水素酸素燃焼 CO₂フリー・ガスタービン 発電システムの実特性シミュレーションとその検討

正員 朴 炳 植 (大阪大学)

非会員 信田 祥 司 (大阪大学)

正員 鈴木 胖 (大阪大学)

Simulation and Sensitivity Analysis of Hydrogen-Oxygen-Burning CO₂-Free Gas Turbine Power Generation System

Pyong Sik Pak, Member, Shoji Shinoda, Non-member and Yutaka Suzuki, Member (Osaka University)

A hydrogen-oxygen-burning CO₂-free gas turbine power generation system has been proposed as one of future high efficiency energy systems, in which the steam produced by utilizing waste heat from factories is used as the working fluid of gas turbine. A simulation model is constructed in this study to estimate power generation characteristics of the proposed system by adopting C++ language. It has been shown from simulation results that the proposed system has high exergetic efficiency, that is, the total exergetic efficiency is 66.2% and fuel-based one is 88.2% for a system utilizing steam with 200°C. Sensitivity analysis has also been carried out when usable steam temperature is changed, together with the case when condenser outlet pressure is changed. A modified system is proposed in this study to make it possible to utilize lower temperature waste heat; that is, a system incorporated a waste heat recovery boiler (WHB). It has been shown that the modified system can make use lower temperature steam than the original proposed system, although its efficiency is deteriorated than the one of the system without a WHB. The characteristics of the system when methane gas is used instead of hydrogen have also been investigated in this study.

キーワード： 水素, 酸素, 二酸化炭素, シミュレーション, 廃熱利用, ガスタービン, 感度解析

1. はじめに

水素燃料は現状では天然ガスを利用して、将来においては太陽エネルギーなどを利用した水の電解などにより製造される貴重な二次エネルギーである。このため、水素燃料の特徴を積極的に生かした高効率な発電システムでの利用を考えるべきである。高効率な発電システムとしては、水素燃料の持つ化学エクセルギーを直接電気エネルギーに変換する燃料電池が高効率システムを実現出来ると期待されている⁽¹⁾。しかし、燃料電池による大規模発電は経済性や信頼性の点でまだ問題があることはよく知られている。これに対して、化学エクセルギーを熱エネルギーを介して電気エネルギーに変換する熱サイクルを利用して発電する火力発電システムは、技術の信頼性や経済性の点で優れたシステムを構築しやすいので、熱サイクルの工夫による効率向上の重要性は高いといえる。水素を燃料とする火力発電シ

テムとしては Aphodid サイクルがよく知られているが⁽²⁾、超高温燃焼が必要など発電の技術が在来の火力発電システムと大幅に異なるので、従来の要素機器技術の応用が困難と考えられる。そこで、本研究では在来の火力発電技術の延長線上にある高効率発電システムを考案することとする。

このような観点から筆者らは、先に発電サイクルの原理に戻ってエクセルギーの流れを分析し、高効率化の対策を考察し、エクセルギーの無駄を省いたエクセルギー利用効率の高い水素酸素燃焼発電システムを提案した⁽³⁾。本システムは、工場排熱など温度が低く質の低い熱エネルギーを利用して製造した飽和蒸気をタービン作動流体として利用し、未来のクリーンな燃料として期待されている水素を燃料とし、酸素を用いて燃焼させる NO_xフリー・CO₂フリーの発電システムである。本システムは従来発電要素機器の組合せで構成されるので、実現が容易なほか信頼性の高いシステムが構築できると期待される。文献(3)では、発電サ

図 1. 水素酸素燃焼 CO₂フリー・ガスタービン 発電システムの構成

Fig. 1. Structure of hydrogen-oxygen-burning CO₂-free gas turbine power generation system.

図 2. 仮想的条件での提案システムのエクセルギーフロー

Fig. 2. Exergy flow of the proposed system estimated under simplified hypothetical assumptions.

イクルの熱力学特性の基本的解析を可能とするため、

1. 燃料流量および燃焼用酸素流量は、作動流体の流量に比べ無視できる。このため、燃料および燃焼用酸素の圧縮動力も無視できる。
2. 各機器での圧力損失、放熱損失、機械損失は無いとする。
3. タービンでの膨張過程において、蒸気の比熱は一定と仮定できる。

などの仮想的な前提条件の基で解析を行い、極めて高いエクセルギー効率を持つと推定されることを述べた⁽³⁾。しかし、これらの想定が現実には成立しないのは明らかである。

本論文では、これらの前提をおかずに現実的な条件を考慮して、提案新システムの特性を推定するためのシミュレーションモデルを開発し、特性を推定した結果について述べる。また、システムの構成を一部変更したシステムや類似システムとの相互比較を行ったり、感度解析を行って得られた結果についても論じる。

2. 提案システムの構成と特徴

図1に筆者らが提案する水素酸素燃焼 CO₂フリー・ガスタービン発電システムの構成を示す。本システムでは、工場廃熱や太陽エネルギー等を利用して製造した水蒸気ガスをガスタービンの作動流体として利用する。作動流体の本発電システムへの入口端では飽和蒸気の状態と仮定している。これは、飽和蒸気を製造するのは過熱蒸気を製造する場合に比べ過熱器が不要で製造しやすいからである。また、工場廃熱は定常的に発生するとは限らず、間欠的に発生する熱を蒸気アキュムレータなどに蓄熱して利用する場合も多いと考えられるからである⁽⁴⁾⁽⁵⁾。以下では、工場廃熱利用製造の飽和蒸気が利用できるものとする。

作動流体の状態は発電サイクルの中で過熱蒸気となったり、飽和水となったり、圧縮水となったりするので、以下 H₂O と総称する。本システムでは、図1に示すように再生器で加熱後の H₂O をガスタービン燃焼器に導き、ここで燃料（水

素) および燃焼用酸素を噴射して燃焼させることにより、 H_2O の温度を 1000°C 以上 (例えば 1300°C) の高温ガスとする。燃焼器出口の高温ガスは、まずタービンに導かれ発電機の駆動に利用される。タービン出口の H_2O はまだかなり高温であるので、次に再生器に導かれ前述のように燃焼器入口の H_2O の昇温に利用される。再生器出口の H_2O はこの後熱交換器に導かれ、リターン水の昇温にさらに利用される。熱交換器を出た低温の H_2O は最後に復水器に導かれ冷却水で冷却されて復水となる。復水はポンプで加圧され熱交換器で加熱された後、飽和蒸気の製造のため廃熱利用工場に戻される。

提案システムでは、上で説明したことから分かるように従来式ガスタービンとは異なり作動流体ガスの圧縮仕事は不要となる。作動流体の圧縮の過程は復水の圧縮という液体の状態で行われるので、後でも示すように実際上無視できるほどのエネルギーしか必要とされない。このため、タービン出力のほとんどが発電機の駆動に利用されるので、顕著に高効率になると期待される。

図 2 は先に述べた仮想的な前提条件の基で、再生器入口の飽和蒸気の温度 200°C 、タービン入口温度 1300°C 、復水器出口圧力 0.05 kg/cm^2 、タービン断熱効率 $\eta_t = 0.875$ 、再生器温度効率 $\eta_h = 0.75$ 、作動流体の定圧比熱 $c_p = 0.562\text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$ と仮定して、解析した特性推定結果⁽³⁾ をエクセルギーフロー図で表したものである。エクセルギーを求めるに当たっての基準環境条件は、ガスについては 25°C 、 1 atm の状態、水 (蒸気を含む) については 25°C の飽和水を基準とした。

図 2 から分かるように、本発電システムでは燃焼器非可逆損失とタービン非可逆損失のほか大きな損失はなく、作動流体 (H_2O 、具体的には飽和水) の圧縮に要するポンプ動力エクセルギーは燃料ベースで 0.08% しか費やされない。タービン発生動力のほとんどすべてが発電電力として有効に取り出される。このため、タービンでの発電電力エクセルギーが大きくなり、供給飽和蒸気の持つエクセルギーを考慮に入れても 71.8% (以下、トータルエクセルギー利用効率という)、投入水素燃料のエクセルギーベースでは 98.5% のエクセルギー利用効率が得られると推定されていることが分かる。

従って、提案システムはこれまでの発電システムと異なり、原理的に極めて高い発電効率を持つことが分かる。次節では、仮想的な条件を前提としないで提案システムの特性をシミュレーションするモデルを構築し、各種の損失・動力を推定することによって、現実的にどの程度高い発電効率が得られるかを評価・検討する。

3. 提案システムの特性推計結果と検討

提案した水素酸素燃焼 CO_2 フリー発電システムの現実 に得られる発電特性を推定するため、筆者らがこれまでに構築したシミュレーションモデル⁽⁶⁾⁻⁽¹⁰⁾ を基に、特性シミュレーションのためのモデルをオブジェクト指向言語の一つ

である C++ を用いて開発した⁽¹⁰⁾。本節では、開発したモデルの概要とモデルを用いて特性を推定した結果について述べる。

〈3.1〉シミュレーションモデルの概要 紙数の制限より構築したモデルの詳細についての説明は省略するが、その概要は次のとおりである。

特性推定の対象となる発電システムは、図 1 に示したようにシステムを構成する各要素機器とそれらの機器間を流れる流体によって構成されており、発電システムの発電電力や燃料消費量などの特性は、各要素機器内で流体がどのような振る舞いをしていくかを推定することによって求まる。

機器内での流体の振る舞いは、機器独自の性質と流体独自の性質から決まる。そこで、筆者らは発電システムのシミュレーションモデルを効率良く構築するためにオブジェクト指向言語 (C++) を用いて、各機器の性質を記述した機器クラスと、各流体の性質を記述した流体クラスを定義し構築した。このため、シミュレーションモデルを構築する際には、これらのクラスから生成したオブジェクトを利用することによって、各機器や流体に関する詳細な知識のない人でもモデルを容易に構築することが可能となる。

以下に構築した機器クラスと流体クラスについて簡単に説明する。

- 機器クラス 断熱効率や圧力損失率など、その機器独自に必要なパラメータ (外生パラメータ) を用いて、機器の入力流体や出力流体の状態値を計算する理論などを実装している。
- 流体クラス 発電システム内を流れる個々の流体には、それぞれ独自の性質があり、その変化を推定するためには専門的な理論が必要になる。そこで、これらの専門的情報を記述した各種の流体のクラスをクラスの継承関係を利用して開発した。シミュレーションモデルを構築する際には、これらのクラスから生成したオブジェクトを機器の入出力に指定するだけで、モデル構築者は必要な情報 (例えば、流体の温度やエンタルピー値) を得ることが可能になる。現在利用可能な流体クラスの種類と継承関係を図 3 に示す。

図 3. 流体クラスの種類と継承関係

Fig. 3. Various fluid classes constructed and inheritance relationship among them.

表 1. シミュレーションの外生変数と外生パラメータ

Table 1. Exogenous variables and parameters assumed for characteristic estimation.

<外生変数>	
変数	基準値
廃熱利用蒸気温度	200℃
タービン入口温度	1300℃
廃熱利用蒸気流量	1 t/h
燃料ガスの成分とその容積組成	H ₂ のみ
燃料ガスおよび燃焼用酸素の温度	25℃
燃料ガスおよび燃焼用酸素の圧力	1.033 kg/cm ²
燃焼器での酸素の過剰率	0.0%
復水器出口圧力	0.05 kg/cm ²
リターン水の圧力	供給飽和蒸気の圧力と同じ
<外生パラメータ>	
パラメータ	基準値
タービン断熱効率	87.5%
ポンプ断熱効率	85%
燃焼器燃焼効率	100%
燃焼器圧力損失率	2%
燃料ガスノズル圧力損失率	20%
酸素噴射ノズル圧力損失率	20%
再生器加熱側圧力損失率	20%
再生器被加熱側圧力損失率	5%
再生器温度効率	75%
発電機効率	98%
熱交換器加熱側圧力損失	0.05 kg/cm ²
熱交換器被加熱側圧力損失率	10%
熱交換器熱交換効率	95%

提案システムのシミュレーションにあたって必要となる外生変数, 外生パラメータを表 1 に示す. 表中には, シミュレーションにあたって用いた外生変数, 外生パラメータの値も示してある. これらの値は筆者らがこれまで種々の CO₂ 回収発電システムの特 性の解析に用いてきた値を基に 10 MW クラスの発電規模の現在および近未来の実現可能性を考慮して想定した値である. ただし, 水素の燃焼技術については将来の技術開発により, 理論酸素量で燃焼器内で完全燃焼出来るもの, すなわち酸素の過剰率は 0.0% でよいと仮定している. 表 1 において, シミュレーションの便宜上, 廃熱利用製造蒸気流量を単位流量 1 t/h としているが, 利用可能蒸気流量あるいは必要出力に応じて, スケール倍する必要があることはいうまでもない.

本シミュレーションモデルでは, 表 1 から分かるように, 作動流体 (H₂O) の流量, 燃料流量, 燃焼用酸素流量を陽に考慮しているほか, 各種要素機器の圧力損失, 放熱損失, 機械損失も考慮している. また, 各流体 (H₂O, H₂, O₂ など) の比熱, エンタルピー, エントロピーなどの熱力学特 性の温度・圧力依存特 性を精度よく近似するメンバ関数を構築し, これを利用して特 性を推定するようになっている. シミュレーション手法の詳細については, 文献 (10) を参照されたい.

(3.2) シミュレーション結果 表 1 に示してあるように, 発電システムの特 性推定に当たって, 図 2 の場合と同じく再生器入口の飽和蒸気の温度 200℃, タービン入口温度 1300℃, 復水器出口圧力 0.05

表 2. 提案システム各部の状態量

Table 2. Estimated values of state variables at various points.

図 1 の位置	温度 (℃)	圧力 (kg/cm ²)	エンタルピー (kcal/kg)	エントロピー (kcal/kg K)	流量 (t/h)
(1)	200	15.9	667	1.54	1.00
(2)	399	15.1	777	1.74	1.00
(3)	1300	14.8	1291	2.22	1.19
(4)	466	0.125	816	2.32	1.19
(5)	274	0.100	723	2.20	1.19
(6)	32.7	0.050	611	2.01	1.19
(7)	32.6	0.050	32.5	0.112	1.19
(8)	32.7	17.6	33.1	0.113	1.19
(9)	138	15.9	139	0.410	1.19
(10)	475	18.8	1562	15.8	0.021
(11)	440	18.8	96.8	1.55	0.164
(12)	25	1.033	0.0	15.5	0.021
(13)	25	1.033	0.0	1.53	0.164

表 3. 提案システムのエクセルギー利用評価

Table 3. Exergy flow and losses of the proposed system.

項目	
入力エクセルギー合計	133.2 (100.0 ^{*1})
燃料化学エクセルギー	100.0 ^{*1}
供給蒸気エクセルギー	36.8
リターン水エクセルギー	-3.66
有効利用エクセルギー合計	88.2 (66.2 ^{*2})
発電電力エクセルギー	96.8
酸素圧縮機仕事	-2.79
水素圧縮機仕事	-5.67
ポンプ動力エクセルギー	-0.12
損失エクセルギー合計	44.9
酸素圧縮機不可逆損失	0.182
タービン非可逆損失	6.30
再生器非可逆損失	3.03
熱交換器熱量損失	1.16
熱交換器非可逆損失	6.55
燃焼器非可逆損失	22.1
酸素噴射ノズル非可逆損失	0.12
燃料ガスノズル非可逆損失	0.24
酸素圧縮機非可逆損失	0.18
燃料圧縮機非可逆損失	0.36
発電機非可逆損失	1.98
復水器損失エクセルギー	2.97

*¹131.0 kcal/s の水素燃料の化学エクセルギーを表している.*²入力エクセルギー合計を基準 (100%) としたとき.

kg/cm², タービン断熱効率 $\eta_t = 0.875$, 再生器温度効率 $\eta_h = 0.75$ としてシミュレーションした. システム各部の状態量の推定値とエクセルギー利用評価結果をそれぞれ表 2 と表 3 に示す. また, 図 4 に本システムのエクセルギーフローを示す.

図 4 を図 2 と比較すると, 燃焼器非可逆損失が燃料化学エクセルギーベースで 22.1%, タービン非可逆損失が 6.30% と同様に大きいと推定されている. しかし, これらの値は図 2 の場合に比べ相対的にはむしろ小さくなっている. 損失が大きくなると推定されているのは, 熱交換器非可逆損失 6.55% や再生器不可逆損失 3.03% である. また, 水素燃

図 4. 提案システムのエクセルギーフロー推定結果

Fig. 4. Estimated exergy flow of the proposed system based on simulation results.

料や燃焼用酸素の圧縮のための動力がそれぞれ 5.70 %, および 2.79 % 必要となるなどのため, トータルエクセルギー利用効率では 5.6 % 低下し, 燃料ベースのエクセルギー効率では 10.3 % 小さくなると推定されている。

しかし, トータルエクセルギー利用効率が 66.2 %, また燃料ベースでのエクセルギー効率では 88.2 % の高い発電効率が得られると推定されていることが分かる。(表 3 より, 531 kcal/s の水素燃料により, そのエクセルギー分の 88.2 % の発電出力が得られるので, 例えば 10 MW の発電出力を得るには表 2 に示す流量はすべて 5.10 倍する必要がある。)

ここでは, 水素を電解する際に副生する酸素が利用出来るものと想定してその製造動力については考慮していない。ただし, 酸素をシステム内で製造する必要のある場合も想定できるので, その場合についての検討すると, 次の通りである。すなわち, 酸素の製造動力を 0.34 kWh/Nm^3 とすると⁽⁹⁾, トータルエクセルギー効率は 61.9 %, 燃料ベースのエクセルギー効率は 82.4 % と推定され, 酸素の製造動力を考慮する場合の効率低下分はそれぞれ 4.3 %, 5.8 % 分となる。以下では, 簡単のため副生酸素が利用出来るものと想定してその製造動力については考慮しなくてよいものとする。また, 酸素の輸送エネルギーも燃料の輸送エネルギーと同様に考慮しなくて良いものとした。

(3.3) 特性の感度解析 モデルが構築できると特性の感度解析が容易に行えるほか, システムの作動範囲を知れるという利点がある。本節では, 本システムの効率に大きな影響を与えると考えられる供給飽和蒸気の温度と復水器出

口圧力を変化させたときの特性を検討した結果について述べる。図 5 はこの時のシステムのトータルエクセルギー効率および燃料ベースのエクセルギー効率の変化を推定した結果を示す。図 5 で推定結果が途中で切れているのは, システムが作動できない状態にあることを示す。システムが作動できない理由は以下のとおりである。

まず, 供給飽和蒸気温度が低い場合には, 蒸気圧力が低くなり, タービンでの膨張仕事が少なくなり, タービンの出口温度が上昇し, その排熱を回収して加熱されるリターン水の温度が圧力に対して高くなりすぎ圧縮水の状態でなくなるからである。逆に, 飽和蒸気温度が高い場合には, 蒸気圧力が高くなってタービン膨張仕事が大きくなる結果, タービン出口温度が低下し, 再生器入口の飽和蒸気の温度を逆に低下させることになり, 燃焼器入口の H_2O の状態が過熱蒸気の状態でなくなるからである。

図 5 において, 供給飽和蒸気温度が高くなると効率も高くなるが, ある温度を越えるとむしろ低くなると推定されている。この理由は次の通りである。すなわち, 蒸気温度が高くなるにつれて, 一定流量 (今の場合 1 t/h) の蒸気を一定温度 (今の場合 1300 °C) に昇温するために必要な投入水素燃料流量は少なくて済み, 発電機端効率は高くなる。しかし, 蒸気温度が高くなるにつれて, 投入燃料エクセルギーの比率が小さくなり, 供給蒸気のエクセルギーで発電する割合が増大することになるので, 蒸気温度が高くなりすぎるとトータルエクセルギー効率はかえって低下することになる。また, 飽和蒸気の温度が高くなると飽和蒸気圧力は加速度的に高くなり, そのため H_2 および O_2 圧縮動力も

加速度的に増大するので、飽和蒸気温度が高くなりすぎると燃料ベースの効率もかえって低下することになるためである。

図5から、復水器出口圧力を低くすると、全体的に効率が良くなり、最大の効率となる供給飽和蒸気温度が低くなることが分かる。ただし、復水器出口圧力を低くすると、復水器が大型となり復水器が高価となる。供給蒸気温度 240℃、復水器出口圧力 0.05 kg/cm² の場合、燃料ベースのエクセルギー効率が最高となり、その時の燃料ベースエクセルギー効率は 90.2 %、トータルエクセルギー効率は 66.1 % になると推定されている。

(a) 提案システムのトータルエクセルギー効率

(b) 提案システムの燃料ベースのエクセルギー効率

図 5. 提案システムのエクセルギー効率

Fig. 5. Estimated exergetic efficiency of the proposed system.

4. より低温の飽和蒸気利用のためのシステム構成の変更とその特性

図5から分かるように、提案システムでは図1の構成のままでは復水器出口圧力が 0.4 kg/cm² 以上に高くなると利用できる飽和蒸気温度は 200℃ 以上の温度が必要となる。一般に、廃熱の利用可能性は廃熱温度が低いと高くなり、廃熱温度が高いと利用可能性は低くなると考えられる。

そこで、本節では提案システムの適用可能性を拡大するため、より低温の廃熱が利用できるように、提案システムの構成を一部変更したシステムを提案するとともに、その特性を推定・検討する。

前節でも述べたように、利用できる飽和蒸気温度が低くなるとタービンでの膨張仕事量が少なくなり、タービン出口温度が上昇し、その排熱を回収するリターン水の温度が圧力に対して高くなりすぎ、圧縮水の状態でなくなる。従って、タービン排熱を回収出来る排熱回収ボイラ (WHB) を図6に示すように組み込み、タービン排熱を回収して過熱蒸気を製造し、これを燃焼器に噴射すると効率向上に寄与できるとともに⁽¹¹⁾、熱交換器に投入されるエネルギーは激減するので、リターン水の温度上昇はわずかになり、圧縮水の状態で廃熱工場側にリターンできることになる。以下では、図6の WHB を組み込んだシステムの特性を推定するとともに、図1の WHB の無いシステムの特性と比較・検討した結果について述べる。

特性の推定にあたっては、WHB に対する条件を除いては WHB なしのシステムの場合と同じとした。表4には WHB のシミュレーションのために用いた外生パラメータを示す。シミュレーション手法の詳細については、文献(12)を参照されたい。

表 4. 排熱回収ボイラ (WHB) に対する外生パラメータ

Table 4. Exogenous parameters of waste heat boiler for its characteristic estimation.

パラメータ	基準値
エンタルピー交換効率	95 %
ターミナル温度差	30℃
ピンチポイント温度差	10℃
出口排ガス乾き温度条件*	10℃
排ガス圧力損失	0.05 kg/cm ²
蒸気圧力損失率	5 %

* 排熱ボイラ出口排ガス温度－飽和蒸気温度

図 6. 排熱回収ボイラを組み込んだシステム

Fig. 6. System incorporated a waste heat recovery boiler.

供給飽和蒸気温度を変化させた時の WHB 有りのシステムと WHB 無しのシステムのトータルエクセルギー効率と燃料ベースのエクセルギー効率を推定した結果を図7に示す。図7より、WHB 無しのシステムでは動作しなかった供

(a) トータルエクセルギー効率の比較

(b) 燃料ベースのエクセルギー効率の比較

図 7. WHB の有無によるエクセルギー効率の比較

Fig. 7. Comparison of exergetic efficiency of systems with and without WHB.

給飽和蒸気の温度が低い場合でも WHB ありのシステムでは動作すると推定されている。ただし、WHB 無しのシステムに比べ全体的に効率が低下すると推定されていることが分かる。WHB を組み込んだ場合に効率が低下するのは、以下の理由と考えられる。

1. WHB の圧力損失のため、タービン出口の圧力が高くなり、従って、タービンで得られる発電電力が減る。
2. 過熱蒸気を噴射して発電電力を増やそうとしているが、そのためには燃料も噴射する必要があるが、その効果は通常の高圧タービン並なので効率向上の度合は比較的小さい。

従って、表 1 および表 4 の想定条件の基では WHB は組み込まない方がむしろ効率の点からは良いと言える。WHB 有りのシステムは供給される飽和蒸気温度が低く WHB 無しのシステムが適用できない場合に導入すべきである。

5. 燃料メタンの場合の検討

水素燃料は化石燃料の供給がタイトになる将来において

は、社会の基本的な燃料になると期待されているが、現状では天然ガスなどを原料として製造されているため高価である。そこで、本節では参考のため燃料として水素ではなく、天然ガスの主成分であるメタンガスを用いた場合について特性がどのように変化するかを検討する。

図 8 は、作動流体の H_2O を回収するため、メタンを用いるときに発生する CO_2 を復水から分離するための気水分離器を図 1 および図 6 のシステムに組み込む部分を示す。分離回収された CO_2 は、後処理あるいは利用のため液化も考えられるが、ここでは大気圧まで加圧するものとした。

図 7 には供給飽和蒸気温度を変化させ他のシミュレーションの条件は表 1 (および表 4) に示すシミュレーション条件と同じとして、トータルエクセルギー効率と燃料ベースのエクセルギー効率を推定した結果も、水素燃料の場合と比較して示してある。図 7 から燃料に水素を用いたシステムの方がメタンを燃料とする場合よりも高効率になると推定されていることが分かる。これは、水素燃料は単位発熱量当りのエクセルギー量が小さいので、少ないエクセルギー量で高温ガスを効率よく発生できるという特徴を持っているからである⁽³⁾。なお、燃料メタンの場合水素を用いる場合に比べ効率が低下するのは不凝縮ガスの CO_2 が排ガスに含まれるため、排ガス成分が水蒸気だけの場合と比べ復水器出口の圧力が高くなるのと、 CO_2 は比熱比が小さいため H_2O ガスだけの場合に比べタービンでの膨張仕事小さくなり効率低下に働くという理由もある。

図 8. メタンを燃料とするときの気水分離器組み込みによる CO_2 の復水からの分離

Fig. 8. Incorporation of water separator into the system for using methane as the fuel.

6. おわりに

天然ガス、石炭、太陽エネルギーなどを利用して製造される二次エネルギーである水素燃料は、有効に利用すべきであるのはいうまでもない。このため、水素燃料の特徴を積極的に生かした高度な利用方法を考案する必要がある。水素燃料は将来水を電気分解して得られるのが主になると考え

られているが、水素を電解する際には酸素を副生する。本研究では、未来のエネルギーシステムとして、水素エネルギーのこのような特徴を生かせる水素酸素燃焼 CO₂フリーのガスタービン発電システムの特性についてシミュレーションモデルを構築し、その基本的特性を種々の点から検討した。

特性シミュレーションの結果によると、例えば 200℃の飽和蒸気を利用すると提案システム(図1)は燃料ベースで 88.2%、トータルエクセルギー利用効率で 66.2%の高い効率を持つと推定されることを示した。また、排熱回収ボイラ(WHB)を組み込むと、より低温の飽和蒸気の利用も可能となり、例えば 150℃の飽和蒸気を利用するとトータルエクセルギー効率 60.9%、燃料ベースでは 76.4%のエクセルギー効率で発電出来ると推定されることも示した。さらに、燃料にメタンを用いたシステムの評価も行い、水素を用いる方が高効率となることも示した。

水素を燃料とする提案発電システムは、高効率で、しかも CO₂も大気汚染物質も全く排出しないクリーンなシステムとなるので、将来のエネルギーシステムとしてその実現が期待される。ただし、本システムが将来のエネルギーシステムとして本当に優れていることを示すためにはシステムの特性のほか、システムの経済性についても評価する必要があることはいうまでもない。例えば、本論文では今後の技術開発により水素は理論酸素量で完全燃焼すると仮定しているが、この前提が成立しない場合、酸素を余分に燃焼器に投入する必要がある、これは復水器圧力の増大につながり効率低下の原因となるだけでなく、不凝縮ガスの存在により復水器が大きくなり、経済性に大きく影響すると思われる。また、種々の補機動力についても考慮する必要がある。これらの問題は今後の検討課題として残されている。

(平成9年5月26日受付, 同9年10月2日再受付)

文 献

- (1) J. Bockris : 「Energy: The Solar-Hydrogen Alternative」, 第2章, Australia & New Zealand Book (1975)
- (2) 水素エネルギーシステム研究会編 : 「水素エネルギー読本」, 131~133, オーム社(昭57)
- (3) 朴・安部・矢野・鈴木 : 「火力発電システムの高効率化のためのエクセルギー評価」, エネルギー・資源 第12回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, 357~362(平8-2)
- (4) 朴・鈴木 : 「工場廃熱利用昼間発電型 CO₂回収発電システムの構成とその基本的特性」, 電学論 B, 116, 5, 587~593(平8-5)
- (5) 小杉・朴・鈴木 : 「太陽熱利用 CO₂回収ハイブリッド型火力発電システムの日射条件に対する特性依存性評価」, 第13回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, 135~140,(平9-1)
- (6) 朴・鈴木 : 「CO₂回収メタノール焚火力発電システムの特性」, エネルギー・資源, 14, 1, 72~77(平5-1)
- (7) 朴・鈴木 : 「CO₂回収を部分的に行う多重熱利用サイクル発電システムの構成と特性」, 電学論 B, 114, 5, 523~530(平6-5)
- (8) 朴・鈴木 : 「飽和蒸気を作動流体として利用する CO₂回収無公害高効率火力発電システム」, 電学論 B, 113, 3, 266~272(平5-3)
- (9) 朴・中村・鈴木 : 「二酸化炭素回収石炭ガス利用高効率発電システム」, 電学論 B, 110, 2, 155~162(平2-2)
- (10) 安部・朴・鈴木 : 「オブジェクト指向言語を用いた酸素燃焼方式 CO₂フリー発電システムの特性シミュレーション」, エネルギー・資源学会 第14回研究発表会講演論文集, 43~48(平7-4)
- (11) 朴・中村・鈴木 : 「ガスタービンコジェネレーションシステムの各種高効率化手法のエクセルギー評価」, 電学論 C, 109, 12, 877~884(平元-12)
- (12) P.S. Pak and Y. Suzuki : 「Thermodynamical, Economical and Environmental Evaluation of High Efficiency Gas Turbine Cogeneration Systems」, Int. J. of Energy Research, 14, 8, 821~832, Oct. 1990.

朴 炳植

(正員) 昭和19年9月18日生。43年3月大阪大学工学部電気工学科卒業。同大学院博士課程を修了して、48年4月大阪大学工学部電気工学科助手、63年1月助教授、平成4年4月情報システム工学科勤務となり、現在に至る。各種システムのモデリングやアナリシスに関する研究に従事。工学博士。エネルギー・資源学会、ガスタービン学会、計測自動制御学会、シミュレーション学会などの会員。

信田 祥司

(非会員) 昭和49年2月24日生。平成8年3月大阪大学工学部情報システム工学科卒業。同年4月同大学院前期課程に入学して、現在に至る。都市および地球環境対応エネルギーシステムに関する研究に従事。

鈴木 胖

(正員) 昭和9年8月23日生。33年大阪大学工学部電気工学科卒業。35年同大学院修士課程修了。同大学工学部電気工学科助手、助教授を経て、47年教授、平成元年5月情報システム工学科勤務となり、現在に至る。モデリングとシミュレーション、都市計画などの研究に従事。工学博士。エネルギー・資源学会、オペレーションズ・リサーチ学会、都市計画学会、IMACSなどの会員。