

学位論文題名

発電用セラミックガスタービン要素機器の基本構造

および高温特性に関する研究

学位論文内容の要旨

近年のガスタービンの進歩は著しく、今後の高効率火力は LNG または石炭ガス化によるガスタービン/蒸気タービンの複合発電が主流になるものと考えられるが、プラント熱効率の向上には、ガスタービンの高温化が重要である。今日のガスタービンの高温化は、主に耐熱合金の開発、冷却技術の進歩によるものであるが、従来の金属空冷ガスタービンでは、高温化に伴って冷却空気が増大し、これが効率向上を押さえている。このため、一部のタービン翼に水蒸気冷却を用いた 1500℃級ガスタービンの導入も計画されている。

一方、耐熱性に優れるセラミックスをガスタービンの高温部に適用したセラミックガスタービンでは、高温化と冷却空気量の低減化が可能となり、熱効率の大幅な向上が期待できる。また、セラミックスを燃焼器に適用した場合、燃焼器壁面の冷却が不要となるため、金属製燃焼器に比べて燃焼性能が向上することが期待できる。

しかしながら、セラミックスは脆性材料であり、強度にばらつきを示すなど、構造材としての信頼性に乏しいという欠点を有しており、これがセラミックガスタービンの実現を阻む最大要因となっている。特に発電用ガスタービンでは、燃焼器、タービン翼の部品寸法が大きいため、有効体積の増加によりセラミックスの破壊確率が高くなり、平均強度は低下する。したがって、燃焼器、タービン翼にセラミックスを適用し、その信頼性を確保するためには、金属製部品を単純にセラミックスに置き換えるのではなく、脆性材料であるセラミックスに適した構造設計を行う必要があると考えられる。

これまでの研究開発においては、セラミックスの分割化など、構造設計面での工夫による強度信頼性の向上が試みられている。しかしながら、大型のガスタービンにセラミックスを適用する際の構造設計技術が確立しているとは言い難く、また、1500℃級セラミック燃焼器・タービン翼について、ガスタービン条件における性能と強度信頼性を検証した例はない。

本研究では、セラミックガスタービンの強度信頼性を向上させるための構造設計概念を明確にするとともに、それに基づくセラミック燃焼器・静翼の基本構造を検討した。また、20MW 級ガスタービンを対象に 1300℃級セラミック燃焼器・静翼を設計・製作し、高圧要素試験により、その性能と強度信頼性を検討した。さらに、セラミック燃焼器・静翼の高温化の可能性について検討するため、構造改良により強度信頼性向上を図った 1500℃級セラミック燃焼器・静翼を設計・製作し、高圧要素試験により、その性能と強度信頼性を検討するとともに、燃焼器・静翼の耐久性について試験片レベルでの検討を行なった。

本論文は7章より構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景とガスタービンへのセラミックスの適用効果について述べるとともに、本研究の目的と概要を述べた。

第2章では、燃焼器・タービン翼の要素試験における燃焼ガス温度計測手法、ならびに、

セラミック材料の耐熱衝撃性評価試験法について検討した。まず、ガスタービンの高温化に伴う要素試験条件の高温化に対応するため、発電用としては今のところ最も過酷な環境と考えられる 1700℃級水素燃焼タービン条件を想定して、燃焼器出口（翼列入口）ガス温度分布測定用の多点型ガス温度プローブを設計・製作した。また、水素燃焼タービン用燃焼器・タービン翼の高圧要素試験に供試し、1700℃級燃焼器・タービン翼の要素試験に適用可能であることが示された。次に、セラミックスの耐熱衝撃性評価試験法として、高温高速燃焼ガス流による熱衝撃試験法を提案し、SiC 製モデル翼を試験片とした熱衝撃試験を実施した。その結果、本試験法によれば熱応力と破壊の関係を定量的に把握することができ、従来困難とされていた 1000℃以上の高温下におけるセラミックスの耐熱衝撃強度の検討が可能になると考えられた。

第3章では、セラミックガスタービンの強度信頼性を向上するための方策として、①セラミックスと金属の複合構造化、②セラミックスの分割化、③セラミックス固定部の遮熱・緩衝化などの構造設計概念の導入について述べた。また、この構造設計概念に基づき、セラミック燃焼器の基本構造として、燃焼器金属壁の内面をセラミック繊維とセラミックタイルで覆ったセラミックタイル・繊維複合型構造について検討した。その結果、本燃焼器構造では壁面の冷却空気量を大幅に低減でき、燃焼性能の向上やセラミックタイルの熱応力低減が期待できると考えられた。セラミック静翼については、その基本構造として、セラミック翼の内部を金属製の翼芯が貫通するセラミックス・金属ハイブリッド静翼構造について検討した。その結果、本静翼構造における必要冷却空気量は金属製空冷翼に比べて大幅に低減できると考えられた。

第4章では、セラミック燃焼器・静翼の基本構造の検討結果に基づき、20MW、1300℃級セラミック燃焼器・静翼を設計・製作し、高圧要素試験により、その性能と強度信頼性について検討した。燃焼器については、石炭ガス化低カロリー燃料用 Si_3N_4 製燃焼器を設計・製作し、高圧燃焼試験によって燃焼器のセラミックス化による燃焼性能の向上効果を明らかにするとともに、定格条件からの燃料急速遮断という最も過酷な条件にも耐え得る強度信頼性を有することを検証した。また、静翼については、 Si_3N_4 製静翼を設計・製作し、高圧翼列試験によって必要冷却空気量が金属製空冷翼の約 1/20 に低減されることを明らかにするとともに、定格条件からの燃料急速遮断という最も過酷な条件にも耐え得る強度信頼性を有することを検証した。

第5章では、セラミック燃焼器・静翼を高温化する際の課題について検討するとともに、構造改良により強度信頼性向上を図った 20MW、1500℃級燃焼器・静翼を設計・製作し、高圧要素試験により、その性能と強度信頼性を検討した。燃焼器については、セラミックス固定部の構造を改良した、石炭ガス化低カロリー燃料用 SiC 製燃焼器の高圧燃焼試験を実施し、定格条件からの燃料急速遮断という最も過酷な条件にも耐え得る強度信頼性を有することを確認した。また、静翼については、セラミック翼の内孔後縁部を拡張するとともに、翼芯の内部冷却方式を採用した、SiC 製静翼の高圧翼列試験を実施し、必要冷却空気量が金属空冷翼の 1/10 以下であることを確認するとともに、翼芯温度を設計温度である 800℃程度に維持することにより、脆性の著しい SiC であっても健全性を確保できるものと考えられた。

第6章では、ガスタービン条件におけるセラミック燃焼器・静翼の耐久性について検討するため、ガスタービン環境を模擬した 1500℃の高速燃焼ガス流中にセラミック試験片を最長 1000 時間まで曝露し、強度劣化特性および酸化特性について検討した。その結果、SiC では燃焼ガス曝露による強度の低下はほとんど見られないが、燃焼ガス流中では試験片の表面に生成した酸化膜が何らかの原因で消失し、酸化膜による保護効果が十分機能しないため、時間とともに減肉が進行することを明らかにした。

第7章では、本研究の結論を取りまとめるとともに、今後の展望について述べた。

以上

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 菱 沼 孝 夫

副 査 教 授 野 口 徹

副 査 教 授 工 藤 一 彦

副 査 教 授 杉 山 憲一郎

学 位 論 文 題 名

発電用セラミックスガスタービン要素機器の基本構造 および高温特性に関する研究

地球温暖化防止のための炭酸ガス排出量削減にはエネルギー消費の大半を占める発電プラントの一層の効率向上が必要である。特に発電の主力である火力発電の高効率化を図るため、今後 LNG または石炭ガス化によるガスタービンを中心とした蒸気タービンとの複合発電が主流になるものと考えられる。近年のガスタービンの進歩は著しく、ガスタービンの高温化による効率向上を図っているが、従来の金属空冷ガスタービンでは、翼冷却空気の増大が効率を低下させるため効率が制約される。そのため耐熱性に優れたセラミックスを高温部である燃焼器およびタービン翼に使用することが試みられているが、その構造と材料の両面から、実用化で重要な、ガスタービンの高温環境下での性能と材料強度は解明されていなかった。

本研究はセラミックガスタービンの強度信頼性を向上させるための構造設計概念を提案し、それに基づくセラミック燃焼器・静翼の基本構造を明らかにしている。更に、20MW 級ガスタービン規模で 1300℃および 1500℃級セラミック燃焼器・静翼を設計・製作し、高圧要素試験により、その性能と強度信頼性を明らかにしている。この結果、耐熱性に優れるセラミックスをガスタービンの高温部に適用したセラミックガスタービンでは、高温化と冷却空気量の低減が可能となり、熱効率の大幅な向上が期待できる。

本論文は 7 章より構成されている。

第 1 章は序論であり、本研究の背景と目的を明らかにしている。

第 2 章では、燃焼器・タービン翼の要素試験における燃焼ガス温度計測手法、ならびに、セラミック材料の耐熱衝撃性評価試験法を提案し、1700℃級ガス温度分布測定用の多点型ガス温度プローブを設計・製作し高温条件下で検証すると共に高温高速燃焼ガス流による熱衝撃試験装置を製作し、SiC 製モデル翼を試験片とした熱衝撃試験を実施し、熱応力と破壊の関係を定量的に把握している。

第3章では、セラミックガスタービンの強度信頼性を向上するための基本構造として、セラミック燃焼器について、燃焼器金属壁の内面をセラミック繊維とセラミックタイルで覆ったセラミックタイル・繊維複合型構造、セラミック静翼については、セラミック翼の内面を金属製の翼芯が貫通するセラミックス・金属ハイブリッド静翼構造を提案している。

第4章では、セラミック燃焼器・静翼の基本構造の検討結果に基づき、20MW規模の、1300℃級 Si_3N_4 製燃焼器を設計・製作し、実用条件を模擬した高圧燃焼試験によって過酷な条件にも耐え得る強度信頼性を検証している。静翼については、 Si_3N_4 製静翼を設計・製作し、高圧翼列試験によって必要冷却空気量が金属製空冷翼の約1/20に低減されること、強度信頼性を有することを検証している。

第5章では、セラミックス材料を Si_3N_4 からSiCに変更し、20MW規模の、1500℃級燃焼器・静翼を設計・製作し、高圧要素試験により、その性能と強度信頼性を検証している。SiC製静翼の高圧翼列試験によって必要冷却空気量が金属空冷翼の1/10以下であることを確認するとともに、翼芯温度を設計温度である800℃程度に維持することにより、脆性の著しいSiCであっても健全性を確保できることを結論している。

第6章では、ガスタービン環境を模擬した1500℃の高速燃焼ガス流中にセラミック試験片を最長1000時間まで曝露し、強度劣化特性および酸化特性について検討し、SiCでは燃焼ガス曝露による強度の低下はほとんど見られないが、燃焼ガス流中では材料表面の酸化膜が消失し、時間とともに減肉が進行するので、実用化にはその対策が必要であると結論している。最後に論文全体の総括を行っている。

以上のように本論文は実用規模の検討によりセラミックスガスタービンの基本構造を明らかにすると共に材料の強度、耐久性の限界を明らかにしており、高温ガスタービン設計の指針を与えたものであり、将来の熱工学、エネルギー変換工学に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。