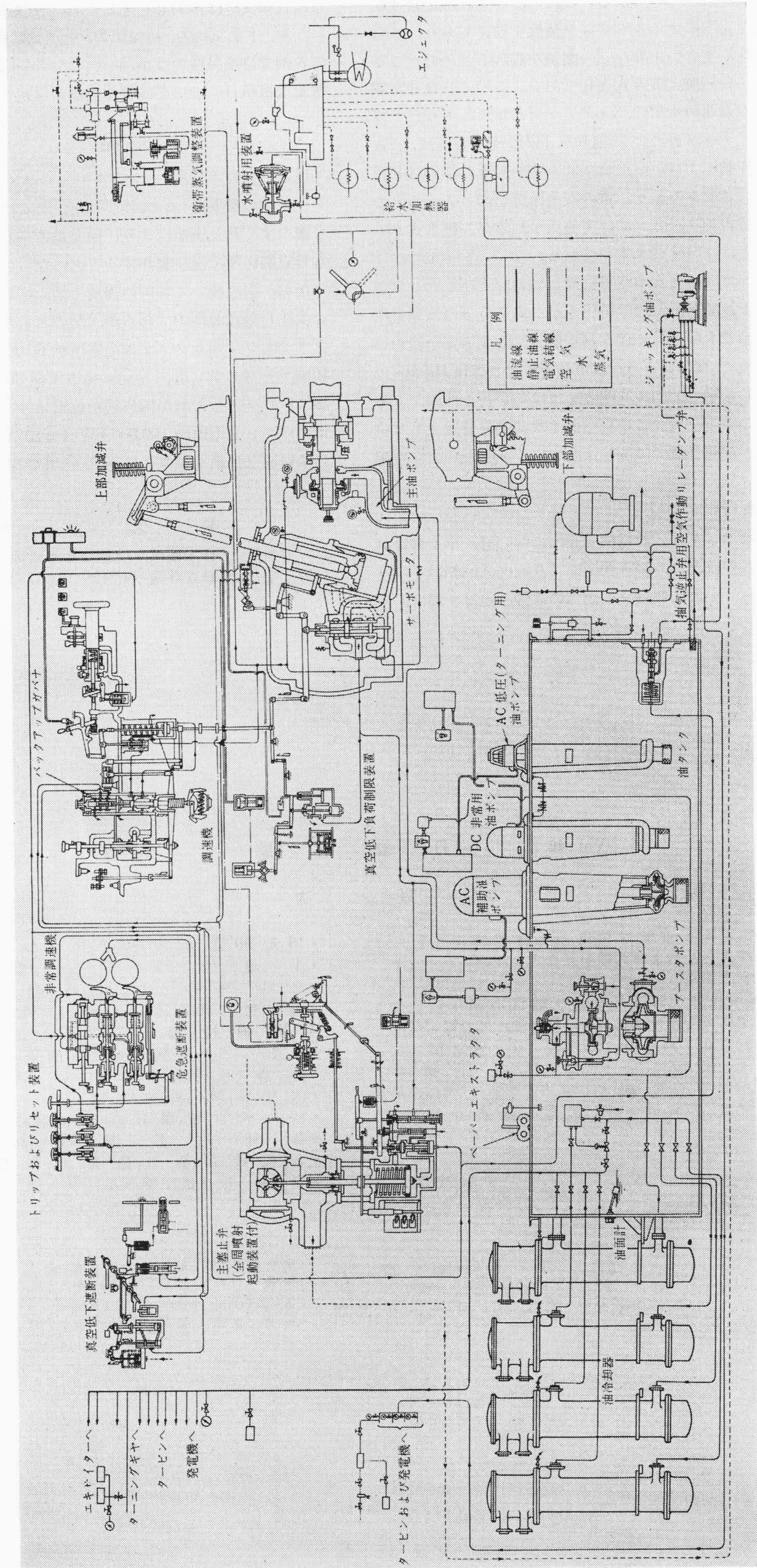
制御系統は第 10 図に示すとおりであるが、次に本制御装置の特長について述べる。

まず、主さい止弁には全周噴射起動装置を設けている。すなわち、タービン起動および低負荷運転時に全加減弁全開の状態の主蒸気を全周噴射せしめるために、本タービンでは第 11 図のように主塞止弁に子弁を内蔵させて、これに定格蒸気条件で約 20% の蒸気量を流しうるように設計してある。このように全加減弁の全開運転を行なうことにより、タービンに流入する蒸気平均流速および熱伝達率を低下し、車室およびノズル部にゆるやかで均一な温度変化を与えることになり、これら高温部のき裂、変形防止に大きな効果を与えている。

非常調速機はタービン速度が定格の 110% ± 1% に達したときに主さい止弁、加減弁および抽気逆止弁を閉鎖させるものであり、従来の日立式タービンではこの非常調速機 1 個にて十分安全なことを多数の実績で立証しているのが、本機では特に顧客の要望によ



第 11 図 全周噴射用主さい止弁バイパス装置



第10図 60,000 kW タービンの制御系統図

り2個の非常调速機を設けたのである。これらはいずれも定常運転時に作動試験可能なようにオイルトリップ装置を備えており、さらに、この作動試験時に主さい止弁などの閉鎖を避けるためのロックアウト弁で圧油経路を切換える方式としてある。このような非常调速機を作動除外時の過速防止用のバックアップとして、スピードガバナの上部にバックアップガバナを設けて、112%過速時には、バックアップガバナの作動により、直接真空低下遮断装置を作動させてタービンをトリップさせよう二重の安全保持を図っている。これらは一部の大容量再熱タービンには実施例があるが、復水式タービンに採用したことは注目すべきものである。

また、本タービンでは排気真空低下に対し警報およびトリップさせるための真空低下遮断装置を設けているが、赤道直下の本発電所の立地条件から、冷却水温上昇に伴う真空低下に対する安全性をいっそう確実にするため、真空低下負荷制限装置により5 in Hg abs以上に排気圧が上昇した場合、加減弁開度を下げて負荷を低減しようように計画されている。なお、この真空低下負荷制限装置とスピードレリの作動が、加減弁制御に関し、互いに干渉しないような配慮が施されている。

4.4 監視計器

タービン監視計器としては、前側軸受箱内に偏心計、車室伸び計および軸位置指示計のほか、顧客要望により両面式回転計を設けている。また、タービン低圧側軸受の後部には伸び差計を設け、さ

らに各軸受には振動計を配して、安全運転監視に便ならしめている。

なお、主蒸気圧力、排気圧力、主蒸気温度、高圧車室壁温度ならびに各軸受排油温度のほか、油タンクレベルなども計測するとともに、所要監視項目については警報装置が設定されている。

5. 結 言

以上シンガポール パシールパンジャン“B”発電所納60,000 kWタービンの概要について述べたが、ここに完成した1号機および2号機のすぐれた実績により、同発電所増設用の3号機および4号機も日立製作所で受注製作することになっている。

なお、引き続き各国の需要事情に応じて種々の形式のタービンを受注し鋭意製作中であるが、そのおもなものにインド、アンドラプラディッシュ州コタグデム発電所納60,000 kW 4台、南アフリカ共和国ケープタウン市アスロン発電所納30,000 kW 1台のほか、再熱タービンとしてわが国最初の輸出品となるフィリピン、マニラ市テーゲン発電所納100,000 kW 1台がある。これらに対してはさらに優秀な技術を投入して国際信用の確保に貢献したい所存である。

参 考 文 献

- (1) 桑野：日本機械学会誌 64, 694 (昭36-5)
- (2) 柴田：日立評論 44, 425 (昭37-3)

Vol. 46

日立評論

No. 12

目 次

- UHF位相変調多重無線装置の干渉雑音について
- 川崎製鉄株式会社および八幡製鉄株式会社納ユニバーサルスラビングミル
- トピー工業株式会社豊橋製造所納H形鋼圧延設備
- トピー工業株式会社豊橋製造所納H形鋼圧延設備電気品
- 静電容量利用の液圧検出法
- ビール仕込プラントの自動化
- シアノエチル化紙の変圧器への応用
- 日立コントロール装置—日立遠心薄膜蒸発器—
- 日立ハイガレジロータリ形
- クレーンの軽量化
- スイニングハンマー式ディスポーザの粉砕性能

- 16形90度カラーブラウン管について
 - 半導体素子の温度特性
 - ウレタンゴムの特性と応用
 - 鋳物砂水分計について
- 特殊鋼特集
- 真空アーク溶解における酸素の除去について
 - 特殊工具鋼のじん性について
 - 改良形M₀高速度鋼ドリル材について
 - 海綿鉄を使用した特殊鋼の特性について
 - 各種耐熱鋼の高温硬度
 - 各種鉄合金の動弾性係数について
 - 厚鋼板抜型工具鋼について

発行所 日立評論社

東京都千代田区丸の内1丁目4番地

取次店 株式会社 オーム社書店

振替口座 東京 71854 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