

島根原子力発電所

465MW 原子力タービンの特徴

465MW Turbine for Shimane Nuclear Power Station

This turbine was completed in June, 1972 at Hitachi Works, Hitachi, Ltd. as one of the largest nuclear turbines in Japan. Presently it is under installation at the Shimane Nuclear Power Station of Chugoku Electric Power Company. In this nuclear turbine, countermeasures for drain erosion peculiar to nuclear turbines are applied to turbine rotors, buckets, casings and diaphragms. In order to remove moisture, grooved buckets are used and moisture separators are installed. Modified 38-inch last stage buckets are used in order to allow 58.5 Hz off cycle operation.

The basic philosophy for the design of governing system containing pressure regulators and bypassing systems is explained.

西村正臣* *Masaomi Nishimura*

安元昭寛* *Akihiro Yasumoto*

1 緒 言

本機は中国電力株式会社・島根原子力発電所（図1⁽¹⁾）の第1号機として納入される国産最大容量の原子力タービンであり⁽²⁾、主蒸気条件は66.85atg, 282°C, 0.4%湿り度、排気真空722mmHg, 形式は非再熱タンデムコンパウンド4流排気、回転速度1,800rpm, 最終段に38in翼を有する465MWの原子力タービンである。表1の日立における原子力発電機プラント製作実績が示すとおり、最終段に38in長翼を有する原子力タービンについてはすでに数多くの実績を有しており^{(5)~(9)}、

本タービンはなんら問題なく工場試験を完了し、現地にて鋭意据付中である。図2は465MW原子力タービンの断面図を示したものである。

本原子力タービンの構造上の特徴は、

- (1) 低圧ロータはディスクを焼ばめ構造とし、動翼先端にみぞを設け、湿分を除去する構造としている。
- (2) 最終段翼は低サイクル運転を可能とするため改良された38in翼を使用し、58.5~60.5Hzのオフサイクル運転を可能

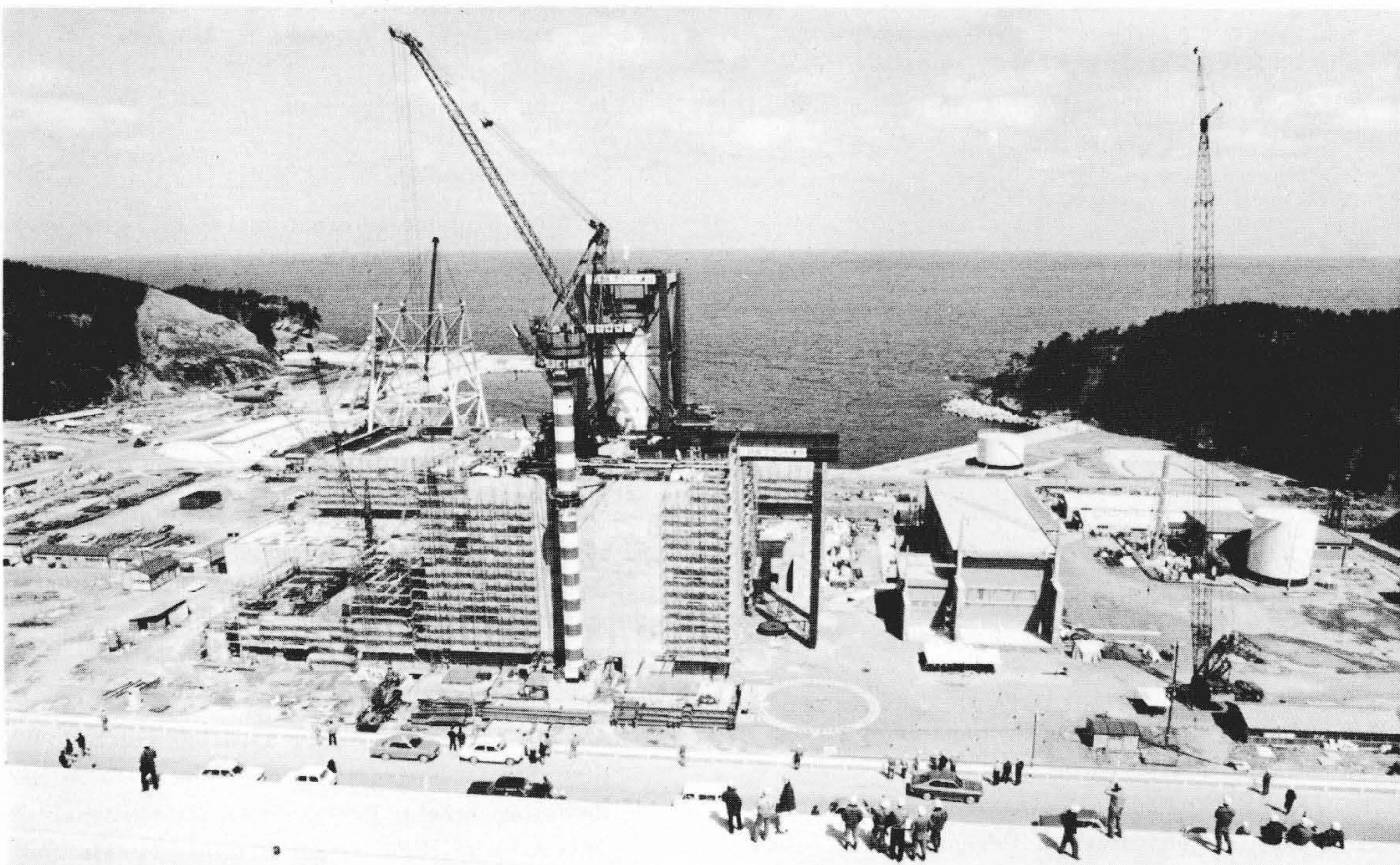


図1 島根原子力発電所現地全景 昭和47年3月建設時撮影
Fig. 1 Site View of Shimane Nuclear Power Station

* 日立製作所日立工場

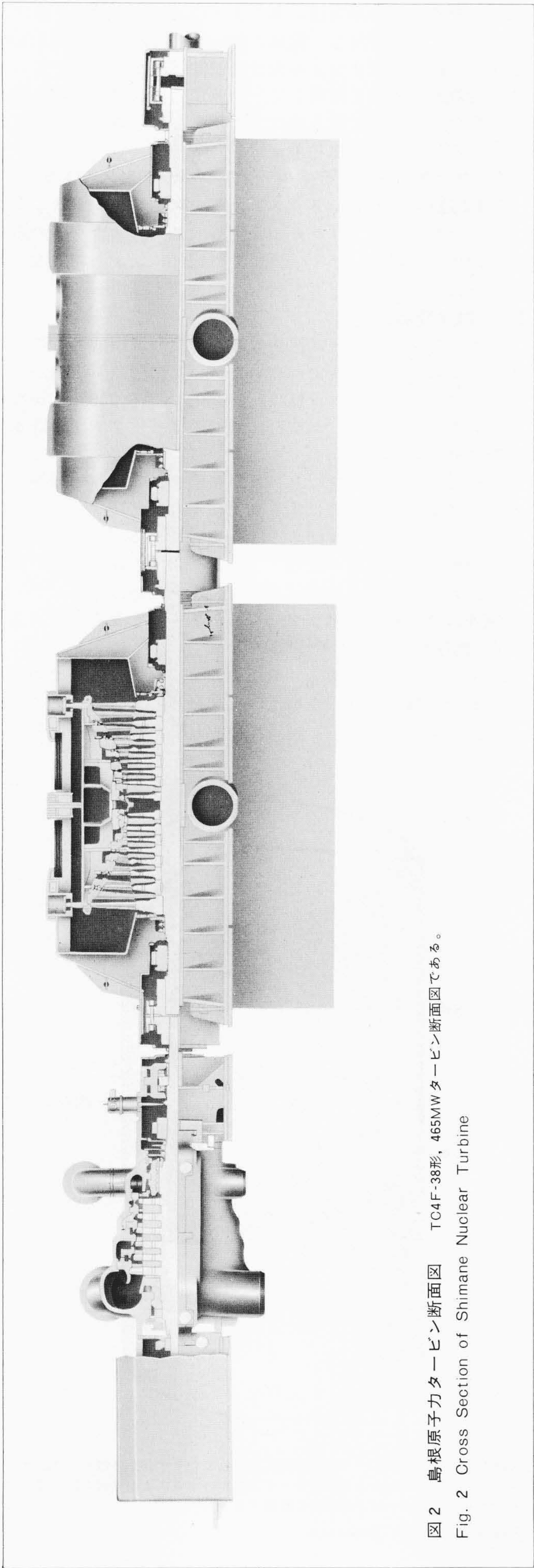


図 2 島根原子力タービン断面図 TC4F-38形, 465MWタービン断面図である。
Fig. 2 Cross Section of Shimane Nuclear Turbine

表 1 原子力用タービン発電機プラントの製作実績

日立にて製作したものおよび現在製作中のものを示す。

Table 1 Hitachi's Experience List of Nuclear Turbines Generators Plants

納 (敬 称 略)	入 先	発電機出力 (MW)	タービン形式	回転数 (rpm)	運 転 開 始
G	E 社	650	TC4F-43	1,800	1970
G	E 社	543	TC4F-38	1,800	1970
東京電力(株)福島1号		462	TC4F-35	1,500	1971
G	E 社	537	TC4F-38	1,800	1971
パキスタン原子力委員会		138.6	TC4F-23	3,000	1971
G	E 社	655	TC4F-43	1,800	1971
G	E 社	837	TC6F-38	1,800	1972
中国電力(株)島根		465	TC4F-38	1,800	1973
中部電力(株)浜岡		540	TC4F-38	1,800	1974
G	E 社	883	TC6F-38	1,800	1974
東京電力(株)福島4号		784	TC6F-35	1,500	1976

- としている。
- (3) スラスト軸受にキングスベリーティルティングパッド軸受を採用している。
 - (4) 高低圧連絡管途中に 4 個の汽水分離装置を有している。
 - (5) 蒸気シール面および水平継手面には12Crステンレスを肉盛るなどの浸食防止を行なっている。
 - (6) 高圧ケーシングおよび主要弁類本体には浸食防止のためCu入り鋳鋼を、汽水分離器本体などにはCu入り鋼板を使用している。

2 タービン構造上の特徴

2.1 タービンロータ

ロータは 1 個の一体削り出し高圧ロータと 2 個の焼ばめ式低圧ロータにより構成されている。

高圧ロータ：耐浸食性の高い材質を使用しているが、蒸気入口側のHi-Lowシャフトパッキン部は特にステンレス鋼製の交換可能なパッキンスリーブを焼ばめすることにより、シャフトが侵食されることを防止している。他のパッキン部はすべてストレートパッキンとし、侵食による被害を最小限にとどめている。また、上記パッキンスリーブ焼ばめする必要から、スラストカラーおよび低圧側カップリングは焼ばめ構造となっている。

低圧ロータ：シャフトとディスクは別々の素材より削り出され、ディスクは翼を植え込んだ状態で、静的バランスを入念に行なったのち、シャフトに焼ばめされる。焼ばめに際しては、材質に変異を生じないように、温度制御された電気炉で平均に加熱されたディスクを無理なくシャフトに直角に焼ばめするよう、厳密な品質管理のもとに行なう。ディスクとシャフトのトルクの伝達は、焼ばめ応力とアキシャルキーにより行なう。低圧ロータ前後のシャフトパッキンは、スラントタイプとなっているが、シャフトが侵食されることのないよう、高圧タービンと同様に、ステンレス鋼製の交換可能なパッキンスリーブが焼きばめられている。ロータ前後のカップリングは、焼ばめの構造となっている。焼ばめカップリングは、一体削り出し構造のカップリングと同等の堅牢（けんろう）さを持っている。

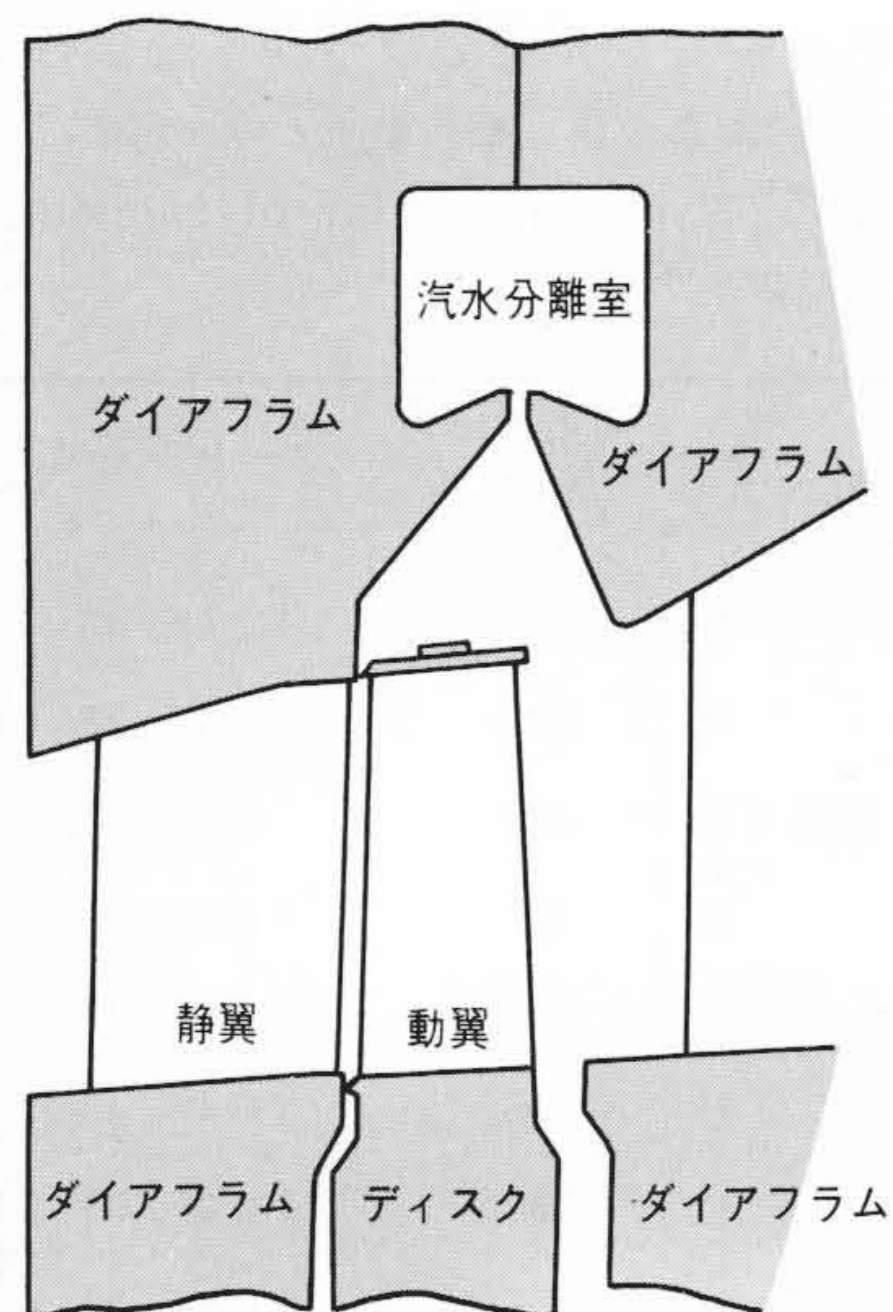


図3(a) 汽水分離ダイアフラム 動翼の回転によりはね飛ばされた水分を汽水分離室に導き、湿分を除去するもの。

Fig. 3(a) Peripheral Chamber in Diaphragm

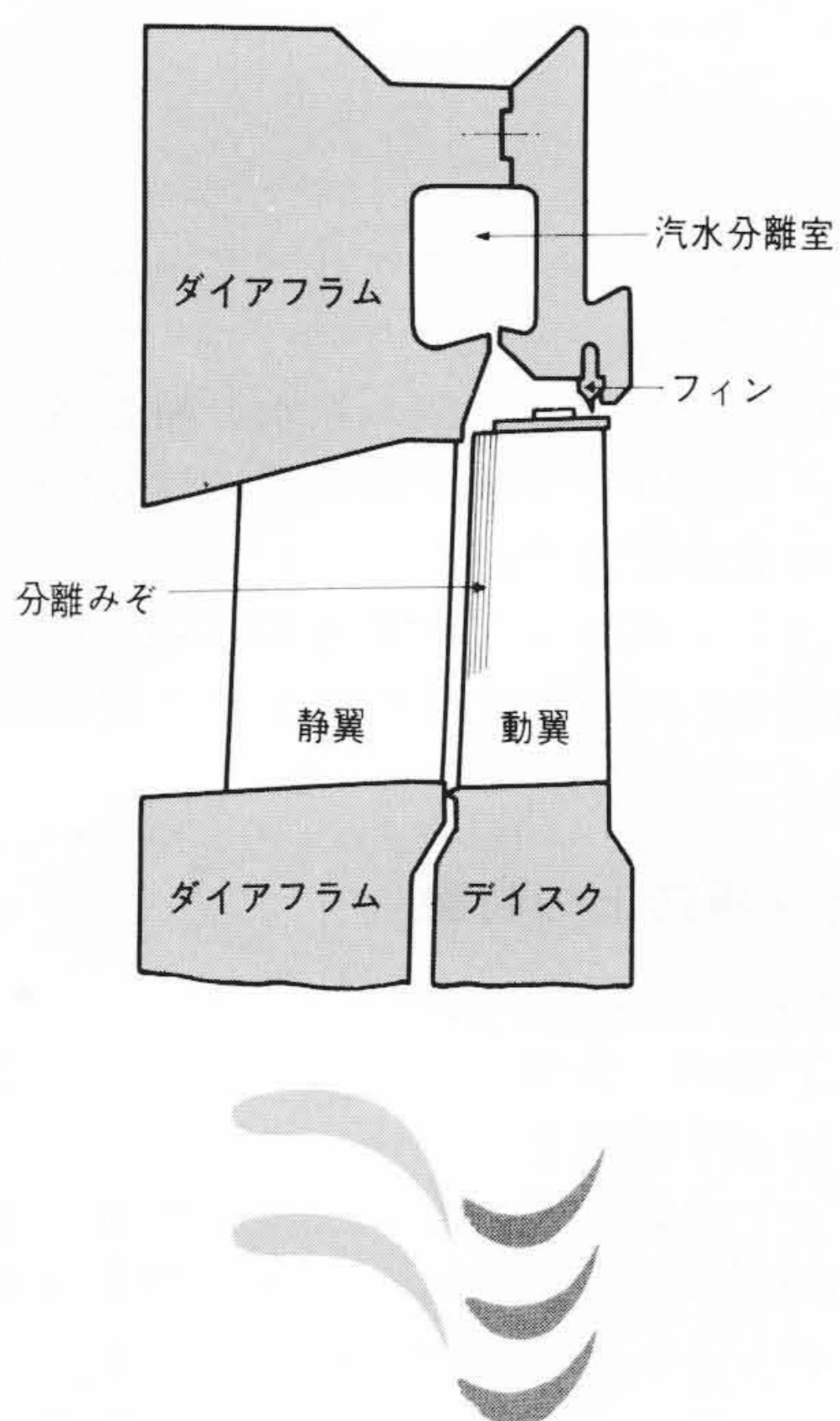


図3(b) みぞ付汽水分離翼 湿り度の高い低圧段落に使用されており、動翼入口端にみぞを設け、そのみぞに沿って湿分を分離するもの。

Fig. 3(b) Grooved bucket and Peripheral Chamber

2.2 最終段38in翼

低サイクル58.5Hzの連続運転を可能にするため、原設計翼を改造設計した。

回転試験の結果、38in改造翼の振動特性は以下に述べるように良好な結果が得られた。すなわち、注目すべき軸方向一次振動の共振点は、58.5Hzの運転限界27.78rpsより低くなり、58.5Hz低サイクル連続運転が十分可能であることを確認した。なお接線方向一次振動(T_1)の共振応答はルースタイワイヤで翼を全周1リングにつづってあるため、ほとんど消滅した。

2.3 溝付汽水分離翼とダイアフラム

本タービンに採用しているみぞ付汽水分離翼とダイアフラムは、浸食の原因となる湿分を積極的に分離するよう設計されており、図3にその構造を示すが、湿分の少ない高圧段落には、図3(a)に示すように動翼の回転によりはね飛ばされた

水分を補獲し次の抽気段に導くように、汽水分離室を設けたダイアフラムを使用し、湿分の深い低圧段落には、図3(b)に示すように動翼プロフィール入口背側部に数本のみぞを切ったみぞ付汽水分離翼を使用して、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ようにしている。これらはいずれも相当な汽水分離効果を得ている。

2.4 キングスベリーティルティングパッド形スラスト

2.1で述べたように、スラストカラーが焼ばめであることから、はめあい部のずれが万一発生し、スラストカラーの振れ回りが生じた場合に、十分カラーの振れにシューが追従できるようにするためキングスベリー形軸受を採用している。

2.5 汽水分離器⁽⁴⁾

本タービンには高圧式汽水分離器で縦形波板式のものが採用されており、使用圧力が高いとはいえ内部蒸気流速が小さいために胴体の大きさは外径2,850mm、高さ6,236mmとかなり大きいもので、タービン架台両側面の床下に2個ずつ計4個設置されている。

機能としては高圧タービン排気に含まれる汽水を分離してかわき蒸気に近い状態にすることにあり、低圧タービンの内部効率の向上と、浸食防止を図るものである。タービン連絡管との相互の熱膨張の吸収、ドレンの排除方法、波板の出し入れ、および内部点検なども容易にできる構造になっている。

図4はその断面図および波形の形状を示したものである。

2.6 高圧ケーシング

高圧ケーシングは流入蒸気圧力および温度が低い一重ケーシング構造が採用されている。従来の大容量火力タービンのケーシングに比較し構造は簡単化されているが、外形お

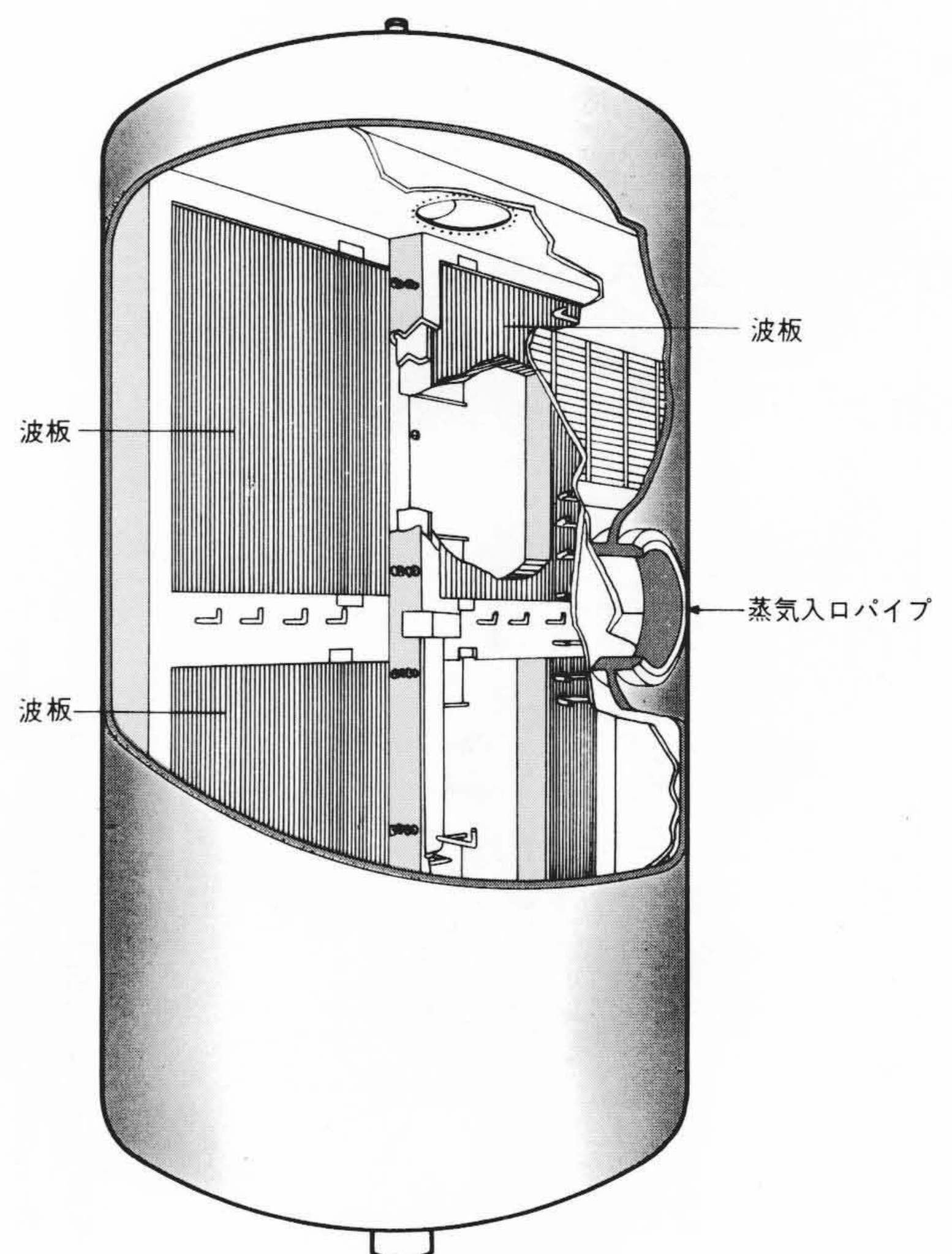


図4 汽水分離器 高圧排気に含まれている水分を分離して低圧タービンの内部効率の向上および低圧タービン内での水滴による侵食を最小限に押えるため高、低圧タービン連絡管に設置する。

Fig. 4 Moisture Separator

よび重量は大きくなっている。ケーシングとダイアフラムおよびパッキンヘッドとの蒸気シール面、高圧側ケーシング水平継手面には12Crステンレス鋼を肉盛しており、またグランド蒸気取出し部の通路にはステンレス鋼製の防食板を設けて浸食防止を図っている。上部ケーシングには除染用座を設け、放射能汚染対策を十分考慮した構造となっている。

2.7 低圧ケーシング

ケーシングは大きい主として機械加工上の大きさによる制限から外部ケーシングは2分割構造が採用されており、高圧排気から連絡管を通して低圧ケーシングにはいる蒸気の入口は下部ケーシングの側面より供給される構造になっており、内部ケーシングはドレンの排除が十分に行なわれるように考慮されている。

2.8 材料の選択

タービンのあらゆる部分が常時湿り蒸気に接しているため、火力用タービンが高温特性に注意して材料選択されるのに対して、耐食性の良いことを主眼とした選択をしてある。当島根原子力発電所の場合、耐浸食性のほか、BWRと組み合わせられるタービンのため、放射能の影響による遊離酸素による腐食に対する考慮も必要となる。表2は浸食の種類とその対策をしたものである。

表2 浸食の種類とその対策 蒸気中の水滴による浸食の種類、発生場所、その対策を示す。

Table 2 Kinds of Erosion and Countermeasures

分類	おもな発生部署	材料面の対策
衝撃による浸食	動翼	炎焼入れまたはステライト板溶接
	ドレン穴、オリフィスの下流側	12Cr ステンレス鋼使用
漏洩による浸食	フランジ面 シール面	ステンレス鋼肉盛 ステライト肉盛
蒸気流による浸食	蒸気流の加速される部分	Cu 入り鋼または Cr 入り鋼

3 原子力タービンの制御⁽³⁾

3.1 圧力制御と速度制御

BWR（沸騰水）形原子力タービンの制御面上での最も大きな特徴は、タービンの速度制御とともに、主蒸気圧力を一定に制御する系統を備えていることである。これはBWR形の原子炉が圧力に対し正の反応度を示すということ、つまり炉圧上昇に伴い炉出力が増加するため、原子炉の安定な運転を行なうには、炉圧力一定制御が不可欠の条件となるためである。

この炉圧力一定制御を行なうため、主蒸気止め弁前の主蒸気管から分岐してタービンバイパス弁を通り、直接復水器に蒸気を放出するタービンバイパス系統が設けられている。このタービンバイパス系統によって、負荷急変時また起動時などの余剰蒸気を復水器に流し、炉圧力の上昇を防いでいる⁽³⁾。

3.2 電気式圧力調整装置（EPR）

上記タービンの制御機器の大部分は、油圧機器とレバー機構とから成るいわゆる機械油圧式ガバナ（MHG）であるが、2系統の圧力制御ループのうち、1系統のみは、応答が一段と速く、精度よい制御を常時要求されるため、電氣的に検出した圧力信号を電子回路で処理し、所定の弁設定信号を含め

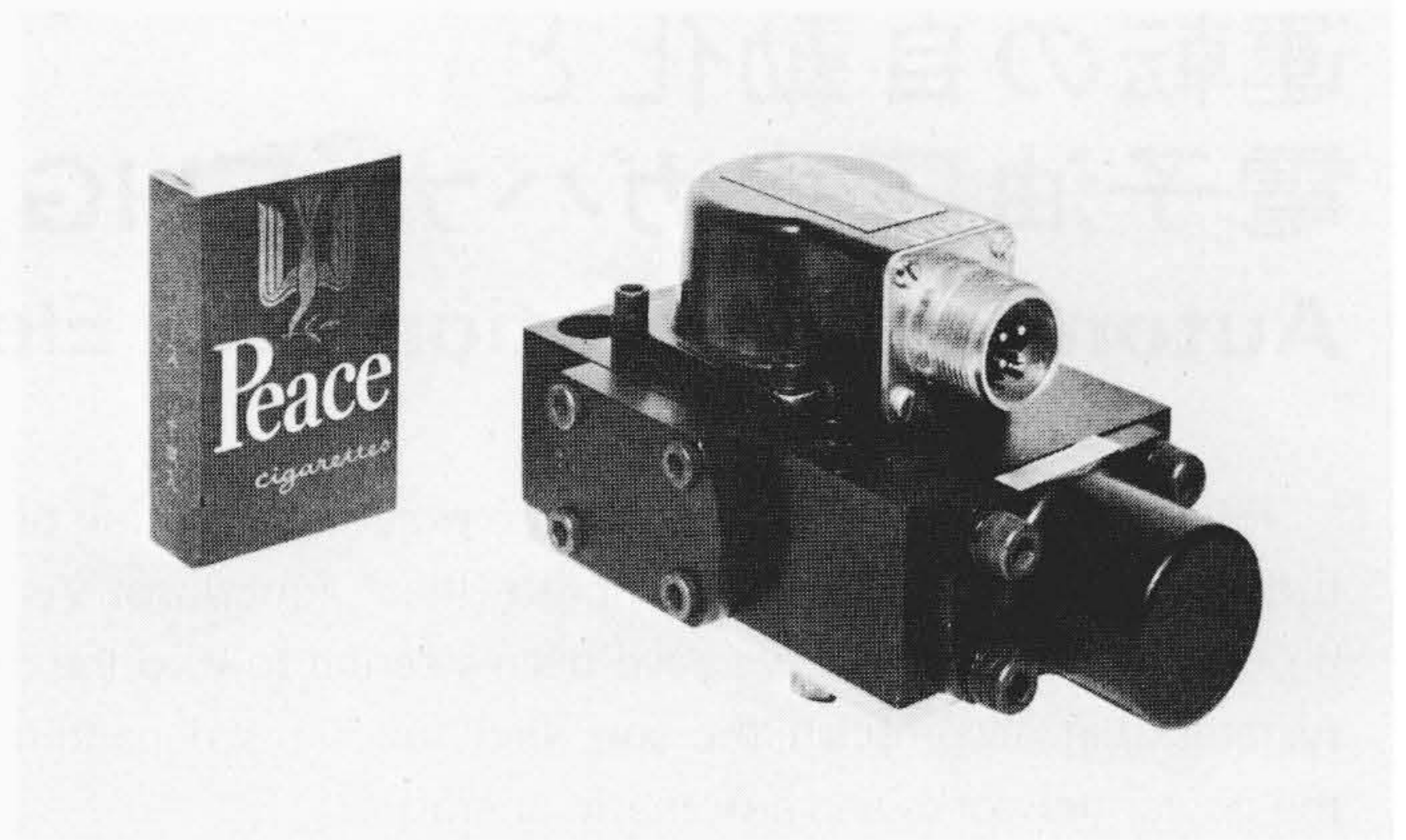


図5 EPR用サーボ弁 応答が速く、精度のよい制御を行なうためにスプールの間げきが小さく、エッジは鋭く仕上げられている。作動油中のきょう雑物を一定値以下に保つよう油の管理が必要である。

Fig. 5 Servo Valve for Electro-hydraulic Pressure Regulator

て各弁の制御を行なう電気油圧式圧力調整装置（EPR）を備え、原則として常時使用する⁽³⁾。

EPRの構成機器は、従来、火力用電子油圧式ガバナ（EHG）について発表してきた^{(10),(11)}のものと類似であるので、詳細説明を省略するが、ただ一つ、作動油に関して、EHGが制御油のみの制御系統で高圧不燃性油を用いているのに反し、EPR作動油は、機械式ガバナと同様、軸受給油系統などにつながったタービン油を使用する。

EPRは電気信号を油圧信号に変換する手段として図5に示すサーボ弁を使用する。このため油中きょう雑物の管理を行なう必要があり、特に軸受給油系統など同一の作動油であることから、試運転時期ではきょう雑物が増加しやすい傾向があり、フラッシング完了時点で、厳重なチェックを行なうことが、その後のEPRの運転を円滑にするためのキーポイントとなろう。

この種のサーボ機器用作動油については、火力用EHGの経験から得た管理方式⁽¹²⁾により、万全の体制で現地試運転に備えている。

4 結 言

表1にも示したように、日立製作所は、最終段に38inおよび43in翼を用いた出力500～900MW級の大容量原子力タービンの主要部品について製作実績を有しており、さらに52in翼を有する超大形原子力タービンに関しても、製作体勢を確立している。今後とも、各位のご支援のもとに原子力機器の開発に努め、電力業界の発展に寄与したいと願っている。

参考文献

- (1) 薬師寺、齊藤：日立評論 53, 1092（昭46-11）
- (2) 馬場：電気学会誌 No. 554, 839（昭44）
- (3) 柏原、滝：日立評論 53, 535（昭46-6）
- (4) 久野、植西：火力発電 22, 637（昭46-6）
- (5) 二宮：電気評論 55（昭45-2）
- (6) 加藤、庄山、羽鳥、久野：日立評論 53, 1097（昭46-11）
- (7) 糸野、北川：日立評論 52, 113（昭45-2）
- (8) 糸野、久野：日立評論 48, 76（昭41-6）
- (9) 糸野：機学誌 71, No. 593, 69（昭43-8）
- (10) 内山、安元、岸上：日立評論 53, 219（昭46-3）
- (11) 印出、野村、安藤、安元、丸山：火力発電 21, 785（昭45-7）
- (12) 安元：油圧技術 10, 35（昭46-6）