

高温高压水環境における SCCき裂の進展評価試験技術

沸騰水型原子炉(BWR)の原子炉再循環系(PLR)配管および炉心シュラウドに用いられている低炭素ステンレス鋼は応力腐食割れ(SCC)が発生しにくいといわれていたが、近年、これらの部材で、表面加工度の高い箇所では、まず、粒内型SCC(TGSCC)が、また、その進展部には粒界型SCC(IGSCC)が多数発見されている状況にある。

このような状況から、低炭素ステンレス鋼に対して実機を模擬した環境下で信頼性の高いき裂進展速度データの採取が必要となっている。

そこで、本報では、まず、当試験を行ううえで重要となる高温高压水環境条件調整方法を説明し、次にSCCき裂進展測定法である電位差法(PDM: Potential Drop Method)、これから発展すると思われるK値制御による方法について説明する。

材料評価事業部
腐食防食技術部
舩形 剛

E-1 高温高压水環境条件の調整に関して

まず、腐食とは、環境と金属表面との電気化学反応であることから、環境状態によっては腐食反応が抑制される場合や、逆に促進される場合がある。したがって、腐食試験を精度よく行う観点においては、試料表面の状態を調整するとともに環境条件を制御することが重要となる。そこで、信頼性の高いデータを取得するためには、試験環境条件である水質条件の再現性も含めて制御することが重要となる。

現在、BWR環境下のSCCき裂進展試験においては、試験槽に送り込む溶液の導電率(送り側の導電率)が $0.1 \mu\text{S}/\text{cm}$ (理論純水では $0.055 \mu\text{S}/\text{cm}$)未満、戻り側の導電率が $0.2 \mu\text{S}/\text{cm}$ 未満に制御された実環境を模擬した条件下でSCCき裂進展のデータを取得することが望まれている。また、この試験条件に関して、腐食防食協会がJIS規格化の検討が行われている状況にある。

このような試験条件が望まれる理由としては、試験片周囲の溶液の導電率上昇(溶液抵抗の低下)が、溶液中の腐食電流を上げ、腐食反応を促進さ

せてしまう可能性があるためである。その結果、SCCき裂進展速度の上昇を招き、実機環境のき裂進展データとはならないためである。

高温高压水応力腐食試験装置は、水質を調整する熱水ループ(写真1)と高温高压条件および荷重条件を調整するオートクレープ付加疲労試験装置(写真2)で構成されている(第1図)。

溶液の導電率を低下するためには溶液に含まれている Na^+ や Cl^- イオンなどの不純物成分を除去しなければならない。そこで、基本的には不純物が少ない蒸留水を試験開始溶液として用いる。さらに、試験中には試験装置や試験片からの溶出イオンなどを除去するために、送り側の調整タンクで、水溶液をイオン交換器とフィルタを通して循環させ、導電率を $0.1 \mu\text{S}/\text{cm}$ 未満に保持している。

一方、戻り側では導電率を調整することは不可能であるが、試験条件である $0.2 \mu\text{S}/\text{cm}$ 未満を満足しなければならない。

第1図 試験機器の構成状況(水溶液の循環)

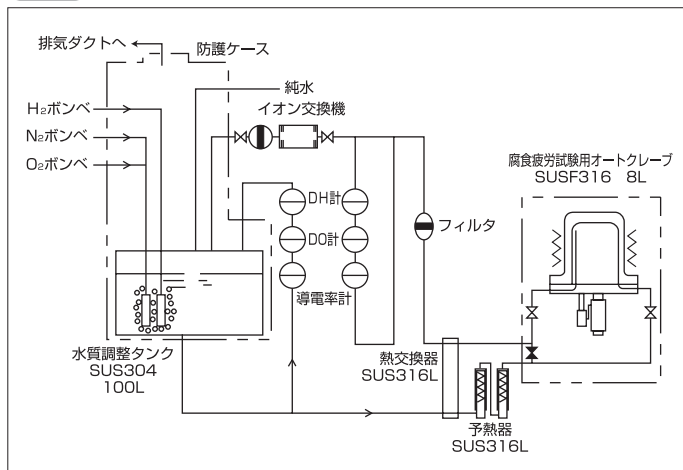


写真1 熱水ループ装置



写真2 腐食疲労試験機



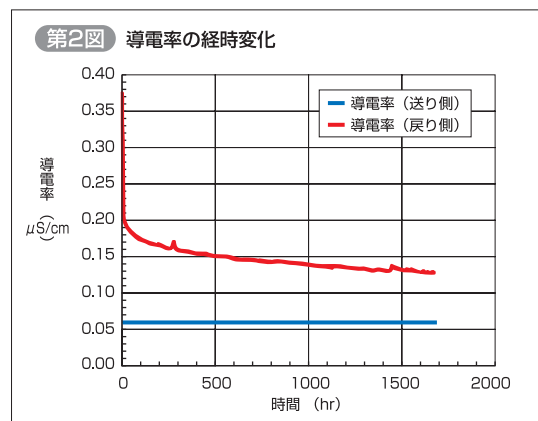
この要求を満足するためには、配管やオートクレーブ内面から腐食溶出するイオン量を低減するとともに、その濃度も低下させる必要がある。そのために試験前に装置内表面にバリアとなる酸化皮膜を成長させるとともに、溶液の流量を増加させることによって濃度低下を図る方法を採用している。

熱水ループは60 L/hの流量で装置内を循環している。オートクレーブの内容積が約10 Lであるため、1時間あたり6回程度入れ替わることになる。このような高流速条件で溶液を循環させることによって、溶出イオン濃度の低下とともに装置内面の酸化皮膜をより速く成長させることも容易となる。

当社新設設備では酸化皮膜を成長させるために、数千時間以上高温で保持している。また、このときの戻り側の導電率経時変化からは約500時間経過後には0.15 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下を示しており、試験

環境としてはじゅうぶんな条件となっている(第2図)。

ただし、実際に試験を行う場合は、試験片取付け時の汚れによって、出口側の導電率が上昇し、試験環境条件にならない場合もあるため、試験開始前には溶液をじゅうぶん循環し、導電率の低下を確認した後、試験を開始することになっている。



E-2 き裂進展速度評価

電位差法

き裂計測には電位差法を適用した。き裂を挿んだ両端に電極を接続し、その間で一定電流を与えた場合、き裂進展にともなって断面積が減少するため抵抗値が上昇し、その結果、電圧が増加する。この電圧変化を測定することによってき裂の進展量を推定する方法である。

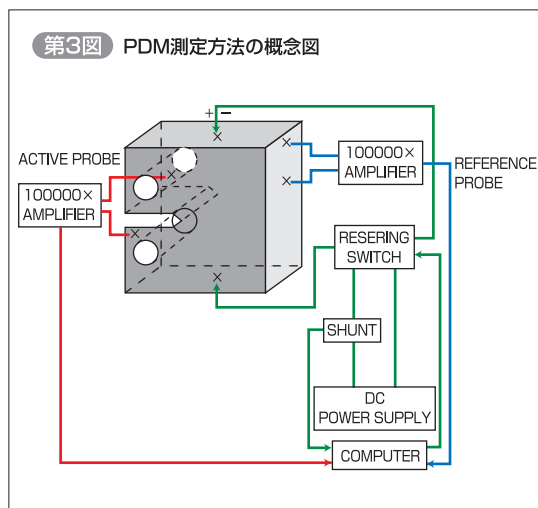
しかし、腐食現象は上述したように電気化学反応であるため、このように外部電流を試験片に与えるということは、自然浸漬状態の腐食反応を乱す要因となる。そのため腐食反応に対する外乱要因の影響が大きくなるような電流付加方法を工夫する必要がある。

電流印加方法には交流法と交番直流法がある。交流法は交流電流を直接試験片に流す方法であるが、交番直流法は、直流を1秒以下の間隔で電流の流れる方向を反転させながら試験片に流す方法である。当社はこの直流法を採用している。

CT試験片によるSCCき裂測定(第3図)においては、試験片の上下に電流印加電極を接続し、直流電源と極性反転スイッチによって、プラスおよびマイナスの直流を交互に試験片に与える。

その際に、き裂の上下の位置にActive Probeを接続し、さらにき裂とは関係のない位置にReference Probeを接続する。き裂進展量とともに変化す

るActive Probeの電圧と、変化しないReference Probeの電圧を測定し、き裂の変化による電圧のみを採用するようにしている。



このように求めた電圧の変化はJohnsonの式(式(1))^{*1)}を用いることによってき裂長さを計算することができる。試験中は電圧変化から求めたき裂長さをモニターすることによってき裂進展量を計測する。

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\cosh^{-1}[\cosh(\pi y/2W)/\cos(\pi a/2W)]}{\cosh^{-1}[\cosh(\pi y/2W)/\cos(\pi a_0/2W)]} \quad (1)$$

参考文献

- *1)
H.H.Johnson,
"Calibrating the
Electric Potential
Method for Studying
Slow Crack Growth",
Materials Research and
Standards, Vol.5,
No.9, p442

ここで、VはActive Probeにおけるき裂長さ a のときの電圧、V₀はその初期値、yはゲージ間隔の1/2、Wは試験片幅を示す。試験時にはReference Probeを用いているので、V/V₀の項はV/V₀/R/R₀として変換できる。ここで、RはReference Probeの電圧であり、R₀はその初期値である。

最終的には式(1)をaについて解き次式でき裂長さを求めることができる*2) (式(2))。

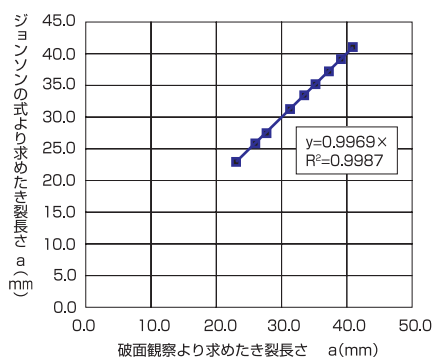
$$a = \frac{2W}{\pi} \cos^{-1} \left\{ \frac{\cosh(\pi y/2W)}{\cosh \left\{ (V/V_0/R/R_0) \times \cosh^{-1} \left[\frac{\cosh(\pi y/2W)}{\cos(\pi a_0/2W)} \right] \right\}} \right\} \quad (2)$$

ただし、SCCき裂は疲労き裂のように予き裂先端から扇型あるいは平行に進展するのではなく、局部的に進展することが多いことから、最終的には試験後試験片の破面観察から、直接き裂進展量を求め、その値と電圧の変化曲線をフィッティングすることによって、き裂進展曲線をえることとしている。

一例として、腐食環境ではないが、大気環境中の疲労き裂試験において、電位差測定から求めたき裂長さと破面観察から求めたき裂長さとの関係(第4図)を示す。

第4図に示すように、破面観察から求めたき裂長さと、電位差法によるJohnsonの式から求めたき裂長さはよい相関性を示すことがわかる。

第4図 破面観察より求めたき裂長さと
Johnsonの式から求めたき裂長さの関係



K値制御による方法

当社の設備では電位差法によるき裂進展量測定他に、除荷弾性コンプライアンス法によるき裂進展量測定も可能である。また、この方法を用いることにより、オンラインでき裂長さ、応力拡大係数(K値)が算出されるので、そのK値にしたがって荷重をフィードバックするSCCき裂進展試験(K値制御SCCき裂進展試験)を行うことも可能である。この方法は現在各機関で検討されている方法であり、今後き裂進展評価に採用されていくものと思われる。

電位差測定の場合、試験時には参照用の電極間の電圧測定によって環境の影響を極力取除くようにしているが、溶液の導電率が高い場合には、どうしてもき裂内の溶液中を流れる電流が多くなることもあり誤差が大きくなる場合がある。このような点において、ボロンや水酸化リチウムを添加する加圧型原子炉(PWR)環境を模擬した条件ではK値制御によるSCCき裂進展試験の方が有効であると思われる。

さらに従来の方法では荷重一定条件下で試験されるため、き裂が進展することによってK値が増大する。そのため、き裂進展下限界K_{ISCC}を求めるためには複数の試験片が必要となる。一方、K値制御の場合にはK値を漸減することが可能であり、K_{ISCC}を1本の試験片から求めることが可能になるという利点もある。

昨年、新設した高温高圧水環境下のSCCき裂進展試験について紹介した。SCC試験は上述のようなき裂進展試験のほかに、低歪速度引張り試験(SSRT)、一定歪を試験片に負荷した状態で、高温水に浸漬する方法(CBB、Uベンド法)がある。当社ではこのような試験にも対応できる設備を保有しているので、ぜひご活用願いたい。

参考文献

*2)
伊藤幹郎ほか：
5th Environmental
Degradation of Nuclear
Materials,(1992)