

大型造粒機の技術変遷と将来展望

Transition and Foresight in Technology of Large Granulator



石川 誠*
Makoto Ishikawa



清水 陽平*
Yohei Shimizu



原脇 六四**
Mutsushi Harawaki



金岡 信之**
Nobuyuki Kaneoka



猫西 正敏**
Masatoshi Nekonishi



戸田 賢二**
Kenji Toda



栗原 正夫*
Masao Kurihara



山澤 隆行***
Takayuki Yamazawa

要 旨

造粒機はポリオレフィンペレット製造用に使用される、処理量増大に特化した押出機である。当社は1960年から60年にわたり造粒機を製造・販売してきた。市場の要求に応えるために造粒機は大型化、構造変更、自動化などの変遷を重ね、安全かつ簡単な操作で、安定して長時間連続運転ができる機械へと進化してきた。本稿では当社の大型造粒機の技術変遷と将来展望について解説する。

— Synopsis —

A granulator is an extruder which is used for a production of polyolefin pellets at high throughput. Our company has produced and delivered granulators for 60 years since 1960. A granulator has evolved into a machine that can be operated stably and continuously for a long period with safe and simple operations through series of changes such as enlargement, structural changes, and automatic operation in order to satisfy the demands of the market. This paper explains the technology transition and foresight of a large granulator of our company.

1. 緒 言

当社は1907年に鉄鋼業を興し、火砲の国産化を図るべく創業した。戦後に民需転換し、1950年に樹脂機械の市場に参入して以降、押出機を製造・販売してきた。押出機はスクリュをシリンダに内蔵し、スクリュの回転によって原料の搬送、可塑化、混練を行う機械である。造粒機は処理量の増大に特化したポリオレフィンペレ

ト製造用押出機の呼称で、黎明期の単軸スクリュ押出機に始まり、単軸スクリュ押出機を備えた二軸スクリュ押出機を経て、現在のギヤポンプを備えた、あるいはギヤポンプレスの二軸スクリュ押出機に主力製品を変えながら当社の製品群の一翼を担ってきた。初期の機種では時間あたり1系列のペレットの製造能力(処理量)は数Tons/Hourであったが、現在では100Tons/Hourに達している。造粒機のトラブルによりペレットが製造できない生産損

*: 広島製作所 樹脂製造機械部 造粒機 G
Polyolefin Extruder Engineering Group,
Plastics Machinery Department, Hiroshima Plant

** : 広島製作所 電装技術部 機械電装設計 G
Machinery Electrical Design Group,
Electrical Engineering Department, Hiroshima Plant

*** : 広島製作所 樹脂製造機械部
Plastics Machinery Department,
Hiroshima Plant

失は多大となるため、長時間安定して連続運転できることが必要不可欠である。加えて、自動運転起動システム、自動樹脂廃棄システムなどの開発・搭載によって安全かつ安定な機械の起動を実現してきた。本稿では、これら造粒機の技術変遷と将来展望を解説する。

2. 造粒機本体の技術変遷と将来展望

2.1 単軸スクリュ押出機

当社は1950年に国産押出機の第一号ともいえるべき、油圧駆動単軸スクリュ押出機を開発した。これは軟質ポリ塩化ビニル(s-PVC)用のスクリュ直径65mmの押出機であった。1958年頃に日本で石油化学コンビナートが稼働を始め、ポリエチレン(PE)の生産が開始され、1963年頃にポリプロピレン(PP)の生産も開始された。これらに伴って当社も本格的に造粒機の開発、生産を始めた。この時期は、スクリュ直径200mmのP200(写真2-1)という機種が主流で、処理量は約1Tons/Hourであった。

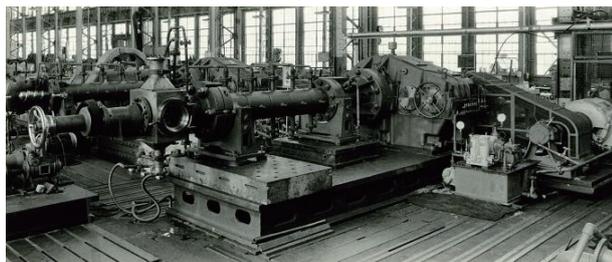


写真2-1 初期の単軸スクリュ押出機、P200 (1960年)

低密度ポリエチレン(LDPE)の場合、①メルトフィードタイプ、②ホモジナイジングタイプ、③メルトホモタイプの3種類の造粒機があった。LDPEは融けた状態(メルト)で重合工程が完了し、この段階で使用される造粒機をメルトフィードタイプと呼んだ。当時は、均一化(ホモジナイジング)、添加剤付与、未反応物の脱気を目的に2度目の造粒が必要なのが一般的で、この段階で用いられる造粒機をホモジナイジングタイプと呼んだ。1976年に工程の合理化のため、1台で①と②の機能を有するメルトホモタイプの造粒機が製造された。スクリュ長さとしてスクリュ直径の比、Length/Diameter (L/D)を異にする二軸スクリュを採用し、優れた混練性能と昇圧性能を両立した特殊な二軸スクリュ押出機、あるいはドイツのバルストルフ社から技術導入したL/Dが長く、特殊なスクリュ形状を採用した単軸スクリュ押出機が生産されたが、重合技術の進歩によりあまり普及しなかった。ホモジナイジングタイプの造粒機も1980年代になると生産台数が減少し、2001年に生産を終了した。

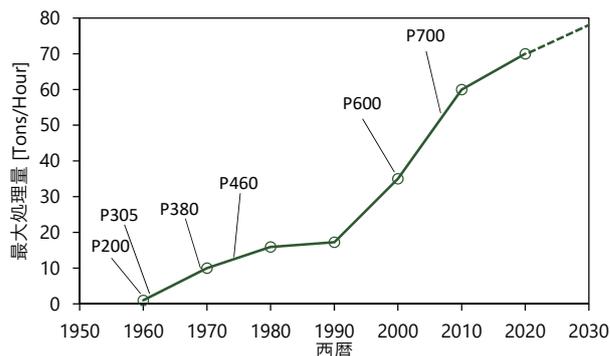


図2-1 単軸スクリュ押出機の最大処理量の変遷 (メルトフィードタイプ)

一方でメルトフィードタイプの単軸スクリュ押出機は現在でもLDPE用造粒機の主流である。図2-1は単軸スクリュ押出機の新機種の投入時期と10年ごとのメルトフィード用造粒機の最大処理量を示す。処理量増大の市場要求に応えるため、スクリュ直径の大きな機種を適宜開発し、2020年にスクリュ直径700mmのP700押出機で70Tons/Hourの処理量に到達した。

高密度ポリエチレン(HDPE)、直鎖状低密度ポリエチレン(L-LDPE)、PPはそれぞれ粉末(パウダ)の状態で重合工程が完了し、可塑性機能が造粒機に要求されるため二軸スクリュ押出機が主流となった。

2.2 二軸スクリュ押出機+単軸スクリュ押出機

1963年に当社はドイツのクラウス=マッフアイ社からDouble Screw Mixer (DSM)の技術導入を行った。DSMは同方向噛合型二軸スクリュをベースに、押出機先端は単軸スクリュ二本に変わるというスクリュ構成の押出機であった。スロット機構という、シリンダとスクリュの一部にテーパ部を設け、シリンダをスクリュ軸方向に油圧で前後移動させてその隙間を調整するという、混練度合い調整の機能を備え、ポリ塩化ビニル(PVC)やアクリロニトリル・ブタジエン・スチレン(ABS)などの混練プロセスに数多く納入された。

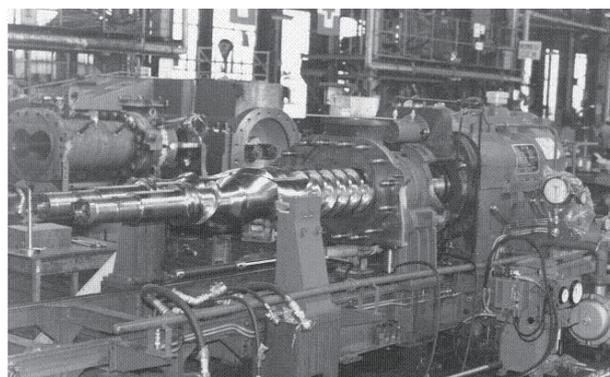


写真2-2 CIM320 (1970年)

1960年後半に、DSMをベースに、スクリュ回転方向を同方向から異方向へ、噛合型を非噛合型へ変更して処理量増加に特化して開発されたのが非噛合型異方向二軸スクリュ押出機、Continuous Intensive Mixer (CIM)であった(写真2-2)。前述のDSMのスロット機構を踏襲した高い混練調整性能と、スクリュの両端を軸受けて支持することで高い耐久性と高速スクリュ回転を実現した。システム全体としては、可塑化混練性能に優れたCIMの下流に昇圧性能に優れた単軸スクリュ押出機を備えたタンデム型システムで構成された(図2-2)。1970年代当時、可塑化用途の単軸スクリュ押出機の処理量は約4Tons/Hourであったが、1970年に生産開始されたCIMは約10Tons/Hourの処理量を達成していた。さらに、1974年に生産開始されたシリンダ直径400mmのCIM400は約20Tons/Hourの処理量まで対応が可能であった。タンデム構成のCIMは国内外で積極的に採用され、1998年までに約110台納入されたが、機械が大きくなるにつれて、延床面積が大きいという課題から次世代機へ交代することになった。

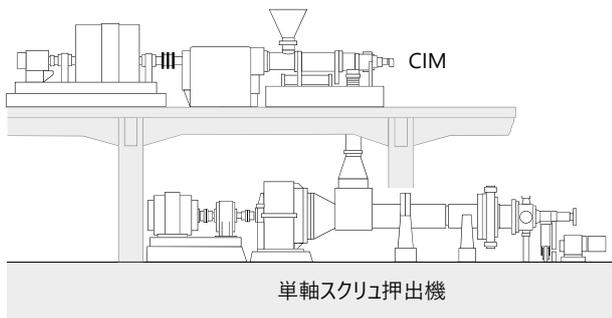


図2-2 CIMと単軸スクリュ押出機のタンデム構成

2.3 二軸スクリュ押出機+ギヤポンプ

省スペース化のためにタンデム構成のCIMを押出機1台に合理化する必要があった。ここで、単軸スクリュ押出機が担っていた高い昇圧能力をどうやって実現するかが課題であったが、ギヤポンプ(歯車ポンプ)を採用することで解決した。ギヤポンプは効率的な油圧ポンプとして一般に利用され、回転する2本の噛合ったギヤがケーシングに内蔵され、溶融状態の樹脂でも効率的に昇圧できる(図2-3)。

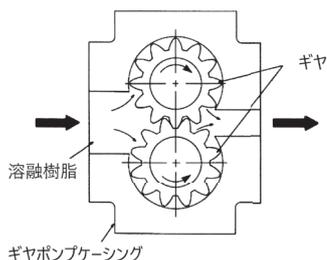


図2-3 ギヤポンプの構造

ギヤポンプは、同じ機能を担っていた単軸スクリュ押出機に比して約1/3のエネルギー消費で、20MPa程度の背圧でも樹脂の温度上昇を最小限に抑えて昇圧が可能である。1984年に造粒機へのギヤポンプ導入を開始した当時、駆動方式は片軸駆動と両軸駆動があったが、片軸駆動はギヤの摩耗が避けられないため、耐久性の高い両軸駆動のみが造粒機に採用されるようになった。また、初期は他社製のギヤポンプを購入していたが、1987年から自社でギヤポンプを製造し、独自開発した軸受け材や軸材を適用して耐久性を高めている。駆動軸は当初ギヤカップリングであったが、メンテナンス性に優れ、減速機の設計自由度の高いユニバーサルジョイントに置き換わっていった。

1980年初頭から、ギヤポンプと従来のCIMの技術をベースにした非噛合型異方向二軸スクリュ押出機 Continuous Mixer Pump System (CMP)が開発され、1984年に生産が開始された(写真2-3)。CMPはギヤポンプを取り付けるために、CIMの両端軸受け構造からスクリュ片端の軸受け構造に変更された。CMPは従来CIMのタンデム構成から押出機一台の構成に変更することで省スペース性を実現し、コストパフォーマンスにも優れる機械であった。CMPは2001年までに約20台が生産され、最大処理量は約30Tons/Hourであった。改造により約60Tons/Hourを達成したCMPもあった。



写真2-3 CMP400 (1986年)

1986年に、従来のCMPを非噛合型から噛合型へ、異方向から同方向へ変更したCMP-Xの生産が開始された(写真2-4)。噛合型同方向二軸スクリュ押出機はスクリュ同士がお互いの樹脂をかき取るというセルフクリーニング性を有するため、樹脂の滞留防止に優れ、原料の搬送能力にも優れる。CMP-Xは2003年まで生産され、

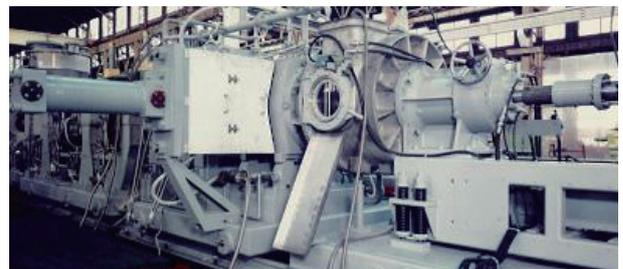


写真2-4 CMP305X (1987年)

その間の納入台数は約 120 台、最大処理量は約 50Tons/ Hour に達した。

「より高混練に適した造粒機を」という市場要求に応える形で、1995 年に非噛合型異方向二軸スクリュ押出機 CIM とギヤポンプを組み合わせた現行型 CIM が生産開始された(写真 2-5)。旧型の CIM をベースにしていたが、押出機先端に昇圧能力を付与するため、全長にわたり二軸スクリュとし、ギヤポンプの採用も実現した。また、スクリュの両端を軸受けで支持し、高速回転と耐久性を両立した。スクリュ先端に軸受けを採用しているため、押出機とその下流のギヤポンプ、スクリーンチェンジャ、カッティング装置を直角に接続した L 字型のレイアウトを採用している。2.2 節に記載のスロット機構は、スクリュ形状の変更により採用できないため、Rotary Slot Bar (RSB) という、特殊な断面形状の二本の Bar をスクリュ軸直角に配置してスクリュ上下を挟み、これらの Bar が回転することで樹脂流路を調整するという混練調整機構を開発した。現行の CIM は HDPE や L-LDPE 用の造粒機に適しており、約 50 台が納入され、スクリュ直径 400mm の CIM400 で約 50Tons/Hour、460mm の CIM460 で約 70Tons/Hour、510mm の CIM510 で約 75Tons/Hour の最大処理量を達成している。



写真 2-5 CIM510 (2016 年)

2001 年に、CMP-X をベースに処理量増大のために L/D を約 2 倍に延長し、スクリュ全長にわたり噛合型同方向スクリュを採用した現行型 CMP の生産を開始した。混練調整機構として、ゲートバルブの開閉機構を利用した Slot Disk (Gate Valve) を開発した。この CMP は主



写真 2-6 現行型のギヤポンプレス CMP362 (2006 年)

に PP 用造粒機として採用され、噛合型スクリュを押し出機先端にも採用することで押し出機自体での昇圧性能に優れるため、ギヤポンプレスでも生産可能となっている(写真 2-6)。また、脱気、過酸化物を用いた粘度調整、インラインコンパウンドと、長い L/D を活かした CMP も生産されている。現行の CMP は約 100 台が納入され、スクリュ直径 335mm の CMP335 で約 55Tons/Hour、362mm の CMP362 で約 65Tons/Hour、387mm の CMP387 で約 90Tons/Hour の最大処理量を達成している。

2.4 造粒機の将来展望

造粒機の歴史は処理量増大の歴史であり、今後も処理量増大の市場要求は続くものと思われ、LDPE、HDPE、L-LDPE、PP のいずれの樹脂も 100Tons/Hour を超えると予想される。必然的に押し出機および付属機器の大型化が進み、安全かつ安定な操作性が重要視されると考えられる。この実現には自動化技術が重要であり、先述した装置本体と並行して進化させてきたが、今後もさらなる開発が必須である。

また、お客様は競争力を高めるために造粒機のランニングコストの低減に尽力されている。トラブルによる造粒機の停止を防ぐこと、安定運転時の消費動力を下げるのが重要となる。消費動力を下げるには、可変速度のモータを押し出機の主モータに採用することが有効な手段と考えられる。処理量、樹脂の粘度、品質に応じてスクリュ回転速度を下げるなどの調整ができれば、消費エネルギーを削減できるためである。また、カッタ刃やダイスなどの消耗品の長寿命化も重要な因子となっている。これらについてはカッタ刃の摩耗速度を自動調整できる制御システムの開発も行っている。

上記の自動化技術、制御システムなどは次章で述べる。

3. 造粒機の自動化の技術変遷と将来展望

3.1 制御システムの変遷

造粒機生産開始当初の 1960 年代は、大規模なアナログ計装にて制御を行っていたが、1975 年に Distributed Control System (DCS) が計装各社より商品化され、プラント全体の運転、監視用に採用されるようになった。

図 3-1 に制御システムの変遷図を示す。1985 年頃より、Programmable Logic Controller (PLC) が、分散制御として、造粒機の制御、インターロック用に採用され始め、ローカル PLC で本体および周辺装置を起動後に、操作権を DCS へ切り替え、システムの操作・監視を DCS で行うようになった。1990 年以降、PLC およびパーソナルコンピュータ(PC)の演算性能が飛躍的に向上し、PLC や PC は一般的なものとなっ

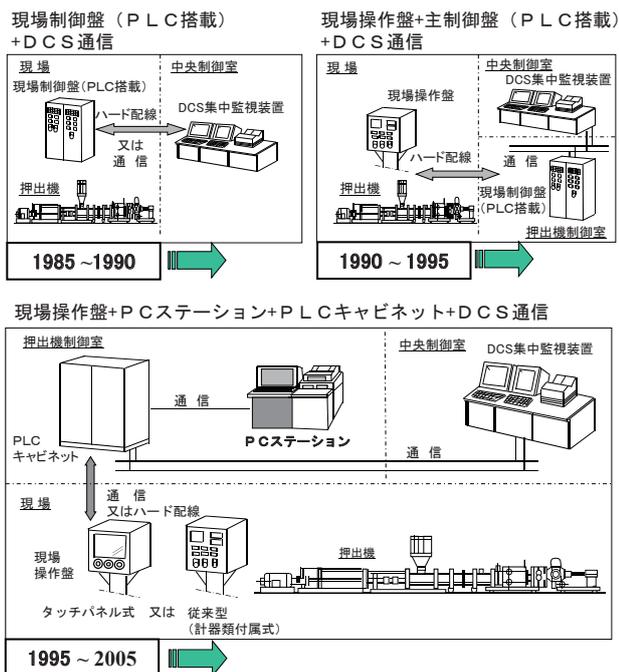


図 3-1 制御システムの変遷

た。2000 年頃からは、PLC とリンクし、PC ベースで操作、監視を行う、PC ステーション(監視装置)を製品化し納入を開始した。PC ステーションは、押出建屋に設置された操作室に設置され、押出プロセスの運転を監視できるシステムである。運転操作のみならず、運転操作ログ、プロセスデータグラフ表示、アラーム履歴など DCS と同等の機能を有している。

2010 年以降の最近の傾向として、図 3-2 に示す造粒機の制御システム構成例のように、プラントの安全監視を行うための Safety Interlock System (SIS)、主要回転機器の振動監視を行う Vibration Monitoring System (VMS)、および主要計装機器の故障診断を行う Asset Management Solutions (AMS) と主要機能を分散し、オンラインで自動的にシステム診断を行うシステムが多く、プラントで採用されるようになってきた。これにより、PLC を用いた造粒機の制御システムには、従来の監視用 DCS へのインターフェースに加えて、前述の SIS、VMS、AMS へのインターフェースが要求されるようになってきている。

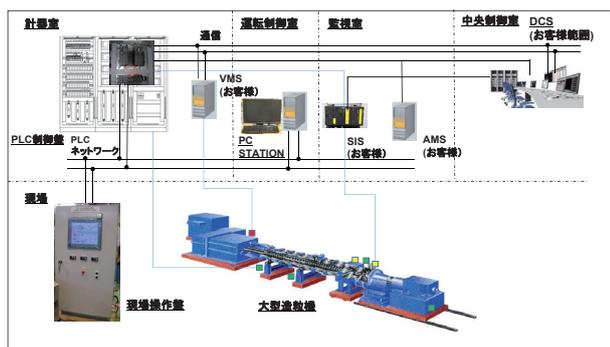


図 3-2 造粒機の制御システム構成例

PC ステーションとして、当初汎用の Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA) ソフトウェアを採用していたが、2009 年以降押出プロセス用の PLC として広く採用されている SIEMENS 製の安全 PLC と親和性の高い DCS システム (PCS 7) をベースとして、PC ステーションをラインナップし、お客様より好評を得ている。図 3-3 および図 3-4 に PLC システム構成図および PC ステーションの代表画面例を示す。

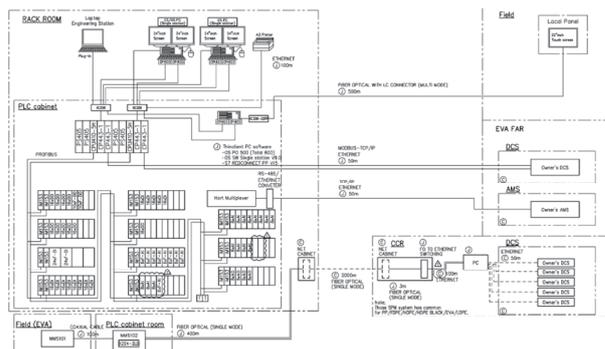


図 3-3 PLC システム構成図

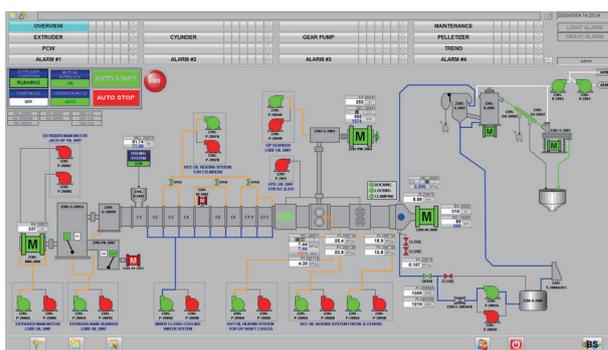


図 3-4 PC ステーション画面例

3.2 PC ステーションの機能と将来展望

PC ステーションは、OS (オペレータステーション) 端末と ES (エンジニアリングステーション) 端末から構成され、ES 端末からは、現場の Human Machine Interface (HMI) タッチモニタや PLC のプログラムのモニタリングやソフトウェアの更新を操作室から実施することを可能としたものである。ES 端末の搭載により、現場でのプログラム更新作業は不要となり、お客様のメンテナンスの作業性を向上させた。

造粒機の制御システムには、異常が発生した場合、機器の保護やオペレータの安全確保を目的に、アラームによる警告、インターロックによる機器の起動制限や自動停止の機能が備わっている。しかし、アラームやインターロックが多数あるため、システムを熟知していないと原因と対策をすぐに見いだせない場合がある。このため、運転支援機能として運転アドバイザー機能を開発して搭載

した。これはアラームやインターロックが発生した場合に想定される原因および対策を自動的に表示してお客様に知らせ、迅速な機器の復旧を補助する機能である。

現在、さらなる機能向上として、PC ステーションから、所定のフォーマットでの運転データの取り出しを可能とするデータトランスファ機能の開発を進めている。加えて、取扱説明書や部品表との関連付けを行い、部品の自動見積照会に展開し、お客様が容易に部品を注文できるシステムの開発を行っている。

さらなる検討項目の一つとして、IoT 技術を活用した迅速なサービス対応が挙げられる。従来は、造粒機の制御関連の保守は、お客様で実施されることがほとんどであったが、今後は、それをサポートする保守サービス能力がメーカーに要求されると思われる。具体的な取り組みとしては、遠隔サポート機能の搭載が挙げられる。これに対し、遠隔での接続が可能なハードウェアを既に PLC に搭載済みであり、プログラムの保守や、デバックを遠隔で実施するソフトウェアやサービスの開発を計画している。

3.3 自動起動・停止機能

造粒機では水中カッティング装置を利用してペレットを生産している。ストランド状の樹脂を押出機先端のダイスから水で満たした水室に吐出し、ダイスに接したカッター刃でストランドを連続切断することで粒状のペレットを得る。水中カッティング装置を有する造粒機の起動は、カッティングを開始するタイミングの調整が難しく、手動立上げには習熟を要する。たとえ操作に慣れたオペレータであっても、迅速かつ高度な作業・操作が要求されるため、負担が大きい。起動操作に失敗した場合、カッティング装置の水室や配管に樹脂が詰まるため、復旧のためのダウンタイムが発生する。また大型の電動機に起動回数制限が設けられている場合には、クールダウンを待つ必要も生じる。

そのため、PLC を使用した制御装置が主流となった 1980 年代後半には、自動起動シーケンスを標準機能として搭載し、円滑でミスのない起動を実現している。また、停止時においても、円滑な再起動が行えるように、最適なタイミングで各機器を停止する自動停止シーケンス機能も搭載している。

3.3.1 自動起動シーケンス

造粒機の起動時は、原料を押出機に投入し、ダイバータバルブおよびダイスから熔融樹脂を排出させながら樹脂の状態を確認するとともに、系内に樹脂を充填するパージ運転が必須である。この後、カッティングを開始するが、各機器の起動タイミングの調整は重要で、通常、試

運転時に当社の運転指導員が最適化する。

自動起動シーケンスは、上記の最適化された原料供給装置、押出機、および押出機下流機器の起動タイミングを含む造粒機の自動起動プログラムである。図 3-5 は代表的なシーケンスのフローチャートを示す。本機能の搭載により、オペレータの負担を軽減した造粒機の起動を実現している。

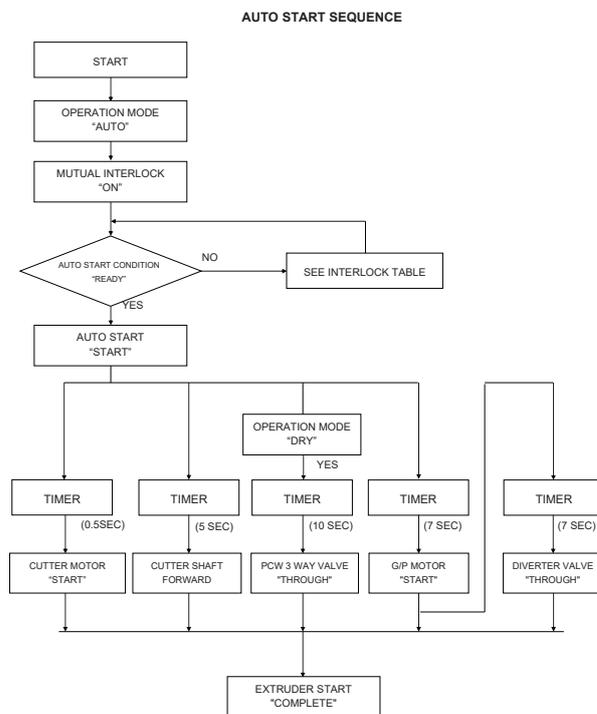


図 3-5 自動起動フローチャート

3.3.2 カッティング装置の水中スタートシーケンス

1990 年代後半から 2000 年代前半にかけてプラントの大型化が進み、現在の造粒機の処理能力は、年産 80 万 Tons 級のプラントにも対応している。高い処理能力を有する造粒機は、パージ運転による熔融樹脂の排出量も増加するため、排出処理作業が難しくなるが、ダイスからの排出量を低減できるカッティング装置の水中スタートシーケンスを開発することでこの作業を平易なものとした。

水中カッティング装置の起動方法としてはドライスタートと水中スタートの 2 種類がある。前者は、カッティングをスタートした瞬間に水室に水は無く、ダイスから樹脂が吐出した直後に水室を水で満たす。後者は、先に水室を水で満たしてからカッティングをスタートする方法である。ドライスタートはダイスの穴が固化した樹脂で閉塞する可能性が低く、良好なペレット形状が得られる一方で、ダイスのパージ運転が必須である。水中スタートは樹脂がダイスに詰まった状態で開始すれば、ダイスへ樹脂をパージする必要が無い一方で、樹脂によっては

ダイスの穴が樹脂で閉塞して十分なペレット形状が得られない場合があった。

従来型的水中カッティング装置の起動シーケンスでは、融点の低いPEやゴム系プロセスでは採用されていたが、比較的融点の高いPPプロセスでは適用が難しかった。そのため、カッティング開始時にダイス温度を高く保つためのステップを加える改善を行い、PP用の造粒機でも適用できる水中カッティング装置の自動起動シーケンス⁽¹⁾⁽²⁾を2000年代後半に開発して以降、標準搭載しており、お客様より高い評価を得ている。

3.3.3 自動停止シーケンス

造粒機の停止は、安全に、かつ円滑な再起動を考慮した適切な順番で行う必要がある。自動停止シーケンスでは上記を考慮して、上流側の機器から適切なシーケンスで順番に停止していく機能を実現している。

また、異常発生時の造粒機停止も平易ではないが、主要機器である造粒機本体、ギヤポンプ、水中カッティング装置のそれぞれの稼働状態を反映したインターロックを相互に連携させる機能を自動停止シーケンスとリンクさせることで、円滑な再起動を考慮した停止だけでなく機器の保護も両立させている。

3.3.4 自動シーケンス範囲の拡大と今後の展望

先述の自動起動シーケンスは、カッティングの開始タイミングの自動化に関わるが、自動起動の範囲を拡大して、系内に樹脂を充填させるためのパージ運転まで含めた自動起動シーケンス、さらに、お客様プラントの設計思想やプロセスの特徴に応じて停止シーケンスをカスタマイズして構成するなど、お客様のニーズを反映した改良を加えた事例もある。

3.4 カッタ制御の自動化

3.4.1 カッタ軸自動押圧制御

1960年代から1980年代迄、水中カッティング装置は連続生産を続けるとカッタ刃のエッジが鈍化してカッティング状態が悪くなるため、運転中に適宜手動でカッタ刃をダイスに当てて、刃を研いでいた。プラントの大型化が進み、高能力と省人力に対応するべく、1987年に自動押圧カッタ装置⁽³⁾ Auto Advanced Direct Drive Cutter (ADC) を上市した。カッタ刃の摩耗量に応じて自動的にカッタ軸を前進させる機能と、カッタ刃をダイプレートに適切な力で押し付けるためのカッタ軸への押圧制御を有しており、カッタ刃のエッジをシャープに保つことで常に高品質なペレットを安定して製造することができる。

図3-6に、造粒中のカッタ軸に作用する力、およびこれらの総和であるダイスに対するカッタ刃の押付力の計算原理を示す。カッタ刃押付力(F0)は以下の数式で計算される。

$$F_0 = f_1 - f_2 - f_3 + f_4 \pm f_5$$

ここで、f1はカッタ軸をダイスに向けて押し付けるためにカッタ軸に印加される油圧、f2は、f1とは逆にカッタ軸をダイスから離す方向にカッタ軸に印加される空圧、f3は水室に流れるPCWの水圧であり、カッタ軸をダイスから離す方向に作用する、f4は角度が付いたカッタ刃が回転することによって船のスクリュと同様に水を押出すことによって生じる反力(水中推力)であり、カッタ軸をダイスに近づける方向に作用する、f5はカッタ軸の摺動抵抗であり、カッタ軸の動く方向と逆の向きに作用する。

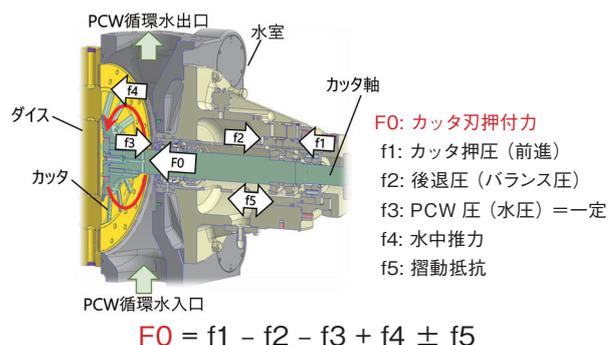


図3-6 カッタ軸に作用する力と押付力の計算原理

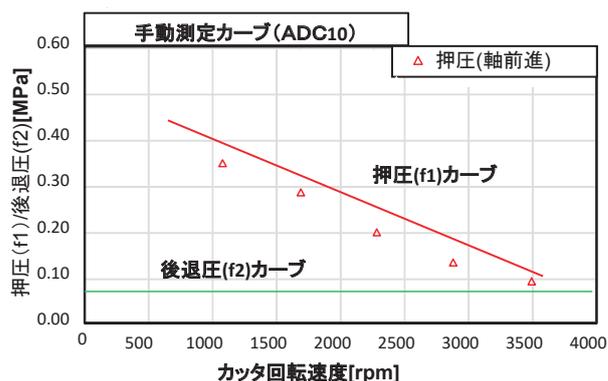


図3-7 カッタ押圧カーブ (一次関数)

カッタ刃押付力(F0)が大きすぎるとカッタ刃やダイスが摩耗しやすくなり、小さすぎると樹脂の切断が不安定となりペレット形状に悪影響を及ぼす。よって、カッタ刃押付力を適正、かつ一定に保つ必要がある。しかしながら、カッタ軸の回転によって発生する水中推力(f4)はカッタ刃の枚数と速度により変化する。このため、カッタ

押付力(F0)を一定に保つため、カッタ回転速度に応じてカッタ押圧(f1)を調整する方法を開発した。カッタの回転速度を変えながら適切なカッタ押圧(f1)を測定し、実測データを一次関数で補間してカッタの押圧カーブ(図3-7)を作成し、本カーブをPLCもしくは調節計などのプログラムへ組み込み、カッタ回転速度に応じたカッタ押圧(f1)の自動制御を行う。

後退圧(f2)の利用方法は二つあり、一つはカッタ刃押付力の発生に利用できる油圧の最大値に限られるため、種々の機械で適切な押圧カーブを運転範囲全般にわたって作成できるように調整するためである。もう一つは、この押圧カーブを用いてカッタ刃押付力を調整しても、場合によってはカッタ摩耗速度の微調整やカッティング状態の改善が必要な場合がある。この際は後退圧(f2)を微調整することでプログラムへ組み込んだ押圧カーブを変更することなく、一時的な調整が可能となり、運転操作が簡略化される。

近年の造粒機の処理量の増加により、ダイスが大型化し、カッタ刃の枚数も増加した。これに伴い、従来の一次関数による押圧カーブでは、補間の精度が不十分となり、2016年からは二次関数の押圧カーブに変更している(図3-8)。また、カッタの大型化が進み、押圧制御のみでは全運転範囲において適切な押圧制御を行うことが難しくなってきた。そこで、図3-8に示すように後退圧(f2)も同時に自動制御することで、全運転範囲において理想的な押圧カーブでカッタ刃押付力を制御する技術を確認した。

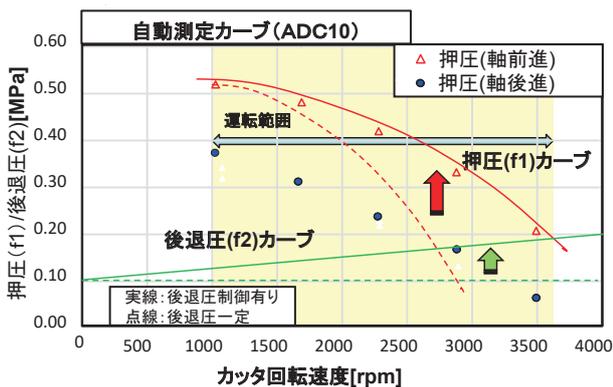
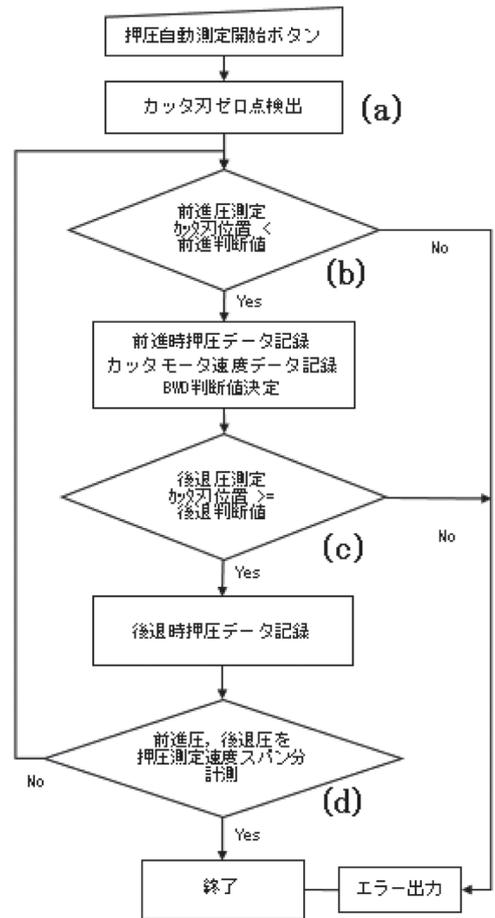


図3-8 二次関数と後退圧制御を適用したカッタ押圧カーブ

3.4.2 押圧カーブ測定の自動化

3.4.1項に記述のように、カッタ押圧カーブは運転指導員が手動で各装置を操作して測定データを採取していたが、“なじみ”などの経時的な要因によるカッタユニット内各部の摩擦抵抗の変化により、押圧カーブの再測定が必要となる場合があった。このため、押圧カーブを自

動測定するアルゴリズムを開発し⁽⁴⁾、制御装置に搭載した。図3-9に示す押圧カーブ自動測定のフローチャートに基づき、図3-10に示す要領で自動測定を行う。測定された結果をもとに、自動的に二次関数の押圧カーブを作成・更新することで、押圧カーブの調整を完了させる。2016年から造粒機に採用した押圧カーブ自動測定システムの主な特徴を以下に示す。



- a) ダイスとカッタ刃の接触した位置を検出、基準となる“ゼロ点”を設定
- b) 押圧を徐々に増加、前進基準位置へ前進する圧力を測定
- c) 押圧を徐々に減少、後退基準位置へ後退する圧力を測定
- d) 全運転領域で b) および c) を測定

図3-9 押圧カーブ自動測定のフローチャート

1) ワンボタンで測定

測定を起動すれば、自動的に押圧測定を開始して数値を記録していく、手動による押圧測定のような煩雑な操作が不要であり、オペレータは測定中の機器の動作観察をするだけで良いため、省人化を可能とする。

2) 再現性の高い押圧測定

手動測定と比べて、オペレータの違いに依存しない再

現性の高いカーブを得ることができる。自動測定で得られたカーブは、図 3-11 に示すように最適化されたカーブと精度良く一致することを確認している。

3) 押圧カーブの自動演算

図 3-12 に操作画面例を示す。自動測定されたデータは PC ステーションで計算処理され、適切な押圧カーブの自動演算とプロット表示を行う。人手による計算やプロットの手間が不要である。

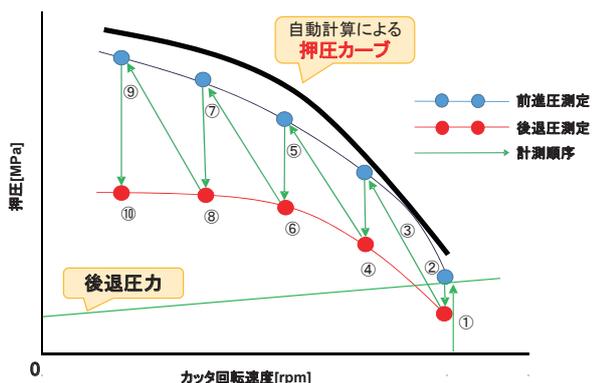


図 3-10 押圧カーブ測定の概念図

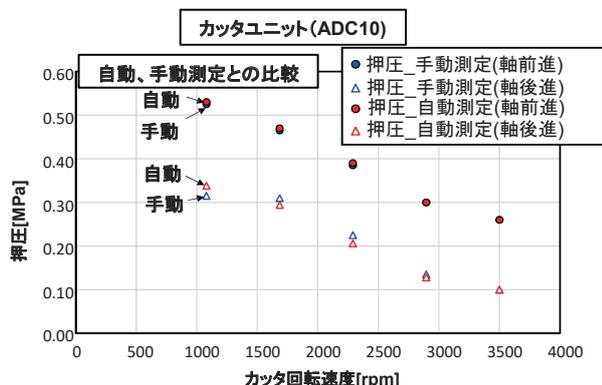


図 3-11 押圧カーブの自動測定と手動測定の比較

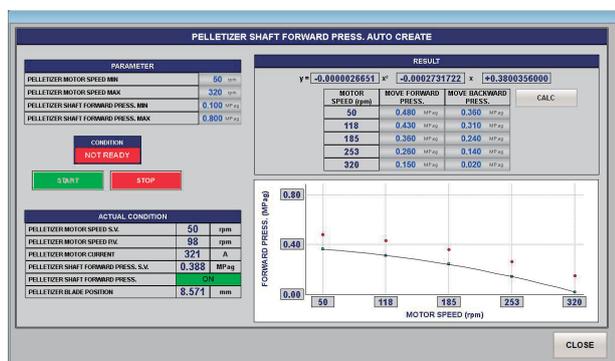


図 3-12 押圧カーブの操作画面例

3.4.3 カッタ自動制御のさらなる進化

カッタ刃の摩耗速度やカッティング状態を管理しながら、標準値より高めの押圧、または低めの押圧にするなどの微調整が可能なパラメータを準備している。お客様の経験を盛り込んだ適正值の設定ができるためカッタ刃の寿命と安定したカッティングとを両立した運用を可能とした。

幅広い樹脂の粘度(Melt Index (MI))や処理量に対応するためには、異なる刃数のカッタホルダを使い分ける必要がある。最適な押圧カーブは刃の枚数により異なるため、各々に最適な押圧カーブが存在する。本カッタ軸自動押圧制御には、それぞれの刃数における押圧測定値を個別記録して押圧カーブの算出・保存が可能であり、使用するカッタホルダに応じて画面選択により呼び出し、使用することが出来る。

また、新品のカッタ刃を使用する前になじみ運転(グライインディング)を行う必要があるが、自動なじみ運転操作を可能とする機能も開発した。さらに、カッタ刃摩耗速度を設定値に自動でコントロールする機能の開発も完了した。これにより、カッタ刃の長寿命化とオペレータの作業負荷軽減が両立できる。これらは、2020 年の出荷機から搭載している。

3.5 運転起動時の廃棄樹脂自動運搬システム

造粒機の運転開始時には、前回の運転でシリンダ内に滞留している樹脂を吐出・廃棄する必要がある。この際、残留樹脂をスクリーンメッシュおよびダイスに通すと目詰まりを起こす可能性があるため、一般的には押出機のシリンダ先端にダイバータバルブ⁽⁵⁾ (スタート用バルブ)が搭載されている。ダイバータバルブとは樹脂の流路を、シリンダ先端から吐出して廃棄する流路と、スクリーンメッシュおよびダイスに通す流路とを切り替えるものである(図 3-13)。

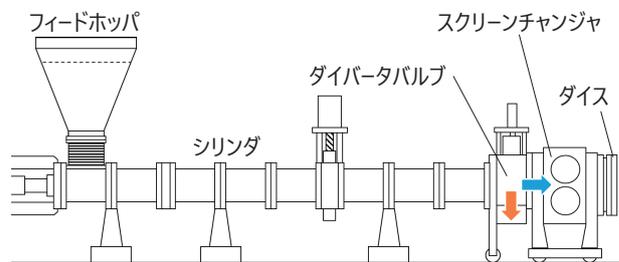


図 3-13 ダイバータバルブを備えた押出機

1986 年のダイバータバルブ導入当初、造粒機の処理量は比較的少なく、廃棄樹脂の処理量は 5Tons/hour 程度であった。そのため、作業者が手鉤、スコップ、シャベルなどで用いて運搬しやすい大きさに切断して樹脂を廃棄していた(図 3-14)。



図 3-14 作業者によるダイバートバルブの樹脂廃棄

しかし、近年の造粒機の大型化に伴い廃棄樹脂の処理量も増加して、現在では 20Tons/hour になる場合もある。短時間とはいえ、このような処理量の樹脂を人力で切断するのは困難、かつ危険となり、加えて廃棄樹脂の処理が適切に行われないと、造粒機の起動に異常をきたす場合があった。そこで、造粒機の大型化が加速した 2006 年に、油圧あるいは空圧駆動による樹脂切断装置⁶⁾がダイバートバルブに導入された(図 3-15)。ダイバートバルブから排出される樹脂は切断装置によって小さな樹脂塊へ切断されるため、安全な廃棄と運搬が可能となり軽労化も実現した。

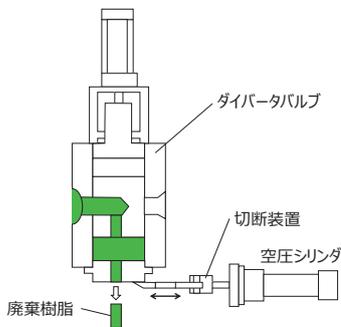


図 3-15 ダイバートバルブ樹脂切断装置

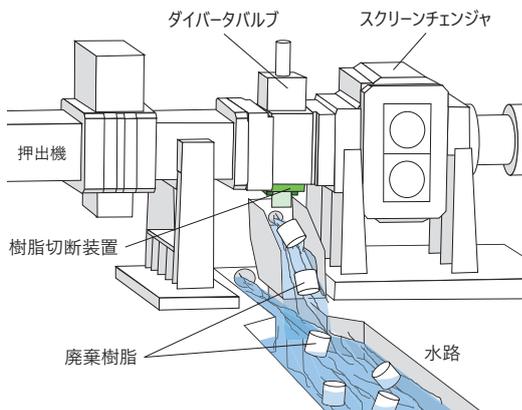


図 3-16 水流を利用した廃棄樹脂自動運搬システム

2007 年にさらなる作業の軽労化として、切断された樹脂塊を自動運搬するシステムが導入された。ダイバートバルブから排出された樹脂を切断し、水路によって樹脂塊を冷却固化させながら自動で系外に運搬するシステムである(図 3-16)。この自動運搬システムによってダイバートバルブからの樹脂廃棄作業の完全な無人化が実現できた。今後も自動化の要求は高まると考えられ、ダイスからの吐出樹脂を廃棄する作業の自動化、ダイスの自動清掃などに取り組み、最終的には造粒機起動の完全自動化の実現を目指す計画である。

4. 結 言

本稿では 60 年にわたる当社の大型造粒機の技術変遷と将来展望を解説してきた。一言で言えば処理量増大に応える大型化と安定運転のための自動化の歴史であったが、その時々市場の要求にどれだけ応えられるかが、製品の普及に大きく影響したと改めて実感する。短期的にみれば、今後も樹脂の市場は堅調に伸びていくことが予想される。変化に機敏に対応した製品を開発してお客様の満足できる造粒機を提供していく所存である。

参 考 文 献

- (1) 牛尾剛, 高本直樹, 梶山靖, 堀本秀樹, 栗原正夫, 岩井淳一, 森田真司: 日本製鋼所技報, 第 59 号 (2008), pp29-33
- (2) 石川誠, 高本直樹, 山澤隆行, 兼山政輝, 西村永吾, 高本誠二, 栗原正夫, 牛尾剛, 井上茂樹: 日本製鋼所技報, 第 63 号 (2012), pp80-85
- (3) 水谷豊, 吉田稔, 石田康彦: “プラスチックの造粒方法及び装置”, 特開平 5-228923 (1993)
- (4) 原脇六四: “プラスチック水中カッティング装置におけるカッター刃押付け圧力曲線の作成方法”, 特許第 4158861 号 (2008)
- (5) 吉田稔, 牧田哲生, 藤井穠義: “樹脂排出弁”, 実開平 2-98273 (1990)
- (6) 西本賢二: “押出機の廃棄樹脂の切断装置”, 実開平 7-5719 (1995)