

ペンストック用 HT980 鋼板の開発

Development of HT980 Steel Plate for Penstock

松川 靖/Yasushi Matsukawa・本社 厚板技術部 次長

有持和茂/Kazushige Arimochi・総合技術研究所 研究主幹 工博

大西一志/Kazushi Onishi・鹿島製鉄所 厚板管理室 参事

要 約

水圧鉄管などの鋼構造物には HT780 鋼板が広く使用されている。近年、国内の揚水発電所の立地は更に大容量、高揚程化の方向にあり、水圧鉄管および分岐管に高強度の HT980 鋼板の採用が検討されている。

高強度の HT980 鋼板を採用することにより、設計板厚を薄くすることができ、その結果として鋼重減にともなう施工コスト削減、工期の短縮が期待できる。本報告では、水圧鉄管および分岐部内部補強材(シクル)用に開発された HT980 鋼板の開発に関する基本的な考え方および板厚 50, 100, 200mm の HT980 鋼板の性能を紹介する。

Synopsis

High strength HT780 steel plate has widely been used in large scale steel structure such as penstocks. Pumped storage hydroelectric power stations are now being constructed in sites which have larger capacities and higher water heads.

The use of HT980 as a substitute for HT780 saves on increases in fabrication costs, transportation costs and fabrication period due to increase in wall thickness and weight.

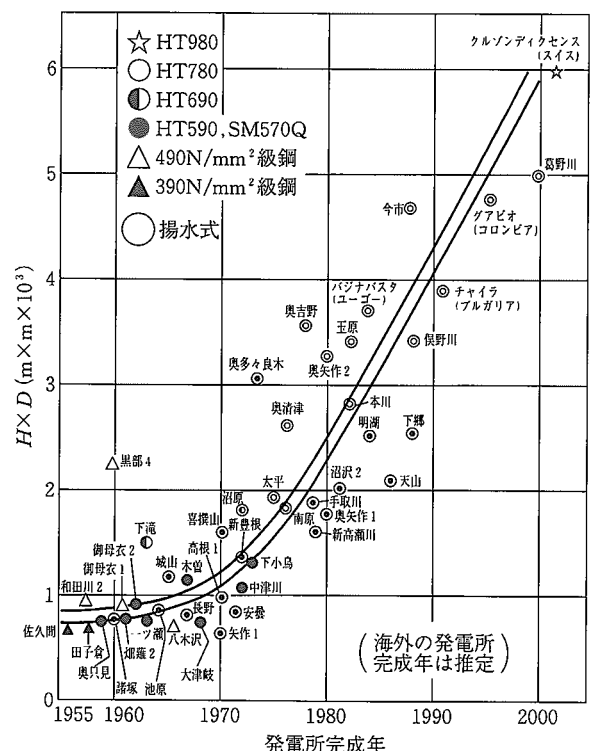
This paper provides information on the basic concept of HT980 steel plate and test results on 50mm, 100mm and 200 mm thick HT980 for penstock, and bifurcations.

1. 緒 言

わが国の電力需要は着実な伸びを示している。ピーク需要に対応する手段として揚水発電所の開発が進められるとともに大型化が進んできた。このことは、使用材料に対しては高強度、厚肉化が要求され HT570, HT780 鋼板が開発されてきた。

第1図にペンストックの大型化の推移を示す。一般にペンストックの規模を表すには、管径 D および設計水頭 H を用いて $H \times D$ (mxm) が指標として用いられる。 $H \times D$ の増大およびそれにともなう材料の高強度化、厚肉化の傾向は極めて顕著である。'95年には $H \times D = 4100$ mxm のエッシャーウィス分岐管の内部補強材(シクル)には板厚 175mm の HT780 鋼板が使用された。また、海外では HT980 鋼板を採用したプロジェクトも建設が進められている。

更に、 $H \times D$ が大きくなると使用される材料の板厚は極めて厚くなり、鋼板製造、溶接施工等の面で技術的、経済的な問題が生ずることが予想されるため、より高強度の材料開発が要求されている。



第1図 ペンストックの大型化の推移

製品紹介

このような背景をふまえ、当社では大型揚水発電所の設計、施工の合理化に寄与するため、HT980鋼板の開発を進めてきた。ペンストック用に開発を進めてきた HT980鋼板の基本的検討結果および板厚50、100、200mmの HT980鋼板の試験結果を紹介する。なお、板厚200mmはエッシャーウィス分岐管のシクル用に開発したものである。

2. ペンストック用 HT980鋼板の目標性能

当社は電源開発瀬沼原水力発電所を初めとしてこれまでに多数のプロジェクトに参加しており、大量の高張力鋼板を納入してきた。ペンストック用 HT980鋼板の目標性能を設定するにあたってはこれらのプロジェクトの要求仕様を参考にした。

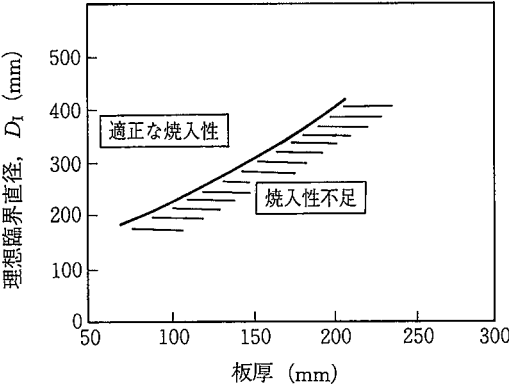
第1表に板厚50、100、200mmの HT980鋼板の目標性能を示す^{1),2),4)}。引張特性は WES3001の HW885に準拠した。ただし、板厚200mmについては、板厚が適用範囲をはるかに超えることから耐力、引張強さとも20N/mm²低減した値を目標値とした。吸収エネルギー値は JIS G 3128の SHY685NSの規定値 $\geq 47\text{J}$ として、試験温度は従来のペンストック用 HT780にならって WES3003にもとづき最低使用温度を0℃とし、破壊伝播停止保証（A種保証）とした。また、溶接割れ防止予熱温度については従来の HT780と同等の溶接施工性を確保するために125℃以下とした。ただし、板厚200mmについては、エッシャーウィス分岐管のシクルは全て工場溶接であり、施工管理が現地トンネル内の溶接に比べ容易であることを考慮して150℃以下とした。更に溶接継手部の引張強さは母材の引張強さと同等以上とした。靱性は WES3003にもとづき最低使用温度を0℃とし破壊発生防止保証（G種保証）とした。ただし、板厚200mmについては、WES2805に準拠することとし、部位、想定欠陥位置に対応して必要とされる靱性値（0℃における限界 CTOD 値）を計算し、それを吸収エネ

ルギー値に換算、最も厳しい値を目標値とした。

3. 基礎的検討³⁾

3-1 必要な焼入れ性

板厚中心部においても十分な強度と高靱性を得るには最適な焼入れ性を確保する必要がある。そこで、第2図に示すごとく、焼入れ性の指標となる理想臨界直径 D_i について、各板厚ごとに靱性確保に必要な最小値を求めた。



第2図 板厚中心部で高靱性を得るための必要 D_i

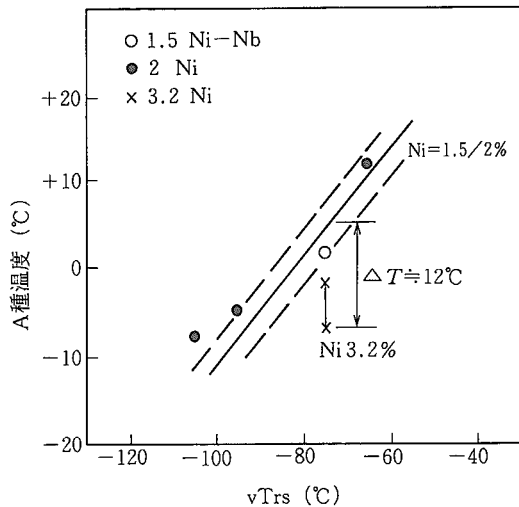
$$D_i = 0.311 \times \sqrt{C} \times (1 + 0.64\text{Si}) \times (1 + 4.10\text{Mn}) \times (1 + 0.27\text{Cu}) \times (1 + 0.52\text{Ni}) \times (1 + 2.33\text{Cr}) \times (1 + 3.14\text{Mo}) \times 25.4 (\text{mm})$$

3-2 Ni 添加量

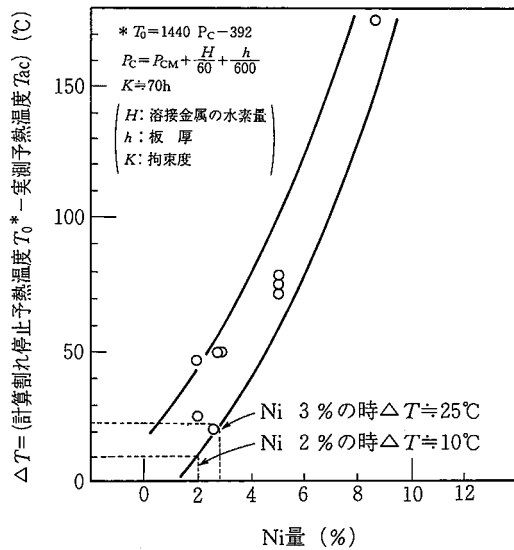
安定した高靱性と破壊伝播停止性能の確保および予熱温度低減効果の面より Ni 添加の効果は大きい。経済性を考慮して Ni 添加量をきめた。第3図にA種温度改善に及ぼす Ni 添加量の影響、第4図に予熱温度低減に及ぼす Ni 添加量の影響を示す。第5図は従来鋼との比較を示している。

第1表 HT980鋼板の目標値

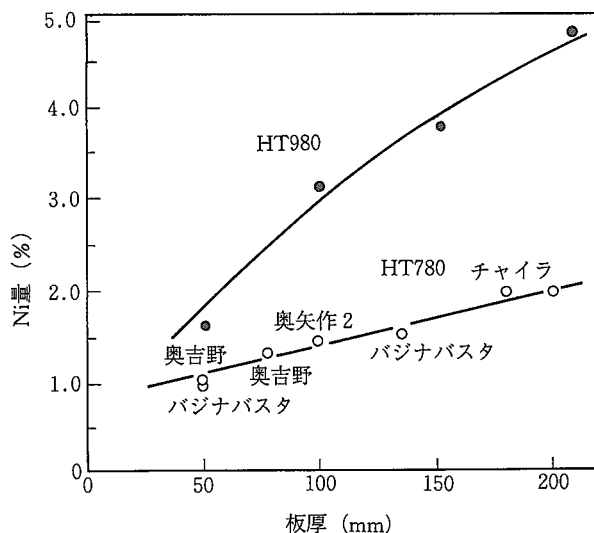
項 目		目 標 値		
		板厚50mm	板厚100mm	板厚200mm
鋼板の機械的性質	耐 力	$\geq 885\text{N/mm}^2$	$\geq 885\text{N/mm}^2$	$\geq 865\text{N/mm}^2$
	引 張 強 さ	950~1130N/mm ²	950~1130N/mm ²	930~1110N/mm ²
	板 厚 方 向 絞 り	—	—	$\geq 25\%$
	シャルピー 吸収エネルギー	3 個の平均 $\geq 47\text{J}(-55^\circ\text{C})$	3 個の平均 $\geq 47\text{J}(-60^\circ\text{C})$	3 個の平均 $\geq 47\text{J}(-65^\circ\text{C})$
	破 面 遷 移 温 度	$\leq -55^\circ\text{C}$	$\leq -60^\circ\text{C}$	$\leq -65^\circ\text{C}$
溶接性	割れ防止予熱温度	$\leq 125^\circ\text{C}$	$\leq 125^\circ\text{C}$	$\leq 150^\circ\text{C}$
継手の機械的性質	引 張 強 さ	$\geq 950\text{N/mm}^2$	$\geq 950\text{N/mm}^2$	$\geq 930\text{N/mm}^2$
	シャルピー 吸収エネルギー	3 個の平均 $\geq 47\text{J}(-10^\circ\text{C})$	3 個の平均 $\geq 47\text{J}(-12^\circ\text{C})$	3 個の平均 $\geq 56\text{J}(0^\circ\text{C})$
	破 面 遷 移 温 度	$\leq -10^\circ\text{C}$	$\leq -12^\circ\text{C}$	—



第3図 A種温度とvTrsの関係



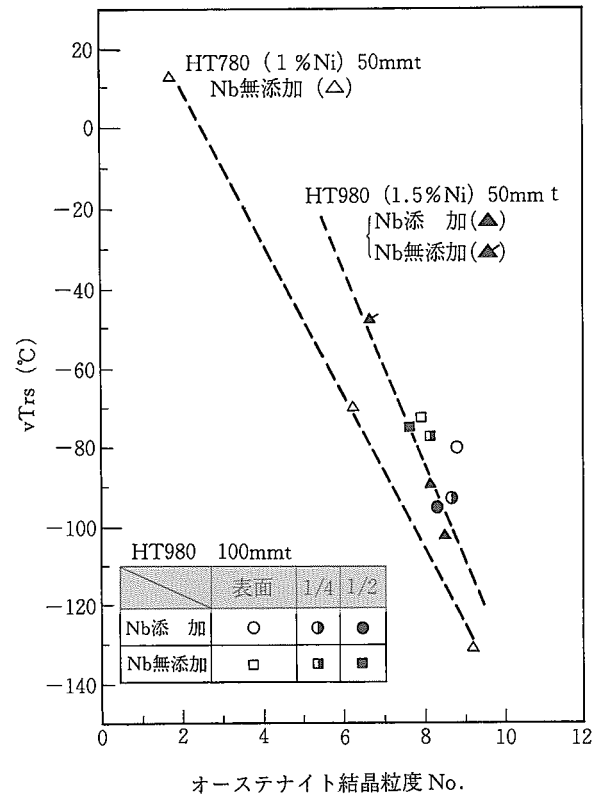
第4図 ΔTに及ぼすNi量の影響



第5図 Ni含有量と板厚の関係

3-3 微量Nbの添加

HT980鋼板における微量Nb添加の有無によるオーステナイト結晶粒度とvTrsの相関を第6図に示す。微量Nbの添加はオーステナイト結晶粒の微細化による強度-靱性バランスの向上、表面部の靱性向上および焼戻し軟化抵抗増大の効果がある。また、Nb ≤ 0.030%であればHT980鋼板の低温割れ性、継手靱性に対し悪影響を及ぼさないことは確認済み¹⁾である。



第6図 vTrsに及ぼすオーステナイト結晶粒度の影響

4. HT980鋼板の諸性能^{1),2),4)}

4-1 母材性能

化学成分を第2表に、機械的性質を第3表に示す。母材の機械的性質は目標性能を十分満足する結果が得られた。また、板厚200mmについては板厚方向特性も良好であることを確認した。

製品紹介

第 2 表 化学成分

板厚 (mm)	化 学 成 分 (wt.%)													
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	B	Ceq	P _{CM}
50	0.12	0.17	0.74	0.003	0.001	0.26	1.58	0.53	0.54	0.036	0.011	0.0009	0.53	0.27
100	0.12	0.21	0.72	0.007	0.001	0.27	3.13	0.53	0.64	0.030	0.011	0.0008	0.60	0.30
200	0.11	0.07	1.00	0.002	0.001	0.23	4.89	0.54	0.63	0.028	0.010	0.0011	0.67	0.33

$Ceq = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14 (\%)$
 $P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B (\%)$

第 3 表 母材の機械試験結果

板厚 (mm)	採取 位置	採取 方向	引張試験				衝撃試験		
			耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	vE-60 (J)	vE-65 (J)	vTrs (°C)
50	1/4t	L	938	972	23	69	192	—	< -95
		C	932	970	21	69	168	—	-95
	1/2t	L	938	970	21	70	198	—	< -100
		C	928	963	22	71	174	—	-100
100	1/4t	L	943	975	24	71	192	—	-93
		C	941	980	24	71	220	—	-93
	1/2t	L	943	980	24	70	180	—	-93
		C	941	985	24	70	199	—	-95
200	1/4t	L	907	975	20	65	—	173	-110
		C	914	986	23	68	—	140	-101
	1/2t	L	912	979	22	62	—	176	-107
		C	912	973	23	67	—	131	-105
	1/2t	Z	—	971	—	55	—	87	-80

4-2 溶接性

Y 形溶接割れ試験による割れ防止予熱温度を第 4 表に示す。溶接材料を吸湿した状態での割れ防止予熱温度は 75~100℃であり、従来の HT780 と同等の低温割れ性能を有していることが確認できた。

4-3 溶接継手性能

サブマージアーク溶接法 (SAW) による溶接継手試験結果を第 5 表に示す。いずれも目標値を十分満足する性能が得られた。

4-4 破壊安全性

破壊安全性を確認するために、母材については ESSO 試

験、溶接継手部については CTOD 試験 (板厚 50mm)、原厚 CT 試験 (板厚 200mm) を実施した。結果を第 6 表、第 7 表に示す。母材の破壊伝播停止特性は WES3003A 種基準を十分満足する良好な値が得られた。また、破壊発生特性は、板厚 50mm の限界 CTOD 値は -10℃ で 0.372mm と高い値が得られ、この結果より WES2805 にもとついて計算した脆性破壊が発生しない許容欠陥の大きさは通常の検査で検出可能な寸法になることが確認できた。また、板厚 200mm については想定した部位、想定欠陥寸法に対して要求される限界 CTOD 値 (0℃ において ≥0.070mm) を満足することを確認した。開発した HT980 鋼板は高い破壊安全性を有しており、ペンストック用として十分な性能であることが確認された。

第 4 表 Y 形溶接割れ試験結果

試験方法	溶接棒吸湿条件	溶接雰囲気	板 厚	割れ防止予熱温度
JIS Z 3158	30℃, 80% 1 hr 放置	30℃, 80%	50mm	100℃
			100mm (片側 50mm に減厚)	≤75℃
			200mm (片側 50mm に減厚)	100℃

第5表 溶接継手の機械試験結果

溶接方法	板厚 (mm)	入熱量 (kJ/mm)	継手引張試験		側曲げ試験	継手衝撃試験				
			引張強さ (N/mm ²)	破断位置		ノッチ 位置	vE0 (J)	vE-10 (J)	vE-12 (J)	vTrs (°C)
SAW	50	4.3	957	W.M	無欠陥	W.M	—	118	—	< -70
						Bond	—	149	—	-70
	100	3.8	1 000	W.M	無欠陥	W.M	—	—	75	-89
						Bond	—	—	84	-92
	200	4.0	1 014	W.M	無欠陥	W.M	95	—	—	-38
						Bond	92	—	—	-56
						HAZ	138	—	—	<-100

第6表 母材の破壊伝播停止特性

板厚 (mm)	溶接 方法	ノッチ 位置	Kca値 at 0°C	A種温度 (°C)
50	SAW	Bond	470MPa・m ^{1/2}	-13
200			460MPa・m ^{1/2}	-27

第7表 溶接継手部の破壊発生特性

板厚 (mm)	溶接 方法	試験方法	ノッチ 位置	限界CTOD値	
				at -10°C	at 0°C
50	SAW	CTOD試験	Bond	0.372mm	—
200		CT試験		—	0.136mm 0.153mm

5. ペンストックへのHT980鋼板適用の展望

揚水発電所を中心とする水力発電所は年々高落差、大容量化されてきており、現在使用されている HT780鋼板の最大厚みも鋼板製造および施工の面でも限界に近づいている。HT980鋼板をペンストックに適用した場合の利点を第8表に示す³⁾。また、スイスの Cleuson Dixence Project では通常の水力発電所ではあるが、落差が1883m と非常に大きいため HT980鋼板が世界で初めてペンストックに採用され、当社も一部(板厚41~43mm, 約750トン)納入し、現在建設が進められている。このような背景と従来の開発成果から、わが国でも大規模ペンストックへの

HT980鋼板の適用検討が進められているところである。

第8表 HT980鋼板適用時の利点

項目	1次効果	2次効果
設計	板厚の減少	岩盤負担率の増大と板厚の低減(相乗効果)
施工	重量の低減 溶接量の低減	仮設備の低減 工期の短縮

6. 結 言

最近の大型構造物の使用鋼材は高強度、厚肉化してきている。このような鋼材の実用化にあたっては、構造物の安全性を確保するために施主、ファブリケータ、鋼材メーカーが一体となって母材性能、加工性、溶接性、溶接継手性能等を考慮して開発、改善を重ねてきた。本報告では HT980鋼板が従来使用されてきた HT780鋼板とほぼ同等の溶接施工性を有し、かつ、母材試験、溶接継手試験、破壊靱性試験結果からペンストック用として十分安全側の性能を有していることを示した。なお、ここに紹介した試験結果の一部については、大阪大学堀川教授の御指導を頂き、また三菱重工(株)殿、(株)栗本鉄工所殿に御協力を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

問合せ先
本社
厚板技術部 次長
☎06(220)5759 松川

参考文献

- 1) 松岡孝, 渡辺征一, 別所清, 飯田豊, 河井清和, 渡辺望: 住友金属, Vol. 38 (1986), No.2 p.13
- 2) K.Bessyo, S.Watanabe, H.Uchimura, K.Kawai, N. Watanabe: The Sumitomo Search, No.37 (1988)

- 3) 丸山嘉一郎, 別所清, 有持和茂, 大西一志, 飯山英明, 村山弘: 住友金属, Vol. 47 (1995), No.4 p.54
- 4) H.Kametani, H.Okada, H.Murayama, K.Arimochi, K. Onishi and K.Horikawa: IIW Doc. XV-952-97 (1997)