

水圧鉄管用 HT950 の開発と溶接施工法の確立・実用化 ～溶接管理技術者の体験紹介から～

渡 邊 望

1. はじめに

水力発電所水圧鉄管の高落差大容量化に伴い、経済性の点から高張力鋼が次々に適用されてきた。その実用化の過程では鋼材、溶接材料、製作、据付、検査の各分野での技術開発が進められ、伝統的な考え方の上に新しい技術を積み重ね、学識経験者、ユーザ、ファブリケータ、材料メーカが協力して高強度材料の水圧鉄管の実用化に向けた開発検証を進めてきた。ここでは、水圧鉄管における高張力鋼材の実用化の変遷、溶接材料と溶接方法、母材と溶接継手の性能、現地自動溶接および溶接施工法について紹介するものである。

2. 水圧鉄管への高張力鋼の適用

2.1 水圧鉄管の大型化と使用鋼材の変化

水力発電所の水圧鉄管の大型化に伴い高張力鋼が次々に適用されてきた。1960年に完成した諸塚発電所水圧鉄管に日本で初めてHT570(最大板厚20mm)が、その後1963年には鬼怒川発電所にHT735(最大板厚30mm)が、1972年には沼原発電所にHT685(最大板厚34mm)が適用された。1975年には大平発電所に最大板厚36mmのHT780(SHY685)が初めて適用され、その後はHT780を使用した水圧鉄管が次々と建設されてきた。2005年には神流川発電所にHT950が初めて適用された。水圧鉄管の大型化と高張力鋼適用の推移を図1に示す。縦軸は設計最大水頭(H)と内径(D)の積で水圧鉄管の規模を表すものである。これらの中で最大規模の葛野川発電所では、HT780を使用して最大板厚は94mmに達した。

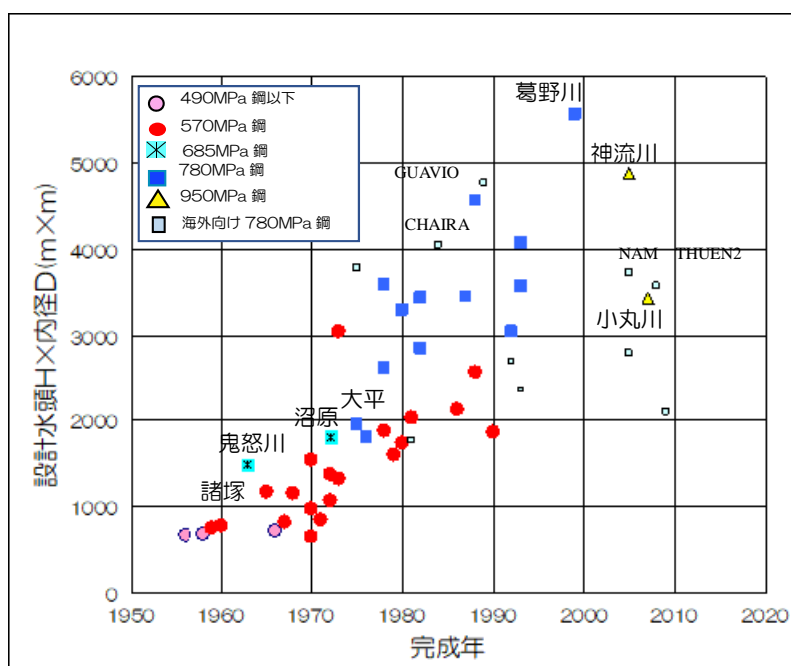


図1 水圧鉄管の大型化と使用鋼材の推移

2.2 高張力鋼適用の利点

水力発電所はスケールメリットを追及するため、高落差・大容量化の道を行ってきた。これに伴って水圧鉄管の設計内圧は大きくなり、鉄管の板厚が増加して鉄管重量および溶接量が増加してくる。これに対して、管胴に引張強度の高い鋼材を使用することで、板厚を薄くして鉄管の重量や溶接量を低減し、水圧鉄管の建設費の多くを占める現地工事費を低減することができる。表 1 に鉄管に使用する鋼材と板厚・重量・溶接量との関係を例示した。一般に鉄管の重量は板厚に比例し、溶接量は板厚の二乗に比例することから、高張力鋼の適用が作業性、工程、経済性に大きく影響することがわかる。

表 1 使用鋼種と板厚・重量・溶接量の関係
(軟鋼で必要板厚 90mm の水圧鉄管に高張力鋼を適用した場合の比較)

鋼材の強度	板厚 (mm)	重量比 (%)	溶接量比 (%)
軟鋼 (400MPa クラス)	90	100	100
HT570	45	50	25
HT685	36	40	16
HT780	33	37	13
HT950	27	30	9

2.3 HT950 の開発と実用化

1982 年頃から水圧鉄管用の HT950 鋼材、溶接材料および施工法の開発検討を開始した。この研究成果を基に、水門鉄管協会では 1999 年に「950N/mm² 級高張力鋼材 (HT100) の水圧鉄管適用への技術指針」を制定し、同時に日本電気技術規格委員会 (JESC) の規格として承認された。(注：水門鉄管協会は H27 年 7 月に解散し(社)電力土木技術協会に業務が引き継がれた)

我が国で初めて HT950 が適用されたのは、2005 年に運開した東京電力神流川発電所で、管胴部の最大板厚は 72mm、使用した HT950 は約 2,330 トン (鉄管重量の約 46%) であった。さらに九州電力小丸川発電所にも約 1,300 トン (鉄管重量の約 37%) の HT950 を適用しており、管胴部の最大板厚は 66mm であった。なお神流川発電所と小丸川発電所は、HT950 を使用した水圧鉄管として世界で唯一稼動しているものである。これらの水圧鉄管の概要を図 2 および図 3 に、使用材料を図 4 に示す。

神流川発電所では HT950 を適用したことにより、水圧鉄管の重量を約 17% 削減し、斜坑の据付期間を約 10% 短縮する等の効果が得られた。

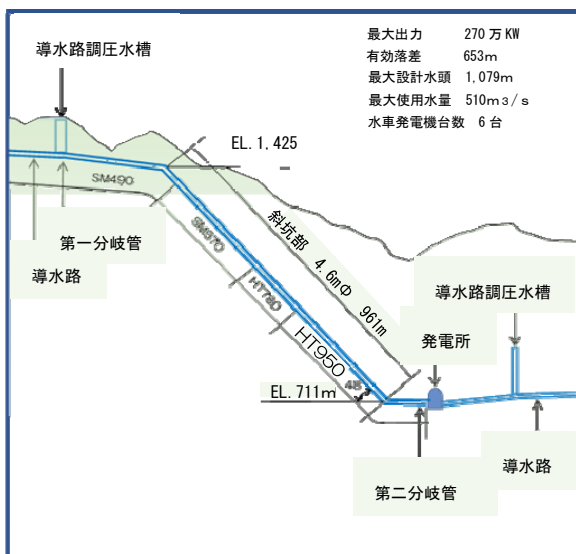


図 2 神流川発電所水圧鉄管

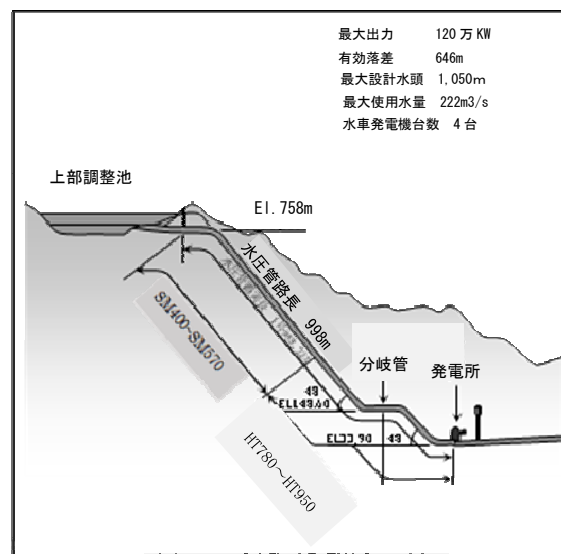


図 3 小丸川発電所水圧鉄管

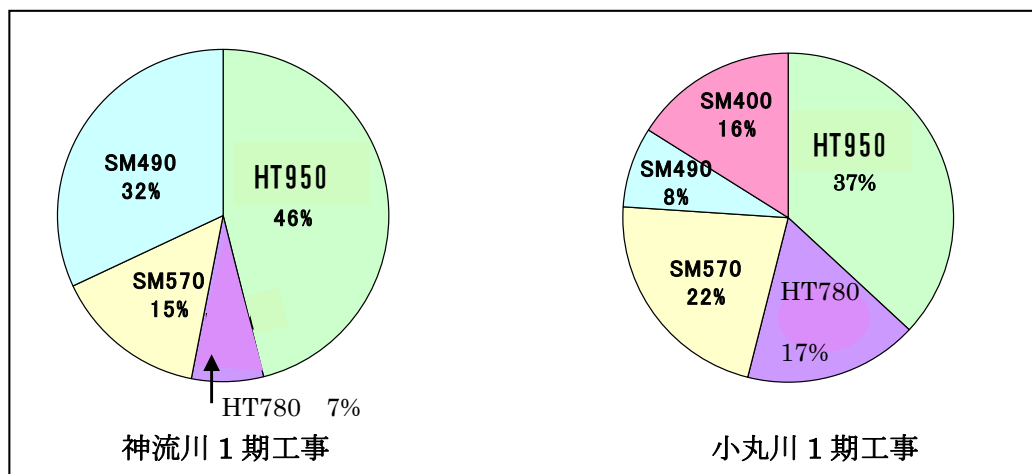


図 4 使用材料の構成

3. HT950 鋼板と溶接継手の目標性能

HT950 鋼板および溶接継手の目標性能を以下の基本的考え方に基づき設定し、鋼板および溶接材料の開発を行った。

- ① HT780 と同等の安全性が確保されること
 - じん性については HT780 に対する考え方を踏襲した。
 - 母材は最低使用温度 0°C でぜい性破壊の伝播を停止する性能を有すること
 - 溶接部は最低使用温度 0°C でぜい性破壊を発生しない性能を有すること
- ② HT780 と同程度の能率で施工できる溶接性・施工性を有すること
 - 予熱・パス間温度、溶接入熱量、後熱条件、使用可能な溶接方法等
- ③ 鋼板の材料費の単価が、HT780 との許容応力比以下であること

注) 母材と溶接継手でじん性に対する要求仕様が異なるのは、溶接継手に母材と同レベルのじん性を要求することが技術的に困難なことから異なる要求仕様としたものである。万一溶接部でぜい性破壊が発生した亀裂は母材でその伝播を停止させるという考え方である。

4. HT950 鋼板の開発

4.1 鋼板の化学成分

化学成分の設計は、製鋼・厚板製造技術・熱処理条件等を考慮し、鋼板そのものに要求される性能（引張特性、じん性等）溶接部に要求される性能（BOND 部や HAZ の衝撃性能等）および溶接施工条件（予熱温度、溶接入熱量等）を勘案して行うものである。JESC では HT950 の化学成分については C、P、S、Ceq、P_{CM}のみを規定している。C は HT780 と同じ値とし、不純物元素である P、S については、HT950 の試験材の実績をもとに上限値を決めた。Ceq、P_{CM}については、じん性および溶接性を考慮し HT950 の製鋼実績をもとに上限値を規定した。Ni については、じん性向上に有効であるが高価であるので経済性を考慮して添加量を決めることが必要である。その他の合金成分については、結晶粒の微細化、焼き入れ性の向上等の目的で適切に添加することが必要である。実際の製造にあたっては、P・S の極小化、TMCP、特殊熱処理法の採用等最新の製鋼・厚板製造技術が駆使された。表 2 に母材の化学成分の仕様と、開発のために製造した鋼板の実績例を HT780 と比較して示す。

表 2 母材の化学成分 (t≤50)

		C	SI	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	Ceq	P _{CM}
HT780	JIS	0.14	0.55	1.50	0.015	0.015	0.50	0.30/	0.80	0.60	0.05	0.005	0.53	—
	G3128	以下	以下	以下	以下	以下	以下	1.50	以下	以下	以下	以下	以下	
	実績 n=62	0.09/ 0.11			0.003/ 0.010	0/ 0.003		0.90/ 1.35					0.45/ 0.53	0.22/ 0.26
HT950	JESC	0.14	—	—	0.010	0.005	—	—	—	—	—	—	0.59	0.29
	H0001	以下			以下	以下							以下	以下
	実績	0.09/ 0.12	0.09/ 0.29	0.74/ 1.11	0.003/ 0.007	0.0007/ 0.003	0.02/ 0.26	1.04 1.99	0.49/ 0.71	0.43/ 0.56	0.04/ 0.10	0/ 0.0016	0.51/ 0.57	0.24/ 0.27

4.2 鋼板と溶接継手の機械的性質

鋼板および溶接継手の機械的性質・許容応力等を HT780 と比較して表 3 に示す。

表 3 鋼板および溶接継手の機械的性質 (t≤50 の場合)

	HT780		HT950	
	母材	溶接部	母材	溶接部
0.2%耐力 (N/mm ²)	685 以上	—	885 以上	—
引張強さ (N/mm ²)	780~930	780 以上	950~1,130	950 以上
伸び (%)	16%以上		12%以上	
許容応力 (N/mm ²)	330		400	
引張強さに対する安全率	2.35		2.35	
破面遷移温度 (°C)	-40°C以下	0°C以下	-50°C以下	-10°C以下
シャルピー吸収エネルギー- 試験温度	47J 以上 -40°C	47J 以上 0°C	47J 以上 -55°C	47J 以上 -10°C

4.3 鋼板の機械的性能

1) 引張性能

鋼板については WES3001 (1996) 「溶接用高張力鋼板」 HW885 に基づき 0.2%耐力、引張強さおよび伸びを表 3 の通り規定した。

2) 衝撃性能

WES3003 (1995)において「一般にぜい性破壊を考慮する溶接構造物に使用する鋼板」として G 種、「ぜい性破壊が特に問題となる特殊な溶接構造物あるいは、特定の場所に使用する鋼板」として A 種を定めている。HT950 の母材に必要なじん性値は、A 種鋼板の要求値を満足するものとして許容応力と最低使用温度を 0°Cとして破面遷移温度を算出し、5°C単位に丸め表 3 に示す通り規定した。この要求仕様を満足していることを確認するため、母材は温度勾配形の ESSO 試験等のぜい性破壊試験を最大板厚で行い、0°Cでぜい性破壊の伝播を停止する性能を有していることを確認した。その上で材料の出荷時には、シャルピー衝撃試験の要求値 (破面遷移温度: vTrs) に変換して性能確認を行った。

5. 溶接材料の開発

5.1 溶接継手の機械的性質

溶接継手部の機械的性質の仕様を HT780 と比較して表 3 に示す。

1) 引張強さ

溶接継手部は、原則として母材の保証引張強さと同等以上の引張強さを有することとした。継手の引張強さは、JIS Z 3121 (1993)「突合せ溶接継手の引張試験方法」1号試験片で求めるのが一般的であるが、試験片形状および母材並びに溶接金属の強度の影響を受けるため、溶接金属の引張強さが低い場合は1号試験片によって得られる強度が設計基準強度を下回る可能性がある。しかし、溶接金属の強度が母材の保証引張強さを下回っても、溶接部の幅が試験片の幅に比べて小さくなると溶接継手部の強度は母材の強度に近づくことが知られている。HT950については、1号試験片による引張試験の結果、母材の保証引張強さを下回った場合でも、製品の溶接継手の強度が母材の保証引張強さと同等以上であることを示すことができれば使用してよいこととした。

この考え方は、水門鉄管技術基準にも記載されている軟質継手の考え方である。HT950の溶接材料の場合強度を高く設定すると、じん性・溶接性が低下する傾向がHT780と比較してより顕著になる。したがって、強度を抑制した溶接材料を採用できるようにした。溶接継手の強度が母材の保証引張強さと同等以上であることを示すこととは、軟質継手の考え方に基づき理論的に説明すること、広幅引張試験で確認すること等が該当する。

2) じん性

HT780の技術基準を定めた当時は、破壊力学の揺らん期であり、水圧鉄管の分野においてはWES 3003 (1973)の線形破壊力学をもとにしたぜい性亀裂伝播停止特性において、停止亀裂長さをA種と比較して短く設定したG種の要求じん性を溶接継手部のぜい性破壊発生特性に相当するとみなしていた。

水門鉄管技術基準においてHT780の溶接部に規定されているじん性は、WES 3003 (1973)のG種に準じて破面遷移温度を0°Cに丸め、その試験温度での吸収エネルギーを47J以上としたもので、この考えが現在に至るとともに十分な実績となっている。

一方、破壊力学の進歩とともにWES規格自体も改正され、現在では、溶接部を対象とした規格であるWES2805「溶接継手のぜい性壊発生および疲労亀裂進展に対する欠陥の評価方法」が制定され、この規格に準拠したじん性算出の考え方もある。

HT950溶接部の要求じん性算出の考え方として、上記の2つの考え方、すなわちWES 3003 (1973)に準拠する考え方とWES 2805 (1997)に準拠する考え方のいずれでもよいものとした。

表 3 に示す HT950 溶接継手部の衝撃性能は、WES 3003 (1973)に準拠して算出したもので、作用応力を許容応力とし、最低使用温度を 0°Cとして破面遷移温度を算出し、5°C単位に丸めた値である。

一方、WES 2805 (1997) (注：最新版は 2011) に準拠する場合は、作用応力・溶接残留応力・突合せ継手部の角変形量・想定きずの寸法等を対象とする溶接継手部に対して設定し、水圧鉄管の最低使用温度における必要破壊じん性値を求め、この値から必要シャルピー吸収エネルギー値を計算すれば良いこととした。

5.2 溶接材料の開発

HT950 溶接材料の開発においては、溶接金属の高じん性化と溶接施工性を確保するための耐割れ性の改善が重要な課題であった。

1) 高じん性化

溶接金属のじん性向上のアプローチとしては、酸素量低減によるマイクロ組織の微細化と延性亀裂抵抗の向上が最大のテーマとなった。酸素量の低減方法は、基本的には溶接中の化学反応（脱酸反応）の効果的促進によって行う。

SMAW と SAW では、フラックス組成を高塩基性とし強脱酸剤を活用することによる超低酸素化を図った。MAG 溶接ワイヤでは、シールドガス組成を Ar+ (5~10%) CO₂ として、アーク雰囲気中の酸化性を低減するとともに強脱酸性成分を活用することで超低酸素化を図った。これらにより溶接金属中の酸素量を従来の 300~1000ppm から 150~200ppm 程度に低減した。SMAW について、酸素量低減とじん性の関係を図 5 に示す。この他に Ni の適量添加による強靭化等の改善で高じん性化を実現した。

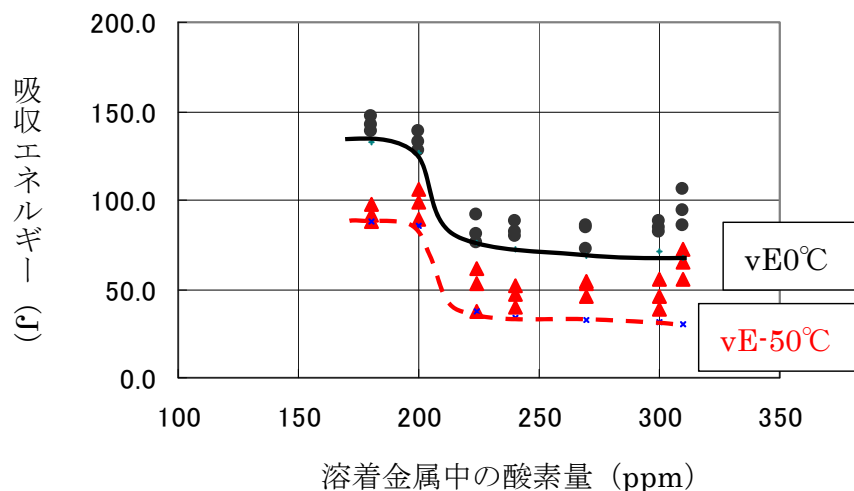


図 5 溶接金属の酸素量の切り欠きじん性への影響

2) 耐割れ性の改善

溶接金属は図 6 に示すように、強度が高くなるほど水素ぜい化に敏感になり、少量の水素の存在によって溶接金属内、あるいは熱影響部に割れが発生する。HT950 の溶接材料の耐割れ性の向上のためには、溶接金属の強度を許容しうる範囲で抑制するとともに、水素源を極力低減することが有効である。

溶接金属の水素源としては、MAG、TIG および SAW では溶接材料そのものからの侵入が支配的で、SMAW では大気雰囲気からの侵入が支配的である。SMAW および SAW のフラックスは、原料および焼成条件を検討して水素量低減を図った。MAG および TIG ワイヤではワイヤの表面性状の改善により水素量低減を図った。その結果、MAG および TIG では、割れ防止予熱温度 50°C 以下という良好な耐割れ性を示した。SMAW および SAW では、溶接直後熱 (150°C で 2 時間以上) を

併用することで、割れ防止予熱温度が 100℃以下となることを確認した。溶接割れ防止温度の評価は、HT780 までは y 形溶接割れ試験による HAZ の割れ防止予熱温度が支配的であったが、HT950 の場合は溶接金属の割れ特性が支配的であることが確認された。そのため、割れ試験方法としては U 形溶接割れ試験を y 形割れ試験に追加して実施することとした。この他に多層溶接割れ試験も合わせ実施し、これらにより溶接割れ防止に必要な予熱・後熱条件を決定した。

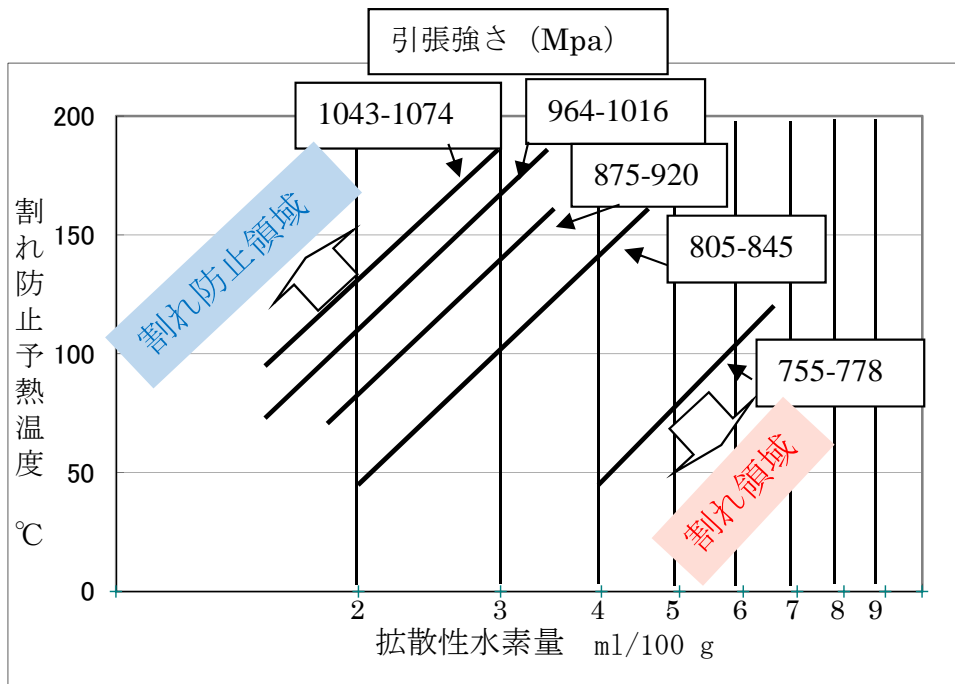


図 6 SAW の拘束多層溶接割れ

5.3 溶接性について

水圧鉄管は高温多湿な現場隧道内で溶接するため、良好な溶接性が求められる。そのため HT950 の予熱パス間温度・入熱量・後熱条件等の溶接施工条件が HT780 と同等なレベルとなるよう、鋼材と溶接材料を開発してきた。確性試験の結果、表 4 に示す通り HT780 とほぼ同等の溶接施工管理で施工できることが確認できた。HT780 と異なる点は溶接直後熱が必要な点である。

表 4 HT780、HT950 水圧鉄管の溶接施工管理基準

項目		HT780	HT950
溶接施工	予熱温度	100℃以上	100℃以上 (t≤50mm)
	パス間温度	230℃以下	230℃以下
	入熱量	45KJ/cm 以下 (継手平均)	
	溶接直後熱	-	150℃×2 時間以上
非破壊検査	方法と抜取率	UT または RT 抜取率で継手効率を決定	
	検査時期	溶接完了後 24 時間以降	

5.4 溶接継手の性能

表 4 の溶接施工管理基準に従って溶接継手を製作し、継手の強度・破壊じん性等の各種試験を行った結果、最低使用温度（0℃）で溶接部がぜい性破壊を発生しないというじん性要求を含め、全ての要求性能を満足することを確認した。

溶接継手のじん性については、図 7 に示すようなK開先の溶接継手を製作し、CT 試験等のぜい性破壊試験をじん性が最も低い BOND 部で実施し、溶接施工法試験においては、これをシャルピー衝撃試験の要求値（破面遷移温度：vTrs）に変換して性能確認を行うこととした。

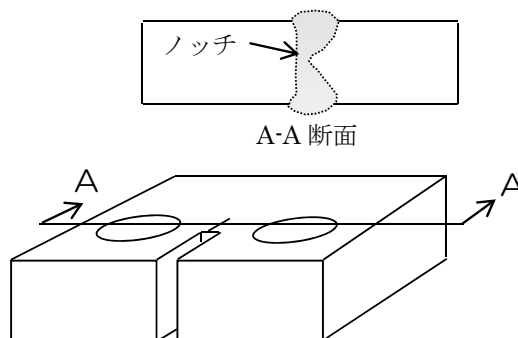


図 7 CTOD 試験片

6. 水圧鉄管の現地工事

6.1 仮工場

揚水発電所の鉄管は輸送上の制約から現地に仮工場を設置し、工場で製作した 2 枚のシェル(半割れ管)の縦継手を溶接して 3m の単管を製作し、それらを 5 本つなげて 15m の単位管とする。これらの溶接には SAW を適用した。

大ブロック化することにより、トンネル内の溶接と比較して仮工場での溶接量が非常に多くなる。SAW による下向き溶接で施工できるので効率化が図れる一方、仮工場での溶接がクリティカルとなってくる。

図 8 に示す円周継手 4 本を同時に溶接する 4 シーム同時溶接装置を適用することで、この問題を解決した。4 台のサブマージアーク溶接機のアークを同時に発生させる必要があるため、ワークを回転させながらアークスタートできる様、アークスタートの際に高周波電流を用いてアークを安定して発生できる特殊な電源を採用した。

開先形状は X 開先とし、割れのリスクを軽減するため、仮付け溶接の予熱温度は本溶接より 25℃ 以上高い温度で管理し、溶接材料は本溶接より強度の低い溶接材料を適用した。

ルート部の割れ等の溶接欠陥を防止するため、裏はつりを実施する必要がある。4 本の円周継手を同時に溶接するので、ガウジング後の溝形状を均一にする必要があり、プラズマガウジングによる自動ガウジングを適用した。この方法は自動化が容易で溝形状を均一に出来ること、および騒音と粉塵が少ないことが特徴である。



図 8 4 シーム同時溶接装置

6.2 据付単位管

仮工場で製作した据付単位管はウインチに接続した台車によって、傾斜した隧道に搬入して据付けられる。HT950 を適用することで鉄管の重量を軽減できるので、据付単位管の長さを大きくすることが出来る。HT950 を適用したプロジェクトでは、据付単位管の長さを、従来の 12m から 15m とし、工期短縮に大きな効果をあげてきた。図 9 に斜坑の据付速度を示しているが、大ブロック化が工期短縮に大きく寄与していることがわかる。

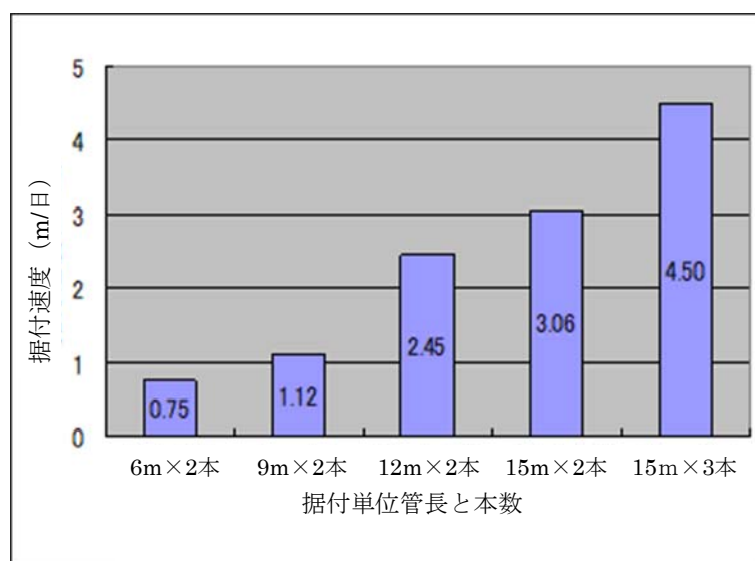


図 9 斜坑の据付速度

6.3 現場溶接

傾斜隧道内における全姿勢の円周溶接は、溶接品質の向上、作業員の負担軽減、工程短縮のため、従来から自動溶接を適用してきた。HT950 水圧鉄管に適用した最新の片面自動溶接システムは、鉄管の内面から裏波溶接を行うことで、外面での作業を極小にして、1 サイクル前に溶接完了した円周溶接の非破壊検査および外面コンクリート打設を、次のサイクルの溶接作業と並行して行なうものである。これにより、図 10 に示すように、1 サイクルの工事日数を、従来の平均 16 日から平均 10 日に短縮することができた。

片側溶接の方法としては裏当金を使用することが多いが、HT780 以上の高張力鋼の溶接には、溶接継手に不溶着部を残すことによる溶接割れのリスク、ルート部に溶接欠陥を残すリスクを避けるため適用していない。

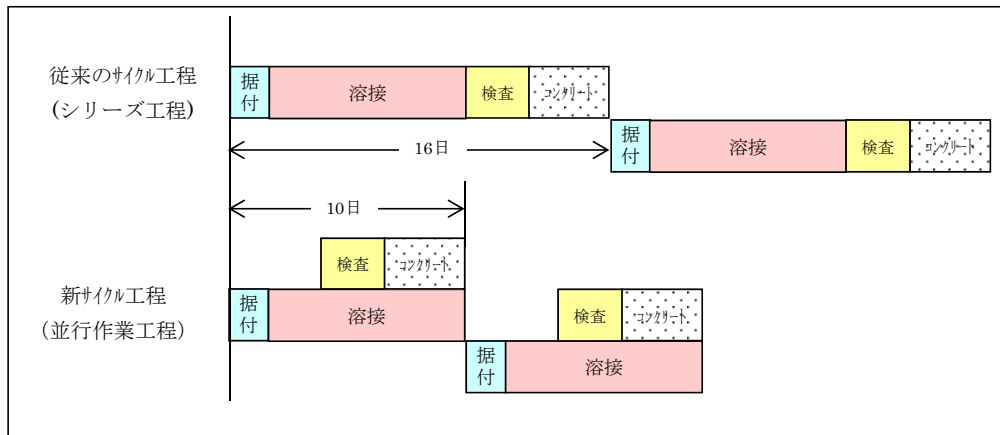


図 10 現場溶接のサイクル工程

HT950 の現場溶接には、取り外し可能なグラスウール製の裏当材を使用し、鉄管内面からの自動 MAG 溶接で外面に余盛を形成する裏波溶接を適用した。

図 11 に開先形状を、図 12 に装置構成を、図 13 に溶接装置を、図 14 に裏当材の貼付け装置を、図 15 に遠隔制御盤を、図 16 に上向姿勢による溶接部のマクロ組織を示す。

溶接装置は鉄管内部に設けた作業ユニットに設置したレール上を走行する。1 シームに溶接装置を 2 台配置し、地から天に向かって溶接する。2 シームを同時に溶接するように、2 つの溶接フロアを設けている。溶接ヘッドは 3 次元のオシレート、前後左右のトーチ角度の調整機構、アーク監視カメラ、開先倅いセンサ等を装備している。

全姿勢の裏波溶接を MAG 溶接で実現するために、グラスウール製の裏当材を自動的に貼付け、取り外す裏当材装置を開発した。本装置は鉄管外面に取付けたアングルレール上を内面の溶接装置に同期して走行し、リールに巻いたグラスウール製の裏当材を溶接部に銅板で押し付けながら移動するもので、溶接後順次裏当材をはがしてリールに巻き取っていく。溶接オペレータはモニタにより裏当材を取り外した後の裏波ビードを監視しながら必要に応じて溶接条件を微調整する。溶接制御装置は作業ユニット上部の操作室に設置し 2 シーム 4 台の溶接装置と裏当材装置の遠隔制御を行う。溶接条件の制御は、溶接装置の位置情報からあらかじめデータベース化した各溶接姿勢における最適条件を自動選択して制御する。オペレータはアークモニタの画面を見ながら条件の微調整を行う。

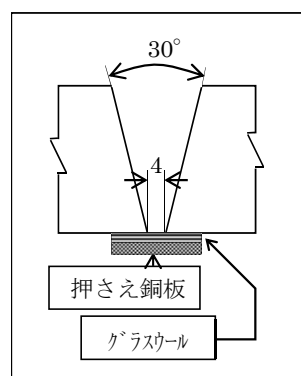


図 11 開先形状

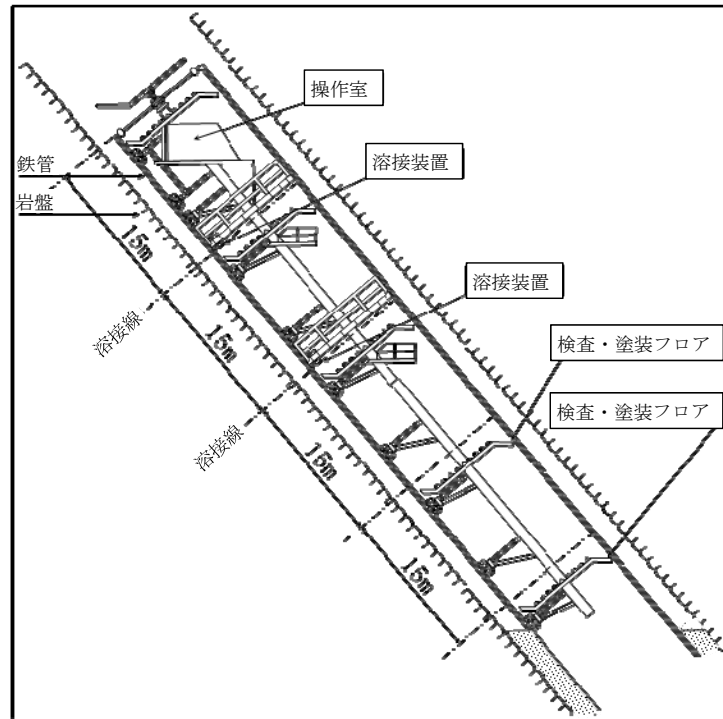


図 12 装置構成



図 13 片面 MAG 自動溶接装置

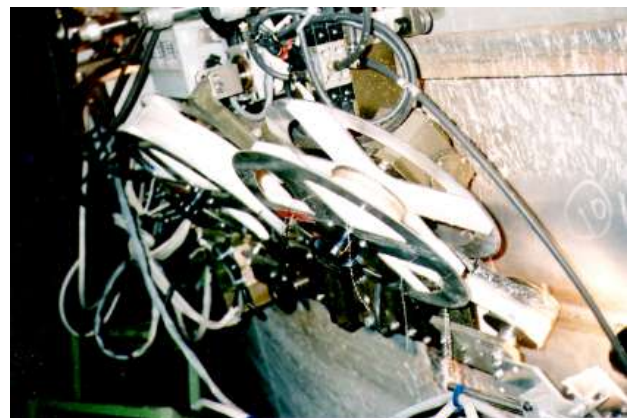


図 14 裏当材貼付け装置



図 15 遠隔制御盤

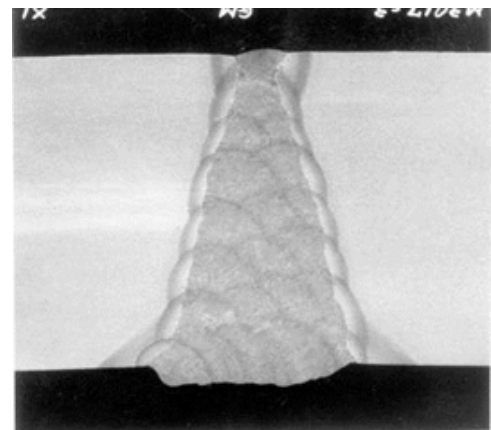


図 16 マクロ組織(上向き姿勢)

6.4 その他の現場溶接

分岐管やバンド管の現場溶接には、被覆アーク溶接を使用した。仮工場、現場での仮付け溶接は、拘束度が高くかつ冷却速度が速くなるため、予熱温度は本溶接より 25℃高く管理するとともに、本溶接より強度の低い溶接材料を使用し、仮付け溶接の割れ防止を図るようにしている。

7. まとめ

日本では 1960 年に HT570 を使用した最初の水圧鉄管が運転開始し、その 15 年後に HT780 を使用した水圧鉄管が完成した。そして 45 年後の 2005 年に HT950 を適用した水圧鉄管が運転を開始した。

水門鉄管協会に於いて HT950 の技術指針を策定したころに、スイスで HT950 を使用して運転開始して間もない水圧鉄管が損壊したため、協会と共に情報を収集し、日本で同様な事故の起こる可能性がないか緊急に検討を行った。当初は外部から侵入した水素による遅れ割れが原因の可能性があるとの情報があり、日本の材料について同様な可能性がないか安全性評価を行った。その結果十分な安全性が確認された。後に、この破壊の原因は仮工場での施工管理不良に起因する縦継手の低温割れから生じたぜい性破壊であると結論された。その際に我が国での高張力鋼実用化の検討における考え方との差についても感じるどころが多かった。

日本での高張力鋼実用化の歴史の各段階で、『鋼材や溶接材料の製造の容易さ』と、『施工管理に余裕をもたせる（施工の容易さ）』という一般的には相反する要求に対して、『施工の容易さ』に十分配慮しながら、学識経験者、ユーザ、ファブリケータ、材料メーカーが共同で要求性能の設定、開発・検証を行なってきた。そして、その成果を基準化するとともに、施工経験を反映した基準の改訂を継続的に行ってきた。このような検討の歴史は日本の高張力鋼の開発実用化の大きな特徴といえる。

水圧鉄管の大型化と経済性の向上に高張力鋼が果たして来た役割は極めて大きかったといえる。それを支えてきたのは、製鋼技術、厚板製造技術、溶接材料、自動化技術および非破壊検査技術等の高張力鋼に関連する技術の発展と、学識経験者、ユーザ、ファブリケータ、材料メーカー等が施工性に十分な配慮をして進めてきた共同研究であり、その成果を基準化してきたことである。

さらに、実施工に当たって契約書上の数少ない要求仕様のみを満足すれば良いという考え方ではなく、「仕様を決めた背景を理解して製造する」という取り組みも重要な点であったと考えている。

参考文献

- 1) 渡邊望,小笠勝,伊藤貴司,亀井博正,高田智成:揚水発電所向け水圧鉄管への新技術の適用,三菱重工技報,Vol.33 No.4 1996 242-245
- 2) 下山博司,藤田憲,仁科直行,渡邊望,日下佳巳,政岡光男:水圧鉄管斜坑部現地片面自動溶接システムの開発,三菱重工技報,Vol.30 No.5 1993
- 3) 渡邊望,藤田憲,仁科直行,政岡光男:水圧鉄管斜坑部現地片面自動溶接システム,溶接技術,Vol.42 1994-9
- 4) 渡邊望,西上幸臣:950N/mm²級高張力鋼材(HT950)の水圧鉄管適用への技術指針 水門鉄管協会 1999年度 水門鉄管技術講習会テキスト

- 5) 久保田克寿,南将行,渡邊望,鈴木成治,堀川浩甫 : 高張力鋼材の外部侵入水素に起因する遅れ破壊に対する安全性評価,水門鉄管 No.225 2006 72-77
- 6) K.Horikawa, N.Watanabe : Application of Extra-High Tensile Strength Steel for Hydropower Plants in Japan, Conference on High Strength Steels for Hydropower Plants Takasaki July 2009
- 7) K.kubota,M.Minami,N.Watanabe :Construction of Steel Penstocks using HT950 at KAN-NA-GAWA Hydro Power Plant of TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY Conference on High Strength Steels for Hydropower Plants July 2005 Organaised by IWS TU Graz
- 8) N.Watanabe,T.Higashikubo:Technical Guidline to Adopt 950MPa Class High Tensile Strength Steel Plate(HT950) for Penstocks, Conference on High Strength Steels for Hydropower Plants July 2005 Organaised by IWS TU Graz
- 9) N.Hara,M.Sato : Development and Application of Welding Consumablesfor 950MPa Class High Strength Steels, Conference on High Strength Steels for Hydropower Plants Takasaki July 2009
- 10) TTsuzuki,N.KawabataM.Okushima,K.Tokunoh,Y.Okamura:Development and Application of 950MPa and 780MPa Class High Strength Steel for Penstock, Conference on High Strength Steels for Hydropower Plants Takasaki July 2009

<略歴>

渡 邊 望 (わたなべ のぞむ)

1975年3月 東京都立大学 工学部 土木工学専攻 修了
 1975年4月 三菱重工業株式会社 入社 神戸造船所鉄構部配属
 2006年4月 原子力サービスエンジニアリング株式会社
 2009年10月 三菱重工メカトロシステムズ株式会社
 2015年9月 三菱重工メカトロシステムズ株式会社 退職
 現在に至る