

大容量原子力タービン発電機

Large Nuclear Steam Turbine-generators

加藤 正 敏* 庄山 悦彦*
Masatoshi Katô Etsuhiko Shoyama

羽鳥 文 夫* 久野 勝 邦*
Fumio Hatori Katsukuni Hisano

要 旨

国内の原子力発電所建設計画も、800 MW 級、1,100 MW 級の時代にはいりつつあるが、これら大容量原子力発電所に用いられるタービン発電機には、従来の火力発電所の場合とは異なった設計技術、製作設備が必要である。本稿では、これらの要点について述べ、大容量原子力タービン発電機プラントの特徴を明確にする。

1. 緒 言

着々と進行する大容量原子力発電所の建設に対応して、蒸気により電力を発生するタービン発電機プラントも大容量化し、新しい技術が導入されつつある。これら原子力用タービンプラントは、火力の場合と比較すると、同じ発生電力に対して2倍近くの蒸気を必要とし、このためにタービン、復水器、給水加熱器などいずれも大形化すると同時に、発電機にも4極機が採用される。日立製作所日立工場では、これに備え、早くから基礎研究に着手し設計製作技術の確立を図ってきたが、近年の使用者側の建設計画に合わせ工場設備の拡充を行ない、1,500~2,000 MW 級タービン発電機の製作体制を完備した。また一方、アメリカにおける増大する需要の一部をになつて、国際分業体制の下で原子力発電用タービンを製作し、アメリカに納入している。表1は、日立製作所にてすでに製作したものまたは現在製作中のものを示している。本稿では、これらの経験を基に、大容量原子力タービン発電機プラントの特徴を紹介し、関係者の参考に供したいと考える。

2. 蒸気タービン

2.1 タービン形式と出力

近年原子力発電プラントの単機出力も増大し、1,100 MW 級の建設計画が国内においても進められているが、このように出力が増加した場合に用いられるタービン形式は表2に示すとおりである。原子炉熱出力には数種の標準があり、この標準熱出力に合わせてタービン形式が選定される。GE形原子力タービンにおいては、タービン内部に設けられるみぞ付翼による汽水分離効果が期待されるために、表2に示すように、非再熱式・再熱式の双方が用いられるが再熱式プラントには次に述べるようなメリットがあり、アメリカにおける最近の傾向としては再熱式プラントの建設が多くなりつつある。

再熱式プラントは、非再熱式の場合と比較すると、同じ原子炉熱出力に対して電気出力が2~3%程度増加し、このために経済的に有利となる場合が多い。さらに最終段長翼先端の湿り蒸気によるエロージョンの点からみると、再熱式プラントの場合には、非再熱式と比較して最終段長翼入口の湿り度が小さく、この点からも有利となる。表2におけるTC6F-52形1,800 rpm機は、火力の26" 3,600 rpm長翼を使用したタービンと比較すると、最終段長翼先端周速、湿り度の点からは同じレベルにあり、1,300 MW級までは現在の技術の延長線にあることがわかる。

* 日立製作所日立工場

表1 原子力用タービン発電機プラントの製作経験

納入先 (敬称略)	発電機出力 (MW)	タービン形式	回転数 (rpm)	日立製作所担当分野	運転開始
アメリカ某社	650	TC4F-43	1,800	M (T-制御装置)	1970
アメリカ某社	543	TC4F-38	1,800	M (T-LP セクション)	1970
東京電力(株)福島1号	462	TC4F-35	1,500	D, M&E(P), E(T&G)	1971
アメリカ某社	537	TC4F-38	1,800	M (T-LP セクション)	1971
パキスタン原子力委員会	138.6	TC4F-23	3,000	D&M (T&G)	1971
アメリカ某社	655	TC4F-43	1,800	M (T-LPロータ)	1971
アメリカ某社	837	TC6F-38	1,800	M (T-LPロータ)	1972
中国電力(株)島根	465	TC4F-38	1,800	D, M&E (T, G&P)	1973
中部電力(株)浜岡	540	TC4F-38	1,800	D, M&E (T, G&P)	1974
アメリカ某社	883	TC6F-38	1,800	M (T-LPロータ)	1974
東京電力(株)福島4号	784	TC6F-35	1,500	D, M&E (T, G&P)	1976

注: D:設計 M:製作 E:据付
T:タービン G:発電機 P:復水器給水加熱器など

表2 タービン形式と出力

発電機出力	1,500 rpm 機	1,800 rpm 機
200 MW 級	TCDF-35	TCDF-38
300 MW 級	TCDF-41	TCDF-43
500 MW 級	TC4F-35	TC4F-38
800 MW 級	TC6F-35	TC4F-43 R/H TC6F-38
1,100 MW 級	TC6F-41	TC6F-38 R/H TC6F-43
1,300 MW 級	TC6F-41 R/H TC6F-52	TC6F-43 R/H TC6F-52

注: R/H は再熱式プラントを示す。

表3 最終段長翼 (1,800 rpm 機の場合)

翼長 (IN)	35	35	43	52
平均直径 (IN)	110	115	127.5	152
排気面積 (FT ²)	84	95.3	105.7	172.4
翼先端周速 (FT/s)	1,140	1,200	1,300	1,600

2.2 構造上の特徴

2.2.1 ロータ

1,500 rpm 機または1,800 rpm 機の採用により、動翼の平均直径を大きくとることが可能となり、表3に示すような長翼が用いられる。この場合、低圧ロータの径が大きくなりロータシャフトを一体鍛造することは困難であるため、低圧ロータには図1に示すように焼ばめ方式を採用する。焼ばめ代は、タービンロータの

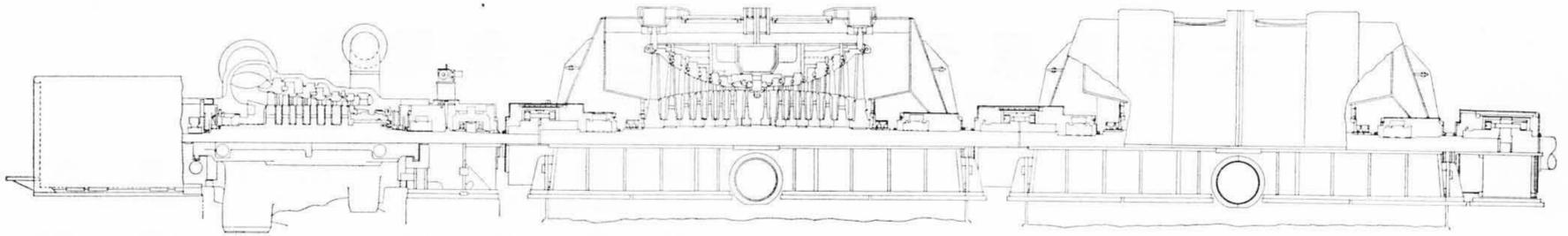


図1 500 MW 級原子力タービン断面図

120% 加速時にディスクとシャフトの間がルーズになるよう選定されており、焼ばめ後は必ず、ロータの120% 過速を行ないルーズにした後回転数を落とし、一様な密着が得られるように製作される。

高圧ロータシャフトの外径は、火力の低圧ロータの場合とほぼ同じくらいとなり、一体鍛造が可能である。高圧ロータとはいえ、使用温度は300°C 以下の低い温度であるため、火力の低圧ロータの場合と同じ Ni-Cr-Mo-V 鋼が使用される。

図2は38インチ長翼を用いた低圧ロータを示したものである。

動翼についてはGE形原子力タービンの特徴としてみぞ付翼が用いられる。みぞ付翼の表面には蒸気中の水滴によるエロージョン防止策として、火焰による表面焼入れが行なわれる。最終段翼については、湿り度が深くなるため成形されたステライト板が溶接され、動翼の12Cr母材を保護する構造となっている。ステライト板の溶接に際しては、ステライト材および12Cr材の双方に対して溶着性のすぐれたインコネル溶接棒が用いられる。

シャフトパッキン部については、スリーブにより保護し、万一シャフト表面が侵食を受けることが生じて、スリーブを交換するだけで再生が可能となる構造となっている。

2.2.2 ダイアフラム

隔板の材質には、2Cr 鋳鋼が用いられるが、湿り度の深くなる低圧部の後段については、合金鋳鉄が使用される。構造としては、ペリフェラルチャンバが全段落に設けられ、みぞ付翼であるか否とにかかわらず動翼により振り飛ばされた水滴を捕獲して抽気段落に導く構造となっている。

2.2.3 ケーシング

蒸気温度は300°C 以下と低く、図1に示すように一重ケーシング構造が採用される。材質はSC相当の普通鋳鋼であるが、BWRと組み合わせられるタービンにおいては、放射能の影響による遊離酸素が原因で、腐食を受けやすくなっており耐食性を増すための微量のCuを混入させてある。主塞(さい)止弁、加減弁および中間弁についても同様である。

低圧タービンについては、ケーシングが大きい主として機械加工上および焼鈍炉の大きさによる制限から2分割構造またはそれ以上の分割構造とされる。材質としては、外ケーシングは火力の場合と同じSM材が使用されるが、内ケーシングの場合には直接蒸気に触れるため微量のCuが混入した耐候性鋼板SMA材が使用される。

蒸気の噴流が直接衝突する部分は、12Cr ステンレス鋼のバッフルプレートにより侵食を防止する手段を講じている。

2.3 計画例

500 MW 級非再熱式プラントの計画の一例は図5に示すとおりである。この場合のタービン断面図は図1に示されている。

タービン入口で若干の湿り分を含んだ蒸気は、高圧タービンで膨張する間に12~13%の湿り度となり、高圧排気から汽水分離器へ導かれる。高圧タービン各段には、水滴分離のためのペリフェラルチャンバが設けられており、動翼から飛散した水滴はここで捕獲さ

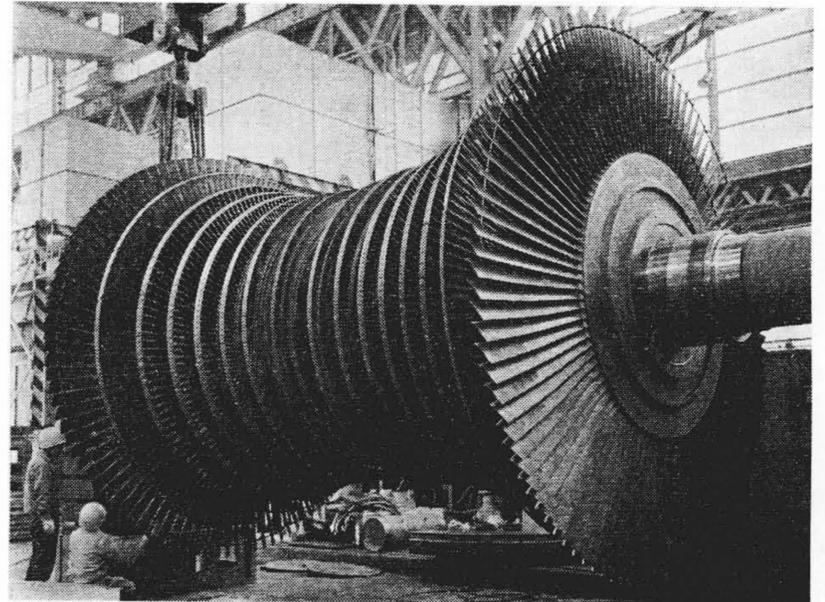


図2 38インチ長翼を使用した低圧ロータ

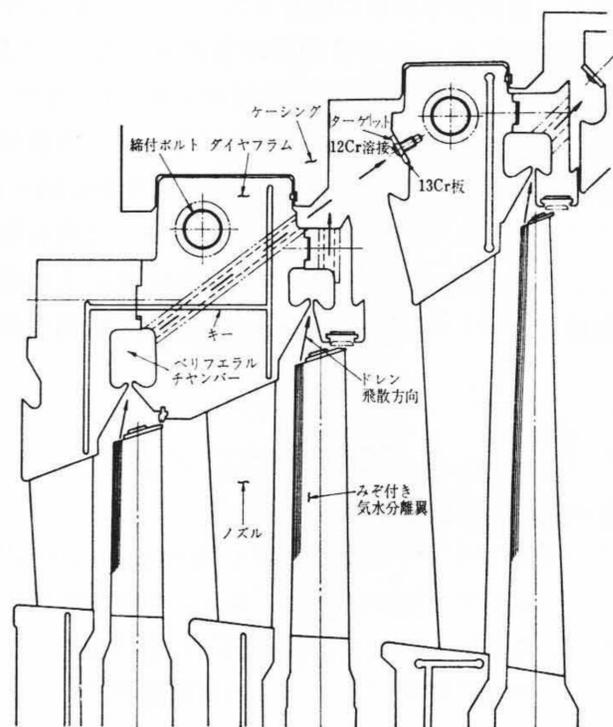


図3 溝付翼とペリフェラルチャンバー

れ、ケーシングまたはダイアフラムに設けられた排出孔を通して高圧排気室に導かれる。図1の場合には高圧タービンが単流であるが、出力が大きくなり600 MW 級以上になると複流構造となる。

高圧初段は、図1の例ではスロットルガバニング方式が用いられている。原子力発電プラントは、従来全負荷に近い状態で常時使用されるという考えのもとにスロットルガバニング方式が採用される例が多いが、最近のものでは、部分負荷時の効率改善を図るために逐次ノズルガバニング方式を用いる傾向がある。

高圧排気を出た蒸気は、一部抽気として給水加熱器へ導かれ原子炉給水を加熱する。最近の原子力発電プラントにおいては、タービンプラントの熱サイクル効率を上げるために給水温度を高くする例があるが、この場合には高圧タービンの途中から抽気する例もある。

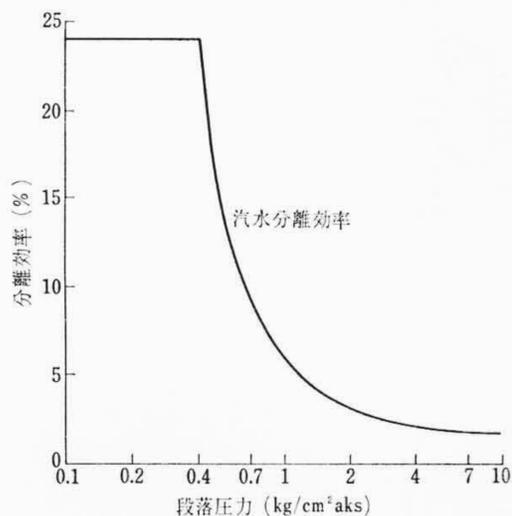


図4 溝付翼と汽水分離効率

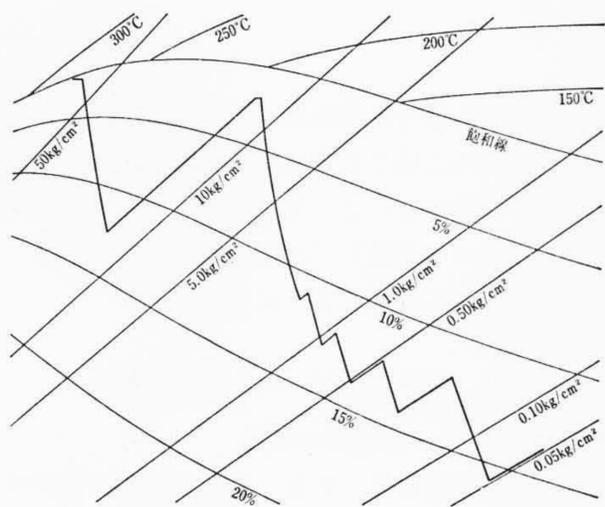


図5 500 MW 級原子力タービン I-S 線図

高圧排気から汽水分離器に導かれた蒸気は、大部分の水分を分離され約2% 湿り度の蒸気となり低圧タービンに流入する。低圧タービン内部では、みぞ付翼により膨張の途上で発生する水分を分離するため、低圧出口においても約15%の湿り度に押えられる。この様子は図5に示されている。みぞ付翼が抽気点以外の段落に設けられる場合には、分離された水滴はペリフェラルチャンバからの排出孔を通り次の抽気点または復水器に導かれる。各給水加熱器に流入するのは、湿り蒸気と水分との混合したものである。

図1において高圧タービン後側シャフトパッキン部は、スリーブが焼ばめされている。このために必然的にスラストカラーが焼ばめ構造となっている。したがって、スラストベアリングは、火力タービンに用いられているテーパランド形と異なりキングスペリー形が用いられ、焼ばめ式スラストカラーが若干傾斜して設定された場合にも自動的に当たりが調整されるよう考慮されている。焼ばめ式のパッキンスリーブまたはスラストカラーが用いられる関係上ロータ両端のカップリングも焼ばめ構造とされる。

3. 原子力タービン補機

日立製作所が最初に商業用原子力タービン補機を製作したのは、東京電力株式会社福島原子力発電所第1号機460 MW ユニットであり、このユニットは昭和46年3月より営業運転にはいつている。これについて中国電力株式会社島根原子力発電所第1号機460 MW ユニット、および中部電力株式会社浜岡原子力発電所第1号機540 MW ユニートを現在鋭意製作中である。原子力発電ユニットはさらに800 MW 級、1,100 MW 級と大形化していくが、これらのタービン補機について、火力発電用タービン補機との特徴的な相違点について述べる。

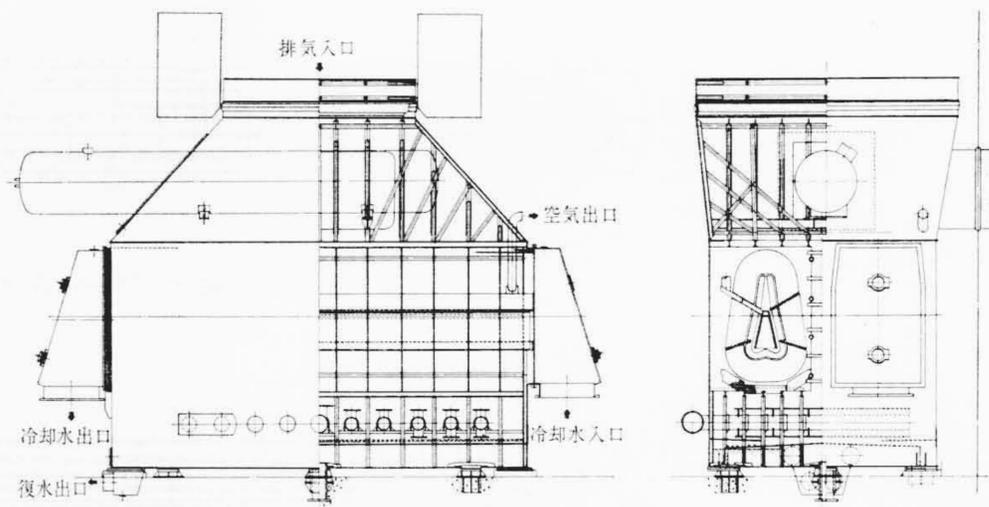


図6 復水器断面図

表4 復水器仕様

	460 MW	784 MW	1,100 MW
形式	2 胴式	3 胴式	3 胴式
真空度 (mm HgV)	722	722	722
冷却水入口温度 (°C)	19	19	19
冷却水量 (m³/h)	88,500	150,400	211,200
伝熱面積 (m²)	34,370	58,900	80,100

3.1 復水器

原子力用復水器は火力用と比較して同出力のものでも多量の蒸気を処理するため非常に大形となり、通常タービン形式により4流排気の場合2胴式、6流排気の場合3胴式を採用し、タービン軸と直角に配置されている。図6は500 MW 級2胴式復水器の断面図、表4は各出力における復水器仕様の一例である。以下復水器の特徴について述べる。

(1) 復水の再熱脱気装置

BWR においては脱気器は別置されないで復水器において復水中の酸素含有量を0.005/l以下に保持するよう計画されており、次のような構造上の考慮がはらわれている。

- (a) 冷却管配列においては、不凝縮気体が局部に停滞することを避け、かつ落下する復水に対向流となる蒸気の流れを与え復水を飽和温度まで再熱し脱気を効果的にしている。
- (b) 冷却管群の下部に脱気トレイを設置し、復水と蒸気を接触させさらに再熱脱気を図っている。
- (c) 補給水およびドレンなど酸素を含んだ流入水に対しては、スプレイパイプにて蒸気中に噴射し加熱脱気効果を高めている。
- (d) 負荷の低下、補給水の増大などにより脱気性能が低下した場合には、補助蒸気を器内に導入し復水の再熱脱気を図っている。

(2) バイパスダンプ

復水器には、タービンの起動時および異常時における主蒸気バイパス、クロスオーバー管の異常圧力上昇時における逃しバイパス蒸気、および給水加熱器ドレン水位上昇時における逃しドレンが流入してくるが、これらは従来の貫流ボイラプラントに比べてダンプ管の数が多く、冷却管群の下に導入している。ダンプ管には多数の穴が上下にあけられており、蒸気およびドレンの噴射方向には噴射流体のエネルギーを減ずるため強固な衝撃板を取り付けている。

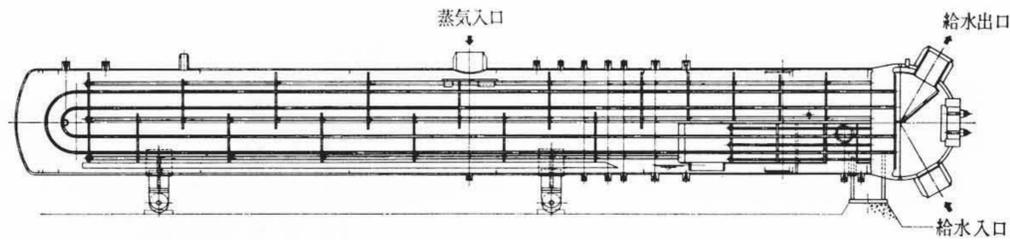


図7 高圧給水加熱器断面図

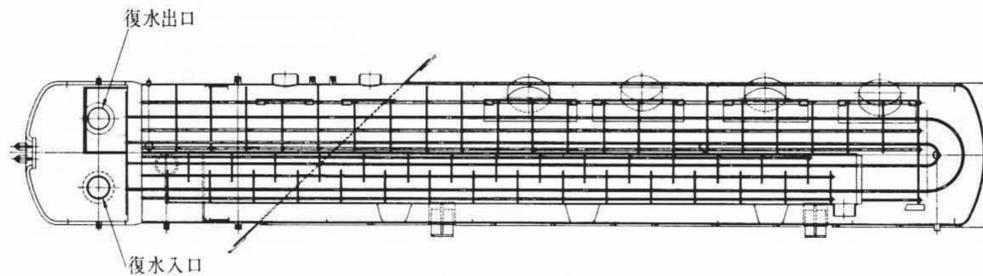


図8 低圧給水加熱器断面図

(3) スプレーカーテン

バイパス運転時における蒸気および熱水によって、タービンの低圧ケーシングが加熱されることのないように連結胴内に復水を噴射して冷却し温度の上昇を押えている。

(4) 放射能減衰装置

復水の放射能を減衰させるために、ホットウェルは仕切板により、ジグザグに仕切られている。この通路により、復水は一定時間器内で停滞し、減衰されたあと復水ポンプにより器外に排水されるようになっている。

3.2 空気抽出器

BWRにおいては、従来の火力と同じような真空部における漏えい空気のほかに、原子炉内において分解した水素および酸素をも処理することになるので、火力に比べて非常に大形となる。構造上は火力と異なる部分はないが、運転中近寄ることができないので、駆動蒸気弁および仕切弁を電動式としている。

3.3 給水加熱器

原子力プラントにおいては火力と比較して復水量が多く、大形となるので高圧給水加熱器に対しては球形水室、低圧給水加熱器に対しては球形または円筒水室を採用している。またドレン量も非常に多いので、通常無効加熱面積の小さい横置として計画される。図7は500 MW級高圧給水加熱器の断面図、図8は低圧給水加熱器の断面図である。BWRにおいては給水のPHコントロールは行なわれず、かつ純度の高い給水が要求されるので、加熱管材としては、耐食性のすぐれたステンレス鋼管が使用される。

3.4 復水脱塩装置

BWRにおいては給水中の溶解塩類や懸濁固物形は原子炉の燃料棒に付着し制御特性を悪くしたり、プラント系統中の放射能濃度を高くするので、復水中の制限値としては、通常全溶解物として、30 ppbぐらいに押える必要がある。このため復水脱塩装置が設置されるが、特に従来の貫流ボイラプラントに比較して、次の点が留意されて設計されている。

- (1) 常に100%復水を脱塩装置に通すものとし、予備塔を1基設ける。
- (2) 脱塩塔および再生塔は、他の機器に比較して放射能濃度が高いのでシールド内に設置される。
- (3) 脱塩塔シールド内にはプラント運転時、運転員の立入ができないので、弁、計器はシールドの外に設置される。
- (4) イオン交換樹脂再生時および移送時の廃液を最小限に抑える。

- (5) 脱塩塔は高圧設計であるが、再生塔は低圧設計であるので、高圧から低圧に通じる弁には、脱塩塔出入口電動弁が閉じていないと開かないようなインターロックをつけ、かつ弁座などのリークに対しては逃し弁またはスプリングロード弁により廃液に流れるようにする。

4. 原子力用タービン発電機

4.1 原子力用タービン発電機の特長

原子力用タービン発電機は、低温、低圧の蒸気を利用するタービンと直結されるため、1,800または1,500 rpm機すなわち4極機となることが多い。火力用2極機と原子力用4極機とは本質的に異なったものではないけれども、細部にわたれば回転数、極数の相違に起因するちがいも多く、同一仕様の2極機と比較したときの4極機の特長は下記のとおりである。

- (1) 固定子鉄心外径はごくわずかに増加するのみで外形寸法には余り差は出ない。内径は大きくなっているため総合して固定子は80%程度に軽くなる。固定子鉄心に関してはコアバックがうすくなるが、振動ノード数が増大するため共振周波数は高く、振動振幅は小さくなり、スプリングマウント方式は不要となる。
- (2) 回転子直径は約1.6倍となり、回転子重量は約2.2倍となる。また回転子の径が大きいため、危険速度は高くなり、1次危険速度は定格速度の下で2次危険速度は定格速度の上という設計が可能となり、バランスの点からも問題が少ない。
- (3) 1極当たりの励磁アンペアターンが少なく、また界磁巻線の銅量も増加できるため励磁容量は約60%に減少する。このため界磁巻線の冷却は楽になり、大容量2極機では採用しがたいラジアルフロー形直接水素冷却方式で1,000 MVA級程度でもじゅうぶん製作可能である。
- (4) 風損、界磁銅損および漂遊負荷損のうちの固定子鉄心端部損失が減少し、したがって効率が向上する。また水素ガスにより持ち去るべき熱量が2極機より少なく、また界磁巻線の冷却も楽なので、2極機より1段低い水素ガス圧で済む場合もある。
- (5) 電機子漏えいリアクタンスもダンパー漏えいリアクタンスも界磁漏えいリアクタンスも増大し、したがって次過渡リアクタンスも過渡リアクタンスも増大する。一般的には動態安定度上はほとんど差がないが、過渡安定度上は過渡リアクタンスの影響が大きいのでその都度(つど)系統条件を考慮して計算する必要がある。運転上の特性たとえば短時間過電流耐力、逆相耐力および許容電圧変動などについては2極機の場合と同様である。

以上の特長につき、500 MW級の2極機と4極機の実機にて比較したものが表5である。

また4極機の代表例の構造断面図は図9に示すとおりであるが、半径方向寸法のうち回転子の占める割合が大きいこと、固定子鉄心にスプリングバーなどが用いられていないことなどがうかがえる。

4.2 構造

4.2.1 冷却方式

固定子コイルの冷却には直接水冷却方式が採用されるが、中空導線の使用、往復流と片道流の使いわけ、水の純度保持方式、絶縁ホースそのほかの接続部の方式などは2極機と同様である。

界磁巻線については、界磁銅損が2極機に比較して、約60%に減少するために、ラジアルフロー形直接冷却方式が採用される。図10に示すような断面構造であり、サブスロットを通過して軸方向に進んだ水素ガスはスロットアーマ、サブスロットカバーの通風孔を通りコンダクタ中の中空孔を半径方向に走ってクリページブロックおよびウェッジの通風孔を経由して空げきに排出されるものである。各種界磁巻線の冷却能力を示したのが図11である。

4.2.2 固定子

2極機の場合には固定子鉄心の電磁振動は4節振動であり振幅も数十～百マイクロン程度に達するために、鉄心の固有振動数を定

格周波数の2倍から離し、かつ水平方向または垂直方向のスプリングバーを用いて鉄心とステータフレームと振動絶縁する方式がとられている。4極機の場合には8節振動となるため、コアバックがうすいにもかかわらず、固有振動数が約2.6倍にもなり、振幅は約21%と小さいため、振動絶縁構造は採用されず、鉄心は直接ステータフレームに取り付けられる。

電機子コイルの電磁力対策は、スロット内およびコイルエンド部とも2極機とほぼ同様の構造が採用される。

4.2.3 回転子

ロータシャフト材およびリテイニングリング材はタービン発電機の材料のうちで最も重要なものに属するが表5にても示したように径が大きく重量も重いものとなる。これらの鍛造設備について

表5 500 MW級実機における2極機、4極機比較

		2 極 機	4 極 機
仕 様	容 量 (kVA)	625,000	626,000
	力 率	0.85	0.9
	水 素 圧 (PSIG)	60	45
	回 転 数 (rpm)	3,600	1,800
冷 却	冷却方式	ステータ ロータ	直接水冷却 ダイアゴナルフロー式
	冷却方式	ステータ ロータ	直接水冷却 ラジアルフロー式
寸 法	フ レ ーム 外 径	100%	97%
	鉄 心 外 径	100%	110%
	空 げ き 長	100%	70%
	ロ ー タ 外 径	100%	160%
	ロ ー タ ボ デ ー 長	100%	98%
	ベ ア リ ン グ ス パ ン	100%	98%
重 量	ス テ ー タ	100%	80%
	ロ ー タ	100%	225%
	全 重 量	100%	102%
損 失	全 損 失	100%	83%
	水素冷却器で冷却する損失	100%	65%
	水冷却器で冷却する損失	100%	100%
リ タ ア ン ク ス	過渡リアクタンス x_d'	100%	125%
	次過渡リアクタンス x_d''	100%	110%
	開路時定数 T_{d0}'	100%	110%
	GD^2	100%	560%
励 磁	励磁アンペアターン	100%	63%
	励磁機容量	100%	50%

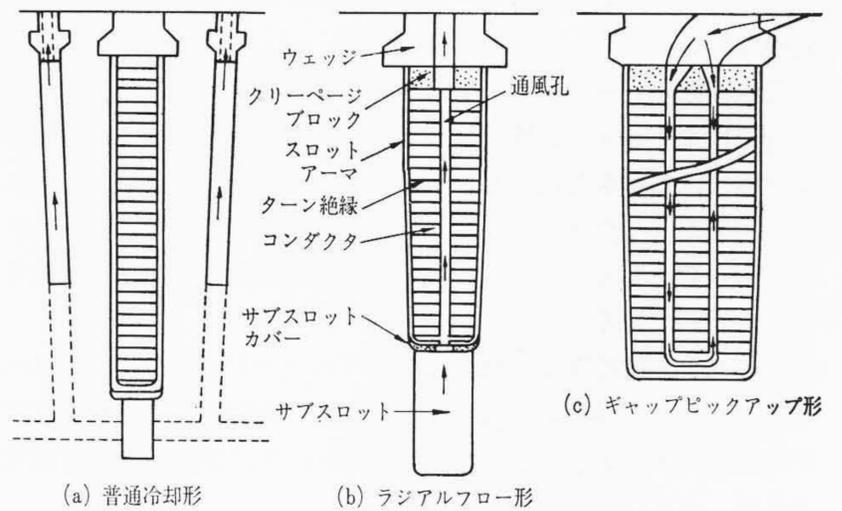


図10 回転子冷却方式比較

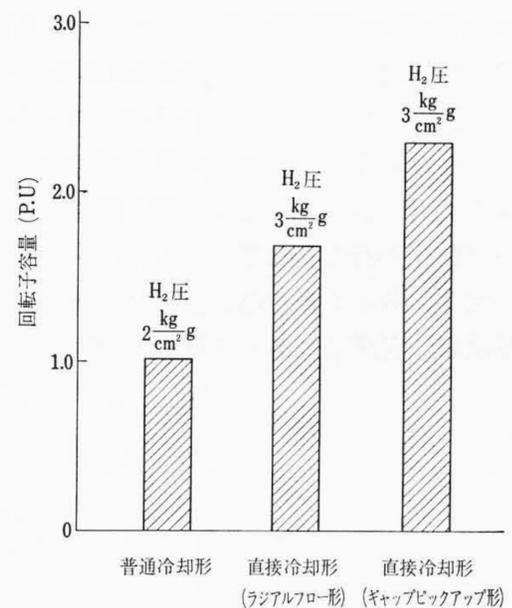


図11 各種冷却能力比較

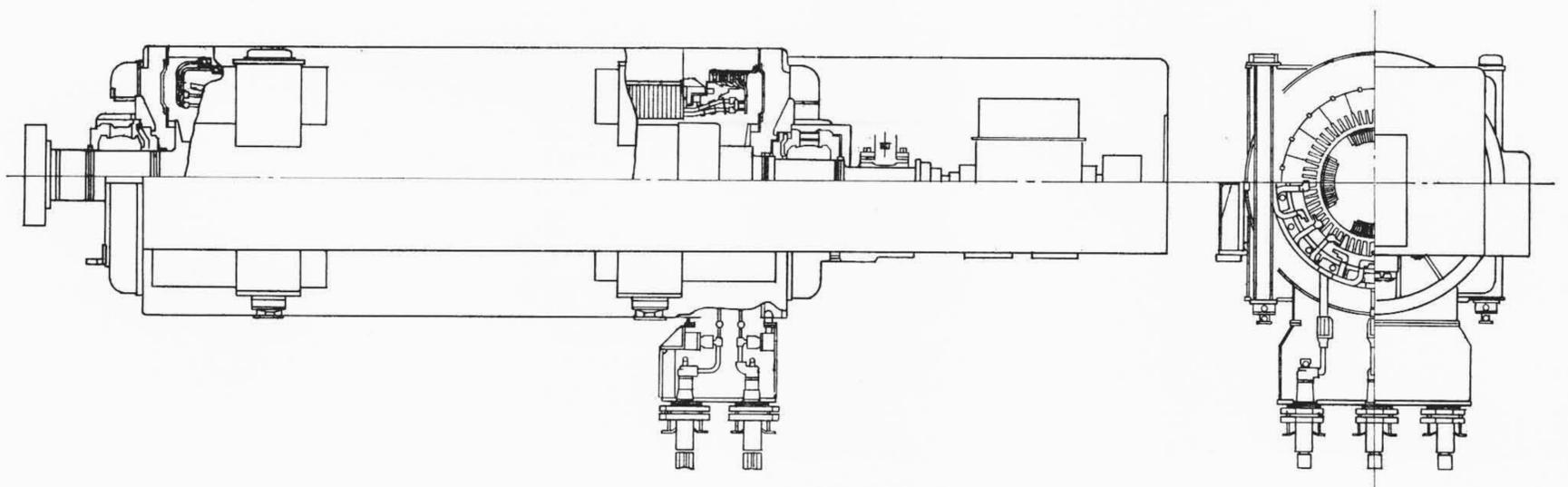


図9 4極タービン発電機構造断面図

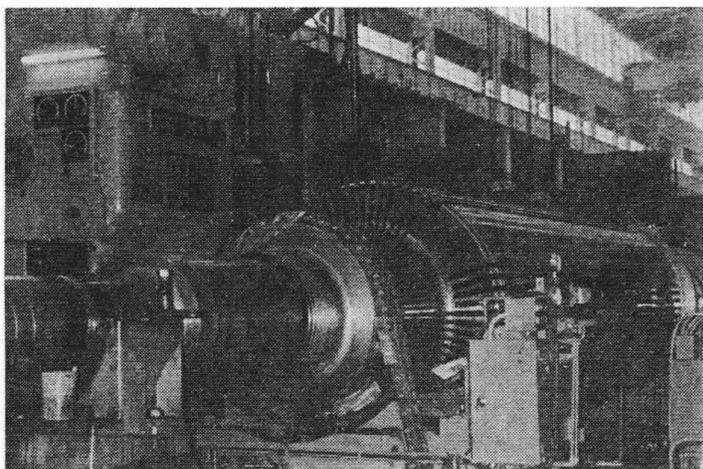


図12 機械加工中の4極回転子

は現在計画中の原子力用タービン発電機においては問題なく製作可能である。

高速回転のロータにおいては、極心軸と極間軸とのおのおのの断面二次モーメントが異なれば、いわゆる倍周波振動が生ずる。2極機ではこれを防止するため磁極部分にクロススロットを切って、両者がつり合うように設計されている。4極機ではロータスロットの数を多く、クロススロットを切らなくとも剛性を一致させることができる。

冷却ファンは効率の観点からラジアルファンが広く用いられる。4極機では風量が少なく回転数も低いというところから比較回転度が1,000以下となるため効率の良いラジアルファンが採用される。

図12は機械加工中の4極回転子である。

4.2.4 軸 受

4極機においてはロータ重量が重いため、軸受も当然大きいものとなり、2極機と比較すると軸受径は約1.4倍、軸受長さは約1.6倍、一方低速なるため軸周速は約0.7倍となるが、寸法の関係より軸受摩擦損失は約1.3倍となる。直径が大きいためオイルリフト付きにすることが多く、また2極機と同じく楕円軸受としてオイルホイップ防止が行なわれる。

軸受についても、43インチの超大径実物大モデルにおいて試作を行ない、層流域、乱流域における軸受の諸特性の解明を行なった。

密封油装置については、軸密封部の寸法、周速などは異なるが、密封油量、油圧は同容量2極機のものと同様のため、装置としては2極機のものと同様である。

4.3 運転上の特長

4.3.1 過渡、次過渡リアクタンスと運転特性

4極機では、電機子みぞ内リアクタンスの関係から電機子漏えいリアクタンスは若干増大し、また極間げきが短くなるため空げきと周方向に走る磁束が増しダンパー漏えいリアクタンスも増大し、したがって次過渡リアクタンスも増大する。さらに界磁スロットが深くなるため界磁漏えいリアクタンスも増大する。また開路時定数は空げきにたくわえられる磁気エネルギーと励磁電力との比であり、4極機のほうが励磁電力が減少するため時定数は若干増大する。

これらの定数の差異により過渡安定度については、若干悪い特性を示す。従って送電可能容量は4極機の方が過渡リアクタンスが大きいため、小さくなっている。

4.3.2 可能出力曲線

4極機では端部漏えい磁束も若干少なく、したがって発生損失も小さく、温度上昇も小さいので固定子鉄心端部の温度上昇という点からは、進相運転の問題は2極機より少ない。安定度上からは2極機とほぼ同一と考えられるため結局可能出力曲線は100%容量、95%進み力率にて運転可能である。

5. 結 言

以上述べたように、新しい技術を駆使した大容量原子力用のタービン発電機プラントについては表1に示すように現在でもかなりの製作経験を有しており、これらの経験を基に今後建設が進められる800 MW級、1,100 MW級の原子力発電プラントにおいては、信頼性の高い機器を納入できると確信している。

参 考 文 献

- (1) 桑野, 久野: 日立評論 48, 76 (昭41-6)
- (2) 桑野: 日本機械学会誌 71, No.593, 69 (昭43-8)
- (3) 二宮: 電気評論 55, No.2 (昭45-2)
- (4) 桑野, 北川: 日立評論 52, 113 (昭45-2)
- (5) 久野, 植西: 火力発電 22, 637 (昭46-6)
- (6) 西, 川村: 日立評論 52, 106 (昭45-2)