

ASK Chemicals L.P., Dublin, Ohio, USA | Copyright 2012 American Foundry Society

著者：A. Carrasco 1), D. Pena 1), G. Trillo 2), J. Prat 3), J. Izaga 1), M. Manzanares 2)

注：1) IK4-AZTERLAN, Metallurgical Research Centre, Durango (Spain) 2) FONDESAL, S.A., Rubi (Spain) 3) ASK Chemicals Espana, S.A., Getxo (Spain)

< Copyright 2014 World Foundry Organization >

「高付加価値鋳鋼品の歩留り最適化」

要約

鋳鋼部品の生産に於いては、マンガン鋼からニッケル合金鋼に至る全ての材質について、極めて複雑で多くの厳しい条件を伴うものの、進歩・改良の可能性が数多く潜在している。それらの可能性の内、本稿は、鋳造品の製品収率、即ち、製品重量と鋳込み溶湯重量の比率と定義される歩留り(製品重量/鋳込み重量＝歩留り)の最適化に専ら焦点を当てて論じるものである。

鋳鋼品の生産に携わるほとんどの企業は、程度の差はあれ、現在市場で入手できる鋳造プロセスのシミュレーション・ソフトウェアを使用している。鋳鋼品産業の中核的部分は、多品種少量生産あるいは小ロット生産の企業から成っているが、前述のシミュレーション・ソフトは、これらの鋳造メーカーが、それが既存のパターンであっても、主として歩留りの向上に焦点を当てて押湯方案の「伝統的な設計基準」を最適化するための検討を行う上で、失敗するリスクが低く、かつ低コストな手段として活用できる。

本稿は、製造コストに直接的かつ重大な影響を及ぼす歩留まりの向上に特別の関心が向けられる現在の鋳鋼品生産現場において用いられている数多くの押湯方案をつぶさに検討して得た成果を紹介する。

この成果は、鋳込み金属(液相冶金学および凝固)、最新の押湯方案(発熱中子、発熱パッド、およびASK ケミカルズが特許を保有するExactcast™ ミニライザー)、非常に先進的な押湯の概念(モジュラス、押湯容量の極小化、および押湯有効距離)を考慮に入れた複層的かつ変動的な諸要素を検討対象として得られたものである。

工業的ステージの実験は、ASK Chemicals および数社の鋳造工場、特に、X線制御機器用鋳鋼部品で60%超の歩留まりを誇るFONDESAL社において実施した。

本稿は、「スーパーアロイ」と名づけられた研究開発プロジェクトが基になっており、主要な研究成果は既に公表され、新規な押湯設計と組成についてはこれを広く提案し、近い将来に出てくるであろう押湯方案に関するニュースも公表されるべきものとなっている。

序論

鋼や複合合金の鋳造技術はそれぞれ多くの特殊性を持っているが、その特殊性が、特に他の鋳造金属と比べ、製品重量/鋳込み重量の歩留りと生産性の点で進歩を制約してきた。

鋳鋼品の特殊物性を研究する場合、押湯方案と冶金学的考察に特段の注意を向けなければならない。何故なら、重要な改善の機会はこちら2点の周辺に存在するものであるからである。たとえば、押湯サイズが小さくなると、熱励起も減少する結果、周辺部位の冶金学的特性が著しく改善される。

実際の製造場面では、前述の歩留りが40%にも満たないケースが多数見られることからしても、歩留りは研究すべき重要課題である。(図1)

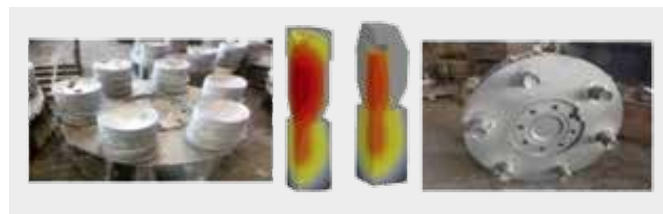


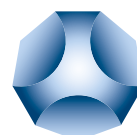
図1 歩留り改善例

このような一般的省察が基となって、スーパーアロイ・プロジェクトは構築され発足することとなった。従来のな方案の考え方について、モジュラス、押湯体積および有効押湯距離の各基準に焦点を当てつつ再吟味を行った。

本稿は、手近な一連の状況がそろっており改善の余地が大きい鋳鋼品の製造に的を絞っている。しかし、製品/鋳込み重量の歩留りを改善するためのどのような作業を行うにも、鋳鋼品に要求される非常に詳細な品質要件および、往々にして小さく、場合によっては統一的な製造ロットサイズが、「良品を造ること」が鋳造工場にとっては第一の関心事であるが故に、進行の障害となってきた。

高度な技術的要求を伴うニッチ用途向けの製造活動の場合、鋳造工場はシミュレーション・ソフトを使って方案の有効性を確認することができ、あまり従来のな方案にとらわれることなく進むことができる。

次項では、新しい計算基準のいくつかを提示し考察する。ここでは、保温/発熱挙動と押湯形状のバランスが取れた先進的な新開発押湯方案に注目する。



「高付加価値鋳鋼品の歩留り最適化」

実験の方法

本研究の実験室ステージの研究作業は、典型的な鋳鋼工場で行われている計算と方案設計の方法を比較検討することから始まり、異なる材質（低ないし中炭素鋼、マンガン鋼、ステンレス鋼）、各種サイズ（小：25kg以下、中：25～150kg、大：150～4,000kg）およびバッチサイズ（単品生産品から量産品まで）が全て記録された変動的検討基盤を得た。

全てのケースにおいて、問題を検討する上で共通する以下の形態が認められた。

- 押湯設計には十分な配慮がなされている。
- 注湯方案の設計には注意が向けられておらず、注湯方法（堰鉢方式または直注ぎ）についてのみ記載されている。

実験室ステージでは、歩留りの極大化を念頭に置いて、前記押湯計算方法の最適化の検討を行った。工業的適用の実験に至る前に、押湯部材の原料成分の熱物理学的特性をインプットしたシミュレーション・ソフトを用いて前記計算結果の検証を行った。

既に述べたとおり、本研究の取り組みは全て、モジュラスの基準を適用して押湯方案を再設計するということに専ら焦点を当てて行ったものである。

設計の基準

押湯方案を構築する場合、いくつかの要素を考慮に入れるが、中でも特に重要なことが、収縮率、押湯の有効距離、押湯の体積およびモジュラスである。

これらの変動要素は、最新のソフトによるシミュレーションを通して、計算が著しく簡略化され信頼できるようにバランスをとらなければならない。

こうして、2つの優先検討課題を収縮率ならびにモジュラスの領域とする方針を固めた。

収縮率：使用する凝固モデルは3態とした。まず、主として溶融合金の過熱に依存する液相収縮、次に合金の凝固範囲に依存する凝固収縮、そして固相収縮である。押湯系が影響を及ぼし得るのは最初の2態であり、3番目の凝固形態は、合金の物理的挙動によるものであり、それを有意に変えることはできない。

モジュラス：モジュラスは方案設計上のキーポイントの1つであり、よって、製品部、押湯系の双方とも安全係数を約25%（押湯系M>製品部M）として検討を行った。

シミュレーション・ソフト

「スーパーアロイ」プロジェクトの過程では、「単品の鋳造品であっても、それが量産品のうちの1個であるがごとく取り扱うものとする」という考えの下、新規な設計コンセプトを採用した。この予備的な取り組み姿勢は、シミュレーション・ソフトを必須手段とし、重要な設計上の新規性を導き出すことになる。

製品の健全性（引け巣がないこと）を、実験室段階においても工業的段階においても最重要点であると見做すこととした。

全ての実験について、従来設計方法を対照して後補正を行った。全ての実験に係るシミュレーションによる押湯計算の有効化については、いくつかのモジュラス値を使って欠陥発生の予測計算を行った。（図2）

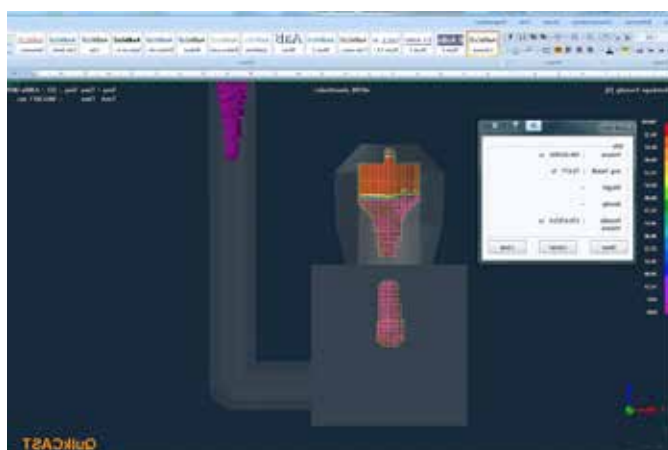
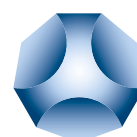


図2 シミュレーションによる引け巣発生予測



「高付加価値鋳鋼品の歩留り最適化」

試験した製品(試験片) 工程変動の検討

工業的製品の場合に付帯する現象のインパクトを最小限に抑えるために、設計変更を行う時は、どのような変更であっても、事前に当該変更に対応する試料の作成を行った。使用した試料は、一辺が200mm、形状モジュラス 3.33cm の角柱状ブロックとした。(図3)

各試験片の押湯は、検討対象であるスリーブが装着され、試験結果は全て典型的収縮モデルを対照として分析した。

試験片の健全性と引けの量を評価するために、全ての試験片について破壊、非破壊の両手法を採用した。



図3 試験片と押湯 (製品M=3.33cm)

本報告の根幹は歩留りの最適化であり、よって、引けに影響を及ぼす工程変動の見極めと評価を行った。その内、最も重要なものを選択し、引けに対する影響を評価した。(図5) 最も関連性が大きい工程変動要素は以下のとおりであった。

- 凝固速度
- 発熱断熱押湯スリーブおよび押湯系の設計
- 溶湯の過熱

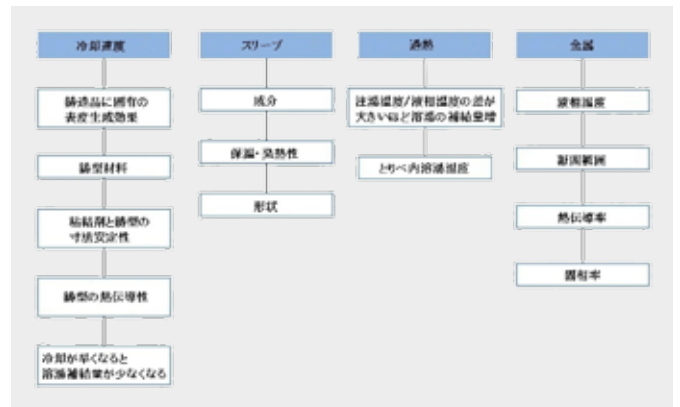


図5 最も重要な工程変動要素

工業的ステージに於ける試験

有効化が確認された全ての計算結果は、工業的に試験され(図4)、健全性と製品/鋳込み重量の歩留りが調べられた。

予備的検討段階では、製品の健全性の確認が第一要件であったので、不要なリスクを回避するため溶解、注湯試験は行っていない。

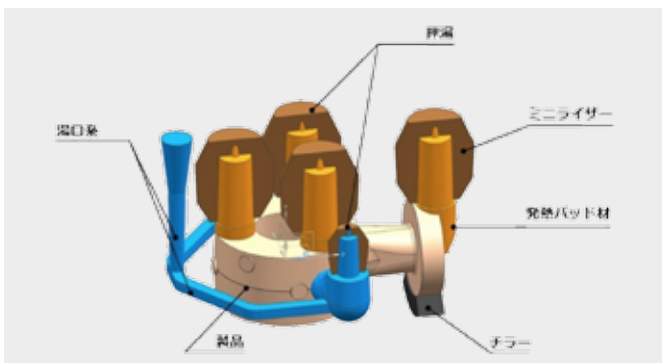


図4 方案の構成要素

結果と考察

この研究開発プロジェクトの枠組みの中で開発された押湯方案と使用した押湯計算の有効化確認手段は、検討対象とした合金の引け形態に影響を及ぼす複数の要素を考慮に入れたものである。ここで、キーポイントとして「凝固速度」に言及することが必要となる。

工業的見地に立てば、液相から固相に至る間隔は個々の合金に特有の物性であり、その挙動を人為的に変えることはできないと考えられる。

シミュレーションソフトを用いて行った分析の結果は、凝固速度が増すと液相/固相の間隔に係る引けが減少することを示した。

この挙動を実験によって検証するため、試験片による試験を計画し実行した。前記と同じ鋳型および押湯方案を用い、モジュラスが各々5.7、4.2、3.9のミニライザー-KMV 1650、KMV 780、KMV 590を装着して造型した。その内1個は底部にチラーをつけ、他の2個はチラー無しとした。この状態で、1個の取鍋から各鋳型に注湯し、冷却後、引け巣の評価を行った。

「高付加価値鋳鋼品の歩留り最適化」

一次および二次収縮に係わる引け巣欠陥は、チラーなしの試験片の方が大きいことが検証された。チラーを使うことによる凝固スピードの増加がモジュラスを変化させることは明らかであるが、同時にそれは収縮形態を変えるものでもある。(図6)

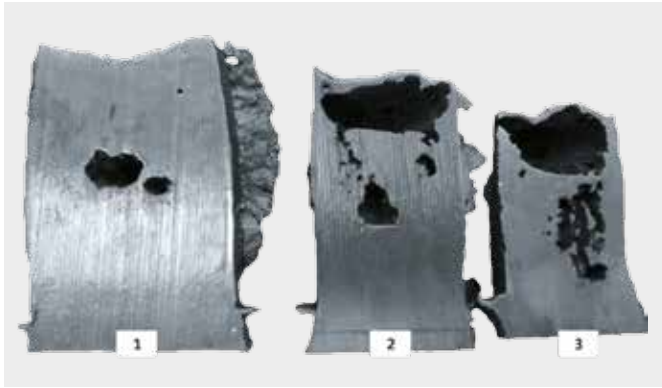


図6 ここに示す3例とも引け巣は無かった。試験片1はチラー有り2と3はチラーなし。

スリーブ

新開発の発熱断熱スリーブと押湯方案は、その保温・発熱能力、形状および成分をバランスよく組み合わせたものである。その熱的性能を最適化する目的で、スリーブ・押湯系の応答性に作用する主要な変動要素に、保温・発熱特性を強化するよう修正を加えた。

スリーブの原料

保温・発熱挙動を最適化するために、様々な原料が取り入れられた。その原料処方としては、アルミノケイ酸塩系マイクロスフィア(微小中空球体)(図7)を保温材として用い、これに発熱材をコールドボックス法によって結合させたものである。



図7 マイクロスフィアの固着メカニズムの詳細

保温および発熱能力

押湯性能最適化の方策は、押湯系自体の保温能力と発熱特性に基づくものとした。工業的ステージの実験に先立ち、保温・発熱配合の1個1個を測定、評価した。(図8)

評価にはETNA法(ASK Chemicalsが開発した専用評価法)を採用したが、これによって各配合の保温性と発熱挙動に対する影響要素を同定することが可能となった。

ETNA試験を実施した後(図9)、保温・発熱スリーブの発熱量のみを変化させて、試験片を2個一組として鋳込んだ。その結果は、発熱量が増加すると押湯の所要体積は減少するというものであった。

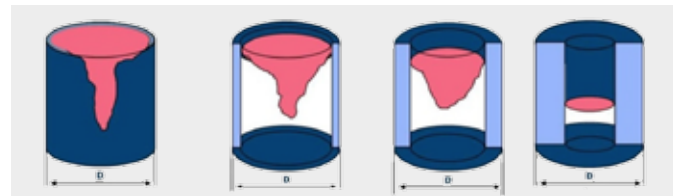


図8 異なる保温・発熱材処方による収縮形態の変化

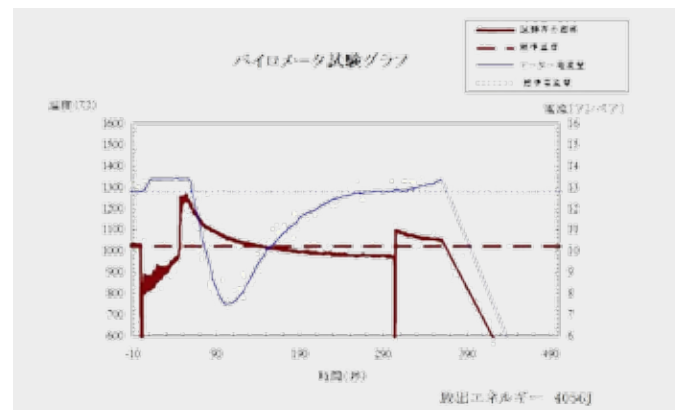


図9 - 1 ETNA 法試験による2種類の配合処方の保温・発熱挙動評価(1)

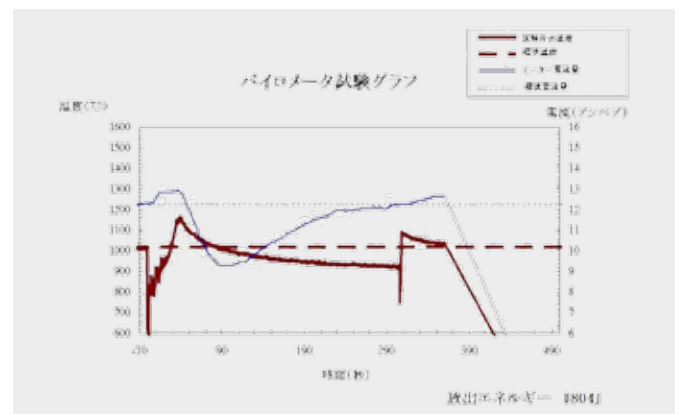


図9 - 2 ETNA 法試験による2種類の配合処方の保温・発熱挙動評価(2)



「高付加価値鋳鋼品の歩留り最適化」

保温・発熱材形状／収縮形態

適用対象に応じて、3種類の基本的形状設計を採用し、これを出発点とした。

- 発熱断熱スリーブ：その特性により、従来型のスリーブと比較して所要溶湯量は少なく、モジュラスが一定に保たれるものと考えられる。
- パッド材：各適用対象に対する被験パッド材の形状適応性は、金属製パッドの除去を容易にし、あるいは押湯有効距離を長くすることによりチラーの使用を不要にする。
- 堰鉢用スリーブ：押湯による影響を受ける部分を保温・発熱材の混合物で被覆することにより、周辺部分の熱応答性が改善できた。

以上のように、開発した押湯方案と形状は、押湯有効半径と押湯有効距離を増加させる可能性が、保温・発熱材混合物の熱応答性に付加されることになり、著しい有益性が認められた。(図10)

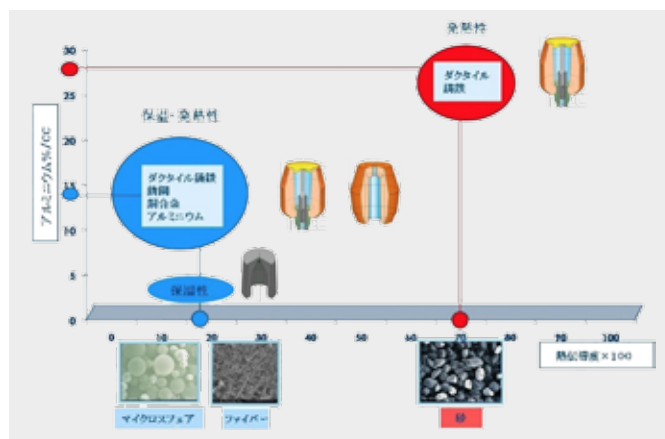


図10 「スーパーアロイ・プロジェクト」で試験したスリーブの形状と配合処方

被験材料

異なる鉄ベースの合金の挙動を検討した結果、被験合金の全てが単一の応答形態を示すものではないことが明らかとなった。ここで得られた情報は、低および中合金鋼、異なる物性を持つステンレス鋼、およびマンガン鋼に関するものである。

合金の化学的性質、固相および液相温度、凝固範囲(狭範囲、広範囲合金)、および固相率の関係性の検討を行った。

押湯能力およびシミュレーション結果の有効性の観点から、固相率(固相対液相の比率で表される)は、合金の凝固範囲に関係しており、凝固範囲が増加するほど押湯系は「より効果的に働くこと」が分かった。(図11)



図11 マンガン鋼鋳鋼品：従来の押湯(最も左)とミニライザー(中央と右)の挙動

溶湯の過熱

合金の過熱温度の定義に適用する基準は非常に主観的なものであり、収縮におけるその影響が考慮されることはめったに無い。

一般的には、過熱温度が上昇すると、収縮傾向も増加する、というように表現されている。(図12)

発熱断熱ミニライザーの熱応答性を最適にした場合、過熱温度上昇100°Cあたりの体積増加分を基準値として使用した。この値は概ね1%に相当する。

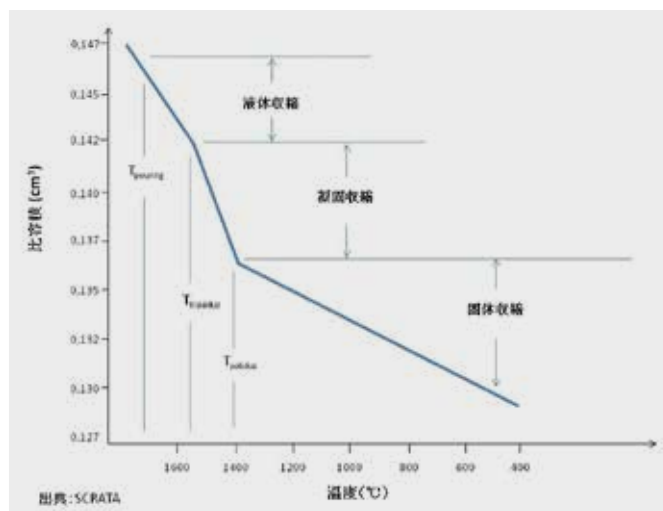


図12 3段階の収縮モデル

「高付加価値鋳鋼品の歩留り最適化」

冶金学的な考察

歩留りの最適化に伴う生産性向上と原価低減効果は、実験ステージに於ける異なる性状の溶湯が発揮した一連の冶金学的改善を鑑みると、副次的であるとさえいえる。それらの効果のうち特筆に価するものが下記のとおりである。

- 鑄型の熱慣性が低いということは、局所的な熱負荷が低いことを意味し、鑄造欠陥（亀裂、偏析等）の発生防止手段となる。
- より望ましいマイクロ組織を呈し、結晶の成長を最小限に留める。
- 鋼屑の投入が減り、原料の回転が向上する。溶解炉へのインゴット投入量が増え、溶湯品質が直接的に向上する。
- 再利用ができない自家製スクラップ（汚染した押湯）による材料のロスが減少する。
- 押湯の断面が小さくなり、場合によっては、押湯切断のための焼きなまし、焼き戻しを省き、製品に割れが生じるリスクを回避できる。



図13 歩留り最適化の例（ステンレス・スチール）

工業的な試作

新しい押湯方案の工業的有効性の実証と、「スーパーアロイ・プロジェクト」で達成した競合上の優位性を体現する実製品の典型見本を造ることを目的として、実際の鑄造現場でいくつかの工業的実験を実施した。

従来的な押湯方案と新開発の方案を比較し、歩留りの点で直接的な改善が明白になっていたため、溶湯の準備は至極単純なものとなった。

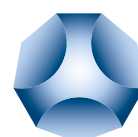
工業化ステージの検討は、異なる顧客分野向けの製品を使って実施した。その結果、全ての実験が合格であると認めるに必須の条件、即ち製品内部の良好な健全性の確証を得た。

各工業化評価実験を行う前に、その有効性の事前確認評価を行った。これには、新しいスリーブの配合を熱物理学的に評価し、その結果を計算式のインプットデータとした。

下の図は前記実験のいくつかの例を示すものであるが、本プロジェクトで得た知見を適用して達成できた歩留り改善が明らかに認められる。（図13、14）



図14 歩留りが58%（写真下）から76%（同上）に改善し、さらに鑄仕上げ時間の短縮も図られた（炭素鋼）



「高付加価値鋳鋼品の歩留り最適化」

結論

現在利用可能なシミュレーションソフトは、新しい保温・発熱材の配合を熱力学的に適正に評価できれば、たとえ1個取りの製品といえども、常に歩留り最適化基準を満たした鋳造が可能である。

どのような鋳鋼品の押湯であっても、発熱断熱ミニライザー、パッド、および堰鉢用スリーブを組み込むことができる。

適正な方案作成基準に従って、鋳造工程に厳密に適用することが前提ではあるが、60%を超える製品／鋳込み重量歩留りが達成できた。歩留り改善を諦めることは、重要な競争上の優位性を見逃すことになる。

引け巢の無い、健全な製品を歩留り良く生産するためには、溶湯の過熱、押湯系の保温・発熱能力、ならびに鋳型の冷却能の間に適正な相互関係が無ければならない。

謝辞

本報告作成の基礎となった「INNOXCAST プロジェクト」(IPT-240000-2010-027) および「スーパーアロイ・プロジェクト」に対する科学技術革新省(“Ministerio de Ciencia e Innovacion”)のご支援に対し深甚なる謝意を表します。

Engineering and Fabrication Area of FONDESAL 社の技術、生産部門の方々からは、これが無ければ本報告で述べた貴重な開発は成し得なかったといえるほど有益な示唆をいただき、また、この革新的な技術の工業的実験にご協力いただいた鋳造工場各位に感謝申し上げます。

参考文献

1. Berriozabalgoitia, I., Penã, D., Trillo, G., Izaga J., Ronald, P.R., “Optimization of Chemically Bonded Sand Moulds”, 70th World Foundry Congress, Monterrey, Mexico (2012).
2. Prat, J., “Solutions to the increasing technical and health and safety demands in the moulding process of big size wind energy castings”, VI International Foundry Technical Forum, Bilbao, Spain (2009).
3. Prat, J., et. al., “New Casting Solutions: Numerically Simulated EXACTCAST™ Core-Sleeves Eliminate Critical Problems With Automobile High-Security Components (Patented)”; 66th World Foundry Congress, Istanbul, Turkey (2004).
4. Prat, J. et. al., “Improving Casting Performance through Customized Insulating Shapes and Advanced Simulation Techniques”, 67th World Foundry Congress, Harrogate, UK (2006).
5. Prat, J., “Latest developments in Feeding Systems for Steel and nodular iron castings” VIII International Foundry Technical Forum, Bilbao, Spain (2013).
6. Prat, J., et. al., Patent No. RU 2202437, (April 12, 2003).

本論文は、「鋳造ジャーナル」2014年10月号に掲載されました。

