

京都大学産学共同講座「脱炭素工学研究講座」の活動紹介

- ◆英 語 名：Neutral Emission Technology Laboratory
- ◆設置期間：2022年4月1日以降
- ◆設置部局：京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻内（桂キャンパス）

- ◆スタッフ：
 - 教 授：高岡昌輝（同専攻兼任）
 - 特定准教授：原田浩希（環境事業本部より出向）
 - 特 定 助 教：木本祐一（環境事業本部より出向）
 - 特 定 助 教：本間亮介

■ 産学共同講座「脱炭素工学研究」の概要

本講座は京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻内に産学共同講座として2022年4月1日より設置しており、第I期の3年間を終えて現在は第II期に入っている^{1), 2), 3)}。京都大学における産学共同講座とは、企業と大学の共同研究をより発展させた形態であり、大学の優れた英知や高度なリソースとともに基礎・基盤的研究を推進し、社会課題にチャレンジするものである。日常的な研究活動を通じて学術的知見を蓄積するとともに、技術開発を行い社会における諸課題の解決、実用化を通じて社会貢献に資するものである。さらに後述のように教育的側面にも注力して本分野における人材育成に込めている。設立のイメージを図1に示す。

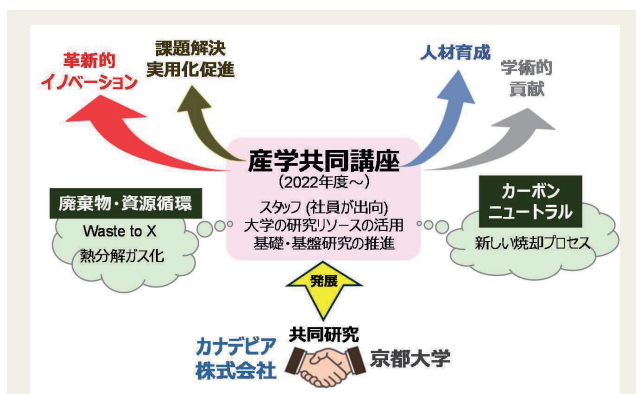


図1 産学共同講座設立のイメージ

現在のスタッフの陣容は、「環境デザイン工学講座」の教授である高岡昌輝先生に本講座の教授を兼任していただき、当社から2名が出向し特定准教授および特定助教を務めており、さらに社外から特定助教が1名、特定研究員が2名、非常勤研究員が2名、事務スタッフが2名となっている。本講座の最大の特徴ともいえるのは、学部および大学院の学生向けに研究テーマを提示し、高岡研究室に配属された学生の一部がそれらを選択することによって実質的に本講座に所属することである。当講座の研究テーマに関心を持つ学生が多く、現在では合計10名を擁するに至っている（表1参照）。

表1 産学共同講座の人員の変遷

年度		2022	2023	2024	2025
教員	教授	1	1	1	1
	特定准教授	1	1	1	1
	特定助教	1	1	1	2
	研究員	0	1	0	4
学生	博士課程	1	1	1	1
	修士課程	1	3	5	5
	学部	3	2	3	4
合計		8	10	12	18

■ 活動実績

設立以来、現時点の研究活動の実績は下記のとおりである。

- ・各学位論文：博士1本、修士4本、学士8本
- ・学会発表：国内8件、海外5件
- ・表彰：ポスター賞1件、発表賞2件、論文賞1件
- ・審査付き論文：4本

続いて、次頁以降でこの研究活動の成果を報告する。

参考文献

- 1) 国立大学法人京都大学，日立造船株式会社：京都大学に産学共同講座「脱炭素工学研究」を開設，京都大学工学部・大学院工学研究科Webサイト（2022）
<https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/news-events/news/admp/pr040331>（確認日：2025.9.20）
- 2) 高岡昌輝，原田浩希，Sylwia Oleszek：産学共同講座「脱炭素工学研究講座」のご紹介，環境衛生工学研究，Vol.36，No.2，pp.9-15（2022）
- 3) 原田浩希：産学共同講座「脱炭素工学研究講座」の紹介，Hitz技報，Vol.83，p.40（2022）

資源循環社会に向けた廃棄物処理プロセスの研究開発

2050年までに温室効果ガスの排出を実質ゼロとする脱炭素社会構築の実現のために、廃棄物・資源循環分野においても各種の都市代謝プロセスを大幅に成長させなければならない。当社はこれらの社会課題にチャレンジすべく、2022年4月より京都大学産学共同講座「脱炭素工学研究」を設立し、新規の廃棄物資源化の変換プロセスと、ごみ焼却プロセスにおける高効率CO₂回収技術に関する研究開発を推進している。

本稿ではこれまでの研究活動において得られた成果を紹介する。

キーワード

産学連携, 脱炭素, 廃棄物・資源循環分野, Waste to X, 高効率CO₂回収



■ 研究内容および成果

(1) 全般

本講座では、廃棄物資源循環分野の中でも特に熱化学変換プロセスを対象として高効率にエネルギーや資源を回収する新しい廃棄物処理プロセスの研究開発に取り組んでいる。

特に熱分解ガス化は、対象となる廃棄物を低酸素雰囲気下で加熱することにより、有用なガスやチャー（炭）を取り出す技術である。図2に示すように、上段の焼却排ガスからCO₂を回収し有効利用または貯留するプロセスフローに比べて、下段の熱分解ガス化では従前の電力のみならずケミカルリサイクルなどの多岐にわたるオプションが広がる可能性がある。

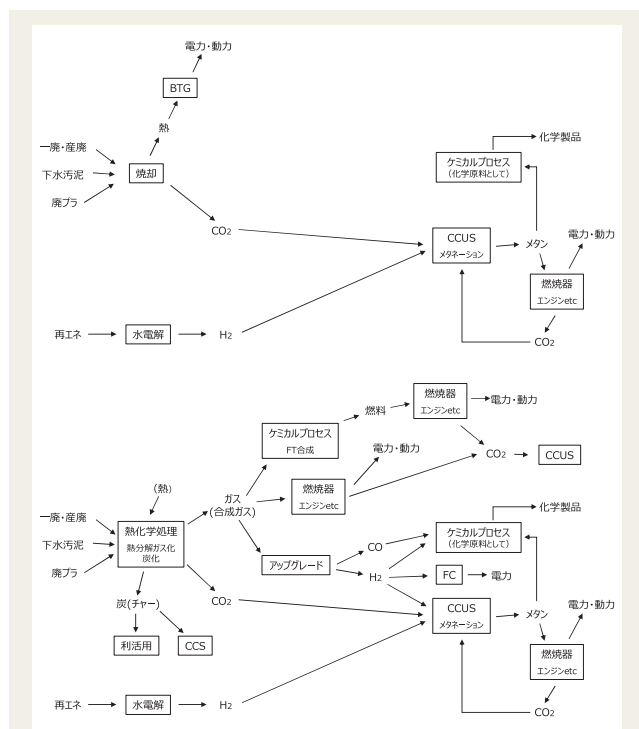


図2 熱分解ガス化で広がるWaste to Xのオプション
(上段：焼却中心、下段：熱分解ガス化中心)

しかしながら廃棄物処理に本技術を適用した際に得られる粗ガスは雑多な夾雑物や、分解しきれなかったタール（油分）を含んでおり、実際に化学原料にするためには熱分解後に改質（分解を促進してH₂やCOの濃度を高める）や、クリーニング（酸性成分等の除去）、分離・濃縮による目的成分の高純度化といった複数のプロセスが必須となる。本講座では最も上流に位置する熱分解ガス化の過程に着目し、原料となる廃棄物の性状による熱分解挙動の違いを調べ、より下流の工程を簡易にするための条件を実験的に検討している。

一方で現状では焼却処理はごみ処理における最も強力な衛生的減容化手段であり、社会的にも広く受け入れられているが⁴⁾、昨今の脱炭素社会構築の潮流の例に漏れずごみ焼却処理施設からのCO₂回収についても社会的に期待されるところである⁵⁾。本講座ではごみ焼却施設において発生する排ガス中のCO₂を高濃度化し、より高効率にCO₂を回収することが可能なプロセスの研究開発を進めている。図3にコンセプト図を示す³⁾。

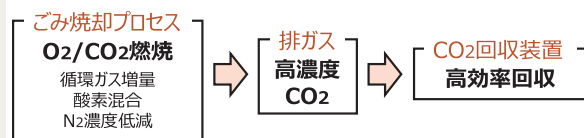


図3 排ガス中CO₂を高濃度化するO₂/CO₂燃焼

なお本研究テーマは本講座発足以前の2021年度に当社と京都大学の共同研究として着手しており、2024度からは国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP21025）として遂行している。京都大学はその再委託先として本事業に参画し引き続き本研究を推進している⁶⁾。

次項より主たる研究課題について紹介する。

(2) 下水汚泥の熱分解ガス化⁷⁾⁻¹⁰⁾

国内では下水汚泥の有機分のエネルギーへの変換率は依然として低水準であり、下水汚泥の熱分解ガス化は、廃棄物からクリーンエネルギーを生み出す技術の有望な選択肢である。熱分解ガス化による主な生成物であるチャー、タール、ガスのうち、有用なガスをより多く得たい場合には、タールを分解・除去する必要がある。タールの分解には触媒を用いた水蒸気改質が有効で、ガス収率の向上に加えて配管の閉塞リスクの低減にも寄与するものである。

本研究では図4に示すプロセス¹¹⁾を想定し、模擬タールと下水汚泥由来の実タールを用いて、800℃、850℃、900℃、S/C（水蒸気と炭素のモル比）が2の条件で、複数の流動媒体兼触媒（オリビン、CaO、珪砂）を用いて実験を行い、タールを最小とし有用なガスへの変換率を最大とする諸条件について検討した。タール由来の炭素のガス、残留タール、触媒表面への析出などの分配挙動を評価した結果、温度が高いほどガス生成量が多くなり、850℃または900℃において、タールからガスへの変換率と触媒の失活原因の一つである炭素析出のいずれの観点においてもオリビン、CaOが有力な候補になりうることを見出した。

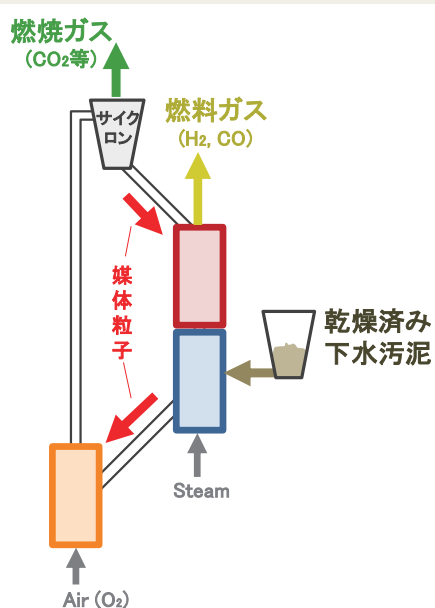


図4 下水汚泥からのH₂製造プロセスのイメージ

(3) 一般廃棄物の熱分解ガス化¹²⁾

熱分解ガス化は下水汚泥だけでなく一般廃棄物への適用においてもその有用性が期待される。本研究では実際のごみ試料の熱分解特性を調査した。まず焼却施設から採取した一般廃棄物を布や紙、プラスチックなどの主要な成分に分類し、乾燥および粗粉碎の後に極低温粉碎を行い、数mgオーダーの微量であっても均一で代表性のある試料を調製することに成功した。

これらの試料を対象とした熱重量分析および熱分解

GC/MS（Gas Chromatograph/Mass Spectrometer）により、ごみを構成する成分ごとの熱分解の温度域やその温度での熱分解時の生成物の分析結果から、成分ごとの熱分解における特徴を抽出した。既往研究との比較からも、セルロースや単一のプラスチックといった単一の物質の熱分解挙動との類似性や、異なるごみ試料間での類似性などを整理し、一般廃棄物への熱分解ガス化技術の適用を目指した基礎的知見を得た。

(4) CO₂高濃度化燃焼技術の研究開発^{13), 14)}

本研究では、従来のごみ焼却プロセスに付加するCO₂回収設備なども含めたプロセス全体の検討と、炉内ガス中のCO₂が従来の燃焼方式に比べて大幅に高濃度となることによって想定されるハードウェアへの影響に関する検討が必要となる。

前者については、まずは自立的なプロセスとして成立するかどうかや、建設コストやエネルギーバランス、運転コスト、用地面積等への影響、立地面での制約などの諸課題を抽出・整理し、対策を講じることが重要となる。その手始めの取り組みとして、本講座ではプロセス計算、熱力学平衡計算、ライフサイクルコスト評価の各種ソフトウェアを駆使して、複数のプロセスフローの構成パターンをモデル化し、運転条件や施設規模などをパラメータとしたケーススタディを進めている。計算精度の向上はもとより、スケールアップ試験で得られるデータの反映なども随時行い、最終的には社会実装に向けた完成形を構築することを目指している。

一方、後者のハードウェア的・技術的な課題群についても並行して実験的検討を進めている。高温の腐食環境にさらされる金属部材の腐食問題、水銀などの重金属類やダイオキシン類といった各種微量有害物質の挙動・除去性能への影響、灰の組成や性質への影響などのそれぞれの研究課題において、雰囲気ガス中の高濃度CO₂の物理的・化学的な影響に関する仮説を立て、実験的・数値計算的なアプローチを包括的に推進している。

■ 今後の展望

設立当初はすべてのことが手探りであったが、3年半が経った現在、ようやく研究室として持続的に運営できる土台が固まってきたと思われる。改めて本講座のミッションを振り返ると、下記3点に集約された。

- ① 脱炭素・資源循環に資する開発を促進し、技術の社会実装のための研究成果を創出する。
- ② アカデミックな知見を創造し蓄積する。
- ③ これからの担う人材を育成する。

今後は量と質の両面でアウトプットを意識して研究を推進し、創造的・発展的な展開を常に模索し、それらが社会に少しでも貢献でき、当社や大学の社会的価値の向上につながるよう進めていきたい。

謝 辞

本講座にご理解とご支援をいただきましたすべての関係機関、関係各位に深甚の謝意を表します。引き続きご指導いただきますようお願い申し上げます。

参考文献

(本講座発信の研究成果は太字の7～10、12～14)

- 4) 肴倉宏史：都市ごみ焼却残渣の資源化の現状と課題，*廃棄物資源循環学会論文誌*，29, 5, pp.339-348 (2018)
- 5) M. Bertone, L. Stabile and G. Buonanno: An Overview of Waste-to-Energy Incineration Integrated with Carbon Capture Utilization or Storage Retrofit Application, *Sustainability*, Vol.16, No.10, p4117 (2024)
- 6) NEDO Webサイト「廃棄物・資源循環分野におけるカーボンニュートラル実現」内
<https://green-innovation.nedo.go.jp/pdf/waste-resource-circulation-carbon-neutral/item-001-2/vision-kanadevia-001.pdf> (確認日：2025.9.20)
- 7) R. Mitsui, H. Harada, K. Shiota and M. Takaoka: Reforming pyrolysis products toward highly efficient energy and resource recovery from sewage sludge, *The 11th International Conference on Combustion, Incineration/Pyrolysis, Emission and Climate Change*, p.50 (2024)
- 8) T. Shiraki, S. Okumura, S. Uehara, H. Harada and M. Takaoka: Analysis of Chemical-looping Method for Production of Hydrogen Gas from Sewage Sludge, *Journal of Material Cycles and Waste Management*
<https://doi.org/10.1007/s10163-024-02140-0> (2024)
- 9) T. Shiraki, S. Okumura, A. Sharma, S. Uehara and M. Takaoka: Chemical looping gasification of sewage sludge using a two-stage bubbling fluidized bed reactor, *Journal of Material Cycles and Waste Management*
<https://doi.org/10.1007/s10163-025-02266-9> (2025)
- 10) 白木敏之，奥村諭，上原慧，原田浩希，高岡昌輝：下水汚泥のCLGによるH₂製造事業，社会実装に向けての経済性評価，*下水道協会誌*，Vol.62, No.750, pp.110-120 (2025)
- 11) 産総研マガジン
https://www.aist.go.jp/aist_j/magazine/20250723.html (確認日：2025.9.20)
- 12) W. Zhao, H. Harada, S. Oleszek, K. Shiota, Y. Sakurai, K. Oshita and M. Takaoka: Study of pyrolysis characteristics of actual refuse to establish a pyrolysis gasification process for municipal solid waste (MSW), *10th International Symposium on Energy from Biomass and Waste (Venice 2024)* (2024)
- 13) T. Okamoto, M. Takaoka, K. Oshita, H. Harada, M. Okada, T. Nagamori and M. Ueda: Evaluation of waste incineration system with O₂/CO₂ combustion and CO₂ capture technologies, *The 10th 3R International Scientific Conference on Material and Waste Management – Circular economy solutions* (2024)
- 14) T. Shinohara, H. Harada, K. Shiota and M. Takaoka: Evaluation of Corrosion of Superheater Tubes under CO₂-rich Environment in Waste to Energy Plant, *10th International Symposium on Energy from Biomass and Waste (Venice2024)* (2024)

文責者

カナデビア株式会社 環境事業本部
開発センター
原田浩希
E-mail : hitzgiho001@kanadevia.com