JAEA-Data/Code 2022-006 DOI:10.11484/jaea-data-code-2022-006



# 原子炉圧力容器用確率論的破壊力学解析コード PASCAL5の使用手引き及び解析手法

User's Manual and Analysis Methodology of Probabilistic Fracture Mechanics Analysis Code PASCAL Ver. 5 for Reactor Pressure Vessels

> 髙見澤 悠 ル カイ 勝山 仁哉 眞崎 浩一 宮本 裕平 李 銀生

Hisashi TAKAMIZAWA, Kai LU, Jinya KATSUYAMA, Koichi MASAKI Yuhei MIYAMOTO and Yinsheng LI

> 安全研究・防災支援部門 安全研究センター 材料・構造安全研究ディビジョン

Materials and Structural Integrity Research Division Nuclear Safety Research Center Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness

日本原子力研究開発機構

February 2023

Japan Atomic Energy Agency

本レポートは国立研究開発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。 本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。 本レポートの成果(データを含む)に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の 条件で利用してください。(<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja</u>) なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課 〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 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. This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en</u>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, 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, 2023

原子炉圧力容器用確率論的破壊力学解析コード PASCAL5 の使用手引き及び解析手法

日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門 安全研究センター 材料・構造安全研究ディビジョン

髙見澤 悠、ル カイ、勝山 仁哉+、眞崎 浩一\*、宮本 裕平\*、李 銀生

(2022年9月7日受理)

原子炉圧力容器(RPV: Reactor Pressure Vessel)は原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する重 要機器の1つであり、中性子照射等に伴う高経年化を考慮した構造健全性確保が極めて重要であ る。国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(JAEA: Japan Atomic Energy Agency)では、 RPV の構造健全性評価に関する研究の一環として、確率論的破壊力学(PFM: Probabilistic Fracture Mechanics) 解析コード PASCAL (PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR) の開発を進めている。本コードは、加圧水型軽水炉(PWR: Pressurized Water Reactor)及び沸騰 水型軽水炉(BWR: Boiling Water Reactor)を対象に、影響因子が持つ不確実さを考慮し、加圧熱 衝撃(PTS: Pressurized Thermal Shock)事象や低温過圧事象(LTOP: Low-Temperature Over Pressure)等の過渡による RPV の炉心領域部の破損確率や破損頻度を求めるものである。破壊力 学や確率論的計算手法等に関する最新知見や国内 RPV に適した評価手法・評価モデルを踏まえ、 新規解析機能の導入を進めるとともに、系統的なコード検証活動を通じて信頼性向上を図ってき た。平成 12 年度に公開した PASCAL では、PWR の PTS 事象を対象に、RPV の破損確率を解析 する基本的な枠組みを整備した。平成18年度に公開した PASCAL2では、内部亀裂の評価手法や 様々な非破壊検査による亀裂の検出性に関する評価モデル等を導入し、過渡事象データベースを 整備した。平成 22 年度に公開した PASCAL3 では、肉盛溶接クラッド部に着目して、亀裂の評価 機能等を改良した。平成29年度に公開した PASCAL4 では、応力拡大係数解や破壊靭性の不確実 さを考慮した評価モデル等の改良により解析機能の高度化を図るとともに、影響因子の不確実さ を認識論的不確実さと偶然的不確実さに分類し、不確実さを考慮した信頼度評価機能等を整備し た。平成 30 年度以降は、これまで PWR の PTS 事象を対象とした RPV 内面側亀裂の評価機能に 加えて、BWR の起動事象、LTOP 事象等を想定した RPV 外面側亀裂の評価機能等の整備を進め てきた。これらの機能整備を踏まえ、国内 PWR 及び BWR の RPV を対象とした確率論的健全性 評価に資する解析コードとして、PASCAL5 へとバージョンアップした。PASCAL5 は PFM 解析 モジュールである PASCAL-RV、PASCAL-RV の入力データの生成や RPV 炉心領域部を対象とし た破損頻度の算出を行うモジュールである PASCAL-Manager、付録として附属する簡易的な熱応 力解析を実施するためのモジュールである PrePASCAL の 3 つで構成されている。本資料は、 PASCAL5の構成、解析手法、基礎理論や使用方法等をまとめたものである。

本研究の一部は、原子力規制庁からの受託事業「高経年化技術評価高度化事業(原子炉一次系 機器の健全性評価手法の高度化)」として行われたものである。 原子力科学研究所:〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4 +安全研究センター \*みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社

#### JAEA-Data/Code 2022-006

### User's Manual and Analysis Methodology of Probabilistic Fracture Mechanics Analysis Code PASCAL Ver. 5 for Reactor Pressure Vessels

# Hisashi TAKAMIZAWA, Kai LU, Jinya KATSUYAMA<sup>+</sup>, Koichi MASAKI<sup>\*</sup>, Yuhei MIYAMOTO<sup>\*</sup> and Yinsheng LI

Materials and Structural Integrity Research Division Nuclear Safety Research Center Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 7, 2022)

As a part of the structural integrity assessment research for aging light water reactor (LWR) components, a probabilistic fracture mechanics (PFM) analysis code PASCAL (PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR) has been developed in Japan Atomic Energy Agency. The PASCAL code can evaluate failure probabilities and failure frequencies of core region in reactor pressure vessel (RPV) under transients by considering the uncertainties of influential parameters. The continuous development of the code aims to improve the reliability by introducing the analysis methodologies and functions base on the state-of-the-art knowledge in fracture mechanics and domestic data. In the first version of PASCAL, which was released in FY2000, the basic framework was developed for analyzing failure probabilities considering pressurized thermal shock events for RPVs in pressurized water reactors (PWRs). In PASCAL Ver. 2 released in FY 2006, analysis functions including the evaluation methods for embedded cracks and crack detection probability models for inspection were introduced. In PASCAL Ver. 3 released in FY 2010, functions considering weld-overlay cladding on the inner surface of RPV were introduced. In PASCAL Ver. 4 released in FY 2017, we improved several functions such as the stress intensity factor solutions, probabilistic fracture toughness evaluation models, and confidence level evaluation function by considering epistemic and aleatory uncertainties related to influential parameters. In addition, the probabilistic calculation method was also improved to speed up the failure probability calculations. To strengthen the practical applications of PFM methodology in Japan, PASCAL code has been improved since FY 2018 to enable PFM analyses of RPVs subjected to a broad range of transients corresponding to both PWRs and boiling water reactors, including pressurized thermal shock, low-temperature over pressure, and normal operational transients. In particular, the stress intensity factor solutions and corresponding calculation methods for external surface cracks and embedded cracks near the RPV outer surface are newly incorporated. Based on these improvements, the analysis code was upgraded to PASCAL Ver. 5. PASCAL Ver. 5 is composed of three modules, i.e., PrePASCAL, PASCAL-RV and PASCAL-Manager. PrePASCAL is a finite element analysis module for calculations of through-wall temperature and stress distributions during transients. PASCAL-RV serves as a PFM analysis module for failure probability calculation. PASCAL-Manager is a multifunctional module which can not only control PFM analyses conducted by PASCAL-RV, but also calculate the failure frequency for the entire core region of RPV based on the failure probabilities obtained from PASCAL-RV. This report provides the user's manual and theoretical background of PASCAL Ver. 5.

Keywords: Probabilistic Fracture Mechanics, Reactor Pressure Vessel, Irradiation Embrittlement, Pressurized Thermal Shock, Low-temperature Over Pressure, Failure Probability, Failure Frequency

Part of the research was performed under the contract research entrusted from Regulatory Standard and Research Department, Secretariat of Nuclear Regulation Authority.

<sup>+</sup>Nuclear Safety Research Center

<sup>\*</sup> Mizuho Research & Technologies, Ltd.

1はじめに	
1.1 概要	1
1.2 PASCAL5 の構成	
1.3 PASCAL4 からの主な変更点	4
2 解析内容	
3 解析コードの流れ	
3.1 PASCAL-RV の計算フロー	
3.2 PASCAL-Managerの計算フロー	
4 解析コードの動作環境	
5 使用手順	
5.1 PASCAL-RV の使用手順	
5.2 PASCAL-Managerの使用手順	
6 基礎理論及び解析手法	
6.1 認識論的不確実さと偶然的不確実さを考慮した信頼度評価	
6.2 確率計算手法	
6.3 信頼度評価手法	
6.4 初期亀裂	
6.5 初期亀裂深さ分布	
6.6 亀裂アスペクト比の分布	
6.7 亀裂深さ方向位置比の分布	
6.8 過渡事象	
6.9 無限長亀裂の応力拡大係数解	
6.10 表面亀裂に対する応力拡大係数解	
6.11 内部亀裂に対する応力拡大係数解	
6.12 応力拡大係数の塑性域補正	
6.13 応力拡大係数に対するクラッドの塑性の影響	
6.14 クラッドを考慮した応力拡大係数評価	
6.15 逐次応力変換手法	
6.16 重み関数法	
6.17 残留応力の考慮	
6.18 容器壁内中性子照射量減衰評価方式	
6.19 亀裂進展モデル	
6.20 破壊靭性及び亀裂伝播停止破壊靭性の評価式	
6.21 K <sub>lc</sub> と K <sub>la</sub> の相関の考慮	

6.22 脆化予測式	
6.23 偏差再計算手法	117
6.24 破壊基準	118
6.25 亀裂進展刻みの計算方式	122
6.26 非破壊検査による亀裂検出性評価モデル	
6.27 中性子照射による上部棚靱性値の低下	123
6.28 自動調整階層別モンテカルロ法	123
6.29 高温予荷重効果	130
6.30 主な確率変数	
6.31 連続計算機能	134
6.32 RPV 炉心領域部のモデル化手法	
6.33 RPV 炉心領域部の亀裂貫通頻度	
7まとめ	
謝辞	
参考文献	139
付録	143
付録1: PASCAL-RV 用入力カード	145
付録2: PrePASCAL の使用手順	
付録 3: PrePASCAL 用入力カード	197
付録4: PASCAL のコード整備、機能検証、活用事例に係る参考資料一覧	

# Contents

1	Introduction1		
	1.1	Overview	1
	1.2	Structure of PASCAL5	3
	1.3	Changes from PASCAL4	4
2	Majo	or Features	5
3	Anal	ysis Flow	. 10
	3.1	Flow of PASCAL-RV	. 12
	3.2	Flow of PASCAL-Manager	. 15
4	Hard	lware and Software Requirements	. 17
5	User	's Manual	. 18
	5.1	Manual for PASCAL-RV	. 18
	5.2	Manual for PASCAL-Manager	. 25
6	Theo	pretical Manual and Analysis Methods	. 57
	6.1	Classification of Epistemic and Aleatory Uncertainties	. 58
	6.2	Probabilistic Calculation Method	. 58
	6.3	Evaluation Method of Confidence Level	. 68
	6.4	Initial Crack Type	. 69
	6.5	Distribution of Crack Depth	. 70
	6.6	Distribution of Crack Aspect Ratio	. 71
	6.7	Distribution of Crack Location	. 72
	6.8	Thermal Transient	. 75
	6.9	Stress Intensity Factor of Infinite-Length Crack	. 78
	6.10	Stress Intensity Factor of Surface Crack	. 78
	6.11	Stress Intensity Factor of Embedded Crack	. 80
	6.12	Stress Intensity Factor Considering Crack Tip Plasticity	. 81
	6.13	Stress Intensity Factor Considering Plasticity of Clad	. 82
	6.14	Treatment of Stress Discontinuity between Clad and Base Metal	. 84
	6.15	Approximation Method for Complicated Stress Distribution	. 89
	6.16	Weight Function Method	. 92
	6.17	Welding Residual Stress	. 95
	6.18	Neutron Fluence Attenuation	. 95
	6.19	Crack Propagation Model	. 96
	6.20	Fracture Toughness and Crack Arrest Toughness Models	. 99
	6.21	<i>K<sub>Ic</sub>-K<sub>Ia</sub></i> Correlation	109
	6.22	Embrittlement Prediction Method	109
	6.23	Re-Calculation of Deviation	117

	6.24	Failure Criterion11	18	
	6.25 Determination for Crack Propagation Increment			
	6.26	Probability of Detection for Nondestructive Examination	22	
	6.27	Decrease of Upper Shelf Energy	23	
	6.28	Hierarchical Monte Carlo Simulation Method12	23	
	6.29	Warm Pre-Stress Effect	30	
	6.30	Main Probabilistic Variables	33	
	6.31	Continuous Calculation Function	34	
	6.32	Modeling of Core Region in RPV	35	
	6.33	TWCF Calculation of Core Region in RPV	35	
7	Sumn	nary	38	
Ac	knowle	edgement	38	
Re	ference	es	39	
Ap	pendix		43	
	Apper	dix 1: Input Card Manual for PASCAL-RV14	45	
	Appendix 2: User's Manual for PrePASCAL			
	Appendix 3: Input Card Manual for PrePASCAL 197			
	Apper	dix 4: List of documents related to code development, verification study, and		
		application of PASCAL	20	

# 略語一覧

ASME	American Society of Mechanical Engineers 米国機械学会			
BNP	Bayesian Non-Parametric ノンパラメトリックベイ			
BWR	Boiling Water Reactor 沸騰水型原子炉			
CDF	Cumulative Distribution Function 累積分布関数			
CEA	The French Alternative Energies and Atomic Energy C	ommission		
		フランス原子力・代替エネ		
		ルギー庁		
CPF	Conditional Probability of Failure	条件付亀裂貫通確率		
CPI	Conditional Probability of Crack Initiation	条件付亀裂進展確率		
EFPY	Effective Full Power Year	定格負荷相当年数		
FCI	Frequency of Crack Initiation	亀裂進展頻度		
FEM	Finite Element Method	有限要素法		
JAEA	Japan Atomic Energy Agency	日本原子力研究開発機構		
JEAC	Japan Electric Association Code	日本電気協会規程		
JSME	The Japan Society of Mechanical Engineers	日本機械学会		
K <sub>I</sub>	Stress Intensity Factor (Mode I)	モードIの応力拡大係数		
K <sub>Ic</sub>	Fracture Toughness	破壊靱性		
K <sub>Ia</sub>	Crack Arrest Toughness	亀裂伝播停止破壊靱性		
LBLOCA	Large Break Loss of Coolant Accident	大破断冷却材喪失事故		
LHS	Latin Hypercube Sampling	ラテン超方格		
LTOP	Low-Temperature Over Pressure	低温過圧		
LWR	Light Water Reactor	軽水炉		
NRC	United States 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		
POD	Probability of Detection	検出確率		
PTS	Pressurized Thermal Shock	加圧熱衝撃		
PWR	Pressurized Water Reactor	加圧水型原子炉		
RPV	Reactor Pressure Vessel	原子炉圧力容器		
$RT_{NDT}$	Reference Temperature for Nil-Ductile Transition	関連温度		
TWCF	Through-Wall Cracking Frequency	亀裂貫通頻度		
USE	Upper Shelf Energy	上部棚吸収エネルギー		
WPS	Warm Pre-Stress	高温予荷重		
WRS	Welding Residual Stress	溶接残留応力		

This is a blank page.

1 はじめに

#### 1.1 概要

確率論的破壊力学(PFM: Probabilistic Fracture Mechanics)は、構造機器に対する負荷や材料特性等の影響因子の不確実さを考慮して、機器の破損確率や破損頻度等の定量指標を求めることができることから、機器の構造健全性を合理的に評価できる手法として注目されている。例えば、米国においては経年劣化が進行した原子炉圧力容器(RPV: Reactor Pressure Vessel)の加圧熱衝撃(PTS: Pressurized Thermal Shock)事象時における健全性評価に関して、PFM解析に基づくスクリーニング基準が定められている。また、スクリーニング基準を満足しない場合には、PFM解析に基づく亀裂貫通頻度(TWCF: Through-Wall Cracking Frequency)を指標とした評価を行うことが認められている<sup>1)</sup>。国内においても、リスク情報の活用や安全性向上評価における活用等を鑑みると、PFMに基づく解析手法の整備及びその実活用が極めて重要である。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(JAEA: Japan Atomic Energy Agency)では、軽水 炉構造機器の健全性に関する研究の一環として、PFM 解析コード PASCAL (PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR)の開発を進めている。本コードは、中性子照射脆化や PTS 事象等の過渡等の影響因子が持つ不確実さを考慮して、RPV の炉心領域部の破損確率等を算出 するために、平成8年度に開発が開始されたものである。その後、破壊力学に関する最新知見や 日本国内の RPV に適した評価手法・評価モデルを踏まえ、信頼性を向上させるため、新しい解 析機能や詳細な解析手法を継続的に導入するとともに、コードの検証を進めている<sup>2)</sup>。平成18年 度に公開した PASCAL2<sup>3)</sup>では、内部亀裂の評価手法や様々な非破壊検査による亀裂の検出性に関 する評価モデル等を導入し、過渡事象データベースを整備した。また、平成 22 年度に公開した PASCAL3<sup>4)</sup>では、肉盛溶接クラッド部に着目した機能を整備した。平成 25 年度以降は、原子力 規制庁からの受託事業において、応力拡大係数解や破壊靭性の不確実さを考慮した評価モデル等 の解析機能の高度化を図った。また、健全性評価に係る影響因子について、知識等の不足による 不確実さで、データを充実することで減少させることができる認識論的不確実さと、影響因子が 本来持っている不確実さであり、データを増やしても減少させることができない偶然的不確実さ に分類し、これらの2つの不確実さを考慮した信頼度評価機能を整備した。さらに、確率論的計 算手法を見直し、数値解析の高速化を実現した。加えて、解析モジュールを整理し、亀裂の破損 確率を算出する PFM 解析モジュールを PASCAL-RV として整備した。これとは別に、PASCAL-RV の確率計算を制御する機能及び PASCAL-RV により算出される全ての亀裂の破損確率から、 中性子照射量分布と過渡発生頻度を考慮して RPV 炉心領域部を対象とした破損頻度を算出する 機能を有するモジュール PASCAL-Manager を整備した。以上を踏まえ、PASCAL-RV、PASCAL-Manager 及び簡易的な熱応力解析を実施するためのモジュールである PrePASCAL の 3 つのモジ ュールから成る解析コードを PASCAL45)として平成 29 年度に公開した。

平成 30 年度以降は、これまでの加圧水型原子炉(PWR: Pressurized Water Reactor)の PTS 事象 を対象とした RPV 内面側亀裂の破損頻度評価機能に加えて、BWR(BWR: Boiling Water Reactor) の起動事象、低温過圧(LTOP: Low-Temperature Over Pressure)事象等を想定した RPV 外面側亀 裂の評価に機能や、近年の研究動向を踏まえた脆化予測機能を整備するとともに、応力拡大係数 計算手法に係る改良等を行い、PASCAL5 へとバージョンアップした。これによって、国内 PWR 及び BWR 双方の RPV を対象とした PFM 解析を可能とした。

本資料は、PASCAL5の構成、解析手法、基礎理論や使用方法等をまとめたものである。

# 1.2 PASCAL5の構成

PASCAL5の構成は表 1-1 に示すように、PASCAL-RV、PASCAL-Manager 及び PrePASCAL の 3 つのモジュールで構成される。

PASCAL-RV は、亀裂の存在を想定した RPV の炉心領域部の破損確率を計算するための PFM 解析モジュールである。ここで破損確率とは、条件付亀裂進展確率(CPI: Conditional Probability of Crack Initiation)及び条件付亀裂貫通確率(CPF: Conditional Probability of Failure)のことである。PASCAL-Manager は、PASCAL-RV により計算された亀裂の破損確率を用いて、過渡の発生 頻度や中性子照射量の空間分布も考慮して RPV の炉心領域部を対象とした破損頻度を求めるためのモジュールである。ここで破損頻度とは、亀裂進展頻度(FCI: Frequency of Crack Initiation) 及び TWCF のことである。また、PASCAL-Manager は、ユーザビリティの向上と計算の効率化を 図るため、PASCAL-RV の入力ファイルを作成し、その計算を制御する機能も備えている。 PrePASCAL は、PASCAL5 に付録として附属している熱応力解析である。CPI 及び CPF を求める 際に必要となる過渡事象発生時の RPV 板厚内における温度分布及び応力分布の解析には、汎用 的な有限要素法(FEM: Finite Element Method)解析コードの使用が想定されるが、簡易な解析ツ ールとして、PrePASCAL を用いても良い。

PASCAL5 は、これら 3 つのモジュールで構成されるコード群の呼称であり、公開する全ての 解析モジュールの Version を 5.0 で統一した。

モジュール名称	Version	説明
PASCAL-RV	5.0	亀裂の存在を考慮して CPI 及び CPF を求める PFM 解析モジュ ール。
PASCAL-Manager	5.0	PASCAL-RV により計算された CPI 及び CPF を用いて、RPV の炉心領域部の FCI 及び TWCF を計算するモジュール。また、PASCAL-RVの入力ファイルの作成や実行管理を行うこともできる。
PrePASCAL	5.0	過渡事象発生時の冷却水の水温及び圧力、冷却水と容器内面 間の熱伝達係数の時刻歴データから、容器壁板厚内の温度分 布及び応力分布を計算する熱伝導・熱応力解析モジュール。

表 1-1 PASCAL5の構成内容

# 1.3 PASCAL4 からの主な変更点

PASCAL4 から PASCAL5 に更新するに当たっての主な変更点を表 1-2 に示す。応力拡大係数 (*K<sub>I</sub>*)解、脆化予測式、延性亀裂評価モデル、内部亀裂の評価点及び存在位置等の解析機能を改 良・追加した。また、PASCAL-RV の機能のうち、長年使用されておらず、今後も使用される見 込みの無い機能を削減し、整理することにより、ユーザビリティ向上を図った。本手引き書には、 PASCAL-RV により計算される CPI 及び CPF から RPV 炉心領域部の FCI 及び TWCF を算出する モジュール PASCAL-Manager の使用方法についても記載している。

項目	内容	
RPV 炉心領域部の評 価	<ol> <li>BWRのRPVを対象に、起動事象、LTOP事象等を想定した RPV 外面側亀裂に係る計算機能を PASCAL-RV に追加。</li> <li>PASCAL-Manager に外面側亀裂を考慮した RPV 炉心領域部の破損頻度を算出する機能を追加。</li> </ol>	
応力拡大係数解	<ol> <li>1) 外表面側亀裂を対象とした JSME 維持規格 2016 年版<sup>60</sup>の応力拡大係 数解の追加。</li> <li>2) 内部亀裂に対する応力分布の逐次近似機能を改良。</li> </ol>	
脆化予測式	ノンパラメトリックベイズ (BNP: Bayesian Non-Parametric) 法 <sup>7)</sup> による 予測法を追加。	
破壊靱性モデル	国内ワイブル分布型破壊靭性(K <sub>lc</sub> )曲線 <sup>5)</sup> 、国内対数正規分布型亀裂	
亀裂伝播停止破壊靭 伝播停止破壊靭性 (K <sub>la</sub> )曲線 <sup>5)</sup> のユーザー入力機能を追加。		
性モデル		
亀裂進展方式	内部亀裂について、RPV の内表面側及びその反対側の点を評価点とし、亀裂進展評価機能を追加。進展と判定される場合は無限長亀裂*に置換し、亀裂進展や破壊評価を行う機能を追加。	
延性亀裂評価 延性亀裂評価機能を追加。		
入力	PASCAL-Managerに残留応力分布データの外部ファイルからの読込機能を追加。	
出力	破壊に寄与した亀裂の出力機能を追加。	
機能の整理	使用される見込みの無い機能を整理し、コードから削除。	

表 1-2 PASCAL4 から PASCAL5 への主な変更点

\*:無限長亀裂:本手引きでは軸方向に長い亀裂及び全周亀裂を指す。

### 2 解析内容

PASCAL5の主な解析内容及び解析機能の一覧を表 2-1に示す。主な要点は下記の通りである。 なお、基礎理論及び解析手法に関する詳細な説明は「6基礎理論及び解析手法」にまとめる。 PASCAL5による解析内容の簡略図を図 2-1に示す。

(1) 確率計算手法

確率計算には、破壊靭性( $K_{lc}$ : Fracture Toughness)分布の累積確率から CPI を算出する方法 及び数値積分を用いた CPF を算出する方法、通常のモンテカルロ法<sup>8)</sup>、階層別モンテカルロ法 <sup>9)</sup>を採用している。階層別モンテカルロ法では、サンプリング及び階層分割の最適化法を開発 し自動化している。また、認識論的不確実さを考慮した計算においては、ラテン超方格

(LHS: Latin Hypercube Sampling) 法<sup>10)</sup>を用いて信頼度を考慮した評価が可能である。 (2) 破壊基準

破壊基準として線形弾性破壊力学に基づく亀裂進展・停止基準(以下、K<sub>lc</sub>/K<sub>la</sub>基準)の他、 塑性崩壊基準や延性亀裂不安定破壊基準による解析が可能である。

(3) 初期亀裂種類

**RPV** 表面に存在する無限長亀裂、表面亀裂及びクラッド下亀裂、並びに内部亀裂を想定することができる。表面亀裂及び内部亀裂の進展解析では、複数の進展モデルが整備されており、 進展中の亀裂形状も含めた詳細な解析が可能である。

(4) 初期亀裂寸法

表面亀裂の解析については寸法固定、深さ固定、アスペクト比固定、長さ固定、寸法分布 を設定できるが、クラッド下亀裂の場合は寸法固定の亀裂のみ考慮できる。また、内部亀裂の 場合は寸法固定、深さ固定、アスペクト比固定、長さ固定、存在位置固定、初期寸法分布を設 定することができる。RPV 炉心領域部の TWCF を求める際には、PASCAL-Manager により、米 国の亀裂分布作成コードである VFLAW<sup>11)</sup>により生成された初期亀裂分布モデルを考慮するこ とも可能である。

(5) 脆化予测式

中性子照射による材料の脆化を予測するため、複数の脆化評価法が整備されている。ユーザ ーは、JEAC4201-1991<sup>12)</sup>、米国改正 PTS 規則<sup>13)</sup>、JEAC4201-2007<sup>14)</sup>、JEAC4201-2007(2013 年 追補版)<sup>15)</sup>、BNP法<sup>7)</sup>に基づく脆化評価法から選択することができる。

(6) 破壊靱性と亀裂伝播停止破壊靱性

破壊靭性  $K_{Ic}$  についてはワイブル分布型の国内確率論的評価モデル、亀裂伝播停止破壊靭性 ( $K_{Ia}$ : Crack Arrest Toughness) については対数正規分布型の国内確率論的評価モデルが整備さ れている。これらの外に、ASME Sec. XI<sup>16</sup>、JEAC4206-2004<sup>17</sup>、JEAC4206-2007<sup>18</sup>、マスター カーブ法<sup>19</sup>)等の複数のモデルから選択可能である。

(7) 応力拡大係数解

無限長亀裂に対しては JSME 維持規格 2016 年版の解<sup>6</sup>が整備されている。表面亀裂に対して

は、JEAC4206-2007の解<sup>18</sup>、JSME 維持規格 2016 年版の解析<sup>6</sup>、CEA の解<sup>20</sup>が整備されてい る。クラッド下亀裂については CEA の解<sup>20</sup>が整備されている。内部亀裂については電力中央 研究所(以下、電中研)の解<sup>21</sup>、ASME Sec. XIの解<sup>16</sup>が整備されている。

(8) 応力拡大係数に係る評価手法

肉盛溶接クラッド部(以下、クラッド部)の応力拡大係数については、重ね合わせの原理 に基づく簡易法<sup>9,22)</sup>や CEA の解<sup>20)</sup>を用いた評価が可能である。また、高温予荷重効果<sup>23)~28)</sup>、 溶接残留応力、塑性域補正の影響<sup>29)~31)</sup>を考慮した評価が可能である。さらに、複雑な応力分 布を考慮して、表面亀裂や無限長亀裂の *K*<sub>I</sub>を求める際には重み関数法<sup>16)</sup>を用いた評価が可能 である。評価手法によってはユーザー入力機能を有し、最新知見等の成果を反映させることが 可能である。

(9) 非破壊検査

非破壊検査による亀裂の検出を考慮することが可能である。検査範囲、検査頻度や検査精 度については、ユーザー入力により設定することが可能である。

(10) 標準的解析手法

国内プラントを想定した標準的解析要領<sup>32)</sup>、標準的解析手法及びそれに付随する国内モデ ルデータを整備しており、入力データの作成においてはこれらが参考になる。

(11) 熱伝導・熱応力解析

RPV 内表面の流体温度、圧力、熱伝達係数の時刻歴から、容器壁板厚内の温度分布、応力 分布の時刻歴を算出するためには、汎用的な FEM 解析コードを用いた熱伝導・熱応力解析を 行うことを想定しているが、付録として附属している PrePASCAL を用いることも可能である。 (12) RPV 炉心領域部の評価

過渡事象の発生頻度、亀裂密度、炉心領域部における中性子照射量の空間分布を考慮した RPV 炉心領域部の破損頻度に関する評価機能を有しており、RPV 炉心領域部を矩形状の領域 (サブリージョン)に分割し、各サブリージョンの破損頻度に関する計算から、RPV 炉心領 域部の破損頻度を算出することが可能である。

(13) 認識論的不確実さと偶然的不確実さを考慮した信頼度評価

認識論的不確実さと偶然的不確実さを考慮した信頼度評価が可能である。不確実さが認識論 的不確実さに分類される確率変数に対して、LHS法を用いてサンプリングすることが可能であ る。

(14)解析効率向上・入力省力化機能

PASCAL-Manager は、RPV 炉心領域部の破損頻度計算に必要となる PASCAL-RV に対する複数の入力ファイルをユーザーが設定した解析条件を踏まえて自動で生成し、PASCAL-RV の解析を効率的に実行・管理する機能を有する。また、PASCAL-RV による破損確率計算結果から RPV 炉心領域部の破損頻度を算出する機能を有する。使用方法は 5.2 節を参照されたい。

表 2-1 PASCAL5の主な評価項目と内容(1/3)

評価項目		内容
解析対象		PWR または BWR の炉心領域部; PTS や LTOP 等の過渡事象
初期	亀裂種類	無限長亀裂、表面亀裂、内部亀裂、クラッド下亀裂
	深さ分布	固定値、指数分布、ユーザー入力(クラッド下亀裂は固定値のみ)
亀裂	アスペクト比	固定値、対数正規分布、ユーザー入力(クラッド下亀裂は固定値の
	分布	み)
	確率変数(認識	化学成分(Cu, Ni, Si, P)、高速中性子照射量、関連温度(RT <sub>NDT</sub> :
	論的不確実さ)	Reference Temperature for Nil-Ductile Transition)初期值、関連温度移行
		量(ART <sub>NDT</sub> )、過渡事象の発生頻度等
$\tau dr$	確率変数(偶然	V V
1 率	的不確実さ)	$\kappa_{lc}, \kappa_{la}$
計算	<u> </u>	累積確率による解析的な算出、シンプソン法を用いた数値積分、モン
	唯平可异于伝	テカルロ法、階層別モンテカルロ法、LHS 法
	確率分布の偏差	亀裂が進展しても、 $K_{lc}, K_{la}$ と $RT_{NDT}$ の偏差再計算を行わない <sup>33)</sup> (RPV
	再計算方式	毎に再計算)。
		無限長亀裂:
		JSME 維持規格 2016 年版の解 <sup>6)</sup>
		内表面亀裂:
		JEAC4206-2007 の解 <sup>18)</sup>
		JSME 維持規格 2016 年版の解 <sup>6)</sup>
		CEA の評価式 <sup>20)</sup> (クラッド部は矩形を想定)
	応力拡大係数解	外表面亀裂:
		JSME 維持規格 2016 年版の解 <sup>6)</sup>
		内部亀裂:
破		電中研の解 <sup>21)</sup>
環 力		ASME Sec. XI の解 <sup>16)</sup>
学   評		クラッド下亀裂:
価		CEA の評価式 <sup>20)</sup>
	カニュドナキャ	簡易法を用いた評価
	クノットを有思	無限長亀裂:JSME 維持規格 2016 年版の解 <sup>6)</sup>
	9 る場合の応力	内表面亀裂 : JEAC4206-2007 の評価式 <sup>18)</sup> 、JSME 維持規格 2016 年版
	<u> </u>	の解 <sup>6)</sup> 、CEAの解 <sup>20)</sup>
	複雑な応力分布	表面亀裂、無限長亀裂を対象とした重み関数法 <sup>16)</sup> 、クラッド下亀裂、
	を考慮した応力	内部亀裂を対象とした亀裂範囲における応力分布の多項式近似手法
	拡大係数の算出	
	破壞基準	Klc/Kla基準、塑性崩壊基準、延性亀裂不安定破壊基準

表 2-1 PASCAL5の主な評価項目と内容(2/3)

	評価項目	内容	
	表面亀裂の進展評	モデル A:深さ方向へ進展した後は無限長亀裂に置き換え、進展	
		を評価 27)	
	恤力式	モデル B:長さ・深さ両方向の進展を独立に評価	
		モデル A:長さ・深さ(内面・外面)方向の進展を独立に評価	
		モデルB:深さ内面方向へ進展した後は表面亀裂に置き換え、進展	
		を評価	
		モデル C:長さ方向への進展判定は行わない。	
	内部亀裂の進展	深さ(内面・外面)方向の進展を独立に評価	
	評価方式	モデル D:長さ・深さ外面方向への進展判定は行わない。	
		深さ内面方向へ進展した後は無限長亀裂に置き換え、	
		進展を評価 27)	
		モデル E:長さ・深さ外面方向、深さ内面方向へ進展した後は無限	
		長亀裂に置き換え、進展を評価	
	照射による上部棚	$\mathbb{E} \wedge C(4201, 2007, \infty \Rightarrow 14)$	
	靭性値の低下	JLACT201-2007 07 24	
		ASME Sec. XI 下限曲線 <sup>16)</sup> 、JEAC4206-2004の国内評価モデル <sup>17)</sup> 、	
	破壊靭性評価 モデル	JEAC4206-2007の国内評価モデル <sup>18)</sup> 、	
		ORNL ワイブル分布型 <sup>34)</sup> 評価モデル、マスターカーブ法 <sup>19)</sup> 、	
		米国 FAVOR の式 <sup>27)</sup> 、国内ワイブル分布型 <sup>5)</sup> 評価モデル	
		ASME Sec. XI 下限曲線 <sup>16)</sup> 、JEAC4206-2004の国内モデル <sup>17)</sup> 、	
	亀裂伝播停止破壊 靭性評価モデル	JEAC4206-2007の国内評価モデル <sup>18)</sup> 、	
		ORNL ワイブル分布型 <sup>34)</sup> 評価モデル、マスターカーブ法 <sup>19)</sup> 、	
		米国 FAVOR の式 <sup>27)</sup> 、国内対数正規分布型 <sup>5)</sup> 評価モデル	
		JEAC4201-1991 予測法 <sup>12)</sup> 、米国改正 PTS 規則における予測法 <sup>13)</sup> 、	
	脆化予測法	JEAC4201-2007予測法 <sup>14)</sup> 、JEAC4201-2007(2013年追補版)	
		予測法 <sup>15)</sup> 、JAEA が整備した BNP 法に基づく予測法 <sup>7)</sup>	
		JEAC4206-2016 モデル $^{28)}$ 、米国 FAVOR のモデル $^{27)}$ 、ACE モデル	
	高温予荷重効果	<sup>23)</sup> 、Chell & Haigh モデル <sup>24)</sup> 、Wallin モデル <sup>25)</sup> 、NRI(修正 Wallin)	
		モデル <sup>26)</sup> 、FAVOR の最良推定モデル <sup>27)</sup>	
	中性子照射量の	指数减衰式 14)	
	容器板厚方向減衰		
	非破壊検査	PASCAL-Manager による検出確率 (POD: Probability of Detection)	
		テーブルの入力	

評価項目		内容
その他	解析効率向上・ 入力省力化機能	<ul> <li>階層別モンテカルロ法の階層分割の最適化</li> <li>階層別モンテカルロ法の亀裂サンプリング数の最適化</li> <li>解析条件の一部を変更した連続計算機能</li> <li>PASCAL-Manager による PASCAL-RV 入力ファイルの自動生成機能</li> <li>PASCAL-Manager による PASCAL-RV 解析の管理機能</li> </ul>
	熱伝導・熱応力解 析	RPV 内表面の流体温度、圧力、熱伝達係数を入力データとして、 板厚内の応力分布、温度分布を計算
	決定論的破壊力学 解析機能	各パラメータの平均値に基づく決定論的破壊力学解析機能
	その他の機能	残留応力の設定、K <sub>lc</sub> とK <sub>la</sub> の相関の考慮 亀裂の進展状況の詳細な出力

表 2-1 PASCAL5の主な評価項目と内容(3/3)



図 2-1 PASCAL5 による解析内容(簡略図)

# 3 解析コードの流れ

PASCAL5 全体の流れを図 3-1 に示す。PASCAL5 では、PWR または BWR の RPV 炉心領域部に 存在する亀裂を対象として、PTS、LTOP 等の過渡事象を想定した FCI 及び TWCF を算出するこ とができる。

PASCAL5 は、亀裂を想定した PFM 解析を実施するモジュールである PASCAL-RV、PASCAL-RVの計算を効率的に実行するとともに、その結果を用いて RPV 炉心領域部を対象とした破損頻 度を算出するモジュールである PASCAL-Manager、付録として附属する JAEA で整備された簡易 的な熱伝導・熱応力解析を実施するモジュールである PrePASCAL の 3 つのモジュールで構成さ れる解析コードである。

PASCAL-RVでは、過渡事象履歴、初期*RT<sub>NDT</sub>、*化学成分、中性子照射量等を入力とし、CPI及びCPFを算出する。容器壁の温度分布及び応力分布の時刻歴に関する入力データについては、 汎用的なFEM解析コードによる解析結果を用いることを基本とするが、後述するPrePASCALを 用いて解析した結果を用いることもできる。PASCAL-RVで不確実さを考慮することができる主な変数は以下の通りである。3.1節にPASCAL-RVのコードの流れを示す。

- · 亀裂寸法
- 化学成分(Cu, Ni, P, Mn, Si)
- · 中性子照射量
- 初期 RT<sub>NDT</sub>
- $\Delta RT_{NDT}$
- 破壞靭性
- 亀裂伝播停止破壊靭性

PASCAL-Manager では、PASCAL-RV で算出された CPI 及び CPF と、別途設定する亀裂の個数 密度、過渡事象の発生頻度等を用いて、FCI 及び TWCF を算出する。3.2 節に PASCAL-Manager のコードの流れについて示す。

PrePASCAL は、過渡事象発生時の冷却水の水温、圧力、冷却水と容器内面間の熱伝達係数の時刻歴データを用いて、容器壁板厚内の温度分布及び応力分布の時刻歴を計算する FEM 解析コードである。PrePASCALの使用手順や入力カードについては付録にまとめている。



図 3-1 PASCAL5 全体の流れ

#### 3.1 PASCAL-RVの計算フロー

亀裂を対象に CPI 及び CPF を求める PFM 解析モジュール PASCAL-RV における解析の流れを 図 3-2 に示す。この図は、認識論的不確実さを考慮して信頼度を評価する際の計算フローを示し ている。認識論的不確実さを考慮して信頼度を評価するために CPI 及び CPF の分布が算出され る。認識論的不確実さや偶然的不確実さを分類せずに CPI 及び CPF を求める場合には、モンテ カルロ法 <sup>35)</sup>が用いられる。

まず、RPVに1つの亀裂が存在すると想定した上で、亀裂深さ及びアスペクト比を設定する。 内部亀裂の場合は、容器における板厚方向の存在位置(板厚に対する比率)も併せて設定する。 また、RPV 材の化学成分、中性子照射量(1MeV 以上の高速中性子が対象)、初期 *RT<sub>NDT</sub>、K<sub>Ic</sub>*等 を設定する。認識論的不確実さを考慮する計算を行う場合には、該当する確率変数については、 LHS 法に基づくサンプリングが行われる。LHS 法の詳細については 6.3 節にて説明する。

次に、*K<sub>Ic</sub>と K<sub>Ia</sub>*の不確実さを偶然的不確実さとして取り扱うときの CPI 及び CPF の算出方法に ついて述べる。図 3-2 の過渡事象時刻ループにおいて、上述で設定された各因子に基づき得られ る *K<sub>Ic</sub>*分布と温度の関係を用いて、過渡事象履歴の各時刻における亀裂評価点における *K<sub>I</sub>*と比較 し、線形弾性破壊力学に基づき、*K<sub>I</sub>*が *K<sub>Ic</sub>*を上回った場合に、亀裂が進展すると判定する。 PASCAL-RV では、与えられた *K<sub>Ic</sub>*の確率分布から解析的に CPI を算出する方法を用いており、全 ての時刻で求められる亀裂進展確率の中で最も大きい値を当該過渡事象における当該亀裂の CPI とする。

続いて、過渡事象における亀裂貫通の判定を行う。PASCAL-RV では、偶然的不確実さとして 取り扱う確率変数である  $K_{lc}$  と  $K_{la}$  の累積確率を示す p の値について積分計算することにより、 CPFを求めている。積分計算の詳細は 6.2.5 項にて述べる。図 3-2 の亀裂進展の判定において、進 展すると判定された亀裂の大きさを一定の値だけ大きくして、 $K_{I}$  と  $K_{Ia}$  を比較し、 $K_{I}$  が  $K_{Ia}$  を下 回った場合に亀裂伝播は停止すると判定する。過渡事象のある時刻で亀裂の進展及び亀裂伝播停 止判定を繰り返し行った後、亀裂の進展が停止せずに亀裂の深さがある板厚比以上になった場合、 亀裂が RPV を貫通したと判定する。また、貫通せずに停止した(または亀裂が進展しない)場 合には、塑性崩壊判定を行う。以上の 2 つの破壊判定のいずれかを満足する場合に、RPV は破壊 すると判定される。破壊すると判定されなかった場合、過渡事象の次の時刻において、再度亀裂 進展判定が実施される。破壊判定がなされた場合、あるいは過渡事象の最後の時刻まで亀裂が貫 通しなかった場合には、次のサンプルの計算が行われる。

なお、認識論的不確実さを考慮せずにモンテカルロ法を用いて CPI 及び CPF を算出する場合 には、図 3-3 に示すように、亀裂及びその他の確率変数をサンプリングした後、亀裂の進展判定 を行い、総サンプル数に対して亀裂が進展及び貫通と判定されたサンプルの割合をそれぞれ CPI と CPF とする。



図 3-2 PASCAL-RVの計算フロー (LHS法)



#### 3.2 PASCAL-Managerの計算フロー

PASCAL-Manager を用いて RPV 炉心領域部の TWCF を算出する際の解析の流れを図 3-4 に示 す。まず、ユーザーが設定した計算条件に基づき、図 3-5 の例に示すように RPV 炉心領域部を展 開し、さらに矩形状に分割した領域(サブリージョン)毎に中性子照射量及び亀裂の個数を算出 する。算出した中性子照射量及び亀裂の個数と、PASCAL-RV により算出した CPI 及び CPF から、 各過渡事象、各サブリージョンにおける CPI 及び CPF を算出する。RPV 炉心領域部の全サブリ ージョンについて CPI 及び CPF を算出した後、それらを用いて RPV 炉心領域部の CPI 及び CPF を算出する。算出した CPI 及び CPF に、想定した過渡事象の発生頻度を考慮することで、各過 渡事象の FCI 及び TWCF を得る。以上を各過渡事象について繰り返し行い、得られた結果を用 いて RPV 炉心領域部の FCI 及び TWCF を得る。以上の CPI、CPF、FCI 及び TWCF は、認識論的 不確実さに伴う分布を有し、その分布から信頼度評価を行うこととなる。TWCF の算出の詳細に ついては、6.33 節に示す。なお、PASCAL-Manager では、考慮すべき亀裂及び過渡事象の条件を 設定することで、FCI 及び TWCF の評価に必要な入力ファイルを自動的に作成することができる。



図 3-4 PASCAL-Manager の破損頻度の計算の流れ



図 3-5 RPV (PWR)の炉心領域部の模式図

# 4 解析コードの動作環境

亀裂を対象に CPI 及び CPF を求める PFM 解析モジュール PASCAL-RV は、これまでのバージョンも含め、FORTRAN で開発されており、算出する破損確率が非常に小さい値になる場合があることを考慮し、変数の精度を倍精度にしている。PASCAL-RV は延べ約 400 個のルーチンで構成されている。また、PASCAL-RV の入力データの自動作成及びその解析結果を用いて TWCF を算出するためのモジュールである PASCAL-Manager は、C#で開発されている。PASCAL-RV 及びPASCAL-Manager は以下の環境で動作することを確認している。PASCAL-Manager の実行にあたっては、.Net Framework v4.0 以上をインストールしておく必要がある。

- Windows 7 Pro 64bit
- ・ メモリ 16GB
- CPU Core i7 3.1GHz
- HDD 1TB
- .NET Framework v4.5

# 5 使用手順

本章では、PASCAL-RV、PASCAL-Managerの使用手順について、解析条件の作成、解析の実行までの一連の流れを説明する。なお、解析条件を記載する入力ファイルの詳細や PrePASCAL の使用手順については、付録を参照のこと。

#### 5.1 PASCAL-RV の使用手順

#### 5.1.1 概要

PASCAL-RV は亀裂を対象として、様々な確率変数の影響を考慮した CPI と CPF を算出するための PFM 解析モジュールである。本モジュールでは初期  $RT_{NDT}$ 、亀裂寸法や化学成分、 $K_{Ic}/K_{Ia}$ 等を確率変数として、中性子照射脆化による  $\Delta RT_{NDT}$ を考慮した上で、亀裂進展挙動を踏まえた CPI と CPF を計算することができる。PASCAL-RV の解析条件の例を表 5-1 に示す。

# 5.1.2 入力ファイルの作成

PASCAL-RV による解析のための解析条件は、拡張子を.pasn とする入力ファイル(以下、pasn ファイル)を用いて、入力カードと呼ばれる関連したまとまりで設定するようになっている。入 カカードの詳細は付録のテキスト編集用入力カードを参照されたい。pasn ファイルの作成に当た っては、PASCAL-Manager を使用するか、既に計算が可能な pasn ファイルを活用して解析条件 を編集・変更することを推奨する。

表 5-1 PWRの PTS 事象を対象とした解析条件例(1/2)

評価項目		1	内容	
-11	種類		表面亀裂、内部亀裂	
初期亀裂	深さ・アスペクト比 分布		表面亀裂:深さ及び長さ固定(深さ6.5mm、長さ6.5mm)	
			内部亀裂:深さ及び長さ固定(深さ 板厚比 3% (6.165mm)、	
			長さ板厚比 3%(6.165mm))	
			平均值: Cu 0.16wt%、Ni 0.61wt%、P 0.01wt%、Si 0.2wt%	
		母材部	標準偏差:Cu0.01wt%、Ni0.02wt%、P0.002wt%、Si0.02%	
	化学成分		打ち切り:標準偏差の5倍	
			平均值 Cu 0.14wt%、Ni 0.80wt%、P 0.012wt%、Si 0.2wt%	
		溶接部	標準偏差:Cu0.01wt%、Ni0.02wt%、P0.0015wt%、Si0.02%	
確惑			打ち切り:標準偏差の5倍	
一変			初期值 :-5.0℃	
剱	$RT_{NDT}$		予測平均誤差:-1.1℃	
	ICI NDI		標準偏差:9.4℃	
			打ち切り:標準偏差の5倍	
			平均值 : $7.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ (E $\ge 1 \text{ MeV}$ )	
	中性子照身	量	標準偏差:平均値の 0.131 倍	
			打ち切り:標準偏差の5倍	
	応力拡大係数		無限長亀裂:JSME 維持規格(2016 年版) <sup>60</sup> の解	
			表面亀裂: CEAの解	
			内部亀裂 : ASME Sec. XI の解	
	破壊基準		K <sub>lc</sub> /K <sub>la</sub> 基準及び塑性崩壊基準	
	亀裂進展刻み		2 mm	
	破壊判定亀裂深さ比		RPV 板厚の 80%	
破	表面亀裂の進展評価		モデル A: 深さ方向へ進展した後は無限長亀裂に置き換え、進展評	
壊力	方式		価を行う。	
学亚	内部亀裂0	り進展評価	モデルD:長さ・深さ外面方向への進展判定は行わない。	
価	方式		深さ内面方向へ進展した後は無限長亀裂に置き換え、深さ方向につ	
			いて亀裂進展評価を行う。	
	破壊靭性値	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	国内ワイブル分布型	
	龟裂伝播停止破壊靭		国内対数正規分布型	
	性評価式	<u>``</u>		
	<u> 肥化</u> →肌→		JEAC4201-2007[2013 牛追佣版] <sup>127</sup> 才測式	
	甲性子照射量の容器		指数減衰式(定数:-9.449m <sup>-1</sup> )	
	板厚方向海	成衰		

	評価項目	内容							
	内半径	2000 mm (母材部までの距離)							
R	クラッド厚さ	5.5 mm							
r V	母材厚さ	200 mm							
	胴部高さ	4.2 m							
	クラッドの有無	あり							
	高温予荷重効果	ACEモデル							
	溶接残留応力の考慮	考慮する <sup>36), 37)</sup> 。							
	焼鈍による脆化回復	考慮しない。							
その	上部棚温度域の破壊 靭性値	上限なし。							
他	流動応力	500 MPa							
	母材部のヤング率	170 GPa <sup>37)</sup>							
	クラッド部のヤング	198 GPa <sup>37)</sup>							
	率								
	評価時期 	48 定格負荷相当年数 (EFPY: Effective Full Power Year)							
	照射温度	288°C							

表 5-1 PWR の PTS 事象を対象とした解析条件例 (2/2)

# 5.1.3 PASCAL-RV による解析の実行

ここでは、PASCAL-RVで PFM 解析を実行する場合の解析の実行方法について説明する。

#### 5.1.3.1 解析の実行方法

以下に示す PASCAL-RV 実行モジュール、PASCAL-RV 用の入力ファイル(\*pasn)を同じフォ ルダ(以下、解析用フォルダ)に置く。

- PASCAL-RV 実行モジュール: PASCAL-RV.exe
- ▶ PASCAL-RV 用入力ファイル (5.1.2 で作成したファイル)
  - : sample.pasn (任意の入力ファイル名)

PASCAL-RV の解析は以下のいずれかの方法で実行する。

- コマンドプロンプトを立ち上げ、解析用フォルダに移動し、「PASCAL-RV.exe sample.pasn」のコマンドを実行する。
- · PASCAL-RV.exeのアイコンに入力ファイルをドラッグする。
- · 「PASCAL-RV.exe sample.pasn」とコマンドを記載したバッチファイルを作成し、実行する。

結果を確認するためには、解析終了後、認識論的不確実さを考慮した解析では csv ファイルを 確認する。モンテカルロ法を用いた解析では rsl ファイルを、決定論解析では.f37 ファイルを確 認する。csvファイル、rslファイル、f37ファイルに記載の内容については 5.1.4 を参照のこと。

#### 5.1.3.2 解析実行中の画面表示情報

解析実行中は、コマンドプロンプト画面が表示され、解析の経過情報が表示される。表示される情報を以下に示す。

- 階層別モンテカルロ法の解析を実施している場合
  - 計算ケース番号(imulti)
  - ・ サンプリングが終了した階層の個数 (icell)
  - 亀裂貫通確率 (pbabf)
  - ・ 収束計算回数(iloop)
  - ・ 収束パラメータ (epsi)

## ●モンテカルロ法の解析を実施している場合

- 計算ケース番号
- ・ サンプリング数
- 破壊した RPV 個数
- · 亀裂貫通確率
- ・ 収束パラメータ
- ●LHS 法を用いた解析を実施する場合

認識論的不確実さを考慮した RPV の TWCF 解析を行う場合には、計算速度の向上等の観 点から、CPI を解析的に算出するとともに、CPF を数値積分で算出するため、計算速度は上 述の階層別モンテカルロ法やモンテカルロ法に比べて速くなる(標準的解析要領<sup>32)</sup>で記載 されている国内モデルプラントを対象とした解析では10000倍程度速くなる)。LHS 法を用 いて解析を実施する場合、PASCAL-RVの実行画面には情報の表示は行われない。

#### 5.1.4 解析結果ファイル

解析実行後には、解析条件ファイルのあるディレクトリに複数の結果ファイルが出力される。 各ファイルの拡張子と内容及び出力される条件を以下に記す。「\*」は入力ファイル名を示す。

#### 5.1.4.1 \*.out ファイル

解析結果のメイン出力ファイル。解析ソルバが検出したエラーやワーニングの情報、並びに解 析の入力条件、解析経過、解析結果等はこのファイルに出力される。解析ケース毎に出力される。

#### 5.1.4.2 \*.rsl ファイル

CPIや CPF 等、最終的な解析結果のみを格納したファイル。過渡事象毎に出力される。

#### 5.1.4.3 \*.f37 ファイル

決定論解析の結果が記載されるファイル。本ファイルは csv ファイル形式であるため、 Microsoft Excel<sup>®</sup>などを用いてカンマ区切りで開くか、区切り位置でカンマを選択することで、内 容確認が容易となる。図 5-1 に表面亀裂の場合のファイルの表示例を、図 5-2 に内部亀裂の場合 のファイルの表示例を、表 5-2 に各列の説明を示す。

	А	В	С	D	E	F	G	н	1	J	К	L	М	N	0	Р	Q	R	S	Т
1	No.	time	а	b	temp0	tempd	fluence0	fluenced	stress0	stressd	drtndt0	drtndtd	rtndt0	rtndtd	KI0	KId	Klc0	Klcd	Kla0	Klad
2		min	m	m	deg.C	deg.C	10e9n/cm	10e9n/cm	MPa	MPa	deg.C	deg.C	deg.C	deg.C	MPam1/2	MPam1/2	MPam1/2	MPam1/2	MPam1/2	MPam1/2
3	1	1.00E+03	1.95E-02	5.85E-02	2.86E+02	2.86E+02	1.10E+01	8.61E+00	8.18E+01	7.05E+01	9.13E+01	7.94E+01	1.48E+01	2.97E+00	1.39E+01	2.10E+01	2.20E+02	2.20E+02	2.20E+02	2.20E+02
4	2	1.00E+03	1.95E-02	5.85E-02	2.83E+02	2.85E+02	1.10E+01	8.61E+00	7.92E+01	5.58E+01	9.13E+01	7.94E+01	1.48E+01	2.97E+00	1.24E+01	1.72E+01	2.20E+02	2.20E+02	2.20E+02	2.20E+02
5	3	1.00E+03	1.95E-02	5.85E-02	2.80E+02	2.84E+02	1.10E+01	8.61E+00	7.52E+01	4.24E+01	9.13E+01	7.94E+01	1.48E+01	2.97E+00	1.06E+01	1.36E+01	2.20E+02	2.20E+02	2.20E+02	2.20E+02
6	4	1.01E+03	1.95E-02	5.85E-02	2.67E+02	2.76E+02	1.10E+01	8.61E+00	1.26E+02	5.98E+01	9.13E+01	7.94E+01	1.48E+01	2.97E+00	1.68E+01	1.95E+01	2.20E+02	2.20E+02	2.20E+02	2.20E+02
7	5	1.01E+03	1.95E-02	5.85E-02	2.56E+02	2.67E+02	1.10E+01	8.61E+00	1.61E+02	7.82E+01	9.13E+01	7.94E+01	1.48E+01	2.97E+00	2.10E+01	2.48E+01	2.20E+02	2.20E+02	2.20E+02	2.20E+02
8	6	1.01E+03	1.95E-02	5.85E-02	2.39E+02	2.61E+02	1.10E+01	8.61E+00	2.30E+02	8.98E+01	9.13E+01	7.94E+01	1.48E+01	2.97E+00	2.93E+01	3.04E+01	2.20E+02	2.20E+02	2.20E+02	2.20E+02
9	7	1.01E+03	1.95E-02	5.85E-02	2.17E+02	2.48E+02	1.10E+01	8.61E+00	3.14E+02	1.20E+02	9.13E+01	7.94E+01	1.48E+01	2.97E+00	4.04E+01	4.08E+01	2.20E+02	2.20E+02	2.20E+02	2.20E+02
10	8	1.01E+03	1.95E-02	5.85E-02	2.09E+02	2.42E+02	1.10E+01	8.61E+00	3.47E+02	1.32E+02	9.13E+01	7.94E+01	1.48E+01	2.97E+00	4.49E+01	4.51E+01	2.20E+02	2.20E+02	2.20E+02	2.20E+02
11	9	1.01E+03	1.95E-02	5.85E-02	1.91E+02	2.33E+02	1.10E+01	8.61E+00	4.18E+02	1.54E+02	9.13E+01	7.94E+01	1.48E+01	2.97E+00	5.48E+01	5.33E+01	2.20E+02	2.20E+02	2.20E+02	2.20E+02
12	10	1.02E+03	1.95E-02	5.85E-02	1.41E+02	1.97E+02	1.10E+01	8.61E+00	5.93E+02	2.24E+02	9.13E+01	7.94E+01	1.48E+01	2.97E+00	8.08E+01	7.70E+01	2.20E+02	2.20E+02	1.88E+02	2.20E+02
13	11	1.02E+03	1.95E-02	5.85E-02	9.66E+01	1.54E+02	1.10E+01	8.61E+00	7.05E+02	2.70E+02	9.13E+01	7.94E+01	1.48E+01	2.97E+00	9.56E+01	9.20E+01	2.20E+02	2.20E+02	1.17E+02	2.20E+02
14	12	1.03E+03	1.95E-02	5.85E-02	6.29E+01	1.13E+02	1.10E+01	8.61E+00	7.19E+02	2.61E+02	9.13E+01	7.94E+01	1.48E+01	2.97E+00	9.05E+01	8.94E+01	1.30E+02	2.20E+02	8.54E+01	1.57E+02
15	13	1.05E+03	1.95E-02	5.85E-02	4.12E+01	7.40E+01	1.10E+01	8.61E+00	6.07E+02	1.69E+02	9.13E+01	7.94E+01	1.48E+01	2.97E+00	6.25E+01	6.24E+01	9.70E+01	1.92E+02	7.09E+01	1.06E+02
16	14	1.06E+03	1.95E-02	5.85E-02	3.01E+01	5.10E+01	1.10E+01	8.61E+00	5.21E+02	1.01E+02	9.13E+01	7.94E+01	1.48E+01	2.97E+00	4.46E+01	4.35E+01	8.52E+01	1.30E+02	6.49E+01	8.53E+01
17	15	1.08E+03	1.95E-02	5.85E-02	2.39E+01	3.67E+01	1.10E+01	8.61E+00	4.66E+02	5.80E+01	9.13E+01	7.94E+01	1.48E+01	2.97E+00	3.39E+01	3.18E+01	7.98E+01	1.06E+02	6.19E+01	7.54E+01
18	16	1.11E+03	1.95E-02	5.85E-02	1.77E+01	2.38E+01	1.10E+01	8.61E+00	4.25E+02	2.57E+01	9.13E+01	7.94E+01	1.48E+01	2.97E+00	2.59E+01	2.31E+01	7.50E+01	9.07E+01	5.92E+01	6.78E+01

図 5-1 決定論解析の結果ファイル例(表面亀裂)

al	A	8	C	D	Ε	F	G	н	1	1	к	L	M	N	0	P	Q	R	5	T	U	v	W	х	Y	z	AA	AB	AC
1 1	io;	time		b	1.8	temp0	tempd	tempd2	fluence0	fluenced	fluenced2	stress0	sbessd .	stressd2	ditndt0	ditedtd	drtndt2	intendit@	rtndtd	(tridtd2	810	KId	K1d2	KIc0	Klod	Kied2	Kia0	Klad	KPad2
2		min		m		deg.C	deg.C	deg.C	10e9n/cm	10e9n/cm	10e9n/cm	MPa	MPa	MPa	deg.C	deg.C	deg.C	deg.C	deg.C	deg.C	MPam1/2	MPam1/2	MPam1/3	MPam1/3	MPam1/2	MPam1/3	MPam1/2	MPam1/2	MPam1/2
3		1 1.00E+03	4.11E-03	2.888-02	8.46E-02	2.888+0	2 2.886+00	2.88E+02	2.25E-01	2.16E-01	2.34E-01	7.27E+01	7.04E+01	7.64E+0	7.45E+01	7,44E+01	7.46E+01	2.34E+0	1 2.33E+0	2.36E+01	3.05E+00	7,46E+00	8.27E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	1.10E+03	1.10E=03	1.09E+03
4		2 1.00E+03	4.11E-03	2.885-02	8.468-02	2.88E+0	2 2.888+00	2.88E+02	2.25E-01	2.16E-01	2.34E-01	2.38E+01	2.165+01	2.75E+0	1 7.45E+01	7.44E+01	7.46E+01	2.34E+0	1 2.338+0	1-2.36E+01	1.00E+00	2.15E+00	2.95E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	1.10E+03	1.10E+03	1.09E+03
5		3 1.00E+03	4.118-03	1.88E-01	8.46E-02	2.88E+0	2 2.88E+00	2.88E+02	2.25E-01	2.16E-01	2.34E-01	7.84E+00	5.61E+00	1.16E+0	7.45E+01	7.44E+01	7.46E+01	2.34E+0	1 2.33E+00	2.36E+01	3.33E-01	4.18E-01	1.22E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	1.10E+03	1.10E+03	1.09E+03
6		4 1.00E+03	4.11E-03	2.888-02	8.468-02	2.885+0	2 2.886+03	2.88E+02	2.258-01	2.16E-01	2.34E-01	-4.34E+00	-6.59E+00	-5.226-03	7.45E+01	7.44E+01	7,46E+01	2.34E+0	1 2.336+03	1 2.36E+01	0.00€+00	0.008+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	1.09E+03	1.10E+03	1.09E+03
7		5 1.00E+03	4.118-03	2.888-02	8.46E-02	2.888+0	2.888+00	2.88E+02	2.258-01	2.16E-01	2.34E-01	-9.53E+00	-1.188+01	-5.64E+00	7.45E+01	7,44E+01	7,46E+01	2.34E+0	1 2.33E+0	1 2.36E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	1.09E+03	1.10E+03	1.09E+03
8		6 1.00E+03	4.11E-03	2.888-02	8.46E-02	2.88E+0	2 2.888+00	2.88E+02	2.25E-01	2.16E-01	2.34E-01	-1.37E+01	-1.61E+01	-9.73E+00	7.45E+01	7,44E+01	7.46E+01	2.34E+0	1 2.33E+0	1 2.36E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	1.09E+03	1.09E+03	1.09E+03
9		7 1.00E+03	4.11E-03	2.885-02	8.46E-02	2.87E+0	2 2.885+00	2.87E+02	2.25E-01	2.168-01	2.34E-01	-1.57E+01	-1.82E+01	-1.16E+0	7.45E+01	7,44E+01	7,45E+01	2.34E+0	1 2.33E+0	2.36E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	1.09E+03	1.09E+03	1.09E+03
10		8 1.01E+03	4.11E-03	2.88E-02	8.46E-02	2.87E+0	2 2.87E+00	2.86E+02	2.258-01	2.166-01	2.34E-01	-1.908+01	-2.19E+01	-1.44E+0	7.45E+01	7.44E+01	7.46E+01	2.34E+0	1 2336+0	2.36E+01	0.008+00	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	1.08E+03	1.08E+03	1.07E+03
11		9 1.01E+03	4.11E-03	2.888-02	8.46E-02	2.86E+0	2 2.868+03	: 2.86E+02	2.258-01	2.16E-01	2.34E-01	-2.00E+01	-2.31E+01	-1.52E+0	1 7.45E+01	7,44E+01	7,46E+01	2.34E+0	1 2,336+0	2.36E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	1.07E+03	1.08E+03	1.07E+03
12		10 1.01E+03	4.11E-03	2.888-02	8.46E-02	2.858+0	2 2.85E+00	2.84E+02	2.25E-01	2.166-01	2.34E-01	-2.53E+01	-2.90E+01	-2.00E+0	7.45E+01	7,44E+0;	7.46E+01	2.34E+0	1 2,33E+0	2.36E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	1.05E+03	1.06E+03	1.04E+03
13		11 1.01E+03	4.118-03	2.88E-02	8.465-02	2.84E+0	2 2.84E+01	2.84E+02	2.258-01	2.16E-01	2.34E-01	-2.57E+01	-2.958+01	-2.03E+0	7.45E+01	7.44E+01	7.46E+01	2.34E+0	1 2,335+0	1-2.36E+01	0.00E+00	0.005+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	1.04E+03	1.05E+03	1.04E+03
14		12 1.01E=03	4.11E-03	2.888-02	8.468-02	2.84E+0	2 2.845+00	2.83E+02	2.25E-01	2.165-01	2.34E-01	-2.60E+01	-2.99E+01	-2.05E+00	7.45E+01	7,44E+01	7,468+01	2.34E+0	1 2.335+0	1 2.36E+01	0.00€+00	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	1.04E+03	1.04E+03	1.03E+03
15		13 1.01E+03	4.11E-03	2.88E-02	8.468-02	2.83E+0	2 2.84E+00	2.835+02	2.256-01	2.166-01	2.34E-01	-2.77E+01	-3.17E+01	-2.21E+0	7.45E+01	7,44E+01	7.46E+01	2.34E+0	1 2,33E+00	1 2.36E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	1.03E+03	1.04E+03	1.03E+03
16		14 1.01E+03	4.11E-03	2.888-02	8.46E-02	2.79E+0	2 2.80E+00	2.78E+02	2.258-01	2.166-01	2.34E-01	-3.428+01	-3.92E+01	-2.74E+0	7.45E+01	7.44E+01	7.46E+01	2.34E+0	1 2.33E+0	2.36E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	9.826+02	9.91E+02	9.72E+02
17		15 1.01E+03	4.11E-03	2.888-02	8.46E-02	2.78E+0	2 2.79E+00	2.78E+02	2.25E-01	2.166-01	2.34E-01	-3.53E+01	-4.05E+01	-2.84E+00	7.45E+01	7.44E+01	7.46E+01	2.34E+0	1 2.33E+0	2.36E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	9.73E+02	9.83E+02	9.63E+02
18		16 1.02E+03	4.118-03	2.888-02	8.468-02	2.76E+0	2 2.768+00	2.75E+02	2,258-01	2.168-01	2.34E-01	-3.92E+01	-4.49E+01	-3.18E+0	7.45E+03	7,44E+01	7.46E+01	2.34E+0	1 2.33E+0	2.368+01	0.00E+00	0.00€+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	9.40E+02	9.50E+02	9.29E+02
19		17 1.02E+03	4.118-03	2.88E-02	8.468-02	2.74E+0	2 2.75E+03	2.73E+02	2.258-01	2.16E-01	2.34E-01	-4.11E+01	-4.69E+01	-3.36E+03	7.45E+01	7,448+01	7.46E+01	2.348+0	1 2.336+0	2.36E+01	0.005+00	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	9.24E+02	9.34E+02	9.126+02
20		18 1.02E+03	4.11E-03	2.888-02	8.46E-02	2,73E+0	2 2.74E+00	2.728+02	2.25E-01	2.16E-01	2.34E-01	-4.05E+01	+4.64E+03	-3.30E+0	7.45E+01	7,44E+05	7,46E+01	2.34E+0	1 2.33E+0	2.36E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	9.09E+02	9.19E+02	8.97E+02
21		19 1.02E+03	4.118-03	2.888-02	8.468-02	2.72E+0	2 2.73E+00	2.71E+02	2.258-01	2.165-01	2.34E-01	-3.82E+01	+4.40E+01	-3.07E+0	7.45E+01	7.44E+01	7.46E+01	2.34E+0	1 2.338+0	2.36E+01	0.00E+00	0.005+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	9.02E+02	9.13E+02	8.91E+02
22		20 1.028+03	4.118-03	2.888-01	8.468-02	2.71E+0	2 2.728+00	2.70E+02	2.25E-01	2.16E-01	2.34E-01	-4.268+01	-4.83E+01	-3.51E+0	7.45E+01	7,44E+01	7.46E+01	2.34E+0	1 2.335+03	2.36E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	8.916-02	9.01E+02	8,81E+02
23		21 1.026+03	4.118-03	2.88E-02	8.465-02	2.71E+0	2 2.726+00	2.70E+02	2.256-01	2.165-01	2.34E-01	-4.64E+01	-5.22E+03	-3.886+01	7.45E+03	7,44E+01	7,468+01	2.34E+0	1 2,335+0	1 2.36E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	8.865+02	8.96E+02	8.76E+02
24		22 1.026+03	4.118-03	2.888-02	8.468-02	2.70E+0	2 2.71E+00	2.695+02	2.158-01	2.166-01	2.346-01	-4.678+01	-5.27E+01	-3.89E+0	7.45E+03	7,448+01	7,468+01	2.346+0	1 2.338+03	2.368+01	0.005+00	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	\$.80E+02	8.90E+02	8.696+03
25		23 1.028+03	4.11E-03	2.886-02	8.468-02	2.69E+0	2 2,70€+0;	2.68E+02	2.25E-01	2.16E-01	2.34E-01	-4,458+01	-5.09E+01	-3.67E+0	7.45E+03	7,44E+01	7,46E+01	2.348+0	1 2.338+0	2.36E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	8.65E+02	8.76E+02	8.54E+02
26		24 1.02E+03	4.11E-03	2.886-02	8.46E-02	2.68E+0	2 2.69E+00	2.67E+02	2.25E-01	2.16E-01	2.34E-01	-4.62E+01	-5.25E+01	-3.82E+0	7.45E+01	7,44E+01	7.46E+01	2.34E+0	1 2.33E+0	1 2.36E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	8.58E+02	8.69E+02	8.46E+02
27		25 1.02E+03	4.31E-03	2.88E-02	8.465-02	2.67E+0	2 2.686+00	2.66E+02	2.258-01	2.165-01	2.34E-01	-4.86E+01	-5.50E+01	-4.03E+0	7.45E+01	7,44E+01	7.465+01	2.34E+0	1 2.335+0	2.36E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	8.50E+02	8.61E+02	8.39E+02
28		26 1.02E+03	4.31E-03	2.888-02	8.468-02	2.67E+0	2 2.686+00	2.665+02	2.256-01	2.168-01	2.34E-01	-4.868+01	-5.52E+01	-4.02E+0	7.45E+01	7,44E+01	7.468+01	2.34E+0	1 2.336+0	2.36E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1:00E+04	1.00E+04	1.00E+04	8.42E+02	8.54E+02	8.31E+02
29		27 1.02E+03	4.11E-03	2.88E-02	8.468-02	2.668+0	2 2.67E+00	2.658+02	2 258-01	2.168-01	2.34E-01	-4.73E+01	-5.40E+01	-3.87E+0	7.45E+01	7,445+01	7.46E+01	2.34E+0	1 2.336+0	2.36E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	8.34E+02	8.46E+02	8.22E+02
30		28 1.02E+03	4.11E-03	2.888-02	8.46E-02	2.64E+0	2 2.65E+00	1 2.63E+02	2.258-01	2.16E-01	2.34E-01	-4.84E+01	-5.54E+01	-3.97E+0	7.45E+01	7.44E+01	7.46E+01	2.34E+0	1 2.33E+0	2.36E+01	0.00E+00	0.008+00	0.00E+00	1.00E+04	1.00E+04	1.00E+04	8.17E+02	8.29E+02	8.04E+02
21		10 1 015-03	# 11E.03	7 225.07	8 445,07	2 43F+0	1 161Fatt	* * #*F_M*	2 25F.01	2145,01	2345-01	.1 0/F+01	A AREAD	d ntran	TAREAD	TAIFAN	7 245.01	2 3/F+0	1 2 335.0	2365+01	0.005+00	0.005+00	0.005+00	1005-04	1005-01	1005+04	8 0.8F.0.7	8 205-02	1 04F+01

図 5-2 決定論解析の結果ファイル例(内部亀裂)

項目	単位	説明
No.		 時刻点の番号
time	min	時刻
а	m	亀裂深さ
b	m	亀裂長さ
sa	m	亀裂深さ位置
temp0	deg.C	長さ方向の評価点の温度
tempd	deg.C	最深点の評価点の温度
tempd2	deg.C	表面側の評価点の温度
fluence0	10 <sup>9</sup> n/cm <sup>2</sup>	長さ方向の評価点の中性子照射量
fluenced	$10^9$ n/cm <sup>2</sup>	最深点の評価点の中性子照射量
fluenced2	$10^9$ n/cm <sup>2</sup>	表面側の評価点の中性子照射量
stress0	MPa	長さ方向の評価点の応力
stressd	MPa	最深点の評価点の応力
stressd2	MPa	表面側の評価点の応力
drtndt0	deg.C	長さ方向の評価点のART <sub>NDT</sub>
drtndtd	deg.C	最深点の評価点の $\Delta RT_{NDT}$
drtndtd2	deg.C	表面側の評価点のART <sub>NDT</sub>
rtndt0	deg.C	長さ方向の評価点の RT <sub>NDT</sub>
rtndtd	deg.C	最深点の評価点の RT <sub>NDT</sub>
rtndtd2	deg.C	表面側の評価点の RT <sub>NDT</sub>
KI0	MPa m <sup>1/2</sup>	長さ方向の評価点の K <sub>I</sub>
KId	MPa m <sup>1/2</sup>	最深点の評価点の <i>K</i>
KId2	MPa m <sup>1/2</sup>	表面側の評価点の K <sub>I</sub>
KIc0	MPa m <sup>1/2</sup>	長さ方向の評価点のK <sub>lc</sub>
KIcd	MPa m <sup>1/2</sup>	最深点の評価点のK <sub>lc</sub>
KIcd2	MPa m <sup>1/2</sup>	表面側の評価点の K <sub>lc</sub>
KIa0	MPa m <sup>1/2</sup>	長さ方向の評価点の K <sub>la</sub>
KIad	$MPa m^{1/2}$	最深点の評価点のKla
KIad2	MPa $m^{1/2}$	表面側の評価点の K <sub>la</sub>

表 5-2 決定論解析の出力項目

※末尾に 0 と記載があるものは長さ方向の評価点のパラメータ、d と記載があるものは最深点の 評価点のパラメータ、d2 と記載があるものは表面側の評価点(内部亀裂の解析時のみ出力)の パラメータである。

#### 5.1.4.4 \*.csv ファイル

認識論的不確実さを考慮する場合に出力されるファイル。認識論的不確実さに分類される確率 変数のサンプリング値が記載されている。A 列は RPV サンプルの番号であり、LHS の分割数の 何番目かを示している。B 列は#CONT の連続解析機能の番号であり、基本的な入力条件の場合 は 0 であり、それ以降の連続解析を使用した条件の結果に対して 1 以降の番号が振られる。C 列 が該当サンプルの CPI、D 列が CPF を示している(図 5-3)。

	А	В	С	D	Е	
1	1	0	2.22E-04	0.00E+00		
2	2	0	8.67E-01	2.67E-02		
3	3	0	2.75E-01	1.70E-06		
4	4	0	3.87E-02	1.78E-15		
5	5	0	9.74E-02	1.64E-12		
6	6	0	9.39E-02	6.37E-03		
7	7	0	9.69E-03	0.00E+00		
8	8	0	5.76E-01	1.42E-05		
9	10	0	1.93E-02	0.00E+00		
10	11	0	6.85E-01	2.36E-05		
11	12	0	5.54E-02	1.75E-04		
12	13	0	2.45E-01	6.05E-06		
13	14	0	2.36E-03	4.46E-13		
14	15	0	6.13E-01	1.21E-04		
15	17	0	6.73E-01	4.64E-05		
16	18	0	1.00E-01	4.96E-06		
17	19	0	9.90E-02	1.22E-06		
18	21	0	1.04E-03	0.00E+00		
19	22	0	4.67E-02	6.37E-04		
20	23	0	1.91E-01	2.00E-02		
21	24	0	4.50E-07	6.94E-13		

図 5-3 認識論的不確実さを考慮した解析の csv ファイル例

#### 5.2 PASCAL-Managerの使用手順

#### 5.2.1 概要

PASCAL-RV の解析は、RPV 炉心領域部に亀裂が 1 つ存在しているという前提に基づいて実施 されている。一方、PASCAL-Manager は RPV 炉心領域部の FCI 及び TWCF とその信頼度を評価 する。PASCAL-Manager によって、RPV 炉心領域部の FCI 及び TWCF を算出するためには、亀裂 分布データで考慮する全パターンの寸法の亀裂に対して、それぞれの CPI と CPF をあらかじめ PASCAL-RV で計算しておく必要がある。

PASCAL-Manager による TWCF 算出の模式図を図 5-4 に示す。PASCAL-Manager は、主に 3 つ の機能を備えている。第 1 の機能は、PASCAL-RV の入力ファイルを作成する機能である。本機 能は、図 5-4 の機能 1 の枠内に対応している。PASCAL-RV は亀裂の CPI 及び CPF を計算するコ ードであり、FCI 及び TWCF を計算するためには、考慮する亀裂寸法や亀裂の存在部位ごとに PASCAL-RV を用いた亀裂を対象とした CPI、CPF を予め計算する必要がある。国内 RPV を対象 とした TWCF 解析の例では、亀裂寸法や存在位置を変えた、数千パターンの入力ファイルの作 成を要することが見込まれる。PASCAL-Manager では、必要な評価条件を指定することで、全て のパターンの亀裂解析用の入力ファイルを自動作成することができる。

第2の機能は、PASCAL-RVの実行を管理する機能である。本機能は、図 5-4の機能2の枠内 に対応している。PASCAL-Managerは、第1の機能で作成した多くのパターンの入力ファイルを、 ユーザーが指定した数に合わせて並列実行する機能を有する。そのため、マルチスレッドマシン を用いることで、効率的に解析を進めることができる。

第3の機能は、PASCAL-RVの解析結果をポスト処理する機能である。本機能は、図5-4の機能3の枠内に対応している。この機能では、PASCAL-RVで計算された亀裂のCPI及びCPFに対して、RPV全体の亀裂分布や過渡事象発生頻度を考慮して、FCI及びTWCFを計算する。以下、本手引きでは機能1、機能2、機能3と呼ぶ。

PASCAL-Manager を実行する際のフォルダ構成を表 5-3 に、ファイルの受け渡しの模式図を図 5-5 に示す。PASCAL-Manager は前述した 3 種類の機能(機能 1~3)を有するが、使用する機能 によって必要となるファイルが異なる。また、条件設定ファイルの概要を表 5-4 に示す。

## JAEA-Data/Code 2022-006



図 5-4 PASCAL-Manager を用いた TWCF 算出の模式図



図 5-5 PASCAL-Managerのファイルの受け渡しの模式図
ファイル及びフォルダ		機能 2	機能 3
PASCAL-Manager.exe	0	0	0
PASCAL-RV.exe	0	0	
FileGroupA	0	0	0
L main.csv	0	0	0
L standard.ini	0	0	0
	0	0	0
LBLOCA.txt	0	0	0
SBLOCA.txt	0	0	0
L	0	0	0
FileGroupB			0
crack_dist_axial_surf.csv			0
crack_dist_axial_surf_OD.csv			0
crack_dist_circ_surf.csv			0
crack_dist_circ_surf_OD.csv			0
└_ crack_dist_embe_base.csv			0
crack_dist_embe_base_OD.csv			0
crack_dist_embe_weld.csv			0
crack_dist_embe_weld_OD.csv			0
L POD.csv			0
L subregion.csv			0
L transient.csv			0
pasnFolder (フォルダ及び内部のファイルは機能1によって生成される)	•	0	
LBLOCA_base_embe_axial_2aot_01.0pct_coa_01.125.pasn		0	
	•	0	
ConditionalProbability (フォルダ及び内部のファイルは機能 2 によって生成される)		•	0
epistemic_variables.csv		•	0
LBLOCA_base_embe_axial_2aot_01.0pct_coa_01.125.csv		•	0
		•	0
TWCF(フォルダ及び内部のファイルは機能3によって生成される)			•
CPI_and_CPF_for_a_crack.csv			•
CPI_and_CPF_for_a_vessel.csv			•

表 5-3 PASCAL-Managerのフォルダ構成 (1/2)

ファイル及びフォルダ	機能1	機能 2	機能3
CPI_and_CPF_for_cracks.csv			•
detail.csv			•
mean_crack_density.csv			•
random_variable_value.csv			•
sampled_frequency.csv			•

表 5-3 PASCAL-Manager のフォルダ構成 (2/2)

○:該当機能を使用する場合に必要となる。

◆:該当機能により生成される。

ファイル名	ファイルを格納	主な内容
	するフォルダ名	
main.csv	FileGroupA	PASCAL-Managerの制御に係る条件
standard.ini	FileGroupA	pasn ファイルの生成に必要な基本的な条件
(例)LBLOCA.txt、	FileGroupA	pasn ファイルの生成に必要な、過渡事象に
LBLOCA_OD.txt	\TransientCondition	係る条件
wrs_for_base_crack_from	FileGroupA	pasn ファイルの生成に必要な、母材部の溶
_inner.csv	\WRS	接残留応力に係る条件
wrs_for_weld_crack_from	FileGroupA	pasn ファイルの生成に必要な、溶接部の溶
_inner.csv	\WRS	接残留応力に係る条件
subregion.csv	FileGroupB	サブリージョンに係る条件
transient.csv	FileGroupB	過渡事象の発生頻度
crack dist embe base csy	FileGroupB	内表面側母材部の内部亀裂の深さ・アスペ
	тпеотоцрв	クト比別密度の定義
crack_dist_embe_base_O	FileGroupB	外表面側母材部の内部亀裂の深さ・アスペ
D.csv	Тисотоцры	クト比別密度の定義
crack_dist_embe_weld.cs	FileGroupB	内表面側溶接部の内部亀裂の深さ・アスペ
V	Тпеотоцры	クト比別密度の定義
crack_dist_embe_weld_O	FileGroupB	外表面側溶接部の内部亀裂の深さ・アスペ
D.csv	Тпеотоцры	クト比別密度の定義
crack dist surf circ csy	FileGroupB	内表面周方向亀裂の深さ・アスペクト比別
	Тпеотоцры	密度の定義
crack_dist_surf_circ_OD.	FileGroupB	外表面周方向表面亀裂の深さ・アスペクト
CSV	Theoroupb	比別密度の定義
crack dist surf axial csy	FileGroupB	内表面軸方向表面亀裂の深さ・アスペクト
	Theoroupb	比別密度の定義
crack_dist_surf_axial_OD	FileGroupB	外表面軸方向表面亀裂の深さ・アスペクト
.csv	1 mooroupD	比別密度の定義
POD.csv	FileGroupB	非破壊検査に関する入力データの定義

	表 5-4	条件設定ファ	・イルの種類と内容
--	-------	--------	-----------

#### 5.2.2 入力ファイルの作成

FCI及びTWCFを算出するためには、まず PASCAL-RVを用いて様々な亀裂及び過渡事象に対して単一亀裂のCPI及びCPFを求める必要がある。機能1では、FileGroupA内のファイルに記載されている条件に基づいて、PASCAL-RVの入力ファイルを作成する。機能2(PASCAL-RVの並列実行機能)に必要となる条件はFileGroupAのmain.csvに記載する。機能3(PASCAL-RVの計算結果からFCI及びTWCFを算出する機能)に必要となる条件は主にFileGroupB内のファイルに記載されている。以下、FileGroupA及びB内のファイルについて説明する。

## 5.2.2.1 main.csv (FileGroupA フォルダ内)

主に PASCAL-Manager で行う解析を制御するためのファイルであり、Microsoft Excel®を用いて 編集することを想定している。表 5-5 から表 5-8 に記載内容を示す。また、図 5-6 に設定例を示 す。図 5-6 における A 列のセルは表 5-5 の項目名に対応しており、B 列以降の色付きで表示して いるセルは PASCAL-Manager に読み込まれる数値が記載されているセルである。背景が白色で表 示されているセルには何を記載しても問題なく、コメントとして利用できる。

内部亀裂の存在を考慮する母材部の体積と溶接部の面積は、"position for embedded crack"で指定した値の最小値と最大値を用いて算出される。(これは、主に内部亀裂の存在位置に関する感度解析を実施するための機能であり、標準的な使用においては"position for embedded crack"に十分な数を指定することが望ましい。)

亀裂アスペクト比については、5.2.2.7 で述べる亀裂深さとアスペクト比別の亀裂密度を設定するファイルの内容と整合の取れた値を入力するように注意されたい。また、"zero value in TWCF calculation"については 5.2.2.5 で詳細を述べるが、PASCAL-RV で算出される CPI 及び CPF に比べて十分小さい正の値を設定するよう注意されたい。さらに、内部亀裂については亀裂深さを複数設定できるが、表面亀裂については深さを複数設定することができず、亀裂深さを板厚比ではなく[m]単位で指定することに注意されたい。

項目名	内容	
	解析に使用する PASCAL-RV の実行体の名前を入力す	
name of PASCAL module	る。[.exe]の拡張子は記載しない。(人刀例: PASCAL PV)	
	「ASCAL_KV」 信頼度評価で考慮する RPV の設定数を入力する。	
number of RPVs	(入力例:1000)	
	機能 2 における PASCAL-RV の並列実行数である。CPU	
number of cores	のコア数より少ない値とするのが望ましい。(入力例:	
	2)	
use function 1	機能1を使用する際は yes、使用しない場合は no を入力	
(create pasn)	する。(入力例: yes)	
use function 2	機能2を使用する際は yes、使用しない場合は no を入力	
(run PASCAL)	する。(入力例: yes)	
function 2 option	機能1を使用せずに機能2を使用する場合に pasn ファイ	
(name of pasnFolder)	ルを格納したフォルダ名を入力する。なお、機能1を使	
	用した場合には pasnFolder が自動で生成される。	
use function 3	機能3を使用する際はyes、使用しない場合はnoを入力	
(calculate TWCF)	する。(入力例: yes)	
	機能2を使用せずに機能3を使用する際はCPI及びCPF	
function 2 option	を記載した csv ファイルを格納したフォルダ名を入力す	
(nome of CD folder)	る。なお、機能2とあわせて機能3を使用した場合、機	
(name of CP folder)	能 2 で自動的に生成される ConditionalProbability フォル	
	ダを自動的に読み込む。	
function 3 option	narent/child 関係を考慮する場合には vag そうでない場	
(consider parent child	parentering 医尿 与惑 $(\lambda - 5)$ (人力例: ves)	
relationship)		
	考慮する亀裂の位置に関する選択肢を入力する。	
	1,2,3のいずれかを入力する。(入力例:1)	
crack population option	1:内表面側亀裂のみを考慮する	
	2:外表面側亀裂のみを考慮する	
	3:両方の亀裂を考慮する	

表 5-5 main.csv の内容(計算内容を決定する項目)

項目名	内容
height of RPV	炉心領域部の高さ[m]を入力する。(入力例: 4.2)
total thickness	クラッドを含む板厚[m]を入力する。(入力例: 0.2055)
clad thickness	クラッド厚さ[m]を入力する。(入力例: 0.0055)
	内半径[m](容器の中心からクラッド表面までの距離で
internal radius	あり、母材表面までの距離ではない。)を入力する。
	(入力例: 1.9945)
zero value in TWCF	対数補間に用いる CPI あるいは CPF の値が 0 となった際
calculation	に代わりに設定する値を入力する。(入力例: 1e-20)
	中性子照射量の空間分布を考慮した時に用いる中性子照
number of fluence datapoint	射量のデータ点数を入力する。(入力例:4)
0 1.	中性子照射量の値[10 <sup>19</sup> n/cm <sup>2</sup> ]を入力する。(入力例:0.5,
fluence datapoint	1.0, 4.0, 7.0)
	内表面側内部亀裂について、内表面と、内部亀裂上の内
number of position for inner	表面に最も近い点との距離のデータ点数を入力する。
embedded crack	(入力例:20)
	内表面側内部亀裂について、内表面と、内部亀裂上の内
position for inner embedded	表面に最も近い点との距離[m]を入力する。(入力例:
crack	0.0056, 0.00954,) 亀裂の存在範囲は最初の入力から
	最後の入力までとする。
	外表面側内部亀裂について、外表面と、内部亀裂上の外
number of position for outer	表面に最も近い点との距離のデータ点数を入力する。
embedded crack	(入力例:20)
	外表面側内部亀裂について、外表面と、内部亀裂上の外
position for outer embedded	表面に最も近い点との距離[m]を入力する。(入力例:
crack	0.0001, 0.00954,) 亀裂の存在範囲は最初の入力から
	最後の入力までとする。

表 5-6 main.csv の内容(RPV の寸法、中性子照射量、内部亀裂の位置)

項目名	内容	
number of depth ratio for	母材部内部亀裂の亀裂深さの数を入力する。(入力例:	
embedded crack in base metal	5)	
depth ratio for embedded	母材部内部亀裂の亀裂深さ 2a/t*[%]を入力する。	
crack in base metal	(入力例: 1, 2, 3, 4, 5)	
number of depth ratio for	溶接部内部亀裂の亀裂深さの数を入力する。(入力例:	
embedded crack in weld metal	23)	
depth ratio for embedded	溶接部内部亀裂の亀裂深さ 2a/t <sup>※</sup> [%]を入力する。	
crack in weld metal	(入力例:1,2,,22,23)	
	内表面亀裂の亀裂深さ a[m]を入力する。	
depth for innersurface crack	(入力例: 0.0065)	
	外表面亀裂の亀裂深さ a[m]を入力する。	
depth for outersurface crack	(入力例: 0.0065)	
number of aspect ratio for	母材部内部亀裂のアスペクト比の数を入力する。	
embedded crack in base metal	(入力例:11)	
aspect ratio for embedded	母材部内部亀裂のアスペクト比 c/a[-]を入力する。	
crack in base metal	(入力例: 1.125, 1.375,, 20)	
number of aspect ratio for	溶接部内部亀裂のアスペクト比の数を入力する。	
embedded crack in weld metal	(入力例:11)	
aspect ratio for embedded	溶接部内部亀裂のアスペクト比 c/a[-]を入力する。	
crack in weld metal	(入力例: 1.125, 1.375,, 20)	
number of aspect ratio for	内表面亀裂のアスペクト比の数を入力する。(入力例:	
innersurface crack	4)	
aspect ratio for innersurface	内表面亀裂のアスペクト比 2c/a[-]を入力する。	
crack	(入力例:2,6,10,100)	
number of aspect ratio for	外表面亀裂のアスペクト比の数を入力する。(入力例:	
outersurface crack	4)	
aspect ratio for outersurface	外表面亀裂のアスペクト比 2c/a[-]を入力する。	
crack	(入力例: 2, 6, 10, 100)	

表 5-7 main.csvの内容(亀裂寸法に係る項目)

\*t:クラッド厚さを含む板厚

項目名	内容		
number of transients	過渡事象の数を入力する。(入力例:13)		
	過渡事象の名称を入力する。(入力例:		
name of transients	ITRAN=057_ISEQ=126, ···)		
number of transient frequency	1 個の RPV で考慮する過渡事象発生頻度の不確かさの組		
combinations	合せ数を入力する <sup>※</sup> 。(入力例: 10)		
end of main.csv	これ以降に記述した内容は読み込まれない。		

表 5-8 main.csvの内容(過渡事象に係る項目)

\*\*効率的に破損頻度の分布を評価するため、一つの RPV で得られた破損確率に対して複数の過渡事象の発生頻度の組合せを掛けて効率的に FCI 及び TWCF の分布を評価している。



図 5-6 main.csv の例

# 5.2.2.2 standard.ini (FileGroupA フォルダ内)

standard.ini ファイルは、PASCAL-Manager が PASCAL-RV の入力ファイルを作成する際のコピ ー元となるファイルである。PASCAL-RV の入力ファイルを作成する際、PASCAL-Manager によ り自動的に設定される条件以外の条件はstandard.iniファイルに記載された条件がそのまま用いら れる。standard.iniファイルには、母材部及び溶接部、内部亀裂及び表面亀裂、軸方向亀裂及び周 方向亀裂の 8 通りの亀裂種類と板厚内の存在位置 2 通りの合計 16 通りの亀裂種類について、基 本的な pasn ファイルの内容(亀裂寸法、サンプル数、過渡事象に係る条件、中性子照射量及び 内部亀裂の存在位置、無限長亀裂の応力拡大係数以外の項目)を PASCAL-RV の入力データと同 様の形式で記載する。その記載内容が、16 通りある亀裂種類のいずれに対応するかを、表 5-9 に 示す文字列をアンダーバー"\_"で結合させて表現する(設定例を図 5-7 に示す)。例えば、 base\_surf\_cire\_inner と記載すると、次の行から#END が現れるまでは母材部周方向内表面亀裂の pasn ファイルを作成する際に用いる内容となる。standard.ini に記載した内容のうち、各 pasn フ ァイルに複製しない項目を表 5-10 に示す。

PASCAL-Manager が PASCAL-RV の入力ファイルを作成する際には、計算速度向上のため、亀 裂進展計算で使用する全ての深さの無限長亀裂に対する *K*<sub>I</sub>を予め計算し、#SIFDT として入力カ ードに記載する。ここで *K*<sub>I</sub>の計算に用いられる無限長亀裂の応力拡大係数評価法は、standard.ini で指定した評価法が用いられる。また、作成される入力ファイルの無限長亀裂の応力拡大係数評 価法のフラグは、standard.ini で入力していたフラグ番号から、ユーザー入力の値を使用すること を意味する 99 へと書き換えられる。

亀裂種類の項目	文字列
	母材部:base
母材部及び溶接部	溶接部:weld
中部を利力マッキナを利	内部亀裂:embe
内部亀裂及び表面亀裂	表面亀裂: surf
杜士士在到卫士士中在到	軸方向亀裂:axial
軸万回亀裂及び周万回亀裂	周方向亀裂:circ
在三十十十年	内表面側:inner
<b></b>	外表面側:outer

表 5-9 亀裂種類を示す文字列

```
base embe axial inner
#TITLE
base_EC_axial_f10
#FLAG
 1 1 1 1 0 1 0 1 1 2
 0 1 31 1 20 20 0 47 71 31
 1 2 16 16 12 0 1 1 0
 0 1 0 0 1 112 0 0 111 0
 1 0
                                                     内表面側母材
#VESSEL
 0.2055 \quad 1.9945 \quad 0.5 \quad 9.449 \quad 0.0055
                                                      部内部軸方向
   288
         0
                                                      亀裂に関する
#MATRAL
 2.10e5
         0.3 -3.90
                    9.4
                          8.9
                                                      条件
   5
       0.0
             0.0 0.16 0.01
  0.11
                   0.02 0.51
        0.21
             0.61
  0.71
       0.010 0.0014 0.003 0.017
  0.20
       0.02
             0.14 0.26
                        0.15
:
: (省略)
#END
base_embe_circ_inner
#TITLE
base_EC_circ_f10
#FLAG
 1 1 1 1 0 1 0 1 1 2
 0 1 31 0 20 20 0 37 71 31
 1 2 16 16 12 0 1 1 0
                                                     内表面側母材
 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 112 \ 0 \ 0 \ 111 \ 0
 1 0
                                                     部内部周方向
#VESSEL
                                                     亀裂に関する
 0.2055 1.9945
                0.5 9.449 0.0055
   288
         0
                                                     条件
÷
: (省略)
#END
```

図 5-7 standard.iniの設定例

カード名称 PASCAL-Manager での処理		ユーザーの注意点
		PASCAL-Manager の実行時に無限長亀裂の
	No.18 の入力カード(無限長亀	入力カードのチェックをパスするため、ユ
#FLAG	裂の応力拡大係数)の番号を 99	ーザーは standard.ini に無限長亀裂の適切な
	に書き換える。	応力拡大係数評価法のフラグを記載する必
		要がある。
		PASCAL-Manager の実行時に記載内容は上
#INDEF	main.csv で設定した亀裂位置が	書きされるが、入力カードのチェックをパ
(内部亀裂のみ)	記載される。	スするため、内部亀裂については当カード
		を記載しておく必要がある。
		PASCAL-Manager の実行時に記載内容は上
#INCRK	main.csv で設定した亀裂位置が	書きされるが、入力カードのチェックをパ
(内部亀裂のみ)	記載される。	スするため、内部亀裂については当カード
		を記載しておく必要がある。
		PASCAL-Manager の実行時に記載内容は上
	main.csv で設定した亀裂深さ及	書きされるが、入力カードのチェックをパ
#CRKFIX	び長さが記載される。	スするため、表面亀裂については当カード
		を記載しておく必要がある。
	main.csv で設定した中性子照射	standard.ini に#CONT カードを記載してもよ
#CONT	量及び内部亀裂の存在位置が記	いが、記載内容は上書きされる。
	載される。	
HTMAREDAT	main.csv で設定したサンプル数	standard.ini に# TWCFEPST カードを記載し
#1WCFEPS1	が記載される。	てもよいが、記載内容は上書きされる。
	過渡事象に係る txt ファイルから	standard.ini に#TRANS カードを記載しても
#IKANS	コピーされた値が記載される。	よいが、記載内容は上書きされる。
	過渡事象に係る txt ファイルから	standard.ini に#TEMP カードを記載してもよ
#TEMP	コピーされた値が記載される。	いが、記載内容は上書きされる。
	過渡事象に係る txt ファイルから	standard.ini に#PRESPT カードを記載しても
#PRESP1	コピーされた値が記載される。	よいが、記載内容は上書きされる。
	過渡事象に係る txt ファイルから	standard.ini に#STRS3D カードを記載しても
#STRS3D	コピーされた値が記載される。	よいが、記載内容は上書きされる。
	機能 1 で計算した無限長亀裂の	standard.ini に#SIFDT カードを記載してもよ
#SIFD1	応力拡大係数が記載される。	いが、記載内容は上書きされる。
	外表面側亀裂については内表面	外表面側亀裂について standard.ini に
#RESSTR	側亀裂の内容を正として変換さ	#RESSTR カードを記載してもよいが、記載
	れた内容が記載される。	内容は上書きされる。

表 5-10 standard.iniのうち、そのままコピーされないカード

# 5.2.2.3 溶接残留応力に係る条件ファイル(FileGroupAフォルダ内)

母材部及び溶接金属部の溶接残留応力(WRS: Welding Residual Stress)に係る条件を記載する ファイルである。溶接残留応力の処理方法を表 5-11 に示す。内表面側亀裂については、 standard.ini に#RESSTR の記載があればそれを用いることとし、記載がない場合には表 5-12 に示 す csv ファイルを読みこんで使用する。外表面側亀裂については、内表面側亀裂で用いる #RESSTR の内容を外表面を基準とした座標に変換して用いる。

さらに、図 5-8 に溶接残留応力に係る条件を記載する csv ファイルの形式を示す。灰色で示し た内容は読み込まれないが入力する必要がある。B15~E15 は読み込まれず B3~E3 の値が用い られる。1 行目と 2 行目に、残留応力分布を指定する時刻(温度)と空間座標点の数を記載する。 図 5-8 では時間点を 4 点、空間座標点を 11 点としている。時間点は過渡事象の時間を考慮して設 定する必要があり、空間座標点は板厚方向の分割の細かさに応じて変更する。3 行目からは軸方 向応力に作用する周方向の残留応力を、時間について列方向、空間座標について行方向に記載す る。時間点の単位は考慮する過渡事象の開始時刻を 0[分]として[分]単位で指定する。空間座標は 内表面からの距離を板厚で割った無次元量である。軸方向亀裂用の記載が終わったら、同様に周 方向亀裂に作用する軸方向の残留応力を記載する。csv ファイルには容器内表面を原点とする座 標での分布を記載し、前述のように外表面側亀裂の解析に用いるための変換は PASCAL-Manager で行う。特別な目的が無い限り、時間点ごとに残留応力の値を変更する必要はない。

使用上の注意として standard.ini に外表面側亀裂の#RESSTR を記載しても使用されない。また、 PASCAL-RV では溶接残留応力を考慮しない解析も可能であるが、standard.ini に内表面側亀裂の #RESSTR がなく、かつ csv ファイルもない場合にはエラーとなる。つまり、解析において残留応 力を使用しない場合でも、standard.ini に内表面亀裂の#RESSTR を記載するか、csv ファイルを用 意する必要がある。

対象/	内表面側亀裂のみを考慮する	外表面側亀裂のみを考慮する	両方の亀裂を考慮する
解析条件	(crack population option=1)	(crack population option=2)	(crack population option=3)
内表面側	standard.ini にて#RESSTR の記載が		standard.ini にて#RESSTR の記載が
の亀裂	あればそれを使用し、なければ表		あればそれを使用し、なければ表
	5-12 に示す csv ファイルを読み込	—	5-12 に示す csv ファイルを読み込
	んで使用する。		んで使用する。
		standard.ini にて内表面側亀裂向け	
		の#RESSTR の記載があれば、それ	まず内表面側亀裂の処理を行う。
外表面側		を外表面を原点として変換して使	内表面側亀裂の処理にて使用した
亀裂	—	用し、なければ表 5-12 に示す csv	データを外表面を原点として返還
		ファイルを読み込んで外表面を原	させて使用する。
		点として変換させて使用する。	

表 5-11 溶接残留応力の設定方法

部材	ファイルパス
母材部	FileGroupA\WRS\wrs for base crack from inner.csv
溶接部	FileGroupA\WRS\wrs_for_weld_crack_from_inner.csv

表 5-12 溶接残留応力の設定する際のファイル名

	А	В	С	D	E	F
1	トランジェント時刻分割数	4				
2	容器肉厚方向深さ分割数	11				
3	軸方向亀裂に作用する周方向離散点応力	0	5	10	100	
4	0	応力値	応力値	応力値	応力値	
5	0.1	応力値	応力値	応力値	応力値	
6	0.2	応力値	応力値	応力値	応力値	
7	0.3	応力値	応力値	応力値	応力値	
8	0.4	応力値	応力値	応力値	応力値	
9	0.5	応力値	応力値	応力値	応力値	
10	0.6	応力値	応力値	応力値	応力値	
11	0.7	応力値	応力値	応力値	応力値	
12	0.8	応力値	応力値	応力値	応力値	
13	0.9	応力値	応力値	応力値	応力値	
14	1	応力値	応力値	応力値	応力値	
15	周方向亀裂に作用する軸方向離散点応力	0	5	10	100	
16	0	応力値	応力値	応力値	応力値	
17	0.1	応力値	応力値	応力値	応力値	
18	0.2	応力値	応力値	応力値	応力値	
19	0.3	応力値	応力値	応力値	応力値	
20	0.4	応力値	応力値	応力値	応力値	
21	0.5	応力値	応力値	応力値	応力値	
22	0.6	応力値	応力値	応力値	応力値	
23	0.7	応力値	応力値	応力値	応力値	
24	0.8	応力値	応力値	応力値	応力値	
25	0.9	応力値	応力値	応力値	応力値	
26	1	応力値	応力値	応力値	応力値	
27						

図 5-8 残留応力を指定する csv ファイルの形式

#### 5.2.2.4 過渡事象に係る条件ファイル(FileGroupA フォルダ内)

熱伝導・熱応力解析コードを用いて得られた過渡事象に係る条件を記載するファイルである。 本ファイルには#TRANS、#TEMP、#PRESPT、#STRS3Dカードが含まれる必要があり、これら4 つのカードの後に#END を記載する必要がある。これら以外のカードが含まれていても問題ない が、解析には使用されない。ここで設定されたカードが pasn ファイルにコピーされる。 PrePASCAL を用いた解析により得られるファイルの内容をそのまま用いることができる。その 場合、ファイル名は main.csv でユーザーが定義した過渡事象の名称と同一とし、拡張子は.txt と する必要がある。ただし、外表面側亀裂を解析する場合には、容器外表面を原点として内表面に 向かう方向を正とする座標軸を用いて温度や応力の分布を記載する必要がある。このような外表 面側亀裂用のファイルについては、過渡事象の名称に加えて、「OD」をファイル名の末尾に追 加する。これらの txt ファイルは、FileGroupA フォルダ内の TransientCondition フォルダに格納さ れていなければならない。例えば、「tran01」という過渡事象について、内表面側及び外表面側 亀裂を対象に解析を行う場合には、内表面からの距離に応じた温度及び応力分布を記載した 「tran01.txt」と、外表面からの距離に応じた温度及び応力分布を記載した「tran01 OD.txt」を TransientCondition フォルダに格納する必要がある。なお、main.csv で設定された過渡事象のみが 解析に適用されるため、TransientCondition フォルダ内には不要なファイルが含まれていても問題 ない。

main.csvの crack population option で外表面側亀裂を対象とした解析を実施する場合に、過渡事象の名称に加えて「\_OD」がファイル名の末尾についているファイルが存在しない場合には、 PASCAL-Manager にて pasn ファイルを生成する前にこれらの「\_OD」なしのファイルから「\_OD」 付きの過渡事象に係る条件ファイルが FileGroupB フォルダ内に生成される。

## 5.2.2.5 subregion.csv (FileGroupB フォルダ内)

RPV 内表面における中性子照射量の分布及び母材と溶接金属の材料を設定するためのファイルである。図 5-9 に設定例を示す。以下、図 5-9 中の数字を用いて説明する。

まず、1行目及び2行目でサブリージョンの列数と行数をそれぞれ設定する。図 5-9 では RPV を 10 行 92 列のサブリージョンに設定している。次に、"start size definition"が記載されると、その次の行から11行分がサブリージョンの寸法を定義する領域となる。図 5-9 の 4 行目の数字はサブリージョンの周方向長さ、A 列の数字はサブリージョンの軸方向長さ(高さ)を表している。 これらの数字は相対値であり、実際の寸法は main.csv で指定した RPV の高さや内半径を元に算出される。各サブリージョンは 1:周方向溶接部、2:軸方向溶接部、3:母材部のいずれかに分類されるため、該当する数字を記載する必要がある。ただし、1、2、3 ではなく 0 を指定することで、そのサブリージョンの寄与を含めない TWCF の評価を行うことができる。図 5-9 は、B10 セルから CO10 セルは周方向溶接部として設定された例である。

また、"start fluence map"が記載されると、サブリージョンごとの中性子照射量の定義を記載する領域が設定される。次の行の"maximum fluence"の隣の列に、照射量の基準となる値を記載する。単位は[10<sup>19</sup>n/cm<sup>2</sup>]である。その次の行以降に各サブリージョンの中性子照射量を基準値で割

った値を記載する。本 csv ファイルの上部にある寸法の定義との対応を見やすくするため、10行 92 列のサブリージョンは B 列以降の列に対応することに注意されたい。A 列に記載した内容は 無視される。

さらに、"start inspection map"が記載されると、サブリージョンごとの非破壊検査の実施回数を 記載する領域が設定される。次の行以降に各サブリージョンの検査回数を記載する。中性子照射 量の値と同様に、10行92列のサブリージョンはB列以降の列に対応することに注意されたい。 A列に記載した内容は無視される。非破壊検査の考慮方法は6.33節を参照されたい。

PASCAL-Manager では、PASCAL-RV の解析結果を補間して各サブリージョンにおける単一亀 裂の CPI 及び CPF を算出する。図 5-10 に示すとおり、中性子照射量と CPI 及び CPF を両対数グ ラフ上にプロットしたとき、そのデータ点を線分で結んで補間する。つまり、両対数補間により 各サブリージョンの CPI 及び CPF が算出される。PASCAL-RV により算出された CPI と CPF の値 が 0 の場合には、main.csv の"zero value in TWCF calculation"で設定した値が適用される(5.2.2.1 を参照のこと)。

	Α	В	С	D	E	F	G	н	1	J	К	L	М	N		CN	CO	С
1	列数	92																
2	行数	10																
3	start size o	definition																
4		141	141	141	141	141	141	141	141	141	141	141	35	141		141	141	
5	440	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3		3	3	
6	440	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3		3	3	
7	440	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3		3	3	
8	440	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3		3	3	
9	440	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3		3	3	
10	32	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	
11	440	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		3	3	
12	440	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		3	3	
13	440	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		3	3	
14	440	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		3	3	
15															中			
16	start fluen	ce map																
17	maximum	7													略			
18		0.399	0.336	0.231	0.1722	0.1344	0.1302	0.147	0.1638	0.1512	0.1302	0.126	0.1239	0.1218	$\smile$	0.3906	0.4074	
19		0.665	0.56	0.385	0.287	0.224	0.217	0.245	0.273	0.252	0.217	0.21	0.2065	0.203		0.651	0.679	
20		0.8075	0.68	0.4675	0.3485	0.272	0.2635	0.2975	0.3315	0.306	0.2635	0.255	0.2508	0.2465		0.7905	0.8245	
21		0.8835	0.744	0.5115	0.3813	0.2976	0.2883	0.3255	0.3627	0.3348	0.2883	0.279	0.2744	0.2697		0.8649	0.9021	
22		0.9025	0.76	0.5225	0.3895	0.304	0.2945	0.3325	0.3705	0.342	0.2945	0.285	0.2803	0.2755		0.8835	0.9215	
23		0.9025	0.76	0.5225	0.3895	0.304	0.2945	0.3325	0.3705	0.342	0.2945	0.285	0.2803	0.2755		0.8835	0.9215	
24		0.9025	0.76	0.5225	0.3895	0.304	0.2945	0.3325	0.3705	0.342	0.2945	0.285	0.2803	0.2755		0.8835	0.9215	
25		0.874	0.736	0.506	0.3772	0.2944	0.2852	0.322	0.3588	0.3312	0.2852	0.276	0.2714	0.2668		0.8556	0.8924	
26		0.7125	0.6	0.4125	0.3075	0.24	0.2325	0.2625	0.2925	0.27	0.2325	0.225	0.2213	0.2175		0.6975	0.7275	
27		0.38	0.32	0.22	0.164	0.128	0.124	0.14	0.156	0.144	0.124	0.12	0.118	0.116		0.372	0.388	
28																		
29	start inspe	ection map																
30		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	
31		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	
32		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	
33		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	
34		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	
35		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	
36		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	
37		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	
38		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	
39		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	
40																		

図 5-9 subregion.csv の設定例



図 5-10 亀裂進展(貫通)確率の両対数補間の例

# 5.2.2.6 transient.csv (FileGroupB フォルダ内)

過渡事象の発生頻度を設定するファイルである。図 5-11 に示すように、過渡事象ごとに発生 頻度の分布を離散的に入力する。まず、main.csv で設定した過渡事象の名称を記載し、隣の列に 離散化した発生頻度の数を記載する。次の行以降に発生頻度[回/炉年]とその発生頻度の値の相対 確率(重み)を記載する。図 5-11 では、"ITRAN=001\_ISEQ=002"という名称の過渡事象の発生頻 度が 20 個の重みつき離散値として与えられている。B2 セルから B21 セルの値の和は 100 でなけ ればならない。なお、各過渡事象の頻度の値をサンプリングして TWCF を算出する際には、例 えば A2 セルの 1.26×10<sup>-7</sup>[回/炉年]はB2 セルに設定された 0.5%の確率でサンプリングされること になる。また、図 5-11 の 22 行目以降に示すように、main.csv で指定した全ての過渡事象につい て、同様の形式で発生頻度を記載する必要がある。

	A	В
1	ITRAN=001_ISEQ=002	20
2	1.26E-07	0.5
3	2.64E-07	0.5
4	7.02E-07	1.5
5	1.39E-06	2.5
6	4.30E-06	5
7	9.92E-06	10
8	1.26E-05	5
9	1.55E-05	5
10	2.12E-05	10
11	2.88E-05	10
12	1.21E-04	10
13	2.12E-04	10
14	2.57E-04	5
15	2.98E-04	5
16	3.85E-04	10
17	4.30E-04	5
18	4.51E-04	2.5
19	4.73E-04	1.5
20	4.91E-04	0.5
21	4.99E-04	0.5
22	ITRAN=002_ISEQ=003	20
23	9.99E-08	0.5
24	2.10E-07	0.5

図 5-11 過渡事象発生頻度の設定例

#### 5.2.2.7 crack\_dist\_embe\_base.csv 等の 8 つの csv ファイル (FileGroupB フォルダ内)

亀裂深さとアスペクト比別の亀裂密度を設定するファイルである。表 5-13 に csv ファイルの 名称と各 csv ファイルで亀裂分布を設定する亀裂との対応を示す。図 5-12 に、内表面側母材部内 部亀裂に関する深さ・アスペクト比別の亀裂密度の設定例を示す。A 列は亀裂深さを表し、亀裂 深さ(表面亀裂では半深さa、内部亀裂では全深さ2a)が板厚の1、2、3、…%と定義される。B 列は、A 列で定義された亀裂深さに対する亀裂の密度であり、母材部内部亀裂に対しては体積密 度[個/ft<sup>3</sup>]、溶接部内部亀裂と表面亀裂に対しては面密度[個/ft<sup>2</sup>]を示す。本ファイルに記載する内 容は、例えば米国の亀裂分布作成コードである VFLAW などを用いて得られたデータを利用する ことを想定しているため、単位は米国のものであることに注意されたい。C列からM列はアスペ クト比別の密度の分布であり、同一深さの亀裂における各アスペクト比の亀裂の割合を百分率で 表している。なお、ここで示される亀裂アスペクト比の数及び値は、main.csv で指定されている

(5.2.2.1)。図 5-12 において亀裂深さ 2a が板厚の 2%である亀裂の密度は 6.843 [個/ft<sup>3</sup>]と指定され ている(B2 セル)。このような深さの亀裂のうち、main.csv で設定された 5 番目のアスペクト比 を持つ亀裂が占める割合は 0.239859%であると定義されている(G2 セル)。このように、1 列目 から 100 列目までで特定の RPV 内の母材部内部亀裂の密度をひとつ定義できる。さらに、101 列 以降に同様の形式で数値を設定することにより、亀裂密度の不確実さを考慮して TWCF の分布 を算出することができる。算出する TWCF の数よりも亀裂密度のデータセット数が少ない場合、 亀裂密度のデータセットを繰り返し用いる。他の 7 つの csv ファイルについても設定方法は同様 である。なお、表面亀裂については、main.csv で設定される亀裂深さ[m]によらず、板厚比が 3% の亀裂の密度分布として入力した値を用いて亀裂個数が計算される。

PASCAL-Manager では、これら 8 つの csv ファイルを読み込んで亀裂個数を計算する。亀裂の 方向の処理について表 5-14 に示す。

csv ファイル名	対象
crack dist embe base	内表面側母材部内部亀裂
crack_dist_embe_base_OD	外表面側母材部内部亀裂
crack dist embe weld	内表面側溶接部内部亀裂
crack dist embe weld OD	外表面側溶接部内部亀裂
crack_dist_axial_surf	内表面の軸方向亀裂
crack dist axial surf OD	外表面の軸方向亀裂
crack_dist_circ_surf	内表面の周方向亀裂
crack dist circ surf OD	外表面の周方向亀裂

表 5-13 亀裂分布を設定する csv ファイル

	А	В	С	D	E	F	G	Н	I	J	K	L	М
1	1	16.147	44.29342	21.80198	16.39035	6.33648	1.834844	1.368515	1.158634	1.835771	1.341298	1.978202	1.66051
2	2	6.843	87.23792	10.15092	1.539539	0.391078	0.239859	0.154287	0.09956	0.106353	0.045219	0.030427	0.00484
3	3	0.49942	90.3524	3.360927	1.592423	2.01987	1.15073	0.655593	0.373504	0.334024	0.108418	0.048974	0.003127
4	4	0.034167	49.3408	9.256419	13.47892	15.22102	6.924192	3.149884	1.432913	0.948377	0.19626	0.050215	0.000998
5	5	0.014967	28.86338	15.92083	21.93773	21.19024	7.697076	2.795859	1.015559	0.502882	0.066351	0.010021	0.000064
6	6	0	99.99999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	7	0	99.99999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	8	0	99.99999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(中略)												
98	98	0	99.99999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
99	99	0	99.99999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	100	0	99.99999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
101	1	12.383	33.14771	20.31201	20.30348	11.57894	2.958586	1.617054	1.283064	2.068461	1.580115	2.512081	2.638515
102	2	8.0936	74.47315	16.94021	5.227313	1.287006	0.694464	0.459838	0.305574	0.339155	0.151088	0.105797	0.016395
103	3	2.0786	90.57991	7.756664	1.113308	0.387962	0.113975	0.033874	0.010067	0.003881	0.000343	0.000033	0
104	4	0.22051	91.08723	4.791653	2.393852	1.411325	0.258154	0.047223	0.008638	0.001869	0.000063	0.000002	0
105	5	0.013076	48.42228	21.77139	19.80548	8.874865	0.999216	0.112501	0.012666	0.001587	0.00002	0	0
106	6	0	99.99999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
107	7	0	99.99999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
108	8	0	99.99999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図 5-12 深さ・アスペクト比別の亀裂密度の設定例(内表面側母材部内部亀裂)

内部/表面	母材部/溶接部	方向	備考				
		周方向	軸方向亀裂と周方向亀裂の割合は等しく、各亀				
			裂の密度は csv ファイルの密度の半分とする。内				
	<b></b>	軸方向	表面側内部亀裂と外表面側内部亀裂の密度はそ				
			れぞれ指定する。				
内立			周方向溶接部には周方向亀裂のみが存在すると				
トノヨウ		周方向	する。内表面側内部亀裂と外表面に近い内部亀				
	冰穴+	裂の密度はそれぞれ指定す					
	俗货币		軸方向溶接部には軸方向亀裂のみが存在すると				
		軸方向	する。内表面側内部亀裂と外表面に近い内部亀				
			裂の密度はそれぞれ指定する。				
	四十十立四	周方向					
中丰工	中心 即	軸方向					
內衣囬	沙谷土寺 立口	周方向					
	俗货部	軸方向	表面亀裂は内表面/外表面、周方向/軸方向の4つ				
		周方向	の亀裂種類ごとに亀裂密度を指定する。				
	母材部	軸方向					
外衣囬	지수 수도	周方向					
	浴拔部	軸方向					

表 5-14 亀裂の位置と方向の分類

# 5.2.2.8 POD.csv ファイル (FileGroupB フォルダ内)

非破壊検査による亀裂検出性である POD 評価モデルを設定するファイルである。図 5-13 に非 破壊検査の設定例を示す。検査については、内部亀裂に対するものと表面亀裂に対するものを個 別に設定する。設定例では1行目から9行目までが内部亀裂、10行目から16行目までが表面亀 裂に対する非破壊検査の設定である。B2のセルは、内部亀裂の亀裂深さのデータ点数、B3のセ ルは内部亀裂の亀裂位置比に対するデータ点数を入力する。4 行目から9 行目には、亀裂深さ及 び亀裂位置比に対する POD をテーブル形式で入力する。続いて、B11のセルには表面亀裂の亀 裂深さのデータ点数を入力し、内部亀裂と同様に12行目から16行目に亀裂深さに対する POD をテーブル形式で入力する。20行目から22行目は、内部亀裂が板厚内にどのように分布してい るかを設定する。B21のセルに区間数を入力し、各区間の亀裂について相対確率を入力する。設 定例では内表面側から外表面側までに一応に分布している設定となっている。

	А	В	С	D	E	F	G	Н
1	POD for er	nbedded c	rack					
2	number of	5	a[mm]のラ	「一夕点数				
3	number of	3	x/t[-]のデ	ータ点数				
4		0	0.5	1				
5	2.19	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00				
6	4.38	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00				
7	6.57	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00				
8	8.76	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00				
9	300	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00				
10	POD for su	urface crac	k					
11	number of	5	a[mm]のラ	「一夕点数				
12	2.19	0.00E+00						
13	4.38	0.00E+00						
14	6.57	0.00E+00						
15	8.76	0.00E+00						
16	10.95	0.00E+00						
17								
18								
19								
20	position di	stribution	for embed	ded crack				
21	number of	1						
22	0	1	100	x/tの最小(	直、最大値、	相対確率	を記入	
23								
24								

図 5-13 非破壊検査の設定例

## 5.2.3 解析の実行

#### 5.2.3.1 解析の実行方法

PASCAL-Manager には機能 1、2、3 があり、各機能を単独で使用することができる。機能 1 で は各亀裂や過渡事象に対応した pasn ファイルを作成する。機能 2 では、pasn ファイルを用いて PASCAL-RVを実行し、亀裂毎の CPI、CPFを算出する。機能 3 では、亀裂毎の CPI、CPFを基に 亀裂分布や過渡の発生頻度等を考慮した上で TWCFを算出する。機能 1、2、3 を全て用いるとき の実行方法について述べる。図 5-14 に解析用フォルダ内の構造を示す。PASCAL-Manager の実行 ファイルと PASCAL-RV の実行ファイルは、同じフォルダ(以下、解析用フォルダ)に格納され ている必要がある。解析用フォルダ内に FileGroupA フォルダと FileGroupB フォルダを作成する。 FileGroupA フォルダには main.csv と standard.ini を格納し、さらに TransientCondition フォルダを 作成する。TransientCondition フォルダ内には、各過渡事象に関する条件を記載した txt ファイル を格納する。これらの txt ファイルの名前は main.csv に記載した過渡事象の名前と一致させてお く必要がある。さらに、必要に応じて WRS フォルダを作成し、溶接残留応力に関する条件を記 載したファイルを格納する。FileGroupB フォルダには機能 3 で使用する csv ファイルを格納する。 これらの csv ファイルの名称については表 5-4 や図 5-14 を参照されたい。以上のように設定した 状態で解析用フォルダ内の PASCAL-Manager.exe を実行すると、解析が行われ、その結果は解析 フォルダ内に作成される TWCF フォルダに csv ファイルなどの形式で出力される。

次に、機能1、2、3を個別に使用するときの実行方法を述べる。図 5-15 から図 5-17 に、それ ぞれの機能を使用するときに必要となるファイルを丸印付きで示す。前述のように機能1、2、3 を全て使用する場合に必要となるファイルに加えて、機能2を使用するときに必要となるファイ  ル (pasnFolder) は機能 1 で、機能 3 を使用するときに必要となるファイル (ConditionalProbability フォルダ) は機能 2 でそれぞれ作成される。ここで同名のファイルが存 在していた場合には上書きされる。PASCAL-Manager は、起動時に main.csv をはじめとする各種 ファイルを読み込むため、引数を指定する必要はない。機能 2 や機能 3 を個別に使用する場合に は、使用する機能及び必要となるフォルダ名を main.csv 内で指定する。出力ファイルについては 5.2.4 にて述べる。

実行モジュール及び各フォルダの概要を以下に示す。

- PASCAL-Manager 実行モジュール(必須)
   : PASCAL-Manager.exe
- PASCAL-RV 実行モジュール(機能1及び機能2を使用する場合に必要)
   : PASCAL-RV.exe
- ➢ FileGroupA (必須)

主に PASCAL-RV の入力ファイル (pasn ファイル) の作成に必要となるファイル群 を収めたフォルダ

- ◆ 過渡事象に関するファイル
   : LBLOCA.txt、LBLOCA OD.txt など
- ◆ PASCAL-Managerの制御に係るファイル : main.csv
- ◆ pasn ファイルの基本的な内容を記載したファイル
   : standard.ini
- ➢ FileGroupB(機能3を使用する場合に必要)

主に TWCF 算出処理で必要となるファイル群を収めたフォルダ

- ◆ サブリージョンの定義を記載したファイル
  - : subregion.csv
- ◆ 過渡事象の発生頻度を記載したファイル
  - : transient.csv
- ◆ 亀裂分布を記載したファイル : crack dist embe base.csv など
- ▶ pasnFolder(機能1を使用せずに機能2を使用する場合に必要)

PASCAL-RV の入力ファイル (pasn ファイル) 群を収めたフォルダ。PASCAL-Manager には PASCAL-RV の入力ファイルを作成する機能があるが、ユーザーが用意し た入力ファイル (pasn ファイル) を PASCAL-RV に入力することもできる。

➤ ConditionalProbability(機能2を使用せずに機能3を使用する場合に必要)

PASCAL-RV で計算した CPI 及び CPF の出力ファイル群を収めたフォルダ。 PASCAL-Manager には PASCAL-RV を用いて TWCF 算出に必要となる CPI 及び CPF を 計算する機能があるが、ユーザーが用意した CPI 及び CPF を記載したファイルを用い て FCI 及び TWCF を算出することもできる。



図 5-15 機能1を使用する際に必要なファイル







図 5-17 機能3を使用する際に必要なファイル

## 5.2.3.2 解析実行中の画面表示情報

PASCAL-Manager による解析の実行中は、コマンドプロンプト画面が表示され、解析の経過情報が表示される。特に機能2を使用している際には、進捗率[%]と経過時間、そこから予測される残り計算時間の目安が表示される。なお、個別に実行される PASCAL-RV のコマンドプロンプト画面は表示されない。図5-18 に PASCAL-Manager 解析実行中の画面表示例を示す。

	0
***************************************	****
**** A management tool to evaluate TWCF by using	*****
***** PFM Analysis of Structural Components in Aging LWR	****
***** (PASCAL-Manager)	****
**** Version 5.0	****
**** 2022. 4. 1	****
****	****
**** Japan Atomic Energy Agency	****
****	****
**** Coded by Mizuho Research & Technologies, Ltd.	****
***************************************	*****
標準的 pasn ファイルを読み込みます。	
\FileGroupA\WRS\wrs_for_base_crack_from_inner.csv を読み込みます。	
\FileGroupA\WRS\wrs_for_base_crack_from_inner.csv を読み込みました。	
\FileGroupA\WRS\wrs_for_weld_crack_from_inner.csvを読み込みます。	
\FileGroupA\WRS\wrs_for_weld_crack_from_inner.csvを読み込みました。	
標準的 pasn ファイルを読み込みました。	
過渡事象に関するファイルを読み込みます。	
過渡事象に関するファイルを読み込みました。	
全周及び軸方向に長い亀裂の応力拡大係数を計算します。	
全周及び軸方向に長い亀裂の応力拡大係数を計算しました。	
parent/child 関係を考慮するために RTNDT を計算します。	
RTNDT の値(確認用)	
fluence[10^19 n/cm^2],RTNDT(base)[deg.C],RTNDT(weld)[deg.C]	
0.5,14.0353,-30.5125	
parent/child 関係を考慮するために RINDT を計算しました。	
pasnノアイルを生成します。	
pasnファイルを生成しました。	
PASCAL を用いて条件付損傷確率を評価します。	
00.122%の pasn ファイルの処理か終了しました。	
経過時間は0日0時間0分28秒です。	
機能2の残り時間の目安は6時間35分です。	
00.243%の pasn ノアイルの処理か終了しました。	
経過時間は0日0時間0分54秒です。 機能2の時期は10日では1000です。	
機能2の残り時間の目安は6時間10分です。	

図 5-18 PASCAL-Managerの解析実行中の画面表示例

# 5.2.4 解析結果ファイル

PASCAL-Manager には 3 つの機能があり、ある機能を用いた解析の出力ファイルが別の機能の 入力ファイルとなることがある。PASCAL-Manager で出力するファイルを格納したフォルダを表 5-15 に示す。一部のフォルダは中間ファイルを格納するために使用され、PASCAL-Manager が正 常に終了した場合には中間ファイルは削除される。

フォルダ名称	作成す	使用す	内容
	つ機能	る機能	
			無限長亀裂の応力拡大係数の計算に用
tentative_workspace_SIF	機能1	機能1	いる中間ファイルであり、自動的に削
			除される。
pasnFolder	機能1	機能 2	PASCAL-RV の入力ファイル
	HAK AK O	HAK AL O	PASCAL-RV を用いた解析の中間ファ
tentative_workspace_計鼻時刻	機拒 2	機能 2	イルであり、自動的に削除される。
	HAR AR O	HAK AL O	PASCAL-RV で算出した CPI 及び CPF
ConditionalProbability_計鼻時刻	機拒 2	機能 3	をまとめたファイル
			算出した TWCF などをまとめたファイ
TWCF	機能 3	なし	12

表 5-15 PASCAL-Manager が出力するファイル及びフォルダ

### 5.2.4.1 pasnFolder フォルダ

本フォルダは PASCAL-Manager の機能1を使用すると生成される。フォルダの中には TWCFを 算出するために必要となる pasn ファイルが格納されている。本フォルダは PASCAL-Manager の 機能2で読み込まれる。機能1を使用せずに機能2を使用したい場合には、pasn ファイルを格納 したフォルダの名称を main.csv で指定する必要がある。

### 5.2.4.2 ConditionalProbability フォルダ

本フォルダは PASCAL-Manager の機能 2 を使用すると生成される。本フォルダ内の csv ファイルの1列目には CPI、2列目には CPF が記載されている。csv ファイルの名前は PASCAL-RV に入力した pasn ファイルと同一である。機能 2 を使用せずに機能 3 を使用したい場合には、 ConditionalProbability フォルダを main.csv で指定する必要がある

# 5.2.4.3 TWCF フォルダ

本フォルダは PASCAL-Manager の機能 3 を使用すると生成される。本フォルダには PASCAL-RVの結果を post 処理して得られる結果が記載された複数の csv ファイルが格納されている。

#### 5.2.4.4 detail.csv

TWCF フォルダ内に格納される本ファイルには、解析により得られる結果の詳細が記録されて おり、ユーザーが解析結果の詳細を確認したり、過渡事象や亀裂種類の寄与等を分析したりする 際に有用である。一例を図 5-19 に示す。まず、認識論的不確実さを考慮して算出された FCI 及 び TWCF の代表的なパーセンタイル値が記録されており、0.1、1、5、50、95、99、99.9 パーセ ンタイル値を確認することができる。次に、過渡事象及び亀裂種類別の FCI 及び TWCF の平均 値、過渡事象及びサブリージョン別の FCI 及び TWCF の平均値が記録されている。

	A	В	С	D	E	F	G	н	I	J	К	L	М	N	0	Р	Q	R
1		0.1percent	1percentile	5percentile	50percenti	95percenti	99percenti	99.9percer	average									
2	FCI	0	0	0	3.95E-14	4.77E-07	3.39E-06	1.90E-05	1.81E-07									
3	TWCF	0	0	0	2.47E-16	2.39E-09	4.57E-08	2.64E-06	6.98E-09									
4																		
5	mean of F(	n.																
6	inoun of the			ITRAN=05	ITRAN=008	ITRAN=03	ITRAN=04	ITRAN=02	ITRAN=06	ITRAN=010	ITRAN=00	ITRAN=00	ITRAN=03	ITRAN=03	ITRAN=054	ITRAN=060	total	
7	hasa	ombo	avial	6 05E-11	2065-00	2 56E-11	1 62E-10	0 5/E-12	1.06E-11	1 495-10	7 15E-11	1 595-19	A 27E-12	0	4 10E-11	1 20E-11	2.62E-00	
0	base	ombo	aira	2 25E-14	2.51E-09	2.27E-11	1.02E 10	0.74E-12	1.00L 11	1.402 10	0.42E-11	7.53E-20	4.370 13	2475-10	1.70E-12	4 70E-12	2.02E 03	
0	Dase	enibe	GILC	2.000 14	2.512 03	2.371 11	1.402 10	3.74L 13	1.00L 12	0	3.42L 11	7.552 20	4.70L 13	2.471 10	1.752 13	4.702 13	J.02L 03	
3	Dase	suri	axiai	4 175 00	1.045.07	1 475 00	1 575 00	0.005 10	4 705 10	0 505 10	E 10E 00	0.445.00	0.005 11	1 505 00	1.005 11	4 405 10	1 705 07	
11	Dase	surt	circ	4.17E-09	1.24E-07	1.4/E-09	1.57E-08	2.38E-10	4.78E-10	3.50E-13	5.16E-09	9.44E-09	2.83E-11	1.50E-08	1.80E-11	4.42E-10	1.76E-07	
11	weid	embe	axiai	0	7015 10	4.50E-10	5015 14	3.19E-14	7.41E-17	0.22E-17	0.33E-23	0	4 705 04	0	7.37E-10	1.52E-13	1.85E-13	
12	weld	embe	circ	4.69E-19	7.21E-13	1.2/E-14	5.61E-14	6.35E-17	1.3/E-1/	0	3.36E-14	0	4./3E-24	1.1/E-13	7.24E-18	3.11E-16	9.41E-13	
13	weld	surf	axial	0	0	0 705 11	0	0 505 40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
14	weld	surf	CIFC	5.55E-14	4.48E-12	8.78E-14	7.13E-13	8.52E-16	8.80E-19	0	1.94E-13	1.14E-13	0	7.23E-13	2.22E-17	1.87E-17	7.03E-12	
15	total			4.24E-09	1.27E-07	1.53E-09	1.60E-08	2.49E-10	4.91E-10	1.48E-10	5.31E-09	9.44E-09	2.88E-11	1.52E-08	5.94E-11	4.55E-10	1.81E-07	
16																		
17	mean of T\	NCF																
18				ITRAN=051	ITRAN=008	ITRAN=032	ITRAN=04	ITRAN=020	ITRAN=06	ITRAN=010	ITRAN=003	ITRAN=002	ITRAN=03	ITRAN=03	ITRAN=054	ITRAN=060	total	
19	base	embe	axial	6.95E-11	2.01E-09	3.56E-11	1.62E-10	9.54E-12	1.06E-11	1.48E-10	6.70E-11	1.58E-18	4.37E-13	0	4.10E-11	1.20E-11	2.56E-09	
20	base	embe	circ	2.35E-14	2.86E-14	2.37E-11	6.50E-11	9.69E-13	1.84E-12	0	9.85E-17	6.42E-20	4.67E-15	1.32E-10	1.79E-13	4.41E-13	2.24E-10	
21	base	surf	axial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
22	base	surf	circ	3.26E-09	8.31E-15	5.75E-10	1.47E-11	7.97E-11	1.07E-10	3.42E-13	1.26E-18	1.18E-10	1.94E-12	6.64E-12	1.03E-11	2.28E-11	4.20E-09	
23	weld	embe	axial	0	0	4.56E-16	0	3.19E-14	7.41E-17	6.22E-17	0	0	0	0	7.37E-16	1.52E-13	1.85E-13	
24	weld	embe	circ	3.93E-19	0	2.24E-15	0	1.39E-18	1.20E-19	0	0	0	0	0	1.04E-18	3.09E-16	2.55E-15	
25	weld	surf	axial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
26	weld	surf	circ	1.73E-14	0	2.17E-15	0	4.52E-18	1.02E-20	0	0	3.11E-21	0	0	1.31E-18	1.58E-22	1.95E-14	
27	total			3.33E-09	2.01E-09	6.33E-10	2.41E-10	9.02E-11	1.19E-10	1.48E-10	6.70E-11	1.18E-10	2.38E-12	1.39E-10	5.11E-11	3.53E-11	6.98E-09	
28																		
29	ITRAN=057	7 ISEQ=126	mean of F	CI														
30	5.75E-13	5.31E-13	4.65E-13	3.94E-13	3.52E-13	2.96E-13	2.47E-13	2.25E-13	2.12E-13	2.04E-13	2.11E-13	2.21E-13	2.38E-13	2.44E-13	2.44E-13	2.31E-13	2.00E-13	1.97E-13
31	1.58E-12	1.46E-12	1.24E-12	1.02E-12	8.05E-13	5.93E-13	4.37E-13	3.57E-13	3.36E-13	3.39E-13	3.57E-13	3.96E-13	4.35E-13	4.44E-13	4.18E-13	3.78E-13	3.45E-13	3.36E-13
32	3.80E-12	3.23E-12	2.45E-12	1.76E-12	1.30E-12	9.23E-13	6.76E-13	5.33E-13	4.38E-13	4.56E-13	5.11E-13	6.02E-13	6.76E-13	6.85E-13	6.40E-13	5.71E-13	4.98E-13	4.67E-13
33	7.65E-12	6.31E-12	4.28E-12	2.75E-12	1.81E-12	1.23E-12	8.64E-13	6.73E-13	5.74E-13	5.94E-13	6.59E-13	7.67E-13	8.66E-13	8.82E-13	8.26E-13	7.31E-13	6.36E-13	5.95E-13
34	1.05E-11	8 95E-12	614E-12	3 97E-12	2.35E-12	149E-12	1 00E-12	7 40E-13	6 50E-13	6.81E-13	7 74E-13	8.64E-13	946E-13	944E-13	8 72E-13	7.80E-13	7.06E-13	674E-13
35	144E-11	1.15E-11	7.52E-12	4 98E-12	2 89E-12	1.66E-12	111E-12	7.89E-13	6.98E-13	7.33E-13	8.33E-13	924E-13	1 02E-12	1.08E-12	1.03E-12	8 92E-13	7.62E-13	7.09E-13
36	1.67E-11	1.36E-11	841E-12	5.61E-12	3.41E-12	1.84E-12	1 27E-12	840E-13	7.14E-13	7.50E-13	8.51E-13	9.51E-13	1.06E-12	1.14E-12	1.13E-12	9.64E-13	8 28E-13	7.65E-13
37	1.84E-11	1.50E-11	9 19E-12	6.09E-12	3 48F-12	1.89E-12	1.30E-12	8 26E-13	7.32E-13	7.82E-13	8.85E-13	9.86E-13	1.08E-12	1.15E-12	1.15E-12	9.95E-13	8 59F-13	7.92E-13
38	7.03E-15	6.35E-16	3 71E-19	0.002 12	0.102 12	0	0	0.202 10	0	0	0.002 10	0.002 10	0002 12	0	0	0.002 10	0.002 10	0
39	1.09E-11	9.34E-12	5.93E-12	3 47E-12	1.95E-12	1 02F-12	716E-13	4 87E-13	446E-13	4 70F-13	5 28E-13	584E-13	6.63E-13	6.86F-13	6.64E-13	5.65E-13	491F-13	4.56E-13
40	1.04E-11	8 77E-12	5 29E-12	3 30E-12	1.83E-12	1.00E-12	6.86E-12	4.81E-12	4 30E-12	4 68E-12	5.20E-10	5.75E-12	6 55E-12	6.84E-12	6.55E-12	5 58E-12	4 96E-12	4 53E-12
40	9.81E-12	7 75E-12	4 90E-12	3 25E-12	1.86E-12	1.00L 12	6.72E-12	4 78E-12	4.00L 10	4.00L 13	5.05E-12	5.45E-12	6 32E-12	6 70E-12	6 30E-12	5 34E-12	4 78E-12	4.40E-12
42	7.89E-12	6 15E-12	4 16E-12	2 74E-12	1.00L 12	9.25E-12	6.25E-12	4.48E-12	3 91E-12	4 16E-12	4 77E-12	5.90E-12	5.80E-12	6.23E-12	5.30L 13	5.04E-12	4 50E-12	4 17E-12
42	5.00L 12	4 22E_12	3.07E_12	10/6-12	1.076 12	0.20L 10	5.40E-12	2 0 2 0 2 0 1 2	2.26E_12	2.57E_12	4.25E-12	4 7/E_12	5.00L 10	5.45E-12	5.05E-12	4 47E-10	2.00E_12	3 7/E_13
43	3.02E-12	9.05E-12	2.00E-12	1.345-12	0.17E_12	6.42E-12	J.49E-13	3.82E-13	3.30E-13	3.37E-13	9.20E-13	4./4E=13	J.JZE-13	J.45E-13	J.00E-13	9.4/E-13	3.88E-13	3.74E-13
44	3.30E-12	2.93E-12	2.09E-12	1.32E-12	9.17E-13	0.43E-13	4.00E-10	3.00E-13	3.13E-13	3.17E-13	3.36E-13	4.11E-13	4.50E-13	4.0JE-13	4.40E-13	3.69E-13	3.40E-13	3.20E-13
40	1.01E-12	1.37E-12	1.20E-12	9.20E-13	7.02E-13	4.97E-13	3.01E-13	2.00E-13	2.44E-13	2.33E-13	2.00E-13	3.22E-13	3.00E-13	3.03E-13	3.40E-13	3.23E-13	2.94E-13	2.01E-13
40	8.52E-13	8.29E-13	7.00E-13	5./9E-13	4.59E-13	3.37E-13	2.48E-13	2.01E-13	1.//E-13	1.//E-13	1.94E-13	2.14E-13	2.3/E-13	2.44E-13	2.38E-13	2.24E-13	2.00E-13	1.93E-13
4/	4.46E-13	4.03E-13	3.56E-13	3.10E-13	2.48E-13	1.98E-13	1.68E-13	1.46E-13	1.36E-13	1.36E-13	1.44E-13	1.58E-13	1./UE-13	1./2E-13	1.66E-13	1.53E-13	1.39E-13	1.40E-13
48	2.02E-13	1.82E-13	1.83E-13	1./IE-13	1.40E-13	1.12E-13	1.04E-13	9.30E-14	0.81E-14	0.14E-14	0.01E-14	1.22E-14	9.31E-14	1.04E-13	1.05E-13	8.99E-14	8.08E-14	1.8/E-14
49																		
50	11 RAN=057	/_ISEQ=126	mean of T	WCF														
51	5.48E-13	5.09E-13	4.48E-13	3.81E-13	3.42E-13	2.90E-13	2.43E-13	2.22E-13	2.09E-13	2.02E-13	2.08E-13	2.18E-13	2.34E-13	2.40E-13	2.40E-13	2.28E-13	1.97E-13	1.95E-13
52	1.37E-12	1.29E-12	1.11E-12	9.33E-13	7.52E-13	5.65E-13	4.22E-13	3.47E-13	3.28E-13	3.31E-13	3.48E-13	3.84E-13	4.20E-13	4.29E-13	4.04E-13	3.67E-13	3.36E-13	3.28E-13
53	2.89E-12	2.49E-12	1.95E-12	1.50E-12	1.16E-12	8.53E-13	6.39E-13	5.10E-13	4.23E-13	4.39E-13	4.90E-13	5.72E-13	6.39E-13	6.47E-13	6.07E-13	5.45E-13	4.78E-13	4.50E-13
54	5.57E-12	4.65E-12	3.23E-12	2.14E-12	1.54E-12	1.11E-12	8.03E-13	6.36E-13	5.48E-13	5.66E-13	6.24E-13	7.19E-13	8.05E-13	8.19E-13	7.70E-13	6.88E-13	6.04E-13	5.67E-13
55	7.49E-12	6.46E-12	4.53E-12	3.02E-12	1.89E-12	1.31E-12	9.19E-13	6.96E-13	6.16E-13	6.43E-13	7.25E-13	8.03E-13	8.73E-13	8.71E-13	8.10E-13	7.30E-13	6.66E-13	6.38E-13

図 5-19 detail.csv の例

#### 5.2.4.5 mean\_crack\_density.csv

TWCF フォルダ内に格納される本ファイルには、亀裂種類、亀裂深さ、亀裂アスペクト比別に、 亀裂数密度及び容器内の亀裂個数の期待値が記録されている。また、内部亀裂の存在を想定して いる容器の領域の体積や溶接面の面積、内表面の面積も記録されている。ここに記載されている 溶接線の面積や RPV の体積については、main.csv や subregion.csv の入力値から計算されている。 本ファイルに記載されている亀裂深さ及び亀裂アスペクト比ごとの亀裂密度については、5.2.2.7 で説明した亀裂密度設定ファイルに記載された亀裂深さ及びアスペクト比ごとの複数の密度のデ ータの平均値である。例えば、亀裂深さ 1%の亀裂密度が 16[個/ft<sup>3</sup>]でアスペクト比 1.125 割合が 50%であれば、該当寸法の亀裂密度は 16[個/ft<sup>3</sup>]×0.50×35.3147[ft<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]より、282.5176[個/m<sup>3</sup>]とな る。ただし、亀裂密度設定ファイルには複数の亀裂密度分布が記載されているため、本ファイル で出力される値はその平均値となる。同様に本ファイルに出力される亀裂個数の平均値について は、この RPV の体積や溶接線の面積に対して亀裂寸法ごとの亀裂密度を積算したものである。 ファイルの内容の例を図 5-20 に示す。なお、5.2.2.7 で説明した亀裂密度設定ファイルに記載さ れている内容は、米国の亀裂分布作成コードである VFLAW などを用いて得られたデータを利用 することを想定しているため、単位は ft であるが、本ファイルでは長さの単位は m を基準とし て記載されていることに留意すること。

	А	В	С	D	E	F	G	Н	Ι	J	К	L	М
1	volume for	4.003294	[m^3]										
2	area for en	3.175581	[m^2]										
3	area for su	53.00957	[m^2]										
4													
5	mean of en	nbedded cra	ack density	for base me	etal [1/m^3]	]							
6		1.125	1.375	1.75	2.5	3.5	4.5	5.5	7	9	12.5	20	
7	1	186.3407	101.0283	91.53807	51.3125	15.28467	8.550852	6.353093	9.515235	6.838508	10.31108	11.91312	
8	2	216.5693	40.18883	13.23718	3.258686	1.240759	0.757325	0.488478	0.543847	0.259462	0.227913	0.085009	
9	3	41.87941	3.152605	0.658918	0.213515	0.066127	0.026444	0.011986	0.00913	0.002859	0.001665	0.000359	
10	4	3.283786	0.220412	0.138299	0.084023	0.022008	0.007411	0.002948	0.001974	0.000539	0.000279	5.15E-05	
11	5	0.307335	0.08613	0.073581	0.038333	0.008194	0.002413	0.000872	0.000536	0.000134	6.56E-05	1.06E-05	
12													
13	mean of en	nbedded cra	ack number	for base me	etal per ves	sel [-]							
14		1.125	1.375	1.75	2.5	3.5	4.5	5.5	7	9	12.5	20	
15	1	745.9765	404.446	366.4538	205.419	61.18902	34.23158	25.4333	38.09229	27.37656	41.2783	47.69172	
16	2	866.9905	160.8877	52.99233	13.04548	4.967125	3.031794	1.955523	2.177181	1.038702	0.912404	0.340315	
17	3	167.6556	12.6208	2.637843	0.854763	0.264725	0.105864	0.047985	0.036551	0.011445	0.006666	0.001438	
18	4	13.14596	0.882373	0.553651	0.336369	0.088106	0.02967	0.011801	0.007902	0.002156	0.001118	0.000206	
19	5	1.230353	0.344804	0.294567	0.15346	0.032804	0.009658	0.003493	0.002145	0.000538	0.000262	4.26E-05	
20													
21	mean of en	nbedded cra	ack density	for weld me	tal [1/m^2]								
22		1.125	1.375	1.75	2.5	3.5	4.5	5.5	7	9	12.5	20	
23	1	13.14653	12.81296	24.65927	45.67809	41.22523	37.21129	33.59251	57.7165	47.0718	83.21614	127.8326	
24	2	5.151579	4.765826	8.489563	13.4989	9.914938	7.292992	5.371599	6.886361	3.762165	3.562315	1.061965	
25	3	0.602152	0.500006	0.761881	0.899294	0.44291	0.222524	0.113963	0.091008	0.026386	0.011386	0.000878	
26	4	0.236907	0.183015	0.251879	0.246267	0.094105	0.037408	0.015435	0.009509	0.001948	0.000579	2.43E-05	
27	5	0.09459	0.068196	0.08535	0.070373	0.021431	0.006974	0.002412	0.001222	0.000194	4.52E-05	1.27E-06	
28	6	0.041011	0.027721	0.031825	0.022594	0.00566	0.001564	0.000471	0.000206	2.71E-05	5.26E-06	1.03E-07	

図 5-20 mean crack density.csv の例



図 5-21 PASCAL-Manager によって算出された破壊頻度例

図 5-21 では Microsoft Excel<sup>®</sup>の「条件付き書式」機能を用いて頻度の高低を色で表現している。 FCI 及び TWCF の高いサブリージョンは赤く表示されており、中性子照射量による脆化の影響を 視覚的に確認することができる。ここで、表示している頻度は各サブリージョンの FCI 及び TWCF であり、単位体積当たりの頻度ではないことに注意されたい。

#### 5.2.4.6 sampled\_frequency.csv

TWCF フォルダ内に格納される本ファイルには、FCI 及び TWCF を算出する際にサンプリング された過渡事象発生頻度の組が全て記録されている。ファイルの内容の例を図 5-22 に示す。

	Α	В	С	D	E	F	G	Н	Ι	J	К	L	М
1	ITRAN=05	ITRAN=008	ITRAN=032	ITRAN=04	ITRAN=020	ITRAN=06	ITRAN=010	ITRAN=00	ITRAN=002	ITRAN=034	ITRAN=031	ITRAN=054	ITRAN=060
2	0.000324	0.000212	2.41E-06	2.29E-05	3.21E-06	8.18E-05	5.32E-06	8.49E-07	1.68E-05	1.30E-05	6.50E-05	9.33E-08	1.22E-05
3	7.63E-05	1.39E-06	6.31E-05	0.000169	3.21E-06	3.20E-05	1.92E-05	8.49E-07	1.68E-05	2.32E-05	0.000105	2.32E-07	3.20E-05
4	0.000458	0.000212	1.51E-05	0.000204	6.30E-06	2.17E-05	4.60E-05	8.87E-06	0.000169	7.86E-06	5.34E-05	9.33E-08	5.00E-05
5	0.000211	4.30E-06	9.42E-06	0.000169	7.56E-06	2.46E-05	5.32E-06	8.49E-07	0.000341	3.23E-05	8.09E-05	1.19E-07	6.38E-05
6	0.000119	0.000121	5.51E-07	0.000358	1.51E-05	8.18E-05	1.92E-05	4.87E-06	0.000169	9.47E-06	9.25E-05	9.50E-07	1.80E-05
7	7.63E-05	2.88E-05	9.90E-07	7.89E-06	1.51E-05	8.18E-05	2.62E-05	4.14E-07	0.000306	9.47E-06	5.34E-05	3.80E-08	7.25E-05
8	0.000262	9.92E-06	1.51E-05	9.60E-05	1.64E-06	0.000147	1.34E-05	1.07E-06	2.29E-05	1.43E-05	7.61E-06	4.95E-07	0.000118
9	0.000324	0.000385	2.41E-06	0.000358	4.44E-06	5.00E-05	4.60E-05	4.14E-07	0.000169	4.85E-06	1.52E-05	1.19E-07	5.00E-05
10	1.50E-05	0.000121	1.31E-06	3.41E-06	5.51E-07	1.80E-05	1.92E-05	6.26E-07	3.41E-06	1.99E-05	2.41E-05	5.83E-08	0.000118
11	0.000406	1.55E-05	6.30E-06	3.41E-06	1.51E-05	1.80E-05	1.47E-06	1.65E-05	1.23E-05	1.99E-05	2.41E-05	9.50E-07	1.22E-05
12	0.000159	0.000121	2.41E-06	0.000306	5.51E-07	1.22E-05	1.92E-05	1.94E-05	2.10E-07	1.30E-05	6.50E-05	1.82E-07	3.91E-05
9997	0.00124	0.00043	1.51E-05	0.000237	1.64E-06	3.20E-05	8.50E-06	6.50E-08	1.68E-05	1.30E-05	4.28E-05	3.80E-08	7.39E-06
9998	0.000996	2.12E-05	3.21E-06	1.23E-05	6.30E-06	1.80E-05	1.92E-05	8.87E-06	9.60E-05	7.86E-06	9.25E-05	9.33E-08	0.000147
9999	0.000119	0.000121	9.90E-07	0.000341	1.64E-06	0.000118	3.67E-05	4.87E-06	0.000341	3.35E-06	8.09E-05	2.32E-07	7.25E-05
10000	0.00014	4.30E-06	9.90E-07	0.000341	1.31E-06	0.000147	9.58E-05	4.14E-07	3.41E-06	5.55E-06	2.41E-05	9.50E-07	2.29E-06
10001	0.00014	0.000385	4.44E-06	0.000306	1.64E-06	7.39E-06	0.000188	4.14E-07	0.000306	9.47E-06	6.50E-05	7.00E-07	5.00E-05

図 5-22 sampled frequency.csvの例

# 5.2.4.7 CPI\_and\_CPF\_for\_a\_crack.csv

TWCF フォルダ内に格納される本ファイルには、過渡事象、亀裂種類、亀裂深さ、亀裂アスペクト比別に、PASCAL-RV で求めた CPI 及び CPF の期待値が記録されている。内部亀裂の解析においては、板厚内の各位置について CPI 及び CPF を算出しているが、このファイル内での記載は板厚内の各位置に対する平均値が用いられている。例えば、ある過渡事象について、ある板厚比位置、あるアスペクト比の内部亀裂の CPI が 1E-12 と記載されていた場合、LHS の分割数だけ計算して得られた当該内部亀裂に関する CPI の総和を、LHS の分割数で除算した値と等しい。また、板厚内の複数個所に対する CPI を算出していた場合、ヒストグラムと折れ線の積で表現される被積分関数を積分することで、平均値を算出している。例えば板厚内の d/t = 0.1、0.2、0.3 の位置の内部亀裂の CPI を計算した場合、CPI がそれぞれ 0.05、0.02、0.01 であり、内部亀裂が板厚内の 0.1 から 0.3 の範囲に一様分布している仮定すると、1 つ目の区間の積分値は(0.2-0.1)×0.5×(0.05+0.02) = 0.0035、2 つ目の区間の積分値は(0.3-0.2)×0.5×(0.02+0.01) = 0.0015 となり、全体の平均値は(0.0035+0.0015) / (0.3 - 0.1) = 0.025 となる。この値は亀裂 1 つあたりの CPI もしくはCPF であるため、RPV 全体では当該の内部亀裂の密度から得られた個数を反映して、RPV 全体における当該内部亀裂の CPI 及び CPF が求められることに注意されたい(この CPI 及び CPF は 5.2.4.8 に記載される)。

FCI及びTWCFの算出においては中性子照射量の空間分布を考慮して PASCAL-RV の結果が補間されるが、本ファイルには PASCAL-RV により算出されたデータ点のうち中性子照射量が最大となるものが記録されている。本ファイルは、亀裂種類や寸法によって CPI 及び CPF がどの程度変化するかを分析する際に有用である。ファイルの内容の例を図 5-23 に示す。

G	A	В	С	D	E	F	G	н	L.	1	к	L	м	N	0	Ρ	Q	R	S	Т	U	V	W	X	Y
1	Startup_PV	NR-casel,	_base_emb	e_axial_in	ner_CPI									Startup_P	WR-casel	_base_emb	e_axial_in	ner_CPF							
2	2a/t[%] c/	1.125	1.375	1.75	2.5	3.5	4.5	5.5	7	9	12.5	20		2a/t[%] c/	1.125	1.375	1.75	2.5	3.5	4.5	5.5	7	9	12.5	20
3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0.107.10	0.555.30	6 775 00	6.545.05	P 0.007.07	FB	2.005.07	2.007.07	1015.07	F 185 67	6.005.07			0.105.10	0.555.10	6 705 AG	6.5.15 of	P 005 07	10 OFF 07	0.007.07	2055.07	1015.07	F 157 07	6.065.07
8	0	2.126-12	2.506-10	0.136+03	0.54E-00	0.00E-U/	2.206+07	2/08E+0/	3.000-07	4,042-07	0.10E-07	0.202-07		0	2.128-12	2.005-10	0.136-03	0.045-00	6.00E-07	2.296-07	2.086-07	3/006-07	4.046-07	9/196-0/	0.20E-07
10	Startup_PV	NR-casel,	_base_emb	e_axial_cu	ter_CPI									Startup_P	WR-casel	_base_emb	e_axial_ou	ter_CPF							
11	2a/t[%] c/	1.125	1.375	1.75	2.5	3.5	4.5	5.5	7	9	12.5	20		2a/t[%] c/	1.125	1.375	1.75	2.5	3.5	4.5	5.5	7	9	12.5	20
12	1	0	0	0	0	0	0 #2	6.29E-15	4.248-12	310E-11	1.118-10	2.73E-10		1	0	0	0	0	0		0.29E-15	4.24E-12	3.10E-11	1.118-10	2.73E-10
17	6	3.91F+08	2 20E-07	9.335-07	5.07E+06	1.516-05	2.435.05	3.565-05	5 31E-05	7385.05	9.795-05	0.000125	-	6	3.915-08	2.20E+07	9.33E-07	5.07E-05	1.405-05	2.055.05	2.835.05	319E-05	3.075-05	3105-05	3.095-05
19	Startup_PV	NR-casel	base_emb	e_circ_inr	ier_CPI									Startup_P	WR-casel	_base_emb	e_circ_inn	er_CPF							
20	28/11/6/ 0/	1.125	1.3/5	1/5	2.5	3.5	4.5	5.5	0	9	12.5	20		28/0,%) C/	1.125	1.3/5	1./5	2.5	3.5	4.5	5.5	1	9	12.5	20
21		0	0		0		10		0						0	0	9	0	0 ==	0	.0	0		0	0
26	6	0	0	0	7.84E-07	9.95E-09	2.34E-12	0	7.53E-14	1.57E-12	9.26E-12	3.00E-11		6	0	0	0	6.15E-08	7.78E-09	2.34E-12	0	7.53E-14	1.57E-12	9.26E-12	3.00E-11
																		0.0.0							
28	Startup_PV	1 1 2 E	Dase_emo	1.76	ter_CPI	26	15		7	0	12.5	20		Startup_P	WR-casel	_base_emb	e_circ_out	er_CPF	2.6	15	6.6	7	0	12.5	20
30	1	0	0		0		0.0	0	0	0		.0		10/12/02/07	1.450	1.010			0	0	0	0	0		.0
	- 1				-		46				-									略		-			
35	6	0	3.40E-12	5.35E-10	1.62E-08	6.63E-08	1.46E-07	2.43E-07	4.31E-07	6.90E-07	1.05E-06	1.53E-06		6	0	3.40E-12	5.34E-10	6.72E-09	6.53E-09	7.89E-09	9.84E-09	1.19E-08	1.45E-08	1.85E-08	2.15E-08
37	Startup PU	NR-case1	base surf	axial inn	er CPI									Startup P	WR-case1	base surf	axial inne	CPF							
38	a/t[%] 2c/	2	6	10	100			-						a/t[%] 2c/	2	6	10	100							
39	3	8.06E-09	3.62E-05	0.000134	0.000514									3	8.06E-09	2.03E-05	4.01E-05	5.85E-05							
41	Startun Pu	NR-case1	hasa sud	avial out	er CPI									Statun P	WR-case1	hase and	avial out	CPE							
42	a/t[%] 2c/	2	base_sur	10	100	-								a/t[%] 2c/	2	6	10	100							
43	3	0	6.80E-07	2.20E-05	7.07E-06							-		3	0	6.80E-07	2.20E-05	7.07E-05							
40	Charles Di	ND erest		alla lass										Chida a D	APR ANNAL		alice James	005							
45	a/t[%] 2c/	2	_base_sum	_circ_inne	100	-						-		a/t/%] 2c/	wre-cases	_base_sun	_circ_inne	100							
47	3	0	7.87E-07	8.14E-05	5.93E-05									3	0	1.15E-07	1.58E-07	1.60E-07							
40	Charles Di	UD and 1		also avia										Charles D	hith annual			005							
49 50	a/t[%] 2r/	2	_oase_sun	_circ_oute	100	-								a/t[%] 2c/	wn-casei,	_base_sun	10	100							
51	3	0	0	0	0							-		3	0	0	0	0							
	Charles City		winded work	a suist is			_							Chat		under and		0.005							
53	Scartup_PV	1 10E	_weid_emc	1 75	ner_CP1	26	15		. 7	0	19.6	20		Stanup_P	1 1 1 SE	_weid_emb	e_axial_in	ner_UPP	28	46		7	0	19.5	20
55	1	0	0	0	0	1.21E-11	2.13E-09	8.53E-09	8.73E-09	8.43E-09	7.76E-09	6.78E-09		1	0	0	0	0	1.21E-11	2.13E-09	8.53E-09	8.73E-09	8.43E-09	7.76E-09	6.78E-09
						<b></b>	85												<b></b>	85					
77	23	3.29E-05	7.27E-05	0.000165	0.000387	0.000584	0.000908	0.001089	0.001329	0.001554	0.001824	0.002097		23	3.29E-05	7.27E-05	0.000165	0.000387	0.000684	0.000908	0.001089	0.001329	0.001564	0.001824	0.002097
79	Startup_PV	NR-case1	weld emb	e axial ou	ter CPI									Startup_P	WR-casel	weld emb	e axial ou	ter_CPF							
80	2a/t[%] c/	1.125	1.375	1.75	2.5	3.5	4.5	5.5	7	9	12.5	20		2a/t[%] c/	1.125	1.375	1.75	2.5	3.5	4.5	5.5	7	9	12.5	20
81	1	0	0	0	0	0	0	0	0	7.48E-16	1.65E-12	2.12E-11		1	0	0	0	0	0	0	0	0	7.48E-16	1.65E-12	2.12E-11
ŝ;	-					4	8 <u>6</u>													梧					
103	23	0.000331	0.000726	0.00155	0.003478	0.005969	0.007587	0.009421	0.011882	0.014097	0.016296	0.018528		23	0.000331	0.000726	0.00155	0.003478	0.005969	0.007587	0.009421	0.011882	0.014097	0.016296	0.018528
105	Startup_PV	NR-casel	weld_emb	e_circ_inr	er_CPI									Startup_P	WR-casel	weld_emb	e_circ_inn	er_CPF							
106	2a/t[%] c/	1.125	1.375	1.75	2.5	3.5	4.5	5.5	7	9	12.5	20		2a/t[%] c/	1.125	1.375	1.75	2.5	3.5	4.5	5.5	7	9	12.5	20
107	1	0	0	0	0	0	7.14E-14	9.48E-11	7.61E-11	5.34E-11	3.03E-11	1.27E-11		1	0	0	0	0	0	7.14E-14	9.48E-11	7.61E-11	5.34E-11	3.03E-11	1.27E-11
120		2.035.00	2615.00	3 595,07	2000.00	0.305.05	1.616.05	2 305.00	3 795.05	5 16E.0E	6 995.05	9 925 .05			2.035.00	2615.00	3595.07	3 835,04	+	1 /05.45	2 105.05	31/6.45	1155.05	5 235.05	6 335.05
123	23	2.03E-09	5-01E-08	3.382-07	2.002-00	3-335-00	1.01E-05	2.395-05	3.12E-05	P 105-02	0.005-00	0.02E-00		23	2.03E-09	2.012-08	3-265-07	£102E-00	0.602-00	1.402-00	2.122-05	3145-00	-105-00	5-236-05	0.325-03
131	Startup_PV	NR-casel	_weld_emb	e_circ_ou	ter_CPI									Startup_P	WR-casel	_weld_emb	e_circ_out	er_CPF							
132	2a/t[%] c/	1.125	1.375	1.75	2.5	3.5	4.5	5.5	7	9	12.5	20		2a/t[%] c/	1.125	1,375	1.75	2.5	3,5	4.5	5.5	7	9	12.5	20
133	1	0	0	0	0	0	0 #2	0	.0	0	0	0		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
155	23	1.01E-05	3.55E-05	0.00011	0.000347	0.000726	0.001043	0.001372	0.001883	0.002385	0.002945	0.00355	1	23	1.01E-05	3.55E-05	0.00011	0.000347	0.000726	0.001043	0.001372	0.001883	0.002385	0.002946	0.00355
100					-																				
157	startup_PV	NR-casel,	weld_surf	_axial_inn	er_CPI	_								startup_P	WR-casel	_weld_surf	_axial_inne	ICPF							
159	2 (Line) 2(Li	3.425-05	0.003925	0.00809	0.021838									a. (170) 20)	3.42F-05	0.002205	0.002717	0.003007							
															Jonata du										
161	Startup_PV	WR-casel	weld_surf	_axial_out	er_CPI									Startup_P	WR-casel	_weld_surf	_axial_oute	r_CPF							
162	a-01%) 20/	£ 10E-00	2625.05	0.255.05	100									a/t[%) 20/	6 105.00	2 525.05	9.255.05	100							
103	3	v.10E-09	ap36-05	0.302-05	2000130									5	0.105-09	3.532-05	0.305-05	0.000130							
165	Startup_PV	NR-casel,	weld_surf	_circ_inne	r_CPI									Startup_P	WR-casel	weld_surf	_circ_inne	CPF							
166	a/t[%] 2c/	2	6	10	100							_		a/t[%] 2c/	2	6	10	100							
207	3	∠.87E+06	0.001494	0.003593	3.010062									3	2-07E-05	0.000173	3.0001/8	0.0001/5							
169	Startup_PV	NR-case1	weld_surf	_circ_oute	r_CPI									Startup_P	WR-casel	_weld_surf	_circ_oute	CPF							
170	a/t[%] 2c/	2	6	10	100									a/t[%] 2c/	2	6	10	100							
1/1	3	0	#015-09	0.105-08	3.88E+07									3	0	e.015-09	d.105-08	3.886.07							

図 5-23 CPI and CPF for a crack.csvの例

#### 5.2.4.8 CPI\_and\_CPF\_for\_cracks.csv

TWCFフォルダ内に格納される本ファイルには、過渡事象、亀裂種類、亀裂深さ、亀裂アスペクト比別に、RPV内の個数や中性子照射量を考慮したCPI及びCPFの期待値が記録されている。 本ファイルは、FCI及びTWCFに対する亀裂種類の寄与を分析する際に有用である。亀裂の個数を破損確率に反映させるにあたっては、6.33節に記載の余事象の考え方を用いている。

# 5.2.4.9 CPI\_and\_CPF\_for\_a\_vessel.csv

TWCF フォルダ内に格納される本ファイルには、過渡事象別に RPV 全体の CPI 及び CPF が記載されている。RPV 全体の CPI 及び CPF として算出される値の数は、main.csv の "number of RPVs"で指定された数に対応する。ファイルの記載内容の例を図 5-24 に示す。亀裂の個数を破損確率に反映させるにあたっては、6.33 節に記載の余事象の考え方を用いている。

	А	В	С	D	E	F	G	Н	I	J	K	L	М	Ν	0
1	CPI for a ve	essel													
2	RPV index	ITRAN=057	ITRAN=008	ITRAN=032	ITRAN=045	ITRAN=020	ITRAN=061	ITRAN=01(	ITRAN=00	ITRAN=002	ITRAN=034	ITRAN=031	ITRAN=054	ITRAN=060	_ISEQ=129
3	0	0	4.96E-08	3.43E-09	1.40E-10	6.79E-09	0	2.22E-16	3.56E-08	5.21E-10	0	3.40E-09	4.55E-08	1.49E-09	
4	1	1.36E-08	0.000148	2.34E-05	1.02E-05	2.40E-07	1.71E-12	2.65E-09	0.000134	9.31E-06	0	2.33E-05	5.90E-06	5.33E-08	
5	2	2.90E-09	3.24E-06	6.64E-07	3.34E-07	9.80E-08	2.94E-12	2.65E-11	3.03E-06	2.91E-07	0	6.63E-07	1.56E-07	4.01E-08	
6	3	1.54E-05	0.003196	0.000669	0.000426	3.33E-05	4.81E-08	6.81E-07	0.003114	0.000309	0	0.000667	0.000148	3.22E-07	
7	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
8	5	4.41E-06	0.001374	0.000287	0.000184	8.75E-06	1.25E-08	5.03E-07	0.001339	0.000134	0	0.000285	5.92E-05	4.32E-07	
9	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10	7	0	2.14E-07	2.66E-08	5.42E-09	3.26E-08	0	3.65E-11	1.75E-07	7.31E-09	0	2.53E-08	2.79E-07	7.31E-09	
1001	998	0	0	0	0	3.18E-13	0	0	0	0	0	0	4.49E-12	1.69E-14	
1002	999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1003															
1004	CPF for a v	essel													
1005	RPV index	ITRAN=057	ITRAN=008	ITRAN=032	ITRAN=045	ITRAN=020	ITRAN=061	ITRAN=01(	ITRAN=00	ITRAN=002	ITRAN=034	ITRAN=031	ITRAN=054	ITRAN=060	_ISEQ=129
1006	0	0	0	3.14E-09	0	6.79E-09	0	2.22E-16	0	2.55E-14	0	0	4.55E-08	1.49E-09	
1007	1	1.36E-08	2.76E-10	2.45E-06	1.86E-13	2.26E-07	1.71E-12	2.65E-09	1.30E-10	5.33E-12	0	4.09E-14	5.89E-06	5.33E-08	
1008	2	6.26E-10	5.11E-13	4.76E-08	0	9.76E-08	2.86E-12	2.65E-11	2.00E-13	7.99E-15	0	0	1.56E-07	4.01E-08	
1009	3	3.15E-06	1.46E-07	3.59E-05	2.53E-09	2.48E-06	1.08E-09	6.81E-07	2.59E-08	2.79E-10	0	7.35E-12	0.000115	2.19E-07	
1010	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1011	5	9.25E-07	1.47E-08	8.41E-06	2.03E-09	1.80E-06	1.37E-09	5.03E-07	3.15E-09	1.09E-11	0	1.82E-14	5.47E-05	3.97E-07	
1012	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1013	7	0	0	2.34E-09	0	3.26E-08	0	3.65E-11	0	0	0	0	2.79E-07	7.31E-09	
2004	998	0	0	0	0	3.18E-13	0	0	0	0	0	0	4.49E-12	1.69E-14	
2005	999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

図 5-24 CPI and CPF for a vessel.csv の例

## 5.2.4.10 random variable value.csv

TWCF フォルダ内に格納される本ファイルには、認識論的不確実さに分類される確率変数について、サンプリングされた値が記載されている。さらに、それらの値を用いた際の FCI 及び TWCF の値も記録されている。ただし、正規分布に従う確率変数については、確率変数の値そのものではなく、サンプリングされた値の標準偏差を記載している。また、PASCAL-Manager では 過渡事象発生頻度と亀裂密度の不確実さについても認識論的不確実さに分類して解析を行うことができるが、これらの値については本ファイルには含まれていない。過渡事象発生頻度については sampled\_frequency.csv に記録される (5.2.4.6)。

# 6 基礎理論及び解析手法

本章では PASCAL の基礎理論及び解析手法について説明する。目次を表 6-1 に改めて示す。

見出し	項目	ページ
6.1	認識論的不確実さと偶然的不確実さを考慮した信頼度評価	58
6.2	確率計算手法	58
6.3	信頼度評価手法	68
6.4	初期亀裂	69
6.5	初期亀裂深さ分布	70
6.6	亀裂アスペクト比の分布	71
6.7	亀裂深さ方向位置比の分布	72
6.8	過渡事象	75
6.9	無限長亀裂の応力拡大係数解	78
6.10	表面亀裂に対する応力拡大係数解	78
6.11	内部亀裂に対する応力拡大係数解	80
6.12	応力拡大係数の塑性域補正	81
6.13	応力拡大係数に対するクラッドの塑性の影響	82
6.14	クラッドを考慮した応力拡大係数評価	84
6.15	逐次応力変換手法	89
6.16	重み関数法	92
6.17	残留応力の考慮	95
6.18	容器壁内中性子照射量減衰評価方式	95
6.19	亀裂進展モデル	96
6.20	破壊靭性及び亀裂伝播停止破壊靭性の評価式	99
6.21	$K_{lc}$ と $K_{la}$ の相関の考慮	109
6.22	脆化予測式	109
6.23	偏差再計算手法	117
6.24	破壊基準	118
6.25	亀裂進展刻みの計算方式	122
6.26	非破壊検査による亀裂検出性評価モデル	122
6.27	中性子照射による上部棚靭性値の低下	123
6.28	自動調整階層別モンテカルロ法	123
6.29	高温予荷重効果	130
6.30	主な確率変数	133
6.31	連続計算機能	134
6.32	RPV 炉心領域部のモデル化手法	135
6.33	RPV 炉心領域部の亀裂貫通頻度	135

表 6-1 基礎理論及び解析手法 目次

#### 6.1 認識論的不確実さと偶然的不確実さを考慮した信頼度評価

PFM 解析では、不確実さを考慮した評価が可能であり、確率変数が有する不確実さについては「認識論的不確実さ」と「偶然的不確実さ」とに分類することができる。

認識論的不確実さとは、知識等の不足に関係する不確実さとされており、データが充実化されることで減少させることができる。一方の偶然的不確実さは材料特性などに見られるように物理量が本来持っている不確実さであり、データが増えても減らすことのできない不確実さである。

PASCAL5 を用いた破損頻度評価にあたっては、確率変数を有する不確実さを認識論的不確実 さと偶然的不確実さとに分類し、認識論的不確実さに対する破損頻度の分布を考慮することで、 信頼度評価を実施可能としている。認識論的不確実さを考慮した解析は LHS 法を用いて行われ る。PASCAL5 において、その不確実さが認識論的不確実さに分類される確率変数と偶然的不確 実さに分類される確率変数を以下に示す。

認識論的不確実さを有する確率変数に分類される確率変数例

- 化学成分
- 中性子照射量
- ・初期 RT<sub>NDT</sub>
- $\Delta RT_{NDT}$
- ·過渡事象頻度

偶然的不確実さを有する確率変数に分類される確率変数例

・破壊靭性及び亀裂伝播停止破壊靭性

なお、PASCAL5 では PASCAL-RV 及び PASCAL-Manager による乱数の生成は、メルセンヌツ イスター法 <sup>38)</sup>に基づき行われる。乱数に用いるシード値は、ソースコード中で固定しているた め、再計算を行っても同じ結果が得られる。

#### 6.2 確率計算手法

確率論的数値計算手法には数値積分手法とモンテカルロ手法<sup>35)</sup>等がある。複雑な問題になると、 数値積分手法の適用は困難となる場合が多く、モンテカルロ手法が有効である。算出したい確率 が非常に低い問題において、通常のモンテカルロ法では、高精度な結果を求めるために必要なサ ンプル数が莫大となり計算時間の問題が生じることがしばしばある。そのため、高速化モンテカ ルロ法として、重み付きモンテカルロ法や階層別モンテカルロ法<sup>8</sup>が良く用いられている。

#### 6.2.1 通常のモンテカルロ(Monte Carlo)法

通常のモンテカルロ法<sup>35)</sup>では、ランダムな擬似乱数を発生することによって確率密度関数から サンプルを設定する。次に、これらのサンプルを用いて決定論的な解析を行う。N回の試行を行 ってそのうち N<sub>f</sub>回は破損した場合、破損確率 P<sub>f</sub>は次のように得られる。

$$P_f = \frac{N_f}{N} \tag{6-1}$$

# 6.2.2 重み付きモンテカルロ法

発生確率が極めて小さい事象を通常のモンテカルロ法で解析する場合には、膨大な数の試行が 必要となる。より少ない試行数で正しい確率を求める高速化手法として、重み付きモンテカルロ 法<sup>39</sup>がある。

いま、問題とする確率変数をxとし、この確率変数の確率密度関数をf(x)とする。 このとき、xがある値cより大きくなる確率は次のように計算される。

$$P(x > c) = \int_{c}^{\infty} f(x)dx \tag{6-2}$$

ここで、*I<sub>c</sub>*(*x*)という関数を次式のように定義する。

$$I_c(x) = \begin{cases} 1 & (x > c) \\ 0 & (x \le c) \end{cases}$$
(6-3)

この関数を用いると式(6-2)は次のようになる。

$$P(x > c) = \int_{-\infty}^{\infty} I_c(x) f(x) dx \tag{6-4}$$

ここで、次式を満足する関数 g(x)を導入する。

$$\int_{-\infty}^{\infty} g(x)dx = 1 \tag{6-5}$$

g(x)は式(6-5)を満足するので、ある確率密度関数であると考えることができる。この関数を用いると式(6-4)は次のように書くことができる。

$$P(x > c) = \int_{-\infty}^{\infty} I'_c(x)g(x)dx \tag{6-6}$$

ただし

$$I'_{c}(x) = \begin{cases} \frac{f(x)}{g(x)} & (x > c) \\ 0 & (x \le c) \end{cases}$$
(6-7)

である。

式(6-1)は式(6-3)で与えた *I<sub>c</sub>*(*x*)を用いて次のように書くこともできる。

$$P(x > c) = \frac{\sum_{i=1}^{N} I_c(x_i)}{N}$$
(6-8)

ここで、Nは、試行の数であり、x<sub>i</sub>は、試行ごとにf(x)に従ったランダムな値をとる。 これに対して、重み付きモンテカルロ法の場合は次式で確率を計算する。

$$P(x > c) = \frac{\sum_{i=1}^{N} I'_{c}(x_{i})}{N}$$
(6-9)

重み付きモンテカルロ法は次のように要約できる。密度関数 *f*(*x*)からサンプルを発生する場合 (通常のモンテカルロ法) はある程度の数の *N*<sub>f</sub>を確保するために、計算回数が十分に多くなけれ ばならなく、計算時間もかかりすぎる。そこで、破壊領域に近づいた位置の別の確率密度関数 *g*(*x*)を考えて、この *g*(*x*)からサンプルを発生させる。こうすることによって、少ないサンプル数 である程度数の *N*<sub>f</sub>を確保できる。

#### 6.2.3 階層別モンテカルロ法

階層別モンテカルロ法<sup>35</sup>は重み付きモンテカルロ法と同様、高速化モンテカルロ法の1つである。発生確率が極めて小さい事象に対しても有効である。

例えば、内表面亀裂寸法は、亀裂の深さ a と容器壁板厚 t との比 a/t、及びアスペクト比 a/c (c は亀裂の半長)によって定義した亀裂寸法平面から採取される。この亀裂寸法平面を図 6-1 に示す。全ての初期亀裂の寸法はこの亀裂平面に含まれていると考えられる。

通常のモンテカルロ法でこの亀裂平面からサンプルを採点するとき、全平面にわたり亀裂寸法 をランダムに決定し、式(6-1)を用いて破壊したサンプル数と全サンプル数との比から破損確率 を計算するが、階層別モンテカルロ法ではこの亀裂サイズ平面に対して、まず図 6-2 に示すよう にいくつかの階層に分割する。そして、亀裂寸法に関する採点は全階層からくまなく採取される ように、強制的に各階層でのサンプル数を設定する。さらに、各サンプルには初期亀裂サイズ分 布に従って重み付きを行う。

つまり、初期亀裂寸法の確率密度をp(a/c, a/t)とすると、第m番目の階層 $(x_1 < a/c < x_2, y_1 < a/c < y_2)$ から採取される確率 $p_m$ は

$$P_m = \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} p(x, y) dx dy$$
 (6-10)

と表される。この確率 pmが m 番目の階層から採取されたサンプルの重みとなる。

このような重み付きをしたサンプリングを行うと破損確率は以下のように計算される。第m番目の階層から採取するサンプル数を $N_m$ 、そのうち破壊した数を $N_{mf}$ とすると、破損確率 $P_m$ は次のようになる。

$$P_f = \sum_{m=1}^{M} p_m \frac{N_{mf}}{N_m}$$
(6-11)

ここで、*M*は総階層数である。本コード内では、初期亀裂寸法に全く分布がない場合を除いて、 全ての初期亀裂に対して階層別モンテカルロ法を利用することが可能である。解の収束性を向上 させるために、特に破損確率が小さいことが予想されるケースにおいては、階層別モンテカルロ 法を利用することが推奨される。



図 6-1 亀裂サイズ平面(階層分割する前の空間)



図 6-2 階層別モンテカルロ法

#### 6.2.4 累積確率からの亀裂進展確率の算出

単一亀裂の CPI は、ある過渡事象の開始から終了までにひとつの亀裂が進展する確率である。 現実の過渡事象は温度や応力が時間に対して連続的に変化するが、PASCAL-RV では時間を離散 化し、過渡事象における物理量の変化を有限個の時刻点における値として表現する。このような 扱いの下では、CPI はある過渡事象のいずれかの時刻点において亀裂が進展する確率として定義 される。

まず、ある時刻においてひとつの亀裂が進展するための条件を考える。その時刻における亀裂の応力拡大係数と部材の破壊靭性をそれぞれ *K*<sub>I</sub>、*K*<sub>Ic</sub> とすると、亀裂が進展する条件は次式で与えられる。

 $K_{IC} < K_I \tag{6-12}$ 

破壊靭性  $K_{lc}$ を決定するためには、破壊靭性の分布を決定する不確実さと、破壊靭性そのもの の不確実さの2つの不確実さが存在する。前者は参照温度の不確実さに起因し、中性子照射量や 化学成分の含有量などの多くの不確実さを考慮する必要がある。ここでは、これらの不確実さに ついては別途考慮するものとし、過渡事象のすべての時刻点において  $K_{lc}$ の分布が定まる場合に、 破壊靭性そのものの不確実さに起因する CPI を求める手順について考える。なお、ここで述べる CPI は、参照温度等に伴う不確実さを含めた CPI とは異なることに注意が必要である。図 6-3 に 算出処理のフローチャートを示す。 $K_{lc}$ の確率密度関数と累積分布関数をそれぞれ  $f(K_{lc})$  と  $g(K_{lc})$ とする。いうまでもなく、 $g(K_{lc})$ は区間[0,1]の実数であり、 $K_{lc}$ の不確実さはその累積確率 p = $g(K_{lc})$ の不確実さと捉えなおすことができる。式(6-12)は
$$p \le g(K_I) \tag{6-13}$$

と書き直すことができる。

次に、過渡事象のいずれかの時刻についてひとつの亀裂が進展するための条件を考える。過渡 事象の時刻点を n 個考慮すると、i 番目 (i = 1,2,3,...n)の時刻点における亀裂の応力拡大係数を  $K_I^{(i)}$ 、温度等を考慮した破壊靭性の累積分布関数を  $g^{(i)}(K_{lc})$ とすると、i 番目の時刻において亀裂 が進展する条件は式(6-13)と同様に

$$p \le g^{(i)}\left(K_I^{(i)}\right) \tag{6-14}$$

となる。いずれかの時刻で亀裂が進展する条件は

$$p \le g^{(1)}(K_I^{(1)}) \lor p \le g^{(2)}(K_I^{(2)}) \lor \cdots \lor p \le g^{(n)}(K_I^{(n)})$$
(6-15)

であるので、ある過渡事象において亀裂が進展する条件は

$$p \le \max\left[g^{(i)}(K_I^{(i)}), i = 1, 2, 3, \cdots, n\right]$$
 (6-16)

となる。ここで max は各時刻点 *i* に対する最大値を取る関数である。すなわち、ある過渡事象に おいて亀裂が進展する確率は

$$CPI = \max \left[ g^{(i)}(K_I^{(i)}), i = 1, 2, 3, \cdots, n \right]$$
(6-17)

となる。



# 6.2.5 積分を利用した亀裂貫通確率の算出

6.2.2.4 で考えた CPI と同様にして、CPF についても、破壊靭性及び亀裂伝播停止破壊靭性その ものの不確実さにのみ注目する。また、破壊靭性と亀裂伝播停止破壊靭性は独立に定まるもので はなく、破壊靭性の高い材料は亀裂伝播停止破壊靭性も高いという相関を想定している。そのた め、ここでは *K*<sub>*lc*</sub> と *K*<sub>*la*</sub> の累積確率が等しいという条件において、CPF を算出する手順を考える。 図 6-4 に算出処理のフローチャートを示す。

CPFを考慮する際には $K_{lc} \ge K_{la} \ge 0$  2つの確率変数が登場するものの、独立な確率変数は1 つのみである。前節の考察と同様に、 $K_{lc} \ge K_{la}$ の不確実さはその累積確率pの不確実さと捉える ことができ、亀裂貫通に至るpの範囲を求めることで、CPFを求めることができる。

まず、亀裂が貫通に至るためには、亀裂が進展することが必要である。よって、*p*が CPIより 大きな値をとる場合には亀裂が進展しないので、亀裂が貫通する*p*の範囲は

# p < CPI

(6-18)

に限定される。さらに、大きな p は高い破壊靭性に対応するので、p が 0 に近いほど亀裂が貫通 し易くなる傾向があると考えられる。しかし、過渡事象中の板厚内の温度分布によっては、破壊 靭性が非常に低く亀裂が進展しても、途中で進展停止条件を満たし、過渡事象終了まで貫通に至 らないこともあるので、注意が必要である。このような考察に基づき、PASCAL5の PASCAL-RV では探索フェーズと積分フェーズという2つのフェーズを設定し、効率的に CPF を算出できるよ うにした。

探索フェーズは、亀裂が貫通する最も高い破壊靭性及び亀裂伝播停止靭製の累積確率pを求めるためのフェーズである。探索範囲は式(6-18)にあるように0 である。PASCALでは、初項がCPI、公比が<math>r(0 < r < 1)となる等比数列にしたがってpを低下させ、探索を行う。公比rの値はユーザーが指定可能であり、1 に近いほど探索時の見逃しは減少するものの、探索回数の増加により解析時間が増加する。rの値は#CPFPARAMカードのCPFSRでユーザーが指定できる。もし探索フェーズで貫通に至るpの最大値が一定値を下回った場合、次の積分フェーズには進まずに、CPF は0として処理される。この値は#CPFPARAMカードのCPIMINでユーザーが指定できる。

積分フェーズは、探索フェーズで求めた亀裂が貫通する p の最大値を用いて、CPF を算出する フェーズである。p を与えたとき、亀裂が貫通する場合には 1 を、亀裂が貫通しない場合には 0 を返す関数 f(p)を考えると、CPF は次式で求めることができる。

$$CPF = \int_0^1 f(p) \, dp$$
 (6-19)

*f(p)*の値は亀裂進展処理を行うことで決定されるので、計算効率の観点からは、積分区間を狭めてより少ないデータ点を用いて積分を近似するのが適切である。式(6-18)より、*p*の積分の上端は1から CPI に変更しても、算出される CPF に影響はない。

$$CPF = \int_0^{CPI} f(p) \, dp \tag{6-20}$$

さらに、探索フェーズで求めた亀裂が貫通する最大のpの値を $p_{max}$ とすると、積分の上端を $p_{max}$ に変更することが可能である。

$$CPF = \int_0^{p_{max}} f(p) \, dp \tag{6-21}$$

PASCAL-RV では探索フェーズで求めた  $p_{max}$  よりもわずかに大きな p を積分の上端として設定し、 貫通に至る p の範囲を取りこぼすことがないように工夫している。また、PASCAL-RV ではさら に  $p=e^x$  という変数変換を行い、x に関する次の積分

$$CPF = \int_{\ln(p_{min})}^{\ln(p_{max})} f(e^x) e^x dx \tag{6-22}$$

を評価している。*pmin*は*pmax*の10<sup>5</sup>倍としている。式(6-22)の積分アルゴリズムにはシンプソン 法を採用した。シンプソン法は積分区間を分割して各区間で被積分関数を2次関数で近似して面 積を求める手法であり、区間内の被積分関数を1次関数で近似する台形公式よりも一般に早く収 束する。分割数を増やすことで積分が収束するが、PASCAL-RV では以下の条件を満たせば CPF の積分評価を終了する。

$$\left|\frac{CPF_{before} - CPF_{after}}{CPF_{after}}\right| < \varepsilon \tag{6-23}$$

ここで、CPF<sub>before</sub> と CPF<sub>after</sub> はそれぞれ分割数を増やす前及び後の積分値である。 $\epsilon$ はユーザーが #CPFPARAM カードの CPFRLER で指定でき、小さければ小さいほど CPF が高精度に評価される。 例えば CPFRLER を 10[%]とすると $\epsilon$ は 0.1 となる。



### 6.3 信頼度評価手法

PASCAL-RV では認識論的不確実さを考慮することにより、CPI 及び CPF の信頼度評価が可能 である。また、PASCAL-Manager を用いることにより、PASCAL-RVの解析結果を踏まえ、FCI及 び TWCF の信頼度評価を行うことができる。本機能を用いた場合、認識論的不確実さに分類し た確率変数については、サンプリングした確率変数の組に対して1つの破損確率を算出するため、 サンプリングした組の数だけ破損確率が算出される。すなわち、破損確率は分布を持つことにな るため、事前に定めたパーセンタイル値を評価対象とすることにより信頼度評価を行うものであ る。

PASCAL では、信頼度評価を行うに当たり LHS 法を採用している。LHS 法は、実験計画法の ひとつである。PASCAL-RV では、認識論的不確実さに分類される確率変数の多数の組のそれぞ れに対して、偶然的不確実さを考慮した CPI 及び CPF を 1 つ評価することにより、CPI 及び CPF の分布を評価する。1 つの CPI 及び CPF を算出する際に固定される認識論的不確実さに分類され る確率変数の数は 10 以上となることが一般的であるため、乱数を利用して確率変数の値を決定 している。LHS 法は、独立な乱数を生成して確率変数の値を決定する通常のモンテカルロ法とは 異なり、各確率変数のサンプリング値が重複しないように工夫されており、より効率的に CPI 及 び CPF の分布を評価することが可能となる。ただし、LHS 法ではサンプリングを開始する前にサ ンプリング数を決定する必要があり、必要に応じてサンプリングを離続できる通常のモンテカル ロ法よりも制限があることに注意する必要がある。

LHS 法では、まずサンプリングを始める前に確率変数の累積確率の定義域である区間(0,1) をサンプリング数で等分割し、各分割区間の中央値から確率変数の累積分布の逆関数を用いて確 率変数の値を決定しておく。例えば、サンプリング数が100である場合には、決定される確率変 数の値は 0.5 パーセンタイル値、1.5 パーセンタイル値、2.5 パーセンタイル値、...、99.5 パーセ ンタイル値となる。

次いで、確率変数の組をサンプリングする際には、各確率変数の値を先に決定した値から選び 出す。ただし、各確率変数において、過去のサンプリング時に決定した値は選択しない。例えば、 サンプリング数が 100 である場合には、確率変数 A は 1 回目のサンプリングでは 1.5 パーセンタ イル値、2 回目のサンプリングでは 18.5 パーセンタイル値、...、確率変数 B は 1 回目のサンプリ ングでは 71.5 パーセンタイル値、2 回目のサンプリングでは 98.5 パーセンタイル値、...という具 合にサンプリングが行われる。確率変数 A に注目すると、全 100 回のサンプリングにおいて 0.5 パーセンタイル値、1.5 パーセンタイル値、2.5 パーセンタイル値、...、99.5 パーセンタイル値が 1 回ずつ選択される。表 6-2 に LHS 法で 5 つの確率変数 (A、B、C、D、E) を 100 個サンプリン グする例を示す。表の行内では数値が一致することは許されるが、列内では一致することはない。

サンプリング来早	確率変数の累積確率[%]					
	確率変数A	確率変数B	確率変数C	確率変数D	確率変数E	
1	1.5	71.5	27.5	16.5	75.5	
2	18.5	98.5	28.5	86.5	71.5	
3	79.5	67.5	29.5	70.5	94.5	
4	60.5	59.5	91.5	98.5	79.5	
5	4.5	20.5	65.5	39.5	1.5	
(略)						
99	87.5	44.5	45.5	49.5	61.5	
100	95.5	93.5	14.5	59.5	59.5	

表 6-2 LHS 法を用いて 100 サンプルの確率変数を決定する例

# 6.4 初期亀裂

初期亀裂は、以下の種類を対象にしている(図 6-5 参照)。

- 表面亀裂(内表面・外表面半楕円亀裂及び内表面クラッド内矩形母材内半楕円亀裂)
  - 内部亀裂
  - ・ クラッド下亀裂
  - · 無限長亀裂



表面亀裂は以下の5種類の亀裂モデルを考慮することができる。

- ・ 初期寸法固定モデル
- ・ 深さ分布あり、アスペクト比一定モデル
- ・ 深さ分布あり、長さ一定モデル
- ・ アスペクト比分布あり、深さ固定モデル
- ・ 深さとアスペクト比がともに分布ありのモデル

内部亀裂についても、表面亀裂と同様の亀裂モデルに加え、深さ比及びアスペクト比を離散値 とした亀裂モデルを考慮することができる。内部亀裂の深さ方向位置比は、ユーザー入力分布ま たは固定値により定義できる。

クラッド下亀裂と無限長亀裂については、ユーザーが入力した固定値を用いる。

#### 6.5 初期亀裂深さ分布

初期亀裂深さの分布モデルは、指数分布<sup>40)</sup>やユーザー入力分布等を考慮することができる。亀 裂の採点方式は、区間内一様採点方式と分布考慮採点方式を考慮することができる。

### 6.5.1 ユーザー定義分布

初期亀裂深さ分布の入力区関数と、各区間の開始深さ、終了深さ、亀裂存在確率を指定する。 入力区間は 0.0 から始め、亀裂存在確率の和が 1.0 になるまで入力する必要がある。区間は途中 に切れ目や重なりが生じてはならず、連続していなければならない。

累積確率密度関数をベースに、一様乱数から亀裂深さをサンプリングするという考え方は、指数 分布の場合と同一である。階層の始点と終点に対応する累積確率密度関数を予め計算しておき、 この範囲内で一様乱数を発生し、これに対応する亀裂深さをサンプリングする。この概念を図 6-6に示す。

前章との相違は、図 6-6 からも把握できるように、ユーザー定義分布の分割間隔と階層別モン テカルロ法の階層間隔が同一でないことを考慮する必要がある点である。これについては、コー ド内でユーザー定義分布の分割間隔を考慮した処理を適切に実施するようにしている。



図 6-6 ユーザー入力分布の累積確率密度関数の模式図

### 6.6 亀裂アスペクト比の分布

初期亀裂のアスペクト比は、対数正規分布及びユーザー入力分布を考慮することができる。また、亀裂の採点方式として、区間内一様採点方式と分布考慮採点方式を考慮することができる。

#### 6.6.1 对数正規分布

アスペクト比の対数正規分布<sup>8)</sup>は以下のように表される。

$$P(\beta) = \frac{C}{\alpha\beta\sqrt{2\pi}} exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(\beta/\mu)}{\alpha}\right)^2\right]$$
(6-24)

ただし、式中の各パラメータは $\beta > 5$ の亀裂の存在確率 $\rho$ によって決定される。ローレンス・リバモア国立研究所(LLNL)は以下の2組のデータを与えている<sup>8)</sup>。

ρ	10-2	10-4
σ	0.538	0.383
μ	1.336	1.158
С	1.419	1.541

パラメータは、 $\rho = 10^2$ のデータが LLNL に推奨されている<sup>8)</sup>。このことはアスペクト比が5よりも大きい初期亀裂の存在確率は0.01 とみなした方が妥当であることを意味している。 式(6-24)の*C* は、 $\sigma$ と $\mu$ から次式を用いて算出することができる。

$$C = \frac{2}{\operatorname{erfc}\left(\frac{\ln\frac{1}{\mu}}{\sigma 2^{\frac{1}{2}}}\right)} \tag{6-25}$$

ここで、*erfc*(*x*)は誤差関数である。アスペクト比の逆数がβ以上の亀裂の存在確率は、式(6-24) をβから無限大まで積分することで得られる。

$$P(>\beta) = \int_{\beta}^{\infty} p(x)dx = \frac{1}{2}erfc\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\frac{\ln\beta - \ln\mu}{\sigma}\right)C$$
(6-26)

よって、区間角から月の間に亀裂が存在する確率は、以下のようになる。

$$P(\beta_2 > \beta > \beta_1) = \frac{1}{2} erfc \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\ln \beta_2 - \ln \mu}{\sigma}\right) C - \frac{1}{2} erfc \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\ln \beta_1 - \ln \mu}{\sigma}\right) C \quad (6-27)$$

階層別モンテカルロ法における連続採点の方法は、ある階層における、対数正規分布の累積確 率密度関数の最小値と最大値を予め計算しておいたうえで、この範囲内の一様乱数を発生し、こ れから、亀裂アスペクト比をサンプリングする。

指数分布との処理上の相違は、対数正規分布の累積確率密度関数は式(6-26)で示されるように 誤差関数が含まれており、一様関数からアスペクト比のサンプリングの際に必要になる、累積確 率密度関数の逆関数の取得が容易ではない点である。本コードでは2分法を用いた逆計算を行い、 一様乱数からアスペクト比を算出している。

### 6.6.2 ユーザー定義分布

初期亀裂アスペクト比 a/c 分布の入力区関数と、各区間の開始アスペクト比、終了アスペクト 比、亀裂存在確率を指定する。ここで a は亀裂深さ、c は亀裂半長である。入力区間は 0.0 から 始め、亀裂存在確率の和が 1.0 になるまで入力する必要がある。区間は途中に切れ目や重なりが 生じてはならず、連続していなければならない。

連続採点の手法は、亀裂深さに対するユーザー定義分布の連続採点(階層別モンテカルロ法用) と同一である。階層の始点と終点に対応する累積確率密度関数を予め計算しておき、この範囲内 で一様乱数を発生し、これに対応する亀裂深さをサンプリングする。

#### 6.7 亀裂深さ方向位置比の分布

PASCAL では、内部亀裂が板厚内に存在する深さ方向の位置を深さ方向位置比と呼ぶ。内部亀 裂の深さ方向位置比の分布は、ユーザー入力分布で取り扱う。亀裂深さ方向位置比分布の入力区 間数と、各区間の開始亀裂深さ方向位置比、終了亀裂深さ方向位置比、亀裂存在確率を指定する。 入力された情報は、これをそのまま階層別モンテカルロ法の階層として取り扱う方式と、入力区 間と階層を別に取り扱う方式の2方式を設けている。

亀裂深さ方向位置比が、深さ比やアスペクト比と異なる点は、深さ比やアスペクト比がそれぞ れ独立した分布であるのに対し、亀裂深さ方向位置比は深さ比との関係が強い点にある。深さ比 の大きい亀裂ほど、板厚の中心部付近にしか存在できない。これを考慮するため、亀裂深さ方向 位置比の分布には、以下の3種類の初期機能を設けている。

- ・ 各亀裂深さ比に対するユーザー入力分布
- ・ 全亀裂深さ比に対するユーザー入力分布
- ・ 各亀裂深さ比に対するユーザー入力分布(連続処理)

# 6.7.1 各亀裂深さ比に対するユーザー入力分布

入力された分布が、各亀裂深さ方向位置比の分布であるとして処理を行う。例えば、亀裂深さ 比分布が一様、亀裂深さ方向位置比分布が一様である場合、各階層の重みは図 6-7 のようになる。 亀裂深さ比方向の階層でみると、内部亀裂の存在範囲(面積)を考慮したうえで一様な分布にな っているが、亀裂深さ方向位置比方向の階層の存在確率をみると一様にはならず、中心部付近の 存在確率が大きくなっている。

	区間	存在確率	重みテーブル					
這置比	0.8~1.0	0.047619	0.033333	0.014286	0.000000	0.000000	0.000000	
包包	0.6~0.8	0.194921	0.044444	0.057143	0.060000	0.0333333	0.000000	
できて、	0.4~0.6	0.514921	0.044444	0.057143	0.080000	0.133333	0.200000	
<b>亀裂</b> 淡	0.2~0.4	0.194921	0.044444	0.057143	0.060000	0.033333	0.000000	
	0.0~0.2	0.047619	0.033333	0.014286	0.000000	0.000000	0.000000	
			0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	存在確率
			0.0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	区間
					亀裂深	さ比		

図 6-7 各亀裂深さ方向位置比に対するユーザー入力分布の各階層の重み

# 6.7.2 全亀裂深さ比に対するユーザー入力分布

入力された分布が、全亀裂深さ比の分布であるとして処理を行う。例えば、亀裂深さ比分布が 一様、亀裂深さ方向位置比分布が一様である場合、各階層の重みは図 6-8 のようになる。亀裂深 さ方向位置比の階層でみると一様な分布になっているが、亀裂深さ方向の階層の存在確率をみる と一様にはなっていない。

	区間	存在確率	重みテーブル					
置比	0.8~1.0	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	
5向位	0.6~0.8	0.2	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	
来さげ	0.4~0.6	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	
龟裂淡	0.2~0.4	0.2	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	
<del>7</del> 2	0.0~0.2	0.2		0.1	0.0	0.0	0.0	
			0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	存在確率
			0.0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	区間
	亀裂深さ比							

図 6-8 全亀裂深さ方向位置比に対するユーザー入力分布の各階層の重み

# 6.7.3 各亀裂深さ比に対するユーザー入力分布(連続処理)

これは、6.7.1項で示した各亀裂深さ比に対するユーザー入力分布と基本的に同様の処理を行う が、6.7.1項の処理ではユーザー入力分布の入力区間がそのまま階層別モンテカルロ法の階層に なるのに対し、ここの処理では、階層別モンテカルロ法の階層間隔を別途入力する点が異なって いる。この部分は、深さ比やアスペクト比の分布のユーザー定義分布の連続採点(階層別モンテ カルロ法用)と同様の処理になっている。

### 6.8 過渡事象

PWR における PTS や BWR における LTOP 等の過渡事象は冷却水温度及び内圧が変化する事象 であり、その事例<sup>41-43)</sup>を図 6-9~図 6-13 に示す。



図 6-9 大破断冷却材喪失事故 (PWR) における冷却水の水温及び内圧の時刻歴例 41)



図 6-10 弁の開固着 (PWR) における冷却水の水温及び内圧の時刻歴例 41)



図 6-11 小破断冷却材喪失事故(PWR)における冷却水の水温及び内圧の時刻歴例<sup>41)</sup>





図 6-13 起動事象 (BWR)の水温及び内圧の時刻歴例<sup>43)</sup>

#### 6.8.1 過渡事象による温度及び応力分布の時刻歴

PTS 等の過渡事象中の冷却水の温度及び内圧の変化によって、RPV の板厚方向において、温度 及び応力分布が生じる。そのため、PFM 手法により RPV 炉心領域部の亀裂進展や破壊等を評価 する際は、RPV の板厚方向における温度及び応力分布の時刻歴を評価する必要がある。

PASCAL5 では、温度及び応力分布に関する決定論的な解析部分と、PFM の解析部分をそれぞ れ独立に取り扱っている。温度及び応力分布に関する決定論的な解析部分に関しては、別途熱伝 導・熱応力解析を実施し、温度及び応力分布に関する解析結果を準備する必要がある。確率論的 解析を目的として開発された PASCAL-RV では、温度に関しては容器壁板厚方向の位置座標及び 時刻に対応したデータテーブルの形で取り扱い、応力に関しては、以下 2 つの形式の入力データ を入力することができる。

(1) 3次多項式分布

応力分布を3次多項式として評価し、各係数項の時刻歴を入力データとして入力する。

(2) 離散点分布

応力分布を容器壁板厚方向の位置座標及び時刻に対応したデータテーブルの形で入力する。

クラッドを考慮し、3 次多項式分布を用いる場合は、クラッド部に対する応力と母材部に対す る応力を別に入力する。3 次多項式分布及び離散点分布の板厚方向の座標単位は、板厚方向の座 標を板厚で無次元化した *x*/*thick* を用いる。

なお、PASCAL-Manager では外面側亀裂評価時、過渡事象時の温度分布及び応力分布を記載した入力ファイルを作成する際に自動的に容器外表面を原点とした座標に変換する。

### 6.8.2 過渡事象の発生頻度

過渡事象の発生頻度は CPI 及び CPF とは独立な変数であるため、PASCAL では PASCAL-Manager におけるポスト処理において過渡事象の発生頻度をサンプリングし、容器全体の CPI 及 び CPF との積をとって FCI 及び TWCF を算出する。PASCAL-Manager では、6.3 節で述べた LHS 法を用いて過渡事象の発生頻度のサンプリングを行う。

FCI及びTWCFは、過渡事象の発生頻度と容器全体のCPI及びCPFの積を全ての過渡事象について足し合わせた和として表現されるため、過渡事象の発生頻度の不確実さはFCI及びTWCFの不確実さに直接的に影響する。PASCALではこの特徴に注目し、ひとつの容器全体のCPI及び CPFに対して複数の過渡事象の発生頻度を掛けて複数のFCI及びTWCFを計算することで、効率的にFCI及びTWCFの分布を評価することができる。ひとつの容器全体のCPI及びCPFに掛ける発生頻度の個数は、表 5-8の number of transient frequency combinations でユーザーが指定することができる。

### 6.9 無限長亀裂の応力拡大係数解

無限長亀裂に関する応力拡大係数解として、JSME 維持規格 2016 年版に示されている解<sup>の</sup>を採 用している。また、亀裂深さに対応した値をユーザーが入力することも可能である。

### 6.10 表面亀裂に対する応力拡大係数解

表面亀裂に対する応力拡大係数解として、以下の解を適用することができる。

- JSME 維持規格 2016 年版の解<sup>6)</sup>
- ・ JEAC4206-2007の解<sup>18)</sup>
- ・ CEA の解<sup>20)</sup>

ここでは、JSME 維持規格 2016 年版の解<sup>6</sup>、CEA の解<sup>20)</sup>について説明する。

## 6.10.1 JSME 維持規格 2016 年版の解

JSME 維持規格 2016 年版の解<sup>6)</sup>を以下に示す。応力分布σ(*x*)が式(6-28)のように板厚比の多 項式で表されるとき、応力拡大係数は式(6-29)のように与えられる。

$$\sigma(x) = \sigma_0 + \sigma_1 \left(\frac{x}{t}\right) + \sigma_2 \left(\frac{x}{t}\right)^2 + \sigma_3 \left(\frac{x}{t}\right)^3$$
(6-28)

$$K_I = \sqrt{\pi a} \left[ (\sigma_0 + \sigma_p) G_0 + \sigma_1 G_1 \left(\frac{a}{t}\right) + \sigma_2 G_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + \sigma_3 G_3 \left(\frac{a}{t}\right)^3 \right]$$
(6-29)

ここで、 $\sigma_0 \sim \sigma_3$ は板厚方向の応力分布を式(6-28)で近似したときの係数、xは表面からの距離、tは板厚、 $\sigma_p$ は内圧(内表面亀裂の場合に必要)、 $G_0 \sim G_3$ は容器及び亀裂寸法から決定された応力 拡大係数補正係数である。なお、補正係数については、JSME 維持規格 2016 年版<sup>6</sup>の表 添付 E-5-9 及び E-5-10 の値を用いている。

#### 6.10.2 CEAの解

(1) クラッド貫通表面亀裂

フランス原子力・代替エネルギー庁(CEA)が開発したクラッド貫通表面亀裂を対象とした 応力拡大係数解<sup>20)</sup>を次式に示す。

$$K = \left[\sum_{j=0}^{4} \sigma_{j} i_{j} \left(\frac{a+r}{h+r}\right)^{j} + \sum_{j=0}^{1} \sigma_{jr} i_{jr} \left(\frac{a+r}{h+r}\right)^{j}\right] \sqrt{\pi(a+r)}$$
(6-30)

想定する亀裂の形状を図6-14に示す。ここで、rはクラッド部の厚さ、hは母材部の厚さ、aは 母材部における亀裂の深さである。なお、亀裂形状を母材内部で半楕円とし、クラッド部で長さ を一定としている。また、想定する応力分布は 4 次多項式分布である。*i*<sub>j</sub> は母材部の応力に対す る形状関数、*i*<sub>j</sub>rはクラッド内部の応力に対する形状関数、*o*<sub>j</sub>は母材部の応力、*o*<sub>j</sub>rはクラッド部の 応力を表す。想定する応力分布の概念図を図 6-15 に示す。なお、CEA の評価式の形状関数が取 得されている範囲は下記の通りである。

$$\frac{1}{16} \le \frac{a}{c} \le 1$$
$$\frac{1}{8} \le \frac{a}{r} \le 4$$
$$0.7 \le \frac{E_1}{E_2} \le 1$$

ここで、E<sub>1</sub>はクラッド部のヤング率、E<sub>2</sub>は母材部のヤング率である。

また、テーブルの範囲外の処理については、次の通りである。

- ・ 形状関数のデータテーブルの範囲外では、データテーブルの端点及び隣接する点を用いて、形状関数を外挿した上で*K*を算出する(深さ方向*a*/*r* ≧ 4の場合を除く)。
- ・ 深さ方向は $1/8 \leq a/r \leq 4$ までしかテーブルが与えられていない。a/r < 1/8の場合は上記 の通り外挿する。a/r > 4より深い場合はJSME維持規格2016年版<sup>6</sup>の式+簡易法とする。
- ・ a/c ≤ 1/16の範囲の亀裂の応力拡大係数は、無限長亀裂との内挿により算出する。



図 6-14 CEA が開発した応力拡大係数評価法における表面亀裂の寸法



図 6-15 想定する応力分布

(2) クラッド下亀裂

クラッド下亀裂を対象とした応力拡大係数の解<sup>13)</sup>を次式に示す。

$$K_{I} = \left(\sum_{j=0}^{4} \sigma_{j} i_{j} \left(\frac{a+r}{h+r}\right)^{j}\right) \sqrt{\pi a}$$
(6-31)

想定する亀裂の形状を図 6-16 に示す。ここで、rはクラッド部の厚さ、hは母材部の厚さ、aは 母材部における亀裂の深さである。また、想定する応力分布は 4 次多項式分布である。ij は母材 部の応力に対する形状関数、σj は母材部の応力を表す。なお、CEAの評価式の形状関数が取得さ れている範囲は下記の通りである。

$$\frac{1}{16} \le \frac{a}{c} \le 1$$
$$\frac{1}{8} \le \frac{a}{r} \le 4$$
$$0.7 \le \frac{E_1}{E_2} \le 1$$

ここで、*E*<sub>1</sub>はクラッド部のヤング率、*E*<sub>2</sub>は母材部のヤング率である。

また、テーブルの範囲外の処理については、次の通りである。

- ・ 形状関数のデータテーブルの範囲外では、データテーブルの端点及び隣接する点を用いて、形状関数を線形外挿した上で*Ki*を算出する(深さ方向*a*/*r* ≧ 4の場合を除く)。
- ・ 深さ方向は1/8 ≤ *a*/*r* ≤ 4の範囲でのみテーブルが与えられている。*a*/*r* < 1/8の場合は上述の通り外挿する。*a*/*r* > 4より深い場合はJSME維持規格の解<sup>6)</sup>+簡易法を用いて*K*<sub>I</sub>を算出する。



図 6-16 応力拡大係数評価法におけるクラッド下亀裂の寸法

## 6.11 内部亀裂に対する応力拡大係数解

内部亀裂に対する応力拡大係数の解として、以下を適用することができる。

- ・ ASME Sec. XI の解<sup>16)</sup>
- ・ 電中研の解<sup>21)</sup>

電中研の評価式とは、電中研の研究報告 T94037「円筒中の埋没き裂の応力拡大係数解の開発」<sup>21)</sup> に示された応力拡大係数解を指す。以下、ASME Sec. XI の解<sup>16)</sup>と電中研の解<sup>21)</sup>について説明す る。

### 6.11.1 ASME Sec. XIの解

ASME Sec. XI<sup>16)</sup>の解では、次式により応力拡大係数が与えられる。応力分布を表す式(6-32)で 得られた*A<sub>i</sub>* (*i* = 0,1,2,3)を用いて、式(6-33)に基づき、応力拡大係数を算出する。

$$\sigma = A_0 + A_1 \left(\frac{x}{t}\right) + A_2 \left(\frac{x}{t}\right)^2 + A_3 \left(\frac{x}{t}\right)^3 \tag{6-32}$$

$$K_I = (A_0 G_0 + A_1 G_1 + A_2 G_2 + A_3 G_3) \sqrt{\pi a/Q}$$
(6-33)

$$Q = 1 + 4.593(a/l)^{1.65} \tag{6-34}$$

ここで、 $A_0 \sim A_3$ は板厚方向の応力分布を式(6-32)で近似したときの係数、xは表面からの距離、 tは板厚、Qは欠陥形状係数、aは亀裂深さ、Iは亀裂長さ、 $G_0 \sim G_3$ は板厚及び亀裂寸法から決定 された補正係数である。なお、補正係数については、ASME Sec. XI<sup>16</sup>の Table A-3610-1 から Table A-3610-6 の値を使っている。

### 6.11.2 電中研の解

曽根田ら<sup>21)</sup>は、内部亀裂の応力拡大係数算出式として次式を示した。

$$K_{I}(\theta) = \sqrt{\frac{\pi a_{2}}{Q a_{1}} (a_{1}^{2} \sin \theta + a_{2}^{2} \cos \theta)^{\frac{1}{4}} \sum_{i} A_{i} G_{i}}$$

$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{a_{2}}{a_{1}}\right)^{1.65}$$
(6-35)

ここで、*a*<sub>1</sub>は亀裂半長、*a*<sub>2</sub>は亀裂深さの半分である。また、*A*<sub>i</sub>は多項式近似された応力分布の係数、*G*<sub>i</sub>は無次元化応力拡大係数データベースから得られる係数である。この手法では、応力分布は4次多項式まで対応可能であり、膜・曲げ応力近似の際に問題となる応力不連続部の評価精度の向上が期待できる。なお、PASCAL-RVでは深さ方向の内表面側及び外表面側、そして長さ方向の亀裂先端において応力拡大係数の算出を行うことが可能である。

### 6.12 応力拡大係数の塑性域補正

PASCAL-RV は、 $K_I$ を算出する際に、塑性域補正を考慮する機能を有している。塑性域補正は JSME 維持規格の式  $^{6}$ を用いて行われている。 塑性域補正を考慮する前の K<sub>I</sub>が以下の式で表される。

$$K_{I} = \sum_{i=1}^{N} G_{i}\sigma_{i}\sqrt{\frac{\pi a}{Q}} = A\sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$$

$$A = \sum_{i=1}^{N} G_{i}\sigma_{i}$$
(6-36)

ここで、Nは考慮する応力分布を多項式で近似したときの次数である。 このとき、塑性域補正を考慮した応力拡大係数 $K_I$ は次の式で計算される $^{0}$ 。

$$K_I^* = A\sqrt{\pi a/Q'}$$

$$Q' = \frac{Q}{1 + \frac{1}{6\pi a} \left(\frac{K_I}{\sigma_y}\right)^2}$$
(6-37)

ここで、σ,は亀裂先端の温度に対応する降伏応力、Qは亀裂形状係数である。

PASCAL-RVでは、母材部,クラッド部それぞれ温度と降伏応力の関係テーブルを入力データとして与えて、直線補間して降伏応力の値を取得する。亀裂長さ方向の評価を行う必要がある場合は、式(6-37)の *a* を亀裂半長さ *b* に置き換えて *K*<sup>\*</sup>*i* の算出を行う。塑性域補正の適用有無は、亀裂前縁の位置(亀裂深さ方向(外表面側)、亀裂長さ方向、亀裂深さ方向(内表面側))毎に設定が可能である。

## 6.13 応力拡大係数に対するクラッドの塑性の影響

クラッド下亀裂に対する *K*<sub>I</sub>の算出においては、クラッドの塑性の影響により、実際の *K*<sub>I</sub>が弾 性解析により求められる *K*<sub>I</sub>に比べて大きくなる。PASCAL-RV では、クラッド下亀裂を対象とし て、*K*<sub>I</sub>算出時の塑性域を考慮した補正について、以下から選択することができる。

- ・ 塑性域補正を考慮しない
- ・ 塑性域補正を考慮する (RSE-M の式<sup>29)</sup>)
- ・ 塑性域補正を考慮する (Marie らの式<sup>30)</sup>)
- ・ 塑性域補正を考慮する(JAEA の式<sup>31)</sup>)

### (1) RSE-Mの式

RSE-Mの補正式<sup>29)</sup>は以下の通りである。

$$K'_{I} = \begin{cases} \beta K_{I} \\ K_{I} + (K'_{I} - K_{I})_{max} \end{cases}$$

$$\beta = 1 + 0.5 \cdot \tanh\left(\frac{36r_{y(c)}}{t_{c}}\right)$$
(6-39)

ここで、 $K'_I$ 及び $K_I$ はそれぞれ補正後の応力拡大係数及び補正前の応力拡大係数である。また、  $(K'_I - K_I)_{max}$ は $K_I$ が最大となる際の $K'_I - K_I$ の値であり、 $r_{y(c)}$ はクラッド部の平面歪塑性域寸法、 $t_c$ は板厚を示す。平面歪塑性域寸法は以下の式で算出される。

$$r_{y} = \frac{1}{6\pi} \left( \frac{K_{I(c)}}{\sigma_{y(c)}} \right)^{2}$$
(6-40)

ここで $K_{I(c)}$ はクラッド面側の応力拡大係数であり、 $\sigma_{y(c)}$ はクラッド部の降伏応力である。

### (2) Marie らの式

Marie らの補正式<sup>30)</sup>は以下の通りである。

$$\frac{K_{cp}}{K_{el}} = \left[1 + \frac{1}{2(1-\nu^2)} \sqrt{1 - \left(\frac{1}{1+2r_{y_c}/a}\right)}\right] \times \sqrt{\frac{a+2r_{y_b}}{a}}$$
(6-41)

ここで、*K*<sub>cp</sub>及び*K*<sub>el</sub>はそれぞれ補正後の応力拡大係数及び弾性解析により求められる応力拡大係数である。また、*r*<sub>y\_b</sub>は母材部の平面歪塑性域寸法、*r*<sub>y\_c</sub>はクラッド部の平面歪塑性域寸法、*a*は 亀裂深さ、*v*はポアソン比である。平面歪塑性域寸法は以下の式で算出される。

$$r_y = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_y}\right)^2 \tag{6-42}$$

ここで、 $K_{I}$ は応力拡大係数、 $\sigma_{y}$ は降伏応力である。

# (3) JAEA の式

JAEA が提案した補正式<sup>31)</sup>は以下の通りである。

$$\frac{K_{cp}}{K_{el}} = \left[1 + A_1 \tanh\left(\frac{A_2 r_{y_c}}{t_c}\right)\right] \times \sqrt{\frac{a + 2r_{y_b}}{a}}$$
(6-43)

ここで、*K*<sub>cp</sub>及び*K*<sub>el</sub>はそれぞれ補正後の応力拡大係数及び弾性解析により求められる応力拡大係数である。また、*r*<sub>y\_b</sub>は母材部の平面歪塑性域寸法、*r*<sub>y\_c</sub>はクラッド部の平面歪塑性域寸法、*a*は

亀裂深さ、A1=0.29、A2=20である。平面歪塑性域寸法は以下の式で算出される。

$$r_y = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_y}\right)^2 \tag{6-44}$$

ここで、 $K_I$ は応力拡大係数、 $\sigma_V$ は降伏応力である。

# 6.14 クラッドを考慮した応力拡大係数評価

クラッドと母材の材料特性は異なるため、溶接により肉盛りされるクラッド中には大きな引張 残留応力が発生する。表面亀裂で亀裂先端がクラッド部に存在する場合は前述の*K*<sub>I</sub>を適用できる ものの、亀裂先端が母材中に位置する場合には、不連続な残留応力分布を適切に考慮する必要が ある。PASCAL-RV では、クラッドを考慮した表面亀裂の*K*<sub>I</sub>の評価手法として、重ね合わせの原 理に基づいた簡易法を採用している。簡易法は近似手法であるが、内表面側無限長亀裂と内表面 亀裂の両方に適用することができる。

### 6.14.1 簡易法

一般的には、クラッドの厚さは母材の厚さの数%(2%程度)に過ぎない。そのため、簡易法<sup>9,22)</sup>では、クラッドの厚さが母材に比べて十分に小さいと仮定し、重ね合わせの原理に基づいて、*K*<sub>I</sub>が計算される。簡易法は膜・曲げ応力、及び3次多項式応力分布について適用することができる。

簡易法の概念図及び計算手順を図 6-17 に示す。以下では、簡易法による K<sub>I</sub>の計算方法について、ステップごとに説明する。応力の座標系を図 6-18 に示す。また、応力の分布を図 6-19 と式 (6-45)に示す。

 $\sigma_{Base} = c_{11}\xi^3 + c_{12}\xi^2 + c_{13}\xi + c_{14}$  $\sigma_{Clad} = c_{21}\xi^3 + c_{22}\xi^2 + c_{23}\xi + c_{24}$ (6-45)



図 6-17 簡易法による応力拡大係数の概念図



図 6-18 応力分布に対する入力座標系 (クラッドを考慮)



図 6-19 入力で用いる応力分布式及び係数

(1) 第1ステップ

第1ステップでは図 6-20 に示す応力分布に対する応力拡大係数を算出する。つまり、クラッドの応力から母材の応力を引いた応力を用いればよい。応力の算出式を以下に示す。

$$\sigma_{Step1} = (c_{21} - c_{11})\xi^3 + (c_{22} - c_{12})\xi^2 + (c_{23} - c_{13})\xi + (c_{24} - c_{14})$$
(6-46)



(2) 第2ステップ

第2ステップは母材の応力を用いて応力拡大係数を算出すればよい。応力の算出式を以下に示 す。

$$\sigma_{Step2} = c_{11}\xi^3 + c_{12}\xi^2 + c_{13}\xi + c_{14}$$
(6-47)

(3) 第3ステップ

第3ステップで考慮する応力分布を図6-21に示す。これはステップ1の応力分布からクラッド 部の応力を取り除いたものに等しい。



図 6-21 第3ステップ応力算出図

ここで、3 次多項式の応力分布に対する応力拡大係数算出は、容器内表面を 0.0、容器外表面を 1.0 とする座標系を用いる必要がある。したがって図 6-18 の応力分布に対して座標変換を施す。 座標変換の前後の座標系を図 6-22 に示す。

座標変換式を以下に示す。

$$\xi = \left(1.0 - \frac{TCLAD}{THICK}\right)\eta + \frac{TCLAD}{THICK}$$
(6-48)

上式を利用すると、以下に示すステップ3で用いる応力分布を得る。

$$\sigma_{Step3} = c_1 A^3 \eta^3 + (3c_1 A^2 B + c_2 A^2) \eta^2 + (3c_1 A B^2 + 2c_2 A B + c_3 A) \eta + (c_1 B^3 + c_2 B^2 + c_3 B + c_4)$$
(6-49)

ただし、A = 1.0 - TCLAD/THICK、B = TCLAD/THICK、 $c_1 = c_{21} - c_{11}$ 、 $c_2 = c_{22} - c_{12}$ 、 $c_3 = c_{23} - c_{13}$ 、 $c_4 = c_{24} - c_{14}$ である。

クラッド部分の応力を取り去った計算を行うため、亀裂深さ*a*は本来の亀裂深さからクラッド 厚を引いたものを用いる。また同様な理由により板厚には母材の厚さを用いる。



図 6-22 第3ステップにおける座標変換

軸方向無限長亀裂について、簡易法による応力拡大係数、及び影響関数法による応力拡大係数 の比較を図 6-23 に示す。応力に関しては、NRC/EPRIベンチマーク基本問題のトランジェント 20 分における応力を用いている。亀裂が小さい領域では、両者の解は良く一致しており、簡易法の 精度が十分であることを確認できる。



図 6-23 簡易法と影響関数法による応力拡大係数の比較 5)

#### 6.15 逐次応力変換手法

溶接により生じる残留応力は、通常容器壁の板厚方向に3次多項式では表現できない複雑な分 布を示す。これに対して、多くの応力拡大係数評価法は3次以下の多項式で表現される応力分布 にしか対応していないため、応力拡大係数の計算精度が十分ではなくなる可能性がある。 PASCAL-RV に整備されている逐次応力変換手法は、入力された離散点の応力分布に対して、亀 裂が存在する範囲のみの分布を多項式で回帰することで、応力拡大係数を精度良く算出すること ができる。回帰する多項式の次数は、0次、1次、2次、3次を指定するほか、以下に述べる手順 で PASCAL-RV において適切な次数0から3を選択することができる。

亀裂が存在する範囲の応力分布を多項式で回帰する際には、回帰に用いる多項式の次数を高く すればより複雑な応力分布を表現したり回帰精度を向上させたりすることができるため、できる だけ高い次数の多項式によって回帰することが望ましいと考えがちである。しかし、例えば ASME Sec. XIの内部亀裂に対する応力拡大係数評価式を用いる場合には、式(6-32)から式(6-33) に示した回帰した多項式の係数を用いて算出することに注意する。

っまり、複雑な応力分布に対応する応力拡大係数を算出することは、1)複雑な応力分布を多項 式で回帰すること、2)式(6-33)を用いて応力拡大係数を算出すること、の2つの処理からなる。 1)の回帰については、回帰に用いる多項式の次数を高くすればより複雑な応力分布を表現したり 回帰精度を向上させたりすることができるため、できるだけ高い次数の多項式によって回帰する ことが望ましいと考えがちである。しかし、応力拡大係数の算出に必要なもう一つの処理2)を踏 まえる必要がある。2)では、1)で得られた多項式の係数 *A<sub>i</sub>*と、既存の表を亀裂寸法等に応じて補 間して得られる *G<sub>i</sub>* の積の和を計算する。このとき、特に 1)で高い次数で回帰を行った場合、多 項式の係数 *C<sub>i</sub>* に絶対値の大きい正と負の実数が含まれることがあり、算出される応力拡大係数 の値が適切でない場合がある。

適切な応力拡大係数を算出するため、応力拡大係数が応力について重ね合わせられることに注 目する。特定の亀裂について応力分布 $\sigma(x) = \sigma_a(x) + \sigma_b(x)$ が作用するときの応力拡大係数  $K_I$ は、  $\sigma(x) = \sigma_a(x)$ のみが作用するときの応力拡大係数  $K_{I,a} \ge \sigma(x) = \sigma_b(x)$ のみが作用するときの応力拡大 係数  $K_{I,b}$ を用いて  $K_{I,c} = K_{I,a} + K_{I,b} \ge x$ る。そのため、亀裂が存在する範囲における応力分布の最大値 を $\sigma_{max} \ge 0$ 、 $\sigma(x) = \sigma_{max} + (E 縮応力) \ge \partial f$ 解することで、位置によらない膜応力 $\sigma_{max}$ が作用してい ると仮定して求めた応力拡大係数  $K_{I,max}$ は、実際の応力拡大係数よりも大きな値であるといえる。 同様に、亀裂が存在する範囲における応力分布の最小値を $\sigma_{min} \ge 0$ 、 $\sigma(x) = \sigma_{min} + (引張応力) \ge \partial f$ 解することで、位置によらない膜応力 $\sigma_{min}$ が作用していると仮定して求めた応力拡大係数 $K_{I,min}$ は、 実際の応力拡大係数よりも小さな値であるといえる。

上記のようにして適切な応力拡大係数の範囲を評価できるため、図 6-24 のフローチャートに 示すように、応力分布を回帰する次数を0次から1つずつ増加させ、回帰した応力分布の係数を 用いて算出した応力拡大係数が範囲外になった場合には、1 つ小さい次数による回帰を採用する。

最後に、与えられた次数の多項式で応力分布を回帰する手順について述べる。PASCAL-RV では、*k* 次の多項式については次式で与えられる誤差 *R* を最小化するように(*k*+1)個の係数*a*<sub>j</sub>を決定する。

$$R = \frac{1}{2} \int_{x_1}^{x_n} dx \left[ \left( \vec{r} - \beta \, \mathrm{k} \, \mathrm{k} \, \mathrm{k} \, \mathrm{k} \, \mathrm{l} \, \mathrm{l} \, \mathrm{l} \, \mathrm{l} \right) - f_k(x) \right]^2 \tag{6-50}$$

*R* は与えられたデータを線形補間して、つまり折れ線グラフで与えられる応力分布と多項式分布 との差の2乗を亀裂が存在する範囲にわたって積分した値であるので、亀裂が存在する範囲にお いて(亀裂端点を含めて)データ点が*n* 個存在する場合には、次式のように積分を(*n*-1)区間に分 割できる。

$$R = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} \int_{x_i}^{x_{i+1}} dx \left[ (\alpha_i x + \beta_i) - \sum_{j=0}^k \alpha_j x^j \right]^2$$
(6-51)
$$(\alpha_i x + \beta_i) - \sum_{j=0}^k \alpha_j x^j = 0$$

$$\begin{cases} \alpha_{i} = \frac{1}{x_{i+1} - x_{i}} \\ \beta_{i} = y_{i} - \alpha_{i} x_{i} \end{cases}$$
(6-52)

上記の考え方のイメージを図 6-25 に示す。係数*aj*は、次式で与えられる(*k*+1)本(*J*=0,1,...,*k*)の方 程式の解として与えられる。

$$\frac{\partial R}{\partial a_j} = 0 \tag{6-53}$$

具体的に積分を実行すると、次式を得る。

$$\sum_{i=1}^{n-1} \left[ \frac{\alpha_i}{J+2} \left( x_{i+1}^{J+2} - x_i^{J+2} \right) + \frac{\beta_i}{J+1} \left( x_{i+1}^{J+1} - x_i^{J+1} \right) - \sum_{j=0}^k \frac{a_j}{J+j+1} \left( x_{i+1}^{J+j+1} - x_i^{J+j+1} \right) \right] = 0 \quad (6-54)$$

求めたい量はa<sub>i</sub>であるので、次式のように変形する。

$$\sum_{j=0}^{k} \left[ \sum_{i=1}^{n-1} \frac{x_{i+1}^{J+j+1} - x_{i}^{J+j+1}}{J+j+1} \right] a_{j} = \sum_{i=1}^{n-1} \left[ \frac{\alpha_{i}}{J+2} \left( x_{i+1}^{J+2} - x_{i}^{J+2} \right) + \frac{\beta_{i}}{J+1} \left( x_{i+1}^{J+1} - x_{i}^{J+1} \right) \right]$$
(6-55)

上記の式は、次式のように行列で表現できる。

$$A_{Jj}a_j = b_J \tag{6-56}$$

$$A_{Jj} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{x_{i+1}^{J+j+1} - x_i^{J+j+1}}{J+j+1} = \frac{x_n^{J+j+1} - x_1^{J+j+1}}{J+j+1} \ (j, J = 0, 1, \dots, k)$$
(6-57)

$$b_{J} = \sum_{i=1}^{n-1} \left[ \frac{\alpha_{i}}{J+2} \left( x_{i+1}^{J+2} - x_{i}^{J+2} \right) + \frac{\beta_{i}}{J+1} \left( x_{i+1}^{J+1} - x_{i}^{J+1} \right) \right] (J = 0, 1, \dots, k)$$
(6-58)

よって、多項式の係数は次式で与えられる。

ai

$$=A_{ij}^{-1}b_j$$
(6-59)



図 6-24 単宏か仔仕 9 る範囲にわける応力分布の多項式四席に用い 適切な次数の判断のフローチャート



図 6-25 亀裂が存在する範囲における応力分布の多項式回帰の説明図

## 6.16 重み関数法

前述のとおり、応力拡大係数の算出には、板厚方向の応力分布を多項式近似した係数が用いら れている。過渡事象により生じる応力分布は、このような多項式で十分近似できることが確認さ れている。一方、クラッド部における残留応力分布のように、複雑な分布を呈する場合には、多 項式近似では十分な精度が得られない。そこで、PASCAL-RVには、ASME Sec. XI<sup>10</sup>に示されて いる、表面亀裂及び無限長亀裂を対象に複雑な分布を呈する残留応力分布を考慮できる応力拡大 係数評価法である重み関数法を導入した。

重み関数法による応力拡大係数は、一般的に次式で表される。

$$K_I = \int_0^a m(x,a)\sigma(x)dx \tag{6-60}$$

ここで、*a*は亀裂深さ、*m*(*x*,*a*)は重み関数である。ASME Sec. XI<sup>16)</sup>の Nonmandatory Appendix A には、上記の式を評価して応力拡大係数を算出する具体的な方法が示されている。この手法では、応力分布が離散点で与えられ、かつ次式のように隣り合う2点間の分布を線形近似することを前提としている。

$$\sigma_i(\mathbf{x}) = k_i \mathbf{x} + b_i$$
 (*i* = 1, ..., *n*) (6-61)

ここで、i番目の区間における切片 biと傾き kiはそれぞれ次式で与えられる。

$$b_{i} = \sigma(x_{i}) - x_{i} \left( \frac{\sigma(x_{i+1}) - \sigma(x_{i})}{x_{i+1} - x_{i}} \right)$$

$$k_{i} = \frac{\sigma(x_{i+1}) - \sigma(x_{i})}{(6-63)}$$
(6-63)

$$k_i = \frac{1}{x_{i+1} - x_i}$$

さらに、重み関数は、無次元係数 G<sub>0</sub>及び G<sub>1</sub>を用いて次式で与えられている。

$$m(x,a) = \frac{2}{[2\pi(a-x)]^{1/2}} \left[ 1 + M_1 \left( 1 - \frac{x}{a} \right)^{1/2} + M_2 \left( 1 - \frac{x}{a} \right) + M_3 \left( 1 - \frac{x}{a} \right)^{3/2} \right]$$
(6-64)

$$M_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} (3G_1 - G_0) - \frac{24}{5} \tag{6-65}$$

$$M_2 = 3$$

$$M_3 = \frac{6\pi}{\sqrt{2}}(G_0 - 2G_1) + \frac{8}{5}$$
(6-66)
(6-67)

式(6-64)を式(6-60)に代入することで、亀裂最深点の応力拡大係数は次式のように求められる。

$$K_{I} = K_{IM0} + K_{IM1}M_{1} + K_{IM2}M_{2} + K_{IM3}M_{3}$$
(6-68)

$$K_{IM0} = \frac{2\sqrt{2}}{3\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^{n} \left[ (k_i x_i + 2k_i a + 3b_i) \sqrt{a - x_i} - (k_i x_{i+1} + 2k_i a + 3b_i) \sqrt{a - x_{i+1}} \right]$$
(6-69)

$$K_{IM1} = \sqrt{\frac{2}{\pi} \frac{1}{\sqrt{a}}} \sum_{i=1}^{n} \left[ \frac{k_i}{2} \left( x_{i+1}^2 - x_i^2 \right) + b_i (x_{i+1} - x_i) \right]$$
(6-70)

$$K_{IM2} = \frac{2}{15} \sqrt{\frac{2}{\pi} \frac{1}{a} \sum_{i=1}^{n} \left[ (3k_i x_i + 2k_i a + 5b_i)(a - x_i)^{3/2} \right]}$$
(6-71)

$$-(3k_ix_{i+1} + 2k_ia + 5b_i)(a - x_{i+1})^{3/2}]$$

$$K_{IM3} = \sqrt{\frac{2}{\pi} \frac{1}{a\sqrt{a}} \sum_{i=1}^{n} \left[ \frac{k_i}{3} \left( x_i^3 - x_{i+1}^3 \right) + \frac{1}{2} (k_i a - b_i) x_{i+1}^2 - \frac{1}{2} (k_i a - b_i) x_i^2 + b_i a (x_{i+1} - x_i) \right]}$$
(6-72)

同様に、表面亀裂の表面点における重み関数は次式で表される。

$$m(x,a) = \frac{2}{(\pi x)^{1/2}} \left[ 1 + N_1 \left(\frac{x}{a}\right)^{1/2} + N_2 \left(\frac{x}{a}\right) + N_3 \left(\frac{x}{a}\right)^{3/2} \right]$$
(6-73)

$$N_1 = 3\pi (2G_0 - 5G_1) - 8$$

$$N_2 = 15\pi (3G_1 - G_0) + 15$$
(6-74)

$$N_2 = 15\pi(3G_1 - G_0) + 15$$

$$N_2 = 3\pi(3G_2 - 10G_1) - 8$$
(6-75)

$$N_3 = 3\pi (3G_0 - 10G_1) - 8 \tag{6-76}$$

これにより応力拡大係数は次式で求められる。

$$K_{I} = K_{IN0} + K_{IN1}N_{1} + K_{IN2}N_{2} + K_{IN3}N_{3}$$
(6-77)

$$K_{IN0} = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \sum_{\substack{i=1\\n\\n}}^{n} \left[ \sqrt{x_{i+1}} (k_i x_{i+1} + 3b_i) - \sqrt{x_i} (k_i x_i + 3b_i) \right]$$
(6-78)

$$K_{IN1} = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \sum_{i=1}^{n} [x_{i+1}(k_i x_{i+1} + 2b_i) - x_i(k_i x_i + 2b_i)]$$
(6-79)

$$K_{IN2} = \frac{4}{15a\sqrt{\pi}} \sum_{\substack{i=1\\n}}^{n} \left[ x_{i+1}^{3/2} (3k_i x_{i+1} + 5b_i) - x_i^{3/2} (3k_i x_i + 5b_i) \right]$$
(6-80)

$$K_{IN3} = \frac{1}{3a\sqrt{\pi a}} \sum_{i=1}^{n} [x_{i+1}^2 (2k_i x_{i+1} + 3b_i) - x_i^2 (2k_i x_i + 3b_i)]$$
(6-81)

# 6.17 残留応力の考慮

PASCAL-RV では、板厚方向位置と応力値の組を複数個指定することで残留応力を入力する。 溶接残留応力の例として、PWR を対象とした突合せ溶接残留応力の例を図 6-26 に、クラッド溶 接残留応力の例を図 6-27 に示す。全応力成分はこれらの残留応力に過渡事象による応力を加算し て得られる。



図 6-26 突合せ溶接による残留応力の例 36)



図 6-27 クラッド溶接による残留応力の例 37)

## 6.18 容器壁内中性子照射量減衰評価方式

本解析コードでは、RPV 内表面での中性子照射量は正規分布モデルを用いて評価する。また、 照射量の容器板厚方向の減衰は、以下の式<sup>14)</sup>で計算している。

$$F = F_0 e^{-ma}$$

(6-82)

- F0 : 容器内表面での照射量
- *m* : 減衰定数
- a : 容器内表面までの距離

なお、外面側亀裂を対象とした解析を行う場合は、板厚の座標軸を反転させる機能が整備され ている。

#### 6.19 亀裂進展モデル

#### 6.19.1 表面亀裂

表面亀裂に対する進展モデルは、以下に示す2つのモデルを適用することができる。

(1) モデルA

亀裂が深さ方向に進展した場合、無限長亀裂に置き換える。その後の進展は無限長亀裂と 同じである。この進展モデルは FAVOR<sup>27)</sup>のモデルであり、保守的なモデルであるといわれ ている<sup>27)</sup>。

(2) モデルB

長さ方向と深さ方向のそれぞれの応力拡大係数を用いて、亀裂進展・停止の判定を行う。 表面亀裂はその形状を保ちながら、少しずつ進展する。





図 6-28 表面亀裂の進展モデルの説明図

## 6.19.2 内部亀裂

内部亀裂は、以下に示す5つの進展方式評価モデルを適用することができる。

(1) モデルA

内面方向、外面方向、長さ方向の3方向の進展評価を行い、独立に微小進展させる。

(2) モデルB

内面方向、外面方向、長さ方向の3方向の進展評価を行い、内面方向に進展した場合は内 表面亀裂に置き換える。それ以外の方向は微小進展させる。 (3) モデル C

内面方向、外面方向の2方向の進展評価のみを行い、長さ方向の進展評価は行わない。進 展した場合は微小進展させる。

(4) モデル D

内面方向、1 方向の進展評価のみを行い、長さ方向の進展評価は行わない。進展した場合は無限長亀裂に置き換える。その後の進展は無限長亀裂と同じである。この進展モデルは FAVORのモデルであり、保守的なモデルであるといわれている<sup>27)</sup>。

(5) モデルE

モデルDを更に保守的にしたモデルである。内面方向、外面方向、長さ方向の3方向の進展評価を行い、進展した場合は無限長亀裂に置き換える。その後の進展は無限長亀裂と同じである。

これらの進展モデルの概念図を図 6-29 に示す。

モデル A			内面方向に進展した場合は微小進展
	•		外面方向に進展した場合は微小進展
	<b>+··</b>		長さ方向に進展した場合は微小進展
	÷		内面方向に進展した場合は表面亀裂
モデル B	C ↓		外面方向に進展した場合は微小進展
	<b>♦○</b> ♦ द		長さ方向に進展した場合は微小進展
	ч <sup>г</sup>		内面方向に進展した場合は微小進展
モデルC	<b>↓</b> ;		外面方向に進展した場合は微小進展
			長さ方向の進展判定は行わない。
		♪	内面方向に進展した場合は無限長亀 裂。
モデルD			外面方向の進展判定は行わない。
			長さ方向の進展判定は行わない。
		>	内面方向に進展した場合は無限長亀 裂
モデルE		≻	外面方向に進展した場合は無限長亀 裂。
	<b>*&gt; +</b>	 ک,	長さ方向に進展した場合は無限長亀 裂。

図 6-29 内部亀裂の進展モデルの説明図
## 6.20 破壊靭性及び亀裂伝播停止破壊靭性の評価式

破壊靭性(K<sub>lc</sub>)の評価式及び亀裂伝播停止破壊靭性(K<sub>la</sub>)の評価式として、以下の曲線及び 評価式を考慮することができる。

- ・ ASME Sec. XIの下限曲線<sup>16)</sup>
- JEAC4206-2004 式<sup>17)</sup>
- ORNL ワイブル分布<sup>34)</sup>
- マスターカーブ法<sup>19)</sup>
- ・ FAVOR v16.1 の式<sup>27)</sup>
- ・ 国内ワイブル分布型破壊靭性曲線 (K<sub>lc</sub>式)<sup>5)</sup>
- · JEAC4206-2007 式<sup>18)</sup>
- 国内対数正規分布型亀裂伝播停止破壊靭性曲線(K<sub>la</sub>式)<sup>5)</sup>
- ・ 国内ワイブル分布型 K<sub>lc</sub>式及び国内対数正規分布型 K<sub>la</sub>式のユーザー設定

ここでは、ASME Sec. XIの下限曲線、JEAC4206-2004の式、ORNL ワイブル分布、マスターカ ーブ法、FAVOR v16.1の式、国内ワイブル分布型破壊靭性曲線、国内対数正規分布型亀裂伝播停 止破壊靭性曲線、国内ワイブル分布型 K<sub>lc</sub>式及び国内対数正規分布型 K<sub>la</sub>式のユーザー設定につい て述べる。

## 6.20.1 ASME Sec. XIの下限曲線

ASME Sec. XIの破壊靭性値の下限曲線<sup>16</sup>は次のようになる。

$$K_{Ic} = 36.5 + 3.084 exp[0.036(T - RT_{NDT} + 56)]$$
 [MPa m<sup>1/2</sup>] (6-83)

$$K_{Ia} = 29.5 + 1.344 exp[0.0261(T - RT_{NDT} + 89)] \text{ [MPa m}^{1/2} \text{]}$$
(6-84)

*T* : 温度(℃) *RT<sub>NDT</sub>* : 関連温度移行量(℃)

## 6.20.2 JEAC4206-2004 の式

JEAC4206-2004の破壊靭性評価式<sup>17)</sup>を以下に示す。

$$K_{Ic} = 65.0 + 419.0 exp[0.0161(T - 125)] \qquad [kg/mm^{3/2}] \\ = 20.16 + 129.94 exp[0.0161(T - 125)] \qquad [MPa\sqrt{m}]$$
(6-85)

上式中の定数 125(= $T_{0J}$ )は、中性子照射量が 10×10<sup>19</sup>n/cm<sup>2</sup>の場合の温度 ( $T_{0J} + \Delta T_{Klc}$  (10<sup>20</sup>n/cm<sup>2</sup>)) である。したがって、式(6-85)は以下のように表せる。

$$K_{Ic} = 20.16 + 129.94 exp \left[ 0.0161 \left( T - T_{0J_0} - \Delta T_{KIc} \right) \right] \quad [MPa \, m^{1/2}] \tag{6-86}$$

また、初期値 ( $T_{0J_0}$ ) は、国内脆化予測式に所定の値を代入して得られる $\Delta T_{Klc}$ =163.925 $^{\circ}$ を差 し引いて、 $T_{0J_0}$ =-38.925 $^{\circ}$ となる。

 $K_{la}$ については、ASMEの $K_{lc}$ と $K_{la}$ 下限曲線の等破壊靭性レベルでの温度差 $\Delta T_{a-C}$ を求め、これを JEACの $K_{lc}$ 曲線評価式に加えることにより定義する。

$$K_{Ia} = 20.16 + 129.94 exp [0.0161 (T - T_{0J_0} - \Delta T_{KIc} - \Delta T_{a-c})]$$
[MPa m<sup>1/2</sup>] (6-87)

式(6-86)及び式(6-87)は破壊靭性の下限曲線に相当するものである。PASCAL-RVでは破壊靭 性値の不確実さを考慮して、確率論的計算で用いる破壊靭性値の平均値を次式の形で評価する。

$$K_{Ic} = 1.43 \{ 20.16 + 129.94 exp [0.0161 (T - T_{0J_0} - \Delta T_{KIc})] \} MPa\sqrt{m}$$

$$K_{Ia} = 1.25 \{ 20.16 + 129.94 exp [0.0161 (T - T_{0J_0} - \Delta T_{KIc} - \Delta T_{a-c})] \}$$
[MPa m<sup>1/2</sup>] (6-89)

すなわち、式(6-88)と式(6-89)はそれぞれ式(6-86)と式(6-87)の標準偏差を下限値の15%及び10%に設定し、それぞれ20分上方に移動させた曲線である。

## 6.20.3 ORNL ワイブル分布

ORNLの3パラメータワイブル分布<sup>34)</sup>を用いたK<sub>la</sub>式及びK<sub>la</sub>式を以下に示す。

$$w(K_{Ic}|a_{2}^{**}(\Delta T), b_{2}^{**}(\Delta T)) = \frac{c(\Delta T)}{b_{2}^{**}(\Delta T)} y^{c(\Delta T)-1} exp(-y^{c(\Delta T)})$$

$$y = \frac{(K_{Ic} - a_{2}^{**}(\Delta T))}{b_{2}^{**}(\Delta T)}$$

$$a_{2}^{**}(\Delta T) = 11.9727 + 25.734 exp(0.00414(\Delta T))$$

$$b_{2}^{**}(\Delta T) = 16.2169 + 46.845 exp(0.02232(\Delta T))$$

$$c(\Delta T) = 2.0325 + 0.4983 exp(0.0243(\Delta T))$$
(6-90)

$$w(K_{Ia}|a_{2}^{**}(\Delta T), b_{2}^{**}(\Delta T)) = \frac{c(\Delta T)}{b_{2}^{**}(\Delta T)} y^{c(\Delta T)-1} exp(-y^{c(\Delta T)})$$

$$y = \frac{(K_{Ia} - a_{2}^{**}(\Delta T))}{b_{2}^{**}(\Delta T)}$$

$$a_{2}^{**}(\Delta T) = 27.01396 + 16.8694 exp(0.02275(\Delta T))$$

$$b_{2}^{**}(\Delta T) = 39.7791 + 0.119282(\Delta T)$$

$$c(\Delta T) = 2.5$$
(6-91)

ここで、 $K_{lc}$ ,  $K_{la}$ の単位は $MPa\sqrt{m}$ 、 $\Delta T$ は T- $RT_{NDT}$ あり、単位は $\mathbb{C}$ である。この式を用いると、 $K_{lc}$ ,  $K_{la}$ の確率密度関数を得ることができる。

累積分布関数(CDF: Cumulative Distribution Function)は、以下の式から算出される。

$$K_{Ic(p)} or \ K_{Ia(p)} = \{-\ln(1-p)\}^{1/c(\Delta T)} b_2^{**}(\Delta T) + a_2^{**}(\Delta T)$$
(6-92)

ここでpは累積確率であり、 $K_{lc}$ ,  $K_{la}$ の中央値を評価する場合は、p=0.5として求められる。

# 6.20.4 マスターカーブ法

マスターカーブ法<sup>19)</sup>における破壊靭性値の分布は、次式で表される。

$$P_f = 1 - exp\left(-\left(\frac{K_{Jc_{-1T}} - K_{min}}{K_0 - K_{min}}\right)^b\right) = 1 - exp\left(-\left(\frac{K_{Jc_{-1T}} - 20}{K_0 - 20}\right)^b\right)$$
(6-93)

ここで、理論的な値として、ワイブル形状母数*b*=4である。 また、破壊靭性値の温度依存性は、次式で表される。

$$K_0 = 31 + 77 exp(0.019(T - T_o)) \text{ [MPa m}^{1/2} \text{]}$$
(6-94)

$$K_{Jc_{1}T(med)} = 30 + 70 \cdot exp(0.019(T - T_o)) \text{ [MPa m}^{1/2}\text{]}$$
(6-95)

 $T_{\circ}$ は $K_{Jc_1T(med)} = 100 MPa\sqrt{m}$ となるマスターカーブの位置を決める参照温度である。 不確実さに関しては、ワイブル分布を仮定して、次式を適用することにより信頼限界を求める ことができる。

$$K_{Jc(X)} = D_1 + D_2 \cdot exp\{0.019 \cdot (T - T_o)\} \text{ [MPa m}^{1/2}\text{]}$$
(6-96)

ここで、D1、D2は信頼限界に対応して定まる係数であり、表 6-3 で与えられる。

信頼限界	係	数		
%	$D_1$	$D_2$		
1	23.5	24.5		
3	24.7	33.2		
5	25.4	37.8		
95	34.6	102.2		
97	35.3	106.8		
99	36.5	115.5		

表 6-3 K<sub>JC</sub>の不確実さ

 $T_o$ に関する標準偏差 $\Delta T_{o\sigma}$ は、次式で表される。

$$\Delta T_{o\sigma} = \frac{Z\beta}{\sqrt{N}} \quad [^{\circ}\mathrm{C}]$$

(6-97)

ここで、Nは  $T_o$ の算出に使用したデータ数、 $\beta$ は 1T 相当の  $K_{lc}$ メディアン値に対応する数値(表 6-4 参照)、Z は正規分布に関する偏差である (ex.: 85%信頼限界の場合、 $Z_{85} = 1.44$ )。

1T相当の <i>K</i> <sub>lc</sub>	係数β
メディアン値[MPa m <sup>1/2</sup> ]	[°C]
83以上	18.0
83~66	18.8
65~58	20.1
57~53	21.4
52~49	22.7

表 6-4 Toの不確実さ

マスターカーブ法により求められる  $T_o$ を用いた破壊靭性の評価法に関して、ASME Code Case N-629<sup>44)</sup>では、 $RT_{NDT}$ の代替値として、 $RT_{To} = T_o + 35^{\circ}$ Fを規定している。

*T*<sub>o</sub>が与えられる場合、任意の確率 P に対する破壊靭性値は、式(6-93)及び式(6-94)から、次式 により与えられる。

$$K_{Jc_{-}1T(P)} = (-\ln(1-P))^{1/4} \cdot (31 + 77exp(0.019(T-T_o)) - 20) + 20$$
[MPa m<sup>1/2</sup>] (6-98)

評価時期の  $T_o$ の評価法としては、 $\Delta T_o = \Delta R T_{NDT}$ を仮定して、初期  $T_o$ に脆化予測式により得られる $\Delta R T_{NDT}$ を加算する方法と、監視試験データから直接  $T_o$ を求める手法が考えられる。試験データから  $T_o$ を算出する際には、次の手法を用いる。

まず、次式を用いて破壊靭性データ(K<sub>k</sub>)を1T試験片データに補正する。

$$K_{Jc_{1T}} = 20 + (K_{Jc_{x}} - 20) \left(\frac{B_x}{B_{1T}}\right)^{0.25} [MPa m^{1/2}]$$
 (6-99)

ここで、 $K_{Jc_x}$ は板厚  $B_x$ の試験片から得られる破壊靭性データであり、 $B_x$ は試験片板厚、 $B_{1T}$ は 1TC(T)試験片の板厚(1 inch)である。

この K<sub>Jc 1T</sub> 値について、次式から算出される上限値との比較を行う。

$$K_{Jc\_limit} = \sqrt{\frac{Eb_0 \sigma_{ys}}{30(1-v^2)}} \quad [MPa \ m^{1/2}]$$
(6-100)

なお、 $K_{Jc}$ がこの上限値を超えて無効(Invalid)と判断された場合は、 $K_{Jc\_limit}$ を採用し、次式 により $K_0$ を算出する。ここで、Nは全データ数、rは有効データ数である。

$$K_0 = \left[\sum_{i}^{N} \left(K_{Jc_1T(i)} - K_{min}\right)^4 / r\right]^{0.25} + 20 \, \left[\text{MPa m}^{1/2}\right]$$
(6-101)

この K<sub>0</sub>を用いて、式(6-94)から、T<sub>o</sub>は次のようにして求めることができる。

$$T_o = T - \frac{1}{0.019} \ln\{(K_0 - 31)/77\}$$
(6-102)

実際の評価対象について考える場合、マスターカーブ法で得られる K<sub>0</sub>は 1TC(T)試験片に対す る破壊靭性値であるため、これを評価対象に対する破壊靭性値に再補正する必要がある。この補 正に関して、Persoz らは、OPERA コードにおいて、次式を用いて実施している。

$$K_{Ic\_new} = K_{min} + (K_{Ic\_orig} - K_{min})(25/l)^{1/4} \text{ [MPa m}^{1/2}\text{]}$$
(6-103)

ここで、*l* は亀裂長さ[mm]である。また、25mm は 1TC(T)試験片の厚さを意味している。この式 (6-103)を導入し、確率論的解析で対象とする亀裂に対しては、式(6-98)から求められる破壊靭 性値を補正して用いることとする。ただし、無限長亀裂に対しては、*l* = 100mm とする。また、 コード中では *K*<sub>min</sub> = 20 を用いる。

なお、現在は ASME Code Case N-629<sup>44)</sup>において、*K*<sub>*lc*</sub>及び *K*<sub>*la*</sub>曲線の指標となる *RT*<sub>*NDT*</sub>の代わり に、次式で表される *RT*<sub>*To*</sub>の使用が認められている。したがって、*To* が実測される場合に、この N-629 の手法を適用して、*K*<sub>*lc*</sub>及び *K*<sub>*la*</sub>曲線を評価できるよう次式も採り入れた。

$$RT_{To} = T_o + 35 \,[^{\circ}F](19.4 \,[^{\circ}C]) \tag{6-104}$$

# 6.20.5 FAVOR v16.1 の式

FAVOR<sup>27)</sup>は Oak Ridge National Laboratory (ORNL) により開発された RPV を対象とした PFM 解析コードであり、NRC による PTS 再評価プロジェクトで用いられている。FAVOR v16.1 で用 いられている破壊靭性評価式 ( $K_{Ic}$ 式)及び亀裂伝播停止破壊靭性評価式 ( $K_{Ia}$ 式) を以下で説明 する。

## (1) 破壊靭性の評価式

K<sub>lc</sub>の累積分布関数は、以下の3パラメータワイブル分布で表される。

$$K_{Ic}(\Delta T_{RELATIVE}) = a_{K_{Ic}}(\Delta T_{RELATIVE}) + b_{K_{Ic}}(\Delta T_{RELATIVE}) \left[ -\ln(1 - \Phi_{K_{Ic}}) \right]^{1/c_{K_{Ic}}} [ksi\sqrt{in.}] for \quad 0 < \Phi_{K_{Ic}} < 1$$

$$a_{K_{Ic}}(\Delta T_{RELATIVE}) = 19.35 + 8.335exp[0.02254(\Delta T_{RELATIVE})]$$

$$b_{K_{Ic}}(\Delta T_{RELATIVE}) = 15.61 + 50.132exp[0.008(\Delta T_{RELATIVE})]$$

$$c_{K_{Ic}} = 4$$
(6-105)

ここで、 $\Delta T_{RELATIVE}$ は次式で表される。

$$\Delta T_{RELATIVE} = T - RT_{NDT} \ [^{\circ}F] \tag{6-106}$$

関連温度移行量 RT<sub>NDT</sub>は次式で表される。

$$RT_{NDT} = RT_{NDT0} - \Delta RT_{epistemic} + \Delta RT_{NDT} \ [^{\circ}F]$$
(6-107)

ΔRT<sub>epistemic</sub>はワイブル分布に従い、次式により決定される。

$$\Delta RT_{epistemic} = -29.5 + 78.0 \{-\ln(1-\Phi)\}^{1/1.73} \ [^{\circ}F]$$
(6-108)

ただし、**Φ**は0~1の一様乱数である。

(2) 亀裂伝播停止破壊靭性の評価式

Klaの累積分布関数は、以下の対数正規分布で表される。

$$K_{Ia}(\Phi_{K_{Ia}}, \Delta T_{RELATIVE})$$

$$= exp\left\{\sigma_{\ln(K_{Ia})} Z_{\Phi_{K_{Ia}}} + \mu_{\ln(K_{Ia})} (\Delta T_{RELATIVE})\right\} [\text{ksi } \sqrt{\text{in.}}]$$

$$Z_{\Phi_{K_{Ia}}} \leftarrow N(0,1)$$

$$(6-110)$$

ここで、*N*(0,1)は平均 0、標準偏差 1 の正規分布に従う乱数である。*K<sub>la</sub>*については、2 つのモデルを適用することができる。

・モデル1

$$\mu_{\ln(K_{Ia})}(\Delta T_{RELATIVE}) = \ln\{K_{Ia(mean)}(\Delta T_{RELATIVE})\} - \frac{\sigma_{\ln(K_{Ia})}^2}{2}$$
  

$$\sigma_{\ln(K_{Ia})} = 0.18$$
  

$$K_{Ia(mean)}(\Delta T_{RELATIVE}) = 27.302 + 69.962exp\{0.006057(\Delta T_{RELATIVE})\}$$
  
(6-111)

・モデル2

$$\mu_{\ln(K_{Ia})}(\Delta T_{RELATIVE}) = \ln\{K_{Ia(mean)}(\Delta T_{RELATIVE})\} - \frac{\sigma_{\ln(K_{Ia})}^2}{2}$$
  

$$\sigma_{\ln(K_{Ia})} = 0.34$$
  

$$K_{Ia(mean)}(\Delta T_{RELATIVE}) = 27.302 + 70.6998exp\{0.008991(\Delta T_{RELATIVE})\}$$
  
(6-112)

以下の式はモデル1とモデル2で共通である。
$$\Delta T_{RELATIVE}$$
は以下の式で表される。  
 $\Delta T_{RELATIVE} = T(r,\tau) - RT_{Arrest}(r,\cdots)$  [°F] (6-113)

RT<sub>Arrest</sub>は以下の式で表される。

$$RT_{Arrest}(r, \cdots) = RT_{NDT0} - \Delta RT_{epist-arrest} + \Delta RT_{Arrest}$$

$$+ \Delta RT_{NDT}(r, \cdots) \quad [^{\circ}F]$$
(6-114)

式(6-114)の右辺第3項は、以下の式で表される。  

$$\Delta RT_{Arrest} = 1.8exp\{\sigma_{\ln(\Delta RT_{Arrest})}Z_{pf} + \mu_{\ln(\Delta RT_{Arrest})}\} [°F]$$

$$Z_{pf} \leftarrow N(0,1)$$
(6-115)

$$\mu_{\ln(\Delta RT_{Arrest})} = \ln[\Delta RT_{Arrest(mean)}] - \frac{\sigma_{\ln(\Delta RT_{Arrest})}^2}{2}$$
(6-116)

$$\sigma_{\ln(\Delta RT_{Arrest})} = \sqrt{\ln[exp\{0.38998^{2} + 2\ln(\Delta RT_{Arrest(mean)})\} - \operatorname{var}(T_{o})] - 2\ln(\Delta RT_{Arrest(mean)})} \quad (6-117)$$

$$\operatorname{var}(T_o) = \begin{cases} 12.7/8^2 & (T_o < -35.7 \ [C]) \\ 99.905982 - 1.7748073T_0 & (-35.7^{\circ}\text{C} \le T_o \le 56 \ [^{\circ}\text{C}]) \\ 0 & (T_o > 56 \ [^{\circ}\text{C}]) \end{cases}$$
(6-118)

ここで、式(6-116)及び式(6-117)で用いられる*ART*Arrest(mean)は次式で表される。

$$\Delta RT_{Arrest(mean)} = 44.122 exp(-0.005971T_o) \quad [^{\circ}C]$$
(6-119)

$$T_o = \frac{RT_{NDT0} - \Delta RT_{epist-arrest} - 32}{1.8} \quad [^{\circ}\text{C}]$$
(6-120)

上式の*ART*epist-arrest は次式で表される。

$$\Delta RT_{epist-arrest} = \Delta RT_{epistemic} + \Delta(\Phi) \quad [^{\circ}F]$$
  

$$\Delta(P) = -29.5 + 78.0\{-\ln(1-P)\}^{\frac{1}{1.73}} + 8.28$$
  

$$-100.43\{-\ln(1-P)\}^{\frac{1}{2.036}}$$
(6-121)

#### 6.20.6 国内ワイブル分布型破壊靭性曲線

1990年代前半に、国内の電気事業者とプラントメーカーによる共同研究でクラス1圧力容器の 破壊靭性データが測定され、一般社団法人火力原子力発電技術協会の*K*<sub>IR</sub>検討会等により評価さ れている。このデータを含む国内外の*K*<sub>Ic</sub>データ<sup>45)~55)</sup>を分析し、破壊靭性値の不確実さがワイブ ル分布に従うと仮定してパラメータを設定している。

3パラメータワイブル分布では確率密度関数は以下のように示される。

$$w(K_{Ic}|a_{2}^{**}(\Delta T), b_{2}^{**}(\Delta T)) = \frac{c(\Delta T)}{b_{2}^{**}(\Delta T)} y^{c(\Delta T)-1} exp(-y^{c(\Delta T)})$$
(6-122)

$$y = \frac{(K_{IC} - a_2^{**}(\Delta T))}{b_2^{**}(\Delta T)}$$
(6-123)

RT<sub>NDT</sub>は以下の式で表される。

$$RT_{NDT} = RT_{NDT(0)} - \Delta RT_{epistemic}$$
(6-124)

$$\Delta RT_{epistemic} = RT_{NDT} - T_o = -15.60 + 67.56[-ln(1-P)]^{1/4.31}$$
(6-125)

ここで、*RT<sub>NDT(0)</sub>は RT<sub>NDT</sub>の*初期値、*p*は 0~1の累積確率である。

CFDは、以下の式から算出される。

$$K_{lc}(\Delta T) = \{-\ln(1-p)\}^{1/c(\Delta T)} b_2^{**}(\Delta T) + a_2^{**}(\Delta T)$$
(6-126)

ここで K<sub>lc</sub>の中央値を評価する場合は、p=0.5 として求められる。

データを追加した上で統計処理を行って得られた *a*2<sup>\*\*</sup>, *b*2<sup>\*\*</sup>, *c*の式を以下に、国内ワイブル分布 曲線を図 6-30 に示す。

$$a_{2}^{**}(\Delta T) = 13.18 + 6.71 exp(0.0337(\Delta T))$$
  

$$b_{2}^{**}(\Delta T) = 15.88 + 42.21 exp(0.0121(\Delta T))$$
  

$$c(\Delta T) = 4$$
  
(6-127)

ここで、 $K_{lc}$ の単位はMPa m<sup>1/2</sup>、 $\Delta T$ は T-T<sub>o</sub>であり、単位は $\mathbb{C}$ である。



図 6-30 国内ワイブル分布曲線

## 6.20.7 国内对数正規分布型亀裂伝播停止破壊靭性曲線

亀裂伝播停止靭性の不確実さについては、これまで国内鋼材を対象とした亀裂伝播停止破壊靭 性データに基づいた確率分布モデルがこれまで整備されていなかったが、以下の鋼材データ<sup>45)~53)</sup> に基づいた確率分布モデルの検討がなされた。

- ・火力原子力発電技術協会の KIR 検討会<sup>45)</sup>
- ・日本溶接協会の HST 小委員会<sup>46),47)</sup>、TS 小委員会<sup>48)~50)</sup>
- ・発電設備技術検査協会の PTS プロジェクト<sup>51)</sup>
- ・米国データ<sup>52),53)</sup>(HSST プロジェクトなど)

Klaの確率的評価モデルにおいて、RT<sub>NDT</sub>は以下の式で表される。

$$RT_{NDT} = RT_{NDT(0)} - \Delta RT_{epist-arrest} + \Delta RT_{arrest}$$
(6-128)

ここで、 $\Delta RT_{epist-arrest}$ は( $RT_{NDT}$ - $T_o$ )であり、 $\Delta RT_{arrest}$ は以下の式で定義される。

$$\Delta RT_{arrest(mean)} = T_{KIa} - T_o = 39.21 exp(-0.0069T_o)$$
(6-129)
$$\sigma_{ln} = 0.275$$
(6-130)

 $\sigma_{ln}$ は $\Delta RT_{arrest}$ の対数標準偏差である。

国内外のデータに対して統計処理を行って得られた *K*<sub>la</sub>の確率的評価モデルは、*T* - *T*<sub>Kla</sub>を用いた対数正規分布に基づく。対数正規分布の式を以下に、対数正規型分布曲線を図 6-31 に示す。

$$K_{Ia}(T - T_{KIa}) = 25.69 + 73.90 exp(0.0127(T - T_{KIa}))$$

$$\sigma_{\log K_{Ia}} = 0.162$$
(6-131)
(6-132)



# 6.20.8 破壊靭性曲線と亀裂伝播停止破壊靭性曲線のユーザー設定

6.20.6 と 6.20.7 に示した破壊靭性曲線及び亀裂伝播停止破壊靭性曲線について、パラメータを ユーザーが任意に設定することが可能である。以下の式の Prm で表記する各パラメータについ て、入力ファイルから設定する。

# 破壞靭性曲線

$a_2^{**}(\Delta T) = Prm1 + Prm2 \exp(a_2 + Prm2)$	$Prm3(\Delta T)$ )	(6-133)
$h^{**}(\Lambda T) = Drm \Lambda + Drm F$ or $n($	$D_{rm}(\Lambda T)$	((104))

$$b_2^{**}(\Delta T) = Prm4 + Prm5 \exp(Prm6(\Delta T))$$
(6-134)

$$c \quad (\Delta T) = Prm7 + Prm8 \exp(Prm9(\Delta T)) \tag{6-135}$$

$$RT_{NDT} = RT_{NDT(0)} - \Delta RT_{epistemic}$$

$$\Delta RT_{epistemic} = RT_{NDT} - T_{o}$$
(6-136)
(6-137)

$$= Prm10 + Prm11 \left[ -\ln(1-P) \right]^{1/Prm12}$$
(0-137)

# 亀裂伝播停止破壊靭性曲線

$$K_{Ia}(T - T_{KIa}) = Prm13 + Prm14 \exp(Prm15(T - T_{KIa}))$$
(6-138)  

$$\sigma_{\log K_{Ia}} = Prm16$$
(6-139)

$$\Delta RT_{arrest(mean)} = T_{KIa} - T_o = Prm17 \exp(Prm18 T_o)$$

$$\sigma_{ln} = Prm19$$
(6-140)
(6-141)

$$\Delta RT_{epist-arrest} = \Delta RT_{NDT} - T_o$$
  
= Prm20 + Prm21 [-ln(1 - P)]<sup>1/Prm22</sup> (6-142)

 $var(T_o) = Prm23 \qquad T_o \le Prm27 \qquad (6-143)$ 

$$var(T_o) = Prm24 + Prm25 \cdot T_o \quad Prm27 \le T_o \le Prm28$$

$$var(T_o) = Prm26 \quad Prm28 \le T_o$$

$$(6-144)$$

$$(6-145)$$

## 6.21 K<sub>lc</sub>とK<sub>la</sub>の相関の考慮

PASCAL-RV では  $K_{lc}$  と  $K_{la}$ の相関関係を考慮することができる。相関係数を1とした場合、 $K_{la}$ がサンプリングされる値は  $K_{lc}$ の分布と同じパーセンタイル値となる。相関係数を0とした場合、 $K_{lc}$ と  $K_{la}$ は独立してサンプリングされる。

### 6.22 脆化予测式

脆化予測式として、以下の式を適用することができる。

- ・ JEAC4201-1991の国内脆化予測式<sup>12)</sup>
- ・ 2018 年度国際ベンチマークで使用した Formula(1)<sup>56)</sup>
- ・ 米国改正 PTS 規則で規定されている脆化予測式<sup>13)</sup>
- ・ JEAC4201-2007の国内脆化予測法<sup>14)</sup>
- ・ JEAC4201-2007(2013 追補版)の国内脆化予測法<sup>15)</sup>
- ・ JAEA にて整備した BNP 法に基づく予測量<sup>7)</sup>

ここでは、JEAC4201-1991<sup>12)</sup>の脆化予測式、2018 年度国際ベンチマークで使用した Formula(1)<sup>56)</sup>、 JEAC4201-2007(2013 年追補版)<sup>15)</sup>の脆化予測法、米国改正 PTS 規則で規定されている脆化予測 式<sup>13)</sup>及び JAEA にて整備した BNP 法に基づく予測量<sup>7)</sup>について説明する。

### 6.22.1 JEAC4201-1991の国内脆化予測式

JEAC4201-1991の国内脆化予測式<sup>12)</sup>を次式に示す。

$$\Delta RT_{NDT} = FF \cdot CF + margin, \quad [°C] \tag{6-146}$$

ただし、FF は中性子照射ファクター(Fluence Factor)で、CF は化学成分ファクター (Chemistry Factor)であり、次式から算出される。

母材:

$$CF = -16.0 + 1210.0 \cdot P + 215.0 \cdot Cu + 77.0\sqrt{Cu \cdot Ni}$$
  

$$FF = (F/10^{19})^{(0.29 - 0.04 \log_{10}(F/10^{19}))}$$
  

$$\sigma = 12.0, \ [^{\circ}C]$$
(6-147)

溶接材:

$$CF = 26.0 - 24.0 \cdot Si - 61.0 \cdot Ni + 301.0\sqrt{Cu \cdot Ni}$$
  

$$FF = (F/10^{19})^{(0.25 - 0.10 \log_{10}(F/10^{19}))}$$
  

$$\sigma = 15.0, \ [^{\circ}C]$$
(6-148)

# 6.22.2 2018年度国際ベンチマークで使用した式

2018年度国際ベンチマーク50で使用した式について、次式に示す。

$$\Delta RT_{NDT} = [18 + 823(P - 0.008) + 148(Cu - 0.08) + 157Ni^2Cu]F^{0.45} [°C]$$
(6-149)

ただし、Fは中性子照射量で、単位は $[10^{19}n/cm^2]$ である。P、Ni、Cuはそれぞれリン、ニッケル、銅の含有量[wt%]である。

6.22.3 JEAC4201-2007(2013年追補版)の国内脆化予測法

電力中央研究所は、国内監視データに基づく新たな脆化予測法の開発を行い、国内脆化予測法 を2007年に提案した<sup>57)</sup>。この式は、JEAC4201-2007<sup>14)</sup>に取り込まれており、溶質原子クラスター による関連温度移行量とマトリックス損傷による関連温度移行量の寄与の二乗和の平方根で表さ れる。その後、2013年に高照射量領域のデータの拡充を踏まえた係数の見直しが行われた<sup>58)</sup>。 次の2つの手順により、関連温度移行量が算出される。

- ・ 反応速度式を用いて照射により生じる鋼材のミクロ組織変化※を計算
- ・ そのミクロ組織に応じた関連温度移行量を計算
- ※ ミクロ組織変化は溶質原子クラスターによる寄与分とマトリックス損傷による寄与分に分け られる。
- (1) 反応速度式によるミクロ組織変化の計算

$$\frac{\partial C_{SC}}{\partial t} = \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} + \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} = \xi_3 \cdot \left( (C_{Cu}^{mat} + \varepsilon_1) \cdot D_{cu} + \varepsilon_2 \right) \cdot C_{MD} + \xi_8 \cdot \left( C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \cdot (1 + \xi_8 \cdot C_{Ni}^0) \right)^2$$
(6-150)

*C*<sub>SC</sub> : 溶質原子クラスターの数密度

Cind: : 照射誘起により形成された溶質原子クラスターの数密度

Csc : 照射促進により形成された溶質原子クラスターの数密度

- *C*<sup>mat</sup>:結晶のマトリックス中に固溶している銅原子の密度…式(6-152)で算出
- **D**<sub>Cu</sub>: 銅原子の拡散係数…式(6-156)で算出
- C<sub>MD</sub> :マトリックス損傷の数密度 式(6-151)で算出
- C<sup>avail</sup> : C<sup>mat</sup>から銅の固溶限C<sup>sol</sup>(入力値 0.04)を差し引いた銅の濃度…式(6-155)で算 出
- **C**<sup>0</sup><sub>Ni</sub> :鋼材中に含まれるニッケル含有量(入力値)

$$\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = \xi_4 \cdot F_t^2 \cdot (\xi_5 + \xi_6 \cdot C_{Ni}^0)^2 \cdot \phi - \frac{\partial C_{SC}}{\partial t}$$
(6-151)

*C<sub>MD</sub>* :マトリックス損傷の数密度

*F<sub>T</sub>* : 温度依存性項

 $\phi$  : 照射速度(中性子束)

$$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -v_{SC} \frac{\partial C_{SC}}{\partial t} - v_{SC}' \cdot C_{SC}$$
(6-152)

*v'sc* :係数…式(6-154)で算出

$$\nu_{SC} = \xi_2 \cdot \left( C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \right)^2 \cdot t_r \tag{6-153}$$

tr : クラスター形成に要する時間(緩和時間)…入力値から算出

$$\nu_{SC}' = \xi_1 \cdot C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \tag{6-154}$$

C<sup>avail</sup> : C<sup>mat</sup>から銅の固溶限C<sup>sol</sup>(入力値 0.04)を差し引いた銅の濃度…式(6-155)で算 出

D<sub>Cu</sub>: 銅原子の拡散係数…式(6-156)で算出

$$C_{Cu}^{avail} = \begin{cases} 0 & C_{Cu}^{mat} \le C_{Cu}^{sol} \\ C_{Cu}^{mat} - C_{Cu}^{sol} & C_{Cu}^{mat} > C_{Cu}^{sol} \end{cases}$$
(6-155)

$$D_{Cu} = D_{Cu}^{thermall} + D_{Cu}^{irrad} = D_{Cu}^{thermall} + \omega \cdot \phi^{\eta}$$
(6-156)

 $D_{Cu}^{thermal}$ : 熱平衡原子空孔の拡散係数への寄与分 (0.75)  $D_{Cu}^{irrad}$ : 照射で形成された原子空孔の拡散係数への寄与分  $\omega$ : 係数 (3.6670381×10<sup>-7</sup>)  $\eta$ : 係数 (0.6162143)

(2) ミクロ組織に応じた関連温度移行量の計算

$$\Delta T_{SC} = \xi_{16} \cdot \sqrt{V_f} = \xi_{16} \cdot \sqrt{\xi_{15} \cdot f(C_{Cu}^{mat}, C_{SC}) \cdot g(C_{Ni}^0) + h(\phi t)} \cdot \sqrt{C_{SC}}$$
(6-157)

 $\Delta T_{SC}$ : 溶質原子クラスターによるシャルピー関連温度移行量  $V_f$ : 溶質原子クラスターの体積率

*C<sub>sc</sub>*:溶質原子クラスターの数密度

$$f(C_{Cu}^{mat}, C_{Sc})$$
 :式(6-158)で算出 $g(C_{Ni}^{0})$  :式(6-159)で算出 $h(\phi t)$  :式(6-160)で算出

$$f(C_{Cu}^{mat}, C_{SC}) = \xi_{11} \cdot \frac{C_{Cu}^0 - C_{Cu}^{mat}}{C_{SC}} + \xi_{12}$$
(6-158)

$$g(C_{Ni}^{0}) = \left(1 + \xi_{13} \cdot (C_{Ni}^{0})^{\xi_{14}}\right)^{2}$$
(6-159)

$$h(\phi t) = \xi_9 \cdot (1 + \xi_9 \cdot D_{SC}) \cdot \phi t \tag{6-160}$$

$$D_{SC} \approx D_{Cu} \tag{6-161}$$

$$\Delta T_{MD} = \xi_9 \cdot \sqrt{C_{MD}} \tag{6-162}$$

*C<sub>MD</sub>* :マトリックス損傷の数密度

.

(1) 及び(2) より、関連温度移行量は次式で算出される。

$$\Delta T = \sqrt{(\Delta T_{SC})^2 + (\Delta T_{MD})^2} \tag{6-163}$$

各式に用いられる係数の一覧を表 6-5 に示す。

変数	値
ξ1	1.6983018×10 <sup>-5</sup>
ξ2	3.5228183×10 <sup>-4</sup>
ξ3	8.3530827×10 <sup>-1</sup>
ξ4	7.1620000×10 <sup>-1</sup>
ξ5	1.1937318×10
ξ6	4.9388038×10 <sup>-1</sup>
ξ <sub>7</sub>	$1.7879868 \times 10$
ڋ 8	$5.7851852  imes 10^2$
<i>چ</i> و	6.0761276×10 <sup>-25</sup>
ξ 10	0.0000000
ξ 11	6.6826000×10 <sup>-1</sup>
ξ 12	5.0523112×10 <sup>-6</sup>
ξ 13	3.5092239×10 <sup>-1</sup>
ξ 14	4.3288847
ξ 15	7.3319000×10 <sup>-1</sup>
ξ 16	$3.0150182 \times 10^2$
ξ 17	2.8235609

表 6-5 係数及び値 58)

なお、PASCAL-RV には、JEAC4201-2007<sup>14)</sup>及び JEAC4201-2007[2013 年追補版]<sup>15)</sup> に基づきΔT を算出できるよう、ΔT算出のためのテーブル、及び電中研報告書(Q06019)<sup>57)</sup>に示されている 予測法に対応したプログラムが整備されている。

# 6.22.4 米国改正 PTS 規則で規定されている脆化予測式

米国原子力委員会 (NRC) における改正 PTS 規則では、中性子照射脆化による関連温度移行 量 $\Delta T_{30}$ を以下の式で算出する<sup>13)</sup>。

 $\Delta T_{30} = MD + CRF$   $MD = A \cdot (1 - 0.001718T_c) \cdot (1 + 6.13 \cdot P \cdot Mn^{2.471}) \cdot \varphi t_e^{0.5}$   $CRP = B \cdot (1 + 3.77Ni^{1.191}) \cdot f(Cu_e, P) \cdot g(Cu_e, Ni, \varphi t_e)$ (6-164)

ここで、*MD* は母材損傷による脆化項、*CRP* は銅富化析出物による脆化項を表す(いずれも単位は[°F])。

これらの式中にある定数及び記号の意味を以下に示す。

*P*:リン含有率 [wt%]

*Mn*:マンガン含有率 [wt%]

*Ni*:ニッケル含有率 [wt%]

Cu: 銅含有率 [wt%]

A=1.417×10<sup>-7</sup>(溶接部)、1.561×10<sup>-7</sup>(母材部)

B = 155.0 (溶接部)、102.5 (母材部、non-Combustion Engineering manufactured vessels)、135.2
 (母材部、Combustion Engineering vessels)

 $\varphi t_e = \varphi t \ (\varphi \ge 4.39 \times 10^{10} \text{ n cm}^{-2} \text{s}^{-1}) \ , \ \varphi t (4.39 \times 10^{10} / \varphi)^{0.2595} \ (\varphi < 4.39 \times 10^{10} \text{ n cm}^{-2} \text{s}^{-1})$ 

φ:中性子束 [n cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>]

t: 定格出力運転時間 [s]

 $f(Cu_e, P) = 0$  ( $Cu \le 0.072$ ),  $[Cu_e - 0.072]^{0.668}$  ( $Cu \ge 0.072, P \le 0.008$ ),  $[Cu_e - 0.072 + 1.359(P - 0.008)]^{0.668}$  ( $Cu \ge 0.072, P \ge 0.008$ )

 $Cu_e = 0$  ( $Cu \le 0.072$ ), MIN(Cu, maximum  $Cu_e$ ) (Cu > 0.072)

maximum  $Cu_e = 0.243$  (Linde 80), 0.301 (Linde 80 以外の材料)

 $g(Cu_e, Ni, \varphi t_e) = 0.5 + 0.5 \tanh\{ [\log_{10}(\varphi t_e) + 1.1390 Cu_e - 0.448Ni - 18.120]/0.629 \}$ 

*T<sub>c</sub>*:冷却材温度 [⁰F]

## 6.22.5 JAEA にて整備した BNP 法に基づく予測量

BNP 法に基づいて JAEA が整備した脆化予測法<sup>7)</sup>では、脆化予測量の不確実さを表す確率分布 が表 6-6 に示す説明変数の関数として定まる。BNP 法で求めた確率分布は正規分布などのように パラメータで指定することができないため、PASCAL ではユーザーが入力した累積確率と累積分 布の値の組を補間して用いる。

用意する csv ファイルは C:\PASCAL\BNP というフォルダに配置して使用する。用意する csv フ ァイルの概要を表 6-7 に示す。PWR 及び BWR の説明変数の数と値は explanatory\_variables\_PWR.csv と explanatory\_variables\_BWR.csv に図 6-32 及び図 6-33 に示すよう に記載する。PWR の場合には照射量の 0.7 乗、BWR の場合には照射量の 0.9 乗がそれぞれ説明変 数に含まれているが、この説明変数の値の数の分だけ inverseCDF\_PWR\_001.csv や inverseCDF\_BWR\_001.csv を用意する。例えば図 6-32 及び図 6-33 の例では、PWR の場合には inverseCDF\_BWR\_001.csv から inverseCDF\_PWR\_019.csv、BWR の場合には inverseCDF\_BWR\_001.csv から inverseCDF\_PWR\_019.csv、BWR の場合 に は inverseCDF\_BWR\_001.csv から inverseCDF\_BWR\_015.csv を用意する。これらのファイルの例を図 6-34 に示す。2 行目以降の各行は累積確率、2 列目以降の各列は、照射量と累積確率以外の説明 変数のある組み合わせに対応する。よって、本 csv ファイルの行数は(累積確率の値の個数+1)、 列数は(照射量と累積確率以外の説明変数のある組み合わせ総数+1)であり、例えば図 6-34 の PWR のためのデータでは、(201+1=202)列(21×6×8+1=1009)列となる。列方向には、まず 第一の説明変数が変化し、次いで第二の説明変数が変化するように、照射量と累積確率以外の 3 つあるいは 2 つの説明変数のすべての組み合わせについて、対応する脆化量を記載する。

表 6-6 説明変数

対象	説明変数							
PWR	Cu含有量、Ni含有量、Si含有量、Fluence <sup>0.7</sup>							
BWR	Cu 含有量、Flux <sup>0.9</sup> 、Fluence <sup>0.9</sup>							

Fluenceの単位は[n/cm<sup>2</sup>]

Fluxの単位は[n/cm<sup>2</sup>/sec]

各化学成分の含有量の単位は[wt%]

表 6-7 BNP 法のための csv ファイルの概要

対象	csv ファイル
PWR	explanatory_variables_PWR.csv
	inverseCDF_PWR_001.csv、
	inverseCDF_PWR_002.csv など
BWR	explanatory_variables_BWR.csv
	inverseCDF_BWR_001.csv、
	inverseCDF_BWR_002.csv など

	A	B	С	D	E	F	G	H	I	JKLMNC	FC R	S	Т	U	V		GR	GS
1	データ数																	
2	21	Cu																
3	6	Ni																
4	8	Si																
5	19	Fluence07																
6	201	累積確率																
7	値															(山略)		
8	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.11	0.12		0.21	0.22	0.23	0.24				
9	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1												
10	0.2	0.24	0.28	0.32	0.36	0.4	0.44	0.48										
11	4E+12	6.47E+12	8.59E+12	1.05E+13	1.23E+13	1.4E+13	1.55E+13	1.71E+13	1.85E+13		9.29E+13	1E+14						
12	2.87E-07	3.71E-07	4.79E-07	6.17E-07	7.93E-07	1.02E-06	1.30E-06	1.66E-06	2.11E-06		1.66E-05	2.07E-05	2.56E-05	3.17E-05	3.91E-05		0.999999629	0.999999713
13																		



	A	B	С	D	EFCF I	J	RENN	0	P	Q	R	S	т	U	V	W		GR	GS
1	データ数																		
2	21	Cu																	
3	9	flux09																	
4	15	Fluence09																	
5	201	累積確率																	
6	値																(由歌)		
7	0.04	0.05	0.06	0.07	0	12 0.13	1	0.18	0.19	0.2	0.21	0.22	0.23	0.24			(一世日)		
8	5.36E+08	7.72E+08	1E+09	1.87E+09	7.94E+	09													
9	2.00E+15	2.87E+15	3.72E+15	5.39E+15	2.28E+	16 2.96E+16	1.2	6E+17											
10	2.87E-07	3.71E-07	4.79E-07	6.17E-07	2.11E-	06 2.68E-06	8.5	54E-06	1.07E-05	1.33E-05	1.66E-05	2.07E-05	2.56E-05	3.17E-05	3.91E-05	4.81E-05		0.999999629	0.999999713
11																			



	А	В	С	D	ALT	ALU	ALV			
1		0	1	2	1006	1007				
2	2.87E-07	-75.49	-75.49	-75.49	-50.49	-50.49				
3	3.71E-07	-75.49	-75.49	-75.49	-50.49	-50.49				
	(中略)									
199	0.99999938	75.48	75.48	75.48	225.49	249.49				
200	0.99999952	75.48	75.48	75.48	225.49	249.49				
201	0.99999963	75.49	75.49	75.49	225.49	249.49				
202	0.99999971	75.49	75.49	75.49	225.49	249.49				
203										
204										

図 6-34 inverseCDF\_PWR\_001.csvの例

# 6.23 偏差再計算手法

PASCAL-RV では、亀裂進展に伴う  $K_{lc}$ 、  $K_{la}$  と  $RT_{NDT}$ の偏差再計算については FAVOR 方式 <sup>33)</sup>を 採用している。

・FAVOR 方式<sup>33)</sup>

亀裂が進展しても、 $K_{lc}$ 、 $K_{la}$ と $RT_{NDT}$ の偏差再計算を行わない。

なお、平均値の再計算は亀裂進展に応じて実施される。また、新しい RPV がサンプリングされた場合は、全ての方式において偏差の再計算が行われる。

### 6.24 破壊基準

PASCAL-RV では破壊基準として、K<sub>lc</sub>, K<sub>la</sub>基準及び塑性崩壊基準、延性亀裂不安定破壊基準を 採用している。

## 6.24.1 Kic, Kia基準

亀裂の進展及び停止の判定は次式で行われる。

 進展判定
 :
  $K_I > K_{Ic}$  (6-165)

 停止判定
 :
  $K_I \le K_{Ia}$  (6-166)

また、以下の条件を満たすと亀裂貫通とみなす。

$$a = r \cdot t \tag{6-167}$$

ここで、*a* は亀裂の深さ、*t* は容器壁の板厚、*r* は破壊とみなす容器壁板厚の割合である。 PASCAL-RV では、*r*をユーザーによって設定することができる。

### 6.24.2 塑性崩壊基準

PASCAL-RV に導入されている塑性崩壊基準<sup>28)</sup>を以下に示す。

$$\sigma_{f} \leq \frac{\sqrt{3} \cdot P \cdot (R_{in} + a_{a}^{*})}{2 \cdot \{(t - a_{a}^{*})\}}$$

$$a_{a}^{*} = \frac{a_{a} \cdot \left\{1 - \left(1 + 2\frac{c_{a}^{2}}{t^{2}}\right)^{-0.5}\right\}}{1 - \frac{a_{a}}{t} \left\{1 + 2\frac{c_{a}^{2}}{t^{2}}\right\}^{-0.5}}$$
(6-168)

*P* : 内圧

- Rin :母材内半径
- *a<sub>a</sub>\**:停止した亀裂の深さ(*a<sub>a</sub>*/2*c<sub>a</sub>*=0の表面亀裂に置換した場合)
- *aa* : 停止した亀裂の深さ
- *ca* : 停止した亀裂の半長
- *t* : 容器壁の板厚
- *σ<sub>f</sub>* :流動応力

# 6.24.3 延性亀裂不安定破壊基準

延性亀裂不安定破壊の判定は次式で行われる。この判定のフロー図を図 6-35 に示す。

(1) 延性亀裂進展の発生に関する判定(その1)

次の条件を満たす場合、延性亀裂進展は発生しないとして延性破壊評価を終了する。

$$T < T_{DT}$$
 (6-169)

ここで、Tは亀裂最深点の温度、TDTはユーザーが指定する温度である。

(2) 延性亀裂進展の発生に関する判定(その2)

次の条件を満たす場合、延性亀裂進展は発生しないとして延性破壊評価を終了する。

$$J_{app} < J_{Ic} \quad \text{stat} \quad J_{app} < J_R^*$$
 (6-170)

ここで、 $J_{app} \ge J_{lc}$ は次のように算出される。

$$J_{\rm app} = \frac{1 - \nu^2}{E} K_I^2 \tag{6-171}$$

$$J_{Ic} = \frac{1 - v^2}{E} K_{J_{Ic}}^2(T)$$
(6-172)

$$K_{J_{lc}}(T) = K_{J_{lc}}(T = 550^{\circ}\text{F}) + \Delta K_{J_{lc}}(T)$$
(6-173)

$$K_{J_{lc}}(T = 550^{\circ}\text{F}) = 70.855 + 0.5784 \times (USE ins \pm ins +$$

$$\Delta K_{J_{Ic}}(T) = 1.35 \left\{ 1033 \cdot \exp\left[ (0.000415 \ln(0.0004) - 0.00698) \cdot \left( \frac{T[^{\circ}F] + 459.69}{1.8} \right) \right] - \sigma_{ref} \right\}$$
(6-175)

$$\sigma_{ref} = 1033 \cdot \exp\left[ (0.000415 \ln(0.0004) - 0.00698) \cdot \left(\frac{550 + 459.69}{1.8}\right) \right] = 3.331798 \quad (6-176)$$

ここで、*E* とvはヤング率とポアソン比である。上部棚吸収エネルギー(USE: Upper Shelf Energy)の調整値は日本電気協会の電気技術規格 JEAC4201-2007<sup>14)</sup>の付属書 B-3000 に基づいて 次のように算出される。ただし、次式で算出される USE 調整値の単位は[J]である。

$$USE$$
調整値[J] =  $USE$ 初期値[J] ×  $(1 - \Delta USE$ 予測値/100) (6-177)

$$\Delta USE \hat{\mathcal{P}} / \# \hat{\mathcal{U}} = C_0 + CF_U \cdot FF_U(f) + M_U$$
(6-178)

$$C_0 = \begin{cases} -0.95 & 母材 \\ -2.78 & 溶接金属 \end{cases}$$
(6-179)

$$CF_{u} = \begin{cases} 5.23 + 9.36 \left( 0.5 + 0.5 \tanh\left[\frac{Cu - 0.087}{0.034}\right] \right) \times (1 + 0.59 \cdot Ni) & \text{B} \text{I} \end{cases}$$
(6.180)

$$\begin{aligned} & FF_U = \\ & \left(9.78 + 3.96 \left(0.5 + 0.5 \tanh\left[\frac{Cu - 0.086}{0.045}\right]\right) \times (1 + 3.63 \cdot Ni) \end{aligned} \right. & \text{溶接金属} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & FF_U(f) = \begin{cases} f^{0.349 - 0.068 \log_{10} f} & \text{Btd} \\ f^{0.234 + 0.015 \log_{10} f} & \text{Rtg} \\ \end{cases} \end{aligned}$$

$$\end{aligned}$$

$$(6-180)$$

ここで、Cu及び Niは銅及びニッケルの含有量[wt%]であり、fは中性子照射量[ $10^{19}$ n/cm<sup>2</sup>]である。 また、パラメータ *M*uはユーザーが入力する。

### (3) 亀裂進展量の算出

延性亀裂進展が発生することが確定した場合、まず  $J_{\mathbb{R}}^*$ の値を  $J_{\text{app}}$  で上書きする。次いで、上部 棚破壊靱性 J<sub>mat</sub> が J<sub>app</sub> と一致することを課して亀裂進展量Δa を算出し、亀裂を進展させる。

$$J_{mat} = M_j \cdot C_1 \cdot \Delta a^{C_2} \tag{6-182}$$

$$\Delta a = \left(\frac{J_{app}}{M_j c_1}\right)^{\frac{1}{c_2}}$$

$$(6-183)$$

$$C_{1} = \begin{cases} \exp[0.147 + 2.84 \cdot \log_{10}(0.5E \text{ing} \text{end}) - 0.00087 \cdot T] & \text{priv} \\ \exp[-0.477 + 2.81 \cdot \log_{10}(0.5E \text{ing} \text{end}) - 0.00098 \cdot T] & \text{ärk} \text{and} \end{cases}$$

$$C_{2} = \begin{cases} -0.549 + 0.383 \cdot \log_{10}(C_{1}) & \text{priv} \\ -0.203 + 0.220 \cdot \log_{10}(C_{1}) & \text{ärk} \text{and} \end{cases}$$

$$(6-184)$$

$$(6-185)$$

ここで、*M<sub>i</sub>*は不確実さを含む因子であり、PASCAL-RVでは正規分布に従う確率変数として扱う。

(4) 不安定破壊に関する判定 次の条件が満たされるとき、延性亀裂が不安定破壊するものと判定する。

$$T_{app} > T_{mat} \tag{6-186}$$

ここで、 $T_{app}$ と $T_{mat}$ はそれぞれ $J_{app}$ と $J_{mat}$ に対応するテアリングモジュラスであり、次式で与えら れる。

$$T_{app} = \frac{E}{\sigma_f^2} \times \frac{dJ_{app}}{da} \tag{6-187}$$

$$T_{mat} = \frac{E}{\sigma_f^2} \times \frac{dJ_{mat}}{da} = \frac{E}{\sigma_f^2} \times M_j \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot \Delta a^{C_2 - 1}$$
(6-188)

PASCAL-RV では、深さがわずかに異なる 2 つの亀裂に対して応力拡大係数を算出し、その差分 により亀裂深さが $a+\Delta a$ における $T_{app}$ を評価する。

$$T_{app}(a + \Delta a) = \frac{E}{\sigma_f^2} \times \frac{1 - \nu^2}{E} \times \frac{d(K_I^2)}{da}$$
$$\approx \frac{E}{\sigma_f^2} \times \frac{1 - \nu^2}{E} \times 2K_I(a + \Delta a) \times \frac{K_I(a + \Delta a + \epsilon) - K_I(a + \Delta a)}{\epsilon}$$
(6-189)

ここで、*ε*は亀裂深さ *a*+Δ*a* に比べて十分小さい数である。

## JAEA-Data/Code 2022-006



図 6-35 J-T法による延性破壊評価のフローチャート

# 6.25 亀裂進展刻みの計算方式

亀裂が進展する場合、ユーザーが入力した亀裂進展刻みに従って微小量進展させる増分計算が 行われる。亀裂進展刻みが小さければ計算精度が高いが、計算時間がかかる。これに対して、 PASCAL-RV は以下の2種類の進展計算方式を用意している。

- ·等間隔進展方式
- · 等比級数進展方式
- (1) 等間隔進展方式

亀裂が進展していくたびに一定の進展量を加算し新たな亀裂寸法を計算していく。

(2) 等比級数進展方式

亀裂が進展していくたびに、等比級数に従って新たな進展量を計算し、亀裂の寸法を更新して いく。初期進展刻みと等比級数の増幅率はユーザーが入力する。

# 6.26 非破壊検査による亀裂検出性評価モデル

PASCAL-RV では以下の非破壊検査に係る POD モデルを適用した解析を行うことができるが、 現状では PASCAL-Manager の機能で非破壊検査を考慮することにしており、本機能の使用は推奨 されない。そのため、本機能については入力カードの説明等からも削除されている。

・ UTS データベースに基づく POD モデル <sup>59)</sup>

これらの方法は、検査により亀裂が検出された場合には補修されて亀裂が取り除かれることが 前提となっている。なお、非破壊検査の取扱いについては、そのほかに検査結果を考慮して、初 期亀裂の大きさ及び密度をベイズ更新によりアップデートする方法もある。その方法については、 NUREG-2163<sup>60)</sup>や勝山他<sup>61)</sup>の文献等を参照されたい。

## 6.27 中性子照射による上部棚靭性値の低下

上部棚靭性値の低下予測式として、JEAC4201式<sup>14)</sup>を考慮することができる。 JEAC4201の上部棚吸収エネルギーの減少率(ΔUSE)予測式<sup>14)</sup>を以下に示す。

$$\Delta USE = C_0 + CF_u \cdot FF_u \tag{6-190}$$

C0 : 母材については-0.95, 溶接金属については-2.78

*CF*<sub>u</sub>:化学成分による係数

母材 : 
$$CF_u = 5.23 + 9.36 \left( 0.5 + 0.5 \tanh\left(\frac{Cu - 0.087}{0.034}\right) \right) (1 + 0.59Ni)$$
  
溶接材 :  $CF_u = 9.78 + 3.96 \left( 0.5 + 0.5 \tanh\left(\frac{Cu - 0.086}{0.045}\right) \right) (1 + 3.63Ni)$ 

 $FF_u$ :中性子照射量fによる係数( $\log$ は常用対数を表す。)

母材	:	$FF_u = f^{(0.349 - 0.068\log f)}$
溶接材	:	$FF_u = f^{(0.234 - 0.015\log f)}$

: 銅の含有量(mass%)
: 銅の含有量(mass%)

- Ni : ニッケルの含有量 (mass%)
- f : 中性子照射量 (×10<sup>19</sup> n/cm<sup>2</sup> E>1MeV)

## 6.28 自動調整階層別モンテカルロ法

PASCAL-RV では、表面亀裂に関する階層別モンテカルロ法による破損確率計算の効率を向上 させるために、亀裂サンプリング数の最適化を採用した。ここでは、亀裂サンプリング数の最適 化及びその収束判定について説明する。

#### 6.28.1 亀裂サンプリング数の最適化

初期亀裂平面の自動分割機能(#CASPCT)では、サンプリング数は全セル同一として取り扱う。

一般的に、解析結果に及ぼす影響の高いセルに関してサンプリング数を増やし、影響の低いセルに関してサンプリング数を減らせば良いのであるが、影響の大きさは中性子照射量や解析条件によって異なるため、解析実施前に最適なサンプリング数を決定することは困難である。

PASCAL-RV に整備された最適化手法は、解析を行っている最中に各セルのサンプリング数を 自動的に最適化する。最適化手法を以下に示す。 1) テスト解析の実施

従来の解析では、各セルのサンプリング数を多く(100~1000 点程度)とっていたが、自動調整を行う場合は、セルごとのサンプリング数は少なく設定する(10 点等)。全セルに対して、この少数点の亀裂をサンプリングして解析を行い、各セルの破損確率を算出する。各セルの破損確率は式(6-194)から算出される。

$$CPF_{cell} = \frac{N_{f\_cell}}{N_{cell}} W_{cell}$$
(6-191)

ここで、 $CPF_{cell}$ は各セルの破損確率、 $N_{f_cell}$ は各セルにおける破損数、 $N_{cell}$ は各セルにおけるサンプリング数、 $W_{cell}$ は各セルの重みである。

各セルの破損確率を全て足し合わせれば、全体の破損確率になる。

2) サンプリング数の最適化

破損確率が一度算出されれば、どのセルが解析結果に高い影響を及ぼすか判断することができる。 亀裂深さの小さな亀裂の場合、重みは大きいが破損割合(*N<sub>f</sub>\_cell</sub>/N<sub>cell</sub>)が低いため破損確率 としては小さな値となる。また非常に深い亀裂の場合、破損割合は高いが重みが小さいため、こ れも破損確率としては小さな値となる。* 

この破損確率の結果を用いて、式(6-192)から各セルのサンプリング数を算出する。

$$N_{cell} = \frac{CPF_{cell}}{CPF}N$$
(6-192)

ここで、*Ncell*は各セルのサンプリング数、*CPFcell*は各セルの破損確率、*CPF*は全体の破損確率、*N*は全サンプリング数である。

すなわち、全サンプリング数を破損確率の割合に応じて再分配する。

しかし、テスト解析における亀裂サンプリング数が少なければ、本来破壊が生じるようなセル であっても破壊が生じない場合もありうる。破損確率にばらつきが生じているため、隣り合った セル同士でもサンプリング数が急激に変化し、解析上問題がある。

これに対して、PASCAL-RV では亀裂サンプリングの平準化を行うことによってこの問題点を 解決している。平準化のルールは「対象セルのサンプリング数を、対象セルの上下左右のセルの サンプリング数と比較し、対象セルのサンプリング数が上下左右のセルのサンプリング数の最大 値の 2/3 倍よりも小さい場合は、対象セルのサンプリング数を上下左右のセルの採点数の 2/3 倍 に変更する」である。この 2/3 倍という数値は、ユーザー入力により変更することができる。平 準化を実施することによって、破損確率に対する影響の大きい部分はサンプリング数が多く、影 響の低い部分はサンプリング数が小さくなり、サンプリング数の不連続性もかなり解消されていることが確認できた。一方、単純な平準化の作業によって、全サンプリング数はかなり増大してしまうため、PASCAL-RV では、さらに全サンプリング数を初期設定値になるように調整している。

3) 解析の繰り返し

新しく得られたサンプリング数を用いて全セルの解析を行うと、新しい破損確率が得られる。 この値を用いてサンプリング数の最適化に関する再評価を実施し、更に妥当なサンプリング数を 計算する。この過程を繰り返しながら解析を進め、破損確率が設定された計算精度に収束するま で解析を実施する。

一般的に、解析に時間を要するのは亀裂が進展した場合である。特に亀裂の進展判定手法に亀 裂の深さと長さの両方向を用いると、亀裂は深さ方向・長さ方向どちらにも微小区間ずつ進展し ていくため、非常に解析時間を要する。亀裂が進展する可能性が高い領域は、初期亀裂深さの深 い領域であるが、自動調整階層別モンテカルロ法では、この領域の重みが小さいため採点が少な い。よって、同じ採点数であっても計算時間は従来の階層別モンテカルロ法に比べ短縮されるこ とになる。

また、従来の階層別モンテカルロ法では、各セルについて大量の亀裂サンプリングを行いなが ら解析を進めていたため、全体の破損確率は解析が終了するまで把握することができなかった。 しかし、自動調整階層別モンテカルロ法では、少ないサンプリング数で全セルに対する計算を行 い、これを何度も繰り返しながらサンプリング数を増やしていくため、解析の途中でも全体の破 損確率を把握することができる。

#### 6.28.2 亀裂サンプリング数の最適化を用いた場合の収束判定

亀裂サンプリング数の最適化を用いた場合、全階層に対する小数回のサンプリングが繰り返し 実施される。よって、ある収束判定値以下に解が落ち着いた場合、解析を終了する収束判定を行 うことが可能である。以下に、この判定手法について記載する。

亀裂を1つ含む RPV に対して PTS 事象を適用した場合、破壊したときは1、破壊しなかった ときは0とカウントされる。これを母集団とした場合、全サンプル値(1または0)の平均値が、 条件付亀裂貫通確率に相当する。

母集団の平均値(つまり条件付亀裂貫通確率)を $\mu$ 、分散を $\sigma^2$ として、ここから n 個のサンプ ルをランダムに取得し、得られたサンプルの平均値を考える。n が小さい場合は、どのサンプル を取得するかによって平均値の変動が大きくなるが、n が大きくなるにつれて、どのようにサン プルを取得しても平均値の差はほとんどなくなる。母集団が大集団である場合、n 個のサンプル から得られる「平均値の」分布は平均値 $\mu$ 、分散 $\sigma^2/n$ の正規分布に従う。この $\mu$ が今求めたい真の 条件付亀裂貫通確率に相当する。 この正規分布の標準化(標準正規分布への 1 次変換)は、式(6-193)のように示される。ここで $\bar{x}$ は、ある n 個のサンプルから得られる平均値である。

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma / \sqrt{n}} \tag{6-193}$$

式(6-193)の正規分布において、95%の確率を持つ区間は、標準正規分布表から式(6-194)のように示される。

 $P(|Z| \le 1.96) = 0.95 \tag{6-194}$ 

式(6-193)に式(6-194)を代入すると、式(6-195)のようになる。

$$P\left(\left|\frac{\bar{X}-\mu}{\sigma/\sqrt{n}}\right| \le 1.96\right) = P\left(|\bar{X}-\mu| \le 1.96\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)$$
$$= P\left(\bar{X}-1.96\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \le \mu \le \bar{X}+1.96\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) = 0.95$$
(6-195)

式(6-195)は、無限大個のサンプルから得られる条件付亀裂貫通確率( $\mu$ ) が95%の確率で存在 する範囲は、n 個のサンプルから得られる平均値( $\overline{X}$ ) に対して±1.96 $\sigma/n^{1/2}$ の範囲であるとい うことを意味している。この範囲を計算する場合、サンプリング数nと母集団の標準偏差 $\sigma$ が必 要になる。サンプリング数nは、PFM解析では容易に取得することができる。母集団の標準偏差  $\sigma$ は、サンプリング数が十分大きいと仮定し、サンプルデータの標準偏差を使用する。母分散 $\sigma^2$ は次式から計算される。

$$\sigma^{2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (X_{i} - \bar{X})^{2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} X_{i}^{2} - \bar{X}^{2}$$
(6-196)

サンプル値 *X*は0か1しか存在しないため、サンプル値の2乗平均は、サンプルの単純平均値 と同一である。サンプル値の平均値が条件付亀裂貫通確率 *P*<sub>f</sub>であることを加味すれば、式 (6-196)は次式のように変形することが可能である。

$$\sigma^2 = P_f - P_f^2 \tag{6-197}$$

上記の母分散評価式は、通常のモンテカルロ法に対しては用いることができるが、階層別モン テカルロ法の場合には用いることができない。そこで、母分散の評価手法について、さらに詳し く検討を行う。 モンテカルロ法は、積分のための手法である。PASCAL-RV で行っている積分の評価対象を図 6-36に示す。積分計算を実施したいのは、このグラフの線の下側の面積である。計算時には乱数 を発生させ、このグラフの線の下側に位置すると評価された場合は1(破壊)、上側に位置する と評価された場合は0(破壊せず)としている。

これを数式で表現すると、以下のようになる。

$$I_{2} = \frac{\sum_{i=1}^{N} g(\xi_{i}, \eta_{i})}{N}$$

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & (y < f(x) \mathcal{O} \succeq \textcircled{E}) \end{cases}$$
(6-198)
$$(6-198)$$

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & (y \ge f(x)\mathcal{O} \succeq \exists) \\ 0 & (y \ge f(x)\mathcal{O} \succeq \exists) \end{cases}$$
(6-199)

ここで、f(x)は図 6-36の横軸をx、縦軸をyとしたときのグラフ中の曲線を意味している。( $\xi_i$ , $\eta_i$ ) は 0.0 から 1.0 の範囲で発生される i 番目の一様乱数対であり、Nはサンプル数である。よって、  $I_2$ は図 6-36の曲線の下部の面積を意味しており、これが条件付亀裂貫通確率に相当することにな る。



ここで、Lの分散 var Lが母分散である。分散には以下の性質がある。

$$var kf(\xi) = k^{2}var f(\xi)$$
(6-200)  
$$var[f(\xi_{1}) + f(\xi_{2}) + \cdots]$$
  
= var f(\xi\_{1}) + var f(\xi\_{2}) + \cdots (\xi\_{1}, \xi\_{2}は互いに独立) (6-201)

これを用いて、以下のように var I2を評価することができる。

$$var I_2 = \frac{1}{N^2} var \sum_{i=1}^{N} g(\xi_i, \eta_i) = \frac{1}{N} var g(\xi, \eta)$$
(6-202)

 $var \ g(\xi,\eta) = E[g^2] - (E[g])^2 = I - I^2 \tag{6-203}$ 

ここで、E[g]は分布gの期待値(平均値)、Iは図 6-36の曲線の下部の面積である。Iは破損確率 に一致するため var  $I_2$ は( $P_f - P_f^2$ )/N となり、これは先に示したn 個のランダムサンプルから構成さ れる確率変数の平均値 $\bar{X}$ の分散と一致している。

階層別モンテカルロ法で評価を行う場合、図6-36の曲線下部の面積」なは次式から算出される。

$$I_{3} = \sum_{j=1}^{m} \frac{b_{j} - a_{j}}{N_{j}} \sum_{i=1}^{N_{j}} f\left(\xi_{i}^{(j)}\right)$$
(6-204)

ここで、 $[a_j, b_j]$ はj番目の小区間であり、 $N_j$ はその小区間のサンプル数、 $\xi_i^{(j)}$ はその小区間内で発生される一様乱数である。

I3の分散 var I3は、式(6-200)、式(6-201)の性質を利用して、次式から算出される。

$$var I_3 = \sum_{j=1}^{m} \frac{b_j - a_j}{N_j} var f(\xi^{(j)})$$
(6-205)

var  $f(\xi^{(j)})$ は、var  $g(\xi,\eta)$ の式で算出することができるが、ある小区間内の取り扱いになるため、 図 6-36 の縦軸である破壊率を対象に算出する。 $b_j - a_j$ は、階層の重みと一致している。よって、 var  $I_3$ は次式を用いて評価される。

$$var I_3 = \sum_{j=1}^{m} \left[ \frac{w_j^2}{N_j} (Rf_i - Rf_i^2) \right]$$
(6-206)

ここで、 $w_j$ はj番目の階層の重み、 $Rf_j$ はj番目の小区間の破壊率である。この var  $I_3$ は、先に示したn 個のランダムサンプルの分散 $\sigma'/N$ に相当する。

**var** *I*<sub>3</sub> を最小にするためには、ラグランジュの未定係数法を用いて以下のように *N<sub>j</sub>* を定めれば 良い。

$$N_j \propto (b_j - a_j) \sqrt{var f(\xi^{(j)})} = w_j \sqrt{(Rf_j - Rf_j^2)}$$
 (6-207)

解析の収束判定では、解である破損確率が存在する範囲が、定められた値(収束判定値)より

も小さくなった時点で収束とみなし、解析を終了する。解の存在する範囲の算出には、式 (6-195)が用いられる。ただし、階層別モンテカルロ法を使用している場合は、分散の評価式に 式(6-206)を用いる必要がある。収束判定値はユーザー入力値であり、破損確率に対する割合を 入力する。例えば、0.05 が入力された場合、解の存在する範囲が、破損確率の 5%以下になった 場合に収束と判定され、解析が終了する。

# 6.29 高温予荷重効果

PASCAL-RVでは、以下の高温予荷重(WPS:Warm Pre-Stress)モデルを適用した解析を行うことができる。

- ・ JEAC4206-2016 モデル<sup>28)</sup>
- ・ FAVOR モデル<sup>27)</sup>
- ・ ACE モデル<sup>23)</sup>
- ・ Chell&Haigh モデル<sup>24)</sup>
- ・ Wallin モデル<sup>25)</sup>
- NRI (修正 Wallin) モデル<sup>26)</sup>
- FAVOR の最良推定モデル<sup>27)</sup>

# 6.29.1 JEAC4206-2016 のモデル

JEAC4206-2016<sup>28)</sup>では、WPS 効果として、応力拡大係数値が単調減少している場合、応力拡大 係数値が破壊靭性を上回ったとしても非延性破壊は生じないとしている。また、再加圧時の評価 については規定されていない。本モデルの模式図を図 6-37 に示す。

PASCAL-RVでは、現在の時間ステップでの応力拡大係数値と、1つ前の時間ステップでの応力 拡大係数値を比較し、応力拡大係数が減少する場合は亀裂の進展が発生しないものとみなして、 これを表現する。



図 6-37 JEAC4206-2016 のモデルの模式図

## 6.29.2 FAVOR モデル

FAVOR のモデル<sup>27)</sup>では、WPS 効果として、現在の時間ステップでの応力拡大係数値が過去の 応力拡大係数値の最大値を超えなければ亀裂の進展が無いものとしている。本モデルの模式図を 図 6-38 に示す。



図 6-38 FAVOR のモデルの模式図

# 6.29.3 ACE モデル

ACE のモデル<sup>23)</sup>では、WPS 効果として、応力拡大係数値が単調減少している場合に亀裂が進展しないことに加えて、応力拡大係数値が以下で定義される *K<sub>FRACT</sub>*を上回らない限りは亀裂が進展しないとしている。

$$K_{FRACT} = Max(K_{Ic}, Min(K_{WPS}, K_2 + K_{WPS}/2))$$
(6-208)

ここで、*Kwps*は過去の応力拡大係数の最大値、*K*<sub>2</sub>は除荷重時の応力拡大係数値である。*K*<sub>2</sub>、*Kwps* 及び *K<sub>FRACT</sub>の模式図を図* 6-39 に示す。



図 6-39 K<sub>2</sub>、K<sub>WPS</sub>及び K<sub>FRACT</sub>の模式図

## 6.29.4 Chell & Haigh モデル

Chell & Haigh モデル<sup>24)</sup> では、WPS 効果として、応力拡大係数値が以下で定義される  $K_{FRACT}$ を上回らない限りは亀裂が進展しないとしている。

$$K_{\text{FRACT}} = K_2 + 0.2(K_{\text{WPS}} - K_2) + 0.87K_{\text{mat}}$$
(6-209)

# 6.29.5 Wallin モデル

Wallin モデル<sup>25)</sup>では、WPS 効果として、応力拡大係数値が以下で定義される  $K_{FRACT}$ を上回らない限りは亀裂が進展しないとしている。

$$K_{\text{FRACT}} = K_2 + [K_{\text{mat}}(K_{\text{WPS}} - K_2)]^{0.5} + 0.15K_{\text{mat}}$$
(6-210)

### 6.29.6 NRI (修正 Wallin) モデル

NRI (修正 Wallin) モデル<sup>26)</sup> では、WPS 効果として、応力拡大係数値が以下で定義される  $K_{FRACT}$ を上回らない限りは亀裂が進展しないとしている。

$$K_{\text{FRACT}} = K_2 + [K_{\text{mat}}(K_{\text{WPS}} - K_2)]^{0.5}$$
(6-211)

#### 6.29.7 FAVOR の最良推定モデル

FAVOR の最良推定モデル<sup>27)</sup>では、WPS 効果として、応力拡大係数値が以下で定義される  $K_{FRACT}$ を上回らない限りは亀裂が進展しないとしている。

$$K_{\rm FRACT} = \alpha K_{\rm WPS} \tag{6-212}$$

ここで、αは次の確率密度関数により定まる確率変数である。

$$f(\alpha; b, c) = \begin{cases} \frac{c\left(\frac{\alpha}{b}\right)^{c-1}}{b\left[1 + \left(\frac{\alpha}{b}\right)^{c}\right]^{2}} & \text{if } \alpha > 0\\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$
(6-213)

ここで b = 1.15643、c = 20.12346 である。 $\alpha$ の平均値( $\alpha$ )及び標準偏差 $\sigma$ は以下のように計算される。

$$\langle \alpha \rangle = \int_0^\infty dx \ x \frac{c \left(\frac{x}{b}\right)^{c-1}}{b \left[1 + \left(\frac{x}{b}\right)^c\right]^2} = b \times B \left(-\frac{1}{c} + 1, \frac{1}{c} + 1\right) \approx 1.1611$$
(6-214)

$$\langle \alpha^2 \rangle = \int_0^\infty dx \, x^2 \frac{c \left(\frac{x}{b}\right)^{c-1}}{b \left[1 + \left(\frac{x}{b}\right)^c\right]^2} = b^2 \times B\left(-\frac{2}{c} + 1, \frac{2}{c} + 1\right) \tag{6-215}$$

$$\sigma = \sqrt{\langle \alpha^2 \rangle - \langle \alpha \rangle^2} = b \sqrt{B\left(-\frac{2}{c} + 1, \frac{2}{c} + 1\right) - B\left(-\frac{1}{c} + 1, \frac{1}{c} + 1\right)^2} \approx 0.10517$$
(6-216)

# 6.30 主な確率変数

PASCAL5で取り扱っている主な確率変数は以下の項目である。

- Cu, Ni, Si, Pなどの化学成分の含有率
- ② 高速中性子照射量、RT<sub>NDT</sub>の初期値、ART<sub>NDT</sub>、破壊靭性値と亀裂伝播停止破壊靭性値
- ③初期亀裂寸法、亀裂密度
- ④ 過渡事象の発生頻度

国内モデル RPV を対象とした計算事例においては、①と②については PASCAL-RV、③と④については PASCAL-Manager にて考慮される。詳細に関しては関連する節を参照されたい。

### 6.31 連続計算機能

PASCAL-RV には連続計算機能が整備されている。この機能では、入力された解析条件の一部 を変更しながら、同じ応力データを用いて連続解析を実施することができる。 連続計算機能の入力カード「#CONT」の例を図 6-40 に示す。

> C---+---10---+---20----+---30----+---40----+---50----+---60 #CONT \$SETSTART A5-STR3D-2.0 1 1 Longitudinal Infinity Flaw, 3-D stress dist., fluence=2.0 3 3 2.0 \$SETEND \$SETSTART A5-STR3D-1.0 1 1 Longitudinal Infinity Flaw, 3-D stress dist., fluence=1.0 3 3 1.0 4 7 6 10.0 20.0 30.0 50.0 75.0 100.0 **\$SETEND** C---+---10---+---20----+---30----+---40----+---50----+---60 #END C---+---10---+---20----+---30----+---40----+---50----+---60

図 6-40 感度解析用連続計算機能によるデータカードの例

#CONTは「\$SETSTART」と「\$SETEND」ではさまれる複数の区間によって構成される。この「\$SETSTART」と「\$SETEND」の間の入力条件が1つのセットとして取り扱われ、感度解析パ ラメータが変更される。図 6-40 の場合は、2つの入力セットが存在している。

\$SETSTART の後ろには、一文字スペースをはさみ、そのセットの解析結果を出力するファイル名を入力する。

\$SETSTART 以下の行では、まずカードセット No.とデータ No.を入力する。この番号は使用マ ニュアルに記述されている。例えば、解析タイトルを修正したいのなら、カードセット No.=1 (#TITLE)、データ No.=1 (ANAME) であるし、中性子照射量を修正したいのなら、カードセット No.=3 (#VESSEL)、データ No.=3 (FLUEC) になる。

その次の行に、修正したいデータを入力する。この場合、データごとに入力フォーマットが異 なるので、注意が必要である。
#### 6.32 RPV 炉心領域部のモデル化手法

PASCAL5 では、予め PASCAL-RV で単一亀裂の CPI 及び CPF を算出しておき、PASCAL-Manager を用いて、RPV 炉心領域部における初期亀裂や過渡事象の発生頻度を考慮し、RPV 炉心 領域部の TWCF を評価する。

#### 6.32.1 サブリージョン

RPV の内表面における中性子照射量の空間的な分布を考慮するために、PASCAL5 では図 5-9 に示すような炉心領域部を有限個のサブリージョンと呼ばれる領域に分割し、中性子照射量の空間分布を離散化している。各サブリージョンは、中性子照射量と材料、体積及び面積の情報を持つ。TWCFを算出する際には、サブリージョンの体積及び面積から各サブリージョンに対して亀裂個数が割り当てられる。全ての亀裂形状に対して、亀裂個数分の CPF を積算して、各サブリージョンの CPF を算出する。

#### 6.32.2 亀裂密度の取扱い

亀裂の形状は亀裂の深さとアスペクト比によって決定される。RPV には様々な深さ及びアスペクト比を持つ亀裂が存在するが、PASCAL5 ではこの亀裂分布の不確実さを考慮することができる。PASCAL5 では、PASCAL-Manager におけるポスト処理において、亀裂深さ及びアスペクト比別の密度の組(以下、密度表)を複数個読み込み、RPV 炉心領域部の CPI 及び CPF を算出する際に異なる密度表を用いることで、FCI 及び TWCF の分布に亀裂深さ及びアスペクト比の不確実さを取り入れている。

#### 6.32.3 中性子照射量分布の取扱い

6.32.1 で述べたように、PASCAL5 ではサブリージョンを設定して中性子照射量の空間分布を離 散化している。各サブリージョンに存在する亀裂の CPI 及び CPF は、中性子照射量の関数とし て、PASCAL-RV で計算された値を補間して算出される。このとき、PASCAL-Manager では説明 変数である中性子照射量と目的変数である CPI 及び CPF について両対数補間を行い、各サブリ ージョンにおける CPI 及び CPF が算出される。

#### 6.33 RPV 炉心領域部の亀裂貫通頻度

**RPV** 炉心領域部の TWCF の算出手順について以下に述べる。 **RPV** 炉心領域部の TWCF は式(6-217)により算出される。

$$TWCF_{RPV} = \sum_{i=1}^{NTRAN} (\phi_i \cdot CPF_{RPV,i})$$
(6-217)

ここで、*TWCF<sub>RPV</sub>*は RPV 炉心領域部の亀裂貫通頻度であり、TWCF の信頼度評価に必要な分布 を有する亀裂貫通頻度である。また、*ϕ*<sub>i</sub>は i 番目の過渡事象の発生頻度、*NTRAN* は過渡事象の数 である。*CPF<sub>RPV,i</sub>は*i番目の過渡事象に対する RPV 炉心領域部の条件付亀裂貫通確率であり、各 サブリージョンの条件付亀裂貫通確率 *CPF<sub>sub,ij</sub>*の余事象を用いて、以下のように算出される。こ こで *NSub* は分割したサブリージョンの数である。

$$CPF_{RPV,i} = 1 - \prod_{j}^{NSub} \left(1 - CPF_{Sub,i,j}\right)$$
(6-218)

*CPF<sub>sub,ij</sub>* は各サブリージョンにおける内部亀裂の条件付亀裂貫通確率 *CPF<sub>EC,Sub,ij</sub>* と表面亀裂の条件付亀裂貫通確率 *CPF<sub>SC,Sub,ij</sub>* を用いて、式(6-219)により算出される。

$$CPF_{Sub,i,j} = 1 - (1 - CPF_{EC,Sub,i,j})(1 - CPF_{SC,Sub,i,j})$$
(6-219)

内部 亀裂の 条件 付 亀 裂貫 通 確 率 *CPF<sub>EC,Sub,i,j</sub>* は さらに 母 材 部 と 溶 接 部 に 対 す る 条件 付 亀 裂貫 通 確 率 (そ れ ぞ れ *CPF<sub>EC,Base,i,j</sub>* と *CPF<sub>EC,Weld,i,j</sub>*) から、式(6-220) により 算出 さ れ る。

$$CPF_{EC,Sub,i,j} = 1 - \left(1 - CPF_{EC,Base,i,j}\right) \left(1 - CPF_{SC,Weld,i,j}\right)$$
(6-220)

表面亀裂の *CPF<sub>SC,Sub,ij</sub>*も同様に、母材部と溶接部の条件付亀裂貫通確率(それぞれ *CPF<sub>SC,Base,ij</sub>と CPF<sub>SC,Weld,ij</sub>*)から式(6-221)より算出される。

$$CPF_{SC,Sub,i,j} = 1 - \left(1 - CPF_{SC,Base,i,j}\right) \left(1 - CPF_{SC,Weld,i,j}\right)$$
(6-221)

さらに母材部の内部亀裂については、軸方向と周方向の亀裂が想定されるため、母材部内部亀 裂の条件付亀裂貫通確率は式(6-222)により算出される。

$$CPF_{EC,Base,i,j} = 1 - (1 - CPF_{EC,Base,axial,i,j})(1 - CPF_{EC,Base,circ,i,j})$$
(6-222)

ここで、

CPF<sub>Ec,Base,i,j</sub>: : i 番目の過渡事象に対する母材部の内部亀裂の条件付亀裂貫通確率

*CPF<sub>Ec,Base,axial,i,j</sub>*: i番目の過渡事象に対する母材部の軸方向内部亀裂の条件付亀裂貫通確率 *CPF<sub>Ec,Base,axial,i,j</sub>*: i番目の過渡事象に対する母材部の周方向内部亀裂の条件付亀裂貫通確率 である。なお、jはサブリージョンの番号を示す添字である。

さらに、母材部の軸方向内部亀裂に対する条件付亀裂貫通確率は式(6-223)により算出される。

CPF<sub>EC,Base,axial,i,j</sub>

$$= 1 - \prod_{k}^{IDEP_{EC,Base} IASP_{EC,Base,j}} \left(1 - CPF_{EC,Base,axial,i,k,l}\right)^{CONT_{axial} \times NCRACK_{EC,Base,j,k,l}}$$
(6-223)

ここで、

*CPF<sub>Ec,Base,axial,i,j</sub>*: *i* 番目の過渡事象、*j* 番目のサブリージョンに対する母材部軸方向内部亀 裂の条件付亀裂貫通確率

CPF<sub>Ec,Base,axial,i,k,l</sub>: i 番目の過渡事象、k 番目の亀裂深さ、1 番目のアスペクト比に対する母 材部軸方向内部亀裂の条件付亀裂貫通確率(PASCAL-RV により算出され る条件付亀裂貫通確率)

**NCRACK**<sub>Ec,Base,j,k,l</sub>: *j*番目のサブリージョン、*k*番目の亀裂深さ、1番目のアスペクト比に対 する母材部内部亀裂の個数

- *IASP<sub>Ec,Base,j</sub>*: *j*番目の亀裂深さにおける母材部の内部亀裂のアスペクト比数
- *IDEP<sub>Ec,Base</sub>*: 母材部の内部亀裂の亀裂深さ数

**CONT**axial : 軸方向亀裂の割合

である。

亀裂個数は亀裂密度とサブリージョンの寸法から算出される。例えば母材部内部亀裂の場合に は、母材部内部亀裂の体積個数密度とサブリージョンの体積との積により亀裂個数が算出される。 さらに、非破壊検査を実施する場合には、亀裂検出確率を考慮して次式のように亀裂個数が変更 され、サブリージョンの CPF の評価に使用される。

$$N_1 = (1 - POD)^{N_{\text{inspection}}} \times N_0 \tag{6-224}$$

ここで、

N <sub>0</sub>	: 亀裂数密度とサブリージョンの寸法から算出された亀裂個数
POD	:1回の非破壊検査における、亀裂検出確率(亀裂深さに依存する)
N <sub>inspection</sub>	:非破壊検査の実施回数
<i>N</i> <sub>1</sub>	:非破壊検査を考慮した後の亀裂個数

同様の手続を通じて、溶接部や表面亀裂についても、PASCAL-RV による解析結果から、条件 亀裂貫通確率(*CPF<sub>EC,Weld,ij</sub>、CPF<sub>SC,Base,ij</sub>*及び*CPF<sub>SC,Weld,ij</sub>*)の分布を求めることが出来る。

なお、RPV 炉心領域部の FCI については、以下の CPF を CPI に置き換え、同様の手順で算出 される。また、これら FCI 及び TWCF の分布を用いた、PASCAL における信頼度評価の手法に ついては、6.3 節を参照されたい。

## 7 まとめ

本手引きは、原子炉圧力容器用確率論的破壊力学解析コード PASCAL5 の構成、解析手法、基 礎理論や使用方法をまとめたものである。

## 謝辞

本手引きの一部は、原子力規制庁から受託した「高経年化技術評価高度化事業(原子炉圧力容器の健全性評価手法の高度化)」(平成25年度)、及び「高経年化技術評価高度化事業(原子炉一次系機器の健全性評価手法の高度化)」(平成26年度~平成28年度)において整備されたものである。

## 参考文献

- 1) U.S.NRC, "Regulatory Guide 1.154: Format and content of plant specific pressurized thermal shock safety analysis reports for pressurized water reactor", 1987, 32p.
- 2) 李銀生他, PASCAL 信頼性向上ワーキンググループ活動報告 –平成 27 年度–, JAEA-Review 2017-005, 2017, 80p.
- 3) 小坂部和也他, 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, 371p.
- 4) 眞崎浩一他, 原子炉圧力容器用確率論的破壊力学解析コード PASCAL3 の使用手引及び解析手法(受託研究), JAEA-Data/Code 2010-033, 2011, 350p.
- 5) 勝山仁哉他, 原子炉圧力容器用確率論的破壊力学解析コード PASCAL4 の使用手引き及び解析 手法(受託研究), JAEA-Data/Code 2017-015, 2018, 229p.
- 6) 日本機械学会, 発電用原子力設備規格 維持規格 (2016 年版), JSME S NA1-2016, 2016.
- Takamizawa H. and Nishiyama Y., "Bayesian analysis of Japanese pressurized water reactor surveillance data for irradiation embrittlement prediction", Journal of Pressure Vessel Technology, 143(5), 051502, 2021.
- 8) Harris, D.O., Lim, E.Y. and Dedhia, D.D., "Probability of pipe fracture in the primary coolant loop of a PWR plant", NUREG/CR-2189, 1981.
- 9) Li, Y. S., Kato, D. Shibata, K., "Sensitivity analysis of failure probability on PTS benchmark problems of pressure vessel using a probabilistic fracture mechanics analysis code", Proceedings of 7th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE-7266, 1999, 10p.
- U.S.NRC, "Technical Basis for the use of probabilistic fracture mechanics in regulatory applications", NUREG/CR-7278, 2022, 111p.
- 11) U.S.NRC, "A generalized procedure for generating flaw-related inputs for the FAVOR code", NUREG/CR-6817, Rev.1, 1986, 177p.
- 12) 日本電気協会, 電気技術規程原子力編, 原子炉構造材の監視試験方法, JEAC4201-1991, 1991.
- 13) Kirk, M., "Revision of  $\Delta$  T30 embrittlement trend curves", EPRI MRP/NRC PTS Re-Evaluation Meeting, 2000.
- 14) 日本電気協会, 電気技術規程原子力編, 原子炉構造材の監視試験方法, JEAC4201-2007, 2007.
- 15) 日本電気協会, 電気技術規程原子力編, 原子炉構造材の監視試験方法, JEAC4201-2007[2013 年 追補版], 2014.
- 16) ASME, "Boiler and pressure vessel code, Section XI, rules for inservice inspection of nuclear power plant components", BPVC-XI-2021, American Society of Mechanical Engineers, 2021.
- 17) 日本電気協会, 電気技術規程原子力編, 原子力発電所用機器に対する破壊靭性の確認試験方法, JEAC4206-2004, 2004.
- 18) 日本電気協会, 電気技術規程原子力編, 原子力発電所用機器に対する破壊靭性の確認試験方法, JEAC4206-2007, 2007.
- 19) ASTM International, "Test method for the determination of reference temperature, T<sub>0</sub>, for ferritic steels

in the transition range", ASTM E1921-02, 2002.

- 20) Marie, S. and Chapuliot, S., "Improvement of the calculation of the stress intensity factors for underclad and through-clad defects in a reactor pressure vessel subjected to a pressurised thermal shock", International Journal of Pressure Vessels and Piping, 85(8), pp.517-531, 2008.
- 21) 曽根田直樹,藤岡照高,円筒中の埋没き裂の応力拡大係数解の開発,電力中央研究所報告, T94037, 1995, 48p.
- 22) Shibata, K., Kato, D., Li, Y. S., "Development of a PFM code for evaluating reliability of pressure components subject to transient loading", Nuclear Engineering and Design, 208(1), pp. 1-13, 2001.
- 23) Moinereau, D., Landron, C., Chapuliot, S. and Marie, S., "Validation of ACE analytical criterion for warm prestress evaluation in RPV integrity assessment", ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2015-45103, 2015, 8p.
- 24) Chell, G. and Haigh, J., "The effect of warm prestressing on proof tested pressure vessels", International Journal of Pressure Vessels and Piping, 23(2), pp.121-132, 1986.
- 25) Wallin, K., "Master curve implementation of the warm pre-stress effect", Engineering Fracture Mechanics, 70(18), pp.2587-2602, 2003.
- 26) Chapuliot, S., Izard, J., Moinereau, D. and Marie, S., "WPS criterion proposition based on experimental data base interpretation," Fontevraud 7, A141, 2010, 10p.
- 27) Williams, P.T. et al., "Fracture analysis of vessels Oak Ridge FAVOR, v16.1, computer code: theory and implementation of algorithms, methods, and correlations", ORNL/LTR-2016/309, 2016, 331p.
- 28) 日本電気協会,電気技術規程原子力編,原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靭性の確認 方法,JEAC4206-2016,2016.
- 29) French Association for Design, "In-service inspection rules for mechanical components of PWR nuclear islands", RSE-M Appendix 5.4, 2010.
- 30) Marie, S. and Nédélec, M., "A new plastic correction for the stress intensity factor of an under-clad defect in a PWR vessel subjected to a pressurised thermal shock", International Journal of Pressure Vessels and Piping, 84(3), pp. 159-170, 2007.
- 31) Lu, K., Katsuyama, J. and Li, Y., "Plasticity correction on the stress intensity factor evaluation for underclad cracks under pressurized thermal shock events", Proceedings of ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2016-63486, 8p.
- 32) 勝山仁哉他, 原子炉圧力容器を対象とした確率論的破壊力学に基づく 健全性評価に関する標 準的解析要領, JAEA-Research 2016-022, 2017, 40p.
- 33) Dickson, T. L., Williams, P. T. and Bass, B. R., "An improved probabilistic fracture mechanics model for pressurized thermal shock", 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, SMiRT-16-1775, 2001, 8p.
- 34) Williams, P. T., Bowman, K. O., Bass, B. R. and Dickson, T. L., "Weibull statistical models of K<sub>Ic</sub>/K<sub>Ia</sub> fracture toughness databases for pressure vessel steels with an application to pressurized thermal shock assessments of nuclear reactor pressure vessels", International Journal of Pressure Vessels and Piping, 78(2-3), pp.165-178, 2001.
- 35) 津田孝夫, モンテカルロ法とシミュレーション: 電子計算機の確率論的応用, 培風館, 1969, 202p.

- 36) Hirota, T., Sakamoto, H. and Ogawa, N., "Proposal for update on evaluation procedure for reactor pressure vessels against pressurized thermal shock events in Japan", ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2014-28392, 2014, 11p.
- 37) Katsuyama, J., Nishikawa, H., Udagawa, M., Nakamura, M. and Onizawa, K., "Assessment of residual stress due to overlay-welded cladding and structural integrity of a reactor pressure vessel", Journal of Pressure Vessel Technology, 135(5), 051402, 2013.
- 38) Matsumoto, M. and Nishimura, T., "Mersenne twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator", ACM Transactions on Modeling and Computer Simulations, 8(1), pp. 3-30, 1998.
- 39) 矢川元基,確率論的破壊力学による原子力施設の健全性評価,原子力工業,34(4), pp.19-30, 1988.
- 40) Simonen, F.A., Johnson, K.I., Liebetrau, A.M., Engel, D.W. and Simonen, E.P., "VISA-II: A computer code for predicting the probability of reactor pressure vessel failure", NUREG/CR-4486, 1986, 97p.
- 41) EricksonKirk, M., Junge, M., Arcieri, W., Bass, B. R., Beaton, R., Bessette, D., Chang, T. H. J., Dickson, T., Fletcher, C. D., Kolaczkowski, A., Malik, S., Mintz, T., Pugh, C., Simonen, F., Siu, N., Whitehead, D., Williams, P., Woods, R. and Yin, S., "Technical basis for revision of the pressurized thermal shock (PTS) screening limit in the PTS rule (10 CFR 50.61)", NUREG-1806 Vol. 1, 2007, 172p.
- 42) Chou, H. W., Huang, C.C., "Probabilistic structural integrity analysis of boiling water reactor pressure vessel under low temperature overpressure event", International Journal of Nuclear Energy, 2015, 785041, 2015.
- 43) Lu, K., Takamizawa, H., Katsuyama, J. and Li, Y., "Recent Improvements of Probabilistic Fracture Mechanics Analysis Code PASCAL for Reactor Pressure Vessels", International Journal of Pressure Vessels and Piping, 199, 104706, 2022.
- 44) ASME, "Boiler and pressure vessel code, code cases, nuclear components", BPVC. CC. NC-2015, American Society of Mechanical Engineers, 2015.
- 45) 火力原子力発電技術協会,構造基準委員会 KIR 検討会活動報告書(最終年度)[第一種容器の 破壊靭性規定策定], 1996.
- 46) 日本溶接協会 原子力研究委員会 8HST 小委員会,原子炉圧力容器用超厚鋼材の安全性に関す る試験研究, 1979.
- 47) 日本溶接協会 原子力研究委員会 9HST 小委員会,原子炉圧力容器用超厚鋼材の安全性に関す る試験研究(Ⅲ) 成果報告書, 1981.
- 48) 日本溶接協会 原子力研究委員会 0TS 小委員会, 軽水炉圧力容器ノズル部の熱衝撃に関する 研究 成果報告書, 1982.
- 49) 日本溶接協会 原子力研究委員会 1TS 小委員会, 軽水炉圧力容器ノズル部の熱衝撃に関する 研究(II) 成果報告書, 1983.
- 50) 日本溶接協会 原子力研究委員会 2TS 小委員会, 軽水炉圧力容器ノズル部の熱衝撃に関する 研究(Ⅲ) 成果報告書, 1983.
- 51) 発電設備技術検査協会,溶接部等熱影響部信頼性実証試験に関する調査報告書 PTS試験(総 まとめ版),1992.

- 52) Iskander, S. K., Corwin, W. R. and Nanstad, R. K., "Results of Crack-Arrest Tests on Two Irradiated High-Copper Welds", NUREG/CR-5584 (ORNL/TM-11575), 1990, 163p.
- 53) Naus, D. J., Keeney-Walker, J., Bass, B. R., Robinson, G. C., Iskander, S. K., Alexander, D. J., Fileds, R. J., DeWit, R., Low, S. R. and Schwartz, C. W., "Crack-arrest behavior in SEN wide plates of lowupper-shelf base metal tested under nonisothermal conditions: WP-2 series", NUREG/CR-5451 (ORNL-6584), 1990, 265p.
- 54) Miura, N., Soneda, N., Arai, T. and Dohi, K., "Applicability of master curve method to Japanese reactor pressure vessel steels," ASME 2006 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2006-ICPVT11-93792, 2006, 8p.
- 55) Tobita, T., Nishiyama, Y., Ohtsu, T., Udagawa, M., Katsuyama, J. and Onizawa, K., 2014, "Fracture toughness evaluation of reactor pressure vessel steels by master curve method using miniature compact tension specimens," Journal of Pressure Vessel Technology, 137(5), 051405, 2015.
- 56) Ralf T., Richard T., Sebastien B., Vladislav P., Miroslav P., Markus N. and Guian Q., "Presentation of DEFI-PROSAFE project: probabilistic methodology to assess margin in deterministic RPV integrity assessment and proposed benchmark," ASME 2018 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2018-84615, 2018, 9p.
- 57) 曽根田直樹, 土肥謙次, 野本明義, 西田憲二, 石野栞, 軽水炉圧力容器鋼材の照射脆化予測法の 式化に関する研究-照射脆化予測法の開発-, 電力中央研究所報告, Q06019, 2007.
- 58) 曽根田直樹, 中島健一, 西田憲二, 土肥謙次, 原子炉圧力容器鋼の照射脆化予測法の改良-高照 射監視試験データの予測の改善-, 電力中央研究所報告, Q12007, 2013.
- 59) 原子力安全基盤機構, 平成 16 年度 原子力発電施設検査技術実証事業(超音波探傷試験における欠陥検出性及びサイジング精度の確認に関するもの), 2005.
- 60) Stevens, G., Kirk M., and Modarres, M "Technical Basis for Regulatory Guidance on the Alternate Pressurized Thermal Shock Rule", NUREG-2163, 2018, 191p.
- 61) Katsuyama, J., Miyamoto, Y., Lu, K., Mano, A. and Li, Y., "Improved Bayesian Update Method on Flaw Distributions Reflecting Non-Destructive Inspection Result", ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2020-21430, 2020, 8p.

# 付録

- 付録1: PASCAL-RV 用入力カード
- 付録2: PrePASCALの使用手順
- 付録3: PrePASCAL 用入力カード
- 付録4: PASCALのコード整備、機能検証、 活用事例に係る参考資料一覧

This is a blank page.

## 付録 1: PASCAL-RV 用入カカード

入力カードセット一覧

No.	カードセット名	内容	ページ数
1	#TITLE	解析タイトルの入力	146
2	#FLAG	解析の流れを制御するためのフラグ入力	147
3	#VESSEL	圧力容器のデータ入力	154
4	#TRANS	過渡事象のデータ入力	155
5	#TEMP	温度分布の時刻歴入力	156
8	#PRESPT	内圧の時刻歴入力(ユーザー入力)	157
9	#CRACKA	初期亀裂深さの分布(指数分布)の入力	158
10	#CRACKB	初期亀裂アスペクト比の分布(対数正規分布)の入力	159
11	#CDEPTH	重み付きモンテカルロ法を用いた確率解析に関するデータ入力	160
12	#CASPCT	階層別モンテカルロ法を用いた確率解析に関するデータ入力	161
14	#MATRAL	評価対象材料の物性、化学成分に関するデータ入力	162
15	#FINIT	表面亀裂の長さに関するデータ入力	164
18	#TBLPRM	表出力のデータ形式入力	165
19	#CRKAUD	初期亀裂深さ分布のユーザー入力	166
20	#CRKBUD	初期亀裂アスペクト比分布のユーザー入力	167
32	#STRS3D	3次多項式応力分布の時刻歴入力	168
33	#CONT	連続解析用データ入力	170
34	#SSAUTO	自動調整階層別モンテカルロ法	172
35	#CORREL	相関係数の設定	173
37	#STRSDT	応力のデータテーブル入力	174
38	#RESSTR	残留応力分布の入力	175
39	#CRKFIX	初期亀裂深さ及び長さの固定値の入力	176
42	#INDEF	内部亀裂の深さ方向位置比分布の定義	177
43	#INCRK	内部亀裂の定義	178
44	#MASTER	マスターカーブの定義	179
45	#PSSYDT	塑性域補正の際に用いる降伏応力テーブルの入力	180
50	#CONT2	連続解析用データ入力(トランジェント DB 用)	181
54	#DRTCRIEPI	JEAC4201-2007の国内脆化予測法のデータ入力	182
55	#YMKICEA	CEA の式で用いるヤング率の入力	183
56	#DRTREVPTS	米国改正 PTS 規則の脆化予測法のデータ入力	184
61	#TWCFEPST	PASCAL-Manager を用いて TWCF を算出する際の入力	185
62	#CPFPARAM	CPFの算出に係る入力	186
63	#SIFDT	無限長亀裂の応力拡大係数	187
64	#JTMETHOD	JT法に係る入力	188
65	#INTERMED	中間ファイルの出力制御	189
66	#KICPARAM	破壊靭性値 K <sub>lc</sub> のユーザー入力	190
67	#KIAPARAM	破壊靭性値 Klaのユーザー入力	191
68	#CRKOUTPT	破損亀裂情報出力の制御	192

入力カードセット一覧

各カードセットの入力方法

解析タイトルの入力 (#TITLE)

ラム 連続計算 <b>予数</b> ) No.		内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
30(1) 1 解析タイトル	解析タイトル		ANAME	A80		

・このカードセットは必要に応じて入力すれば良い。

・解析タイトルが入力されなかった場合、解析タイトルには "unknown" が用いられる。

イトルの初めに1文字スペースを入れ、コメント行として認識されることを避ける必要がある。 (解析タイトルの初めの1文字に "c"または "C"を用いることはできな K 解析タイトルの最初の文字が"c"または"C"で始まる場合、その行は「コメント行」として認識されるため、解析タイトルとして認識されない。このような場合は、  $(^{\circ}, ^{\circ})$ 

No.	カラム (行数)	連続計算 No.		内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
	1-5 (1)	_	解析種類	<ul> <li>0:確率論的解析(認識論的不確実さを考慮しない。)</li> <li>1:確率論的解析(認識論的不確実さを考慮する。)</li> <li>2:決定論的解析</li> <li>3:無限長亀裂の応力拡大係数計算</li> </ul>	IANA	IS		I
2	6-10(1)	2	入力単位系	1: 国際単位系 (SI)	IINPT	IS		
3	11-15(1)	3	出力単位系	1:国際単位系 (SI)	IOUTPT	I5		
4	16-20 (1)	4	応力の評価方式	1:3次多項式分布 2:離散点入力 (データテーブル)	ISTRES	15		
5	21-25 (1)	5	温度の評価方式	0:データテーブル	ITEMP	15		
9	26-30 (1)	9	内圧の評価方式	1:データテーブル	IPRES	15		
7	31-35 (1)	7	温度及び応力の補間方式	0:線形補間(1次)	INTARP	15		
8	36-40 (1)	8	中性子照射の減衰効果	<ol> <li>部村内の位置に応じて指数減衰 (容器内表面に存在する表面亀裂を想定)</li> <li>部村内の位置に応じて指数増加 (容器外表面に存在する表面亀裂を想定)</li> </ol>	IRRAD	15		
6	41-45 (1)	6	クラッド有無の選択	0:クラッド無し 1:クラッド有り	ICLAD	I5		
10	46-50 (1)	10	高温予荷重効果 0:WPS 考 1:応力拡力 2:ACEモ 3:応力拡力 4:Chell & 5:Wallin モ 6:NRI (修 7:FAVOR	慮しない。 大係数の減少過程では亀裂進展しない。 デル 大係数が過去の最大値より小さい場合、亀裂進展しない。 Haigh モデル 5正 Wallin)モデル の最良推定モデル	IWPS	IS	I	I
IANA	12100541	は、全ての確	[率変数の不確実さを偶然的不]	確実さとみなして損傷確率等を計算する。				

(1/6)解析の流れを制御するためのフラグ入力 (#FLAG) ・IANAが1のときは、Ke及びKaの不確実さは偶然的不確実さ、その他の確率変数の不確実さは認識論的不確実さとして損傷確率等を複数個計算するため、#TWCFEPST カードを入力する必要がある。 ・No.はエラー出力時等に表記されるコード内での取り扱い番号である。

- 147 -

カラム (行数)	連続計算 No.		内容	变数名	影式	U.K.	S.I.
 1-5 (2)	11	非破壊検査 (bSI) 有無の選択	0:無し	IPSI	I5		
6-10 (2)	12	亀裂の存在位置	0:溶接部 1:母材部	IWELD	IS		
11-15 (2)	13	<b></b> 創 目 烈 植 類	<ul> <li>0: 無限長亀裂(深さ可変)</li> <li>1: 表面亀裂(深さ及びアスペクト比可変)</li> <li>2: 表面亀裂(深さ及びアスペクト比可変)</li> <li>3: 表面亀裂(深さ可変、長さ固定)</li> <li>4: 表面亀裂(アスペクト比可変、深さ固定)</li> <li>10: 無限長亀裂(深さ比及びアスペクト比可変)</li> <li>21: 内部亀裂(深さ比可変、長さ固定)</li> <li>21: 内部亀裂(深さ比可変、大スペクト比可変)</li> <li>23: 内部亀裂(深さ比可変、アスペクト比可変)</li> <li>25: 内部亀裂(深さ比及びアスペクト比可変)</li> <li>25: 内部亀裂(深さ比及びアスペクト比可変)</li> <li>21: 内部亀裂(深さ比及びアスペクト比可変)</li> </ul>	ICRACK	15	I	I
 16-20 (2)	14	龟裂配置方向	0:周方向亀裂 1:軸方向亀裂	IORIN	IS		
21-25 (2)	15	初期亀裂の深さ分布種類	2:ユーザー入力分布 10:指数分布(連続サンプリング) 20:指数分布(階層別、連続サンプリング) 22:ユーザー入力分布(階層別、連続サンプリング)	IDEPT	IS	I	I
26-30 (2)	16	初期アスペクト比分布種類	0: 対数正規分布 2: ユーザー入力分布 20: 対数正規分布(階層別、連続サンプリング) 22: ユーザー入力分布(階層別、連続サンプリング)	IASPT	IS		

解析の流れを制御するためのフラグ入力(#FLAG) (2/6)

S.I.			I
U.K.		I	I
形式	I5	15	15
変数名	IPLANE	ISIFA	ISIFB
「」	初期亀裂平面の定義方式 0:初期亀裂平面自動分割	無限長亀裂の応力拡大係数 15: 内表面側周方向亀裂 JSME維持規格 2016 年版の解 16: 外表面側周方向亀裂 JSME維持規格 2016 年版の解 25: 内表面側軸方向亀裂 JSME維持規格 2016 年版の解 26: 外表面側軸方向亀裂 JSME維持規格 2016 年版の解 37: 内表面側軸方向亀裂 簡易法 (JSME維持規格 2016 年版の解 47: 内表面側軸方向亀裂 簡易法 (JSME維持規格 2016 年版の解 99: ユーザーが入力した値	表面亀裂の応力拡大係数 15: 内表面側周方向亀裂 JEAC4206-2007 式 17: 内表面側周方向亀裂 JSME維持規格 2016 年版の解 18: 外表面側周方向亀裂 JSME維持規格 2016 年版の解 25: 内表面側軸方向亀裂 JSME維持規格 2016 年版の解 27: 内表面側軸方向亀裂 JSME維持規格 2016 年版の解 28: 外表面側軸方向亀裂 JSME維持規格 2016 年版の解 37: 内表面側軸方向亀裂 簡易法 (JSME維持規格 2016 年版の解 45: 内表面側軸方向亀裂 簡易法 (JSME維持規格 2016 年版の解 71: CEA の解(軸,周共通、長さ方向評価点: クラッド/母村境界) 72: CEA の解(軸,周共通、 とうッド下亀裂)
連続計算 No.	17	<u>8</u>	19
カラム (行数)	31-35 (2)	36-40 (2)	41-45 (2)
No.	17	18	19

解析の流れを制御するためのフラグ入力(#FLAG) (3/6)

No.	カラム (行数)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
20	46-50 (2)	20	内部亀裂の応力拡大係数 21:周方向亀裂 電中研式 22:軸方向亀裂 電中研式 31:ASME Sec. XI (2021年版の解)	ISIFI	I5		
21	1-5 (3)	21	亀裂進展に伴う確率変数評価 1:FAVOR の方式	IPROG	I5		
22	6-10 (3)	22	表面亀裂の進展則 2:深さ方向に進展したら無限長亀裂 3:長さ方向、深さ方向それぞれについて進展したら微小進展	IFINIT	IS		
23	11-15 (3)	23	<ul> <li>破壊靱性値 K<sub>a</sub>の評価式</li> <li>1: ASME Sec. XI 下限曲線</li> <li>4: JEAC4206-2004</li> <li>5: ORNL ワイブル分布型</li> <li>6: Master Curve</li> <li>7: FAVOR v16.1 式</li> <li>8: 国内ワイブル分布型</li> <li>9: JEAC4206-2007 (1.パス法により求められた RT<sub>Nor</sub>使用)</li> <li>10: JEAC4206-2007 (1.パス性用)</li> <li>11: JEAC4206-2007 (1.パッ使用)</li> <li>11: JEAC4206-2007 (1.パッケー)</li> </ul>	IKIC	IS	I	I
24	16-20 (3)	24	<ul> <li>亀裂伝播停止破壊靭性値 K<sub>a</sub>の評価式</li> <li>1:ASME Sec. XI 下限曲線</li> <li>1:ASME Sec. XI 下限曲線</li> <li>1:ASME Sec. XI 下限曲線</li> <li>4:JEAC4206-2004</li> <li>5:ORNL ワイブル分布型</li> <li>6:Master Curve</li> <li>7:FAVOR v16.1 式 (モデル 1)</li> <li>8:FAVOR v16.1 式 (モデル 2)</li> <li>9:JEAC4206-2007(1パッス法により求められた RT<sub>Nor</sub>使用)</li> <li>10:JEAC4206-2007(1パッ(世用)</li> <li>11:JEAV4206-2007(1パッ(世用)</li> <li>11:JEAV4206-2007(1パッ(世用)</li> <li>11:JEAV4206-2007(1パッ(用)</li> <li>11:JEAV4206-2007(1パッ(用)</li> <li>11:JEAV4206-2007(1パッ(用)</li> <li>11:JEAV4206-2007(1パッ(用)</li> <li>11:JEAV4206-2007(1パッ(用)</li> <li>11:JEAV4206-2007(1パッ(用)</li> <li>11:JEAV4206-2007(1パッ(用)</li> <li>11:JEAV4206-2007(1パッ(用)</li> <li>11:JEAV4206-2007(1パッ(用)</li> </ul>	IKIA	SI		

解析の流れを制御するためのフラグ入力 (#FLAG) (4/6)

No.	カラム (行数)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
25	21-25 (3)	25	<ul> <li>Δ RT<sub>NDT</sub> の評価式 0: JEAC4201-1991</li> <li>1: 2018 年度国際ベンチマークで使用した Formula(1)</li> <li>9: 米国改正 PTS 規則の脆化予測法</li> <li>11: JEAC4201-2007 (データテーブルの値を補問)</li> <li>12: JEAC4201-2007 (データテーブルの値を補問)</li> <li>13: JEAC4201-2007 2013 追補版 (データテーブルの値を補問)</li> <li>20: JAEA にて整備した BNP 法に基づく予測量 (PWR)</li> <li>21: JAEA にて整備した BNP 法に基づく予測量 (BWR)</li> </ul>	IDRTR	IS	I	
26	26-30 (3)	26	■ 報道法 # 10 # 10 # 10 # 10 # 10 # 10 # 10 # 1	ICRITN	15		
27	31-35 (3)	27	計算結果の出力 0:結果ファイルを出力する。 亀裂進展情報詳細ファイルは出力しない。 1:結果ファイルを出力しない。 亀裂進展情報詳細ファイルも出力しない。	IGRAPH	IS		
28	36-40 (3)	28	モンテカルロ法の選択 0:重み付きモンテカルロ法 1:階層別モンテカルロ法	IPTYPE	I5		
29	41-45 (3)	29	非破壊検査(ISI) 有無の選択 0:無し (非破壊検査を考慮する場合は PASCAL-Managerの設定ファイル内で設定する)	ISII	15		
31	1-5 (4)	31	自動調整階層別モンテカルロ法 0:自動調整を行わない。 100: 亀裂サンプリング数の最適化を実施する。	IPTY2	IS		
32	6-10 (4)	32	K <sub>t</sub> cとK <sub>ta</sub> の相関の考慮 0:相関を考慮しない。 1:相関を考慮する。	ICOREL	I5		
33	11-15 (4)	33	中性子照射量による上部棚靭性値の低下予測 0:考慮しない。 2:JEAC4201式を使用	IDUSE	I5		
34	16-20 (4)	34	焼鈍及び再脆化の考慮 0:考慮しない。	IANNE	15	Ι	
35	21-25 (4)	35	残留応力の考慮 0:残留応力を考慮しない。 1:残留応力を考慮する。	IRSTRS	15		

解析の流れを制御するためのフラグ入力 (#FLAG)

(2/6)

- 151 -

## JAEA-Data/Code 2022-006

			解析の流れを制御するためのフラグ入力(#FLAG) (6/6)				
No.	カラム (行数)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
36	26-30 (4)	36	複雑な応力分布への対応 一の位:無限長亀裂のフラグ 十の位:表面亀裂のフラグ 百の位:内部亀裂のフラグ 百の位:内部亀裂のフラグ 一の位及び十の位のフラグの内容 3:3次関数で逐次変換を実施する。 8:重み関数で逐次変換を実施する。 9:逐次変換を実施する。 1:1次関数で逐次変換を実施する。 1:1次関数で逐次変換を実施する。 3:3次関数で逐次変換を実施する。 3:3次関数で逐次変換を実施する。 4:0~3次関数のうち適切な次数を内部で選択する。 9:逐次変換を実施しない。	ISBSFG	15	I	I
37	31-35 (4)	37	決定論解析における K <sub>t</sub> のシプト量	ILIMTC	15	シフト 倍率×10	シフト 倍率×10
38	36-40 (4)	38	決定論解析における Kuのシフト量	ILIMTA	15	シフト 倍率×10	シフト 倍率×10
39	41-45 (4)	39	応力拡大係数の塑性域補正 一桁目:亀裂深さ方向(内部久陥の場合は外表面側) ニ桁目:亀裂深さ方向(内部久陥内表面側) (クラッド下亀裂の場合) 0:塑性域補正を実施しない。 1:塑性域補正を実施(Marie らの式) 2:塑性域補正を実施(Marie らの式) 3:塑性域補正を実施(JAEA の式) (クラッド下亀裂以外の場合) 0:塑性域補正を実施しない。 1:塑性域補正を実施しない。	IPSFG	15	I	I
40	46-50 (4)	40	非破壊検査の取り扱い方式の選択(*) 1:全亀裂計算方式 (*非破壊検査を考慮する場合は PASCAL-Manager の設定ファイル内で設定する)	IPND	15		
41	1-5 (5)	41	クラッド部の亀裂進展モデルの選択 0:クラッド部の亀裂進展あり。 1:クラッド部の亀裂進展なし。	ICLINI	IS		

(UV 14#) Ŧ У, Ч 11 1 6 観話の 話と が 単 値 よ ん や が 気

・このカードセットは必ず入力しなければならない。
・No.13 で内部亀裂を選択した場合、#CASPCT, #FINIT, #INCRK, #INDEF を指定する必要がある。#INDEF は区間の開始と終了に同一値を用いることが可能であるが、
#CASPCT は区間の開始と終了に同一値を用いることができないため、注意を要する。
・No.13 で 22 番(深さ比可変、長さ固定)を選択した場合、#FINIT で長さを定義する。#CASPCT で定義したアスペクト比に関する設定は無視される。
・No.13 で 23 番(深さ比可変、アスペクト比固定)を選択した場合、#FINIT でアスペクト比を定義する。#CASPCT で定義したアスペクト比に関する設定は無視される。
・No.13 で 24 番(深さ比固定、アスペクト比可変)を選択した場合、#CRKFIX で深さを定義する。#CASPCT で定義した深さ比に関する設定は無視される。
・No.13 で 25番(深さ比及びアスペクト比は離散値)を選択した場合、No.15(初期亀裂の深さ分布種類)で 2 番(ユーザー入力)を設定し、#CRKAUD で深さ分布を定
義する。また、No.16(初期アスペクト比分布種類)で2番(ユーザー入力分布)を設定し、#CRKBUD でアスペクト比を定義する。離散値を設定する場合には、No.28
(モンテカルロ法の選択)を0(重み付きモンテカルロ法)に設定する。
・No.13 で 31 番(深さ比,アスペクト比固定)を選択した場合、#CRKFIX で深さ及びアスペクト比を定義する。亀裂サンプリング数は、#INCRK で定義する。
・内部亀裂を対象とする場合、No.17 で 0 番(初期亀裂平面自動分割)を選択する必要がある。
・No.19 で 71 番(CEA の解)を選択した場合、#YMKICEA でヤング率を指定する必要がある。
・応力拡大係数式(No.18 及び 19)は、亀裂方向、応力の入力形式、クラッドの有無によって使用できるものとできないものがあるので、注意が必要である。
・No.25 で 9 番(米国改正 PTS 規則の脆化予測法)を選択した場合、#DRTREVPTS でパラメータを指定する必要がある。
・No.25 で 11 番(JEAC4201-2007(データテーブルの値を補間))、もしくは 12 番(JEAC4201-2007_2013 追補版(移行量を式により算出))や 13 番(JEAC4201-2007_2013
追補版(データテーブルの値を補間))を選択した場合、#DRTCRIEPI でパラメータを指定する必要がある。
・No.31 の自動調整階層別モンテカルロ法は、アスペクト比の分布を考慮した表面亀裂を対象とする。
・No.31及び No.32は、入力する必要があるときにのみ入力すればよい。この行を省略した場合は、No.31~No.36は0として取り扱われる。

・No.40で1番(全亀裂計算方式)を選択した場合、#NDISETで非破壊検査シナリオを定義する必要がある。

No.	カラム (行数)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10(1)	1	圧力容器の板厚 (クラッド厚も含む)	THICK	F10.0	inches	ш
2	11-20 (1)	2	圧力容器の内半径	RAD	F10.0	inches	ш
3	21-30 (1)	3	圧力容器の中性子照射量(中性子照射量)	FLUEC	F10.0	$ imes 10^{19} \ { m n/cm^2}$	$ imes 10^{19} \ {\rm n/cm^2}$
4	31-40 (1)	4	圧力容器の炉壁内中性子照射量減衰定数	DECAY	F10.0	inches <sup>-1</sup>	m <sup>-1</sup>
5	41-50 (1)	5	クラッドの厚さ	TCLAD	F10.0	inches	ш

圧力容器のデータ入力 (#VESSEL)

・このカードセットは必ず入力しなければいけない。

・No.5については、クラッドを考慮しない場合は入力を省略しても良い。

・クラッドを考慮する場合、内半径は中心からクラッドの表面までの距離とする。

・No.3の入力単位は×10<sup>19</sup> n/cm<sup>2</sup>である。入力のケタに注意すること。

内容	TMAX F10.0 minutes min	間刻み TDET F10.0 minutes min	ラグ 0:等間隔 1:等比級数 ICPFG I10	CDET F10.0 inches nun	CAMP F10.0 — — — —	CEND F10.0 容器板厚の割合 容器板厚の割合	デー入力点数 NTDIV IS ー ー ー ー	TPOS F10.0 minutes min
内容		<b>持間刻み</b>	7 ラグ 0:等間隔 1:等比級数	4			-ザー入力点数	z
	過渡事象の総評価時間	過渡事象評価における時	亀裂進展刻み方式選択フ	第1回目の亀裂進展刻み	亀裂進展刻み増幅率	亀裂破壊深さ	過渡事象評価時間のユー	過渡事象評価時間データ
連続計算 No.	1	2	3	4	5	9	1	
カラム (行数)	1-10(1)	11-20 (1)	21-30 (1)	31-40(1)	41-50 (1)	51-60 (1)	1-5 (2)	$\begin{array}{c} 1-50 \\ (3 \sim) \end{array}$
No.	1	2	3	4	5	9	7	8

過渡事象のデータ入力 (#TRANS)

このカードセットは必ず入力しなければいけない。

・過渡事象の評価時刻を等間隔で行う場合は、No.2の時間刻みを設定し、No.7 及び No.8 を入力してはいけない。

・過渡事象の評価時刻を等間隔で設定しない場合は、No.7 及び No.8 を用いて評価時刻を入力する。この際、No.2 で設定された時間刻みは無視される。

・No.5の亀裂進展刻み増幅率は等比級数の係数を意味している。等間隔で亀裂を進展させる場合は、この値は使用されない。

1         1-5(1)         温度分布データベースの時刻分割数         NTDATL         15         1         -         -           2         6-10(1)         温度分布データベースの炉壁内位置分割数         NTDATC         15         -         -         -           3         1-50(2~)         1         データを入力するための炉壁内位置データ         XOT (NTDATC)         15         -         -         -           4 $1-10$ データを入力するための時刻データ         XMFT (NTDATC)         F10.0         minutes         min           5 $1-50$ ボータ         TPDIS (NTDATL, NTDATC)         F10.0 $\circ$ F         ~	No.	カラム (行数)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
2 $6-10(1)$ 温度分布データベースの炉壁内位置分割数         NTDATC         I5 $  -$ 3 $1-50(2\sim)$ $1$ $\forall - \gamma e \lambda \lambda \gamma e \lambda b o p e e h d e e h d e e h d e e h d e$	1	1-5 (1)		温度分布データベースの時刻分割数	NTDATL	15		
3 $1-50(2\sim)$ $7-\rho$ を入力するための炉壁内位置データXOT (NTDATC)F10.0容器板厚の割合 (%)容器板厚の割合 (%)容置板厚の割合 (%)容置板Function (%)容置the matheman容置theman容置theman容置theman容置theman容置theman容Theman容Theman????????? <th< td=""><td>2</td><td>6-10(1)</td><td></td><td>温度分布データベースの炉壁内位置分割数</td><td>NTDATC</td><td>15</td><td> </td><td> </td></th<>	2	6-10(1)		温度分布データベースの炉壁内位置分割数	NTDATC	15		
4 $1-10$ (不定)データを入力するための時刻データTMFT (NTDATL)F10.0minutesmin5 $1-50$ (不定)温度データTPDIS (NTDATL, NTDATC)F10.0°F°C	3	$1-50~(2\sim)$	1	データを入力するための炉壁内位置データ	XOT (NTDATC)	F10.0	容器板厚の割合 (%)	容器板厚の割合 (%)
5 $\frac{1-50}{(不定)}$ 温度データ TPDIS (NTDATL, NTDATC) F10.0 °F °C	4	1-10 (不定)		データを入力するための時刻データ	TMFT (NTDATL)	F10.0	minutes	min
	5	1-50 (不定)		温度データ	TPDIS (NTDATL, NTDATC)	F10.0	٩°	Ĉ

温度分布の時刻歴入力 (#TEMP)

・このカードセットは必ず入力しなければならない。

・#TEMP の入力例を以下に示す。

2+40+50 時刻分割数及び位置分割数	4 0.6 1.0 温度データを入力するための炉壁内位置データ。NTDATC=5 なので 5 個入力している。	2 1. 733E+02 1. 827E+02	2 1.230E+02 1.310E+02	1 9.364E+01 9.846E+01 // // NTDATL=5 なので、時刻データ及び温度データのセットを 5 セット入力する。	1 8. 231E+01 8. 525E+01	1 7.178E+01 7.287E+01
-+30+-	0. 4	631E+02 1. 733	149E+02 1.230	876E+01 9.364	935E+01 8.231	068E+01 7.178
+20	0. 2	1.578E+02 1.	1. 107E+02 1.	8. 631E+01 8.	7. 786E+01 7.	7.012E+01 7.
С+10- #темр	5 5 0.1	10.0 1.151E+02 20.0	7. 662E+01	40. 0 6. 611E+01 60. 0	00. 0 6. 558E+01 100. 0	6. 556E+01

No.	カラム (行数)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10(1)		内圧データベースの時刻分割数	NUMP	110		
2	$1-10(2^{\sim})$	1	内圧データを入力する時刻データ	TIMP (NUMP)	F10.0	minutes	min
3	11-20 (2 $\sim$ )		内圧データ	PDT (NUMP)	F10.0	ksi	MPa

内圧の時刻歴入力(ユーザー入力) (#PRESPT)

・このカードセットは内圧の評価方式 (#LAGの No.6) でデータテーブルが選択された場合に入力する必要がある。

・時刻データ及び内圧データは、定義された時刻分割数と同数を入力しなければならない。

No.	カラム (行数)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10(1)	1	指数分布の指数	ALAMDA	F10.0	inches <sup>-1</sup>	mm <sup>-1</sup>
2	11-20 (1)	2	亀裂の存在確率の打ち切りデータ	DEPAMP	F10.0	亀裂存在確率	亀裂存在確率
4		石枯 在 赵 《 浙	黒スストト てくくせん こちまざ ふくな たくごう こうしょう 読みよく た	۲ ب			

初期亀裂深さ分布(指数分布)の入力(#CRACKA)

・このカードセットは初期亀裂の深さ分布種類 (#FLAG の No.15) に指数分布が選択された場合に入力する必要がある。

も 後 分割数を用いて均等に分割する。打ち切りデータがある場合は、スレショルド値から打ち切り位置までを分割することになるため、無駄な分割がなくなり、亀裂の存 解析時間の短縮につながる。この機能はモンテカルロ法の手法に重み付きモンテカルロ法が採用されている場合にのみ有効である。亀裂の存在確率の打ち切りデータ が設定されていない(=0)場合、重み付きモンテカルロ法の亀裂深さ分布はスレショルド値(設定されていない場合は容器内表面)から容器外壁までを、入力された 深い亀裂は存在確率が低いため、解析上の重要性が低い。亀裂の存在確率の打ち切りデータに値を入力すると、その存在確率以下のデータは取り扱わなくなるため、 在確率の高い箇所を集中的に分割するため解析精度も向上する。これについては、重み付きモンテカルロ法を用いた確率解析に関するデータ入力 (#CDEPTH) 照されることを望む。

S.I.		
U.K.	I	
形式	F10.0	F10.0
変数名	BOAMED	BOASIG
内容	亀裂アスペクト比の平均値	亀裂アスペクト比の標準偏差
連続計算 No.	1	2
カラム (行数)	1-10(1)	11-20 (1)
No.	1	2

初期亀裂アスペクト比の分布(対数正規分布)の入力 (#CRACKB)

・このカードセットは初期アスペクト比分布種類(#FLAGの No.16)に 対数正規分布が選択された場合に入力する必要がある。

・LLNL は BOAMED=1.336、BOASIG=0.538 という値を推奨している。これはアスペクト比 a/b が 0.2 よりも小さい亀裂の存在確率を 0.01 とした場合のデータである。

No.	カラム (行数)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-5 (1)	1	亀裂深さ分布の定義点数	NAFLOW	I5		
2	6-15 (1)	2	亀裂深さのサンプル数	NSMAX	110		
4	16-25 (1)	4	亀裂深さのしきい値	THRESH	F10.0	inches	mm
5	1-10 (2)	5	95%信頼区間が破損確率に占める割合(計算打ち切り条件として使用)	CIF95	F10.0	%	%

重み付きモンテカルロ法を用いた確率解析に関するデータ入力 (#CDEPTH)

・このカードセットは無限長亀裂、表面亀裂(初期亀裂長さ固定)、表面亀裂(初期亀裂アスペクト比固定)を対象としている場合に入力する必要がある。

亀裂深さが非常に小さい場合、亀裂が進展する可能性は非常に小さくなる。そのような場合、亀裂深さのしきい値(スレショルド値)を設定する。この値よりも小さ な亀裂はサンプリングされないため、解析の効率が上がる。サンプリングされる範囲の亀裂存在確率は、サンプリングされない範囲の亀裂存在確率に基づき修正され る。なお、サンプリングされる亀裂深さの上限は、圧力容器板厚または亀裂存在確率の打ち切りデータ は#CRACKA の No.2: DEPAMP で定義される。 ・No.5 の 95%信頼区間が破損確率に占める割合は、この判定条件を用いた計算の打ち切りを行わない場合、入力しなくても良い。

Ī		階層別モンテカルロ法を用いた確率解析に関するデータフ	、力 (#CASPCT	(		
5 連続計算 ) No.		内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
) 1		<b>亀裂深さ比座標 (x / thickness)</b> の分割数	NAOT	15		I
1) 2		亀裂アスペクト比座標 (a / b) の分割数	NAOB	15	—	
1) 3		<b>亀</b> 裂深さ比座標 (x / thickness) の下限値	AOTLOW	F10.0	—	
1) 4		<b>亀</b> 裂深さ比座標 (x / thickness) の上限値	AOTUP	F10.0	—	
1) 5		亀裂アスペクト比座標 (a / b) の下限値	AOBLOW	F10.0	—	
1) 6		亀裂アスペクト比座標 (a / b) の上限値	AOBUP	F10.0	—	
1) 7		各階層のサンプリング数	NSAMP	IS		I
亀裂アスペクト比の	H 0	0分布を考慮)を対象としており、表面亀裂の初期亀裂平面の定義方式	(#FLAG Ø) No.17:	(IPLANE)	いたの(初期亀季	要求
場合に入力する必要	心思	<b>夏がある。</b>				
ルロ法を対象として	4	、おり、モンテカルロ法の選択 (#FLAGの No.28: IPTYPE (No.28)) に1	が入力されている	場合に入	力する必要があ	Ŷ
としており、初期値	]期值	<b>訃裂の深さ比、アスペクト比、をともに固定する場合 (#FLAG の No.13</b>	: ICRACK = 31)	を除いた≦	全ケースにおいて	、、本カードイメー
要がある。						

・入力された分割数及び上限・下限値を用いて、初期亀裂平面を等間隔に分割する。

自動調整階層別モンテカルロ法を用いることもが可能になる。自動調整階層別モンテカルロ法については、#SSAUTOに記す。 、このカードセットを入力した場合のみ、

- 亀裂長さを固定する場合(#FLAGの No.13 ICRACK = 22):#FINITの No.4 CKLNGの値を用いる。NAOB=1 に自動設定され、AOBLOW, AOBUP は無視される。 ・本カードイメージでは、階層の下限値と上限値に同一の値を指定することができない。内部亀裂を対象とする場合、以下のように入力する必要がある。

(#FLAGの No.13 ICRACK = 23):#FINITの No.4 CKLNGの値を用いる。NAOB=1 に自動設定され、AOBLOW, AOBUP は無視され - 亀裂アスペクト比を固定する場合 ŝ

- 亀裂深さ比、アスペクト比を固定する場合(#FLAG の No.13 ICRACK = 31):本カードイメージは使用しない。#CRKFIX の No.1 FIXDEP、No.2 FIXLNG の値を用い - 亀裂深さ比を固定する場合(#FLAGの No.13 ICRACK = 24): #CRKFIXの No.1 FIXDEPの値を用いる。NAOT=1 に自動設定され、AOTLOW, AOTUP は無視される。

各セルのサンプリング数は、#INCRK の No.4 MSAMP31 を用いる。

ŝ

(1/2)
(#MATRAL)
化学成分に関するデータ入力
評価対象材料の物性、

No.	カラム (行数)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10(1)	1	ヤング率	YOUNG	F10.0	ksi	MPa
2	11-20 (1)	2	ポアソン比	NN	F10.0	—	I
3	21-30 (1)	3	初期 RT NDT の平均値	RTMED	F10.0	Ч°	Ĉ
4	31-40 (1)	4	初期 RT NDT の標準偏差	RTSIG	F10.0	Ч°	Ĉ
5	41-50 (1)	5	<b>△ RT</b> NDT の標準偏差	DRSIG	F10.0	Ч°	Ĉ
9	1-10 (2)	9	∆RTNDTの標準偏差の打ち切り割合	TDRSIG	F10.0	標準偏差の倍数	標準偏差の倍数
7	11-20 (2)	L	Mc補正值	RTMCAD	F10.0	Ч°	Ĉ
8	21-30 (2)	8	脆化予測法の平均予測誤差	RTPRED	F10.0	Ч°	Ĉ
6	31-40 (2)	6	Cuの含有率の平均値	CUMED	F10.0	wt%	wt%
10	41-50 (2)	10	Cuの含有率の標準偏差	CUSIG	F10.0	wt%	wt%
11	1-10 (3)	11	Cuの含有率の最小値	CUMIN	F10.0	wt%	wt%
12	11-20 (3)	12	Cuの含有率の最大値	CUMAX	F10.0	wt%	wt%
13	21-30 (3)	13	Niの含有率の平均値	FNIMED	F10.0	wt%	wt%
14	31-40 (3)	14	Niの含有率の標準偏差	FNISIG	F10.0	wt%	wt%
15	41-50 (3)	15	Niの含有率の最小値	FNIMIN	F10.0	wt%	wt%
16	1-10 (4)	16	Niの含有率の最大値	FNIMAX	F10.0	wt%	wt%
17	11-20 (4)	17	P の含有率の平均値	PHOMED	F10.0	wt%	wt%
18	21-30 (4)	18	P の含有率の標準偏差	PHOSIG	F10.0	wt%	wt%
19	31-40 (4)	19	Pの含有率の最小値	PHOMIN	F10.0	wt%	wt%

## JAEA-Data/Code 2022-006

(2/2)	
(#MATRAL)	
化学成分に関するデータ入力	
評価対象材料の物性、	

No.	カラム (行数)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
20	41-50 (4)	20	P の含有率の最大値	XYMOHd	F10.0	wt%	wt%
21	1-10 (5)	21	Siの含有率の平均値	SIMED	F10.0	wt%	wt%
22	11-20 (5)	22	Siの含有率の標準偏差	DISIS	F10.0	wt%	wt%
23	21-30 (5)	23	Siの含有率の最小値	NIMIS	F10.0	wt%	wt%
24	31-40 (5)	24	Siの含有率の最大値	XYWIS	F10.0	wt%	wt%
25	41-50 (5)	25	Kie の標準偏差	FKCSIG	F10.0	平均値の倍数	平均値の倍数
26	1-10 (6)	26	$K_k$ の標準偏差の打ち切り割合	DISOJI	F10.0	標準偏差の倍数	標準偏差の倍数
27	11-20 (6)	27	Kuoの標準偏差	FKASIG	F10.0	平均値の倍数	平均値の倍数
28	21-30 (6)	28	Kaの標準偏差の打ち切り割合	TKASIG	F10.0	標準偏差の倍数	標準偏差の倍数
29	31-40 (6)	29	中性子照射量の標準偏差	FLUSIG	F10.0	平均値の倍数	平均値の倍数
30	41-50(6)	30	上部棚靱性値	UPKIC	F10.0	ksi • inches <sup>1/2</sup>	MPa•m <sup>1/2</sup>
31	1-10(7)	31	流動応力	SFLOW	F10.0	ksi	MPa

このカードセットは必ず入力しなければならない。

・ヤング率(YOUNG)及びポアソン比(UN)は、J-R 曲線を計算する際に利用される。

・Siに関するデータ(No.21 ~ No.24)は、ΔRT<sub>NDT</sub>の評価式(#FLAGの No.25 IDRTR)に0(JEAC4201-1991の国内予測式)が指定されていない場合は使用されない。 ・K<sub>le</sub>及びK<sub>la</sub>の偏差に関するデータ(No.25 ~ No.28)は、破壊基準(#FLAG の No.26 ICRITN)に 0(K<sub>le</sub>-K<sub>la</sub> 基準)が指定されている時にのみ有効となる。

・#MASTER の No.1 MASTERFLG に 0 (To=Toini+ΔRTNDT) が選択された場合、RTMED には 0 を入力する必要がある。

・上部棚靱性値に 0 を入力すると、上部棚靱性を考慮しない。

1     1-10(1)     1     亀裂       2     11-20(1)     2     長さ       3     21-30(1)     3     亀裂	I,	炎致名	形式	U.K.	S.I.
2         11-20(1)         2         長さ           3         21-30(1)         3         亀裂	、裂の最大長さ	FLENG	F10.0	inches	ш
	さ方向の亀裂進展刻み	CLAMP	F10.0	深さ方向亀裂進	展刻みの倍数
	、裂を無限長亀裂へと変更させるアスペクト比	TRINF	F10.0		
4 31-40(1) 4 初期	期亀裂長さまたは初期亀裂アスペクト比	CKLNG	F10.0	長さ固定の場合は初期亀裂長 アスペクト比固定の場合	きさ (UK : inches , SI : m)、 やはアスペクト比 b / a
日本社會などの世界中でしたよう。	インシュアニン 三人の しょうざいしょう しょうしょう	キ 一 一 王 く	- 内畝角刻	キャッシュ アンス 担人 ア・	アンズを用いて

(#TRANS, No.4) にて入力されており、この深さ方向の進展刻みに CLAMP を掛けて長さ方向の進展刻みを評価する。 (#FLAG の No.13 ICRACK) に 2 (表面亀裂(長さ固定)) または 3 (表面亀裂(アスペクト比固 定))が指定された場合、及び長さまたはアスペクト比を固定した内部亀裂を対象としている場合に有効となる。初期亀裂アスペクト比を入力する場合は、アスペクト 亀裂を無限長亀裂へと変更させるアスペクト比 (TRINF)は、表面亀裂の進展則 (#FLAG の No.22 IFINIT)に 3(長さ方向、深さ方向それぞれについて進展したら微 ・長さ方向の亀裂進展刻み(CLAMP)は、表面亀裂の進展則 (#FLAG の No.22 IFINIT)に 3(長さ方向の進展停止も考慮する。)が指定された場合にのみ有効となる。 小亀裂進展)が指定された場合にのみ有効となる。長さ方向へ亀裂が進展していき、指定アスペクト比 (TRINF)を超えたときに亀裂を無限長亀裂に置き換える。 比は「b/a」で入力する必要があるので、十分な注意を要する。b は亀裂長さの半長である。 亀裂種類 初期亀裂長さまたは初期亀裂アスペクト比 (CKLNG) は、 深さ方向の亀裂進展刻みは過渡事象のデータ入力

1     1-10(1)     1     表出力の形式     0:Excel形式     N3DFG     110     一       2     11-20(1)     2     亀裂進展状況ファイルに出力する亀裂数     NFPCNT     110     一       3     21-30(1)     3     表出力を行う際の、深さ方向分割数     N3DDV     110     一	No.	カラム (行数)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
2     11-20(1)     2     亀裂進展状況ファイルに出力する亀裂数     NFPCNT     110     一       3     21-30(1)     3     表出力を行う際の、深さ方向分割数     N3DDV     110     一	1	1-10(1)	1	表出力の形式 0:Excel形式 1:GnuPlot形式	N3DFG	110		
3     21-30(1)     3     表出力を行う際の、深さ方向分割数	2	11-20 (1)	2	亀裂進展状況ファイルに出力する亀裂数	NFPCNT	110		
	3	21-30 (1)	3	表出力を行う際の、梁さ方向分割数	N3DDV	110		

表出力のデータ形式入力 (#TBLPRM)

が出 容器板厚 の分割はこの N3DDV を用いて設定する。なお、このパラメータは重み付きモンテカルロ法を用いて解析を行っている場合にのみ有効であり、階層別モンテカルロ法を 用いている場合は、入力された深さ比分割の設定を用いて出力を行うので、注意が必要である。アスペクト比の分割についても、同様に階層別モンテカルロ法のデー このカードセットは必要に応じて入力すれば良い。このカードセットが入力されなかった場合、N3DFG=0, NFPCNT=0, N3DDV=30 がデフォルト値として設定される。 亀裂進展状況ファイルには、サンプリングされた亀裂の情報(亀裂深さ、亀裂長さ、各種偏差の量等)や亀裂の進展・停止情報(応力拡大係数、破壊靭性値等) 表出力を行うには、時間の分割数、容器板厚の分割数、アスペクト比の分割数が必要である。時間については、入力された評価時間での情報を出力するが、 力される。このファイル情報量が多いため、出力する亀裂数に制限を施している。NFPCNT=100の場合は、進展した亀裂 100 個の情報についてのみ出力する。 タを用いる。

	建桃司 异 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1   1-10(1)		初期亀裂深さ分布の入力区間数	ICRKA	110		
2 1-15 (2 $\sim$ )	-	入力区間の開始深さ	SCRKA (ICRKA)	F15.0	inches	ш
3 16-30 (2~)	-	入力区間の終了深さ	ECRKA (ICRKA)	F15.0	inches	ш
4 31-45 (2 $\sim$ )		入力区間内の亀裂存在確率	PCRKA (ICRKA)	F15.0		

初期亀裂深さ分布のユーザー入力 (#CRKAUD)

このカードセットは初期亀裂の深さ分布種類 (#FLAGの No.15 IDEPT)に2(ユーザー入力分布)が指定された場合に入力する必要がある。

それと同数を入力する必要がある。 初期亀裂深さ存在確率分布の分割区間数をICRKAで指定し、No.2 ~No.4 については、 入力区間は深さ 0.0 から初め、亀裂存在確率の和が 1.0 になるまで入力する必要がある。区間は途中に切れ目や重なりが生じてはならず、連続していなければならない。 (#FLAGのNo.131CRACK)で25番を設定している場合には離散値(入力区間の開始深さと入力区間の終了深さが同一となる。)を入力するが、その場合にも亀裂存在 確率が0の区間について入力する必要がある。

このカードセットを用いた場合は、重み付きモンテカルロ法を用いた確率解析に関するデータ入力 (#CDEPTH の No.1 で設定された亀裂深さ分布の定義点数 NAFLOW) の値は無視される。

No.	カラム (行数)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10(1)		初期亀裂アスペクト比分布の入力区間数	ICRKB	110	I	I
2	1-15(2~)	-	入力区間の開始アスペクト比	SCRKB (ICRKB)	F15.0	l	
3	$16-30 (2 \sim)$	-	入力区間の終了アスペクト比	ECRKB (ICRKB)	F15.0	l	
4	$31-45 \ (2\sim)$		入力区間内の亀裂存在確率	PCRKB (ICRKB)	F15.0		

初期亀裂アスペクト比分布のユーザー入力 (#CRKBUD)

・このカードセットは初期亀裂の深さ分布種類 (#FLAGの No.16 IASPT)に2(ユーザー入力分布)が指定された場合に入力する必要がある。

・初期亀裂アスペクト比存在確率分布の分割区間数をICRKBパラメータで指定し、No.2 ~No.4 については、それと同数を入力する必要がある。

・入力区間はアスペクト比 a / b = 0.0 から初め、亀裂存在確率の和が 1.0 になるまで入力する必要がある。区間は途中に切れ目や重なりが生じてはならず、連続していな ければならない。

No.	カラム (行数)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-5 (1)		軸方向亀裂に作用する応力データベースの時刻分割数	NSTRESL	15		
2	$1-10(2^{\sim})$		軸方向亀裂に作用する応力データを入力するための時刻データ	TMFSTL (NSTRESL)	F10.0	minutes	min
3	$11-25 (2\sim)$		定義時刻での、軸方向亀裂に作用する母材の応力の3次成分	S3DLB3 (NSTRESL)	F15.0	ksi	MPa
4	$26-40(2\sim)$		定義時刻での、軸方向亀裂に作用する母材の応力の2次成分	S3DLB2 (NSTRESL)	F15.0	ksi	MPa
5	$41-55 (2\sim)$	-	定義時刻での、軸方向亀裂に作用する母材の応力の1次成分	S3DLB1 (NSTRESL)	F15.0	ksi	MPa
6	$56-70 (2 \sim)$	-	定義時刻での、軸方向亀裂に作用する母材の応力の0次成分	S3DLB0 (NSTRESL)	F15.0	ksi	MPa
7	$71-85 (2\sim)$		定義時刻での、軸方向亀裂に作用するクラッドの応力の3次成分	S3DLC3 (NSTRESL)	F15.0	ksi	MPa
8	$86-100(2\sim)$		定義時刻での、軸方向亀裂に作用するクラッドの応力の2次成分	S3DLC2 (NSTRESL)	F15.0	ksi	MPa
6	101-115 (2~)		定義時刻での、軸方向亀裂に作用するクラッドの応力の1次成分	S3DLC1 (NSTRESL)	F15.0	ksi	MPa
10	116-130 (2~)		定義時刻での、軸方向亀裂に作用するクラッドの応力の0次成分	S3DLC0 (NSTRESL)	F15.0	ksi	MPa

3 次多項式応力分布の時刻歴入力(#STRS3D) (1/2)

11         1-5 ( $\pi$ i)         周 $\pi$ helleggluft ( $\pi$ H = $3cb$ $J = - \pi-2ch)         \piSTRESC         15                     12         1-10 (\pic)         \pi/\pi \pi/\pi \pi/\pi \pi/\pi \pi/\pi \pi \pi           13         11-25 (\pic)         \pi/\pi \pi/\pi/\pi \pi/\pi \pi/\pi \pi/\pi \pi/\pi \pi/\pi \pi/\pi           14         26-40 (\pic)         \pi/\pi/\pi \pi/\pi/\pi \pi/\pi \pi/\pi \pi/\pi \pi/\pi           15         1-25 (\pi/\pi)         \pi/\pi/\pi \pi/\pi/\pi \pi/\pi/\pi \pi/\pi \pi/\pi           16         26-40 (\pi/\pi)         2 \pi/\pi/\pi/\pi \pi/\pi \pi/\pi \pi/\pi           17         1-25 (\pi/\pi)         2 \pi/\pi/\pi/\pi \pi/\pi \pi/\pi \pi/\pi           16         56-70 (\pi/\pi)         2 \pi/\pi/\pi/\pi 2 2 \pi/\pi \pi/\pi           17         71-85 (\pi/\pi)         2 2 2 2 2 2 2 2 2$	No.	カラム (行数)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
12         1-10 ( $\pi$ )         [ $10 (\pi)$ [ $ 10 (\pi)$ <td>11</td> <td>1-5 (不定)</td> <td></td> <td>周方向亀裂に作用する応力データベースの時刻分割数</td> <td>NSTRESC</td> <td>I5</td> <td> </td> <td></td>	11	1-5 (不定)		周方向亀裂に作用する応力データベースの時刻分割数	NSTRESC	I5		
13       11-25 ( $\pi$ i)       ( $\pi$ i) <td>12</td> <td>1-10 (不定)</td> <td></td> <td>周方向亀裂に作用する応力データを入力するための時刻データ</td> <td>TMFSTC (NSTRESC)</td> <td>F10.0</td> <td>minutes</td> <td>min</td>	12	1-10 (不定)		周方向亀裂に作用する応力データを入力するための時刻データ	TMFSTC (NSTRESC)	F10.0	minutes	min
14 $26-40$ ( $\pi$ c) $\pi$ ( $\pi$ )	13	11-25 (不定)		定義時刻での、周方向亀裂に作用する母材の応力の3次成分	S3DCB3 (NSTRESC)	F15.0	ksi	MPa
15         41-55 (不定)         定義時刻での、周方向亀裂に作用する母材の応力の1次成分         S3DCB1 (NSTRESC)         F15.0         ksi         MPa           16         56-70 (不定)         2         定義時刻での、周方向亀裂に作用するクラッドの応力の0次成分         S3DCB0 (NSTRESC)         F15.0         ksi         MPa           17         71-85 (不定)         2         定義時刻での、周方向亀裂に作用するクラッドの応力の0次成分         S3DCC3 (NSTRESC)         F15.0         ksi         MPa           18         86-100 (不定)         7         23DCC3 (NSTRESC)         F15.0         ksi         MPa           19         101-115 (不         た         定義時刻での、周方向亀裂に作用するクラッドの応力の2次成分         S3DCC1 (NSTRESC)         F15.0         ksi         MPa           19         101-115 (不         た         116-130 (K         53DCC1 (NSTRESC)         F15.0         ksi         MPa           16         116-130 (K         た         53DCC1 (NSTRESC)         F15.0         ksi         MPa           20         116-130 (K         53DCC1 (NSTRESC)         F15.0         ksi         MPa           20         116-130 (K         53DCC1 (NSTRESC)         F15.0         ksi         MPa	14	26-40(不定)		定義時刻での、周方向亀裂に作用する母材の応力の2次成分	S3DCB2 (NSTRESC)	F15.0	ksi	MPa
16         56-70 ( $\pi$ c)         2 $r$ 義時刻での、周方向亀裂に作用する母材の応力の0次成分         S3DCB0 (NSTRESC)         F15.0         ksi         MPa           17         71-85 ( $\pi$ c) $r$ 義時刻での、周方向亀裂に作用するクラッドの応力の3次成分         S3DCC3 (NSTRESC)         F15.0         ksi         MPa           18 $86-100$ ( $\pi$ c) $r$ 義時刻での、周方向亀裂に作用するクラッドの応力の2次成分         S3DCC2 (NSTRESC)         F15.0         ksi         MPa           19 $101-115$ ( $\pi$ $r$ 美時刻での、周方向亀裂に作用するクラッドの応力の1次成分         S3DCC1 (NSTRESC)         F15.0         ksi         MPa           20 $116-130$ ( $\pi$ $r$ $r$ $r$ $r$ $r$ 20 $r$ $r$ $r$ $r$ $r$ $r$ $r$ 20 $r$ $r$ $r$ $r$ $r$ $r$ $r$	15	41-55 (不定)		定義時刻での、周方向亀裂に作用する母材の応力の1次成分	S3DCB1 (NSTRESC)	F15.0	ksi	MPa
17         71-85 (不定)         定義時刻での、周方向亀裂に作用するクラッドの応力の3次成分         S3DCC3 (NSTRESC)         F15.0         ksi         MPa           18         86-100 (不定)         定義時刻での、周方向亀裂に作用するクラッドの応力の2次成分         S3DCC2 (NSTRESC)         F15.0         ksi         MPa           19         101-115 (不 定)           S3DCC1 (NSTRESC)         F15.0         ksi         MPa           20         116-130 (不           S3DCC1 (NSTRESC)         F15.0         ksi         MPa           20         116-130 (不           S3DCC0 (NSTRESC)         F15.0         ksi         MPa           20         116-130 (不            S3DCC0 (NSTRESC)         F15.0         ksi         MPa	16	56-70 (不定)	7	定義時刻での、周方向亀裂に作用する母材の応力の0次成分	S3DCB0 (NSTRESC)	F15.0	ksi	MPa
18         86-100(不定)         定義時刻での、周方向亀裂に作用するクラッドの応力の2次成分         S3DCC2(NSTRESC)         F15.0         ksi         MPa           19         101-115(不 定)         定義時刻での、周方向亀裂に作用するクラッドの応力の1次成分         S3DCC1(NSTRESC)         F15.0         ksi         MPa           20         116-130(不 定)         定)         たま         たいのの         MPa         MPa	17	71-85(不定)		定義時刻での、周方向亀裂に作用するクラッドの応力の3次成分	S3DCC3 (NSTRESC)	F15.0	ksi	MPa
19     101-115 (不 定)     定義時刻での、周方向亀裂に作用するクラッドの応力の1次成分     S3DCC1 (NSTRESC)     F15.0     ksi     MPa       20     116-130 (不 定)           MPa	18	86-100 (不定)		定義時刻での、周方向亀裂に作用するクラッドの応力の2次成分	S3DCC2 (NSTRESC)	F15.0	ksi	MPa
20     116-130 (不 定)     定義時刻での、周方向亀裂に作用するクラッドの応力の 0 次成分     S3DCC0 (NSTRESC)     F15.0     ksi     MPa	19	101-115 (不 定)		定義時刻での、周方向亀裂に作用するクラッドの応力の1次成分	S3DCC1 (NSTRESC)	F15.0	ksi	MPa
	20	116-130(不 定)		定義時刻での、周方向亀裂に作用するクラッドの応力の0次成分	S3DCC0 (NSTRESC)	F15.0	ksi	MPa

3 次多項式応力分布の時刻歴入力(#STRS3D) (2/2)

- このカードセットは応力の評価方式(#FLAG No.4 ISTRES)に1(3次多項式分布)が選択された場合に入力する必要がある。
- ・時刻分割数を入力した後、その分割数と同数の定義時刻データ及び応力データを入力する。軸方向亀裂に作用する応力データについて全て入力した後、周方向亀裂に 作用する応力データを入力する。
- ・入力する応力は、「亀裂に作用する応力」である。軸方向亀裂に作用する応力は、圧力容器の場合は一般的に周方向応力であり、周方向亀裂に作用する応力は、圧力容 器の場合は一般的に軸方向応力である。取り違えないように注意を要する。
- ・クラッドに対する応力は、クラッドを考慮していない場合は入力しなくても良い。

連続解析用データ入力 (#CONT)

+ #CONT の入力例を以下に示す。

```
#CONTは入力カードの最後、「#END」の直前に記述しなければいけない。
  09---
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        09----
                                                                                                                                                                                                                                                                                                       C---+---10---+---20----+---30----+---40----+---50----+---60
                                                                 Longitudinal Infinity Flaw, 3-D stress dist., fluence=2.0
                                                                                                                                                           Longitudinal Infinity Flaw, 3-D stress dist., fluence=1.0
3 3
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     ・#CONT は連続計算を行う必要がある場合に入力すれば良い。
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      75.0
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        ---+----40---
   ---40--
                                                                                                                                                                                                                                                      50.0
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      G----+----10----+----20-----+----30--
c---+---10---+---20----+---30--
                                                                                                                                                                                                                                                      30.0
                                $SETSTART A5-STR3D-2.0
                                                                                                                                  $SETSTART A5-STR3D-1.0
                                                                                                                                                                                                                                                     20.0
                                                                                                                                                                                                                                                     10. 0
100. 0
                                                                                                  2.0
                                                                                                                                                                                                   1.0
4 7
6
                                                                                                                                                                                                                                                                                       $SETEND
                                                                                                                   $SETEND
                                                                                   ო
                #CONT
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      #END
```

・#CONT は「\$SETSTART」と「\$SETEND」ではさまれる複数の区間によって構成される。この「\$SETSTART」と「\$SETEND」の間の入力条件が 1 つのセットとして取 り扱われ、入力カードが修正される。上記の例の場合は、2 つの入力セットが存在している。

・SSETSTARTの後ろには、一文字スペースをはさみ、そのセットの解析結果を出力するファイル名を入力する。

ば、解析タイトルを修正したいのならカードセット No.=1 (#TITLE)、データ No.=1 (ANAME) であるし、中性子照射量を修正したいのなら、カードセット No.=3 \$SETSTART 以下の行では、入力カードの変更を行いたいカードセットの No.と連続計算用データ No.を入力する。この番号は本手引き書に全て記載されている。例え
ŝ
になる
(FLUEC)
<i>−</i> ≯ No.=3
下 〔〕
(#VESSEI

- 注意が必要である。入力フォーマットについては、パラメータ データごとに入力フォーマットが異なるので、 これは、 、その次の行に、修正したいデータを入力する。 ごとに本手引書に全て記載されている。
- どのパラメータを再入力する必要があるかについては、各パラメータの連続計 温度分布の全てを再入力する必要がある。 算用データ No.を参照することにより把握できる。 時刻歴の温度分布を修正するような場合は、
- ・全ての修正個所の記述が終了したら、最後に「\$SETEND」を入力する。「\$SETSTART」と「\$SETEND」の組(カードセット)は複数入力することが可能であり、入力 された回数だけ解析が繰り返される。
- と「\$SETEND」の組で変更さ #CONT で入力された変更内容は、全て初期の解析条件に対する変更内容として取り扱われる。つまり、#CONT の最初の「\$SETSTART」 「\$SETEND」の組の解析条件には全く影響を与えない。 れた内容は、#CONTの2番目以降の「\$SETSTART」と
- ・#CONTの中で、#CONT自身の内容を変更することはできない。つまり、#CONTで修正を行うカードセット No.に 33 (#CONT)を指定することはできない。

No.	カラム (行数)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10(1)	1	自動調整後の各階層の平均サンプリング数	NSAMP2	110		
2	11-20 (1)	2	収束計算を行う場合の繰り返し計算の最大回数	IEPSMX	110		
3	21-30 (1)	3	収束計算を行う場合の収束判定値	CSEPSI	F10.0		
4	31-40 (1)	4	各階層の亀裂サンプリング数のスムージングパラメータ	CSAMP	F10.0	_	
5	41-50 (1)	5	深さ比方向の階層間隔のスムージングパラメータ	SSAMPD	F10.0	_	
9	51-60 (1)	9	アスペクト比方向の階層間隔のスムージングパラメータ	SSAMP0	F10.0		

自動調整階層別モンテカルロ法 (#SSAUTO)

このカードセットは自動調整階層別モンテカルロ法 (#FLAGの No.31 IPTY2)に 0 以外のパラメータが選択された場合に入力する必要がある。

上の値を入力しなければならない。例えば 1.5 が入力されれば、ある階層のサンプリング数とその周囲の階層のサンプリング数の比は、最大 1.5 まで許容されることに サンプリング数の最適化を行う場合、自動調整後の各階層の平均サンプリング数(No.1)に基づき解が収束するまでサンプリングを続ける。・各階層の亀裂サンプリン グ数のスムージングパラメータとは、ある階層のサンプリング数とその周囲の階層のサンプリング数の比を調整するためのパラメータである。このパラメータは 1.0 以 なる。サンプリング数の比が1.5 よりも大きい場合は、サンプリング数の少ない階層のサンプリング数を増やす。

S.I.	
U.K.	
形式	F10.0
変数名	CORKK
内容	K <sub>tc</sub> -K <sub>ta</sub> の相関係数
連続計算 No.	1
カラム (行 数)	1-10(1)
No.	1

相関係数の設定 (#CORREL)

・このカードセットは K<sub>t</sub>と K<sub>ta</sub>の相関の考慮 (#FLAGの No.32 ICOREL)に1(相関の考慮)が選択された場合に入力する必要がある。

・相関係数には 0.0 ~ 1.0 の値を入力しなければならない。

J.S.			板厚の% ( x / thick)	uim	MPa
U.K.			板厚の% (x / thick)	mim	ksi
形式	IS	SI	F15.0	F15.0	F15.0
变数名	NSDATT	NSDATP	SDATP (NSDATP)	SDATT (NSDATT)	STRDAT(NSDATT, NSDATP)
孝母	データを入力する際のトランジェント時間分割数	データを入力する際の容器板厚方向深さ分割数	応力を定義する容器板厚方向深さ	応力を定義するトランジェント時刻	離散点応力
連続計算 No.			1		
カラム (行数)	1-5 (1)	6-10(1)	$1-75 (2^{\sim})$	1-15 (不 定)	1-75 (不 定)
No.	1	2	3	4	5

(#STRSDT)
応力のデータテーブル入力

・このカードセットは応力の評価方式(#FLAGのNo.4 ISTRES)に2 (離散点入力(データテーブル))が選択された場合に入力する必要がある。

・#STRSDTの入力例を以下に示す。

応力データを入力するための炉壁内位置データ。 NSDATP=5 なので 5 個入力している。	応力データを入力するための時刻データ。この時刻に対応する 応力データを以下の行で入力する。	→ → → → → → → → → → → → → → → → → → →	対応する順番で入力する。	NTDATL=5 なので、時刻データ及び応力データの セットを 5 セット入力する。		
+70+	1.0	3. 96462E+02	4. 28869E+02	3. 13033E+02	2.17882E+02	1. 22731E+02 +70+
	· 1数 0.6	4. 17147E+02	4. 46106E+02	3. 23375E+02	2. 24087E+02	1. 24800E+02 -50+60
+40+	創数及び位置分害 0.4	4. 39212E+02	4. 63344E+02	3. 33718E+02	2. 30293E+02	1. 27557E+02 +40+
-20+30	≫時刻分 0.2	5. 90212E+02	6. 70194E+02	5.70216E+02	4. 77134E+02	3. 84051E+02 -20+30
C+10+ #TFMP	5 5 10 0 1	6. 32961E+02	7. 03290E+02	40. 0 5. 89522E+02	4. 89545E+02	3. 88188E+02 C+10+

	公谷
× N	。際のトランジェント時刻(
mí.	際の容器板厚方向深さ分割
	、器板厚方向梁さ
	、ランジェント時刻
	<b> する周方向離散点応力</b>
	<b>引する軸方向離散点応力</b>

残留応力分布の入力 (#RESSTR)

、このカードセットは残留応力の考慮 (#FLAG の No.35 IRSTRS)に1(残留応力を考慮)が選択された場合に入力する必要がある。

・トランジェント時刻はトランジェント時刻分割数と同数を入力しなければならない。

・容器板厚方向深さは容器板厚方向深さ分割数と同数を入力しなければならない。

・応力は容器板厚方向深さ分割数と同数の値の組を各トランジェント時刻に対して入力しなければならない。

No.	カラム (行数)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	TS
1	1-10(1)	1	初期亀裂深さの固定値(a)	FIXDEP	F10.0	inches	ш
2	11-20 (2)	2	初期亀裂長さの固定値(c)	FIXLNG	F10.0	inches	m

初期亀裂深さ及び長さの固定値の入力 (#CRKFIX)

・このカードセットは亀裂種類 (#FLAGの No.13 ICRACK) に 10 (無限長亀裂(深さ固定)) または 11 (表面亀裂(深さ&長さ固定))、または 24 (内部亀裂(深さ比固

定))または31(内部亀裂(アスペクト比及び深さ比固定))が選択された場合に入力する必要がある。 ・無限長亀裂を対象とする場合は、初期亀裂長さの固定値として入力された値は無視される。

・表面亀裂を対象とし、かつ表面亀裂の応力拡大係数式(#FLAGの No.19 ISIFB)に 15,25,45(JEAC4206-2007 式)場合は、亀裂深さ比(a/t)が 0.1 以下になるよう初期亀 裂深さを設定する必要がある。

$ \left[ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	·0	カラム (行数)	連続計算 No.	经村	変数名	形式	U.K.	S.I.
1-10(2)         E間総数         I.10(2)         I.10(2)		1-10(1)	-	深さ方向位置比分布算出フラグ 0: 亀裂深さ毎の分布 1: 全亀裂に対する分布 2: 連続サンプリング手法	IETYPE	110		
	- >	1-10(2)		区間総数	ICRKE	110		
1         16-30(3~) <sup>2</sup> 入力区間の終了深さ         ECRKE(ICRKE)         F15.0         x/thick         x/thick           i         31-45(3~)         入力区間内の亀裂存在確率         PCRKE         F15.0         -         -		$1-15(3\sim)$	,	入力区間の開始深さ	SCRKE (ICRKE)	F15.0	x/thick	x/thick
31-45 (3~)         入力区間内の亀裂存在確率         PCRKE         F15.0         -         -		$16-30 (3 \sim)$	4	入力区間の終了深さ	ECRKE(ICRKE)	F15.0	x/thick	x/thick
		$31-45(3\sim)$		入力区間内の亀裂存在確率	PCRKE (ICRKE)	F15.0		

内部亀裂の深さ方向位置比分布の定義 (#INDEF)

このカードセットは内部亀裂を対象とする場合に必ず設定する必要がある。

初期亀裂深さ存在確率分布の分割区間数をICRKEパラメータで指定し、No.3 ~No.5 については、それと同数を入力する必要がある。

・深さ方向位置比を固定した解析を実施したい場合、入力区間の開始深さと終了深さに同一値を指定し、存在確率を 1.0 にする。

S.I.						板厚比	板厚比
U.K.						板厚比	板厚比
形式	IS	F10.0	IS	110	IS	F10.0	F10.0
変数名	INTOSEFLG	EPSLINTOSE	INPROGFLG	MSAMP31	NEOT	EOTLOW	EOTUP
内容	内部亀裂の表面亀裂への変換手法 0: ASME& JSME 方式 1: S/THICK の利用	内部亀裂の表面亀裂への変換パラメータ	内部亀裂の進展手法フラグ 0: 完全独立進展 1: 内面が進展したら表面亀裂 2: 内面と外面のみ進展評価 3: 内面が進展したら無限長亀裂 4: 内表面側、外表面側、長さ方向の評価点 のいずれかが進展したら無限長亀裂	深さ及びアスペクト比を固定した内部亀裂の各階層のサンプリング 数	深さ方向位置比の階層分割数	深さ方向位置比の最小値(階層開始位置)	深さ方向位置比の最大値(階層終了位置)
連続計算 No.	1	2	m	4	5	6	7
カラム (行数)	1-5 (1)	6-15(1)	16-20(1)	21-30(1)	1-5(2)	6-15(2)	16-25(2)
No.	1	2	m	4	5	9	7

内部亀裂の定義 (#INCRK)

このカードセットは内部亀裂を対象とする場合に必ず設定する必要がある。

42 は、INTOSEFLG が 0 の場合は S< $\alpha a$  の  $\alpha \delta$ 、INTOSEFLG が 1 の場合は、S/THICK< $\alpha$  の  $\alpha \delta$ 入力する。 ・内部亀裂の表面亀裂への変換パラメータ (EPSLINTOSE) お、内部亀裂の深さ方向の長さを 2a とする。

・深さ方向位置比の階層分割は、NEOT, EOTLOW, EOTUP の3 つのパラメータを用いて定められる。階層は、EOTLOW から EOTUP までの範囲を NEOT 個に均等分割さ れる。

JAEA-Data/Code 2022-006

- 178 -

S.I.		Ĉ	TOMASTER に対する 倍率		MPa	mm	MPa	Ĉ	mm	MPa $m^{1/2}$
U.K.		Ĉ	TOMASTER に対する 倍率		MPa	mm	MPa	Ĉ	mm	MPa $m^{1/2}$
形式	110	F10.0	F10.0	110	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0
変数名	MASTERFLG	TOMASTER	T0SIGMA	NMASTERDATA	EMASTER	BOMASTER	SIGMAYMASTER	TESTTEMP	BXMASTER (NMASTERDATA)	FTMASTER (NMASTERDATA)
内容	To の算出フラグ     0: To=ToMASTER+ΔRT <sub>NDT</sub> 1:以下でのデータから ToMASTER を算出       2: To=ToMASTER	To の値	To の偏差	試験データの個数	ヤング率	板厚	降伏応力	試験温度	試験片の板厚	破壞勒性値
連続計算 No.	1	2	3	8	4	5	9	L	0	¢
カラム (行数)	1-10 (1)	1-10(2)	11-20(2)	1-10(3)	11-20(3)	21-30(3)	31-40(3)	41-50(3)	$1-10(4\sim)$	11-20 (3~)
No.	1	2	3	4	5	9	7	8	6	10

マスターカーブの定義 (#MASTER)

、このカードセットはマスターカーブを使用する場合、及び RTn を使用する場合に必ず設定する必要がある。

・MASTERFLGに0を指定した場合、#MATRALのNo.3 RTMED、No.4 RTSIG、No.5 DRSIGは0.0にする必要がある。

・RTn を用いて破壊靱性値を評価する場合、#MATRAL の No.3 RTMED は 0.0 にする必要がある。この場合、TOSIGMA は使用されず、#MATRAL の No.4 RTSIG、No.5 DRSIG が使用される。

TS	I	J.	MPa		J.	MPa
U.K.	I	Ĉ	MPa	l	Ĉ	MPa
形式	I10	F15.0	F15.0	110	F15.0	F15.0
変数名	IPSSYDTB	PSSYDTBT (IPSSYDTB)	PSSYDTBS (IPSSYDTB)	IPSSYDTC	PSSYDTCT (IPSSYDTC)	PSSYDTCS (IPSSYDTC)
内容	母材の降伏応力データテーブル入力点数	母材の降伏応力を定義するための温度	上記温度における母材の降伏応力	クラッド材の降伏応力データテーブル入力点数	クラッド材の降伏応力を定義するための温度	上記温度におけるクラッド材の降伏応力
連続計算 No.				7		
カラム (行数)	1-5 (1)	$1-15(2\sim)$	$16-30~(2\sim)$	1-5 (IPSSYDTB+2)	1-15 (IPSSYDTB+3~)	16-30 (IPSSYDTB+3~)
No.	1	2	3	4	5	6

塑性域補正の際に用いる降伏応力テーブルの入力 (#PSSYDT)

・このカードセットは塑性域補正 (#FLAGの No.39 IPSFG)に0以外が指定された場合に入力する必要がある。

・クラッドを考慮していない場合は、クラッドに関するデータ (No.4~No.6) を入力しなくても良い。

		/cm <sup>2</sup> eV			
.I.S		$ imes 10^{19}$ n E>1M	I	—	
U.K.		$ imes 10^{19}  \mathrm{n/cm^2}$ E>1MeV	I		
形武	110	F10.0	110	a256	
変数名	NFLUCONT	FLUCONT(NFLUCONT)	NTRANSCONT	TRANSCONT (NTRANSCONT)	
经过	中性子照射量の条件設定個数	即の重将避子孙中	トランジェントの条件設定数	トランジェントの条件設定ファイル名	
連続計算 No.					
カラム (行数)	1-10 (1)	1-10 $(2 \sim NFLUCONT+1)$	1-10 (NFLUCONT+2)	$1-10$ (NFLUCONT+3 $\sim$ )	
No.	1	2	3	4	ĺ

連続解析用データ入力(トランジェント DB 用) (#CONT2)

このカードセットは中性子照射量とトランジェントに対する感度解析を実施する際に利用する。入力された条件の組み合わせの数だけ、解析が実施される。

.

- 181 -

- カードイメージに記載されている中性子照射量の値(#VESSELの No.3 FLUEC)やトランジェントの値(#TEMP等)は全て無視され このカードが使用された場合、 ŝ .
- トランジェントの条件設定ファイルのフォーマットは、基本的に PASCAL-RV の入力ファイルのフォーマットと同一である。この条件設定ファイルのうち、以下の項 目のデータを PASCAL-RV の入力ファイルによって指定されたデータと置換する。
- ≻ #TEMP
- ▶ #STRESS
- ▶ #STRS3D
- ≽ #STRSDT
- ≽ #PRESFM
- Y #PRESPT
- ▶ #VESSEL (THICK,RAD,TCLAD のみ)
- ▶ #TRANS (TMAX, TDET, NTDIV, TPOS  $\mathcal{O}\mathcal{H}$ )
- #CONT2は#CONT及び#NDISETと併用することができない。

S.I.	у	J.
U.K.	year	۰F
形式	F10.0	F10.0
変数名	DRCEFPY	DRCTMPIR
内容	定格負荷相当年数(EFPY)	照射温度
連続計算 No.	1	2
カラム (行数)	1-10(1)	11-20 (1)
No.	1	2

JEAC4201-2007の国内脆化予測法のデータ入力 (#DRTCRIEPI)

・このカードセットはΔRT<sub>NDT</sub>の評価式の選択(#FLAG の No.25 IDRTR)に 11(JEAC4201-2007(データテーブルの値を補間))、もしくは 12(JEAC4201-2007\_2013 追補 版(移行量を式により算出))や13(JEAC4201-2007\_2013 追補版(データテーブルの値を補間))が指定された場合に入力する必要がある。

No.	カラム (行数)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	.I.S
1	1-10(1)	1	クラッドのヤング率	YMCLAD	F10.0	ksi	GPa
2	11-20 (1)	2	母材のヤング率	YMBASE	F10.0	ksi	GPa

CEAの式に用いるヤング率の入力(#YMKICEA)

・このカードセットは表面亀裂の応力拡大係数の選択(#FLAGの No.19 ISIFB)に 71(CEA の解)が指定された場合に入力する必要がある。

1         1-10(1)         1         Mn の含有率の平均値         FMNMED         F10.0            2         11-20(1)         2         Mn の含有率の標準偏差         FMNMEG         FMNMEG         F10.0          -           3         21-30(1)         3         Mn の含有率の最小値         FMNMIN         F10.0          -           4         31-40(1)         4         Mn の含有率の最大値         FMNMAX         F10.0          -           5         1-10(2)         5         花格負荷相当年数(EFPY)         FMNMAX         F10.0          -           6         11-20(2)         6         冷却材温度         DRREFPY         F10.0          -           7         21-25(2)         7         E10.0         ICE         IS          -           8         26-30(2)         8         溶核材の種類を表すフラグ(0: Inde80 UA, I: Linde80)         ILINDE         IS          -	No.	カラム (行数)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
2       11-20(1)       2       Mn の告有率の標準備差       FMNSIG       F10.0           3       21-30(1)       3       Mn の告有率の最小値       FMNMIN       F10.0           4       31-40(1)       4       Mn の告有率の最小値       FMNMIN       F10.0           5       1-10(2)       5       定格負荷相当年数(EFPY)       FMNMAX       F10.0           6       11-20(2)       6       冷却却温度       DRREFPY       F10.0       vear          7       21-25(2)       7       E-530(2)       8       が被打の種類を表すフラグ(0: Iona-CE, 1: CE)       ICE       I5           8       26-30(2)       8       溶核状の種類を表すフラグ(0: Linde80 L/M, 1: Linde80)       ILINDE       I5	1	1-10(1)	1	Mn の含有率の平均値	FMNMED	F10.0		I
3       21-30(1)       3       Mn の含有率の最小値       FMNMIN       F10.0           4       31-40(1)       4       Mn の含有率の最大値       FMNMAX       F10.0           5       1-10(2)       5       定格負荷相当年数(EFPY)       DREFPY       F10.0       year          6       11-20(2)       6       冷却材温度       DREFPY       F10.0       year          7       21-25(2)       7       E156(2)       F10       PR            8       26-30(2)       8       溶铵材の種類を表すフラグ(0:Linde80以外,1:Linde80)       ILNDE       I5	2	11-20 (1)	2	Mn の含有率の標準偏差	FMNSIG	F10.0		I
4       31-40(1)       4       Mn の含有率の最大値       FMNMAX       F10.0        -         5       1-10(2)       5       定格負荷相当年数 (EFPY)       DRREFPY       F10.0       year       -         6       11-10(2)       6       冷却材温度       DRREFPY       F10.0       year       -         7       12-12(2)       6       冷却材温度       DRREFPY (0: non-CE, 1: CE)       ICE       15       -       -         8       26-30(2)       8       溶铵材の種類を表すフラグ (0: Linde80 以外、1: Linde80)       ILINDE       15       -       -       -	3	21-30 (1)	3	Mn の含有率の最小値	FMNMIN	F10.0		I
5       1-10(2)       5       定格負荷相当年数 (EFPY)       DRREFPY       F10.0       year         6       11-20(2)       6       冷却材温度       DRRTEMP       F10.0       °°F       °         7       21-25(2)       7       圧力容器の製造方法を表すフラグ (0: non-CE, 1: CE)       ICE       I5       一       °         8       26-30(2)       8       溶接材の種類を表すフラグ (0: Linde80 以外、1: Linde80)       ILINDE       I5       一       一	4	31-40 (1)	4	Mn の含有率の最大値	FMNMAX	F10.0		I
6       11-20(2)       6       冷却材温度       DRRTEMP       F10.0       °F       °         7       21-25(2)       7       圧力容器の製造方法を表すフラグ(0: non-CE, 1: CE)       ICE       I5       一       -         8       26-30(2)       8       溶接材の種類を表すフラグ(0: Linde80以外、1: Linde80)       ILINDE       I5       一       -	5	1-10 (2)	5	定格負荷相当年数 (EFPY)	DRREFPY	F10.0	year	у
7     21-25 (2)     7     圧力容器の製造方法を表すフラグ (0: non-CE, 1: CE)     ICE     I5     一       8     26-30 (2)     8     溶接材の種類を表すフラグ (0: Linde80 以外、1: Linde80)     ILINDE     I5     一	9	11-20 (2)	9	冷却材温度	DRRTEMP	F10.0	Ч°	С.
8     26-30 (2)     8     溶接材の種類を表すフラグ (0: Linde80 以外、1: Linde80)     ILINDE     I5	7	21-25 (2)	L	圧力容器の製造方法を表すフラグ (0: non-CE, 1: CE)	ICE	SI	_	
	8	26-30 (2)	8	溶接材の種類を表すフラグ (0: Linde80 以外、1: Linde80)	ILINDE	I5	Ι	Ι

米国改正 PTS 規則の脆化予測法のデータ入力(#DRTREVPTS)

・このカードセットはΔRTNDTの評価式の選択(#FLAGのNo.25 IDRTR)に9(米国改正 PTS 規則の脆化予測法)が指定された場合に入力する必要がある。

No.	カラム (行数)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-10(1)	1	模擬する圧力容器の個数	NRPV	110		
2	11-15 (1)	2	認識論的不確実さを伴う変数の出力 0: 出力しない 1: 出力する	ILHSOUT	I5		
3	16-20 (1)	3	CONT における中性子照射量ループの数	FCONT	15		

PASCAL-Manager を用いて TWCF を算出する際の入力 (#TWCFEPST)

・このカードセットは PASCAL-Manager を用いて TWCF を計算する際に PASCAL-Manager で作成される。

CONT 機能を用いることで各種変数を変更できるが、2 つ以上の変数の組を変更する際には、最も外側のループが中性子照射量に関するループになるようにしなければ ならない。中性子照射量以外の変数の組み合わせを M とすると、PASCAL3で算出する CPI の数は NRPV×FCONT×M となる。中性子照射量以外の条件が同一で、中性 子照射量の値がより高い解析の結果として得られた CPI が 0 のとき、計算を行わずに CPI を 0 とする。なお、FCONT に 0 を設定すると、計算をスキップせずに CPI を 評価する。

No.	カラム (行数)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
-	1-15(1)	1	CPF を計算する CPI の最小値	CPIMIN	F15.0		
2	16-30 (1)	2	CPFの計算における、貫通する最大の Kteの累積確率を探索する際の公比	CPFSR	F15.0		
3	31-45 (1)	3	CPF を台形公式を用いて積分する際の要求相対誤差	CPFRLER	F15.0	%	%

CPF の算出に係る入力 (#CPFPARAM)

・このカードセットは必ず入力しなければならない。

カラム (行数)	) 里	<b>車続計算</b> No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
1-5 (1)         応犬           割後         1	い しょう	応力 割数	拡大係数データベースの炉壁内位置分 	NSIFDATP	IS		I
1-100(2~) 1 炉壁	1 「「」	炉壁	内位置データ	SIFDEP (NSIFDATP)	F10.0	inch	ш
1-100 (不定) (エン	名 词 で と に	名ごし	渡事象評価時刻における、炉壁内位置 の応力拡大係数データ	SIFDAT (NTDIV, NSIFDATP)	F10.0	ksi•inches <sup>1/2</sup>	MPa•m <sup>1/2</sup>

無限長亀裂の応力拡大係数 (#SIFDT)

・このカードは#FLAG の No.8 ISIFA に 99 を設定した際には必ず入力しなければならない。

・このカードは#TRANS よりも後に記載しなくてはならない。過渡事象評価時刻は#TRANS に記載されているものを用いていることを前提とする。

TS	-	$\mathcal{D}_{\circ}$	ſ	ſ	ſ	ſ	-	-	-	T	
U.K.	T	ч <b>°</b>	ft-lbf	ft-lbf	ft-lbf	ft-lbf	I	I	I	I	ı
形式	I5	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0
変数名	JTFLG	TDTJT	USEINIMED	<b>USEINISIG</b>	USEINIMIN	USEINIMAX	DUSEMU	JMATMJMED	<b>JMATMJSIG</b>	JMATMJMIN	JMATMJMAX
内容	J-T 法を適用するフラグ         0: 適用しない           1: 適用する	延性亀裂進展を考慮する温度の下限	NSE 初期値の平均値	USE 初期値の標準偏差	USE 初期値の最小値	USE 初期値の最大値	Δ USE 予測値のパラメータ Mu	上部棚破壊靱性のパラメータ Mjの平均値	上部棚破壊靱性のパラメータ Mjの標準偏差	上部棚破壊靱性のパラメータ Mjの最小値	上部棚破壊靱性のパラメータ Mjの最大値
連続計算 No.						1					
カラム (行数)	1-5 (1)	6-15 (1)	16-25 (1)	26-35 (1)	1-10 (2)	11-20 (2)	21-30 (2)	1-10 (3)	11-20 (3)	21-30 (3)	31-40 (3)
No.	1	2	3	4	5	9	7	8	6	10	11

JT 法に係る入力 (#JTMETHOD)

<sup>・</sup>このカードはJT法により延性亀裂進展を考慮する場合に記載する。

S.I.	1
U.K.	ı
形式	I5
変数名	INTMFIL
内容	中間ファイル出力の有無 0: 出力しない 1: 出力する
連続計算 No.	1
カラム (行数)	1-5 (1)
No.	1

中間ファイルの出力制御 (#INTERMED)

・このカードが入力されない場合は、0として扱われる。

S.I.													
U.K.													
形式	F15.5	F15.5	F15.5	F15.5	F15.5	F15.5	F15.5	F15.5	F15.5	F15.5	F15.5	F15.5	
変数名	KCA1	KCA2	KCA3	KCB1	KCB2	KCB3	KCC1	KCC2	KCC3	RTE1	RTE2	RTE3	
内容	式(6-133)の Prm1 の値	式(6-133)の Prm2 の値	式(6-133)の Prm3 の値	式(6-134)の Prm4 の値	式(6-134)の Prm5 の値	式(6-134)の Prm6の値	式(6-135)の Prm7 の値	式(6-135)のPrm8の値	式(6-135)のPrm9の値	式(6-137)の Prm10 の値	式(6-137)の Prm11 の値	式(6-137)の Prm12 の値	
連続計算 No.	1	2	3	4	5	9	7	8	6	10	11	12	
カラム (行数)	1-15(1)	16-30(1)	31-45(1)	1-15(2)	16-30(2)	31-45(2)	1-15(3)	16-30(3)	31-45(3)	1-15(4)	16-30(4)	31-45(4)	
No.	1	2	3	4	5	9	7	8	6	10	11	12	

(#KICPARAM	
りユーザー入力	
破壞勒性值 K <sub>le</sub> 6	

 $\sim$ 

・このカードは#FLAGの No.23 で 17 が選択された場合に入力する必要がある。

S.L.																
U.K.			—	—	-		_									—
影	F15.5	F15.5	F15.5	F15.5	F15.5	F15.5	F15.5	F15.5	F15.5	F15.5	F15.5	F15.5	F15.5	F15.5	F15.5	F15.5
変数名	KAP1	KAP2	KAP3	KAPSIG	RTA1	RTA2	RTASIG	RTA3	RTA4	RTA5	VAR1	VAR2	VAR3	VAR4	VAT1	VAT2
内容	式(6-138)の Prm13 の値	式(6-138)の Prm14の値	式( 6-138 )の Prm15 の値	式( 6-139 )の Prm16 の値	式( 6-140 )の Prm17 の値	式( 6-140 )の Prm18 の値	式(6-141)の Prm19の値	式( 6-142 )の Prm20 の値	式( 6-142 )の Prm21 の値	式( 6-142 )の Prm22 の値	式(6-143)の Prm23の値	式( 6-144 )の Prm24 の値	式( 6-144 )の Prm25 の値	式( 6-145 )の Prm26 の値	式( 6-143 )の Prm27 の値	式( 6-144 )の Prm28 の値
連続計算 No.	1	2	3	4	5	9	7	8	6	10	11	12	13	14	15	16
カラム (行数)	1-15(1)	16-30(1)	31-45(1)	1-15(2)	1-15(3)	16-30(3)	31-45(3)	1-15(4)	16-30(4)	31-45(4)	1-15(5)	16-30(5)	31-45(5)	46-60(5)	1-15(6)	16-30(6)
No.	1	2	3	4	5	9	7	8	6	10	11	12	13	14	15	16

破壊勤性値 Kii のユーザー入力 (#KIAPARAM)

Г

・このカードは#FLAGの No. 24 で 17 が選択された場合に入力する必要がある。

S.I.	
U.K.	
形式	I5
変数名	CRKOUTFG
内容	破損亀裂情報出力 0: 出力しない 1: 出力する
連続計算 No.	1
カラム (行数)	1-5 (1)
No.	

破損亀裂情報出力の制御(#CRKOUTPT)

Γ

・このカードが入力されない場合は、0として扱われる。

・出力される情報は下表の通りである。

	破損亀裂出力情報
項目	說明
中性子照射量 [n/em <sup>2</sup> ] E>1MeV	サンプルの RPV 表面における中性子照射量の値
時刻 [min]	破損と判定された時刻
位置	base:母材部、weld:溶接部
方向	axial:軸方向、circ:周方向
龟裂形状	Infinite:無限長亀裂、全周亀裂、Surface:表面亀裂、Embedded:内部亀裂
初期亀裂深さ [m]	破損と判定された亀裂の初期状態の亀裂深さ
初期亀裂半長さ [m]	破損と判定された亀裂の初期状態の亀裂長さ
初期亀裂深さ位置比 [-]	破損と判定された亀裂の初期状態の亀裂深さ位置比
破損時亀裂深さ [m]	破損と判定された亀裂の判定時の亀裂深さ
[m] 新井長 [m]	破損と判定された亀裂の判定時の亀裂半長
破損判定	Penetration:貫通、Plastic collapse:塑性崩壞、Ductile failure:延性亀裂不安定破壞

#### 付録 2: PrePASCAL の使用手順

#### 概要

PrePASCALは有限要素法に基づき、伝熱解析及び静的応力解析を実施する解析コードである。 確率論的破壊力学解析コード PASCAL-RV 用温度分布及び応力分布データ作成に特化した解析コ ードであるため、入力可能な項目及び解析機能は一般の FEM 解析コードと比較して限定的であ るが、入力した材料特性及び過渡事象中の内圧、冷却材温度、熱伝達係数の時刻歴から弾性解析 を実行し、解析結果として RPV 板厚内における温度分布及び応力分布を PASCAL-RV の入力フォ ーマットの形式で出力する。なお、PrePASCAL 以外の FEM 解析コードを用いて得られる解析結 果を、PASCAL-RV の入力フォーマットの形式に正しく変換すれば、PASCAL-RV による解析に適 用することができる。ここでは、入力項目、実行方法、出力項目について説明する。

#### 入力ファイルの作成

単位は別途実施する PASCAL-RV の単位と統一されていれば特に問題はないが、表 付録 2-1 に 示す単位系で PrePASCAL の解析を実行すると、得られる解析結果は PASCAL-RV の入力ファイル の単位系と統一される。詳細な入力フォーマットは付録の PrePASCAL 用入力カードを参照され たい。また、PrePASCALの入力ファイルには特定の拡張子は設定されていないため、ファイル名 に拡張子をつけない形式で保存する。拡張子をつけていた場合でも動作に問題はないが、出力さ れるファイル名に入力ファイルの拡張子が含まれてしまうことに留意されたい。

解析種類	項目	単位
	<b>RPV</b> 板厚	
	(クラッド厚を含む)	111
伝熱/応力	RPV 内半径	m
	クラッド厚	m
	過渡事象時間	min
	密度	kg/m <sup>3</sup>
	比熱	J/kg K
伝熱	熱伝導率	W/m K
	水温	°C
	熱伝達係数	W/m <sup>2</sup> K
	密度	kg/m <sup>3</sup>
	ヤング率	MPa
	ポアソン比	-
	線膨張係数	1/00
応力	(瞬間値)	1/°C
	降伏応力	MPa
	塑性ひずみ	-
	内圧	MPa
	初期温度	
	(応力フリー温度)	°C

表付録 2-1 PrePASCAL 入力項目

# 解析の実行

# 解析の実行方法

以下に示す PrePASCAL 実行モジュール、PrePASCAL メッシュファイル、PrePASCAL 解析実行 用バッチファイルの3つと、入力ファイルを同じフォルダ(以下、解析用フォルダ)に置く。

- ▶ PrePASCAL 実行モジュール
  - : prepascal5.0A.exe
- ▶ PrePASCALメッシュファイル
  - : mesh\_n.dat
- ▶ PrePASCAL 解析実行用バッチファイル
  - : Pre\_run.bat
- ▶ PrePASCAL 用入力ファイル
  - : sample (任意の入力ファイル名)

実行は以下のいずれかの方法で行う。

- コマンドプロンプトを立ち上げ、解析用フォルダに移動し、「Pre\_run.bat sample」として実行する。sample は入力ファイル名である。
- · Pre\_run.batのアイコンに入力ファイルをドラッグする。
- ・ 「**Pre\_run.bat sample**」と記載したバッチファイルを新たに作成し、そのバッチファイルをダ ブルクリックする。

# 解析実行中の画面表示情報

解析実行中及び解析終了後の画面の例をそれぞれ図付録 2-1、図付録 2-2に示す。



図付録 2-1 解析実行中の画面例



図付録 2-2 解析終了後の画面例

# 解析結果ファイル

PrePASCALを実行した際に、出力されるファイルの一覧を表付録 2-2 に示す。主に使用するファイルは、PASCAL-RV の入力として使用可能なフォーマットである.pfm15 ファイルである。また、必要に応じて温度分布の時刻歴が出力されている.tmp15 ファイル、応力分布の時刻歴が出力されている.str15 ファイルでは、解析結果の確認に用いることもできる。

出力ファイル (拡張子の前は入力ファイル名)	内容
.fem15	FEM の入力ファイル
.sol15	FEM の出力ファイル
.t19	MENTAT 形式のファイル
.tmp15	温度分布の時刻歴
.str15	応力分布の時刻歴
	PASCAL-RV の入力として
.pfm15	使用可能なファイル

表 付録 2-2 PrePASCAL 出力ファイル

#IIILE, #FLAG (FLAG No.1~No.27) , #VESSEL, #IKANS, #PKESPT (X(3#PKESFM)	
#PTEMPT (又\z#PTEMPF), #MAHEAT, #MASTRS, #WORKHD, #INITIAL, #MESHNO,	¢MESHNO, #END
#FLAG のうち、以下のフラグは必須の入力項目である。	
No.1: IANA	
No.2: IINP	
No.3: IOUTP	
No.4: ISTRES	
No.5: ITEMP	
No.6: IPRES	
No.9: ICLAD	
No.27: IGRAPH	
各カードセットの入力方法を以下のテーブルに示す。なお、開発当初の PrePASCAL では、出力結果ファイルを旧バージョンの	ィージョンの PASCAL-RV の
入力カードとして適用できるように設計されていたため、現状版の PrePASCAL の計算に使用しない入力カードが残存している。J	年している。以下のテーブル

において、計算に使用されない入力項目についてはセルを灰色で表示する。計算に使用されない項目には変数名が設定されていない。

- 197 -

付録 3: PrePASCAL 用入力力一ド

変数名 形式 U.K. S.I.	
内容	
連続計算 No.	
カラム (行 数)	
No.	

解析タイトルの入力 (#TITLE)

このカードは必要に応じて入力すれば良い。

・解析タイトルが入力されなかった場合、解析タイトルには"unknown"が用いられる。

Ŕ イトルの初めに1文字スペースを入れ、コメント行として認識されることを避ける必要がある。 (解析タイトルの初めの1文字に"c"または"C"を用いることはできな ・解析タイトルの最初の文字が"c"または"C"で始まる場合、その行は「コメント行」として認識されるため、解析タイトルとして認識されない。このような場合は、 (,,)

S.L.		I						I	
U.K.		I				l			
形式	IS	15	IS	IS	I5	IS	15	IS	IS
変数名	IANA	IINPT	IOUTPT	ISTRES	ITEMP	IPRES	INTARP	I	ICLAD
内容	解析種類 1:FEM 解析	入力単位系 0:英国慣用単位系 1:国際単位系 1:	出力単位系 0:英国慣用単位系 1:国際单位系 1:国際单位系 1.	応力の評価方式 1:3 次多項式分布 2:離散点入力 (データテーブル)	温度の評価方式 0:データテーブル	内圧の評価方式 1:データテーブル	温度及び応力の補間方式 0:線形補間(1次)	中性子照射の選択 0:無し 1:有り(部材内は指数減衰) 2:有り(部材内はユーザー入力減衰)	クラッド有無の選択 0:クラッド無し 1:クラッド有り
連続計算 No.	1	7	ę	4	5	9	7	∞	6
カラム (行番号)	1-5 (1)	6-10 (1)	11-15 (1)	16-20 (1)	21-25 (1)	26-30 (1)	31-35 (1)	36-40 (1)	41-45 (1)
No.	1	5	n	4	5	9	7	8	6

解析の流れを制御するためのフラグ入力 (#FLAG) (1/7)

10         46-50(1)         10         高温予荷重効果有無の選択         0: 無し         二         IS         一         IS         一         一         一         一         一         一         15         一         一         一         一         一         一         一         一         一         一         一         一         一         一         15         一         15         一         一         一         一         一         一         一         一         一         一         一         一         一         15         一         一         一         一         一         一         一         一         一         一         一         一         一         二         一         二         一         一         一         一         一         一         一         一         一         一         一         二 <th二< th="">         二         &lt;</th二<>	No.	カラム (行番号)	連続計算 No.	内容		変数名	形式	U.K.	S.I.
11         1-5(2)         11         非破壊検査(ISI) 有無の選択         0: 無し         11: VISA-II モデル         1         1           11         1-5(2)         11         11: VISA-II モデル         -         IS         -         -         -           12         11.1         12: LLNL モデル         -         IS         -         -         -         -           12         11.0         21: PISC モデル         -         IS         -         -         -           12         6.10(2)         12         4200存在位置         0:溶铵部         -         IS         -	10	46-50 (1)	10	高温予荷重効果有無の選択 0:5	無し 有 9		I5		
11         1-5(2)         11         11: VISA-II モデル         11: VISA-II モデル           12: LLNL モデル         12: LLNL モデル         -         IS           13         6.10(2)         12         4           12         6.10(2)         12         6           13         6.10(2)         12         6           13         1: 時材部         -         15				非破壊検査 (ISI) 有無の選択 0:	進 一				
11         1-5 (2)         11         12:LLNLモデル         -         15         -         16         -         1         -         1         -         1         -         1         -         1         -         1         -         1         1         -         1         1         -         1         1         -         1         1         -         1         1         -         1 <th1< th=""></th1<>				11:	VISA-II モデル				
12         6-10(2)         12         21: FISC モデル         22: 改良 FISC モデル         1: 母材部           12         6-10(2)         12         値裂の存在位置         0: 溶接部         -         IS         -         IS         -         IS         - <th>Π</th> <td>1-5 (2)</td> <td>11</td> <td>12 :</td> <td>: LLNL モデル</td> <td> </td> <td>I5</td> <td> </td> <td> </td>	Π	1-5 (2)	11	12 :	: LLNL モデル		I5		
12     6-10(2)     12     22: 改良 PISC モデル     22     22       1: 母材部     0:溶接部     1     15     -				21:	PISC モデル				
12     6-10(2)     12 <ul> <li>● 10(2)</li> <li>● 12</li> <li>● 13</li> <li>● 15</li> <li>● 16</li> <li>● 16</li> <li>● 17</li> <li>● 10</li> <li>● 15</li> <li>● 15</li> <li>● 16</li> <li>● 15</li> <li>● 16</li> <li>● 15</li> <li>● 15</li> <li>● 15</li> <li>● 16</li> <li>● 16</li> <li>● 16</li> <li>● 15</li> <li>● 15</li> <li>● 16</li> <li>● 16</li> <li>● 16</li> <li>● 17</li> <li>● 15</li> <li>● 16</li> <li>● 16</li> <li>● 16</li> <li>● 16</li> <li>● 15</li> <li>● 16</li> <li>● 17</li> <li>● 16</li> <li>● 17</li> <li>● 15</li> <li>● 16</li> <li>● 17</li> <li>● 16</li> <li>● 16</li></ul>				22:	改良 PISC モデル				
12 0-10 (2) 12 — 1: 母材部 1: 母材部	ç		ç	●1000000000000000000000000000000000000	容接部		16		
	17	0-10 (2)	12	1:1	母材部		cl		

解析の流れを制御するためのフラグ入力 (#FLAG) (2/7)

S.I.	l	I	Ι	I	
U.K.	I	I	I		I
形式	IS	I5	IS	IS	IS
変数名	Ι	I	Ι	I	I
内容	<ul> <li>亀裂種類</li> <li>0:無限長亀裂</li> <li>1:表面亀裂 (アスペクト比可変)</li> <li>2:表面亀裂 (長さ固定)</li> <li>3:表面亀裂 (アスペクト比固定)</li> </ul>	<ul><li>龟裂配置方向</li><li>0:周方向龟裂</li><li>1:軸方向龟裂</li></ul>	<ul> <li>初期亀裂の深さ分布種類</li> <li>0: Marshall 分布</li> <li>1: OCTAVIA 分布</li> <li>2:ユーザー入力分布</li> <li>3:ユーザー入力分布 (不連続採点)</li> </ul>	初期アスペクト比分布種類 0:対数正規分布 1:指数分布 2:ユーザー入力分布	表面亀裂の初期亀裂平面の定義方式 0:初期亀裂平面自動分割 1:初期亀裂平面のユーザー分割
連続計算 No.	13	14	15	16	17
カラム (行番号)	11-15 (2)	16-20 (2)	21-25 (2)	26-30 (2)	31-35 (2)
No.	13	14	15	16	17

解析の流れを制御するためのフラグ入力 (#FLAG) (3/7)

No.	カラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	惠式	U.K.	S.I.
			無限長亀裂の応力拡大係数				
			11:周方向龟裂 VISA-II式 (膜·曲げ応力用)				
			12:周方向亀裂 ユーザー入力 (膜・曲げ応力用)				
			13:周方向龟裂 VISA-II式 (3 次多項式用)				
			21:軸方向亀裂 VISA-II式 (膜・曲げ応力用)				
ç		c T	22:軸方向亀裂 ユーザー入力 (膜・曲げ応力用)		U F		
18	30-40 (2)	18	23:軸方向亀裂 VISA-II式 (3 次多項式用)		c		
			31:周方向亀裂 葡易法 (膜·曲げ応力用)				
			33:周方向龟裂 簡易法(3次多項式用)				
			41:軸方向亀裂 簡易法 (膜・曲げ応力用)				
			43:軸方向亀裂 簡易法(3次多項式用)				
			51:軸方向龟裂影響関数法				

解析の流れを制御するためのフラグ入力 (#FLAG) (4/7)

	カラム	連続計算	<u> </u>	上 一	(*** 力	十	21.11	F C
No.	(行番号)	No.	谷村	×.	<b></b>	形式	U.K.	S.I.
			表面亀裂の応力拡大係数					
			11:周方向龟裂 Newman-Raju 式					
			12:周方向龟裂白鳥式					
			13:周方向龟裂 VISA-II 式					
			14:周方向龟裂関東式					
19	41-45 (2)	19	21:軸方向龟裂 Newman-Raju 式			15		
			22:軸方向龟裂白鳥式					
			23:軸方向龟裂 VISA-II 式					
			24:軸方向龟裂関東式					
			31:周方向龟裂 葡易法 (Newman-Raju)					
			41:軸方向龟裂 簡易法 (Newman-Raju)					
20	46-50 (2)	20	内部亀裂の応力拡大係数 入力不可			15		
			●:VISA-Ⅱの評価方式 0:VISA-Ⅱの評価方式	Et.				
21	1-5 (3)	21	1:FAVOR の評価方	4		15		
			2:OCA-Pの評価方	2				
			表面亀裂の進展則					
			0:長さ方向に進展したら溶接長さの表面	龟裂				
22	6-10 (3)	22	1:長さ方向に進展したら無限長亀裂			15		
			2:深さ方向に進展したら無限長亀裂					
			3:長さ方向の進展停止も考慮する。					

解析の流れを制御するためのフラグ入力(#FLAG) (5/7)

S.I.	I	I
U.K.	I	I
形式	IS	IS
変数名		I
内容	<ul> <li>破壊靭性値 K<sub>t</sub> の評価式</li> <li>0:NRC の平均曲線</li> <li>1: ASME Sec. XI 下限曲線</li> <li>2: ORNL 平均曲線</li> <li>3:ユーザー入力分布</li> </ul>	<ul> <li>破壊靱性値 K<sub>la</sub>の評価式</li> <li>0:NRC の平均曲線</li> <li>1: ASME Sec. XI 下限曲線</li> <li>2: ORNL 平均曲線</li> <li>3:ユーザー入力分布</li> </ul>
連続計算 No.	23	24
カラム (行番号)	11-15 (3)	16-20 (3)
No.	23	24

解析の流れを制御するためのフラグ入力(#FLAG) (6/7)

No.	カラム (行番号)	連続計算 No.	内容	変数名	形式	U.K.	S.I.
25	21-25 (3)	25	<ul> <li>Δ RT NDT の評価式</li> <li>0: JEAC の国内予測式</li> <li>1: 米国 RG1.99 Rev.2 式</li> <li>5: ユーザー入力分布</li> </ul>	I	IS	I	
26	26-30 (3)	26	破壞基準 0: Kk-Ku基準 1: R6 法	I	I5		I
27	31-35 (3)	27	計算結果の出力 1:出力しない。	IGRAPH	I5		
28	1-5 (4)	31	自動調整層別モンテカルロ法 0:自動調整を行わない。 100: 亀裂採点数の最適化を実施 100: 亀裂採点数の最適化を実施 1:アスペクト比方向の階層間隔を自動調整 1:アスペクト比方向の階層間隔を自動調整 1:アスペクト比方向の階層間隔を自動調整 1:アスペクト比方向の階層間隔を自動調整 1:アスペクト比方向の階層間隔を自動調整 1:アスペクト比方向の階層間隔を自動調整 1:アスペクト比方向の階層間隔を自動調整 1:アスペクト比方向し動調整を実施 11:全ての自動調整を実施	I	13	I	I
29	6-10 (4)	32	K <sub>te</sub> と K <sub>ta</sub> の相関の考慮 0:相関を考慮しない。 1:相関を考慮する。	I	I5	I	

解析の流れを制御するためのフラグ入力(#FLAG) (7/7)

・このカードセットは必ず入力しなければいけない。 ・灰色のセルについては、計算には使用されないため、適当な数値を入力する。

- 205 -

No.	カラム (行番号)	連続計算 No.	內容	変数名	形式	U.K.	S.I.
-	1-10(1)		圧力容器の板厚(圧力容器を解析する場合はクラッド厚を含む板厚)		F10.0	inches	В
5	11-20 (1)	2	圧力容器の内半径(圧力容器を解析する場合) 板の長さ(板を解析する場合)		F10.0	inches	ш
3	21-30 (1)	3	圧力容器の中性子照射量 (フルエンス)		F10.0	$ imes 10^{19} \ { m n/cm^2}$	$ imes 10^{19} \ { m n/cm^2}$
4	31-40 (1)	4	圧力容器の炉壁内中性子照射量減衰定数		F10.0	inches <sup>-1</sup>	m <sup>-1</sup>
5	41-50 (1)	5	クラッドの厚さ		F10.0	inches	m

解析の流れを制御するためのフラグ入力 (#VESSEL)

・このカードセットは必ず入力しなければいけない。

・クラッドの厚さ(No.5)については、クラッドを考慮しない場合は入力を省略しても良い。

・クラッドを考慮する場合、内半径は中心からクラッドの表面までの距離とする。

・灰色のセルについては、計算には使用されないため、適当な数値を入力する。
No.	カラム	連続計算	内容	変数名	形式	U.K.	T'S
	(行番号)	No.	[				
-	1-10(1)		過渡事象の総評価時間	TMAX	F10.0	minutes	min
2	11-20 (1)	2	過渡事象評価における時間刻み	TDET	F10.0	minutes	min
3	21-30 (1)	3	亀裂進展刻み方式選択フラグ 0:等間隔 1:等比級数		110		
4	31-40 (1)	4	第1回目の亀裂進展刻み		F10.0	inches	mm
5	41-50 (1)	5	亀裂進展刻み増幅率		F10.0		
9	51-60 (1)	6	亀裂破壊深さ		F10.0	容器板厚の割合 (%)	容器板厚の割合 (%)
7	1-5 (2)		過渡事象評価時間のユーザー入力点数	NTDIV	15		
8	$1-50 (3 \sim)$	L	過渡事象評価時間データ	TPOS	F10.0	minutes	min

過渡事象のデータ入力 (#TRANS)

このカードセットは必ず入力しなければいけない。

過渡事象の評価時刻を等間隔で行う場合は、No.2の時間刻みを設定し、No.7及びNo.8については入力してはいけない。

・過渡事象の評価時刻を等間隔で設定しない場合は、No.7 及び No.8 を用いて評価時刻を入力する。この際、No.2 で設定された時間刻みは無視される。

・FEM 解析を行う場合は、入力された過渡事象評価時間で増分回数・増分刻みを決定する。

・灰色のセルについては、計算には使用されないため、適当な数値を入力する。

No.	カラム (注乗旦)	連続計算	委问	変数名	形式	U.K.	S.I.
	(1) 街 9)	N0.					
1	1-10(1)		時刻 0 のときの内圧	PDATA (1)	F10.0	ksi	MPa
2	11-20 (1)		時刻 1/4 TMAX のときの内圧	PDATA (2)	F10.0	ksi	MPa
3	21-30 (1)	1	時刻 1/2 TMAX のときの内圧	PDATA (3)	F10.0	ksi	MPa
4	31-40 (1)		時刻 3/4 TMAX のときの内圧	PDATA (4)	F10.0	ksi	MPa
5	41-50 (1)		時刻 TMAX のときの内圧	PDATA (5)	F10.0	ksi	MPa

内圧の時刻歴入力(4 次多項式)(#PRESFM)

・このカードセットは内圧の評価方式 (#LAGの No.6) で4次多項式分布が選択された場合に入力する必要がある。

・TMAX とは過渡事象の総評価時間(#TRANS No.1 にて定義)のことである。

(行番号)         No.         Description         Descr	Ŋ	カラム	連続計算	内容	亦教名	泛洲	11 K	15
1         1-10(1)         内圧データベースの時刻分割数         NUMP         110         一         一           2         1-10(2~)         1         内圧データを入力する時刻データ         TIMP (NUMP)         F10.0         minutes         minutes           3         11-20(2~)         内圧データ         PDT (NUMP)         F10.0         ksi         MPa		(行番号)	No.	I, -	I X			-
2         1-10(2~)         1         内圧データを入力する時刻データ         71MP (NUMP)         F10.0         minutes         minutes <thtminutes< th="">         minutes         &lt;</thtminutes<>	-	1-10 (1)		内圧データベースの時刻分割数	NUMP	110		
3 11-20 (2 $\sim$ ) $\mu$ ET (NUMP) F10.0 ksi MPa	2	$1-10(2\sim)$	1	内圧データを入力する時刻データ	TIMP (NUMP)	F10.0	minutes	min
	ю	$11-20 \ (2\sim)$		内圧データ	PDT (NUMP)	F10.0	ksi	MPa

内圧の時刻歴入力(ユーザー分布)(#PRESPT)

・このカードセットは内圧の評価方式 (#LAGの No.6) でデータテーブルが選択された場合に入力する必要がある。

・時刻データ及び内圧データは、定義された時刻分割数と同数を入力しなければならない。

S.I.		Ç	kg/m <sup>3</sup>	J/kg•K	W/m·K		Ç	kg/m <sup>3</sup>	J/kg•K	W/m·K
U.K.	I	۰F					۰F			
形式	15	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0	15	F10.0	F10.0	F10.0	F10.0
変数名	NMATBH	RMT(1,I,1)	RMT(1,I,2)	RMT(1,I,3)	RMT(1,I,4)	NMATCH	RMT(2,I,1)	RMT(2,1,2)	RMT(2,I,3)	RMT(2,1,4)
内容	母材の物性値の入力データ数	温度	密度	比熱	熱伝導率	クラッド材の物性値の入力データ数	温度	密度	比熱	熱伝導率
連続計算 No.				I			I		Ι	Ι
カラム (行番号)	1-5 (1)	$1-10(2\sim)$	$11-20(2\sim)$	$21-30~(2\sim)$	$31-40~(2\sim)$	1-5 (NMATBH+2)	1-10 (NMATBH+3 $\sim$ )	11-20 (NMATBH+3~)	21-30 (NMATBH+3~)	31-40 (NMATBH+3 $\sim$ )
No.	1	2	з	4	5	9	7	8	6	10

伝熱解析の物性値の入力 (#MAHEAT)

・FEM 解析では入力データの単位について特に制限がないが、その統一性を要求する。

例えば、熱伝導率の単位は W/m℃であれば、熱伝達係数を W/m²℃、密度・比熱を J/m³℃で入力する必要があり、それに対応し、解析結果の温度の単位は℃である。

<sup>・</sup>クラッドを考慮しない場合は No.1~No.5 の項目の入力だけでよい。

No	カラム	連続計算	<u>※</u> 平	亦粉及	十 肖	71.11	C I
INO.	(行番号)	No.	日本	炎欬力	マナイン	U.N.	<b>.</b> c
1	1-5 (1)		母材の物性値の入力データ数	NMATBT	I5		
2	$1-10(2^{\sim})$	Ι	温度	RMT(3,I,1)	F10.0	Ч°	Ĉ
3	$11-20(2\sim)$	I	密度	RMT(3,I,2)	F10.0		kg/m <sup>3</sup>
4	$21-30~(2\sim)$	I	本ング率	RMT(3,I,3)	F10.0		MPa
5	$31-40~(2\sim)$	I	ポアンン比	RMT(3,I,4)	F10.0		
6	$41-50~(2\sim)$	Ι	線膨張係数(瞬間)	RMT(3,1,5)	F10.0	1/°F	$1/^{\circ}C$
7	$41-50~(2\sim)$	I	降伏応力	RMT(3,I,6)	F10.0		MPa
8	1-5(NMATBT+2)	Ι	クラッド材の物性値の入力データ数	NMATCT	I5		
6	$1-10(NMATBT+3\sim)$	I	温度	RMT(4,I,1)	F10.0	Ч°	ç
10	11-20(NMATBT+3~)	I	密度	RMT(4,I,2)	F10.0		kg/m <sup>3</sup>
11	$21-30(NMATBT+3\sim)$	I	本ング率	RMT(4,I,3)	F10.0		MPa
12	$31-40(\text{NMATBT}+3\sim)$	I	ポアンン比	RMT(4,I,4)	F10.0		
13	$41-50(NMATBT+3\sim)$	I	線膨張係数(瞬間)	RMT(4,I,5)	F10.0	1/°F	1/°C
14	$51-60(NMATBT+3\sim)$		降伏応力	RMT(4,I,6)	F10.0		MPa

応力解析の物性値の入力(#MASTRS:FEM card)

・クラッドを考慮しない場合は No.1~No.7 の項目の入力だけでよい。

・FEM 解析では入力データの単位について特に制限がないが、その統一性を要求する。

例えば、ヤング率の単位は kgficm<sup>2</sup> であれば、荷重を kgf、長さ、座標を cm で入力する必要があり、それに対応し、解析結果の応力の単位は kgficm<sup>2</sup>、変位の単位は cm である。

- 211 -

Ĩ	カラム	連続計算	<u> </u>	女子来以	千江	11 12	10
No.	(行番号)	No.	四位	炎奴石		U.N.	.1.C
			応力-ひずみ曲線の入力方法				
1	1-5 (1)		0: 塑性ひずみ vs. 加工硬化係数	ITWORK	15		
			1: 塑性ひずみ vs. 応力				
(	(		応力-ひずみ曲線の温度の番号		;		
2	$(\sim 7)$ C-I		(#MASTRS の温度の順番に対応)	IMAIBT	cl		
3	$6-10(2^{\circ})$	I	応力-ひずみ曲線のデータ点の個数	NPLSBT	15		
4	$1-10~(3\sim)$		母材の塑性ひずみ	RMT(3,I,7~)	F10.0		
ı			加工硬化係数(ITWORK=0)				Ę
S	$11-20(3 \sim)$	I	応力(ITWORK=1)	$KM1(5,1,8\sim)$	F10.0		MPa
9	$1-10(3\sim)$		クラッド材の塑性ひずみ	RMT(4,I,7~)	F10.0		
t			加工硬化係数(ITWORK=0)				Ę
<b>,</b>	$11-20(5\sim)$		応力(ITWORK=1)	$ m KM1(4,1,8\sim)$	F10.0		MPa
の支置	なん観寺がはくのもし どお	い名歌」とない					

弾塑性解析の物性値の入力 (#WORKHD:FEM card)

型性のめる脾研ではこのカートを領略してはいけない。

・クラッド考慮しない場合は No.1~No.5 の項目の入力だけでよい。

・FEM 解析では入力データの単位について特に制限がないが、その統一性を要求する。

例えば、ヤング率の単位は kgf/cm<sup>2</sup> であれば、荷重を kgf、長さ、座標を cm で入力する必要があり、それに対応し、解析結果の応力の単位は kgf/cm<sup>2</sup>、変位の単位は cm である。

	カラム	連続計算	中院	<u>亦***</u>	十 肖	21.11	ΤC
N0.	(行番号)	No.	日本	冬秋口	ノナヘビ	U.N.	<b>5.</b> I.
1	1-10(1)		初期温度	TDATA(1)	F10.0	Ч°	Ĉ
2	11-20 (1)		最終温度	TDATA(2)	F10.0	Ч°	Ĉ
3	21-30 (1)		崩壞定数	TDATA(3)	F10.0	sec <sup>-1</sup>	sec <sup>-1</sup>
4	31-40 (1)		冷却材と容器の間の熱伝達係数	TDATA(4)	F10.0		$W/m^2 \cdot K$

冷却材温度履歴(指数関数的減衰)の入力(#PTEMPF:FEM)

・ # PTEMPF と # PTEMPT のどちらかを入力しなければならない。

lo.	カラム (行来号)	連続計算	内谷	変数名	形式	U.K.	S.I.
1	1-5 (1)		データ点数	NUMTP	I5		
5	1-10 (2 $\sim$ )		時刻	TIMT(I)	F10.0	minutes	min
ŝ	$(2^{\sim})$		冷却材温度	TMPDT(I)	F10.0	년 o	ç
4	21-30 (2~)		冷却材と容器の間の熱伝達係数	HCOED(I)	F10.0		W/m²•K

冷却材温度履歴(データテーブル)の入力 (#PTEMPT: FEM)

・ # PTEMPF と # PTEMPT のどちらかを入力しなければならない。

S	Ч°	F10.0	TEMPO	初期温度		1-10(1)	-
.1.6	U.N.	マインド	<u> </u>		No.	(行番号)	N0.
Ċ	24 14	<del></del>	<i>凶 -</i> 州: 14	- 学子 	連続計算	カラム	5

## 容器の初期温度の入力 (#INTIAL:FEMcard)

U.K. S.I.										スキドな
形式	IS					I5				在ナス、
変数名	MESHNO					MELETP				解析のみを実
内容	FEM のメッシュの種類 MESHNO 1:等分割メッシュ圧力容器(クラッドを考慮しない)	(図 付録 3-1 を参照) 2:非等分割メッシュ圧力容器 (クラッドを考慮可能)	(図 付録 3-2 を参照)	3:非等分割メッシュ圧力容器(クラッドを考慮)	(図 付録 3-3 を参照)	要素種類	MELETP=1:軸対称要素	2:平面ひずみ要素	3:平面応力要素(弾性解析のみ実施可能)	素い間」とは弾顔性解析を実施すろととができろが、平面向力更素に関しては補作
連続計算 No.										重なよれ通
カラム (行番号)	1-5 (1)					6-10 (1)				重素 劢 ィ ҝ 亚
No.	1					5				軸社統

FEM のメッシュ番号の入力 (#MESHNO: FEM card)

JAEA-Data/Code 2022-006













## 付録4: PASCALのコード整備、機能検証、活用事例に係る参考資料一覧

PASCAL5 は PASCAL4 の公開以降に最新知見に基づき新たな機能を整備するだけでなく、整備 されている機能をソースコードレベルで検証する等、解析コードの信頼性向上に努めている。ま た、整備した機能を用いた計算事例を報告している。ここでは PASCAL4 が公開された 2018 年以 降に公開された参考資料を示す。

## 参考資料

- Lu, K., Masaki, K., Katsuyama, J. and Li, Y., "Development of crack evaluation models for probabilistic fracture mechanics analyses of Japanese reactor pressure vessels", ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2018-84965, 2018, 8p.
- Lu, K., Masaki, K., Katsuyama, J., Li, Y. and Uno, S., "Development of probabilistic fracture mechanics code PASCAL Version 4 for reactor pressure vessels", ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2018-84964, 2018, 10p.
- Li, Y., Uno, S., Masaki, K., Katsuyama, J., Dickson, T. and Kirk, M., "Verification of probabilistic fracture mechanics analysis code through benchmark analyses", ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2018-84963, 2018, 11p.
- Lu, K., Mano, A., Katsuyama, J., Li, Y. and Iwamatsu, F., "Development of stress intensity factors for subsurface flaws in plates subjected to polynomial stress distributions", Journal of Pressure Vessel Technol., 140(3), 031201, 2018.
- 5) 日本電気協会, 確率論的破壊力学に基づく原子炉圧力容器の破損頻度の算出要領, JEAG4640-2018, 2019.
- Lu, K., Katsuyama, J., Li, Y., Miyamoto, Y., Hirota, T., Itabashi, Y., Nagai, M., Suzuki, M. and Kanto, Y., "Verification of a probabilistic fracture mechanics code PASCAL4 for reactor pressure vessels", International Conference on Nuclear Engineering, ICONE27-2320, 2019, 9p.
- Katsuyama, J., Masaki, K., Lu, K., Watanabe, T. and Li, Y., "Effect of coolant water temperature of ECCS on failure probability of RPV", ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2019-93967, 2019, 7p.
- Lu, K., Katsuyama, J., Li, Y. and Yoshimura, S., "Application of probabilistic fracture mechanics methodology for Japanese reactor pressure vessels using PASCAL4", ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2019-93935, 2019, 9p.
- 9) 李銀生他, "PASCAL 信頼性向上ワーキンググループ活動報告; 平成 28 及び 29 年度", JAEA-Review 2020-011, 2020, 130p.
- Katsuyama, J., Osakabe, K., Uno, S., Li, Y. and Yoshimura, S., "Guideline on probabilistic fracture mechanics analysis for Japanese reactor pressure vessels", Journal of Pressure Vessel Technology, 142(2), 021205, 2020.
- Lu, K., Katsuyama, J., and Li, Y., "Improvements on evaluation functions of a probabilistic fracture mechanics analysis code for reactor pressure vessels", Journal of Pressure Vessel Technology, 142(2), 021208, 2020.
- 12) Lu, K., Katsuyama, J., Li, Y., Miyamoto, Y., Hirota, T., Itabashi, Y., Nagai, M., Suzuki, M. and Kanto, Y., "Recent verification activities on probabilistic fracture mechanics analysis code PASCAL4 for reactor pressure vessel", Mechanical Engineering. Journal, 7(3), 19-00573, 2020.

- Katsuyama, J., Miyamoto, Y., Lu, K., Mano, A. and Li, Y., "Improved Bayesian update method on flaw distributions reflecting non-destructive inspection result", ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2020-21430, 2020, 8p.
- Lu, K., Katsuyama, J. and Li, Y. "Extension of PASCAL4 code for probabilistic fracture mechanics analysis of reactor pressure vessel in boiling water reactor", ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2020-21421, 2020, 10p.
- 15) Lu, K., Katsuyama, J. and Li, Y., "Plasticity correction on stress intensity factor evaluation for underclad cracks in reactor pressure vessels", Journal of Pressure Vessel Technology, 142(5), 051501, 2020.
- Lu, K., Katsuyama, J., Li, Y. and Yoshimura, S., "Application of probabilistic fracture mechanics to reactor pressure vessel using PASCAL4 code", Journal Pressure Vessel Technology, 143(2), 021505, 2021.
- Lu, K., Katsuyama, J., Masaki, K., Watanabe, T. and Li, Y., "Effect of coolant water temperature of emergency core cooling system on failure probability of reactor pressure vessel", Journal Pressure Vessel Technology, 143(3), 031704, 2021.
- 18) Li, Y., Katsumata, G., Masaki, K., Hayashi, S., Itabashi, Y., Nagai, M., Suzuki, M. and Kanto, Y., "Verification of probabilistic fracture mechanics analysis code for reactor pressure vessel", Journal of Pressure Vessel Technology, 143(4), 041501, 2021.
- Lu, K., Takamizawa, H., Katsuyama, J. and Li, Y., "Recent improvements of probabilistic fracture mechanics analysis code PASCAL for reactor pressure vessels", International Journal of Pressure Vessels and Piping, 199, 104706, 2022.

This is a blank page.