



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) —
(研究報告)



2002年4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

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)
2002

システム化規格の開発
- 第3報 裕度交換手法の検討 (その1) -
(研究報告)

浅山 泰¹、加藤 猛彦²

要 旨

高速増殖炉 (FBR) の実用化のためには、その信頼性・安全性をさらに向上させながら、経済性を、将来の軽水炉をも凌駕するレベルまで高める必要がある。このために著者らは、平成12年度から、システム化規格の開発を実施している。

本報では、システム化規格の根幹をなす概念である裕度交換について、破損確率の評価値をベースとする方法を提案した上で、例題を用いた具体的・定量的な検討を行った。FBRの原子炉容器が、鍛造リングで製作され供用期間中検査 (ISI) を受けない場合と、板材の縦溶接により製作される代わりに ISI を受ける場合の2例を想定し、それぞれについて、熱疲労き裂の発生、進展を考慮して、破損確率を算出した。その上で、算出された破損確率に基づき、裕度交換の可能性を検討した。

この結果に基づき、システム化規格の中で裕度交換を行う方法として、破損確率の算出という手続きを必要としないより簡易な方法である、設計係数を用いる方法 (設計係数法) を提案した。この方法は、例えば疲労の場合、現状ではひずみ範囲に対して2、繰返し数に対して20の安全率が設けられているが、目標信頼度および技術的選択肢の組合せに対応する形で、一律ではない複数の設計係数を新たに設定するものである。本報では、例題検討に基づき、疲労に対してシステム化規格で設定すべき設計係数の値を具体的に試算した。

以上により、破損確率の評価に基づく裕度交換および設計係数法がシステム化規格に適用できる見通しを示した。最後に、これらに関する今後の開発課題を示した。

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

² 常陽産業株式会社

Development of FBR System Based Code

- Report No.3: Development of methodologies for margin exchange (1) -

Tai Asayama³, Takehiko Kato⁴

Abstract

For the commercialization of fast breeder reactors, economy must be drastically improved so that they can be competitive to future generation light water reactors. Reliability and safety must also be increased. For this purpose, the authors have been developing the FBR System Based Code since fiscal year 2000. One of the core concepts of the System Based Code is margin exchange and methodologies that realize it were strongly needed.

This report proposes a methodology for margin exchange that is based on failure probability calculation. The effectiveness of the methodology is demonstrated by a worked example, which quantitatively shows a possibility of margin exchange between two designs of FBR reactor vessels, one made of forged rings with no ISI, and the other a welded vessel with ISI implemented. Failure probabilities for both designs were calculated considering thermal fatigue crack initiation and propagation. By setting an appropriate design life, calculated cumulated failure probabilities for both designs became equivalent, which means margin exchange hold for those designs.

Based on this methodology, a simpler method for margin exchange, systematize design factors, was proposed for the implementation in the System Based Code. This methodology does not need the detailed calculation of failure probabilities. Current safety factors for fatigue assessment for example, which is 2 for strain range and 20 for numbers of cycles to failure, are replaced by systematized design factors, which consists of multiple values of factors corresponding to target reliabilities and arrays of technical options that are provided in the partial code of the System Based Code. This report showed some example values determined based on the above worked example.

Those results showed that the two methodologies proposed in this report are promising to be implemented in the System Based Code. Finally, items to be developed regarding two methodologies were clarified.

³ Structural Mechanics Group, Advanced Technology Division, Oarai Engineering Center

⁴ Joyo Industries, Co. Ltd.

目 次

1. 緒言	1
2. 裕度および裕度交換の定義	2
2. 1 裕度の定義	2
2. 2 裕度交換の定義	2
2. 3 裕度交換の典型的な例	3
3. 裕度交換の定量的検討	5
3. 1 破損確率評価の導入	5
3. 2 例題の設定	5
3. 3 破損確率の評価	6
3. 3. 1 評価の前提	6
3. 3. 2 破損確率の評価法	6
3. 3. 3 評価結果	7
3. 4 裕度交換	8
3. 5 破損の定義の重要性	8
4. 設計係数への展開	15
4. 1 設計係数の算出手順	15
4. 2 設計係数の試算結果	15
4. 3 仕上がりイメージ	16
5. 本手法の特徴と課題	21
5. 1 破損確率の評価に基づき裕度交換を行うことに関する特徴と課題	21
5. 1. 1 特徴	21
5. 1. 2 課題	21
5. 2 設計係数法による裕度交換に関する特徴と課題	22
5. 2. 1 特徴	22
5. 2. 2 課題	23
6. 結言	24
謝辞	25

参考文献	26
付録1：破損確率の算出手順	28
付録2：疲労およびクリープ疲労に対する設計係数の設定手順	35
付録3：クリープ疲労を考えた場合の裕度交換例	39
付録4：信頼性工学の関連事項	41

表リスト

表 2-1	裕度交換の定義	4
表 2-2	裕度交換の例	4
表 3-1	裕度交換が成立する条件	10
表 3-2	き裂発生確率と貫通確率の関係	10
表 4-1	システム化規格における疲労に対する設計係数のイメージ	17

図リスト

図 3-1	破損確率評価の導入	11
図 3-2(1)	母材と溶接金属の疲労寿命	12
図 3-2(2)	累積き裂進展確率	12
図 3-2(3)	累積破損確率	13
図 3-3	累積破損確率	14
図 4-1	疲労に対する設計係数の設定	19
図 4-2	設計係数設定の仕上がりイメージ	20

1. 緒言

高速増殖炉（FBR）の実用化のためには、その信頼性・安全性をさらに向上させながら、経済性を将来の軽水炉をも凌駕するレベルまで高める必要がある。このためには、高温構造設計を大きく合理化しなければならない。

このような必要性に基づき、著者らは、平成12年度から、システム化規格の開発を実施している。システム化規格とは、規格基準に含まれる幾つかの技術項目の間で余裕を相互交換可能にすることにより、余裕の重複を避け、過剰な余裕を適正な水準に合理的に設定することを目標とする、柔軟な規格基準体系である [1-4]。

本報では、システム化規格の根幹をなす概念である裕度交換について、破損確率の評価値をベースとする方法を提案した上で、例題を用いた具体的・定量的な検討を行った。FBRの原子炉容器が、鍛造リングで製作され供用期間中検査（ISI）を受けない場合と、板材の縦溶接により製作される代わりにISIを受ける場合の2例を想定し、それぞれについて、熱疲労き裂の発生、進展を考慮して、破損確率を算出した。その上で、算出された破損確率に基づき、裕度交換の可能性を検討した。

この結果に基づき、システム化規格の中で裕度交換を行う方法として、破損確率の算出という手続きを必要としないより簡易な方法である、設計係数を用いる方法（設計係数法）を提案した。この方法は、例えば疲労の場合、現状ではひずみ範囲に対して2、繰返し数に対して20の安全率が設けられているが、目標信頼度および技術的選択肢の組合せに対応する形で、一律ではない複数の設計係数を新たに設定するものである。本報では、例題検討に基づき、疲労に対してシステム化規格で設定すべき設計係数の値を具体的に試算した。

最後に、破損確率の評価に基づく裕度交換および設計係数法に関する今後の開発課題を示した。

2. 裕度および裕度交換の定義

本章では、裕度交換の具体的な検討に先立ち、「裕度」および「裕度交換」の定義を明確にする。

2. 1 裕度の定義

「裕度」という用語は、さまざまな場合に用いられる。例えば、 S_m 値は、材料の引張り強さに対して裕度を持つと言われる。さらに、設計荷重は、実際に負荷される荷重に対して裕度を持つように定められると言われる。また、 S_m 値と設計荷重（応力）の差が、裕度と呼ばれることもある。

システム化規格は、多様な技術的選択肢を利用して、裕度を最適化すると同時にコストミニマム設計の実現を目指すものである。このため、「裕度」を明確に定義しておくことが必要となる。

システム化規格では、信頼性工学の概念を参考とし、裕度 M を、

$$M=R-S \quad (2-1)$$

で定義するものとする。ただし、 R は強度、 S は荷重を示す（影響因子等をすべて含めた確率密度分布を考える）。裕度 M は、定義の上から、破損確率と一対一対応である¹。

2. 2 裕度交換の定義

「裕度交換」は、システム化規格において登場する新たな概念である。先に設けた裕度の定義に従って、裕度交換を定義する。

ある機器に対して、同一の機能を満たす複数の設計方法（構造）があり、それらについて破損確率が同一の場合、それらの間では、裕度交換が成立していると考えられる。

¹ 例えば、 R および S がそれぞれ、 $N(\mu_R, \sigma_R^2)$ 、 $N(\mu_S, \sigma_S^2)$ なる正規分布で表される場合には、破損確率 P_f は、次式で表される。

$$P_f = \Phi\left(\frac{0 - \mu_M}{\sigma_M}\right) = \Phi\left(\frac{\mu_S - \mu_R}{(\sigma_S^2 + \sigma_R^2)^{1/2}}\right)$$

この上で、真裕度交換と、公称裕度交換を定義する。

2つの構造で現実の破損確率が同一の場合、真裕度交換が成立していると考ええる。例えば、「鍛造リング+ISIなし」と「板材溶接構造+ISIあり」の場合などである。

これに対して、2つの構造に対して、異なる評価法で評価された破損確率が同一という場合は、それらの間では、真裕度交換ではなく、公称裕度交換が成立していると考ええる。例えば、「鍛造リング+弾性解析」と「板材溶接構造+詳細非弾性解析」の場合である。評価上の破損確率は同一となったとしても、現実の破損確率は後者の方が高い。

まとめると、表 2-1 のようになる。

2. 3 裕度交換の典型的な例

システム化規格における裕度交換の典型的な例と考えられるものを表 2-2 に上げる。表 2-2 には、「原設計」と「代替設計」の組を 7 組上げている。これらの例のうち、例 1、例 2、例 5、例 6 は、原設計と代替設計で、破損確率が変化しない（変化しないような設計を行うことが原理的に可能）と考えられるため、真裕度交換であるということが出来る。これに対して、例 3、例 4 は、破損確率が変化する。例 3 の場合は、原設計の弾性解析を代替設計の非弾性解析に置き換えることによって、ひずみ範囲の評価値が下がる。これにより生じた余裕を活かして、鍛造リングに替えて相対的に強度の低い溶接構造を採用したものである。この場合、実際に構造に生じるひずみ範囲は、原設計でも代替設計でも同一であるから、破損確率は代替設計の方が高いことになる。このため、例 3 は真裕度交換ではなく、公称裕度交換である。非弾性解析の精度が弾性解析に対して高く、よりよく実現象を把握することが可能であるという前提のもとで、このような公称裕度交換を行うことが出来る。

表 2-1 裕度交換の定義

	定義	評価上の破損確率	構造物の現実の破損確率	例
1	真裕度交換	同じ	同じ	「鍛造リング+ISIなし」と「溶接構造+ISIあり」
2	公称裕度交換	同じ	異なる	「鍛造リング+弾性解析」と「溶接構造+非弾性解析」

表 2-2 裕度交換の例

	原設計	代替設計	項目(種別)	備考
1	鍛造リング+ISIなし	溶接構造+ISIあり	製作法とISI	真裕度交換
2	高強度材+ISIなし	低強度材+ISIあり	材料強度とISI	真裕度交換
3	鍛造リング+弾性解析	溶接構造+非弾性解析	製作法と設計解析法	公称裕度交換
4	荷重保守的決定論+高強度材	荷重精密確率密度分布+低強度材	荷重評価と製作法	公称裕度交換
5	通常の表面仕上げ+PSI	精密な表面仕上げ+PSIなし	材料強度とPSI	真裕度交換
6	保守的な据付公差+高応力	緩和された据付公差+低応力	荷重と製作	真裕度交換
7	鍛造リング+モニタリングなし	溶接構造+モニタリングあり	製作法と検査	?

3. 裕度交換の定量的検討

3. 1 破損確率評価の導入

システム化規格では、規格基準に含まれる技術項目間の裕度交換を行う。このためには、さまざまな選択肢の組合せに対して、それを適用した場合の構造の信頼度（破損確率）を評価する必要がある。

構造の破損確率は、基本的に、荷重と強度で決定されるが、これらのほかにも、使用前検査、運転方法、供用期間中検査、保守の方法などにより、破損確率は変化する。概念図を図 3-1 に示す。裕度交換により最適設計を実現するためには、これらの効果をすべて考慮して破損確率を求める手法が必要となる。

従来の構造設計基準は、決定論に基づき構築されてきた。

このため、システム化規格では、破損確率評価法を開発する。破損確率評価法は、管制基準における裕度交換を実現するためのツールとして位置付けられる。この意味で、システム化規格は、確率論をベースとすることになり、この点で、決定論ベースで構築されてきた従来の基準と大きく異なるものとなる。

3. 2 例題の設定

本章では、2章で設けた裕度交換の定義に基づき、定量的な検討を試みる。問題を明確にするために、表 2-2 の例 1 に相当する下記の例題を設けて検討を行う。

例題 1：FBR の原子炉容器の液面近傍の高応力部について考える。次の 2 種類の設計①と②の間で、裕度交換は成立するか？

- ① ステンレス鋼（316FR）鍛造リングで製作し、ISI は実施しない。
- ② 316FR 板材の溶接構造とし、製作コスト削減を図るが、その代わりに、溶接部について ISI を実施する。ISI で発見された疲労き裂は、補修されると仮定する。

破損モードは、実際はクリープ疲労であるが、ここでは、単純化のため、クリープの効果は無視して、疲労のみを考慮する。

評価対象モデルは、ナトリウム冷却型大型 FBR の原子炉容器とした（直径約 10,000mm、板厚 30mm）。板材の溶接構造では、縦方向の溶接線を仮定した。温度は 550℃、ひずみ範囲は 0.4%とした。

3. 3 破損確率の評価

3. 3. 1 評価の前提

ここでは、破損モードとして疲労を仮定しているため、疲労き裂の発生とその後の進展を考慮し、破損確率を求めるものとする。計算には、代表的な数値計算法であるモンテカルロ法を用いる。

なお、本報で作成し、検討のために用いた破損確率評価法は、裕度交換を定量的に検討する目的のために作成した暫定的なもので、今後の R&D により、逐次高度化されるものである。したがって、本報では、破損確率の相対的な関係を問題とし、値そのものの妥当性を深く論じることはしないものとする。

3. 3. 2 破損確率の評価法

疲労破損を対象とした破損確率の評価に当たっては、初期欠陥の想定、疲労き裂発生の評価、発生き裂の寸法形状の設定、疲労き裂進展評価、ISI の効果の考慮、破損の定義、寸法効果などの因子、加えてこれらに係る確率変数の設定と数値計算の手法などがポイントとなる。それぞれについて以下に要点を記す。詳細は付録 1 に示す。

初期欠陥に関しては、十分な供用前検査 (PSI) を仮定し、陽には考慮しなかった (溶接金属の疲労強度は、試験の平均傾向に基づき設定しているため、PSI の判定基準以下の欠陥の効果は、評価に含まれていると考えることができる)。

疲労き裂発生評価に関しては、母材と溶接金属の疲労強度を、試験の平均傾向に基づく設定し、両者におけるき裂発生寿命の違いを考慮した。累積疲労損傷が 1 に達した時点で疲労き裂が 1 個発生すると仮定した。

発生した疲労き裂の深さは 1mm、アスペクト比は確率分布とした。

疲労き裂進展評価においては、応力拡大係数を Raju-Newman の平板解とし、き裂進展則は Paris 則とした。

疲労き裂進展評価では、溶接金属に対しては、ISI の効果を考慮した。ISI の効果は、き裂検出確率を仮定し、検出されたき裂は補修され、当該部は、その時点のき裂の無い部分の強度と同等となると仮定した。

破損は、き裂深さが板厚の 1/4 に達した時点として定義した。この定義は、本報の検討を進めるための暫定値であり、今後、システム化規格として、破損の定義に関して詳細に検討すべきである (3. 5 参照)。

寸法効果は、本報のように、材料試験片ベースで構造物の破損確率を評価する場合に問題となる。いくつかの考え方が提案されているが、決定的なものはない。

無く、今後検討が必要であることから、本報では寸法効果は考慮せず、材料試験片ベースで求めた破損確率に基づき議論を進めることにした。

以上において用いた確率変数およびその他の詳細を付録1に示す。

数値計算の手法としては、代表的な手法であるモンテカルロ法を用いた。その適用に当たっては、確率密度分布の低密度の領域で、層別サンプリングを行い、計算負荷の低減を図った。モンテカルロ法の試行回数は、ほぼ安定した解が得られる20,000回とした。

なお、溶接継手の疲労評価に当たっては、316FRの場合ひずみ集中の効果が小さいことから、この効果は考慮せず、溶接金属の疲労強度の低下のみ考慮した。

3. 3. 3 評価結果

(1) き裂発生確率・進展確率・破損確率の関係

疲労き裂の発生確率は、溶接金属の疲労強度が母材のそれを下回るため(図3-2(1))、前者の発生確率が後者のそれを上回る。き裂進展確率は、溶接金属の疲労き裂進展速度と母材のき裂進展速度が等しいことから、ISIを実施しない場合は同等と評価されるが、ISIの開始後は、溶接金属の累積き裂進展確率の上昇速度が減少する。精度の高いISIを仮定した場合には、累積き裂進展確率はほぼ一定値を保つようになる(図3-2(2))。き裂発生とき裂進展の両者を考慮して破損確率を求めると、最初のうちは、疲労強度の弱い(き裂発生確率が高い)溶接金属の破損確率が母材のそれを上回るが、ISIの実施に伴って溶接金属のき裂進展確率の増加が抑制されるようになると、ある繰返し数以降は、逆に母材の破損確率が溶接金属のそれを上回るようになる(図3-2(3))。供用期間を通じてき裂の発生を考慮しているため、母材の場合も溶接金属の場合も、繰返し数の増加とともに、破損確率は1に漸近する。

(2) 破損確率の評価結果

例題1の設計①、②のそれぞれについて、3. 3. 2で定義した累積破損確率を求めた。母材については、ISIを行わない場合を、溶接継手については、ISIを行わない場合の他、精度Advancedを用い、1、2、3、5、10年間隔で実施した場合について計算した。これらのうち、図3-3に、母材の場合と、溶接継手のISIなし、ISI間隔1年、ISI間隔10年度の場合をプロットした。図3-3は、累積破損確率の繰返し数に伴う変化をプロットしたものである。ISI間隔が短くなるとともに、累積破損確率の上昇速度が抑制されることが分かる。

3. 4 裕度交換

ここでは、3. 3の破損確率の評価結果をもとに、原子炉容器について、「鍛造材+ISIなし」の設計と、「溶接継手+ISIあり」の設計の間の裕度交換を検討する。累積破損確率が同一となる点では、裕度交換が成立していると考えることができる。図3-3をもとに、例題1の設計①と②が同じ累積破損確率を与える点を求めると、表3-1のようになる。ISIの頻度に応じて、裕度交換が成立するまでに要する繰り返し数が異なることが分かる。

ここで、仮に想定繰り返し数が600サイクルで、かつ経済上の観点から、累積破損確率の目標値が、 1×10^{-8} と設定されているとすると、溶接構造を採用すると目標値がクリアできないため、鍛造材を採用せざるを得なくなる。しかし、溶接構造に1年間隔でISIを施せば、累積破損確率は目標値を下回り、溶接構造の採用が可能になる。実際にどちらを採用するかは、製作性やコスト等を考慮し、設計者が決定すればよい。

なお、例題1ではクリープの効果を無視したが、これを無視せずクリープ疲労の場合について破損確率の計算と裕度交換の検討を行った結果を付録3に示す。付録3には、クリープ疲労の場合について、「316FR+ISIなし」の場合と「SUS304+ISIあり」の場合の裕度交換を検討した結果を参考のために示す。

3. 5 破損の定義の重要性

システム化規格では、目標信頼度（破損確率）に基づいてき裂の貫通確率を管理することが基本となる。この場合、き裂の発生確率と貫通確率の関係を把握しておくことが重要である。また、實際上構造健全性判定の目安となりうるき裂深さ（板厚の1/4、1/2などで、補修や取替の基準となりうるき裂深さ）と貫通確率の関係も重要である。

3. 2に示した例題において、鍛造材（ISIなし）の繰り返し数が500サイクルの場合について、き裂の発生確率およびある深さに達する確率を求めると、表3-2のようになる。その時点でき裂深さが板厚の3/4に達する確率（この確率は貫通確率にある程度近い値と考えられる。貫通確率そのものを解析的に求めると、貫通直前の計算誤差が大きくなり得るのでここでは求めていない）を、その時点でき裂が発生する確率と比較すると、前者の方が約8桁低い値になっていることがわかる。また、その時点でき裂深さが板厚の1/4に達している確率は、その時点でのき裂発生確率に比して約4桁低く、貫通確率に比して約4桁高い。この例の場合、例えば、「繰り返し数が500サイクルにおけるき裂発

生確率は 4×10^{-6} である」ことと、「繰返し数が 500 サイクルにおいて、き裂深さが $t/4$ に達する確率が 7×10^{-10} である」ことは、等価である。

表 3-1 裕度交換が成立する条件

	累積破損確率	ISI (年/回)	サイクル数
A	7×10^{-10}	1 (Advanced)	(495)
B	5×10^{-9}	2 (Advanced)	(675)
C	2×10^{-8}	3 (Advanced)	(800)
D	6×10^{-8}	5 (Advanced)	(980)
E	2×10^{-7}	10 (Advanced)	(1205)

表 3-2 き裂発生確率と貫通確率の関係

き裂深さ	累積確率	備考
発生	4×10^{-6}	従来評価
t/10	2×10^{-8}	
t/4	7×10^{-10}	本例題
t/2	3×10^{-12}	
(3/4)t	7×10^{-14}	貫通確率に近い値

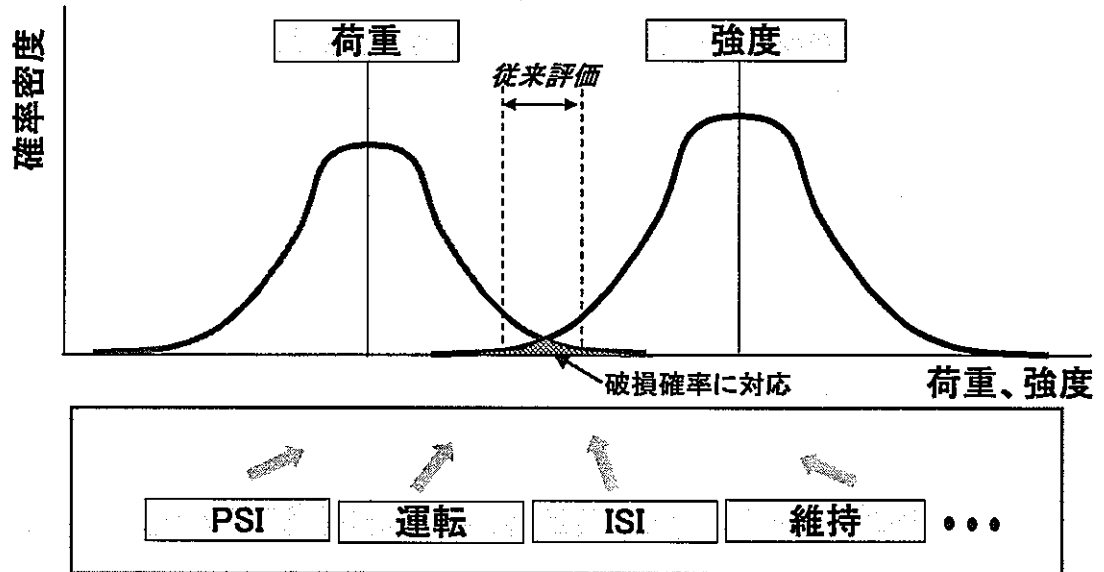


図 3-1 破損確率評価の導入

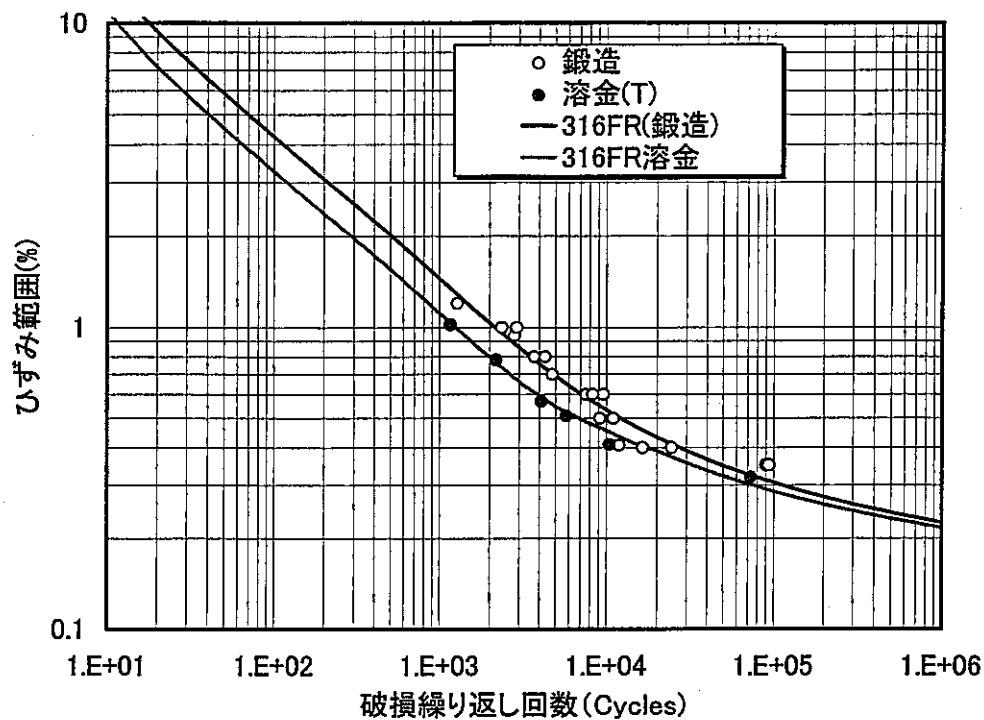


図 3-2(1) 母材と溶接金属の疲労寿命

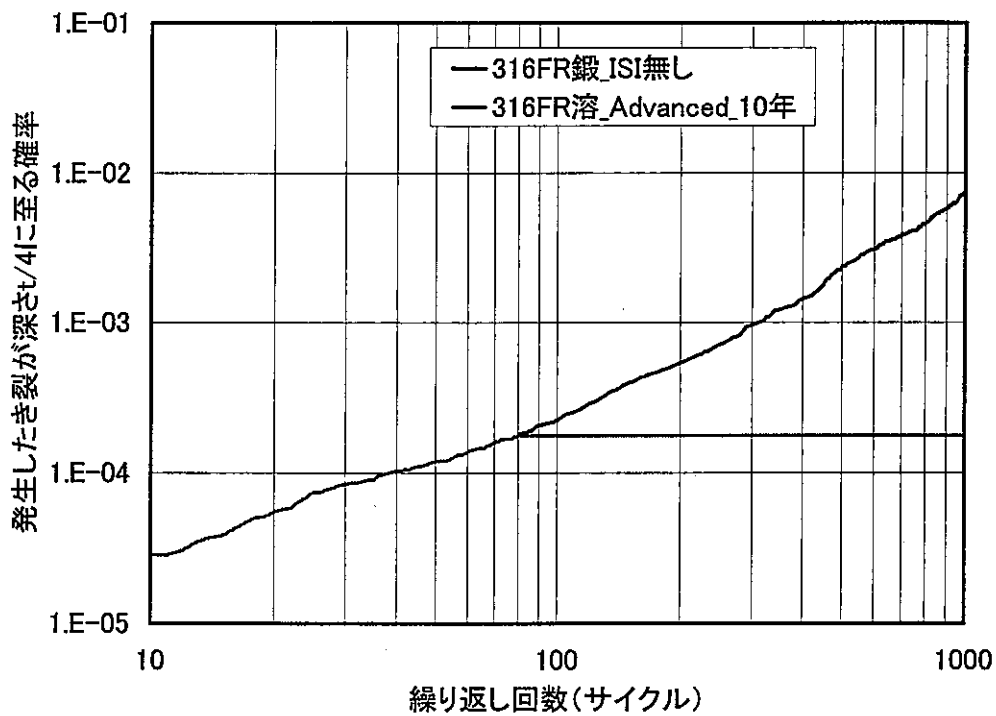


図 3-2(2) 累積き裂進展確率

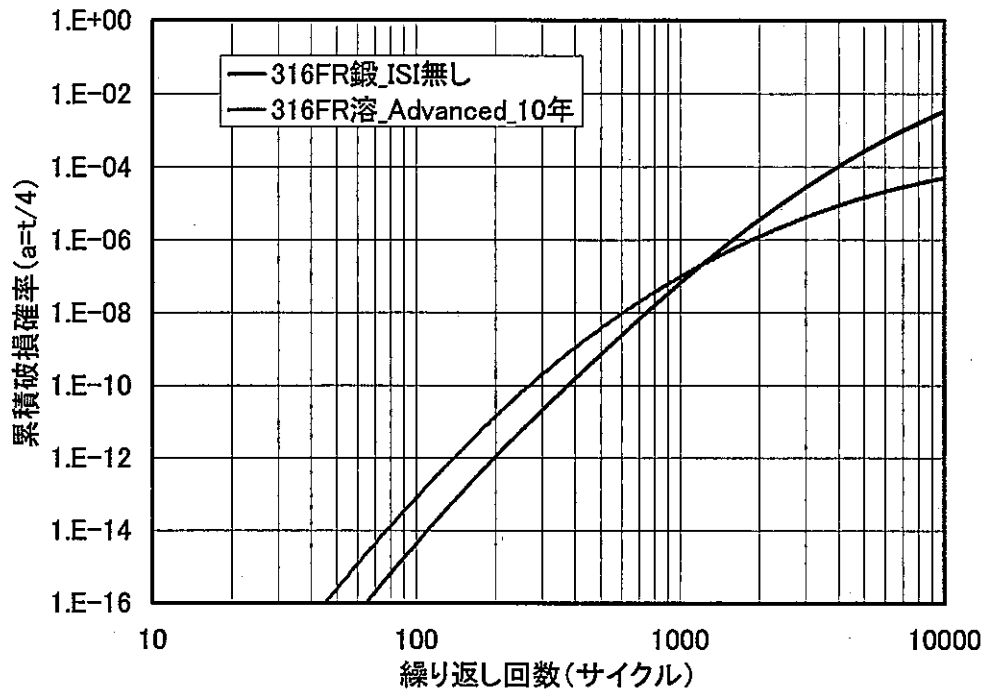


図 3-2(3) 累積破損確率

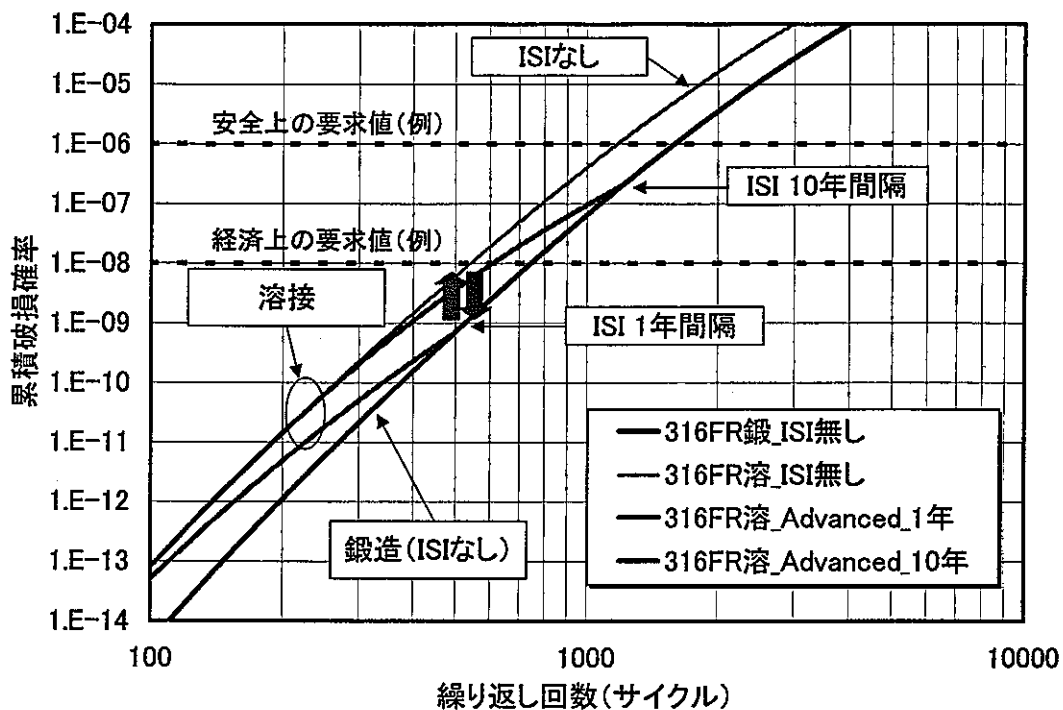


図 3-3 累積破損確率

4. 設計係数への展開

3章の例題では、直接破損確率を計算することにより裕度交換の可否を判断したが、システム化規格では、簡易法を定めることが望ましい。ここでは、裕度交換の指標となりうる設計係数を、新たに設定することを考える。この設計係数は、信頼性工学の考え方を参考とし、従来の「安全率」とは異なり、目標信頼度（破損確率）と明確にリンクするものとする¹。

ここでは、破損モードとして疲労を想定し、3章の例題に基づき、システム化規格における設計係数のイメージを示す。

4. 1 設計係数の算出手順

本手順は、以下の4段階に大別できる。詳細は、付録1および2に示す。

- (1) 累積破損確率の算出：試験データなどに基づいて相対的に確度高く確率分布を設定できる特性について、確率分布を考慮し、累積破損確率を算出する（3章で実施したのと同等の内容。例えば付録1などによる）。
- (2) 設計係数の仮設定：(1)の結果をもとに、累積破損確率と疲労寿命に対する設計係数の関係を求める（付録2）。
- (3) 影響因子の効果取り込み：(2)で算出した設計係数に対して、(1)では考慮しなかったが破損確率の決定要因となると考えられる影響因子の効果を加味し、さらに広い設計オプションに対応できるよう、設計係数を定める。このために、エキスパートパネル、エンジニアリングジャッジメントを広く活用する。例えば、最終的な破損確率に対する効果を判断してもらい、設計係数に割り戻す。
- (4) キャリブレーション：(2)、(3)で算出した設計係数に対して、現状基準をリファレンスとするキャリブレーションを行う（同一の手法で算出した破損確率が、例えば、システム化規格の最重要機器と現状の第1種機器とで同等となるようにする）〈本報では未実施である〉

4. 2 設計係数の試算結果

破損モードとして疲労を想定し、3章の例題に基づき、システム化規格における設計係数のイメージを表4-1に示す。この設計係数の特徴は以下のとおり

¹ 信頼性工学で用いられる部分安全係数についてその要点を付録4に示す。本報で提案している設計係数は、目標破損確率とリンクしている点で、部分安全係数と共通性を持つ。

である。

- (1) この設計係数は、目標信頼度と、設計オプションの組合せによって決まる。
- (2) 同一の数値は、同一の許容繰返し数に対応する。
- (3) 同一の目標信頼度で、同一の（同一と見なすことのできる）数値があれば、裕度交換が成立していることを示す（同一の信頼度、許容繰返し数が、異なる設計オプションの組合せで実現できる）。これをもとに、裕度交換の可能性を検討できる。
- (4) 設計係数は、基本となる 316FR 鍛造材に対する疲労強度の比率として設定されているので、例えば、「溶接+ISI」など、鍛造材以外の材料を用いた設計についても、すべて、あたかも鍛造材を用いているかのようにして設計できる。

4. 3 仕上がりイメージ

表 4-1 は、3 章の例題の限られた条件に対する試算結果に基づきイメージを示したものである。実際の設計係数の設定イメージとして、以下が考えられる。

- (1) 実機条件（温度、ひずみ範囲、応力比、板厚等）を包絡する形で設定する。この結果、複数の表が用意される。
- (2) 容器、管それぞれに設定する。この設計係数は、き裂進展を考慮しているため、板厚外径比、応力比などが大きく異なる機器には別々に用意することが合理的であることによる。イメージを図 4-2 に示す。
- (3) さらに多くの設計オプションに対応できるように定める。
- (4) 表 4-1 をさらに簡易化する方法を検討する。具体的には、基準となる設計係数に対して、設計オプションごとの因子係数を定め、簡単な公式により、表 4-1 の設計係数を算出できるようにする。

表 4-1 システム化規格における疲労に対する設計係数のイメージ¹

- ・適用範囲：容器
- ・ステンレス鋼、550℃、ひずみ範囲 0.4%
- ・正字体は例題に基づく計算値、イタリックはエンジニアリングジャッジメントを想定した値

設計オプション		システム化規格における 目標信頼度 ² および設計係数 ³		
検査	材料・製作等	高	中	普通
ISI なし	鍛造材	1.5	1.0	0.6
	溶接 (表面仕上)	2.0	1.4	0.9
	溶接 (仕上緩和) ⁴		2.9	2.0
	表面強化処理 ⁵	1.0	0.6	
	...			
ISI あり ⁶ (1年)	鍛造材	—	—	—
	溶接 (表面仕上)	1.0	0.4	0.2
	溶接 (仕上緩和)		1.8	1.0
	表面強化処理	—	—	—
	...			
ISI あり (5年)	鍛造材	—	—	—
	溶接 (表面仕上)	1.4	0.7	0.3
	溶接 (仕上緩和)		2.4	1.4
	表面強化処理	—	—	—
	...			
ISI あり (10年)	鍛造材	—	—	—
	溶接 (表面仕上)	1.6	0.8	0.4
	溶接 (仕上緩和)		2.6	1.6
	表面強化処理	—	—	—
	...			

¹ 容器と管に分けて設定することを想定。本表は、板厚 30mm の大型容器を想定した場合の、 $\Delta \epsilon_p=0.4\%$ 、 $a_0=t/4$ に対する試算値。

² 本試算では、信頼度の「高」/「中」/「普通」は、それぞれ累積破損確率 $10^{-7}/10^{-6}/10^{-5}$ に相当。現状の係数を用いた場合の破損確率は約 1×10^{-6} であり、「普通」でも、現状よりも 3 桁程度高い信頼度に対応。

³ 「目標信頼度中」の「鍛造材」の値 (17) で正規化して表示。システム化規格では、荷重のばらつきを別途評価するため、ひずみ範囲に関する係数は廃止し、必要な場合に別途定めることを想定。

⁴ エンジニアリングジャッジ「表面仕上 (余盛高さ制限) の緩和により容器の信頼度が 2 桁低下」を仮定。

⁵ エンジニアリングジャッジ「表面強化処理で容器の信頼度が 1 桁向上」を仮定。

⁶ ISI は PNL モデルの Advanced とする。a=t/10 のき裂を 90%、9t/10 のき裂を 99.9% の確率で検知し、検知されたき裂は補修すると仮定。

表 4 に示す設計係数の見方 (例)

<設計>

- 目標信頼度が「高」のとき、鍛造を溶接構造（表面仕上げ）に変えるならば、毎年 ISI を実施することにより、裕度交換が成立する。
- 目標信頼度が「中」の場合は、5 年毎に ISI を実施することにより、裕度交換が成立する。
- 目標信頼度が「普通」の場合は、10 年毎に ISI を実施することにより、裕度交換が成立する。

<維持>

- 溶接構造を用いたプラントの信頼度を、「普通」から「中」に格上げしたい場合、ISI の間隔を 10 年から 5 年に短縮すればよい。
- 信頼度が「普通」で、すでに設計寿命の 2/3 を経過しているプラントの溶接部を補修する。もともと表面仕上げしてあっても、補修時には「緩和仕上」として信頼度は低下しない。
- 信頼度が「普通」のプラントで、「緩和仕上」の溶接部に対して、ISI を 5 年間隔で実施していたが、運転実績により、実際の負荷回数は、多くとも設計想定 の 3/4 以下であることが分かった。この場合、ISI を 10 年間隔に延長しても、所期の信頼度を維持できる。

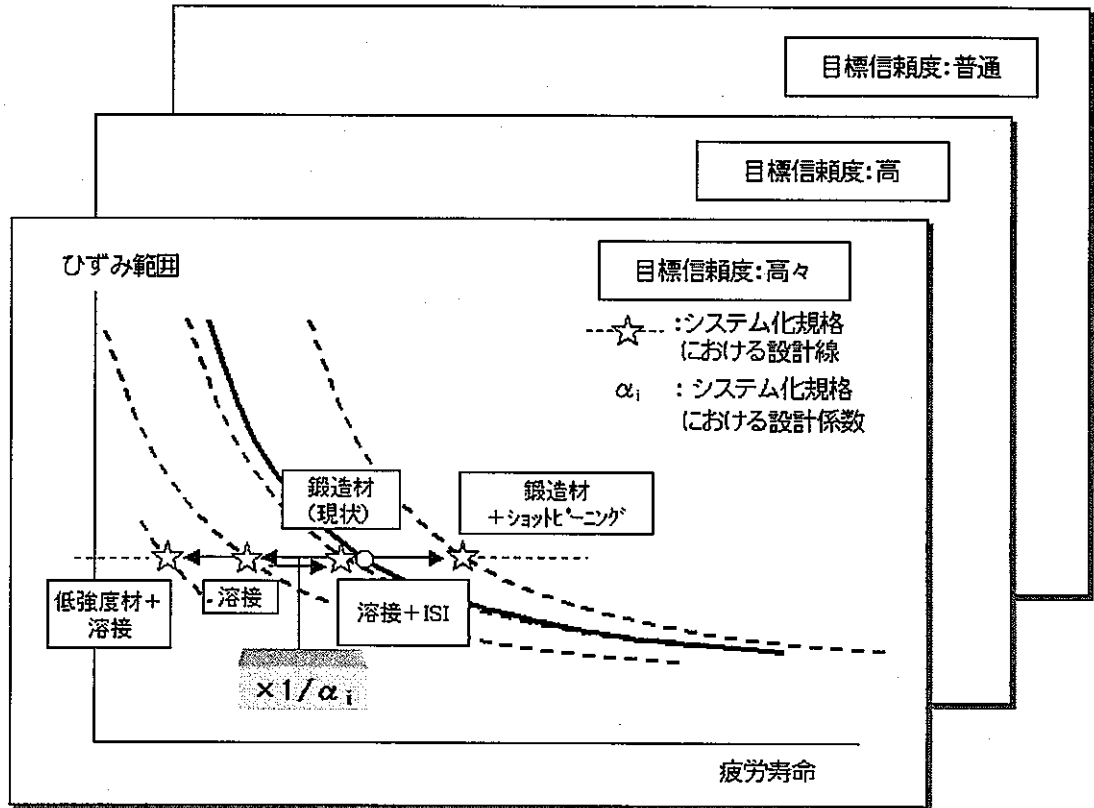


図 4-1 疲労に対する設計係数の設定

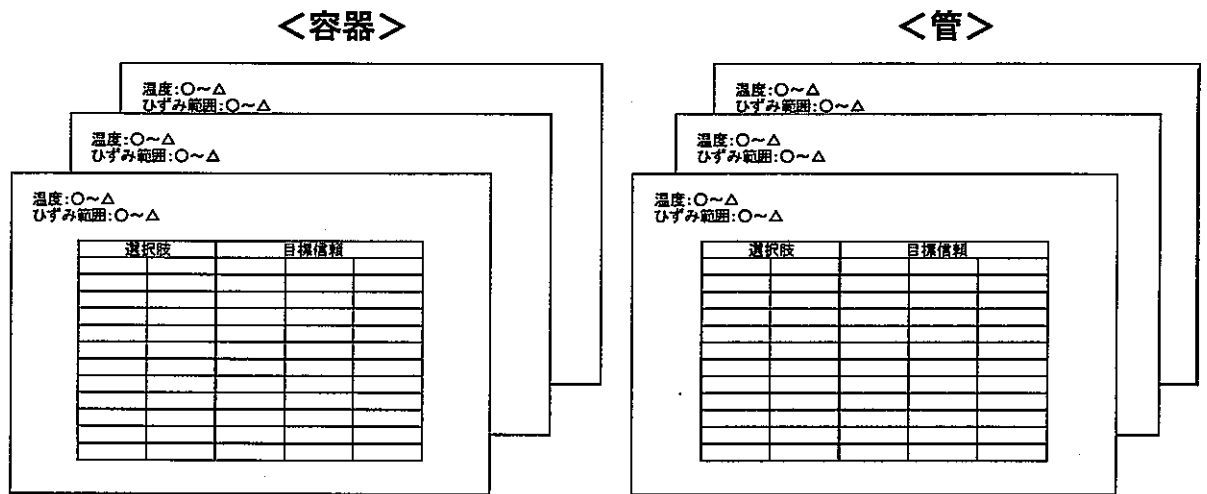


図 4-2 設計係数設定の仕上がりイメージ

5. 本手法の特徴と課題

3章で破損確率の評価値に基づき裕度交換を行う方法を提案した。4章では、設計係数を介して裕度交換を行う手法を提案した。本章では、これらの方法について、特徴と課題をまとめる。

5. 1 破損確率の評価に基づき裕度交換を行うことに関する特徴と課題

5. 1. 1 特徴

本方法は、破損確率の評価値に直接基づいて裕度交換を行う手法であり、裕度交換の定義（2章参照）に最も忠実な手法であると言える。このため、方法論上の曖昧さが少ないという特徴を有する。

5. 1. 2 課題

破損確率の評価値は、裕度交換の指標として用いられるばかりではなく、将来的には、安全設計・系統設計から算出される目標信頼度と対比されることになる。このため、十分な確度で破損確率を算出することが、今後極めて重要なポイントなる。本項では、この観点も含めて、破損確率評価に関する主な課題を検討する。

(1) データベースの充足性

本報で検討しているように、解析モデルに基づいて破損確率を求める場合に、まず課題となるのが、データの充足性である。これは、破損確率評価法として、モンテカルロ法などの数値計算法を用いる場合でも、解析的手法を用いる場合でも、あるいは何らかの簡易法を用いる場合でも共通の課題である。

破損モードとして、一次応力や疲労などの代表的なモードを考える場合には、基本となるデータはかなり揃っていると考えられる。しかしこの場合でも、詳細に検討すると、例えばひずみ速度効果に関するデータ（低ひずみ速度のデータ）が少ない、環境効果などの影響因子に関するデータが少ない、長時間データが少ない、などの課題が出る可能性がある。

一次応力や疲労などの代表的な破損モードのみならず、システム化規格で考慮すべき（破損確率を算出すべき）破損モード全般およびそれに対する影響因子について、十分なデータが利用可能なかどうか、整理検討することが必要である。データ不足と判断される項目で、試験により取得可能なものがあれば、試験の実施も検討する必要がある。

しかしながら、多くの場合、短期間でのデータの取得・充足は困難であると思われる。この場合は、統計的手法による補完を検討する、類似のデータに基づくエンジニアリングジャッジを導入する、など何らかの工夫を行い、算出される破損確率の不確定性を極力抑えるようにする努力が必要である。

裕度交換に当たっても、データ不足によりその客観性が減じることをないよう、複数の方法で相互に検証を行うなどの検討が必要となる。

破損確率評価に基づく裕度交換を行う上で、データの不足に起因する不確定性をいかに減じるかが、この方法の実用化の上で大きな課題となる。

(2) 評価法の標準化

破損確率評価において、データの充足性ととも結果に大きな影響を及ぼすのが、評価手法である。疲労の場合であれば、き裂発生・進展評価法がこれにあたる。これらの評価法は基本的なフローについては確立されているといえるが、発生き裂の寸法形状のモデル化、クリープ損傷の評価法など、結果に有意な影響を及ぼす因子であっても、いまだ評価法が確立されるに至っていないか、あるいは諸説が並存しているものもある。

これらについては、残念ながら、早急な課題解決は容易でない。システム化規格における破損確率評価においては、現状の知見に基づいて、技術的に妥当であると考えられる評価手順を標準案として定め、逐次最新知見に則って、専門家の協議などにより見直してゆくことが現実的である。

(3) 現実の破損頻度との対比

データベースの充足、評価法の高度化の課題の克服と同時に重要となるのが、現実の破損頻度との対比である。解析モデルに基づき算出された破損確率が、現実の破損頻度を妥当に再現していることを確認する必要がある。これは、ある程度破損確率の大きい領域 ($10^{-2} \sim 10^{-3}$ 程度の領域) については、破損確率の評価値と、破損データベースなどから求められる現実の機器の破損頻度を対照することにより、評価が可能である。これよりも破損確率の低い領域については、直接の比較対照ではなく、何らかの工夫が必要となる。

5. 2 設計係数法による裕度交換に関する特徴と課題

5. 2. 1 特徴

本方法は、裕度交換を取り込んだ設計基準を構築するために、本報で新たに提案したものであるが、以下の特徴を有する。

(a) 本資料で検討した設計係数は、信頼性工学の概念を背景としており、目標

破損確率と明確にリンクしている。このため、目標破損確率を明確に意識した設計が可能となる。

- (b) その上で、設計係数の選択を通じて、裕度交換が可能となる。
- (c) エキスパートパネル、エンジニアリングジャッジメントの取り込みが、比較的容易である。
- (d) 設計係数は既存基準と異なるものになるが、評価法自体は、既存基準と大きくは変わらないため、従来基準と比較しても違和感が少なく、作成、使用、説明とも容易である。

5. 2. 2 課題

本方法の課題として、以下を上げることができる。

- (a) 実機条件をカバーするより多くの条件の解析にもとづく設計係数の算出。
本報では、単一の例題に基づき疲労に対する設計係数を試設定したが、様々な荷重、構造、検査条件に対する設計係数を設定することが必要となる。
- (b) (a)の結果を受けて、適切な場合分けに基づき設計係数を設定する方法の確立。設計係数は、荷重、構造、検査の条件によって異なる値が定められるが、あまりにも細分化して設計係数を定めることは、規格として現実的でない。このため、適切な条件分けが必要となる。
- (c) エキスパートパネル、エンジニアリングジャッジメントの取り込み方法確立。破損確率に有意な影響を与えると考えられるが、解析や数値計算に取り込みにくい因子については、その効果をエキスパートパネルやエンジニアリングジャッジメントにより同定し、設計係数の設定に反映することが必要である。
- (d) 設計係数の確度に対する考え方の明確化。エキスパートパネル、エンジニアリングジャッジメントにより設定した設計係数と、詳細数値計算により設定した設計係数では、その確度に差があり得るが、その処理の考え方。
- (e) 簡単な公式による設計係数の導出。本報の提案では、荷重、構造、検査等の設計選択肢の組合せに応じて、テーブルの形で設計係数を定めることを考えているが、テーブルの数を増やしたくない場合には、さまざまな設計選択肢の組合せに対する設計係数を簡単な公式で導出できるようにしておくことが望ましい。このような公式の実現性を検討することが必要である。
- (f) 要素技術の開発（別途実施中）と、(d)への取り込み：材料特性の仕分け・設定、荷重特性の設定、き裂発生・進展評価法の高度化、荷重および強度に対する確率論的評価法の高度化、ISI 精度および頻度と破損確率の定量関係の構築（ ΔPf が求まったときに、精度と頻度にどう落とすか。例えば、PNL モデルと JEAC4205 などの規定との関係の判断）。

6. 結言

本報の検討により得られた結果は以下のとおりである。

- 1) システム化規格の基本的な概念である、裕度および裕度交換に対して、明確な定義を定めた。
- 2) 裕度交換の指標として、破損確率を用いることを前提に、破損確率評価法の暫定案を示した。
- 3) FBR 原子炉容器液面近傍を取り上げ、「鍛造材+ISIなし」という設計と、「溶接継手+ISIあり」という設計について、疲労に対する累積破損確率を算出した。
- 4) 3)の2つの設計について、算出された累積破損確率をもとに、裕度交換の可能性を検討し、一定の供用期間を設定し、適切な ISI 条件を定めることにより、裕度交換が可能であることを示した。
- 5) システム化規格において、規格の使用者が破損確率を算出することなしに、より容易に裕度交換の可否の判断を行うことができるように、「設計係数法」を提案した。
- 6) 3)の例題をもとに、目標信頼度と設計選択肢に対応する形で、設計係数の値を具体的に試算した。
- 7) 破損確率の算出、破損確率にもとづく裕度交換、設計係数法による規格化について、その特徴と今後の開発課題を明らかにした。

謝辞

本検討を進めるにあたって、新型炉技術株式会社の田下正宣氏には、設計手法高度化委員会システム化規格ワーキンググループ主査として、豊富な実務経験に基づく大所高所からの示唆を度々いただいた。核燃料サイクル開発機構大洗工学センター 要素技術開発部 構造信頼性グループの森下正樹グループリーダー、川崎信史副主任研究員、本社 FBR サイクル推進部炉システムグループの堂崎浩二氏には、細部にわたる有益な助言をしばしばいただいた。また、三菱重工業株式会社の大谷知未氏と中馬康晴氏には確率論的強度評価に関して技術的なヒントをいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] Asada, Y., Tashimo, M. and Ueta, M., System Based Code -Principal Concept-, Proceedings of ICON10 (2002)
- [2] Asada, Y., Tashimo, M. and Ueta, M., System Based Code -Basic Structure-, Proceedings of ICON10 (2002)
- [3] 浅山 泰、システム化規格－基本的な考え方－（研究報告）、核燃料サイクル開発機構成果報告書 TN9400 2001-065 (2001)
- [4] 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－（研究報告）、核燃料サイクル開発機構成果報告書 JNC TN9400 2001-090 (2001)

付 録

付録 1 : 破損確率の算出手順

本資料で用いた破損確率の算出手順は以下の通り。

以下の過程において、安全率は考慮しない。

(1) き裂発生確率

- ① 代表的な温度、ひずみ範囲、保持時間などの条件を設定する。
- ② 疲労強度、クリープ強度など、代表的な特性で、試験データなどに基づき、相対的に確度の高い確率分布を設定できるものに対して、確率分布を設定し、確率変数とする。
- ③ クリープ疲労破損クライテリアは、時間消費型の線形損傷則とする。

$$D_f = \frac{N}{N_f} \quad (\text{A1.1})$$

$$D_c = N \int_0^{t_h} \frac{dt}{t_r}$$

$$D_c + 7/3D_f < 1 \quad (0 < D_f \leq 0.3)$$

$$7/3D_c + D_f < 1 \quad (0.3 < D_f \leq 1)$$

ここで、

- N : 繰り返し数
- N_f : 疲労寿命
- D_f : 累積疲労損傷
- D_c : 累積クリープ損傷
- t_r : クリープ破断時間
- t_h : ひずみ保持時間

- ④ モンテカルロ法を用いて、き裂発生確率密度関数 $f_i(x)$ を計算する。材料特性に相関があるものについては、乱数の発生に当たって、これを考慮する。
- ⑤ 必要であれば、寸法効果を考慮する。
- ⑥ 計算されたき裂発生確率は、機器 1 体あたりのき裂発生確率と考える。
- ⑦ この過程で用いる材料定数等を表 A1.1 に示す。

(2) き裂進展確率

- ① 破損の定義を設定する。
- ② き裂発生を考慮する（深さ a_{init} のき裂が 1 個発生すると仮定する。アスペクト比は確率分布を考慮する。）
- ③ PSI の有無、精度を考慮し、必要な場合は初期欠陥を考慮する。
- ④ 膜曲げ比、弾性追従係数、などの条件を設定する。

- ⑤ 疲労き裂進展速度、クリープき裂進展速度など、代表的な特性で、試験データなどに基づき、相対的に確度の高い確率分布を設定できるものに対して、確率分布を設定し、確率変数とする。
- ⑥ 簡易法により、応力拡大係数を算出し、Paris 則を用いてき裂進展計算を行う。

$$\frac{da}{dN} = \left(\frac{da}{dN}\right)_f + \left(\frac{da}{dN}\right)_c \quad (\text{A1.2})$$

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_f = C_f (\Delta J_f)^{m_f}$$

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_c = C_c (\Delta J_c)^{m_c}$$

ここで、

da/dN	: クリープ疲労き裂進展速度
$(da/dN)_f$: 疲労き裂進展速度
$(da/dN)_c$: クリープき裂進展速度
ΔJ_f	: 弾塑性 J 積分範囲
ΔJ_c	: クリープ J 積分範囲
m_f	: 疲労き裂進展速度の定数
C_f	: 疲労き裂進展速度の定数 (指数)
m_c	: クリープき裂進展速度の定数
C_c	: クリープき裂進展速度の定数 (指数)

- ⑦ モンテカルロ法を用いて、き裂進展確率密度関数 $f_P(x)$ を計算する。材料特性に相関があるものについては、乱数の発生に当たって、これを考慮する。
- ⑧ この過程で用いる材料定数等を表 A1.2 に示す。
- ⑨ 以上の過程において、安全率は考慮しない。

(3) ISI の考慮

- ① ISI のレベルを設定する。次式で示す PNL モデルなどを用いる。

$$\begin{aligned} \text{Poor:} & \quad POD = \Phi\{0.432 + 0.163 \ln(a/t)\} \\ \text{Good:} & \quad POD = \Phi\{1.75 + 0.583 \ln(a/t)\} \\ \text{Advanced:} & \quad POD = \Phi\{3.63 + 1.106 \ln(a/t)\} \end{aligned} \quad (\text{A1.3})$$

ここで、

POD	: き裂検出確率
a	: き裂深さ
t	: 板厚

- ② ISI の頻度を設定する。
- ③ き裂進展確率に、ISI の効果を反映する。

(4) 破損確率

- ① (1)、(2) より、次式により破損確率 P_f を求める。

$$P_f = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^k f_i(i) \cdot f_p(k-i) \quad (\text{A1.4})$$

ここで、

- $f_i(x)$: $n=x$ cycle において $a=a_{init}$ のき裂が発生する事象の確率密度関数
 $f_p(x)$: $n=x$ cycle の間に $a=a_{init}$ のき裂が $a=a_{cr}$ まで進展する事象に関する確率密度関数

- ② (3) により、ISI の効果を考慮する。

参考文献

- [1] 若井 隆純、青砥 紀身、高速増殖大型炉機器・配管に対する欠陥評価指針の検討 (その1)、JNC TN9400 2001-78 (2001)
 [2] Nakayama, Y., Naoki, M., Takahashi, Y., Shimakawa, T., Date, S. and Toya, Y., Development of Fatigue and creep crack propagation law for 316FR stainless steel in consideration of FBR operating condition, PVP-Vol.365 (1998) 191.
 [3] 中馬 康晴、山内 雅文、大谷 知未、浅山 泰、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)
 [4] Simonen, F. A. and Woo, H. H., Analysis of the impact of inservice inspection using a piping reliability model, NUREG/CR-3869 PNL-5149 (1984)

表 A1.1 き裂発生計算にかかわるパラメータ

特性	材料			
	316FR		SUS304	
	母材	溶接部	母材	溶接部
疲労	対数正規分布 <板材> μ : 板材平均 σ : 0.235 ($n < 10^4$) 0.889 ($n > 10^4$) <鍛造材> μ : 鍛造材平均 σ : 0.235 ($n < 10^4$) 0.889 ($n > 10^4$)	対数正規分布 μ : 溶接金属平均 σ : 0.235 ($n < 10^4$) 0.889 ($n > 10^4$)	対数正規分布 <板+鍛造> μ : BDS σ : 0.329 ($n < 10^4$) 0.654 ($n > 10^4$)	—
動的応力 ひずみ曲 線 (決定 論)	DDS	DDS (母材と同じ)	BDS	—
クリープ 破断時間*	対数正規分布 μ : DDS σ : 0.604	対数正規分布 μ : DDS σ : 0.604	対数正規分布 μ : BDS σ : 0.604	—
クリープ ひずみ曲 線* (決定論)	対数正規分布 μ : DDS σ : 0.657	対数正規分布 μ : $\alpha_c=2$ σ : 0.657	対数正規分布 μ : BDS σ : 0.657	—

*相関係数 0.83 を考慮

表 A1.2 き裂進展計算に係るパラメータ

特性	材料			
	316FR		SUS304	
	母材	溶接部	母材	溶接部
疲労き裂 進展	$C_f=6.34 \times 10^{-5}$ (定数) $m_f=1.37$ (σ : 0.4216)	$C_f=6.34 \times 10^{-5}$ (定数) $m_f=1.37$ (σ : 0.4216)	$C_f=6.34 \times 10^{-5}$ (定数) $m_f=1.37$ (σ : 0.4216)	—
クリープ き裂進展	$C_f=7.41 \times 10^{-3}$ (定数) $m_f=1.37$ (σ : 0.4220)	$C_f=2.32 \times 10^{-2}$ (定数) $m_f=0.969$ (σ : 0.4220)	$C_f=1.64 \times 10^{-2}$ (定数) $m_f=0.941$ (σ : 0.4220)	—
初期き裂	溶接欠陥	本解析では、十分な PSI により、き裂進展に至る可能性のある溶接欠陥は除去されていると考える。		
	疲労/クリープ疲労により発生するき裂	き裂深さ： アスペクト比：	1mm (指数分布) μ : 0.5, σ : 0.5382 (対数正規分布)	

表 A1.3 モデルに係るパラメータ

形態	円筒容器 (外径：約 9600mm、板厚：30mm)
温度	550℃
ひずみ範囲	0.4%、0.3%
ひずみ速度	0.1%/s
ひずみ保持時間	なし、1000h
弾性応力比 (膜：曲げ)	3:1
弾性追従係数	き裂発生：1.7 (弾塑性)、1.7 (クリープ) き裂進展：1.7 (弾塑性)、3.0 (クリープ)
き裂形状	外面軸方向き裂
応力拡大係数	Raju-Newman 平板解
破損の定義	$a=t/4$

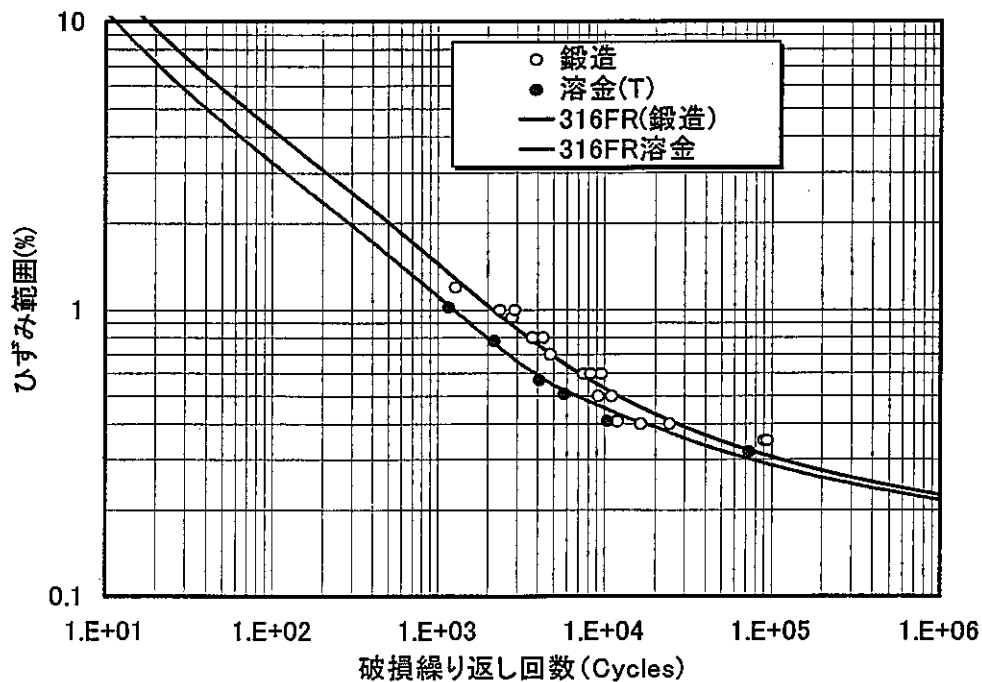


図 A1.1 疲労強度

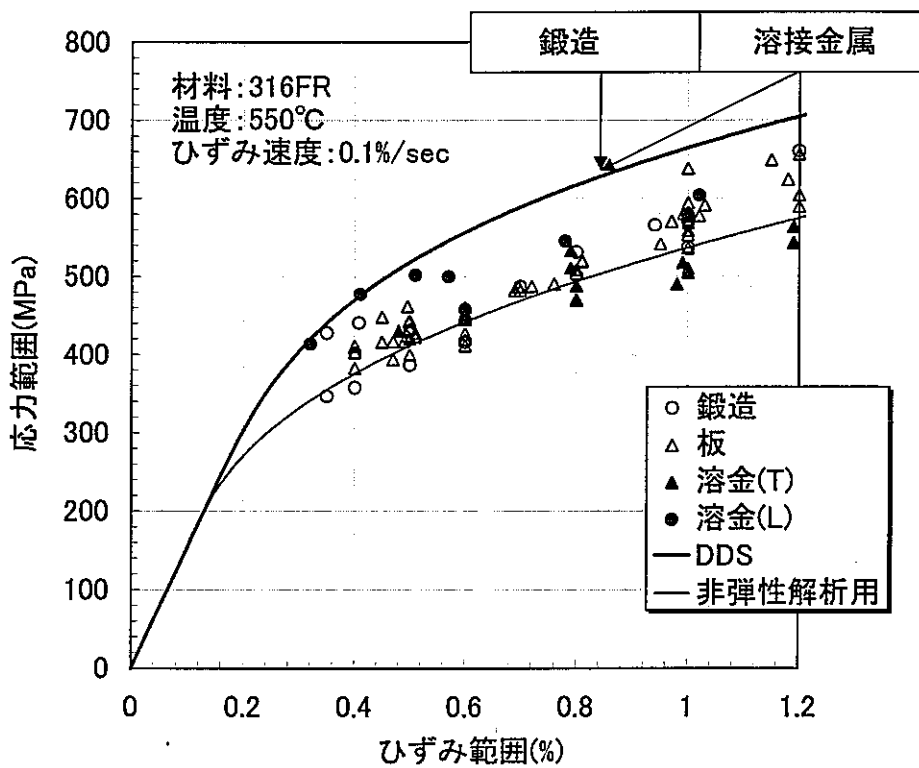


図 A1.2 動的応力ひずみ関係

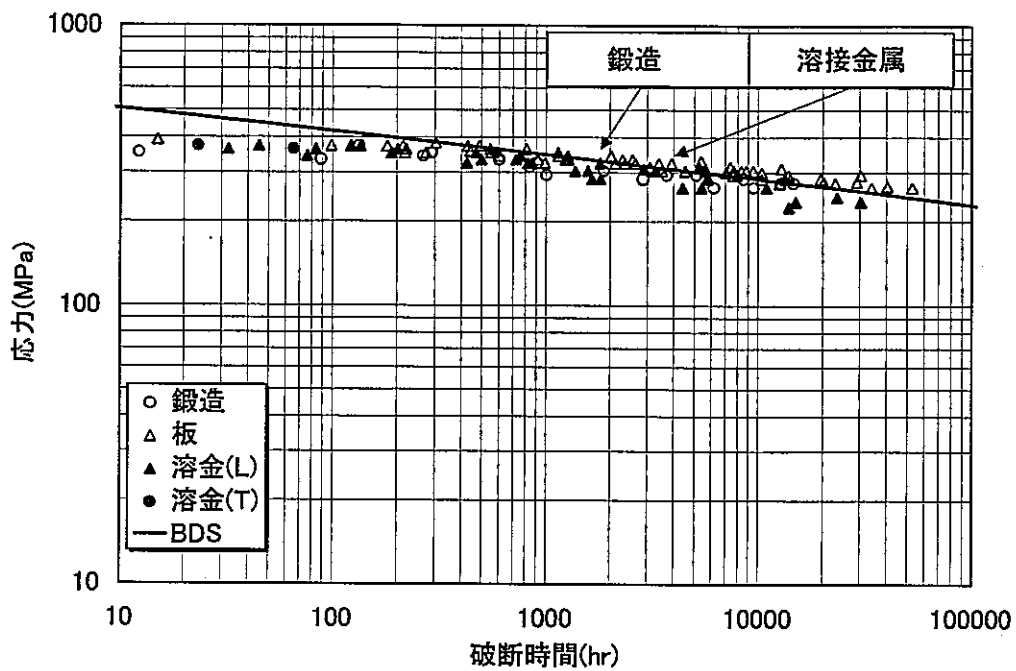


図 A1.3 クリープ強度

付録2 疲労およびクリープ疲労に対する設計係数の設定手順

疲労およびクリープ疲労に対するシステム化設計係数の設定手順を示す。破損モードが疲労の場合は、クリープ損傷に関連する部分を省略する。

(1) き裂発生進展確率の計算手順

破損モードとしてクリープ疲労き裂の発生と進展を考慮すると、破損限界関数は、一般に、以下の形で表すことができる。

$$g(\bar{x}) = f(N_f, t_R, \dot{\epsilon}_c, T, \Delta\epsilon_t, \dot{\epsilon}_t, t_h, q, D, \frac{da}{dn}, \frac{da}{dt}, I_a, I_f, a_{cr}) \quad (\text{A2.1})$$

ここで、

- N_f : 疲労強度
- t_R : クリープ強度
- $\dot{\epsilon}_c$: クリープひずみ速度
- T : 温度
- $\Delta\epsilon_t$: 全ひずみ範囲
- $\dot{\epsilon}_t$: 全ひずみ速度
- t_h : 保持時間
- q : 弾性追従係数
- D : クリープ疲労損傷の制限値
- da/dn : 疲労き裂進展速度
- da/dt : クリープき裂進展速度
- I_a : ISI の精度
- I_f : ISI の頻度
- a_{cr} : 限界き裂深さ

である。

このように、多くの基本変数を考慮する必要がある。ここでは、き裂発生と進展を分けて評価する。き裂発生については、 D を目標信頼度 r_t の関数として与え、さらに、疲労強度とクリープ強度を確率変数とすることを前提にそれぞれ設計係数 λ_{N_f} 、 λ_{t_R} を与える。このとき g は、

$$g_I(\bar{x}_I) = f(\lambda_{N_f} N_f, \lambda_{t_R} t_R, \dot{\epsilon}_c, T, \Delta\epsilon_t, \dot{\epsilon}_t, t_h, q, D(r_t)) \quad (\text{A2.2})$$

と表される。クリープ疲労損傷は、時間消費型線形損傷則にて評価するものとする。

き裂進展については、疲労き裂進展速度とクリープき裂進展速度を確率変数とする。このとき g は、

$$g_P(\bar{x}_P) = f\left(\frac{da}{dn}, \frac{da}{dt}, I_a, I_f, a_{cr}\right) \quad (\text{A2.3})$$

と表される。

(2) 設計係数の計算手順

①き裂発生に対して

き裂発生に対する設計係数は、以下の手順に従って決定する。

- (1) 付録1の手順に従い、繰り返し数 N_i と累積き裂発生確率 P_f の関係を求める。
- (2) 目標破損確率 (例えば、 10^{-6} 、 10^{-5} 、 10^{-3} など) に対する $N_i(10^{-6})$ 、 $N_i(10^{-5})$ 、 $N_i(10^{-3})$ を求める。
- (3) $N_i(10^{-6})$ 、 $N_i(10^{-5})$ 、 $N_i(10^{-3})$ を与える λ_{N_f} 、 λ_{t_R} の組合せを求める。
- (4) 上記の組合せのうち、

$$\beta' = \text{Min} \left[\left\{ (\log \lambda_{N_f} / \sigma_{N_f})^2 + (\log \lambda_{t_R} / \sigma_{t_R})^2 \right\}^{1/2} \right] \quad (\text{A2.4})$$

を与えるものを選び、これを目標破損確率に対応する設計係数とする。ここで、

σ_{N_f} : 疲労寿命の対数標準偏差

σ_{t_R} : クリープ破断時間の対数標準偏差

β' : Hasofer と Lind の安全性指標に相当する指標¹ (図 A2.1 参照)。

②き裂発生+進展に対して

き裂発生+進展に対する設計係数は、以下の手順に従って決定する。

- (5) 付録1の手順に従い、繰り返し数 N_i と累積き裂発生確率 P_f の関係を求める。
- (6) 目標破損確率 (例えば、 10^{-6} 、 10^{-5} 、 10^{-3} など) に対する $N_{ip}(10^{-6})$ 、 $N_{ip}(10^{-5})$ 、 $N_{ip}(10^{-3})$ を求める。
- (7) $N_{ip}(10^{-6})$ 、 $N_{ip}(10^{-5})$ 、 $N_{ip}(10^{-3})$ を与える λ_{N_f} 、 λ_{t_R} の組合せを求める。信頼性工学の考え方からすると、これらのほかに、き裂進展に関する確率変数 (Paris 則の係数および指数) も含めて設計係数を定めた方が厳密な扱いとなるが、ここでは、簡略化のため、2変数とする。
- (8) き裂発生(4)に飛ぶ。

※システム化規格では、荷重のばらつきは別途扱うため、従来の「ひずみ範囲に対する係数2」は、廃止し、必要な場合は別途定める。

③疲労に対する設計係数とクリープ疲労に対する設計係数の関係

以上の方法は、疲労強度とクリープ強度の同時確率密度分布に基づく方法である

¹ β' は、繰り返し数と ISI の検査の効果を含めて考慮する量であり、Hasofer と Lind の安全性指標そのものとは異なる。

が、一方、疲労単独の条件で設計係数 λ_{NF} を定め、この上でクリープに対する設計係数 λ_{CR} を定めるという方法もあり得る。この場合、同一の λ_{CR} に対して、疲労強度単独で求めた λ_{NF} が、同時確率密度を考慮して求めた λ_{NF} よりも大きい値となっていれば、これを採用した場合保守的となるので、問題はないと思われる。

(3) キャリブレーションとエンジニアリングジャッジメントの反映

- (1) (1) ~ (2) の設計係数は、破損確率の計算結果に基づき定めたが、破損確率の計算値そのものは、計算手法によって異なる可能性があるため、一種の相対値であると思なすべきである。このため、既存基準との対比によるキャリブレーションが必要になる。例えば、既存基準で第1種機器を設計した場合の破損確率が妥当であるとの認識があると仮定すれば、システム化規格の最重要と区分される機器の破損確率が、同じ手法で評価した場合の現状の第1種機器の破損確率と同等になるように、システム化規格の設計係数を設定すればよい。現状の第1種機器の破損確率が、合理化の余地のあるものであると考えるならば、システム化規格の設計係数は、現状より大きな破損確率に対応するように設定すればよい。
- (2) さらに、(1) ~ (2) で設定した設計係数は、基本的な特性に基づいて定められたものであり、影響因子については考慮されていない。影響因子の多くは、定量評価が難しいと考えられる。このような場合には、エキスパートパネルなどのエンジニアリングジャッジを導入することが考えられるが、導入のしかたとして、2通り考えることができる。
 - ① 係数そのものをエンジニアリングジャッジで決める。
 - ② 機器全体の信頼性への影響をエンジニアリングジャッジで決める。
 ②の例を、例題として示す。

例題) 経済性の観点からは、据付精度をより施行の容易なように緩和することが考えられる。これが構造健全性に及ぼす影響の定量評価は容易ではない。この場合、仮にエキスパートの間で、「破損確率はほとんどあがらないが、1桁上がるとして評価すれば十分保守的」との認識があるとする。この情報を利用して設計係数を設定するためにはどうすればよいか。

解) 許容累積破損確率 P_{θ} が、一桁下がった場合と等価なので、例えば今満たすべき条件が $P_{\theta}=10^{-6}$ であるならば、 $P_{\theta}=10^{-5}$ に対して定められている係数を用いればよい。あるいは、これを、許容累積破損確率が $P_{\theta}=10^{-6}$ でありかつ据付精度が緩和された場合の設計係数として、設定すればよい。

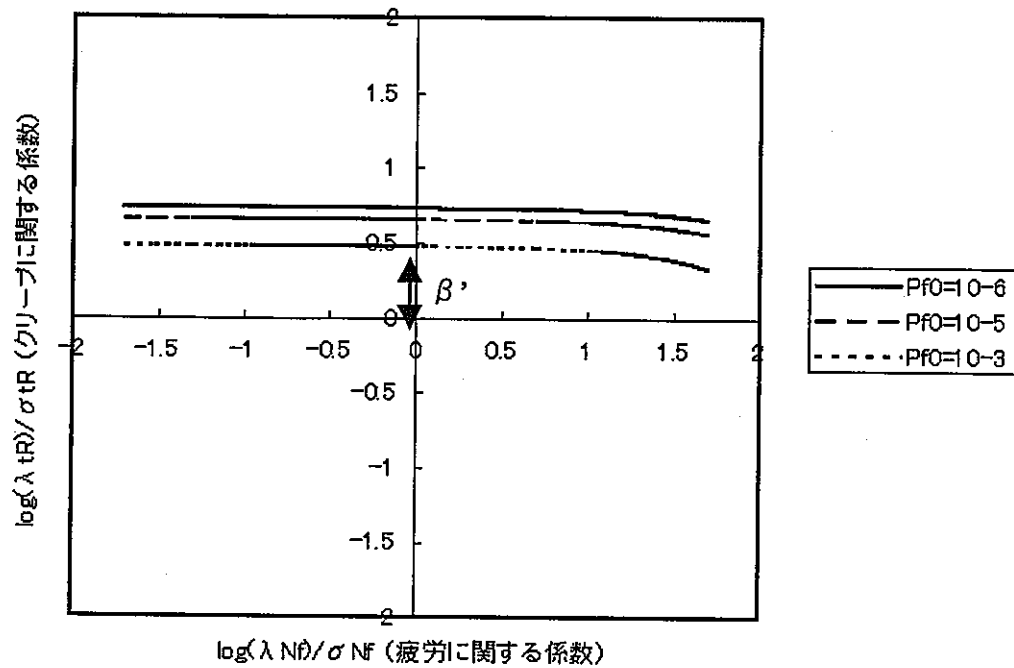


図 A2.1 クリープ疲労に対する設計係数の設定

付録3 クリープ疲労を考えた場合の裕度交換例

A3.1 計算条件

クリープ疲労を考えた場合の裕度交換例として、以下を試算した。

表 A3.1 クリープ疲労に対する裕度交換試算条件

	裕度交換項目	破損モード	負荷条件
ケース1	316FR 鍛造リング⇔ 316FR 板溶接+ISI	クリープ疲労	$\Delta \varepsilon t=0.4\%$ 、 ε $t=0.1\%/s$ 、 $t_h=1000h$
ケース2	316FR 鍛造リング⇔ 304 鍛造リング+ISI	↑	$\Delta \varepsilon t=0.4\%$ 、 ε $t=0.1\%/s$ 、 $t_h=1000h$

A3.2 裕度交換

以下の場合に、材料強度とISIの裕度交換が成立する。

表 A3.1 裕度交換が成立する条件

(1) 316FR 鍛造リング⇔316FR 板溶接+ISI

ケース1	累積破損確率	ISI (年/回)	サイクル数	設計寿命 (年)
A	6×10^{-7}	1 (Advanced)	(455)	(57)
B	1×10^{-5}	2 (Advanced)	(565)	(71)
C	6×10^{-5}	3 (Advanced)	(640)	(80)
D	5×10^{-4}	5 (Advanced)	(770)	(96)
E	1×10^{-2}	10 (Advanced)	(1060)	(133)

(2) 316FR 鍛造リング⇔304 鍛造リング+ISI

ケース2	累積破損確率	ISI (年/回)	サイクル数	設計寿命 (年)
A	2×10^{-4}	1 (Advanced)	(710)	(89)
B	9×10^{-4}	2 (Advanced)	(815)	(102)
C	2×10^{-3}	3 (Advanced)	(870)	(109)
D	7×10^{-3}	5 (Advanced)	(1010)	(126)
E	4×10^{-2}	10 (Advanced)	(1280)	(160)

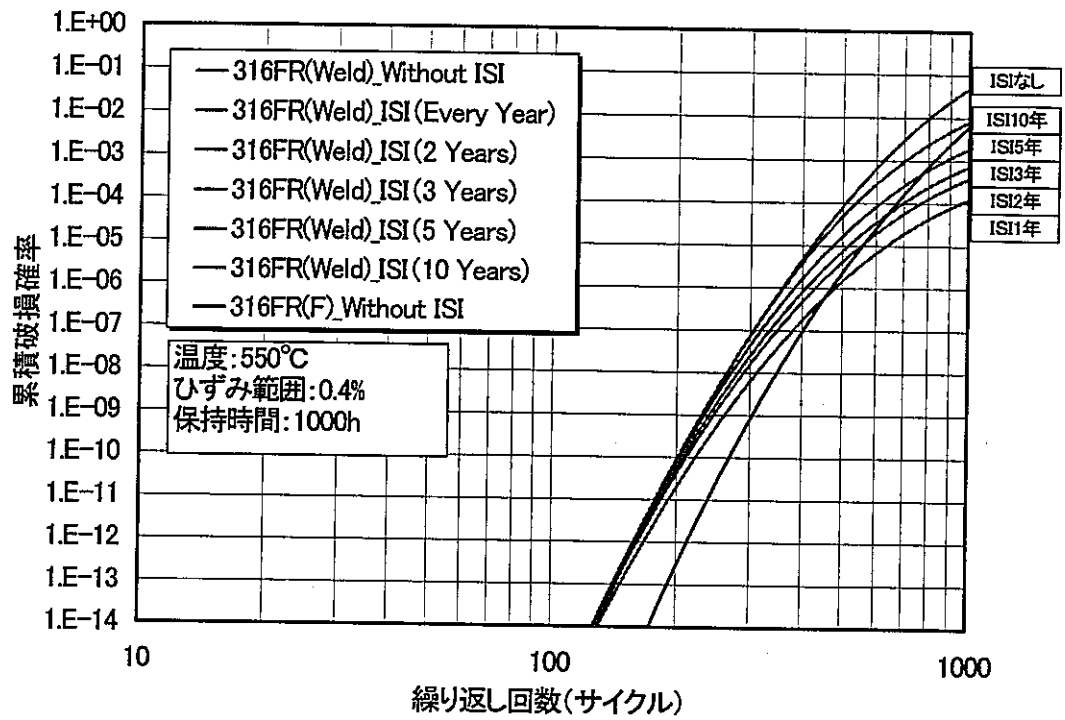


図 A3.1 ケース 1 の累積破損確率

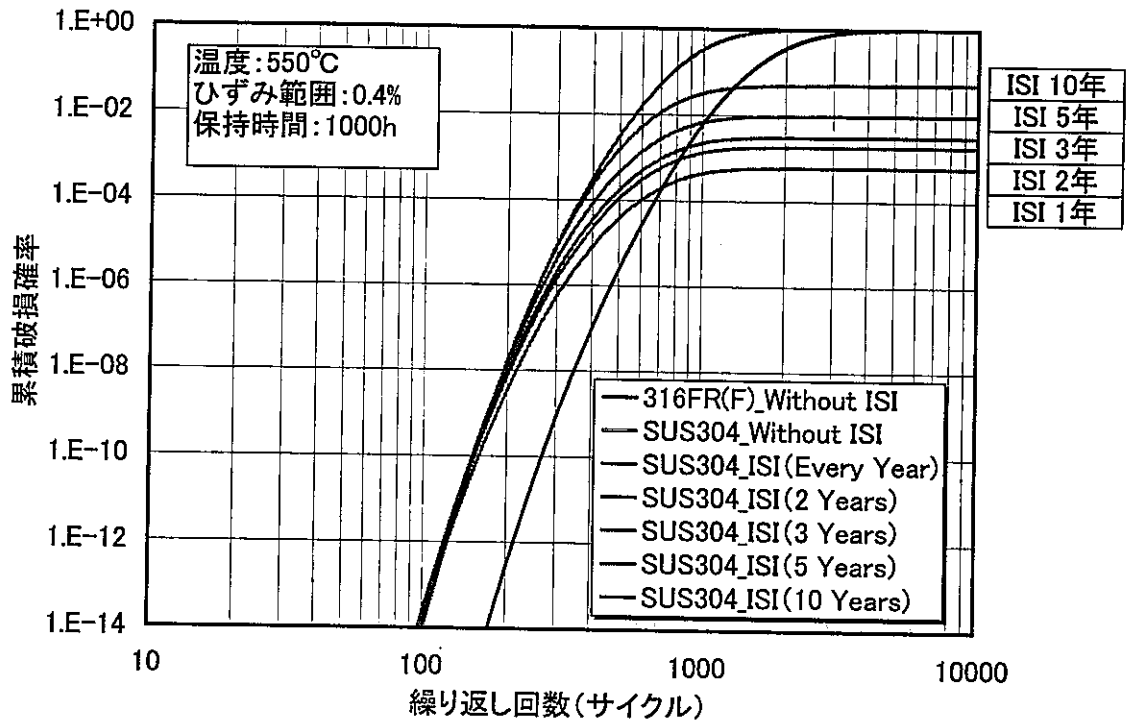


図 A3.2 ケース 2 の累積破損確率

付録 4 : 信頼性工学の関連事項

(1) 信頼性評価法

破損限界関数 (破損面) $f(x)$ を次式で定義すると、

$$f(\bar{x}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (\text{A4.1})$$

裕度 M は、

$$M = f(\bar{x}) \quad (\text{A4.2})$$

で表され、 $f(x) > 0$ が安全領域を、 $f(x) \leq 0$ が破損領域を表す。

変数 X_i の確率密度関数が正規分布で表される場合、Hasofer と Linda の安全性指標 β は、基本変数の組 x を正規化した z 座標系における、原点と破損面との距離として得られる。

$$\begin{aligned} \bar{z} &= (z_1, z_2, \dots, z_n) \\ z_i &= \frac{X_i - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \\ \mu_{z_i} &= 0, \sigma_{z_i} = 1 \end{aligned} \quad (\text{A4.3})$$

破損確率 P_f は、標準正規分布関数を用いて、

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (\text{A4.4})$$

で与えられる。このとき、設計点 $\bar{z}_d = (z_{d1}, z_{d2}, \dots, z_{dn})$ は、破損面上でもっとも原点に近い点である。

基本変数の確率密度分布が正規分布でない場合、破損確率を求めることは簡単でないが、中心極限定理を活用すると、基本変数の分布形が結果に大きな影響を及ぼさない場合があることが分かる。

(2) 中心極限定理

対象としている確率変数 X が、 n 個の同一の分布をもつ独立な確率変数 Y_i の和として表されるならば、 X の分布は、 Y_i の分布の形 (平均値、分散は有限とする) と無関係に、いつでも正規分布となる。これは、さらに条件を付け加えれば、同一の分布を持たない独立変数の総和に対しても成立する。

これを用いると、次のことが言える。例えば強度 X が、多くの独立で同一の分布をもつ変数の積で表されるとする。

$$\begin{aligned} X &= Z_1 Z_2 \cdots Z_n, \\ Y &= \ln X = \ln Z_1 + \ln Z_2 + \cdots + \ln Z_n \end{aligned} \quad (\text{A4.5})$$

Y は $n \rightarrow \infty$ のとき、正規分布に近づく。したがって、 X は対数正規分布に近づく。

(3) 部分安全係数

基本変数 X_i に対する部分安全係数 λ_i は、 X 座標系における設計点に対する各変数の座標の平均値に対する比として与えられる。

$$\lambda_i = \frac{X_{di}}{\mu_{X_i}} \quad (\text{A4.6})$$

<参考：2変数 R と S の場合の部分安全係数>

強度 R と荷重 S の 2 変数が正規分布を取る場合に、部分安全係数を簡単な計算により求める。破損限界関数 f は、

$$f(R, S) = R - S \quad (1)$$

変数 R 、 S が正規分布で表されるものと仮定し、これらを標準正規変数に変数変換すると、

$$R' = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R}, \quad (2)$$

$$S' = \frac{S - \mu_S}{\sigma_S}$$

(2)を(1)に代入して、

$$R' = \frac{\sigma_S}{\sigma_R} S' - \frac{\mu_R - \mu_S}{\sigma_R} \quad (3)$$

(3)は R' - S' 平面における破損面であり、その原点との距離 β は、

$$\beta = \frac{\mu_S - \mu_R}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_R^2}} \quad (4)$$

β を与える点、すなわち設計点 (S'_d, R'_d) は、

$$S'_d = \frac{\sigma_S(\mu_R - \mu_S)}{\sigma_S^2 + \sigma_R^2}, \quad (5)$$

$$R'_d = \frac{-\sigma_R(\mu_R - \mu_S)}{\sigma_S^2 + \sigma_R^2}$$

これを R - S 平面にもどすと、

$$R_d = S_d = \frac{\sigma_R^2 \mu_S + \sigma_S^2 \mu_R}{\sigma_S^2 + \sigma_R^2} \quad (6)$$

となり、一点が決定される。

強度および荷重に対する部分安全係数 γ_R および γ_S は、それぞれ、次のように求めることができる。

$$\gamma_R = R_d / \mu_R, \quad (7)$$

$$\gamma_S = S_d / \mu_S$$