


# 修士論文概要書

Master's Thesis Summary

Date of submission: 01 / 15 / 2026

専攻名 (専門分野) Department	総合機械工学専攻	氏名 Name	曾 泊軒	指導 教員 Advisor	中垣 隆雄 
研究指導名 Research guidance	エクセルギー工学	学籍番号 Student ID number	CD 5224B051-4		
研究題目 Title	データセンターの未利用排熱を活用した直接空気回収技術に関する研究 ～固体吸収材を用いた統合システムの概念設計～				

## 1. 緒言

産業革命以降、人間活動による温室効果ガス排出の急激な増大が問題視されており、気候変動に向けた取り組みが世界中で加速している。地球温暖化の主な原因とされるCO<sub>2</sub>については、鉄鋼業や化学産業、輸送部門といった脱炭素困難な領域由来の残余排出を相殺する手段として、CO<sub>2</sub>の直接空気回収技術 (Direct Air Capture, 以下DAC) が有力視されている。商用化されているDAC技術にはアルカリ性吸収液や固体吸収材を用いる方法があり、現状前者がエネルギー消費およびコストの面で優位性が報告されている。一方で、アミン系固体吸収材は約60~100℃の熱で再生が可能で、モジュール化が比較的容易で設置の自由度が高いことから、既存の低温未利用排熱を活用することで消費エネルギーを大幅に低減できると考えられる。

一方で近年、情報インフラの発展や生成AIの普及により、データセンター (以下DC) の需要が日増しに高まっていることから、サーバー由来の莫大な低温排熱が常時発生している。本研究では、DC由来の未利用排熱をDACプロセスに活用した統合システムについて、DACの導入によるサーバー冷却負荷の低減効果を定量化するとともに、種々の固体DACプロセスについて性能解析を実施し、統合システムの概念設計を実施した。

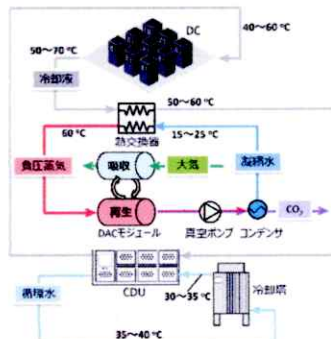


図1. 統合システムのPFD

## 2. 冷却塔消費電力の削減量試算

30 MW級の電力需要があるDCを想定し、DACプロセスによる排熱回収率と冷却塔のファン消費電力の削減量を試算した。排熱温度は、液浸冷却に関する既往研究の試験条件と、市販サーバーの最大ジャンクション温度を参考に70℃とした。ピンチ温度を6℃に固定してスチームジェネレーター上のTQ線図を描くことで、排熱回収率を計算したところ64%となった。次に、冷却塔を通る循環水の温度レンジ縮小率から、塔内所要風量の削減率を求めた。計算はMerkelの理論式と手塚の経験式を連立させ、荏原冷熱システム(株)の角型開放式冷却塔をモデル機として実施した。試算の結果、蒸気生成による排熱回収を介することで、冷却塔のファン消費電力を89%削減でき、DCのPUE改善に繋がることが分かった。

## 3. 固体DACプロセスの性能解析

### 3.1 低温再生材料の材料特性取得

固体DACを想定した吸収材の作製方法および吸着脱着特性は、既に数多くの従来研究で報告されているが、その多くが80~100℃前後での再生を想定している。本研究では市販サーバーの排熱性を考慮して、60℃の負圧蒸気を使用したパイロットスケールの試験実績を持つ川崎重工業(株)の固体吸収材の使用を前提とした。当該吸収材については、火力発電所の排ガスを模した環境下での材料特性が公開されているが<sup>1)</sup>、DACでの使用を想定した試験に関しては報告が見当たらない。そこで本吸収材に対し、吸着等温線の取得とサイクル試験によるWorking Capacityの測定を実施した。さらに、

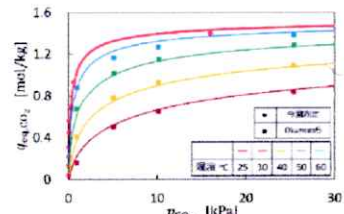


図2. CO<sub>2</sub>吸着等温線

充填層内の物質保存式、化学種保存式、エネルギー保存式、運動量保存式を連成した一次元数値モデルを構築し、吸着速度定数を未知数として試験結果に対するフィッティングで決定した。

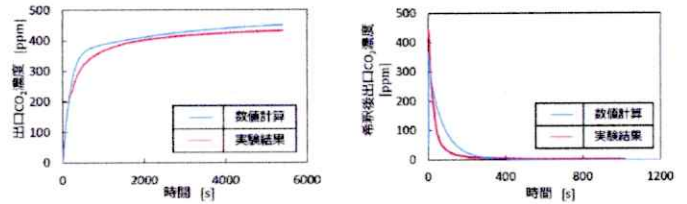


図3. 破過曲線のフィッティング結果  
(左: 吸収工程, 右: 再生工程)

### 3.2 フルスケールDAC性能解析

取得した材料特性を適用して、固体吸収材を用いたDACプロセスのフルスケール性能解析を実施した。固体DACの代表的なプロセスとして粒子充填層、ハニカム型固定層、向流型移動層および粒子落下移動層の4種を選定し、性能を比較した。

固定層の計算では、材料特性の取得に使用した数値モデルをスケールアップし、圧力損失の式と熱・物質輸送係数を吸収材形状に合わせて変更することで、反応器の動的挙動をシミュレーションした。従属変数の値が吸収・再生サイクル間で収束するまで計算することで、定常状態の1サイクルにおける性能解析を実施した。設計変数は反応器長さ、吸収・再生工程それぞれの導入ガスのSV値および工程終了時の相対CO<sub>2</sub>ローディングとしている。

向流型移動層については、粒子充填層と同様の空隙率を仮定し、吸収塔と再生塔の二塔式を前提として、各塔の従属変数の値が定常状態に収束するまで計算した。設計変数は固体吸収材の循環速度、各塔の軸方向長さおよび導入ガスと粒子の体積流速比とした。

粒子落下移動層でも計算方法は同様であるが、吸収塔内部を高い空隙率を保って粒子を落下させることを想定している。平均落下速度は内部構造によりある程度制御可能であると仮定しているが、気流中における自由落下速度の軸方向分布を別途計算し、反応器内における自由落下速度の平均値以上にならないよう上限を設けた。設計変数は向流型移動層のものに加えて、吸収塔の空隙率 (90~99.5%) とした。

上記の条件のもとで、遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化を実施した。前述の排熱回収率の仮定から、すべての排熱を使用した場合の消費電力、年間回収量、敷地面積 (モジュール高さを約40 mに固定して概算) を目的関数として計算した。計算の結果、各プロセスにおける3次元パレート解を取得し、Climeworks社の年間36000トンクラスと同等の回収量における敷地面積と消費電力のトレードオフを考慮したKnee点 (図4) を各プロセスの性能代表値とした。これらの結果より、本試算条件では粒子落下移動層が最適なプロセスであると考えられる。Knee点における消費電力は0.76 GJ/tonであり、再生熱量をDC排熱で賄うことで、既存のDACプロセスと比較し大幅に回収エネルギーを削減できることが分かった。

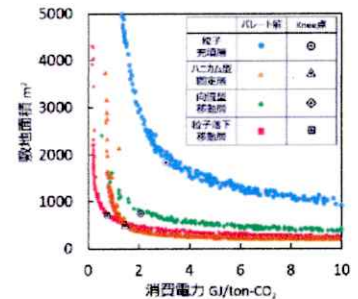


図4. Knee点解析結果

参考文献 [1] T. Okumura, et al., International Journal of Greenhouse Gas Control, 2023