

特集記事・5

我が国の社会インフラを支える鉄鋼材料

水圧鉄管用高張力鋼

High Strength Steel for Penstock

川畑友弥

Tomoya Kawabata

東京大学大学院
准教授

1 はじめに

鋼構造物の大型化に伴い、構造用鋼の高強度化要求が高まっている。これは、高強度化によって設計応力を高め得るために構造重量を軽減でき、施工コスト、輸送コストなど構造物全体の制作コストを低減できるためである。しかしながら、高強度化によって一般的には溶接割れや脆性破壊の感受性が高まることとなる。このため、高強度化に際しては、従来以上に、材料・設計・施工の総合的な検討が必要となる。

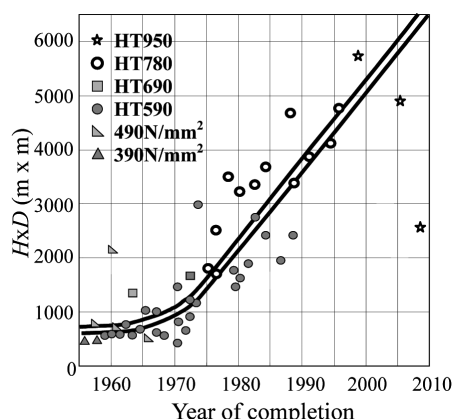
特に、水圧鉄管（ペnstock）は土木分野への高強度鋼適用構造の代表格であり、水圧鉄管の大型化にともなって、適用される鋼板も高張力化が進んだ歴史を持ち、既にHT100（引張応力950MPa級）鋼までが実用化されている¹⁻⁹⁾。図1は水力発電所完成年と水力発電所の規模を示す $H \times D$ （ H ：設計水頭[m]、 D ：最大管径[m]）、及び使用鋼材の関係を示したものである。水力発電所の大型化に伴い順次高強度の鋼材が使用されてきた経緯が判る。これは我が国の電力需要の顕著な伸びに対し、特にピーク需要に対応する手段として建設された揚水発電所の高効率化に大きく寄与したものである。このように当分野は溶接鋼構造の中で最も高張力化が早期に進

展し、それだけに様々な問題点を先駆的にクリアしてきた分野でもある。本稿では、現在の水力発電所建設の動向を概説した上で、最高強度鋼であるHT100の国内外での適用事例について詳説するとともに今後の高張力鋼のさらなる適用拡大に対する必要事項を展望する。

2 国内水圧鉄管に対するHT100の適用

日本は豊富な水資源を国内に有することもあり、化石燃料や原子力に頼らない再生可能エネルギーの筆頭として世界第6位¹¹⁾の水力発電能力を誇る。中でも大容量の発電能力を持つ揚水発電所には図1で示したように高張力鋼が積極的に使用されてきた歴史を持つ。日本国内のペnstock用鋼に対し、“水門鉄管技術基準水圧鉄管編”（（一社）電力土木技術協会発行）において、HT80に対する要求特性の思想が示されている。これは、溶接部からの脆性き裂発生を防止するとともに、万が一溶接部で脆性き裂が発生しても、母材で停止することにより二重の安全性を確保しようという考えに基づいたものであり、“溶接部は0℃で脆性破壊が発生しないこと”に加え“母材は0℃で脆性き裂の伝播を停止すること”を要求している。さらにHT100についても同様の要求がなされ、（社）水門鉄管協会所管の規格JESC H0001（2000）¹²⁾として、日本電気技術規格委員会に承認されている。その要求性能の詳細を表1～3に示すが、母材には脆性き裂伝播停止特性をWES3003（日本溶接協会規格、低温用圧延鋼板判定基準、1995）による換算を経てシャルピー特性として要求し、溶接部については脆性き裂発生特性を使用温度にて要求していることが読み取れる。

HT100（950N/mm²級）鋼板は、1964～1971年頃に開発され、潜水艦用として規格化されている。この鋼材はNiを5～6%含む高価な特殊な材料であった。一般構造用HT100鋼板は、1965年頃から研究開発がなされているが、板厚も薄く、

図1 ペnstockの大型化と高張力鋼適用の推移¹⁰⁾

靱性レベルも低いものであった。1985年頃から高強度、高靱性を比較的経済的な成分系で得るための研究開発が進んだ。一般に鋼材が高強度化すると保有靱性値は低下する。この傾向は母材特性としての脆性き裂伝播停止特性、溶接部特性としての脆性き裂発生特性の双方において一般的に顕著に見られる。一方で当然ながら高強度鋼は高い設計応力のもとで使用されることから、必要とされるこれらの特性もより高度なものとなるのは明らかで、この相反する状況で構造物の安全性確保に十分な特性を具備するには高度な鋼材設計、製造技術および施工技術が必要とされる。特に溶接施工技術については重要であり、ペンストックの場合狭隘・劣悪環境であるトンネル内での現地施工が必須であるため、できる限り優れた溶接施工性を付与することが極めて重要である。上記の諸要求を満たす事を鋼材設計の最重要理念に据え基本的に低C、合金元素添加型成分系にて製造される低P_{CM} (P_{CM}は低温割れ感受性指数) タイプの我が国の高強度鋼は溶接施工裕度により配慮した信頼性の高い溶接構造用鋼材と言える。このようなHT100鋼の材質設計、製造技術については多くの文献に詳細に紹介されているのでここではその要点だけを記述するに留める。HT100級の高強度鋼の製造技術の基本は焼き入れ焼き戻しの熱処理であるので、まずは板厚中心まで十分なマルテンサイト変態率を確保できる成分設計を基本(図

表1 HT100 (950N/mm²級高張力鋼材) の化学成分範囲¹²⁾

板厚 t[mm]	C	P	S	C _{eq}	P _{CM}
t≤50	≤0.14	≤0.010	≤0.005	≤0.59	≤0.29
50<t≤100				≤0.62	≤0.33
100<t≤200				≤0.71	≤0.36

$C_{eq}=C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14$ [%]
 $P_{CM}=C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B$ [%]

表2 HT100 (950N/mm²級高張力鋼材) の機械特性範囲¹²⁾

項目	板厚 t[mm]	t≤50	50<t≤75	75<t≤100	100<t≤200
0.2%耐力 [N/mm ²]		≥885			≥865
引張強さ [N/mm ²]		950~1130			930~1110
伸び [%]		≥12			
厚さ方向の絞り値[%]		≥25			
破面遷移温度, vTrs [°C]		≤-55		≤-60	
吸収エネルギー, vE _T [J]		T=-55°C		T=-60°C	
		≥47			

表3 HT100溶接継手部の機械特性範囲¹²⁾

板厚, t [mm]	t≤100	100<t≤200
引張強さ [N/mm ²]	≥950	≥930
破面遷移温度, vTrs [°C]	≤-10	≤-15
吸収エネルギー, vE _T [J]	T=-10°C	T=-15°C
	≥47	

2) として、板表面での過焼入れによる性能低下を防ぎ、また板厚方向各位置でできるだけ均質かつ優れた機械的性質が得られるように、結晶粒径のコントロールを中心とした技術が適用されている。もちろん熱処理タイプの高強度鋼の特性はP,Sといった不純物元素に敏感なため、製鋼過程でのこれらの徹底した低減も重要である。なお熱処理工程において十分な焼き入れ効果を得るため、極厚鋼では多段の焼き入れプロセスが採用されることもある⁶⁾。特に脆性き裂伝播停止特性にはNiの効果が顕著であることは有名であるが、近年では、TMCP法 (Thermo-Mechanical Control Process) を適用することにより未再結晶域圧延の効果を最終組織細分化へ最大活用した鋼 (図3) も開発され、細粒化による強度靱性バランス改善効果を活用し高価なNi添加量を低減することに成功している (図4)。

また、溶接材料についても母材と並行して開発が進められた¹⁴⁾。高強度鋼の溶接施工は汎用強度鋼では考慮不要の低温割れに対する防止対策が肝要になってくる。図5¹⁵⁾はSAW (Submerged Arc Welding) 材料での溶接金属の強度レベル毎の拡散性水素量 (JIS Z 3118) と多層溶接割れ停止予熱及びパス間温度の関係を示す。拡散性水素量を抑えるほど割れ

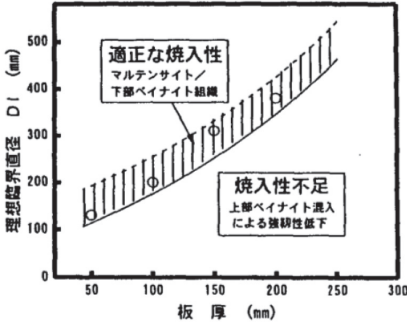


図2 板厚中心部で高靱性を得るためのDI設計⁷⁾
 $DI=0.311\sqrt{C}\times(1+0.64Si)\times(1+4.10Mn)\times(1+0.27Cu)\times(1+0.52Ni)\times(1+2.33Cr)\times(1+3.14Mo)\times25.4$ [mm]

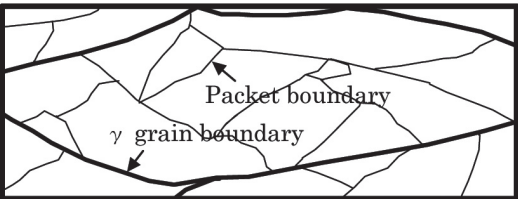
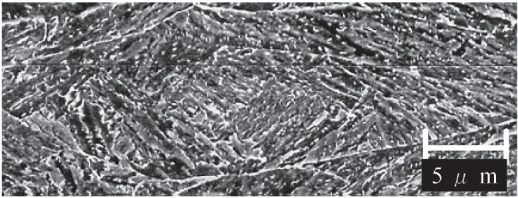


図3 TMCP型HT100鋼のミクロ組織解析例⁸⁾

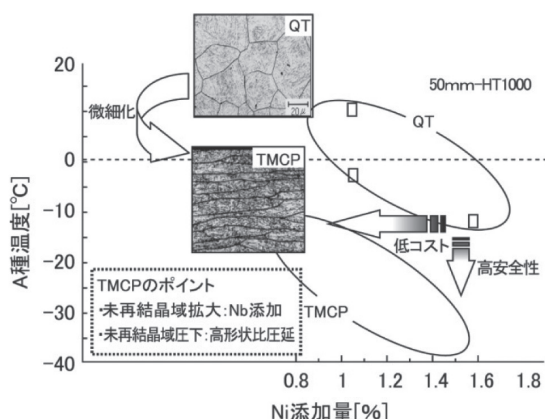


図4 HT100へのTMCP適用によるNi添加量の低減効果¹³⁾

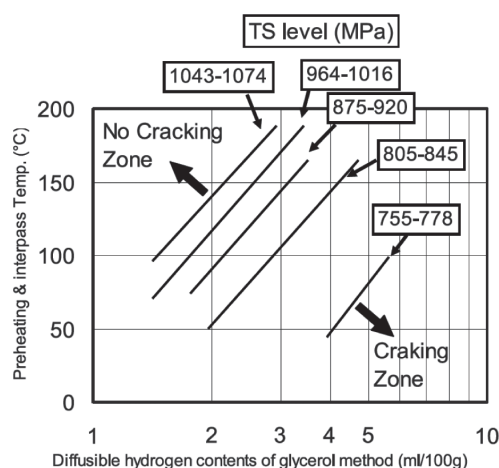


図5 高強度溶接金属における引張強さ・拡散性水素量・予熱・パス間温度と割れ有無の関係¹⁵⁾

停止予熱及びパス間温度が低下し、強度が高いほどその傾向は顕著である。溶接面で低減が有効である水素源は溶接中の大気からの侵入と溶接材料の保持水分量が殆どである。特にSMAW (Self-shielded Metal Arc Welding) 材料とSAW材料においては被覆材とフラックスの含有水分量を抑えることと、アーク中の水素分圧を下げる為に配合原料面の検討がなされてきた。前者については含有水分を抑えた原料の適用、焼成温度の高温化、後者については炭酸塩などのCO₂原料、フッ化物などのフッ素原料の適正化が図られた。脆性破壊特性については、母材と同様Niの適正添加が極めて効果的であることが明らかになり、一般的に母材よりも多量のNiが添加される傾向にある。さらに溶接金属中の酸素量を低減することにより靱性は改善する(図6)。ここで改善が期待できる靱性には2つの特性が挙げられる。一つは酸素量低減により氧化物形成元素が多くマトリクスに固溶状態で残存し、変態点が低下することにより結晶粒の微細化が図れること、つまり耐脆性破壊特性の改善である。二つ目は延性破壊抵抗の増

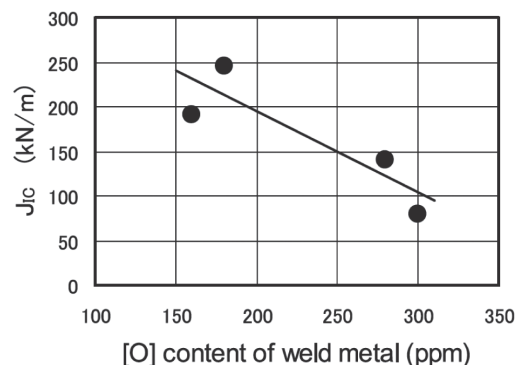


図6 HT100級高強度溶接金属中の酸素量とJICの関係¹⁴⁾

加である。酸素量の低減方法は溶接方法毎に異なり、基本的には溶融金属中の脱酸反応の促進が必要である。SMAWやSAWでは脱酸成分の増加と高塩基化が有効である。またGMAWではシールドガスのCO₂比率の低減によりアーク雰囲気中の酸素源を極力抑制することが有効である。実際の発電所建設にあたっては、これらの開発により得られた溶接材料が適用されている。

水力発電所はピーク電力への強靱な対応力から揚水発電を中心に日本各地で設置が進められ溶接用高張力鋼として最高峰のHT100も国内の二つの発電所に適用されたが、現在我が国では大型プロジェクトの新建設は一段落した感がある。昨今の緊迫した電力事情から水力発電が有望な再生可能エネルギーの一つとして再評価されている向きもあるが、揚水発電所の計画は用地の問題もあり2007～2011年に運転を開始した小丸川発電所以降国内では進んでいないのが現状である。

3 中国における水力発電需要と発電所建設

世界規模でのエネルギー事情を考えると、今後も電力需要は顕著な増加が見込まれており、それに伴い水力による発電電力も増加していくと予想されている。2007～2008年の水力発電機器の地域別の発注量の統計が向井らによって整理されている¹⁶⁾。発注量は水車出力ベースで年平均48.5GWであり、そのうちの実に63%を中国が占める¹⁷⁾。この統計は発電機器についてのものであるが、水圧鉄管についての需要についても同様と考えて良いだろう。中国の水資源のうち、理論上の利用可能な水力エネルギー量(包蔵水力)は694GWと言われており、このうち技術的には542GW、経済的には402GWの発電所建設が可能とされる¹⁸⁾。2020年には発電所建設が328GW(包蔵水力の60%)に達すると予測されており、平均13GW/年のペースで建設される見通しがある。図7には近年の中国の著しい電力量需要の増加を示している¹¹⁾。

この電力需要を賄うため、CO₂排出量の少ない水力発電所建設のニーズも高く発電量においてコンスタントにおよそ2割の貢献をしている。2009年に完成・運用開始し、2012年に全面稼働を始めた世界最大の水力発電所である三峡ダムに匹敵する大型水力発電所の計画も各地で進められている(図8¹⁹⁾には揚子江上流域の建設計画を示す)。地域としては「西部大開発」「西電東送」の方針のもとに西部地区における開発に重点が置かれている。

このように中国をはじめとしインドを含めたアジア地域においては水力発電所建設プロジェクトが活発化している。その多くは高強度鋼適用による設計合理化を指向したものであり、中でも、中国／瀧灘発電所(2007年営業運転開始)、三峡発電所(2009年運転開始)、インド／プルリア発電所(2008年営業運転開始)を皮切りに強度と溶接性とのバランスに優れたTMCP鋼板をHT60まで適用することが一般化してきた。

4 クルゾン・ディクセンス事故とその後の欧州での高張力鋼の使用状況

HT100を水圧鉄管分野へ適用する試みは日本と同じく欧州でも進められていた。世界初適用を実現したのはスイスのクルゾン・ディクセンス発電所であった¹⁰⁾。しかしながらこの発電所は1999年6月の運用開始後、2000年1月までに漏水が見つかり²⁰⁾、鉄管の補修を余儀なくされた。詳細な検査によりその他の内張管を構成する単位管の溶接部の45箇所(2000箇所中で)、別の欠陥(微小き裂)があることが明らかになったため、さらなる補修期間を要し、運用再開は2000年の8月まで持ち越されていた²¹⁾。その後、重大な破壊事故を2000年12月に引き起こし、当該発電所の実質的な運用開始が大幅に

遅延したことは有名である。事故はダムからたいへん長い導水路を経て設置されているペンストックの破壊により管外に噴出した水が表土を押し流し、小集落が流され3人が死亡する大惨事であった²²⁾。この事故によって当該ペンストックに接続されているBieudron発電所は稼働を停止した。その後の調査によって、パイプライン建設を請け負った企業が行った溶接部分が壊れ、約27,000立方メートル²²⁾の水が奔出し小集落へ泥を運んだことが分かった²⁰⁾。当初事故の原因は運転中にシーム溶接金属部の外側表面に位置した開口欠陥から進展した応力腐食割れであるとされた²³⁾。本発電所の事業者であるeos : énergie ouest suisseはさらなる調査のため、独自に専門家会議を設置し原因究明を継続した。調査結果についてはCerjak教授の調査グループを中心としてグラーツで開催されたHSS (Conference on High Strength Steel for Hydropower Plants) 2005にて公開された。この会議には国内にHT100適用予定プロジェクトを抱えていた日本からも積極的に議論に参加している。因みに本シンポジウムにおい



図8 揚子江上流域での水力発電所計画¹⁹⁾

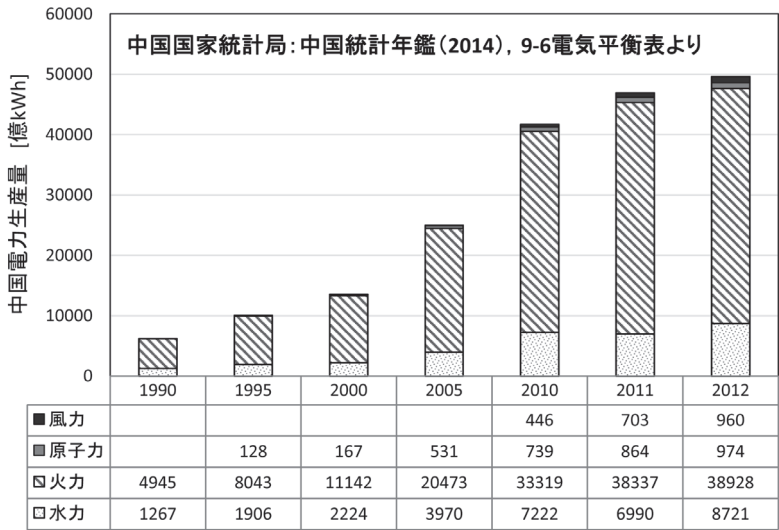


図7 中国の電力需要の顕著な伸び¹¹⁾

ては溶接施工時の低温割れに事故原因を求めており^{24,25)}、当局捜査による運用中の応力腐食割れを否定している。2009年には神流川発電所の近隣都市である高崎市にて会議（通称高崎会議）が開催されている。日本ではHT100を適用した東京電力（株）/神流川発電所、九州電力（株）/小丸川発電所が無事運開したことなどがこの高崎会議にて報告された²⁶⁾。この高崎会議においては、日本の優れた技術をアピールするとともに、事故以来高張力化にブレーキがかかった欧州含め世界にHT100をはじめとする高張力鋼活用の呼びかけがなされた。クルゾン・ディクセンスプロジェクトの進捗状況として、事故後最高強度を780MPaに低下させ、補修作業を行っている旨の報告があったが、ここで、日本の鋼材に対する要求仕様との違いが鮮明化した（表4^{26,27)}）。クルゾン・ディクセンスでは最高硬さの規定が新たに追加されたものの依然C最大値は高めのままであり、SR処理を必須としている。高張力鋼の適用を促進する方法として軟質溶接金属を積極的に認めるという方法がある。クルゾン・ディクセンスでの事故も溶接金属における水素割れが原因であった。これを回避するためには、極めて限られた溶接条件かつ高コストの溶接施工を行う必要がある（図9には欧州ミルメカによる溶接推奨条件範囲を示す²⁸⁾。HT100（S960QL）では極端に推奨範囲が狭い）。

クルゾン・ディクセンスの当該発電所は事故後の修復を終えて2010年に再稼働した²⁹⁾後、第3回のHSS会議が再びグラーツで2013年に開催された。ここでも高張力鋼の特性や軟質継手の性状に関する話題が議題となったが欧州では最高強度クラスをHT80級に据えてしばらく建設工事が進められているのが実情である。HT100の適用再開は直ぐには実現しない可能性が高いと見られている。なお、国内でHT100を初適用すべく施工中であった神流川発電所プロジェクトでは事業者である東京電力（株）および大学・施工会社・ミルメカで構成された検討委員会を組織し、現地曝露も併せて母

材、溶接金属それぞれについて遅れ破壊特性を追加調査し、その安全性を検証している（表5³⁰⁾）。

5 高張力鋼のさらなる適用のために

水圧鉄管工事はトンネル内の高温多湿環境下での溶接施工が必要であり、水圧鉄管用鋼の高強度化にあたっては、常に、溶接性の確保が大きな課題であることから、従来のオーバーマッチ概念（溶接金属強度 $\geq$ 母材強度）には必ずしもとらわれないイーブンあるいはアンダーマッチ継手の検討がなされてきた³¹⁻³⁴⁾。これらの検討の結果、軟化域が存在しても、構造物としての強度は充分確保できることが明らかとなっている。このように水圧鉄管分野においては溶接施工性を考慮し軟質継手を許容する土壌を持つが、軟質溶材の適用は初層のみに限定し、二層目以降の溶接パスにおいてはイーブンマッチ以上の溶接材料を適用している。母材・溶接材料の最も良い組み合わせにおいても溶接施工条件には予後熱・パス間温度制限などの溶接施工条件は限定され、その制限により施工工期が長期化、コストが高騰することがあり、高張力鋼の適用拡大に対し大きな障害になっていると考えられる。つまり、今後の高張力鋼の適用拡大を考えた時、最も考慮すべき問題は溶接施工における管理条件の緩和であると言える。

そのような背景の中、溶接条件の緩和が可能な「HT100鋼板に軟質溶材を組み合わせた場合」の変形（強度）特性・破壊特性について検討された事例が報告されている^{35,36)}。表6、

表4 クルゾン・ディクセンス補修工事と神流川の仕様比較

プロジェクト	H×D	鋼材量	C	Ceq	母材vE	継手vE
クルゾン・ディクセンス	6,000	12,500	0.18 max	0.60 max	50J (-40℃)	100J (0℃)
神流川	5,000	5,000	0.14 max	0.59 max	47J (-55℃)	47J (-10℃)
プロジェクト	規格	継手Hv	入熱		パス間温度	
クルゾン・ディクセンス	HT780	350max	2.3kJ/mm		150-200℃	
神流川	HT950	-	4.5kJ/mm		100-230℃	
プロジェクト	規格	工場製作	現地仮工場		トンネル	
クルゾン・ディクセンス	HT780	単管3m×2~4 +SR	12m単位管		周継手TIG	
神流川	HT950	曲げ加工	単管3m×5		周継手MIG	

*最高強度クラス,50mmtにおける比較

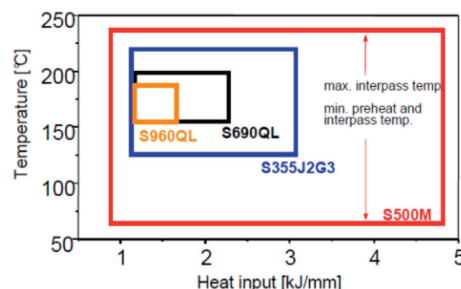


図9 欧州メーカによる推奨溶接条件²⁸⁾

表5 遅れ破壊感受性比較表³⁰⁾

鋼種	メーカ	限界水素量 (mass% ppm)	侵入水素量 (mass% ppm)	限界水素量 ／侵入水素量
HT100 母材	A	1.38 以上	0.26	5
HT100 母材	B	0.64 以上	0.06	10
HT100 母材	C	1.36 以上	0.26	5
HT100 母材	D	1.56 以上	0.35	4
HT100 溶接金属	F	0.22 以上	0.01	22

注1)侵入水素量は水素量が飽和状態となった6週,8週の平均値

図10に継手作製条件を示す。HT100鋼板に対し2ランク強度の低いHT60級溶接材料を組み合わせた継手が評価されている。HT60級の溶接材料を用いる場合には、拘束条件にもよるが実質的には予後熱フリーが達成可能であると考えられ、高張力鋼の溶接施工にとって大きな変革点となり得る条件である。表7に広幅引張試験の結果を示すが、HT60級溶接材料の場合でも塑性拘束効果により950MPa以上の強度が達成できることが示されている³⁶⁾。また、このような軟質継手の破壊靱性についても調査されており、限界CTOD値が改善することが示されている(図11)。軟質継手の問題は表7中にも示されているが、伸びが顕著に低下することである。水圧鉄管としてのどの程度の伸び特性が必要となるかが今後の適用のキーポイントになってくると考えられる。

また、HT100のイーブンマッチを確保した上で溶接金属成分の改良により予後熱フリーを達成することを目標とした試みがNEDO(独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)の鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発プロジェクト内で行われた。溶接による希釈を考慮に入れた上でCr, Mo量を適切に設計することで、予熱フリーを達成している(図12)³⁷⁾。残留オーステナイトを積極利用しているため、溶接金属部の降伏応力が低いことが特徴である。このような背景から等価ワイブル応力概念を用いて、低降伏強度を持つ溶接金属部に要求される耐脆性破壊特性が検討されている³⁸⁾。降伏強度が低下するほど必要限界CTOD値が増加するものの、十分に低く、問題にならない(図13)。実継手を用いた表面欠陥付き広幅引張試験の結果も設計応力(400MPa)を上回るグロス応力600MPaまで脆

性破壊は非発生であり、延性き裂進展も僅かであり、本分野のみならず高張力鋼の鋼構造分野への適用に対する今後の一つの方向性が示されている。

6 おわりに

本稿では特にHT100の開発実用化に用いられた鋼材・溶接に対する冶金・破壊力学知見の概要および欧州でのHT100事故例のレビューを中心に本分野の現状技術を概観した。それぞれの部分で紙面の都合上詳細を省きながら記述したの

表7 広幅引張試験結果³⁵⁾

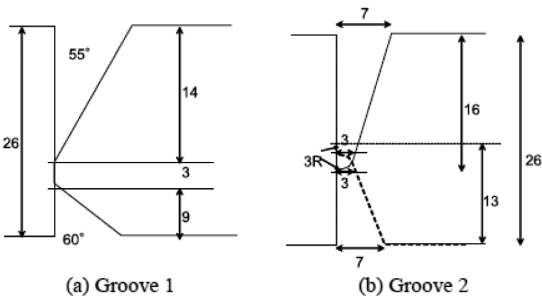
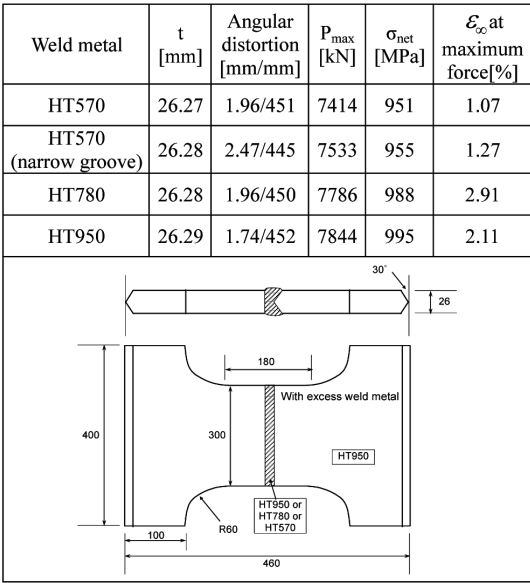


図10 軟質広幅継手検討のための開先形状

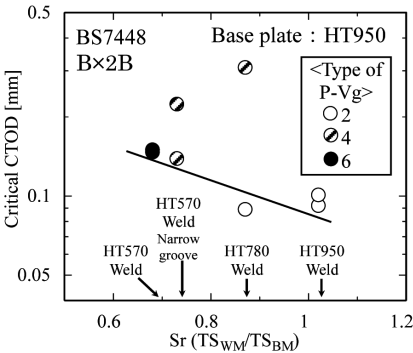


図11 軟質継手の三点曲げCTOD試験結果³⁶⁾

表6 軟質継手の適用性検討のための溶接継手作製条件³⁵⁾

Mark	Edge preparation	Shielded gas	Welding material	preheat (°C)	Inter-pass temp.[aim] (°C)	Current (A)	Voltage (V)	Speed (mm/min.)	Heat input (kJ/mm)
1	#1	Ar80% -CO ₂	950MPa class	125	100~125[125]	270	31.0	310	1.62
2			780MPa class	100	100~220[175]				
3			570MPa class	N/A	~250[200]				
4	#2								

で、深い理解のためにはリストアップした参考文献の調査をお願いする次第である。

2015年7月に経済産業省・資源エネルギー庁から示された「2030年のエネルギー需給の姿」において、我が国政策として安全性 (Safety)・安定供給 (Energy Security)・経済効率性 (Economic Efficiency)・環境適合 (Environment) の観点 (3E+S) を考慮し2030年のエネルギー割合の目標を策定している。目標設定は現在の延長線上の比較的穏当なものであると言えるが、そこでは、既存のエネルギー源に加え、再生可能エネルギーを一定割合で確保したいとの考えが打ち出されている。再生可能エネルギーの中で水力発電所は最も高出力が期待できるものであり、世界的に見るとさらに大きな市場となる可能性がある。特にHT80以上の高強度鋼が大量に適用される可能性のある分野であり、特に新興国を始めとする海外の動向に注視していく必要がある。

謝辞

本稿執筆にあたり、詳細な資料調査に際し大変お世話になった村山技術士事務所／村山弘氏および日本検査キューエイ

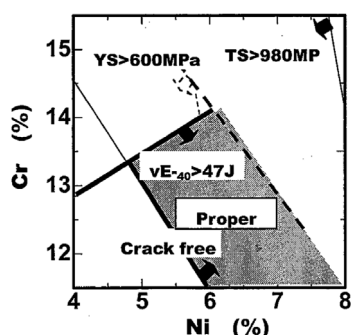


図12 予熱無しHT100を成立させるために必要な溶接金属化学成分範囲³⁷⁾

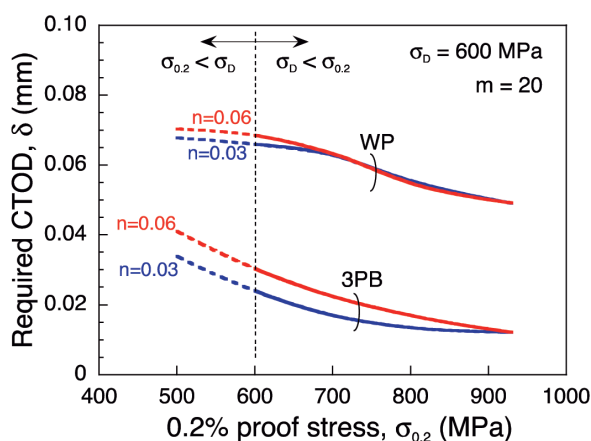


図13 HT100母材に対し低降伏強度を持つ溶接金属部に対する要求CTOD値計算例³⁸⁾

(株)／大西一志氏に心よりお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 渡辺祐一, 有持和茂, 大西一志: ペンストック用HT 980鋼の開発, 溶接学会'96春季フォーラム, 溶接学会全国大会講演概要, (1996) 58, 15.
- 2) 矢野清之助, 岡村義弘, 井上尚志, 田辺康児, 前原郷治, 村岡寛英, 豊福昭典, 堀井行彦: 100kg/mm²級高張力鋼の開発, 製鉄研究, 322 (1986), 99.
- 3) 松岡孝, 渡辺征一, 別所清, 飯田豊, 河井清和, 渡邊望: 100kg/mm²級高張力厚鋼板の開発, 住友金属, 38 (1986), 13.
- 4) 三宅孝則, 小林英司, 小川隆生, 小関智也, 寺嶋久栄: 極厚100kg/mm²級高張力厚鋼板, 川崎製鉄技報, 20 (1988) 3, 233.
- 5) 三瓶哲也, 作井新, 本多孝行, 石川博, 長縄裕: 極厚HT 100級鋼板の開発, 日本鋼管技報, 133 (1990), 37.
- 6) 丸山嘉一郎, 別所清, 有持和茂, 大西一志, 飯山英明, 村山弘: 極厚HT980Z・150mm厚鋼板の開発, 住友金属, 47 (1995) 4, 54.
- 7) 松川靖, 有持和茂, 大西一志: ペンストック用HT980鋼板の開発, 住友金属, 50 (1998) 1, 105.
- 8) 川畑友弥, 永吉明彦, 有持和茂, 岡口秀治, 松川靖, 渡邊望: アレスト性に優れたTMCP型HT100鋼板の開発, 溶接学会全国大会講演概要, (2000) 67, 144.
- 9) 西脇芳文, 前島俊雄, 久保田克寿: 引張強さ950N/mm²級高張力鋼 (HT-100) の水圧鉄管への適用検討, 土木学会論文集, (2001) 672, 37.
- 10) K.Horikawa and N.Watanabe: Application of Extra-High Tensile Strength Steel for Hydropower Plants in Japan, Conference on High Strength Steels for Hydropower Plants Takasaki, 3-1~3-8, (2009)
- 11) 世界エネルギー機関 (IEA): Key World Energy Statistics (2015), http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld_Statistics_2015.pdf
- 12) JESC H0001 (2000), 950N/mm²級高張力鋼材 (HT100) の水圧鉄管適用への技術指針
- 13) 有持和茂: 溶接構造用1000N鋼についてーペンストックおよび建築分野における技術開発／実用状況と課題ー, 溶接学会誌, 78 (2009) 6, 529.
- 14) 佐藤統宣, 原則行: 780MPa級及び950MPa級高張力鋼用溶接材料について, 溶接学会誌, 78 (2009) 6, 550.
- 15) N.Okuda, Y.Ogata, Y.Nishikawa, T.Aoki, A.Goto and T.Abe: Hydrogen Induced Cracking Susceptibility of Weld Metal, IIW/JIS, Doc.No.II-1072-86 (1986)

- 16) 向井一馬, 篠原朗, 陳梁年: 中国市場向け水力発電機器の大容量化技術, 東芝レビュー, 64 (2009) 9, 57.
- 17) R.W.McCoy, Jr., McCoy Power Reports Hydro Turbines & Generators 2008, <http://www.mccoypower.net/index.htm>. (accessed 2009-07-01.)
- 18) 梁維燕: 中国大型水電気組製造工業的就与展望, 第二屆水力発電技術国際会議論文集, 北京, 2009-4, 中国水力発電工程学会, 中国三峡工程開発総公司 (連合主催). 中国電力出版社, (2009) 2.
- 19) NHK解説委員室: アジアを読む 「三峡ダムに見る 中国エネルギー事情」, (2008.4), <http://www.nhk.or.jp/kaisetsu-blog/600/7915.html>
- 20) Communiqué de presse CLEUSON-DIXENCE est à l'arrêt Des soudures défectueuses ont été détectées dans le puits blindé, (2000.3.17)
- 21) Communiqué de presse CLEUSON-DIXENCE : Prochaine remise en exploitation, (2000.5.25)
- 22) eos: Accident du puits blindé de Cleuson-Dixence : état de la situation au 8.05.2001 (mise à jour au 21.6.01), (2002.07)
- 23) Communiqué de presse Catastrophe de CLEUSON-DIXENCE : Rupture du puits blindé, (2002.9.17)
- 24) T.Dorsch, K.Saarinen, E.Roos, Thomas Böllinghaus, H.Cerjak and N.Enzinger: Results of Stress Corrosion Investigation on Steel and Weldments on Steels S890 and S690, Proceedings, High Strength Steels for Hydropower Plants, (2005), 04-1.
- 25) H.Cerjak: The Role of Welding in the Power Generation Industry, Safety and Reliability of Welded Components in Energy and Processing Industry, Houdremont Lecture on the occasion of 61st IIW Annual Assembly, Graz, (2008), 17.
- 26) K.Aoki and M.Minami: Construction of Steel Penstocks using HT100 at Kannagawa Hydropower Plant, Conference on High Strength Steels for Hydropower Plants Takasaki, (2009), 1-1.
- 27) H.Cerjak, O.Chene, N.Enzinger and E.Roos: Qualification Program for the Rehabilitation of Cleuson-Dexence: Requirements and Results, Conference on High Strength Steels for Hydropower Plants - Takasaki, 2-1.
- 28) O.Chene: Welding Processes for the Cleuson-Dixence Shaft, Conference on High Strength Steels for Hydropower Plants - Takasaki, 8-1.
- 29) <http://www.hydro-exploitation.ch/hydroelectric/bieudron.html>, (accessed 2016-09-20.)
- 30) 久保田克寿, 南将行, 渡辺望, 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, (2006) 225, 72.
- 31) 佐藤邦彦, 豊田政男, 浮田和明, 中村明弘, 松浦十四彦: 軟質溶接継手のHT80水圧鉄管現場円周継手への適用性について (第1報) 溶接割れに対する検討, 溶接学会誌 47 (1978) 5, 283.
- 32) 佐藤邦彦, 豊田政男, 浮田和明, 下田隆二, 中村明弘, 松浦十四彦: 軟質溶接継手のHT80水圧鉄管現場円周継手への適用性について (第2報) 継手性能の検討, 溶接学会誌, 47 (1978) 10, 697.
- 33) M.Toyoda, F.Minami, C.Ruggieri, C.Thaulow and M.Hauge: Fracture property of HAZ-notched weld joint with mechanical mis-matching-Part1, Mis-Matching of Welds,ESIS 17, Mechanical Engineering Publications, London, (1994), 399.
- 34) C.Thaulow, O.Ranestad, M.Hauge, Z.Zhang, M.Toyoda and F.Minami: FE calculations of stress fields from cracks located at the fusion of weldments, Engineering Fracture Mechanics, 57 (1997) 6, 637.
- 35) M.Mochizuki, H.Kitano, S.Okano, T.Kawabata and H.Sakaibori: Mechanical Discussion on 950MPa Class Steel Plate Welded Joint for Penstock (Report 1: Characteristics of Deformation and Strength by Numerical Welding Stress-Strain Simulation Considering Microstructural Effect), Conference on High Strength Steels for Hydropower Plants, Takasaki, (2009), 13-1.
- 36) T.Kawabata, H.Sakaibori, K.Onishi and M.Mochizuki: Mechanical Discussion on 950MPa Class Steel Plate Welded Joint for Penstock (Report 2: Effect of Welding Conditions on Brittle Fracture Behavior and Fracture Assessment), Conference on High Strength Steels for Hydropower Plants, Takasaki, (2009), 14-1.
- 37) 小川和博, 平田弘征, 薄井孝裕, 井上裕滋, 糟谷正, 橋場裕治, 中村修一, 松尾孟: クリーンMIG HT980溶接材料—予熱フリー, 高強度, 高靱性の溶接金属の設計—, NEDO鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発プロジェクト 第2回シンポジウム予稿集, (2012), 27.
- 38) 南二三吉, 高嶋康人, 大畑充, 邱海, 糟谷正, 井上健裕, 井上裕滋, 川畑友弥, 小川和博: 980MPa級高強度鋼クリーンMIG溶接継手の破壊性能評価手法—継手性能の検証と溶接部破壊靱性要求に関する考察—, NEDO鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発プロジェクト 第2回シンポジウム予稿集, (2012), 35.

(2016年9月28日受付)