

ブス混練技術の進化と新型連続混練機COMPEO

平井和彦*

はじめに

Buss AGは、1901年に鉄鋼建設関連の企業としてスイス・バーゼル近郊の町に設立されたが、1946年に画期的な単軸往復動連続混練機の原理を発明したHeinz List氏の参画によりブス・ニーダーの開発製造を開始した。鋳物砂やミルクチョコレートの混練に始まり、1950年以降はプラスチック用、アルミ電極ペースト用、粉体塗料用などの連続混練機の導入により約70年にわたり各業界における混練工程の生産性向上、製品品質向上に貢献してきた。連続混練機の実績でもあり、長年『コニーダー』の名前とともにその実力は認知されてきた。

特に温度やせん断に敏感な材料の混練には抜群の性能を発揮し、多くの業界において最良の選択肢として確立されている。その代表例として、ケーブル絶縁用コンパウンド、医療用の高品質PVCペレット、ハロゲンフリー難燃ポリオレフィン（HFFR）、架橋ポリエチレン（XLPE）のペレット、粉体塗料、食品産業におけるチューインガム用ガムベースなどがある。

現在、より強靱で耐擦傷性、難燃性、耐候性などにも優れ、かつ省エネにも

つながる材料の需要は着実に伸びている。このような特性は、多種多様なフィラーや添加剤を均一に混合することでしか得ることはできない。こうした状況を踏まえ、これまで長年にわたり連続混練機を開発製造してきた専門メーカーとして、極めて繊細で敏感な化学材料の加工に用いられてきたその混練技術を更に進化させてきた。2018年には、これまでのブス・ニーダー技術を踏襲し、かつ様々なアプリケーションに対応した次世代に向けた新型連続混練機を開発した。

1. ブス混練技術

ブス・ニーダーは、単軸でありながら一般的な単軸押出機とは違いスクリュが単純な回転運動だけではなく、一回転する間に軸方向に一往復する動作を繰り返す。スクリュは複数の混練

フライト（羽根）を持ち、混練ピンが混練フライトの開口部に対応するようにバレル内面に固定されている。スクリュの回転と往復動の組合せにより混練フライトと混練ピンとの間で高度な分散混合をもつ強力な延伸流動が起こる。これによってマトリックス材料及び添加剤の凝集が崩壊する。径方向と軸方向の混合効果の組合せの結果、効率よい分配混合が行われ混練部の最終部分では均質的な混練を確実に行うことができる。

混練の過程で非常に重要なせん断勾配は混練ピンと混練フライトの側面で作られる。ここで重要なのはせん断ギャップ（Si）で、フライトピッチ全体にわたっている（図1）。この技術的特徴のおかげで、混練部における製品は局所的な突出のない非常に均一で穏やかなせん断を得ることができる。そのせん断勾配は、マトリックス

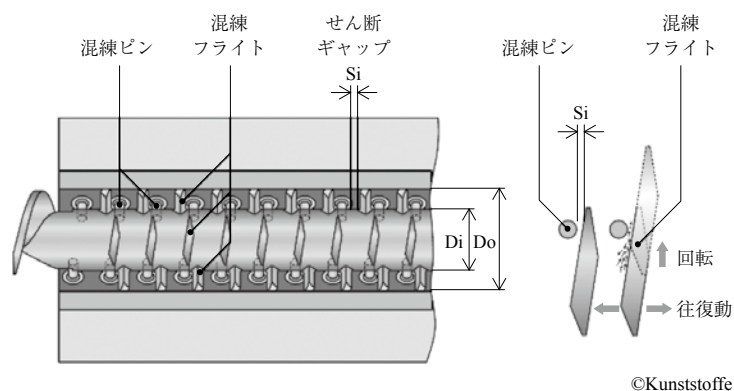


図1 ブス・ニーダー混練の仕組み

* Kazuhiko Hirai
 (株)ブス・ジャパン 代表取締役社長
 Tel. 03-5646-7611
 Fax. 03-5646-7612
 E-mail: info.jp@busscorp.com
 http://busscorp.com/jp

材料を摩擦熱で溶融させ、分配・分散混合に必要なエネルギーをまかなうのに十分な大きさを有している。しかもそのせん断効果は、マトリックス材料あるいは添加剤のいずれに対しても熱的または機械的な損傷を与えることがない。そのような理由から、ブッス・ニーダーは、あらゆる種類の温度とせん断に敏感な材料の混練のための最良の選択肢として確立されてきた。

更にブッス・ニーダーは、スクリュ径に比例したせん断ギャップを持つ唯一の単軸あるいは多軸混練機であり、せん断勾配は常に機械のサイズに関係なく、スクリュ回転数に直接比例している。このため、様々なサイズの機械へのスケールアップと混練条件の移転が非常に容易にできるという利点がある。また混練ピンの周りを混練フライトがこすり合うようなかたちで通過しているので、セルフクリーニングの機能も持っている。

50年以上も使用してきたいわゆる第一世代ブッス・ニーダーのスクリュは、外周に3枚の混練フライトがつく仕様であったが、2000年に導入された4枚フライトの技術では、羽根がオーバーラップし流動安定性が向上するため、よりよい搬送効果をもたらすとともに、より安定した温度制御及び吐出量の増大など極めて優れたパフォーマンスが達成された。

ブッス・ニーダーにおける混練ピンは、常にバレル内面に固定されているが、これもさらなる進化を遂げている。混練ピンの先に液剤注入のための貫通穴が付き、先端部に逆止弁機能を持たせたものもオプションで用意されたため、液剤を溶融した材料の中に直接注入が可能となり、液体がバレルの内壁を覆い高熱により焼き付くことはなく、より効果的な混練がプロセスのあらゆる場所で可能となっている（図2）。

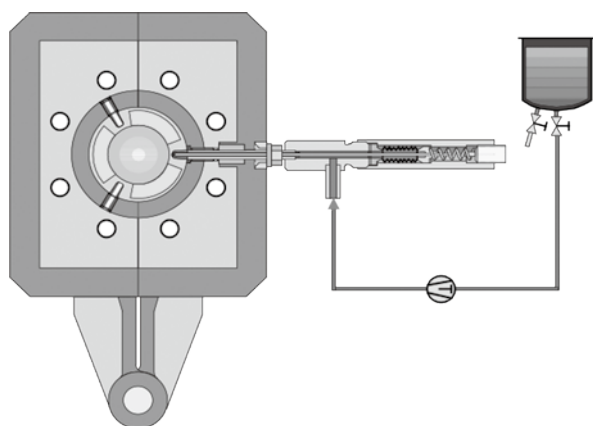


図2 液剤注入用混練ピン

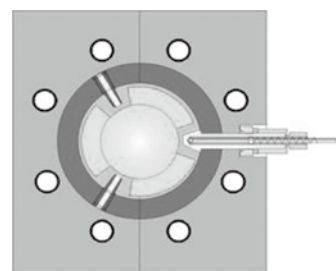


図3 温度センサ内蔵混練ピン

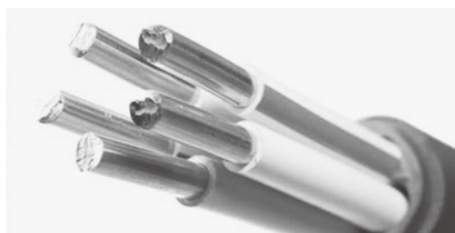


図4 難燃剤入ケーブル被覆

また混練ピン内に熱電対（温度センサ）を内蔵したタイプでは、混練中の樹脂に囲まれているため、その測定された温度は樹脂温度と同じか極めて近いものとなっている。この熱電対付き混練ピンを複数配置することにより、プロセス中の温度分布や温度勾配も極めて正確にモニターできる。これは温度に敏感な材料の混練において、プロセスコントロールが正確にできるということである（図3）。

揮発性物質は通常、バレルの終端部から押出ユニットに追加された真空脱気装置により除去される。ブッス・ニーダーが実現した、多数の混練サイクルや亀裂、曲げにより、常に混合材料の表面が再生され、空気や揮発性物質の閉じ込めを極めて効率的に抑制している。

以上のようにオリジナルのユニークな技術とその長年にわたる改良と進化により、ブッスの混練システムは、一般的な二軸混練機に比べて以下のような優位点がある。

- ・均一で適度なせん断率
- ・緻密な温度コントロール
- ・高い充てん率
- ・多種多様なフィラー・添加剤の投入が可能
- ・簡単メンテナンス・クリーニング
- ・スケールアップが容易

2. ブッス・ニーダーによる混練の実例

実際の混練事例は多々あるが、そのなかでも特に大きな実績及び評価を得ているものの一つが、ノンハロゲン難燃材料のケーブルコンパウンドである（図4）。ワイヤーやケーブル用に使用される主なポリマーは、LDPE、HDPE及びコポリマー（EVA、EEA、EPDM）といったものである。ハロゲン族元素（フッ素、塩素、臭素、ヨウ素、アスタチン）を鎖内に含まないポリマーが、ケーブル用ノンハロゲン難燃材料の母材すなわちマトリックスになる。しか

しながら、それらの材料はPVCの持つ自己消火性が劣っているため、難燃性の物質を用いて改質する必要がある。標準的には、55～65wt%の難燃剤をポリマーに添加することで達成できる。

火災、もしくは燃焼プロセスは、下記の三要素が同時に存在するときのみに発生する。

- ① 燃焼材料（例えばポリマーなど有機物）
- ② 酸素（例えば周囲の空気から供給される）
- ③ 発生源（例えば加熱もしくは火災）

上記の三要素のうち、一つでも欠けていれば火災もしくは燃焼プロセスは生じない。

難燃剤は、物理面と化学面の両方もしくは一方の作用によって燃焼プロセスを防止または抑制する働きをする。難燃剤は、ポリマーの分解が始まる温度範囲もしくはポリマーが事前発火する温度においてその作用が始まらなければならない。ケーブル用コンパウンドにおいては、その温度は180～300℃の間である。最も良く用いられているノンハロゲン難燃剤は水酸化アルミニウム（ATH）である（日本では水酸化マグネシウム $Mg(OH)_2$ が主流）。ATHは比較的安価で絶縁ケーブルの通常の寿命期間内において、無機添加物として機能する。180～200℃の範囲の温度でATHは分解をはじめ、塩化アルミニウムに変化する。この反応は吸熱作用を有するため、ケーブルから熱が奪われる。その副産物として水が発生し、それが水蒸気となって吸熱作用に拍車がかかり、更に熱が奪われる。前述したように、日本では水酸化マグネシウムが多く使用されてきた。この材料はATHと同様の働きをするが、分解温度が約250～300℃と格段に高い。経験上、この材料は炭化を促進し煙の発生を抑える働きがあることが知られている。低煙のコンパウンドが求められる場合は、極めて有益である。

このように産業界の厳しい要求に応える難燃剤を加工するため、混練に求められる要件は何といっても、低い熔融温度（ATHの場合190℃未満）での分散分配混合である。また、材料を複数回投入したり、決められた位置に反応液を注入することも不可欠である。これらの用途には、ブッス・ニーダーの独自技術が大変適している。その動作原理により、均一かつ適度なせん断速度で無数の混合サイクルが行われ、最大の生産量においても、最高の混合効率と製品品質が得られる。せん断速度が適度であることの副次効果として、他のスクリュ押出機に比べて磨耗はごくわずかである。

液体注入用混練ピンは、加工部のほとどの位置にも設置することができ、計画的に反応プロセスを操作できるユニークな設計となっている。混練ライン全体の監視は、加工部のあらゆる点の温度計測を通じて、継続的に行うことができる。これによりオンラインでの品質保証、品質制御が格段に容易になる。

3. 次世代向け新型連続混練機 COMPEO

2018年に発表されたCOMPEO（コンペオ）シリーズ（図5）は、熱可塑性樹脂、熱硬化性樹脂、繊維強化プラスチック、エンジニアリングプラスチック、マスターバッチからエラストマー、ゴムに至るまで一台で様々な用途の作業工程に対応できるよう高い柔軟性を達成し、また作業工程の安定性向上を実現した。

新たに耐熱温度400℃までの材料にも対応でき、また非常に広いプロセス設定が可能となった。操作性の向上やオペレーターの安全性向上にも配慮しながら、更にエネルギー効率の改善による運転コストの削減にも重点を置いて開発された。またモジュールシステムの採用により、各用途それぞれのコンパウンディング方法に最適な構成が可能となった。

その基本構成例（図6）においては、2カ所の材料供給部があり、ポリマー・添加剤及びフィラーは第1供給部から

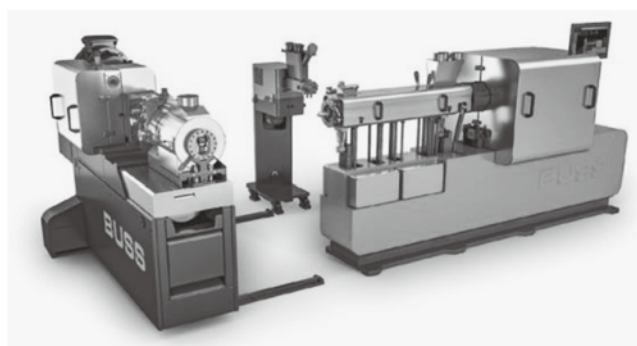


図5 COMPEO外観

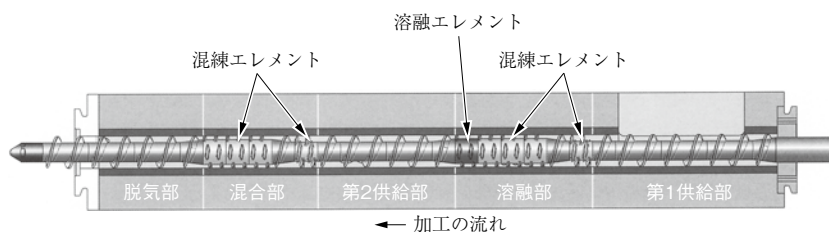


図6 COMPEO加工部基本構成

投入され加工部に運ばれる。続いてポリマーは熔融部で溶かされ、添加剤と混合されることになる。

第2供給部においてはフィラーが更に追加され、均一に混ぜ合わされながら下流工程の混合部へ運ばれる。そして脱気部において揮発性物質と混入した空気や水蒸気を取り除かれ、押出ユニットへ運ばれることになる。その際の加工部の長さ、フィーダの種類と数、温度・脱気方法・加工部形状は、それぞれの混練用途に合わせ最適な形に組合せることができる。

柔軟な組合せを可能とした新しい加工部は、スクリュの羽根を2枚から3枚、4枚、6枚まで選択できる混練エレメントを採用し、新しいプロセスエンジニアリングの幅を広げた。つまり、これまでのスクリュ技術（3枚または4枚フライト）に新開発の2枚及び6枚羽根のエレメントを組合せることで、高い処理能力と入力エネルギーの抑制という、これまでは相反してきた二つの大命題を同時に解決することが可能となった。混練フライトの形状は、新規開発の6枚羽根も含めて、材料が流れていく過程全般において混練フライトと混練ピン間のせん断ギャップが一定に保たれるように、自由局面加工をベースに設計されている。これにより、材料にかかるせん断応力を均等化することが可能となり、局所的な温度上昇のリスクを排除できる（図7）。

加工部のはじめにある原材料供給口

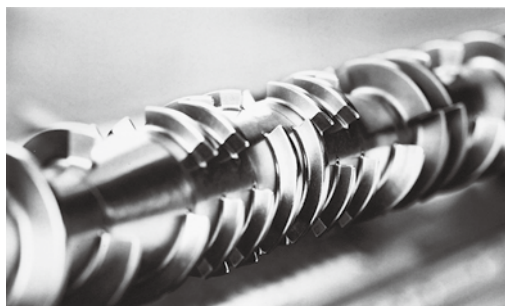


図7 自由な組合せが可能なスクリュ

（図8）の長さを、スクリュ軸径比4L/D取ることにより、より多種多量の材料を自由落下で供給することができ、加えて、混入空気を排出するダクトを供給部に取り付けたことにより、供給部充填容量が増加しギアボックスへの負担が軽減される。計量器により充填される複数台のホッパの代わりに垂直スクリュ付きホッパやサイドフィーダを使用することも可能となっている。このように、新しいスクリュ形状と原材料供給工程の改良などを組合せることで、生産量を旧モデル対比20%も向上させることに成功した。またトルクも容量比で15%向上し、その結果従来よりも長い混合部を配置することが可能となった。これらの改善により、エネルギー効率を犠牲にすることなく、加工安定性が向上した。

COMPEOはこれまでの機種に比べ、回転スピードと吐出量の設定範囲が極めて広がっている。そのため、スクリュ構成を変えることなく吐出量を最小から最大まで1:6の比で変化させることができ、例えば機械の起動時やサンプル製造など小ロットの作業にも対応できるなど、製造の柔軟性はもとよりユーザーにとって利便性向上も期待できる。

機械の最終段階で適切な圧力をかけることは、コンパウンディングにおいて様々な原材料を均一に混合するのと

同様、高品質なペレットを製造するのに非常に重要である。COMPEOの押出ユニットはその重要な役目を果たしている。この新しい押出ユニットは、コンパウンディング装置側に頼ることなく、スクリーンチェンジャーやベレタイザーのような下流の機器に対して、常に安定した圧力をかけることができる。これにより大きく異なる製品を1台でプロセスできるハイブリッドなシステムを実現できる。

新しい押出ユニットは、円錐型二軸スクリュの原理をベースにした下込め式となっている。その結果、ゆっくり回転する二軸スクリュで全体的に昇圧が行われることになり、混練機から押出ユニットへの移行部分での発熱が軽減される。異方向回転式二軸スクリュの採用で、バックプレッシャーが高い状況においても確実に搬送され、また速度と温度上昇も極力小さくすることができる。またCOMPEOの押出ユニットは、広くアプリケーションに対応し、非常に使い勝手がよくできている。押出ユニットのハウジングは完全に開閉できるよう設計されており、洗浄やメンテナンス時においてあらゆるシステム構成部品に簡単にアクセス可能となっている（図9）。

タッチパネル（図10）を装備したシステムコントローラーはグラフィカルな画面デザインにより見やすく、ま

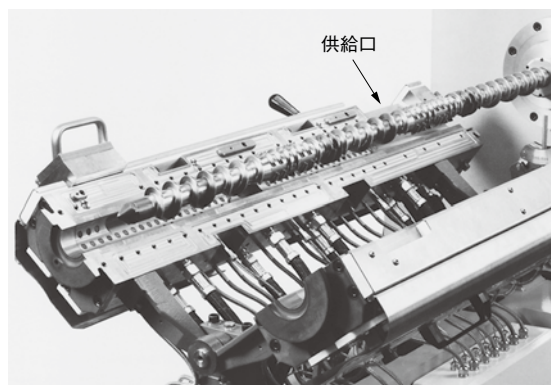


図8 120度バレルが開くCOMPEO加工部

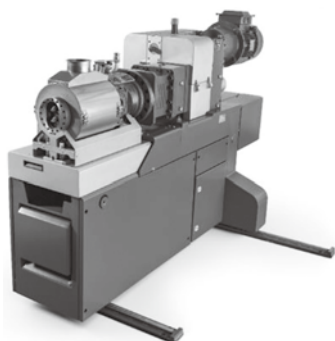


図9 新規開発の押出ユニット



図10 直感的な操作が可能なタッチパネル

た操作性が重視されている。更に上位のネットワークに接続するためのインターフェースを備えているため、ネットワーク経由のリモート診断、リモートメンテナンスもオプションで可能となっている。

コントローラーには配合処方計算式が内蔵され、それぞれの配合処方間の切り換えはほぼボタン一つで行うことができる。重要なシステムのパラメータ（充てん量・流量／容量・圧力・温度・吐出量等）についてはすべてビジュアル化され、かつそれらの記録・保存もできるようになっている。更に動作中も、設定された温度・消費電力・エネルギー入力値等（つまりシステム全体の作業効率）のパラメータを継続的にモニターすることも可能である。

COMPEOの設計には人間工学・メンテナンス性・省エネ性能などに、大きく配慮がなされている。例えば配線やケーブルは、簡易清掃性を考えてパネルの後ろに配置され、ギアボックスは防音フードで覆うなど、操作時の安全性も向上させている。更に、エネルギー損失を最小化するため、混練部のバレルを断熱材で覆う形とした。使用されているモジュールもあらかじめ標準化されているため、旧機種対比で最大30%ものコスト削減を実現。更に加工部に高い耐摩耗性を持つ表面強化材を使用したことで、補修部品の交換などメンテナンス費用も最小限に抑え

られる。

4. COMPEOによる熱硬化性樹脂の混練

熱硬化性樹脂は、一旦硬化させると堅くなって変形しなくなるプラスチックであるが、巨大分子鎖の熱硬化性の程度に応じて、高分子化合物を3つ（熱可塑性樹脂、エラストマー、熱硬化性樹脂）に分類したうちの一つである。熱可塑性樹脂は架橋する熱硬化点がなく、そのため可溶性であるが、一方エラストマーと熱硬化性樹脂は熱によって硬化し、不溶性で分解温度を超えると熱分解する。

20世紀初期に初めて工業的に製造された熱硬化性樹脂は、主原子価による化学結合で三次元的に架橋した堅いガラス質の高分子材料である。この結合は、触媒があれば室温で、高温においては熱活性によって分子鎖同士が化学反応することで起こる。熱硬化性樹脂は、熱機械的強度が極めて高く、架橋密度の高さゆえに優れた電気的性質と、耐薬品性を示す。

こうした特性により、各種の利用分野が広がっている。高強度の熱硬化性樹脂は、特に高負荷条件での耐熱性を利用して、例えば自動車産業では、エンジンルームやドライブトレインの精巧な部品に使用されている。電気機器

では、優れた絶縁性と良好な難燃性、非変形性を合わせ持つ特性は及ぶものがない。様々なガスや液体に対する優れた耐性もまた、熱硬化性樹脂が食品や化学品産業で優先的に採用される理由となっている。

熱硬化性樹脂の生産は、プレポリマーをガラスまたはカーボン強化繊維、充てん剤、あるいは天然繊維と混練することから始まる。その後多くの場合、それぞれの反応を起こさせ最終製品にする。熱硬化性樹脂にとって添加剤を優しく注入することは、絶対的な温度制限を厳しく順守することと同程度に重要である。COMPEOでは、その基本的な動作原理により、またせん断ストロークごとに緩和ポイントが設けられており、これらの点を問題なく扱うことができる。

そしてバレル側とスクリュのシャフト内の両方に熱媒を通すことが可能であり、加工プロセス部の数カ所に熱電対を内蔵した混練ピンが設置でき、混練中の製品内部の温度を正確に測定することで常に最適な加工温度を保つことができる。カスタマイズされた材料設計の結果、熱硬化性樹脂材料の使用寿命が長くなることも珍しくない。

COMPEOが備えるブス・ニーダー技術は、費用対効果の高い優れた生産性、連続生産による数々の長所により、熱硬化性樹脂の混練にまさに最適

な技術といえる。パッチ式に対する連続生産による利点として、優れた再現性を持つ確固とした製品品質、定評ある温度制御、理想的なプラント稼働率、高い生産性などがある。混練後の樹脂は、ロール状にして粉碎される。フェール樹脂やメラミン樹脂等、熱間造粒される製品もあるが、他の加工法よりも高い生産性が得られている。

COMPEOによる熱硬化性樹脂の混練システムには、以下のような優位点がある。

(1) 低いプロセス温度

COMPEOでも混練ユニットと押出ユニットでの加圧が分離されているので、混練を低圧、低温で行うことができる。各プロセスの温度設定の要件は、独自のスクリュ設計に合わせて最適化されている。

(2) 均一で適度なせん断速度

均一で適度なせん断速度により、作業として必要なせん断のみを行い、低温での混合材料の混練の制御を可能にしている。COMPEOは他の混練システムと比較してもせん断速度のばらつきが小さいため、すべての分子のせん断を均一にすることができ、より小さな投入エネルギーにより高品質な混合材料を得ることができる。

(3) 正確な温度コントロール

ブッス・ニーダーは、入力エネルギーのコントロール及び均一で適度なせん断速度に加え、熱電対を内蔵した混練ピンをバレルに沿ってあらゆる場所に設置することができる。混練中のポリマーの中の温度を高精度にモニターすることにより、より正確な温度コントロールを実現している。

(4) 低エネルギー投入で強力混練

COMPEOでは、必要に応じて各プロセスセクションにおける混練サイクル数を増やすことで、従来より15～40%低いエネルギー投入でも同程度の吐出量を可能とした。

(5) 強力な分配混練

ブッス・ニーダーは、スクリュの回

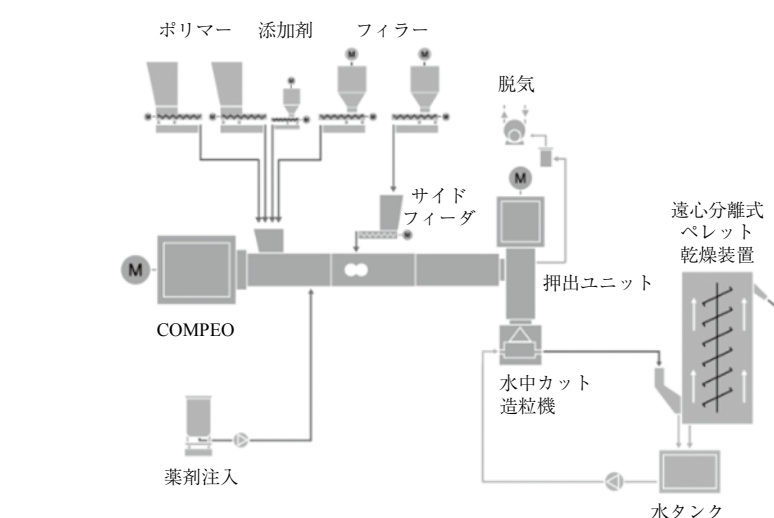


図11 COMPEOによる混練システム例

転と軸方向の往復動による混練フライトと混練ピンの相互作用により、伸長流や多数のせん断界面、クロスチャネルミキシングを生成して、強力な分配混練を実現している。

ブッス・ニーダーは、世界中の数多くのコンパウンド工場で既に導入され、その能力を実証してきたが、COMPEOもブッスのエンジニアが持つ広範囲の加工プロセス知識も併せて、熱硬化性樹脂に関してまさに最適な連続混練装置となっている。

おわりに

COMPEOの導入により、温度に敏感な熱硬化性樹脂から極めて高温のアプリケーションに対応するエンジニアリングプラスチックや、新規開発の熱可塑性エラストマーに至るまで、多種多様なコンパウンディング作業に応じて最適化された混練ラインの提供が可能になる。そしてそのアプリケーションの多様性に加え、高い混合性能・高い充てん率・正確な温度コントロールといった旧来のブッス・ニーダー技術のコアな優位性もCOMPEOは兼ね備えている。

ブッスの強みは、混練加工プロセス

において顧客や製品ごとにソリューションを提供できることにある（図11）。技術的な市場ニーズがより高いレベルになってきているのと同様、加工プロセスや製品品質の向上も必要不可欠となっている。ブッスの製品の高い性能と費用対効果は、『Swiss Quality』という言葉に集約されており、これによって最高品質の混練技術のメーカーとなっている。

参考文献

- 1) Stefan Nageleほか、『PALSTICS AGE ENCYCLOPEDIA 進歩編2013』, V編1. コンパウンディングー4-フライトブッス・ニーダー技術, p.141-147 (プラスチックエージ, 2012)。
- 2) 田島克ほか、『混練・分散の基礎と先端的应用技術』, 第3章最新混練装置及び技術 (株テクノシステム)。
- 3) Wolfgang Walterほか, “より多様化した混練フライトによる先進的なコンパウンディングシステムの開発,” *Kunststoffe International*, 108 (5), (2018)。