

JAEA-Review 2017-005 DOI:10.11484/jaea-review-2017-005

PASCAL 信頼性向上ワーキンググループ活動報告

-平成 27 年度--

Activities of Working Group on Verification of PASCAL —Fiscal Year 2015—

> 李 銀生 林 翔太郎 板橋 遊 永井 政貴 関東 康祐 鈴木 雅秀 眞崎 浩一

Yinsheng LI, Shotaro HAYASHI, Yu ITABASHI, Masaki NAGAI Yasuhiro KANTO, Masahide SUZUKI and Koichi MASAKI

> 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

March 2017

日本原子力研究開発機構

March 2017

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。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒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. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, 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, 2017

JAEA-Review 2017-005

PASCAL 信頼性向上ワーキンググループ活動報告 - 平成 27 年度 -

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

李 銀生 · 林 翔太郎*1 · 板橋 遊*2 · 永井 政貴*3

関東 康祐^{*4} • 鈴木 雅秀^{*5} • 眞崎 浩一^{*6}

(2017年1月30日受理)

日本原子力研究開発機構では、原子炉圧力容器(RPV)の構造健全性評価手法の高度化を目的 に、中性子照射脆化を考慮して、加圧熱衝撃等の過渡事象が発生した場合の RPV の破損確率や破 損頻度を評価する確率論的破壊力学解析コード PASCAL を開発し、最新知見に基づきその機能の 高度化を進めてきた。RPV の構造健全性評価において確率論的手法の活用が期待される中で、RPV の健全性評価に係る取組みを促進するためには、PASCAL の確率変数、評価機能、評価モデル等 を含めた機能検証を行い、その検証過程を整理するとともに、検証結果を取りまとめておくこと が必要不可欠である。

こうした背景を踏まえ、開発機関以外の当該分野に関する専門家の下で、PASCALの確率論的 破壊力学ソルバーである PASCAL3 をソースコードレベルで機能検証することにより、本コード の信頼性を向上させることを目的として、PASCAL 信頼性向上 WG を設立した。一年の活動を通 じて、PASCAL3 が十分な信頼性を有することが確認された。本報は、PASCAL 信頼性向上 WG の 平成 27 年度における活動内容及び活動結果についてまとめたものである。

本研究は、日本原子力研究開発機構と三菱重工業株式会社、株式会社 IHI、電力中央研究所、 茨城大学、長岡技術科学大学、みずほ情報総研株式会社との共同研究の成果を含む。本研究の 成果は、関係機関が共有している。

- 原子力科学研究所:〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4
- *1 三菱重工業株式会社
- *2 株式会社 IHI
- *3 電力中央研究所
- *4 茨城大学
- *5 長岡技術科学大学
- *6 みずほ情報総研株式会社

Activities of Working Group on Verification of PASCAL —Fiscal Year 2015—

Yinsheng LI, Shotaro HAYASHI^{*1}, Yu ITABASHI^{*2}, Masaki NAGAI^{*3},

Yasuhiro KANTO^{*4}, Masahide SUZUKI^{*5} and Koichi MASAKI^{*6}

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 January 30, 2017)

For the improvement of the structural integrity assessment methodology on reactor pressure vessels (RPVs), the probabilistic fracture mechanics (PFM) analysis code PASCAL has been developed and improved in Japan Atomic Energy Agency based on latest knowledge. The PASCAL code evaluates the failure probabilities and frequencies of Japanese RPVs under transient events such as pressurized thermal shock considering neutron irradiation embrittlement. In order to confirm the reliability of the PASCAL as a domestic standard code and to promote the application of PFM on the domestic structural integrity assessments of RPVs, it is important to verify the probabilistic variables, functions and models incorporated in the PASCAL and summarize the verification processes and results as a document.

On the basis of these backgrounds, we established a working group, composed of experts on this field besides the developers, on the verification of the PASCAL3 which is a PFM analysis module of PASCAL, and the source program of PASCAL3 was released to the members of working group. Through one year activities, the applicability of PASCAL in structural integrity assessments of domestic RPVs was confirmed with great confidence. This report summarizes the activities of the working group on the verification of PASCAL in FY2015.

Keywords: Probabilistic Fracture Mechanics, Reactor Pressure Vessel, Neutron Irradiation Embrittlement, Pressurized Thermal Shock, Structural Integrity Assessment, Through-wall Cracking Frequency

*5 Nagaoka University of Technology

This work includes the results of joint research between Japan Atomic Energy Agency and Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., IHI Corporation, Central Research Institute of Electric Power Industry, Ibaraki University, Nagaoka University of Technology, Mizuho Information & Research Institute, Inc. The rights of this work are shared by these organizations.

^{*1} Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

^{*2} IHI Corporation

^{*3} Central Research Institute of Electric Power Industry

^{*4} Ibaraki University

^{*6} Mizuho Information & Research Institute, Inc.

目次

1. はじ	こめに	1
1.1	確率論的破壊力学解析コード PASCAL	1
1.2	確率論的破壊力学解析コードの信頼性向上	2
1.3	PASCAL 信頼性向上 WG の設置	2
2. 信頼	〔 性向上実施内容	4
2.1	実施内容	4
2.2	配布したソフトやマニュアル類	4
3. 信頼	頁性向上結果	6
3.1	概要	6
3.2	三菱重工業株式会社による機能検証	7
3.3	株式会社 IHI による機能検証	24
3.4	一般財団法人電力中央研究所による機能検証	37
3.5	茨城大学による機能検証	42
3.6	長岡技術科学大学による機能検証	50
3.7	事務局による機能検証	56
4. まと	: め	62
参考文南	犬	63
付録		64

Contents

1.	Preface	1
	1.1 Probabilistic Fracture Mechanics Analysis Code PASCAL	1
	1.2 Verification on Probabilistic Fracture Mechanics Analysis Code	2
	1.3 Establishment of WG on Verification of PASCAL.	2
2.	Outline of Verification Activity	4
	2.1 Outline	4
	2.2 Distribution of softwares and manuals	4
3.	Results of Verification Activity	6
	3.1 Overview	6
	3.2 Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.	7
	3.3 IHI Corporation	24
	3.4 Central Research Institute of Electric Power Industry	37
	3.5 Ibaraki University	42
	3.6 Nagaoka University of Technology	50
	3.7 Developers	56
4.	Summary	62
Refe	erences	63
App	endix	64

表 リスト

表 1	PASCAL 信頼性向上 WG 参加者一覧	3
表 2	各参加機関の実施項目	4
表 3	各機関への配布物	5

図 リスト

図1 7	確率論的破壊力学解析コー	、PASCAL の評価フロー	·
------	--------------	----------------	---

1. はじめに

1.1 確率論的破壊力学解析コード PASCAL

原子炉圧力容器(Reactor Pressure Vessel, RPV)は原子炉冷却材圧力バウンダリの最も 重要な構成機器の1つであり、その健全性の確保は極めて重要である。現在、国内にお ける RPV の構造健全性評価は、日本電気協会規程¹⁾に準拠した決定論的手法により行わ れている。一方で、近年欧米においては、RPV の構造健全性に関する合理的評価指標を 設定し、原子力プラントの長期供用に対する安全水準の維持と保全最適化の両立を図る ことを目的に、確率論的手法の実用化が進められている。国内においても、RPV の構造 健全性に関する合理的な確率論的数値指標を評価し、高経年化技術評価の高度化に資す るためには、確率論的破壊力学(Probabilistic Fracture Mechanics, PFM)に基づく解析手 法の整備が重要である。

このような背景から、日本原子力研究開発機構(原子力機構)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、平成 8 年度から PFM 解析コード PASCAL(<u>P</u>FM <u>A</u>nalysis of <u>S</u>tructural <u>C</u>omponents in <u>Aging L</u>WR)を開発してきた²⁾。

PASCALの評価フローを図1に示す。PASCALはプリプロセッサのPrePASCAL、確率 論的解析ソルバーPASCAL3、ポストプロセッサ PostPASCAL で構成されている。 PrePASCALは有限要素法を用いた加圧熱衝撃(Pressurized Thermal Shock, PTS)等の過 渡事象による RPV 壁内における温度分布及び応力分布の時刻歴を求めるモジュールで ある。PASCAL3は、中性子照射量や材料の化学成分等の影響因子の不確かさを考慮し、 中性子照射脆化や PTS 等の過渡事象による亀裂進展確率(Conditional probability of crack initiation, CPI)や亀裂貫通確率(Conditional probability of failure, CPF)等を解析するモ ジュールである。PostPASCALは、PASCAL3を用いて全ての評価対象過渡事象、評価対 象亀裂(表面亀裂、溶接部における内部亀裂や母材部における内部亀裂等)を対象とし た CPI 及び CPF を求めた結果等を踏まえ、RPV 炉心領域の亀裂進展頻度(Frequency of crack initiation, FCI)や亀裂貫通頻度(Through-wall cracking frequency, TWCF)を求める



図1 確率論的破壊力学解析コード PASCAL の評価フロー

1.2 確率論的破壊力学解析コードの信頼性向上

国内における RPV の構造健全性評価において確率論的手法の活用が期待される中で、 RPV の健全性評価に係る取組みを促進するため、PASCAL コード、特に確率論的破壊力 学解析ソルバーである PASCAL3 の信頼性を確保することが必要不可欠である。

解析コードの信頼性確認方法としては、一般的に Verification and Validation (V&V) 等が挙げられるが、RPV の亀裂貫通等の極低頻度の現象を対象とした PFM 解析コード については、実験に基づく妥当性確認 (Validation)が現実的には困難である。このため、 実装された個別機能の検証 (Verification) が非常に重要となる。

1.3 PASCAL 信頼性向上 WG の設置

以上の背景を踏まえ、本研究では、国内での確率論的手法の活用を念頭に置き、主に 確率論的破壊力学解析ソルバーである PASCAL3 を対象として、開発機関以外の当該分 野に関する専門家の下で、PASCAL3 の信頼性を向上させることを目的として、ソースコ ードレベルでの機能の検証を行う「PASCAL 信頼性向上 WG」を設置することとした。 WG の参加者の一覧を表 1 に示す。PASCAL3 の開発機関である原子力機構及びみずほ情 報総研株式会社が WG の事務局を務めた。

表 1 PASCAL 信頼性向上 WG 参加者一覧

(敬称略、)	順不	同)
--------	----	---	---

WG 参加機関	略称	参加者
三菱重工業株式会社	MHI	廣田 貴俊、村上 毅、林 翔太郎
株式会社 IHI	IHI	佐藤 輝嘉、板橋 遊、南日 卓
一般財団法人電力中央研究所	電中研	曽根田 直樹、山本 真人、永井 政貴
茨城大学	茨城大学	関東 康祐
長岡技術科学大学	長岡技科大	鈴木 雅秀、岡山 龍太
みずほ情報総研株式会社	MHIR	小坂部 和也、真崎 浩一
(事務局)		
日本原子力研究開発機構	JAEA	李 銀生、海老根 典也、勝山 仁哉、勝
(事務局)		又 源七郎*

注*: 原子力機構の外来研究員として、当 WG に参加したが、現在はみずほ情報総研株 式会社の社員である。

2. 信頼性向上実施内容

2.1 実施内容

WG では、各機関が独自に機能検証に関する実施項目を決定し、それぞれ独自の方法 により検証作業を実施することとした。各機関の実施項目の一覧を表2に示す。

各機関は開示された PASCAL3 のソースコードを用いて、必要に応じた入力データ作 成やデバッグ出力等を行い、ソースコードレベルでの検証作業を行った。また、検証作 業や結果は記録を残すとともに、WG 会合で報告し、他機関によるレビューを受けた。

分類	項目	実施機関
	RT _{NDT}	MHI
萨索亦粉	化学成分	MHI
唯平友奴	中性子照射量	MHI
	破壊靱性・亀裂伝播停止靱性	MHI/IHI
	応力拡大係数の評価	MHI
	表面亀裂の応力拡大係数	事務局
	内圧を考慮した応力拡大係数	事務局
萩年ファー	条件付亀裂進展確率	IHI
計価ノロー	条件付亀裂進展停止確率	IHI
町Ш八	条件付亀裂貫通確率	IHI
	亀裂進展・停止時の評価	IHI
	脆化予測法	MHI
	高温予荷重効果	事務局
	コード内のデータの流れ	電中研
	低破損確率計算の検証	電中研
その他	他の解析コードとのベンチマーク	MHI
	系統的な感度解析	長岡技科大
	Unit Test による自動検証	茨城大学

表2 各参加機関の実施項目

2.2 配布したソフトやマニュアル類

WGにおける各機関への配布物の一覧を表3に示す。本WGでは、PASCAL3の実行体 に加え、ソースコードレベルでの検証作業を行うため、PASCAL3(Ver.3.5A)のソース コードを配布した。また、典型的な解析を実施するための26種類の入出力ファイルを配 布した。マニュアルとして、PASCAL3の基本的な操作方法を記した簡易マニュアルとと もに、PASCAL3の解析例、解析理論及び使用方法の詳細をまとめた詳細マニュアルを配布した。

No.	配布物
1	ソースコード (Ver.3.5A)
2	実行体 (Ver.3.5A)
3	サンプル入出力ファイル
4	簡易マニュアル
5	詳細マニュアル

表3 各機関への配布物

3. 信頼性向上結果

3.1 概要

2.1 節に示した各機能について、PASCAL3 とは別のソフトウェア(Excel[®]や自社製ソフト等)との比較やソースコードレベルの機能検証を行った結果、PASCAL3 に実装されている機能が正しく動作していることが確認された。各機関の報告の詳細を 3.2 から 3.7 節に示す。

本 WGの平成 27 年度の活動を通じて、以下の観点を含めた機能検証を行い、PASCAL3 の信頼性向上を実現した。

- ・確率変数については、標本が与えられた確率分布に従うことが確認された。
- ・評価式や評価手法については、十分に評価精度を有することが確認された。
- ・解析フローについては、正しくコーディングされていることが確認された。
- ・米国で開発された PFM 解析コード FAVOR 12.1³⁾とほぼ同等の解析精度を有するこ とが確認された。

以上を踏まえて、本 WGの平成 27 年度の活動目標が達成された。

3.2 三菱重工業株式会社による機能検証

PASCAL検証結果(MHI)



🙏 三菱重工

PASCALの検証内容(1/2)

- □ 目的
 - PASCAL信頼性向上WGにおいて、表1の検証を実施した。

● 本資料に検証結果をまとめる。

表1 検証項目の一覧

MHI検証対象	検証項目
1.照射脆化予測式	(1)決定論での検証
Ann 270 (p. p. H. 1999) and S. 200 (P. C. 1999) and S. 200 (P. C. 1999)	(2)確率変数を適用したときの検証
2.破壊靭性と亀裂伝播停止靭性	確率変数を適用したときの検証
3.応力拡大係数	塑性域補正・クラッドの影響を考慮したときの検証
4.FAVORとの比較	(1)応力拡大係数の比較
	(2)条件付き破壊確率の比較

ロ 検証の対象

PASCAL ver3.5A

□ 検証環境

表2 検証環境

項目	使用機器
CPU	Intel Xeon CPU E5-1607
メモリ	16GB
OS	Windows7 (64bit)
コンパイラー	Intel Composer XE2011 (IA-32 Visual
	Studio2008モード)

PASCALの検証内容(2/2)

🙏 三菱重工

2

🙏 三菱重工

□ 検証で用いた計算ツール(MHIツール)

MHIツール(※)の概要を表3に示す。

表3 MHIツールの概要			
計算ツール	概要	使用箇所	
脆化予測式の 計算ツール	化学成分、中性子照射量と照射東、照射温度 を入力するとJEAC4201-2007 (2013追補版)の テーブルの値からΔRT _{NDT} を出力するツール	P. 5, P. 6 P. 10, P. 11	
破壊靭性と 亀裂伝播停止靭性 の計算ツール	RT _{NDT} と温度を入力として、破壊靭性と亀裂伝 播停止靭性を国内ワイブル分布と対数正規分 布の確率変数として発生させるツール	P. 14∼P. 16	
応力拡大係数の 計算ツール	亀裂形状と応力分布を入力として、維持規格 2008 (2010年追補版)の式に従って応力拡大係 数を計算し、塑性域補正を考慮して補正した 値を出力するツール	P. 17∼P. 26	

※MHI社内QAプログラムに基づき検証済み

内容

- 1. 照射脆化予測式の検証
- 2. 破壊靭性と亀裂伝播停止靭性の検証
- 3. 応力拡大係数の検証
- 4. FAVORとの比較による検証

1. 照射脆化予測式の検証

ロ検証の対象

JEAC4201-2007(2013追補版)の脆化予測式

口検証内容

PASCAL3で計算したΔRT_{NDT}を出力してMHIで作成したΔRT_{NDT}を計算する MHIツールの出力値と比較

(1)決定論的な計算結果との比較

⇒ PASCAL3に実装されたJEAC4201-2007(2013追補版)の計算方法 の確認

(2)確率論的な計算結果との比較

⇒確率変数のサンプリングの妥当性確認

⇒打ち切り範囲の感度の確認

1. 照射脆化予測式の検証

★三菱重工

4

★ 三菱重工

- (1) 決定論的評価における脆化予測式の検証
 - 表4の基本設定値を設定
 - 基本設定値から表5に示す範囲で、Cu、Ni、中性子照射量、中性子束をパラメー タとしてそれぞれ単独で変化させたときの△RT_{NDT}を計算し、MHIツールの結果と 比較
 - MHIツールにおけるJEACテーブル範囲外の値は表6の処理を実施

表4 基本設定値(決定論)

項目	設定値
Cu	0.15 (wt%)
Ni	0.5(wt%)
中性子照	7×10 ¹⁹ (n/cm ²)
射量	
中性子束	6×10 ¹⁰ (n/cm ² s)
照射温度	285(°C)

表5 /	ペラメータ範囲
項目	設定値
Cu	0.03~0.22 (wt%)
Ni	0.40~0.99 (wt%)
中性子照射量	0.09~11.0×10 ¹⁹
	(n/cm ²)
中性子束	$3.6 \sim 11.1 \times 10^{10} (n/cm^2 s)$

※パラメータは規格テーブルの範囲を網羅するよう に設定**(Ni**以外)

18=1 5	テーブル	テーブル	テーブルの)範囲外の処理	
777-3	上限	下限	上限を超えた場合	下限未満となった場合	
Cu (wt%)	0.20	0.04	電中研式	外挿	
Ni (wt%)	1.10	0.50	外挿	外挿	
中性子照射量	10 × 1019	0.4 × 4019	商山田子	雨山田子	
 (n/cm ²)	10 × 10 **	0.1 × 1019	電中研入	電中研入	5

表6 テーブル(PWRの照射量ベース)範囲外の処理



1. 照射脆化予測式の検証

★ 三菱重工

7

(2) 確率論的評価における脆化予測式の検証

a. 確率変数のサンプリングの妥当性確認(1/2) 表7の条件で、上下限の範囲で正規分布の確率変数が設定されることを確認。

📫 発生させた確率変数の分布の妥当性確認

表7	確率変数の設定
<u>1X</u> (11年午友奴の設定

項目	分布形状	平均值 μ	標準偏差σ	打ち切り範囲
Cu (wt%)		0.12	0. 04	$\pm 2\sigma$
Ni (wt%)	正規分布	0.8	0.15	±2σ
$RT_{NDT0} + \Delta RT_{NDT} (^{\circ} \mathbf{C})$		0	$\sqrt{9.4^2 + 9.5^2}$	±2σ

※1 CuとNiの平均値は、JEACテーブルの中央値

※2 CuとNiの標準偏差は、JEACテーブルの範囲と±20の範囲が一致するように設定 ※3 RT_{NDT}の標準偏差は標準的解析要領の設定値



1. 照射脆化予測式の検証

(2) 確率論的評価における脆化予測式の検証

- a. 確率変数のサンプリングの妥当性確認(2/2)
 - 表10の条件で、PASCAL3においてRT_{NDT}を10⁵回出力
 - MHIツールにおいて、RT_{NDT}を10⁵回出力
- ➡ 上記のRT_{NDT}の分布を比較

表10 検証条件

項目	分布形状	平均値	標準偏差
Cu (wt%)		0. 12	0. 01
Ni(wt%)		0.8	0. 02
中性子照射量(n/cm ²)	正規分布	7 × 10 ¹⁹	9. 2 × 10 ¹⁸
RT _{NDT0} (°C)		-5	9.4
$\Delta \operatorname{RT}_{\operatorname{NDT}}(^{\circ}\operatorname{C})$		脆化予測の∆RT _{NDT}	9.5
中性子束(n/cm ² s)	田内は	6×10 ¹⁰	
中性子照射温度(℃)	固正10	288	_

※1 銅とニッケルの平均値は、JEACテーブルの中央値

※2 銅とニッケルとRT_{NDT}の標準偏差は標準的解析要領の設定値

※3 中性子照射量は10¹⁹~1.3×10²⁰の中間値で、標準偏差は平均の13.1%

1. 照射脆化予測式の検証

(2) 確率論的評価における脆化予測式の検証



表11 累積頻度とRT_{NDT}の比較(単位℃)

%tile	PASCAL3	MHIツール
0.1	42	42
1	54	54
5	64	64
50	88	88
95	114	114
99	124	124
99.9	134	134
99.99	144	144

99.99%程度まで、累積頻度が一致



🙏 三菱重工

11

★ 三菱重工

1. 照射脆化予測式の検証

(2) 確率論的評価における脆化予測式の検証

- b. 打ち切り範囲の設定による感度の確認
 - 確率変数の設定は表12とする。

- 打ち切り範囲を変更し、表13の条件で9ケースのRT_{NDT}の分布を比較する。
- 📫 標準的解析要領の打ち切り範囲(±5ơ)が結果に与える影響を確認する。

	表12 検証条件	
項目	平均値	標準偏差
Cu (wt%)	0. 12	0. 01
Ni(wt%)	0.8	0. 02
中性子照射 量f(n/cm ²)	7×10 ¹⁹	9. 2×10 ¹⁸
RT _{NDT0} (°C)	-5	$\sqrt{9.42 \pm 9.52}$
ΔRT_{NDT} (°C)	脆化予測の∆RT _{NDT}	V 311 T 310
中性子東 (n/cm ² s)	6×10^{10}	0
中性子照射 温度(℃)	288	—

赤	<u>表13 打ち切り範囲</u>							
ケース	Cu	Ni	RT _{NDT}					
1	±3σ	$\pm 5\sigma$	$\pm 5\sigma$					
2	±4σ	$\pm 5\sigma$	±5σ					
3	±5σ	±3σ	±5σ					
4	±5σ	±4σ	±5σ					
5	$\pm 5\sigma$	$\pm 5\sigma$	±3σ					
6	±5σ	$\pm 5\sigma$	±4σ					
7	$\pm 5\sigma$	$\pm 5\sigma$	±5σ					
8	±3σ	±3σ	±3σ					
9	打ち切り無し							

※確率変数が打ち切り範囲外となった場合 は打ち切り境界値の値を設定する。

12

★ 三菱重工

1. 照射脆化予測式の検証

b.



(2) 確率論的評価における脆化予測式の検証



- 図13 全ケースの累積確率の比較
- CASE1~9はほぼ一致し、±3σの打ち切り範囲でも確率変数の分布に大きな 違いはない。
- ⇒標準的解析要領の打ち切り範囲±5σは、十分に収束していると考えられる。

2. 破壊靭性と亀裂伝播停止靭性の検証

.★三菱重工

14

ロ 検証の対象

- 国内破壊靭性カーブ(ワイブル分布)
- 国内亀裂伝播停止靭性カーブ(国内対数正規分布)
 (脆化予測式はJEAC4201-2007(2013追補版)を使用)

□ 検証内容

- 検証条件は表14とする
- PASCAL3のK_{lc}とK_{la} (※)を出力する。
- MHIツールのKicとKiaを出力する。
- 📥 上記2つの出力値の確率変数の分布を比較することで、妥当性を確認

表14 検証条件

平均値	標準偏差
0.12	0. 01
0.8	0. 02
7×10 ¹⁹	9. 2×10^{18}
-5	9.4
脆化予測の	9.5
288	-
60	-
6×10^{10}	0
	平均値 0.12 0.8 7×10 ¹⁹ -5 脆化予測の ΔRT _{NDT} 288 60 6×10 ¹⁰

※PASCAL3においてK_{ia}は 亀裂発生時のみ計算され るが、検証においては亀裂 が発生しないときのK_{ia}も計 算し出力するように変更

打ち切り範囲

JEACテーブル範囲外の 値は境界値を設定





3. 応力拡大係数の検証

ロ 検証の対象

維持規格2008(2010年追補版)の添付E-5の式

- 口 検証内容
 - 負荷する応力分布は小LOCA条件を想定したもの(図20)
 - 亀裂の種類は表15の6種
 - PASCAL3とMHIツールで応力拡大係数Kを出力し比較





🙏 三菱重工



3. 応力拡大係数の検証

★三菱重工



(a) 周方向内表面半楕円亀裂(塑性域補正+クラッド効果あり)





3. 応力拡大係数の検証



(b) 軸方向内表面半楕円亀裂(塑性域補正+クラッド効果あり)













[2] Dickson, T. L., Williams, P. T., and Yin, S., Fracture Analysis of Vessels – Oak Ridge, FAVOR, v012.1, Computer Code: User's Guide, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2012/566, November, 2012, United States Nuclear Regulatory Commission ADAMs number ML13008A016.

- 20 -



Flaws in Reactor Pressure Vessels," PVP Vol. 250, ASME Pressure Vessels and Piping Conference, (1993) 77-

88.



● PASCAL3の維持規格式と電中研の式とFAVORのK値は±1%の精度で一致 → 内部亀裂に対して同等のK値を計算できると考えられる。

FAVORのK値の式: R.C. Cipolla, et al., Failure Analysis Associates, Computational Method to Perform the Flaw Evaluation Procedure as Specified in the ASME Code, Section XI, Appendix A, EPRI Report NP-1181, September, 1979

4. FAVORとの比較



30

(2) 条件付き破壊確率の比較(亀裂形状固定条件)

表24の条件で下記図の応力分布を与える条件で以下2つの値を比較

● PASCAL3の条件付き破壊確率(維持規格2008(2010年追補版))





脆化予測法

表24 比較条件(2/2)

3X= · 204X2X11 (=/=)						
項目	設定値					
容器内半径	1995mm					
容器厚さ	205mm					
クラッド厚さ	5mm					
亀裂種類	軸方向内部亀裂					
亀裂深さa	4.1mm					
亀裂長さ日	9.93mm					
亀裂位置d	82.4mm					
Cu	0.127wt%					
Ni	0.939wt%					
Р	0.012wt%					
Mn	1.505wt%					
中性子照射量	パラメータ					
中性子照射温度	288(°C)					
RT _{NDTO}	-15.4 (°C)					
過渡温度	60(°C)					
内圧	5.8(ksi)					
*FAVOR解析における1条件を抽出した設定値 31						

米国改正PTS規制の式



● FAVORとPASCALの条件付き破壊確率の差は小さい。 ⇒特定形状における条件付き破壊確率が同等の値となることを確認した。



- 照射脆化予測式の検証
 - 決定論の評価においてPASCAL3とMHIツールの計算値が一致することを確認
 - 確率変数を設定した条件でPASCAL3とMHIツールのRT_{NDT}の分布が一致する ことを確認
 - ±5σの打ち切り範囲を設定した条件では、打ち切りが無い場合とRT_{NDT}の確率 変数の分布に差がないことを確認

破壊靭性と亀裂伝播停止靭性の検証 2.

- 確率変数を設定した条件でPASCAL3とMHIツールのK_lとK_{la}の分布が一致 することを確認
- 応力拡大係数の検証 3.
 - PASCAL3(維持規格2008(2010年追補版)とMHIツールのKIが一致するこ とを確認
- FAVORとの比較 4.
 - ●応力拡大係数を比較し、PASCAL3のKがFAVORと同等の値となることを確認
 - 軸方向内部亀裂固定形状に対するPASCAL3とFAVORの条件付き破壊確率 の差は小さく、同等の結果を得られた。

3.3 株式会社 IHI による機能検証



確認方針

・第2回PASCAL-WGでJAEA/みずほ情報総研から紹介された方針を基本とする。
 ・確率変数

一定数サンプリングし、理論値との比較を実施する。

・評価フロー、評価式

事象を発生させる条件で解析を実施し、想定の結果となることを確認する。 結果を理論式による理論値と比較する。

<u>実施項目</u>

Copyright @2015 IHI Corporation All Rights Reserved.

検証①:条件付き き裂<mark>進展</mark>確率

検証②: 条件付き き裂停止確率

検証③: 条件付き き裂<mark>貫通</mark>確率

検証④: き裂進展停止判定、WPSの評価



<検証①~③> コードVer.: PASCAL3_source_3.4B 2015/10/30配布版 実行環境: SUSE Linux Server 10 SP4 (x86_64) コンパイラ: インテル(R) Fortran コンパイラー ifort 14.0.3 ルーチン名:検証した主なルーチン名 pfm.f 解析部分の制御ルーチン inichk.f き裂進展ループ実行判定 arrest.f き裂進展停止判定 skic.f き裂進展破壊靭性値Kicの算出 skia.f き裂停止破壊靭性値Kiaの算出

解析環境の検証: 解析事例D01~08、P01~15を実行→同様の結果 PASCAL-WG-2-3資料のケース1~3を実行→同様の結果 以上から検証を実施する実行環境、コンパイル方法に問題無い。

Copyright @ 2015 IHI Corporation All Rights Reserved.

IHI

Realize your dreams

3

4

検証の準備

入力ファイル作成用のExcelを作成 →入力フォーマット逸脱の防止 PASCAL3_source_3.4B対応 →diff で差分チェック



Copyright @2015 IHI Corporation All Rights Reserved.





検証方針:

計算経過を出力し、き裂進展/停止の確率と条件を検証する。(検証①②③④) →計算経過の出力:pfmファイルで出力設定 き裂進展:時間、RTNDT、K₁、K₁C、K₁a、き裂深さ、き裂長さ (itime, rtd, akid, akicd, akiad, a, b) き裂進展/停止フラグ:icflag, iflag, iflag0, nidflg, ni0flg

→進展確率の検証:き裂が進展するインプット条件の作成 進展フラグで進展有無を判定 iflag

サンプルサイズ:1000

									1910.233		
STEP	RTNDT	K, akid	Kic, akicd	K _{la} , akiad	а	b	icflag	iflag	iflag0	nidflg	ni0flg
1	98.4249	33.27089	79.36161	0	0.015	0.03	1	0	0	0	0
2	98.4249	39.66492	79.36161	0	0.015	0.03	1	0	0	0	0
3	98.4249	52.20223	79.36161	0	0.015	0.03	1	0	0	0	0
4	98.4249	67.73282	79.36161	0	0.015	0.03	1	0	0	0	0
5	98.4249	77.32386	79.36161	0	0.015	0.03	1	0	0	0	0
6	98.4249	89.68878	79.36161	0	0.015	0.03	0	1	0	1	1
6	97.90012	128.2746	79.36161	61.88956	0.017	0.03	0	1	0	1	1
6	97.37535	139.2002	79.36161	62.12895	0.019	0.03	0	1	0	1	1

き裂進展確率解析時の途中計算過程 出力例

Copyright @ 2015 IHI Corporation All Rights Reserved.





目的:

所定の応力条件におけるき裂進展確率を算出し、き裂進展確率が Kicの確率分布による理論値と整合しているかを検証する。

<u>入力データ:</u>

・P01_Standard.pasNを基に作成

・K1c以外のバラつきを0にする。

・荷重を増加させ、所定の荷重でき裂進展させる。

想定結果:

・所定荷重でのき裂進展確率は理論値と一致する。 ・KI>KIC条件でき裂進展する。

No.	K _{ic} モデル	分布	K _{ic} 標準偏差	K _{la} モデル	K _{la} 標準偏差
1-1	1 : ASME SectionXI下限曲線	正規分布	0.15	1 : ASME SectionXI下限曲線	0.1
1-2	1 : ASME SectionXI下限曲線	正規分布	0.3	1 : ASME SectionXI下限曲線	0.1
1-3	1 : ASME SectionXI下限曲線	正規分布	0	1 : ASME SectionXI下限曲線	0.1
1-4	8:国内ワイブル分布型	ワイブル	-	5: ORNLワイブル分布型	-
pyright @ 20	15 IHI Corporation All Rights Reserved.				7

検証①:条件付き き裂進展確率

IHI Realize your dreams

8

正規分布: ASME SectionXI下限曲線

ワイブル分布:国内ワイブル分布式

 $K_{Ic(p)} = \{-\ln(1-p)\}^{1/c(\Delta T)} b_2^{**}(\Delta T) + a_2^{**}(\Delta T)$ (使用手引き 式6-67) $a_2^{**}(\Delta T) = 13.2208 + 13.2584 \exp(0.0037(\Delta T))$ $b_2^{**}(\Delta T) = 17.2722 + 78.2050 \exp(0.0173(\Delta T))$ $c(\Delta T) = 2.9312 + 0.4722 \exp(0.0477 (\Delta T))$

→Kc算出サブルーチンskic.fで、上式が定義できていることを確認した。

Copyright @2015 IHI Corporation All Rights Reserved.





[→] K>K_{IC}でき裂進展した。(iflag=1が出力) _{Copyright @2013 IHI Corpora} → 一定値としたK_Iに対するK_{IC}の累積確率とき裂進展確率は対応した。

検証②:条件付き き裂停止確率

IHI Realize your dreams

9

IHI

Realize your dreams

<u>目的:</u>



No.	K _{ic} モデル	► _{IC} 標準偏差	K _{la} モデル	分布	► _{la} 標準偏差
2-1	1 : ASME SectionXI下限曲線	0	1 : ASME SectionXI下限曲線	正規分布	0.1
2-2	1 : ASME SectionXI下限曲線	0	1 : ASME SectionXI下限曲線	正規分布	0.2
2-3	9:JEAC4206-2007(1パス)	0	5: ORNL ワイブル分布型	ワイブル	-
2-4	9:JEAC4206-2007(1パス)	0	12: 国内対数正規分布型	対数正規	0.279
2-5	9:JEAC4206-2007(1パス)	0	12:国内対数正規分布型	対数正規	0.418

Copyright @2015 IHI Corporation All Rights Reserved.

対数正規分布

0.418

0.418

<u>正規分布: ASME SectionXI下限曲線</u>

 K_{Ia} = 29.5+1.344 exp[0.0261(T - RT_{NDT} + 89)]
 (使用手引き式6-28)

 T
 :温度(°C)

 RT_{NDT}
 :関連温度移行量(°C)

<u>ワイブル分布:ORNLワイブル分布式</u>

 $K_{Ia(p)} = \{-\ln(1-p)\}^{1/c(\Delta T)} b_2^{**}(\Delta T) + a_2^{**}(\Delta T)$ (使用手引き式6-35) $a_2^{**}(\Delta T) = 27.01396 + 16.8694 \exp(0.02275(\Delta T))$ $b_2^{**}(\Delta T) = 39.7791 + 0.119282(\Delta T)$ $c(\Delta T) = 2.5$

<u> 対数正規分布:国内対数正規分布型</u>

検証②:条件付き き裂停止確率

1

 $K_{Ia} = 34.87 + 42.97 \exp(0.0187 \times (T - RT_{NDT}))$ (使用手引き式6-66) $\Delta T = T - RT_{NDT}$ $\sigma_{log10}(K_{Ia}) = 0.121$

→Kla算出サブルーチンskia.fで、上の分布式が定義できていることを確認した。

Copyright @2015 IHI Corporation All Rights Reserved.

2-5

(PASCAL3_4B修正版) 0.9 0.8 0.7 0.6 0.5 0.4 0.3 正規分布 o=0.1 正規分布 g=0.2 対数正規分布 glog10(Kla)=0.121 ワイブル分布 正規分布 σ=0.1サンブル 0.3 正規分布 σ=0.2サンブル ワイブル分布 サンブル 0.2 対数正規 clog10(Kla)=0.182 対数正規 olog10(Kia)=0.121サンブル 対数正規 olog10(Kia)=0.182サンブル 0.1 0 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 K_{la} [MPavm] K1a 標準偏差 K1cモデル 分布 ンプル値 殳定値 0.099 2-1 1: ASME SectionXI下限曲線 正規分布 0.1 2-2 1: ASME SectionXI下限曲線 0.2 0.199 正規分布 5: ORNL ワイブル分布型 0.189 2-3 ワイブル _ 0.281 2-4 12:国内対数正規分布型 σ_{log10}(K_{la})=0.121 对数正規分布 0.279

・K_I < K_{Ia}でき裂停止した。(iflag=0)

12:国内対数正規分布型 σ_{log10}(K_{la})=0.182

Copyright © 2013 IHI Corporation All Rig ・ Ki(に対するKiaの累積確率と「き裂停止確率」は対応した。

11

IHI

Realize your dreams

IHI

検証③:条件付き き裂貫通確率

<u>目的</u>:

き裂貫通が判定された場合のサンプルが正しくカウントされ、 き裂貫通確率として正しく出力しているかを検証する。

き裂貫通判定

・き裂長さ、き裂進展フラグ

<u>想定結果</u>

・き裂深さが破壊クライテリアを超えた場合はき裂貫通とみなす。
 つまり、解析終了時のき裂長さは破壊クライテリア以下となる。
 ・貫通数カウントとPASCAL3破壊確率出力値が整合する。

No.	解析条件	貫通判定
3-1	一部のき裂が進展して貫通する	0.75t
3-2	一部のき裂が進展して貫通する	0.8t
3-3	すべてのき裂進展し、一部が進展停止、残りは貫通する	0.75t
3-4	すべてのき裂進展し、一部が進展停止、残りは貫通する	0.8t

Copyright @2013 IHI Corporation All Rights Reserved.

検証③:条件付き き裂貫通確率

0.168

E 0.16

で 0.156 酸 約 0.152

0.148

き裂貫通

・き裂進展フラグ 1



き裂進展停止

・き裂進展フラグ 0

Case3-3 算出値

Case3-4 算出値

Case3-3 貫通判定 0.75t Case3-4 貫通判定 0.8t

Copyright @2013 IHI Corporation All Rights Reserved.

13

IHI

Realize your dreams


検証の実施条件

コードVer.: PASCAL3_source_3.5A 実行環境: SUSE Linux Server 10 SP4 (x86_64) コンパイラ: インテル(R) Fortran コンパイラー ifort 14.0.3 ルーチン名:検証した主なルーチン名 pfm.f 解析部分の制御ルーチン inichk.f き裂進展ループ実行判定 arrest.f き裂進展停止判定 skic.f き裂進展破壊靭性値Kicの算出 skia.f き裂停止破壊靭性値Kiaの算出

プログラムの改変: →計算経過の出力:pfmファイルで出力設定 き裂進展:時間、RTNDT、KI、KIC、KIa、き裂深さ、き裂長さ (itime, rtd, akid, akicd, akiad, a, b) き裂進展/停止フラグ:icflag, iflag, iflag0, nidflg, ni0flg

Copyright @2015 IHI Corporation All Rights Reserved.

検証④:き裂進展・停止時の評価

IHI Realize your dreams

15

目的:

所定のき裂進展条件において、き裂が進展するかどうかを検証する。 プログラムの内部パラメータ「き裂進展開始フラグ」出力条件を確認する。 入力データの作成

・P01_Standard.pasNの温度、圧力データ、解析条件をベースとし、 温度低下後、K値が増加するような内圧の仮想条件で検討した。 ・すべてのサンプルでき裂が進展する条件で、き裂進展の条件を調査する。

想定結果

・KI>KICでき裂進展開始するが、WPSを考慮する場合は KI>KICであっても所定条件を満たさない限りき裂は進展しない。







サンプルサイズ:1000

17

IHI

Realize your dreams

IHI

Realize your dreams

				A		V2	
	領域①	領域2	領域③	領域④	領域⑤	領域⑥	領域⑦
K値	$K_{IC} > K$	$K_{max} > K > K_{IC}$	$K_{max} > K > K_{IC}$	$K_{IC} > K$	$K_{ace} > K > K_{IC}$	$K_{max} > K > K_{ace}$	K > K _{max}
Δκ	+	+	-	—	+	+	+
WPS 無し	0	198	326	0	268	191	17
WPS AK	0	198	0	0	594	191	17
WPS ACE	0	198	0	0	0	785	17
WPS Kmax	0	198	0	0	0	0	802

・いずれの条件においても、K>Kににおいてき裂は進展した。 ・所定の条件下においては、き裂が進展しないWPSが確認された。

Copyright @2015 IHI Corporation All Rights Reserved.

検証④:き裂進展・停止時の評価

4-1:WPS無し き裂情報の推移

1000サンプルの1例

icflag(き裂形状フラグ)

1: 半楕円き裂 iflag(き裂底部進展フラグ) 0: 進展なし 1: 進展あり

0:軸方向に長いき裂

領域	Step	き裂形状 フラグ icflag	き裂進展 フラグ iflag	Kı [MPa√m]	ΔK _ι [MPa√m]	K _{ic} [MPa√m]	備考
1	5	1	0	67.7	7.0	179.8	
0	20	1	0	107.6	1.1	179.8	
0	35	1	0	116.6	0.3	167.6	
3	50	1	0	118.4	0.0	135.3	← K _{max}
3	60	1	0	117.9	-0.1	123.1	
3	61	1	0	117.3	-0.6	118.5	
3	62	0	1	116.6	-0.7	114.5	

K_I > K_{IC}にて、き裂は進展開始。

· △K < 0 においても、き裂は進展開始。





4-2:WPS ΔK き裂情報の推移

					71⊞19	1000-	サンプルの1例
領域	Step	き裂形状 フラグ icflag	き裂進展 フラグiflag	Kı [MPa√m]	ΔK _i [MPa√m]	K _{ic} [MPa√m]	備考
1	5	1	0	67.7	7.0	179.8	
0	20	1	0	107.6	1.1	179.8	
0	35	1	0	116.6	0.3	167.6	
3	50	1	0	118.4	0.0	135.3	← K _{max}
4	70	1	0	50.2	-7.4	66.3	
4	75	1	0	25.9	-3.6	59.2	←K _{min}
5	76	1	0	56.5	30.6	63.0	
5	77	0	1	84.5	28.0	63.0	

・KI>KICにて、き裂は進展開始。

 $\cdot \Delta K < 0$ のとき、き裂は進展しない。

Copyright @2015 IHI Corporation All Rights Reserved.

検証④:き裂進展・停止時の評価

4-3:WPS ACE き裂情報の推移

00.0
 icflag(き裂形状フラグ)
0:軸方向に長いき裂
<u>Iflag(さ裂底部進展ノフク)</u> 0 ・進展なし。
■ 1:進展あり

1000サンプルの1例

1:半楕円き裂

iflag(き裂底部進展フラグ) 0: 進展なし 1: 進展あり

20

IHI

Realize your dreams

19

領域	Step	き裂形状 フラグ icflag	き裂進展 フラグ iflag	Kı [MPa√m]	ΔK _I [MPa√m]	K _{ic} [MPa√m]	備考				
1	5	1	0	67.7 7.0		179.8					
2	20	1	0	107.6	1.1	179.8					
0	35	1	0	116.6	0.3	167.6					
3	50	1	0	118.4	0.0	135.3	←K _{max}				
4	70	1	0	50.2	-7.4	66.3					
4	75	1 0	0	25.9	-3.6	59.2	←K _{min}				
5	76	1	0	56.5	30.6	63.0					
5	77	1	0	84.5	28.0	63.0					
6	78	0	1	113.0	28.6	62.6	K _{ace} = <mark>85.1</mark> MPa√m				
- k - Z	 K_I > K_{IC}にて、き裂は進展開始。 AK < 0 のとき き裂は進展しない。 0:軸方向に長いき裂 										

・ ΔK < 0 のとき、き裂は進展しない。

・KI < Kaceのとき、き裂は進展しない。

Copyright @2015 IHI Corporation All Rights Reserved.



4-4:WPS Kmax き裂情報の推移

		1000-	サンプルの1	例						
領域	Step	き裂形状 フラグ icflag	き裂進展 フラグ iflag	Kı [MPa√m]	ΔK _ı [MPa√m]	K _{ic} [MPa√m]	備考			
1	5	1	0	67.7	7.0	179.8				
0	20	1	0	107.6	1.1	179.8				
2	35	1	0	116.6	0.3	167.6				
3	50	1	0	118.4	0.0	135.3	← K _{max}			
4	70	1	0	50.2	-7.4	66.3				
4	75	1	0	25.9	-3.6	59.2	←K _{min}			
5	76	1	0	56.5	30.6	63.0				
5	77	1	0	84.5	28.0	63.0				
6	78	1	0	113.0	28.6	62.6	K _{ace} = 85.1MPa√m			
Ø	79	0	1	141.8	28.8	62.3	K _I > K _{max}			
 K_I > K_ICにて、き裂は進展開始。 · ΔK < 0 のとき、き裂は進展しない。 · K_I < K_{max}のとき、き裂は進展しない。 · K_I < K_{max}のとき、き裂は進展しない。 Copyright B2016 IHI Corporation AI Rights Reserved. Copyright B2016 IHI Corporation AI Rights Reserved. 										

検証④:き裂進展・停止時の評価

き裂停止の評価

目的:

所定のき裂停止条件において、き裂が停止するかどうかを検証する。 プログラムの内部パラメータ「き裂進展開始フラグ」出力条件を確認する。

入力データ

・検証②で使用したNo.2-1条件を用いて、評価する。 ・き裂は一旦進展後、停止する条件とする。

想定される動作

 K_{IC} > K_I 条件でき裂進展後、 Kla > Kl条件でき裂伝播停止。



IHI

Realize your dreams



		1000 ታ:	レプルの1例							
Step	き裂形状 フラグ icflag	き裂進展 フラグ iflag	Kı [MPa√m]	ΔK _i [MPa√m]	K _{ic} [MPa√m]	K _{la} [MPa√m]	備考			
1	1	0	0.0	1.0	61.0	0.0				
3	1	0	29.4	15.7	61.0	0.0				
5	1	0	52.9	7.8	61.0	0.0				
7	0	1	68.6	7.8	61.0	0.0	き裂進展開始			
7	0	1	90.8	22.2	61.0	47.5				
7	0	1	131.6	0.0	61.0	50.4				
7	0	1	119.8	-0.2	61.0	53.2				
7	0	1	56.1	-0.8	61.0	55.3				
7	0	0	54.6	-0.8	61.0	55.3	き裂伝播停止			
8	0	0	54.6	0.0	79.5	55.3				
・ K _l < K _{la} にて、き裂伝播停止した。										

Copyright @2015 IHI Corporation All Rights Reserved.

その他: (1) KIC、KIa評価式



23

1:半楕円き裂 iflag(き裂底部進展フラグ) 0:進展なし 1:進展あり

(1) K_{IC}、K_Ia評価式の推奨組合わせ 検証①②ではK_{IC}>K_Iとなる組合せとした。 K_{IC}, K_Ia評価式の組合せによっては、K_{IC}<K_Iとなる場合もある。



Copyright @2015 IHI Corporation All Rights Reserved.

その他:(2)破損時の解析条件出力

(2)K_{IC}、K_Ia評価式のシフト 確定論解析におけるK_{IC}、K_Iaのシフト量(ILIMTC,ILMITA)が 確率論解析においても使用できるようにならないか。

現状で、ユーザ定義式で表現可能ではあるが。

(3)破損時の解析条件出力 確率変数の解析条件一覧が出力できるようにならないか。 ソースコードを改変しなくともプログラムの妥当性確認が可能。 非現実的な解析条件での破壊確率を検証できる。

Copyright @2015 IHI Corporation All Rights Reserved.

まとめ

 (1)PASCAL3の機能について機能検証及び動作確認を実施し、以下の項目について 想定通り機能することを確認した。
 ①条件付き き裂進展確率
 ②条件付き き裂停止確率
 ③条件付き き裂停止確率

③条件付き き裂貫通確率 ④き裂進展停止判定、WPSの評価

(2) PASCAL3の機能について改良を提案した。

 (1) K_{IC}、K_{Ia}の推奨組合せ:非現実的な解析条件へのエラー表示
 (2) K_{IC}、K_{Ia}評価式のシフト:実験データ中央値からのバラつき評価
 (3)破損時の解析条件出力:解析の妥当性検証、破壊防止策の立案のため

Copyright @2015 IHI Corporation All Rights Reserved.



IHI

Realize your dreams

25

IHI

Realize your dreams

3.4 一般財団法人電力中央研究所による機能検証

PASCAL信頼性向上WG資料

電力中央研究所 材料科学研究所

I 電力中央研究所

C CRIEPI

III 電力中央研究所

目的および主な解析条件

【目的】破損に至るケースにおいて、各確率変数が現実的な値としてサンプリング されているかどうかを確認する.



C CRIEPI

I 電力中央研究所

その他の解析条件

主なパラメータ		条 件		
RT _{NDT} の初期値		− 12 °C		
中性子照射量		$9.0 \times 10^{9} n/cm^{2}$		
中性子束		$0.51 \times 10^{11} n/(cm^2 s)$		
		冬 供		
さ裂種類,配置万回	内部さき	袋(深さ比およびアスペクト比可変), 軸方向		
無限長き裂の応力拡大係数	JSME	推持規格 2010 年追補の式		
半だ円き裂の応力拡大係数	CEAの	元		
内部き裂の応力拡大係数	軸方向	き裂電中研式		
半だ円き裂の進展則	深さ,長	き方向にそれぞれ微小進展		
K _{la} の評価式	FAVOF	とV06.1 式(モデル 1)		
∆RT_{NDT}の評価式	JEAC4	201-2007_2013追補(シフト量を式により計算)		
各判定条件		条件		
表面き裂への変換		S < 0.4a		
無限長き裂への変換		a/c < 0.1		
破壊判定		a/t > 0.8		

CRIEPI

3

R電力中央研究所

確率変数

確率変数	条 件					
初期き裂深さ	指数分布(Marshall 分布, <i>λ</i> =0.16 mm), 階層別(80分割)					
初期アスペクト比	対数正規分布(μ= 1.366, σ= 0.538),階層別(25 分割)					
き裂深さ方向位置比	各き裂深さ比に対する入力(下表参照),階層別(5分割)					
破壞靱性値 K _{lc}	FAVOR V06.1式(ΔRT _{epistemic} が確率変数として与えられる)					
※各階層で10サンプル計算するので,全サンプル数は10 ⁵ (=80x25x5x10).						

80 分割
٨

بد	区間	存在確率										33
這個上	0.8-1.0	0.174876	0.03640	0.02898	0.02305	0.01831		0.0	0.0	0.0	0.0	1
向任	0.6-0.8	0.216714	0.03819	0.03144	0.02588	0.02131		0.0	0.0	0.0	0.0	
さ方	0.4-0.6	0.216820	0.03819	0.03144	0.02588	0.02131		2.65e-8	2.16e-8	1.75e-8	1.42e-8	
緊緊	0.2-0.4	0.216714	0.03819	0.03144	0.02588	0.02131		0.0	0.0	0.0	0.0	"
忙	0.0-0.2	0.174876	0.03640	0.02898	0.02305	0.01831		0.0	0.0	0.0	0.0	IJ
	指数分	布に 🦯	0.18739	0.15227	0.12374	0.10055		2.65e-8	2.16e-8	1.75e-8	1.42e-8	存在 確率
	従う存れ	车確率	0.0 - 0.00625	0.00625 - 0.0125	0.0125 - 0.01875	0.01875 - 0.025		0.475 - 0.48125	0.48125 - 0.4875	0.4875 - 0.49375	0.49375 - 0.5	区間
							き裂	設深さ比				

CRIEPI



- ✓ き裂深さ比によらず,内部き裂の内表面側エッジが表面近傍にあるサンプルが最終的に 破壊に至る(左図,黄).
- ✓ サンプリング時点で表面き裂に変換されたものは、ごく小さなき裂(中央図, 赤, 緑)を除き、ほとんど破壊に至る(右図, 赤, 緑).
- ✓ サンプリング時点で内部き裂と判定されたもののほとんどは破壊に至らず(中央図,黒), 解析中に内部き裂→表面き裂→破壊の過程を経るものは僅かである(右図,黒).
 © CRIEPI

- 39 -



内部き裂から表面き裂への変換判定: S<αa

8

✓ 内部き裂から表面き裂への変換判定が破壊確率に寄与していることがわかる.

α

C CRIEPI

I 電力中央研究所

9

まとめ

✓ 各確率変数のうち、初期き裂寸法および位置に着目して、現実的な値がサン プリングされているかどうかを調べた。

今回の解析条件では、サンプリングされた内部き裂の深さ比やアスペクト 比によらず、内部き裂から表面き裂へ変換されるか否かの判定条件が破 壊確率に大きく寄与していることがわかった。

✓ 応力拡大係数の計算に用いる応力分布に関するプログラムの流れを調べた.

PTS事象の初期段階では、内表面近傍は急峻で複雑な応力分布となるため、応力拡大係数を計算する際には、き裂近傍の応力分布を用いることが望ましい。PASCALでは板厚全体で正規化した3次多項式で応力分布を与え、その一部を用いて応力拡大係数を計算していることを確認した。

CRIEPI

3.5 茨城大学による機能検証

3.5.1 目的

Unit Test により PASCAL3 ソースプログラムの自動検証を行い、現状および今後の PASCAL3 ソースプログラムの信頼性を保証することを目的とする。

Unit Test とは単体テストのことであり、副プログラムごとの動作テストを示し、プロ グラムのデバッグや信頼性保障のための基本的な方法である。これをサポートするため のツールが Unit Test Framework であり、テスト自体をプログラムの要求仕様として用い ようとするのが、テスト駆動型開発(Test Driven Development: TDD)である。PASCAL3 プログラムはすでに Ver.3 に達しており、開発初期からの適用はできないが、現状の信 頼性保証、および Ver.4 に向けての開発に寄与することができると考える。

Unit Test のためのツールは様々な言語に対して開発されているが、そのほとんどはオ ブジェクト指向言語であり、Fortran を対象としたものは極めて少ない。その中で、機能 的に充実しているものとして、FRUIT[1]がある。これは、Ruby と Fortran95 で実装され ており、基本的には Fortran90 以降を対象としているので、そのままでは Fortran77 で記 述されている PASCAL3 には適用できない。ここでは、Ruby ファイルを一部書き換える ことにより、Fortran77 に対応させたバージョンを用いて、PASCAL3 プログラムの Unit Test をサポートするシステムを使用して、その適用性を調べることを目的とする。

3.5.2 FRUIT での Unit Test

FRUIT をインストールし、そのディレクトリ内にテスト用の作業ディレクトリを作成 する。その中に、テストしたいプログラムのソースを収めた src というディレクトリと テストの内容を収めた test というディレクトリを作成する。テストの実行をサポートす るツールとして rake (Ruby make)を使用している。それぞれのディレクトリ、および作 業ディレクトリに rakefile というファイルを入れておく。これらのファイルはテスト実 行を制御するものであり、基本的には変更の必要はない。

src ディレクトリにはテストしたいソースファイル(必要ならインクルードされるフ ァイルやデータファイル)を入れておく。test ディレクトリにテスト用のプログラムを 作成して入れておく。サンプルファイルがあるので、これを修正しておけば良い。FRUIT のユーティリティおよび自動実行に必要なプログラムは自動的に生成されるため、テス トを行いたいプログラムのみを作成すれば良い。



図 3.5.1: FRUIT ディレクトリ構造

テストは、サブプログラムの入力と出力のペアを用意し、サブプログラムの実行によ って得られた結果と得られるはずの値を比較することによって行われる。比較用のプロ グラムとして、論理値、整数値、実数値、文字列、配列の比較を行う以下のサブルーチ ンが用意されている。

call assert_true(1 == 1, "Boolean test")

call assert_false(1 == 1, "Boolean test fails")

call assert_equals(123, 123, "Integer equality")

call assert_equals(1.23, 1.23, "Double equality")

call assert_equals(1.23, 1.3, 0.1, "Double equality within a tolerance")

call assert_equals("abc", "abc", "String equality")

call assert_equals(a, b, 3, 2, d, "2D array equality within a tolerance")

3.5.3 サンプル

簡単なプログラムのテストの例を示す。

・テスト対象ファイル (src ディレクトリ内に格納する)

sample.f (add_integer ではおかしな値になるように細工してある) subroutine add_integer (a, b, output) integer a, b, output output=a+b if (output == 0) output = output + 777 !error to be detected return end subroutine add_real (a, b, output) real a, b, output output=a+b return end

return end

othersample.f

subroutine twice (a, output) integer a, output output=2*a return end subroutine circle (a, output) real a, output output=3.14*a

```
    テスト記述ファイル

sample test.f90
     module sample_test
       use fruit
     contains
       ! setup before all
       ! setup = setup_before_each
       subroutine setup
       end subroutine setup
       ! teardown_before_all
       ! teardown = teardown before each
       subroutine teardown
       end subroutine teardown
       subroutine test_sample_should_produce_4_when_2_and_2_are_inputs
          use sample, only: add
     I
          integer:: result
          call add integer (2,2,result)
          call assert_equals (4, result)
       end subroutine test_sample_should_produce_4_when_2_and_2_are_inputs
       subroutine test fruit multiple cases
          use sample, only: add
     !
          integer:: result
          !FRUIT SPEC
                           Spec string may given as Fortran's "comment" line.
          call add integer (0,0,result)
          call assert_equals (0, result, "message shown when assertion fails")
          call assert equals (0, result)
          call add integer (1,2,result)
          call assert_equals(4, result, "Error in test. It asserts 1+2 should be 4.")
          call add_integer (1,0,result)
          call assert_equals (1, result)
       end subroutine test fruit multiple cases
       subroutine test_more_with_spec_in_spec_variable
     !
          use sample, only: add
          !The following variable "spec" is not used within fortran.
          !It's parsed by fruit processor.
```

```
!Fortran compiler will complain that this variable is unused.
    character(len=*), parameter :: spec = 'calculation should produce 4.0&
     & when 2.0 &
     &and 2.0 &
     &are inputs'
    real:: result. a. b
    a=2.0
    b=2.0
    call add_real (a,b,result)
    call assert_equals (4.0, result)
  end subroutine test_more_with_spec_in_spec_variable
end module sample test
```

ここで、テスト記述ファイルのファイル名と module 名は一致させる必要がある。 サブル ーチン setup と teardown は作業用のサブルーチンであり、必要であれば、ここに何か記 述する。(ここでは、何もしない)

テストのためのサブルーチンが3つ用意してある。名前や内容は自由にして構わない。 基本的には、テストしたいサブルーチンを適切に呼び出し、その実行結果と期待される 値と比較を行う。そのために、FRUIT で用意されている各種の assert サブルーチンを使 用している。テストに合格すれば何も出力されないが、失敗するとその結果が出力され る。以下にこの例での出力を示す。

Test module initialized

. : successful assert, F : failed assert

```
..running test: test_another_module_module_can_be_in_other_directories
   ..running test: test including one failure
F
  Un-satisfied spec:
  -- including one failure
..running test: test another module module can be in another directories
```

Un-satisfied spec:

-- Spec string may given as Fortran's "comment" line.

..running test: test_more_with_spec_in_spec_variable

```
Start of FRUIT summary:
```

Some tests failed!

-- Failed assertion messages:

[test_including_one_failure]:Expected [0], Got [777]; User message: [0+0 should be 0] [test_fruit_multiple_cases]:Expected [0], Got [777]; User message: [message shown when assertion fails] [test_fruit_multiple_cases]:Expected [0], Got [777] [test_fruit_multiple_cases]:Expected [4], Got [3]; User message: [Error in test. It asserts 1+2

should be 4.] -- end of failed assertion messages.

Total asserts : 10

Successful Failed	:	6 4		
Successful ra	te:	60.00%		
Successful a Successful c end of F	sser ases RUI1	ts / total asserts : [/ total cases : [ſ summary	6 / 5 /	10] 7]

実行中、失敗したテストは F で、成功したテストは.で表示され、失敗するとその詳細が 示される。最後にテストのサマリが示されている。ここの例では、7つのテストサブル ーチン内で10の assert が呼び出され、それぞれ5つ、6つのケースが成功している。

3.5.4 PASCAL ソースファイルの検証例

今年度は PASCAL プログラムのソースの一部を用いて、FRUIT が適用可能であるかど うかを検証する。サンプルとして、応力拡大係数を重み係数を用いて算出するサブルー チン kanto.f を例として取り上げる。Pascal のソースファイルの以下の2つである。

```
kanto.f
  ***** kanto: 関東式を用いた応力拡大係数の算出 *****
С
      subroutine kanto(a,b,bstrs,ipos,aki)
      implicit real*8(a-h,o-z)
      dimension bstrs(1:4)
      include 'common.h'
      xi=1.0d0-dsqrt(1.0d0-a/THICK)
      abc=a/b
      f1=0.0d0
      do 10 i=0,2
      do 10 j=0,2
         f1=f1+gk(ipos,i,j)*xi**dble(i)*abc**dble(j)
   10 continue
      q=1.0d0+1.464d0*abc**1.65d0
      aki=(bstrs(1)+bstrs(2))*dsqrt(pi*a/q)*f1
      return
      end
kantst.f(係数を設定するサブルーチン)
  ***** kantst: 関東式のパラメータセット *****
C
      subroutine kantst
      implicit real*8(a-h.o-z)
      include 'common.h'
      gk(1,0,0) = 0.287026d0
      gk(1,0,1) = 0.773799d0
      gk(1,0,2)=-0.0226018d0
      gk(1,1,0) = 1.225600d0
      gk(1,1,1)= 1.302010d0
     gk(1,1,2)=-1.429360d0
      gk(1,2,0)= 0.279154d0
      gk(1,2,1)=-2.620830d0
     gk(1,2,2)= 1.824190d0
    <中略>
      gk(4,0,0) = 0.862347d0
      gk(4,0,1) = 0.313731d0
```

 $\begin{array}{l} gk(4,0,2)=-0.206164d0\\ gk(4,1,0)=0.387558d0\\ gk(4,1,1)=-5.257410d0\\ gk(4,1,2)=2.613180d0\\ gk(4,2,0)=-1.745840d0\\ gk(4,2,1)=4.640630d0\\ gk(4,2,2)=-2.369910d0\\ \end{array}$

return end

さらに、上記のプログラムで使用されるデータを設定するためのサブルーチンを新たに 作成し、test フォルダに置いた。ここでは、板厚(THICK)と円周率(pi)を設定するだ けである。

setdat.f(必要なデータを設定するサブルーチン) subroutine setdat include 'common.h' THICK = 0.2050d0 pi = 4*atan(1.d0) end

ここまでの準備の後、テスト用のプログラム pfm_sample_test を以下のように設定した。 言語は Fortran90 である。ここで、サブルーチン setup はそれぞれのテストの前に自動的 に呼ばれるもので、テストの準備を行う。ここでは、先ほど定義したサブルーチン setdat を呼び出すのに使用している。もう一つの自動的に呼ばれるサブルーチン teardown はテ ストが終わった後に自動的に呼ばれるもので、ここでは、出力以外は必要ないので何も 行っていない。最後のサブルーチン test_kanto がテストの本体である。ここでは、まず、 係数を設定するサブルーチン kantst を呼び出し、その後、応力値を設定している。次に、 半楕円表面亀裂の亀裂深さを 0.01m、亀裂長さを 0.03m、ipos=2 としてサブルーチン kanto を呼び出している。結果の応力拡大係数は変数 result に格納される。その次の行で、正 解値(の近似値) 0.17 と結果との比較を行っている。ここでは、誤差を 0.01 以内、0.001 以内の 2 通りで比較を行っている。最後の文字列"Fail for sif in Kanto"は比較が失敗した 時に出力させるメッセージである。成功した場合には、何も出力されない。

pfm_sample_test.f90(テストを定義するファイル) ! Copyright (c) 2005-2010, 2012-2013, Andrew Hang Chen and contributors, ! All rights reserved. ! Licensed under the 3-clause BSD license. module pfm_sample_test use fruit contains ! setup_before_all ! setup = setup_before_each

subroutine setup print *, "Initialization of PFM program" call setdat end subroutine setup ! teardown_after_all ! teardown = teardown_after_each subroutine teardown print *, "Tear_Down for PFM program" end subroutine teardown

subroutine test_kanto
double precision :: result
double precision :: bstrs(4)

call kantst
bstrs(1) = 1.0d0
bstrs(2) = 0.0d0
call kanto(0.01d0,0.03d0,bstrs,2,result)
call assertEquals (0.17d0, result, 1.0d-2, "Fail for sif in Kanto")
call assertEquals (0.17d0, result, 1.0d-3, "Fail for sif in Kanto")

end subroutine test_kanto

end module pfm_sample_test

以下に、このテストを実行した時の出力を示す。最初のテストでは、誤差が 0.01 以内で あったので、比較は成功し、出力はピリオド'.'のみとなっている。次のテストで失敗し たため、'F'が出力されている。失敗した時のメッセージが上記のプログラムで指定した メッセージとともに出力されている。最後に、サマリーが出力され、2つのテストのう ち、1つが成功、1つが失敗のため、50%の成功率である、ということがわかる。

Test module initialized

. : successful assert, F : failed assert

Initialization of PFM program ..running test: test_kanto .F Un-satisfied spec: -- kanto

Tear_Down for PFM program

Start of FRUIT summary:

Some tests failed!

-- Failed assertion messages: [test_kanto]:Expected [0.1700000000000001], Got [0.16695412890648242]; User message: [Fail for sif in Kanto]

-- end of failed assertion messages.

Total asserts : Successful : Failed :	2 1 1		
Successful rate:	50.00%		
Successful assert Successful cases end of FRUIT	s / total asserts : [/ total cases : [summary	1 / 0 /	2] 1]

ここでは、テストの例として、非常に簡単な場合を挙げて説明を行った。実際のテス

トでは、データファイルからの入力が必要であり、データに応じた正解を与えておく必要がある。

3.5.5 まとめ

ここでは、プログラムを構成する部品が正しく機能しているかを検証するためのユニ ッットテストの適用法を PASCAL の一部のサブプログラムを対象として記述した。

実際のプログラムの検証は、様々なレベルで多数行われるため、一つ一つのテストを 手作業で作成していくことは、非常にコストがかかる。また、一つの検証で非常に多く の出力が得られているため、これらのデータを Unit Test として整備することをサポート するツールの開発が必要であると考えられる。入力パラメータと出力が、例えばエクセ ルファイルで与えられた場合、これを上述のテストプログラムとして生成するツールで ある。

将来的には、幾つかのテストモジュールを作成し、プログラムの修正が行われるたび に、該当モジュールのテストを行い、また定期的に全モジュールのテストを行って、プ ログラムの信頼性を担保することが望ましい。理想的には、すべての副プログラムのす べての機能のテストを行うことが望ましいが、そのコストは膨大なものとなる。取り入 れている開発者の経験上、80%のカバー率で有効であるとの報告がある。

[参考文献]

[1] FORTRAN Unit Test Framework (FRUIT), http://sourceforge.net/projects/fortranxunit/, (参照: 2016 年 3 月 25 日).

[2]テスト駆動開発とは何か、それを気に入っているのは何故か、あなたも使うべきなのは何故か, http://postd.cc/test-driven-development/, (参照: 2016年3月25日).

3.6 長岡技術科学大学による機能検証

設定条件

使用プログラム:PASCAL3_6 圧力容器 ・3ループ・内径:1994 [mm]・肉厚:206 [mm] (クラッド厚も含む) ・クラッド:6 [mm] 運転温度 288 [°C] 過渡事象 ·JEAC SBLOCA HTC 21411 [W/m²K] ·JEAC LBLOCA HTC 21411 [W/m²K] ·JEAC MSLB HTC 17819 [W/m²K] ・条件1: 表面半楕円き裂 初期欠陥 ·条件2: 内部欠陥 欠陥位置 軸方向、溶接金属中 Cu: 0.12 [%]、Ni: 0.56 [%]、P: 0.01 [%]、Si: 0.25 [%] 化学成分 非破壊検査 考慮しない 条件1:表面半楕円き裂 model A、B、C、D 条件2:内部欠陥 model A、B、C 進展モデル JEAC4201-2007 脆化予測式 条件1 考慮あり、考慮なしの2パターン 高温予荷重(WPS) 条件2 考慮なし 条件1: 0.5、1、3、7 [x10¹⁹n/cm²] 条件2: 0.5、1、3、7 [x10¹⁹n/cm²] 中性子照射量

き裂進展モデル

繰り返し収束数

表面半楕円き裂

250回

内部欠陥

	き裂進展方向	進展前	進展後	
±≓ II.A	長さ方向			進展判定は行わない
C / IVA	深さ方向	\mathbf{v}		進展した場合は無限長き裂
T ≓ µ 0	長さ方向	••		進展した場合は微小進展
ET NG	深さ方向			進展した場合は微小進展

	き裂進展方向	進展前	進展後	
	内面方向) O	進展した場合は微小進展
モデルA	外面方向	0 →) O	進展した場合は微小進展
	長さ方向			進展した場合は微小進展
	内面方向	1 0		進展した場合は反楕円き裂
モデルB	外面方向	Q ↓	Ô	進展した場合は微小進展
	長さ方向			進展した場合は微小進展
	内面方向) O	進展した場合は微小進展
モデルC	外面方向	Ģ	Ô	進展した場合は微小進展
	長さ方向			進展判定は行わない

2



・model Aとmodel Cの破壊確率がほぼ同じである。

・model Aとmodel Cのき裂進展確率はほぼ同じである。



model Aの破壊確率が最も高い。

・model Aとmodel Cのき裂進展確率はほぼ同じである。



model Aの破壊確率が最も高い。

・model Aとmodel Cのき裂進展確率はほぼ同じである。



model Aの破壊確率が最も高い。

・model Aとmodel Cのき裂進展確率はほぼ同じである。



model Aの破壊確率が最も高い。

・model Aとmodel Cのき裂進展確率はほぼ同じである。





9

model Aの破壊確率が最も高い

model B及びmodel Cの破壊確率は同じ挙動をする。

・低照射量時ではmodel B、高照射量時ではmodel Aの破壊確率が最も大きくなる。



・model A及びmodel Cの破壊確率はほぼ同じである。

・低照射時のみmodel Bの破壊確率がその他のmodel A、 Cよりも大きくなっている。





・model Aとmodel Cの破壊確率がほぼ同じである。

model Aとmodel Cの破壊確率が最も高い。

11

まとめ



・LBLOCA、MSLB、SBLOCAの全条件でmodel Aの破壊確率が最も高くなる。

・表面半楕円き裂の各過渡条件においてmodel A及びmodel Cのき裂進展確率がほぼ同じである。

	過渡条件	WPS	破壊確率が最も大きいモデル		
表面半楕円き裂	LBLOCA		Model A		
	MSLB	No WPS	Model A		
	SBLOCA		Model A		
	LBLOCA		Model A		
	MSLB	WPS	Model A		
	SBLOCA		Model A		
内部欠陥	LBLOCA		Model A		
	MSLB	No WPS	Model B		
	SBLOCA		Model A or Model C		

各条件まとめ

3.7 事務局による機能検証



内圧を考慮した応力拡大係数

1

2



応力拡大係数(1/4)

- 応力分布、及び亀裂寸法等から応力拡大係数が正し く計算されていることを確認する。
- > 内表面亀裂の場合は、亀裂面の内圧が考慮された 上で応力拡大係数が計算されていることを確認する。
- ▶ 塑性域補正が考慮されていることを確認する。



- 表面亀裂に対する内圧の影響

 - が加えて、「内圧と応力分布を個別に入力した場合」と、「内圧はゼロとして、内圧相当 分を応力分布の0次項に加算した場合」とで結果が一致することを確認した。(下 図)





応力拡大係数(4/4)

5

- ▶ 塑性域補正
 - ✓ 亀裂寸法を固定した場合の応力拡大係数に対し、塑性域補正を考慮した結果が、 Microsoft Excel[®]とPASCAL3の2つの方法で一致することを確認した。(下図)



高温予荷重効果



PASCAL3のWPS

- ▶ WPSを考慮する機能は次の3つから選択可能である。
 - ✓ Kıが減少中(dK/dt<0)の場合には亀裂が進展しない。
 - Kiが式で求めるK_{FRAC}を超えない場合には亀裂が進展しない(<u>ACE</u> <u>モデルを追加</u>)。
 - ✓ 過去のKIの最大値(KI max)を超えない場合には亀裂が進展しない。



PVP2015-45103 (ACEモデル)

8

7

ACEモデルでは、KIが以下の式で求めるKFRACを超えない場合に は亀裂が進展しない。





表面亀裂の応力拡大係数



4. まとめ

国内での確率論的手法の活用を念頭に置き、開発機関以外の当該分野に関する専門家の下で、PASCALの信頼性を向上させることを目的として、ソースコードレベルでの機能検証を行う「PASCAL 信頼性向上 WG」を設置した。

本 WG では、各機関が独自に機能検証に関する実施項目を決定し、それぞれ独自の方 法により機能検証作業を実施した。機能の検証作業や結果は記録を残すとともに、WG 会合で報告し、他機関によるレビューを受けた。

各機能について、ソースコードレベルで検証した結果、PASCAL に実装されているほぼ全ての機能について問題のないことを確認した。機能検証及び検証結果に関する WG 会合によるレビューを通じて、PASCAL の信頼性の向上を実現した。

参考文献

- 社団法人日本電気協会,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.
- (4) 真崎浩一他,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,JAEA-Data/Code 2010-033, 2011, 350p.
- Williams, P.T. et al., Fracture Analysis of Vessels Oak Ridge FAVOR, v12.1, Computer Code : Theory and Implementation of Algorithms, Methods, and Correlations, ORNL/TM-2012/567, 2012, 271p.

付録

A. 機能検証に使用した入力データ

本付録では、本文中に記載した各機関の機能検証に使用した PASCAL3 の入力データ を示す。

A1. 三菱重工業による機能検証に使用した入力データ





35

添付資料(検証インプット)

★ 三菱重工

照射脆化予測式検証用チェックライト抜粋

				中性子照射量	中性子束	Cu成分	Ni成分	⊿RTNDT	初期温度	バラツキ	
				f	phi	сор	ani	drtndt	rtmed	rtsigd	
rtndt2	1 ****	1	1	7.00E+19	6.00E+10	3.00E-02	5.00E-01	4.44E+01	-5.00E+00	1.0734-307	
rtndt2	1 ****	1	1	7.00E+19	6.00E+10	4.00E-02	5.00E-01	4.82E+01	-5.00E+00	7.3137-308	
rtndt2	1 жжжжже	1	1	7.00E+19	6.00E+10	8.00E-02	5.00E-01	6.71 E+01	-5.00E+00	2.5893-202	
rtndt2	1 жжжжж	1	1	7.00E+19	6.00E+10	1.30E-01	5.00E-01	8.73E+01	-5.00E+00	1.6632-201	
rtndt2	1 жжжжж	1	1	7.00E+19	6.00E+10	1.70E-01	5.00E-01	9.93E+01	-5.00E+00	7.2199-202	
rtndt2	1 ****	1	1	7.00E+19	6.00E+10	2.20E-01	5.00E-01	1.11 E+02	-5.00E+00	3.0996-202	
rtndt2	1 ****	1	1	7.00E+19	6.00E+10	1.50E-01	4.00E-01	9.00E+01	-5.00E+00	2.5893-202	
rtndt2	1 ***	1	1	7.00E+19	6.00E+10	1.50E-01	5.20E-01	9.43E+01	-5.00E+00	2.2756-201	
rtndt2	1 жижник	1	1	7.00E+19	6.00E+10	1.50E-01	6.50E-01	9.93E+01	-5.00E+00	5.9230-308	

各値をケース条件と照合



添付資料(検証インプット)

★三菱重工

37

- (2) 確率論的評価における脆化予測式の検証
- a. 確率変数のサンプリングの妥当性確認(2/2)
 2項 破壊靱性計算の出力 T-RT_{NDT}を流用

MHIツールは、以下のSTEPで計算

 STEP1: 乱数発生プログラムにより 確率変数を設定(10⁵回分)
 STEP2: JEAC4201-2007_2013追補版(データテーブル補間) プログラム および電中研式により △RT_{NDT}を計算
 STEP3: (T-RTNDT) を読み込み 破壊靱性計算実施(2項で使用)

添付資料(検証インプット)

🙏 三菱重工

(2) 確率論的評価における脆化予測式の検証 b. 打ち切り範囲の設定による感度の確認

入力データ例 (case1)

crack	k te	est								
#FLAG										
0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	
0	1	11	0	20	20	0	15	17	31	
1	2	8	12	13	0	0	0	0		
0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	
0	0									
#VESSEL										
0.20	000	2.	000		7.0		0.0	0.	005	
:	288		0							
#CRKFIX										
0.0	020	0.	020							
#DRTCRI	EPI									
6.000	d10	28	8.0							
#MATRAL										
2.10	0e5		0.3	2	5.0		9.4		9.5	
	5	0	0.12	(0. 01		0.09		0.15	Case 199
(0.8	0	0. 02	C	0.70	1	0.90	0.	016	う 調の言有重
0.0	002	0.	010	0.	022	1	0.20	(0.02	平均、標準偏差、打ち切り(30
0.	14	0	0. 26	C	0.00		5	0. 2	2786	
	5	0.	131		220		500			
#TRANS										
100	0.0	3	8. 00		0		2.00		1.0	0.12
1										
100	0.0									
#TEMD										

39

🙏 三菱重工

添付資料(検証インプット)

2. 破壊靭性と亀裂伝播停止靭性の検証


		<i>л</i> ц
KIC	書き出し部分	KIA書き出し部分
c & & & & & & & & & & & & & & & & & & &	を製造展ループ実行制定 +++ ioflagdam = ioflag call iniob&(titme, astart.b.bstart.ss.rtd,	call arrest(itime, a.start, b.bstart, sa, \$ rtd, rt0, rt22, iffag, iffag, iffagd2, \$ akid2, akid2, akid0, akid0, akid0, akid0, \$ akid2, akid2, akid2, akid2, \$ akiagd, akid2, akid2, \$ akiagd, akid2, akid2, \$ akiagd, akisg0, akisg12, \$ akiagd, akisg0, akisg12, \$ akid0, akis00, akisg2, \$ akid0, akis00, akisg2, \$ akid0, akis00, akid20, ak
writ 1117 form	Huoflux =FLUEC/DRCFLUX te(117, 1117) f/fluoflux. f.cop. ani, rtsigd ut(`&inc tirrad = 288.000, phi = ', lpel4.5,', fluence =', 14.5 ; coccept = ibel4.5 ; incks = ibel4.5 ; incem ='	

41

添付資料(検証インプット)

★ 三菱重工

2. 破壊靭性と亀裂伝播停止靭性の検証

チェックライト出力例

KIC

					a	Ь		f	drtd	rtd	K	KIC	T-rtndt
K1C_最深部	1	1	1	1	2.00E-02	2.00E-02	1.6127-312	6.89E+19	9.41E+01	9.41E+01	7.90E+01	7.40E+01	-3.41E+01
K1C_最深部	1	1	1	2	2.00E-02	2.00E-02	1.6127-312	7.99E+19	9.89E+01	9.62E+01	7.90E+01	7.05E+01	-3.62E+01
K 1C_最深部	1	1	1	3	2.00E-02	2.00E-02	1.6127-312	6.71E+19	9.57E+01	1.21E+02	7.90E+01	5.12E+01	-6.10E+01
K1C_最深部	1	1	1	4	2.00E-02	2.00E-02	1.6127-312	6.27E+19	9.41E+01	7.84 E+01	7.90E+01	1.06E+02	-1.84E+01
K 1C_最深部	1	1	1	5	2.00E-02	2.00E-02	1.6127-312	6.50E+19	9.12E+01	8.71E+01	7.90E+01	4.54E+01	-2.71E+01
K1C 最深部	1	1	1	6	2.00E-02	2.00E-02	1.6127-312	7.08E+19	9.78E+01	7.56E+01	7.90E+01	5.50E+01	-1.56E+01
K1C_最深部	1	1	1	7	2.00E-02	2.00E-02	1.6127-312	6.00E+19	9.15E+01	6.71E+01	7.90E+01	1.34E+02	-7.10E+00
K1C_最深部	1	1	1	8	2.00E-02	2.00E-02	1.6127-312	7.61E+19	8.97E+01	8.10E+01	7.90E+01	6.87E+01	-2.10E+01

T-RT_{NDT}は Excel上で計算

KIA

					a	ь		drtd	rtd	К	KIO	KIA			T-rtndt
K1AK	1	1	1	1	2.20E-02	2.00E-02	1.6127-31	9.41E+01	9.41E+01	1.47E+02	7.40E+01	5.20E+01	4.11E-01	4.11E-01	-3.41E+0
K1AK	1	1	1	2	2.20E-02	2.00E-02	1.6127-31	9.89E+01	9.62E+01	1.47E+02	7.05E+01	4.97E+01	3.69E-01	3.69E-01	-3.62E+0
K1A_K	1	1	1	3	2.20E-02	2.00E-02	1.6127-31	9.57E+01	1.21E+02	1.47E+02	5.12E+01	3.74E+01	2.11E-01	2.11E-01	-6.10E+0
K1AK	1	1	1	4	2.20E-02	2.00E-02	1.6127-31	9.41E+01	7.84E+01	7.73E+01	1.06E+02	7.39E+01	7.20E-01	7.20E-01	-1.84E+0
K1A_K	1	1	1	5	2.20E-02	2.00E-02	1.6127-31	9.12E+01	8.71E+01	1.47E+02	4.54E+01	3.40E+01	2.61E-02	2.61E-02	-2.71E+0
K1A.K	1	1	1	6	2.20E-02	2.00E-02	1.6127-31	9.78E+01	7.56E+01	1.47E+02	5.50E+01	4.03E+01	4.63E-02	4.63E-02	-1.56E+0

T-RT_{NDT}は Excel上で計算 KIAは 進展後形状に対して計算

添付資料(検証インプット)		★三菱重工

3. 応力拡大係数の検証の検証

入力データ例(半だ円亀裂及び無限長亀裂)

#TITLE crack	k t	est		軸方	方向,周	方向	の選択	e 1	クラット	² 有 JSME簡易法軸・周の選択 / 無限長用,半だ円用
#FLAG	1	1	1	0	1	0	1	1	8	,朔性博建正有
ō	1	11	ŏ	20	20	ō	37	37 4	31	ELAMET
1	3	8	5	11	0	0	0	0	/	
100	0	0	0	0	0	0	0	1114	0	板厚と容器半径の設定
0	0					335				クラッド分を考慮
#VESSEL				4	_					
0. 2	050	1.	995		10.0		0.0	0.	005 ←	―― クラッド厚
	288		0			**	1 II 6 44 /	D10-		
#CRKFIX					-	201		(0/2)		
0.0	041	0.0	205	K		1/KC	, RC	(6/2)		
#TRANS										
10	0.0	3	. 00		0		2.00		1.0	0.8
1										
10	0.0									
#PSSYDT										
2										
-		0.0		1	800 0	-			容器	降伏応力
	5	00.00		-	300.0					
2										
		0.0		1	250.0	-			クラット	《降伏応力
	5	00.0		1	250. 0					
#FINIT										
99	9.0		1.0		0.1	-	1.0			
							-	_	半だ円	き裂で a/eが小さい場合
									無限さ	剥として扱われる そのしきい値

43

添付資料(検証インプット)

★ 三菱重工

3. 応力拡大係数の検証の検証



添付資料(検証インプット)

🙏 三菱重工

4. FAVORとの比較

(1)応力拡大係数の比較



45

★ 三菱重工

添付資料(検証インプット)

4. FAVORとの比較

(1)応力拡大係数の比較





47

🙏 三菱重工

添付資料(検証インプット)

FAVORとの比較
 (2)破壊確率の比較

米国改正PTS規則の脆化予測法使用時に初期RTNDT+RTNDTに加味されるバラツキを強制的になくして比較するための修正

ソース	errtn.f	(csigma.fで呼ばれる)	103-105行目をコメント	
if (ccc ccc & ccc & en if (c end	(IKIC.eq. all rando rtsigd rtsigd d if (IKIA.eq all rtarre d if	7) then m(ddumPhid) = -29.5d0+78.0d0* (-dlog(1.0d0-ddumPhid))*4 = -rtsigd/1.8d0 7.or.IKIA.eq.8) then sst(ddumPhid, RTMED, rtsi	*(1.0d0/1.73d0) gda)	

A2. IHI による機能検証に使用した入力データ

添付資料(検証①:条件付き き裂進展確率)



入力データの作成(例 検証No.1-1)



添付資料(検証①:条件付き き裂進展確率)

入力デ	一タの作	⊑成(例)					
#S1	RS3D					늘	き裂進展後停止させない
2	1					+	-め暄広力を設定
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
	1.0	0.0	0.0	0.0	100.0		
	2.0	0.0	0.0	0.0	200.0		
	3.0	0.0	0.0	0.0	253.4	← 1% ¯]
	4.0	0.0	0.0	0.0	293.2	← 5%	
	5.0	0.0	0.0	0.0	314.4	←10%	
	6.0	0.0	0.0	0.0	340.1	←20%	
	7.0	0.0	0.0	0.0	358.7	←30%	
	8.0	0.0	0.0	0.0	374.5	←40%	ボウのキ列准屈頼変
<u>Kic中央值</u>	9.0	0.0	0.0	0.0	389.3	←50%	「加定のさる進展確率」
	10.0	0.0	0.0	0.0	404.1	←60%	確率に相当する何重
	11.0	0.0	0.0	0.0	419.9	←70%	
	12.0	0.0	0.0	0.0	438.4	←80%	
	13.0	0.0	0.0	0.0	464.1	←90%	
	14.0	0.0	0.0	0.0	485.3	←95%	
	15.0	0.0	0.0	0.0	525.1	←99% _	J
	16.0	0.0	0.0	0.0	600.0		
	17.0	0.0	0.0	0.0	700.0		
	18.0	0.0	0.0	0.0	800.0		
	19.0	0.0	0.0	0.0	900.0		
Copyright @2015 IHI	20.0 Corporation - 11 rays	0.0	0.0	0.0	1000.0		2

IHI Realize your dreams 添付資料(検証②:条件付き き裂停止確率)



IHI

入力データの作成



添付資料(検証②:条件付き き裂停止確率)



入力データの作成

P01_Standard.pasN入力ファイルのうち、以下を変更



IHI

Realize your dreams

5

6

IHI

Realize your dreams

Copyright @2013 IHI Corporation All Rights Reserved.

添付資料(検証③:条件付き き裂貫通確率)

き裂停止しない応力条件(No.3-1,3-2) き裂停止する応力条件(No.3-3,3-4) 下記は3-3 #STRS3D #STRS3D 21 21 0 -1550 -1550 -1550 -1550 0 0 0 22.5 0 555 1100 1655 2200 2755 3300 4155 4400 4455 4400 4455 4400 4455 4600 4655 4700 4755 4800 0 0.05 0.1 0.25 0.3 0.35 0.4 0.5 0.6 0.65 0.6 0.75 0.8 0.85 0.8 0.9 0.95 0.05 45 67.5 90 62.5 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.55 0.55 0.6 0.65 0.7 0.75 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 -1550 -1550 35 7.5 -70 -147.5 -1550 -1550 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 -1550 -1550 -1550 -1550 -1550 -1550 -1550 -1550 -1550 -1550 -1550 -1550 -1550 -1550 -225 -380 -457.5 -535 -612.5 -690 -767.5 -845 0.75 0.8 0.85 0.9 0.95 -922.5 -1000 No.3-1, 3-2: 1000 一部のき裂が **هم** 200 き裂厚貫通 No.3-3, 3-4: -No.3-3, 3-4: 0.2 すべてのき裂が 0.8 ・部のき裂は停止 0.4 1 進展開始 No.3-1 残りは板厚貫通 --- No.3-2 No.3-3 -No.3-4 --1500 板厚位置/板厚 Copyright @2013 IHI Corporation All Rights Reserved. 軸方向応力の板厚方向分布





7



⇒WPSの有無、WPSモデルによるき裂進展条件の確認。 3.5Aに実装されているWPSモデルをすべて検証する。

Copyright @2013 IHI Corporation All Rights Reserved.

電力中央研究所による機能検証に使用した入力データ A3.



R電力中央研究所

2

入力ファイルの概要(2)



CRIEPI

A4. 長岡技科大による機能検証に使用した入力データ

インプットデータ



入力データ例	
表面半楕円き裂	LBLOCA WPS考慮なし model A

#TITLE									
out-nowps-	bloca	-mmo	delAU	.5	1			2	
#FLAG	1	1	1	0	11	0	1	1	0
0	0	1	1	20	20	0	17	71	22
0	0	, i	Ē	20	20	0	41	1	22
1	2	5	5	11	0	0	1	0	~
100	1	2	0	0	0	0	0	0	0
1									
#VESSEL									
0.206	2	0.5	9.4	0					
#TRANS									
90	3	0	2	1	0.8				
25									
0.1	0.2	0.5	1	2					
3	5	7.5	10	15					
20	25	30	35	40					
45	50	55	60	65					
70	75	80	85	90					
#MATRAL	15	3	a	30					
#WATKAL	0.0	150	110	45					
2.10E+05	0.3	-50	10	15					
5	0-	0-	0.1	0					
0.04	0.2	0.6	0	0.5					
0.62	0	0	0	0					
0.25	0	0.2	0.3	0.2					
5	0.1	5	0.1	220					
500									
#TEMP									

①.初期き裂の深さ分布種類 指数分布

②.無限き裂の応力拡大係数 軸方向き裂 簡易法 (JSME維持規格2010年追加補版の式)

③.Mc補正値 0に設定

④.脆化予測法の平均予測誤差0に設定

A5. 事務局による機能検証に使用した入力データ

(MEA) み^{ずほ情報総研}添付資料1:内圧を考慮した応力拡大係数の確認計算用入力データの作成 1

● フラグの設定



(AEA) みずほ情報総研 添付資料1:内圧を考慮した応力拡大係数の確認計算用入力	データの作成
● 応力及び圧力の設定(亀裂面の内圧を考慮したケース)	
*STR3C0 42 3. 000E +00-2. 561 23904F-01 4. 141991 76E +01-2. 52144367E +01 9. 64906563E +01 0. 0000000E +00 0. 0000000E +00-1. 28723603E +02 8. 57495228E +01 6. 000E +00-4. 61535374E +01 1. 00333925E +02-7. 73364657E +01 9. 67292304E +01 0. 0000000E +00 0. 0000000E +00-1. 40116506E +02 8. 60743048E +01 9. 000E +00-4. 61535374E +01 9. 92342578E +01 -8. 79449911E +01 9. 96159725E +01 0. 0000000E +00 0. 0000000E +00-1. 40116506E +02 8. 60743048E +01 1. 020E +01-6. 115397215E +01 -1. 33771721E +02 -1. 33771721E +02 0. 0000000E +00 0. 0000000E +00 -1. 40116506E +02 8. 60743048E +01 1. 500E +01-4. 1168064E +02 8. 42800171E +02-5. 6674794E +02 1. 0980757E +02 0. 0000000E +00 0. 0000000E +00 -2. 655973E +03 2. 11649992E +02 1. 500E +01-4. 1168064E +02 8. 42800171E +02-5. 6674794E +02 1. 7897054E +02 0. 0000000E +00 0. 0000000E +00 -2. 655973E +03 2. 11649992E +02 1. 500E +01-4. 221718E +02 1. 1372653E +03 -1. 1744406E +03 3. 591286054 0.0 0. 0000000E +00 -2. 86579736E +03 3. 9512862E +02 2. 100E +01-4. 2221718E +02 1. 1372653E +03 -1. 1744406E +03 3. 5912859752 +02 0. 0000000E +00 -2. 86579756E +03 4. 41775030E +02 2. 100E +01-4. 2221718E +02 1. 137263E +03-1. 174440E +03 3. 95138772E +02 0. 0000000E +00 -2. 86579756E +03 4. 41775030E +02 2. 100E +01-3. 12499858E +02 1. 11608517E +03-1. 3212127E +03 4. 29628721E +02 0. 0000000E +00 0. 0000000E +00-2. 86279755E +03 4. 41775030E +02 2. 100E +01-3. 12499858E +02 1. 11608517E +03-1. 3212127E +03 4. 29628721E +02 0. 0000000E +00 0. 0000000E +00-3. 07407815E +03 4. 8771204E +02 2. 100E +01-3. 12499858E +02 1. 11608517E +03-1. 3212127E +03 4. 29628721E +02 0. 0000000E +00 0. 0000000E +00-3. 07407815E +03 4. 8771204E +02 2. 100E +01-3. 12499858E +02 1. 11608517E +03-1. 3212127E +03 4. 29628721E +02 0. 0000000E +00 0. 0000000E +00-3. 07407815E +03 4. 8771204E +02 (w T #w)	
Image: Physical and the system 内圧の設定(2次関数的に減少する内圧を付与) 1.0000E-003_0000E-01 1.0000E-003_0000E-01 1.0000E-003_0000E-01 1.0000E-003_0000E-01 2.0000E-003_0000E-01 2.0000E-003_000E-01 2.0000E-003_000E-01 2.000E-01 0.000E-003_000E-01 2.000E-01 0.000E-003_000E-01 2.000E-01 0.000E-003_000E-01 2.000E-01 0.000E-003_000E-01 2.000E-01	
3.000E-019.7000E-00 3.1000E-019.2000E-00 4.0000E-015.5000E-00 5.0000E-012.4000E-00 8.0000E-013.0000E-01 8.6000E-013.0000E-01	





添付資料2:塑性域補正の確認計算用入力データの作成

4

● フラグの設定

					0.00	•••	~		
#FLAG	1	1	1	0	1	0	1	1	1
0	1	11	0	20	20	0	37	71	31
1	2	8	11	13	0	1	0	0	
0	1	0	0	1	0	0	0	0	0

塑性域補正の考慮の有り(111)と無し(0)を変更

#FLAG	塑性	Ł域ネ	甫正え	考慮	するな	τ—;	ス	+		
# LAG	1	1	1	0	1	0	1		1	
0	1	11	0	20	20	0	37	7	31	
1	2	8	11	13	0	1	0	Þ		
0	1	0	0	1	0	0	0	111	0	



(JAEA) み^{すほ情報総研}添付資料4:CEAの全周亀裂応力拡大係数解の確認計算用入力データの作成 6

#FLAG	1	1	1	0	1	0	1	1	1	表面半楕円亀裂としてCEAの解を使用。
0	1	11	Ó	20	20	0	37	714	31	
1	2	8	11	13	0	0	0	0		
0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	
1	9.47		207	94.7						

#CRKF1X		亀裂形状はa=6mm、c=18mm	
0.006	0.01800		



_

表 1. SI 基本単位						
甘大昌	SI 基本ì	単位				
本平里	名称	記号				
長さ	メートル	m				
質 量	キログラム	kg				
時 間	秒	s				
電 流	アンペア	Α				
熱力学温度	ケルビン	Κ				
物質量	モル	mol				
光度	カンデラ	cd				

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単	位の例
AI 立 是 SI 組 立 単位	
名称	記号
面 積 平方メートル	m ²
体 積 立方メートル	m ³
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s
加 速 度メートル毎秒毎秒	m/s^2
波 数 毎メートル	m ⁻¹
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積 立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m ⁸
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1
比 透 磁 率 (b) (数字の) 1	1
(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では	t物質濃度

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 租立单位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体鱼	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 (b)	m^2/m^2
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m ²	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電 荷 , 電 気 量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{2} A^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^2$
線量当量,周辺線量当量, 方向性線量当量,個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (h)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (a)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周期現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。 セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM物告2(CI-2002)を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	[組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^{2} s^{2} K^{1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^2$
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘 電 辛	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語								
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号			
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d			
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с			
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m			
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ			
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n			
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р			
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f			
10^3	+ 1	k	10^{-18}	アト	а			
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z			
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v			

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位					
名称	記号	SI 単位による値			
分	min	1 min=60 s			
時	h	1 h =60 min=3600 s			
日	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	۰	1°=(π/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad			
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²			
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³			
トン	t	$1 t=10^3 kg$			

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの							
3	名称		記号	SI 単位で表される数値			
電子	ボル	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J			
ダル	- F	\sim	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg			
統一原	子質量単	単位	u	1 u=1 Da			
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m			

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{ m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉結的な間径は
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	dB -	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値			
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N			
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s			
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$			
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx			
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²			
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T			
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹			
(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≦ 」					

は対応関係を示すものである。

			表	10.	SIに 尾	属さないその他の単位の例
名称					記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	"		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$