

■ 研究論文 ■

多重熱利用サイクルを用いたCO₂全回収 無公害高効率発電システム

CO₂-Recovering Multi-Cascade Heat Utilizing Power Generation
System with Non-Polluting Characteristics

朴 炳 植*・鈴木 胖**

Pyong Sik Pak Yutaka Suzuki

(1993年6月4日原稿受理)

Abstract

A thermal power generation system is proposed which emits no air pollutants and recovers generated carbon dioxide (CO₂) completely. The system is composed of the following three subsystems, that is, (a) a CO₂ recovering gas turbine power generation subsystem (PGS) based on oxygen combustion method (OCM), (b) an expansion turbine PGS using the steam produced by utilizing waste heat of the gas turbine, and (c) a CO₂ recovering dual-fluid PGS based on OCM in which the outlet steam of the subsystem of (b) is used as the main working fluid. The system is composed in such a way that the heat is utilized multicascade way, so that a high power generation efficiency can be realized. It has been estimated through simulation results that the net power generation efficiency is 41.9% by considering both the electric power required for production of high-pressure oxygen and liquefaction of recovered CO₂, and that CO₂ recovery rate is 97.8%. The efficiency has been shown 11.1% higher than that of a conventional large scale steam turbine power generation system in which 90% of CO₂ is recovered by using alkanolamine-based solvent.

1. はじめに

エネルギー問題と地球環境問題の抜本的同時解決を目指して、二酸化炭素(CO₂)を回収・輸送し、太陽エネルギーを利用して長距離輸送可能な燃料を合成して、利用しようというCO₂グローバル・リサイクルエネルギーシステムを構築する方策が種々提案されている¹⁻⁴⁾。本CO₂グローバル・リサイクルエネルギーシステムが持続可能性を持って成立するためには、燃料燃焼利用の際に発生するCO₂をできるだけ100%に近い回収率で回収して循環利用することが不可欠となる。また、CO₂回収利用システムのエネルギー効率の高いことも非常に重要となる。これは、CO₂回収発電シ

ステムではCO₂回収のために余分のエネルギーを要し、これは発電システムの効率を悪化させ、CO₂排出量を増大させるという悪循環を招くので、発電効率は出来るだけ高いことが望まれるからである。将来はエネルギー事情が悪化するので、効率が高いことはさらに重要となると考えられる。

筆者らは先に、発電効率の高いCO₂回収発電システムとして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を提案した⁵⁾。しかし、本システムでは発生CO₂を30%ほどしか回収しないため、CO₂回収を行っている割には高効率となるが、持続可能なCO₂グローバル・リサイクルエネルギーシステムの実現のためにも、地球温暖化防止のためにも、一施設当りのCO₂の排出量が莫大でCO₂回収の効果が大きいと考えられる火力発電システムにおいてCO₂回収を行うとすれば、できるだけ100%に近い回収率で回収することが必要になると考えられる。本論文では、CO₂回収を

*大阪大学工学部情報システム工学科助教授

** " " 教授

〒 565 吹田市山田丘2-1

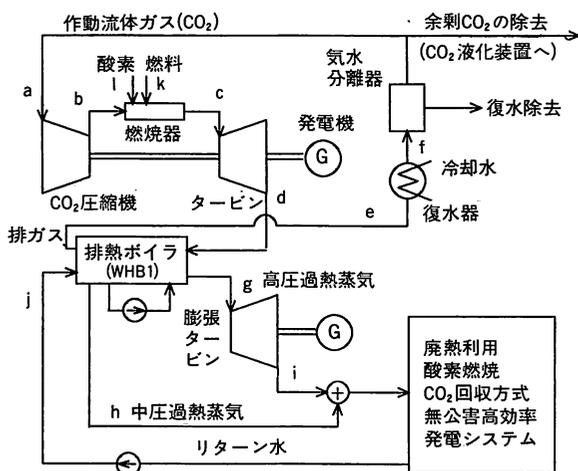
部分的に行う多重熱利用サイクルなど^{5),6)}を総合利用してCO₂を100%近く回収する発電システムの構成を提案するとともに、その発電およびCO₂回収特性について検討した結果について述べる。なお、本発電システムは、ばいじん、SO_xのほかNO_xなどの大気汚染物質を排出しないし、CO₂も排出しないという意味で無公害発電システムとなる⁶⁾。

2. CO₂全回収多重熱利用サイクルの構成

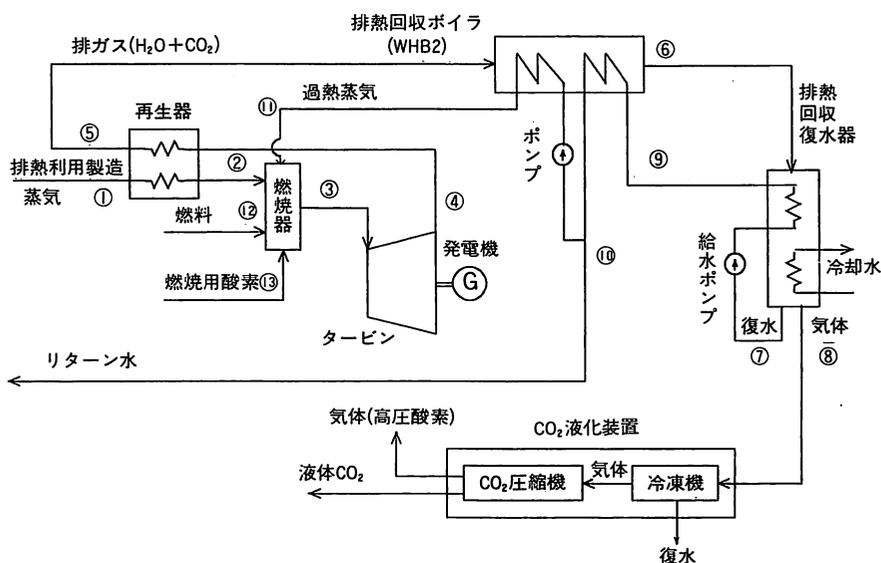
2.1 基本構成

図-1に酸素燃焼方式CO₂回収法を用いてCO₂を原理的に100%回収する無公害多重熱利用サイクル発電

システムの構成を示す。本発電システムは、トッピングサイクルとしてセミクロードサイクルのプレイトンサイクルを用いた酸素燃焼方式CO₂回収ガスタービン発電システム、ミドルサイクルとして膨張タービン発電システム、ボトムサイクルとしてセミクロードサイクルの二流体サイクルを用いた廃熱利用・酸素燃焼CO₂回収方式・無公害高効率火力発電システムを持つ複合発電システムとなっている。図-1(a)に示すように、本発電システムではまずトッピングサイクルを構成するCO₂を作用流体とするガスタービン発電システムで酸素燃焼方式を採用した発電を行い、その際に発生するCO₂は排熱回収された排気ガスを冷却水で



(a) 全体構成



(b) 廃熱利用・酸素燃焼CO₂回収方式・無公害高効率発電システムの構成

図-1 CO₂全回収多重熱利用サイクル発電システムの構成

冷却することによって回収されるのは先に報告した酸素燃焼方式CO₂回収複合サイクル発電の場合と変わらない⁴⁾。

しかし、本発電システムではガスタービン発電後のタービン排熱を利用して排熱ボイラ（以下、WHB 1と略す）で200kg/cm² a程度前後の高圧の過熱蒸気を製造するだけでなく20kg/cm² a程度前後の中圧蒸気も製造する。そして、高圧過熱蒸気はミドルサイクルを構成する膨張タービン発電機を駆動させてWHB 1出口の中圧蒸気と同じ圧力にまでしか膨張させずに、この中圧蒸気およびWHB 1出口中圧蒸気の両方を、ボトミングサイクルを構成するガスタービン発電システムの作動流体として利用する点が異なっている。

中圧蒸気をガスタービン発電システムの作動流体として用いるボトミングサイクル発電システムの概略構成は、図-1(b)に示す通りであり、これは筆者らが既に提案した廃熱利用・酸素燃焼CO₂回収方式・無公害高効率火力発電システム（以下、BCPシステムという）と構成は全く同じである⁶⁾。このBCPシステムの動作を説明すると次の通りである。本BCPシステムでは、前述の20kg/cm² a前後の同圧力の両蒸気（以下、H₂Oと表す）を混合し、図-1(b)に示すように効率向上のため再生器で加熱した後ガスタービン燃焼器に導き、ここで燃料および燃焼用酸素を噴射して燃焼させることにより、H₂Oの温度を1000℃以上の高温ガスとする。燃料としては、メタノール、メタン、天然ガス、酸素吹き込みにより熱分解したクリーン化石炭ガスなど、クリーンで窒素成分を極僅かしか含まない燃料なら何でもかまわない⁷⁾。なお、蒸気タービン発電の場合と異なり燃焼器出口ガス温度を1000℃以上の高温にできるのは、蒸気タービン発電の場合に比べて圧力が20kg/cm² a程度前後と大幅に低いことと、ガスタービン技術に基づいているからである。逆に、燃料を空気ではなく酸素を用いて燃焼させても燃焼ガス温度を1400℃以下の燃焼器およびタービンの耐熱可能温度以下にできるのは、大量のH₂Oを冷却用流体として利用しているからである。燃焼器出口の水蒸気と燃料の燃焼の結果生じるH₂OとCO₂を主成分とする高温ガスは、まずタービンに導かれ発電機の駆動に利用される。タービン出口のガスはまだかなり高温であるので、前述のように再生器に導かれH₂Oの昇温に次に利用される。再生器出口のガスはこの後排熱回収ボイラ（WHB 2）に導かれ、発電出力の増大と発電効率の向上のための燃焼器噴射用の過熱蒸気の製造に利用さ

れる。WHB 2を出た低温、低圧の排気ガスは排熱回収復水器に導かれ、WHB 1へのリターン水の給水加熱に最終的に利用された後、冷却水で冷却される。このため、リターン水温度を比較的高くできるとともに復水器での放熱量を小さくできるという利点がある。復水器出口ではタービン排ガス中に含まれる水蒸気の大部分が復水し、この復水は排ガス中に含まれる気体成分であるCO₂とは簡単に分離される。復水は上記のように排熱回収復水器で加熱されWHB 2で加熱された後、過熱蒸気の発生のための給水（リターン水）としてWHB 1へ送り返される。

排熱回収復水器出口において復水しなかった気体中には、燃料の燃焼により生じたCO₂が含まれている。このほか、復水しなかった水蒸気分が飽和蒸気の形で含まれている。さらに、燃料の完全燃焼を期するため燃焼器で過剰に噴射された酸素（O₂）も含まれている。この復水器出口の気体は図-1(b)に示すように、まず冷却脱湿を行い排ガス中の水分を十分に除去する。この後、約140kg/cm² aにまで圧縮して水冷すると排ガス中に含まれるCO₂はすべて液体として回収され、O₂分のほとんどは気体として回収される。この回収高圧O₂は燃料の燃焼用に再利用することができる。このBCPシステムで発生するCO₂が回収される点では、本システムは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場合⁵⁾と同じである。

CO₂をほぼ100%回収する本システム（以下、CO₂全回収多重熱利用サイクル発電システムという）と、文献5)で報告した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相違を説明すると次のようになる。すなわち、本システムではトッピングサイクルとなっているガスタービン発電の作動流体としては空気ではなくCO₂が用いられており、ガスタービン燃焼器では燃料の燃焼用酸化剤として空気ではなく酸素が用いられている。そして、排気ガスは排熱ボイラWHB 1を出た後、大気へ放出されずに、復水器で冷却され、排気ガス中の水蒸気分は気水分離器で除去され、燃料燃焼により生じたCO₂量に等しい余剰のCO₂量分を除去した後、トッピングサイクルとなっているガスタービン発電システムの作動流体として再利用される点が異なっている。このため、本発電システムではボトミングサイクルとなっているBCPシステムで発生するCO₂のみならず、トッピングサイクルと成っているガスタービン発電に際して発生するCO₂も回収されるので、CO₂は原理上100%回収される構成とな

っている。回収液化CO₂は、メタノールやメタンなどの燃料の合成のためのCO₂資源として再利用することができる¹⁾。

2.2 システムの特徴

本提案CO₂全回収多重熱利用サイクル発電システムでは、燃料の持つエネルギーを利用して高温熱を発生し、その熱を三重の発電サイクルを用いて多重に利用する構成となっているので、高効率な発電が出来るという特徴がある。

本CO₂全回収多重熱利用サイクル発電システムの中のトッピングサイクルとなっている酸素燃焼方式CO₂回収ガスタービン発電システムはセミクローズドサイクルとなっており、CO₂回収のため冷却を行っているが、これは作動流体となるCO₂の温度を低下させるのでCO₂の圧縮効率を向上させるのに役立つほか、タービン排ガス中に含まれる水蒸気の復水作用によりタービン排圧を大気圧以下にするのでタービン仕事量を大幅に増大させる効果を持つ。ミドルサイクルとなっている膨張タービン発電システムは構成が簡単で、CO₂の発生もなく、トッピングサイクル発電システムの排熱を利用して高効率の発電を行うことの出来る構成となっている。さらに、ボトムサイクルとなっているBCPシステムでは、従来式ガスタービンと異なり作動流体がガスの圧縮仕事が不要となる。圧縮の過程は復水の圧縮という水の圧縮の過程で行われるので、気体の場合に比べ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、次節のシミュレーション結果でも示すように、このBCPシステム内で投入される燃料のエネルギー基準でいうと、発電機端の効率は83%近い高い値を得ることが可能となり、燃焼用の高圧酸素量および燃料燃焼により発生するCO₂量が大幅に少なくなり、酸素の発生および圧縮のために必要となる動力およびCO₂の液化処理のために必要となる動力も僅かで済むので、BCPシステムの正味発電効率が顕著に高くなるという特徴がある⁹⁾。

本システムでは、燃料の燃焼に空気ではなく酸素を用いているので、燃焼ガスの主成分は水蒸気とCO₂のみとなり、このため燃焼排ガスからCO₂を回収するのに基本的に冷却水による冷却の操作だけで分離回収出来るので信頼性が高く大規模化が容易であるという特徴もある。さらに、本システムでは空気燃焼の場合と異なり、燃焼反応中に窒素分が実際存在しないのでサーマルNO_xの生成がない⁸⁾という特徴もある。

3. 提案システムの特性推計結果と検討

提案したCO₂全回収多重熱利用サイクル発電システムの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^{4~7)}を基に特性シミュレーションのためのモデルを開発した。本節では、開発したモデルを用いて特性を推定した例について述べる。紙数の制限よりモデルの詳細についての説明は省略するが、特性の推定に当たって必要となる外生変数および外生パラメータは表1に示すとおりである。表1には、また本例の特性の推定に当たって用いた外生変数および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回収発電システムやコージェネレーションシステムの特性の解析に用いてきた値を基に実現可能性を考慮して想定した値である。

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、ガスタービン発電機の発電端電力は100MW、ガスタービン入口温度は1200℃とした。燃料の種類としては、持続性のある燃料の候補として、CO₂と水素より合成できるメタノールあるいはメタンなどがあるが、ここでは天然ガスの主成分でもあるメタンとした。

シミュレーションモデルにより推定した本発電システム各部の温度、圧力、エンタルピおよび流量の推定結果を表2に示す。

本発電システムでは、表2および図-2に示すようにCO₂回収ガスタービン発電システムの高圧タービン発電機で100MWの電力を発電するのに238Gcal/hの燃料を消費し、タービン出口ガス温度は611℃、ガス流量は941t/hと推定された。この排ガス流量により排熱ボイラ(WHB1)で200kg/cm²a、566℃の高圧蒸気および15kg/cm²a、199℃の中圧蒸気をそれぞれ152t/hおよび10.8t/h発生し、高圧蒸気を利用して膨張タービンで25.2MW発電でき、回収液化CO₂は52.9t/h、CO₂回収率は96.9%になると推定された。なお、CO₂回収率が100%とならないのは、表1に示すように本システム内の各種の要素機器において流量損失があると仮定しているためである。

膨張タービン出口の蒸気の状態値は15kg/cm²a、216℃となり、この蒸気とWHB1出口の中圧蒸気がBCPシステムの作動流体として利用される。BCPシステムでは、103Gcal/hの燃料を消費し、99.5MW発電でき(発電機端効率82.9%、以下、発電効率は低発熱量基準)、回収液化CO₂は23.6t/h、CO₂回収率は

表1 シミュレーション・モデルの外生変数と外生パラメータ

(a) 外生変数

変数	基準値
タービン入口温度	1200°C
タービン入口圧力	40 kg/cm ² a
燃料の種類, 温度	メタン; 15°C
燃焼器での酸素過剰率	1.2
再生器の温度効率	75%
復水器出口温度	32.55°C
復水器出口圧力	0.1 kg/cm ² a
ガスタービン発電機定格出力	100 MW
高圧蒸気圧力; 温度	200 kg/cm ² a; 566°C以下
中圧蒸気圧力	15 kg/cm ² a
排熱ボイラ入口給水温度	75°C

(b) 外生パラメータ

パラメータ	基準値
CO ₂ 圧縮機断熱効率	85%
CO ₂ 圧縮機流量損失率	0.05%
ガス及び膨張タービン断熱効率	87.5%; ; 90%
ガス及び膨張タービン流量損失率	0.05%
燃焼器燃焼効率	99%
燃焼器圧力損失率	2%
燃焼器流量損失率	0.05%
燃料噴射ノズル圧力損失率	10%
酸素噴射ノズル圧力損失率	10%
蒸気噴射ノズル圧力損失率	10%
再生器蒸気および燃焼ガス圧力損失率	2%; ; 10%
再生器蒸気および燃焼ガス流量損失率	0.05%; ; 0.05%
排熱ボイラエンタルピ交換率	95%
排熱ボイラターミナル温度差 (入口排ガス温度-ボイラ出口蒸気温度)	40°C
排熱ボイラピンチポイント温度差	20°C
WHB 2 出口排ガス乾き温度条件 (出口排ガス温度-飽和蒸気温度)	10°C
排熱ボイラ排ガス圧力損失	0.05 kg/cm ²
排熱ボイラ蒸気圧力損失率	5%
排熱ボイラ排ガス流量損失率	0.05%
リターン水温度	100°C
復水器排ガス圧力損失	0.05 kg/cm ²
気水分離器圧力損失率	2%
発電機効率	98%
酸素製造原単位	0.34 kWh/Nm ³
BCPシステムの従来式補機の動力消費率	3.0%
その他システムの従来式補機の動力消費率	1.0%
冷凍機COP	3.5

99.8%と推定された。

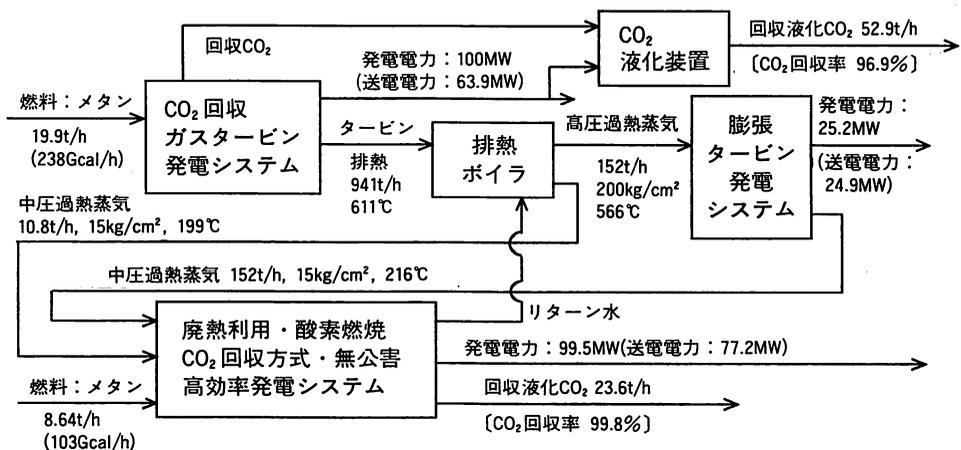
CO₂回収ガスタービン発電システム、膨張タービン発電システムおよびBCPシステムの所内用動力は合計3.84MWと推定され、CO₂回収ガスタービン発電システムおよびBCPシステムで使用される酸素の製造圧縮電力はそれぞれ28.6MWh/hおよび13.3MWh/h、

回収CO₂の液化用の電力(酸素回収による電力節約分を考慮した正味電力)はそれぞれ6.52MWh/hおよび6.44MWh/hと推定されるので、合計送電可能電力は、166.0MWとなり、総合送電端発電効率は41.9%となる。本システムにおける合計CO₂生成量は78.3t/h、合計CO₂回収量は76.5t/h、総合CO₂回収率は97.8%

表2 発電システム各部の状態量の推定結果

位置あるいは種類*	温度 (°C)	圧力 (kg/cm ² a)	エンタルピ** (kcal/kg)	流量 (t/h)
a CO ₂ 圧縮機入口	32.6	0.686	1.63	842.2
b 燃焼器入口	466.7	40.8	110.4	841.8
c タービン入口	1199.9	40.0	348.2	941.6
d タービン出口	610.9	0.800	157.7	941.1
e 排熱ボイラ(WHB1)出口	101.3	0.750	17.5	940.6
f 復水器出口	32.6	0.700	32.6	940.6
g 高圧過熱蒸気	566.0	200.0	799.3	151.8
h 中圧蒸気	199.0	15.0	642.5	10.8
i 膨張タービン出口	216.4	15.0	653.7	151.8
j 排熱ボイラ(WHB1)入口	75.0	18.0	50.3	162.5
k 燃料	15.0	45.4	-5.27	19.9
l 酸素	15.0	45.4	-2.16	80.4
① 再生器入口	215.2	15.0	69.9	162.5
② 燃焼器入口	429.6	14.7	185.0	162.5
③ タービン入口	1200.0	14.4	581.4	230.6
④ タービン出口	483.2	0.222	202.5	230.5
⑤ 再生器出口	307.3	0.200	121.4	230.3
⑥ 排熱回収復水器入口	63.2	0.150	15.9	230.2
⑦ 排熱回収復水器出口	32.6	0.100	7.37	185.9
⑧ 冷凍機入口	32.6	0.100	3.13	44.3
⑨ 排熱ボイラ(WHB2)入口	42.2	16.3	16.8	180.8
⑩ 排熱ボイラ(WHB2)出口	100.0	16.3	75.3	162.5
⑪ 燃焼器噴射蒸気	277.3	16.3	104.3	18.3
⑫ 燃料	15.0	16.3	-5.27	8.64
⑬ 燃焼用酸素	25.0	16.3	0.0	41.3

* : 発電システムの位置あるいは種類を表す記号(英小文字および数字)については図-1を参照のこと。
 ** : ガスについては1atm, 25°Cを基準とし, 蒸気, 液体(水)については25°Cの飽和水を基準としている。ただし, ⑪燃焼器噴射蒸気はガスタービンの作動流体として利用されているので, ここではガス扱いして表示されている。



合計送電可能電力 166.0MW [総合送電端効率 41.9%] 総合CO₂回収率 97.8%

図-2 CO₂全回収多重熱利用サイクル発電システムの特性推定結果

となる。

本システムの特性をアミン系化学吸収液を用いたCO₂回収大規模蒸気タービン発電システムの特性推定結果と比較すると次のようになる。なお、比較の対象として複合発電方式を採用しなかったのは、複合発電システムはCO₂回収のないときには高効率であるが、CO₂回収率を90%近くに高めると、CO₂吸収液加熱用の抽気蒸気量が大きくなるため、CO₂回収を行う蒸気タービン発電システムの効率よりかえって低くなってしまいうためである⁹⁾。CO₂回収大規模蒸気タービン発電システムでは、CO₂の回収を行わない場合送電端発電効率は43.5%であるが、発生CO₂の90%を排煙より回収すると、効率は37.7%に低下すると推定されている⁹⁾。従って、CO₂を回収するという前提条件のもとでは、提案システムの方が4.2%、相対値では11.1%効率が良いことになる。

なを、本発電システムの送電端効率を、タービン入口温度1200°Cの高温ガスタービンコンバインドサイクル発電システムにO₂/CO₂燃焼を採用した場合の効率と比較すると、この発電システムでは効率は40.7%になると推定されているので¹⁰⁾、本発電システムの方が相対値で2.95%効率が低いと推定されていることが分かる。

4. おわりに

本論文では、発生CO₂を100%近く回収する無公害の多重熱利用サイクル発電システムを提案した。

シミュレーションモデルを構築し、本発電システムの特性を推定した結果、CO₂回収率97.8%で41.9%の送電端効率(低発熱量基準)を持ち、これは従来式の大規模発電システムにおいて、化学吸収法を用いて発生CO₂の90%を回収するとした場合の推定効率37.7%より11.1%高いと推計されることを示した。

本発電システムは、熱を高温から低温まで多重に利用することにより、CO₂の回収をほぼ完全に行う割には高い効率を得ることが出来る。冷却作用によってCO₂の回収が行えるので、大型システムにも適用でき、無公害で信頼性の高いCO₂回収発電システムを構築することができる。また、基本的に既存の技術に基づいて構築できる、という特徴がある。ただし、酸素燃焼

の燃焼器の開発、小型で熱交換効率の良い排熱ボイラの開発やO₂とCO₂の不凝縮気体を含む排ガスの小型で効率の良い復水器(凝縮器)の開発などが要求されるが、現在技術を適用して解決は可能であると思われる。

なお、本発電システムはこれまでに提案されている種々のCO₂回収発電システムに比べ発電効率は高いものの、システム構成が複雑になる。このため、CO₂排出制約下における将来の新しい発電システムとして本システムが本当に優れているかどうかは、経済性も含めて検討する必要があるが、これは今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 佐野：「エネルギーと地球環境の同時解決を目指して」、エネルギー・資源 Vol. 11, No. 2, pp.101~106(平2-3)
- 2) 鈴木・佐野・朴：「CO₂循環エネルギーシステムの基礎的検討」、エネルギー・資源学会第10回研究発表会講演論文集, pp. 141~146 (平3-4)
- 3) 新エネルギー産業技術総合開発機構・地球環境産業技術研究機構・エネルギー・資源学会：「自然エネルギーによるCO₂グローバルリサイクルシステムの可能性調査」報告書(平4-3)
- 4) 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 Vol. 14, No. 1, pp.72~77(平5-1)
- 5) 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」、電気学会論文誌B, Vol. 114, No. 5, (平6-5掲載予定)
- 6) 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」、電気学会論文誌B, Vol. 113, No. 3, pp.266~272 (平5-3)
- 7) 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」、電気学会論文誌B, Vol. 110, No. 2, pp.155~162 (平2-2)
- 8) 朴・鈴木：「ガスタービンの効率および燃料によるサーマルNO_x生成特性の比較」、シミュレーション, Vol. 7, No. 1, pp.30~37 (昭63-3)
- 9) 朴・鈴木：「CO₂回収率をパラメータとしたCO₂回収複合発電システムの特性」、エネルギー・資源学会第9回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, pp.349~354 (平5-1)
- 10) Y. Suzuki and P.S.Pak : A Power Generation System with Complete CO₂-Recovery Based on Oxygen Combustion Method, Proceedings of International Symposium on CO₂ Fixation and Efficient Utilization of Energy (1993-11)