

ライザーブレースアーム溶接部の構造健全性評価手法の検討

Structural Integrity Assessment for Riser Brace Arm Weld

日立 GE	岩松 史則	Fuminori IWAMATSU	Non-member
日立 GE	廣川 文仁	Fumihito HIROKAWA	Non-member
東京電力 HD	神長 貴幸	Takayuki KAMINAGA	Non-member

Flaw evaluation method for riser brace arm weld was investigated in case of a flaw is detected in in-service inspection. Weld residual stress was evaluated using 3-D finite element model considering structure of riser brace. Fatigue and SCC crack growth evaluation was performed using evaluated residual stress and stress due to normal operation. Two methods, which are JSME fitness-for-service code and influence function method, were applied to estimation of stress intensity factor to investigate effect of stress distribution in SCC crack growth evaluation. Results of SCC crack growth evaluation indicated that small crack not to cause failure of riser brace was allowable due to limitation of evaluation method, which allows up to 80% crack depth of thickness. Therefore, SCC crack growth evaluation considering penetration, which means up to 100% crack depth of thickness, was performed. In addition, seismic evaluation assuming failure of one of four riser brace leaf was performed.

Keywords: Fracture Mechanics, Finite Element Analysis, Weld Residual Stress, and Crack Growth Evaluation

1. 緒言

ライザーブレースアーム（以下、ライザーブレース）の溶接部は、日本機械学会の発電用原子力設備規格維持規格（以下、JSME 維持規格）[1]に基づき経年劣化事象として応力腐食割れ（SCC：Stress Corrosion Cracking）を対象とした検査が実施されている。当該部は、国内での損傷事例はないが、海外において数件の事例が報告されているため、亀裂が検出された場合の評価方法を検討した。国内プラントにおけるライザーブレースの構造は、図1に示す通り、オーステナイト系ステンレス鋼製であり、RPVのクラッド溶接上に施工されたパッド溶接に対して溶接により接続される。ライザーブレースの構造健全性上の懸念は、亀裂の進展によるライザーブレースの破断である。このため、溶接金属からライザーブレースの厚さ方向に進展する亀裂を想定した。ライザーブレースに想定した亀裂に対して、溶接残留応力を考慮した亀裂進展評価および1箇所が破断した時の耐震性評価の手法を検討した。

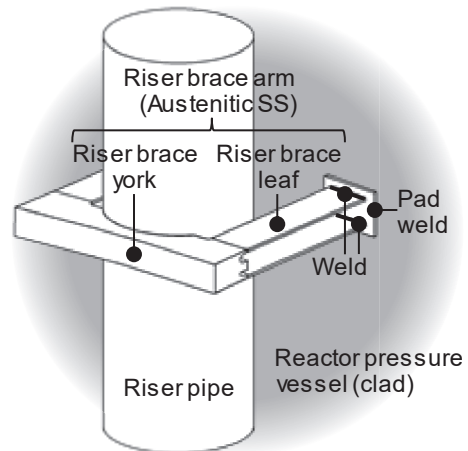


Fig. 1 Schematic of riser brace arm

2. 亀裂進展評価

2.1 溶接残留応力評価

疲労およびSCCによる亀裂進展に影響する溶接残留応力を、ライザーブレースの構造を考慮した三次元の有限要素解析（FEA：Finite Element Analysis）により評価した。溶接残留応力解析では、RPVの製造工程を考慮して、クラッド溶接、パッド溶接、ライザーブレース取付け溶接および各工程間の応力除去焼鈍（SR：Stress Relief Heat Treatment）を模擬した。沸騰水型原子炉（BWR：Boiling Water Reactor）のBWR-5型を対象に図2に示す解析モデルを作成した。ライザーブレースおよび周辺構造の対称

連絡先: 岩松史則、
〒319-1292 茨城県日立市大みか町7-1-1、
日立GEニュークリア・エナジー(株)、
E-mail: fuminori.iwamatsu.vt@hitachi.co.jp

性を考慮して、RPVの周方向15度範囲をモデル化の対象とした。取付け溶接近傍の応力分布に対してモデル化範囲が影響しないように、RPVの鉛直方向長さは2,000mm範囲をモデル化した。解析手法については、原子力安全基盤機構において実施されたニッケル基合金異材溶接部のき裂進展評価技術検証プロジェクト（通称、FDMプロジェクト）を参考にした[2]。非定常熱伝導解析および熱弾塑性解析では、各材料の室温から溶融に至る高温までの材料特性が必要となる。ここでは、原子力安全基盤機構において実施された複雑形状部機器配管健全性実証プロジェクト（通称、IAFプロジェクト）において材料試験を実施して取得された材料特性を参考にした[3]。解析には、汎用FEAソフトウェアのABAQUS Ver. 6.13を用いた。なお、プラントにより当該部の材料が異なる場合についても、強度レベルはほぼ同等の材料であることが想定される。このため、応力評価への影響は小さい。

三次元モデルを用いた非定常熱伝導解析および熱弾塑性解析により得られた溶接残留応力分布を、図3に示す。径、周および軸方向応力の等高線図から、溶接により生じる残留応力は周および軸方向が支配的となった。クラッド溶接およびパッド溶接により高い引張残留応力が生じるが、各工程後のSRの施工により緩和するため、ライザーブレース取付け溶接部近傍に生じる残留応力は、取付け溶接自体によって生じると考えられる。また、取付け溶接後の軸方向応力についても、幅方向端部で低下する領域を除いてはほぼ一様となった。これらの結果から、取付け溶接により高い引張応力が生じる幅方向中央部については、軸対称要素を用いた二次元モデルにより評価できる可能性が示唆された。

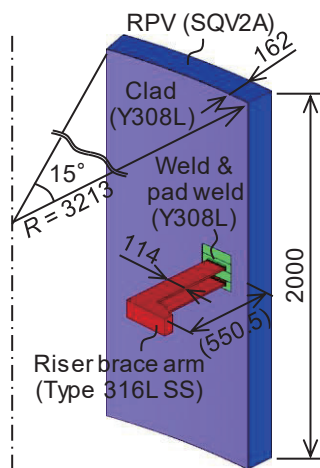


Fig. 2 Analysis model for evaluating weld residual stress

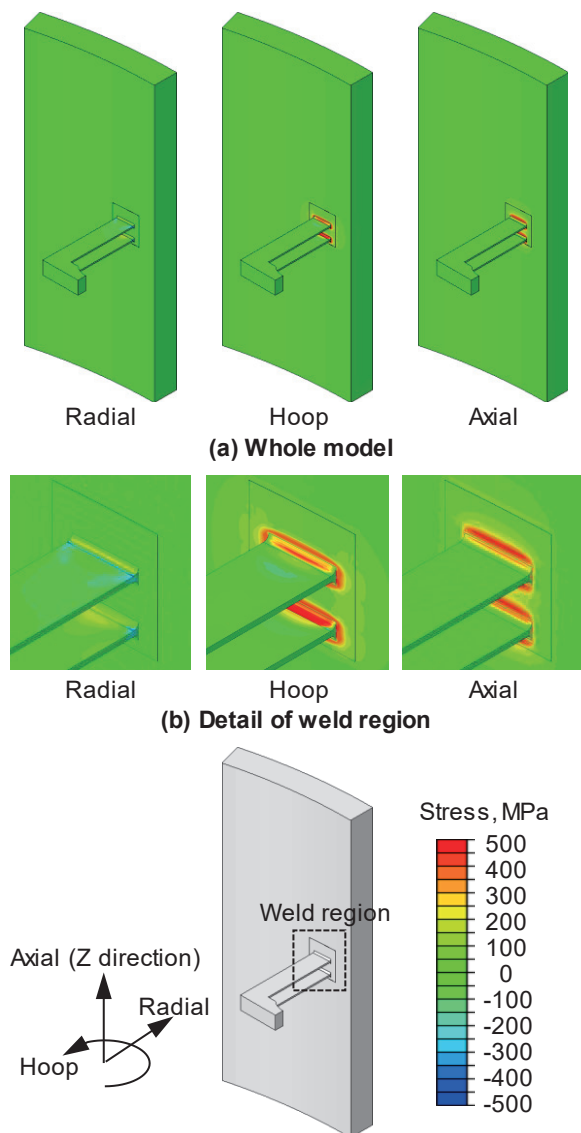


Fig. 3 Stress contour of weld residual stress

2.2 疲労亀裂進展評価条件

ライザーブレースにおいて疲労亀裂の発生を想定し、JSME維持規格に従った疲労亀裂進展評価を実施した。評価対象のBWR-5型の設計時における工認応力計算書の疲労評価データおよび前述の残留応力解析結果を用いて、疲労亀裂進展を評価した。過渡回数についても設計時のサーマルサイクルに基づき評価条件を設定した。疲労亀裂進展評価では溶接残留応力および通常運転時応力を考慮した。溶接残留応力は、図3に示した解析結果を用いた。通常運転時の応力は、工認計算書の一次、二次およびピーク応力値を基に表面最大応力を設定し、曲げ応力分布として考慮した。

構造健全性上懸念されるライザーブレースの破断を生じ得る母材から厚さ方向に進展する疲労亀裂を想定した。

想定した亀裂を図 4 に示す。ライザーブレス厚さ方向の亀裂寸法を亀裂深さ a 、幅方向の亀裂寸法を亀裂長さ l および亀裂の幅方向位置 O を定義した。亀裂および進展方向は、RPV に対する円筒座標系 (径、周および軸方向) を用いて定義した。疲労亀裂進展評価に用いる構造寸法および初期亀裂寸法は、ライザーブレス厚さ t の 9.6 mm に対して、想定する初期亀裂深さ a_0 を 0.05 mm および 1.0 mm の 2 通りとした。また、初期亀裂のアスペクト比 a_0/l_0 (l_0 : 初期亀裂長さ) は 1/10 とした。亀裂の位置はライザーブレスの幅方向中央とした ($O/W=0.5$)。ライザーブレスは、オーステナイト系ステンレス鋼製であるため、疲労亀裂進展速度として JSME 維持規格の添付 E-2 に示されるオーステナイト系ステンレス鋼の BWR 環境中の疲労亀裂進展速度を適用した。疲労亀裂進展速度を決定する破壊力学パラメータである応力拡大係数は、JSME 維持規格の添付 E-5 に示される平板中の半円表面欠陥の応力拡大係数の算出法を適用した。

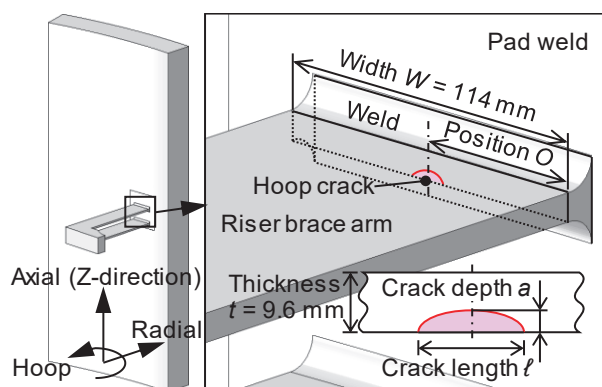


Fig. 4 Assumed fatigue crack in riser brace arm weld

2.3 疲労亀裂進展評価結果

疲労亀裂進展評価の結果を、図 5 に示す。初期亀裂深さ a_0 が 0.05 mm の場合は、運転期間として 40 年を想定しても進展量ごく僅かであった。初期亀裂深さ a_0 が 1.0 mm の場合についても、当該部点検周期である 10 年間における亀裂深さの進展量は約 0.2 mm と僅かであった。さらに、亀裂深さ a_0 が 1.0 mm の場合に、仮に 40 年の運転期間を想定しても進展量は約 0.9 mm であった。ライザーブレス厚さ t は 9.6 mm であり、疲労亀裂の発生を想定した場合は、ライザーブレスの破断に至る可能性は低いことが示された。

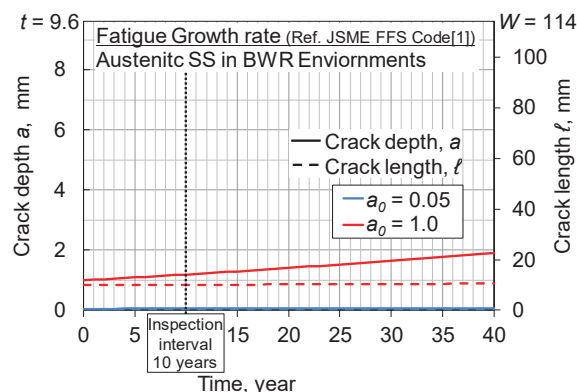


Fig. 5 Fatigue crack growth evaluation results

2.4 SCC 亀裂進展評価条件

SCC 亀裂進展評価においても、溶接残留力に加えて通常運転時に生じる応力を考慮した。通常運転時の応力評価には、溶接残留応力評価と同様の図 2 に示した三次元解析モデルを用いた。解析モデルには、通常運転時の負荷を想定して雰囲気温度は 276°C、RPV 内面に 7.24 MPa の内圧を負荷した。また、内圧によって RPV に生じる軸力を考慮して、解析モデル上端面に軸力に相当する分布力として負荷した。さらに、ライザー管から受ける負荷として、軸力 1,080 N、鉛直方向変位 4.03 mm および曲げモーメント 3,510 kN·m を負荷した。通常運転時についても、温度上昇に伴う材料特性の変化を考慮するため、溶接残留応力解析と同様に IAF プロジェクトにより取得された成果を参考にした。解析には、汎用 FEA ソフトウェアの ABAQUS Ver. 6.13 を用いた。

通常運転時の負荷により生じる変形状態を、図 6 に示す。変形図は、負荷により生じる変形状態の確認を容易にするため実際の 100 倍の変形量とした。SCC 亀裂進展評価に用いる応力は、溶接残留応力と通常運転時応力の重ね合せにより求めた。図 7 に示す通りライザーブレス厚さ方向の距離 d および評価ラインを定義して、溶接残留応力、通常運転時の応力および重ね合せ応力を図 8 に示す。距離 d が 0 の表面では、重ね合せ応力として 200 MPa 近い引張応力が生じた。この重ね合せ応力を用いた SCC 亀裂進展評価の条件を検討した。SCC 亀裂進展評価における想定亀裂は、疲労亀裂進展評価と同様に、図 4 に示したライザーブレスの厚さ方向に進展する周方向亀裂とした。

この想定亀裂に対して、SCC 亀裂進展速度を決定する破壊力学パラメータである応力拡大係数の評価方法として、JSME 維持規格の添付 E-5 に示される平板中の半円

表面欠陥の応力拡大係数の算出法[1]および影響関数法[4]を適用した。両評価法の最も異なる点は、図9に示す考慮可能な応力分布の複雑さである。JSME維持規格では、溶接残留応力のような複雑な応力分布に対しても評価可能なように、亀裂深さ方向の応力分布を3次多項式により近似して応力拡大係数の算出に用いる。一方で、影響関数法では、亀裂面上の任意の応力分布を考慮可能である。

評価した応力拡大係数を用いてステンレス鋼製のライザーブレースにおけるSCC亀裂進展速度を算出するために、JSME維持規格の添付E-2に示されるBWR通常炉内水質環境中の低炭素ステンレス鋼および鋭敏化 SUS304のSCC亀裂進展速度を適用した[1]。

評価条件をまとめて表1に示す。評価結果の整理と把握を容易にするため、評価条件は初期亀裂深さおよびSCC亀裂進展速度に着目した8ケースに分類した。初期亀裂位置および応力拡大係数評価法の異なるSCC亀裂進展評価は、表の分類上は同ケースとした。初期亀裂深さ a_0 は、亀裂の進展性および検査における検出性を考慮して0.05、1.0、2.0および4.0mmとした。初期亀裂長さ l_0 は、初期アスペクト比 a_0/l_0 が1/10となるように設定した。JSME維持規格では亀裂幅方向、すなわちライザーブレース幅方向の応力分布を考慮しないため、幅方向中央に初期亀裂を想定した($O/W=0.5$)。影響関数法では、ライザーブレース幅方向の応力分布の影響について検討するため、初期亀裂位置 O/W を0.15から0.85の範囲で変化させた。SCC亀裂進展評価では、亀裂深さ a が厚さ t の80%に到達、または運転期間が60年に到達した時点で評価を終了した。

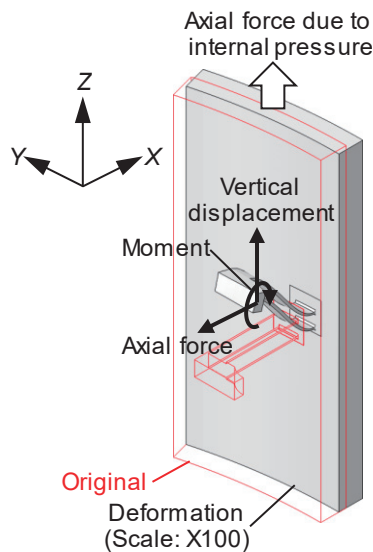


Fig. 6 Deformation due to normal operating condition (Deformation scale: X100)

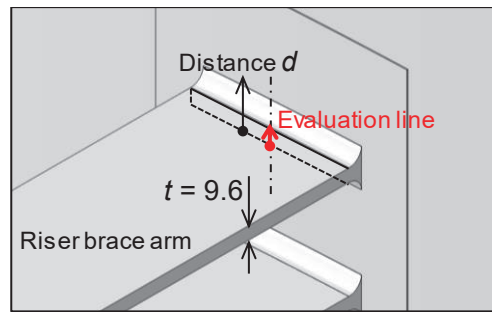


Fig. 7 Definition of distance d and evaluation line

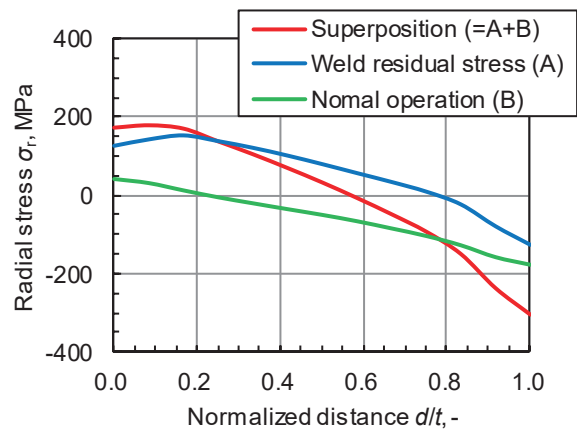
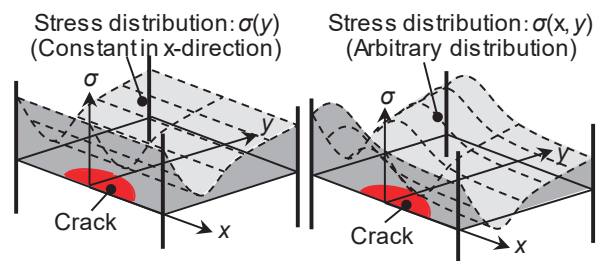


Fig. 8 Radial stress distribution on evaluation line in Fig. 7



(a) JSME FFS Code (b) Influence function method

Fig. 9 Stress distribution to calculate stress intensity factor

Table 1 Conditions of SCC Crack growth evaluation

Case No.	Initial crack depth a_0 , mm	Initial aspect ratio a_0/l_0	Initial crack position O/W	SCC growth rate
1	0.05	1/10	0.5	Low carbon stainless steel in BWR environment
2	1.0		0.5 (0.15~0.85)	
3	2.0		0.5 (0.15~0.85)	
4	4.0		0.5	
5	0.05		0.5	Sensitized Type 304 stainless steel in BWR environment
6	1.0		0.5 (0.15~0.85)	
7	2.0		0.5 (0.15~0.85)	
8	4.0		0.5	

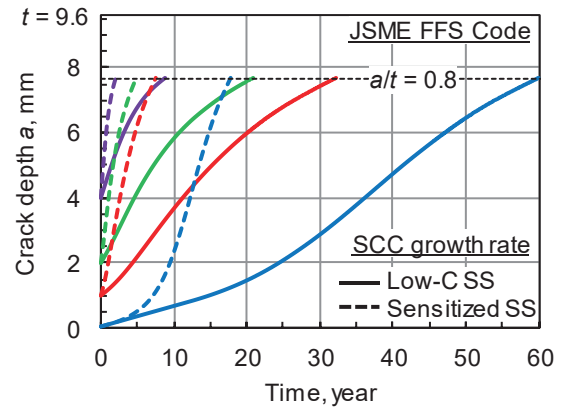
2.5 SCC 亀裂進展評価結果

JSME 維持規格の応力拡大係数評価法を用いた評価結果を、図 10 に示す。この 8 ケースの評価では、いずれも亀裂深さ a が厚さ t の 80% に到達して評価が終了した。低炭素ステンレス鋼の SCC 亀裂進展速度を用いた評価では、初期亀裂深さ a_0 が 4.0 mm の Case 4 を除いては、10 年以上の運転期間を要した。一方、鋭敏化 SUS304 の SCC 亀裂進展速度を用いた評価では、初期亀裂深さ a_0 が 0.05 mm の Case 5 を除いては、10 年以内に厚さ t の 80% に到達する評価結果となった。亀裂長さ l は、図 10(b) に示した通り、評価終了時においてライザーブレース幅 W の 114 mm の半分以下であった。亀裂深さ a が厚さ t の 80% に到達した時点では、ライザーブレースは、破断には至らないと考えられる。また、図 10(c) に示した亀裂深さ a に対する最深点の応力拡大係数 K の変化は、外面側が圧縮応力となる応力分布の影響を受けて、亀裂深さ a が 4 mm を超えた程度からいずれのケースにおいても低下する傾向を示した。このため、亀裂深さ a が厚さ t の 80% を超える範囲まで評価した場合、SCC 亀裂進展速度はより低下する傾向となることが示唆された。

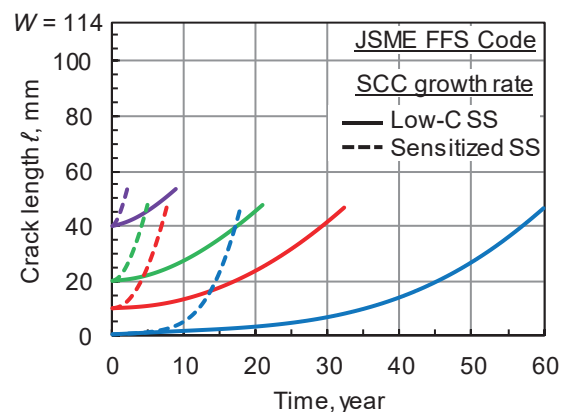
影響関数法による応力拡大係数評価法を用いた評価結果を、図 11 に示す。図 11 では、JSME 維持規格による評価結果と比較するため、ライザーブレース幅方向中央に初期亀裂を想定 ($O/W = 0.5$) した評価結果を示した。影響関数法による評価では、ライザーブレース幅方向の応力分布についても考慮しているが、初期亀裂位置 O/W が 0.5 の場合には、JSME 維持規格と同様の傾向となった。

さらに、影響関数法により初期亀裂位置 O/W を変化させた SCC 亀裂進展評価結果を、図 12 に示す。図 12 には、厚さ t の 80% に到達する運転期間および初期亀裂を想定したライザーブレース内面の径方向応力分布を示した。評価結果から、表面 (ライザーブレース内面) の応力分布と、亀裂進展速度は相関があると考えられる。ライザーブレース端部では、引張応力が低下、もしくは圧縮応力となるため、幅方向端部に近づくにつれて亀裂進展速度が急激に低下した。JSME 維持規格では、亀裂幅方向には一定の応力分布が想定されるため、単に最も厳しい位置での亀裂深さ方向の応力分布を用いることは、過度に安全側の結果となる場合があり得る。このような場合には、影響関数法のような、より複雑な応力分布を考慮可能な評価法が有効である。影響関数法により評価した各初期亀裂位置 O/W の SCC 亀裂進展評価により得られた亀裂形状の変化を、図 13 に示す。図 13 では、初期亀裂位置 O を

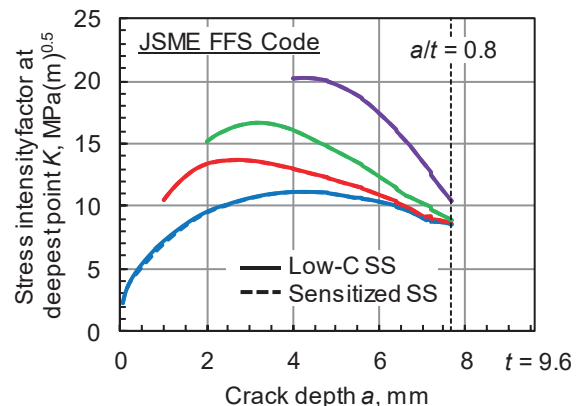
0 mm および ± 40 mm 変化させた評価結果を代表例として示した。初期亀裂位置 O を変化させた場合、亀裂はライザーブレースの中央部に向かって進展した。



(a) Crack depth



(b) Crack length



(c) Stress intensity factor at deepest point

— Case 1 — Case 2 — Case 3 — Case 4
 - - - Case 5 - - - Case 6 - - - Case 7 - - - Case 8

Fig. 10 Results of SCC crack growth evaluation by JSME FFS Code

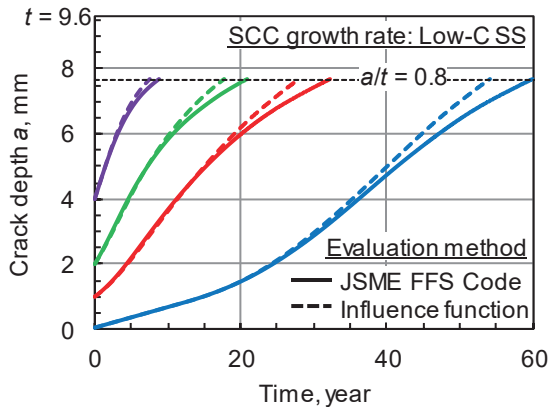


Fig. 11 Comparison of crack depth between JSME FFS Code and Influence function method

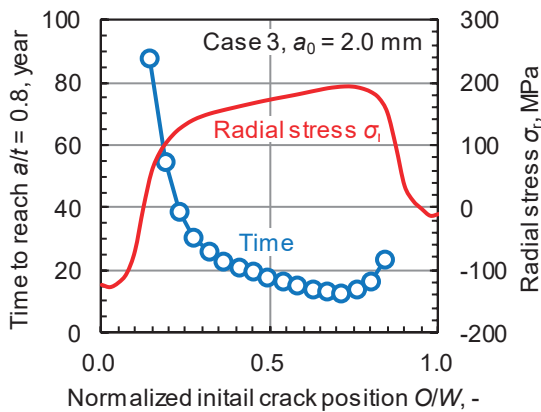


Fig. 12 Effect of crack position on time to reach $a/t = 0.8$

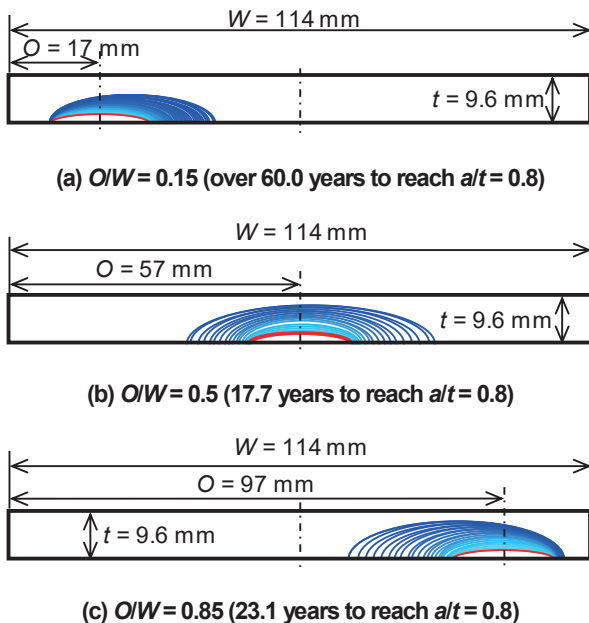


Fig. 13 SCC crack growth behavior every one year (Case 3, $a_0 = 2.0$ mm)

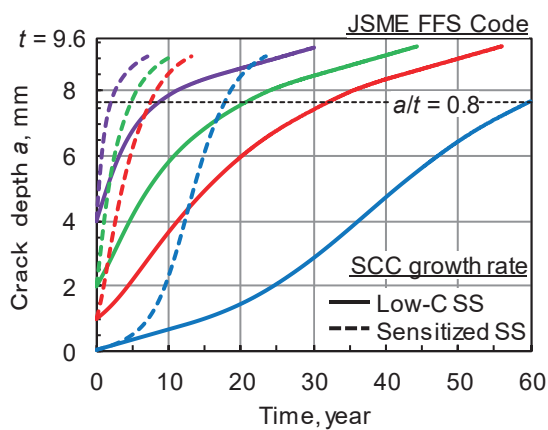
2.6 貫通に至る運転期間の評価

JSME の配管破損防護設計規格には、破断前漏洩 (LBB: Leak Before Break) 評価のために貫通亀裂形状の決定方法に関して記述している[5]。この中では、厚さ t の 80% の亀裂深さ a まで有効な応力拡大係数解を用いて 100% 貫通まで適用することは、貫通時の亀裂長さを大きく想定し、応力拡大係数解として安全側となるとしている。この規格では疲労亀裂を対象としているが、SCC 亀裂の進展速度が疲労亀裂と同様に応力拡大係数の指数関数で表現されるという前提に基づけば、SCC 亀裂に対しても安全側の評価となると考えられる。このため、前述の JSME 維持規格および影響関数法の適用範囲を超える貫通に至るまでの SCC 亀裂進展評価を実施した。適用範囲を超える応力拡大係数の算出では、JSME 維持規格の評価法では補正係数を、影響関数法では影響係数をそれぞれ外挿して評価に適用した。SCC 亀裂進展評価では、亀裂深さ a が厚さ t の 100% に到達、亀裂長さ方向に亀裂がライザーブレースの幅方向端部に到達または運転期間が 60 年に到達した時点で評価を終了した。

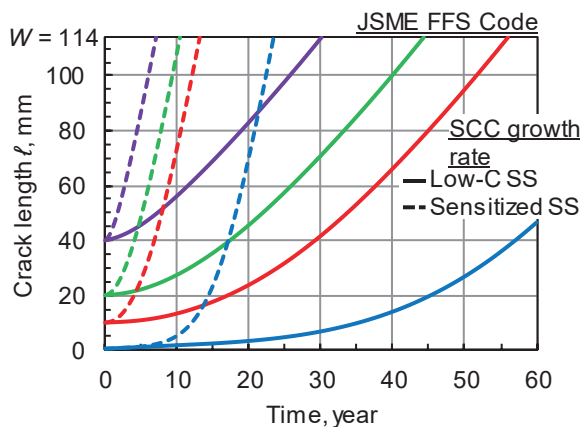
JSME 維持規格による貫通までを想定した SCC 亀裂進展評価結果を、図 14 に示す。亀裂深さ a が厚さ t の 80% を超えると進展速度が低下することが確認された。いずれの評価ケースにおいても亀裂深さ a が厚さ t の 100% に到達したケースはなく、亀裂長さ l がライザーブレースの幅 W に到達するか、運転期間 60 年を超えて評価を終了した。これは、図 14(c) に示した通り、亀裂深さ a が厚さ t の 100% に到達する以前に亀裂最深点の応力拡大係数がほぼ 0 に近くなるためである。図 8 に示した応力分布は、溶接残留応力が支配的であり自己平衡性を持つと考えられる。さらには、通常運転時の膜応力成分が圧縮側となるために、このような傾向となった。

影響関数法により初期亀裂位置 O/W を変化させた SCC 亀裂進展評価結果を、図 15 に示す。図 15 には、亀裂深さ a が厚さ t の 80% に到達時および貫通までの SCC 亀裂進展評価結果による運転期間を示した。貫通までの進展を評価した場合、初期亀裂深さ a_0 が 2.0 mm の Case 7 においても 10 年を超える結果となった。

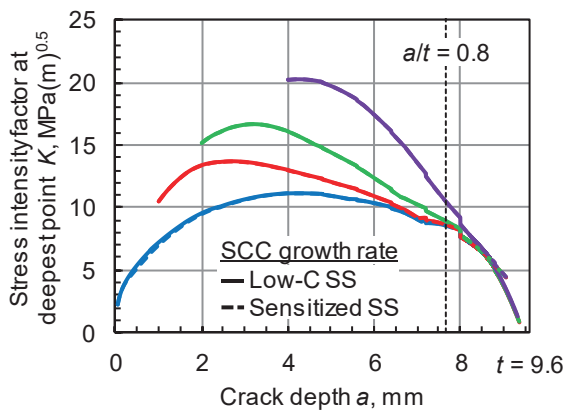
以上の評価結果より、点検期間として 10 年を想定した場合に、検出可能な亀裂寸法によっては亀裂深さ a が厚さ t の 80% に到達する可能性があるが、2.0 mm 以下の亀裂寸法であれば SCC 亀裂進展による貫通は生じない結果となった。



(a) Crack depth



(b) Crack length



(c) Stress intensity factor at deepest point

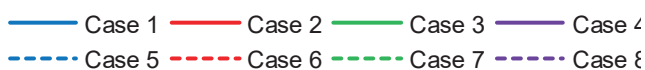


Fig. 14 Results of SCC crack growth evaluation over $a/t = 0.8$ by JSME FFS Code

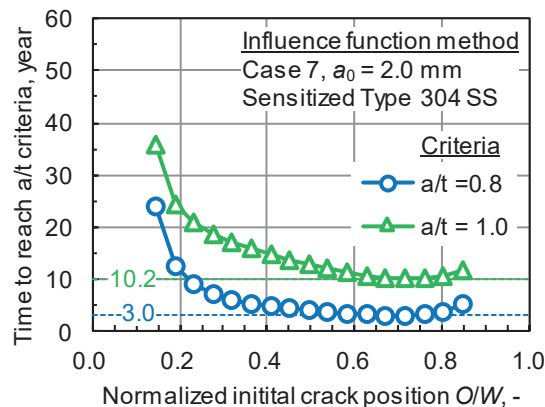


Fig. 15 Effect of crack position on time to reach $a/t = 0.8$ and 1.0

3. 耐震性評価

点検時に大きな亀裂が見つかった場合、または点検時に破断していた場合を想定し、ライザーブレース溶接部4か所のうち、1箇所が破断した状態の耐震性評価を実施した。ここでは、溶接部に、疲労やSCCによる亀裂を想定した場合、複数箇所の溶接部が同時に破断に至る可能性は非常に低く、1箇所の溶接部に亀裂が生じた場合を想定した。ジェットポンプの耐震性については、建設時の工認において図16に示すモデルにより各部位に発生する荷重を算出して応力評価を実施している。ライザーブレースは、2本のリーフを1箇所がのビーム要素でモデル化している。本研究では、ビーム要素の断面性状（断面積、断面二次モーメント等）を1箇所分に置き換え、1箇所破断の状態の剛性をモデル化する。上下2本のリーフの破断箇所の違いにより、厳密には地震応答が変化するが、約3mのライザー管長さに対して上下のリーフ間隔は約90mmであり破断位置の相違は小さいと判断した。

破断後の評価用死荷重（流体反力含む）は、破断前の設計死荷重を基に、破断前後の自重応答解析の応答値から破断後の死荷重を推定し安全側に設定した。地震荷重地震荷重は鉛直・水平震度を用いて静解析による応答解析からライザーブレース溶接部に発生する反力からマージンを考慮し設定した。震度は安全側の評価となるよう、各プラントの確定地震動 S_s の包絡値を用いた。評価に用いた震度は、鉛直方向に1.48および水平方向に2.08である。

ライザーブレース溶接部1箇所が破断した場合の耐震性評価結果を表2に示す。許容応力には、SUS304の許容応力に継手効率0.65を考慮した。左右に分かれているリーフのうち、2本残っている側が健全側、1箇所破断している側の残り1箇所が破断側である。表に示す通り、破

断側の剛性が低下した分、健全側がより荷重を受け持つが、許容応力以下であり、耐震成立性が示された。

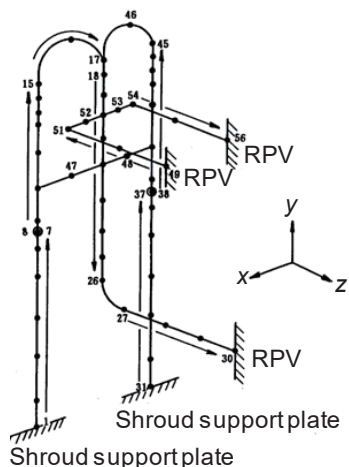


Fig. 16 Seismic safety evaluation model of jet pump with riser brace

Table 2 Result of seismic evaluation

Position	Stress intensity $P_m + P_b$, MPa	Allowable stress, MPa
Failure-side riser brace	174	253
Non-failure side riser brace	239	253

4. 結言

検査によりライザーブレースの溶接部に亀裂が検出された場合の評価方法を検討した。ライザーブレースを破断する方向の亀裂を想定し、疲労亀裂進展評価、SCC 亀裂進展評価および 1 箇所が破断した時の耐震全性評価の手法を検討し、以下の成果を得た。

- (1) 溶接残留応力評価結果と疲労亀裂進展評価により、点検周期である 10 年間における亀裂深さの進展量は僅かであった。亀裂の発生要因として疲労を想定した場合は、ライザーブレースの破断に至る可能性は低い。
- (2) ライザーブレースの幅方向中央に初期亀裂を想定した SCC 亀裂進展評価から、JSME 維持規格による評価結果と、亀裂面上の任意の応力分布を考慮可能な影響関数法による評価結果は一致した。
- (3) SCC 亀裂進展評価により、亀裂が厚さの 80% に到達するまでの運転期間を評価した結果から、亀裂が厚さの 80% に到達した時点ではライザーブレースの断面積の半分以上が残存していることを示した。

- (4) 貫通までを想定した SCC 亀裂進展評価の結果から、点検期間の 10 年を想定した場合に 2.0 mm 以下の亀裂寸法であれば貫通は生じないことを示した。
- (5) ジェットポンプ耐震モデルを用いた耐震試験評価結果から、ライザーブレース溶接部一カ所が破断した場合の、耐震成立性を示した。

謝辞

本研究は、東京電力ホールディングス(株)、東北電力(株)、中部電力(株)、北陸電力(株)、中国電力(株)、日本原子力発電(株)、電源開発(株)、東芝エネルギーシステムズ(株)、日立GEニュークリアエナジー(株)の共同研究にて実施した成果の一部である。本研究の遂行にあたりご協力頂いた関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 一般社団法人 日本機械学会、“発電用原子力設備規格 維持規格 (2012 年版)”, JSME S NA1-2012, 2012.
- [2] 独立行政法人 原子力安全基盤機構、“平成 22 年度 ニッケル基合金の溶接部のき裂進展評価技術検証 (FDM) に関する事業報告書”, 11 原高報-0005, 2012.
- [3] 独立行政法人 原子力安全基盤機構、“複雑形状部機器配管健全性実証 (IAF) 事業 原子炉圧力容器の異材溶接部に関する高温材料特性データ集”, JNES-RE-2012-0024, 2013.
- [4] 岩松史則、宮崎克雅、白鳥正樹、“影響関数法による任意分布応力場における表面き裂の応力拡大係数と疲労き裂進展評価手法の開発”, 日本機械学会論文集 (A 編)、77 巻、782 号、2011.
- [5] 一般社団法人 日本機械学会、“発電用原子力設備規格 配管破損防護設計規格”, JSME S ND1-2002, 2002.