



**Ni 基合金異材溶接部に対する確率論的破壊力学  
解析コード PASCAL-NP の使用手引き**

User's Manuals of Probabilistic Fracture Mechanics Analysis Code  
for Ni-based Alloy Welds, PASCAL-NP

宇田川 誠 勝山 仁哉 鬼沢 邦雄

Makoto UDAGAWA, Jinya KATSUYAMA and Kunio ONIZAWA

安全研究センター  
原子炉安全研究ユニット  
Reactor Safety Research Unit  
Nuclear Safety Research Center

November 2013

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2013

Ni 基合金異材溶接部に対する確率論的破壊力学解析コード  
PASCAL-NP の使用手引き

日本原子力研究開発機構  
安全研究センター 原子炉安全研究ユニット

宇田川 誠 ・ 勝山 仁哉 ・ 鬼沢 邦雄<sup>+</sup>

(2013 年 7 月 2 日受理)

軽水炉機器の経年劣化を考慮した構造健全性評価に関する研究の一環として、Ni 基合金異材溶接部に対する確率論的破壊力学 (PFM; Probabilistic Fracture Mechanics) 解析コード PASCAL-NP (PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR – NiSCC / PWSCC) を開発した。PASCAL-NP は、Ni 基合金、ステンレス及び低合金鋼等から成る異材溶接部や、原子炉圧力上蓋貫通部及び原子炉圧力容器底部スタブチューブのような複雑形状部において、応力腐食割れ (SCC; Stress Corrosion Cracking) に伴う漏えいや破断等の機器類の破損確率をモンテカルロ法に基づき評価するものである。経年劣化事象として、加圧水型原子炉 (PWR; Pressurized Water Reactor) における PWR 一次系水質環境中応力腐食割れ (PWSCC; Primary Water Stress Corrosion Cracking) 及び沸騰水型原子炉 (BWR; Boiled Water Reactor) における Ni 基合金の BWR 水質環境中応力腐食割れ (NiSCC; Ni-based alloy Stress Corrosion Cracking) を対象として、多様なき裂発生箇所、き裂方向を想定した解析機能を有するとともに、材料強度、き裂進展速度及び残留応力分布等のばらつきを考慮して、き裂発生及びき裂進展評価、並びに破損確率解析を実施することができる。

本報告書は、PASCAL-NP を開発し、本使用手引きとしてまとめるに当たって調査を行った PWSCC 及び NiSCC による実機損傷事例、国内外における研究機関及び規制当局の論文や、電力会社及びプラント製造会社の報告書等に示されている実測値や知見に基づく解析の根拠となるデータをまとめるとともに、本解析コードの解析実行方法及び損傷事例解析結果についてまとめたものである。

## User's Manuals of Probabilistic Fracture Mechanics Analysis Code for Ni-based Alloy Welds, PASCAL-NP

Makoto UDAGAWA, Jinya KATSUYAMA and Kunio ONIZAWA<sup>+</sup>

Reactor Safety Research Unit  
Nuclear Safety Research Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 2, 2013)

As a part of research on the structural integrity assessment for light water reactor (LWR) components considering aging degradation, a probabilistic fracture mechanics (PFM) analysis code PASCAL-NP (PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR – NiSCC / PWSCC) has been developed. This code evaluates the failure probabilities on a basis of Monte Carlo method caused by stress corrosion cracking (SCC) at dissimilar metal welds and structurally discontinuous components. PASCAL-NP treats primary water stress corrosion cracking (PWSCC) in pressurized water reactor (PWR) and Ni-based alloy stress corrosion cracking (NiSCC) in boiled water reactor (BWR). This PFM analysis code has functions of crack initiation and crack growth calculations for various patterns of crack locations and orientations in a probabilistic manner such as the scatters of material strength, crack growth rate and residual stress distribution, and so on. This code can also evaluate the failure probabilities such as leakage and/or break probabilities of Ni-based alloy welds due to these types of SCC.

This report summarizes the failure examples in actual plants and theoretical sources according to papers published by domestic and international institutes and regulatory bodies and reports documented by electric power companies and plant suppliers, and so on. This one also represents methods to execute program and the case studies using PASCAL-NP code.

**Keywords:** Probabilistic Fracture Mechanics, Primary Water Stress Corrosion Cracking, Ni-based Alloy Stress Corrosion Cracking, Failure Probability Evaluation

---

<sup>+</sup> Research Planning and Co-ordination Office • Serve concurrently in LWR Long-Term Reliability Unit

## 目 次

1	はじめに	1
2	損傷事例	2
2.1	PWSCC 及び NiSCC の概要	2
2.2	原子炉圧力容器上蓋貫通部における PWSCC 損傷事例	3
2.3	ホットレグ及びコールドレグにおける PWSCC 損傷事例	4
2.4	制御棒駆動機構ハウジングにおける NiSCC 損傷事例	6
2.5	シュラウドサポートにおける NiSCC 損傷事例	7
3	解析機能	9
3.1	解析機能の概要	9
3.2	解析方法	10
3.3	機器の幾何形状	11
3.4	機器の材質	13
3.5	初期き裂発生	15
3.6	き裂進展速度線図	23
3.7	き裂進展解析	33
3.8	残留応力分布のばらつき	41
3.9	破損判定	48
3.10	結果出力	50
3.11	確率分布設定方法	60
4	インプットファイル	61
4.1	インプットファイル内のキーワード一覧	61
4.2	解析方法	63
4.3	機器の幾何形状	63
4.4	機器の材質	64
4.5	初期き裂発生	65
4.6	き裂進展速度線図	66
4.7	き裂進展解析	68
4.8	残留応力分布のばらつき	69
4.9	破損判定	69
4.10	結果出力	70
4.11	確率分布設定方法	71
5	解析実行	72
5.1	解析実行方法	72
5.2	漏えい確率	74
5.3	実機損傷事例解析	76
5.4	実機損傷事例解析インプットファイル	88
6	まとめ	139
	参考文献	139
	付録 (略語一覧)	145

## Contents

1	Introduction -----	1
2	Failure Examples -----	2
2.1	Outlines of PWSCC and NiSCC -----	2
2.2	PWSCC at Vessel Head Penetrations -----	3
2.3	PWSCC at Hot-Legs and Cold-Legs -----	4
2.4	NiSCC at Control Rod Drive Housings -----	6
2.5	NiSCC at Shroud Support -----	7
3	Analytical Functions -----	9
3.1	Outlines of Analytical Functions -----	9
3.2	Method of Analysis -----	10
3.3	Geometry of Components -----	11
3.4	Materials of Components -----	13
3.5	Crack Initiation -----	15
3.6	Crack Growth Rate -----	23
3.7	Simulation of Crack Growth Behavior -----	33
3.8	Scatter of Residual Stress Distribution -----	41
3.9	Failure Judgments -----	48
3.10	Outputs -----	50
3.11	Setting of Probability Distributions -----	60
4	Input File -----	61
4.1	Keywords in Input File -----	61
4.2	Method of Analysis -----	63
4.3	Geometry of Components -----	63
4.4	Materials of Components -----	64
4.5	Crack Initiation -----	65
4.6	Crack Growth Rate -----	66
4.7	Simulation of Crack Growth Behavior -----	68
4.8	Scatter of Residual Stress Distribution -----	69
4.9	Failure Judgements -----	69
4.10	Outputs -----	70
4.11	Setting of Probability Distributions -----	71
5	Program Execution -----	72
5.1	Method to Program Execution -----	72
5.2	Probability of Leakage per Segment -----	74
5.3	Case Studies -----	76
5.4	Samples of Input File in Case Studies -----	88
6	Summary -----	139
References	-----	139
Appendix (Abbreviations)	-----	145

表 リスト

表 2.1.1	PWSCC 及び NiSCC の概要	2
表 2.2.1	原子炉圧力容器上蓋貫通部における PWSCC 検査結果	3
表 2.3.1	ホットレグにおける PWSCC 検査結果	5
表 2.3.2	コールドレグにおける PWSCC 検査結果	5
表 2.3.3	UT、ECT 及び破壊後実測によるき裂寸法検査結果 <sup>22), 24)</sup>	5
表 2.4.1	制御棒駆動機構ハウジング検査結果	6
表 2.5.1	シュラウドサポート上部周方向溶接部検査結果	8
表 2.5.2	シュラウドサポート下部周方向溶接部検査結果	8
表 3.1.1	実機損傷事例に対応した解析機能の概要	9
表 3.4.1	主な Ni 基合金の種類と化学組成	13
表 3.4.2	Ni 基合金母材の引張特性の最小値	14
表 3.4.3	Ni 基合金溶接金属の引張特性の最小値	14
表 3.5.1	$t_0$ 設定例	15
表 3.5.2	初期き裂発生時間の実測値と解析結果との比較	16
表 3.5.3	$\alpha_1$ に対する統計処理結果	17
表 3.5.4	$i_0$ 算出例	19
表 3.5.5	$(\sigma_{\text{eff}} - \sigma_y) - (\sigma_{\text{app}} - \sigma_y)$ , $d_c$ グラフの値 ( $\sigma_s = 1000 \text{ MPa}$ )	21
表 3.5.6	$i_\sigma$ 算出例	22
表 3.5.7	$i_m$ 設定例	22
表 3.6.1	き裂進展速度線図の設定例一覧	23
表 3.6.2	Ni 基合金母材の PWR 一次系水質環境中 SCC き裂進展速度設定例	24
表 3.6.3	Ni 基合金溶接金属の PWR 一次系水質環境中 SCC き裂進展速度設定例	25
表 3.6.4	ステンレス鋼の PWR 一次系水質環境中 SCC き裂進展速度設定例	26
表 3.6.5	低合金鋼の PWR 一次系水質環境中 SCC き裂進展速度設定例	27
表 3.6.6	Ni 基合金母材の BWR 水質環境中 SCC き裂進展速度設定例	28
表 3.6.7	Ni 基合金溶接金属の BWR 水質環境中 SCC き裂進展速度設定例	29
表 3.6.8	ステンレス鋼の BWR 水質環境中 SCC き裂進展速度設定例	30
表 3.6.9	低合金鋼の BWR 水質環境中 SCC き裂進展速度設定例	31
表 3.7.1	PASCAL-NP におけるき裂種類と応力拡大係数算出式	34
表 3.7.2	PASCAL-NP において設定できるき裂種類の組合せ	37
表 3.9.1	き裂種類と破損判定実施項目	48
表 3.9.2	き裂種類と漏えい判定方法	48
表 3.9.3	き裂種類と破断判定方法	49
表 3.10.1	解析種別によるコンディションファイル及びアウトプットファイル	50
表 3.10.2	コンディションファイル及びアウトプットファイル名の決定方法	50
表 3.10.3	アウトプットファイルにおける出力項目	50
表 3.11.1	各確率変数に対する標準的な確率分布の候補	60
表 4.1.1	インプットファイル内のキーワード一覧	61
表 5.2.1	検査結果による機器及びセグメントあたりの漏えい確率	75
表 5.3.1	実機損傷事例解析の概要及び構成	76

図 リスト

図 2.2.1	原子炉圧力容器上蓋貫通部における PWSCC 損傷事例模式図	3
図 2.3.1	ホットレグ及びコールドレグにおける PWSCC 損傷事例模式図	5
図 2.3.2	V. C. Summer 原子力発電所のホットレグにおける PWSCC 貫通の様子 <sup>22)</sup>	5
図 2.4.1	制御棒駆動機構ハウジング損傷事例模式図	6
図 2.5.1	シュラウドサポートにおける NiSCC 損傷事例模式図	8
図 3.2.1	PASCAL-NP の解析フロー	10
図 3.3.1	機器の幾何形状入力例	11
図 3.4.1	Ni 基合金の PWR 一次系模擬水中 SCC 破断時間に及ぼす Cr 含有量の影響	14
図 3.5.1	$\alpha_i$ に対する実測値と解析結果との比較	18
図 3.5.2	表面切削加工による応力分布の例	20
図 3.5.3	$(\sigma_{\text{eff}}-\sigma_y)-(\sigma_{\text{app}}-\sigma_y)$ , $d_c$ グラフ ( $\sigma_s = 1000 \text{ MPa}$ )	21
図 3.6.1	PWSCC 及び NiSCC が発生した異材溶接部の模式図	23
図 3.6.2	Ni 基合金母材の PWR 一次系水質環境中 SCC き裂進展速度線図例	24
図 3.6.3	Ni 基合金溶接金属の PWR 一次系水質環境中 SCC き裂進展速度線図例	25
図 3.6.4	ステンレス鋼の PWR 一次系水質環境中 SCC き裂進展速度線図例	26
図 3.6.5	低合金鋼の PWR 一次系水質環境中 SCC き裂進展速度線図例	27
図 3.6.6	Ni 基合金母材の BWR 水質環境中 SCC き裂進展速度線図例	28
図 3.6.7	Ni 基合金溶接金属の BWR 水質環境中 SCC き裂進展速度線図例	29
図 3.6.8	ステンレス鋼の BWR 水質環境中 SCC き裂進展速度線図例	30
図 3.6.9	低合金鋼の BWR 水質環境中 SCC き裂進展速度線図例	31
図 3.6.10	$c_p$ を考慮したき裂進展計算フロー	32
図 3.6.11	$c_p$ 算出のための入力データ例	32
図 3.7.1	幾何形状の入力	34
図 3.7.2	き裂種類 5 におけるき裂進展速度線図切替え機能	36
図 3.7.3	周方向・内外表面き裂から周方向・貫通き裂への置換	38
図 3.7.4	き裂種類の変化を考慮した解析事例模式図 (ホットレグ)	38
図 3.7.5	き裂種類の変化を考慮した解析事例模式図 (原子炉圧力容器上蓋貫通部)	39
図 3.7.6	き裂種類の変化を考慮した解析フロー	40
図 3.8.1	板厚内領域分割数による残留応力のばらつき発生モデルの選択フロー	41
図 3.8.2	板厚内均一増加/減少モデルの計算フロー	42
図 3.8.3	板厚内均一増加/減少モデルによる計算例	43
図 3.8.4	板厚内分割領域の局所的増加/減少モデルの計算フロー	45
図 3.8.5	板厚内分割領域の局所的増加/減少モデルの計算過程	46
図 3.8.6	板厚内分割領域の局所的増加/減少モデルによる計算例	47
図 3.9.1	破断判定方法におけるき裂寸法や幾何形状	49
図 3.10.1	コンディションファイル例	51
図 3.10.2	決定論的破壊力学解析アウトプットファイル例	57
図 3.10.3	確率的破壊力学解析アウトプットファイル例	58
図 5.1.1	コマンドプロンプトにおける PASCAL-NP 実行例	72
図 5.1.2	確率論的解析におけるサンプリング数表示の様子	73
図 5.2.1	き裂最深点の応力拡大係数に及ぼすき裂間距離の影響 <sup>70)</sup>	74
図 5.3.1	Davis-Besse 原子炉圧力容器上蓋貫通部における PWSCC 損傷事例解析条件模式図	77



図 5.3.2	Davis-Besse 原子炉圧力容器上蓋貫通部における PWSCC 破損確率解析結果と検査結果との比較	78
図 5.3.3	大飯 3 号機原子炉圧力容器上蓋貫通部における PWSCC 損傷事例解析条件模式図	79
図 5.3.4	大飯 3 号機原子炉圧力容器上蓋貫通部における PWSCC 破損確率解析結果と検査結果との比較	80
図 5.3.5	V. C. Summer ホットレグにおける PWSCC 損傷事例解析条件模式図	81
図 5.3.6	V. C. Summer ホットレグにおける PWSCC 破損確率解析結果と検査結果との比較	82
図 5.3.7	浜岡 1 号機制御棒駆動機構ハウジングにおける NiSCC 損傷事例解析条件模式図	84
図 5.3.8	浜岡 1 号機制御棒駆動機構ハウジングにおける NiSCC 破損確率解析結果と検査結果との比較	85
図 5.3.9	敦賀 1 号機シュラウドサポートにおける NiSCC 損傷事例解析条件模式図	86
図 5.3.10	敦賀 1 号機シュラウドサポートにおける NiSCC 破損確率解析結果と検査結果との比較	87

This is a blank page.

## 1 はじめに

軽水炉機器の構造健全性評価には、従来の決定論的破壊力学 (DFM; Deterministic Fracture Mechanics) 解析手法と比較して、より合理的な評価手法として確率論的破壊力学 (PFM; Probabilistic Fracture Mechanics) 解析手法が近年用いられ、米国等においては規制基準に採り入れられるとともに<sup>1)</sup>、リスク情報を活用した供用中検査計画策定の際にも活用される動向にある<sup>2), 3)</sup>。日本原子力研究開発機構安全研究センターは1996年度から、軽水炉構造機器の高経年化評価に関する研究の一環として、原子炉圧力容器に対するPFM解析コードPASCAL (PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR)<sup>4)-6)</sup>をはじめとし、き裂を有するオーステナイト系ステンレス鋼配管溶接部に対するPFM解析コードPASCAL-SC (PASCAL - Stress Corrosion Cracking)<sup>7)</sup>、PASCAL-EQ (PASCAL - Earthquake)<sup>7)</sup>及びPASCAL-SP (PASCAL - Stress Corrosion Cracking at Welded Joints of Piping)<sup>8)</sup>、減肉を有する炭素鋼配管に対するPFM解析コードPASCAL-EC (PASCAL - Erosion Corrosion)<sup>9)</sup>等を開発しており、最新の研究成果を逐次反映しこれらのPFM解析コードの機能追加や改良を続けながら知見を蓄積してきた。

原子力発電プラントの高経年化に伴い、国内外の加圧水型原子炉 (PWR; Pressurized Water Reactor) における原子炉圧力容器上蓋貫通部やホットレグ等のNi基合金異材溶接部において、PWR一次系水質環境中応力腐食割れ (PWSCC; Primary Water Stress Corrosion Cracking) が多数発生している<sup>10)-27)</sup>。また、沸騰水型原子炉 (BWR; Boiling Water Reactor) における制御棒駆動機構ハウジングやシュラウドサポート部等のNi基合金異材溶接部においても、Ni基合金のBWR水質環境中応力腐食割れ (NiSCC; Ni-based alloy Stress Corrosion Cracking) が発生している<sup>10), 28)-33)</sup>。これまでSCCとしてはBWRにおけるステンレス鋼製の再循環系配管溶接部やシュラウドサポート等におけるSCCが代表的なものであったが、これと比較してPWSCC及びNiSCCには発生条件やき裂進展形態に異なる特徴が見られたため、Ni基合金使用部位に対する実機の損傷事例の調査、PWSCC及びNiSCCき裂進展速度等の実測、溶接施工や運転状態を考慮した応力分布の評価等が国内外において行われた。このようにして得られた構造健全性評価において重要な材料強度、き裂進展速度及び残留応力分布等のパラメータは大きなばらつきを有していたことから、これらのパラメータのばらつきを適切に考慮して合理的な構造健全性評価を行うためにはPFM解析手法が有用であると考えられる。そこで、Ni基合金異材溶接部に対するPFM解析コードPASCAL-NP (PASCAL-NiSCC/PWSCC) を開発することとした。

PASCAL-NPは、Ni基合金異材溶接部に発生するPWSCC及びNiSCCを対象として、初期き裂発生時間、き裂進展速度、残留応力分布及び材料の機械的特性等のばらつき等を考慮し、経年劣化によるき裂進展量を統計的に評価するとともに対象機器における漏えい確率や破断確率等の破損確率を評価することができる。また、PWSCC及びNiSCCの損傷事例に対応するため、円筒構造物の軸/周方向き裂、内/外表面き裂、表面/貫通き裂及び母材/溶接金属におけるき裂といった多様なき裂進展解析機能を有し、原子炉圧力容器上蓋貫通部や制御棒駆動機構ハウジングのような複雑形状部に発生するき裂にも対応することができる。

本報告書は、PASCAL-NPが対象とする実機における損傷事例、解析機能、根拠となるデータ、使用方法及び損傷事例解析をまとめたものである。

## 2 損傷事例

本章では、まず PASCAL-NP が対象とする PWSCC 及び NiSCC の概要を2.1で述べる。次に PWSCC による代表的な原子炉压力容器上蓋貫通部の損傷事例を2.2、ホットレグ及びコールドレグにおける損傷事例を2.3にて述べる。NiSCC による代表的な原子炉压力容器底部にある制御棒駆動機構ハウジングにおける損傷事例を2.4、シュラウドサポートにおける損傷事例を2.5にて述べる。

### 2.1 PWSCC 及び NiSCC の概要

PWSCC 及び NiSCC の概要を表2.1.1に示す。PWR 一次系水質環境中における Ni 基合金の応力腐食割れを PWSCC、BWR 水質環境中における Ni 基合金の応力腐食割れを NiSCC と大別される。これは、PWSCC は高温環境下 (原子炉压力容器上蓋にて318 °C 程度、ホットレグにて324 °C 程度) にあるため僅かな温度の高低でも大きな影響を受ける一方、NiSCC は比較的低い温度環境下 (原子炉压力容器底部及びシュラウドサポートにて、288 °C 程度) にあるため、温度よりも腐食電位 (ECP; Electrochemical Corrosion Potential) の影響が顕著になるためである。また、実機における損傷事例によると、PWSCC は Ni 基合金母材の Alloy 600、及び溶接金属の Alloy 182 と Alloy 132で、NiSCC は溶接金属の Alloy 182でその大半が発生する<sup>10)-33)</sup>。き裂進展の駆動力としては、溶接残留応力、運転応力及び表面切削加工による応力が挙げられる。

なお、ステンレス鋼に発生する従来型の SCC に対しては、き裂発生・進展に及ぼす照射の影響について照射材を用いた試験等により評価がなされている<sup>34)</sup>。しかしながら、PWSCC や NiSCC に対しては、未だ十分なデータが得られていないと考えられ、現状の PASCAL-NP では照射の影響を無視することとしている。

表2.1.1 PWSCC 及び NiSCC の概要

	発生条件			損傷事例
	環境	材料	応力	
PWSCC	PWR 一次系水質	Alloy 600 Alloy 182 Alloy 132	溶接残留応力 運転応力	原子炉压力容器上蓋貫通部 (2.2) ホットレグ及びコールドレグ (2.3)
NiSCC	BWR 水質	Alloy 182	表面切削加工による応力	制御棒駆動機構ハウジング (2.4) シュラウドサポート (2.5)

## 2.2 原子炉圧力容器上蓋貫通部における PWSCC 損傷事例

原子炉圧力容器上蓋貫通部における PWSCC 損傷事例模式図を図2.2.1に示す<sup>12)</sup>。制御棒駆動機構 (CRDM; Control Rod Drive Mechanism) を構成する貫通管が、原子炉圧力容器上蓋に J 溶接により取付けられている。材質に着目すると、原子炉圧力容器には低合金鋼、肉盛溶接金属にはステンレス鋼、貫通管、バタリング及び J 溶接金属には Ni 基合金が用いられており、3種類の材料から成る異材溶接部である。原子炉圧力容器上蓋貫通部における PWSCC 検査結果を表2.2.1に示す<sup>13)</sup>。この結果は米国の69基の PWR プラントについて、約5000の貫通部を検査した結果である。本 PWSCC の発生要因としては、溶接残留応力及び表面切削加工により生じた引張応力が挙げられる。すなわち、図2.2.1及び表2.2.1に示した箇所は高い引張応力が発生していたと推測される。原子炉圧力容器上蓋貫通部の代表的な損傷事例として、米国 Davis-Besse では貫通管の軸方向内表面き裂による漏えいのため、1次冷却水中のホウ酸が低合金鋼を著しく減耗させた<sup>14), 15)</sup>。また、上蓋と比較して温度の低い原子炉圧力容器下部の貫通部においても、米国 South Texas Project – 1号機において漏えいに伴うホウ酸析出物が検出されている<sup>16), 17)</sup>。

国内では、関西電力大飯3号機の原子炉圧力容器上蓋貫通部において、山側の溶接金属における PWSCC が貫通し漏えいに至っている<sup>10), 18)-20)</sup>。この貫通部の調査結果によるとグラインダまたはカッター加工の後、バフ仕上げがなされていない箇所から PWSCC が発生しており<sup>18)</sup>、極表面の応力状態や加工硬化域の深さがき裂発生までの時間に影響を及ぼしていると考えられる。

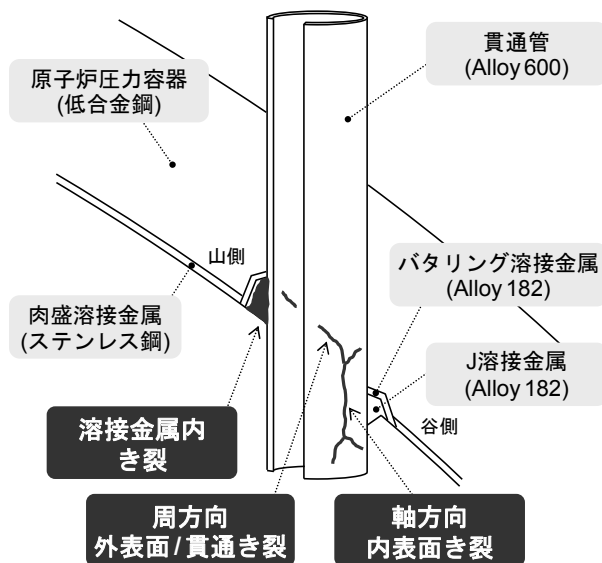


表2.2.1 原子炉圧力容器上蓋貫通部における PWSCC 検査結果

	材質	き裂指示	漏えい
軸方向内表面き裂	母材	112	31
溶接金属内き裂	溶接金属	224	20
周方向外表面/貫通き裂	母材	7	2

図2.2.1 原子炉圧力容器上蓋貫通部における PWSCC 損傷事例模式図

## 2.3 ホットレグ及びコールドレグにおける PWSCC 損傷事例

ホットレグ及びコールドレグにおける PWSCC 損傷事例の模式図を図2.3.1に示す<sup>10), 21)</sup>。原子炉圧力容器と1次冷却系配管との接合箇所のうち、原子炉圧力容器から冷却材が流出する部位をホットレグ、原子炉圧力容器へ冷却材が流入する部位をコールドレグと呼ぶ。米国 V. C. Summer 原子力発電所のホットレグ及びコールドレグにおける PWSCC 検査結果を表2.3.1及び表2.3.2に示す<sup>22)</sup>。V. C. Summer 原子力発電所は3ループの PWR であるため、ホットレグ及びコールドレグそれぞれについて3箇所ずつ検査がなされている。検査方法として超音波探傷試験 (UT; Ultrasonic Testing) 及び渦電流探傷試験 (ECT; Eddy Current Testing) を併用した結果が示されている。この表から分かるように PWSCC の大半はホットレグに発生していた。この原因は、ホットレグの温度 (約324 °C<sup>23)</sup>) はコールドレグの温度 (約288 °C<sup>22)</sup>) より高く PWSCC が発生・進展し易かったためと考えられる。それ故、PWSCC の発生・進展について評価する際、評価対象部位の温度を考慮することは重要である。

さらに、漏えいした1箇所ホットレグに対しては検査後に切出し、き裂に沿って割った後、き裂寸法を実測している。このホットレグに対する UT、ECT 及びき裂破面開放後の実測によるき裂寸法の検査結果を表2.3.3に示す<sup>22), 24)</sup>。UT の検査精度は良くなく、例えば250° 位置においては、き裂深さ15.6 mm と十分に深いき裂であったが UT では検出されなかった。一般に溶接金属中の SCC に対する UT の検査精度は溶接金属の柱状晶 (デンドライト) 等の影響を受けて低下する<sup>25)</sup>。このような溶接金属内に発生するき裂は UT による検査だけでは検出することが困難であるため、供用運転開始から初期き裂発生までの時間を算出し構造健全性評価を実施することが重要である。なお、初期き裂発生までの時間の算出方法は3.5で述べる。

ホットレグ及びコールドレグは、原子炉圧力容器管台に低合金鋼、肉盛溶接金属及びセーフエンドにステンレス鋼、バタリング及び突合せ溶接金属に Ni 基合金が用いられており、3種類の材料から成る異材溶接部である。V. C. Summer 原子力発電所のホットレグにおいて見られた PWSCC 貫通の様子を図2.3.2に示す<sup>26)</sup>。PWSCC は突合せ溶接部またはバタリングの溶接金属表面から発生した後、Alloy 182を選択的に進展し、低合金鋼中は進展せず、ステンレス鋼中の進展は遅延していたものと考えられている。一方、周方向き裂に着目すると、図2.3.2に示すようにき裂はバタリング溶接金属表面から発生した後、き裂最深点が低合金鋼に到達して停止している。周方向き裂発生位置が図中に示すよりもセーフエンド寄りでありき裂が進展しても低合金鋼に到達せずバタリング溶接金属内を進展し続ける場合には、ホットレグの破断に至る可能性もあると考えられる。国内では、関西電力大飯3号機、北海道電力泊1号機、四国電力伊方1, 2号機などのホットレグにおいて、主に軸方向の内表面き裂が検出されている<sup>10), 27)</sup>。

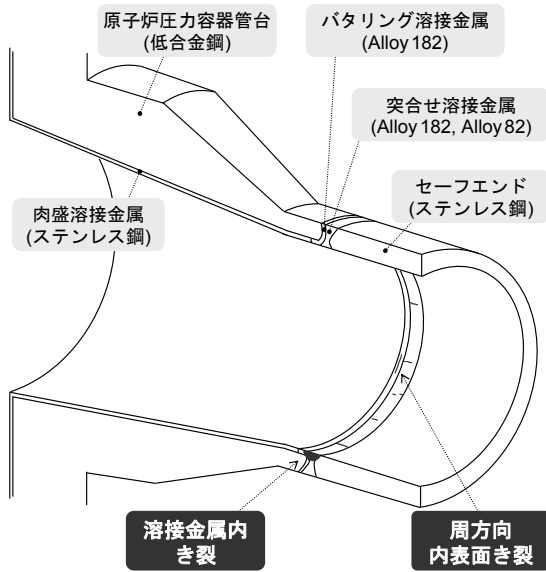


図2.3.1 ホットレグ及びコールドレグにおける PWSCC 損傷事例模式図

表2.3.1 ホットレグにおける PWSCC 検査結果

	材質	き裂指示	漏えい
溶接金属内き裂	溶接金属	9	1
周方向内表面き裂	溶接金属	3	0

表2.3.2 コールドレグにおける PWSCC 検査結果

	材質	き裂指示	漏えい
溶接金属内き裂	溶接金属	0	0
周方向内表面き裂	溶接金属	2	0

表2.3.3 UT、ECT 及び破壊後実測によるき裂寸法検査結果<sup>22), 24)</sup>

き裂位置	き裂方向	UT		ECT	き裂破面開放後の実測値	
		き裂長さ	き裂深さ	き裂長さ	き裂長さ	き裂深さ
7°	軸	68	64*	44	64	64*
11-14°	周	15	-	25	41	5
12°	軸	-	-	12.7	-	-
250°	軸	-	-	12.7	19	15.6
252°	軸	-	-	12.7	9	3.4
255°	軸	-	-	10	7	3.3
265°	軸	-	-	15	5	2.3
309°	軸	-	-	6.4	-	-

\* 漏えい

- 非検出または論文に記載なし

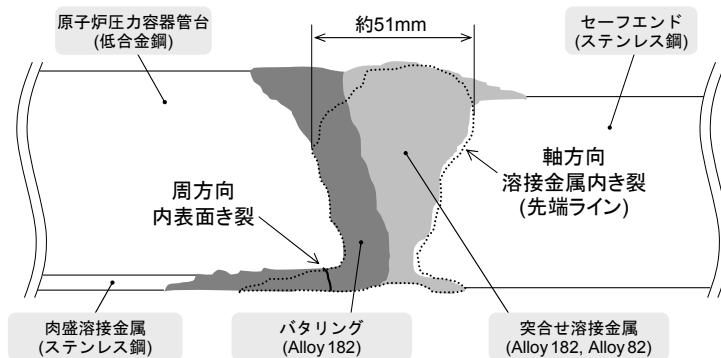


図2.3.2 V. C. Summer 原子力発電所のホットレグにおける PWSCC 貫通の様子<sup>22)</sup>

## 2.4 制御棒駆動機構ハウジングにおける NiSCC 損傷事例

制御棒駆動機構ハウジングにおける NiSCC 損傷事例模式図を図2.4.1に示す<sup>10), 28), 29)</sup>。これは BWR の原子炉圧力容器下部にある制御棒を通すための容器貫通部で生じた NiSCC の一例である。き裂は下部溶接金属を貫通したため、冷却水の漏えいに至っている。この部位の施工順序は概ね以下に示すとおりである。まず、原子炉圧力容器内表面に肉盛溶接及び肉盛座を溶接施工した後、肉盛座表面とスタブチューブを溶接し、最後にスタブチューブと制御棒駆動機構ハウジングを溶接する。スタブチューブと制御棒駆動機構ハウジングとの間に隙間があるため、下部溶接金属で NiSCC が発生し貫通すると冷却水はこの隙間を通り漏えいに至る。材質に着目すると、原子炉圧力容器には低合金鋼、制御棒駆動機構ハウジングにはステンレス鋼、肉盛溶接金属、肉盛座、スタブチューブ、下部溶接金属及び上部溶接金属には Ni 基合金が用いられている。下部溶接金属及び肉盛座に Alloy 182、上部溶接金属に Alloy 82が用いられており、NiSCC は相対的に Cr 量が少ない Alloy 182の方から発生する傾向にある。き裂進展挙動に着目すると、NiSCC は下部溶接金属 (Alloy 182) を優先的に進展する一方、肉盛座 (Alloy 182) 及びスタブチューブ (Alloy 600) では顕著なき裂進展は見られなかった。このことから、NiSCC の発生及び進展は Ni 基合金の化学成分だけではなく、溶接方法及び溶接後熱処理等により生じる残留応力の影響も受けると推測される。

中部電力浜岡1号機における制御棒駆動機構ハウジング検査結果を表2.4.1に示す。同種の貫通部は89箇所あり、そのうちの原子炉圧力容器下部ヘッド底の中央位置から離れた取付け角度が大きい (40.4°) 貫通部の1箇所が図2.4.1に示すように山側と谷側の間で漏えいした。取付け角度が小さい (0~27.9°) 場合、初層は山側と谷側を交互に溶接し2層から最終層は山側から谷側までをまとめて溶接する一方、取付け角度が大きい (31.2°~) 場合、谷側の溶接を初層から最終層まで全て終了した後、山側の溶接を初層から開始する。漏えいした貫通部における取付け角度や溶接施工を模擬したモックアップ試験体により、山側と谷側の間付近では、山側や谷側と比較して応力が高く NiSCC 発生 の閾値を超えうることが確認されており<sup>29)</sup>、そのため NiSCC の発生及び進展が生じたものと考えられる。

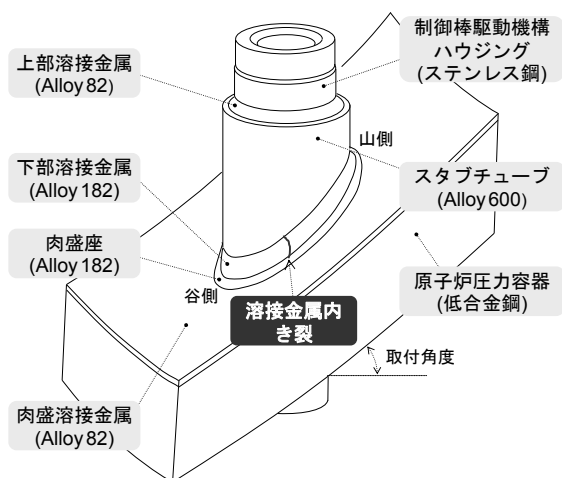


表2.4.1 制御棒駆動機構ハウジング検査結果

	材質	き裂指示	貫通
溶接金属内き裂	溶接金属	1	1

図2.4.1 制御棒駆動機構ハウジング損傷事例模式図



## 2.5 シュラウドサポートにおける NiSCC 損傷事例

シュラウドサポートには、レグ型、ブラケット型及びコーン型がある<sup>30)</sup>。ここでは、沸騰水型原子炉である日本原電敦賀1号機のコーン型シュラウドサポートを取上げ、NiSCC 損傷事例の模式図を図2.5.1に、シュラウドサポート上部及び下部で行われた周方向溶接部の検査結果をそれぞれ表2.5.1及び表2.5.2に示す<sup>10)</sup>。上部溶接部では貫通き裂が3箇所に見つかっている。一方、下部で発生したき裂は、Ni 基合金周方向溶接金属中を選択的に進展し、Ni 基合金母材や Ni 基合金肉盛溶接金属中ではほとんど進展していないが、シュラウドサポート厚さ約25 mm を超える深さ程度に到達したき裂は少なくとも5箇所見つかっている (き裂深さは約22 mm から34 mm)<sup>31)</sup>。また、下部溶接部の内表面にはき裂が発生する一方、下部溶接部の外表面には発生しないことも分かる。外表面にき裂が発生しない理由として、耐圧試験によりシュラウドサポートが内側に変形することにより、外側の溶接金属は引張られ溶接時の圧縮塑性歪が緩和し、耐圧試験後ではこの圧縮塑性歪が原因となって発生していた引張応力も緩和することや<sup>32)</sup>、外側の溶接金属は幾何形状の制約のため、グラインダ等による表面切削加工の度合が内側よりも低いことが考えられる。材質に着目すると、原子炉圧力容器及びシュラウドサポート取付け部位における肉盛溶接金属には低合金鋼、上部シュラウドサポート及び炉水に接する肉盛溶接金属にはステンレス鋼、バタリング、シュラウドサポートにおける周方向溶接金属、軸方向溶接金属及び下部シュラウドサポートには Ni 基合金が用いられている。NiSCC は、軸方向に発生しやすい傾向があることが分かる。この要因として、運転状態において軸方向の引張応力よりも周方向の引張応力が高いことが挙げられる<sup>32)</sup>。また、下部周方向溶接金属において周方向き裂は少なくとも21箇所検出されている<sup>33)</sup>。この周方向き裂は、軸方向き裂と繋がったり、周方向と軸方向との中間の斜め方向に進展したりする場合がある<sup>33)</sup>。

表2.5.1 シュラウドサポート上部周方向溶接部検査結果

	材質	き裂指示	貫通
軸方向 内表面 き裂	溶接 金属	46	3
軸方向 外表面 き裂	溶接 金属	10	

表2.5.2 シュラウドサポート下部周方向溶接部検査結果

	材質	き裂指示	貫通
軸方向 内表面 き裂	溶接 金属	228	原子炉 圧力容器 までは 進展せず (5)
軸方向 外表面 き裂	溶接 金属	0	
周方向 内表面 き裂	溶接 金属	21	

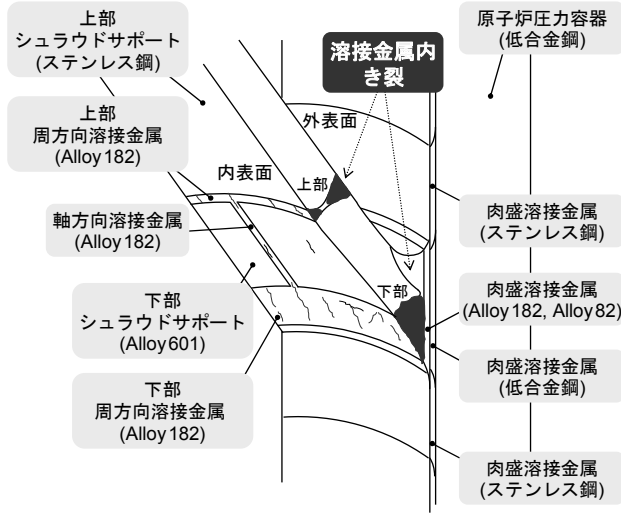


図2.5.1 シュラウドサポートにおける NiSCC 損傷事例模式図

### 3 解析機能

本章では、PASCAL-NP の解析機能について述べる。3.1では2章で記した実機損傷事例に対して破損確率解析を実施するために実装している解析機能一覧を示す。3.2以降では、各解析機能について、国内外における研究機関及び規制当局の論文、電力会社及びプラント製造会社の報告書等に示されている実測値や知見に基づいた解析の根拠となるデータ等も踏まえ、その機能を述べる。

#### 3.1 解析機能の概要

PASCAL-NP は PWSCC 及び NiSCC を主な評価対象としており、これらの SCC による実機損傷事例は2章に示したとおりである。PASCAL-NP はこれらの実機損傷事例に対して破損確率解析を実施するための解析機能を表3.1.1のように実装している。確率論的破壊力学解析では、モンテカルロ法によるサンプリング数が約10万回以上と多いことから、き裂先端の応力拡大係数を簡便に求めるため、機器類の複雑な幾何形状を円筒形状または平板形状に近似するとともに、き裂形状も半楕円形状等の単純な形状として取り扱い、決定論的なき裂進展解析を繰り返し行い、破損判定を経て、対象とする機器類の破損確率を算出する。

表3.1.1 実機損傷事例に対応した解析機能の概要

実機損傷事例	PWSCC		NiSCC	
	原子炉圧力容器 上蓋貫通部	ホットレグ	制御棒駆動機構 ハウジング	シュラウド サポート
解析方法 (3.2)	確率論的破壊力学 (PFM) または決定論的破壊力学 (DFM) 解析			
機器の幾何形状 (3.3)	円筒または平板形状に近似 内半径、肉厚及び溶接金属部の幾何形状を入力			
機器の材質 (3.4)	Ni 基合金 (母材及び溶接金属)、ステンレス鋼及び低合金鋼			
初期き裂発生 (3.5)	PWSCC き裂発生モデル		NiSCC き裂発生モデル	
き裂進展速度線図 (3.6)	Ni 基合金 (母材及び溶接金属)、ステンレス鋼及び低合金鋼			
き裂進展解析 (3.7)	軸方向・内表面 軸方向・外表面 周方向・内表面 周方向・外表面 周方向・貫通 半径方向・溶接金属内	軸方向・溶接金属内 周方向・内表面 (周方向・貫通)	軸方向・溶接金属内 (軸方向・外表面)	軸方向・溶接金属内 周方向・内表面
残留応力分布の ばらつき (3.8)	板厚内均一増加/減少モデル 板厚内分割量機器の局所的増加/減少モデル			
破損判定 (3.9)	漏えい・破断判定		漏えい判定	
結果出力 (3.10)	コンディションファイル (PFM 及び DFM : 解析条件のまとめ) アウトプットファイル (PFM : ヒストグラム及び破損確率、DFM : 解析結果の時刻歴)			
確率分布設定方法 (3.11)	ばらつきを考慮するパラメータに対して確率分布を設定			

### 3.2 解析方法

PASCAL-NP における解析種別は、PFM と DFM に大別され、ユーザーはそのいずれかを選択する。PASCAL-NP の解析フローを図3.2.1に示す。図中の (a) 及び (b) は、PFM 及び DFM における解析フローである。PFM では、まず定数として取扱う評価対象機器の幾何学形状や運転応力分布等のパラメータを設定した後、ばらつきを考慮するき裂進展速度や残留応力分布等のパラメータに対して確率分布を設定し1回目の確率変数のサンプリングを行い、き裂発生時間の算出、き裂進展解析、破損（漏えいまたは破断）判定を実施する。1回目のサンプリングに対して破損判定までの解析を終了した後、モンテカルロ法を用いて2回目の確率変数のサンプリングを行い再度破損判定までの解析を実施する。このような解析をユーザーが定めた総サンプリング数回（解析の目的とする十分な精度が得られる大きな回数）繰り返す。最後に統計処理を実施して、各時刻におけるき裂寸法等のヒストグラム及び破損確率の時刻歴を求める。DFM では、確率変数のばらつきをプログラム内部で自動的にゼロとし確率変数を平均値（中央値）に定数化して1回の計算のみを実施する。き裂寸法、応力拡大係数、き裂進展速度等の解析結果について時刻歴の形式で詳細に出力されるため、ユーザーは設定どおりの計算が行われていることを確認することができる。

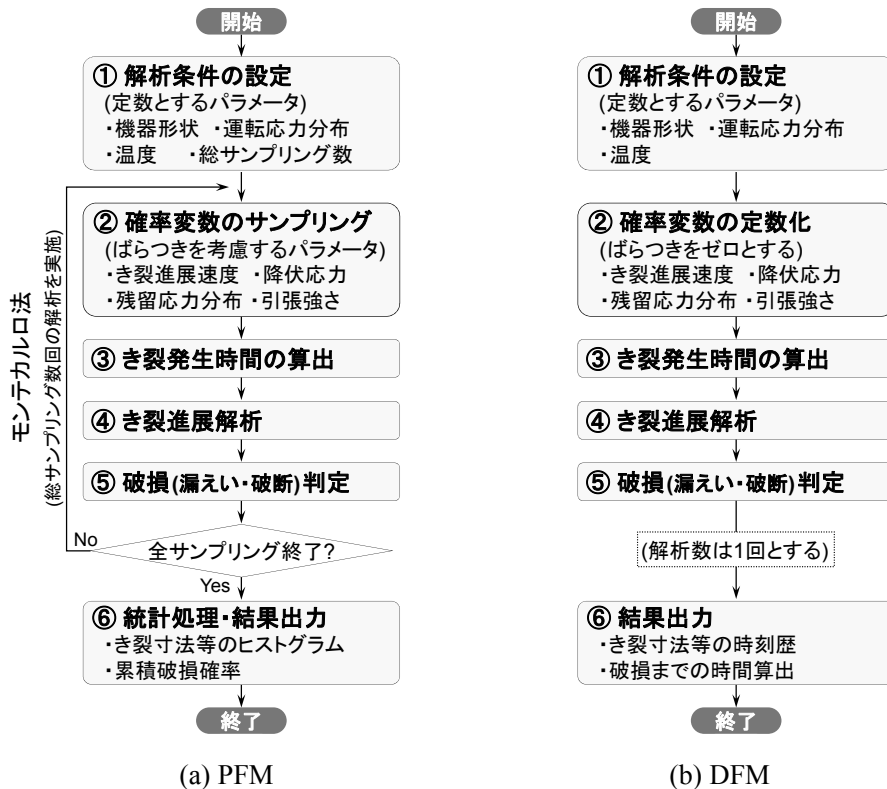
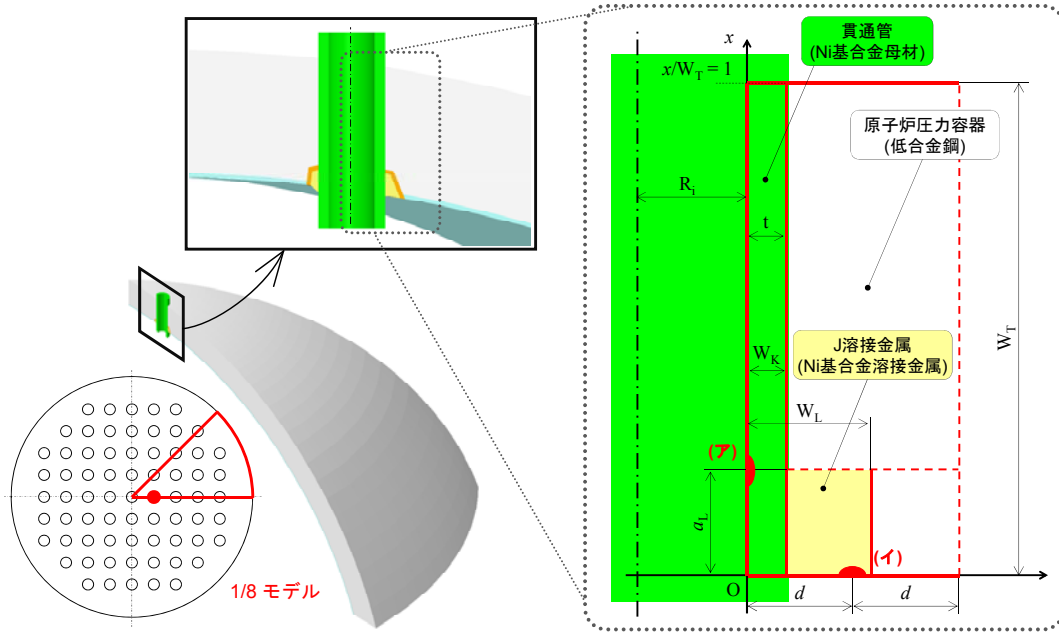


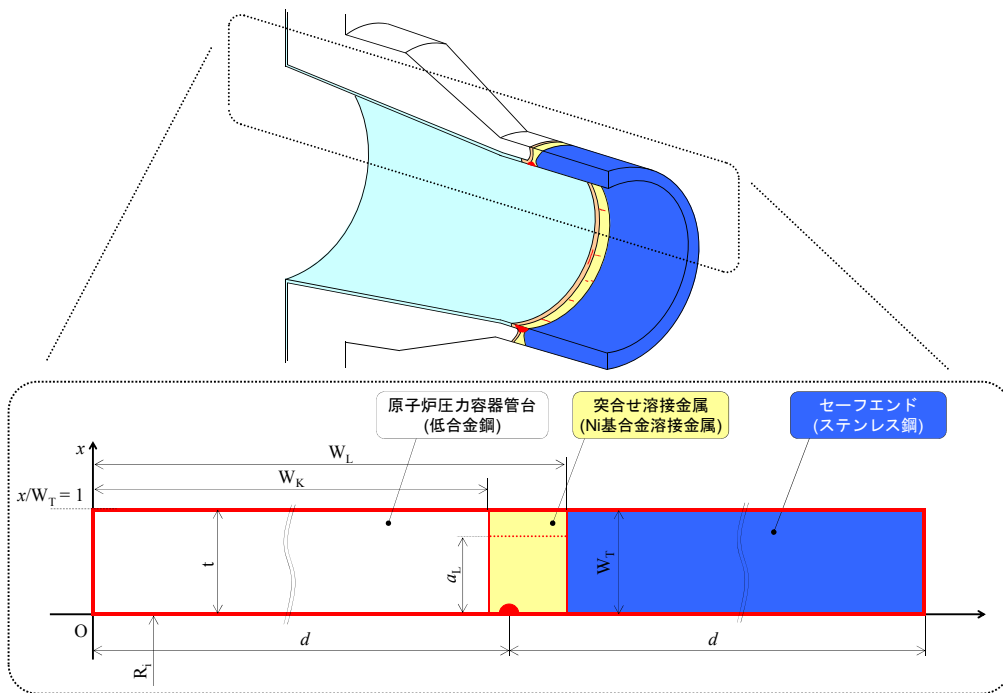
図3.2.1 PASCAL-NP の解析フロー

### 3.3 機器の幾何形状

PASCAL-NP では、き裂先端の応力拡大係数を影響関数法により算出する。このため、評価対象となる機器の幾何形状を入力する必要がある。機器の幾何形状入力例を図3.3.1に示す。例えば原子炉压力容器上蓋貫通部を対象として、貫通管にき裂がある場合 (ア)、内半径  $R_i$  及び肉厚  $t$  を入力する。溶接金属にき裂がある場合 (イ)、貫通管内半径  $R_i$  及び肉厚  $t$  のほか、自由表面から溶接金属までの距離やき裂先端の材質を識別するための  $W_k$  及び  $W_L$ 、並びに漏えい時き裂深さを算出するための  $W_T$  を入力する。

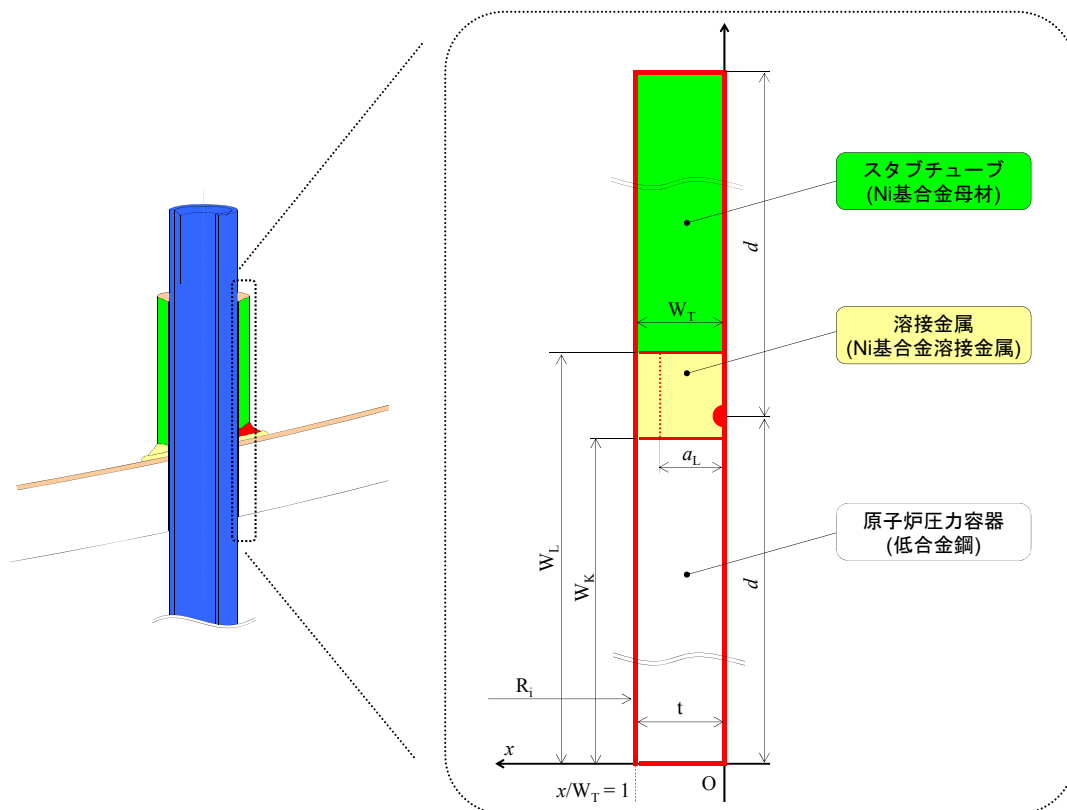


(a) 原子炉压力容器上蓋貫通部

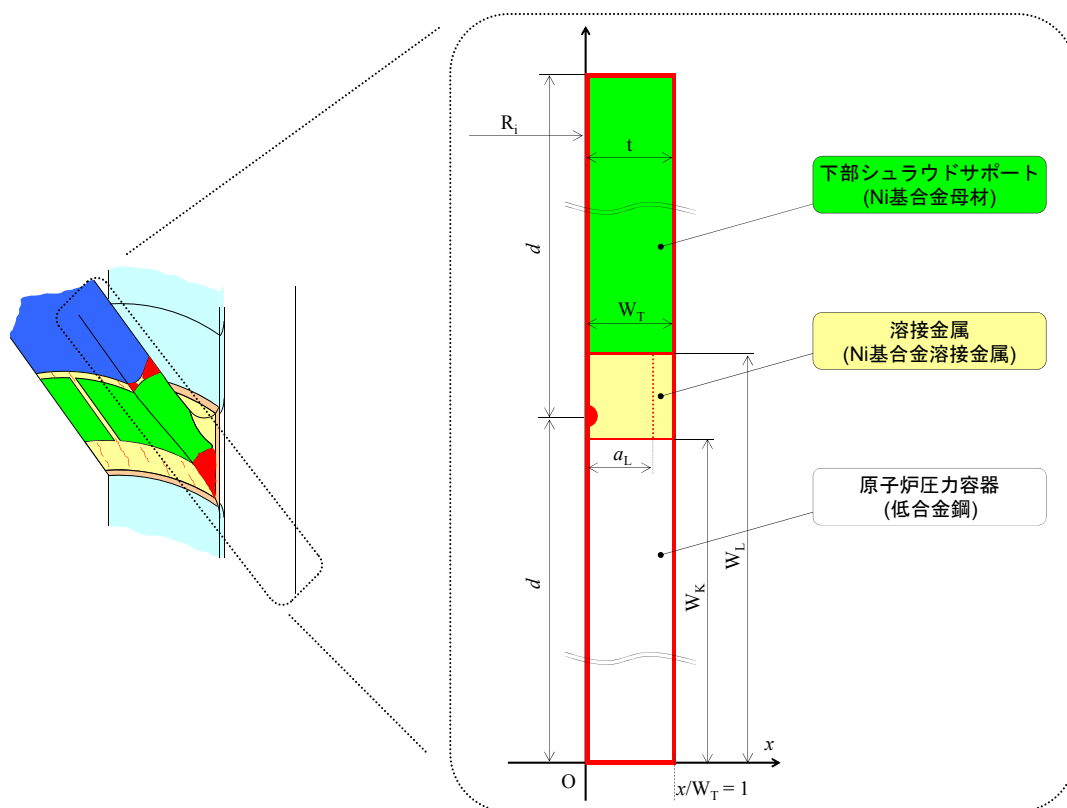


(b) ホットレグ

図3.3.1 機器の幾何形状入力例



(c) 制御棒駆動機構ハウジング



(d) シュラウドサポート

図 3.3.1 機器の幾何形状入力例 (続き)

### 3.4 機器の材質

機器の材質としては、初期き裂発生までの時間算出や破断判定のため、降伏応力や引張強さ等を入力する必要がある。主な Ni 基合金の種類と化学組成を表3.4.1に示す<sup>11), 35)-37)</sup>。Ni 基合金には 600系母材 (Alloy 600)、600系溶接金属 (GTAW 溶接用 Alloy 82、SMAW 溶接用 Alloy 182及び Alloy 132)、690系母材 (Alloy 690) 及び690系溶接金属 (GTAW 溶接用 Alloy 52、SMAW 溶接用 Alloy 152) がある。これらの合金の化学組成は、米国溶接協会 (AWS; American Welding Society)、米国機械学会 (ASME; American Society of Mechanical Engineers)、国際標準化機構 (ISO; International Organization of Standardization) 等の複数の機関による規格値、材料供給元のカタログ値及びプラントメーカー側からの規定値があり、それぞれの間で僅かに異なっている。例えば、Alloy 600の C 含有量の最大値を0.05としている場合<sup>11)</sup>と0.15としている場合<sup>35), 37)</sup>がある。

本解析コードが対象としているき裂のうち、2章で述べたとおり、PWSCC は600系の母材及び溶接金属に、NiSCC は600系の溶接金属に発生していた。近年、これらの機器の補修や取替えには耐食性を向上させるため、600系よりも Cr 量を増加させた690系が用いられている。Ni 基 10%Fe 系合金の360°C 温度加速 PWR 一次系模擬水中 SCC 破断時間に及ぼす Cr 含有量の影響は図3.4.1に示すとおりであり<sup>37)</sup>、Cr 含有量の増加により耐食性が向上していることが分かる。

Ni 基合金母材及び溶接金属の引張特性の制限値を、表3.4.2及び表3.4.3に示す<sup>35), 38)</sup>。表からも分かるように最小値のみに制限値が設定されていることが引張特性のばらつく一因となっている。これらの最小値を考慮して確率分布の下限值を決定する。上限値や確率分布形状は別途決定する必要がある。また、Ni 基合金だけでなくステンレス鋼や低合金鋼の引張特性を入力することもできる。3.5に初期き裂発生モデル、3.6にき裂進展速度線図の設定方法について述べている。

表3.4.1 主な Ni 基合金の種類と化学組成

			Ni	Cr	Fe	C	Mn	S	Si	Cu	Ti	P	Co
600系母材	Alloy 600	最小値	72.0	14.0	6.0	-	-	-	-	-	-	-	-
		最大値	-	17.0	10.0	0.050	1.0	0.015	0.50	0.50	-	-	0.10
600系溶接金属	Alloy 82	最小値	残部	18.0	-	-	2.5	-	-	-	-	-	-
		最大値	(67)	22.0	3.0	0.100	3.5	0.015	0.50	0.50	0.75	0.030	0.10
	Alloy 182	最小値	残部	13.0	-	-	5.0	-	-	-	-	-	-
		最大値	(59)	17.0	10.0	0.100	9.5	0.015	1.00	0.50	1.00	0.030	0.12
	Alloy 132	最小値	残部	68.0	13.0	-	-	2.0	-	-	-	-	-
		最大値	(59)	-	17.0	11.0	0.080	3.5	0.015	0.50	0.50	-	0.015
690系母材	Alloy 690	最小値	58.0	28.0	7.0	-	-	-	-	-	-	-	-
		最大値	-	31.0	11.0	0.040	0.5	0.015	0.50	0.50	-	-	0.10
690系溶接金属	Alloy 52	最小値	残部	28.0	8.0	-	-	-	-	-	-	-	-
		最大値	(54)	31.5	12.0	0.040	1.0	0.008	0.50	0.30	1.00	0.020	0.02
	Alloy 152	最小値	残部	28.0	8.0	-	-	-	-	-	-	-	-
		最大値	(48)	31.5	12.0	0.045	5.0	0.008	0.65	0.50	0.50	0.020	0.02

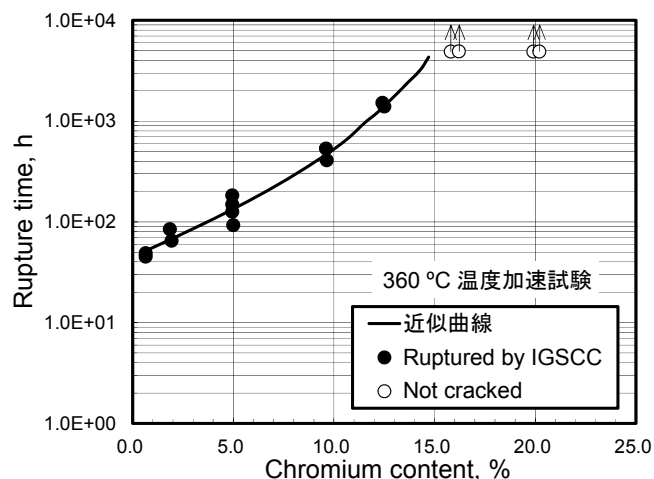


図3.4.1 Ni 基合金の PWR 一次系模擬水中 SCC 破断時間に及ぼす Cr 含有量の影響

表3.4.2 Ni 基合金母材の引張特性の最小値

材質	製造方法	外径 mm	降伏点 (0.2%耐力) 最小値 MPa	引張強さ 最小値 MPa
Alloy 600 (NCF600TP)	熱間仕上後 焼きなまし	127 以下	205	550
		127 超え	175	
	冷間仕上後 焼きなまし	127 以下	245	550
		127 超え	205	
Alloy 690 (NCF690TP)	熱間仕上後 焼きなまし	127 以下	205	590
		127 超え	175	
	冷間仕上後 焼きなまし	127 以下	245	590
		127 超え	205	

表3.4.3 Ni 基合金溶接金属の引張特性の最小値

材質	用途	溶接方法	降伏点 (0.2%耐力) 最小値 MPa	引張強さ 最小値 MPa
Alloy 82	Alloy 600 の溶接 異材溶接	GTAW	-	552
Alloy 182		SMAW	(250)	
Alloy 132		SMAW	-	
Alloy 52	Alloy 690 の溶接 異材溶接	GTAW	-	
Alloy 152		SMAW	-	

GTAW : Gas Tungsten Arc Welding (ガスタングステンアーク溶接)

SMAW : Shielded Metal Arc Welding (被覆アーク溶接)



### 3.5 初期き裂発生

PWSCC や NiSCC における健全性評価を行う際、き裂の発生を考慮した評価が重要であることは、2章で述べたとおりである。PASCAL-NP には、初期き裂発生までに要する時間を算出する機能が実装されている。

初期き裂発生までに要する時間  $t_i$  (hr) を、式3.5.1により算出する<sup>39)43)</sup>。

$$t_i = \frac{\alpha_i \times t_{i0}}{i_\theta \times i_\sigma \times i_m} \quad \text{式3.5.1}$$

ここで、各パラメータは次のとおりである。

$\alpha_i$ : 初期き裂発生時間のばらつきを考慮するための確率分布

$t_{i0}$ : 温度、応力及び材料パラメータが全て1となる時、初期き裂発生までの時間を保守的に設定した値である。表3.5.1に従う。

$i_\theta$ : 温度パラメータ (325 °C のとき、 $i_\theta = 1.0$ )

$i_\sigma$ : 応力パラメータ (表面切削加工がなく負荷応力が450 MPa のとき、 $i_\sigma = 1.0$ )

$i_m$ : 材料パラメータ (Alloy 600でカーバイド析出位置が旧結晶粒界+結晶粒内のとき  $i_m = 1.0$ )

$t_i$  (hr) 経過時に初期き裂が発生するものとする。Alloy 600の PWSCC に対して Amzallag らは超音波探傷試験のき裂検出能から、初期き裂深さを機器板厚の10 %厚さまたは2 mm のいずれか小さい方としている。Alloy 182の PWSCC に対して Thierry らは実測により、初期き裂深さを0.50 mm 以上としている。Alloy 182の NiSCC に対して斉藤らの論文<sup>44)</sup>を参考に、初期き裂深さを0.60 mm とした。初期き裂発生時間の実測値と解析結果の比較を表3.5.2に示す。Alloy 600の PWSCC に対する初期き裂発生モデルは、 $t_{i0}$ を10000 (hr) としたとき、1ケース (No.4) を除いて保守的な計算結果を与えるモデルである。PASCAL-NP では、この初期き裂発生モデルに含まれる過度な保守性を除外するとともに破損確率に及ぼす初期き裂発生時間のばらつきの影響を考慮するため、 $\alpha_i$  を設けて確率分布を持たせることも可能である。 $\alpha_i$  の確率分布について3.5.1に述べる。Alloy 600の PWSCC におけるパラメータは、原著論文<sup>39)42)</sup>で表3.5.2に示すように設定されている。他の合金 (ここでは Alloy 182) については、Alloy 600における325 °C の場合、及び表面切削加工がなく負荷応力が450 MPa の場合を参考に、 $i_\theta = 1.0$ 及び  $i_\sigma = 1.0$ と固定して  $A_\sigma$  と  $i_m$  と  $t_{i0}$  をそれぞれ調整し初期き裂発生までの時間となるようにした。その結果を表3.5.2にまとめて示している。Alloy 182の NiSCC については、初期き裂発生までの時間の実測値が得られている中で実機条件に近い ECP = 0 mV<sub>SHE</sub> の場合のパラメータを求めている。なお、初期き裂発生モデルには ECP を直接入力することができないため、ECP = 0 mV<sub>SHE</sub> 以外の場合には、初期き裂発生モデルのパラメータを調整しなおす必要がある。温度パラメータ  $i_\theta$ 、応力パラメータ  $i_\sigma$  及び材料パラメータ  $i_m$  について、3.5.2、3.5.3及び3.5.4に示す。

表3.5.1  $t_{i0}$  設定例

き裂タイプ	Ni 基合金種類	$t_{i0}$ (hr)
PWSCC	Alloy 600	10000
	Alloy 182	10000
NiSCC	Alloy 182 (0 mV <sub>SHE</sub> )	86

表3.5.2 初期き裂発生時間の実測値と解析結果との比較

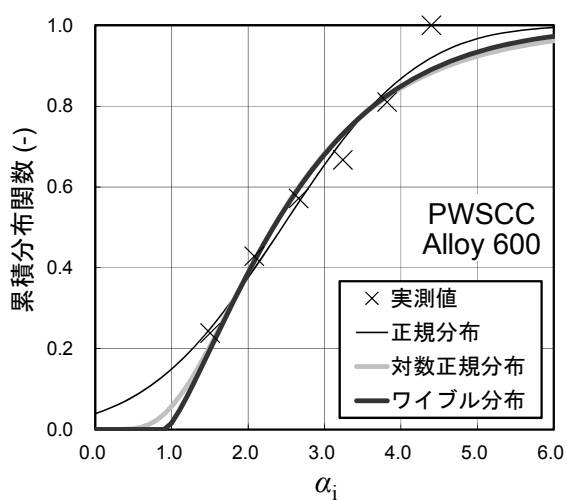
		実測値 (hr)	$i_0$	$i_\sigma$	$i_m$	$i_0 \times i_\sigma \times i_m$	解析結果 (hr)	$\alpha_i$
PWSCC Alloy 600	Hydraulic expansion	>80000	1.0	0.4	0.2	0.080	125000	-
	Divider plate	>80000	0.9	0.3	0.5	0.135	74074	-
	Hard rolling on cold leg (Ringhal 2)	48000	0.1	2.2	2.0	0.440	22727	2.112
	Pressurizer nozzle (San Onofre)	56000	3.3	0.1	0.5	0.165	60606	0.924
	Nozzle (San Onofre)	8000	3.3	0.9	0.5	1.485	6734	1.188
	Pressurizer nozzle (ANO1)	84336	3.3	0.3	0.5	0.495	20202	4.175
	Pressurizer nozzle (Palo Verde 1)	33320	3.3	0.4	0.5	0.660	15152	2.199
	Nozzle (Palo Verde 2)	25000	1.1	1.5	0.5	0.825	12121	2.063
	Explosive expansion (Fessenheim 1)	75000	1.0	0.4	1.0	0.400	25000	3.000
	Hard rolling on SG hot leg (Gravelines 6)	30000	1.0	2.2	0.5	1.100	9091	3.300
	Hydraulic expansion (Doel 2)	30000	1.0	0.4	2.0	0.800	12500	2.400
	Small U-bends Vallourec	30000	0.3	2.2	2.0	1.320	7576	3.960
	Small U-bends Westinghouse	6000	0.3	10.0	2.0	6.000	1667	3.600
	Sensitive hard rolling on SG hot leg	20000	1.0	2.2	1.0	2.200	4545	4.400
	Very sensitive hard rolling on SG hot leg	8000	1.0	2.2	2.0	4.400	2273	3.520
	1300 MW Pressurizer Nozzle	8000	3.3	3.2	0.5	5.280	1894	4.224
	Mechanical pluggs	40000	1.0	1.0	0.5	0.500	20000	2.000
	French CRDM Nozzles	80000	0.5	1.5	0.5	0.375	26667	3.000
	''	26800	0.5	1.5	0.5	0.375	26667	1.005
	''	72909	0.1	2.8	1.1	0.246	40584	1.796
''	48427	0.1	2.5	1.1	0.220	45455	1.065	
''	58868	0.1	2.5	1.1	0.220	45455	1.295	
''	90777	0.1	2.5	1.1	0.220	45455	1.997	
PWSCC Alloy 182	CL1	23771	4.4	0.2	0.7	0.527	18970	1.253
	CL4	13365	7.6	0.2	0.7	0.921	10860	1.231
	CL5	737	1.4	14.6	0.7	13.859	722	1.021
	CL10	1998	7.6	1.1	0.7	0.44	1678	1.190
NiSCC Alloy 182 0 mV <sub>SHE</sub>	No. 1	2930	0.088	0.522	0.7	0.032	2662	1.101
	No. 2	3060	0.088	0.522	0.7	0.032	2662	1.150
	No. 3-12	>3500	0.088	0.522	0.7	0.032	2662	>1.315

### 3.5.1 初期き裂発生モデルのばらつき

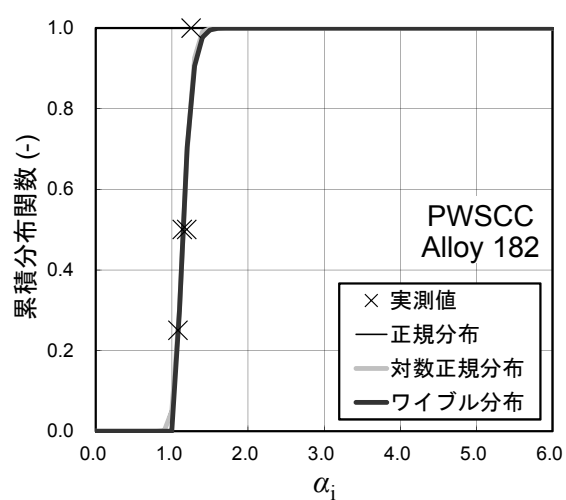
初期き裂発生モデルのばらつき  $\alpha_i$  に用いる確率分布を選定するため、確率分布の候補として、ワイブル分布、正規分布及び対数正規分布を取上げ、非線形最小二乗法による統計処理を実施した。この結果を表3.5.3及び図3.5.1に示す。NiSCC Alloy 182 (0 mV<sub>SHE</sub>) ではデータ数が2点と少ないため、論文中に示されている予測式を用いてデータを追加して統計処理を実施した。一般的に表中に示した AIC (情報量基準)<sup>45)</sup> が少ないほど適した確率分布である。しかしながら、表3.5.3の Alloy 600では正規分布でフィットした場合 AIC が最小となるが、図3.5.1に示すように正規分布では  $\alpha_i$  が負となる確率が10 %程度発生する。 $\alpha_i$  は時間を算出するための係数であり常に正である必要があることから、負の確率を与える正規分布は妥当でないと考えられる。対数正規分布とワイブル分布では、 $\alpha_i$  が約1.5以下で対数正規分布の確率の方が高くなっており、約1.5以上ではあまり差は見られない結果となった。しかしながら、累積分布関数値がゼロのとき  $\alpha_i$  は1近傍にあると考えられることから、5.3の実機損傷事例解析では全ケースに対してワイブル分布を用いることとした。なお、PWSCC Alloy 182における  $\alpha_i$  の確率分布は、試験数が少ないため精度は良くない。このため、別のデータで代用するか別途決定する必要がある。

表3.5.3  $\alpha_i$  に対する統計処理結果

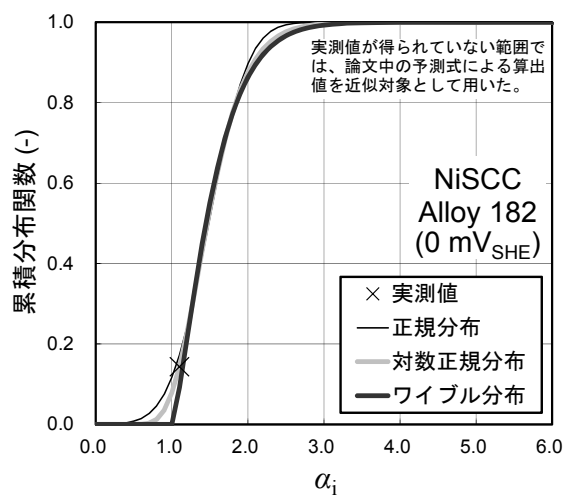
き裂タイプ	材質	データ数	確率分布	パラメータ			残差平方和	AIC
				形状	縮尺	位置		
PWSCC	Alloy 600	21	ワイブル	形状	縮尺	位置	0.019	-77.8
				1.285	1.873	0.924		
			正規	平均値	標準偏差	-	0.011	-91.2
				2.444	1.392	-		
	対数正規	平均値	標準偏差	-	0.020	-78.5		
		0.844	0.535	-				
	Alloy 182	4	ワイブル	形状	縮尺	位置	0.066	5.0
				1.509	0.157	1.021		
正規			平均値	標準偏差	-	0.859	13.2	
			1.151	0.098	-			
対数正規	平均値	標準偏差	-	1.121	14.3			
	0.844	0.535	-					
NiSCC	Alloy 182 (0 mV <sub>SHE</sub> )	2 + (12)	ワイブル	形状	縮尺	位置	0.035	7.6
				1.314	0.593	1.000		
			正規	平均値	標準偏差	-	0.018	4.3
				1.485	0.407	-		
対数正規	平均値	標準偏差	-	0.025	4.9			
	0.382	0.270	-					



(a) PWSCC Alloy 600



(b) PWSCC Alloy 182



(c) NiSCC Alloy 182 (0 mV<sub>SHE</sub>)

図3.5.1  $\alpha_i$  に対する実測値と解析結果との比較

### 3.5.2 温度パラメータ

初期き裂発生までに要する時間  $t_i$  は温度が高いほど短くなる。ここでは、 $t_i$  に及ぼす温度の影響を考慮するため、温度パラメータ  $i_0$  を式3.5.2及び式3.5.3により算出する。

$$T > T_{th} \quad i_0 = A_0 \times \exp(-Q_i/RT) \quad \text{式3.5.2}$$

$$T < T_{th} \quad i_0 = 0 \quad (\text{き裂は発生しない}) \quad \text{式3.5.3}$$

ここで、各パラメータは次のとおりである。

$T$ : 温度 (K)

$T_{th}$ : 温度閾値 (K)

$A_0$ : 温度パラメータ算出係数

$Q_i$ : き裂発生に要する活性化エネルギー (kJ/mol)

$R$ : ガス定数 (kJ/(molK)) =  $8.31447 \times 10^{-3}$

$T$ ,  $T_{th}$ ,  $A_0$ ,  $Q_i$ ,  $R$  をインプットファイルにて指定する。Alloy 600に対する  $i_0$  算出例を、表3.5.4に示す。Alloy 600のき裂発生モデルでは、325 °C のとき  $i_0 = 1.00$  となるように  $A_0$  が設定されているため、Alloy 182のき裂発生モデルにおいても同様の調整をした。

表3.5.4  $i_0$  算出例

	$T$ (°C)	$T_{th}$ (°C)	$A_0$ (-)	$Q_i$ (kJ/mol)	$i_0$ (-)
PWSCC (Alloy 600, Alloy 182)  NiSCC (Alloy 182)	325	250	9.49E+15	183	1.00
	320				0.73
	315				0.53
	310				0.39
	305				0.28
	300				0.20
	295				0.14
	290				0.10

### 3.5.3 応力パラメータ

初期き裂発生までに要する時間  $t_i$  は応力が高いほど短くなる。ここでは、 $t_i$  に及ぼす応力の影響を考慮するため、応力パラメータ  $i_\sigma$  を式3.5.4、式3.5.5及び式3.5.6により算出する。

$$\sigma_{\text{eff}} > \sigma_{\text{th}} \text{ かつ PWSCC の場合} \quad i_\sigma = A_\sigma \times \sigma_{\text{eff}}^n \quad \text{式3.5.4}$$

$$\sigma_{\text{eff}} > \sigma_{\text{th}} \text{ かつ NiSCC の場合} \quad i_\sigma = A_\sigma \times (\sigma_{\text{eff}} - \sigma_y)^n \quad \text{式3.5.5}$$

$$\sigma_{\text{eff}} < \sigma_{\text{th}} \text{ の場合} \quad i_\sigma = 0 \text{ (き裂は発生しない)} \quad \text{式3.5.6}$$

ここで、各パラメータは次のとおりである。

$\sigma_{\text{eff}}$ : 有効応力 (MPa)

$\sigma_{\text{th}}$ : 応力閾値 (MPa)

$A_\sigma$ : 応力パラメータ算出係数

$n$ : 指数

上式における有効応力  $\sigma_{\text{eff}}$  は、式3.5.7及び式3.5.8により算出し、降伏応力と切削加工の影響を考慮する。

$$\sigma_{\text{app}} > \sigma_y \text{ の場合} \quad \sigma_{\text{eff}} = f(\sigma_{\text{app}} - \sigma_y, \sigma_s, d_c) + \sigma_y \quad \text{式3.5.7}$$

$$\sigma_{\text{app}} < \sigma_y \text{ の場合} \quad \sigma_{\text{eff}} = \sigma_{\text{app}} \quad \text{式3.5.8}$$

ここで、各パラメータは次のとおりである。

$\sigma_{\text{app}}$ : 負荷応力 (MPa)

$\sigma_y$ : 降伏応力 (MPa)

$\sigma_s$ : 切削加工による極表面の応力 (MPa)

$d_c$ : 切削加工による加工硬化域深さ ( $\mu\text{m}$ )

PASCAL-NP は保守性を担保するため、内表面から初期き裂深さ上限値までの範囲に発生する運転応力と残留応力の和の最大値を  $\sigma_{\text{app}}$  として使用する。 $\sigma_y$  は運転状態における降伏応力である。 $\sigma_s$  及び  $d_c$  は表面切削加工に関するパラメータである。 $\sigma_s$  及び  $d_c$  を1000 MPa 及び100  $\mu\text{m}$  程度とした応力分布の例を図3.5.2に示す。応力分布は極表面にて非常に高い引張応力となり、表面からの深さ  $d_c$  程度にて、ほぼゼロになる傾向にある。

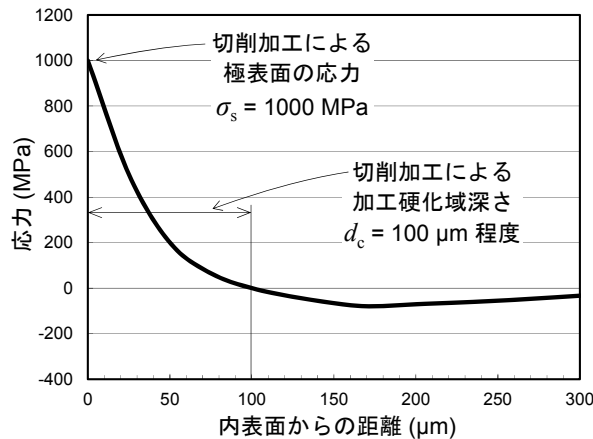


図3.5.2 表面切削加工による応力分布の例

$\sigma_s = 1000 \text{ MPa}$  における  $(\sigma_{\text{eff}} - \sigma_y) - (\sigma_{\text{app}} - \sigma_y)$ ,  $d_c$  グラフを図3.5.3に示す。図中には  $d_c = 0$  (切削加工なし) から  $d_c = 200 \text{ }\mu\text{m}$  (強加工) までのグラフの変化が示されており、 $(\sigma_{\text{app}} - \sigma_y)$  または  $d_c$  が増加する程  $(\sigma_{\text{eff}} - \sigma_y)$  が増加する。すなわち、負荷応力  $\sigma_{\text{app}}$  の増加、加工硬化域深さ  $d_c$  の増加、降伏応力  $\sigma_y$  の減少により、有効応力  $\sigma_{\text{eff}}$  は増加する。なお、 $d_c = 0$  (切削加工なし) の場合、 $\sigma_{\text{eff}} = \sigma_{\text{app}}$  となる。

$\sigma_s = 1000 \text{ MPa}$  における  $(\sigma_{\text{eff}} - \sigma_y) - (\sigma_{\text{app}} - \sigma_y)$ ,  $d_c$  グラフの値を表3.5.5に示す。これらの値を表形式でインプットファイルに入力する。

$i_\sigma$  算出例を表3.5.6に示す。 $\sigma_{\text{app}}$  が増加する程、 $\sigma_y$  が低下する程及び  $d_c$  が深くなる程  $\sigma_{\text{eff}}$  が増加するため、 $i_\sigma$  が増大する (初期き裂発生までの時間が減少する) ことが分かる。

PWSCC (Alloy 182) の場合、PWSCC (Alloy 600) に合わせて応力腐食割れ発生の応力閾値  $\sigma_{\text{th}} = 250 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_{\text{eff}} = 450 \text{ MPa}$  のとき  $i_\sigma = 1.0$ 、算出される初期き裂発生までの時間が変化しないように原著論文<sup>43)</sup>から  $A_\sigma$  を調整して求めた (表3.5.6)。

NiSCC (Alloy 182) の場合、原著論文<sup>44)</sup>に示されている  $\sigma_{\text{th}} = 350 \text{ MPa}$  及び  $n = 1.36$  を用いた。さらに PWSCC における基準に合わせて  $\sigma_{\text{eff}} = 450 \text{ MPa}$  のとき  $i_\sigma = 1.0$ 、算出される初期き裂発生までの時間が変化しないように原著論文<sup>44)</sup>から  $A_\sigma$  と  $t_{i0}$  を調整した。表3.5.6に示されているように全てのき裂種類において  $\sigma_{\text{eff}} = 450 \text{ MPa}$  のとき  $i_\sigma = 1.0$  と算出されていることを確認した。

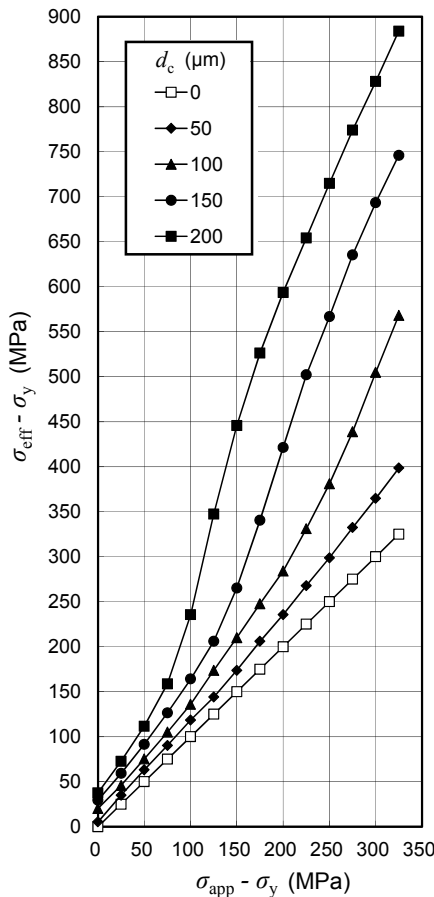


表3.5.5  $(\sigma_{\text{eff}} - \sigma_y) - (\sigma_{\text{app}} - \sigma_y)$ ,  $d_c$  グラフの値 ( $\sigma_s = 1000 \text{ MPa}$ )

$\sigma_{\text{eff}} - \sigma_y$ (MPa)		$d_c$ ( $\mu\text{m}$ )				
		0	50	100	150	200
$\sigma_{\text{app}} - \sigma_y$ (MPa)	0	0	5	20	30	38
	25	25	35	46	59	73
	50	50	63	75	92	112
	75	75	90	105	127	159
	100	100	119	136	164	236
	125	125	144	174	206	347
	150	150	174	210	265	446
	175	175	206	248	341	526
	200	200	236	284	421	594
	225	225	268	331	502	654
	250	250	299	381	567	715
	275	275	333	439	635	774
	300	300	365	505	693	828
325	325	399	568	746	884	

図3.5.3  $(\sigma_{\text{eff}} - \sigma_y) - (\sigma_{\text{app}} - \sigma_y)$ ,  $d_c$  グラフ  
( $\sigma_s = 1000 \text{ MPa}$ )

表3.5.6  $i_{\sigma}$  算出例

		$A_{\sigma}$ (-)	n (-)	$\sigma_{th}$ (MPa)	$\sigma_s$ (MPa)	$d_c$ ( $\mu$ m)	$\sigma_{app}$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_{app}-\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_{eff}-\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_{eff}$ (MPa)	$i_{\sigma}$ (-)	
PWSCC	Alloy 600	2.44E-11	4	250	0	0	450	300	150	150	450	1.00	
							400		100	100	400	0.62	
							350		50	50	350	0.37	
							300		0	0	300	0.20	
					450	1000	100	450	300	150	210	510	1.65
					400			100		136	436	0.88	
					350			50		75	375	0.48	
					300			0		20	320	0.26	
	450	450	450	0	20	470	1.19						
	400		50	75	475	1.25							
	350		100	136	486	1.36							
	300		150	210	510	1.65							
	Alloy 182	2.68E-19	7	250	0	0	450	300	150	150	450	1.00	
							400		100	100	400	0.44	
350							50		50	350	0.17		
300							0		0	300	0.06		
NiSCC	Alloy 182	1.91E-03	1.36	350	0	0	450	350	100	100	450	1.00	
							400	350	50	50	400	0.39	
							350	350	0	0	350	0.00	
							345	325	20	20	345	0.00	
				450	1000	50	325	450	125	144	469	1.65	
				400				75	90	415	0.87		
				350				25	35	360	0.24		
				345				20	29	354	0.19		

### 3.5.4 材料パラメータ

初期き裂発生までに要する時間  $t_i$  は耐食性の悪い材料ほど短くなる。Alloy 600の場合、材料の耐食性はカーバイド ( $M_7C_3$ ) 析出位置のみに依存するとし、表3.5.7を参考に材料パラメータ  $i_m$  をインプットファイルに定数として入力する。カーバイドの析出位置が変化すること、3.4に示したように、製造方法、化学成分及び熱処理等が異なることや規格上許容される範囲が広いことが挙げられる。Alloy 182の場合、全ての実測値に対して保守的な評価を与えるように原著論文<sup>43)</sup>から  $i_m$  を調整し、0.70とした。

表3.5.7  $i_m$  設定例

	カーバイド析出位置	$i_m$ (-)
Alloy 600	旧結晶粒界 + 結晶粒内	1.00
	旧結晶粒界	0.65
	主に結晶粒界 + 結晶粒内 + 双晶境界	0.60
	主に結晶粒界 + 双晶境界	0.50
	主に結晶粒界 + 結晶粒内	0.40
	結晶粒界のみ	0.25
Alloy 182	現状ではデータが得られていないため、常に 0.7 を指定	0.70

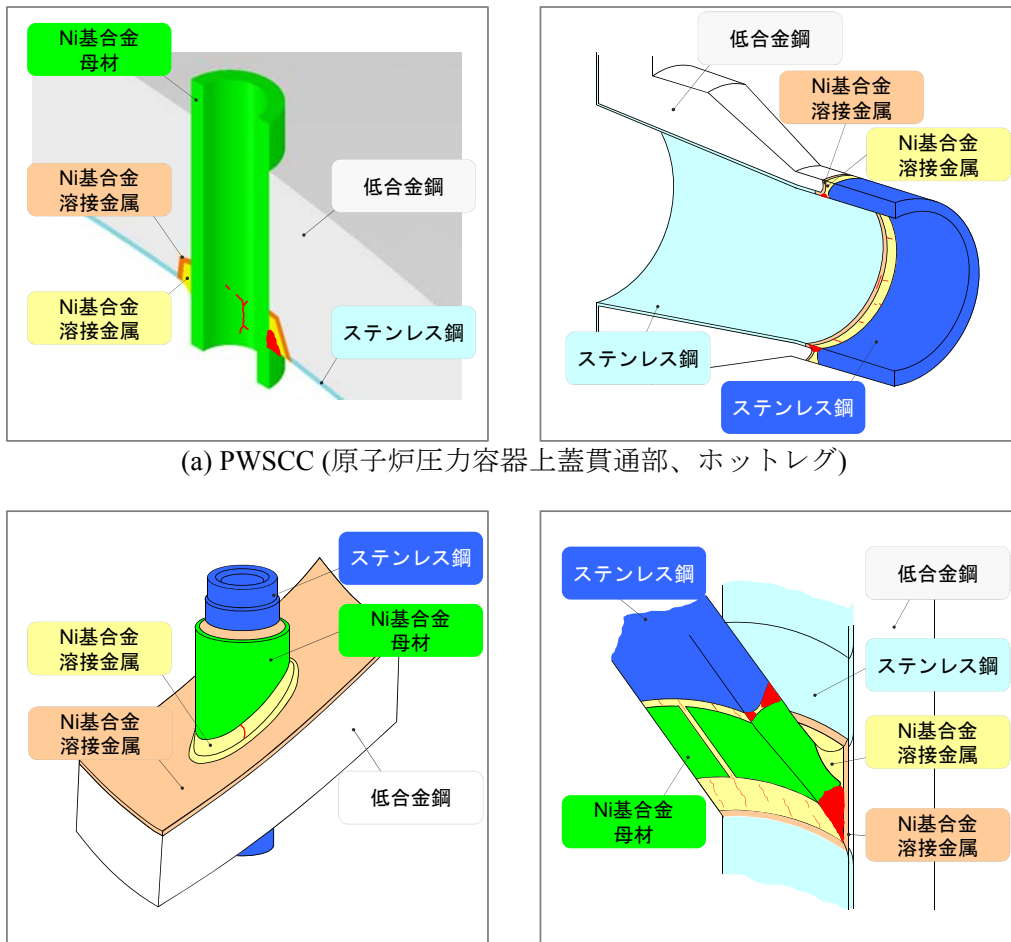


3.6 き裂進展速度線図

PASCAL-NP では図3.6.1に示すような異材溶接部の構造健全性評価を実施するため、Ni 基合金、ステンレス鋼及び低合金鋼のき裂進展速度を設定する必要がある。PWSCC では温度によるき裂進展速度の加速効果を、BWR 水質環境中では ECP によるき裂進展速度の加速効果を考慮することができる。この章ではき裂進展速度線図設定例を表3.6.1のように3.6.1から3.6.8に示す。また、PASCAL-NP は PWSCC 及び NiSCC を主な対象としているが、初期き裂発生までの時間に関するデータ等があれば再循環系配管溶接部でよく検出される従来型の BWR 水質環境中ステンレス鋼の SCC も評価することができる。

表3.6.1 き裂進展速度線図の設定例一覧

	Ni 基合金		ステンレス鋼	低合金鋼
	母材	溶接金属		
PWR 一次系水質環境	3.6.1 (PWSCC)	3.6.2 (PWSCC)	3.6.3	3.6.4
BWR 水質環境	3.6.5 (NiSCC)	3.6.6 (NiSCC)	3.6.7	3.6.8



(a) PWSCC (原子炉压力容器上蓋貫通部、ホットレグ)

(b) NiSCC (制御棒駆動機構ハウジング、シュラウドサポート)

図3.6.1 PWSCC 及び NiSCC が発生した異材溶接部の模式図

3.6.1 Ni 基合金母材の PWR 一次系水質環境中 SCC き裂進展速度

Ni 基合金母材の PWR 一次系水質環境中 SCC (PWSCC) のき裂進展速度  $da/dt$  (m/s) を、き裂前縁の応力拡大係数  $K_I$  (MPa $\sqrt{m}$ ) をパラメータとして、式3.6.1及び式3.6.2により算出する。PWSCC の  $da/dt$  は温度上昇及び塑性歪増加とともに加速される。各係数の設定例を表3.6.2に、これらの値を用いたき裂進展速度線図を図3.6.2に示す<sup>46), 47)</sup>。設定例では、 $K$  値が60 MPa $\sqrt{m}$  を超える範囲において実測値が得られていないため、上限値を100 MPa $\sqrt{m}$  としている。米国材は国産材よりも平均値が高くばらつきも大きくなっている。

$$\frac{da}{dt} = c_{temp} \times c_p \times \alpha_r (K_I - K_{th})^\beta \quad \text{式3.6.1}$$

$$c_{temp} = \exp\left[-\frac{Q_g}{R} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_{a,ref}}\right)\right] \quad \text{式3.6.2}$$

表3.6.2 Ni 基合金母材の PWR 一次系水質環境中 SCC き裂進展速度設定例

		Alloy 600 (国産材)	Alloy 600 (米国材)
$Q_g$	活性化エネルギー	130 kJ/mol	130 kJ/mol
R	ガス定数	$8.314 \times 10^{-3}$ kJ/molK	$8.314 \times 10^{-3}$ kJ/molK
$T_a$	き裂位置の評価温度	325 °C, 318 °C	325 °C, 318 °C
$T_{a,ref}$	参照評価温度	325 °C	325 °C
$c_{temp}$	き裂進展速度に及ぼす温度の影響係数	1.000 (325 °C) 0.734 (318 °C)	1.000 (325 °C) 0.734 (318 °C)
$c_p$	き裂進展速度に及ぼす塑性歪の影響係数	ここでは 1.0 に設定した。 (詳細は 3.6.9 で述べる。)	ここでは 1.0 に設定した。 (詳細は 3.6.9 で述べる。)
$\alpha_r$	き裂進展速度係数 (対数正規分布とする)	$\ln(\alpha_r)$ の平均値: -29.0054 $\ln(\alpha_r)$ の標準偏差: 0.5110	$\ln(\alpha_r)$ の平均値: -27.3358 $\ln(\alpha_r)$ の標準偏差: 1.0160
$K_{th}$	応力拡大係数閾値	9.0 MPa $\sqrt{m}$	9.0 MPa $\sqrt{m}$
$K_{lower}$	応力拡大係数下限値	9.0 MPa $\sqrt{m}$	9.0 MPa $\sqrt{m}$
$K_{upper}$	応力拡大係数上限値	100 MPa $\sqrt{m}$	100 MPa $\sqrt{m}$
$\beta$	指数	1.16	1.16

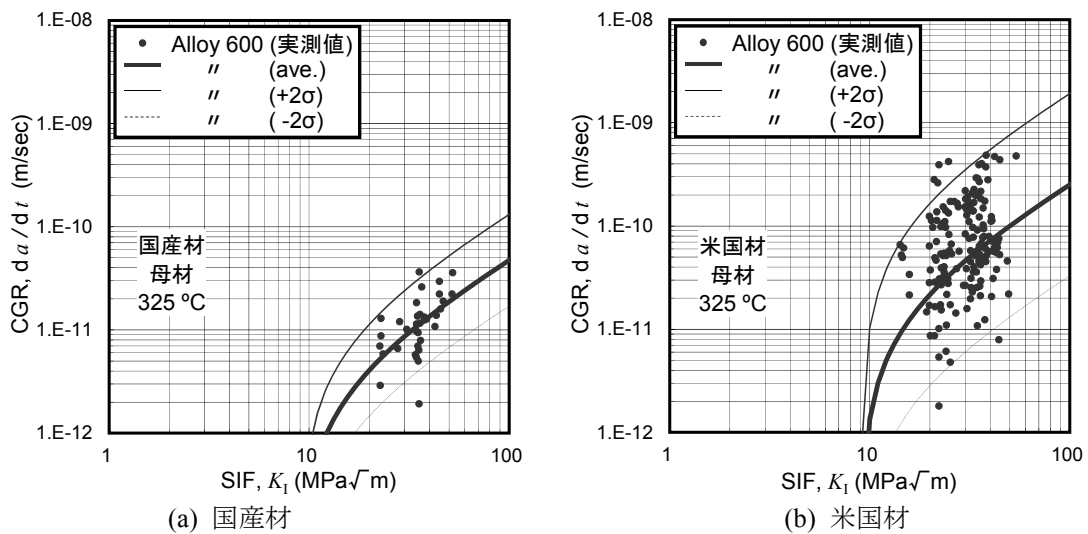


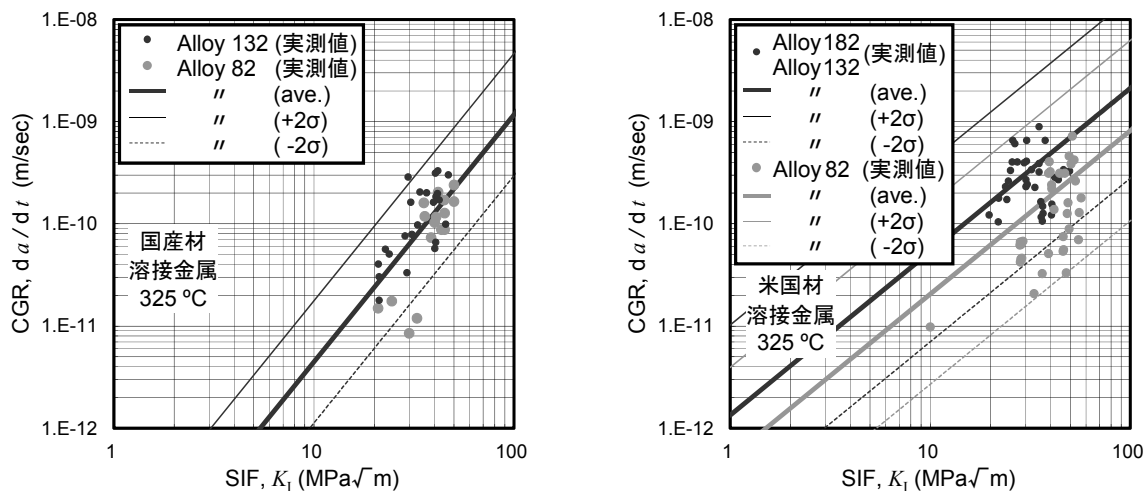
図3.6.2 Ni 基合金母材の PWR 一次系水質環境中 SCC き裂進展速度線図例

3.6.2 Ni 基合金溶接金属の PWR 一次系水質環境中 SCC き裂進展速度

Ni 基合金溶接金属の PWR 一次系水質環境中 SCC (PWSCC) のき裂進展速度  $da/dt$  (m/s) を、き裂前縁の応力拡大係数  $K_I$  (MPa $\sqrt{m}$ ) をパラメータとして、母材の場合と同様に前述した式3.6.1及び式3.6.2により算出する。各係数の設定例を表3.6.3に、これらの値を用いたき裂進展速度線図を図3.6.3に示す<sup>46)-49)</sup>。これらのデータは全てデンドライト方向のき裂進展速度である。White らは、デンドライト直交方向のき裂進展速度を、概ねデンドライト方向の半値としている。国産材及び米国材の  $K_I = 30$  (MPa $\sqrt{m}$ ) 以下において、Alloy 82は Alloy 132や Alloy 182よりも低いき裂進展速度を示している。この理由は、表3.4.1に示したように Alloy 82の方が耐食性を向上させる Cr 量が多いためであると考えられる。

表3.6.3 Ni 基合金溶接金属の PWR 一次系水質環境中 SCC き裂進展速度設定例

		Alloy 132, Alloy 82 デンドライト方向 (国産材)	Alloy 182, Alloy 132, Alloy 82 デンドライト方向 (米国材)
$Q_g$	活性化エネルギー	215 kJ/mol	130 kJ/mol
$R$	ガス定数	$8.314 \times 10^{-3}$ kJ/molK	$8.314 \times 10^{-3}$ kJ/molK
$T_a$	き裂位置の評価温度	318 °C, 325 °C	318 °C, 325 °C
$T_{a,ref}$	参照評価温度	325 °C	325 °C
$c_{temp}$	き裂進展速度に及ぼす温度の影響係数	1.000 (325 °C) 0.599 (318 °C)	1.000 (325 °C) 0.734 (318 °C)
$c_p$	き裂進展速度に及ぼす塑性歪の影響係数	ここでは 1.0 に設定した。 (詳細は 3.6.9 で述べる。)	ここでは 1.0 に設定した。 (詳細は 3.6.9 で述べる。)
$\alpha_r$	き裂進展速度係数 (対数正規分布とする)	Alloy 132, Alloy 82 $\ln(\alpha_r)$ の平均値: -31.7056 $\ln(\alpha_r)$ の標準偏差: 0.6880	Alloy 182, Alloy 132 $\ln(\alpha_r)$ の平均値: -27.3358 $\ln(\alpha_r)$ の標準偏差: 1.0160 Alloy 82 $\ln(\alpha_r)$ の平均値: -28.2913 $\ln(\alpha_r)$ の標準偏差: 1.0160
$K_{th}$	応力拡大係数閾値	0 MPa $\sqrt{m}$	0 MPa $\sqrt{m}$
$K_{lower}$	応力拡大係数下限値	0 MPa $\sqrt{m}$	0 MPa $\sqrt{m}$
$K_{upper}$	応力拡大係数上限値	100 MPa $\sqrt{m}$	100 MPa $\sqrt{m}$
$\beta$	指数	2.42	1.6



(a) 国産材 (Alloy 132, Alloy 82)

(b) 米国材 (Alloy 182, Alloy 132, Alloy 82)

図3.6.3 Ni 基合金溶接金属の PWR 一次系水質環境中 SCC き裂進展速度線図例

3.6.3 ステンレス鋼の PWR 一次系水質環境中 SCC き裂進展速度

ステンレス鋼の PWR 一次系水質環境中 SCC のき裂進展速度  $da/dt$  (m/s) をき裂前縁の応力拡大係数  $K_I$  ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) をパラメータとして、前述した式3.6.1及び式3.6.2により算出する。この条件下における応力腐食割れのき裂進展速度は非常に遅いため、冷間加工を与えた材料による加速試験が行われている。例えば、Catherin らは降伏応力を1057 MPa まで増加させた材料で試験を実施した<sup>50)</sup>。このとき、き裂進展速度は冷間加工が無い場合と比較して約100倍以上加速されている<sup>51)</sup>。なお、Catherin らの実験ではき裂進展方向は圧延方向に対して垂直方向である。各係数の設定例を表3.6.4に、これらの値を用いたき裂進展速度線図を図3.6.4に示す。なお、ここでは活性化エネルギーを70 kJ/molK<sup>52)</sup>とし、289 °C の実測値を325 °C の相当値に換算するとともに、1057 MPa における値から175 MPa (SUS316L の JIS における降伏応力最小値) へ換算した値を示している。この降伏応力に対する換算には近似式 ( $da/dt = 10^{(-8.175+0.00257\sigma_y)}$ , (mm/s), (MPa)<sup>51)</sup>) を用いた。

表3.6.4 ステンレス鋼の PWR 一次系水質環境中 SCC き裂進展速度設定例

		ステンレス鋼
$Q_g$	活性化エネルギー	70 kJ/mol
R	ガス定数	$8.314 \times 10^{-3}$ kJ/molK
$T_a$	き裂位置の評価温度	318 °C, 325 °C
$T_{a,ref}$	参照評価温度	325 °C
$c_{temp}$	き裂進展速度に及ぼす温度の影響係数	1.000 (325 °C), 0.846 (318 °C)
$c_p$	き裂進展速度に及ぼす塑性歪の影響係数	ここでは 1.0 に設定した。 (詳細は 3.6.9 で述べる。)
$\alpha_r$	き裂進展速度係数 (対数正規分布とする)	SUS316L $\ln(\alpha_r)$ の平均値 : -30.6510 $\ln(\alpha_r)$ の標準偏差 : 0.2430
$K_{th}$	応力拡大係数閾値	0 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
$K_{lower}$	応力拡大係数下限値	0 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
$K_{upper}$	応力拡大係数上限値	100 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
$\beta$	指数	1.03

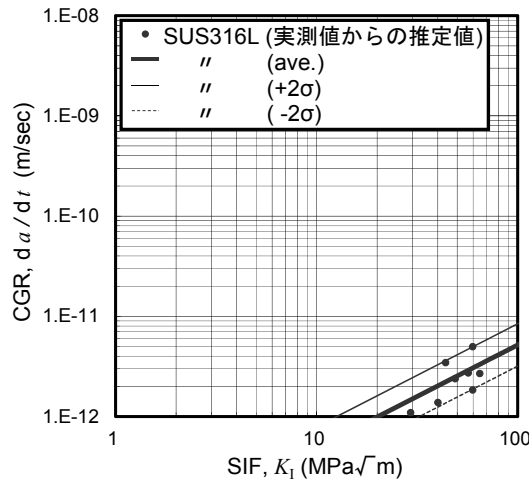


図3.6.4 ステンレス鋼の PWR 一次系水質環境中 SCC き裂進展速度線図例

3.6.4 低合金鋼の PWR 一次系水質環境中 SCC き裂進展速度

低合金鋼の PWR 一次系水質環境中 SCC のき裂進展速度  $da/dt$  (m/s) をき裂前縁の応力拡大係数  $K_I$  ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) をパラメータとして、前述した式3.6.1及び式3.6.2により算出する。低合金鋼の PWR 一次系水質環境中 SCC についての実験はなされているが、SCC 感受性は小さかった<sup>53)</sup>。このため保守的に応力腐食割れのき裂進展速度として、Davis-Besse で見られたホウ酸腐食速度を設定した例を表3.6.5及び図3.6.5に示す<sup>54)</sup>。PWSCC が貫通する前における通常運転時の PWR 一次系の水質環境が保たれているうちは、PWSCC き裂進展速度の方が早く低合金鋼のホウ酸腐食速度は無視しうると考えられる。

表3.6.5 低合金鋼の PWR 一次系水質環境中 SCC き裂進展速度設定例

		低合金鋼
$Q_g$	活性化エネルギー	0 kJ/mol
R	ガス定数	$8.314 \times 10^{-3}$ kJ/molK
$T_a$	き裂位置の評価温度	325 °C
$T_{a, \text{ref}}$	参照評価温度	325 °C
$c_{\text{temp}}$	き裂進展速度に及ぼす温度の影響係数	1.000 (325 °C)
$c_p$	き裂進展速度に及ぼす塑性歪の影響係数	ここでは 1.0 に設定した。 (詳細は 3.6.9 で述べる。)
$\alpha_r$	き裂進展速度係数 (対数正規分布とする)	$\ln(\alpha_r)$ の平均値 : -27.3933 $\ln(\alpha_r)$ の標準偏差 : 0.0001
$K_{\text{th}}$	応力拡大係数閾値	0 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
$K_{\text{lower}}$	応力拡大係数下限値	0 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
$K_{\text{upper}}$	応力拡大係数上限値	100 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
$\beta$	指数	0.0

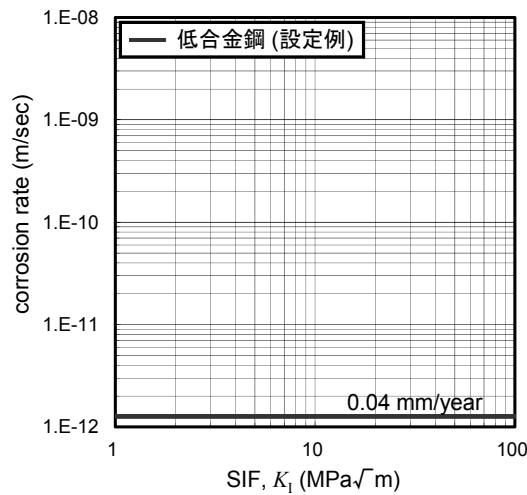


図3.6.5 低合金鋼の PWR 一次系水質環境中 SCC き裂進展速度線図例

3.6.5 Ni 基合金母材の BWR 水質環境中 SCC き裂進展速度

Ni 基合金母材の BWR 水質環境中 SCC (NiSCC) のき裂進展速度  $da/dt$  (m/s) をき裂前縁の応力拡大係数  $K_I$  (MPa $\sqrt{m}$ ) をパラメータとして、式3.6.3及び式3.6.4により算出する。NiSCC き裂進展速度は、ECP 上昇及び塑性歪増加とともに加速される。ここでは、母材に対する実測値のデータ数が少ないため、実測値が得られている範囲で後述する溶接金属のき裂進展速度における平均値  $\ln(\alpha_r)$ のみを調整して、ばらつきの大きさ等の他のパラメータは全て同じとした。各係数の設定例を表3.6.6に、これらの値を用いたき裂進展速度線図を図3.6.6に示す<sup>55), 56)</sup>。

$$\frac{da}{dt} = c_{ECP} \times c_p \times \alpha_r (K_I - K_{th})^\beta \tag{式3.6.3}$$

$K_I < K_{lower}$  のとき  $K_I = K_{lower}$ 、 $K_I > K_{upper}$  のとき  $K_I = K_{upper}$  とする。

$$c_{ECP} = a_{ECP} \times \exp(b_{ECP} \times ECP) \tag{式3.6.4}$$

$ECP < ECP_{lower}$  のとき  $ECP = ECP_{lower}$ 、 $ECP > ECP_{upper}$  のとき  $ECP = ECP_{upper}$  とする。

表3.6.6 Ni 基合金母材の BWR 水質環境中 SCC き裂進展速度設定例

		母材 (Alloy 600)
ECP	腐食電位	水質環境により変化する。
$ECP_{lower}$	腐食電位下限値	-100 mV <sub>SHE</sub>
$ECP_{upper}$	腐食電位上限値	200 mV <sub>SHE</sub>
$a_{ECP}$	$c_{ECP}$ 算出係数	$2.08 \times 10^{-16}$
$b_{ECP}$	$c_{ECP}$ 算出係数	0.0204
$c_{ECP}$	き裂進展速度に及ぼす ECP の影響係数	$3.517 \times 10^{-18}$ (-200mV <sub>SHE</sub> ), $2.705 \times 10^{-17}$ (-100mV <sub>SHE</sub> )
$c_p$	き裂進展速度に及ぼす塑性歪の影響係数	ここでは 1.0 に設定した。 (詳細は 3.6.9 で述べる。)
$\alpha_r$	き裂進展速度係数 (対数正規分布とする)	$\ln(\alpha_r)$ の平均値: -5.2726 $\ln(\alpha_r)$ の標準偏差: 0.5424
$K_{th}$	応力拡大係数閾値	0 MPa $\sqrt{m}$
$K_{lower}$	応力拡大係数下限値	0 MPa $\sqrt{m}$
$K_{upper}$	応力拡大係数上限値	56 MPa $\sqrt{m}$
$\beta$	指数	4.5

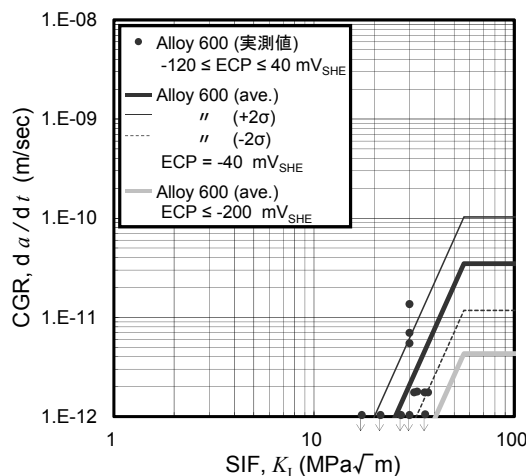


図3.6.6 Ni 基合金母材の BWR 水質環境中 SCC き裂進展速度線図例

3.6.6 Ni 基合金溶接金属の BWR 水質環境中 SCC き裂進展速度

Ni 基合金溶接金属の BWR 水質環境中 SCC (NiSCC) のき裂進展速度  $da/dt$  (m/s) をき裂前縁の応力拡大係数  $K_I$  ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) をパラメータとして、式3.6.3及び式3.6.4により算出する。NiSCC き裂進展速度は、ECP 上昇及び塑性歪増加とともに加速される。各係数の設定例を表3.6.7に、これらの値を用いたき裂進展速度線図を図3.6.7に示す<sup>56)</sup>。

表3.6.7 Ni 基合金溶接金属の BWR 水質環境中 SCC き裂進展速度設定例

		溶接金属 (Alloy 182, Alloy 132)
ECP	腐食電位	水質環境により変化する。
ECP <sub>lower</sub>	腐食電位下限値	-100 mV <sub>SHE</sub>
ECP <sub>upper</sub>	腐食電位上限値	200 mV <sub>SHE</sub>
a <sub>ECP</sub>	c <sub>ECP</sub> 算出係数	$2.08 \times 10^{-16}$
b <sub>ECP</sub>	c <sub>ECP</sub> 算出係数	0.0204
c <sub>ECP</sub>	き裂進展速度に及ぼす ECP の影響係数	$3.517 \times 10^{-18}$ (-200mV <sub>SHE</sub> ), $2.705 \times 10^{-17}$ (-100mV <sub>SHE</sub> )
c <sub>p</sub>	き裂進展速度に及ぼす塑性歪の影響係数	ここでは 1.0 に設定した。 (詳細は 3.6.9 で述べる。)
$\alpha_r$	き裂進展速度係数 (対数正規分布とする)	$\ln(\alpha_r)$ の平均値 : 0.0000 $\ln(\alpha_r)$ の標準偏差 : 0.5424
K <sub>th</sub>	応力拡大係数閾値	0 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
K <sub>lower</sub>	応力拡大係数下限値	0 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
K <sub>upper</sub>	応力拡大係数上限値	56 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
$\beta$	指数	4.5

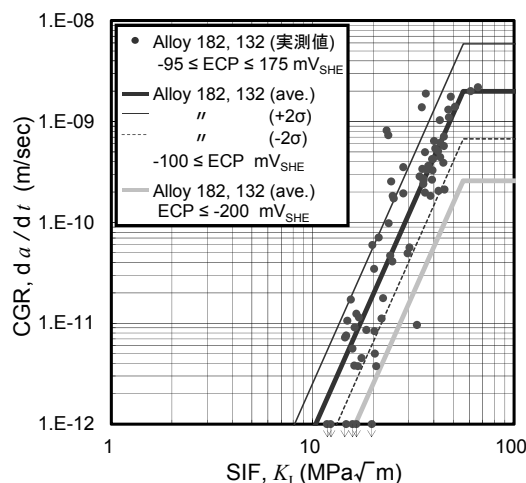


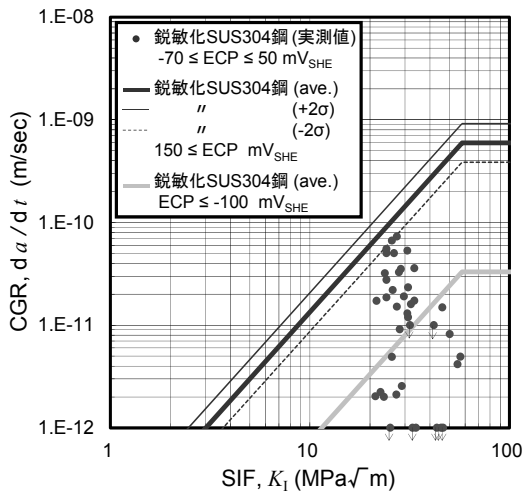
図3.6.7 Ni 基合金溶接金属の BWR 水質環境中 SCC き裂進展速度線図例

3.6.7 ステンレス鋼の BWR 水質環境中 SCC き裂進展速度

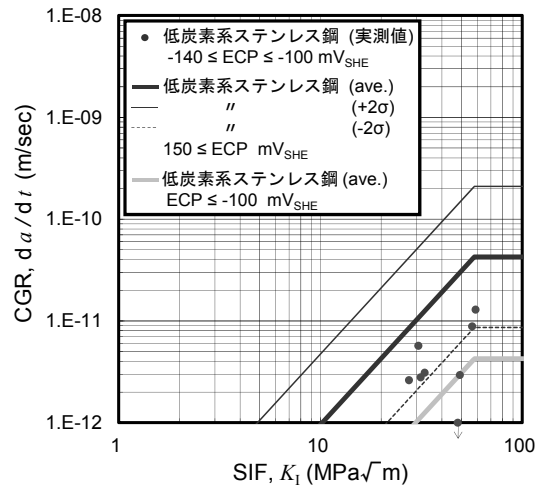
ステンレス鋼の BWR 水質環境中 SCC のき裂進展速度  $da/dt$  (m/s) をき裂前縁の応力拡大係数  $K_I$  (MPa $\sqrt{m}$ ) をパラメータとして、式3.6.3及び式3.6.4により算出する。SCC き裂進展速度は、ECP 上昇及び塑性歪増加とともに加速される。各係数の設定例を表3.6.8に、これらの値を用いたき裂進展速度線図を図3.6.8に示す<sup>8), 57)</sup>。

表3.6.8 ステンレス鋼の BWR 水質環境中 SCC き裂進展速度設定例

		鋭敏化 SUS304 鋼	低炭素系ステンレス鋼
ECP	腐食電位	水質環境により変化する。	水質環境により変化する。
ECP <sub>lower</sub>	腐食電位下限値	-100 mV <sub>SHE</sub>	-100 mV <sub>SHE</sub>
ECP <sub>upper</sub>	腐食電位上限値	150 mV <sub>SHE</sub>	150 mV <sub>SHE</sub>
a <sub>ECP</sub>	c <sub>ECP</sub> 算出係数	1.760378×10 <sup>-1</sup>	2.355684×10 <sup>-1</sup>
b <sub>ECP</sub>	c <sub>ECP</sub> 算出係数	1.157019×10 <sup>-2</sup>	9.210340×10 <sup>-3</sup>
c <sub>ECP</sub>	き裂進展速度に及ぼす ECP の影響係数	9.984735×10 <sup>-1</sup> (150 mV <sub>SHE</sub> ) 5.535016×10 <sup>-2</sup> (-100 mV <sub>SHE</sub> )	9.378146×10 <sup>-1</sup> (150 mV <sub>SHE</sub> ) 9.378147×10 <sup>-2</sup> (-100 mV <sub>SHE</sub> )
c <sub>p</sub>	き裂進展速度に及ぼす塑性歪の影響係数	ここでは 1.0 に設定した。 (詳細は 3.6.9 で述べる。)	ここでは 1.0 に設定した。 (詳細は 3.6.9 で述べる。)
α <sub>r</sub>	き裂進展速度係数 (対数正規分布とする)	ln(α <sub>r</sub> )の平均値: -30.0094 ln(α <sub>r</sub> )の標準偏差: 0.2167	ln(α <sub>r</sub> )の平均値: -32.5872 ln(α <sub>r</sub> )の標準偏差: 0.7983
K <sub>th</sub>	応力拡大係数閾値	0 MPa $\sqrt{m}$	0 MPa $\sqrt{m}$
K <sub>lower</sub>	応力拡大係数下限値	0 MPa $\sqrt{m}$	0 MPa $\sqrt{m}$
K <sub>upper</sub>	応力拡大係数上限値	57.9 MPa $\sqrt{m}$	57.9 MPa $\sqrt{m}$
β	指数	2.161	2.161



(a) 鋭敏化 SUS304 鋼



(b) 低炭素系ステンレス鋼

図3.6.8 ステンレス鋼の BWR 水質環境中 SCC き裂進展速度線図例



3.6.8 低合金鋼の BWR 水質環境中 SCC き裂進展速度

低合金鋼の BWR 水質環境中 SCC のき裂進展速度  $da/dt$  (m/s) をき裂前縁の応力拡大係数  $K_I$  (MPa $\sqrt{m}$ ) をパラメータとして、式3.6.3及び式3.6.4により算出する。なお、各係数の設定例を表3.6.9に、これらの値を用いたき裂進展速度線図を図3.6.9に示す<sup>58), 59)</sup>。

表3.6.9 低合金鋼の BWR 水質環境中 SCC き裂進展速度設定例

		低合金鋼
ECP	腐食電位	水質環境により変化する。
ECP <sub>lower</sub>	腐食電位下限値	-50 mV <sub>SHE</sub>
ECP <sub>upper</sub>	腐食電位上限値	40 mV <sub>SHE</sub>
a <sub>ECP</sub>	c <sub>ECP</sub> 算出係数	2.08×10 <sup>-16</sup>
b <sub>ECP</sub>	c <sub>ECP</sub> 算出係数	0.0204
c <sub>ECP</sub>	き裂進展速度に及ぼす ECP の影響係数	4.70×10 <sup>-16</sup> (40 mV <sub>SHE</sub> )
c <sub>p</sub>	き裂進展速度に及ぼす 塑性歪の影響係数	ここでは 1.0 に設定した。 (詳細は 3.6.9 で述べる。)
α <sub>r</sub>	き裂進展速度係数 (対数正規分布とする)	ln(α <sub>r</sub> )の平均値: -3.6447 ln(α <sub>r</sub> )の標準偏差: 0.4378
K <sub>th</sub>	応力拡大係数閾値	0 MPa $\sqrt{m}$
K <sub>lower</sub>	応力拡大係数下限値	0 MPa $\sqrt{m}$
K <sub>upper</sub>	応力拡大係数上限値	0 MPa $\sqrt{m}$
β	指数	4.0

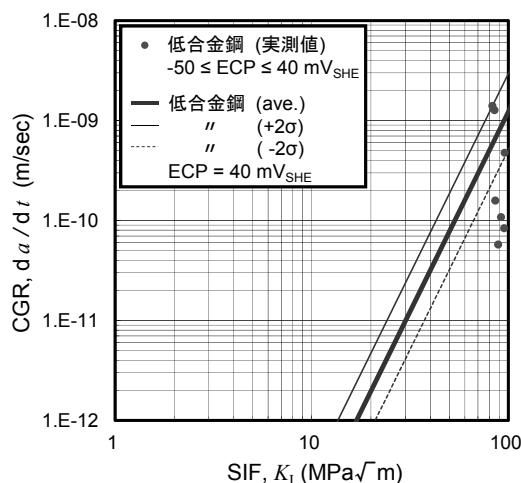
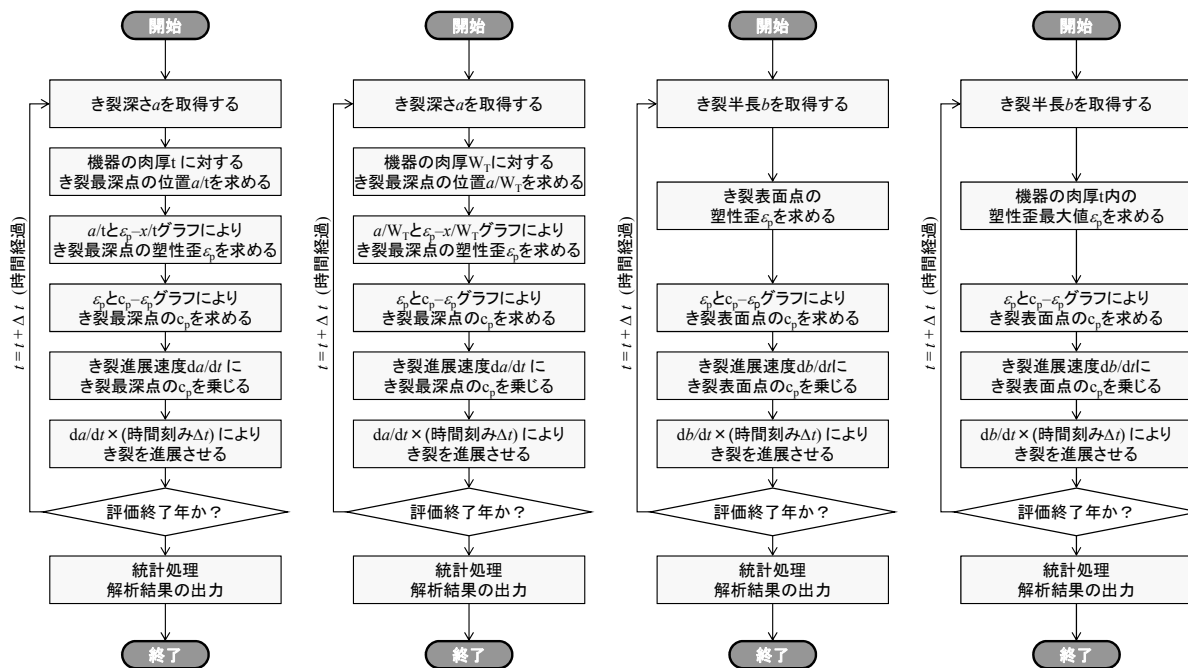


図3.6.9 低合金鋼の BWR 水質環境中 SCC き裂進展速度線図例

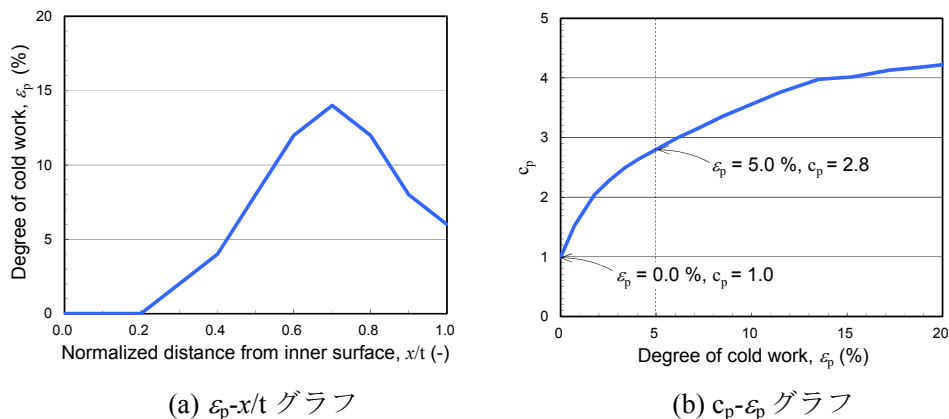
3.6.9 き裂進展速度に及ぼす塑性歪の影響評価機能

き裂進展速度は塑性歪の増加により加速される。この効果を考慮するため3.6.1から3.6.8で示したき裂進展速度に及ぼす塑性歪の影響係数  $c_p$  を設定する。き裂種類0, 1, 2, 3のき裂深さ、き裂種類5のき裂深さ、き裂種類0, 1, 2, 3, 5のき裂半長及びき裂種類4のき裂半長に対する  $c_p$  を考慮したき裂進展計算フローを、図3.6.10 (a)、(b)、(c) 及び (d) に示す。き裂深さに対してはき裂進展に伴いき裂最深点の塑性歪  $\epsilon_p$  が変化することからき裂進展毎に  $c_p$  が更新される。表面き裂のき裂長さに対してはき裂進展に係らず常にき裂表面点の塑性歪  $\epsilon_p$  により  $c_p$  を算出する。貫通き裂のき裂長さに対しては保守的に機器の肉厚  $t$  内の塑性歪最大値により  $c_p$  を求める。以上の計算のために入力する  $\epsilon_p$ - $x/t$  グラフ及び  $c_p$ - $\epsilon_p$  グラフ<sup>49)</sup>例を図3.6.11 (a) 及び (b) に示す。



(a) き裂種類 0, 1, 2, 3 のき裂深さ (b) き裂種類 5 のき裂深さ (c) き裂種類 0, 1, 2, 3, 5 のき裂半長 (d) き裂種類 4 のき裂半長

図3.6.10  $c_p$  を考慮したき裂進展計算フロー



(a)  $\epsilon_p$ - $x/t$  グラフ (b)  $c_p$ - $\epsilon_p$  グラフ

図3.6.11  $c_p$  算出のための入力データ例

### 3.7 き裂進展解析

PASCAL-NP におけるき裂種類及び応力拡大係数算出式を3.7.1に、き裂種類5におけるき裂進展速度の切替え機能を3.7.2に、き裂進展の形態が変化する場合の連続解析機能を3.7.3に示す。

#### 3.7.1 き裂種類及び応力拡大係数算出式

PWSCC 及び NiSCC の損傷事例によると、管の軸/周方向、管の内/外表面、貫通/未貫通き裂や溶接金属内き裂といったき裂形態があることが分かる。このような多様なき裂を評価するため、PASCAL-NP は影響関数法による応力拡大係数算出機能を数多く有している。PASCAL-NP におけるき裂種類と応力拡大係数算出式を表3.7.1に示す。き裂種類は次の6種類であり、き裂種類0 (周方向・内表面き裂)<sup>60), 61)</sup>、き裂種類1 (軸方向・内表面き裂)<sup>60), 62)</sup>、き裂種類2 (周方向・外表面き裂)<sup>60), 63)</sup>、き裂種類3 (軸方向・外表面き裂)<sup>60), 64)</sup>、き裂種類4 (周方向・貫通き裂)<sup>65)-67)</sup>、き裂種類5 (軸及び半径方向・溶接金属内き裂)<sup>67)</sup>、それぞれのき裂種類において応力拡大係数を算出することができる。表中における応力次数とは応力分布を多項式で近似し入力する際の次数であり、応力拡大係数算出式の選択によって自動的に決定される。また、表中の○印で示すようにき裂種類により実施可能となる破損判定も決定される。これらの破損判定の詳細は3.9にて述べる。

応力拡大係数算出には応力のほか、評価対象となる機器の幾何形状を入力する必要がある。円筒構造物にき裂がある場合 (き裂種類0から4)、図3.7.1に示すように、内半径  $R_i$  及び肉厚  $t$  を入力する。溶接金属内に軸方向き裂または半径方向き裂がある場合 (き裂種類5)、 $R_i$  及び  $t$  のほか、溶接金属  $W_K$ 、 $W_L$  及び  $W_T$  を入力する。

表3.7.1 PASCAL-NP におけるき裂種類と応力拡大係数算出式

き裂種類	き裂方向	き裂発生表面	応力拡大係数算出式	応力次数	形状	破損判定		解析対象
						漏えい	破断	
0	周	内表面	ASME <sup>60)</sup>	4次	平板 (無限幅)	○	○	・原子炉压力容器上蓋貫通部 ・ホットレグ
			Bergman <sup>61)</sup>	3次	円筒 ( $5 < R_i/t < 10$ )			
1	軸	内表面	ASME <sup>60)</sup>	4次	平板 (無限幅)	○	-	・原子炉压力容器上蓋貫通部
			Shiratori <sup>62)</sup>	3次	円筒 ( $1/9 < R_i/t < 10$ )			
2	周	外表面	ASME <sup>60)</sup>	4次	平板 (無限幅)	○	○	・原子炉压力容器上蓋貫通部
			Chapuliot <sup>63)</sup>	3次	円筒 ( $1 \leq R_i/t < \infty$ )			
3	軸	外表面	ASME <sup>60)</sup>	4次	平板 (無限幅)	○	-	・原子炉压力容器上蓋貫通部
			Fett <sup>64)</sup>	3次	円筒 ( $4 < R_i/t < 10$ )			
4	周	貫通	Sander <sup>65)</sup>	定数	円筒 (薄肉)	-	○	・原子炉压力容器上蓋貫通部 ・ホットレグ
			Zang <sup>66)</sup>	4次	円筒 ( $4 < R_i/t < 10$ )			
			API <sup>67)</sup>	1次	円筒 ( $3 < R_i/t < 10$ )			
5	軸半径	溶接金属内	API <sup>67)</sup>	4次	平板 (有限幅)	○	-	・原子炉压力容器上蓋貫通部 ・ホットレグ ・シュラウドサポート ・制御棒駆動機構ハウジング

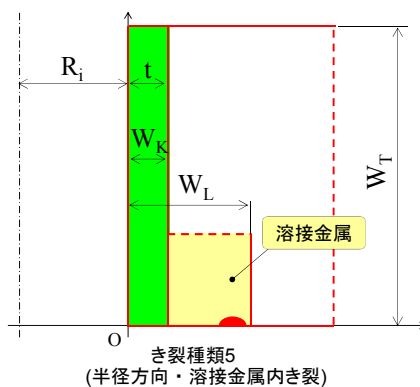
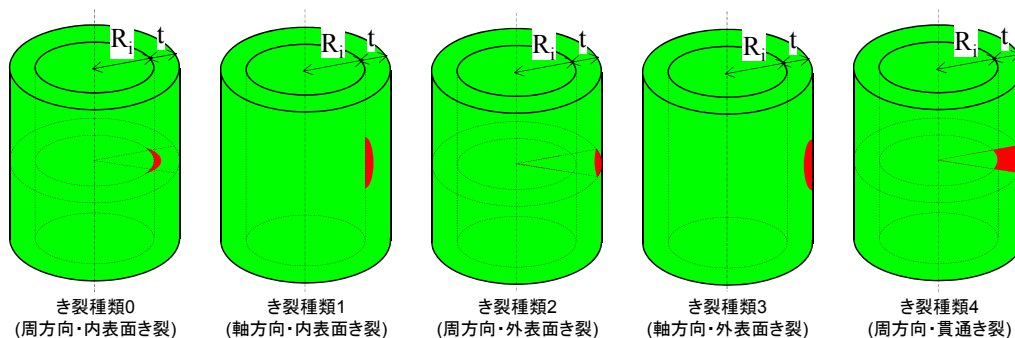


図3.7.1 幾何形状の入力

### 3.7.2 き裂種類5における有限幅平板近似手法及びき裂進展速度線図切替え機能

原子炉压力容器上蓋貫通部における J 溶接金属の半径方向き裂進展評価例を取り上げ、き裂種類5における有限幅平板近似手法及びき裂進展速度線図の切替え機能について述べる。影響関数法により応力拡大係数 (K 値) を算出するため複雑な形状を簡略化する必要がある。図3.7.2の左側に示すように貫通管内表面からき裂中心までの距離が  $d$  のとき、幅 $2d$ 、厚さ  $W_T$  の有限幅平板として近似することとした。この有限幅平板の近似によりき裂先端の K 値に及ぼす自由表面(ここでは貫通管内表面)からの距離の影響を考慮することができる。すなわち、幅 $2d$ が狭くなりき裂表面点(図3.7.2の B1点)が自由表面に近づくにつれて K 値は大きくなるため、無限幅平板で近似するよりも保守的なき裂進展評価となる。

材質に着目すると、J 溶接金属には Ni 基合金溶接金属、貫通管には Ni 基合金母材及び原子炉压力容器には低合金鋼が用いられている。このため、き裂先端がどの材料にあるかによりき裂進展速度線図を切替える必要がある。まず、状態 I に示すように、A 点、B1点及び B2点の全てが J 溶接金属内 (Ni 基合金溶接金属) にある場合、全ての点において Ni 基合金溶接金属のき裂進展速度線図を適用する。次に、状態 II に示すように、B1点が貫通管 (Ni 基合金母材) に達した場合、B1点のき裂進展速度線図を Ni 基合金溶接金属から Ni 基合金母材へ切り替える。この条件下において状態 III のようにき裂進展すると、B1点と B2点のき裂進展速度が異なるため、初期のき裂中心位置が移動する。き裂種類5では、き裂中心の移動に伴う有限幅平板の幅の変化 ( $d'$ ) を考慮して応力拡大係数の算出を行う。B2点が低合金鋼に達した場合、き裂進展速度を Ni 基合金溶接金属から低合金鋼へ切替える。最終的に A 点が漏えい判定となるき裂深さ ( $a_L$ ) に達した場合、漏えいと判定する。なお、B1点が管内面に達する場合、K 値の評価は困難となるため解析はエラーを返し強制終了することとしている。

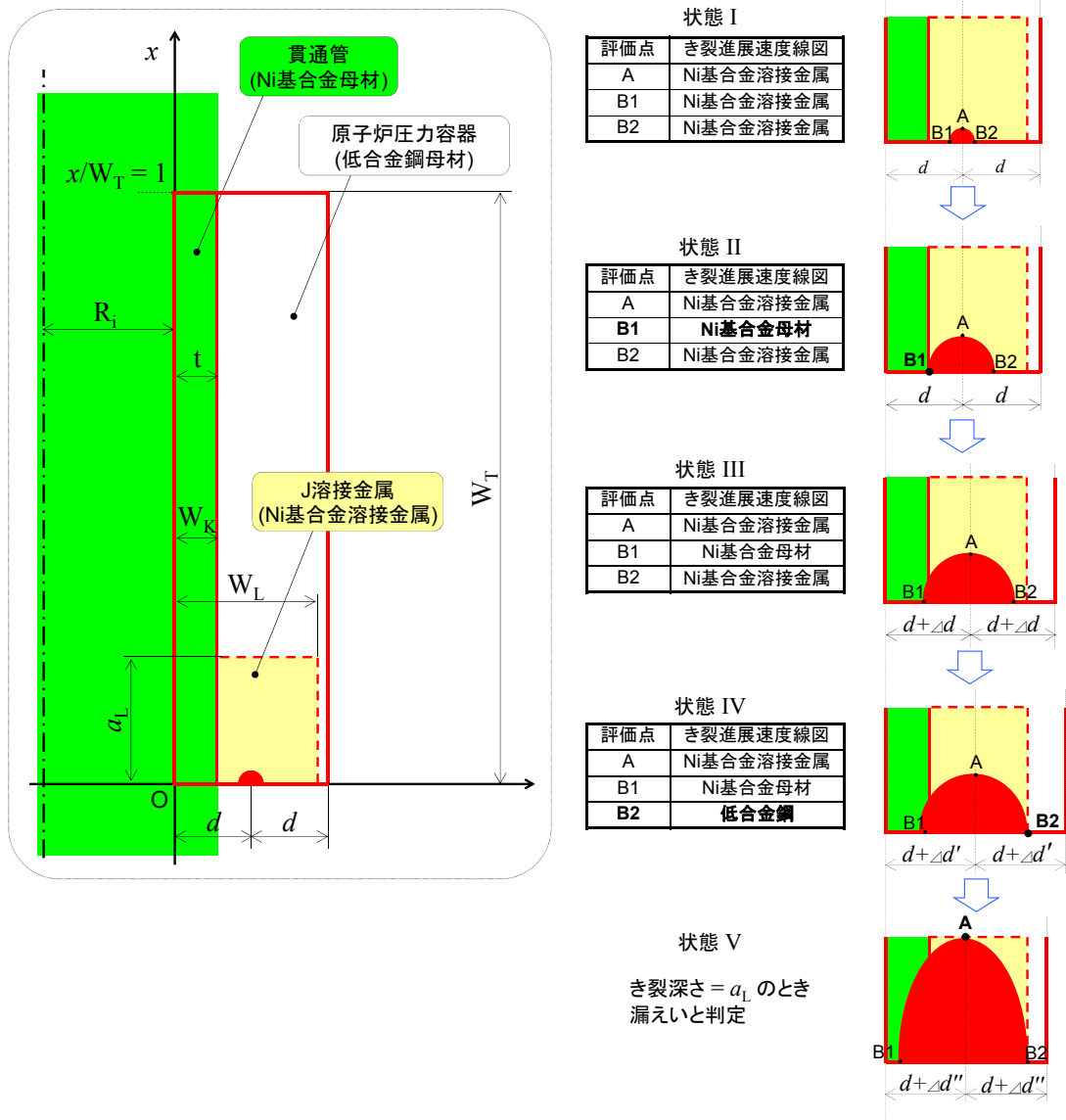


図3.7.2 き裂種類5におけるき裂進展速度線図切替え機能

### 3.7.3 き裂種類の変化を考慮したき裂進展解析機能

PASCAL-NP ではき裂進展に伴うき裂種類の変化を考慮してき裂進展解析を実施することができる。き裂進展解析を Step 1 No. 1、Step 1 No. 2、Step 2 No. 1及び Step 2 No. 2に分け、き裂種類を表3.7.2のように設定する。き裂の方向が変化するとき Step を増加、周方向・内外表面き裂が周方向貫通き裂に変化するとき No.を増加させるものとする。

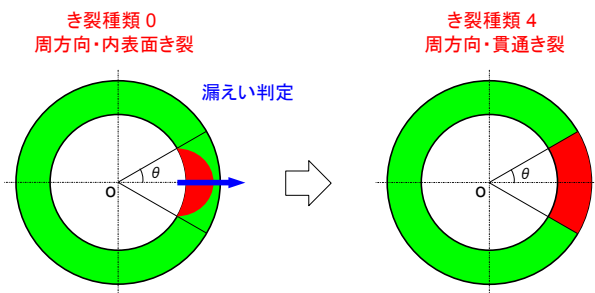
No.が増加するとき図3.7.3に示すように、周方向・内外表面き裂の漏えい時においてき裂長さの等しい周方向・貫通き裂へき裂の置換えがなされる。このように周方向・貫通き裂に切替えた場合、Step 1 No. 2にて破断までの解析を実施するため Step 2へ移行しない。一例として Step 1 No. 1と Step 1 No. 2にき裂種類を指定した場合におけるき裂種類の変化を考慮した解析事例模式図(ホットレグ)を図3.7.4に示す。

Step が増加するとき、半径/軸方向き裂(き裂種類1、き裂種類3、き裂種類5)の漏えい時において、周方向き裂(き裂種類0、き裂種類2、き裂種類4)への置換えがなされる。このとき、Step 1の初期き裂発生時間算出のほか、Step 2の初期き裂発生時間の算出をすることもできる。Step 1 No. 1、Step 2 No. 1及び Step 2 No. 2にき裂種類を指定した場合におけるき裂種類の変化を考慮した解析事例模式図(原子炉圧力容器上蓋貫通部)を図3.7.5に示す。

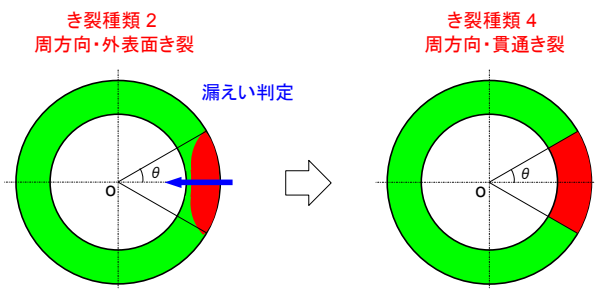
なお、確率変数のサンプリングは解析開始毎に一回なされ、その解析が終了するまで同じ確率変数が用いられる。以上の事項をまとめ、き裂種類の変化を考慮した解析フローを図3.7.6に示す。

表3.7.2 PASCAL-NP において設定できるき裂種類の組合せ

		Step 1		Step 2	
		No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
Step 1 のみ	周方向・内表面き裂	0	-	-	-
	軸方向・内表面き裂	1	-	-	-
	周方向・外表面き裂	2	-	-	-
	軸方向・外表面き裂	3	-	-	-
	周方向・貫通き裂	4	-	-	-
	半径/軸方向・溶接金属内き裂	5	-	-	-
	周方向・内外表面き裂から 周方向・貫通き裂へ変化	0	4	-	-
Step 1 及び Step 2	軸方向/半径方向から 周方向・内外表面き裂あるいは 周方向・貫通き裂へ変化	1	-	4	-
		1	-	0	4
		1	-	2	4
		3	-	4	-
		3	-	0	4
		3	-	2	4
		5	-	4	-
		5	-	0	4
		5	-	2	4



(a) き裂種類 0 からき裂種類 4



(b) き裂種類 2 からき裂種類 4

図3.7.3 周方向・内外表面き裂から周方向・貫通き裂への置換

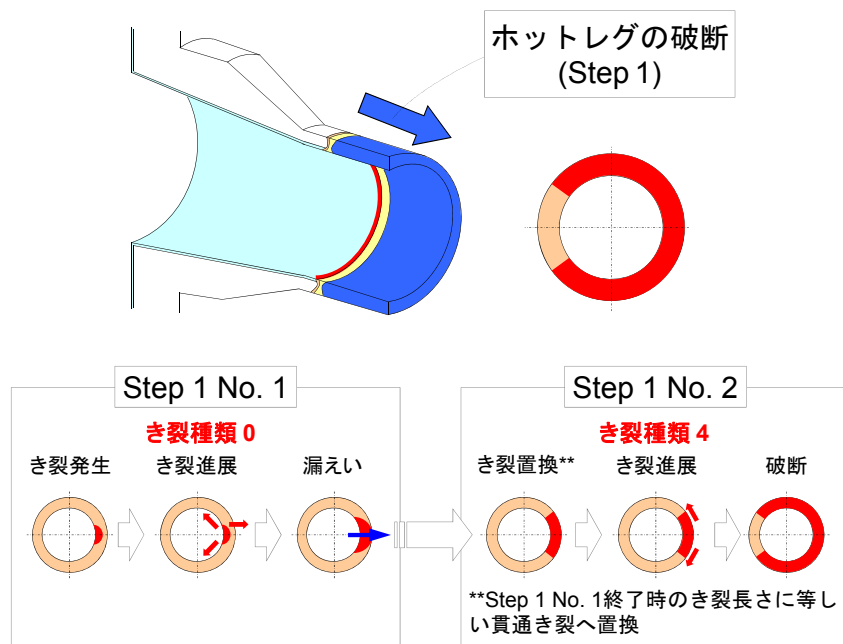


図3.7.4 き裂種類の変化を考慮した解析事例模式図 (ホットレグ)



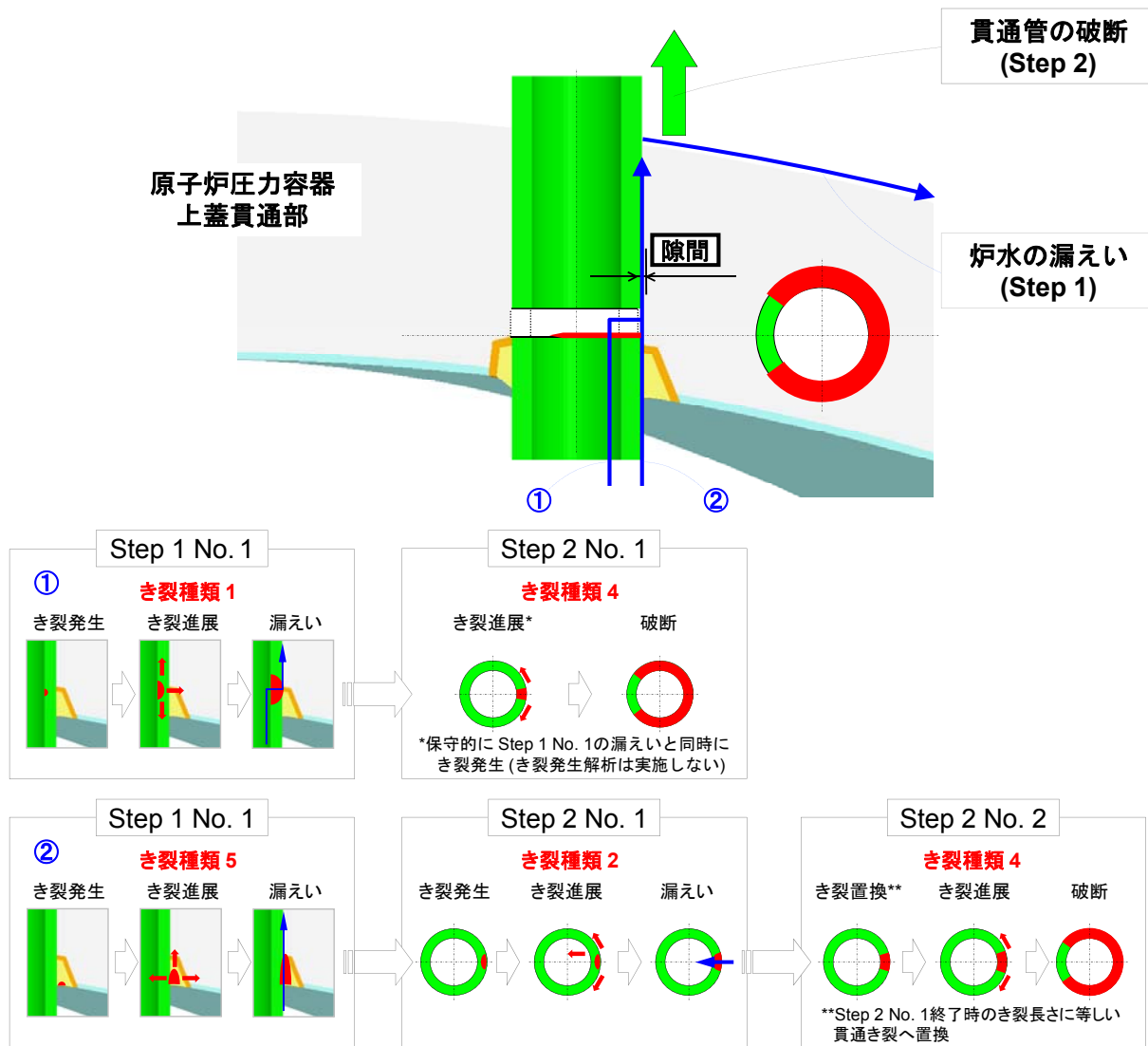


図3.7.5 き裂種類の変化を考慮した解析事例模式図 (原子炉圧力容器上蓋貫通部)

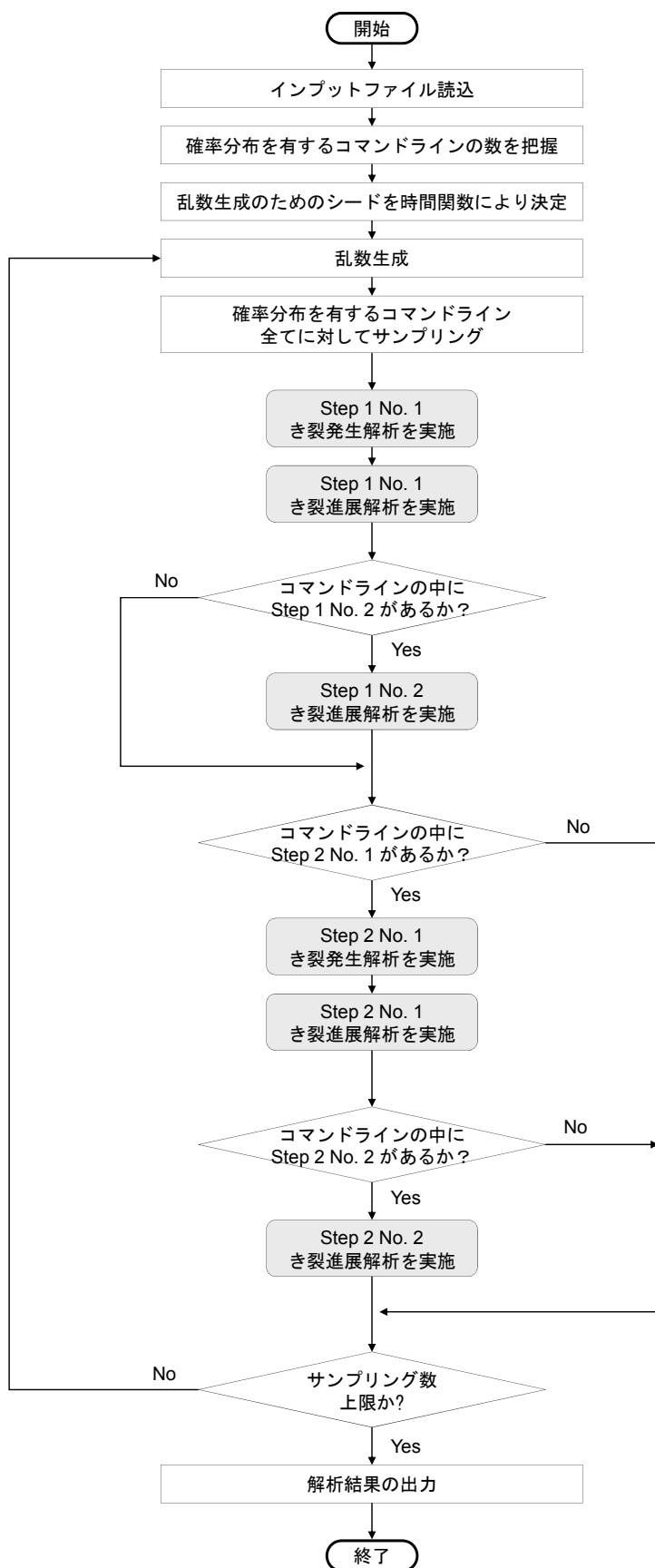


図3.7.6 き裂種類の変化を考慮した解析フロー

### 3.8 残留応力分布のばらつき

き裂発生・進展に及ぼす残留応力のばらつきの影響は非常に大きい<sup>68)</sup>。PASCAL-NP には残留応力のばらつき発生モデルとして、「3.8.2板厚内均一増加/減少モデル」及び「3.8.3板厚内分割領域の局所的増加/減少モデル」が導入されている。ユーザーは、「3.8.1板厚内領域分割数の読込及び残留応力のばらつき発生モデルの選択」に従いいずれかのモデルを選択する。

#### 3.8.1 板厚内領域分割数の読込及び残留応力のばらつき発生モデルの選択

板厚内領域分割数による残留応力のばらつき発生モデルの選択フローを図3.8.1に示す。板厚内領域分割数を、\*Dev\_num\_of\_residual\_stress\_distribution\_for\_stepX\_noX の第1項に入力する。この板厚内領域分割数は、評価対象機器の板厚に対する分割数であるため、1以上の整数を入力する。ここで、板厚内領域分割数に1を入力すると、板厚内均一増加/減少モデルが適用され、2以上を入力すると、板厚分割領域の局所的増加/減少モデルが適用される。また、1以上の整数ではない場合、エラーを返し解析を実行しないものとする。

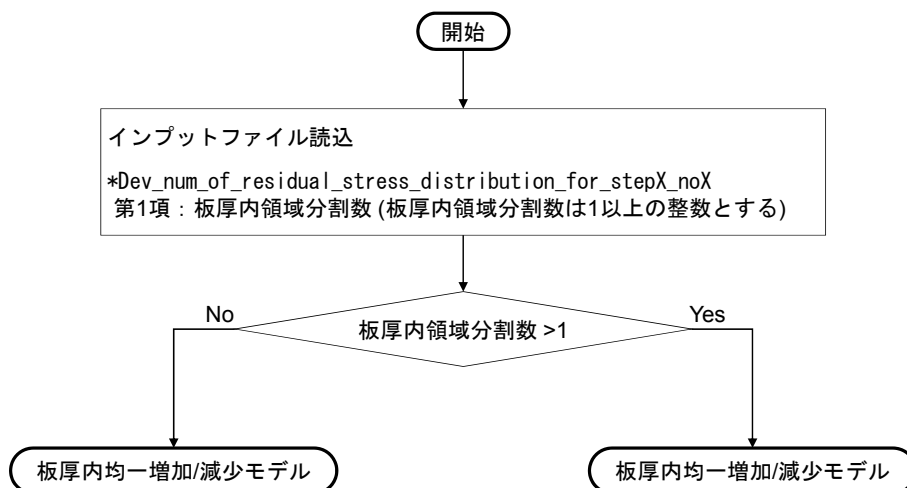


図3.8.1 板厚内領域分割数による残留応力のばらつき発生モデルの選択フロー

### 3.8.2 板厚内均一増加/減少モデル

板厚内均一増加/減少モデルは、板厚内に均一な残留応力のばらつきを発生させるモデルである。計算フローを図3.8.2に示す。まず、\*Residual\_stress\_distribution\_for\_stepX\_noX を用いてばらつきを考慮しない元の残留応力分布係数 ( $\sigma_{r,0}, \sigma_{r,1}, \sigma_{r,2}, \sigma_{r,3}, \dots$ ) を入力する。

次に、\*Scatter\_of\_residual\_stress\_distribution\_for\_stepX\_noX を用いて、残留応力のばらつき  $\sigma_{r,scatter}$  に使用する確率分布を入力する。確率分布の入力方法は、「3.11確率分布設定方法」に従う。

この板厚内均一増加/減少モデルは、板厚内の残留応力分布を均一に増加/減少させるモデルであるため、入力した残留応力分布係数 ( $\sigma_{r,0}, \sigma_{r,1}, \sigma_{r,2}, \sigma_{r,3}, \dots$ ) のうち、0次係数の  $\sigma_{r,0}$  のみに  $\sigma_{r,scatter}$  を加え  $\sigma_{r,0} = \sigma_{r,0} + \sigma_{r,scatter}$  として更新され、1次係数以降 ( $\sigma_{r,1}, \sigma_{r,2}, \sigma_{r,3}, \dots$ ) は変化させずに残留応力分布が作成される。板厚内均一増加/減少モデルによる計算例を図3.8.3に示す。この計算例の条件は、残留応力分布係数 ( $\sigma_{r,0}, \sigma_{r,1}, \sigma_{r,2}, \sigma_{r,3}, \sigma_{r,4}$ ) に (300, -200, -240, 180, 260 MPa)、残留応力のばらつき  $\sigma_{r,scatter}$  に正規分布 (平均値：0 MPa、標準偏差：20 MPa) を設定したものである。

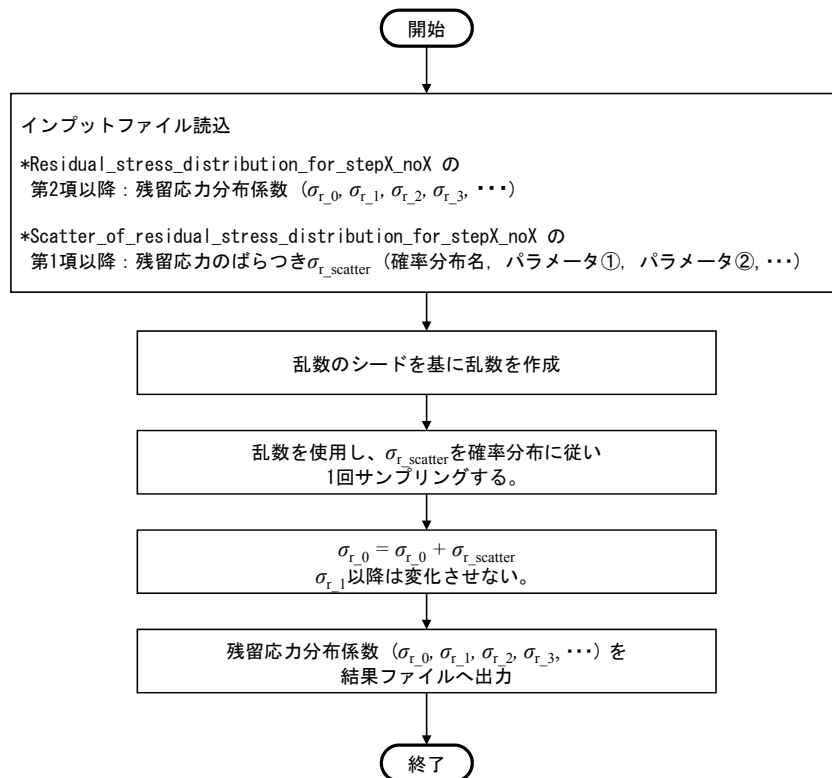
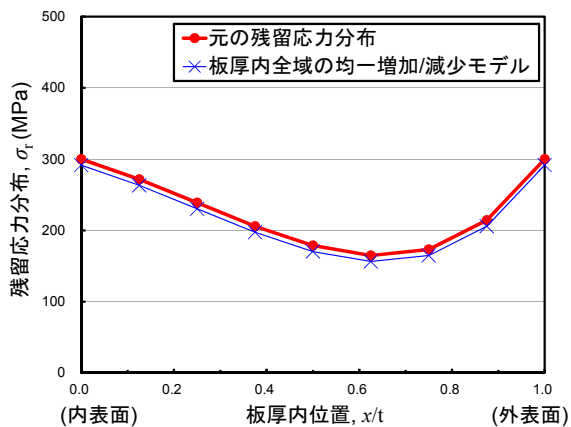
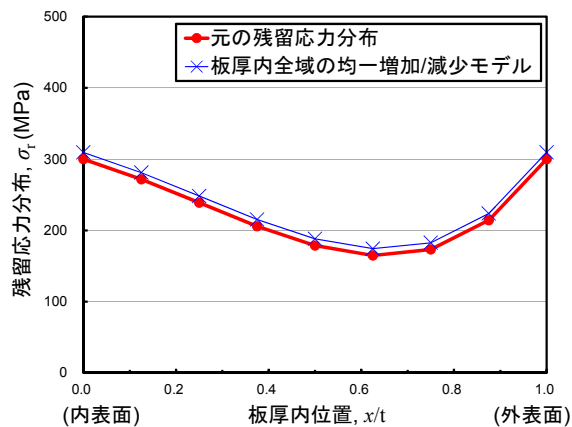


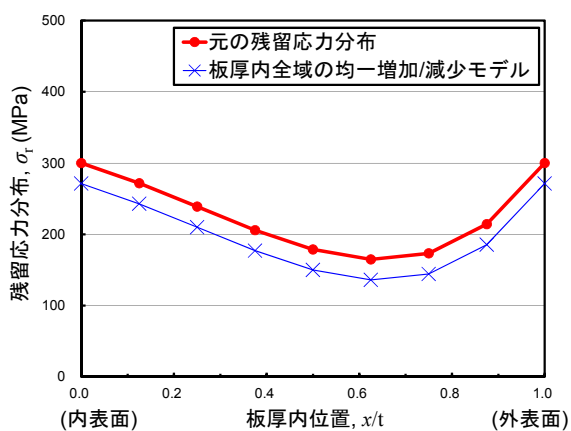
図3.8.2 板厚内均一増加/減少モデルの計算フロー



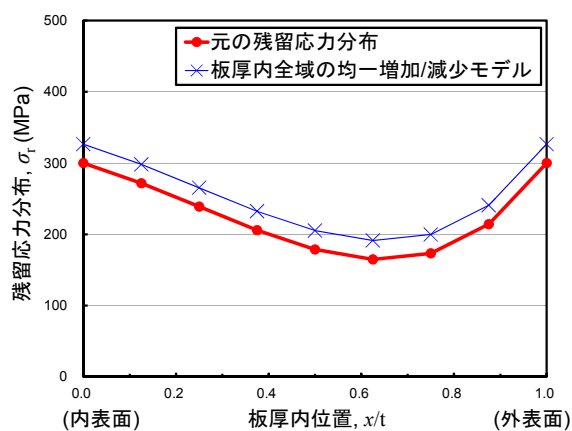
(a) サンプルング例①



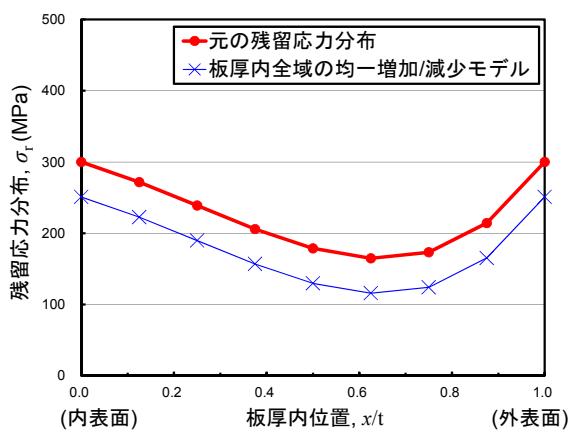
(b) サンプルング例②



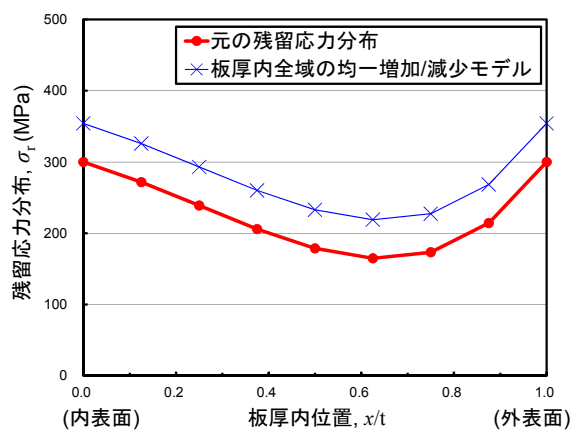
(c) サンプルング例③



(d) サンプルング例④



(e) サンプルング例⑤



(f) サンプルング例⑥

図3.8.3 板厚内均一増加/減少モデルによる計算例

### 3.8.3 板厚内分割領域の局所的増加/減少モデル

板厚内分割領域の局所的増加/減少モデルは、板厚を等分割し各領域内で残留応力のばらつきを発生させるモデルである。算出フロー及び計算過程を図3.8.4及び図3.8.5に示す。

図3.8.4のインプットファイル読込に示すように\*Residual\_stress\_distribution\_for\_stepX\_noX における、第1項の残留応力分布次数  $n$ 、第2項以降の残留応力分布係数 ( $\sigma_{r,0}$ ,  $\sigma_{r,1}$ ,  $\sigma_{r,2}$ ,  $\sigma_{r,3}$ , ...)、\*Dev\_num\_of\_residual\_stress\_distribution\_for\_stepX\_noX における第1項の板厚内領域分割数 dev\_num、\*Scatter\_of\_residual\_stress\_distribution\_for\_stepX\_noX における第1項以降にある残留応力のばらつき  $\sigma_{r\_scatter}$  に使用する確率分布がこのモデルに使用される。確率分布の入力方法は、「3.11確率分布設定方法」に従う。

分割領域の順番を内表面から  $i = 1 \sim \text{dev\_num}$  とし、各分割領域の中央点の座標  $x/(i)$  を算出する。図3.8.5 (a) は、dev\_num = 8とし、この処理を実施したものである。1番目の分割領域にて処理を実施するため、 $i = 1$  が設定される。1番目の分割領域中央点における残留応力  $\sigma_{d,1}$  を残留応力分布係数及び1番目の分割領域中央点における座標を用いて算出する。残留応力のばらつきを発生させるため、乱数のシードを基に乱数を生成し、1番目の分割領域中央点における残留応力のばらつき  $\sigma_{d,1\_scatter}$  をサンプリングし、 $\sigma_{d,1} = \sigma_{d,1} + \sigma_{d,1\_scatter}$  とし  $\sigma_{d,1}$  を更新する。以上の処理を  $i = 8$  まで続けた例を、図3.8.5 (b) 及び (c) に示す。なお、残留応力のばらつき  $\sigma_{d,i\_scatter}$  は正規分布 (平均値=0 MPa, 標準偏差=20 MPa) とした。最後に、 $\sigma_{d,1}$ ,  $\sigma_{d,2}$ , ...,  $\sigma_{d,8}$  を、元の残留応力分布の次数  $n$  でフィッティングし、残留応力分布係数 ( $\sigma_{r,0}$ ,  $\sigma_{r,1}$ ,  $\sigma_{r,2}$ ,  $\sigma_{r,3}$ , ...) を更新する。以上の処理を施した残留応力分布及び元の残留応力分布との比較を、図3.8.5の (d) 及び (e) に示す。板厚内分割領域の局所的増加/減少モデルによる計算例を、図3.8.6に示す。試計算条件は、残留応力分布の次数  $n$  に4、残留応力分布係数 ( $\sigma_{r,0}$ ,  $\sigma_{r,1}$ ,  $\sigma_{r,2}$ ,  $\sigma_{r,3}$ ,  $\sigma_{r,4}$ ) に (300, -200, -240, 180, 260 MPa)、板厚内領域分割数 dev\_num に8、残留応力のばらつき  $\sigma_{r\_scatter}$  に正規分布 (平均値0 MPa, 標準偏差20 MPa) を設定したものである。

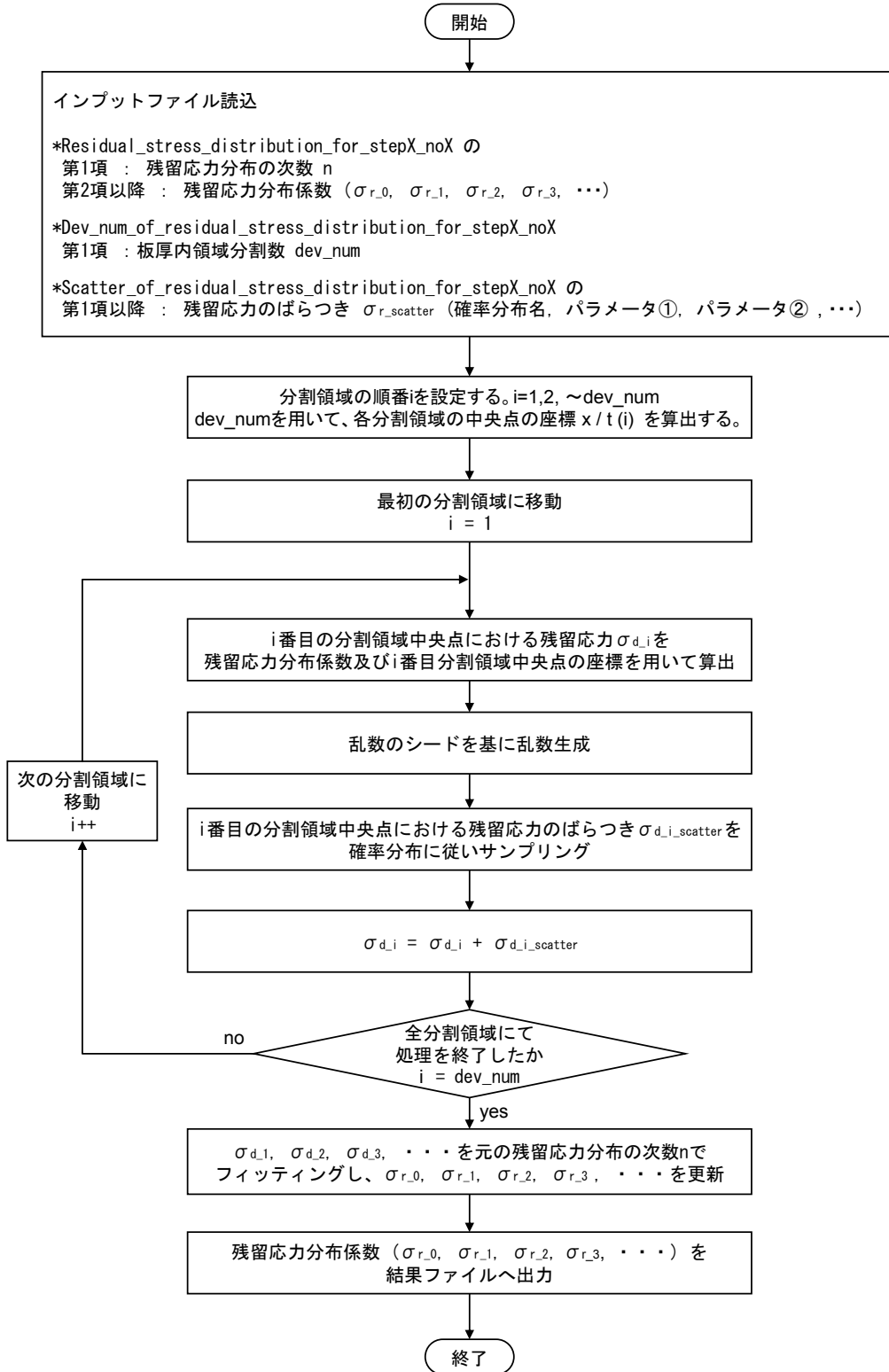
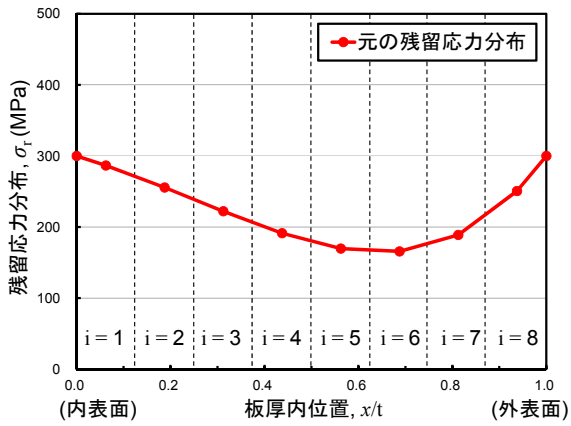
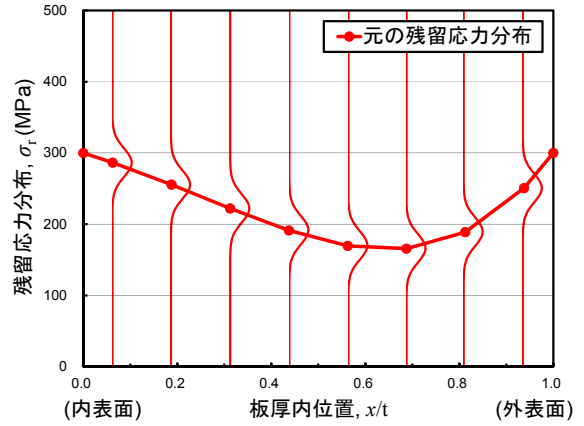


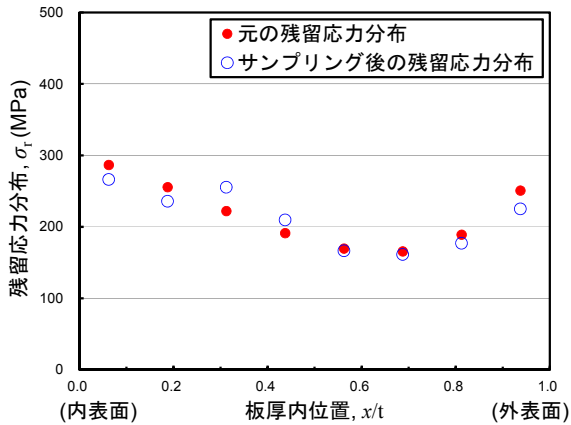
図3.8.4 板厚内分割領域の局所的増加/減少モデルの計算フロー



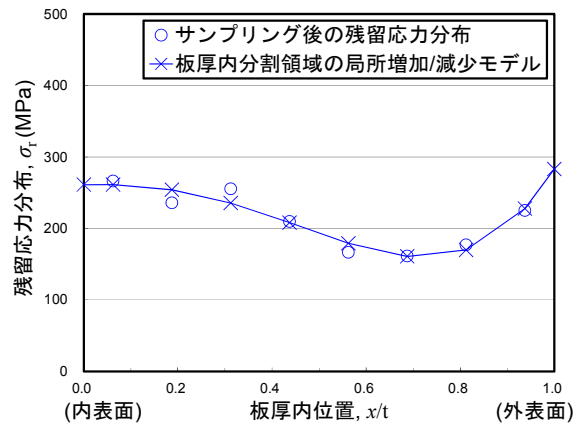
(a) 各板厚内分割領域の中央点における  
残留応力の算出 (dev\_num=8)



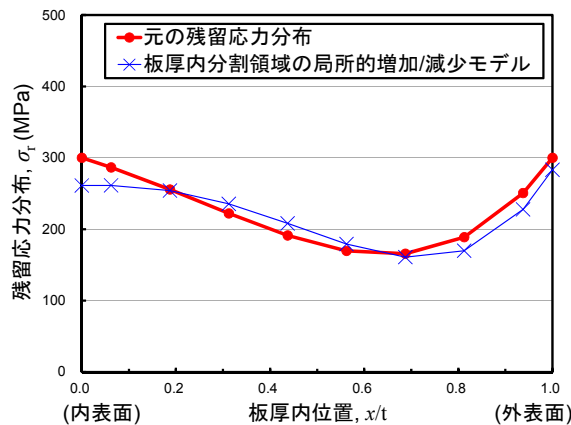
(b) 残留応力のばらつきとして確率分布を設定  
(確率分布：正規分布,  
平均値=0 MPa, 標準偏差=20 MPa)



(c) 残留応力のサンプリング



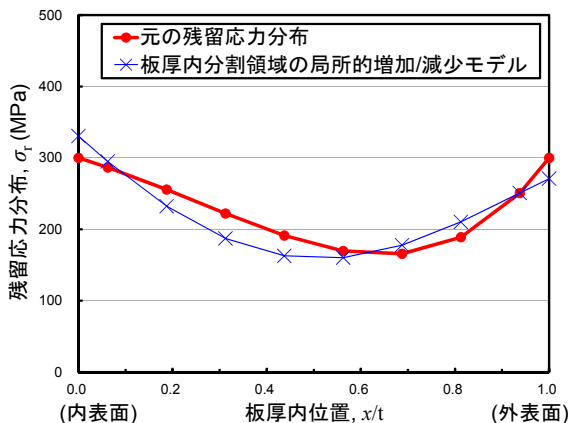
(d) サンプリング後の残留応力分布を  
元の残留応力分布の次数で再フィット



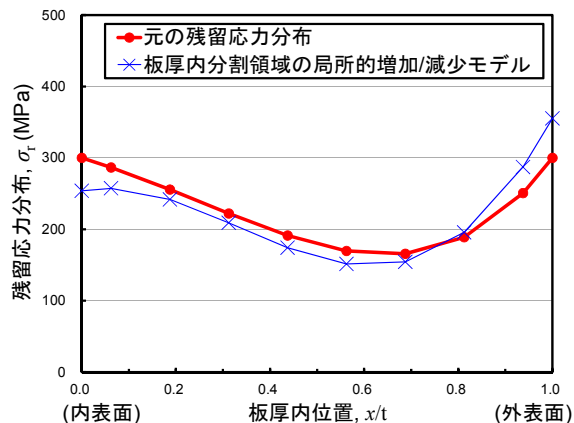
(e) 元の残留応力分布と板厚内分割領域の局所的増加/減少モデルとの比較

図3.8.5 板厚内分割領域の局所的増加/減少モデルの計算過程

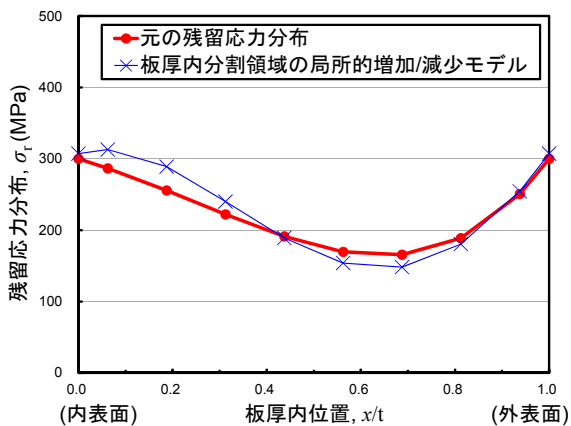




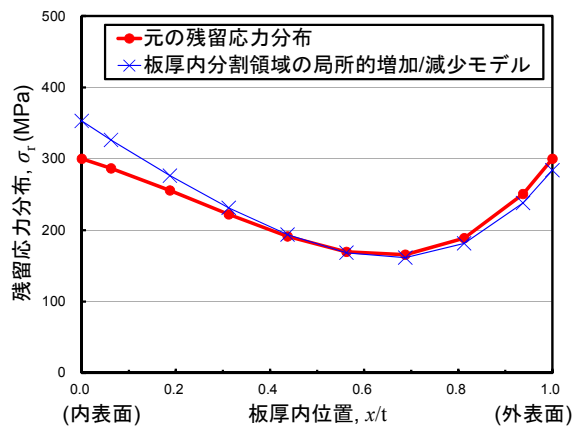
(a) サンプル例①



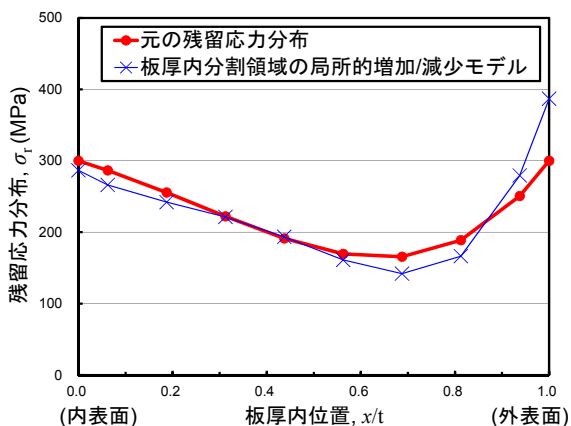
(b) サンプル例②



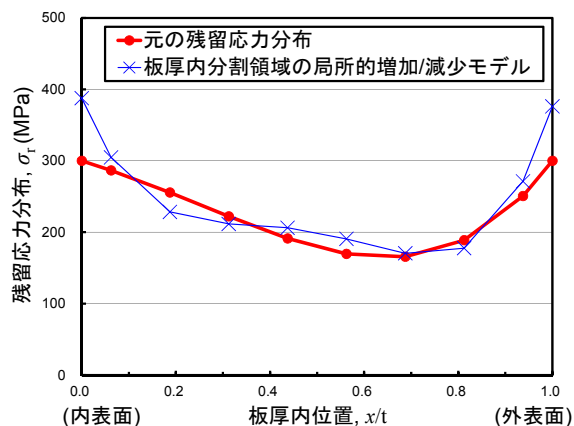
(c) サンプル例③



(d) サンプル例④



(e) サンプル例⑤



(f) サンプル例⑥

図3.8.6 板厚内分割領域の局所的増加/減少モデルによる計算例

### 3.9 破損判定

き裂進展の結果として生じる「破損」とは、き裂貫通による冷却水の「漏えい」またはリガメント減少による機器の「破断」の2種類のみ分類されている。き裂種類と破損判定の実施項目を表3.9.1に示す。漏えい判定は、き裂種類4を除くき裂種類において実施され、き裂種類4では貫通き裂のため解析開始時に既に漏えいと判断されき裂進展毎の漏えい判定は実施しない。破断判定は、周方向き裂のき裂種類0, 2, 4において実施され、軸方向または半径方向き裂のき裂種類1, 3, 5ではき裂が進展し続けても破断に至ることはないとして破断判定は実施しない。漏えい及び破断判定方法の詳細を3.9.1及び3.9.2に述べる。

表3.9.1 き裂種類と破損判定実施項目

き裂種類		漏えい判定	破断判定
0	周方向・内表面き裂	○	○
1	軸方向・内表面き裂	○	—
2	周方向・外表面き裂	○	○
3	軸方向・外表面き裂	○	—
4	周方向・貫通き裂	—	○
5	軸/半径方向・溶接金属内き裂	○	—

#### 3.9.1 漏えい判定

き裂種類と漏えい判定方法を表3.9.2に示す。き裂種類が0, 1, 2, 3の場合、配管肉厚  $t$  に対する漏えいとき裂深さ比  $a_L/t$  を用いて漏えい判定を実施する。き裂種類が5の場合、き裂深さ方向肉厚  $W_T$  に対する漏えいとき裂深さ比  $a_L/W_T$  を用いて漏えい判定を実施する。インプットファイルにて2つの判定方法が入力された場合、表3.9.2に従い漏えい判定方法を自動選択する。漏えい判定に用いる  $a_L, t$  及び  $W_T$  の幾何形状は、図3.7.1に示したとおりである。

表3.9.2 き裂種類と漏えい判定方法

き裂種類		$a_L/t$ を基準とした漏えい判定	$a_L/W_T$ を基準とした漏えい判定
0	周方向・内表面き裂	○	—
1	軸方向・内表面き裂	○	—
2	周方向・外表面き裂	○	—
3	軸方向・外表面き裂	○	—
5	軸/半径方向・溶接金属内き裂	—	○

3.9.2 破断判定

き裂種類と破断判定方法を表3.9.3に示す。表中に示すとおり極限荷重評価法<sup>69)</sup>による破断判定は全ての周方向き裂 (き裂種類0, 2, 4) に対して、破断時のき裂半角  $\theta_B$  の設定による破断判定方法は周方向・貫通き裂 (き裂種類4) に対して用いることができる。き裂種類4において、極限荷重評価法と破断とき裂半角の設定の2つの破断判定方法が同時に用いられた場合、どちらか一方の条件を満足した時点で破断と判定する。破断判定に用いるき裂寸法や幾何形状の模式図を図3.9.1に示す。 $a$  はき裂深さ、 $\theta$  はき裂半角、 $t$  は管の肉厚、 $R_m$  は管の平均半径、 $\beta$  は中立軸の位置を示す角度である。極限荷重評価法における評価式を式3.9.1から式3.9.3に、破断とき裂半角の設定における評価式を式3.9.4に示す。ここで、 $P_b'$ は塑性崩壊時の曲げ応力、 $P_m$  は1次一般膜応力、 $P_b$ は一次曲げ応力、 $P_e$ は熱膨張応力、 $\sigma_f$ は材料の流動応力である。

表3.9.3 き裂種類と破断判定方法

き裂種類		極限荷重評価法	破断とき裂半角の設定
0	周方向・内表面き裂	○	—
2	周方向・外表面き裂	○	—
4	周方向・貫通き裂	○	○

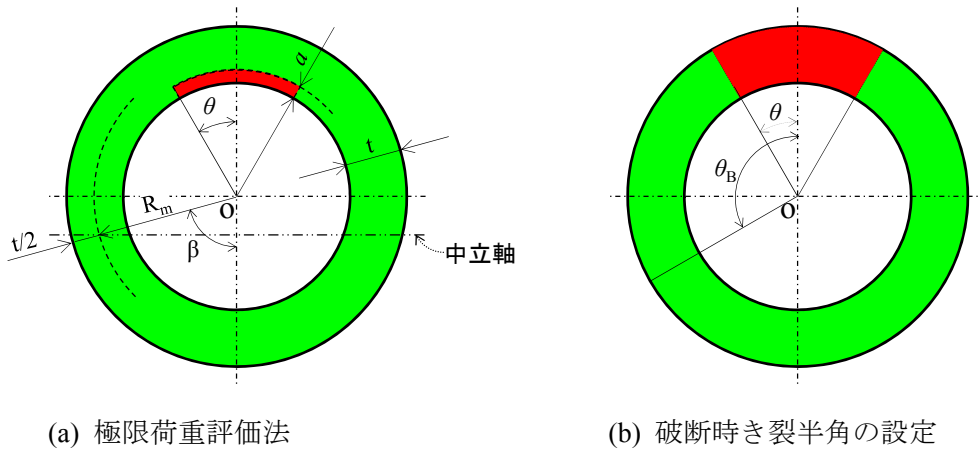


図3.9.1 破断判定方法におけるき裂寸法や幾何形状

$$P_b' \leq P_b + P_e \tag{式3.9.1}$$

$$P_b' = \frac{2\sigma_f}{\pi} \left( 2 \sin \beta - \frac{a}{t} \sin \theta \right) \tag{式3.9.2}$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left( \pi - \frac{a}{t} \theta - \pi \frac{P_m}{\sigma_f} \right) \tag{式3.9.3}$$

$$\theta \geq \theta_B \tag{式3.9.4}$$

### 3.10 結果出力

PASCAL-NP を実行するとインプットファイル読込の後に解析が実施され、解析条件をまとめたコンディションファイル及び解析結果をまとめたアウトプットファイルが表3.10.1に示すように作成される。コンディションファイルは常に同じ形式で出力されるが、アウトプットファイルは解析種別 (DFM または PFM) やき裂種類により異なる形式で出力される。コンディションファイル及びアウトプットファイル名の決定方法は表3.10.2に示すとおりである。また、アウトプットファイルにおける出力項目は表3.10.3に示すとおりであり、き裂種類により出力項目が自動的に決定される。コンディションファイルについて3.10.1に、決定論的破壊力学解析におけるアウトプットファイルについて3.10.2に、確率論的破壊力学解析におけるアウトプットファイルについて3.10.3に述べる。

表3.10.1 解析種別によるコンディションファイル及びアウトプットファイル

解析種別	コンディションファイル	アウトプットファイル
DFM	3.10.1に従う。 解析条件のまとめ	3.10.2に従う。 出力項目の時刻歴
PFM		3.10.3に従う。 出力項目のヒストグラム及び破損確率

‘出力項目’は表 3.10.3に従う。

表3.10.2 コンディションファイル及びアウトプットファイル名の決定方法

	ファイル名
コンディションファイル	File_name_解析種別_analysis_condition.dat
アウトプットファイル	(DFM) File_name_DFM_Step数.csv (PFM) File_name_PFM_Step数_出力項目.csv

‘File\_name’はインプットファイル内で入力する。

表3.10.3 アウトプットファイルにおける出力項目

き裂種類	出力項目												
	き裂寸法			応力拡大係数			き裂進展速度					き裂位置	
	深さ	半長	半角	深さ	半長	半角	深さ	半長	長さ	長さ	半角	き裂中心座標	
	dep	len	theta	dep_K	len_K	theta_K	dep_VELO	len_VELO	len_b1_VELO	len_b2_VELO	theta_VELO		
0	周方向 内表面き裂	○	○	○	○	○	-	○	○	-	-	○	-
1	軸方向 内表面き裂	○	○	-	○	○	-	○	○	-	-		-
2	周方向 外表面き裂	○	○	○	○	○	-	○	○	-	-	○	-
3	軸方向 外表面き裂	○	○	-	○	○	-	○	○	-	-		-
4	周方向 貫通き裂	-	○	○	-	-	○	-	-	-	-	○	-
5	半径/軸方向 溶接金属内き裂	○	○	-	○	○	-	○	-	○	○	-	○

### 3.10.1 コンディションファイル

インプットファイルにより入力が入力が正しくなされているかを確認するため、PASCAL-NP はコンディションファイルを自動的に1つ作成し解析条件をまとめて出力する。コンディションファイルの出力例を図3.10.1に示す。

-----	
-- ANALYSIS	
-----	
Method of analysis	PFM
Total sampling number	1000000
Time span of analysis (min, max, step)	0.000, 40.000, 0.100
Type of SCC	PWSCC
-----	
-- COMPONENT	
-----	
Component	VHP (VHP_Case1_PFM)
Inner radius (mm)	34.920
Pipe thickness (mm)	15.880
WT (mm)	no_used
WK (mm)	no_used
WL (mm)	no_used
-----	
-- MATERIAL for Step1	
-----	
Material	base_metal
Elastic (MPa)	198600.000
Yield stress (Probability distribution)	
Probably distribution	Normal
Mean value	316.700
Standard deviatuon	43.000
Lower limit	187.700
Upper limit	445.700
Tensile strength (Probability distribution)	
Probably distribution	Normal
Mean value	690.300
Standard deviatuon	61.000
Lower limit	507.300
Upper limit	873.300
-----	
-- MATERIAL for Step2	
-----	
Material	base_metal
Elastic (MPa)	198600.000
Yield stress (Probability distribution)	
Probably distribution	Normal
Mean value	316.700
Standard deviatuon	43.000
Lower limit	187.700
Upper limit	445.700
Tensile strength (Probability distribution)	
Probably distribution	Normal
Mean value	690.300
Standard deviatuon	61.000
Lower limit	507.300
Upper limit	873.300
-----	
-- CRACK INITIATION for Step1	
-----	
Standard time ti0 (hr)	10000.000
Scatter $\alpha_i$ (Probability distribution)	

図3.10.1 コンディションファイル例

Probably distribution	Weibull
Shape	1.285
Scale	1.873
Shift	0.924
Temperature parameters	
Temperature (C)	318.000
Threshold (C)	250.000
Coefficient	9.49E+15
Energy (kJ/mol)	182.963
Gas constant (kJ/(mol·K))	0.00831447
Index	0.64683244
Stress parameters	
Depth of curing (μm)	100.000
Sigma s (MPa)	1000.000
Threshold (MPa)	250.000
Coefficient	2.44E-11
Power	4
Index (calculated by DFM)	0.40167669
Surface machining	- , 0.000, 50.000, 100.000, 150.000, 200.000 0.000, 0.000, 5.000, 20.000, 30.000, 38.000 25.000, 25.000, 35.000, 46.000, 59.000, 73.000 50.000, 50.000, 63.000, 75.000, 92.000, 112.000 75.000, 75.000, 90.000, 105.000, 127.000, 159.000 100.000, 100.000, 119.000, 136.000, 164.000, 236.000 125.000, 125.000, 144.000, 174.000, 206.000, 347.000 150.000, 150.000, 174.000, 210.000, 265.000, 446.000 175.000, 175.000, 206.000, 248.000, 341.000, 526.000 200.000, 200.000, 236.000, 284.000, 421.000, 594.000 225.000, 225.000, 268.000, 331.000, 502.000, 654.000 250.000, 250.000, 299.000, 381.000, 567.000, 715.000 275.000, 275.000, 333.000, 439.000, 635.000, 774.000 300.000, 300.000, 365.000, 505.000, 693.000, 828.000 325.000, 325.000, 399.000, 568.000, 746.000, 884.000
Material parameter	
Index	0.50000000
Crack initiation	
Overall index	0.12990876
Judgement	Crack
Depth of initial crack (mm) (Probability distribution)	
Probably distribution	Normal
Mean value	2.000
Standard deviatuon	1.000
Lower limit	1.000
Upper limit	3.000
Half length of initial crack (mm) (Probability distribution)	
Probably distribution	Normal
Mean value	6.000
Standard deviatuon	3.000
Lower limit	3.000
Upper limit	9.000
Half angle of initial crack (degree) (Probability distribution)	no_used
Position of initial crack (mm) (Probability distribution)	no_used
-----	
-- CRACK INITIATION for Step2	
-----	
Standard time ti0 (hr)	0.000
Scatter αi (Probability distribution)	
Probably distribution	Weibull
Shape	1.285
Scale	1.873
Shift	0.924
Temperature parameters	
Temperature (C)	318.000
Threshold (C)	250.000

図3.10.1 コンディションファイル例 (続き)

Coefficient	9.49E+15
Energy (kJ/mol)	182.963
Gas constant (kJ/(mol·K))	0.00831447
Index	0.64683244
Stress parameters	
Depth of curing (μm)	100.000
Sigma s (MPa)	1000.000
Threshold (MPa)	250.000
Coefficient	2.44E-11
Power	4
Index (calculated by DFM)	0.72981341
Surface machining	
	-, 0.000, 50.000, 100.000, 150.000, 200.000
	0.000, 0.000, 5.000, 20.000, 30.000, 38.000
	25.000, 25.000, 35.000, 46.000, 59.000, 73.000
	50.000, 50.000, 63.000, 75.000, 92.000, 112.000
	75.000, 75.000, 90.000, 105.000, 127.000, 159.000
	100.000, 100.000, 119.000, 136.000, 164.000, 236.000
	125.000, 125.000, 144.000, 174.000, 206.000, 347.000
	150.000, 150.000, 174.000, 210.000, 265.000, 446.000
	175.000, 175.000, 206.000, 248.000, 341.000, 526.000
	200.000, 200.000, 236.000, 284.000, 421.000, 594.000
	225.000, 225.000, 268.000, 331.000, 502.000, 654.000
	250.000, 250.000, 299.000, 381.000, 567.000, 715.000
	275.000, 275.000, 333.000, 439.000, 635.000, 774.000
	300.000, 300.000, 365.000, 505.000, 693.000, 828.000
	325.000, 325.000, 399.000, 568.000, 746.000, 884.000
Material parameter	
Index	0.50000000
Crack initiation	
Overall index	0.23603350
Judgement	Crack
Depth of initial crack (mm) (Probability distribution)	no_used
Half length of initial crack (mm) (Probability distribution)	no_used
Half angle of initial crack (degree) (Probability distribution)	
Probably distribution	Normal
Mean value	0.600
Standard deviation	0.000
Lower limit	0.600
Upper limit	0.600
Position of initial crack (mm) (Probability distribution)	no_used
-----	
-- CRACK GROWTH for Step1 No1	
-----	
Flag of crack kind	1
Initiated surface	Inner_surface
Direction	Axial
SIF calculator	Shiratori
Operating stress distribution	
Order	3
Sigma (0)	0.000
Sigma (1)	0.000
Sigma (2)	0.000
Sigma (3)	0.000
Residual stress distribution	
Order	3
Sigma (0)	337.370
Sigma (1)	-22.744
Sigma (2)	-70.452
Sigma (3)	87.406
Dev num of residual stress distribution	8
Scatter of residual stress distribution (Probability distribution)	
Probably distribution	Normal
Mean value	0.000
Standard deviation	10.000

図3.10.1 コンディションファイル例 (続き)

Lower limit	-60.000
Upper limit	60.000
Plastic strain distribution, x/t vs $\epsilon_p$	
	0.000, 0.000
	0.100, 0.000
	0.200, 0.000
	0.300, 0.000
	0.400, 0.000
	0.500, 0.000
	0.600, 0.000
	0.700, 0.000
	0.800, 0.000
	0.900, 0.000
	1.000, 0.000
<hr/>	
-- CRACK GROWTH for Step2 No1	
<hr/>	
Flag of crack kind	4
Initiated surface	Through_wall
Direction	Circumferential
SIF calculator	API4
Operating stress distribution	
Order	1
Sigma(0)	18.910
Sigma(1)	0.000
Residual stress distribution	
Order	1
Sigma(0)	-74.620
Sigma(1)	442.550
Dev num of residual stress distribution	8
Scatter of residual stress distribution (Probability distribution)	
Probably distribution	Normal
Mean value	0.000
Standard deviatuon	10.000
Lower limit	-60.000
Upper limit	60.000
Plastic strain distribution, x/t vs $\epsilon_p$	
	0.000, 0.000
	0.100, 0.000
	0.200, 0.000
	0.300, 0.000
	0.400, 0.000
	0.500, 0.000
	0.600, 0.000
	0.700, 0.000
	0.800, 0.000
	0.900, 0.000
	1.000, 0.000
<hr/>	
-- LEAK JUDGEMENT	
<hr/>	
Leak judgement based on crack depth ratio for t	0.800
Leak judgement based on crack depth ratio for WT	no_used
<hr/>	
-- BREAK JUDGEMENT	
<hr/>	
Break judgement based on primary stress (MPa) (Pm, Pb, Pe)	18.910, 0.000, 0.000
Break judgement by half crack angle (degree)	Not evaluate
<hr/>	
-- SCC GROWTH RATE	
<hr/>	
CGR of base metal	
Slope	
Beta (-)	1.160
Kth (MPa $\sqrt{m}$ )	9.000

図3.10.1 コンディションファイル例 (続き)



Lower limit of K (MPa $\sqrt{m}$ )	9.000
Upper limit of K (MPa $\sqrt{m}$ )	100.000
Scatter (Probability distribution)	
Probably distribution	LogNormal
Mean value of ln(X)	-27.336
Standard deviatuon of ln(X)	1.016
Lower limit	-33.432
Upper limit	-21.240
Parameters of PWSCC	
Temperature (C)	318.000
Reference temperature (C)	325.000
Activation energy for crack growth (kJ/mol)	130.000
Gas constant (kJ/(mol·K))	0.008
Effect of temperature on CGR	0.734
Parameters of NiSCC	
ECP (mVSHE)	no_used
Lower limit of ECP (mVSHE)	no_used
Upper limit of ECP (mVSHE)	no_used
a_ECP	no_used
b_ECP	no_used
Effect of ECP on CGR	no_used
Effect of plastic strain, $\epsilon_p$ vs $C_p$	
	0.000, 1.000
	2.002, 2.742
	4.002, 4.054
	6.002, 5.224
	8.005, 6.303
	10.002, 7.271
	12.007, 8.136
	14.004, 8.909
	16.002, 9.593
	18.002, 10.173
	20.006, 10.696
	22.038, 11.178
	24.720, 12.539
	25.720, 15.212
	26.719, 18.775
	28.174, 27.468
<hr/>	
-- OUTPUT (min, max, step)	
<hr/>	
File name	Davis_Besse_Sample
Time span (year)	0.000, 40.000, 1.000
Crack depth (mm)	0.000, 13.000, 1.000
Half crack length (mm)	0.000, 36.000, 2.000
Half crack angle (degree)	0.000, 180.000, 10.000
SIF at deepest point (MPa $\sqrt{m}$ )	0.000, 100.000, 5.000
SIF at surface point (MPa $\sqrt{m}$ )	0.000, 100.000, 5.000
SIF in hoop direction (MPa $\sqrt{m}$ )	0.000, 100.000, 5.000
Crack growth velocity at deepest point (mm/year)	0.000, 100.000, 5.000
Crack growth velocity at surface point (mm/year)	0.000, 100.000, 5.000
Crack growth velocity at surface point of b1 (mm/year)	no_used
Crack growth velocity at surface point of b2 (mm/year)	no_used
Crack growth velocity in hoop direction (mm/year)	0.000, 100.000, 5.000
Position of crack center (mm)	no_used
start	2012/08/10 10:55:14
computer name	EPSON1859
execute time	200.082 [min] (3.335 [hours])

図3.10.1 コンディションファイル例 (続き)

### 3.10.2 決定論的破壊力学解析におけるアウトプットファイル

決定論的破壊力学解析におけるアウトプットファイルは、表3.10.3に示したようにき裂種類により定まる出力項目の時刻歴であり、き裂方向が変化する Step 毎に出力される。アウトプットファイルはカンマ区切りのテキスト形式 (csv ファイル) により作成され、マイクロソフトエクセル等を用いて各セルに分割して表示することができる。アウトプットファイル例を図3.10.2に示す。図3.10.2 (a) 及び (b) は、き裂種類1及び5のアウトプットファイル例であり、その内容は表3.10.3における○で示した出力項目に従う。例えば、図3.10.2 (a) における time, dep, len, dep\_K, len\_K, dep\_velo 及び len\_velo は、評価年数、き裂深さ、き裂長さ、き裂最深点応力拡大係数、き裂表面点応力拡大係数、き裂最深点き裂進展速度及びき裂表面点き裂進展速度であり、初期き裂発生までは全ての出力項目にゼロを出力、初期き裂発生後は詳細な結果を出力、Leak とき裂深さに達した以降には全ての項目を一定値とする。図3.10.2 (b) における len\_b1\_velo, len\_b2\_velo 及び center は、B1点におけるき裂進展速度、B2点におけるき裂進展速度及びき裂中心位置 (図3.7.2の  $d$  に相当) である。き裂が Ni 基合金溶接金属内を進展し表面点 (B2点) が低合金鋼に達する8.5年にてき裂進展速度 len\_b2\_velo がほぼゼロ、表面点 (B1点) が Ni 基合金母材に達する8.6年にてき裂進展速度 len\_b1\_velo が30分の1程度に低下しており、B1点と B2点のき裂進展速度が異なるためき裂中心位置が移動している。最後に9.4年にて最深点 (A 点) が Leak とき裂深さ  $a_L$  に達した後、全ての項目に一定値が出力される。

time	dep	len	dep_K	len_K	dep_velo	len_velo
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	2.531	6.159	24.008	15.447	0.72	0.27
10	3.306	6.491	26.189	18.129	0.842	0.404
11	4.202	6.954	28.257	20.633	0.961	0.536
12	5.215	7.54	30.199	22.648	1.074	0.645
13	6.339	8.23	32.087	24.457	1.186	0.745
14	7.591	9.033	34.555	26.774	1.334	0.876
15	8.995	9.969	37.101	29.083	1.49	1.009
16	10.579	11.044	41.052	31.772	1.735	1.167
17	12.46	12.297	46.267	35.021	2.067	1.363
18	12.704	12.572	46.826	35.371	2.103	1.384
19	12.704	12.572	46.826	35.371	2.103	1.384
20	12.704	12.572	46.826	35.371	2.103	1.384
21	12.704	12.572	46.826	35.371	2.103	1.384
22	12.704	12.572	46.826	35.371	2.103	1.384
23	12.704	12.572	46.826	35.371	2.103	1.384
24	12.704	12.572	46.826	35.371	2.103	1.384
25	12.704	12.572	46.826	35.371	2.103	1.384

初期き裂発生前は全ての項目をゼロとする

き裂進展解析結果の出力

Leak時き裂深さ $a_1=12.704$ に達した後、全ての項目を一定値が出力される

(a) き裂種類：1 応力拡大係数：Shiratori 式の例

time	dep	len	dep_K	len_K	dep_velo	len_b1_velo	len_b2_velo	center
0.0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.0	0.75	0.75	11.431	12.434	1.533	1.754	1.754	25.5
7.1	0.903	0.925	12.76	13.66	1.828	2.039	2.039	25.5
7.2	1.086	1.129	14.161	14.995	2.159	2.367	2.367	25.5
7.3	1.302	1.366	15.647	16.436	2.533	2.741	2.741	25.5
7.4	1.555	1.64	17.23	17.986	2.956	3.166	3.166	25.5
7.5	1.851	1.957	18.921	19.647	3.433	3.646	3.646	25.5
7.6	2.194	2.321	20.731	21.424	3.974	4.188	4.188	25.5
7.7	2.592	2.74	22.67	23.323	4.585	4.798	4.798	25.5
7.8	3.05	3.22	24.747	25.351	5.275	5.483	5.483	25.5
7.9	3.578	3.768	26.973	27.517	6.055	6.251	6.251	25.5
8.0	4.183	4.393	29.357	29.829	6.933	7.112	7.112	25.5
8.1	4.876	5.104	31.905	32.298	7.921	8.077	8.077	25.5
8.2	5.668	5.912	34.622	34.934	9.027	9.158	9.158	25.5
8.3	6.571	6.828	37.507	37.748	10.261	10.366	10.366	25.5
8.4	7.597	7.865	40.553	40.753	11.626	11.718	11.718	25.5
8.5	8.76	9.036	43.742	43.961	13.123	13.228	0	25.5
8.6	10.072	9.698	46.29	47.344	14.367	0.402	0	24.839
8.7	11.509	9.718	49.548	50.857	16.019	0.445	0	24.818
8.8	13.111	9.74	52.773	54.554	17.719	0.491	0	24.796
8.9	14.883	9.765	55.883	58.417	19.42	0.54	0	24.772
9.0	16.825	9.792	58.811	62.415	21.073	0.591	0	24.745
9.1	18.932	9.821	61.547	66.521	22.663	0.644	0	24.715
9.2	21.198	9.853	64.183	70.72	24.236	0.699	0	24.683
9.3	23.622	9.888	66.958	74.969	25.934	0.755	0	24.648
9.4	25.62	9.926	66.958	74.969	25.934	0.755	0	24.61
9.5	25.62	9.926	66.958	74.969	25.934	0.755	0	24.61
9.6	25.62	9.926	66.958	74.969	25.934	0.755	0	24.61
9.7	25.62	9.926	66.958	74.969	25.934	0.755	0	24.61
9.8	25.62	9.926	66.958	74.969	25.934	0.755	0	24.61
9.9	25.62	9.926	66.958	74.969	25.934	0.755	0	24.61
10.0	25.62	9.926	66.958	74.969	25.934	0.755	0	24.61

初期き裂発生前は全ての項目をゼロとする。  
(ここでは、省略して1年刻みで表示した。)

初期き裂の発生。A点(き裂最深点)、B1点(き裂表面点①)、B2点(き裂表面点②)は、全てNi基合金溶接金属にある。

B1点がNi基合金母材に達して、B1点のき裂進展速度が1/30程度に低下する。

B2点が低合金鋼に達して、B2点のき裂進展速度がほぼゼロになる。

B1点とB2点のき裂進展速度が異なるため、き裂中心位置が移動する。

A点が進展しLeak時き裂深さ $a_1=25.62$ に達した後、全ての項目に一定値が出力される。

(b) き裂種類：5 応力拡大係数：API5式の例

図3.10.2 決定論的破壊力学解析アウトプットファイル例

### 3.10.3 確率論的破壊力学解析におけるアウトプットファイル

確率論的破壊力学解析のアウトプットファイルは表3.7.2に○で示した出力項目ごとに1つずつ作成される。アウトプットファイルはカンマ区切りファイル (csv) 形式により作成される。カンマ区切りファイルをマイクロソフトエクセルにより開いた例を図3.10.3に示す。(a) は、出力項目：き裂深さにおけるアウトプットファイルであり、1列目に運転年数、2列目に漏えいしたサンプルを漏えい時き裂深さ  $a_L$  としたき裂深さ平均値、3列目に漏えいしたサンプルを除外したき裂深さ平均値、4列目以降がき裂深さのヒストグラム、最後から3行目がヒストグラムに表れているサンプル数の合計、最後から2行目が漏えいしたサンプル数、最後の行が漏えい確率となっている。行数は運転年数でありここでは1年ごとに出力している。(b) は、出力項目：き裂半角におけるアウトプットファイルであり、(a) で漏えい確率であった部分が破断確率になっている。周方向き裂においてき裂半長や半角を出力するときに破断確率が出力される。

time [year]	depth_average with leakage [mm]	depth_average without leakage [mm]	under	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	over 12	sum	depth=12.704 (leakage)	Probability of leakage
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	2.324	2.324	0	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0
8	2.255	2.255	0	22	24	8	1	1	0	0	0	0	0	0	0	56	0	0
9	2.677	2.677	0	76	114	42	7	6	6	1	0	0	0	2	0	254	0	0
10	3.223	3.056	0	118	208	89	48	20	7	6	7	3	4	1	9	520	9	0.0009
11	3.788	3.384	0	157	306	169	73	30	24	24	10	8	5	8	40	854	37	0.0037
12	4.231	3.653	0	210	394	244	103	68	50	26	30	22	8	10	89	1254	80	0.008
13	4.646	3.795	0	248	502	290	175	86	59	50	43	25	13	18	176	1685	161	0.0161
14	5.068	4.012	0	266	572	358	228	120	89	69	40	42	26	37	268	2115	257	0.0257
15	5.526	4.278	0	263	581	428	261	181	113	75	67	62	46	32	395	2504	371	0.0371
16	5.921	4.442	0	286	610	475	274	227	153	102	79	65	57	53	552	2933	525	0.0525
17	6.291	4.506	0	289	643	550	288	207	196	135	101	74	63	41	762	3349	729	0.0729
18	6.672	4.703	0	260	663	557	351	228	189	152	119	93	85	63	946	3706	912	0.0912
19	6.972	4.835	0	301	612	596	393	278	183	160	139	120	98	68	1164	4112	1117	0.1117
20	7.321	4.948	0	264	629	589	415	297	225	170	136	129	97	96	1401	4448	1361	0.1361
21	7.6	5.044	0	245	638	618	444	292	224	191	154	120	122	98	1649	4795	1600	0.16
22	7.844	5.118	0	249	591	640	452	344	257	184	164	138	105	107	1911	5142	1848	0.1848
23	8.088	5.228	0	236	602	601	467	346	305	211	160	139	132	95	2161	5455	2087	0.2087
24	8.31	5.318	0	231	598	596	457	373	272	258	198	142	137	109	2405	5776	2340	0.234
25	8.573	5.479	0	223	531	596	491	366	304	218	209	173	148	112	2676	6047	2590	0.259
26	8.832	5.547	0	195	541	545	479	377	299	228	195	189	148	134	2955	6285	2885	0.2885
27	9.026	5.599	0	190	495	565	448	393	301	254	203	163	170	126	3225	6533	3151	0.3151
28	9.199	5.667	0	205	463	555	449	387	320	239	201	186	136	151	3483	6775	3401	0.3401
29	9.368	5.713	0	198	454	528	424	394	317	278	209	162	158	139	3744	7005	3662	0.3662
30	9.531	5.749	0	192	445	492	431	368	318	297	215	177	163	124	3999	7221	3927	0.3927
31	9.705	5.877	0	179	422	473	420	361	314	261	242	210	141	144	4232	7399	4144	0.4144
32	9.823	5.919	0	164	425	448	425	362	309	272	220	204	186	136	4460	7611	4379	0.4379
33	9.967	6.007	0	152	397	442	410	380	280	282	235	185	182	155	4692	7792	4608	0.4608
34	10.124	6.13	0	133	366	429	401	352	300	269	246	200	168	155	4930	7949	4830	0.483
35	10.273	6.191	0	131	335	396	385	348	317	225	250	216	168	163	5163	8097	5074	0.5074
36	10.393	6.209	0	146	317	361	383	307	314	255	227	203	185	142	5402	8242	5310	0.531
37	10.501	6.266	0	141	304	357	366	319	270	244	232	216	180	148	5604	8381	5513	0.5513
38	10.619	6.347	0	125	312	329	332	318	279	228	219	203	172	183	5805	8505	5715	0.5715
39	10.716	6.359	0	125	295	317	323	295	285	225	215	184	183	142	6039	8628	5924	0.5924
40	10.809	6.369	0	108	302	297	314	293	261	249	187	193	153	164	6223	8744	6128	0.6128
41	10.894	6.386	0	104	266	312	296	288	250	241	194	186	149	149	6414	8849	6314	0.6314
42	10.984	6.452	0	92	259	290	277	273	240	262	190	193	157	132	6579	8944	6483	0.6483
43	11.069	6.474	0	89	258	267	255	283	228	228	217	157	167	138	6746	9033	6662	0.6662
44	11.158	6.536	0	72	234	263	252	261	232	215	195	186	150	154	6891	9105	6823	0.6823
45	11.233	6.613	0	79	209	251	253	240	228	207	197	166	159	138	7055	9182	6964	0.6964
46	11.308	6.676	0	77	188	236	234	249	227	193	211	144	142	138	7213	9252	7110	0.711
47	11.386	6.673	0	63	186	218	213	236	218	179	224	170	118	126	7359	9310	7275	0.7275
48	11.454	6.734	0	55	173	224	196	211	223	183	173	201	124	118	7487	9368	7407	0.7407
49	11.521	6.816	0	43	166	207	197	193	221	172	171	190	147	111	7601	9419	7526	0.7526
50	11.595	6.902	0	41	144	198	186	170	217	183	141	170	181	106	7720	9457	7650	0.765
51	11.657	6.988	0	32	141	181	186	168	197	180	154	145	154	143	7828	9499	7759	0.7759
52	11.71	7.01	0	39	115	178	175	176	176	178	142	143	140	141	7946	9543	7877	0.7877
53	11.752	7.061	0	34	126	167	177	152	157	177	140	135	129	131	8065	9590	7972	0.7972
54	11.807	7.125	0	25	120	149	155	179	129	167	160	121	131	116	8164	9616	8070	0.807
55	11.861	7.112	0	22	111	139	146	166	139	144	165	116	111	123	8260	9642	8188	0.8188
56	11.905	7.141	0	27	94	128	142	151	149	123	160	127	110	107	8354	9672	8283	0.8283
57	11.949	7.226	0	27	85	121	134	143	140	133	136	117	120	101	8439	9696	8360	0.836
58	11.994	7.236	0	25	78	108	129	132	134	124	127	132	99	112	8513	9713	8452	0.8452
59	12.028	7.273	0	28	65	112	112	132	128	131	101	140	102	94	8589	9734	8522	0.8522
60	12.055	7.31	0	26	73	101	104	117	140	115	108	120	112	87	8657	9760	8586	0.8586

(a) き裂種類：1 応力拡大係数：Shiratori 式 出力項目：き裂深さ

図3.10.3 確率的破壊力学解析アウトプットファイル例

9年経過時 2/10000の確率で初期き裂が発生し始める

き裂角度区分数を18とした例  
0°~170°まで10°ピッチで17区分と  
170°超えを1区分

ヒストグラムに表れている  
サンプル数の合計

破断した  
サンプル数

破断確率

破断したサンプルを  
破断時き裂角度として  
き裂角度平均値を算出

破断したサンプルを  
除外して  
き裂角度平均値を算出

運転年数

time [year]	theta_average with break [degree]	theta_average without break [degree]	under 10	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	over 170	sum	Break	Probability of break
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0.6	0.6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
10	1.114	1.114	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0
11	2.147	2.147	40	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42	0	0
12	3.483	3.483	78	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	87	0	0
13	3.749	3.749	159	5	4	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	176	0	0
14	5.111	5.111	235	7	7	9	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	266	0	0
15	6.784	6.784	318	28	17	10	9	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	390	0	0
16	8.364	8.364	423	28	32	29	11	10	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	540	0	0
17	9.567	9.567	574	39	32	47	28	11	9	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	747	0	0
18	11.54	11.54	670	57	48	47	48	27	10	9	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	923	0	0
19	13.245	13.245	797	77	57	63	50	44	27	11	7	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1140	0	0
20	14.915	14.915	925	106	69	77	64	50	44	25	11	7	7	0	0	0	0	0	0	0	0	1385	0	0
21	16.985	16.985	1047	115	98	89	75	66	48	42	25	11	7	6	0	0	0	0	0	0	0	1629	0	0
22	19.282	19.115	1144	136	103	125	90	76	62	51	41	22	12	6	6	0	0	0	0	0	0	1874	3	0.0003
23	21.785	21.393	1224	154	114	132	123	97	69	63	50	43	13	11	0	0	0	0	0	0	0	2112	8	0.0008
24	24.156	23.383	1321	177	123	132	133	126	89	65	64	50	43	21	21	0	0	0	0	0	0	2365	18	0.0018
25	26.711	25.5	1377	219	151	139	133	131	124	91	66	61	53	39	42	0	0	0	0	0	0	2626	32	0.0032
26	29.034	26.985	1473	245	146	172	139	139	126	120	89	63	62	54	77	0	0	0	0	0	0	2909	61	0.0061
27	31.723	28.599	1516	275	176	169	173	135	139	130	120	88	67	57	131	0	0	0	0	0	0	3176	103	0.0103
28	34.546	30.258	1547	294	188	198	159	180	133	138	132	117	86	67	185	0	0	0	0	0	0	3424	155	0.0155
29	37.289	31.795	1588	290	219	192	203	160	173	138	137	129	115	86	249	0	0	0	0	0	0	3679	217	0.0217
30	39.957	33.086	1643	293	201	238	190	200	163	174	138	130	133	111	333	0	0	0	0	0	0	3947	295	0.0295
31	42.975	34.822	1664	291	196	220	243	187	200	157	181	131	133	129	440	0	0	0	0	0	0	4172	377	0.0377
32	45.924	35.747	1650	336	193	208	227	231	193	195	158	178	131	131	566	0	0	0	0	0	0	4397	501	0.0501
33	48.756	36.811	1630	356	226	205	217	220	224	198	193	159	173	132	691	0	0	0	0	0	0	4624	626	0.0626
34	51.381	37.588	1653	346	222	235	207	219	215	223	200	186	166	168	818	0	0	0	0	0	0	4858	766	0.0766
35	53.843	38.803	1681	355	213	221	234	204	219	215	226	196	187	164	979	0	0	0	0	0	0	5094	898	0.0898
36	56.272	39.103	1702	379	210	209	221	230	209	218	217	222	194	192	1132	0	0	0	0	0	0	5335	1059	0.1059
37	58.824	39.997	1671	378	234	209	217	215	231	206	223	217	218	197	1316	0	0	0	0	0	0	5532	1224	0.1224
38	62.24	40.286	1672	387	220	215	210	221	220	226	203	227	214	219	1504	0	0	0	0	0	0	5738	1418	0.1418
39	63.501	40.626	1662	390	218	228	212	211	223	222	218	203	233	219	1707	0	0	0	0	0	0	5946	1611	0.1611
40	56.637	40.614	1642	393	236	218	230	211	206	226	227	209	208	236	1913	0	0	0	0	0	0	6155	1824	0.1824
41	67.904	40.794	1599	423	217	222	217	229	216	204	226	225	211	205	2140	0	0	0	0	0	0	6334	2038	0.2038
42	70.201	41.574	1547	409	247	212	216	219	225	222	203	227	221	214	2336	0	0	0	0	0	0	6498	2228	0.2228
43	72.164	41.734	1536	398	238	224	212	213	228	218	226	202	227	216	2544	0	0	0	0	0	0	6682	2440	0.2440
44	74.331	42.142	1474	422	215	218	234	210	212	224	220	226	202	229	2749	0	0	0	0	0	0	6835	2653	0.2653
45	76.514	42.65	1432	413	215	194	223	226	218	215	222	221	219	205	2968	0	0	0	0	0	0	6971	2864	0.2864
46	78.318	43.383	1345	446	205	203	187	199	226	234	209	206	235	223	3365	0	0	0	0	0	0	7130	3062	0.3062
47	80.109	43.932	1321	403	223	192	185	188	203	229	213	208	239	3571	0	0	0	0	0	0	0	7293	3274	0.3274
48	82.006	44.347	1245	426	218	189	191	195	186	207	230	225	215	211	3797	0	0	0	0	0	0	7415	3478	0.3478
49	83.907	44.689	1180	398	206	163	195	185	198	192	211	232	220	221	3984	0	0	0	0	0	0	7535	3692	0.3692
50	85.604	44.697	1217	416	196	192	189	193	183	187	211	232	220	221	4204	0	0	0	0	0	0	7661	3898	0.3898
51	87.336	44.689	1180	398	206	163	195	185	198	192	211	232	220	221	4204	0	0	0	0	0	0	7772	4122	0.4122
52	88.866	45.003	1154	383	190	177	168	197	183	199	190	187	206	246	4408	0	0	0	0	0	0	7888	4320	0.4320
53	90.534	45.143	1097	384	191	157	178	164	197	189	192	196	190	209	4639	0	0	0	0	0	0	7983	4532	0.4532
54	92.035	44.937	1056	379	184	156	155	185	159	204	186	189	196	193	4837	0	0	0	0	0	0	8079	4747	0.4747
55	93.184	45.103	1054	346	194	150	154	154	186	164	202	191	180	205	5017	0	0	0	0	0	0	8197	4927	0.4927
56	94.493	44.937	1015	349	179	159	143	162	153	181	170	198	188	186	5211	0	0	0	0	0	0	8294	5121	0.5121
57	95.969	45.803	951	352	181	137	166	134	171	145	188	167	196	198	5382	0	0	0	0	0	0	8368	5294	0.5294
58	97.105	45.532	918	350	167	149	141	165	135	173	143	186	167	202	5568	0	0	0	0	0	0	8464	5486	0.5486
59	98.463	45.563	883	334	156	134	148	140	165	141	169	142	190	170	5757	0	0	0	0	0	0	8529	5673	0.5673
60	99.961	45.704	831	342	143	127	139	144	144	168	137	173	139	192	5917	0	0	0	0	0	0	8596	5845	0.5845

(b) き裂種類 : 4 応力拡大係数 : API4式の例 出力項目 : き裂半角

図3.10.3 確率的破壊力学解析アウトプットファイル例 (続き)

### 3.11 確率分布設定方法

各確率変数に対する標準的な確率分布の候補を表3.11.1に示す。降伏応力、引張強さ、残留応力分布及び初期き裂寸法には正規分布、SCC き裂進展速度係数には対数正規分布、初期き裂発生モデルにはワイブル分布が標準的な確率分布の候補として挙げられるが、ユーザーは任意に設定することができる。確率分布の入力が求められる入力カードの次の行に、表中の順序により確率分布を設定する。例えば、3.6.1で示した Ni 基合金母材 (米国材) の PWSCC き裂進展速度係数  $\alpha_r$  を、下限値 $-6\sigma$  及び上限値 $+6\sigma$  として入力するときは次のように指定する。確率分布設定方法の詳細は4.11に示す。

\*Scatter\_of\_CGR\_of\_base\_metal

LogNormal, -27.3358, 1.0160, -30.3838, -20.471681

表3.11.1 各確率変数に対する標準的な確率分布の候補

	標準的な確率分布の候補
降伏応力, $\sigma_y$	正規分布
引張強さ, $\sigma_u$	正規分布
初期き裂寸法や位置	正規分布
残留応力分布, $\sigma_r$	板厚内全域の均一増加/減少モデルまたは 板厚内分割領域の局所的増加/減少モデルにおいて 正規分布
SCC き裂進展速度係数, $\alpha_r$	対数正規分布
初期き裂発生モデル, $\alpha_i$	ワイブル分布

## 4 インプットファイル

本章ではインプットファイル作成方法について述べる。インプットファイル内のキーワード一覧を4.1に示した後、キーワード毎の入力項目を4.2から4.10に、確率分布設定方法を4.11に示す。

### 4.1 インプットファイル内のキーワード一覧

インプットファイル内のキーワード一覧を表4.1.1に示す。全キーワードはアスタリスク1つから始める。PASCAL-NP はインプットファイルの読込時、表4.1.1のキーワードを探し、キーワードの次の行からを入力項目の行と識別する。入力項目の行数、1行あたりの入力項目の数及び内容は4.2以降に示すようにキーワードにより決定される。なお、アスタリスク2つ以上から始まる行はコメントアウトされるため、コメントやメモの記載等に利用することができる。また、インプットファイルはテキスト形式とし、インプットファイルにおけるキーワードの記載順序は任意である。

表4.1.1 インプットファイル内のキーワード一覧

定数または文字列を設定するキーワード	確率分布を設定するキーワード
(4.2) *Method_of_analysis *Total_sampling_number *Time_span_of_analysis *Type_of_SCC	(4.4) *Yield_stress_for_step1 *Tensile_strength_for_step1 *Yield_stress_for_step2 *Tensile_strength_for_step2
(4.3) *Component *Inner_radius_and_pipe_thickness *WT *WK *WL	(4.5) *Scatter_of_crack_initiation_for_step1 *Depth_of_initial_crack_for_step1 *Half_length_of_initial_crack_for_step1 *Half_angle_of_initial_crack_for_step1 *Position_of_initial_crack_for_step1
(4.4) *Material_for_step1 *Elastic_for_step1 *Material_for_step2 *Elastic_for_step2	(4.5) *Scatter_of_crack_initiation_for_step2 *Depth_of_initial_crack_for_step2 *Half_length_of_initial_crack_for_step2 *Half_angle_of_initial_crack_for_step2 *Position_of_initial_crack_for_step2
(4.5) *Standard_time_of_crack_initiation_for_step1 *Temperature_index_for_step1 *Stress_index_for_step1 *Surface_machining_for_step1 *Material_index_for_step1	(4.6) *Scatter_of_CGR_of_base_metal *Scatter_of_CGR_of_weld_metal *Scatter_of_CGR_of_RPV_base_metal
(4.5) *Standard_time_of_crack_initiation_for_step2 *Temperature_index_for_step2 *Stress_index_for_step2 *Surface_machining_for_step2 *Material_index_for_step2	(4.8) *Scatter_of_residual_stress_distribution_for_step1_no1 *Scatter_of_residual_stress_distribution_for_step1_no2 *Scatter_of_residual_stress_distribution_for_step2_no1 *Scatter_of_residual_stress_distribution_for_step2_no2
(4.6) *Slope_of_CGR_of_base_metal *Effect_of_Temperature_on_CGR_of_base_metal *Effect_of_ECP_on_CGR_of_base_metal *Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_base_metal	(4.11) 確率分布の設定方法は、4.11に従う。
(4.6) *Slope_of_CGR_of_weld_metal *Effect_of_Temperature_on_CGR_of_weld_metal *Effect_of_ECP_on_CGR_of_weld_metal	

表 4.1.1 インプットファイル内のキーワード一覧 (続き)

<p>*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_weld_metal (4.6) *Slope_of_CGR_of_RPV_base_metal *Effect_of_Temperature_on_CGR_of_RPV_base_metal *Effect_of_ECP_on_CGR_of_RPV_base_metal *Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_RPV_base_metal (4.7) *Flag_of_crack_kind_for_step1_no1 *SIF_calculator_for_step1_no1 *Operating_stress_distribution_for_step1_no1 *Residual_stress_distribution_for_step1_no1 *Plastic_strain_distribution_for_step1_no1 (4.8) *Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_step1_no1 (4.7) *Flag_of_crack_kind_for_step1_no2 *SIF_calculator_for_step1_no2 *Operating_stress_distribution_for_step1_no2 *Residual_stress_distribution_for_step1_no2 *Plastic_strain_distribution_for_step1_no2 (4.8) *Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_step1_no2 (4.7) *Flag_of_crack_kind_for_step2_no1 *SIF_calculator_for_step2_no1 *Operating_stress_distribution_for_step2_no1 *Residual_stress_distribution_for_step2_no1 *Plastic_strain_distribution_for_step2_no1 (4.8) *Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_step2_no1 (4.7) *Flag_of_crack_kind_for_step2_no2 *SIF_calculator_for_step2_no2 *Operating_stress_distribution_for_step2_no2 *Residual_stress_distribution_for_step2_no2 *Plastic_strain_distribution_for_step2_no2 (4.8) *Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_step2_no2 (4.9) *Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_t *Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_WT (4.9) *Break_judgement_based_on_primary_stress *Break_judgement_by_half_crack_angle (4.10) *File_name *Time_span *Crack_depth *Half_crack_length *Half_crack_angle *SIF_at_deepest_point *SIF_at_surface_point *SIF_in_hoop_direction *Crack_growth_velocity_at_deepest_point *Crack_growth_velocity_at_surface_point *Crack_growth_velocity_at_surface_point_of_b1 *Crack_growth_velocity_at_surface_point_of_b2 *Crack_growth_velocity_in_hoop_direction *Position_of_crack_center</p>	
--	--



#### 4.2 解析方法

解析方法に関するキーワード			
入力項目	単位	型	詳細
<b>*Method_of_analysis</b>			
解析種別	-	string	DFM か PFM のいずれかを設定する。DFM を設定した場合、インプットファイル内に確率分布を無視し、ばらつきをゼロとして決定論的解析が実施される。PFM を設定した場合、インプットファイル内の確率分布が有効となり確率論的解析が実施される。
<b>*Total_sampling_number</b>			
サンプリング数	-	long	PFM の場合サンプリング数を設定する。DFM の場合、*Method_of_analysis にて DFM が指定された場合、解析数は 1 となるため任意の数を設定する。
<b>*Time_span_of_analysis</b>			
解析期間 (min, max, step)	year	double	解析期間を設定する。き裂発生・進展解析は、開始年から終了年まで、年刻み毎に実施される。
<b>*Type_of_SCC</b>			
き裂タイプ	-	string	PWSCC か NiSCC のいずれかを設定する。PWSCC を入力した場合、き裂進展速度に及ぼす ECP の影響は無視される。NiSCC を入力した場合、き裂進展速度に及ぼす温度の影響は無視される。

#### 4.3 機器の幾何形状

機器の幾何形状に関するキーワード			
入力項目	単位	型	詳細
<b>*Component</b>			
機器名称		string	任意の機器名称を設定する。
<b>*Inner_radius_and_pipe_thickness</b>			
機器内半径, $R_i$ 機器肉厚, $t$	mm mm	double double	機器内半径及び肉厚を入力する。
<b>*WT</b>			
自由表面から溶接金属 までの距離, $W_T$	mm	double	自由表面から溶接金属までの距離 $W_T$ を入力する。
<b>*WK</b>			
自由表面から溶接金属 までの距離, $W_K$	mm	double	自由表面から溶接金属までの距離 (溶接金属幅を含めない) $W_K$ を入力する。
<b>*WL</b>			
自由表面から溶接金属 までの距離, $W_L$	mm	double	自由表面から溶接金属までの距離 (溶接金属幅を含める) $W_L$ を入力する。

\*WT, \*WK, \*WL はき裂種類5の場合のみ有効となるが、全てのき裂種類にて入力する。

#### 4.4 機器の材質

機器の材質に関するキーワード			
入力項目	単位	型	詳細
<b>*Material_for_stepX</b>			
材質名	-	string	base_metal か weld_metal を入力する。 stepX に使用するき裂進展速度を選択する。
<b>*Elastic_for_stepX</b>			
弾性係数, E	MPa	double	弾性係数を入力する。
<b>*Yield_stress_for_stepX</b>			
降伏応力, $\sigma_y$	MPa	確率分布	降伏応力の確率分布を入力する。
<b>*Tensile_stress_for_stepX</b>			
引張強さ, $\sigma_u$	MPa	確率分布	引張強さの確率分布を入力する。

4.5 初期き裂発生

初期き裂発生に関するキーワード			
入力項目	単位	型	詳細
<b>*Standard_time_of_crack_initiation_for_stepX</b>			
標準化された初期き裂発生までの時間, $t_{i0}$	hr	double	温度パラメータ $i_{\theta}$ 、応力パラメータ $i_{\sigma}$ 及び材料パラメータ $i_m$ が全て 1 の場合における初期き裂発生時間を保守的に設定した値である。 $t_{i0}$ に 0 が入力された場合、step 開始と同時に SCC が発生するものとし、初期き裂発生時間の計算及び結果出力をしない。
<b>*Scatter_of_crack_initiation_for_stepX</b>			
き裂発生時間のばらつき, $\alpha_i$	-	確率分布	初期き裂発生時間のばらつきを考慮するため、確率分布を設定する。
<b>*Temperature_index_for_stepX</b>			
温度, $T$	°C	double	温度パラメータ $i_{\theta}$ を算出するため、各パラメータを入力する。
温度閾値, $T_{th}$	°C	double	
温度係数, $A_{\theta}$	-	double	
活性化エネルギー, $Q_i$	kJ/mol	double	
ガス定数, $R$	kJ/(mol°C)	double	
<b>*Stress_index_for_stepX</b>			
加工硬化域深さ, $d_c$	μm	double	応力パラメータ $i_{\sigma}$ を算出するため、各パラメータを入力する。SCC 発生時間に及ぼす負荷応力及び表面切削加工の影響等を考慮する。
極表面の応力, $\sigma_s$	MPa	double	
応力閾値, $\sigma_{th}$	MPa	double	
応力係数, $A_{\sigma}$	-	double	
応力指数, $n$	-	double	
<b>*Surface_machining_for_stepX</b>			
硬化域深さ, $d_c$ 負荷応力-降伏応力, $\sigma_{app}-\sigma_y$ 有効応力-降伏応力, $\sigma_{eff}-\sigma_y$	MPa	15 行×6 列	有効応力 $\sigma_{eff}$ に及ぼす加工硬化域深さ $d_c$ の影響を次の行列形式で設定する。 1 行 1 列：任意 1 行目 2 列から 1 行目 6 列： $d_c$ 2 行目 1 列から 15 行目 1 列目： $\sigma_{app}-\sigma_y$ 2 行 2 列から 5 行 14 列の範囲： $\sigma_{eff}-\sigma_y$
<b>*Material_index_for_stepX</b>			
材料パラメータ, $i_m$	-	double	母材では炭化物析出位置により $i_m$ を設定する。 結晶粒界のみ：0.25 主に結晶粒界+結晶粒内：0.40 主に結晶粒界+双晶境界：0.50 主に結晶粒界+結晶粒内+双晶境界：0.60 旧結晶粒界：0.65 旧結晶粒界+結晶粒内：1.00 溶接金属では常に 0.70 とする。
<b>*Depth_of_initial_crack_for_stepX</b>			
初期き裂深さ	mm	確率分布	き裂種類 0, 1, 2, 3, 5 のとき有効。
<b>*Half_length_of_initial_crack_for_stepX</b>			
初期き裂半長	mm	確率分布	き裂種類 0, 1, 2, 3, 5 のとき有効。
<b>*Half_angle_of_initial_crack_for_stepX</b>			
初期き裂半角	degree	確率分布	き裂種類 4 のとき有効。
<b>*Position_of_initial_crack_for_stepX</b>			
初期き裂中心位置	mm	確率分布	き裂種類 5 のとき有効。

#### 4.6 き裂進展速度線図

き裂種類1, 2, 3, 4の場合、少なくとも4.4にて指定した材料 (base\_metal か weld\_metal) それぞれに対して設定する必要がある。き裂種類5の場合、RPV\_base\_metal を加えた全ての材料 (base\_metal, weld\_metal 及び RPV\_base\_metal) に対して設定する必要がある。なお、解析中に使用しない材料に対して設定しても、それは無視され、解析は正常に実行される。どのき裂進展速度で解析が実行されたかは、コンディションファイルに記載される。また、3.6に示したように Ni 基合金や低合金鋼のほかステンレス鋼のき裂進展速度を入力することもできる。

き裂進展速度線図に関するキーワード (き裂進展速度線図の傾きとばらつき)			
入力項目	単位	型	詳細
<b>*Slope_of_CGR_of_base_metal</b>			
き裂進展速度指数, $\beta$	-	double	き裂進展速度線図の傾き (Ni 基合金母材)
応力拡大係数閾値, $K_{th}$	MPa $\sqrt{m}$	double	
〃 下限値, $K_{lower}$	MPa $\sqrt{m}$	double	
〃 上限値, $K_{upper}$	MPa $\sqrt{m}$	double	
<b>*Slope_of_CGR_of_weld_metal</b>			
き裂進展速度指数, $\beta$	-	double	き裂進展速度線図の傾き (Ni 基合金溶接金属)
応力拡大係数閾値, $K_{th}$	MPa $\sqrt{m}$	double	
〃 下限値, $K_{lower}$	MPa $\sqrt{m}$	double	
〃 上限値, $K_{upper}$	MPa $\sqrt{m}$	double	
<b>*Slope_of_CGR_of_RPV_base_metal</b>			
き裂進展速度指数, $\beta$	-	double	き裂進展速度線図の傾き (低合金鋼)
応力拡大係数閾値, $K_{th}$	MPa $\sqrt{m}$	double	
〃 下限値, $K_{lower}$	MPa $\sqrt{m}$	double	
〃 上限値, $K_{upper}$	MPa $\sqrt{m}$	double	
<b>*Scatter_of_CGR_of_base_metal</b>			
き裂進展速度線図 確率分布, $\alpha_r$		確率分布	き裂進展速度線図の確率分布 (Ni 基合金母材)
<b>*Scatter_of_CGR_of_weld_metal</b>			
き裂進展速度線図の 確率分布, $\alpha_r$		確率分布	き裂進展速度線図の確率分布 (Ni 基合金溶接金属)
<b>*Scatter_of_CGR_of_RPV_base_metal</b>			
き裂進展速度線図の 確率分布, $\alpha_r$		確率分布	き裂進展速度線図の確率分布 (低合金鋼)

き裂進展速度線図に関するキーワード (き裂進展速度に及ぼす各因子の影響)			
入力項目	単位	型	詳細
<b>*Effect_of_Temperature_on_CGR_of_base_metal</b>			
き裂先端の温度, $T_a$	°C	double	き裂進展速度に及ぼす温度の影響を算出するための各パラメータを入力する。 PWSCCのみ有効。 (Ni 基合金母材)
参照温度, $T_{a,ref}$	°C	double	
活性化エネルギー, $Q_g$	kJ/mol	double	
ガス定数, R	kJ/mol°C	double	
<b>*Effect_of_Temperature_on_CGR_of_weld_metal</b>			
き裂先端の温度, $T_a$	°C	double	き裂進展速度に及ぼす温度の影響を算出するための各パラメータを入力する。 PWSCCのみ有効。 (Ni 基合金溶接金属)
参照温度, $T_{a,ref}$	°C	double	
活性化エネルギー, $Q_g$	kJ/mol	double	
ガス定数, R	kJ/mol°C	double	
<b>*Effect_of_Temperature_on_CGR_of_RPV_base_metal</b>			
き裂先端の温度, $T_a$	°C	double	き裂進展速度に及ぼす温度の影響を算出するための各パラメータを入力する。 PWSCCのみ有効。 (低合金鋼)
参照温度, $T_{a,ref}$	°C	double	
活性化エネルギー, $Q_g$	kJ/mol	double	
ガス定数, R	kJ/mol°C	double	
<b>*Effect_of_ECP_on_CGR_of_base_metal</b>			
腐食電位, ECP	mV <sub>SHE</sub>	double	き裂進展速度に及ぼす腐食電位の影響を算出するための各パラメータを入力する。 NiSCCのみ有効。 (Ni 基合金母材)
// 下限値, ECP <sub>lower</sub>	mV <sub>SHE</sub>	double	
// 上限値, ECP <sub>upper</sub>	mV <sub>SHE</sub>	double	
係数, $a_{ECP}$	-	double	
指数, $b_{ECP}$	-	double	
<b>*Effect_of_ECP_on_CGR_of_weld_metal</b>			
腐食電位, ECP	mV <sub>SHE</sub>	double	き裂進展速度に及ぼす腐食電位の影響を算出するための各パラメータを入力する。 NiSCCのみ有効。 (Ni 基合金溶接金属)
// 下限値, ECP <sub>lower</sub>	mV <sub>SHE</sub>	double	
// 上限値, ECP <sub>upper</sub>	mV <sub>SHE</sub>	double	
係数, $a_{ECP}$	-	double	
指数, $b_{ECP}$	-	double	
<b>*Effect_of_ECP_on_CGR_of_RPV_base_metal</b>			
腐食電位, ECP	mV <sub>SHE</sub>	double	き裂進展速度に及ぼす腐食電位の影響を算出するための各パラメータを入力する。 NiSCCのみ有効。 (低合金鋼)
// 下限値, ECP <sub>lower</sub>	mV <sub>SHE</sub>	double	
// 上限値, ECP <sub>upper</sub>	mV <sub>SHE</sub>	double	
係数, $a_{ECP}$	-	double	
指数, $b_{ECP}$	-	double	
<b>*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_base_metal</b>			
き裂進展速度に及ぼす 塑性歪の影響, $c_p$ - $\epsilon_p$ (Ni 基合金母材)	-	16行×2列	1 列目: 塑性歪の絶対値, $\epsilon_p$ 2 列目: き裂進展速度に及ぼす塑性歪の影響係数, $c_p$ (Ni 基合金母材)
<b>*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_weld_metal</b>			
き裂進展速度に及ぼす 塑性歪の影響, $c_p$ - $\epsilon_p$ (Ni 基合金溶接金属)	-	16行×2列	1 列目: 塑性歪の絶対値, $\epsilon_p$ 2 列目: き裂進展速度に及ぼす塑性歪の影響係数, $c_p$ (Ni 基合金溶接金属)
<b>*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_RPV_base_metal</b>			
き裂進展速度に及ぼす 塑性歪の影響, $c_p$ - $\epsilon_p$ (低合金鋼)	-	16行×2列	1 列目: 塑性歪の絶対値, $\epsilon_p$ 2 列目: き裂進展速度に及ぼす塑性歪の影響係数, $c_p$ (低合金鋼)

4.7 き裂進展解析

き裂進展解析に関するキーワード			
入力項目	単位	型	詳細
<b>*Flag_of_crack_kind_for_stepX_noX</b>			
き裂種類	-	int	0 (周方向・内表面き裂) 1 (軸方向・内表面き裂) 2 (周方向・外表面き裂) 3 (軸方向・外表面き裂) 4 (周方向・貫通き裂) 5 (軸/半径方向・溶接金属内き裂)
<b>*SIF_calculator_for_stepX_noX</b>			
応力拡大係数算出式	MPa	string	き裂種類 0 : ASME, Bergman き裂種類 1 : ASME, Shiratori き裂種類 2 : ASME, Chapuliot き裂種類 3 : ASME, Fett き裂種類 4 : Zang, Sander, API4 き裂種類 5 : API5
<b>*Operating_stress_distribution_for_stepX_noX</b>			
次数 0 次係数, $\sigma_{op\_0}$ 1 次係数, $\sigma_{op\_1}$ 2 次係数, $\sigma_{op\_2}$ 3 次係数, $\sigma_{op\_3}$ 4 次係数, $\sigma_{op\_4}$	- MPa MPa MPa MPa MPa	int double double double double double	運転応力分布を多項式近似したときの係数を入力する。 き裂種類 0 : ASME (4 次式), Bergman (3 次式) き裂種類 1 : ASME (4 次式), Shiratori (3 次式) き裂種類 2 : ASME (4 次式), Chapuliot (3 次式) き裂種類 3 : ASME (4 次式), Fett (3 次式) き裂種類 4 : Zang (4 次式), Sander (0 次式), API4 (1 次式) き裂種類 5 : API5 (4 次式)
<b>*Residual_stress_distribution_for_stepX_noX</b>			
次数 0 次係数, $\sigma_r_0$ 1 次係数, $\sigma_r_1$ 2 次係数, $\sigma_r_2$ 3 次係数, $\sigma_r_3$ 4 次係数, $\sigma_r_4$	- MPa MPa MPa MPa MPa	int double double double double double	残留応力分布を多項式近似したときの係数を入力する。 多項式近似の次数は、応力拡大係数算出式に従う。 き裂発生・進展解析には運転応力及び残留応力分布が用いられる。 破断判定には運転応力分布のみが使用される。
<b>*Plastic_strain_distribution_for_stepX_noX</b>			
塑性歪分布, $\epsilon_p-x/t$ または $\epsilon_p-x/W_T$	-	11 行×2 列	1 列目 : (き裂種類 0,1,2,3,4 のとき) 正規化距離, $x/t$ (き裂種類 5 のとき) 正規化距離 $x/W_T$ (内表面を 0.0, 外表面を 1.0 とする。) 2 列目 : 塑性歪の絶対値, $\epsilon_p$

#### 4.8 残留応力分布のばらつき

残留応力のばらつき発生モデルに関するキーワード			
入力項目	単位	型	詳細
<b>*Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_stepX_noX</b>			
板厚内領域分割数		int	板厚内均一増加/減少モデル：1を入力する。 板厚内分割領域の局所的増加/減少モデル：分割数を入力する。ただし分割数は、応力拡大係数の次数+1以上である必要がある。
<b>*Scatter_of_residual_stress_distribution_for_stepX_noX</b>			
残留応力のばらつき	MPa	確率分布	板厚内均一増加/減少モデルまたは板厚内分割領域の局所的増加/減少モデルに使用する残留応力のばらつきを入力する。

#### 4.9 破損判定

破損判定に関するキーワード			
入力項目	単位	型	詳細
<b>*Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_t</b>			
漏えい時 き裂深さ比, $a/t$		double	漏えい判定に配管肉厚 $t$ に対するき裂深さ基準を用いる場合、漏えいと判定されるき裂深さ比 ( $a/t$ ) を設定する。 き裂種類 0, 1, 2, 3 において有効となる。
<b>*Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_WT</b>			
漏えい時 き裂深さ比, $a/W_T$		double	漏えい判定に $W_T$ に対するき裂深さ基準を用いる場合、漏えいと判定されるき裂深さ比 ( $a/W_T$ ) を設定する。 き裂種類 5 においてのみ有効となる。
<b>*Break_judgement_based_on_primary_stress</b>			
1次一般膜応力, $P_m$ 1次曲げ応力, $P_b$ 熱膨張応力, $P_e$	MPa MPa MPa	double double double	実断面応力基準を用いて破断判定をする場合、 $P_m$ , $P_b$ 及び $P_e$ を入力する。 実断面応力基準を用いない場合、"Not evaluate" と入力する。 き裂種類 0, 2, 4 において有効となる。
<b>*Break_judgement_by_half_crack_angle</b>			
破断時 き裂半角, $\theta_B$	degree	double	破断とき裂半角 $\theta_B$ を用いて破断判定をする場合、 $\theta_B$ を入力する。 $\theta_B$ による破断判定を実施しない場合、"Not evaluate" と入力する。 き裂種類が 4 の場合にのみ有効となる。 実断面応力基準による破断判定と併用できる。

4.10 結果出力

結果出力に関するキーワード			
入力項目	単位	型	詳細
<b>*File_name</b>			
ファイル名	-	string	アウトプットファイル名を入力する
<b>*Time_span</b>			
出力年 (min, max, step)	year	double	min~max まで、step 刻み毎にデータを出力する。
<b>*Crack_depth</b>			
き裂深さ (min, max, step)	mm	double	min~max までの区間を step で分割し、き裂深さのヒストグラムを作成する。 き裂種類 0, 1, 2, 3, 5 において有効となる。 (なお、0~min の区間と max を超える区間が 1 つずつ追加される。この処理は他のキーワードでも同様である。)
<b>*Half_crack_length</b>			
き裂長さ (min, max, step)	mm	double	min~max までの区間を step で分割し、き裂長さのヒストグラムを作成する。 全き裂種類において有効となる。
<b>*Half_crack_angle</b>			
き裂半角 (min, max, step)	degree	double	min~max までの区間を step で分割し、き裂半角のヒストグラムを作成する。 き裂種類 0, 2, 4 において有効となる。
<b>*SIF_at_deepest_point</b>			
き裂最深点における 応力拡大係数 (min, max, step)	MPa√m	double	min~max までの区間を step で分割し、き裂最深点における応力拡大係数のヒストグラムを作成する。 き裂種類 0, 1, 2, 3, 5 において有効となる。
<b>*SIF_at_surface_point</b>			
き裂表面点における 応力拡大係数 (min, max, step)	MPa√m	double	min~max までの区間を step で分割し、き裂表面点における応力拡大係数のヒストグラムを作成する。 き裂種類 0, 1, 2, 3, 5 において有効となる。
<b>*SIF_in_hoop_direction</b>			
き裂角度方向における 応力拡大係数 (min, max, step)	MPa√m	double	min~max までの区間を step で分割し、き裂角度方向における応力拡大係数のヒストグラムを作成する。 き裂種類 4 において有効となる。
<b>*Crack_growth_velocity_at_deepest_point</b>			
き裂最深点における き裂進展速度 (min, max, step)	mm/year	double	min~max までの区間を step で分割し、き裂最深点におけるき裂進展速度のヒストグラムを作成する。 き裂種類 0, 1, 2, 3, 5 において有効となる。
<b>*Crack_growth_velocity_at_surface_point</b>			
き裂表面点における き裂進展速度 (min, max, step)	mm/year	double	min~max までの区間を step で分割し、き裂表面点におけるき裂進展速度のヒストグラムを作成する。 き裂種類 0, 1, 2, 3 において有効となる。
<b>*Crack_growth_velocity_at_surface_point_of_b1</b>			
き裂表面点 b1 における き裂進展速度 (min, max, step)	mm/year	double	min~max までの区間を step で分割し、き裂表面点 b1 におけるき裂進展速度のヒストグラムを作成する。 き裂種類 5 において有効となる。



<b>*Crack_growth_velocity_at_surface_point_of_b2</b>			
き裂表面点 b2 における き裂進展速度 (min, max, step)	mm/year	double	min~max までの区間を step で分割し、き裂表面点 b2 におけるき裂進展速度のヒストグラムを作成する。 き裂種類 5 において有効となる。
<b>*Crack_growth_velocity_in_hoop_direction</b>			
き裂角度方向における き裂進展速度 (min, max, step)	degree/year	double	min~max までの区間を step で分割し、き裂角度方向におけるき裂進展速度のヒストグラムを作成する。 き裂種類 0, 2, 4 において有効となる。
<b>*Position_of_crack_center</b>			
き裂中心位置 (min, max, step)	mm	double	min~max までの区間を step で分割し、き裂中心位置のヒストグラムを作成する。 き裂種類 5 において有効となる。

#### 4.11 確率分布設定方法

	1 項目	2 項目	3 項目	4 項目	5 項目
定数	Const	定数	-	-	-
一様分布	Interval	最小値	最大値	刻み	-
正規分布	Normal	平均値	標準偏差	下限値	上限値
対数正規分布*	LogNormal	平均値	標準偏差	下限値	上限値
ワイブル分布	Weibull	形状	縮尺	位置	-

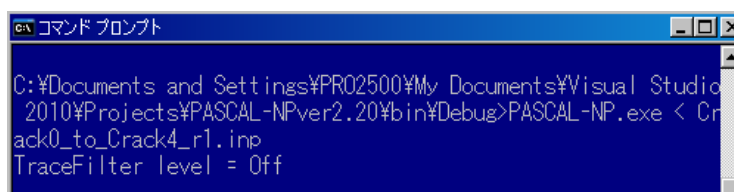
\*ばらつきを考慮するパラメータ X に対して、自然対数をとった  $\ln(X)$  を正規分布にフィッティングし、その平均値、標準偏差、下限値及び上限値を入力する。

## 5 解析実行

解析実行方法を5.1に、検査結果を用いたセグメントあたりの漏えい確率の算出方法を5.2に、PWSCC 及び NiSCC による実機損傷事例を対象とした解析条件及び解析結果を5.3に、実機損傷事例に用いたインプットファイルのサンプルを5.4に示す。

### 5.1 解析実行方法

1. 解析実行プログラム (PASCAL-NP.exe) 及びインプットファイル (Crack0\_to\_Crack4\_r1.inp とする) を同一のフォルダに置く。
2. コマンドプロンプトにて次のように入力する。実行例を図5.1.1に示す。  
PASCAL-NP.exe < Crack0\_to\_Crack4\_r1.inp
3. 解析が開始する。DFM 解析の場合、解析回数は1であるため開始後すぐに終了する。PFM 解析の場合、サンプリング数回相当の解析を実施するための時間を要する。PFM 解析の進捗はコマンドプロンプト上に現在解析中のサンプリング数が図5.1.2のように表示されることで把握できる。
4. プログラム終了後、解析条件ファイル及び解析結果ファイルが作成される。



```
コマンド プロンプト
C:\Documents and Settings\PRO2500\My Documents\Visual Studio
2010\Projects\PASCAL-NPver2.20\bin\Debug>PASCAL-NP.exe < Cr
ack0_to_Crack4_r1.inp
TraceFilter level = Off
```

図5.1.1 コマンドプロンプトにおける PASCAL-NP 実行例

```

sampling no = 974522
sampling no = 974523
sampling no = 974524
sampling no = 974525
sampling no = 974526
sampling no = 974527
sampling no = 974528
sampling no = 974529
sampling no = 974530
sampling no = 974531
sampling no = 974532
sampling no = 974533
sampling no = 974534
sampling no = 974535
sampling no = 974536
sampling no = 974537
sampling no = 974538
sampling no = 974539
sampling no = 974540
sampling no = 974541
sampling no = 974542
sampling no = 974543
sampling no = 974544
sampling no = 974545
sampling no = 974546
sampling no = 974547
sampling no = 974548
sampling no = 974549
sampling no = 974550
sampling no = 974551
sampling no = 974552
sampling no = 974553
sampling no = 974554
sampling no = 974555
sampling no = 974556
sampling no = 974557
sampling no = 974558
sampling no = 974559
sampling no = 974560
    
```

図5.1.2 確率論的解析におけるサンプリング数表示の様子

5.2 漏えい確率

軸方向き裂の場合、き裂の自由表面の影響によりその近傍の周方向応力は減少する。き裂最深点の応力拡大係数に及ぼすき裂間距離の影響を図5.2.1に示す<sup>70)</sup>。図中のグラフは縦軸に式5.2.1における  $F_{I,A}$ 、横軸に  $a/f$  (き裂深さ  $a$  とき裂間距離  $f$  との比) をとったものである。グラフからき裂の間隔  $f$  が非常に広いまたはき裂深さ  $a$  が浅い場合 ( $a/f$  がゼロ)  $F_{I,A}$  が最大、 $a/f = 0.2$ 程度で  $F_{I,A}$  が顕著に減少、 $a/f = 0.7$ 程度で  $F_{I,A}$  減少の割合が緩やかになっている。すなわち、き裂が深く密集している程き裂最深点における応力が減少し、き裂最深点の  $K$  値は低下する。このため、十分に深く進展した軸方向き裂の自由表面の側近において軸方向き裂は発生・進展しにくくなる。したがって、同じ溶接線に複数のき裂深さ  $a_L$  の軸方向貫通き裂が検出されたとすると、軸方向貫通き裂の間には  $a_L/f = 0.2$ に相当する  $a_L$  の5倍程度のき裂間距離  $f$  が空いていると考えられる。ここでは、このき裂間距離  $f$  により溶接線を分割したものをセグメントとする。機器及びセグメントあたりの漏えい確率の検査結果を表5.2.1に示す。この表において、漏えい時き裂深さ  $a_L$  は機器の厚さ、セグメント長さ  $f$  は漏えい時き裂深さの5倍 ( $a_L/f = 0.2$ )、溶接線当たりのセグメント数は四捨五入し整数とした。また、表5.2.1から分かるように機器あたりの漏えい確率は、常にセグメントあたりの漏えい確率以上となる。保守性を担保しおおまかな評価をするためには機器あたりの漏えい確率を、詳細な評価をするためにはセグメントあたりの漏えい確率を用いるべきであると考えられる。

$$F_{I,A} = \frac{K_{I,A}}{\sigma\sqrt{\pi a}}$$

式5.2.1

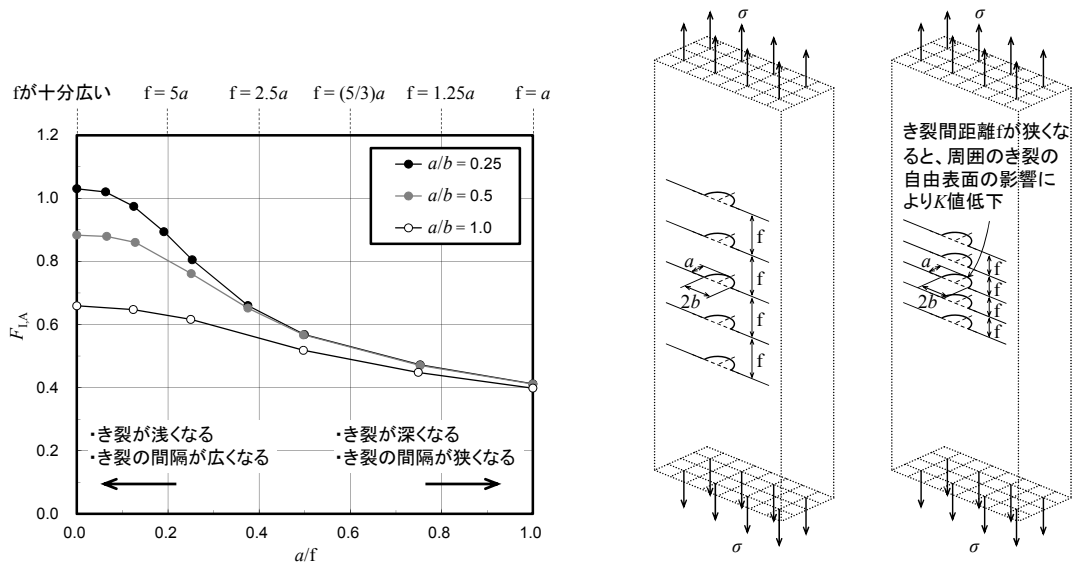


図5.2.1 き裂最深点の応力拡大係数に及ぼすき裂間距離の影響<sup>70)</sup>

表5.2.1 検査結果による機器及びセグメントあたりの漏えい確率

	溶接線 長さ (mm)	漏えい時 き裂深さ (mm)	セグメント 長さ (mm)	溶接線 あたりの セグメント数	機器 あたりの 漏えい確率	セグメント あたりの 漏えい確率
Davis-Besse 原子炉压力容器 上蓋貫通部	319.2	15.88	79.5	4	3/69 (4.3 %)	3/276 (1.1 %)
大飯3号機 原子炉压力容器 上蓋貫通部	319.2	25.7	128.5	2	1/69 (1.4 %)	1/138 (0.7 %)
V. C. Summer ホットレグ	2375.0	78.0	390.0	6	1/3 (33.3 %)	1/18 (5.6 %)
浜岡1号機 制御棒駆動機構 ハウジング	478.8	20.8	104.0	5	1/89 (1.1 %)	1/445 (0.2 %)
敦賀1号機 シュラウド サポート	11623.9	25.4	127	92	1/1 (100 %)	5/92 (5.4 %)

### 5.3 実機損傷事例解析

実機における PWSCC 及び NiSCC 損傷事例を取上げ、PASCAL-NP を用いた破損確率解析を実施した。ここでは、損傷事例のモデル化の方法や、破損確率解析条件及び解析結果について述べる。実機損傷事例解析の概要及び構成を表5.3.1に示す。米国 Davis-Besse 原子炉圧力容器上蓋貫通部における PWSCC 損傷事例解析条件及び解析結果を5.3.1及び5.3.2に、大飯3号機原子炉圧力容器上蓋貫通部における PWSCC 損傷事例解析条件及び解析結果を5.3.3及び5.3.4に、米国 V. C. Summer ホットレグにおける PWSCC 損傷事例解析条件及び解析結果を5.3.5及び5.3.6に、浜岡1号機制御棒駆動機構ハウジングにおける NiSCC 損傷事例解析条件及び解析結果を5.3.7及び5.3.8に、敦賀1号機シュラウドサポートにおける NiSCC 損傷事例解析条件及び解析結果を5.3.9及び5.3.10に示す。なお、実機損傷事例解析に用いたインプットファイルは5.4.1～5.4.5に示されている。

表5.3.1 実機損傷事例解析の概要及び構成

	対象機器	き裂種類	解析条件	解析結果	インプットファイル
Davis-Besse	原子炉圧力容器上蓋貫通部	PWSCC	5.3.1	5.3.2	5.4.1
大飯3号機			5.3.3	5.3.4	5.4.2
V. C. Summer			5.3.5	5.3.6	5.4.3
浜岡1号機	スタブチューブ	NiSCC	5.3.7	5.3.8	5.4.4
敦賀1号機	シュラウドサポート		5.3.9	5.3.10	5.4.5

#### 5.3.1 Davis-Besse 原子炉圧力容器上蓋貫通部における PWSCC 損傷事例解析条件

原子炉圧力容器上蓋には制御棒駆動機構を設けるための Ni 基合金の貫通管が J 溶接により取付けられている。米国では母材及び溶接金属で漏えいし、日本では溶接金属で漏えいする傾向にある。この理由として3.6.1に示したように、米国の母材のき裂進展速度の方が国産材よりも10倍程度速く、そのばらつきも大きいことが理由の一つとして上げられる。また、3.5及び3.6に示したように PWSCC 発生及び進展に及ぼす温度の影響は非常に大きいため、相対的に運転温度の高いプラントから先行して PWSCC の漏えいに至っている<sup>10), 17)</sup>。

Davis-Besse 原子炉圧力容器上蓋貫通部における PWSCC 損傷事例解析条件模式図を図5.3.1に示す。PWSCC 発生及び進展の駆動力として、溶接残留応力、表面切削加工による応力及び運転応力が挙げられる。このうち、溶接残留応力と運転応力は次の手順により有限要素解析により求めた<sup>71)-73)</sup>。対称性を考慮して1/8モデルとし、全69つの貫通管のうち最も損傷を受けた位置にある貫通管をモデル化した。このモデルを用いて J 溶接、耐圧試験 (20 °C、21.5 MPa<sup>71)</sup>)、運転状態 (318 °C、17.2 MPa<sup>71)</sup>)を模擬した伝熱解析及び応力解析を実施した。PASCAL-NP における解析条件の概要は次のとおりである。Davis-Besse は米国のプラントであることから母材のき裂進展速度線図は米国材相当とし、高温における材料特性は米国原子力規制委員会 (NRC; Nuclear Regulatory Commission) の報告書<sup>74)</sup>等から引用した。周方向応力分布解析結果のうち管内表面に

着目すると貫通部谷側が高く、4.5に示したき裂発生応力閾値250 MPa を大きく超えている。Step 1ではこの部位からの軸方向き裂発生及び進展解析を実施した。次に軸方向応力分布解析結果によると谷側外表面J溶接金属直上の応力が250 MPa を超えていることが分かる。Step 1で漏えいした場合、この部位は応力腐食割れの条件の一つである水環境条件を満足してき裂は進展し続ける。Step 2では保守的な解析を実施するため、Step 1で漏えいしたサンプルに対して Step 2開始時の初期き裂発生時間をゼロとして、周方向貫通き裂進展解析のみを実施した。Step 1の漏えい判定は板厚の80 %、Step 2の破断判定は3.9.2に示した実断面応力基準とした。

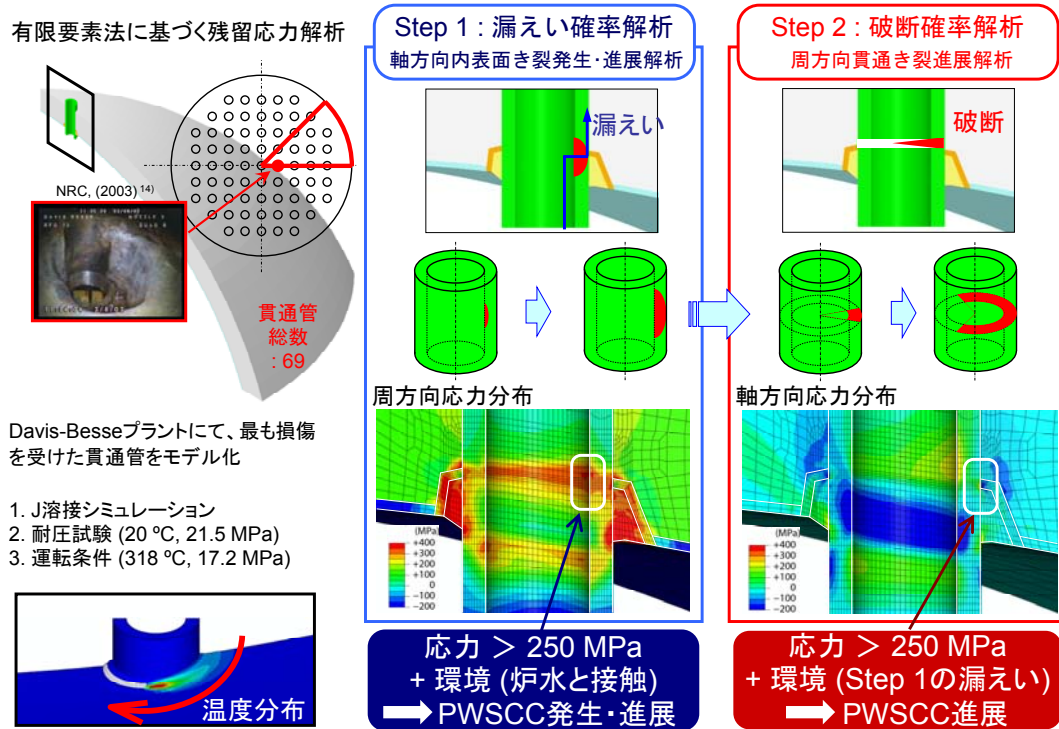


図5.3.1 Davis-Besse 原子炉圧力容器上蓋貫通部における PWSCC 損傷事例解析条件模式図

5.3.2 Davis-Besse 原子炉压力容器上蓋貫通部における PWSCC 損傷事例解析結果

Davis-Besse における破損確率解析結果と検査結果との比較を図5.3.2に示す。縦軸は累積破損確率であり、Step 1で求めた累積漏えい確率または Step 2で求めた累積破断確率のいずれかである。横軸は運転年数であり、検査結果の年数は解析結果と比較するため定期検査等で停止していた時間を除いた Effective Full Power Years とした<sup>15)</sup>。また、検査結果の漏えい確率は、表5.2.1に示したように、機器及びセグメントあたりの破損確率の両方を示している。初期き裂深さ平均値を2.0 mm と定義した初期き裂発生確率が0.11 %となるまでに7.2 年を要する。15.8 年経過時に3/69の貫通管 (3/276セグメント) の漏えいが検出されており、PFM 解析結果は検査結果に対し保守的な評価を与えつつ概ね良く一致することが示された。PFM 解析によると27.9年経過時に1/69の貫通管が破断する結果となった。

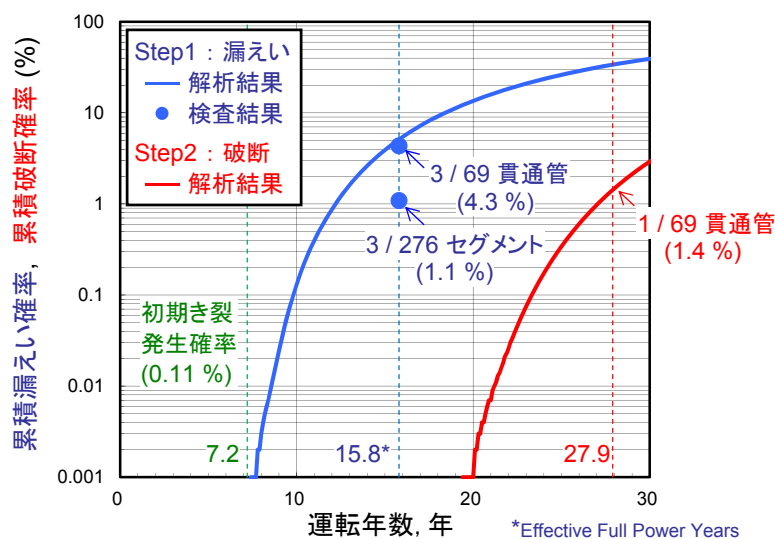


図5.3.2 Davis-Besse 原子炉压力容器上蓋貫通部における PWSCC 破損確率解析結果と検査結果との比較



5.3.3 大飯3号機原子炉压力容器上蓋貫通部における PWSCC 損傷事例解析条件

大飯3号機原子炉压力容器上蓋貫通部における PWSCC 損傷事例解析条件模式図を図5.3.3に示す。大飯3号機において漏えいが検出された貫通管は Davis-Besse の場合よりもやや外側の貫通管であるが、前述した Davis-Besse と同じ応力分布で代用することとした。溶接金属表面の応力解析結果に着目すると山側の方が谷側よりも高いため、山側で PWSCC が発生し易い傾向にあると推測され、大飯3号機の検査結果でも山側で PWSCC が貫通しており<sup>18)-20)</sup>、この傾向を裏付けるものとなっている。さらに、山側の溶接金属表面には、バフ仕上げがなされていないため、グライダ痕の残っている部分が確認されており、3.5.3に示した切削加工域が深くなることで初期き裂発生までの時間を短縮していると考えられる。Davis-Besse における事例解析では保守的に Step 2開始と同時に初期き裂が発生するとしたが、本事例のように溶接金属からき裂が発生する場合、Step 1において漏えいに至るまでは Step 2において J 溶接金属部直上の母材外表面谷側部分は炉水と接触しないため、Step 2開始時に初期き裂発生時間を再度算出することとした。大飯3号機の原子炉压力容器は国産であるため、PASCAL-NP に入力する溶接材及び母材のき裂進展速度線図は国産材相当の Alloy 182及び Alloy 600とした。

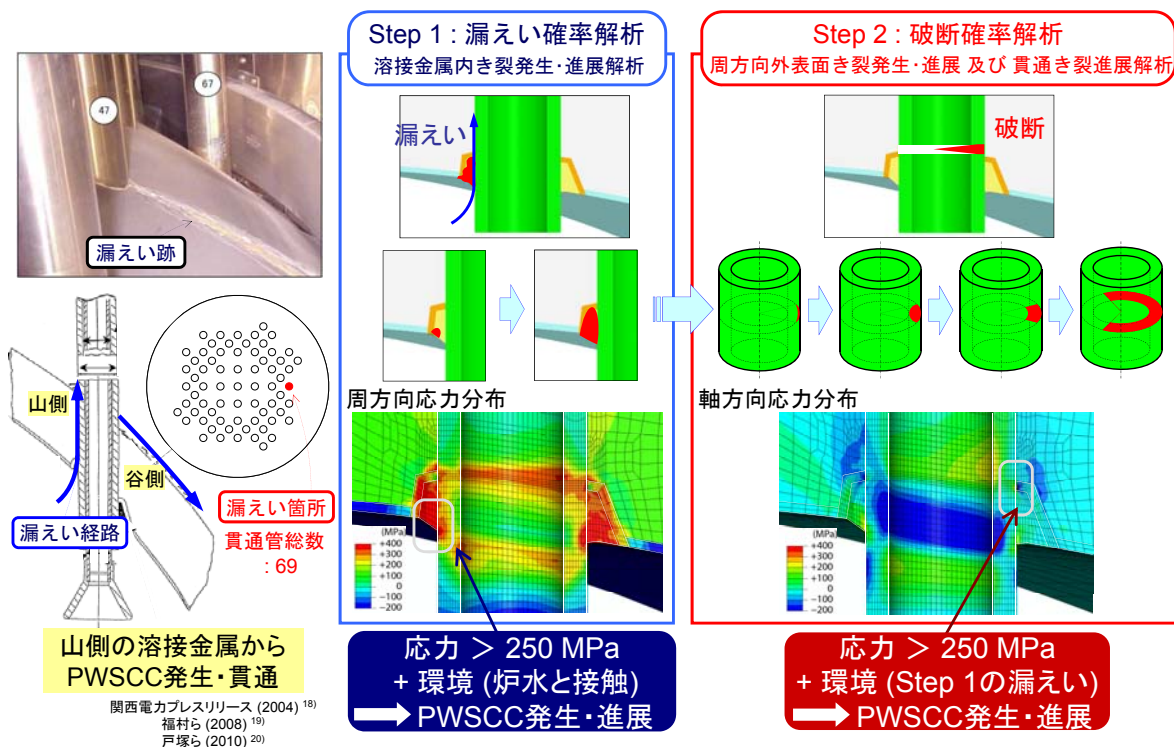


図5.3.3 大飯3号機原子炉压力容器上蓋貫通部における PWSCC 損傷事例解析条件模式図

5.3.4 大飯3号機原子炉压力容器上蓋貫通部におけるPWSCC損傷事例解析結果

大飯3号機破損確率解析結果を図5.3.4に示す。検査結果の運転年数は停止していた時間を含めた営業運転開始から検査までの年数とした。1.9年経過時、初期き裂深さ平均値を0.75 mmとした初期き裂発生確率解析結果が0.10%となる。漏えい確率解析結果はその後増加し12.4年経過時、貫通管の1/69 (セグメントの1/138)の検査結果に対して保守的かつ概ね一致した。破断確率解析結果は、Davis-Besseでは運転年数の経過に伴いある程度の増加が見られた一方で、大飯3号機では40年間0.0001%未満であった。この理由として、本損傷事例ではStep 2の初期き裂発生時間を含めていることや、Step 2の開始時に貫通き裂ではなく外表面き裂を経由して貫通き裂としていること、さらには国産材 Alloy 600のき裂進展速度は、米国材のものよりも約十倍弱も遅くばらつきも小さいが挙げられる。

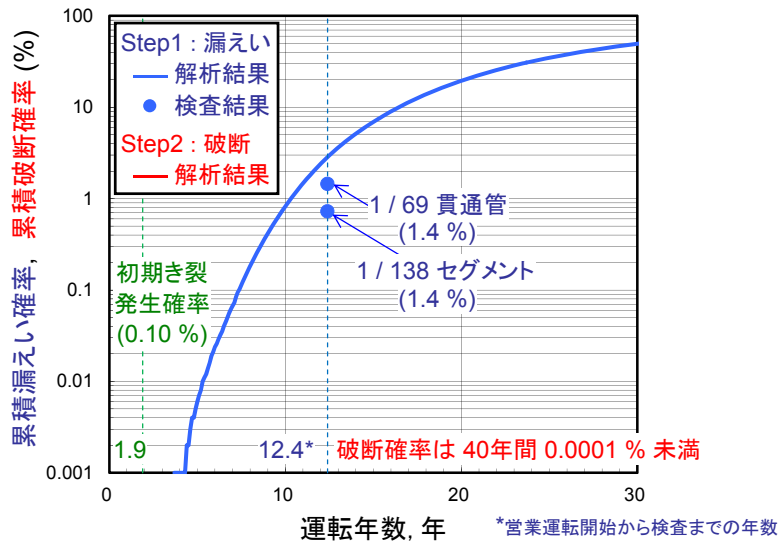


図5.3.4 大飯3号機原子炉压力容器上蓋貫通部におけるPWSCC破損確率解析結果と検査結果との比較

5.3.5 V. C. Summer ホットレグにおける PWSCC 損傷事例解析条件

V. C. Summer ホットレグにおける PWSCC 損傷事例解析条件模式図を図5.3.5に示す。V. C. Summer は Westinghouse 製の3ループ PWR であり、図中左下に示すように原子炉压力容器から蒸気発生器へと向かう経路にホットレグを1つずつ、プラント全体でホットレグを3つ有する<sup>75)</sup>。このうちの1つのホットレグにおいて軸方向溶接金属内き裂が原因となり漏えいに至った。き裂の様子を図中左上に示す<sup>26)</sup>。軸方向溶接金属内き裂はバタリングまたは突合せ溶接金属表面から発生し、原子炉压力容器管台に (低合金鋼) に達するとほぼ停止、セーフエンド (ステンレス) に達すると遅延しており、バタリング及び J 溶接金属内を優先的に進展し貫通している。き裂前縁の形状が円形になっていることから分かるようにデンドライト粒界型き裂であるため、3.6.2 における米国材 Alloy 182のデンドライト方向に相当するき裂進展速度線図を用いた。

漏えいした部位を切出してさらに詳しく検査した結果、バタリングに周方向き裂も見つかった。周方向き裂も軸方向き裂と同様に原子炉压力容器管台に達すると停止していたが、周方向き裂発生位置がセーフエンド寄りであった場合、き裂は原子炉压力容器で停止することなく進展を続けてホットレグの破断に至る可能性もあると考えられる。ここでは、軸方向溶接金属内き裂発生・進展解析を Case 1、周方向内表面き裂発生・進展解析及び周方向貫通き裂進展解析を Case 2として、破損確率解析を実施した。温度及び内圧は324 °C 及び15.5 MPa とし、残留応力及び運転分布は文献値を参考に決定した<sup>76)</sup>。なお、破損確率に及ぼす補修溶接の影響評価のため、Case 2では補修溶接なし/ありの残留応力を用いて破損確率解析を実施した<sup>76), 77)</sup>。

き裂の様子

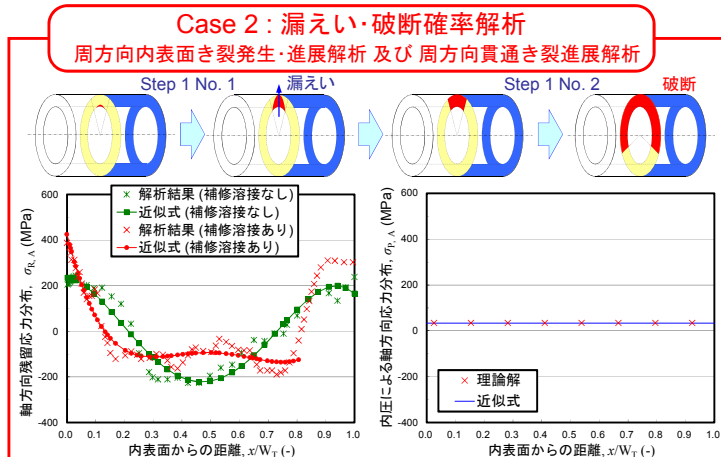
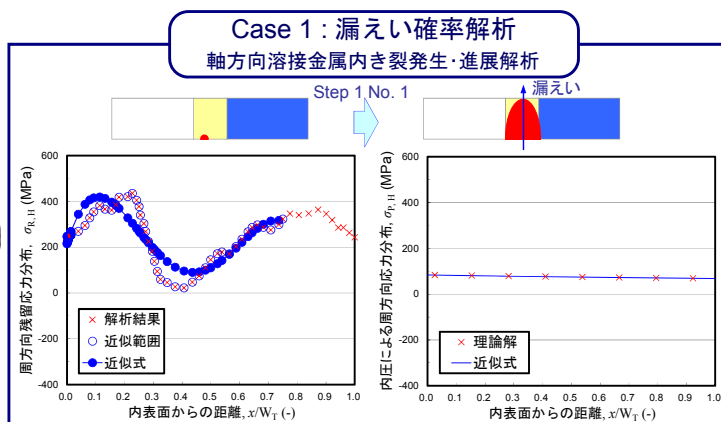
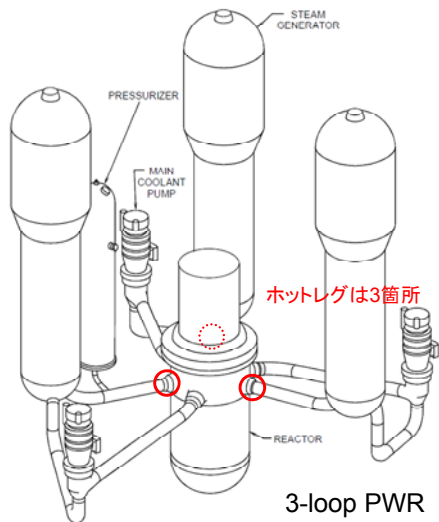
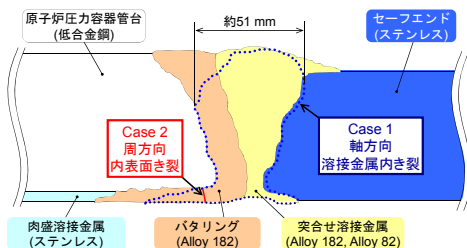


図5.3.5 V. C. Summer ホットレグにおける PWSCC 損傷事例解析条件模式図

5.3.6 V. C. Summer ホットレグにおける PWSCC 損傷事例解析結果

V. C. Summer ホットレグにおける PWSCC 破損確率解析結果と検査結果との比較を図5.3.6に示す。Case 1、Case 2 (補修溶接なし) 及び Case 2 (補修溶接あり) における破損確率解析結果を (a)、(b) 及び (c) に示す。Case 1の場合、初期き裂発生確率は、6.5年経過時に0.19%となった。その後累積漏えい確率が増加し、検査がなされた16.8年において保守的な評価を与えつつ概ね一致する結果となった。Case 2 (補修溶接なし) の場合、初期き裂発生確率が0.12%になるまでに58.6年及び破断確率が33.3%になるまで162.0年である一方、Case 2 (補修溶接あり) の場合、初期き裂発生確率が0.44%になるまで0.7年及び破断確率が33.3%になるまでに33.1年であり、破損確率に及ぼす補修溶接の影響は極めて大きいことが分かった。検査結果では16.8年に5 mm 深さ程度の周方向き裂を検出していることから、初期き裂発生時間までの時間をみると補修溶接ありの解析結果の方が検査結果の傾向に近いと考えられる。このため、V. C. Summer において製造時に何らかの補修溶接がなされていたものと推測される。

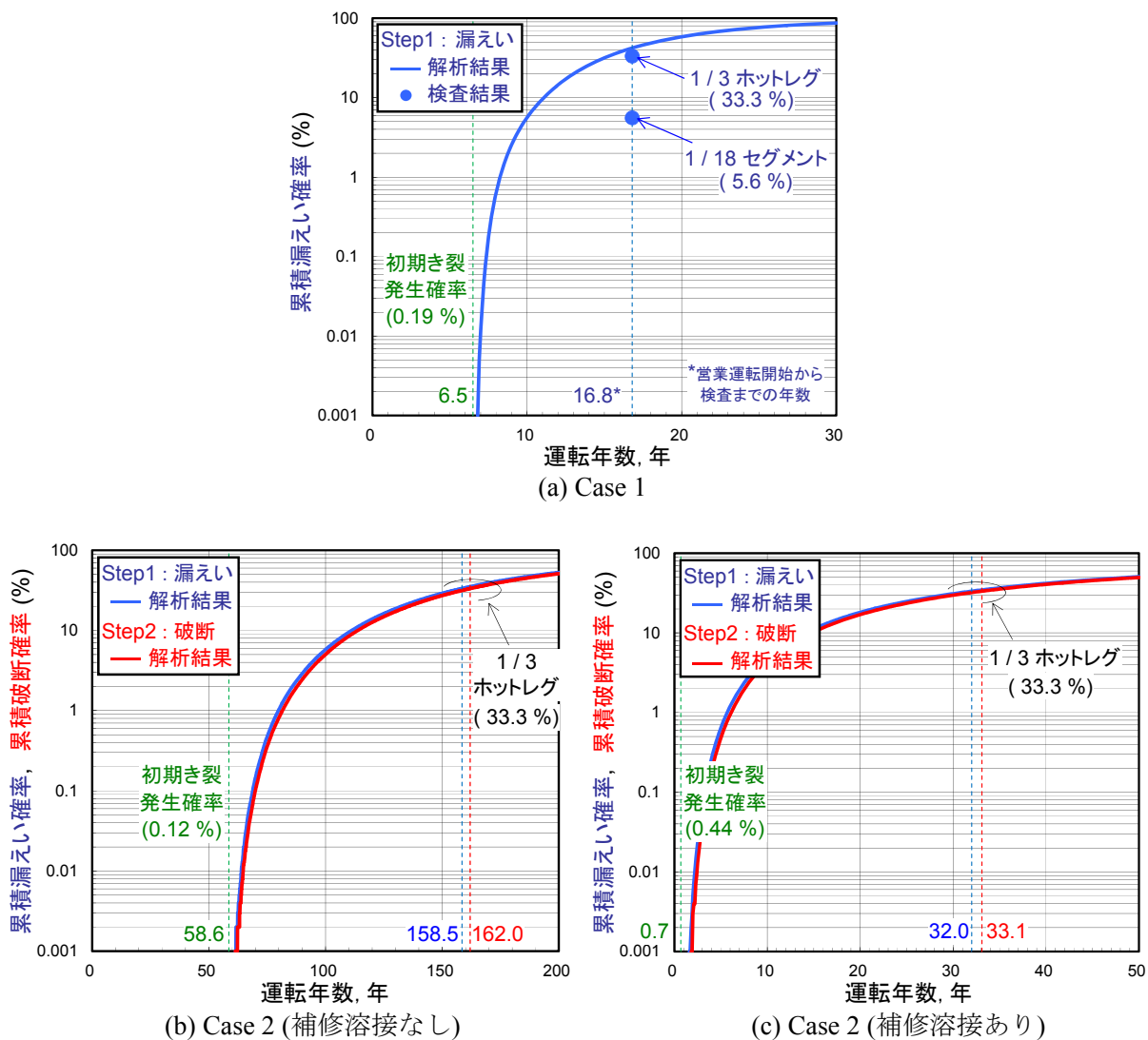


図5.3.6 V. C. Summer ホットレグにおける PWSCC 破損確率解析結果と検査結果との比較

### 5.3.7 浜岡1号機制御棒駆動機構ハウジングにおける NiSCC 損傷事例解析条件

浜岡1号機制御棒駆動機構ハウジングにおける NiSCC 損傷事例解析条件模式図を図5.3.7に示す<sup>28), 29)</sup>。全貫通部数89のうち取付角度の大きい貫通部の1つが漏えいした。下部溶接金属の溶接施工は Alloy 182を用いた手動溶接の SMAW であり、取付角度が小さい場合、初層は谷側及び山側を交互に溶接し、2層目から最終層までは山側から谷側までをまとめて溶接している。取付角度が大きい場合、谷側半分の初層から最終層を全て終了した後、山側半分の初層から最終層までを溶接している。この溶接施工の違いが90°近傍の残留応力分布に影響を及ぼしていると考えられ、漏えいした箇所では後者の溶接方法が適用されている。上部溶接金属の溶接施工は Alloy 82を用いた自動溶接の GTAW である。Alloy 182と Alloy 82の Cr 量を比較すると3.4に示したように、Alloy 182の方が Cr が少なく耐食性に劣る。したがって Alloy 82よりも Alloy 182の方に NiSCC が発生し易い傾向にある。Alloy 182と Alloy 600の Cr 量は同程度であるが、Alloy 182が溶接金属であり Alloy 600が母材であるため、Alloy 182の方が高い引張の残留応力となっている。以上のことから、Alloy 182で NiSCC が発生する検査結果はこれまでの知見と良く一致している。なお、き裂発生や進展に影響を及ぼす溶存酸素濃度は運転開始時 (1976) から水素注入試験開始時 (1998) まで、概ね0.1~0.25 ppm であり、初期き裂発生までの時間は3.5に示した0 mV<sub>SHE</sub>を使用した<sup>44)</sup>。残留応力分布は実測値と良好に一致している解析結果<sup>78)</sup>により決定した。PWSCC 損傷事例解析の場合と異なり、表面の残留応力平均値は NiSCC の発生閾値350 MPa を超えないが、残留応力のばらつきを考慮することで NiSCC の発生確率は2%となる。さらに、中部電力プレスリリース<sup>79)</sup>によると、溶接金属表面にグラインダ痕が確認されており、ここでは100 μm の切削加工深さを仮定して  $\sigma_{\text{eff}}$  を算出した。これにより NiSCC 発生確率は2%から14%に増加する。

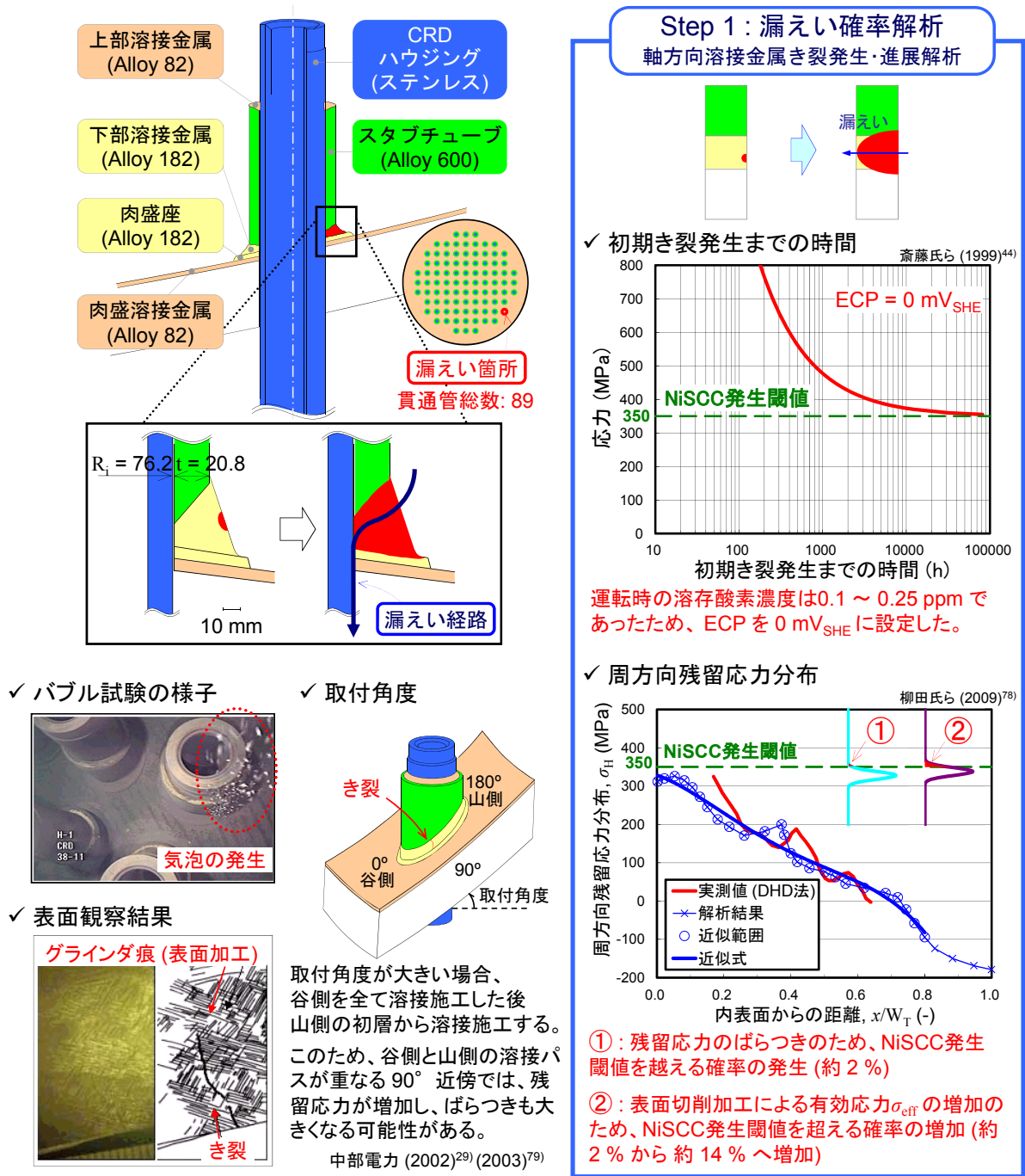


図5.3.7 浜岡1号機制御棒駆動機構ハウジングにおける NiSCC 損傷事例解析条件模式図

### 5.3.8 浜岡1号機制御棒駆動機構ハウジングにおける NiSCC 破損事例解析結果

浜岡1号機制御棒駆動機構ハウジングにおける NiSCC 破損確率解析結果と検査結果との比較を図5.3.8に示す。1.2年後初期き裂発生確率が0.12 %となり、累積漏えい確率が緩やかに増加している。解析結果は検査結果と概ね一致しつつ保守的な評価を与える。PWSCC 発生閾値250 MPa と比べて NiSCC 発生 の 応力 閾値は350 MPa と高く、溶接金属表面の残留応力値も応力閾値の350 MPa 近傍にある。このため、累積漏えい確率解析結果に及ぼす残留応力の平均値やばらつきの影響は PWSCC の場合と比べて NiSCC の方が大きくなると考えられる。

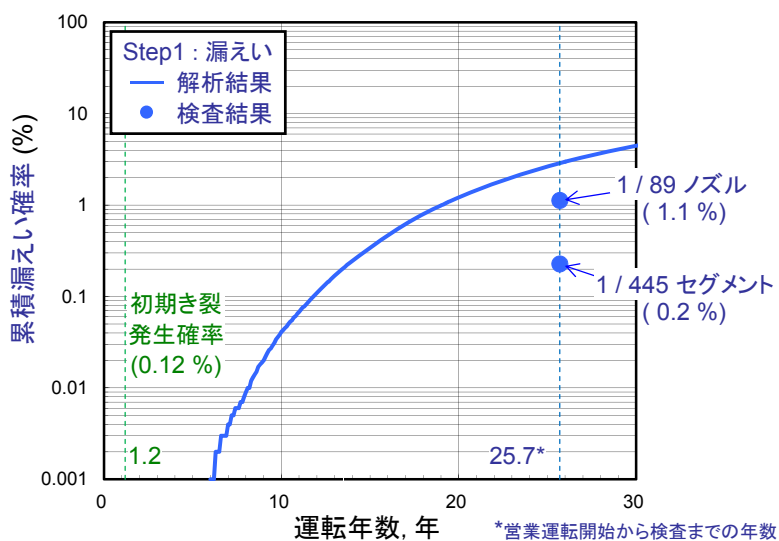


図5.3.8 浜岡1号機制御棒駆動機構ハウジングにおける NiSCC 破損確率解析結果と検査結果との比較

5.3.9 敦賀1号機シュラウドサポートにおける NiSCC 損傷事例解析条件

日本原電敦賀1号機シュラウドサポートにおける NiSCC 損傷事例解析条件模式図を図5.3.9に示す<sup>31)</sup>。シュラウドサポートは Alloy 182により原子炉压力容器下部に溶接されている。NiSCC は下部溶接金属の内表面側に発生しており外表面側には発生していない。日本原電によるとこの理由として、耐圧試験により外表面には引張の変形が発生し溶接時の圧縮塑性歪が緩和することから引張残留応力も低下することが一因としている。損傷事例解析に用いる周方向応力分布は図5.3.9の右上に示すように内表面と外表面の応力解析結果<sup>32)</sup>を保守的に線形補完したものをを用いた。シュラウドサポート展開図を図5.3.9の下に示す。下部溶接金属内表面の NiSCC の総数は228箇所、シュラウドサポート厚さ25.4 mm を超える程度の深いき裂は少なくとも5箇所 (き裂深さ：22から34 mm 程度) と報告されている。損傷事例解析では保守的にシュラウドサポート厚さの8割に至った場合に漏えいとした。

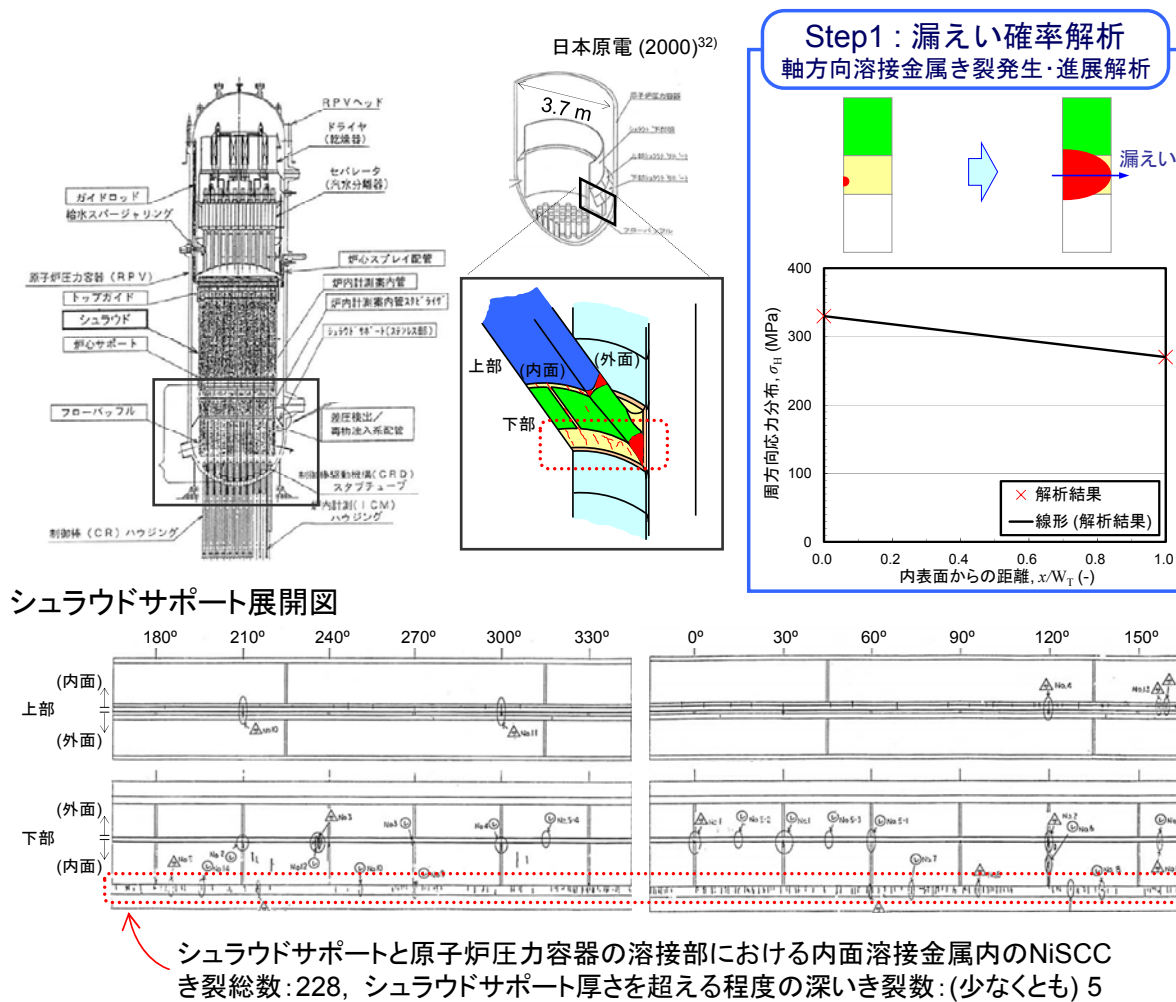


図5.3.9 敦賀1号機シュラウドサポートにおける NiSCC 損傷事例解析条件模式図



5.3.10 敦賀1号機シュラウドサポートにおける NiSCC 破損事例解析結果

敦賀1号機シュラウドサポートにおける NiSCC 破損確率解析結果と検査結果との比較を図5.3.10に示す。初期き裂発生確率は1.1年で0.13%となる。検査結果による機器あたりの漏えい確率は、29.5年経過時漏えい確率(漏えい数/溶接線数)は1/1すなわち100%となる。しかしながら、1溶接線に漏えいと定義したき裂が少なくとも5箇所あるものの、き裂の数に関する情報が機器あたりの漏えい確率には反映されていない。このためシュラウドサポート下部溶接線のようにき裂寸法に対して非常に長い溶接線の漏えいに関して検査結果と PFM 解析結果とを比較する場合、検査結果による漏えい確率としては機器あたりの漏えい確率よりもセグメントあたりの漏えい確率を用いるべきである。検査結果によるセグメントあたりの漏えい確率(漏えいき裂数/セグメント数)は29.5年で5.4%であり、解析結果は検査結果に対して概ね一致し保守的な評価となった。

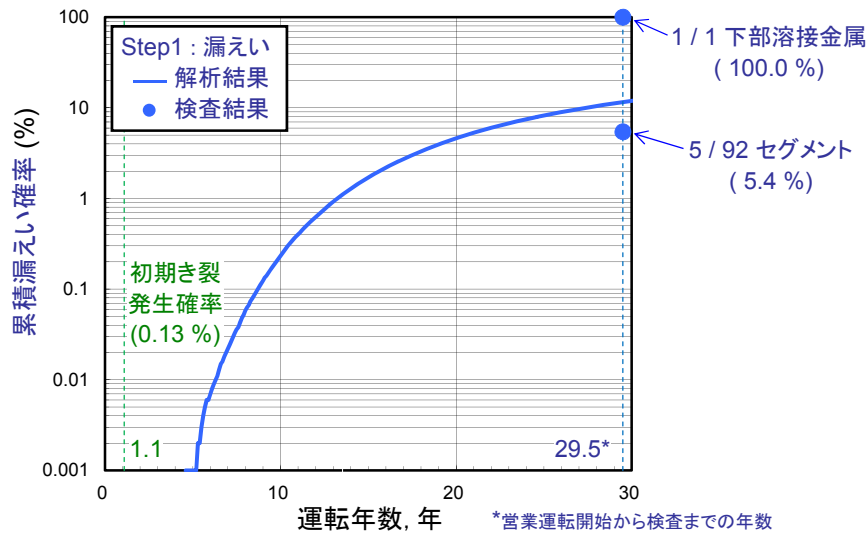


図5.3.10 敦賀1号機シュラウドサポートにおける NiSCC 破損確率解析結果と検査結果との比較

## 5.4 実機損傷事例解析インプットファイル

ここでは、5.3の損傷事例解析に用いたインプットファイルを示す。アスタリスクが2個以上の行はコメントアウト、1個の行はキーワード、キーワード直下は入力項目である。

### 5.4.1 Davis-Besse 損傷事例解析インプットファイル

```

**-----
** 【 解析手法 】
** *Method_of_analysis
**   : 解析手法 (PFM or DFM)
** *Total_sampling_number
**   : サンプル数
** *Time_span_of_analysis
**   : 解析期間 (min, max, step)
**-----
** *Method_of_analysis
**   PFM
**
** *Total_sampling_number
**   10000000
**
** *Time_span_of_analysis
**   0.0, 40.0, 0.1
** *Type_of_SCC
**   PWSCC
**-----
** 【 機器の幾何形状 】
** *Component
**   : 機器名
** *Inner_radius_and_pipe_thickness
**   : 配管内半径またはノズル内半径 Ri (mm), 配管肉厚またはノズル肉厚 t(mm)
** *WT, *WK, *WL
**   : 溶接金属の寸法 (mm)
**-----
** *Component
**   VHP (VHP_Case1_PFM)
** *Inner_radius_and_pipe_thickness
**   34.92, 15.88
** *WT
**   183.0
** *WK
**   15.88
** *WL
**   46.0
**-----
** 【 機器の材質 】
** *Material_for_stepX
**   : 材料名
** *Elastic_for_stepX
**   : 弾性係数 (MPa)
** *Yield_Stress_for_stepX
**   : 降伏応力, (確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, ...)
** *Tensile_Strength_for_stepX
**   : 引張強さ, (確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, ...)
**-----
*****
** Step 1 **
*****
** *Material_for_step1

```

```

base_metal
**
*Elastic_for_step1
  198600
** NUREG CR-5642 at 318°C
**
*Yield_stress_for_step1
  Normal, 316.7, 43.0, 187.7, 445.7
** Average : NUREG CR-5642 at 318
** Scatter :  $\sigma = 3\sigma / 3 = 129.0 / 3 = 43.0$ 
** LowerLimit :  $-3\sigma$ 
** UpperLimit :  $+3\sigma$ 
**  $3\sigma = \text{NUREG CR-5642 at RT} - \text{JIS G4903 NCF600 TP at RT}$ 
**  $3\sigma = 374.0 - 245.0 = 129.0$ 
**
*Tensile_strength_for_step1
  Normal, 690.3, 61.0, 507.3, 873.3
** Average : NUREG CR-5642 at 318
** Scatter :  $\sigma = 3\sigma / 3 = 183.0 / 3 = 61.0$ 
** LowerLimit :  $-3\sigma$ 
** UpperLimit :  $+3\sigma$ 
**  $3\sigma = \text{NUREG CR-5642 at RT} - \text{JIS G4903 NCF600 TP at RT}$ 
**  $3\sigma = 733.0 - 550.0 = 183.0$ 
**
*****
** Step 2 **
*****
*Material_for_step2
  base_metal
*Elastic_for_step2
  198600
*Yield_stress_for_step2
  Normal, 316.7, 43.0, 187.7, 445.7
*Tensile_strength_for_step2
  Normal, 690.3, 61.0, 507.3, 873.3
-----
** 【 初期き裂発生モデル 】
** *Standard_time_of_crack_initiation_for_stepX
**   : ti0 (hr)
** *Scatter_of_crack_initiation_for_stepX
**   :  $\alpha_i$  (確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, . . .)
** *Temperature_index_for_stepX
**   : 温度, 温度閾値, At, Qi, R
** *Stress_index_for_stepX
**   : 切削加工深さ ( $\mu\text{m}$ ), 極表面応力 (MPa), 応力閾値 (MPa), As, n
** *Surface_machining_for_stepX
**   : (負荷応力-降伏応力) vs 切削加工深さ を表形式で入力
** *Material_index_for_stepX
**   : 定数を入力
** *Depth_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂深さ (mm)
** *Half_length_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂半長 (mm)
** *Half_angle_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂半角 (degree)
** *Position_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂中心位置 (mm)
-----
*****
** Step 1 **
*****
*Standard_time_of_crack_initiation_for_step1
  10000
*Scatter_of_crack_initiation_for_step1
  Weibull, 1.285, 1.873, 0.924

```

```

*Temperature_index_for_step1
318, 250, 9.49E+15, 182.963, 8.31447E-3
** T, Tth, Aθ, Qi, R
*Stress_index_for_step1
100, 1000, 250, 2.44E-11, 4
** dc, σs, σth, Aσ, n
** σ app には保守的に板厚内の応力最大値を入力
*Surface_machining_for_step1
-, 0, 50, 100, 150, 200
0, 0, 5, 20, 30, 38
25, 25, 35, 46, 59, 73
50, 50, 63, 75, 92, 112
75, 75, 90, 105, 127, 159
100, 100, 119, 136, 164, 236
125, 125, 144, 174, 206, 347
150, 150, 174, 210, 265, 446
175, 175, 206, 248, 341, 526
200, 200, 236, 284, 421, 594
225, 225, 268, 331, 502, 654
250, 250, 299, 381, 567, 715
275, 275, 333, 439, 635, 774
300, 300, 365, 505, 693, 828
325, 325, 399, 568, 746, 884
*Material_index_for_step1
0.5
*Depth_of_initial_crack_for_step1
Normal, 2.00, 1.00, 1.00, 3.00
*Half_length_of_initial_crack_for_step1
Normal, 6.00, 3.00, 3.00, 9.00
*Half_angle_of_initial_crack_for_step1
Normal, 2.00, 0.50, 0.50, 3.50
*Position_of_initial_crack_for_step1
Normal, 96.75, 0.00, 96.75, 96.75
*****
** Step 2 **
*****
*Standard_time_of_crack_initiation_for_step2
0
** Step2 開始と同時にき裂が発生
*Scatter_of_crack_initiation_for_step2
Weibull, 1.285, 1.873, 0.924
*Temperature_index_for_step2
318, 250, 9.49E+15, 182.963, 8.31447E-3
*Stress_index_for_step2
100, 1000, 250, 2.44E-11, 4
*Surface_machining_for_step2
-, 0, 50, 100, 150, 200
0, 0, 5, 20, 30, 38
25, 25, 35, 46, 59, 73
50, 50, 63, 75, 92, 112
75, 75, 90, 105, 127, 159
100, 100, 119, 136, 164, 236
125, 125, 144, 174, 206, 347
150, 150, 174, 210, 265, 446
175, 175, 206, 248, 341, 526
200, 200, 236, 284, 421, 594
225, 225, 268, 331, 502, 654
250, 250, 299, 381, 567, 715
275, 275, 333, 439, 635, 774
300, 300, 365, 505, 693, 828
325, 325, 399, 568, 746, 884
*Material_index_for_step2
0.5
*Depth_of_initial_crack_for_step2
Normal, 15.88, 0.00, 15.88, 15.88

```

```

*Half_length_of_initial_crack_for_step2
  Normal, 0.18, 0.00, 0.18, 0.18
*Half_angle_of_initial_crack_for_step2
  Normal, 0.60, 0.0, 0.60, 0.60
**  $2\pi r \times \theta / 360 = 2\text{mm} \times 2$ 
**  $\theta = 0.6 \text{ deg}$ 
*Position_of_initial_crack_for_step2
  Normal, 96.75, 0.00, 96.75, 96.75
**-----
** 【 き裂進展評価 】
** *Flag_of_crack_kind_for_stepX_noX
**   : (1行目) き裂種類
**   き裂種類 0 (周方向・内面き裂)
**   き裂種類 1 (軸方向・内面き裂)
**   き裂種類 2 (周方向・外面き裂)
**   き裂種類 3 (軸方向・外面き裂)
**   き裂種類 4 (周方向・貫通き裂)
**   き裂種類 5 (半径方向・J溶接部き裂)
** *SIF_calculator_for_stepX_noX
**   : (1行目) 応力拡大係数算出式
**   き裂種類 0 の場合 ASME, Bergman
**   き裂種類 1 の場合 ASME, Shiratori
**   き裂種類 2 の場合 ASME, Chapuliot
**   き裂種類 3 の場合 ASME, Fett
**   き裂種類 4 の場合 Zang, Sander, API4
**   き裂種類 5 の場合 API5
**   ASME 式の場合のみ塑性域補正 (MPa) が必要
** *Operating_stress_distribution_for_stepX_noX
**   次数,  $\sigma_{op\_0}$ ,  $\sigma_{op\_1}$ ,  $\sigma_{op\_2}$ ,  $\sigma_{op\_3}$ ,  $\sigma_{op\_4}$ 
** *Residual_stress_distribution_for_stepX_noX
**   次数,  $\sigma_{r\_0}$ ,  $\sigma_{r\_1}$ ,  $\sigma_{r\_2}$ ,  $\sigma_{r\_3}$ ,  $\sigma_{r\_4}$ 
** *Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_stepX_noX
**   板厚内領域分割数
** *Scatter_of_residual_stress_distribution_for_stepX_noX
**   確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, . . .
**-----
*****
** Step1_No1 **
*****
*Flag_of_crack_kind_for_step1_no1
  1
*SIF_calculator_for_step1_no1
  Shiratori
*Operating_stress_distribution_for_step1_no1
  3, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
** 周方向の拘束のため、運転応力を無視する
*Residual_stress_distribution_for_step1_no1
  3, 337.37, -22.744, -70.452, 87.406
*Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_step1_no1
  8
*Scatter_of_residual_stress_distribution_for_step1_no1
  Normal, 0.0, 10.0, -60.0, 60.0
*Plastic_strain_distribution_for_step1_no1
** a/t,  $\epsilon_p$  %
  0.0, 0.00
  0.1, 0.00
  0.2, 0.00
  0.3, 0.00
  0.4, 0.00
  0.5, 0.00
  0.6, 0.00
  0.7, 0.00
  0.8, 0.00
  0.9, 0.00
  1.0, 0.00

```

```

*****
** Step1_No2 **
*****
** Step1_No1 はき裂種類 1 のため、Step1_No2 に移行しない
**
**
**
*****
** Step2_No1 **
*****
*Flag_of_crack_kind_for_step2_no1
  4
*SIF_calculator_for_step2_no1
  API4
*Operating_stress_distribution_for_step2_no1
  1, 18.91, 0.00
** 軸方向に拘束がないため、運転応力を考慮する
*Residual_stress_distribution_for_step2_no1
  1, -74.62, 442.55
*Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_step2_no1
  8
*Scatter_of_residual_stress_distribution_for_step2_no1
  Normal, 0.0, 10.0, -60.0, 60.0
*Plastic_strain_distribution_for_step2_no1
** a/t,  $\epsilon_p$  %
  0.0, 0.00
  0.1, 0.00
  0.2, 0.00
  0.3, 0.00
  0.4, 0.00
  0.5, 0.00
  0.6, 0.00
  0.7, 0.00
  0.8, 0.00
  0.9, 0.00
  1.0, 0.00
*****
** Step2_No2 **
*****
** Step2_No1 はき裂種類 4 のため、Step2_No2 に移行しない
**
**
**-----
** 【 Leak 判定 】
** *Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_in_pipe
**   : Leak 時のき裂深さ比 a/t (き裂種類 0~3 にて有効)
** *Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_J-groove_welds
**   : Leak 時のき裂深さ比 a/T (き裂種類 5 にて有効)
**-----
** *Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_t
**   0.8
** *Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_WT
**   0.186
** aL/T = 34/183 = 0.186
**-----
** 【 破断判定 】
** *Break_judgement_based_on_primary_stress
**   : 1 次一般膜応力 Pm (MPa), 1 次曲げ応力 Pb (MPa), 熱膨張応力 Pe (MPa)
**   : 破断判定に 1 次応力基準を適用するとき入力 (き裂種類 0, 2, 4 にて有効)
**   : 無効とする場合は, "Not evaluate" と入力
** *Break_judgement_by_half_crack_angle
**   : 破断時き裂半角  $\theta_B$  (degree)
**   : 破断判定にき裂半角を適用するとき入力 (き裂種類 4 にて有効)
**   : 無効とする場合は, "Not evaluate" と入力
**-----

```

```

*Break_judgement_based_on_primary_stress
  18.91, 0, 0
*Break_judgement_by_half_crack_angle
  Not evaluate
**-----
** 【 き裂進展速度線図 】
** *Slope_of_CGR_of_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (Ni 基合金母材)
** *Slope_of_CGR_of_weld_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (Ni 基合金溶接金属)
** *Slope_of_CGR_of_CGR_of_RPV_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (原子炉圧力容器鋼)
** き裂進展速度乗数, 応力拡大係数シフト量, 下閾値, 上閾値
**
** *Scatter_of_CGR_of_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (Ni 基合金母材)
** *Scatter_of_CGR_of_weld_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (Ni 基合金溶接金属)
** *Scatter_of_CGR_of_CGR_of_RPV_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (原子炉圧力容器鋼)
** き裂進展速度係数  $\alpha$  の自然対数  $\ln(\alpha)$  を正規分布に当てはめ, 平均値及び標準偏差を算出する
**  $\alpha$  の単位は, da/dt (m/s), K (MPa0.5)
**-----
*****
** base metal **
*****
*Slope_of_CGR_of_base_metal
  1.16, 9.0, 9.0, 100.0
*Scatter_of_CGR_of_base_metal
  LogNormal, -27.3358, 1.0160, -33.4318, -21.2398
*Effect_of_Temperature_on_CGR_of_base_metal
** Ta(C), Ta_ref(C), Q(kJ/mol), R(kJ/molK) ** c_temp = 0.734
  318, 325, 130, 8.31447E-3
*Effect_of_ECP_on_CGR_of_base_metal
** ECP (mVSHE), ECP_lower (mVSHE), ECP_upper (mVSHE), a_ECP, b_ECP ** c_ECP = 9.752641E-18
  -150, -200, -100, 2.08E-16, 0.0204
*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_base_metal
**  $\epsilon_p$  %, Cp
  0.000, 1.000
  2.002, 2.742
  4.002, 4.054
  6.002, 5.224
  8.005, 6.303
  10.002, 7.271
  12.007, 8.136
  14.004, 8.909
  16.002, 9.593
  18.002, 10.173
  20.006, 10.696
  22.038, 11.178
  24.720, 12.539
  25.720, 15.212
  26.719, 18.775
  28.174, 27.468
*****
** weld metal **
*****
*Slope_of_CGR_of_weld_metal
  1.60, 0.0, 0.0, 100.0
*Scatter_of_CGR_of_weld_metal
  LogNormal, -27.3358, 1.0160, -33.4318, -21.2398
*Effect_of_Temperature_on_CGR_of_weld_metal
** Ta(C), Ta_ref(C), Q(kJ/mol), R(kJ/molK) ** c_temp = 0.734
  318, 325, 130, 8.31447E-3
*Effect_of_ECP_on_CGR_of_weld_metal

```

```

** ECP (mVSHE), ECP_lower (mVSHE), ECP_upper (mVSHE), a_ECP, b_ECP    ** c_ECP = 9.752641E-18
-150, -200, -100, 2.08E-16, 0.0204
*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_weld_metal
** ε p %, Cp
  0.000, 1.000
  2.002, 2.742
  4.002, 4.054
  6.002, 5.224
  8.005, 6.303
 10.002, 7.271
 12.007, 8.136
 14.004, 8.909
 16.002, 9.593
 18.002, 10.173
 20.006, 10.696
 22.038, 11.178
 24.720, 12.539
 25.720, 15.212
 26.719, 18.775
 28.174, 27.468
*****
** RPV base metal **
*****
*Slope_of_CGR_of_RPV_base_metal
  0.0, 0.0, 0.0, 100.0
*Scatter_of_CGR_of_RPV_base_metal
  LogNormal, -27.3933, 0.0001, -27.3939, -27.3927
*Effect_of_Temperature_on_CGR_of_RPV_base_metal
** Ta (C), Ta_ref (C), Q (kJ/mol), R (kJ/molK)    ** c_temp = 0.734
  324, 325, 0, 8.31447E-3
*Effect_of_ECP_on_CGR_of_RPV_base_metal
** ECP (mVSHE), ECP_lower (mVSHE), ECP_upper (mVSHE), a_ECP, b_ECP    ** c_ECP = 9.752641E-18
-150, -200, -100, 2.08E-16, 0.0204
*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_RPV_base_metal
** ε p %, Cp
  0.000, 1.000
  2.002, 2.742
  4.002, 4.054
  6.002, 5.224
  8.005, 6.303
 10.002, 7.271
 12.007, 8.136
 14.004, 8.909
 16.002, 9.593
 18.002, 10.173
 20.006, 10.696
 22.038, 11.178
 24.720, 12.539
 25.720, 15.212
 26.719, 18.775
 28.174, 27.468
-----
** 【 結果出力 】
** *File_name
**   : 出力ファイル名
** *Time span
**   : 出力年 (min, max, step)
** *Crack depth
**   : き裂深さ (min, max, step)
** *Half crack length
**   : き裂長さ (min, max, step)
** *Half crack angle
**   : き裂半角 (min, max, step)
** *SIF at deepest point
**   : き裂最深点の SIF (min, max, step)

```



```

** *SIF at surface point
**   : き裂表面点の SIF (min, max, step)
** *SIF in hoop direction
**   : き裂角度方向の SIF (min, max, step)
** *Crack growth velocity at deepest point
**   : き裂最深点の進展速度 (min, max, step)
** *Crack growth velocity at surface point
**   : き裂表面点の進展速度 (min, max, step)
** *Crack growth velocity at surface point of b1
**   : き裂表面点 b1 の進展速度 (min, max, step) (注: き裂種類 5 のみ有効)
** *Crack growth velocity at surface point of b2
**   : き裂表面点 b2 の進展速度 (min, max, step) (注: き裂種類 5 のみ有効)
** *Crack growth velocity in hoop direction
**   : き裂角度方向の進展速度 (min, max, step)
** *Position of crack center
**   : き裂中心位置 (min, max, step) (注: き裂種類 5 のみ)
**-----
*File_name
  Davis_Besse_Sample
*Time_span
  0.0, 40.0, 0.1
*Crack_depth
  0.0, 13.0, 1.0
*Half_crack_length
  0.0, 36.0, 2.0
*Half_crack_angle
  0.0, 180.0, 10.0
*SIF_at_deepest_point
  0.0, 100.0, 5.0
*SIF_at_surface_point
  0.0, 100.0, 5.0
*SIF_in_hoop_direction
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_at_deepest_point
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_at_surface_point
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_at_surface_point_of_b1
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_at_surface_point_of_b2
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_in_hoop_direction
  0.0, 100.0, 5.0
*Position_of_crack_center
  20.0, 26.0, 0.5

```

## 5.4.2 大飯3号機損傷事例解析インプットファイル

```

**-----
** 【 解析手法 】
** *Method_of_analysis
**   : 解析手法 (PFM or DFM)
** *Total_sampling_number
**   : サンプル数
** *Time_span_of_analysis
**   : 解析期間 (min, max, step)
**-----
**Method_of_analysis
  PFM
**
**Total_sampling_number
  1000000
**
**Time_span_of_analysis
  0.0, 40.0, 0.1
**
**Type_of_SCC
  PWSCC
**-----
** 【 機器の幾何形状 】
** *Component
**   : 機器名
** *Inner_radius_and_pipe_thickness
**   : 配管内半径またはノズル内半径 Ri (mm), 配管肉厚またはノズル肉厚 t (mm)
** *WT, *WK, *WL
**   : 溶接金属の寸法 (mm)
**-----
**Component
  J-groove_welds_up_hill
**Inner_radius_and_pipe_thickness
  34.92, 15.88
**WT
  183.0
**WK
  15.88
**WL
  34.0
**-----
** 【 機器の材質 】
** *Material_for_stepX
**   : 材料名
** *Elastic_for_stepX
**   : 弾性係数 (MPa)
** *Yield_Stress_for_stepX
**   : 降伏応力, (確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, ...)
** *Tensile_Strength_for_stepX
**   : 引張強さ, (確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, ...)
**-----
*****
** Step 1 **
*****
**Material_for_step1
  weld_metal
**
**Elastic_for_step1
  198600
** NUREG CR-5642 at 318°C
**
**Yield_stress_for_step1
  Normal, 316.7, 43.0, 187.7, 445.7

```

```

** Average : NUREG CR-5642 at 318
** Scatter :  $\sigma = 3\sigma / 3 = 129.0 / 3 = 43.0$ 
** LowerLimit :  $-3\sigma$ 
** UpperLimit :  $+3\sigma$ 
**  $3\sigma = \text{NUREG CR-5642 at RT} - \text{JIS G4903 NCF600 TP at RT}$ 
**  $3\sigma = 374.0 - 245.0 = 129.0$ 
**
*Tensile_strength_for_step1
  Normal, 690.3, 61.0, 507.3, 873.3
** Average : NUREG CR-5642 at 318
** Scatter :  $\sigma = 3\sigma / 3 = 183.0 / 3 = 61.0$ 
** LowerLimit :  $-3\sigma$ 
** UpperLimit :  $+3\sigma$ 
**  $3\sigma = \text{NUREG CR-5642 at RT} - \text{JIS G4903 NCF600 TP at RT}$ 
**  $3\sigma = 733.0 - 550.0 = 183.0$ 
**
*****
** Step 2 **
*****
*Material_for_step2
  base_metal
**
*Elastic_for_step2
  198600
** NUREG CR-5642 at 318°C
**
*Yield_stress_for_step2
  Normal, 316.7, 43.0, 187.7, 445.7
** Average : NUREG CR-5642 at 318
** Scatter :  $\sigma = 3\sigma / 3 = 129.0 / 3 = 43.0$ 
** LowerLimit :  $-3\sigma$ 
** UpperLimit :  $+3\sigma$ 
**  $3\sigma = \text{NUREG CR-5642 at RT} - \text{JIS G4903 NCF600 TP at RT}$ 
**  $3\sigma = 374.0 - 245.0 = 129.0$ 
**
*Tensile_strength_for_step2
  Normal, 690.3, 61.0, 507.3, 873.3
** Average : NUREG CR-5642 at 318
** Scatter :  $\sigma = 3\sigma / 3 = 183.0 / 3 = 61.0$ 
** LowerLimit :  $-3\sigma$ 
** UpperLimit :  $+3\sigma$ 
**  $3\sigma = \text{NUREG CR-5642 at RT} - \text{JIS G4903 NCF600 TP at RT}$ 
**  $3\sigma = 733.0 - 550.0 = 183.0$ 
**
-----
** 【 初期き裂発生モデル 】
** *Standard_time_of_crack_initiation_for_stepX
**   : ti0 (hr)
** *Scatter_of_crack_initiation_for_stepX
**   :  $\alpha_i$  (確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, ...)
** *Temperature_index_for_stepX
**   : 温度, 温度閾値, At, Qi, R
** *Stress_index_for_stepX
**   : 切削加工深さ ( $\mu\text{m}$ ), 極表面応力 (MPa), 応力閾値 (MPa), As, n
** *Surface_machining_for_stepX
**   : (負荷応力-降伏応力) vs 切削加工深さ を表形式で入力
** *Material_index_for_stepX
**   : 定数を入力
** *Depth_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂深さ (mm)
** *Half_length_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂半長 (mm)
** *Half_angle_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂半角 (degree)
** *Position_of_initial_crack_for_stepX

```

```

**      : 初期き裂中心位置(mm)
**-----
*****
** Step 1 **
*****
*Standard_time_of_crack_initiation_for_step1
  10000
*Scatter_of_crack_initiation_for_step1
  Weibull, 1.285, 1.873, 0.924
*Temperature_index_for_step1
  318, 250, 9.49E+15, 182.963, 8.31447E-3
** T, Tth, Aθ, Qi, R
*Stress_index_for_step1
  150, 1000, 250, 2.68E-19, 7
** dc, σs, σth, Aσ, n
** σappには保守的に板厚内の応力最大値を入力
*Surface_machining_for_step1
  -, 0, 50, 100, 150, 200
  0, 0, 5, 20, 30, 38
  25, 25, 35, 46, 59, 73
  50, 50, 63, 75, 92, 112
  75, 75, 90, 105, 127, 159
  100, 100, 119, 136, 164, 236
  125, 125, 144, 174, 206, 347
  150, 150, 174, 210, 265, 446
  175, 175, 206, 248, 341, 526
  200, 200, 236, 284, 421, 594
  225, 225, 268, 331, 502, 654
  250, 250, 299, 381, 567, 715
  275, 275, 333, 439, 635, 774
  300, 300, 365, 505, 693, 828
  325, 325, 399, 568, 746, 884
*Material_index_for_step1
  0.7
*Depth_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 0.75, 0.25, 0.50, 1.00
*Half_length_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 0.75, 0.25, 0.50, 1.00
*Half_angle_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 2.00, 0.50, 0.50, 3.50
*Position_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 25.50, 0.50, 25.00, 26.00
*****
** Step 2 **
*****
*Standard_time_of_crack_initiation_for_step2
  10000
*Scatter_of_crack_initiation_for_step2
  Weibull, 1.285, 1.873, 0.924
*Temperature_index_for_step2
  318, 250, 9.49E+15, 182.963, 8.31447E-3
*Stress_index_for_step2
  100, 1000, 250, 2.44E-11, 4
*Surface_machining_for_step2
  -, 0, 50, 100, 150, 200
  0, 0, 5, 20, 30, 38
  25, 25, 35, 46, 59, 73
  50, 50, 63, 75, 92, 112
  75, 75, 90, 105, 127, 159
  100, 100, 119, 136, 164, 236
  125, 125, 144, 174, 206, 347
  150, 150, 174, 210, 265, 446
  175, 175, 206, 248, 341, 526
  200, 200, 236, 284, 421, 594
  225, 225, 268, 331, 502, 654

```

```

250, 250, 299, 381, 567, 715
275, 275, 333, 439, 635, 774
300, 300, 365, 505, 693, 828
3250, 325, 399, 568, 746, 884
*Material_index_for_step2
0.5
*Depth_of_initial_crack_for_step2
Normal, 2.00, 1.00, 1.00, 3.00
*Half_length_of_initial_crack_for_step2
Normal, 6.00, 3.00, 3.00, 9.00
*Half_angle_of_initial_crack_for_step2
Normal, 2.00, 0.50, 0.50, 3.50
*Position_of_initial_crack_for_step2
Normal, 96.75, 0.00, 96.75, 96.75
**-----
** 【 き裂進展評価 】
** *Flag_of_crack_kind_for_stepX_noX
**   : (1行目) き裂種類
**   き裂種類 0 (周方向・内面き裂)
**   き裂種類 1 (軸方向・内面き裂)
**   き裂種類 2 (周方向・外面き裂)
**   き裂種類 3 (軸方向・外面き裂)
**   き裂種類 4 (周方向・貫通き裂)
**   き裂種類 5 (半径方向・J溶接部き裂)
** *SIF_calculator_for_stepX_noX
**   : (1行目) 応力拡大係数算出式
**   き裂種類 0 の場合 ASME, Bergman
**   き裂種類 1 の場合 ASME, Shiratori
**   き裂種類 2 の場合 ASME, Chapuliot
**   き裂種類 3 の場合 ASME, Fett
**   き裂種類 4 の場合 Zang, Sander, API4
**   き裂種類 5 の場合 API5
**   ASME 式の場合のみ塑性域補正 (MPa) が必要
** *Operating_stress_distribution_for_stepX_noX
**   次数,  $\sigma_{op\_0}$ ,  $\sigma_{op\_1}$ ,  $\sigma_{op\_2}$ ,  $\sigma_{op\_3}$ ,  $\sigma_{op\_4}$ 
** *Residual_stress_distribution_for_stepX_noX
**   次数,  $\sigma_{r\_0}$ ,  $\sigma_{r\_1}$ ,  $\sigma_{r\_2}$ ,  $\sigma_{r\_3}$ ,  $\sigma_{r\_4}$ 
** *Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_stepX_noX
**   板厚内領域分割数
** *Scatter_of_residual_stress_distribution_for_stepX_noX
**   確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, . . .
**-----
*****
** Step1_No1 **
*****
*Flag_of_crack_kind_for_step1_no1
5
*SIF_calculator_for_step1_no1
API5
*Operating_stress_distribution_for_step1_no1
4, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
*Residual_stress_distribution_for_step1_no1
4, 350.49, 1922.93, -16761.95, -93214.60, 828911.87
*Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_step1_no1
8
*Scatter_of_residual_stress_distribution_for_step1_no1
Normal, 0.0, 10.0, -60.0, 60.0
*Plastic_strain_distribution_for_step1_no1
** a/t,  $\epsilon_p$  %
0.0, 0.00
0.1, 0.00
0.2, 0.00
0.3, 0.00
0.4, 0.00
0.5, 0.00

```

```

0.6, 0.00
0.7, 0.00
0.8, 0.00
0.9, 0.00
1.0, 0.00
*****
** Step2_No1 **
*****
*Flag_of_crack_kind_for_step2_no1
2
*SIF_calculator_for_step2_no1
Chapuliot
*Operating_stress_distribution_for_step2_no1
3, 180.91, 0.0, 0.0, 0.0
*Residual_stress_distribution_for_step2_no1
3, -199.99, 1810.95, -4148.10, 2918.95
*Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_step2_no1
8
*Scatter_of_residual_stress_distribution_for_step2_no1
Normal, 0.0, 10.0, -60.0, 60.0
*Plastic_strain_distribution_for_step2_no1
** a/t, ε p %
0.0, 0.00
0.1, 0.00
0.2, 0.00
0.3, 0.00
0.4, 0.00
0.5, 0.00
0.6, 0.00
0.7, 0.00
0.8, 0.00
0.9, 0.00
1.0, 0.00
*****
** Step2_No2 **
*****
*Flag_of_crack_kind_for_step2_no2
4
*SIF_calculator_for_step2_no2
API4
*Operating_stress_distribution_for_step2_no2
1, 180.91, 0.00
*Residual_stress_distribution_for_step2_no2
1, -74.62, 442.55
*Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_step2_no2
8
*Scatter_of_residual_stress_distribution_for_step2_no2
Normal, 0.0, 10.0, -60.0, 60.0
*Plastic_strain_distribution_for_step2_no2
** a/t, ε p %
0.0, 0.00
0.1, 0.00
0.2, 0.00
0.3, 0.00
0.4, 0.00
0.5, 0.00
0.6, 0.00
0.7, 0.00
0.8, 0.00
0.9, 0.00
1.0, 0.00
*****
** 【 Leak 判定 】
** *Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_t
** : Leak 時のき裂深さ比 a/t (き裂種類 0~3 にて有効)

```

```

** *Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_WT
**   : Leak 時のき裂深さ比 a/T (き裂種類 5 にて有効)
**-----
** *Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_t
**   0.8
** *Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_WT
**   0.14
** aL/T = 25.7/183 = 0.14
**-----
** 【 破断判定 】
** *Break_judgement_based_on_primary_stress
**   : 1次一般膜応力 Pm (MPa), 1次曲げ応力 Pb (MPa), 熱膨張応力 Pe (MPa)
**   : 破断判定に1次応力基準を適用するとき入力 (き裂種類 0, 2, 4 にて有効)
**   : 無効とする場合は, "Not evaluate"と入力
** *Break_judgement_by_half_crack_angle
**   : 破断とき裂半角 θB (degree)
**   : 破断判定にき裂半角を適用するとき入力 (き裂種類 4 にて有効)
**   : 無効とする場合は, "Not evaluate"と入力
**-----
** *Break_judgement_based_on_primary_stress
**   18.91, 0, 0
** *Break_judgement_by_half_crack_angle
**   Not evaluate
**-----
** 【 き裂進展速度線図 】
** *Slope_of_CGR_of_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (母材)
** *Slope_of_CGR_of_weld_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (溶接金属)
** *Slope_of_CGR_of_CGR_of_RPV_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (原子炉圧力容器鋼)
**   き裂進展速度乗数, 応力拡大係数シフト量, 下閾値, 上閾値
**
** *Scatter_of_CGR_of_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (母材)
** *Scatter_of_CGR_of_weld_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (溶接金属)
** *Scatter_of_CGR_of_CGR_of_RPV_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (原子炉圧力容器鋼)
**   き裂進展速度係数 α の自然対数 ln(α) を正規分布に当てはめ, 平均値及び標準偏差を算出する
**   α の単位は, da/dt (m/s), K (MPam0.5)
**-----
*****
** base metal **
*****
** *Slope_of_CGR_of_base_metal
**   1.16, 9.0, 9.0, 100.0
** *Scatter_of_CGR_of_base_metal
**   LogNormal, -29.0054, 0.5110, -32.0714, -25.9394
** *Effect_of_Temperature_on_CGR_of_base_metal
**   ** Ta(C), Ta_ref(C), Q(kJ/mol), R(kJ/molK) ** c_temp = 0.734
**   318, 325, 130, 8.31447E-3
** *Effect_of_ECP_on_CGR_of_base_metal
**   ** ECP (mVSHE), ECP_lower (mVSHE), ECP_upper (mVSHE), a_ECP, b_ECP ** c_ECP = 9.752641E-18
**   -150, -200, -100, 2.08E-16, 0.0204
** *Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_base_metal
**   ** ε p %, Cp
**   0.000, 1.000
**   2.002, 2.742
**   4.002, 4.054
**   6.002, 5.224
**   8.005, 6.303
**   10.002, 7.271
**   12.007, 8.136
**   14.004, 8.909

```

```

16.002, 9.593
18.002, 10.173
20.006, 10.696
22.038, 11.178
24.720, 12.539
25.720, 15.212
26.719, 18.775
28.174, 27.468
*****
** weld metal **
*****
*Slope_of_CGR_of_weld_metal
  2.42, 0.0, 0.0, 100.0
*Scatter_of_CGR_of_weld_metal
  LogNormal, -31.7056, 0.6880, -35.8336, -27.5776
*Effect_of_Temperature_on_CGR_of_weld_metal
** Ta(C), Ta_ref(C), Q(kJ/mol), R(kJ/molK) ** c_temp = 0.734
  318, 325, 215, 8.31447E-3
*Effect_of_ECP_on_CGR_of_weld_metal
** ECP(mVSHE), ECP_lower(mVSHE), ECP_upper(mVSHE), a_ECP, b_ECP ** c_ECP = 9.752641E-18
  -150, -200, -100, 2.08E-16, 0.0204
*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_weld_metal
** ε p %, Cp
  0.000, 1.000
  2.002, 2.742
  4.002, 4.054
  6.002, 5.224
  8.005, 6.303
  10.002, 7.271
  12.007, 8.136
  14.004, 8.909
  16.002, 9.593
  18.002, 10.173
  20.006, 10.696
  22.038, 11.178
  24.720, 12.539
  25.720, 15.212
  26.719, 18.775
  28.174, 27.468
*****
** RPV base metal **
*****
*Slope_of_CGR_of_RPV_base_metal
  0.0, 0.0, 0.0, 100.0
*Scatter_of_CGR_of_RPV_base_metal
  LogNormal, -27.3933, 0.0001, -27.3939, -27.3927
*Effect_of_Temperature_on_CGR_of_RPV_base_metal
** Ta(C), Ta_ref(C), Q(kJ/mol), R(kJ/molK) ** c_temp = 0.734
  318, 325, 0, 8.31447E-3
*Effect_of_ECP_on_CGR_of_RPV_base_metal
** ECP(mVSHE), ECP_lower(mVSHE), ECP_upper(mVSHE), a_ECP, b_ECP ** c_ECP = 9.752641E-18
  -150, -200, -100, 2.08E-16, 0.0204
*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_RPV_base_metal
** ε p %, Cp
  0.000, 1.000
  2.002, 2.742
  4.002, 4.054
  6.002, 5.224
  8.005, 6.303
  10.002, 7.271
  12.007, 8.136
  14.004, 8.909
  16.002, 9.593
  18.002, 10.173
  20.006, 10.696

```



22.038, 11.178  
 24.720, 12.539  
 25.720, 15.212  
 26.719, 18.775  
 28.174, 27.468

```

**-----
** 【 結果出力 】
** *File_name
**   : 出力ファイル名
** *Time span
**   : 出力年 (min, max, step)
** *Crack depth
**   : き裂深さ (min, max, step)
** *Half crack length
**   : き裂長さ (min, max, step)
** *Half crack angle
**   : き裂半角 (min, max, step)
** *SIF at deepest point
**   : き裂最深点の SIF (min, max, step)
** *SIF at surface point
**   : き裂表面点の SIF (min, max, step)
** *SIF in hoop direction
**   : き裂角度方向の SIF (min, max, step)
** *Crack growth velocity at deepest point
**   : き裂最深点の進展速度 (min, max, step)
** *Crack growth velocity at surface point
**   : き裂表面点の進展速度 (min, max, step)
** *Crack growth velocity at surface point of b1
**   : き裂表面点 b1 の進展速度 (min, max, step) (注: き裂種類 5 のみ有効)
** *Crack growth velocity at surface point of b2
**   : き裂表面点 b2 の進展速度 (min, max, step) (注: き裂種類 5 のみ有効)
** *Crack growth velocity in hoop direction
**   : き裂角度方向の進展速度 (min, max, step)
** *Position of crack center
**   : き裂中心位置 (min, max, step) (注: き裂種類 5 のみ)
**-----
*File_name
  Ohi3_Sample
*Time_span
  0.0, 40.0, 0.1
*Crack_depth
  0.0, 40.0, 2.0
*Half_crack_length
  0.0, 40.0, 2.0
*Half_crack_angle
  0.0, 180.0, 10.0
*SIF_at_deepest_point
  0.0, 100.0, 5.0
*SIF_at_surface_point
  0.0, 100.0, 5.0
*SIF_in_hoop_direction
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_at_deepest_point
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_at_surface_point
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_at_surface_point_of_b1
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_at_surface_point_of_b2
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_in_hoop_direction
  0.0, 100.0, 5.0
*Position_of_crack_center
  20.0, 30.0, 0.5
    
```

## 5.4.3 V. C. Summer 損傷事例解析インプットファイル

(Case1)

```

**-----
** 【 解析手法 】
** *Method_of_analysis
**   : 解析手法 (PFM or DFM)
** *Total_sampling_number
**   : サンプル数
** *Time_span_of_analysis
**   : 解析期間 (min, max, step)
**-----
**Method_of_analysis
  PFM
**
**Total_sampling_number
  1000000
**
**Time_span_of_analysis
  0.0, 60.0, 0.1
**
**Type_of_SCC
  PWSCC
**-----
** 【 機器の幾何形状 】
** *Component
**   : 機器名
** *Inner_radius_and_pipe_thickness
**   : 配管内半径またはノズル内半径 Ri (mm), 配管肉厚またはノズル肉厚 t (mm)
** *WT, *WK, *WL
**   : 溶接金属の寸法 (mm)
**-----
**Component
  V. C. Summer
**Inner_radius_and_pipe_thickness
  378.0, 78.0
**WK
  800
**WL
  848
**WT
  78.0
**-----
** 【 機器の材質 】
** *Material_for_stepX
**   : 材料名
** *Elastic_for_stepX
**   : 弾性係数 (MPa)
** *Yield_Stress_for_stepX
**   : 降伏応力, (確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, ...)
** *Tensile_Strength_for_stepX
**   : 引張強さ, (確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, ...)
**-----
*****
** Step 1 **
*****
**Material_for_step1
  weld_metal
**
**Elastic_for_step1
  196400
** NUREG CR-5642 at 324°C
**

```

```

*Yield_stress_for_step1
  Normal, 343.9, 11.8, 308.5, 379.3
** Average : JAEA at 324°C = 343.9MPa
** Scatter :  $\sigma = 3\sigma / 3 = 35.5 / 3 = 11.8$ 
** LowerLimit :  $-3\sigma$ 
** UpperLimit :  $+3\sigma$ 
**  $3\sigma = \text{JAEA at RT} - \text{JIS G3224 Ni6082 at RT}$ 
**  $3\sigma = 395.5 - 360.0 = 35.5$ 
**
*Tensile_strength_for_step1
  Normal, 584.3, 33.0, 485.0, 683.0
** Average : JAEA at 324°C = 584.3MPa
** Scatter :  $\sigma = 3\sigma / 3 = 99.0 / 3 = 33.0$ 
** LowerLimit :  $-3\sigma$ 
** UpperLimit :  $+3\sigma$ 
**  $3\sigma = \text{JAEA at RT} - \text{JIS G3224 Ni6082 at RT}$ 
**  $3\sigma = 699.0 - 600.0 = 99.0$ 
**
**-----
** 【 初期き裂発生モデル 】
** *Standard_time_of_crack_initiation_for_stepX
**   : ti0 (hr)
** *Scatter_of_crack_initiation_for_stepX
**   :  $\alpha i$  (確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, . . .)
** *Temperature_index_for_stepX
**   : 温度, 温度閾値, At, Qi, R
** *Stress_index_for_stepX
**   : 切削加工深さ( $\mu\text{m}$ ), 極表面応力(MPa), 応力閾値(MPa), As, n
** *Surface_machining_for_stepX
**   : (負荷応力-降伏応力) vs 切削加工深さ を表形式で入力
** *Material_index_for_stepX
**   : 定数を入力
** *Depth_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂深さ(mm)
** *Half_length_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂半長(mm)
** *Half_angle_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂半角(degree)
** *Position_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂中心位置(mm)
**-----
*****
** Step 1 **
*****
*Standard_time_of_crack_initiation_for_step1
  10000
*Scatter_of_crack_initiation_for_step1
  Weibull, 1.285, 1.125, 0.924
*Temperature_index_for_step1
  324, 250, 9.49E+15, 182.963, 8.31447E-3
** T, Tth, A $\theta$ , Qi, R
*Stress_index_for_step1
  100, 1000, 250, 2.68E-19, 7
** dc,  $\sigma_s$ ,  $\sigma_{th}$ , A $\sigma$ , n
**  $\sigma_{app}$  には保守的に、き裂深さ上限値までの範囲に発生する応力の最大値を入力
*Surface_machining_for_step1
  -, 0, 50, 100, 150, 200
  0, 0, 5, 20, 30, 38
  25, 25, 35, 46, 59, 73
  50, 50, 63, 75, 92, 112
  75, 75, 90, 105, 127, 159
  100, 100, 119, 136, 164, 236
  125, 125, 144, 174, 206, 347
  150, 150, 174, 210, 265, 446
  175, 175, 206, 248, 341, 526

```

```

200, 200, 236, 284, 421, 594
225, 225, 268, 331, 502, 654
250, 250, 299, 381, 567, 715
275, 275, 333, 439, 635, 774
300, 300, 365, 505, 693, 828
325, 325, 399, 568, 746, 884
*Material_index_for_step1
  0.7
*Depth_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 0.75, 0.25, 0.50, 1.00
*Half_length_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 0.75, 0.25, 0.50, 1.00
*Half_angle_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 2.00, 0.50, 0.50, 3.50
*Position_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 820.00, 2.00, 808.00, 832.00
**-----
** 【 き裂進展評価 】
** *Flag_of_crack_kind_for_stepX_noX
**   : (1行目) き裂種類
**     き裂種類 0 (周方向・内面き裂)
**     き裂種類 1 (軸方向・内面き裂)
**     き裂種類 2 (周方向・外面き裂)
**     き裂種類 3 (軸方向・外面き裂)
**     き裂種類 4 (周方向・貫通き裂)
**     き裂種類 5 (半径方向・J溶接部き裂)
** *SIF_calculator_for_stepX_noX
**   : (1行目) 応力拡大係数算出式
**     き裂種類 0 の場合 ASME(4th), Bergman(3rd)
**     き裂種類 1 の場合 ASME(4th), Shiratori(3rd)
**     き裂種類 2 の場合 ASME(4th), Chapuliot(3rd)
**     き裂種類 3 の場合 ASME(4th), Fett(3rd)
**     き裂種類 4 の場合 Sander(const), Zang(4th), API4(1st)
**     き裂種類 5 の場合 API5(4th)
**     ASME 式の場合のみ塑性域補正 (MPa) が必要
** *Operating_stress_distribution_for_stepX_noX
**   次数,  $\sigma_{op\_0}$ ,  $\sigma_{op\_1}$ ,  $\sigma_{op\_2}$ ,  $\sigma_{op\_3}$ ,  $\sigma_{op\_4}$ 
** *Residual_stress_distribution_for_stepX_noX
**   次数,  $\sigma_r\_0$ ,  $\sigma_r\_1$ ,  $\sigma_r\_2$ ,  $\sigma_r\_3$ ,  $\sigma_r\_4$ 
** *Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_stepX_noX
**   板厚内領域分割数
** *Scatter_of_residual_stress_distribution_for_stepX_noX
**   確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, . . .
**-----
*****
** Step1 No1 **
*****
*Flag_of_crack_kind_for_step1_no1
  5
*SIF_calculator_for_step1_no1
  API5
*Operating_stress_distribution_for_step1_no1
  4, 83.6, -20.4, 6.2, -1.6, 0.3
*Residual_stress_distribution_for_step1_no1
  4, 214.8, 4269.8, -27264.6, 51858.9, -30490.0
*Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_step1_no1
  1
*Scatter_of_residual_stress_distribution_for_step1_no1
  Normal, 0.0, 10.0, -60.0, 60.0
*Plastic_strain_distribution_for_step1_no1
** a/t,  $\epsilon_p$  %
  0.0, 0.00
  0.1, 0.00
  0.2, 0.00
  0.3, 0.00

```

```

0.4, 0.00
0.5, 0.00
0.6, 0.00
0.7, 0.00
0.8, 0.00
0.9, 0.00
1.0, 0.00
**-----
** 【 Leak 判定 】
** *Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_t
**   : Leak 時のき裂深さ比 a/t (き裂種類 0~3 にて有効)
** *Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_WT
**   : Leak 時のき裂深さ比 a/T (き裂種類 5 にて有効)
**-----
** *Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_t
**   0.8
** *Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_WT
**   0.8
**-----
** 【 破断判定 】
** *Break_judgement_based_on_primary_stress
**   : 1 次一般膜応力 Pm (MPa), 1 次曲げ応力 Pb (MPa), 熱膨張応力 Pe (MPa)
**   : 破断判定に 1 次応力基準を適用するとき入力 (き裂種類 0, 2, 4 にて有効)
**   : 無効とする場合は, "Not evaluate" と入力
** *Break_judgement_by_half_crack_angle
**   : 破断時き裂半角  $\theta_B$  (degree)
**   : 破断判定にき裂半角を適用するとき入力 (き裂種類 4 にて有効)
**   : 無効とする場合は, "Not evaluate" と入力
**-----
** *Break_judgement_based_on_primary_stress
**   80.0, 0, 0
** *Break_judgement_by_half_crack_angle
**   Not evaluate
** 軸方向き裂のため破断判定なし
**-----
** 【 き裂進展速度線図 】
** *Slope_of_CGR_of_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (母材)
** *Slope_of_CGR_of_weld_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (溶接金属)
** *Slope_of_CGR_of_CGR_of_RPV_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (原子炉圧力容器鋼)
** き裂進展速度乗数, 応力拡大係数シフト量, 下閾値, 上閾値, 温度補正係数
**
** *Scatter_of_CGR_of_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (母材)
** *Scatter_of_CGR_of_weld_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (溶接金属)
** *Scatter_of_CGR_of_CGR_of_RPV_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (原子炉圧力容器鋼)
** き裂進展速度係数  $\alpha$  の自然対数  $\ln(\alpha)$  を正規分布に当てはめ, 平均値及び標準偏差を算出する
**  $\alpha$  の単位は, da/dt (m/s), K (MPam0.5)
**-----
*****
** base metal **
*****
** *Slope_of_CGR_of_base_metal
**   1.03, 0.0, 0.0, 100.0
** *Scatter_of_CGR_of_base_metal
**   LogNormal, -30.6510, 0.2430, -32.1090, -29.1930
** *Effect_of_Temperature_on_CGR_of_base_metal
**   Ta(C), Ta_ref(C), Q(kJ/mol), R(kJ/molK) ** c_temp = 0.734
**   324, 325, 70, 8.31447E-3
** *Effect_of_ECP_on_CGR_of_base_metal
**   ECP (mVSHE), ECP_lower (mVSHE), ECP_upper (mVSHE), a_ECP, b_ECP ** c_ECP = 9.752641E-18

```

```

-150, -200, -100, 2.08E-16, 0.0204
*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_base_metal
** ε p %, Cp
  0.000, 1.000
  2.002, 2.742
  4.002, 4.054
  6.002, 5.224
  8.005, 6.303
 10.002, 7.271
 12.007, 8.136
 14.004, 8.909
 16.002, 9.593
 18.002, 10.173
 20.006, 10.696
 22.038, 11.178
 24.720, 12.539
 25.720, 15.212
 26.719, 18.775
 28.174, 27.468
*****
** weld metal **
*****
*Slope_of_CGR_of_weld_metal
  1.6, 0.0, 0.0, 100.0
*Scatter_of_CGR_of_weld_metal
  LogNormal, -27.3358, 1.0160, -33.4318, -21.2398
*Effect_of_Temperature_on_CGR_of_weld_metal
** Ta(C), Ta_ref(C), Q(kJ/mol), R(kJ/molK)
  324, 325, 130, 8.31447E-3
*Effect_of_ECP_on_CGR_of_weld_metal
** ECP(mVSHE), ECP_lower(mVSHE), ECP_upper(mVSHE), a_ECP, b_ECP
  -150, -200, -100, 2.08E-16, 0.0204
*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_weld_metal
** ε p %, Cp
  0.000, 1.000
  2.002, 2.742
  4.002, 4.054
  6.002, 5.224
  8.005, 6.303
 10.002, 7.271
 12.007, 8.136
 14.004, 8.909
 16.002, 9.593
 18.002, 10.173
 20.006, 10.696
 22.038, 11.178
 24.720, 12.539
 25.720, 15.212
 26.719, 18.775
 28.174, 27.468
*****
** RPV base metal **
*****
*Slope_of_CGR_of_RPV_base_metal
  0.0, 0.0, 0.0, 100.0
*Scatter_of_CGR_of_RPV_base_metal
  LogNormal, -27.3933, 0.0001, -27.3939, -27.3927
*Effect_of_Temperature_on_CGR_of_RPV_base_metal
** Ta(C), Ta_ref(C), Q(kJ/mol), R(kJ/molK) ** c_temp = 0.734
  324, 325, 0, 8.31447E-3
*Effect_of_ECP_on_CGR_of_RPV_base_metal
** ECP(mVSHE), ECP_lower(mVSHE), ECP_upper(mVSHE), a_ECP, b_ECP ** c_ECP = 9.752641E-18
  -150, -200, -100, 2.08E-16, 0.0204
*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_RPV_base_metal
** ε p %, Cp

```

```

0.000, 1.000
2.002, 2.742
4.002, 4.054
6.002, 5.224
8.005, 6.303
10.002, 7.271
12.007, 8.136
14.004, 8.909
16.002, 9.593
18.002, 10.173
20.006, 10.696
22.038, 11.178
24.720, 12.539
25.720, 15.212
26.719, 18.775
28.174, 27.468
**-----
** 【 結果出力 】
** *File_name
**   : 出力ファイル名
** *Time span
**   : 出力年 (min, max, step)
** *Crack depth
**   : き裂深さ (min, max, step)
** *Half crack length
**   : き裂長さ (min, max, step)
** *Half crack angle
**   : き裂半角 (min, max, step)
** *SIF at deepest point
**   : き裂最深点の SIF (min, max, step)
** *SIF at surface point
**   : き裂表面点の SIF (min, max, step)
** *SIF in hoop direction
**   : き裂角度方向の SIF (min, max, step)
** *Crack growth velocity at deepest point
**   : き裂最深点の進展速度 (min, max, step)
** *Crack growth velocity at surface point
**   : き裂表面点の進展速度 (min, max, step)
** *Crack growth velocity at surface point of b1
**   : き裂表面点 b1 の進展速度 (min, max, step) (注: き裂種類 5 のみ有効)
** *Crack growth velocity at surface point of b2
**   : き裂表面点 b2 の進展速度 (min, max, step) (注: き裂種類 5 のみ有効)
** *Crack growth velocity in hoop direction
**   : き裂角度方向の進展速度 (min, max, step)
** *Position of crack center
**   : き裂中心位置 (min, max, step) (注: き裂種類 5 のみ)
**-----
*File_name
  V. C. Summer_AxialCrack
*Time_span
  0.0, 60.0, 0.1
*Crack_depth
  0.0, 81.0, 5.0
*Half_crack_length
  0.0, 500.0, 20.0
*Half_crack_angle
  0.0, 180.0, 10.0
*SIF_at_deepest_point
  0.0, 100.0, 5.0
*SIF_at_surface_point
  0.0, 100.0, 5.0
*SIF_in_hoop_direction
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_at_deepest_point
  0.0, 100.0, 5.0

```

```
*Crack_growth_velocity_at_surface_point  
0.0, 100.0, 5.0  
*Crack_growth_velocity_at_surface_point_of_b1  
0.0, 100.0, 5.0  
*Crack_growth_velocity_at_surface_point_of_b2  
0.0, 100.0, 5.0  
*Crack_growth_velocity_in_hoop_direction  
0.0, 100.0, 5.0  
*Position_of_crack_center  
800.0, 850.0, 5.0
```



(Case2 補修溶接なし)

```

**-----
** 【 解析手法 】
** *Method_of_analysis
**   : 解析手法 (PFM or DFM)
** *Total_sampling_number
**   : サンプルング数
** *Time_span_of_analysis
**   : 解析期間 (min, max, step)
**-----
**Method_of_analysis
  PFM
**
**Total_sampling_number
  1000000
**
**Time_span_of_analysis
  0.0, 200.0, 0.1
**
**Type_of_SCC
  PWSCC
**-----
** 【 機器の幾何形状 】
** *Component
**   : 機器名
** *Inner_radius_and_pipe_thickness
**   : 配管内半径またはノズル内半径 Ri (mm), 配管肉厚またはノズル肉厚 t (mm)
** *WT, *WK, *WL
**   : 溶接金属の寸法 (mm)
**-----
**Component
  V. C. Summer
**Inner_radius_and_pipe_thickness
  378.0, 78.0
**WK
  800
**WL
  848
**WT
  78.0
**-----
** 【 機器の材質 】
** *Material_for_stepX
**   : 材料名
** *Elastic_for_stepX
**   : 弾性係数 (MPa)
** *Yield_Stress_for_stepX
**   : 降伏応力, (確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, ...)
** *Tensile_Strength_for_stepX
**   : 引張強さ, (確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, ...)
**-----
*****
** Step 1 **
*****
**Material_for_step1
  weld_metal
**
**Elastic_for_step1
  196400
** NUREG CR-5642 at 324°C
**
**Yield_stress_for_step1
  Normal, 343.9, 11.8, 308.5, 379.3
** Average : JAEA at 324°C = 343.9MPa

```

```

** Scatter :  $\sigma = 3\sigma / 3 = 35.5 / 3 = 11.8$ 
** LowerLimit :  $-3\sigma$ 
** UpperLimit :  $+3\sigma$ 
**  $3\sigma = \text{JAEA at RT} - \text{JIS G3224 Ni6082 at RT}$ 
**  $3\sigma = 395.5 - 360.0 = 35.5$ 
**
*Tensile_strength_for_step1
  Normal, 584.3, 33.0, 485.0, 683.0
** Average : JAEA at 324°C = 584.3MPa
** Scatter :  $\sigma = 3\sigma / 3 = 99.0 / 3 = 33.0$ 
** LowerLimit :  $-3\sigma$ 
** UpperLimit :  $+3\sigma$ 
**  $3\sigma = \text{JAEA at RT} - \text{JIS G3224 Ni6082 at RT}$ 
**  $3\sigma = 699.0 - 600.0 = 99.0$ 
**
-----
** 【 初期き裂発生モデル 】
** *Standard_time_of_crack_initiation_for_stepX
**   : ti0 (hr)
** *Scatter_of_crack_initiation_for_stepX
**   :  $\alpha_i$  (確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, ...)
** *Temperature_index_for_stepX
**   : 温度, 温度閾値, At, Qi, R
** *Stress_index_for_stepX
**   : 切削加工深さ( $\mu\text{m}$ ), 極表面応力(MPa), 応力閾値(MPa), As, n
** *Surface_machining_for_stepX
**   : (負荷応力-降伏応力) vs 切削加工深さ を表形式で入力
** *Material_index_for_stepX
**   : 定数を入力
** *Depth_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂深さ(mm)
** *Half_length_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂半長(mm)
** *Half_angle_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂半角(degree)
** *Position_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂中心位置(mm)
**
-----
*****
** Step 1 **
*****
*Standard_time_of_crack_initiation_for_step1
  10000
*Scatter_of_crack_initiation_for_step1
  Weibull, 1.285, 1.125, 0.924
*Temperature_index_for_step1
  324, 250, 9.49E+15, 182.963, 8.31447E-3
** T, Tth, A $\theta$ , Qi, R
*Stress_index_for_step1
  100, 1000, 250, 2.68E-19, 7
** dc,  $\sigma_s$ ,  $\sigma_{th}$ , A $\sigma$ , n
**  $\sigma_{app}$ には保守的に、き裂深さ上限値までの範囲に発生する応力の最大値を入力
*Surface_machining_for_step1
  -, 0, 50, 100, 150, 200
  0, 0, 5, 20, 30, 38
  25, 25, 35, 46, 59, 73
  50, 50, 63, 75, 92, 112
  75, 75, 90, 105, 127, 159
  100, 100, 119, 136, 164, 236
  125, 125, 144, 174, 206, 347
  150, 150, 174, 210, 265, 446
  175, 175, 206, 248, 341, 526
  200, 200, 236, 284, 421, 594
  225, 225, 268, 331, 502, 654
  250, 250, 299, 381, 567, 715

```

```

275, 275, 333, 439, 635, 774
300, 300, 365, 505, 693, 828
325, 325, 399, 568, 746, 884
*Material_index_for_step1
  0.7
*Depth_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 0.75, 0.25, 0.50, 1.00
*Half_length_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 0.75, 0.25, 0.50, 1.00
*Half_angle_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 2.00, 0.50, 0.50, 3.50
*Position_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 820.00, 2.00, 808.00, 832.00
-----
** 【 き裂進展評価 】
** *Flag_of_crack_kind_for_stepX_noX
**   : (1行目) き裂種類
**   き裂種類 0 (周方向・内面き裂)
**   き裂種類 1 (軸方向・内面き裂)
**   き裂種類 2 (周方向・外面き裂)
**   き裂種類 3 (軸方向・外面き裂)
**   き裂種類 4 (周方向・貫通き裂)
**   き裂種類 5 (半径方向・J溶接部き裂)
** *SIF_calculator_for_stepX_noX
**   : (1行目) 応力拡大係数算出式
**   き裂種類 0 の場合 ASME(4th), Bergman(3rd)
**   き裂種類 1 の場合 ASME(4th), Shiratori(3rd)
**   き裂種類 2 の場合 ASME(4th), Chapuliot(3rd)
**   き裂種類 3 の場合 ASME(4th), Fett(3rd)
**   き裂種類 4 の場合 Sander(const), Zang(4th), API4(1st)
**   き裂種類 5 の場合 API5(4th)
**   ASME 式の場合のみ塑性域補正 (MPa) が必要
** *Operating_stress_distribution_for_stepX_noX
**   次数,  $\sigma_{op\_0}$ ,  $\sigma_{op\_1}$ ,  $\sigma_{op\_2}$ ,  $\sigma_{op\_3}$ ,  $\sigma_{op\_4}$ 
** *Residual_stress_distribution_for_stepX_noX
**   次数,  $\sigma_r\_0$ ,  $\sigma_r\_1$ ,  $\sigma_r\_2$ ,  $\sigma_r\_3$ ,  $\sigma_r\_4$ 
** *Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_stepX_noX
**   板厚内領域分割数
** *Scatter_of_residual_stress_distribution_for_stepX_noX
**   確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, . . .
-----
*****
** Step1 No1 **
*****
*Flag_of_crack_kind_for_step1_no1
  0
*SIF_calculator_for_step1_no1
  ASME
*Operating_stress_distribution_for_step1_no1
  4, 34.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
*Residual_stress_distribution_for_step1_no1
** 補修なし
  4, 235.3, -192.2, -7312.8, 16087.8, -8652.7
** 補修あり
** 4, 424.8, -5093.7, 17070.0, -23676.1, 11524.0
*Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_step1_no1
  1
*Scatter_of_residual_stress_distribution_for_step1_no1
  Normal, 0.0, 10.0, -60.0, 60.0
*Plastic_strain_distribution_for_step1_no1
** a/t,  $\epsilon_p$  %
  0.0, 0.00
  0.1, 0.00
  0.2, 0.00
  0.3, 0.00

```

```

0.4, 0.00
0.5, 0.00
0.6, 0.00
0.7, 0.00
0.8, 0.00
0.9, 0.00
1.0, 0.00
*****
** Step1 No2 **
*****
*Flag_of_crack_kind_for_step1_no1
  4
*SIF_calculator_for_step1_no1
  Zang
*Operating_stress_distribution_for_step1_no1
  4, 34.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
*Residual_stress_distribution_for_step1_no1
** 補修なし
  4, 235.3, -192.2, -7312.8, 16087.8, -8652.7
** 補修あり
** 4, 424.8, -5093.7, 17070.0, -23676.1, 11524.0
*Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_step1_no1
  1
*Scatter_of_residual_stress_distribution_for_step1_no1
  Normal, 0.0, 10.0, -60.0, 60.0
*Plastic_strain_distribution_for_step1_no1
** a/t,  $\epsilon_p$  %
  0.0, 0.00
  0.1, 0.00
  0.2, 0.00
  0.3, 0.00
  0.4, 0.00
  0.5, 0.00
  0.6, 0.00
  0.7, 0.00
  0.8, 0.00
  0.9, 0.00
  1.0, 0.00
**-----
** 【 Leak 判定 】
** *Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_t
**   : Leak 時のき裂深さ比 a/t (き裂種類 0~3 にて有効)
** *Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_WT
**   : Leak 時のき裂深さ比 a/T (き裂種類 5 にて有効)
**-----
*Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_t
  0.8
*Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_WT
  0.8
**-----
** 【 破断判定 】
** *Break_judgement_based_on_primary_stress
**   : 1次一般膜応力 Pm (MPa), 1次曲げ応力 Pb (MPa), 熱膨張応力 Pe (MPa)
**   : 破断判定に1次応力基準を適用するとき入力 (き裂種類 0, 2, 4 にて有効)
**   : 無効とする場合は, "Not evaluate"と入力
** *Break_judgement_by_half_crack_angle
**   : 破断時き裂半角  $\theta_B$  (degree)
**   : 破断判定にき裂半角を適用するとき入力 (き裂種類 4 にて有効)
**   : 無効とする場合は, "Not evaluate"と入力
**-----
*Break_judgement_based_on_primary_stress
  34.0, 0, 0
*Break_judgement_by_half_crack_angle
  Not evaluate
**-----

```

```

** 【 き裂進展速度線図 】
** *Slope_of_CGR_of_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (母材)
** *Slope_of_CGR_of_weld_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (溶接金属)
** *Slope_of_CGR_of_CGR_of_RPV_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (原子炉圧力容器鋼)
** き裂進展速度乗数, 応力拡大係数シフト量, 下閾値, 上閾値, 温度補正係数
**
** *Scatter_of_CGR_of_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (母材)
** *Scatter_of_CGR_of_weld_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (溶接金属)
** *Scatter_of_CGR_of_CGR_of_RPV_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (原子炉圧力容器鋼)
** き裂進展速度係数  $\alpha$  の自然対数  $\ln(\alpha)$  を正規分布に当てはめ, 平均値及び標準偏差を算出する
**  $\alpha$  の単位は, da/dt (m/s), K (MPam0.5)
**-----
*****
** base metal **
*****
*Slope_of_CGR_of_base_metal
  1.03, 0.0, 0.0, 100.0
*Scatter_of_CGR_of_base_metal
  LogNormal, -30.6510, 0.2430, -32.1090, -29.1930
*Effect_of_Temperature_on_CGR_of_base_metal
** Ta(C), Ta_ref(C), Q(kJ/mol), R(kJ/molK) ** c_temp = 0.734
  324, 325, 70, 8.31447E-3
*Effect_of_ECP_on_CGR_of_base_metal
** ECP (mVSHE), ECP_lower (mVSHE), ECP_upper (mVSHE), a_ECP, b_ECP ** c_ECP = 9.752641E-18
  -150, -200, -100, 2.08E-16, 0.0204
*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_base_metal
**  $\epsilon_p$  %, Cp
  0.000, 1.000
  2.002, 2.742
  4.002, 4.054
  6.002, 5.224
  8.005, 6.303
  10.002, 7.271
  12.007, 8.136
  14.004, 8.909
  16.002, 9.593
  18.002, 10.173
  20.006, 10.696
  22.038, 11.178
  24.720, 12.539
  25.720, 15.212
  26.719, 18.775
  28.174, 27.468
*****
** weld metal **
*****
*Slope_of_CGR_of_weld_metal
  1.6, 0.0, 0.0, 100.0
*Scatter_of_CGR_of_weld_metal
  LogNormal, -27.3358, 1.0160, -33.4318, -21.2398
*Effect_of_Temperature_on_CGR_of_weld_metal
** Ta(C), Ta_ref(C), Q(kJ/mol), R(kJ/molK)
  324, 325, 130, 8.31447E-3
*Effect_of_ECP_on_CGR_of_weld_metal
** ECP (mVSHE), ECP_lower (mVSHE), ECP_upper (mVSHE), a_ECP, b_ECP
  -150, -200, -100, 2.08E-16, 0.0204
*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_weld_metal
**  $\epsilon_p$  %, Cp
  0.000, 1.000

```

```

2.002, 2.742
4.002, 4.054
6.002, 5.224
8.005, 6.303
10.002, 7.271
12.007, 8.136
14.004, 8.909
16.002, 9.593
18.002, 10.173
20.006, 10.696
22.038, 11.178
24.720, 12.539
25.720, 15.212
26.719, 18.775
28.174, 27.468
*****
** RPV base metal **
*****
*Slope_of_CGR_of_RPV_base_metal
  0.0, 0.0, 0.0, 100.0
*Scatter_of_CGR_of_RPV_base_metal
  LogNormal, -27.3933, 0.0001, -27.3939, -27.3927
*Effect_of_Temperature_on_CGR_of_RPV_base_metal
** Ta(C), Ta_ref(C), Q(kJ/mol), R(kJ/molK) ** c_temp = 0.734
  324, 325, 0, 8.31447E-3
*Effect_of_ECP_on_CGR_of_RPV_base_metal
** ECP(mVSHE), ECP_lower(mVSHE), ECP_upper(mVSHE), a_ECP, b_ECP ** c_ECP = 9.752641E-18
  -150, -200, -100, 2.08E-16, 0.0204
*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_RPV_base_metal
** ε p %, Cp
  0.000, 1.000
  2.002, 2.742
  4.002, 4.054
  6.002, 5.224
  8.005, 6.303
  10.002, 7.271
  12.007, 8.136
  14.004, 8.909
  16.002, 9.593
  18.002, 10.173
  20.006, 10.696
  22.038, 11.178
  24.720, 12.539
  25.720, 15.212
  26.719, 18.775
  28.174, 27.468
*****
** 【 結果出力 】
** *File_name
**   : 出力ファイル名
** *Time span
**   : 出力年 (min, max, step)
** *Crack depth
**   : き裂深さ (min, max, step)
** *Half crack length
**   : き裂長さ (min, max, step)
** *Half crack angle
**   : き裂半角 (min, max, step)
** *SIF at deepest point
**   : き裂最深点の SIF (min, max, step)
** *SIF at surface point
**   : き裂表面点の SIF (min, max, step)
** *SIF in hoop direction
**   : き裂角度方向の SIF (min, max, step)
** *Crack growth velocity at deepest point

```

```

**      : き裂最深点の進展速度 (min, max, step)
** *Crack growth velocity at surface point
**      : き裂表面点の進展速度 (min, max, step)
** *Crack growth velocity at surface point of b1
**      : き裂表面点 b1 の進展速度 (min, max, step) (注: き裂種類 5 のみ有効)
** *Crack growth velocity at surface point of b2
**      : き裂表面点 b2 の進展速度 (min, max, step) (注: き裂種類 5 のみ有効)
** *Crack growth velocity in hoop direction
**      : き裂角度方向の進展速度 (min, max, step)
** *Position of crack center
**      : き裂中心位置 (min, max, step) (注: き裂種類 5 のみ)
**-----
*File_name
  V. C. Summer_HoopCrack_wo_repair
*Time_span
  0.0, 200.0, 0.1
*Crack_depth
  0.0, 81.0, 5.0
*Half_crack_length
  0.0, 500.0, 20.0
*Half_crack_angle
  0.0, 180.0, 10.0
*SIF_at_deepest_point
  0.0, 100.0, 5.0
*SIF_at_surface_point
  0.0, 100.0, 5.0
*SIF_in_hoop_direction
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_at_deepest_point
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_at_surface_point
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_at_surface_point_of_b1
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_at_surface_point_of_b2
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_in_hoop_direction
  0.0, 100.0, 5.0
*Position_of_crack_center
  800.0, 850.0, 5.0

```

(Case2 補修溶接あり)

```

**-----
** 【 解析手法 】
** *Method_of_analysis
**   : 解析手法 (PFM or DFM)
** *Total_sampling_number
**   : サンプルング数
** *Time_span_of_analysis
**   : 解析期間 (min, max, step)
**-----
**Method_of_analysis
  PFM
**
**Total_sampling_number
  1000000
**
**Time_span_of_analysis
  0.0, 200.0, 0.1
**
**Type_of_SCC
  PWSCC
**-----
** 【 機器の幾何形状 】
** *Component
**   : 機器名
** *Inner_radius_and_pipe_thickness
**   : 配管内半径またはノズル内半径 Ri (mm), 配管肉厚またはノズル肉厚 t (mm)
** *WT, *WK, *WL
**   : 溶接金属の寸法 (mm)
**-----
**Component
  V. C. Summer
**Inner_radius_and_pipe_thickness
  378.0, 78.0
**WK
  800
**WL
  848
**WT
  78.0
**-----
** 【 機器の材質 】
** *Material_for_stepX
**   : 材料名
** *Elastic_for_stepX
**   : 弾性係数 (MPa)
** *Yield_Stress_for_stepX
**   : 降伏応力, (確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, . . .)
** *Tensile_Strength_for_stepX
**   : 引張強さ, (確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, . . .)
**-----
*****
** Step 1 **
*****
**Material_for_step1
  weld_metal
**
**Elastic_for_step1
  196400
** NUREG CR-5642 at 324°C
**
**Yield_stress_for_step1
  Normal, 343.9, 11.8, 308.5, 379.3
** Average : JAEA at 324°C = 343.9MPa

```



```

** Scatter :  $\sigma = 3\sigma / 3 = 35.5 / 3 = 11.8$ 
** LowerLimit :  $-3\sigma$ 
** UpperLimit :  $+3\sigma$ 
**  $3\sigma = \text{JAEA at RT} - \text{JIS G3224 Ni6082 at RT}$ 
**  $3\sigma = 395.5 - 360.0 = 35.5$ 
**
*Tensile_strength_for_step1
  Normal, 584.3, 33.0, 485.0, 683.0
** Average : JAEA at 324°C = 584.3MPa
** Scatter :  $\sigma = 3\sigma / 3 = 99.0 / 3 = 33.0$ 
** LowerLimit :  $-3\sigma$ 
** UpperLimit :  $+3\sigma$ 
**  $3\sigma = \text{JAEA at RT} - \text{JIS G3224 Ni6082 at RT}$ 
**  $3\sigma = 699.0 - 600.0 = 99.0$ 
**
-----
** 【 初期き裂発生モデル 】
** *Standard_time_of_crack_initiation_for_stepX
**   : ti0 (hr)
** *Scatter_of_crack_initiation_for_stepX
**   :  $\alpha_i$  (確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, ...)
** *Temperature_index_for_stepX
**   : 温度, 温度閾値, At, Qi, R
** *Stress_index_for_stepX
**   : 切削加工深さ( $\mu\text{m}$ ), 極表面応力(MPa), 応力閾値(MPa), As, n
** *Surface_machining_for_stepX
**   : (負荷応力-降伏応力) vs 切削加工深さ を表形式で入力
** *Material_index_for_stepX
**   : 定数を入力
** *Depth_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂深さ(mm)
** *Half_length_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂半長(mm)
** *Half_angle_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂半角(degree)
** *Position_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂中心位置(mm)
**
-----
*****
** Step 1 **
*****
*Standard_time_of_crack_initiation_for_step1
  10000
*Scatter_of_crack_initiation_for_step1
  Weibull, 1.285, 1.125, 0.924
*Temperature_index_for_step1
  324, 250, 9.49E+15, 182.963, 8.31447E-3
** T, Tth, A $\theta$ , Qi, R
*Stress_index_for_step1
  100, 1000, 250, 2.68E-19, 7
** dc,  $\sigma_s$ ,  $\sigma_{th}$ , A $\sigma$ , n
**  $\sigma_{app}$  には保守的に、き裂深さ上限値までの範囲に発生する応力の最大値を入力
*Surface_machining_for_step1
  -, 0, 50, 100, 150, 200
  0, 0, 5, 20, 30, 38
  25, 25, 35, 46, 59, 73
  50, 50, 63, 75, 92, 112
  75, 75, 90, 105, 127, 159
  100, 100, 119, 136, 164, 236
  125, 125, 144, 174, 206, 347
  150, 150, 174, 210, 265, 446
  175, 175, 206, 248, 341, 526
  200, 200, 236, 284, 421, 594
  225, 225, 268, 331, 502, 654
  250, 250, 299, 381, 567, 715

```

```

275, 275, 333, 439, 635, 774
300, 300, 365, 505, 693, 828
325, 325, 399, 568, 746, 884
*Material_index_for_step1
  0.7
*Depth_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 0.75, 0.25, 0.50, 1.00
*Half_length_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 0.75, 0.25, 0.50, 1.00
*Half_angle_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 2.00, 0.50, 0.50, 3.50
*Position_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 820.00, 2.00, 808.00, 832.00
**-----
** 【 き裂進展評価 】
** *Flag_of_crack_kind_for_stepX_noX
**   : (1行目) き裂種類
**   き裂種類 0 (周方向・内面き裂)
**   き裂種類 1 (軸方向・内面き裂)
**   き裂種類 2 (周方向・外面き裂)
**   き裂種類 3 (軸方向・外面き裂)
**   き裂種類 4 (周方向・貫通き裂)
**   き裂種類 5 (半径方向・J溶接部き裂)
** *SIF_calculator_for_stepX_noX
**   : (1行目) 応力拡大係数算出式
**   き裂種類 0 の場合 ASME(4th), Bergman(3rd)
**   き裂種類 1 の場合 ASME(4th), Shiratori(3rd)
**   き裂種類 2 の場合 ASME(4th), Chapuliot(3rd)
**   き裂種類 3 の場合 ASME(4th), Fett(3rd)
**   き裂種類 4 の場合 Sander(const), Zang(4th), API4(1st)
**   き裂種類 5 の場合 API5(4th)
**   ASME 式の場合のみ塑性域補正 (MPa) が必要
** *Operating_stress_distribution_for_stepX_noX
**   次数,  $\sigma_{op\_0}$ ,  $\sigma_{op\_1}$ ,  $\sigma_{op\_2}$ ,  $\sigma_{op\_3}$ ,  $\sigma_{op\_4}$ 
** *Residual_stress_distribution_for_stepX_noX
**   次数,  $\sigma_r\_0$ ,  $\sigma_r\_1$ ,  $\sigma_r\_2$ ,  $\sigma_r\_3$ ,  $\sigma_r\_4$ 
** *Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_stepX_noX
**   板厚内領域分割数
** *Scatter_of_residual_stress_distribution_for_stepX_noX
**   確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, . . .
**-----
*****
** Step1 No1 **
*****
*Flag_of_crack_kind_for_step1_no1
  0
*SIF_calculator_for_step1_no1
  ASME
*Operating_stress_distribution_for_step1_no1
  4, 34.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
*Residual_stress_distribution_for_step1_no1
** 補修なし
** 4, 235.3, -192.2, -7312.8, 16087.8, -8652.7
** 補修あり
** 4, 424.8, -5093.7, 17070.0, -23676.1, 11524.0
*Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_step1_no1
  1
*Scatter_of_residual_stress_distribution_for_step1_no1
  Normal, 0.0, 10.0, -60.0, 60.0
*Plastic_strain_distribution_for_step1_no1
** a/t,  $\epsilon_p$  %
  0.0, 0.00
  0.1, 0.00
  0.2, 0.00
  0.3, 0.00

```

```

0.4, 0.00
0.5, 0.00
0.6, 0.00
0.7, 0.00
0.8, 0.00
0.9, 0.00
1.0, 0.00
*****
** Step1 No2 **
*****
*Flag_of_crack_kind_for_step1_no1
  4
*SIF_calculator_for_step1_no1
  Zang
*Operating_stress_distribution_for_step1_no1
  4, 34.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
*Residual_stress_distribution_for_step1_no1
** 補修なし
** 4, 235.3, -192.2, -7312.8, 16087.8, -8652.7
** 補修あり
  4, 424.8, -5093.7, 17070.0, -23676.1, 11524.0
*Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_step1_no1
  1
*Scatter_of_residual_stress_distribution_for_step1_no1
  Normal, 0.0, 10.0, -60.0, 60.0
*Plastic_strain_distribution_for_step1_no1
** a/t,  $\epsilon_p$  %
  0.0, 0.00
  0.1, 0.00
  0.2, 0.00
  0.3, 0.00
  0.4, 0.00
  0.5, 0.00
  0.6, 0.00
  0.7, 0.00
  0.8, 0.00
  0.9, 0.00
  1.0, 0.00
**-----
** 【 Leak 判定 】
** *Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_t
**   : Leak 時のき裂深さ比 a/t (き裂種類 0~3 にて有効)
** *Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_WT
**   : Leak 時のき裂深さ比 a/T (き裂種類 5 にて有効)
**-----
*Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_t
  0.8
*Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_WT
  0.8
**-----
** 【 破断判定 】
** *Break_judgement_based_on_primary_stress
**   : 1次一般膜応力 Pm (MPa), 1次曲げ応力 Pb (MPa), 熱膨張応力 Pe (MPa)
**   : 破断判定に1次応力基準を適用するとき入力 (き裂種類 0, 2, 4 にて有効)
**   : 無効とする場合は, "Not evaluate"と入力
** *Break_judgement_by_half_crack_angle
**   : 破断時き裂半角  $\theta_B$  (degree)
**   : 破断判定にき裂半角を適用するとき入力 (き裂種類 4 にて有効)
**   : 無効とする場合は, "Not evaluate"と入力
**-----
*Break_judgement_based_on_primary_stress
  34.0, 0, 0
*Break_judgement_by_half_crack_angle
  Not evaluate
**-----

```

```

** 【 き裂進展速度線図 】
** *Slope_of_CGR_of_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (母材)
** *Slope_of_CGR_of_weld_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (溶接金属)
** *Slope_of_CGR_of_CGR_of_RPV_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (原子炉圧力容器鋼)
** き裂進展速度乗数, 応力拡大係数シフト量, 下閾値, 上閾値, 温度補正係数
**
** *Scatter_of_CGR_of_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (母材)
** *Scatter_of_CGR_of_weld_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (溶接金属)
** *Scatter_of_CGR_of_CGR_of_RPV_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (原子炉圧力容器鋼)
** き裂進展速度係数  $\alpha$  の自然対数  $\ln(\alpha)$  を正規分布に当てはめ, 平均値及び標準偏差を算出する
**  $\alpha$  の単位は, da/dt (m/s), K (MPam0.5)
**-----
*****
** base metal **
*****
*Slope_of_CGR_of_base_metal
  1.03, 0.0, 0.0, 100.0
*Scatter_of_CGR_of_base_metal
  LogNormal, -30.6510, 0.2430, -32.1090, -29.1930
*Effect_of_Temperature_on_CGR_of_base_metal
** Ta(C), Ta_ref(C), Q(kJ/mol), R(kJ/molK) ** c_temp = 0.734
  324, 325, 70, 8.31447E-3
*Effect_of_ECP_on_CGR_of_base_metal
** ECP (mVSHE), ECP_lower (mVSHE), ECP_upper (mVSHE), a_ECP, b_ECP ** c_ECP = 9.752641E-18
  -150, -200, -100, 2.08E-16, 0.0204
*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_base_metal
**  $\epsilon_p$  %, Cp
  0.000, 1.000
  2.002, 2.742
  4.002, 4.054
  6.002, 5.224
  8.005, 6.303
  10.002, 7.271
  12.007, 8.136
  14.004, 8.909
  16.002, 9.593
  18.002, 10.173
  20.006, 10.696
  22.038, 11.178
  24.720, 12.539
  25.720, 15.212
  26.719, 18.775
  28.174, 27.468
*****
** weld metal **
*****
*Slope_of_CGR_of_weld_metal
  1.6, 0.0, 0.0, 100.0
*Scatter_of_CGR_of_weld_metal
  LogNormal, -27.3358, 1.0160, -33.4318, -21.2398
*Effect_of_Temperature_on_CGR_of_weld_metal
** Ta(C), Ta_ref(C), Q(kJ/mol), R(kJ/molK)
  324, 325, 130, 8.31447E-3
*Effect_of_ECP_on_CGR_of_weld_metal
** ECP (mVSHE), ECP_lower (mVSHE), ECP_upper (mVSHE), a_ECP, b_ECP
  -150, -200, -100, 2.08E-16, 0.0204
*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_weld_metal
**  $\epsilon_p$  %, Cp
  0.000, 1.000

```

```

2.002, 2.742
4.002, 4.054
6.002, 5.224
8.005, 6.303
10.002, 7.271
12.007, 8.136
14.004, 8.909
16.002, 9.593
18.002, 10.173
20.006, 10.696
22.038, 11.178
24.720, 12.539
25.720, 15.212
26.719, 18.775
28.174, 27.468
*****
** RPV base metal **
*****
*Slope_of_CGR_of_RPV_base_metal
  0.0, 0.0, 0.0, 100.0
*Scatter_of_CGR_of_RPV_base_metal
  LogNormal, -27.3933, 0.0001, -27.3939, -27.3927
*Effect_of_Temperature_on_CGR_of_RPV_base_metal
** Ta(C), Ta_ref(C), Q(kJ/mol), R(kJ/molK) ** c_temp = 0.734
  324, 325, 0, 8.31447E-3
*Effect_of_ECP_on_CGR_of_RPV_base_metal
** ECP(mVSHE), ECP_lower(mVSHE), ECP_upper(mVSHE), a_ECP, b_ECP ** c_ECP = 9.752641E-18
  -150, -200, -100, 2.08E-16, 0.0204
*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_RPV_base_metal
** ε p %, Cp
  0.000, 1.000
  2.002, 2.742
  4.002, 4.054
  6.002, 5.224
  8.005, 6.303
  10.002, 7.271
  12.007, 8.136
  14.004, 8.909
  16.002, 9.593
  18.002, 10.173
  20.006, 10.696
  22.038, 11.178
  24.720, 12.539
  25.720, 15.212
  26.719, 18.775
  28.174, 27.468
**-----**
** 【 結果出力 】
** *File_name
**   : 出力ファイル名
** *Time span
**   : 出力年 (min, max, step)
** *Crack depth
**   : き裂深さ (min, max, step)
** *Half crack length
**   : き裂長さ (min, max, step)
** *Half crack angle
**   : き裂半角 (min, max, step)
** *SIF at deepest point
**   : き裂最深点の SIF (min, max, step)
** *SIF at surface point
**   : き裂表面点の SIF (min, max, step)
** *SIF in hoop direction
**   : き裂角度方向の SIF (min, max, step)
** *Crack growth velocity at deepest point

```

```

**      : き裂最深点の進展速度 (min, max, step)
** *Crack growth velocity at surface point
**      : き裂表面点の進展速度 (min, max, step)
** *Crack growth velocity at surface point of b1
**      : き裂表面点 b1 の進展速度 (min, max, step) (注: き裂種類 5 のみ有効)
** *Crack growth velocity at surface point of b2
**      : き裂表面点 b2 の進展速度 (min, max, step) (注: き裂種類 5 のみ有効)
** *Crack growth velocity in hoop direction
**      : き裂角度方向の進展速度 (min, max, step)
** *Position of crack center
**      : き裂中心位置 (min, max, step) (注: き裂種類 5 のみ)
**-----
*File_name
  V. C. Summer_HoopCrack_w_repair
*Time_span
  0.0, 200.0, 0.1
*Crack_depth
  0.0, 81.0, 5.0
*Half_crack_length
  0.0, 500.0, 20.0
*Half_crack_angle
  0.0, 180.0, 10.0
*SIF_at_deepest_point
  0.0, 100.0, 5.0
*SIF_at_surface_point
  0.0, 100.0, 5.0
*SIF_in_hoop_direction
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_at_deepest_point
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_at_surface_point
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_at_surface_point_of_b1
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_at_surface_point_of_b2
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_in_hoop_direction
  0.0, 100.0, 5.0
*Position_of_crack_center
  800.0, 850.0, 5.0

```

## 5.4.4 浜岡 1 号機損傷事例解析インプットファイル

```

**-----
** 【 解析手法 】
** *Method_of_analysis
**   : 解析手法 (PFM or DFM)
** *Total_sampling_number
**   : サンプルング数
** *Time_span_of_analysis
**   : 解析期間 (min, max, step)
**-----
**Method_of_analysis
  PFM
**
**Total_sampling_number
  1000000
**
**Time_span_of_analysis
  0.0, 60.0, 0.1
**
**Type_of_SCC
  NiSCC
**-----
** 【 機器の幾何形状 】
** *Component
**   : 機器名
** *Inner_radius_and_pipe_thickness
**   : 配管内半径またはノズル内半径 Ri (mm), 配管肉厚またはノズル肉厚 t (mm)
** *RPV_thickness
**   : 原子炉圧力容器鋼の厚さ T (mm) (注: き裂種類 5 のみ有効)
** *WL
**   : ノズル内面から原子炉圧力容器鋼までの距離 WL (mm) (注: き裂種類 5 のみ有効)
**-----
**Component
  StubTube
**Inner_radius_and_pipe_thickness
  76.2, 20.8
**WT
  20.8
**WK
  800
**WL
  840
**-----
** 【 機器の材質 】
** *Material_for_stepX
**   : 材料名
** *Elastic_for_stepX
**   : 弾性係数 (MPa)
** *Yield_Stress_for_stepX
**   : 降伏応力, (確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, ...)
** *Tensile_Strength_for_stepX
**   : 引張強さ, (確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, ...)
**-----
*****
** Step 1 **
*****
**Material_for_step1
  weld_metal
**
**Elastic_for_step1
  200120
** NUREG CR-5642 at 288°C
**

```

```

*Yield_stress_for_step1
  Normal, 322.6, 43.0, 193.6, 451.6
** Average : NUREG CR-5642 at 288
** Scatter :  $\sigma = 3\sigma / 3 = 129.0 / 3 = 43.0$ 
** LowerLimit :  $-3\sigma$ 
** UpperLimit :  $+3\sigma$ 
**  $3\sigma = \text{NUREG CR-5642 at RT} - \text{JIS G4903 NCF600 TP at RT}$ 
**  $3\sigma = 374.0 - 245.0 = 129.0$ 
**
*Tensile_strength_for_step1
  Normal, 694.7, 61.0, 511.7, 877.7
** Average : NUREG CR-5642 at 288
** Scatter :  $\sigma = 3\sigma / 3 = 183.0 / 3 = 61.0$ 
** LowerLimit :  $-3\sigma$ 
** UpperLimit :  $+3\sigma$ 
**  $3\sigma = \text{NUREG CR-5642 at RT} - \text{JIS G4903 NCF600 TP at RT}$ 
**  $3\sigma = 733.0 - 550.0 = 183.0$ 
**-----
** 【 初期き裂発生モデル 】
** *Standard_time_of_crack_initiation_for_stepX
**   : ti0 (hr)
** *Scatter_of_crack_initiation_for_stepX
**   :  $\alpha_i$  (確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, . . .)
** *Temperature_index_for_stepX
**   : 温度, 温度閾値, At, Qi, R
** *Stress_index_for_stepX
**   : 切削加工深さ ( $\mu\text{m}$ ), 極表面応力 (MPa), 応力閾値 (MPa), As, n
** *Surface_machining_for_stepX
**   : (負荷応力-降伏応力) vs 切削加工深さ を表形式で入力
** *Material_index_for_stepX
**   : 定数を入力
** *Depth_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂深さ (mm)
** *Half_length_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂半長 (mm)
** *Half_angle_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂半角 (degree)
** *Position_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂中心位置 (mm)
**-----
*****
** Step 1 **
*****
*Standard_time_of_crack_initiation_for_step1
  86.0
*Scatter_of_crack_initiation_for_step1
  Weibull, 1.314, 0.593, 1.00
*Temperature_index_for_step1
  288, 250, 9.49E+15, 182.963, 8.31447E-3
** T, Tth, A $\theta$ , Qi, R
*Stress_index_for_step1
  100, 1000, 350, 1.91E-3, 1.36
** dc,  $\sigma_s$ ,  $\sigma_{th}$ , A $\sigma$ , n
**  $\sigma_{app}$  には保守的に板厚内の応力最大値を入力
*Surface_machining_for_step1
  -, 0, 50, 100, 150, 200
  0, 0, 5, 20, 30, 38
  25, 25, 35, 46, 59, 73
  50, 50, 63, 75, 92, 112
  75, 75, 90, 105, 127, 159
  100, 100, 119, 136, 164, 236
  125, 125, 144, 174, 206, 347
  150, 150, 174, 210, 265, 446
  175, 175, 206, 248, 341, 526
  200, 200, 236, 284, 421, 594

```



```

225, 225, 268, 331, 502, 654
250, 250, 299, 381, 567, 715
275, 275, 333, 439, 635, 774
300, 300, 365, 505, 693, 828
325, 325, 399, 568, 746, 884
*Material_index_for_step1
  0.7
*Depth_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 0.60, 0.10, 0.30, 0.90
*Half_length_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 0.60, 0.10, 0.30, 0.90
*Half_angle_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 2.00, 0.50, 0.50, 3.50
*Position_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 820.0, 2.0, 804.0, 816.0
**-----
** 【 き裂進展評価 】
** *Flag_of_crack_kind_for_stepX_noX
**   : (1行目) き裂種類
**   き裂種類 0 (周方向・内面き裂)
**   き裂種類 1 (軸方向・内面き裂)
**   き裂種類 2 (周方向・外面き裂)
**   き裂種類 3 (軸方向・外面き裂)
**   き裂種類 4 (周方向・貫通き裂)
**   き裂種類 5 (半径方向・J溶接部き裂)
** *SIF_calculator_for_stepX_noX
**   : (1行目) 応力拡大係数算出式
**   き裂種類 0 の場合 ASME, Bergman
**   き裂種類 1 の場合 ASME, Shiratori
**   き裂種類 2 の場合 ASME, Chapuliot
**   き裂種類 3 の場合 ASME, Fett
**   き裂種類 4 の場合 Zang, Sander, API4
**   き裂種類 5 の場合 API5
**   ASME 式の場合のみ塑性域補正 (MPa) が必要
** *Operating_stress_distribution_for_stepX_noX
**   次数,  $\sigma_{op_0}$ ,  $\sigma_{op_1}$ ,  $\sigma_{op_2}$ ,  $\sigma_{op_3}$ ,  $\sigma_{op_4}$ 
** *Residual_stress_distribution_for_stepX_noX
**   次数,  $\sigma_r_0$ ,  $\sigma_r_1$ ,  $\sigma_r_2$ ,  $\sigma_r_3$ ,  $\sigma_r_4$ 
** *Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_stepX_noX
**   板厚内領域分割数
** *Scatter_of_residual_stress_distribution_for_stepX_noX
**   確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, . . .
**-----
*****
** Step1_No1 **
*****
*Flag_of_crack_kind_for_step1_no1
  5
*SIF_calculator_for_step1_no1
  API5
*Operating_stress_distribution_for_step1_no1
  4, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
*Residual_stress_distribution_for_step1_no1
  4, 328.6, -309.8, -1595.3, 3888.3, -2764.9
*Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_step1_no1
  1
*Scatter_of_residual_stress_distribution_for_step1_no1
  Normal, 0.0, 10.0, -60.0, 60.0
*Plastic_strain_distribution_for_step1_no1
** a/t,  $\epsilon_p$  %
  0.000, 0.00
  0.002, 0.00
  0.004, 0.00
  0.010, 0.00
  0.021, 0.00

```

```

0.038, 0.00
0.2, 0.00
0.4, 0.00
0.6, 0.00
0.8, 0.00
1.0, 0.00
**-----**
** 【 Leak 判定 】
** *Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_t
**   : Leak 時のき裂深さ比 a/t (き裂種類 0~3 にて有効)
** *Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_WT
**   : Leak 時のき裂深さ比 a/T (き裂種類 5 にて有効)
**-----**
*Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_t
0.80
*Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_WT
0.80
**-----**
** 【 破断判定 】
** *Break_judgement_based_on_primary_stress
**   : 1 次一般膜応力 Pm (MPa), 1 次曲げ応力 Pb (MPa), 熱膨張応力 Pe (MPa)
**   : 破断判定に 1 次応力基準を適用するとき入力 (き裂種類 0, 2, 4 にて有効)
**   : 無効とする場合は, "Not evaluate" と入力
** *Break_judgement_by_half_crack_angle
**   : 破断時き裂半角  $\theta_B$  (degree)
**   : 破断判定にき裂半角を適用するとき入力 (き裂種類 4 にて有効)
**   : 無効とする場合は, "Not evaluate" と入力
**-----**
*Break_judgement_based_on_primary_stress
Not evaluate
*Break_judgement_by_half_crack_angle
Not evaluate
**-----**
** 【 き裂進展速度線図 】
** *Slope_of_CGR_of_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (母材)
** *Slope_of_CGR_of_weld_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (溶接金属)
** *Slope_of_CGR_of_CGR_of_RPV_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (原子炉圧力容器鋼)
** き裂進展速度乗数, 応力拡大係数シフト量, 下閾値, 上閾値
**
** *Scatter_of_CGR_of_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (母材)
** *Scatter_of_CGR_of_weld_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (溶接金属)
** *Scatter_of_CGR_of_CGR_of_RPV_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (原子炉圧力容器鋼)
** き裂進展速度係数  $\alpha$  の自然対数  $\ln(\alpha)$  を正規分布に当てはめ, 平均値及び標準偏差を算出する
**  $\alpha$  の単位は, da/dt (m/s), K (MPam0.5)
**-----**
*****
** base metal **
*****
*Slope_of_CGR_of_base_metal
4.5, 0.0, 0.0, 56.0
*Scatter_of_CGR_of_base_metal
LogNormal, -5.2726, 0.5424, -8.5270, -2.0182
*Effect_of_Temperature_on_CGR_of_base_metal
** Ta (C), Ta_ref (C), Q (kJ/mol), R (kJ/molK) ** c_temp = 0.734
288, 325, 130, 8.31447E-3
*Effect_of_ECP_on_CGR_of_base_metal
** ECP (mVSHE), ECP_lower (mVSHE), ECP_upper (mVSHE), a_ECP, b_ECP ** c_ECP = 9.752641E-18
0, -200, -100, 2.08E-16, 0.0204
*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_base_metal

```

```

** ε p %, Cp
  0.000, 1.000
  2.002, 2.742
  4.002, 4.054
  6.002, 5.224
  8.005, 6.303
 10.002, 7.271
 12.007, 8.136
 14.004, 8.909
 16.002, 9.593
 18.002, 10.173
 20.006, 10.696
 22.038, 11.178
 24.720, 12.539
 25.720, 15.212
 26.719, 18.775
 28.174, 27.468
*****
** weld metal **
*****
*Slope_of_CGR_of_weld_metal
  4.5, 0.0, 0.0, 56.0
*Scatter_of_CGR_of_weld_metal
  LogNormal, 0.0000, 0.5424, -3.2544, 3.2544
*Effect_of_Temperature_on_CGR_of_weld_metal
** Ta(C), Ta_ref(C), Q(kJ/mol), R(kJ/molK) ** c_temp = 0.734
  288, 325, 215, 8.31447E-3
*Effect_of_ECP_on_CGR_of_weld_metal
** ECP(mVSHE), ECP_lower(mVSHE), ECP_upper(mVSHE), a_ECP, b_ECP ** c_ECP = 9.752641E-18
  0, -200, -100, 2.08E-16, 0.0204
*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_weld_metal
** ε p %, Cp
  0.000, 1.000
  2.002, 2.742
  4.002, 4.054
  6.002, 5.224
  8.005, 6.303
 10.002, 7.271
 12.007, 8.136
 14.004, 8.909
 16.002, 9.593
 18.002, 10.173
 20.006, 10.696
 22.038, 11.178
 24.720, 12.539
 25.720, 15.212
 26.719, 18.775
 28.174, 27.468
*****
** RPV base metal **
*****
*Slope_of_CGR_of_RPV_base_metal
  4.0, 0.0, 0.0, 100.0
*Scatter_of_CGR_of_RPV_base_metal
  LogNormal, -3.6447, 0.4378, -6.2745, -1.0209
*Effect_of_Temperature_on_CGR_of_RPV_base_metal
** Ta(C), Ta_ref(C), Q(kJ/mol), R(kJ/molK) ** c_temp = 0.734
  288, 325, 215, 8.31447E-3
*Effect_of_ECP_on_CGR_of_RPV_base_metal
** ECP(mVSHE), ECP_lower(mVSHE), ECP_upper(mVSHE), a_ECP, b_ECP ** c_ECP = 9.752641E-18
  0, -200, -100, 2.08E-16, 0.0204
*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_RPV_base_metal
** ε p %, Cp
  0.000, 1.000
  2.002, 2.742

```

4.002, 4.054  
 6.002, 5.224  
 8.005, 6.303  
 10.002, 7.271  
 12.007, 8.136  
 14.004, 8.909  
 16.002, 9.593  
 18.002, 10.173  
 20.006, 10.696  
 22.038, 11.178  
 24.720, 12.539  
 25.720, 15.212  
 26.719, 18.775  
 28.174, 27.468

-----

\*\* 【 結果出力 】

\*\* \*File\_name  
 \*\* : 出力ファイル名  
 \*\* \*Time span  
 \*\* : 出力年 (min, max, step)  
 \*\* \*Crack depth  
 \*\* : き裂深さ (min, max, step)  
 \*\* \*Half crack length  
 \*\* : き裂長さ (min, max, step)  
 \*\* \*Half crack angle  
 \*\* : き裂半角 (min, max, step)  
 \*\* \*SIF at deepest point  
 \*\* : き裂最深点の SIF (min, max, step)  
 \*\* \*SIF at surface point  
 \*\* : き裂表面点の SIF (min, max, step)  
 \*\* \*SIF in hoop direction  
 \*\* : き裂角度方向の SIF (min, max, step)  
 \*\* \*Crack growth velocity at deepest point  
 \*\* : き裂最深点の進展速度 (min, max, step)  
 \*\* \*Crack growth velocity at surface point  
 \*\* : き裂表面点の進展速度 (min, max, step)  
 \*\* \*Crack growth velocity at surface point of b1  
 \*\* : き裂表面点 b1 の進展速度 (min, max, step) (注: き裂種類 5 のみ有効)  
 \*\* \*Crack growth velocity at surface point of b2  
 \*\* : き裂表面点 b2 の進展速度 (min, max, step) (注: き裂種類 5 のみ有効)  
 \*\* \*Crack growth velocity in hoop direction  
 \*\* : き裂角度方向の進展速度 (min, max, step)  
 \*\* \*Position of crack center  
 \*\* : き裂中心位置 (min, max, step) (注: き裂種類 5 のみ)

-----

\*File\_name  
 Hamaoka1\_Sample  
 \*Time\_span  
 0.0, 60.0, 0.1  
 \*Crack\_depth  
 0.0, 40.0, 2.0  
 \*Half\_crack\_length  
 0.0, 40.0, 2.0  
 \*Half\_crack\_angle  
 0.0, 180.0, 10.0  
 \*SIF\_at\_deepest\_point  
 0.0, 100.0, 5.0  
 \*SIF\_at\_surface\_point  
 0.0, 100.0, 5.0  
 \*SIF\_in\_hoop\_direction  
 0.0, 100.0, 5.0  
 \*Crack\_growth\_velocity\_at\_deepest\_point  
 0.0, 100.0, 5.0  
 \*Crack\_growth\_velocity\_at\_surface\_point  
 0.0, 100.0, 5.0

```
*Crack_growth_velocity_at_surface_point_of_b1  
0.0, 100.0, 5.0  
*Crack_growth_velocity_at_surface_point_of_b2  
0.0, 100.0, 5.0  
*Crack_growth_velocity_in_hoop_direction  
0.0, 100.0, 5.0  
*Position_of_crack_center  
800.0, 840.0, 2.0
```

## 5.4.5 敦賀1号機損傷事例解析インプットファイル

```

**-----
** 【 解析手法 】
** *Method_of_analysis
**   : 解析手法 (PFM or DFM)
** *Total_sampling_number
**   : サンプル数
** *Time_span_of_analysis
**   : 解析期間 (min, max, step)
**-----
**Method_of_analysis
  PFM
**
**Total_sampling_number
  1000000
**
**Time_span_of_analysis
  0.0, 60.0, 0.1
**
**Type_of_SCC
  NiSCC
**-----
** 【 機器の幾何形状 】
** *Component
**   : 機器名
** *Inner_radius_and_pipe_thickness
**   : 配管内半径またはノズル内半径 Ri (mm), 配管肉厚またはノズル肉厚 t (mm)
** *RPV_thickness
**   : 原子炉圧力容器鋼の厚さ T (mm) (注: き裂種類 5 のみ有効)
** *WL
**   : ノズル内面から原子炉圧力容器鋼までの距離 WL (mm) (注: き裂種類 5 のみ有効)
**-----
**Component
  Shroud_Support
**Inner_radius_and_pipe_thickness
  2000, 25.4
**WT
  25.4
**WK
  800
**WL
  860
**-----
** 【 機器の材質 】
** *Material_for_stepX
**   : 材料名
** *Elastic_for_stepX
**   : 弾性係数 (MPa)
** *Yield_Stress_for_stepX
**   : 降伏応力, (確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, ...)
** *Tensile_Strength_for_stepX
**   : 引張強さ, (確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, ...)
**-----
*****
** Step 1 **
*****
**Material_for_step1
  weld_metal
**
**Elastic_for_step1
  200120
** NUREG CR-5642 at 288°C
**

```

```

*Yield_stress_for_step1
  Normal, 322.6, 43.0, 193.6, 451.6
** Average : NUREG CR-5642 at 288
** Scatter :  $\sigma = 3\sigma / 3 = 129.0 / 3 = 43.0$ 
** LowerLimit :  $-3\sigma$ 
** UpperLimit :  $+3\sigma$ 
**  $3\sigma =$  NUREG CR-5642 at RT - JIS G4903 NCF600 TP at RT
**  $3\sigma = 374.0 - 245.0 = 129.0$ 
**
*Tensile_strength_for_step1
  Normal, 694.7, 61.0, 511.7, 877.7
** Average : NUREG CR-5642 at 288
** Scatter :  $\sigma = 3\sigma / 3 = 183.0 / 3 = 61.0$ 
** LowerLimit :  $-3\sigma$ 
** UpperLimit :  $+3\sigma$ 
**  $3\sigma =$  NUREG CR-5642 at RT - JIS G4903 NCF600 TP at RT
**  $3\sigma = 733.0 - 550.0 = 183.0$ 
**-----
** 【 初期き裂発生モデル 】
** *Standard_time_of_crack_initiation_for_stepX
**   : ti0 (hr)
** *Scatter_of_crack_initiation_for_stepX
**   :  $\alpha_i$  (確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, . . .)
** *Temperature_index_for_stepX
**   : 温度, 温度閾値, At, Qi, R
** *Stress_index_for_stepX
**   : 切削加工深さ ( $\mu\text{m}$ ), 極表面応力 (MPa), 応力閾値 (MPa), As, n
** *Surface_machining_for_stepX
**   : (負荷応力-降伏応力) vs 切削加工深さ を表形式で入力
** *Material_index_for_stepX
**   : 定数を入力
** *Depth_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂深さ (mm)
** *Half_length_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂半長 (mm)
** *Half_angle_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂半角 (degree)
** *Position_of_initial_crack_for_stepX
**   : 初期き裂中心位置 (mm)
**-----
*****
** Step 1 **
*****
*Standard_time_of_crack_initiation_for_step1
  86.0
*Scatter_of_crack_initiation_for_step1
  Weibull, 1.314, 0.593, 1.00
*Temperature_index_for_step1
  288, 250, 9.49E+15, 182.963, 8.31447E-3
** T, Tth, A $\theta$ , Qi, R
*Stress_index_for_step1
  100, 1000, 350, 1.91E-3, 1.36
** dc,  $\sigma_s$ ,  $\sigma_{th}$ , A $\sigma$ , n
**  $\sigma_{app}$  には保守的に板厚内の応力最大値を入力
*Surface_machining_for_step1
  -, 0, 50, 100, 150, 200
  0, 0, 5, 20, 30, 38
  25, 25, 35, 46, 59, 73
  50, 50, 63, 75, 92, 112
  75, 75, 90, 105, 127, 159
  100, 100, 119, 136, 164, 236
  125, 125, 144, 174, 206, 347
  150, 150, 174, 210, 265, 446
  175, 175, 206, 248, 341, 526
  200, 200, 236, 284, 421, 594

```

```

225, 225, 268, 331, 502, 654
250, 250, 299, 381, 567, 715
275, 275, 333, 439, 635, 774
300, 300, 365, 505, 693, 828
325, 325, 399, 568, 746, 884
*Material_index_for_step1
  0.7
*Depth_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 0.60, 0.10, 0.30, 0.90
*Half_length_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 0.60, 0.10, 0.30, 0.90
*Half_angle_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 2.00, 0.50, 0.50, 3.50
*Position_of_initial_crack_for_step1
  Normal, 820.0, 2.0, 804.0, 816.0
**-----
** 【 き裂進展評価 】
** *Flag_of_crack_kind_for_stepX_noX
**   : (1行目) き裂種類
**   き裂種類 0 (周方向・内面き裂)
**   き裂種類 1 (軸方向・内面き裂)
**   き裂種類 2 (周方向・外面き裂)
**   き裂種類 3 (軸方向・外面き裂)
**   き裂種類 4 (周方向・貫通き裂)
**   き裂種類 5 (半径方向・J溶接部き裂)
** *SIF_calculator_for_stepX_noX
**   : (1行目) 応力拡大係数算出式
**   き裂種類 0 の場合 ASME, Bergman
**   き裂種類 1 の場合 ASME, Shiratori
**   き裂種類 2 の場合 ASME, Chapuliot
**   き裂種類 3 の場合 ASME, Fett
**   き裂種類 4 の場合 Zang, Sander, API4
**   き裂種類 5 の場合 API5
**   ASME 式の場合のみ塑性域補正 (MPa) が必要
** *Operating_stress_distribution_for_stepX_noX
**   次数,  $\sigma_{op_0}$ ,  $\sigma_{op_1}$ ,  $\sigma_{op_2}$ ,  $\sigma_{op_3}$ ,  $\sigma_{op_4}$ 
** *Residual_stress_distribution_for_stepX_noX
**   次数,  $\sigma_r_0$ ,  $\sigma_r_1$ ,  $\sigma_r_2$ ,  $\sigma_r_3$ ,  $\sigma_r_4$ 
** *Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_stepX_noX
**   板厚内領域分割数
** *Scatter_of_residual_stress_distribution_for_stepX_noX
**   確率分布名, パラメータ①, パラメータ②, . . .
**-----
*****
** Step1_No1 **
*****
*Flag_of_crack_kind_for_step1_no1
  5
*SIF_calculator_for_step1_no1
  API5
*Operating_stress_distribution_for_step1_no1
  4, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
*Residual_stress_distribution_for_step1_no1
  4, 330.0, -60.0, 0.0, 0.0, 0.0
*Dev_num_of_residual_stress_distribution_for_step1_no1
  1
*Scatter_of_residual_stress_distribution_for_step1_no1
  Normal, 0.0, 10.0, -60.0, 60.0
*Plastic_strain_distribution_for_step1_no1
** a/t,  $\epsilon_p$  %
  0.000, 0.00
  0.002, 0.00
  0.004, 0.00
  0.010, 0.00
  0.021, 0.00

```



```

0.038, 0.00
0.2, 0.00
0.4, 0.00
0.6, 0.00
0.8, 0.00
1.0, 0.00
**-----
** 【 Leak 判定 】
** *Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_t
**   : Leak 時のき裂深さ比 a/t (き裂種類 0~3 にて有効)
** *Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_WT
**   : Leak 時のき裂深さ比 a/T (き裂種類 5 にて有効)
**-----
**Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_t
0.80
**Leak_judgement_based_on_crack_depth_ratio_for_WT
0.80
**-----
** 【 破断判定 】
** *Break_judgement_based_on_primary_stress
**   : 1 次一般膜応力 Pm (MPa), 1 次曲げ応力 Pb (MPa), 熱膨張応力 Pe (MPa)
**   : 破断判定に 1 次応力基準を適用するとき入力 (き裂種類 0, 2, 4 にて有効)
**   : 無効とする場合は, "Not evaluate" と入力
** *Break_judgement_by_half_crack_angle
**   : 破断時き裂半角  $\theta_B$  (degree)
**   : 破断判定にき裂半角を適用するとき入力 (き裂種類 4 にて有効)
**   : 無効とする場合は, "Not evaluate" と入力
**-----
**Break_judgement_based_on_primary_stress
Not evaluate
**Break_judgement_by_half_crack_angle
Not evaluate
**-----
** 【 き裂進展速度線図 】
** *Slope_of_CGR_of_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (母材)
** *Slope_of_CGR_of_weld_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (溶接金属)
** *Slope_of_CGR_of_CGR_of_RPV_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (原子炉圧力容器鋼)
** き裂進展速度乗数, 応力拡大係数シフト量, 下閾値, 上閾値
**
** *Scatter_of_CGR_of_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (母材)
** *Scatter_of_CGR_of_weld_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (溶接金属)
** *Scatter_of_CGR_of_CGR_of_RPV_base_metal
**   : SCC き裂進展速度線図の傾き (原子炉圧力容器鋼)
** き裂進展速度係数  $\alpha$  の自然対数  $\ln(\alpha)$  を正規分布に当てはめ, 平均値及び標準偏差を算出する
**  $\alpha$  の単位は, da/dt (m/s), K (MPam0.5)
**-----
*****
** base metal **
*****
**Slope_of_CGR_of_base_metal
4.5, 0.0, 0.0, 56.0
**Scatter_of_CGR_of_base_metal
LogNormal, -5.2726, 0.5424, -8.5270, -2.0182
**Effect_of_Temperature_on_CGR_of_base_metal
** Ta (C), Ta_ref (C), Q (kJ/mol), R (kJ/molK) ** c_temp = 0.734
288, 325, 130, 8.31447E-3
**Effect_of_ECP_on_CGR_of_base_metal
** ECP (mVSHE), ECP_lower (mVSHE), ECP_upper (mVSHE), a_ECP, b_ECP ** c_ECP = 9.752641E-18
0, -200, -100, 2.08E-16, 0.0204
**Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_base_metal

```

```

** ε p %, Cp
  0.000, 1.000
  2.002, 2.742
  4.002, 4.054
  6.002, 5.224
  8.005, 6.303
 10.002, 7.271
 12.007, 8.136
 14.004, 8.909
 16.002, 9.593
 18.002, 10.173
 20.006, 10.696
 22.038, 11.178
 24.720, 12.539
 25.720, 15.212
 26.719, 18.775
 28.174, 27.468
*****
** weld metal **
*****
*Slope_of_CGR_of_weld_metal
  4.5, 0.0, 0.0, 56.0
*Scatter_of_CGR_of_weld_metal
  LogNormal, 0.0000, 0.5424, -3.2544, 3.2544
*Effect_of_Temperature_on_CGR_of_weld_metal
** Ta(C), Ta_ref(C), Q(kJ/mol), R(kJ/molK) ** c_temp = 0.734
  288, 325, 215, 8.31447E-3
*Effect_of_ECP_on_CGR_of_weld_metal
** ECP(mVSHE), ECP_lower(mVSHE), ECP_upper(mVSHE), a_ECP, b_ECP ** c_ECP = 9.752641E-18
  0, -200, -100, 2.08E-16, 0.0204
*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_weld_metal
** ε p %, Cp
  0.000, 1.000
  2.002, 2.742
  4.002, 4.054
  6.002, 5.224
  8.005, 6.303
 10.002, 7.271
 12.007, 8.136
 14.004, 8.909
 16.002, 9.593
 18.002, 10.173
 20.006, 10.696
 22.038, 11.178
 24.720, 12.539
 25.720, 15.212
 26.719, 18.775
 28.174, 27.468
*****
** RPV base metal **
*****
*Slope_of_CGR_of_RPV_base_metal
  4.0, 0.0, 0.0, 100.0
*Scatter_of_CGR_of_RPV_base_metal
  LogNormal, -3.6447, 0.4378, -6.2745, -1.0209
*Effect_of_Temperature_on_CGR_of_RPV_base_metal
** Ta(C), Ta_ref(C), Q(kJ/mol), R(kJ/molK) ** c_temp = 0.734
  288, 325, 215, 8.31447E-3
*Effect_of_ECP_on_CGR_of_RPV_base_metal
** ECP(mVSHE), ECP_lower(mVSHE), ECP_upper(mVSHE), a_ECP, b_ECP ** c_ECP = 9.752641E-18
  0, -200, -100, 2.08E-16, 0.0204
*Effect_of_plastic_strain_on_CGR_of_RPV_base_metal
** ε p %, Cp
  0.000, 1.000
  2.002, 2.742

```

4.002, 4.054  
 6.002, 5.224  
 8.005, 6.303  
 10.002, 7.271  
 12.007, 8.136  
 14.004, 8.909  
 16.002, 9.593  
 18.002, 10.173  
 20.006, 10.696  
 22.038, 11.178  
 24.720, 12.539  
 25.720, 15.212  
 26.719, 18.775  
 28.174, 27.468

-----

```

** 【 結果出力 】
** *File_name
**   : 出力ファイル名
** *Time span
**   : 出力年 (min, max, step)
** *Crack depth
**   : き裂深さ (min, max, step)
** *Half crack length
**   : き裂長さ (min, max, step)
** *Half crack angle
**   : き裂半角 (min, max, step)
** *SIF at deepest point
**   : き裂最深点の SIF (min, max, step)
** *SIF at surface point
**   : き裂表面点の SIF (min, max, step)
** *SIF in hoop direction
**   : き裂角度方向の SIF (min, max, step)
** *Crack growth velocity at deepest point
**   : き裂最深点の進展速度 (min, max, step)
** *Crack growth velocity at surface point
**   : き裂表面点の進展速度 (min, max, step)
** *Crack growth velocity at surface point of b1
**   : き裂表面点 b1 の進展速度 (min, max, step) (注: き裂種類 5 のみ有効)
** *Crack growth velocity at surface point of b2
**   : き裂表面点 b2 の進展速度 (min, max, step) (注: き裂種類 5 のみ有効)
** *Crack growth velocity in hoop direction
**   : き裂角度方向の進展速度 (min, max, step)
** *Position of crack center
**   : き裂中心位置 (min, max, step) (注: き裂種類 5 のみ)

```

```

-----
*File_name
  Shroud_Support_Sample
*Time_span
  0.0, 60.0, 0.1
*Crack_depth
  0.0, 40.0, 2.0
*Half_crack_length
  0.0, 40.0, 2.0
*Half_crack_angle
  0.0, 180.0, 10.0
*SIF_at_deepest_point
  0.0, 100.0, 5.0
*SIF_at_surface_point
  0.0, 100.0, 5.0
*SIF_in_hoop_direction
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_at_deepest_point
  0.0, 100.0, 5.0
*Crack_growth_velocity_at_surface_point
  0.0, 100.0, 5.0

```

```
*Crack_growth_velocity_at_surface_point_of_b1  
0.0, 100.0, 5.0  
*Crack_growth_velocity_at_surface_point_of_b2  
0.0, 100.0, 5.0  
*Crack_growth_velocity_in_hoop_direction  
0.0, 100.0, 5.0  
*Position_of_crack_center  
800.0, 860.0, 2.0
```

## 6 まとめ

本報告書は、Ni 基合金異材溶接部に対する確率論的破壊力学解析コード PASCAL-NP の解析理論及び使用方法をとりまとめたものである。PASCAL-NP には PWSCC 及び NiSCC に関する最新の知見が反映されており、構造健全性に影響を及ぼすパラメータのばらつきを考慮して Ni 基合金異材溶接部（原子炉圧力容器上蓋貫通部、ホットレグ、スタブチューブ及びシュラウドサポート等）の破損確率解析を実施することができる。

### 参考文献

- 1) G. Yagawa, Y. Kanto, S. Yoshimura, H. Machida and K. Shibata: Probabilistic fracture mechanics analysis of nuclear structural components: a review of recent Japanese activities, Nuclear Engineering and Design, 207, pp. 269-286, (2001).
- 2) Nuclear Energy Agency, Committee on the Safety of Nuclear Installations: EC-JRC/OECD-NEA Benchmark Study on Risk Informed In Service Inspection Methodologies, (2010).
- 3) (社) 日本溶接協会・原子力研究委員会・PFM 小委員会: リスク活用のための確率論的破壊力学技術 -基礎と応用-, (2012).
- 4) 柴田勝之, 鬼沢邦雄, 李銀生, 加藤大輔: 確率論的破壊力学コード PASCAL の開発と使用手引き, JAERI-Data/Code 2001-011, (2001).
- 5) 小坂部和也, 加藤大輔, 鬼沢邦雄, 柴田勝之: 原子炉圧力容器用確率論的破壊力学解析コード PASCAL2 の使用手引き及び解析手法, JAEA-Data/Code 2006-020, (2006).
- 6) 眞崎浩一, 西川弘之, 小坂部和也, 鬼沢邦雄: 原子炉圧力容器用確率論的破壊力学解析コード PASCAL3 の使用手引き及び解析手法, JAEA-Data/Code 2010-033, (2011).
- 7) 伊藤裕人, 鬼沢邦雄, 柴田勝之: 確率論的破壊力学解析コード PASCAL-SC 及び PASCAL-EQ の使用手引き, JAERI-Data/Code 2005-007, (2005).
- 8) 伊藤裕人, 加藤大輔, 小坂部和也, 西川弘之, 鬼沢邦雄: 原子炉配管溶接部に対する確率論的破壊力学解析コード PASCAL-SP の使用手引き, JAEA-Data/Code 2009-025, (2010).
- 9) 伊藤裕人, 加藤大輔, 鬼沢邦雄, 柴田勝之: 減肉配管構造信頼性解析コード PASCAL-EC の使用手引き, JAEA-Data/Code 2006-001, (2006).
- 10) Japan Nuclear Technology Institute: 原子力施設公開情報ライブラリー NUCIA website <http://www.nucia.jp/>
- 11) Peter M. Scott: Primary Water Stress Corrosion Cracking of Nickel-base Alloys.
- 12) Peter Riccardella, Nathaniel Cofie, Angah Miessi, Stan Tang and Bryan Templeton: Probabilistic Fracture Mechanics Analysis to Support Inspection Intervals for RPV Top Head Nozzles, Proceedings of the Conference on Vessel Penetration Inspection, Crack Growth and Repair, NUREG/CP-0191, (2003).
- 13) G. White, L. Mathews and C. Eing: Summary of US PWR Reactor Vessel Head Nozzle Inspection Results, Proceedings of the Conference on Vessel Penetration Inspection, Crack Growth and Repair, NUREG/CP-0191, (2003).

- 14) Allen L. Hiser, Jr: US REGULATORY EXPERIENCE AND PROGNOSIS WITH RPV HEAD DEGRADATION AND VHP NOZZLE CRACKING, Proceedings of the Conference on Vessel Penetration Inspection, Crack Growth and Repair, NUREG/CP-0191, (2003).
- 15) Hongqing Xu, Steve Fyfitch and James W. Hyres: Laboratory Investigation of PWSCC of CRDM Nozzle 3 and Its J-Groove Weld on the Davis-Besse Reactor Vessel Head, 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, The Minerals, Metals & Materials Society, (2005).
- 16) Hongqing Xu, Steve Fyfitch, James W. Hyres, Francois Cattant and Allan Mellree: Laboratory Investigation of the Alloy 600 Bottom Mounted Instrumentation Nozzle Samples and Weld Boat Sample from South Texas Project Unit 1, 12th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, The Minerals, Metals & Materials Society, (2005).
- 17) 高原省五, 渡辺憲夫: 米国の加圧水型原子力発電所における Alloy 600 製圧力バウンダリー構成機器の 1 次冷却水応力腐食割れ事例の傾向分析, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 5, No. 4, pp. 282-291, (2006).
- 18) 関西電力株式会社: 関西電力プレスリリース “大飯発電所 3 号機の定期検査状況について (原子炉容器上部ふた制御棒駆動装置取付管台からの漏えいの原因と対策)”, (2004).
- 19) 福村卓也、戸塚信夫: 原子炉容器上蓋管台部の 1 次冷却材漏洩経路等調査, INSS JOURNAL, Vol. 15, pp. 113-124, (2008).
- 20) 戸塚信夫、福村卓也: 大飯 3 号機上蓋管台漏洩部調査に基づく PWSCC き裂進展速度について, INSS JOURNAL, Vol. 17, pp. 344-346, (2010).
- 21) 四国電力株式会社: 伊方発電所 2 号機原子炉容器入口管台内表面の微小な傷について, (2006).
- 22) W. H. Bamford, J. Foster, K. R. Hsu, L. Tunon-Sanjur and A. Mellree: Alloy 182 Weld Crack Growth, and its Impact on Service-Induced Cracking in Operating PWR Plant Pipint, 10th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, The Minerals, Metals & Materials Society, (1997).
- 23) Frederick W. Brust and Paul M. Scott: WELD RESIDUAL STRESSES AND PRIMARY WATER STRESS CORROSION CRACKING IN BIMETAL NUCLEAR PIPE WELDS, Proceedings of 2007 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2007-26297, (2007).
- 24) R. Miteva and N. G. Taylor: General Review of Dissimilar Metal Welds in Piping Systems of Pressurised Water Reactors, Including WWER Designs, (2006).
- 25) 古村一朗、古川敬: 開口合成 3 次元超音波探傷法による Ni 基合金溶接部の SCC 探傷特性, 溶接・非破壊検査技術センター技術レビュー, Vol. 6, (2010).
- 26) S. Hunt, J. Broussard, P. O’Regan and D. Covill: Weld Overlay Deposit on Alloy 82/182 Butt Welds to Reduce ID Surface Stresses, Proceedings of the Conference on Vessel Penetration Inspection, Crack Growth and Repair, NUREG/CP-0191, (2003).
- 27) 関西電力株式会社: 関西電力プレスリリース “大飯発電所 3 号機の定期検査状況について (原子炉容器 A ループ出口管台溶接部の傷の原因と対策)”, (2008).

- 28) 原子力安全・保安院: 中部電力株式会社浜岡原子力発電所 1 号機における制御棒駆動機構ハウジング貫通部からの漏えいについて (最終報告書), (2002).
- 29) 中部電力株式会社: 補修・取替え: CRD スタブチューブ溶接部の SCC と取替工法について, 原子力構造機器の材料, 設計, 施工, 検査, 維持, に関する講習会、日本溶接協会, (2003).
- 30) 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), pp. IJG-B-1-3 - IJG-B-1-4, (2012).
- 31) 日本原子力発電株式会社: 敦賀発電所 1 号機のシュラウドサポート部損傷の調査状況について 平成 12 年 2 月 20 日, (2000).
- 32) 日本原子力発電株式会社: 敦賀発電所 1 号機のシュラウドサポート部損傷の調査状況について 平成 12 年 4 月 20 日, (2000).
- 33) GE Nuclear Energy: The Evaluation of Observed Cracking at Nine Mile Point Unit 1 H9 Weld for Continued Operation (Non-Proprietary Version), GE Nuclear Energy Report GE-NE-B13-02097-00, Section 5-Rev.1, (2001).
- 34) Hirokazu Ugachi, Hirokazu Ugachi, Yoshiyuki Kaji, Junichi Nakano, Yoshinori Matsui, Kazuo Kawamata and Takashi Tsukada: DEVELOPMENT OF TEST TECHNIQUES FOR IN-PILE SCC INITIATION AND GROWTH TESTS AND THE CURRENT STATUS OF IN-PILE TESTING AT JMTR, 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, The Minerals, Metals & Materials Society, (2005).
- 35) SPECIAL METALS 社 ホームページ <http://www.specialmetals.com>
- 36) T. Yonezawa, K. Tsutsumi, H. Kanasaki, K. Yoshimoto, Y. Nomura and S. Asada: SCC Growth Rate of Nickel Based Alloy 132 in PWR Primary Water, Proceedings of the Conference on Vessel Penetration Inspection, Crack Growth and Repair, NUREG/CP-0191, (2003).
- 37) 米沢利夫: 材料が支える原子力システム より高い信頼性のために 第 3 回 Ni 基合金, 日本原子力学会誌, Vol. 53, No. 10, p.48, (2011).
- 38) 日本工業規格: 管用継目無ニッケルクロム鉄合金管, JIS G4903, (2008).
- 39) Claude Amzallag, Son Le Hong, Claude Pages and Angel Gelpi: STRESS CORROSION LIFE ASSESSMENT OF ALLOY 600 PWR COMPONENTS, Ninth International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, The Minerals, Metals & Materials Society, (1999).
- 40) Son Le Hong, Claude Amzallag and Angel Gelpi: MODELLING OF STRESS CORROSION CRACK INITIATION ON ALLOY 600 IN PRIMARY WATER OF PWRs, Ninth International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, The Minerals, Metals & Materials Society, (1999).
- 41) Claude Amzallag, Son Le Hong, Claude Benhamou and Angel Gelpi: METHODOLOGY USED TO RANK THE STRESS CORROSION SUSCEPTIBILITY OF ALLOY 600 PWR COMPONENTS, PVP-Vol. 410-2, Assessment Methodologies for Preventing Failure, Service Experience and Environmental Considerations Volume 2, ASME, (2000).

- 42) P. M. Scott and C. Benhamou: An Overview of Recent Observations and Interpretations of IGSCC in Nickel base Alloys in PWR Primary Water, 10th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, The Minerals, Metals & Materials Society, (2002).
- 43) Thierry Couvant and Francois Vaillant: INITIATION OF PWSCC OF WELD ALLOY 182, 15th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, The Minerals, Metals & Materials Society, (2011).
- 44) N. Saito, S. Tanaka and H. Sakamoto: EFFECT OF CORROSION POTENTIAL ON THE SCC INITIATION LIFETIME OF ALLOY 182 WELD METAL, Ninth International Symposium on Environmental degradation of materials in nuclear power systems – water reactors, pp. 493-499, (1999).
- 45) 鈴木義一郎: 情報量基準による統計解析入門, (1995).
- 46) 社団法人日本機械学会: ニッケル合金の PWR 一次系水質環境中の SCC き裂進展速度, 発電用原子力設備規格 維持規格 事例規格, JSME S NA-CC-006, (2008).
- 47) G. A. White, J. Hickling and L. K. Mathews: Crack Growth Rates for Evaluating PWSCC of Thick-Wall Alloy 600 Material, 11th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, The Minerals, Metals & Materials Society, (2003).
- 48) G. A. White, N. S. Nordmann, H. Hickling and C. D. Harrington: DEVELOPMENT OF CRACK GROWTH RATE DISPOSITION CURVES FOR PRIMARY WATER STRESS CORROSION CRACKING (PWSCC) OF ALLOY 82, 182, AND 132 WELDMENTS, Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, The Minerals, Metals & Materials Society, (2005).
- 49) R. Magdowski, F. Vaillant, C. Amzallag and M. O. Speidel: STRESS CORROSION CRACK GROWTH RATES OF ALLOY 600 IN SIMULATED PWR COOLANT, 8th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, The Minerals, Metals & Materials Society, (1997).
- 50) Catherine Guerre, Olivier Raquet, Emmanuel Herms, Marc Le Calvar and Guy Turluer: SCC GROWTH BEHAVIOR OF AUSTENITIC STAINLESS STEELS IN PWR PRIMARY WATER CONDITIONS, Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System – Water Reactors -, The Minerals, Metals & Materials Society, (2005).
- 51) David Tice, Norman Platts, Keith Rigby, John Stairmand and Howard Fairbrother: ENVIRONMENTALLY ASSISTED CRACK GROWTH OF COLD-WORKED TYPE 304 STAINLESS STEEL IN PWR ENVIRONMENTS, Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System – Water Reactors -, The Minerals, Metals & Materials Society, (2005).
- 52) Peter L. Andresen, Thomas M. Angeliu, William R. Catlin, Lisa M. Young and M. Horn: Effect of Deformation on SCC of Unsensitized Stainless Steel, CORROSION, 00203, (2000).



- 53) 新井拓, 黛正己: 低合金鋼の SCC 特性に及ぼす温度、水質と荷重モードの影響, 電力中央研究所報告 研究報告 T98051, (1999).
- 54) J. H. Park, O. K. Chopra, K. Natesan and W. J. Shack: Boric Acid Corrosion of Light Water Reactor Pressure Vessel Materials, NUREG/CR-6875, (2005).
- 55) Lars G. Ljungberg and Margareta Stigenberg: STRESS CORROSION CRACKING PROPAGATION IN LOW-STRENGTH NICKEL-BASE ALLOYS IN SIMULATED BWR ENVIRONMENTS, 8th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactor, pp. 704-711, (2003).
- 56) 長瀬博, 藤森治男, 齋藤利之, 山本豊, 高守謙郎, 堂崎浩二, 新井拓, 熊野秀樹: BWR 環境中でのニッケル基合金溶接金属の SCC き裂進展速度線図の提案, 日本機械学会論文集 (A 編), 76 巻, 764 号, pp. 81-83, (2010).
- 57) 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), 添付 E-2-14, (2012).
- 58) F. P. Ford, R. M. Horn, J. Hickling, R. Pathania and G. Bruemmer: Stress Corrosion Cracking of Low Alloy Steels under BWR Conditions; Assessment of Crack Growth Rate Algorithms, Proceeding of the Ninth International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, pp. 855-864, (1999).
- 59) F. Iwamatsu, K. Miyazaki and M. Mochizuki: Estimation of SCC Crack Growth Behavior under Weld Residual Stress in the Bottom of a Reactor Pressure Vessel by Finite Element Analysis, Proceeding of the ASME 2012 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2012-78471, (2012).
- 60) Russell C. Cipolla and Darrell R. Lee: Technical Basis for Stress Intensity Factor Coefficients in ASME Section XI Appendix A, PVP-Vol.480, Pressure Vessel and Piping Codes and Standards, PVP2004-2708, (2004).
- 61) M. Bergman: Stress Intensity Factors for Circumferential Surface Cracks in Pipes, Fatigue Fract. Engng Mater. Struct. Vol. 18, No. 10, pp. 1155-1172, (1995).
- 62) M. Shiratori: Analysis of Stress Intensity Factors by an Influence Function Method, Teaching materials in JSME, No. 900-2, (in Japanese), (1990).
- 63) Chapuliot, S.: Formulaire de KI Pour les Tubes Comportant un Defaut de Surface Semi-elliptique Longitudinal ou Circonférentiel, interne ou externe, Rapport CEA-R-5900, (2000).
- 64) T. Fett, D. Munz and J Neumann: Local Stress Intensity Factors for Surface Cracks in Plates under Power-Shaped Stress Distributions, Engineering Fracture Mechanics, 36, 4, pp. 647-651, (1990).
- 65) J. L. Sanders, Jr.: Circumferential Through-Cracks in Cylindrical Shell under Combined Bending and Tension, ASME J. Appl. Mech., Vol. 50, p. 221, (1983).
- 66) W. Zang: Stress Intensity Factor Solutions for Axial and Circumferential Through-Wall Cracks in Cylinders, SINTAP/SAQ/02, SAQ Control AB, (1997).
- 67) American Petroleum Institute: Fitness-For-Service API 579-1/ASME FFS-1, (2007).
- 68) Jinya Katsuyama, Tohru Tobita, Hiroto Itoh and Kunio Onizawa: Effect of Welding Conditions on Residual Stress and Stress Corrosion Cracking Behavior at Butt-Welding Joints of Stainless Steel Pipes, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 134, 021403, (2012).

- 69) 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), 添付 E-9, (2012).
- 70) Y. Murakami, S. Aoki, N. Hasebe, Y. Itoh, H. Miyata, N. Miyazaki, H. Terada, K. Tohgo, M. Toya and R. Yuuki: STRESS INTENSITY FACTORS HANDBOOK, Committee on Fracture Mechanics, The Society of Material Science, Japan, Vol. 2, pp. 868-870, (1987).
- 71) D. Rudland, G. Wilkowski, Y.-Y. Wang and W. Norris: Analysis of Weld residual Stresses and Circumferential Through-Wall Crack K-solutions for CRDM Nozzles, NUREG/CP-0180, (2003).
- 72) Makoto Udagawa, Jinya Katsuyama and Kunio Onizawa: On the evaluation of PWSCC growth near J-groove welds of vessel head penetration nozzle, Proceedings of the 8th International Welding Symposium, p. 319, (2005).
- 73) Makoto Udagawa, Jinya Katsuyama and Kunio Onizawa: STUDY ON PWSCC BEHAVIORS AT NICKEL-BASED ALLOY WELDS BASED ON WELD RESIDUAL STRESS ANALYSIS AND PROBABILISTIC FRACTURE MECHANICS, Proceedings of the ASME 2010 Pressure Vessels & Piping Division / K-PVP Conference, PVP2010-26028, (2010).
- 74) J. L. Rempe, S. A. Chavez, G. L. Thinnis, C. M. Allison, G. E. Korth, R. J. Witt, J. J. Sienicki, S. K. Wang, L. A. Stickler, C. H. Heath and S. D. Snow: Light Water Reactor Lower Head Failure Analysis, Appendix B, High temperature Creep and Tensile Data for Pressure Vessel Steel and Penetration Materials, NUREG/CR-5642, (1993).
- 75) U. S. NRC Technical Training Center: Pressurized Water Reactor (PWR) Systems, Reactor Concepts Manual, (2011).
- 76) Frederick W. Brust and Paul M. Scott: WELD RESIDUAL STRESSES AND PRIMARY WATER STRESS CORROSION CRACKING IN BIMETAL NUCLEAR PIPE WELDS, Proceedings of 2007 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2007-26297, (2007).
- 77) David Rudland, Frederick W. Brust, DJ Shim and G. Wilkowski: PWSCC Crack Growth Mitigation With Inlay, Proceedings of the ASME 2011 Pressure Vessels & Piping Division Conference, PVP2011-57954, (2011).
- 78) Nobuyoshi Yanagida, Kazuo Ogawa, Koichi Saito and Ed Kingston: STUDY ON RESIDUAL-STRESS REDISTRIBUTIONS DURING THE PROCESS OF MANUFACTURE OF A VESSEL PENETRATION SET-ON JOINT, Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2009-77408, (2009).
- 79) 中部電力株式会社: 中部電力プレスリリース 浜岡原子力発電所 1号機 制御棒駆動機構ハウジング部からの漏えいに関する調査状況について (金属調査・その他のスタブチューブ下部溶接部点検結果), (2002).

## 付録 (略語一覧)

英語名称		日本語名称
ASME	American Society of Mechanical Engineers	米国機械学会
AWS	American Welding Society	米国溶接協会
BWR	Boiling Water Reactor	沸騰水型原子炉
CRDM	Control Rod Drive Mechanism	制御棒駆動機構
DFM	Deterministic Fracture Mechanics	決定論的破壊力学
ECP	Electrochemical Corrosion Potential	腐食電位
ECT	Eddy Current Testing	渦電流探傷試験
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding	ガスタングステンアーク溶接
ISO	International Organization of Standardization	国際標準化機構
NiSCC	Ni-based alloy Stress Corrosion Cracking	Ni 基合金の BWR 水質環境中応力腐食割れ
NRC	Nuclear Regulatory Commission	米国原子力規制委員会
PFM	Probabilistic Fracture Mechanics	確率論的破壊力学
PWR	Pressurized Water Reactor	加圧水型原子炉
PWSCC	Primary Water Stress Corrosion Cracking	PWR 一次系水質環境中応力腐食割れ
SMAW	Shielded Metal Arc Welding	被覆アーク溶接
UT	Ultrasonic Testing	超音波探傷試験

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立法メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s
電荷, 電気量	クーロン	C	s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	Vs
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C	K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>
放射線量	グレイ	Gy	J/kg
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg
酸素活性化	カタール	kat	s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の間には1:1の関係がある。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位	
	名称	記号
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s
表面張力	ニュートンメートル	N m
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s
角速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>
電表面積	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>
誘電率	ファラド毎メートル	F/m
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr
放射線輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>24</sup>	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 <sup>-6</sup> m

