

## 環境配慮型サイクル媒体で低温排熱を有効利用する アミン-CO<sub>2</sub>サイクルバイナリー発電機

Environmentally Friendly Amine-CO<sub>2</sub> Cycle Binary Power Generation System Effectively Utilizing Low-Temperature Waste Heat

井上 翔太 INOUE Shota 山本 泰 YAMAMOTO Yasushi

省エネ推進に向けて、産業プロセスや発電プラントから排出される80～150℃の低温の未利用熱を有効利用する手段として、アミン-CO<sub>2</sub>(二酸化炭素)サイクルバイナリー発電機を開発している。この発電機は、バイナリー発電のサイクル媒体として、東芝は環境負荷が低いCO<sub>2</sub>を吸収したアミン水溶液を使用しており、既存のバイナリー発電機よりも安全で高出力を得られる。

発電出力100 kW級の実証試験を実施し、発電システムとして系統構成の最適化及び運転制御方法の確立を完了した。この成果を踏まえて商用プロトタイプを設計製造し、長期的な機器の状態変化を評価して、商用化に向けて設備維持管理方法を確立していく。

To promote energy conservation, Toshiba Corporation is developing an amine-carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) cycle binary power generation system to effectively utilize low-temperature waste heat emitted from industrial processes and power plants at temperatures of 80°C to 150°C. The system achieves enhanced safety and higher power output compared with conventional binary power generation systems by using an environmentally friendly CO<sub>2</sub>-absorbed amine aqueous solution. Through demonstration tests on a 100 kW-class prototype, we have established process optimization and operation control schemes for the power generation system. In the future, we will develop a commercial prototype, evaluate long-term changes in equipment, and establish the optimal maintenance and management methods toward commercialization.

### 1. まえがき

産業・発電の分野では、プロセスに投入された熱エネルギーのうち、低温となったものは利用しきれずに未利用熱として廃棄されてきた。この未利用熱を有効利用することが、省エネ推進の一助となる。我が国では、200℃以上の未利用熱については、省エネ努力により減少しているが、200℃未満の利用は進んでいない。

200℃未満の未利用熱を活用する技術として、熱水や蒸気の熱エネルギーで、沸点の低いサイクル媒体を沸騰させ、その汽力でタービンを回転させるバイナリー発電がある。アンモニア水や代替フロンなどがサイクル媒体として使われており、経済性や、環境負荷、安全性の確保などの課題があるため、我が国ではほとんど使われていない。

東芝は、既存のサイクル媒体の代わりにCO<sub>2</sub>を吸収したアミン水溶液を用いるアミン-CO<sub>2</sub>サイクルバイナリー発電機の社会実装に向けた開発を進めている<sup>(1)-(7)</sup>。CO<sub>2</sub>分離回収技術の開発で得られた知見を応用して、CO<sub>2</sub>を吸収したアミン水溶液を用い、80～150℃の未利用熱を効率的に電気エネルギーへ変換する。環境に配慮しながら、安全かつ高い発電出力を持つことが特長である。産業プロセス・発電プラントの排出ガスや、蒸気、温水、地熱などに含まれる多

種多様な低温の未利用熱を有効利用できる。

ここでは、アミン-CO<sub>2</sub>サイクルバイナリー発電機の概要・特長・開発課題、及び動作試験結果について述べる。

### 2. アミン-CO<sub>2</sub>サイクルバイナリー発電機の概要と特長

アミン-CO<sub>2</sub>サイクルバイナリー発電機は、図1に示すとおり、蒸発器、セパレーター(気液分離器)、中間熱交換器(予熱器)、タービン発電機、凝縮吸収器(復水器)、及び循環ポンプで構成される。アミン水溶液は弱塩基性の有機溶媒であり、常温でCO<sub>2</sub>と接触すると、化学的にCO<sub>2</sub>を吸着して水溶液の中に取り込む。一方、CO<sub>2</sub>を吸収したアミン水溶液を70℃以上に温めると、CO<sub>2</sub>をガスとして放出する。

この発電サイクルは、次の四つの機能に分解できる。

- ① CO<sub>2</sub>を豊富に含んだアミン水溶液を循環ポンプで昇圧し蒸発器に流入させる。
- ② アミン水溶液を熱源媒体(未利用熱源)と熱交換させ、CO<sub>2</sub>ガスを水溶液から放出し、水を蒸発させる。
- ③ ②で生成した二相流をセパレーターで分離し、CO<sub>2</sub>ガスと水蒸気から成る気相を用いてタービン発電機を回転させ、発電する。液相のアミン水溶液は中間熱交換器を介して、凝縮吸収器へ還流させる。
- ④ タービン発電機を通過した水蒸気を凝縮吸収器で凝

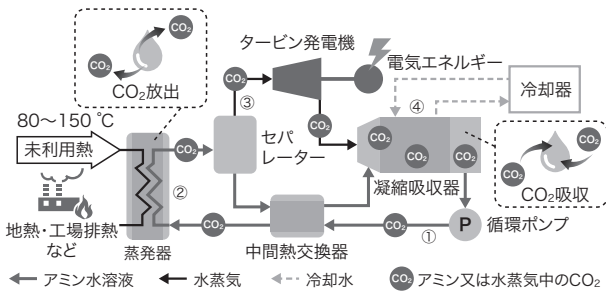


図1. アミン-CO<sub>2</sub>サイクルバイナリー発電機の概要

CO<sub>2</sub>を吸収したアミン水溶液がクローズドで循環する発電サイクルである。

Outline of amine-CO<sub>2</sub> cycle binary power generation system

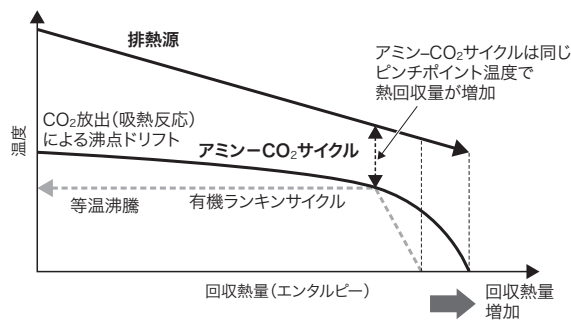


図2. バイナリー発電の排熱回収線図

沸点ドリフト効果により、アミン-CO<sub>2</sub>サイクルバイナリー発電は低温熱源からの熱回収に優れている。

Waste heat recovery flow diagrams for organic Rankine cycle (ORC) and amine-CO<sub>2</sub> cycle binary power generation systems

縮し、同時にCO<sub>2</sub>ガスをアミン水溶液に吸収させる。

①～④の過程をクローズドなサイクルで繰り返すことで、連続的に未利用熱を電気エネルギーに変換する。特に、②の過程でアミン水溶液がCO<sub>2</sub>ガスを放出する際は、吸熱反応であるため外部から効率良く熱を取り込むことが可能となる。CO<sub>2</sub>の発泡開始温度は水の沸点よりも低いことから、CO<sub>2</sub>を吸収したアミン水溶液は、実質的に沸点を下げる効果がある。

図2に、バイナリー発電の排熱回収線図を示す。一般に、低温未利用熱から熱回収する場合、熱交換器の高温側と低温側の最接近温度差(ピンチポイント温度差)が熱回収量に影響する。バイナリー発電サイクルは、CO<sub>2</sub>吸収による沸点の低下とCO<sub>2</sub>放出に伴う実質的な沸点上昇の効果によって、単一サイクル媒体の場合と比較して、同じピンチポイント温度差でより多くの熱量を回収でき、熱交換後のガス温度もより高温にできる。

また、サイクル媒体の特性上、低圧・低流量で運転可能であるため、既存の代替フロンに代表される有機ランキンサ

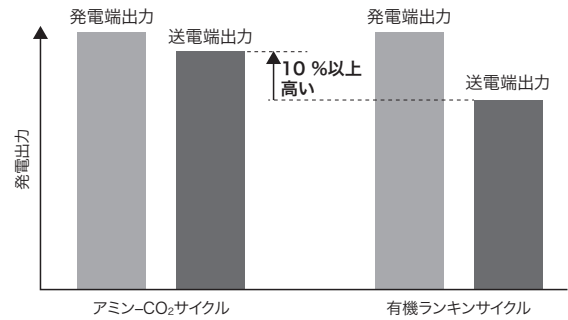


図3. 発電出力の比較

アミン-CO<sub>2</sub>サイクルバイナリー発電で得られる正味出力(送電端出力)は、有機ランキンサイクルに比べて10%以上多い。

Comparison of output power of ORC and amine-CO<sub>2</sub> cycle binary power generation systems

イクルと比較して循環ポンプの動力を低減でき、同一熱源条件の場合、有機ランキンサイクルより送電端出力は10%以上高いことが期待できる(図3)。

アミン水溶液は、低毒性でありかつ温暖化係数が小さく、オゾン層保護法の規制対象外の持続可能な物質である。アミン-CO<sub>2</sub>サイクルは、負圧条件下で運転するためサイクル媒体の漏洩(ろうえい)リスクも低く、長期間にわたり安全で環境に配慮した運用が可能である。

### 3. アミン-CO<sub>2</sub>サイクルバイナリー発電機の課題

#### 3.1 凝縮吸収器(負圧条件下)内の水蒸気凝縮・CO<sub>2</sub>吸収現象及び凝縮吸収性能の把握

蒸発器でアミン水溶液から放出されたCO<sub>2</sub>ガスが、タービン発電機で仕事をした後に凝縮吸収器内で滞留すると、タービン出口圧力が上がり、圧力差が取れなくなって発電効率の低下を招く。そのため、凝縮吸収器内でCO<sub>2</sub>ガスを効率良くアミン水溶液に吸収させることが、発電効率を決める重要な要素となる。一方、凝縮吸収器内において、水蒸気の凝縮と同時にアミン水溶液がCO<sub>2</sub>を吸収する挙動については既往研究が乏しく、機器設計段階における詳細な性能予測が困難であった。

そこで当社は、バイナリー発電運転条件下における凝縮吸収器内の水蒸気凝縮・CO<sub>2</sub>吸収現象の解明、水蒸気凝縮・CO<sub>2</sub>吸収挙動のモデル化、及びそれらを組み込んだ1次元モデルの構築を実施した<sup>(8)</sup>。

#### 3.2 発電システム運転制御方法の確立

アミン-CO<sub>2</sub>サイクルは、当社独自の発電サイクルであるため、運転方法や制御ロジックを、一から構築する必要がある。1次元モデルによる動的シミュレーションを活用し、発電装置内の水位制御などの各部制御系検討に加え、運転

条件や運転パラメータの検証・最適化を実施した。

#### 4. アミン-CO<sub>2</sub>サイクルバイナリー発電機の動作試験と開発の成果

開発のプロセスとして、図4に示すように基礎試験と実スケール試験を実施し、水蒸気凝縮・CO<sub>2</sub>吸収挙動のモデル化及び1次元モデルの構築により、商用機設計ツールを作成した。

##### 4.1 基礎試験<sup>8)</sup>

図5に示すとおり、このサイクルでは水蒸気の凝縮とCO<sub>2</sub>吸収の二つの機能を要するため、凝縮吸収器にはスパイラル熱交換器を採用した。スパイラル熱交換器の伝熱部にお

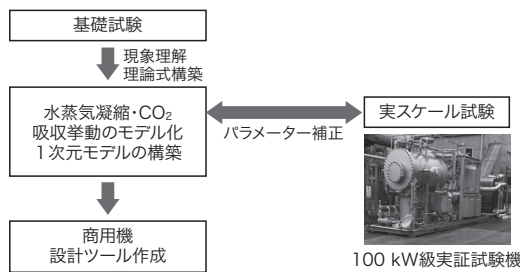
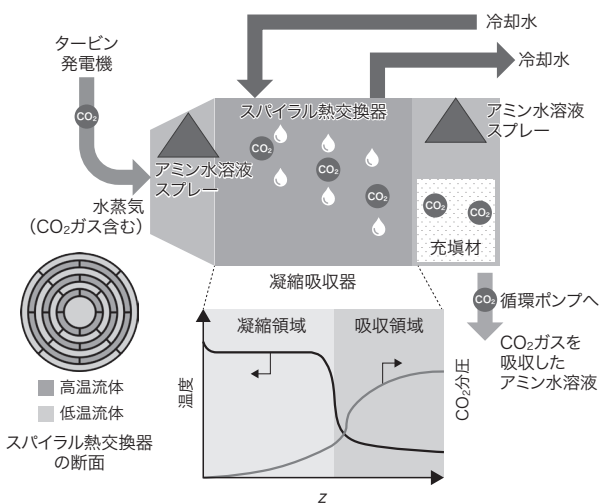


図4. 開発プロセス

基礎試験で得られた水蒸気凝縮CO<sub>2</sub>吸収の試験データから水蒸気凝縮・CO<sub>2</sub>吸収挙動をモデル化し、1次元モデルを構築して、商用機設計ツールを作成した。

Development process of amine-CO<sub>2</sub> cycle binary power generation system



z:凝縮吸収器における水蒸気とCO<sub>2</sub>ガスの流れ方向位置

##### 図5. 凝縮吸収器の概要

スパイラル熱交換器の伝熱部の前後にアミン水溶液スプレーを設置し、試験データを得た。

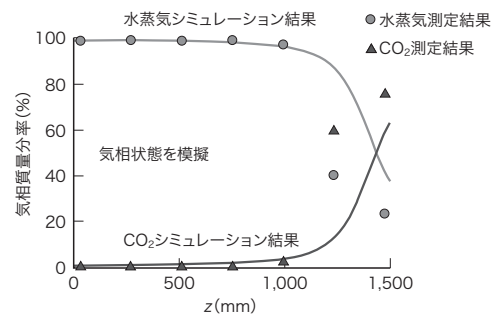
Outline of condenser-CO<sub>2</sub> absorber unit

ける蒸気流れ方向の水蒸気凝縮量やCO<sub>2</sub>吸収量を計測するため、可視化試験装置を作成し、凝縮吸収器内の実運転条件(温度・圧力・流速)における水蒸気とCO<sub>2</sub>の気相質量分率データを取得した(図6(a))。また、発電性能のポイントとなる水蒸気凝縮とCO<sub>2</sub>吸収を同時に行う凝縮吸収器の1次元モデルを構築し、図6(b)に示すCO<sub>2</sub>吸収流束分布のシミュレーション結果を得た。凝縮吸収器内前半部では水蒸気の凝縮が優位に進行し、アミンによるCO<sub>2</sub>吸収は主に凝縮完了後に生じることを確認した。

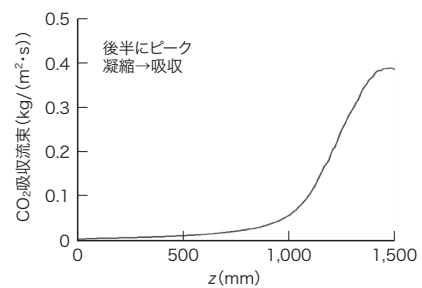
##### 4.2 100 kW級実スケール試験

図7に示した100 kW級実証試験機を設計製作し、当社の京浜事業所で、ガスエンジン発電機のジャケット冷却水排熱を利用して実証試験を実施した。100 kW級実証試験機の諸元を表1に示す。商用スケールの実証試験機でバイナリー発電機の運転データを取得し、各種条件における運転パラメータの最適化及び運転制御ロジックの有効性検証を実施した。

従来のガスエンジンでは、ジャケット冷却水は戻り温度が約90℃の状態ですぐに2次冷却水と熱交換され、この熱は冷却塔から排出されていた。この排熱をバイナリー発電機の熱源とするため、ジャケット冷却水戻り系統を分岐してバイナリー発電機の蒸発器へ温水を送り、バイナリー発電機に熱を取



(a) 気相質量分率分布の測定とシミュレーションの結果



(b) CO<sub>2</sub>吸収流束分布のシミュレーション結果

##### 図6. 基礎試験の結果

水蒸気凝縮が進行し、凝縮完了後にCO<sub>2</sub>吸収が進むことが確認され、シミュレーションでも試験結果を再現できた。

Results of basic phenomenon tests prior to demonstration tests

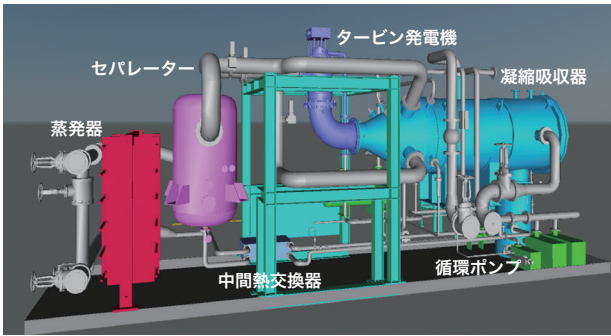


図7. アミン-CO<sub>2</sub>サイクルバイナリー発電の100 kW級実証試験機の構成

長さ7 m, 幅2.3 m, 高さ3 mの実証試験機を設計製造した。

100 kW-class prototype configuration

表1. 100 kW級実証試験機的主要諸元

Main specifications of 100kW-class prototype

項目	諸元
最大発電出力	160 kW
電圧	400 V
排熱源	ガスエンジンジャケット冷却水
熱源水温度	85 ~ 95 °C
熱源水流量	80 ~ 120 t/h
冷却水温度(環境条件)	10 ~ 30 °C
冷却水流量	50 ~ 200 t/h

り込む系統とした。また、多様な熱源温度で発電出力データを取得するために温度調整設備を設置し、熱源と冷却水の各種条件について発電性能を確認した。

試験の結果、最大100 kWの発電出力が連続的に得られることが確認できた。従来捨てられていた熱から、追加燃料や追加のCO<sub>2</sub>排出なく発電出力が得られたことは、大きな成果である。

実証試験の結果に、基礎試験の結果から作成した理論モデルを用いてパラメーター補正を行い、商用機設計ツールを整備した。商用機設計ツールを用いて、凝縮吸収器及び発電サイクルの最適設計を実施することで、凝縮吸収性能の目標値を実証試験機で達成した。発電システムとしての運転方法や運用ロジックの有効性を確認し、系統構成の最適化と運転制御方法の確立を完了した。

## 5. あとがき

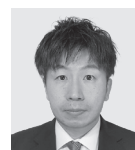
今後は、実証試験機で得られた知見を反映した100 kW級商用プロトタイプ的设计及び社会実装により、この技術の普及に向けた活動を推進する。特に、長時間の発電運転データを取得し、機器の経年的な状態変化を評価し、長期

的な設備維持管理方法の確立に注力する。2028年度からの商用化・社会実装を目指す。また将来は、工場排ガスからの直接熱回収や大容量化に向けた開発に取り組み、地熱発電や温泉を含めた更なる低温未利用熱の活用拡大を通して省エネに貢献する。

ここで述べた成果の一部は、NEDO(国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)の助成事業(JPNP21005)の結果、得られたものである。

## 文献

- (1) Ogawa, T.; Yamamoto, Y. "Low temperature cycle using amine-CO<sub>2</sub> fluid". The Society of Chemical Engineers (SCEJ) 48th Autumn Meeting. Tokushima, 2016-09. SCEJ, 2016, H207.
- (2) Ogawa, T.; Yamamoto, Y. "Low temperature cycle using Amine-CO<sub>2</sub> fluid (2) Heat recovery from hot water at 95 °C". SCEJ 82nd Annual Meeting. Tokyo, 2017-03. SCEJ, 2017, 9-d-ACKN No.80.
- (3) 山本 泰, 小川 斗. "アミン-CO<sub>2</sub>を用いた低温熱サイクルの研究". 日本機械学会2017年度年次大会講演論文集. さいたま, 2017-09, 日本機械学会. 2017, No.17-1-G0800101. <[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmemecj/2017/0/2017\\_G0800101/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmemecj/2017/0/2017_G0800101/_pdf/-char/ja)>, (参照 2026-02-03).
- (4) 山本 泰, ほか. "アミン水溶液とCO<sub>2</sub>を用いた低温熱サイクルの開発". 日本機械学会 第23回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集. 宇部, 2018-06, 日本機械学会. 2018, No.18-17-C211. <[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmepes/2018.23/0/2018.23\\_C211/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmepes/2018.23/0/2018.23_C211/_pdf/-char/ja)>, (参照 2026-02-03).
- (5) Ogawa, T. et al. "Low Temperature Cycle Using Amine-CO<sub>2</sub> Fluid (4) Thermal Degradation of MDEA Solution". SCEJ 83rd Annual Meeting. Osaka, 2018-03. SCEJ, 2018, E219.
- (6) Ogawa, T.; Yamamoto, Y. "Low Temperature Cycle Using Amine-CO<sub>2</sub> Fluid (5) Dependence of Power on MDEA Fluid Conditions". SCEJ 50th Autumn Meeting Kagoshima, 2018-09. SCEJ, 2018, DB115.
- (7) Ogawa, T. et al. Low Temperature Power Cycle Using Amine - CO<sub>2</sub> Fluid. MATEC Web of Conferences. 2021, **333**, 09001. <<https://doi.org/10.1051/mateconf/202133309001>>, (accessed 2026-02-03).
- (8) 佐藤結斗, ほか. "アミン-CO<sub>2</sub>ランキンサイクルの凝縮吸収器の疑似2次元モデルによる性能予測". 第28回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集. 京都, 2024-06, 日本機械学会. 2024, A223.



井上 翔太 INOUE Shota  
サーマル&ハイドロパワー事業部  
ヒートサイクル計画・技術部  
Heat Cycle Planning & Engineering Dept.



山本 泰 YAMAMOTO Yasushi  
総合研究所 エネルギーシステムR&Dセンター  
機械技術開発部  
博士(工学) 日本機械学会・日本原子力学会会員  
Mechanical Engineering R&D Dept.