

含Ni 13%クロム鑄鋼の諸特性

Properties of Nickel Containing Cast 13%Chromium Steels

伏見 次男* 大島 俊彦*
Tsugio Fushimi Toshihiko Ōshima

要 旨

13%Cr鋼にNiを添加した場合の、熱処理特性、機械的性質、物理的性質、溶接性の変化についての文献報告と筆者らの経験を対比した。また5～6%Niを含むスウェーデン、ボフォース社の特許鋼2RM2による大形ポンプ水車ランナの製造について述べた。

1. 緒 言

水車ランナ用材料としての13%Cr鑄鋼の重要性は、いまさら強調する必要がないほどである。それゆえこの鋼種は、国内、外を問わず、常に改良の対象となってきた。

従来、本鋼種の改良研究における第一の目的は靱性(じんせい)、つまり衝撃値の改善にあった。しかし従来の研究⁽¹⁾⁽²⁾は、たとえばASTM, AISI規格(Type 410)の化学成分を出るものではなく、その規格範囲内で最適の目標化学成分を決定するということがであったため、それなりに重要な成果はあったが、飛躍的な改善には至らなかった。

一方、これらの研究とは別に、比較的大量のNiを13%Cr鋼に添加して諸性質を改善しようとする試み⁽³⁾⁽⁴⁾があった。

現在の高強度、高靱性13%鋼は後者の研究結果、つまり、比較的多量のNiを含む鋼種で実現されており、従来からの鋼種である410形鋼の限界も明らかにされつつある。

また13%Cr鋼の改良研究の第二の目的は溶接性の改善に関するものであるが、これも結果的には後者の研究⁽⁴⁾が成功して、比較的多量のNiは13%Cr鋼の溶接性を大いに改善することが確認されるに至っている。410形鋼の溶接施行法はよく研究されているが、材料それ自身の溶接性の改善は、強靱鋼としての性質をそこなわずに実現されたものとしてはNiを比較的多量に含むもののみがある現状である。

以下、本報では13%Cr鑄鋼に対するNi添加の効果を報告し、次いで現在採用しているスウェーデン、ボフォース社の特許鋼⁽⁵⁾である、4～8%Niを含む13%Cr鋼(2RM2)による水車ランナの製造について述べる。

2. 13%Cr鑄鋼の諸性質に及ぼすNiの影響

2.1 熱処理特性に及ぼす影響

Niが A_{C1} 点、 M_s および M_f 点を低下させることはよく知られており、13%Cr鋼の場合も例外ではない。13%Cr鋼に関するIrvine⁽⁶⁾らの研究ではNiの1%は A_{C1} 点を約30℃低下させるとされているから、それによれば、Niの添加による A_{C1} 点の変化は図1に示すようになる。

図1と実際の組織変化の観察とは必ずしも明確に一致するわけではないが、Ni添加の効果は組織変化と明確に対比できる。

図2はNi添加量の異なる13%Cr鑄鋼の焼もどしによる組織変化を示したものである。1%Niを添加した13%Cr鑄鋼(以下13-1鋼と略す)は単純な組織変化を示すだけである。つまりマルテンサイトの分解と炭化物の凝集の過程が見られるだけである。

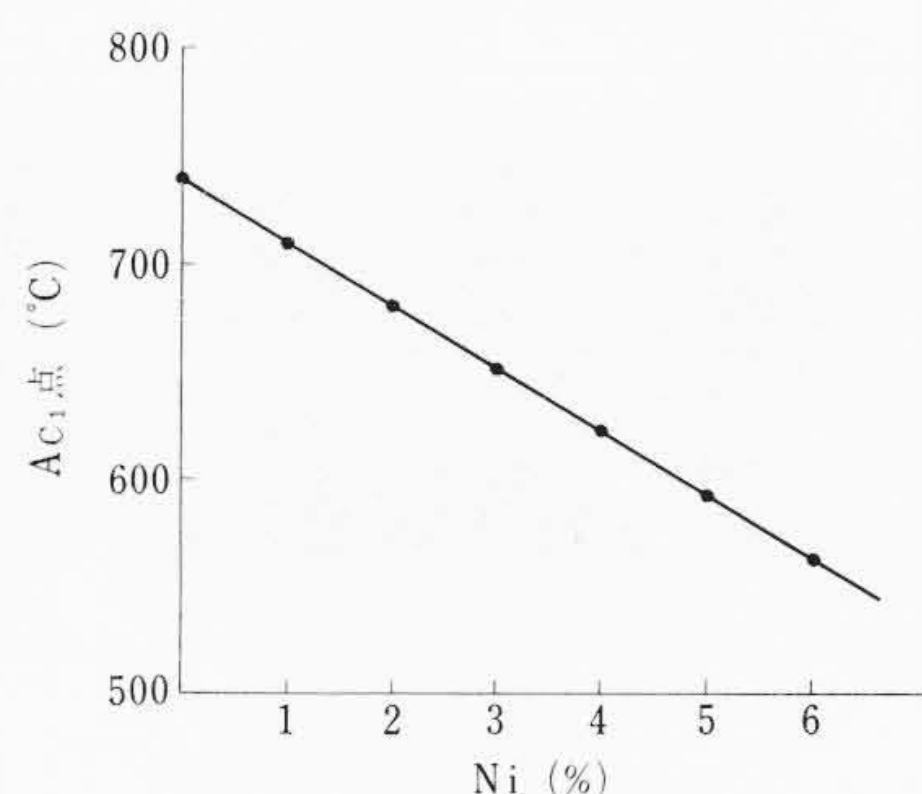


図1 A_{C1} 点に及ぼすNiの効果

Niの添加量が多くなった13-6鋼では、550℃、600℃の焼もどし温度のものは、当初のマルテンサイトリーフの配列とはかなり異なる組織が見られる。Irvineらのデータによれば13-6鋼の A_{C1} 変態点は560℃と計算されるから、600℃の焼もどしは A_{C1} 点以上になっており、したがってオーステナイトとフェライトの混合組織である⁽⁴⁾ことが理解できる。13-3.7鋼の組織変化はその点で13-6鋼と異なり、13-6鋼を600℃で焼もどしたものに相当する組織状態が見られない。つまり13-3.7鋼では、 A_{C1} 点以上の加熱によって生成したオーステナイトの挙動は13-6鋼のそれとは異なることからこれから推定される。

Niが焼入れ性を増大させることは13%Cr鋼においても同様で、図3はIrvineらがS曲線に及ぼすNiの効果を調査した結果を示したものである。3%を越えるNiの効果については、S曲線あるいはCCT曲線の形では求まっていないが、実用的には不要と思われる。

また M_s 点の変化についてはIrvineはNi 1%により、17℃低下するとしているので、Niによる M_s 点の変化は図4のようになる。

これらのことから、Niの多い13%Cr鋼の焼入れは大形の鑄鋼品でも急冷する必要はなく、したがってひずみが少なくできる特長を有するが、十分に低い温度変化まで冷却してマルテンサイト変態の割合を高めておく必要があることが理解される。

図1, 3, 4に対しては実際に取り扱う鋼の化学成分とIrvineらの試験した鋼の差を考慮する必要があるが、Niを13%Cr鋼に添加した場合の熱処理特性についての概略はこれから推定することができる。

Niの効果について最も重要なことは、G.Baggström⁽⁴⁾により報告されたように、4%以上を含有する13%Cr鋼はその A_{C1} 点以上の適当な温度範囲で焼きもどした場合、生成したオーステナイトがそのまま常温まで冷却されてもきわめて安定に存在することにある。

図5は焼もどし温度と常温で存在するオーステナイト量その他の関連を示したものである。

* 日立製作所勝田工場

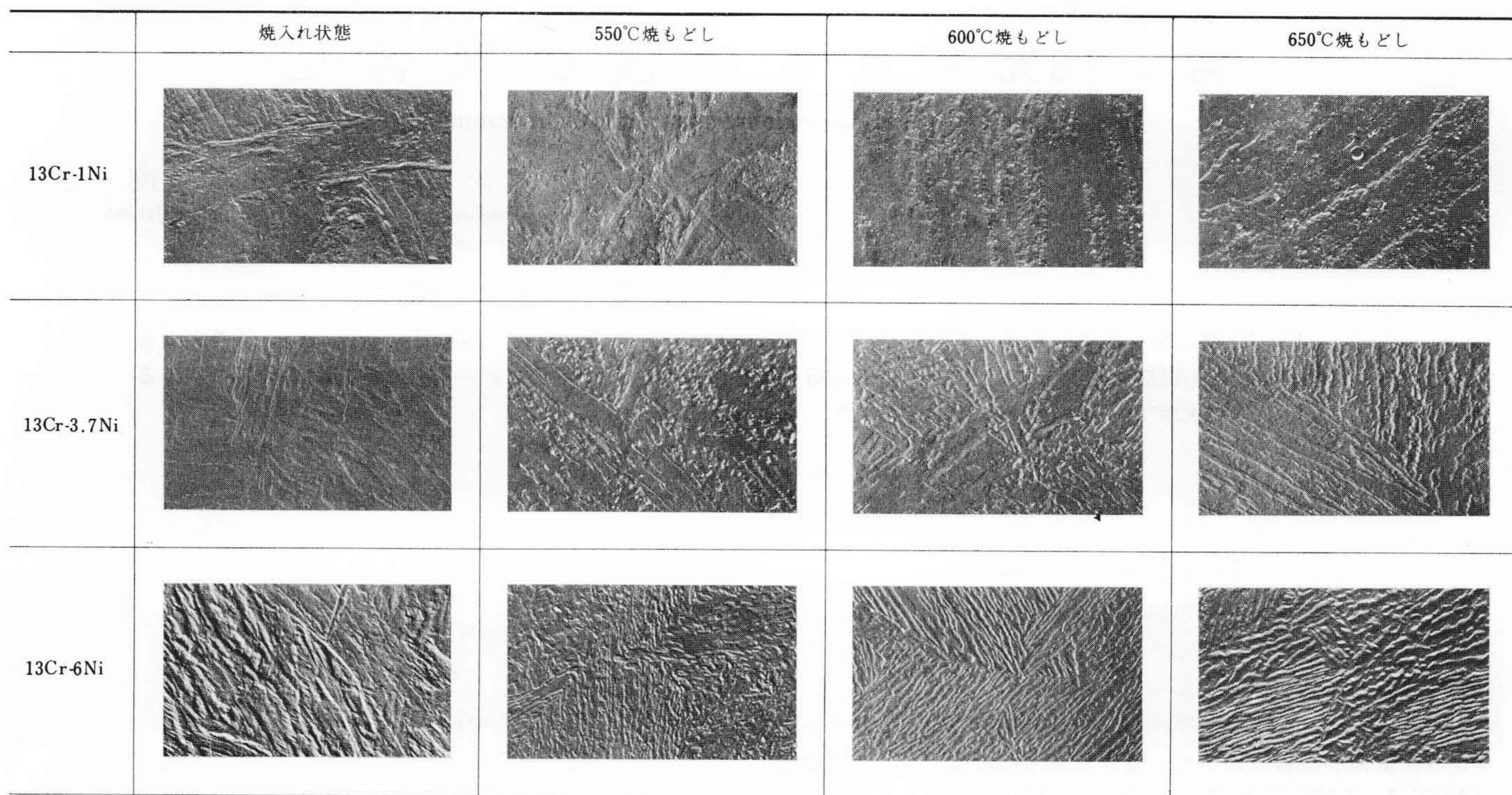
倍率：4,000 $\frac{1}{2}$

図2 Ni含有量による13%Cr鋼の組織変化

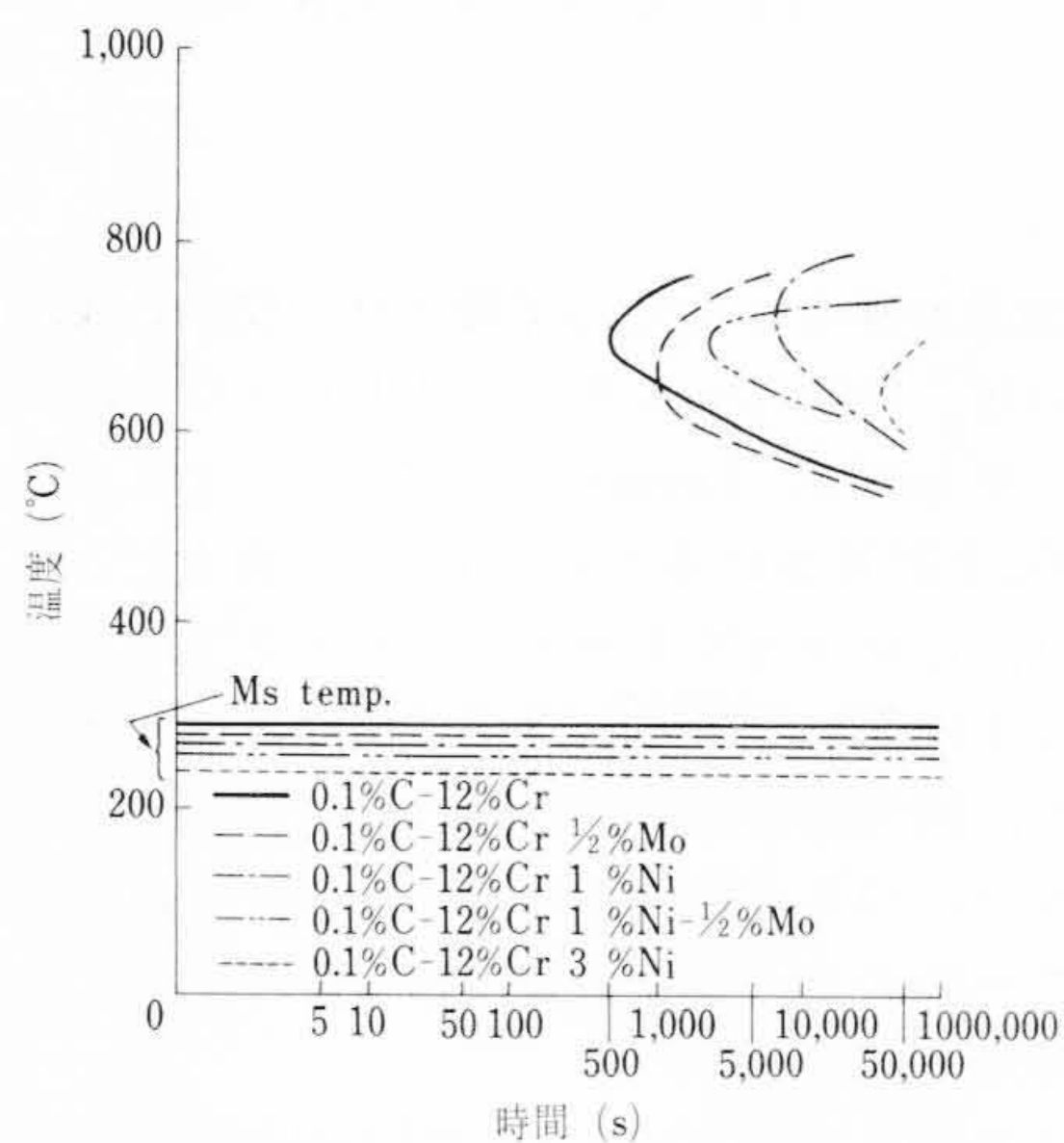


図3 Irvineらによる3%までのNiを添加した13%Cr鋼のS曲線

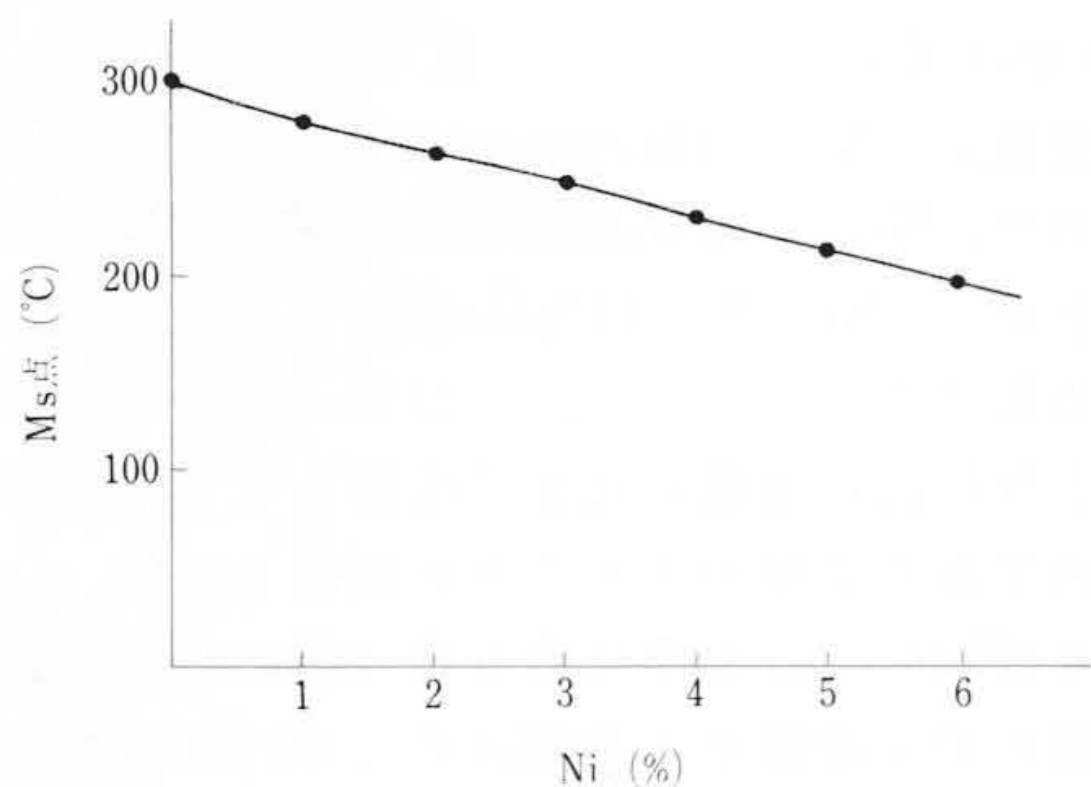
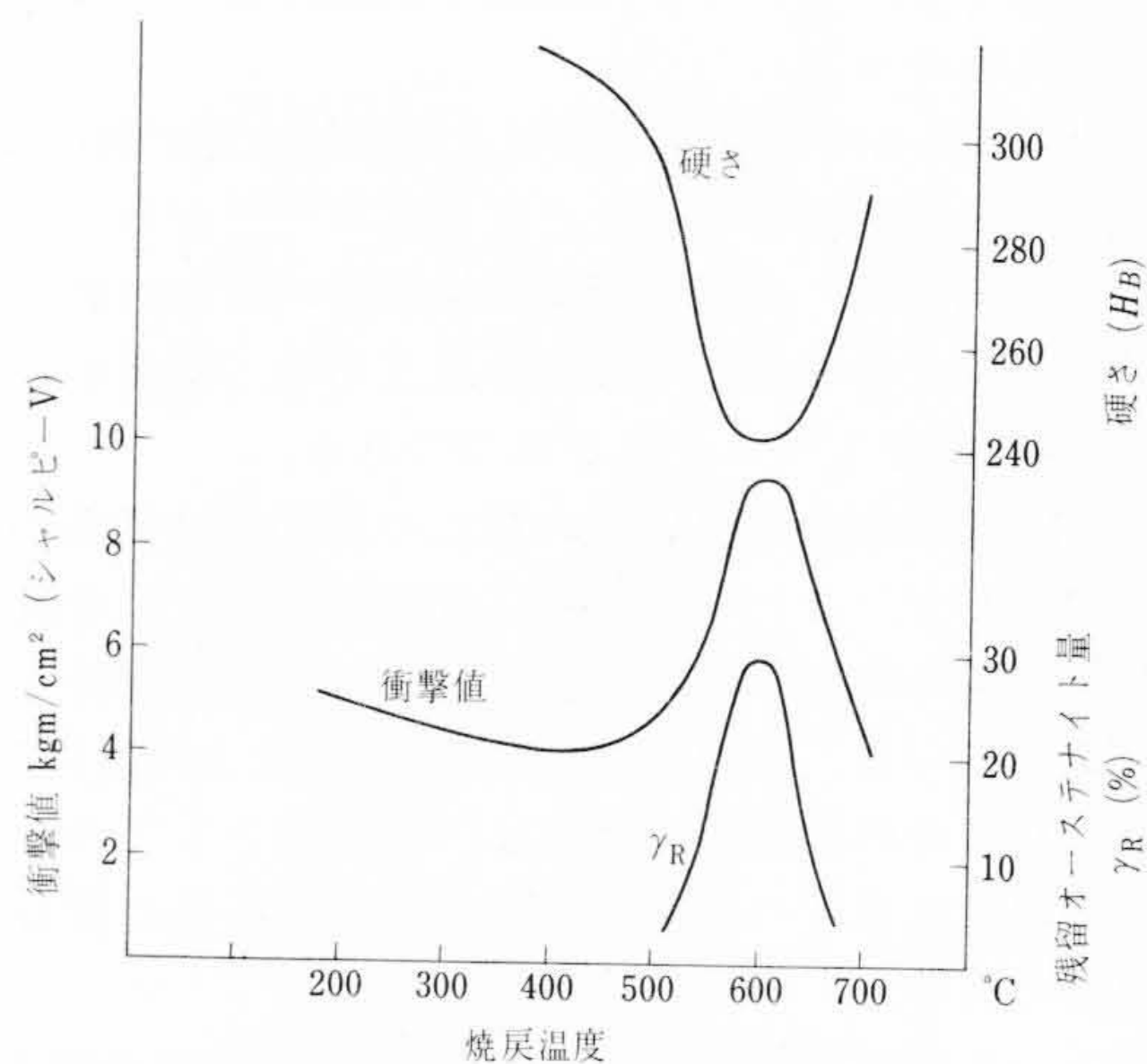


図4 Ms点に及ぼすNiの効果

2.2 機械的性質に及ぼす影響

13%Cr鋼にNiを添加した材料の機械的性質の比較が最近H. Souresny⁽⁷⁾らにより報告されている。それをまとめて示したのが図6である。

鋼種9, 10を一応別にすれば, 13%Cr鋼の機械的性質は, これ

図5 焼もどしによる残留オーステナイト(γ_R)の生成と、かたさ、衝撃値の変化

からは4%Niで限界に達するよう見える。彼らは铸造試験片、熱処理については述べていないので、詳細な議論はできないが、筆者らの経験ではこのデータの伸び、衝撃値がやや低いように考えられる。

参考までに筆者らが現在までに得ている数値を整理して鋼種7, 8について示すと図7のようになる。

Niの含有量の多い鋼種8相当のもののほうがいくぶん低い衝撃値が得られているが、これは図8に示すように、これら2鋼種の衝撃遷移温度曲線そのものが異なるためである。

2.3 溶接性に及ぼす影響

“溶接性”を判定するための方法は種々のものがある。しかしいずれも定性的なものであるといって過言ではないであろう。もちろん同じ方法で試験して相対的にすぐれているものは、比較対象となった劣る材料のそれよりすぐれていることは確かでも、実際の種々の作業における安全性、信頼性との関連になると経験的に決定されるのが普通である。4%以上のNiを含む13%Cr鋼の溶接性が格段にすぐれたものであることは経験的に確認されており⁽⁴⁾,

表1 2RM2鋼と410形鋼の物理的性質の比較

	2RM2鋼	410形鋼	備考
ヤング率 kg/cm ²	20.9×10 ³	—	
剛性率 kg/cm ²	8.13×10 ³	—	
ポアソン比	0.284	—	
熱膨張率 /°C	12.86×10 ⁻⁶	11.85×10 ⁻⁶	0°C～500°C平均
熱伝導率 cal/cm/s/°C	0.045	0.064	0°C
電気抵抗 μΩ-cm	72	50.6	20°C
密度 g/cm ³	7.76	7.75	

注：410形鋼のデータは参考文献(8)

3. 2RM2鋼（4～8%Ni13%Cr鋼）による大形水車ランナの製造

マルテンサイト形の13%Cr鋼と比較した場合の2RM2鋼の長所は、強度、衝撃値、耐キャビテーション性といった特性がすぐれていることももちろんであるが、まず第一に溶接作業性がすぐれていることである。溶接部位、形状などにより施工条件は多少変わるが、良い条件のもとでは常温でも溶接が可能である。

このことは、補修溶接あるいは構造溶接時の作業性を高めるばかりでなく、発電所における長期間の使用の結果、エロージョン、キャビテーションが発生したときの対策としてもきわめて有利な条件である。

このような特性に注目して、昭和45年1月本鋼に関する特許を前記ボフォース社より導入し、従来、鋼板、鍛造品あるいは比較的小形の鋳鋼品に適用されていたものを鑄込重量150tを越える大形水車ランナ鋳鋼品にまで適用範囲を拡大している。

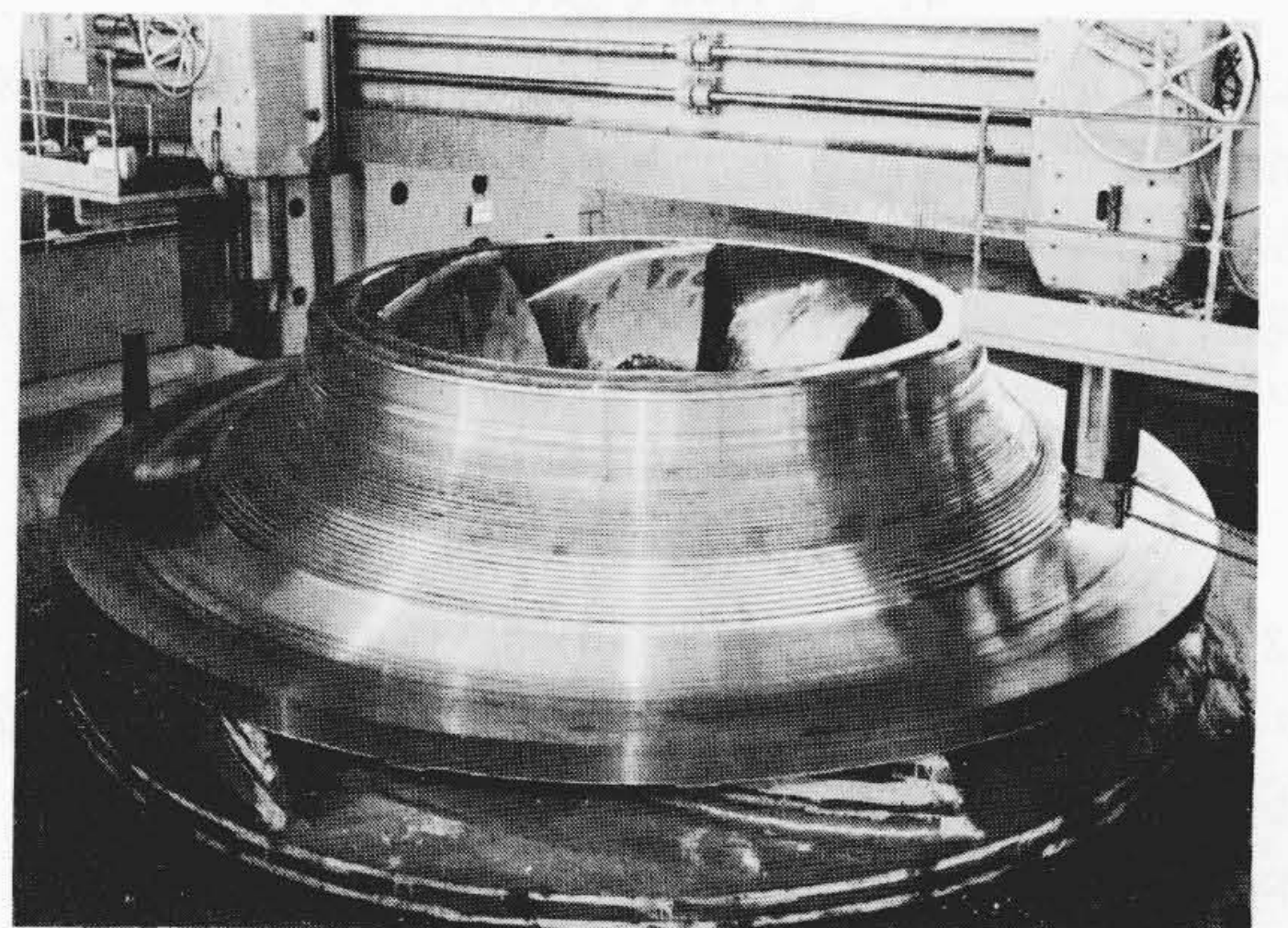
以下、2RM2鋼による大形水車ランナ（図9参照）の製造について概要を述べる。

3.1 溶 解

溶解法は通常の13%Cr鋳鋼とたいして変わるところはない。ただできるだけ低炭素量の溶湯を得るよう努めた。高強度を得るため炭素量を増す必要は事実上ないばかりでなく、Irvine⁽⁶⁾らも述べているように炭化物の粒界析出など好ましくない効果が考えられるからである。

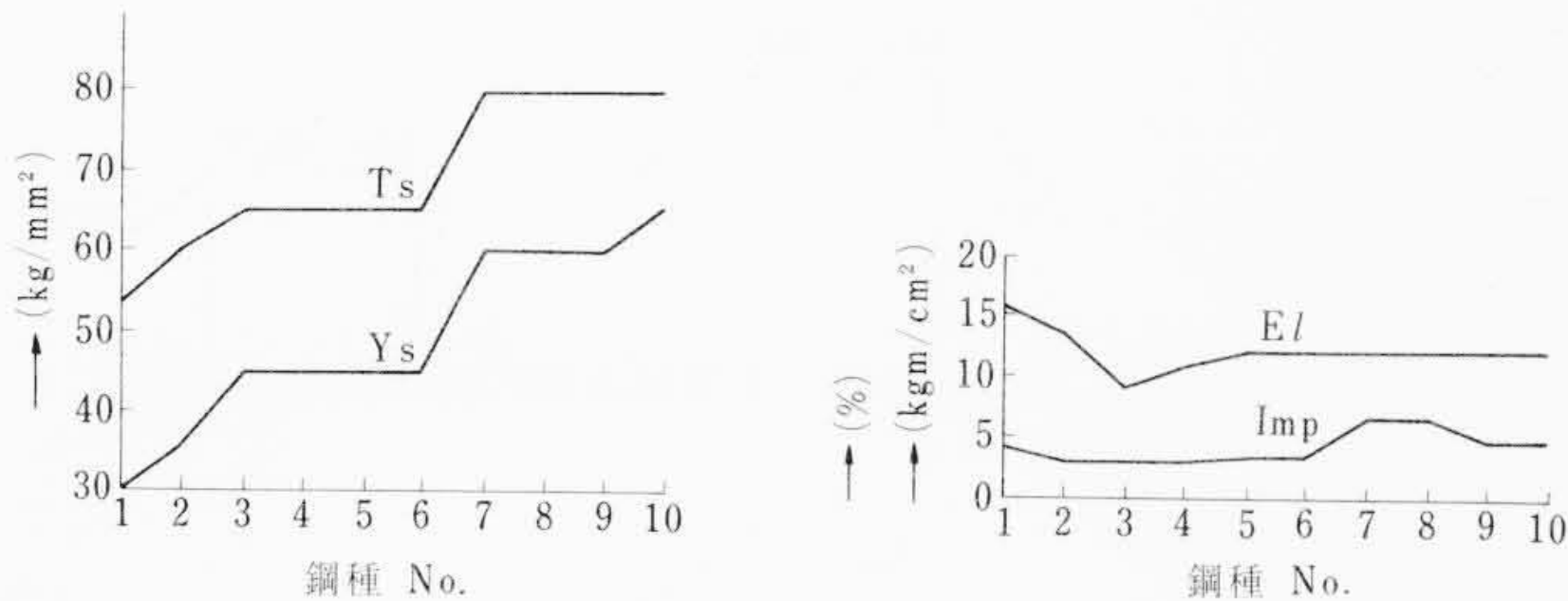
3.2 鑄 造 法

鑄造方案とか鑄込み作業上の技術に関しては通常の13%Cr鋼あるいは18-8鋼の経験が適用できた。ただ前章で述べたように、焼入れ性が大きくMs点が高いことから鑄型内冷却時の温度分布、たたき出し温度、たたき出し後の処置などについては十分慎重な配慮を加えた。図10は、鑄型内における冷却時の温度測定の結果を示したもので、そのように冷却されたランナの鑄造のままの状態における残留応力の測定結果は図11に示すようになる。



（直径5,900mm、高さ1,600mm、重量65t）

図9 機械加工中の2RM2鋼製大形ポンプ水車ランナ

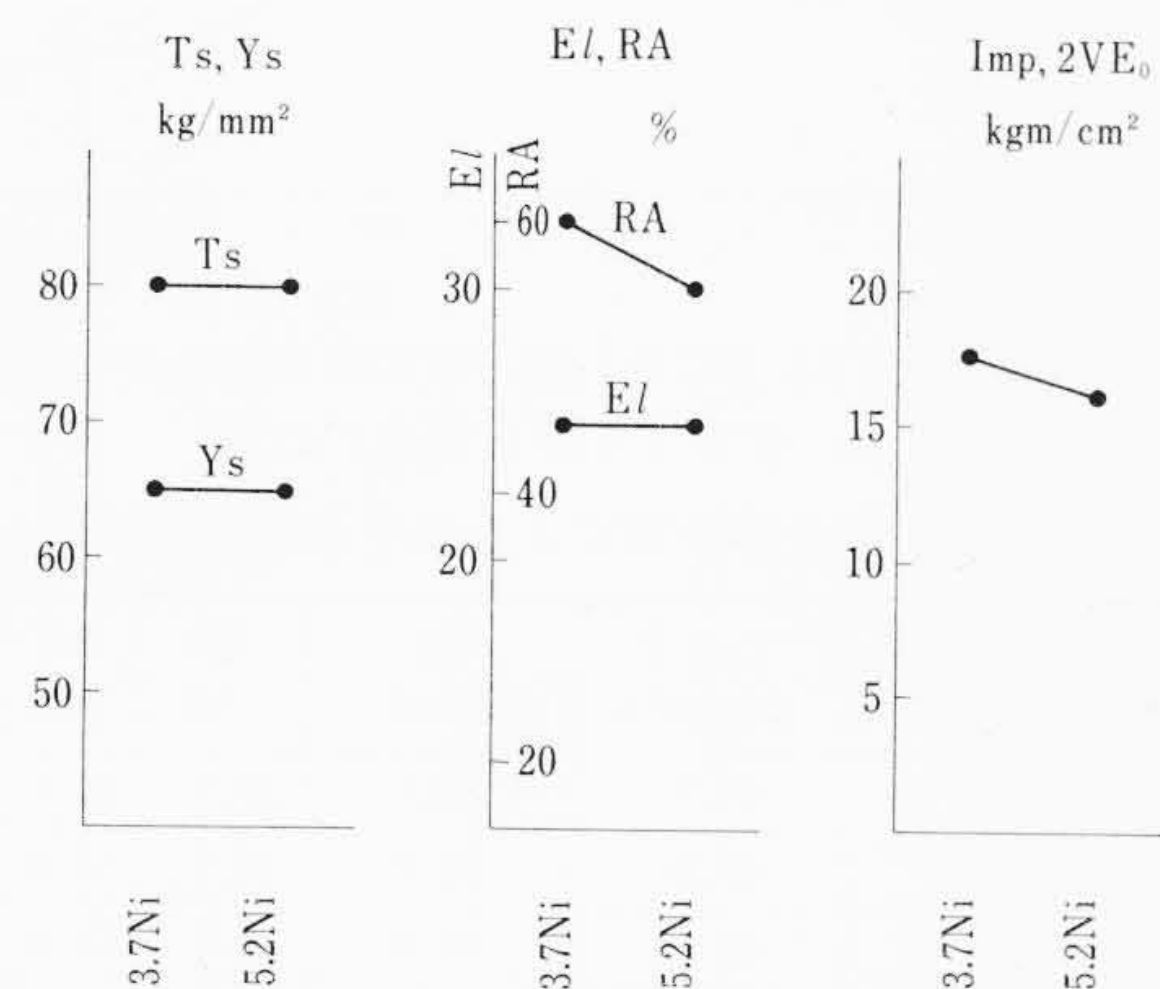


注1：材質一覧

鋼種		化 学 成 分						% Mo
		C	Si	Mn	Cr	Ni		
1	GS-22CrMo4	0.22	0.40	0.70	0.90	—		0.45
2	GS-30Mn6	0.30	0.40	1.40	—	—		—
3	GS-35NiCr6	0.35	0.30	0.60	0.55	1.55		—
4	GX-22Cr14	0.22	0.60	0.40	14.00	0.40		—
5	GX-20CrNi141	0.20	0.60	0.40	14.00	1.00		—
6	GX-10CrNi131	0.10	0.30	0.40	13.00	1.20		—
7	GX-5CrNiMo134	0.05	0.30	0.40	13.00	4.00		0.40
8	GX-5CrNiMo136	0.05	0.30	0.40	13.00	6.00		1.50
9	GX-5CrNiMo174	0.05	0.30	0.40	17.00	4.00		1.50
10	GX-5CrNiMo176	0.05	0.30	0.40	17.00	6.00		1.50

注2：衝撃試験片はDVM、引張試験は1=5dTPによる

図6 H.Souresnyによる各種13%Cr鋳鋼の機械的性質



（キールブロックTPによる）

図7 3.7%Niを含有する13%Cr鋳鋼と5.2%Niを含有するそれとの機械的性質の比較例

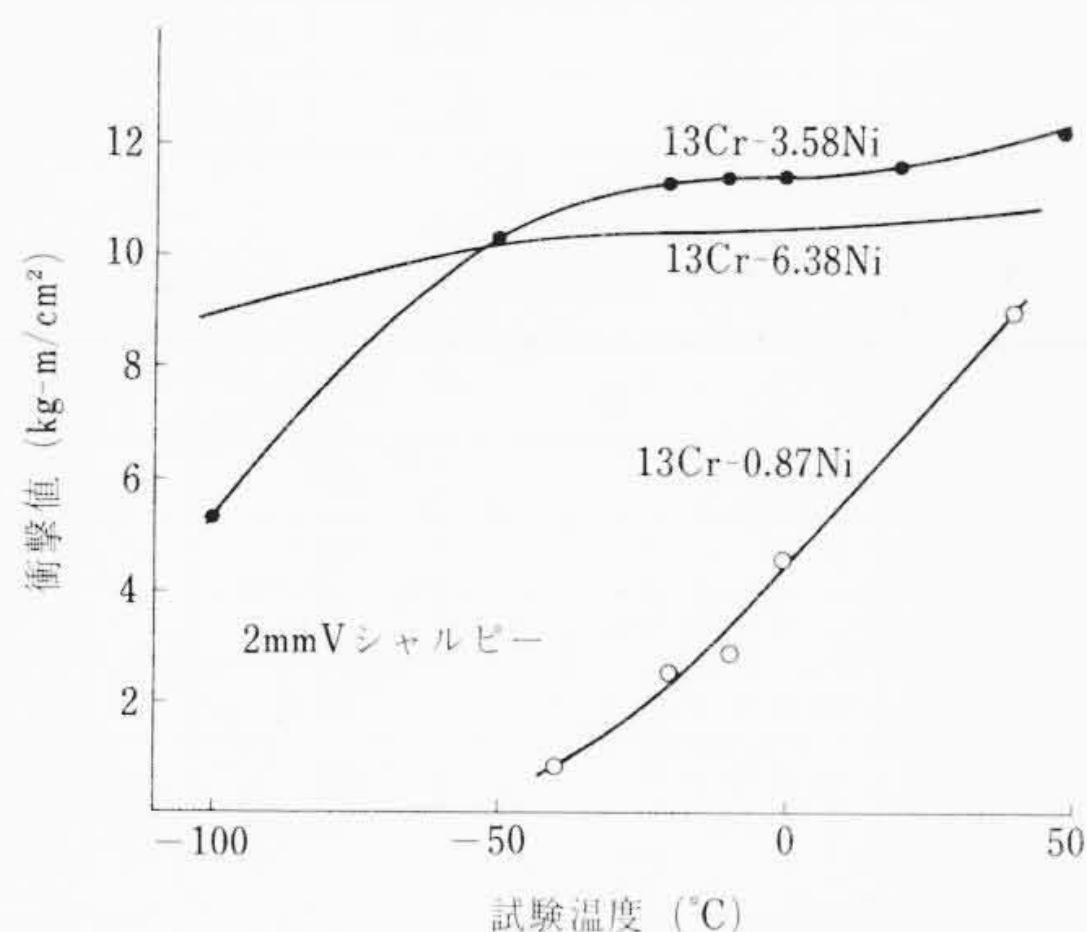


図8 Ni含有量による13%Cr鋳鋼の衝撃遷移温度曲線の変化

その理論的根拠も、大量の残留オーステナイトの存在により説明が可能である。

2.4 物理的性質に及ぼす影響

表1に通常の410形鋼の物理的性質⁽⁸⁾と5～6%Niを含む13%Cr鋼のそれとを比較して示した。後者の熱伝導率の低いこと、熱膨張係数の大きいこと、電気抵抗の大きいことなどは残留オーステナイトの存在によるものである。

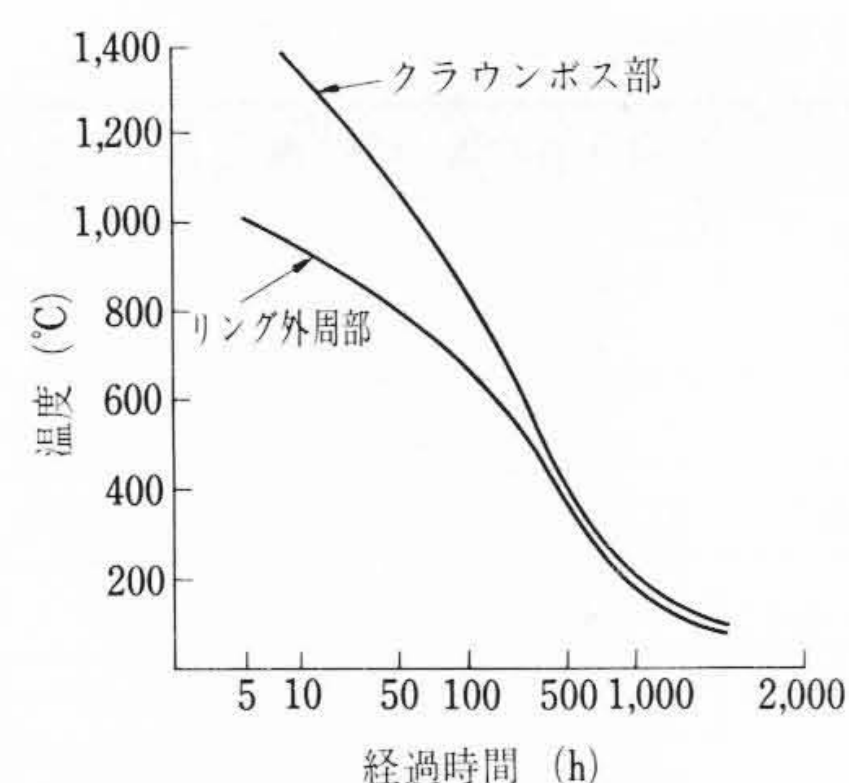


図10 大形ポンプ水車ランナの鋳型内における温度変化

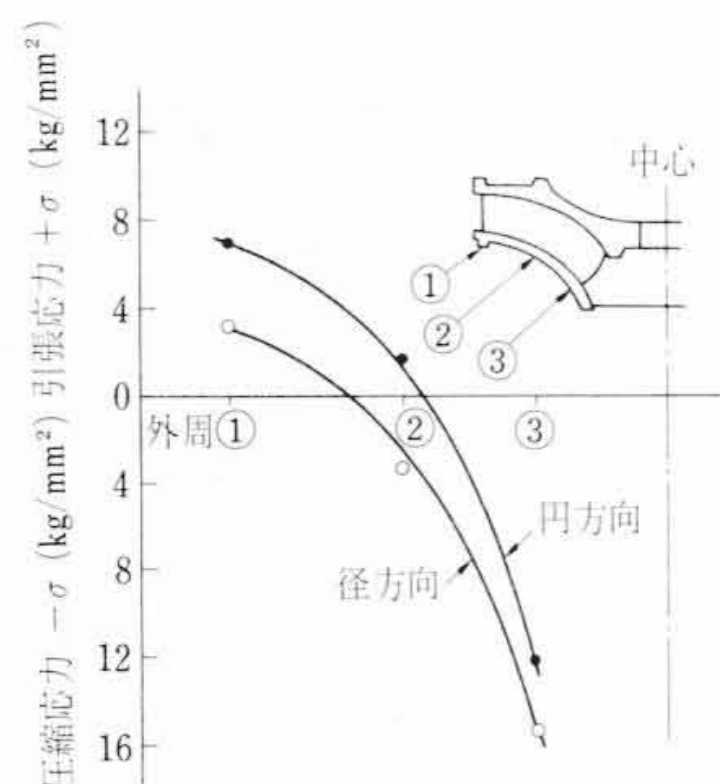


図11 鋳造のままの状態での大形ポンプ水車の残留応力測定結果

表2 大形ポンプランナの機械的性質

試験片採取位置	$Y_{s0.2}$ (kg/mm ²)	T_s (kg/mm ²)	El (%)	RA (%)	$I_{mp2v}E_0$ (kg ^{-m} /cm ²)	かたさ (H _B)
クラウン外周部	69.0	84.6	21.5	60.3	15.6 14.5 14.8 13.0	248
	63.3	85.4	23.2	65.1	20.8 20.8 21.5 19.7	262
	67.1	84.4	24.0	59.6	18.2 18.6 18.2	255
クラウンボス部	72.7	85.8	21.9	59.3	17.8 16.7 19.0	262
	70.4	84.1	23.4	55.9	14.5 17.1 19.9	262

3.3 熱処理と機械的性質

標準的な熱処理は図12に示すとおりである。適正なオーステナイト化温度は比較的広い範囲にあるが、焼もどし温度範囲は狭い。

焼入れ時の冷却速度は、炭化物の粒界析出を考慮して図13のようになる。

熱処理後のランナの機械的性質は表2にまとめて示すとおりである。また参考までに水中における疲労強度は通常の410形13%Cr鋼のそれと比較して図14のようになる。

3.4 溶接

溶接作業はすべて150°C以下の予熱で行なうことができた。本鋼の溶接には、市販のオーステナイト系の溶接棒のほか強度上の要求のある個所には、新たに開発した共金系の溶接棒が使用された。

共金溶接棒による継手の機械的性質の一例は表3に示すとおりである。2RM2鋼の熱影響部の靱性は高いので、オーステナイト系溶接棒を使用した場合には、後熱を省略する場合もある。しかし共金溶接棒はマルテンサイト化するので後熱が必要である。

3.5 2RM2鋼による大形水車ランナの製造実績

表4は昭和47年1月現在における大形水車ランナの製造実績を示したものである。水車ランナとしての完成重量の総計は約614.6tに達し、その他の製品を含め、溶解数で91チャージに達している。

4. 2RM2鋼の応用範囲

本鋼は良好な溶接性を主眼とした使用分野のほか、強靱鋼、低温用鋼としての使用も可能である。いずれの場合もステンレスである特徴はそのまま生かされる。

現在計画中のものとしては、原子力、化学装置関係の压力容器、などがある。

5. 結 言

13%Cr鋼にNiを添加した場合の諸特性の変化と、スウェーデン、ボフォース社より導入した、4～8%Niを含む13%Cr鋼(2RM2)による大形水車ランナの製造について述べた。

本鋼はすぐれた溶接性に加え、従来の410形鋼を大きく上回る強度、靱性を具備し、高度の信頼性を要求される水車ランナなどの分野における13%Cr鋼としての地位を固めるに至っている。

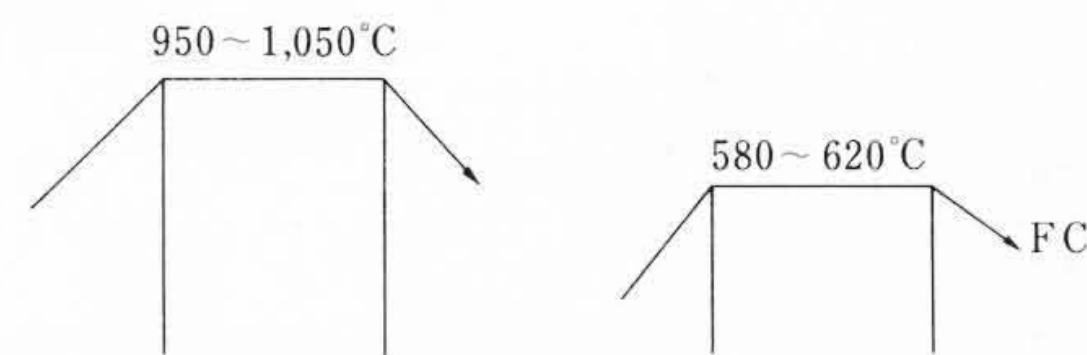


図12 2RM2鋼の標準的熱処理

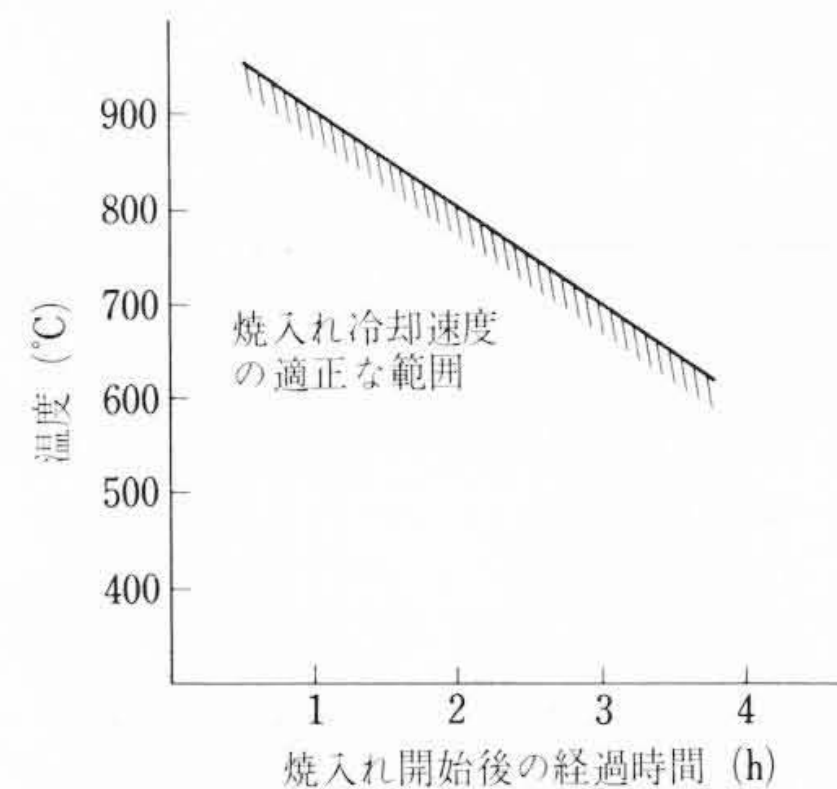


図13 焼入時の適正な冷却速度範囲

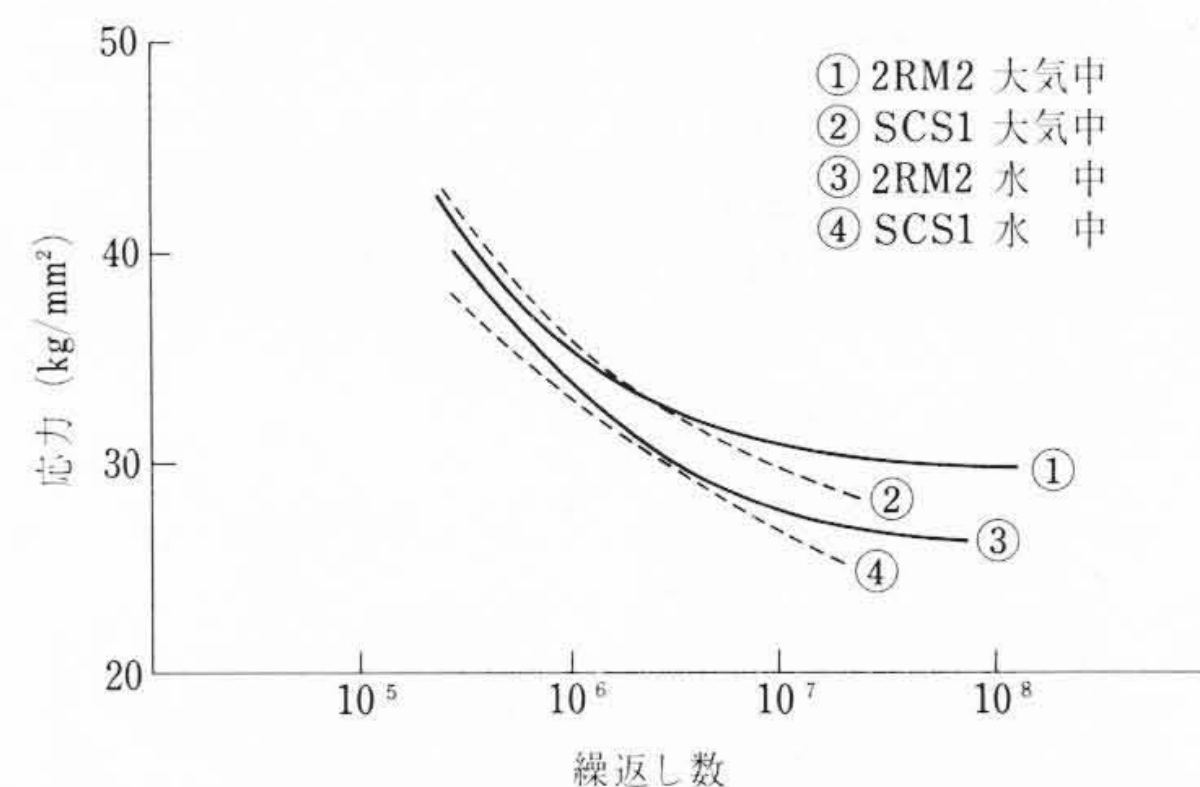


図14 SCS1鋼と2RM2鋼の大気および水中における疲労強度の比較

表3 共金溶接棒による継手の機械的性質

試 験	後 熱	$Y_{s0.2}$ (kg/mm ²)	T_s (kg/mm ²)	El (%)	RA (%)	$Imp2v$ 0°C (kg ^{-m} /cm ²)
継 手	な し	64.1	83.1	16.7	60.1	—
		68.3	86.0	14.1	51.0	—
	580°C×6 h	60.0	83.0	20.0	51.0	* 5.4
		60.9	85.7	19.4	49.0	* 5.4
溶 着 金 属	な し	79.4	99.6	14.0	31.0	4.5
		80.1	101.1	12.0	25.3	5.0
	580°C×6 h	73.3	95.2	23.0	60.9	6.5
		72.6	94.1	23.0	59.4	6.6

* : Notchの位置はHAZ

表4 昭和47年1月現在における2RM2鋼による水車ランナの製造実績

納 入 先	品 名	単重(t)	員 数	備 考
C 発電所	ポンプランナ	65	3	輸 出
N 発電所	ポンプランナ	50	3	
P 発電所	カプランランナブレード	11	16	輸 出
N 社	フランシスランナ	13.5	2	輸 出
N 社	フランシスランナ	66	1	輸 出

参 考 文 献

- (1) F.A.Brandt : Trans.A.S.M. vol 48, 368(1956)
- (2) E.von.Rajakovics : Giesserei, 10,Jan (1963)
- (3) E.zing,Th.Geiger : Schweizer Archiv, Mär (1957)
- (4) G.Baggström : Water Power, Dec (1957)
- (5) 日本特許第408305号, 第508827号
- (6) K.J.Irvine,D.J.Crowe,F.B.Pickering : J.I.S.I.Aug (1960)
- (7) H.Souresny,H.Sauer : Giesserei,16,Dez (1971)
- (8) BISRA: Physical Constants of Some Commercial Steels at Elevated Temperatures. (1953,Butterworths Scientific Co)