第 3 章

エタノール、ジスチラーズコーンオイルおよびトウモロコシ併産物の乾式粉砕製造

序説

米国は世界のバイオ燃料（エタノールとバイオディーゼル）**生産のリーダーであり**、これは化石燃料への依存を軽減し温室効果ガス排出量を低減するためにバイオ燃料を使用することを求める政府の指示とともに、高い農業生産性とインフラによる結果である。米国のエタノール生産量は過去 10 年にわたって増加し続けており、2017 年 55 億ブッシェルを上回るトウモロコシを使用して生産される量は 590 億リットルを超えると予測されている（**図 1**；再生可能燃料協会、2017 年）。米国のエタノール生産量の約 90 パーセントは 29 州に所在する 214 の乾式粉砕エタノールプラントで生産されている（**図 2**；RFA、2017 年）。結果として、2017 年の生産量はジスチラーズ併産物が月約 3,650 万メートルトルトン（**図 3**；RFA、2017 年）、ジスチラーズコーンオイルが 15 億 kg（**図 4**；RFA、2017 年）と予測されている。今日、米国のエタノール生産量に占める湿式プラントの割合はわずか約 10 パーセントにすぎず、トウモロコシ併産物の生産量の割合は比較的小さく、コーングルテンフィードはわずか 360 万メートルトルトン、コーングルテンミールは約 705,000 メートルトンである（**図 5**；RFA、2017 年）。ジスチラーズ併産物の生産量 3,650 万メートルトルトンのうち、約 1,100 万メートルトルトンが輸出され（**図 6**；RFA、2017 年）、70 パーセントは米国内で肉牛、乳牛、豚および家禽用の飼料に用いられる（**図 7**；RFA, 2017 年）。豚および家禽用飼料での DDGS 使用量は 2004 年以降増加傾向（**図 8**；RFA、2017 年）にあるが、肉牛は国内で生産される湿式および乾式のトウモロコシ併産物の約 45 パーセントを消費し、これに乳牛（31 パーセント）、豚（15 パーセント）、家禽（8 パーセント）が続く。

2005 年に米国のエタノールプラント数社が低脂肪 DDGS を生産する前に、シンスティレージからコーンオイルを部分的に抽出し始めた。コーンオイル抽出の第 1 のメリットは設備投資および稼働コストが比較的少なくて済むという点であり、その結果として時間をかけずに投資を回収することが可能で、新たな併産物を生産、販売することでエタノールプラントの収入が増加する。現在、ジスチラーズコーンオイルの約 51%は動物用飼料に用いられ（すなわち、家禽と豚）、45%はバイオディーゼル生産に、残り 5%は他の商業目的で使用されている（**図 9**；RFA、2017）。2017 年現在、ジスチラーズコーンオイルの輸出はごくわずかであるが、輸出市場の飼料メーカーが高エネルギー飼料補給剤として使用することを真剣に検討すべき、経済的かつ優れたエネルギー源である。

世界のバイオディーゼル生産で最も使用されている飼料原料は菜種油、大豆油およびパーム油であるが（IEA、2015 年）、近年は動物性油や回収した食用油の使用量が増加傾向にある（Licht、2013 年）。米国のバイオディーゼル生産においては、大豆油が最も費用のかからない飼料原料であるが、低コストでのバイオディーゼルの生産というこれからの目標を達成するために、ジスチラーズコーンオイルのような低コストの代替品を使用できるというメリットがあり、その一方、食用油脂との競合を最小限に抑えることもできる。脂肪や油脂に含まれるトリアシルグリセロールは、脂肪酸をグリセロールエステルからアシルエステル（例えばメチル、エチル）に変換するために用いられる化学プロセスであるエステル交換反応処理を施すと、ディーゼルエンジンに用いられる石油を一部置換する原料として使用することができる。トリアシルグリセロールは粘度が高いため、ディーゼルエンジンのシリンダーでの噴霧化が適切に行われず、燃焼効率の悪化、燃料の堆積、エンジン摩耗や故障に結びつくことから、この変換が必要である（Ziejewski ら、1986 年 a,b; Goering ら、1987 年）。

本章の目的はエタノール生産、コーンオイル抽出および DDGS 生産の基本原理を記載して、米国燃料エタノール業界が生産するトウモロコシ併産物の栄養特性および飼料価値についての理解を深めてもらうことである。

図1. 米国産エタノール生産量の推移

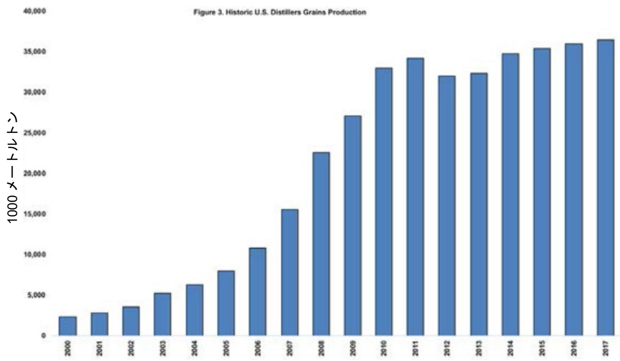


図2. 技術別のエタノール生産

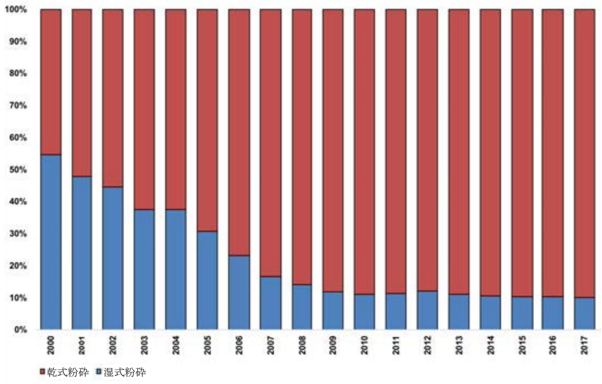


図5. 米国燃料エタノール併産物の生産量

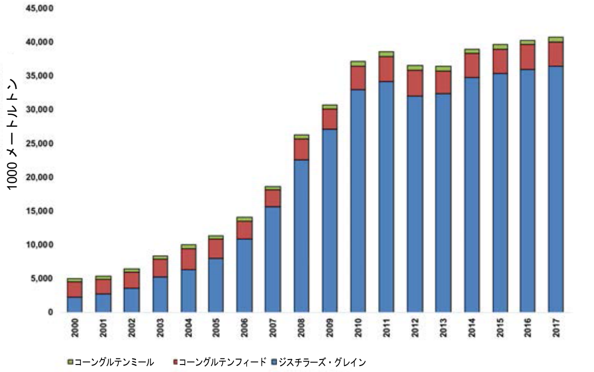


図3. 米国ジスチラーズ・グレイン生産量の推移

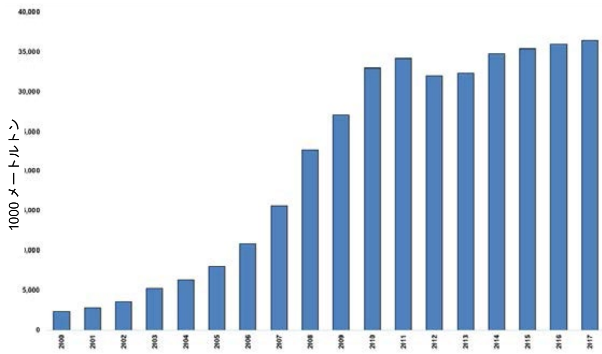


図6. 米国ジスチラーズ・グレイン輸出量の推移

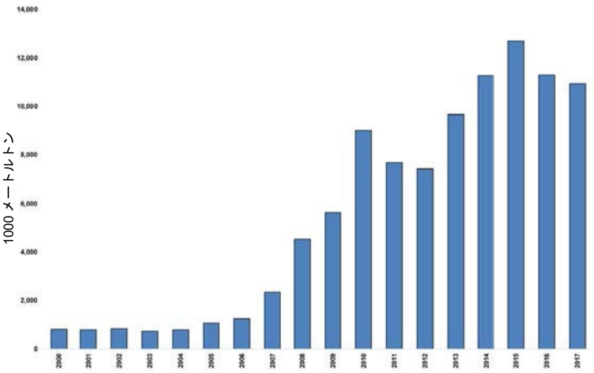


図4. 米国コーンジスチラーズオイル生産量の推移

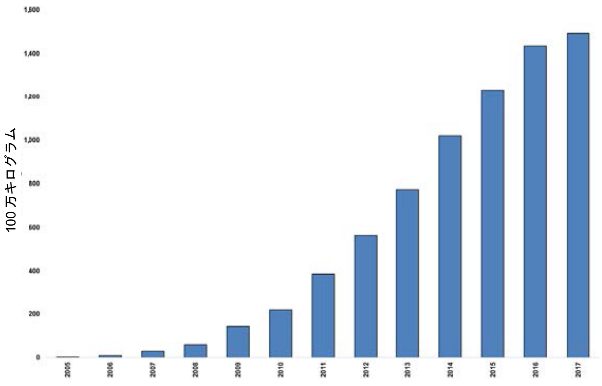


図7. 米国ジスチラーズ・グレインの輸出と国内消費

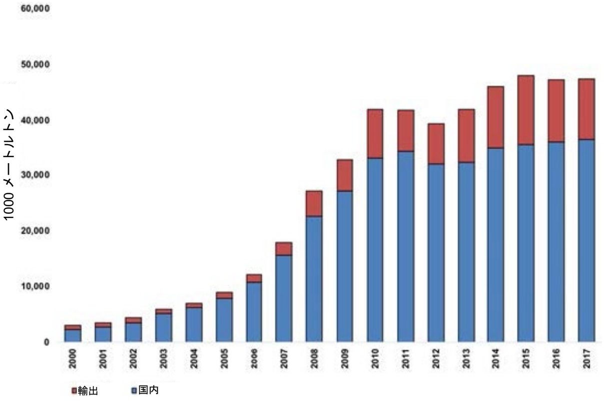


図 8. 米国産ジスチラーズ・グレインの動物種別消費量

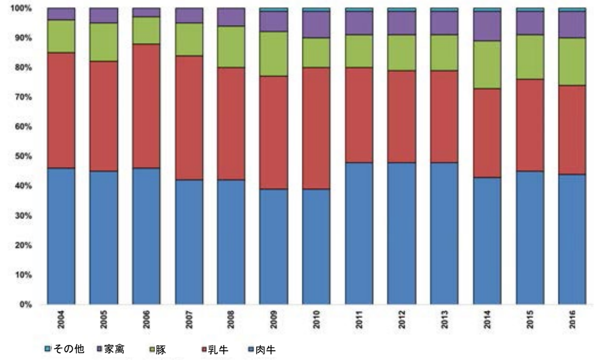
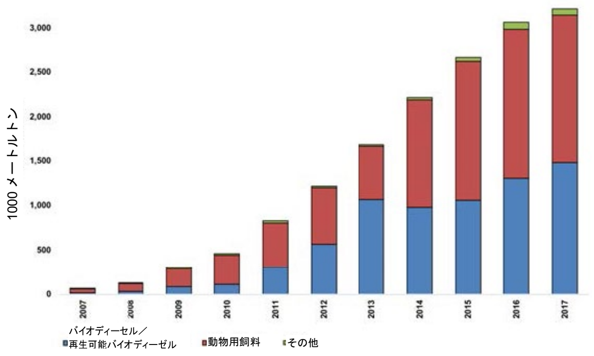


図 9. 米国のコーンジスチラーズオイルの消費量



デンプンからエタノールへの変換

米国のエタノール生産ではトウモロコシが主要なデンプン（グルコース）源である。サトウキビを除けば、トウモロコシによるエタノール収量が他の原料すべてを上回る（**表 1**）。しかしながら最近になって、トウモロコシ繊維とその他のセルロース原料をグルコースに変換してエタノール生産に使用する技術が開発された。グルコースをエタノールに変換した場合のエネルギー効率は約 51.4 パーセントで、二酸化炭素の生成は残る 48.6 パーセントに起因する。無水デンプンを原料としてエタノールを生産する場合の効率は約 56.7 パーセントである。エタノール生産に用いられる原料の栄養成分によって、生産されるジスチラーズ併産物の栄養組成が決まることになる。

表 1. 各種原料のデンプン含有率とエタノール収量（出典：Saskatchewan Agriculture and Food、1993 年）

原料	水分 (%)	デンプン (%)	エタノール収量 (L/MT)
デンプン	-	100.0	720
サトウキビ	-	-	654
大麦	9.7	67.1	399
トウモロコシ	13.8	71.8	408
オーツ麦	10.9	44.7	262
小麦	10.9	63.8	375

乾式粉砕エタノール生産

穀粒の微粉化

図 10 に示すように、乾式粉砕技術を用いたエタノール生産の最初のステップは、ハンマーミルでトウモロコシを粉砕して粒径を小さくすることである。ハンマーミルは高速で回転するハンマーチップでトウモロコシを粉砕する。粉砕されたトウモロコシの粒度は主にローターの体積、ハンマーチップの速度、ハンマーの数およびスクリーンの目開きで決まる（Dupin ら、1997 年）。ハンマーミルで用いられるスクリーンは通常その直径が 3mm～5mm の範囲である。穀粒の粒径はエタノール収量に影響を及ぼすことがあるため（Kelsall と Lyons、1999 年）、エタノール製造業者は非常に細かくトウモロコシを粉砕してエタノールの収量を最大限まで高める傾向にある。**表 2** から分かるように、5 ㎜のスクリーンを通過するように粉砕したトウモロコシ粒の収量は、8 mm のスクリーンを通過したものを 0.20 ガロン（0.85 リットル）上回る。

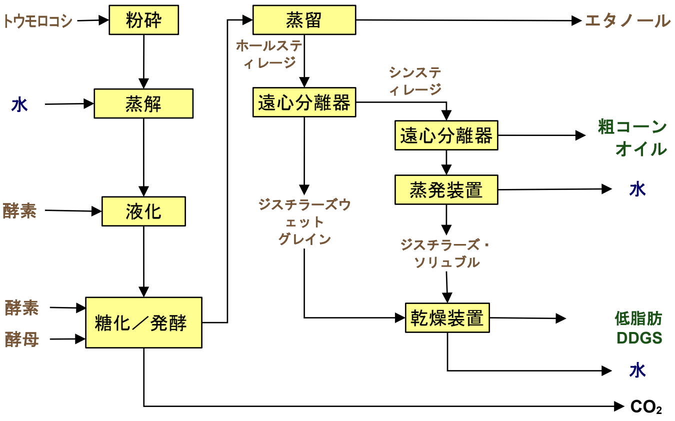


図 10. 乾式粉砕エタノールと併産物の生産プロセス

表 2. 粉砕トウモロコシ粒径別エタノール収量（出典：Kelsall と Lyons, 1999 年）

粒径	エタノール収量（ガロン／ブッシェル）
微粉砕トウモロコシ、5mm スクリーン	2.65
粗粉砕トウモロコシ、8mm スクリーン	2.45

蒸解と糖化

可溶性タンパク質、糖、非デンプン結合脂質の滲出を開始させるための添加物として、水と回収スティレージを粉砕したトウモロコシに加える（Chen ら、1999 年）。その後、デンプンをグルコースに加水分解し、酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)のためにデンプン分解酵素を加えてグルコースをエタノールに変換する蒸解のプロセスを実施する。この蒸解プロセスで用いられる一般的な温度は予備混合タンクでは 40～60℃、蒸解では 90～165℃、液化は 60℃である（Kelsall と Lyons、1999 年）。デンプンの糊化は 50℃～70℃の温度範囲で開始する。デンプンをグルコースに変換するプロセスで重要なステップは、デンプン糊化を完了させることである（Lin と Tanaka、2006 年）。糊化の進行中、デンプン顆粒に含まれるアミロースのほぼすべてが滲出するが（Han と Hamaker、2001 年）、可溶化アミロースから成る顆粒とゲルが膨らむため、粘度が高まる（Hermansson と Kidry matteran、1995 年）。

デンプン重合体を完全に加水分解するためには複数の酵素を組み合わせたものが必要である。アミラーゼ類はデンプン業界で最も広く用いられている熱安定酵素である（Sarikaya ら、2000 年）。アミラーゼ類には α アミラーゼまたはグルコアミラーゼが含まれる（Poonam と Dalel、1995 年）。糊化後すぐのデンプンの加水分解に用いる酵素は熱安定性のあるものでなければならない。酵素の費用はエタノール生産コストの約 10～20 パーセントを占める（Gregg ら、1998 年）。

エタノールプラントの中にはバッチ蒸解システムを採用しているところがあるが、連続蒸解システムで生産を行っているプラントもある（Kelsall と Lyons、1999 年）。バッチ蒸解システムでは、既知量のトウモロコシ粕を既知量の水と回収スティレージと混ぜ合わせる。連続蒸解プロセスでは、トウモロコシ粕、水および回収スティレージを連続的に予備混合タンクに投入する。予備混合タンクでは糊化に必要な温度をわずかに下回る温度に保たれ、マッシュはジェットクッカーを経由して連続的にポンプで送り込まれる。クッカーの設定温度は 120℃である。マッシュはクッカーから垂直カラムの最上部に入り、約 20 分かけて降下し、その後フラッシュチャンバーへと進み、80～90℃で液化する。液化のために高温に耐えるアミラーゼを穀物に対し 0.05～0.08 パーセントの重量濃度で添加する。液化／フラッシュチャンバーでの保持時間は約 30 分である。システム内の pH は 6.0～6.5 の範囲内で管理される。バッチシステムでは使用する酵素の数は連続システムよりも少なく、エネルギー効率も上回る。バッチシステムの主たるデメリットは時間単位の生産性または原料利用率が低下することである。

発酵

発酵は酵母によって糖をアルコールに変換するプロセスである。最も一般的に使用されている酵母は*Saccharomyces cerevisiae*（Pretorius、2000 年）であるが、これはこの酵母を使用すると発酵ブロスのエタノールを 18 パーセントという高濃度にすることができるからである。*Saccharomyces* が人間にとって摂取しても安全（GRAS）な食品添加物であると広く認められている酵母（Lin と Tanaka、2006 年）であるという理由もある。理想的な発酵では、約 95 パーセントの糖がエタノールと二酸化炭素に変換され、1 パーセントが酵母細胞の細胞内物質に変換され、4 パーセントがグリセロール等その他の生成物に変換される（Boultonet ら、1996 年）。酵母の費用はエタノール生産コストの約 10%を占める（Wingren ら、2003 年）。

予備発酵は発酵に望ましい数の酵母細胞を得るために実施するもので、3～5 億の細胞／ml になるまで 10～12 時間撹拌する工程である。発酵は温度約 33℃（Thomas ら、1996 年）、pH 約 4.0（Neish と Blackwood、1951 年）で起こり、48～72 時間続く（Ingledew、1998 年）。エタノールに加え、二酸化酸素も生成されるが、回収されるか、あるいは大気中に放出される。

効率よくエタノールを生産する上で、通常の酵母増殖の管理が重要なファクターとなる。酵母の活性は発酵装置の温度に大きく依存している。Torija ら（2003 年）の報告によれば、酵母の増殖と発酵に最適な温度はそれぞれ 28℃と 32℃である。*S. cerevisiae* の高温（35℃超）での発酵効率は低い（Banat ら、1998 年）。そのため、発酵装置には冷却システムが必要とされる。

エタノールプラントで発酵槽を管理する上での課題のひとつは、他の微生物による汚染を避けることである。微生物汚染はエタノール収量およびエタノールプラントの生産性を低下させる原因となる（Barbour と Priest、1988 年）。微生物汚染に関係する最も代表的な有機体は乳酸杆菌と野生酵母である。これらの微生物は *Saccharomyces cerevisiae* と栄養素（微量ミネラル、ビタミン類、グルコースおよび遊離アミノ態窒素）を競い合い、酢酸または乳酸といった阻害最終生成物を産生する。野生酵母である *Dekkera/Brettanomyces* は燃料アルコールの生産で問題となる（Abbott と Ingledew、2005 年）。現在、燃料エタノールプラントでは抗生物質を使用することで乳酸バクテリア汚染を低減している（Narendranath と Power、2005 年）。

エタノールの蒸留

発酵後、蒸留塔でエタノールを回収する。発酵槽から回収したエタノールには水が混入しているので、分子篩装置を用いて水分を除去し、純粋なエタノールを生産する。

コーンオイルの抽出

米国のエタノールプラントの大半（90 パーセント以上）が様々な油分抽出技術を用いて、DDGS の生産に先立ち様々な量の油を抜き取っているが、現在はコーンオイル抽出を行っていない残りのエタノールプラントもこの技術を採用する可能性があり、また、すでにコーンオイルの抽出を実施しているエタノールプラントでも、新しい技術が開発され、さらに多くの油が抽出されていることから、将来的にジスチラーズコーンオイルの抽出が増加することが考えられる。粗コーンオイルの生産はトウモロコシを使用するエタノールプラントで行われており、コーンオイルは DDGS 生産プロセスのシンスティレージ部分から抽出されている（CEPA、2011 年）。シンスティレージからコーンオイルを抽出するのは、発酵と蒸留の後であり、DDGS 生産のために乾燥する前である。コーンオイル抽出システムを既存のエタノールプラントに追加することで、プラントのエネルギー効率が向上するとともに、処理トウモロコシのメートルトン当たりの総燃料生産量が増加する。既存エタノールプラントにコーンオイル抽出設備を設置することで、エタノール生産量に影響を及ぼすことなく、バイオディーゼルの原料生産が促進される。

エタノール業界では様々なコーンオイル抽出技術が商業的に利用可能となっている。エタノール蒸留後にシンスティレージからコーンオイルを抽出するために、複数の独自開発プロセスが用いられている。エタノール業界の大半は、遠心分離を用いてホールスティレージからシンスティレージを取り出し、このシンスティレージからコーンオイルを抽出するプロセスを使用している（CEPA、2011 年）。シンスティレージにはトウモロコシに含まれる利用可能な油分の約 30 パーセントが含まれており、結果として得られる部分濃縮シンスティレージを加熱し、第 2 の遠心分離装置によってコーンオイルを抽出する。熱交換器では蒸気でシンスティレージの温度を上げて抽出を促進し、コーンオイルの抽出後に熱エネルギーはシンスティレージから熱交換器に回収され、新たに投入されるスティレージの加熱に用いられる。一般に、こうしたプロセスでは、様々に構成したデカンタ、遠心分離装置、および熱を用いて、併産物処理の工程から物理的に 30～70 パーセントの油分を分離する。こうしたプロセスから生産されるジスチラーズコーンオイルはすべて食用には適していない。しかし、コーンジャームからコーンオイルを抽出して食用に適した品質の高いコーンオイルをウェットミリングで生産する場合には、通常溶媒（ヘキサン）抽出が用いられる（Moreau、2005 年）。ヘキサン抽出は非常に効果的で、DDGS 中のコーンオイルの 90 パーセントを抽出することができるが、ヘキサン抽出施設を建設するための設備投資の高コストがエタノール業界でのこの技術を採用するうえでの足かせとなっている。現在、ヘキサンによる抽出を使用して DDGS からコーンオイルを除去している施設は 1 件だけ（Novita 社、サウスダコタ州ブルッキングズ所在）である。この施設では飼料グレードのコーンオイルと低脂肪（粗脂肪 3.5 パーセント）DDGS を生産している。

コーンオイル抽出をしない場合には、生産されるエタノール 3.8 リットル当たりの DDGS 生産量は 2.4kg で（CEPA, 2011 年）、一方コーンオイル抽出を行った DDGS の収量は、生産されるエタノール 1 リットル当たり約 0.06kg 減少し、これは 9.4 パーセントの低下となる。コーンオイルの除去は DDGS の栄養組成に影響を及ぼし、主として粗脂肪含有率が低下するが、エネルギー価およびタンパク質の含有量への影響には幅がある。低脂肪 DDGS を各種の動物に給与する場合の影響についての詳細な情報は、**第 13、15、17、18、20、21、24 および 25 の各章**を参照されたい。

併産物の生産

エタノールの蒸留後に残る水分と固形物はホールスティレージと呼ばれる。ホールスティレージは主として水分や繊維、タンパク質、油分から構成される。混合物であるこのホールスティレージは遠心分離で粗固形物と液体とに分離させる。シンスティレージと呼ばれる液体は更に遠心分離器にかけて油分を抽出し、その後蒸発装置で処理して余分な水分を除去し、乾物が約 30 パーセントの濃縮ジスチラーズ・ソリュブル（シロップ）を生産する。濃縮ジスチラーズ・ソリュブル(CDS)は地元の家畜生産者に販売するか、粗固形物と混合して乾燥させ、ドライド・ジスチラーズ・グレイン・ウィズ・ソリュブル（DDGS）にすることができる。ウェットケーキとも呼ばれる粗固形物には乾物が約 35 パーセント含まれており、乾燥させることなく地元の家畜生産者に販売するか、乾燥させてドライド・ジスチラーズ・グレインを生産するか、あるいは濃縮ジスチラーズ・ソリュブルと混ぜ合わせて乾燥させ、DDGS（乾物 88 パーセント）にすることができる。乾式粉砕エタノールプラントで生産される各種併産物の割合を**図 11** に示している。

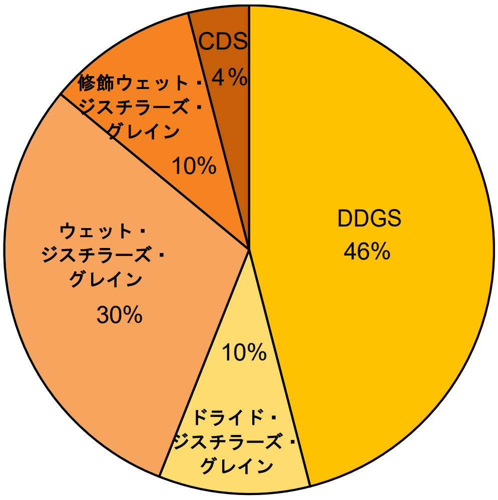


図 11. 乾式粉砕エタノールプラントで生産される各種併産物の割合（RFA、2017 年）

References

Abbott, D.A., and W.M. Ingledew. 2005. The importance of aeration strategy in fuel alcohol fermentations contaminated with Dekkera/Brettanomyces yeasts. Appl. Biochem. Biotechnol. 69:16-21.

Banat, I.M., P. Nigam, D. Singh, R. Merchant, and A.P. McHale. 1998. Ethanol production at elevated temperatures and alcohol concentrations: A review; Part-I Yeast In General. World J. Microbiol. Biotechnol.14:809-821.

Barbour, E.A., and F.G. Priest. 1988. Some effects of *Lactobacillus* contamination in scotch whisky fermentations. J. Inst. Brew. 94:89-92.

Boulton, B., V.L. Singleton, L.F. Bisson, and R.E. Kunkee. 1996. Yeast and biochemistry of ethanol fermentation.
In: Principles and Practices of Winemaking, BoultonB, SingletonVL, Bisson LF, Kunkee RE (eds). Chapman and Hall. New York, pp. 139-172.

California Environmental Protection Agency. 2012. California-Modified GREET Pathway for the Production of Biodiesel from Corn Oil at Dry Mill Ethanol Plants. Stationary Source Division, Release Date: November 3, 2011, Version 2.0. 40 pp.

Chen, J.J., S. Lu, and C.Y. Lii. 1999. Effect of milling on physicochemical characteristics of waxy rice in Taiwan.
Cereal Chemistry 76:796-799.

Dupin, I.V.S., B.M. McKinnon, C. Ryan, M. Boulay, A.J. Markides, P.J. Graham, P. Fang, I. Boloni, E. Haque, and C.K. Spillman. 1997. Comparison of energy efficiency between roller mill and a hammer mill. Appl. Engineering in Agric.13:631-635.

Goering, C.E., M.D. Schrock, K.R. Kaufman, M.A. Hanna, F.D. Harris, and S.J. Marley. 1987. Evaluation of vegetable oil fuels in engines. Proc. Int'l. Winter Meeting of ASAE, Paper No. 87-1586. St. Joseph, MO.

Gregg, D.J., A. Boussaid, and J.N. Saddler. 1998. Techno-economic evaluations of a generic wood-to-ethanol process: effect of increased cellulose yields and enzyme recycle. Bioresour. Technol.63:7-12.

Han, X.Z., and B.R. Hamaker. 2001. Amylopectin fine structure and rice starch paste breakdown. J. Cereal Sci. 34:279-284.

Hermansson, A.M., and S. Kidry matteran. 1995. Starch – A phase-separated biopolymer system. In: S.E. Harding, S.E. Hill and J.R. Mitchell, Editors, Biopolymer Mixtures, Nottingham University Press, UK. pp. 225-245.

International Energy Agency (IEA). 2015. World Energy Outlook 2015. Paris, 200 pp.

Ingledew, W.M. 1998. Alcohol production by Saccharomyces cerevisiae: A yeast primer. Chapter 5 In: The alcohol textbook. 3rd ed. K.A. Jacques, T.P. Lyons and D.R. Kelsall Ed. Nottingham University Press. Nottingham, UK.

Kelsall, D.R., and T.P. Lyons. 1999. Grain dry milling and cooking for alcohol production: designing for 23 percent ethanol and maximum yield. Chapter 2. In: The alcohol textbook. 3rd ed. K.A. Jacques, T.P. Lyons and D.R. Kelsall Ed. Nottingham University Press. Nottingham, UK.

Licht, F.O. 2013. World Ethanol and Biofuels Report, London, Agra Inf.

Lin, Y., and S. Tanaka. 2006. Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects. Appl. Microbiol. Biotechnol. 69: 627-642.

Moreau, R.A. 2005. Corn oil in edible oil and fat products. In: Baileys Industrial Oil and Fat Products, Vol. 2: Edible Oil and Fat Products:Edible Oils, ed. F. Shahidi, pp. 149-172. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Narendranath, N.V., and R. Power. 2005. Relationship between pH and medium dissolved solids in terms of growth and metabolism of Lactobacilli and Saccharomyces cerevisiae during ethanol production.
Appl. Environ. Microbiol. 71: 2239-2243.

Neish, A.C., and A.C. Blackwood. 1951. Dissimilation of glucose by yeast at poised hydrogen ion concentrations.
Can. J. Technol. 29:123-129.

Poonam, N. and S. Dalel. 1995. Enzyme and microbial systems involved in starch processing. Enzyme Microb. Technol. 17:770-778.

Pretorius, I.S. 2000. Tailoring wine yeast for the new millennium: Novel approaches to the ancient art of winemaking. Yeast 16:675-729.

Renewable Fuels Association. 2017. Annual Industry Outlook. http://www.ethanolrfa.org/pages/annual-industry-outlook

Sarikaya, E., T. Higassa, M. Adachi, and B. Mikami. 2000. Comparison of degradation abilities of α- and β-amylases on raw starch granules. Proc. Biochem. 35:711-715.

Saskatchewan Agriculture and Food. 1993. Establishing an Ethanol Business.

Thomas, K.C., S.H. Hynes, and W.M. Ingledew. 1996. Practical and theoretical considerations in the production of high concentrations of alcohol by fermentation. Proc. Biochem. 31:321-331.

Torija, M.J., N. Rozès, M. Poblet, J.M. Guillamón, and A. Mas. 2003. Effects of fermentation temperature on the strain population of Saccharomyces cerevisiae .
International J. Food Microbiol. 80: 47-53.

Wingren, A.M., Galbe, and G. Zacchiu. 2003. Techno-Economic Evaluation of Producing Ethanol from Softwood: Comparison of SSF and SHF and Identification of Bottlenecks. Biotechnol. Prog. 19:1109-1117.

Ziejewski, M., H. Goettler, and G.L. Pratt. 1986a. Comparative analysis of the long-term performance of a diesel engine on vegetable oil-based alterantive fuels. SAE Technical Paper Series, No. 860301. Warrendale, PA.

Ziejewski, M., H. Goettler, and G.L. Pratt. 1986b. Influence of vegetable oil based alternative fuels on residue deposits and components wear in a diesel engine. SAE Technical
Paper Series, No. 860302. Warrendale, PA.