

CCUS実用化に向けたアミン系のCO₂吸収液 TS-X

TS-X: Amine-Based CO₂ Solvent for Practical Realization of CCUS

岩浅 清彦 IWASA Kiyohiko 藤田 己思人 FUJITA Koshito 村井 伸次 MURAI Shinji

地球温暖化を防止するための対策の一つに、燃焼排ガスに含まれる二酸化炭素(CO₂)を分離回収・地中に隔離して貯留・利用するCCUS(Carbon Dioxide Capture, Utilization and Storage)がある。この技術が広く社会実装されることが強く望まれるが、建設コストや運転コストの低減が課題である。

東芝は、CO₂を効率的に回収可能なアミン系のCO₂吸収液TS-Xを新たに開発し、当社が佐賀市清掃工場へ納入したCO₂分離回収プラントで評価した。当社の従来の吸収液TS-1に比べ、主成分アミンの減少速度を約1/3に抑制でき、プラントをより経済的に運転できることを実証した。

Carbon dioxide (CO₂) capture, utilization, and storage (CCUS) technologies, which can separate and capture CO₂ in combustion flue gas and isolate and store CO₂ underground, have been attracting attention as a countermeasure against global warming. However, the widespread implementation of CCUS technologies in society requires reductions in both construction and operating costs.

Toshiba Corporation has developed TS-X, an amine-based CO₂ solvent capable of efficiently capturing CO₂, and evaluated its performance at a CO₂ capture plant delivered to a waste incineration facility in Saga City. As a result, we have verified that the amine degradation rate of TS-X solvent is reduced to approximately one-third of that of our conventional TS-1 solvent, thereby enabling more economical operation of CO₂ capture plants.

1. まえがき

CO₂を分離回収する技術は、膜分離法や、物理吸収法、化学吸収法などの様々な手法がある。また、回収したCO₂は地中などに貯留するCCS(Carbon Dioxide Capture and Storage)と、利活用するCCU(Carbon Dioxide Capture and Utilization)があり、二つを合わせたものがCCUSである。

東芝は、燃焼排ガスに含まれるCO₂を効率良く回収できる化学吸収法に着目し、その吸収液を開発してきた。そして、その技術を実証するとともに、高効率で省エネなCO₂分離回収プラントのプロセス設計を実現するため、福岡県大牟田市にある(株)シグマパワー有明 三川発電所内にパイロットプラントを設置し、吸収液及びプラントの性能検証や、運転性・運用性・保守性などの評価を実施している。図1に、パイロットプラントの全景を示す。このパイロットプラントは、三川発電所から排出される排ガスの約1%に相当する、2,100 Nm³(注1)/hを処理でき、1日当たり10 tのCO₂を分離回収する能力がある。

パイロットプラントで得た試験データ、運転ノウハウ、課題解決策などは、新規プロジェクトの設計にも活用し、様々な排ガス源を対象としたプラント建設や運用に反映してきた。その一つに、佐賀市の清掃工場に納入したごみ処理排ガス

(注1) 0℃、1気圧の状態に換算した体積。

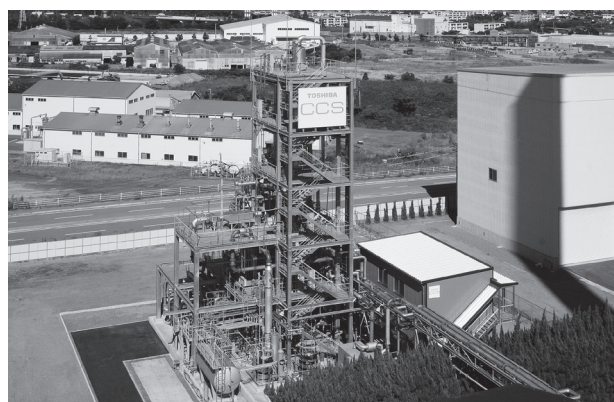


図1. パイロットプラントの全景

実排ガスを用いたこのパイロットプラントで、性能検証や各種評価を実施し、ラボでは確認できない課題などを抽出して技術検証を行う。

CO₂ capture and storage (CCS) pilot plant at Mikawa Power Plant in Omuta City

からのCO₂分離回収プラントがある。

ここでは、アミン系CO₂吸収液開発の概要及びそのパイロットプラントでの評価と、世界で初めて(注2)、(1)、(2)商用利用された佐賀市清掃工場CO₂分離回収プラントでの評価について述べる。

(注2) 2016年8月時点、当社調べ。

2. 吸収液の開発

当社は、アンモニア(NH₃)の水素(H)原子を炭化水素基で置換した化合物であるアミンをベースとして、吸収液を開発している。

2.1 吸収液の開発の進め方

分子全体の構造及び各置換基と、CO₂吸収量や、反応速度、耐熱性、耐酸性などの諸物性との関係を把握することで、より良好な吸収液性能を発揮する分子設計を進めている。

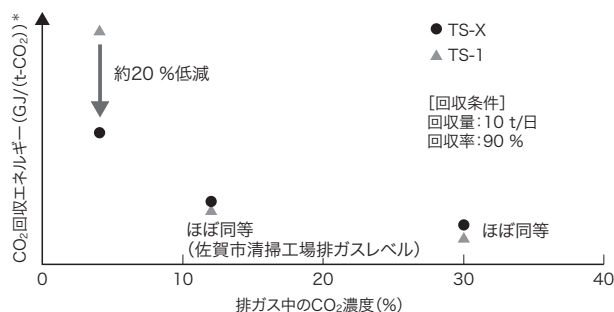
分子設計が完了した候補液は、まず、ラボスケールの試験(以下、ラボ試験と略記)を行い、CO₂吸収性能や耐酸性などを評価した。次に、ラボ試験で良好な性能が確認できた吸収液は、パイロットプラント試験を行い、その性能をプラント規模で確認・評価した。これにより信頼性の高いプラント設計を実現した。

更に、新吸収液の長期連続運転における性能評価は、佐賀市と共同で、商用プラントである清掃工場のCO₂分離回収プラントにて、吸収液の劣化に起因した性能への影響確認や、その劣化対策を実施した。

2.2 パイロットプラント試験

ラボ試験において、当社開発の従来吸収液TS-1より優位な性能を示した新吸収液TS-Xを、パイロットプラントに導入して性能評価した。

その結果、TS-XはTS-1に比べて、CO₂の吸収量や、吸収速度が優れており、CO₂回収エネルギーは、図2に排ガス中のCO₂濃度依存性としてTS-1との比較で示すように、濃度が12～30 vol%のケースでは同等であるものの、濃度が4 vol%のケースでは約20%低減でき、より省エネでCO₂が回収できることを確認した。これは、TS-Xが低濃度CO₂の



* 1 tのCO₂を分離回収するのに要する熱エネルギー (GJ)

図2. CO₂回収エネルギーの排ガス中のCO₂濃度依存性

TS-Xは、TS-1に比べ、低濃度CO₂排ガスからのCO₂回収に特に有効であることが確認された。

Dependence of CO₂ capture energy on CO₂ concentration in flue gas

排ガス源、つまり、ガスタービンコンバインドサイクル発電所のようなCO₂排出源に対して、特に有効であることを示している。

パイロットプラントは、試験設備という特性から、年単位での連続運用は現実的ではないため、吸収液の劣化兆候が見られる前の運転初期段階について、評価を行った。結果としてTS-Xは、運転初期段階だけの評価ではあるものの、プラント規模での運転でも問題点は発現せず、商用プラントへの展開が可能であることを確認した。

3. 佐賀市清掃工場での吸収液の評価

当社は、2013年から清掃工場由来CO₂の有効利用を検討するための佐賀市「清掃工場バイオマス利活用促進事業」に参画し、2013年10月にCO₂回収量が10～20 kg/日の小型実証プラントを佐賀市清掃工場に納入した^{(1), (3)}。この運用を通じて、回収したCO₂の純度が高く、施設園芸などに提供可能であることを実証した。

その後、佐賀市は環境省の「二酸化炭素回収機能付き廃棄物発電検討事業」に採択され、また、当社は佐賀市の公募に対して回収量10 t/日のCO₂分離回収プラントを受注・納入し、2016年8月に商用運転が開始された。図3にその全景を示す。

清掃工場で商用運転される世界初^{(1), (2)}のCO₂分離回収プラントであり、回収したCO₂は藻類の培養やきゅうり栽培などに活用されるために、佐賀市から事業者に売却されている。

3.1 長期連続運転での性能評価

吸収液の劣化影響は、長期連続運転における性能評価を経て判断することが重要になる。



図3. 佐賀市清掃工場CO₂分離回収プラントの全景

当社が納入したCCUのプラントであり、佐賀市によって商用運転されている。

CO₂ capture plant at waste incineration plant in Saga City

そこで当社は、佐賀市と共同で、佐賀市清掃工場のCO₂分離回収プラントに吸収液を供給し、商用の長期連続運転でのプラント性能及び吸収液性能を評価した。評価期間は、2023年3月～2024年3月の約1年間である。

3.2 吸収液の劣化影響評価

吸収液の劣化進行度合いを把握するための有効な指標の一つとして、主成分アミンの減少量がある。図4(a)にプラントの運転時間に対する主成分アミンの減少量を、過去に実測したTS-1の結果との比較で示す。TS-XはTS-1に比べ、主成分アミンの減少速度が約1/3にまで抑制できたことを確認した。実運用条件で立証できたといえる。

また、アミン系の吸収液は、排ガス中の酸素や酸との接触で、有機酸や無機酸などの劣化生成物を形成するため、これらが系統内に時間とともに蓄積される。これらの存在も、吸収液の寿命に大きく影響する。劣化生成物の一例として、有機酸の一種であるギ酸について、蓄積量の経時変化をTS-1の結果との比較で図4(b)に示す。TS-XはTS-1に比べ、ギ酸の蓄積速度が約1/7にまで低減したことを確認できた。更に、グリコール酸や、酢酸など、その他の有機酸を含む総量評価でも、TS-1に比べて約1/3に低減したことも確認できた⁽⁴⁾。

3.3 吸収液の劣化影響対策

化学吸収法によるCO₂分離回収技術では、主成分アミンの劣化がプラントの性能に大きく影響する。特に酸(無機酸・有機酸)の蓄積は、吸収液の性能低下によるCO₂回収率低下・回収エネルギー増大をもたらすだけでなく、プラントの設備の腐食原因にもなり得る。

これら劣化生成物(不純物)をプロセス中から除去する方法としては、吸収液の定期的な交換や補給が考えられるが、吸収液の購入や廃液処理にコストが掛かる。そこで、蓄積した不純物だけを除去して性能を維持・回復させる目的で、当社は不純物のうちで特に酸を除去する方法として電気透

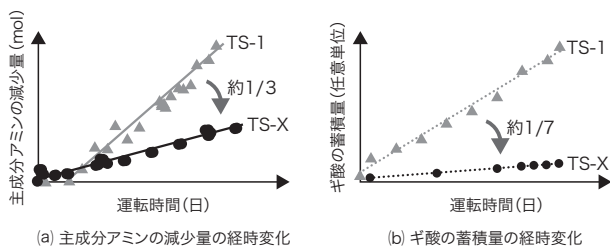


図4. 吸収液の劣化影響の経時変化

TS-Xは、TS-1に比べ、主成分アミンの減少量やギ酸の蓄積量が、顕著に抑制できていることを確認した。

Changes in solvent degradation over time

析に着目し、ラボスケールから開発を進めていた。

3.2節で述べたように吸収液の劣化は従来よりも抑制できたが、更なる改良を目的に、2024年4月から佐賀市清掃工場で、電気透析装置を用いた吸収液の浄化・再生に着手した。装置は仮設のユニットハウスに収納し、商用運転中の吸収液を連続で一部抜き出して、電気透析装置で酸除去を行い、酸除去後の吸収液は、CO₂分離回収プロセスへ戻した。

図5に、電気透析装置を用いた酸除去の概念図を示す。電気透析は、電気透析槽に劣化した吸収液と不純物回収液(濃縮液)を流し、その両端に設けた電極に電圧を印加する。そして、陰イオンである酸は陰イオン交換膜を通じて回収液へ移動させる。この工程で、回収液へ陰イオン交換膜を通じて微量のアミンが漏出する問題がある。効率的な酸除去に加え、このアミン漏出の抑制が、電気透析の性能を

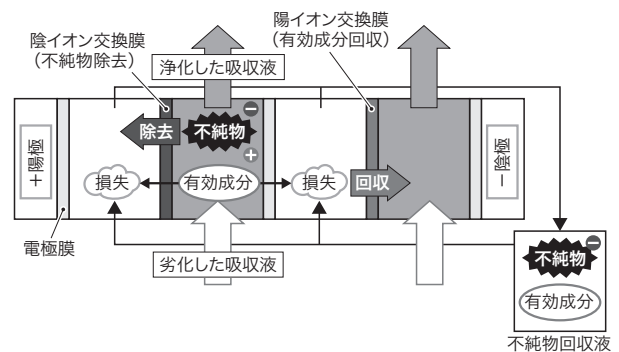


図5. 電気透析装置を用いた酸除去の概念図

佐賀市清掃工場のCCUでの実証試験に用いた装置である。

Acid removal from solvent using electro dialysis

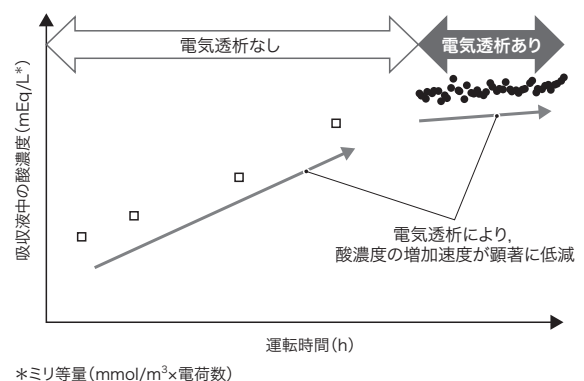


図6. 電気透析の実証試験結果

吸収液中の酸濃度の経時変化で、電気透析により増加速度が顕著に低減できたことを確認した。

Differences in acid concentration increase rates obtained by tests with and without electro dialysis

決める重要な因子になる。アミン漏出を抑制するためのイオン交換膜の配置や、酸除去量とアミン漏出量の関係性について、当社がラボ試験で得た知見を生かし、商用運転中のプロセスでの実証試験を実施した。

試験では、電気透析装置はマニュアル運転にてデータを取得し、電気透析装置の稼働前後で吸収液中の酸濃度の増加速度を比較した。図6にその結果を示す。電気透析装置の稼働前は、吸収液中の酸濃度は経時によって単調増加の傾向を示し、稼働後は、酸濃度がほぼ一定値とみなせるほどまで増加速度を顕著に低減でき、当初の見込みどおり、酸除去機能が有効に働いたことを確認した。

現在は、佐賀市と共同で、電気透析装置の自動化システムを構築中である。今後、自動化した電気透析装置を設置し、運転員にも優しいプロセス設計を推進していく。

4. あとがき

当社は、地球温暖化対策の切り札ともいわれるCCUSに関する技術開発を進めており、この論文では、三川パイロットプラント及び佐賀市清掃工場CO₂分離回収プラントでの技術開発について述べた。当社が開発を進めるCO₂の吸収液及び分離回収プロセスは、主に燃焼排ガスをターゲットとし、特に低CO₂濃度排ガス源である、ガスタービンコンバインドサイクル発電所にも適していて、省エネ型である。また、吸収液の長寿命化を実現することが可能であり、これらの技術を更に高め、CCUS技術を広く普及させることで、カーボンニュートラル実現の一助になるよう、引き続き研究開発及び事業化を進めていく。

謝 辞

この開発に際し、ご協力をいただいた佐賀市の関係各位に、深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) 東芝. “佐賀市発で世界初 最先端のCO₂分離回収プラント”. Toshiba Clip. <<https://www.toshiba-clip.com/detail/3646>>, (参照 2026-03-03).
- (2) 東芝. “佐賀市清掃工場向け二酸化炭素分離回収プラントが稼働を開始”. ニュースリリース. <<https://www.global.toshiba.jp/news/corporate/2016/08/pr1001.html>>, (参照 2026-03-03).
- (3) 東芝. “佐賀市「清掃工場バイオマスエネルギー活用促進事業」への参画について”. ニュースリリース. <<https://www.global.toshiba.jp/news/corporate/2013/06/pr1101.html>>, (参照 2026-03-03).
- (4) 東芝エネルギーシステムズ. “佐賀市のCO₂分離回収商用設備で、耐久性が高く環境にやさしいCO₂吸収液の実証運転を完了～新吸収液を用いたCO₂分離回収設備の販売開始～”. ニュースリリース. <<https://www.global.toshiba.jp/news/energy/2024/04/news-20240418-01.html>>, (参照 2026-03-03).



岩浅 清彦 IWASA Kiyohiko
サーマル&ハイドロパワー事業部
CO₂分離回収システム計画・開発部
CCUS System Engineering & Development Dept.



藤田 己思人 FUJITA Koshito
総合研究所
エネルギーシステムR&Dセンター 化学技術開発部
Chemical Engineering R&D Dept.



村井 伸次 MURAI Shinji, D.Eng.
総合研究所
エネルギーシステムR&Dセンター 化学技術開発部
博士(工学) 日本化学会・高分子学会会員
Chemical Engineering R&D Dept.