

フコイダンを製造するサイホン式プラントの自動化技術と製作

青木 央

Fabrication and automation technology of the siphon method plant for manufacturing the Fucoidan

Hiroshi Aoki

要 旨

フコイダンは、ガラスサイホンを用いて製造する方法が既に開発されており、この方式に基づいてフコイダンを閉鎖系で純度良く製造できる装置を発展型として開発している。この装置はバルブ操作をおこなない抽出液を制御しフコイダンを抽出精製するが、開発の初期段階では手動操作であったこの装置の自動化を計画し、一定の完成を見ているので経過を報告する。

コンブやヒバマタそしてモズクなどの海藻類に含まれている硫酸化多糖類のフコイダンは、フコースを構成糖とした基本骨格を持ち、その水酸基の一部が硫酸エステル化された化学構造を持つ天然高分子化合物である。このフコイダン¹⁾は、ガゴメ昆布には、マコンブより2倍程度多く含まれ、褐藻類から取れるアルギン酸とは異なり、食物繊維としての生理的な基礎機能を持つこと以外に、特有の機能性を持つとされる。例えば、繊維芽細胞成長因子 (FGF) との協働作用による組織修復の機能は、創傷被覆保護材への応用などが可能である^{2) 3)}。

機能性多糖類であるフコイダンの基本的な抽出方法には、2通りの方法があり、酸抽出法と塩化カルシウム法に分類される。酸抽出法に代表されるのは、西出ら⁴⁾が報告する抽出方法になる。一方、塩化カルシウム法はアルギン酸の抽出方法の逆用になる。つまりは、アルギン酸をアルギン酸Ca塩として不溶性とした後の水溶性成分を抽出する。アルギン酸を抽出した残部にはフコイダンがあるという技術思想になる。

この塩化カルシウム法による抽出方法は、通常のビーカ、分液ロートなどの実験器具により、実

施が可能であるが、より効率的な方法として、ガラスサイホンを用いる方法がある。この方式については、既に具体的な抽出方法と抽出されたフコイダンの品質を分析した例を報告済みである。⁵⁾

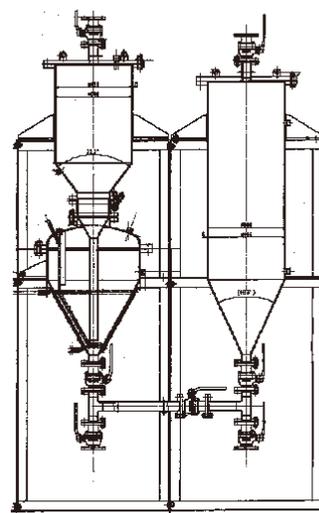


図1 抽出装置の本体構造

その製造技術に関して、塩化カルシウム法による新規のバッチ生産方式を開発中であるが、この製造技術の中心となる装置は閉鎖系であるので、原材料の損失や異物の混入が少なく、良質のフコ

イダンが製造可能である。この特別に工夫された塩化カルシウム法によるフコイダンの製造方法を連続バッチ生産式で可能とする装置は特許を取得している。この装置はステンレス製であり、図1に示したような構造をしている。このフコイダン製造装置はコーヒーの抽出で知られるサイホン方式と連結管の原理によって液体を制御するので、作業工程の管理が容易な製造ラインが実現できると考えている。内部構造の詳しくなどは公開特許情報⁶⁾の図面などを参考にしてほしい。向かって左側が抽出槽で、右側が沈降精製槽となっている。抽出槽は2段構造になっており、上部のファネルが分離できる。

フコイダンの製造工程の概要を表1に示したが、このうち、洗浄から精製までをこのフコイダン製造装置が分担する。この発明で注目すべきは、例えば、コンブ粉末を洗浄したのち、次の容器に移し替えて作業するということがなく、そして、抽出後のコンブ粉末が、残渣としてそのまま試料トレイの役割を持つ篩の上に回収されるという特徴を持つ。抽出槽側には、上部ファネルの分離、持ち上げ用メカニカル機構を設計していないので、現在は上部ファネルを天井の小型クレーンで吊り上げて、篩の交換作業することになる。原材料のコンブ粉末化と再精製でのイオンコントロールと乾燥は、別途の付帯作業となる。



図2 計装作業後の装置正面

装置の設計方針、要求仕様として、1回あたり標準1kg処理（最大2kg）、熱源はスチーム、ステンレス仕様で、原材料の投入は、市販のJIS規格

の篩をカートリッジとして装填し交換使用できること、バルブ開閉による操作で作業が完了し、200Lのメジャー兼沈降タンクを連結するなどがある。水冷、加熱ジャケット、温度計、圧力計、水位計などを備え、密閉容器で、多少の加圧、減圧に耐える仕様となる。大きさは W1800mm × D850mm × H2500mm となった。最大耐圧1MPaで設計した。装置本体の製作は広島市内の圧力装置メーカーにお願いした。

表1 フコイダンの製造工程の概要

工程	実施例
洗浄	酢酸酸性 70%エタノール
抽出	塩化 Ca 含有熱水抽出
精製	アルコール沈降精製、静置分離
再精製	キレート剤によるイオン交換、 アルコール再精製
乾燥	凍結乾燥

この装置を稼動して製造の実施は、以下のようになる。函館小安産ガゴメ昆布粉末900g（クロスビータミル粉砕、刃目1.5mm）を用いた。洗浄液は酢酸酸性70%エタノール30Lで実施、洗浄温度は70℃程度になる。バルブ操作とジャケット水冷で吸引ろ過し、抽出液は下部より排出、この工程で脱塩など水溶性成分の除去と脱脂、脱色素を行う。抽出は水30Lに塩化Ca・2水和物39gを加えアルギン酸から分離抽出、このとき抽出温度は80~90℃となり、抽出時間は5分間で実施する。その後バルブ操作と蒸気加圧でサーバタンクへ移送、抽出液の2倍量（目安量60L）のエタノールと混合して静置した後、下部の沈降したフロックを回収する（体積圧縮）。その後フロックを別途の35L容器で、10mM EDTA-2Na含有0.9%食塩水に再溶解し、再度、フロックとなるようエタノールを加えて再精製をおこない、プランクトンネットで回収、リンス、水切りし、凍結乾燥機にかける。このときのフコイダンNaの収量は、50g程度となることが判った。

製造工程は、本体にある7つのボールバルブを開閉操作することで実施している。詳しくの操作手順は、やはり公開特許情報⁶⁾の実施例に記載されているので参考にされたい。基本的には、これ

らのバルブ操作によりフコイダンの製造が可能であり、その方法などをマニュアル操作で試験し、動作を確認した後、製造品質の安定化、連続生産による効率化などを目標に、熱源であるスチームと冷却水の流量、給湯、薬剤投入を制御するバルブが配置するなどして、自動化システムの導入を検討した。フコイダンの抽出操作のモード変更が容易で、用途に合わせた品質のフコイダンを製造できる自動化システムの完成を目標に研究開発を進めている。

図2はその計装改良が進む装置外見で、その開発目標を達成するために、自動化のためのシーケンス制御用⁷⁾の配電盤が前面に取り付けられている。



図3 本体の操作パネルの様子

メインバルブの操作状況と位置関係がわかるように表示灯とスイッチのレイアウトを工夫している。右や上に見える画面が GOT のパネルユニット。上段左が蒸気バルブ出力計、同じ並びの中央が、温調用 PID 制御ユニット（表示が23℃）である。右端には、緊急停止用の丸い押しボタンスイッチを配置している。

中央に配電制御盤（図3）があり、制御方式には、PLC（プログラマブルロジックコントロール）が採用され、GOT（グラフィックオペレーターミナル）により、稼動状態の視認性のよい表示、タッチパネル操作による小型化を目指している。そして、バルブの開閉のロジック制御をプログラミングし、メモリできるようにすることでモード変更の容易な装置の高度化・自動化を進めている。この一連の計装技術の開発方向は、シーケンス制御される製造プロセスを採用する多くのラインで設計の主流となりつつあると思われる。



図4 操作盤の内部、配線の様子

右下側にある長方形のボックスが PLC 制御用の PC ユニットである。配電盤の縦横はカバー付の配線ダクトを設置し、引き回しを整理して、製作される。GOT の採用により、スイッチ類の大幅な削減ができる。

配電制御盤の内部を図4に示したが、これらの装置は全て自作によるアSEMBリである。工作の要点や設計の方針など、製造装置の自動化に関する基本的な作業項目は、

1. 配電盤の金属加工、結線作業。
2. バルブコントロール用の電動バルブ設置
3. システム稼動のための給排水管の施工と流量制御システムの設置
4. 熱源(スチーム)の制御に関わるシステム設計
5. 抽出工程のシーケンス制御（PLC方式）のプログラミング
6. グラフィカルオペレーションのためのタッチパネルモニター（GOT）の設置と表示のデザイン。

以上の6項目に整理できると思われるので、以下に順次、実施内容や注意点などを記載する。

配電盤の工作・生産では、ワイヤ放電カッターが利用される場所であるが、ハンドメイド試作機となると、ドリル、ヤスリ、金切鋸などを活用し、穴あけ加工を行う。10mmφ以上の丸穴あけは、表示灯、スイッチの設置に必須になるが、ホールソーという下穴を中心にくりぬき加工をする工具を利用する。また、アースは緑色であるが、内部の配線色の基本は黄色という計装のルールがある。圧着端子の加工、ならびにワイヤの加工工具などは必須となる。一部、半田付けの加工が生じる。制御盤の内部信号は24Vにより制御される。しかし、電動バルブなどは駆動がAC100Vにな

るので、シーケンサから直接制御できないから、スイッチ用のリレーを設置することとなる。また、薬液用の送液ポンプのようなものや3相200Vで正転、逆転を利用するモータの場合などは、開閉器を使用しシーケンサから制御する。このとき発動機は、駆動時に一瞬の過大の電流が流れるので、その対策として、遅延ブレーカが設置される。

バルブコントロール用の電動アクチュエータユニットは、手動用のハンドを取り外して設置になる。ユニットからは、開閉情報を配電盤にリターンし、表示などを行う必要がある。バルブが閉のときは青色、開のときは赤色などという表示灯のルールもある。また、シーケンサにもバルブの開閉情報を利用し、ヒューマンエラー対策として危害の恐れが生じないようにインターロックシステムを設計する必要がある。さらには、自動運転のほか、手動運転に対応できるよう回路の切り替え、平行回路の備えをしている。

給排水のフローコントロール関係では、給水系は歯車式、エタノールなどが通る薬液系は、超音波式のフローメータが採用されている。この理由は主には歯車式の羽材料の耐薬品性能による。流量に比例した出力となるパルスはカウンタで計測、流量に変換する。この制御用カウンタは、シーケンサユニットのシリーズに販売がある。給水は20A、通常は15Aの太さで配管してある。途中でワイディングフィルターを入れてある。

熱源となるスチームは、食品加工工場では通常ある送気圧力で十分なレベルであるが、工業技術センターは、所内の給湯、暖房ボイラー設備にある還流ボイラーから蒸気を送ることができる。また、抽出用温水を供給するため小型の熱交換器を背後に設置してある。抽出温度は、熱電対を内蔵した被覆管を直接、液中に接触させて測定するが、外部監視用にバイメタル式の温度計を2箇所設置してある。抽出温度のコントロールは送気量をPID制御する。PIDの制御ユニットは、現在小型のものが市販されており、設定も学習機能が標準で装備されており、細かなパラメータの設定はそれほど難しくはない。蒸気の送気出力は、PID制御ユニットからではなく、ニードルバルブユニットからの開閉信号をモニターし、電圧で表示する。急激な異常圧力上昇時に備えて緊急停止ボタン、マニュアルベント用のリークバルブなどを備

える。

抽出工程は、一定のサイクルの繰り返しになるのであるから、幾つかある抽出モードをプログラムしておき、繰り返し装置を稼働させる。この一定の手続きをシーケンス制御というが、ラダーという絵図でプログラムが表現される。このプログラムを幾つか用意して、メモリーに保存が利くので、適宜呼び出して、装置を稼働させる。高精製品の製造モードや、短時間製造のecoモードなどをプログラム開発し、備えることができる。また、他の材料からの抽出物の製造に応用できるような設定も開発し、装置の汎用性を高めることができる。

シーケンサユニットの電源は、GOTやそのほかの装置からは独立しており、本電源がショットダウンしない限り、すべてのシステムが一度に機能しなくなることは無いような設計になっている。さらに、電源投入時は、シーケンシャルに通電され、突入電流の影響を回避する方法が採用されている。これは、航空機などのシステムで、コックピットのスイッチを定まった手順で、わざわざ順番に入れてゆく様と同様である。この1秒にもみたくない操作時間の間隙が、装置を保護し電源の軽量化に貢献するのである。

GOTは身近なところでは銀行ATMのタッチパネルで応用されている。操作したいところに触れると次の画面に切り替わり、次の操作を指示する。必要があれば、10キーパットを表示し、処理する試料の量などの数値入力を行う。この画面の大きさに制限があるが、デザインは、専用のソフトで如何様にもできる利点がある。開発側は、使い勝手の関係で、この意匠にはユーザの意見をフィードバックして改良すべき内容が含まれることを心得ておく必要がある。図5に本機の操作画面のデザイン例を示した。

具体的な工作技術のうち、更に詳しい配電盤と配線などの電気関係の工作ルールなどは、文献8)、配電盤の表示灯など設計ルールは文献9)をシーケンス回路の実用例や設計は文献10)、入出力装置の割付と接続は文献11)をシーケンスプログラムのプログラミングは文献12)を参考にされたい。また、PLCとGOTの供給メーカーが提供する実践的なトレーニングテキストなども大変参考になる。また、PLCのプログラミングには専用



図5 GOT 操作画面のデザイン例

上段は、立ち上げ時の初期画面の例、「標準」とある四角の部分タッチすると下段のような設定画面に切り替わる。原材料処理量を別のポップアップ画面で入力すると、ハイライト部分に作業に要する液量の見積りが算出され、「標準」モードでの製造コストの計算を支援する。このように画面の「入れ子」が可能である。

の書き込み用ソフトウェアのインストールされたPCが必要であり、GOTの画面の製作、デザインにもやはり専用のエディタソフトウェアのインストールされたPCを用意する必要がある。エンジニアリング業界では常識かもしれないが、配管バルブ系の機材と電気系の機材では、納期に極端な差があり、作業日程が大きく変更になる場合があるので、発注には注意が必要である。

2011年の東日本大震災における原発事故のニュースは、これらのプラントの設計と製作に影響を与えた。たとえば、製造工程が進行中の時に装置を安全に止めることができるかといった課題が浮上してくることになる。プラントには熱容量というものがあり、熱効率を引き上げると冷めにくい装置となり、緊急冷却が難しくなる。また、緊急バルブ開放により、抽出物を緊急廃棄して、ショットダウンすることも考えなくてはならず、そのほか、蒸気配管の損傷が起きた場合に作業員を熱傷から保護できるかなど、課題がいっぱいある

ことを示唆されたことが教訓となっている。

最後に、トータルした製造コストの関係では、エタノールの原材料費に占める割合の削減（租税関係事務を含む）と再利用、もしくは代替品としてインプロパノール（IPA）の使用などが利用目的により選択できると考えている。最終的には医療用品としてしての高品位で高度な需要に対応できる製品の製造許認可を得られるような製造設備を目指している。それに対応した先端的な設計が採用されていると思っている。まだ、道半ばではあるが、塩化カルシウムを用いたサイホン方式によるフコイダンの製造法は、連続バッチ生産方式に技術展開が可能な方法であり、良質なフコイダンの製造が可能である。本件のようなシーケンスロジック制御による自動化システムの開発により、安定した工業生産技術に発展させたい。

謝 辞

この研究開発は、文部科学省都市エリア産学官連携促進事業（発展型）（平成18-20年度）、文部科学省地域イノベーション戦略支援プログラム（グローバル型）（平成21-25年度）の事業資金を利用しています。この場を借りて関係者の方々に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 山田信夫：海藻フコイダンの科学（成山堂書店）、(2006)
- 2) K.Murakami, H.Aoki, S.Nakamura, M. Takikawa, M. Hanazawa, S. Kishimoto, H. Hattori, Y. Tanaka, T. Kiyosawa, Y. Sato, M. Ishihara: Biomaterials, 31 (2010) ,83-90
- 3) K. Murakami, M. Ishihara, H. Aoki, S. Nakamura, S-I. Nakamura, S. Yanagibayashi, M. Takikawa, S.Kishimoto, H. Yokoe, T.Kiyosawa, Y. Sato: Wound Repair and Regeneration, 18 (2010) , 478-485
- 4) 西出栄一、安斎寛、内田直行：日本水産学会誌 (Nippon Suisan Gakkaishi) ,53 (1986) ,1083-1088
- 5) 青木央：北海道立工業技術センター研究報告、第13号 (2014) ,1-6
- 6) 青木央、宮崎俊一：フコイダン抽出・精製装置及びフコイダンを抽出・精製する方法、特許

- 第4759706号 (2011)
- 7) 坪井照雄：新版シーケンス制御入門（コロナ社）、(2008)
 - 8) 佐藤一郎：図解制御盤の設計と製作（日本理工出版会）、(2008)
 - 9) 佐藤一郎：図解シーケンス制御と故障修理（日本理工出版会）、(2008)
 - 10) 佐藤一郎：図解シーケンス実用回路（第2版）（科学図書出版）、(2007)
 - 11) 吉本久泰：12週間でマスターPCシーケンス制御（東京電気大学出版局）、(2008)
 - 12) 熊谷英樹：ゼロからはじめるシーケンスプログラム（日刊工業新聞社）、(2010)