

高エネルギー効率及び経済性に優れた バイオ燃料製造装置の開発： バイオエタノール膜分離脱水システム -MMDS®-

Development of a Biofuel Production System with High Energy Efficiency and Excellent Economic Performance: MMDS® (Mitsubishi Membrane Dehydration System)



松澤 雅登^{*1}
Masato Matsuzawa

志村 良太^{*3}
Ryota Shimura

鈴木 孝允^{*2}
Koin Suzuki

大貫 琢郎^{*4}
Takuro Onuki

吉徳 光一朗^{*2}
Koichiro Yoshitoku

磯谷 康平^{*5}
Kohei Isogai

バイオエタノールは、ガソリン代替となるクリーン燃料として、また次世代航空機燃料である SAF (Sustainable Aviation Fuel) の原料として注目されている。世界のエタノール消費量は、コロナ禍による一時的な減少を除き、漸増傾向が続いている。さらに、米国での SAF 生産が本格化した場合、SAF 原料としての急激な需要増加が見込まれる。バイオエタノールを燃料として使用するためには、製造工程の最終段階でバイオエタノール中に含まれる水分の除去が不可欠である。しかし、現状ではバイオエタノール製造工程の消費エネルギーの約 6 割が蒸留・脱水工程に起因しているため、この脱水工程での消費エネルギー削減が求められている。また、バイオエタノールプラントについては、2000 年代に新設されたプラントが老朽化しており、設備の更新需要が予測されている。そのタイミングで、エネルギー消費量の削減効果が高い本研究の膜分離脱水システムへの置換えを提案できるよう研究開発を進めている。三菱重工業株式会社は、植物由来のクリーン燃料であるバイオエタノールの高効率な新型膜分離脱水システムの開発とその事業化を推進することで、脱炭素技術としての早期確立・社会実装を図るとともに、持続可能なカーボンニュートラル社会の実現に貢献してゆく。

1. はじめに

本研究は、バイオエタノールを燃料用途に適合させるための脱水工程に着目している。バイオエタノールの蒸留・脱水工程は製造工程におけるエネルギー消費の大部分(約 6 割)を占める。蒸留工程は水-エタノール共沸により約 95vol% で限界となるため、燃料用途に適合する 99.5vol% 超の無水エタノールを得るには脱水工程が追加が必要となる。その脱水工程において従来主流の PSA (Pressure Swing Adsorption) 法は原料を気化させる必要があるため、エネルギー消費量の面で課題がある。

三菱重工業株式会社(以下、当社)では、モノリス型セラミック脱水膜を採用し、液相での脱水を可能とする膜分離脱水システム MMDS® (Mitsubishi Membrane Dehydration System)を開発した。当社総合研究所長崎地区にパイロットプラントを設置して実機向け同型膜にて所期の製品純度を達成したことを報告する。本報では、開発の経緯とシステム概念、パイロット試験での濃縮性能取得結果を取りまとめ、現段階での技術的インパクトと今後の課題を報告する。

1990 年代以降、バイオエタノールの脱水工程には高分子系やゼオライト系の膜技術が提案さ

*1 総合研究所 化学研究部 主席研究員

*2 総合研究所 化学研究部

*3 GX セグメント プロセスエンジニアリング部 部長 技術士(化学工学部門)

*4 GX セグメント プロセスエンジニアリング部 グループ長

*5 GX セグメント プロセスエンジニアリング部

れてきたが、実液耐久性や透過速度の制約により広域普及に至っていない。今回、透過性能の改善により、実機向け同型膜を用いたパイロット試験での国内燃料規格 99.5vol% 以上のエタノール純度達成を確認できたことは、脱水工程の低エネルギー化と装置のコンパクト化を両立する実用的選択肢としての MMDS® の位置付けを強める。

2. エタノール脱水膜設備について

MMDS® の基本概念は、粗エタノール(約 90～95vol%) を圧力下で加熱した液相で膜に供給し、膜透過側を真空近くまで減圧することで粗エタノールの水蒸気圧と透過側水分圧の差を透過の駆動力とし、水を選択的に透過させることで無水に近いエタノールを得るものである。膜はモノリス型セラミック膜を採用し、液相での脱水に適した素材を選定している。

システム構成は、粗エタノール受入タンク、エタノール予熱器、エタノール脱水モジュール(膜容器・膜エレメントを収めたモジュール群)、及び透過側の真空排気系を主要機器としている。商用機はコンテナ化(20ft コンテナベースの膜コンテナと共通機器コンテナ)が可能であり、建設コストを低減することを目指している。脱水膜は、モノリス型セラミック膜を採用しており、チューブ型や中空糸型と比べて液相供給、耐環境性、装置規模のコンパクト化等で優位性がある。図 1 に膜選定におけるモノリス型セラミック膜の優位性を示す。

膜種	モノリス型セラミック膜 (4)	チューブ型セラミック膜	中空糸膜
イメージ			
基材	セラミック	セラミック	有機高分子
原料供給性	液・ガス いずれも使用可能	ガスのみ	ガスのみ
耐水性・耐酸性	○	△ 大型商用用途向けの安定運転実績無し	○
長期耐久性	(○) 実証試験にて検証予定	△ 大型商用用途向けの安定運転実績無し	○
膜比表面積	○	△	◎
透過速度	○	○	△
装置規模	○ コンパクト	△	△
OPEX	◎ ワンスルー収率高・リサイクル負荷小 日本ガイシと共同開発中 MMDS®	—	△ モノリス型セラミック膜に劣る

図1 膜選定におけるモノリス型セラミック膜の優位性

膜性能向上の主要ターゲットは(1)透過速度の向上により膜の必要数を低減すること、(2)水/エタノール選択性の向上により透過水へのエタノール混入を抑え収率を高めること、(3)膜の耐久性向上により運転変動や長期運転に対応可能とすることである。エネルギー面では、気化工程なしでの液相分離、更に前段の蒸留設備の負荷低減の寄与度が大きい。膜分離脱水法は PSA 法に比べ蒸留塔と脱水ユニットの合計必要熱量を約 38% 削減する試算が得られた。また、CAPEX 及び 20 年分の OPEX の合算として比較した場合にも、米国中西部や日本・欧州での試算結果において合計コストとして 35～37% の削減となる結果が得られた。

図 2 に必要脱水エネルギーの比較、図 3 に膜分離脱水システムと PSA の経済性比較を示す。膜分離脱水システムに求められる機能を以下に纏める。

- ・製品純度: 国内燃料規格の要求純度である 99.5vol% 以上を達成すること
- ・収率及び省エネルギー性: エタノールの回収率を高く保持したまま、蒸留塔での再生負荷を低減して総合エネルギーを低減すること
- ・耐久性・耐汚濁性: バイオエタノール実液中の不純物によるファウリングに対して耐性を有し、長期運転が可能であること
- ・モジュール性: コンテナ・モジュール化設計(20ft コンテナ単位)を採用し、幅広いキャパ

シティへの対応と短納期化が可能であること。また、PSA の一部置換から段階的に導入可能なフレキシビリティを確保すること。図 4 に商用機イメージを示す。

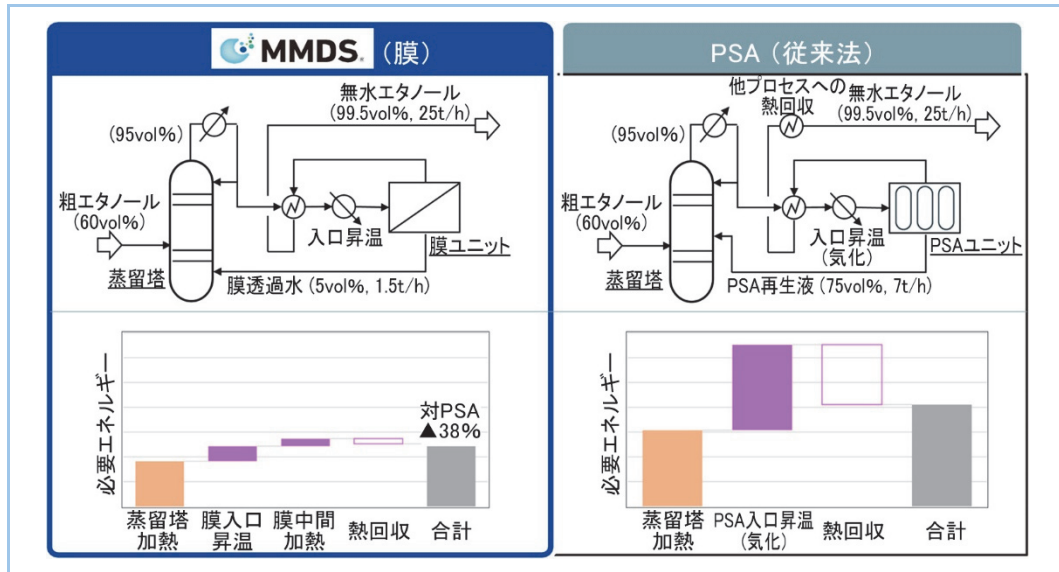


図2 必要脱水エネルギーの比較

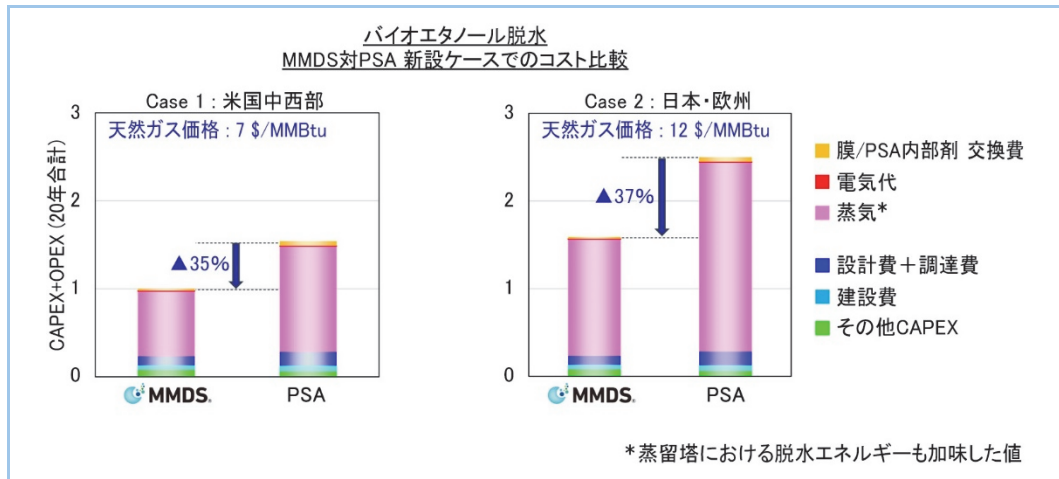


図3 膜分離脱水システムと PSA の経済性比較

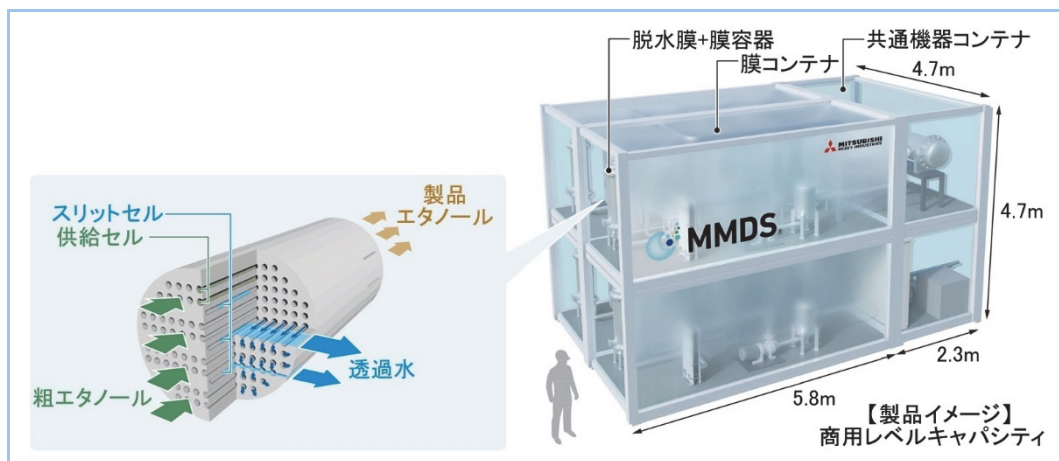


図4 商用機イメージ

研究開発のアプローチとしては、ラボレベルで小型膜を用いた基礎評価に始まり、物質移動を考慮した透過速度計算モデル(濃度・温度・流速への依存性を表現するモデル)の構築、境膜物質移動係数の層流・乱流域での定式化、そして大型脱水膜へのスケールアップ評価及びパイロット検証へと段階的に進めている。これらの検討を通じて、透過水量の推定、必要膜本数試算、

及び経済性評価を実施し、商用導入に向けたプロセス設計指針の確立を目指している。

3. 実証試験

3.1 実証設備の概要

パイロットプラントは当社総合研究所長崎地区内に設置され、商用機と同型の大型脱水膜エレメントを収めたモジュール群と、前流側のエタノール昇圧ポンプ・予熱器、エタノール循環ライン、透過側の真空排気系、及びそれらを設置するスキッドにより構成される。

運転は供給されたエタノールを圧力下で加熱し、液相で膜容器を通過させ、膜の透過側を真空にする方式で、液相の水蒸気分圧と透過側の水分圧差を透過の駆動力とする。パイロットプラントでは商用機と同等の孔数、膜面積を有する膜を用いて、循環ポンプ・予熱器により所定の循環液量と温度に制御し、非透過側を加圧し閉ループでの循環条件にて試験を行う。本装置にて水透過速度の温度、濃度、及び流速への依存性の確認が可能である。

図5に当社総合研究所長崎地区内に設置したパイロットプラントの外観を示す。



図5 当社総合研究所長崎地区内に設置したパイロットプラントの外観

試験の目的は実機向け同型膜における脱水性能（製品純度 $\geq 99.5\text{vol}\%$ ）の確認、及び温度・濃度・流量パラメータに対する条件依存性の確認である。併せて、ラボスケールで得た物質移動モデルや境膜物質移動係数の知見をパイロット試験へ反映し、実機設計に適用可能なシミュレーションモデルの妥当性を検証することも狙いとした。加えて、実運転に伴う運転性、安全性、及び運転操作手順の確認を行った。

3.2 エタノールの濃縮試験/膜性能の条件依存性の確認試験

パイロット試験は連続濃縮のシステムを適用して実施され、閉ループ運転下で国内燃料規格の達成可否を評価した。初期粗エタノール濃度が約 $92.5\text{vol}\%$ の供給液を循環濃縮したところ、経時的にエタノール濃度が上昇し最終的に国内燃料規格の約 $99.6\text{vol}\%$ までの濃縮（所期性能）を確認した。

小型ラボ膜試験と大型脱水膜パイロット試験を比較し、いずれのスケールでも同様の濃縮挙動と温度・流速の条件依存性が確認された。様々な条件下での水透過速度の測定値は、小型膜ラボ試験結果より構築した物質移動モデル（濃度依存式、Arrhenius 型温度依存、境膜物質移動係数の流速依存を組み合わせた式）と整合し、モデルにより実機向け同型膜の性能を予測することが可能になった。

試験にて得られた重要知見は以下のとおりである。

- 実機向け同型膜において高純度（ $\geq 99.5\text{vol}\%$ ）の製品を安定して得られることが実証され、膜分離脱水法がガソリン混合用の品質規格を満足し得ることが確認された。
- 温度上昇と供給流速増加は水透過 flux を増加させる方向に寄与することが確認され、温

度・流速・供給濃度の変動が水透過 flux に与える条件の依存性が予測と概ね一致した。

3.3 今後の検討課題

バイオエタノールの実液には発酵由来の微量不純物が含まれることが多く、これらが膜性能低下や目詰まりを引き起こす可能性がある。パイロット試験では、工業エタノールを循環液として適用しており、運転中に顕著な性能低下は観察されなかったものの、膜分離脱水システムの実機適用に向けては長期運転・実液運転条件下でのファウリング挙動の定量的評価及び原因物質の特定が重要課題である。

当社はファウリングの対策の一環として、膜の耐久性と不純物耐性を評価するために、実液を用いたファウリング試験を計画している。当社の MMDS®は液相分離により高効率な脱水（パイロット試験で 99.5vol%以上の純度達成）とエネルギー消費削減を示しており、信頼性確保のために当社総合研究所でのラボ試験機及び米国のバイオエタノールプラントでの実液試験の実施、膜性能変化有無の確認と原因物質推定を計画しており、実証試験と商用化に向けた評価を進める。図 6 に開発ロードマップを示す。

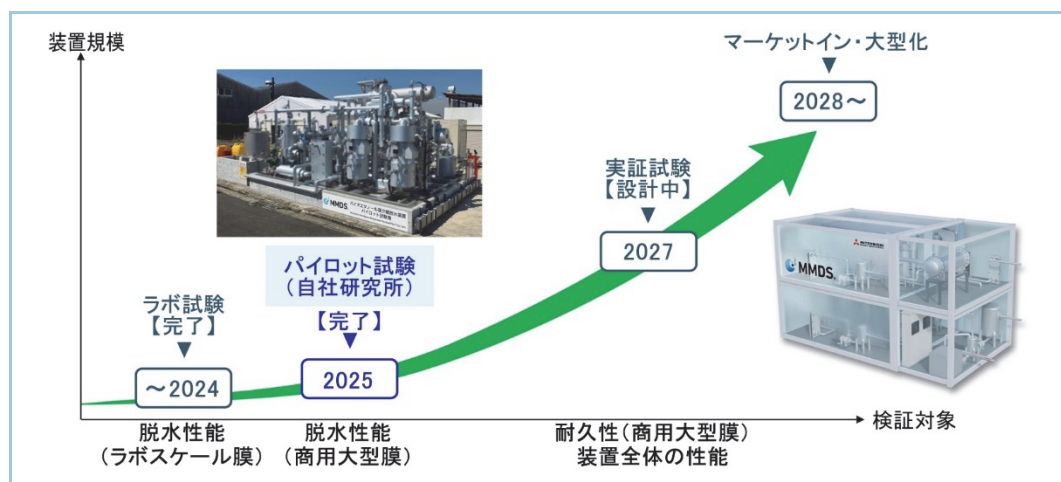


図6 開発ロードマップ

4. まとめ

本報では、モノリス型セラミック膜を用いた MMDS®の開発と、当社総合研究所長崎地区に設置のパイロットプラントによる濃縮試験結果、及び膜の条件依存性の確認結果を報告した。パイロットプラントでの濃縮試験により、初期粗エタノール約 92.5vol%→約 99.6vol%まで濃縮し、国内のガソリン直接混合規格を満足する製品純度の達成を確認した。これにより、膜分離脱水法の PSA 法に代わる脱水ソリューションとしての商用化の見通しを得た。一方で、バイオエタノール実液に含まれる微量不純物によるファウリング対策と長期耐久性の実証は未実施の課題であり、ラボでのファウリング評価及び米国での実液試験といった追加検証が不可欠である。今後は、パイロット試験で得た運転データを基にプロセス最適化を進め、実証プラント建設と早期市場投入に向けた技術・事業両面の準備を加速する。

MMDS®は三菱重工業株式会社の日本等における登録商標です。

参考文献

- (1) 三菱重工業株式会社プレスリリース、バイオエタノール膜分離脱水システム開発のパイロットプラントで所期性能達成 (2025)
<https://www.mhi.com/jp/news/250912.html>
- (2) 三菱重工業株式会社プレスリリース、三菱重工と ICM 社、バイオエタノール膜分離脱水効率向上に向け戦略的提携に合意 (2025)
<https://www.mhi.com/jp/news/25110501.html>

-
- (3) ICM, Inc. ICM and MHI form strategic alliance to advance ethanol dehydration efficiency (2025)
<https://icminc.com/icm-and-mhi-form-strategic-alliance-to-advance-ethanol-dehydration-efficiency/>
 - (4) 日本ガイシ株式会社, <https://www.ngk.co.jp/rd/subnano/>