



なく、必要な冷却水の温度条件や、排ガス側の圧力損失条件を考慮して、本システムに適した方式を検討、実証する必要がある。同時に、AHAT システム全体の熱物質収支を評価することを念頭に、これらシステム固有の機器に流入する流体の組成、温度、圧力および流量の非線形な応答を解明し、予測可能なモデルを構築しておく必要がある。最後に、本システムのように、複雑な応答を示す機器が組み合わされたシステムでは、定格運転条件や機器仕様の決定、起動停止も含めた運用計画の立案にあたり、各機器の動作特性を連成させた熱物質収支を評価する手法の構築が必要となる。

これらの課題を踏まえ、本研究の目的は、以下とした。

- (1) 本システム固有の機器である増湿塔に関し、本システムに適した方式を検討する。システム全体と増湿塔の動作特性を連成させた熱物質収支計算により、システム検証機の増湿塔の機器仕様と運用条件を決定する。
- (2) 本システム固有の機器である水回収装置に関し、本システムに適した方式を検討するとともに、機器内部の熱物質移動現象をモデル化して、システム全体と連成させた熱物質収支計算により、システム検証機の水回収装置の機器仕様と運用条件を決定する。
- (3) 複雑な応答を示す機器(増湿塔、ガスタービン、水回収装置など)が組み合わされたシステムにおいて、各機器の動作特性を連成させた熱物質収支計算を行い、定格運転条件や機器仕様を決定し、起動停止も含めた運用計画を策定する。
- (4) システム検証機を製作、運転することにより、前記(1)(2)の固有機器の動作の実証と、構築したこれら機器単体モデルの妥当性、前記(3)のシステム全体の評価手法の妥当性を検証するとともに、本システムの原理的な成立性を確認する。

## 2. 増湿塔の基本仕様検討

ガスタービンシステムに適した加湿装置の方式検討の結果、システム検証機には充填物を用いた増湿塔を採用することとし、従来の提案モデルから計算に必要な精度を考慮した簡略モデルを構築した。本モデルを用いて、従来研究では十分に検討されていなかった、増湿塔に供給する空気や熱水の運用条件を検討した。電気出力 3 MW 級のシステム検証機を対象として、増湿塔循環水のポンプ動力、増湿塔に関連する熱交換器類の体積、増湿塔への散布水の突沸有無などを考慮し、散布水温度は沸点から下方にマージンを取った 160 °C、空気供給温度は増湿塔出口空気温度と同等な 105 °C、充填物高さは熱交換器類の体積を最小とする観点から 1 m を選定した。

## 3. 水回収装置のモデル化および基本仕様検討

ガスタービンシステムの水回収装置として、経済性、排ガス側の圧力損失の面で有利な従来にないスプレイ式水回収装置を検討した。対向流スプレイ式は温度効率が高いものの液滴の逆流と気液接触距離の確保が課題であり、スプレイ液滴の落下運動と、液滴と排ガスの熱物質移動現象をモデル化し、3 MW 級システム検証機の水回収装置の仕様を検討した。その結果、排ガス流速は 2.5 m/s、ザウタ平均スプレイ液滴径は 650  $\mu$ m、気液接触距離は 1.5 m、スプレイ水流量は 45 kg/s 以上とすることで、液滴の逆流を許容値以下に抑えつつ、増湿塔の加湿量に対して 109.6 %を回収可能となる見通しを得た。

## 4. システム熱物質収支評価手法の検討

高湿分空気利用ガスタービンシステム全体に関して、各機器のオフデザインでの動作特性を連成させ

た熱物質収支計算を可能とする目的で、ガスタービン本体、熱交換器など、第 2 章で述べた増湿塔、第 3 章で述べた水回収装置以外の機器に関してもモデル化した。市販の動特性シミュレーターを用いて逐次法によりシステム全体の熱物質収支計算を可能とするにあたり、一時遅れ要素を利用して、計算の発散を防ぎつつ、現実的な時間で計算可能となる工夫をした。このように、増湿塔や水回収装置の複雑な応答特性を連成させてシステム全体の熱物質収支を計算可能としたことで、各状態での空気冷却器、エコマイザの循環水流量と、排ガス再加熱器への再循環水流量、吸気噴霧冷却水の流量の運用を定量的に計画可能となった。

## 5. 要素およびシステム実験による検証

前章で検討した AHAT システム検証機を製作、運転することにより、増湿塔、水回収装置の動作を実証し、出口流体の温度条件や加湿量、水回収量の計算結果と実測値の比較により、これらの章で検討した機器の運用条件の妥当性と、熱物質移動モデルの妥当性を検討した。増湿塔の運用条件に関しては、第 4 章で計画した散布水流量を基に調整することで問題の無い条件で運転することができた。増湿塔の熱的性能に関しては、第 2 章で検討した増湿塔評価モデルを用いることにより加湿量や流体出口温度の計算値と測定値が十分な精度で一致した。水回収装置の運用条件に関しては、微細な液滴の逆流割合を許容値以下に抑制する観点から、排ガス流速と気液接触距離、スプレイ液滴径の組み合わせを検討し、逆流するミスト量を許容値以下として運転できた。水回収装置の熱的性能に関しては、回収水量を約 10 % 過大評価しており、スプレイ液滴の中に一部含まれる微細な液滴が、排ガス流れにより逆流して系外に散逸するなどの原因が考えられる。この因子を予め考慮すれば、本研究のモデルにより、同様の方式の水回収装置の基本設計と、部分負荷での挙動を詳細に予測できると考えられる。

部分負荷状態のシステム全体ヒートマスバランスの予測に関しては、発電効率の計算結果と測定値の差は 4 ケース平均で 0.35%(相対値)、空気、排ガス、水系温度(16 箇所)の差は平均 4.9℃であった。この程度の予測精度であれば、部分負荷性能の予測には充分であり、新規なプラントの仕様決定、運転計画の立案が十分に可能である。また、本システム検証機の運転により、AHAT システムを構成する全ての機器が計算と合致して動作していることが確認でき、発電効率も計算と合致しているため、AHAT システムの原理的な成立性を確認した。最後に、商用機のプラント機器の仕様の把握を目的として、圧力比が 8 から 24、発電端出力が 1MW から 100MW の 5 つのケースを仮定して、増湿塔及び水回収装置の仕様を検討した。増湿塔に関しては、充填物の体積と、排熱回収する熱交換器(エコマイザ、空気冷却器、再生熱交換器)の体積の合計が最小となる組み合わせを検討し、これら合計体積が最小となるのは、圧力比 8 から 24 について、充填物高さが 1m、2m、3m、4m、6m となる場合であった。

## 6. 結論

高効率で負荷変動への追従性が良い高湿分空気利用ガスタービンシステムの原理的な成立性の確認を目的として、数値シミュレーションおよび検証実験を行い、以下の結果を得た。

- (1) 本システム固有の機器である増湿塔に関し、本システムに適した方式を検討するとともに、増湿塔の充填物内部の熱物質移動モデルを用いて、電気出力 3MW 級のシステム検証機の増湿塔の基本仕様、運用条件を検討した。ガスタービンの圧力比や排熱が変化する状況での増湿塔の運用方法が詳細に検討可能となり、散布水温度や空気供給温度を目標値とするための給水流量計画を決定した。
- (2) 本システム固有の機器である水回収装置に関し、低圧損の特徴を持つ、従来に無いスプレイ式(対

向流)を検討し、スプレイ液滴の落下運動と、液滴と排ガスの熱物質移動現象をモデル化した。そのモデルを用い、3MW 級システム検証機の水回収装置の仕様、運用条件を検討した。

(3) 複雑な応答を示す機器(増湿塔、ガスタービン、水回収装置など)が組み合わせられたシステムにおいて、各機器のオフデザインでの動作特性を連成させた熱物質収支計算を可能とするモデルを作成した。各機器の応答特性を連成させてシステム全体を計算可能としたことで、各機器の仕様と、運用計画を立案可能となった。

(4) システム検証機を製作、運転することにより、前記(1)(2)の固有機器の動作の実証と、構築したこれら機器単体モデルの妥当性、前記(3)のシステム全体の評価手法の妥当性を検証するとともに、本システムの原理的な成立性を確認した。