

大容量原子力タービンの製作上の問題点

Some Problems on Manufacturing for Large Nuclear Steam Turbines

桑野幸三* 北川祐司*
Kôzô Kumeno Yuji Kitagawa

要 旨

急速に発展する原子力発電時代に対処し、日立製作所は独自の技術開発を進め、昭和43年西パキスタン向け138,600 kW 原子力タービンを完成し、目下現地据付中である。一方、アメリカからの国際分業化の要請にも応じて、日立製作所はすでに各種の大容量原子力発電用タービン(1,800 rpm, TC4F-38形, TC6F-38形およびTC4F-43形)の主要機器についても多くの製作実績をあげており、ここに1,000,000 kW級の超大形原子力タービンの設計および製作体制は完備された。

本文では、これらの大容量タービンの製造実績に基づき、その問題点につき概説する。

1. 緒 言

近年、原子力発電に関する技術の進歩は著しく、その大容量化に伴う経済性の向上とあいまって、原子力発電所の建設計画は図1⁽¹⁾⁽²⁾に示すように世界的に激増しているが、わが国でも、現在海外依存度の高いエネルギー資源問題の長期的安定化を図るため、国家的な電源開発計画の中に強力に取り上げられて、各電力会社にて大容量原子力発電所の建設が急ピッチに進められ、次代の大容量発電設備の主役としての体制を固めつつある。なお「電源開発計画の超長期展望」⁽²⁾によれば、昭和60年度の発電設備において「原子力」の占める比率は約25~36%と予測されている。

このような情勢に対処して、日立製作所では、約10年前から原子力発電プラントの設計製作技術に関し、独自の研究開発を続けていたが、その成果が国際的にも認められ、先年パキスタン原子力委員会納め138,600 kW 原子力タービンを受注した。同機は国産原子力タービン1号機として、さる昭和43年に工場試運転を終了し(図2)、日本の輸出火力機器に新記録を加えるに至った⁽³⁾。

一方、アメリカにおける発電設備は周知のとおり膨大で、その設備容量は1966年末現在にて、266,816 MWに達し⁽⁵⁾、ソビエト、イギリス、日本および西ドイツの4個国総合計容量を上まわるほどであ

るが、ここに本拠を占める世界最大の電機メーカーGE社においても、その製作中の事業用タービン総出力の約50%近くはすでに原子力タービンであると報ぜられており、原子力発電時代の波は世界的にも予想以上に早く到来する機運にある。

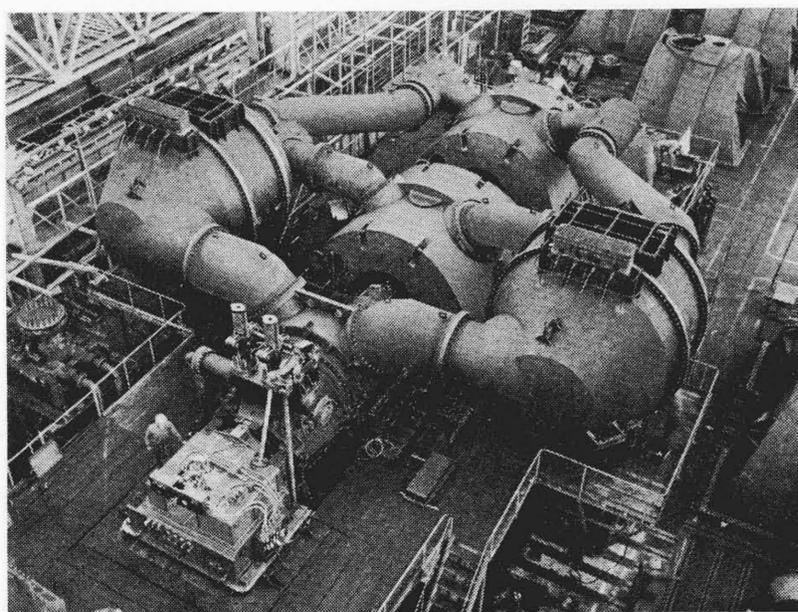
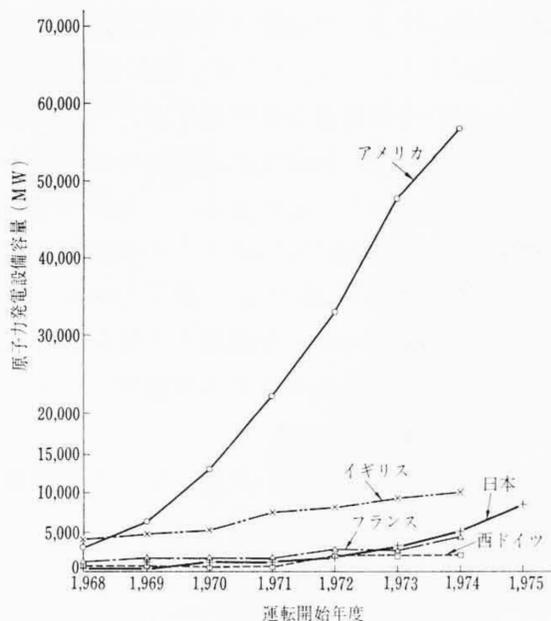
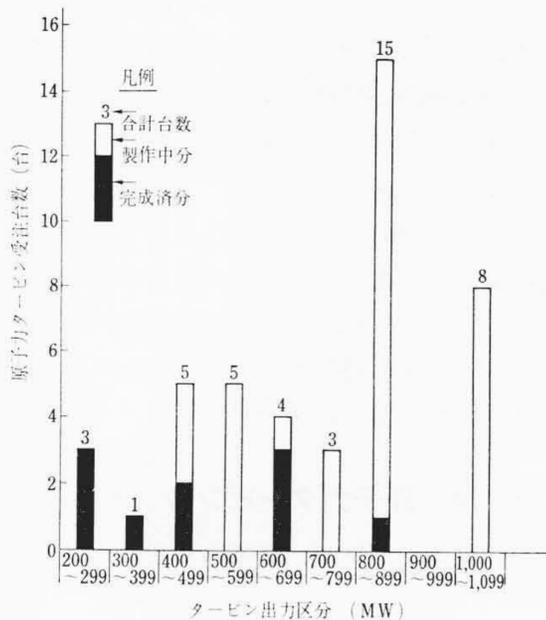


図2 西パキスタン納 138,600 kW 原子力タービンの工場試運転状況



(出典) 欧米諸国分: Nuclear Engineering International の1969年2月号の統計表による。
日本の分: 「昭和43年度中央電力協議会電力長期計画」による。

図1 各国の原子力発電設備容量の推移予想



形式別受注数	回転数 (rpm)	
	1,500	1,800
TCDF	—	3
TC4F	2	5
TC6F	1	12

(注) TC: タンデムコンパウンド
DF: 2流排気形
4F: 4流排気形
6F: 6流排気形

図3 アメリカ GE社の原子力タービン受注実績(1968年11月現在)

* 日立製作所日立工場

表1 「原子力発電用タービン機器」の受注一覧表
(昭和44年10月現在)

納入先 (敬称略)	定格出力 (kW)	タービン 形式	回転数 (rpm)	主蒸気条件		日立製作所の 製作担当範囲
				圧力 (kg/cm ² g)	温度 (°C)	
西バキスタン, 原子炉委員会	138,600	TC4F-23	3,000	38.3	248.8	タービン一式 (完成済)
アメリカ 某社	650,000	TC4F-43	1,800	66.8	282	加減弁制御油圧装置一式 (完成済)
アメリカ 某社	543,000	TC4F-38	1,800	66.8	282	低圧 38 インチ翼タービン2 セクション(ロータ, ダイアフラ ム, 車室, 軸受他)(完成済)
アメリカ 某社	537,000	TC4F-38	1,800	66.8	282	低圧 38 インチ翼タービン2 セクション(ロータ, ダイアフラ ム, 車室, 軸受他)(完成済)
アメリカ 某社	837,000	TC6F-38	1,800	62.2	297	低圧 38 インチ翼タービンロ ータ3本 (製作中)
アメリカ 某社	655,000	TC4F-43	1,800	66.8	282	低圧 43 インチ翼タービンロ ータ2本 (製作中)
中国電力株式 会社 (島根)	465,000	TC4F-38	1,800	66.8	282	タービン一式 (設計中) (原子炉及タービン発電機プ ラント一式)

表2 BWR形原子炉用標準原子力タービン形式例
(仮定条件: 主蒸気圧力=66.8 kg/cm²g (950 psig) 飽和,
排気真空度=722 mmHg (1.5" Hg abs))

タービン 回転数 (rpm)	最終段 翼長 (inch)	タービン形式別の標準出力 (MW)					
		TCDF		TC4F		TC6F	
		非再熱	再熱	非再熱	再熱	非再熱	再熱
1,800	35	260	275	520	550	780	825
	38	330	345	660	690	990	1,035
	43	385	405	770	810	1,150	1,215
1,500	35	260	275	520	550	780	825
	41	360	380	720	760	1,080	1,140

なお、GE社の1968年現在における原子力タービン受注状況は、図3に示すように、すべてタンデムコンパウンド形であり、TC4F形およびTC6F形が主体で、この中で最終段翼に38インチまたは43インチを採用した汽機が90%以上を占め、その最大出力は約1,100 MWに達している。

このような情勢下において、日立製作所は国内の諸原子力発電所の建設計画に参画するばかりでなく、その大容量タービンの製作技術の国際的成果はアメリカにおいても認められるところとなり、数年前から原子力タービンの製作に関する国際的分業体制が進み、表1に示すとおり、最終段長翼に38インチないし43インチを使用した出力500,000~900,000 kW級の超大容量原子力タービンの主要部品に関しても、すでに多くの製作実績をあげて、その製品に関する国際的信頼性を高めることができた。

このように、独自の国産技術に加えて、アメリカ有力メーカーとの共同製作段階における、細部にわたる両社技術陣相互のたゆみない研さんを通じて、原子力タービン国産化の体制はここに確立された。本文では原子力タービンの特長ならびに国産化に関する問題点について、日立製作所における実績例を提示して、その概要を述べる。

2. 原子力タービンの特長

原子力発電用蒸気タービンが、従来の石炭または石油使用の火力

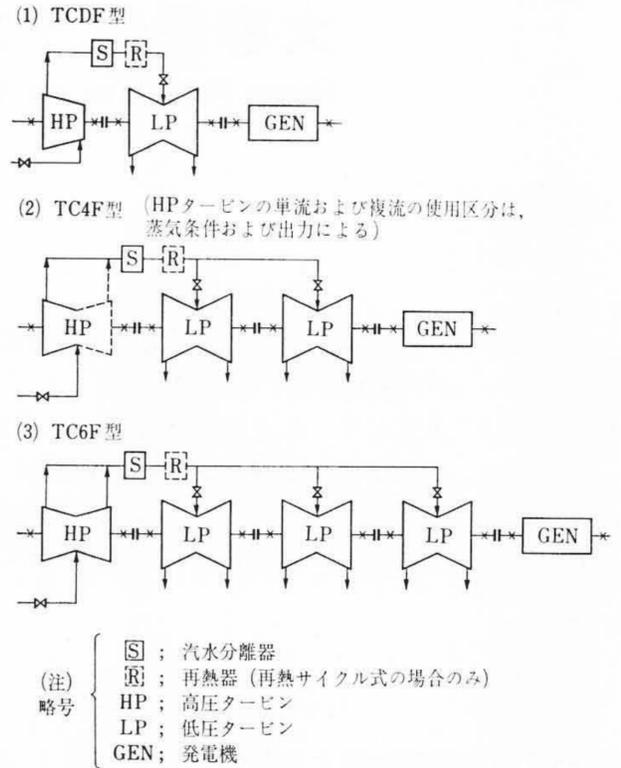


図4 原子力タービンの形式例

発電用大容量蒸気タービンと比較して異なる基本的条件は、タービン入口の蒸気圧力と温度が低いことである。これは、大形実用原子炉の出口蒸気温度が、現在の設計技術では一般に300°C近辺で経済的に最適とされているためである。なお、今後開発される高速増殖炉などにおいても原子炉出口蒸気の圧力・温度の大幅な向上は望みがないと見られている。

したがってアメリカGE社式のBWR形原子炉を採用する場合で例示すれば、タービン入口の蒸気圧温度の標準は67.8 kg/cm² abs, 282°Cであり⁽⁴⁾、これを超臨界圧の火力247 kg/cm² abs, 566°C級と比較すると、圧力は約28%である。

また、最近、原子力タービン内の熱サイクル効率の向上を図るため、高圧タービンの排気を、主蒸気のバイパス蒸気などで再熱するサイクルを採用する計画例もある。

いずれにしても、このような低温低圧の蒸気条件に起因して、次のような原子力タービン固有の諸問題が生ずる。

2.1 タービン排気蒸気量大→長翼採用→全体構造の大形化

蒸気の有効熱落差が小さいため流入所要蒸気量が増大し、かつ、入口蒸気の比体積が大きいため、タービン翼が全般的に長大化する。したがってタービンの全体構造が大形化する。一方、原子力タービンでは高い蒸気湿り域内で、回転される動翼の浸食防止のために、長翼先端の周速が制約されることになる。したがって高速機(3,000 rpm または 3,600 rpm)の場合では23インチ長翼程度までが限度と考えられるので、200,000 kW級以上の原子力タービンでは、低速機(1,500 rpm または 1,800 rpm)を採用する傾向となる。

次に、BWR形原子炉と組合せする大容量原子力タービンの標準形式例を図4および表2に示した。

また、図5にはTC4F-38形原子力タービンの断面構造例を提示した。

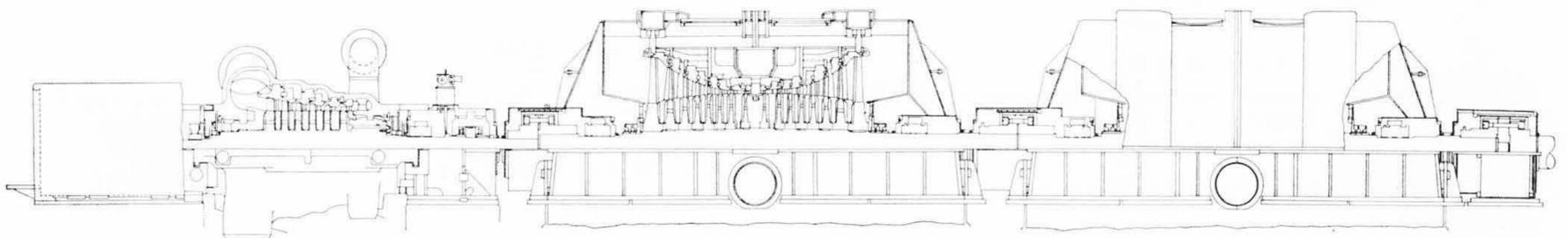


図5 TC4F-38形原子力タービンの断面図

2.2 湿り蒸気域運転→汽水分離器の採用

上述のように、タービン流入蒸気は入口条件ですでに低圧湿り域にあるため、このままならの汽水分離装置をも用いないまま排気真空まで膨張すると、低圧最終段出口で20%以上の湿り分を含むことになり、長翼の浸食が著しくなる。これを避けるために、タービン内部または高低圧連絡管中に各種の汽水分離装置が用いられる。なお高低圧連絡管中の汽水分離装置の構造例は後述の図16および図17のとおりである。また、低圧最終段の湿り度を火力用タービンと同程度に維持し、かつタービン内部効率を向上させるために、汽水分離器のほかに高低圧連絡管中に再熱器を設けて再熱サイクルを採用する場合もある。

2.3 湿り蒸気に対する耐食対策

原子力タービンでは多くの部分が常時湿り蒸気に接しているため、その構造および材料は耐食性を考慮して選定される。特に高速回転するロータにおいては、長翼の先端付近にステライト板をインコネル棒にて溶接したり、汽水分離用みぞ付翼(図10)のみぞ部に表面硬化のための特殊熱処理を行なうなどのほか、ロータの蒸気シールパッキング部にはスリーブ式シャフトパッキングを用いてシャフト本体を保護し、万一エロージョンを受けた場合に交換可能な構造としている。

一方、非回転体部品においても、全面的に、材料選定に際し耐食性が考慮されるが、さらに、ケーシングおよびダイヤフラムなどの各シール面には各種の耐食構造を採用する。また、汽水分離器の波板などにおいてもステンレス鋼を使用している。

3. 大容量原子力タービン製作上の問題点

3.1 部品の大形化→高性能な大形機械設備の配備

前述のように、大容量原子力タービンでは従来の高速機に比較して、低速機(1,500 rpm または 1,800 rpm)となるため、各機器構造の全面的な大形化により、その各種の製造ならびに試験設備には飛躍的な大形化が要求される。また、この種の大形原子力タービンにおいては、各所に汽水分離機構などの新設計構造が採用され、その構成部品の製造、検査および組立の管理についてはいっそう高度な技術を必要とする。

以下に原子力タービンの主要部品ごとに、その製造上の問題点について述べる。

3.2 車 室

高圧車室は従来の大容量火力タービンの高中圧車室に比較して、流入蒸気圧力および温度が低くなり、構造は簡単化するが、外形および重量が大きくなるため鋳造設備の大形化が必要である。

低圧車室は通常タービンの最大重量片を占めることになるが、大形化による剛性および加工上の問題のほかに、輸送上の寸法制限なども考慮して設計される。たとえば、最終段動翼が38インチの複流排気形低圧車室では、外部車室は上半および下半ともにそれぞれ二分割構造となる。このような大形の溶接式構造物の製作に当たっては、溶接部焼鈍用の大形炉およびフランジ面加工用の大形高精度の加工機械が不可欠であり、またこれらの大形車室の溶接、加工ならびに組立調整の諸関係作業のためには広大な作業場の確保が必要である。

図6はTC4F-38形の原子力低圧タービンの組立状況を示したものである。

3.3 ロ ー タ

高圧部のロータは、低速タービンにおいても、比較的外径が小さいため、一体鍛造削出しロータを使用することになり、従来の火力発電用タービンと比較して特記すべき問題点はない。

低圧部のロータは前述のような長大翼を植込むため、車盤の外径

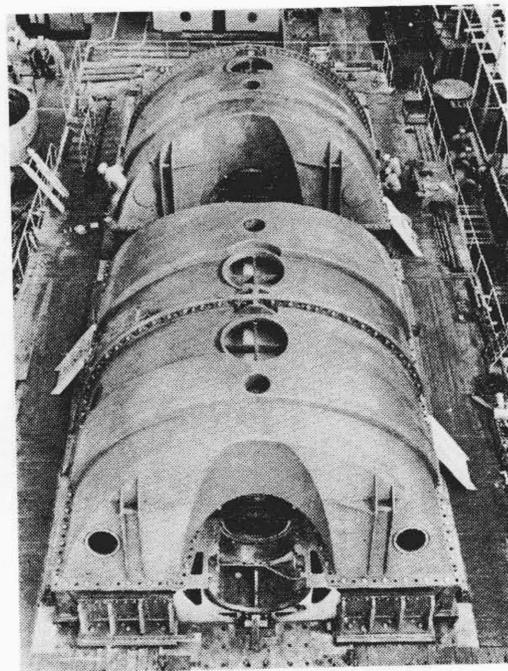


図6 TC4F-38形原子力タービンの低圧部組立状況

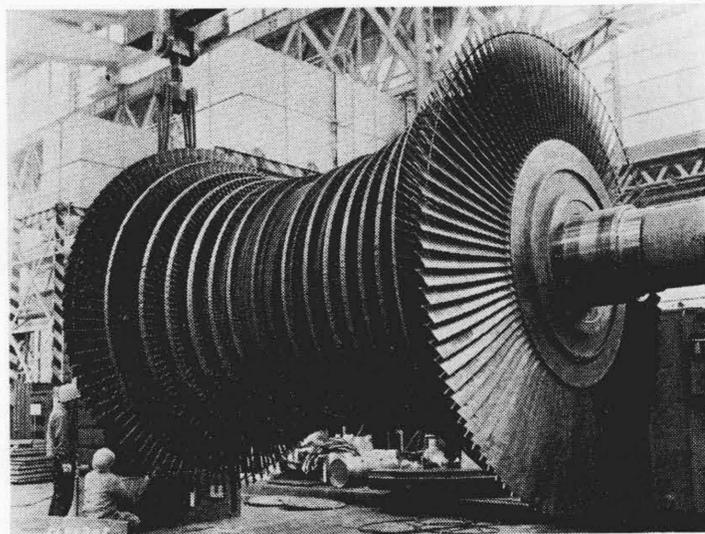


図7 38インチ長翼を最終段に植込んだ原子力タービンロータ

および幅の大形化に伴い、ロータは車軸と車盤とを別体鍛造方式とし、焼ばめ組立式とする。

日立製作所で完成した38インチ長翼を有する原子力タービン低圧ロータの外観例は図7のようなものである。

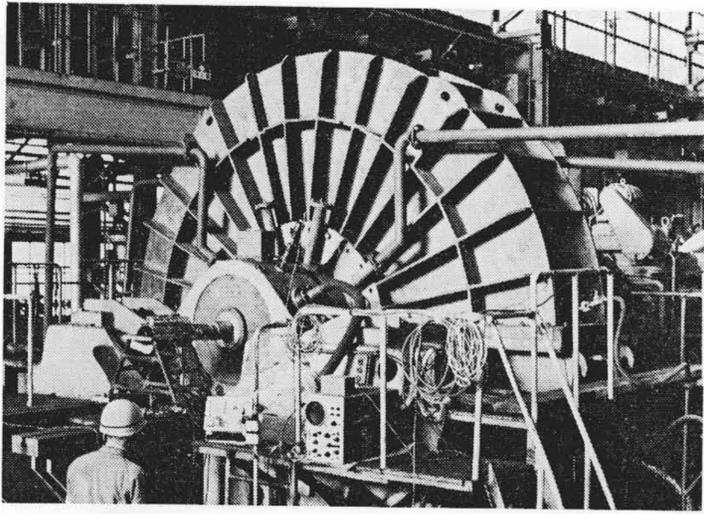
この大形低圧ロータの製造ならびに検査において、従来の火力用と比較して新たに留意すべき諸項は次のとおりである。

- (1) 車盤の材質管理：鍛造荒引き後および仕上加工後に超音波探傷試験を行なう。また長翼用車盤では内周および外周の一部からストレスリングを取り材料の詳細点検を行なう。
- (2) 各車盤に動翼植込み組立後、単独静的バランス試験を実施する。
- (3) 長翼を植込んだ車盤は、ホイールボックス試験により低速から過速域までの広範囲の回転において動翼群の振動特性試験を行なうため、図8のような特殊大形試験装置が必要となる。
- (4) 車軸に各車盤の焼ばめ組立を行なうために、大形均一加熱装置および組立用の特殊大形ピット装置が整備されねばならない。
- (5) ロータの全体組立完成後に、定格回転数以上の過速度バランス試験を行なうために、図9のような大形ロータ過速バランス装置が必要である。

3.4 動 翼

(1) 長 翼 加 工

- (i) 38~43インチ級の長翼になると、鍛造素材の材質および



(ホイールボックステスト装置)

図8 38インチ長翼を植込んだ車盤の高速回転振動特性試験装置

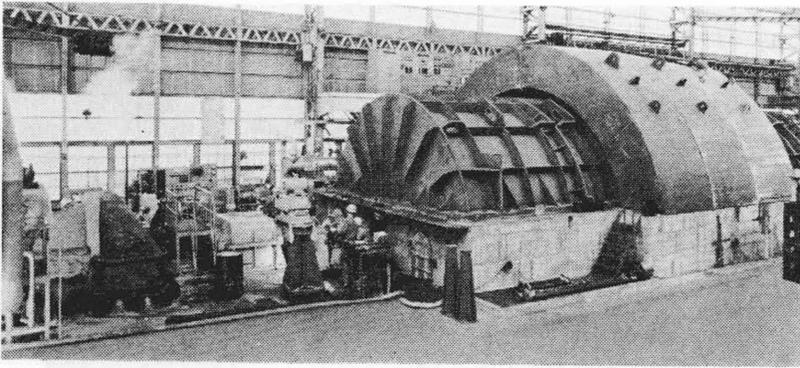


図9 大形ロータの過速バランス試験装置

寸法管理にはいっそう高度な技術が必要である。

(ii) 長翼のプロファイル部加工を高精度高能率で行なうために、大形特殊な加工専用機が必要である。

(iii) 長大翼の翼入口先端部に浸食防止用に取り付けるステライイト板の接合に際しては、安定した溶接作業管理を行なうため、特殊治工具を用いて、厳選された高級技能者により作業が進められる。さらにこのステライイト板の溶接部に対しては、X線検査および特殊超音波探傷試験により万全な品質管理が行なわれる。

(2) 汽水分離用みぞ付翼

(i) みぞ付汽水分離翼は図10のように動翼プロファイル入口背側に数本のみぞを切り、動翼に衝突し付着する水分を遠心力により外周に振り飛ばすものである。このみぞ付動翼の外周のダイヤフラムには図11のようなスリットおよび汽水分離室が設けられており、動翼によりはね飛ばされた水分は、この室で捕獲されて次の抽気点に導かれる。日立製作所ではこのみぞ付動翼を実物大低圧タービン試験装置に収めて、湿り蒸気中の運転試験を行ないその特性を図12のように確認した。

(ii) 本みぞ付翼の加工上重要な点は、三次元的に複雑な曲面を有するプロファイル部に一様な深さのみぞを加工する作業と、そのみぞ付翼部の表面硬化のための火焰(えん)焼入熱処理の管理などである。

(3) インパクトロッド付翼

動翼の振動を減衰させる目的で動翼プロファイル部内に、インパクトロッドをそう入する方式を一部の段落翼に適用する。このインパクトロッド用穴加工においては、特に精密な工作設備、技術が必要である。

3.5 ダイヤフラム

ダイヤフラムの構造も動翼および噴口翼の長大化に伴い、特に低

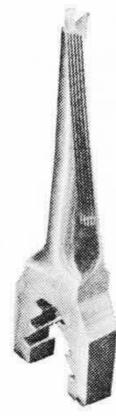


図10 汽水分離用みぞ付翼

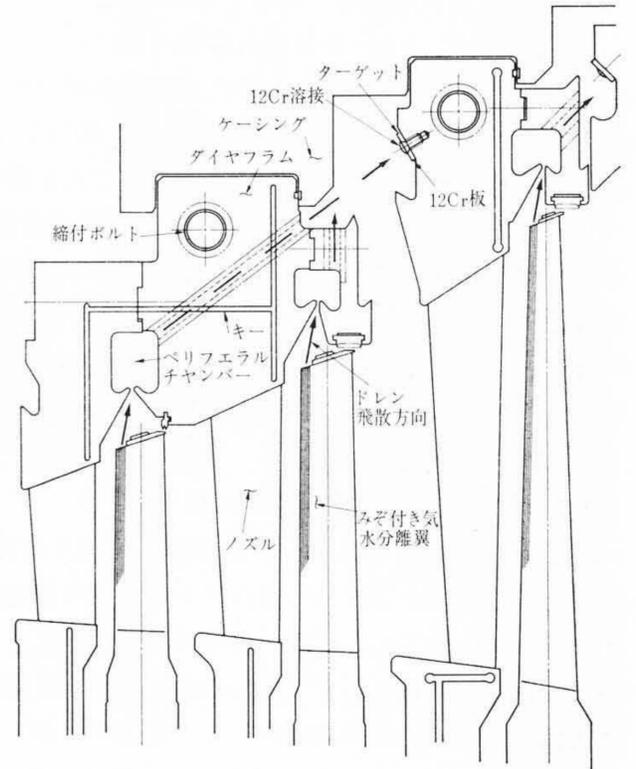


図11 「みぞ付汽水分離翼」と「ダイヤフラム」による汽水分離機構

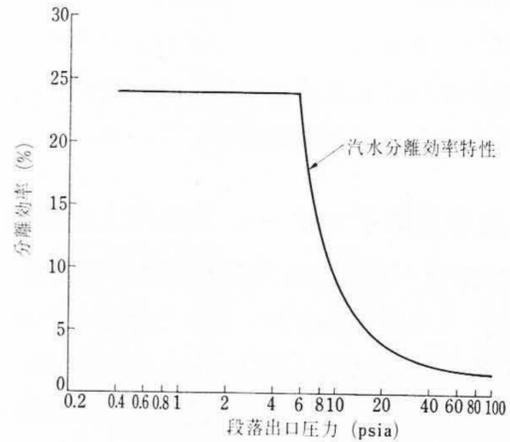


図12 みぞ付翼の汽水分離効率特性

圧部において大形化するが、低圧最終段の湿り度の大きい蒸気域における巨大ダイヤフラムでは特殊合金鋳鉄が採用される。またダイヤフラムの水平面は湿り蒸気による浸食を防ぐため、ボルト締めにより完全にメタルコンタクトを行なわせる方法を採用する。

ダイヤフラムの製造上の主要注意事項は次のとおりである。

(1) ダイヤフラムの長大化に伴い、溶接式、鋳鋼製および鋳鉄製ともにそれぞれ、溶接ならびに鋳造方案管理において従来のダイヤフラムと比較し、格段の高度技術が必要であり、内外輪の体積差、諸熱処理管理、噴口翼の浸炭防止法など、作業実績による緻密な設計、製作、品質管理によって初めて安定した製品が生まれる。

(2) 溶接ダイヤフラムの外輪および内輪と噴口翼の溶接部の品質管理のために放射線検査を実施する必要があるが、原子力タービンのように大形厚肉ダイヤフラムの新設計品などの検査には図13のような、5 MeV級の高性能リニアック放射線試験装置が必要である。

(3) ダイヤフラムの巨大化により、その諸機械加工工程においても、当然多数の大形専用機の確保が肝要である。

(4) 上述のような巨大ダイヤフラムの新設計品においては、実機運転時における各ダイヤフラム前後の蒸気圧力差による作用荷重の数倍の試験荷重にて、各ダイヤフラムの荷重たわみ試験を実施する。ここで、大形ダイヤフラムに対して運転状態と同様に全周均一な荷重を加えながら微小たわみ

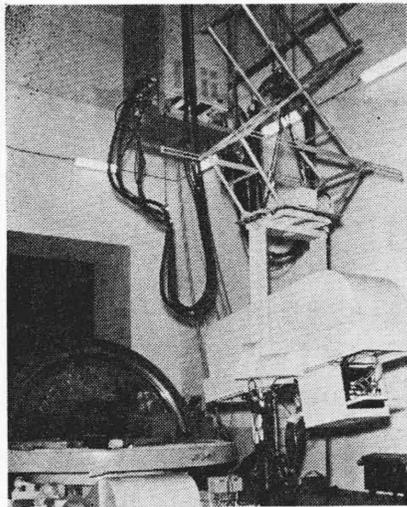


図13 5 MeV リニアック放射線試験装置によるダイヤフラム検査状況

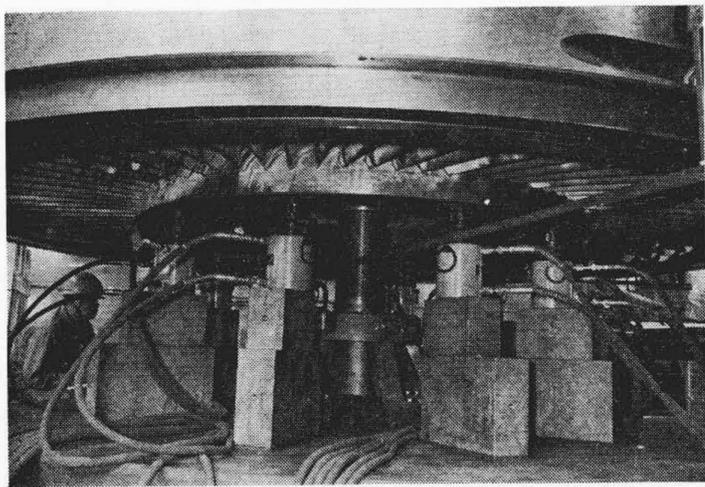


図14 大形ダイヤフラムたわみ試験装置

の変化を測定するためには、図14のような特殊大形たわみ測定装置と高度な測定技術が要求される。

以上のような、各種の特殊試験に基づく詳細な検査記録は、単なる品質管理資料に止まらず、設計および製造部門にフィードバックされて、次の記録品完成への飛躍の基盤として活用されている。

3.6 汽水分離器

高低圧連絡管の途中に設置する別体式の汽水分離装置は、前述のとおり、高圧タービン排気に含まれる汽水を分離して、低圧タービンの内部効率の向上と、侵食防止を図るものであるが、わずかの圧力低下で高い汽水分離効率を確保する特性が要求される。

日立製作所では、実機運転条件と同等の汽水分離試験装置によって、綿密な基礎実験を行ない、図15に例示のような試験記録を得て、蒸気の流速に対する適正な波形およびピッチなどを選定している。なお、汽水分離器の構造例としては、図16の「横形波板式汽水分離器」および図17の「縦形波板式汽水分離器」の二種類の標準形式があるが、いずれの汽水分離器においても、内部の蒸気流路ばかりでなく、タービンとの連絡管との相互の熱膨張の吸収、ドレンの排除方法、および内部点検法などについてもじゅうぶん配慮した構造としなければならない。

3.7 制御装置

タービン制御系統について、従来の大容量火力用タービンと比較し、若干異なる点は図18に見られるように、主蒸気系統に「タービンバイパス弁」、各低圧タービン入口に「組合せ中間弁」が設けられていることである。

「タービンバイパス弁」はタービンの起動または停止時などに、原子炉より供給される蒸気の全量あるいは一部分をタービンが消化しないときに、この弁を通して不要な蒸気を復水器に排出して原子炉を保護するものである。

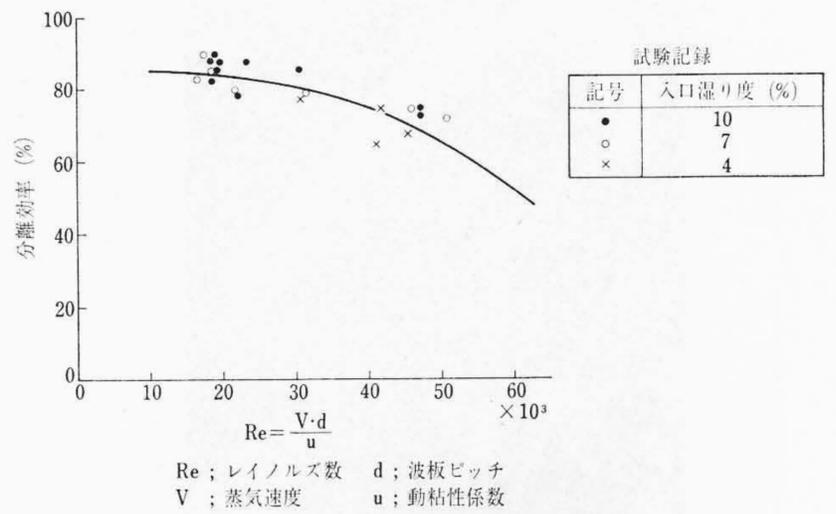


図15 波板式汽水分離器の効率

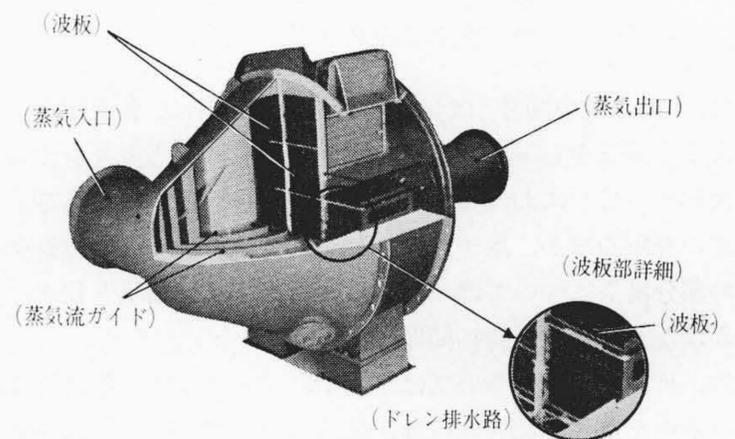


図16 横形波板式汽水分離器

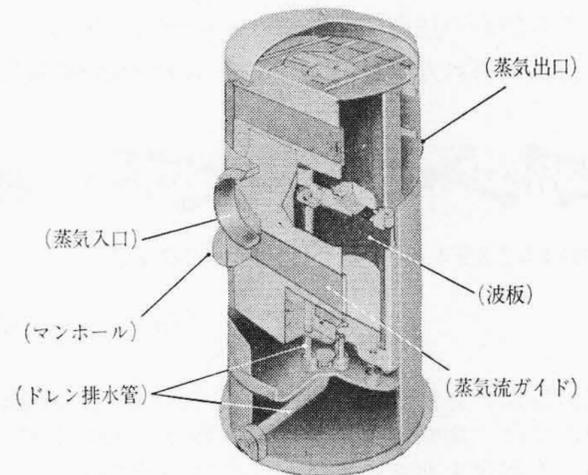


図17 縦形波板式汽水分離器

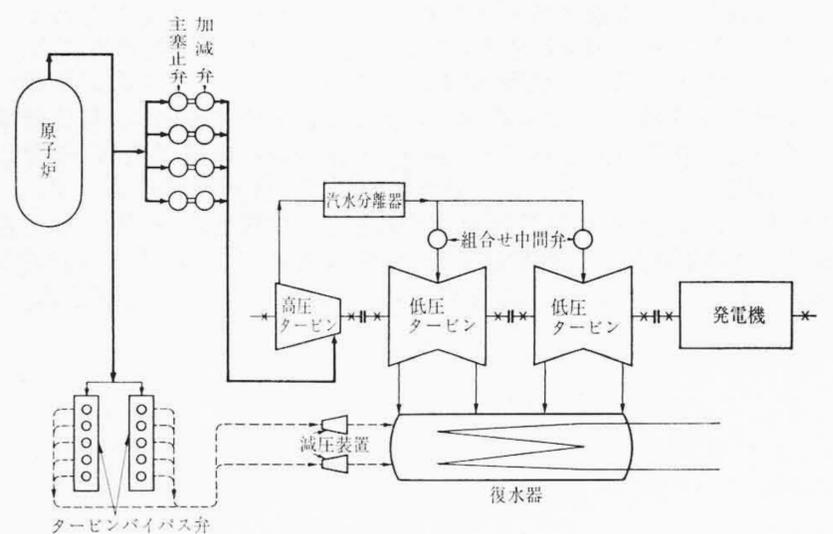


図18 原子力タービンの主蒸気系統例

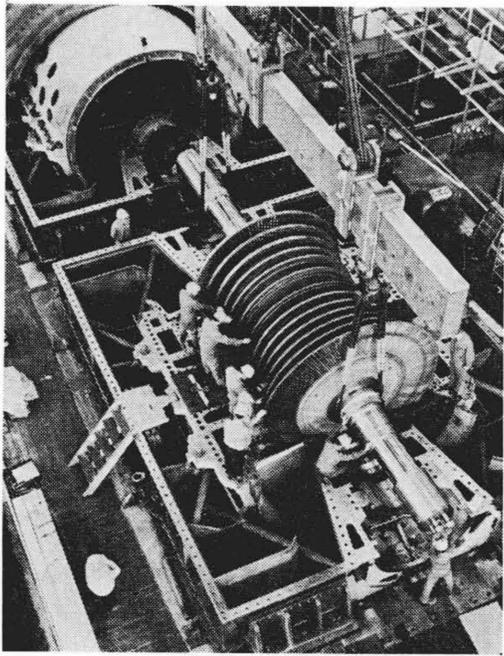


図19 原子力タービン低圧部にロータ組立中の状況

また、「組合せ中間弁」は発電機負荷しゃ断時に、各低圧タービンに流入する蒸気をしゃ断してタービン過速を押える働きをするもので、再熱タービンにおける組合せ再熱弁と同様なものである。

上述の弁類のほか、原子力タービンに採用される各種制御装置の個々の部分構造については、従来の再熱タービン部品と比べ本質的な差異はなく、製造上特に問題はない。

なお、日立製作所においては、表1に示すように、主蒸気系統の制御の中枢をなす加減弁制御油圧装置において、すでに650,000kW原子力タービン用としての一式を製作し、特性試験も実施されている。

従来の大部分のタービンでは油圧機械式の制御装置を使用していたが、次第に電子油圧式ガバナ(EHG)を採用する傾向にあり、この方面においても独自の技術開発により製作実績を有している。

このような技術研さんの結晶として、入念な品質管理により製作

された各部品は、図19のように慎重に点検組み立てられて、高性能な原子力タービンが完成する。

4. 結 言

原子力発電に関する技術開発は急速に進展しつつあり、いずれ近い将来において在来の火力発電に対して、経済的に優位に立つものと予想されている⁽⁷⁾。このような動向に対処して、原子力発電用原動機の中核をなす大形原子力タービン機器の製作技術開発、ならびに信頼性の向上に努めることがわれわれに課せられた急務である。

日立製作所は既述のように、原子力タービンの設計技術、製作および検査設備、各種高級技能者ならびに品質管理システムの全般につき総合体制を確立し、すでに38インチおよび43インチ長翼を用いる大形原子力タービンに関し、数多くの生産実績をあげている。この経験を背景として、引き続き国際的視野に立って、その技術開発と生産活動を進めつつあり、今や1,000,000kW級の超大形原子力タービンの製作体制も確立されている。なお、52インチ長翼を有する超大形タービンに関しても現有の諸設備にてじゅうぶん生産できることを確認し、大容量原子力タービンの基本計画も完了している。

今後とも、顧客各位の絶大なるご支援のもとに、さらに高性能の原子力発電用機器の開発に努め、国内外の原子力発電の発展のために貢献したいと念願している。

参 考 文 献

- (1) Nuclear Engineering International p.103 (Feb.-1969) "Reports from world nuclear power station sites"
- (2) 藤井：火力発電，第20巻，第8号，p.1，(1969-8)
- (3) 桑野：日本機械学会誌，第71巻，第593号，p.69 (昭43-8)
- (4) 桑野，久野：日立評論 48，76 (昭41-6)
- (5) Edison Electric Institute：(1968-9) "Statistical year book of the Electric Utility Industry for 1967"
- (6) 重本：火力発電，第20巻，第5号，p.1 (1969-5)
- (7) 渡辺：火力発電，第20巻，第1号，p.55 (1969-1)



特 許 の 紹 介



特許第457594号 (特公昭40-8295号)

平野睦房・三浦武雄

演 算 増 幅 器

磁気増幅器を用いた演算増幅器において、演算器の誤差をゼロに近づけるためには、増幅器の増幅度をきわめて大きくすることが必要であるが、増幅度を非常に大にするのは容易でない。

本発明は、増幅度があまり高くなくとも誤差をじゅうぶんゼロに近づけ得るような演算増幅器を得るためになされたもので、出力電圧に比例した帰還電流が供給される電圧補償巻線と出力電流に比例した帰還電流が供給される電流補償巻線とを、演算増幅器の磁心に制御巻線とともに巻き回しせしめたことを特長とするものである。

図は本発明の一例を示すもので、出力巻線 N_1 , N_2 、制御巻線 N_{C1} 、ダイオード $d_1 \sim d_4$ 、交流電源 E_s 、入力インピーダンス Z_i 、帰還インピーダンス Z_f および負荷 Z_L からなる従来の増幅器に、電圧補償巻線 N_{C2} 、電流補償巻線 N_{C3} 、および出力電圧帰還抵抗 R_f を付加した構成となっている。この構成において、各補償巻線 N_{C2} , N_{C3} と制御巻線 N_{C1} との巻線比を β , α とし、増幅度を $-R_A$ 、出力巻線 N_2 の端子電圧と負荷電流 I との変化のこう配を Z_0 、制御巻線 N_{C1} のインピーダンスを Z_1 とすれば、入力電圧 E_i と出力電圧 E_0 との関係は

$$E_0 = -\frac{Z_f}{Z_i} E_i \times \frac{1}{1 - \frac{Z_f}{R_f} \left(1 + \frac{Z_1}{Z_f} + \frac{Z_1}{Z_i}\right) \beta + \frac{Z_f \left(1 + \frac{Z_1}{Z_i} + \frac{Z_1}{Z_f}\right) (Z_0 + Z_L - \alpha R_A)}{Z_L R_A}}$$

となる。したがって、巻線比 α , β をそれぞれ $Z_0 = \alpha R_A$, $R_f = \beta R_A$ を満足するように選ぶと、分母第2項と第3項の和はゼロとなり、 $E_0 = -Z_f/Z_i \cdot E_i$ の関係となるので、誤差のない理想的な演算増幅器が得られる。(栞山)

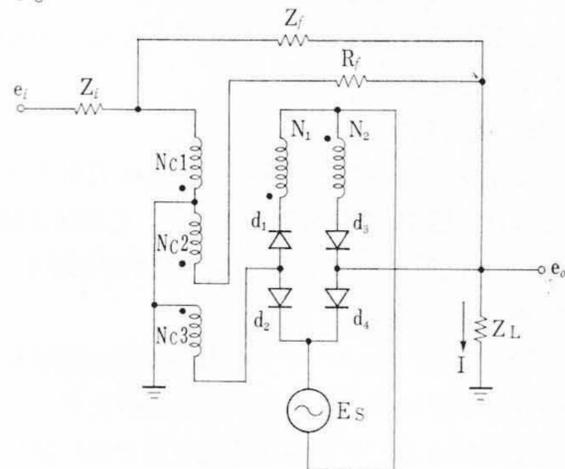


図 1