

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	超臨界CO2クローズドサイクルガスタービンの開発－第五報 従来型ガスタービンとの複合サイクルの検討－
著者(和文)	蓮池 宏, 小川 紀一郎, 宇多村元昭
出典(和文)	第40回 日本ガスタービン学会定期講演会, , ,
発行日 / Pub. date	2012, 10

## 超臨界 CO<sub>2</sub> クローズドサイクルガスタービンの開発 — 第五報 従来型ガスタービンとの複合サイクルの検討 —

\*蓮池 宏，小川 紀一郎（エネ総研），宇多村 元昭（東工大）

### Development of Super-critical CO<sub>2</sub> Closed Cycle Gas Turbine — 5th Report: Configuration and Performance of Combined System with Conventional Gas Turbine —

\*Hiroshi HASUIKE, Kiichiro OGAWA(IAE), Motoaki UTAMURA(Tokyo Tech)

#### ABSTRACT

One of the features of supercritical CO<sub>2</sub> closed cycle gas turbines (S-CO<sub>2</sub>GT) is applicability of various types of heat source. “Dirty fuels” such as coal and biomass are applied solely to boilers for S-CO<sub>2</sub>GT. On the contrast, “clean fuels” such as natural gas have many options to be used which compose many kinds of power cycle containing S-CO<sub>2</sub>GT, some of which have potentials to realize higher efficiency. As examples, we examined combined systems in which conventional gas turbines (open Brayton cycle) are used as a topping cycle. Several configurations are proposed and their total efficiencies are calculated. The simple combination of conventional gas turbine and S-CO<sub>2</sub>GT does not give higher efficiency than the combination of conventional gas turbine and steam-water Rankine cycle because waste heat from gas turbine is not thoroughly recovered due to relatively high temperature range of CO<sub>2</sub> heater in S-CO<sub>2</sub>GT. Improved system where steam generated by low temperature waste heat is injected to conventional gas turbine combustor achieves high efficiency.

**Key words:** Gas Turbine, Carbon Dioxide, Super-critical, Power Generation, Combined cycle

#### 1. はじめに

超臨界 CO<sub>2</sub> クローズドサイクルガスタービン (S-CO<sub>2</sub>GT) は、CO<sub>2</sub> を臨界点近傍の超臨界状態で圧縮し、実ガス効果により圧縮動力を低減するとともに、理想気体に近い数百℃の領域で膨張させ大きなタービン仕事を取出すことにより高効率を得ることを特長としている。

このシステムは、主として原子力分野への適用を目指して、米国、日本、フランス、韓国等で開発が行われてきた<sup>1) 2)</sup>。筆者らは、中小規模での高効率発電および低品質油、石炭等を含む多様な燃料対応性等の特徴を有していることに着目して、産業部門や再生可能エネルギーへの適用を検討している。2008～2010 年度には、NEDO 技術開発機構からの委託事業として本技術の研究開発を行い、ベンチスケールの試験装置において発電運転に成功した<sup>3)</sup>。

本稿では、実証試験と並行して実施した実用プラント概念設計の一部として、天然ガスを燃料とした発電システムおよび熱併給発電システムについて、複合サイクル発電等との比較を行った結果を紹介する。

#### 2. 検討対象の概要

S-CO<sub>2</sub>GT の実用プラントを検討するに当たり、使用燃料を“クリーン燃料”と“ダーティ燃料”分けて考えた。ここで“クリーン燃料”は、ガスタービンやガスエンジン等の内燃機関に直接利用可能な燃料を指す。天然ガスが代表的である。“ダーティ燃料”はクリーン燃料の反対語で、内燃機関に直接利用できない石炭、バイオマス、重質油等を指す。ダーティ燃料の利用にはボイラを用いることになり、この検討は既報<sup>4)</sup>において報告したとおりである。

本稿はクリーン燃料の場合についての検討結果である。

クリーン燃料の場合、ボイラを用いる方式も可能であるが、その効率はダーティ燃料と同レベルになる。他方、天然ガスを用いる既存の発電技術として、ガスタービン複合発電やガスエンジン発電が実用化されており、ボイラ方式より高い効率が達成されている。これらの既存技術と競合するため、S-CO<sub>2</sub>GT においても、ボイラ方式より高効率な発電方式が必要とされる。

本稿では、従来型ガスタービン（オープンブレイトンサイクル）をトッピングサイクルとして用いる複合サイクルを提案する。

## 2.1 検討対象サイクル

本検討において対象としたサイクルを Fig. 1～Fig. 4 に示す。

Fig.1 は、ガスタービンと蒸気タービンの組合せによる通常のカスタム複合サイクルである。Fig.2 と Fig.3 が、ガスタービン排ガスを使って S-CO<sub>2</sub> サイクルを加熱する提案方式で、Fig.2 は、ガスタービン複合サイクルの蒸気タービンを単純に S-CO<sub>2</sub> サイクルに置き換えたものである。この場合、S-CO<sub>2</sub> サイクルの加熱温度域が 385～500℃ であるため、排熱のうち 385℃ 以下の部分が利用できない、という問題が生じる。既報において検討したボイラ適用の場合は、燃焼ガスの 385℃ 以下の部分は、燃焼用空気の前熱により回収することができたが、排熱利用の場合はその手法を用いることができない。

そこで Fig.3 に示すように、385℃ 以下の排熱利用のために S-CO<sub>2</sub> サイクルの後段に熱回収装置（ボイラ）を設置して、その発生蒸気をガスタービン燃焼器に導入し、全体としての効率向上を図るシステムを検討した。燃焼器への蒸気導入は、チェンサイクルの考え方を応用したものである。参考のため、回収蒸気を全量ガスタービンに導入するチェンサイクルを、Fig.4 に示した。なお、Fig.3 の候補案においては、ボイラにおける蒸気圧力を単圧とするか、複圧とするかで排ガス回収の程度が異なるが、ここではガスタービン燃焼器導入が可能な範囲で複圧方式を採用した。

## 3. 効率検討

### 3.1 検討条件

検討条件は下記のとおりとした。

- 1) 発電規模（発電端）  
5MW、12.5MW、25MW、50MW
- 2) 燃料  
天然ガス（低位発熱量；8,790kcal/m<sup>3</sup>N）
- 3) 従来型ガスタービン  
タービン入口温度 1,150℃(5MW)～1,250℃ (12.5～50MW)
- 4) S-CO<sub>2</sub> ガスタービンサイクル  
圧縮機出口圧力 20MPa  
加熱器入口温度 385℃  
加熱器出口（タービン入口）温度 450～500℃  
サイクル効率 38～42%（サイクル入熱基準）

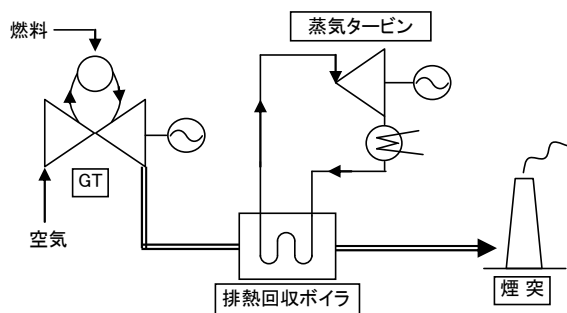


Fig.1 Conventional Gas Turbine Combined Cycle.

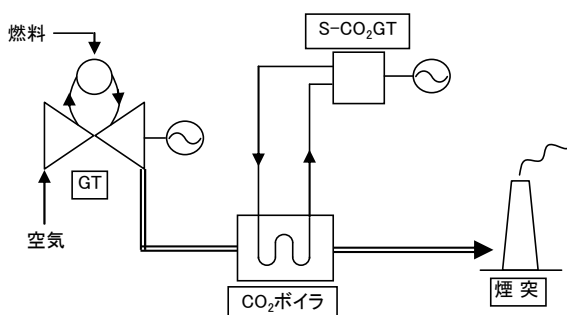


Fig.2 Conventional GT/S-CO<sub>2</sub>GT Combined Cycle.

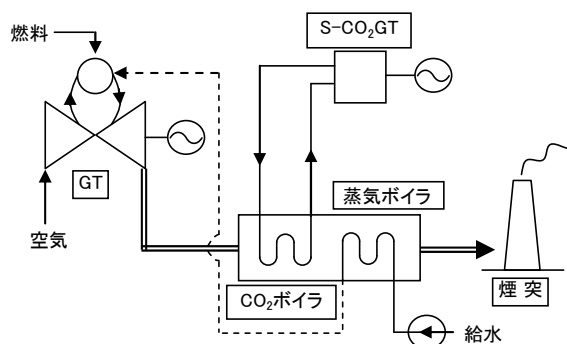


Fig.3 Conventional GT/S-CO<sub>2</sub>GT Combined Cycle with Steam Injection.

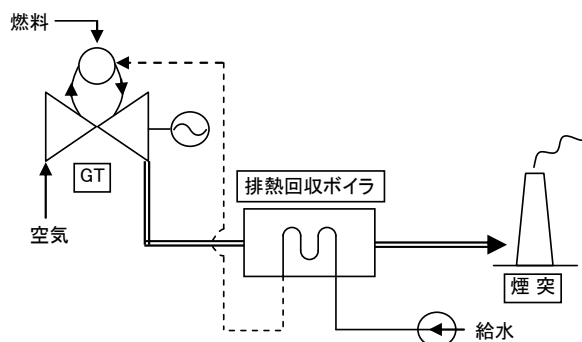


Fig.4 Steam Injection (Cheng Cycle) Gas Turbine.

### 3.2 効率計算結果

筆者らが作成した簡易計算手法を使って、各ケースの効率を試算した。その際、まず従来型ガスタービン複合ドサイクルにおいて、仕様・効率等に関するメーカー公表値と筆者らの計算結果とを照合して一定の精度が得られることを確認し、その上で他の方式の計算を実施した。

Fig.5 にガスタービン規模 12.5MW 級における計算結果を示す。同図に示されるように、Fig.2 の従来型ガスタービンと S-CO<sub>2</sub>GT との単純な複合サイクルは、ガスタービン・蒸気タービンの複合サイクルの効率に及ばない。S-CO<sub>2</sub>GT のサイクル効率は蒸気タービンサイクルと遜色ないものの、中低温域の排熱を利用できていないことの影響が大きい。

中低温排熱の利用を図った Fig.3 の蒸気回収・燃焼器投入方式では、回収蒸気の投入によりガスタービン出力が増大しており、さらに排ガス量が増えたことにより S-CO<sub>2</sub>GT の出力も増大している。排熱を全て蒸気として回収するチェンサイクル (Fig.4) よりも大きな出力が得られ、検討対象の中で最も高い効率が見られることが判明した。

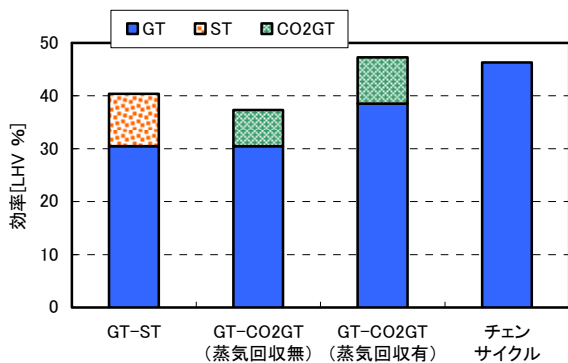


Fig. 5 Comparison of Power Generation Efficiency (12.5MW class).

Fig.6 に 5MW から 50MW までプラント規模を変えて、従来型との対比で Fig.3 の蒸気投入型のガスタービン・S-CO<sub>2</sub>複合発電システムの効率特性を示した。同図に見られるように、全範囲においてガスタービン・S-CO<sub>2</sub>複合発電システムの効率が高く、特に 20MW 程度以下の中小規模において、顕著な効率差が見られる。

なお、発電規模が 100MW 以上まで大きくなると、従来方式 (特に、GT - ST 方式) は大型化に伴う効率上昇が本方式より顕著になるので、効率は逆転すると予想される。

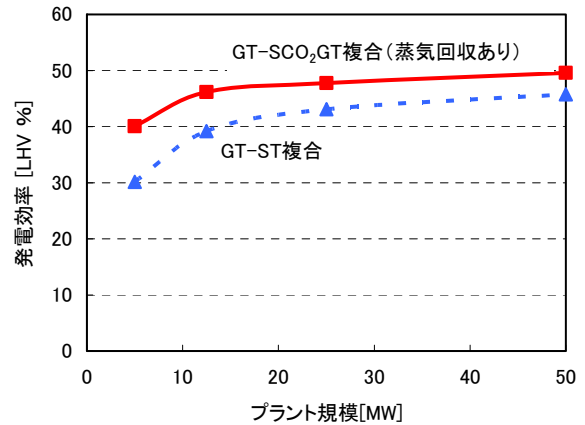


Fig. 6 Comparison of Power Generation Efficiency in Various Plant Capacities.

### 3.3 熱併給発電への適用

次に、熱併給発電 (コージェネレーション) 向け CO<sub>2</sub> 発電システム適用の可能性を検討した。現在、熱併給発電向けの原動機は、比較的規模の大きい (1MW 以上) 場合は、ガスエンジンとガスタービン方式が中心となっている。特に、規模が大きくなるにつれガスタービンが採用される傾向が見られる。ガスタービンはガスエンジンに比べて大容量化し易いという特性に加え、蒸気の発生量が多い、軽量、振動が少ない等の特長を有する。特に、季節と時間帯に応じて熱と電気の供給割合を比較的自由に変更できる熱電可変型の要求が増えており、その場合はガスタービンが適している。

ガスタービンに S-CO<sub>2</sub>GT サイクルを組み合わせた熱併給発電システムを評価するため、Fig.7~9 に示す各種ガスタービン適用型熱併給プラントを想定し効率計算を行った。

Fig.7 は、発電と熱併給の割合が固定された従来型熱併給プラント、Fig.8 は熱電可変型システムの一般的フローでチェンサイクル方式を応用したものである。

Fig.9 が熱併給型 (熱電可変型) S-CO<sub>2</sub>GT 発電システムのフロー例である。このシステムでは、CO<sub>2</sub> 加熱器後段の熱回収部で蒸気を発生させ、電力のニーズが高い場合はガスタービン燃焼器へ蒸気を投入し、熱のニーズが高い場合は外部への蒸気供給の割合を増す。ガスタービン排熱の一部を S-CO<sub>2</sub>GT に回すため、排熱をすべて蒸気として回収する熱電化変型 (Fig.8) に比べ、最大発生蒸気量が少なくなる反面、最大発電量は大きくなると予想される。

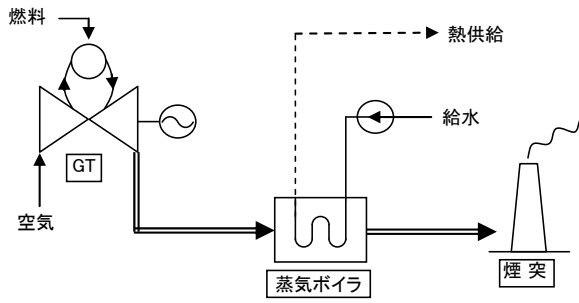


Fig.7 Gas Turbine Cogeneration System.

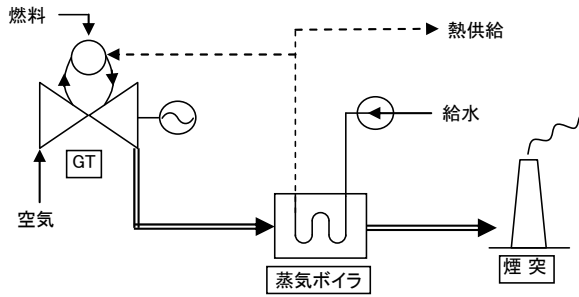


Fig.8 Cheng Cycle Flexible Cogeneration System.

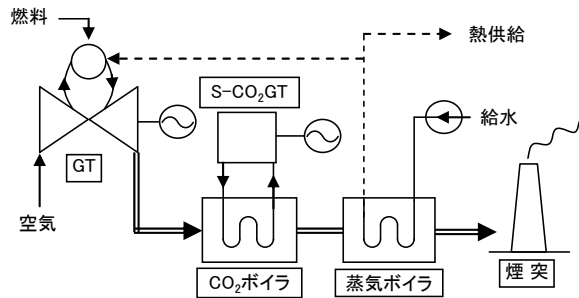


Fig.9 Cheng Cycle/S-CO<sub>2</sub>GT Flexible Cogeneration System.

5MW 級システムにおける発電と熱供給の効率評価結果を Fig.10 に示す。Fig.8 (チェンサイクル) と Fig.9 (S-CO<sub>2</sub>GT 適用) のシステムについての結果であるが、Fig.7 のシステムは、チェンサイクルの熱出力最大のケースに相当すると考えて良い。

Fig.11 には、国内において商品化されている熱電可変型プラントの実績と S-CO<sub>2</sub>GT 適用システム (Fig.9) の位置付けを示す。縦軸と横軸は、発電と熱出力の効率 (投入燃料基準) である。

Fig.10 および Fig.11 に示されるように、S-CO<sub>2</sub>GT 適用システムは熱出力の割合がやや小さいという制限はあるが、発電効率の面で優位性がある。近年ますます電気の需要は増加する傾向があり、また電気と蒸気のエネルギーとしての質の違いを勘案すると、発電出力が大きいことは大きな特長であると考えられる。

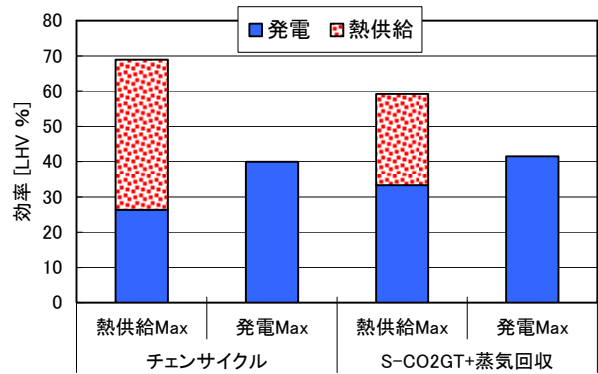


Fig.10 Comparison of Heat and Power Generation Efficiency (5MW class).

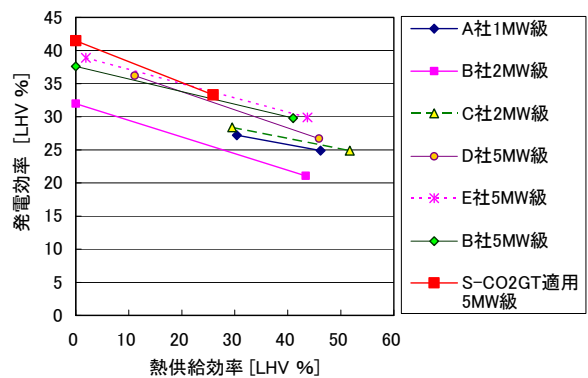


Fig.11 Power Output and Thermal Output of Proposed S-CO<sub>2</sub> System and Commercial Flexible Cogeneration.

#### 4. まとめ

天然ガス等のクリーン燃料を用いた超臨界 CO<sub>2</sub> ガスタービンの発電システムとして、より高い効率を得るために、従来型ガスタービンをトッピングサイクルとする複合サイクルを検討した。

S-CO<sub>2</sub> サイクルによる熱回収の後段に熱回収ボイラを設置して、その発生蒸気をガスタービン燃焼器に導入するシステムは、ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせる従来型の複合サイクル発電より高い効率が得られることが示された。

#### 参考文献

- 1) 東京工業大学、プレスリリース、2010年2月19日.
- 2) Sandia National Laboratories, Operation and Analysis of Supercritical CO<sub>2</sub> Brayton Cycle, September 2010.
- 3) 蓮池宏ほか, 超臨界 CO<sub>2</sub> クローズドサイクルガスタービンの開発 - 第四報 ベンチスケール装置による運転試験結果 -, 第39回日本ガスタービン学会定期講演会、2011年7月.
- 4) 蓮池宏ほか, 超臨界 CO<sub>2</sub> ガスタービン発電システムの効率特性評価, 第38回日本ガスタービン学会定期講演会、2010年10月.