気水分離器における液相分離部が気液分離性能に及ぼす影響*

Effects of Liquid-Separation Components on Separation Performance of a Steam Separator

上遠野 健 一**†
KATONO Kenichi

田 丸 隼 斗**
TAMARU Hayato

細 川 茂 雄**
HOSOKAWA Shigeo

林 公 祐**
HAYASHI Kosuke

富 山 明 男**
TOMIYAMA Akio

Abstract A downscaled model of a steam separator is used to understand characteristics of swirling flow and to investigate the effects of geometry of separator components on separation performance. Main conclusions obtained are as follows. (1) Separation performance improves with the gas volume flux. However carryunder, i.e. the weight percentage of entrained gas in the water leaving the separator, tends to be lower as the liquid film thickness becomes thinner under low liquid volume flux conditions. (2) The ratio of the flow rate of separated liquid to the total liquid flow rate does not depend on the liquid volume flux so much. On the other hand, the carryunder becomes lower with the liquid volume flux. (3) An improved pick-off ring, whose gap width is about the maximum liquid film thickness and sudden expansion is mitigated by a diffuser, effectively reduces the pressure drop while keeping high separation performance.

Keywords: Steam separator, Two-phase flow, Swirling flow, Pick-off Ring (POR)
Advanced Boiling Water Reactor (ABWR)

1. 緒 言

改良型沸騰水型原子炉 ABWR (Advanced Boiling Water Reactor) の気水分離器は、流路内に固定されたスワラーにより炉心で発生した蒸気と水の気液二相流に旋回力を与え、遠心分離作用により密度の大きい水を外側へ集めて複数段のピックオフリング (Pick-off Ring: POR) により気水分離器外部へ押し出し、密度の小さい蒸気を流路中央へ集めて上方出口から蒸気乾燥器へ送り出す[1]。気水分離器は冷却水の再循環経路に含まれるため、気水分離器の圧力損失低減により、密度波振動防止や再循環系ポンプの負荷低減、原子力プラントの電気出力向上など、ABWR の安全性及び経済性の向上が期待できる。

気水分離器の圧力損失低減を目的とした過去の研究には、機器評価指標である気液分離性能と圧力損失から気水分離器の改良方法を検討した研究[2-6]が多いが、内部流動の把握に基づく研究例は少ない。一方、片岡ら[7-10]は気水分離器の第1段分離部までを模擬した約1/5スケール試験装置内の空気-水系旋回二相流を対象に、流動状態、液膜厚さ、液相分離率、液滴分布、圧力損失を測定し、気水分離器構成要素の寸法や形状が気水分離器の性能及び旋回二相流の流動状態に及ぼす影響を調べている。しかし、第1段分離部以降の第2、第3段分離部を含む気液分離特性に及ぼす構成要素の影響を検討した例はほとんどない。そこで、本研究では、気水分離器の第2段分

* 2015.7.10 受付

** 神戸大学大学院 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1

† 株式会社日立製作所 研究開発グループ エネルギーイノベーションセンタ

〒319-1292 茨城県日立市大みか町七丁目 1 番 1 号

TEL: (0294)55-8088 FAX: (0294)55-9973 E-mail: kenichi.katono.kq@hitachi.com

離部までを模擬した縮小試験装置を用いて、流動状態、液相分離率、液膜厚さ、キャリーアンダー（分離液相と共に排出される気相の質量流量割合）、圧力損失を測定し、気水分離器の構成要素である POR の形状が気液分離特性に及ぼす影響を検討した。

2. 気水分離器内旋回二相流動模擬試験

2.1 試験装置

Fig. 1 に試験装置の概略を示す。試験装置は、気液混合部、プレナム、気水分離器模擬試験部、試験部貯水タンク、キャリーアンダー測定容器、上部タンク、下部貯水タンク、水及び空気の供給系で構成されている。試験部は実機を約 1/5 に縮小したスケールダウンモデルであり、スタンドパイプ、スワラー、バレル、第 1 段 POR、第 2 段 POR 及び排水流路からなる。第 1 段 POR 下部のバレル及びスタンドパイプは二重円筒となっており、中心流路が気水分離器内流路、外側の環状流路が排水流路を模擬している。Fig. 2 に示すハブと 8 枚の固定羽根からなるスワラーにより旋回力を加えられた気液二相流は旋回しながらバレル内を上昇し、第 1 段 POR で液相の一部が分離される。分離された液相は排水流路を通過し試験部貯水タンクを経て下部貯水タンクへ戻る。第 1 段 POR において分離しきれなかった液相と気相は旋回しながらバレル内を上昇し、第 2 段 POR により再度気液分離され、下部貯水タンクに戻る。

Fig. 3 に基準とした POR の概略を示す。第 1 段 POR は内径 32 mm、肉厚 0.6 mm であり、バレル内壁と POR 外壁の間隔（以下、ギャップ幅）は 3.4 mm である。また、第 2 段 POR は内径 35 mm、肉厚 0.6 mm であり、ギャップ幅は 1.9 mm である。

2.2 試験条件

縮小試験装置を用いて実機気水分離器の圧力損失及び気水分離性能を評価するためには、クオリティと二相遠心力を一致させることが有用である[6]。本試験は、出力密度を増加した ABWR の定格運転時のクオリティと二相遠心力に一致する条件（バレル内気相体積流束 $J_G = 14.6$ m/s、バレル内液相体積流束 $J_L = 0.08$ m/s）[7]を包含するように、 $J_G = 12.0, 14.6, 17.8$ m/s の 3 条件、 $J_L = 0.05, 0.08, 0.11$ m/s の 3 条件で行った。なお、試験部貯水タンクの水位は、排水流路出口に加わる静水圧と試験部内部の全圧との比が実機体系

と一致するように、排水流路出口より 5 mm 高い位置に設定した。

Fig. 1 Experimental apparatus.

Fig. 2 Swirler shape.

Fig. 3 Normal POR (gap 3.4 mm).

2.3 測定方法

試験部内における流動状態の可視化には、高速度ビデオカメラ (Redlake, Motion Pro X-3) を用いた。第1段 POR 通過後のバレル内流動をバレル外部側方から撮影 (画素数: 900×500 pixel、フレームレート: 2,000 fps、露光時間: $100 \mu\text{s}$) し、また、高速度ビデオカメラに接続したボアスコープ (OLYMPUS, R080-084-000-50) を試験部上方からバレル内に挿入して撮影した (画素数: 400×400 pixel、フレームレート: 1,000 fps、露光時間: $900 \mu\text{s}$)。

第1段 POR における液相分離率 $W_{s,1}^*$ 、第2段 POR における液相分離率 $W_{s,2}^*$ 、及び、合計の液相分離率 $W_{s,T}^*$ は以下の諸式で定義される。

$$W_{s,1}^* = \frac{W_{Ls,1}}{W_{Ls,1} + W_{Ls,2} + W_{Lus}} \quad (1)$$

$$W_{s,2}^* = \frac{W_{Ls,2}}{W_{Ls,1} + W_{Ls,2} + W_{Lus}} \quad (2)$$

$$W_{s,T}^* = \frac{W_{Ls,1} + W_{Ls,2}}{W_{Ls,1} + W_{Ls,2} + W_{Lus}} \quad (3)$$

ここで、 $W_{Ls,1}$ 及び $W_{Ls,2}$ は各々第1段及び第2段 POR における分離液相質量流量であり、 W_{Lus} は未分離液相質量流量である。分離液相体積流量及び未分離液相体積流量は受け止め法により計測し、 $(W_{Ls,1} + W_{Ls,2} + W_{Lus})$ と供給液相質量流量との差は $\pm 1\%$ 以内であった。

第1段 POR 下流における液膜厚さの測定には、レーザフォーカス変位計 (KEYENCE, LT9030M) を用いた。計測位置である第1段 POR 下流のバレル外壁面を平面に加工することで、レーザビームの屈折に伴う測定誤差を低減した[11]。液膜厚さ計測の空間分解能は $0.1 \mu\text{m}$ 、サンプリング周期は 0.64 ms で、測定点数は 50,000 点とした。なお、測定値の平均値の不確かさは 1% であった。

キャリーアンダー (CU) は以下の式で定義される。

$$CU = \frac{W_{Gs,1}}{W_{Gs,1} + W_{Ls,1}} \quad (4)$$

ここで、 $W_{Gs,1}$ は第1段 POR における分離気相質量流量であり、排水流路から排出された分離気相をキャリーアンダー測定容器に回収し、容器上部

に接続したチューブから気相を取り出し、水上置換による受け止め法により 5 回計測した。5 回の計測値の標準偏差は平均値に対して 1.6% 以下であった。

試験部内圧力分布 P_z ($z = -183, -83, -36, 50, 150, 212 \text{ mm}$ 、 z はバレル下端を基準とした高さ) は、圧力測定用タップに微差圧トランスデューサ (Valdyne, DP45) を接続して測定した。この機器の計測精度は $\pm 0.5\%$ である。圧力計測時のサンプリング周波数は 1.0 kHz 、測定点数は 50,000 点とした。なお、第1段 POR 先端位置が $z = 170 \text{ mm}$ であるため、第1段 POR における圧力損失は $P_{150} \sim P_{212}$ 間の差圧として評価した。

3. 試験結果及び考察

3.1 流動状態

Fig. 4 に第1段 POR 通過後の試験部内、Fig. 5 に第1段 POR 下流のバレル内流動の可視化結果を示す。試験条件は共に $J_G = 14.6 \text{ m/s}$ 、 $J_L = 0.08 \text{ m/s}$ である。Fig. 4 より、 $t = 0 \text{ ms}$ では試験部内の液相は旋回力により壁面に集積して液膜となっておりガスコア内には液滴が見られないが、 $t = 10 \text{ ms}$ では液膜の一部が第1段 POR を乗り越える際に大量の液滴が飛散している様子を確認できる。また、Fig. 5 より、第1段 POR 通過時に飛散した液滴がガスコア内を移動している様子や、旋回力によってバレル壁面の液膜に再付着している液滴も確認できる。

Fig. 4 Flow pattern in the test section.

Fig. 5 Flow pattern after passing through 1st POR.

3.2 液相分離率

Fig. 6 に各 J_G 及び J_L における液相分離率を示す。 J_G の増加に伴い $W_{s,1}^*$ は増加している。これは J_G 増加により界面せん断力が増加し、液膜が薄くなる[7]ことで第1段 POR のギャップ部に液相が流入しやすくなったためである。一方、 J_G 増加に伴い $W_{s,2}^*$ は減少している。これは J_G 増加により $W_{s,1}^*$ が増加し、第1段 POR 下流に残留する液相流量が減少したためである。 J_G が増加すると $W_{s,T}^*$ は僅かに増加している。これは J_G 増加により旋回力が強くなり、液滴の壁面への付着が促進されたこと、及び、第1段 POR における分離率が大きく、第1段 POR を乗り越える際の液滴飛散が少ないことが原因と考えられる。

一方、 J_L が増加しても $W_{s,1}^*$ はほぼ一定である。このことから J_L が増加しても第1段 POR 上流における液膜流量と液滴流量の比が変化していないと考えられる。また、 J_L の増加に伴い $W_{s,2}^*$ 及び $W_{s,T}^*$ は僅かに減少している。これは J_L 増加により第1段 POR を乗り越える液膜流量及び第1段 POR 部で飛散する液滴量が増加し、第2段 POR で分離されずにそのまま通過する液相が増加したためといえる。

Fig. 6 Effects of J_G and J_L on W_s^* .

3.3 液膜厚さ

Fig. 7 に第1段 POR 下流における液膜厚さ測定値の平均値 δ_m を示す。 $J_L = 0.08$ m/s において、 J_G の増加に伴い δ_m は減少している。これは 3.2 節で述べたように、 J_G の増加に伴って $W_{s,1}^*$ が増加し、第1段 POR 下流の液相流量が減少したこと、及び、界面せん断力が増加したことによるものと考えられる。なお、 $z = 200$ mm 付近において液膜厚さが下流側よりも厚いのは、第1段 POR 背面に生じている液溜まりの影響である。

一方、 $J_G = 14.6$ m/s において、 J_L の増加に伴い $z = 200$ mm 付近における液膜厚さが減少している。これは J_L の増加により第1段 POR を乗り越える際に飛散する液滴量が増加するためといえる。また、第2段 POR 先端位置 ($z = 240$ mm) における液膜厚さには J_L の影響はほとんどみられない。以上より、 J_L が増加すると第1段 POR 下流における液滴流量割合が増加し、3.2 節で述べたように、 $W_{s,2}^*$ 及び $W_{s,T}^*$ が僅かに減少する要因となっていると考えられる。

Fig. 7 Film thickness in the downstream of 1st POR.

3.4 キャリーアンダー

Fig. 8 に各 J_G 及び J_L における CU を示す。 J_G が 12.0 m/s から 14.6 m/s に増加すると CU は減少し、14.6 m/s から 17.8 m/s に増加すると CU は増加する傾向がある。 J_G 増加により、バレル部における旋回力が強くなることで気液分離は促進され、バレル内壁面を旋回しながら上昇する液膜内に同伴される気相割合は減少する。一方、界面せん断力の増加により液膜厚さが薄くなることで、特に J_L が低い条件において POR ギャップ部から排水流路への気相流入が増加し、 $J_G = 17.8$ m/s で CU が増加する傾向を示したものと考えられる。

また、 J_L の増加に伴い CU が減少している。これは J_L 増加により液膜が厚くなるため、排水流路への気相流入が抑制されたためと考えられる。

3.5 軸方向圧力分布

Fig. 9 に次式で定義される無次元圧力 P^* を示す。

$$P^* = \frac{P_z - P_{212}}{P_{212}} \quad (5)$$

ここで、 P_{212} は最下流側の計測位置 ($z = 212$ mm) における圧力である。

Fig. 8 Effects of J_G and J_L on CU .

スワラーが装着されているディフューザ部では内径が 30 mm から 40 mm へと拡大されているため、ディフューザ下流において圧力回復が生じると考えられる。しかし、ディフューザ部での P^* の勾配は、圧力回復がなく摩擦損失による圧力損失が生じるバレル部と同程度であり、このことから、スワラーによる圧力損失は、流路拡大による圧力回復よりも大きいことがわかる。また、第 1 段 POR を含む区間での P^* の勾配も大きい。これは、液相分離に伴う運動量損失に加え、POR 入口部では流路面積の急縮小、出口部では急拡大があるため局所損失が生じ、比較的大きな圧力損失となるためと考えられる。なお、局所圧力損失の影響が大きいと考えられるスワラー部及び第 1 段 POR 部における P^* の勾配は、 J_G に強く依存している。

Fig. 9 Axial distribution of P^* .

4. ピックオフリングの改良

4.1 改良型ピックオフリング

3.5 節の検討から、気水分離器の圧力損失低減には、スワラー及び POR 形状の改良が有効であることがわかる。著者らはこれまでにスワラー形状改良による低圧損型気水分離器の検討をしている[10]。以下では、気水分離器の第 2 段分離部までを模擬した縮小試験装置を用いて、第 1 段 POR 形状の改良を検討し、気液分離性能や圧力損失に及ぼす影響を調べた結果を示す。

Fig. 10 に改良型 POR の概略を示す。改良型 POR のギャップ幅は既報[9]において測定した第 1 段 POR 位置における定格運転相当条件 ($J_G = 14.6 \text{ m/s}$, $J_L = 0.08 \text{ m/s}$) 時の最大液膜厚さに相当する 2.2 mm とし、Fig. 3 に示した基準 POR (Normal) のギャップ幅 (3.4 mm) よりも狭くした。また、POR 出口部での局所圧力損失低減を狙い、POR 下流流路形状を急拡大流路からディフューザに変更した。ディフューザ高さは単相流におけるディフューザ性能線図[12]を用いて流れの剥離が生じない条件となるように決定した。なお、本研究では第 2 段 POR 形状は変更していない。

Fig. 10 Improved POR.

以下では、ギャップ幅とディフューザ部のそれぞれの効果を調べるために、ギャップ幅のみを変更した POR (R-Gap) と、さらにディフューザ部も設けた POR (Improved) の性能を調べた。

Table 1 Type of PORs.

POR type	POR gap [mm]	Diffuser	Figure
Normal	3.4	—	Fig. 3
R-Gap	2.2	—	—
Improved	2.2	○	Fig. 10

4.2 性能評価

Fig. 11 に第 1 段 POR 部圧力損失 ΔP を示す。 J_G 増加に伴い ΔP は増加している。これはギャップ幅が液膜厚さより大きいので、第 1 段 POR 入口部における気相の流路面積急縮小の影響が大きく、 J_G 増加に伴い気流の縮流に伴う局所圧力損失が増加したためである。一方、 J_L 増加に伴い ΔP は減少している。これは、 J_L 増加に伴い第 1 段 POR 上流の液膜厚さは増加し、POR 入口部の流路面積の縮小割合が相対的に小さくなり、気相の縮流による局所圧力損失が低下したためと考えられる。また、POR ギャップ幅の減少により ΔP は減少している。これは、ギャップ幅の減少により、流路のブロックage比 (POR 内側流路面積とパレル部流路面積の比) が小さくなったためといえる。POR (Improved) では POR (Normal) と比較すると定格運転相当条件で ΔP が約 43% 低減している。これは、流路のブロックage比が小さくなったことに加え、POR 下流における流れの剥離の緩和により、局所圧力損失が減少したためといえる。

Fig. 11 Effects of POR type on ΔP .

Fig. 12 に液相分離率を示す。POR ギャップ幅の減少により第 1 段 POR における液相分離率 $W_{s,1}^*$ は減少している。これは、ギャップ幅の減少により、液膜及び擾乱波が第 1 段 POR 部から排水流路側へ流入しづらくなったためといえる。第 2 段 POR における液相分離率 $W_{s,2}^*$ はギャップ幅の減少により増加している。これは、 $W_{s,1}^*$ が減少し 2 段目に流入する液相が増加したためである。合計液相分離率 $W_{s,T}^*$ はギャップ幅の減少により僅かに減少している。これは、第 1 段 POR を乗り越える液相が増加し、その際に飛散する液滴量

が増え、再付着せずにガスコアを通過したこと、及び、2 段目に流入する液相の増加により第 2 段 POR を乗り越える液相が増えたためと考えられる。POR (Improved)では、ギャップ幅が同じ POR (R-Gap)と比較して $W_{s,1}^*$ が僅かに減少している。これは、POR 出口部における流路面積の急拡大が緩和されたことにより排水流路側への排水が抑制されたためと考えられる。しかし、第 2 段 POR 部での液相分離により $W_{s,1}^*$ の減少を補っており、 $W_{s,T}^*$ には大きな減少はみられない。

Fig. 12 Effects of POR type on W_s^* .

Fig. 13 に CU 測定結果を示す。POR ギャップ幅の減少により CU は減少する。これは、ギャップ幅減少により、液膜と POR のギャップ部に気相が流入しにくくなったためである。また、POR (Improved)による CU は、ギャップ幅が同じ POR (R-Gap)による CU とほぼ同じである。このことから、ギャップ幅 2.2 mm では CU に対する POR 下流流路形状の影響は小さいことがわかる。

以上より、Fig. 10 に示した改良型 POR により、気液分離性能を維持しつつ、圧力損失を低減できることを確認した。

Fig. 13 Effects of POR type on CU .

5. 結 言

気水分離器の第 2 段分離部までを模擬した縮小試験装置を用いて、流動状態、液相分離率、液膜厚さ、キャリーアンダー、圧力損失を測定し、気水分離器の構成要素であるピックオフリングが気液分離特性に及ぼす影響を実験的に調べ、以下の結論を得た。

- (1) 気相体積流束の増加に伴い、液相分離率が増加し、かつ、キャリーアンダーが減少する。ただし、液膜厚さが薄くなると、ピックオフリングギャップ部から排出流路へ気相が流入しやすくなるため、液相体積流束が低い条件下では、高気相体積流束条件においてキャリーアンダーが増加する傾向がある。
- (2) 液相体積流束が液相分離率に及ぼす影響は小さい。一方、液相体積流束の増加に伴い、キャリーアンダーは減少する。
- (3) ピックオフリングギャップ幅を最大液膜厚さ程度とし、出口部をディフューザ形状とした改良型ピックオフリングにより、気液分離性能を維持しつつ、第 1 段ピックオフリング部における圧力損失を著しく（約 43%）低減できる。

謝 辞

本研究における実験データ収集及び整理にあたっては、神戸大学大学院の卒業生である三賀丈詩氏、また、神戸大学大学院の船橋駿斗氏に協力頂きました。ここに記して感謝いたします。

Nomenclature

CU	: carryunder	[-]
D	: pipe diameter	[m]
J	: volume flux in the barrel	[m/s]
P	: gauge pressure	[Pa]
P^*	: non-dimensional pressure	[-]
t	: time	[s]
W_{Gs}	: separated-gas flow rate	[kg/s]
W_{Ls}	: separated-liquid flow rate	[kg/s]
W_{Lus}	: unseparated-liquid flow rate	[kg/s]
W_s^*	: ratio of separated-liquid flow	[-]
z	: axial position from the swirler outlet	[m]

Greek letters

δ_m	: mean value of liquid film thickness measurement data	[m]
ΔP	: pressure loss at 1st POR	[Pa]

Subscripts

B	: barrel
G	: gas phase
L	: liquid phase
P	: plenum
S	: standpipe
T	: total
1	: first stage
2	: second stage

参考文献

- [1] Wolf, S. and Moen, R. H., Advances in Steam-Water Separators for Boiling Water Reactors, ASME Paper No.73-WA/PWR-4 (1973).
- [2] Nakao, T., Murase, M., Ishida, N., Kawamura, T., Minato, A. and Moriya, K., Decreasing of Pressure Loss in BWR Steam Separator (1) (Evaluation Method of Gas-Liquid Separation), Japanese Journal of Multiphase Flow, Vol. 15(4), 382–389 (2001).
- [3] Nakao, T., Murase, M., Ishida, N., Kawamura, T., Nishida, K. and Moriya, K., Decreasing of Pressure Loss in BWR Steam Separator (2) (Decreasing Method of Pressure Loss), Japanese Journal of Multiphase Flow, Vol. 15(4), 390–398 (2001).
- [4] Ikeda, H., Takigawa, Y., Iwaki, C., Morooka, S., Yamazaki, Y., Yamada, K., Yagii, T. and Soneda, H., Development of Low-Pressure-Loss Steam Separator with Design by Analysis and Test (I) Validation of Analysis Method and Design of Low-Pressure-Loss Steam Separator, Trans. At. Energy Soc. Japan, Vol. 9(2), 109–117 (2010).
- [5] Iwaki, C., Yamazaki, Y., Morooka, S., Yamada, K., Ikeda, H., Yagii, T. and Soneda, H., Development of Low-Pressure-Loss Steam Separator with Design by Analysis and Test (II) Verification of the Full-Scale Steam Separator Performance with Improved Swirler, Trans. At. Energy Soc. Japan, Vol. 9(2), 118–124 (2010).
- [6] Katono, K., Ishida, N., Sumikawa, T. and Yasuda, K., Air-Water Downscaled Experiments and Three-Dimensional Two-Phase Flow Simulations of Improved Steam Separator for Boiling Water Reactor, Nucl. Eng. Des., Vol. 278, 465–471 (2014).
- [7] Kataoka, H., Tomiyama, A., Hosokawa, S., Sou, A. and Chaki, M., Two-Phase Swirling Flow in a Gas-Liquid Separator, J. Power and Energy Syst., Vol. 2(4), 1120–1131 (2008).
- [8] Kataoka, H., Shinkai, Y., Hosokawa, S. and Tomiyama, A., Swirling Annular Flow in a Steam Separator, J. Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 131, 032904 (2009).
- [9] Kataoka, H., Shinkai, Y. and Tomiyama, A., Pressure Drop in Two-Phase Swirling Flow in a Steam Separator, J. Power and Energy Syst., Vol. 3(2), 382–392 (2009).
- [10] Matsubayashi, T., Katono, K., Hayashi, K. and Tomiyama, A., Effects of Swirler Shape on Swirling Annular Flow in a Gas-Liquid Separator, Nucl. Eng. Des., Vol. 249, 63–70 (2012).
- [11] Takamasa, T. and Hazuku, T., Measuring a Film Flowing Down a Vertical Wall Using Laser Focus Displacement Meter (1st Report, Measuring Principle and Film Thickness), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 64(617), 128–135 (1998).
- [12] Matsunaga, S., Tomita, Y., Nishi, M. and Tsukamoto H., Fluidonics -Foundation and Application- (in Japanese), 82–84, Asakura Publishing, Tokyo (1991).