

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文審査報告書

論文題目

CCS付き火力発電における化学吸収液の劣化を考慮した
エネルギーペナルティとコスト削減のための
システム評価に関する研究

System evaluation for reducing energy penalty and cost in thermal
power plants with CO₂ capture considering degradation of amine-
based solutions

申請者

磯谷 浩孝

Hiroataka ISOGAI

総合機械工学専攻 エクセルギー工学研究

2023年2月

(1) 審査経緯

当該博士論文審査は、以下の通り実施された。

- 2022 年 10 月 8 日 副査に事前説明，予備審査開催通知申請書提出
- 2022 年 10 月 31 日 予備審査会
- 2022 年 11 月 17 日 教室受理決定
- 2022 年 12 月 22 日 創造理工学研究科運営委員会受理決定
- 2022 年 12 月 23，28 日 博士論文審査第一回目
- 2023 年 1 月 19 日 博士論文審査第二回目
- 2023 年 1 月 27 日 公聴会
- 2023 年 2 月 8 日 審査分科会
- 2023 年 2 月 25 日 創造理工学研究科運営委員会合否判定

(2) 論文の背景，内容および評価

温室効果ガス排出量削減は喫緊に解決すべき課題であり，日本国内においても 2020 年 10 月に，2050 年までに温室効果ガスの正味排出量をゼロにするカーボンニュートラルの実現を目指すことが政府から宣言された．温室効果ガスの 85%はエネルギー起源の CO_2 であるが，電力の安定供給と低コスト化のために不可欠な火力発電における対策として **Carbon Capture and Storage (CCS)** の適用が選択肢の一つとしてあり，導入のための長期ロードマップも経済産業省から発表されている．CCS は CO_2 の大量排出源等から大気放散前に回収し，圧入施設まで輸送して，長期的な貯留に適した地層へ圧入する技術である． CO_2 分離回収技術の中でも，アミン系水溶液を用いた化学吸収法による燃焼後分離 (**Amine-based Post-combustion CO_2 Capture**，以下アミン PCC) は既に実用化済みであり，今後数十年間における大規模展開の可能性が最も高い重要技術であるが，前述の長期ロードマップにおいても高いコストが課題として挙げられている．本論文が対象とする火力発電における分離回収コスト削減のためには，アミン PCC の操業に要する熱（再生熱量）および電気エネルギー，すなわち発電所に対するエネルギーペナルティの低減が重要であり，既往研究では吸収液開発やプロセス改良などがなされてきた．それでも依然としてエネルギーペナルティの削減余地はあるが，既往研究には現状と目標値のギャップに着目した PCC のシステム評価は少なく，今後の開発の指針が明確に定まっていない．また，アミンの酸化あるいは再生時の高温による劣化によって初期の吸収性能を失っていくが，コストの観点からそれらを許容したアミン PCC システムの運転が必然となる．しかしながら，既往研究には特定のアミンに対する劣化生成物の化学的な分析や同定の報告はあるものの，コストに直結する吸収液の劣化によるアミン PCC システムの運転特性およびエネルギーペナルティへの影響については理解が不十分であり，経験的な対策に留まっているのが現状である．

このような背景の下、本論文では、これまで不十分であったアミン PCC システムの運転特性、吸収液の液特性および運転条件等の相互の複雑な関係性について膨大な文献調査を通して整理し、機械工学の視点から包括的に考慮した新たな方法でアミン PCC のシステムを評価している。また、具体的な運転方法の検討事例とコスト試算について述べ、さらなるコスト削減に向けた研究開発の指針を示している。特に、液昇温熱や蒸発潜熱に関与する吸収液の液特性や運転条件のシステム内の機能連関を丹念に整理することで、再生熱量内訳における液昇温熱の過大評価やシステム視点での改善方法など新たな知見について述べている。実践的なシステム評価および運転条件探索支援ツールとして市販のプロセスシミュレータを駆使し、新旧二種の PCC 吸収液モデルを含むアミン PCC 導入の超々臨界圧微粉炭焚き火力発電と天然ガス焚きガスタービン複合発電のシミュレーションモデルをそれぞれ構築するとともに、いくつかの改良プロセスについて検討事例を示している。蒸発潜熱の大幅削減の有効手段としてリッチ液の分岐投入があるが、液昇温熱の増大とのトレードオフが本質的な要因となって大幅な再生熱量低減が困難であることを明らかにし、従来見過ごされてきた粘度や熱伝導率などの輸送物性を指標とした吸収液選定や、吸収塔の充填物の有効比表面積の拡大などによる設備縮小化にも重点を置いた研究開発が重要との指針をまとめている。

一方、劣化に対しては全く独自のアプローチ法を築いている。まず、長時間の実運転を通じた劣化生成物の整理を通して、代表的な生成物としてギ酸を含む模擬劣化液を調製し、基礎試験によって液特性を、分離回収試験によって運転特性をそれぞれ取得している。前述のプロセスシミュレーションモデルをアレンジして劣化が運転特性およびエネルギーペナルティに与える影響を調査し、実運転での劣化液の CO₂ 分離回収挙動のメカニズムを解明するとともに、劣化を許容したアミン PCC システムの運転の可能性について言及している。さらに、一つとして同じ状態にならない劣化液によるアミン PCC のシステム評価の新たな方法論として総体的アプローチを考案し、全ての化学種の同定・定量を伴うことなくシミュレーションに基づいた最適な運転条件の合理的な探索の可能性を拓いた。これらのシステム評価は、確度の高い CO₂ 分離回収コストの算出にも応用可能であり、具体的に日・米におけるフルチェーン CCS を想定し、電力単価および CO₂ avoided コストをそれぞれ試算している。その結果、上記の改良によるコスト低減への重要度を定量的に示し、劣化に対してはリクレメーション等で劣化生成物濃度を適正に管理すればコスト増を抑制可能であることなどを明らかにした。

以上要するに、本論文は CCS 付き火力発電における化学吸収液の劣化を考慮したエネルギーペナルティとコスト削減のためのシステム評価に関して包括的かつ体系的に整理しており、国家プロジェクトとして進行中の CO₂ 分離材の標準評価法の基盤形成にも大きく貢献するものである。よって本論文は博士（工学）早稲田大学の学位論文として価値あるものと認める。

2023 年 2 月

審査員

主査 早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学 中垣 隆雄

早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学 草鹿 仁

早稲田大学教授 博士（工学）名古屋大学 松田 佑

金沢大学准教授 博士（地球環境学）京都大学 山田 秀尚
