



旋回二相流動把握に基づく気水分離器圧力損失低減に関する研究

上遠野, 健一

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2017-03-25

(Date of Publication)

2018-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6926号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006926>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



論文内容の要旨

氏 名 _____ 上遠野 健一 _____

専 攻 _____ 機械工学 _____

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

旋回二相流動把握に基づく

気水分離器圧力損失低減に関する研究

指導教員 _____ 富山 明男 _____

(注) 2, 000 字～4, 000 字でまとめること。

東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所事故の影響により原子力発電の増加ペースは鈍化しているが、長期的には、開発途上国における人口増加や電力需要増加だけでなく、気候変動対策やエネルギーの安定供給、他の燃料価格の不安定さなどの理由から、エネルギーミックスにおいて原子力発電は重要な役割を果たすことが期待されており、事故の教訓を活かした安全機能強化に加え、経済性に優れた原子力発電プラントが求められている。改良型沸騰水型原子炉 (ABWR: Advanced Boiling Water Reactor) は現時点において世界で唯一運転実績を有する第 3 世代+の原子炉であるが、その炉内構造物である気水分離器は、流路内に固定された旋回羽根 (スワラー) により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機能を有する。気水分離器は原子炉冷却材の再循環経路に含まれるため、気水分離器の気水分離性能を維持しつつ圧力損失を低減させることで、再循環系ポンプの負荷低減や燃料サイクルコストの低減、密度波振動防止など、プラント特性の向上に寄与し、ABWR の安全性及び経済性を向上させることができる。

気水分離器に関する従来の研究においては様々な模擬実験が行われているが、模擬実験と実機実証試験との力学的類似性についての系統的研究はなされていない。また、機器評価指標である気水分離性能と圧力損失からスワラーの改良方法を検討した研究はなされているが、内部流動状態の把握に基づくスワラー形状の改良は行われていない。さらに、気水分離器の内部流動の詳細把握に基づく第 2 段、第 3 段ピックオフリング (気水分離器内壁面に形成された旋回液膜を分離し、気水分離器外部へと排水するための構成要素) を含む気水分離器の特性把握に関する研究は見当たらない。そこで本研究では、気水分離器内旋回二相流動の詳細把握に基づく、気水分離器の開発及び改良方法の構築を目的とした。

まず第 2 章では、気水分離器の実機実証試験結果を基に、空気-水系縮小実験と実機実証試験との力学的類似性を保つための物理量の選定について考察するとともに、実機気水分離器の 1/2 スケールの空気-水系縮小実験装置を用いて、気水分離器のキャリーオーバー (気水分離器の上部空間に排出される気相中に含まれる液相の質量流量割合) 特性の実機模擬性を実験的に調べた。気相流量を特徴づける気相の体積流速とクオリティ (全質量流量に対する気相の質量流量の比) を実機条件と一致させた場合、力学的類似性が成り立たず、キャリーオーバーの絶対値、及び、ABWR の定格クオリティ付近のキャリーオーバーの傾向を模擬できないこと、また、気水混合を特徴づける気相の運動エネルギーとクオリティを実機条件と一致させた場合、キャリーオーバー特性は実機実証試験と比較的良く一致したが、第 1 段排水率が実機実証試験よりも小さく、気水分離器内における第 1 段、第 2 段、第 3 段各々での気水分離プロセスが実機実証試験と異なる可能性があることがわかった。気水分離に影響を及ぼすと考えられる気水混合体の遠心力とクオリティを実機条件と一致させることで、広範囲のクオリティ条件下で、キャリーオーバー特性が実機実証試験

と同様の傾向となること、及び、ABWRの定格クオリティにおける第1段排水率が実機実証試験と同程度となることから、気水分離器内における気水分離プロセスが実機実証試験と類似であると考えられることを明らかにした。以上の検討結果から、流動状態の可視化や液膜厚さ計測といった流動状態の詳細把握が比較的容易な大気圧・空気-水系縮小実験により、実機実証試験の評価が可能となった。

続いて第3章では、気水分離器の第1段分離部までを模擬した縮小実験装置と、基準となる従来型スワラー、羽根の外周側出口角度を半分にしたスワラー、出口側ハブ径を半分にしたスワラー、及び、羽根枚数を8枚から6枚に減らしたスワラーを用いて、流動状態、液膜厚さ、液相分離率、圧力損失を測定し、気水分離性能の維持と圧力損失の低減との両立が可能なスワラー形状を実験的に調べた。スワラー形状に関しては、羽根の外周側出口角度を半分にしたスワラーでは、旋回力の低下により気水分離性能が低下し、かつ、スワラーが据え付けられているディフューザ内流路面積は従来型スワラーとほぼ変わらないため圧力損失低減の効果は小さいこと、また、出口側ハブ径を半分にしたスワラー、もしくは、羽根枚数を8枚から6枚に減らしたスワラーは、旋回力が維持されるため気水分離性能は低下せず、かつ、ディフューザ内流路面積は従来型スワラーより拡大されるため圧力損失を低減させることが可能であることがわかった。さらに、ディフューザ内流路面積の軸方向の変化率にも着目し、気水分離性能の維持と圧力損失の低減との両立が可能な出口側ハブ径の縮小、羽根枚数の減少に加え、ディフューザ入口におけるディフューザ内流路面積の急縮小を排除し、軸方向の流路面積変化を緩やかにした改良型スワラーを提案し、改良型スワラーによる気水分離性能は従来型スワラーと同程度であり、かつ、圧力損失は従来型スワラーに比べ約25%低減できることを確認した。

また第4章では、気水分離器の第2段分離部までを模擬した縮小実験装置を用いて、流動状態、液相分離率、液膜厚さ、キャリアアンダー（第1段分離部で分離された液相に含ま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流量制限リング（排水流路内に設置され、気泡を含む排水の排出量を調整することでキャリアアンダーが制限値以下となるように調整する構成要素）及びピックオフリングが気水分離特性に及ぼす影響を実験的に調べた。流量制限リングギャップ幅を狭くすることにより、排水流路面積が減少するため気相の流入が抑制されキャリアアンダー性能は向上するが、流量制限リングギャップ幅を狭くしすぎると、第1段ピックオフリングを乗り越える液相及び飛散する液滴が増加するため、液相分離率が低下する可能性があることがわかった。したがって、流量制限リングギャップ幅は、気水分離性能や圧力損失性能を踏まえ、最適化する必要があることを確認した。また、ピックオフリングギャップ幅を最大液膜厚さ程度とし、ピックオフリング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、気水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約43%低減できる

ことを低減できることを確認した。

以上、本研究では、縮小模擬実験による実機条件の模擬方法の妥当性について検討し、大気圧・空気-水系縮小実験装置を用いて、気水分離器内旋回二相流に関する実験データを蓄積し、スワラーやピックオフリング、流量制限リングといった、気水分離器の構成要素が旋回二相流動に及ぼす影響を把握した。本研究で得られた知見により、気水分離器内旋回二相流動の詳細把握に基づく気水分離器の圧力損失低減が可能となり、ABWRの安全性及び経済性向上に寄与できる。

氏名	上遠野 健一		
論文 題目	旋回二相流動把握に基づく気水分離器圧力損失低減に関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	富山 明男
	副査	教授	山根 隆志
	副査	教授	鈴木 洋
	副査	准教授	細川 茂雄
要 旨			
<p>東日本大震災に伴う原子力発電所事故の影響により原子力発電の増加ペースは鈍化しているが、開発途上国における人口増加や電力需要増加に加え気候変動対策やエネルギーの安定供給、他の燃料価格の不安定さなどの理由から、安全性・経済性に優れた原子力発電プラントの開発が求められている。改良型沸騰水型原子炉（ABWR: Advanced Boiling Water Reactor）は現時点において世界で唯一運転実績を有する第3世代+の原子炉である。その炉内構造物である気水分離器は、流路内に固定された旋回羽根（スワラー）により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機能を有する。気水分離器は原子炉冷却材の再循環経路に含まれるため、気水分離器の気水分離性能を維持しつつ圧力損失を低減できれば、再循環系ポンプの負荷や燃料サイクルコストの低減、密度波振動防止など、ABWRの安全性・経済性の向上に寄与できる。気水分離器に関する過去の研究では様々な縮小模擬実験が行われているが、模擬実験と実機実証試験との力学的相似性に関する系統的研究はなされていない。また、機器評価指標である気水分離性能と圧力損失からスワラーの改良方法を検討した研究はなされているが、内部流動状態の把握に基づくスワラー形状の改良は行われていない。さらに、気水分離器内壁面に形成された旋回液膜を分離・排出するための構成要素であるピックオフリングを複数含む気水分離器の特性を実験的に調べた研究は見当たらない。そこで本研究では、気水分離器内旋回二相流動の詳細把握に基づく、気水分離器の改良指針の構築を目的としている。</p> <p>第1章には、本研究の背景・既存の研究・目的が整理されている。</p> <p>第2章では、気水分離器の実機実証試験結果を基に空気-水系縮小模擬実験と実機実証試験との力学的相似性を保つための物理量が考察されている。また、実機気水分離器の1/2スケールの空気-水系縮小実験装置を用いて気水分離器のキャリアオーバー（気水分離器出口における全質量流量に対する液相の質量流量の比）特性の実機模擬性が実験的に調べられている。気相流量を特徴づける気相の体積流速とクオリティ（全質量流量に対する気相の質量流量の比）を実機条件と一致させても力学的相似性は成立せず、キャリアオーバーの定性的・定量的傾向を模擬できないこと、気水混合を特徴づける気相の運動エネルギーとクオリティを実機条件と一致させるとキャリアオーバー特性は実機実証試験と比較的良く一致するが第1段ピックオフリングによる排水率が実機実証試験よりも小さく実機実証試験の分離プロセスと異なる可能性があることが確認されている。一方、気水混合流体に作用する遠心力とクオリティを実機条件と一致させると広範囲のクオリティにおいてキャリアオーバー特性及び第1段排水率が実機試験と同様となることを明らかにしている。本結果から、遠心力とクオリティを一致させれば力学的相似が成立し、流動状態の可視化や液膜厚さ計測といった流動状態の詳細把握が比較的容易な大気圧・空気-水系縮小実験により、実機気水分離器特性の評価が可能であるという重要な結論を得ている。</p> <p>第3章では、第1段ピックオフリングまでを模擬した縮小実験装置と、基準となる従来型スワラー、羽根の外周側出口角度を半分にしたスワラー、出口側ハブ径を半分にしたスワラー、及び、羽根枚数を8枚から6枚に減らしたスワラーを用いて、流動状態、液膜厚さ、液相分離率、圧力損失を測定し、気水分離性能の維持と圧力損失の低減との両立が可能なスワラー形状を実験的に調べている。羽根の外周側出口角度を半分にしたスワラーでは旋回力低下により気水分離性能が低下し、かつ、スワラーが据え付けられているディフューザ内流路面積は従来型スワラーとほぼ変わらないため圧力損失低減の効果は小さいこと、また、出口側ハブ径を半分にしたスワラー、もしくは、羽根枚数を8枚から6枚に減らしたスワラーは、旋回力が維持されるため気水分離性能は低下せず、かつ、ディフューザ内流路面積が従来型より大きい</p>			

氏名	上遠野 健一
<p>圧力損失も低減可能であることを確認している。本結果を基に、出口側ハブ径の縮小、羽根枚数の減少に加え、ディフューザ入口におけるディフューザ内流路面積の急縮小を排除し、軸方向の流路面積変化を緩やかにした改良型スワラーを考案している。改良型スワラーによる気水分離性能は従来型スワラーと同程度であり、かつ、圧力損失は従来型に比べ約25%低減できることを明らかにしている。</p> <p>第4章では、第2段ピックオフリングまでを模擬した縮小装置を用いて、流動状態、液相分離率、液膜厚さ、キャリアアンダー（第1段ピックオフリングで分離された気相質量流量の全分離質量流量に対する比）、圧力損失を測定し、気水分離器の構成要素である流量制限リング（排水流量に設置されている排出流量調整用部品）及びピックオフリングが気水分離特性に及ぼす影響を実験的に調べている。流量制限リングのギャップ幅を減少すると排水流路面積減少により排水流路への気相流入が抑制されキャリアアンダーは低下するが、流量制限リングギャップ幅を狭くしすぎると第1段ピックオフリングを乗り越える液相及び飛散する液滴が増加するため液相分離率が低下する可能性があることが確認されている。また、ピックオフリングギャップ幅を最大液膜厚さ程度とし、かつ、ピックオフリング出口部をディフューザ形状とする比較的単純な改良により、気水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43%も低減できることを明らかにしている。</p> <p>第5章には、本研究の成果が総括されている。</p> <p>本研究は、気水分離器内旋回二相流に関する詳細な流動把握に基づきスワラー、ピックオフリングの改良指針を提示したものであり、原子炉熱流動に関する重要な知見を得たものとして価値ある集積である。提出された論文は工学研究科学学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の上遠野健一は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。</p>	