環境省・廃棄物資源循環学会共催シンポジウム（令和２年度第３回）
「地域循環共生圏形成における廃棄物エネルギー利用施設の果たす役割と可能性」

先導的な廃棄物処理に係る技術事例報告

中小廃棄物処理施設における先導的廃棄物処理システム化等評価事業「CO_2分離膜を適用した次世代低炭素型高効率バイオガス発電システムおよびコンバインドシステム」

令和３年３月３日

株式会社タクマ
株式会社ルネッサンス・エナジー・リサーチ
南但広域行政事務組合

TAKUMA
技術を大切に
人を大切に
地球を大切に

目次

1.最新技術事例報告

① 本事業の提案システムとその概要

- 本事業の提案システムとその概要
- 事業実施内容
- 事業実施体制

② 採用するCO_2分離膜技術について

③ 本事業の実施報告（システムⅠ）

- 基礎試験結果報告
- 実証試験１結果報告（CO_2分離膜システムの最適化）
- 実証試験２結果報告（高性能ｶﾞｽｴﾝｼﾞﾝとの組合せ）

④ 提案システムのCO_2およびコスト削減効果

2.タクマのCO2問題に対する取り組み

TAKUMA

技術を大切に
人を大切に
地球を大切に

提案システムの目的

TAKUMA

中小規模施設でのエネルギー活用の拡大には
メタンガス化システムの導入促進が必要

▼

**CO_2分離膜を適用することにより、
バイオガス中のCH_4濃度を高め、
CO_2排出量削減に寄与する３つのシステム**

システムⅠ

CO_2分離膜を適用した高効率バイオガス発電システム

システムⅡ

分離回収したCO_2の有効利用システム

システムⅢ

併設焼却炉でのガスエンジン排ガスの有効利用システム

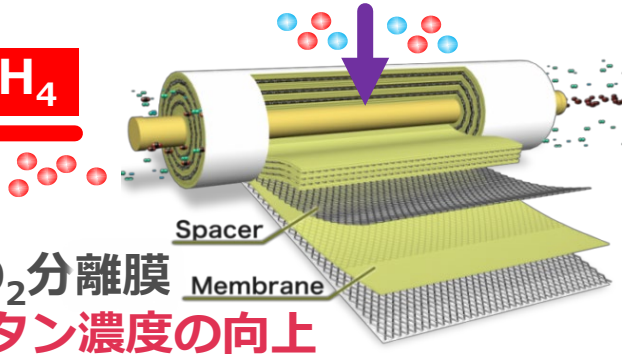
Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

提案システムの概要

TAKUMA

バイオガス＝CH_4：50～55%＋CO_2：45～50%

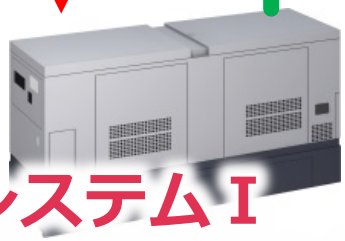
CH_4：90%程度 CH_4

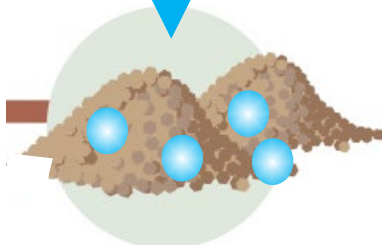


CO_2 分離回収したCO_2の利用

CO_2分離膜
メタン濃度の向上

ガスエンジン排ガスの利用





システムⅠ
ガスエンジン発電機

- 発電効率の向上
- 売電収入の増加
- 安価な汎用ガスエンジン
- 国内メーカによる安定したメンテナンス

システムⅢ
併設焼却炉

- ガスエンジンと焼却炉の排ガス中NOxの同時脱硝
- 排ガス量低減による消費電力削減

システムⅡ
CO_2の有効利用

- CO_2を灰へ固定化、CO_2排出量削減
- 重金属固定化薬剤削減
- 他の有効用途の検討

Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

事業実施内容

TAKUMA

システムⅠ
CO_2分離膜を適用した高効率バイオガス発電システム

- CO_2分離膜の最適運転条件の基礎試験(平成29年度)
- 実証試験装置の設計・製作(平成29年度)
- 高効率バイオガス発電システムの実証試験１(平成30、31年度)
- 分離膜で精製したバイオガスを用いた高性能ガスエンジンの実証試験２(令和2年度)

システムⅡ
分離回収したCO_2の有効利用システム

- CO_2の利用用途の調査(平成29年度)
- CO_2の灰への固定化試験(平成29年度)
- CO_2を用いた重曹（$NaHCO_3$）の製造試験(平成30年度)
- メタネーションによるCO_2の利用検討(平成30年度)

システムⅢ
併設焼却炉でのガスエンジン排ガスの有効利用システム

- 燃焼シミュレーションによる排ガス量、NOx削減効果の確認(平成29、30年度)
- 小型実験炉での排ガス量、NOx削減効果の確認試験(平成29、30年度)

Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

事業実施体制

TAKUMA

◆代表事業者

株式会社 タクマ

- CO_2分離膜を適用したバイオガス発電効率向上の基礎試験、実証試験１
- 分離回収したCO_2の有効利用試験
- 併設焼却炉でのガスエンジン排ガスの有効利用試験

◆共同実施者

株式会社 ルネッサンス・エナジー・リサーチ

- 一般廃棄物由来のバイオガスに対するCO_2分離膜の最適運転条件の確認
- CO_2分離膜を適用したバイオガス発電効率向上の実証試験２

◆共同実施者

南但広域行政事務組合

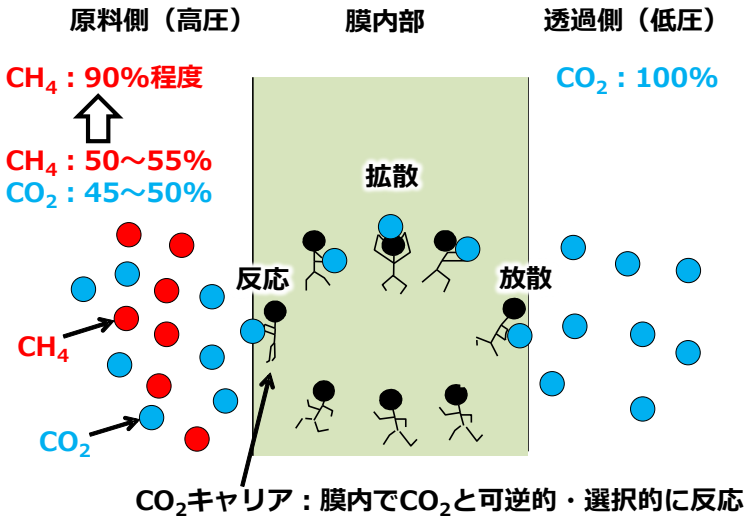
- 実証試験サイトおよびバイオガスの提供

Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

採用するCO_2分離膜技術について

TAKUMA

■ CO_2分離膜の原理



CO_2とキャリアとの選択的反応の模式図

CO_2とキャリアとの反応の際に熱エネルギーが発生

▼

CO_2の放散に必要な熱エネルギーをまかなうことができる

▼

エネルギー消費がない

■ 従来技術との比較と特長

従来技術（化学吸収法・PSAなど）
- 設備が大きく、高コスト
- CO_2分離に膨大なエネルギーが必要

CO_2分離膜
- 設備がコンパクト
- コスト、エネルギー消費ともに従来比1/5

■ 水素製造プラント向けで実用段階にある技術

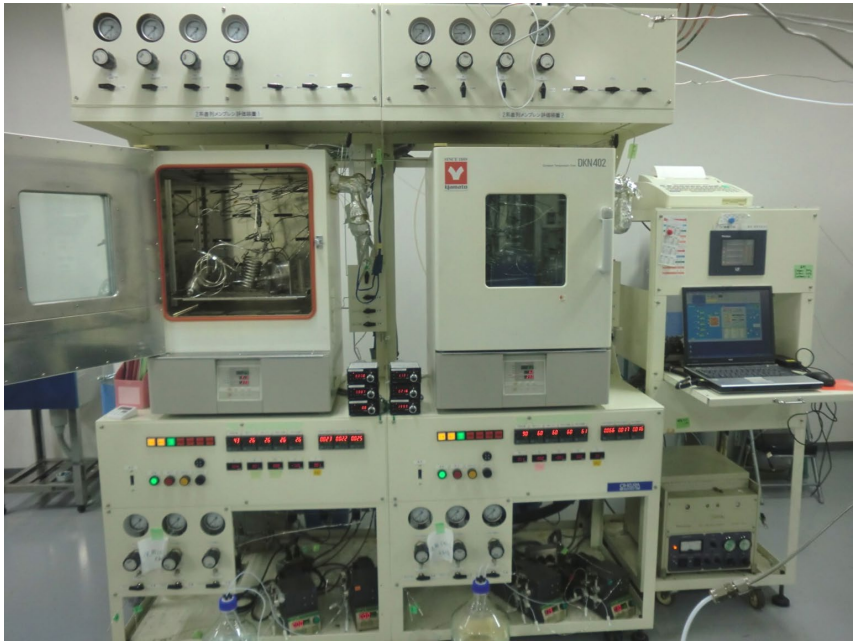
Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

基礎試験結果

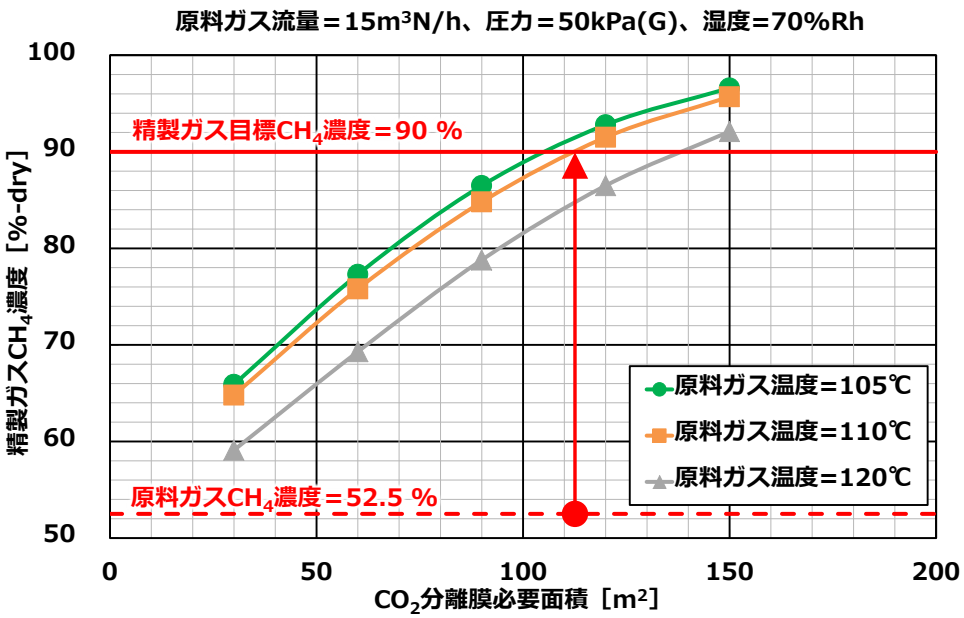
TAKUMA

CO_2の分離性能はCO_2分離膜の原料側-透過側のCO_2ガス分圧差、ガス温度、ガス湿度に影響される

- 模擬のバイオガスを使用して、CO_2分離膜の種類、ガス圧力・温度・湿度、必要膜面積などの最適条件に関する基礎試験を実施した
- 基礎試験の結果をもとに、実証試験装置の計画・設計・製作を行った



基礎試験装置



基礎試験結果（精製ガスCH_4濃度と必要膜面積の計算結果）

Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

実証試験１試験サイトの概要

TAKUMA

名　　称：南但ごみ処理施設（南但広域行政事務組合）
所　在　地：兵庫県朝来市和田山町高田817-1
共 用 開 始：平成25年4月
施 設 規 模：ストーカ式焼却炉 43t/24h×1系列
　　バイオマス設備 36t/24h×1系列（前処理設備入口）
　　リサイクル施設 17t/5h×1系列
発 電 設 備：ガスエンジン発電機 191kW×2基

高効率原燃料回収施設棟 全景

メタン発酵槽（高温乾式メタン発酵）

Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

CO_2分離膜実証試験装置フロー

TAKUMA

原料ガス
CH_4+CO_2
(CH_4=50～55%)

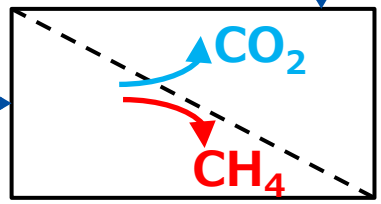
↓

ガス
昇圧装置

→

加湿・加温
装置

→



CO_2分離膜装置

スイープガス

CO_2+蒸気

蒸気ボイラ

実機ではガスエンジンの廃熱から得られる蒸気を利用

↓

精製ガス
CH_4＋蒸気+CO_2

除湿・加温
装置

↓

精製ガス
CH_4+CO_2
目標CH_4=90%

ガスエンジン
発電機

CO_2分離膜装置

Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

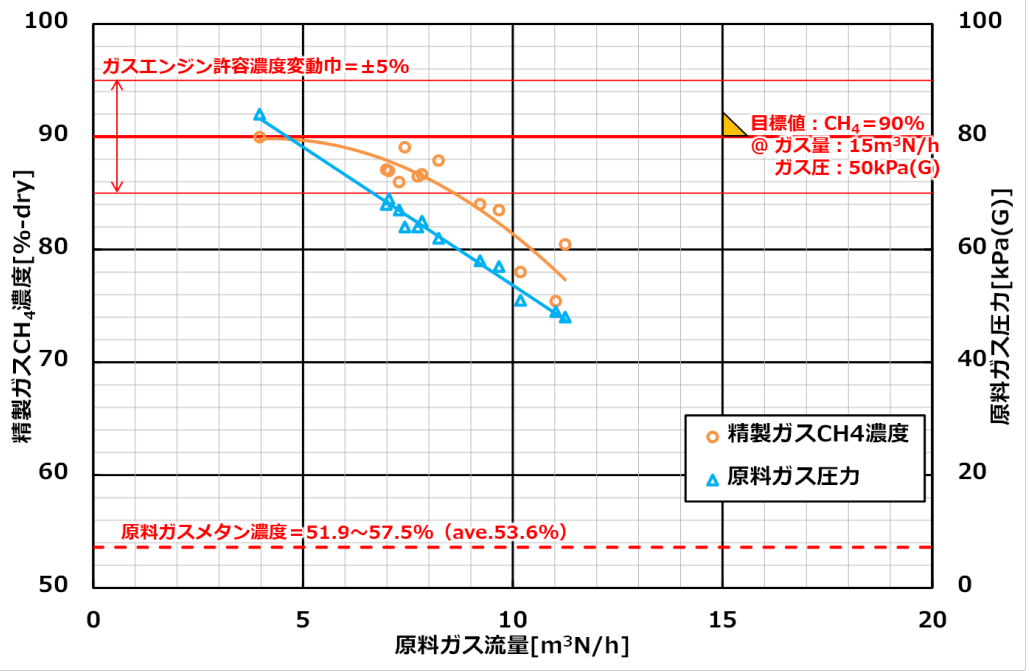
実証試験１結果①

TAKUMA

【最適運転条件の確認】

- 実証用の膜分離モジュールを用いて**目標メタン濃度（90%）を達成**し、そのための**運転条件を明確化**できた
- 当初計画では50kPa(G)程度のガス圧力を想定していたが、ガス流量を下げ（15→5m³N/h）、ガス圧力を上げることにより（50→80kPa(G)）、精製ガスのメタン濃度を目標の90%とすることができた

装置名称	仕様項目		H30年度	
			計画	結果
ガス昇圧装置	ガス量	[m³N/h]	15.0	5.0
	ガス圧力	[kPa(G)]	50	80
CO_2分離膜装置	膜本数	[本]	4	5
	処理ガス量	[m³N/h/本]	3.75	1.0



実証試験結果

Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

実証試験１結果②

TAKUMA

【最適運転条件の確認】

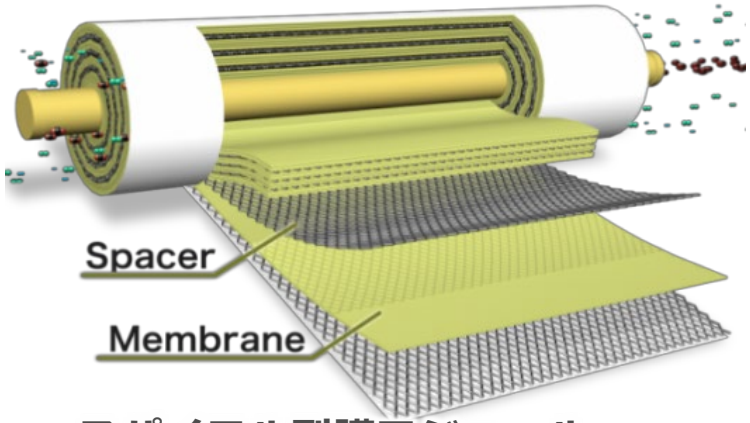
CO_2分離膜のシミュレーションと実証試験結果の差異

- 分離膜エレメントをガス圧力が高い水素用（数MPa(G)）から、ガス圧力が低いバイオガス用（50kPa(G)）に転用

⇒ 作動圧の低下に伴い透過ガスボリュームの増大に対応した膜モジュール構造の見直し（スペーサ部分の増加）によるモジュール化効率の低下・有効膜面積の減少

- 実用化規模では、ガスエンジン付属のガス昇圧装置を利用して、加圧条件でのCO_2分離膜の運転が行えるため、必要膜面積の低減を図ることができる

⇒ 加圧の運転条件へ見直し、実証試験を実施



スパイラル型膜モジュール

Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

実証試験１結果③

TAKUMA

【性能経時変化】

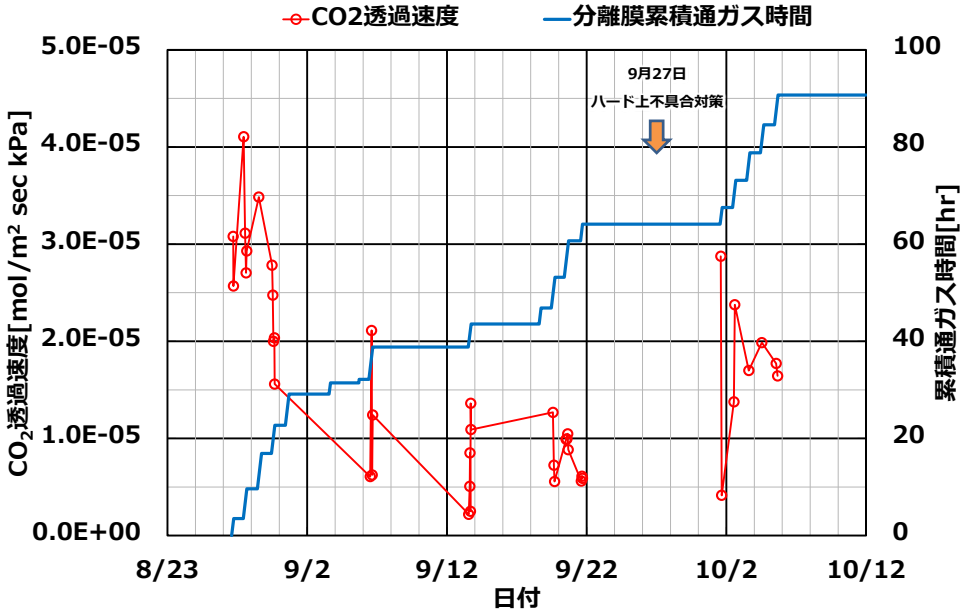
- CO_2分離膜の性能（CO_2透過速度）が不安定

⇒ 分離膜ユニットのハード上の初期トラブル（ガスシール用O-リングの損傷）

⇒ 対策を行っても初期性能まで回復しない（2018年9月27日）

- バイオガス中に想定外の硫黄化合物等、膜被毒成分が影響している可能性

⇒ 被毒物質の調査



実証試験結果（CO_2透過速度の経時変化）

Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

膜被毒成分の調査

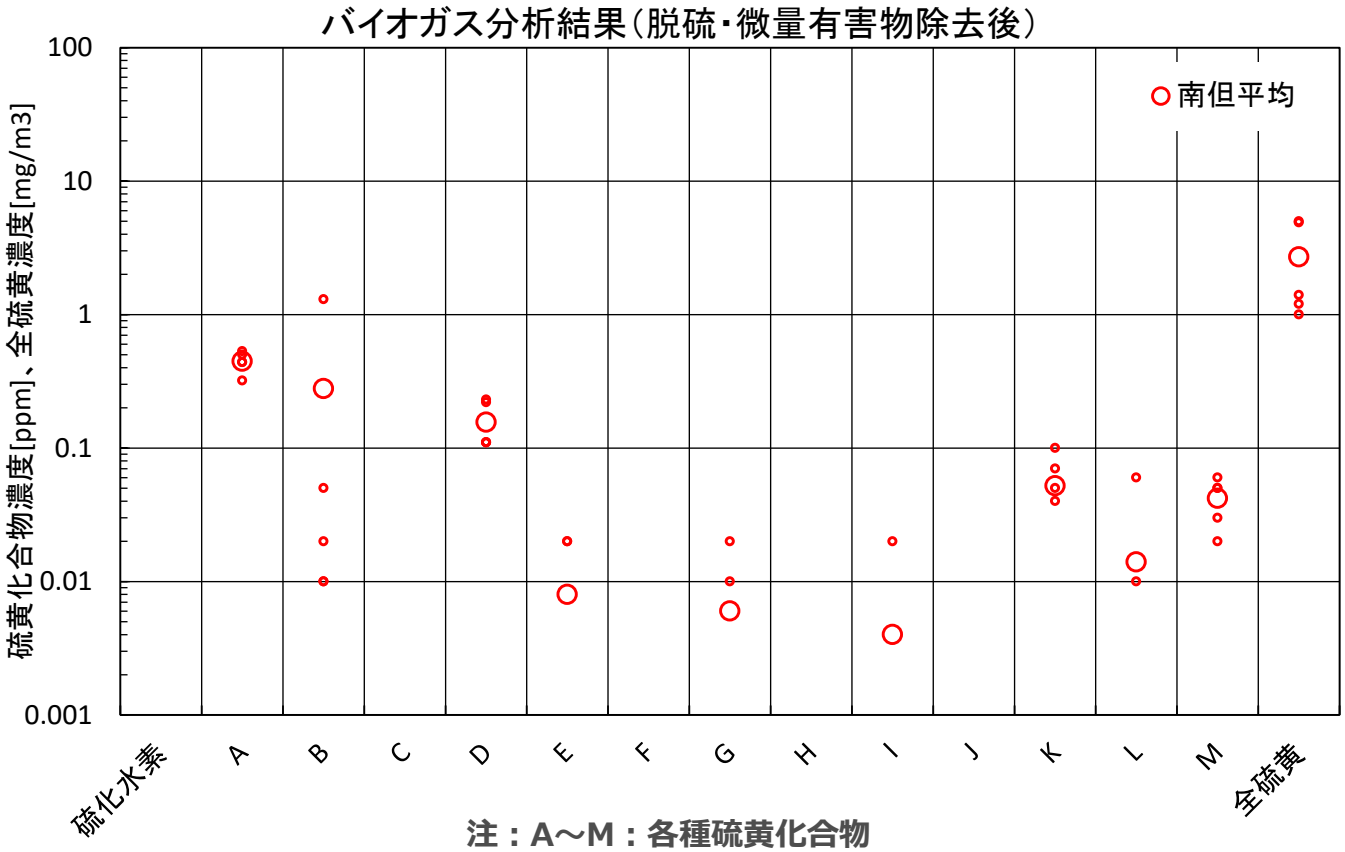
TAKUMA

- 複数施設のバイオガスの**詳細な分析**を実施（ガスクロマトグラフ(FPD)法）

⇒ 硫化水素以外にも硫黄化合物を検出

⇒ 硫黄化合物の定性・定量分析値の合計と全硫黄分析値が概ね一致、バイオガス中の**硫黄化合物をほぼ全量定量**できた

⇒ 膜被毒成分の調査と併行して、被毒成分除去のための基礎試験を実施



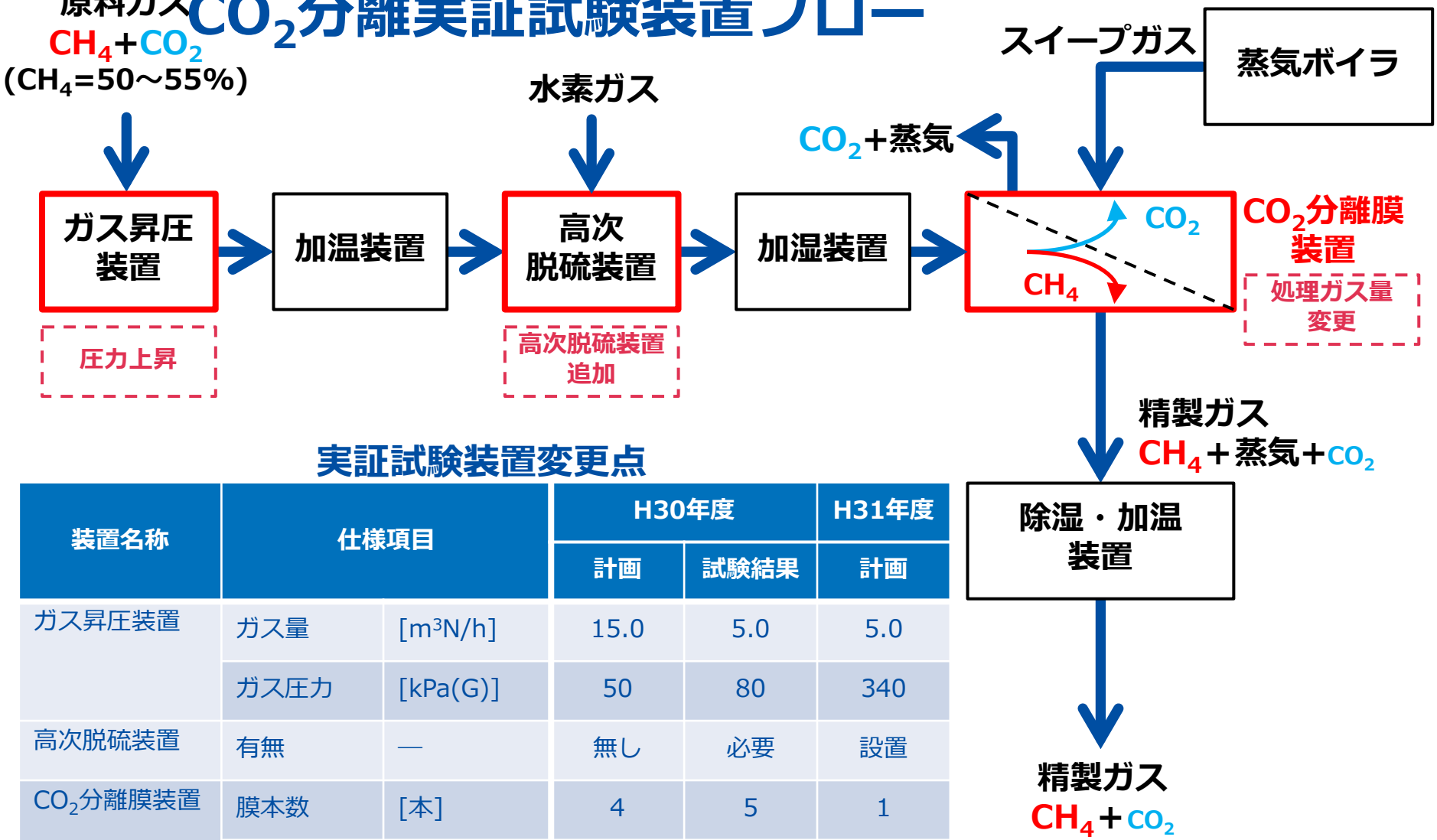
注：A～M：各種硫黄化合物

Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

CO_2分離膜実証試験装置フロー（改良後）

TAKUMA

CO_2分離実証試験装置フロー



実証試験装置変更点

装置名称	仕様項目		H30年度		H31年度
			計画	試験結果	計画
ガス昇圧装置	ガス量	[m³N/h]	15.0	5.0	5.0
	ガス圧力	[kPa(G)]	50	80	340
高次脱硫装置	有無	—	無し	必要	設置
CO_2分離膜装置	膜本数	[本]	4	5	1
	処理ガス量	[m³N/h/本]	3.75	1.0	5.0

Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

実証試験1結果①（装置改良後）

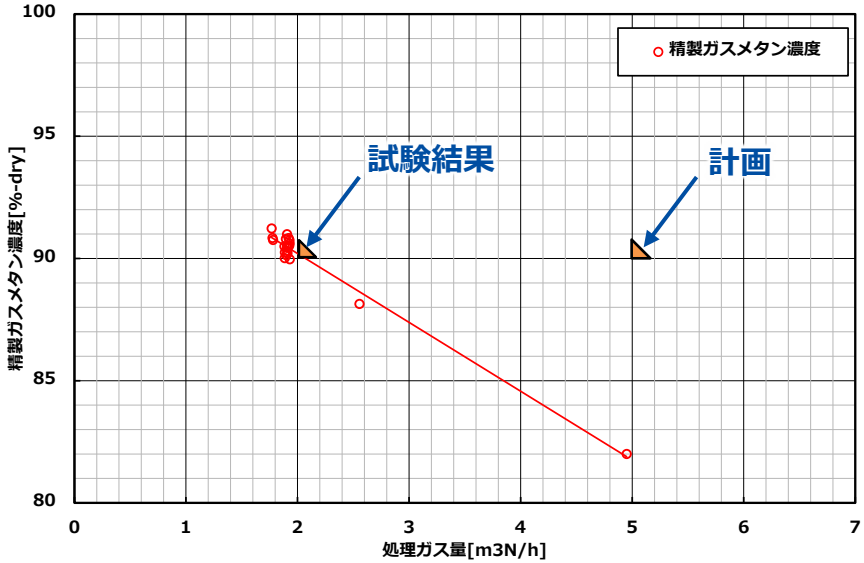
TAKUMA

【最適運転条件】

- 加圧条件における目標メタン濃度（90%）を得るための運転条件を確認した
- 計画のガス量を処理することができなかったため、目標のCO_2とコストの削減メリットを得ることができない結果となった

⇒ 高性能ガスエンジン（舶用を転用、加圧型、400kW）の性能確認を行い、実用化規模における膜分離システムの最適化を図る・・・実証試験２

装置名称	仕様項目		H30年度		H31年度	
			計画	結果	計画	結果
ガス昇圧装置	ガス量	[m³N/h]	15.0	5.0	5.0	2.0
	ガス圧力	[kPa(G)]	50	80	340	340
CO_2分離膜装置	膜本数	[本]	4	5	1	1
	処理ガス量	[m³N/h/本]	3.75	1.0	5.0	2.0



実証試験１結果

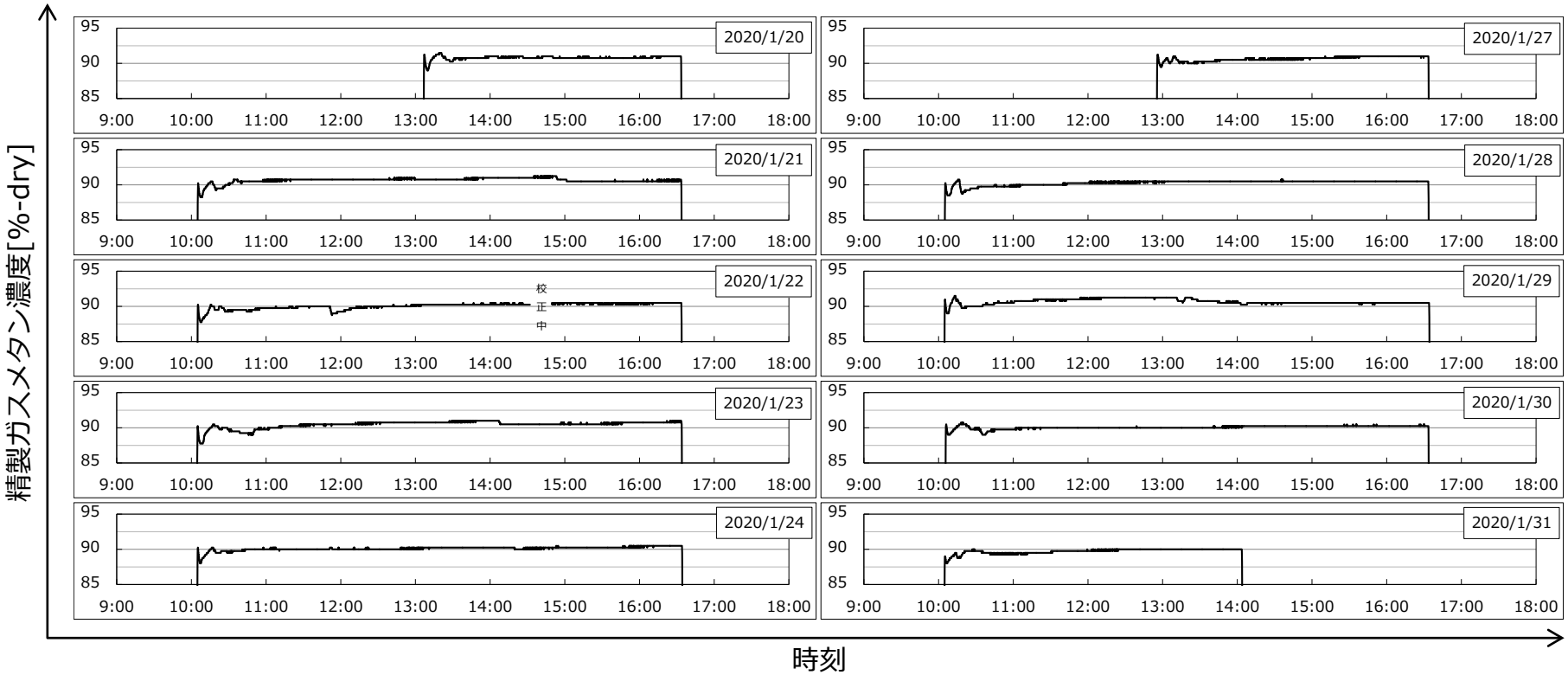
Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

実証試験1結果②（装置改良後）

TAKUMA

【最適運転条件】

- 10回の立上げ下げを含む日中運転により、安定したCO_2分離膜の性能を確認することができた



Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

実証試験２試験概要

TAKUMA

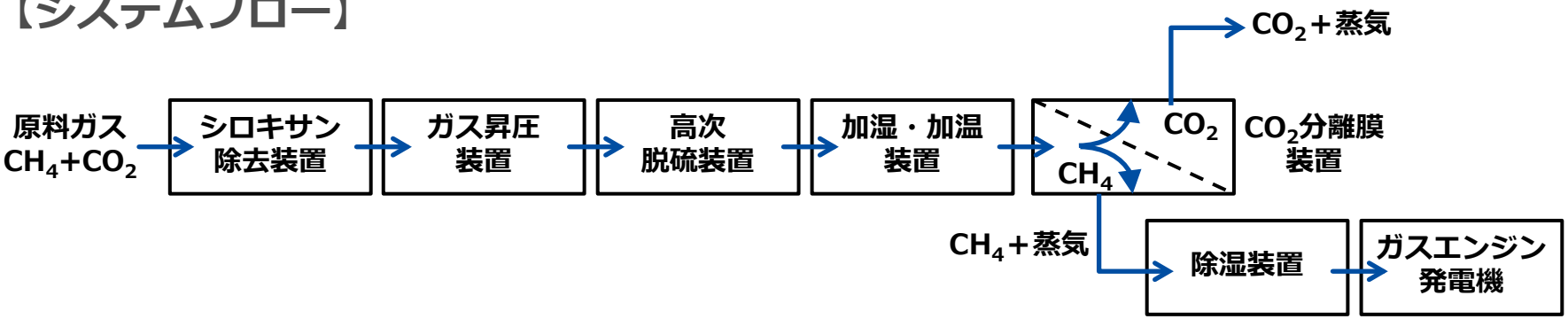
【試験概要】

八戸市東部終末処理場の既設メタンガス化施設から発生するバイオガスを用いて、膜エレメント15本を搭載したCO_2分離膜を準備し、CO_2分離膜で精製したバイオガスを用いて、**高性能な舶用天然ガスエンジン（加圧型、400kW）**の性能および発電効率を確認すると共に、メタン濃度によるエンジン性能の影響を調べ、最適な膜分離条件（CO_2除去率等）やエンジン稼働条件を確認する。

【試験条件】

- 膜入口温度　：110℃
- 供給側圧力　：500～700kPa(G)
- 透過側圧力　：大気圧
- バイオガス流量　：50～200m^3/h
- 供給側湿度　：70%Rh
- 透過側スイープガス：15本の膜エレメントの内、10本はスチーム供給、5本はスイープガス無し

【システムフロー】

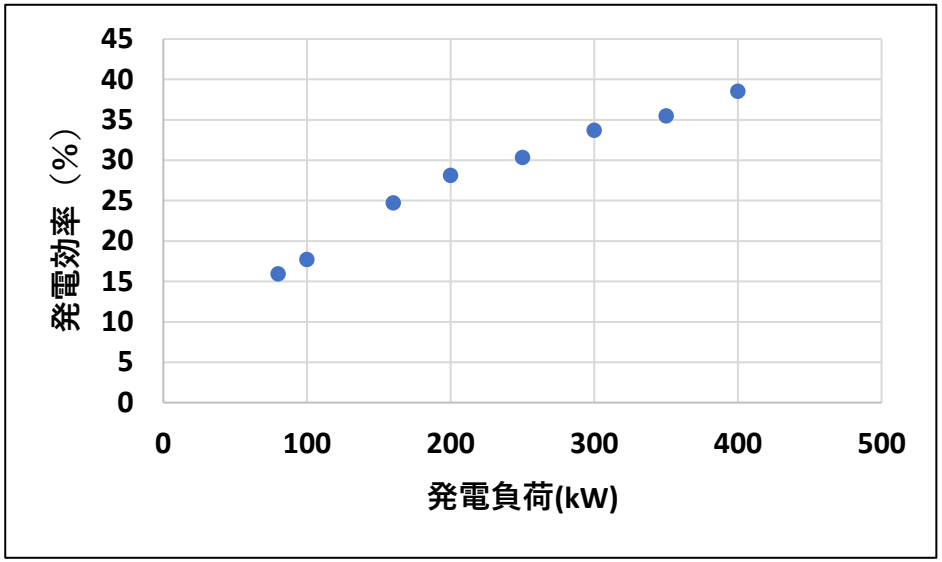


Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

実証試験２結果

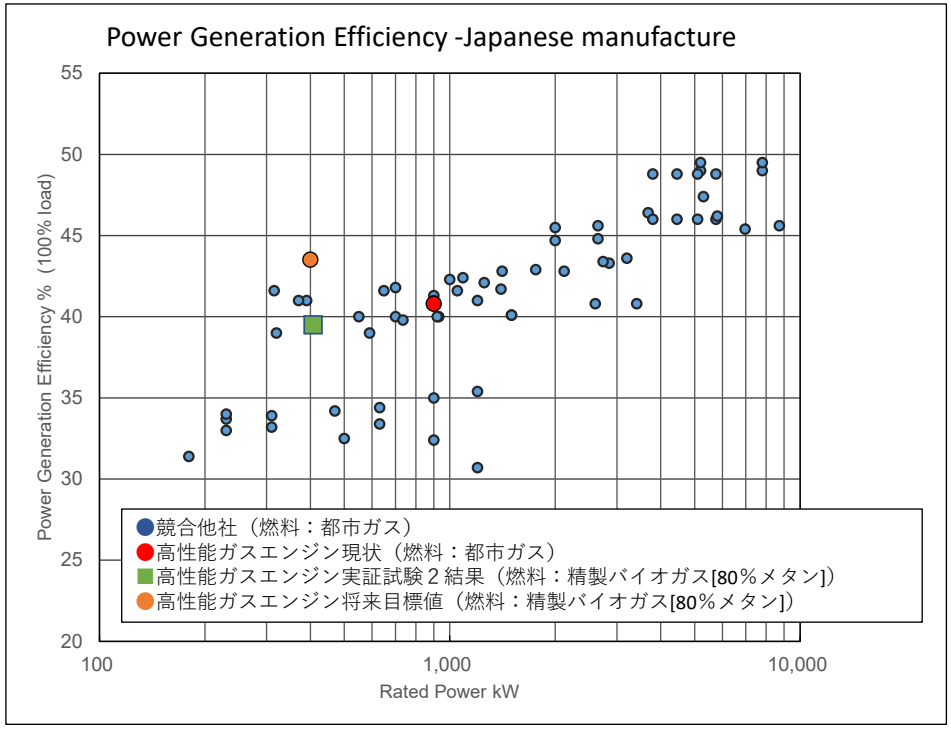
TAKUMA

実証試験2結果



発電負荷400kW時の発電効率＝39%
（着火用パイロット燃料油の熱量を考慮すると38%）

メーカー情報（競合他社製品との発電効率比較）



商用機については、過給システムの改良、弁タイミングの最適化等により43%以上の発電効率を目指す。また過給圧が高いので、膜分離用の昇圧機や昇圧エネルギーは不要となる。

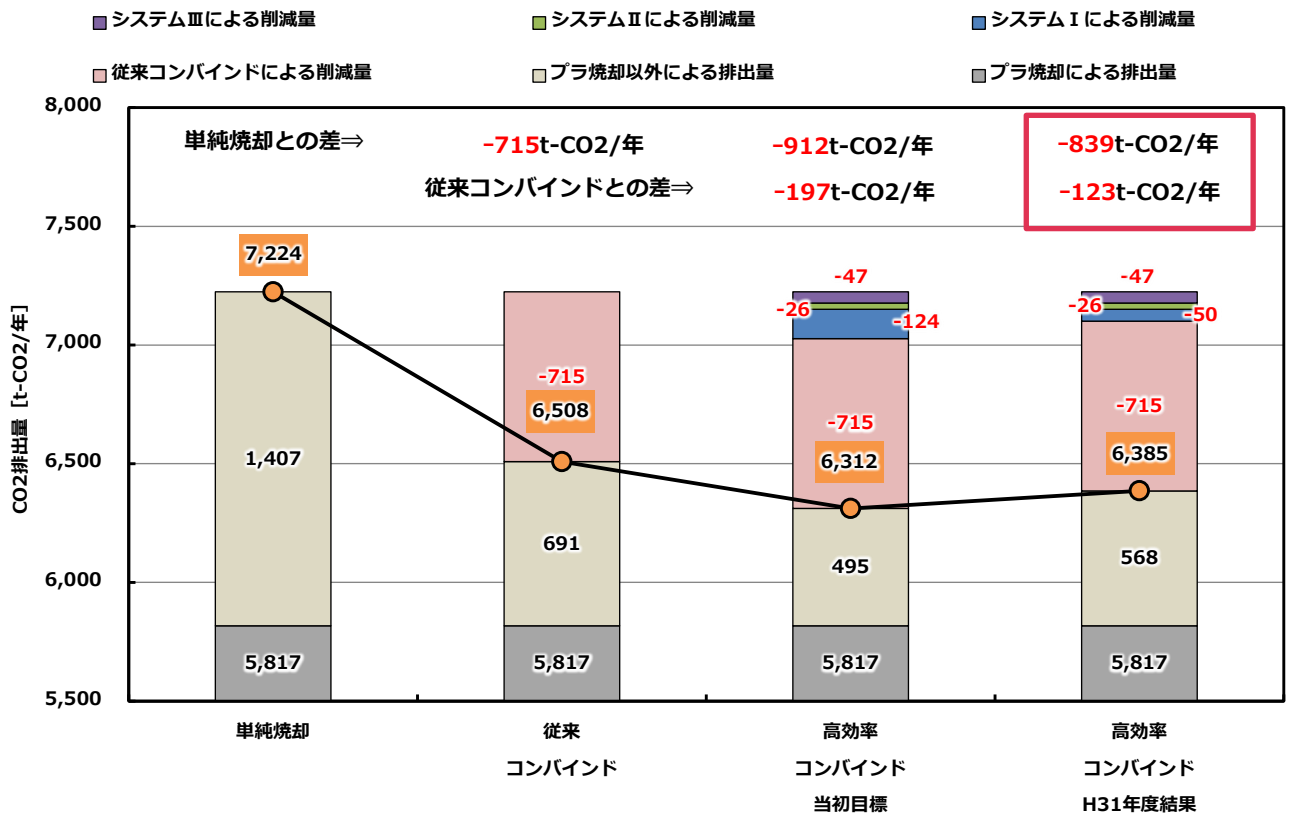
高性能舶用天然ガスエンジンの発電効率が実証試験では目標値に達しなかったことと、試験に用いた機種は800kW機をベースとした400kW仕様のガスエンジン発電機であり、今回のFS条件の施設規模（14,000ton/年）では部分負荷運転となり発電効率が低下するため、FS評価は行わなかった

Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

提案システムにおけるCO_2削減量

TAKUMA

- メタンガス化システムにCO_2分離膜を適用することにより、従来コンバインドシステムよりも更にCO_2排出量を削減することができるシステムを提案することができた
- CO_2排出量の削減メリットが当初の目標値よりも減少しているが、システムⅠの実証試験１の結果より、バイオガスを加圧条件としたことに伴うガス昇圧装置の消費電力増加によるものである



ガスエンジン発電機効率
従来コンバインド：33%
高効率コンバインド：38%

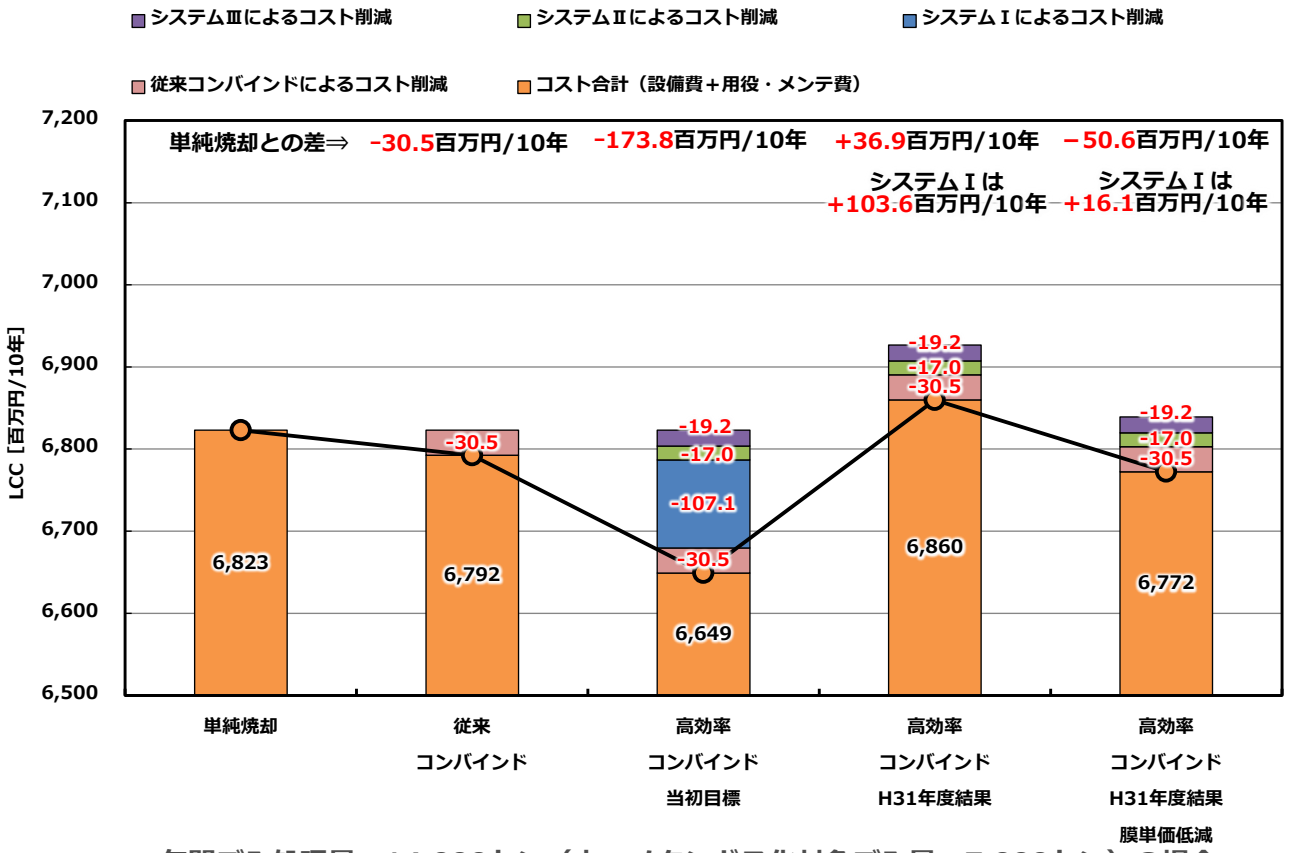
年間ごみ処理量＝14,000トン（内、メタンガス化対象ごみ量＝7,000トン）の場合

Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

提案システムにおけるコスト削減量

TAKUMA

- 高効率コンバインドシステムのコストが従来コンバインドシステムよりも増加しているが、システムⅠのガス昇圧装置の消費電力増加に伴う売電収入の減少と、膜エレメント本数増加と高次脱硫装置追加に伴うコスト増によるものである
- 本システムが普及してCO_2分離膜エレメントが量産された場合、膜エレメントコストを本試算の30%程度まで低減することが可能であり、この場合は単純焼却システムと比較して50.6百万円/10年のコスト削減が期待できる



ガスエンジン発電機効率
従来コンバインド：33%
高効率コンバインド：38%

年間ごみ処理量＝14,000トン（内、メタンガス化対象ごみ量＝7,000トン）の場合

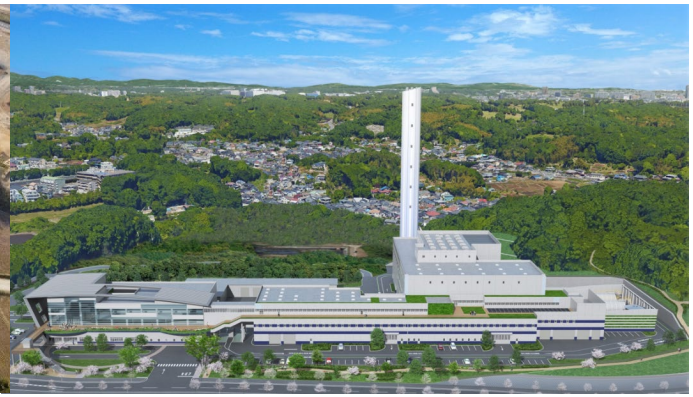
Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

タクマのCO_2問題に対する取り組み

TAKUMA

都市ごみバイオガス化施設の建設・運営

発注者		南但広域行政事務組合 殿 (兵庫県朝来市、養父市)	宮津与謝環境組合 殿 (京都府宮津市、 与謝野町、伊根町)	町田市 殿 (東京都)
施設規模	バイオガス化	24 t ／24h×1系列 (発酵槽入口)	20.6 t ／24h×1系列 (発酵槽入口)	25 t ／24h×2系列
	焼却	43 t ／24h×1系列	30 t ／24h×1系列	129 t ／24h×2系列 (発電付)
竣工,事業方式		2013年5月, 建設･運転委託	2020年6月, DBO	2021年12月(予定), DBO



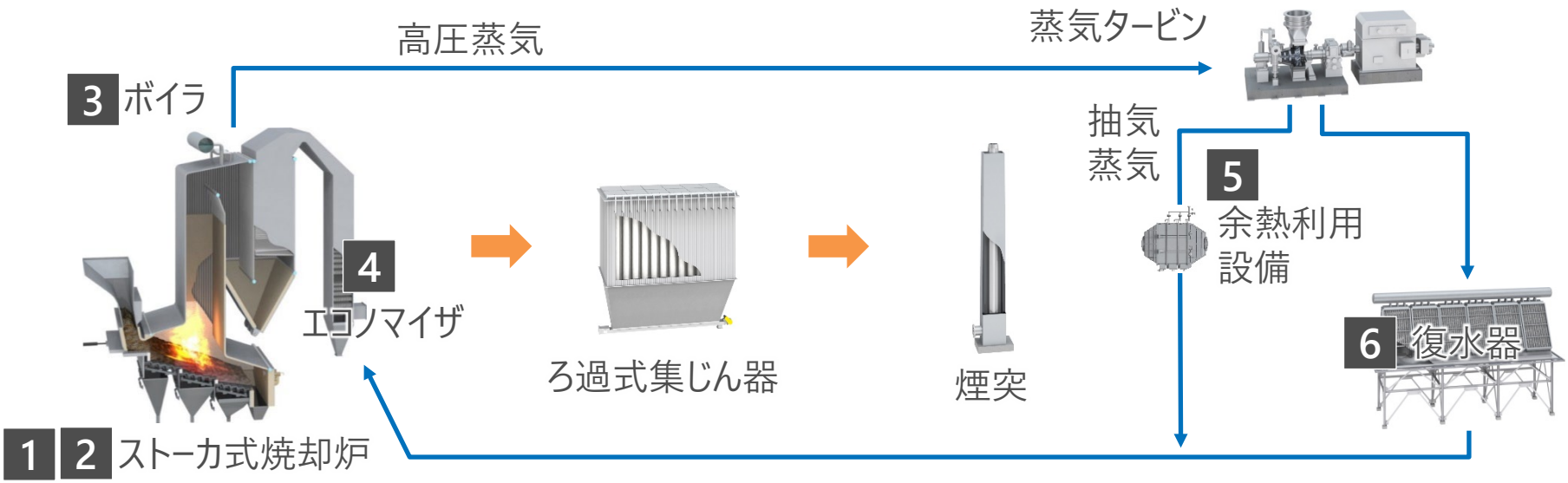
完成イメージ図
(出典：施設HP　https://machi-netsu.jp/)

Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

タクマのCO_2問題に対する取り組み

TAKUMA

都市ごみ焼却施設における高効率発電技術



1 高性能ストーカ炉

低空気比燃焼

3 高温高圧ボイラ

ボイラ蒸気の高温・高圧化

5 熱のｶｽｹｰﾄﾞ利用

高圧蒸気⇒抽気蒸気として
エネルギーの段階的利用

2 炉内NOx低減技術

触媒脱硝装置の非設置

4 低温エコノマイザ

ボイラ出口排ガス温度の低減

6 高真空復水器

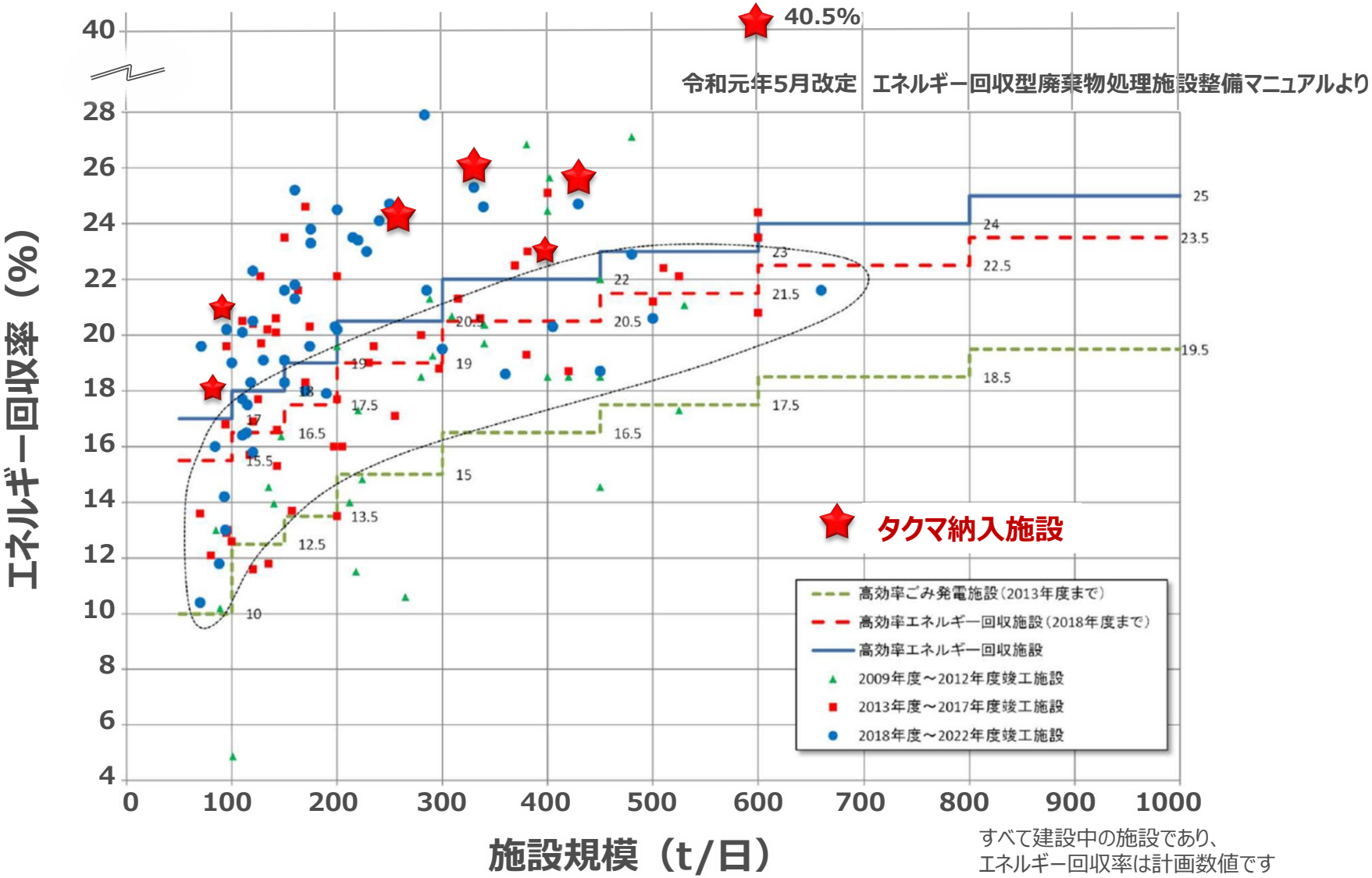
タービン排気蒸気の高真空化

Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

タクマのCO$_2$問題に対する取り組み

TAKUMA

都市ごみ焼却施設のエネルギー回収率



すべて建設中の施設であり、
エネルギー回収率は計画数値です

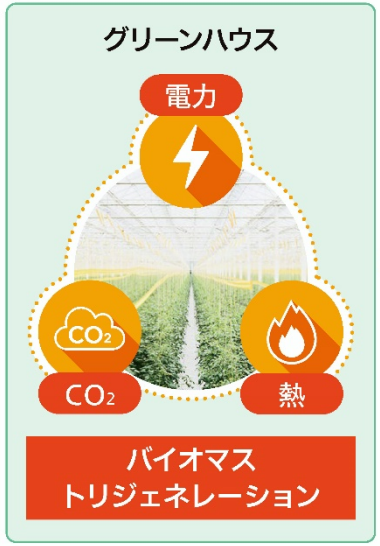
Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

タクマのCO_2問題に対する取り組み

TAKUMA

バイオマス発電のCO_2・熱・電力の施設園芸(野菜栽培)への活用

顧　　客　　名：　株式会社サラ様
工　事　名　称：　SARAパワー発電所
発　電　規　模：　10,000kW
　　年間8,000万kWh(約2万世帯)
主　な　燃　料：　PKS等の輸入木材、一般木材
完　　成：　2019年3月
O＆M受託期間：　2019年4月1日～
　　2039年3月31日(予定)



※EPC:Engineering Procurement Construction

出典：(株)タクマ CSR報告書2019、 https://www.takuma.co.jp/csr/csr_report/2019.html

Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.

ご清聴ありがとうございました。

Copyright(C) 2021 TAKUMA Co.,ltd All Rights Reserved.