

発電用ボイラの大径管溶接継手部のクリープ損傷評価

中代 雅士^{*1}

Nakashiro Masashi

発電用ボイラの大径管は通常溶接施工により組み立てられるが、溶接時には耐力を超えるような残留応力が発生している。さらに、CrMo 鋼では、溶接継手部のクリープ長時間強度は、母材よりも低下している。一方、A-USC (Advanced Ultra-Supercritical) ボイラで採用を検討しているオーステナイト系耐熱材料では、熱膨張率が大きいので発生する熱応力は大きく、高温強度が高いため応力緩和量が小さく、残留応力による損傷評価が重要である。このような背景から、大径管継手部の寿命評価が重要課題となっている。本稿では、配管溶接継手部の寿命評価を行う場合に、製造時や運用中に発生した残留応力（2次応力）と運用時の外部応力（1次応力）を考慮した簡易クリープ損傷解析評価手法を紹介し、残留応力を含めた評価手法を紹介する。

キーワード：残留応力、熱応力、クリープ、クリープ疲労、応力緩和、内部応力、溶接割れ、2次応力、損傷評価、寿命評価、SR、低合金鋼、CrMo 鋼

1. はじめに

ボイラ配管は通常溶接施工により組み立てられる。溶接時には局部加熱による熱応力で、耐力を超えるような残留応力が発生している場合がある。特にCrMo 鋼の場合には、加熱冷却による焼入熱処理で、継手部の高強度化と延性低下による脆化が問題になる。これらの特性を改善するとともに初期残留応力を下げるときのSR熱処理(Stress Relief heat treatment)が施される。

一方、ボイラとタービン間の大径管はタービン入口側を固定端とし、起動停止時の温度変化に伴う熱膨張変化による熱応力（2次応力）が加算される。さらにCrMo 鋼の溶接継手部は長時間クリープ強度の低下が大きな問題になっている。特に高Cr 鋼では、溶接継手 HAZ (Heat Affected Zone) 部

の軟化層に損傷が発生するタイプIVクラックが大きな問題となっている。一方、蒸気温度700℃級のA-USC (Advanced Ultra-Supercritical) プラントの開発が進行しているが、配管にはNi基耐熱材料の採用が検討されている⁽¹⁾。フェライト鋼と比較してオーステナイト材料は熱膨張率が大きく、高温強度が高いため、発生する応力は大きく、かつ、応力緩和量が小さく、2次応力評価が重要である。

本稿では、配管部の溶接継手部に注目して、設計時の応力評価、配管許容応力の取り方、応力緩和評価法、溶接継手部の評価法を紹介し、残留応力を含む2次応力の応力緩和特性と運用時の外部応力を考慮した簡易損傷評価手法と、本手法による寿命評価の有効性を紹介する。

*1：フェロー 博士（工学） 技術士（金属部門・総合技術監理部門）

2. ボイラ大径管の設計許容応力の考え方

2.1 クリープ許容応力

一般高温機器部材で一番に要求される機械特性は、温度・時間に依存するクリープ強度である。クリープ強度は時間依存の機械特性であり、設計基準には耐用年数（使用時間）を明確に決めており、使用環境下においてこの設計耐用年数に耐えるように使用応力が決められて設計される。ASME Sec.1（発電用ボイラ規格）では、以下の6項目で最低値の応力を採用することが決められている。

- ① 常温の規格最小引張強度の 1/4
- ② 使用温度における引張強度の 1/4
- ③ 常温の規格最小降伏点の 5/8
- ④ 使用温度における降伏点の 5/8
- ⑤ 10 万時間に対してクリープひずみが 1% 以下の応力レベル
- ⑥ 10 万時間のクリープ破断強度の平均値の 2/3 応力レベル、最低値の 4/5 応力レベル

これらの中で、クリープ温度域では⑥項の応力値が最小の場合が多く、設計許容応力値として採用されている。NIMS（National Institute for Materials Science：独立行政法人物質・材料研究機構）のクリープデータシートでは長時間クリープ試験結果が含まれているが、一般的には温度、応力加速のクリープ試験結果を応力-温度・時間パラメーターで整理して、長時間強度の外挿値で評価している。パラメータ法には種々のものが提案され、外挿値の信頼性などが検討報告されている。中でも LMP（Larson-Miller Parameter： $P=(T+273) \times (\log tr+C)$ ）は定数が 1 個の簡単な式であり、一般的に利用されている。

2.2 配管系許容応力

実際の配管設計では、配管系の熱膨張による熱

応力などを考慮した評価が重要になってくる。配管系の応力計算は、常温状態から運転中の高温状態の変化過程で、配管固定部、支持方法を考慮した数値解析で各部位での応力値を計算し、これらの数値が許容応力値以下であることが要求される。ANSI（American National Standards Institute）の基準では、設計許容最大応力 S_a は室温での設計許容応力 S_c と使用温度域での設計許容応力 S_h 、および疲労係数 f を乗じた次式で算出される⁽²⁾。

$$S_a = (1.25S_c + 0.25S_h) \times f \quad (1)$$

疲労係数 f は起動停止回数が 7000 回以下の場合には 1 である。式 (1) で S_a は、クリープ許容応力である S_h よりも常温の許容応力 S_c （通常引張強度の 1/4、 $1/4\sigma_B$ ）の影響が大きい。配管系では、固定点と支持方法でひずみ依存型の熱応力が発生するが、ひずみ量は一定であり、配管系自体の応力緩和量によって応力が低下することを考慮して許容応力が決められている。変形応力は常温での引張許容応力で決まり、クリープ強度よりも常温での引張強度が重要であり、かなり大きな数値が許容されている。

2.3 溶接継手部のクリープ強度

溶接継手部のクリープ強度は、材質、温度・時間によって母材との強度低下比の継手性能係数で評価される。図 1 は 2.25Cr1Mo 鋼の ASME コード N-47 で報告されている溶接継手係数を Larson-Miller Parameter (MPL) で整理した結果を示す⁽³⁾。一般的には、温度が高いほど、運用時間が長いほど溶接継手部の強度が低下し、実機使用環境下では、0.7 以下の数値になる。また図 2 は溶接継手部のクリープ試験結果で、破断位置の領域図を示す。応力が 70N/mm² 以上の高い領域、または使用温度が 700℃ 以上では、母材で破断するが、高温低応力側になるほど HAZ 部や溶接金属部 (DEPO 部) で破断し、実機使用環境では継手部の強度評

価が重要であることを示している。さらに、最近では Mod.9Cr1Mo 鋼 (P91 鋼) などの高 Cr 鋼の高強度材が実用化されているが、これらの溶接継手部の強度低下量は大きく、重要な課題となっている⁽⁴⁾。

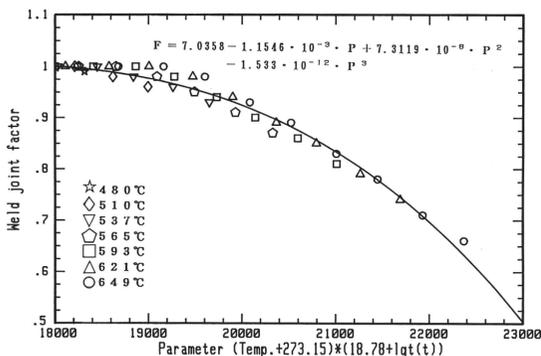


図1 ASME 設計基準 (溶接継手係数) の Larson-Miller Parameter 整理

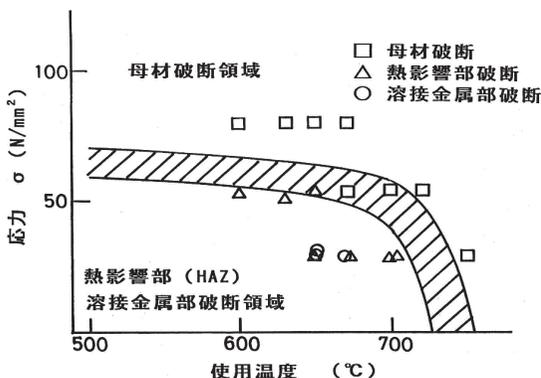


図2 2.25Cr1Mo 鋼溶接継手部のクリープ破断領域図

2.1 項のクリープ設計許容応力は母材のクリープ強度が基準となっており、溶接継手部の継手係数を 0.7 とした場合には、母材の 10 万時間の許容応力が継手部の平均破断応力と同等となる。低合金鋼配管の余寿命評価は、溶接部の強度低下で寿命が決まる。実機部材の寿命評価には、溶接継手部の寿命評価が主体となっている。

2.4 応力緩和特性

高温機器をクリープ域で使用した場合の 2 次応力などの拘束変形による応力は、部材がクリープ変形によって応力緩和する。この応力緩和は、簡易法として応力と定常クリープ速度の関係式ノートン則 (Norton law) で計算される。

$$d\varepsilon/dt = k\sigma^n \quad (2)$$

ここで、 ε :クリープひずみ、 k, n :材料定数、 σ :応力 (MPa)、 t :経過時間 (h)

k と n は各温度別のクリープ試験で最小クリープ速度と応力の線形関係式から得られ、対数プロットで k は定数、直線の傾きが n である。 k は温度依存性が大きく、 n は温度依存性が小さい。最近ではクリープひずみ速度と破断時間の関係 (Monkman-Grant 関係) がよく報告されているが、各ひずみ速度での破断時間を求め、この破断時間と各温度での応力を求め、ひずみ速度と応力値から k, n 値を求めることも可能である。

応力緩和式は、式 (2) を積分して σ で整理すればよい。

$$1/\sigma^{(n-1)} = 1/\sigma_0^{(n-1)} + (n-1) \cdot E \cdot k \cdot t \quad (3)$$

ここで、 σ_0 :初期応力 (MPa)、 E :高温でのヤング率 (MPa)、 t :経過時間 (h)

実験的な応力緩和特性は、式 (3) で計算されるよりも、1 次クリープ変形による応力緩和量が大きい。しかし、実機での応力レベルは小さいので 1 次クリープ変形は小さいのと、1 サイクルあたりの時間が長いので、大きな差異はないと考える。また、起動停止時の繰返効果では、溶接時の残留応力、配管系の拘束条件による応力変化は連続して緩和していきと考えられる。特殊なケースとして、サイクル毎に急加熱冷却するなどして熱応力が発生する場合には、1 回毎に応力発生と応力緩和量を計算して損傷量を計算し、起動停止回数を乗じた数値が累積損傷量になる。一般的には、毎回発生する応力による損傷の方が大きい。比較

的短時間で損傷が発生した場合には、この起動停止過程で発生する応力が要因となることが多い。

一般的な寿命評価では、初期値の状態から継続的な応力緩和で評価することが、妥当であると考えられる。

2.5 配管応力評価式

配管は内圧によるフープ応力 σ_h と軸応力 σ_a の複合応力が作用する。 σ_h と σ_a の作用方向は直交するので、簡易的に評価するには Mises の等価応力式が有効であり、式 (4) で計算される。

$$\sigma_m = (\sigma_a^2 + \sigma_h^2 - \sigma_a \cdot \sigma_h)^{1/2} \quad (4)$$

実機での評価では、主応力値と方向が重要であるが、これらの評価を行うには詳細な構造解析が必要であるが、簡易法として等価応力を採用する。実機評価では、応力緩和量が負荷応力に大きく依存するので、1次応力と部材のクリープ強度で寿命が決まる。

2.6 溶接継手部の残留応力

溶接継手部の残留応力は、CrMo 鋼のように溶接後 SR 熱処理を実施して、残留応力を下げる処理をする場合もあるし、材質によって処理方法が異なる。一方、オーステナイトステンレス鋼や Ni 基耐熱鋼では、溶接後熱処理を行わない場合もあり、溶接時に発生した残留応力を正確に評価するには、個別に計測することが必要である。これらの溶接施工条件は製造ノウハウに関するものが多く、一般には公開されていない。

溶接部の局所的な残留応力計測には X 線回折法 (X 線法) による計測が有効である。ただ、X 線法は材料の制限があること、計測部位は極く表面を計測しているので、溶接部の内部応力変化が大きい場合には、計測部位の応力分布状況を把握しておく必要がある。内部の応力分布が要求される場合には、部材全体の応力計測は切断法、数値解析法で評価する。また、最近では DHD (Deep Hole

Drilling) 法や穿孔 (Hole drilling) 法による厚さ方向の応力分布計測法も実用化されている。

3. ボイラ大径管 (2.25Cr1Mo 鋼) の応力評価と溶接継手部の寿命評価例

ボイラ主蒸気管、高温再熱蒸気管などの大径管は、タービン側との取り付け位置を固定端としてバネによるつり下げで支持されている。ボイラ本体の構造物も建屋鉄骨につり下げられた状態で、自由に熱膨張変形するようになっている。これらの取り付けから、大径管には軸方向や曲げの配管系応力が発生する。2.25Cr1Mo 鋼などの低合金鋼では、溶接継手部の強度が問題であり、配管系応力によるクリープ損傷が発生する可能性について検討した。

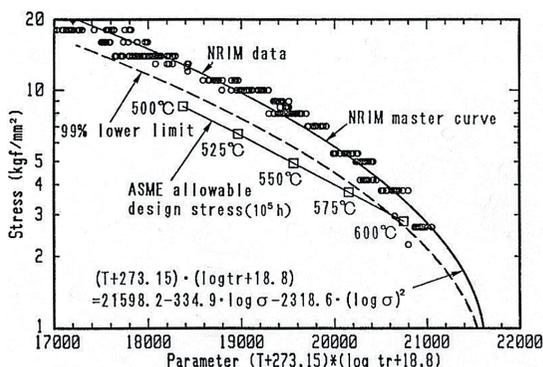


図3 NIMSのクリープデータシートの Larson-Miller Parameter 整理結果

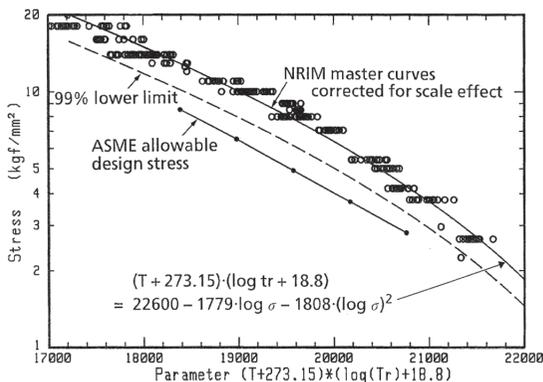


図4 試験中の高温酸化を考慮したクリープ強度評価結果

図3はNIMSのクリープデータシートで2.25Cr1Mo鋼(STBA24)のLMPで整理したものである⁽⁵⁾⁽⁶⁾。図中には、ASMEの設計基準値(設計許容応力-使用温度-10万時間)を記入している。このデータはボイラ伝熱管から試験片サイズがφ6mmの小型試験体でかつ試験時間が1万時間以上の試験結果が含まれており、試験中の高温酸化の影響が大きい結果になっている⁽⁷⁾。高温酸化による試験体の減肉量を計算し、実応力でクリープ強度を評価した場合には、図4のように低応力側でクリープ強度は大幅に改善され、大径管のような厚肉部材では運用中の酸化減肉は実用上問題にならないと考えられた。

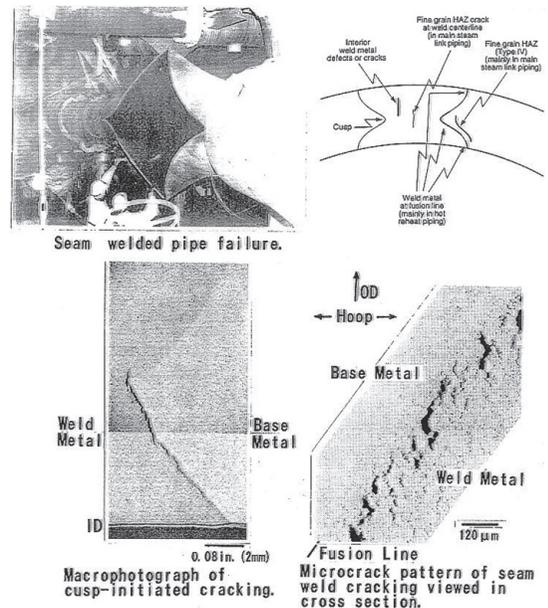


図5 米国で発生した1.25Cr0.5Mo鋼シーム高温再熱蒸気管のタイプIVクラックの損傷事例 (R. Visvanathan, PVP-Vol.303, 1995-7)

表1 米国内で発生した大径管溶接継手部のき裂発生と損傷事例集 (R. Visvanathan, PVP - Vol. 303, 1995-7)

プリント名	出力 (MW)	運転期間	運転時間 (h)	温度 (°C)	圧力 (MPa)	管寸法	応力	損傷発生部	損傷発生状況	損傷発生方法	溶接開先形状	初期き裂発生箇所	き裂伝播方向	き裂伝播箇所	き裂深さ (管肉厚比%)	き裂長さ
						外形肉厚 (mm)	平均応力 許容応力 (MPa)									
S1	220	1962-79	120,000	538	3.4	508.0 18.8	43.6 44.6	高温再熱エルボ 1.25Cr0.5Mo	破断	破断	X形状	内側	内側-外側	溶着金属境界部	貫通	2.4m
S2	220	1962-92	212,000	538	3.4	508.0 18.8	43.6 44.6	高温再熱エルボ 1.25Cr0.5Mo	リーク	リーク	X形状	内側から7.6mm	中央部-内側-外側	溶着金属境界部	貫通	内側~200mm
M1	760	1971-86	97,000	538	5.0	812.8 38.2	50.8 53.5	高温再熱管 2.25Cr1Mo	破断	破断	X形状	外側	外側-内側	溶着金属境界部	貫通	6.1m
M2	750	1971-85	88,000	538	4.0	762.0 33.4	44.8 44.6	高温再熱管 1.25Cr0.5Mo	破断	破断	X形状	中央部	中央部-内側-外側	溶着金属境界部	貫通	5.5m
P1	326	1960-85	NR	538	3.2	444.5 20.6	34.7 44.6	高温再熱管	主き裂	NR						
F	745	1970-86	101,000	538	4	762.0 35.6	42.1 44.6	高温再熱エルボ	主き裂	目視	X形状	中央部	中央部-内側-外側	溶着金属境界部	95	500mm以上
J	200	1957-85	184,000	566	2.5	457.2 19.1	28.4 39.8	高温再熱管 2.25Cr1Mo	主き裂	超音波法	X形状	外側から9.5mm	中央部-内側	溶接補修部 HAZ	60(HAZ)	241mm
G2	250	1957-85	184,000	566	2.7	698.5 28.6	32.6 39.8	高温再熱管 2.25Cr1Mo	主き裂	超音波法	X形状	外側から17.8mm	中央部-外側	溶着金属境界部	75	356mm
B	1120	1975-87	80,000	538	4.9	914.4 57.2	37.1 53.5	高温再熱管 2.25Cr1Mo	主き裂	超音波法	X形状	外側から25.4mm	中央部	溶着金属境界部	15	178mm
N	163	1963-86	NR	545	3.5	NR	-	高温再熱管	主き裂	NR						
K	200	1965-86	NR	543	3.1	NR	-	高温再熱管	主き裂	NR						
C	NR	1965-93	150,000	566	3.5	702.1 36.6	32.2 39.8	高温再熱管 2.25Cr1Mo	主き裂	超音波法	U形	中央部	中央部	溶着金属境界部、タイプIV	10	NR
MS1	570	1965-90	152,000	538	17.9	406.4 69.9	43.7 53.5	主蒸気管管 2.25Cr1Mo	主き裂	超音波法	U形	中央部	中央部-外側	HAZ細粒部(溶着部)	NR	外側 229mm
MS2	570	1965-92	168,000	538	17.9	406.4 69.9	43.7 53.5	管 2.25Cr1Mo	リーク	リーク	U形	中央部	NR	HAZ細粒部(溶着部)	貫通	外側 660mm 内側 229mm
MS3	570	1965-93	172,000	538	17.9	508.0 85.7	44.6 44.6	管管管台 1.25Cr0.5Mo	主き裂	超音波法	U形	外側から38.1mm	外側から38.1mm	HAZ細粒部(タイプIV)	44	外側 254mm 中心 470mm
P2	220	1967-86	NR	538	12.1	NR	-	主蒸気異径管	リーク	NR						
G1	880	1974-93	156,000	538	24.3	457.2 92.1	49.0 53.5	管管管台 2.25Cr1Mo	リーク	リーク	U形	中央部	中央部-内側-外側	HAZ細粒部(タイプIV)	貫通	外側 838mm 内側 127mm

表2 日本国内で観察された管寄及び高温大径管における損傷、劣化事例 (IIC REVIEW No.27 2002/4)

ボイラ形式	出力 (MW)	運転時間	起動停止回数	使用温度(°C) SH出口 /RH出口	状況				
					部位	形態	寿命消費率(%)	材質	
A	自然循環型	350	16万	900	569/540	MSPラテラル溶接部	仮止め溶接痕での、ボイドを伴う割れ	—	火SFA24
B	自然循環型	350	19万	1,200	570/568	HRPのYピース溶接部	ボイド多数	100	A387 GrD
C	自然循環型	350	20万	1,400	570/568	MSPのYピース溶接部	内在のブローホールから、割れが進展	—	A182 F22
						HRPの周、長手継手	ボイド	~63	A387 Gr22
D	自然循環型	85	15万	2,700	538/538	HRPのYピース溶接部	ボイド	—	主管 A387 GrC
E	自然循環型	85	16万	2,500	538/538	HRPのYピース溶接部と近傍の長手継手	ボイドと割れ(Yピース溶接部)	—	分岐管 A335 P11
F	自然循環型	85	15万	2,400	541/541	HRPのYピース溶接部と近傍の長手継手	ボイドと貫通割れ(Yピース溶接部)	—	ラテラル A182 F11
G	自然循環型	350	19万	1,100	570/568	MSPの周継手	割れ	—	STPA24
						HRPの周、長手継手	ボイド連結	~100	SA387 GrD
H	貫流型	600	17.5万	350	541/568	MSP安全弁管台溶接部	ボイド連結	100	管 STPA24 管台 火SFA24
I	変圧貫流型	600	16.5万	400	541/568	MSP安全弁管台溶接部	ボイド連結	100	管 STPA24 管台 火SFA24
J	自然循環型	250	16万	400	569/540	管寄管台、スタブ溶接部	ボイド、微視き裂	~100	管寄 STPA23 管台 A182 F11 スタブ STBA24

図5は米国で発生した1.25Cr0.5Mo鋼溶接管のタイプIVクラックによる噴破事故例である。また、表1は20年前に米国EPRIが発表した米国での大径管事故発生リストである。同様に表2は日本国内で観察された大径管の損傷事例である。これらの表から大径管の損傷は特異なものではなく、15万時間以上の長時間使用後に発生する可能性があると考えられた⁽⁸⁾。最近は図5のような大きな損傷は発生していないが、溶接継手に関連した損傷は継続的に発生していると考えられる。寿命評価技術・検査技術が進歩しているので、適切な寿命評価を実施すれば噴破する前に対策が立てられると考える。

このような大径管の損傷評価を究明する一環として、英国プラントのYピース継手に発生したタイプIVクラックの損傷原因究明の調査結果から、

タイプIVクラックは溶接継手部の強度と配管系応力で評価できることを明らかにした⁽⁹⁾。これらの手法を用いて、2.25Cr1Mo鋼の寿命評価を検討した結果を報告する。

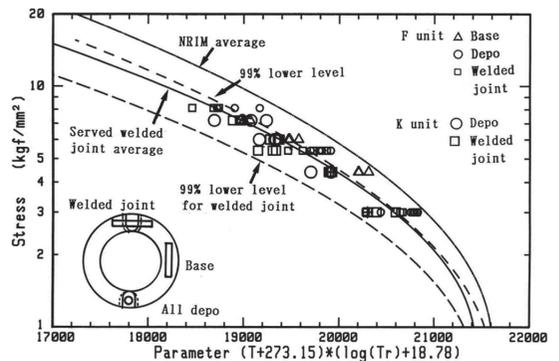


図6 実機使用材の溶接継手部クリープ試験結果 (F、Kは発電所名)

表3 ANSI基準による許容熱応力 Sa による配管応力が作用した時のクリープ損傷計算式

材料	温度 (°C)	設計許容応力			ヤング率 E(kgf/mm²)	クリープひずみパラメータ	
		Sc	Sh	Sa		k	n
2.25Cr1Mo鋼	540	10.5	5.5	14.5	16,200	2.91×10^{-11}	4.983
	570	10.5	4.0	14.1	15,750	9.79×10^{-11}	4.983

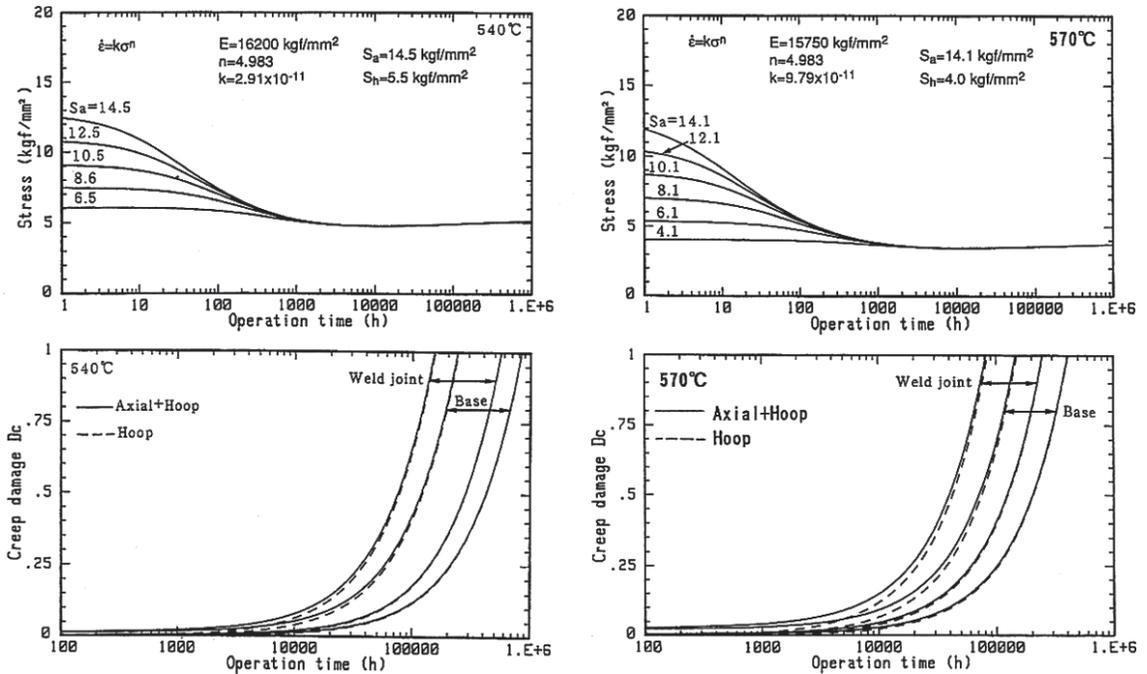


図7 2.25Cr1Mo 鋼の温度別応力緩和特性と累積クリープ損傷評価

図6は2.25Cr1Mo 鋼の実機使用経年部材によるクリープ試験結果である。図に示すように、実機使用材では、経年劣化により母材のクリープ強度が低下していないのに対して、溶接継手部は顕著にクリープ強度が低下しており、継手の寿命評価が重要であることを示している。継手の損傷マップを図2に示すが、実機使用応力条件になればHAZ 部だけに特定されず溶接金属部そのもののクリープ強度が低下する。

次に、配管系応力の評価について検討した。表3は2.25Cr1Mo 鋼に対して2章で紹介したANSIの配管許容応力を基に規定されている許容応力値 (S_c , S_h , S_a)、クリープひずみ速度から k 値、 n 値の関係式 (実験式)、高温引張試験から算出したヤング率 (実験値) を示す。

これらの数値から運用中の応力緩和を計算して累積クリープ損傷量を計算した。図7に540°C、570°Cの各温度別の応力緩和曲線と累積クリープ損傷率の計算結果を示すが、(軸応力+内圧)と

内圧のみによる計算では軸応力加算によるクリープ損傷の差異は小さく、内圧と継手強度だけで評価しても大差ない。これらの結果から、540°Cでは15~20万時間程度、570°Cでは10~20万時間程度で損傷が発生する可能性があることを示唆している。表2で示した日本での溶接継手部の損傷事例では、本評価とほぼ同様な結果が得られていることから、計算手法は妥当であると評価できる。これらの損傷は継手部特有の問題であり、継手を補修すれば寿命延伸が可能であることも最近報告されている。

4. 大径管の溶接継手部の寿命評価手順

3章で計算した低合金鋼の大径管溶接継手部の寿命評価と対策をまとめると以下ようになる。

- ①部材の溶接継手部の強度特性を正確に把握しておく必要がある。特性評価には、クリープ試験で使用応力レベルでの温度加速試験を含み、試験破断時間が数万時間の長時間データ

が必要である。母材と溶接継手部のクリープ強度比（溶接継手強度係数）を応力・温度・時間のパラメータで表示し、使用領域のクリープ強度を把握しておく。同時に、**図2**に示すようなクリープ試験条件と破断位置の関係を示した損傷領域図を明確にしておき、実機使用環境における損傷部位を把握しておく必要がある。

- ②大径管のクリープ損傷は、配管支持状態に依存した軸応力が加算されるので、高温使用時の応力緩和量を評価する必要がある。応力緩和量の評価は、簡易法としてノートン則式(2)による応力-最小クリープ速度の関係式から応力緩和式(3)を求め、各応力-クリープ損傷の累積を計算して評価する。特にクリープ強度が高く、応力緩和量が小さい場合には、熱応力などの2次応力による損傷評価が重要となる。
- ③CrMo鋼溶接継手部のクリープ強度は、長時間、高温使用になるほど、母材と継手部の強度差が大きくなる。特に高Cr鋼のような熱処理で強度を確保している材料は、高温長時間使用後のクリープ強度評価、溶接継手部の強度低下の把握が重要である。
- ④タイプIVクラックの損傷解析評価には、継手部の長時間強度、配管系応力解析、応力緩和曲線を考慮した損傷量評価で計算できる。
- ⑤ステンレス鋼や、Ni基耐熱鋼を配管に採用した場合には、配管系応力評価、溶接継手部の挙動、特性把握が重要である。特に異材継手や、溶接金属に異材を使用する場合には、物性値の差による応力発生と応力緩和速度、クリープ強度が問題になる。

蒸気温度が700℃級のA-USCプラントの開発が計画されており、Ni基耐熱材料の採用が検討されているが、フェライト鋼よりも熱膨張

率が大きく、クリープ強度が高いので残留応力が残りやすく、配管の問題が発生しやすいと考えられ、十分な検討が要求される。また、健全性評価には、残留応力評価が重要となってくると考える。

- ⑥タイプIVクラックは部材内部からクリープボイドなどの損傷が発生する場合があります。健全性評価には、内部の損傷評価が重要である。
- ⑦製造時の溶接継手部に発生する残留応力の評価や、使用中の起動停止時に発生する残留応力評価が重要となる場合が想定される。

5. まとめ

火力発電用ボイラの大径管を主体とした溶接継手部の寿命評価方法について紹介した。配管では2次応力や溶接施工時の残留応力を加算した応力評価が重要である。残留応力の現地計測法が開発されており、携帯型の小型X線装置の使用や、穿孔法による準非破壊法による計測が可能になっている。経年後の残留応力評価は、解析による計算よりも、直接残留応力を計測する方が容易になっている。クリープ損傷評価では、クリープデータ自体のばらつきが大きいこと、高温使用中に残留応力は応力緩和すること、起動停止による温度変化で残留応力が新たに追加されることなどを考慮すると、厳密解による評価よりも簡易型による評価が有効である場合もある。さらに、使用中の金属組織変化、溶接継手部の強度評価などは時間依存で特性が大きく変化するので、これらの長時間後の挙動を把握した上で評価すれば、比較的簡単に評価ができる可能性がある。新規に開発された材料に対しては、実機使用後の継続的な材料データの収集と評価が重要である。

参考文献

- (1) 火力原子力発電技術協会、A-USC 開発推進委員会主催：先進超々臨海圧火力発電技術開発講演会、2013-12-17
- (2) ASME Code for Pressure Piping, B31
- (3) Case of ASME boiler and pressure vessel code, N-47-28, July 1988
- (4) 6th International 'HIDA' Conference, Nagasaki, December 2013
- (5) NAIM (現 NIMS) CREEP DATA SHEET NO.3B 1986：ボイラ・熱交換器用合金鋼管 STBA24 (2.25Cr1Mo) のクリープデータシート
- (6) 中代雅士、芝田三郎、米山弘志、馬木秀男、佐久間直勝、渡辺照継、奥山好寛：2.25Cr1Mo 鋼溶接継手部のクリープ損傷予測と超音波ノイズ分析による損傷評価、材料 Vol.45、No.3、pp.321-327、1996
- (7) 中代雅士：火力発電用ボイラ管の損傷と抜管検査方法、IIC REVIEW No.22、pp.32-44、(1999/10)
- (8) 中代雅士：火力発電用大径管の経年劣化と非破壊検査による寿命評価手法、IIC REVIEW No.27、pp.14-26、(2002/4)
- (9) 中代雅士：火力発電用ボイラ主要耐圧部の保守検査技術と評価技術、IIC REVIEW No.28、pp.14-25、(2002/10)
- (10) C. R. Brinkman, P. J. Maziasz, B. L. P. Keys, H. D. Upon: Oak Ridge National Laboratory Report No. ORNL/9Cr/90-1, (1990)



フェロー 博士 (工学)
技術士 (金属部門・総合技術監理部門)

中代 雅士

TEL. 03-6404-6033
FAX. 03-6404-6044