

# 累積 CO<sub>2</sub>排出原単位を評価指標とする ビール工場のライフサイクルアセスメント

室山 勝彦<sup>\*</sup>・大口 宗範<sup>\*\*</sup>・林 卓也<sup>\*</sup>・林 順一<sup>\*</sup>

## 摘 要

本研究では、ビール工場において原料から製品に至る一連の工程に対して投入される電力、ガス水道水等のユーティリティ、排出される有機廃水、ビールかす等の固形副産物などのエミッションに関して、ライフサイクルアセスメント・インベントリー解析に基づき、累積 CO<sub>2</sub>排出原単位を指標として環境影響を評価した。すなわち、ビール工場で排出される有機廃液をメタン発酵処理し、バイオガスを回収しこれより燃料電池により電力を得て工程に還元するとき、また、副産物であるビール粕を、焼却、メタン発酵、乾燥などの処理を行った場合の、製品ビールにかかる累積 CO<sub>2</sub>排出原単位への影響を検討し、より好ましい廃棄物処理法採用のための指針を得ることを目的とし、LCA インベントリー解析を行った。

あるビール工場において、廃液のメタン発酵によって回収されるメタンを燃料電池によって電力に変換して工程に還元する場合、全工程に投入される電力の 9.74%が節減されることが分かった。また製品ビールへの累積 CO<sub>2</sub>排出原単位の 48.3%が水道、電力、ガス、灯油などの工程ユーティリティに由来することが明らかになった。これらから、廃液および廃棄物からエネルギーを回収して外部からのエネルギーの投入を低減することが CO<sub>2</sub> 排出の削減に重要であるとわかる。しかし、製品ビールへの累積 CO<sub>2</sub>排出原単位への節減は 2.30%にとどまった。これは、製品ビールの相当の割合がアルミ缶でパッケージングされているため製品ビールへの累積 CO<sub>2</sub>排出原単位を押し上げていることにも原因がある。もしアルミ缶の代わりにガラス瓶がパッケージングに使用されれば、さらなる累積 CO<sub>2</sub>排出原単位の削減になることがわかった。またビール粕の乾燥を伴わない飼料化、コンポスト化、および焼却は実質的な CO<sub>2</sub>の排出につながらないと判断された。さらに、ビール粕をメタン発酵してバイオガスを回収し、排水処理のバイオガスも含めて燃料電池によって電力を得ることができれば、電力の 59.8%が還元されることが分かった。

キーワード：ビール工場，累積 CO<sub>2</sub>排出原単位，ライフサイクルアセスメント，ゼロエミッション

## 1. はじめに

ある製品が原料から一連の工程を経て造られるとき、各工程で資源、エネルギーが消費され、同時に環境へ二酸化炭素、化学物質、廃棄物、熱や騒音などが放出される。これらの環境へ放出されるものを環境影響負荷と呼ぶ。原料が準備され、生産プロセスに投入された原料が加工されて、製品が製造され、副産物、廃棄物が処理される一連の工程で、製品単位数あたりいくらの物質、エネルギーが消費され、どのような環境影響負荷が放出されるかを定量的に評価する手法が Life Cycle Assessment or Analysis (LCA)であり、製品の環境影響評価を行う有力な手段とされている。LCA の手法によれば、製品が購入さ

れて使用され、廃棄されるまでの環境への影響についても評価できることはいうまでもない。環境負荷因子としては、CO<sub>2</sub>排出（温暖化）、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>（酸性雨）、フロン（オゾン層破壊）、有害化学物質（生態系破壊）などが考えられるが、どのような因子を評価インデックスとして用いるか、複数の因子が関わる場合それらをどう組み合わせ、その製品の原料から使用後廃棄されるまでのどの範囲で、総合的に環境影響評価するかが問題となる。

食品工業では大気中の CO<sub>2</sub>が固定されたバイオマス为原料として用いるが、原料から製品に至る物質の変化は有機炭素として配分される製品、副産物または廃棄物として把握できる。またその過程で投入される電力、燃料などのユーティリティの量が把握

2000年6月30日受付，2000年11月24日受理

<sup>\*</sup>関西大学工学部化学工学科，〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

<sup>\*\*</sup>大気社（株），環境設備事業部，〒338-0002 東京都品川区大崎 1-11-2

できれば、環境へのエミッションは累積 CO<sub>2</sub>量として評価できる。食品製造プロセスから環境へのエミッションは累積 CO<sub>2</sub>量として評価できる。食品製造プロセスから環境へのエミッションは廃水と固形廃棄物が主である。固形廃棄物の利用法には、コンポスト化、飼料化、エネルギー化、焼却、埋め立てがある。また廃水処理には物理化学的処理と生物化学的処理があり、生物化学的処理には、活性汚泥法などの好気性処理とメタン発酵に代表される嫌気性処理がある。従来から環境基準を満たすことを目的とした処理が、排水と固形廃棄物では別々に行われてきた。メタン発酵によれば、排水中あるいは固形廃棄物中の有機炭素をメタンとして回収できる。有機排水の嫌気処理によって回収されたメタンを燃料として、あるいは燃料電池に適用してさらに電力に変換する試みがビール工場において始められている。

ゼロエミッションの観点からは、例えば、食品固形廃棄物が、乾燥飼料、炭化物、コンポストなどの資源に転換されれば、物質に関する廃棄物ゼロ化が達成されたかに見える。しかし、その過程で、大量のエネルギーが投入されるとすれば、そのエネルギー使用に伴って二酸化炭素が環境中に排出され環境負荷が生じることになる。すなわち、排水、廃棄物のエネルギー化、資源化によって環境負荷の低減に対してどのような効果が生じるのかについて客観的、総合的に評価する必要がある。食品工業では、大気汚染物質や化学物質のエミッションが問題となることは少ないので、累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位 を評価指標とする LCA インベントリー解析によれば、地球環境保全の観点から廃棄物処理としてどの方法が望ましいかが判断できる。

本研究では、ビール工場を例にとり、そこで排出される廃液よりメタン発酵により、有機炭素成分をバイオガスとして回収し、これを燃料電池に通して電力に変換し工程電力として還元したときの累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位に及ぼす影響を検討し、また、副産物であるビール粕を、焼却、メタン発酵、乾燥の各処理をしたときの累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位に及ぼす影響を比較検討する。

## 2 . ビールの製造工程

### 2.1 製造工程と副産物または廃棄物<sup>1,2,3)</sup>

ここで我が国のビールの大部分を占める下面発酵淡色ビール（副原料使用）を製造する工程の概略と副産物あるいは廃棄物の状況を述べる。

(1) 麦芽の粉碎：麦芽（発芽した大麦）から麦芽根を除き粉碎する。このとき、麦芽根（麦根）が廃棄物としてもとの大麦に対して 1~2% 生成する。

(2) 糖化：粉碎麦芽と副原料、温水を仕込み混合して適当な温度に保って糖化を促進する。麦芽自体が保有していた各種の加水分解酵素の作用により、麦芽中のデンプン、タンパク質が可溶化するとともに、副原料のでんぷん、タンパク質も含めてそれらから発酵性糖類、アミノ酸などが生成する。最終的に加温し、酵素を失活させて糖化を終了させる。

(3) 麦汁濾過：糖化を終了したもろみは、濾過器を通して、殻皮などの固形分（ビール粕）を麦汁から分離する。このプロセスで製品ビールの約 13% の多量のビール粕が発生する。水分は、もとのビール粕で 80% 以上、脱水したものは約 65% である。

(4) 麦汁煮沸：麦汁（糖化液）は加温して 1~2 時間煮沸する。この際、ホップを添加して、ホップの苦みと香気を付与する。煮沸によってビール混濁の原因となる熱凝固性のタンパク質が析出するが、これは沈殿槽でホップ粕とともに除去される。粒状ホップの使用などでホップ粕の生成量は多くないが、ホップ粕は飼料としての価値も低い。この煮沸工程では多大のエネルギーを必要とする。

(5) 麦汁冷却：次いで麦汁は 5~8 まで冷却される。その際再びタンパク質、ポリフェノールなどが凝固析出するので、沈殿、珪藻土濾過などにより除去する。冷麦汁には酵母増殖に必要な溶存酸素供給のため、無菌空気が吹き込まれる。このプロセスでは熱回収の可能性がある。

(6) 発酵：麦汁にビール酵母を添加して大部分の発酵性糖類をアルコールと炭酸ガスに変える。酵母を加えられた麦汁は、酵母増殖が起こり発酵は旺盛になり、CO<sub>2</sub> 泡が発生する。発酵熱は冷却装置によって除去し、発酵温度（6~10）を調節する。液温を 3~5 に下げ酵母を沈殿させて、通常 6~10 日間で主発酵を終了し、若ビールを得る。

(7) 後発酵（貯酒）：若ビールは沈降した酵母を分離して貯酒タンクに移す。後発酵は少量の酵母で緩慢な発酵が行われ、生成した炭酸ガスはビールに飽和するとともに未熟臭を揮散させる。若ビールは徐々に冷却され、0~-1 で数週間~2ヶ月程度貯酒され、その間、酵母や混濁物は次第に沈降して清澄なビールになる。分離された酵母は、一部が循環利用されるが、残りは酵母製剤、酵母エキスなどに有効利用される。

(8) 濾過：熟成の終わったビールには、なお少量の酵母や混濁物が浮遊しているので、種々のタイプの濾過器を通して清澄にし、保存性をよくする。この工程で珪藻土の濾過残渣が廃棄物となる。

(9) パッケージング工程：濾過したビールは、ビン詰、アルミ缶詰、あるいは樽詰めする。製品ビールは日

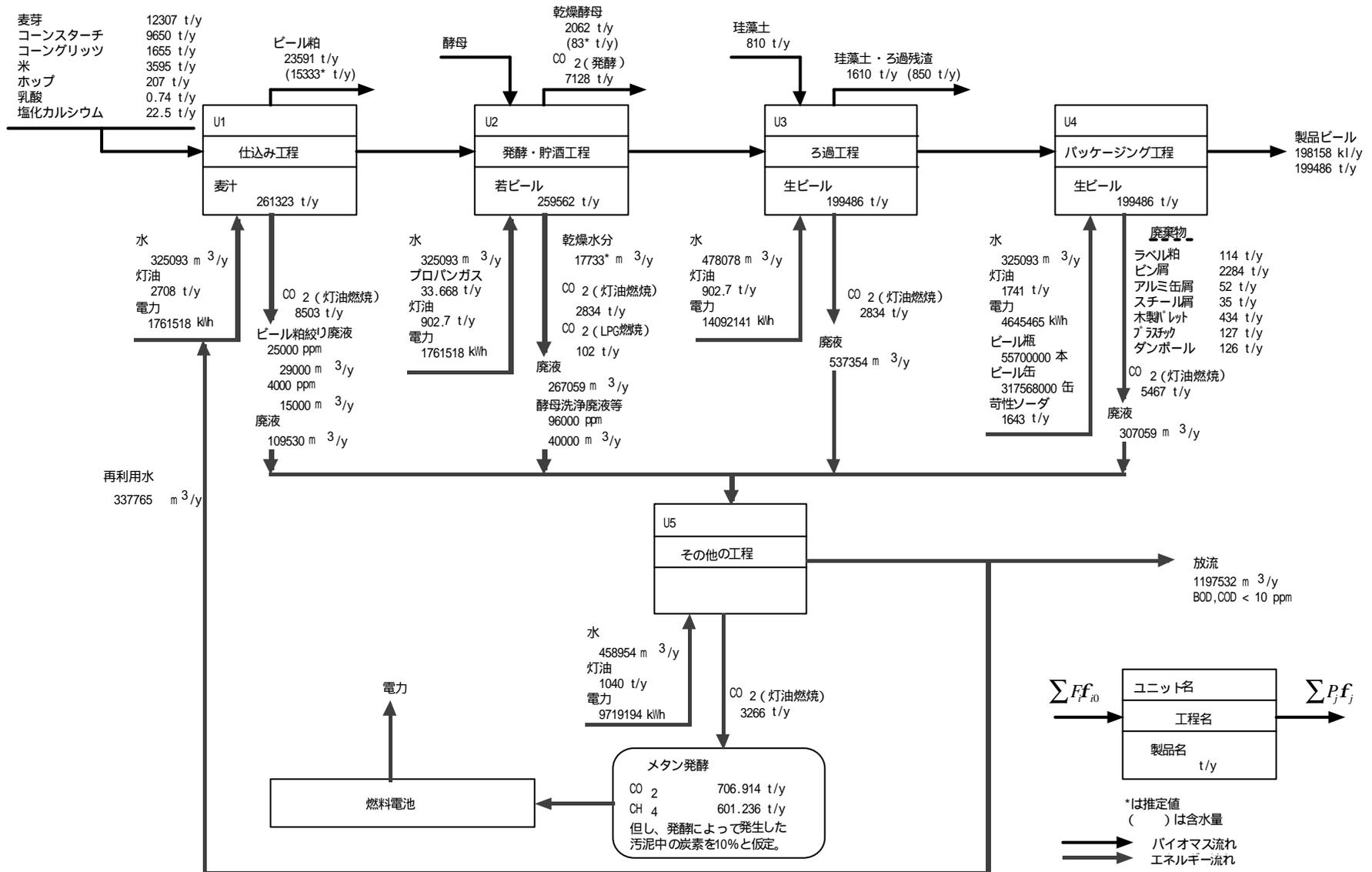


図1 ビールの製造工程における原料から製品に至る物質とエネルギーのフロー

光や振動を避け、低温で保管し、新鮮なうちに短期間で消費されるように物流システムが整備される。パッケージング工程では、アルミ屑、ガラス屑、廃パレットや廃段ボールなど多量の廃棄物が生じる。

(10) 廃液・洗浄廃水：以上の各工程から多量の廃液や洗浄廃水が排出される。これらは、メタン発酵などによって資源回収がはかられたのち、基準を満たすための処理が施されて放流される。

## 2.2 ビール製造の物質及びエネルギーフロー

図1に某ビール工場の物質フロー及び、ユーティリティフローに関する調査データ<sup>4)</sup>を示す。図中で水分含量など一部の数値は推定した。以下では、Unit 1(仕込み工程)、Unit 2(発酵貯酒工程)、Unit 3(濾過工程)、Unit 4(パッケージング工程)、Unit 5(その他の工程)、計5工程に分けて工程ごとにインベントリー解析を行う。

## 2.3 炭素収支による考察

データを入手したビール工場において、投入される原料、副原料を入手してその元素分析を行った。また排水中の TOC(全有機炭素)、IC(無機炭素)、汚泥、酵母の元素分析値<sup>5)</sup>、ビールかすの元素分析、製品ビールの TOC、ICを測定して生産物、副産物の炭素量を評価した。図2に原料、副原料として投入された炭素の量を100%として、製造工程の各段階で排出される排水、廃棄物、酵母、汚泥、発酵ガスとしての CO<sub>2</sub> および最終製品としてのビールに含まれる炭素量の収支を示す。

ここで、製品ビールには CO<sub>2</sub> が溶解しているが、総炭素 45.6%に対して約 0.6%が溶解 CO<sub>2</sub>(IC)である。またメタン発酵処理より製造されるバイオガスの CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>比は 70/30の比率を仮定した。

### (1) CO<sub>2</sub>として排出されるロスの減少

アルコール発酵の結果生成する CO<sub>2</sub> は、以前は清涼飲料水の生産に有効に使用されていた。現在は、発酵中気散する CO<sub>2</sub> の一部は捕集精製され、パッ

ーキング及び発酵槽での操作を嫌気雰囲気で行うためのガスとして工程内利用されている。

### (2) 廃水からの有機炭素成分の回収

工程からの廃水に含まれる炭素 C のメタン化による回収には限界がある。メタン発酵処理にかかる前の段階の廃液中に含まれる全 C 量は、バイオガス、汚泥、処理後の排水に分配されるものの合計、すなわち、6.1%にすぎないものである。そのうちの約 80% がバイオガスとして回収できる。

### (3) 製品の炭素収率

炭素基準のビールへの収率は 45%であり、この値は例えば調味料の生産などの場合に比較して相対的に高い。

### (4) ビール粕・余剰酵母の利用

余剰酵母は、酵母製剤、酵母エキスなどに有効に利用されている。また、ビール粕は飼料として十分市場価値があるが、廃棄される場合もコンポストなどの有機炭素として再資源化する方法<sup>6)</sup>の採用が望ましい。しかもできるだけエネルギーを投入しない加工法が望まれる。

## 3. ビールの累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位

### 3.1 累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位に対する寄与<sup>7)</sup>

環境影響因子として CO<sub>2</sub> を対象とする場合、ある物質単位質量当たりの累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位はその物質が天然の状態から今の状態にいたるまでに排出してきた CO<sub>2</sub> の累積量として定義される。また、電力に関しては、火力、原子力、水力による発電による寄与を考慮して、単位発電量当たりの累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位を求める。それぞれは次の単位で定義される。

物質流れに対する累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位

[kg-CO<sub>2</sub>/t]

投入電力に対する累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位

[kg-CO<sub>2</sub>/kWh]

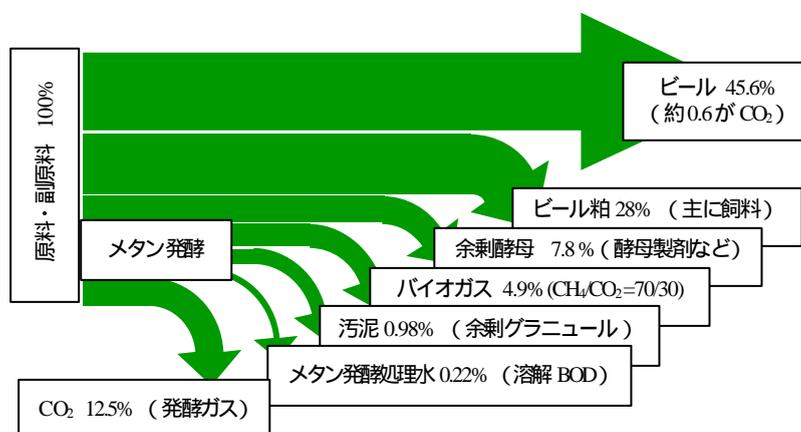


図2 ビール製造における炭素収支

ある生産プロセスの各工程内のユニットで生産される製品の累積排出原単位は、原料および副原料、電力およびガスなどのユーティリティのように製品の製造に対して直接発生する累積排出量を製品の生産量で割った比例的累積排出原単位と、設備の建設、保全、運転など間接的に発生するとみられる累積排出量を製品の生産量で割った固定的累積排出原単位および、製品の廃棄やリサイクル、廃棄物の資源化、焼却処理などの各種の処理過程で発生する累積排出量を処理量で割った後処理過程における累積排出原単位の三つの項の和として与えられる。

他のプロセス産業の場合と同様に、ビール製造生産プロセスでは、生産設備の耐用年数が長く、またスループットも大きいため、単位製品量あたりの固定的排出原単位は他の二者に比較してはるかに小さい。そこで、本研究では比例的累積排出原単位と廃棄物（副産物）の処理過程における累積排出原単位の二つについて考慮する。

ただし、電力、水、ガス、灯油などの工程ユーティリティの製品の累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位に対する寄与には次のような違いが生じる。電力、水では、使用する時点でそれまで累積された CO<sub>2</sub> が製品の累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位に反映される。一方、ガス、灯油などの化石燃料では、使用直前までに蓄積された CO<sub>2</sub> と使用（燃焼）の結果排出される CO<sub>2</sub> の合計が製品の累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位に反映される。

### 3.2 CO<sub>2</sub> 排出原単位データ

表 1 に、ビール製造の各工程に入力される、原料および電力、ガス、油などユーティリティの有する CO<sub>2</sub> 排出原単位を、書籍<sup>8)</sup>、NEDO の報告書<sup>9)-12)</sup>およびホームページ：<http://www.nrim.go.jp:8080/ecomat/J/ecodb/ecodb.htm> から引用して示す。

表 1 原料、ユーティリティの累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位

品名	累積CO <sub>2</sub> 排出原単位 [kgCO <sub>2</sub> /t]or [kgCO <sub>2</sub> /kWh]*	出典	備考 (近似物質)
麦芽	1019	A	
コーンスターチ	256	A	
コーングリッツ	325	A	
米	988	A	(玄米)
ホップ	9848	A	
乳酸	1058	A	(酢酸)
塩化カルシウム	109	B	(炭酸カルシウム)
珪藻土	72	A	
水	0.204	B	(工業用水)
灯油	119	B	
プロパンガス	119	B	
電力	0.547	B	

出典：A=LCA 実務入門<sup>8)</sup>、B=NEDO による報告書<sup>9)-12)</sup>

### 3.3 灯油・プロパンガスの換算

図 1 のデータに基づき、各工程での灯油、LPG の

それぞれの年間使用量に対して、それぞれの完全燃焼を仮定し、発生する CO<sub>2</sub> を表 2 のように算定した。

表 2 各工程で使用された灯油/LPG に伴う CO<sub>2</sub> 発生量

Unit 工程	U1 仕込み	U2 発酵・貯酒	U3 ろ過	U4 パッケージング	U5 その他
灯油[t/y]	2708	902.7	902.7	1741	1040
CO <sub>2</sub> 発生量[t/y]	8503	2834	2834	5467	3266
LPG[t/y]	0	33.668	0	0	0
CO <sub>2</sub> 発生量[t/y]	0	102.0	0	0	0

## 4. ビールの累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位

### 4.1 累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位

ビールが製造される工程での累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位を以下のように定め検討する。

(1) 原料から製品に至る工程で、原料に由来する副産物として例えば発酵の過程で発生する CO<sub>2</sub> 量あるいは副産物を焼却した場合の CO<sub>2</sub> 発生は、元来植物の炭素は大気中の CO<sub>2</sub> を取り込み固定したものであるから、それ自身が自然環境下で無機化された場合と等価であると見なされるので、本研究では累積しない。

(2) 外部からのエネルギー（電力、ガス、灯油、水等）の使用に伴って発生する CO<sub>2</sub> 発生量：ビールが製造されるに当たって、外部から供給されるものであるから、この累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位をどれだけ低くするかが課題である。

(3) 上記(1)、(2)の発生量の合計：これが一般的に製造製品への累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位として定義される。もし、製品が複数種にわたる場合、それぞれの製品に累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位を分担させる。

### 4.2 副産物の CO<sub>2</sub> 排出原単位

図 1 に示したビール製造工程では、ビール粕、廃酵母、珪藻土濾過残渣、廃液など多種の副産物を発生する。これらは製品ビールに対して付加価値が小さいかあるいは価値は高くてもその量が少ないため、それぞれに負わせる CO<sub>2</sub> 排出原単位は 0 とした。

### 4.3 工程ごとの Biomass 流れの量及び累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位の変化

工程で生じる廃液は合流させてメタン発酵装置に導き、発生したバイオガスより燃料電池を用いて発電して工程エネルギーとして還元している。そこで、この電力を図 1 のユニット 1 及び 2 に還元した場合について計算した（発生電力でユニット 1 の全ての工程電力及びユニット 2 の一部がまかなえる）。

表 3 に各工程の Biomass 流れの量、バイオマス流れ及び Utility 流れの累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位の変化を示す。表中、原料・副原料の行の、Biomass 流れの項には麦芽、副原料の他に投入される水を加えた。また同行

表3 各工程のBiomass及びEnergy流れの累積CO<sub>2</sub>排出原単位

電力をUnits 1,2に還元しない	Unit	工程名	Biomass 流れの量P [t/y]	Biomass流れの [kg-CO <sub>2</sub> /t]	Utility流れの [kg-CO <sub>2</sub> /t]	Totalの [kg-CO <sub>2</sub> /t]
	原料	原料・副原料	352530	59.97	0	59.97
	Unit1	仕込み	261323	80.91	44.64	125.54
	Unit2	発酵・貯酒	259562	81.46	60.65	142.10
	Unit3	ろ過	199486	106.3	132.8	239.06
	Unit4	パッケージング	199486	192.03	174.3	366.33
	Unit5	排水処理	-	0	5.357	5.357
	製品	生ビール	199486	192.03	179.66	371.69
廃液をメタン発酵し電力をUnits 1,2に還元	Unit	工程名	Biomass 流れの量P [t/y]	Biomass流れの [kg-CO <sub>2</sub> /t]	Utility流れの [kg-CO <sub>2</sub> /t]	Totalの [kg-CO <sub>2</sub> /t]
	原料	原料・副原料	352530	59.97	0	59.97
	Unit1	仕込み	261323	80.91	38.11	119.02
	Unit2	発酵・貯酒	259562	81.46	54.08	135.54
	Unit3	ろ過	199486	106.3	124.2	230.52
	Unit4	パッケージング	199486	192.03	165.8	357.79
	Unit5	排水処理	-	0	5.357	5.357
	製品	生ビール	199486	192.03	171.12	363.15

のBiomass流れの累積CO<sub>2</sub>排出原単位には、パッケージング工程において、製品の容器となるビール瓶、アルミ缶のCO<sub>2</sub>排出原単位の寄与を後述のように加えた。

上記の計算結果で、あるUnit前後での急変は、そのUnitでのBiomass流れの量の急変に逆比例的に対応する。また、あるUnitから排出される排水や廃棄物が多いとBiomass流れの量が大きく低下する。上表の結果より、製品ビールの累積CO<sub>2</sub>排出原単位の48.2%（廃水を有効利用しない場合には49.4%）が水道、電力、ガス、灯油などのユーティリティに由来することが明らかとなった。このことから、食品工業におけるCO<sub>2</sub>削減にはいかに外部からのエネルギーの投入を抑制するかがキーポイントとなる。

#### 4.3 パッケージング工程の累積CO<sub>2</sub>排出原単位

パッケージング工程に供給される、アルミ缶、ビールビンに関するCO<sub>2</sub>原単位<sup>13)</sup>をもとに、パッケージングに伴う累積CO<sub>2</sub>排出原単位を求めた。なお、アルミ缶に関して、現在の廃アルミ缶の回収率を74.4%<sup>14)</sup>、回収アルミ缶を地金に再溶解しアルミ缶に再生する場合に必要なエネルギーを、ポーキサイトから作られる新アルミ缶の場合の3%<sup>15)</sup>とみなした。また、ビールビンの再利用回数が12.5回<sup>15)</sup>であることより、1/12を新ビンの比率とした。

#### 4.4 排水処理で発生するバイオガスの有効利用

複数の各工程から排出された溶存有機物を含む排水より、メタン発酵リアクターを通してバイオガスを回収し、これを燃料電池を用いて電力に変換したときの影響を調べた。この場合の燃料電池の稼働データとして大橋による報告<sup>16)</sup>を用いた。

バイオガスをすべて有効利用して電力として回収

し、Unit1の電気使用量の全量、Unit2の一部として還元したときの累積CO<sub>2</sub>排出原単位への影響を調べた。この回収された年間3115000[kWh]の電力で、工場の年間電力31980000[kWh]の9.74%をまかなうことができる。またこの電力によって8.54[kg-CO<sub>2</sub>/t]（電力として回収しない場合の全累積CO<sub>2</sub>排出原単位の約2.30%）の累積CO<sub>2</sub>排出原単位の削減となることが分かった。

#### 4.5 ビール粕をメタン発酵した場合

ビール粕をメタン発酵して電力を回収する場合の影響を検討した。ビール粕は年間23591t/y（推定含水量15333t/y）発生する。通常メタン発酵によってバイオガスとして回収できるC量は、投入量の約8割である。そこで、工程のデータよりビール粕に含まれるC量を49.7wt%（乾燥基準）とし、以下の仮定のもとに計算を行った。

- (1)投入されたC量の20%が汚泥や、増殖菌体、処理液中の残留有機物に分配される。
- (2)メタン発酵でC量の80%がバイオガスとして回収され、バイオガス中のCH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>の比率はそれぞれ70、30vol%とした。
- (3)燃料電池の稼働データとして、大橋による報告<sup>16)</sup>を用いた。

回収された電力をUnit1へ還元したときの累積CO<sub>2</sub>排出原単位への影響を検討した。回収された年間16035000[kWh]の電力は、工場の年間電力の50.1%、排水処理のバイオガスも含めると59.8%をまかなうことができる。またこの電力によって52.5[kg-CO<sub>2</sub>/t]（排水、廃棄物からエネルギーを回収しない場合に比較して約14.1%）の累積CO<sub>2</sub>排出原単位の削減につながることを分かった。

#### 4.6 ビール粕を焼却処理した場合

乾燥状態のビール粕の元素比および湿潤状態のビール粕 1 kg 中に含まれる元素の質量比を表 4 に示す。データより、ビール粕 23591 t 中に 15333 t の水を含んでいるので、含水率は 65%とした。

表 4 ビール粕の元素比

元素	重量比(d.a.f.) [%]	ビール粕中の質量比 [-]
C (炭素)	49.7	0.174
O (酸素)	39.4	0.138
H (水素)	6.7	0.0235
N (窒素)	4.2	0.0147
S (硫黄)	0	0
W (水分)	-	0.65

#### (1) ビール粕の発熱量と自燃性の推定<sup>17)</sup>

発熱量を推算するには様々な方法があるが、ここではビール粕の元素組成をもとに Steuer の式に従って発熱量を推定した。さらに、燃焼温度を推定したところ 835 となり、湿った状態のビール粕は補助燃料がなくても自燃すると判断した。しかし、その実質の発熱量は小さく、燃焼熱の利用はその用途が限定される。

#### (2) ビール粕を焼却処理した場合の評価

ビール粕中の炭素の燃焼によって発生する CO<sub>2</sub> は、その原料の穀物が大気中の CO<sub>2</sub> を取り込み固定されたものであるから、環境負荷とならないと判断される。また(1)で明らかなように、ビール粕の燃焼は補助燃料を必要としないので、輸送等に伴う影響が無視できれば、焼却に伴う CO<sub>2</sub> 排出原単位に及ぼす影響は小さいと判断される。

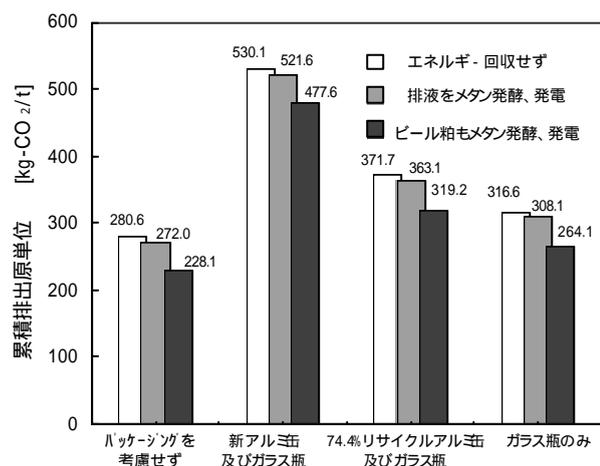


図 3 累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位に及ぼすパッケージングの影響

#### 4.7 缶ビールの功罪

近年アルミ缶入りビールの販売量は、簡便さのためか、益々増えているように思われる。ところで、

アルミニウムは電気の缶詰と呼ばれるほどその製造にエネルギーを要する。ビールのパッケージングに、アルミニウム缶を使用する場合と、リサイクルの優等生と呼ばれるビール瓶を使用する場合のその製品量比率を変化させて、製品ビールの累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位に及ぼす影響を検討した。なお、調査データの場合の製品ビールに対する缶ビール、瓶ビール、業務用樽詰めビールの比率を 4:3:3 と仮定した。

図 3 に、パッケージングの影響を除いた (アルミ缶、ビンの CO<sub>2</sub> 原単位を考慮しない) 場合、アルミ缶に鉱石からの新アルミのみを使用した場合、アルミ缶に関して現在の回収率 74.4% (25.6% が新アルミ、74.4% が再生アルミ) の場合、およびアルミ缶の部分全てをガラスビンで置き換えた場合を比較して示す。なお、業務用ビールの全体に対する製造比率は各場合で変わらないものとし、業務用容器は何度でもリサイクル使用されるとした。また、それぞれの場合で、排水、廃棄物からエネルギー回収しない場合、排水をメタン発酵して得たバイオガスを燃料電池によって電力化する場合、ビール粕および排水をすべてメタン発酵し、燃料電池を用いて電力化する場合の、累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位を比較した。

図から明らかなように、パッケージングの影響を考慮しない場合に比較して新アルミ缶をビール詰め容器に使用する場合は累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位が激増する。再生アルミの利用率が上がれば、累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位は減少するが、さらにアルミ缶をやめて、すべてガラスビン容器に変更した場合には、最も累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位が小さくなり、その値はパッケージングの影響を考慮しない場合に近くなる。またアルミ缶の使用率が低下すれば、廃棄物から得た電力の還元による累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位の削減効果も大きくなる。これはビールビンのリサイクル率が高いためガラスビン容器とする場合の累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位への寄与がアルミ缶を容器とする場合に比較して相当に小さいためである。

## 5. まとめ

ビール工場の製造工程の LCA インベントリー分析によって、製品ビールの累積 CO<sub>2</sub> 排出原単位の 62.8% が水道、電力、ガス、灯油などのエネルギーに由来すると分かった。このことから、外部からのエネルギーの投入をいかに低減するかが CO<sub>2</sub> の削減に重要であると言える。従って、その製造工程で発生する排水や廃棄物をエネルギー化して工程還元することによって、外部からの導入エネルギーの削減が可能となる。

ビール工場廃液のメタン発酵によってバイオガス

を得て、これを燃料電池に通して電力として回収した場合、燃料電池の稼働状況の季節的変動の影響が無視できるとき、廃水から回収された電力は、工場の年間電力の9.74%をまかなうことができ、製品ビールの2.30%の累積CO<sub>2</sub>排出原単位の削減が実現されることが分かった。製品ビールの累積CO<sub>2</sub>排出原単位の削減率が大きくないのは、製品ビールのかかなりの割合がCO<sub>2</sub>排出原単位の大きいアルミ缶を容器として販売されるためである。

さらに、廃液に加えてビール粕もメタン発酵し、燃料電池システムによって発電する場合についても評価を行った。この場合には、工場の年間電力の59.8%をまかなうことができ、14.1%の累積CO<sub>2</sub>排出原単位の削減が実現すると分かった。しかし、ビール粕は飼料として十分市場価値があるため、メタン発酵によるエネルギー化は現実的な選択ではないであろう。またビール粕の焼却については、ビール粕に自燃性があるため、焼却による累積CO<sub>2</sub>排出原単位への影響は少ないと判断された。

また、累積CO<sub>2</sub>排出原単位への寄与が大きいアルミ缶に変えて、再使用率の大きいガラスビン容器として使用すれば、製品ビールの累積CO<sub>2</sub>排出原単位をさらに削減できることが明らかになった。

謝辞：本研究の研究費の一部は平成11年度文部省科学研究費、特定領域研究（課題番号11128251）の援助を受けた。記して深く感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) 吉澤淑編 (1995) 酒の科学 朝倉書店.
- 2) 野白喜久雄他編 (1988) 醸造の事典 朝倉書店.
- 3) 小林富二男 (1998) ビール製造工程における副産物とその再資源化, 畜産コンサルタント, No. 339, 10-15.
- 4) 文部省科学研究費特定領域研究 (1997) ゼロエミッションを目指した物質循環プロセス

の構築, 製造業における物質とエネルギーフローに関するアンケート(A-2班); あるビール工場のアンケート調査結果(著者分担).

- 5) J. E. Bailey and D.F. Ollis (1986) Biochemical Engineering Fundamentals, Second Ed., McGraw-Hill Inc.
- 6) 藤原 昇 (1997) ビールかす, 有機廃棄物資源化大事典, 農文協, p. 189-192.
- 7) 中西英二, 磯部靖三, 高松武一郎, 安岡弘陽, 伊東速水 (1996) LCAにおける配分問題に対する一考察, 化学工学論文集, 21, 815-821.
- 8) LCA実務入門編集委員会編 (1998) LCA実務入門, (社)産業環境管理協会.
- 9) NEDO/SCEJ (1992) Report on CO<sub>2</sub> Emission in Chemical Industries, NEDO-ITE-9101, Tokyo, Japan.
- 10) NEDO/RITE/SCEJ (1994) Report on Eco-balance Analysis for Chemical Products, NEDO-GET-9310-1, Tokyo, Japan.
- 11) NEDO/RITE/SCEJ (1995) Report on Eco-balance Analysis for Chemical Products( ), NEDO-GET-9410-1, Tokyo, Japan.
- 12) NEDO/RITE/SCEJ (1996) Report on Eco-balance Analysis for Chemical Products( ), NEDO-GET-9505, Tokyo, Japan.
- 13) 中西英二ら(化学工学会内, 地球環境プロジェクトH研究会) (1993) プラスチック製品の使用量増加が地球環境に及ぼす影響評価報告書, (社)プラスチック処理促進協会.
- 14) 環境庁編 (2000) 環境白書-総説-, (株)ぎょうせい.
- 15) 村田徳治 (1993) リサイクル技術の実際, オーム社.
- 16) 大橋伸吾 (1999) バイオガスを燃料とした燃料電池の導入, 環境管理, 35, No. 4, 30-35.
- 17) 田中信寿 (2000) 私信(講義資料).

# Life Cycle Assessment of Beer Brewery Factory Based on Cumulative CO<sub>2</sub> Emission Unit

Katsuhiko MUROYAMA\*, Munenori OHGUCHI\*\*, Takuya HAYASHI\*  
and Jun'ichi HAYASHI\*

(\*Department of Chemical Engineering, Kansai University, Suita City, Osaka  
564-8680, Japan,

\*\*Taikisha Co. Ltd., 1-11-2 Osaki, Shinagawa-ku, Tokyo 338-0002, Japan)

## Abstract

We conducted a life cycle assessment (LCA) inventory analysis for input of raw materials, output of products, input of utilities such as electricity, gas, oil and water and various emissions concerning solid wastes in a beer brewery process and wastewater and evaluated environmental impact on global warming based on the cumulative CO<sub>2</sub> emission unit. Namely, the effect of energy recovery due to electric generation by a fuel cell using biogas from methane fermentation of wastewater on the cumulative CO<sub>2</sub> emission unit for the product was evaluated. Also, the effects of methods of treating beer lees on the cumulative CO<sub>2</sub> emission unit i.e., combustion, drying, methane fermentation, converting into livestock's feed or composting, were also estimated.

In a beer brewery factory, the amount as much as 48.3% of the cumulative CO<sub>2</sub> emission unit charged on the product beer is found to be due to utilities such as water, electricity, gas and kerosene. These results show that important thing is how to reduce the energy input from the outside via recovering of energy from organic wastewater and solid wastes. It is found that in the beer brewery factory, the electric energy recovered by the methane fermentation-fuel cell system saves 9.74% of the total electric consumption and it reduces about 2.31% of the total cumulative CO<sub>2</sub> emission for the product beer. It is also found that the combustion of beer refuse, utilization of beer refuse as livestock's feed without drying or composting of beer refuse does not increase the cumulative CO<sub>2</sub> emission unit for the product beer. Also, it may be pointed out that if the organic carbon of the beer lees could be effectively converted into biogas by methane fermentation as well as that in the wastewater and the biogas could be converted to electricity via a fuel cell, about a 59.8% of total electric energy in the utilities would be saved.

**Key Words:** beer brewery, cumulative CO<sub>2</sub> emission, life cycle assessment, analysis of environmental impact, zero-emission.