

マルテンサイト系 13Cr-3.5Ni ステンレス鋳鋼 製水車ランナ^{*1}

川崎製鉄技報
17 (1985) 3, 273-281

新中 博昌^{*2} 広瀬 彰^{*3} 曾我部 暁^{*4} 野口 紘^{*5}

13Cr-3.5Ni Martensitic Stainless Steel Castings for Hydraulic Turbine Runner

Hiromasa Niinaka, Akira Hirose, Satoru Sogabe, Hiroshi Noguchi

要旨

水力発電用水車ランナには、強度、耐食性、耐摩耗性が要求されるために、13Cr-3.5Ni マルテンサイト系ステンレス鋳鋼が多用される。本鋼種は、鋳造後の焼準、焼戻の熱処理条件が材料特性に大きく影響する。

当社では、水車ランナの製造に当って、CAD を使用した凝固シミュレーションによる鋳造方案の立案、中子砂のガス発生量、中子の乾燥、アルゴンシールド注入法、型ばらし温度の管理、熱処理の管理および溶接補修の管理を厳重に行うことにより、品質の確保を図っている。

これまでに、フランシス型、カプラン型およびペルトン型の3種類の水車ランナのいずれについても、良好な製造実績をあげている。

Synopsis:

The 13Cr-3.5Ni martensite stainless steel is used for the hydraulic turbine runner, because it is suitable for high strength, high corrosion resistant and high abrasion resistant materials. These material properties is affected sensitively by heat treatment of normalizing and tempering. In manufacturing the hydraulic turbine runner, Kawasaki Steel established quality control in the manufacturing process, using the following technical improvements: (1) design of casting plans with solidification simulation using CAD, (2) control of the volume gases that are generated from the core, (3) control of core drying, (4) control of the pouring process by sealing with the argon gas, (5) control of the knockout temperature, (6) control of heat treatment, (7) control of repair welding.

It has now become possible to manufacture satisfactory products of three types of runners such as Francis Kaplan, and Pelton runners.

1 緒 言

鋳鋼品の中で最も要求品質の高いものの一つに、水力発電用水車ランナがある。水車ランナ材は、優れた強度、耐食性および耐摩耗性が要求されるため、最近ではほとんどが 13Cr-3.5Ni マルテンサイト系ステンレス鋳鋼品である^{1,2)}。

当社の水車ランナの製造実績は古く、鋼種も普通鋼 (SC46) から、13Cr ステンレス鋼、13Cr-3.5Ni ステンレス鋼へと変遷をとげ、型式もフランシス水車ランナからカプラン水車ランナペーン、ペルトン水車ランナへと製造分野を拡げて、現在では、全ての型式の水車ランナが製造可能となっている。これらのランナの要求品質特性は年々厳しくなり、品質上はもちろんのこと、コストおよび納期対応からも種々の対策を立て、改善に努力を傾注して来た。

本報告では、水車ランナの種類と特徴、ランナの製造工程とその重要管理項目、焼戻条件の違いによる材料特性の変化等について述べる。

2 水車ランナの種類と特徴

水力発電用水車は、Fig. 1~3 に示すように、フランシス、カプランおよびペルトンの3種類があり、当社では、これら3種とも製

造実績がある。3種類の特徴は下記の通りである。

(1) フランシス型

中落差、中水量の発電所向で、現在稼働している発電所の80%を占めている。水力発電所の主流。

(2) カプラン型

低落差、大水量の発電所向で、現在稼働している発電所の10%を占めている。例えば、農業用灌漑水路等に設置可能。今後、新規プラントは増加する傾向がある。

(3) ペルトン型

高落差、小水量の発電所向で、現在稼働している発電所の10%を占めている。フランシスに比べてダム建設費、発電所設備費が割安のため、今後伸びが期待される分野。ペルトンは上記水車のうち最も仕様が厳しく、製造が難しいと言われている。

3 13Cr-3.5Ni ステンレス鋼の性質

3.1 金属学的性質

Table 1 は、当社で製造している 13Cr-3.5Ni マルテンサイト系ステンレス鋳鋼水車ランナの化学組成を、ASTM A743/743M, CA-6NM (12Cr-4Ni) 鋼の化学組成と比較して示したものである。耐食性鋼である CA-6NM 鋼にくらべ、当社製ランナ材は Mo の添

*1 昭和60年5月21日原稿受付

*2 知多製造所鋳造部鋳造管理室主査 (課長)

*3 知多製造所鋳造部鋳造管理室主査 (樹長)

*4 知多製造所鋳造部鋳造管理室

*5 鉄鋼研究所知多研究部主任研究員 (課長補)

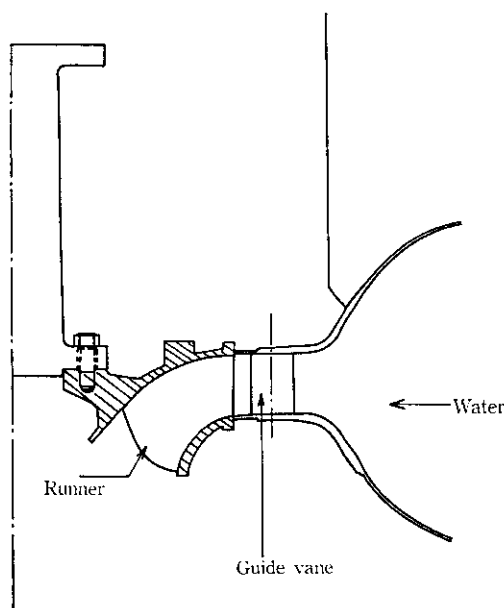


Fig. 1 Profile of Francis runner

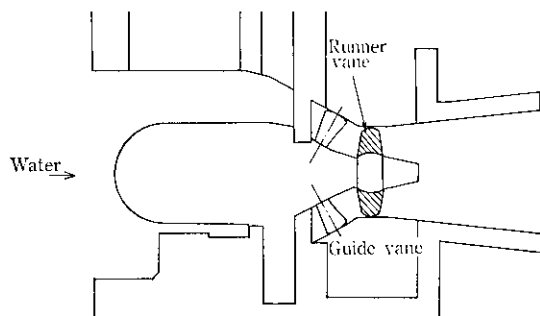


Fig. 2 Profile of Kaplan runner

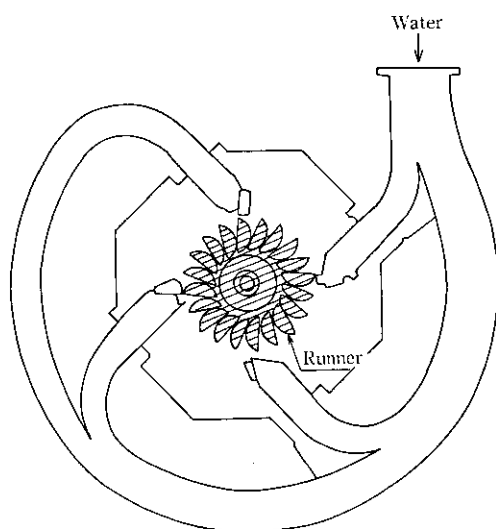


Fig. 3 Profile of Pelton runner

加量が少ない。Mo の添加は鋼の焼戻軟化抵抗を増し³⁾、当ランナ材の場合には、じん性劣化の原因となる炭化物のオーステナイト粒界への析出を抑制する⁴⁾が、当社の Mo 添加量はこれらの効果を損なわない必要最小限としている。

このステンレス鋼は常温でマルテンサイト組織とすることを特徴

Table 1 Chemical composition of 13Cr-3.5Ni cast steel used (%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
ASTM CA-6NM*	≤0.06	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	3.5~4.5	11.5~14.0	0.40~1.0
13Cr-3.5Ni	0.04~0.06	0.35~0.45	0.65~0.75	≤0.020	≤0.010	3.60~3.90	11.70~12.70	0.20~0.30

* ASTM A743/743M, CA-6NM

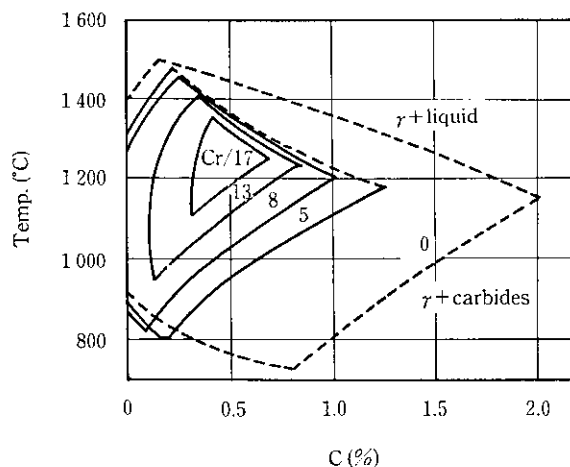


Fig. 4 Variation of the amount of austenite in accordance with chromium contents

としているため、焼ならし温度（又は焼入温度）で安定なオーステナイト単相とすることが最も重要である。もしも、オーステナイト単相とならず、フェライト相が残留している場合には、機械的性質とくにじん性を劣化させやすい⁵⁾。従って、このフェライト相（一般にはδフェライトと呼ばれている）が、焼ならし温度で残留しないようにすることが、当ランナ製造上での大きな管理項目のひとつである。このフェライトは、化学組成や熱処理条件により大きな影響を受ける。

Fig. 4⁶⁾ は、Fe-C 状態図に示すオーステナイト域が、Cr% の増加によって狭められる様子を示したものである。図中右側の線は炭化物析出線を、左側の線はフェライト+オーステナイトとオーステナイト単相との境界線を示している。C が 0.5% で、Cr が 22% の場合、温度が 1275°C でオーステナイト単相となるが、それ以上の Cr% になるとオーステナイト単相となることはない。

Table 1 に示す当社製ランナ材の場合、C と Cr の範囲からすれば、Fig. 4 で見るかぎり、焼ならし温度（900°C 以上）ではオーステナイト単相となるか又はオーステナイト+フェライトとなるかの判断はむずかしい。なぜなら、Cr 以外の合金元素でも、安定なオーステナイト域生成に関係する合金元素があるからである。

Fig. 5⁷⁾ は、C% と Cr 当量 ($Cr_{eq} = Cr + 2Si + 1.5Mo - 2Ni - 1Mn - 15N$) により焼ならし温度における組織が、オーステナイト単相になるかオーステナイト+フェライトになるかを示したものである。当社製ランナの場合、Cr 当量を高くなるように計算しても 8% 以下であり、0.04~0.06% C を満たすかぎり、フェライトの混入する危険はないことがわかる。

また、Fig. 6⁸⁾ は、同一化学組成であっても、焼入温度（又は焼ならし温度）によってフェライト量が変わることを示したものである。焼入温度を 927~1093°C (1700~2000°F) とするとき、フェライト量が最も少なくなることがわかる。

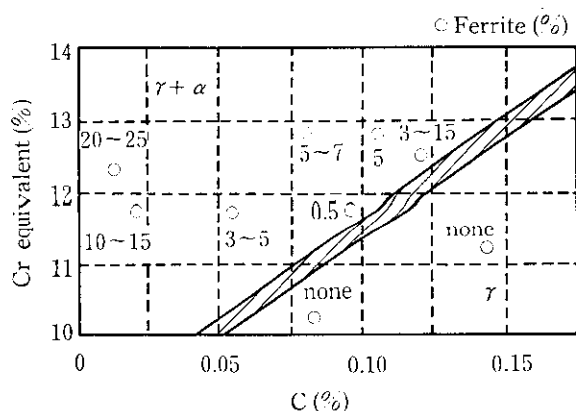


Fig. 5 Effect of carbon content and chromium equivalent on the amount of ferrite

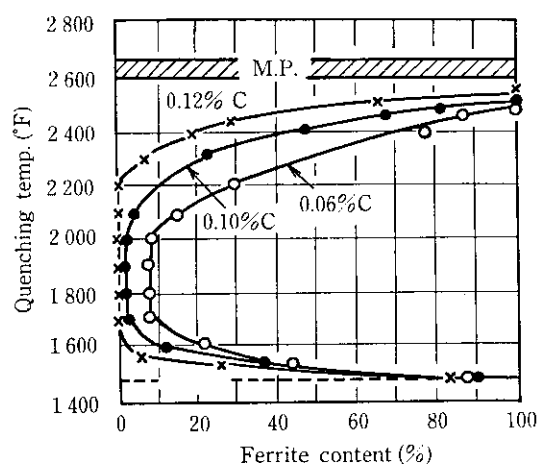


Fig. 6 Variation of the amount of ferrite with quenching temp. and carbon contents in 12.5 Cr steel

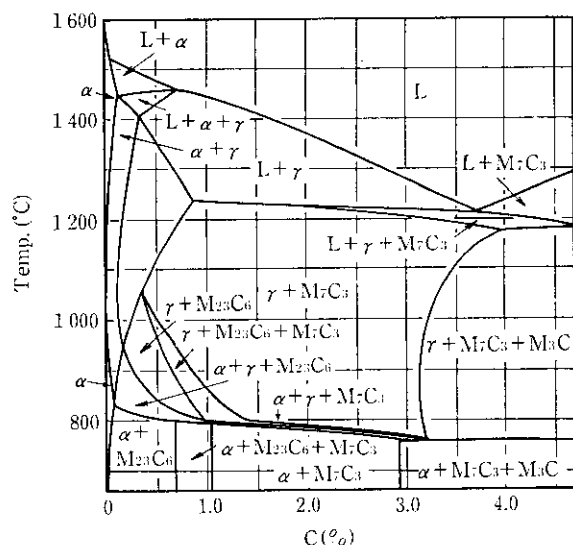


Fig. 7 Effect of carbon content on equilibrium relationships of 13% Cr stainless steel

フェライト以外にもランナ材の材質に大きな影響を与えるものがあるが、それは前述したように炭化物である。Fig. 7⁶⁾はFe-Cr-C三元状態図の13%Crにおける等Cr断面図を示したもので、C%が0.04~0.06%と非常に低い場合にはM₂₃C₆型の炭化物が存



Photo 1 Microstructure of 13Cr-3.5Ni cast steel at as-cast

在することがわかる。この炭化物がオーステナイト粒界に析出してじん性を劣化させる場合があることは前述したが、その程度は熱処理条件の設定いかんによっても異なる。

以上述べてきたことから、当ランナ材の組織は、マルテンサイト、残留オーステナイトおよび炭化物からなっていることがわかる。Photo 1は、当ランナ材の casting のままの組織を示したものである。粗いマルテンサイト組織となっているが、一部に腐食されていない白い部分が見られる。これはマルテンサイト化していない残留オーステナイトである。

このような casting 組織は、次工程の熱処理で強じんなマルテンサイト組織へと変化する。従って、当ランナ材の品質は熱処理工程で作りこまれるといっても過言ではない。この点については、次章でくわしく述べる。

3.2 機械的性質

水車ランナは、その使用環境から、水に対する耐食性、耐キャビテーションエロージョン性、土砂に対する耐摩耗性が要求される⁹⁾。耐キャビテーションエロージョン性は、引張強さまたは硬さが高くなるほど優れていることが知られており⁹⁾、従って、引張強さや硬さに対する要求はきびしいものになっている。Table 2は、当ランナ材に要求される機械的性質を示したものである。引張強さが75 kgf/mm²以上、0°Cにおける衝撃値が6 kgf·m/cm²以上の要求値となっており、水車ランナが高強度・強じん性の要求される casting 品であることが理解できる。また、土砂に対する耐摩耗性は硬さが最も関係する¹⁰⁾ことから、硬さも高い値が要求される。

以上述べた要求特性は、今後の水車ランナの使用環境条件によってはますますきびしくなることが予想される。

Table 2 Mechanical properties of 13Cr-3.5Ni cast steel

YP (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	El (%)	RA (%)	HB	Charpy impact value (kgf·m/cm ²)
≥55	≥75	≥15	≥40	217~302	≥6 (0°C)

4 焼戻条件の違いによる材料特性の検討

4.1 機械的性質と焼戻条件との関係

当鋼種ランナ材は、 casting のままでマルテンサイトと残留オーステ

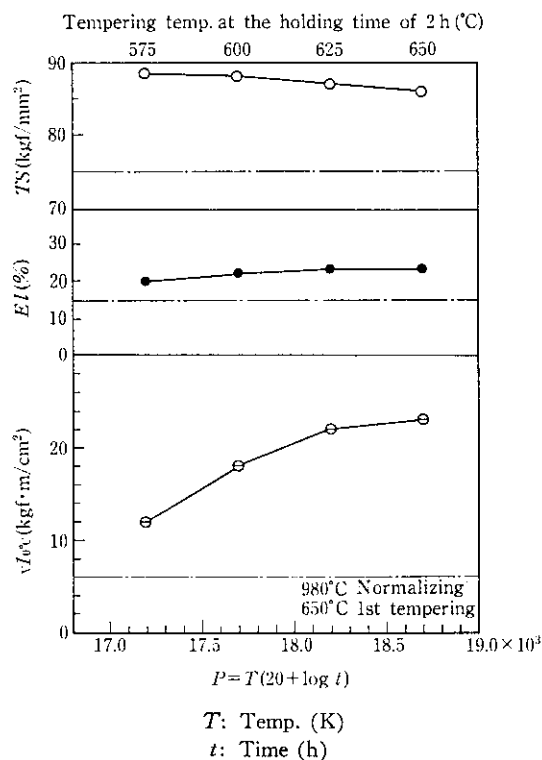


Fig. 8 Relation between mechanical properties and tempering conditions

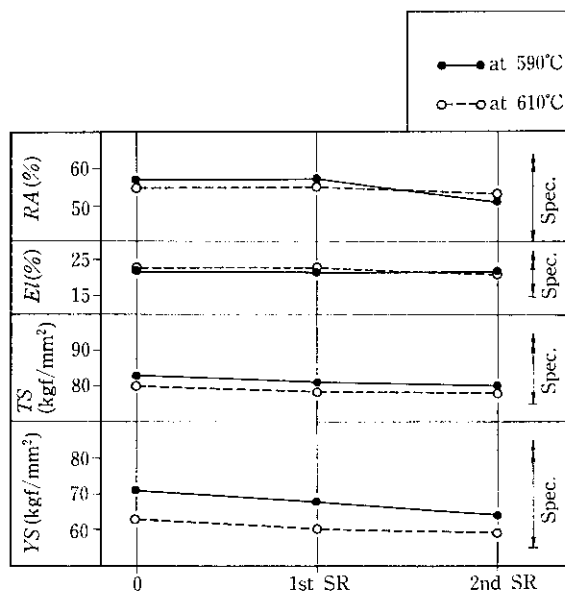


Fig. 9 Variation of tensile test properties with the repeated number of SR

ナイトの混合組織となっている。通常の熱処理工程は拡散焼鈍、調質熱処理から成り、補修溶接がある場合には、溶接後に応力除去焼鈍（以後 SR とよぶ）が加えられる。調質熱処理には、焼ならし-2 段焼戻、いわゆる NTT 処理が行われる。

Fig. 8 は、当鋼種ランナ材の機械的性質と 2 段目焼戻条件との関係を示したものである。前処理は、1000°C での拡散焼鈍後、980°C での焼ならしを行い、650°C で 1 段目の焼戻を行った。2 段目焼戻における焼戻パラメーター P の増加、すなわち 2 段目焼戻条件が高温長時間側に移行するにつれて、強度はわずかに低下する

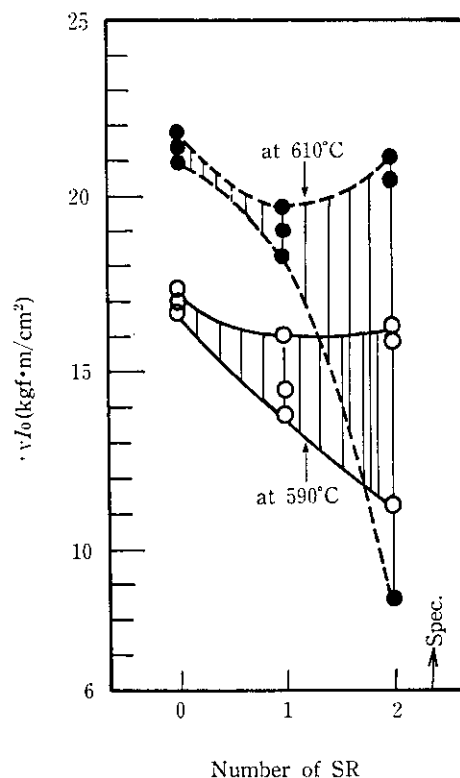


Fig. 10 Variation of Charpy impact value with the repeated number of SR

が、反面延性およびじん性は向上することが認められる。とくに強度低下のわりにはじん性の向上が大きく、NTT 処理によるじん性への効果が著しい。従って、当鋼種ランナ材の焼戻条件設定にあたっては、機械的性質の焼戻条件依存性を十分検討することが重要である。

溶接補修を行った場合には、前述したように補修後 SR が加えられるが、この回数が増えると機械的性質とくにじん性の劣化をまねく。

Fig. 9 は引張特性と SR 回数との関係を示したものである。拡散焼鈍、調質 (NTT) 処理のみの場合が SR 0 回に相当する。また温度は 590 および 610°C の 2 水準で、調質時の焼戻温度も SR 温度と同一温度とした。SR 回数の増加にともなう、強度、延性とも低下する傾向を示し、とくに降伏強さ (0.2% 耐力) の低下が大きい。また、590°C と 610°C の温度の影響を見ると、延性にはあまり影響もないが、強度とくに降伏強さには大きな影響を与え、610°C の方が低い値を示している。

Fig. 10 はじん性と SR 回数との関係を示したものである。SR 回数の増加にともなう、じん性は低下する傾向を示すと共に、そのバラツキも大きくなっている。このようなじん性の挙動は、焼戻および SR 温度を 590°C とした場合にも見られる。しかし、610°C の場合の方がじん性は高いがバラツキも大きい。これは同じ焼戻・SR 条件であっても、じん性の劣化をまねく場合があることを示していると解される。

当鋼種ランナ材のじん性劣化については、岩淵らが優れた研究^{4,11-13)}をしており、それによると、焼戻加熱により析出したオーステナイトの安定性と、オーステナイト粒界への炭化物の析出が原因と述べている。析出オーステナイトが安定であれば、それは残留オーステナイトとして測定されるはずである。そこで、Fig. 10 のデータを、残留オーステナイト量で整理しなおして、Fig. 11 に示す。残留オーステナイト量の増加につれて、じん性は向上する傾向

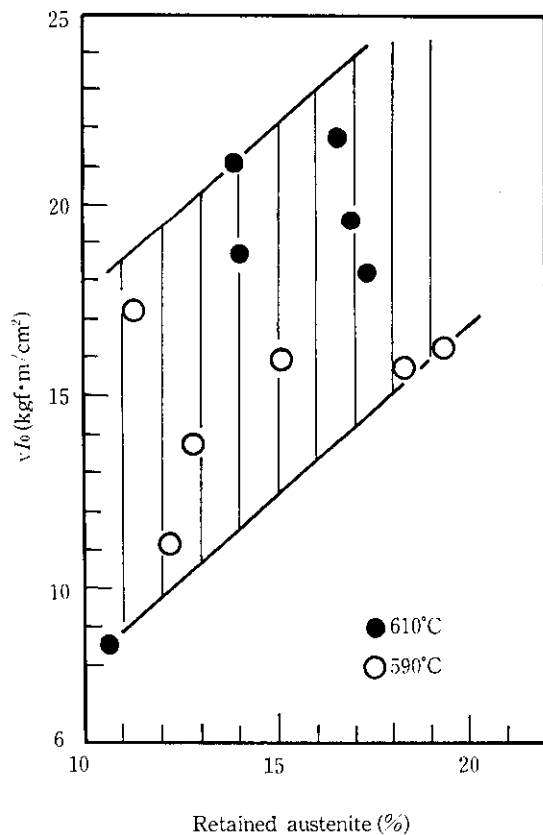


Fig. 11 Relation between the amount of retained austenite and Charpy impact value

を示すが、同一残留オーステナイト量であってもまだじん性に差が見られ、単に残留オーステナイト量だけでは評価できないことも示している。これは、残留オーステナイト量以外に、岩刈らのいう粒界析出炭化物も一因となっているためと考えられる。

以上述べたように、当鋼種ランナ材は、焼戻条件の設定や SR 回数が、機械的性質とくにじん性に大きな影響をおよぼす。とくに、調質処理終了後に SR 回数を増すのは問題であり、従って、補修溶接はできるだけ調質熱処理前に行うのが望ましい。調質後に補修溶接を行う必要がある時は、できるだけ少ない SR 回数となるよう管理することが重要である。

4.2 焼戻加熱過程での変態点の変化

前章で、焼戻条件により当ランナ材の機械的性質は大きく変わり、その原因のひとつは、焼戻加熱過程で析出するオーステナイトの安定性に依存していることを述べた。

Fig. 12 は、当ランナ材の熱膨張曲線の一例を示したものである。温度の上昇にともなう、試料は膨張していくが、612°C 付近から膨張量が変化していくのが認められる。この点が、マルテンサイト相境界にオーステナイトが析出しはじめる¹³⁾ 温度と考えられる。そこで、この温度を A_{c1s} 点とし、 A_{c1s} 点と焼戻および SR 回数との関係を Fig. 13 に示す。 A_{c1s} 点は、焼戻後の焼戻および SR 回数が増加するにつれて、低温側に移行していることがわかる。そして、その程度は 1 回目、2 回目に大きく低下し、3 回、4 回と回を重ねるにつれて小さくなっている。しかし、焼戻および SR 温度の 590 と 610°C の A_{c1s} 点におよぼす影響はほとんどないようである。すなわち、当ランナ材は、調質熱処理時の焼戻回数を増すことによって、その A_{c1s} 点 (オーステナイト析出開始温度)

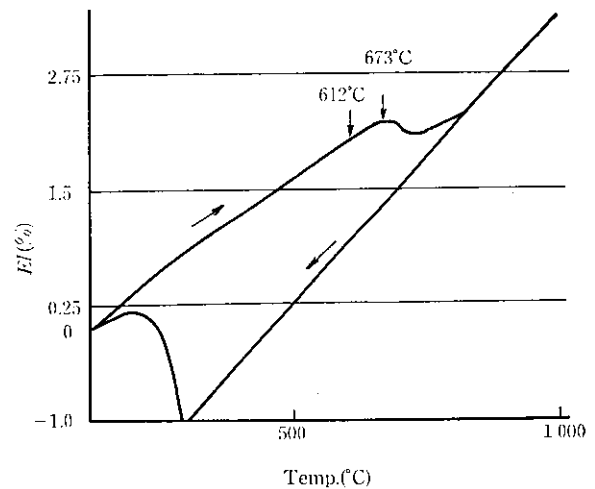


Fig. 12 Thermal expansion curve of 13Cr-3.8Ni cast steel

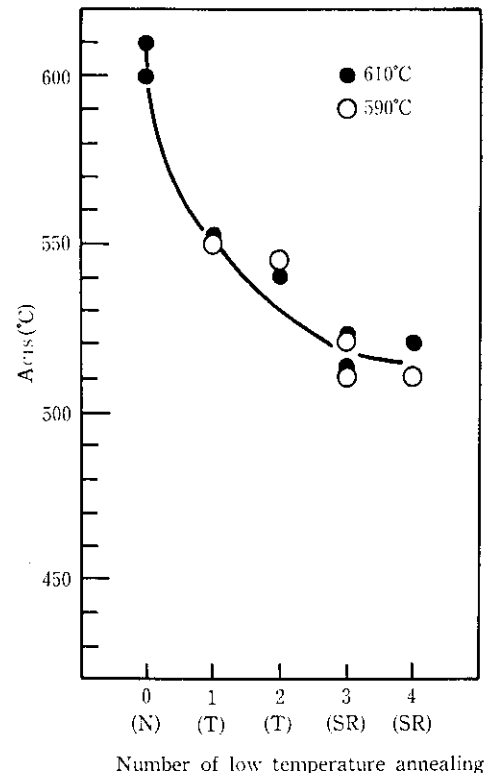


Fig. 13 Variation of re-tempering condition on A_{c1s} temperature

は 510~520°C まで低下しており、その後 SR を 2 回繰り返すことにより、わずかに低下している。このことは、焼戻および SR 回数を増すことにより、オーステナイトはより低い温度から析出することを示しており、その量は、到達加熱温度が高い程多いと考えられる。このオーステナイトが安定なオーステナイトであれば、じん性向上に寄与するためその量が増すほど好ましいが、析出しはじめる温度によってその安定性は異なるようであり¹³⁾、析出オーステナイトすべてが安定なオーステナイトではないことを示している。従って、当鋼種ランナ材の品質設計にあたっては、析出オーステナイトの挙動を十分把握しておくことが必要である。

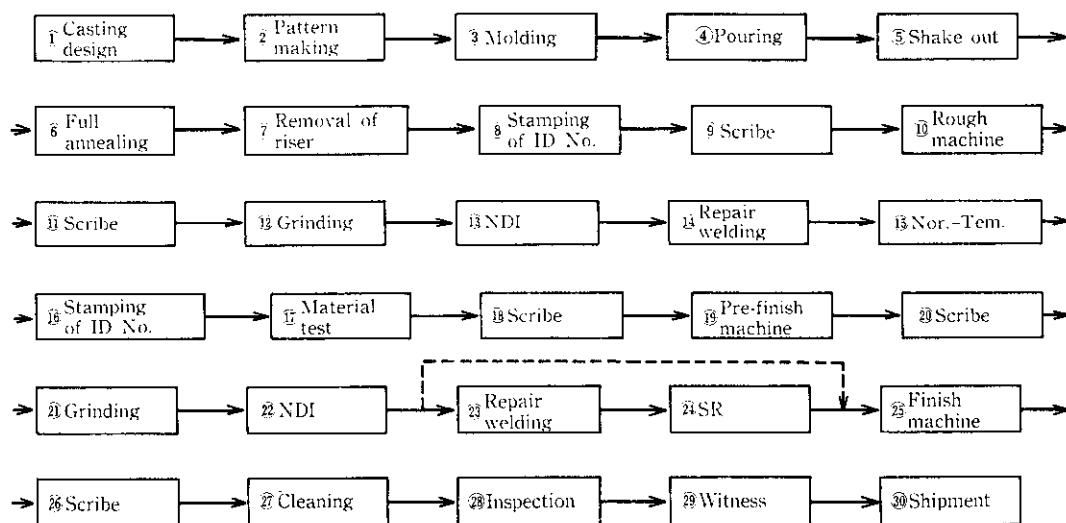


Fig. 14 Manufacturing flow chart of Francis runner

5 製造工程と品質管理

5.1 製造工程

カプラン水車のランナペーンの製造においては、ブレードの面積が大きいので、Photo 2 のように傾斜鑄込を採用した、さらに熱処理時の変形防止策を種々検討したこと以外は、基本的にはフランシスランナと同一製造工程であり、またペルトンランナもほとんど同一工程である。従って以下は、フランシスランナに関して記述する。

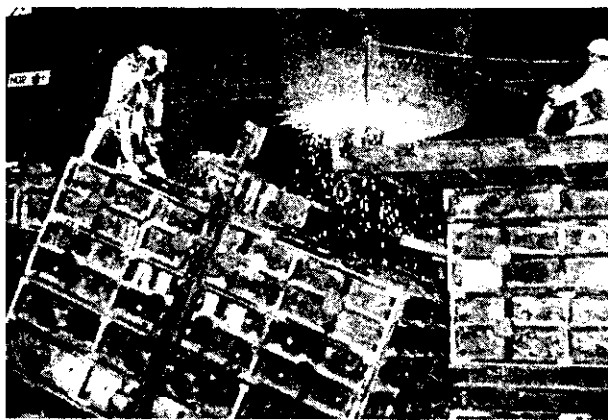


Photo 2 Pouring

Fig. 14 に荒削り仕様の場合の製造工程図を示す。工程数が非常に多いことが一般の鋳鋼品に比べて特徴的な点である。この図で、②③の NDI で無欠陥の場合 ⑤の納入加工に工程が進むことを点線は示している。当社の基本的な考え方は、⑩の NDI で全ての欠陥を発見し ⑭の補修で完全補修することにより、現在のレベルは約半分の件数が ②④の SR を経ないで、⑤の納入加工に工程を進めている。

5.2 重要管理項目

製造工程中での重要管理項目について基本的考え方を述べる。

5.2.1 鑄造方案

当社の鑄造方案の大きな特徴は、独自に開発した 2 次元凝固解析システム BACCAS (Binding application for CAD and computational analysis of solidification) を用いて、鑄造方案を検証し、品質予測を行う点にある。鑄物は一般的に形状が複雑であるため、解析用データの作成に手間がかかり、日常的に凝固シミュレーションを実施できない欠点があった。BACCAS は、入出力に CAD を使用したもので、オペレーターが CAD で鑄物形状を入力し、それに物性値、境界条件等の計算条件を既に登録してあるライブラリーから選択するだけで、凝固解析用データを自動的に作成するシステムである。

本システムの開発により、凝固解析が迅速に行えるので、鑄造方

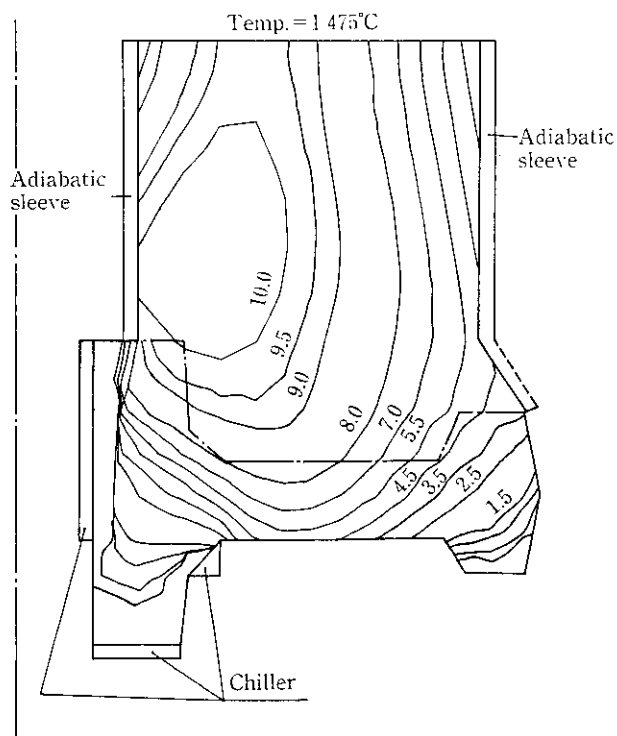


Fig. 15 Computer simulation results of Pelton runner (Figures indicate solidification time)

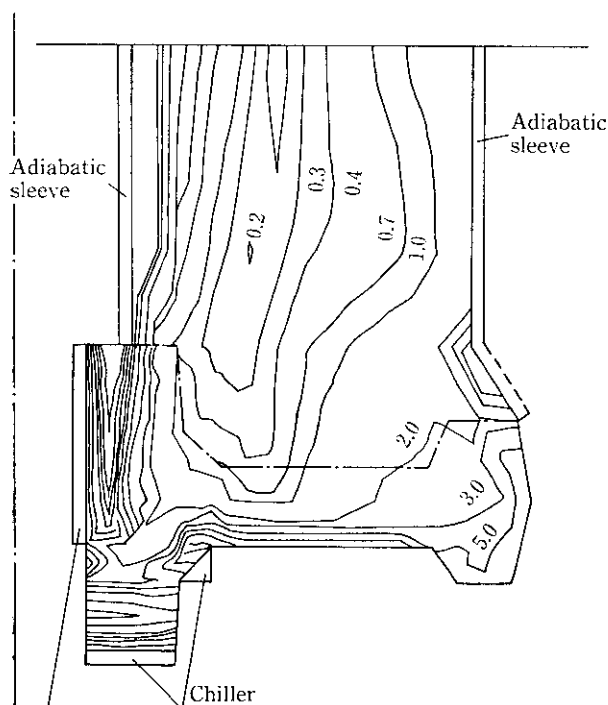


Fig. 16 Computer simulation result of Pelton runner (Figures indicate temperature gradient)

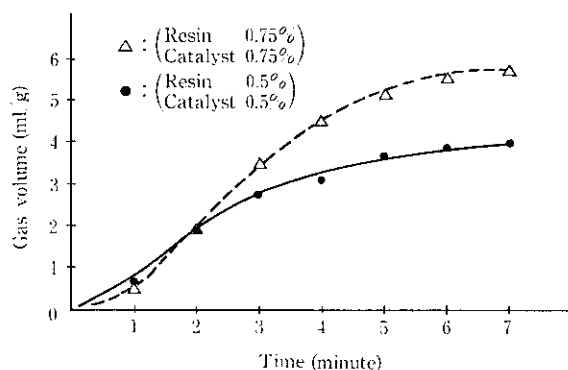


Fig. 17 Time-volume profile of gaseous effluent from phenolic urethan molds

案に日常的に適用できる。

ペルトン水車ランナのディスク部を本システムを用いて、凝固シミュレーションを行った例を Fig. 15, 16 に示す。Fig. 15 は固相率 60% 時の凝固時間であり、Fig. 16 はその時の温度勾配の図を示している。

5.2.2 鋳 型

流水面の基本的な余肉は、熱処理でのスケールオフも含んで、2～3mm にしてあるので、中子砂の選定と乾燥は最も重要なものの一つである。当社では、崩壊性の良いクロマイトフェノールウレタン鋳型を採用しているが、樹脂と硬化剤の配合率により、中子砂のガス発生量に差がある。Fig. 17 は砂（重量）に対する樹脂と硬化剤の添加量を 0.75% ずつと 0.5% ずつにした場合の 1200℃ 雰囲気中でのガス発生量の関係を示す。これから明らかなように、樹脂と硬化剤の添加量を 0.5% ずつにするとガス発生量は約 30% 減少することから、0.5% 配合の砂を採用している。

Fig. 18 はフェノールウレタン鋳型の乾燥温度と残留強度の関係を示す。この結果より、中子の乾燥は 100～150℃ の温度を採用し

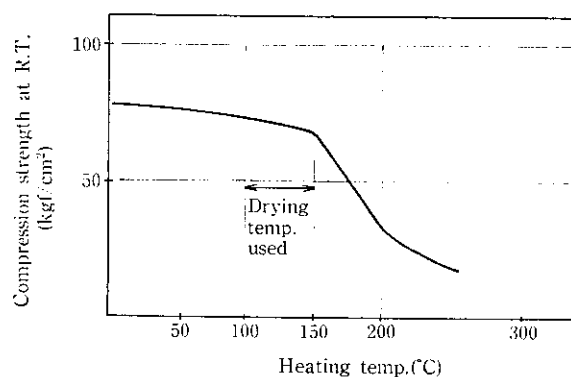


Fig. 18 Variation of retained strength with heating temperature for phenolic urethan molds

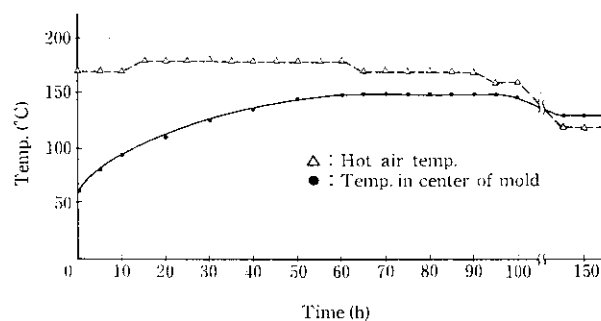


Fig. 19 Time-mold temp. profile of Francis runner core drying after mold assembly

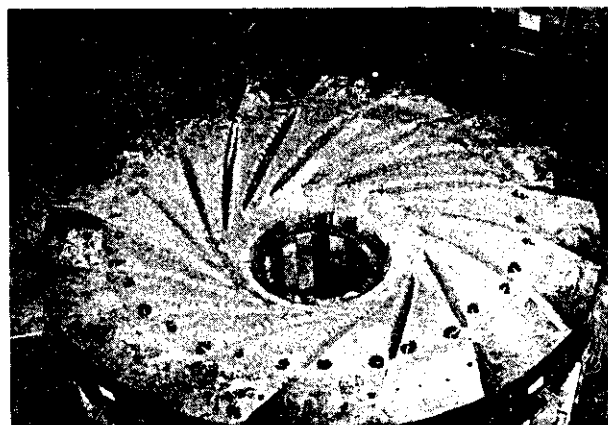


Photo 3 Core assembly of Francis runner

ている。また Fig. 19 は実体の乾燥記録を示す。Fig. 19 で示す通り、電気熱風機で中子にサーモカップルを挿入して、実体測温管理を実施している。

Photo 3 は中子のセットが完了した状態を示す。

5.2.3 注 湯

当社の特徴は、アルゴンシールド注入法である。Fig. 20 にアルゴンシールド注入法の概念図を示す。注入流のアルゴンシールド方法は、取鍋ノズル-湯口間をアルゴンシールドボックス方法による完全盲注入で、鋳込直前よりアルゴンシャワーにより保護するものである。この方式により、注入流の雰囲気は O_2 濃度 1%～0.2% に保持される。また甕内のアルゴンシールド方法は、鋳込直前にアルゴンガスで置換され、完全に密封するものである。

さらに鋳型内のアルゴンシールド方法は事前置換方式であり、鋳込

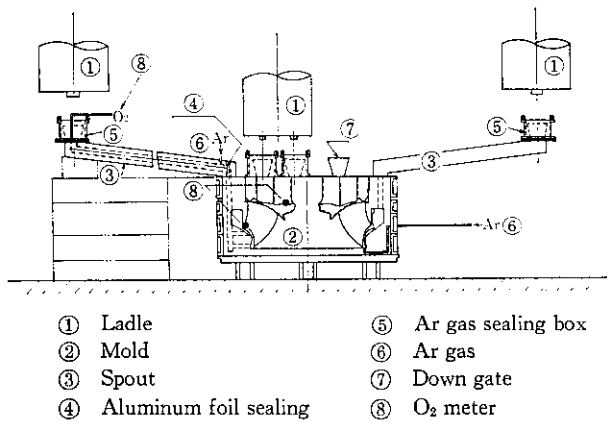


Fig. 20 Non-oxidation atmosphere casting

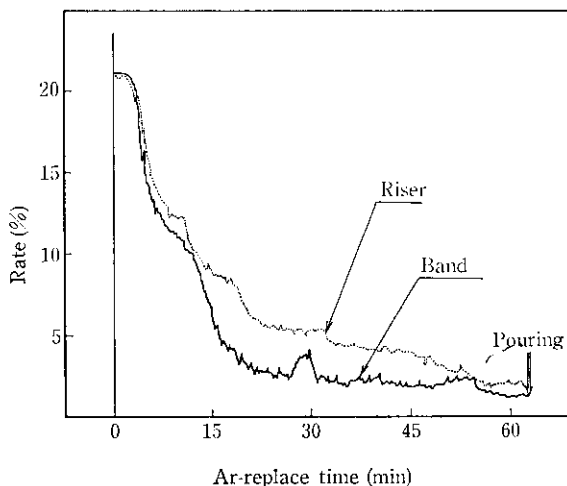


Fig. 21 Time-volume profile of oxygen in mold cavity

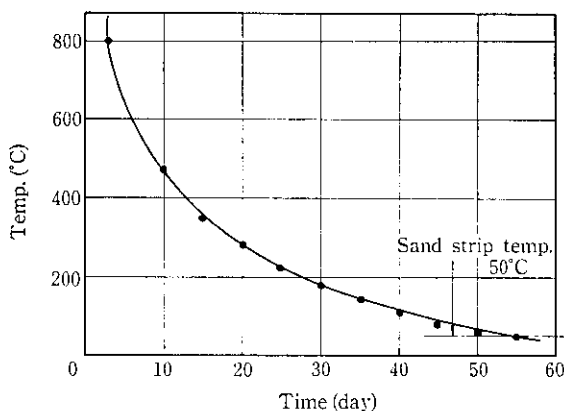


Fig. 22 Cooling curve in mold after pouring for Francis runner at air cooling

と同時にアルゴン注入をストップする方式を採用している。Fig. 21は鋳型内の O₂ 濃度の変化を示し、鋳込時の O₂ 濃度は 2% 以下になっていることがわかる。

5.2.4 型ばらし

13Cr-3.5Ni 鋼はマルテンサイト系ステンレス鋼であり、M_s 点 260°C~270°C、M_f 点 80°C~90°C のため、型ばらし温度の管理は重要である。当社の基準は本体測温方式で、80°C に達した時点で型ばらしを行っているが、自然放置すると徐冷日数が長くなる。

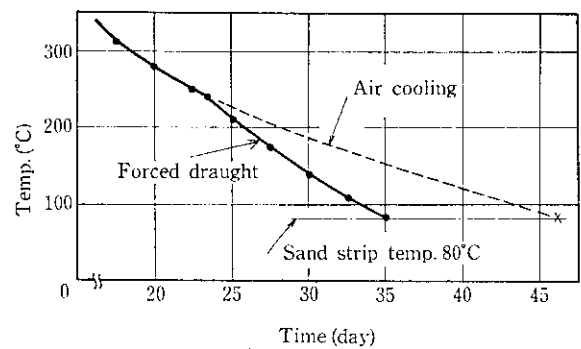


Fig. 23 Cooling curves in mold after pouring for Francis runner at forced draught

Fig. 22 は自然放置の場合の冷却曲線であり、現在は Fig. 23 のように強制冷却方式を採用して徐冷日数の短縮を図っている。

5.2.5 熱処理

13Cr-3.5Ni 鋼は熱処理温度依存性が大きい材料であるので、熱処理は最重要管理項目であり、実体測温制御による熱処理を行っている。

肉薄部としてバンド出口端対角 2 箇所、肉厚部としてクラウン入口側対角 2 箇所およびカップリング面裏 1 箇所の本体測温により設定温度 ±20°C 以内に管理している。特に焼戻し温度は重要であるので、再循環方式の焼戻し炉を使用して ±15°C を目標に管理を行っている。

5.2.6 溶接補修

溶接前の全体予熱、溶接中の保熱、層間温度、溶接電流、電圧、溶接速度、溶接棒、溶接者等を規定したモニター方式による溶接作業管理を厳重に行うことにより溶接欠陥の排除を行っている。

さらに、溶接後直ちに、溶着金属中の水素拡散のため保温、徐冷を実施し、また水素に起因する遅れ割れの潜伏期間を放置することにより、溶接欠陥を次工程に持ち越さないよう管理している。

5.3 製造実績

当社の水車ランナの製造実績は豊富であり、Photo 4~6 は、それぞれ当社で製造した 13Cr-3.5Ni 鋼のフランシス水車ランナ、カプラン水車ランナおよびペルトン水車ランナである。

さらに、Fig. 24 は水車本体付試験片による材料試験の実績値であり、これらの値は Table 2 の規格値を十分満足していることを示している。

また、Table 3 に、各タイプにおける当社の製造可能重量と寸法を示す。

Table 3 Maximum weight and size

Products	Maximum weight (t)	Maximum size (mm)
Francis runner	25	3 500 φ
Kaplan runner blade	25	4 000 × 4 000
Pelton runner	25	3 500 φ

6 結 言

13Cr-3.5Ni ステンレス鋼製水車ランナの製造と品質に関して述

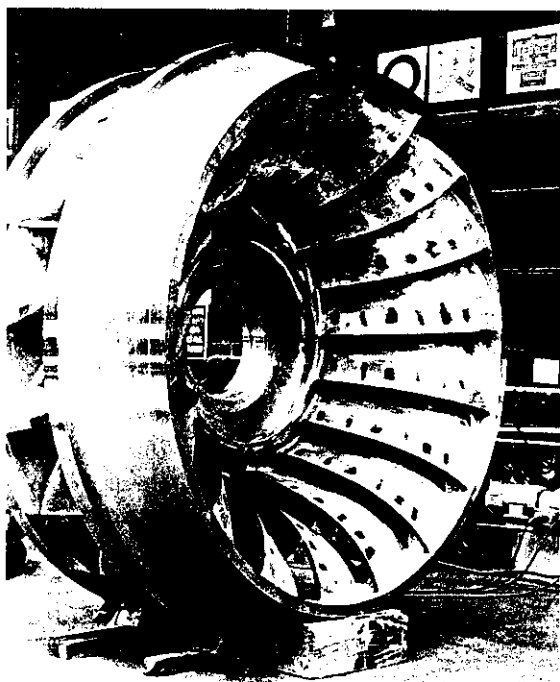


Photo 4 Francis runner

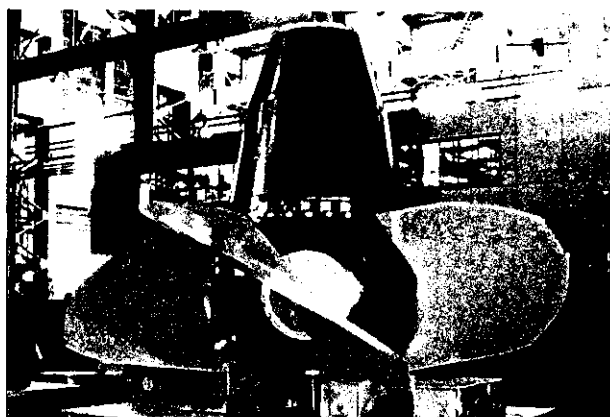


Photo 5 Kaplan runner

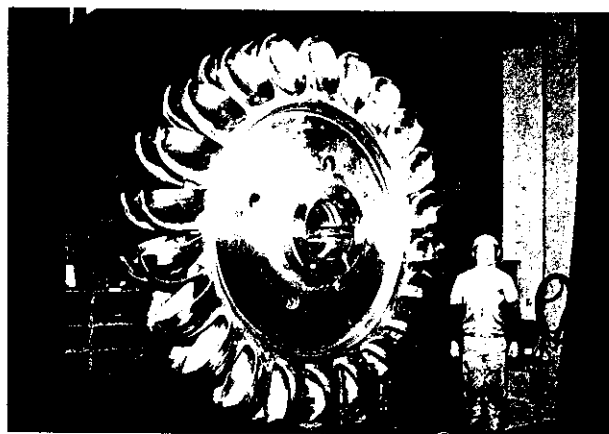


Photo 6 Pelton runner

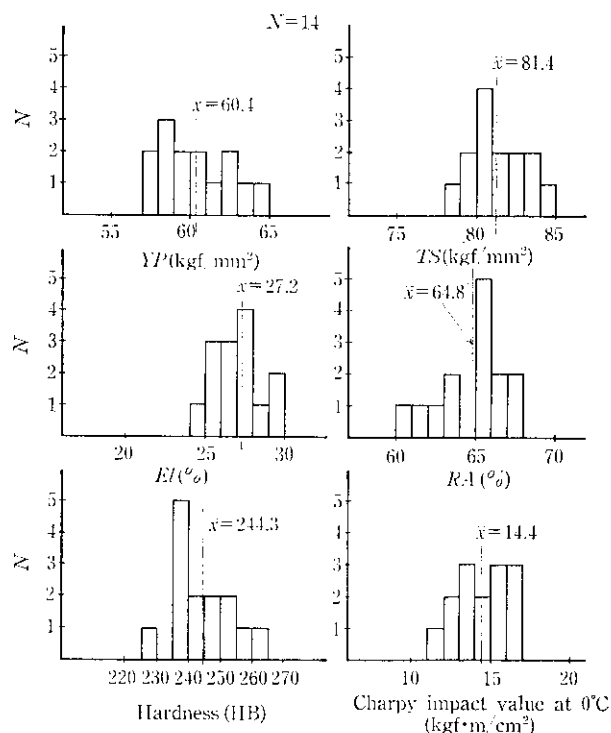


Fig. 24 Histograms of results from material testing of 13Cr-3.5 Ni runner

べた。当社ではフランシス型、カプラン型およびペルトン型と全ての型式のランナの製造技術確立し、すでに多数の納入実績をもっている。さらに最近当社独自の開発による凝固シミュレーションを

用いた鋳造方案 (BACCAS) を実用化し、高品質の鋳造品を製造している。

参考文献

- 1) 池野雅雄, 館野三備, 辻本信行: 神戸製鋼技報, 26 (1976) 3, 43
- 2) 岩淵義孝: 鉄と鋼, 70 (1984) 1, 120
- 3) 日本学術振興会製鋼第19委員会編: 鉄鋼と合金元素(上), 535 [誠文堂新光社]
- 4) 岩淵義孝, 竹之内朋夫: 鉄と鋼, 69 (1983) 11, 1502
- 5) 池野雅雄, 久保田正己, 牧岡 稔: 神戸製鋼技報, 16 (1966) 3, 191
- 6) 長谷川正義監修: ステンレス鋼便覧, 39~40 [日刊工業新聞社]
- 7) R. L. Rickett, W. F. White, C. S. Walton, and J. C. Butler: Tr. ASM, 44 (1952), 138
- 8) 出原正己, 荒井 信: 鋳物, 55 (1983) 9, 565
- 9) 徳田 昭, 熊田有宏, 中川嘉一: 日本製鋼所技報, No. 27 (1970), 3142
- 10) 日本金属学会・日本鉄門協会編: 鉄鋼材料便覧, 1099 [丸善株式会社]
- 11) 岩淵義孝: 鋳物, 55 (1983) 11, 683
- 12) 岩淵義孝: 鉄と鋼, 70 (1984) 7, 701
- 13) 岩淵義孝: 鉄と鋼, 70 (1984) 10, 1437