Short Paper

Development of Closed-Cycle Gas Turbine for Oxy-Fuel IGCC Power Generation with CO₂ Capture — Emission Analysis of Gasified-Fueled Gas Turbines with Circulating Exhaust & Stoichiometric Combustion —

Takeharu HASEGAWA, Hiroyuki NISHIDA, and Jun INUMARU

(Received October 20, 2011)

CO₂回収型高効率IGCC用閉サイクルガスタービンの開発 —排気循環・O₂量論比燃焼ガスタービンの排気特性— 長谷川武治, 西田啓之, 犬丸 淳

A CO-rich gasified coal fuel, derived from an oxygen-CO₂ blown gasifier, is burnt with oxygen under stoichiometric conditions in a closed cycle gas turbine for the highly-efficient, oxy-fuel IGCC (integrated coal gasification combined cycle) power generation system with CO₂ capture. Stoichiometric combustion is diluted with the recycled gas turbine exhaust and adjusted for given temperatures. Since some of the exhaust is used to feed coal into the gasifier, it is necessary to minimize not only CO and H₂ of unburned fuel constituents but also residual O₂, not consumed in the gas turbine combustion process. In this study, reaction characteristics of reactant gases in the combustor and exhaust have been clarified through numerical analysis based on reaction kinetics. As a result, it was clarified that since fuel oxidation is inhibited due to reasons of exhaust-recirculation and stoichiometric combustion, combustion efficiency was estimated to be lower than those in the cases of the developed H₂/O₂, LNG/O₂ fired closed-cycle gas turbines and a conventional LNG fired-gas turbine. Meanwhile, unburned constituents in exhausts were slowed to oxidize in an HRSG, and exhaust gases reached equilibrium. However, reaction heat in HRSG couldn't devote enough energy for combined cycle thermal efficiency, making advanced combustion technology necessary for achieving highly-efficient oxy-fuel IGCC.

Key Words

Gasification, Carbon dioxide capture & storage, Closed-cycle gas turbine, Emission characteristics, Flue gas reaction, Reaction kinetics

1. はじめに

エネルギー資源の多様化, 高効率発電および地球環境問題への対応から, 石炭ガス化複合発電 (IGCC) にCO₂回収機構を組み合わせた発電システムが国内外で注目されている。電力中央研究所では, さらに閉サイクルガスタービンを組み合わせたCO₂回収型高効率IGCCシステムを提案し¹⁾, 各開発要素の実現性の評価について検討を進めてきた^{2)~5)}。本システムは, ガス化燃料のO₂による量論比燃焼を燃焼ガスで希釈す

るものであり, CO₂回収動力を低減し, 高効率を実現する発電システムである。本稿では, 反応数値解析を用いて燃焼排気ガス特性について調べると共に, WE-NET プロジェクト⁶⁾等の閉サイクルガスタービンの燃焼特性と比較し, 開発課題を示す³⁾。

2. CO₂回収型火力発電システムの概要

これまでに提案されているCO₂回収機構を組み込む火力発

Central Research Institute of Electric Power Industry,
Energy Engineering Research Laboratory
2-6-1, Nagasaka, Yokosuka-shi, Kanagawa-ken 240-0196, Japan

(財)電力中央研究所 エネルギー技術研究所 高効率発電領域
〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂 2-6-1

電システムを以下に挙げる。

- (1) Post-Combustion (燃焼後回収) システム
- (2) Oxy-fuel Combustion (酸素燃焼) システム
- (3) Pre-Combustion IGCC (燃焼前回収) システム
- (4) Oxy-fuel IGCC (CO₂ 回収型高効率 IGCC) システム

(1)は燃焼排気ガスからPSA法等を用いてCO₂を回収するシステム、(2)は酸素燃焼によりCO₂分離動力を低減するシステム、ならびに(3)はIGCCによる燃焼前回収システムである。現在、各機関で検討が進められている。

一方、電力中央研究所では(4)の酸素吹き IGCC を対象に酸素燃焼閉サイクルガスタービンを採用し、排気ガスからの CO₂分離回収動力を低減する CO₂回収型高効率 IGCC システムを提案している¹⁾。全体システムの構成を図 1 に示す。

O₂-CO₂吹き石炭ガス化燃料をO₂にて量論比燃焼させ、ガスタービン排気ガスの一部はハロゲン、重金属およびH₂Oを分離・除去した後、CO₂を回収し、残りはリサイクルして燃焼器に供給して燃焼温度を調整する閉ループを構成する。すなわち、CO₂ および H₂O を主成分とするガスタービン排気ガスを循環させ、汽水分離により高純度のCO₂を分離・回収し、さらに分離したCO₂の一部をガス化炉への石炭搬送用に使用する。

Fig. 1 Schematic diagram of oxy-fuel IGCC and semi-closed cycle gas turbine¹⁾

Table 1 Rated conditions of semi-closed cycle gas turbine combustor

	Gasified fuel	Oxidizer	Dilution gas
Components			
CO [vol%]	66.2	0	0
H ₂	23.8	0	0
CH ₄	0.3	0	0
CO ₂	4.9	0	69.5
H ₂ O	3.2	0	26.9
N ₂ , Ar	1.5	2.5	2.7
O ₂	0	97.5	0.9
Pressure in combustor	2.2MPa		
ϕ *	0.98 (Overall equivalence ratio is 0.89)		
Dilution ratio	5.54 (dilution/fuel molar ratio)		
Exhaust temp. : T _{ex}	1573K at combustor exit		

ϕ^* : calculated from fuel and oxidizer without O_2 in dilution

ことによりガス化特性を向上するとともに、ガス化燃料中の N_2 濃度を低減し、 CO_2 回収動力を低減するゼロエミッション型IGCC発電を実現する。この場合、Pre-Combustion IGCCシステムに見られるような水蒸気シフト反応の適用を必要とせず、 CO_2 分離回収のための所内動力を低減できる。本システムでは乾式ガス精製等を採用し、送電端熱効率42% (HHV基準) を目標に検討が進められている。

ガスタービン燃焼器の定格条件を表1に示す。燃焼器出口ガス温度 T_{ex} を1573 K (1300℃)、燃焼器内圧力を2.2 MPa、燃料と酸化剤中 O_2 成分から算出される当量比 ϕ^* を0.98に設定し、燃焼ガス温度を1573 Kに調整するために燃料の5.54倍(モル比)の排気循環ガス(Dilution gas)を燃焼器に供給している。

3. 排気循環による O_2 量論比燃焼特性

排気循環による O_2 量論比燃焼の基本的な燃焼特性を把握することを目的に、ガスタービン燃焼排気ガス特性および煙道での排気ガスの反応特性について、均一予混合気条件を仮定し反応動力学解析を用いて検討した。

3.1 定格条件における排気循環・ O_2 量論比燃焼特性

図2は、表1に示す定格条件での主な化学種の経時変化について、反応解析による検討結果を示す。解析では、燃焼器に完全攪拌反応器を仮定し、混合気の反応は一定温度で均一に進行するものとしている。反応スキームはMillerとBowmanによって提案された248式の素反応からなるモデル⁷⁾を用い、熱力学データには主にJANAFの熱物性値表の値を用いた。また、拡散過程は考慮していない。

従来のLNG焼きガスタービンの場合と比較すると、排気循環によるガス化燃料・ O_2 量論比燃焼では燃料成分の酸化反応が大幅に遅れ、数十msの反応時間では十分な燃焼効率は得られていない。例えば、燃焼器内燃焼ガスの燃焼反応時間を20 msと仮定すると、燃焼器出口における燃焼排気ガスは O_2 成分を2.5vol%，CO および H_2 成分をそれぞれ 2.9vol%，0.4vol% 含み、燃焼効率は約 76% にとどまることがわかる。

Fig. 2 Chemical species behavior over time in gasified fuel/O₂ stoichiometric combustion with exhaust recirculation

3.2 各種燃料の排気循環・O₂量論比燃焼との比較

図3は、H₂、LNG燃料およびガス化燃料のO₂量論比燃焼時の燃焼器出口における排気ガス特性および燃焼効率について比較して示す。解析では、燃料の相違を比較することから燃料、酸化剤および排気循環ガスの全体から算出される総括当量比を1に設定している。排気循環ガスは各燃料のO₂量論比燃焼時の平衡条件に相当する組成に設定し、燃焼器出口ガス温度 $T_{ex} = 1573$ K となるように希釈比率 (Dilution ratio) を調整している。

WE-NET プロジェクト⁶⁾の水蒸気希釈によるH₂・O₂量論比燃焼の場合、燃焼排気ガス中の残留O₂およびH₂濃度は反応時間約20 msで1%以下にまで低減し、燃焼効率は97%に達する。同様に、LNGを燃料とする閉サイクルガスタービンの場合 ($T_{ex} = 1573$ K)、燃焼ガス中に残留するO₂成分およびCO、H₂の未燃焼成分の濃度は増加するものの、いずれも1%程度であり、燃焼効率は87%を維持される。一方で、ガス化燃料・O₂量論比燃焼時の残留O₂成分および未燃焼可燃性成分は、H₂およびLNG燃料の場合の数倍にのぼり、燃焼効率は72%にまで低下する。このため、CO₂回収型高効率IGCC発電システムで採用する排気循環によるガス化燃料・O₂量論比燃焼閉サイクルガスタービンでは、わが国のWE-NETプロジェクトやPre-Combustion IGCCシステムで検討されているガスタービン燃焼器技術よりも、一層の燃焼性向上を図る燃焼制御技術が必要になる。

3.3 ガスタービン排気ガスの反応特性

膨張タービン入口 (ガスタービン燃焼器出口に相当) から排気循環ガス用圧縮機入口までのガスタービン排気ガスの反応特性についての解析結果を図4に示す。解析では、排気ガスの温度および圧力履歴を図5に示す値に設定している。すなわち、燃焼温度 $T_{ex} = 1573$ K、圧力2.2 MPaの燃焼ガスが膨張タービンで動力回収され、ガス温度950 K、圧力はほぼ大気圧(0.11 MPa)に低下する。その後、排熱回収ボイラ(HRSG)にて熱回収され、圧縮機入口では約400 Kにまで低下する。

膨張タービン入口において燃焼排気ガス中に高濃度残留する未燃焼COおよびH₂成分は、膨張タービンおよび排熱回収ボイラ部の温度条件の下で酸化反応が進行し、残留O₂、未燃

Fig. 3 Stoichiometric combustion characteristics of each fuel; overall equivalence ratio is 1, markers(★) are test data⁶⁾

Fig. 4 History of combustion emissions from gas turbine inlet to compressor inlet of recirculating exhaust

Fig. 5 Typical stream history of exhaust temperature and pressure from gas turbine inlet to compressor inlet of recirculating exhaust

焼COおよびH₂成分の濃度は低下する。そして、排熱回収ボイラ部で排気ガス温度が673 K以下に低下すると、COとH₂成分の酸化反応はほぼ停止する。その結果、排熱回収ボイラ入口相当時間(400 ms)では、O₂濃度は約0.9 vol%とほぼ平衡濃度にまで低下し、COおよびH₂濃度はいずれも0.01 vol%以下と大幅に低下し、燃焼効率は99.9%に達する。この際、未燃焼成分の酸化への寄与は膨張タービンおよび煙道ではほぼ同程度になると予想される。

4. まとめ

CO₂回収型高効率IGCCを対象に、排気循環によるO₂量論比燃焼閉サイクルガスタービンの排気特性について反応数値解析により検討した。その結果、従来の空気燃焼の場合と異なり、O₂量論比燃焼反応は遅く、数十msの燃焼時間では完全燃焼に至らず未燃焼成分が増加する。一方で、燃焼ガス中に残留する未燃焼成分は膨張タービンを通過後も緩慢な酸化反応を継続して十分な燃焼効率を得ることが可能であり、ここでの反応熱はシステムの適正化により膨張タービンまたは排熱回収ボイラ部で回収することができる。ただし、ガスタービン燃焼器での燃焼効率の低下は、膨張タービンによる動力回収を低減するため、CO₂回収型高効率IGCCの実現には熱効

率を向上するガスタービン燃焼技術の開発が重要である。今後は、燃焼効率を向上する最適な燃焼反応条件について検討するとともに、燃料、酸化剤および排気循環ガスの供給方法の工夫等により反応促進を図るガスタービン燃焼技術について検討する。

文 献：References

- 1) 白井 ほか, 電中研報告書M07003(2007)
 - 2) 中尾 ほか, 電中研報告書M08006(2009)
 - 3) 長谷川 ほか, 電中研報告書M10005(2011)
 - 4) 小林, 布川, 電中研報告書M09015(2009)
 - 5) Kidoguchi, K., *et al.*, Proceedings of the ASME Power Conference 2011 (POWER 2011) and the International Conference on Power Engineering 2011 (ICOPE-11), (2011)
 - 6) WE-NET Home Page/WE-NET report, http://www.ena.or.jp/WE-NET/report/report_j.html (2011/9/3参照)
 - 7) Miller, J. A., Bowman, C. T., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **15**, 287-338(1989)
-