

## 報 告

## 燃焼ガス浄化技術による 一般廃棄物処理施設由来 CO<sub>2</sub> の農業利用

Agricultural Use of CO<sub>2</sub> Derived from Municipal Solid Waste Treatment Facilities  
with Combustion Gas Purification Technology



岡部 潤輝\* 藤川 宗治\*  
Junki OKABE Muneharu FUJIKAWA  
佐藤 和宏\* 増田 孝弘\*  
Kazuhiro SATOH Takahiro MASUDA

**【要旨】** 当社は、バイオマス発電施設において実績を複数有する燃焼ガス浄化設備「t-CarVe(ティー・カーブ)<sup>®</sup>」の適用範囲を一般廃棄物処理施設へ拡大すべく、町田市バイオエネルギーセンターにて実証試験を実施した。本設備は、燃焼ガス中のCO<sub>2</sub>を分離回収することなく、有害成分の除去により安全にCO<sub>2</sub>を園芸施設へ供給するものである。約400日間にわたる連続運転を通じて、一般廃棄物燃焼ガスにおいてもCO、NO<sub>x</sub>、HCl、ダイオキシン類などを、農業利用に適した濃度まで浄化できることを実証した。また、園芸施設内の大気環境分析では、浄化ガス施用区と液化炭酸ガス施用区との間に有意差は認められず、いずれも一般的な大気と同等であった。さらに、栽培したいちごを用いた動物実験および微量成分分析においても有害な影響は認められなかった。これらの結果から、当社の燃焼ガス浄化設備により、一般廃棄物の燃焼ガス由来のCO<sub>2</sub>が農業利用可能であることが示唆された。

キーワード：燃焼ガス浄化，トリジェネレーション，農業利用，カーボンニュートラル，  
一般廃棄物処理施設

### Abstract

In order to expand the application range of the combustion gas purification system “t-CarVe<sup>®</sup>,” which has a proven track record in biomass power generation facilities, to municipal solid waste treatment facilities, our company conducted a demonstration test at the Machida City Bio-Energy Center. This equipment safely supplies CO<sub>2</sub> to greenhouses by removing harmful components instead of capturing and recovering CO<sub>2</sub> from combustion gas. Through continuous operation for approximately 400 days, it was demonstrated that combustion gas from municipal solid waste could be purified and CO, NO<sub>x</sub>, HCl, dioxins, and other harmful substances reduced to concentrations suitable for agricultural use. Analysis of the atmospheric environment in the greenhouse showed no significant difference between the purified gas enrichment and the liquefied carbon dioxide gas enrichment, and both were equivalent to the general atmosphere. In addition, no adverse effects were observed in animal experiments or trace component analyses using the strawberries cultivated. These results suggest that CO<sub>2</sub> recovered from municipal solid waste combustion gas using our company’s purification system can be put to agricultural use.

**Keywords:** combustion gas purification, trigeneration, agricultural use, carbon neutral, municipal solid waste treatment facility

\* 研究部  
Energy & Environmental Research Dept.

## 1. はじめに

2050年カーボンニュートラルの実現に向け、廃棄物分野においてもCO<sub>2</sub>の排出削減と有効利用に関する取り組みが加速している。当社では、廃棄物処理施設などから排出される燃焼ガス中CO<sub>2</sub>の分離回収技術、回収したCO<sub>2</sub>の利用技術、および燃焼ガスを浄化してCO<sub>2</sub>を直接利用する技術の研究開発に注力している。

CO<sub>2</sub>の直接利用先の一つとして有力なのが農業分野である。大規模なハウス園芸栽培施設（以下、園芸施設と記す）において、光合成に必要なCO<sub>2</sub>濃度を大気より高めることで農作物の生育を促進し、収量増加や品質向上を図るCO<sub>2</sub>施用技術（以下、CO<sub>2</sub>施用と記す）が広く活用されている。一般的に園芸施設内へ供給されるCO<sub>2</sub>は、液化炭酸ガスを直接供給する方式と、灯油やLPガスを園芸施設内の装置で燃焼し、その燃焼ガスを供給する方式の2通りがある。しかしながら、これらの方式は化石資源由来のCO<sub>2</sub>を供給するケースがほとんどであるため、カーボンニュートラルの観点で課題が残る。また、化石資源の燃焼ガスにはNO<sub>x</sub>（窒素酸化物）などが含まれる場合があり、農作物の品質への影響に注意を要する。加えて、近年の燃料価格高騰が農業経営を圧迫している現状もあり、持続可能な農業の実現に向けて新たなCO<sub>2</sub>供給源の確保が求められている。

そこで当社は、バイオマス発電所の燃焼ガスを園芸施設に利用することを目的として、燃焼ガスを浄化したカーボンニュートラルなCO<sub>2</sub>を、安全性を高めながら安価に園芸施設へ供給する「燃焼ガス浄化装置（t-CarVe・ティー・カーブ<sup>®</sup>：以下、浄化装置と記す）」を開発した<sup>1,2)</sup>。当社の浄化装置は既に複数のバイオマス発電施設への納入実績を有し、現在も安定稼働を継続している。今回はこのバイオマス発電施設向け浄化技術を一般廃棄物処理施設の燃焼ガ

スにも適用することを目的として、2023年11月に町田市バイオエネルギーセンター（熱回収施設：ストロカ式焼却炉、処理能力258トン/日）にて実証試験を開始した。本稿では、同センターの燃焼ガスを利用した実証試験について報告する。

## 2. 燃焼ガス浄化技術の概要

### 2.1 基本コンセプト

園芸施設内のCO<sub>2</sub>施用に必要なCO<sub>2</sub>濃度は400~1,500 ppm程度であり、燃焼ガス中のCO<sub>2</sub>濃度（10~15%）の1/10ほどの低濃度である。この濃度差に着目すれば、必ずしもCO<sub>2</sub>を高純度に分離回収する必要はない。そのため、燃焼ガスに含まれる農作物および作業環境に有害となる微量成分を許容値以下に低減し、CO<sub>2</sub>を含んだまま直接供給する浄化技術を採用した。本技術は、化学吸収法などの分離回収技術と比較して設備コストやエネルギー消費を大幅に抑えることができ、特にCO<sub>2</sub>排出源と園芸施設が近接している場合には大幅なコスト削減が可能となる。

一方、園芸施設では、農作物育成のための適切な温度管理に必要な熱や、設備稼働のための電力も不可欠である。一般廃棄物処理施設では、浄化技術によるCO<sub>2</sub>供給に加えて、ごみ燃焼熱由来の蒸気熱および、ごみ発電やバイオガス発電で生み出される電力をハウス園芸に活用することができる。すなわち、これらのCO<sub>2</sub>、熱、電力という3つのユーティリティを一括して有効利用する「トリジェネレーション」を実現することで、園芸施設における化石資源消費を大幅に抑制することが可能となる（図1）。

### 2.2 浄化設備の構成と燃焼ガスの浄化原理

浄化設備は、一般廃棄物処理施設などにおける多くの実績を通じて培われた当社の排ガス処理技術を

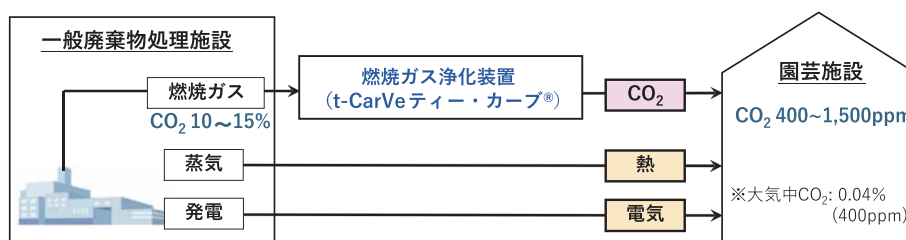


図1 トリジェネレーション概念図

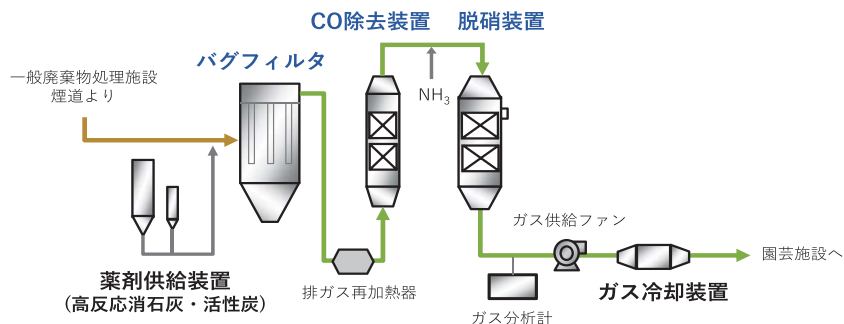


図2 燃焼ガス浄化設備の機器構成図

応用して開発したものである。主な構成機器は、薬剤供給装置、バグフィルタ、CO除去装置、脱硝装置、ガス冷却装置である（図2）。

バグフィルタでは燃焼ガスに含まれる各成分を通常の一般廃棄物処理施設よりも低濃度まで除去する必要があるため、反応層初期形成方式を採用している。本方式は、十分な量の高反応消石灰および活性炭をあらかじめろ布上にコーティングすることで、燃焼ガス中の酸性ガス成分、有機化合物、重金属類に突発的な濃度変動があっても常時安定して除去することができる。

CO除去装置は優れた分解性能を有する酸化触媒を充填しており、CO（一酸化炭素）を酸化するとともに、微量であっても農作物の生育阻害となるエチレンなどの炭化水素類を十分に低減する役割を担う。触媒充填量は定常運転時の必要量に対して十分な余裕を持たせた設計としており、安定した処理性能を継続的に発揮できる構成となっている。

脱硝装置は脱硝触媒とアンモニア供給によりNO<sub>x</sub>を窒素に還元する。NO<sub>x</sub>の急激な濃度変動にも追従できるよう、フィードフォワード制御とフィードバック制御を組み合わせた制御方式を採用している。

また、作業環境や農作物に対する安全性確保の観点から、浄化ガス中に含まれる各成分濃度の連続的な監視を実施している。万が一これらの濃度が基準を超えた場合には、速やかにガスの供給を停止するインターロック機能を備えており、安全性に十分配慮した設計としている。

### 3. 実証試験の概要

#### 3.1 浄化技術の適用範囲拡大に向けて

バイオマス発電施設での適用実績を踏まえ、浄化技術の適用範囲を一般廃棄物処理施設へ拡大すべく、2023年度に町田市バイオエネルギーセンターにて実証試験を開始した。一般廃棄物処理施設は全国に約1,000か所存在しており、浄化技術の導入展開により地方自治体における地域循環型カーボンリサイクルへの貢献が期待される。一般廃棄物処理施設から排出される燃焼ガスは、バイオマス発電施設と比較して廃棄物の組成変動に起因する燃焼ガス成分の変動幅が大きいという特徴がある。また、塩化ビニルなどのプラスチック類に由来するHCl（塩化水素）や、重金属類が微量に含まれている場合もある。このため、浄化技術の一般廃棄物処理施設への適用にあたっては、これらの変動要因に対応できる浄化性能と安定した運転を実証することが不可欠となる。

#### 3.2 実証設備と栽培条件

試験で利用した燃焼ガスは、熱回収施設の排ガス処理設備を通過した後の誘引通風機出口より一部を引き抜き、同センター内に設置した浄化設備（概略寸法6.0×3.4×3.0 m、CO<sub>2</sub>供給能力：70 m<sup>3</sup>N/h、14 kg-CO<sub>2</sub>/h）にて処理した浄化ガスを試験用の園芸施設へ供給した（図3）。

園芸施設は2棟設置し（各28 m<sup>2</sup>）、浄化ガスを施用する棟を実験区、従来技術である液化炭酸ガスを施用する棟を比較対照区として、いちご（品種名：章姫）の栽培試験を実施した（図4）。実験区では、一般廃棄物処理施設で常時発生する燃焼ガス中のCO<sub>2</sub>を浄化技術によって安価に継続供給できる利点を活かし、生育促進を優先したCO<sub>2</sub>管理（常時



図3 燃焼ガス浄化設備外観



(外観)



(内観)

図4 園芸施設

1,000~1,500 ppm に維持) をおこなった。一方, 対照区では慣行栽培方式<sup>†</sup>に準じた CO<sub>2</sub>管理 (800~1,000 ppm に間欠的に維持) をおこなった。

## 4. 試験結果

### 4.1 浄化装置の稼働状況と浄化ガスの性状

浄化装置は, 2023 年 11 月の稼働開始以来, 熱回収施設の定期休炉期間およびいちご栽培の休耕期間を除き, 約 400 日間にわたり定常運転を継続した。この間, 浄化ガス中の各成分濃度は安定して推移し, 基準値超過による浄化ガスの供給停止 (インターロックの作動) はなかった。

図5に連続ガス分析計で測定した浄化ガスの日間トレンドの代表例を示す。いずれの成分も許容値を十分に下回る数値で安定的に推移しており, 浄化設備が良好な処理性能を発揮していることを確認した。CO<sub>2</sub>供給先である園芸施設内の作業環境への影響が特に懸念されるCOについては, 出口濃度を5 ppm未滿に維持しており, CO除去装置が安定した分解性能を有していることを示した。また, HCl や SO<sub>x</sub> (硫黄酸化物) などの酸性ガス成分についても, 反応層初期形成方式の採用により高い除去性能を達成した。

表1に, その他の代表的な有害成分を手分析により測定した結果を示す。微量有害物質である水銀およびダイオキシン類については, いずれも極めて低い濃度であり, 高い安全性を確保することが可能で

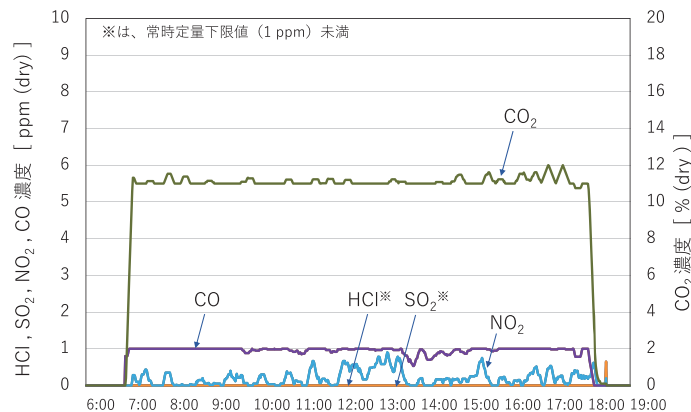


図5 浄化ガス中の各成分トレンド

<sup>†</sup> 特定の明確な基準や定義が存在しないものの, 農業従事者が地域の慣習や法律に基づいて農薬や肥料や CO<sub>2</sub>管理濃度などを適切に活用し, 一般的におこなわれている農業の方法。

表1 手分析法による浄化ガスの分析値

ガス成分	単位	浄化ガス分析値
アンモニア	ppm	<0.7
エチレン	ppm	<0.005
水銀	μg/m <sup>3</sup>	<0.06
ダイオキシン類	pg-TEQ/m <sup>3</sup>	<0.001

あることを確認した。また、農作物の生育阻害因子として知られるエチレンについては検出下限値未満に抑えられていることを確認した。アンモニアについても同様に検出下限値未満であり、浄化装置における脱硝工程での NO<sub>x</sub> 制御が適切におこなわれ、未反応アンモニアのリークがないことが示された。

これに加え、未知成分を含む複合的な農作物への影響を評価する観点から、浄化ガスの変異原性の有無について Ames 試験<sup>†</sup>を実施した。焼却燃焼ガスの変異原性試験に関する先行研究<sup>3)</sup>を参考に、浄化ガス中の成分を幅広く捕集するため、溶解特性の異なる3種の溶媒（水、アセトン、DMSO）を用いたが、いずれの溶媒においても変異原性は認められなかった。

さらに、浄化ガスを実際に施用した環境条件を評価するため、供給先である園芸施設内の大気環境を分析した。表2にその結果を示す。浄化ガスを施用した実験区と液化炭酸ガスを施用した対照区を比較したところ、両区の大気環境に有意な差は認められず、浄化ガス施用下においても園芸施設内環境が一

般的な大気と同等であることを確認した。また、実際の農園の大気環境や東京都内の大気中濃度の年平均値とも同等であることが確認できた。

以上より、一般廃棄物処理施設の燃焼ガスにおいても、本浄化技術により各成分を十分に低い濃度に低減できることが実証された。加えて、浄化ガスを施用した園芸施設内の環境が一般大気と同等であることから、農業利用への安全性も確認された。

#### 4.2 農作物（いちご）の育成試験結果

本試験における各栽培区でのいちごの可販果（8g以上の果実）の収穫結果を表3に示す。実験区は対照区と比較して積算収量で18%、可販果の果実数で13%上回る結果であった。この収量増加は、CO<sub>2</sub>施用による光合成促進効果に起因すると考えられる。実験区ではCO<sub>2</sub>管理濃度を対照区よりも高く維持したことで光合成が活発化し、同化産物<sup>††</sup>の生成量が増加したことで花芽分化や着果の促進に寄与し、可販果の果実数の増加につながったと推察される。また、光合成の活発化により、果実数が増加しても各果実への同化産物の供給が維持されたため、可販果の平均重量も同等以上の水準を保ったと考えられる。

収穫したいちごの外観品質および糖度についても対照区と同等以上であり、浄化ガスの施用が品質面に影響を与えないことを確認した。また、栽培期間

表2 園芸施設内の大気環境分析結果

CO <sub>2</sub> 施用方法	単位	浄化方式	慣行栽培方式	慣行栽培方式	東京都内 大気中年平均値 <sup>※2</sup>
		(本実証「実験区」)	(本実証「対照区」)	(実農園 <sup>※1</sup> )	
		浄化ガス	液化炭酸ガス	燃焼ガス	
CO	ppm	<0.1	0.1	<0.1	
HCl	ppm	0.001	0.009	0.019	
SO <sub>2</sub>	ppm	<0.001	<0.001	<0.001	0.001
NO	ppm	0.016	0.008	0.003	
NO <sub>2</sub>	ppm	0.015	0.013	0.010	0.012
アンモニア	ppm	0.010	0.010	0.010	
エチレン	ppb	<5	<5	<5	
水銀	mg/m <sup>3</sup>	<0.0001	<0.0001	<0.0001	
ダイオキシン類	pg-TEQ/m <sup>3</sup>	<0.01	<0.01	<0.01	0.013~0.021

※1：イオンアグリ創造(株)千葉柏農場イチゴハウス

※2：東京環境局報告値(2022)より

<sup>†</sup> 細菌を用いて、化学物質が遺伝子を損傷する性質（変異原性）の有無を調べる試験。変異原性と発がん性には高い相関があることから、食品添加物や医薬品などの発がん性スクリーニングに広く用いられている。陰性対照（溶媒のみの添加）との比較により、被験物質の変異原性を評価する。

<sup>††</sup> 植物が光合成により二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）と水から合成する有機物の総称。主成分はグルコース（ブドウ糖）で、これがデンプンやスクロース（ショ糖）に変換され、植物体の成長、果実の肥大・糖度向上、根の発達などに利用される。

を通じて病害虫の発生も認められなかった。

さらに、各栽培区で収穫したいちごを用いて、ラットによる経口毒性試験等の動物実験およびいちごに含まれる微量成分分析を実施した結果、両栽培区とも有害な影響は認められず、成分分析結果も同等であった。これらの結果から、浄化ガスを施用して栽培したいちごは、一般的に流通するいちごと同等の品質であることが示された。

表3 各試験区でのいちご収穫結果

	単位	実験区	対照区
CO <sub>2</sub> 管理濃度	ppm	1,000~1,500 (常時制御)	800~1,000 (間欠制御)
積算収量	kg	59.2	50.1
可販果の平均重量 <sup>*1</sup>	g	18.1	17.3
可販果実数	個数	3,278	2,892

※1：収穫した果実1個当たりの平均重量

## 5. 今後の展望

従来の施設園芸における慣行栽培では、CO<sub>2</sub>施用に化石資源由来のCO<sub>2</sub>を使用することが一般的である。これに対して、本浄化技術では廃棄物由来のカーボンニュートラルなCO<sub>2</sub>の利用を可能とする。試算によれば、本浄化装置を利用したトリジェネレーションへの転換により、いちご園芸施設1haあたり、約300t-CO<sub>2</sub>/年（電力・熱の供給含む）の脱炭素化が見込まれる。また、ハウス栽培される農作物の多くは、農作物ごとの固有なCO<sub>2</sub>濃度の適用範囲内において、CO<sub>2</sub>濃度が高いほど光合成が促進される傾向がある。そのため、適切なCO<sub>2</sub>管理のもとで高濃度施用をほかの農作物に適用した場合、本実証と同様に収量の増加が期待でき、農業経営の収益向上に寄与する可能性がある。

当社では、本技術の一般廃棄物処理施設への適用による事業化に向け、2027年度の実現を目標に取り組んでいる。2025年10月から2026年4月にかけては、同センター内に併設されたバイオガス化施設<sup>†</sup>（乾式高温メタン発酵方式、処理能力50トン/日）のバイオガスエンジン発電機から発生する燃焼ガスの浄化ガスを園芸施設へ供給する実証試験を実施している。今後は、本稿で報告した一般廃棄物処理施設由来の燃焼ガスに加え、バイオガスエンジン燃焼ガスへの本技術の適用も含めた包括的な展開を進め、一般廃棄物処理施設でのCO<sub>2</sub>農業利用事業の早期実現を目指す。本技術の普及を通じて、地域循環共生圏の創出や持続可能なまちづくりに貢献するとともに、2050年カーボンニュートラル社会の実現に貢献していく所存である。

## 謝辞

本実証試験を実施するにあたり、多大なるご協力をいただきました町田市殿および、農作物育成についてご指導いただきましたイオンアグリ創造株式会社殿に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) タクマ技報編集事務局：バイオマス発電施設CO<sub>2</sub>供給設備、タクマ技報、Vol. 29, No. 1, pp. 43-45 (2021)
- 2) 内山慎也, 藤川宗治, 谷口哲也：燃焼ガス浄化設備によるバイオマス燃焼ガス中CO<sub>2</sub>の有効利用、タクマ技報、Vol. 30, No. 2, pp. 58-63 (2022)
- 3) Yoshino, H., Urano, K.: Mutagenicity of exhaust gas from incineration plants of municipal waste, Science of the Total Environment, Vol. 162, pp. 23-30 (1995)

<sup>†</sup> 生ごみなどを発酵させて生成したバイオガスを燃料にガスエンジンで発電を行う施設