

論文の内容の要旨

論文題目 Process Integration and Design of High Efficiency Power Generation Systems Based on Energy Recuperation Technology

(エネルギー再生技術に基づく高効率発電システムの統合化と設計に関する研究)

氏名 クチョンターラー プラパン

第1章

本章は、まずエネルギーに対する基礎的な事柄をまとめ、発電システムについてその原理と特徴を整理して解説した。そして、高効率発電技術に関する既往の研究をまとめた。年々電気エネルギーの需要が増加する中、エネルギー資源を有効に利用するため、より高効率な発電システムが求められている。タービンや燃料電池などの要素技術とそれぞれの技術を組み込んだシステムがこれまで提案されてきたが、個々の要素技術の改善では限界がある。さらなる高効率化のためには、個々の要素技術をいかに統合するかという最適システム化技術、あるいはその手法・方法論が重要となる。既往の研究では、発電システムから出た排熱をいかに有効に利用するかという観点のみに基づいて、全体の効率の向上を図ってきた。しかし、これは主なエクセルギー損失が燃焼過程で生じていることを考えると、排熱のマッチング・有効利用のみでは限界があることは明らかである。そこで、エネルギープロセス内で質が低下したエネルギーすなわち排熱をリサイクルすることによって、エネルギーの有効利用を図るという「エネルギー再生」の概念を提案し、その原理と適用手法について考察し、高効率化を実現するための統合的なエネルギープロセスの設計手法及び方法論を確立することを目的として研究を行った。具体的な例として、燃料電池とガスタービン；バイオマスガス化とガスタービンの組み合わせを取り上げ、それぞれにエネルギー再生技術をどのように適用すればよいかを、プロセスシミュレーターを用いて計算することによって明らかにし、エネルギー再生技術による発電システムの高効率化に必要な設計手法を明らかにした。

第2章

本研究では、エネルギー再生技術を、排熱を熱として再利用する熱再生、水蒸気を発生させて排熱を再利用するスチーム再生、排熱を反応熱として再利用する熱化学再生の3つに分類し、それぞれの原理及び特徴を解析した。その上で、エネルギー再生の概念に基づき、エネル

ギープロセスをどのように統合化すべきかの指針を提案した。まず、エクセルギーの観点から、ガスタービン（GT）の発電技術を解析し、内部損失として燃焼過程におけるエクセルギー損失が最も大きいことを示した。また、単純な GT では、内部損失に加えて外部損失として廃熱のエクセルギーも大きいため、システムの効率が低くなることを示した。その結果、エネルギープロセスでの効率向上のためには燃焼過程におけるエクセルギー損失と外部損失としての廃熱の損失を共に低下させることが必要であることを明らかにした。従来の高効率化の手法であるカスケード利用では、GT と水蒸気タービン（ST）のコンバインドサイクルなどにおいて、排熱を回収し、外部損失を減らすことによって全体の効率を向上できるが、燃焼過程におけるエクセルギー損失を低下できるものではないことを指摘した。これに対して、エネルギー再生は内部損失と外部損失の双方の低下が期待できることを示した。

熱再生、スチーム再生、熱化学再生をガスタービンに適用し、それぞれをした。すると、熱再生は燃焼過程におけるエクセルギー損失（内部損失）を減少させるので、燃焼性能を向上させることがわかった。一方、スチーム再生の場合は低エクセルギー率の水蒸気を加えるため、燃焼過程のエクセルギー損失が大きくなるが、スチーム再生は熱再生より廃熱のエクセルギー損失（外部損失）を大いに減少させることができ、その結果、スチーム再生を組み込んだ GT は単純な GT より効率が高いことがわかった。しかし、燃焼や水蒸気発生などにおける内部損失が大きいため、熱再生を組み込んだ GT より総合効率が低いこと、また熱再生はスチーム再生より効率的であることがわかった。それにもかかわらず、熱再生では排熱を回収しきれない場合があるので、熱再生だけでは不十分だと考え、熱再生に加えてスチーム再生を適用した結果、より高い効率が得られることがわかった。また、熱化学再生を適用することで、全体の効率が更に向上することを示した。これは、吸熱反応によって、燃料の熱容量が増加しエクセルギー率が減少するので、燃焼におけるエクセルギー損失と外部損失が低下したためだと考えた。

第3章

近年の高効率発電システムの一つである固体電解質形燃料電池（SOFC）とガスタービン（GT）のコンバインドシステム（SOFC-GT）に対して、提案した手法を実際に適用し、本手法によって SOFC-GT の最適設計が可能なことを実証した。そして、SOFC と高温分ガスタービンのコンバインドシステム（SOFC-HAT）を、熱とスチーム再生を組み込んだ新しいシステムとして提案した。まず、SOFC-GT のコンバインドシステムにおけるエネルギー再生技術の新しい統合化の評価を行った。その結果、全体のシステムパフォーマンスが主に SOFC の燃料利用率と GT の効率によるということがわかった。GT 燃焼室のエクセルギー損失の減少は、SOFC の燃料利用率を高めシステム全体の効率を向上する。そのため、熱再生を組み込んだ GT

は同じタービン入り口温度で、高い SOFC の燃料利用率が得られることがわかった。また、熱再生で回収しきれない GT の排熱をスチーム再生で使用するによって、全体の効率が上がることを明らかにした。

一方、SOFC-HAT は、通常の熱とスチーム再生を統合した SOFC-GT、及び水蒸気タービン (ST) を組み込んだ SOFC-GT システムより、総合効率が優れていることが示された。これは、エネルギー及びエクセルギー解析の結果により、SOFC-HAT は熱とスチームの再生比率が高く、内部エクセルギー損失が最も低いとわかった。

第4章

本章では、バイオマスガス化とガスタービンを組み合わせたシステム (BIG/GT) に対して、エネルギー再生技術を適用し、最適プロセス設計を試みた。一般的なガス化炉の内部燃焼の代わりに、GT の排熱を熱化学再生しガス化の反応熱として与えることで、全体の効率の向上が期待できる。ここでは、三つ全てのエネルギー再生技術を組み込んだ BIG/GT を提案した。まず、エネルギー再生技術を適用することによって廃熱の外部損失が低下し、それにより、一般の BIG/GT より全体の効率が高くなった。また、熱とスチーム再生を組み込んだ BIG/GT と比較しても、三つのエネルギー再生技術を統合したシステムの効率が高いことから、熱化学再生を導入すると効果的であることが実証された。エクセルギー解析の結果、熱交換器におけるエクセルギー損失を減少させることで、システムの総合効率が向上するということがわかった。

第5章

本章は本研究の総括である。本研究によりエネルギー再生の概念に基づき、発電システムを高効率化するための設計手法及び方法論を提案した。エクセルギーの観点から、熱再生、スチーム再生、熱化学再生のそれぞれの特徴を解析し、最適な統合化の指針を提案した。エネルギー再生技術を組み込む際には、まず熱再生と熱化学再生を最大にするように適用するのが最も有効であることが明らかになった。さらに、外部損失を低下するためには、スチーム再生を適用することが適切であることがわかった。また、SOFC-GT と BIG/GT について提案した手法を実際に適用したところ、より高い効率が得られた。このような新しいエネルギー再生技術を統合したシステムを提案した。