北マリアナ諸島サイパンで世界初の

固定化酵母による商業ベースでの ビール連続醸造

バイオリクターによるビール連続醸造に関する研究は 1970 年代前半から始まり、数多くの研究結果が発表されている。

しかし、商業ベースでの実用化はほとんど例がなく（ビールの後発酵工程でフィンランドのビール工場が実用化している）、キリンビールがサイパンにおいて世界で初めて主発酵も含めたビール醸造を連続発酵法により成功させている。

バイオリクターを用いると酵母密度等が従来の回分式発酵と大きく異なるため、品質や成分も大きく影響を受ける。これらの問題点をどのようにして解決し、実用化に槽ぎつけたか。その興味ある経過を解説していただいた。

岡 本 隆 典

はじめに

キリンビール株式会社は、1992 年に世界で初めて固定化酵母による主発酵、後発酵技術を導入した小規模ビール連続醸造プラントを北マリアナ諸島、サイパンに建設し、同年 12 月から商業ベースで実運転を開始した。初年度である 1993 年度には併設されたビヤレストランで約 40 kl のビールが販売され、サイパンのオリジナルビールとして定着してきている。プラントの概要とこれまでの運転経過、および長い研究の歴史から実用化に至るまでの技術的なポイントを紹介する。

1. サイパン初のマイクロブルワリー レストラン

1992 年 12 月、サイパン国際空港から車で約 20 分のホテル・ニッコー・サイパン正面に建設された大ショッピングモール“ラ・フィエスタ・サンロケ”内にブルワリーレストラン“サイパン・ビアファクトリー・ボガボガ”がオープンした。店内にはサイパン唯一のビール工場であるマイクロブルワリーが併設され、オリジナルビール、“ボガボガ”が提供されている（写真 1、2）。

サイパンは人口約 6 万人、面積 122 km² の小さな島で

あるが、観光客は年間 50 万人を越え、その経済を支えている。近年、空路約 3 時間の手近な海外リゾートとして人気を集めており、日本からの観光客がその 70% 以上を占めている。気候は、高温多湿で年間平均気温 27°C (25~33°C)、平均湿度は 82% (年間雨量 2,100 mm) におよぶ。

こうした環境から、消費されるアルコール飲料はビールがその大部分であるが、主としてアメリカ本土および

写真 1 ホテルニッコーサイパンよりラ・フィエスタ・サンロケを臨む

The Commercial Operation of a Continuous Fermentation System Employing Immobilized Yeast—First Introduced in the World in Saipan, Northern Mariana Islands—

Takanori OKAMOTO (Technology Development Department, Beer Division, Kirin Brewery Co., Ltd.)

写真 2 ポガボガの店内から見るマイクロブルワリー

写真 3 ポガボガの店内風景

日本から輸入される壺，缶製品が飲まれていた。ポガボガは南国サイパンの気候，風土にマッチした，すっきりして爽快なサイパンで初めてのドラフトビールとして，地元の人たちをはじめ，日本からの観光客などに受け入れられ，定着してきている（写真3）。

2. ビアファクトリー・ポガボガの概要

ビアファクトリー・ポガボガのアウトラインは以下の通りである。

店舗業態 サイパン唯一のビール工場を併設し，オリジナルの生ビールを提供するパブブルワリーレストラン

1F ミニブルワリー，バー，軽食

2F シュラスコスタイルのバーベキューレストラン

規 模 1F 310m² 69 席

2F 418m² 80 席

運 営 サイパンスプリングバレーブルワリー社

資 本 金 US \$ 290 万

キリンビール(株) US \$ 255 万 (88%)

トロピカルプラザ社 (JAL 100%出資)

写真 4 サイパンのスーパー・ブリュー・システム

US \$ 35 万 (12%)

ビール製造能力 500l/日

150kl/年

製造設備

仕 込 麦汁製造釜 1,800l

麦汁タンク 1,800l

発酵・貯蔵 スーパー・ブリュー・システム（写真4）

第1槽（遊離酵母発酵槽）

第2槽（固定化酵母発酵槽）

第3槽（固定化酵母熟成槽）

ビールタンク 1,800l×2

パッケージング ビール濾過機，樽詰機

ユーティリティ 冷凍設備，水処理設備，ボイラ，空気圧縮機

3. スーパー・ブリュー・システムの開発

ビアファクトリー・ポガボガの特徴は，サイパンで唯一のビール工場を持つブルワリーレストランということであるが，とりわけ技術的にはその醸造設備に世界で初めて固定化酵母による発酵，熟成技術“スーパー・ブリュー・システム”を導入したことである。

（1）固定化酵母によるビール醸造

ビール産業は他に類を見ないほど大量の液を長期間，貯留するため典型的な装置産業である。したがって，工場の建設コスト削減，製造工程の効率化はつねに大きな技術的課題となってきた。近年，その答えとしてコンピュータによる製造工程のFA化とならんで，ビール醸造工程では発酵，貯蔵タンクの大型化が進められてきた。20年ほど前には100kl以下の屋内横型タンクが普通であったが，現在では屋外に400～800klのコンカルタンクを建設するのが常識となっている。

生産効率を考えた場合，タンクの大型化とならんで発

酵、熟成に要する時間を短縮し、装置を小型化できれば魅力的である。このような考えからビール醸造においても固定化酵母バイオリアクターの研究が行われている。1937年にレンガ片に酵母を吸着させた研究例が最初と言われているが、本格的には1970年代前半に相次いで発表された研究から始まる¹⁻³⁾。これらはいずれも、酵母とケイソウ土を混合して多孔性の酵母菌体層を形成し、細胞の系外への流出を抑えながら麦汁を連続的に通し、発酵を行おうとしたものである。固定化により酵母濃度は固定化しない場合と比べて10倍にもなり、発酵速度は5~10倍程度になる。

発酵速度が上れば生産性は当然高くなる。エタノール、アミノ酸などの単一成分の生産であれば、生産性のみを問題にすればよいが、ビールの場合は高級アルコール類やエステル類など多くの微量成分が複雑に絡み合っ

(2) スーパー・ブリュー・システム(SBS)の原理

① C-N バランスに着目し香味改善を実現

固定化酵母を用いたビール醸造においては前述のような香味の問題があった。キリンビールでは、この問題を解決するために、固定化酵母による発酵と通気攪拌発酵を組み合わせたシステムをすでに提案している⁸⁾。通気攪拌発酵では同様に酵母を高濃度に保持して迅速発酵を可能とするが、盛んな酵母増殖に伴ってアミノ酸が過剰に消費される。その結果ビールとしては酸味が強く、水っぽいものとなる。これら正反対の香味特性を持つ二つの方法を組み合わせることにより、伝統的な回分式静置

第1図 アミノ酸と糖の消費パターンモデル

第1表 スーパーブリューシステムで製造したビールの分析値例

分 析 値	従来法	SBS
外観エキス (°P)	1.75	2.06
エタノール (w/w%)	3.87	3.79
外観発酵度 (%)	84.15	81.45
pH	4.26	4.36
アミノ酸合計 (mg/L)	804.04	709.00
全窒素 (mg/L)	55.58	55.63
全ダイアセチル (mg/L)	0.02	0.03
n-Propanol (mg/L)	11.43	11.60
Isobutanol (mg/L)	11.64	8.60
Isoamyl alcoho (mg/L)	62.63	55.27
Ethyl acetate (mg/L)	14.08	15.78
Isoamyl acetate (mg/L)	1.38	1.36

発酵と同程度の糖(C)-アミノ酸(N)バランスが実現される(第1図)。すなわち、通気攪拌発酵により、まずアミノ酸を回分式静置発酵の場合と近くなるまで消費させ、その後浮遊酵母を遠心分離で除去し、固定化酵母で糖を消費させる。ビールの重要な香味成分の多くは主発酵工程で酵母の増殖、発酵に伴って生成される。したがって、増殖の指標となるアミノ酸の消費と発酵の指標となる糖の消費のバランスを回分式の場合と同程度に確保すれば、同様の成分組成が得られ、結果として同様のビール香味が実現できるというアイデアである(第1表)。

② ダイアセチル迅速低減技術の開発

ビールの熟成は、代表的な不快臭気成分とされるダイアセチルの除去が大きな目的である。ダイアセチルは、発酵の前期に酵母の増殖に伴ってバリン生合成経路の中間代謝物として生成するα-アセト乳酸が前駆体となる。伝統的な低温貯蔵による熟成では、α-アセト乳酸が貯蔵中に酸化的脱炭酸反応によりダイアセチルに変化すると考えられている。この反応は非生物的反応でその速度は、温度と時間に依存する。実際は貯蔵タンクでは、生成したダイアセチルはただちに浮遊している酵母に取り込まれ、無臭のアセトインに変換されるので問題にならない。しかし、α-アセト乳酸が多量に残った状態でビール濾過工程で酵母が除去されると、パッケージのなかでダイアセチルになり、問題となる。貯蔵は低温で行われるため、α-アセト乳酸の脱炭酸反応が律速になって長期間を要している。

この反応は温度が高くなればなるほど速く進む。従来熟成工程は、タンパクを主成分とする混濁物質除去の目的もあって、低温で行われてきたが、近年この作用機作が明らかになるに連れ、α-アセト乳酸の早期消失を目的として、主発酵終了後、やや高めに温度を保持することが行われている。さらに極端に、発酵を終了した若ビー

第2図 加熱および第3槽によるダイアセチルの低減

ルを 60~70°C に加熱してやれば 20~30 分という短時間で反応は完了する。また、これを嫌気状態で行えば、 α -アセト乳酸の大部分が中間生成物であるダイアセチルを経ずに、直接アセトインに変換する⁹⁾。少量生産するダイアセチルは、再度低温で固定化酵母リアクターを通すことにより容易にアセトインに還元され、弁別閾値を下回る(第2図)。この技術を前述の主発酵システムと組み合わせ、発酵、熟成工程を合わせてわずか3~4日という超短期間でアクセプタブルなビールの連続製造が可能となった¹⁰⁾。

③ ハイパミックス担体によるスケールアップ

SBS のもう一つの大きな技術要素は、キリンビールで開発した粒状セラミック担体、ハイパミックスである。固定化担体としては一般に細胞を保持するのに適したサイズの多孔質あるいはマトリックス状の物質が用いられる。固定化担体に求められる性能は、当然ながら細胞固定化能力の高さ、操作の簡便性に加え食品では人体への安全性が重要になる。これらの条件を満たし、かつ安価なものとなると限られてくる。研究段階ではアルギン酸カルシウムのゲルに酵母細胞を包括してビーズ状にする方法が多く試みられた。しかし、この方法は物理的強度の低下、処理流量の低下を招き、長期間の連続運転、ス

写真5 セラミックス担体ハイパミックスに固定化された酵母

第3図 固定化酵母による発酵効率の経時変化
○: アルギン酸Caビーズ ●: ハイパミックス

ケールアップには問題があった。ハイパミックスはアルギン酸ビーズよりは劣るものの高い固定化能力を有し、物理強度に優れているため、長期間連続運転を行った場合もアルギン酸ビーズのような膨潤による圧密化減少は起こらず、安定した発酵過程を示す(写真5, 第3図)。実用規模での生産を考えた場

第4図 スーパー・ブリュー・システムのプロセスフロー

合、発酵速度の変動が小さいことは大きな利点であり、スケールアップ、および長期間におよぶ連続運転が可能となった。

4. サイパンの SBS プラント

サイパンに建設されたプラントは、スーパー・ブリュー・システムの原理に則り、テクニカルセンターでのスケールアップ試験を経て設計した。プロセスフローを第4図に示す。麦汁は回分式で調整し、冷却後 0℃ 以下の低温で麦汁タンクに保存する。この麦汁を連続的に加熱殺菌しながら第1槽（通気搅拌遊離酵母槽）に供給して 13℃ で酵母を増殖させ、適度なアミノ酸消費量を確保する。アミノ酸消費量のコントロールは日常的には発酵度で行い、定期的にアミノ酸分析を行って確認する。ついで酵母を遠心分離した後、第2槽（固定化酵母槽）で糖の消費を行う。第2槽は粒状セラミック担体ハイパミックスを用いた充填槽型固定化槽で、上向流で運転する。発酵温度は 8℃ とし、均一な温度分布を確保するために、冷却ジャケットに加え、内部に冷却管を持つ。ここまですが伝統的醸造法の主発酵工程に相当し、工程滞留時間は 2～3 日である。

さらに熟成工程としてまず嫌氣的に加熱し、 α -アセト乳酸の大部分を無臭のアセトインに直接変換する。つい

第2表 オリジナルビール“ボガボガ”の分析値

分析項目	分析値
原麦汁濃度 (w/w%)	10.53
外観エキス (w/w%)	1.00
外観発酵度 (%)	90.2
アルコール (v/v%)	5.00
色度 (EBC)	9.2
pH	4.3
イソフムロン類 (mg/L)	12.1
総アミノ酸 (mg/L)	525
全ダイアセチル (mg/L)	0.08
酢酸エチル (mg/L)	26.8
酢酸イソアミル (mg/L)	1.8
イソアミルアルコール (mg/L)	63.0

で第3槽（固定化酵母槽）で再度酵母と接触させることにより、一部生成したダイアセチルをアセトインに還元する。第3槽は第2槽と同様上向流充填槽型固定化槽で、ダイアセチルの再生成を抑えるため、0℃ の低温で運転する。滞留時間は約 1 日で、発酵、熟成工程を合わせた工程時間は 3～4 日となる。

連続的に得られるビールはビアタンクに溜めて、回分式に濾過、樽詰され、併設のレストランで販売されている。

第5図 工程各槽の糖度の経時変化

5. SBS の運転経過およびビール品質

(1) オリジナルビール“ボガボガ”

品質コンセプトは、事前の市場調査により設計した。主なターゲットは 20~30 代を中心とする日本からの観光客であったが、既存の輸入ビールに飽き足らない地元の人たちをも意識した。“南国サイパンでのリゾート気分”にマッチする軽いイメージ、解放感、ちょっと違う満足感”をキーワードとし、“すっきり、ドライな口当たり、特徴的なエステル香”を特徴とするビルスナータイプのドラフトビールとした。日本のビールと比較して大きな違和感がなく、かつ差別性を付与することが求められたが、高発酵度、高エステル類など、2 段階の高濃度の酵母による発酵という SBS の原理にも起因する香味成分生成の特徴を生かして満足できるレベルで実現できた(第 2 表)。

(2) 6 カ月におよぶ連続運転

SBS の一大特徴は長期連続運転である。酵母は固定化直後にはなお増殖系にあり、静止期に入るまでに数日を要するが、定常状態に入れば長期に渡って連続的に安定したビール品質を維持できる。立上げ後 1 年間すなわち 2 回の連続運転における糖度の経過を示す(第 5 図)。第 1 回の立上げ時には初期の機械トラブルなどもあり、適性な管理状態になるまでにやや長期間を要したが、その後はほぼ安定的にコントロールできた。1993 年 6 月の第 2 回立上げは極めて順調に行われ、ビール品質も良好に維持できた。連続運転期間は、固定化酵母の活性低下に伴う発酵効率の低下、ビール品質への影響などを考慮して決定されなければならないが、現時点では開発段階での検討結果から安全を見て 6 カ月としている。現在 4 回目の連続運転に入っているが、実績を重ねてさらに連続運転期間が延長できればメリットが大きくなることはいうまでもない。

(3) 工程管理作業

運転要員は 1 名で、定常作業は週 1~2 回の麦汁製造、ビール濾過樽詰のほか、糖度測定、pH 測定、微生物測定などの工程管理、点検監視作業である。SBS は連続運転のため、液の移送、タンク洗浄といった作業が少なく、通常、各管理項目は安定している。6 カ月に 1 度

の固定化酵母槽の再生ほか立上げ時は手動操作となるため、若干の要員が必要となる。またその間、2 週間程度の停止期間とある程度の製造ロスを見込まなければならず、その短縮は今後の課題である。

おわりに

長年の研究開発を経て、固定化酵母によるビールの発酵、貯蔵技術が世界ではじめて商業ベースで実用化され、1 年余り経過した。サイパンの SBS プラントは規模が小さいため、経済メリットの面では評価が難しく、また連続運転ゆえに製造の柔軟性という面でなお改善を要する部分もある。しかしながら、将来のテクノ・イノベーションに向けて一つの可能性を開いたことは評価に値するものと信ずる。読者諸氏をはじめ、より多くの方々にご来店いただき、新技術の味に触れていただければ幸いである。

＜キリンビール(株)技術部＞

文 献

- 1) D. A. BAKER and B. H. KIRSOP : *J. Inst. Brew.*, **79**, 487 (1973)
- 2) L. P. NARZISS and P. HELICH : *Brauwelt*, **111**, 1491 (1971)
- 3) L. P. NARZISS and P. HELICH : *Brew. Dig.*, **47**, 106 (1972)
- 4) F. H. WHITE and A. D. PORTNO : *J. Inst. Brew.*, **84**, 228 (1978)
- 5) S. E. GODTFREDSEN, M. OTTESEN and B. SVENSSON : *Proc. Eur. Brew. Conv.*, **18**, 505 (1981)
- 6) C. A. MASCHELEIN and C. FRANCTTE : *Cerevisiae*, **3**, 135 (1983)
- 7) B. PARDONOVA, M. POLEDNIKOVA, H. SEDOVA, M. KAHLER and J. LUDVIK : *Brauwissenschaft*, **35**, 254 (1982)
- 8) K. NAKANISHI, T. ONAKA, T. INOUE and S. KUBO : *Proc. Eur. Brew. Conv.*, **20**, 331 (1985)
- 9) T. INOUE, H. MURAYAMA, K. KAJINO, T. KAMIYA, S. MITSUI and M. MAWATARI : *Proc. Eur. Brew. Conv.*, **23**, 369 (1991)
- 10) K. NAKANISHI, H. MURAYAMA, K. SATO, A. NAGARA, T. YASUI and S. MITSUI : *Hakkokougaku*, **67**, 509 (1989)