

大飯発電所 3 号機

加圧器スプレイライン配管溶接部における有意な指示について
(2020年9月25日公開会合における

指摘事項の回答 (亀裂進展))

2020年10月

関西電力株式会社

■ 2020年9月25日公開会合における指摘事項の回答 (亀裂進展)

これまでの公開会合で提示した亀裂進展評価における保守性の考え方等について以下のようなご指摘を頂いていることから、評価の前提条件について改めて整理するとともに、過去・将来の亀裂進展に対する入力データの妥当性、ばらつきを考慮して評価を行い、13か月以上の健全性を確認することとした。

亀裂進展評価においては、欠陥形状と亀裂進展式、並びに表層硬さ、内部硬さ、溶接残留応力及び溶接金属内の進展速度の各種入力条件があり、過去・将来の亀裂進展評価における条件の考え方について本資料にて示す。

なお、更なるデータの拡充を図るべく、モックアップの表層部及び内部の硬さ測定、並びに残留応力評価を追加実施し、亀裂進展評価に用いた。

< 2020年9月25日公開会合における亀裂進展に関する指摘事項 >

- ・ 亀裂進展を評価する当たり、適切な幅を持った条件・前提を設定し、厳しい条件・前提において将来の亀裂進展が評価されている必要がある。
- ・ 法令で要求している定期事業者検査の評価期間13か月以上への適合を確認すること。
- ・ 過去と将来の亀裂進展評価における亀裂長さについて適切に評価すること。
- ・ シンニング加工による表層の硬さデータの取扱いについて整理すること。
- ・ 亀裂進展式における外挿の考え方について整理すること。
- ・ 溶接金属部の亀裂進展速度についての考察を適切に行うこと。

1. 欠陥形状

ISI で確認された欠陥指示は、図-1. 1 に示すとおり、欠陥深さ $a=4.6\text{mm}$ 、欠陥長さ $l=67\text{mm}$ であるが、屈折角 45° による斜角法で検出している指示長さは、DAC20%を超える範囲の配管外表面において測定された長さであり、実際の欠陥は配管内表面に存在している。

配管内表面におけるモデル化欠陥長さは、以下の式に示すとおり外表面における指示長さに内周と外周の比を乗じることで算出が可能であり、検出された亀裂の配管内表面におけるモデル化欠陥長さは 51mm となる。

$$67\text{mm} \times \frac{(114.3\text{mm} - 2 \times 14.0\text{mm}) \times \pi}{114.3 \times \pi} = 50.5\text{mm} \rightarrow 51\text{mm}$$

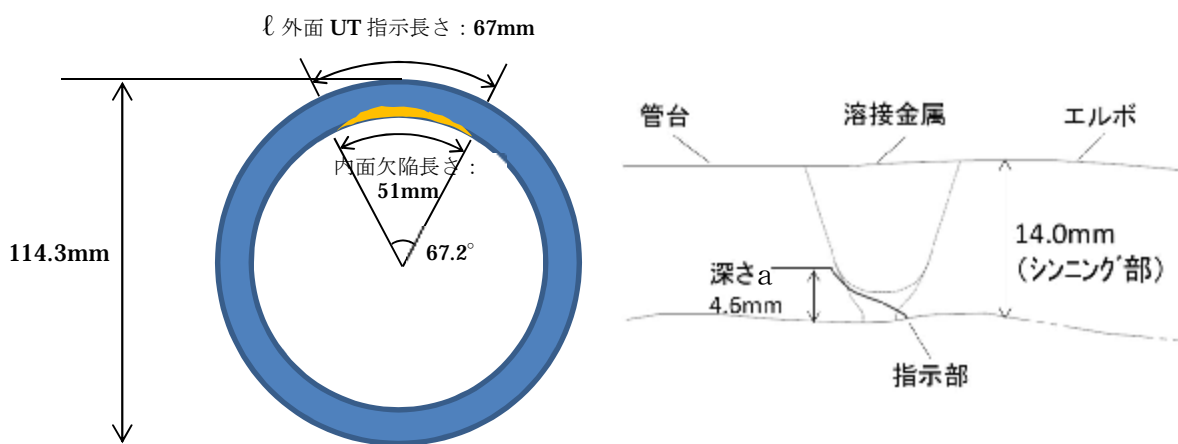


図-1. 1 UT 指示長さと欠陥長さ

なお、欠陥の指示範囲の 51mm は、図-1. 2 に示すとおり、欠陥長さを確認するために実施した2次クリーピング波法^{*}による測定結果の配管外面における指示範囲 (53mm) から配管内表面に換算した寸法 (41mm) よりも長いことから、亀裂長さとして 51mm を採用することは妥当であると考えられる。

※ 2次クリーピング波法と屈折角 45° による斜角法(横波)は、内面から進展する亀裂の検出手法として活用されており、JEAC4207-2008 (解説-4221-1)において、「2次クリーピング波法は、その原理から管内面の板厚方向に進展した開口き裂状の欠陥に反応することから、管内面で裏波部の形状に起因するエコー等と欠陥との判断に不確かさが残る指示について主に用いることになる」と記載されている。

上記を踏まえ前回の公開会合では、過去の評価においてはより実態に即した発生時期、進展評価となるよう欠陥長さを 51mm とし、他方、将来の予測においては強度上より保守的な評価となるよう欠陥長さ l を 67mm としてモデル化のうえ評価していたが、過去と将来において連続性、一貫性がなく適切なものとなっていなかった。したがって、今回、実機から得られるデータとして、より実態に即したものとすべく、モデル化欠陥長さを 51mm に見直し評価を行う。

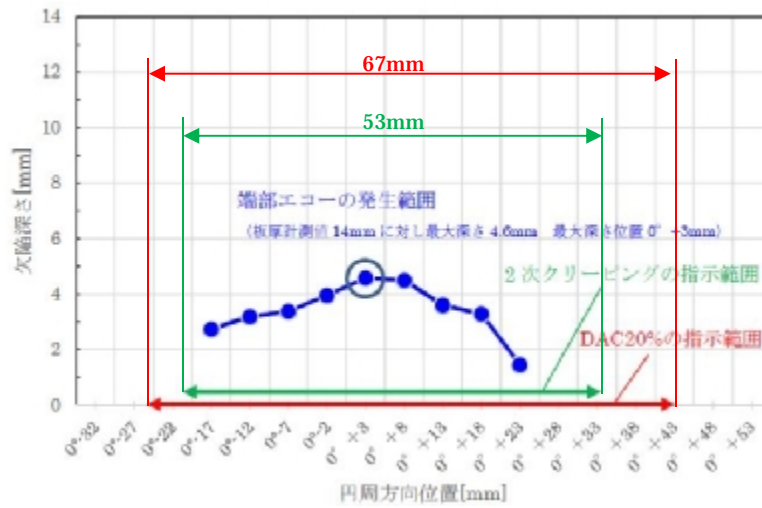
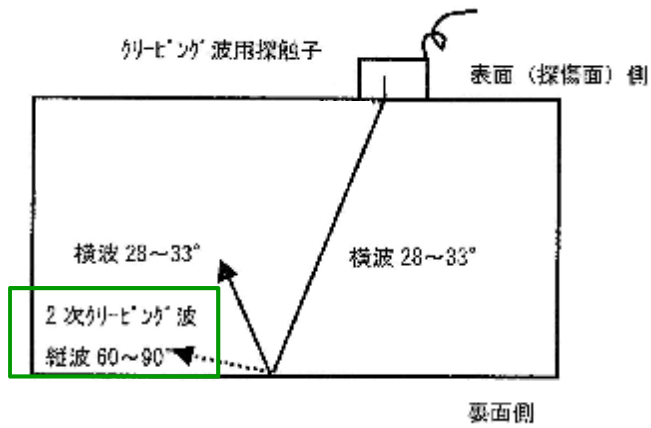


図-1. 2 2次クリーピング波法結果図

2. 亀裂進展評価式

2. 1 SCCによる亀裂進展評価式

PWR環境下における亀裂進展が硬度依存性を有することについて、電共研「強加工SCC懸念部位差別化のためのデータ拡充研究」や、電共研「PWR環境下のSCC進展データの拡充に関する研究」等が実施され、強加工SCCの亀裂進展評価式が作成されている。

ここでは、今回検討したそれぞれの亀裂進展評価式について説明する。

a. 公開進展式（図-2.1のオレンジ色グラフ）

公開進展式とは、電共研「維持規格導入に向けたSUS配管のSCC評価データ整備研究」（図-2.1の①白丸プロット）及び電共研「PWR環境下のSCC亀裂進展データの拡充に関する研究（Step1）」（図-2.1の②赤丸プロット）にて得られたデータ（ビッカース硬さ**260Hv**～**310Hv**程度）を使用して作成し、国際学会「**Fonteraud7,2010**」にて発表されているものである。

なお、上記の電共研においては、コンパクトテンション（CT）試験片に約**2mm**の予亀裂を導入した亀裂進展評価を実施している。

b. BFC式（ベストフィット曲線式）（図-2.1の黒色グラフ）

BFC式とは、公開進展式の作成後に実施された各種研究データも加えることで、現時点で判明しているPWR環境下（**290℃**）における全てのSCC亀裂進展研究データから亀裂進展評価式の取得を図ったものである。

具体的には、公開進展式のデータに加え、公開進展式の作成後に実施された電共研「PWR環境下のSCC亀裂進展データの拡充に関する研究（Step2）」（図-2.1の③青丸プロット）にて得られたデータ（ビッカース硬さ**200Hv**～**250Hv**程度）及びINS研究データ（**Journal of Nuclear Materials 426(2012)59-70**）（図-2.1の④水色四角プロット）を使用して作成した。

また、使用したデータでは**195Hv**以下の亀裂進展については認められていないものの、**200Hv**付近でも亀裂進展が認められているデータ（図-2.1の青丸プロット）もあり、SCC機構論的に**195Hv**に特異性があるとは考えにくいことから、外挿補完することが適切であると判断した。（これまでの公開会合においては、外挿補完することが保守的である旨の説明をしていたが、再検討した結果、外挿補完することは保守的な補完ではなく、適切な補完であると整理し直している。）

なお、上記の電共研及びINS研究においては、コンパクトテンション（CT）試験片に約**2mm**の予亀裂を導入した亀裂進展評価を実施している。

c. 包絡曲線式（図-2.1の緑色グラフ）

包絡曲線式とは、SCC亀裂進展試験のばらつきを考慮し、現時点で判明しているPWR環境下（**290℃**）における全てのSCC亀裂進展研究データすべてを包絡させることで、最も早い亀裂進展速度を設定できるようにしたものである。

また、BFC式と同様に、**195Hv** 以下については外挿補完することが適切であると判断した。(これまでの公開会合においては、外挿補完することが保守的である旨の説明をしていたが、再検討した結果、外挿補完することは保守的な補完ではなく、適切な補完であると整理し直している。)

公開進展式 : $da/dt(K, HV) = 4.73 \times 10^{-25} \times K^{1.96} \times HV^{5.67}$ (mm/s)

BFC式 : $da/dt(K, HV) = 1.13 \times 10^{-26} \times K^{1.96} \times HV^{6.45}$ (mm/s)

包絡曲線式 : $da/dt(K, HV) = 3.38 \times 10^{-26} \times K^{1.96} \times HV^{6.45}$ (mm/s)

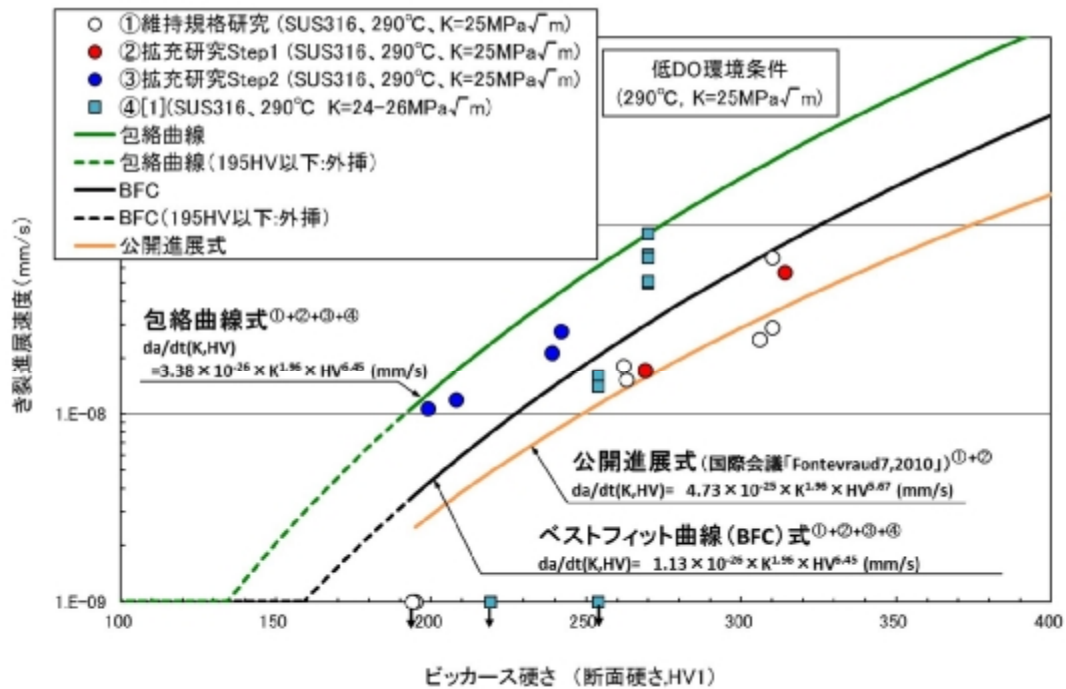
da/dt : 亀裂進展速度 (mm/s)

a : 欠陥深さ (mm)

t : 時間 (s)

K : 応力拡大係数 (MPa√m)

HV : ビッカース硬さ (HV)



① 維持規格研究「維持規格導入に向けた SUS 配管の SCC 評価データ整備研究」

② 拡充研究 Step1「PWR 環境下の SCC 亀裂進展データの拡充に関する研究」

③ 拡充研究 Step2「PWR 環境下の SCC 亀裂進展データの拡充に関する研究(Step2)」

④ [1] Journal of Nuclear Materials 426 (2012) 59-70

図-2. 1 亀裂進展速度線図

2. 2 今回の評価に使用する S C C による亀裂進展評価式

2. 2. 1 「過去進展評価」に使用する S C C による亀裂進展評価式

「過去進展評価」に使用する亀裂進展評価式については、過去進展における亀裂進展評価式の適用妥当性を確認するために、「B F C 式」及び「包絡曲線式」の両方を使用することが適切であると判断した。

2. 2. 2 「将来進展評価」に使用する S C C による亀裂進展評価式

「将来進展評価」に使用する亀裂進展評価式については、将来の欠陥深さ及び欠陥長さが保守的な評価（将来の欠陥深さ及び欠陥長さが大きくなる）とするために、亀裂進展評価式の傾きが厳しい「包絡曲線式」を使用することが適切であると判断した。

2. 3 疲労による亀裂進展評価式

疲労評価に用いる進展式は、維持規格 添付 E-2 に規定されるオーステナイト系ステンレス鋼の軽水炉（PWR 一次系）にある表面欠陥の疲労亀裂進展速度式が規定されていることから、「過去進展評価」及び「将来進展評価」において本式を使用する。

$$da/dN = 4.35 \times 10^{-10} \times T_c^{0.63} \times t_r^{0.33} \times (\Delta K)^{3.0} / (1 - R)^{1.56} \quad (\text{mm/cycle})$$

ΔK : 応力拡大係数変動範囲 (MPa $\sqrt{\text{m}}$)

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (R \geq 0 \text{ の場合})$$

$$\Delta K = K_{max} \quad (R < 0 \text{ の場合})$$

K_{max} : 最大応力拡大係数 (MPa $\sqrt{\text{m}}$)

K_{min} : 最小応力拡大係数 (MPa $\sqrt{\text{m}}$)

T_c : 温度 (°C)

t_r : 負荷上昇時間 (s)

R : 応力比 ($R = K_{min}/K_{max}$)





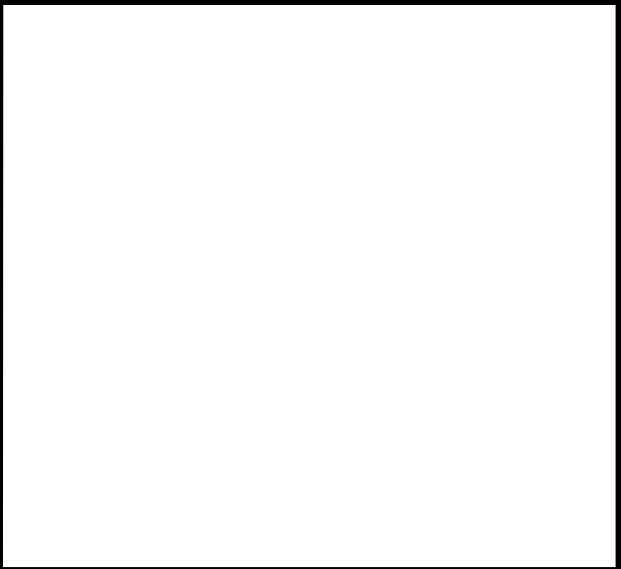
3. 過去の進展評価における入力条件


3. 1 モックアップの製作

過去の亀裂進展の検証に際しては、実機状況を踏まえた評価が必要となる。検証に用いる評価条件は次頁以降に示すが、実機状況を確認することはできないため、補足的情報を取得することを目的として、モックアップを製作し各種パラメータを採取した。

モックアップ製作においては、製作図を基に実機と同材質である **SUS316** 配管材を使用し、開先及びシンニング部の形状・加工条件、溶接方法・積層を合わせた条件にて施工している。表層硬さへ影響するシンニング加工については、実機製造時と同じ加工法を適用し、また残留応力、内部の硬さへ影響する溶接方法については、実機溶接時の溶接施工記録書に記載の溶接法、電流値、ビード数と同じ条件で施工した。実機とモックアップの比較一覧を表-3. 1に示す。同じ材料、加工法、及び溶接条件にて製作された今回のモックアップは、実機状況を概ね再現しているものと考えられるため、モックアップより採取したデータを基に、欠陥再現性の検証を実施するものとする。なお、今回製作したモックアップと実機状況は完全には一致しないため、実機検証にモックアップの各種パラメータを使用する際には、ばらつきを考慮する。詳細は次項以降で説明する。

表-3.1 実機とモックアップの比較一覧

		実機	モックアップ	差異
材質	管台	SUS316	同左	なし
	エルボ	SUS316	同左	なし
形状	管台	管台 (4B) 外径: 114.3mm (公称値) 	直管 (4B-Sch160) 外径: 114.3mm (公称値) 板厚: 13.5mm (公称値)	管台と直管の相違はあるが、溶接部近傍に限れば寸法は相違なし
	エルボ	60° エルボ (4B-Sch160) 外径: 114.3mm (公称値) 	直管 (4B-Sch160) 外径: 114.3mm (公称値) 板厚: 13.5mm (公称値)	エルボと直管の相違があるが、溶接部近傍に限れば寸法は相違なし
	組合せ			溶接部近傍に限れば寸法は相違なし
溶接	開先加工			なし
	方法・積層			なし

 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

3. 2 表層硬さ

(1) 表層硬さの測定結果

今回欠陥指示が確認された溶接部近傍は、配管内表面に開先合わせのための機械加工（シンニング加工）が施されており、機械加工に伴う内表面の極表層の硬さの硬度上昇が懸念される。PWR環境において、硬度の上昇に伴いステンレス鋼のSCC亀裂進展性が認められていることから、現状の欠陥を再現する検証においては、表層硬さを設定する必要がある。このため、実機と同等の加工条件により製作したモックアップより新たに3断面のデータを取得し表層硬さを確認した。硬さはJISに基づきデータを採取し、4Bのモックアップより取得したデータを表-3.2に、他口径で過去に取得したデータを表-3.3に、4Bモックアップより取得したデータ及び他口径で過去取得した極表層硬さを平均化した内表面からの板厚方向硬さ分布を図-3.1に示す。

表-3.2 シンニング部の板厚方向硬さデータ（荷重2g）

--

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

表-3.3 シンニング部の板厚方向硬さデータ (荷重 10g)

--

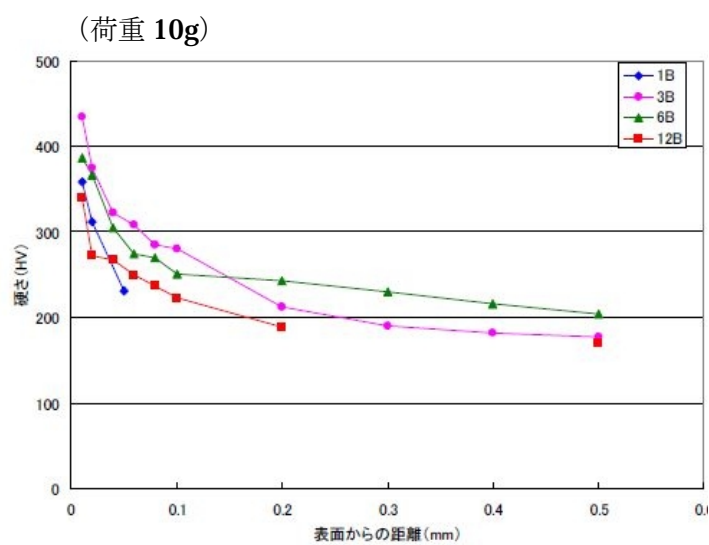
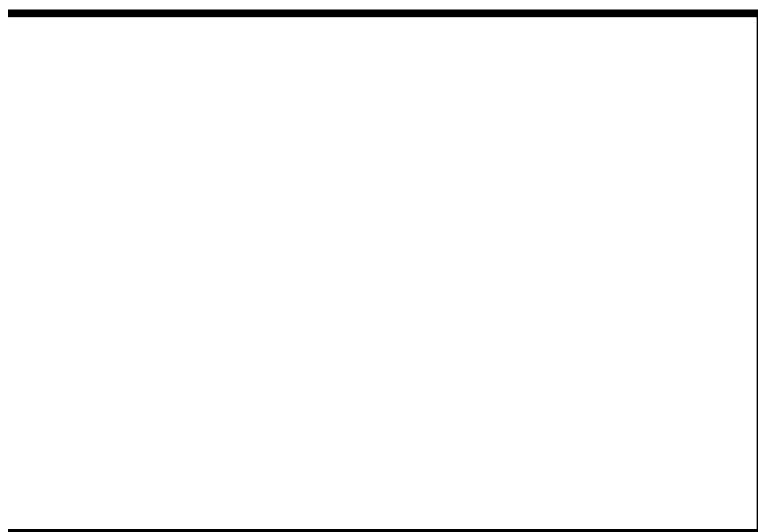



図-3.1 シンニング部の板厚方向硬さ分布

 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(2) 表層硬さの換算について


図－3. 1の表層硬さは表層付近の非常に微小な領域から採取するため、硬さを荷重 2g で採取している。(過去に実施した 4B 以外は荷重 10g で採取。) 表層硬さについては、計測時の荷重によりばらつきがあり、一般的に 1 kg 以上の負荷荷重により計測された硬さが精緻であることから、これまで進展評価においては、荷重 1 kg で取得した硬さを用いている。したがって、測定された表層硬さのデータを亀裂進展評価に考慮するためには、モックアップから採取した荷重 2g での硬さを荷重 1kg での硬さに換算する必要がある。今回換算を目的として、モックアップより負荷荷重を変化させて硬さを計測した結果、表－3. 4の計測結果と図－3. 2に示す傾向が確認された。

表－3. 4 負荷荷重ごとの硬さデータ



図－3. 2 負荷荷重による硬さのばらつき分布

図－3. 2のとおり、換算のためのデータにおいてもばらつきがあることから、ばらつきを考慮し、計測された硬さの最大値、最小値の2ケースを設定する。荷重換算においては、計測した点の (2g－1kg)、(10g－1kg) の値に対する平均値と標準偏差の3倍の3 σ を考慮している。

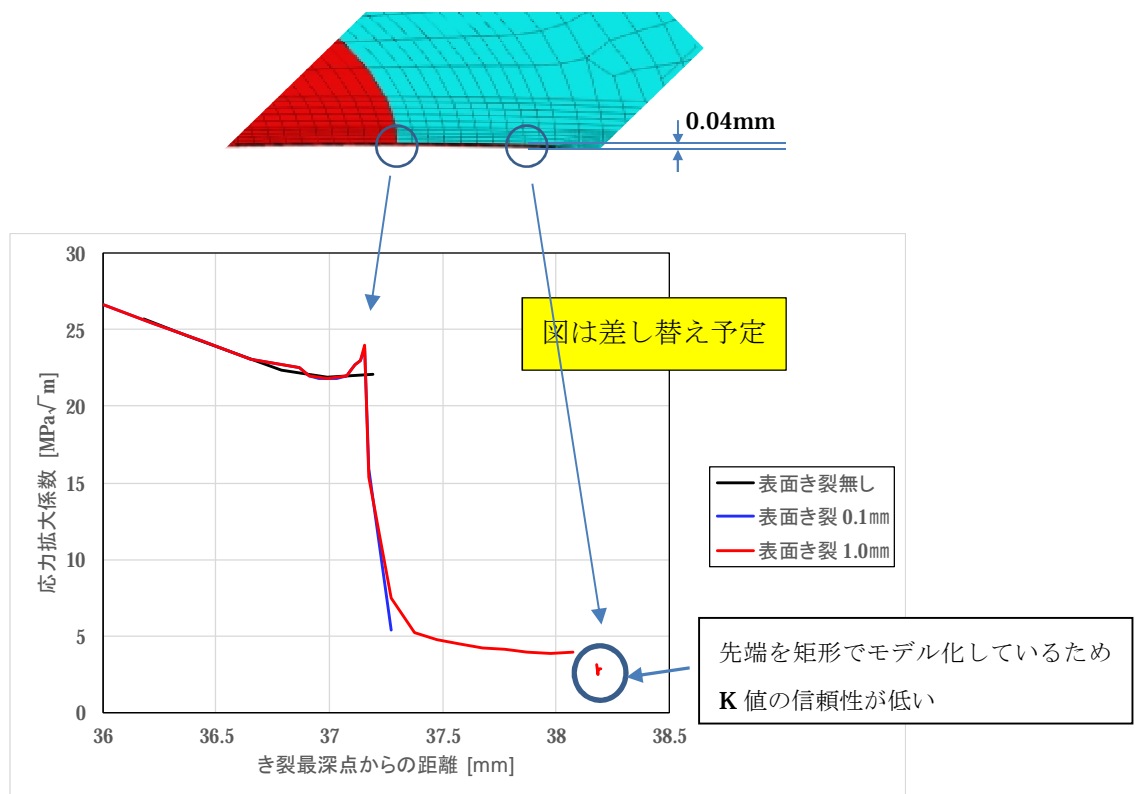
 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(3) 亀裂進展に用いる表層硬さの選定

極表層は SCC の発生領域に位置し特異な硬さを示すため、一般的に表層硬さを考慮した亀裂進展解析は行われていない。しかし、表層の硬さについては、長さ方向の SCC 進展速度に影響すると考えられたため、亀裂進展解析への適切な入力条件を検討した。

硬度が高い領域である深さ 0.04mm に長さ 1mm の表面亀裂が伝播することを想定して FEM 解析を実施した結果、深さ 0.04mm より浅い領域の K 値は $5\sim 7\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 程度と低く、当該部の亀裂だけが有意に進展することは考え難いことが分かった。

一方で、シンニング加工の影響を完全に否定できないため、表面が荒れた領域を超え、亀裂が伝播し得る結晶粒が認められる領域となる表層からの距離 0.04mm の領域を進展評価に用いることとした。



図一 3. 3 表面亀裂先端近傍における亀裂前縁に沿った応力拡大係数の FEM 解析結果 (亀裂深さ 0.04mm)

以上のことより、図-3.2のとおり、換算のためのデータにおいてもばらつきがあることから、ばらつきを考慮して、表面硬さを以下のとおり設定する。

- ① $+3\sigma$ 考慮： **304HV**
- ② -3σ 考慮： **116HV**

なお、前回の会合においては、モックアップの1断面から取得したデータを基に荷重 **1kg** の条件へ単純換算し評価の入力条件を設定しており、モックアップと実機とのばらつき及び測定誤差によるばらつきが考慮されていなかった。したがって、今回改めて、追加でデータを拡充するとともに、他口径の荷重 **10g** で取得した硬さ結果を加えることで、測定に係るばらつきを考慮し、また、得られた結果に対し標準偏差を考慮することで、実機とモックアップのばらつきを考慮した表層硬さとする事としている。

3. 3 内部硬さ

現状の欠陥を再現する検証においては、板厚内部の欠陥の進展経路を想定し、進展経路の硬さ分布を設定する。このため、実機と同等の加工条件及び溶接条件にて製作したモックアップの進展経路の硬さ新たに4断面から計測した。計測結果を表-3.5に示す。また、内部硬さにおいてもバラツキを考慮し、計測した5断面の各アドレスについて平均値と標準偏差の3倍である3σを考慮し、最大値、最小値の2ケースを設定した。設定した内部硬さを表-3.6に示す。

表-3.5 内部硬さデータ (荷重 1kg) (最上図は前回提示データ)

TIG+SMAW	溶金中央からの距離 (mm)														＜進展評価に用いる硬さ分布＞		
	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	内面からの距離	適用硬さ
10.5	169	170	187	174	172	178	170	182	170	178	172	174	187	170	169	～外表面	189HV
9.5	175	179	172	175	178	191	179	191	179	191	178	175	172	179	175		
8.5	182	171	183	182	190	187	184	180	184	187	190	182	183	171	182		
7.5	175	178	189	174	196	200	198	199	198	200	196	174	189	178	175		
6.5	184	181	185	197	192	204	209	183	209	204	192	197	185	181	184	4mm～	189HV
5.5	187	189	183	190	203	213	204	204	204	213	203	190	183	189	187	3～4mm	201HV
4.5	179	185	185	189	192	213	209	206	209	213	192	189	185	185	179	2.98～3mm	202HV
3.5	195	189	200	201	196	206	217	203	217	206	196	201	200	189	195	2～2.98mm	208HV
2.5	195	191	198	202	199	205	208	216	208	205	199	202	198	191	195	1～2mm	212HV
1.5	200	196	199	201	202	212	200	186	200	212	202	201	199	196	200	0.68～1mm	207HV
0.5	209	202	200	199	200	207	203	202	203	207	200	199	200	202	209	0～0.68mm	200HV
																0mm	290HV

追加断面1

TIG+SMAW	溶金中央からの距離 (mm)													
	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
10.5														
9.5														
8.5														
7.5														
6.5	174	186	192	196										
5.5	193	187	196	194										
4.5		197	198	194	209									
3.5		195	205	200	206									
2.5					215	212	222	219						
1.5								211	204	219	205			
0.5											180	194		

追加断面2

TIG+SMAW	溶金中央からの距離 (mm)													
	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
10.5														
9.5														
8.5														
7.5														
6.5	183	187	191	199										
5.5	184	190	189	182										
4.5		199	194	187	208									
3.5		211	199	197	209									
2.5					206	203	199	199						
1.5								196	196	201	194			
0.5											188	205		

追加断面3

TIG+SMAW	溶金中央からの距離 (mm)													
	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
10.5														
9.5														
8.5														
7.5														
6.5	179	183	191	184										
5.5	184	194	189	184										
4.5		194	197	202	195									
3.5		195	196	194	208									
2.5					212	202	201	201						
1.5								196	192	194	210			
0.5											193	202		

追加断面4

TIG+SMAW	溶金中央からの距離 (mm)													
	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
10.5														
9.5														
8.5														
7.5														
6.5	184	190	184	182										
5.5	188	191	184	193										
4.5		189	196	202	198									
3.5		209	198	200	198									
2.5					195	201	208	201						
1.5								202	192	193	204			
0.5											190	200		

表-3. 6 進展評価に用いる内部硬さデータ (平均値±3σ)

平均値+3σ		平均値-3σ	
内面からの距離	適用硬さHV	内面からの距離	適用硬さHV
~外表面	212	~外表面	166
	↑		↑
6mm~	212	6mm~	166
5~6mm	205	5~6mm	170
4~5mm	226	4~5mm	170
3~4mm	226	3~4mm	176
2.98~3mm	230	2.98~3mm	182
2~2.98mm	234	2~2.98mm	180
1~2mm	233	1~2mm	170
0.68~1mm	221	0.68~1mm	162
0~0.68mm	212	0~0.68mm	188
0mm	304	0mm	188

なお、前回の会合においては、内部硬さはモックアップの1断面から取得したデータを基に評価の入力条件を設定しており、モックアップと実機とのばらつき及び測定誤差によるばらつきが考慮されていなかった。したがって、今回改めて、追加でデータを拡充することで、測定に係るばらつきを考慮し、また、得られた結果に対し標準偏差を考慮することで、実機とモックアップのばらつきを考慮した内部硬さとするとしている。

3. 4 溶接残留応力

進展評価に用いる残留応力分布に関しては、実機当該部に発生する溶接残留応力及び運転中応力を考慮する必要がある。溶接残留応力については、当該部の溶接方法（TIG+SMAW）を模擬した FEM 解析を新たに実施し、進展経路に則した残留応力分布を設定した。

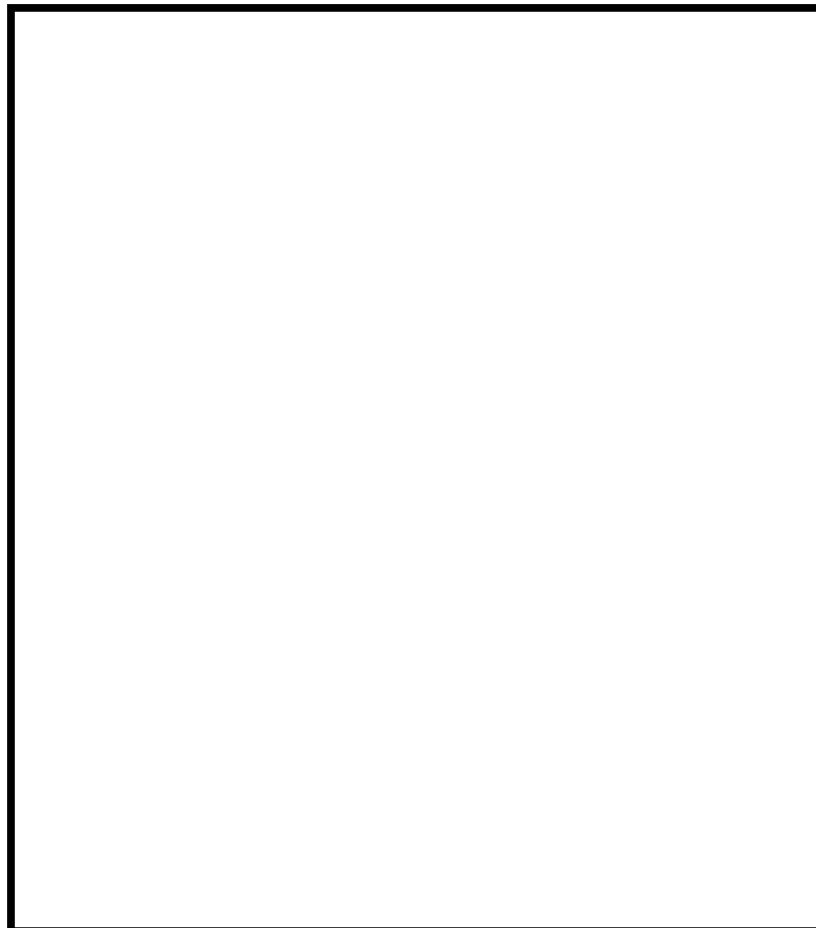
溶接残留応力の評価には FEM モデルによる弾塑性解析を用いており、旧 JNES の複雑形状部機器配管健全性実証（IAF）事業^{※1}により実物の溶接部を模擬した解析ができることが確認されている。

なお、解析の入力条件においては、実機と同じ開先形状、溶接パス数、入熱条件を採用し、更に溶接残留応力が入熱量の差によりばらつく事等を考慮し、入熱量を±20%の範囲で設定^{※2}した。評価に用いた溶接残留応力分布を図－3. 4、3. 5に示す。

※1 複雑形状部機器配管健全性実証（IAF）事業 溶接残留応力解析評価データ集

小口径円筒突合せ接手（4B Sch40 管）

※2 溶接入熱は、溶接電流（以下、電流）、溶接電圧（以下、電圧）、溶接速度（以下、速度）によって決定され、 $\text{入熱} = \text{電流} \times \text{電圧} \div \text{速度}$ の関係を有する。溶接施工においては、溶接施工法、溶接材料を踏まえ、電流値を設定し（溶接施工記録書記載値）、電圧と速度はその電流値に応じて従属的に設定される。溶接技能資格を有する作業者による溶接施工では、施工中の電圧変動は小さく、また溶接速度は溶接の状況（母材と溶接金属の熔融状況⇔入熱量に相関）を一定に維持するため微調整している。したがって、溶接施工中の溶接入熱の変動は小さいが、溶接状況に応じた微調整による入熱変動幅を保守的に±15%と見込み、更に残留応力解析では実機との差分も考慮して、溶接入熱最大として+20%、溶接入熱最小として-20%とした。



図－3. 5 溶接残留応力分布（入熱量 小）

： 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

3. 5 溶接金属内の進展速度

一般的に溶接金属内のSCC進展速度は母材に比べ遅い傾向にあり、このことはBWR環境中ではあるが、図-3.6に示すようなデータも取得されている。図-3.6のデータでは、母材（熱影響部）よりも一般溶接金属部のSCC進展速度が1/3程度遅い傾向が確認されており、これは溶接金属中に含まれるフェライト量が影響している可能性が考えられる。

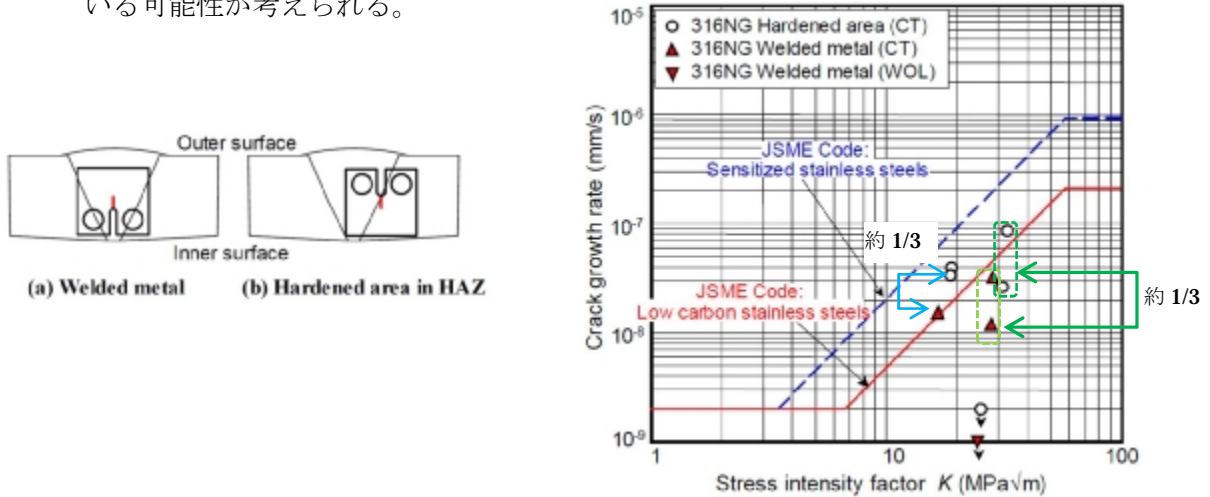


図-3.6 母材（熱影響部）と溶接金属のBWR環境中SCC進展速度結果

また、図-3.7には、BWR環境中において、SCC進展速度に及ぼすフェライト量の影響が取得されている。フェライト量が2%増加（6.5%から8.5%に増加）することで、SCC進展速度が抑制される傾向が確認されている。

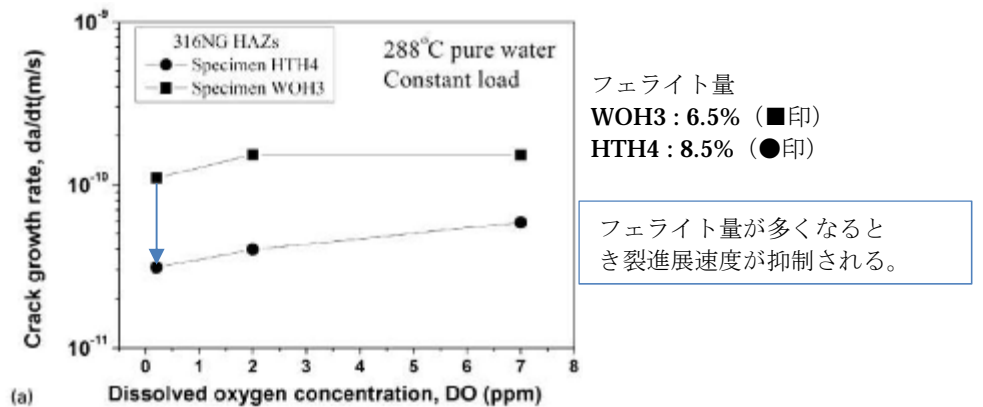


図-3.7 母材（熱影響部）のBWR環境中SCC進展速度結果（フェライト量影響）

PWR環境においては、溶接金属内のSCC亀裂進展速度データが得られていない状況であるが、上記のBWR環境を考慮すると、PWR環境下においても抑制される可能性が考えられるため、今回の評価では、BWRで確認されている1/3、母材相当及び母材の1/2の進展速度となるものと想定した評価を実施している。

3. 6 その他の入力条件

その他の入力条件については、ばらつきが生じないものであることから、以下のとおり設定している。

① 応力拡大係数

亀裂進展式で用いる応力拡大係数は、維持規格 **EB-4360** 及び維持規格 添付 **E-5** に従い、円筒内表面だ円欠陥に対する **K** 値式を用いて計算する。

② 荷重と荷重の組み合わせ

当該欠陥の亀裂進展評価に考慮する荷重との荷重の組合せは、維持規格 添付 **E-7** の規定に従い、表-3. 7 及び表-3. 8 の通り設定する。

表-3. 7 き裂進展評価で考慮する荷重の種類

項目		評価内容	
		SCCによる き裂進展評価	疲労による き裂進展評価
内圧	出力運転条件	○	○
	過渡条件	—	○
熱	出力運転条件	○	○
	過渡条件	—	○
機械的荷重		○	○
地震 ^{注1}	1/3Sd*	—	○
溶接残留応力		○	○

凡例：○ ⇒考慮、— ⇒考慮せず

注1：Sd*は、弾性設計用地震動（Sd）による地震力と静的地震力のうち大きい方の地震力の値を示す。

表-3. 8 き裂進展評価で考慮する荷重の組合せ

評価内容	組合せ
SCCによる き裂進展評価	出力運転条件（内圧、熱）+機械的荷重+溶接残留応力
疲労による き裂進展評価	出力運転条件（内圧、熱）+機械的荷重+過渡条件（内圧、熱） +溶接残留応力
	出力運転条件（内圧、熱）+機械的荷重+地震+溶接残留応力

③ 出力運転条件による応力

き裂進展評価にて出力運転条件として用いる設計条件と、同条件における圧力+熱+自重による軸方向応力を表-3. 9にまとめる。出力条件における発生応力は、既工認において実施した3次元梁解析結果より設定する。

表-3.9 き裂進展評価に考慮する出力運転条件

運転圧力 (MPa)	運転温度 (°C)	発生応力 (MPa)
15.41	291.7	100 ^{注1}

(注1) 亀裂進展評価における出力運転時(100%出力運転)の応力は、下表の99.3MPaを切り上げて100MPaとしている。

出力運転時(100%出力運転)において考慮している応力内訳

条件	Pm 一次一般膜応力 (MPa)	Pe 熱膨張応力 (MPa)	Pb 自重による一次 曲げ応力 (MPa)	合計 (MPa)
出力運転時 (100%出力運転)	32.7	62.8	3.8	99.3

④ 過渡条件

過渡条件は表-3.10にまとめる。過去の進展評価では、進展の逆算において評価期間における過渡回数 N を、 $N=60$ 年過渡回数 \times 評価年数/60 を切り上げて算出している。

表-3.10 過去評価における過渡条件

No	運転ケース	変動応力 (MPa)	過渡回数 (回)
			60 年
1	起動・停止	96	
2	負荷上昇 (15→100%)	35	
3	負荷減少 (100→15%)	35	
4	90%から 100%へのステップ状負荷上昇	35	
5	100 から 90%へのステップ状負荷減少	35	
6	100%からの大きなステップ状負荷減少	36	
7	燃料交換	14	
8	0%から 15%への負荷上昇・15%から 0%への負荷減少	33	
9	1 ループ停止 / 1 ループ起動 I) 1 ループ停止	35	
10	1 ループ停止 / 1 ループ起動 II) 1 ループ起動	34	
11	負荷の喪失	44	
12	外部電源喪失	47	
13	1 次冷却材流量の部分喪失	35	
14	100%からの原子炉トリップ I) 不注意な冷却を伴わないトリップ	34	
15	100%からの原子炉トリップ II) 不注意な冷却を伴うトリップ	38	
16	100%からの原子炉トリップ III) 不注意な冷却と安全注入を伴うトリップ	51	
17	1 次冷却系の異常な減圧	45	
18	制御棒クラスタの落下	37	
19	出力運転中の非常用炉心冷却系の誤起動	43	
20	1 次冷却系停止ループの誤起動	40	
21	1 次系漏えい試験	75	
22	タービン回転試験	44	

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

⑤ 地震力

き裂進展評価に用いる地震力は、維持規格 添付 E-7 で規定される評価すべき地震力の S_1 を S_d (弾性設計用地震動)と読み替え、 $1/3S_d^*$ として、 S_d 地震力と静的地震力の大きいものを $1/3$ したものを用いる。なお、評価に用いる地震力は既工認において用いた地震力と同等の地震力とする。なお、地震時の発生回数については、JEAG 4613-1998「原子力発電所 配管破損防護設計指針」に基づいて設定(10年に1回地震(地震1回あたり60回の繰り返し回数)が発生すると仮定)し60回とする。また、地震の負荷上昇時間は1sとする。

4 過去の進展評価結果

4. 1 亀裂進展評価

欠陥深さ **4.6mm**、長さ **51mm** の欠陥形状に対し、表-4. 1 のばらつきを踏まえた入力条件を用いた包絡曲線式、B F C 式による進展評価を行った。

表-4. 1 入力条件

	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
板厚内硬さ	モックアップ 5 断面の 最大値		モックアップ 5 断面の 最小値	
表層硬さ	HV		HV	
溶接残留応力 (TIG+SMAW)	標準入熱量+20%		標準入熱量 - 20%	
運転応力	100MPa		100MPa	
溶接金属内のき裂進展速度	母材内と同等と仮定		母材内と同等と仮定	
き裂進展評価式	包絡曲線式	BFC 式	包絡曲線式	BFC 式

評価の結果、図-4. 1 の亀裂進展経過が確認された。

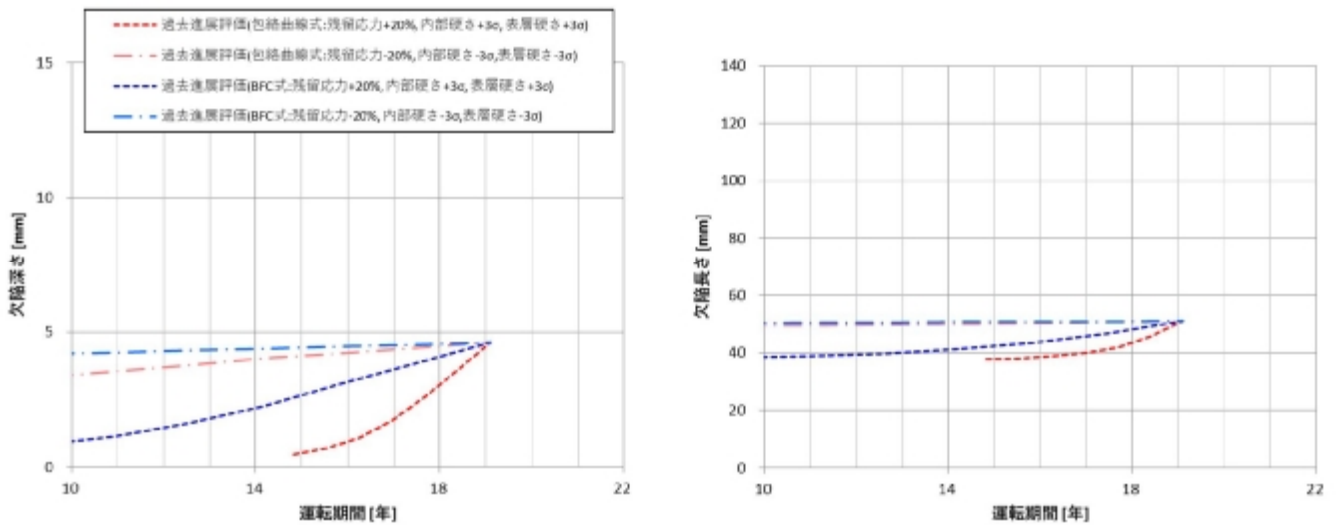


図-4. 1 包絡曲線式・B F C 式による進展評価結果

図-4. 2に示すとおり、各領域について以下のとおり整理した。

領域①：前回 ISI 時における深さ 2.8mm以上の範囲について

領域①については、前回 ISI 時（運転期間 11.1 年）に検出限界である 2.8mm以上の亀裂が生じていたこととなるが、前回の ISI 記録を踏まえても、有意な欠陥指示は確認されていないことから、領域①の範囲についてはこれまでの亀裂進展経過とは考えにくい。

領域③：包絡曲線式（+3σ）以上の亀裂進展速度範囲について

領域③については、包絡曲線式にばらつきを考慮した以上の応力・硬さを入力した範囲となることから、実機条件から大きく離れる領域となる。また、包絡曲線式は強加工 SCC の亀裂進展研究において得られているデータを包絡する進展速度であり、領域③は現在の SCC 進展速度の知見を超える進展領域であることから、これまでの亀裂進展経過とは考えにくい。

以上のことから、今回の欠陥は領域②の範囲で生じたと考えられる。

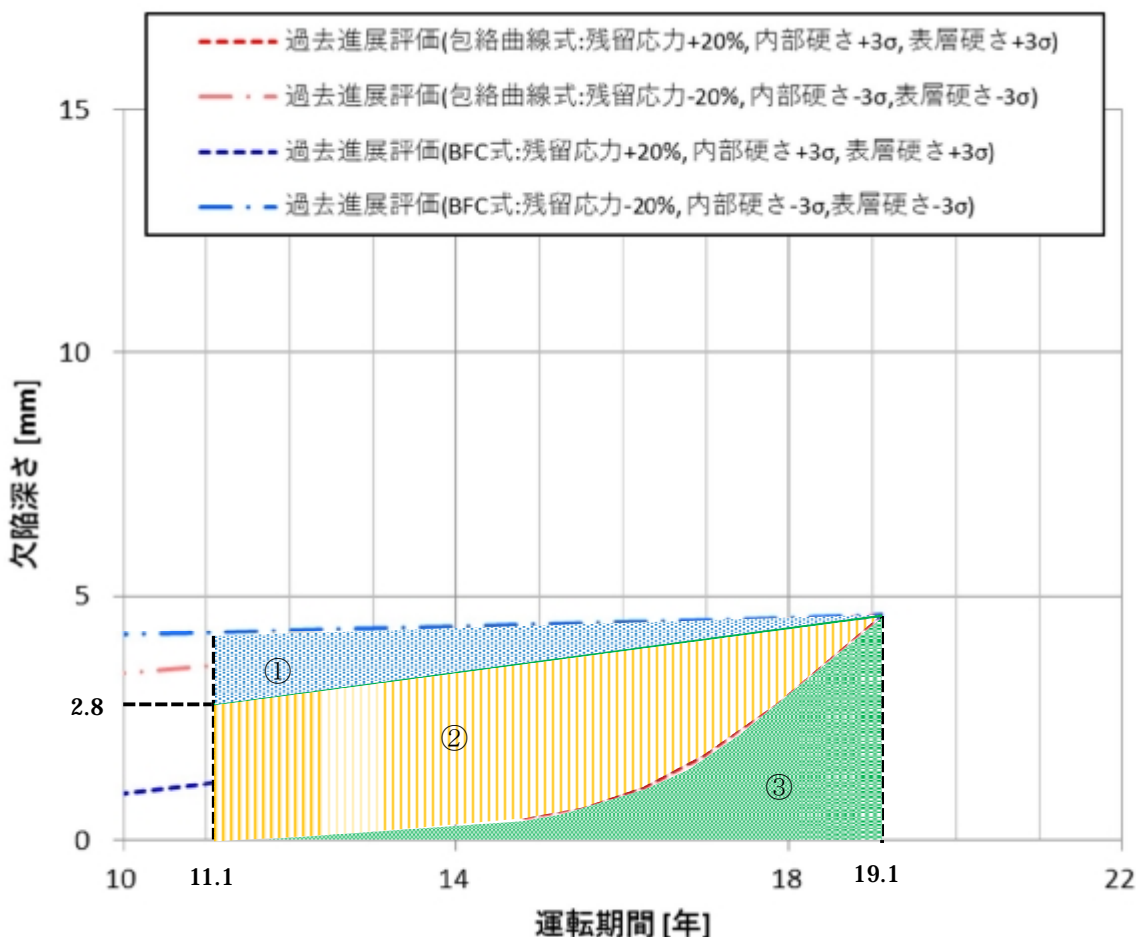


図-4. 2 想定される深さ進展領域図

4. 2 裏波溶け込み部の進展速度について

図-4. 3に裏波溶け込み部の亀裂進展速度を、母材の 1/2 および 1/3 とした場合の亀裂進展評価結果を示す。3. 5章に示した通り、BWR 条件では溶接部が HAZ 部と比べて 1/3 程度の亀裂進展速度となることが知られている。PWR 条件下における実際の亀裂進展速度は不明であるものの、BWR 相当の溶接金属における抑制効果を見込んでも、包絡曲線式の+3σ 条件は、前回 ISI 時において 2.8mm 以下の領域に位置しており、過去の亀裂進展を説明可能であることが確認できた。

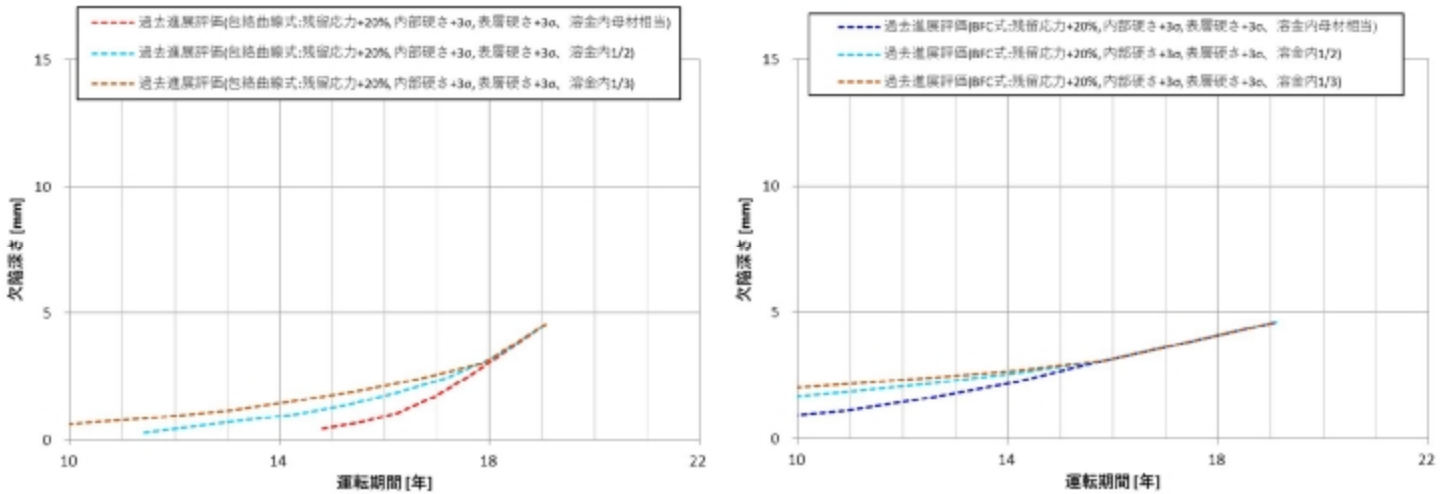


図-4. 3 溶接金属部の亀裂進展速度を変化させた場合の亀裂進展評価結果

4. 3 過去の進展評価結果に対する考察について

過去進展の可能性のある領域②の内、領域①に近い範囲については、**2.8mm** がSCCに対する検出限界ではあるものの、検出限界はUTSにおける100%の探傷が担保された欠陥サイズであり、UTSでは**1.3mm**のSCC欠陥も**8割**の検出率が確認されていることから、前回ISI時点では更に小さな欠陥であったと考える。また、領域③に近い範囲については、統計上、進展が生じ難い領域であることから、亀裂の進展経過は領域②の中域であったと考えている。

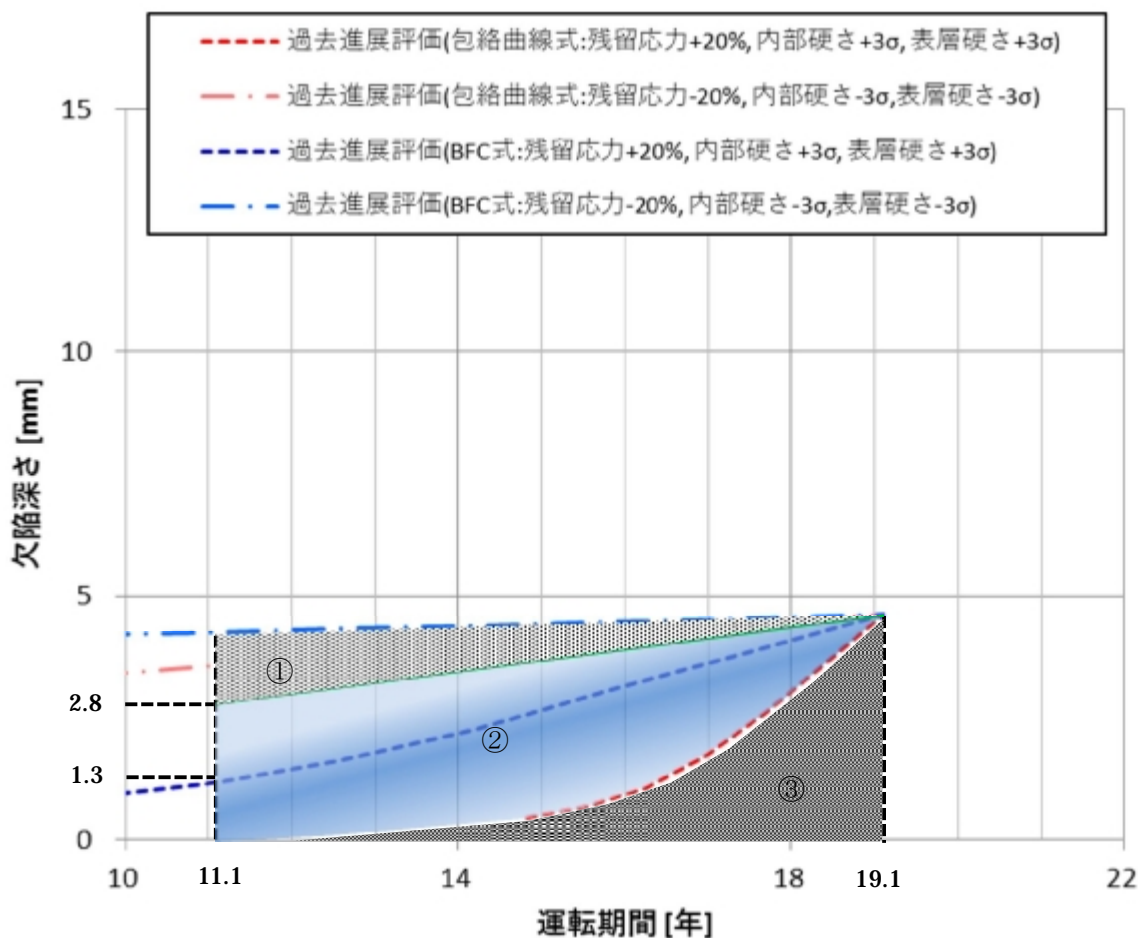


図-4. 4 領域②の想定進展経過

以上のとおり、ばらつきを考慮した過去の亀裂進展評価では、**BFC**式及び包絡曲線式のいずれの式でも亀裂の進展経過を表すことができていると考えており、本進展式を将来の亀裂進展評価に用いることができると判断した。

5. 将来の進展評価における入力条件

5. 1 モックアップの製作

将来の亀裂進展の検証に際しては、モックアップ等実機から取得されたものではない値を用いるため、不確実性の重ね合わせの程度を考慮した保守的な（厳しい）データを採用する。

今回は、実機状況を確認することはできないため、補足的情報を取得することを目的として、モックアップを製作し各種パラメータを採取した。

モックアップ製作の詳細については、3項「過去の進展評価における入力条件」の3. 1項「モックアップの製作」に示すとおり。

5. 2 表層硬さ

表層硬さについては、3項「過去の進展評価における入力条件」の3. 2項「表層硬さ」に示すとおりであり、以下の2ケースを設定している。

① $+3\sigma$ 考慮：**304HV**

② -3σ 考慮：**116HV**

将来の進展評価における入力条件としては、より保守的なデータを採用する必要があるため、上記の「 $+3\sigma$ 考慮：**304HV**」を採用する。

5. 3 内部硬さ

内部硬さについては、3項「過去の進展評価における入力条件」の3. 3項「内部硬さ」に示すとおりであり、以下の2ケースを設定している。

将来の進展評価における入力条件としては、より保守的なデータを採用する必要があるため、下記の「表-5. 1 進展評価に用いる内部硬さデータ (平均値±3σ)」の平均値+3σの値を採用する。

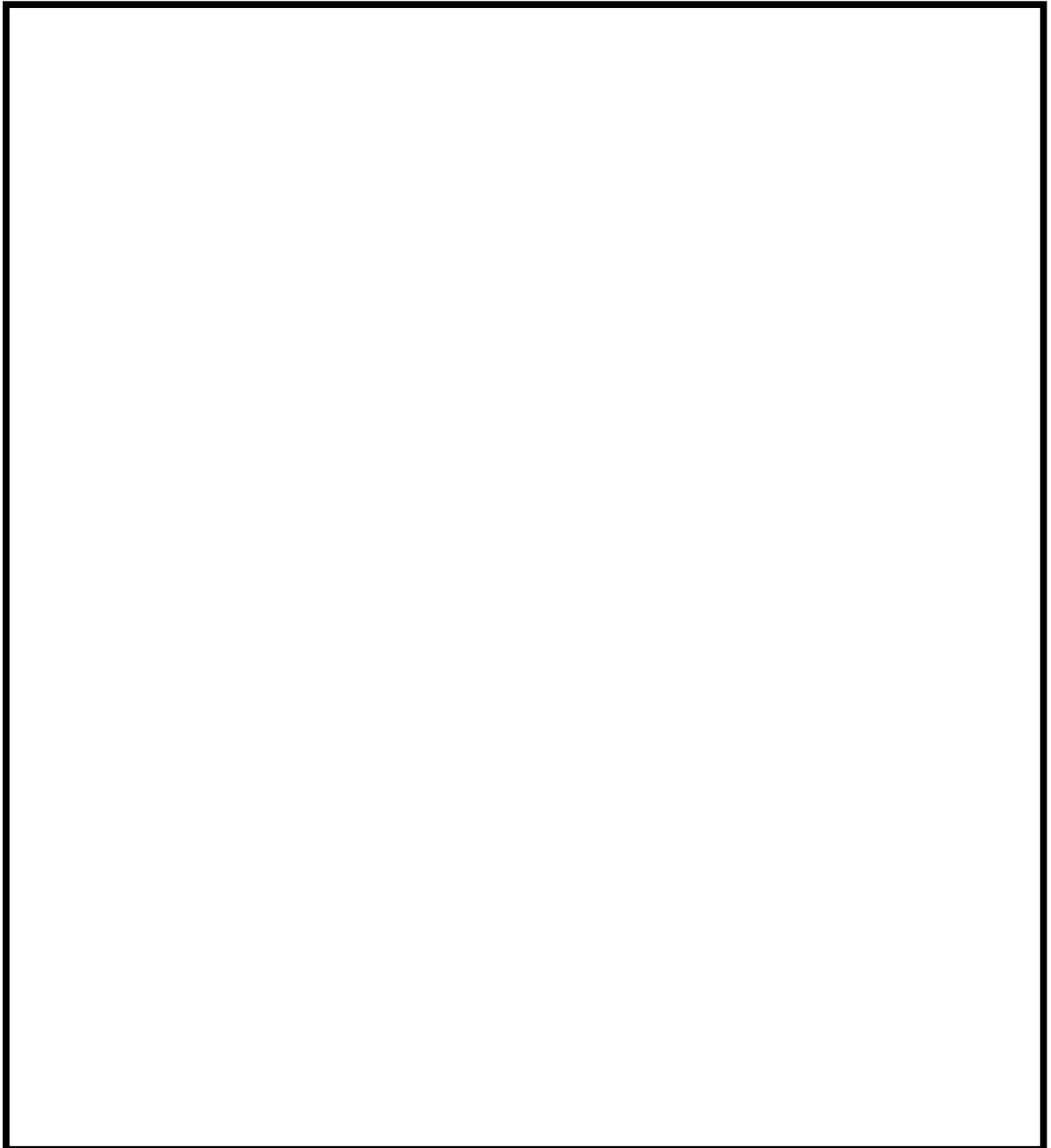
表-5. 1 進展評価に用いる内部硬さデータ (平均値±3σ)

平均値+3σ		平均値-3σ	
内面からの距離	適用硬さHV	内面からの距離	適用硬さHV
~外表面	212	~外表面	166
	↑		↑
6mm~	212	6mm~	166
5~6mm	205	5~6mm	170
4~5mm	226	4~5mm	170
3~4mm	226	3~4mm	176
2.98~3mm	230	2.98~3mm	182
2~2.98mm	234	2~2.98mm	180
1~2mm	233	1~2mm	170
0.68~1mm	221	0.68~1mm	162
0~0.68mm	212	0~0.68mm	188
0mm	304	0mm	188

5. 4 溶接残留応力

溶接残留応力については、3項「過去の進展評価における入力条件」の3.4項「溶接残留応力」に示すとおりであり、以下の2ケースを設定している。

将来の進展評価における入力条件としては、より保守的なデータを採用する必要があるため、下記の「図－5. 1 溶接残留応力分布（入熱量 大）」の値を採用する。



図－5. 1 溶接残留応力分布

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

5. 5 溶接金属内の進展速度

溶接金属内の進展速度については、3項「過去の進展評価における入力条件」の3.5項「溶接金属内の進展速度」に示すとおりであり、3ケースを設定している。

ただし、将来の進展評価における入力条件においては、現時点の欠陥先端位置は溶接金属を通過し母材に位置しているものと想定されることから、母材の進展のみを考慮すればよく、溶接金属内の影響はないものとする。

5. 6 そのほかの入力条件

そのほかの入力条件については、3項「過去の進展評価における入力条件」の3.6項「そのほかの入力条件」と同様に、ばらつきが生じないものであることから、以下のとおり設定している。

① 応力拡大係数

亀裂進展式で用いる応力拡大係数は、維持規格 **EB-4360** 及び維持規格 添付 **E-5** に従い、円筒内表面だ円欠陥に対する **K** 値式を用いて計算する。

② 荷重と荷重の組み合わせ

当該欠陥の亀裂進展評価に考慮する荷重との荷重の組合せは、維持規格 添付 **E-7** の規定に従い、表-5. 2 及び表-5. 3の通り設定する。

表-5. 2 亀裂進展評価で考慮する荷重の種類

項目		評価内容	
		SCCによる 亀裂進展評価	疲労による 亀裂進展評価
内圧	出力運転条件	○	○
	過渡条件	—	○
熱	出力運転条件	○	○
	過渡条件	—	○
機械的荷重		○	○
地震 ^{注1}	1/3Sd*	—	○
溶接残留応力		○	○

凡例：○ ⇒考慮、— ⇒考慮せず

注1：Sd*は、弾性設計用地震動（Sd）による地震力と静的地震力のうち大きい方の地震力の値を示す。

表－５．３ 亀裂進展評価で考慮する荷重の組合せ

評価内容	組合せ
SCCによる 亀裂進展評価	出力運転条件（内圧、熱）＋機械的荷重＋溶接残留応力
疲労による 亀裂進展評価	出力運転条件（内圧、熱）＋機械的荷重＋過渡条件（内圧、熱） ＋溶接残留応力
	出力運転条件（内圧、熱）＋機械的荷重＋地震＋溶接残留応力

③ 出力運転条件による応力

亀裂進展評価にて出力運転条件として用いる設計条件と、同条件における圧力＋熱＋自重による軸方向応力を表－５．４にまとめる。なお、出力条件における発生応力は、既工認において実施した３次元梁解析結果より設定する。

表－５．４ 亀裂進展評価に考慮する出力運転条件

運転圧力 (MPa)	運転温度 (°C)	発生応力 (MPa)
15.41	291.7	100 ^{注1}

(注1) 亀裂進展評価における出力運転時（100%出力運転）の応力は、表－５．５の99.3MPaを切り上げて100MPaとしている。

表－５．５ 出力運転時（100%出力運転）において考慮している応力内訳

条件	Pm 一次一般膜応力 (MPa)	Pe 熱膨張応力 (MPa)	Pb 自重による一次 曲げ応力 (MPa)	合計 (MPa)
出力運転時 (100%出力運転)	32.7	62.8	3.8	99.3

④ 過渡条件

表－5. 6 のとおり、14 ヶ月の過渡回数を考慮する。

表－5. 6 亀裂進展評価で考慮する過渡条件

No	運転ケース	変動応力 (MPa)	過渡回数 (回)
			14 ヶ月 ^{注1}
1	起動・停止	96	
2	負荷上昇 (15→100%)	35	
3	負荷減少 (100→15%)	35	
4	90%から 100%へのステップ状負荷上昇	35	
5	100 から 90%へのステップ状負荷減少	35	
6	100%からの大きなステップ状負荷減少	36	
7	燃料交換	14	
8	0%から 15%への負荷上昇・15%から 0%への負荷減少	33	
9	1 ループ停止 / 1 ループ起動 I) 1 ループ停止	35	
10	1 ループ停止 / 1 ループ起動 II) 1 ループ起動	34	
11	負荷の喪失	44	
12	外部電源喪失	47	
13	1 次冷却材流量の部分喪失	35	
14	100%からの原子炉トリップ I) 不注意な冷却を伴わないトリップ	34	
15	100%からの原子炉トリップ II) 不注意な冷却を伴うトリップ	38	
16	100%からの原子炉トリップ III) 不注意な冷却と安全注入を伴うトリップ	51	
17	1 次冷却系の異常な減圧	45	
18	制御棒クラスタの落下	37	
19	出力運転中の非常用炉心冷却系の誤起動	43	
20	1 次冷却系停止ループの誤起動	40	
21	1 次系漏えい試験	75	
22	タービン回転試験	44	

(注 1) 評価期間における過渡回数 N は、 $N=60$ 年過渡回数 (PSR において過去の実過渡回数から設定した回数) \times 評価年数/60 を切り上げて算出。

⑤ 地震力

亀裂進展評価に用いる地震力は、維持規格 添付 E-7 で規定される評価すべき地震力の S_1 を S_d (弾性設計用地震動)と読み替え、 $1/3S_d^*$ として、 S_d 地震力と静的地震力の大きいものを $1/3$ したものを用いる。なお、評価に用いる地震力は既工認において用いた地震力と同等の地震力とする。なお、地震時の発生回数については、JEAG 4613-1998「原子力発電所 配管破損防護設計指針」に

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

基づいて設定（10年に1回地震（地震1回あたり60回の繰り返し回数）が発生すると仮定）し60回とする。また、地震の負荷上昇時間は1sとする。

6. 将来の進展評価結果

5項で整理した将来の亀裂進展評価条件は、3項で検討した過去の亀裂進展評価条件のうち保守的なデータを使用することで、14ヵ月後の欠陥深さ及び欠陥長さが保守的な評価（欠陥深さ及び欠陥長さが大きくなる）となるようにしている。

亀裂進展評価結果のグラフを図-6.1、亀裂進展評価及び破壊評価の結果を表-6.1～6.3に示す。なお、破壊評価においては、板厚は保守的に公称値（13.5mm）を用いている。

評価の結果、包絡曲線式による14ヵ月後の亀裂進展量5.8mmの場合、当該部の残り厚さは $14.0\text{mm} - 5.8\text{mm} = 8.2\text{mm}$ となり必要最小厚さを満足することから、技術基準規則第17条の構造及び強度の要求を満足することを確認した。また、維持規格に基づく許容欠陥寸法の限界の評価及び許容曲げ応力の評価を満足することから、技術基準規則18条の使用中の亀裂等による破壊の防止の要求を満足することを確認した。

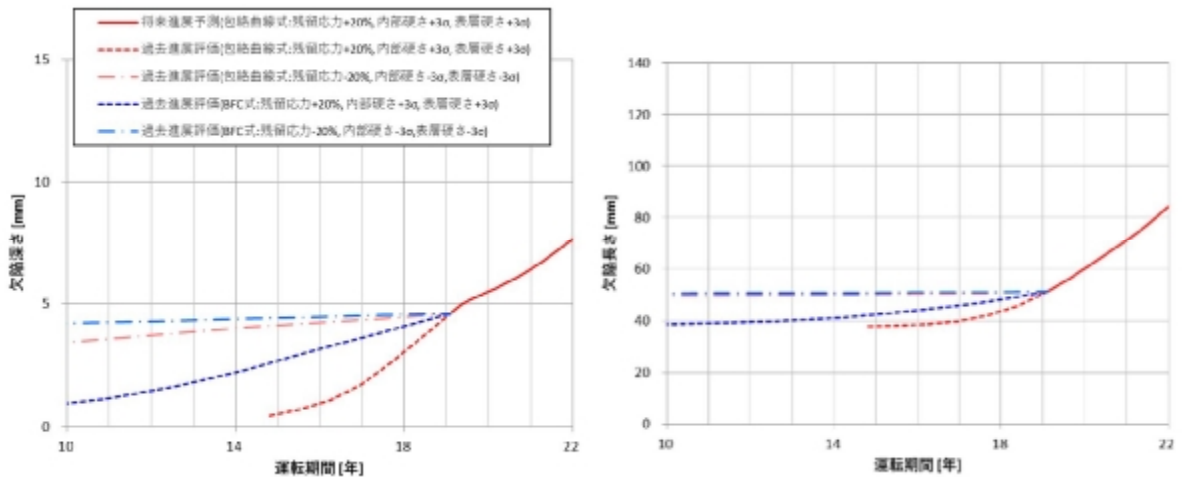


図-6.1 将来の亀裂進展評価結果

表－6. 1 当該欠陥の亀裂進展評価結果

	包絡曲線式 評価期間：14ヶ月	
	欠陥深さ a (mm)	欠陥長さ ℓ (mm)
初期寸法	4.6	51
SCCによる進展量	1.1	12
疲労による進展量	0.1	1
評価期間末期の亀裂寸法	5.8	64

表－6. 2 許容欠陥寸法の限界の評価結果

評価式	初期欠陥		評価期間 (月)	評価期間末期の予測欠陥寸法			許容欠陥寸法の限界 ^{注1} a _c (mm)	判定 a _f < a _c
	深さ (mm)	長さ (mm)		深さ a _f (mm)	長さ ℓ _f (mm)	欠陥角度 2θ (°)		
包絡曲線式	4.6	51	14	5.8	64	85.0	7.3	○

注1 JSME 維持規格 事例規格の技術評価書に規定の代替案による

表－6. 3 許容曲げ応力による評価結果

評価式	評価期間 (月)	荷重の 組合せ	一次曲げ応力 P _b (MPa)	許容曲げ応力 S _c (MPa)	判定 P _b < S _c
包絡曲線式	14	A, B	3.8	40.3	○
		C+Ss	64.8	113.4	○
		D+Sd	52.0	115.8	○
		SA	3.8	105.3	○