

CCU/CCUSに関する 日本国内の動向

京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻

教授 高岡昌輝

(廃棄物資源循環学会焼却研究部会 部会長)

本日の内容

- 焼却からの化石由来炭素の回収必要性
- 環境省シナリオの深堀（焼却研究部会）
 - 焼却ごみの再設定
 - エネルギー自立のための施設規模
 - CC適用施設の数
- 他のCC/CCUS技術（焼却研究部会 + α）

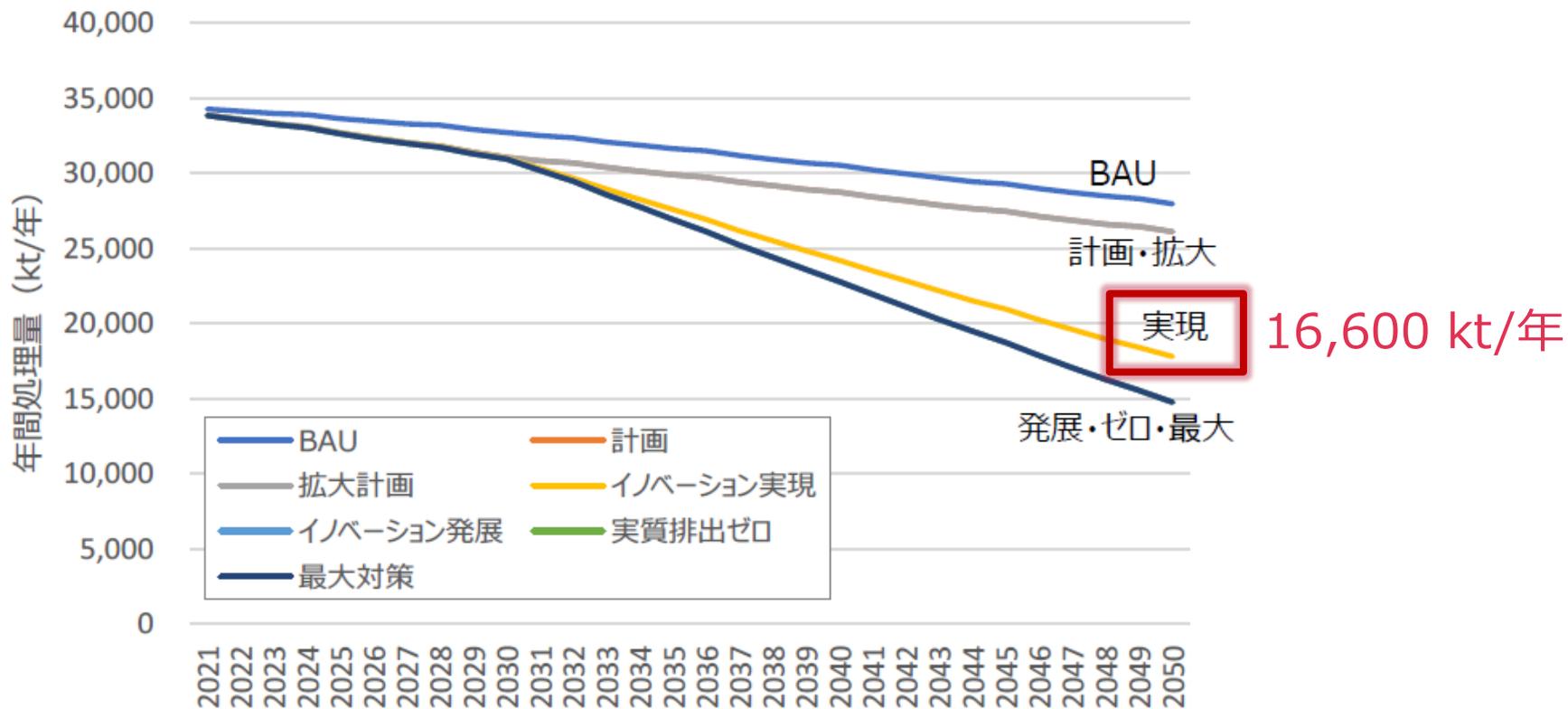
中長期シナリオと温室効果ガス排出量の見通し

廃棄物・資源循環分野で 想定するシナリオ	2050年GHG排出量(千トンCO ₂)			
	非エネルギー 起源CO ₂	エネルギー 起源CO ₂	CCUS	合計
1) BAU (現況年度の対策のまま2050年に推移)	29,602	4,367		33,968
2) 計画シナリオ (地球温暖化対策計画やプラスチック資源循環戦略などに計画・制度に基づいた目標値を導入)	20,270	1,933	-	22,203
3) 拡大計画シナリオ (2) にエネルギー起源CO ₂ 対策を追加)	20,270	1,911	-	22,180
4) イノベーション実現シナリオ (3) をベースに各重点対策領域をさらに削減)	9,031	1,468	-	10,499
5) イノベーション発展シナリオ (4) をベースに現状では必ずしも十分に担保されない水準まで深堀)	6,164	0	-	6,164
6) 実質排出ゼロ (5) をベースにCCUSで相殺)	6,164	0	-6,164	0
7) 最大対策シナリオ (6) をベースに廃棄物処理施設でのCCUSを最大限まで見込む)	6,164	0	-16,138	-9,975

焼却処理量

イノベーション実現シナリオの条件(16,600kt/年)を採用
(実質排出ゼロシナリオのごみ質が不明であったためイノベーション実現シナリオを採用)

・年間焼却処理量(シナリオ別)



人口減少や3Rの推進により、年間処理量は現在の半分以下まで減少。

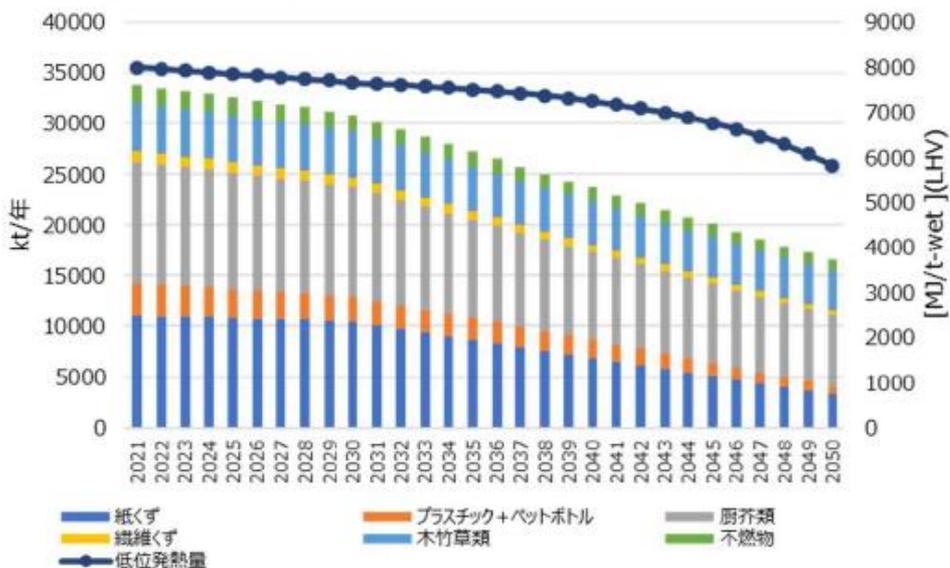
ごみ組成

イノベーション実現シナリオにおけるグラフをもとに、ごみ組成を下表の通り設定。簡略化のため、全施設(全国)共通のごみ組成とする。

・ごみ質: 組成別焼却量(Y1軸)と推計低位発熱量(Y2軸)

(イノベーション実現シナリオ)

⇒ 厨芥メタン発酵を進めるが、紙・プラが減少し発熱量が大幅に低下

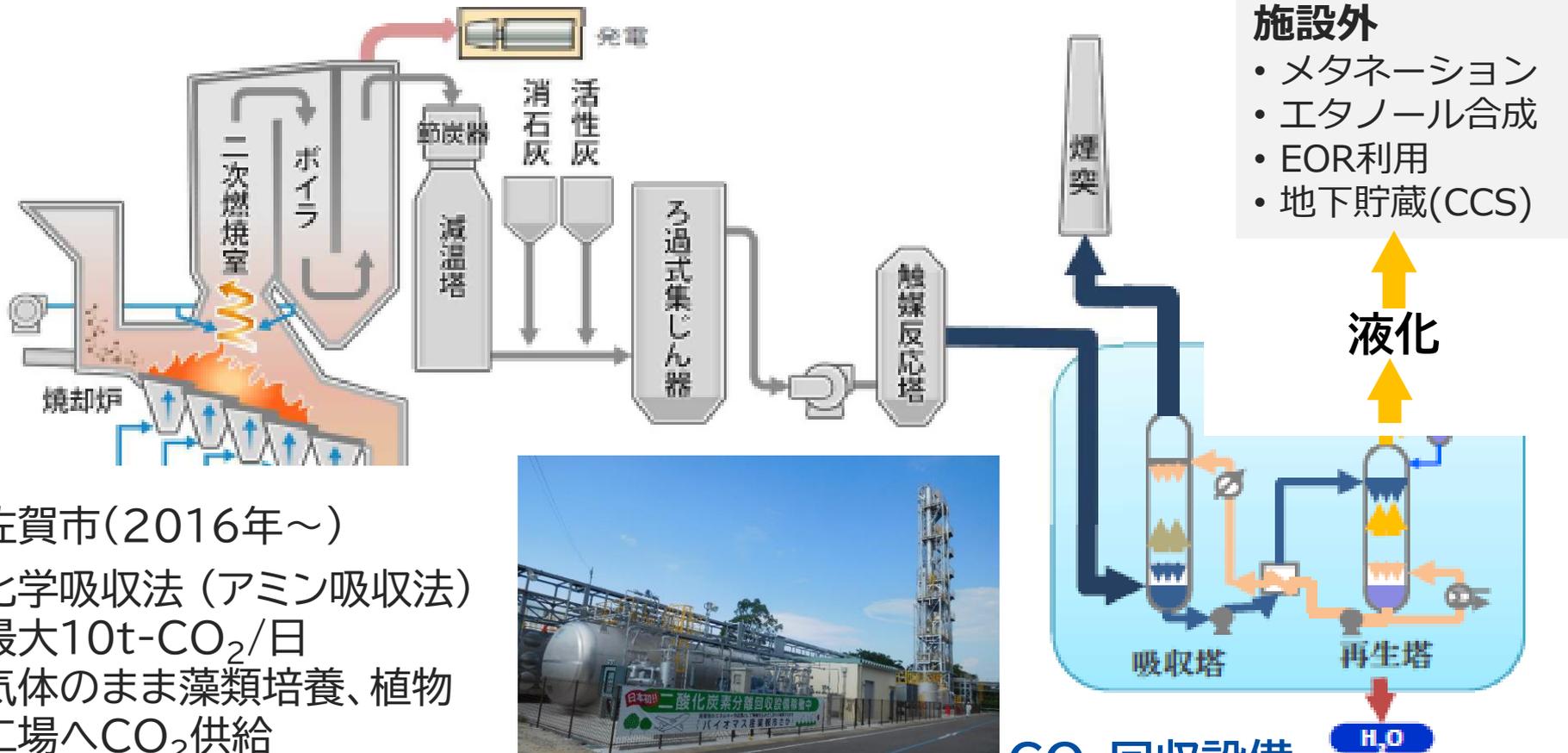


項目	割合(湿重量)
紙くず	20%
プラスチック+PET	5%
厨芥類	42%
繊維くず	3%
木竹草類	22%
不燃物	8%

プラスチックの消費量削減やリサイクル推進により、ごみ組成におけるプラスチック+PETの割合が、現状15%程度から5%に減少。

処理システム

補助燃料を使用しない燃焼方式(ストーカetc.)とする。
高効率発電を行うため、乾式排ガス処理システムを基本とする。



佐賀市(2016年～)

化学吸収法 (アミン吸収法)

最大10t-CO₂/日

気体のまま藻類培養、植物
工場へCO₂供給

ふじみ衛生組合(2021年～)

横浜市(2022年～) CCU実証試験



CO₂回収設備
(化学吸収法)

カーボンニュートラル化に必要なCO₂回収規模

設定したベースシナリオにおける年間のCO₂発生量は、年間の焼却処理量（16,600kt/年）と前ページの原単位より以下の通りとなる。

バイオマス由来: 9,680 kt-CO₂/年

非バイオマス由来: 2,062 kt-CO₂/年

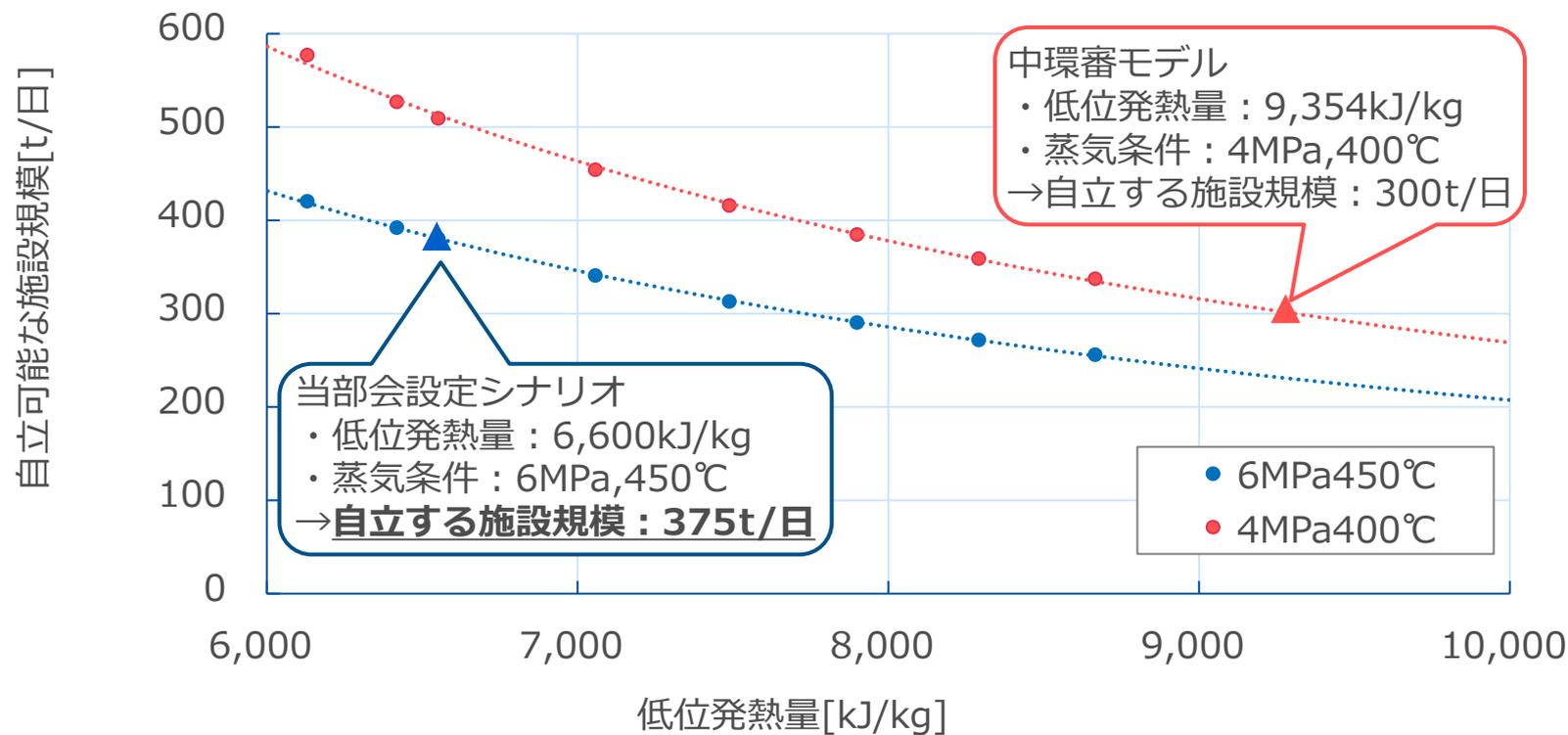
合計: 11,742 kt-CO₂/年

非バイオマス由来のCO₂発生量を全量回収できるだけのCO₂回収設備を設置するとした場合のCO₂回収設備設置施設規模は、以下の通りとなる。

項目	数値	備考
CO ₂ 回収対象設備		
CO ₂	2,292 kt-CO ₂ /年	CO ₂ 吸収率:90%
ごみ量換算	3,240 kt-ごみ/年	原単位:0.707t-CO ₂ /ごみt
焼却施設		
施設規模(合計)	12,052 t/日	運転日数:280日/年 調整稼働率:0.96

CO₂回収設備導入時にエネルギー自立可能な条件

外部からエネルギー(熱、電気)供給が不要で、エネルギー的に自立する施設規模を検討。



- ✓ ベースシナリオでは、エネルギー自立するために施設規模375t/日が必要となる。
- ✓ 中環審モデルとは、低位発熱量および蒸気条件が異なるため、エネルギー自立可能な施設規模が異なる結果となった。

2050年におけるCO₂回収設備導入数の試算と効果

2050年における焼却施設の規模および分布を設定し、CO₂回収設備を導入可能な焼却施設数ならびにその効果を3ケースで試算した。

2050年における各焼却施設の年間処理量[t/年]の設定方法

ベース:2020年の施設ごとの年間処理量(環境省 廃棄物処理実態調査より) に対して

- ・ 2050年の都道府県ごとに人口減少に応じて施設の処理量を減らす
 例)東京都:13,733千人→11,459千人(×0.83)
 香川県: 951千人→ 686千人(×0.72)
- ・ 2050年の総排出量に合わせるよう排出原単位を一律で減らす(×0.63)
- ・ 稼働日数:280日、調整係数:0.96にて施設規模を設定

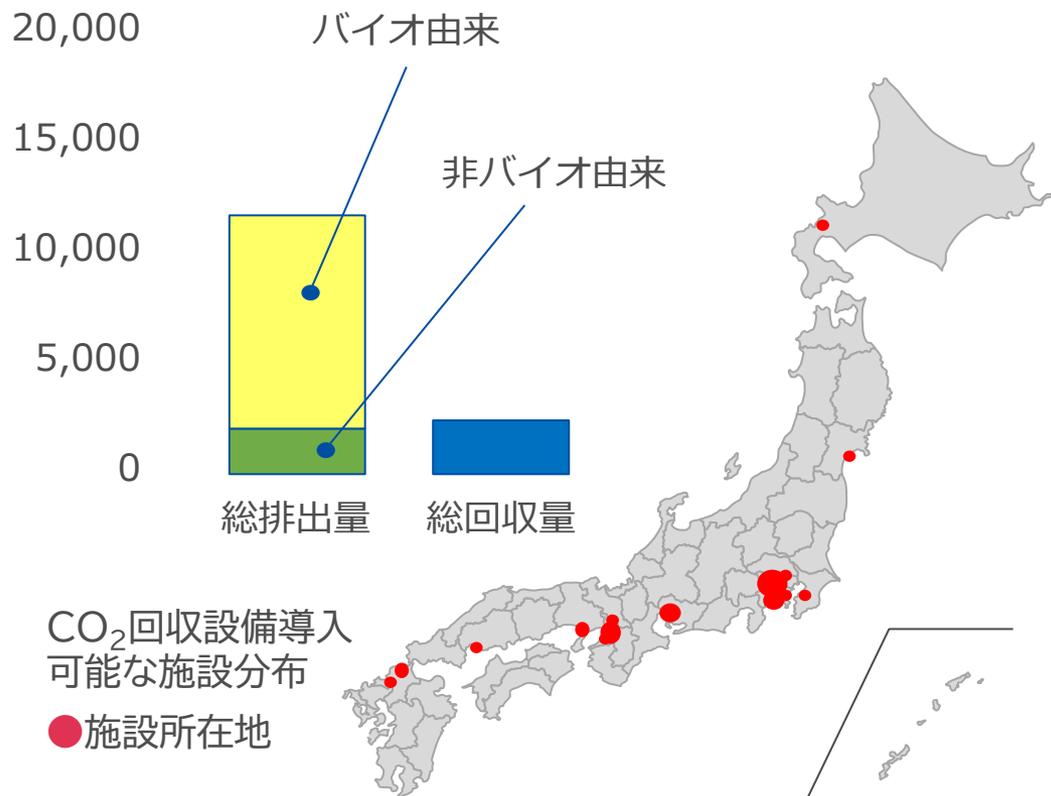
計算例

東京都 ▲▲工場
 70,000t/年 (2020年実績)
 ↓ ×0.83 (人口減)
 58,100t/年
 ↓ ×0.63 (排出原単位調整)
 36,000t/年 (2050年予想)
 ↓
 133t/日

		Case1	Case2	Case3
		施設数維持 (広域化なし)	大都市圏でのみ 広域化	各都道府県内で 広域化
全国年間処理量	kt/年	16,600	16,600	16,600
全国施設数	ヶ所	1,090	1,069	190
375t/日以上	ヶ所	7	38	143
CN化達成率	%	30	120	450

Case2 大都市圏においてのみ広域化

複数の焼却施設を保有する大都市(または大都市圏)において広域化を行い、CO₂回収設備(375t/日施設)を可能な限り導入。



- ✓ CO₂回収設備導入可能施設は38施設
- ✓ CN化達成率は120%

	2020		2050	
	管内施設数	管内総施設規模	管内総施設規模	375t/日超の施設数
	ヶ所	t/日	t/日	ヶ所
札幌市	3	2,100	737	1
仙台市	3	1,800	610	1
さいたま市	4	1,430	696	1
千葉市	2	1,005	435	1
東京都二十三区	22	12,580	5,327	14
横浜市	5	5,340	1,750	4
川崎市	3	1,950	705	1
名古屋市	6	4,300	1,379	3
京都市	4	2,200	700	1
大阪広域組合	7	4,400	1,862	4
堺市	4	1,660	464	1
神戸市	3	2,100	822	2
広島市	4	1,500	551	1
北九州市	3	2,130	810	2
福岡市	3	1,651	571	1

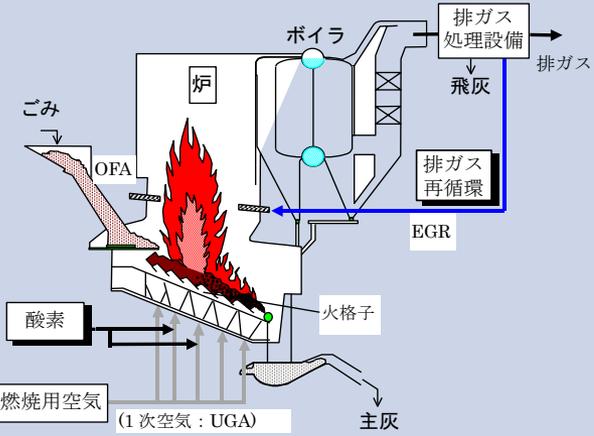
CN化に向けた焼却技術の課題

- ✓ 焼却由来の排ガスは、CO₂が低濃度、不純物を含むため、浄化設備や回収設備に多大なエネルギーとコストがかかる
→CO₂回収を前提とした場合、焼却処理の在り方はこのままでよいのか？
- ✓ もう一つの視点として、焼却しない廃棄物処理技術も検討の必要があるのでは？
- ✓ CO₂利活用まで見据えた回収技術
→CO₂削減にかかるコストを踏まえた技術普及のトランジションをどう考えるか

	処理技術	概要
熱処理	酸素（富化）燃焼	排ガス中CO ₂ 濃度を高め、高効率にCO ₂ を回収
	ケミカルループ燃焼	酸化還元反応を利用、水分凝縮のみでCO ₂ 回収可
	ガス化	CO、H ₂ 、CO ₂ etc. 合成ガス精製
	炭化	炭化後貯留
	メタネーション	CO ₂ の利用技術、触媒でH ₂ との反応にてCH ₄ を生成
	メタノール合成	CO ₂ の利用技術、触媒でH ₂ との反応にてCH ₃ OHを生成
	エタノール合成	ガス化ガスの利用技術、バイオによりエタノールを生成

酸素（富化）燃焼

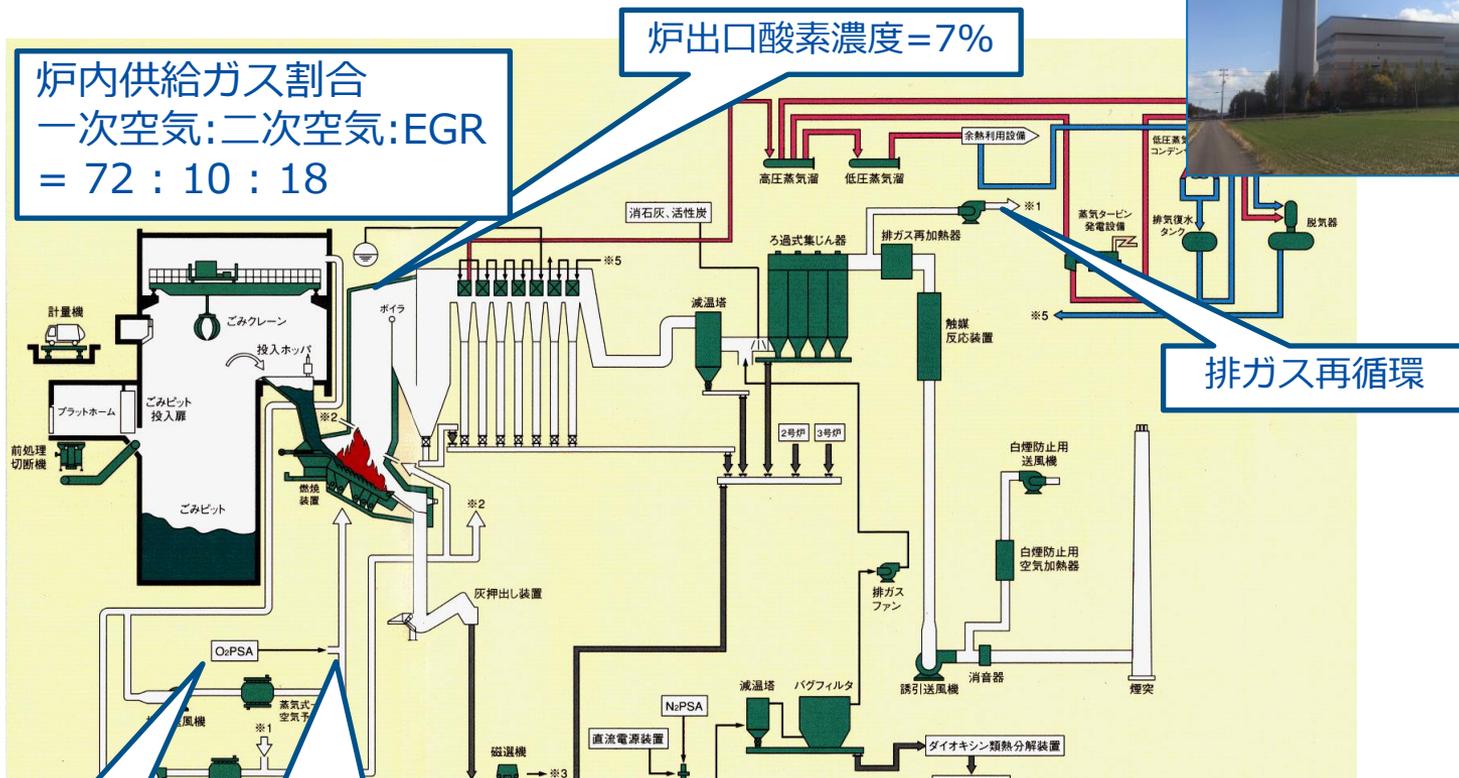
比較的大規模施設（都市部）での適用が考えられる

内容	特長	課題
<ul style="list-style-type: none">燃焼用空気に純酸素あるいは空気に酸素を混合したガスを用いることで、低空気比・高温燃焼を行う 	<ul style="list-style-type: none">CO₂回収効率化（排ガス中CO₂濃度高められる）熱回収率向上（排ガス熱損失の低減）高温燃焼による排ガス中DXNs低減、主灰性状の改善排ガス量低減による排ガス処理設備の小型化一廃もそのまま処理できる（設備変更が軽微と想定）	<ul style="list-style-type: none">▲求めるCO₂濃度にするための設備トータルコスト（純酸素燃焼でないと下流でCO₂分離工程が必要）▲酸素製造コスト▲酸素製造に必要なエネルギー <p>→例として、500MW級の空気燃焼と酸素燃焼の比較で、CCS設備設置し、酸素製造時の窒素を外販する前提で経済性確保できる可能性</p>

酸素（富化）燃焼 実績

施設概要

プラント名称	仙台市松森工場
竣工	2005年8月
ごみ処理能力	200 t/24 h×3 炉



		酸素富化	従来燃焼
CO ₂ 濃度	vol.%-dry	16.4	10.7
排ガス量	Nm ³ /kg-ごみ	3.8	5.4

ケミカルループ^o燃焼

2000年前後から主に石炭ガス化燃焼分野での研究報告

廃プラの燃焼においてダイオキシン類生成量が通常燃焼より低いという報告(2018)

バイオマス燃焼においてNO生成量が通常燃焼より30%低いという報告(2013)

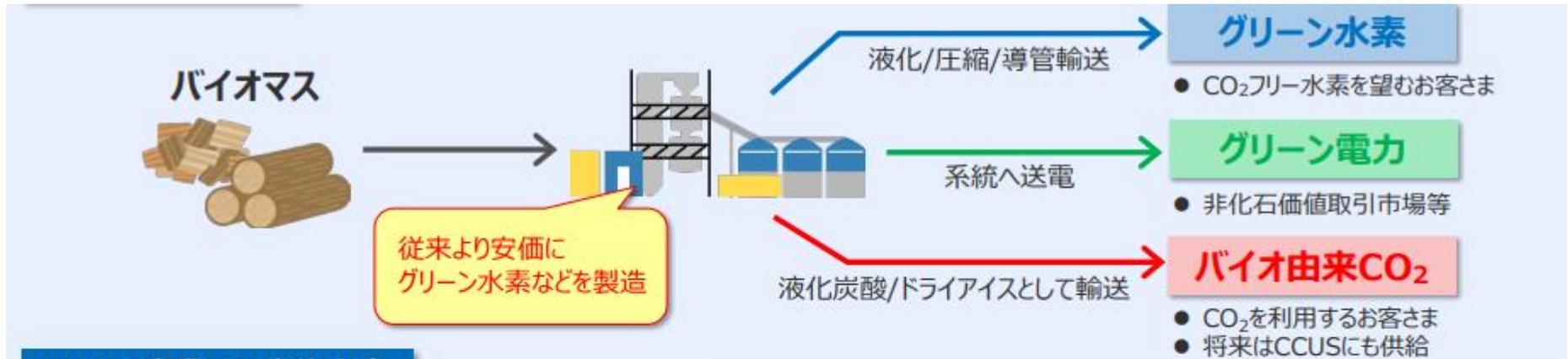
2021年から大阪ガス、JCOALのグループがNEDO委託事業で実証予定

内容	特長	課題
<ul style="list-style-type: none">CaO、NiO等が担持されたFe₂O₃/Al₂O₃等の金属酸化物粒子の酸化還元反応を使って燃焼させる	<ul style="list-style-type: none">○CO₂を効率的に回収○プロセス構成によりH₂製造も可能○通常の焼却炉と同様に一廃を処理できると思われる	<ul style="list-style-type: none">▲ 粒子の劣化▲ 機器構成が複雑 (機器点数が多い)▲ 商業化

ケミカルループ[®]燃焼

NEDO委託事業内容

水素製造を含めてプロセス実証

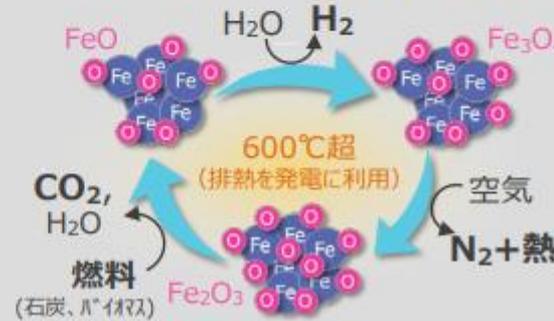


NEDO事業での実施内容



- 石炭・バイオマスからCO₂分離しつつ水素・電力を製造する技術の開発。分離したCO₂は貯留または利用する想定
- 2020年11月～2024年度末までの期間、要素技術開発および300 kW規模装置でのプロセス実証へ取り組む
- 石炭のクリーン利用技術として商用化を目指すJCOALと、バイオマス利用での商用化を目指す当社とで共同実施

<ケミカルループ[®]燃焼技術とは>



- 金属酸化物(例:酸化鉄)を介し燃料を燃焼する技術
- 追加的な設備なく低コストで高純度CO₂を分離可能
- 金属酸化物に水を作用させると水素を生成可能

一廃への適応に関しては、廃棄物中の微量成分が粒子へ与える影響を確認する必要があると考えられる

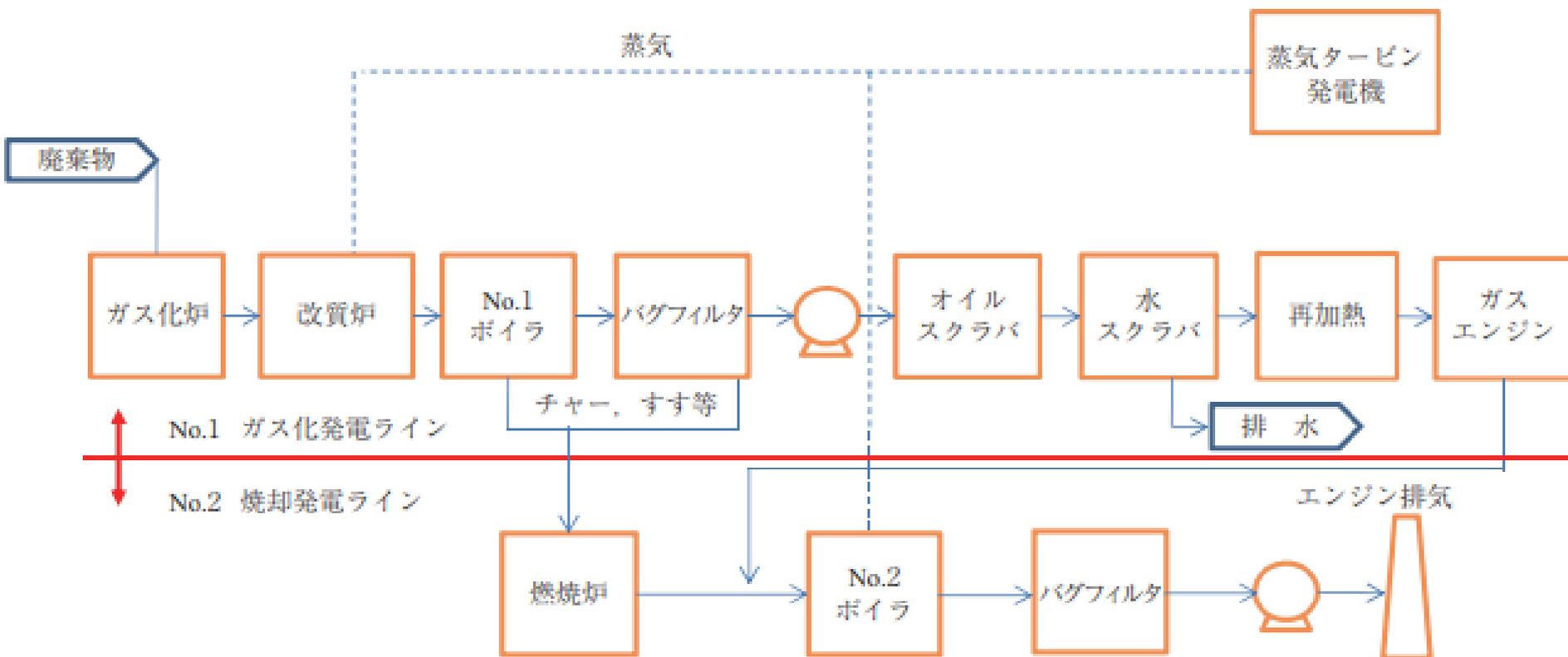
ガス化（エネルギー利用）

CN達成に向けては直接焼却と同じくCO₂回収が必要となる
実用化技術として利用先を含めたスキームを構築することで、
早期に社会実装し、CO₂回収と組み合わせることが考えられる

内容	特長	課題
<ul style="list-style-type: none">各種原料を部分酸化雰囲気中でガス化し、合成ガス（CO、H₂、CO₂）を得て、各種エネルギー源として利用	<ul style="list-style-type: none">○ガス化溶融炉など一廃向けでも適用例あり○生成ガスはエネルギーとして利用可能○比較的小規模でも発電効率を高められる	<ul style="list-style-type: none">▲ 生成ガスの利用先確保（輸送に難ありのためオンサイト利用が現実的）▲ エネルギー利用後のCO₂回収が必要▲ メタン発酵と比べると高温プロセスのため有用成分収率低（一廃の場合）▲ ガス中の不純物の処理が必要になる場合あり

ガス化改質

酸素・水蒸気および空気を適切に利用したガス化プロセスにおいて、ガスエンジンの安定稼働とプロセス全体の送電端効率27%が両立する目途をプロセス検討において得ている



ガス化（化学原料利用）

他の技術と組み合わせてCO₂回収することになる
オンサイトで輸送しやすい液体/固体の化学原料に変換できれば、施設規模に寄らず化学産業と連携可能と想定

内容	特長	課題
<ul style="list-style-type: none">各種原料を部分酸化雰囲気ですガス化し、合成ガス（CO、H₂、CO₂）を得て、化学原料として利用する	<ul style="list-style-type: none">○ガス化溶解炉など一廃向けでも適用例あり○生成ガスは化学原料として利用可能○オンサイトで化学品に変換 (例：積水化学のエタノール)	<ul style="list-style-type: none">▲ 生成ガスの利用先確保▲ 生成ガスからCO₂の分離が必要 (ガス精製・利用設備コスト)▲ メタン発酵と比べると高温プロセスのため有用成分収率低（一廃の場合）

小規模施設でCCSとしての利用が考えられる

内容	特長	課題
<ul style="list-style-type: none">• 有機物を無酸素雰囲気中で加熱し、炭素分に富んだ物質を得る	<ul style="list-style-type: none">○炭化物の保管安定性（CO₂固定化しやすい）○技術保有企業が複数あり、国内実績あり○固体炭素としてのカーボンを固定できるため運搬しやすい	<ul style="list-style-type: none">▲炭化熱源の確保（一廃だとカーボン割合が湿基準で25wt%程度→有効CO₂固定化率は？）▲炭化物を有効利用する場合は灰分の分離が必要（流動床式の例；田原リサイクルセンター）、また有効利用先でCO₂排出にならないよう配慮が必要（利用先は限定）▲貯留場所（可燃物の保管）

焼却と連携する技術 メタネーション

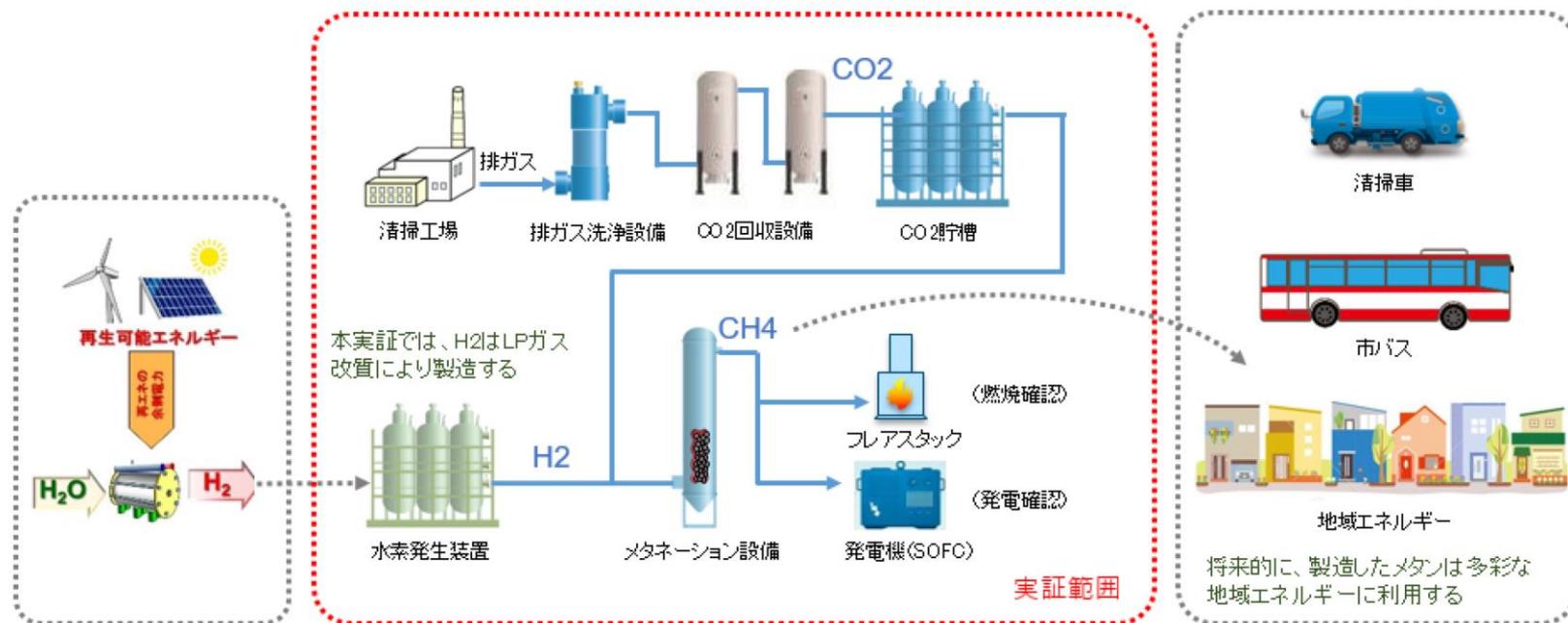
<環境省委託事業>

清掃工場から回収した二酸化炭素の資源化による炭素循環モデルの構築実証事業

代表：日立造船株式会社（共同実施者（株）エックス都市研究所）

期間：2018～2022年度

概要・目的：小田原市環境事業センターから排出される二酸化炭素を水素と反応させ、商用規模で、天然ガスの代替となるメタンの製造を実証する。実証を通して、メタネーション技術の普及に向けた課題を明らかにする。また、本技術の二酸化炭素排出量の削減効果を検討する。



焼却と連携する技術 メタノール合成

JFEエンジニアリング

「クリーンプラザふじみ」で回収したCO₂を用いて、三菱ガス化学新潟研究所においてメタノール転換試験を行った結果、ごみ焼却排ガス中のCO₂からメタノールを製造。



清掃工場（クリーンプラザふじみ）

CCU実証実験内容



<https://www.jfe-eng.co.jp/news/2022/20220331.html>

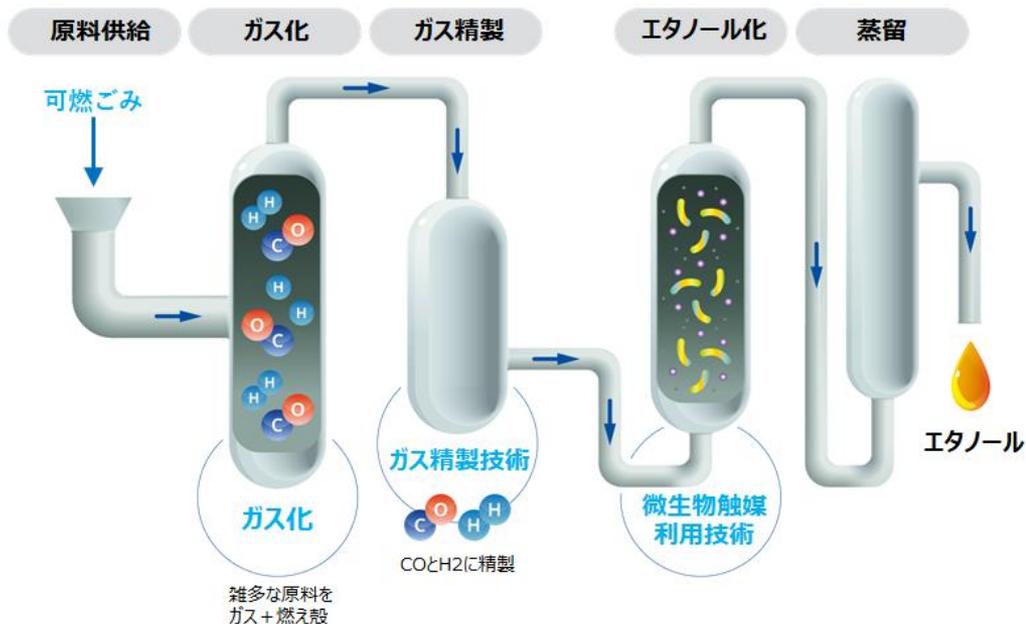
ガス化と連携する技術 エタノール合成

積水化学工業

環境省委託事業...「二酸化炭素の資源化を通じた炭素循環社会モデル構築促進事業」

岩手県久慈市において20t/日で可燃ごみを分別することなくガス化し、このガスを精製の上、ランザテック社が開発した微生物により、化学触媒や熱・圧力を用いることなくエタノールに変換。

更に、住友化学株式会社と協業し、エタノールをエチレンに、さらにはプラスチック（ポリオレフィン）に変換するループの構築を進める



まとめ

- ✓廃棄物・資源循環分野でカーボンニュートラルを達成しようとする、CCU/CCSを前提とした廃棄物処理施設の整備が必要
- ✓将来のごみの組成の変化(バイオマス比率、低位発熱量など)考慮する必要あり。
- ✓カーボンニュートラル化の達成には、2,292kt-CO₂/年のCO₂回収設備が必要となり、焼却施設規模で12,052t/日の焼却炉にCO₂回収設備設置が必要と試算。
- ✓ベースシナリオにおいて、CO₂回収設備(CC)を設置した際にエネルギー自立する処理規模は375t/日以上で、非バイオマス由来のCO₂を全量回収するためには、33以上の焼却施設でCO₂回収設備(化学吸収法)の導入を行う必要あり。
- ✓大都市圏でのみ広域化を行うと、2050年にCO₂回収設備設置可能施設は全国38施設で、非バイオマス由来CO₂の約1.2倍のCO₂を回収可能。
- ✓化学吸収法以外のCCとして、酸素富化燃焼、ケミカルループ燃焼、ガス化、炭化などの技術が、すでに実証あるいは一部実証されつつある。
- ✓熱化学変換によるガスから有用物をつくる技術として、メタネーション、メタノール合成、エタノール合成が実証されつつある。

以下、補足資料

CO₂回収技術の整理

手法		原理	起因力	長所	短所
化学吸収法		化学反応	温度差	<ul style="list-style-type: none"> ・低分圧ガス向き ・炭素水素への親和力が低い ・大容量向き 	<ul style="list-style-type: none"> ・吸収液が高価 ・腐食、浸食、泡立ちがある ・適用範囲が限定的
物理吸収法		物理吸収	分圧差 (濃度差)	<ul style="list-style-type: none"> ・高分圧ガス向き ・適用範囲が広い ・腐食、侵食、泡立ちが少ない ・再生熱源を必要としない 	<ul style="list-style-type: none"> ・吸収液が高価 ・重炭化水素への親和力が高い
吸着 分離法	PSA	吸着	分圧差 (濃度差)	<ul style="list-style-type: none"> ・高純度精製が可能 ・装置が比較的簡易 ・適用範囲が広い 	<ul style="list-style-type: none"> ・再生ガスが必要 ・水分の親和性が強い
	TSA	吸着	温度差	<ul style="list-style-type: none"> ・高純度精製が可能 ・適用範囲が広い 	<ul style="list-style-type: none"> ・吸収材料が多く、装置が大型化する ・吸着材料費が掛かる ・再生用熱源が必要
膜分離法		透過	分圧差 (濃度差)	<ul style="list-style-type: none"> ・簡便 ・安価 ・小容量向き 	<ul style="list-style-type: none"> ・回収したCO₂が低純度 ・運転比が高い ・大容量に不向き ・油脂分含む有ガスに弱い
深冷分離法		液化・精留	相変化	<ul style="list-style-type: none"> ・高純度精製が可能 ・大容量向き 	<ul style="list-style-type: none"> ・装置が複雑 ・建設費が高価 ・運転費が高い

本検討では、実績がもっとも多い**化学吸収法**を廃棄物焼却施設に導入することを前提として、以降の検討を行う。

自立可能条件の検討に用いたパラメータ①

中央環境審議会循環型社会部会(第38回)資料の試算モデル(4ケース)を元に検討

項目	設定方法
処理方式・炉数	ストーカ式焼却炉 2炉構成
ごみ低位発熱量 [kJ/kg]	当部会設定シナリオ：6,600kJ/kg
ごみ中の炭素割合 [%]	当部会設定シナリオ：19.3%
ボイラ効率 [%]	92%で一定（中環審資料と同効率）
発電効率 [%]	6MPa,450℃と4MPa,400℃においてタービン入口蒸気量に応じて設定（図1） 設定シナリオ：16.5%(375t/日,6MPa,450℃)
場内消費電力原単位 [kWh/tごみ] （CO ₂ 回収設備分除く）	施設規模(t/日)に応じて原単位を設定（図2）
消費蒸気原単位 [GJ/tCO ₂] （CO ₂ 回収設備分）	3.08で一定（中環審モデル）
消費電力原単位 [kWh/tCO ₂] （CO ₂ 回収設備分）	CO ₂ 回収量に応じて原単位を設定（図3） ※液化に必要な消費電力も含む

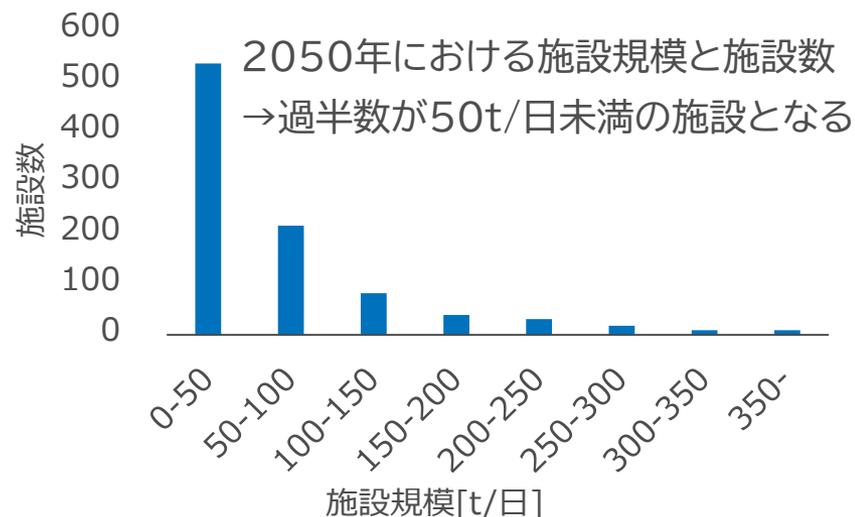
自立可能条件の検討に用いたパラメータ②

発電効率[%]	場内消費電力原単位[kWh/tごみ]	CO ₂ 回収設備消費電力原単位[kWh/tCO ₂]
<p>発電効率[%]</p> <p>タービン入口蒸気量[GJ/h]</p> <p>● 6MPa450°C ◆ 中環審モデル ● 4MPa400°C</p>	<p>場内消費電力原単位[kWh/tごみ]</p> <p>原単位[kWh/tごみ]</p> <p>施設規模[t/日]</p> <p>◆ 中環審モデル</p>	<p>CO₂回収設備消費電力原単位[kWh/tCO₂]</p> <p>原単位[kWh/tCO₂]</p> <p>CO₂回収量[t-CO₂/日]</p> <p>◆ 中環審モデル</p>
<p>図1</p>	<p>図2</p>	<p>図3</p>
<p>● 6MPa,450°C 中環審モデル3点(施設規模300, 600, 1800t/日において、CO₂回収設備導入時の発電効率17.0, 19.1, 22.4%)を基準に近似曲線を設定</p> <p>● 4MPa,400°C 中環審モデル1点(施設規模300t/日において、CO₂回収設備導入時の発電効率13.9%)を基準に、6MPa,450°Cの近似曲線をスライド</p>	<p>中環審モデル1点(施設規模300t/日において100kWh/tごみ)を基準に、プラントメーカの実績の、施設規模による原単位変化率を用いて近似曲線を設定</p>	<p>当該施設の運転データが入手できないため中環審モデル1点(施設規模300t/日において293kWh/tCO₂)を基準に、原単位がCO₂回収量の0.6乗則で変化するとし、近似曲線を設定</p>

Case1 施設数が維持された場合

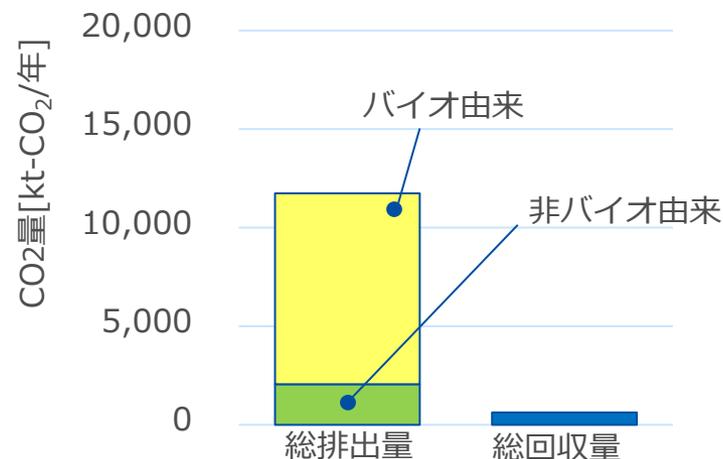
- ✓ 2020年時点と同数(同箇所)の施設とする
- ✓ 年間処理量の減少に合わせ施設規模だけ縮小

		2020年	2050年
全国年間処理量	kt/年	34,169	16,600
全国施設数	ヶ所	1,090	1,090
375t/日以上上の施設数	ヶ所	125	7



CO₂回収設備導入可能な施設分布

● 施設所在地



- ✓ CO₂回収設備を導入できる施設は7施設のみ
- ✓ CN化達成率は30%にとどまる

Case3 都道府県内で広域化

各都道府県内で広域化を行い、CO₂回収設備導入可能な施設(375t/日)を可能な限りつくる (例)北海道

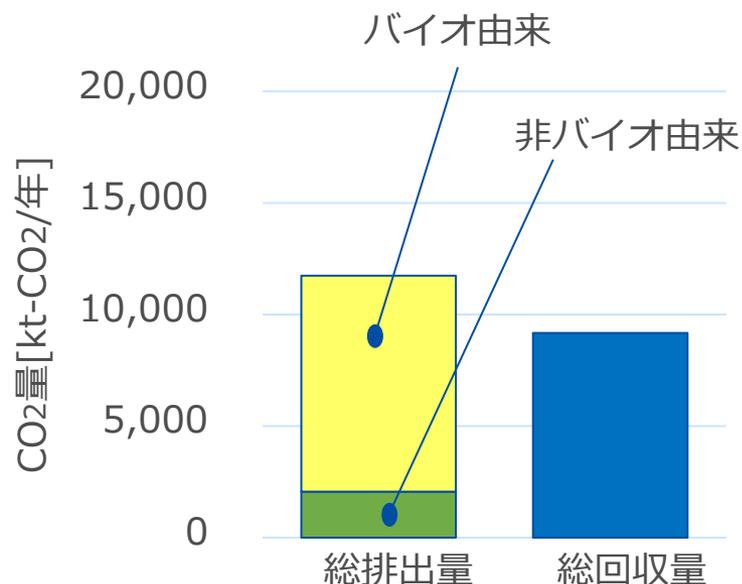
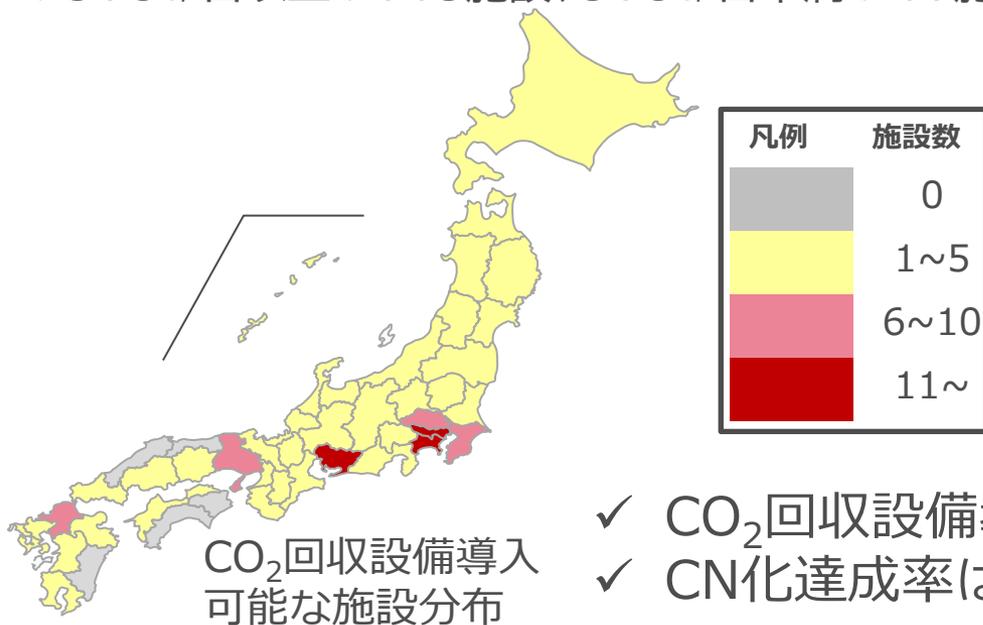
2050年の総施設規模1,987t/日

→ $1,987 \div 375 = 5.29\dots$

→ 375t/日以上が5施設、375t/日未満が1施設の計6施設とする

		2020	2050
全国年間処理量	kt/年	34,169	16,600
全国施設数	ヶ所	1,090	190※

※375t/日以上が143施設、375t/日未満が47施設



- ✓ CO₂回収設備導入可能施設は143施設
- ✓ CN化達成率は450%