# 大容量原子力タービン用汽水分離器の開発 Development of Moisture Separator for Large Nuclear Steam Turbine

我が国における原子力発電計画も年々大容量化し、1,000MWe以上の単機出力プ ラントが建設されようとしている。日立製作所では、現在運転に入っている500MWe クラスの原子力タービン用として、波板式汽水分離器を開発し好成績を収めている が、今回新しく1,000MW級の大容量原子力タービンに適したコンパクトな汽水分 離器を開発した。この論文は、新しい形の波板式汽水分離器を開発するに当たって 実施された種々の理論解析と実証試験のうち、湿り蒸気の水滴に関する特性、汽水 分離特性、及び波板の安全性について述べるものである。

相馬昭	男*	Akio Sôma
二宮	敏*	Satoshi Ninomiya
安ヶ平紙	已雄**	Norio Yasugahira
佐藤	武**	Takeshi Satô
植西	晃**	Akira Uenishi

# 日 緒 言

原子力発電において当分の間主流をなす、軽水炉(沸騰水 型及び加圧水型)を用いた発電プラントと、従来の火力発電 プラントにおける蒸気タービンの主な相違は, タービン入口蒸気圧力・温度が低いこと。 (2) 全熱落差が小さく蒸気量が多くなること。 (3) 全段落が湿り蒸気中で運転されること。 などである(1)-(3)。最近の大容量火力発電プラントでは、超臨界 蒸気圧246kg/cm<sup>2</sup>, 1段再熱式538°C/538°Cの蒸気温度が用い られることが多いが、この場合に湿り蒸気中で運転されるのは 低圧部2~3段であり、タービン低圧最終段出口の湿り度は約 10%程度である(図1参照)。これに対し、原子力発電プラン トにおいては、タービン入口において既に0.2~0.4%程度の 水分を含む蒸気が流入し, 適当な汽水分離器を設けずにター ビン出口圧力まで膨張させたとすれば、低圧最終段出口湿り 度は約25%にも達する。この状態では、湿り分による動翼の 侵食が著しくなるばかりでなく、タービンの内部効率を大幅 に低下させる原因ともなる。従って、この膨張途上で発生す る水分をいかに有効に除くかということが、原子力発電用タ ービンの大きな問題である。蒸気中の水分を除去する方法と して、タービン動翼に設けた溝により水滴を受けとめ、遠心・ 力で振り飛ばして分離する溝付翼によるものと、高圧タービ ンと低圧タービンの中間に適当な汽水分離器を設けて水分を 分離する二つの手法が採られている(4)。これらの使用によっ て原子力タービンの低圧最終段出口湿り度は図1に示すよう に、約15%程度とされ、従来の火力発電用非再熱式タービン の場合と同程度の湿り度になり、実績のある範囲にできる。 日立製作所では、このような目的に供する汽水分離装置とし て、これまでにも理論的・実験的検討を続け種々の形式の汽 水分離器を開発し,実機に適用している(2)(4)。これまで中国電 力株式会社島根原子力発電所納め460MW原子力タービン<sup>(5)</sup>, あるいは中部電力株式会社浜岡原子力発電所納め 540 MW 原 子力タービンなどに採用している汽水分離器は,タービン排



図 | タービン膨張曲線の比較 汽水分離器を設けることによって, 原子力タービンの最終段湿り度は火力発電用非再熱式タービンと同程度にされ ている。

我々はこのような、1,000MW以上の大容量原子力タービン に適するコンパクトな新形式の汽水分離器の開発に取り組ん でいたが、このほど十分信頼性のおける形で完成することが できたので、以下これについて報告する。

33

## 2 大容量汽水分離器の形式・構造の選定

#### 2.1 従来形との相違

気1流につき1個の分離器とする方式であり、4流排気のタ ービンでは4個の汽水分離器が設けられている。タービン容 量が増大し、排気流数も増加してくるとこの形式の汽水分離 器では配置が複雑となり、据付スペース上も不経済となるの で、1,000MW以上の大容量原子力タービン用汽水分離器とし てコンパクトなものが要望されていた<sup>(6)</sup>。 従来の汽水分離器は円筒形の容器を縦に設置し、その内部 に波板が垂直に置かれ、蒸気流がこれに直交して流れるもの であり、1,000MW級原子力タービンにこの形式の汽水分離器 を用いたときのタービン室内の配置は図2(a)に示すように、 汽水分離器は6個となり、設置のスペースも不経済である。 同じ容量の原子力タービンに新しく開発した汽水分離器を採

\* 日立製作所日立工場 \*\* 日立製作所日立研究所

410 日立評論 VOL. 57 No. 5(1975-5)



図2 汽水分離器とタービンとの配置 出力1,000MW級の原子力タービンでは,汽水分離器は従来の縦 形では6個となるが,横置形では2個となりタービン室の配置は著しくコンパクトになる。



図3 横置形汽水分離器構造 分離器下方から蒸気が流入し,上向に流出する。波板配置を傾斜させることにより,器内の空間を有効に利用し,コンパクト化した構造となる。



図 4 汽水分離器供試波板 波板を傾斜して使用する分離器には,上流側に大きなポケットを設けたA形, B形が適する。C形は従来の波板を垂直に設置する分離器に使用されている。

34

表1 1,100MW原子力タービン用汽水分離器蒸気条件計画値 高圧タービンで仕事をした蒸気は12.3%の水分を含んでいるが,汽水分離器で 2%の湿り度まで除湿される。これによって低圧タービン内の蒸気の湿り度を 少なく抑えている。

項	目	(単	位)	計 画 值
乙酸化甲	蒸気	量	(kg/h)	5,600,000
分離茲	圧	カ	(ata)	15.22
~ "	湿り	度	(%)	12.3
八成世界日	蒸気	量	(kg/h)	5,090,000
分離奋	圧	カ	(ata)	15.0
шц	湿り	度	(%)	2.0
分離	ドレン	量	(kg/h)	510,000
分离	雅 劾	率	(%)	85.0
庄 5	カ 損	失	(%)	1.9

用した場合は、汽水分離器容器はタービンの左右に各1個と されタービン室内の配置は図2(b)に示すように簡素化され、 据付スペースなど経済性に富んだものとなる。新しく開発さ れた汽水分離器では、円筒容器を横置きとし、高圧タービン を出た湿分を含む蒸気は容器下部の2個所から入り、湿分を 分離された蒸気が上部の3個所から流出し、それぞれ低圧タ ービンに導かれる。図3にこの横置形汽水分離器の全体構造 を示す。表1は1,100MW原子力タービン汽水分離器の蒸気 条件計画値である。このクラスでの分離器の大きさは軸長約 14m,容器径3.2mぐらいになる。横置形汽水分離器内の空 間は有効に利用され、しかも蒸気の流れに無理がなく、良好 な汽水分離が得られる構造として決定されたものである。波 板は傾斜して置かれており、従来の汽水分離器の波板が垂直 に置かれていたのと比べて変わった点である。このような傾 斜設置に最適な波板の開発について次に述べる。 器外に排出するのも容易であった。しかし,傾斜した波板で は分離された水滴を器外に排出するために波板にくふうが必 要となる。図4に横置形汽水分離器用として開発した波板形 状(A形及びB形)と,従来の縦形汽水分離器用に開発し,使 用している波板形状(C形)とを合わせて示す。新形波板では 蒸気流の上流に向かって,大きなポケットを設けており,波 板を傾斜して設置するときこの部分が下方にあって分離され たドレンを受けとめ,ドレン集合室に導くものである。

# 3 波板の開発

新形波板の開発に当たっては、従来形の波板の開発から蓄積された技術を基に、更にいっそうの発展がなされた。図4 に示した横置形汽水分離器用波板の形状、すなわち山高さ、 山ピッチ及び波板ピッチ、あるいはドレンポケットの位置や 大きさなどの決定に当たっては徹底的な理論解析と実証試験 を行ない、分離性能、圧力損失、波板の強度・振動などあら ゆる面から検討を加え、十分信頼性をもって完成できたもの と確信している。以下、波板の開発、試験について述べる。

## 3.1 波板内を流れる水滴の運動解析

## 3.1.1 基礎式

湿り蒸気中の水滴の運動方程式は次式で与えられる。

#### 2.2 波板形状

従来の汽水分離器では波板が垂直設置であり、この場合に は分離された水滴は重力により垂直に落下するので、水分を ここに, y:水滴の運動方向

*t*:時間

*V<sub>y</sub>*: y 方向の蒸気速度

d:水滴径

γ, γs:それぞれ水滴,及び蒸気の比重量

C<sub>D</sub>: 球の抵抗係数

また、水滴の自然落下、すなわち静止蒸気中の水滴に重力 が作用したときの水滴の運動は、浮力を考慮して次式で与え られる。

35

この場合の最終速度、すなわち終端速度 Vtは Coの値に応じ



図5 波板内の水滴の運動 波板内の水滴の運動は、蒸気圧力 による影響は小さい。水滴の径に よって運動の軌跡は変わり、図の 例では20µ以下の水滴は蒸気流と 同一流れとなり、分離も難しくな ることを示している。 412 日立評論 VOL. 57 No. 5(1975-5)





(c) C 形 注:矢印は,いずれも流れ方向を示す。

図 6 回流水 槽による 波板内流線観察 波板の形状, 寸法(山の高さ, 山ピッチ, 波板ピッチ)について, 蒸気流の流線解析を行ない, 大容量汽水分 離器に適した波板を開発した。 (a) 波板入口湿り度(6%) (b) 波板入口湿り度(12%) 注: 矢印は, いずれも流れ方向を示す。

図7 波板内の水滴分離状況の観察 湿り蒸気の水滴が, 波板内で分離される状況を可視モデルで観察した。かぎ板の助走部では滴状に付着し, ポケット部で膜状となって流下する様子が観察できる。

て異なるが、レイノルズ数 $R_e$ が300< $R_e$ <2,500の場合には、 次式となる。

$$\frac{1}{V_t} = \frac{18}{g} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma - \gamma_s}\right) \frac{\nu_s}{d^2} + 0.4583 \left[\left(\frac{\gamma_s}{\gamma - \gamma_s}\right) \frac{1}{g d}\right]^{0.5} \cdots (3)$$

## 3.1.2 計算結果

36

圧力5~15ataにおける波板内の水滴の運動の計算結果を図 5に示す。圧力による影響は小さいこと、また、水滴径については、 $50\mu$ 以上のものは容易に分離、除去できることが分かる。しかし、 $20\mu$ 以下の径の水滴は蒸気との相対速度が小さく、大部分は衝突しないで通過してしまうことを示している。このような解析を詳細に行なって波板形状は決定される。

3.2 波板内の蒸気流動,及び水滴分離状況の確認

波板内の蒸気の流れを観察するために,回流水槽内にアル ミニウム粉末を浮かべ,その流線模様を写真撮影した一例を 図6に示す。これらの写真により渦の発生個所や流れが波板 に衝突する様子が明確に観察され,理論解析による波板形状 の確認と改良が行なわれる。横置形汽水分離器用として新し く考案したA形,B形の波板形状についてドレンポケットの 位置,かぎ状板の寸法などが適切に決定されている。

更に,実際に蒸気中の水滴がかぎ状板で捕獲,分離され,

## 4 分離性能と波板強度に関する実験的検討

## 4.1 分離性能と圧力損失

汽水分離器の湿分分離性能は,タービン低圧段の動翼のエ ロージョン防止と,タービン効率にとって重要である<sup>(7)</sup>。ま たタービン効率には,分離器を通る間の蒸気の圧力損失も無 視できない。以下,これらについて述べる。

波板内流れの理論解析,及び種々の基礎実験によって決定 された新形波板の水分分離性能を最終的に確認するため,実 機汽水分離器の波板ブロックの一部に相当する試験装置を用 いて実験した。図8は試験装置を示し,図4に示したA形及



ドレン ポケットを流下する状況を透明プラスチック製の波板
によって確認を行なった。波板内水滴分離の状況の一例を図
7に示す。かぎ板部上流の助走距離内で滴状になって付着し
た水滴がかぎ板によって捕獲, 分離された後, ドレン ポケッ
トに導かれ膜状になって合体し、ポケット内を流下する様子
が分かる。最終的に波板形状を決定するまでには、 種々の条
件下で詳細な確認試験が行なわれる。



(%) 2~20 5  $\Delta$ 0 8 2~15 .  $P_2$ 1-3.0 2~18 12  $\boldsymbol{\Delta}$ 0 P 2.0 <1 計画值 分離器内圧力損失 101.33 1.67 0.67 1.0 0.33 0 波板前面蒸気流速比 V/Vp (Vp:設計流速)

分離器入口 蒸気圧力(ata)

B形波板

A形波板

分離器入口 蒸気湿り度(%)

図 9 波板前面流速と汽水分離効率の関係 A形波板は比較的高流速 領域まで高効率を維持し、設計流速近傍で、分離効率は約95%となる。 図|| 分離器内圧力損失 設計流速時の圧力損失は1.4~1.8%で、小さな値である。分離器入口、同出口における流れの拡大、縮小による損失が支配的であるため、波板形状A形、B形に関係なく同一の値となっている。P1=分離器入口圧力、P2=分離器出口圧力





図10 波板内圧力損失 波板内圧力損失は,A形がB形に比べて小さく, 分離性能に加えて,この面でもA形波板が優れている。 図12 波板入口部,同出口部における流速分布 分離器入口部に適 正な流量分配装置を設けて,波板前面の流速分布を一様にしている。

びB形につき分離性能の確認を行なった。実験の条件として は表1に示す計画値を満足するように、分離器入口蒸気圧力、 湿り度及び蒸気流速を選択した。汽水分離性能の試験におい ては、湿り蒸気中の水滴分布が実機タービンのそれに一致し ていることが重要で、これについては慎重な検討を行なって いるが、今回は紙面の都合で割愛する。参考文献(4)にその概 要を示してあるので参照されたい。図9は実験による新形波 板の汽水分離性能を示すもので、波板前面蒸気流速に対する 汽水分離効率の形で示してある。いずれの波板形状において も分離器入口圧力、湿り度による影響は顕著に現われず、流 速による影響が大きい。これらは理論的にも予想されること である。横置形汽水分離器用として開発したA形、B形を比 較すると、最高分離効率ではA形が約5%程優れ、95%に達 する。そのうえ、流速に対する特性をみるとA形は比較的高 流速の範囲まで高効率を維持するのに対し、B形は低流速の 失について実験的検討を行なった。図10に、A形とB形の波板について波板単独の圧力損失を比較した結果を示す。レイノルズ数 $R_e$ は波板の1流路内の流体相当直径をとる。A形、B形とも $R_e=10^4$ 付近に遷移領域が存在し、乱流域では緩やかに $S_D$ が減少する傾向を示す。しかし、圧力損失はA形がB形の½~½5と小さく、分離性能に加えて波板単独の圧力損失をみてもA形は有利である。但し、この波板内の圧力損失は、汽水分離器全体の圧力損失の0.8%程度のものであり、次に述べるように実質的に分離器の圧力損失には現われない程度のものである。

次に, 波板を分離器内に組み込んだ状態での圧力損失結果 を図11に示す。A形, B形の波板形状による差異は分離器内 圧力損失には現われず, 分離器の出入口部などの構造自体に よって支配される損失が大半を占めている。損失レベルは設 設流速で約1.4~1.7%となり, 計画値を満足している。

範囲において高い分離効率が得られている。波板の傾斜角度	4.2 分離器内の蒸気分配
を45~90度変化させても分離特性には影響しないことが分か	横置形汽水分離器は,円筒容器の長手方向寸法が大きくな
った。以上の結果から、分離性能面からみると大容量に適し、	るため、波板に流入する蒸気が容器の長手方向にわたって一
最も優れた波板形状はA形であり,分離効率計画値も十分満	様に分布するよう十分な配慮が必要である。これは器内圧力
足することが明らかとなった。	損失はもとより, 分離性能を良好に保持するために重要とな
次に,分離性能と同様に重要な要素である圧力損失に関し	る。図9に示したように汽水分離効率は波板前面流速によっ
ては, 波板単独の圧力損失と分離器入口, 同出口間の圧力損	て変化するので、各波板前面で一様流速分布にならず、極端
	37

414 日立評論 VOL. 57 No. 5 (1975-5)





図13 波板の振動応力分布 設計流速における振動応力は最大42kg/cm<sup>2</sup> と小さく、ステンレス製波板の許容応力に比べ十分小さな値である。

図14 波板の振動応力実測例(設計流速時) 蒸気力が波板に負荷され,振動する状態をひずみゲージにより実測した波形である。振動サイクルは 100Hz近傍となり,タービン運転サイクルとの共振がないことを示している。

に不均一になると分離効率が不均一になるおそれがある。こ のために,分離器の蒸気入口部に適正な流量分配装置を設け, 図12に示す結果を得た。分配装置を設けない場合には,蒸気 入口管近傍の流速が設計流速の約2倍の高流速となり,逆に 分離器長手方向両端部では設計流速の½ぐらいの流速となっ て不均一な流速分布となってしまうが,適切な分配装置を開 発し,これを設けることによって分離器長手方向,波板高さ 方向のいずれの方向にわたっても均一な流速分布が得られる よう改善されている。

# 4.3 波板の強度に関する検討

38

新形式の波板の湿分分離効率については前述したが,この 波板の強度について次に述べる。

波板に働く力にはジグザグに屈曲した流路で発生する非定 常の蒸気力と、分離器内で起こる波板に流入する蒸気の流速 の非一様性による変動力が考えられる。4.2で述べたように、 分離器内で波板に流入する蒸気の速度分布は一様化が図られ ており、これに基づく蒸気力も小さく抑えられる。 波板間の ジグザグ流路で起こる蒸気流による変動力については、波板 固有振動数との共振をみるため、流速を広範囲にわたって変 化させて波板の振動数と応力の測定を行ない、実用流速範囲 とその前後には共振現象のないことを確認している。波板に 負荷される振動応力の実測結果の一例を図13に示す(波板は A形の場合を示す)。また、図14は波板の高さ方向について振 動応力分布を示した。実測した振動波形から分かるように, 波板の振動サイクルは非常に複雑な合成サイクルとなってお り,周波数分析によっても明確な共振サイクルはない。一方. 振動応力レベルは最大42kg/cm<sup>2</sup>程度と小さく波板材(ステン レス鋼)の疲労限応力を十分下まわる値であり、新形波板と して開発した波板は十分信頼性の高い形状である。

# 5 結 言

原子力タービン用汽水分離器としては,既にパキスタン国 納め 138MW原子力タービン用として低圧汽水分離器を,更 に中国電力株式会社島根原子力発電所納め 460MW原子力タ ービンなどの縦形の高圧汽水分離器を開発し,現在既に運 転している。これらの技術を基に,今回 1,000MW以上の原 子力タービンの汽水分離器としてコンパクトな横置形の分離 器(特許出願中)を開発したのでその概要について述べた。従 来の開発品に優るとも劣らぬ信頼性を確認しているが,実機 汽水分離器製作に当たっては,品質管理などをこれまでと同 様に実施しこれに当たりたいと考えている。本文が将来の原 子力発電所建設計画の際の一助ともなれば,筆者らの幸いと するところである。

#### 参考文献

- (1) 粂野, 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) 粂野「138,600kW原子力タービン」日本機械学会誌71(1968-8)
- (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 (1970)
- (4) 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 (1971)

(5) 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)

(6) 久野, 安元ほか, 「原子力タービン発電機の最近の動向」日立 評論 56, 889 (昭49-9)

(7) R. C. Spencer. J. A. Booth "Heat Rate Performance of Nuclear Steam Turbine Generators" American Power Conference Chicago Illinois (April 23-25, 1968)