

# 大型用 SCS24 鋼の強度・靱性の改良

伊東 眸\*・久保 健一\*<sup>2</sup>

Improvement of Toughness and Strength on Large Scaled SCS24 Stainless Cast Steel

Hitomi ITOH and Kenichi KUBO

**Synopsis** : In order to prepare a water turbine runner for ultra high head, SCS24 was selected as a cast steel superior to SCS6, due to its more-than-adequate strength, and problems relating to the use of this material for large sizes were identified and the steel was modified to optimize its strength and toughness. The results were as follows.

(1) As the target chemical composition of the cast steel was similar to that of the SUS630 forged steel that is normally used, it was found that the toughness of large SCS24 cast steel was very poor. It could be improved by adding approximately 2% Co in order to raise the Ms point.

(2) It was found that the target values could be generally satisfied with cast steel for remelting in a 1-ton mold, and so an actual water turbine runner was manufactured. The runner had no casting defects, and structurally it was almost uniform from outside to inside. It had a uniform martensitic structure with small quantities of  $\delta$  ferrite. The mechanical properties were slightly lower in the thickness transition area, but the target value for toughness was satisfied. Regarding the  $10^7$  cycle time strength in tap water at room temperature, the modified material had roughly 1.3 times higher the fatigue strength in tap water than SCS6.

(3) Weld repairs for this material were conducted using Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), and both the tensile properties of the deposit metals and toughness of weld joints were satisfactory. Furthermore, the microstructure of the welded boundary was uniform.

(4) The above results confirm that the modified SCS24 is a suitable stainless cast steel for a water turbine runner that combined both high strength and high toughness.

**Key words**: SCS24; SCS6; water turbine; toughness; Co;  $\delta$  ferrite; Ms point.

## 1. 緒言

大型水車用のランナ材として耐キャビテーション性から 12Cr 系のステンレス鋳鋼が使用され、岩淵らの一連の化学成分、熱処理、靱性や溶接性などの検討<sup>1-6)</sup>を通じこれまでに 12Cr4NiMo 鋼の SCS6 の製造法は確立されてきた。ところが今後開発が指向される水車はさらに落差が大きくなる傾向にあり、強度的な実力が 0.2% 耐力 600 MPa 級での SCS6 では強度不足になることが見込まれている。

水車のランナ材として要求される性質は、高強度であること、高靱性であること、キャビテーションに耐性があること、さらに水環境で使用されることから耐遅れ割れ性を有していること、また製造上から溶接補修性の良いことが挙げられる。このうち、耐キャビテーション性からは Cr 量が 12% 以上必要であること、耐遅れ割れ性からは 32HRC 以下すなわち引張強さ 1000 MPa 以下というのが、これまでのランナ材での常識的な材料指針となっており、これらを満足しながら材料選定がなされてきた。

今回、さらに高落差の水車ランナを準備するにあたり SCS6 を凌駕する鋳鋼として強度的に余裕のある SCS24 を

選定し、大型化に伴う課題の抽出と検討を行い、改良を図った。

## 2. 目標性質と予備試作

鋳造する鋼塊重量は金属組織、強度、靱性などに影響を及ぼすため、重要な指標となる。今後の水車としては出力変動に対応することが比較的容易なデリア型のランナを念頭に置いた。このランナとしては今回の製品重量は 2 トンから 4 トン程度と推定されるため、このクラスの鋳鋼の試作と大型化に伴う課題の抽出を行った。

### 2.1 目標性質と材料選定

改善の目標値としては SCS6 を 0.2% 耐力で実質 100 MPa 上回る強度レベル 700 MPa 以上を狙い、次のとおりとした。なお、目標値はデリア型ランナを念頭に置くため、取り付け部の軸にあたる約 500 mm 径の部分の D/4、H/4 部 (D: 直径, H: 高さ) の値とした。

0.2% 耐力 700 MPa 以上

引張強さ 1000 MPa 以下

273K 靱性値 40 J/cm<sup>2</sup> 以上 (理想値は 60 J/cm<sup>2</sup> 以上)

平成 14 年 2 月 28 日受付 平成 14 年 5 月 2 日受理 (Received on Feb. 28, 2002; Accepted on May 2, 2002)

\* 三菱重工業 (株) 高砂研究所 (Takasago R&D Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 2-1-1 Shinhamma Arai-cho Takasago 676-8686)

\*<sup>2</sup> 三菱重工業 (株) 神戸造船所 (Kobe Shipyard & Machinery Works, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

この性質を満足させる鑄造合金の候補は日本工業規格 (JIS) の鑄造合金の中でSCS24しか見当たらない。しかしながら、本合金は調査した限りでは小型のものに適用した例しか見当たらず、数トンに及ぶ部材に使用されてはしないと判断された。さらに大型で靱性を重視するため、通常の熱処理（固溶化処理後、1段時効）では目標の靱性値を満足しないことが予想され、低温で使用される部品の熱処理である2段時効が必要と考えた。2段目の時効温度については鍛鋼品 (SUS630) の経験から決めることにした。大型のSCS24鑄鋼を溶製するにあたり、鍛鋼の実績から化学成分を推定して予備試作を行い、必要な改善を図ることにした。

2.2 予備試作

予備試作として、1 ton 高周波誘導溶解炉で Table 1 に示す化学成分の鋼塊を溶製し、径500 mm×高さ500 mmの有機自硬性鑄型に鑄込んだ。その後、1313K×4 h/強制空冷の固溶化処理、1033K×4 h/強制空冷および858K×4 h/強制空冷での2段時効処理を施した。

試作材からの試験片採取位置および機械的性質を Fig. 1 に示すが、強度的には目標を十分満足できるものの、靱性が十分ではないことが明らかとなった。273Kでのシャルピー衝撃試験片断面のマイクロ組織を Fig. 2 に示すが、鍛造品では少ないδフェライトが多く見られ、かつそのδフェライトに沿って割れが進行していることが認められた。

そこで熱力学計算ソフトウェア Thermo-Calcにより状態図上でδフェライト量を極小化するように成分の最適化を

図った。Fig. 3 に計算状態図の一例を示したが、オーステナイト形成元素の添加量を増加し、フェライト形成元素の添加量を減少させることでδフェライト量が少なくなる結果が得られた。すなわち、0.03C-0.5Si-0.5Mn-15.5Cr-3.5Ni-3Cu-0.25Nbを基本成分として、オーステナイト形成元素としてC, NiおよびCu量、フェライト形成元素としてCr量の検討を加えた。この結果、Cについてはわずかな変化であるが添加量が少なくなるほどδフェライトは多くなるので、C量を低下させることは好ましくない。Niについては5%の添加でδフェライトはごくわずかになるが、基本成分では430K程度にあるMs点をさらに下げるので、3.5%程度が適切なものと考えた。Cuについては少ないほどδフェライトは多くなるが、靱性向上のためにはむしろ析出強化元素のCuを低減させる方が好ましいと考えられた。Crについてはフェライトを安定化させるだけであるから、できるだけ少ない量としてそのまま15.5%とした。

本鋼のマルテンサイト変態開始温度 (Ms点) が室温に近いことから、δフェライトの抑制を目的としたオーステナイト形成元素の添加はこのMs点を低下させ、未変態の

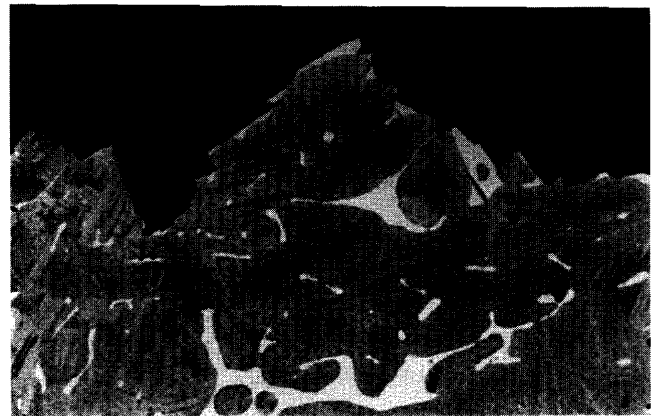
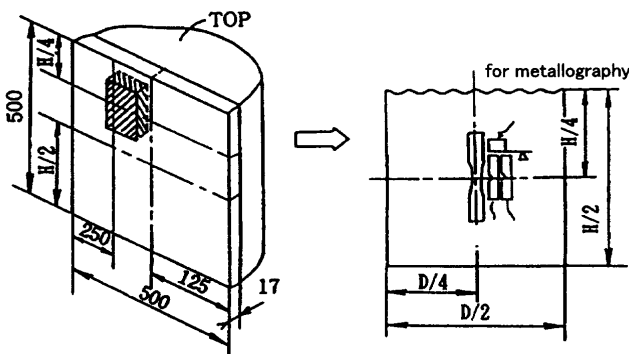


Fig. 2. Metallography of sectioned charpy impact specimen after test.

Table 1. Chemical composition of a trial casting steel. (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Co	Nb
0.035	0.55	0.40	0.010	0.006	4.48	15.6	2.64	-	0.25



0.2% offset strength 812MPa  
 Tensile strength 918MPa  
 Elongation 9.3 %  
 vEo 16 J/cm<sup>2</sup>

Fig. 1. Mechanical properties of a trial casting.

15.5Cr-3.5Ni-3Cu-0.25Nb-0.03C-0.5Si-1Mn

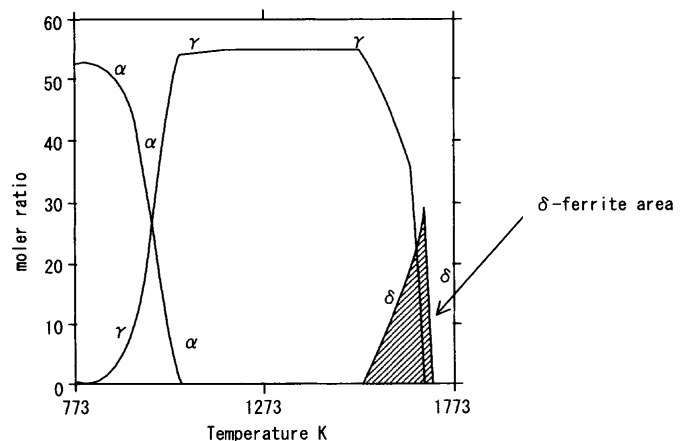


Fig. 3. Representative calculated alloy phase diagram by Thermo-calc.

Table 2. Chemical compositions of 25 kg casting steels.

Test charge	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Nb	Co	Heat treatment
1	0.023	0.43	0.85	0.003	0.005	5.20	15.4	2.30	0.23	-	1313K×10h/AC, 1033K×10h/AC, 858K×20h/AC
2	0.025	0.45	0.50	0.004	0.005	4.73	15.7	2.30	0.23	2.07	
3	0.027	0.44	0.53	0.005	0.005	4.92	16.2	2.54	0.24	4.09	
4	0.030	0.50	0.55	0.006	0.005	5.06	16.7	2.59	0.25	6.10	

Table 3. Mechanical properties of 25 kg casting steels.

Test charge	Co mass %	0.2% offset strength MPa	Tensile strength MPa	Elongation %	vEo J/cm <sup>2</sup>
1	0	643	827	26.3	100
2	2.07	669	842	23.4	119
3	4.09	673	853	23.4	116
4	6.10	656	865	26.0	112
Aim	—	≥700	≤1000	—	≥40

オーステナイトの残留による韌性低下が予想された。そこで、オーステナイトを安定化させ、かつMs点を向上させることを考えた。Ms点向上元素としては、Al, Co, Nb, Zr, Taが挙げられる。Alは大気溶解において脱酸材として使用されるが、強力なフェライト形成元素であることおよび歩留まりが悪いことから除外した。Nb, Zr, TaはCあるいはNと結合して炭化物あるいは窒化物を形成し、Ms点を向上させるが析出硬化の作用で韌性が低下すると予想されるため除外した。一方、Coはオーステナイト形成元素でありながら、Ms点を向上させるほとんど唯一の合金添加元素である<sup>7)</sup>。そこでCoの添加の影響を検討するために、小型鋳塊によりその添加効果を確認した。

### 3. 供試材および試験方法

予備試験での化学成分に対して、Coの効果を確認するため0から6mass%のCoを添加した25kgの鋳塊を高周波誘導溶解炉により溶製し、JIS G 0307-1998 図1(a)の供試材が得られる砂鋳型に鋳込んだ。化学成分および熱処理をTable 2に示す。この供試材から、引張および衝撃試験片を採取した。引張は室温で、衝撃は273Kで試験をした。

### 4. 試験結果

試験結果をまとめてTable 3に示す。2段目の時効時間が長時間であった影響で、すべての供試材で強度は目標を満足していなかった。一方、衝撃値はCo添加により改善し、約2%で最も高くなる傾向が認められた。ただし、それ以上の添加は韌性向上の効果を期待できないことが明らかとなった。

マイクロ組織としてはFig. 4に示すように、Coを2%添加しても無添加のものとは比べてその差はなく、 $\delta$ フェライト



Co: 2%



Co free

0.1mm

Fig. 4. Microstructure of 25 kg casting steels with and without Co.

はほとんど残留していない。これは質量が小さな供試材であることによるものと考えられる。

従って、大型鋼塊にするためにはCoを約2%添加するとともに、熱処理時間を短くする、又は温度を下げることで目標を達成できると考えられた。

### 5. 考察

#### 5.1 Ms点を上昇させる効果について

韌性向上のために今回Coを約2%添加したが、この理由は $\delta$ フェライト抑制およびMs点の上昇を狙ったものである。SCS24自体はマルテンサイト変態をいったん起こさせ、その後の時効により逆変態のオーステナイトを析出させることにより韌性を向上させている。SCS24のオーステナイトは2つに区分される。1つは溶体化後に残留したオーステナイトでこれは含有するNi量が少なく、韌性の向上に寄与しない。他方、いったんマルテンサイトに変態させ、その後に逆変態させたオーステナイトにはNiが多く含有

されており、これが靱性を向上させると考えられている<sup>8)</sup>。すなわち、溶体化処理後にマルテンサイト変態を促進させることが逆変態オーステナイトを増加させ、靱性向上に寄与するものと判断された。

Ms点については多くの研究者が検討しており<sup>9,10)</sup>、例えばFinklerとSchirra<sup>10)</sup>は8~14 mass%Crを含有する鋼の検討結果から、Ms点を下記式で表示している。

$$Ms(^{\circ}C) = 635 - 474[\%C + 0.86(\%N - 0.15(\%Nb + \%Zr)) - 0.066(\%Ta + \%Hf)] - (17\%Cr + 33\%Mn + 21\%Mo + 17\%Ni + 39\%V + 11\%W) \dots\dots\dots(1)$$

この(1)式の精度は良くないという中川、宮崎<sup>9)</sup>の指摘はあるが、本式の元素の効果からわかるように、Ms点を上昇させる元素は炭化物や窒化物を強力に形成するNb, Ta, ZrおよびHfだけであり、式中に示されるその他の金属元素は6元素ともMs点を下げる効果となっている。

また、別のMs点の予測式<sup>7)</sup>は以下で示されている。

$$Ms(K) = 823 - 361(\%C) - 39(\%Mn) - 35(\%V) - 20(\%Cr) - 17(\%Ni) - 10(\%Cu) - 5(\%Mo + \%W) + 15(\%Co) + 30(\%Al) \dots\dots\dots(2)$$

(1)式では示されていないものの、(2)式ではMs点を上げる元素としてCoとAlがあるが、後者は強力な脱酸材であるとともにフェライト形成元素であるため、Ms点を上昇させる有効な添加元素として残るのは実用上Coだけに限られる結果となる。

5.2 1 ton 溶解材での材質確認

予備検討で行った1 ton溶解材と同一の鑄型を準備して、改良成分材で靱性向上が確保できているか確認した。溶解した成分をTable 4に示す。

熱処理は溶体化 1313K×10h/強制空冷、1段時効 1033K×10h/強制空冷および2段時効 858K×10h/空冷である。得られた試験結果をTable 5に示す。目標強度は満足し、靱性も平均で見れば目標値を満足する結果になっている。

靱性値が小型供試材の時よりも著しく低下した理由は大型鋼塊になったため、結晶粒度が大きくなったこと、さらにはδフェライトが幾分多くなったことが考えられる。前者については鑄込み後の冷却速度をチルなどの使用により大きくすることで微細化を促進することは考えられるが、砂鑄型への鑄造であることから大きな効果はないものと推定される。後者については初晶の析出・成長に依存することすなわち冷却過程での速度が遅くなるため結晶粒が大きく成長してδフェライトが残りやすいことに関連しており、これ以上の大きな改善効果は難しいと判断した。

5.3 実ランナ形状での溶解材の材質確認

上記1ton溶解材で概ね目標値を満足できると考えたため、実ランナ形状(実重量約2.5ton)の溶製をした。化学成分をTable 6に示す。出来上がったランナの形状をFig. 5

Table 4. Chemical composition of 1ton casting steel.

(mass%)									
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Nb	Co
0.036	0.68	0.52	0.011	0.003	4.72	15.7	2.29	0.24	2.22

Table 5. Mechanical properties of 1ton casting steel.

Tested material	0.2% offset strength MPa	Tensile strength MPa	Elongation %	vEo J/cm <sup>2</sup>
D/4,T/4	745	875	11.1	39
	739	874	15.7	52
Y-block	776	894	22.0	106
				118
Aim	≥700	≤1000	-	≥40

Table 6. Chemical composition of cast runner.

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Co	Nb
0.03	0.53	0.57	0.030	0.007	4.6	15.8	2.1	2.15	0.36

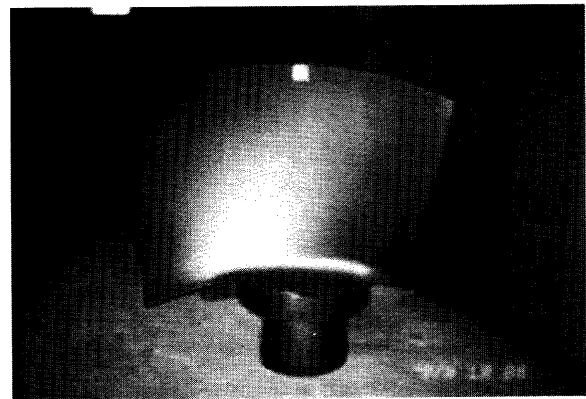


Fig. 5. An appearance of a cast runner after heat treatment.

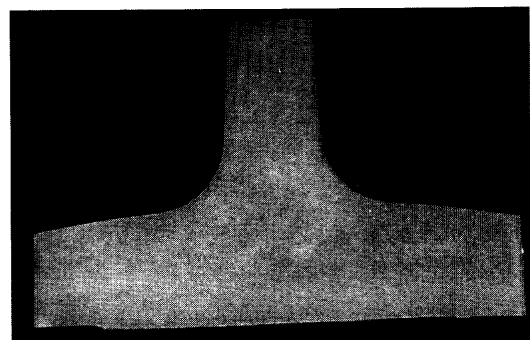
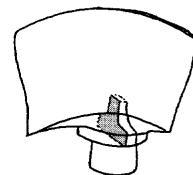


Fig. 6. Macrostructure of a cast runner.

に示す。ランナは特に有害な鑄造欠陥もなく、均一な鑄肌をしている。このランナの熱処理は上記の1 ton溶解材と同一である。ランナの肉厚変化部で切断し、マクロ組織を観察した結果をFig. 6に示す。異常のない均質な組織と

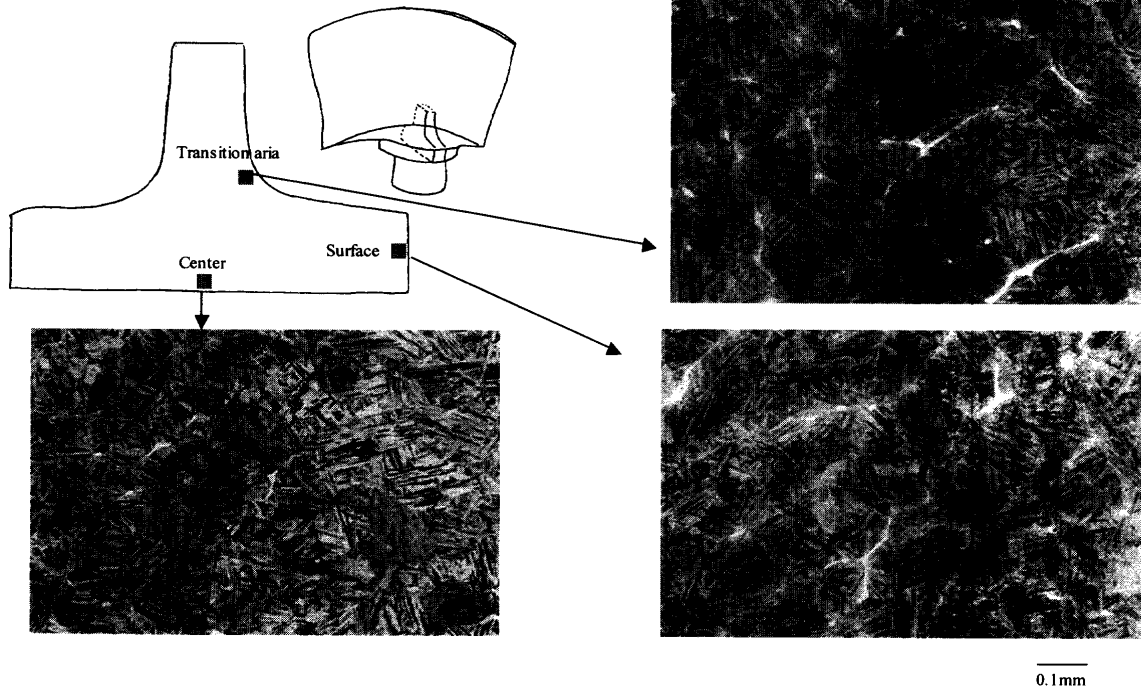


Fig. 7. Microstructures at different positions in a cast runner.

Table 7. Mechanical properties of cast runner.

Tested site	0.2% offset strength MPa	Tensile strength MPa	Elongation %	vEo J/cm <sup>2</sup>
Surface	798	908	19.6	52
	806	914	20.7	55
Center	813	918	15.0	44
	806	914	14.6	52
Transition area	813	905	7.1	42
	813	905	13.6	40
Y-block	775	888	21.1	48
Aim	≥ 700	≤ 1000	—	≥ 40

Table 8. Tensile properties of deposit metal.

0.2% offset strength	MPa	771(Aim ≥ 700)
Tensile strength	MPa	901(Aim ≤ 1000)
Elongation	%	21.4

Table 9. Impact properties of welded joint.

Notch site	vEo J/cm <sup>2</sup>		
Deposit	80,	70,	123
Bond	90,	100,	94
HAZ	90,	80,	70
Base Metal	78,	81,	84

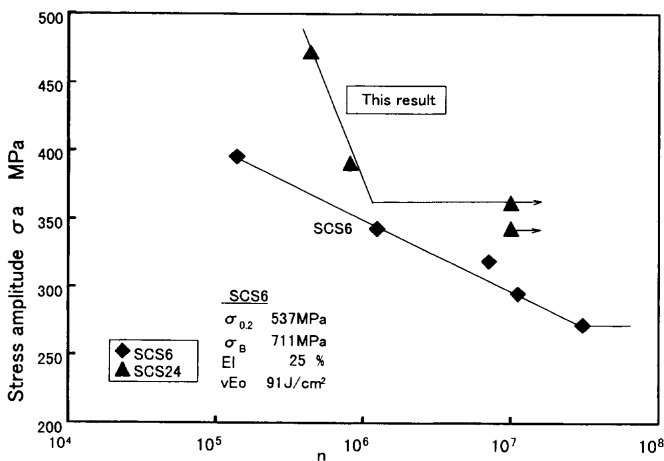
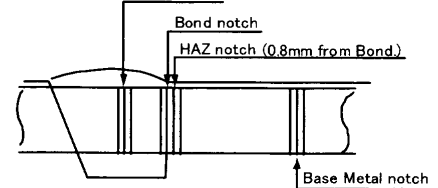


Fig. 8. Fatigue strength of this cast steel in tap water compared with that of SCS6.

なっている。Fig. 7に示すようにマイクロ組織的には若干のδフェライトが認められるが、概ね均一のマルテンサイト組織となっている。機械的性質としてはTable 7に示すよ



うに肉厚変化部で少し低くなるが、目標値を満足した靱性値を示している。さらに、室温での水道水中の疲労試験結果をSCS6の結果とともにFig. 8に示すが、10<sup>7</sup>サイクル時間強度で見た場合、本改良材はSCS6に比べ約1.3倍の水道水中疲労強度を示した。したがって、本材料は実ランナの材質から見た場合でも十分な強度・靱性を持つ材料となっている。

#### 5.4 溶接補修性の確認

本ランナは casting 工程における溶接補修をTIG溶接で行うが、溶接金属の引張試験結果をTable 8に、溶接継手の衝撃性質をTable 9に示すが、いずれも良好な性質を確保している。また、溶接境界のマイクロ組織はFig. 9に示すよう

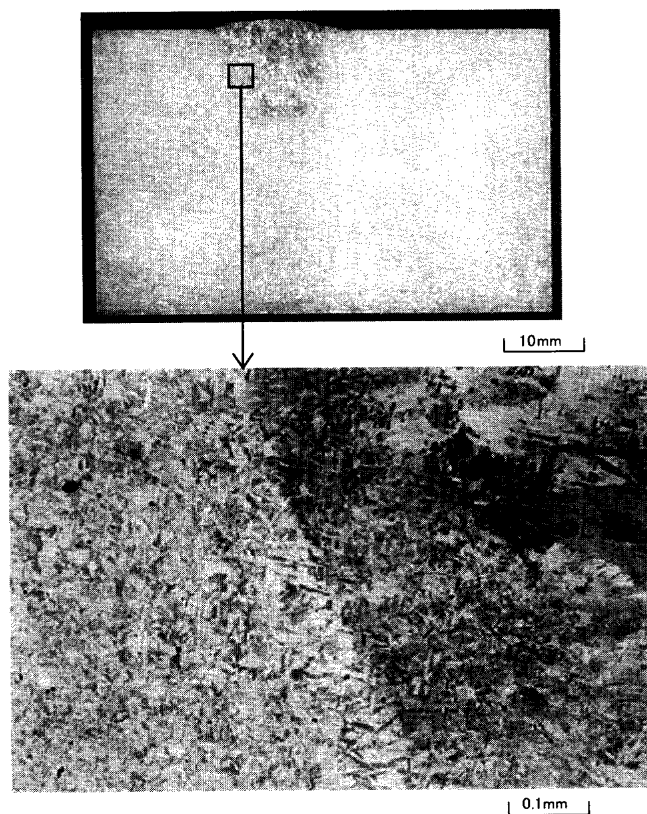


Fig. 9. Macro and microstructure at welded joint.

に均一の組織を呈している。

以上より溶接部についても、正常な性質を有しており本材料が高強度・高靱性を併せ持つステンレス鋳鋼であることが確認された。

## 6. まとめ

高落差の水車ランナを準備する目的でSCS6を凌駕する鋳鋼として強度的に余裕のあるSCS24を選定し、大型化に伴う課題を抽出し検討を加え、改良を図った。得られた結果は以下のとおりである。

(1) 鍛鋼品 (SUS630) そのものの化学成分を目標値として鋳造した場合、強度は満足するが靱性が満足しない。

靱性を向上させるためMs点を上げるCoを約2%添加することにより、大型SCS24鋳鋼を高靱性化することが可能となった。

(2) 1 ton溶解材で概ね目標値を満足できる結果が得られたため、実ランナ形状 (実重量約2.5 ton) の溶製をした。ランナは内外部ともに健全な品質であった。マイクロ組織において若干の $\delta$ フェライトが認められるが、概ね均一のマルテンサイト組織となっている。機械的性質は肉厚変化部で少し低くなるが、目標値を満足した靱性値を示した。また、室温での水道水中の $10^7$ サイクル時間強度で見た場合、本改良材はSCS6に比べ約1.3倍の水道水中疲労強度であった。

(3) 本鋳造材の溶接補修はTIG溶接で行うが、溶接金属の引張性質・溶接継手の衝撃性質はいずれも良好であった。また、溶接境界のマイクロ組織は均一の組織を呈している。

以上より溶接部についても、正常な性質を有しており本SCS24改良鋼は高強度・高靱性を併せ持つステンレス鋳鋼であることが確認された。

Thermo-Calcでの計算に際しては、住友金属工業 (株) 総合技術研究所の五十嵐正晃主任研究員のお手をわずらわせました。ここに記して謝意を表します。

## 文 献

- 1) Y.Iwabuchi and T.Takenouchi: *Tetsu-to-Hagané*, **69** (1983), 1502.
- 2) Y.Iwabuchi: *Tetsu-to-Hagané*, **70** (1984), 120.
- 3) Y.Iwabuchi: *Tetsu-to-Hagané*, **70** (1984), 701.
- 4) Y.Iwabuchi: *Tetsu-to-Hagané*, **70** (1984), 1437.
- 5) Y.Iwabuchi, K.Azekoshi, T.Takenouchi and T.Miyamoto: *Tetsu-to-Hagané*, **71** (1985), 1163.
- 6) Y.Iwabuchi, K.Azekoshi and T.Hatano: *Tetsu-to-Hagané*, **74** (1988), 1846.
- 7) 改訂5版金属便覧, 日本金属学会編, 丸善, 東京, (1990), 539.
- 8) H.Nakagawa, H.Yokota and T.Miyazaki: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 1444.
- 9) G.H.Eichelman, Jr. and F.C.Hull: *Trans. Am. Soc. Met.*, **45** (1953), 77.
- 10) H.Finkler and M.Schirra: *Steel Res.*, **67** (1996), 328.
- 11) H.Nakagawa and T.Miyazaki: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 249.