生産現場をデザインする、新理論ハードウェア。

SE-DUZ series

新理論可塑化システムSPIRAL LOGICは、
住友重機械工業のSE-DUZシリーズに搭載。
最高のパフォーマンスを誇る全電動成形機と、
革新的な可塑化システムのコンビネーションが、
新たな時代の射出成形工場の姿をデザインします。

「青木固」技術賞受賞

SPIRAL LOGIC LIMITEDは、
住友重機械工業株式会社とともに
プラスチック成形加工学会の
第20回「青木固」技術賞を受賞いたしました。

SE18DUZ | SE30DUZ | SE50DUZ | SE75DUZ | SE100DUZ | SE130DUZ | SE180DUZ

- T-Rex16
- T-Rex22
- T-Rex32
- T-Rex45

成形機の詳しい仕様については、
住友重機械工業株式会社営業室営業技術部(Tel:043-420-1470)へお問い合わせください。

2020 次世代の成形工場へ
ISBN978-4-9905045-0-2

SPIRAL LOGIC LIMITED
E-mail: info@spirallogic.com.hk Web: www.spirallogic.com.hk
Copyright 2010 SPIRAL LOGIC LIMITED All Rights Reserved.

平成22年11月30日 第1刷発行【著者】SPIRAL LOGIC LIMITED【発行所】合同会社マーキュリーズ・プラス 大阪市住之江区粉浜2-7-4 Tel: 06-4701-7414
Printed in Japan

2020

次世代の成形工場へ

SPIRALLOGIC
TECHNOLOGY & EVOLUTION

Introduction

2020 次世代の成形工場へ

射出成形に存在する奇妙な関係

19世紀中ごろに発明されたプラスチックは、安価で大量に工業製品を供給できる素材として注目を集め、その成形加工法の模索が続いた。第二次世界大戦中の大量生産品の莫大な需要が技術革新を促し、1946年、アメリカで最初のスクリュ式射出成形機が登場する。この革命的な機械の普及により、プラスチック射出成形品は、瞬く間にあらゆる産業分野に浸透し、今やなくてはならない存在として豊かな消費社会を支えている。

ところが、射出成形の黎明期からは想像もできない進化と膨張を遂げた素材や製品にひきかえ、当時先行していた押出成形のシステムをそのまま継承した射出成形機の基本的な構造には、大きな変化は見られない。最先端の製品が、戦後すぐに確立したメカニズムによって生産されている。今まさに我々が射出成形の生産現場で直面しているさまざまな課題やトラブルは、隠然と存在するこの奇妙な関係に根ざしているようだ。

すべてはサファイアから始まった

ここで、プラスチックとはまったくかけ離れた物質である、「サファイア」を語らねばならない。宝石のサファイアは、酸化アルミニウム(Al_2O_3)に鉄やチタンなどの不純物を含んで天然に産出するもので、美しく磨かれた青い石が宝飾店に並んでいる。ダイヤモンドと同じく、工業的に生産することができ、人造のサファイア単結晶(いわゆるサファイアガラス)は、硬度の高さや優れた耐熱性・絶縁性から、腕時計のガラスや半導体基板などに用いられる。

生産技術の確立には、正確な理論による裏付けが必要である。従来の射出成形は、勘や推測が支配する旧態依然としたブラックボックスの世界であった。しかし、肝心の対象となる樹脂が、バレルの中でどのような挙動をとっているかがわからなければ、理論を構築することができず、良品を安定して大量生産するための技術も確立することはできない。

SPIRAL LOGIC LIMITEDは、今日の射出成形における、素材や製品と生産システムとの進化のギャップを埋めるべく、サファイア単結晶をバレルに装着して、「本当は何が起こっているのか」を観察することを、研究と開発のスタートとした。新理論可塑化システム SPIRAL LOGICは、サファイア単結晶の放つ凛とした光芒から生まれたのである。

CONTENTS

03 **射出成形進化論**
- 可塑化システムと周辺環境の変化
- 研究～剪断発熱の罪科の発見
- 開発～SPIRAL LOGICの誕生
- マテリアルマトリクス

11 **This is the SPIRAL LOGIC!**
- T-Rexユニットシステム全体像
- GSローダ・T-Rexバレル
- GSバルブ・T-Rexスクリュ

17 **第3の可塑化システム** SPIRAL LOGICはプリプラを超えた
- ソリッドベッドモデルの問題と解決
- 具体的な課題への対応評価比較
- 成形事例での検証

23 **誌上講演** SPIRAL LOGICの融解と実践
- 融解の基礎理論と温度設定の実際

31 **Factory Innovation** 奮闘する生技担当者から見える未来工場
- 突発性ショートショット
- 温度とGSローダの設定
- 黒点の発生
- スクリュ・スクリュチップの腐食
- 省エネ・省コスト対策
- 品質管理は正しいか

45 **展開する新技術**
- エンプラ専用ペレタイザ Raptor22
- GENESIS-2――波形による品質管理と成形機キャリブレーション

49 **資　料** 樹脂・グレード別推奨設定温度

[射出成形進化論]

The Evolution of the Injection Molding

可塑化システムと周辺環境の変化

50年代から現在に続く、可塑化システムと周辺環境(主に国内)の変化を概観してみよう。

高度経済成長に沸く70年代は、国産の優れた成形機が続々と登場し、業界が急速に拡大と発展を遂げた。後にエンプラと呼ばれたいくつかの樹脂はすでに量産化されていたが、需要は大きくはなかった。

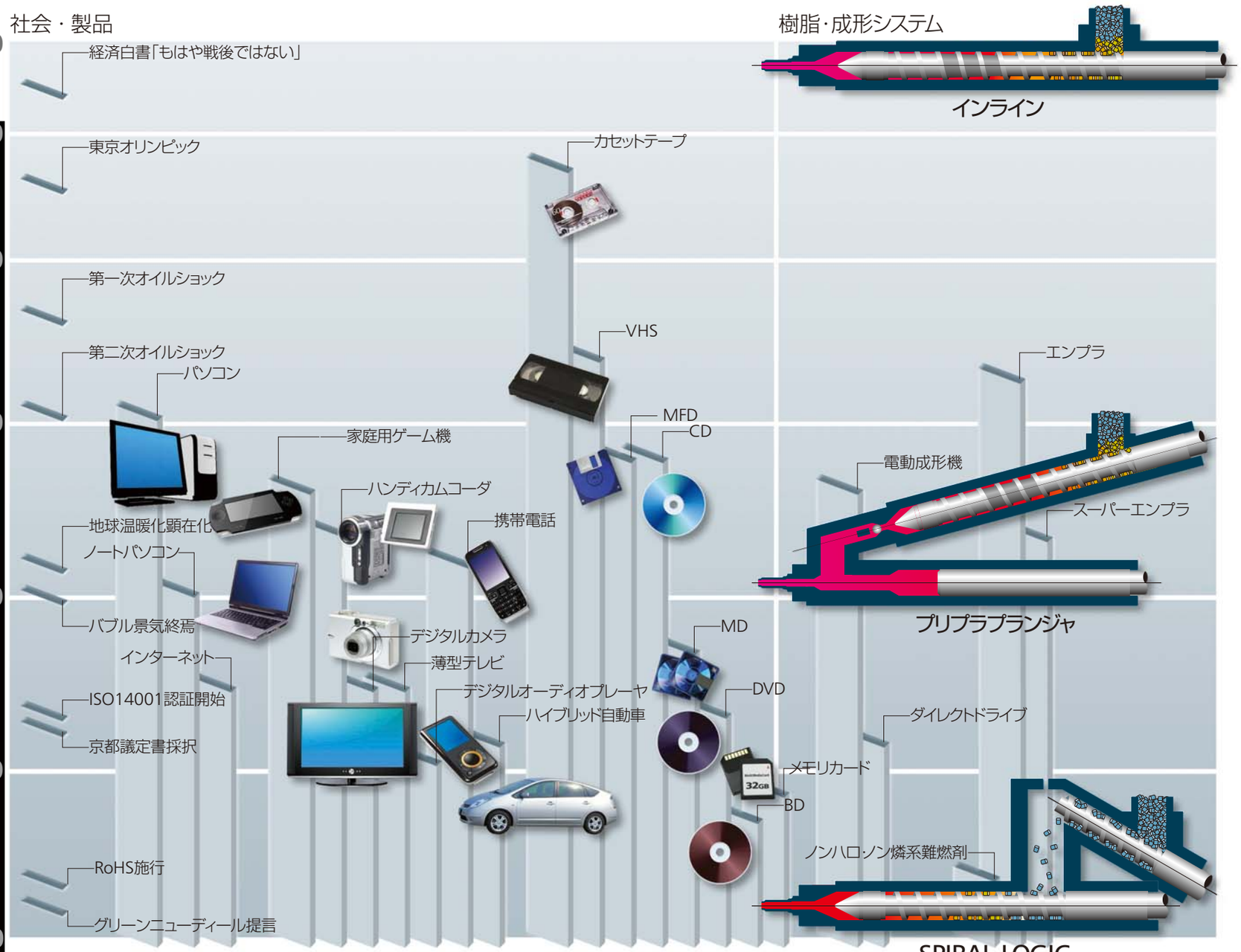
80年代には、電動成形機とプリプラプランジャ方式が登場し、変革の兆しが見えた。しかし、融解のメカニズムに変化はなく、50年代から続く成形機の基本構造に変わりはない。

90年代は、技術革新によってデジタルカメラや携帯電話などのさまざまな小型軽量のIT機器が登場し、瞬く間に普及していった。成形現場ではエンプラの急速な拡大にともない、ガスという新たな課題への対応に追われた時期でもある。

2000年代に入り、環境負荷への対策という概念がより鮮明になる。ヨーロッパを中心として原材料の環境への負荷低減の動きが高まり、有害物質を規制するRoHSが施行された。これにより、鉛フリーハンダの使用が余儀なくされ、耐熱温度要求が260℃になったことが、LCPの普及を促した。高機能ナイロンでは、ノンハロゲン難燃剤グレードが現れ、従来には見られなかった現象への対処が迫られるようになる。

1984年に電動成形機が発売されてすでに四半世紀が経ち、今では電動がデファクトとなっている。そのメリットを活かし、複雑な制御システムが標準装備となったほか、成形品の軽量化・薄肉化にともなって、最大射出速度を競う動きが加速した。いずれも、射出性能を重視した改良である。

2008年、成形機の根源的な性能である、計量＝融解システムを新理論によってデザインしたSPIRAL LOGICが、デビューする。その革新性と他を圧倒するパフォーマンスは、従来のインライン方式・プリプラプランジャ方式に続く、第3の可塑化システムとして位置づけることができる。SPIRAL LOGICの登場は、長い射出成形の歴史が初めて迎えるパラダイムの転換、といっても過言ではない。



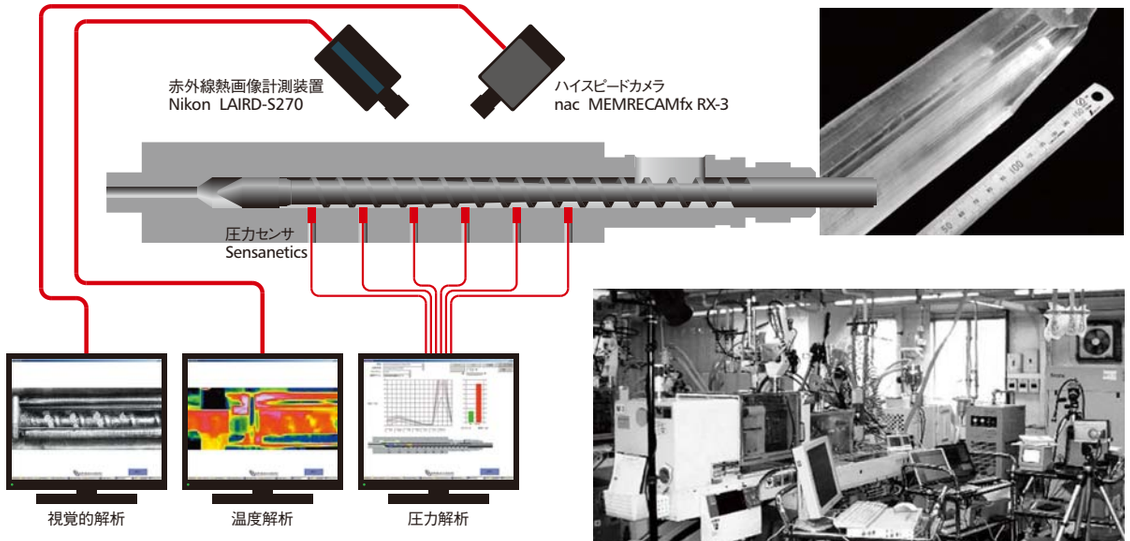
研究～剪断発熱の罪科の発見

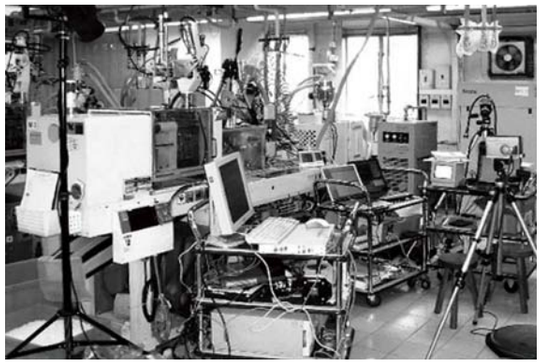
SPIRAL LOGICの研究開発の舞台となったのは、ある日系企業が1987年に設立した香港の金型・成形工場である。同社は、百数十台保有する成形機のすべてが18トン機で、小物精密エンプラに特化している。月産部品生産数は約1億個だが、不良率が1ppmだとすると、月間100個も不良が発生してしまう。そこでppb(10億分の1)の不良率を目標にして、2002年、生産設備である射出成形機自体を研究開発する独自のプロジェクトに着手した。

射出成形機の融解理論は、1950年代から60年代に、ドイツのDr. TadmorとDr. Maddockが研究した押出機の融解理論が原点である。この理論では、ソリッドベッドとメルトプールが発見された。その後急速に発展していく射出成形機の可塑化システムは、すべてこのモデルを基本としてスクリュデザインや圧縮比などが改善されてきた。しかし、押出機の理論がそのまま引き継がれているため、特に最近のエンプラ射出成形で生ずる複雑な問題を、根本的に解決することはできない、というのが実情である。

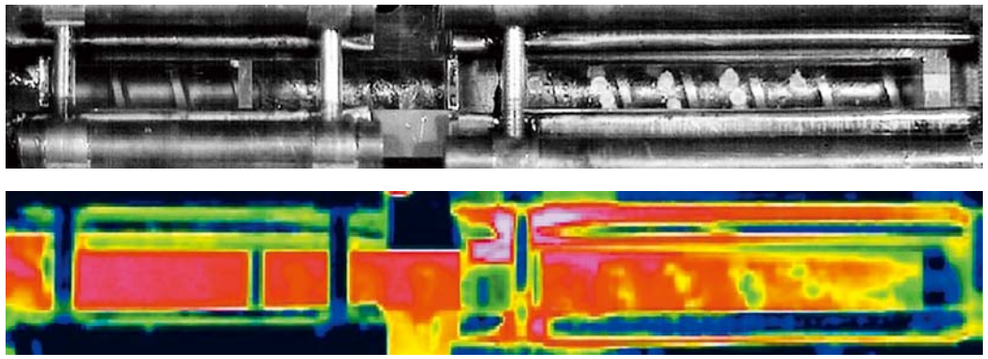
この点を踏まえ、プロジェクトは当初から射出成形の根源要素である融解に着目して研究を始めた。この分野では、東京大学の横井秀俊教授が、石英ガラスによる可視化装置を利用した理論研究の第一人者として有名である。プロジェクトでは、バレルの中をより多角的かつ詳細に捉えるために、観察窓部分に単結晶サファイアを採用した。単結晶サファイアは、高純度の酸化アルミニウム(Al_3O_2)を真空中で長時間にわたり結晶成長させたもので、透過波長領域が広く、高温・高圧の過酷な条件に耐える、優れた透明素材である。SPIRAL LOGIC LIMITEDでは、この可視化バレルを「サファイアバレル」と呼んでいる。

サファイアバレルを、赤外線カメラ・高速度カメラ・特注の圧力センサーなどの機器で観察し、バレル内のペレットからメルトへの挙動を、視覚・温度・圧力で動的に捉えることに世界で初めて成功する。

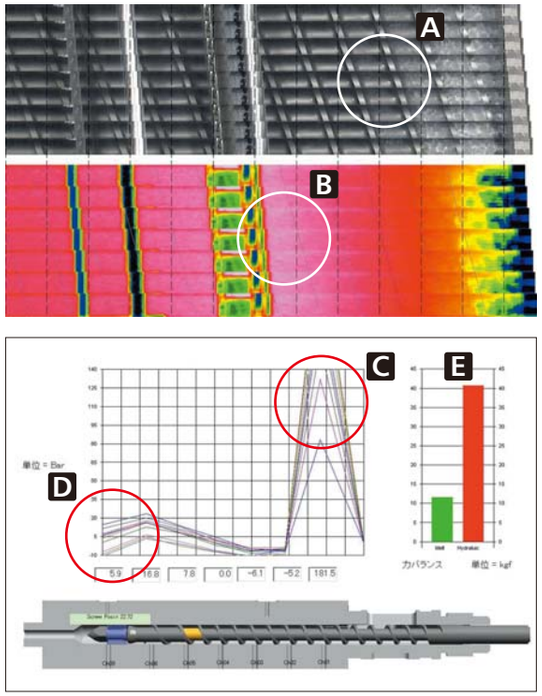




サファイアインゴッド(右上)を全長95mm×幅12mmに加工し、研究用のバレルに取り付けた。このサファイアバレルよって、世界初のハイスピードカメラと赤外線熱画像計測装置による同時撮影が実現した。



ハイスピードカメラと赤外線熱画像計測装置による画像。これらの連続画像を合成して動的な挙動を把握できるようにした。



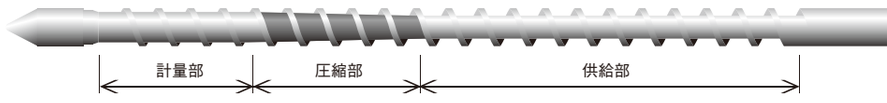
従来型バレルの視覚・温度・圧力による解析。剪断発熱の実際の姿とその影響を捉えている。画像の数か所の縦の線は、押さえブロック部分の映り込み。

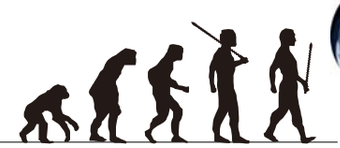
サファイアバレルで得られた、従来型バレルの画像を見てみよう。ペレットはホッパ口から入ってすぐに融けている(A)。圧縮部で融けるわけではなかったのである。赤外線では、過剰発熱の様子を捉えた(B)。ヒータの設定温度は200℃だが、この部分の実際の温度は206℃となっている。これが剪断発熱だ。

バレル内の圧力挙動を検証する。ホッパ口近くに大きな圧力がある(C)。渋滞したメルトにペレットが押し込まれているために発生した圧力だ。この力が従来のインライン方式特有の現象であるネジ抜きの原因となっている。棒グラフ(E)を見ると、圧力の異常な関係がわかる。メルト圧(緑)がスクリュ後退力(赤)よりも低い状態は、スクリュがメルトを前方に押し出さず、後退してしまったネジ抜き現象を表している。折れ線グラフの左端(D)では、ショット毎の波形が大きくばらついているが、これはネジ抜きによりメルトが減圧されて圧力変動が起きたためである。

このように、剪断発熱は不安定要因であり、剪断を前提とした構造のスクリュ・バレルそのものに、さまざまな問題を引き起こす原因があることが明らかになった。また、剪断発熱では、どれだけの熱エネルギーを得られるかを具体的に計算することは事実上不可能なので、樹脂の温度を正確に制御するロジカルな方法は存在しない。そこで活用されるのが、勘や経験といったファジーな要素なのだ。おおよそ近代的な生産設備の中で、パラメータの決定に勘や経験が優先されるようなシステムは、他にはないといえる。

従来のスクリュの、計量部・圧縮部・供給部で構成されるデザイン。1950年代から変わらない。60年も昔の技術でスーパーエンプラを成形するというのは、無理のある話ではないだろうか。





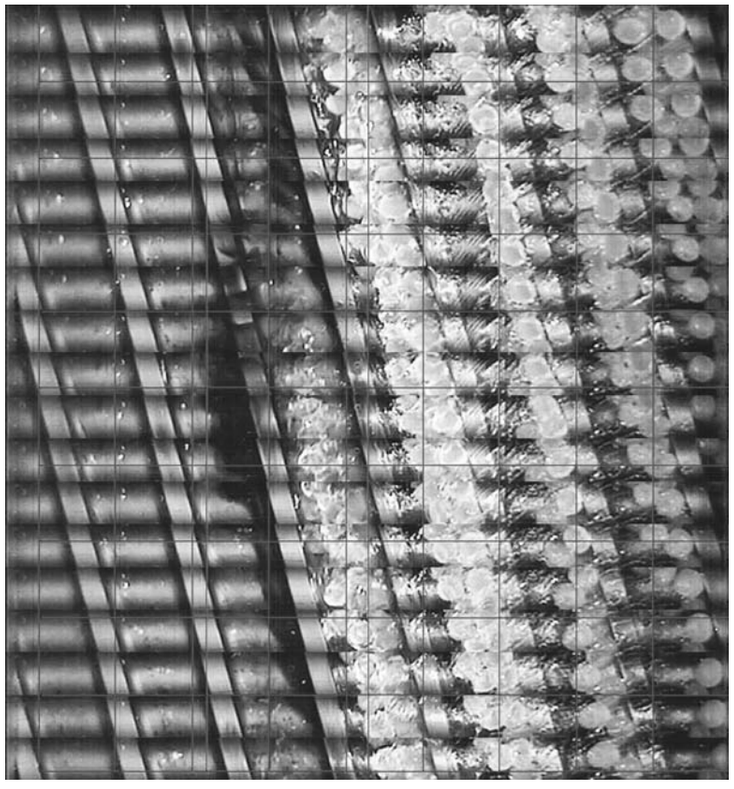
開発～SPIRAL LOGICの誕生

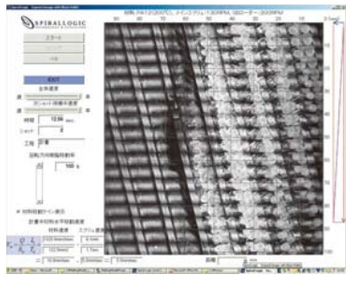
データの詳しい解析を重ねた結果、剪断発熱を発生させる最大原因として、スクリュの圧縮部の存在がクローズアップされた。圧縮部の勾配によって、前進速度の比較的遅いメルトが渋滞し、後続のペレットの前進を阻害するほか、滞留層を形成するなど、スクリュの圧縮部は、樹脂の安定した融解にはまったく不要の部位だということがわかった。そこで、スクリュを勾配のないストレートスクリュとし、圧縮部をなくした分を短縮した斬新なデザインを考案した。純粋にヒータの熱量のみを利用した伝熱融解を行うのである。また、単にスクリュを変えるだけではなく、アッシィの各部を検証して新しい設計を施し、システム全体として最大のパフォーマンスを発揮できるようにした。

こうして、独自に研究解析した結果をベースに、従来からすでに先人によって研究されている技術を組み合わせ、まったく新しい融解理論に基づいた可塑化システムの開発を進め、ついにSPIRAL LOGICの完成を見たのである。

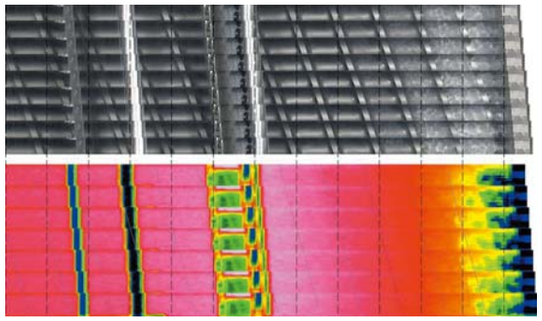
開発ではさまざまな形状のスクリュが作られ、試行錯誤が続いた。

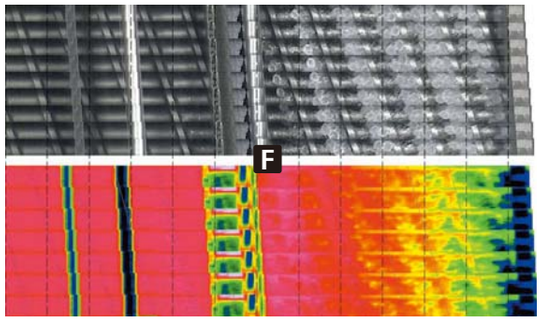
ところで、射出成形の教本には、「樹脂の融けるエネルギーは主に剪断発熱による」とある。はたしてヒータの熱量だけで樹脂が正常に融けて充分に混錬されるのだろうか、という疑問も不思議ではない。この問いかけには、下の連続写真が答えとなる。透明ペレットに一粒だけ黒いペレットを混入した状態を観察したものだ。黒いペレットがスムースに融けて、混錬されていくのがわかる。樹脂の融解に、剪断発熱は必要ない。

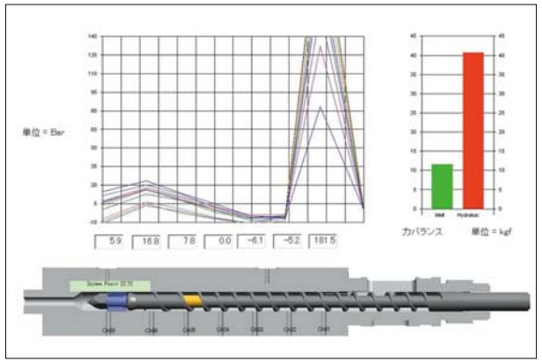


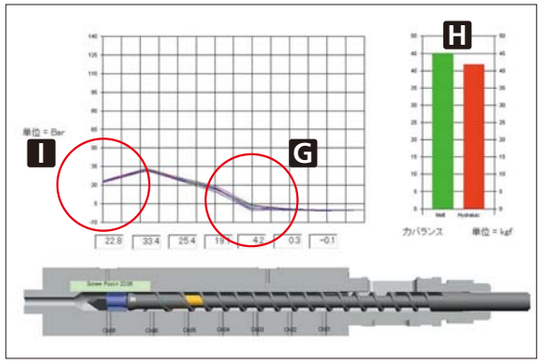


T-Rexスクリュに黒ペレットを投入している。(GSローダを使用)





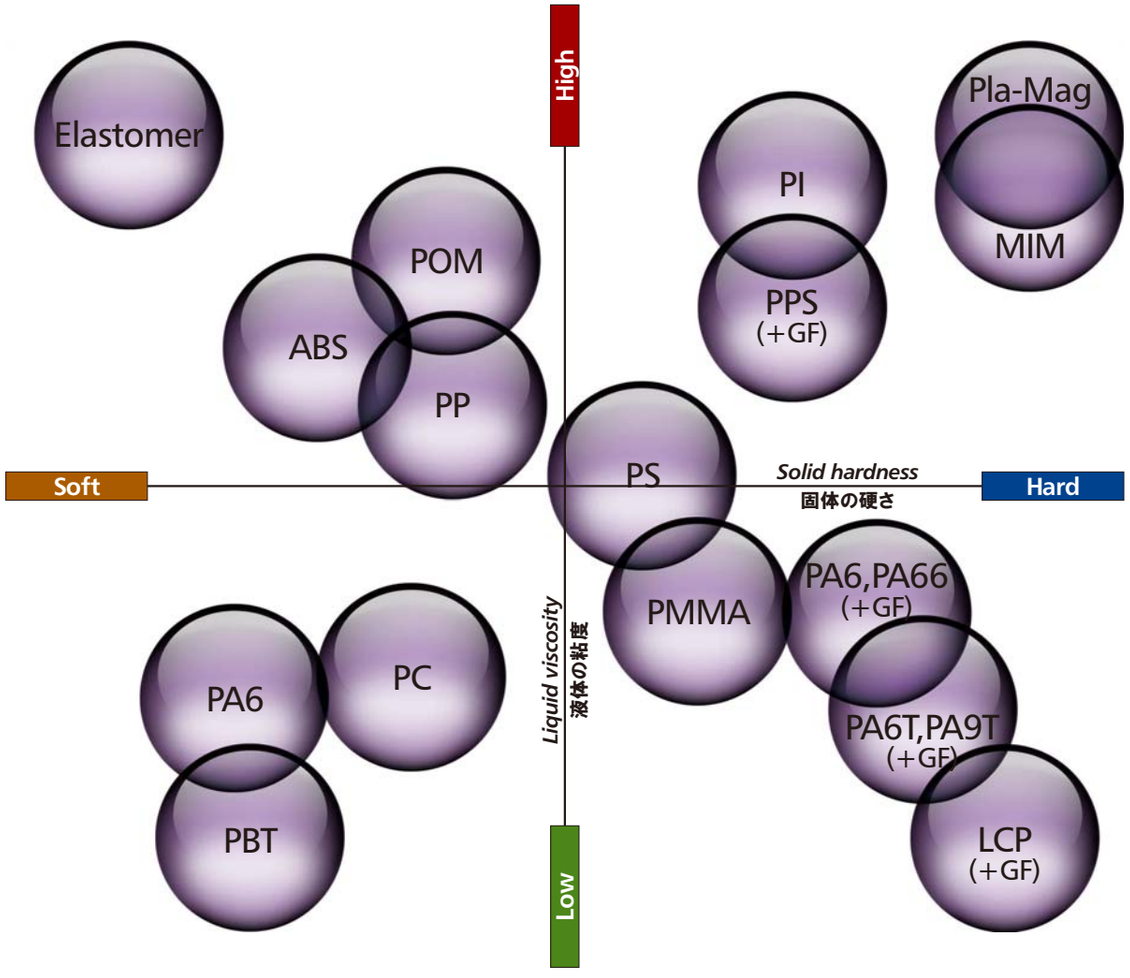




視覚・温度・圧力による解析を、従来型可塑化システム(左)とSPIRAL LOGICで比較。剪断発熱の有無による違いが歴然と示されている。

システム構成の説明は後に譲るとして、ここではデータによる比較検証を行ってみよう。06ページで示した画像とグラフを従来型可塑化システム(左)とSPIRAL LOGICで比べてみる。

剪断発熱のないSPIRAL　LOGICでは、視覚・赤外線の画像とも、ペレットはゆっくりと加熱されて融解しているのが確認できる(F)。圧力データで見ても、ホッパ口から3つ目のセンサまでは融けていないことがわかる(G)。また、定量供給によってペレットが無理に押し込まれることがないので、バレル内に異常な圧力が発生しない。棒グラフ(H)でメルト圧(緑)がスクリュ後退力(赤)より高い状態が示すように、スクリュはメルトの圧力で後退するため、折れ線グラフの左端の圧力(I)は一定となっている。SPIRAL LOGICは、メルトが非常に安定しているのだ。



Material-Matrix

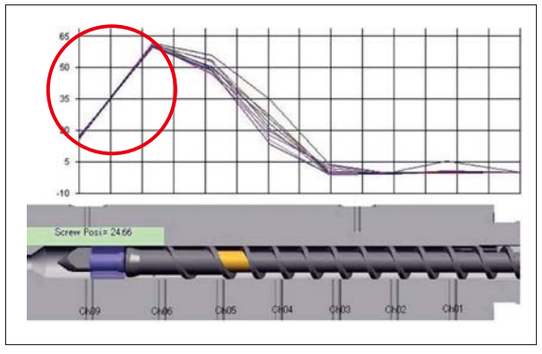
各エンプラ固有の問題を確認することができる、マテリアルマトリクス。
SPIRAL LOGICは、どの領域の問題に対しても調整能力を持っている。
樹脂の種類を選ばず、精密で安定した成形が可能だ。

マテリアルマトリクス

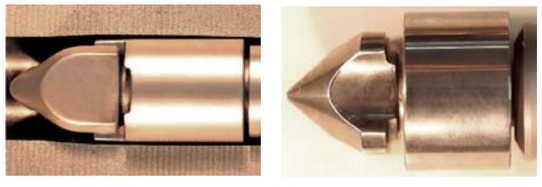
インラインスクリュは、固体であるペレットと液体であるメルトの両方を同時に取り扱う。このため、固体と液体のそれぞれの特徴が影響し合い、問題を複雑にしている。マテリアルマトリクスでは、樹脂の特性として、横軸にペレット＝固体の硬さを、縦軸にメルト＝液体の粘性を配置し、樹脂がどのあたりの座標を占めているかで、従来の可塑化システムで起きる問題点と、SPIRAL LOGICでの解決を把握することができる。

High Viscosty

メルトの粘度の高い樹脂では、スクリュチップに問題が起きる。共回りでは、バレルに摩耗が発生、非共回りでは押付力によりヘッドに摩耗が発生する。POMによる圧力解析では、メルトとチェックリング部分の圧力差が大きく、大きな力がスクリュヘッドとチェックリングにかかることがわかった。この解析に基づき、スムースに樹脂がチェックリング部分を通過できるような共回り・非共回りハイブリッド式のGSバルブを開発、圧力差を1/2にすることができ、耐久性が大きく改善された。



POMの圧力解析。粘度が高いためチェックリング部分の圧力差が大きい。



バレルの摩耗(左)とスクリュヘッドの摩耗。

Low Viscosty

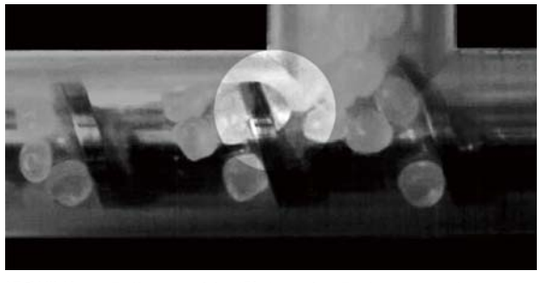
バレルの中でのメルト＝液体に対し、牽引流はバレル壁面だけに発生し、スクリュ側では圧力逆流が生まれるため、搬送速度は固体より遅い。メルトの粘度の低い樹脂は、特に遅くなる。一方、自由落下で押し込まれたペレットが後方からどんどん送られてくるため、圧縮部で発生したメルトの渋滞が、ホッパ口付近まで続く。これがいわゆる「噛み込みが悪い」という現象である。SPIRAL LOGICのGSローダは、メルトの搬送速度に合わせたペレットの定量供給を行うため、このような渋滞は起きない。渋滞がないので、ネジ抜きを起こすこともない。

Hard Pellet

GFを加えたような硬いペレットを、自由落下によって供給すると、バレルのホッパ口付近で過剰に充満して大きな圧力を生じ、バレルの摩耗を引き起こす。またペレットが閉塞した状態では、水分がうまく排出されない。SPIRAL LOGICでは、GSローダで定量供給を行うため、このような問題を回避することができる。

Soft Pellet

エラストマに代表される固体の軟らかい樹脂は、計量が安定しない。一般的に噛み込みが悪いと表現されているが、これは他の問題と同様に、過剰供給が原因である。また、軟らかいペレットがホッパ口付近でつぶされるという現象も起きる。このために、フライトに貼り付いたペレットが樹脂の供給に空間を作り、それが計量時間のばらつきにつながる。これらはすべて、定量供給方式のGSローダが解決する。



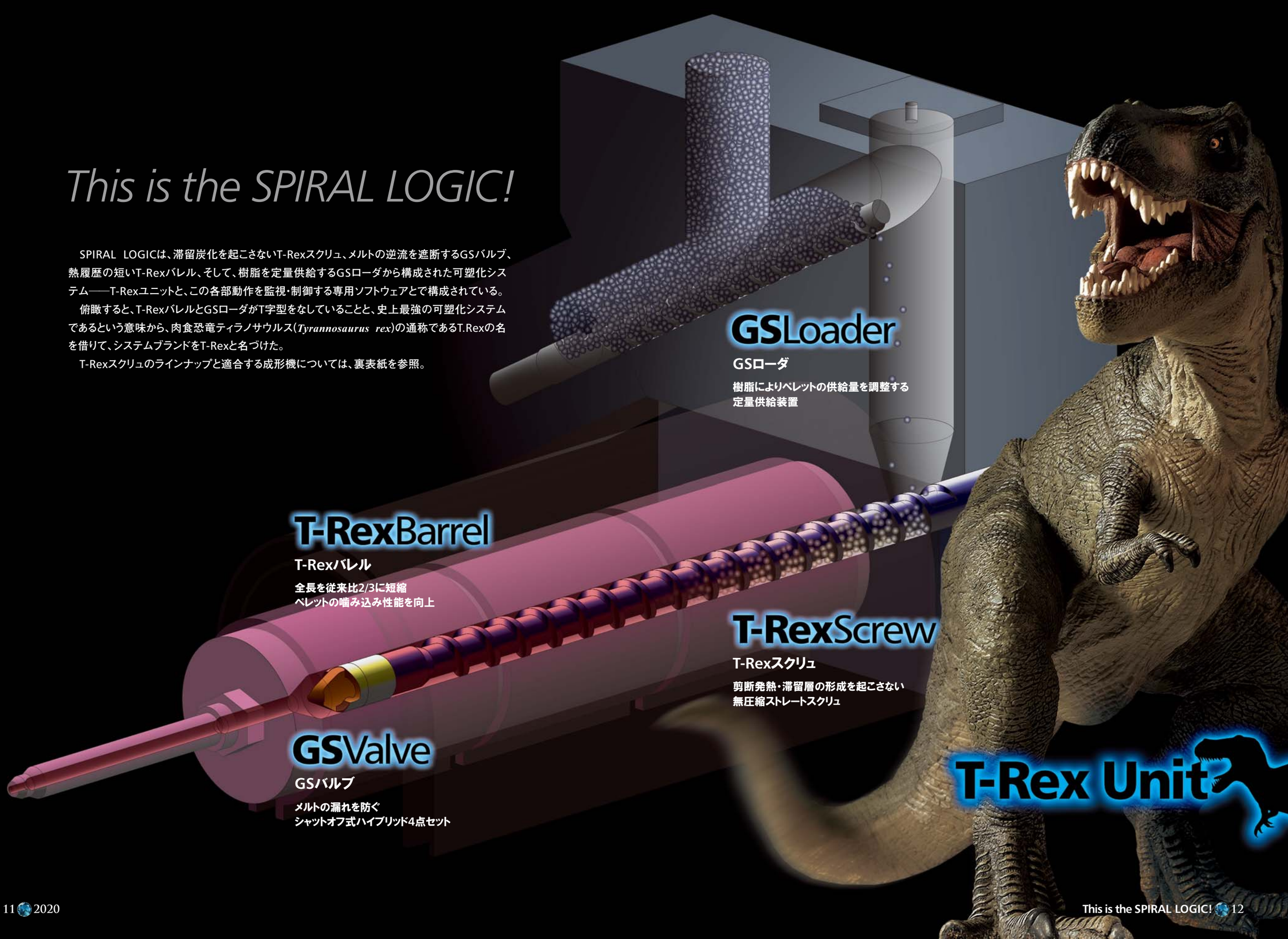
過剰供給でフライトにつぶされて貼りついたエラストマのペレット。

This is the SPIRAL LOGIC!

SPIRAL LOGICは、滞留炭化を起こさないT-Rexスクリュ、メルトの逆流を遮断するGSバルブ、熱履歴の短いT-Rexバレル、そして、樹脂を定量供給するGSローダから構成された可塑化システム――T-Rexユニットと、この各部動作を監視・制御する専用ソフトウェアとで構成されている。

俯瞰すると、T-RexバレルとGSローダがT字型をなしていることと、史上最強の可塑化システムであるという意味から、肉食恐竜ティラノサウルス(*Tyrannosaurus rex*)の通称であるT.Rexの名を借りて、システムブランドをT-Rexと名づけた。

T-Rexスクリュのラインナップと適合する成形機については、裏表紙を参照。



GSLoader
GSローダ

従来の自由落下によるペレット供給では、ペレットがホッパ口付近に充満し、その部分に大きな圧力が発生する。このため、GF入りなどの硬いペレットは、その摩擦力によってバレル内壁やスクリュを摩耗させてしまう。

また、後述するようにT-Rexスクリュは圧縮部のない構造になっているが、この場合でも、メルト＝液体の前進速度はペレット＝個体の前進速度よりも遅いため、自由落下による供給ではバレル内にペレットが押し込まれることになり、無圧縮スクリュでもほとんどの樹脂でネジ抜きが起きてしまう。

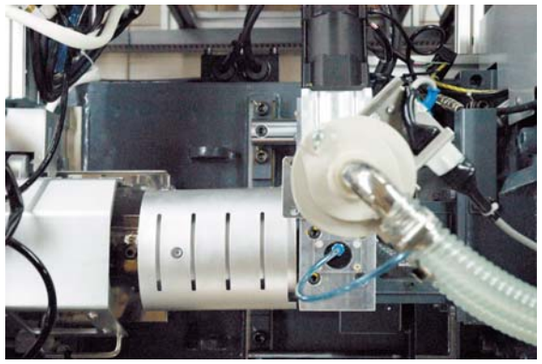
GSローダは、スクリュの回転トルクをモニタしてペレットの供給量を調節し、メルトの前進速度に合わせた定量供給を行う。バレル内にペレットは充満しないので、バレルやスクリュが摩耗することはない。また、適当な間隙があるため、ペレットに内包する水分は、ホッパ口から自然に放出される。

GSローダに似た供給装置が、以前より他社から発売されている。これらは一般に「飢餓供給装置」と呼ばれ、GSローダと同様にペレットの適量供給をアピールしているが、装置単体での使用は、可塑化能力を低下させるというデメリットがある。GSローダは可塑化能力の高いT-Rexバレルとのカップリングにより、システム全体として必要な可塑化性能を保つことができる。従来の圧縮部のあるスクリュに単品型装置を装着しても、ある程度の改善効果を期待できるにすぎない。

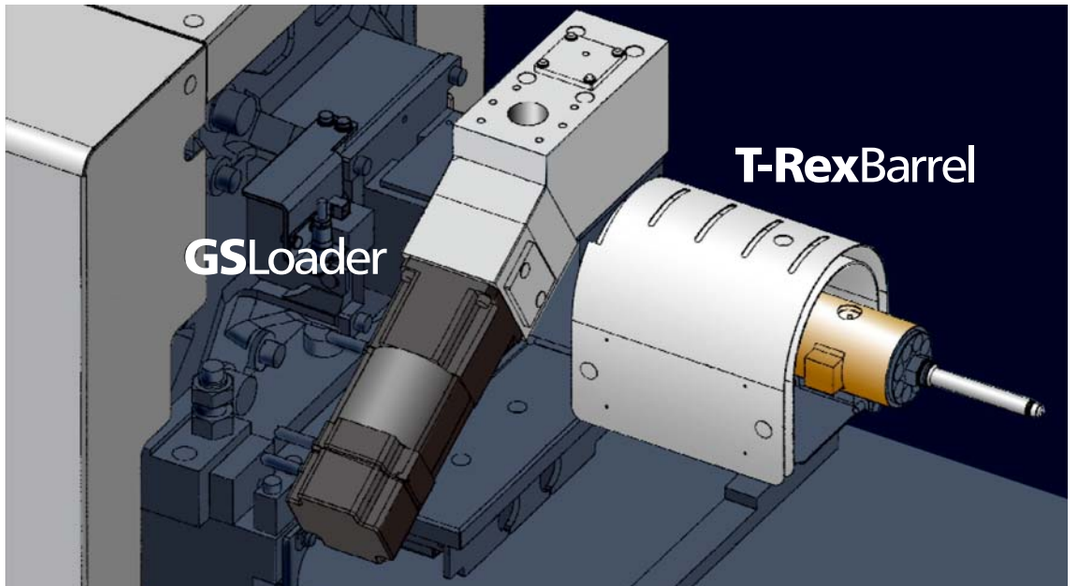
GSローダには、ヒータは装備されていない。また、供給スクリュの外径(14mm)はローダバレルの内径(30mm・数値はいずれもT-Rex16の場合)より小さい構造となっており、通常使用している限りでは、特にメンテナンスは必要ない。

バレルの摩耗

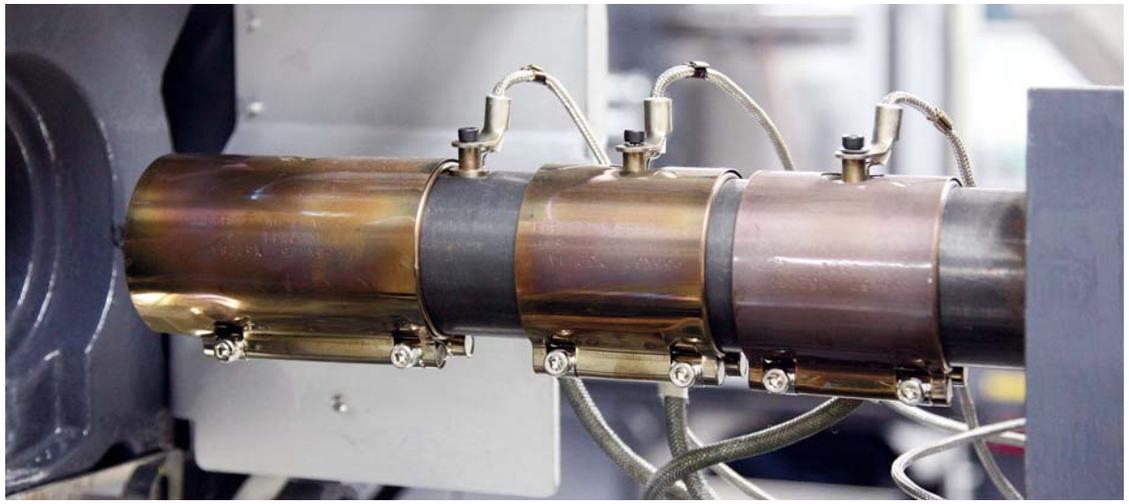
GFを加えた硬いペレットが充満した状態で発生する圧力(摩擦力)は、想像以上に大きい。このように摩耗してしまったバレルで、正常な安定成形が行えるはずがない。水分(気体)が後方へ抜けられないペレットの閉塞状態も、容易に想像できる。

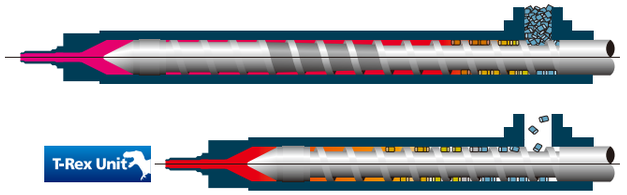


T-Rexユニットを俯瞰する。バレルとローダがT字型に直行するデザイン。



T-RexBarrel
T-Rexバレル





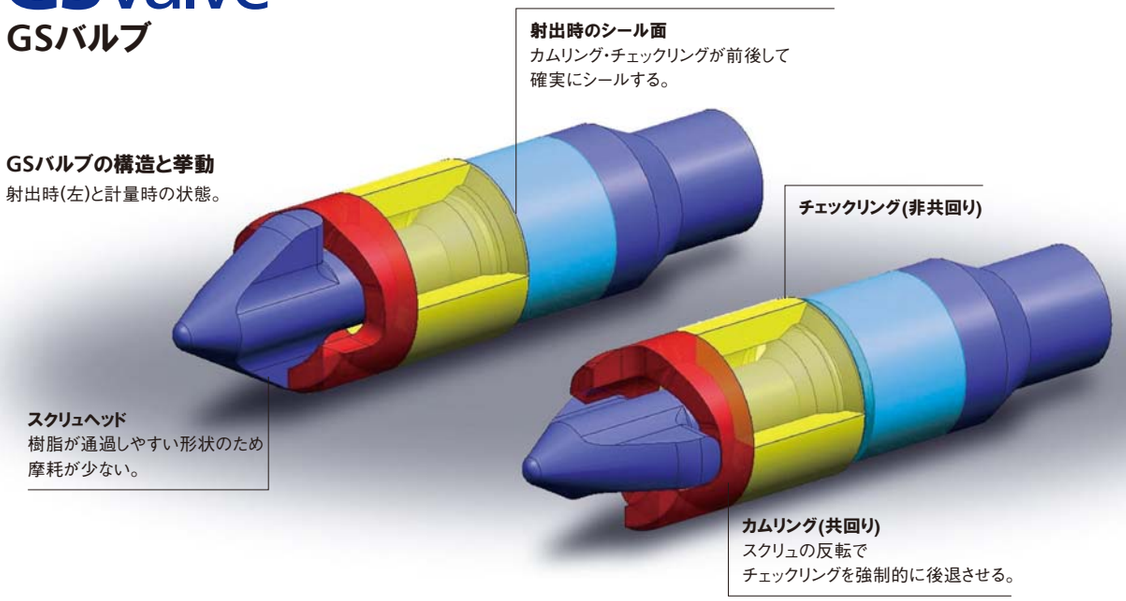
短いバレルは熱履歴も少ない。特殊デザインで噛み込みを向上させた。樹脂に優しい融解と搬送。

特殊なデザインを施した構造のT-Rexバレルは、ペレットの噛み込みを大きく改善したため、スムースな搬送を実現している。また、T-Rexスクリュは、従来型に比べて2/3の長さとなっており、これによってT-Rexバレルの全長も短縮された。長さの短縮と、樹脂がスムースに融解・搬送されることにより、バレル内で樹脂が受ける熱履歴は大幅に減少する。

GSローダの効果によって、ホッパ口のブリッジの心配がないため、ホッパ下に通水して冷却する必要はない。温度が高い方が水分の排出には有利であり、ポンプによる吸引や、真空ホッパなどの特別な付帯設備を必要としない。

水冷シリンダ温度が高くて良いならば、ゾーン1のヒータ容量を有効的に使うことができる。ヒータからの熱量のみで樹脂を融解するT-Rexバレルでは、エネルギーの効率利用の観点からも歓迎される効果だ。また、16mmのスクリュでバレル内の樹脂の量を比較すると、T-Rexバレルでは従来型に対して1/5と大きく低減された。簡単で楽なパージが行え、色替性にも優れている。T-Rexバレルは、省エネ・省コストをももたらすのである。

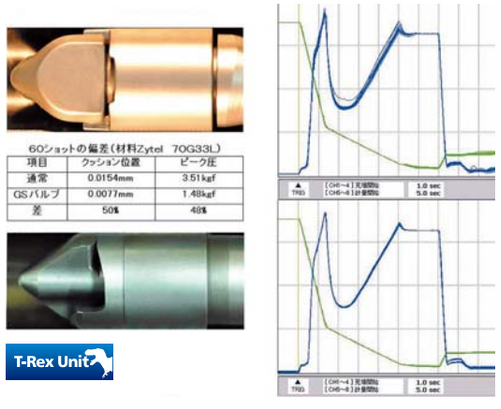
GSValve
GSバルブ



インライン方式の弱点のひとつに、スクリュヘッド3点セットのシール動作の遅延が挙げられる。計量完了後のサックバックでは、メルトがスクリュ前方へ流れ込む。射出開始時にチェックリングの後退が遅れると、メルトが後方へ漏れてしまう。これらのメルトの動きが、射出の不安定要因となり、転写性の悪化をも引き起こすことになる。

GSバルブは、スクリュヘッド・カムリング・チェックリング・シールリングの4点で構成される、新開発のスクリュチップである。カムリングは共回り、チェックリングは非共回りのハイブリッド型となっている。電動成形機の特徴を活かし、カムリングを反転させることで、チェックリングを強制後退させる前後式シャットオフ機構を備えた。これが、あえてバルブと名づけた理由だ。

また、開閉をカムリング、シールをチェックリングと機能を分けたことによって、優れた遮断性と耐久性を両立させた。メルトが通過しやすい構造のため、容易に摩耗することはなく、たとえ多少摩耗したとしても性能に影響を及ぼすことはない。この点が、過去に発売された回転式3点セットとは大きく異なる。耐久試験では、PA46(Stanyl TS200F6)+GF30%を使用し、サイクル7秒で300万ショット(1年間)成形しても、クッション異常は発生していない。



GSバルブと従来型3点セットの比較

60ショットの充填圧力波形を重ね描きしたもの。スクリュチップ以外はSPIRAL LOGICのシステムを使用。GSバルブは、T-Rexスクリュなどが作り上げた優れた繰り返し安定性を、そのシャットオフ性能で担保する役割を果たしている。サックバック量を変化させても、最小クッションは変わらない。

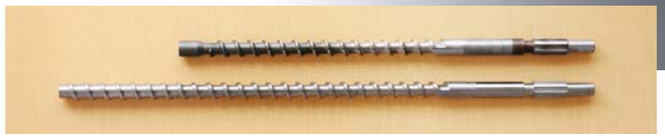
T-RexScrew
T-Rexスクリュ

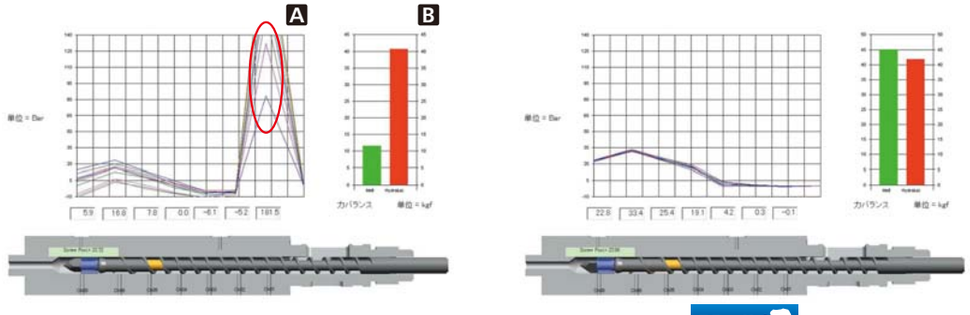
T-Rexスクリュは、直接樹脂の融解を担う部分であり、SPIRAL LOGICの理論と技術の中核である。だが、特に新奇なデザインを凝らしているわけではなく、溝深さが一定で、圧縮比1のシンプルなストレートスクリュだ。樹脂が渋滞する起点となる圧縮部をなくすことにより、メルトのばらつきの原因であるネジ抜きを起こさない。これにより、充填時のメルト圧の挙動が安定する。充填圧力波形の重ね描きを従来型可塑化システムと比較すると、その優越性は明らかである。

圧縮部において樹脂が滞留層を形成するということが、粘性流体理論による流動解析で解明された。滞留層では脱水分解により炭化が進行し、これが黒点の原因となる。圧縮部のないT-Rexスクリュでは、滞留層は形成されず、黒点も発生しない。これについては、後の「Factory Innovation」で詳しく解説している。

また、圧縮部の省略によって、全長を約2/3に短縮することができた。熱履歴の減少は、ノンハロ難燃剤入り樹脂の脱水分解のリスクに対しても有利な条件となる。

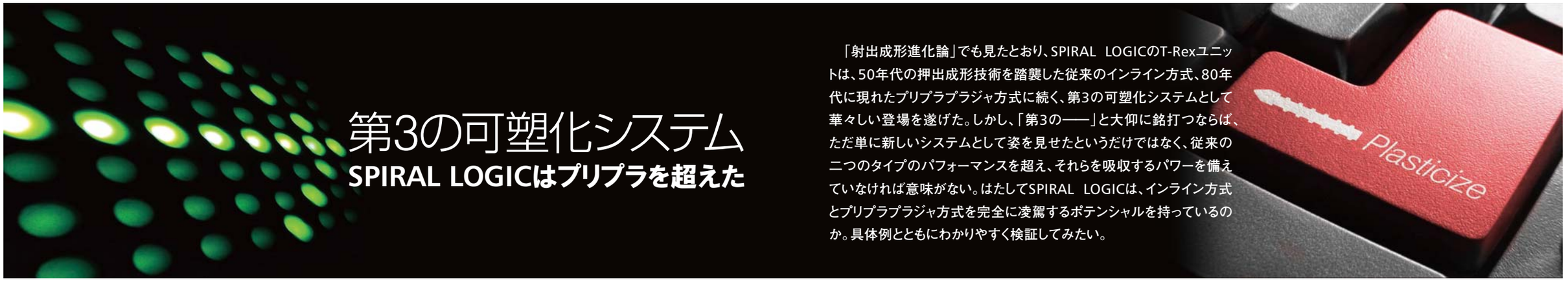
従来型スクリュとの全長比較





バレル内の圧力挙動

従来型可塑化システム(左)では、圧力のばらつきが顕著なうえ、ペレットの閉塞で発生したネジ抜きを示す異常な圧力の山(A)が現れている。グラフ(B)は、メルト圧実測値＝緑＜スクリュに掛かる圧力実測値＝赤という異常現象を捉えた。

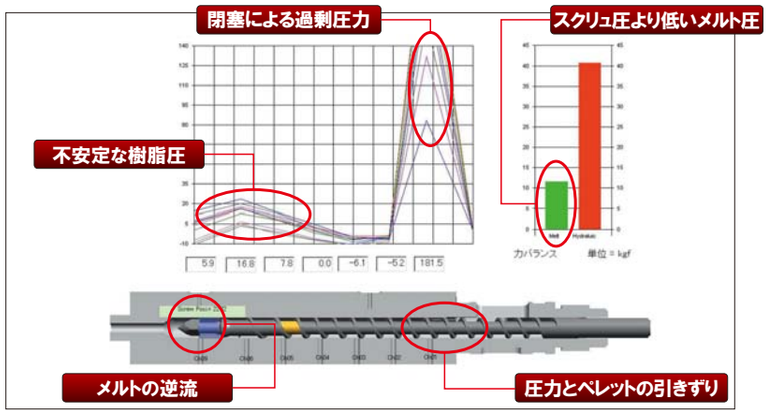


第3の可塑化システム
SPIRAL LOGICはプリプラを超えた

「射出成形進化論」でも見たとおり、SPIRAL LOGICのT-Rexユニットは、50年代の押出成形技術を踏襲した従来のインライン方式、80年代に現れたプリプラプラジャ方式に続く、第3の可塑化システムとして華々しい登場を遂げた。しかし、「第3の――」と大仰に銘打つならば、ただ単に新しいシステムとして姿を見せたというだけではなく、従来の二つのタイプのパフォーマンスを超え、それらを吸収するパワーを備えていなければ意味がない。はたしてSPIRAL LOGICは、インライン方式とプリプラプラジャ方式を完全に凌駕するポテンシャルを持っているのか。具体例とともにわかりやすく検証してみたい。

ソリッドベッドモデルを前提にしたシステムの問題と原因

インラインの3大弱点



ネジ抜き（樹脂圧のばらつき）

ネジ抜きは、インライン方式の最大の弱点といえる。ホッパ口付近で充満し閉塞した状態のペレットによって、スクリュはメルトを押し出さず、ネジが抜けるように後退してしまう。これが樹脂圧の減圧とばらつきの原因となっている。

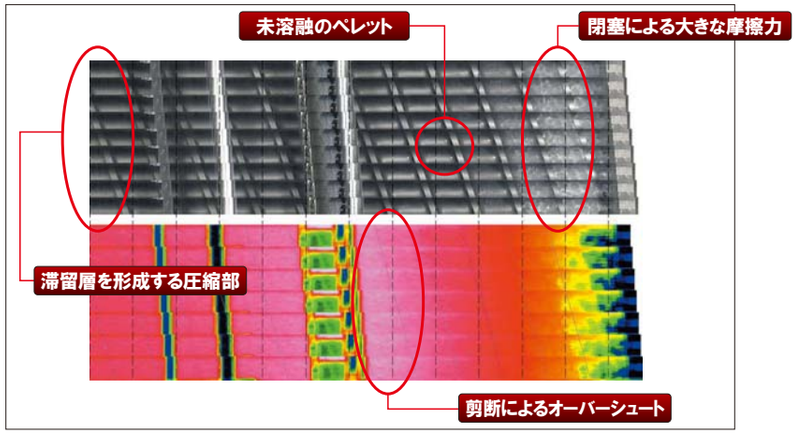
引きずり（実充填圧のばらつき）

ネジ抜きを起こした次のショットでは、大きな圧力と、その右側にある大量のペレットの塊を、スクリュが引きずりながら押さなければならない。「実充填圧力＝成形機の射出圧力－バレル内の圧力損失」という関係に基づくと、バレル内の圧力のばらつきは、充填結果である製品のばらつきにつながる。

メルトの逆流（射出工程のばらつき）

従来のスクリュヘッド3点セットには、シール動作の遅延によってシャットオフ機能が完全ではないという構造上の欠点がある。サックバック時と射出開始時に、樹脂が漏れている状態では、安定した充填量を確保することはできない。

インライン・プリプラ共通の弱点



ピーク圧の周期的ばらつき

剪断発熱によってオーバーシュートが発生する。これにより、熱電対とヒータとの関係が攪乱される。

黒 点（滞留炭化）

スクリュ圧縮部の勾配によって樹脂の滞留層が形成され、脱水分解が進行して炭化する。

混練不良（ソリッドベッドのブレイクアップ）

未溶融ペレットのかたまりが、樹脂の中に沈み込み、充分な熱量が伝わらず、未溶融部分を残して射出される。

超少量の計量不良

狭ピッチコネクタなどの射出量0.5g程度の計量では、スクリュが1回転もしないため、充分な混錬が行われない。

バレルの摩耗

ホッパ口付近で閉塞しているペレットが、バレル内壁を強く摩擦する。

SPIRAL LOGICによる解決

GSLoader GSローダ　T-Rex Unit
- ペレットが閉塞しない定量供給
- 水分を自然に排出する構造

T-RexBarrel T-Rexバレル　T-Rex Unit
- 噛み込みの良いスムースな搬送
- 全長の短縮による短い熱履歴

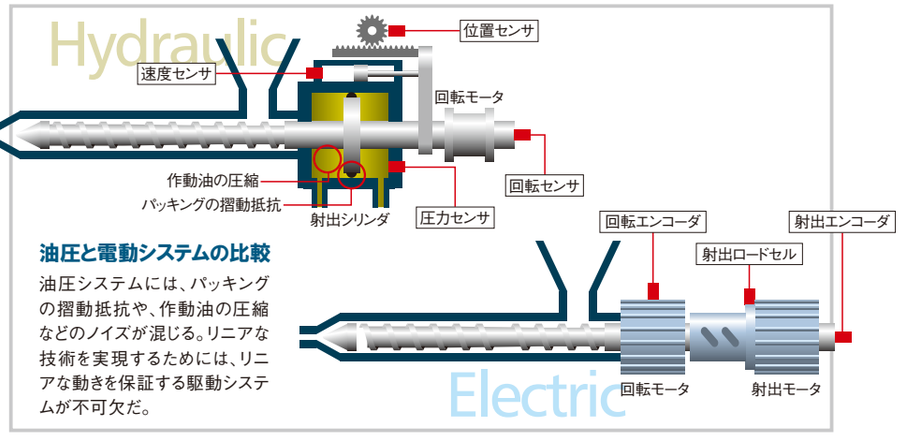
T-RexScrew T-Rexスクリュ　T-Rex Unit
- 無剪断可塑化による樹脂圧の安定
- ソリッドベッドの発生のないスムースな融解
- 滞留炭化を起こさないストレートスクリュ
- 充分な回転数で超少量計量を可能に

GSValve GSバルブ　T-Rex Unit
- メルトの逆流を防ぐシャットオフ性能
- 共回りのカムリングと非共回りのチェックリングによるハイブリッド構造

可塑化機構と射出機構を分離し、充填の安定性を追求したユニークな構造のプリプラプランジャ方式。コネクタなど小物精密品の成形現場で、一定の評価を受けている。しかし、スクリュが起こす剪断発熱で樹脂を融解していることは、従来のインライン方式と変わりはなく、そもそもここに課題があるようだ。小物精密安定成形のための理想のハードウェアは、プリプラなのか、SPIRAL LOGICのT-Rexユニットなのか。具体的な課題とそれぞれの対応を一覧にして見えてくるのは、暴竜 T-Rexの圧倒的な優越性だ。

電動機の優位性

プリプラプランジャ成形機の射出システムは油圧式である。油圧シリンダは、パッキングの摺動抵抗が大きく、作動油の圧縮など複雑な挙動をとり、その動作にノイズ成分が混入してしまう。いくら計量・射出の繰り返し精度を追求しても、駆動系に高い安定性・信頼性がなければ意味がない。T-Rexユニットは、ノイズ成分のきわめて少ない電動成形機との相乗効果で、リニアな波形を捉えることが可能となった。SPIRAL LOGICは電動機にふさわしい技術といえる。



油圧と電動システムの比較

油圧システムには、パッキングの摺動抵抗や、作動油の圧縮などのノイズが混じる。リニアな技術を実現するためには、リニアな動きを保証する駆動システムが不可欠だ。

超少量計量を可能にするT-Rexユニット

最大射出圧250MPaを可能にする実用的なスクリュの最小径は16mmとされている。従来の16mmスクリュアッシィで射出量0.3～0.5gの狭ピッチコネクタを成形する場合、計量時のスクリュは1/4～1/2回転しか回らず、これでは剪断発熱による完全な融解は不可能である。実際には、ノズルやゲートを通過する際の剪断によって融解していると考えられる。これは、インライン方式に限らず、プリプラプランジャ方式でも同じことがいえる。

T-Rexユニットでは、GSローダがペレットの供給量を調整することにより、スムースな融解と混練が可能な充分な回転時間をスクリュに与える。

T-Rex16(16mmスクリュ・写真)は、射出量1.0gにおいてスクリュを15回転(3.4sec/300rpm)、0.5gでも約5回転させることで、充分に溶けて粘度が低く均一なメルトを作る、超少量計量を実現したインラインスクリュアッシィである。

具体的な課題への対応評価比較

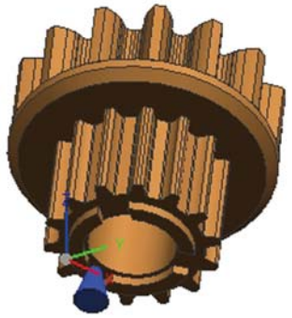
課 題	プリプラプランジャ(油圧式)	従来型インライン(全電動式)	T-Rex Unit SPIRAL LOGIC
射出の基本性能	✕ 油圧による射出では超低速制御性が悪い	◎ 電動サーボモータはレンズの成形などで優れた超低速制御性を発揮	◎ 電動のメリットに加えメルト圧が安定する
メルト圧の安定	◎ プリプラスクリュは固定された状態でペレットを押し出すためメルト圧は安定する	✕ ネジ抜きが発生するとメルト圧がばらつき突発的なショート・バリに	◎ 剪断しないのでネジ抜きが発生せずメルト圧は安定する
射出の安定　引きずり	◎ ネジ抜きに続く引きずり現象はない	✕ 計量時のネジ抜き部分が引きずりを起こす	◎ ネジ抜きが発生しないので引きずりもない
射出の安定　変動要因	✕ 油圧シリンダの摺動抵抗などが変動要因に ※実質推力＝射出油圧―ピストン抵抗―油圧パッキング抵抗―油圧配管圧縮	◎ 電動サーボモータは油圧シリンダのような変動要因を持たない	◎ 電動サーボモータは油圧シリンダのような変動要因を持たない
射出の安定　波形精度	✕ 波形は作動油圧(インプット)を表示しており射出圧(アウトプット)を示しているわけではない	○ 入力・出力に独立したセンサを持つが引きずりがあるために電動の良さを発揮しきれていない ※インプット＝エンコーダ／速度センサ ※アウトプット＝ロードセル圧力	◎ 入力・出力に独立したセンサを持つうえ引きずりがないので波形の信頼性が増す ※インプット＝エンコーダ／速度センサ ※アウトプット＝ロードセル圧力
滞留炭化(黒点)	✕ 圧縮スクリュなので樹脂の滞留層を形成し炭化を起こす ✕ プリプラスクリュから射出プランジャまでの流路が長いためコンタミ対策では不利	✕ 急激に圧縮するために滞留層が厚い ○ インライン式ではスクリュチップを出た樹脂は次のショットで射出されるため滞留は比較的シンプル	◎ T-Rexスクリュは圧縮部のないストレートスクリュなので滞留層は形成されず炭化もない
摩　耗	✕ プリプラスクリュではペレットの閉塞で剪断発熱が起きホッパ口付近が摩耗する ✕ 射出プランジャでは摩耗により後方から樹脂が漏れる	✕ ペレットの閉塞で剪断発熱が起きホッパ口付近が摩耗する ○ スクリュチップの磨耗が顕著	◎ 定量供給なのでペレットの閉塞がなく無理な力がかからず摩耗しない ◎ 摩耗しにくい構造のGSバルブたとえ多少摩耗してもシャットオフ性能に影響はない
スクリュチップでの逆流	✕ スクリュチップはないがプランジャを定期的に清掃する必要がある	✕ 計量完了時・射出開始時・射出完了時に逆流が発生している ○ 一部オプションでは逆転式開閉機構によって逆流は止まるがメルト圧のばらつきを反映して充填ピーク圧が不安定に	◎ 優れたシャットオフ性能のGSバルブがメルトの逆流を防止する 安定したメルト圧をそのまま保持し成形品の繰り返し安定性が向上
超少量計量	✕ プリプラスクリュの回転数が少ないので充分な融解と混練ができない しかし射出プランジャが別にあるためにインライン方式よりも有効といえる	✕ スクリュの回転数が不十分なため未溶融が射出されてしまう	◎ T-RexバレルとGSローダの組合せが可塑化能力を調整し1.0gを安定計量することが可能
省エネ	✕ 油圧ユニット(射出シリンダ・型締力シリンダ)は電力消費が大きい ✕ プリプラスクリュとプランジャのヒータ容量が大きい	◎ 全電動は油圧・ハイブリッドに比べ省電力 ○ シンプルなインラインスクリュ式	◎ 全電動は油圧・ハイブリッドに比べ省電力 ◎ T-Rexバレルの長さは従来比2/3でヒータの電力消費はさらに少ない
メンテナンス	✕ プリプラスクリュ・マニフォルド・射出プランジャなど構造が複雑なためメンテナンス性に劣る	○ インライン方式はシンプルな構造なのでメンテナンスは比較的容易	◎ インライン方式はシンプルな構造なのでメンテナンスは比較的容易 GSローダは基本的にメンテナンスフリー

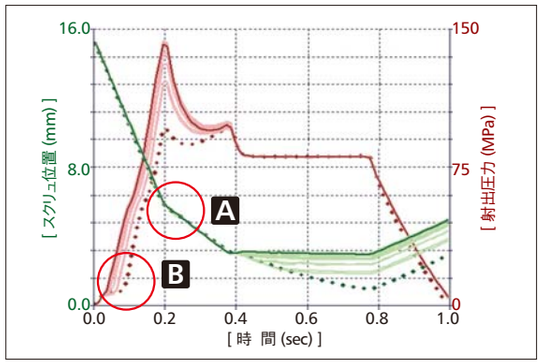
成形事例での検証-1

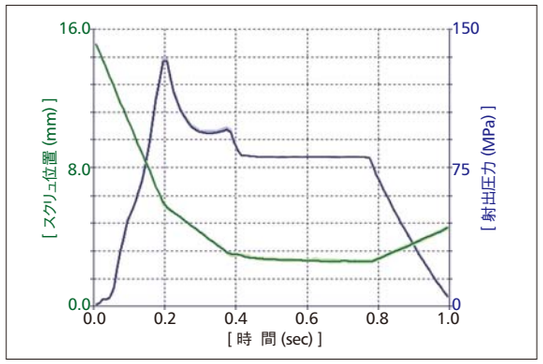
PCギアの突発性ショート

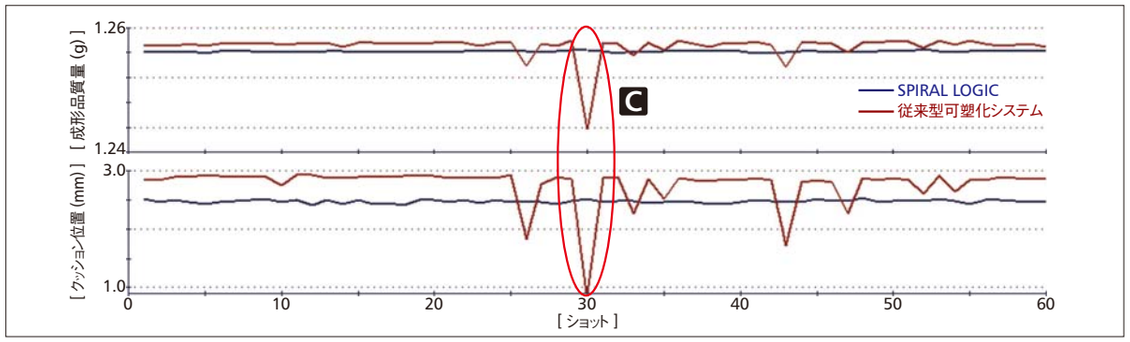
実際の成形事例での比較データを見てみよう。まず、PCギアの60ショット分のデータである。左側の従来型可塑化システムの波形(左)で、30ショット目にあたる点線に注目されたい。スクリュは、射出中に設定の速度どおり正確に動いているが(A)、射出開始時に圧力が上昇してこない(B)。このショットでは、ネジ抜きが起きてメルトの密度が低くなったため、スクリュが押しても圧力が上がらなかったのである。その結果、充填ピーク圧が上がらず、保圧でも補正できずに、質量で約1%のショートとなってしまった(C)。このデータは、製品が小さく、ゲートやランナも細い現実の成形では、保圧による充填の補償が完全ではないということも、同時に示している。

SPIRAL LOGIC(右)では、圧力とスクリュ位置の波形がきれいに収束し、成形品の質量にばらつきは見られない。安定したメルトが、安定した品質の製品を生み出している。

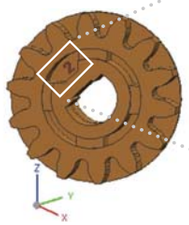


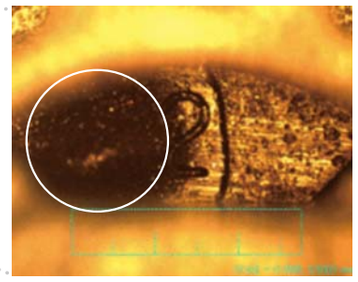


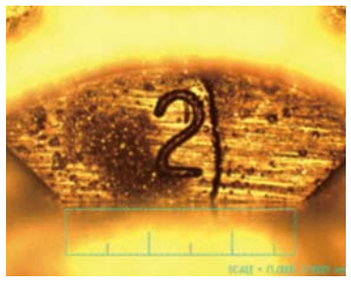




30ショット目の成形品の拡大写真を比較する。従来の可塑化システム(左)では、ショートショットが発生。SPIRAL LOGICでは60ショットすべてが安定していた。

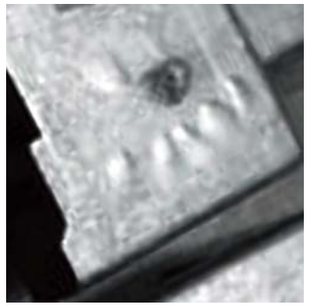






成形事例での検証-2

LCPコネクタのブリスタ

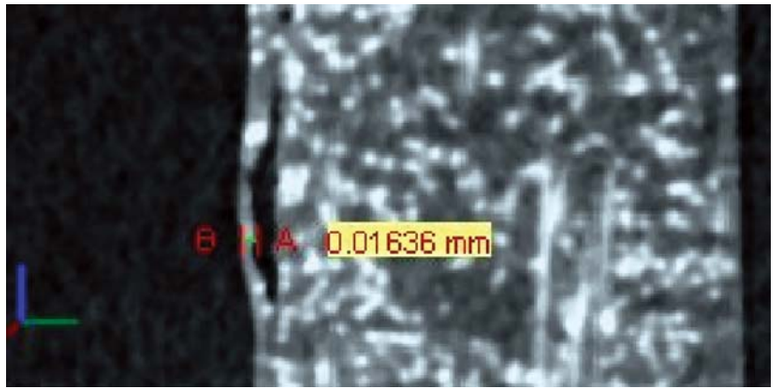


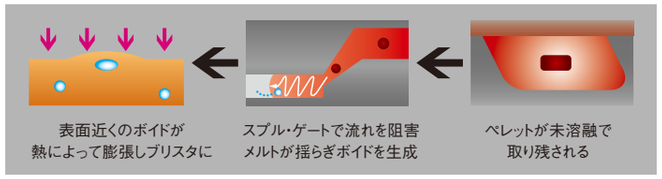
ブリスタとは、鉛フリーハンダのリフロー時(260℃・数秒から数十秒)に、成形品の一部が直径1mm以下・高さ0.1mm以下の円形に膨れる現象であり、特にLCPコネクタで問題になる不良だ。成形品表面を膨らませる力は、ガスや水といわれていたが、メルトの流速が速い場合や、粘性が高い時に発生するスパイラリング(メルトの揺らぎ)によるボイド(空気の巻き込み)が原因と考えられる。ゲートで未溶融があると、それが邪魔でメルトの流速が速くなること、また、未溶融が通過する際には粘性が高いような状態になることから、この時にボイドが生ずる可能性が高い。

従来のインライン方式では、未溶融対策として、ノズル部の温度を高く設定する、ゲートまでの射出速度を抑えるなどのテクニックが使われるが、完全ではないし合理的でもない。プリプラ方式は、構造的に樹脂の滞留が長いため未溶融が発生しにくいと考えられるが、これも完全に発生を防いでいるとはいえない。

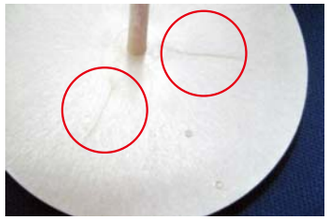
SPIRAL LOGICには、未溶融の発生しやすいLCPなどの低粘度樹脂向けに、熱容量やスクリュフライト、専用設定ソフトなどを新設計としたLSバレルがラインナップされている。LSバレルを使用すれば、未溶融は起きず、ブリスタも発生しない。

ドイツphoenix x-ray社製のX線CT装置による、ブリスタ断面の拡大画像。

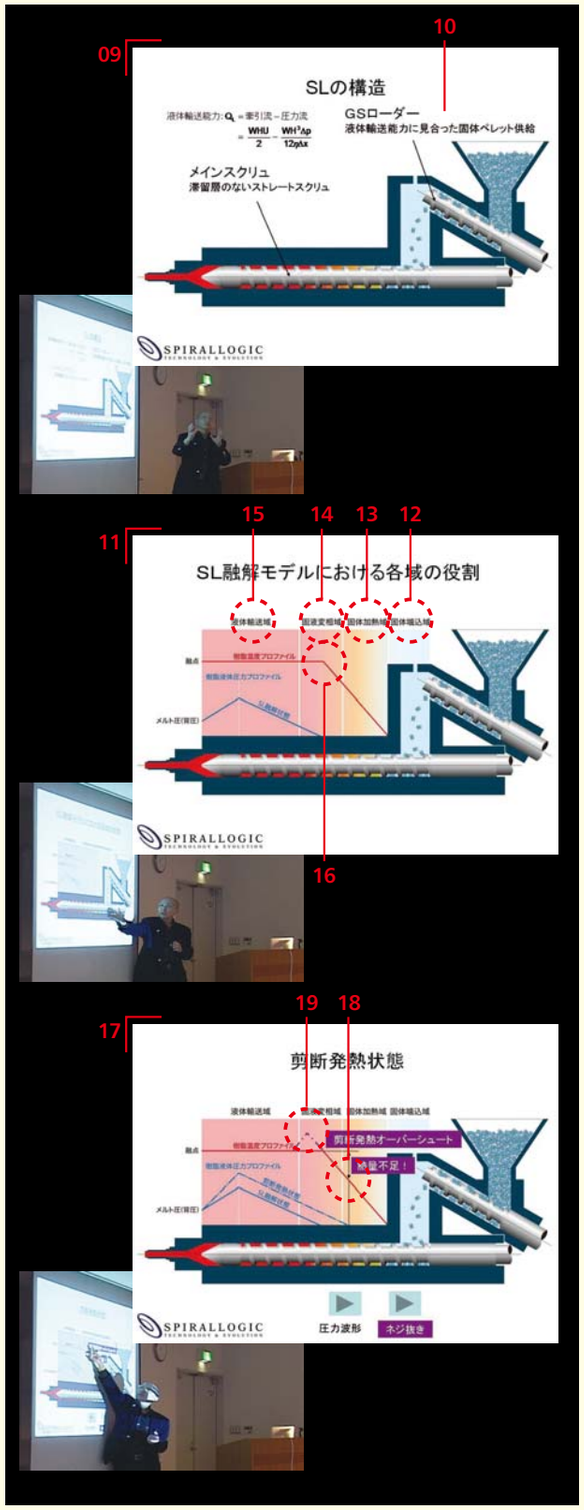




従来の可塑化システムにおいて、360~400℃という高温のLCPなどを成形する場合、ゾーン1の熱量が水冷されているホッパ下に奪われるためペレットが充分加熱されない。そこに、急激な剪断発熱が加えられると、あるペレットがさっと融けて急速に粘度の低いメルトができる。まだ熱量を充分に受けていない別のペレットがこのメルトに包まれ、完全に融解・混練されないまま前進して未溶融を形成する。こうしてできた未溶融が、ブリスタの原因となる。



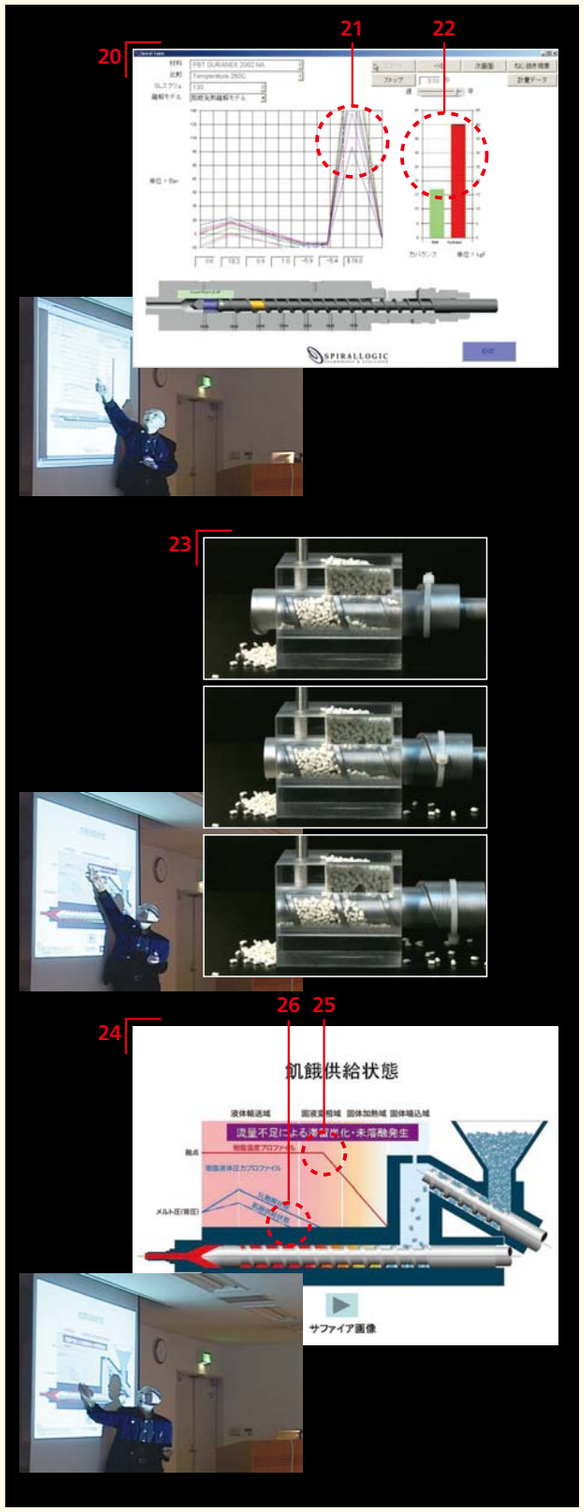
LCP(SUMIKA SUPER E5002L)成形品による未溶融の消失の検証。左側には未溶融が原因のウェルドが2か所に発生している。SPIRAL LOGICのLSバレルを使用すると、未溶融がなくなるためウェルドは消える。(2つの穴はセンサ用のもの)



■固体と液体の輸送能力を同じにしない限り、渋滞が起きるわけですが、では、SPIRAL LOGICはどういうふうにしてそのバランスを取っているのでしょうか。【←09】液体輸送能力に見合った固体ペレットを定量供給する、GSローダという装置を備えています。【←10】先ほどの数式のように液体の輸送能力は、スクリュのジオメトリと回転数、それにその樹脂の粘性によって決定されますから、粘性の低い樹脂では入れる量を制限しなければいけない。また、粘性の高い樹脂では、多めに入れる必要があります。

■圧縮域のある、いわゆる剪断発熱系のスクリュでは、入口の供給部、そして圧縮部、計量部という3つの部分に分割しますが、SPIRAL LOGICでは、各域を4分割して、それぞれに役割名を付けました。【←11】入口部分は固体噛込域。【←12】そして固体加熱域。【←13】その次に固体から液体へ変相させる固液変相域。【←14】最後に液体輸送域となっています。【←15】固体噛込域の役目は、GSローダから入ってきたペレットを必ず前に送り込む、というものです。次に、一番重要な固体加熱域ですが、これは樹脂をヒータで融点まで十分に温める役目があります。固液変相域は、文字どおり、固体から液体へ変相させる域です。そのあとは液体輸送域ですね。先ほど説明した、固体の輸送能力と液体の輸送能力のバランスに加えてもうひとつ。ここから液体になるというこのポイント。【←16】ここで、樹脂が十分に融解点に達しているという温度のバランス、これを加えた両方を整えると、SPIRAL LOGIC融解状態が完成されるわけです。

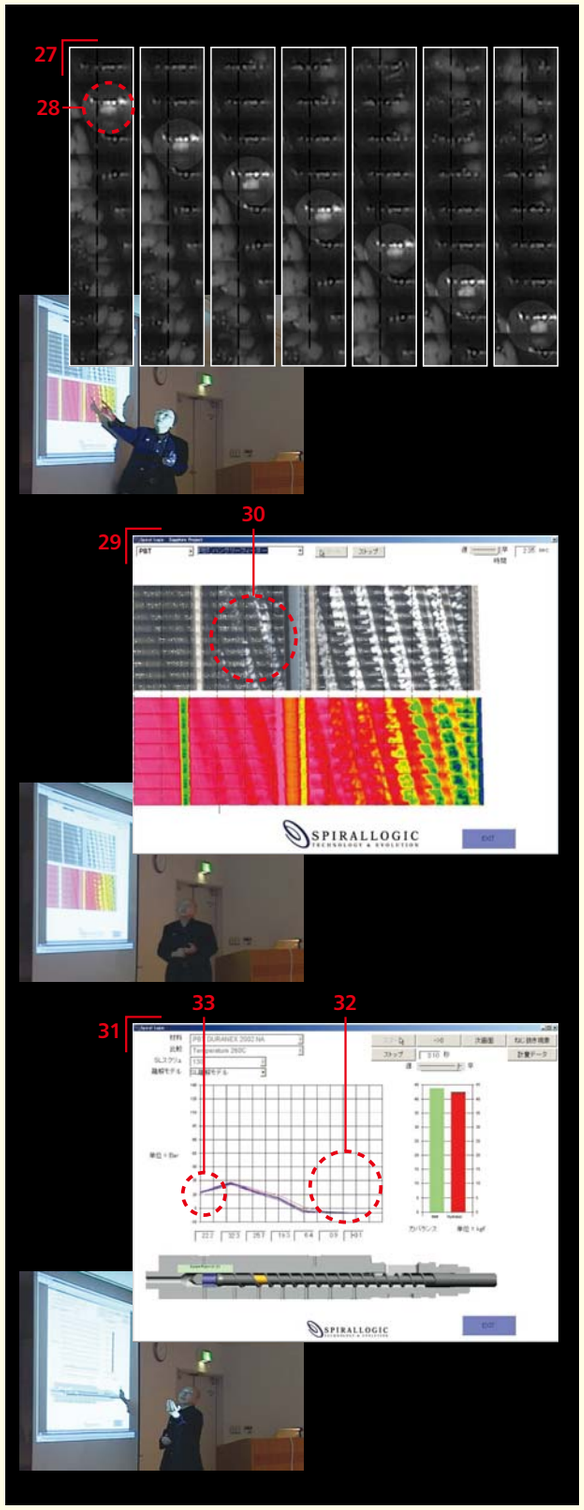
■GSローダから入れる量を増やしたらどうなるか。液体の能力よりも、固体を多めに入れた、というケースですね。【←17】先ほどの交通渋滞の例で考えれば分かりますが、液体の待ち行列が伸びてきますから、当然このあたりで液体にならざるを得なくなるわけですね。【←18】温度で見ると、融点に達してない前に液化しなければならないので、その分熱量が不足します。その足りない分はスクリュの運動エネルギーが補うのですが、それがいわゆる剪断発熱というものです。ところが、運動エネルギーを熱エネルギーに変換すると、必ずオーバーシュートが発生します。【←19】つまり、熱量を加え過ぎるというわけですね。



■そして、もうひとつの問題。これは剪断発熱状態のバレル内部の圧力分布のグラフです。【←20】計量中に、入口部分に非常に大きな圧力が立ってますね。【←21】150気圧だとか200気圧ぐらいの圧力が、16mmのスクリュで起きています。そして、もうひとつ特徴的なのは、計量中の圧力のバランスです。緑のメルト圧で赤の背圧に打ち勝ってスクリュを後へ押しもどすというのが、インラインスクリュの基礎となっていますが、そうなってません。【←22】スクリュが勝手に下がっている感じがしますね。

■なぜ、スクリュが勝手に後退するのか。ペレットがスムースに前に出ていく場合は問題はないのですが、詰まった、噛んだとなると、ペレットが雌ネジの役目をして、スクリュが回転しながら後ろへ下がってしまうわけです。【←23】「ネジ抜き」現象と呼びます。本来は液体の力でスクリュを押しもどさなければいけないのですが。それから、入口部分に大きな樹脂の塊を持って、それを射出の時に引きずらなければいけないという「引きずり」現象も起こします。インラインスクリュ3大弱点のうちのふたつ、「ネジ抜き」と「引きずり」、これはこの入口部分の混雑が問題となっているわけです。

■では今度は、GSローダの入れる量を液体の輸送能力よりも少なくした場合にどうなるか。【←24】当然渋滞の流れが短くなりますから、その分前に進みます。しかし、ここですでに充分に融けるだけの熱量を受けています。【←25】それで前へ無駄な距離が発生しています。【←26】その分だけ計量時間が長くなって、ばらついてしまいます。それ以上に大きな問題は、流量が不足することで滞留炭化が起きて、黒点が発生してしまうことです。

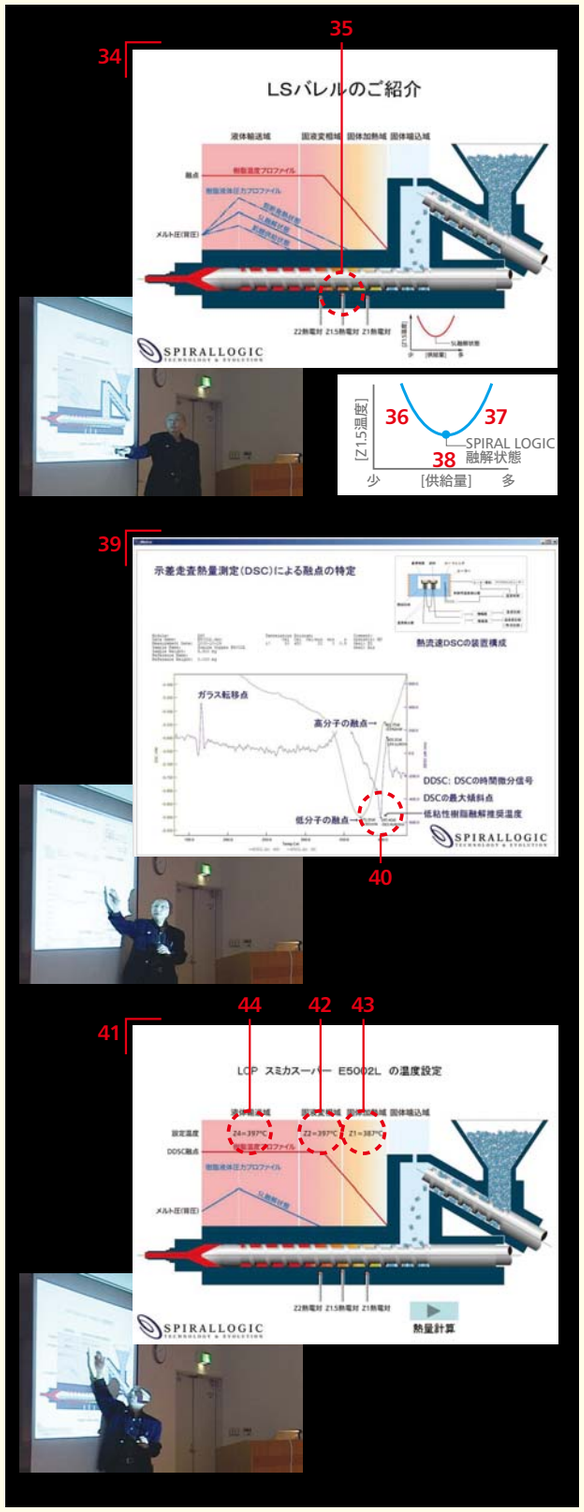


■これは、飢餓供給状態をサファイアバレルを使って可視化したものを展開画像で処理したものです。【←27】この引き側フライトのところ、この樹脂見ていてください。【←28】おなじところにずっといます。ここには流量が全然ないので、いったんそこへ入ったら、24時間、48時間、分解するまでいます。結果、それが黒点となるわけです。

■では、ちょうどいい状態の融解、SPIRAL LOGIC融解状態、はどうでしょうか。【←29】この辺を注視していただくと、引き側フライトにも十分に液体樹脂が流れ込んでいます。【←30】液体樹脂でどんどん洗浄をして行ってくれるという、自浄作用が働きますから、この融解状態で成形をすれば、1年でも2年でも3年でも、黒点は一切起きません。これは私どもの成形工場で実際に証明している、大変自信のあるマターです。

■次に、圧力波形がどうなるかですが、これが、SPIRAL LOGIC融解状態の圧力波形です。【←31】入口部分には混雑がありませんから、ご覧のとおり異常な圧力は立っていません。【←32】またメルト圧は、10ショットとも同じです。【←33】背圧にメルト圧が打ち勝って、常に同じだけの樹脂密度で計量するわけですから、同じ計量ができて当然です。

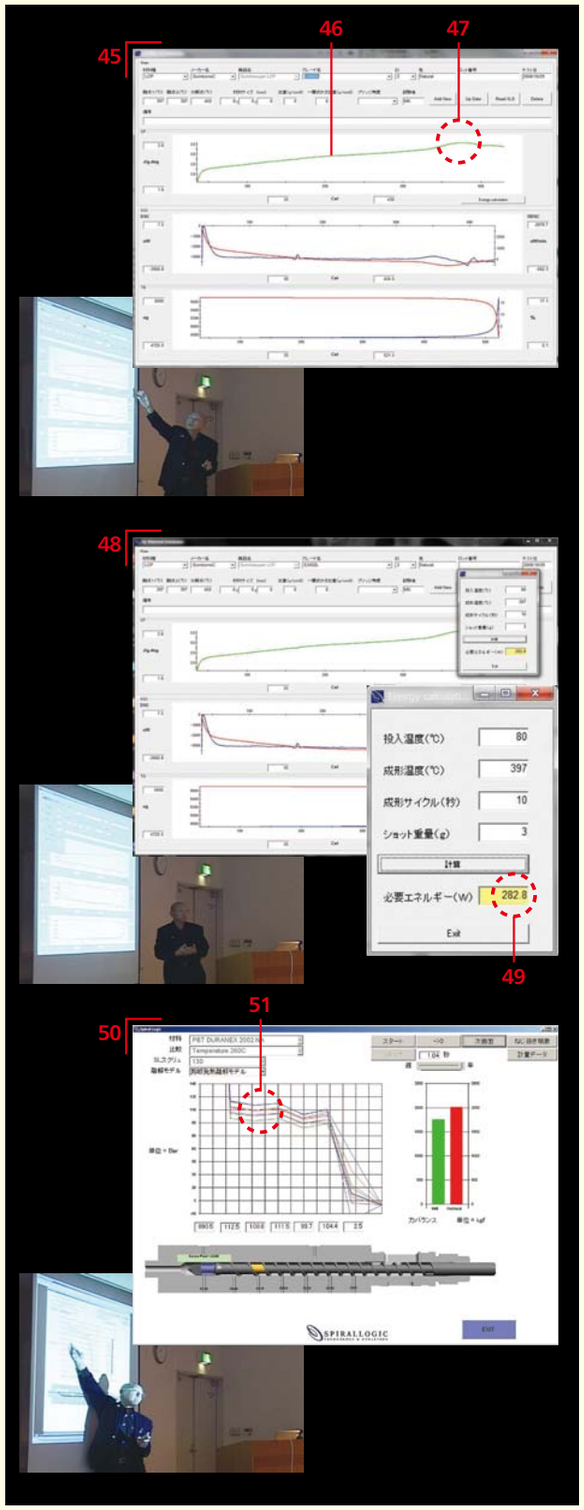
■さて、SPIRAL LOGICをお使いになったことがある方で、GSローダの供給量をちょうどいい点に調整することを難しいとお感じになられたことがあるかと思います。そこで、これをなんとか自動化できないかと研究して、このLSバレルを開発しました。【→34】ハード面では、ゾーン1とゾーン2の真ん中にゾーン1.5という熱電対を1本追加しています。【→35】そしてもうひとつのポイントは、この3本の熱電対を、バレルが壊れない限界まで差し込んで、樹脂の温度を測定するようにしています。一般的な可塑化装置の熱電対は、ずっと外に付いてます。バレルの温度、ヒータの温度を管理しているんですけれども、一番大事な樹脂の温度を管理しない限りは、意味がありません。ですから、ずっと奥へ持って行ったわけですね。



■まず、アイドリングの状態、それから非常に飢餓的な状態で、このゾーン1.5の温度がどうなるかですが、ホッパ下側に熱を引っ張られるので、ゾーン1を中心にした温度勾配が生まれています。供給量を除々に増やしていくと、熱量がどんどん奪われていきますから、この勾配がますます下がってきます。つまり、供給量を多くしていくと、ゾーン1.5の温度が下がります。【←36】ある一定の供給量以上になると、今度は剪断発熱が起き始めて、当然ここの温度は上がってきます。【←37】簡単なロジックですね。つまり、ちょうどいい状態で、温度が一番低くなるわけです。【←38】このゾーン1.5の温度を見ながら、GSローダの供給量を調整すると、だれがやってもドンピシャ、SPIRAL LOGIC融解状態を選ぶことができます。これを全自動で設定するプログラムを備えたシステムが、LSバレルです。

■ところで、ゾーン1・ゾーン2の温度、それからゾーン4の温度を、何度に設定すればいいのかという課題があります。樹脂材料メーカのカタログを見ると、例えば320℃から340℃にしなさい、などと相当な幅があります。SPIRAL LOGICでは、樹脂ごとに何℃、とピンポイントで決めることができます。これは、SUMIKA SUPER E5002Lという非常に粘性の低いLCPの検証結果です。【←39】このDDSCのピークポイントの397℃で融かすと、非常に良く融けます。【←40】これよりも低くてもうまく融けず、高くても融けません。高分子の場合は、融点が非常に曖昧ですから、難しいというのが今までの考え方だったんですが、私どもの検証では低粘性のLCPや、PA46・6T・9T、そういった樹脂は、このポイントでしか本当にきれいに融かすことができません。現在このデータは、約200種の材料のものを集めています。

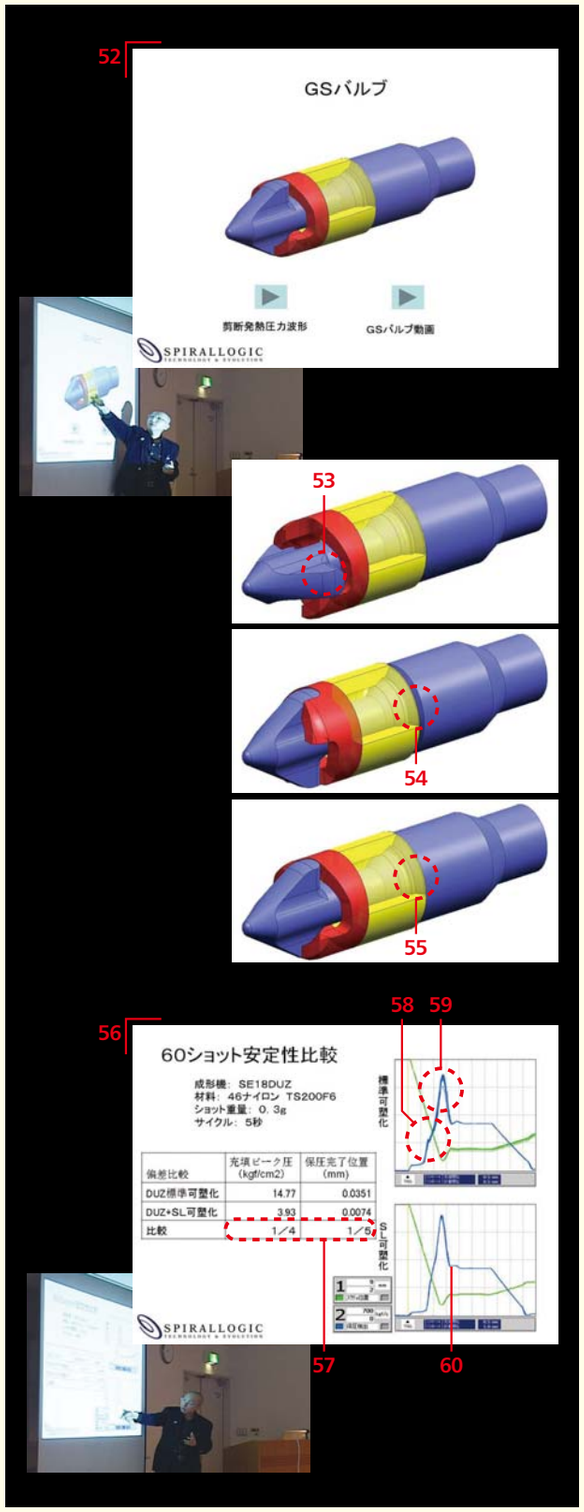
■ここで、SUMIKA SUPER E5002Lの場合の具体的な設定方法を説明します。【←41】固液変相域のゾーン2で397℃にします。【←42】ゾーン1は、397℃に設定すると、ホッパ下側に引っ張られる分だけ上がりますから、ゾーン1.5に山ができてしまいます。ちょうどこのゾーン1.5で397℃になるような温度プロファイルを作るためには、ゾーン1を、およそ10℃下げた温度、387℃に設定します。【←43】ゾーン4は397℃プラスアルファ、これは成形に必要な粘性をどうしても下げたいのであれば、樹脂が分解しない程度に温度を上げて設定すれば結構です。【←44】



■剪断発熱を利用しないで、ヒータの熱容量だけでうまく融けるのか、とご心配の方がいらっしゃると思いますので、先ほどのSUMIKA SUPER E5002Lを使って説明してみます。【←45】一番上のこの緑色の線のグラフ、これは室温から400℃までのこの樹脂の比熱です。【←46】この室温での比熱は材料メーカーの提供では1.6です。ところがこの結晶潜熱があるあたりは、その3倍ぐらいの比熱を持っています。【←47】室温のデータだけを持っていても、熱容量の計算ができないですよね。ですから、私どもでは、各樹脂の比熱を0.5℃単位でデータベース化しました。

■この比熱データをベースに、投入温度80℃、397℃で成形、サイクル10秒でショット3gという条件で、必要エネルギーを計算します。【←48】すると、280Wあれば、この樹脂は十分融けることがわかります。【←49】ところが成形機のヒータは1.2kWぐらいのものが付いてます。ホッパ下の水の方に、熱がほとんど引っ張られてるわけですね。SPIRAL LOGICでは、ホッパ下側に熱を引っ張られないような、いろんな工夫をして、ほとんどのエネルギーが樹脂に流れるようにしています。そのために、ヒータだけの加熱で樹脂が充分融けるようになっているのです。ですから、水冷シリンダに冷却水は……要りませんね。

■それでは、今度はスクリュ先端の部材の話をしましょう。もう一度、剪断発熱状態の融解の様子を見ていただきます。【←50】この射出の時に、チェックリングの後ろ側に圧力が溜まっています。【←51】これは、実はチェックリングが閉まってないんですね。チェックリングが閉まってなくて、入口部分の樹脂の塊でシールしているんです。それから、計量の時の最後で、ここの圧力を見てていただきたいのですが、計量が終わるとマイナスになっているのが、また上がってきています。これは、チェックリングが閉まっていない状態で、後の圧力の塊に押された液体樹脂が潜り込んで、前に流れてきているのです。SPIRAL LOGICでは、このようにセンサがまったく感知しない、つまり漏れていないのです。SPIRAL LOGICの射出時の波形は、プレゼンテーションL2.0でご覧いただけます。



■やっぱり、チェックリングはきっちり閉まらないと、ということで開発したのが、このGSバルブです。【←52】非共回りのチェックリングに、新しい部材、カムリングを付けています。まず、計量の開始でカムリングのロックが外れます。【←53】そして、計量で回転させると樹脂圧でここに隙間ができます。【←54】そこをくぐって樹脂が前に流れ込んで、メルト圧でスクリュを押し下げます。計量終了後逆転してサックバック前に閉めます。【←55】サックバックの時は、もうそこから樹脂は流れ込まないわけですね。サックバックが終わって、次の射出工程ではチェックリングがきっちり閉まってますから、樹脂の漏れはありません。普通の成形機では、サックバック量を変えると、クッション位置も一緒に動きますね。SPIRAL LOGICでは、クッション量は変わりません。本当のサックバックができるわけです。

■これは、18トンの成形機で成形した、PA46で0.3g・5秒サイクルの成形品の、従来の3点セットで行ったものと、GSバルブの、60ショットの比較データです。【←56】充填ピーク圧のばらつきは、4分の1に、保圧の完了位置のばらつきは、5分の1になりました。【←57】ロードセルが見ている樹脂の圧力波形ですが、従来の3点セットは、ここがばらついています。【←58】「ハナタレ」です。それからここが、ひとつだけ低いですね。【←59】ピーク圧がばらつきます。SPIRAL LOGICは、60ショットすべて波形がきれいに重なっています。【←60】

■細かい説明が足りない部分があったかと思います。SPIRAL LOGICのウェブサイトwww.spirallogic.com.hkにアクセスしていただければ、ダウンロードセンタから、詳しい資料を見ていただくことができます。ご静聴ありがとうございました。

本稿は、2010年3月10日・11日に住友重機械工業株式会社千葉工場において行われたSPIRAL LOGICの講演の内容を、若干修正・加筆して構成したものです。

ファクトリ・イノベーション

Factory Innovation

奮闘する生技担当者から見える未来工場

フィクション

舞台は日本国内の、とある中堅成形メーカ。IT関連のエンプラ機構部品や外観部品を大手メーカへ供給している。ここにひとりの若き生産技術者がいた。業界の厳しい環境を乗り切り、競争に勝ち抜くために、常に前向きに現場改革を進めたいと願っている。その手段を模索しつづけてきたものの、これといった決定的なツールに出会うこともなく、工場の確固たる未来像を描ききれない。

一方現場では、毎日のように起こるさまざまな課題やトラブルの処理に忙殺されている。ところが、あるきっかけで導入したまったく新しい技術が、直面する問題をスマートに解決することがわかり、現場での実績を着実に積み重ねていく。だがそれは、凝り固まって漫然と業界にはびこる、旧習との闘いでもあった。

彼の奮闘をとおして、具体的な理論・技術とともに、生産現場が改革を遂げていく様子と、徐々に見えてきた工場のあるべき未来像を、フィクションとして描いてみた。

CAST

清 家　修（せいけおさむ）
生産技術部課長

芝 原（しばはら）
執行役員

黒 島（くろしま）
ベテラン成形技術者

麗 子（れいこ）
成形部部員

滝 中（たきなか）
客先の部長

（登場人物は実在の個人と一切無関係）

Case 1

突発性ショートショット【不良対策にあけくれる現場】

POMインシュレータに突発的ショートが発生している。発生部位やキャビティを特定できない。検査基準では、目視による全数検査を行うようになっている。しかし、ある日客先のセットメーカから不良が混入していたと連絡があり、当日の全数を引き取って再検査することになった。客先担当者の滝中部長に呼び出され、対策を迫られた。先輩のベテラン技術者・黒島に相談してみるが……。

清家　「黒島さん、明日までに滝中部長に対策書を出さないといけないんです。どういった対策を提案したらいいんでしょうか」

黒島　「ネジ抜きをするから、ある時ポッとショートがでるらしい。インラインだからしょうがねぇよ。もっと背圧をかけるかだな」

清家　「背圧か……。プリプラはどうなんですか」

黒島　「プリプラはな、ネジ抜きはしねぇが黒点がでるんだ。ショートがなくなっても、黒点がでるんじゃなんにもならねぇだろ。滝中部長には『もっと厳しく検査します』っていうんだな」

清家　「参ったな。それで勘弁してくれますかね……」

その夜、パソコンの前で思案する清家。

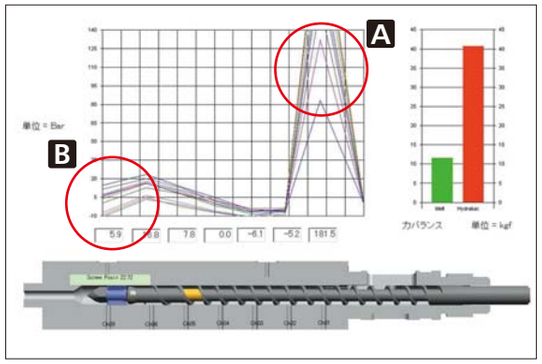
清家　「インラインでネジ抜きは宿命なのか……。プリプラが答えではないのは明らかだな。何か新しい技術がないか、ネットで調べてみよう。……SPIRAL LOGICだって？ どこかで聞いたな。……これは使えるかも知れないぞ」

翌日、客先での会話。

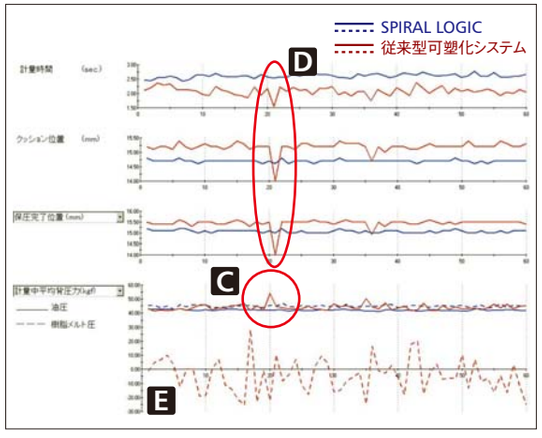
清家　「……というわけで、このSPIRAL LOGICというのを一度導入してみたいと思うのですが。根本的に何か変わる気がするんです」

滝中　「それなら実は僕もIPFで見たよ。講演も聴いて、なかなか面白いと思った。ハードウェアそのものを見直した方がいいかもしれないね。『SPIRAL LOGICの導入でショートの原因であるネジ抜きを起こさない専用ラインとする』というこの対策書なら合格だよ。でも会社は予算あるのかな？」♠

解説 1 ネジ抜きを起こさない【インライン方式最大の弱点を克服】



従来型可塑化システムに見られる、ネジ抜きの原因となるホッパ口付近の大きな圧力(A)とメルト圧のばらつき(B)。



異常な圧力の発生(C)と、その次のショットで起きたネジ抜き(D)。従来型可塑化システムでは、ネジ抜きは不可避であり、しかもいつ起こるか予測できない。メルト圧は背圧よりも低く、相当ばらついている(E)。

突発性ショートショットは、低粘度樹脂で頻繁に発生する不良である。従来では発生のメカニズムが不明とされており、再現性がないため対策の施しようのない厄介な現象であった。

ベテラン技術者の黒島氏がいうように、インラインスクリュ最大の問題であるネジ抜きが直接の原因となっている。従来のバレルでは、圧縮部を起点とした低粘度のメルトの渋滞と、未溶融のペレットがホッパ口付近で強く押し合っている。圧力の分布をみると、この部分に非常に大きな圧力がかかっている。この状態では、ペレットはバレル壁面と一体化し、スクリュに対してナットのように働くため、スクリュがペレットを押し出さず、回転力によって後退してしまう。これがネジ抜きだ。

ネジ抜きが起きる状態では、バレル各部の圧力にも大きなばらつきを生じているが、実際の稼働ではスクリュヘッドの閉まり挙動の遅れによってメルトの漏れが行う「調整」によって、連続成形が成り立っている。しかし、あるショットでこのタイミングに狂いが生じると、通常より低い密度で充填されてしまう。これが、突発性ショートショットの起きるメカニズムだ。

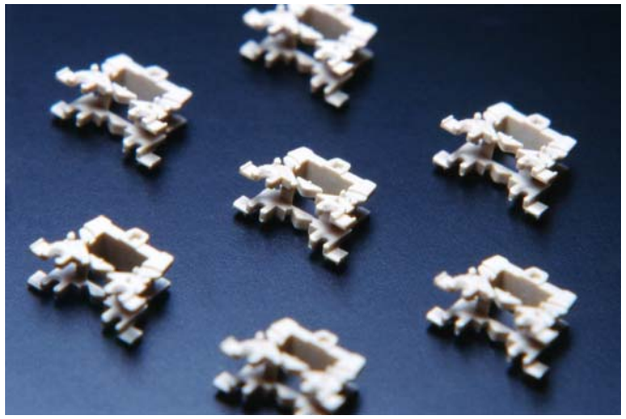
SPIRAL LOGICでは、ショートショットは発生しない。圧縮部のないT-Rexスクリュではメルトの渋滞がなく、メルト漏れのないGSバルブとあいまって、安定したメルトを実現している。また、定量供給のGSローダはペレットを充満させず、ナット状態を形成することもないのである。SPIRAL LOGICは、ネジ抜きをしない、画期的なインラインスクリュアッシィだ。

なお、従来の成形技術では、メルト圧を安定させるために背圧を掛ければよい、とされている。しかし、ナット(バレル内のペレットの閉塞)を持って、ボルト(スクリュ)を回してみるとどうなるだろう。いくらボルトを持つ手に力を入れても、ネジの力で後退してしまうのは明らかだ。つまり、背圧(＝射出モータ)で、ネジ抜き(＝回転モータ)を制御することはできないのである。

Case 2

温度とGSローダの設定【勘の通用しないスーパーエンプラ時代の可塑化】

突発性ショートショットに対し、抜本的対策としてSPIRAL LOGICを導入、大胆な改革が客先にも好意的に受け取られていた。しかし、また別の問題が起きたようだ。成形課のちょっと手厳しい後輩の麗子から呼び出された。



麗子　「このLCP、どうも計量時間がばらつくんですけど。いくら良品が取れるといったって、こんなにばらついてたら、管理できていないっていわれますよ」

清家　「計量が安定しないの?」

麗子　「ほら、これ、このデータ。最新の成形機っていうことだけど、これだったら、古い機械のほうがそれなりに安定していますけど」

清家　「ほんとだ。困ったな……」

麗子　「清家さんが決めて入れたんだから、なんとかしてくださいよ」

新参者のSPIRAL LOGICに対して、現場は露骨に不快感を表している。温度設定に間違いがあるのか?設定を確認してみることにした。

ノズル:340℃	Z4:340℃	Z2:320℃	Z1:280℃

清家　「あれっ?違うなあ。これではゾーン1の熱量が足りないよ! この温度設定は……」

麗子　「ああそれ、黒島さんが来て、LCPは入り口を下げとくんだって。それに、材料メーカの資料にもそう書いてありますよ。ほら」

清家　「うーん……。あれっ、ペレットがホッパ口にあふれてるよ。GSローダが供給を最適に調整するはずなんだけどなあ。これも黒島さんの指示?」

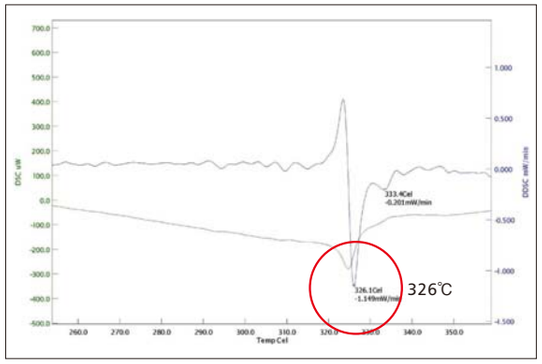
麗子　「計量のばらつきを相談したら、噛み込みが悪いなら供給量を増やせばいいといわれて、設定を変えたんです。これで問題あるんなら、黒島さんにいってくださいよ。うちの成形の神様だから、私からあの人にはいえませんよ」

清家　「科学的に検証された技術を使いこなすのに、経験とか勘に頼ってはだめなんだけどなあ……」♠

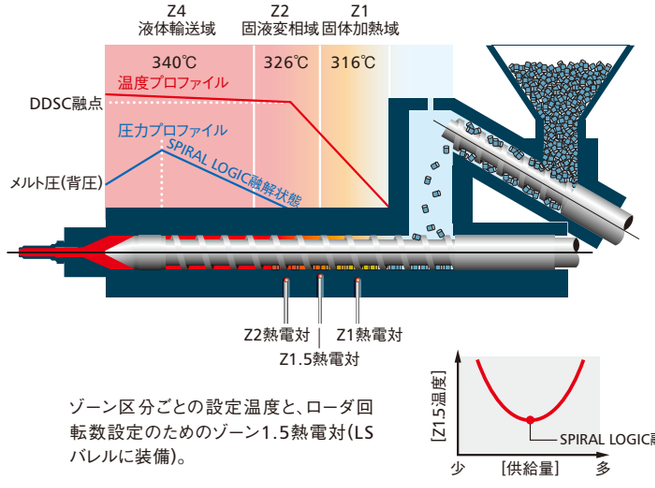
解説2 設定値はピンポイントで決める【大切なのは正しい温度管理】

	ノズル	Z4	Z2	Z1
樹脂メーカ資料	340~370	340~370	320~350	280~320
黒島氏の設定	340	345	330	280
SPIRAL LOGIC推奨設定	340	340	326	316

LCP SUMIKA SUPER E6007Lの設定温度。メーカの資料には幅がある。黒島氏はその幅の中から「適当だと思う」数値を選んだ。



示差走査熱量測定(DSC)によるSUMIKA SUPER E6007Lの融点の特定。DDSC融点は、DSCの描く曲線の最大傾斜時の温度。



ゾーン区分ごとの設定温度と、ローダ回転数設定のためのゾーン1.5熱電対(LSバレルに装備)。

T-Rexユニットでは、バレル内の役割に応じてゾーンを区分した。固体加熱域をゾーン1、固液変相域をゾーン2、液体輸送域をゾーン4とし、これにノズル部を加えた4か所のヒータの温度設定を行う。純粋にヒータの熱量だけで樹脂を融かすので、設定したとおりの温度を得ることができるが、それだけに理論に即したシビアな設定値が要求される。これは逆に捉えると、可塑化の自動設定の可能性があるということだ。

黒島氏は、樹脂メーカの資料が示す、幅のある温度帯域から、経験や勘で各部の温度を決めたようだが、これが科学的な理論に裏打ちされたSPIRAL LOGICへ適用することがて妥当であるかどうかは、言を待たないであろう。LCPのような結晶性樹脂は、示差走査熱量測定で得られるDDSCのピーク点を融点とすることが理想的である。ここでの例であるSUMIKA SUPER E6007LのDDSC融点は、測定の結果326℃と求められる。これに基づき、各部を表のように設定するのが望ましい。温度設定の考え方と手順は、前掲の「誌上講演 SPIRAL LOGICの融解と実践」に詳しく説明がある。

GSローダの回転数は、飢餓供給状態より徐々に設定値を上げていき、波形を確認しながら適切な供給量を探る。スクリュの後退が直線的となるか、回転トルク・射出時の圧力が安定するかなどがポイントだ。しかし、LCPのように回転トルクなどに顕著な差が見られない樹脂では、波形で判断をすることが困難となる。この場合は、低粘度樹脂専用のLSバレルに装備されているゾーン1.5の温度で適正値を判断する。これも同じく「誌上講演 SPIRAL LOGICの――」に詳しく説明があるが、ゾーン1.5の温度が最低の時に、SPIRAL LOGIC融解状態となっているので、これによって適切なGSローダの設定が可能となる。

このように、ヒータ温度・ローダ回転数ともに、ピンポイントで決めることができる。なお、麗子さんが心配した計量時間のばらつきについてであるが、計量で肝要なのは密度の安定性であって、これが確保されていれば、時間の多少のばらつきは重要ではない。

Case 3

黒点の発生【射出成形の不可避的課題】

正しい設定方法を理解して、LCPの問題は解決された。SPIRAL LOGICは、経験よりも理論が有効なハードウェアであることをあらためて認識する。うまくいきそうな感触をつかんだのもつかの間、守旧派からの思わぬ反撃に遭う。

黒島　「清家君、ちょっとほら、黒点が出てる。君はSPIRAL LOGICは黒点が絶対に出ないなんていってたはずだよな」

清家　「ちょっと待ってください。もともとペレットの中に黒点が多かったのかもしれませんよ。まず、スクリュを見てみましょう」

黒島　「真ん中へんが黒くなってるぜ。炭化してるんだ。SPIRAL LOGICは炭化しないんだろ」

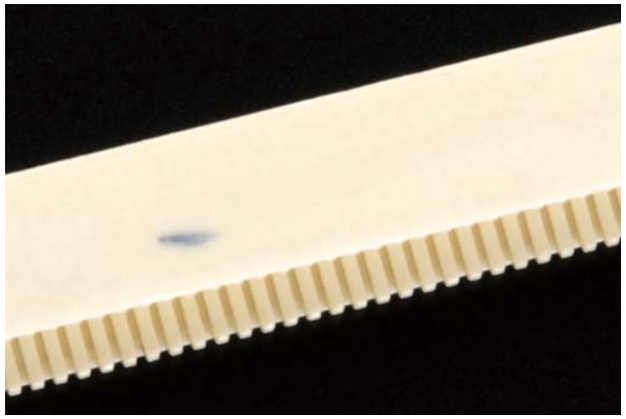
清家　「あれっ。どうなってるんだ。SPIRAL LOGICの説明はいい加減なのかな。なんだか、ますます面倒くさくなってきちゃったよ……」

事務所にもどって、冷静に考え直してみる。

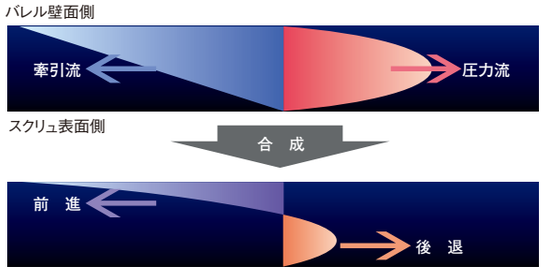
清家　「SPIRAL LOGICの講演では、2年経っても炭化しないといっていたぞ。それは……えーと、確かクエット流とかで、バレル壁面は牽引流、スクリュの表面は圧力流、この逆流が圧縮部で流速を失なうから表面を流れない。だから圧縮部の表面は最初に計量した樹脂がずっと滞留している……と。」

それでは、なぜ圧縮部のないSPIRAL LOGICが炭化を起こすのか？ 何か別の理由があるはずと考えた清家は、成形条件表を取り出してみた。

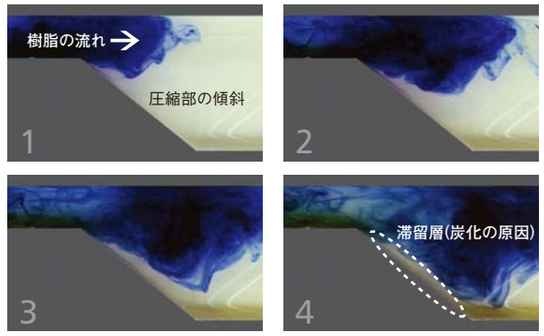
清家　「ん？ GSローダの設定が妙に低いな。この前は入れ過ぎで問題が起きたんで、びびっちゃって今度は減らし過ぎたのかな。流量が極端に少ないことが、滞留の原因かもしれないな。もう一度ローダの設定値を見直してみよう」♠



解説3 滞留炭化を起こさない【適正な供給量がポイント】



クエット流による、メルトの挙動の二次元的説明。バレル壁面側は牽引流となって前進しようとする(上図の青い三角形)。ここで、牽引流により前方の圧力が上がれば、その圧力により断面積に対して圧力流が発生(上図の赤いお椀型)。それぞれを合成すると、バレルの壁面側は前進し、スクリュ表面は後退することになる。



逆流成分が勾配にさしかかって力を失い、勾配の表面に達しないことを見るための、水を使った簡単なシミュレーション。

黒点の発生は、透明や淡色の成形品で致命的な不良となる。PP電池パック・LCPコネクタなどの電子部品では、導電性のある黒点(＝炭素)の存在はやはり致命的だ。黒点は、スクリュ表面に生じた樹脂の炭化物が剥離して成形品に混入したもので、樹脂が熱履歴による脱水分解で炭化する条件があるかぎり、必ず発生する現象だ。

従来型のスクリュを抜いてみると、圧縮部に炭化層が発生しているのが観察できる。炭化は圧縮部そのものに起因するのであり、スクリュのフライトデザインや表面処理、または樹脂に原因があるわけではない。圧縮部で樹脂が滞留することにより長い熱履歴にさらされ、炭化物を形成するのである。それでは、なぜ圧縮部で樹脂が滞留するのだろうか。

フライトの空間でメルトに働く力を合成すると、メルトはバレル内壁側では前進し、底部(スクリュ表面)では逆流成分のために後退している。これは、粘性流体の輸送理論「クエット流」で説明される事象である。ここで、メルトが圧縮部にいたると、スクリュ表面を後退する逆流成分は、傾斜で空間が広くなったことで勢いを失い動きを止める。つまり、傾斜のあるスクリュ圧縮部の表面をメルトは流れないのだ。河口で勢いを失なった水が、土砂を堆積させて三角州を形成する状態をイメージすればわかりやすい。驚くべきことだが、圧縮部の表面には、一番最初に計量した時に流れた樹脂がずっとそのまま滞留していることになる。

T-Rexスクリュは、圧縮部のないストレートスクリュなので、全長にわたってスクリュ表面を後退する逆流成分が働き、滞留層を形成することはない。従来の剪断発熱モデルにおいて、数え切れないほど出現した新しいデザインと材質のスクリュは、うたい文句として「黒点が減る」といった。いずれも圧縮部があるため、黒点が完全になくなることはなかったのだ。圧縮部のないT-Rexスクリュを組み込んだSPIRAL　LOGICは、黒点が起きないスクリュアッシィである。

しかしながら清家氏がいうとおり、供給過多を危惧するあまり、GSローダの設定量を少なくして飢餓状態にしてしまうと、後退する逆流成分が消失して滞留層を形成することがある。理論的な最適の設定値をつかむことが重要だ。

Case 4

スクリュ・スクリュチップの腐食 【異常に速い腐食の進行で上がらない生産性】

いろいろな樹脂を成形するうちに、標準的な可塑化の設定が決まってきたので、立ち上げも早くなり、生産は以前に比べてはるかに順調だ。別の成形条件表を参照したり、パージした材料の様子を見て温度を決めたりといった、経験と勘に支配されていた現場の状況が変わりつつある。SPIRAL LOGIC LIMITEDに樹脂の融点の分析を依頼した結果に基づくと、経験値に比べて低い温度で溶かしたり、粘度を高く保ちながら混錬する、というのは理にかなっていることもわかった。

ある日、SPIRAL LOGICにもすっかり馴染んでくれた成形部の麗子が、またやって来た。

麗子　「清家さん、新しい金型が来たんで試作しているんですけど、条件が全然出ないんですよ。やっぱり、ほかの成形機じゃ駄目なんで、ちょっとSPIRAL LOGICを貸してくれませんか?」

清家　「条件が出ないって、どういうことなの?」

麗子　「だいたい、この46ナイロンって、ガスっぽくて。試作してても金型のシボがテカッてくるんですよ」

清家　「ナイロンだから当然、除湿乾燥だろ?」

麗子　「もちろん。でもなんだかガスが多くて。2日間やってるんですけど、今日は噛み込みが悪くて、計量のばらつきがすごいんです。おまけに、射出ではスクリュが押し切るし。いったいどうなってるんだか」

清家　「それって、もしかしてスクリュヘッドとかが腐食してない? 押し切るのは、まずチェックリングを疑うべきじゃないかな」

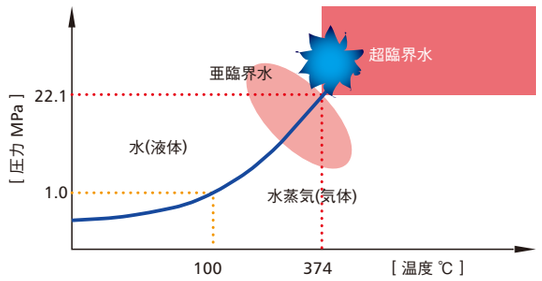
麗子　「まさか腐食なんて。たった2日ですよ!?」

清家　「面倒だけど、ちょっと開けて見てみよう」

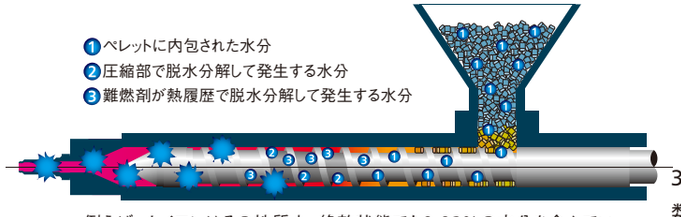
出てきたスクリュチップは、まるで溶けたソフトクリームのようにヘロヘロになり、外径は1mmも痩せている。スクリュには、もはや山がないような状態だ。

二人　「な、なんだこれはー!?」♠

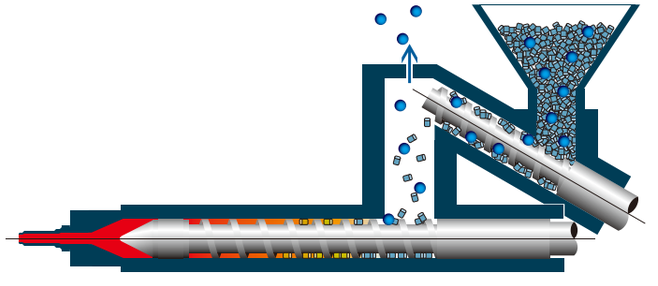
解説4 腐食のメカニズム 【超臨界水が原因　水がなければ腐食しない】



超臨界水は、誘電率とイオン積が変化し、反応溶媒効果を高め、強い腐食性を持つとされる。汚水処理やダイオキシンを発生しない有機物の分解方法として研究されており、環境問題を解決する将来の技術として位置づけられている。その一方で、射出成形の現場でショット毎に発生している超臨界水は、残念ながら安定生産を邪魔する「悪玉」でしかない。



例えば、ナイロンはその性質上、絶乾状態でも0.02%の水分を含んでいる。1トンの樹脂を使うと、200ccもの水がバレルに侵入する。難燃材も問題だ。RoHSの影響でハロゲン系(臭素系)難燃剤が使えなくなり、今後の主流となる分解温度の低い無機系(水酸化マグネシウムなど)では、分解の結果として、水を生成するためである。



SPIRAL LOGICでは、ペレット内包する水分は定量供給の間隙を縫って排出される。圧縮部がないので滞留による脱水分解(炭化)もなく、短い熱履歴で難燃剤の脱水分解も少ない。

RoHSの施行とともに、電子部品では要求される耐熱温度が上がり、PA66などに代わり、320〜340℃の高温で成形するPA46・PA6T・PA9Tなどが増えた。これらの成形現場では、スクリュチップやスクリュ計量部の腐食が大きな問題となっている。写真のように、まるで溶けているように見えることや、ヘッドからスクリュ計量部に限定していること、そしてきわめて短期間で進行することが特徴的だ。

「樹脂から発生するガスが腐食を引き起こす」という定説がある。しかし、ノズルや金型にはあまり腐食は見られないし、金型を開けた時にガスが出て、他の機械にも腐食が及ぶというわけではない。スクリュチップとスクリュ計量部だけに激しい腐食が見られるのは、ほかに原因があるはずである。一体何が原因なのだろうか。

研究の結果、スクリュヘッドやスクリュを腐食させる原因として、次の3種類の「水」を特定した。

1. ペレットに内包された水分
2. 圧縮部で脱水分解して発生する水分
3. 難燃剤が熱履歴で脱水分解して発生する水分

高機能ナイロンの場合、剪断発熱により樹脂温度は320〜340℃程度に上昇することがある。また、バレル内は数百MPaという高圧だ。このような高温高圧下にある水分は、金をも解かす強腐食性を持った、液体でも気体でもない超臨界水となる。水の超臨界に達する条件は、厳密には374℃以上・22.1MPa以上だが、300℃を超えた状態では亜臨界という、超臨界と同様の腐食性の強い状態になっている。成形機のバレル内部では、毎ショットこれに近い状態となっている。このようなバレル内にある水が超臨界水となり、腐食が急速に進行していくのである。

スクリュ計量部は、チェックリングからの逆流によって高温高圧となるため、超臨界水・亜臨界水にさらされて腐食してしまう。しかし、バレルの後方では圧力が低いため、水分は超臨界・亜臨界にはならず、一方で金型に入った超臨界水・亜臨界水は、急激に温度が奪われるため、普通の状態にもどってしまう。スクリュチップとスクリュ計量部だけが腐食するのはこのためなのだ。

Case 5

省エネ・省コスト対策 【必ずクリアしなければならない切実な問題】

さまざまな問題を、SPIRAL LOGICが理論による裏付けで鮮やかに解決していく様子に、社内でも次第にシンパが増えているようだ。導入台数も伸び、稼働は順調で、清家にも今までにない穏やかな毎日が訪れている。そんな中、執行役員の芝原部長から直々に呼び出しがかかった。何事かと緊張して役員室へ。

芝原　「清家君、あの新しい成形機、何ていったかな」
清家　「SPIRAL LOGICです」
芝原　「そうそう、それなんだけど、ランニングコストはどうなっているの?」
清家　「全電動ですから、油圧やハイブリッドに比べて電力コストは格段に抑えられているはずですが」
芝原　「いや、ほかの全電動と比べてどうなのかということなんだよ」
清家　「説明では、ほかの全電動機よりも省エネになると」
芝原　「それはほんとかね。黒島さんがいってたが、ヒータだけで融かしているそうじゃないか。だったら今までの全電動機より電気を食うんじゃないのか」

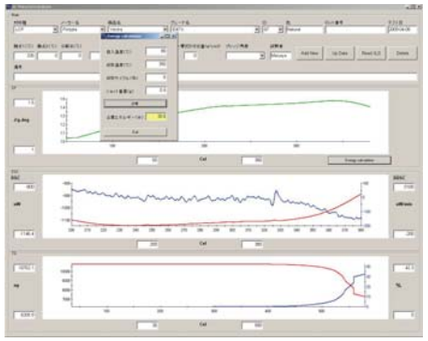
SPIRAL LOGICはランニングコストが抑制されると、稟議書にも説明してあるのだが、どうも感覚的に理解できないようだ。

清家　「18トン機には3kWぐらいのヒータが付いてますが、えーと、例えば、このPOM M90Sの1gでサイクル10secというのがあるんですけど、実際はどれぐらいで融けてるかというと」
芝原　「1kWぐらいかな?」
清家　「いえ、52.7Wなんです。ほかの樹脂もここに表が」
芝原　「……ほー、なるほど。効率良く融かすなら何kWもいらんというわけか。もっと詳しいデータでプレゼンしてみてくれんかね。全社的に検討してみるから」

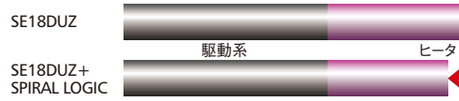
これは大きなチャンスだ。さっそくSPIRAL LOGICのウェブにアクセスして、プレゼンのデザインを始めた。

樹脂・グレード	サイクル	ショット質量	必要ヒータ容量
POM M90S	10.0sec	1.0g	52.7W
LCP SUMIKA SUPER E5002L	10.0sec	3.0g	282.8W
LCP VECTRA E471i	6.0sec	0.5g	30.6W
PA46 Stanyl	15.0sec	3.0g	134.6W

解説 5 理想の融解がもたらすメリット 【エネルギーと材料は必要にして充分に】

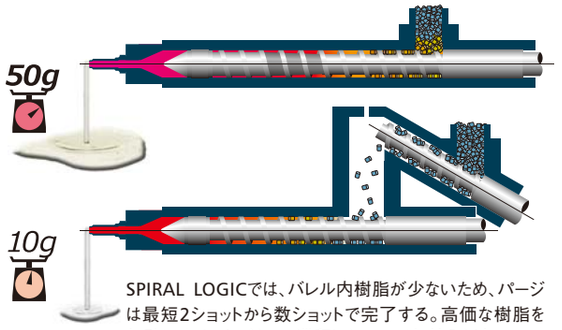


SPIRAL LOGIC LIMITEDが開発した、樹脂の融解に必要な熱量を算出する専用ソフト。



主にヒータ容量が減ることにより、成形機の電力消費を21%も抑えることができる。油圧機に比べてランニングコストの圧倒的に低い従来型全電動機よりも、さらに省エネ。

モールドデポジットは、金型に侵入した水分が原因。従来型によるPP部品の成形では、1日でデポジットが大量に付着する(左)。SPIRAL LOGICは、16日後でも微量。



SPIRAL LOGICでは、バレル内樹脂が少ないため、パージは最短2ショットから数ショットで完了する。高価な樹脂を無駄にすることがない。滞留しないので色替えも速い。

SPIRAL LOGICでは、定量供給によってバレル内にペレットが充満することがないため、バレル表面からペレットへの伝熱効率は高い。バレルは従来の2/3の長さに短縮されているので、ヒータ全体の容量は小さくなっている。また、ホッパ口でのブリッジ対策が不要となり、水冷シリンダに通水しないことによって、ゾーン1のヒータ容量を効率的に利用することができる。

SPIRAL LOGIC LIMITEDでは、主要な樹脂・グレードについて、その正確で温度ごとの細かい比熱のデータベースをもとに、投入温度・DDSC融点・サイクル・ショット質量を入力すると、融解に必要な熱量を算出するソフトウェアを開発した。これによって得られる熱量の値は、成形機に標準搭載されているヒータの容量に比べて、はるかに小さい。樹脂を効率的に融かすためのエネルギーは、以外に少ないのである。

次に金型のメンテナンスを見てみよう。メンテナンスの大きな要因としてモールドデポジットが挙げられる。充填工程では、ランナ・キャビティ部分の空気が圧縮されて高温になる。ガスベントから空気が抜けるよりも樹脂が到達するのが早ければ、フローフロントは高圧高温の空気にさらされるが、もしそこにスクリュ圧縮部での脱水分解で生じた水分が混入していれば、局所的に超臨界水が生成され、樹脂を分解する。これが金型に付着したものが、モールドデポジットだ。成形品に付着すれば、変色などの不良になる。SPIRAL LOGICでは、金型に水分が侵入しないため、モールドデポジットは激減する。

また、バレル内の樹脂量も重要なポイントだ。T-Rexバレルは短く、その上GSローダによってペレットが必要量しか供給されないため、バレル内の樹脂の量は従来に比べてはるかに少ない。16mmスクリュで比較すると、従来型が約50gであるのに対し、SPIRAL LOGICでは約10gと、1/5にまで減っている。少ないパージ量ですばやい樹脂替えを可能としている。

SPIRAL LOGICは、シビアなコスト削減の要求にもしっかり応えることのできる、優れた生産システムである。

Case 6

品質管理は正しいか【成形機の状態をレポートしても意味がない】

SPIRAL LOGICは省エネ・省コストでもあることが上層部にも理解され、全社的な方針として旧機種の置き替えと増設に採用されることとなった。機械が順次納入され、生産の陣列に加わっていく中、導入の契機ともなった客先の滝中部長に相談を持ちかけられる。

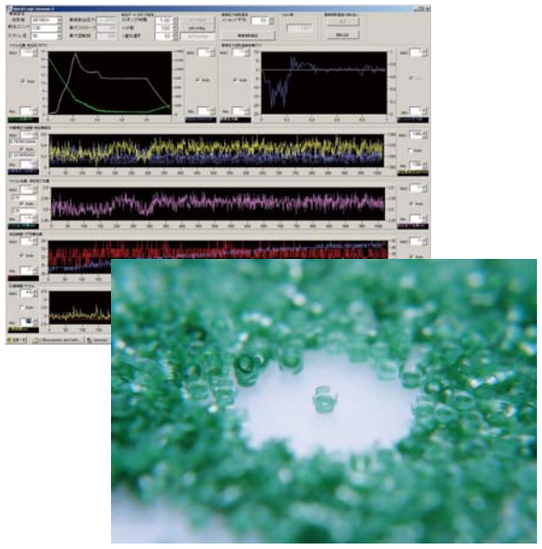
滝中　「SPIRAL LOGICは順調なようですね」
清家　「ええ、まったく滝中部長の後押しのおかげですよ。ほんとに感謝しています」
滝中　「ところで相談なんですが、いまもらっている品管のレポートですけど、まあこういっては失礼なんだが、実はこれにはなんだかあまり意味がないように思えるんです」

いきなり「意味がない」といわれて少し身構えてしまうが、研究好きの滝中部長のこと、おそらくSPIRAL LOGICの提案している手法を持ち出すのだろうと、気を取り直して訪ねてみる。

清家　「……といいますと?」
滝中　「ロギングのデータとかいろいろあるでしょ。これって、できた成形品の品質と直接関連があるのかな」
清家　「その時の成形機の状態なわけですから……」
滝中　「いや、清家さんもたぶんわかっていると思うけど、SPIRAL LOGICの場合は、波形イコール成形品なんだよね」
清家　「ええ、SPIRAL LOGICの波形は充填の挙動を表していますから。重ね描きもきれいに収束してますし」
滝中　「そうそう、そこから波形が外れてると、そのショットに何か問題があるというか、つまり不良なわけですよね。それを品管に使ったらどうかと、SPIRAL LOGICは提案していますよ。実はA社は、台数は御社より少ないけど、もうそういう手法をもとに工夫して品管レポートを出してるんだな」

しまった、他社に先を越されている。トラブルや省エネを解決したことで、研究がおろそかになったようだ。品管こそ新技術導入の成功を締めくくるカギなのに。

解説 6 波形による品質管理の可能性【波形=製品というリニアな関係を活用する】



SPIRAL LOGICの波形を使った品質管理では、個々の成形品に対して充填工程の動的な記録ができる。もし不良が発生しても、なぜそうなったかという原因を特定することが可能だ。

品質管理のレポート項目は、製品の計測に加え、成形条件やロギングデータなどが主流となっている。しかし、これらはあくまで成形品の見かけや機械の状態の報告であり、生産の本来的な品質であるプロセスを示したものではない。射出成形機、特に全電動機の各工程の動作が均一であることは、ロギングデータが保証しているのだが、実際の稼働によって生産される成形品の品質との間には直接相関がないため、これらのデータを成形品の品質保証に使うことはできない。また、不良が発生しても、確たる原因を遡及する術もない。

SPIRAL LOGICの圧力波形は、メルトの充填時の挙動をダイレクトに示している。その重ね描きがずれることなく収束しているのは、すなわち成形品が毎回同じように作られていることにほかならない。毎ショットの波形をデータ化すれば、成形品ひとつひとつの充填工程を来歴として記録し、品質の根拠として開示することができる。

これまで見てきたように、SPIRAL LOGICではショートショットや黒点などが発生しないのだから、もはやそれらを不良項目として管理する必要がないといえる。充填圧力の基準波形からの乖離が、不良品判別や原因特定の唯一の根拠となり得るのは、そういった問題の解決があってこそなのである。

波形による管理のためのソフトウェアや、そこから派生・展開する新たなコンセプトについては、次の「展開する新技術」に詳しい解説があるので参照されたい。それらはまさに、生産技術者として清家氏が追い求めてきた、10年後の新しい工場を創造するツールである。

EMT designs new life style

生産現場をデザインする技術展望

E ngineering grade
信頼を生む生産技術

- E 成形プロセスを波形で捉える
  ・・・限りなく実像に近づいた最適条件を抽出
- E 波形と成形品のリニアな関係
  ・・・アカデミックでロジカルな成形技術
- E バイヤーに対する説得力
  ・・・技術的優位性

M ass-production grade
安心を生む量産技術

- M 確実な量産へのアプローチ
  ・・・良品／不良品判定機能
- M 成形品の再現性を確保
  ・・・「機械の再現性」という観点からの脱却
- M やすらかに眠れる夜
  ・・・突発的な不良対応からの解放

T raceability
責任を生むトレーサビリティ

- T 不良原因を特定できる再現性
  ・・・確実な対策を講じることが可能
- T CSRに対応・社会的責任を果たす
  ・・・正確な記録のディスクロージャ
- T あいまいな回答を排除
  ・・・「検査する」「ミスを減らす」では必ず再発

SPIRAL LOGICが、成形工場のあるべき姿として標榜するEMTコンセプト。単なる生産設備にとどまらず、工場から業界全体までを変革するパワーと可能性を秘めている技術、それがSPIRAL LOGICだ。

展開する新技術 生産革命の実現へ

SPIRAL LOGICは、T-Rexユニットという、次世代の射出成形技術のスタンダードとなる基幹システムを完成させた。しかしSPIRAL LOGIC LIMITEDは、この成果に安住することなく、さらなる高みに向かって技術の開発を続けている。確かな理論に裏打ちされた強固なコアテクノロジーから派生する、新しい応用技術の一端をご紹介しよう。

Raptor22

SPIRAL LOGIC搭載エンプラ専用ペレタイザ

SPIRAL LOGICは、滞留炭化を起こさないため黒点が発生しない。この最大ともいえる効果を利用して、エンプラ専用のペレタイザ・Raptor22を開発した。Raptorは、約8,300万～約7,000万年前の東アジアに生息していた小型恐竜、ヴェロキラプトル(*Velociraptor*)の通称。映画「ジュラシック・パーク」では、獰猛・俊敏で頭の良い恐竜として描かれている。小さなボディで貪欲に捕食するその様子を、ランナをバリバリ食べてしまうコンパクトマシンのイメージになぞらえ、ネーミングとキャラクタに採用した。

メインスクリュ径	22 mm
メインスクリュモータ電力	1.5 kW
ヒータ容量	2.7 kW
押出能力(PCによる参考値)	5 kg/hr
SKD11回転刃径	18 mm
本体外形寸法(WxDxH)	1,460 x 500 x 1,240 mm
質量(サイクロンユニットを含む)	200 kg
電源規格	AC200V 3相4線 30A

すでにかなりの数の納入実績があるこのRaptor22を、他社に先駆けていち早く導入した、山秀精密(香港)有限公司の様子をレポートしてみよう。

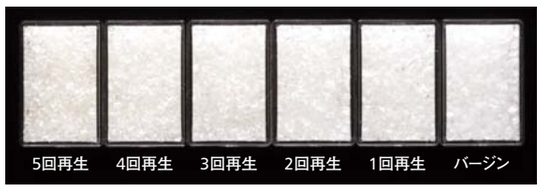
★ ★ ★

同社では早くから日本製のペレタイザを数台設置し、ランナのリサイクルに活用してきた。リペレットの内製化は、品質の安定やオペレーションの利便性、それに経済性など、さまざまな面でメリットがある。

「今までのペレタイザは、どうしても黒点が出てしまうんで、黒や暗色のパーツに用途が限られてしまうんです」と語るのは、成形に従事する董さん。同社はSPIRAL LOGICを多数導入しているが、リペレットで発生した黒点は如何ともしがたく、そのまま成形品に残ってしまう。「せっかく黒点の出ない成形機を使っているわけですから、ペレタイザも黒点が出ないものにしないと意味がないですよね。そこでRaptor22をすぐに導入したわけです」

Raptor22には、T-Rexユニットと同様に、滞留炭化を起こさないT-Rexスクリュ、熱履歴が少なく噛み込みの良いT-Rexバレル、材料を定量供給するGSローダが搭載されている。押出機として機能するので、GSバルブは装備されていない。押し出されたメルトは、高速回転刃が所定の長さに切断し、回転刃ユニット内に噴霧される純水微細ミストによって冷却される。バレルが短い上に、水冷タンクが不要なため、従来のペレタイザに比べとてもコンパクトだ。

従来型ペレタイザの発する刺激性ガスに顔をしかめる取材のカメラマン氏。ガスによる作業環境の汚染は、慣れれば済む、という問題ではない。



Raptor22によるCOC(APL5014DP)の連続再生の結果。

良いものができる、使いやすい、身体をいじめない。現場で働く人に必須の条件を備えたRaptor22に、董さんもにっこり。

「場所もとらないし、何しろ使いやすいですね。冷却用の純水は、市販の18Lボトルの蒸留水をセットすれば、連続で4日ぐらい運転できます。押出能力は5kg/hrで、そんなもので足りるのかなと思っていたんですけど、実際出てくるランナはそんなにたくさんないので、これで充分です。それに、剪断発熱で不必要に高温にならないので、難燃剤とかが分解せず、刺激臭がないのも助かります」

目や鼻を刺激するようなガスが、健康に良いわけはない。Raptor22は、優れたリペレット性能に加え、作業環境の改善にも貢献している。

★ ★ ★

ペレタイザは、水槽式コールドカットやホットカットなどのタイプが発売されており、それらの広告では、「LCPもナイロンもOK」といった謳い文句が並べられている。しかし、LCPは粘度が低いためにストランドができないので、水槽ではペレットを作れない。一方、ホットカットは冷却が追いつかない、という問題がある。これでは、「何でもござれ」というわけにはいかない。

では、Raptor22はどうだろう? 答えは、下に挙げたトライ実績に表れている。「エンプラ専用」と銘打つだけの実力は、充分に備わっている。

- レンズ用
  - COC 三井化学 APL5014DP
  - COP 日本ゼオン ZEONEX 480R
  - COP 日本ゼオン ZEONEX F52R
  - OKP 大阪ガスケミカル OKP4HT
  - PC 帝人 Panlite SP-1516
- 導光板用
  - PC 出光興産 Taflon LC1500
  - PC MEP Iupilon HL-4000
- ナイロン
  - PA46 DSM Stanyl TS200F6
  - PA66 東レ Amilan CM3004
  - PA9T クラレ Genestar N100A
- エラストマ
  - TPO 三井化学 Milastomer 5030NS
  - TPE ダイセル・エボニック Vestamid P7283-LD
- 高機能樹脂
  - PEEK VICTREX 450G
  - ULTEM SABIC UL-1000
  - PPA SOLVAY Amodel A-4422
  - LCP DIC OCTA LD-235

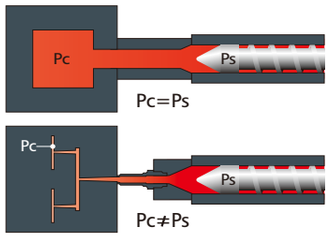
Raptor22のトライの実績。SPIRAL LOGIC LIMITEDでは、樹脂・目的・再生材の評価方法などを伝えれば、トライを無料で受け付けている。ぜひご利用を。

GENESIS-2

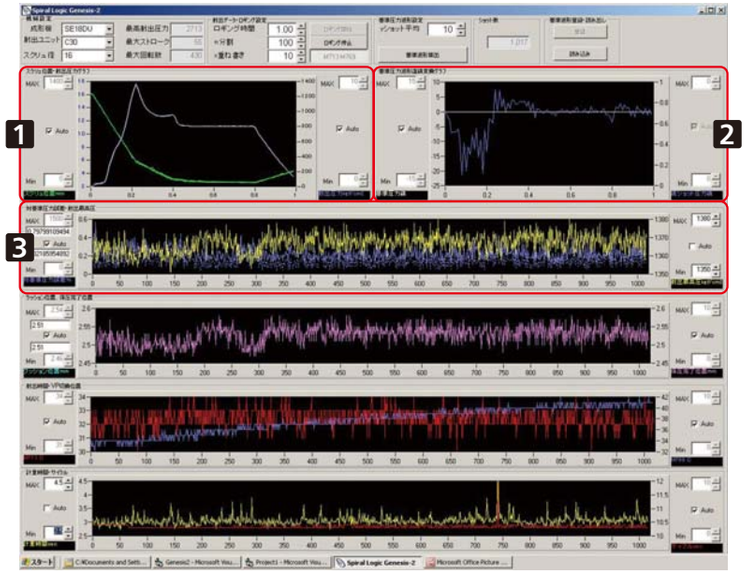
GENESIS-1からGENESIS-2へ

2002年に研究開発プロジェクトをスタートさせたSPIRAL LOGICは、発明した理論に基づくハードウェアであるT-Rexユニットを完成させ、住友重機械工業のフラッグシップ機である全電動機SE-DUZシリーズの全機種に搭載する体制が整った。また、前ページでも紹介したように、SPIRAL LOGICを搭載したエンプラ専用ペレタイザ Raptor22の開発にも成功している。プロジェクトスタート当時に制定した社内の開発コードは、GENESIS-1と称されたが、2010年10月、以上に挙げた華々しい成果を以ってGENESIS-1は終了を迎えた。

続いてGENESIS-2が始動している。GENESIS-1の成果をベースに、EMTコンセプト(44ページ)の実現を目指し、さらなる技術展開を企図した。現時点でその全貌を詳細に語ることはできないが、そのうちの二つの開発テーマについて報告する。



実際の射出成形では、パスカルの静的圧力均衡法則は成り立たない。



圧力波形による品質管理

現在確立されている波形を用いた良品・不良品の判別方法は、ピーク圧がある一定のレンジに収まっているかという手法や、波形が描く面積(積分値)の平均値からの乖離を見るという手法などがある。いずれも静的な圧力の値をベースにしたものである。

従来の考え方では、パスカルの原理(静的圧力均衡法則)によってスクリュの保圧力がキャビティに伝わるとしている。しかし、実際の成形では、21ページの例にもあるように、製品が小さく、ゲート・ランナ・ノズル径が細いため、圧力は完全には伝わらない。保圧による充填の補償も完全ではない。つまり、クッション位置やピーク圧・圧力面積等の方法では、品質の判断は不可能なのだ。

SPIRAL LOGICでは、メルトの流れの全工程での均一性が担保されており、メルトの挙動はロードセル波形で捉えることができる。すなわち、圧力波形＝成形品という関係が成り立つ。そのため、スクリュの射出開始位置から終了位置までの動的な挙動を分析することによって、成形品の品質が管理できるのだ。

SPIRAL LOGICの開発した圧力波形による品質管理プログラムは、ショット毎に算出される「圧力誤差率」という概念で成形品の品質を判別している。そのプロセスは、以下に説明があるので参照されたい。また、不良を引き起こす個々の要因(例えば、ノズルの閉塞など)に対して、その特徴的な波形変化が観察されることから、不良原因の特定も可能となる。

1. 射出開始から保圧終了までを時間で100分割し、標準圧力波形を作成。
2. 標準圧力波形を直線に変換し、毎ショットの圧力波形と比較。＋側エラーと－側エラーの絶対値の面積の総和を圧力絶対誤差とする。圧力絶対誤差を基準ピーク圧力で割ったものが、圧力絶対誤差率。
3. 圧力誤差率を各ショットごとにプロット。

標準金型による成形機キャリブレーション

ある機構を持った器具や機械は使用を重ねるにしたがって、さまざまな影響を受けて各所のスペックに偏りを生じる。また、同じモデルでも固体による差異、いわゆる「機差」がある。これらのスペックの偏りを把握するために、共通の標準器を用いて測定の基盤を作ることを、キャリブレーション(校正)という。

現在、生産の現場で成形機に対して、熱電対やモータの測定が定期的に行われているが、これらは部品の精度や性能の確認であって、キャリブレーションではない。マイクロメータで例えると、接触面が荒れていないかとか、ネジが汚れていないかなどを見ているようなものだ。FDA(米国食品医薬品局)では、成形機の部分的な「キャリブレーション」を義務付けているが、上で述べたように、その考え方は本来的な意味において間違っており、しかもどこを「キャリブレーション」するかはメーカの判断にゆだねられている。

マイクロメータのキャリブレーションは、基準器の計測によって行われる。では、同じ品質の製品を安定生産させるために射出成形機をキャリブレーションするには、どうすればよいのだろう。

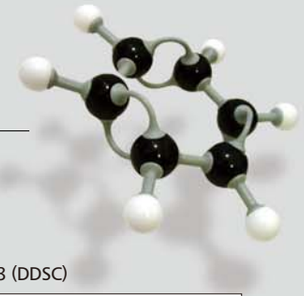
SPIRAL LOGICでは、キャリブレーション用標準金型を考案した。複数の熱電対・圧力センサ・変位センサを装備しており、熱・圧力・充填速度・型開閉のタイミングを同時に計測できる。成形機に対するキャリブレーション用標準金型という概念は、樹脂の温度や粘性・密度といった可塑化と充填工程の繰り返し正確性が保証されていなければ成り立たない。それらが保証されているSPIRAL LOGICだからこそ可能な、標準化技術である。

目下のところ、キャリブレーション用標準金型で計測したデータを解析して校正判定するソフトウェアを開発中だ。いつでもどこでも、同じものが同じ品質で生産できる。そんな夢物語が、現実のものとなりつつある。

ユーザとともに進化するSPIRAL LOGIC

GENESIS-2は、SPIRAL LOGICを実際に運用されるユーザの意見や要望を積極的に取り入れることで、ユーザサイドの技術を開発するプロジェクトだ。ユーザとともに道を切り開いていく努力で、生産の理想の姿であるEMTコンセプトを、近い将来に実現したいと願っている。

[資　料] 樹脂・グレード別推奨設定温度



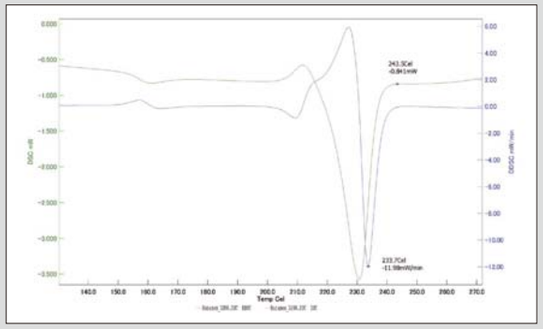
「誌上講演 SPIRAL LOGICの融解と実践」および「Factory Innovation」にあるように、結晶性樹脂の場合、示差走査熱量測定で得られるDDSC(DSCの時間微分)のピークポイントを融点として、各ゾーンの温度設定を行う。SPIRAL LOGIC LIMITEDには、結晶性樹脂のグレード別に200種以上のDDSCデータがファイリングされている。一覧表では、そのうちの代表的な樹脂とグレードのゾーン2における推奨設定温度を示した。

一方、非晶性樹脂には融点という概念がなく、ガラス転移点以上の温度が液体とされている。このため、結晶性樹脂のような測定方法で温度を決定することはできない。SPIRAL LOGICでは、まず全ゾーンをフラット(同一温度)に設定して適度な粘度が得られたら、ゾーン1をその温度－10℃に設定し、ゾーン4およびノズルを必要な粘度になるまで上昇させる、という方法が合理的であると考える。

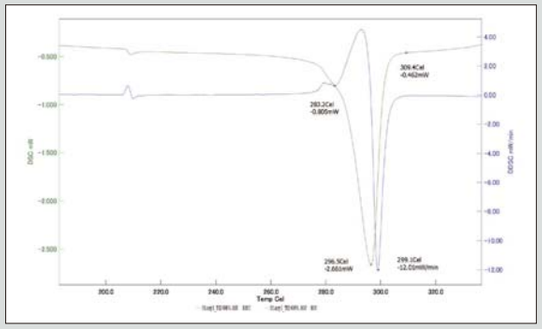
SPIRAL LOGIC LIMITEDでは、すでにファイリングされているデータは、依頼に応じて個別に公開している。また、ファイルにない樹脂については、DDSC・TG(熱重量測定)の測定データを提供するサービスを実施。ペレットが数gあれば、1～2日で測定することが可能だ。可塑化がうまくいかない場合や、新しい樹脂をトライする際に、ご利用をおすすめしたい。

示差走査熱量測定器

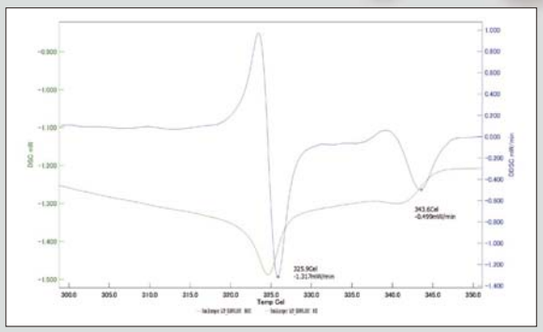
PBT ポリプラスチックス DURANEX 3200 (DDSC)



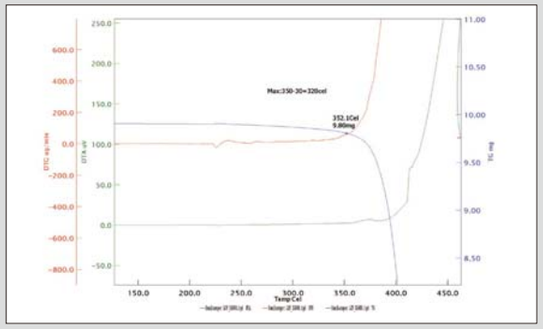
PA46 DSM Stanyl TE248F6 (DDSC)



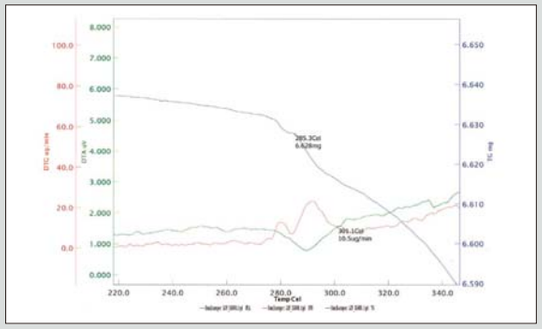
LCP 住友化学 SUMIKA SUPER E6008 (DDSC)



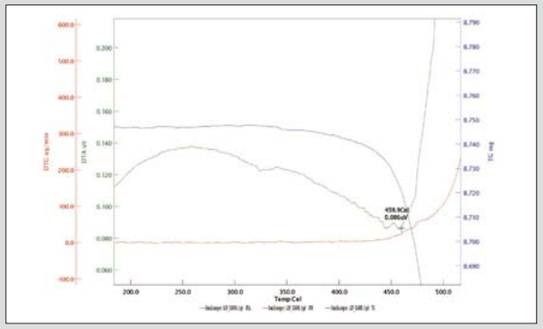
PBT ポリプラスチックス DURANEX 3200 (TG)



PA46 DSM Stanyl TE248F6 (TG)



LCP 住友化学 SUMIKA SUPER E6008 (TG)



DDSCによるゾーン2の推奨設定温度

樹 脂	メーカ	グレード	設定温度
LCP	上野製薬	UENO 2030G	351.2
		UENO 6040GM	324.0
	住友化学	SUMIKA SUPER E6006L	335.5
		SUMIKA SUPER E6007L	333.4
		SUMIKA SUPER E6008	343.4
		SUMIKA SUPER E6807LHF	338.2
		SUMIKA SUPER E6808UHF	332.5
		SUMIKA SUPER E5002L	397.4
		SUMIKA SUPER E5008L	401.4
		SUMIKA SUPER E52008	402.7
	DIC	OCTA LD-235	337.6
	大塚化学	POTICON VCF442	334.6
	東 レ	Siveras L304G35	329.3
		Siveras LX70M30H	323.1
	新日本石油化学	Xydar CM311B	351.9
		Xydar NE123	406.3
LCP	新日本石油化学	Xydar RC210	406.3
	ポリプラスチックス	Vectra T130	379.6
		Vectra E130G	346.6
		Vectra E130i	339.0
		Vectra S471	353.8
		Vectra E473i	330.7
		Vectra E480i	343.7
		Vectra E481i	336.1
PA46	DSM	Stanyl TS200F6	293.4
		Stanyl TS250F6	295.4
		Stanyl TS271P4	298.5
		Stanyl TS272B6	294.1
		Stanyl TE248F6	299.1
		Stanyl EN568	294.1
		Stanyl TW341	294.9
PA6T	三井化学	ARLEN HPA-LG2M	313.2
		ARLEN E430N	330.2
	EMS	HT2C-3X	317.5
PA10T	EMS	XE4102	306.3
PA66	東 レ	Amilan CM3004	263.1
	旭化成	Leona 1502S	270.6
PA11	東京材料	RILSAN BMN O TLD	326.7
Zytel	デュポン	Zytel FE110007	226.4
PPS	DIC	E-200-E5	288.4
	ポリプラスチックス	FORTRON 1140A6	288.7
	シェブロンフィリップス	Ryton R-7-120NA	289.9
PBT	ポリプラスチックス	DURANEX 3200	233.7
		DURANEX 3300	229.4
		DURANEX CRN7020B	231.8
	MEP	NOVADURAN 5010GN6	232.3
TPE	東レ・デュポン	Hytrel 7247	223.4