

# 原子力用タービン発電機の最近の動向

## Recent Trends of Nuclear SteamTurbine-Generator

Planned unit capacities of nuclear power plants in this country are increasing to 800 MWe - 1,100 MWe approaching the US level. Features and characteristics of steam turbine-generators for these growing nuclear power plants are discussed along with our operating experience with recently manufactured units of Hitachi.

久野勝邦\* Katsukuni Hisano  
安元昭寛\* Akihiro Yasumoto  
岡 勇蔵\* Yûzô Oka

### 1 緒 言

最近の世界的な石油危機を境として、原子力発電所建設計画が大きくクローズアップされ、出力1,100MWe級発電所の建設が続々と予定されている。我が国においても石油に代わるエネルギー源として原子力発電を積極的に開発すべきであると、昭和60年度の開発目標を6,000万kW(以上)に置いている。このような情勢においてその重要な発電部分を担っているタービン発電機の最近の動向及び運転実績について記述し関係者の参考に供すると同時に、将来の原子力発電所建設計画を考察する際の一助ともなれば筆者らの幸いとするところである。

表1は、日立製作所が従来手掛けてきた原子力タービン発電機プラントの設計、製作及び据付の経験について示したものであるが、これらをベースとして、今後建設される大容量機について、性能的にも優れ、且つ信頼性の高い機器としてゆきたいと願っている。

### 2 最近の原子力発電用蒸気タービン

蒸気タービンの構造上の特徴、タービン形式及び標準出力などについては、参考文献(1)~(9)に既に詳細にわたって述べ

られているので、本稿ではタービンの最近の動向を中心に述べたい。

#### 2.1 タービン本体

1,100MWe級原子力タービンの断面の一例は、図1に示すとおりである。高压部は500MWe級が単流であったのに比較して複流となっているため動翼、ロータの信頼性としては、500MWe級とはほぼ同程度であり、対向流であるため推力のバランスは安定している。各低压部は、従来形の低压部分を3個(6流排気)タンデム1軸に直結しており、強度信頼性の点では従来機と変わらないが、大出力を伝達する関係でジャーナル径が1,100MWe級で31in(787mm)になり、新しい経験分野となる。軸受メタルは、従来は一体形で水平面で分割されていたが、このクラスの軸受メタルは半径方向に2分割し、ライナとケーシングに分け、軸受メタル材中に残存する水素分によりバビットとの密着不良が起こることのないよう配慮されている。タービン発電機全長では70mにも達する大構造となり、軸系の安定性には細心の注意が必要である。軸受の径が31inにもなると、従来のオイルホール現象とは全く異なる不安定現象を示すことがあり、これを防止するた

表1 原子力タービン発電機プラントの製作経験 日立製作所における設計、製作、据付の経験を示す。

Table 1 Experience in Nuclear Steam Turbine-Generator Plant

| 納入先              | 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(昭和) |
|------------------|-----------|---------|----------|-----------------------|----------|
| アメリカ某社           | 650       | TC4F-43 | 1,800    | M(T-制御装置)             | 45       |
| アメリカ某社           | 543       | TC4F-38 | "        | M(T-LPセクション)          | "        |
| 東京電力(株)〔福島1号〕    | 462       | TC4F-35 | 1,500    | D, M & E(P), E(T & G) | 46       |
| アメリカ某社           | 537       | TC4F-38 | 1,800    | M(T-LPセクション)          | "        |
| パキスタン原子力委員会      | 138.6     | TC4F-23 | 3,000    | D & M(T & G)          | "        |
| アメリカ某社           | 655       | TC4F-43 | 1,800    | M(T-LPロータ)            | "        |
| アメリカ某社           | 837       | TC6F-38 | "        | "                     | 47       |
| 中国電力(株)〔島根1号〕    | 465       | TC4F-38 | "        | D, M & E(T, G & P)    | 49       |
| 中部電力(株)〔浜岡1号〕    | 540       | "       | "        | "                     | "        |
| アメリカ某社           | 883       | TC6F-38 | "        | M(T-LPロータ)            | "        |
| 東京電力(株)〔福島4号〕    | 784       | TC6F-35 | 1,500    | D, M & E(T, G & P)    | 51       |
| 日本原子力発電(株)〔東海2号〕 | 1,100     | TC6F-41 | "        | D, M & E(P), E(T & G) | "        |
| 中部電力(株)〔浜岡2号〕    | 840       | TC6F-38 | 1,800    | D, M & E(T, G & P)    | 53       |

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

\* 日立製作所日立工場

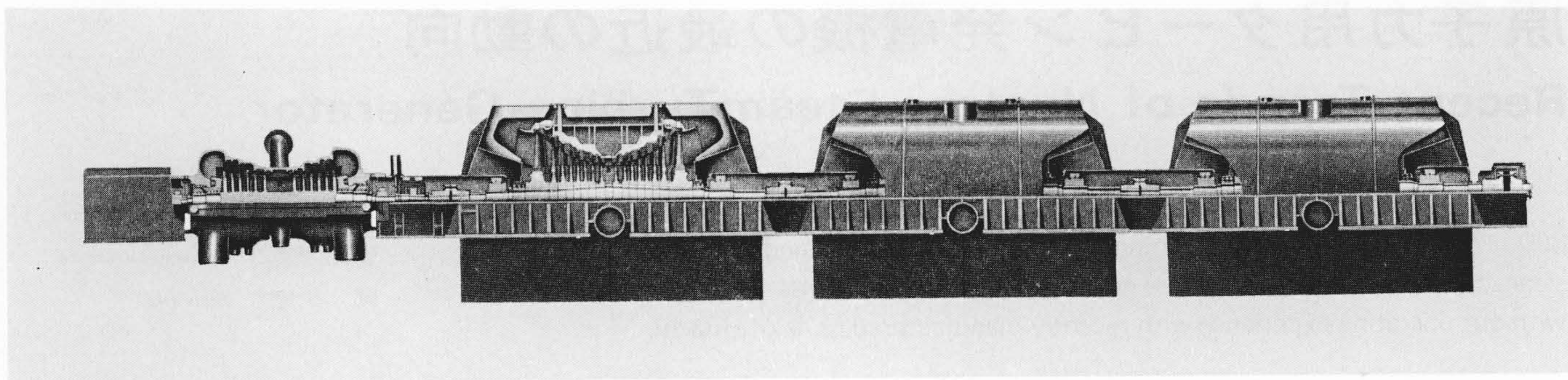


図1 1,100MWe級原子力タービン断面図 1,100MWe級の原子力タービンの代表的な断面図を示す。  
Fig. 1 1,100MWe Nuclear Steam Turbine

めには排油温度上昇、又は軸受メタルの温度上昇制限から求める必要油量よりは更に大量の潤滑油を送り込み、軸受を安定化させる必要がある。

## 2.2 汽水分離器

高压タービンと低压タービンを連結するクロスアラウンド管中には、参考文献(5)に詳述されている高压用波板式汽水分離器が用いられる。この汽水分離器は、800MWe級までは図2(a)に示すような縦形が用いられるが、更に大出力となり1,100MWe級には同図(b)に示すような横形が用いられ、構造をコンパクト化すると同時に分離性能の向上を図っている。この汽水分離器においては、図2(b)に示すように、高压タービン排気湿り蒸気は胴体の下から入り、両側に分かれて傾斜して配置された波板式分離器を通して胴体上部の出口ノズルを通り、中間阻止弁及び低压タービンに導かれる。この方式においては、スペースファクターが優れ、しかも下から上に湿り蒸気が通過する間に水分が下側に自然落下して分離される効果も期待できるため、分離性能が若干良いなどのメリットがある。

## 2.3 蒸気衛帯系統

沸騰水型原子炉と組み合わせた蒸気タービンにおいては、原子炉蒸気が衛帯系統からグランド蒸気復水器に導かれ、排出空気からの放射能を防止する目的で、分離形の衛帯系統(Separate Steam Seal System: SSSSと略す)を用いるのが最近の傾向であり、新設プラントでは蒸気タービンの高压部、低压部及び弁類、原子炉給水ポンプ用タービンなど

全面的に採用される。図3は、タービンの軸封装置の比較を示すものである。

## 2.4 再熱式プラント

我が国においては、まだその実績が少ないが、アメリカにおいては再熱式プラントが数多く、特に最近建設されるものの大部分が再熱式である。再熱式を採用することのメリットは、主に熱効率の向上にあり、図4はその数値を示すものである。一般にタービン出力は最終段翼強度で制約されるが、再熱式の場合には非再熱式に比較して約5%排気流量が減少するために同一のタービンで約7%最大出力を増加させることが可能である。再熱器の中味は、2.2に述べた縦形又は横形の汽水分離器にフィン付チューブを組み合わせた方式が用いられるが、既存技術の組み合わせであるため信頼性の点では十分である。

## 2.5 タービン用ガバナ

図5は、沸騰水型原子力タービンの主蒸気系統を示すものである。

沸騰水型原子力タービンの制御上の最大の特徴は、原子炉の圧力を一定に制御することである。これは沸騰水型原子炉が圧力に対し正の反応度を持つためである。すなわち、原子炉圧力が上昇すると炉の出力が増加し、系全体が不安定になる。この不安定性を解消するために原子炉の圧力を一定に制御する必要がある。タービン発電機の負荷にかかわらず、原子炉の圧力を一定に制御するために、図5に示すタービンバイパス系統がある。このタービンバイパス系統は、原子炉

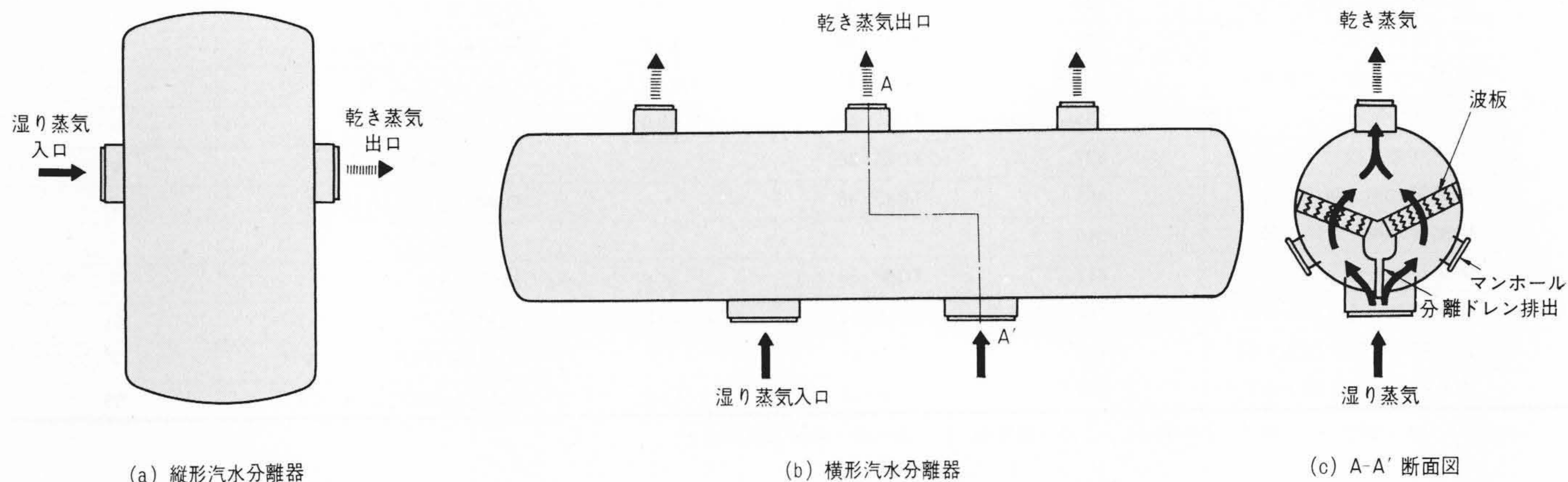


図2 高压用波板式汽水分離器 大容量機に使用する縦形及び横形の汽水分離器の構造を比較して示す。

Fig. 2 Corrugated Type Moisture Separater for High Pressure

| 項目<br>区分                               | 高圧タービン グランド部                                                   | 低圧タービン グランド部                                             | 備 考                                                      |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 新<br>方<br>式<br><br>(非放射<br>性蒸気<br>による) | <p>グランド蒸気 エバポ<br/>復水器へ レータより コンデンサへ ヒータへ</p> <p>ハイロー形パッキング</p> | <p>グランド蒸気 エバポレータ<br/>復水器へ より</p> <p>ダブルスラント形パッキング</p>    | タービン抽気により、エバ<br>ポレータで蒸発させた非放<br>射性蒸気によってグランド<br>シールを行なう。 |
| 旧<br>方<br>式                            | <p>グランド蒸気 軸封蒸気<br/>復水器へ 供給ラインへ</p> <p>ストレート形パッキング</p>          | <p>グランド蒸気 軸封蒸気<br/>復水器へ 供給ラインより</p> <p>ダブルスラント形パッキング</p> | 高圧タービンのグランドか<br>らの漏洩蒸気を低圧タービ<br>ンのグランドのシールに用<br>いる。      |

注：  
 ——— 非放射性蒸気  
 - - - 放射性蒸気  
 - - - 空 気

図3 蒸気衛帯方式比較図 蒸気衛帯方式について、新方式（SSSS）と従来方式とを比較して示す。  
 Fig. 3 Comparison of Steam Seal Packings

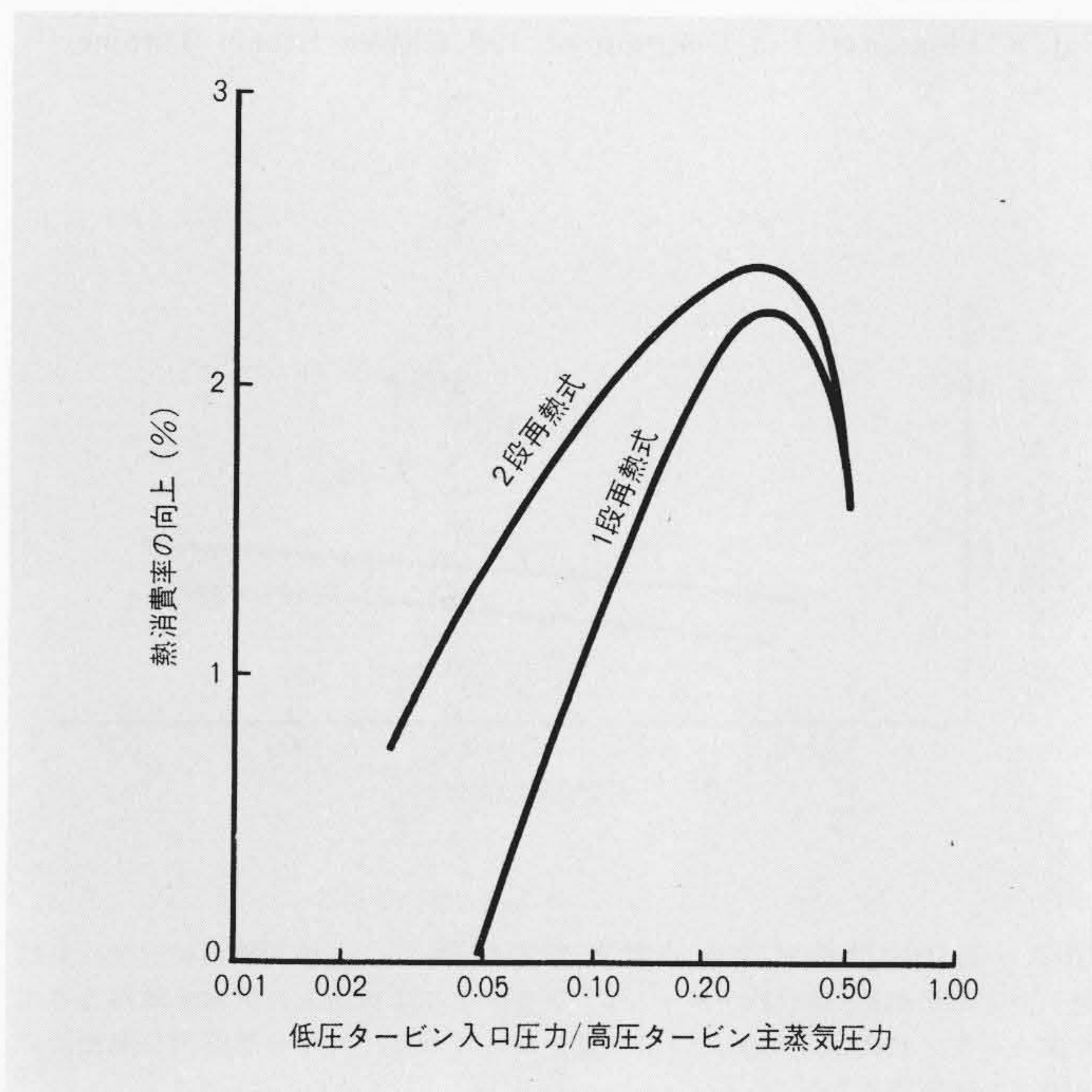


図4 再熱式プラントの熱消費率向上 参考文献(10)より算出した再熱式プラントの熱消費率向上を示す。  
 Fig. 4 Heat Rate Improvement of Reheat Type

と主蒸気止め弁の間の主蒸気管より分岐され、タービン バイパス弁及び減圧器を通して復水器に至る系統であり、主蒸気をタービンに通さず直接復水器へ流す目的で設けられている。

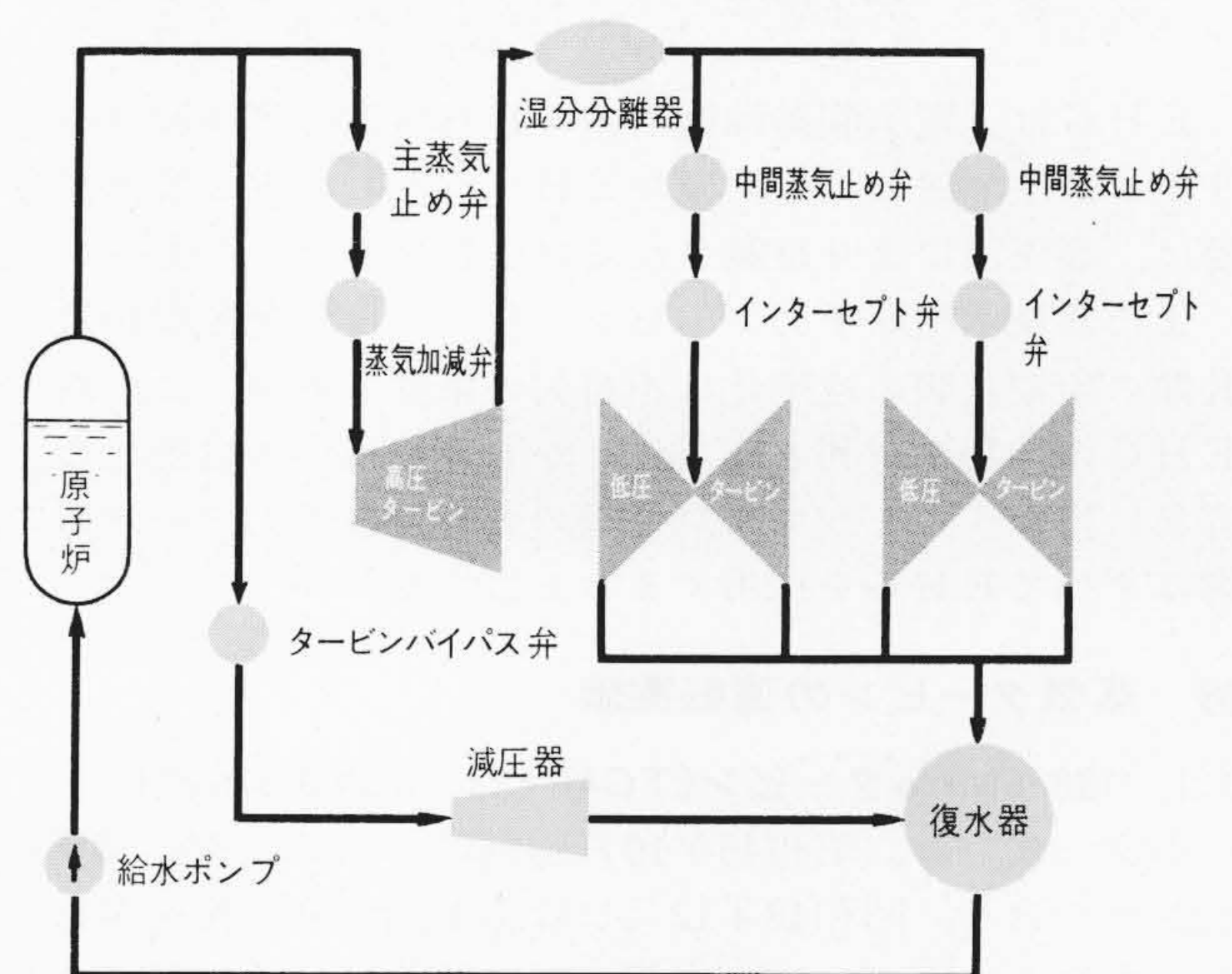


図5 BWR形原子力タービンの主蒸気系統 原子炉からの蒸気の一部は主蒸気止め弁、蒸気加減弁を通り高圧タービンで膨張したあと、湿分離器（汽水分離器）を経て、中間蒸気止め弁、インターセプト弁に至り、低圧タービンで膨張する。他方はタービンバイパス弁、減圧器を経て復水器へ流入する。  
 Fig. 5 Schematic Steam Flow Diagram of BWR Type Nuclear Steam Turbine

通常の運転中には、タービン バイパス系統はタービン バイパス弁によって閉じられているが、起動時や負荷しゃ断時など原子炉発生蒸気量がタービン通過蒸気量よりも多い場合、その余剰蒸気をタービン バイパス系統を通じて復水器に流し、

表2 原子力タービンの制御方式の比較 784MW以上の大容量原子力タービンでは、電気油圧式ガバナ(EHG)を採用している。

Table 2 Comparison of BWR Type Nuclear Steam Turbine Governing Method

| 施設者名       | 発電所名                 | 出力(MW) | 制御方式 | 運転開始(昭和) |
|------------|----------------------|--------|------|----------|
| 中国電力(株)    | 島根原子力発電所第1号機         | 465    | MHG  | 49       |
| 中部電力(株)    | 浜岡原子力発電所第1号機         | 540    | "    | "        |
| 東京電力(株)    | 福島原子力発電所第4号機         | 784    | EHG  | 51       |
| 中部電力(株)    | 浜岡原子力発電所第2号機         | 840    | "    | 52       |
| 日本原子力発電(株) | 東海第2発電所 (GE社製, 日立据付) | 1,100  | "    | "        |

原子炉の圧力が上昇するのを抑える。

圧力制御のほかに通常のタービンと同様に、起動時のタービン速度の上昇及び負荷しゃ断時などの速度上昇率の抑制を行なうため、タービン速度制御も必要となる。

以上述べたように沸騰水型原子力タービンの制御は、入力信号として主蒸気圧力とタービン速度及び出力信号として蒸気加減弁開度とタービンバイパス弁開度があり、これらを組み合わせて制御を行なっている。

また単機出力の増加に伴い、ロータの慣性が増大し、全負荷しゃ断時の瞬時最大速度上昇率が高くなりがちであるが、これを低く抑えるために応答の良い制御を行なう必要がある。

従って、大容量原子力タービンでは複雑な制御と応答の良い制御を要求されるため、従来の機械油圧式ガバナ (MHG と略す) に代わり制御性の良い電子油圧式ガバナ (以下、EHG と略す) を採用している。

表2は、日立製作所で製作及び設計中、又は据付中の沸騰水型原子力タービンの出力と制御方式を示すものであるが、784MWe以上の大容量原子力タービンにはEHGを用いている。

EHGは、電気制御回路であるEHG盤、高圧制御油を送り出す高圧油圧ユニット及びEHG盤からの電気制御信号を受け、高圧油により駆動される弁駆動装置とから成っている。

また沸騰水型原子力タービンにおいては、運転操作及び主弁類の定期試験の遠隔化は不可欠の条件であり、この点でもEHGの採用が有利となる。しかも運転操作の自動化なども容易に行なうことができ、今後の大容量原子力タービンの制御はすべてEHGを採用することになる。

3 蒸気タービンの運転実績

3.1 138.6MWeタービン(TC4F-23 3,000rpm機)

本タービンは、昭和46年10月運転に入って以来好調裏に運転されており、昭和48年12月には第1回定期点検を実施したが、懸念されたタービン内部の侵食現象は全く発見されず当初の材料選択が正しかったことを立証した(参考文献(2) 参照)。また性能試験においては、タービン内部の膨張曲線を調査するため、各種精密測定を実施したが、図6に示すように測定精度の範囲内ではほぼ計画上のエンタルピーエントロピ(i-s)線図と良く一致していることが確認された。更に低圧用波板式汽水分離器の性能も所期の計画値以上の実測値が確認された。

3.2 460MWeタービン(TC4F-38 1,800rpm機)

本機は、中国電力株式会社島根原子力発電所1号機用タービンとして、昭和49年3月以来順調に運転されている。運転状況は振動値も小さく極めて順調である。タービンプラントの

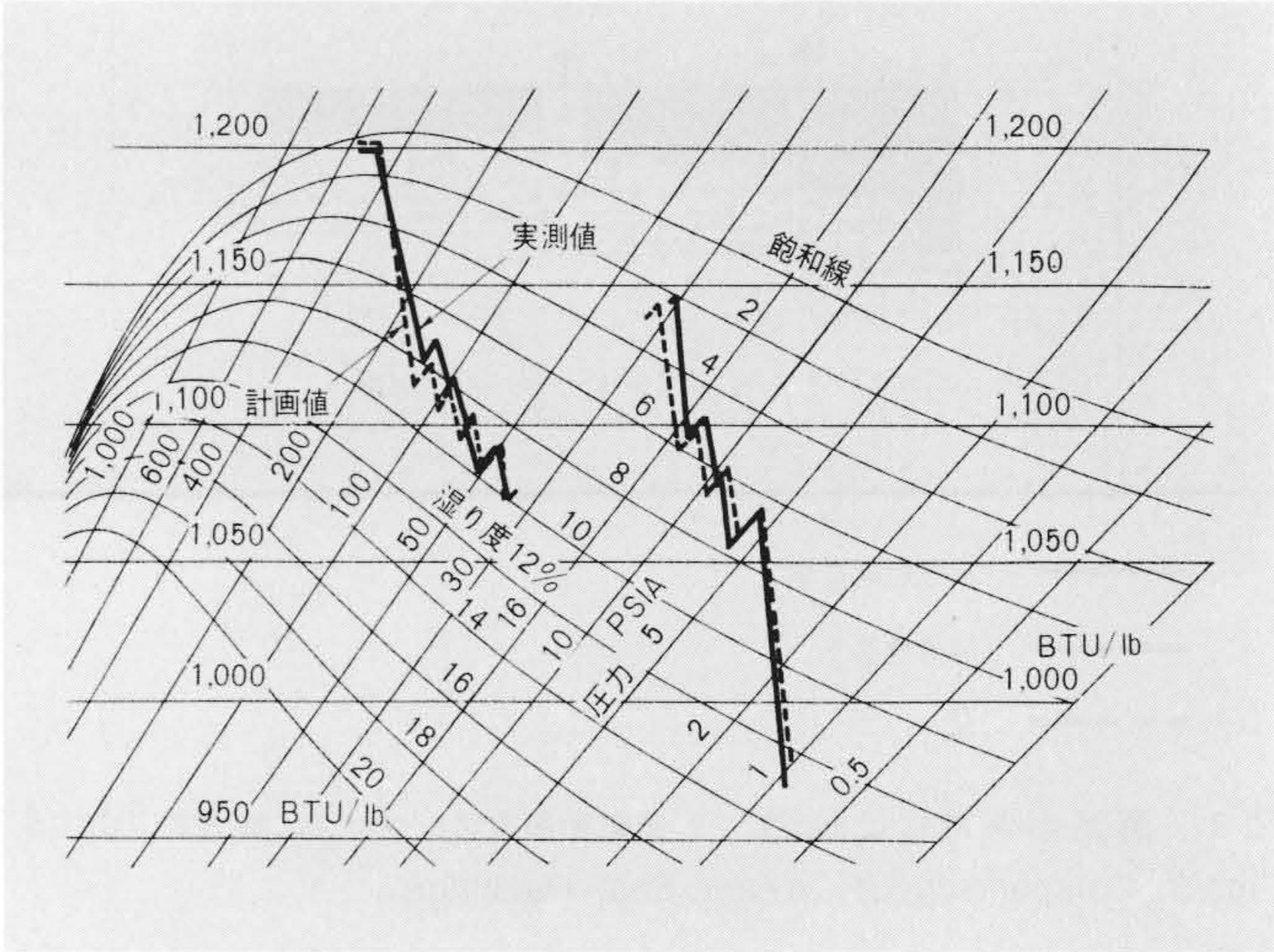


図6 138.6MWeタービン実測i-s線図 138.6MWeタービンにおいて各種測定装置を使用して求めたi-s線図を計画値と比較して示す。  
Fig. 6 Measured i-s Diagram of 138.6 MWe Steam Turbine

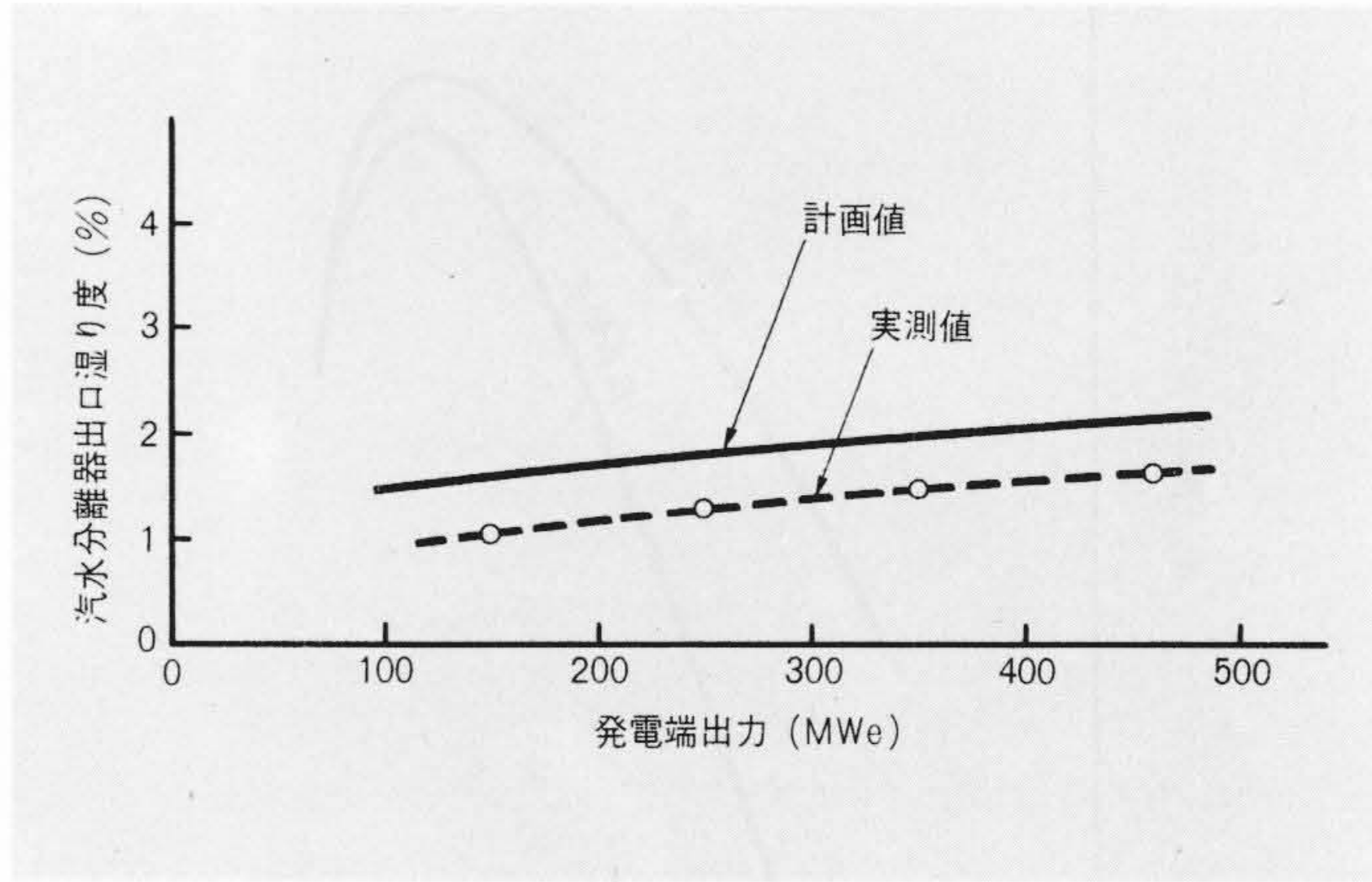


図7 高圧用波板式汽水分離器実測結果 中国電力株式会社島根原子力発電所納め 465MWeタービン プラントにて実測した汽水分離器出口湿り度を示す。計画以下の少ない湿り度となっており、汽水分離器の分離性能の良好さが確認された。  
Fig. 7 Measured Data of Corrugated Type Moisture Separator of Steam Turbine

性能は測定精度の範囲内で計画値と良く一致しており、また高圧用波板式汽水分離器の性能も、図7に示すようにすべての負荷範囲にわたり所期の分離効果の得られていることが確認されている。

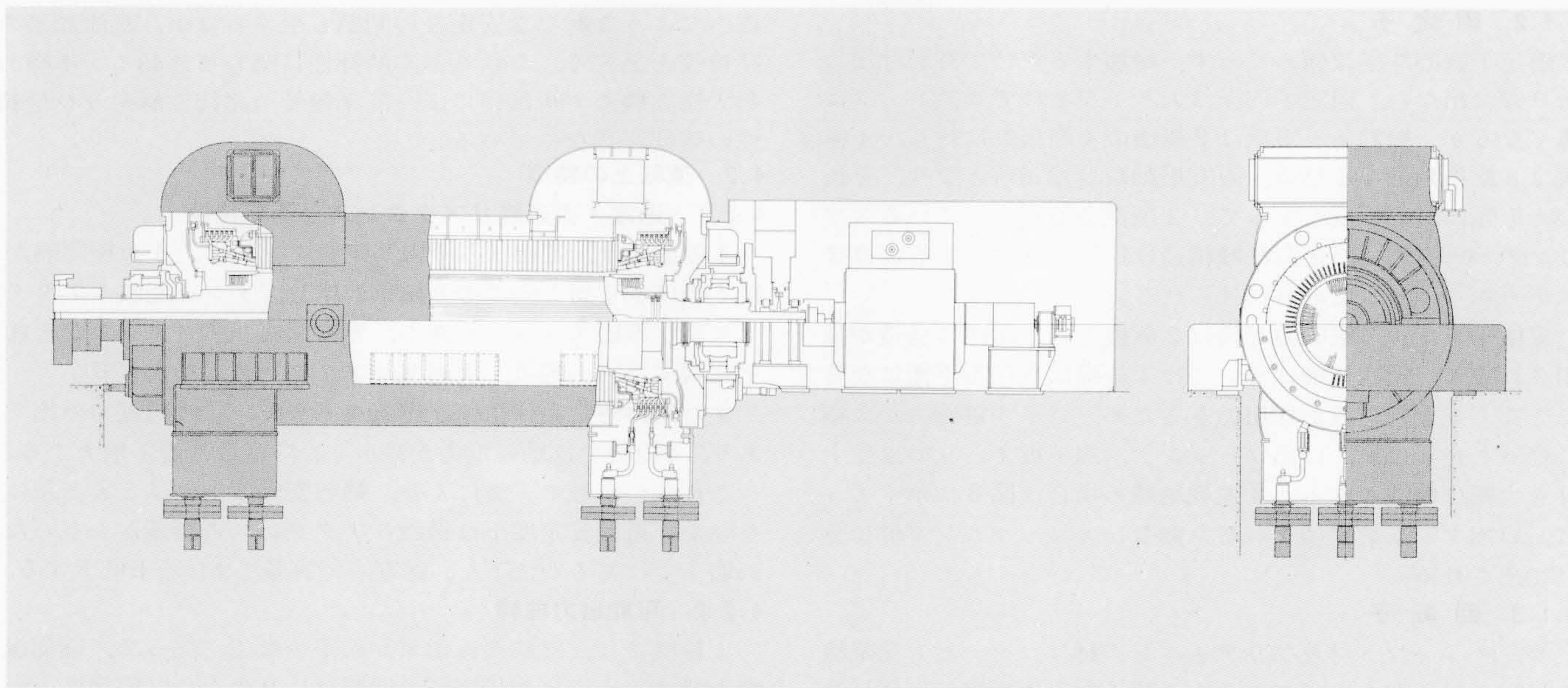


図8 4極タービン発電機断面構造図 4極タービン発電機の構造断面の一例を示す。2極機に比べロータ径が大形化しているのに対し、ステータコアが薄いなどの特徴がある。

Fig. 8 Cross Section View of 4 Pole Turbine Generator

#### 4 原子力用タービン発電機

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、1,800rpm又は1,500rpm、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極機とは本質的な相違はないが、細部にわたれば回転数、極数の違いによる構造、特性の相違がみられる。

##### 4.1 構造上の特徴

4極機の代表例の断面構造図は図8に示すとおりである。

##### 4.1.1 冷却方式

固定子コイルの冷却は直接水冷却方式が用いられるが、中空、中実素線を混用して漂遊損を減少させる混合素線の採用往復流と片道流の使い分け、水の純度保持方式及び絶縁ホー

スほかの接続部の方式などは2極機と同一である。

界磁巻線は、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、励磁容量及び界磁銅損が2極機に比べ60%に減少する。このため冷却は容易となり、大容量2極機では採用しにくいラジアルフロー直接水素冷却方式で1,300MVA級程度まで冷却できる。ラジアルフロー方式は図9に示すような断面構造であり、サブスロットを軸方向に進んだ水素ガスはコンダクタの中空孔を半径方向に走って空げきに排出されるものである。

損失のうち風損、界磁銅損及び漂遊負荷損（固定子端部損失が減少するため）が減少し、効率が向上するとともに、水素ガスによる冷却が容易となるため、2極機より一段低い水素ガス圧で済む場合もある。

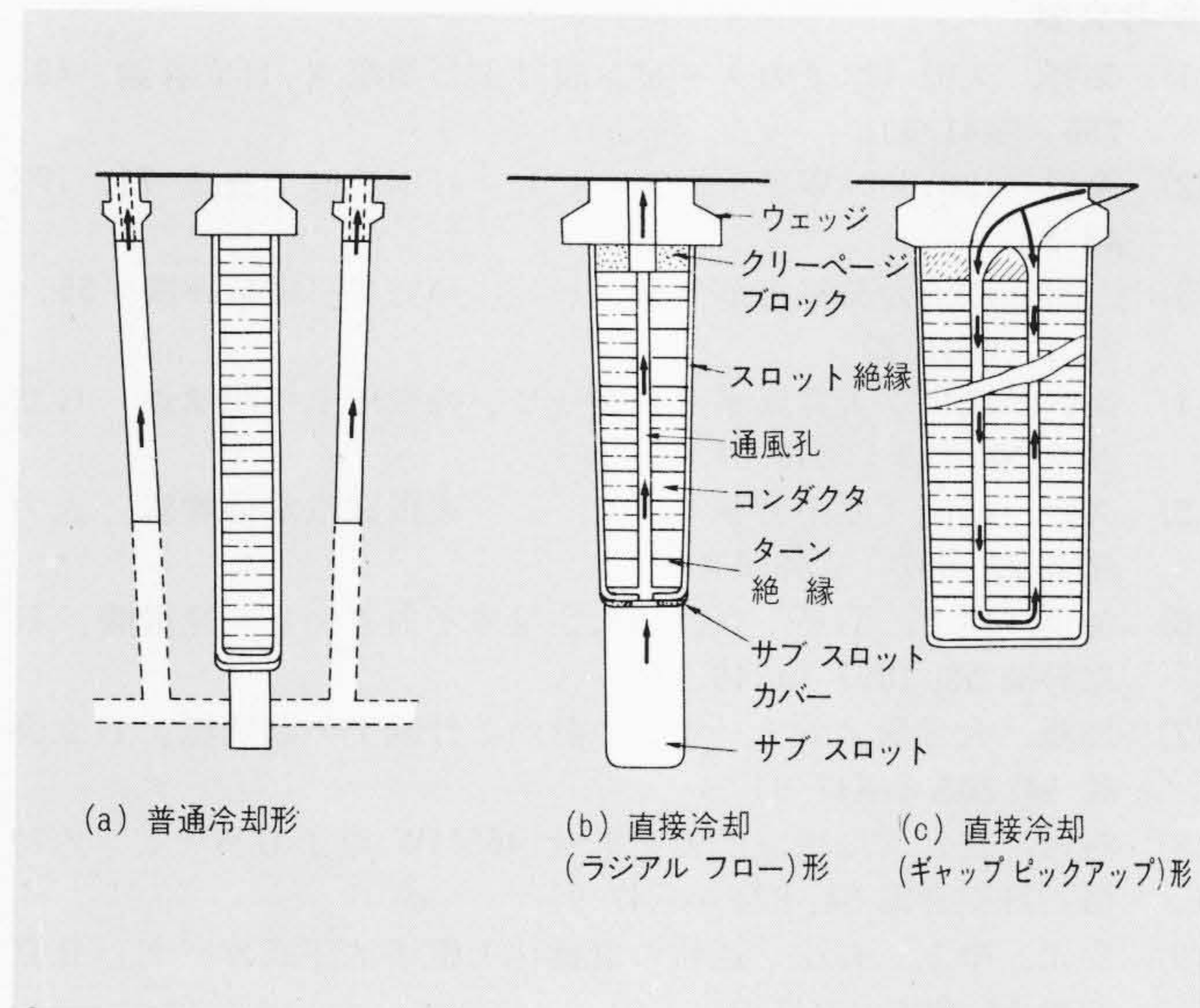


図9 回転子冷却方式比較 回転子の冷却方式は図示の3種に大別され、4極機ではラジアルフローが用いられる。

Fig. 9 Comparison of Rotor Cooling Methods

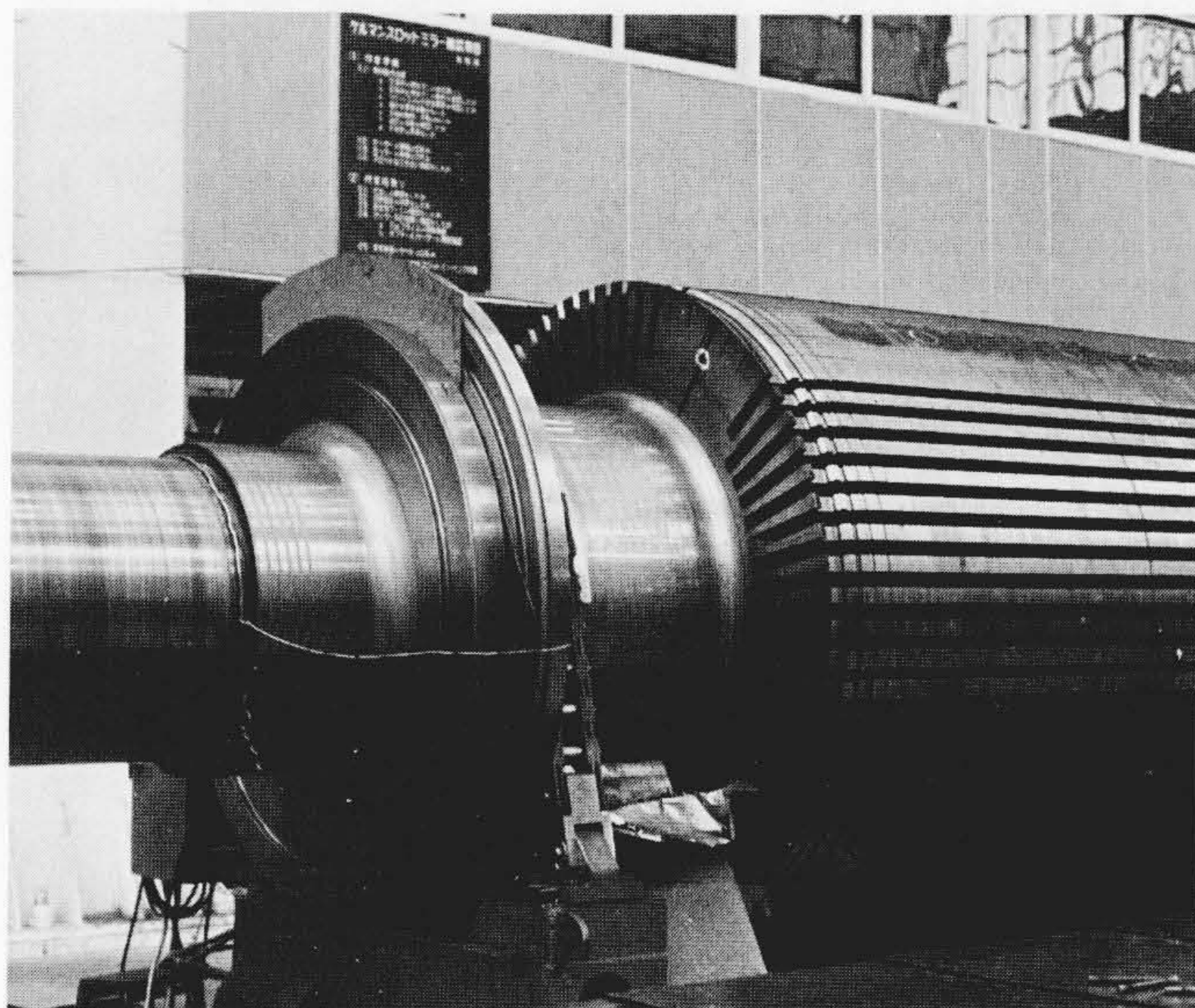


図10 4極タービン発電機の回転子 4極機ではスロットの数が多く、磁極部のクロススロットなしで極心軸、極間軸の剛性が一致する。

Fig. 10 Rotor of 4 Pole Turbine Generator

#### 4.1.2 固定子

固定子鉄心外径は極めてわずかに増加するだけで外形寸法に余り差は出ない。固定子内径は大きくなるのでコアバックは薄くなるが、振動ノード数は2極機の4節振動に対し、4極機は8節振動となるため、固有振動数は2.6倍となり、それゆえ振幅は21%程度となって、2極機で使用されているスプリングバーを用いた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2極機とほぼ同様の構造が採用されるが、大容量機については4極機は電圧不平衡になることなく4並列結線が採用できるため、コイル電磁力が大幅に軽減されるほか、口出ブッシング、端子板まわりの温度上昇も大幅に軽減される。4並列結線の場合は図8に示すように、口出ブッシングはタービン側及びスリップリング側に分けて出される。

#### 4.1.3 回転子

ロータシャフト材及びリティニング材は、タービン発電機の材料の最重要なものであるが、原子力用4極機では径は2極機の約1.6倍、重量は約2.2倍と大きくなる。これらの鍛造技術については1,300MVA級程度でも問題はなく製作可能である。

極心軸と極間軸の剛性の差による倍周波振動を防止するため、2極機では磁極部分にクロススロットを切るが、4極機ではロータスロットの数が多くクロススロットなしで剛性を一致させることができる。

回転子径が大きいため危険速度は高くなり、バランスの点から問題が少ない。

冷却ファンは回転数が低く風量も少ないところから、比較回転数が1,000rpm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10は機械加工後の4極回転子である。

#### 4.1.4 軸受

ロータの径及び重量の増大により軸受も大径化し、2.1に

述べたような新たな安定性の問題も生ずるほか、乱流潤滑の諸特性を呈する。これら基本的特性に関しては43インチ径の超大径実機モデル試作により乱流軸受の諸特性解明及び信頼性の確認を行なっている。

#### 4.2 運転上の特徴

##### 4.2.1 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が、また極間隔が短く空けきを周方向に走る磁束が増し、ダンパ漏洩リアクタンス及び界磁スロットが深く、界磁漏洩リアクタンスがそれぞれ増すため、過渡、次過渡リアクタンスが増大する。

また開路時定数は空けき磁気エネルギーと励磁電力の比であり、4極機では励磁電力が減少し、時定数は若干増大する。

これらの定数の差異により、動態安定度上はほとんど差はないが、過渡安定度上は過渡リアクタンスの影響が大きいため若干ではあるが低下し、送電可能容量もまた若干低下する。

##### 4.2.2 可能出力曲線

4極機では、端部洩れ磁束が若干少なく、従って、端部温度上昇の点からは進相運転の問題はより少ない。安定度上からは2極機とほぼ同一と考えられ、結局、可能出力曲線は2極機と同一となる。

#### 4.3 運転実績

昭和49年3月中国電力株式会社島根原子力発電所1号機が運転に入り、現在好調裏に稼動中である。本発電機の据付状況は図11に示すとおりである。本機は上述の4極機の特徴を生かして設計、製作されたもので、例えばバランス上の困難もなく、且つ振動値も低く、軸受まわりの問題も生じていない。これらは、いずれも4極機の運転上の安定性を示すものと言えるであろう。

#### 5 結 言

以上述べたように、原子力発電機器も大容量化するに従って、種々の新技術が用いられるようになるが、機器の信頼性は何にも増して重要な要素であり、従来機の実績を踏まえつつ安定性を確認しながら取り入れてゆきたいと考えている。

#### 参考文献

- (1) 糸野, 久野「原子力タービン設計上の問題点」日立評論 48, 756 (昭41-6)
- (2) 糸野「138,600kW原子力タービン」日本機械学会誌 71, (昭43-8)
- (3) 二宮「原子力発電用蒸気タービンについて」電気評論 55, 2, 1 (昭45-2)
- (4) 糸野, 北川「大容量原子力タービンの製作上の問題点」日立評論 52, 113 (昭45-2)
- (5) 久野, 植西「原子力発電用タービン波板式汽水分離器」火力発電 22, 637 (昭46-6)
- (6) 加藤, 庄山, 羽鳥, 久野「大容量原子力タービン発電機」日立評論 53, 1097 (昭46-11)
- (7) 加藤「大容量蒸気タービンの動向と計画上の諸問題」日立評論 54, 805 (昭47-9)
- (8) 西村, 安元「島根原子力発電所 465MW 原子力タービンの特徴」日立評論 54, 824 (昭47-9)
- (9) 安元, 岸上, 有江「運転の自動化と電子油圧式ガバナ」日立評論 54, 828 (昭47-9)
- (10) R. C. Spencer, J. A. Booth "Heat Rate Performance of Nuclear Steam Turbine-Generators", American Conference, Chicago, Illinois (April 23-25, 1968)

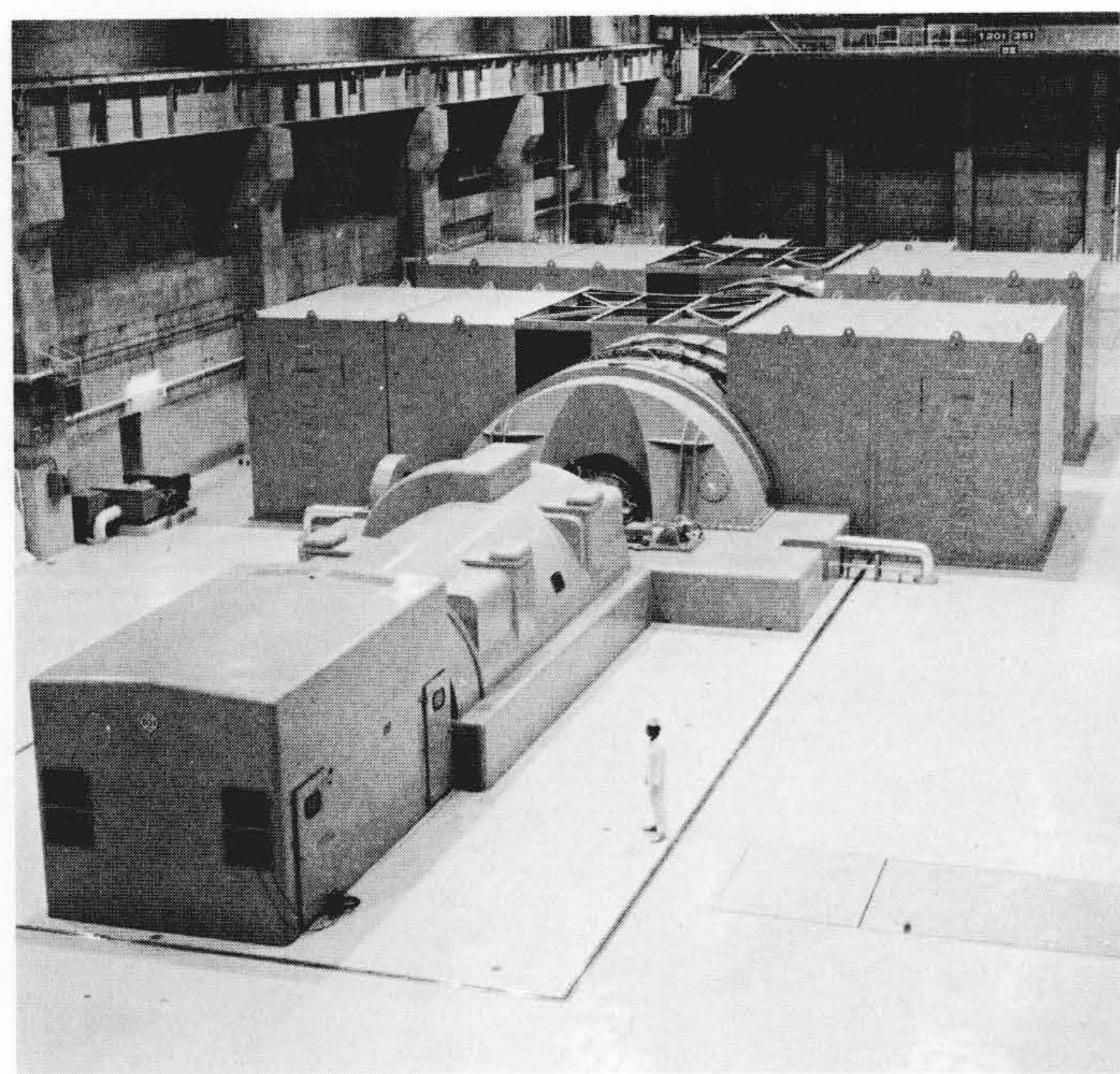


図11 原子力用4極タービン発電機 4極原子力機の発電所における据付姿を示す。

Fig. 11 4 Pole Turbine Generator for Nuclear Power