

ビール粕を原料とする成形炭の製造装置の開発[†]

岡本裕行¹・佐藤清仁¹・八木紀依¹・井上雅夫²・山崎秀一²・石田清治²・芝田隼次^{3††}

¹アサヒビール(株)生産技術研究所, 302-0106 茨城県守谷町緑 1-1-21

²新日本空調株新事業開発部, 103-0021 中央区日本橋本石町 4-4-20

³関西大学工学部 化学工学科, 564-8680 吹田市山手町 3-3-35

ビール粕を原料として成形炭を製造するプロセスの開発と得られたビール粕成形炭の物性評価を行った。高含水率のビール粕(脱水後 67 wt%)を熱風で乾燥させ、加熱しながら高圧で圧縮して成形品を作成し、これを低酸素雰囲気下で炭化することにより、一定の大きさの炭化物を得た。成形時にバインダーは不要であった。成形品の炭化時に発生する乾留ガスの燃焼排気の一部還流させて炭化を行う方法(熱風循環式炭化法)を採用し、高い収率で品質にムラのない成形炭が得られた。ビール粕成形炭は約 27 MJ/Kg の高い発熱量を有していた。この発熱量は備長炭と同等であり、オガ炭より約 13% 程度低かった。ビール粕成形炭の窒素含有率、リン含有率は、備長炭やオガ炭に比べて非常に高く、窒素は 9~20 倍、リンは 40 倍以上の含有率であった。ビール粕成形炭はリン、カルシウム、マグネシウムなど豊富なミネラルを含み、天然ミネラル素材としての活用も期待できる。

緒 言

ビール工場では、大麦の穀皮を主体としたビール粕が仕込工程(糖化工程)より排出される。国内全体でその量は平成 11 年度には年間約 70 万 ton(含水率 80% 相当)に達したと推定される。これまでビール粕は乳酸発酵処理を施した後、主に乳牛肉牛用飼料として利用されてきた。

ビール工場のゼロエミッションを推進し、安定したビール生産を保証するためには、ビール粕の有効利用の多様化が望まれる。ビール粕の有効利用には、これまで様々な方法が検討されている。紙の原料への利用(Maeda, 1994)、加水分解によるガス化(Behmel and Meyer-Pittroff, 1995)、ビール粕の蛋白質を分離して養殖魚の飼料とする方法(Kishi, 1996)、下痢症状改善薬とする方法(Ishiwaki, 1999)などの研究が試みられている。一方、ビール粕から活性炭を製造する試み(Hayashi *et al.*, 2000)もある。筆者らは、ニッケル触媒存在下でビール粕を亜臨界状態で処理することによりメタンを主成分とする気体燃料に変換できることを確認し、報告(Okamoto *et al.*, 1999)している。

Yatagai (Yatagai, 1997) は、その著書の中で木炭の用途について従来の燃料用途の他に、広い比表面積を生かして各種吸着材、土壌改良材、水質浄化材などに利用できることを述べている。また、Kishimoto (Kishimoto, 1990) は木炭を調理用燃料として使用すると、燃焼時に発生する遠赤外線的作用ですばやく加熱され、うまみ成分が漏出しないことを指摘している。ビール粕を原料として炭を作る研究は行われておらず、ビール粕の有効利用法の 1 つとして検討する価値がある。低コストでビール粕から炭を製造するには、バインダー無添加で成形する必要があり、環境上の問題を考えると炭化時に煙が出ない方法で炭化することが望まれる。

本研究では、上記のような技術的課題を念頭において、ビール粕から成形炭を造ることを目的として、ビール粕の乾燥、成形、炭化工程について検討した。すなわち、ビール粕を乾燥する装置

の開発とその特性の試験、乾燥ビール粕をバインダー無添加で成形する装置の開発とその特性の試験およびビール粕成形品を無煙で炭化する装置の開発とその特性の試験を行うと共に、得られたビール粕成形炭の特性を明らかにした。

1. 実 験

1.1 原料および試薬

実験に使用したビール粕はビール工場から入手した。ビール粕は機械的脱水を行って、含水率 67 wt% としたものをを用いた。含水率は 105°C 恒量乾燥により、灰分は 600°C 恒量燃焼により求めた。元素組成は元素分析計(Carlo Erba, NA-1500)で、発熱量は発熱量計(島津製作所, CA-4 PJ)で測定した。乾燥基準でのビール粕の物性は Table 1 に示されている。

1.2 乾燥装置および乾燥実験の方法

ビール工場のボイラ廃熱あるいは炭化時に発生する廃熱を利用することを前提に乾燥装置の検討を行った結果、流動床方式の乾燥装置とした。熱風を下から送り込んで脱水済みビール粕を乾燥させる方式である。Fig. 1 に乾燥装置のフローシートを示す。乾燥ビール粕は乾燥炉の下部から出るものと、サイクロンの下部から出るものに分かれる。それぞれ平均粒子径が異なるため、粗粒と細粒とに呼び分けることとする。粗粒と細粒をレーザー回折法を原理とする粒度分析計(LEEDS & NORTHRUP, マイクロトラック粒度分析計)で測定した結果、粗粒はモード径 1.78 mm(分布幅 0.45~3.56 mm)で、細粒はモード径 0.80 mm(分布幅 0.056~2.00 mm)であった。乾燥装置の能力は設計時点で 100 Kg-Dry/h とした。乾燥後の水分量の測定には、水分計(KETT ELECTRIC LABORATORY, FD-240-2)を用いた。

1.3 成形装置および成形実験の方法

乾燥ビール粕の成形には、オガズ用成形機(オリオンコール(株))を一部改造して使用した。成形装置の構造を Fig. 2 に示す。乾燥ビール粕を成形装置の上部から定量的に供給し、一軸スクリーンの回転によってビール粕は圧縮され加熱筒へと押し出される。加熱筒外面のヒーターによって、加熱筒の内部は 200~400°C 程度にまで加熱できる。乾燥ビール粕は圧縮と加熱の作用によって連

† 2000 年 9 月 11 日受理

†† shibata@kansai-u.ac.jp

Table 1 Chemical and physical properties of spent grain (dry base)

Calorific Value (Gross)	[MJ/Kg]	12.1
Total-C	[wt%]	49.9
Total-N	[wt%]	4.5
Ash	[wt%]	4.4

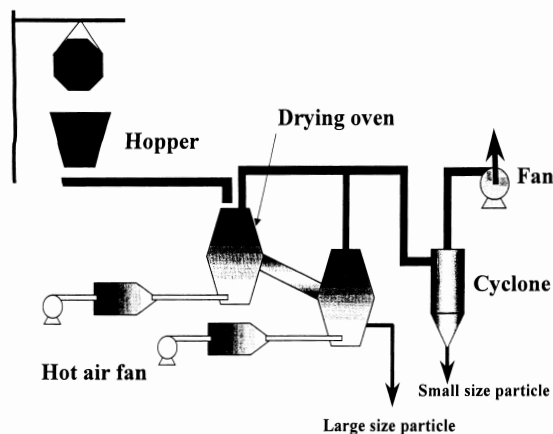


Fig. 1 Flow sheet of dryer

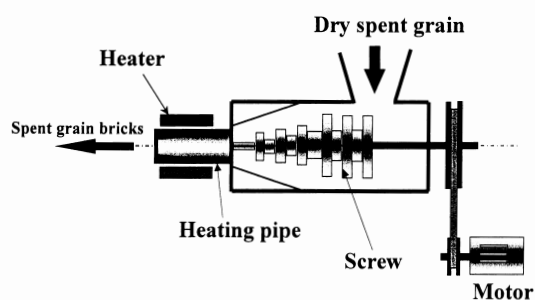


Fig. 2 Outline of briquette machine

続的に棒状に成形される。成形体の直径は 50 mm である。乾燥ビール粕は粉粒体用供給機 (ホソカワミクロン (株), LIVEBIN SCREW FEEDER MODEL VLS-20-50) によって一定量で供給される。供給機にはインバーターが搭載されていて任意に供給量 (0~400 cm³/s) を変えることができる。成形品の強度 (軸方向に直角の向きでの最大点荷重) は、テンシロン (株)オリエンテック, RTC-1310 A) で測定した。

1.4 炭化装置および炭化実験の方法

ビール粕成形品の炭化には、Fig. 3 に示すような炭化装置を設計試作した。ビール粕成形品は金属製の専用トレーに積載した上で台車上に積み上げるようにした。1枚のトレーには、約 400 mm の長さに切り揃えた成形品が 8 本積載できる。台車は炭窯炉本体と連結するようになっている。燃焼時に発生するガスは無臭化、無害化するために、炭化室の上に設けたガス燃焼室のバーナーで強制的に燃焼される。炭化完了後は、台車を引き出し、冷却ボックスをかぶせて火を消した。炭化の方法は熱風循環式炭化法とした。熱風循環式炭化法とは、ガス燃焼室の排気ガスを炭化室に一部還流することにより、着火から炭化までを行う方法である。炭化工程の最後には、「煉らし」と呼ばれる 700°C 以上に成形品の温度を上昇させる工程を付加した。得られた炭化物については、炭の最小径、硬度、精練度、炭素量、窒素量および灰分量について調べた。一般的に収縮率が大きく縮まった炭は品質が良いとされているので、品質を表す尺度になるのではないかと考えて最小径

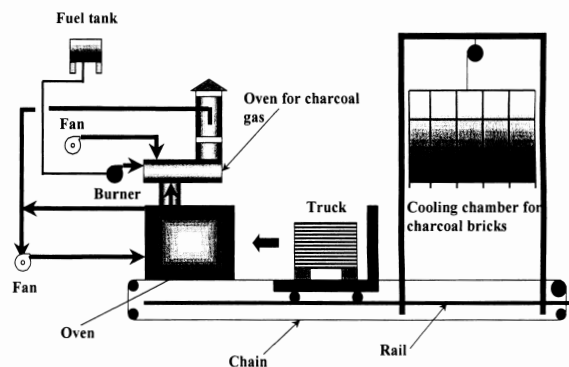


Fig. 3 Outline of charring facility with combustion gas returning

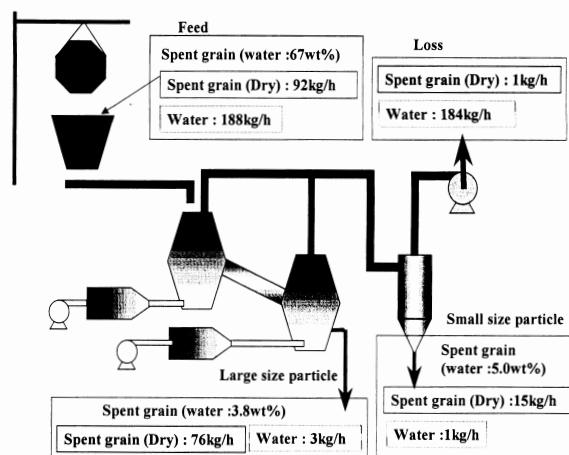


Fig. 4 Material balance in dryer

も測定した。一部、備長炭 (南部川村森林組合)、オガ炭 (サンホワイト太陽炭(株)) との物性の比較も行った。最小径は、デジタルノギス (株) ミットヨ, DIGIPA) で、硬度は三浦式木炭硬度計を使用して測定した。精練度の測定には、木炭精練度計 (株) 三陽電機製作所, FA 56 型) を使用した。炭素量、窒素量は元素分析装置 (株) 住化分析センター, SUMIGRAPH NC-1000) を使用した。灰分量は JIS K 2272 に従い測定した。灰分を構成するミネラルについては、試料炭を湿式分解後誘導結合プラズマ発光分析法 (ICP-AES 法) により定量した。

2. 結果と考察

2.1 ビール粕の乾燥について

乾燥装置内でのマテリアルバランスを Fig. 4 に示す。含水率 67% のビール粕は乾燥工程で含水率 3.8% まで乾燥される。ビール粕の収率は 82.6% であり、残りの乾燥ビール粕はサイクロンで捕集される。サイクロンで捕集されたビール粕は含水率 5.0% であり、捕集量は供給ビール粕に対して 16.3% である。損失となるビール粕は 1.1% であった。乾燥ビール粕の粒度分布は既に述べたように、乾燥装置下部から得られる粗粒についてはモード径 1.78 mm (分布幅 0.45~3.56 mm) で、サイクロンから捕集される細粒についてはモード径 0.80 mm (分布幅 0.056~2.00 mm) であった。後に述べるように、乾燥ビール粕を分級することで成形性が向上することが明らかとなった。Fig. 5 は乾燥炉内の温度変化を時間の関数として表したものである。乾燥炉内の温度は装置立ち上げ後約 60 分で安定し、第一乾燥炉の設定温度 60°C、第二乾燥炉の設定温度 110°C に達する。ビール粕投入量を一定にしても、炉内温度は安定しない。これは、熱風温度が安定していることから推

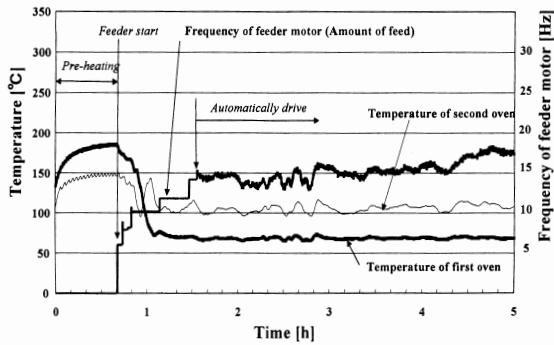


Fig. 5 Temperature change in dryer as a function of time

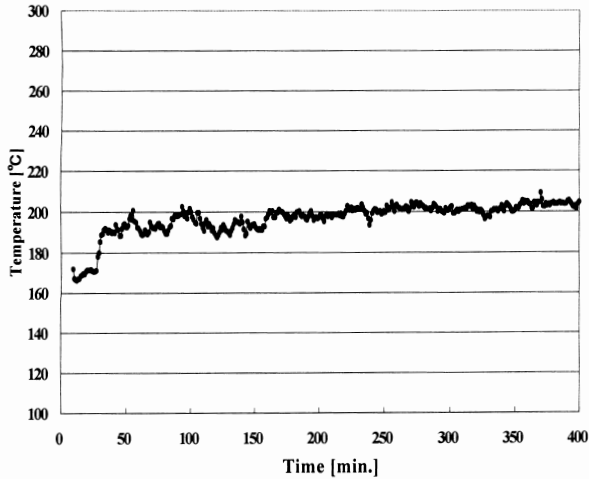


Fig. 6 Temperature change in briquette machine as a function of time (at internal surface of heating pipe)

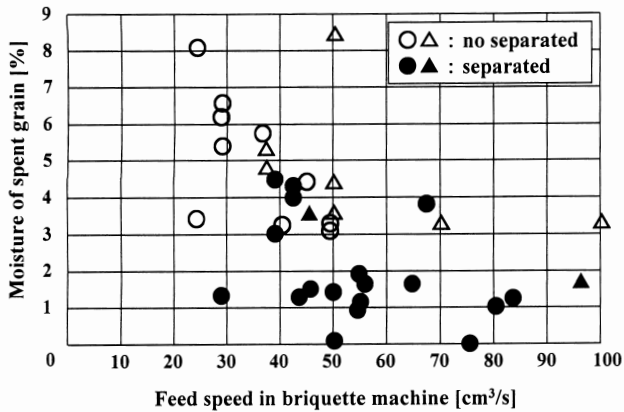


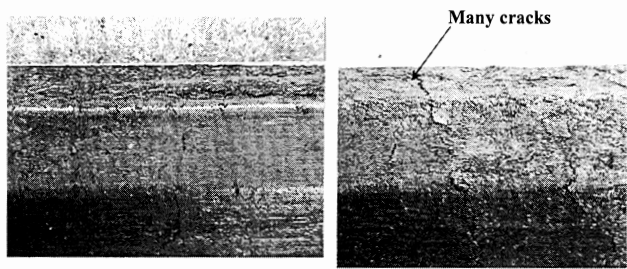
Fig. 7 Relation of parameters for briquette machine

察して、ホッパーに投入したビール粕の含水率に変動があるためであると考えられる。そこで、炉内温度を一定とするようにビール粕投入量を自動で調整するようにした。この操作によって乾燥炉内の温度は Fig. 5 に示されているように、ほぼ一定値に制御することができた。

2.2 乾燥ビール粕の成形について

試行錯誤の結果、成形の成否に関わる重要な指標として加熱筒内温度が上げられることがわかったので、成形を安定させるために、温度設定値に対して実際の温度のずれが小さくなるようヒーターの電流値を PID 制御で増減する方法を採用した。その結果、加熱筒内温度は安定した。Fig. 6 に加熱筒内温度の経時変化を示す。

成形の成否に関わるパラメータとしては、加熱筒内温度の他に乾燥ビール粕供給速度、乾燥ビール粕含水率および乾燥ビール粕



a) Feed speed : 60[cm³/sec.] b) Feed speed : 95 [cm³/sec.]

Fig. 8 Surface of spent grain bricks obtained from briquette machine

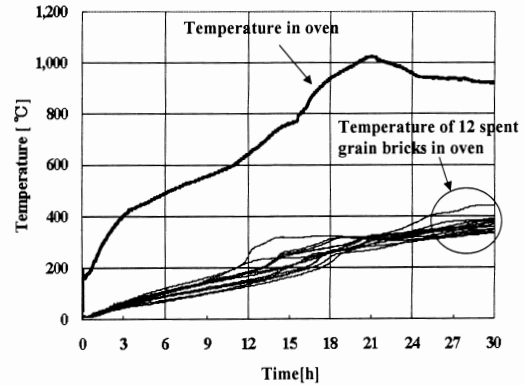


Fig. 9 Temperature change in charring facility with combustion gas returning as a function of time

の粒度分布が重要である。Fig. 7 は、供給速度と含水率の関係を表した散布図である。原料の含水率が高い場合には、成形機への原料の供給速度を低下させねばならないので、両者には負の相関がみられる。原料を粗粒と細粒に分級している場合にうまく成形されたものを●印、成形の失敗を▲印で示した。原料を分級していない場合にうまく成形できたものを○印、成形の失敗を△印で示した。ここでうまく成形されたというのは、ビール粕成形品ができたことを意味しており、成形の失敗と表現されたものは、乾燥ビール粕が固まらずに成型品がまったくできなかったことを表している。この図から、含水率を減らして、粗粒と細粒とをそれぞれ別にして成形する方が成形能力が向上することがわかる。生成した成形品の観察結果から、供給速度を上げると Fig. 8 の写真右の様なひび割れが増えていくことがわかる。これは、ビール粕の成形時に蒸発する水分の量が増すためであると考えられる。ビール粕成形品にひび割れがあると、その強度は極端に下がり割れやすくなる。成形品にひび割れがほとんどない状態を維持しながら、乾燥ビール粕の供給量が最大となるのが、60 cm³/s 付近であった。この供給量が本成形装置の最大能力であると考えられる。

供給量を任意に変えてひび割れない成形品を作成し、その中からサンプルを取り出して、軸方向に直角の向きでの最大点荷重を測定した。測定値はいずれも約 320 N となり、平均値の差の検定 ($n=10$) を有意水準 5% で行ったところ、供給量を 45~59 cm³/s に変えても最大点荷重は変わらないという結果が得られた。

2.3 ビール粕成形品の炭化について

ガス燃焼室の高温排ガスを炭化に利用する熱風循環式炭化法で炭化した。炭化装置内での代表的な成形品の温度上昇パターンを Fig. 9 に示す。この方法で炭化を行った場合、常に炉内部の雰囲気は攪拌されている状態にあるので、成形品の温度分布が小さくなると考えられる。得られたビール粕成形炭の最小径の相対度数分

Table 2 properties of some charcoals

		Spent grain charcoal	Bincho-tan	Oga-tan
Hardness	[-]	20	20	20
Refining degree	[Log(Ω /cm)]	<0.5	0	0
Calorific value (Gross)	[MJ/Kg]	27.3	25.7	31.6
Density	[g/cm ³]	1.75	1.99	2.06
Volatile compound	[wt%]	7.7	8.3	6.8
Total-C	[wt%]	68.0	75.2	74.5
Total-N	[wt%]	4.89	0.52	0.25
Ash	[wt%]	11.9	0.8	2.1
Total-Si	[wt%]	1.9	<0.01	0.26
Total-P	[wt%]	2.0	<0.05	<0.05

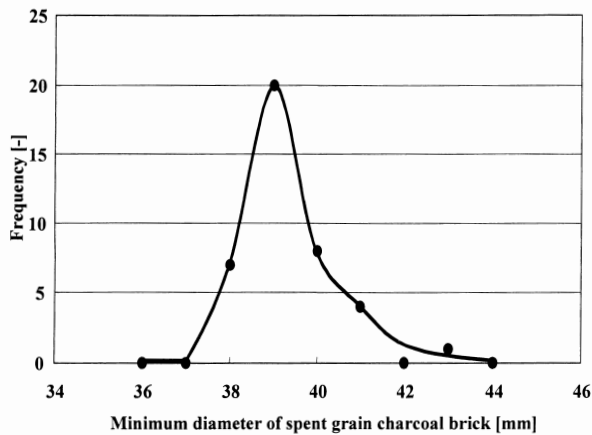


Fig. 10 Frequency distribution of minimum diameter of obtained charcoal bricks

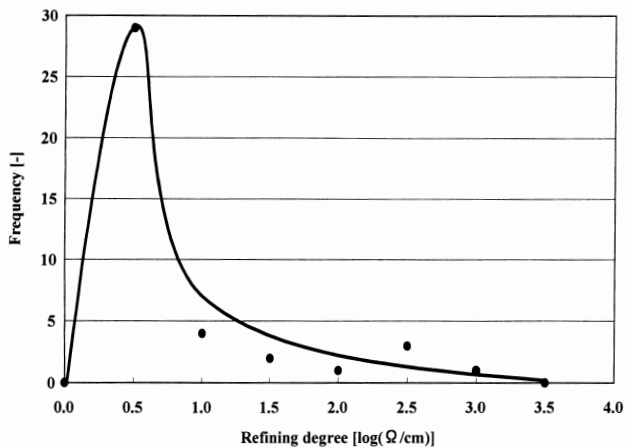


Fig. 11 Frequency distribution of refining degree of charcoal bricks

布を Fig. 10 に示した。相対度数分布は正規分布に近い左右対称の形となっており、平均値は 39.13 mm で標準偏差 (σ) は 1.03 mm である。炭化する前の成形品の直径は 50 mm であるので、炭化時に直径で約 22% の収縮をする。Fig. 11 はビール粕成形炭の精煉度の相対度数分布を表したものである。精煉度の平均値は 0.83 log (Ω /cm) であり、この値は白炭の種類に入る炭化度である。Fig. 10 に示すビール粕成形炭の最小径や、Fig. 11 に示す精煉度の相対度数分布から、得られたビール粕成形炭の品質のばらつきは実用上問題がない程度に小さいと考えられる。

得られたビール粕成形炭、備長炭およびオガ炭の工業分析値を

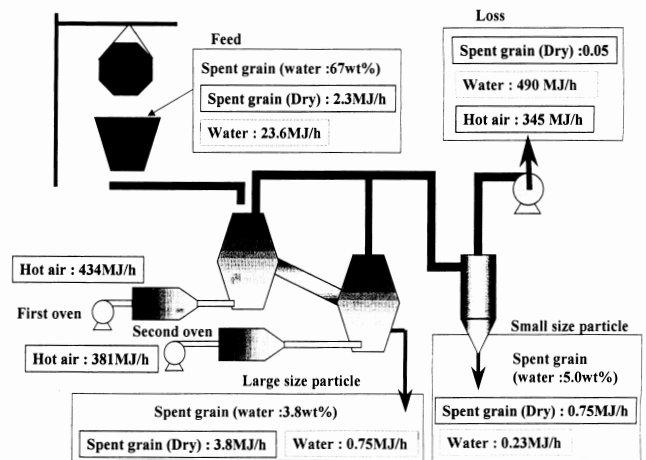


Fig. 12 Energy balance in dryer

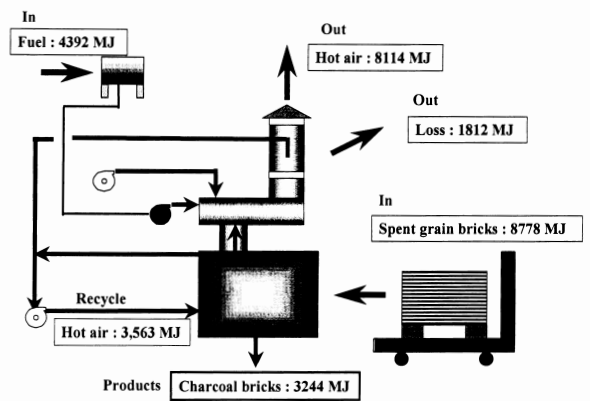


Fig. 13 Energy balance in charring facility

Table 2 に示す。ビール粕成形炭は硬度が高く、精煉度は低く、白炭に分類される炭であることが明らかとなった。通常の炭と比べて、原料のビール粕に起因する N, Si, P が多く含まれ、灰分が高いことがわかる。灰分量、窒素量が多いことがビール粕成形炭の特徴である。ビール粕成形炭の炭素量含有率は、備長炭およびオガ炭の炭素量含有率よりも少ない。

2.4 熱収支

開発した乾燥装置と炭化装置についての熱収支を Fig. 12 および Fig. 13 に示す。図に示したエネルギーの単位は一回の炭化処理あたりに発生するエネルギーを MJ で表している。乾燥装置では、熱風発生装置で加熱した熱量の約 60% がビール粕の含有水分の蒸発に使用され、比較的高い熱効率であるといえる。乾燥炉内

からのビール粕のサンプリング結果から、乾燥は第一乾燥炉でほぼ終了していることを示すデータが得られており、第二乾燥炉で要するエネルギーは更に削減できる可能性がある。炭化装置の入熱の構成は、ビール粕成形品の持つエネルギー 67% と、ガス燃焼室で排気ガスを完全燃焼させるためにバーナーで使用する灯油のエネルギー 33% という結果であった。炉の熱効率率は 25% であったが、これは研究開発用での小型炉であることを考慮するとやむをえない数値であると考えられる。ガス燃焼室用のバーナーは出力調整ができない形式を採用しているが、乾留ガスの発生量が炭化工程の進捗によって増減するので、これにバーナー出力が追従するようにすれば、灯油使用量を更に削減できると考えている。すなわち、乾留ガスの発生量が多い場合には、ガス燃焼室のバーナーは種火として必要最小限の火力でよく、ガス燃焼室のバーナー用としての灯油所要量はもっと少なくて済む。炭化開始 12 時間後に炉内温度は 500°C に達して、乾留ガス発生も多量になる。炭化開始 12 時間はガス燃焼室のバーナーでの灯油所要量は現状通り必要であり、12 時間以降にはその量は 50% で済むと仮定すると、灯油エネルギーの所要量は 2,928 MJ と計算され、約 33% 削減できるものと考えられる。表面からの熱ロスを同じと仮定すれば、その場合の熱効率率は 28% に改善されると計算された。

炭化工程の廃熱を乾燥に利用できないかについて検討した。炭化装置から放出される熱量の経時変化を計算したところ、1 バッチ 36 時間の炭化工程で 300 MJ/h の熱放出が 16 時間続くことがわかった。炭化工程のタイミングに乾燥工程をあわせることができれば、この研究用小型装置の場合でも乾燥に必要な熱量の 37% 以上を廃熱でまかなうことができるという計算になる。

結 言

ビール粕を乾燥し、圧縮加熱成形して、低酸素濃度下で炭化してビール粕成形炭を試作した。

- 1) 熱効率 60% のビール粕乾燥装置を開発した。熱風による流動床方式のため、炭化装置からの廃熱を利用した乾燥が可能であった。
- 2) バインダー無添加で安定して加熱圧縮成形できる成形装置を開発した。成形装置の能力は 60 cm³/s を得た。

- 3) 炭化方法については、乾留ガスの燃焼排ガスの廃熱を利用した熱風循環式炭化法を採用した。その結果、煙が出ない方法で炭化することができ、得られた炭化物の品質にばらつきが小さく、収率が高いことが確認できた。
- 4) ビール粕成形炭の発熱量は約 27 MJ/kg で、備長炭と同等であり、オガ炭より約 13% 程度低かった。窒素、リンの含有率については、ビール粕成形炭の方が高く、窒素は木炭の 9~20 倍、リンは木炭の 40 倍以上であった。
- 5) 乾燥と炭化の熱収支を検討した結果、乾燥と炭化のタイミングを合わせることによって、乾燥に要する熱エネルギーの 37% 以上は炭化工程で発生する廃熱でまかなうことができる。

[謝 辞] 本研究にあたって、装置の試作改良に御協力戴いたアサヒビール(株)研究開発センター総務部 江並啓一様、品川ファーマス(株)エンジニアリング部 上村精二様、小島直也様、(株)オリオンコール 島田一成様に深く感謝致します。

Literature cited

- Behmel, U. and R. Meyer-Pittroff; "Energy from Production-Specific Waste," *Brauwelt International*, **1**, 48-55 (1995)
- Hayashi, J., A. Kubo, A. Furukawa and K. Muroyama; "Preparation of Activated Carbon with High Specific Surface Area from Beer Lees by Chemical Activation with KOH," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **26**, 293-297 (2000)
- Ishiwaki, N.; "Development of High Valued Use of Spent Grain by Fractionating Technology," Master Brewers Association of The Americas Summary (1999)
- Kishimoto, S.; "Mokutan to Shokuhin," *New Food Ind.*, **32**, 32-37 (1990)
- Kishi, S.; "Process for Separating Malt Protein Flour From Brewer's Spent Grain," *Powder Sci. & Eng.*, **28**, 61-69 (1996)
- Maeda, H.; "Sapporo Collaborates to Deverop Malt-Fiber Paper. By-Product Is Recycled in Envirromentally Friendly Paper," *JPI Journal*, **32**, 356-360 (1994)
- Okamoto, H., Y. Kitagawa, T. Minowa and T. Ogi; "Thermochemical Conversion of Spent Grain into Fuels," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **25**, 73-78 (1999)
- Yatagai, M.; "Mokutan no Tokusei to sono Riyou," *Mokuzai Kogyo*, **52**, 472-477 (1997)

Development of Production Process of Charcoal Bricks from Spent Grain

HIROYUKI OKAMOTO¹, KIYOHITO SATO¹, NORIE YAGI¹
MASAO INOUE², SHUICHI YAMASAKI², SEIJI ISHIDA²
and JUNJI SHIBATA³

¹*Process Engineering Research & Development Lab., Asahi Breweries Ltd., Moriya Ibaraki 302-0106*

²*Shin Nippon Air Technologies co., Ltd., Tokyo 103-0021*

³*Department of Chemical Engineering, Kansai University, Suita 564-8680*

Key words: spent grain, thermal conversion, charcoal bricks.

A process was developed for production of charcoal bricks from spent grain from a beer brewery, and the physical and chemical properties of the charcoal bricks produced were evaluated. The beer spent grain (water content 67 wt%) was first dried, then pressed at high temperature and pressure to make bricks without any binder. Finally, the spent grain bricks were carbonized in a low oxygen atmosphere to produce charcoal bricks.

The heat recycling carbonization method, in which a part of carbonization gas output was returned to the carbonization furnace, was applied to the carbonization of the bricks. This method yielded charcoal bricks with a constant quality and high yield. The charcoal bricks had a high calorific value of about 27 MJ/Kg, which was equipollent to that of Bincho-tan and was about 13% lower than that of Oga-tan. The contents of nitrogen and phosphorus in the charcoal bricks were 9-20 times and 40 times greater than those of Bincho-tan and Oga-tan, respectively. As the spent grain charcoal bricks contained various minerals such as calcium, magnesium and phosphorus, they had the possibility to be used as a source of natural minerals.
