

バイオマス燃料製造による焼酎粕処理プロセスの開発

宮崎大学 工学教育研究部 塩盛 弘一郎・工学部 濱田百合香・あなぶきグループ 池田 勇人

1. 焼酎製造と焼酎粕処理の現状

焼酎は、九州における代表的な蒸留酒であり、特に南九州では甘藷を主原料とする芋焼酎が生産されている¹⁾。以前、芋焼酎は独特の臭いがあることから、地元根付いた酒として主に南九州で愛飲されてきた。その後、焼酎製造の技術革新が進み¹⁾、甘藷独特の芳醇な香味を有した蒸留酒として、お湯割りやロックなど多様な飲み方が可能で、酔い覚めの良いことから消費者に広く受け入れられるようになり、出荷量および売上額が年々増加している。宮崎県での焼酎売上額および出荷額も年々増加し、平成22年度は全国2位であった売上額は平成26年度に1位となり、その後4年間連続で1位を維持している(図1)。一方、焼酎製造量の増加と共に焼酎製造過程で生じる焼酎蒸留粕の排出量も増加している。焼酎蒸留粕は、焼酎蒸留が減圧蒸留なのか常圧蒸留なのかの蒸留方法、および、スチームを焼酎もろみに吹き込む直接加熱なのか、蒸留釜の外側もしくは内部に設置された加熱配管から蒸留釜内の焼酎もろみを加熱する間接加熱なのかの加熱方法の違いにより発生する量が異なるが、宮崎県内では焼酎出荷量のほぼ2倍の量の焼酎蒸留粕が発生している²⁾。以前は、焼酎蒸留粕の全量が海洋投棄や畑地還元されていたが、ロンドン条約により2006年3月から廃棄物の海洋投棄が原則禁止となり、焼酎粕の全量が陸上処理されるようになった。焼酎粕は、産業廃棄物の廃酸に分類されている。宮崎県の焼酎粕の処理状況を図1に示す²⁾。焼酎粕の約40%は有償物や再生利用で利用されているが、約60%は減量化の中間処理や最終処分が行われており、有効利用されていない²⁾。自社工場内の処理施設へ設備投資が難しい中小の焼酎メーカーは、焼酎粕を廃棄物処理業者へ処理委託している場合が多くなっている。廃棄物処理業社では、焼酎粕の大部分が減量化と呼ばれる焼却処分で行われている。焼酎粕処理コストは、1tあたり6、7千円から1万数千円と処理方法によって幅があるものの、焼酎製造コストの大きな割合を占めている。近年、産業廃棄物の処理コストは高騰する傾向があり、より安価な焼酎粕の処理方法や資源化方法の開発が待望されている。

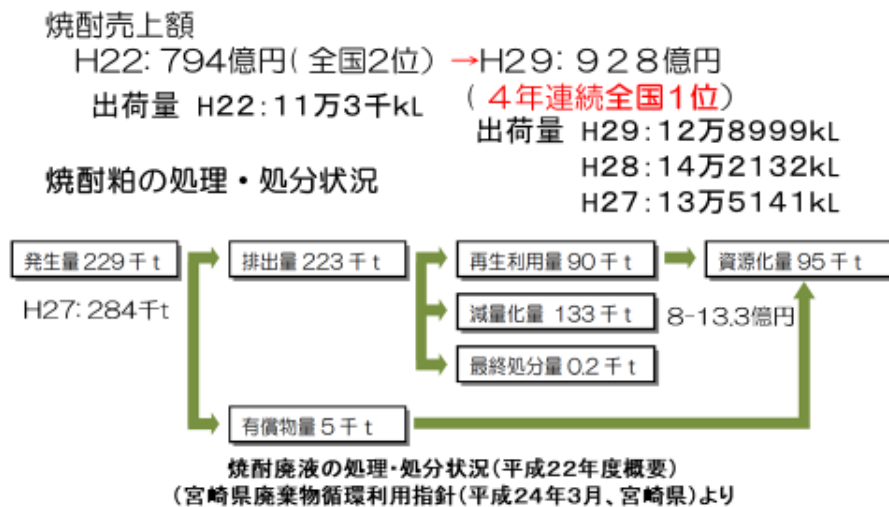


図1 宮崎県の焼酎産業の現状

焼酎粕の陸上処理が決定した後、種々の処理方法が提案され、技術開発が行われた。宮崎県廃棄物循環利用指針²⁾には焼酎蒸留粕の資源化方法として、堆肥化、飼料化、バイオガス化、エタノール化が挙げられ、それぞれの製造物として、堆肥、飼料、メタン、バイオエタノールが示されている。堆肥化³⁾や飼料化⁴⁾は、比較的中規模の焼酎メーカーに導入されており、堆肥や飼料が製造され、販売されている。焼酎メーカーによっては近くの農場や牧場、または、農場や牧場の経営を行い、堆肥や飼料の消費先を確保している場合もある。バイオガス化は、比較的大規模の処理設備であり、高温メタン発酵によりメタンを生産し、ボイラーの燃料として利用や各種発電機により発電への利用が行われている⁵⁾。エタノール化は、焼酎粕には1%未満ではあるが微量のエタノールが残っており、このエタノールを回収して精製することにより、バイオエタノール燃料として利用する⁶⁾。

堆肥化や飼料化は、肥料や飼料としての製品規格に合致させて製品の認可を受ける必要があると共に、製造過程で衛生管理を厳密に行う必要がある。メタン発酵は、メタンガスの分離と利用が比較的容易であることから導入例は多いが、大きな発酵タンクとガスの精製と貯蔵の設備が必要で初期の設備費が高額となり、可燃性のメタンガスの取り扱いに注意が必要であると共にメタン発酵後の消化液の処理が必要など、課題が全く無いわけではない。エタノール化では、バイオエタノールとして自動車等の燃料に用いる場合は、精製して高純度エタノールとする必要があるが、エタノールは水と共沸混合物を形成することから、膜分離による精製プロセス⁷⁾が必要となり、設備と運転コストが高価となる。

焼酎粕の処理施設は、焼酎メーカーが単独で自社内に導入している場合もあるが、中小のメーカーでは協同組合を作り、処理施設を導入してきた。しかしながら、焼酎粕の処理施設が導入されてから10年以上が経過し、施設の老朽化も進み処理コストの増大や処理プラントの運転や維持が難しくなっている場合もある。また、廃棄物処理業者の委託処理の価格と競合するようになり、廃棄物業者への委託処理に切り替える場合も進んできており、焼酎粕の再資源化率や有効利用率が高くなっていない。

2. 再発酵・蒸留・固液分離を統合したバイオ燃料製造による焼酎粕処理プロセスの開発

2.1 減圧蒸留焼酎粕の再発酵によるエタノール生産

著者の一人の池田は、焼酎粕に含まれるエタノールを、蒸留方法を工夫して効率よく取り出して利用するために種々の条件で焼酎粕の蒸留実験を行っていた。その中で、蒸留後に当初焼酎粕に含まれていたエタノール総量に比べ留出液のエタノール総量が増加する現象を見いだした。そこで、塩盛らと共同で焼酎粕の蒸留実験を詳細に行い、焼酎粕の蒸留後にエタノールが増加していることを確認した。この時使用した焼酎粕は、減圧蒸留により製造された焼酎の蒸留粕(減圧蒸留焼酎粕)であった。減圧蒸留操作は、蒸留釜の中を減圧して行われ、もろみの温度が50~60℃で沸騰がおこり、蒸留される。減圧蒸留により製造された焼酎は、一般的に淡泊なすっきりとした香味となる。減圧蒸留は蒸留温度が低いことから、焼酎もろみに含まれるデンプンからグルコースを経てエタノールへと変換する各種酵素群や酵母の生体触媒活性が残っていることが予測された。そこで、減圧蒸留焼酎粕に含まれる糖化酵素活性および酵母の生菌を測定した。その結果の一

例を図 2 に示す。減圧蒸留焼酎粕に含まれる糖化酵素活性は、40℃とほぼ同じ酵素活性が 60℃まで維持されており、70℃では大きく低下した。また、宮崎県の焼酎メーカーで広く使用されている宮崎酵母は、加熱処理しないときに比べ、50℃で 1 時間加熱すると生菌数は 1 万分の 1 の約 10^3 個まで減少した。55℃以上の熱処理では酵母の生菌は確認できなかった。一方、焼酎の発酵を行い、約 1 時間の減圧蒸留を行った後に得られた焼酎粕は、60℃より高い温度で減圧蒸留が行われたにも関わらず生菌を 10^3 個以上確認することができ、減圧蒸留焼酎粕には酵母が生存していることがわかった。減圧蒸留の行われる 60℃程度の温度で減圧蒸留焼酎粕には糖化酵素活性および酵母生菌のいずれも残っており、デンプンからグルコース、そしてエタノールへの物質変換能力が存在していることがわかった。これにより、先の減圧蒸留焼酎粕を蒸留する過程でエタノールが増加した現象は、蒸留過程で糖化とエタノール発酵が進みエタノールが増加したためと考えられる。

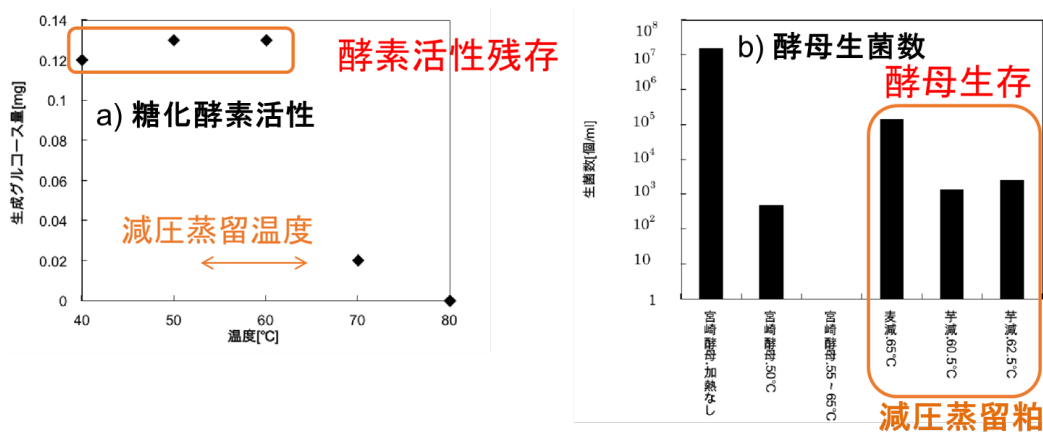


図 2 芋焼酎減圧蒸留粕の a)糖化酵素活性および b)酵母生菌数

そこで、減圧蒸留焼酎粕にデンプンまたはグルコースを添加することでエタノールが生成されるかを確認した。グルコースまたは種々のデンプン源を減圧蒸留焼酎粕に添加した場合の発酵日数によるエタノール生成量を図 3 に示す。グルコースを添加した場合、3 日目よりエタノールが生成し始め、5 日以降は約 10wt% で一定となった。さつまいもを添加した場合は 4 日目にエタノールが増加し、その後少しずつ増加し 8 日後に約 2wt% となった。中華麺またはうどん麺の場合は、エタノール

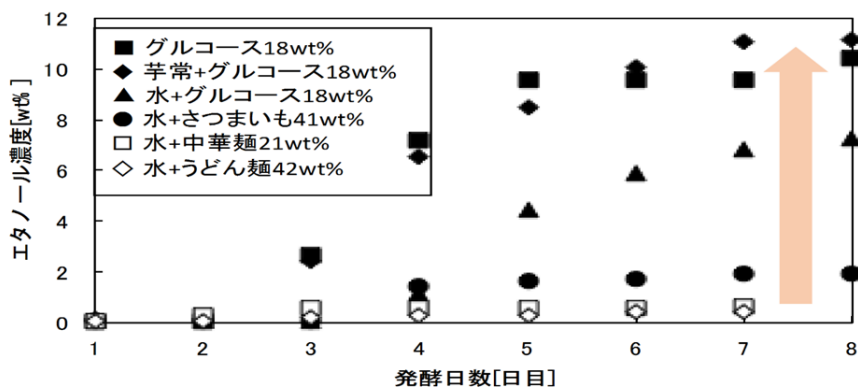


図 3 芋焼酎の減圧蒸留焼酎粕にグルコースまたは各種デンプン源を添加した場合の発酵日数によるエタノール濃度の変化

ル生成量が少なく約 1wt%のエタノール生成となった。麺類の場合、発酵が進んでも麺の形状が保たれており、うまく糖化できなかったと考えられる。さつまいもの場合、糖化とエタノール発酵が進み、さらに発酵条件を最適化することにより 5wt%程度のエタノールが生成されることを確認した。以上の様に減圧蒸留焼酎粕は、グルコースまたは適切なデンプン源を加えることによりエタノールを生産することが確認された。一方、常圧蒸留による焼酎の製造から排出された蒸留粕(常圧蒸留焼酎粕)は、100℃付近まで蒸留温度が高くなるため、糖化酵素群と酵母は失活しており、そのままではエタノール製造に利用できなかった。そこで、常圧蒸留焼酎粕に市販の麴と酵母を追加してデンプン源またはグルコースを添加するとエタノール生産が可能であることを確認した。

2.2 焼酎粕処理プロセスの構築

減圧蒸留焼酎粕にはデンプンからグルコースを経てエタノールを生産する物質変換能力があることから、エタノール製造を中心とした焼酎粕処理プロセスを構築することとした。また、本焼酎粕処理プロセスの構築のために新しい技術や高度なプロセスは利用せず、既存のプロセス、すなわち“ローテク”、の組み合わせにより全体を構築することとした。さらに、プロセスの構築にあたり、ガソリンへ添加する高純度エタノールの製造を目標とせず、ボイラー燃料の製造を目的とした。エタノールの蒸留による精製は、水との共沸点の 96wt%以上は不可能であり、ガソリンに添加する 99.5wt%まで精製するには膜分離などの高度分離法⁷⁾が必要であり、設置コストが高くなると予想された。70wt%エタノールを燃料としたボイラーは市販されており、プロセスの熱源として利用でき、余剰スチームによる発電も可能と考えた。さらに、エタノール蒸留後の蒸留粕の固液分離により得られる固形分も燃料として利用することとした。固形分は堆肥や飼料として利用することも可能であるが、製造時の衛生管理や製品の品質保証に不安が残され、販売先の開拓や確保が難しいと考えた。固液分離の廃液は、クエン酸などの有機物が溶解しており COD が高いことから、従来の生物処理槽による排水処理に加え、微生物燃料電池による発電も検討することとした。これらを統合

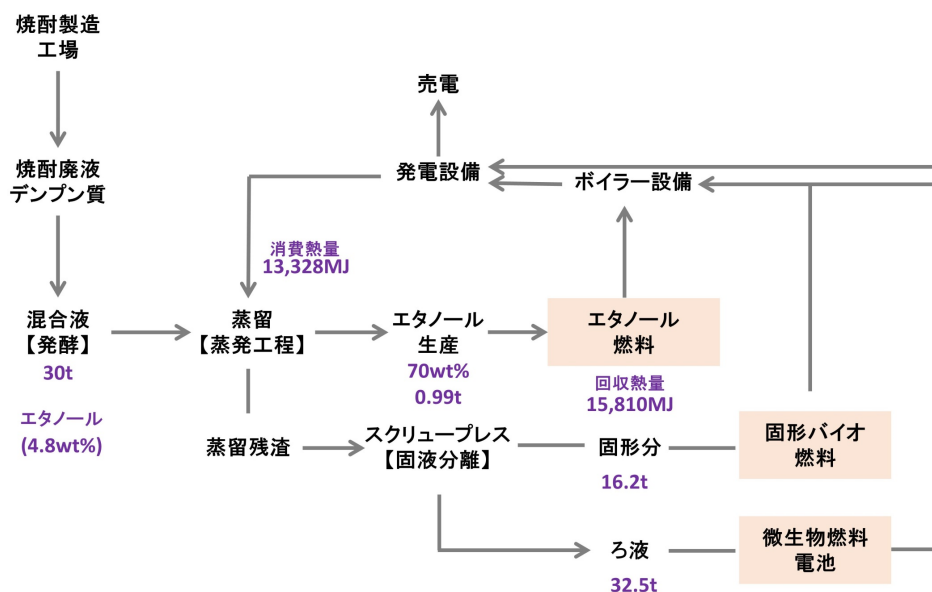


図 4 焼酎バイオマス燃料製造による焼酎粕処理プロセス

して、焼酎粕の全てをエネルギーとして利用する焼酎粕処理プロセスを図4に示すように構築した。このプロセスに従い、再発酵、エタノール蒸留および固液分離の各段階の試験と評価を行った。

2.3 多段棚段精留塔によるエタノール蒸留

焼酎粕にデンプン源またはグルコースを加えエタノール発酵して生成したエタノールは、蒸留により回収することとした。(株)本村製作所製(福岡県大川市)のアロマ減圧水蒸気蒸留装置(図5左側)を転用し、発酵もろみの減圧蒸留を行った。留出した留出液を再度蒸留釜に入れ蒸留を繰り返し、エタノール燃料として必要な70wt%以上の純度とするためには3回の蒸留を繰り返す事が必要であった。そこで、エタノールの精留効果を高めるために蒸留釜の上部の蒸気が上昇する部分に図5右側の棚段精留塔を設置する改造を行った。

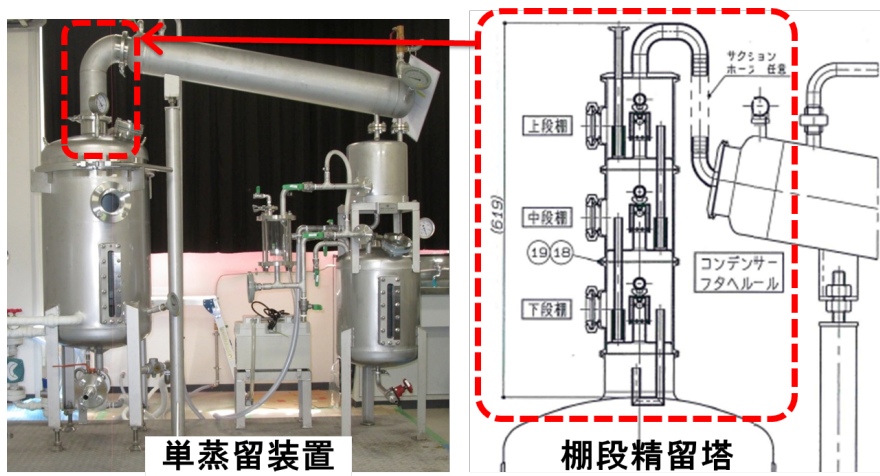


図5 単蒸留装置(左)と多段棚段精留塔への改造(左)

この多段精留塔を設置した蒸留装置を用いて、焼酎粕に10wt%となるようにエタノールを添加した模擬焼酎もろみの減圧蒸留を行った。蒸留時間と蒸留釜および各棚段の温度の関係を図6左側に示す。加熱開始後、発生した蒸気が棚段に達し各棚段の温度が上昇して塔頂より留出が開始すると、留出液の全量を最上段の棚段に返送し全還流状態を保った。各棚段の温度がほぼ一

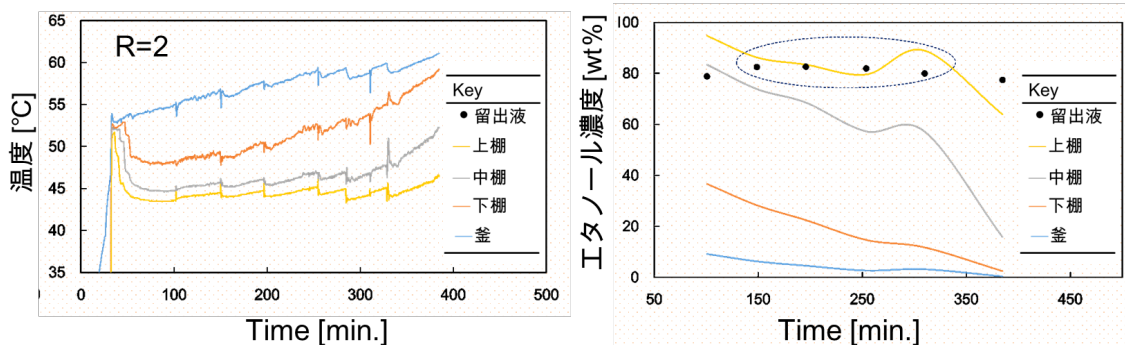


図6 多段棚段精留蒸留装置による模擬焼酎もろみの蒸留挙動. 蒸留釜と各棚段の温度(左)および蒸留釜、各棚段と留出液のエタノール濃度(右)

定となったら還流比($R = (\text{塔頂への戻液量}) / (\text{留出液量})$)を設定値に設定して蒸留を行い、留出液を採取した。各棚段の温度と蒸留器の内部の圧力のデータよりエタノール濃度を算出し、蒸留に伴う各棚段のエタノール濃度の変化を図6右側に示す。採取した留出液のエタノール濃度もプロットした。釜内および下段の棚段エタノール濃度は蒸留の進行と共に緩やかに低下した。一方、上段の棚段のエタノール濃度は、蒸留が進行してもほぼ一定に保たれ、留出液のエタノール濃度とほぼ同じ約 80wt%であった。このときのエタノール回収率は 90%以上であった。単蒸留装置では留出が始まったときのエタノール濃度は高いが、蒸留の進行と共にエタノール濃度は低下し、得られる留出液全体のエタノール濃度は低くなる。このため、エタノール濃度とエタノール回収率が相反する。多段棚段精留蒸留装置を用いることにより 1 度の蒸留操作で 80wt%のエタノールを高回収率で得られることが確認できた。

2.4 高分子凝集剤を用いたスクリープレスによる固液分離

芋焼酎の焼酎粕は未反応のデンプンや各種多糖類、セルロースなどの繊維などの芋の組織などが含まれており、固形分の粘着性が高く、固液分離した固形分の含水率を低くすることが難しい。減圧蒸留芋焼酎粕を再発酵した蒸留粕および芋焼酎粕を、各種の固液分離操作による固液分離試験を行い、分離した固形分の含水率を調べた。その結果、(株)北陵(北海道釧路市)のスクリープレスを用いた高分子凝集剤を添加した固液分離操作が固形分の含水率を80wt%以下と低くできることがわかった。その操作の様子を図7に示す。pH調整とカチオン性とアニオン性の高分子凝集剤を添加した蒸留粕は、透明感のある上清とブロックが生成していることがわかる。この状態でスクリープレスにより圧搾することで、含水率 74%の固形分を得ることができた。従って、(株)北陵のスクリープレスを用いた固液分離方法を本処理プロセスに採用することとした。

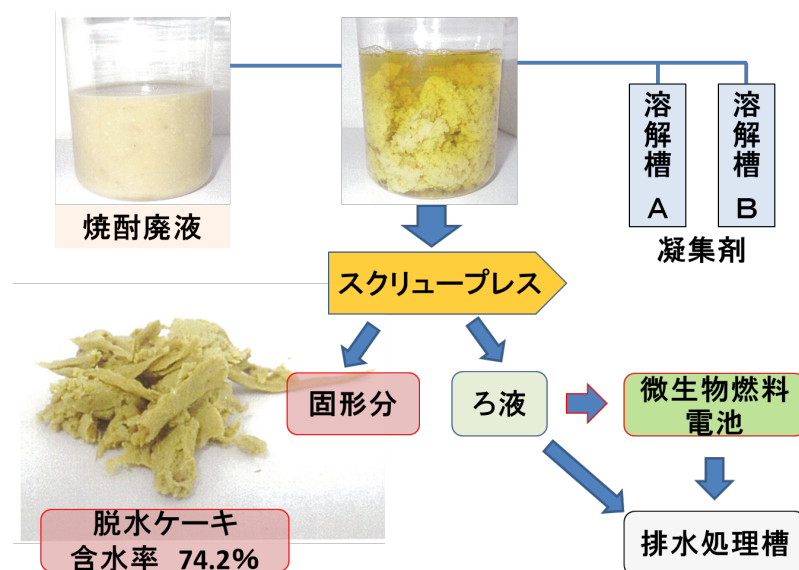


図7 高分子凝集剤を用いたスクリープレスによる固液分離操作

3. バイオ燃料製造による焼酎粕処理プロセスのミニプラント建設と実証試験

3.1 焼酎粕処理ミニプラントの建設

芋焼酎減圧蒸留粕の再発酵、多段棚段精留蒸留装置によるエタノール燃料製造、スクリーンレスによる固液分離による固形燃料製造のそれぞれの試験結果を考慮し、図 8 に示す処理プラントを設計し、宮崎大学産学・地域連携センターに隣接した敷地に建設した。固液分離後の排水は、生物処理槽による処理とした。

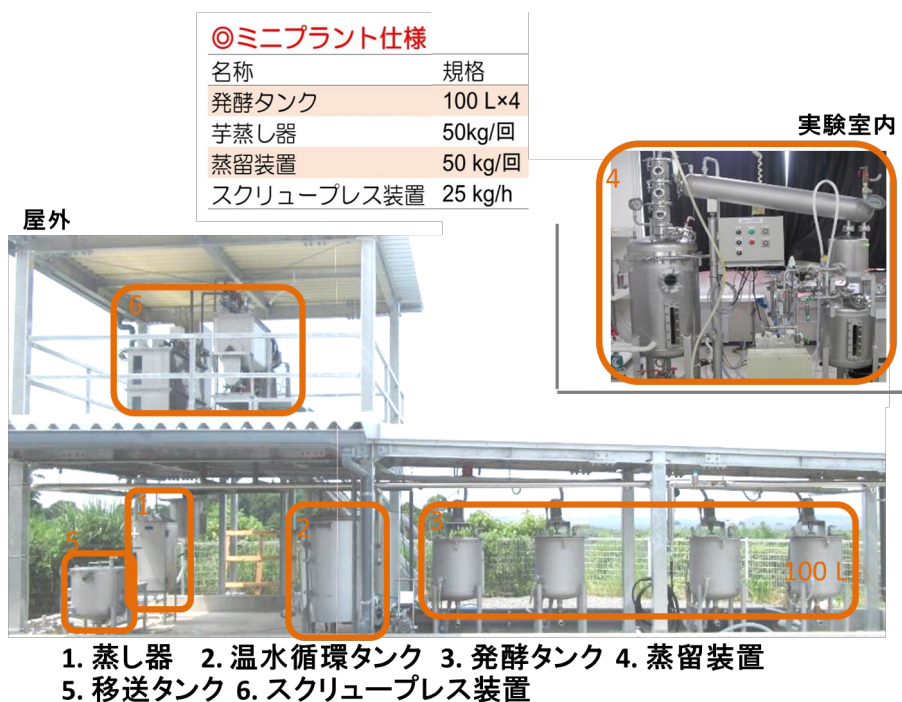


図 8 焼酎粕処理プロセスのミニプラントの全景と設備およびそれらの仕様

焼酎粕を再発酵するタンクは、100L を 4 基設置し、1 日 50-80kg の蒸留粕にデンプン源の蒸し芋またはグルコースを添加して 4 日間で再発酵し、5 日目に排出して蒸留器へ移送し、蒸留を行うこととした。蒸留器は、実験室に設置した装置を用い、50kg ずつ 2 回を 8 時間で行うこととした。蒸留後に蒸留釜に残った蒸留粕は、実験室から移送タンクに移送し、スクリーンレス固液分離装置へ連続的に送液して、中和スラリー、カチオン性およびアニオン性高分子凝集剤水溶液を連続的に添加・混合後に圧搾することとした。このときのスクリーンレスへの混合液の供給速度は 25kg/h となるように蒸留粕、中和スラリーおよび凝集剤水溶液の送液量を調整し、再発酵もろみの全量が 8 時間で処理できるようにした。

3.2 蒸留粕処理ミニプラントによる運転結果

蒸留粕処理ミニプラントの発酵タンクを用いて、蒸し芋の添加量を変えて再発酵を行った結果の一例を図 9 に示す。蒸し芋の添加量が増加すると共にエタノール濃度は高くなり、蒸留粕とほぼ同量の蒸し芋を加えると約 8wt% のエタノールが製造できた。

再発酵もろみを多段棚段精留蒸留装置で蒸留した結果の一例を図10に示す。再発酵後のエタノール濃度が異なっても回収した留出液のエタノール濃度は80wt%と高く保つことができた。再発酵もろみに含まれるエタノールが留出液へ回収される割合を表した回収率は、蒸留操作で異なる

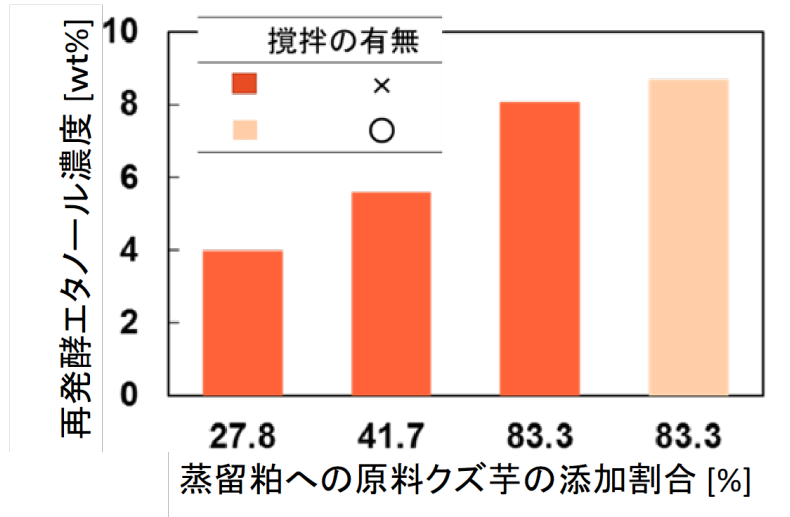


図9 焼酎粕処理ミニプラントによるエタノール再発酵結果

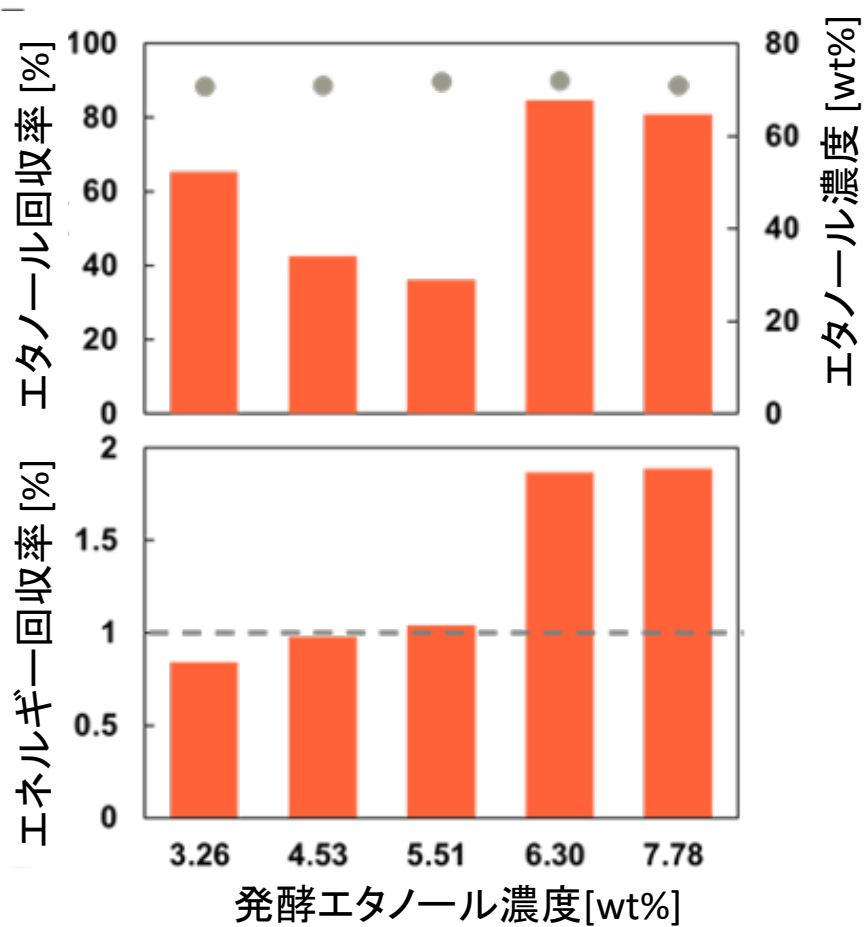


図10 焼酎粕処理ミニプラントによるエタノール蒸留結果

が再発酵エタノール濃度が高いと高くなる傾向がみられた。エネルギー回収率は、回収されたエタノール水溶液の発熱量と蒸留操作に使用した蒸気量より算出した使用熱量との比とした。エネルギー回収率は再発酵エタノール濃度が 5wt% 以上の場合で 1 より大きくなり、蒸留に必要な熱量は、製造したエタノール燃料でまかなえることが確認された。蒸留操作の繰り返しや留出液の採取終了の設定により留出液の回収量とエタノール濃度が変わり、その値によってエタノール回収率とエネルギー回収率も変わる。蒸留の操作条件を最適化することで、エタノール回収率とエネルギー回収率は、高められると考えられる。

蒸留後の蒸留粕をスクリープレスによる固液分離し、得られた固形分の脱水ケーキと脱水ケーキをペレットに加工した結果を図 11 に示す。中和スラリーと高分子凝集剤の添加量を最適化した結果、含水率 74wt% の脱水ケーキを得ることができた。さらに脱水ケーキからペレットを作成したところ良好に成形することで、ペレットの含水率は 23wt% であった。脱水ケーキおよびペレットのバイオマスボイラーでの燃焼が可能であることも確認し、燃料として発熱量や組成の評価も行った。



図 11 焼酎粕処理ミニプラントによる固液分離結果

3.3 蒸留粕処理ミニプラントによるバイオ燃料製造結果のまとめ

焼酎粕を種々の処理条件で再発酵、蒸留および固液分離を行った結果より、約 15t の焼酎粕を処理した場合に製造されるエタノール燃料、固形燃料および排水の見積もり量を算出し、表 1 にまとめた。本処理プロセスにより、約 15t の蒸留粕から約 1t の 70wt% エタノール燃料と約 16t の固形

表 1 蒸留粕処理ミニプラントによるバイオ燃料製造量の見積もり

原料		添加量
発酵	焼酎蒸留廃液 (固形分7wt%)	14.9 t
	くず芋	12.4 t
	加水	2.8 t
固液分離	消石灰, 凝集剤水溶液	36 t
製造物		製造量
	70wt% エタノール燃料	0.99 t
	固形バイオ燃料 (水分率80%以下)	16.2 t
	最終排水	32.5 t

燃料を製造できると見積もられた。しかしながら、固液分離で pH 調整スラリーと凝集剤水溶液を再発酵もろみとほぼ同量添加する必要であり、固液分離後の廃水が約 30t 発生することとなった。今後、固液分離プロセスを再検討し、最終廃水が増えない操作方法もしくは固液分離プロセスに代替する必要があると考えている。

4. 今後の取り組み

焼酎粕処理ミニプラントの運転結果に基づき、処理プロセスを再検討して、焼酎粕を1日 15t 処理する実証プラントを設計して宮崎県内に建設する計画である。その実証運転を行い、焼酎粕からバイオマス燃料の製造に特化した処理プロセスの有効性を確認する。本処理プロセスの運転と実証をきっかけとしてバイオマス燃料の利用技術が発展し普及することを期待している。

5. 参考文献

- (1) 小川喜八郎, 中島勝美; 本格焼酎の来た道, 金羊社 (2007).
- (2) 宮崎県; 宮崎県廃棄物循環利用指針, p.18-24 (2012).
- (3) 工藤哲三; 焼酎粕のコンポスト化技術の開発, 日本醸造学会誌, 96(5), 307-313 (2001).
- (4) 林國興; 焼酎粕の飼料利用, 日本暖地畜産学会報, 55(2), 101-107 (2012).
- (5) 藤原誉司; 甘藷製焼酎粕のメタン発酵処理によるリサイクルシステム, 化学工学, 83(2), 92-95 (2019).
- (6) 幡手泰雄, 愛甲涼子, 大角義浩, 上村芳三, 海陸大志, 下田雅彦, 岩田大輔, 柏田 雅徳, 河野恵宣; 蒸留による焼酎廃液処理の新技术, 鹿児島大学工学部研究報告, 39, 117-120 (1997).
- (7) 佐藤公則, 水野豪仁, 中根 堯; バイオエタノールの濃縮・脱水, 膜, 31(1) 20-21 (2006).