

システム化規格の開発

第6報：確率論の考え方

(その2：エンドキャップ破損確率の試評価)

(研究報告)

2003年8月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2003

システム化規格の開発 第6報：確率論の考え方
(その2：エンドキャップ破損確率の試評価)
(研究報告)

川崎 信史¹ 浅山 泰¹

要 旨

高速増殖炉の信頼性、安全性、経済性の三者を成立させるため、従来の構造設計基準より広い分野を対象とし総合的に構造健全性を確保する、新しい規格体系（システム化規格）の検討が開始されている。

このような規格体系では荷重設定、構造設計、材料、製作、検査、維持といった異なる分野間を通じ信頼性・安全性を評価するため、対象全分野を通じ共通して適用できる定量的指標が必要となる。

本報告書では、構造物の製作時に発生する初期欠陥、及び疲労損傷により供用期間中に発生するき裂、この両者が進展し貫通・漏洩に至る事象を定量的指標のひとつである破損確率を用い計算した。構造は、経済産業省が日本原子力発電株式会社に委託し実施している発電用新型炉技術確証試験において検討された形状を評価対象とした。ここで選定されている構造は、複数の溶接施工法を用い製作することのできるエンドキャップである。本構造が、現状の機器区分において第1種相当機器及び第3種相当機器として設計・製作・検査・運転された場合に潜在的に有する破損確率を推定するため、設計方法（構造選定）、製作方法等を両区分に対し設定し、破損確率の計算を行った。本評価によって得られる破損確率は、現状での推定予測値であり、予測する荷重レベルや想定する初期欠陥の分布等によって変動する。そのため、今後評価誤差幅を少なくしていくために必要な課題についても、摘出をおこなった。特に、初期欠陥の分布想定、き裂進展評価法の精度、き裂の検出確率については、今後の推定精度の向上、あるいは推定幅の評価が必要となる。

また、破損確率をシステム化規格という規格・基準体系の中で使用していくためには、荷重設定・構造設計・材料・製作・検査(PSI)・維持(ISI)という各分野の主要パラメータから破損確率を簡易推定する手法も必要となってくる。そのため、モンテカルロ法の計算結果を回帰分析し、破損確率を主要パラメータの線形和として簡易推定する方法（ベクトル法）の適用を試みた。荷重レベルを区分し、回帰を実施した結果、このような簡易手法を用いた場合でも、破損確率は±2オーダーの精度で評価できることがわかった。

¹ 大洗工学センター 要素技術開発部 構造信頼性研究グループ

Development of System Based Code

Vol. 6: Probabilistic approach Part 2

-Model calculation of failure probability about End-caps -
(Research report)

Nobuchika KAWASAKI¹ Tai ASAYAMA¹

Abstract

Both reliability and safety need to be further improved for the successful commercialization of Fast Breeder Reactors. At the same time, construction and operation costs need to be reduced. To achieve compatibility in matters of reliability, safety, and cost, the development of a System Based Code for the Integrity of FBR was started. This code extends the present structural design standard to include the areas of load setting, fabrication, inspection, maintenance, and so on.

A quantitative index is required to connect different partial standards in this code. Failure probability is considered as one of the candidate indexes.

In this report, failure probabilities have been calculated considering cracks induced during fabrication and fatigue cracks initiated while in service. End-caps have been selected as structures under study, because several welding methods for them could be adopted. Failure probabilities for structures designated as class 1 and class 3 components have been calculated. These End-caps are also considered as class 1 and class 3 components in the stages of design, fabrication, inspection, and service. These values are presently calculated estimations, and are subject to variation by load levels or assumed distributions of initial cracks. In this way problems to be addressed for the future studies are identified. In particular it is necessary to refine the assumption of initial crack-distributions, the accuracy of estimation for crack propagations, and the probability of crack detections in order to improve the accuracy of calculated failure probabilities.

To develop the SBC, a simplified method for estimation of failure probability is also needed. Consequently regression analyses have been applied to the Monte Carlo calculation results in order to confirm the feasibility of the Vector Method, which is a simplified estimation method. The failure probabilities were estimated within \pm two order against the Monte Carlo's results by this method.

¹ Structural Mechanics Research Group, Advanced Technology Division, Oarai Engineering Center

目次

1. 緒言	1
2. 破損確率の計算方法	
2. 1 基本概念	2
2. 2 入力確率分布及び評価方法	3
2. 3 クライテリア	6
3. 例題設定	
3. 1 機器選定	8
3. 2 機器使用条件	8
4. 破損確率の計算結果	
4. 1 計算方法	16
4. 2 基本構造に対する計算結果	16
4. 3 パラメータサーベイ	17
4. 4 応力に対する感度	17
4. 5 き裂進展速度に対する感度	18
4. 6 初期欠陥に対する感度	18
4. 7 検査に対する感度	18
4. 8 計算される破損確率の傾向.....	19
5. 破損確率の簡易推定方法.....	35
6. 今後の課題	52
7. 結言	58
謝辞	60
参考文献	61

図表一覧

表 4-1	破損確率計算の考え方	23
表 4-2	破損確率計算の入力	24
表 5-1	支配パラメータと計算された破損確率の一覧	38
表 5-2	変数変換式	39
表 5-3	支配パラメータの変換例	40
表 5-4	変数変換された支配パラメータの一覧	41
表 5-5	点数一覧	42
表 5-6	影響係数	43
表 6-1	課題一覧	54
図 2-1	破損確率の基本概念図	7
図 3-1	エンドキャップの構造例	10
図 3-2	例題基本構造	11
図 3-3	冷却材の熱履歴	12
図 3-4	解析モデル	13
図 3-5	基準熱応力 [熱過渡 (350 秒後) における応力強さ (Tresca) 分布]	14
図 3-6	第 1 種機器における軸方向応力分布 (基準熱応力) [熱過渡による円筒部の膜+曲げ応力強さ (Tresca) の軸方向分布]	15
図 4-1	破損確率の計算フロー	25
図 4-2	各評価部位でのき裂発生寿命及びき裂進展速度	26
図 4-3	A 溶接部での破損確率	26
図 4-4	B 母材部での破損確率	27
図 4-5	B 溶接部での破損確率	27
図 4-6	C 溶接部での破損確率	28
図 4-7	基本構造での破損確率	28
図 4-8	応力に対する感度	29
図 4-9	き裂進展速度に対する感度	30
図 4-10	き裂進展速度に対する感度 (2)	31
図 4-11	最大き裂深さに対する感度	32
図 4-12	最大き裂深さに対する感度 (3)	33
図 4-13	検査に対する感度	34
図 5-1	破損確率の定式化	44
図 5-2	予測される破損確率 (全体回帰)	45
図 5-3	応力の感度	46
図 5-4	材料の感度	47

図 5-5	製作の感度	48
図 5-6	検査の感度	49
図 5-7	影響係数（区分回帰）	50
図 5-8	予測される破損確率（区分回帰）	51

1. 緒言

高速増殖炉 (FBR) を実用化するためには、必要とされる信頼性・安全性が確保でき、なおかつプラントのコストダウンが可能となる設計手法が求められている。

そのため、高温構造設計の分野において、従来対象範囲としてきたいわゆる強度計算の領域から対象範囲を拡大し、本来構造物の持っているであろう総合的な裕度を評価していこうとする検討がスタートした。これは、総合的な裕度を確保することで設計の自由度が拡大するため、プラントのコストダウンを可能とする基準体系を新しく構築できると考えたからである。

この総合的な裕度という観点からは、基準の対象範囲は従来の構造設計の上流である荷重の設定方法や構造物の製作方法にまで踏み込んでいくとともに、従来の構造設計の下流である検査や維持の分野も対象としていく必要がある。また、そのうえで、総合的な裕度を評価する方法^{4,7,9,10,11}や、異なる基準間で裕度を配分、交換していく方法^{6,8}の開発が必要となる。これらの新しい裕度概念をベースにした基準体系は、現在「システム化規格」^{1,2,3,4,5}として規格の骨格が検討されており、上記の方法論は、そのなかに組み込まれていくこととなる。

これまでこの総合的な裕度の評価方法としては、破損確率を用いた評価手法を構築・提案してきた。通常、設計者は、構造設計の中で用いられている応力やひずみ、クリープ損傷や疲労損傷といった概念に対する感覚は持ち合わせており、計算される数値の妥当性を工学的に判断しうるが、この破損確率に対して、工学的な傾向を経験として持ち合わせ、その上で妥当性を判断できる設計者はほとんどいないと思われる。また、破損確率の計算においては、初期欠陥分布の想定を初めとする入力分布によって大きく計算結果が左右されると言うこともわかってきた。

そこで、破損確率の計算方法を順次、標準化し、このような問題を解決していくとともに、原子力プラントで通常用いられる機器を例として用い、実構造が設計・使用されている範囲内での最大破損確率を予測することにより、現状での評価限界、今後の課題についても摘出していくこととした。また、応力や材料特性、製作方法、検査程度等をパラメータとする破損確率の変動傾向を検討することや、破損確率を主要パラメータの線形和として簡易推定する方法 (ベクトル法) の適用性検討も評価の妥当性や規格化の可能性を判断する上で必要となるため、これらも並行して実施することとした。このような簡易推定法を構築することができれば、設計時にモンテカルロ法を用いた計算を実施しなくとも破損確率を予測することができ、規格化の上では大きな利点となるためである。

2. 破損確率の計算方法

2. 1 基本概念

破損確率計算の中で模擬している破損過程は、製造時に発生する恐れのある初期欠陥と供用中に発生する恐れのあるき裂、この両者の進展・貫通・内部冷却材の漏洩という現象であり、供用期間中にこのような事象が発生する確率を計算している。この計算のフローは、図 2-1 に示すとおりである。このようにき裂の存在、荷重、き裂進展速度、き裂検出精度を確率として考えることで、製造ミス、設計ミス、材料劣化、検査の見落としといった事象も過度に保守的になることなしに考慮することができる。また、破損を防止するために実施する検査の効果についても考慮し、荷重・材料・製作・検査(PSI)・運転(ISI)の全分野に共通する指標として用いることができる。

初期欠陥は、選定した溶接工法に対応する初期欠陥の分布を入力値とする。分布としては、き裂の存在個数[個/単位体積]、き裂深さ分布[き裂深さ]、き裂のアスペクト比の分布[アスペクト比]が必要となる。これらの分布から、各々の深さ及びアスペクト比を持つき裂の存在確率が計算できる。ここで、定義されているき裂の個数及び分布は、各溶接工法で施工した時に現実に発生する確率であり、通常非破壊検査により検出されたき裂分布から推測することにより求められる。

荷重は、該当構造物に負荷されると予測される荷重分布を入力確率分布として用いる。この分布を用いて、き裂発生サイクル及びき裂貫通サイクルを予測することとなる。本検討においては、荷重以外の各パラメータの影響が明確になるように荷重は一定値を用いており、確率分布とはしていない。

き裂発生評価法及びき裂進展評価法は、各構造・材料条件、荷重条件において最も精度良く中央値を予測することができる評価方法を用いることが望ましい。ただし、複雑な荷重履歴をうける構造物の特定環境下でのき裂発生、き裂進展を精度良く計算することは非常に難しい問題である。そのため、評価法が保守性を持つことを承知の上で、現行規格において用いられているき裂発生及びき裂進展評価法から安全裕度を取り除いた評価法を使用し、保守的な破損確率を構造物の破損確率と見なすこととする。

き裂進展速度は、CT 試験結果等に現われる材料のばらつき等を再現した確率分布を使用することで模擬する。施工ミス、特定環境の影響等でき裂進展速度が変化する恐れがある場合は、人為的に保守的な分布を使用することもありうる。

き裂の検出確率は、非破壊検査の種類により定義されるき裂の検出確率を用いる。本来、このき裂の検出確率は、材料、溶接施工法の違い、欠陥の種別、検査員のレベル等によって異なるはずである。しかしながら、各条件ごといき裂の検出確率を求めることは、現実的には難しい。もし、母集団が多くの材料、溶接工法、欠陥、検査員を含むものであるならば、それをデータベースとして策定される検出確率の分布は、全体の平均傾向を再現していることとなる。そのため、特定の条件に対するデータが

ない場合でも、平均的な確率分布を使用しておけば、破損確率を今後用いていくかどうかの見通しを判断していく上では概ね妥当な値が計算されるものと考えている。

2. 2 入力確率分布及び評価方法

本計算において使用した入力確率分布及び評価方法を以下に示す。

破損モード：

疲労によるき裂の発生・進展。想定機器使用温度 400℃。

き裂の存在個数 Pv^* [個/単位体積]：

1 種相当機器

$$6.1 \text{ [個/m}^3\text{]} (10^{-4} \text{ [個/in}^3\text{)])}^{16}$$

(突合せ両側溶接あるいは裏あて金を使用する突合せ片側溶接を想定)

(TIG 溶接を想定)

3 種相当機器

$$1 \text{ 種相当機器より } 2 \text{ オーダー高い個数 (610 [個/m}^3\text{]} (10^{-2} \text{ [個/in}^3\text{)])}$$

(突合せ片側溶接を想定)

(SMAW 溶接を想定)

き裂深さ分布 [き裂深さ]：

Jouris & Shaffer の欠陥深さ分布¹⁷ (確率密度 $f(a)$ [mm^{-1}])

$$f(a) = \begin{cases} 0 & (a \leq 0.1) \\ \frac{1}{1.34} \exp\left(-\frac{a-0.1}{1.34}\right) & (a > 0.1) \end{cases} \quad \text{き裂深さ: } a \text{ [mm]}$$

なお、本計算においては、初期欠陥は溶接施工プロセスの初層で生じると考え、TIG 溶接を想定した 1 種相当機器での最大欠陥深さを 3mm、SMAW 溶接を想定した 3 種相当機器での最大欠陥深さを 6mm と想定した。

き裂のアスペクト比の分布 [アスペクト比]：

Harris (LLNL:1984) の対数正規分布¹⁸

$$f(\beta) = \frac{C}{\sigma\beta\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left\{ \frac{\ln(\beta/\beta m)}{\sigma} \right\}^2\right]$$

β : アスペクト比 = c/a , a : き裂深さ [mm], $2c$: 表面長さ [mm],

$\beta > 1$, $\beta m = 1.336$, $\sigma = 0.5382$

C : 不完全確率関数の補正係数

$$\frac{1}{C} = \int_{\beta_{\min}}^{\beta_{\max}} \frac{1}{\sigma\beta\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left\{\frac{\ln(\beta/\beta_m)}{\sigma}\right\}^2\right] d\beta$$

荷重 :

発生する熱荷重は常に一定であり、大きさに変動はないと仮定した。

溶接部強度評価法 (き裂発生) :

316FR 鋼溶接部は、応力集中はないものの、疲労強度の低下がある。SUS304 鋼溶接部は、疲労強度の低下はないものの、応力集中が発生する。これらの影響は、母材として計算されたひずみに対し、ひずみ集中を考慮することで計算可能である。溶接部強度評価法としては、高速増殖実証炉用に整備された「高速増殖実証炉高温構造設計方針 (案)」¹⁵ 付録 F 溶接部の評価に記載のある、両鋼の強度評価法を使用し計算した。

き裂発生クライテリア :

き裂発生サイクル数は、告示 501 号¹² 別図第 2 設計疲れ線図 (オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金) より一般に安全裕度と考えられている繰返し数に対し 20 あるいは応力に対して 2 を除いた関係を中央値ベースの疲労寿命として考え、これをクライテリアとした。

き裂の発生は、疲労寿命の半分とした。発生するき裂は、深さで 0.5mm のき裂である。

き裂進展評価法 :

き裂進展評価法は、電力中央研究所の発行している「高温構造健全性評価指針 (案) : 平成 12 年度版」¹⁹ に記載のき裂進展評価法を使用した。

き裂進展速度 :

同じく、電力中央研究所の発行している「高温構造健全性評価指針 (案) : 平成 12 年度版」に記載のき裂進展速度を中央値ベースのき裂進展速度として使用した。確率分布は、対数標準偏差が 0.42 の対数正規分布である。

き裂の検出確率 :

文献より以下のき裂検出確率 (POD) を設定した。

$$RT : \text{POD}(a) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{a - 0.62}{68.26} \right)^{0.29} \right\} \quad (\text{Halmshaw のデータを近似}^{14})$$

$$UT : \text{POD}(a) = \phi \{ 3.63 + 1.106 \ln(a/t) \} \quad (\text{Simonen}^{20})$$

a : 欠陥深さ, t : 板厚

$$\phi\{x\} = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt$$

破損確率 :

破損確率の計算は、初期欠陥（存在確率:Pc）が進展し破損にいたる確率(Pc×Pp)と繰返し熱疲労により疲労き裂が発生・進展し破損にいたる確率(Pip)の両者から、破損確率(Pf = Pip+PcPp-PipPcPp)を演算することにより計算する。

評価体積中に初期欠陥が存在する確率 Pc は、ポワソン分布として考えることができ、その確率は、 $Pc(N) = (VPv^*)^N \cdot \exp(-VPv^*) / N!$ と表現できる¹⁶。ここで、N は評価体積中に存在するき裂の個数であり、V は評価対象体積、Pv* は単位体積当たりの初期欠陥の個数である。評価体積中にき裂が存在しない確率は $\exp(-VPv^*)$ であるため、評価対象体積中にき裂の存在する確率は $Pc = 1 - \exp(-VPv^*)$ と記述できる。評価対象体積中に 1 個のき裂の存在する確率は $Pc(1) = VPv^* \exp(-VPv^*)$ であり、 $VPv^* \ll 1$ の時、 $Pc \approx Pc(1) \approx VPv^*$ となる。

1 個のき裂が存在し破損に至る確率は Pc(1) Pp であり、2 個のき裂が存在しそのうち 1 個以上のき裂が破損に至る確率は $Pc(2)(1 - (1 - Pp)^2)$ となる。そのため、存在するき裂のいずれかが破損に至る確率は、以下の式で表現される。

$$\sum_{N=1}^{\infty} Pc(N) \{ 1 - (1 - Pp)^N \}$$

$VPv^* \ll 1$ の時は、前述のように Pc(1) Pp が、存在するき裂のいずれかが破損に至る確率となる。

繰返し熱疲労により疲労き裂が発生・進展し破損にいたる確率 Pip は、以下の式により計算される。

i サイクル時にき裂が発生する確率 : Pi(i)

Δk サイクル後にき裂が破損する確率 : Pp(Δk)

i サイクル時に発生したき裂がその後、n サイクル時に破損する確率 : Pi(i) × Pp(n-i)

その結果、n サイクル時にき裂が破損する確率は、

$$Pip(n) = \sum_{i=2}^{n-1} Pi(i) \times Pp(n-i)$$

n サイクルまでにき裂が破損する累積確率は、

$$\sum_{k=3}^n Pip(k) = \sum_{k=3}^n \sum_{i=2}^{k-1} Pi(i) \times Pp(k-i)$$

となる。今、n サイクルまでに評価体積中に発生したき裂の個数を m とすると、供用期間中に m 個のき裂が発生しそのうちのいずれかのき裂が破損に至る累積確率は、上記 $\sum Pip(k)$ を 1 個のき裂が発生しそのき裂が破損に至る事象の累積確率と考えると、 $1 - (1 - \sum Pip(k))^m$ と考えることができる。m は構造及び破損モードにあわせ推測する必要がある。実際の熱疲労においては、多数の亀甲状のき裂が発生後、合体し、合体後の主き裂が進展、貫通・破損に至る。そのため構造の大きさに依存するが最終的に破損に至る主き裂の数は、多くはない。そのため、本計算においては、 $m=1$ とした。なお、き裂の進展評価においては、合体や近傍に別のき裂があることによる応力の開放は考慮していない。

2. 3 クライテリア

き裂の貫通を想定する際には、構造の片側表面からのき裂の進展・貫通だけでなく、評価しているき裂の反対側の表面からき裂が発生・進展し、評価き裂と合体・貫通に至る現象も考慮しなくてはならない。

膜応力支配型の板では初期欠陥からの進展がほぼ貫通き裂を形成すると思われるのに対し、板の純曲げのような曲げ応力支配型の状態では、片側からのき裂進展がおおよそ $1/2t$ のような状態でも貫通に至ることがありうると考えられる。

このようないわゆるお迎えき裂の発生を検討した例として、膜応力支配型の平板モデル試験や配管エルボモデル試験では初期欠陥から進展したき裂がほぼ貫通き裂を形成しているが、曲げ応力支配型の平板モデル試験では肉厚の 6 割程度、曲げ応力支配型の配管エルボモデル試験では肉厚の 6 割から 7 割程度で貫通に至っていると報告した例がある²¹（試験は電力中央研究所で実施したもの）。

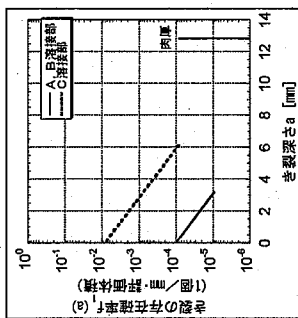
一方、このようなお迎えき裂の発生・合体の挙動のメカニズムの詳細はまだわかっておらず荷重や構造にあわせ解析を用いて予測することは、困難であるため、現状では、貫通のクライテリアを便宜上、肉厚に対する割合で設定し、貫通を評価することとした。

高速炉の構造物は、肉厚が 10~30mm 程度の薄肉構造物（容器・配管）が多い。そのため、応力は、曲げ+ピーク応力型となり、き裂面の反対側での応力値は相対的に小さくかつ平坦化している。そこで、本評価では、内表面からのき裂進展のみを評価対象とする代わりに、 $3/4t$ を貫通のクライテリアとすることで実際の漏洩現象を模擬することとした。

破損確率計算手法の概念

初期欠陥の存在確率を想定する

$$(P_0 = \sum_{i=1}^n f_i(a) da)$$



初期欠陥分布の例

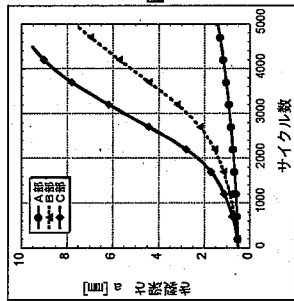
き裂の進展

$$da/dN = C \Delta K_r^{1.37}$$

$$\Delta K_r = F \Delta K^2 / E$$

$$\Delta K = \sigma \sqrt{\pi a} g f$$

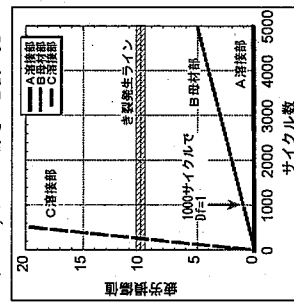
進展評価方法は、決定論と同じ



き裂進展速度例 (中央値)

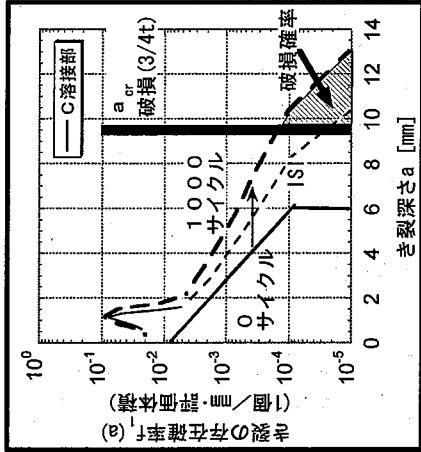
供用中にき裂が発生する

標準試験片での疲労試験結果から微小き裂の発生サイクルを予測する
例: 疲労寿命の1/2 (Df=10)で0.5mm深さのき裂が発生



き裂発生サイクルの予測例

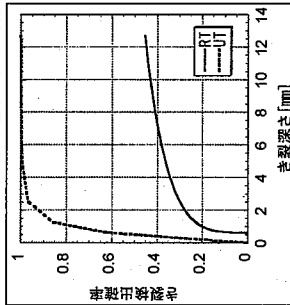
運転期間中にクラテリア以上に進展するき裂の割合が破損確率



決定論に基づく破損サイクルの評価との違いは、入力分布を確率分布としている点

入力分布の例:
欠陥の存在確率、
き裂進展速度、
き裂検出確率

検査によりき裂を発見・補修する



き裂検出確率の例

図 2-1 破損確率計算手法の基本概念図

3. 例題設定

前章で設定した入力確率分布及び評価方法を用い破損確率を計算する。計算対象は、原子力プラントで使用される機器のうち代表的な構造としてエンドキャップを選定した。この例題設定に関する検討は、経済産業省が日本原子力発電株式会社に委託し実施している発電用新型炉技術確証試験¹⁴の中で実施されたものである。

3. 1 機器選定

発電用新型炉技術確証試験の中では、システム化規格 **WG** という名称のワーキンググループが開催され、以下の条件から代表機器を選定している。

- ・ 破損モードが単一で、破損モードの変化による影響が現われない使用条件
- ・ 応力条件や材料特性、製作方法、検査程度等の変更により信頼度の異なる機器を設計可能であること

この条件から、クリープを生じない通常使用温度 **400°C** で使用されるナトリウム配管のステンレス製エンドキャップを評価機器に選定した。このとき、主要破損モードは、疲労損傷となる。供用期間は **60 年** であり、想定熱過渡繰返し数は **1000 回** である。

エンドキャップの設計例としては、図 3-1 に挙げるような構造が考えられる。これは、同一の使用条件で、溶接部をどの程度の応力レベルの位置に配置し、どのような種類の溶接工法を選択するかという問題に置き換えられる。そのため、①に近い低応力部と高品質溶接の組合せ、②に近い高応力部と低品質溶接の組合せを出発点とすることとなった。

その結果、例題の基本構造としては、図 3-2 に挙げる 2 種類の構造が選定された。これらの構造は、これまでの機器区分の考え方からすると、第 1 種及び第 3 種相当機器の構造となる。そのため、第 1 種相当機器及び第 3 種相当機器という名称を使用している。なお、第 1 種相当機器は、**316FR** 鋼製であり、第 3 種相当機器は、**SUS304** 鋼製である。第 1 種相当機器の構造においては、蓋底部からの距離により応力値が異なるため、応力が十分低くなると予測される通常設計位置の **A 部**（蓋底部から **30mm**）と、高応力部となる **B 部**（蓋底部から **10mm**）の両者の位置に溶接を配置したケースの計算が行われた。設計が成立するのは、**A 溶接部**のみであり、**B 溶接部**は予備的な位置づけである。

3. 2 機器使用条件

本機器は、**400°C** の通常使用温度において繰返し熱過渡を受ける。設計上想定する最大繰返し数を **1000 回** と考えており、構造設計が成立する最大の熱過渡応力で **1000 回**

使用された場合に、第1種相当機器構造の破損確率がもっとも高くなると考えられる。また、ここで計算された破損確率は、熱疲労を受ける構造に対し、熱疲労設計を実施した場合に想定される最大破損確率と解釈することができる。

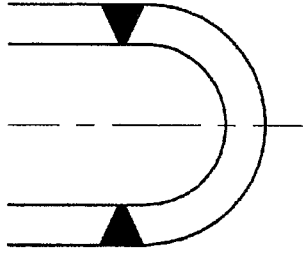
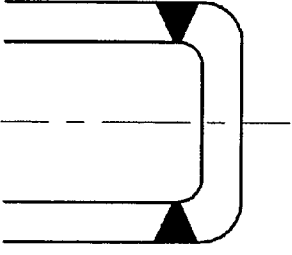
第3種相当機器の構造にも同一の熱過渡事象を負荷することとなった。これは、異なる信頼度として設計された機器が、同一の使用条件において示す破損確率を計算するためであり、これにより熱疲労設計を実施しなかった機器に熱疲労が生じた場合の破損確率が予測できる。

最大熱過渡応力の計算は、次のように実施された。まず、図3-3に示す内在冷却材の熱履歴により両構造物に与えられる基準弾性熱応力を有限要素法により計算する（第1種相当機器の基準弾性熱応力、第3種相当機器の基準弾性熱応力）。次に告示501号¹²に基づき、1000回の繰返しにより設計疲労損傷値がクライテリアに達する応力値を求め、上記で計算された基準弾性熱応力のピーク表面応力との比率を求める。この比率を用いて、基準弾性熱応力を補正すると、熱疲労設計を実施した構造物が最大限受ける熱過渡応力が推定できる。熱疲労設計を実施しない第3種相当機器の構造に関しては、第1種相当機器の機器構造から求めた比率を用いて、第3種相当機器の基準弾性熱応力の補正を行い、同一の熱過渡を受けた場合の最大熱過渡応力を計算している。

この計算により第1種相当機器構造のA部（蓋底部から30mm）には、ピーク応力範囲で444MPa、曲げ応力範囲で413MPaの熱応力が、B部（蓋底部から10mm）にはピーク応力範囲で677MPa、曲げ応力範囲で576MPaが負荷されると求まっている。316FR鋼の溶接部においては、溶接部の強度差はあるが、応力集中がないため当該箇所に応力がそのまま溶接部の応力とみなせる。新規き裂が発生する可能性がもっとも高い部位は、ピーク応力値の高いB母材部の疲労損傷であり、新規き裂は、本部位に生じると予測される。

第3種相当機器構造のC部（蓋底部）には、ピーク応力範囲で887MPa、曲げ応力範囲で618MPaの熱応力が負荷されている。SUS304の製作されている第3種相当機器構造には、溶接金属と母材の硬さの違いによりひずみの集中が生じるため、C部の相当ひずみ範囲は、3.25%と大幅に拡大する。

計算に用いられた解析モデルを図3-4に、応力のコンター図を図3-5に示す。また、1種相当機器構造における軸方向の応力分布を図3-6に示す。

形 状	①	②
		
	1種機器に多い	3種機器に多い

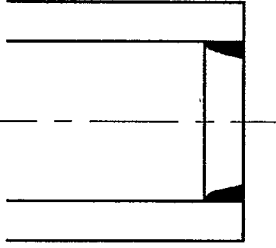
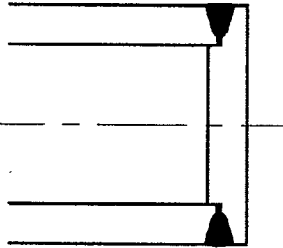
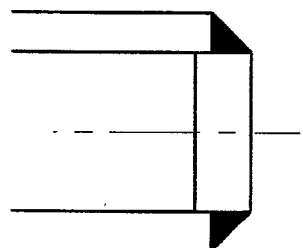
形 状	③	④	⑤
			
	火力	火力	火力

図 3-1 エンドキャップの構造例

第 1 種相当機器 第 3 種相当機器

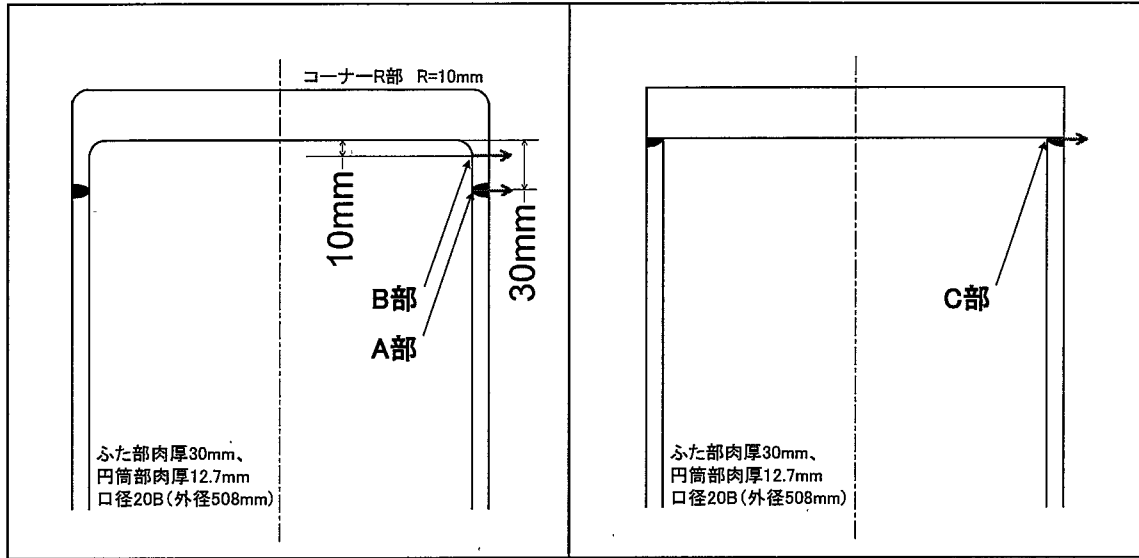


图 3-2 例題基本構造

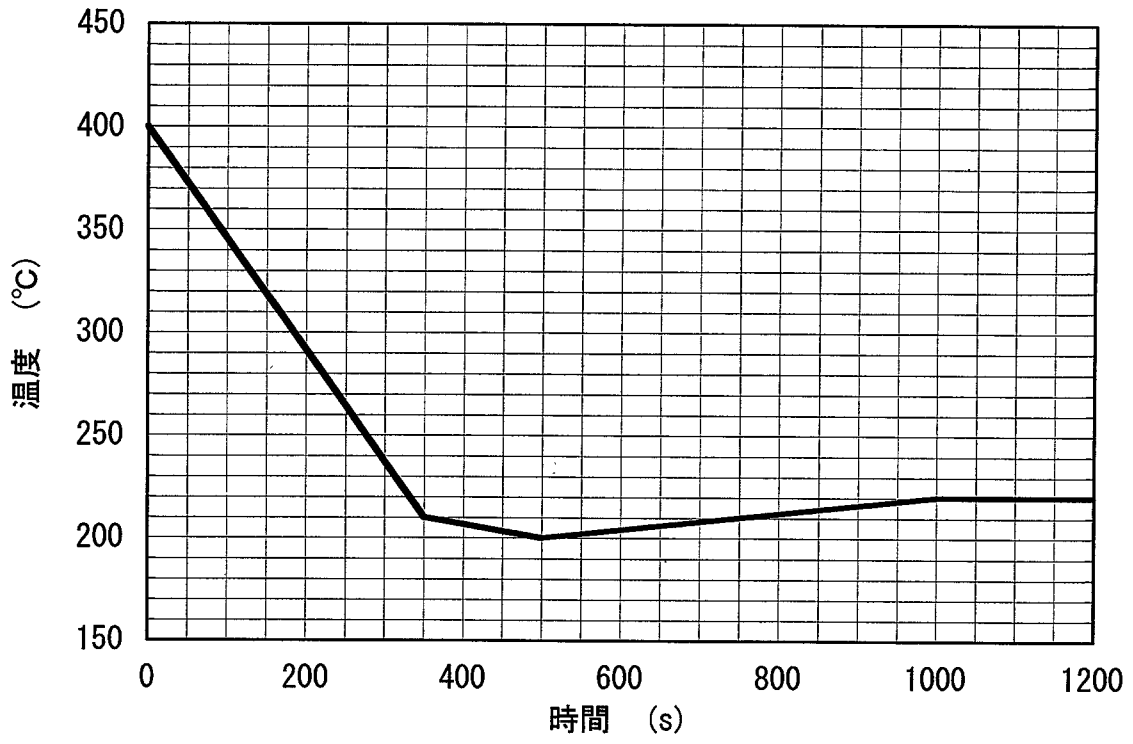
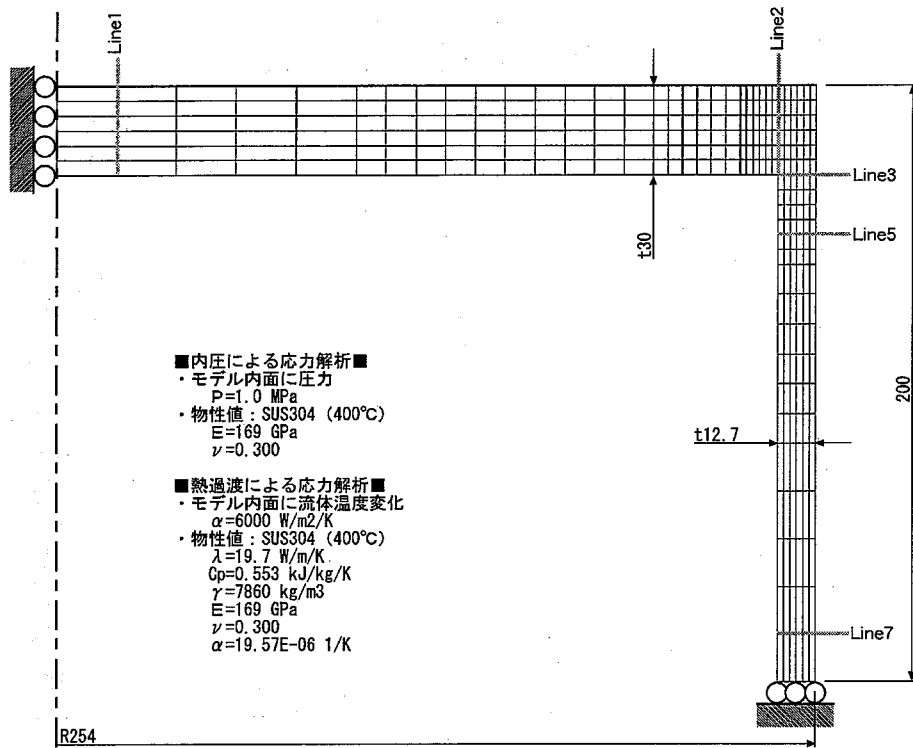
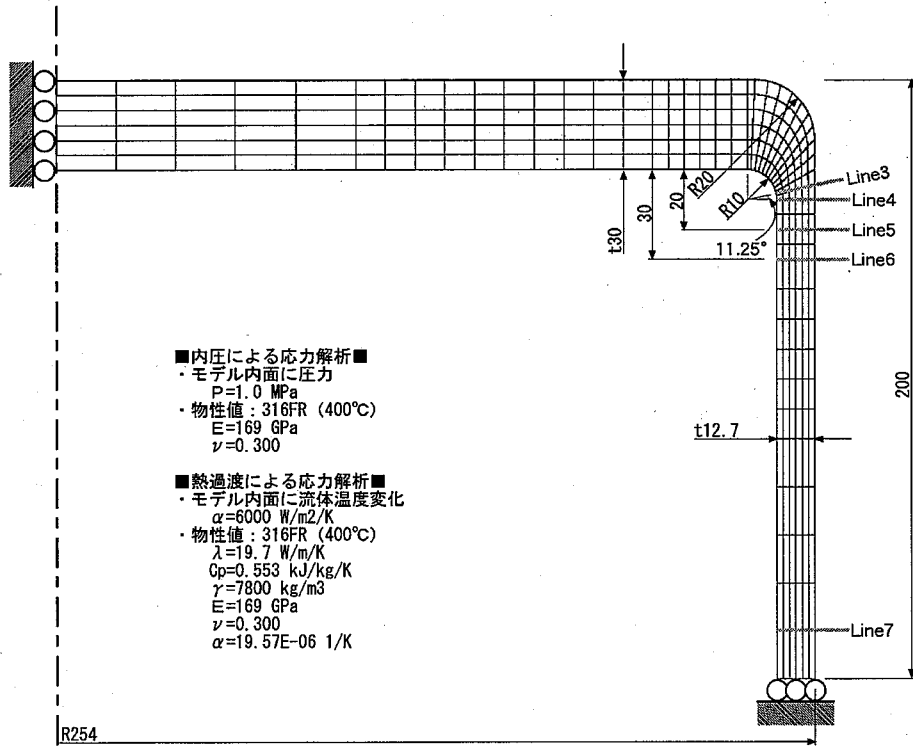


図 3-3 冷却材の熱履歴

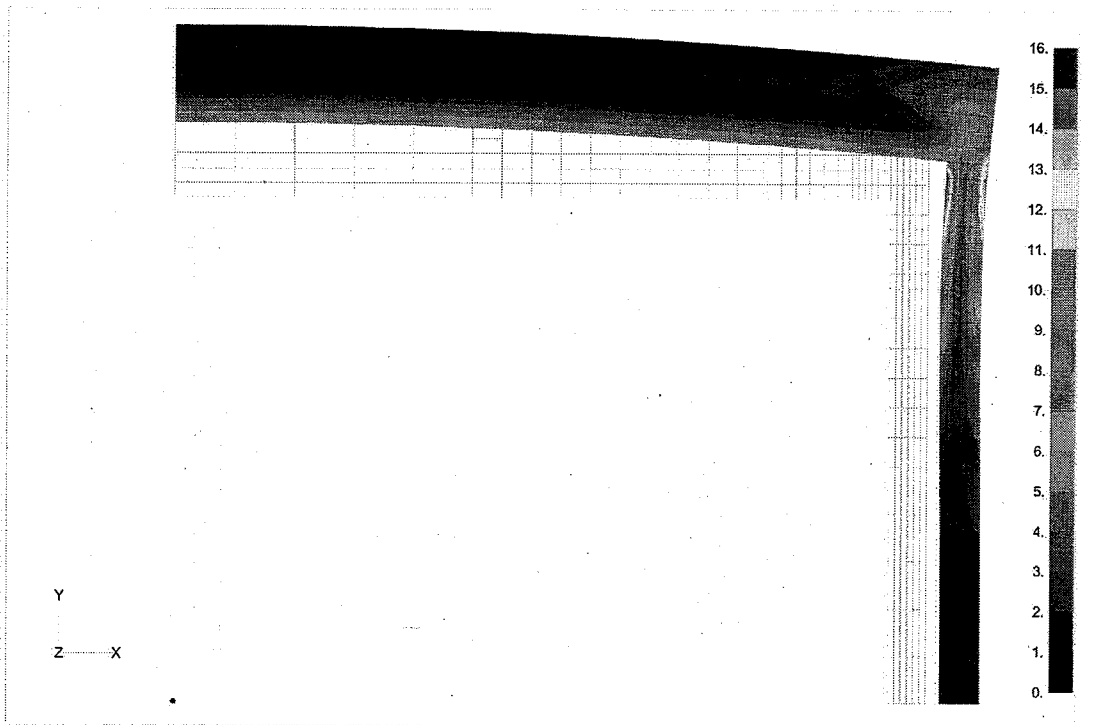


3種相当機器構造



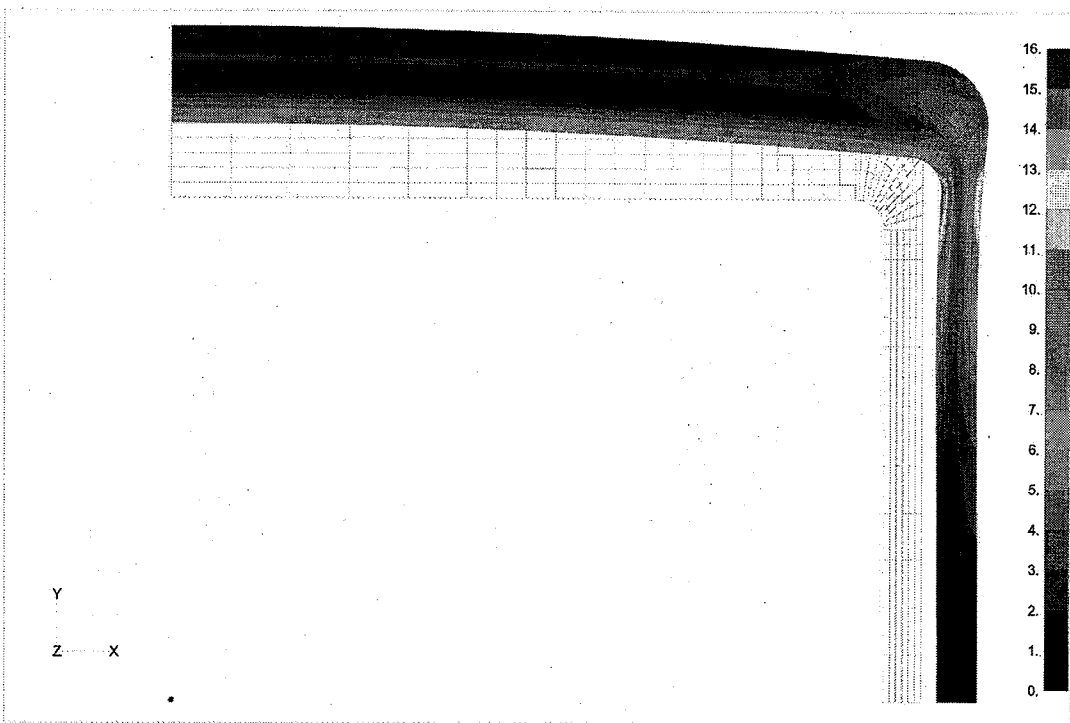
1種相当機器構造

図 3-4 解析モデル



応力 (×10MPa)

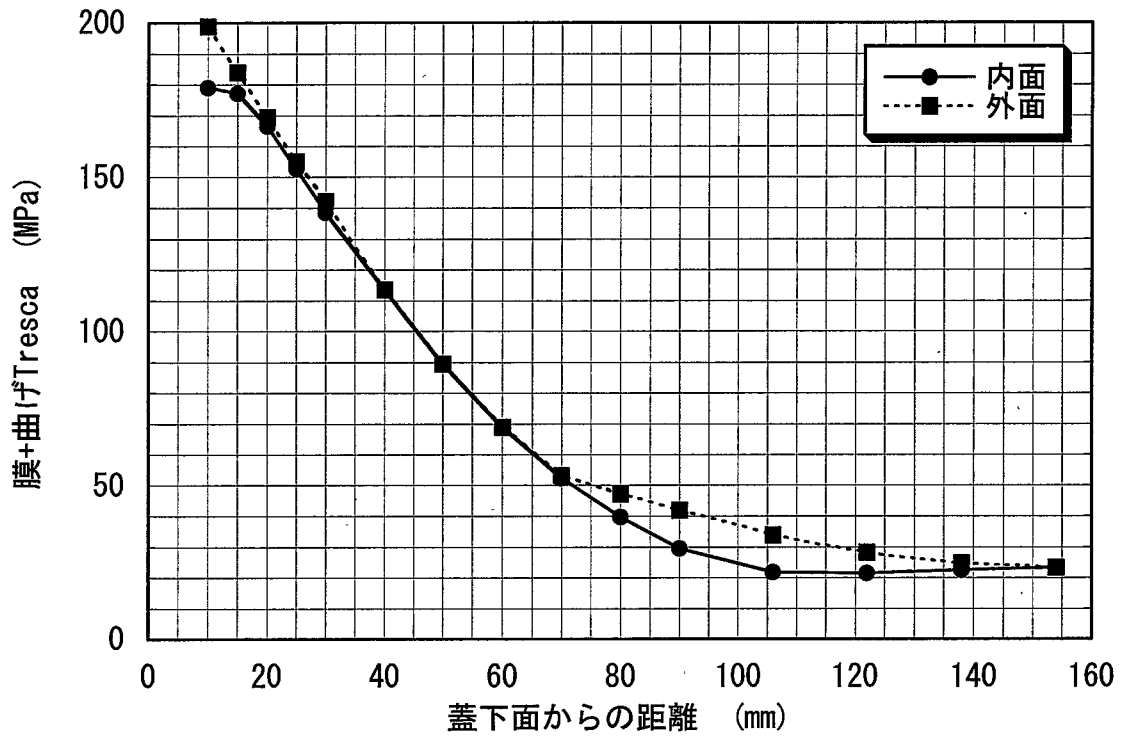
3 種相当機器構造



応力 (×10MPa)

1 種相当機器構造

図 3-5 基準熱応力 [熱過渡 (350 秒後) における応力強さ (Tresca) 分布]



補正係数は 3.3 倍

図 3-6 第 1 種機器における軸方向応力分布 (基準熱応力)
 [熱過渡による円筒部の膜+曲げ応力強さ (Tresca) の軸方向分布]

4. 破損確率の計算結果

4. 1 計算方法

破損確率は、初期欠陥が進展し破損にいたる確率($P_c \times P_p$)と、繰返し熱疲労により疲労き裂が発生・進展し破損にいたる確率(P_{ip})の両者から、いずれかのき裂が破損に至る確率($P_f = P_{ip} + P_c P_p - P_{ip} P_c P_p$)を演算することにより求めた。ここにおいて、 P_c は評価体積中に1個の初期欠陥が存在する確率を、 P_p は1個の初期欠陥が貫通に至る確率を用いた。この計算は、図4-1に示すように、初期欠陥の存在確率、材料特性を確率分布として与えるとともに、検査によるき裂の発見・補修を確率モデルとして考慮することにより実施した。計算の考え方及び計算に用いた入力値を表4-1、4-2に示す。計算コードは、サイクル機構で開発したREAL-P²²を使用している。

4. 2 基本構造に対する計算結果

3章で選定したA,B,Cの3評価部位に対し、決定論的な考えで初期欠陥を想定し、き裂進展量を計算すると、図4-2のようになる。なお、溶接部と母材部ではき裂進展速度がほぼ等しいため、溶接による応力の集中のないA部,B部は、溶接部と想定しても母材部と想定してもき裂進展速度は同一である。同図に併記してあるき裂発生寿命と溶接部では初期欠陥が存在する可能性があるということとを合わせて考えると、B部,C部はき裂の進展が有意な領域である、A部,C部では初期欠陥からのき裂が進展する、C部では寿命中の新規き裂の発生の可能性があるという事が読み取れる。また、2章で想定した最大初期欠陥深さ(1種相当機器:3mm、3種相当機器:6mm)を考慮すると、最短の破損サイクル数は、C溶接部<B溶接部<A溶接部<B母材部の順番となる。

図4-3、4-4、4-5、4-6は、A溶接部、B母材部、B溶接部、C溶接部における累積破損確率をサイクル数に対する変化として示したものである。A及びB溶接部は、C溶接部と比較すると初期欠陥の個数が少ないため、供用直後の破損確率は、C溶接部より低い。さらにA溶接部は、応力も低く、き裂進展が遅いため、供用末期になっても破損確率の上昇はほとんどない。B母材部では、初期欠陥がないとみなしており、供用期間中のき裂発生の可能性も低いため、破損確率は、おおよそ0[機器・供用期間]である。C溶接部は、初期欠陥個数が多く、き裂進展も有意である、そのため、供用期間中に破損確率(累積)は、上昇し、PSIもISIも実施しない条件で $1E-4$ [機器・供用期間]となる(計算値は $2.7E-4$ 。以下、原則有効数字1桁に丸める)。なお、参考のため実施したB溶接部は、AとCの中間の傾向を見せる。

第1種相当機器の破損確率は、A溶接部の破損確率で決定され、その破損確率は、PSIもISIも実施しなかった場合で $1E-11$ [機器・供用期間]、PSI(RT)、ISI(UT:100%/10年)を実施した場合には、おおよそ0($1E-12$ [機器・供用期間]未満)となる。

第3種相当機器の破損確率は、PSIもISIも実施しなかった場合で $1E-4$ [機器・供用期

間]、PSI(RT)、ISI(UT:7.5%/10年)を実施した場合では、 $1E-6$ [機器・供用期間]となる。通常第1種相当機器はISIを実施しながら供用に用い、第3種相当機器ではISIを実施しない。そのため、第1種相当機器の破損確率は、おおよそ0 ($1E-12$ [機器・供用期間]未満)、第3種相当機器の破損確率は、 $1E-4$ [機器・供用期間]と予測していることとなる。

第3種相当機器構造のC部は、第1種相当機器構造で高応力部となるB部 (PSI,ISIなしで $1E-8$ [機器・供用期間]) よりも破損確率が高い、B部とC部の応力レベルがほぼ同じことを考えると、A部のB部の応力の差 (曲げ応力:413→576MPa) により4オーダー、B部のC部の差異である初期欠陥設定の違いにより4オーダーの差が生じていることがわかる。

4. 3 パラメータサーベイ

前節での検討を受け、更に詳細なパラメータに対し感度解析を実施することとした。前節から抽出される感度の大きいパラメータは、応力、初期欠陥 (個数、サイズ)、検査である。また、応力は結果としてき裂進展速度を変化させていることとなるので、同一応力条件において、材料特性や使用環境の違いによりき裂進展速度が異なるケースについても計算を実施した。パラメータの範囲は、実際に各パラメータが変動しうると考えられる最大幅を想定し、設定した。

4. 4 応力に対する感度

第1種相当機器構造において、応力を変化させた場合の傾向を図4-8に示す。第1種相当機器構造において想定している欠陥の存在確率は $1E-4$ [個/評価体積]であるため、初期欠陥からの進展が破損を支配している曲げ応力が 900MPa 以下の領域では、破損確率は、初期欠陥の存在確率に収束するように増加していく。 900MPa を超えると、き裂の発生が有意になってくるため、発生したき裂が破損に至ることにより再び破損確率は増加し始める。初期欠陥による破損確率の増加割合は、想定する初期欠陥の深さ及びアスペクト比に依存し、発生き裂による破損確率の増加割合は、き裂発生寿命のばらつきと発生き裂のアスペクト比に依存する。第3種相当機器構造における応力の感度も図4-8は示しているが、応力に関する感度は、第1種相当機器とほぼ同じ傾向である (欠陥の存在確率及び最大き裂深さが異なる)。この場合、欠陥の存在確率は $1E-2$ [個/評価体積]であるため、本確率に対し初期欠陥に起因する破損確率は収束していく。なお、本図では、各機器種別相当のPSI/ISIを実施した場合の破損確率も記載してある。PSIやISIは、それぞれ製造時、運転時に一定の割合のき裂を検出・補修するという行為であり、き裂の分布形状が検査・補修により変化することとなる。このような分布形状の変更があった場合でも、破損確率の値自体は変化するが、応力に対する感度傾向は、ほぼ同様と計算されていることが図から読み取れる。

4. 5 き裂進展速度に対する感度

第1種相当機器構造において、き裂進展速度を変化させた場合の傾向を図4-9、4-10に示す。本図は、基本構造のき裂進展速度を決定する Paris 則の材料定数 C_1 (中央値 $1.43E-4$ [mm/cycle]、対数標準偏差 0.42 の対数正規分布) の中央値を 0.5~4 倍までの範囲で変化させたものである。初期欠陥からの進展が破損を支配している曲げ応力範囲が 800MPa 以下の領域では、き裂進展速度の影響は破損確率が低い領域の方が大きく、また破損確率は $1E-4$ [機器・供用期間] に収束する同一の曲線を横軸に平行移動した曲線となる (図4-10)。これは、決定論的なき裂進展評価において、き裂進展速度が応力のおおよそ 3 乗に比例しており、き裂進展速度の変化は、応力の変化に換算可能であるからである (き裂進展速度半減と応力 2 割減少が同じ効果をもたらす。)

4. 6 初期欠陥に対する感度

破損確率が小さいとき、初期欠陥の個数と破損確率は、ほぼ比例する。そのため、ここでは、欠陥の最大深さに対する感度を検討した。初期欠陥の深さ分布は、**Jouris & Shaffer** の指数関数で表記しており、この関数に対し上限欠陥深さを想定している。実際の機器の製作において欠陥が出やすいのは溶接の第1層といった限られた深さの領域であり、製作時から肉厚の半分以上を超えるような大きなき裂は存在しないという想定に基づき、欠陥の上限値という考えは導入されている。なお、第1種相当機器構造にて、想定しているき裂の存在確率は、深さ 1.5mm で $3E-5$ [個/評価体積]、深さ 3mm で $1E-5$ [個/評価体積]、深さ 6mm で $1E-6$ [個/評価体積] となっている。

第1種相当機器構造において、最大欠陥深さを変化させた場合の傾向を図4-11、4-12に示す。初期欠陥のうち、深さやアスペクト比の大きい欠陥のみが破損に至る破損確率の低い領域では、最大き裂深さの影響は大きいですが、最大き裂深さより小さいき裂が破損に至りだす $1E-5$ [機器・供用期間] オーダーの破損領域になると、最大き裂深さの影響は、ほとんど現れなくなる。

4. 7 検査に対する感度

PSI/ISI の有無については、図4-8 から読み取れるため、PSI におけるき裂検出確率を変更したケースを検討した。ISI で UT を実施する場合、PSI においても UT を実施するが、本検討では UT は供用前の検査データと比較検討することによりき裂の検出をしていると考え、PSI に対し通常の文献で示されているような高いき裂検出確率は適用していない (RT のき裂検出確率を使用)。ここでは、PSI の段階でも UT により最大限き裂を検出し補修を行うことを考え、PSI のき裂検出確率に対し、UT の式 (2 章に記載の式) を使用した。

図4-13 に示すように、PSI の強化は PSI のみを実行し ISI をしない場合は、いずれも 1 オーダー程度の効果があるが、ISI と組み合わせると PSI を強化する効果は少ない。

これは、き裂検出確率はある程度き裂が進展した深いき裂の場合に大きくなり、短いき裂に対しては小さいため、PSI でのき裂検出確率が低く、き裂を見落としたとしてもそのき裂は、破損に至る前に ISI により検出されるからである。

4. 8 計算される破損確率の傾向

計算された破損確率の特徴をまとめると概ね以下に示すようになる。

- ・ 熱過渡応力による疲労き裂の貫通を防止するとき、曲げ応力範囲が破損確率の変化と対応しており、曲げ応力範囲に着目し分析が可能となる見込みがある。ピーク応力範囲は、き裂の発生寿命に影響を及ぼすが、設計対象となる **600MPa** 前後 **1000** サイクルの熱過渡に対しては、初期欠陥からの破損が機器の破損確率を決定しているため、概ね曲げ応力範囲の違いにより結果は整理できる。また、膜応力範囲はき裂進展速度に影響を及ぼすが、熱過渡応力を対象とする場合、範囲が大きく変動することはないため、曲げ応力範囲で整理してよいものと思われる。
- ・ 応力に対する感度は高く、また設計する応力レベルにより、き裂進展速度、最大欠陥深さに対する感度も変化する。しかし、以下のことにより、応力の感度を検査の有無に従い定量化しておけば、おおよその破損確率はおおむね予測できるものと思われる。検査の有無、初期欠陥の個数の違いによる応力の感度（傾向）の変化は少ない。き裂進展速度の変化は応力の変化に換算できる。最大き裂深さの影響は、 $1E-9$ [機器・供用期間]といったレベルでは影響が大きい、 $1E-5$ [機器・供用期間]程度のオーダーでは影響がほとんどない。
- ・ **100%/10年** というような頻度で ISI を実施する場合は、ISI を実施したうえでの PSI の強化はほとんど計算上は影響がないと評価される。PSI のみを実施し ISI を実施しない場合は、RT から UT への変更 (**1mm** 深さの欠陥の **2割** 検出から **8割** 検出への変更) は、概ね **1** オーダーの破損確率の低下と評価される。

これらの傾向は、負荷応力における膜応力の大幅な上昇(現状 **10MPa** 程度を想定)、寿命中におけるき裂発生確率の大幅な上昇(現状は、き裂発生中央値は運転寿命の **10** 倍以上のサイクル数) というような場合は変動するものの、材料特性や初期欠陥分布の多少の変化からは影響を受けないものと思われる。

また、これらの特徴を踏まえ、従来より設計者の持っている感覚と比較可能と思われるポイントをまとめると以下のようなようになる。ただし、ここに列挙した項目は、設計者の感覚と比較するために、計算結果から推測したものであり、工学的に妥当である

と判断された訳ではない。

1. 第1種相当機器の構造を疲労設計限界まで使用したとしても、破損確率は工学的に無視しうるレベルまでに低い。また、本構造においては、検査（PSI/ISI）の有無にかかわらず、破損確率は工学的に無視しうるレベルまで低い。そのため、検査は想定する破損モードによるき裂の発生を検出するのではなく、想定外の破損モードが生じていないか確認するという位置づけになっている。（図 4-3）
2. 溶接部を有する構造において、もっとも破損に至る確率が高い部位は、溶接部である。たとえ疲労損傷が母材部において最大となるよう設計したとしても、溶接部に存在する初期欠陥から破損に至る確率の方が有意に大きく、予期される破損部位は溶接部である。（ただし、溶接部の応力は、母材部の $2/3$ 程度と考えており、溶接部といえどもある程度の荷重は負荷されていると想定している。）（図 4-3、図 4-5、図 4-8）
3. 母材想定において疲労設計限界となる位置に、溶接部を設定すると破損確率は有意に増加する。計算結果における増加量（図 4-7 中 5～14 オーダー）を応力に換算すると、最高品質の溶接施工の場合、母材における 1.5 倍程度の応力増加となる。これは、決定論評価における寿命の観点からは、約 3 割の運転サイクルに寿命が低下することを意味している。（図 4-7、図 4-8：3 割は当該はずみ範囲での例）
4. 耐圧設計のみ実施し、疲労設計を実施しなかった構造物に、熱疲労が生じたとしても、たいていの場合、疲労損傷による破損の防止ができています。たとえば、コーナー部に低品質の溶接を実施したとしても、肉厚の半分を超えるような大きな初期欠陥が発生することは考えにくく、その結果、このような設計・製作においても 10^4 [機器・供用期間]（一万個の機器に対し一回）といったような頻度でしか破損には至らない（検査・補修に期待しない場合）。（図 4-6）
5. 上記 4 のような設計・製作をした構造物においては、検査の重要性が高くなる。RT 並の PSI 及び運転期間の中期の ISI（UT）を実施した計算例では、破損確率が有意に下がっている（図 4-6 中 2 オーダー）。これは、当該部位での設計応力を $2/3$ 程度にすることと同等の効果があると計算されており、有意と見なせる。（図 4-6、図 4-8）
6. 運転中に新規に発生するき裂から破損に至りだすのは、運転期間の $1/10$ 程度でき裂が発生（中央値ベース）しているような高応力状態（図 4-8 中 900MPa : 寿命発生

の予測は約 100 サイクル)においてである。ただし、発生き裂が破損に至りだすと、当破損モードによりき裂が発生する部位(数量)が多いため、破損確率は急速に上昇し、検査及び補修のみにより破損を防止することは難しい。

7. 材料のき裂進展速度は、破損確率と有意な関係がある。現状の決定論的なき裂進展評価が、き裂進展速度は応力のおおよそ 3 乗に比例すると予測しているように、材料の劣化、破損モードの増加等による材料のき裂進展速度の変化は、破損確率を大幅に変更する(特に実際に設計領域になると思われる $1E-9$ [機器・供用期間]前後の低い破損確率の領域において)。(図 4-9、図 4-10)
8. 一般に、確率論的な評価においては、存在するき裂の最大深さに制限を設けないことが多いが、溶接施工のプロセスから考えると、複数の溶接パスにわたる初期欠陥は考えにくく、ある限られた層数に初期欠陥の深さを限定しても良いものと工学的には考えられる。その大きさは、数 mm (本計算では、TIG=3mm、SMAW,SAW=6mm と想定)程度と考えられるが、大きさ自体の影響は、個数や進展速度と比較すると大きくない。(図 4-12)
9. PSI を実施した場合においても、存在する可能性のある欠陥が 100%発見されることは考えにくい(本計算では、UT 並の検査においても 1mm 深さのき裂では約 2 割が未検出と想定)。そのため、き裂が進展する領域で、ISI による検査・補修を期待している場合は、PSI の効果は、ISI の効果と比較すると低い。これは、き裂がある程度進展した段階で検査を行う方が検査の効果がでるためである。

これらの特徴をもった評価方法で計算された破損確率(検査なし)は、「熱疲労を受ける構造に対し、熱疲労設計を実施した場合に想定される最大破損確率」は、 $1E-11$ [機器・供用期間]。「疲労設計を実施しなかった機器に熱疲労が生じた場合の破損確率」は、 $1E-4$ [機器・供用期間]と現時点で評価される。また、現状の機器区分をベースに考えると、「熱疲労設計を実施し、第 1 種機器相当の検査を実施する場合の破損確率」は、無視しうる程度に小さく($1E-12$ 未満[機器・供用期間])、「熱疲労設計を実施しなかった機器を、第 3 種機器として検査を実施せずに用いた場合の破損確率」は、 $1E-4$ [機器・供用期間]と評価される。

現時点で計算されている破損確率は、多くの仮定や想定を含んだものであり、現段階でそのまま設計に使用できるレベルのものではない。そのため、破損確率評価方法は、これまでの応力やひずみに基づき行われる設計から得られた知見との比較が今後必要となる。また、計算される破損確率の傾向をより定量的に捉えるためには、回帰分析等

を使用した各因子の影響を定量化する手段が必要となる。次章では、このような手段のうちベクトル法¹³を適用した例を紹介する。

表 4-1 破損確率計算の考え方

	第1種相当機器の構造		第3種相当機器の構造
評価部位	溶接部 A部、(B部)	母材部 B部	溶接部 C部
材料	316FR (共金系溶接金属)	316FR (鍛造材)	SUS304 (308系溶接金属)
熱荷重	1種機器母材部(B部)において、疲労損傷Dfが1000サイクルで1となる熱過渡条件を設定		
応力解析	上記熱過渡条件を用い、1種・3種両者に熱荷重を負荷し、弾性FEM解析によってそれぞれの応力分布を求める		
き裂発生評価	評価部位表面のピーク応力範囲に対し、弾性追従によるひずみ集中を考慮し、相当ひずみ範囲を算出 各材料の疲労寿命の1/2サイクルにおいて、0.5mm深さのき裂が発生すると考える		き裂発生の評価は、第1種機器と同じ考え方を用いる。 ただし、溶接部評価法は、SUS304のものを使用。
き裂進展評価	評価ラインに垂直な応力によりき裂が進展すると考える。		
疲労寿命	き裂発生サイクル数は、告示501号 別図第2 設計疲れ線図より繰返し数に対し20あるいは応力に対して2を除いた線図を中央値ベースの疲労寿命として考え、これをクライテリアとした。		
疲労き裂進展	各材料の試験データをもとにParis則の係数について対数正規分布を設定		
初期欠陥分布	対象溶接部に1.21E-4の確率で1個の初期欠陥が存在すると設定	初期欠陥は存在しないと設定	対象溶接部に1.21E-2の確率で1個の初期欠陥が存在すると設定
初期欠陥の深さ分布	Jouris & Shafferの式 ただし、上限値あり (TIG 3mm, SMAW, SAW 6mm)	初期欠陥なし	Jouris & Shafferの式 ただし、上限値あり (6mm)
初期欠陥のアスペクト比(き裂半長/き裂深さ)	Harrisの式		
PSI/ISI	RT: Halmshawの式、UT: Simonenの式		

表 4-2 破損確率計算の入力

	第1種機器相当の構造			3種
	A溶接部 (30mm)	B溶接部(10mm)	B母材部(10mm)	C溶接部
ピーク応力範囲[MPa]	444	677	677	887
応力集中係数 K、 弾性追従係数 q_n	1.00、3	1.19、3	1.19、3	2.00、3
相当ひずみ範囲[%]	0.328	0.841	0.841	3.25
き裂発生サイクル(中央値) 対数標準偏差	234,000 1.0	7,450 0.4	10,000 0.4	261 0.4
膜応力範囲[MPa]	9.56	9.61	9.61	23.5
曲げ応力範囲[MPa]	413	576	576	618
Paris則の係数C1 対数標準偏差	1.43E-4 0.42	1.43E-4 0.42	1.43E-4 0.42	1.43E-4 0.42
Paris則の指数 m_1	1.37	1.37	1.37	1.37
PSI (溶接検査)	RT	RT	なし	RT
ISI (UT)	100%/10年	100%/10年	なし	7.5%/10年

供用前のUTについては、ISIとの比較用データを取得していると解釈し、PSIでのき裂検出(及び補修)確率としては、考慮していない。

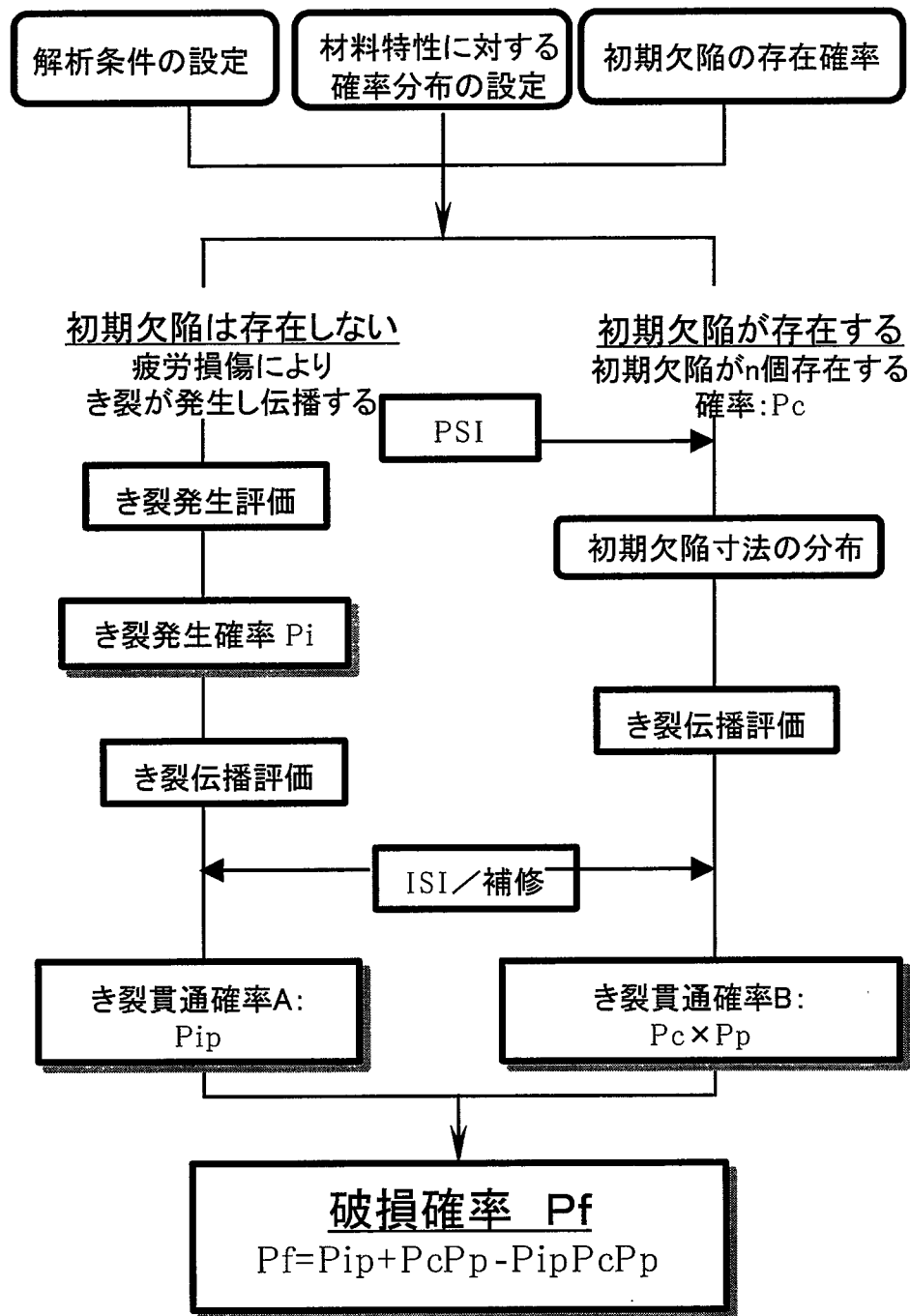
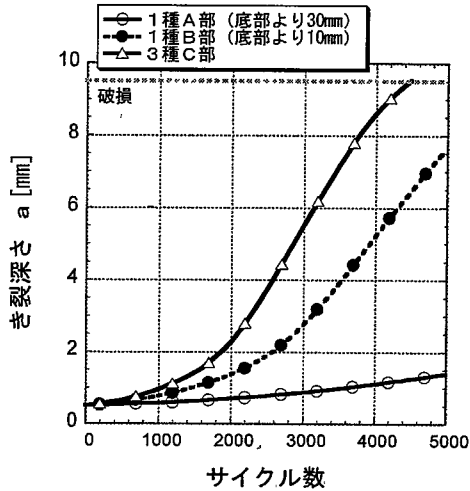


図 4-1 破損確率の計算フロー

初期欠陥深さが0.5mm、アスペクト比1の場合のき裂進展量(決定論)



0.5mm深さのき裂が発生するサイクル数

1種 A溶接部	1種 B母材部	1種 B溶接部 (仮想)	3種 C溶接部
234,000	10,000	7,450	261

き裂の破損に至るサイクル数

	1種 A部	1種 B母材部	1種 B溶接部	3種 C部
0.5mm→3/4t	16,000	6,200	6,200	4,500
最短破損サイクル	3mm→3/4t 8,000	(き裂発生 10,000)+ 6,200	3mm→3/4t 3,100	6mm→3/4t 1,500

図 4-2 各評価部位でのき裂発生寿命及びき裂進展速度

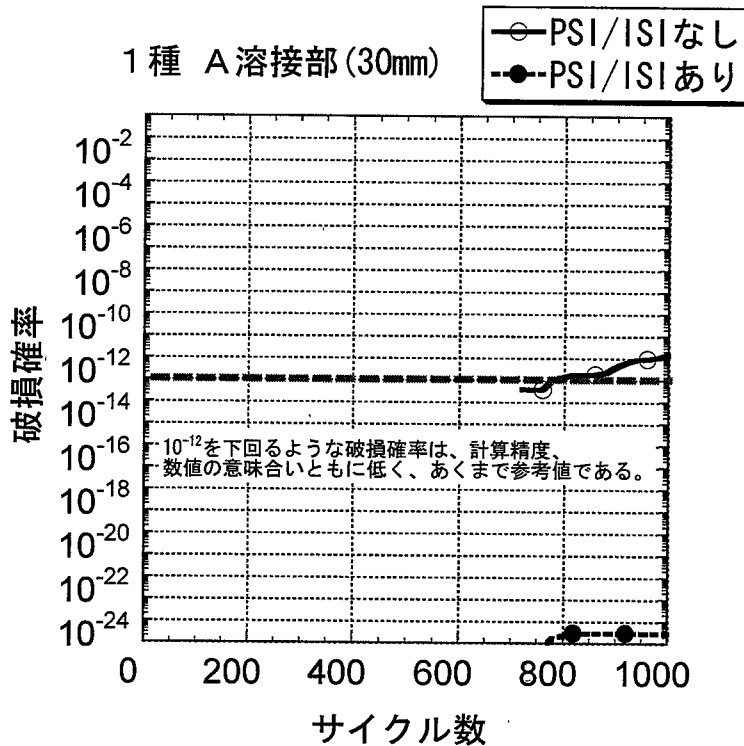


図 4-3 A 溶接部での破損確率

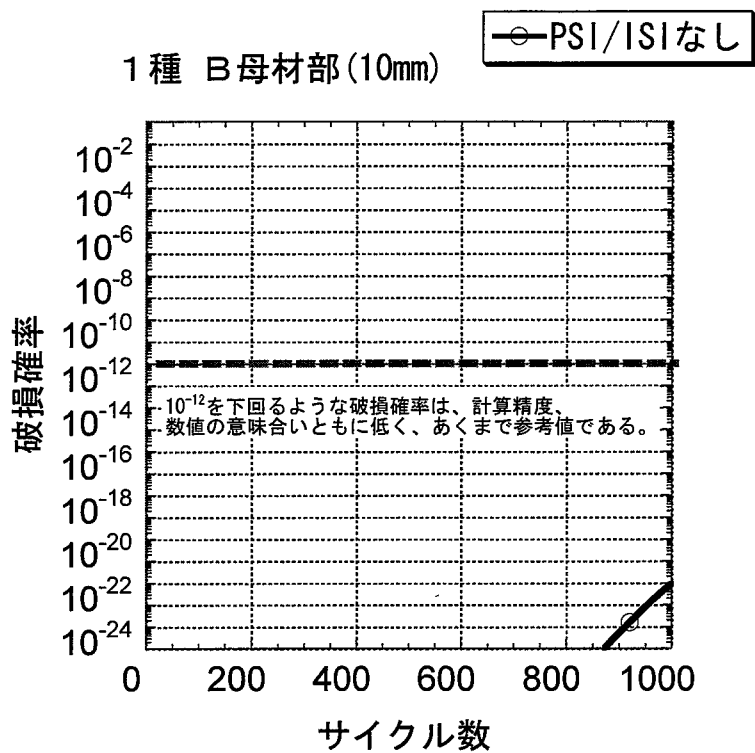


図 4-4 B母材部での破損確率

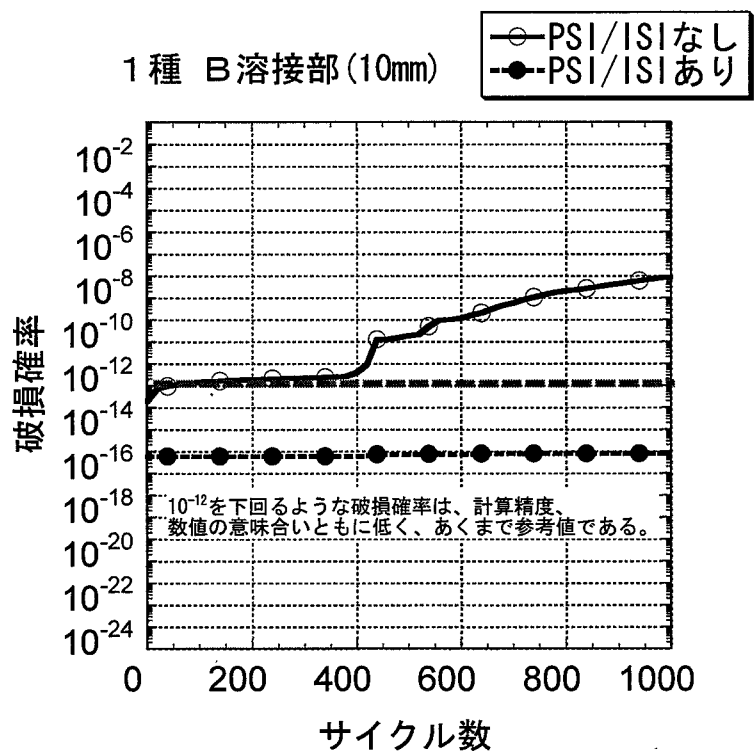


図 4-5 B溶接部での破損確率

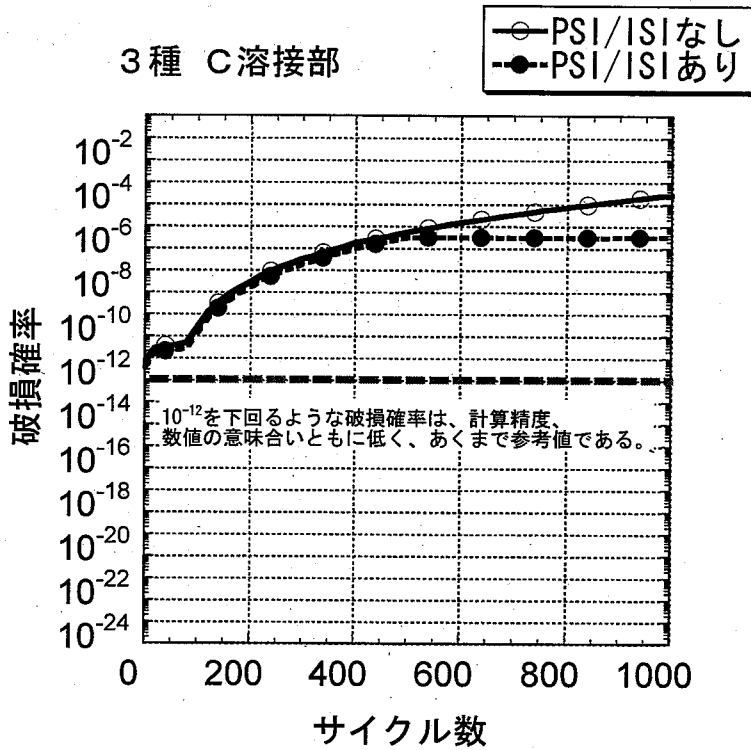
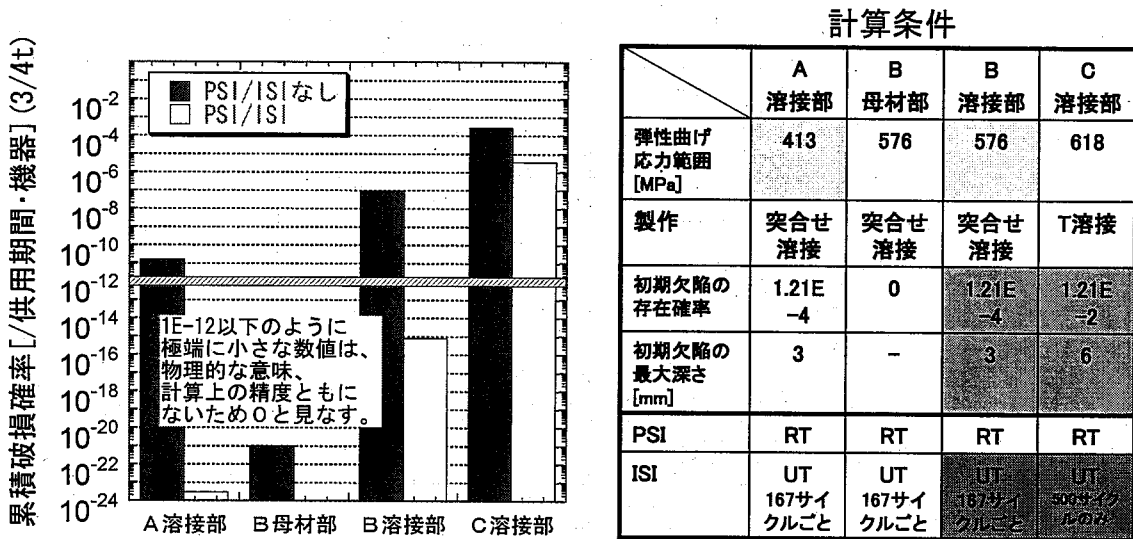


図 4-6 C溶接部での破損確率



A溶接部は、熱疲労設計を実施した場合の設計限界条件。
 C溶接部は、熱疲労設計を実施しない場合に予測される最大破損条件。

図 4-7 基本構造での破損確率

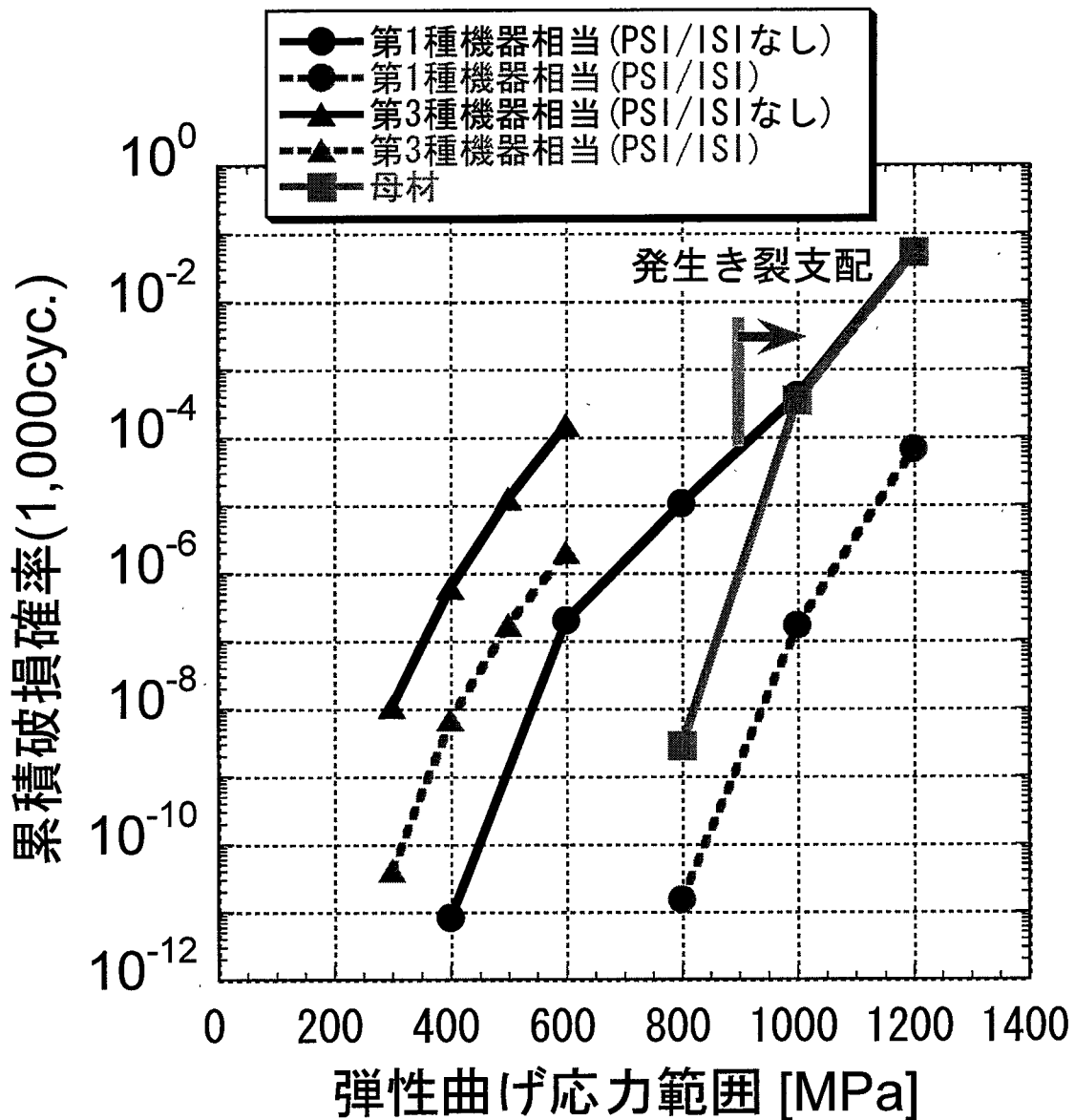


図 4-8 応力に対する感度

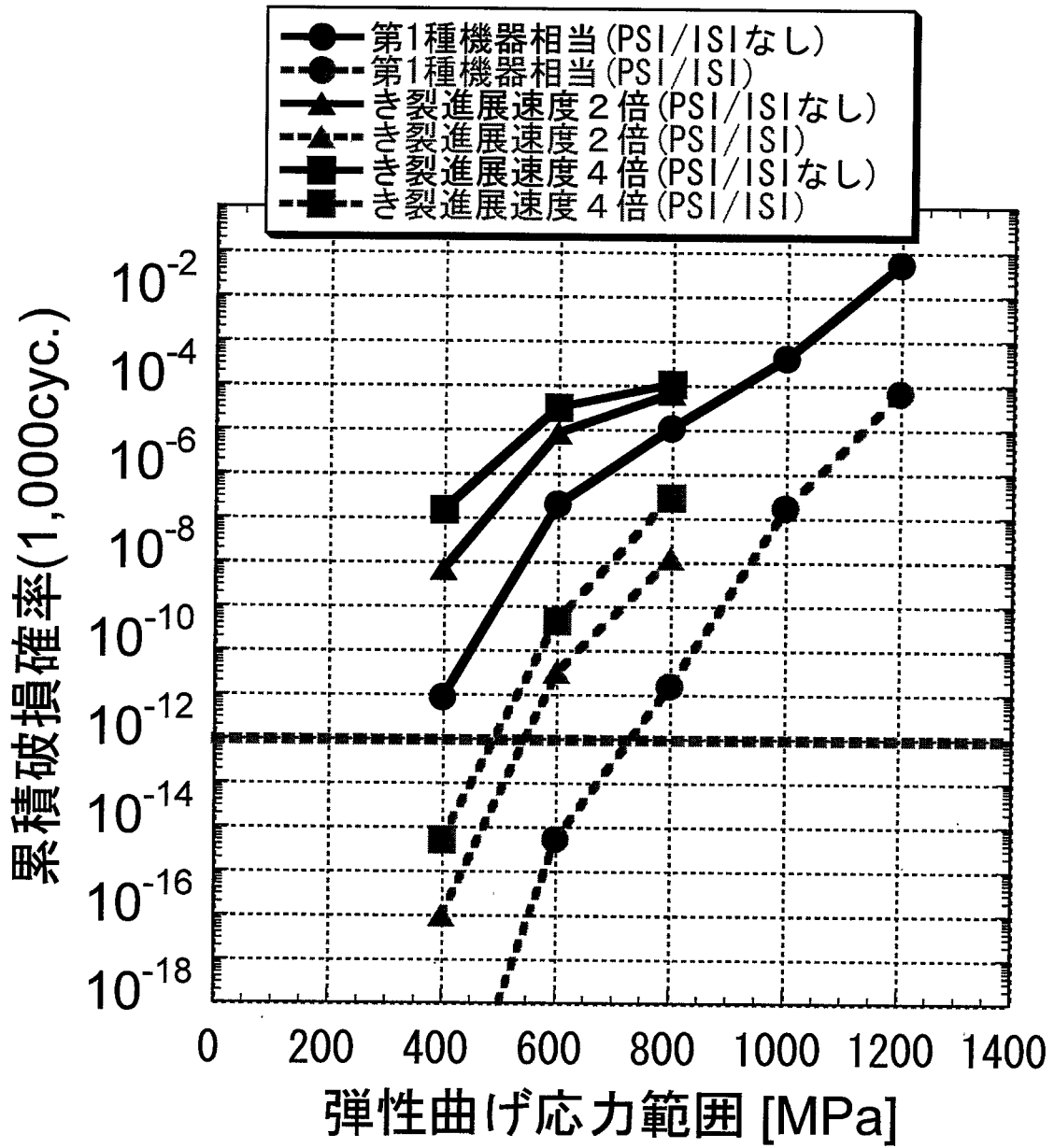
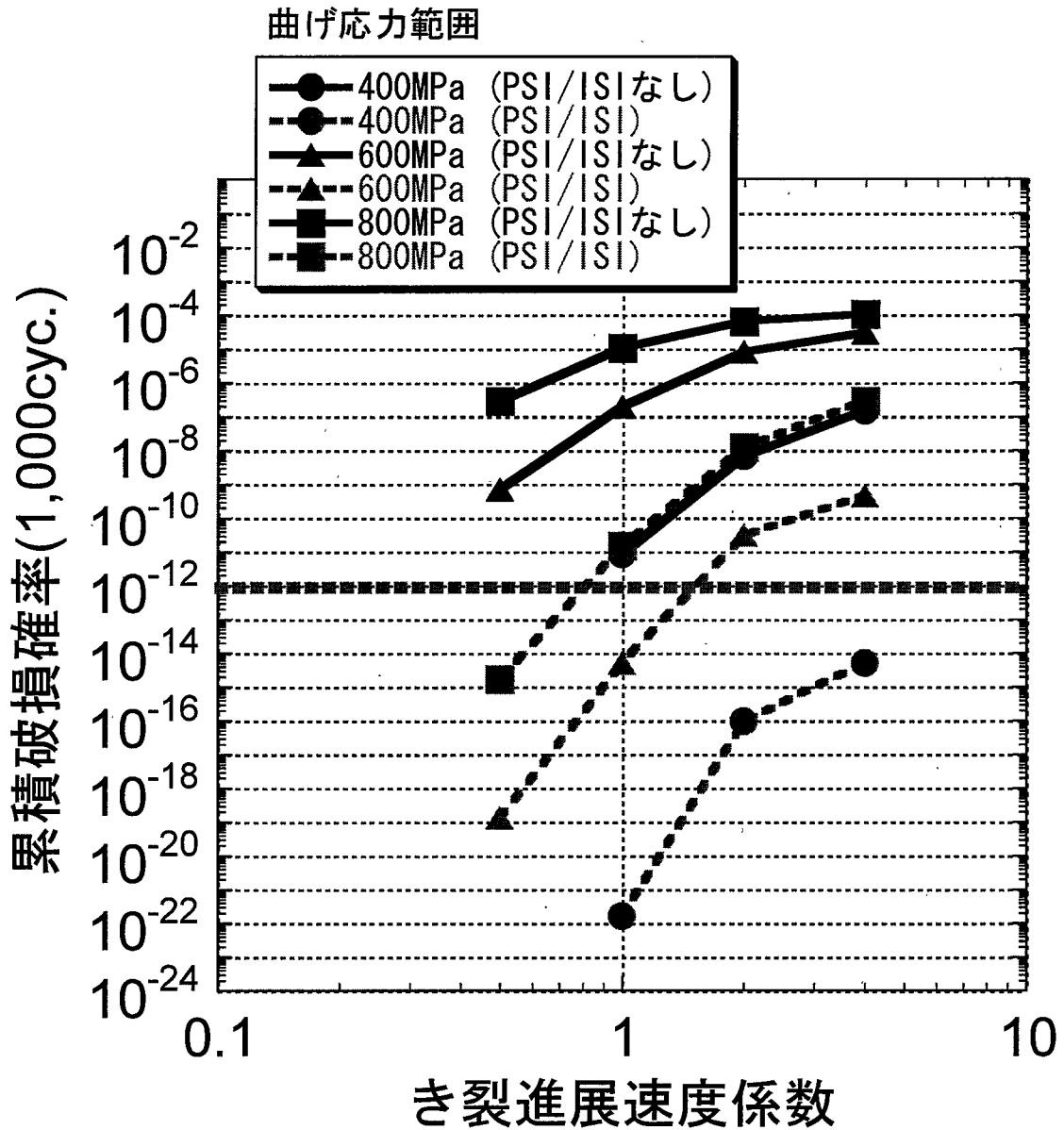


図 4-9 き裂進展速度に対する感度



注：本係数は、標準き裂進展速度との比率である。

(標準き裂進展速度: $da/dn = C_1 \Delta J f^{1.37}$; C_1 : 中央値 $1.43E-4$ [mm/cycle]、対数標準偏差 0.42 の対数正規分布)

図 4-10 き裂進展速度に対する感度 (2)

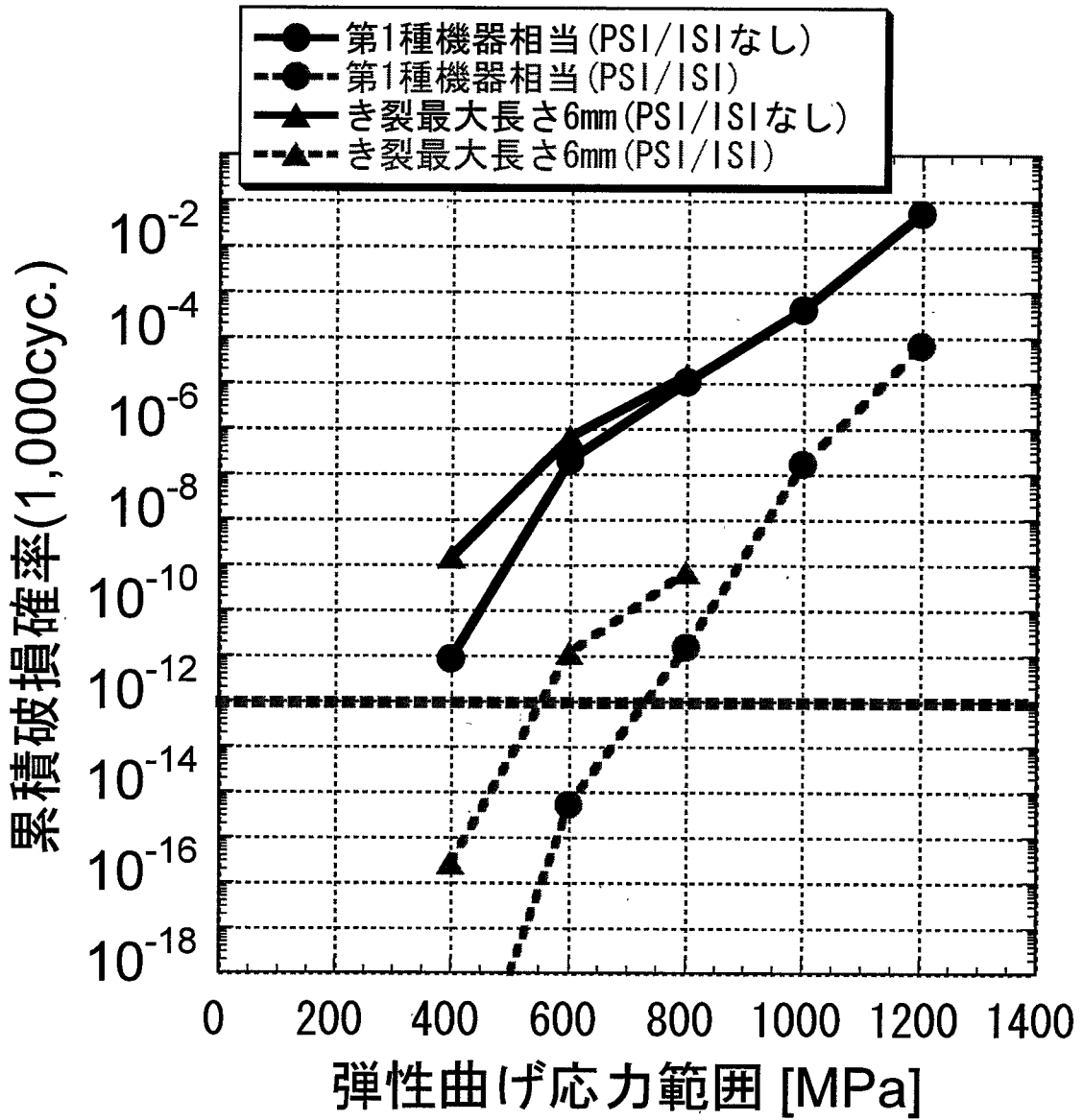


図 4-11 最大き裂深さに対する感度

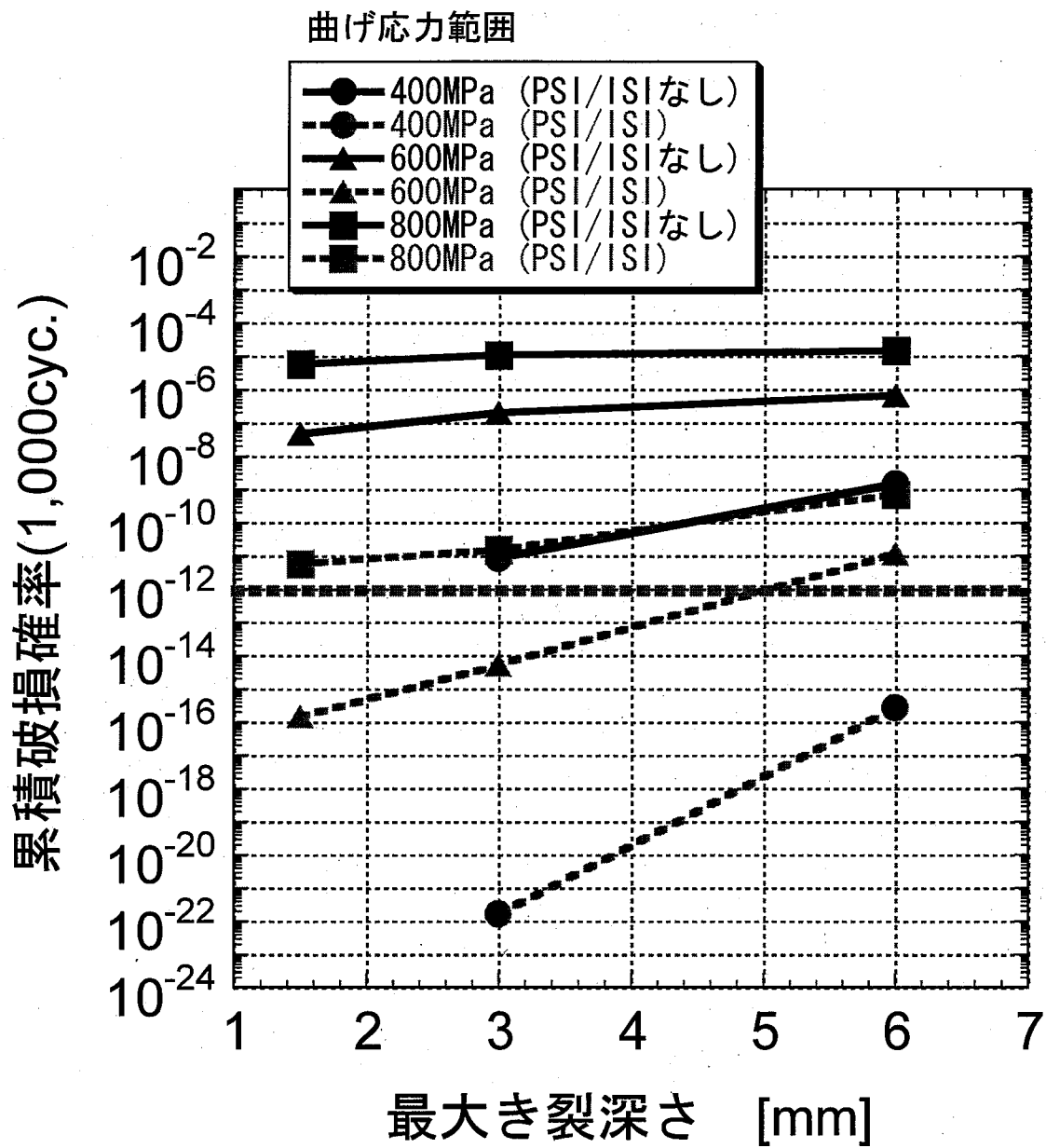


図 4-12 最大き裂深さに対する感度 (2)

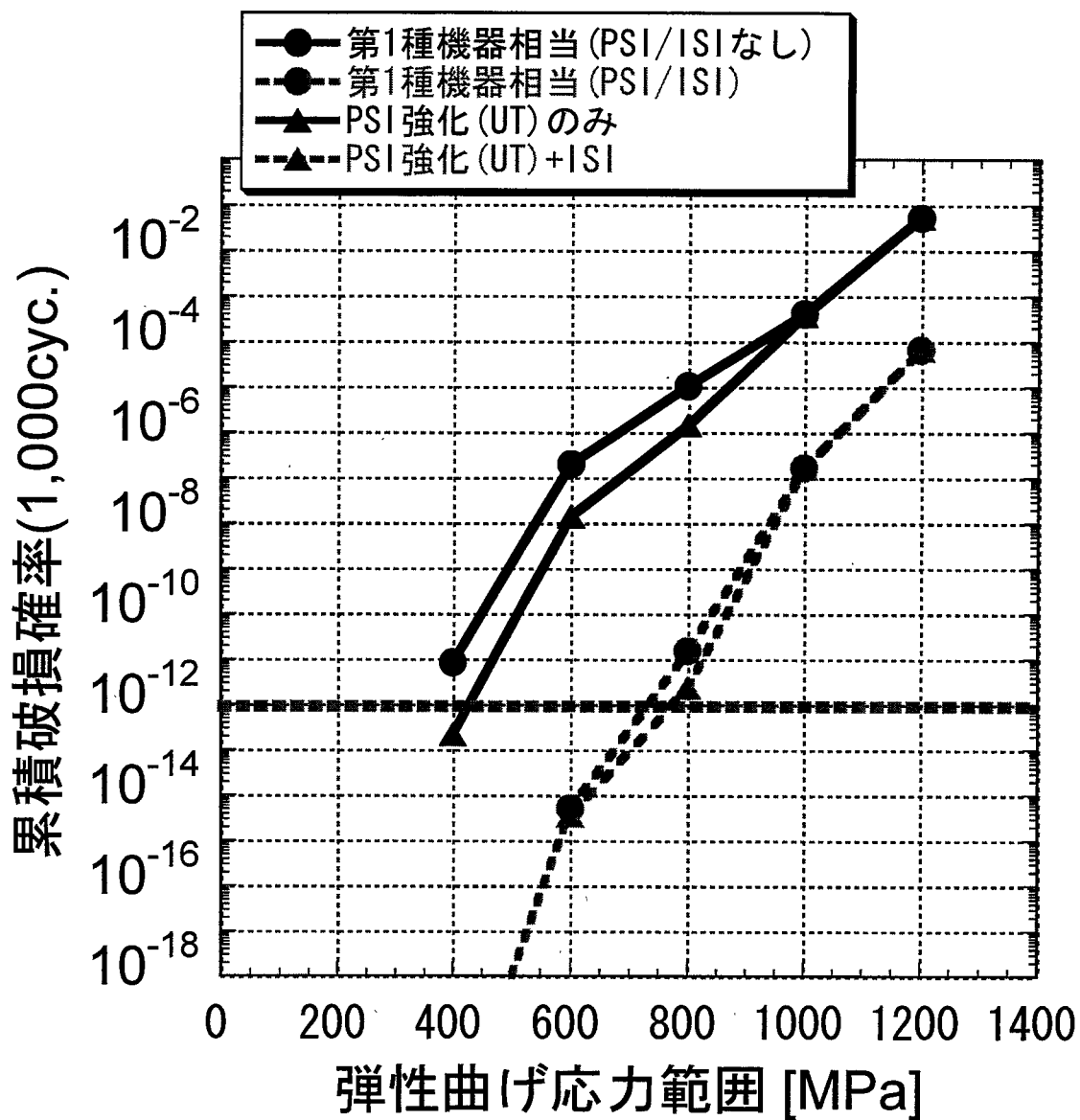


図 4-13 検査に対する感度

5. 破損確率の定式化

ベクトル法¹³は、裕度交換の可否を判断する簡易信頼度評価法として提案された手法であり、予め代表的な条件について等破損確率曲面を求めておき、その後、この曲面に対し線形化処理を実施、ベクトル計算により裕度交換評価を行う手法である。

本検討のように限られた計算結果から等破損確率曲面を求めることは難しいため、ここでは、破損確率計算結果に対し、線形化処理を実施し、破損確率のベクトル表記を試みることにした。

前章での検討から、使用する曲げ応力範囲が制限されている場合（き裂発生に対し、運転寿命の10倍以上の裕度が確保されている。）、破損確率の傾向は、概ね曲げ応力範囲と破損確率の関係で基本的な特性は押さえられ、き裂進展速度、最大き裂深さ、検査種別（PSI）、ISIの有無・頻度により補正を加えれば、おおよその破損確率の定式化は可能と考えられる。

一方、応力の3乗がき裂進展速度となり、該当き裂進展速度で進展する初期欠陥のうち、破損に至る欠陥の割合が破損確率となることから、破損確率を支配するパラメータとしては、応力よりき裂進展速度の方が適切である。このことから、破損確率の定式化においては、荷重、材料、製作、PSI、ISIの各分野において、特徴的なパラメータを抽出後、より破損確率との関連が深いパラメータに変換することにより、より簡便な関数として破損確率を表現できると思われる。

破損確率をこれらのパラメータの線形和 $[\log(\text{Pf}) = \sum a_i z_i; a_i \text{ 各パラメータに対する影響係数、} z_i \text{ 各パラメータ}]$ として表現できれば、モンテカルロ法による破損確率の計算を前提とする設計でなく、ベクトル法のような簡易破損確率予測式に基づく設計が可能となる。本章では、前章で計算した破損確率をこの線形和の形で予測できるか検討を行う。

前章で各パラメータの変動範囲が実際の供用範囲をカバーするようにパラメータ計算を実施しているため、その結果を使用し検討を行った。パラメータ計算の計算条件を表記したものが、表5-1である。

荷重：曲げ応力範囲、材料：き裂進展速度、製作：初期欠陥の個数、最大き裂深さ、PSI：検査種別、ISI：検査頻度が各分野の特徴的なパラメータ(x)である。

これらのパラメータをより破損確率と対応づけるように変数変換(x→y)を実施する。変数変換式を、表5-2及び以下に示す。

荷重： 応力の3乗

材料： 進展速度比の対数

製作（初期欠陥の個数）： 個数の対数

製作（最大き裂深さ）： き裂深さの指数

PSI： 検査種別による点数化

ISI : 検査間隔[年]

また、各パラメータに対する影響係数の大きさを比較できるように各パラメータの使用範囲を設定し、該当使用範囲が 0 点～5 点までの範囲に分布するように線形変換を実施することとする。この変換式は、図 5-1 に示すものであり、その結果各パラメータは、表 5-3 のように変換される。なお、初期欠陥の個数と破損確率の関係は、破損確率が小さいとき、ほぼ線形関係にあるため、今回の検討（4 章の破損確率計算）では対象外としているため、本章の検討でも対象外としている。

このような変換を経て、各分野の基本パラメータ x_i (表 5-1) は、変数変換により y_i (表 5-4) に、点数化により z_i (表 5-5) に変換される。破損確率 Pf が下記のような式で表現できるかどうか判断するために、表 5-5 に対し、回帰分析を実施し、影響係数を求めた。

$\log(Pf) = \sum a_i z_i + C$: a_i 影響係数、 z_i 各分野での品質点数

回帰分析により計算される影響係数は、荷重 : -1.88、材料 : -2.57、製作 : -1.56、PSI : -0.29、ISI : -1.48 となった。モンテカルロ計算により計算された破損確率と本手法により予測される破損確率を図 5-2 に示す。1E-5/[機器・供用期間]を上回る領域や 1E-10/[機器・供用期間]を下回る領域で、多少保守的な評価を与えるものの、1E-5～1E-10/[機器・供用期間]といった実際に使用する領域では、このような簡易手法でも、おおむね破損確率を予測できていることがわかる。

$\log(Pf) = \sum a_i z_i + C$ という定式化では、影響係数を簡便に定数として回帰しているため、実際の破損確率との間に回帰予測誤差が生じる。そのため、回帰分析における条件を絞り込み、各分野の条件ごとに影響係数を求めた。各分野の条件を変更した場合の影響係数を図 5-3 から図 5-6 に示す。これらの図から応力レベル、検査の有無という条件による影響係数の差異が大きいことがわかる。そのため、応力レベルを 3 レベル、検査を有無という 2 レベルに分割し、以下の 6 条件に対し、別途影響係数を求めることとした。

低応力 (400MPa) 検査 (PSI/ISI) なし
 中応力 (600MPa) 検査 (PSI/ISI) なし
 高応力 (800MPa) 検査 (PSI/ISI) なし
 低応力 (400MPa) 検査 (PSI/ISI) あり
 中応力 (600MPa) 検査 (PSI/ISI) あり
 高応力 (800MPa) 検査 (PSI/ISI) あり

その結果影響係数は、表 5-6 のようになった。影響係数をレーダーチャートで表現すると図 5-7 のようになる。本図は、表 5-6 での解析結果の示す以下のような傾向を図にしたものである。

- ・ 材料、製作、ISI の影響係数は応力が高くなるほど小さくなっていき、これらの因子の影響は高応力ほど少ない（4 章の傾向の定量化）。
- ・ PSI, ISI の係数変化は小さく、材料、製作と比較すれば、ほぼ一定と見なしてよい

レベルである。

図 5-8 は、条件に応じ表 5-6 に示す影響係数を使い分けた時の破損確率の予測値を示している。本図は、どの破損破損確率のレベルにおいても、おおむね $\log(Pf) = \sum a_i z_i + C$ という単純な線形和の形に、破損確率は定式化することができ、その精度はおおよそ ± 2 オーダーの精度であることを示している。

表 5-1 支配パラメータと計算された破損確率の一覧

No.	荷重 (曲げ応力[MPa])	材料	製作 き裂の長さ[mm] /厚み[mm]	製作 最大き裂長さ[mm]	PSI	ISI (間隔)	破損確率 (Pf)	log(Pf)
1	413	316FR	1.00E-04	3	なし	なし	1.5E-11	-11
2	413	"	"	3	RT	10年	2.9E-24	-24
3	576	"	0	0	なし	なし	9.3E-22	-21
4	576	"	1.00E-04	3	なし	なし	8.8E-08	-7
5	576	"	"	3	RT	10年	7.3E-16	-15
6	618	304	1.00E-02	6	RT	30年	3.3E-06	-5
7	400	316FR	1.00E-04	3	なし	なし	8.2E-12	-11
8	600	"	"	3	"	"	2.0E-07	-7
9	800	"	"	3	"	"	1.0E-05	-5
10	1000	"	"	3	"	"	4.0E-04	-3
11	400	"	"	3	RT	10年	1.6E-22	-22
12	600	"	"	3	"	"	5.0E-15	-14
13	800	"	"	3	"	"	1.5E-11	-11
14	1000	"	"	3	"	"	1.7E-07	-7
15	400	304	1.00E-02	6	なし	なし	6.0E-07	-6
16	600	"	"	6	"	"	1.5E-04	-4
17	400	"	"	6	RT	30年	6.8E-09	-8
18	600	"	"	6	"	"	2.0E-06	-6
19	400	316FR:2倍	1.00E-04	3	なし	なし	6.6E-09	-8
20	400	316FR:4倍	"	3	"	"	1.5E-07	-7
21	600	316FR:2倍	"	3	"	"	8.1E-06	-5
22	600	316FR:4倍	"	3	"	"	3.0E-05	-5
23	800	316FR:2倍	"	3	"	"	6.4E-05	-4
24	800	316FR:4倍	"	3	"	"	1.1E-04	-4
25	400	316FR:2倍	"	3	RT	10年	9.4E-17	-16
26	400	316FR:4倍	"	3	"	"	5.0E-15	-14
27	600	316FR:2倍	"	3	"	"	3.1E-11	-11
28	600	316FR:4倍	"	3	"	"	4.5E-10	-9
29	800	316FR:2倍	"	3	"	"	1.2E-08	-8
30	800	316FR:4倍	"	3	"	"	2.8E-07	-7
31	400	316FR	1.00E-04	6	なし	なし	1.4E-09	-9
32	600	"	"	6	"	"	6.4E-07	-6
33	800	"	"	6	"	"	1.5E-05	-5
34	400	"	"	6	RT	10年	2.6E-16	-16
35	600	"	"	6	"	"	1.1E-11	-11
36	800	"	"	6	"	"	6.9E-10	-9
37	400	316FR	1.00E-04	3	UT	なし	2.1E-13	-13
38	600	"	"	3	"	"	1.4E-08	-8
39	800	"	"	3	"	"	1.4E-06	-6
40	1000	"	"	3	"	"	3.6E-04	-3
41	400	"	"	3	"	10年	5.4E-24	-23
42	600	"	"	3	"	"	3.4E-15	-14
43	800	"	"	3	"	"	2.3E-12	-12
44	1000	"	"	3	"	"	1.6E-07	-7
45	600	316FR:1/2倍	1.00E-04	3	なし	なし	6.8E-10	-9
46	800	316FR:1/2倍	1.00E-04	3	なし	なし	2.9E-07	-7
47	600	316FR	1.00E-04	1.5	なし	なし	4.4E-08	-7
48	800	316FR	1.00E-04	1.5	なし	なし	5.8E-06	-5
49	600	316FR:1/2倍	1.00E-04	3	RT	10年	1.3E-19	-19
50	800	316FR:1/2倍	1.00E-04	3	RT	10年	1.6E-15	-15
51	600	316FR	1.00E-04	1.5	RT	10年	1.5E-16	-16
52	800	316FR	1.00E-04	1.5	RT	10年	5.7E-12	-11

表 5-2 変数変換式

	パラメータ	想定範囲 (計算値)	変数変換式	本検討における備考
x_1	荷重 曲げ応力範囲	0~800MPa (400~1200MPa)	$y_1 = k \cdot x_1^n$ $= 1.24 \times 10^{-5} \cdot x_1^3$	き裂発生の影響が現れる高応力 条件は検討対象外。 膜応力比高も検討対象外。
x_2	材料 き裂進展速度	中央値の0.1~10倍 (0.5, 1, 2, 4倍)	$y_2 = \log(x_2)$	
x_3	製作 き裂個数	0~1 (1個のき裂の存在確率) (0, 1E-4, 1E-2)	$y_3 = \log(x_3)$	破損確率の低い領域では、破損 確率とき裂の存在確率が比例す ることから、本パラメータは検討対 象外とした。1E-4のケースを使用。
x_4	製作 最大き裂深さ	0~3/4t (1.5, 3, 6mm:t=12.7)	$y_4 = \exp(kx_4)$ $= \exp(-x_4/1.34)$	
x_5	PSI 検査種別	なし、RT、UT	なし、RT、UT $= (0, 3, 5)$	
x_6	ISI 検査頻度	なし~1年間隔 (なし、10年、30年)	$y_6 = x_6$	UTを想定。 ISIなしは、点数を0点とする。 z=0

表 5-3 支配パラメータの変換例

荷重

曲げ応力 MPa	y1	z1 点
0	0	5.00
400	793.6	4.5
600	2678.4	3.3
800	6348.8	1

PSI

PSI	z5 点
UT	5
RT	3
なし	0

材料

き裂進展 速度比	y2	z2 点
0.1	-1.0	5
0.5	-0.3	3.25
1	0.0	2.5
2	0.3	1.75
4	0.6	0.99
10	1.0	0

ISI

ISI	y6	z6 点
1年	1	5
10年	10	4.24
30年	30	2.54
60年以上	60	0

製作

最大き裂 深さ mm	y4	z4 点
0	1.00	5
1.5	0.33	1.63
3	0.11	0.53
6	0.01	0.05
9.5	0.00	0

表 5-4 変数変換された支配パラメータの一覧

No.	荷重 y1	材料 y2	製作 y3	製作 y4	PSI y5	ISI y6
1	873.5	0.00	4	0.107	0	∞
2	873.5	0.00	4	0.107	3	10
3	2369.7	0.00	-	1.000	0	∞
4	2369.7	0.00	4	0.107	0	∞
5	2369.7	0.00	4	0.107	3	10
6	2926.8	0.00	2	0.011	3	30
7	793.6	0.00	4	0.107	0	∞
8	2678.4	0.00	4	0.107	0	∞
9	6348.8	0.00	4	0.107	0	∞
10	12400.0	0.00	4	0.107	0	∞
11	793.6	0.00	4	0.107	3	10
12	2678.4	0.00	4	0.107	3	10
13	6348.8	0.00	4	0.107	3	10
14	12400.0	0.00	4	0.107	3	10
15	793.6	0.00	2	0.011	0	∞
16	2678.4	0.00	2	0.011	0	∞
17	793.6	0.00	2	0.011	3	30
18	2678.4	0.00	2	0.011	3	30
19	793.6	0.30	4	0.107	0	∞
20	793.6	0.60	4	0.107	0	∞
21	2678.4	0.30	4	0.107	0	∞
22	2678.4	0.60	4	0.107	0	∞
23	6348.8	0.30	4	0.107	0	∞
24	6348.8	0.60	4	0.107	0	∞
25	793.6	0.30	4	0.107	3	10
26	793.6	0.60	4	0.107	3	10
27	2678.4	0.30	4	0.107	3	10
28	2678.4	0.60	4	0.107	3	10
29	6348.8	0.30	4	0.107	3	10
30	6348.8	0.60	4	0.107	3	10
31	793.6	0.00	4	0.011	0	∞
32	2678.4	0.00	4	0.011	0	∞
33	6348.8	0.00	4	0.011	0	∞
34	793.6	0.00	4	0.011	3	10
35	2678.4	0.00	4	0.011	3	10
36	6348.8	0.00	4	0.011	3	10
37	793.6	0.00	4	0.107	5	∞
38	2678.4	0.00	4	0.107	5	∞
39	6348.8	0.00	4	0.107	5	∞
40	12400.0	0.00	4	0.107	5	∞
41	793.6	0.00	4	0.107	5	10
42	2678.4	0.00	4	0.107	5	10
43	6348.8	0.00	4	0.107	5	10
44	12400.0	0.00	4	0.107	5	10
45	2678.4	-0.30	4	0.107	0	∞
46	6348.8	-0.30	4	0.107	0	∞
47	2678.4	0.00	4	0.326	0	∞
48	6348.8	0.00	4	0.326	0	∞
49	2678.4	-0.30	4	0.107	3	10
50	6348.8	-0.30	4	0.107	3	10
51	2678.4	0.00	4	0.326	3	10
52	6348.8	0.00	4	0.326	3	10

表 5-5 点数一覧

No.	荷重 z1	材料 z2	製作 z3	製作 z4	PSI z5	ISI z6	log(Pf)
1	4.45	2.50	-	0.53	0.00	0.00	-11
2	4.45	2.50	-	0.53	3.00	4.24	-24
3							
4	3.51	2.50	-	0.53	0.00	0.00	-7
5	3.51	2.50	-	0.53	3.00	4.24	-15
6							
7	4.50	2.50	-	0.53	0.00	0.00	-11
8	3.31	2.50	-	0.53	0.00	0.00	-7
9	1.00	2.50	-	0.53	0.00	0.00	-5
10							
11	4.50	2.50	-	0.53	3.00	4.24	-22
12	3.31	2.50	-	0.53	3.00	4.24	-14
13	1.00	2.50	-	0.53	3.00	4.24	-11
14							
15							
16							
17							
18							
19	4.50	1.75	-	0.53	0.00	0.00	-8
20	4.50	0.99	-	0.53	0.00	0.00	-7
21	3.31	1.75	-	0.53	0.00	0.00	-5
22	3.31	0.99	-	0.53	0.00	0.00	-5
23	1.00	1.75	-	0.53	0.00	0.00	-4
24	1.00	0.99	-	0.53	0.00	0.00	-4
25	4.50	1.75	-	0.53	3.00	4.24	-16
26	4.50	0.99	-	0.53	3.00	4.24	-14
27	3.31	1.75	-	0.53	3.00	4.24	-11
28	3.31	0.99	-	0.53	3.00	4.24	-9
29	1.00	1.75	-	0.53	3.00	4.24	-8
30	1.00	0.99	-	0.53	3.00	4.24	-7
31	4.50	2.50	-	0.05	0.00	0.00	-9
32	3.31	2.50	-	0.05	0.00	0.00	-6
33	1.00	2.50	-	0.05	0.00	0.00	-5
34	4.50	2.50	-	0.05	3.00	4.24	-16
35	3.31	2.50	-	0.05	3.00	4.24	-11
36	1.00	2.50	-	0.05	3.00	4.24	-9
37	4.50	2.50	-	0.53	5.00	0.00	-13
38	3.31	2.50	-	0.53	5.00	0.00	-8
39	1.00	2.50	-	0.53	5.00	0.00	-6
40							
41	4.50	2.50	-	0.53	5.00	4.24	-23
42	3.31	2.50	-	0.53	5.00	4.24	-14
43	1.00	2.50	-	0.53	5.00	4.24	-12
44							
45	3.31	3.25	-	0.53	0.00	0.00	-9
46	1.00	3.25	-	0.53	0.00	0.00	-7
47	3.31	2.50	-	1.63	0.00	0.00	-7
48	1.00	2.50	-	1.63	0.00	0.00	-5
49	3.31	3.25	-	0.53	3.00	4.24	-19
50	1.00	3.25	-	0.53	3.00	4.24	-15
51	3.31	2.50	-	1.63	3.00	4.24	-16
52	1.00	2.50	-	1.63	3.00	4.24	-11

表 5-6 影響係数

	荷重 a1	材料 a2	製作 a4	PSI a5	ISI a6	定数項 C
全体	-1.88	-2.57	-1.56	-0.29	-1.48	5.38
低応力 検査なし	(-0.08)	-2.83	-4.14	-	-	-1.19
中応力 検査なし	(-0.58)	-1.97	-0.57	-	-	0.23
高応力 検査なし	-	-1.08	-0.15	-	-	-2.44
低応力 検査あり	-	-5.85	-13.90	-0.52	-2.50	11.90
中応力 検査あり	(-5.62)	-3.93	-2.39	-0.21	-1.56	22.90
高応力 検査あり	-	-3.42	-0.86	-0.39	-1.37	5.13

基本式

基本パラメータ $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$

= (応力, き裂進展速度, き裂個数, 最大き裂深さ, PSI種別, ISI頻度)

$$\log(Pf) = \sum k_i(x) x_i + C$$

$$= \sum a_i y_i + C'$$

$$= \sum a_i' z_i + C'' \quad [C, C', C'', a_i, a_i' : \text{定数}, y_i = g_{1-i}(x_i), z_i = g_{2-i}(y_i)]$$

y : x の変数変換 $y_i = g_{1-i}(x_i)$

$\log(Pf)$ と y_i が線形な関係になるように変換式を予測し変数変換した x

z : y の点数化。 $z_i = g_{2-i}(y_i)$

y_i の最大値と最小値が5点から0点(1点)の範囲に分布するように線形変換した y

$$z = \frac{y_i - y_{i-\text{最小点数}}}{\frac{y_{i-\text{最大点数}} - y_{i-\text{最小点数}}}{\text{点数幅}}} + \text{最低点数}$$

図 5-1 破損確率の定式化

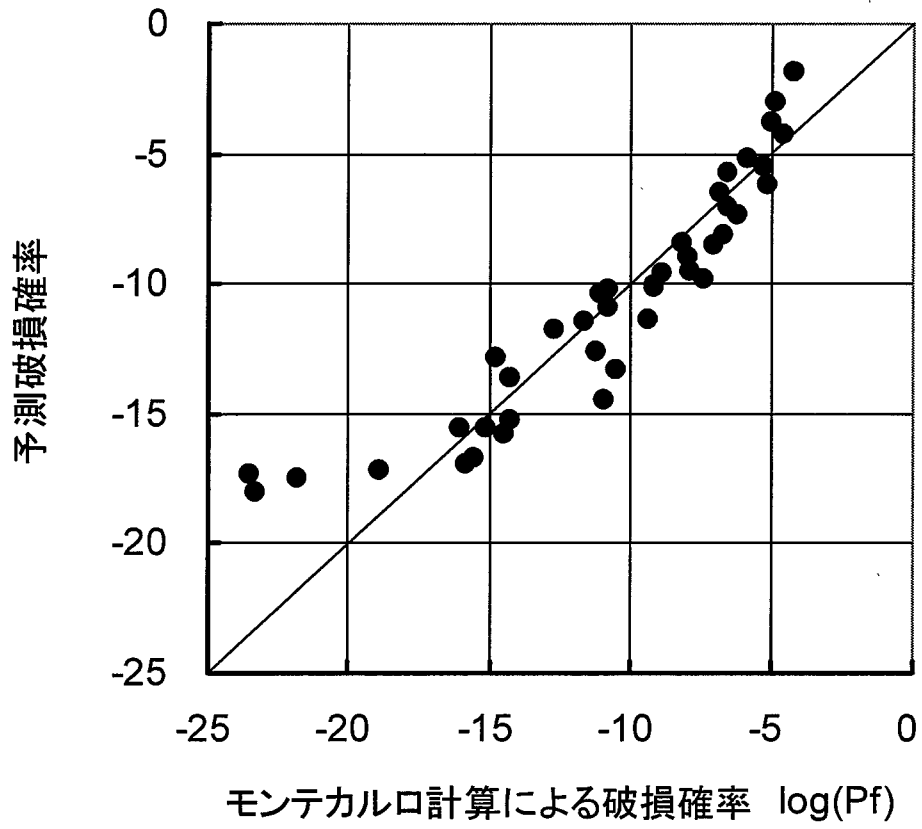


図 5-2 予測される破損確率 (全体回帰)

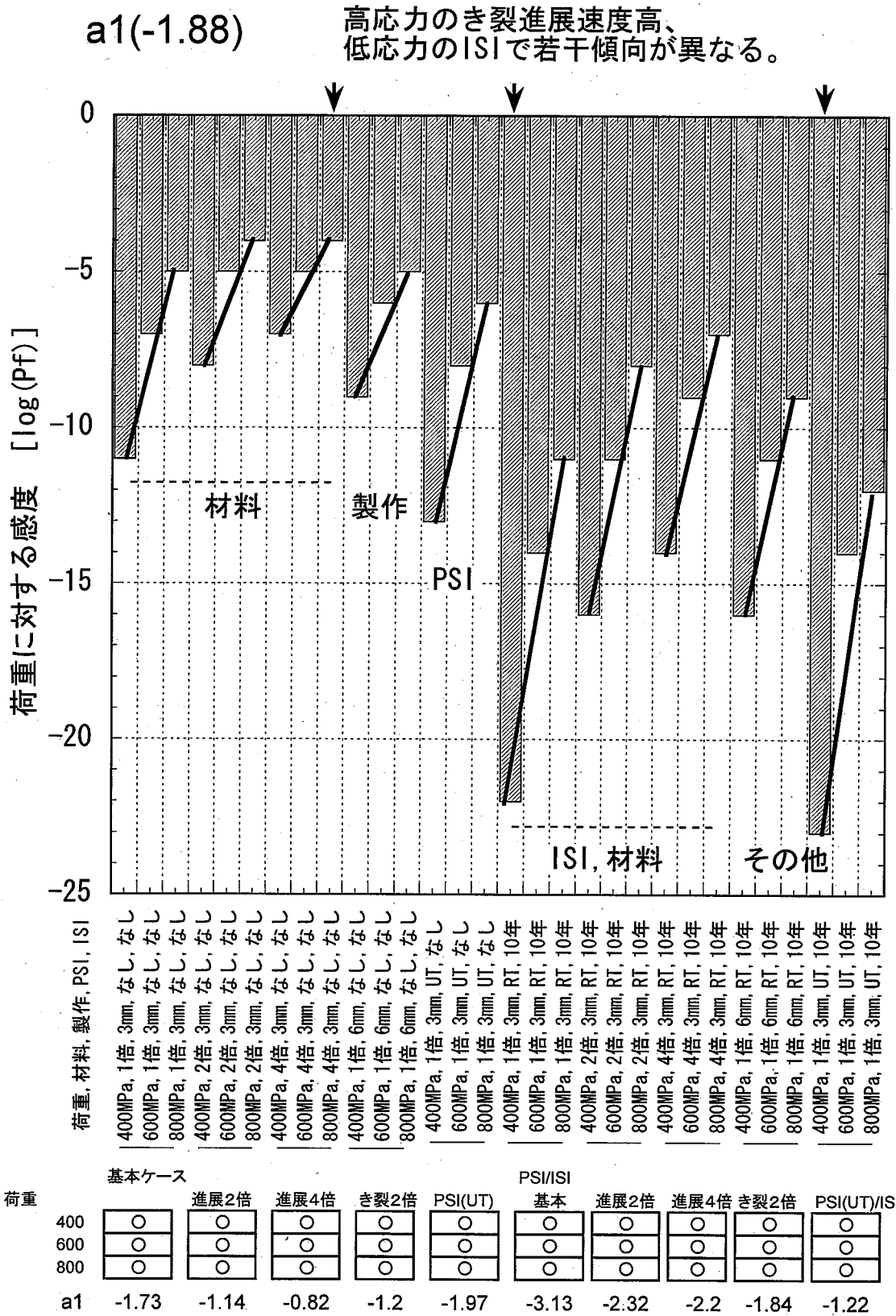


図 5-3 応力の感度

a2 (-2.57) ISIの有無で傾向が異なる。
 応力レベルにも依存する。

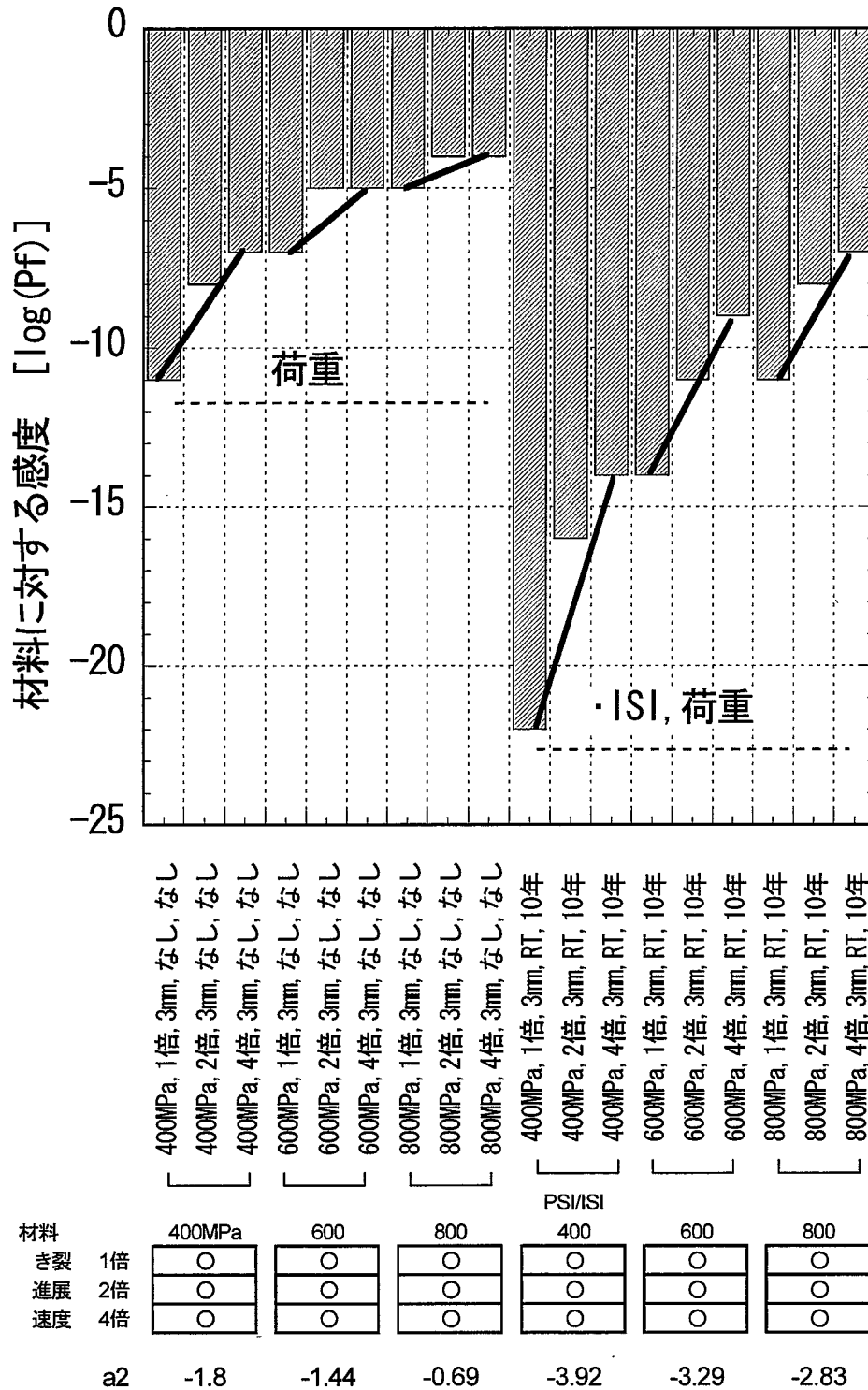


図 5-4 材料の感度

a4 (-1.56) 応力レベルによる差が顕著
ISIによる差もある。

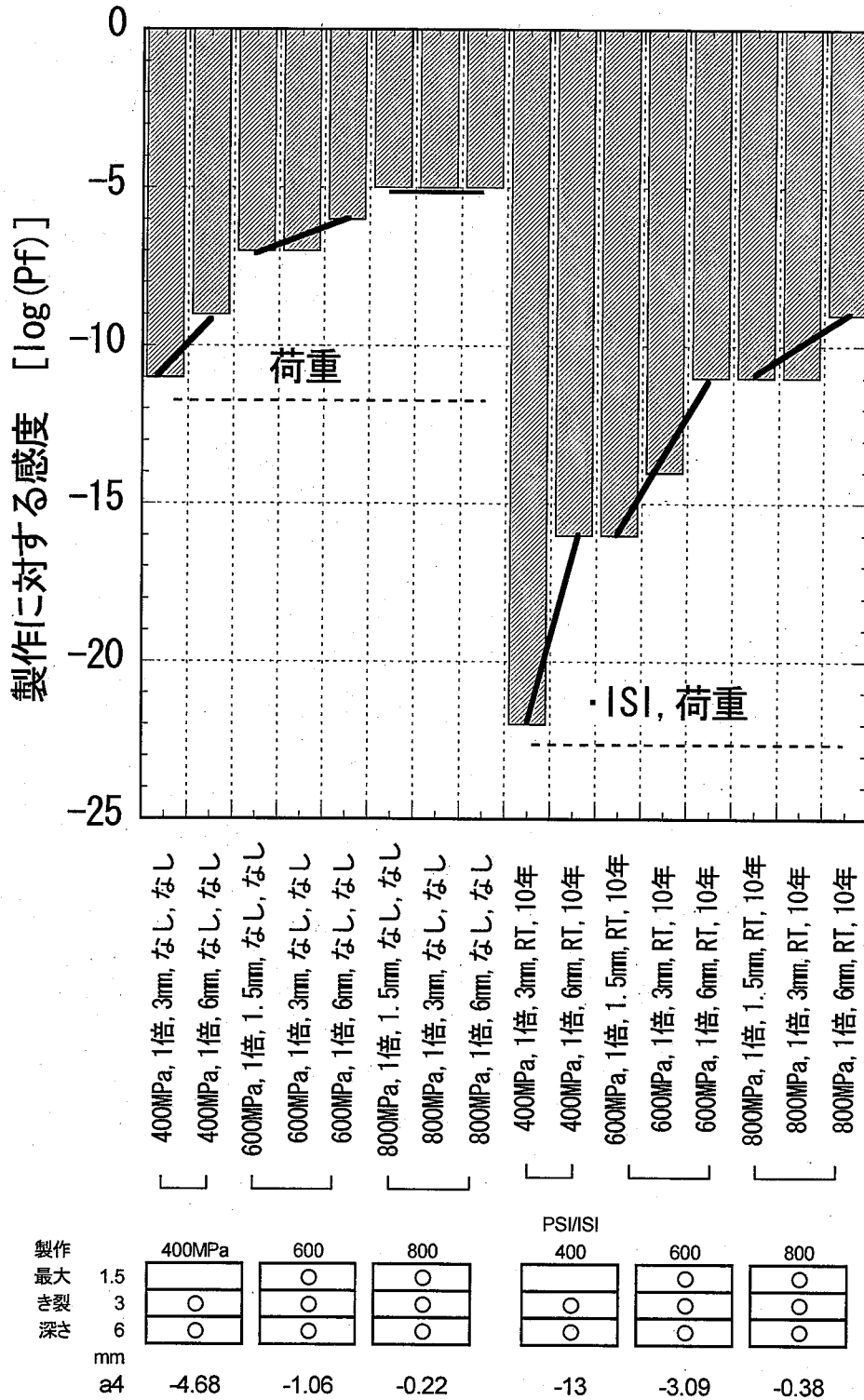


図 5-5 製作の感度

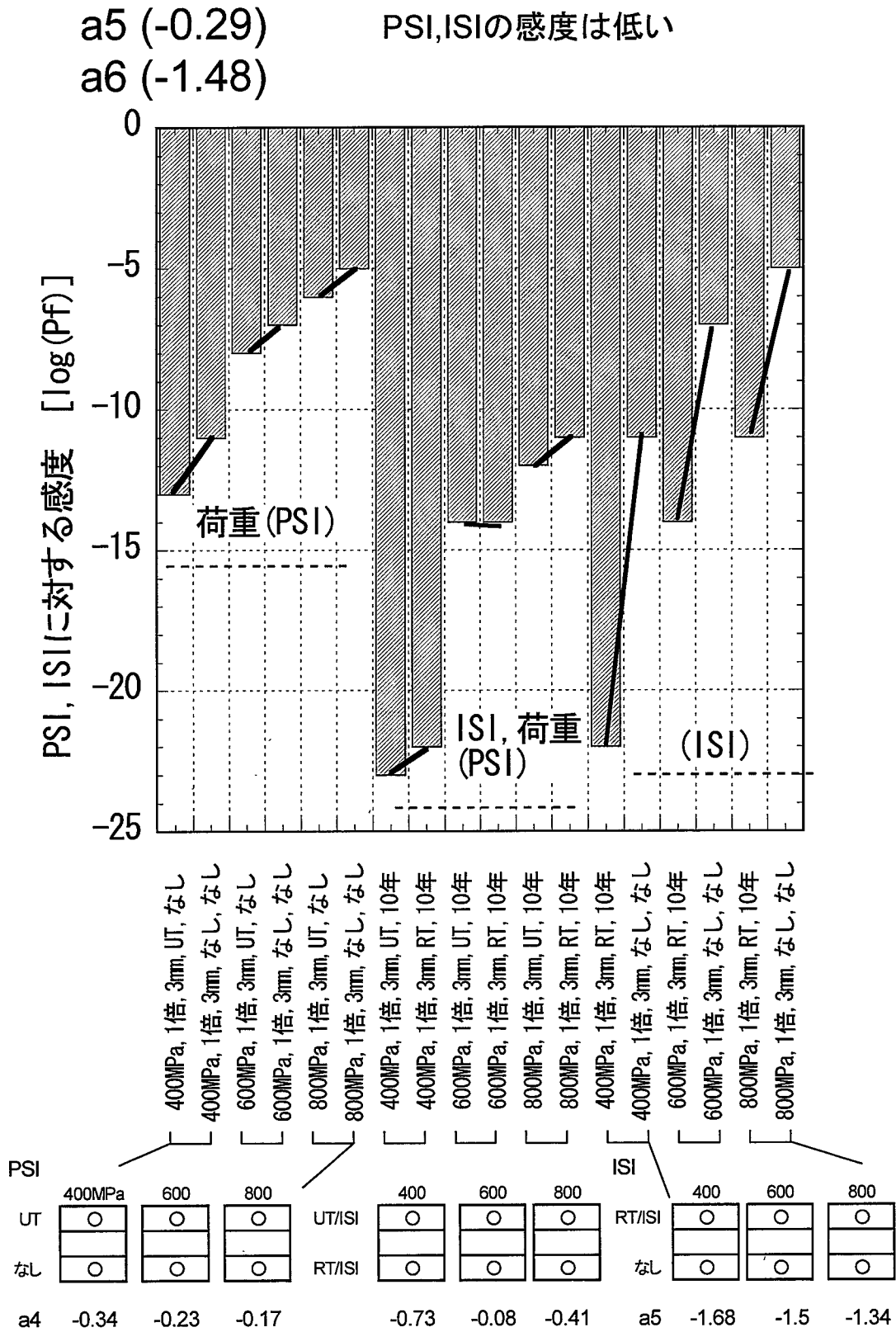
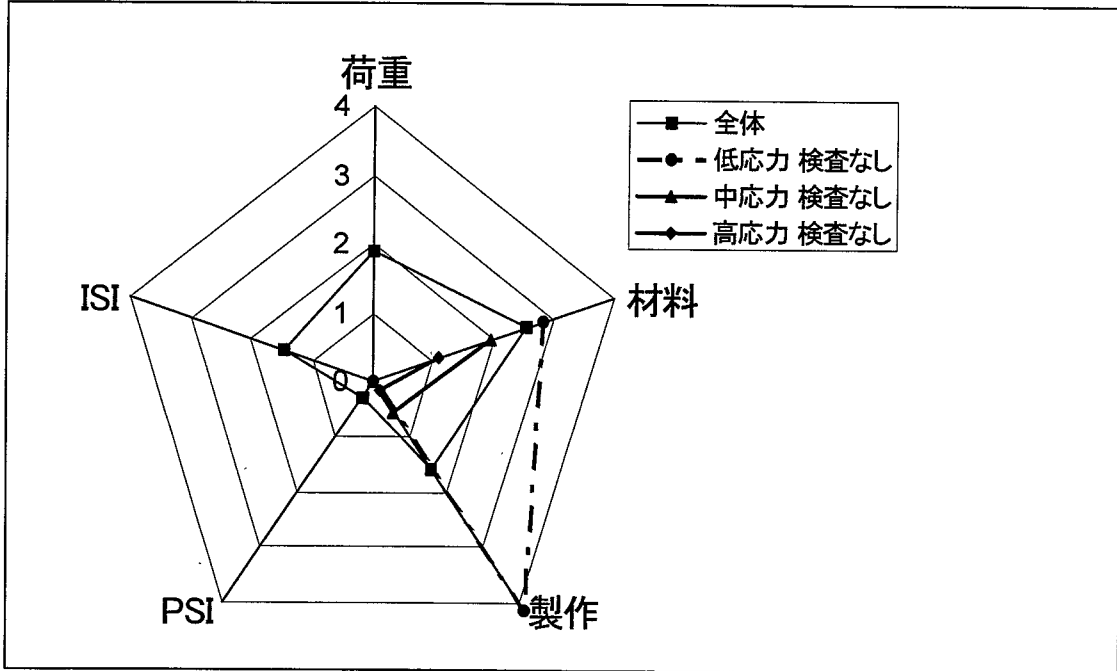


図 5-6 検査の感度

検査なし



検査あり

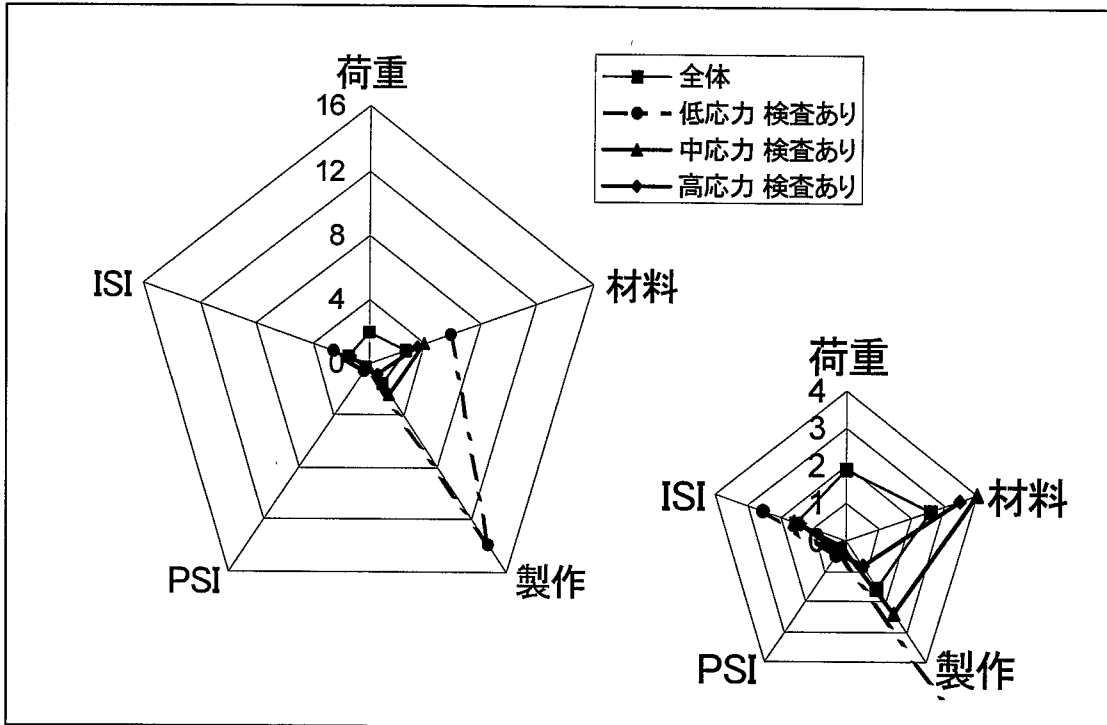


図 5-7 影響係数 (区分回帰)

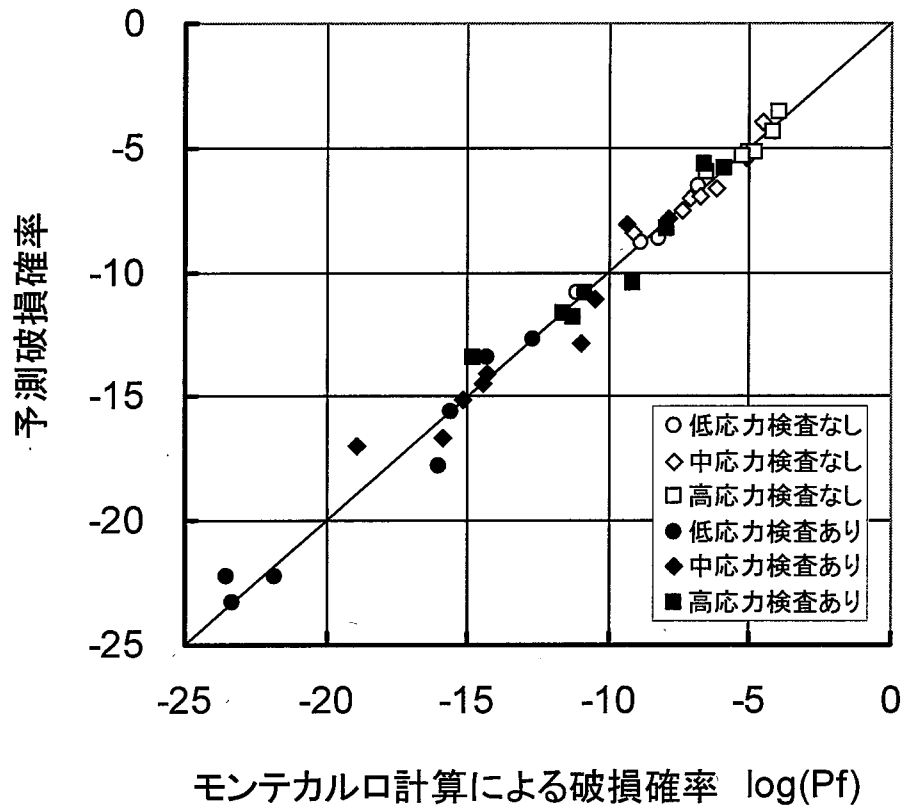


図 5-8 予測される破損確率 (区分回帰)

6. 今後の課題

- 4章においておおよその破損確率の傾向を図示し、5章においては、各分野ごとに代表的なパラメータを抽出することで、簡単な線形和の形で破損確率は表現されうるということを例示した。基本的な評価の方向性は、これにより具体化したと考えられる。今後は、計算条件（入力分布特性）及び計算結果に対する信頼性の向上を図り、規格化を図っていく必要がある。今後の課題としては、1) 入力分布特性の予測精度の影響検討、2) き裂発生評価法、き裂進展評価法の予測精度の影響検討 3) 入力分布特性、き裂発生評価法、き裂進展評価法の高精度化、4) 計算される破損確率の妥当性の傍証、が挙げられる。
- 入力分布特性の予測精度の影響検討

今回の検討では、応力レベルの変化、き裂進展速度の中央値の変化、最大き裂深さの変化、PSIの種別、ISIの頻度といった中央値の変化に対する影響を確認した。

これは、設計の差異（対象設計部位による応力レベルの差、設計者による溶接部配置位置等設計自体の差）、材料や施工法の差異、検査方法の差異等、異なる設計・製作・運転をした場合でも本手法が有効であるか検討するために実施したものである。

一方、設計部位によっては、プラントの熱的条件により負荷荷重に実際に変動がある場合、同一材料や同一施工法においても製造者、製作者等の違いによって、き裂進展速度の標準偏差やアスペクト比の分布、き裂深さの分布が変化する場合、RTやUTのき裂検出確率が検査部位や検査員によって変化する場合も考えられる。これらは、設計・製作・運転の種別の違いと比較すると、同一の設計・製作・運転をした場合におけるモデルの予測精度の幅と考えられる。

異なる設計・製作・運転方法間での破損確率の差は、今回定式化の見込みがあることが確認できたので、今後は、条件による分布形状の違いやモデルの予測精度がどの程度破損確率の評価結果に影響を与えるかを検討し、異なる設計・製作・運転方法間での破損確率の差と比較し、許容できる幅なのかどうか判断していく必要がある。
- き裂発生評価法、き裂進展評価法の予測精度の影響検討

今回の検討では、き裂発生評価法、き裂進展評価法を暫定し評価を行った。しかし、き裂発生及び進展においても、予測と現実との差はある。定式化方法の検討をする際、多くのパラメータを振ることは、本質を見失うため、現評価では、このような差があることを承知の上で、破損確率の評価を実施している。今後、き裂発生及び進展の予測においても予測精度の影響を把握していく必要があるが、実際に構造物が使用される範囲で、構造物の真の挙動を予測し、各評価方法との差異を定量

化していくことは、真の挙動の予測が難しいため、長期にわたる検討や実験が必要な課題となる。そのため、き裂発生及び進展の予測においては、保守的な仮定を導入し、真の破損確率より大きめの破損確率を用いることを許容していかざるを得ない。この場合、長期的な真の挙動の予測に関する R&D の他に必要となることは、導入した保守的な仮定が条件が異なるときにどの程度変化するかという見込みを予測することである。真の挙動が不明瞭な状態で、保守性を定量化することは難しいが、保守性が大きく変化する領域を区分化していく等の方法で、破損確率の相対的な関係が大きく変化しない評価方法を構築していく必要があると思われる。

- ・ 入力分布特性、き裂発生評価法、き裂進展評価法の高精度化

前述のように、長期的に取り組んでいく必要がある。特に、評価幅が大きく、評価結果にも大きな影響を与えるき裂進展評価法に関して、高精度化の要求が大きいと思われる。

- ・ 計算される破損確率の妥当性の傍証

計算される破損確率は、予測誤差を含んだものであることは、上記に記載したが、計算されている実現象がその誤差幅内におおむね入ることを最終的になんらかの手段をもって確認する必要がある。き裂進展評価の妥当性や製作時のき裂の存在確率、き裂の検出確率については試験を持って確認することができるが、計算される破損確率自体を試験により確認しようとすることは、最悪条件の組合せが起きるまで試験を実施することであり、非現実的なアプローチとなる。また、評価に保守性が残るため、計算された破損確率自体と正確に対応する試験状態というものは存在しない。そのため、どのようにして破損確率の妥当性を傍証していくか、方法の検討の段階から検討を進めていく必要がある。

これらの課題を各入力分布、評価法ごとに今後の検討方法、検討時期の案とともに表 6-1 に示す。

表 6-1 課題一覧 (1/4)

1. 入力分布特性の予測精度の影響検討		課題	検討方法	検討時期
分野				
検討方法		現在は、各パラメータごとに計算可能なオプションを選定し、感度解析を実施している。オプション間の影響の比較を見るためには、感度解析の考え方を統一化して行く必要がある。	感度解析を実施するに当たっては、入力分布の変動幅を設定し、破損確率の変動を各パラメータごとに比較する必要がある。 適切な変動幅の設定が感度解析にとっても重要であり、予期される変動幅(中央値ベース)、最大予測変動幅のような変動幅を各パラメータごとに設定し検討を進める。また、分布の確からしさについても評価をしていく必要がある。	早期
き裂の存在個数		破損確率を決定する重要なパラメータとして選定されているが、現実的にどの程度の幅を変動幅として設定すべきか、まだ検討されていない。	分布自体は、暫定しているため、上記変動幅を設定が必要。	早期
き裂深さ分布		同上	同上	早期
き裂のアスペクト比の分布		同上	同上	早期
荷重分布		現在は、変動がないと仮定している。どの程度の幅を変動幅として設定すべきかは、まだ検討されていない。	分布を、暫定し、上記変動幅を設定していく必要がある。	早期
き裂進展速度		破損確率を決定する重要なパラメータとして選定されているが、現実的にどの程度の幅を変動幅として設定すべきか、まだ検討されていない。	分布自体は、暫定しているため、上記変動幅を設定が必要。	早期
き裂の検出確率		同上	同上	早期

検討時期
 早期:破損確率を用いた規格体系が構築可能か判断するために必要
 中期:破損確率を用いた規格体系を詳細化していくために必要
 長期:破損確率を用いた規格体系の妥当性を示していくために必要

表 6-1 課題一覧 (2/4)

2. き裂発生評価法、き裂進展評価法の予測精度の影響検討		検討時期	
分野	課題	検討方法	検討時期
	1. に準拠	1. に準拠	早期
き裂発生評価法	現在のき裂発生の評価は、相当ひずみ範囲を予測し、そこから更にき裂発生寿命を予測する。相当ひずみ予測の段階で、評価法により差が生じる。また、標準試験片における相当ひずみ範囲と疲労寿命(25%荷重低下)の関係は明確になっていないが、構造物におけるき裂発生寿命との関係は明確にはなっていない。	荷重分布における変動幅の検討と合わせ、相当ひずみ範囲における変動幅の検討を進める必要がある。構造物におけるき裂発生寿命の予測式(寿命の定義による寿命の違い、環境効果、表面粗さの影響をひずみ範囲ごとに暫定定量化)の検討を進める。 その上で、他の変動幅と比較していく必要がある。	早期
き裂進展評価法	現在は、単一き裂の進展を参照応力法に基づき、計算している。 損傷モードに応じた微小き裂の発生密度、き裂の開閉口挙動、進展の相互干渉、合体については考慮していない。	評価方法自体の改良は、3. の高精度化において実施する。 まず、保守性が存在する項目の特定、損傷モード、ひずみ範囲に応じた保守性の区分化を進めていく必要がある。	早期
破損確率の計算方法	計算方法自体は、暫定されている(2章)が、微小き裂の発生密度との関連付けができていない。	微小き裂の発生密度を暫定し、影響を評価していく必要がある。	早期
クライテリア(破損の定義)	本検討では3/4tを使用している。熱過渡疲労での漏洩を予測するのに、このクライテリアが適切であるか明確ではない。	規格体系の構築ではなく詳細化の検討に該当すると思われるため 3. の高精度化において中期的に検討を実施すれば良いと思われる。	中期

検討時期 早期:破損確率を用いた規格体系が構築可能か判断するために必要
 中期:破損確率を用いた規格体系を詳細化していくために必要
 長期:破損確率を用いた規格体系の妥当性を示していくために必要

表 6-1 課題一覧 (3/4)

3. 入力分布特性、き裂発生評価法、き裂進展評価法の高精度化 (1/2)		課題		検討時期
分野	課題	検討方法		
き裂の存在個数	溶接部のき裂存在個数に対し、決定打となる有望な入力分布がない。また、き裂の存在する位置(表面か内部か)に関する情報が不足している。溶接工法による違いに関しては、定量的な違いが明確になっていない。	既存知見の調査を継続する。き裂の位置については、当面保守的に全て表面き裂として存在する事とする。予測精度の影響を明確にしていくとともに、試験の実施を要望していく。		中期
き裂深さ分布	同じく、決定打となる有望な分布がなく、溶接工法による違いも明確でない。	既存知見の調査を継続する。予測精度の影響を明確にしていくとともに、試験の実施を要望していく。		中期
き裂のアスペクト比の分布	同上	同上		中期
荷重分布	分布を同定する方法が定まっていない。	系統の熱的条件と発生荷重の関係を長期的に検討していく。分布が同定できない場合は、保守的な荷重を設定する。		中期
き裂進展速度	通常の実験室ベースでのデータはあるが、材料の熱時効、環境効果、照射効果等き裂進展速度を増加させる要因の考慮が不十分。	予測精度の影響を明確にしていくとともに、き裂進展速度を増加させる要因とメカニズムを検討していく。		中期
き裂の検出確率	決定打となる有望な分布がない。また、溶接部あるいは薄肉構造物のデータが少なく、分布の信頼性が低い。溶接工法による違いも明確でない。	既存知見の調査を継続する。厚肉構造物のデータを薄肉構造物に転用する考え方を検討していくとともに、ナトリウムを用いた熱過渡試験試験体を用いた特定深さの検出確率を確認していく。溶接部、溶接工法に関しては、予測精度の影響を明確にしていくとともに、試験の実施を要望していく。		中期

検討時期
 早期: 破壊確率を用いた規格体系が構築可能か判断するために必要
 中期: 破壊確率を用いた規格体系を詳細化していくために必要
 長期: 破壊確率を用いた規格体系の妥当性を示していくために必要

表 6-1 課題一覧 (4/4)

3. 入力分布特性、き裂発生評価法、き裂進展評価法の高精度化 (2/2)		課題	検討方法	検討時期
分野	き裂発生評価法	特に微小き裂の発生密度に関して破損モードに合わせた明確な見解がない。	破損モード(ひずみ範囲、応力状態も含む)とき裂の発生様式に関して検討が必要。完璧な評価法を策定することは難しいため、保守性の半定量的評価がより重要となってくる。	中期
	き裂進展評価法	構造不連続部を持つ構造に対する熱荷重によるき裂進展評価は、精度があまりよくない。	損傷モードに応じた微小き裂の発生密度、き裂の開閉口挙動、進展の相互干渉、合体について検討を進めるとともに、保守性の半定量的評価を進めていく。	中期
	破損確率の計算方法	微小き裂の発生密度との関連付けができていない。	き裂発生評価法とあわせ、検討を進めていく。	中期
	クラリティア(破損の定義)	本検討では3/4tを使用している。熱過渡疲労での漏洩を予測するのに、このクラリティアが適切であるか明確ではない。	貫通に至った熱過渡試験結果を調査・検討し、クラリティアを決定していく必要がある。	中期
4. 計算される破損確率の妥当性傍証		計算された破損確率がどの程度妥当性を持っているのか判断できない。	<p>入力分布の妥当性やき裂発生・進展評価の妥当性を示す基礎的な試験・知見と確率論的な考察を組み合わせ、部分的に妥当性を検討していく。</p> <p>また、破損確率の高い1E-1~1E-2程度の事象に対し、妥当性を検討し、破損確率の低い事象に対しては、確率論的な評価法を使用した外挿と割り切っていく等評価限界の認識と残存リスクの設定方法の検討を実施していく。</p> <p>最終的には、現在の設計手法と設計成立範囲を比較することにより、設計成立範囲に対しエンジニアリングジャッジを下していく。</p>	長期

検討時期
 早期: 破損確率を用いた規格体系が構築可能か判断するために必要
 中期: 破損確率を用いた規格体系を詳細化していくために必要
 長期: 破損確率を用いた規格体系の妥当性を示していくために必要

7. 結言

これまでの検討内容をまとめると以下のような内容となる。

熱過渡設計を実施した場合の限界設計例と熱過渡設計を実施しない設計例の破損確率を計算し、熱過渡設計を実施した場合には、検査なしで $1E-11$ [機器・供用期間]のオーダーで、検査を実施する場合（第1種機器相当）には、 $1E-12$ [機器・供用期間]以下のおおよそ0のレベルで破損すると評価するのが現状の評価レベルだということを確認した。また同様に、熱過渡設計を実施しない場合においては、現状の評価レベルは、検査なしで $1E-4$ [機器・供用期間]、検査あり（第3種機器相当）で $1E-6$ [機器・供用期間]のオーダーである。

実設計に基づいた構造物の破損確率計算の計算結果から、荷重、材料、製作、PSI、ISIの各分野の支配パラメータとして、曲げ応力範囲、き裂進展速度、欠陥の個数、最大き裂深さ、PSIの種別、ISIの頻度を選定した。

曲げ応力範囲、き裂進展速度、最大き裂深さ、PSIの種別、ISIの有無に関しパラメータ解析を実施し、曲げ応力範囲が 900MPa を下回る領域（1000サイクルの負荷を想定）では、初期欠陥からの破損が機器の破損確率を決定することがわかった。初期欠陥が破損に至る割合が増加するにつれ、各パラメータによる影響は少なくなっていく。そのため、高応力側の方が低応力側よりき裂進展速度、最大き裂深さ、ISIの有無の影響が少ない、この傾向は計算結果にも明確に現れた。

荷重、材料、製作、PSI、ISIの各分野の支配パラメータをそれぞれ、荷重：応力の3乗、材料：進展速度比の対数、製作（初期欠陥の個数）：個数の対数、製作（最大き裂深さ）：き裂深さの指数、PSI：検査種別による点数化、ISI：検査間隔というパラメータに変数変換し点数化することにより、 $\log(Pf) = \sum a_i z_i + C$ (a_i ：影響係数、 z_i ：各分野での品質点数)という簡便な形に定式化できることを確認した。

パラメータ解析の結果を回帰分析することにより、上記影響係数を求めた。求めた影響係数を使用した破損確率の予測結果は、ファクター5程度の精度を見せた。

影響係数を応力レベルで3区分、検査の有無の2区分合計6区分に分割し回帰分析を行うことにより、破損確率の予測精度は上昇することを確認した。その結果計算された精度はファクター2程度となった。

材料（き裂進展速度）、製作（最大き裂深さ）、ISI（頻度）の影響係数は、低応力になるほど小さくなり、破損確率の計算結果と整合が取れている。材料、製作の影響係数の変動と比較すると、PSI、ISIの変動は、本検討範囲では、ほぼ一定と見なせる。

今後の課題として、1) 入力分布特性の予測精度の影響検討、2) き裂発生評価法、き裂進展評価法の予測精度の影響検討 3) 入力分布特性、き裂発生評価法、き裂進展評価法の高精度化、4) 計算される破損確率の妥当性の傍証、を選定し、課題の検討方法を取りまとめた。

6章に示したように、破損確率に基づく設計体系の全体の構築には、まだ多くの課題が残されているが、現状の知見のみでも破損確率を簡便に定式化することが可能であり、規格化が可能であることがわかった。今後のこれらの課題を検討するとともに各機器において許容可能となる破損確率を合意していくことにより、破損確率をベースとする設計が可能になるものと考えられる。

謝辞

本検討の実施にあたっては、経済産業省委託研究である発電用新型技術確証試験・設計手法高度化確証試験に設置されているシステム化規格ワーキンググループでの議論を参考にさせていただいた。同ワーキンググループ主査である新型炉技術株式会社の田下正宣氏、三菱重工株式会社の安藤清委員、株式会社日立製作所の小山田修委員、東京電力株式会社の設楽親委員、関西電力株式会社の野村友典委員、核燃料サイクル開発機構の森下正樹委員には、豊富な実務経験に基づく大所高所からの示唆をはじめ様々な観点からご指導いただいた。

また、新型炉技術株式会社の神島吉郎氏、株式会社テプコシステムズの町田秀夫氏、三菱重工業株式会社の大谷知未氏には、破損確率の入力値、き裂発生及び進展評価法の考え方について有益な助言をたびたびいただいた。

そして破損確率の計算においては、常陽産業株式会社の加藤猛彦氏の助言を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1. Asada Y., et al., "System Based Code -Principal Concept", Tenth International Conference on Nuclear Engineering, 2002 April, (2002)
2. Asada Y., et al., "System Based Code - Basic Structure ", Tenth International Conference on Nuclear Engineering, 2002 April, (2002)
3. Asayama, T., Morishita, M., Dozaki, K. and Higuchi, M., "Development of the System Based Code for Fast Breeder Reactors and Light Water Reactors - Basic scheme -", Tenth International Conference on Nuclear Engineering, 2002 April, (2002)
4. Asayama, T., Kawasaki, N., Morishita, M. and Dozaki, K., "Development of the System Based Code for Fast Breeder Reactors - Probabilistic methods in creep-fatigue evaluation -", Tenth International Conference on Nuclear Engineering, 2002 April, (2002)
5. Asayama, T., Morishita, M., Kawasaki, N. and Dozaki, K., "Development of the System Based Code for Structural Integrity of FBRs", ASME PVP Vol.439, (2002) 265
6. 浅山 泰, "システム化規格の開発—基本的な考え方—", JNC TN9400 2001-065, (2001)
7. 川崎 信史, 浅山 泰, "システム化規格の開発—確率論の考え方 (その1): クリープ疲労強度の確率論による試評価—", JNC TN9400 2001-090, (2001)
8. 浅山 泰, 加藤 猛彦, "システム化規格の開発 - 第3報 裕度交換手法の開発 (その1) -", JNC TN レポート, JNC TN9400 2002-014, (2002)
9. 川崎 信史, 浅山 泰, "システム化規格の開発 (第4報) - 確率論を用いた強度計算を目的とする材料の統計的性質: 316FR 母材材料強度 -", JNC TN9400 2002-017, (2002)
10. 中馬 康晴, 他, "確率論に基づくクリープ疲労設計評価法の検討", 日本材料学会 高温強度シンポジウム予稿集, (2001)
11. N. Kawasaki, et al., " Probabilistic approach for creep-fatigue evaluation in liquid metal cooled fast reactor", ASME PVP Vol.439, (2002)
12. 経済産業省, "発電用原子力設備に関する構造等の技術基準 (昭和 55 年 10 月 30 日 通商産業省告示第 501 号) "
13. 浅山 泰, "システム化規格の開発 第5報: 裕度交換手法の開発 (その2: ベクトル法による品真保証指数の設定) ", JNC TN9400 2003-036, (2003)
14. 日本原子力発電株式会社, "平成 14 年度 発電用新型炉技術確証試験 事業報告書 その1 設計手法高度化確証試験", 日本原子力発電株式会社, (2003)

15. 日本原子力発電株式会社, "高温増殖実証炉高温構造設計方針(案)", 日本原子力発電株式会社, (1999)
16. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Probability of Pipe Fracture in the Primary Coolant Loop of a PWR Plant Volume 5", NUREG/CR-2189, Vol.5 UCID-18967, Vol.5 RM, (1981)
17. Jouris, G. M. and Shaffer, D.H., "Methodology for Initial Flaw Distribution", Nuclear Engineering and Design, 60, (1980), 43-47
18. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Probability of Pipe Fracture in the Reactor Coolant Loops of Combustion Engineering PWR Plants", NUREG/CR-3663 Vol.2, (1984)
19. 電力中央研究所, "平成 12 年度発電用新型炉技術確証試験(高速増殖炉技術確証試験)、調査報告書別冊 高温構造健全性評価指針(案)", 電力中央研究所, (2001)
20. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Analysis of the Impact of Inservice Inspection Using a Piping Reliability Model, NUREG/CR-3869 PNL-5149 R5, 1984
21. 日本原子力発電株式会社, "平成 13 年度 発電用新型炉技術確証試験 事業報告書 その 1 設計手法高度化確証試験", 日本原子力発電株式会社, (2002)
22. 加藤 猛彦, 浅山 泰, "材料強度・構造信頼性評価システム MSS-REAL 使用説明書 Version1.0", JNC TN9400 2003-002, (2003)