

要旨

マリン事業では、プレジャーボートをはじめ、スポーツボート、パーソナルウォータークラフト(以下、PWC)など、マリンレジャーを通してお客さまに感動を提供できる製品を開発・製造・販売している。そのモデルラインナップの中でも特に愛好家のお客さまから根強い支持を得ているモデルがスタンドアップモデル(「SuperJet」)である。

30年以上愛され続けたヤマハ「SuperJet」が、2ストロークエンジンの排ガス規制で市場は限られ、このままでは販売継続が危ぶまれる中、三気筒4ストロークエンジンを搭載した待望のNEWモデルを生み出すために、三つの重要な課題【フルモデルチェンジ】【新工法導入】【新工場立ち上げ】と向き合い、試行錯誤しながら行った工法開発～生産準備での取り組みの概要を紹介する。

Abstract

In the marine business, we develop, manufacture and sell products that can provide Kando to customers through marine leisure, such as pressure boats, sports boats, and personal watercraft (PWC). Among our model lineup, the stand-up model SuperJet has gained strong support from enthusiasts.

The Yamaha SuperJet, which has been popular for more than 30 years, has a limited market due to emission regulations placed on 2-stroke engines, and while the model's future sales may be in jeopardy, in order to create the long-awaited NEW model equipped with a 3-cylinder 4-stroke engine, we faced three important issues; a [full model change], [introduction of new production methods], and [the startup of new factories]. Here we introduce an outline of the initiatives used from production method development to production preparation that were all carried out through trial and error.

1 はじめに

1-1. 新工法導入に向けて

PWC艇体のモノ創りは大きくは3つ、大量生産向け SMC (Sheet Molding Compound) と少量向けコンベンショナルな HLU (Hand Lay-Up) と VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) に分類され、各工法の現在対象とする製品サイズと年間生産数のレンジは下図(図1)のようになっており、今回狙いとする中量生産モデルにはどの工法も適していなかった。

この中量生産の規模レンジとして年間2,000~4,000台を設定した。今後ヤマハボート(PWC)のモノ創りの強みとしたい領域であり、新たな領域へのチャレンジである。

1-2. 製造拠点再編に向けて

従来モデル「SuperJet」は、製造委託先(ミツワ株式会社、以下ミツワ(株))にて年間1,000台規模で HLU にて生産されているが、今回狙いとする生産規模(年間2,000台以上)を実現するには、図2のように生産体制から見直しが必要であった。

お客さまからの期待と社内からの大きな声を受けて社内工場・外部生産委託の可能性検討、また製造経験者を社内から募ることから検討を開始した。

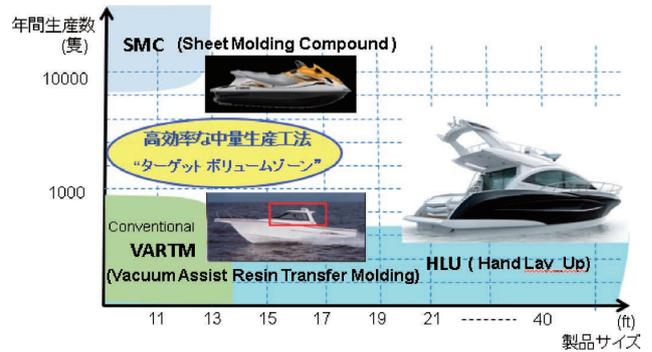


図1 新工法で狙うボリュームゾーン

F4R 製造工程概要

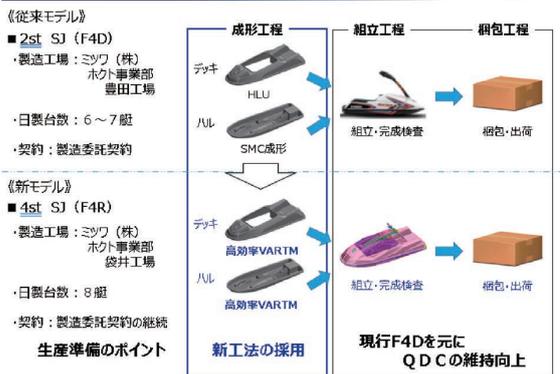


図2 製造工程の概要

2 新工法の導入

目指す新工法は、現 VARTM(注入成形)を中量生産向けに進化させた高効率 VARTM である。その対象が「SuperJet」(小型 PWC)ということもあり、運動性を際立たせる“軽量化”と“優美な外観キャラクター”の実現が求められ、また一方ではスポーティなライディングに適した“安定した強度”の確保が条件である。

その実現に向け、まず FRP (Fiber Reinforced Plastics) 業界で技術先進するヨーロッパ各国の技術が集結する「JEC Composites 展」にて、このクラスの FRP 製品を最も効率的に製造する技術ファクターを探り出し、先進技術メーカーと技術開発をスタートさせた。

新工法の量産化展開に向けた3つのキー要素2-1.「型製作プロセスの造り込み」、2-2.「成形工程の効率化」、2-3.「高い外観性と安定化」と2-4.「各プロセス効率化に向けた活動」に関し説明する。

2-1. 型製作プロセスの造り込み (高精度化と耐久性向上)

2-1-1. 背景

従来 FRP 成形型は短期間・低コストで製作する目的で以下のようなステップで製作した。

- (1) オス型(マスター型)の製作(製品と同様の形状を発泡ウレタンや樹脂パテを使用して削り出す)
- (2) メス型の製作(製品に使用されるものとほぼ同様の FRP 材で成形され、金属フレーム等で剛性を補強したもの)
- (3) メス型を使用して製品を成形

今回のプロジェクトでは生産要求数に対応するため複数の型を製作する必要があり、メス型を製作するためのマスター型には複数回の脱型に耐えられる耐久性が求められる。したがって複数個製作が必要な FRP 製型作りはさらに以下のような工程が追加される。

- (4) 耐久性を担保するため上記2のメス型を用いて FRP でオス型を再製作(ゼロマスターと呼ぶ)
- (5) 追加するメス型の複製(以降、4で製作したゼロマスターを使ってメス型を繰り返し製作)

ここで問題になるのが、FRP の収縮である。FRP は熱硬化性樹脂を使用するため硬化反応時に収縮するという特性がある。したがって、上記の型作りの場面で3回(オス型→メス型→ゼロマスター型→メス型)、製品の成形で1回、合計4回収縮が発生、同時に型や製品の形状についても収縮の影響を受け、

変形を起こすことが良くある。

以上により型の高精度化を達成するには「型づくり」工程から見直す必要があった。

また、型の耐久性において通常 FRP で成形するボートは年間最大100隻程度、型に求められる繰返しは500成形程度になる。一方、今回求められる耐久数は、1型あたり年間250隻程度、型に求められる繰返しは1,000成形以上であった。

2-1-2. 課題解決

<型 高精度化に向け>

通常、製品を成形するまで3回型製作(反転)を繰り返し、これにより型精度(収縮により)が悪化し、型精度低下につながる。キャビ型(下型)とコア型(上型)を合わせて成形物を形成する VARTM 工法では、この型反転による精度低下がダイレクトに製品厚みに効いてきてしまう。

これをできる限り回避するため、型作り反転の回数を減らす手法として“エポキシマスターの製作”を採用した。

これは初ステップで直接ゼロマスターを製作する方法で、エポキシペーストを使用した強固な型を NC(数値制御)で削りだすことができ、型作り反転の回数をメス型製作と製品成型の2回に半減することができる。

また、高温でキュア(硬化)するため経時変化にも強く製品ライフを全うできるマスター型となる。

<型 高耐久性に向け>

1型あたり1,000回以上の成形に耐えられる(一般的なボート FRP 型寿命の2倍以上)仕様としてキャビ型およびコア型ともに次の2要素を型造りに採用した。

- (1) 高効率成形を実現するため、下記(樹脂注入と製品離型までの時間短縮)に示すように成形中の最高発熱温度は100℃程度となる。この厳しい条件にも耐えうる仕様にするため荷重たわみ温度140℃以上有する樹脂材料を選定した。
- (2) また、この材料のパフォーマンスを最大限に生かすため段階的に100℃まで型を加温することとした。

これらより製品成形の際に樹脂の硬化発熱温度が高温になることを許容し、かつ型劣化を最小に抑え耐久性を十分持たせることを可能にした。

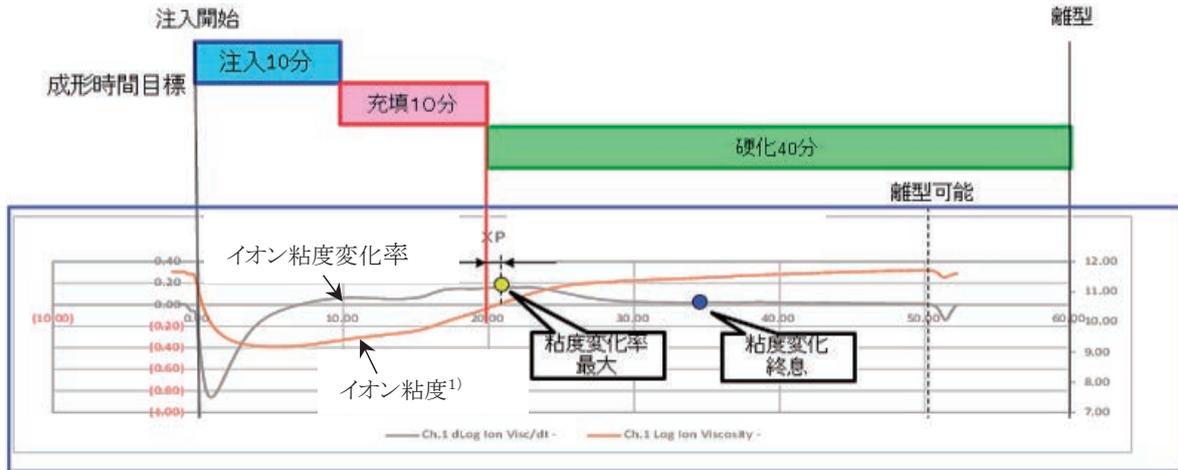


図3 成形時間と樹脂硬化データ 目標値

2-2. 成形工程の効率化

2-2-1. 背景

通常 FRP 製品の成形サイクルは1日1成形であり、既存の樹脂では硬化にかかる時間が長く今回求める短時間の成形には適していない。理由は、それを満足するため単純に樹脂の最大硬化発熱までの時間（製品離型できるまでの時間）を短くすると樹脂ゲル時間（流動可能な時間）がそれに比例して短くなってしまい、型内へ樹脂注入している間に硬化反応が始まってしまい、樹脂粘度が上昇し型内に樹脂が充填できないからである。

高効率な成形に求められる樹脂性能は、最大硬化発熱までの時間が短く、かつゲル時間をできる限り長く保つことのできるスペシャルな特性を有する樹脂であった。またそれを樹脂の開発のみでは達成することは難しく、型内への樹脂注入・充填にかかる時間をできる限り短縮する機構が必要であった。

樹脂の硬化特性に関する目標値と樹脂の型内充填に関する目標値を仮設定し、これら両面から達成を狙っていくこととした。以下がその値である。

1) イオン粘度とは硬化中の電子の動きにくさ(抵抗)のことをいう。

1日8成形（1成形／時間）達成に向け（年間2,000台、月間170台 要求台数による）以下を狙い設定値とした。

- (1) 型内への樹脂注入・充填を20分以内に完了させる。
- (2) 上記1に伴い樹脂のゲル化(図3 粘度変化率最大)までの時間を20分以上とする。
- (3) 製品が離型できるまでの時間(図3 粘度変化終息;樹脂硬化反応終了)を60分以内(型温調活用により)とする。

2-2-2. 課題解決

<樹脂注入～製品離型の時間短縮>

型内への樹脂充填時間を最短にする(ガラスへの樹脂含浸速度向上)と同時に、樹脂の硬化特性としてゲル化時間を充填時間以上かつ高い硬化反応性を有する仕様の造りこみを実施してきた。そのキー要素が次の3つである。

- (1) 樹脂フローメディア(中間層にポリエステル繊維配合)含む3層構造のコンポジットガラスの採用することにより、高い流動性を実現し型内への樹脂充填時間10分以内を成立させた。
- (2) 温調条件下(型温度40℃)にて、ゲル化15分以上、最大硬化発熱40分以内を満足する樹脂を開発した。これによりハル成形において図4のような硬化特性を得ることができた。
- (3) 上記2を達成するため成形用 FRP 型に温調機能を採用した(下記にその構造を記載)。

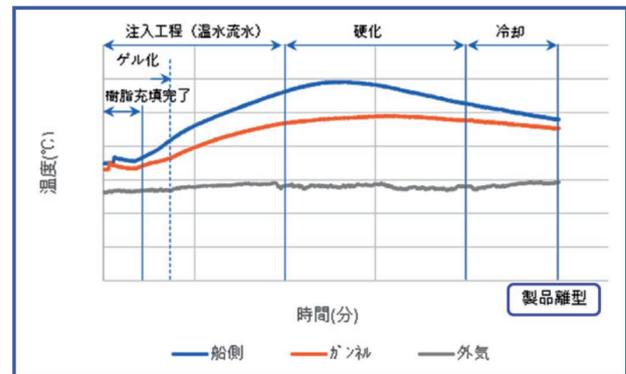


図4 樹脂充填時間と硬化データ

＜型の温調仕様＞

成形工程の効率化（短時間での製品離型）と年間通し気温変化による影響を受けず安定した品質の成形を実現するには、型の温調機能がキー要素である。

通常 FRP 成形で型を加温するには硬化炉などのブース内で型温度を上げるのが一般的で、型温度を10℃程度上昇させるのに数時間要する。それを10分程度で達成する手段として、型の内部から温水により加温する構造を検討し、最終的に図5に示す型積層内部に中空層（パラビーム3D グラスファイバー素材積層部）を設け、そこに温水を流し短時間で型を温める仕様（図6）とした。

これによりゲルコート塗布後の硬化にかかる時間および成形（型内樹脂注入）後の硬化時間を大幅に短縮させることを達成した。

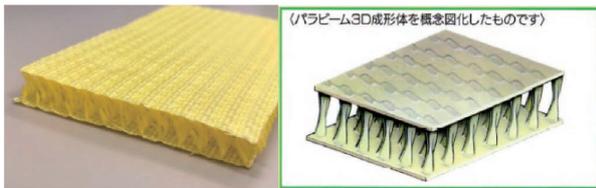


図5 パラビーム材と概念図

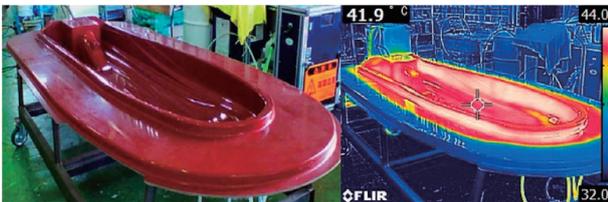


図6 パラビーム含む FRP テスト型

パラビーム採用にあたり、大きな懸念が成形性と耐圧・耐久性だが、成形性に関し、複雑形状各部エリアごとに形状を分割しそれをスパイラルチューブで繋ぐ方法を採用した。これによりハル、デッキの複雑形状部にも追従が可能となった。

次に、耐圧・耐久性に関し、パラビームは E ガラス繊維で垂直方向の糸（長繊維）が上下層を連続して一体サンドイッチする織り込み構造のため、座屈強度に優れ、また、耐圧面でも1Mpa 以上の内圧に耐えられる強度を有する。

経年劣化的にも4年以上に相当する連続浸漬加速試験（アレニウスの定理を適用）でパラビームの強度低下は20%程度であり、型全体に与える影響は少ない。

型内に積層されたこのパラビーム内に温水を流すことにより短時間での型昇温（15分以内で型表面20℃昇温）を可能とした。

2-3. 高い外観性と安定化

2-3-1. 背景

ヤマハ PWC の約9割強はアメリカで艇体を SMC +ウレタン塗装仕様にてモノ創りしており、今回年間生産数と初期投資面から VARTM 工法を選択（創り込み）するが、商品性要求からは工法が違って同レベルのヤマハ外観品質が求められる。

そのため型の高品質な仕上げとその持続性（耐久性）、また同時に季節変動に左右されない成形環境（特に型温コントロール）の安定が求められる。

PWC の中でも最も小型の「SuperJet」に4ストロークエンジン（三気筒）を搭載し、また性能面で機敏性が重要となるモデルであることから、外サイズにも制約条件が入る。

これら空間制約がある中で、デザイナーが意図する鮮明な外観キャラクターを創り出し、またさらにこのデザインを際立たせるため、ヤマハ PWC として初の2色塗分けをデッキに採用した（図7）。

これらを品質良く実現するにはモノ創りの工夫が必要であった。



図7 「SuperJet」外観

2-3-2. 課題解決

安定した外観品質づくりに次の3要素を採用することで高品質な外観を創り出した。

- (1) 鈍角な面の繋がりにもかかわらず、鮮明なキャラクターを創出するため、耐久性あるエポキシマスターをオス型に採用、またその仕上げ工程でキャラクターライン部強調。
- (2) 製品ゲルコート吹付け機械化により霧状の吹付けと厚みを均一にするため2段階吹付けとし、また基材ガラスの外観への映りこみをなくすためゲルコート層直下にバリアコート（フィラー含む表面平滑用低粘度樹脂）層を追加。
- (3) 成形時型内での硬化反応をより促進させるため型温度を40℃に昇温。

また、2色塗分けに関し、“型と塗分けマスキングジグ”の精度がキーとなる。2-1で述べた型高精度化の活動結果と、マスキングジグについては3D 粉末焼結造形を利用し高精度化を実現することで、塗分けを可能とした。

2-4. 各プロセス効率化に向けた活動

＜ガラス裁断自動化と賦形プリフォーム化＞

基材として使用するガラス材の裁断形状をデータ化し自動裁断機で複数枚カットする仕様を採用した(図8)。これによりネックであった基材準備(カッティング)工程の大幅な時間短縮、また同時にガラス材の使用効率(歩留まり)も大きく改善することができた。



図8 自動裁断機



図9 プリフォーム

また、裁断したガラスの型への賦形も工数のかかる工程であり、複雑形状部の小さく裁断したガラス材を複雑に組み合わせセットする工程を別工程(ガラス材のプリフォーム化)とすることで、メインのガラス材セット工程の平準化を図ることができる(図9)。

このガラス材のプリフォーム化にあたり、以下の取り組みを実施した。これら3要素によりポンプケース部のガラスプリフォーム化を実現した。

- (1) 使用するガラス材として熱可塑性繊維層を含むコンポジットガラスを採用し、これを外部からプレスし、加熱することにより形状を保持。
- (2) 上記プレスのために下型をFRP製、上型をシリコン製5mm程度の膜(柔らかく、形状追従性に優れている)とし、その間にガラス材をレイアウトし、中を真空状態にすることによりガラス材を下型の形状に追従。
- (3) 上記加熱のために熱伝導性に優れたカーボン繊維を採用。これをFRP製下型の表面へ高耐熱樹脂にてラミネートし、これに電気を流すことによりコンポジットガラス材

中のポリエステル層(低軟化点“110℃”仕様を選定)を120℃前後まで加温し(その後常温まで冷却)形状保持。

3 製造拠点の再編

3-1. NEW モデル立上げに向けた製造課題

通常、新機種プロジェクトの中での製造パートは、既存モデルのスキームを基本として展開していく。しかし今回の「SuperJet」の場合は、心臓部であるエンジンが2ストロークから4ストロークに変更されることになり、艇体設計含め多くの新規構造、新規部品が採用された。それらを製造工程へ落とし込む過程の中で、旧モデルの製造工程が参考にならない場合にどうしたら良品を安定的に生産ができるかを模索し、決定していく必要があった。旧モデルは、長年大きな仕様変更がなかったため、それに対する蓄積されたノウハウがないことも新機種プロジェクトの大きな課題であった。

3-2. 工程設計の進め方

「SuperJet」は、【フルモデルチェンジ】【新工法導入】という旧モデルから大きな変化点があり、工程設計としてはゼロからの作り込みが必要となった。従来の開発・生産準備プロセスでは、開発で仕様が決まることが遅れると、連れて工程設計への展開が遅れ、生産準備が後手にまわるという課題があった。その課題に対するプロセス改革として、以下の様な取り組みを行った。

(1) DR0、1次試作からの製造プロセスの参画

通常はまだ生産準備プロセスをスタートしていないDR0段階の情報を元に、工程設計の青図を作成し、1次試作の中で具現的な項目に変換、追加をすることで生産準備の精度を上げる。

(2) 実験、開発との工程設計の共有

開発プロセスの中で発生する仕様変更や設計変更に対し、工程設計に影響する部分を随時、1次試作で作上げた青図に落とし込み、アップデートする。

(3) 開発課題の対策案検討に製造要求織込み

開発プロセスの中で発生する課題に対して、対策案の検討を設計、実験、製造のメンバーで行うことで、工程設計の青図で示した製造要求も含め、対策案の最適化を図る。

3-3. 工場立上げに向けた製造ライン設計

3-3-1. 製造ライン設計と工場

工程設計と製造条件をまとめた青図で工程の枠はほぼ完成していた。あとは工程間の物流や部品供給などを踏まえ、数パターンのレイアウトをパズルのように組み合わせ、製造ライン設計を進めた。しかしどう組み合わせても、旧モデルを製造して

PWC medium-volume production method development and reorganization of manufacturing bases

いたスペースでは収まらなかったため、別の新たな生産スペースを確保する必要があった。その生産場所として候補に挙がったのは、ミツワ(株)袋井工場で、倉庫として使用していたエリアに「SuperJet」の製造ラインを新たに構築することとなった。

既存の設備をエリア外に移設し、必要なスペースを空け、床や天井などの基礎部分も整備を行った。その空間に原材料⇒成形⇒組立⇒完成検査⇒梱包までの一貫製造ライン、それを取り巻く部品庫や受入・出荷のプラットホーム、作業者の休憩場に至るまで、必要なものを配置設計し、施工計画を作成した。施工完了のターゲットを型物試作に置き、成形条件が本工程に近い形でトライできるような準備を整えた(図10)。

ミツワ袋井工場 ラインレイアウト

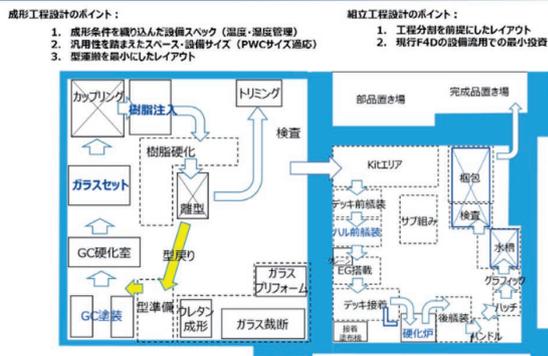


図10 工程レイアウト

3-3-2. 物流スキームの新規構築

工場での生産を行うには、工場を取り巻くサプライヤーと工場機能とを、効率よく繋ぐスキームと品質管理が不可欠である。「SuperJet」の製造工場となるミツワ(株)袋井工場はヤマハ社外であることから、通常ヤマハの社内工場にあるあたりまえの機能が揃っていない。よって、新たな物流スキームを構築する

ことが課題となった。

(1) 部品受入れ業務機能

通常、ヤマハの工場機能の一つとして、納入される部品に対して初品受入検査を実施し、良品のみを検取するQゲートがあるが、その機能と権限を社外に委託することは難しく、ヤマハ社内はどこかでその機能を補う必要があった。今回、その役割を製造部門が受け入れてくれることとなった。本来CKD(海外工場で完成するモデル)のパーツの受入、ピッキング、梱包を一手に引き受けている工場で、CKDのパーツで培った高い品質管理能力を「SuperJet」の構成部品にも展開していただくことで、管理された部品を社外に有償支給し、安心して組立、完成できる基盤となった。

(2) 台湾(台湾山葉機車)製品の国内輸入と供給スキーム

「SuperJet」の構成部品の中に JET PUMP ASSY という部品がある。これはエンジンと連結し、エンジンの動力を JET PUMP 内のインペラに伝え、推進力となるジェット水流を発生させる重要なパーツである。JET PUMP ASSY は、アメリカで生産している他の PWC やスポーツボートに対しても、YMT(台湾山葉機車)で生産し、供給されている。「SuperJet」の JET PUMP ASSY も、その流れで YMT での生産になることから、台湾から日本への輸入と、それを組立工場へ供給するという新たなスキームを構築する必要があった。そのスキーム構築に協力してくれたのが、YMT(台湾山葉機車 輸出管理部門)と調達推進部である。YMTと調達推進部は海外調達部品の手配スキームを持っており、そのスキームに「SuperJet」の JET PUMP ASSY を当てはめることを提案し、艇体の組立計画に対して最適な供給体制を構築することができた(図11)。

製造スキームの概要

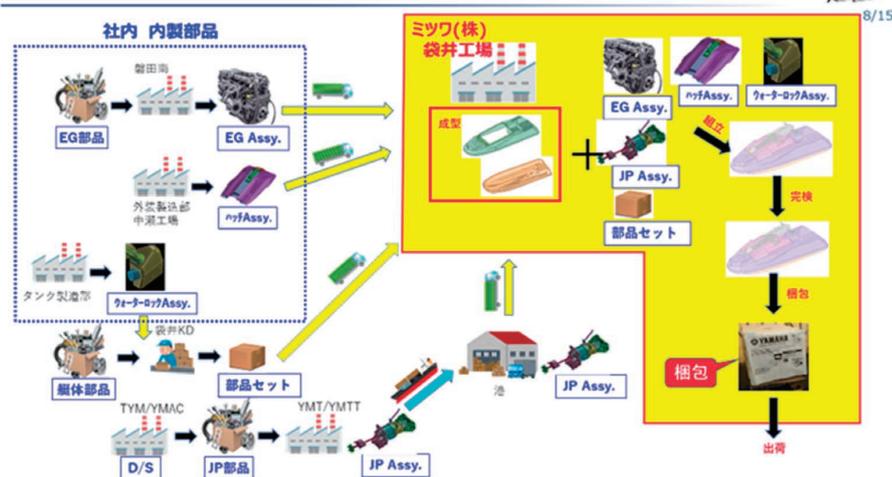


図11 製造スキームの概要

(3)社内内製部品への展開

PWCの構成部品は、製造拠点がアメリカに集約していることもあり、エンジンと一部のパーツ以外は、日本での製造実績がなかった。「SuperJet」は唯一の国内完成モデルとして、社内工場の製造技術、生産能力を活用することが製造スキームの重要なキーと考えた。その要望に応じてくれたのが、製造部門の樹脂成型担当とアルミプレス担当である。樹脂成形では、大型の樹脂インジェクション成形で「SuperJet」の重要パーツであるエンジンハッチ ASSY を、アルミプレスでは、「SuperJet」の排気系統の重要パーツであるウォーターロック ASSY を、それぞれ製造して供給することとなった。それぞれの生産準備担当者は、初めて関わるPWC商材に対し、製品の使われ方、部品の機能や商材特有の市場影響まで深掘りし、緻密な良品条件を設定することで、精度の高い生産準備を展開してくれた。

4 おわりに

国内外の多くのお客さまからの期待と社内からの大きな声を受けて、【フルモデルチェンジ】【新工法導入】【新工場立ち上げ】の3つの大きな“新”にチャレンジし、非常に多くの課題を乗り越え、2020年8月生産立上げを実現した。

心配していた量産での品質のバラツキも現場製造スタッフの作業改善と熟練度向上、そして作業標準書ブラッシュアップにより高い完成度を達成した。

量産開始から一年(2021年8月時点)、年間2,000隻の生産と、狙いとしていた成形良品率97%を達成することができた。このプロジェクトを通し、中量工法のモノ創りの技術ノウハウと進化した高効率VARTMというヤマハ独自の強みを手に入れ、今後さらなる商品競争力向上への戦略に繋げていく。

■ 著者



中辻 聡
Akira Nakatsuji
マリン事業本部
製造統括部
ボート製造部



横大路 裕信
Hironobu Yokooohji
マリン事業本部
製造統括部
ボート製造部

■ 開発メンバー



北川 欽哉
Kinya Kitagawa
マリン事業本部
製造統括部
ボート製造部



村越 功
Isao Murakoshi
マリン事業本部
製造統括部
ボート製造部