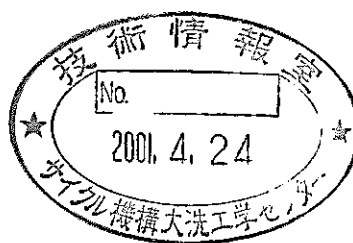


FBR プラントの低コスト・長寿命化に関する 構造・材料技術の調査研究

(研究報告書)

2000 年 5 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)
2000

FBR プラントの低コスト・長寿命化に関する構造・材料技術の調査研究 (研究報告書)

浅山 泰¹

要 旨

高速炉の実用化のためには、建設コストの低減は当然として、同時に維持コストの低減を図るとともに、プラント設計寿命の延長を図ることが必要である。この観点から従来より、新構造材料の開発や高温構造設計基準の高度化が行われてきた。しかし、高速炉が軽水炉なみの経済性を確保するためには、さらに視野を広げかつ突っ込んだ検討を行う必要がある。

そこで、本研究では、いわゆる設計基準に限らず、プラントコストの低減に寄与すると考えられる技術を広い範囲でサーベイし、有望技術を摘出した。調査対象は、プラント機器構造の材料選定、設計解析、製作・検査、運転・維持のすべてとした。摘出した有望技術について効果と課題の概略を評価した。特に有望と考えられるものについては、実証炉フェーズI設計を例題とし、中間熱交換器の設計に対する合理化効果を試算した。この結果、破損モードとして最も代表的なクリープ疲労のみを考えた場合には、現状の弾性解析ベースの許容応力で約2倍程度の拡大を見込めるとともに、設計寿命60年を実現できる見通しを得ることができた。

さらに、これらの有望技術をプラント設計に適用し、安全性を確保した上でコストミニマムを実現するプラント設計を行うために必要となる新たな基準体系の概念検討を行った。この基準体系は、従来の高温構造設計基準を、材料選定、設計解析、製作・検査、運転・維持を包括管理する体系に発展させたもので、確保すべき安全裕度を定量的に示した上で、最も合理的にそれを達成する方法を示すことのできる体系である。

¹ 大洗工学センター システム技術開発部 構造・材料技術開発グループ
本研究は、実用化戦略調査研究の一環として実施した (WBS 番号: 123110)

**Investigation of technologies on structure and materials that contribute to the
reduction of construction cost and elongation of design life of FBRs
(Research report)**

Tai ASAYAMA¹

Abstract

For the commercialization of FBRs, not only construction cost but also maintenance cost must be reduced. At the same time, design life should be extended. For this purpose, elevated temperature design standard has been successively updated and new materials have been developed. However, more efforts are necessary to make FBR competitive against advanced LWRs.

From this viewpoint, this report widely surveyed innovative technologies that had not been assessed in the current effort for the improvement of the design standard but were considered to be able to contribute to cost reduction. Areas investigated were specification and fabrication of structural material, design evaluation, fabrication, inspection, operation and maintenance. Promising technologies were selected from the result and the extent of improvement of the design of the intermediate heat exchanger of the so-called "Demonstration Reactor Phase I Design Study" was quantitatively evaluated; the allowable stress level calculated by elastic analysis can be roughly doubled and the design life of 60 years was envisaged.

Moreover, a new concept of design standard that is indispensable to utilize the above promising technologies in actual plant designs without decreasing reliability. The new system of codes and standards must cover not only design evaluation but also specification and fabrication of structural material, fabrication, inspection, operation and maintenance. At the same time, it must show quantitatively the safety margins that must be made and the way to achieve it so that the cost be minimum as well.

¹ Structure and Material Research Group, System Engineering Technology Division, Oarai Engineering Center

This study was performed within the framework of the strategic investigation and research for the commercialization of fast breeder reactors (WBS: 123110).

目次

1. 緒言	1
2. 有望技術の調査	2
2. 1 目的	2
2. 2 方法	2
2. 3 有望技術の抽出	2
2. 3. 1 材料	
2. 3. 2 設計評価	
2. 3. 3 製作・検査	
2. 3. 4 維持（検査、評価、補修・取替）	
2. 3. 5 全般	
2. 4 有望技術の採用による効果の試評価	6
2. 4. 1 評価条件	
2. 4. 1 評価結果	
3. 有望技術の適用のための新基準体系	9
3. 1 新基準体系が具備すべき条件	9
3. 2 新基準体系の概念と研究開発課題	9
3. 2. 1 システム化規格体系の概念と目的	
3. 2. 2 規格体系化の考え方	
3. 2. 3 開発の進め方と期待される成果	
3. 2. 4 研究開発課題	
3. 2. 5 規格体系のイメージ	
3. 2. 6 システム化規格開発に関するまとめ	
4. まとめ及び今後の計画	12
参考文献	13
付録	
A 1. 有望技術の抽出結果	
A 2. 合理化効果の試評価結果	

表リスト

表 1	有望技術の摘出結果	14
表 2	システム化規格体系の考え方	17
表 3	システム化規格開発の進め方と期待される成果	18
表 4	システム化規格に関する研究開発課題	19

図リスト

図 1	有望技術による合理化効果の試評価結果	20
図 2	システム化規格体系のイメージ	21

1. 緒言

高速炉の実用化のためには、建設コストの低減は当然として、同時に維持コストの低減を図るとともに、プラント設計寿命を軽水炉なみに 60 年に引き上げることが必要である。この観点から、従来より、高温構造設計に関して、新材料開発や設計評価体系の高度化検討が鋭意行われてきており、コスト削減や長寿命化に寄与する成果が得られている⁽¹⁾⁽²⁾。しかしながら、軽水炉なみの経済性を確保するためには十分ではなく、さらに高度な新たな技術が必要である。本調査研究の目的は、高温構造設計におけるこのような新たな技術の調査を行い、有望な技術を摘出し、その効果及び研究開発課題の予備評価をすることである。Phase II において、詳細評価を実施し、有望技術の絞込みを行う。

従来の高温構造設計の高度化研究は、いわば材料開発と設計解析に限定する形で進められてきたが、その過程で、従来は検討の対象とされてこなかった設計前提事象等にも踏み込むことにより大きな合理化効果が期待できることが認識されるようになってきた。そこで、本調査研究では、調査対象を従来の検討が行われてきた領域から大きく拡大し、プラントの材料選定、設計解析、製作・検査、運転・維持のすべての段階とした。これらのすべてについて、まず有望と考えられる技術の摘出を行った。次に、摘出した技術について、その効果と課題の概略を評価した。代表的なものについては、実証炉フェーズ I 設計に対する合理化効果を試算した。さらに、これらの有望技術を、実際に設計へ適用するためには、従来の高温構造設計基準をより大きな包括的な体系に発展させる必要があることを示し、その構造設計基準体系の概念を提示した。最後に、今後の計画を示した。

2. 有望技術の調査

2. 1 目的

高速炉の実用化のためには、建設コストの低減は当然として、同時に維持コストの低減を図るとともに、プラント設計寿命を軽水炉なみに 60 年に引き上げることが必要である。この観点から、従来より、高温構造設計に関して、新材料開発や設計評価体系の高度化検討が鋭意行われてきており、コスト削減や長寿命化に寄与する成果が得られている⁽¹⁾⁽²⁾。しかしながら、軽水炉なみの経済性を確保するためには十分ではなく、さらに高度な新たな技術が必要である。本調査研究の目的は、高温構造設計におけるこのような新たな技術の調査を行い、有望な技術を摘出し、その効果及び研究開発課題の予備評価をすることである。Phase II において、詳細評価を実施し、有望技術の絞り込みを行う。

2. 2 方法

従来の高温構造設計の高度化研究は、いわば材料開発と設計解析に限定する形で進められてきたが、その過程で、従来は検討の対象とされてこなかった設計前提事象等にも踏み込むことにより大きな合理化効果が期待できることが認識されるようになってきた。そこで、本調査研究では、調査対象を従来の検討が行われてきた領域から大きく拡大し、プラントの材料選定、設計解析、製作・検査、運転・維持のすべての段階とした。これらのすべてについて、まず有望と考えられる技術の摘出を行った。現状で成立性を見通すことができ有望と考えられるもののほか、現状では成立性が必ずしも明らかではないが今後の研究開発によって有望となる可能性があるものを含めた。また、現在すでに R&D を実施中のものも対象に含めた。次に、摘出した技術について、その効果と課題の概略を評価した。代表的なものについては、実証炉フェーズ I 設計に対する合理化効果を試算した。

2. 3 有望技術の摘出結果と開発課題

有望技術の摘出結果をまとめたものを表 1 に示す。材料、設計、製作・検査、運転・維持の大項目に分類し、それぞれの有望技術について効果と課題の概略を示した。大項目ごとに要点をまとめると以下の通りである。なお、表 1 のもとになった個々の有望技術の調査結果を付録 A1 に示す。

2. 3. 1 材料

①有望技術

材料に関しては、新材料開発による効果が最も大きいと期待できる。まず、高クロム系鋼（12Cr 系鋼等）の採用により、その高熱伝導率、低熱膨張率を生かして許容応力

を拡大することにより、物量削減等による建設コスト低減を期待できる。この他の新材料として、高速炉構造用 SUS316 (316FR) の炭素量をさらに絞り込んで、クリープ疲労強度の向上を図った極低炭素 316S-FR の開発も、許容応力の増加、長寿命化等の観点で有望である。

この他に、オーステナイト系ステンレス鋼とフェライト鋼の異材継手の強度向上、表面加工等による既存材料の強度向上も検討課題である。

②主な課題

高クロム系鋼は、火力等で実績はあるが、主として母材のクリープ強度の高強度化を目指して開発されてきた材料である。したがって、FBR 温度条件での引張、クリープおよびクリープ疲労強度・挙動の把握と評価法の検討及び溶接材料・溶接部強度評価に重点をおいた検討が必要である。また、FBR 機器で用いられる形状に対応する管材、板材及び鍛造材の製造上の課題確認も必要である。特に重点的に検討すべき項目は以下の通りである。

- 薄肉管の製作精度の確認
- 溶接材料、溶接施工仕様、熱処理仕様の検討
- FBR における使用温度に対する最適成分系の検討
- FBR 条件下でのクリープ疲労強度の把握と評価法の検討
- 溶接部の疲労、クリープ疲労に関するデータの取得と評価法の検討

極低炭素 316S-FR 鋼は、現状では母材のデータが少量得られているだけであり、溶接部に関する検討が未実施であるので、母材のデータ拡充と溶接部の強度評価を検討する必要がある。

異材継手については、接合方法、バタリング材の償権等を行った上で長時間試験を実施し、強度の向上と組織の安定化（界面破断の防止）を図ることがポイントとなる。

2. 3. 2 設計評価

①有望技術

設計については、従来は、応力解析法や強度評価法に絞って検討が実施されてきたが、さらに合理化効果を得るためには、枠組みを広げて検討を行うことが必要である。すなわち、従来の検討項目に加えて、設計の前提事項である、想定破損モード、破損の定義、負荷想定法等の検討を行うことにより大きな合理化効果が期待できる。

破損モードについては、想定外破損事象の防止による信頼性の向上という点から、過去の FBR の破損事例の調査等に基づき、遺漏なく設定するための検討を行う必要がある。破損の定義については、現状はき裂の発生を基準にしているが、機器の機能要求を明確にした上で欠陥寸法等に基づき定量的に定義することにより信頼性向上と設計合理化が可能となる。負荷想定については、想定事象から応力を算出する際の過度な保守性を排除することにより、設計合理化が可能となる。

一方従来から検討を行ってきた応力解析法に関しては、非弾性解析法を整備することが必要である。これによりひずみ範囲の評価精度が向上し、設計合理化に大きく寄与することが期待される。クリープ疲労等の強度クライテリアについては、現状の安全裕度を見直し、適正化することによる合理化が期待される。これは非常に効果が大きいと考えられるポイントである。このためには、強度評価法の特長に長時間領域（実機使用条件相当の領域）における予測信頼性の向上が不可欠である。

安全裕度については、従来のように不確定要因も含めて設定するのではなく、想定破損モードについてのみ設定し、不確定要因については検査で対応するなどの考え方を採用することによる合理化が期待される。このように、安全裕度を設計解析のみで決定するのではなく、維持等とも連携しながら定める方向が、今後の検討の主流となると考えられる。

これらの合理化により、熱保護構造の簡素化等による物量削減などの建設コストの低減や長寿命化が可能となる。

さらに、LBB 評価の精度を上げることにより、漏えい対策設備の合理化により建設コスト削減を図る必要がある。

②主な課題

非弾性解析法を整備等、従来から検討が行われてきているものについては、これを着実に継続する必要がある。非弾性解析法については、設計合理化の見通しを明確にするために、その効果を定量的に明確にする必要がある。また、強度評価法については、精度向上とそれによる合理化効果を十分検討し、過度な精緻化を避ける等の判断が必要となる。さらに、安全裕度の定量化等、従来検討されることの少なかった観点の検討を重点的に実施し、信頼性と経済性の両立を図りながら合理化を進める必要がある。

2. 3. 3 製作・検査

①有望技術

製作・検査については、従来あまり検討されておらず、今後の検討による合理化が期待される。製作関係では、製作精度、据付精度、溶接施工法などの検討が、検査関係では材料検査、溶接検査等の検討が必要である。このうち、現時点で合理化効果が大きいと期待されるのは、溶接継手について、機器や部位に応じて適切な形状及び施工法の溶接継手を採用することによる合理化効果である。例えば従来は、TIG 溶接を前提に設計を行ってきた原子炉容器を、より高速の溶接が可能な SMAW 溶接を用いて製作すれば、工期短縮によるコスト削減効果が期待できる。この場合、SMAW 溶接継手の強度評価法を整備する必要がある。さらに、突合せ以外の継手形状の溶接施工法の採用により、高価な鍛造品の使用を回避することによる建設コストの削減が期待される。この場合も、評価法の整備が必要である。

このほか、材料や溶接の検査の合理化によってもコスト削減が期待される。

②主な課題

高効率溶接法の開発と実用化を始めとする溶接技術の開発及び使用前検査レベルの適正化が課題として上げられる。後者については、現状を詳細に調査し、例えば、工場検査と立会い検査が重複実施されている場合等について、検査の目的と精度に照らして、不要な検査を排除することによる効率化を検討する必要がある。逆に、詳細な検査を実施することを前提として他の条件を緩和する等の新しいアプローチについても検討する必要がある。

2. 3. 4 維持（検査、評価、補修・取替）

①有望技術

維持（検査、評価、補修・取替）についても、従来は突っ込んだ検討は行われておらず、今後十分な検討が必要である。これにより信頼性の向上と合理化効果が期待できる。信頼性の向上については、軽水炉で維持基準が整備されつつあることが考えると、同等のものをFBRについても整備することは必須と考えられる。これにより、適切な方法による供用中検査の実施による維持コストの削減が期待される。これに加えて、新しい観点からの合理化効果として、プラントの設計段階において、検査の方法や頻度を考慮することにより、設計裕度を適正化するという効果が期待できる。これは、②でも述べた設計と維持における健全性の分担担保であるが、詳細は⑤で述べる。

検査については、想定破損モード、破損の定義を踏まえた上で、ナトリウム冷却特有の問題を考慮し、機器や部位に応じた非破壊検査の検出対象（き裂あるいはき裂に到る以前の損傷）と検出限界を明確にすることが必要である。さらに、連続漏えい監視と非破壊検査の位置付けの明確化により、合理的な検査が可能となる。検査箇所と頻度の合理化という観点からはリスクインフォームド技術の利用による効果が期待できる。想定外事象に破損の防止と言う点では、広範囲を対象として、き裂発生の前段階で損傷を検知することができれば効果が大きいと考えられ、手法の開発努力が必要である。

評価については、高温破壊力学評価法を整備すべきである。さらに、プラントの信頼性向上の観点からは、き裂発生の前段階の損傷に基づき、健全性を評価する手法を整備することが望ましい。

補修（溶接）、取替については、補修溶接の品質が当該部の健全性の鍵を握ると考えられることから、補修溶接法及び補修溶接部の強度評価法を開発すべきである。

②主な課題

構造健全性を検査により担保する場合、ナトリウム中での欠陥計測に対する要求がこれまで以上に大きくなり、ナトリウム中計測技術は非常に重要な意味を持つことから、この開発が大きな課題となる。構造健全性の定義を明確化することも同時に重要である。また、モニタリング技術は、構造健全性を担保する中での役割が大きくなることが予想されるため、詳細な検討が必要である。さらに、リスク技術は、今後の検査の合理化の

キーポイントとなる技術であり、米国等の実績調査に加えて、我国の実情に合った技術開発を行う必要がある。

2. 3. 5 全般

プラントの設計においては、材料の許容値、設計解析、製作・検査、維持等のそれぞれにおいて、安全裕度が設定されるが、これらの積み重ねにより、全体として過剰な裕度が設定されている可能性がある。これを改め、全体としての裕度を適正なものとする必要がある。理想的には、リスク情報等に基づき、機器ごとに許容破損確率等を定め、これを満足するように各段階における裕度を設定する方法が考えられる（全体裕度の定量化と適正化）。この場合、各段階での裕度は、コストミニマムになるように配分（裕度交換）することができれば最も合理的である。例えば、設計で保守的な安全裕度を設定した場合にはメンテナンスフリーに近くする、反対に、設計で想定破損モードのみに対応する安全裕度を取った場合には、不確定要因には高度な供用期間中検査で対応するなどのオプションを考えることができる。このためには、各段階において多様な選択肢を用意しておく必要がある。このような思想による設計は、現状の基準体系では困難であるため、これを可能とするための基準体系の整備が必要である。

さらに、想定外事象への対応も含めた健全性担保の観点からは、現状では研究開発課題が多いものの、プラント全体をモデル化してリアルタイムで稼動状況をシミュレーションする方法等も検討してゆく必要がある。

2. 4 有望技術の採用による効果の試評価

有望技術の採用による効果については、現状で行った評価を表1に示した。定性的な評価となっているものが多いが、今後 Phase II において、詳細な評価を行ってゆく。このなかで、現状で定量的な評価が可能なものについては、試計算を実施して合理化効果を評価した。対象は、日本原子力発電(株)で実施された実証炉設計研究フェーズ I プラントの中間熱交換器上部管板とした。中間熱交換器は炉心からの一次ナトリウムと蒸気発生器へ出て行く二次ナトリウムが直接熱交換する安全上重要な機器である。特に管板部は、一次ナトリウムと二次ナトリウムの温度差が熱応力として作用する上に、構造上の不連続部も多くクリープ疲労評価が最も厳しくなる部位の一つであることから選定した。材料は高速炉構造用 SUS316 鋼 (316FR) である。外径は 2750mm、肉厚 30mm である。負荷条件として設計時の想定負荷を用いた。想定破損モードとしては、FBR で防止すべき最も重要なモードの一つであるクリープ疲労のみを考慮して評価した。

2. 4. 1 評価条件

評価対象の有望技術は、表1から、効果が大きいと思われ、かつ現段階で定量評価が容易なものとして、設計の前提事項、設計解析、設計及び維持の連携（裕度分担）の観

点から、以下の4ケースを選定し、試評価を行った。なお、評価条件等の詳細については付録 A2 に示した。

(1) 想定事象に基づく過渡熱応力評価の合理化（設計の前提事項）

設計解析に用いる過渡熱応力評価を合理化することによる効果を検討した。まず、従来のように、動特性解析における影響因子をノミナル条件を基本としてパラメータ解析を行い、安全係数を考慮した多直線モデル化することにより保守的に包絡する方法を変更し、実験計画法を用いて影響因子のすべての組合せについて動特性評価を行い、このなかから最悪条件を割り出す方法を検討した。この方法により、発生応力の評価値を約 10% 合理化することが期待できる。次に、運転条件の最適化について検討した。仮に、1 次ポンプポンプボニーモーター流量及び 2 次ポンプポンプボニーモーター流量のふれ幅を、現状の $15 \pm 2\%$ および $8 \pm 1\%$ から、それぞれ $1/3$ 及び $1/2$ 程度にできたとすると、発生応力の評価値を約 20% 合理化することが期待できる。なお、上記の試算では、実証炉設計研究の中間熱交換器ガス巻き込み防止構造について試算された合理化効果が、同じ割合で中間熱交換器上部管板にも適用できると仮定した。

(2) 非弾性解析（設計）

従来の弾性解析の代りに非弾性解析を用い、ひずみと応力の評価を合理化したものである。ここでは詳細非弾性解析は実施せず、弾性解析における弾性追従係数（DDS では 3 と規定）を、経験的に得られた最適値（ $=1.5$ ）として、簡易的に非弾性解析による応力の評価値の合理化効果を評価したものである。

(3) 設計と維持の裕度分担（設計及び維持の連携）

一般に従来の高温構造設計では、き裂の発生を防止するものとしており、破損試験により得られた平均傾向に十分な安全率を乗じて設計評価を行っている。したがって、き裂が発生した場合の評価は当然のことながら実施されない。ここでは、発想を転換し、仮にクリープ疲労により発生する欠陥（クリープ疲労き裂）を想定しても、供用中の進展により貫通き裂が発生する確率は十分小さいことを確率論的破壊力学により示すことができれば、設計時の安全裕度を軽減できるとして合理化効果を評価した。

まず、初期欠陥としては、圧力容器鋼の溶接欠陥に関する海外のデータを使用し、き裂深さとアスペクト比について確率密度関数を仮定した上で、クリープ疲労き裂進展計算を行った。破損の判定としては、き裂深さが $0.8t$ に達したときと定義した（日本機械学会 発電用原子力設備規格維持規格では最大許容欠陥深さは $0.75t$ となっている）。次に、負荷応力レベルを変えて解析を行い、破損確率の評価値が 1 き裂あたり 10^{-6} 以下の場合に許容されるものとした。破損確率が許容限度内であれば、疲労寿命に関する安全率、クリープ寿命に関する安全率を、現状の 20 から 5 に低減できるものとして合理化

効果を評価した。

(4) 上記の有望技術の組合せ

上記の「過渡熱応力の合理化」と「非弾性解析」の組合せ及び「非弾性解析」と「裕度分担」の組合せの2つを検討した。

2. 4. 2 評価結果

2. 4. 1 で取り上げた技術を用いた場合の合理化効果を図1に示す。ここで取り上げた技術は、いずれも応力とひずみの評価の合理化につながるもので、その効果は実質的により高応力を許容できることにより例えば熱保護構造の削減による物量削減を通してコスト削減にもつながるし、反対に応力を従来なみに抑えた場合には長寿命化が可能となる。現実には両者のバランスを考えることになる。このため、効果は、従来の評価法（弾性解析）による許容発生応力の増加率と、設計寿命の増加率の両方について示した。

許容発生応力の増加率は、「過渡熱応力の合理化」、「非弾性解析」、「設計と維持の裕度分担」の順に大きくなり、これらを組み合わせるとさらに大きな効果が期待できる。本試評価によると、許容発生応力は2倍程度まで増加できることが期待される。これが実現すると、まず薄肉化による物量削減が可能となる。さらに、現状では IHX 上部管板は応力低減のために複雑な削りだし加工をしているが、これをなくすことにより加工工数の低減を通じた工期短縮が期待できる。さらに、起動時等の運転（昇温速度等）に対する制約が減り、運転効率の向上も期待できる。これらの効果は基本的に原子炉容器等にも共通であると考えられ、プラント全体として合理化効果は大きいと期待できる。寿命については、ほとんどの技術においても2倍以上の合理化効果が期待できる。

なお、本試評価結果について、以下の点に注意が必要である。

①本試評価では破損モードとしてクリープ疲労のみを考慮している。応力の増加とともにひずみの制限等他の要因（破損モード）がクリティカルとなる可能性もあるため、今後検討が必要である。

②本試評価は現在 R&D を実施中の技術に基づき現状で期待できる合理化の可能性を評価したものであり、将来基準体系に採用されると考えられる評価法そのものによる評価ではない。評価の精度は、今後の関連 R&D の進捗とともに高くなる。

3. 有望技術の適用のための新基準体系

3. 1 新基準体系が具備すべき条件

上記で摘出、検討した有望技術を設計に適用するためには、これらを高温構造設計の基準体系に盛り込むことが必要になる。このためには、従来の高温構造設計基準や材料強度基準の枠組みでは不十分で、これらを、上記有望技術の反映が可能なように、拡張して新たな体系とすることが必要である。この新たな体系が具備すべき条件は、以下の通りである。

(1) 従来の高温構造設計基準にない項目の基準化

設計の前提事項に関する基準（想定破損モード、破損の定義、想定事象に基づく過渡熱応力の評価等）、製作に関する基準（溶接施工法、溶接部形状）、運転・維持に関する基準（検査、評価、補修・取替）等、従来の高温構造設計基準にない項目をも含む体系

(2) 選択肢の多様化

材料選定、設計、製作・検査、運転・維持において、解析法（弾性解析、非弾性解析等）、溶接施工法（TIG 溶接、SMAW 溶接）等の選択肢を多く整備し、最も合理的な方法を選択できる体系

(3) 裕度交換

材料選定、設計、製作・検査、運転・維持の各段階間で、安全裕度の交換（分担担保）を可能とする体系

(4) 全体裕度定量化と合理的設定

現状では必ずしも明確でない全体裕度を定量化し、要求に応じて合理的に設定できるような体系

3. 2 新基準体系の概念と研究開発課題

3. 2. 1 システム化規格体系の概念と目的

システム規格体系とは、設計想定事象、材料仕様、設計解析、製作・検査、維持等、構造健全性保証に関連する部分基準を連携させ、プラントの構造健全性を一貫して評価することにより、部分基準間の安全裕度の交換を可能にし、全体裕度の最適化を図る規格体系である。これにより、必要な構造健全性を確保しながらコストミニマムを実現する。

3. 2. 2 規格体系化の考え方

システム化規格体系を構築するためには、次の項目を実施することが必要である。

(1) 部分基準の摘出と作成

- (2) システム化規格化（部分基準間の裕度交換と全体健全性の指標を規定）
- (3) 関連事項の調査・検討（規制・法規、規格・基準、既存研究、関係動向）

部分基準の摘出については、例えば既存の ASME B&PV Code⁽³⁾の体系を参考とする方針の他、新たに FBR のニーズに即して柔軟な体系を開発する方針が考えられる（表 2（1））。

システム化規格化の方法としては、健全性評価の指標として、例えばリスク情報と破損確率評価をベースとする方法、品質保証レベルをベースとする方法、安全裕度をベースとする方法などを考えることができる。これらの概要と課題等を表 2（2）にまとめた。

上記に加えて、システム化規格作成に影響する法規・規制の調査及び参考となる既存規格・基準や関連研究の調査が必要である。さらに、FBR に先行して民間規格作成を推進している点で我が国の軽水炉の動向を、また、国際化指向の規格・基準における影響力の強さという点で ASME の動向を把握することが必要である。

3. 2. 3 開発の進め方と期待される効果

システム化規格体系は新しい概念による規格体系であるから、その開発のためには様々な課題の解決や調査検討が必要となり、中には長期間の研究を要するものもある。このため、開発は中間的な目標を定めながら段階的に行うことにより、成果を積み重ねるとともに不要な開発リスクを回避することが必要である。

システム化規格が目標とする効果は、所与の健全性を確保しながらプラント全体としてのコストミニマムを達成できることであるが、それに至るまでの開発過程においても、開発段階に応じたいろいろな効果を期待することができる。これがシステム化規格開発の特徴である。開発段階は例えば次の 3 段階に分ける。

- I-1) 部分基準の整備
- I-2) 部分基準の高度化及び選択肢の多様化
- II) システム化規格化（ここで部分基準間の裕度交換を取り入れる）
- III) 健全性要求適正化（ここでリスク情報等に基づき健全性要求レベルを検討する）

規格化検討そのものは容易に着手できるグレード I から開始し、新概念や評価法の含まれるグレード II、III については、当初は調査検討を主体とし、徐々に規格化検討に移ってゆくという方法が考えられる。各グレードで想定したシステム化規格の内容と期待される効果を表 3 にまとめた。

3. 2. 4 研究開発課題

システム化規格では、従来の基準の枠を越え、構造健全性の定義をより明確にした上で、これを可能な限り定量的な指標を用いて評価することになる。このため、その体系

化においては、次に挙げる点のひとつひとつの基本に立ち返って検討を行うことが必要である。

- A) どのような条件下で、
- B) どのような機器構造の、
- C) どのような破損モードに対して、
- D) どのように評価した健全性を、
- E) どのように指標化し、
- F) どのようなクライテリアで確保するか
このために、
- G) どのような情報を参考として、
- H) どのような部分基準を摘出・作成し、
- I) どのようにシステム化規格化するか。

現状で、これらの過程において課題となると考えられる項目のうち、主なものを表4にまとめた。

3. 2. 5 規格体系のイメージ

現状で考えられるシステム化規格体系のイメージを図2に示した。部分基準としてFBRのニーズに即した柔軟な体系を採用し、システム化は安全裕度(係数)をベースとして行った例である。

3. 2. 6 システム化規格開発に関するまとめ

システム化規格はFBRプラント実用化に必要な信頼性の確保とコストの削減を実現する上で非常に有望と考えることができる。本規格は新しい概念に基づくものであるため、規格化そのもののみならず規格化の方針についても十分な調査検討を行いながら、目標を明確にして開発を進めることにより所期の効果を得ることが重要である。

4. まとめ及び今後の計画

本調査研究では、FBR プラントの建設コストおよび維持コストの低減と設計寿命の長寿命化に資すると考えられる有望技術を摘出し、効果と課題を予備評価した。現状で定量評価が可能な技術については試評価を行い、十分な合理化効果が期待できることを示した。さらに、これらの有望技術を設計に適用するために必要となる新基準体系（システム化規格）の概念を提示した。

今後、有望技術の効果と研究開発課題を詳細に評価し、絞込みを行う。また、システム化規格について、骨格となる規定内容の検討を実施する。

参考文献

1. Kawasaki,N. et.AL., Recent Design Improvements of Elevated Temperature Structural Design Guide for DFBR in Japan, SMiRT15, Div.F, F04/4 (1999).
2. (社)日本溶接協会、明日のエネルギーの礎に ―高速炉新材料の実用化に向けて― (1999)
3. ASME, Boiler and Pressure Vessel Code (1998)

表1 有望技術の抽出結果 (1/3)

番号	大項目	番号	中項目	番号	小項目	番号	候補技術	説明	効果	課題
1	材料	1	新材料の開発	1	強度の向上	1	原子炉容器等への改良ステンレス鋼(極低炭素316S-FR)の採用	316FRをベースに炭素量を0.001～0.006%(重量)に抑え、クリープ疲労強度を向上	クリープ強度の向上による機器の高応力化、長寿命化、高温化	成分・製造法の最適化、強度データ取得、溶接材料及び溶接法の開発
				2	耐熱性の向上	1	炉心支持構造への超耐熱材料(高融点材料)の採用(W、Mo等)	PAHR(Post Accident Heat Removal)評価成立性の拡大	PAHR対策の簡素化(流路構造の簡素化、板厚の削減)	強度データの取得、製作加工性(曲げ、切削、溶接等)の確保
		2	既存材料の利	3	耐食性の向上	1	水系(海水系)への高耐食新材料の採用	軽水炉の新材料の取り込み	補修・交換頻度の低減	適用部位特定、強度データ取得
				1	軽水炉材料	1	軽水炉材料を低温部に採用する	単価削減による低コスト化	水蒸気系配管、タービン発電機、燃取設備	仕様最適化、強度データ取得、溶接材料及び施工法開発、環境効果データ取得、破壊力学データ取得
				2	火力材料	1	高Cr材料の採用	12Cr系鋼等を採用し、高強度、低熱膨張率の特性を生かす。	IHX、SG伝熱管の薄肉化による容器の小型化、配管引き回しの短縮	
		3	検査	3	石油・石油化学材料	1				
				1	検査の見直し	1	検査の見直し	原子力級特有の検査・管理項目を見直し、品質を確保したままコスト低減を図る	ナトリウムバウンダリ以外の2次系のコスト削減	法規・規制等の拘束条件の調査
		4	材質の改善	1	表面改質技術	1	表面改質技術の開発	ショットピーニングを施すことにより疲労/クリープ疲労寿命を増加		施工技術の確立、環境効果、経年劣化の確認
		5	材料データベース	1	データ拡充	1	高Cr材料、他分野材料	有望材料のSMATへの登録	-	-
				2	機能拡充	1	年代別、成分幅、強度	検索機能の拡充	-	-
2	設計評価	1	負荷想定	1	負荷想定 of 合理化	1	想定事象 of 合理的設定	想定事象を運転状態も含めて見直し、合理的に設定(運転状態Ⅲのクリープ疲労評価等)	発生確率の低い事象により設計がクリティカルになることを防止し、安全裕度を適正化することによる物量削減等	合理化論理の構築
				2	過渡熱応力評価 of 合理化	2	想定事象に基づき過渡熱応力を評価する際の過度な保守性の排除	実験計画法、統計処理等を用いて想定事象を合理的に抱絡する手法を開発	実質的な生応力の向上による物量削減等を通じた建設コストの削減	一般的な手法の開発
		2	機器区分	1	機器区分の見直し	1	機器区分を見直し、破壊の定義とも関係付け、健全性要求を明確化する。	機器区分を見直し、破壊の定義とも関係付け、健全性要求を明確化する。	信頼性の向上、建設コストの削減	機器区分設定論理の開発
				2	機器と機器区分の対応見直し	2	機器と機器区分の対応見直し	見直した機器区分に機器を適切に分類する	信頼性の向上、建設コストの削減	-
		3	破壊モード	1	破壊モードの抽出	1	FBRの破壊事例の調査等により想定すべき破壊モードを抜けなく抽出する。	国内外、プラント、試験設備の事例調査。	信頼性の向上。過度な安全裕度の排除。	-
				2	破壊の定義の明確化	1	欠陥寸法等で破壊を定量的に定義	現状ではき裂発生を防止しているが、真に有害な欠陥のみを防止することによる安全裕度の適正化	より高応力が許容されることによる物量削減等による建設コストの削減	微小き裂の評価、複数き裂の評価、熱過渡特有のアスペクト比の小さいき裂の評価法
				3	想定外破壊モードへの対応	1	方法、論理の開発	安全裕度は想定破壊モードに対してのみ設定し、想定外事象に対しては検査で対処することにより排除	より高応力が許容されることによる物量削減等による建設コストの削減	検査方法や間隔などの論理構築
		4	1次応力制限	1	制限値の緩和	1	フェライト系鋼の1次応力制限の緩和	現状のSm=1/3Suから、Sm=1/2Suに変更する。	SG等における高応力化による物量削減	ASMEにおける安全率改定の動向等の調査
		5	ひずみ制限	1	制限値の緩和	1	ひずみ制限値の合理化	現状の膜1%、曲げ2%の制限を緩和あるいは機能性化する	高応力化等	-
		6	クリープ疲労	1	クリープ無視範囲の設定	1	Negligible creep curveの導入	材料・温度・時間の関数として、クリープ損傷を評価する必要のない条件を定める。	設計工数の削減	クリープ疲労強度との対応検討
				2	クライテリア改良	1	クリープ疲労クライテリア改良	時間消費則よりもさらに精度の高い評価法を導入することによる合理化	時間消費則の精度を大きく改善することは期待薄。	き裂発生～進展の統合評価の実現が必要。
		7	ラチェット	1	評価法合理化	1	非弾性解析による評価の合理化	高精度な構成則の使用による評価の合理化	各種液面近傍、2次系配管壁貫通部Yピース部、管板高応力部等の評価合理化	構成則の高度化
		8	座屈	1	制限値の緩和	1	複合構造物の座屈限界評価の高度化	現状の単純円筒の評価法を発展させ、3次元構造体にも座屈制限を取り込む	信頼性向上	評価法開発
						2	座屈安全率の合理化	座屈安全率の根拠を整備し、ベローズの座屈安全率を合理化する。	IHXバウンダリベローズの安全率合理化	評価法開発
						3	大口径配管の採用	座屈評価法の整備による大口径配管の採用による物量削減	物量削減	評価法開発
		9	非弾性解析	1	全般	1	非弾性解析の全面適用	弾性解析に代わり非弾性解析を全面的に採用することによる評価の合理化	ひずみ及び応力の評価値の合理化により、実質的により高応力が許容されることによる物量削減等を通じた建設コスト要求精度に応じた解析による設計工数の合理化	評価手法(評価法が満たすべき要件)の整備
				2	構成則の開発とその検証	1	2直線近似モデルや高精度モデルなどの選択肢を用意する	解析精度要求に応じた解析による精度と設計工数のバランス	非弾性解析の信頼性向上	FBR使用条件における材料挙動との対照による検証。
				3	負荷履歴の考慮法	1	非弾性解析は履歴の影響が現れるため、事象のモデル化方法を提示	考えられる事象の組み合わせを保守的にモデル化できる方法の提示	非弾性解析にかかわる設計工数の削減	モデル化手法開発
				4	高速計算法の開発	1	並列計算による非弾性解析の高速化	高精度の構成則による解析のためには計算機の高速度が必要		FINASの並列計算対応化

表1 有望技術の抽出結果 (2/3)

番号	大項目	番号	中項目	番号	小項目	番号	候補技術	説明	効果	課題
		10 11 12	供用温度 経年劣化 環境効果	5 6 1	簡易非弾性解析 応力分類 時効破壊特性 ナトリウム環境効果		弾性追従概念の利用による非弾性ひずみの簡易推定 3次元構造、非弾性解析に適した応力分類の考え方の提示 1 機器全般の高温化 1 時効効果係数の導入 2 サンプリング材の破壊特性試験による脆化評価 1 ナトリウム環境効果評価法の整備	ホップの類似を利用し、特定構造の弾性追従係数のみを非弾性解析により求める 従来ほど厳密に分類しない方向 高温化による熱効率向上 ASME流の時効効果係数を導入し安全裕度を明確化 余寿命評価の一環として位置付けられる	Ke係数を精度よく求めることができ、非弾性解析に近い効果が得られる。 評価上の過度な保守性の排除 方策と反映先の機器 メンテナンスフリー化 信頼性向上	手法の適用条件、一般性の確認 一般的な手法の開発 燃料材料等とのバランス 合理化効果の評価 評価法の開発、データの取得 新材料(316SFR)、12Cr系鋼等のデータ取得と評価法構築
		13	LBB	2 3 1	エロージョン 中性子照射効果 手法の高度化		1 エロージョン限界のガイドライン化 2 局部腐食評価法の開発 1 中性子照射効果の評価法の高度化 1 LBB評価法の高度化と設計導入 2 フェライト鋼に対する評価法の開発 1 LBB成立性と供用中検査要求とのリンクの検討 3 設備の合理化	配管内流速を上げることによる合理化 現状考慮されていない局部腐食評価法を開発することによる信頼性向上 高速中性子照射量の制限値、クリープ強度低減係数の合理化 漏えい率で100g/s、漏えい量で500kg以下であればキャッチパン程度の簡便な漏えい対策設備で対応可能。 降伏点と引張強さの差が少ないフェライト鋼に対して変位ベースの不安定破壊評価法を開発する LBBが成立する個所では、供用中検査に連続漏洩監視を考慮し、合理化を図る Na-水反応時の伝熱管の破壊要因を明らかにし、初期破壊規模及びき裂の自己拡大を評価することにより、Na-水反応の想定初期条件の緩和を図る	RV等の容器の小型化、配管の細径化による物量削減 遮蔽板の削除等の物量削減 漏えい対策設備の合理化、ISI実施個所の合理化 1次主冷却系等のLBB成立性を示すことによる安全設備削減による建設コスト削減 維持コストの削減削減 熱効率向上	ナトリウム流動試験による限界流速の把握 局部腐食評価法の開発 スペクトル効果等に着目した評価法(実証炉用設計基準)の高度化 実証データの取得、フェライト鋼のLBB評価手法の開発、漏えい検出器の感度 評価法開発 LBB成立性と設計で考慮する破損モード、運転状態分類、機器区分の対応明確化 伝熱管のき裂の自己拡大挙動評価法の開発、高温ラプチャ評価用データの取得
3	製作・検査	1	溶接	1	構造・設計		1 同材継手の拡大採用 2 異材継手の拡大採用 3 多様な形状の継手採用	大型鍛造品に代えて板材の溶接構造を採用 RV(SUS)とルーフデッキ(SGV)、配管(12Cr)とルーフデッキ(SGV)、容器(SUS)と配管(12Cr)等に異材継手を設ける 炉内構造物、カバーガスバウンダリへの多様な形状の継手(T字継手、カバーガスバウンダリ)	設計自由度の拡大、製作コストの削減 設計自由度の拡大、製作コストの削減 工数削減による建設コスト低減	溶接継手評価法の合理化、検証 溶接材料(バタリング材含む)、異材継手評価法の開発 適用可能な形状の抽出、強度評価法開発
		2	製作・据付・検	2 3 4 6 7 1 2 3	母材・溶接材料 溶接施工 検査 残留応力評価 新接合技術 製作 据付 検査		1 高強度異材継手の開発 1 高効率/高速溶接法の開発 1 溶接検査の簡素化 1 溶接残留応力を予測 1 新接合技術の導入 1 製作公差の緩和 1 据付精度の緩和 1 検査の簡素化	12Cr系鋼の異材継手のバタリング材の開発 現状信頼性の観点からTIG溶接を用いている個所にEBWやレーザー接合を用いる 自主検査、客先検査、官庁検査等重複実施している検査を簡素化し、工数の削減を図る FEMシミュレーション等により残留応力を予測 圧着、爆着等の技術開発 原子炉容器の真円度等に対する要求を緩和 原子炉構造等の据付精度の緩和 例えば、FBRは低圧であるにもかかわらず、一次系容器は耐圧検査が義務付けられている。このように本来必要ではないと考えられるものを省略する	異材継手の強度向上 工期短縮による建設コスト削減 工期短縮による建設コスト削減 信頼性の向上。 工期短縮による建設コスト削減 工期短縮による建設コスト削減 工期短縮による建設コスト削減 工期短縮による建設コスト削減	界面破断の防止 溶接条件、溶接材料の最適化、強度データの取得、強度評価法の開発 技術的には、検査の方法、回数等と欠陥検出確率の関係を明らかにすることが必要 評価法の高精度化 適用候補個所の洗い出し、適用性の調査 公差の適正値の設定 公差の適正値の設定 検査要求の適正化検討
4	運転・維持	1 2 3	全般 運転 監視	1 1 1 2	維持基準の整備 運転の最適化 プロセス量のモニタリング 材料情報		1 維持基準の整備 1 過渡熱応力評価のフィードバックによる運転の最適化 1 プロセス量(温度、流量など)のモニタリングによる評価 1 ひずみセンサーの開発 1 材料情報(特性、組織等)のモニタリングによる評価	軽水炉なみの維持基準を整備する 過渡熱応力の評価結果を運転(昇温速度等)にフィードバックし、熱応力の発生を抑える 温度等のモニタリングにより、クリープ疲労損傷等を演算する。軽水炉の疲労モニタリングに相当。 溶射皮膜を形成しその抵抗変化を測定することによりひずみ・温度等を計測。火カタービン等で研究中。 非破壊試験(電子線回折法、陽電子消滅法、Aパラメータ法等)によりき裂発生を直前に検知する。	信頼性の向上及び長寿命化。システム規格の部分基準化による設計思想の革新(安全裕度の削減) 熱応力の低減による、熱保護構造の削減等による建設コストの削減、長寿命化 設計時の想定負荷と実績を比較することによる寿命延長効果。検査計画の合理化。システム規格の部分基準化による設計思想の革新(安全裕度の削減) ひずみ評価の高精度化による損傷評価の高精度化。 定検間隔適正化、設計裕度の適正化、補修・交換限界適正化、長寿命化、信頼性向上	運転、検査、評価、補修・代替に関する規定の明確化を通じた維持コストの削減及び長寿命化 運転に関して調整可能な範囲の調査 対象破損モード、演算精度、設計安全裕度削減のロジック 技術開発 検知技術開発、対象個所及び頻度同定ロジック、マクロき裂を許容した場合の使い分けロジック(対象、時期等)

表1 有望技術の抽出結果 (3/3)

番号	大項目	番号	中項目	番号	小項目	番号	候補技術	説明	効果	課題
		4	供用期間中検	1	位置付け	2	ナトリウム中の合金元素濃度の分析による材料損傷の推定	ナトリウム中の合金元素濃度の分析により、腐食等の発生を検知する	直接検査することができない箇所についても異常を検知することができる	分析方法、精度等課題が大きい。
				2	UT適用範囲の拡大	3	材料サンプリング	損傷・き裂監視用サーベランスTPの採用	プラントの損傷状態を比較的正確に知ることができる	サンプリング位置の決定、試験片取り出し方法
				3	検査手法高度化	2	バイパスループの設置	材料監視用のバイパスループを設置する	プラントの損傷状態を比較的正確に知ることができる	プラントの負荷状態、材料の再現性等の課題が大きい
				4	検査合理化	1	設計、LBBとの関係の明確化	連続漏洩監視等との役割分担を明確化し、検査の合理化を	設計裕度合理化、ISI内容合理化	機器ごとの接近性、適用可能な非破壊検査法の明確化
		5	評価			1	UT適用範囲の拡大		検査コストの削減	溶接部等の検査精度の向上
				1	き裂進展解析法整備	1	ISI技術の高度化	FBR特有の検査技術(ナトリウム中可視化装置、ナトリウム中UT、ナトリウム中ロボット、高温用EMAT、高温UT、高温用ISIロボット)の高度化	信頼性向上、検査コスト削減	システム規格、軽水炉なみ信頼性の獲得(漏えい監視による代替を中止)
				2	不安定破壊評価法整備	1	リスクインフォームド技術	リスクインフォームド技術の利用により、検査対象と頻度を合理的に設定	検査コスト削減	リスクインフォームド技術の調査、開発、データベース整備
				3	非き裂性欠陥評価法整備	1	高温破壊力学評価法の整備	簡易法の整備	欠陥の明確な定義に基づく健全性評価	微小き裂の評価、複数き裂の評価、熱過渡特有のアスペクト比の小さいき裂の評価
				4	余寿命評価法整備	1	配管を対象とした変位ベースの不安定破壊評価法の開発	高延性のオーステナイト系鋼の不安定破壊評価は荷重ベースで行われるが、フェライト系鋼では適用範囲が狭くなるため、変位制御の評価法を開発する	フェライト系鋼を1次系主配管等に適用した場合のLBB成立性の拡大	評価法の開発
				5	確率論的欠陥評価法	1	非き裂性欠陥(変位、組織変化等)の検知	非き裂性の欠陥を非破壊検査により検知する	信頼性の向上	検査技術の開発
		6	補修・取替			1	き裂前段階の損傷を検知し、余寿命を評価する	組織変化等のき裂の前段階の損傷を検知し、余寿命を評価する。	信頼性の向上、超音波探傷試験及びX線透過探傷試験等の非破壊検査の合理的な適用による維持コストの削減	組織変化等をもとにした余寿命評価技術の開発
						1	確率論的欠陥評価技術	き裂の発生、進展を確率論的手法に予測する手法の開発	安全裕度の定量化、リスク情報などに基づく全体裕度の適正化へのリンク	き裂発生に対する評価法の開発
				1	改質	2	確率論的欠陥評価に必要なデータベースの整備	材料データ等の取得	確率論的欠陥評価の信頼性向上	試験データの洗い出しと評価
				2	補修	1	劣化材改質	ショットピーニング等による表面改質	表面に圧縮残留応力を付与することによる疲労寿命等の回復	改質技術の開発及び改質後の強度評価技術の開発
				3	取替	1	劣化材補修	溶接、ろう付け、レーザー等による補修技術の開発	設計時安全裕度の合理化、長寿命化	補修技術の開発及び補修後の強度評価技術の開発
				4	取替前提設計	1	劣化機器・部位の取替	取替技術の開発	長寿命化	取替部の接続部の溶接等の強度評価法の整備
				5	メンテナンスフリー	1	プラントの供用期間中に機器等の取替を前提とする設計	機器ごとに寿命を定めて設計する	設計裕度の削減、材料コストの削減等による建設コストの削減	取替を前提としない場合、する場合の建設コスト、維持コストの比較評価
						1	設計時にメンテナンスフリーを前提とし、検査、評価、補修・取替を前提としない	設計裕度と検査、補修・取替のコストのトレードオフの評価とその反映	維持コストの削減	メンテナンスフリーとするための判断基準、評価法の整備
5	全般	1	新しい基準体系	1	基準化範囲の拡大	1	材料、設計、製作・検査、運転・維持をカバーする基準体系の整備	信頼性及び経済性向上に資する技術の適用と、合理的な組み合わせを可能とするために基準体系として整備する	信頼性向上、建設コスト削減、維持コスト削減、設計長寿命化	—
				2	選択肢の多様化	1	材料、設計、製作・検査、運転・維持の各段階において、評価法、施工法等について多様な選択肢を設ける	例えば、異なる溶接施工法に関する基準を用意しておき、適用部位の要求に応じて適切に選択できるようにする	強度要求に応じた品質保証を行うことによる信頼性向上、建設コスト削減、維持コスト削減、設計長寿命化	—
				3	裕度交換	1	材料、設計、製作・検査、運転・維持の各段階間で、安全裕度の交換ができる体系の整備	例えば、設計時に保守的な裕度を設定した機器についてはメンテナンスフリーとするが、機器によっては小さめの裕度で設計し、供用中検査の強化で品質保証を行うなどの方法(裕度交換)を可能とする	結果的に同等の品質保証を、最も合理的な方法(コストミニマム)で実施することによる建設コスト削減、維持コスト削減、設計長寿命化	—
				4	全体裕度の定量化	1	すべての段階を通じた裕度(全体裕度)を定量的指標で表示する体系の整備	例えば、破損確率等の定量的指標により、機器の裕度(健全性)を表す	信頼性の明確化	—
				5	全体裕度の適正化	1	全体裕度の目標値を適切なレベルに設定するための技術	機器に要求される健全性のレベルを、例えばリスクに基づき合理的に設定し過剰な保守性を排除する	裕度の適切な設定による建設コスト削減、維持コスト削減、設計長寿命化	—
		2	法規、規制、規格、基準、関係動向の調査	1	法規・規制	1	電気事業法、原子炉等規制法、安全設計審査指針	有望技術の適用にあたって考慮すべき法規・規制等の調査	—	—
				2	規格・基準	1	基準体系の動向、JSME、火原協、ASME、R5、6、RCC-M、MR、R-SEM、API	既存基準の調査により、合理化に資する知見を得る(ASMEの安全率改定、PDM、LRFD、R11、RIDの動向は特に参考になると考えられる)	—	—
				3	関連動向	2	設計仕様と規格の関連調査(軽水炉、火力、航空、石油)	多分野の基準の調査により、合理化に資する知見を得る	—	—
						1	軽水炉、火力の非破壊検査による寿命延長の実態調査	軽水炉、火力の長寿命化の動向調査を行うことによりFBRの長寿命設計に資する知見を得る	—	—
		3	コスト算定法の開発	1	コスト算定法	1	設計法、施工法等(選択肢の選択状況)に応じたコスト算定法の開発	例えば長寿命設計と交換前提設計、鍛造一体構造と溶接構造等のコスト比較を可能とし、コストミニマムとなるように選択肢を選択することを可能とする	選択肢の適切な選定による建設コスト削減、維持コスト削減、設計長寿命化	—

表 2 (1) 部分基準抽出の考え方

		ASME B&PV Code (LWR & FBR)	FBR システム規格	
			案 1 (ASME 方式)	案 2 (FBR のニーズに即した方式)
材料選定	JIS、告示 501 号、DDS (案) 材料強度基準	Sect. II	材料基準 (仕様、許容値)	案 1 に加えて、システム条項、負荷想定基準、運転中 (常時) 監視基準など、合理化のために必要な基準を含めて柔軟に体系化 (イメージを添付 1 に示す)。
負荷想定	—	—		
設計解析	告示 501 号、DDS (案)	Sect. III	設計・建設基準	
製作・検査	告示 501 号、省令 81 号	Sect. III, V, IX	設計・建設基準、溶接基準	
維持	供用期間中検査	Sect. XI, V	維持基準	
	評価	Sect. XI	維持基準	
	補修・取替	Sect. XI	維持基準	

表 2 (2) システム規格体系化の考え方

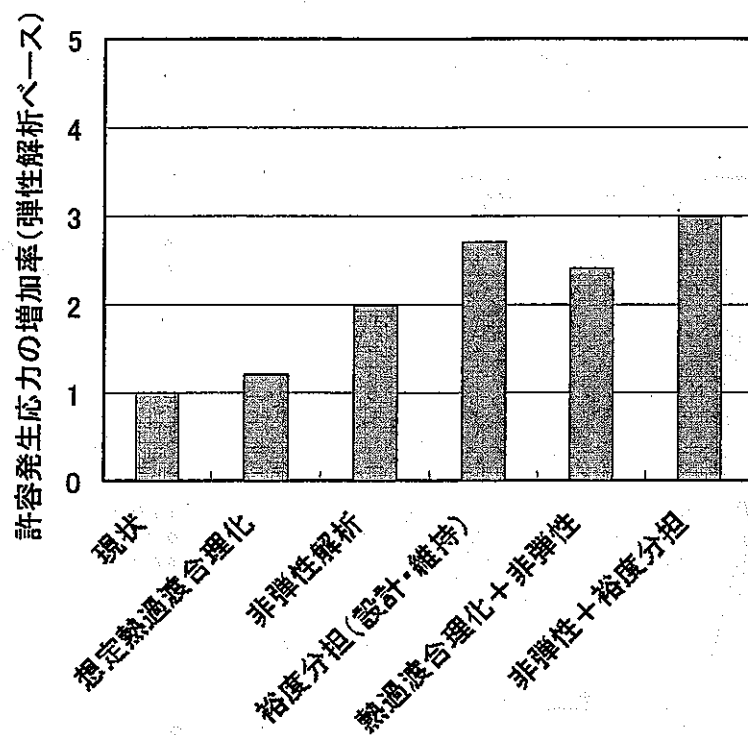
	概要	課題	コメント
(1) 破損確率に基づく方法	すべての部分基準において選択肢ごとに破損確率を求め、これに基づき全体の健全性 (=1-全体の破損確率) を求める。これを目標値以下にする。	- 部分基準における破損確率の求め方 - 全体の目標値の定め方	- 健全性が定量化され、明確な評価が可能。 - 部分基準や破損モードによって、破損確率の計算が困難 (定義できない) なものがある。 - 全体の目標値 (絶対値) を客観的に定めるにはリスク文化の醸成が必要。
(2) 品質保証水準に基づく方法	すべての部分基準において選択肢ごとに品質保証の水準を表す指数を定め、これに基づき全体の品質保証水準を求める (各部分基準の指数の和、あるいは重みを考慮した和)。これを目標値以上にする。	- 部分基準の指数の定め方 - 部分基準ごとの重みの定め方 - 全体の目標値の定め方	- 健全性評価の作業は容易。 - 必ずしもリスク情報を用いなくても規格化可能。 - 指標を定めるためにはかなりの工学的判断が必要となる可能性。
(3) 安全係数に基づく方法	負荷想定、材料、設計解析等の部分基準において選択肢に対応する安全係数を定める。さらに、製作・検査や維持の部分基準も含めて、可能な選択肢の組み合わせを予め定めておく。	- 選択肢に対応する安全係数の設定と根拠付け - 組み合わせの選定	- 現状の設計基準と照らし合わせて違和感が少ない。 - 安全係数は、主要な破損モードに対する確率論的評価結果と工学的判断を組み合わせる形で策定するのが現実的と思われる。

表3 システム規格による合理化効果

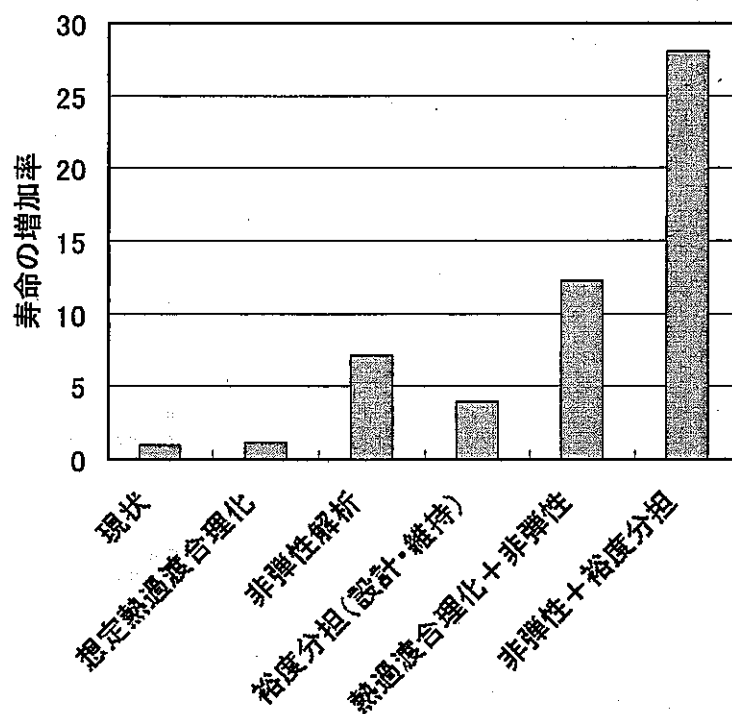
グレード	部分基準の整備	部分基準の高度化	システム化	健全性要求適正化	概要	効果	注意事項	主な研究開発課題
I-1					維持基準など、FBR では現在明確に基準化されていないが必要であるものを基準化し、ASME B&PV Code なみの体系を構築する。	ASME Code (軽水炉) なみの基準体系を整備することによる信頼性の向上効果。	- システム規格の予備段階である。 - FBR の特徴を生かした基準整備がポイント。	決定論的欠陥発生／進展評価法
I-2					- I-1 で策定した以外に合理化効果が大きいと考えられ策定の必要な部分基準の作成 (負荷想定基準等) - 部分基準の高度化 (破損の定義の合理化等) - 部分基準の選択肢の拡大 (裕度交換は前提としない)	- 基準高度化による合理化効果。 - 例えば負荷想定 の裕度適正化、破損の定義の合理化等による許容値拡大等の合理化効果。 - 例えば選択肢を拡大し、より適切な溶接施工法の採用を可能とすることによるコスト削減。	- システム規格の予備段階である。 - かなりの合理化効果が期待できる。	- 設計前提条件明確化 - 破損基準明確化 - 部分基準の選択肢拡大と高度化のための調査研究
II					- 破損確率、品質保証水準、安全裕度等の指標により、裕度交換を前提とする体系とする。 - リスク情報は使用せず、全体健全性の目標値は現状なみとする。 - 部分基準の選択肢の拡大 (裕度交換を前提とする)	裕度交換により、設計の自由度が拡大することによる合理化効果。	- システム規格。 - レファレンスとして、現状の設計における健全性の定量化が必要。 - かなりの合理化効果が期待できる。	- 確率論的欠陥発生／進展評価法 - 健全性指標作成・演算技術
III					リスク情報などに基つき機器ごとの全体健全性の目標値を最適化する。	健全性の要求レベルそのものの変更による合理化効果。	- システム規格。 - プラント依存の評価となる。事象の影響度の評価法整備が必要。	健全性目標値設定技術

表 4 主な研究開発課題

分類	項目	内容	備考
共通技術	設計前提条件	- 想定事象と負荷の合理的な設定（事象、振幅、回数、応力評価法を規定）→ 負荷想定基準 - 機器の破損の定義の明確化（安全性、経済性、社会的受容性に基づく定義）→ 健全性の定義 - 機器の健全性要求値明確化（安全性、経済性、社会的受容性に基づく定義）→ 信頼レベル - 機器ごとに健全性と信頼レベルを定義→ 機器カテゴリー	- 現状の設計による破損確率を予め評価する必要。これを合理化する（＝破損確率は増加する）場合の根拠の明確化が必要。米国の RII 導入（＝破損確率は増加する）妥当性の根拠付けの考え方を参考。 - 破損の定義の明確化については、各種維持基準において設計で許容されなかった欠陥が供用後に許容される論理（供用中に安全裕度が減少することを許容する論理）を確認し参考。また軽水炉の PTS 評価における仮想欠陥の考え方を参考。
	破損（健全性）基準	- 考慮すべき破損モードの明確化（トラブル事例調査等破損モード選定のロジック明確化） - 破損モードごとの影響因子明確化 - 破損モードごとの破損検知性明確化	- ASME B&PV Code Section III における LRFD、PDM の考え方を調査。 - ASME B&PV Code Case におけるリスク評価用の Degradation Mechanism 選定法参考。
	破損評価法	- 決定論的欠陥発生／進展評価法（欠陥：変形、き裂、減肉等） - 確率論的欠陥発生／進展評価法（確率論の対象となりうる欠陥および破損モードの同定） - 確率論的評価のためのデータベース調査と開発（開発可能性評価含む） - 確率論的評価の対象とならない破損モードの考慮方法明確化 - 複数の破損モードが重畳する場合の評価法 - 確率論的評価の感度解析、不確かさ評価	- 決定論的欠陥評価の基準化例は、軽水炉の維持規格案（欠陥評価）（現在意見公募中）、米国の ASME B&PV Code Section XI、英国の R6、R5、仏国の RSE-M を参考。 - 確率論的欠陥進展評価法については国内外における確率論的破壊力学コードによる原子炉容器や配管の評価例を参考。 - システム規格においては、設計時の破壊確率評価と、供用期間中検査を目的とした評価の考え方を明確に整理する必要。その上で必要な手法及びデータベースを明らかにして開発・整備を行う。
	健全性指標作成・演算	- 破損確率による方法（求め方と部分基準相互の演算方法） - 品質保証水準による方法（求め方と部分基準相互の演算方法） - 安全係数による方法（求め方と部分基準相互の演算方法） - その他	いずれの方法についても定量化の限界を見極め、いかに合理的に工学的判断を取り入れるかがポイントとなる可能性。
	健全性目標値	リスク評価技術に基づく機器の健全性要求値明確化手法	- ASME Code では、軽水炉の供用中検査を対象として 3 種の Code Case があり、プラントへ適用中。日本でも調査研究を実施しているのでフォローが必要。ただし我が国では炉心損傷確率の議論の受容性がポイントとなる可能性。 - Section III では、リスク情報に基づく設計法を検討中。フォローが必要。
部分基準	部分基準の選択肢拡大と高度化	- 材料選定、負荷想定、設計解析、製作・検査、維持等の部分基準において選択肢として規定すべき項目を調査研究により抽出 - 抽出された項目を選択肢とするための研究開発 - 選択肢の健全性への寄与あるいは品質保証水準の明確化	抽出した部分基準に優先度をつけ、参考情報を有効活用し、効率的に開発を行う必要。
基準体系化	適用範囲	機器カテゴリーに基づく適用範囲の決定（ナトリウムバウンダリ、等）	3、4 種機器の考え方。
	条文化	- システム条項 - 部分基準 - 条文化方針の検討（構造、スタイル等）	国際整合性の観点から ASME 流を指向するか、オリジナリティー重視の観点から独自の方法を創出するか。
調査	法規・規制	- 原子炉等規制法、電気事業法、省令、告示 - 安全設計審査指針の構造設計関連項目	システム規格作成のための法規・規制への要求事項 (?) を明らかにする。
	規格・基準	- 日本機械学会、火力原子力発電技術協会、発電設備技術検査協会、他 - ASME B&PV Code、Post Construction、O&M、API、他 - RCC-M、MR、RSE-M、R6、R6、他	
	関係動向	- 日本機械学会、火力原子力発電技術協会、発電設備技術検査協会 - ASME B&PV Code、Post Construction、O&M、API - その他	



(1) 許容発生応力の増加率 (弾性解析ベース)



(2) 寿命の増加率

図1 合理化効果の試評価結果

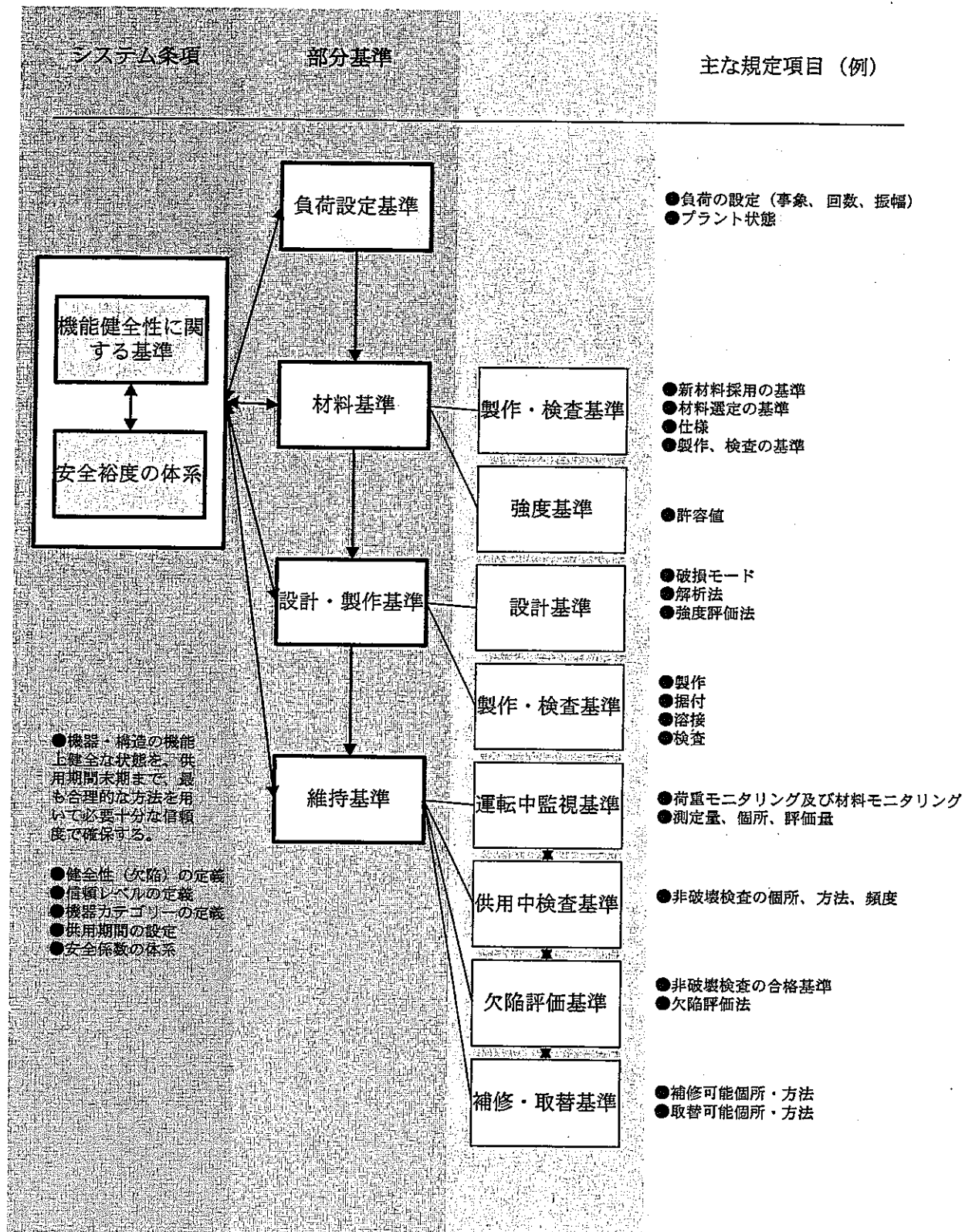


図2 システム化規格のイメージ

付録 A 1 有望技術の摘出結果

目次

A1. 有望技術の摘出	_____	A1-2
大項目 1	材料 _____	A1-8
大項目 2	製作・検査 _____	A1-25
大項目 3	設計評価法 _____	A1-39
大項目 4	環境効果と経年劣化 _____	A1-49
大項目 5	欠陥評価 _____	A1-58
大項目 6	維持（欠陥評価を除く） _____	A1-76
大項目 7	耐震・免震 _____	A1-107
大項目 8	システム規格（コンセプト） _____	A1-111
大項目 9	システム規格（部分基準の選択肢） _____	A1-133
大項目 10	法規、規制、規格、基準、関係動向 _____	A1-162
大項目 11	その他 _____	A1-170

A1. 有望技術の抽出

本調査研究は、将来の高速炉を対象としたものであることから、従来検討が行われてきた範囲にこだわらず、プラントの材料選定～設計解析～製作・検査～運転・維持のすべての段階を対象とし、また、技術分野も従来の技術にとらわれず、将来開発される可能性があると考えられる技術までも対象として調査を行った。

まず、考えられる技術項目を分類し、その分類に従って建設コスト及び維持コストの低減と長寿命設計に寄与すると考えられる候補技術の抽出を行った。分類はすべての段階を考え、材料、設計・製作・検査、運転・維持、システム化規格の4分野を設定し、次に大項目として以下の11項目を設定した。

分野	大項目
材料	1. 材料
設計・製作・検査	2. 製作・検査、3. 設計評価法
運転・維持	4. 環境効果と経年劣化、5. 欠陥評価とLBB、6. 維持
システム化規格	8. システム化規格（コンセプト）、9. システム化規格（部分基準の選択肢）、10. 法規、規制、規格、基準、関係動向
その他	7. 耐震・免震、11. その他

これら大項目ごとに中項目および小項目に細分化し、小項目ごとに合理化に対して寄与の可能性のある候補技術を抽出した。これら抽出された候補技術を表 A1.1 にまとめて示す。

抽出された候補技術には、従来技術の高度化技術、現在開発中の技術、他分野で開発・実用化されている技術、現状では成立性が必ずしも明らかではないが今後の研究開発により将来可能となる技術等が含まれている。

抽出された候補技術は、各技術ごとに現状・効果・課題・関連事項についてまとめた。まとめは候補技術1件ごとに1枚の様式で、表 A1. 1 の「大項目－中項目－小項目－候補技術」を整理番号として行った。また、特に有望な技術に関しては参考となる文献等を添付した。まとめた結果を整理番号順に示す。

また、抽出された有望技術については、4項目の分野毎に各候補技術と合理化効果の見通しについて、また対象機器ごとの適用技術について検討した。

表 A1-1 (1/5) 「低コスト・長寿命プラント」候補技術

分野	番号	大項目	番号	中項目	番号	小項目	番号	候補技術
(1): 材料	1	材料	1	新材料の開発	1	強度の向上 2 耐熱性の向上 3 耐食性の向上 4 高温被覆管材料 5 処理・処分性の向上 6 インテリジェント材料 7 新概念の材料	1	改良ステンレス鋼(極低炭素316S-FR)の採用 1 超耐熱材料(高融点材料)の採用 1 高耐食新材料の採用 1 高温に耐える被覆管材料の開発 1 処理処分に適した材料・設計 1 高温インテリジェント材料の開発 1 固着しない軸材料の開発 2 任意の熱伝導性能を発揮できる(断熱)材料の開発 1 軽水炉材料の活用 1 高Cr材料の採用 2 非原子力級材料の適用性調査 1 非原子力級材料の適用性調査 1 表面改質技術の開発
			2	既存材料の利用	1	軽水炉材料 2 火力材料 3 石油・石油化学材料 1 表面改質技術 1 データ拡充 2 機能拡充		
(2): 設計・製作・ 検査	2	製作・検査	1	溶接	1	構造・設計 2 母材・溶接材料 3 溶接施工 4 検査 5 強度評価 6 残留応力評価 7 新接合技術 1 製作・据付・検査	1	同材継手の拡大採用 2 異材継手の拡大採用 3 多様な形状の継手採用 1 高強度異材継手の開発 1 高効率/高速溶接法の開発 1 同材継手評価法の信頼性向上 2 異材継手評価法の信頼性向上 1 新接合技術の導入
	3	設計評価法	1	1次応力制限 2 ひずみ制限 3 クリープ疲労 4 ラチェット	1	1 制限値の緩和 1 制限値の緩和 1 クリープ無視範囲の設定 2 クライテリア改良 1 評価法合理化	1	1 フェライト系鋼の1次応力制限の緩和 1 ひずみ制限値の合理化 1 Negligible creep curveの導入 1 クリープ疲労クライテリア改良

表 A1-1 (2/5) 「低コスト・長寿命プラント」候補技術

分野	番号	大項目	番号	中項目	番号	小項目	番号	候補技術
			5	座屈	1	制限値の緩和	1	複合構造物の座屈限界評価の高度化
			6	配管	1		2	座屈安全率の合理化
			7	応力解析法	1	非弾性解析の拡大採用	3	大口徑配管の採用
					2	簡易非弾性解析	1	非弾性解析の全面適用／非弾性解析による設計
			8	共用温度	3	応力分類		
			9	破損モード	1		1	機器全般の高温化
					1	破損モードの抽出		
					2	想定外破損モードへの対応		
					3	破損事例調査		
(3): 運転・維持	4	環境効果と 経年劣化	1	時効効果	1		1	材料組織安定性評価(時効硬化)の導入
			2	環境効果	1	ナトリウム環境効果	2	脆化損傷評価技術
					2	エロージョン	1	環境効果評価法整備
					3	中性子照射効果	1	エロージョン限界の明確化→配管内流速の増大
			3	材料組織の観察に 基づく強度評価	1	許容値の設定	2	腐食損傷評価技術
					2	強度／余寿命評価法	1	中性子照射効果の評価方法の高度化(制限条件緩和) ／照射損傷評価技術／環境効果評価法整備
	5	欠陥評価とLBB	1	維持基準(軽水炉相 当の欠陥評価)	1		1	時効効果の導入(材料劣化・組織変化を考慮した強度評 価手法の高精度化及び許容値の設定
			2	LBB			2	高温損傷評価技術(組織変化等)
							1	時効効果の導入(材料劣化・組織変化を考慮した強度評 価手法の高精度化及び許容値の設定
							1	維持基準の整備
							1	LBB評価法の高度化と設計導入
							1	LBB評価法の高度化と設計導入
							1	LBBとISIの関係
							1	LBBによる配管漏洩時のNa漏洩量の低減及びSG伝熱管 破損時のNa-水反応の緩和
							1	
							1	不安定破壊を考慮した配管の強度評価法の採用

表 A1-1 (3/5) 「低コスト・長寿命プラント」候補技術

分野	番号	大項目	番号	中項目	番号	小項目	番号	候補技術
					3	非き裂性欠陥評価法整備	1	1 き裂進展による余寿命評価技術 1 き裂進展に基づく高温設計の導入 2 損傷値と設計許容値の定量化 1 破壊力学的評価等による構造信頼性の向上(損傷許容設計) 1 確率論的欠陥評価技術 1 母材および溶接部の欠陥存在確率分布データの整備(確率論的欠陥評価技術)
			4	確率論的欠陥評価	4	余寿命評価法整備	1	
					5	き裂評価の設計への導入	2	
					6	欠陥許容設計	1	
					1	評価法整備	1	
					2	データベース整備	1	
	6	維持(欠陥評価を除く)	1	維持基準(軽水炉相当の検査、補修・取	1	1 プロセス量	1	1 維持基準の整備 1 プロセス量(温度、流量など)のモニタリングによる評価 2 損傷の間接情報の非破壊検査技術 1 薄膜センサー(温度、ひずみ)の開発
			2	モニタリング	2		1	
					3	材料情報	1	1 直接的な損傷モニタリング/欠陥の直接情報の非破壊検査技術/損傷の直接情報の非破壊検査技術 1 プラント監視診断技術(オンライン診断、オフライン診断)
					4	プロセス量and/or材料情報による余寿命評価	2	
					5	サーベランス	1	2 寿命カウンターの開発 1 損傷・き裂監視用サーベランスTPの採用 2 バイパスループによる材料劣化監視
					6	ダイレクトサーベランス	1	
			3	ISI	1	UT適用範囲の拡大	1	1 寿命モニターの導入 1 UT適用範囲の拡大 1 ISI手法の高度化
			4	補修	2	検査手法高度化	1	
					1	劣化材の改質	1	1 劣化材改質技術 1 劣化材補修技術
					2	劣化材の補修	1	
			5	取替	1	劣化材の取替	1	1 劣化材交換技術 2 機器取替技術の開発 3 機器交換前提の設計 4 機器、部位の交換計画の立案 5 交換品の長寿命化 6 メンテナンスフリー
				その他				

表 A1-1 (4/5) 「低コスト・長寿命プラント」候補技術

分野	番号	大項目	番号	中項目	番号	小項目	番号	候補技術
	7	耐震・免震	1	耐震	1	配管耐震評価法の高度化	1	配管耐震評価の合理化 2 配管評価法の見直し地震荷重 3 配管に対するシステム崩壊概念の採用
			2	免震	1	3次元免震技術の開発	1	3次元免震技術
(4): システム化 規格	8	システム規格 (コンセプト)	1	健全性の考え方	1		1	非バウンダリ機器の破損限界(機能喪失限界)の拡大
			2	供用期間の考え方	1		1	機器交換前提の設計
			3	運転状態の考え方	1		1	運転状態分類と評価項目の見直し(運転状態Ⅲ、Ⅳのひずみ制限評価、クリープ疲労制限評価の廃止)
			4	機器区分の考え方	1		1	機器・配管の重要度分類見直し
			5	裕度交換の考え方	1		1	設計から運転・検査までの総合的な裕度評価
			6	許容リスク(クライテリアの考え方)	1		2	確率論に基づく設計裕度の合理化、安全対応設備の合
			7	運転への反映	1		3	材料～製作～検査工程の一体化
			8	設備への反映	1		4	炉～機器～発電機器の設計一体化
			9	プラントシミュレーション	1		1	安全性・経済性リスクに基づく総合的な健全性評価・機能評価
			10	認証	1		2	各種機器のリスク管理状況調査
			11	基準の構成	1	1 階層化	1	最適運転制御/最適制御・運転の要求
					2	2 他基準等との関係	1	確率論に基づく設計裕度の合理化、安全対応設備の合
	9	システム規格 (部分基準の選択肢)	1	負荷想定	1	1 想定の区分化	1	2 経済性リスクに基づくNa漏洩対策
			2	材料	1	1 規格の区分化	1	1 損傷、環境及び運転履歴モニタリング情報の一元化による総合余寿命評価技術の採用
							2	2 数値エンジニアリングモデルに基づく設計手法の開発
							1	1 interim certificationの採用
								1 設計条件のノミナル化(荷重、etc) 統計手法による熱流動一構造健全性評価法 設計用と維持用の考え方
								1 材料規格の詳細化による強度基準値の引き上げ
								2 機器の重要度分類に応じた材料仕様の区分化と検査仕様区分化
								3 材料、製作仕様クラス区分化(区分絞り込み)
								4 プラントの概念に応じた適正材料の採用

表 A1-1 (5/5) 「低コスト・長寿命プラント」候補技術

分野	番号	大項目	番号	中項目	番号	小項目	番号	候補技術
A1-7			3	溶接	1	規格の区分化	1	1 製作精度の緩和 1 材料仕様区分化による検査仕様の採用 1 モニタリング手法区分化と検査仕様区分 1 1 リスク評価に基づく合理的検査基準の開発 2 リスク情報に基づく検査 1 確率論に基づく検査部位、検査期間の合理的設定 1 検査要求項目と機器の設計との対応の明確化 2 材料データによる設計裕度、検査仕様の区分化 1 機器区分による余寿命評価手法の選定 1 電気事業法、原子炉等規制法、安全設計審査指針 1 基準体系の動向、JSME、火原協、ASME、R5、6、RCC-M、MR、R-SEM、API 1 設計仕様と規格の関連調査(軽水炉、火力、航空、自動車、石油) 1 火力の非破壊検査による寿命延長の実態調査
			4	設計	1	規格の区分化	1	
			5	製作	1	規格の区分化	1	
			6	使用前検査	1	規格の区分化	1	
			7	モニタリング	1	規格の区分化	1	
			8	供用中検査	1	規格の区分化	1	
					2	リスク情報に基づく検査		
					3	確率論に基づく検査		
					4	設計との対応明確化		
			9	余寿命評価仕様	1	評価の区分化	1	
	10	法規、規制、規格、基準、関係動向	1	法規・規制	1	高温設計／維持に関する規格・基準	1	1 電気事業法、原子炉等規制法、安全設計審査指針 1 基準体系の動向、JSME、火原協、ASME、R5、6、RCC-M、MR、R-SEM、API 1 設計仕様と規格の関連調査(軽水炉、火力、航空、自動車、石油) 1 火力の非破壊検査による寿命延長の実態調査
			2	規格・基準	2	その他の規格・基準	1	
			3	関連動向	1	寿命延長(軽水炉、火力)	1	1 2重管SGの採用 2 2重管SGの同時破損防止ロジックの構築 1 熱保護構造の採用【M】 1 機器のモジュール化【K】 1 コスト算定法の開発と標準化【K】
	11	その他	1	プラント概念に係る技術	1	SG	1	
					2	熱保護構造の採用		
					3	機器のモジュール化		1 2重管SGの同時破損防止ロジックの構築 1 熱保護構造の採用【M】 1 機器のモジュール化【K】 1 コスト算定法の開発と標準化【K】
			2	コスト算定	1		1	

整理No.	1-1-1-1	
大項目	1	材料
中項目	1	新材料の開発
小項目	1	強度の向上
候補技術	1	改良ステンレス鋼（極低炭素 316S-FR）の採用

現状	
現状の設計では、もんじゅの SUS304 と比較し高温強度の高い 316FR 鋼を開発採用している。さらに、熱膨張率が小さく発生応力を低減可能な高フェライト鋼の採用が検討されている。一方、次世代材料として 316FR 鋼から更に工業レベル範囲で炭素を低減した 316S(Super)-FR 鋼についての検討が行われている。316S-FR 鋼はクリープ疲労強度が著しく向上し、これまでに短時間の条件ではクリープによる寿命低下がほとんどない良好な結果が得られている。 316FR : C~0.01% 316S-FR: C=0.001~0.006% (極低炭素化)	
効果	
316S-FR 鋼の開発が達成され実機に採用されれば、以下のような合理化が可能である。 ・ 機器の高温化・高応力化（許容応力の向上） ・ 機器の長寿命化 適用部位：原子炉容器等 効果：大	
課題	
成分・製作プロセスの最適化（基礎的なデータはあり） 材料データの取得（基準化対応） 溶接材料および溶接方法の開発。 （低応力化のためフェライト鋼を採用するが、RV 等重要機器については靱性の高いオーステナイト鋼を使用する等、両者の使い分けについて検討が必要。）	
関連事項	
2. 溶接, 3. 設計評価法, 4. 環境効果と経年劣化	

整理No.	1-1-2-1	
大項目	1	材料
中項目	1	新材料の開発
小項目	2	耐熱性の向上
候補技術	1	超耐熱材料（高融点材料）の採用

現状	
・ 炉心熔融事故を想定する場合、炉心下部の構造には 2000℃～3000℃程度の燃料デブリが落下し、そこで冷却保持することが要求される。SUS 材で直接に燃料デブリを受けると構造材が短時間で高温化して変形・破断に至る可能性が高い。ナトリウムとの共存性が良く耐熱性の高い機能材が適用できれば、PAHR（Post Accident Heat Removal）評価の成立性を高めることができる。 ・ 高融点金属の例：タングステン（融点 3680K）、モリブデン（融点 2890K）	
効果	
・ 超耐熱材料を機能材として適用することができれば、PAHR 対策の簡素化（温度・強度制限のために設定している流路構造の簡素化、板厚の削減）が可能となる。	
適用部位：炉心支持構造物	
効 果：中	
課題	
・ 高い融点及びクリープ強度が必要 ・ ナトリウムとの共存性、引張特性及びクリープ特性データの取得が必要 ・ 製作加工（例えば曲げ、切削、溶接等）の難度が比較的大きいものが多い。	
関連事項	
4.環境効果と経年変化	

整理No.	1-1-3-1	
大項目	1	材料
中項目	1	新材料の開発
小項目	3	耐食性の向上
候補技術	1	高耐食新材料の採用

現状
水系（海水系）を対象。 LWRでの新材料開発の動向調査。 LWRでの開発・実用化状況を適宜把握し、LWRの動向に合わせて適用を検討。
効果
長寿命化 高信頼性 {開発状況により採用効果見込めるが、FBR独自の検討重要度は低い} 合理化効果：小 対象機器：水蒸気系（配管，SG，タービン発電機）
課題
耐食材料の開発・改良
関連事項
システム規格（コンセプト） 関連キコンセプト：国内外の関連動向

整理No.	1-1-4-1	
大項目	1	材料
中項目	1	新材料の開発
小項目	4	高温被覆管材料
候補技術	1	高温に耐える被覆管材料の開発

現状
・ 使用材料 改良オーステナイト鋼 ・ 構造健全性支配要因 被覆管およびラップ管の高速中性子照射によるスエリングによって発生する BDI(燃料ピンバンドルとラップ管の相互作用)または DDI(ラップ管とラップ管の相互作用) ・ 設計温度 原子炉出口温度 550℃に対し、ホッテストピンの温度として 710℃を想定。 ・ 開発状況 オーステナイト系材料は、耐スエリング性が不足しているので、燃焼度及び燃料寿命を延ばすためフェライト鋼の採用が検討されている。フェライト鋼は耐スエリング性に優れている反面、一般的に高温強度が不足している欠点がある。海外では、高温強度を改善するため分散強化型や析出硬化型の高強度フェライトの開発が進んでおり、我国でも開発に着手している。加工性、材料データの不足、特に照射データの不足など課題も多い。なお、高 Ni 鋼は高温クリープに優れるが、照射脆化が著しい。この点の改良が進めば採用の可能性も有る。
効果
・ 対象機器 炉心 ・ 効果 中 運転温度の高温化→プラント効率の向上→発電単価の低下というメリットと高温化による設計、材料費の上昇、材料開発費の発生、プラント寿命の短命化というデメリットの比較が必要。
課題
如何に少ない予算で材料が開発できるか。 取替え寿命の考え方の明確化。
関連事項
構造材料の高温化

整理No.	1-1-5-1	
大項目	1	材料
中項目	1	新材料の開発
小項目	5	処理・処分性の向上
候補技術	1	処理処分に適した材料・設計

現状	
・現状のFBR設計では、廃炉段階での処理、処分にに関して十分考慮した材料選定が行われているとはいえない。 ・材料選定に当たって、被曝の観点以外に廃炉段階での処理・処分を考えた成分選定基準を明確にしておくことが重要である。 ・具体的には、作業被曝の低減からMn, Coの規制 ・長期の放射線の低減からはNb, Uなどの規制 参考として、現状の放射性廃棄物に含まれる放射性物質の規制の例を添付に示す。	
効果	
・処理・処分費用の低減 (実用炉設計段階での直接のコスト低減には結びつかないが、処理処分までも考えた材料選定をしているとの基本方針が必要。) 適用部位：機器・配管全般 効果：－	
課題	
・クライテリアの明確化 ・クラッド発生量の評価など	
関連事項	
4. 環境効果、経年変化 6. 維持基準 8, 9. システム規格	

添付

表 放射性廃棄物に含まれる放射性物質(参考)

放射性物質の種類	政令濃度上限値 (Bq/ton)	六ヶ所再処理プラント 総放射能規制値 (Bq)
トリチウム	-	1.22×10^{14}
炭素 14	3.7×10^{10}	3.37×10^{12}
コバルト 60	1.11×10^{13}	1.11×10^{15}
ニッケル 59	-	3.48×10^{12}
ニッケル 63	1.11×10^{13}	4.44×10^{14}
ストロンチウム 90	7.4×10^{10}	6.66×10^{12}
ニオブ 94	-	3.33×10^{10}
テクネチウム 99	-	7.40×10^9
ヨウ素 129	-	1.11×10^8
セシウム 137	1.11×10^{13}	4.07×10^{13}
アルファ線を放出する 放射性物質	1.11×10^{13}	2.33×10^{11}

整理No.	1-1-6-1	
大項目	1	材料
中項目	1	新材料の開発
小項目	6	インテリジェント材料
候補技術	1	高温インテリジェント材料の開発

現状
金材研を中心に研究開発中。複合材の開発が中心となっているが、一部高温材料についても研究中。ZrO_2(ジルコニア)は、過大な応力が作用すると結晶構造が変化し、破壊を抑制する特性を持っている。これを生かし、靱性の向上や材料の自己修復に活用するための基盤研究の段階にある。
効果
・対象機器 原子炉構造(炉内構造物) ・効果 大。ただし、実用化の目処がたたず、期待薄。
課題
・このような材料の実現性はあるのかの見極め。 ・強度と延性の要求を満足するか。
関連事項

整理No.	1-1-7-1	
大項目	1	材料
中項目	1	新材料の開発
小項目	7	新概念の材料
候補技術	1	固着しない軸材料の開発

現状	
ポンプの軸固着は回転側（軸）と固定側の隙間が狭い部分で発生するが、ポンプの構造上そのような部位はNa液中軸受、羽根車吸込側ウエアリング、羽根車主板側ウエアリング、ケーシングカバーからの軸貫通部である。この内最つとも狭い隙間となっているのは軸受部で、この部位は起動停止及び地震時等で固定側と回転側の接触が生じるため、両者にコルモノイを盛って噛り付かないようにしている。 その他の部位については特にコーティング等の手だては施していない。 軸固着の最大の原因はケーシングのひずみで、ケーシングの温度の不均一によりケーシングがその取付けフランジを起点に曲がって上記各部の隙間が狭くなり、定常的な接触摩擦状態になり焼き付くものである。固着部の例として最も多いのがケーシングカバーからの軸貫通部で、米国でも沢山のトラブルが報告されている。 以上のように優れたコーティング材を施工できたにしても定常接触状態では焼き付く可能性が高い。 対策としては 1) ケーシングをなるべく変形させないこと 温度不均一の低減、ポンプ長さの短縮化 2) 変形に追随し、隙間が維持できるような構造の採用 3) 接触反力が小さくなる構造の採用（この場合はコーティング材が重要となる）	
効果	
・対象機器 ポンプ、配管、冷却系機器 ・効果 大。 ただし本技術により「ポンプ軸固着」が荷重条件より除外されるのは期待薄。電磁ポンプの適用性がキーとなる。	
課題	
・機械式ポンプに代る概念の適用	
関連事項	
・システム規格(熱過渡条件)	

整理No.	1-1-7-2	
大項目	1	材料
中項目	1	新材料の開発
小項目	7	新概念の材料
候補技術	2	任意の熱伝導性能を発揮できる（断熱）材料の開発

現状
熱交換器の熱応力緩和構造として実用新案が出されている。基本的な概念は、温度差に起因する熱応力を低減させるために、温度差を生じる部位間に熱伝導が良好で力学的な拘束を生じない物質を充填するものである。
効果
・対象機器 冷却系機器 ・効果 小。 定常時の応力低減には効果があるが、過渡的な熱応力に対する効果は小さい。また、信頼性を得るためには、かなりの R&D が必要となる。
課題
・材料の開発 ・信頼性の確認 ・あくまで解析上のアイデアであり、具体的な物質や実設計への適用例は無い。
関連事項
・システム規格(熱過渡条件)

整理No.	1-2-1-1	
大項目	1	材料
中項目	2	既存材料の利用
小項目	1	軽水炉材料
候補技術	1	軽水炉材料の活用

現状
プラントイメージとして、低温・低コストプラント概念がある場合、実績・低コストの観点からLWR材をFBRに適用可であることを検討。可能性あることを確認し、価格調査。 SUS304鋼、2.25Cr-1Mo鋼等は既存材料とする。
効果
低コスト 実績 {開発状況により採用効果見込めるが、FBR独自の検討重要度は低い} 合理化効果：中 対象機器：水蒸気系配管、タービン発電機、燃取設備
課題
将来のプラントイメージ（低温、小型化） 適用する場合は、データの追加取得計画も有り得る。
関連事項
システム規格（コンセプト） 関連キーワード：国内外の関連動向、リスク管理、Partial Design Margin

整理No.	1-2-2-1	
大項目	1	材料
中項目	2	既存材料の利用
小項目	2	火力材料
候補技術	1	高 Cr 材料の採用

現状
最新の設計では高 Cr 鋼を広範な部位に採用し、機器の小型化、配管の短縮化などの合理化を図っている。特に、12Cr 系鋼は、従来の改良 9Cr 鋼より強度が高く熱膨張率が低いため効果が大きいため注目されている。 但し、12Cr 鋼については火力データを参考に検討を行っているが、FBR 条件でのデータ（特にクリープ疲労データ、環境効果）が不十分なため、今後データの採取ならびに実機への適用性検討が必要である。
効果
高 Cr 鋼（12Cr 鋼など）が実機に採用されれば、以下のような合理化が可能である。 ・ IHX, SG 伝熱管の薄肉化（熱伝導率の向上による） ・ 上記に伴う容器の小型化 ・ 配管引回しの短縮化（熱膨張率が小さいこと、および降伏応力が高いことによる） 適用部位：機器・配管全般 効 果：大
課題
強度データ・材料特性データの取得 溶接材料および溶接方法の開発及び強度確認。 強度評価法の確立 環境の影響の把握（照射、ナトリウムの影響） 破壊力学的特性の把握（LBB 検討を含む）
関連事項
2. 溶接, 3. 設計評価法, 4. 環境効果と経年劣化

整理No.	1-2-2-1	
大項目	1	材料
中項目	2	既存材料の利用
小項目	2	火力材料
候補技術	1	高Cr材料の採用

現状	
・改良9Cr-1Mo鋼の1.2～1.5倍以上の強度、及び1.5倍以上のクリープ破断強度を有する。熱抵抗性の大きなフェライト系高強度材の採用により、2次系及び1次系の物量削減及び高温・高応力化が可能となる。例えば、高強度化により2次系を高温・高圧化（超臨界圧）にすることが可能となり、発電効率向上が図れる。 ・対象温度が550℃～600℃を境界に、低温側と高温側とで仕様の考え方をかえることで、広い範囲の温度に適用可能。改良9Cr-1Mo鋼に代わる成分仕様及びSUSに代わる成分仕様の区分化で1次系から2次系までの高精度の適用が可能。 ・従来実績としては、火力ボイラチューブ、火力蒸気タービン及びガスタービン等がある。 ・経済性は、物量削減と材料費増加とのバランスで決まる。 ・文献：日本学術振興会、耐熱金属材料第123委員会研究報告Vol.38.No3.平成9年	
効果	
物量削減、低コスト化、信頼性向上、高応力化、発電効率向上、長寿命化 合理化効果：大（開発要素はあるが、効果大。FBR独自の検討重要度は極めて高い） 対象機器：冷却系（IHX, SG, 1次系・2次系配管）	
課題	
材料開発・実用化研究、溶接材料開発、製造性検討、基準化 FBR特有のクリープ疲労挙動の把握は必須。	
関連事項	
設計評価法、環境効果・経年劣化、維持、欠陥評価 システム規格、規格・基準、関連動向 関連キーコンセプト：国内外の関連動向、リスク管理、Partial Design Margin、機能健全性 信頼度の定量化、合理的品質体系、経年変化、法規・規格・基準、その他	

FBRのコスト低減と長寿命化に関する調査

整理No.	1-2-2-1	
大項目	1	材料
中項目	2	既存材料の利用
小項目	2	火力材料
候補技術	1	高Cr材料の採用

現状
現状は改良9Cr鋼を用いた設計を行っているが、これをさらに高Cr化した12Cr鋼等のより高強度材を用いることで、物量削減などを図る。 12Cr鋼等の材料データについては火力用にデータが取られているが高温データが不足していると思われる。
効果
高Cr鋼の採用による効果としては、主に蒸気発生器（SG）の合理化が考えられる。 高強度であることからSG伝熱管を薄肉化が可能となり、熱伝導率向上による伝熱面積削減＝総伝熱管長短縮による、SGのコンパクト化による物量削減。また、その他強度部材の薄肉化による物量削減効果も若干期待できる。 IHX、配管への採用などを設計で選択した場合でも同様の効果が期待される。 適用部位：SG、IHX、配管 効果：大
課題
高Cr材料の強度向上率の把握 材量データの充足性調査 不足材料データの取得計画 靱性低くLBBの成立が難しい可能性有り
関連事項
設計評価法、環境効果と経年劣化、欠陥評価とLBB 機能健全性の明確化、信頼度の定量化、強度評価法高度化

整理No.	1-2-2-2	
大項目	1	材料
中項目	2	既存材料の利用
小項目	2	火力材料
候補技術	2	高 Cr 材料の採用

現状	
SG、二次系配管候補材料として、改良 9 Cr-1 Mo 鋼に対する評価手法、材料強度データベースが整備されている。 さらに高 Cr の材料として 12Cr 系材料の採用が検討されている。	
効果	
・対象機器 配管、冷却系機器 ・効果 大 - 高強度→薄肉化→物量の低減 - 低い熱膨張率→配管引回しの短縮化	
課題	
・材料仕様の絞込み ・溶接材料の選定 ・強度評価手法の確立と基準化 ・材料強度データベースの拡充と基準化 ・長時間安定性、環境効果の確認	
関連事項	
・溶接 ・設計評価法 ・環境効果と経年劣化	

整理No.	1-2-2-2	
大項目	1	材料
中項目	2	既存材料の利用
小項目	2	火力材料
候補技術	2	非原子力級材料の適用性調査

現状	
・原子力級は検査・管理項目が多いが、非原子力級材料として検査項目等を減らし材料費を低減させる。ただし、質は変わらない。重要部位以外に適用する。 ・JIS仕様のバラツキ、製造メーカーによるバラツキ等の情報把握も必要。 ・機器分類－材料仕様区分－製造仕様区分－検査仕様区分と整合性をとる。 (検査仕様の項目削減につながる：使用はJIS範囲とする) ・対象材料：SUS304鋼、SUS316鋼、Cr-Mo鋼、C.S.	
効果	
低コスト (材料,検査) {機器－材料－検査と関連付けにより効果見込める} 合理化効果：中 対象機器：Naバウンダリー以外の2次系	
課題	
設計裕度と仕様の関連把握 適用機器との関連性	
関連事項	
経年劣化、システム規格、維持 関連キーワード：リスク管理、Partial Design Margin、信頼度の定量化、合理的品質体系、経年変化、その他	

整理No.	1-2-3-1	
大項目	1	材料
中項目	2	既存材料の利用
小項目	3	石油・石油化学材料
候補技術	1	非原子力級材料の適用性調査

現状
・ J I S規格材を使用しているが、規格材も製造技術の発展により時代とともに材料の性質が改善されている。そこに、注目し「市販材を製造年代別にみた鋼中のP、S、Cr、・・・等の含有率」を整理し、成分のばらつきにより特性のばらつきを把握リスク管理等に利用している。 ・ クリープ、疲労、腐食等の材料特性及び想定外トラブルの要因となりうる因子（例えば、P、S、Si、B、Cu、Co、Ti等の元素、Mn、S、P等不純物の変析、結晶粒度等）の状況を調査（製造年代別整理）することで、品質の向上、ばらつき低減等が予測され、材料仕様、リスク評価等の観点から、考え方をFBR用仕様にも反映可能。 (MnSの偏析物が起点となった疲労破壊の事例あり)
効果
低コスト（材料,検査） {機器—材料—検査と関連付けにより効果見込める} 合理化効果：中 対象機器：プラント全体
課題
設計裕度と仕様の関連把握 適用機器との関連性
関連事項
システム規格、維持 関連キーワード：リスク管理、Partial Design Margin、信頼度の定量化、合理的品質体系、経年変化、その他

整理No.	1-3-1-1	
大項目	1	材料
中項目	3	材質の改善
小項目	1	表面改質技術
候補技術	1	表面改質技術の開発

現状
高速炉運転条件では、き裂は表面から発生する、さらに各種の環境要因は表面のき裂発生に影響する。現状、これらの要因に対して積極的な表面改質処理は施されていない。 ショットピーニングした 316FR 鋼のクリープ疲労試験を実施し、0.7%以下のひずみ範囲では大幅な寿命の増加が得られた(電中研)。
効果
・対象機器 配管系機器(ノズル、エルボ) ・効果；現状の 2 倍程度の寿命増加は期待できる。 表面処理技術が熱保護の役割も果せば効果は大。
課題
・マイナスの要因の分析 ・施工技術
関連事項
・設計評価法 ・経年劣化 ・維持

整理No.	2-1-1-1	
大項目	2	製作・検査
中項目	1	溶接継手の開発
小項目	1	異材継手
候補技術	1	高強度異材継手の開発

現状	
LNG タンクで、9%Ni 鋼とステンレス配管の異材継手が使われている。 使用温度は-170℃という低温で、通常は脆性破壊防止の観点からステンレスを材料として使用するのが理想的であるが、費用面等よりタンク材（構造部材）として 9%Ni 鋼が使われている。ただし、配管系は加工性の高いステンレス（SUS304）が使われるため、異材の溶接継手が存在する。課題として、希釈等による靱性劣化が考えられたため、溶接材料（インコネル、ハステロイ等）や溶接条件を変化させた試験を行い、最適な溶接法を決定した。 非原子力分野では各社独自で異材の健全性を検討している状況にあり、日本溶接協会で行われている各種委員会活動は、あくまで勉強会的な位置付けである。	
効果	
・対象機器 配管 ・効果 大 適材適所の材料使用を可能として全体のコストを削減するためには、異材部の信頼性向上の効果は大きい。特に高 Cr 系鋼の採用のためには、高強度異材継手の開発が必要となる。	
課題	
・溶接法の最適化 ・強度データの取得 ・長時間安定性 ・強度評価法の開発	
関連事項	
・材料 ・設計評価法 ・環境効果と経年劣化	

整理No.	2-1-1-1	
大項目	2	製作・検査
中項目	1	溶接
小項目	1	構造・設計
候補技術	1	同材継手の拡大採用

現状
継手の強度は一般に母材より劣るため、強度上高い信頼性を要求される部位には継手を配置しない設計が行なわれる。このため、原型炉などでは原子炉容器をリング鍛造で製作した。しかし、一般にそのような方法は材料コストが上昇し、経済上は不利となる。また、大型鍛造品では、鍛造比が小さくなるため強度特性上板材溶接の方が有利となる可能性がある。
効果
大型鍛造材削減によるコスト低減・設計自由度拡大 適用部位例： ・ 炉心支持構造物取り付け台 ・ 炉内構造物（炉心支持構造） ・ ルーフデッキ構造（完全溶け込み溶接→隅肉溶接） 効 果：中
課題
溶接部の信頼性確保 溶接部強度データの取得 溶接部強度評価法の高信頼化 溶接部に対する ISI の免除または軽減
関連事項
1. 材料, 2. 溶接, 3. 設計評価法, 6. 維持

整理No.	2-1-1-2	
大項目	2	製作・検査
中項目	1	溶接
小項目	1	構造・設計
候補技術	2	異材継手の拡大採用

現状	
一般に使用される機器に要求される機能や強度、環境、荷重等とコストを勘案し使用材料が決定される。このため、機器毎に使用材料が異なり必然的に異材継手が生じてしまう。 一般に継手部は母材一般部と比較して強度が低下するが、異材継手の場合、材料の不連続性が高いため同材継手よりも強度が低下することが懸念される。しかしながら、現状明確な設計評価法は確立されていない。 最新の設計では高 Cr 鋼を広範に採用する予定であるため、高 Cr 鋼とオーステナイトステンレス鋼や炭素鋼との異材継手が現われる可能性があり、これらについて十分な強度を有する施工法を確立することが重要となっている。	
効果	
異材継手が許容されることにより個々の機器に最適な材料を使用することができる。特に高温での使用 適用部位： RV (SUS) とルーフデッキ (SGV) 配管 (12Cr) とルーフデッキ (SGV) 容器 (SUS) と配管 (12Cr) ←側部流入方式の場合 効果：大	
課題	
異材継手強度データの取得。 溶接材料および溶接方法の開発及び強度確認。 強度評価法の確立	
関連事項	
1. 材料, 2. 溶接, 3. 設計評価法	

整理No.	2-1-2-1	
大項目	2	製作・検査
中項目	1	溶接
小項目	2	母材・溶接材料
候補技術	1	高強度異材継手の開発

現状
一般に使用される機器に要求される機能や強度，環境，荷重等とコストを勘案し使用材料が決定される。このため，機器毎に使用材料が異なり必然的に異材継手が生じてしまう。 （例えば実用炉設計では，1次系配管・容器とルーフデッキ等） 一般に継手部は母材一般部と比較して強度が低下するが，異材継手の場合，材料の不連続性が高いため同材継手よりも強度が低下することが懸念される。しかしながら，現状明確な設計評価法は確立されていない。 最新の設計では高Cr鋼を広範に採用する予定であるため，高Cr鋼とオーステナイトステンレス鋼や炭素鋼との異材継手が現われ，これらについて十分な強度を有する施工法を確立することが重要となっている。
効果
・異材継手の高信頼性化 ・異材継手が許容されることにより個々の機器に最適な材料を使用することができる。 ・設計自由度の拡大（例えば，配管には熱膨張係数の小さいフェライト鋼を採用し，容器には靱性の高いオーステナイト系ステンレス鋼を使用する等） ・高温部での異材継手使用が可能となる 適用部位：機器・配管全般 効果：中
課題
異材継手強度データの取得。 溶接材料および溶接方法の開発及び強度確認 →化学成分移行の制限，熱膨張量の不連続性の排除，特異な損傷（界面破断等）の排除 強度評価法の確立
関連事項
1. 材料，2. 溶接，3. 設計評価法

整理No.	2-1-2-1	
大項目	2	製作・検査
中項目	1	溶接
小項目	2	母材・溶接材料
候補技術	1	高強度異材継手の開発

現状	
ステンレス鋼とフェライト鋼の間の溶接継手（異材継手）としてインコネルをバタリングする手法が有力であるが、界面破断など強度上の課題があり検討がなされている。 異材継手としては、現状原子炉容器付け根とルーフスラブ、SGとIHX間の配管あるいは胴部等のいずれかの位置で必要。 R/V付け根では、高温・高応力部を避けるため位置の最適化を行い、熱遮へい対策を講ずるなど、異材継手部を保護する対策が採られている。	
効果	
高応力となるR/Vルーフスラブへの直接接続が可能となれば、ルーフスラブ部の削りだし構造が無くなるため合理化可能となる。また、熱遮へい材削減も考えられるが、異材継手部でない場合でも、R/V付け根は高応力部位であるため、液面近傍と付け根部の応力のバランスを採った設計をする必要があり、温度分布（応力分布）コントロールのための熱遮へい構造が必要となる可能性が高く、熱遮へい構造削減効果は少ないと考えられる。 適用部位：R/V、配管（SG、IHX） 効果：小	
課題	
界面破断対策、新接合法の開発（EBWなど） 評価法の確立	
関連事項	
材料、設計評価法、欠陥評価とLBB 信頼度の定量化、強度評価法高度化	

整理No.	2-1-2-1	
大項目	2	製作・検査
中項目	1	溶接
小項目	2	母材・溶接材料
候補技術	1	高強度異材継手の開発

現状
高温域に適用するフェライト系鋼／ステンレス鋼異材継手を対象とする。 1) 従来の状況調査 (TIG溶接) ・インコネルバタリング材：強度は同材継手の同等。しかし、界面破断の可能性大。 ・308、309系バタリング材：溶接金属破断。同材継手より強度大きく低下。 2) TIG溶接による界面破断の防止策 ・新バタリング材調査 (Ni系溶接材料の可能性調査必要)。 ・新溶接法の調査。 3) 新接合技術の採用 ・EBW、圧接 (圧着、爆着)、レーザ等技術、爆着 (Zr/SUSに適用) の可能性調査。 4) 同材継手と同等の扱い方法検討
効果
高性能化、配管長の削減による低コスト化 合理化効果：大 対象機器：1次系・2次系配管
課題
新技術の開発、施工法開発 強度・挙動の把握と評価法 新接合による長時間健全性確認
関連事項
材料、設計評価法、欠陥評価、経年劣化 関連キーワード：リスク管理、Partial Design Margin、機能健全性、信頼度の定量化、強度評価法、経年変化、その他

整理No.	2-1-3-1	
大項目	2	製作・検査
中項目	1	溶接
小項目	3	溶接施工
候補技術	1	高効率／高速溶接法の開発

現状
・溶接継手の信頼性、製作精度の観点から、現状は一種容器（あるいは重要構造物）には TIG 溶接を中心に使用している。（一部 SMAW あり） ・TIG 溶接は 1 パスあたりの溶着量が少ないため、パス数が大きくなり（50mm 厚で 50 パス以上）溶接工数が長くなっている。（特にステンレスの場合は層間温度制限のため時間がかかる。） ・軽水炉機器ではすでに一次バウンダリ容器の一部に、EBW 溶接を適用して合理化を図っている（PWR SG 胴部等）。また、薄板についてはレーザー接合も実用になっている。
効果
・溶接時間の削減による工期短縮 ・上記に伴うコストダウン ・溶接法によっては、開先加工、開先合わせ精度の緩和による治工具の削減 適用部位：機器・配管全般 効果：大
課題
・溶接条件、溶接材料の最適化 ・新溶接法による継手強度の確認
関連事項
1. 新材料、6. 維持基準

整理No.	2-1-3-1	
大項目	2	製作・検査
中項目	1	溶接
小項目	3	溶接施工
候補技術	3	高効率／高速溶接法の開発

現状
溶接工数削減のため高効率／高速溶接法の検討がなされている。 高速化をのするためには入熱量を多くすることと、移動速度を高速化すること、狭開先化し溶金量を少なくするなどが考えられる。入熱量の増加は、残留変形の増大、残留応力の増大、鋭敏化など問題を招くため、入熱削減、移動速度の高速化の方向が主流と考えられる。単なる移動速度高速化は溶け込み不良などを招くだけであり、溶接棒の細径化や狭開先などと組み合わせて最適化を行う方向性である。
効果
溶接工数削減によるコストダウン 適用部位：全般 効果：中
課題
最適化手法の開発
関連事項
材料、設計評価法（残留応力評価など）

整理No.	2-1-3-1	
大項目	2	製作・検査
中項目	1	溶接
小項目	3	溶接施工
候補技術	1	高効率/高速溶接法の開発

現状
・現状での施工方法にこだわらず、施工工数の短縮化の観点から、施工法、施工条件等を調査する。 ・TIG、SMAW、SAW以外の施工法の可能性 ・開先形状（ホットワイヤ狭開先等） ・新接合方法の採用可能性調査必要 ・EBW、レーザの適用実績調査必要
効果
低コスト {開発状況により採用効果見込めるが、FBR独自の検討重要度は低い} 合理化効果：大 対象機器：プラント全体
課題
実績調査と適用可能部位の特定
関連事項
材料、設計評価法、欠陥評価、経年劣化 関連キーワード：Partial Design Margin、機能健全性、信頼度の定量化、

整理No.	2-1-5-1	
大項目	2	製作・検査
中項目	1	溶接
小項目	5	強度評価
候補技術	1	同材継手評価法の信頼性向上

現状
継手部は母材と比較して延性やクリープ疲労強度が低いため、構造評価の際、特別な配慮が必要となる。現状の評価法では、継手を含む構造モデルの非弾性解析により継手近傍のひずみ挙動を把握し、その結果と溶接部の短軸試験の結果に基づき溶接部の強度評価法を定めている。しかし、本手法は弾性解析ベースの評価であり、母材評価と同様に大きな保守性を有している。また、強度の低減に関しても保守的な見積を行っている。
効果
・母材と併せて強度評価の信頼性が高まれば、評価の裕度を削減する事ができる。 これにより、許容応力が向上し設計の自由度が拡大する。 適用部位：機器・配管全般 効 果：中
課題
・継手強度のデータ拡充 ・継手強度評価法の開発（非弾性解析用を含む）
関連事項
3. 設計評価法

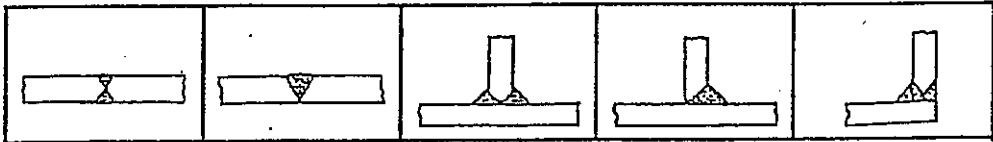
整理No.	2-1-5-2	
大項目	2	製作・検査
中項目	1	溶接
小項目	5	強度評価
候補技術	2	異材継手評価法の信頼性向上

現状
異材継手は同材継手と比較して、強度が低くまた特異な破壊を生じる場合がある事が知られている。しかし、現状ではそれらを考慮した異材継手の強度評価法は確立されていないこのため、真に止むを得ない場合を除き、異材継手を避ける設計が行われている。
効果
・ 不可避な異材継手の信頼性向上 ・ 強度評価が信頼できかつ十分な強度が得られれば、機器や部位毎に最適な材料を選択して使用する事ができる。 適用部位：機器・配管全般 RV (SUS)、配管 (12Cr) とルーフデッキ (SGV) 容器 (SUS) と配管 (12Cr) →側部流入方式が可能となる 効 果：中
課題
・ 異材継手の強度データ拡充 ・ 評価法の確立
関連事項
3. 設計評価法

整理No.	2-1-7-1	
大項目	2	製作・検査
中項目	1	溶接
小項目	7	新接合技術
候補技術	1	新接合技術の導入

現状
・異材継手や燃料被覆管等を対象とした新接合技術 ・新接合技術方法の調査と適用可能性 ・EBW、圧接（圧着，爆着），レーザー、爆着技術等の可能性調査。 ・燃料被覆管に関しては、その適用材料の調査も必要。 ・レーザーのNi基材料への適用上の課題（添付）
効果
高信頼性 （開発状況により採用効果見込めるが、FBR独自の検討重要度は低い） 合理化効果：大 対象機器：配管、（燃料被覆管）
課題
新技術の開発、 施工法開発 強度・挙動の把握と評価法 新接合による長時間健全性確認
関連事項
材料、 設計評価法、 欠陥評価、 経年劣化 関連キーワード：Partial Design Margin、機能健全性、信頼度の定量化

整理No.	2-2-3-1	
大項目	2	製作・検査
中項目	2	溶接継手の拡大採用
小項目	3	多様な形状の継手採用
候補技術	1	拡大採用

現状	
・現状のFBRの継手は、軽水炉に準じて設定した機器区分を基に、軽水炉の規定に準じた継手形状を保守的に採用している。(許認可の受け易さの観点から) ・低圧であるFBRプラントの本来の機能を考えると、より工数の低減できる継手形状でも健全性が保証される部位がありうると考えられる。特に炉内機器等非バウンダリ機器 ・機器区分の見直しとともに、FBRの機能に適した製作基準を策定して必要がある。	
効果	
・炉内構造物にT字継手、隅肉溶接などの採用	
	
・カバーガスバウンダリの継手の多様化（隅肉適用など）	
適用部位：機器・配管全般	
効 果：中	
課題	
・使用可能性のある継手形状の抽出 ・各継手形状に対する継手係数（強度係数）の設定 ・設計・製作・検査基準への反映	
関連事項	
8、9 システム規格	

整理No.	2-4-1-1	
大項目	2	製作・検査
中項目	4	溶接技術の高度化
小項目	1	高効率/高速溶接法の開発
候補技術	1	高効率/高速溶接法の開発

現状	
高効率/高速溶接法としては、EB(電子ビーム)溶接とレーザー溶接が用いられている。いずれの溶接法も1パスで深い溶け込みが得られ、総溶接入熱量が低いために溶接変形が少ないという利点を有している。EB溶接は真空中で溶接するのに対し、レーザー溶接は大気中で不活性ガスを流しながら溶接できるという特徴を有している。 EB溶接はすでに下記に示すように、多岐の材料を用いた重要機器に適用されている実績を有している。 ・BWR 原子炉炉心構造物、チャンネルボックス、・ガスタービンローターシャフト、・ボイラドラム、圧力容器、・航空機タービンローターのヘリカルギア、・ロケットエンジンのチタン製モーターケース、・ターボチャージャー、・潜水調査船しんかい 6500 耐圧殻 また SAW(サブマージアーク)溶接は、TIG 溶接に比べ5～10 倍程度の効率を有している。しかしながら、溶接部の靱性は低いので原子力関連では注意が必要である。船舶等で、重要部材の溶接によく用いられる溶接は「MIG 溶接」で、効率は TIG の2 倍程度である。電極自体が溶けるタイプの溶接法で、強度や靱性は TIG に比べてやや劣る。	
効果	
・対象機器 原子炉機器(炉内構造物) ・効果 大	
課題	
・溶接施工法の確立 ・施工基準の策定 ・強度データの収集	
関連事項	
・設計評価法 ・環境効果と経年劣化	

整理No.	3-1-1-1	
大項目	3	設計評価法
中項目	1	1次応力制限
小項目	1	制限値の緩和
候補技術	1	フェライト系鋼の1次応力制限の緩和

現状
フェライト鋼では$S_m = 1/3 S_u$としている。 これを$1/2 S_u$とすることについて、見通しが検討されている。
効果 SG等において、応力制限が緩和緩和されることに依る効果で、物量削減効果が期待できる。材料の高Cr化などと併せてみるのがより効果的と考えられる。 適用部位：SG 効果：中
課題
関連事項
材料—新材料の開発

整理No.	3-2-1-1	
大項目	3	設計評価法
中項目	2	ひずみ制限
小項目	1	制限値の緩和
候補技術	1	ひずみ制限値の合理化

現状	
クリープ疲労評価の前提、微小変形理論の担保などから、膜1%、曲げ2%の制限が課されている。 材料ごとにメカニズムに沿った決定法とすべき（破断値に対する安全率等）との見解や、3次元構造、あるいは非弾性解析を実施した場合の総体的に弾性で局所が非弾性といった状況の場合は、許容値を別途考慮すべきとの議論がなされている。 より大きなひずみを許容する場合、ラチェット疲労等の問題があることも指摘されている。	
効果	
許容値の合理化により、一般的には高応力化、負荷サイクル繰返し数の増加などが期待でき、物量削減または寿命延長に効果があると考えられるが、クリープ疲労損傷制限、機能制限など他の制限がクリティカルとなる場合も多いと考えられる。 適用部位：全般（液面近傍、高応力部位等） 効果：中	
課題	
より精密な評価法の開発。	
関連事項	
材料、設計評価法－ラチェット Partial design margin、機能健全性の明確化、信頼度の定量化、強度評価法高度化、経年変化、リスク管理手法	

整理No.	3-3-1-1	
大項目	3	設計評価法
中項目	3	クリープ疲労
小項目	1	クリープ無視範囲の設定
候補技術	1	Negligible creep curve の導入

現状	
クリープ損傷を評価する必要の無い状態を、温度・時間の関数として示す。 原電R&Dにおいて素案を検討中。材料のクリープ特性から決定する。 類似の考え方に、BDSのクリープ損傷が顕著でない場合（クリープ損傷量を計算してしきい値を決める）やASMEのN201（炉心支持構造物設計法：Negligible creep curveとしてではなく短時間高温である条件の設定法として使用）などがある。	
効果	
比較的低温に近い機器の設計において評価が簡略化されるため、設計工数の削減につながる。 適用部位：コールドレグ機器 効果：中	
課題	
関連事項	
材料 機能健全性の明確化、信頼度の定量化、強度評価法高度化	

整理No.	3-3-2-1	
大項目	3	設計評価法
中項目	3	クリープ疲労
小項目	2	クライテリア改良
候補技術	1	クリープ疲労クライテリア改良

現状	
時間消費則、延性消耗則などの改良が検討されている。 メカニズムに基づく損傷則を望む声があるが、現状そこまで至っていない。検討中の損傷則については、過度は保守性を無くすよう検討が進められている。 実験データの得にくい低ひずみ速度（実機に近い）での保守性の改善については大きな改善の可能性もある。	
効果	
き裂発生を防止する評価法としては、各国のクリープ損傷評価基準などと比較しても、BDS、DDSのクリープ疲労損傷評価法から大きく合理化される部分は少ないと考えられる。 き裂進展評価との連携や、荷重設定条件の合理化などと整合した形での検討が効果的と考えられる。 適用部位：ホットレグ機器 効果：小	
課題	
関連事項	
欠陥評価とLBB－確立論的欠陥評価技術、システム規格－負荷想定 機能健全性の明確化、信頼度の定量化、強度評価法高度化	

整理No.	3-4-1-1	
大項目	3	設計評価法
中項目	4	ラチェット
小項目	1	評価法合理化
候補技術	1	

現状
B r e e型ラチェット、促進クリープ、液面ラチェットなど各種モードを想定した弾性解析ベースの評価法が整備されている。 非弾性解析によるラチェットひずみ算出も、弾完全塑性体を仮定した比較的保守的なものから、大野-王モデルのような高精度のものまで可能となっている。構成則についてはさらなる高度化が検討される可能性が高い。 各容器液面近傍、2次配管壁貫通部Yピース部、管板高応力部などが厳しい評価となっている。
効果
発生累積ひずみの合理化（厳密化）により、一般的には高負荷化、負荷サイクル繰返し数の増加などが期待でき、物量削減または寿命延長に効果があると考えられるが、クリープ疲労損傷制限、機能制限など他の制限がクリティカルとなる場合も多いと考えられる。 適用部位： 全般 効果： 小
課題
高精度評価法
関連事項
材料、設計評価法-ひずみ制限 Partial design margin、機能健全性の明確化、信頼度の定量化、強度評価法高度化、経年変化、リスク管理手法

整理No.	3-5-1-1	
大項目	3	設計評価法
中項目	5	座屈
小項目	1	制限値の緩和
候補技術	1	複合構造物の座屈限界評価の高度化

現状	
R/Vを想定した単純円筒やトップエントリー配管等の座屈評価法は構築されている。 3次元構造体の評価などに、座屈・崩壊を制限として取り込む案も提案されており、複合構造物についても座屈限界評価法の整備が必要である。 ルーフスラブなどについては、各パネルの座屈が制限値となっている。	
効果	
座屈・崩壊を制限値とすることで実質的に過度な保守性を排除することが考えられ、物量削減効果などが期待される(R/Vなどの地震時評価では取り込み済み)。FBRの場合、低圧設計であるため、地震以外で荷重制御型の制限がクリティカルとなる部位は少ないが、配管付け根部などの熱膨張応力に対する評価に利用できれば配管短縮などの物量低減効果が期待できる。 強度的には一部のパネルが座屈するが全体の剛性に影響を与えないような場合を許容することで、制限値が上昇する。 適用部位：配管、ルーフスラブ 効果：中	
課題	
評価法整備 機能制限との兼ね合い	
関連事項	
設計評価法－応力解析法 機能健全性の明確化、信頼度の定量化、強度評価法高度化、リスク管理手法	

整理No.	3-5-1-2	
大項目	3	設計評価法
中項目	5	座屈
小項目	1	制限値の緩和
候補技術	2	座屈安全率の合理化

現状
容器の座屈評価法については動的応答低減効果などが取り入れられ、比較的实际の現象に近い状態を評価するようになってきている。容器の座屈安全率については、リスクベースの値などを考慮することも可能と考えられるが、現状議論されていない。 ペローズの座屈評価法は、比較的薄肉のペローズを想定した評価法が策定されており、これをIHXバウンダリペローズなどの比較的厚肉のペローズの設計に用いると、過度に安全側に評価される可能性があることが原電R&Dで指摘されている。厚肉ペローズの場合、薄肉ペローズのヒンジ型崩壊ではなく、膜で降伏する塑性崩壊に近い現象となるためであると考えられる。
効果
免震建屋を前提に設計が進められており、座屈安全率の合理化効果は直接的に物量削減などに現れにくい。 ペローズの安全率の問題は、安全上の問題として重要な課題であるがコスト低減効果は小さいと考えられる。 適用部位：IHX 効果：小
課題
関連事項
設計評価法－応力解析法 Partial design margin、機能健全性の明確化、信頼度の定量化、強度評価法高度化、リスク管理手法

整理No.	3-5-1-3	
大項目	3	設計評価法
中項目	5	座屈
小項目	1	制限値の緩和
候補技術	3	大口徑配管の採用

現状
R/Vを想定した単純円筒やトップエントリー配管等の座屈評価法は構築されている。 3次元構造体の評価などに、座屈・崩壊を制限として取り込む案も提案されており、配管等についても座屈限界評価法の整備が必要である。
効果
配管付け根部などの熱膨張応力に対する評価に利用できれば、大口徑配管の採用、配管短縮などの物量低減効果が期待できる。
課題
関連事項
設計評価法－応力解析法 機能健全性の明確化、信頼度の定量化、強度評価法高度化、リスク管理手法

整理No.	3-7-1-1	
大項目	3	設計評価法
中項目	7	応力解析法
小項目	1	非弾性解析の拡大採用
候補技術	1	非弾性解析の全面採用／非弾性解析による設計

現状	
弾性解析から非弾性挙動を推定する評価法に加え、非弾性解析を用いてひずみ算出などを行う評価法の検討が進められている（DDS委員会等）。 弾性解析に基づく評価法の中で、あるモードのラチェットひずみのみを求める場合や、弾性追従係数のみを求めるために非弾性解析を利用する部分非弾性解析については、実用化の目処が得られている。	
効果	
発生ひずみ（応力）をより精密に算定することが可能であり、弾性解析に基づく場合に比べより過度の保守性が入る場合が少なくなるため、実質的な高負荷化、寿命延長、物量削減が可能。 適用部位： 全般 効果： 大	
課題	
負荷サイクルに関連した、クリープ疲労初期応力の問題と負荷順序の問題に対する工学的な解決。採用する応力ひずみ関係、サイクルの順番の取り方により部分的に非保守側となる場合がある。	
関連事項	
材料、設計評価法 機能健全性の明確化、信頼度の定量化、強度評価法高度化、経年変化、リスク管理手法	

整理No.	3-8-1-1	
大項目	3	設計評価法
中項目	8	供用温度
小項目	1	
候補技術	1	機器全般の高温化

現状
機器全般の温度を高温化することにより熱効率の向上が期待されるが、これらは炉心出口温度から機器全般の最高温度は決定されている。 現状炉心出口温度は、燃料被覆管の制限（燃焼度が進んだ場合の内圧に対するクリープ強度）がクリティカルとなっており、炉心のピーキングファクターなどを考慮すると炉心出口温度を上昇させることは難しい現状にある。
効果
熱効率向上によるトータルコスト削減 適用部位： 全般 効果： 大
課題
炉心高温化
関連事項
材料 機能健全性の明確化、経年変化

整理 No.	4-1-1-1	
大項目	4	環境効果と経年劣化
中項目	1	時効効果
小項目	1	時効効果
候補技術	1	材料組織安定性（時効効果）の導入

現状

- ・ 組織の安定した材料の使用により ISI を簡素化するか、もしくは材料の劣化を検査、モニタリングすることで環境効果を補填する、2 種類の方向性が考えられる。
- ・ ASME においては長時間側の材料強度値に対して、時効効果係数を SUS304 で(YS : 1. 0, TS : 0. 8), SUS316 で(YS : 1. 0, TS : 0. 8), 2.25Cr-1Mo で(YS : 1. 0~0. 63, TS : 1. 0~0. 62)として導入している。クリープ疲労に関しては特に時効効果係数は規定されていない。
- ・ 現状の安全率に長時間使用後の時効効果係数が包含されると解釈するか否かにより、検討の方向性が変わる。
- ・ 316FR 鋼では結晶粒度の微細化によりクリープ強度の向上傾向が有る。

・ 文献 :

ASME Boiler & Pressure Vessel Code, III, Div1-Subsection NH, 1995

効果

- ・ NDE, メンテナンスのフリー化による低コスト化
- ・ 設計裕度の考え方が明確化される
- ・ 対象 : 全般
- ・ 効果 : 小

課題

- ・ 破損モードとの対応
- ・ 現状案における裕度設定の明確化

関連事項

- ・ 組織の回復技術の導入による長寿命化

キ-コンセプト : リスク管理, Partial Design Margin, 信頼度の定量化, 強度評価法, 経年変化・欠陥評価, 規格・基準, 関連動向

整理 No.	4-1-1-2	
大項目	4	環境効果と経年劣化
中項目	1	時効効果
小項目	1	時効効果
候補技術	2	脆化損傷評価技術

現状		
・ NDE (UT, MT), もしくはサンプリング材の破壊試験により脆化を評価する手法が一般的に採用されている。 ・ 脆化のモニタリングにより材質変化 (劣化) を把握し, 劣化が確認された時点から材料特性及び組織変化を把握するための検査・モニタリング計画の適正化を図ることができる。 ・ またサンプリングおよび高温損傷評価時期の適正化を図ることができる。 ・ 熱時効は本質的には焼き戻し脆化とほぼ同じ機構であり, 焼き戻し脆化係数と焼き戻しパラメータを用いた熱時効係数 NAF を定義して評価をおこなう試みが為されている。 $NAF = EF \times (P - F)^L$ EF: 成分元素に依存する焼き戻し脆化係数, $P = T(C + \log t) \times 10^{-3}$, T は焼き戻し時の絶対温度, t はその時間, C は定数 F: 材料と時効条件に依存する定数 L: 材料と時効条件に依存する定数 ・ またバルクハウゼンノイズ法, 材料の音速測定などにより熱時効による材質変化を測定できる可能性も指摘されている。 ・ 文献: 日本機械学会編, 動力プラント・構造物の余寿命評価技術, 技報堂出版, 1992		
効果		
・ 設計裕度の適正化による低コスト化 ・ 余寿命評価技術の高精度化 ・ 検査計画の適正化 ・ 対象: 配管 (溶接部, エルボ), IHX (管板), SG (管板) ・ 効果: 小		
課題		
・ 破損モードとの対応 ・ 寿命への影響の評価 ・ Na 環境中でのサンプル材の採取技術 ・ 脆化に関する FBR 機器の設計・評価対応方法の検討 ・ 脆化, 劣化, 腐食および高温損傷などの材料損傷の区分を明確にする		
関連事項		
・ LWR でのサンプリング材の採取方法 ・ 材料, 溶接, システム規格 キーワード: リスク管理, Partial Design Margin, 信頼度の定量化, 強度評価法, 経年変化・欠陥評価, 規格・基準, 関連動向		

整理 No.	4-2-1-1	
大項目	4	環境効果と経年劣化
中項目	2	環境効果
小項目	1	Na 環境効果
候補技術	1	環境効果評価法整備

現状	
・ 疲労に関しては大気中寿命 < Na 中寿命であるが、F C I は大気中寿命 = Na 中寿命である。 ・ 長時間側では内部損傷が支配的となり、環境効果との影響は小さくなるためと考えられる。 ・ Na 環境効果は、オーステナイト系ステンレス鋼は、Na 環境効果をくされ代として評価すべきことを規定している。 ・ これまでの研究の結果、高速増殖実証炉の使用条件ではNa 接液部のくされ代は一般に壁厚に比べて僅かな量であることが明らかとなっている。 ・ 減肉はわずかであり寿命への影響は小さいと考えられる。 ・ 316FRはC量が少ないために浸炭が生じると予想され、長時間強度に対する影響を確認する必要がある。 ・ 文献： Furukawa, T. Yoshida, E. Kato, S. Komine, R., Effect of Sodium on Mechanical Strength of FBR Grade Type316 Stainless Steel, PVP-373, Fatigue, Fracture, and Residual Stresses, ASME, 1998	
効果	
・ 余寿命評価技術の高精度化によるF C I 評価の合理化 ・ 対象：1次系および2次系配管 ・ 効果：中	
課題	
・ 実験的検討が困難 ・ 経年劣化評価・モニタリングへの環境影響の取り込み方法 ・ Na 環境効果は維持モニタリングでその影響を確認する	
関連事項	
・ 材料、溶接、システム規格 キーコンセプト：リスク管理, Partial Design Margin, 機能健全性, 信頼度の定量化, 強度評価法, 経年変化・欠陥評価, 規格・基準, 関連動向	

整理No.	4-2-2-1	
大項目	4	環境効果と経年変化
中項目	2	環境効果
小項目	2	エロージョン
候補技術	1	エロージョン限界の明確化→配管内流速の増大

現状	
・現状の設計では、従来のナトリウム設備で採用されている流速を基に、一般部における流速を 10m/s 程度以下に制限している。(これまでに実績として問題とならなかった範囲) 但し、エロージョン発生限界は明確になっておらず、流速をあげる余地は残されていると考えられる。 ・軽水炉での流速は、主配管ではFBRより速いものもある。一般産業品(水車など)では更に高速流体も使用している。 ・ただし、10m/s 程度以上の流速でトラブルを生じているケースもあり、慎重な検討と評価法の策定が必要である。 ・問題となる箇所は、例えば機器・配管の出入り口部近傍、エルボ内面、ポンプインペラ等が考えられる。	
効果	
・配管内流速を上げることができれば、RVなどの容器の小型化及び配管の細径化が可能になり、物量削減に寄与する。 ・全体として、評価法(あるいは設計ガイドライン)を明確にすることにより信頼性の向上を図る。	
適用部位：配管全般(1・2次系)	
効 果：中	
課題	
・ナトリウム流動試験による限界把握が必要	
関連事項	
3. 設計評価法	

整理 No.	4-2-2-2	
大項目	4	環境効果と経年劣化
中項目	2	環境効果
小項目	2	エロージョン
候補技術	2	腐食損傷評価技術

現状

- ・ 腐食の形態としては、全面腐食、孔食、隙間腐食、粒界腐食および応力腐食割れがあげられる。
- ・ 現状の設計としては局部腐食を考慮した設計はしておらず、局部腐食の生じない材料の選定を前提としている。
- ・ 局部腐食を考慮する場合には材料の選定を見直す必要がある。
- ・ 局部腐食に対しては小面積の損傷測定結果から構造物全体の最大損傷量を極値解析的手法により推定することがよくおこなわれている。
- ・ 上記手法により腐食と寿命の関係を求める手法も提案されている。
- ・ また腐食に当たっては表面状態の変化に伴うメタル条件の変化の影響評価にも留意する必要がある。

効果

- ・ 余寿命評価技術の高精度化
- ・ 対象：SG，水系
- ・ 効果：中

課題

- ・ 定量的な評価が困難
- ・ 回復技術の確立
- ・ 全面腐食を前提の設計ではあるが、局部腐食に対する破損モードへの取り込みは必要（ただし、事前に対象部位設定は困難か）
（局部腐食の可能性とリスク管理）

関連事項

- ・ 材料，溶接，システム規格

キーワード：機能健全性，信頼度の定量化，強度評価法，経年変化・欠陥評価，規格・基準，関連動向

整理No.	4-2-3-1	
大項目	4	環境効果と経年変化
中項目	2	環境効果
小項目	3	中性子照射効果
候補技術	1	中性子照射効果の評価方法の高度化

現状	
中性子照射により引張延性やクリープ強度・延性が低下する。このため、引張延性を確保するため高速中性子の照射量を制限するとともに、クリープ強度の低下を考慮するため熱中性子照射量に応じた強度低下係数を、クリープひずみ速度の増加を考慮するために増倍係数を設定している。	
効果	
・ 炉内構造物の信頼性向上 ・ 遮蔽体の合理化	
適用部位：炉内構造物，遮蔽体，原子炉容器	
効 果：中	
課題	
照射試験データの拡充	
スペクトル効果を考慮した評価法の合理化	
関連事項	
3. 設計評価法	

整理 No.	4-3-1-1	
大項目	4	環境効果と経年劣化
中項目	3	材料組織の観察に基づく強度評価
小項目	1	許容値の設定
候補技術	1	時効効果の導入（材料劣化・組織変化を考慮した強度評価手法の高精度化および許容値の設定）

現状	
・ 火力蒸気タービンロータでは、材料の劣化を非破壊計測により測定し、過去の運転履歴および将来の運用形態から温度、応力場を計算し、欠陥の評価をおこなうシステムが導入されている。 ・ 材料劣化、組織変化を考慮した強度評価手法の高精度化および許容値の設定が必要である。 ・ 316FR 鋼では結晶粒度の微細化によりクリープ強度の向上傾向が有る。 ・ ASME においては長時間側の材料強度値に対して、時効効果係数を SUS304 で(YS : 1. 0, TS : 0. 8), SUS316 で(YS : 1. 0, TS : 0. 8), 2.25Cr-1Mo で(YS : 1. 0~0. 63, TS : 1. 0~0. 62)として導入している。クリープ疲労に関しては特に時効効果係数は規定されていない。 ・ 現状の安全率に、長時間使用後の時効効果係数が包含されると解釈するか否かにより、検討の方向性が変わる。 ・ 文献 : ASME Boiler & Pressure Vessel Code, III, Div1-Subsection NH, 1995 日本機械学会編, 動力プラント・構造物の余寿命評価技術, 技報堂出版, 1992	
効果	
・ 許容値の適正化による低コスト化 ・ 設計裕度の考え方が明確化される ・ 対象 : 全般 ・ 効果 : 小	
課題	
・ 破損モードとの対応 ・ 損傷（寿命）を決定するメカニズム（き裂、減肉など）と組織変化の関連を調査する必要あり ・ 現状案における裕度設定の明確化	
関連事項	
・ 火力ロータ脆化評価, 許容欠陥寸法との関係 キーコンセプト : 機能健全性, 信頼度の定量化, 経年変化・欠陥評価, 規格・基準, 関連動向	

整理 No.	4-3-1-2	
大項目	4	環境効果と経年劣化
中項目	3	材料組織の観察に基づく強度評価
小項目	1	許容値の設定
候補技術	2	高温損傷評価技術（組織変化等）

現状	
・ 現状ではクリープ疲労損傷はD_fとD_cの和をもって設計評価をおこなっているが、組織変化とクリープ疲労損傷メカニズムとの関係は明確化されていない。 ・ FCIの主な損傷メカニズムは、微小き裂発生→進展であり、ひずみ制御型の負荷により疲労き裂が進展しつつ、クリープにより加速される損傷形態であると考えられるが、FBRへの適用に当たっては、その妥当性の検討が必要である。 ・ き裂発生、進展に対する組織、環境の効果、および損傷許容寸法に対する組織、環境の効果を明らかにすることで、許容値の適正化を図ることができる。 ・ 現状の寿命($D_f+D_c=1$等)はT. P. の破損寿命に対応し、構造物の健全性とその関連に対する検討は不十分である。 ・ 構造物の寿命 or 破損を具体的に記述し、(板厚の1/2のき裂発生寿命等)損傷発展メカニズムが特定できれば、許容値の合理化につながる。 ・ メカニズムが明らかになれば、環境効果、時効効果の定量化とそれによる許容値の合理化への論理づけができると考えられる。	
効果	
・ 許容値の適正化による低コスト化 ・ 運転中の寿命管理の高精度化 ・ 対象：容器，IHX，SG ・ 効果：大	
課題	
・ FCI評価技術へのフィードバック ・ 従来データの見直しによる新評価技術の開発 ・ Na中測定に対する影響の調査要 ・ FCI損傷としての観察（例えば、微小き裂）対象と損傷メカニズムの関連明確化	
関連事項	
・ 材料，溶接，設計評価法，維持 キーワード：機能健全性，信頼度の定量化，強度評価法，経年変化・欠陥評価，規格・基準，関連動向，その他	

整理 No.	4-3-2-1	
大項目	4	環境効果と経年劣化
中項目	3	材料組織の観察に基づく強度評価
小項目	2	強度/余寿命評価法
候補技術	1	時効効果の導入（材料劣化・組織変化を考慮した強度評価手法の高精度化および許容値の設定）

現状	
・ 火力蒸気タービンロータでは、材料の劣化を非破壊計測により測定し、過去の運転履歴および将来の運用形態から温度、応力場を計算し、欠陥の評価をおこなうシステムが導入されている。 ・ 材料劣化、組織変化を考慮した強度評価手法の高精度化および許容値の設定が必要である。 ・ 現状の安全率に長時間使用後の時効効果係数が包含されとすることにより、短時間側での安全率に対して時効効果係数分を加算できる可能性がある。 ・ 文献： ASME Boiler & Pressure Vessel Code, III, Div1-Subsection NH, 1995 日本機械学会編，動力プラント・構造物の余寿命評価技術，技報堂出版，1992	
効果	
・ 時効効果の定量化による寿命評価法の精度向上（高精度化） ・ 許容値の適正化による低コスト化 ・ 長寿命化 ・ 設計裕度の考え方が明確化される ・ 対象：全般 ・ 効果：小	
課題	
・ 寿命評価のために必要な損傷に係わる材料情報とその定量化及びモニタリング方法開発 ・ 損傷としての観察（例えば、微小き裂）対象と損傷メカニズムの関連明確化	
関連事項	
・ 材料，溶接，システム規格，設計評価法 キーコンセプト：リスク管理，Partial Design Margin，機能健全性，信頼度の定量化，合理的品質保証体系，強度評価法，経年変化・欠陥評価，規格・基準，関連動向	

整理 No.	5-1-1-1	
大項目	5	欠陥評価と LBB
中項目	1	維持基準（軽水炉相当の欠陥評価）
小項目	1	維持基準（軽水炉相当の欠陥評価）
候補技術	1	維持基準の整備

現状	
・ 電中研の高温構造健全性評価指針においては、欠陥の評価にあたってはクリープ疲労き裂伝播、漏洩および延性不安定破壊を代表的な破損様式としている。 ・ クリープ疲労き裂伝播においては、疲労 J 積分範囲による伝播速度およびクリープ J 積分による伝播速度の和によつてき裂伝播速度を評価している。 ・ 漏洩においては、き裂の寸法からき裂開口量を求め、さらに漏洩量の評価をおこなうことで評価を図っている。 ・ 延性不安定破壊においては、実断面応力が塑性流動応力を超えるか否かによつて不安定破壊の評価を図っている。 ・ 「原子力発電設備維持に関わる技術基準について」においては、フェライト鋼容器、配管およびオーステナイト鋼ステンレス鋼配管の 3 種について維持基準を規定している。 ・ 評価対象欠陥寸法との対比により欠陥評価の有無を判断し、欠陥形状のモデル化、さらにパリス則を用いた欠陥進展評価をおこない、破壊評価をおこなうことと規定している。 ・ オーステナイトステンレス配管に対しては SCC による欠陥進展評価もおこなうことを規定している。 ・ 破壊評価に当たっては、応力拡大係数、極限荷重評価法、弾塑性破壊力学評価法、2 パラメータ評価法を用いている。 ・ 想定負荷回数は運転実績から推定をおこない、負荷条件は欠陥の進展には運転状態 I、II を、破壊の評価には運転状態 I～IV の条件を用いている。 ・ 以上維持基準の整備を図ることにより、定期検査時の欠陥評価作業を合理化することができる。 ・ 文献：	
発電設備技術検査協会編，原子力発電設備維持に関わる技術基準について，1996	
効果	
・ 健全性評価による長寿命化 ・ 対象：炉容器以外全般 ・ 効果：大（健全性維持の観点から）	
課題	
・ 安全評価と構造設計との整合性 ・ 新材料に対する LBB 成立性の確認	
関連事項	
・ システム規格、溶接、環境効果・経年劣化 キーワード：リスク管理，Partial Design Margin，機能健全性，信頼度の定量化，合理的品質保証体系，強度評価法，経年変化・欠陥評価，規格・基準，関連動向	

整理No.	5-1-0-1	
大項目	5	欠陥評価と LBB
中項目	1	維持基準（軽水炉相当の欠陥評価）
小項目	0	
候補技術	1	維持基準の整備

現状	
維持基準として規格化されているのは、ASME Sec.XI のみ。高速炉用の Div.3(1 ページだけ)はあるが、具体的な方法は軽水炉用の Div.1 引用。わが国では軽水炉用の維持基準(欠陥評価法のみ)が、日本機械学会にて最終審議段階にある。高速炉用の欠陥評価法は電中研で指針化され、フランスの RCC-MR A-16(提案中)と同等のレベルにある。 また、非原子力用ではあるが API RP579 が 2000 年 2 月 15 日に発行され、ASME の Post Construction Code として引用される予定である。 実機への LBB 概念の検討は、小口径配管への適用範囲拡大と貫通だ円き裂シナリオの導入による漏えい量の予測精度向上、ならびにこれらを反映した安全対応設備の合理化について実施している。現状の安全対応設備は過剰設備であることが数値上示されている。	
効果	
・対象機器 原子炉構造、配管、冷却系機器、BOP ・効果 大 設計時の損傷を定量化し、き裂というものを損傷に置きかえることにより安全裕度の定量化と合理化が可能。 維持基準による評価体系を確立することにより、合理的な検査体系や寿命管理が可能となる。	
課題	
フェライト鋼に対する欠陥評価法の開発が必要。現状はオーステナイト鋼に対する手法をそのまま適用しており、延性破壊評価が過度に保守的。	
関連事項	
・溶接 ・設計評価法 ・維持 ・システム規格	

整理No.	5-1-1-1	
大項目	5	欠陥評価とLBB
中項目	1	維持基準（軽水炉相当の欠陥評価）
小項目	1	
候補技術	1	維持基準の整備

現状

- ・設計時にLBB評価を実施しているが、軽水炉で整備が進められている維持基準に相当する基準はFBRにはない。
- ・当面は軽水炉並みの維持基準をFBR用に整備する必要がある。
- ・将来的には、別途検討が行われているシステム規格の中に包括的に取り入れて策定を行うことが必要である。
- ・内容としては、検査、欠陥評価、補修を含む。

参考として、添付に軽水炉維持基準の目次を示す。

効果

- ・軽水炉並みの維持基準の整備により、運転開始後に検出された損傷に対する評価が可能となる。
- ・システム規格の1アイテムとして維持基準を策定し全体の裕度のバランスを定量的に調整することができる。これにより機器の設計合理化を図る。
- ・設計段階で損傷許容の考えが採用されれば、設計の裕度を低減させることができる。

適用部位：機器・配管全般

効果：中

課題

荷重、想定き裂の設定。

高温破壊力学パラメータの検討

破壊力学データの取得。

損傷許容設計との対応の検討。

関連事項

8. システム規格, 9. システム規格, 10. 2 規格・基準

発電用原子力設備の維持に係る技術基準原案
目 次

総 則

- JGA-1000 目的
- JGA-2000 適用
- JGA-3000 基準の構成
- JGA-4000 設備維持の責任及び基準の運用
- JGA-5000 品質記録の作成及び保管
- JGA-6000 基準の改訂
- JGA-7000 用語の定義

供用期間中検査

供用期間中検査の一般要求事項

- JIA-1000 適用範囲及び適用区分
- JIA-2000 試験及び検査
- JIA-3000 検査基準
- JIA-5000 系の漏えい試験
- JIA-6000 検査計画書及び記録

第 1 種機器

- JIB-1000 適用範囲及び試験対象機器
- JIB-2500 供用期間中検査の試験方法、試験範囲及び程度
- JIB-5000 系の漏えい試験

第 2 種容器 (鋼製)

- JIE-1000 適用範囲及び試験対象機器
- JIE-2500 供用期間中検査の試験方法、試験範囲及び程度
- JIE-5000 系の漏えい試験

第 3 種機器

- JIC-1000 適用範囲及び試験対象機器
- JIC-2500 供用期間中検査の試験方法、試験範囲及び程度
- JIC-5000 系の漏えい試験

第 4 種機器

- JID-1000 適用範囲及び試験対象機器
- JID-2500 供用期間中検査の試験方法、試験範囲及び程度
- JID-5000 系の漏えい試験

支持構造物

- JIF-1000 適用範囲及び試験対象機器

- JIF-2500 供用期間中検査の試験方法、試験範囲及び程度
- 供用期間中検査における超音波探傷試験指針
- 供用期間中検査における渦流探傷試験指針

評価

評価の一般要求事項

- JEA-1000 評価の一般
- JEA-2000 個々の共通規定
- JEA-3000 所有者の責任
- JEA-4000 報告及び記録の管理

欠陥評価

- JEB-3000 フェライト鋼容器の欠陥評価
- JEB-4000 オーステナイト系ステンレス鋼配管の欠陥評価
- JEB-5000 フェライト鋼配管の欠陥評価
- 添付-1 欠陥形状のモデル化
- 添付-2 欠陥進展データ
- 添付-3 欠陥形状評価法
- 添付-4 欠陥の合体条件評価法
- 添付-5 応力拡大係数の算出
- 添付-6 K_{Ia} , K_{IIa} の規定
- 添付-7 フェライト鋼容器の欠陥破壊評価に係る許容基準
- 添付-8 極限荷重評価法
- 添付-9 弾塑性破壊力学評価法
- 添付-10 オーステナイト系ステンレス鋼の 2 パラメータ評価法
- 添付-11 破壊評価法の選択
- 添付-12 フェライト鋼配管の欠陥評価に用いる破壊靱性 J_{Ic} の規定
- 添付-13 フェライト鋼配管 2 パラメータ評価法

補修・取替

補修・取替の一般要求事項

- JRA-1000 維持基準の適用範囲と補修・取替の定義
- JRA-2000 設置者の責任
- JRA-3000 補修・取替の選択
- JRA-4000 補修・取替実施計画
- JRA-5000 補修・取替に伴う検査
- JRA-6000 品質記録
- JRB-1000 補修技術

JRB-2000 補修方法

- JRB-2100 欠陥部の除去
- JRB-2101 欠陥除去方法
- JRB-2200 水中での溶接方法
- JRB-2201 湿式溶接方法
- JRB-2202 乾式溶接方法
- JRB-2300 溶接部の残留応力を緩和する方法
- JRB-2301 水冷グループ溶接方法
- JRB-2302 水冷溶接方法
- JRB-2303 外面バタリング溶接方法
- JRB-2304 高周波誘導加熱方法
- JRB-2400 溶接後熱処理が不要な溶接方法
- JRB-2401 テンパーヒード溶接方法
- JRB-2500 表面改質による方法
- JRB-2501 金属粉末溶融レーザクラッド方法
- JRB-2502 スリーブ溶融ティグクラッド方法
- JRB-2600 スリーブによる補修方法
- JRB-2601 外面スリーブ方法
- JRB-2602 内面スリーブ方法
- JRB-2603 伝熱管スリーブティグ溶接方法
- JRB-2604 伝熱管スリーブレーザ溶接方法
- JRB-2605 伝熱管スリーブろう付方法
- JRB-2606 伝熱管スリーブ拡管方法
- JRB-2700 施設による補修方法
- JRB-2701 伝熱管溶接施設方法
- JRB-2702 伝熱管機械的施設方法
- JRB-3000 暫定補修方法
- JRB-3001 当て板による補修方法
- JRB-3002 接合材による補修方法
- JRB-3003 充填材による補修方法

用語の定義

- JDA-1000 用語の定義

整理No.	5-1-1-1	
大項目	5	欠陥評価とLBB
中項目	1	維持基準（軽水炉相当の欠陥評価）
小項目	1	
候補技術	1	維持基準の整備

現状
軽水炉における維持基準は整備されている。 単順にFBR用として取り込むとした場合でも高温（クリープ）に関する検討が必要となる。 軽水炉用基準が既存プラントの寿命延長等を念頭にしているのに対し、ここで検討するものは新設プラントにおける合理化の観点も含む点である。 合理化の観点からはシステム規格の包括的基準の中の一つとして、リスクベース評価や、確率論的欠陥評価技術などの取り込みを考慮した場合と整合する基準体系とする必要がある。
効果
維持基準による補修などを前提とした設計法により、他の長寿命化、合理化等の技術とも連携し合理化効果を発揮する。 適用部位： 全般 効果： 中
課題
補修まで考慮した基準。欠陥の発見確率とモニタリング手法。
関連事項
材料、溶接、設計評価法 機能健全性の明確化、信頼度の定量化、強度評価法高度化、経年変化および欠陥評価技術、リスク管理手法、法規・規制・規格・基準

整理No.	5-2-1-1	
大項目	5	欠陥評価と LBB
中項目	2	L B B
小項目	1	手法の高度化
候補技術	1	LBB 評価法の高度化と設計導入

現状	
電中研の高温欠陥評価法をベースに貫通だ円き裂の進展評価法や開口面積、漏えい評価法を追加。また、貫通き裂長さ評価線図などの簡易化も実施。 現状は決定論に基づく評価であり、軽水炉を対象に確率論に基づくリスクベースの評価が行われている。	
効果	
・対象機器 配管 ・合理化効果 大 LBB 概念の導入による安全対応設備の削減、ISI 部位の合理化。	
課題	
・フェライト鋼への適用手法の開発。 ・漏えい量と適切な安全対応設備の対応。 ・実証データの蓄積	
関連事項	
・溶接 ・維持 ・システム規格	

整理No.	5-2-2-1	
大項目	5	欠陥評価と LBB
中項目	2	L B B
小項目	2	設計における考慮
候補技術	1	LBB 評価法の高度化と設計導入

現状	
「もんじゅ」における考え方を踏襲。 LBB と構造設計のリンクは無し。 LBB 成立の場合は、DBE として $Dt/4$ の破損口、BDBE((5)項事象)として瞬時両端破断を想定した安全評価を実施。	
効果	
・対象機器 配管 ・効果 中 LBB 成立性の可否による安全裕度の使い分け →構造設計の合理化 LBB 評価の信頼性向上による BDBE の想定を不要とする →安全設計の合理化	
課題	
・ LBB 成立性と設計で考慮する破損モード、破損確率、運転状態分類、機器区分の対応の明確化。 ・ 安全審査に耐えられる安全シナリオの作成。 ・ 構造屋と安全屋の相互信頼。	
関連事項	
・ 溶接 ・ 維持 ・ システム規格	

整理No.	5-2-3-1	
大項目	5	欠陥評価と LBB
中項目	2	L B B
小項目	3	検査における考慮
候補技術	1	LBB と ISI の関係

現状
LBB 成立性の有無と ISI の要求事項はリンクしていない。本来、LBB 概念が成立する場合はリークモニタリングのみで体積検査が免除されるべきであるが、現状は体積検査が実施されている。FRB 機器は低圧で運転され、しかも延性の高い材料が使用されていることから LBB は成立しやすく、体積検査が不要になれば ISI の大幅な合理化に結びつく。
効果
・対象機器 配管、冷却系機器 ・効果 大 ISI 対象部位の大幅な減少。ISI 期間の短縮。被爆量の低減。
課題
・体積検査免除のシナリオ作成 ・漏洩を許容する PA 上の努力 ・漏洩検知能力の信頼性向上 ・補修方法の確立とプラント再立ち上げまでの工期短縮
関連事項
・溶接 ・欠陥評価 ・システム規格

整理 No.	5-2-4-1	
大項目	5	欠陥評価とLBB
中項目	2	LBB
小項目	4	設備の合理化効果
候補技術	1	LBBによる配管漏えい時の Na 漏えい量の低減及び SG 伝熱管破損時の Na-水反応の緩和

現状	
漏えい対策設備は漏えい率で 100g/s、漏えい量で 500kg 以下であれば、キャッチパン程度の簡便な漏えい対策設備で対応することが可能である。しかしながら、現状設計ではそれよりもはるかに大きな漏えい規模を想定した漏えい対策設備を具備している。微小漏えいを想定した場合には、例えば外管のような漏えい対策設備はそのバウンダリ内全てに漏えいナトリウムの影響を拡大させる可能性があり、保温材のみを有する配管と比べて後処理が煩雑になる可能性が高い。 Na-水反応による高温ラプチャ評価において想定する漏えい Na 量は仮想的に高温ラプチャが発生しやすい条件を設定しているため、高温ラプチャの発生並びに事故の拡大が安全評価上、大きな課題となる。これを防止することを求められた場合、内圧の低減、伝熱管肉厚の増加といった熱効率上不利となる対策を講じることが求められ、コストアップの要因となる懸念がある。	
効果	
LBBを適用した場合のナトリウム漏えい量を明らかにし、漏えい対策に応じた稼働率を示す。これより、現実的な漏えい率に似合った漏えい対策設備を提案する。 適用部位：配管全般 効果：中 伝熱管の破損要因を明らかにし、想定される破損挙動に基づいて初期破損規模並びにき裂の自己拡大を評価することで Na-水反応の想定初期条件の緩和を図る。 適用部位：SG 伝熱管 効果：大	
課題	
1) 高感度漏えい検出器の開発 腐食による影響の確認 2) 伝熱管のき裂の自己拡大挙動評価法の開発 高温ラプチャ評価用評価データの取得	
関連事項	
1.材料、2.溶接、4.環境効果と経年劣化	

整理No.	5-3-1-1	
大項目	5	欠陥評価と LBB
中項目	3	欠陥評価技術
小項目	1	き裂進展解析法整備
候補技術	1	クリープ疲労き裂進展解析法

現状	
電中研が「高温欠陥評価法」を整備。破壊力学パラメータとして J 積分を採用し、参照応力法の基づく簡易評価法を提示。疲労き裂ならびにクリープき裂進展データは、SUS304 鋼ならびに 316FR 鋼に対し提示。クリープ疲労き裂進展評価は線形加算則を採用	
効果	
・対象機器 配管、冷却系機器 ・効果 大 欠陥許容設計への対応。 損傷の定量化＝き裂の定量的評価→安全率の合理的設定	
課題	
・初期欠陥の考え方 ・き裂進展に伴う熱応力解放(コンプライアンス変化)の考慮 ・貫通の定義 ・許容欠陥の考え方 ・安全率の設定	
関連事項	
・溶接 ・設計評価 ・維持	

整理 No.	5-3-2-1	
大項目	5	欠陥評価とLBB
中項目	3	欠陥評価技術
小項目	2	不安定破壊評価法の整備
候補技術	1	不安定破壊を考慮した配管の強度評価法の採用

現状	
現状のLBB評価法は、高延性、高靱性特性を有するオーステナイト系ステンレス鋼を対象に整備されてきたもので、荷重をベースとした評価法になっている。これをそのままフェライト系鋼に適用した場合にはLBBの成立範囲が非常に狭くなり、ギロチン破断を想定する部位が発生することが懸念される（例えば1次系主配管）。この場合、漏えい対策設備を合理化することは困難であるばかりか、LBBを前提として連続漏えい監視をベースとしたISI計画の見直しを迫られる懸念がある。 一方、従来の荷重ベースの評価法に替えて、回転角基準の評価法を適用すればフェライト鋼配管においてもLBBが成立する範囲が拡がり、2次系の漏えい対策設備の合理化が可能となる。	
効果	
1) LBBに適用によるISIの簡素化が図れる。 2) フェライト鋼配管では、許容強度が大きくなる反面、不安定破壊に対しての強度は低下する傾向にあるがこれが顕著でないことを示すことで、適用範囲の拡大（例えば熱応力低減を目的とした容器に対する適用）を図り、構造の合理化を狙う。 3) 配管の合理化において有効なフェライト系材料の適用範囲を拡げることで、設計の合理化に繋がる。 適用部位：機器・配管全般 効果：大	
課題	
1) フェライト系材料の破壊力学評価用物性データの取得（小） 2) 構造物試験による強度の確認（小） 3) （特に溶接部の）経時変化データ（熱時効等）の取得（小）	
関連事項	
1.材料、2.溶接、3.設計評価法、4.環境効果と経年劣化	

整理No.	5-3-3-1	
大項目	5	欠陥評価と LBB
中項目	3	欠陥評価技術
小項目	3	非き裂状欠陥評価法整備
候補技術	1	

現状	
溶接欠陥の内、非き裂性欠陥として考えられるブローホール、スラグ巻き込み、タングステン巻き込みについては、き裂状欠陥と見なし安全側の評価を行っている。さらに、内部欠陥よりも表面欠陥の方が、応力拡大係数もしくはJ積分値が大きくなることから、表面き裂へのモデル化が行われている。	
効果	
・対象機器 配管、冷却系機器 ・効果 小 非き裂状欠陥からき裂が発生するまでの寿命を精度良く評価することにより、き裂貫通寿命までの合理化が期待できる。しかしながら、欠陥のモデル化を安全側にした場合には、効果は小さくなる。	
課題	
・欠陥のモデル化 ・微小き裂進展クライテリア	
関連事項	
・溶接 ・維持基準	

整理No.	5-3-4-1	
大項目	5	欠陥評価とLBB
中項目	3	欠陥評価技術
小項目	4	余寿命評価法整備
候補技術	1	き裂進展による余寿命評価技術

現状	
軽水炉の維持基準としては、検出された欠陥に基づく余寿命評価手法が基準化されつつある。 高速炉についても、ほぼ同一のシナリオが適用でき、き裂進展手法としては 5-3-1-1 が適用できる。	
効果	
・対象機器 原子炉構造、配管、冷却系機器、BOP ・効果 大 き裂が見つかった場合の寿命管理手法を確立することにより、設計時の安全裕度の切詰めが期待できる。 熱応力場では、き裂が停留する可能性が高く、高速炉の優位性を生かした寿命管理手法が構築できる。	
課題	
・欠陥検出の信頼性 ・安全裕度の設定 ・限界き裂の考え方	
関連事項	
・維持 ・き裂進展評価法 ・システム規格	

整理No.	5-3-5-1	
大項目	5	欠陥評価と LBB
中項目	3	欠陥評価技術
小項目	5	き裂評価の設計への導入
候補技術	1	き裂進展に基づく高温設計の導入

現状	
設計ではき裂の発生を認めていない。 単軸丸棒試験片における寿命とき裂長さとの関係は定量化されつつある。この関係に基づいて予測される構造物のき裂長さ、計測されるき裂長さの対応は良好。単軸試験片の寿命はほぼ 10mm のき裂長さに対応。10mm 以上のき裂進展については、破壊力学に基づく予測が可能で、手法は電中研で開発済み(5-3-1-1)	
効果	
・対象機器 原子炉構造、配管、冷却系、BOP ・効果 大 損傷とき裂長さとの対応が明確になる。安全裕度の考え方も明確になり、合理的な設定が可能。 単軸試験片の寿命に基づく一義的な寿命でなく、各構造に応じた寿命の定義が可能となる。	
課題	
・安全裕度の設定 ・き裂発生寿命ー微小き裂進展寿命ーマクロき裂進展寿命の定義の明確化 ・各寿命過程に対する評価クライテリアの開発 ・実証データの蓄積	
関連事項	
・溶接 ・設計評価法 ・システム規格	

整理No.	5-3-5-2	
大項目	5	欠陥評価と LBB
中項目	3	欠陥評価技術
小項目	5	き裂評価の設計への導入
候補技術	2	損傷値と設計許容値の定量化

現状
損傷は、単軸試験片の破断寿命(25%荷重低下で定義)に基づき計算されるが、損傷値と物理量との対応が不明確である。実際の試験では、破断寿命の 10%程度から有意なき裂が観察され、き裂長さが約 10mm に達した時点と寿命がほぼ対応することが明らかとなっている。しかしながら、損傷値とき裂長さとの関係に及ぼす影響因子については十分に解明されていない。また、設計で許容できるき裂長さの限界値についても基準は設けられていない。
効果
・対象機器 原子炉構造、配管、冷却系、BOP ・効果 中 損傷値とき裂長さとの対応が明確になる。安全裕度の考え方も明確になり、合理的な設定が可能。 設計許容値が 10mm 以下になれば、現状設計よりも厳しくなる場合もある。
課題
・影響因子の把握 ・許容値の決定
関連事項
・設計評価法 ・システム規格

整理No.	5-3-6-1	
大項目	5	欠陥評価と LBB
中項目	3	欠陥評価技術
小項目	6	欠陥許容設計
候補技術	1	破壊力学的評価等による構造信頼性の向上（損傷許容設計）

現状
効果
課題
関連事項
5-3-5-1 に含む

整理No.	5-4-1-1	
大項目	5	欠陥評価とLBB
中項目	4	確率論的欠陥評価技術
小項目	1	評価法整備
候補技術	1	確率論的欠陥評価技術

現状
き裂進展評価法はある程度確立されており、これに確率論的評価を取り入れた一般的な確率論的欠陥評価技術については研究がなされている。溶接部などの確率密度分布を必要とするためこれらのデータベースを蓄積する必要があることと、FBR実機への適用法上の課題の抽出と、合理化効果への寄与の検討が必要である。
効果
実質上の高応力化につながり、長寿命化、物量削減が可能 適用部位： 全般 効果： 大
課題
設計思想におけるき裂の取り扱い。 確率密度データベースの構築
関連事項
材料、溶接、設計評価法 機能健全性の明確化、信頼度の定量化、強度評価法高度化、経年変化および欠陥評価技術、リスク管理手法、法規・規制・規格・基準

整理No.	5-4-2-1	
大項目	5	欠陥評価とLBB
中項目	4	確率論的欠陥評価技術
小項目	2	データベース整備
候補技術	1	母材および溶接部の欠陥存在確率分布データの整備

現状
き裂進展評価法はある程度確立されており、これに確率論的評価を取り入れた一般的な確率論的欠陥評価技術については研究がなされている。溶接部などの確率密度分布を必要とするためこれらのデータベースを蓄積する必要があることと、FBR実機への適用法上の課題の抽出と、合理化効果への寄与の検討が必要である。 確率密度関数としては圧力容器鋼の溶接欠陥に対する海外データなどが有名である。
効果
実質上の高応力化につながり、長寿命化、物量削減が可能 適用部位： 全般 効果： 大
課題
設計思想におけるき裂の取り扱い。 確率密度データベースの構築
関連事項
材料、溶接、設計評価法 機能健全性の明確化、信頼度の定量化、強度評価法高度化、経年変化および欠陥評価技術、リスク管理手法、法規・規制・規格・基準

整理 No.	6-1-1-1	
大項目	6	維持（欠陥評価を除く）
中項目	1	維持基準（軽水炉相当の検査，補修・取替）
小項目	1	維持基準（軽水炉相当の検査，補修・取替）
候補技術	1	維持基準の整備

現状

- ・ 検査間隔は基本的に10年周期（3年(16-34%)，7年(50-67%)，10年(100%)）であるが，第1種容器に関しては第4回目以降の検査間隔は7年間としている。また発電所の定期検査間隔とあわせるために最大1年間の短縮，延長がみとめられている。
- ・ しかしながら実際には毎年検査をおこない，検査をおこなっている。
- ・ 補修・取替後の機器について，新たに検査期間の設定をおこなう必要はないとされている。
- ・ 検査には，漏洩試験，非破壊検査をおこない，非破壊検査には目視試験（直接，遠隔，VT，レプリカ），表面試験（磁粉探傷，浸透探傷），体積試験（放射線透過，超音波探傷，渦流探傷）が指定されている。
- ・ 検査の結果，欠陥が許容寸法を満足しない場合には補修（構造健全性を確保するために機器・部品の取替によらず強度を回復する行為であり，欠陥除去，補強を含む），取替（構造健全性を確保するために機器等の全体又はその構成部品を交換する行為であり，改造を含む）が行われる。
- ・ 以上の維持基準の整備を図ることにより，定期検査時の欠陥評価作業を合理化することができる。

文献：

発電設備技術検査協会編，原子力発電設備維持に関わる技術基準について，1996

効果

- ・ 健全性評価による長寿命化
- ・ 対象：伝熱管
- ・ 効果：大（健全性維持の観点から）

課題

- ・ 微小欠陥の取り扱い

関連事項

- ・ NDE，軽水炉の補修取替工法
- ・ 溶接，システム規格

キーワード：リスク管理，Partial Design Margin，機能健全性，信頼度の定量化，合理的品質保証体系，強度評価法，経年変化・欠陥評価，規格・基準，関連動向

整理No.	6-1-1-1	
大項目	6	維持（欠陥評価を除く）
中項目	1	維持基準（軽水炉相当の検査、補修・取替）
小項目	1	
候補技術	1	維持基準の整備

現状
維持基準として検査、補修・取替に関する項目が規格化されているのは、ASME Sec.XIのみである。非原子力用には、ASME Post Construction Committee で検討されているが、補修溶接法の検討が中心。
効果
・対象機器 配管 ・効果 大 長寿命化のためには不可欠な技術。また、設計裕度の合理化の裏付けとしても必要。
課題
・検査部位のスクリーニング ・検査方法の基準化 ・検査方法と欠陥検出精度の関連の明確化 ・補修方法の基準化 ・取替基準の明確化
関連事項
・溶接 ・欠陥評価

整理No.	6-1-1-1	
大項目	6	維持（欠陥評価を除く）
中項目	1	維持基準（軽水炉相当の検査、補修、取替）
小項目	1	
候補技術	1	維持基準の整備

現状	
・設計時に LBB 評価を実施しているが、軽水炉で整備が進められている維持基準に相当する基準は FBR にはない。 ・当面は軽水炉並みの維持基準を F B R 用に整備する必要がある。 ・将来的には、別途検討が行われているシステム規格の中に包括的に取り入れて策定を行うことが必要である。 ・内容としては、検査、欠陥評価、補修を含む。 （維持基準の中で欠陥評価とそれ以外に分離する理由がないので同内容を記載。）	
効果	
・軽水炉並みの維持基準の整備により、運転開始後に検出された損傷に対する評価が可能となる。（P A） ・システム規格の 1 アイテムとして維持基準を策定し全体の裕度のバランスを定量的に調整することができる。これにより機器の設計合理化を図る。 ・設計段階で損傷許容の考えが採用されれば、設計の裕度を低減させることができる。 （機器コストの合理化より、むしろ軽水炉並みの信頼性の確保に重点がある。）	
課題	
・ナトリウム中、あるいは高温中検査技術の開発 ・ナトリウム中あるいは高温中補修技術の開発 ・遠隔操作装置の開発	
関連事項	
8, 9 システム規格, 10. 2 規格・基準	

整理No.	6-1-1-1	
大項目	6	維持
中項目	1	維持基準（軽水炉相当の検査、補修・取替）
小項目	1	
候補技術	1	維持基準の整備

現状
軽水炉における維持基準は整備されている。 単順にFBR用として取り込むとした場合でも高温（クリープ）に関する検討が必要となる。 軽水炉用基準が既存プラントの寿命延長等を念頭にしているのに対し、ここで検討するのは新設プラントにおける合理化の観点も含む点である。 合理化の観点からはシステム規格の包括的基準の中の一つとして、リスクベース評価や、interim certification、確率論的欠陥評価技術などの取り込みを考慮した場合と整合する基準体系とする必要がある。
効果
維持基準による補修などを前提とした設計法により、他の長寿命化、合理化等の技術とも連携し合理化効果を発揮する。 適用部位： 全般 効果： 中
課題
高温化、検査・欠陥評価技術、補修技術（高温部位）の確立。
関連事項
材料、溶接、設計評価法 機能健全性の明確化、信頼度の定量化、強度評価法高度化、経年変化および欠陥評価技術、リスク管理手法、法規・規制・規格・基準

整理No.	6-2-1-1	
大項目	6	維持
中項目	2	モニタリング
小項目	1	プロセス量
候補技術	1	プロセス量（温度、流量）のモニタリングによる評価

現状
軽水炉の疲労モニタリング、もんじゅにおけるクリープ疲労モニタリングなどが研究されている。評価部位の温度などは必ずしも詳細に測定（モニタリング）されているとは限らないので、最も近傍（一般には上流）のプロセス量である温度、流量などから、プラント動特性、熱流動を考慮し、当該部への荷重条件を設定し当該部の発生応力を算定する。発生した事象について損傷値を計算しこれを積分してゆくことにより、健全性裕度の確認、予寿命の評価などに適用する。高速な応答を求められることから、応力算定の方法としてGreen関数を用いる方法や、基準事象のデータベースから想定する方法などが採られている。計算機能力の向上から、より詳細な解析を実施することも将来的には可能となる可能性が高い。
効果
モニタリングのみによる合理化効果はないが、損傷評価の前提となった場合、設計時の安全裕度を大幅に引き下げられる。また、モニタリングである値まで損傷が達しない場合はISIを実施しないことによる検査の合理化が可能。 適用部位： 全般 効果： 大
課題
モニタリングが有効であるとして、損傷評価法の精度及び安全裕度（事象想定回数含む）の考え方。設計において安全裕度を高く取った場合は損傷はモニターされない。モニタリングによる損傷を確認することと引き替えに、設計時の安全率を引き下げるロジック。損傷値が積分値であることから、積算のためのオンラインモニタリングか、オフラインで損傷を記憶する手法の開発が必要。
関連事項
設計評価法 機能健全性の明確化、信頼度の定量化、強度評価法高度化、経年変化および欠陥評価技術、リスク管理手法

整理No.	6-2-1-2	
大項目	6	維持
中項目	2	モニタリング
小項目	1	プロセス量
候補技術	2	損傷の間接情報の非破壊検査技術

現状
軽水炉の疲労モニタリング、もんじゅにおけるクリープ疲労モニタリングなどが研究されている。 構造物の損傷を表す間接情報が確定できればこれを測定する技術を開発することが有効と考えられる。 液分析による、損傷評価の可能性有り。
効果
欠陥評価による補修を前提とした場合、設計時の安全裕度を削減する効果を発揮する。 適用部位： 全般 効果： 大
課題
損傷を表す間接情報の確定
関連事項
設計評価法 機能健全性の明確化、信頼度の定量化、強度評価法高度化、経年変化および欠陥評価技術、リスク管理手法

整理No.	6-2-2-1	
大項目	6	維持
中項目	2	モニタリング
小項目	2	プロセス量モニターのためのセンサー
候補技術	1	薄膜センサー（温度・ひずみ）の開発

現状
溶射皮膜を形成し、その抵抗変化などの物性変化を測定することで、ひずみ・温度などの情報を得る。火力タービンなどで研究中。
効果
モニタリングのみによる合理化効果はないが、損傷評価の前提となった場合、設計時の安全裕度を大幅に引き下げられる。 適用部位： 全般 効果： 大
課題
センサーの開発
関連事項
機能健全性の明確化、信頼度の定量化、強度評価法高度化、経年変化および欠陥評価技術、リスク管理手法

整理 No.	6-2-3-1	
大項目	6	維持（欠陥評価を除く）
中項目	2	モニタリング
小項目	3	材料情報
候補技術	1	直接的な損傷モニタリング／欠陥の直接情報の非破壊検査技術／ 損傷の直接情報の非破壊検査技術

現状	
- 直接的なモニタリングにより損傷の予測精度の検証および精度向上を図ることで、設計裕度の適正化を図り、信頼性の向上を図ることができる。 - モニタリングデータと損傷予測データの対比により次回定検、補修時期の延長もしくは適正化を図ることができる。 - NDE (UT, MT), もしくはサンプリング材の破壊試験により損傷を評価する手法が一般的に採用されている。 - 今後のNDE手法として、軽水炉では電子線回折法（1mm程度のサンプルで可）、陽電子消滅法、X線回折法また超音波利用法なども候補としてあげられる。 - 電子線回折法は採取した試料からミクロ組織、転位、析出物、粒界偏析などの多くの情報が得られる長所がある。短所としてはサンプル材を抽出しなくてはならないことがあげられるが、本来1mm程度の減肉は許容できる設計となっていること、また損傷部の除去を図れるなどで必ずしも短所とはならない。 - 陽電子消滅法は疲労破壊や中性子照射損傷の状況を精度よく求めることができる可能性があることが長所としてあげられるが、まだ開発の途上であることが短所である。 - X線回折法は応用範囲が広く、結晶構造解析、集合組織解析、化学分析、応力測定など実用実績が多いことが長所としてあげられるが、材料によっては疲労損傷の評価には適さないことが短所としてあげられる。ただしX線を細束に絞り込むことによって正確に疲労損傷を測定できる可能性がある。 - 超音波利用法は材料の体積的な微小き裂の存在情報を得られることが長所としてあげられ、短所としては微小き裂にのみ着目しているため、全体積的な疲労度を損傷初期から検出することが困難な点が上げられる。 文献：Hayashi,M. Matsumoto,K. Iki,A., Fatigue Monitoring System for BWR Reactor Pressure Vessel, ASM, 1992	
効果	
- モニタリングによる定検間隔の延長 - モニタリングによる補修、交換限界基準の引き下げ - 長寿命化、信頼性向上 - プラントシミュレーションとのリンクにより効果大 - 対象：部位特定（配管，SG，IHX），・効果：大	
課題	
破壊様式と損傷情報及びその検出方法と評価方法の開発	
関連事項	
材料，溶接，システム規格，環境効果と経年劣化 キーコンセプト：リスク管理，Partial Design Margin，機能健全性，信頼度の定量化，合理的品質保証体系，強度評価法，経年変化・欠陥評価，規格・基準，関連動向，その他	

表 高温における劣化状況の非破壊的検出法

		クリープ リラクセーション	低サイクル疲労 熱疲労	脆 化
金属組織 (レプリカ)	キャビティ	○		
	結晶粒変形	○		
	微小き裂		○	
	炭化物	○		
	σ 相	○		
電 気 抵 抗		○	○	
硬 さ		○		
X 線 回 折			○	
電 気 化 学				○
渦 電 流		○	○	○
超 音 波		○	○	○
密 度		○		
バルクハウゼンノイズ			○	○
磁 気 A E		○		○
エ ッ チ 法				○

表 定期点検周期延長について（蒸気タービン本体）

（昭和62年 5月15日付エネ庁通達：62資公部第255号）

	運転時間が10万時間 以下及び起動停止回 数が2500回以下	運転時間が10万時間を 越えている場合。又は、 起動停止回数が2500回を 越えている場合。
(1) 適切な運転管理の採用。	○	○
(2) 日常における保守点検の実施。	○	○
(3) 機器の寿命評価の実施。	×	○
(4) 他機における故障の防止策の適用。	○	○
(5) 前回定期検査時において異常の無いこと。	○	○
(6) 前回定期検査時における不具合にたいし 処置されていること。	○	○
(7) 定期検査後の不具合に対し処置されて いること。	○	○

○：適用 ×：適用不要

表 蒸気タービン経年劣化の形態

損傷の形態	要 因	構成部品の劣化事例
割 れ	疲労、熱疲労、熱衝撃、 クリープ、脆化、フレタング、 応力腐食、腐食疲労、	ロータ割れ、動翼植込み部割れ、 ケーシング割れ、 ボルト破損、
変 形	クリープ リラクゼーション 熱低	ロータ曲がり、羽根浮上り、 シュラウド浮上り、 ノズルダイヤフラムの倒れ、 ケーシングの変形、配管の変形、 ネジ穴のクリープ、ボルト変形、
減 肉	侵食、酸化、摩耗、エロージョン ボルトエロージョン、電食	羽根の侵食、ノズルの侵食、 弁の侵食、配管の減肉
スケール 付着	酸化、	ノズル面積減少 ボルトの焼付け、弁棒のスティック

：高温域での要因

整理No.	6-2-3-1	
大項目	6	維持（欠陥評価を除く）
中項目	2	モニタリング
小項目	3	材料情報
候補技術	1	直接的な損傷モニタリング／欠陥の直接情報の非破壊検査技術／ 損傷の直接情報の非破壊検査技術

現状
火力発電用ボイラを対象として、設備診断技術実証試験が発電技検で実施された。ボイラ材ならびにタービン材を対象に、損傷モニタリング手法として以下の手法が推奨されている。 硬さ測定法(ボイラー、タービン)；クリープ疲労 電気抵抗法(ボイラーHAZ、タービン)；クリープ X線回折法(タービン)；疲労 超音波法(ボイラー、タービン)；クリープ疲労 Aパラメータ法(ボイラーHAZ、タービン)；クリープ その他ボイド面積率法、キャビティ平均長さ法、組織対比法、結晶粒変形法、微視き裂測定法 上記手法はいずれもマクロき裂を許容しない日本の考え方に対する手法である。
効果
・対象機器 配管、冷却系 ・効果 小 き裂発生を許容する体系を採用した場合には効果は小さい。
課題
・限界寿命の定義と余寿命の関係 ・FBR 機器への余寿命診断手法の適用性
関連事項
・設計評価法 ・環境効果と経年劣化

整理No.	6-2-3-1	
大項目	6	維持
中項目	2	モニタリング
小項目	3	材料情報
候補技術	1	直接的な損傷モニタリング／欠陥の直接情報の非破壊検査技術／損傷の直接情報の非破壊検査技術

現状
プロセス量に基づく損傷評価ではなく、構造物の直接の損傷、劣化の度合いを測定する技術の開発。現状損傷としては第3期クリープの様な大きな損傷（ポイドなどが明らかに発生する）については、ある程度測定することが可能となっている模様（主に火力で検討されている模様）。原理としては超音波を用いるものが有望であり、損傷が大きくなることによる構造物中の超音波の減衰から、損傷の程度を同定しようというものである。 粒界のCrカーバイドを検出する手法も研究されている。
効果
欠陥評価による補修を前提とした場合、設計時の安全裕度を削減する効果を発揮する。 適用部位： 全般 効果： 大
課題
損傷を表すパラメータの確定
関連事項
設計評価法 機能健全性の明確化、信頼度の定量化、強度評価法高度化、経年変化および欠陥評価技術、リスク管理手法

整理No.	6-2-3-1	
大項目	6	維持（欠陥評価を除く）
中項目	2	モニタリング
小項目	3	材料情報
候補技術	1	直接的な損傷モニタリング

現状
材料の損傷を精度よくモニタリングし、事前に破損を防止することができれば、破損に伴う汚染や炉心損傷のリスクを低減させることができるとともに、復旧に関わるコストを低減させることができる。また、モニタリングを実施することを前提に通常の供用期間中検査の頻度を低減する事が可能となる。さらに、モニタリングにより実損傷程度を把握できれば、破損に至る前に評価上有害な損傷を検知した場合、補修・交換等の対応が可能となり設計裕度を低減することが可能となる。 現状、実用に供されている技術は少ないが、破損の防止や検査コストの削減を目的とした技術の開発・実用の気運が高まっている。
効果
破損に伴う汚染や炉心損傷のリスクの低減 復旧に関わるコストの低減 検査頻度や設計裕度の低減 適用部位：機器・配管全般 効 果：大
課題
モニタリングに関わる要素技術の開発（直接的なクリープ、疲労損傷計測技術） モニタリング費用の算定および低減 対象箇所、損傷モードの選定 モニタリングの適用方法の明確化、基準化
関連事項
3. 設計評価法, 4. 環境効果と経年劣化, 5-1 維持基準, 5-3 欠陥評価技術, 8. システム規格, 9. システム規格

整理No.	6-2-4-1	
大項目	6	維持
中項目	2	モニタリング
小項目	4	プロセス量 and/or 材料情報による予寿命評価
候補技術	1	プラント監視診断技術（オンライン診断/オフライン診断）

現状
軽水炉の疲労モニタリング、もんじゅにおけるクリープ疲労モニタリングなどが研究されている。 評価部位の温度などは必ずしも詳細に測定（モニタリング）されているとは限らないので、最も近傍（一般には上流）のプロセス量である温度、流量などから、プラント動特性、熱流動を考慮し、当該部への荷重条件を設定し当該部の発生応力を算定する。発生した事象について損傷値を計算しこれを積分してゆくことにより、健全性裕度の確認、予寿命の評価などに適用する。 第3期クリープの判定が可能であれば、クリープ破損直前を検知できる可能性がある。
効果
モニタリングのみによる合理化効果はないが、損傷評価の前提となった場合、設計時の安全裕度を大幅に引き下げられる。 適用部位： 全般 効果： 大
課題
予寿命評価法の精度向上
関連事項
設計評価法 機能健全性の明確化、信頼度の定量化、強度評価法高度化、経年変化および欠陥評価技術、リスク管理手法

整理No.	6-2-4-2	
大項目	6	維持
中項目	2	モニタリング
小項目	4	プロセス量 and/or 材料情報による予寿命評価
候補技術	2	寿命カウンターの開発

現状
軽水炉の疲労モニタリング、もんじゅにおけるクリープ疲労モニタリングなどが研究されている。 評価部位の温度などは必ずしも詳細に測定（モニタリング）されているとは限らないので、最も近傍（一般には上流）のプロセス量である温度、流量などから、プラント動特性、熱流動を考慮し、当該部への荷重条件を設定し当該部の発生応力を算定する。発生した事象について損傷値を計算しこれを積分してゆくことにより、健全性裕度の確認、予寿命の評価などに適用する。 第3期クリープの判定が可能であれば、クリープ破損直前を検知できる可能性がある。
効果
モニタリングのみによる合理化効果はないが、損傷評価の前提となった場合、設計時の安全裕度を大幅に引き下げられる。 適用部位： 全般 効果： 大
課題
関連事項
設計評価法 機能健全性の明確化、信頼度の定量化、強度評価法高度化、経年変化および欠陥評価技術、リスク管理手法

整理 No.	6-2-5-1	
大項目	6	維持（欠陥評価を除く）
中項目	2	モニタリング
小項目	5	サーベランス
候補技術	1	損傷・き裂監視用サーベランス TP の採用

現状	
・ 圧力容器などにおいては、表面部のくり抜き小型サンプル、貫通型のプラグサンプルの採取がおこなわれている。 ・ 表面部小型サンプルは表面部のみの損傷調査に適しており、光学顕微鏡、透過電子顕微鏡および破面観察に有効である。寸法は5φ×5mmで十分である ・ プラグサンプルは管厚方向の損傷の検出に有効である。 ・ 両サンプル採取後には溶接にて補修をおこなう。 ・ 上記採取方法は、環境モニタリングには有効であるが、損傷のモニタリングに対しては予き裂部材の挿入、検査によるモニタリングが有効であると考えられる。 ・ 火力（ガスタービン）部品においては、交換部品のローテーションによる検査、補修工程の合理化をはかる動きがある。	
効果	
・ モニタリングによる定検間隔の延長 ・ モニタリングによる補修、交換限界基準の引き下げ {腐食に関しては有効の可能性あり} ・ 対象：水系，SG，IHX ・ 効果：中	
課題	
・ モニタリング機器挿入位置の決定 ・ T. P. の回収方法 ・ クリティカルな部位へのT. P. 適用は困難であると考えられ、同様な損傷が生じる裕度のある部位、もしくはクリティカルな部位付近への適用により推定をおこなう必要がある ・ サーベイランス可能な位置の特定	
関連事項	
・ 材料， システム規格，環境効果・経年劣化 キコンプト：リスク管理，Partial Design Margin，機能健全性，信頼度の定量化，合理的品質保証体系，強度評価法，経年変化・欠陥評価，規格・基準，関連動向，その他	

整理No.	6-2-5-2	
大項目	6	維持（欠陥評価を除く）
中項目	2	モニタリング
小項目	5	サーベランス
候補技術	2	バイパスループによる材料劣化監視

現状
サーベランス試験片は、材料の経年劣化、とりわけ照射効果を把握するために炉心周りに取付けられ、適宜取出して破壊試験に供されている。しかしながら、荷重は負荷されてはいない。そこで、実機主要部位と同一の使用環境となるダミーループで材料試験を平行して実施し、適宜抽出して材料の破損状況や劣化状況をチェックできるプラントシステムを考案できれば、設計段階のマージンを合理化できる余地がある。
効果
・対象機器 原子炉構造、配管、冷却系 ・効果 ? 単純に考えるとコストアップにつながるが、プラントの長期的なリスク管理を含む信頼性、高性能化の面で向上し、設計、評価、検査を含めた総合的な合理化につながる可能性もあるのでは？
課題
・どの部位に取付けるか。 ・バイパスループの設置が新たなリスク要因とならないか。 ・負荷する荷重と実際の機器の荷重をどのように対応させるか。
関連事項
・設計評価法 ・環境効果と経年劣化

整理No.	6-2-6-1	
大項目	6	維持（欠陥評価を除く）
中項目	2	モニタリング
小項目	6	ダイレクトサーベランス
候補技術	1	寿命モニターの導入

現状
き裂は許容しない設計となっており、寿命の把握は難しい。しかしながら、製造時に応力的に厳しいことが予測される部位に複数の予き裂を導入しておき、そのき裂を寿命モニターとして監視すれば、合理的な寿命管理が可能となる。例えば、3種類のき裂を導入しておき、最も大きいき裂が貫通する時点を寿命の40%、二番目を寿命の50%、三番目を寿命の80%に設定しておけば、三番目のき裂が貫通した時点で寿命とすれば、現状に比べかなり長期間の運転が可能となる。 なお、寿命モニターを設けた部分については予め漏えい対策のエンクロージャーを設けておく。
効果
・対象機器 配管、冷却系、BOP ・効果 大 とことん寿命まで使える。ただし、設計ミスがあった場合にはかえって寿命を縮める要因となる。
課題
・概念が受け入れられるか。 ・適切な場所にき裂を導入できるか。 ・裕度が少なくなった分、財産的な評価が難しくなる。
関連事項
・欠陥評価 ・設計評価法

整理No.	6-3-1-1	
大項目	6	維持
中項目	3	I S I
小項目	1	UT適用範囲の拡大
候補技術	1	UT適用範囲の拡大

現状
溶接部の欠陥評価のためRTが撮られている。 RTをUTで代替することが可能となれば検査コスト削減となる。溶接部であることや場合によっては、複雑な構造で入射角に対する適切なエコーが得られないなどの課題がUTにはあり、検出精度向上が必要である。
効果
検査工数の削減によるコストダウン。 適用部位： 全般 効果： 小
課題
UTにおける溶接部、複雑形状部などの検査精度向上
関連事項
溶接 信頼度の定量化、経年変化および欠陥評価技術

整理 No.	6-3-2-1	
大項目	6	維持（欠陥評価を除く）
中項目	3	I S I
小項目	2	検査手法高度化
候補技術	1	I S I 手法の高度化

現状

- ・ 欠陥、損傷の検出技術高度化を図るためには、NDIの高度化が必要である。6-2-3-1と関連あり。
- ・ 欠陥に対する構造健全性評価技術の高度化を、維持基準への反映をおこなう必要がある。5-1-1-1, 6-1-1-1と関連あり。
- ・ モニタリングと評価を統合した寿命管理システムの採用により、検査間隔の適正化を図ることができる。6-5-1-4と関連あり。

効果

- ・ 定検作業の省力化

{ I S I 関連研究の情報を適宜把握程度、本調査対象としては重要度低い }

- ・ 対象：全般
- ・ 効果：小

課題

関連事項

- ・ 材料, システム規格, 環境効果・経年劣化

キーワード：リスク管理, 機能健全性, 信頼度の定量化, 合理的品質保証体系,
経年変化・欠陥評価, 規格・基準, 関連動向

整理No.	6-3-2-1	
大項目	6	維持（欠陥評価を除く）
中項目	3	ISI
小項目	2	検査手法高度化
候補技術	1	ISI 手法の高度化

現状
軽水炉では ISI 手法として UT が主流となり、FBR への適用についても高温ナトリウム中での適用性が確認されている。一方、軽水炉では ISI インターバルならびに ISI 期間の短縮が計画され、検査の自動化ならびに検査部位の合理化が進められている。FBR では、漏えい検知可能なき裂長さに対する限界き裂長さの裕度は大きく、LBB 概念と組合せることにより合理的な ISI 手法が策定できるものと考えられる。
効果
・対象機器 配管 ・効果 大 設計時の過度な裕度を排除し、運転・維持を含めた総合的な裕度を保つためには、ISI 手法の高度化は不可欠。ただし、LBB 概念を積極的に活用すれば ISI 手法への負担は少なくなる。
課題
・何をどの時期に見つけ、健全性とどのようにリンクさせるかのシナリオの作成 ・ISI 機器開発のための設計の提示
関連事項
・溶接 ・システム規格

整理No.	6-3-2-1	
大項目	6	維持基準（欠陥評価を除く）
中項目	3	ISI
小項目	2	検査手法高度化
候補技術	1	ISI手法の高度化

現状	
・FBRの特殊な環境に適した非破壊検査技術の開発がこれまでも実施されており、今後も新しい技術の適用によるISI手法の高度化が必要である。（一部他の項目と重複する） ・FBRの特有のISI技術としては以下の内容を開発中。（例） ナトリウム中可視化装置、ナトリウム中UT、ナトリウム中ロボット 高温用EMAT、高温UT、高温用ISIロボット ・将来的には、システム規格の一環としてISIが設計にまで関連してくるため、ISI技術の確立とその信頼性データの取得が必要。	
効果	
・実質的にISIにより精度の高い検出が可能であるなら、部材が破損する前に損傷の検知・補修が可能となるため、機器の設計裕度を切り下げても供用期間中の健全性は担保される。 ・当面は、軽水炉での検査レベルに達することによる安心感	
課題	
・ISIによる設計裕度削減ためには、システム規格の中での設計とのリンクを図る必要がある。 ・上記の現状で示した高温、ナトリウム中に対するセンサ、ロボットの開発 ・さらにレーザーなどの新しい要素技術の開発・実用化	
関連事項	
8, 9. システム規格	

整理No.	6-3-2-1	
大項目	6	維持
中項目	3	ISI
小項目	2	検査手法の高度化
候補技術	1	ISI手法の高度化

現状
目視、UT検査など。アクセスが難しい場所について自動機の開発などが行われている。 (例：R/V溶接線のISI装置等)。
効果
ISI工数の削減 適用部位： R/V、IHX容器、ポンプ容器 効果： 小
課題
関連事項

整理 No.	6-4-1-1	
大項目	6	維持（欠陥評価を除く）
中項目	4	補修
小項目	1	劣化材の改質
候補技術	1	劣化材改質技術

現状	
・ 表面に硬球を叩き付けることにより圧縮の残留応力を付与するショットピーニング，ウォータージェットピーニングなどの技術も用いられている。 ・ BWRにおいては，空気搬送ノズルを用いてステンレス材にショットピーニング施工をおこなう手法が採用されている。 ・ ノズルの取り回しが可能な範囲であれば，施工が可能である。 ・ ノズル形状は対象にあわせて設計をおこなうことにより，寸法的な制約はある程度回避が可能である。 ・ ノズル寸法が小さいときにはショット径，空気圧を上げる必要がある。 ・ ショットピーニングのBWRでの対象機器は，炉内機器（シュラウド），SG，IHXなどである。 ・ ショット後には硬球の回収が必要であり，回収が可能な構造にのみ適用できる。 ・ 劣化材の表面を対象として，損傷を削除または損傷回復，レーザによる表面処理，熱処理による改善もあるが現実には適用不可の可能性はある。 ・ 高速ショットにより衝突エネルギーを熱エネルギーに変換し，表面の組織変化により改質を図るWPC施工も着目されつつある。	
効果	
・ 改質による長寿命化 ・ 対象：配管（溶接部，エルボ） ・ 効果：中	
課題	
・ 劣化による表面変化の内容の特定とその改質技術	
関連事項	
・ IHSI（残留応力）改善技術（LWR配管） ・ 材料，環境効果と経年変化，システム規格 キーコンセプト：リスク管理，機能健全性，信頼度の定量化，合理的品質保証体系，経年変化・欠陥評価，規格・基準，関連動向，その他	

整理 No.	6-4-2-1	
大項目	6	維持（欠陥評価を除く）
中項目	4	補修
小項目	2	劣化材の補修
候補技術	1	劣化材補修技術

現状	
・ 火力（ガスタービン）機器においてはき裂型の損傷に対して、溶接補修、ろう付け補修またレーザ補修が用いられている。 ・ 溶接補修は、損傷部位のき裂を加工によって除去し、溶接により欠損部へ肉盛りをおこなう手法である。肉盛材は構造材と同じ母材を用いるのが一般的である。 ・ ろう付け補修は、溶接補修と同様の手法であり、欠損部へろうを充填し冷却凝固させる手法である。一般に入熱量は少なく、比較的短時間で作業ができる利点がある。 ・ レーザ補修は、やはり溶接補修と同様の手法であり、レーザビームを用いた高エネルギー密度を有する精密溶接技術を利用したものであり、深溶け込み溶接が可能で熱影響部は狭く歪みを生じにくいいため、入熱量は少なく比較的短時間で作業ができる利点がある。 ・ 「原子力発電設備維持に関わる技術基準について」においては補修が必要となった原因を解明した上で補修技術を選択する必要を指定し、おもに溶接を主体とした補修方法を指定している。	
・ 文献： Corcorano, S. Guerreschi, U. Enabling Technologies for Advanced Turbine Component Life Extension, Asme Turbo Expo, 1999 Okamura, H. Ohtani, R. Fujii, K. The reliability of the Repair Weld Joints of Aged High Temperature Components in Fossil Power Plants, 23. MPA-Seminar, 1997	
効果	
・ 補修による長寿命化運用 ・ 対象：配管（溶接部、エルボ） ・ 効果：中	
課題	
・ 母材強度と同等な強度を確保できる補修技術 ・ 補修後の材料特性の把握 ・ 補修対象部位の特定が必要であるが、湿式溶接や、当て板、接着剤および充填材を用いる補修技術は第1種容器に対しては適用させないなどの技術の区分化をおこなうことも可能である。	
関連事項	
キーコンセプト：リスク管理、機能健全性、信頼度の定量化、合理的品質保証体系、経年変化・欠陥評価、規格・基準、関連動向、その他	

整理 No.	6-5-1-1	
大項目	6	維持（欠陥評価を除く）
中項目	5	取替
小項目	1	劣化材の取替
候補技術	1	劣化材交換技術

現状

- ・ 火力（ガスタービン）機器においてはき裂型の損傷に対して、損傷個所を部位ごと取り替える手法が検討されている。
- ・ 劣化が顕著と思われる部品を交換前提の設計とすることで、交換を省力化する技術も考えられる。
- ・ また交換が容易な構造設計および材料の選定をおこなうことにより、交換の省力化を図り、長寿命化による低コスト化効果を増大させる方向性も考えられる。
- ・ 補修ではなく交換をおこなうことから、重要度の高い1次系配管などに適用することが有効であると考えられる。
- ・ 劣化材と新材の接合（溶接）技術及び接合後の構造（部位）強度の把握が重要である。
- ・ 2.25Cr-1Mo 鋼で、再補修により HAZ に HAZ が重なる部位のクリープ破断強度が低下する傾向にあるため、再補修作業に当たってはその旨に留意する必要がある。

文献：

Okamura,H. Ohtani,R. Fujii,K, The reliability of the Repair Weld Joints of Aged High Temperature Components in Fossil Power Plants, 23. MPA-Séminar, 1997

効果

- ・ 劣化材交換による長寿命化
- { 6-5-1-4 と関連。6-5-1-4 も含め検討 }
- ・ 対象：原子炉容器以外の機器全般
 - ・ 効果：（交換前提設計の場合は効果大）

課題

- ・ 交換後の強度の確保

関連事項

- ・ 材料、溶接、環境効果と経年劣化、システム規格

キーコンセプト：リスク管理、機能健全性、信頼度の定量化、合理的品質保証体系、経年変化・欠陥評価、規格・基準、関連動向、その他

整理No.	6-5-1-2	
大項目	6	維持（欠陥評価を除く）
中項目	5	取替
小項目	1	劣化材の取替
候補技術	2	機器取替技術の開発

現状	
設計時には取替を想定しておらず、軽水炉においてはやむを得ず SG、シュラウド、熱交換器などの取替を行っている。機器の取替を前提とすれば、裕度の切詰めた設計が可能となり、さらに取替技術の向上による取替工事期間の短縮、費用の低減が可能となれば、現状の取替を前提としない設計よりもコストを削減できることが期待できる。	
効果	
・対象機器 炉内機器、配管、冷却系、BOP ・効果 ? 裕度の切詰めによる設備コストの低減と、取替工事に伴うプラント稼働率の低下、維持費用の増加のバランスによる。設計裕度とプラントコストの相関に関する検討が必要。	
課題	
・安全審査上の問題。 ・ナトリウム除洗技術。 ・廃棄物の増加による環境負荷。 ・設計裕度とプラントコストの相関に関するデータベースの作成。	
関連事項	
・材料 ・溶接 ・システム規格	

整理No.	6-5-1-3	
大項目	6	維持（欠陥評価を除く）
中項目	5	取替
小項目	1	劣化材の取替
候補技術	3	機器交換前提の設計

現状	
現状の設計では一部の消耗品を除き、機器が共用期間中にわたり健全であることが要求される。このため、機器は損傷が生じないよう十分な裕度をもって設計され材料も吟味されたものが使用される。このため、原子力の機器は一般品と比べコストの高いものとなっている。 ところで、そのような機器を交換することを前提に設計を行えば、強度上の裕度を低減でき、品質の低いまたは検査を簡略化した一般品を採用することが容易になる。また、劣化の著しいことが予想される機器については予め交換容易な設計を行っておけば、万一損傷が生じても対応が容易になる。	
効果	
低グレード品・一般品の採用によるコスト削減 設計裕度の低減 適用部位：機器・配管全般 効果：大	
課題	
機器交換作業のコスト算出 機器交換と共用機間中の健全性を保証するコストの比較 交換が容易となる機器配置，形状，接合方法等の検討	
関連事項	
3. 設計評価法， 4. 環境効果と経年劣化， 5-1 維持基準， 8. システム規格， 9. システム規格	

整理 No.	6-5-1-4	
大項目	6	維持（欠陥評価を除く）
中項目	5	取替
小項目	1	劣化材の取替
候補技術	4	機器，部位の交換計画の立案

現状	
・ 部品や部位が曝される運転時の温度，応力状態および保持時間から寿命を予測する寿命管理システムが必要である ・ 上記システムに基づき，定期検査や劣化部位の補修，交換などにより運転スケジュールを適正化する。 ・ 参考としてガスタービン寿命管理システムがあげられる。 ・ ただしガスタービン寿命管理システムにおいては，比較的大きなき裂の進展の予測を前提としているため，微小き裂の管理に対しては別途対応が必要である。 ・ 補修，交換ともに設計時において高強度材を使用するも補修，交換回数を低減した場合のコストと一般材を使用するも補修，交換回数が増加する場合のコストの比較が重要である。 ・ 文献： Hayasaka,Y. Isobe,N. Sakurai,S. Kumata,K., Life Manegement System for Hot -Gas - Path Components of Gas Turbine, ASME Turbo Expo, 1999	
効果	
・ 交換計画における余寿命適正化による長寿命化 { 6-5-1-1 の技術適用可能性有りの場合，設計段階から部位・機器を特定し，交換前提の設計を実施：技術的調査としては6-5-1-1 でカバー } ・ 対象：機器，部位限定 ・ 効果：中	
課題	
・ 余寿命評価技術の高精度化	
関連事項	
キーワード：リスク管理，機能健全性，信頼度の定量化，合理的品質保証体系，経年変化・欠陥評価，規格・基準，関連動向，その他	

整理No.	6-5-1-5	
大項目	6	維持（欠陥評価を除く）
中項目	5	取替
小項目	1	劣化材の取替
候補技術	5	交換品の長寿命化

現状	
・ FBRプラント設計では、一部の部材については、永久構造物とせず定期的に交換することとなっている。それらの部材の長寿命化を図ることによりプラントのメンテナンスコストの削減が可能である。 ・ 代表的な交換品としては、制御棒、燃料集合体があげられる。制御棒は、現状 1 年程度の寿命しかなく、交換頻度が高いため合理化の程度が大きいと期待される。 ・ 動的機器、BOP 関連では収集のメンテナンス部材（ポンプシール、フィルターなど）がある。これらは定期的に交換しているが、メンテナンスフリーあるいは長寿命化による経済効果は大きい。	
効果	
・ 燃料集合体、制御棒：交換頻度の削減によるメンテナンス費用の削減 ・ 交換頻度の削減による定期検査工程短縮、およびこれに伴う稼働率の向上 対象機器：プラント全般（特に制御棒、燃料集合体） 効果：大	
課題	
・ 燃料集合体、制御棒については照射データの拡充と、クライテリアの見直し ・ 交換品の長寿命化を図った場合の経済性上の効果の定量化（製品コスト、リスクなどとのバランス）	
関連事項	
4. 環境効果と経年劣化, 5-1 維持基準, 8. システム規格, 9. システム規格	

整理No.	6-5-1-6	
大項目	6	維持
中項目	5	その他
小項目	1	
候補技術	6	メンテナンスフリー

現状
メンテナンスを要求される部位としては、ポンプ、弁等の動的機器の可動部、計測器、電機品などが多数を占める。容器・配管などの静的機器は溶接線の I S I 等を除くと、寿命中健全性が確保される設計となっているため、基本的にはメンテナンスフリーといえる。メンテナンスフリーと補修・交換はコスト的に見てトレードオフの関係にあり、メンテナンスフリーを払っても、交換する方がコスト的に得な場合はメンテナンスを実施する。最もコストが掛かる究極としては、メンテナンス無しでは現状技術で保証できない場合である。 静的機器に関連するメンテナンスとしては、配管サポートなどがあげられるが、線量が高くメンテナンスが困難（高価）な場合は、高価なメカニカルスナバを採用し、メンテナンスが容易（安価）な場合はオイルスナバを用いるなどのトレードオフを実施している。 容器や熱交換器などのように現状メンテナンスフリーのものについても、メンテナンス・交換することでそれ以上の投資を回収できれば交換を前提とした静的機器の設計も可能である。そのためには、静的機器に対するの明確な判断基準（ここでは損傷の評価）が可能とならなければならない。
効果
課題
関連事項
材料、溶接、設計評価法 機能健全性の明確化、信頼度の定量化、強度評価法高度化、経年変化および欠陥評価技術、リスク管理手法、法規・規制・規格・基準

整理No.	7-1-1-1	
大項目	7	耐震・免震
中項目	1	耐震
小項目	1	配管耐震評価法の高度化
候補技術	1	配管耐震評価法の高度化

現状
耐震プラントでは地震荷重は変位制御的な荷重と考えられ、その特性に基づく動的応答低減を考慮することにより機器の地震時座屈評価の合理化が可能である。配管に関しては、実証炉設計のトップエントリー式配管について動的応答低減を考慮した地震時座屈評価法が策定されている。 任意形状の一般配管（あるいは実用炉に対応した配管構造）についても同様な効果が期待されるが、十分な検討が行われておらず評価法は合理化されていない。また、実証炉設計時に検討された評価法は基本的にオーステナイト系ステンレス鋼を前提としているため、最新の設計に採用されている高 Cr 鋼配管への適用性検討も必要となる。
効果
座屈制限の合理化及びそれに伴う配管の薄肉化 配管サポートの削減 適用部位：配管全般 効 果：中
課題
任意形状配管への動的応答低減の適用検討 高 Cr 鋼配管への動的応答低減の適用性検討 （免振プラントにおける高度化の必要性を検討必要）
関連事項
3. 設計評価法

整理 No.	7-1-1-2	
大項目	7	耐震・免震
中項目	1	耐震
小項目	1	配管耐震評価法の高度化
候補技術	2	配管評価法の見直し地震荷重

現状	
・ D D S 案では運転状態Ⅳに対して $S_n = \beta (3S_{MH})$, $\beta = 2.5$ の制限を採用している。 ・ 運転状態Ⅰ～Ⅲに対しては膜 (1%), 膜+曲げ (2%), 溶接部はその 1/2 とし, 歪みの制限を設けている。ラチェット疲労の概念を導入することにより, これらの値の合理化をはかることができる可能性がある。 ・ また軽水炉では実験結果をもとにラチェット疲労の概念を導入し, 制限の合理化をはかる動きがある。 ・ 文献: Fujikawa, T. Endou, R. Furukawa, S. Ono, S. Oketani, K., Study on Strength of Piping Components Under Elastic-Plastic Behavior due to Seismic Loading, PVP-vol.387, Seismic Engineering, 1999	
効果	
・ 運転条件Ⅳに対する裕度の引き下げによる低コスト化 ・ 対象: 配管 (溶接部, エルボ) ・ 効果: 中	
課題	
関連事項	
・ 設計評価法	
キーコンセプト: Partial Design Margin, 信頼度の定量化, 強度評価法, 規格・基準, 関連動向	

整理No.	7-1-1-3	
大項目	7	耐震・免震
中項目	1	耐震
小項目	1	配管耐震評価法の高度化
候補技術	3	配管に対するシステム崩壊概念の採用

現状	
日本 JEAG 局部塑性崩壊防止 (S2 : IV_{AS} の許容応力) 圧力+地震慣性 < 3Sm、地震のみ変動応力 < 3Sm 米国 ASME ラチェット疲労破壊の防止 (Level D 許容値の合理化) 圧力+地震慣性 < 4.5Sm、地震相対変位応力 < 6Sm (非弾性解析による場合は、累積ラチェットひずみを 5% に制限 & 繰り返しひずみの制限)	
効果	
・対象機器 配管 ・効果 中 1. ASME 流のラチェット疲労破壊防止に基づき許容値の割増し 2. システム崩壊防止概念を採用して、さらに許容値の割増し 局部崩壊は許容、ただしラチェット疲労またはその他のバウダリー喪失に至る破壊の防止が前提 → サポートコストの軽減	
課題	
1. 国内軽水炉では未だ ASME の採用は審議中？ そのままだは了解できず (設計式が破壊メカニズムと対応していない等) 2. 軽水炉配管に比べ、相対的に薄肉、低圧配管となる FBR 配管の破壊メカニズムデータ蓄積が不十分 3. 許容値割増しにより相対的に従来設計に比べて変位は大きくなるため、配管系の大幅振動が、周辺機器や、各種配管アタッチメントにもたらす影響評価が重要	
関連事項	
・設計評価法 ・システム規格	

整理No.	7-2-2-1	
大項目	7	耐震・免震
中項目	2	3次元免震技術の開発
小項目	2	3次元免震技術
候補技術	1	3次元免震技術

現状
厚肉ラバーベアリング、コイルばね+水平方向ラバーベアリング（3重マット方式）、さらばね+ラバーベアリング、空気バネ+ラバーベアリングなどいくつかの方式が提案されている。 建屋のロッキングモードが発生する問題と、鉛直方向剛性を小さくするために用いるバネなどの水平方向との連成などからくる不確定要因などが実用上の課題となっている。
効果
地震入力低減による薄肉化：物量削減 適用部位： 全般 効果： 大
課題
ロッキングモードの回避
関連事項

整理No.	8-1	
大項目	8	システム規格（コンセプト）
中項目	1	健全性の考え方
小項目		
候補技術		（非バウンダリ機器の破損限界（機能喪失限界）の拡大）

現状
現状の設計では、主要機器においては安全側の配慮としてバウンダリ構成部材以外の部材についてもバウンダリ機器と同等のクライテリアを適用し健全性評価を実施している場合がある。また、重要度の低い機器に対しては、検査程度の低減を前提に厳しいクライテリアを課している場合がある。また、評価作業簡素化のため、保守的なクライテリアを設けている場合もある。これらの機器について、機能喪失を健全性上のクライテリアとして考えその限界を正確に把握すれば、許容応力の向上等設計の合理化が図れる。
効果
許容値の向上。 評価寿命の拡大。 施工・構造の簡易化。 適用部位：非バウンダリ機器全般 効 果：大
課題
具体的なクライテリア及び安全率の設定。 評価手法の開発。
関連事項
3. 設計評価法

整理No.	8-1-1-1	
大項目	8	システム規格（コンセプト）
中項目	1	健全性の考え方
小項目	1	
候補技術	1	非バウンダリ機器の破損限界（機能喪失限界）の拡大

現状	
・伝熱管は現状S_o支配の設計となっている。 S_o値の裕度見直しにより、S_o値向上。	
効果	
・許容値向上による合理化 ・機能健全性、 合理化効果：中 対象機器：SG、IHX	
課題	
関連事項	
・材料、設計評価法、欠陥評価、LBB、システム規格 関連キコンセプト：リスク管理、Partial Design Margin、機能健全性、信頼度、規格・基準、	

整理No.	8-2	
大項目	8	システム規格（コンセプト）
中項目	2	供用期間の考え方
小項目		
候補技術		（機器交換前提の設計）

現状
現状は、想定する供用期間中に機器が破損しないことを設計時に保証しなければならない。このため高価な高強度材料を採用したり溶接線排除のため鍛造材を用いたり熱保護構造や応力緩和構造を設ける等の対策が随所で施されている。さらに、施工においても、工数を掛けてより信頼性の高い工法を採用する等、コストアップの大きな要因となっている。 これに対し、機器の交換を前提とし安価な材料・構造・工法等を採用すれば、場合によってはトータルコストの削減が可能となる。また、機器交換の前提で設計を行えば、実際の取り替え工事において工数の低減等が可能となる。さらに、損傷モニタリングを適用すれば、信頼性の向上、機器寿命の延長が可能となる。
効果
適用可能な機器は限定されるが、使用条件が厳しい機器や寿命確保のため特別な対策を施しているような機器については効果が大きいと考えられる。 適用部位：機器・配管全般 効 果：大
課題
トータルコストの計算 取り替え手法の開発と信頼性の確保
関連事項
3. 設計評価法

整理No.	8-2-1-1	
大項目	8	システム規格（コンセプト）
中項目	2	供用期間の考え方
小項目	1	
候補技術	1	機器交換前提の設計

現状
・ 経済性・健全性の観点から、設計寿命中期において、機器交換することが有利と判断された場合、及びその可能性がある場合は交換を前提とした設計を行う。 ・ ここでの設計とは、機器の裕度設定（強度クライテリア、許容値と裕度の関係区分、製作・検査仕様、配置、モニタリングによる余寿命評価等）を総合的な判断に基づいて行うシステムを示す。 ・ 例えば、安全性、機能性維持の観点から、60年設計を30年設計 x 2の可能性を検討。材料／製作／検査／モニタリング仕様をCクラスとし、30年 x 2とか。 ・ 60年はややきついが、将来の寿命延長（モニタリング評価技術及び交換技術）技術の進展を予測し、モニタリングにより交換時期を判断する対象機器の検討が必要である。 ・ 6-5-1-4 参照
効果
低コスト、機能維持、 合理化効果：中 対象機器：冷却系、配管、
課題
・ 可能性のある対象機器・部位の特定
関連事項
・ 材料、製作・検査、設計評価法、環境効果、経年変化、欠陥評価、LBB、維持、法規・規制、システム規格 関連キーワード：リスク管理、Partial Design Margin、機能健全性、信頼度、品質保証体系、規格・基準、国内外関連動向

整理No.	8-3	
大項目	8	システム規格
中項目	3	運転状態の考え方
小項目		
候補技術		(運転状態分類と評価項目の見直し (運転状態Ⅲ, Ⅳのひずみ制限評価, クリープ疲労制限評価の廃止))

現状
現状のFBR設計では、運転状態Ⅲ, Ⅳにおいてもひずみ制限及びクリープ疲労制限を課している。これらの状態は発生頻度が小さいこと及び事象発生後、運転状態Ⅰ, Ⅱとは異なり機器の補修やプラントの放棄等の対応が取られることから、一部の評価を省略することが考えられる。
効果
特に厳しい少数回事象によりプラントの損傷評価値が支配されるような場合、当該評価を省略することができれば設計の合理化が可能となる。 適用部位：機器・配管全般 効 果：中
課題
評価省略時の健全性確保の確認
関連事項
3. 設計評価法

整理No.	8-3-1-1	
大項目	8	システム規格（コンセプト）
中項目	3	運転状態の考え方
小項目	1	
候補技術	1	運転状態分類と評価項目の見直し（運転状態III、IVのひずみ制限評価、クリープ疲労制限評価の廃止）

現状
・ 運転状態III、IVに対しては過大な変形の防止のみを制限 ・ 運転状態IIIに対しては、適用材料毎に、高温評価（クリープ疲労評価）適用温度を設定。
効果
裕度の拡大、 低コスト化 合理化効果：中 対象機器：RV、1次系
課題
・ FCI評価の廃止可否の議論 ・ 評価廃止対象温度の検討
関連事項
・ 材料、設計評価法、環境効果、維持、法規・規制、システム規格 関連コンセプト：リスク管理、Partial Desibn Margin、信頼度、規格・基準、 国内外関連動向

整理No.	8-3-1-1	
大項目	8	システム規格（コンセプト）
中項目	1	運転状態の考え方
小項目	1	
候補技術	2	運転状態分類と評価項目の見直し

現状																															
現状の高温設計基準は、想定される破損モードならびに運転状態のすべての組合せを網羅し、一次応力制限を除きほぼ同等の安全裕度が考慮されている。これは、高温では残留応力によるクリープ損傷を考慮する必要性が生じたために、発生頻度が少ない運転状態Ⅲ、Ⅳに対してもひずみ制限やクリープ制限を行ったためである。しかしながら、発生頻度が少ない運転状態Ⅲ、Ⅳが設計を支配している現状を見ると、この取扱いについて再検討してみる必要があるものと考えられる。運転状態Ⅲ、Ⅳに対して設計時にひずみ制限、クリープ疲労制限を満足しておく必要があるのか、あるとしても運転状態Ⅰ、Ⅱと同等の安全率を課す必要があるのかについて再議論の余地があるものと考えられる。																															
効果																															
・対象機器 原子炉構造、配管、冷却系、BOP																															
・合理化効果 大																															
冗長性が低い破損モードに対してはすべての運転状態を、冗長性が高い破損モードについては運転状態Ⅰ、Ⅱのみを考慮すれば良いものとする。すなわち、運転状態Ⅲ、Ⅳの累積ひずみやクリープ疲労については起こってから考えるという立場である。これは、熱応力主体のFBRの特質を最大限生かせる概念であると考えられる。熱応力では、発生するひずみ自体限界があり、しかも1回だけではほとんど有意な損傷を生じないから、起こってから考えても間に合う性質のものである。このような事象の影響は、総寿命に影響するものであることから、維持基準で見直していけば十分である。																															
課題																															
・熱応力一回で重大な損傷とならないことについては、事前に十分に検証しておく(設計としてでなく、R&Dとして)。																															
関連事項	<table border="1"><thead><tr><th>運転状態</th><th>Ⅰ</th><th>Ⅱ</th><th>Ⅲ</th><th>Ⅳ</th><th>試験</th></tr></thead><tbody><tr><td>一次応力制限</td><td>○</td><td>○</td><td>○</td><td>○</td><td>○</td></tr><tr><td>ひずみ制限</td><td>○</td><td>○</td><td>△</td><td>△</td><td>○</td></tr><tr><td>クリープ疲労制限</td><td>○</td><td>○</td><td>△</td><td>△</td><td>○</td></tr><tr><td>座屈制限</td><td>○</td><td>○</td><td>○*</td><td>○*</td><td>○</td></tr></tbody></table>	運転状態	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	試験	一次応力制限	○	○	○	○	○	ひずみ制限	○	○	△	△	○	クリープ疲労制限	○	○	△	△	○	座屈制限	○	○	○*	○*	○
運転状態	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	試験																										
一次応力制限	○	○	○	○	○																										
ひずみ制限	○	○	△	△	○																										
クリープ疲労制限	○	○	△	△	○																										
座屈制限	○	○	○*	○*	○																										
・システム規格	○；設計基準と維持基準で健全性評価 *；設計基準では弾塑性座屈のみ。クリープ座屈は維持基準のみ。 △；維持基準で健全性確認																														

整理No.	8-4	
大項目	8	システム規格
中項目	4	機器区分の考え方
小項目		
候補技術		(機器・配管の重要度分類見直し)

現状
現状は安全上の重要度に基づき機器の分類が行われているが、プラントの合理化の観点からは、経済上の重要度も考慮した分類がなされる事が望ましい。
効果
・安全及び経済上の重要度の低い機器の更なる低コスト化 ・経済上重要度の高い機器の高信頼度化 適用部位：機器・配管全般 効果：中
課題
・経済性を考慮した機器の重要度の再分類 ・定量的な指標（リスク）を導入した重要度分類手法の開発
関連事項
3. 設計評価法

整理No.	8-4-1-1	
大項目	8	システム規格（コンセプト）
中項目	4	機器区分の考え方
小項目	1	
候補技術	1	機器・配管の重要度分類見直し

現状	
・ 機器・配管の重要度区分は安全面からの観点のみではなく、機器のメンテナンス性（交換可能性、モータリング適用の可能性等）及び構造の特殊性等を考慮して設定する。 ・ 機器分類をベースにして8-5-1- の裕度の考え方を適用。	
効果	
物量削減、検査工程短縮、 合理化効果：大 対象機器：プラント全体	
課題	
・ 機器区分化及び各種仕様区分化の考え方及び手法の検討 ・ 検討のベースとなる現状での（個別）裕度設定の明確化必要	
関連事項	
・ 材料、製作・検査、設計評価法、環境効果、経年変化、欠陥評価、LBB、維持、法規・規制、システム規格 関連キーワード：リスク管理、Partial Design Margin、機能健全性、信頼度、品質保証体系、規格・基準、国内外関連動向	

整理No.	8-5	
大項目	8	システム規格（コンセプト）
中項目	5	裕度交換の考え方
小項目		
候補技術		（設計から運転・検査までの総合的な裕度評価，確率論に基づく設計裕度の合理化，安全対応設備の合理化，材料～製作～検査工程の一体化，炉～機器～発電機器の設計一体化）

現状
現状の設計基準は，基本的に設計に限定した規準であり，製作・検査あるいは運転開始後のメンテナンスとの関係は明確ではない。また，個々の規格・基準での個別に安全側の設定を行い全体として過度に保守的な評価を行っている恐れがある。このような過度の保守性を排除するためには，材料選定から運転開始後の ISI に至るまでのすべての段階を包括する基準を構築する必要がある。このために，健全性の定量的な指標として例えばリスクを導入する事が考えられる。このとき，各機器における個々の段階での評価値のリスクに及ぼす重要度，影響度からリスクが計算されるが，トータルのリスクがクライテリアを満足する範囲で個々の評価の裕度を調整する事ができる。
効果
各種設計裕度の適正化。安全対応設備の合理化 適用部位：機器・配管全般 効果：大
課題
クライテリアの設定。 確率論的データの取得。 確率論的評価手法の確立
関連事項
3. 設計評価法

整理No.	8-5-1-1	
大項目	8	システム規格（コンセプト）
中項目	5	裕度交換の考え方
小項目	1	
候補技術	1～4	設計から運転・検査までの一体化による総合的な裕度評価

現状
・設計から製作、運転・検査までを一体化し、総合的な裕度評価を行う。 ・設計段階では、炉一構造機器－発電機器を通じて、機器区分と組合せて裕度の重点化/合理化を検討する。重点化の判断には、確率論的手法も適用する。その結果として、安全設備等の充実や合理化が提起され、総合的には物量の合理化を図る。 ・確率論に基づく設計裕度の合理化により、安全対応設備の合理化が可能。 ・また、材料～製作～検査に関する仕様は個別ではなく、機器区分とも関連付けての一体化を行うことで工程の合理化が可能。 例えば、Aクラスの材料仕様に対しては、Aクラスの製作仕様・検査仕様で長い検査間隔 Cクラスの材料仕様に対しては、Cクラスの製作仕様・検査仕様で短い検査間隔 ・機器区分は安全面からの重要度区分の観点に加えて、交換可能性、モックアップ適用の可能性、構造の特殊性等を考慮して設定する。
効果
物量削減、検査工程短縮、 合理化効果：大 対象機器：プラント全体
課題
・機器区分化及び各種仕様区分化の考え方及び手法の検討 ・検討のベースとなる現状での（個別）裕度設定の明確化必要
関連事項
・材料、製作・検査、設計評価法、環境効果、経年変化、欠陥評価、LBB、維持、法規・規制、システム規格 関連キーワード：リスク管理、Partial Design Margin、機能健全性、信頼度、品質保証体系、規格・基準、国内外関連動向

整理No.	8-5-1-2	
大項目	8	システム規格（コンセプト）
中項目	5	裕度交換の考え方
小項目	1	
候補技術	2	確率論に基づく設計裕度の合理化、安全対応設備の合理化

現状

一次応力制限では、引張強さに対して3倍の設計裕度が、クリープ疲労に対しては20倍の設計裕度が考慮されている。ひずみの制限については、膜ひずみ1%、膜+曲げひずみ2%が設定されているが、設計裕度としては明確に示されていない。これらの数値や設計裕度は、約30年前にASMEの規格委員会で工学的に決められたものであり、確率論的手法が進歩した現在にあっては、確率的な見地よりこれらの数値を見直す必要があるものと考えられる。

効果

- ・対象機器 原子炉構造、配管、冷却系機器、BOP
- ・効果 大
設計裕度を定量的に決定することにより過度な裕度が排除される。

課題

- ・確率分布データベースの整備
- ・確率にリンクしたリスクと効果の指標の構築

関連事項

- ・溶接
- ・設計評価法

整理No.	8-6	
大項目	8	システム規格
中項目	6	許容リスク（クライテリアの考え方）
小項目		
候補技術		（安全性・経済性リスクに基づく総合的な健全性評価・機能評価， 各種機器のリスク管理状況調査）

現状
現状の設計基準は，基本的に設計に限定した規程であり，製作・検査あるいは運転開始後のメンテナンスとの関係は明確ではない。また，個々の規格・基準での個別に安全側の設定を行い全体として過度に保守的な評価を行っている恐れがある。このような過度の保守性を排除するためには，材料選定から運転開始後の ISI に至るまでのすべての段階を包括する基準を構築する必要がある。このとき，各機器における個々の段階での規定の重要度，影響度を明確にしていく必要があるが，このための定量的な指標としてリスクが候補となる。リスクに影響を与える各因子については確率論的な評価を取り入れ計算を可能にし，これにより各因子のリスクに対する影響度が明確になり，実質的に現状設定している過剰な安全率の切り下げが可能になると期待される。
効果
設計基準や他の規定の裕度の適正化 適用部位：プラント全般 効果：大
課題
リスク指標の設定 リスクの演算手法の開発 リスク情報の収集
関連事項
3. 設計評価法

整理No.	8-6-1-1	
大項目	8	システム規格（コンセプト）
中項目	6	許容リスク（クライテリアの考え方）
小項目	1	
候補技術	1～2	安全性・経済性リスクに基づく総合的な健全性評価・機能評価

現状	
・リスクは経験の浅いリスクと未経験の行為のリスクがあるが、両者ともに問題の予測と問題に適切に対処する計画や準備（リスク対策）が重要。 ・前者及び後者共に、事前（設計段階）での問題認識が極めて重要であり、総合的な推理（予測）を行うためには、従来プラントでの事故調査と原理・原則の解明及び新規プラントの従来プラントと相違点と理由及び根拠の明確化が必要。 ・設計裕度の設定の考え方、運転管理、運転条件、検査の精度と期間、モニタリング方法と余寿命の評価・管理及び設備の追加、合理化との関連性の明確化により、合理化及び長寿命化を図る。	
効果	
・将来の未経験のトラブル防止に対しては必須課題。 合理化効果：運転以降も含め総合的観点からは、経済性効果大。 対象機器：全般（重要機器に限定しない）	
課題	
・従来事故（トラブル）の要因調査	
関連事項	
・材料、製作・検査、設計評価法、環境効果、経年変化、欠陥評価、LBB、維持、法規・規制、システム規格 関連キーワード：リスク管理、Partial Design Margin、機能健全性、信頼度、品質保証体系、規格・基準、国内外関連動向	

整理No.	8-7	
大項目	8	システム規格（コンセプト）
中項目	7	運転への反映
小項目		
候補技術		（最適運転制御，最適制御・運転の要求）

現状

現状は，構造に発生する応力を抑えるためにプラント熱過渡の調整を行うが，発生応力の最小化を目指した最適化は行っていない。

構造に発生する応力の情報を熱過渡側にフィードバックし，発生応力の観点から最適化を行えば，構造の負担が小さくなり，設計合理化につながる。また，実運転時に熱過渡のモニタリングを実施し，それを運転にフィードバックする事により，発生応力を低減し，長寿命化につなげる事ができる。

効果

応力の低減による設計合理化，長寿命化

対象機器：プラント全般

効 果：大

課題

フィードバック手法の開発

関連事項

整理No.	8-7-1-1	
大項目	8	システム規格 (コンセプト)
中項目	7	運転への反映
小項目	1	
候補技術	1	最適運転制御/最適制御・運転の要求

現状
8-5-1- 及び8-6-1- の考え方にに基づき、機器設計・製作及び運転条件・維持管理への具体化を図る。
効果
合理化効果： 対象機器：
課題
関連事項 ・材料、製作・検査、設計評価法、環境効果、経年変化、欠陥評価、LBB、維持、法規・規制、システム規格 関連キ-コンセプト：リスク管理、Partial Desibn Margin、機能健全性、信頼度、品質保証体系、規格・基準、国内外関連動向

整理No.	8-8	
大項目	8	システム規格（コンセプト）
中項目	8	設備への反映
小項目		
候補技術		（確率論に基づく設計裕度の合理化，安全対応設備の合理化，経済性 リスクに基づく Na 漏洩対策）

現状
現状の設計は，安全系を多重に配置しプラントの安全性を高めているが，それらの設備のプラント全体の安全に対する寄与度は必ずしも明確でなく，過剰に保守的な設備が設けられている事も否定できない。このため，リスクに基づき安全対応設備の評価を行い，プラント全体へのリスク低減に貢献しない設備を削減したり，プラント全体として裕度が大きすぎる場合は適当な設備を削減し，プラントコストを低減する事が考えられる。
効果
冗長設備の合理化。 適用機器：安全系機器 効 果：大
課題
リスク計算手法の開発及び精度向上 PA 対策
関連事項
1 1. 1 プラント概念に関する技術

整理No.	8-8-1-1	
大項目	8	システム規格（コンセプト）
中項目	5	設備への反映
小項目	1	
候補技術	2	確率論に基づく安全対応設備の合理化

現状
現在の安全対応設備は、配管の破断を想定して設計されており、配管破断の確率は考慮されていない。そのために、プラント寿命中に使用される可能性が非常に低い安全対応設備が設置され、プラント建設コストの多くの部分を占めているものと考えられる。そこで、破損確率を基準に安全対応設備の重みを変えることにより、設備の大幅な合理化が図れるものと期待される。
効果
・対象機器 配管、冷却系機器、BOP ・効果 大
課題
・確率分布データベースの整備 ・確率にリンクした安全シナリオの作成 ・リスクと効果の指標の構築
関連事項
・維持 ・欠陥評価と LBB

整理No.	8-8-1-1	
大項目	8	システム規格（コンセプト）
中項目	8	設備への反映
小項目	1	
候補技術	1～2	確率論、経済性リスクに基づく設計裕度合理化及び安全設備対応

現状
8-5-1- 及び8-6-1- の考え方に基づき、機器設計・製作及び運転条件・維持管理への具体化を図る。
効果
合理化効果： 対象機器：
課題
関連事項 ・材料、製作・検査、設計評価法、環境効果、経年変化、欠陥評価、L B B、維持、法規・規制、システム規格 関連キ-コンセプト：リスク管理、Partial Desibn Margin、機能健全性、信頼度、品質保証体系、規格・基準、国内外関連動向

整理No.	8-9-1-1	
大項目	8	システム規格 (コンセプト)
中項目	9	プラントシミュレーション
小項目	1	
候補技術	1	損傷、環境及び運転履歴モニタリング情報の一元化による総合余寿命評価技術の採用

現状	
対象機器を特定し、下記情報をで集約し、強度及び腐食に関する損傷・余寿命評価を行う寿命評価総合システム。予測値は定期検査にて直接測定した情報により修正し精度向上を図る。評価は、組織変化状況一シロ割れ発生状況一割れ進展状況と段階的にシステム化。 集約情報 ・設計条件 (寿命、環境、温度、応力等) ・モニタリング情報 1 (機器運転情報：環境、温度、時間、負荷 他) ・モニタリング情報 2 (オンラインモニタリング情報) ・モニタリング情報 3 (ISI 結果、機器異常情報、サンプリング結果、サーベランス情報、等) 余寿命を評価する手法の定式化が必要。 下記情報の参照 ・グリーン関数を用いたモニタリングー疲労損傷評価システム (LWR) ・GT 高温部品の寿命管理システム ・もんじゅモニタリングシステム ・文献： Hayashi,M. Matsumoto,K. Iki,A., Fatigue Monitoring System for BWR Reactor Pressure Vessel, ASM, 1992	
効果	
長寿命化、信頼性向上、経年劣化評価、寿命管理上不可欠な技術。) 合理化効果：大 対象機器：配管、SG、熱交、容器液面近傍	
課題	
・モニタリング方法の開発、モニタリング情報を基にした寿命評価手法の構築 ・総合的余寿命診断技術の開発	
関連事項	
環境効果と経年劣化、維持、システム規格、関連情報 関連キーワード：国内外の関連動向、リスク管理、Partial Design Margin、機能健全性 信頼度の定量化、合理的品質保証体系、経年変化、欠陥評価、その他	

整理No.	8-9-1-2	
大項目	8	システム規格（コンセプト）
中項目	9	プラントシミュレーション
小項目	1	
候補技術	2	数値エンジニアリングモデルに基づく設計手法の開発

現状

各機器の各部位毎で解析を行っている。また、熱流動解析と構造解析は連成されておらず、熱流動解析結果から熱過度条件を安全側に決定している。構造解析においても、部位間の相互作用は考慮されておらず、それぞれが安全側となるようにモデル化している。この原因としては、解析できるモデルの規模が計算機能力から限定されており、数万自由度規模の解析モデルが限界であった。

現在、1億自由度級の解析を目指した文部省の ADVENTURE プロジェクト、「地球シミュレータ」の開発を目指した（財）高度情報科学技術研究機構の GeoFEM プロジェクトが進行中である。

効果

・対象機器 原子炉構造、配管、冷却系機器

・効果 中

構造機器などを丸ごと解析が可能となり、解析の信頼性の向上により現在の設計裕度の切詰めが可能、また、高価な試作や実施試験を計算に置き換えることが可能となり、経済性の向上に資することができる。

課題

- ・超並列計算機上で稼働する有限要素解析システムの開発
- ・材料モデル、流体・構造連成モデル等の開発が必要
- ・解析の精度向上に見合った入力条件の高精度化

関連事項

- ・設計評価法

整理N o.	8-10-7-1	
大項目	8	システム規格
中項目	10	認証
小項目	7	
候補技術	1	interim certification の採用

現状
certificate 期間（認証期間）を区切り、その時点で検査・補修・交換を実施して、次の認証期間中の健全性を評価確認し、認証を更新するシステム。 現状のプラント・設計運転における保守・補修や試験炉、原型炉における確認のスタンスをより明確にし、コストにも反映することを考える。
効果
開発費削減 実績評価による交換頻度：想定される発生頻度と設計上考慮する発生頻度が大きく異なる場合、認証期間を区切ることにより設計上考慮する発生頻度を低減させてコスト低減を図り、かつ実績評価によりその寿命延長を図る。設置者のリスク有り。 適用部位： 全般 効果： 大
課題
損傷評価技術の確立、法的対応
関連事項
機能健全性の明確化、信頼度の定量化、強度評価法高度化、経年変化および欠陥評価技術、リスク管理手法、法規・規制・規格・基準

整理No.	9-1	
大項目	9	システム規格 (部分基準の選択肢)
中項目	1	負荷想定
小項目		
候補技術		(設計条件のノミナル化 (荷重, etc.), 統計手法による熱流動-構造健全性評価法)

現状
現状の設計では、解析結果に不確定性が高いためプラント熱過渡解析結果から得られた熱過渡を応力的に厳しくなるようなモデル化 (折れ線化) を行い、熱応力解析の条件としている。このため、設計評価においては、一般に現実より非常に厳しい応力を発生させて健全性評価を行っている。このため、解析精度を向上させてプラント熱過渡解析の解析結果を直接熱応力解析に利用できるようになれば、発生応力は大幅に低減することになる。さらに、統計的手法を用い過渡のバラツキを考慮すれば、当該手法の高信頼化につながる。
効果
運転条件、過渡条件の許容値の緩和 適用部位：機器・配管全般 効果：大
課題
プラント熱過渡解析の精度向上 熱流動解析の精度向上
関連事項
3. 設計評価法

整理 No.	9-1-1-1	
大項目	9	システム規格（部分基準の選択肢）
中項目	1	負荷想定
小項目	1	想定 of 区分化
候補技術	1	設計条件 of ノミナル化

現状	
・ 現状は運転状態Ⅰ～Ⅳの負荷条件および想定回数を用いた設計となっている。 ・ 負荷荷重としては、圧力、自重、熱荷重、地震荷重があり、熱荷重及び地震荷重は不確定要因の考えを取り入れている。 ・ 熱荷重に関しては、熱過度解析による最大値を使用することで、ノミナル化を図る。 ・ ノミナル化により設計効率の向上を図ることができれば、低コスト化を図ることができる。ただし熱過度解析の実施は必須である。	
効果	
・ 設計条件の緩和 ・ 設計効率の向上による低コスト化 ・ 許容値の適正化による低コスト化 ・ 対象：RV，1次系，2次系 ・ 効果：大	
課題	
・ 熱過度解析の確認	
関連事項	
設計評価法	
キーコンセプト：機能健全性，信頼度の定量化，経年変化・欠陥評価，規格・基準，関連動向	

整理No.	9-1-1-1	
大項目	9	システム規格
中項目	1	負荷想定
小項目	1	想定の区分化
候補技術	2	統計手法による熱流動－構造健全性評価法

現状
すべてのシステムパラメータの最も厳しい組み合わせが重なった場合の熱過渡を「包絡」し、構造物の応力が大きめに出る様な熱過渡設定を行う（温度勾配の倍率α、温度変化幅の倍率βなどを用いた方法）。また、想定する事象について毎回最も厳しい組み合わせで発生すると想定する。 統計的手法を用いることにより、過度な包絡を無くし（最も厳しいケースを特定する）、発生応力もそのパラメータとなる因子の発生頻度に応じて統計的に設定する（最も厳しい組み合わせが毎回来るわけではない）。
効果
物量削減、熱過渡荷重の許容量増加：繰り返し増加による長寿命化、運転性の向上等 熱過渡の影響度を把握し上流側へのフィードバックすることによる設計最適化。 適用部位： 全般 効果： 大
課題
統計手法の確率および適用範囲の確認
関連事項
維持、システム規格－運転への反映 機能健全性の明確化、信頼度の定量化、強度評価法高度化、

整理No.	9-2	
大項目	9	システム規格（部分規準の選択肢）
中項目	2	材料
小項目		
候補技術		（材料規格の詳細化による強度基準値の引き上げ，機器の重要度分類に応じた材料仕様の区分化と検査仕様区分化，材料，製作仕様区分化（区分絞り込み），プラントの概念に応じた適性材料の採用）

現状

現状は規定された材料仕様範囲内の製品では同一の強度基準を用いる事になるが，その仕様を詳細化する事によりより優れた仕様の材料を実力通りに評価して使用する事ができる。

また，現状は，定められた機器の区分毎に使用する材料の検査程度や強度等が基準に定められている。これに対し，リスク評価に基づき安全上または経済性上の重要度の応じて強度・検査程度・コストが適切な材料を用いる事が望まれる。さらに，現状は機器区分毎に保守的な安全率が設定されているが，材料毎に検査程度や製作仕様に応じた値に設定する事ができれば，設計・製作の自由度が広がりコスト低減につながる。

効果

・材料コストの最適化

適用機器：機器・配管全般

効果：中

課題

・材料データの取得

・材料強度，検査等のプラントリスクへの寄与度の把握

関連事項

1. 材料

整理 No.	9-2-1-1	
大項目	9	システム規格（部分基準の選択肢）
中項目	2	材料
小項目	1	規格の区分化
候補技術	1	材料規格の詳細化による強度基準値の引き上げ

現状	
・ 機器に対して適正な区分化をおこない、材料規格の分類との対応付けをおこなうことにより、強度基準値の適正な設定が可能である。 ・ 重要度の高い機器では強度基準値の設定によってはコスト増となるため、重要度の低い機器の基準値とのバランスが重要である。 ・ 材料規格の詳細化にともなうコストの見積もりが必要である。 ・ 材料仕様の区分化は、特性（成分、強度）を事前に確認するか否かで、その結果は裕度の考え方及びリスクの認識に係わる。また、区分化によるコストは製造する材料物量（板、管）や形状（鍛造）とも関連する。 ・ 区分化は3レベル位が妥当か。 - A：詳細成分規定及び検査項目（裕度削減，許容値アップ） - B：Aより成分規定及び検査項目を落とす (特性はAと変わらない？。未確認項目に対する裕度アップ，リスク評価) - C：JIS仕様	
効果	
・ 強度基準値の適正化による低コスト化，材料のトータルコスト低減 ・ 対象：全般（対象を絞っては効果がない），効果：中	
課題	
・ 機器区分の設定 ・規制との関連	
関連事項	
材料， 製作・検査， 経年変化， 維持 キーコンセプト：機能健全性，信頼度の定量化，経年変化・欠陥評価，規格・基準，関連動向 品質保証体系	

整理 No.	9-2-1-2	
大項目	9	システム規格（部分基準の選択肢）
中項目	2	材料
小項目	1	規格の区分化
候補技術	2	機器区分に応じた材料仕様の区分化と検査仕様区分化

現状	
・ 材料仕様の区分化にあたっては、9-2-1-1 との対応を考慮しなければ、重要機器の設計裕度が増加するだけになってしまうため、強度基準値との対応付けが必要となる。 ・ 検査仕様の区分化により、重要度の低い機器での検査工程の省力化が可能である。 ・ 重要度の高い機器と低い機器間でのバランスが重要である。 ・ 材料仕様と検査仕様の組合せでトータルコストを低減する方策を検討。 ・ 検査仕様はモニタリングに係わる部分を除いて3レベル程度を想定。 ・ 余寿命評価のためのモニタリングが別途仕様を設定。ただし、定期検査仕様との整合性は必要である。	
効果	
・ 検査工程の省力化による低コスト化 ・ モニタリングによる検査工程管理 ・ 対象：全般 ・ 効果：大	
課題	
・ 重要度の高い機器と低い機器間でのバランス	
関連事項	
材料、 製作・検査、 経年変化、 維持 キーワード：機能健全性、信頼度の定量化、経年変化・欠陥評価、規格・基準、関連動向 品質保証体系	

整理 No.	9-2-1-3	
大項目	9	システム規格（部分基準の選択肢）
中項目	2	材料
小項目	1	規格の区分化
候補技術	3	材料，製作仕様クラス区分化（区分絞り込み）

現状	
- 仕様クラスの区分化にあたっては，9-2-1-1および9-2-1-2との組み合わせによりトータルコストが低減できるよう考慮しなくてはならない。 - 機器の区分化をおこない，材料規格の分類との対応付けをおこなうことにより，強度基準値の適正な設定が可能であり，機器区分との相関性が必要である。 - 製作の仕様は加工，溶接，組立て仕上げ毎にその程度を区分化することが適切である。 - 仕上げは，見た目を重要視しがちであるが，機能に影響しない範囲では荒らしあげでも可能なようにする。（規制との関連及び規制排除の方策検討）	
効果	
- 設計裕度の適正化による低コスト化 - 対象：全般 - 効果：大	
課題	
機器の区分化	
関連事項	
材料， 製作・検査， 経年変化， 維持 キーワード：機能健全性，信頼度の定量化，経年変化・欠陥評価，規格・基準，関連動向 品質保証体系	

整理 No.	9-2-1-4	
大項目	9	システム規格（部分基準の選択肢）
中項目	2	材料
小項目	1	規格の区分化
候補技術	4	プラントの概念に応じた適正材料の採用

現状	
・ プラントの運用形態を明確化し， 起動回数頻度小，長時間連続運転→クリープ強度の高い材料 起動回数頻度大，短時間運転 →低サイクル疲労強度の高い材料 を適用することにより，適正材料の選定を図ることが可能であると思われる。 ・ プラント概念に応じた適用材料の選定により，経済性，健全性を確保。材料選定には，強度特性と共に物性値特に熱抵抗性を考慮する。 低温・低コストプラント : 既存材料の使用 高温・高性能プラント : 高強度新材料の適用 高温・低コストプラント : 高強度新材料の適用範囲工夫	
効果	
・ 適正な材料の使用による長寿命化 ・ 適正な材料の使用による低コスト化 ・ 対象：全般 ・ 効果：大	
課題	
・ プラント概念の明確化	
関連事項	
材料， 製作・検査， 強度評価法， 環境効果， 経年変化， 維持 キープコンセプト：機能健全性，信頼度の定量化，経年変化・欠陥評価，規格・基準，関連動向 品質保証体系	

整理No.	9 - 3	
大項目	9	システム規格（部分規準の選択肢）
中項目	3	溶接
小項目		（規格の区分化）
候補技術		

現状
現状は、告示 501 号、省令 81 号等により、実機に用いられる継手形状や施工法が限定されている。ところで、継手形状や施工法に等級を設けそれぞれに適切な適用箇所や安全率等を設定した上で適用を認めれば、応力の低い箇所や重要度の低い箇所での施工の容易な溶接が可能となり、製作コストが低減可能となる。逆に、TIG 等の信頼性の高い施工を行った継手については、安全率の低減等の検討の余地がある。
効果
強度上重要度の低い箇所の継手の低級化。 高信頼継手の安全率の低減。 適用部位：機器・配管全般 効 果：中
課題
継手形状、施工法の強度・信頼性確認
関連事項
2. 1 溶接, 10. 1 法規・規制

整理 No.	9-3-1-1	
大項目	9	システム規格（部分基準の選択肢）
中項目	3	溶接
小項目	1	規格の区分化
候補技術	1	

現状	
・ 溶接規格の区分化に当たって、より簡便な溶接構造、および溶接方法の選定をおこなうことにより、工程を省力化し低コスト化を図ることができる。 ・ 機器区分に対応した製作使用区分化を行う。ただし、溶接に関しては規制側の制限の配慮が必要。 ・ 製作仕様は加工、溶接、組立て仕上げ毎にその度を区分化する。 ・ 仕上げは、見た目を重要視しがちであるが、機能に影響しない範囲では荒らしあげでも可能なようにする。（規制との関連及び規制排除の方策検討） ・ 表面の荒らし上げに当たっては、機器の区分、発生応力および環境温度を考慮し、き裂発生、進展に対する影響を評価する必要がある。	
効果	
・ 製作、溶接工程の省力化による低コスト化 ・ 対象：機器全般、配管（溶接部） ・ 効果：大	
課題	
・ 機器区分化 ・ 規制との関連	
関連事項	
材料、 製作・検査、 経年変化、 維持、 法規・規制 キーコンセプト：機能健全性、信頼度の定量化、経年変化・欠陥評価、規格・基準、関連動向 品質保証体系	

整理No.	9-4	
大項目	9	システム規格（部分基準の選択肢）
中項目	4	設計
小項目		（規格の区分化）
候補技術		

現状
現状は機器の重要度分類に応じ、強度設計の程度を変化させている。具体的には、重要度の高い機器に対しては詳細な解析を要求し、重要度の低い機器に対しては簡易な評価を許容している。同時に、詳細な解析を実施した場合は、許容値を緩和している。このため、重要度の低い機器に対しても詳細な解析を実施したり、またより精度の高い評価手法を開発すれば、許容値を緩和させる事ができ、設計の合理化につながる。 また、それらのような評価を行っている機器に対して、検査を手厚く行う等トータルのリスクを低減させれば、強度上の許容値を緩和する事ができる。
効果
・許容値緩和による設計合理化 対象機器：機器・配管全般 効 果：大
課題
・機器の重要度分類の見直し ・簡易評価手法の高精度化 ・リスク評価法の開発
関連事項
3. 設計評価法

整理 No.	9-4-1-1	
大項目	9	システム規格（部分基準の選択肢）
中項目	4	設計
小項目	1	規格の区分化
候補技術	1	

現状
・ 機器区分とリンクした 裕度の確保（許容値の考え方） 評価項目の限定 材料／製作／溶接／検査 の適用仕様 を総合的に規定することで総合的な区分化が可能である。 区分化に当たっては、材料、製作仕様クラスおよび検査仕様の区分化との関連を考慮した、 トータルコスト低減を図ることが必要である。
効果
・ 設計裕度の適正化による低コスト化 ・ 仕様一体化による工数削減 ・ 対象：全般 ・ 効果：大
課題
・ 機器の区分化 各種仕様の区分化
関連事項
材料， 製作・検査， 強度評価， 経年変化， 環境効果， 維持， 法規・規制 キーワード：機能健全性，信頼度の定量化，経年変化・欠陥評価，規格・基準，関連動向 品質保証体系

整理No.	9-5	
大項目	9	システム規格（部分規準の選択肢）
中項目	5	製作
小項目		（規格の区分化）
候補技術		（製作精度の緩和）

現状
現状の機器設計・製作においては、強度・機能上の要求及び取り付け条件等により、極めて厳しい製作精度が要求されている。このために工数が増えたり高価な治具を用いる事などにより、機器の製作コストが膨らんでいる。このため、機器に要求される製作精度を緩和できれば、大幅なコストダウンが可能である。
効果
機器製作工数・コストの低減。 適用部位：機器・配管全般 効果：大
課題
強度上・機能上の要求条件の適正化 取り付け条件の融通
関連事項
2. 2 製作

整理 No.	9-5-1-1	
大項目	9	システム規格（部分基準の選択肢）
中項目	5	製作
小項目	1	規格の区分化
候補技術	1	製作精度の緩和

現状	
・ 製作精度の緩和により、組み立て性への影響、また過度な変位制御型荷重が作用することが予想されるため、緩和の度合いが重要である。 ・ 溶接製作精度の緩和によって設計時において、より簡便な溶接構造、および溶接方法の選定をおこなうことにより、コストの低減を図ることができる。 ・ 組み立てへの影響、及び機能性への影響（例えば隙間腐食等）がない範囲では、表面仕上げも含めた精度は要求しないことで製作の合理化が可能。 ・ 仕上げは、見た目を重要視しがちであるが、機能に影響しない範囲では荒ら仕上げでも可能なようにする。（規制との関連及び規制排除の方策検討） ・ ただし、表面の荒ら仕上げに当たっては、機器の区分、発生応力および環境温度を考慮し、き裂発生、進展に対する影響を評価する必要がある。	
効果	
・ 設計レベルでの溶接手法の適正選択による低コスト化 ・ 工数削減 ・ 対象：配管（溶接部、エルボ部）、効果：中	
課題	
・ 溶接製作精度の区分化 ・ 精度を要求しない部位の選定 ・ 製作仕様への反映	
関連事項	
材料、 製作・検査、 強度評価、 経年変化、 環境効果、 維持、 法規・規制 キーコンセプト：機能健全性、信頼度の定量化、経年変化・欠陥評価、規格・基準、関連動向 品質保証体系	

整理No.	9-6	
大項目	9	システム規格（部分規準の選択肢）
中項目	6	使用前検査
小項目		（規格の区分化）
候補技術		

現状
FBR は低圧であるが、現状軽水炉並みに耐圧試験が行われる。しかし、1 次系容器に関しては耐圧は本質的に重要ではないため、試験を省略する事が考えられる。
効果
耐圧試験省略 対象機器：容器 効 果：小
課題
耐圧試験不要のロジックの作成
関連事項
10.1 法規・規制

整理 No.	9-6-1-1	
大項目	9	システム規格（部分基準の選択肢）
中項目	6	使用前検査
小項目	1	規格の区分化
候補技術	1	材料仕様区分化による検査仕様の採用

現状
・ 9-2-1-1, 9-2-1-2との組み合わせにより検査工程の省力化が期待できる。 ・ 検査仕様の区分化により、重要度の低い機器での使用前検査工程の省力化が可能である。 ・ 重要度の高い機器と低い機器間でのバランスが重要である。 ・ 材料仕様と検査仕様の組合せでトータルコストを低減する方策検討。 ・ 検査仕様はモニタリングに係わる部分を除いて3レベル程度想定する。 ・ 余寿命評価のためのモニタリングが別途仕様を設定。ただし、定期検査仕様との整合性は必要である。 ・ 8-5-1-1 参照のこと。
効果
・ 検査工程の省力化による低コスト化。 ・ 対象：全般 ・ 効果：大
課題
・ 機器の区分化
関連事項
材料, 製作・検査, 強度評価, 経年変化, 環境効果, 維持, 法規・規制 キーコンセプト: 機能健全性, 信頼度の定量化, 経年変化・欠陥評価, 規格・基準, 関連動向 品質保証体系

整理No.	9-7	
大項目	9	システム規格（部分規準の選択肢）
中項目	7	モニタリング
小項目		（規格の区分化）
候補技術		（モニタリング手法区分化と検査仕様区分）

現状
損傷モニタリングを行う際に、モニタリング対象の重要度や損傷の度合いに応じてサンプリングの頻度や内容、計測位置等を定める事により、計測コストを低減させる事ができる。
効果
モニタリングコストの低減 対象機器：機器・配管全般 効果：中
課題
モニタリング技術の開発 リスク計算手法の開発
関連事項
2. 製作・検査

整理 No.	9-7-1-1	
大項目	9	システム規格（部分基準の選択肢）
中項目	7	モニタリング
小項目	1	規格の区分化
候補技術	1	モニタリング手法区分化と検査仕様区分

現状	
・ 精度およびコストの点からモニタリング手法を区分化し、機器の区分に応じたモニタリング手法を設定することにより、機器の劣化、損傷を区分に応じて検出することができ、長寿命化および高信頼性化を図ることができる。 ・ モニタリング手法の適切な選択により、コストを抑制することができる。 ・ モニタリングで注視している機器に対しては、逆に定検時の作業を簡素化できる可能性もあると考えられる。 ・ 定検にて得られた情報はモニタリングによる予測値の補正に使用し、精度向上を図る。したがって、モニタリング精度確保の観点から、機器毎後の定検期間を設定することも考慮する。	
効果	
・ モニタリング手法の適正採用による低コスト化 ・ 検査工程の省力化による低コスト化 ・ 対象：機器限定（配管，1次系，次系） ・ 効果：大	
課題	
・ 精度，コストなどを考慮したモニタリング手法の区分化 ・ モニタリングデータの余寿命予測技術への導入	
関連事項	
材料， 製作・検査， 強度評価， 経年変化， 環境効果， 維持， 法規・規制 キープコンセプト：機能健全性，信頼度の定量化，経年変化・欠陥評価，規格・基準，関連動向 品質保証体系	

整理No.	9-8	
大項目	9	システム規格（部分規準の選択肢）
中項目	8	供用中検査
小項目		（規格の区分化）
候補技術		（リスク情報に基づく検査，確率論に基づく検査，設計との対応の明確化）

現状
近年，米国ではリスク情報に基づき機器の ISI 頻度を定め，作業の合理化を図ろうとしている。即ち，プラントの安全に影響を及ぼす影響の高いもの，頻繁に故障・破損するものの検査頻度を高くし，それら以外の頻度を低くしようというものである。国内でも，軽水炉の ISI について検討が行われている。 FBR においても，コストミニマムで一定水準のプラントの安全性または経済性を保証するには，同様な手法が採用される事が望まれる。さらに，システム規格の中では，材料，設計，PSI,モニタリング等ともリンクし，全体の安全性確保のコスト低減を図る事が可能となる。
効果
・検査頻度の低減（一定水準以上の安全性確保） 適用機器：機器・配管全般 効 果：大
課題
リスク情報の収集 リスク計算手法の開発
関連事項
2. 製作・検査

整理 No.	9-8-1-1	
大項目	9	システム規格（部分基準の選択肢）
中項目	8	供用中検査
小項目	1	規格の区分化
候補技術	1	

現状	
・ 検査仕様の区分化により、重要度の低い機器での供用中検査の省力化が可能である。 ・ 供用中の材料劣化を検査により検出し、劣化が顕著となったことが確認された段階で、劣化の度合いについて高温損傷評価技術によってリスク評価をおこない、許容欠陥、定検間隔などの検査基準を適正化することができる。 ・ 重要度の高い機器と低い機器間でのバランスが重要である。 ・ 検査仕様はモニタリングに係わる部分を除いて3レベル程度想定する。 ・ 余寿命評価のためのモニタリングについて別途仕様を設定。ただし、定期検査仕様との整合性は必要である。	
効果	
・ 対象：全般 ・ 効果：大	
課題	
・ 精度，コストなどを考慮した供用中検査手法の区分化 ・ 検査データの余寿命予測技術への導入	
関連事項	
材料， 製作・検査， 強度評価， 経年変化， 環境効果， 維持， 法規・規制 キーコンセプト：機能健全性，信頼度の定量化，経年変化・欠陥評価，規格・基準，関連動向 品質保証体系	

整理 No.	9-8-2-1	
大項目	9	システム規格（部分基準の選択肢）
中項目	8	供用中検査
小項目	2	リスク情報に基づく検査
候補技術	1～2	リスク評価に基づく合理的検査基準の開発及びリスク情報による検査

現状
・ 材料の検査およびモニタリングにより劣化を検出し、劣化が顕著となったことが確認された段階で、劣化の度合いについて高温損傷評価技術によってリスク評価をおこない、許容欠陥、定検間隔などの検査基準を適正化することができる。 ・ 設計段階での予想リスクに応じた検査及びモニタリング仕様（内容、頻度、等）を設定し、共用期間での運転情報・検査情報を基に評価を見直し、リスク軽減化を図る。 ・ モニタリングデータに対して確率論的アプローチにより、リスクの想定事象および発生頻度を求めることができる。
効果
・ 検査基準の適正化による長寿命化 ・ 検査間隔の適正化による低コスト化。 ・ 検査情報からのリスク評価の精度向上による低コスト化 ・ 対象： 機器限定（R V， 1次系， 2次系），効果： 大
課題
・ 劣化モニタリング， 検出技術 ・ 高温損傷評価技術 ・ リスク評価に寄与する検査手法（情報取得方法） ・ リスクの事象および発生確率の明確化
関連事項
材料， 製作・検査， 強度評価， 経年変化， 環境効果， 維持， 法規・規制 キーワード： リスク管理， Partial Design Margin， 信頼度の定量化， 強度評価法， 経年変化・品質保証体系， 欠陥評価， 規格・基準， 関連動向

整理No.	9-8-2-1	
大項目	9	システム規格（部分基準の選択肢）
中項目	8	供用中検査
小項目	2	リスク情報に基づく検査
候補技術	1	リスク評価に基づく合理的検査基準の開発

現状
機器種別毎に検査項目が規定。使用条件、負荷応力に応じた重みは考慮されない。 米国ではリスクベースの評価が検討され、安全性、健全性を維持しつつ、供用中検査に要する資源の効果的かつ定量的な活用を図っている。現在、下記の Code Case が Sec.XI に適用する手法として発行されている。 N-560(Alternative Examination Requirement for Class 1, Category B-J Piping Welds, Sec.XI, Div.1)-1996 EPRI が開発した本格的なリスクベース手法。現行 ISI 計画の代替案策定についての要求を規定。 N-577(Risk-Informed Requirement for Class 1,2 and 3 Piping, Method A, Sec.XI, Div.1)-1997 ASME 方式と呼ばれ、本格的な解析に基づく説得性の高い本格的な手法であるが、複雑で工数を要する。 N-578(Risk-Informed Requirement for Class 1,2 and 3 Piping, Method B, Sec.XI, Div.1)-1997 EPRI 方式と呼ばれ、これまでに蓄積されたデータベースを有効に活用し、N-577 に比べて実用的ではあるがやや定性的な評価となる。 規制側も以下の RG(規制方針)を目指した DR(ドラフト)を発行している。 RG1.174(DG1061) ; 一般的なリスクインフォームドガイダンス RG1.175(DG1062) ; 供用期間中検査方法 RG1.176(DG1064) ; グレード別品質保証 RG1.177(DG1175) ; 技術仕様書 RG1.178(DG1063) ; 供用期間中評価方法 米国石油学会は、下記の指針化と評価アプリケーションの開発を終えている。 API-580 Risk Based Inspection
効果
・対象機器 配管、冷却系機器 ・効果 大 要素数 890 の内、Sec.XI の検査要求箇所 161→リスクベース 16 箇所(被爆量 1/15)
課題
・確率データベースの整備 ・許容値についてのコンセンサス形成
関連事項
・5-4-1-1 確率的欠陥評価技術 ・9-8-3-1 確率論にもとづく検査部位、検査期間の合理的設定

整理 No.	9-8-2-2	
大項目	9	システム規格（部分基準の選択肢）
中項目	8	供用中検査
小項目	2	リスク情報に基づく検査
候補技術	2	リスク情報に基づく検査

現状	
- 各機器に対するリスク情報を求めることで、機器の区分に応じたリスクの想定事象および発生頻度を求めることができる。 - 機器の区分およびリスクの事象、頻度に対する評価結果によっては、次回定検までの運転計画を適正化できる可能性がある。 9-8-2-1 参照のこと。	
効果	
- 検査基準の適正化による長寿命化 - 検査基準の適正化による低コスト化。 - 対象：全般 - 効果：大	
課題	
- 劣化モニタリング，検出技術 - 高温損傷評価技術 - 機器の区分化 - リスクの事象および発生確率の明確化	
関連事項	
材料， 製作・検査， 経年変化， 環境効果， 維持， 法規・規制 キーコンセプト：リスク管理， Partial Design Margin， 信頼度の定量化， 強度評価法， 経年変化・品質保証体系， 欠陥評価， 規格・基準， 関連動向	

整理 No.	9-8-3-1	
大項目	9	システム規格（部分基準の選択肢）
中項目	8	供用中検査
小項目	2	確率論に基づく検査
候補技術	1	確率論に基づく検査部位，検査期間の合理的設定

現状
・ 解析により応力状態，温度状態，その他の環境状態が同等と思われる部位をデータベース化し，確率論に基づくサンプリングにより選定した個所について検査およびモニタリングをおこなうことで，検査部位を低減することが期待できる。 ・ 欠陥の成長シミュレーションにばらつきの考慮を導入することにより，定検間隔の適正化を図ることができる。 ・ 軽水炉における確率論を導入した評価手法の調査が必要である。 ・ 適切なサンプリング手法の選定が重要である。 ・ 共用期間中での検査及びモニタリング情報により，確率論により設定した条件変更により，その後の精度を向上させる。
効果
・ 検査対象個所の低減による低コスト化 ・ 検査間隔の適正化による低コスト化 ・ 対象：機器限定（RV，1次系，2次系） ・ 効果：大
課題
・ サンプリング手法の選定 ・ 欠陥成長シミュレーション技術 ・ 損傷に対する確率論の導入
関連事項
材料， 製作・検査， 経年変化， 環境効果， 維持， 法規・規制 キーワード：機能健全性，信頼度の定量化，強度評価法，経年変化・欠陥評価，規格・基準，品質保証体系， 関連動向

整理 No.	9-8-4-1	
大項目	9	システム規格（部分基準の選択肢）
中項目	8	供用中検査
小項目	4	設計との対応明確化
候補技術	1	検査要求項目と機器の設計との対応の明確化

現状
・ 検査仕様の区分化により、重要度の低い機器での供用中検査の省力化が可能である。 ・ 省力化が可能な機器に対しては、検査の実行性を多少失っても低コスト構造を採用することが可能である。 ・ 供用中の材料劣化を検査により検出し、劣化が顕著となったことが確認された段階で、劣化の度合いを高温損傷評価技術によってリスク評価をおこない、許容欠陥、定検間隔などの検査基準を適正化することができる。 ・ 重要度の高い機器と低い機器間でのバランスが重要である。 ・ 検査仕様はモニタリングに係わる部分を除いて3レベル程度想定する。
効果
・ 検査工程の簡素化による低コスト化 ・ 対象：全般 ・ 効果：中
課題
・ 検査を前提とした設計の採用と信頼性確保の両立 ・ 材料劣化検出技術
関連事項
キーワード：機能健全性，信頼度の定量化，強度評価法，経年変化・欠陥評価，規格・基準，関連動向

整理No.	9-8-4-1	
大項目	9	システム規格（部分基準の選択肢）
中項目	8	供用中検査
小項目	4	設計との対応明確化
候補技術	1	検査要求項目と機器区分の対応の明確化

現状
現状の設計基準では、機器区分が行われ、機器区分に応じた検査が行われている。しかしながら、FBR では熱応力が支配的であり、機器区分に関わらず「解析に基づく設計」が適用され、それに応じて検査も第1種機器に対する基準が適用されている。 しかしながら、機器の設計で用いた手法と検査をリンクさせるのは過剰な品質であり、機器区分と検査要求項目の関係を明確にしておく必要がある。
効果
- 対象機器 冷却系機器、BOP - 効果 中 機器区分に応じた検査要求項目を明確にすることで、適度な検査を合理化できる。
課題
設計手法と検査要求項目の関連の確認
関連事項
- 溶接 - 設計評価法

整理 No.	9-8-4-2	
大項目	9	システム規格（部分基準の選択肢）
中項目	8	供用中検査
小項目	4	設計との対応明確化
候補技術	2	材料データによる設計裕度，検査仕様の区分化

現状	
・ 9-2-1-1，9-2-1-2 参照 ・ 1-2-2-3 及び 1-2-3-1 の考え方（材料製造技術の向上，ばらつきの低減）を導入。 ・ 検査仕様の区分化により，重要度の低い機器での供用中検査の省力化が可能である。 ・ 供用中の材料劣化を検査により検出し，劣化が顕著となったことが確認された段階で，劣化の度合いについて高温損傷評価技術によってリスク評価をおこない，許容欠陥に対する基準を適正化することができる。 ・ 重要度の高い機器と低い機器間でのバランスが重要である。 ・ 余寿命評価のためのモニタリングについて別途仕様を設定。ただし，定期検査仕様との整合性は必要である。 ・ 取得データの量及びデータのばらつき，並びに取得データから考えられる外挿性の精度等を考慮した裕度設定，検査仕様設定を行う。	
効果	
・ 設計裕度削減 ・ 強度基準値の適正化による低コスト化 ・ 対象：全般，効果：大	
課題	
・ データのばらつき要因の整備と将来予測	
関連事項	
材料， 製作・検査， 強度評価， 経年変化， 環境効果， 維持， 法規・規制 キーコンセプト：機能健全性，信頼度の定量化，強度評価法，経年変化・欠陥評価，規格・基準， 関連動向	

整理No.	9 - 9	
大項目	9	システム規格（部分規準の選択肢）
中項目	9	予寿命評価仕様
小項目		（評価の区分化）
候補技術		（機器区分による予寿命評価手法の選定）

現状
損傷や環境及び運転履歴のモニタリング情報を一元化し精度の高い予寿命評価を実施する事により、機器の寿命管理を行う事ができる。モニタリング情報に基づき、寿命に悪影響を及ぼす因子を除去・低減する事により長寿命化が図れる。また、機器の重要度や損傷の程度によりモニタリングの程度を調整すれば、モニタリングコストの低減につながる。
効果
・ 機器の長寿命化 ・ モニタリングコストの低減 適用機器：機器・配管全般 効 果：中
課題
・ 予寿命評価技術の高度化 ・ モニタリング技術の開発
関連事項
2. 製作・検査

整理 No.	9-9-1-1	
大項目	9	システム規格（部分基準の選択肢）
中項目	9	余寿命評価仕様
小項目	1	評価の区分化
候補技術	1	機器区分による余寿命評価手法の選定

現状	
・ 機器毎（機器区分毎）に予想される事象（クリープ、疲労、クリープ疲労、腐食、振動等）を特定し、その事象を把握する最適な検査及びモニタリング手法を選定する。 ・ 選定された手法に応じた損傷（寿命）評価法を運転開始前までに構築する。 ・ 適切な評価法を導入することにより、機器の長寿命化を図ることができる。 ・ また重要度の低い機器に対する余寿命評価を低減することにより低コスト化を図ることができる。	
効果	
・ 余寿命評価技術の高精度化 ・ 対象： 容器，IHX，SG，配管 ・ 効果： 大	
課題	
・ 機器の区分化 ・ 評価手法 ・ 検査及びモニタリング手法	
関連事項	
材料， 製作・検査， 強度評価， 経年変化， 環境効果， 維持， 法規・規制 キーコンセプト：リスク管理， Partial Design Margin， 機能健全性， 信頼度の定量化， 合理的品質保証体系， 強度評価法， 経年変化・欠陥評価， 規格・基準， 関連動向	

整理No.	10-1-1-1	
大項目	10	法規、規制、規格、基準、関係動向
中項目	1	法規・規制
小項目	1	
候補技術	1	電気事業法、原子炉等規制法、安全設計審査指針

現状
原子力発電所を建設するにあたっては、電気事業法が適用される。その第 48 条「電気工作物の維持」の規定によれば「電気事業者は、電気事業用に供する電気工作物を通商産業省令で定める技術基準に適合するように維持しなければならない」とあり、技術基準として省令 62 号「発電用原子力設備に関する技術基準」が引用される。省令 62 号では、原子力発電所の材料、構造設計に関する規定が定められ、これを受けた詳細規定として告示 501 号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」が定められている。 原子力発電所の安全審査ならびに工事認可は、原子炉等規制法(炉規法)が適用される。安全審査では、炉規法第 23 条、第 24 条に基づき実施され、その詳細は安全設計審査指針に定められている。工事認可は、第 27 条に基づき行なわれる。 以上を表 10-1-1-1(1)～(2)にまとめて示す。
効果
課題
関連事項

表 10-1-1-1(1) 原子力発電所に関する法律体系

設置申請		電気事業法 原子炉等規制法
環境審査		発電所の立地に関する環境審査指針(エネ庁)
設計	構造	通産省省令 62 号→通産省告示 501 号
	耐震	JEAG4601
材料	母材	通産省省令 62 号→JIS
	溶接材料	通産省省令 81 号→JIS
施工	溶接	通産省省令 81 号→通産省告示 612 号
	その他	通産省省令 81 号
検査		通産省省令 62 号→JIS
安全審査		原子炉等規制法
工事認可		原子炉等規制法
運転		電気事業法
維持	検査	—
	評価	—
	補修	—
廃棄物処理		—
廃止		—

表 10-1-1-1(2) 原子力発電所に関する法律体系

項目		日本	日本 (民間化)	米国	フランス	米国
設置申請		炉規法		10 CFR		
環境審査		行政指導		R.G.		
設計	構造	省令 62 号→ 告示 501 号		ASME Sec. III		
	耐震	JEAG4601		R.G. ASME		
材料	母材	省令 62 号→ JIS		ASME Sec. II		
	溶接材料	省令 81 号→ JIS		ASME Sec. II		
製作	溶接	省令 81 号→ 告示 612 号		ASME Sec. III		
	その他	省令 81 号				
検査		省令 62 号→ JIS				
安全審査		炉規法		R.G.		
工事認可		炉規法		R.G.		
運転		JEAG				
維持	検査	—		ASME Sec. XI		
	評価	—		ASME Sec. XI		
	補修	—		ASME Sec. XI		
廃棄物処理		省令○号→ 告示○号				
廃止		炉規法				

整理No.	10-2-1-1	
大項目	10	法規、規制、規格、基準、関係動向
中項目	2	規格・基準
小項目	1	高温設計／維持に関する規格・基準
候補技術	1	基準体系の動向、JSME、火原協、ASME、R5、6、RCC-M、MR【H】、R-SEM、API

現状
DDS、ASME、R5 ならびに RCC-MR のクリープ疲労寿命評価法の概要を表 10-2-1-1-1 に示す。評価法の概念については、DDS は原型炉高温構造設計方針 BDS の考え方を踏襲していることから、この表では BDS/DDS として表記している。 ひずみ範囲の算出では、すべての基準においてひずみ集中の予測法としてノイバー則が採用されている。DDS では、これに弾性追従の概念を重ね合わせているのに対し、ASME では多軸性のみを考慮し、RCC-MR では両者を考慮し、R5 では両者とも考慮していないなどの特徴を有している。 疲労損傷の算出に用いる疲労線図は、海外基準がいずれも FF 波のみを用いているのに対し、DDS のみがひずみ速度依存性を考慮している。 クリープ保持開始時の初期応力の予測には、ほとんどの基準で繰返し応力-ひずみ関係 ($\Delta \sigma/2 - \Delta \epsilon/2$) が用いられているが、ASME のみが単調応力-ひずみ関係を用いている。 クリープ損傷の評価は R5 以外で時間消費則が採用されている。R5 は、クリープ疲労損傷評価では延性消耗則を採用しているが、クリープ損傷評価では時間消費則を採用している。 クリープ疲労損傷の許容値として、R5 以外はクリープ疲労相互作用を考慮した値 D を設定しており、D は疲労損傷もしくはクリープ損傷の関数として定義されている。R5 では相互作用を考慮しない $D=1$ としている。許容値に対応する損傷の定義は、ほとんどの基準で単軸試験片の破断寿命に対応させているが、R5 のみが微小き裂の発生寿命と進展寿命に分離している。 欠陥評価法の比較については、表 10-2-1-1-2 に示す。
効果
課題
関連事項

表 10-2-1-1-1 各種海外基準のクリープ疲労寿命評価法の概要

基準	BDS/DDS	ASME Sec. III Subsec. NH	RCC-MR	R5	延性消耗則
ひずみ範囲	ノイバーと弾性 追従	ノイバーと多軸 性	ノイバー、弾性 追従 と多軸性	ノイバー	ピーク応力から の弾性追従
疲労線図	ひずみ速度依存	FF 波	FF 波	FF 波	FF 波
疲労損傷の割 増	回数に対し 20 or ひずみに対し 2 の安全裕度考慮			安全裕度を含ま ない平均傾向線	回数に対し 20 or ひずみに対 し 2
初期応力	サイクリック	モノトニック	サイクリック	サイクリック	サイクリック
緩和過程	弾性追従	等時応力-ひず み	弾性追従	弾性追従	弾性追従
応力の割増	大きめの初期応 力と 少なめの緩和	1/0.67	1/0.9	-	-
損傷則	時間消耗	時間消耗	時間消耗	延性消耗	延性消耗
クリープ損傷 の割増	クリープ破断時 間に対し 10 and 損傷に対し 2	クリープ破断時間に対し 10		クリープ破断延 性の平均値	クリープ破断延 性の最小値に裕 度を考慮 (暫定 10%)
クリープ疲労 相互作用	$D_f + D_c < D$	$D_f + D_c < D$	$D_f + D_c < D$	$D_f + D_c < 1$	$D_f + D_c < 1$
損傷の定義	単軸試験片寿命 を基準	単軸試験片寿命 を基準	単軸試験片寿命 を基準	微小き裂の発生 と進展に分離	単軸試験片寿命 を基準

表 10-2-1-1-2 各種海外欠陥評価法の概要

項目	R5	A-16	電中研指針
国名	英国	仏国	日本
適用機器	ガス炉	高速増殖炉	高速増殖炉
材料	クロモリ鋼 オーステナイト鋼	オーステナイト鋼	オーステナイト鋼
クリープ疲労 評価	○	○	○
漏洩評価	×	×	○
延性破壊評価	×	○	○
欠陥の想定	×	×	解説に記述
安全率	×	×	解説に考え方を記述
判断基準	×	×	解説に例題

クリープ疲労き裂進展評価法の比較

項目	R5	A-16	電中研指針
評価式	$da/dN = da/dN_f + da/dN_c$		
疲労き裂進展	$da/dN_f = C_f \Delta K^{m_f}$	$da/dN_f = C_f \Delta J^{m_f}$	
パラメータ 算出式	有限要素解析 き裂開口比は提示	参照応力法 き裂開口比は暫定値 (1.0)	
材料特性式	実験で求める。 (実験法を提示)	C_f と m_f を提示。	
クリープき裂 進展	$da/dN_c = \int A \cdot C^* dt$	$da/dN_c = \int C_c \cdot J^{m_c} dt$	
パラメータ 算出式	参照応力法 (評価概念のみ)	参照応力法 (具体的手順、式)	
材料特性式	実験で求める。 (実験法を提示)	C_c と m_c を提示。	

延性破壊評価法の比較

項目	R5	A-16	電中研指針
評価クライテ リオン	—	J-T	σ_{net}
材料特性式	—	×	流動応力の定義と S_y 、 S_u 提示

整理No.	10-2-2-1	
大項目	10	法規、規制、規格、基準、関係動向
中項目	2	規格・基準
小項目	2	その他の規格・基準
候補技術	1	設計仕様と規格の関連調査（軽水炉、火力、航空、自動車、石油）

現状
軽水炉、火力、航空、自動車、石油について、設計仕様と規格、規格で考慮している破損モード、破損クライテリオン、安全率の考え方について整理した。 結果を表 10-2-2-1 に示す。
効果
課題
関連事項

表 10-2-2-1 設計仕様と規格の関連調査（軽水炉、火力、航空、船舶、石油化学）

機器名		軽水炉	火力	航空	船舶	石油化学
設計仕様	材料	炭素鋼 ステンレス鋼	クロモリ鋼	アルミ合金	低炭素鋼	クロモリ鋼 ステンレス鋼
	荷重	内圧 熱荷重 地震	内圧 熱荷重	自重 運動荷重 風荷重	自重 浮力 波力	内圧 熱荷重 地震
	構造の特徴	軸対称	軸対称	シェル/リブ*	シェル/リブ*	軸対称
	使用温度	～302℃	600℃			～800℃
	使用環境	大気 高温水 蒸気	燃焼ガス	大気	海水	大気 化学溶液
適用基準		告示 501 号	省令 51 号	耐空性審査 基準	船級協会 基準	ASME Sec. VIII API
破損モード	脆性破壊	最低使用温度を遷移 温度より高く設定す ることで防止	—	—		
	延性破壊	機械荷重による発 生応力を引張強さ の 1/3 以下に制限	機械荷重による発 生応力を引張強さ の 1/4 以下に制限 (解析に基づく設計 では 1/3)	安全率 1.5		
	クリープ 破断	—	クリープを考慮 した許容値	—		
	環境破壊	水環境の制御で 防止	—	—		
	動的破壊	—	—	—		
	塑性ラッチェット	一次+二次応力 制限で防止	—	—		
	クリープ ラッチェット	—	—			
	低サイクル疲労	疲労制限で防止。寿 命で 20 倍の裕度を確 保。	—	安全寿命設計 では 3。損傷 許容では安全 率は用いな い。実機によ る強度保証を 義務づけられ ている。		
	高サイクル疲労	高サイクル側の疲労 線図を準備。流体と の連成については評 価法を規定。	—			
	ラッチェット疲労	研究中	—	—		
	クリープ 疲労	—	—	—		
	弾性座屈	軸圧縮を受ける 円筒胴と外圧を 受ける容器の胴 についてはチャ ートで評価。	—	静強度評価 でカバー。		
	塑性座屈	上記に含める。	—	—		
	クリープ 座屈	—	—	—		

整理No.	11-1-1-1	
大項目	11	その他
中項目	1	プラント概念に関する技術
小項目	1	SG
候補技術	1	2重管SGの採用

現状	
・FBRプラントが軽水炉プラントに比べてコスト高になっていると考えられている理由の一つに、2次ナトリウム系の設置があげられている。一方で、ナトリウム・水反応の影響が炉心側にまで及ぶことを懸念する声も高い。その妥協点として2重管SGによる2次系削除プラントが大幅な合理化案として提案されている。 ・2重管SGの開発については、2重管構造の検討、接合技術の検討、ナトリウムループによるモックアップ試験などがこれまで行われてきた。しかし、実用化段階での将来技術という位置づけであったため、現実的な設計への採用には至っていない。 ・経済性を追求する実用化段階炉としては、2重管削除による2次系削除プラント検討は重要な課題と考えられ、研究開発の推進が必要と考えられる。	
効果	
・2次系削除による機器の削減（物量削減：IHX、ポンプ、配管） ・2次系削除による建物、電気制御系の削減 ・熱効率の向上もしくはSG伝面の削減による機器の縮小（物量削減）	
適用部位：SG伝熱管	
効果：大	
課題	
・漏洩検出性能を満たす2重管構造の開発（含む管板部構造） ・信頼性のある接合技術及びその検査技術の開発 ・2重管に対する設計評価の合理化（板厚の削減）	
関連事項	
5. 欠陥評価とLBB	

整理No.	11-1-1-2	
大項目	11	その他
中項目	1	プラント概念に関する技術
小項目	1	SG
候補技術	2	2重管SGの同時破損防止ロジックの構築

現状
現状、軽水炉SGまたは数少ないFBR用ナトリウム加熱SG（試験装置も含む）の故障率データから、内外管の破損を独立事象と想定して、ナトリウム－水反応発生（同時破損）確率、或いは検出時間への要求が評価されているのみで、共通要因、従属要因による同時破損は評価されていない。また、確立した評価手法も存在しない。従って、破損防止ロジックも構築されていない。
効果
このロジックは、2重管SGを用いた2次系削除プラントの安全シナリオ構築する上で不可欠であり、この構築により建設コスト低減ポテンシャルを有する2次系削除プラントが初めて実現可能となる。
課題
同時破損確率評価方法の開発 要素試験等による関連データの取得 ISI手法の開発 同時破損防止ロジックの構築
関連事項
5. 欠陥評価とLBB

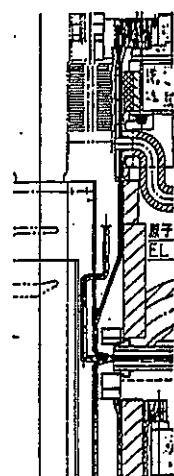
整理No.	11-1-2-1	
大項目	11	その他
中項目	1	プラント概念に関する技術
小項目	2	熱保護構造の採用
候補技術	1	熱保護構造の採用

現状

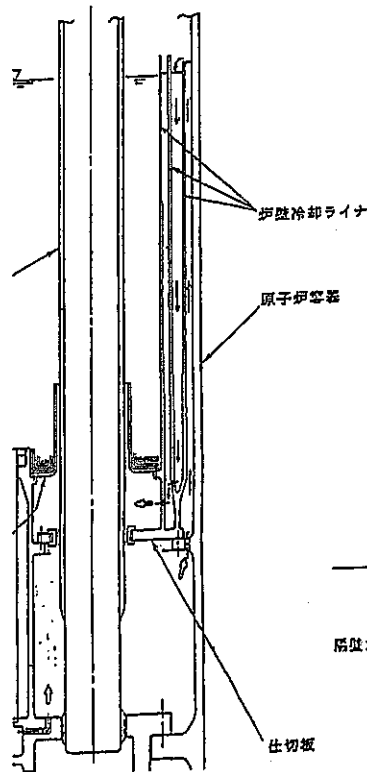
現状の設計においては建設コスト低減を目標に、容器壁等の熱保護構造の撤去または簡素化を目指しており、線膨張係数が小さく発生応力の低いフェライト鋼の採用や、設計基準合理化のための検討が行われている。

一方、長寿命化の観点からは、容器壁等の発生応力を低減させ長期間の使用における信頼性を高めることが考えられる。このため、熱保護構造の採否に伴う得失を評価し、共用機間末期までを考えたトータルコスト及び信頼性に基づき採否の判断を行う必要がある。

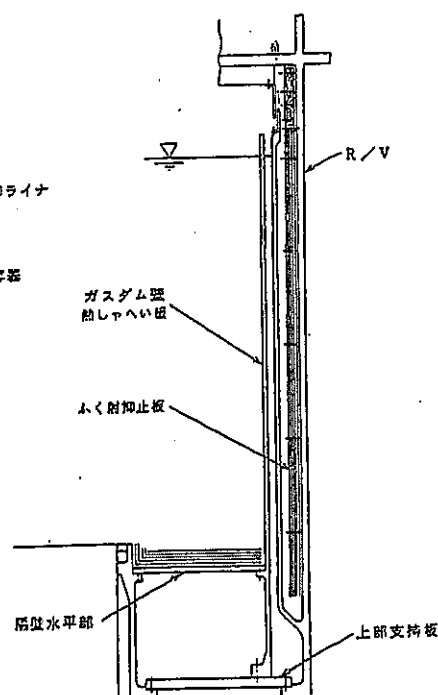
これまでの FBR 設計においてさまざまな容器壁保護構造の採用が検討されてきたが、その例を以下に示す。



もんじゅ炉容器
(Y ピース)



実証炉炉容器
(壁冷構造)



実証炉炉容器
(ガスダム構造)

効果
容器壁の熱応力を低減することにより、以下の効果が期待できる。 ・ 容器の長寿命化，高信頼化 ・ 容器への非原子力級材料の採用 ・ 容器の溶接施工の品質要求の緩和
課題
熱保護構造のコスト計算 信頼性の定量評価
関連事項
1. 材料， 2. 溶接， 3. 設計評価法， 4. 環境効果と経年劣化， 5. 欠陥評価と LBB， 6. 維持， 8. システム規格， 9. システム規格

整理No.	11-1-3-1	
大項目	11	その他
中項目	1	プラント概念に係る技術
小項目	3	機器のモジュール化
候補技術	1	機器のモジュール化

現状
軽水炉では個々のプラント毎に熱荷重、地震荷重を設定し、設計を行っている。設置申請、安全審査等の許認可も各プラント毎に実施している。既設プラントの横に設置され、ほとんど同じ設計であっても、すべての項目について同一の作業、書類の整備が行われている。一方、航空機などでは型式証明という形で審査が行われ、同一スペックに対しては個々に審査しなくても良い。 原子力プラントにおいても、免震構造が採用されれば、個々のプラント毎の審査に代えて型式証明に類する審査体制が可能となる。
効果
・対象機器 全機器 ・効果 大
課題
・審査体制の大幅見直し ・電力側のニーズの標準化
関連事項

整理No.	11-2-1-1	
大項目	11	その他
中項目	2	コスト算定
小項目	1	
候補技術	1	コスト算定法の開発と標準化

現状
高速炉の経済性評価においては、コマンドコストコードが使用されてきた。コマンドコストコードは、各設備・機器の費用及び建設に係わる諸費用を勘定項目ごとにコスト評価式を設定しコストを計算し、これらを積算してプラント全体の建設コストを算出する。 コスト評価式は、勘定項目が含む設備・機器を代表する物理量に物理量あたり単価（ユニットコスト）を積算する形式を基本とし、物理指標には、主に体積、面積、長さ、重量、板厚、流量、容量などが用いられる。
効果
課題
現状のコスト評価式では、コスト評価式で設定されている物理指標が、コスト低減効果を直接あらわさない場合には、コスト低減は評価されない。 例えば、原子炉容器のコストは（炉容器重量）×（重量あたり単価）であり、重量が削減されなければ、板厚の変化、材質の変更、製作方法及び検査方法の改良が行われてもコスト低減は評価されない。
関連事項

付録 A 2 合理化効果の試評価結果

目次

A2.1 合理化効果の抽出と適用部位	_____	A2-2
A2.1.1 分野毎の合理化効果	_____	A2-2
A2.1.2 部位ごとの評価	_____	A2-22
A2.2 合理化効果の試算	_____	A2-34
A2.2.1 熱過渡条件の最適化による合理化	_____	A2-34
A2.2.2 確率論によりき裂を考慮した設計	_____	A2-56
A2.2.3 表面処理、非弾性解析、維持基準の効果	_____	A2-74

A2. 1 合理化効果の抽出と適用部位

A2. 1. 1 分野毎の合理化効果

有望技術の調査・検討結果について、大項目を以下に示す分野に分類した上で、各分野毎に実機に及ぼす合理化効果を整理した。

- ①材料
- ②設計・製作・検査
- ③運転・維持
- ④システム化規格

(1) 材料

材料に関して提案された候補技術を表 A2.1.1(1)-1にまとめて示す。表 A2.1.1(1)-1(1/2)は採用による大きな効果が期待される技術を、また表 A2.1.1(1)-1(2/2)は効果は小さいが合理化の可能性のある技術を示す。これら候補技術について特に大きな効果が期待される技術について以下にまとめる。

a. 大きな効果が期待される候補技術

大きな効果が期待される材料候補技術を、高温・高圧化のための新材料の採用、及び物量削減のための新材料・技術の採用の観点からみると下記の技術があげられる。

(a) 高温・高圧化のための新材料の採用

- i. 原子炉容器の高温化対応としては、現状の 316FR 鋼に代わり極低炭素の 316S-FR 鋼を採用。
- ii. 中間熱交換器、蒸気発生器及び 1 次 2 次配管の冷却系の高温・高圧化対応としては、316FR 鋼、SUS304 鋼及び改良 9Cr-1Mo 鋼に代わり、高強度 12Cr 鋼を採用。
- iii. 高温化の実現のためには、耐スウェリング性、耐照射脆化性、高クリープ強度に優れた燃料被覆管の開発が望まれる。

(b) 物量削減のための新材料・技術の採用

- i. 中間熱交換器、蒸気発生器及び 1 次・2 次配管の冷却系の薄肉化・小型化による物量削減対応として、316FR 鋼、SUS304 鋼及び改良 9Cr-1Mo 鋼に代わり、高強度 12Cr 鋼を採用。
- ii. 配管長の短縮による物量削減対応として、高温でも同材継手と同等に扱える高強度異材継手を開発して採用。
- iii. 材料コスト低減、検査工数短縮をねらい、システム規格の一環として、機器区分に対応した材料仕様／製作仕様／検査仕様の区分化及び仕様の一体化を図る。

b. 候補新材料の現状

上記で抽出された大きな合理化効果が期待される原子炉容器用材料 (316S-FR 鋼)、冷却系機器・配管用材料 (12Cr 系鋼) 及び配管用異材継手の現状について示す。

(a) 原子炉容器用「極低炭素 3 1 6 S-FR 鋼」

i. 材料の特徴

3 1 6 F R 鋼 ($C=0.01\%$) に対して炭素量を低減($C=0.001\sim 0.06\%$) した 3 1 6 S-FR 鋼は、3 1 6 F R 鋼に対してクリープ強度は同等で、クリープ疲労強度が 1.5 倍の強度を有する。

ii. 適用による効果

F B R 機器の強度の支配的因子であるクリープ疲労強度許容値の増大により、高温化・高圧化及び長寿命化が可能となる。

iii. 採用に係わる課題

本鋼の実用化に向けた大きな課題としては下記があげられる。

- ・材料データの蓄積
- ・溶接材料及び溶接方法の開発

(b) 冷却系機器・配管用「高強度 1 2 C r 系鋼」

i. 材料の特徴

火力での開発研究では、改良 9 C r - 1 M o 鋼の 1.2 倍以上の高強度材の開発は終わり実用化段階にある。さらに、1.5 倍以上の高強度材を目的にした開発が進められている。

F B R 機器に採用するためには、高温強度に優れるだけでなく、ナトリウムとの共存性、加工性、溶接性等にも優れた特性を有することが必要である。現在、開発が進められている火力用高クロム鋼の特性及び従来の高 C r 鋼に関する知見から、下記の特性を目標とする F B R 用 1 2 C r 系鋼開発の可能性が極めて高いと考えられる。

- ・高温強度：550℃において，
 - 最大許容応力強さ(S_o) : 改良 9 Cr-1Mo 鋼の 1.5 倍以上
 - 設計クリープ破断強さ(S_R) : 改良 9 Cr-1Mo 鋼の 1.5 倍以上
 - 疲労強度 : 改良 9 Cr-1Mo 鋼と同等並
 - クリープ疲労強度 : 改良 9 Cr-1Mo 鋼と同等以上
- ・環境効果：ナトリウムとの共存性；改良 9Cr-1Mo 鋼と同等
 - 水・蒸気中耐食性，対 SCC 性；改良 9Cr-1Mo 鋼と同等以上
- ・加工性 : 改良 9 Cr-1Mo 鋼並み（改良 9 Cr-1Mo 鋼の下限程度）

- ・溶接性 : 改良 9 Cr-1Mo 鋼と同レベル

- ・開発・実用化費用 : 火力等で取得されたデータ・知見の活用で従来の開発費を削減可能。

ii. 適用による効果

(i) 冷却系 (IHX, SG, 配管) への高強度 12Cr 系鋼採用により機器の板厚は 2 割程度以上削減でき、物量もこれに合わせて削減可能となる。また、熱膨張率が小さく発生熱応力が小さいことを考慮すると更に物量削減の可能性は非常に大きい。

4. 熱交換器 (IHX)

伝熱管の板厚削減により必要伝面が低下し、その結果伝熱管本数等の削減が可能となり、IHX の小型化が図れる。

ア. 1 次系配管・2 次系配管

熱膨張率が小さく、対熱応力抵抗性が大きいので、発生熱応力がステンレス鋼よりも低下する。また、降伏点が大きいののでラチェットや座屈に対する許容値が増大する。

ハ. 蒸気発生器

伝熱管の板厚削減により必要伝面が低下し、その結果伝熱管本数等の削減が可能となり、SG の小型化が図れる。

(ii) SG 伝熱管や水系配管に適用すると、従来と同等の物量で主蒸気条件の改善 (高圧化, 高温化) が図れ、発電効率向上を狙うことも可能となる。

(iii) クリープ疲労評価法において、クリープ効果が顕著でない温度範囲が高温側まで拡大され、クリープ評価法の合理化が図れる。

(iv) 長寿命化効果大

iii. 採用に係わる課題

本鋼の実用化に向けた大きな課題としては下記があげられる。

(i) 薄肉管の製作精度の確認。

(ii) 溶接材料及び溶接施工仕様の確認 (熱処理仕様の確認)。

(iii) FBR 温度条件 (550℃) では、適正成分仕様が多少異なるので、火力仕様を基に FBR 条件下での改良検討が必要。適用温度により最適成分系を変えた仕様区分化の検討。

(iv) 火力ではクリープ強度をベースに開発され、データは短時間強度とクリープデータが主体となっている。しかし、FBRではクリープ疲労強度が主体となり、クリープとともに、疲労に及ぼす各種因子の把握が特徴的となり、この観点からの検討が必要である。

(v) 溶接部の疲労、クリープ疲労に関するデータの取得と評価法の検討。

(c) 配管用「異材継手」

i. 現状と適用の効果

316FR鋼と高強度12Cr鋼のオーステナイト系ステンレス鋼とフェライト系鋼の異材継手が存在する。従来の知見では、オーステナイト系ステンレス鋼とフェライト系鋼の異材継手強度はフェライト鋼の同材継手と同等の強度を有するが長時間になると破断部がフェライト鋼とステンレス鋼の界面になる傾向が観察されている。この点の改良が可能となると、異材継手部を高温高応力部に設置することが可能となり、配管長の大幅な縮小が可能となる。

ii. 適用上の課題

高強度な異材継手の開発・実用化のための重要課題としては下記があげられる。

(i) 異材継手製作方法の開発

イ. 新接合方法の採用検討

・EBW法、レーザ法等の適用による高強度化の検討

ロ. 新バタリング材の採用検討

・Ni基材料の適用可能性検討

(ii) 異材溶接部の強度データの蓄積

(iii) 継手強度評価法の開発

表 A2.1.1(1)-1(1/2) 材料に関する合理化候補技術 (1/2)

1) 効果が期待される技術

対象機器	課題・目的	対策	採用への課題	期待効果	備考
R/V	高温・高応力化（許容応力向上）	改良ステンレス鋼の採用	溶接材料開発、 材料データの蓄積	大：FCI 寿命 1.5 倍(対 316FR) 長寿命化	
	材料仕様・データ取得の合理化	非原子力級材料の考え方導入	システム規格化	中：仕様区分化で検査等合理化	材料/製作/検査仕様一体化
炉心	高温・長寿命化	高強度燃料被覆管の開発	交換寿命の定義化等	中：	開発費と効果のバランス
炉心支持構造物	PAHR 評価成立性の向上	高融点材料（例 W,Mo）の採用	強度特性把握 Na 共存性確認	中：課題克服コスト大	候補材料は加工性難度高い
炉内構造物	自己修復・自己抑制機能材料	高温インテリジェント材料の開発	基礎研究段階	（実現すれば大）	実用化の可能性不透明
冷却系機器	物量削減（伝熱管薄肉化、容器の小型化）	高Cr鋼の採用	溶接材料開発 材料データの蓄積	大：Su、Sy、SR1.2～1.5 倍以上 （対改良 9 Cr-1Mo 鋼） 大：長寿命化	熱応力抵抗性大きく、ステンレス鋼の約 4 倍
	材料仕様・データ取得の合理化	非原子力級材料の考え方導入	システム規格化	中：仕様区分化で検査等合理化	材料/製作/検査仕様一体化
配管	物量削減（薄肉化）	高Cr鋼の採用	溶接材料開発 材料データの蓄積	大：Su、Sy、SR1.2～1.5 倍以上 （対改良 9 Cr-1Mo 鋼） 大：長寿命化	熱応力抵抗性大きく、ステンレス鋼の約 4 倍
	材料仕様・データ取得の合理化	非原子力級材料の考え方導入	システム規格化	中：仕様区分化で検査等合理化	材料/製作/検査仕様一体化
ノズル・エルボ	疲労き裂発生寿命の向上	表面改質技術の採用	施工方法と効果確認	大：疲労寿命 2 倍向上	適用術の熱保護効果も期待
1 次系配管	配管長の削減 継手適用範囲の拡大	異材継手の高温部への適用	新接合技術の開発 新継手データ蓄積 強度評価法の開発	大：同材継手と同等扱い	EBW やレーザーの適用期待有
ポンプ	軸固着の防止	軸材料（コーティング材）の開発	接触反力小構造採用	中：長寿命化	電磁ポンプの適用優先
Naバウンダリ以外	材料仕様・データ取得の合理化	非原子力級材料の考え方導入	システム規格化	中：仕様区分化で検査等合理化	材料/製作/検査仕様一体化

PAHR (Post Accident Heat Removal)

表 A2.1.1(1)-1(2/2) 材料に関する合理化候補技術 (2/2)

2) 効果は小さいが可能性のある技術

対象機器	課題・目的	対策	採用への課題	期待効果	備考
冷却系機器	熱応力の低減	任意の熱伝導性を発揮できる 断熱材料開発	熱伝導性が高く、力 学的拘束のない物資 の開発	小：アイディア段階。開発費大。 熱過渡応力に対する効果小。	
水蒸気系	材料仕様・データ取得の合理化	非原子力級材料の考え方導入	システム規格化	小：既存材料、JIS 仕様で対応	
	耐食性向上	高耐食性新材料	軽水炉の動向把握	小：FBR 機器としての特異性なし	軽水炉開発材料を適用

(2) 設計・製作・検査

設計・製作・検査に関する合理化について概要を図 A2.1.1(2)-1にまとめて示す。図は高度化あるいは合理化する項目と効果の関係を示すものであるが、効果については最終的な効果と中間的な効果にわけて記載している。例えば、効果として「高応力化が可能になる」という場合が想定されるが、プラントの低コスト化あるいは長寿命化に対して高応力化がどのように寄与するかを考えると、高応力が許容されることによって最終的に物量が削減されたり、工数が削減されたりすることとなる。従って最終的な効果は、「物量削減」「工数削減」である。以下に高度化する項目毎に説明を記載する。

a. 評価法の高度化・簡素化

設計評価方法としては、1次応力制限、クリープ疲労評価法、ラチェットひずみ評価法、座屈評価法などのいくつかの合理化項目があげられている。これらの合理化の方向性としては2種類の方向性が含まれている。1つは、高度化・精緻化ということであり、もう一つは簡素化という方向である。もちろん簡素化と高度化・精緻化が同時になされればそれが一番望ましいが、一般的には評価を簡素化すると精度が低下し、精度を向上させるあるいは現象を忠実にシミュレートしようとする評価法が複雑になるという相反する傾向がある。ここでは、2つの側面から考えてみる。

評価法を高度化・精緻化することによる効果としては、過度な裕度の排除による実質的なクライテリアの拡大が考えられる。より現象を精密に評価することにより、今まで unknown factor として取られていた過度な保守性を排除してゆくが可能となる。設計として必要な安全率を確保することはもちろん必要であるが、現状の設計法では設計法の中で「保守側」設定をしている部分が多く、場合によってはこれらが重なり合い、安全率を1としてもまだ過大な裕度をもっている場合があるし、逆にぎりぎりの場合もある。より高度に・精密に評価することが可能になれば、これらのうちの過度の裕度だけを減らしてゆくことができる。

それにより機器の高温化が可能になる、あるいは実質的な裕度が大きくなる、高応力を許容できるようになるといったことが考えられる。すなわち、いままでは過度に裕度を取りすぎていたために、現状と同じ条件であってもより高い温度で使える、破損までの裕度が大きくなる、あるいはより高い応力まで使えるといった状況が生まれる。

これらの効果は、先に述べたようにプラントのコストにとっては中間的な効果であり、最終的には、より高温で使うことができれば熱効率の向上が可能となるし、高応力で使用することが可能になれば、応力低減のための構造（熱遮へい構造等）の削除やより薄肉の構造、配管の短縮などの物量削減が期待できる。また、高応力で使用が可能となれば、中間熱交換器管板などのように応力低減のための複雑な形状を採用している部位については、それを実現するための加工工数も削減することが可能となる。設計および使用条件等を従来どおりとする場合、実質的な裕度が向上し寿命の延長が可能となる。裕度が向上する場合、現状では機器を保護する観点から複雑な運転をしなければならなかったり、多数のインターロックを設けて極狭いバンド幅で運転しなければならないと言った運転制御に関する制約が緩和され、運転制御コスト場合によってはそのための設備の削減につながると考えられる。

そのための技術としては、非弾性解析の採用が非常に有効である。非弾性解析採用にあたっての効果としては、弾性解析や公式によるばあいより評価すべきひずみなどの値がより実際の構造物に近いものになる（精緻化）と、局所の座屈などいままで弾性解析などでは記述が難しかったものが評価可能になり（高度化）、包絡的に取られていた過度の裕度が排除される効果が期待できる。

これとは逆に評価を簡素化することは、設計に必要となる工数の削減に直結する。評価が簡単になり多くのパラメータサーベイが可能になった結果として、多数の設計パラメータを考慮した最適化がなされ、その結果物量削減や効率向上寿命延長などが図られると言うことが無いわけではないが、ここでは副次的効果と考え直結する効果としては図 A2.1.1(2)-1 には記載していない。簡素化の手法としては Negligible creep の導入や、スクリーニングルールの充実などがまず考えられる。非弾性解析は、評価法の簡素化とは考えられない場合が多いが、DDS におけるラチェットひずみ評価法に代表されるように、弾性解析による非常に複雑な手順が組み合わされた高度な評価法を採用することヲ考えた場合、非弾性解析による評価が簡素化としても有効な場合が考えられる。

b. 供用前検査の合理化

供用前検査についても、設計評価法と同様に高度化と簡素化の両面が考えられる。検査が簡単にあるいは高速に行える場合検査工数の削減につながる。簡素化に当たっては、従来と同様の品質の検査が簡単に行える場合と、検査の品質を落として簡単にする場合

が考えられる。前者の場合そのための技術開発が必要であり、後者の場合はここで簡略化した分を他の部分で補い、総合的な品質を確保するような基準体系とする必要がある。

検査を高精度化する場合設計法と同様に、unknown factor に対する過度の裕度の引き下げなどが考えられる。供用前検査の場合特に確率論的評価法を組み合わせられる場合に、最終的破損確率の低減に寄与する。

検査の高度化手法としては超音波探傷検査（UT）の高度化などがあげられる。

c. 供用中検査の合理化

供用中検査についても、供用前検査、設計評価法と同様に高度化と簡素化の両面が考えられる。検査が簡単にあるいは高速に行える場合検査工数の削減につながる。簡素化に当たっては、従来と同様の品質の検査が簡単に行える場合と、検査の品質を落として簡単にする場合が考えられる。前者の場合そのための技術開発が必要であり、後者の場合はここで簡略化した分を他の部分で補い、総合的な品質を確保するような基準体系とする必要がある。現状は供用中検査が無くても十分な品質を確保する基準体系に加えて供用中検査を実施してより安全性を高めるという体系になっている。試験炉・原型炉などの場合未知の事象が多くこのような対応も必要であるが、知見が蓄積されてくるに従い、必要となる供用中検査も削減されるであろうし、供用中検査を実施することと引き替えに、供用前検査、あるいは設計を簡略化するなどの対応をとることが可能となると考えられる。

供用中検査の場合、確率論的評価法と組み合わせられる場合には、最終的破損確率の低減に寄与するし、補修を前提とすると破損には至らず寿命延長にも寄与する。

検査の高度化手法としては超音波探傷検査（UT）の高度化や、検査の困難な部分の機械化・自動化などがあげられる。

d. 溶接方法の高度化

溶接方法の高度化としては、異材継手の採用や、多様な継手の採用と、溶接自体を高速化する高効率溶接法の開発があげられている。継ぎ手の種類を多様化することは、構造の自由度を増大させ、高価な鍛造材の使用の削減や、より設計が簡単あるいは製作工数が少ない構造を採用できるなどの効果が考えられる。

高効率溶接については、溶接時間の短縮に直結する。

溶接方法の高度化に関しては、溶接部に評価法の開発、検査方法の合理化とも密接に関連している。これらの高度化の効果は、評価法及び検査の項目から得られる合理化項目となるため、図 A2.1.1(2)-1 では溶接方法の高度化と評価法、検査への関連を表す流れを表記した。

コスト低減のための最適組合せの増大

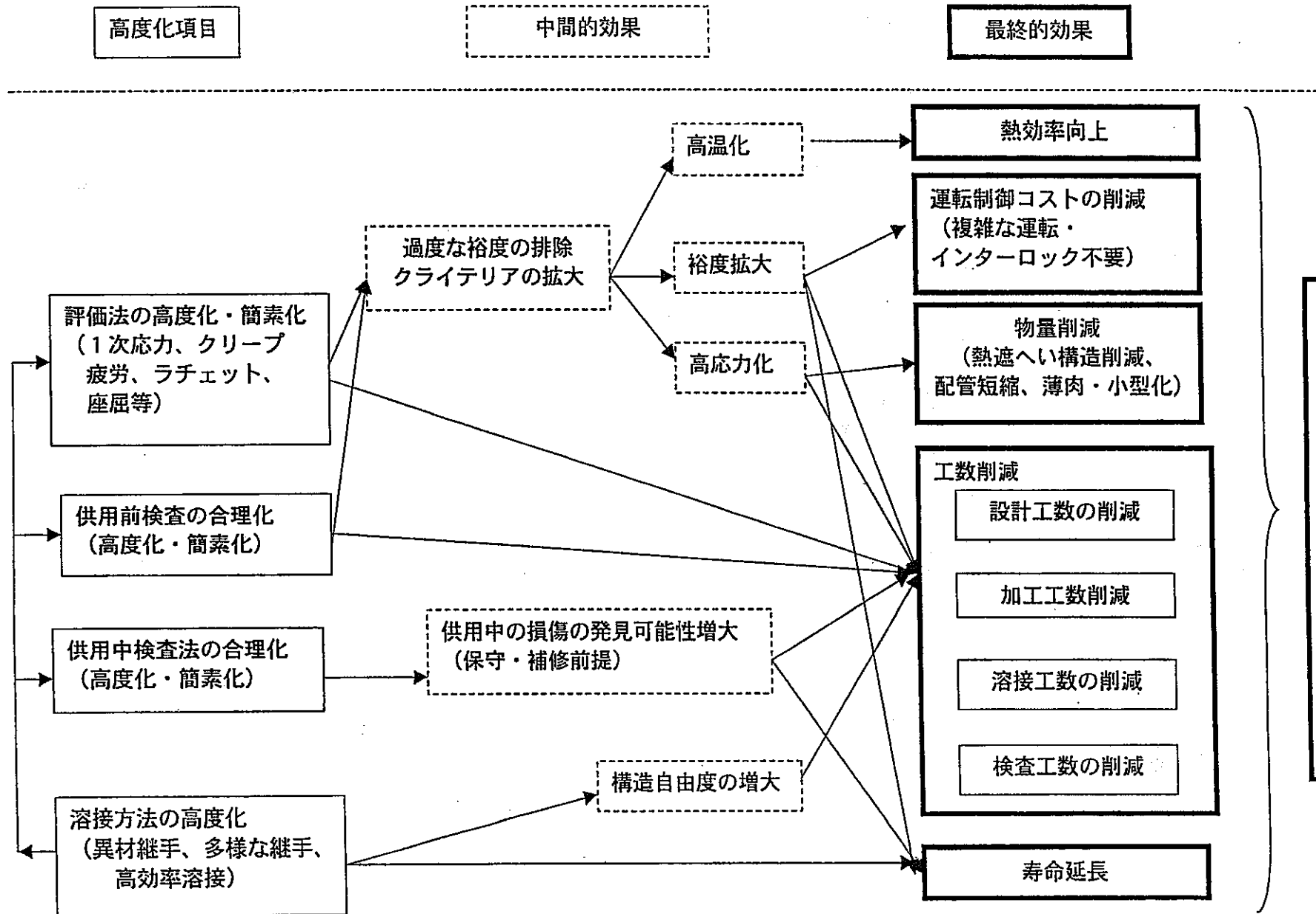


図 A2.1.1(2)-1 設計・製作・検査による合理化効果

(3) 運転・維持

a. 概要

候補技術調査を大項目毎に整理し、効果を適切にアピールするためのストーリーを作成した。対象とした大項目は、運転、維持に関わる以下の項目である。

環境効果と経年劣化

欠陥評価と LBB

維持(欠陥評価を除く)

b. ストーリー作りのための整理

各候補技術に対して整理された結果から、効果と課題を抽出し 5 段階に分類した。効果については、効果の大きい順に 5 から 1 まで評価し、5 と 4 は効果大、3 は効果中、2 と 1 は効果小とした。課題については、課題の少ない、もしくは解決が容易な順に 5 から 1 まで評価し、5 と 4 は課題小、3 は課題中、2 と 1 は課題大とした。効果と課題の加算をもって総合評価を行い、10 から 8 は評価大、7 から 4 までは評価中、3 から 1 は評価低とした。

c. 環境効果と経年劣化

表 A2.1.1(3)-1 に評価結果を示す。

環境効果については、全体的に効果が小さく、その割には困難な課題が多い。これらの中で、効果が大きい技術としては「高温損傷評価技術」がピックアップされている。効果としては、損傷評価技術により環境効果、劣化評価の高度化が図られ、許容値の合理化につながるというストーリーが考えられる。調査表では、破損メカニズムの解明(実験室レベル)→環境効果、劣化評価の高度化→許容値の合理化という流れが示されているが、モニタリングの中で損傷評価を行う技術(6-2-3-1)と組合せるとさらに効果が高いものになると考えられる。

d. 欠陥評価と LBB

表 A2.1.1(3)-2 に評価結果を示す。

欠陥評価と LBB については、全体的に効果が大きく、さらに残された課題も比較的少ない。定量的評価によると、欠陥評価技術を設計に取り込む効果自体は比較的小

さく、維持基準を前提とする設計裕度の切詰めというストーリーにより大きな合理化が期待できる。欠陥評価技術については、電中研を中心に比較的整備されており、データの拡充や試験研究の追加で相当の部分が解決される見通しを得ることが出来るものと考えられる。

LBB については、5-2-4-1 に挙げられている安全対応設備の合理化の観点からは効果が大きいものと考えられるが、漏洩自体を許容しない現状の一般認識を変えていかなければならないという大きな課題がある。しかしながら、LBB 成立性を前提に、ISI の合理化、すなわち体積検査を漏洩監視に置き換えることによっても大きな効果が期待でき、この場合には課題も比較的少ないことから、高い総合評価となっている。

確率論的な評価については、効果が大きいもののデータベースが未整備であり、今後大規模な試験研究が必要となるものと考えられるが、感度評価を実施することにより、重要となるパラメータの絞込は可能であり、その結果によっては残された課題が絞り込まれる可能性が高い。

e.維持(欠陥評価を除く)

表 A2.1.1(3)-3 に評価結果を示す。

維持については、全体的に効果が大きく、残された課題の評価に応じて総合評価が分かれている。これは、維持を拡充すれば設計裕度の切詰めが可能となるというストーリーに基づく評価であり、効果については前述の欠陥評価や LBB と同じ観点に立っている。モニタリングは、過度な安全裕度の合理化の代償として位置付けることが出来、その効果としては大きいものが期待できるが、モニタリング技術自体開発的な要素が多く、さらにハードの開発も伴うことから大きな投資が必要となるものと予想される。そのために総合評価としては中のレベルにあるが、投資額と合理化額の比較によっては、有望な技術として位置付けられる。

ISI 技術に関しては、RT に代わる UT 適用範囲の拡大やリスク評価に基づく対象部位の合理化が有望であり、すでに軽水炉では実用段階にある。

補修、取替技術は、長寿命化技術として有望であるが、これを前提に設計裕度を切詰めるためには多くの課題を解決する必要がある。この技術は、結果としては発電単価の低減に寄与する可能性が非常に高いと考えられるが、事前に効果を期待することには困難が多いものと考えられる。

f.まとめ

運転、維持に関する候補技術のストーリーをまとめると以下ようになる。

設計裕度の合理化はプラントの建設コストの低減に寄与し、そのためには維持基準の確立、そのための欠陥評価法の確立、モニタリング技術の確立が前提となる。モニタリング技術としては、高温損傷評価技術、薄膜センサーなどを用いたプロセス量のモニタリングによる評価が有望である。確率的な評価は課題が多いものの、効果も大きく感度評価を含め、その効果については定量的な検討を進めていく必要がある。一方、モニタリング技術や ISI 手法の合理化、LBB 概念による ISI 部位の削減は、運転費用の低減に寄与する。UT 適用範囲の拡大やリスク評価法の導入などが有望技術として挙げられる。補修、取替技術はプラントの長寿命化に寄与し、発電コストの低減に効果が出るものと考えられる。劣化材補修技術、劣化材の交換や機器取替技術の開発が有望である。

表 A2.1.1(3)-1

分野毎の合理化効果(運転・維持関連)

報告書目次(案)						候補技術		効果	課題	総合評価
番号	大項目	番号	中項目	番号	小項目	番号	提案			
4	環境効果と経年劣化	1	時効効果	1	ナトリウム環境効果 エロージョン 中性子照射効果 材料組織の観察に基づく強度評価	1	材料組織安定性評価(時効硬化)の導入【H】	小(1)	中(3)	中(4)
		2	環境効果	1		2	脆化損傷評価技術【H】	小(1)	大(1)	低(2)
				2		1	環境効果評価法整備【T】	中(3)	大(1)	中(4)
						1	エロージョン限界の明確化→配管内流速の増大【M】	中(3)	中(3)	中(6)
						2	腐食損傷評価技術【H】	中(3)	大(1)	中(4)
				3		1	中性子照射効果の評価方法の高度化(制限条件緩和)【M】／照射損傷評価技術【H】／環境効果評価法整備【T】	小(1)	大(1)	低(2)
		3	材料組織の観察に基づく強度評価	1		1	時効効果の導入(材料劣化・組織変化を考慮した強度評価手法の高精度化及び許容値の設定【H】)	小(2)	中(3)	中(5)
				2		2	高温損傷評価技術(組織変化等)【H】	大(4)	中(3)	中(7)
						1	時効効果の導入(材料劣化・組織変化を考慮した強度評価手法の高精度化及び許容値の設定【H】)	小(2)	中(3)	中(5)

表 A2.1.1(3)-2

分野毎の合理化効果(運転・維持関連)

JNC TN9400 2001-021

報告書目次(案)						候補技術		効果	課題	総合評価
番号	大項目	番号	中項目	番号	小項目	番号	提案			
5	欠陥評価とLBB	1	維持基準(軽水炉相当の欠陥評価)	1		1	維持基準の整備【MTK】	大(4)	中(3)	中(7)
		2	LBB	1	手法の高度化	1	LBB評価法の高度化と設計導入【HTK】	中(3)	中(3)	中(6)
				2	設計における考慮	1	LBB評価法の高度化と設計導入【HTK】	小(2)	中(3)	中(5)
				3	検査における考慮	1	LBBとISIの関係	大(4)	中(3)	中(7)
				4	設備の合理化効果	1	LBBによる配管漏洩時のNa漏洩量の低減及びSG伝熱管破損時のNa-水反応の緩和【M】	大(4)	大(1)	中(5)
		3	欠陥評価技術	1	き裂進展解析法整備	1	不安定破壊を考慮した配管の強度評価法の採用【M】	大(4)	小(4)	大(8)
				2	不安定破壊評価法整備	1		大(4)	小(4)	大(8)
				3	非き裂性欠陥評価法整備	1		大(4)	小(4)	大(8)
				4	余寿命評価法整備	1	き裂進展による余寿命評価技術【H】	大(4)	中(3)	中(7)
				5	き裂評価の設計への導入	1	き裂進展に基づく高温設計の導入【H】	小(2)	小(4)	中(6)
				6	欠陥許容設計	2	損傷値と設計許容値の定量化【K】	中(3)	大(2)	中(5)
						1	破壊力学的評価等による構造信頼性の向上(損傷許容設計)【M】	小(2)	小(4)	中(6)
		4	確率論的欠陥評価技術	1	評価法整備	1	確率論的欠陥評価技術【T】	大(4)	大(2)	中(6)
				2	データベース整備	1	母材および溶接部の欠陥存在確率分布データの整備(確率論的欠陥評価技術)【T】	大(4)	大(2)	中(6)

表 A2.1.1(3)-3

分野毎の合理化効果(運転・維持関連)

報告書目次(案)						候補技術		効果	課題	総合評価
番号	大項目	番号	中項目	番号	小項目	番号	提案			
A2-19 6	維持(欠陥評価を除く)	1	維持基準(軽水炉相当の検査、補修・取替)	1		1	維持基準の整備【MTK】	大(4)	小(4)	大(8)
		2	モニタリング	1	プロセス量	1	プロセス量(温度、流量など)のモニタリングによる評価【M】	大(4)	中(3)	中(7)
				2	プロセス量モニターのためのセンサー	2	損傷の間接情報の非破壊検査技術【H】	大(4)	大(2)	中(6)
				3	材料情報	1	薄膜センサー(温度、ひずみ)の開発【K】	大(4)	中(3)	中(7)
				4	プロセス量 and/or 材料情報による余寿命評価	1	直接的な損傷モニタリング【M】／欠陥の直接情報の非破壊検査技術／【H】損傷の直接情報の非破壊検査技術【H】	大(4)	大(2)	中(3)
				5	サーベランス	1	プラント監視診断技術(オンライン診断、オフライン診断)【T】	大(4)	大(2)	中(6)
				6	ダイレクトサーベランス	2	寿命カウンターの開発【K】	大(4)	大(2)	中(6)
				1	UT適用範囲の拡大	1	損傷・き裂監視用サーベランスTPの採用【H】	中(3)	大(2)	中(5)
				2	検査手法高度化	2	バイパスループによる材料劣化監視【K】	中(3)	大(1)	中(4)
		3	ISI	1	UT適用範囲の拡大	1	寿命モニターの導入【K】	中(3)	大(1)	中(4)
				2	検査手法高度化	1	UT適用範囲の拡大【K】	大(4)	小(4)	大(8)
		4	補修	1	劣化材の改質	1	ISI手法の高度化【M】	中(3)	中(3)	中(6)
				2	劣化材の補修	1	劣化材改質技術【H】	大(4)	大(2)	中(6)
		5	取替	1	劣化材の取替	1	劣化材補修技術【H】	大(4)	小(4)	大(8)
						1	劣化材交換技術【H】	大(4)	中(3)	中(7)
						2	機器取替技術の開発【K】	大(4)	中(3)	中(7)
						3	機器交換前提の設計【M】	大(4)	大(2)	中(6)
						4	機器、部位の交換計画の立案【H】	大(4)	大(2)	中(6)
						5	交換品の長寿命化【M】	小(2)	大(2)	中(4)
						6	メンテナンスフリー	大(4)	大(2)	中(6)
			その他							

(4) システム化規格

① システム化規格の導入

現状の設計基準は、基本的に設計に限定した基準であり、製作・検査あるいは運転開始後のメンテナンスとの関係は明確ではない。また、個々の規格・基準で個別に安全側の設定を行なっているため、全体として過度に保守的な評価を行なっている恐れがある。このような過度の保守性を排除するために、材料選定から運転開始後の ISI に至るまでの全ての段階を包括する基準（システム化規格）を構築する必要がある。

② 評価指標としてのリスクの導入

設計基準をシステム化規格とし、設計や製作・検査、運転等について統合した評価を実施するためには、システム化規格全体で単一の評価指標を設ける必要がある。このため、定量的な評価指標としてプラントの安全性及び経済性に基いたリスクを導入することが考えられる。

③ 裕度の交換

各機器における個々の段階での評価値のリスクに及ぼす重要度、影響度からプラント全体のリスクが計算される。このとき、トータルリスクがクライテリアを満足する範囲で、個々の評価の裕度を交換することによりコストの最小化を図ることが可能となる。

④ システム化規格化による合理化効果

システム化規格化により③で述べた各段階での裕度の交換が可能となる。また、従来構造設計基準では積極的に扱わなかった製作・検査等の項目についても設計の立場から合理化の検討を行なうことができる。より具体的な事項に対する合理化の可能性を表 A2.1.1(4)-1 にまとめて示す。

表 A2.1.1(4)-1 システム化規格化による合理化項目と期待される成果

項目	内容	合理化効果
破損限界の拡大	機器の機能喪失に基づいた破損ク ライテリアを設定。	許容値拡大及び寿命延長 寿命に関しては 10 倍程度以上の延 長が可能
機器交換・補修 前提の設計	供用期間中の寿命を保証せず、交 換・補修を前提とした設計を行う。	使用条件が厳しく寿命確保のため 多大なコストを掛けている機器の 合理化につながる。炉内構造物、 SG 伝熱管等が候補。 さらに、BOP 等に一般品の使用も 可能となる。
最適運転制御	発生応力の最小化を目指した運転 の最適化。	応力低減による設計合理化、機器 長寿命化が可能。
負荷条件のノミ ナル化	プラント熱過渡条件をノミナル値 ベースで評価。不確定性は統計的 手法により考慮する。	評価上発生応力を低減でき、運転 条件、過渡条件を緩和する事が可 能。
材料仕様の最適 化	材料仕様の詳細化による優秀材料 の許容応力の向上。経済上の重要 度に基づく使用材料の選定。	材料コストの低減が可能。原子カ スベックではない通常の鋼板の使 用による合理化効果は大。
施工の最適化	溶接方法や加工精度の等級を従来 の区分にとらわれず、リスクに基 づき最適化する ・重要度低→低コスト施工 ・重要度高→高信頼性施工	機器製作コストの最大の割合を示 す施工の最適化により合理化効果 は大。
検査・モニタリ ング	検査・モニタリング実施を担保に し設計裕度を低減する。さらに、 検査・モニタリングの点数・頻度 等を最適化。	設計自由度拡大に伴う合理化効果 大。
安全・保護設備 の削除	リスクによる定量的な評価により 安全に対する寄与度の小さな安 全・保護設備を削除する。	設備（例えば炉壁保護構造、後備 炉停止系等）削減による合理化効 果大。

A2. 1. 2 部位ごとの評価

いくつかの機器に対し、有望技術を適用した場合のコスト削減または長寿命化への寄与を検討し、合理化効果が大きいと考えられる技術を抽出した。

検討の対象とした機器は以下の通りである。

- ①原子炉容器
- ②中間熱交換器
- ③蒸気発生器
- ④1次系・2次系配管
- ⑤BOP

上記機器に対して適用可能な技術を抽出し、その効果を表 A2.1.2-1～5 及び図 A2.1.2-1～5 にまとめた。

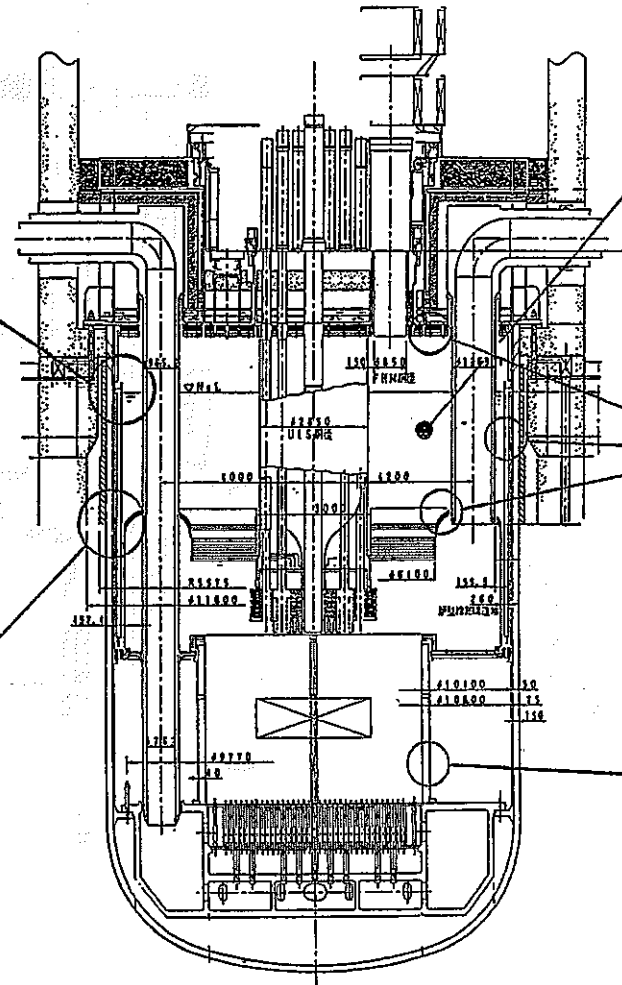
原子炉構造の合理化

JNC TN9400 2001-021

A2-23

高応力部
316S-FRや高Cr鋼を使用する事により、許容応力を向上
→長寿命化、信頼性向上
1-1-1-1, 1-2-2-1
非弾性解析により設計裕度拡大
→長寿命化
設計自由度拡大
3-7-1-1
設計条件ノミナル化により設計裕度拡大
→長寿命化
設計自由度拡大
9-1-1-1

容器胴
耐高温材料を開発する事によりプラントの高温化を図る。
→プラント効率向上
1-1-2-1
高価な天型リング鍛造材に代わり、溶接構造を採用
→材料コスト低減
2-1-1-1
高効率・高速溶接法を開発する事により施工期間を短縮
→施工コスト削減
2-1-3-1



炉内流動
プラント全体の熱流動をシミュレーションし過渡評価の制度を向上
→発生応力の低減
設計裕度の拡大
8-9-1-2

熱保護構造
評価の合理化により熱保護構造を削減
→物量削減
3

炉内構造物
交換を前提とした設計を行いトータルコストを最適化する
→設計・製作コスト削減
6-5-1-3

機器全般
検査・モニタリングの担保により設計裕度を削減
→設計自由度拡大
8, 9
き裂発生許容及び維持基準の整備
→許容応力拡大、寿命延長
5, 6
クリープ疲労クライテリアを向上させることにより許容応力を向上
→許容応力拡大
3-3-2-1

図 A2.1.2-1 原子炉容器（炉内構造を含む）の合理化

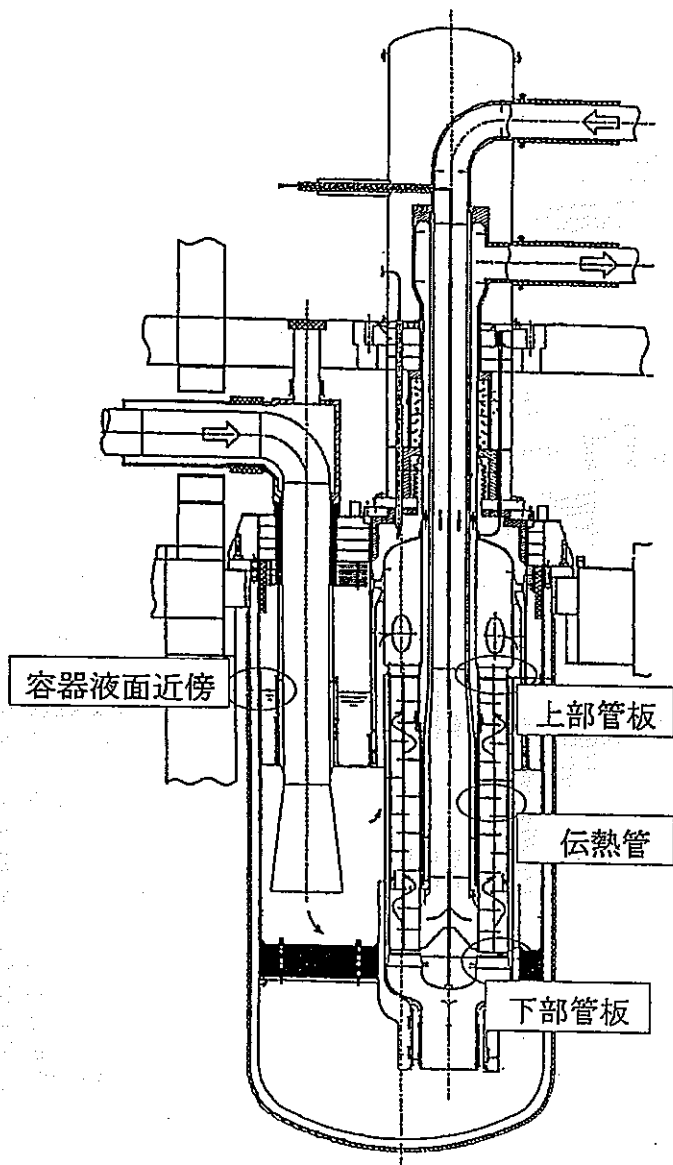
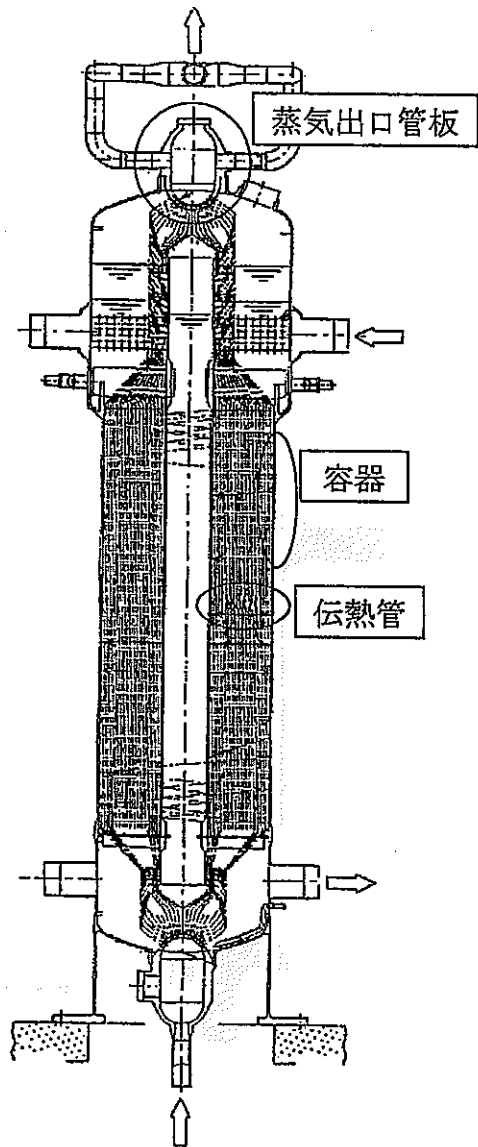


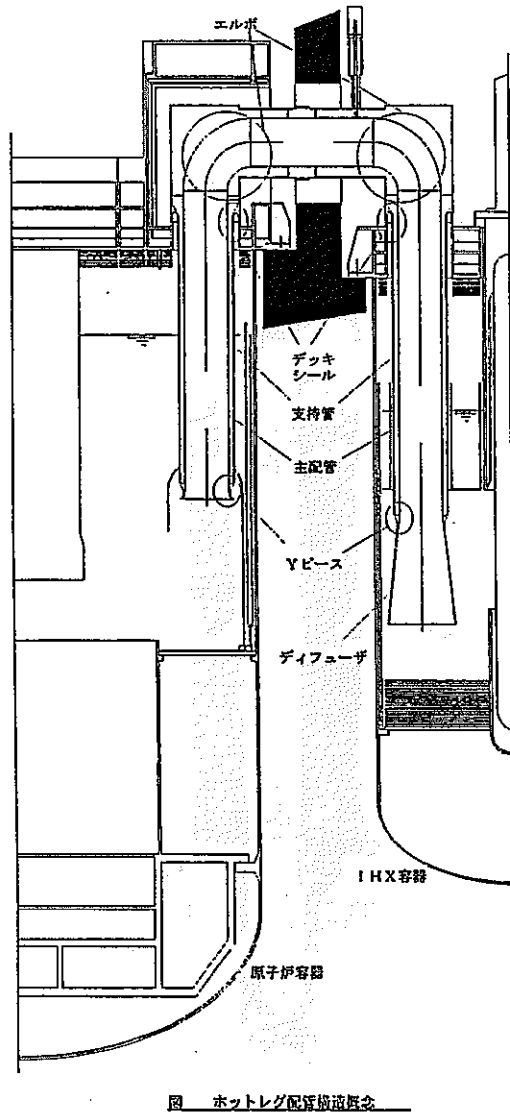
図 A2.1.2-2 中間熱交換器の合理化

候補技術	予想効果	
高Cr鋼の採用	物量削減	大
非弾性解析の採用	物量削減	大
Negligible creep curve の導入	設計工数低減	中
欠陥評価(設計導入、余寿命評価)	物量削減 ISIの簡素化	大
モニタリングと総合余寿命評価技術	長寿命化	大
確率論・リスク評価に基づく総合的評価	検査頻度の低減 冗長設備合理化	大
規格・想定 of 区分化	検査工数・項目削減 物量削減	大



候補技術	予想効果	
高Cr鋼の採用	物量削減	大
非弾性解析の採用	物量削減	大
Negligible creep curve の導入	設計工数低減	中
LBB評価法	ISI簡素化	大
管NA-水反応の緩和	肉厚増加防止	大
欠陥評価(設計導入、余寿命評価)	物量削減 ISIの簡素化	大
モニタリングと総合余寿命評価技術	長寿命化	大
機器交換前提設計	設計裕度の低減	中
確率論・リスク評価に基づく総合的評価	検査頻度の低減 冗長設備合理化	大
規格・想定との区分化	検査工数・項目削減 物量削減	大
2重管SGの採用	機器削減	大

図 A2.1.2-3 蒸気発生器の合理化

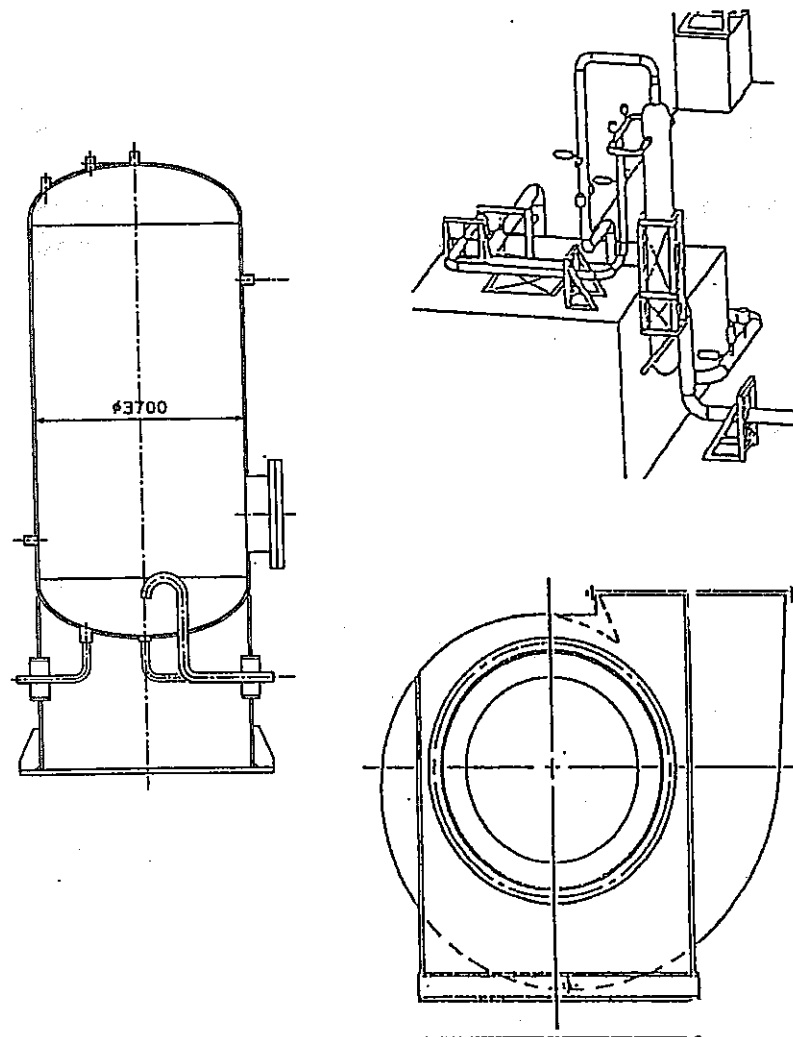


候補技術	予想効果	
高Cr鋼の採用	物量削減	大
表面改質	物量削減	大
高強度異材継手採用	配管長短縮	大
高効率溶接法の開発	工期短縮	中
非弾性解析の採用	物量削減	大
ひずみ制限値の緩和	物量削減	中
Negligible creep curve の導入	設計工数低減	中
維持基準の整備	設計裕度低減	中
LBB評価法	ISI簡素化	大
欠陥評価(設計導入、余寿命評価)	物量削減 ISIの簡素化	大
モニタリングと総合余寿命評価技術	長寿命化	大
機器交換前提設計	設計裕度の低減	中
確率論・リスク評価に基づく評価	検査頻度の低減 冗長設備合理化	大
規格・想定との区分化	検査工数・項目削減 物量削減	大

図 A2.1.2-4 1次系・2次系配管の合理化

BOPの合理化

機器をメンテナンスフリーとする →検査コスト低減 6-5-1-6
非バウンダリ機器の破損限界合理化 →設計裕度の合理化 長寿命化 8-1-1-1
機器・配管の重要度分類の見直し →製作・材料コストの低減 8-2-1-1
機器のモジュール化 →製作コストの削減 11-1-3-1
処理処分性の向上 →廃棄コストの削減 1-1-5-1
機器交換前提の設計 →設計裕度の合理化 3



設計から運転・検査までの総合的な評価 →製作コスト削減 長寿命化 8-5-1-1
安全性・経済性リスクに基づく総合的な健全性・機能評価 →製作コスト削減 長寿命化 8-6-1-1
経済性リスクに基づくNa漏洩対策 →冗長設備合理化 8-8-1-2
材料、製作仕様クラス区分化 →材料コスト低減 9-2-1-3
プラント概念に応じた適性材料の採用 →材料コスト低減 9-2-1-4
リスク情報に基づく検査 →検査コスト低減 9-8-2

図 A2.1.2-5 BOP の合理化

表 A2.1.2-1 プラント設計に対する合理化効果（原子炉容器、炉内構造を含む）

機器：原子炉容器（対象機器毎の効果）

効果：◎大，○中，小

部位	候補技術 (中項目)	合 理 化 効 果				総合評価				
		コスト削減		長寿命設計	その他			課題		
胴・一般部	改良ステンレス鋼の採用	許容応力向上	◎	長寿命化 (実寿命)	◎	信頼性向上	材料開発	開発要素大だが、長寿命化、信頼性向上が可能	採用	
	高 Cr 鋼の採用	許容応力向上	◎	長寿命化 (実寿命)	◎	低応力化	データ蓄積 溶接部強度確認	低応力化により、長寿命化、信頼性向上が可能	採用	
	非弾性解析の適用	評価の合理化 設計自由度の拡大	◎	長寿命化 (評価上)	○	信頼性向上	解析手法の開発 保守性の確保	実用化容易であり効果が大きい	採用	
炉内構造	設計条件のノミナル化	評価の合理化 設計自由度の拡大	◎	長寿命化 (評価上)	○	低応力化	バラツキの評価 保守性の確保	評価の合理化効果が大きい	採用	
	超耐熱材料の採用	高温化によるプラント効率向上	◎				材料開発	開発要素大であるが、経済的效果は大きい	採用	
	溶接継手の拡大採用	材料コスト低減	◎				継手の信頼性確保	現状の設計の前提となっている	採用	
	高効率・高速溶接法の開発	施工期間の削減	◎				施工法の信頼性確保	経済的效果が大きい	採用	
	プラントシミュレーション手法の開発	評価の合理化 設計裕度の合理化	○	長寿命化 (評価上)	○	信頼性向上	シミュレーション手法の開発	評価の合理化・信頼性向上効果が大きい	採用	
	制限値緩和 (FCI, ラチェット等)	評価の合理化 熱保護構造の削除	◎	長寿命化 (クライテリア)	○		評価手法の高度化 実験データの充実	物量の大幅な削減が可能となる	採用	
	交換を前提とした設計	設計裕度の合理化	○	寿命適正化	○	信頼性向上	経済性評価	信頼性向上の効果が大きい	採用	
	全般	設計から運転・検査までの総合的な裕度評価	製作コスト低減	◎	長寿命化	◎	合理化効果は任意の項目で得られる	リスク算定等評価法開発	システム規格として検討必須	採用
		安全性・経済性リスクに基づく総合的な健全性・機能評価	製作コスト低減	◎	長寿命化	◎	合理化効果は任意の項目で得られる	リスク算定等評価法開発	システム規格として検討必須	採用
		き裂発生許容	設計裕度の合理化	◎	長寿命化 (クライテリア)	◎		評価法・維持基準の策定	大幅な長寿命化が見込める	採用
クリープ疲労クライテリアの向上		設計裕度の合理化	◎	長寿命化 (評価上)	◎	信頼性向上	実験データ (長時間) の充実	評価の合理化効果が大きい	採用	

表 A2.1.2-2 中間熱交換器の合理化効果

効果：◎大、○中、小

部位	候補技術 (中項目)	合 理 化 効 果				総合評価	
		コスト削減	長寿命設計	その他	課題		
容器液面 近傍 上部管板 下部管板 伝熱管	高Cr鋼の採用	物量削減 (薄肉化、小型化)	◎ 長寿命材料	◎	データ蓄積 溶接部強度確認	課題解決容易 効果特大	採用
	高効率溶接法の開発	工期短縮	○		適用部位抽出 継手強度確認	課題解決容易	採用
	非弾性解析の採用	許容値の増大 →薄肉化	◎ 寿命延長	○	解析手法と評価結果 の相関性確認	合理化評価手法と しては適任	採用
	ひずみ制限値の緩和	高応力化	○ 長寿命	○ 機能健全性	評価法の開発	成立すれば効果あり	検討
	Negligible creep curveの導入	物量削減	○ 長寿命化		規制との関連 新材料に対する評価	評価法の簡便化	採用
	高温損傷評価技術	許容値の適正化	○ 寿命管理高精度 化	◎ 信頼性定量化	評価技術開発	技術開発は高度で あるが、開発必須	採用
	維持基準の整備	設計裕度低減	○ 寿命評価	○ 信頼性定量化	き裂、損傷評価との 関連性明確化	軽水炉並みの整備 は必要	検討
	欠陥評価（設計導 入、余寿命評価）	高応力化→物量削減 ISIの簡素化	◎ 余寿命評価	◎	データベース構築 強度の確認	確率論、リスク評 価手法を導入し、 合理化効果大	採用
	モニタリングと総 合余寿命評価技術	裕度の切り下げ	◎ 長寿命化	◎ 健全性確保 信頼性向上	検出技術・手法の開 発	技術開発は高度で あるが、開発必須	採用
	機器交換前提設計	設計裕度の低減	○ 適切寿命	◎	対象部位に選定	総合的性材監評価 必要	検討
	確率論・リスク評価 に基づく総合的健 全性・機能性評価	裕度の最適化 検査頻度の低減	◎ 適正寿命評価	◎ 健全性 機能性	リスク情報収集 リスク評価手法開発	システム規格とし て必須	採用
	確率論に基づく設 計裕度と総合的裕 度交換	設計裕度の最適化 冗長設備合理化	◎ 長寿命化	◎ 信頼性	リスク評価手法開発 リスク情報収集	システム規格とし て必須	採用
	規格の区分化	検査工数・項目削減 材料仕様簡素化	◎ モニタリング頻 度の最適化	◎	材料・製作・検査仕 様の一体化	システム規格とし て必須	採用
	想定区分化	許容値の緩和	◎		熟過度解析精度	熟過度解析精度向 上は必須課題	採用

表 A2.1.2-3 蒸気発生器の合理化効果

効果：◎大、○中、小

効果：◎大、○中、△小

部位	候補技術 (中項目)	合 理 化 効 果					総合評価		
		コスト削減		長寿命設計		その他			課題
容器	高Cr鋼の採用	物量削減 (薄肉化、小型化)	◎	長寿命材料	◎		データ蓄積 溶接部強度確認	課題解決容易 効果特大	採用
	高効率溶接法の開発	工期短縮	○				適用部位抽出 継手強度確認	課題解決容易	採用
	1次応力制限の緩和	許容値増大 (物量削減)	○				規制との関連	新材料の許容値策 定と関連付けで効 果	検討
	非弾性解析の採用	許容値の増大 →薄肉化(物量削減)	◎	寿命延長	○		解析手法と評価結果 の相関性確認	合理化評価手法と しては適任	採用
出口管板	ひずみ制限値の緩和	高応力化	○	長寿命	○	機能健全性	評価法の開発	成立すれば効果あ り	検討
入口管板	Negligible creep curveの導入	物量削減	○	長寿命化			規制との関連 新材料に対する評価	評価法の簡便化	採用
伝熱管	高温損傷評価技術	許容値の適正化	○	寿命管理高精度 化	◎	信頼性定量化	評価技術開発	技術開発は高度で あるが、開発必須	採用
	腐食損傷評価技術								
	維持基準の整備	設計裕度低減	○	寿命評価	○	信頼性定量化	き裂、損傷評価との 関連性明確化	軽水炉並みの整備 は必要	検討
	LBB評価法	ISI簡素化	◎				検出器の開発	フレイト系鋼の適用 範囲拡大で効果大	採用
	管NA-水反応の緩和	肉厚増加防止 内圧低減防止	◎				高温ラフチャージ取得 き裂自己拡大評価法 開発	プラント全体への 影響大	採用
	欠陥評価(設計導 入、余寿命評価)	高応力化→物量削減 ISIの簡素化	◎	余寿命評価	◎		データベース構築 強度の確認	確率論、リスク評 価手法を導入し、 合理化効果大	採用
	モニタリングと総合 余寿命評価技術	裕度の切り下げ	◎	長寿命化	◎	健全性確保 信頼性向上	検出技術・手法の開 発	技術開発は高度で あるが、開発必須	採用
	機器交換前提設計	設計裕度の低減	○	適切寿命	◎		対象部位に選定	総合的性材整評価 必要	検討
	確率論・リスク評価 に基づく総合的健全 性・機能性評価	裕度の最適化 検査頻度の低減	◎	適正寿命評価	◎	健全性 機能性	リスク情報収集 リスク評価手法開発	システム規格とし て必須	採用
	確率論に基づく設計 裕度と総合的裕度交 換	設計裕度の最適化 冗長設備合理化	◎	長寿命化	◎	信頼性	リスク評価手法開発 リスク情報収集	システム規格とし て必須	採用
	規格の区分化	検査工数・項目削減 材料仕様簡素化	◎	モニタリング頻 度の最適化	◎		材料・製作・検査仕 様の一体化	システム規格とし て必須	採用
	想定区分化	許容値の緩和	◎				熱過度解析精度	熱過度解析精度向 上は必須課題	採用
	2重管SGの採用	2次系削除による機 器削減 制御系、機器削減	◎				欠陥評価、LBB技 術と関連	プラント全体への 効果大	採用

表 A2.1.2-4 1次系・2次系配管の合理化効果

効果：◎大，○中，△小

部位	候補技術 (中項目)	合 理 化 効 果					総合評価		
		コスト削減		長寿命設計		その他			課題
	高Cr鋼の採用	物量削減 (薄肉化、小型化)	◎	長寿命材料	◎		データ蓄積 溶接部強度確認	課題解決容易 効果特大	採用
	表面改質	許容値増大 薄肉化(物量削減)	◎	長寿命化	◎		施工方法と効果確認	補修技術と合わせ 効果大	採用
	高強度異材継手採用	配管長短縮	◎	長寿命化	◎	信頼性	新接合技術開発 強度評価法確立	開発要素大だが、 効果大。開発見通し有り。	採用
	高効率溶接法の開発	工期短縮	○				適用部位抽出 継手強度確認	課題解決容易	採用
	非弾性解析の採用	許容値の増大 →薄肉化(物量削減)	◎	寿命延長	○		解析手法と評価結果 の相関性確認	合理化評価手法と しては適任	採用
	ひずみ制限値の緩和	高応力化	○	長寿命	○	機能健全性	評価法の開発	成立すれば効果あり	検討
	Negligible creep curveの導入	物量削減	○	長寿命化			規制との関連 新材料に対する評価	評価法の簡便化	採用
	管内流量の増大	機器の小型化 配管細径化	○				エロージョン限界の明確化	慎重なデータ蓄積と 評価法必要	検討
	高温損傷評価技術	許容値の適正化	○	寿命管理高精度化	◎	信頼性定量化	評価技術開発	技術開発は高度であるが、開発必須	採用
	維持基準の整備	設計裕度低減	○	寿命評価	○	信頼性定量化	き裂、損傷評価との 関連性明確化	軽水炉並みの整備は必要	検討
	LBB評価法	ISI簡素化	◎				検出器の開発	フェライト系鋼の適用 範囲拡大で効果大	採用
	欠陥評価(設計導入、 余寿命評価)	高応力化→物量削減 ISIの簡素化	◎	余寿命評価	◎		データベース構築 強度の確認	確率論、リスク評価 手法を導入し、 合理化効果大	採用
	モニタリングと総合 余寿命評価技術	裕度の切り下げ	◎	長寿命化	◎	健全性確保 信頼性向上	検出技術・手法の開発	技術開発は高度であるが、開発必須	採用
	機器交換前提設計	設計裕度の低減	○	適切な寿命	◎		対象部位に選定	総合的性材整評価 必要	検討
	確率論・リスク評価 に基づく総合的健全性・ 機能性評価	裕度の最適化 検査頻度の低減	◎	適正寿命評価	◎	健全性 機能性	リスク情報収集 リスク評価手法開発	システム規格として 必須	採用
	確率論に基づく設計 裕度と総合的裕度交換	設計裕度の最適化 冗長設備合理化	◎	長寿命化	◎	信頼性	リスク評価手法開発 リスク情報収集	システム規格として 必須	採用
	規格の区分化	検査工数・項目削減 材料仕様簡素化	◎	モニタリング頻 度の最適化	◎		材料・製作・検査仕 様の一体化	システム規格として 必須	採用
	想定区分化	許容値の緩和	◎				熟過度解析精度	熟過度解析精度向 上は必須課題	採用

表 A2.1.2-5 プラント設計に対する合理化効果 (BOP)

機器:BOP (対象機器毎の効果)

効果:◎大, ○中, 小

部位	候補技術 (中項目)	合 理 化 効 果				総合評価			
		コスト削減		長寿命設計	その他			課題	
全般	処理処分性の向上	廃棄コストの削減	○			材料選定 コスト算定	ニーズ・効果が不明確	検討	
	機器交換前提の設計	設計裕度の合理化	◎	寿命適正化	○	経済性評価	一般品・低級品が使用可能となり効果大	採用	
	機器のメンテナンスフリー化	検査コスト低減	◎			信頼性確保 リスク管理	検査廃止による合理化効果は大きい	採用	
	非バウンダリ機器の破損限界	設計裕度の合理化	◎	長寿命化 (クライテリア)	◎	信頼性確保, リスク管理, 評価法確立	不要な裕度を削減する事により合理化効果大	採用	
	機器・配管の重要度分類の見直し	製作コスト低減	◎			リスク算定等評価法開発	品質・コストの最適化が可能	採用	
	設計から運転・検査までの総合的な裕度評価	製作コスト低減	◎	長寿命化	◎	合理化効果は任意の項目で得られる	リスク算定等評価法開発	システム規格として検討必須	採用
	安全性・経済性リスクに基づく総合的な健全性・機能評価	製作コスト低減	◎	長寿命化	◎	合理化効果は任意の項目で得られる	リスク算定等評価法開発	システム規格として検討必須	採用
	経済性リスクに基づく Na 漏洩対策	冗長設備合理化	◎			リスク算定等評価法開発	設備削減による合理化効果大	採用	
	材料, 製作仕様クラス区分化	材料コスト削減	◎			リスク算定等評価法開発	品質・コストの最適化が可能	採用	
	プラント概念に応じた適性材料の採用	材料コスト低減	◎	長寿命化 (実寿命)	○	リスク算定等評価法開発	品質・コストの最適化が可能	採用	
	リスク情報に基づく検査	検査コスト低減	◎	長寿命化 (実寿命)	○	リスク算定等評価法開発	システム規格として検討必須	採用	
	機器のモジュール化	製作コスト低減	◎		信頼性向上 (現地施工量低減による)	特になし	実現容易であり, 効果が大きい	採用	

A2. 2 合理化効果の試算

有望技術のうち、現状で効果が大きいと考えられ、かつ定量評価が比較的容易である以下の3項目について、合理化効果を試算した。

- 熱荷重条件の最適化による合理化
- 確率論によりき裂を考慮した設計
- 表面処理効果、非弾性解析、維持基準の効果

A2.2 合理化効果の試算

A2.2.1 熱荷重条件の最適化による合理化

(1) 概要

負荷条件の最適化として、FBRの主たる荷重である熱荷重を最適化し過度な裕度を排除することが、実質的な低コスト・長寿命につながる。

ここでは、そのための3つの方策についてその手法と、定量化の例を示す。

第1の方法は、熱過渡条件設定における「多直線化」での過度な裕度をなくすことである。第2の方法は、プラントシステム側と調整して熱過渡を緩和することである。これは本来の設計のあり方であるが、現状必ずしも最適化がなされているとは言い切れない。第3の方法は、事象想定回数に対する荷重の厳しさを適切に考慮する（最も厳しい様態が前想定回数発生するわけではない）方法、すなわち事象における荷重の分布を考慮する方法である。

(2) 熱荷重条件の最適化技術

a. 多直線化の見直し

プラントの構造設計では、動特性解析→（熱流動解析）→構造解析→健全性評価という手順で、設計が進められる。

ここで、構造設計側に与えられる設計荷重条件として、熱負荷に関するものは構造物に加わる温度と熱伝達率などの伝熱条件である。

熱的条件は、運転状態（通常運転、トリップ等）ごとに異なるので、それぞれの状態について与えられる。

各運転状態ごとの熱荷重条件については、プラントのシステムパラメータのふれ幅を考慮し、構造にとって最も厳しい条件を包絡するよう設定する。例として、FBR実証炉の中間熱交換器において手動トリップに対し考慮されている制御パラメータを表 3.2.1(2)a-1 に示す。従来は、ノミナルの状態での動特性解析を行い、各パラメータが構造健全性（発生応力）に厳しい影響を与えそうなものをいくつか振って解析し、最も厳しい状態を包絡するよう多直線化を実施している。多直線化の方法としては、温度変化勾配が厳しくなる場合はこの最急勾配をとり（ α 係数）、温度落差が大きくなる場合はその最大温度落差を包絡する（ β 係数）ようにする。多直線化の例を図 A2.2.1(2)a-1 に示す。図は、最も勾配

が厳しくなる場合 $\alpha = 1.5$ 、最も温度落差が大きくなる場合 $\beta = 1.5$ として仮に引いた線である。このようにして作成された多直線は、最も厳しい場合を「包絡」はしているが必ずしもそのような状態が生じる訳ではない。

実際に評価しなければならないのは、各制御パラメータが変動した場合の最も厳しい場合であるが、これを実施しようとする表 A2.2.1(2)a-1 のケースでも 4374 回程度 (制御パラメータ 3 個が 7 種類 2 個が 1 種類 (ポンプトリップまとめて考えて) とすると 2×3^7) の動特性解析及び応力解析を実施しなければならない。従来これが現実的でないことから多直線化を実施していたが、多直線化手法を用いるが故に過度の保守性が入る可能性が高かった。

1 つのアプローチとしては、計算を高速に行い数千ケースのパラメータを実際に評価することであるが、現在の計算機環境などからはまだ困難な部分が多い。

ここでは、統計的な手法を用いて最悪の条件を探し出しこれを当該運転条件の代表とすることで多直線化による過度の裕度を排除することを考える。

ここで用いるのは実験計画法による手法で、有望な手法として研究が進められている⁽¹⁾。表 A2.2.1(2)a-1 に示す制御パラメータを表 A2.2.1(2)a-2 に示す直交表という表に割り付け解析を、そこに示されるケースを解析 (実験計画法では実験という) することで、フルマトリクスの解析数千ケースを実施したのと同様の情報を得ることができる。この例の場合は 4374 ケースを 18 ケースに落とすことができる。従来のノミナル 1 ケース + パラメータ数ケースに比較すると解析ケースは増えるが現実的な解析ケースである。ここで、制御の項目を影響「因子」、パラメータを水準と呼ぶ。例では、8 因子で水準が 2 または 3 となる。

この 18 ケースの解析を JNC 殿所有の熱流動一構造統合解析コード parts を用いて実施した。parts コードでは、プラント内の各部分 (R/V、IHX 等) の熱的特性と、対象としてみたい部位の GREEN 関数準備しておくことにより、プラントの動特性を解き、その時点での応力応答が得られるコードである。

これにより得られた 18 ケースについて、1 例として IHX のガス巻き込み防止構造案の解析を実施した結果の応力値を表 A2.2.1(2)a-3 に示す。この結果を要因分析したものを図 A2.2.1(2)a-2 に示す。要因分析結果からどの因子が最も応力に寄与しているかがわかると同時に、算術的处理により任意の条件での応力値が算出可能となる。一般には最悪ある

いは最良の条件を求めたい場合が多いが、18ケースの中に必ず最悪・最良の条件があるとは限らない。そこで、最悪、最低を推定する。本統計処理においては、要因の加法性が得られているので、任意の応力は σ は

$$\sigma = \Sigma (\sigma_i - Y)$$

σ_i : ある因子 i の水準（パラメータ）が想定値（たとえば MAX）であることによる応力の寄与分。要因分析結果から得られる。

Y : 平均

とあらわされ、想定する水準の組み合わせを

因子A : 水準 MAX、因子B : 水準 MIN・・・のように決定するとその組み合わせでの応力が想定可能である。最悪・最悪の組み合わせは要因分析図で最悪・最良となる条件が判断できるため、ここからその組み合わせでの応力を算定する。表 A2.2.1(2)a-4 に推定した最良・最悪の場合の応力値と、実際にその組み合わせで解析した場合の結果を比較して示す。ほぼ良好な推定が可能となっている。

このようにすることで、最悪の条件が確定されるため、その場合について健全性評価を実施すれば、多直線化を行う必要は無いと考えられる。

1例として、上記で解析した熱過渡を多直線化した場合と最悪条件とした場合の比較を実施した。多直線化する際の係数 α β は今回は最悪条件とノミナル値の比の最大値から決定した。実際には、いくつかのパラメータ解析と設計者の判断、他の運転状態での値などから決定されている。今回は最悪条件が既知であるので、多直線化手法における保守性のみが抽出された形となっている。 $\alpha=1.7$ 、 $\beta=1.2$ となった。

多直線化した温度変化と最悪条件、ノミナル条件の温度変化を図 A2.2.1(2)a-3に示す。また、応力値を図 A2.2.1(2)a-4に示す。発生最大応力は、最悪条件の場合420MPaであるのに対し、多直線化の場合462MPaであり1割の応力値が過度に設定されていることがわかる。

b. プラントシステム側と調整した熱過渡の最適化

現在の設計においても考慮されているが、プラントのシステムパラメータが応力あるいは損傷にどの程度利いているかの定量的評価が難しいため、必ずしも最適化されていないのが現実である。

a 項の例の様に実験計画法を取り入れた要因分析を行うと、発生応力に与える制御因子の影響度合いがわかるので、これを調整することで発生応力を引き下げることが可能である。

図 A2.2.1(2)b-1 からは 1 次ポンプと 2 次ポンプポンプモーター流量の影響が大きいことがわかるので、この影響を小さくするよう対策とする。単純な例としては、流量のふれ幅をそれぞれ $1/3$, $1/2$ 程度にできたとする。すると要因分析図は図 A2.2.1(2)b-1 の様になると想定される（平均は変わらずふれ幅の大きい部分が無くなる）。

この結果最悪条件を求めると、約 380 MPa となり、 462 MPa に対し 80 MPa の合理化となり約 2 割の応力低減が可能となる。

もちろん最良の条件をシステムパラメータ側で実現できれば発生応力は 266 MPa まで低減され、約 43% の応力低減することも可能である。

c. 事象想定回数での荷重の分布の考慮

次に a.及び b.項では最悪条件を逃さずかつ過度に保守側にならないことを条件としていたが、検討からもわかるように、最悪条件はプラントシステムパラメータがあるふれ幅のどこかにたまたまいた場合の組み合わせである。これまでは、必ず最悪の組み合わせでいることとしていたが、その組み合わせでいる確率は小さく、これを現実的な確率密度分布（度数分布）で評価することにより、合理化を狙うことができる。

具体的手法としては、b.項までに実施した実験計画法による要因分析結果を用い、プラントシステムパラメータのふれに対する確率との関係から現実的な度数分布を算定する。検討のフローを図 A2.2.1(2)c-1に示す。まず、要因分析を実施する。次に、プラントが影響因子の各水準にいる確率を想定する。今回は、表 A2.2.1(2)c-1 に示すように、2水準の場合は1／2の確率でどちらかの水準、3水準の場合は1／3の確率でいずれかの水準にいと仮定した。

要因分析の結果をもとに、因子のすべての水準の組み合わせについて応力を算定する。今回の例では4374ケース。また、それぞれのケースの発生確率を算定する。今回は各水準の確率を同一にしているため、すべてのケースの発生確率は均一となっている。各ケースの発生応力の分布を図 A2.2.1(2)c-2に示す。

次に、ある応力範囲にあるケースをまとめる。たとえば300MPa以上320MPa以下という具合である。この範囲に入るケースとその発生回数を作成する。図 A2.2.1(2)c-3 に示す棒グラフのイメージである。発生回数は発生確率及び総事象想定回数から算定する。

設定した範囲の最大の応力が当該回数発生する度数分布とする。

設定した度数分布から、当該応力回数での損傷を計算する。

表 A2.2.1(2)a-1 I HX手動トリップにおける影響因子の設定値

影響因子	条 件	ノミナル値	パラメータ値	
			MAX値	MIN値
崩壊熱		ノミナル条件Aの崩壊熱	ノミナル値Aの崩壊熱を用い。プラス側誤差 10%、カロリーメトリックス誤差 2%を考慮 ノミナル値A $\times 1.1 \times 1.02$	ノミナル値Bを用い、マイナス側誤差 15%、カロリーメトリックス誤差 2%を考慮 ノミナル値B $\times 0.85 \times 0.98$
1次主ポンプコストダウン特性 (流量半減時間)		6.5 秒	系統圧損誤差 10%を考慮 6.5 $\times 1.1 \rightleftharpoons 7.1$ 秒	5.5 秒
2次主ポンプコストダウン特性 (流量半減時間)		6.5 秒	7.5 秒	5.5 秒
1次ポンプポニーモータ流量		15 %	系統圧損誤差 10%を考慮 15 $\times 1.1 \rightleftharpoons 17$ %	系統圧損誤差 10%を考慮 15 $\times 0.9 \rightleftharpoons 13$ %
2次ポンプポニーモータ流量		8 %	系統圧損誤差 10%を考慮 8 $\times 1.1 \rightleftharpoons 9$ %	系統圧損誤差 10%を考慮 15 $\times 0.9 \rightleftharpoons 7$ %
トリップ後のSG給水温度		240℃	圧力設定誤差 $+2\text{kg/cm}^2$ を考慮 $+3^\circ\text{C}$	圧力設定誤差 -2kg/cm^2 を考慮 -3°C
トリップ後のSG給水流量		25 %	流量制御系の計測/設定誤差を考慮 $+3\%$	流量制御系の計測/設定誤差を考慮 -3%
1次主ポンプトリップ遅れ時間		0.3 秒	遅れ要因の最大値を考慮 2 秒	—
2次主ポンプトリップ遅れ時間		0.3 秒	遅れ要因の最大値を考慮 2 秒	—

表 A2.2.1(2)a-2 影響因子の実験計画法による直交表L18における割り付け

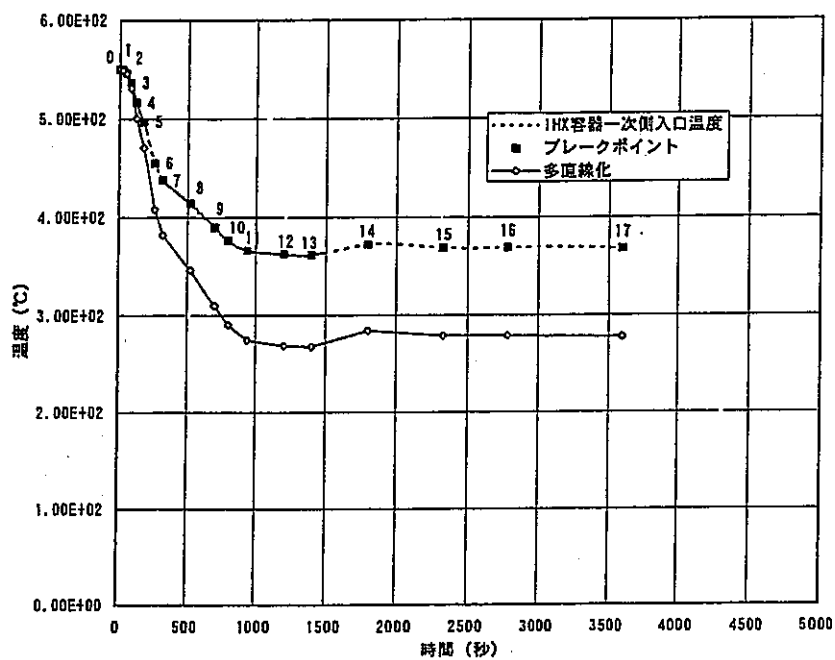
ケース No.	A. ポンプト リップ遅れ時間	B. 崩壊熱	C. 1次主ポン プ流量半減時間	D. 2次主ポン プ流量半減時間	E. 1次ポンプ ボニーマータ流	F. 2次ポンプ ボニーマータ流	G. トリップ後 のSG給水温度	H. トリップ後 のSG給水流量
1	1 NOM	1 MIN	1 MIN	1 MIN	1 MIN	1 MIN	1 MIN	1 MIN
2	1 NOM	1 MIN	2 NOM	2 NOM	2 NOM	2 NOM	2 NOM	2 NOM
3	1 NOM	1 MIN	3 MAX	3 MAX	3 MAX	3 MAX	3 MAX	3 MAX
4	1 NOM	2 NOM	1 MIN	1 MIN	2 NOM	2 NOM	3 MAX	3 MAX
5	1 NOM	2 NOM	2 NOM	2 NOM	3 MAX	3 MAX	1 MIN	1 MIN
6	1 NOM	2 NOM	3 MAX	3 MAX	1 MIN	1 MIN	2 NOM	2 NOM
7	1 NOM	3 MAX	1 MIN	2 NOM	1 MIN	3 MAX	2 NOM	3 MAX
8	1 NOM	3 MAX	2 NOM	3 MAX	2 NOM	1 MIN	3 MAX	1 MIN
9	1 NOM	3 MAX	3 MAX	1 MIN	3 MAX	2 NOM	1 MIN	2 NOM
10	2 MAX	1 MIN	1 MIN	3 MAX	3 MAX	2 NOM	2 NOM	1 MIN
11	2 MAX	1 MIN	2 NOM	1 MIN	1 MIN	3 MAX	3 MAX	2 NOM
12	2 MAX	1 MIN	3 MAX	2 NOM	2 NOM	1 MIN	1 MIN	3 MAX
13	2 MAX	2 NOM	1 MIN	2 NOM	3 MAX	1 MIN	3 MAX	2 NOM
14	2 MAX	2 NOM	2 NOM	3 MAX	1 MIN	2 NOM	1 MIN	3 MAX
15	2 MAX	2 NOM	3 MAX	1 MIN	2 NOM	3 MAX	2 NOM	1 MIN
16	2 MAX	3 MAX	1 MIN	3 MAX	2 NOM	3 MAX	1 MIN	2 NOM
17	2 MAX	3 MAX	2 NOM	1 MIN	3 MAX	1 MIN	2 NOM	3 MAX
18	2 MAX	3 MAX	3 MAX	2 NOM	1 MIN	2 NOM	3 MAX	1 MIN

表 A2.2.1(2)a-3 各ケースにおける応力値

ケース No.	解析結果		解析条件									
	発生時刻	発生応力	A. ポンプトリップ 遅れ時間	B. 崩壊熱	C. 1次主ポンプ 流量半減時間	D. 2次主ポンプ 流量半減時間	E. 1次ポンプボ ーモータ流量	F. 1次ポンプボ ーモータ流量	G. トリップ後のS G給水温度	H. トリップ後のS G給水流量		
1	1050	336	1 NOM	1 MIN	1 MIN	1 MIN	1 MIN	1 MIN	1 MIN	1 MIN		
2	950	352	1 NOM	1 MIN	2 NOM	2 NOM	2 NOM	2 NOM	2 NOM	2 NOM		
3	885	367	1 NOM	1 MIN	3 MAX	3 MAX	3 MAX	3 MAX	3 MAX	3 MAX		
4	970	330	1 NOM	2 NOM	1 MIN	1 MIN	2 NOM	2 NOM	3 MAX	3 MAX		
5	895	354	1 NOM	2 NOM	2 NOM	2 NOM	3 MAX	3 MAX	1 MIN	1 MIN		
6	1050	314	1 NOM	2 NOM	3 MAX	3 MAX	1 MIN	1 MIN	2 NOM	2 NOM		
7	1080	393	1 NOM	3 MAX	1 MIN	2 NOM	1 MIN	3 MAX	2 NOM	3 MAX		
8	655	289	1 NOM	3 MAX	2 NOM	3 MAX	2 NOM	1 MIN	3 MAX	1 MIN		
9	995	314	1 NOM	3 MAX	3 MAX	1 MIN	3 MAX	2 NOM	1 MIN	2 NOM		
10	655	334	2 MAX	1 MIN	1 MIN	3 MAX	3 MAX	2 NOM	2 NOM	1 MIN		
11	1085	404	2 MAX	1 MIN	2 NOM	1 MIN	1 MIN	3 MAX	3 MAX	2 NOM		
12	655	311	2 MAX	1 MIN	3 MAX	2 NOM	2 NOM	1 MIN	1 MIN	3 MAX		
13	1160	276	2 MAX	2 NOM	1 MIN	2 NOM	3 MAX	1 MIN	3 MAX	2 NOM		
14	1075	365	2 MAX	2 NOM	2 NOM	3 MAX	1 MIN	2 NOM	1 MIN	3 MAX		
15	990	369	2 MAX	2 NOM	3 MAX	1 MIN	2 NOM	3 MAX	2 NOM	1 MIN		
16	955	376	2 MAX	3 MAX	1 MIN	3 MAX	2 NOM	3 MAX	1 MIN	2 NOM		
17	1130	276	2 MAX	3 MAX	2 NOM	1 MIN	3 MAX	1 MIN	2 NOM	3 MAX		
18	1085	347	2 MAX	3 MAX	3 MAX	2 NOM	1 MIN	2 NOM	3 MAX	1 MIN		

表 A2.2.1(2)a-4 最悪・最良条件

	最良の組み合わせ	最悪の組み合わせ
A. ポンプトリップ遅れ時間	1	2
B. 崩壊熱	3	1
C. 1次主ポンプ流量半減時間	3	1
D. 2次主ポンプ流量半減時間	1	3
E. 1次ポンプボニーモータ流量	3	1
F. 2次ポンプボニーモータ流量	1	3
G. トリップ後のSG給水温度	3	1
H. トリップ後のSG給水流量	1	3
予想応力 MP a (kgf/mm ²)	265.7 (27.10)	416.8 (42.50)
発生応力MP a (kgf/mm ²)	272.2 (27.75)	419.8 (42.80)



$$\alpha(dt/dt) = 1.5, \beta(\Delta T) = 1.5$$

図 A2.2.1(2)a-1 多直線化の例

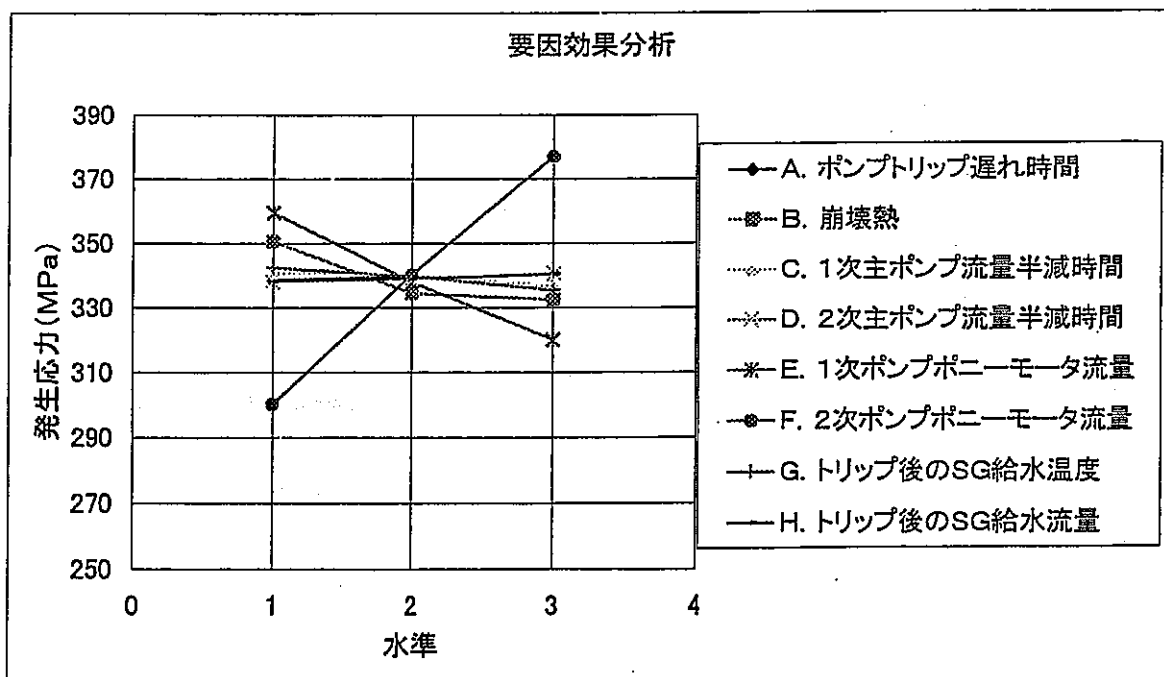


図 A2.2.1(2)a-2 要因効果

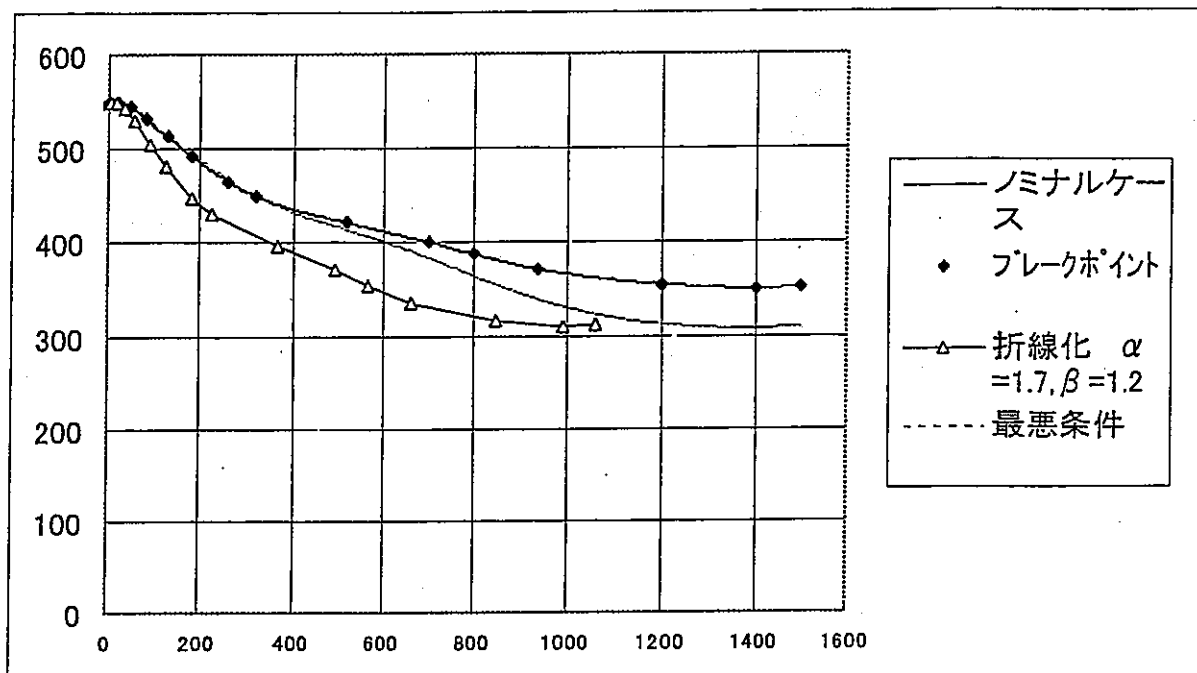


図 A2.2.1(2)a-3 多直線化と最悪条件の比較

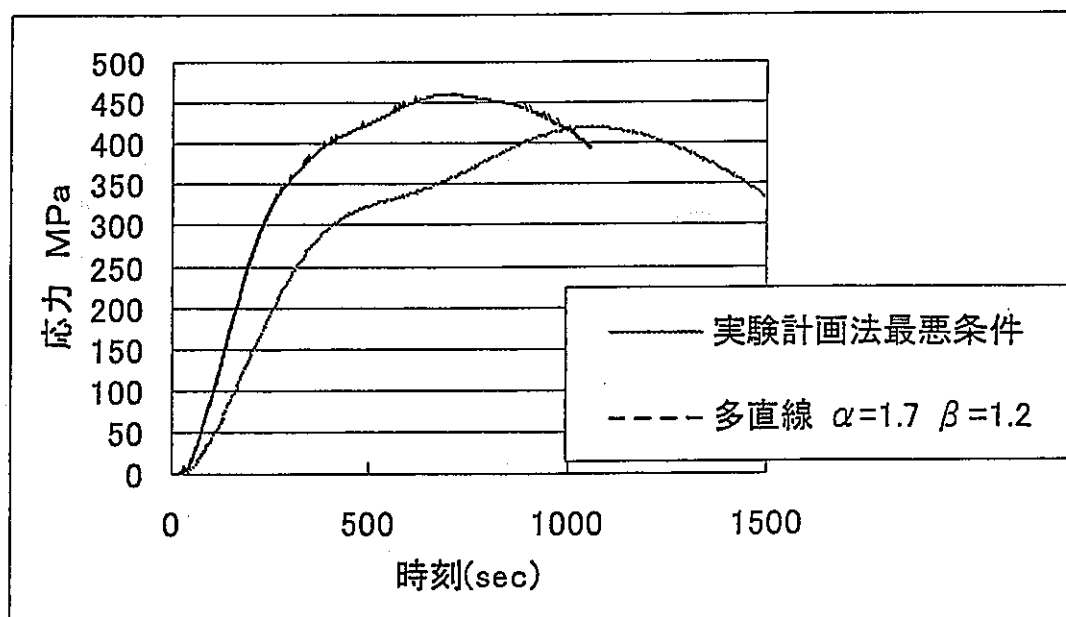


図 A2.2.1(2)a-4 多直線化と最悪条件の応力比較

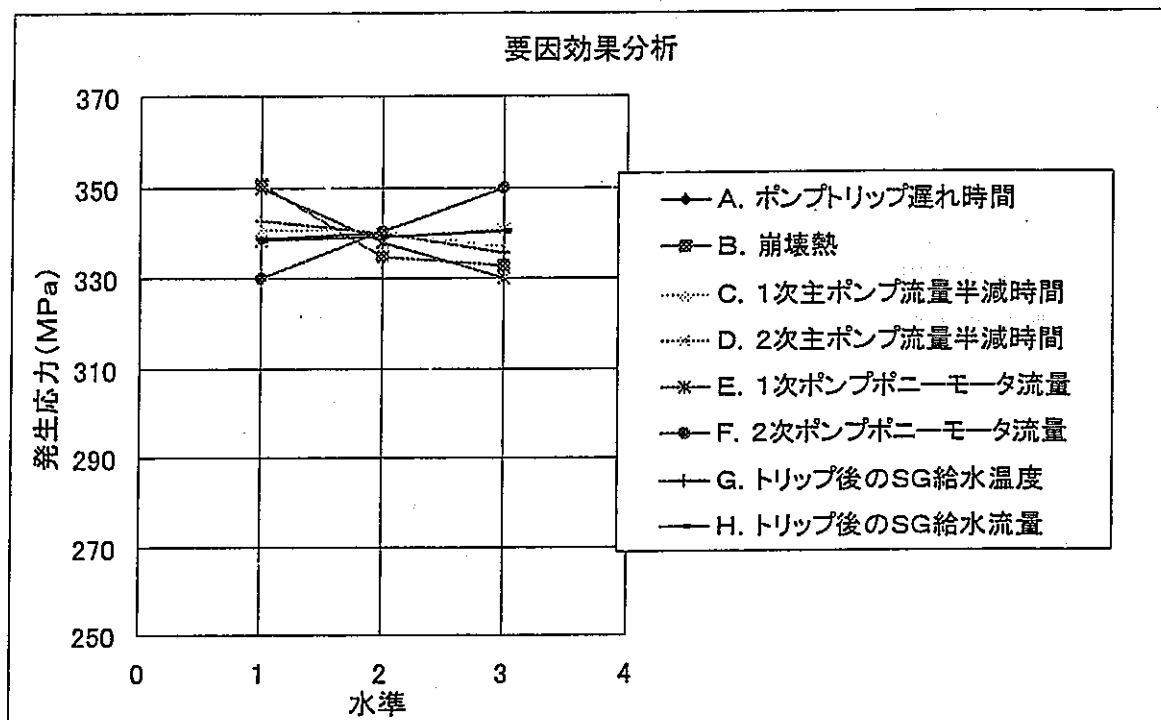


図 A2.2.1(2)b-1 プラントシステムと調整を想定した要因効果図

	水準 1	水準 2	水準 3
A. ポンプトリップ遅れ時間	1 / 2	1 / 2	—
B. 崩壊熱	1 / 3	1 / 3	1 / 3
C. 1次主ポンプ流量半減時間	1 / 3	1 / 3	1 / 3
D. 2次主ポンプ流量半減時間	1 / 3	1 / 3	1 / 3
E. 1次ポンプポンニ—モータ流量	1 / 3	1 / 3	1 / 3
F. 2次ポンプポンニ—モータ流量	1 / 3	1 / 3	1 / 3
G. トリップ後のSG給水温度	1 / 3	1 / 3	1 / 3
H. トリップ後のSG給水流量	1 / 3	1 / 3	1 / 3

表 A2.2.1(2)c-1 仮定した各水準の発生確率

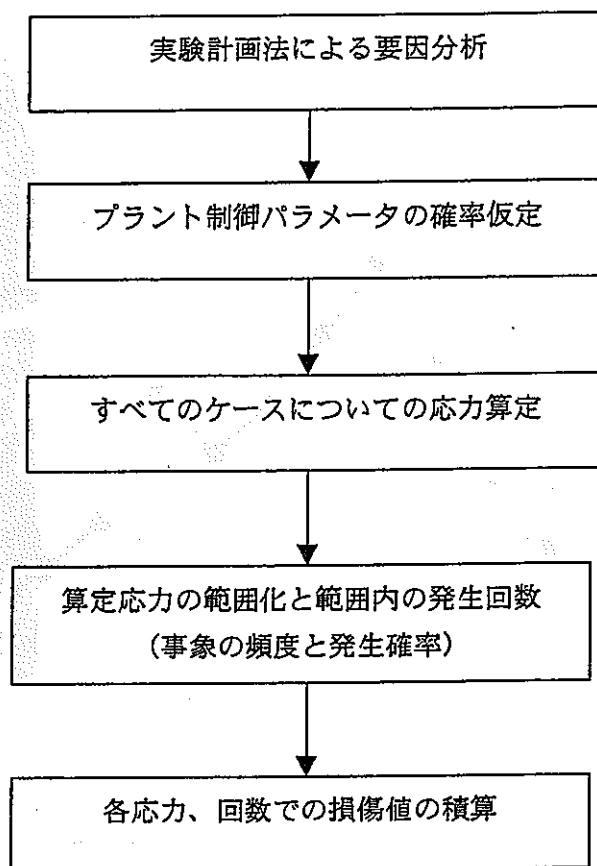


図 A2.2.1(2)c-1 発生応力の度数分布の算定フロー

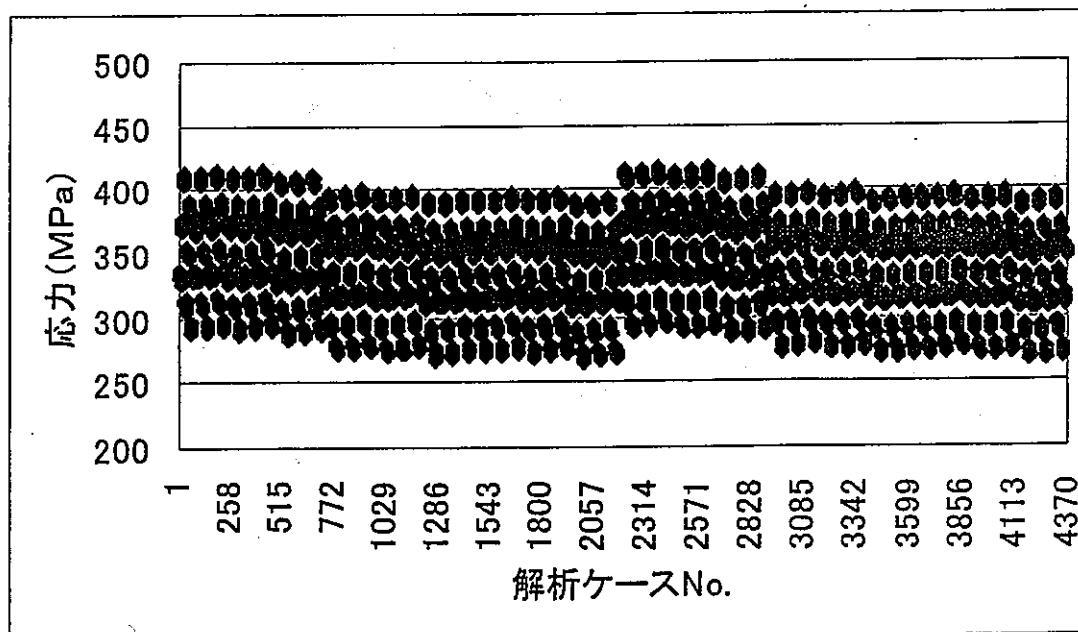


図 A2.2.1(2)c-2 発生応力の分布(4374 ケース)

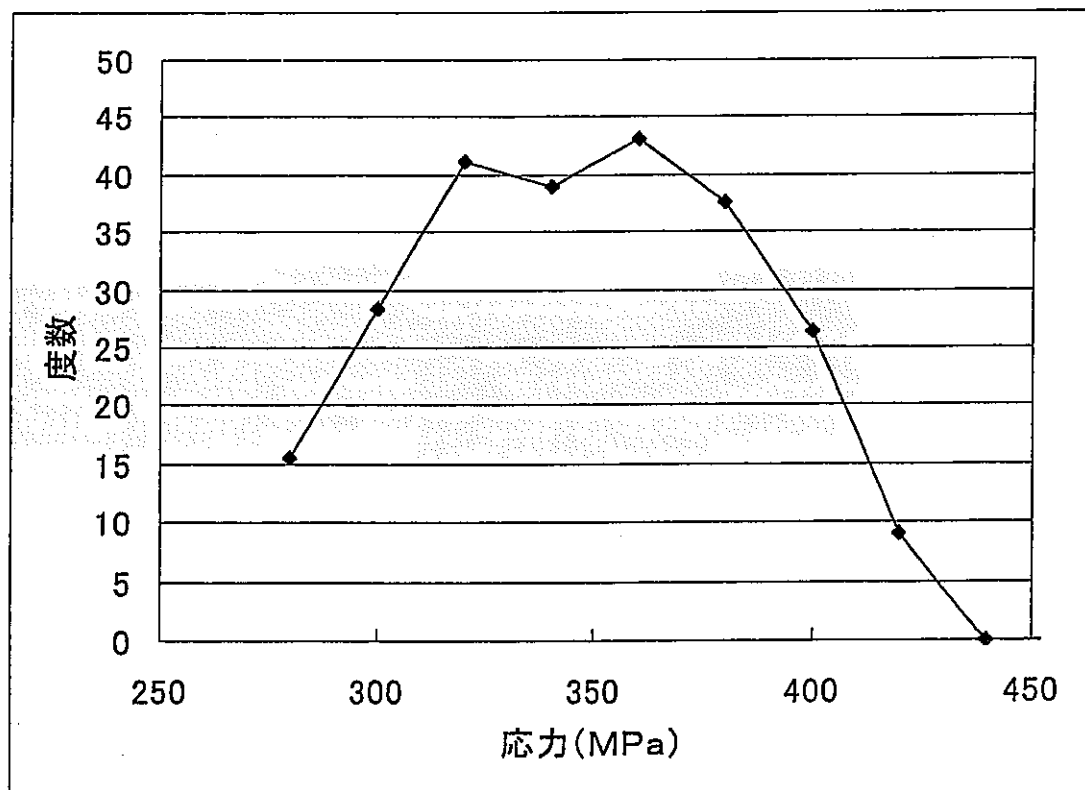
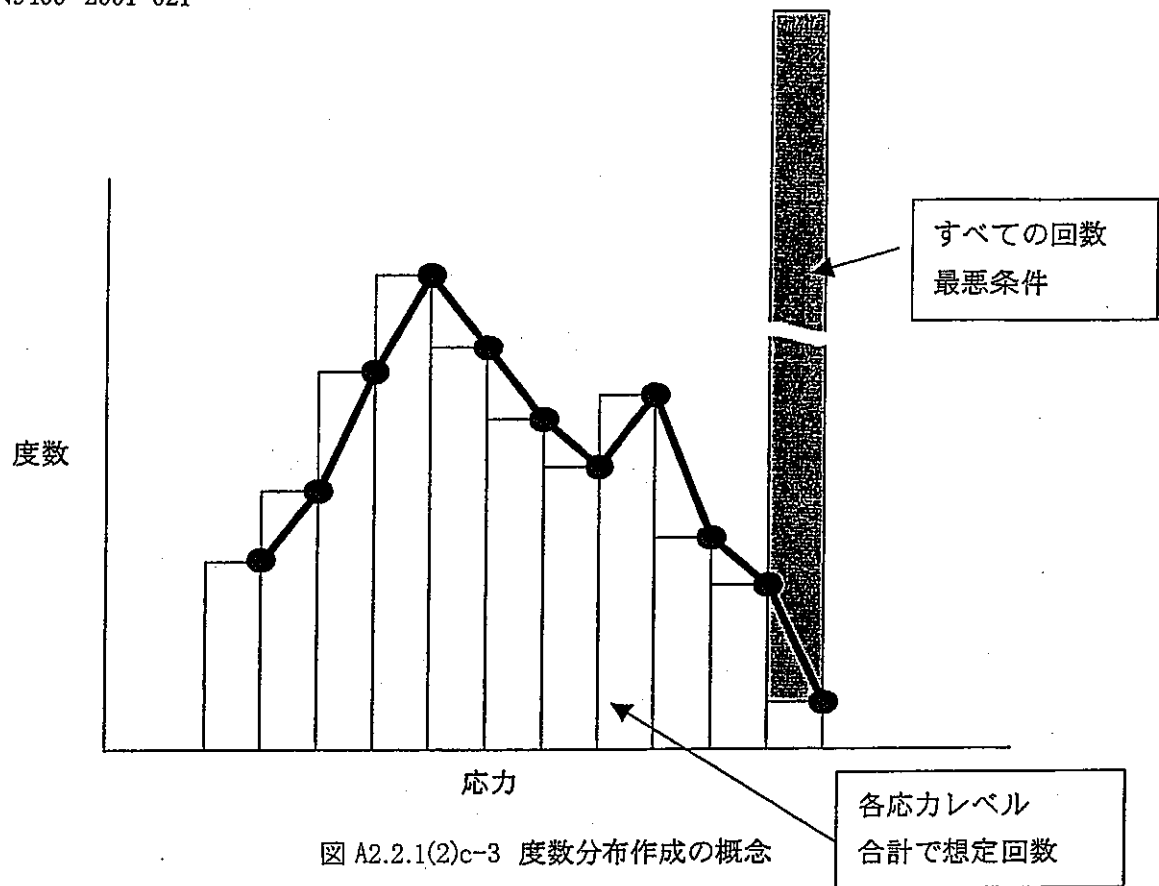


図 A2.2.1(2)c-4 I HX熱過渡における度数分布

(3) 荷重条件最適化による効果の定量化

熱荷重条件を最適化した場合の効果の定量化について、効果が期待できるクリープ疲労損傷評価の例を以下に示す。

定量化を行う項目は、2. 項の(1)多直線化の見直し、(2)プラントシステム側と調整した熱過渡の最適化、(3) 事象想定回数での荷重の度数分布の考慮についてである。

a. 実施条件

定量化は、F B R実証炉用中間熱交換器の上部管板の設計を例に実施する。発生応力条件および想定回数は実証炉設計と同等とする。高温保持時間等は定量化条件として以下のように設定する。評価はD D S (案) のクリープ疲労損傷評価法に準ずる。

事象組合	S n (MPa)	想定回数
1 ポンプ軸固着－ 外部電源喪失＋D G 1 台起動失敗	585.5	3
外部電源喪失＋D G 1 台起動失敗－ S G 入口放出弁誤開	382.5	3
手動トリップ－ S G 入口放出弁誤開	123.6	2 6 0
外部電源喪失－ 外部電源喪失	118.7	4 0

項 目	設定値
高温保持時間	1 0 0 0 時間／回*1
最高温度	5 5 0℃
弾性追従係数 (弾塑性、クリープ)	3
レファレンス寿命	3 0 年

*1手緩和は総保持時間30万時間（30年相当）を考慮

b. 定量化手法

定量化は、以下の3つの場合について実施する。

(a) 損傷値の比較

レファレンスの条件でのクリープ疲労損傷評価結果に対し、各項目を採用した場合の損傷値の減少を示す。

多直線化については、2項で算出した応力低減率がI H X上部管板でも同一であると仮定し、各事象の応力を同一比率で低下させた。

プラント側との調整についても同様に、2項で算出した応力低減率がI H X上部

管板でも同一であると仮定し、各事象の応力を同一比率で低下させた。

事象発生回数の度数分布については、2. 3 項の分布と同一の分布を示すと考え、最大応力が 416.8MPa から 585.5MPa に比例で増大するとした。2. 3 項の分布は 240 回の総事象発生回数に対して各点の発生回数を決定している（総回数×発生確率）。この総発生回数を 3 回として、各応力の発生度数を求めた。総発生回数が 3 回であるため、各応力算出点の発生度数は非常に小さくなる。これらの分布をまとめて、約 1 回の発生頻度になる点の集まりとなる応力範囲を決定した（表 A2.2.1(3)-1）。すなわち、505.7MPa～585.5MPa までの応力となる点の発生度数を加算するとほぼ 1 回となり、これを最大の 585.5MPa で代表させている。外電喪失+DG 1 台起動失敗についても 3 回で同様である。手動トリップについては、260 回であるため、刻み幅を 10MPa として度数分布表を作成した（表 A2.2.1(3)-1 および図 A2.2.1(3)-1。外部電源喪失については、発生応力十分低いのでここでは無視した。

IHX 上部管板については、評価上影響の大きい事象が 3 回であり、度数分布を考慮しても、2 回が小さめの応力となるのみで度数分布を考慮する影響が小さいと考えられる。そのため、2. 3 項で算出した IHX のガス巻き込み防止構造についても同様に定量化を実施し、回数の多い場合の効果を見た。

(b) 応力増大効果

各項目を採用した場合に、レファレンスと同等の損傷値となる応力値を求め、レファレンス応力との比をとり増大率とする。

各事象の応力は、すべて同一の比率で増大すると仮定する。

応力、度数の算定法などは(1)項と同一である。損傷値の合計が同一となることとし、内訳である累積疲労損傷値、累積クリープ損傷値の値は異なる。

(c) 寿命延長

各項目を採用した場合に、レファレンスと同等の損傷値となる事象発生回数を求め、レファレンスの事象発生回数との比をとり増大率とする。

各事象の回数は、すべて同一の比率で増大すると仮定する。また、発生回数が整数とならない場合も採用した（例：発生回数 2.3 回）。

各事象の回数は、すべて同一の比率で増大すると仮定する。

応力、度数の算定法などは(1)項と同一である。損傷値の合計が同一となることとし、内訳である累積疲労損傷値、累積クリープ損傷値の値は異なる。

c. 定量化結果

(a) 損傷値の比較

発生損傷値の比較を表 A2.2.1(3)-2及び図 A2.2.1(3)-2に示す。IHX上部管板の場合、損傷を与える事象として1次ポンプ軸固着の3回が支配的であるため、プラント側と調整してこの荷重を低減させることが非常に効果が大きいことがわかる。

ガス巻き込み防止構造（水平多孔板）のように発生回数の多い事象では、最大の約 420MPa を 240 回想定していた従来評価に比べ、最大応力は9回（図 A2.2.1(2)-4）である本評価の効果が非常に大きいといえる。

なお、度数分布考慮の場合は、度数分布を用いることの効果のみを見るため、レファレンスの多直線化条件で算出された応力（最大 585.5MPa）を基準にしており、プラント側との調整を重畳すればさらに合理化される可能性がある。

(b) 応力増大効果

各合理化方策を実施した場合には、発生応力が小さくなる。逆に言えば高い発生応力まで許容できることになる。このような、応力増大の効果として、損傷値が合理化対策を実施しない場合と同じになる応力まで増大可能として算出した。応力増大前と後の比で応力増大効果を現した。結果の比較を図 A2.2.1(3)-3 及び表 A2.2.1(3)-2に示す。多直線化、およびプラント側との調整の場合は、単純に合理化策による応力低減効果の逆数となるだけである。荷重の度数分布を考慮する場合は、損傷値の場合と異なり、IHXガス巻き込み防止構造の場合も応力増大効果は上部管板とほぼ同様である。IHX管板や、ガス巻き込み防止構造のように、比較的高い応力の場合、損傷値の増大は応力の増大に敏感であるためと考えられる。

(c) 寿命延長

各合理化方策を実施した場合には、損傷値が小さくなる。逆に言えばより長い時間 (=多くの事象発生回数) まで許容できることになる。このような、寿命延長大の効果として、損傷値が合理化対策を実施しない場合と同じになる事象発生回数を増大可能として算出した。寿命延長前後の比を寿命延長の合理化率とした。結果の比較を図 A2.2.1(3)-4及び表 A2.2.1(3)-2に示す。応力の低減が大きいほど寿命延長が大きいことが確認される。また、損傷値の比較からも類推されることであるが、管板のように少数回の場合、度数分布を考慮することの効果は小さいが、ガス巻き込み防止構造のように想定回数が多い場合は効果は大きい。

表 A2.2.1(3)-1 想定事象度数分布

IHX1次ポンプ軸固着		外電喪失+DG1台起動失敗		手動トリップ	
Sn (MPa)	回数	Sn (MPa)	回数	Sn (MPa)	回数
449.5	1	293.7	1	83.6	19
505.7	1	330.4	1	93.6	58
585.5	1	382.5	1	103.6	67
				113.6	79
				123.6	37

表 A2.2.1(3)-2 合理化効果一覧

	損傷値	応力増大	寿命延長
レファレンス	1	1	1
多直線化	0.77	1.11	1.5
プラント側との調整	0.61	1.22	2.3
事象発生度数分布考慮 (上部管板)	0.74	1.15	1.6
(参考) 事象発生度数分布考慮 (ガス巻き込み防止構造)	0.29	1.18	4.1

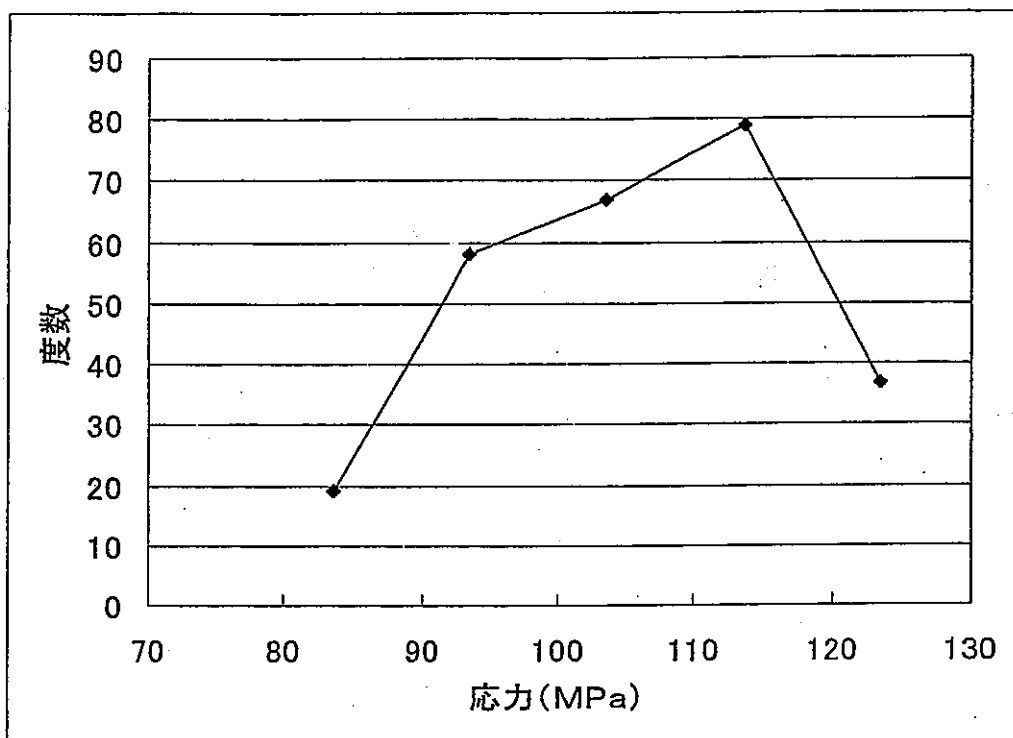


図 A2.2.1(3)-1 手動トリップにおける発生応力の度数分布 (IHX上部管板)

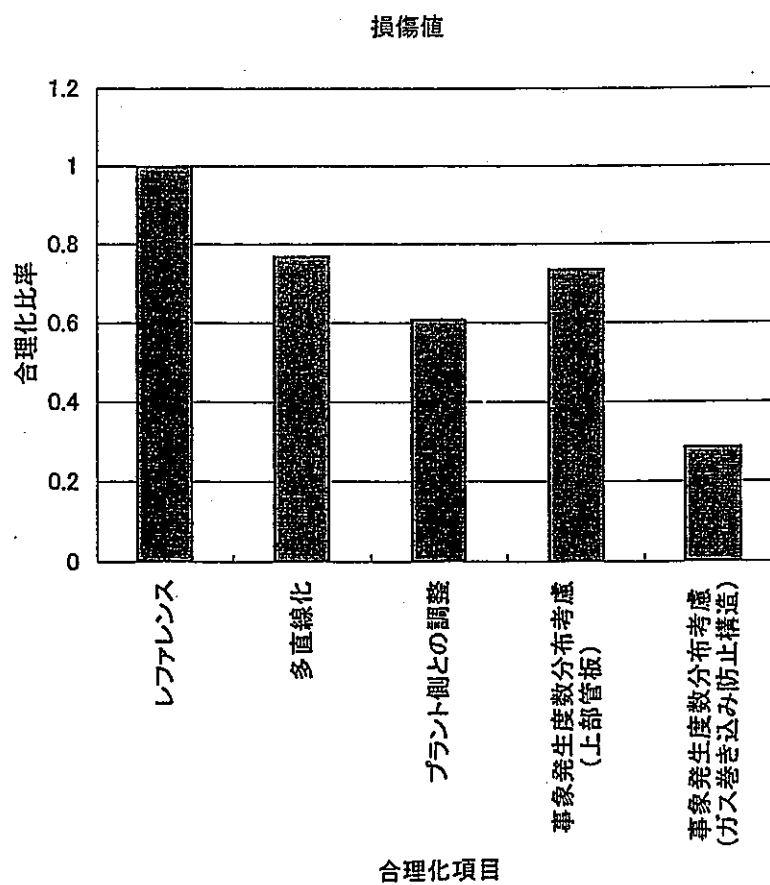


図 A2.2.1(3)-2 損傷値の低減率

応力増大効果

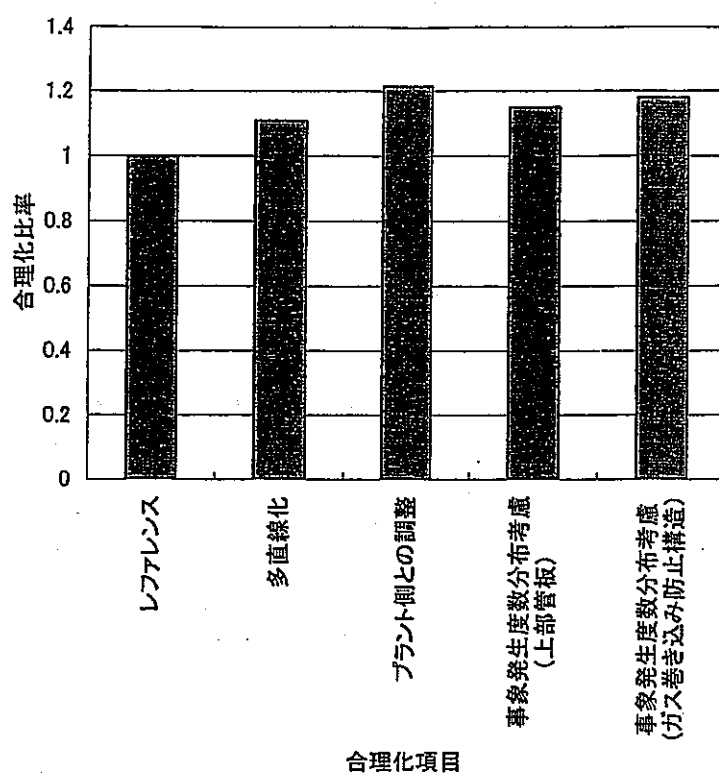


図 A2.2.1(3)-3 許容応力の増大率

寿命延長効果

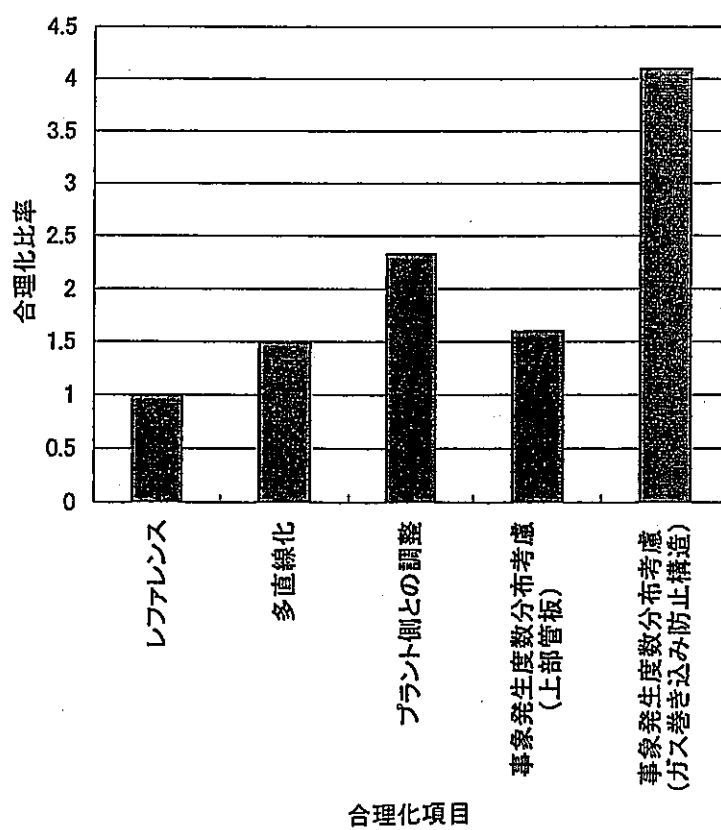


図 A2.2.1(3)-4 寿命延長率

A2.2.2 確率論によりき裂を考慮した設計

(1) 概要

設計評価法に、現状の設計法を一步進め、き裂を考慮（陽に考慮するか陰に考慮するかは各種想定される）した場合の合理化効果について検討する。

(2) 評価シナリオ

表 A2.2.2(2)-1 にシナリオとして考えられるき裂発生、進展評価の組み合わせを示す。

理想的には、き裂発生からき裂進展、破損までをシミュレートする方法が望まれる。決定論的手法は No. 4 の手法であり、き裂進展解析に入る場合の初期き裂の想定が難しいがこれを保守側に想定するなどして実用化することは可能と考えられる。一方き裂発生を、確率論的に考える手法はあまり研究されていない。

No. 3 の場合、き裂発生を決定論的に、すなわちクリープ疲労評価として実施し発生き裂を決定した場合、き裂進展を評価するための確率密度分布が無いので続いて確率論的にき裂進展を評価することは原理的にあり得ない。発生寿命と進展寿命を分離し、進展寿命評価に発生寿命評価の結果を前提としないという手法は決定論の場合（No. 4）と同様に考えられる。

しかしながらここで発想を評価法の合理化という点に立ってみると、必ずしもき裂発生と進展評価がシリーズになされなければならないというものではない。発生しないか、破損（貫通等）しないかのいずれかで制限されていればよいという発想ができる。たとえば、き裂発生評価には、各種のファクターの重ね合わせを考慮し大きな安全率が取られているが、発生評価に多少誤差を生じても大きな進展が無ければそれで問題ないと考えることができる。すなわち、大きな進展が無いような荷重、構造であることが設計時に担保できれば、unknown ファクターに対する裕度をそれほど大きく取らなくても問題ないという考えである。最も極端な言い方をすれば、き裂進展さえなければき裂発生を評価する必要はないという言い方もできる。これは極論であり、現状の技術と合理化の効果を考えて、き裂進展による破損が無いことを担保に、き裂発生の unknown ファクターを切り下げることで十分な効果が期待される。この流れの例を 図 A2.2.2(2)-1 および 図 A2.2.2(2)-2 に示す。き裂の進展評価は決定論的に実施することも可能であるが、ここでは将来のリスクベース評価などとの整合性も考慮し確率論的評価を実施するものとする。図 A2.2.2(2)-1 では、き裂進展に裕度が無い場合（薄板など）では、従来通りのクリープ疲労発生防止に、

図 A2.2.2(2)-2 の場合、き裂進展かクリープ疲労評価の厳しい方で制限使用というものである。いずれの手法でもき裂進展裕度の無い場合は許容されず安全が確保される。

ここでの効果の試評価に於いては、き裂進展による破損に裕度がある場合、クリープ疲労評価の安全率が削減できるという観点から計算を実施する。

従ってここでの定量化は以下とする。

- ・評価モデル I H X 上部管板
- ・試算手順 (1) 確率論的欠陥評価 → 破損確率が十分低いことを示す。
(2) 裕度を削減したクリープ疲労評価
(3) 合理化効果算定

表 A2.2.2(2)-1 き裂を想定した評価におけるき裂発生評価と進展評価の組み合わせ

	き裂発生	き裂進展	評価法
1	確率論	確率論	クリープ疲労き裂発生を確率論的に計算し、発生き裂の確率密度分布を作成する（現在算定手法無し）。確率密度からさらに確率論的にき裂進展を計算する（計算手法有り、データベース等不足）。
2	確率論	決定論	クリープ疲労き裂発生を確率論的に計算し、発生き裂の確率密度分布を作成する（現在算定手法無し）。上記から何らかの形で選定したき裂の進展計算を実施（き裂進展計算手法あり、初期欠陥の想定難）。
3	決定論	確率論	き裂発生を損傷値ベースで計算する（クリープ疲労損傷評価法）。初期き裂の確率密度から確率論的にき裂進展を計算する（計算手法有り、データベース等不足）。決定論的には発生き裂の確率密度分布をあたえることはできないので、シリーズに実施することはできない。
4	決定論	決定論	き裂発生を損傷値ベースで計算する（クリープ疲労損傷評価法）。何らかの形でクリープ疲労初期き裂を想定し、進展計算を実施する（き裂進展計算手法あり、初期欠陥の想定難）。

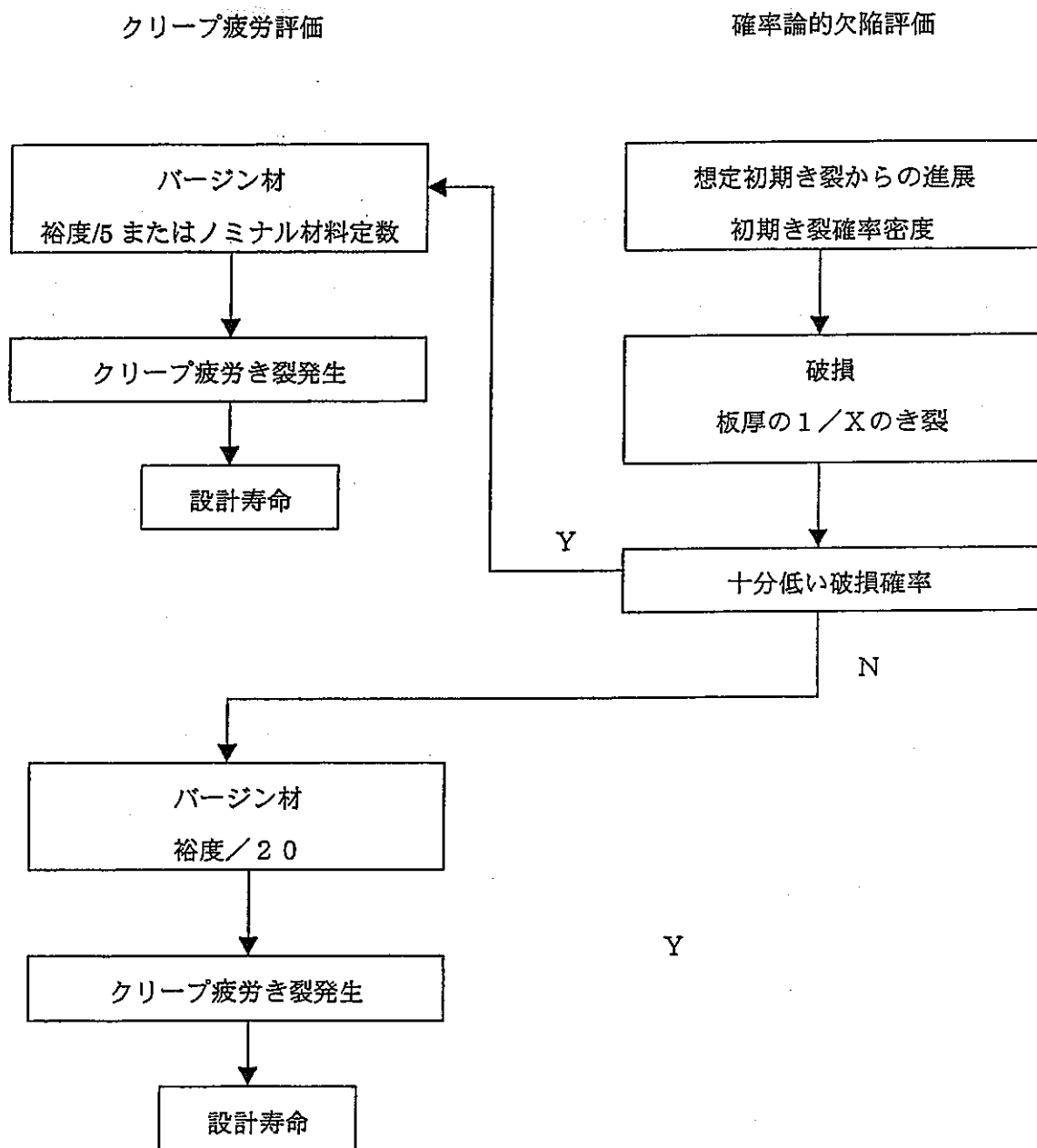


図 A2.2.2(2)-1 き裂進展評価の流れの例

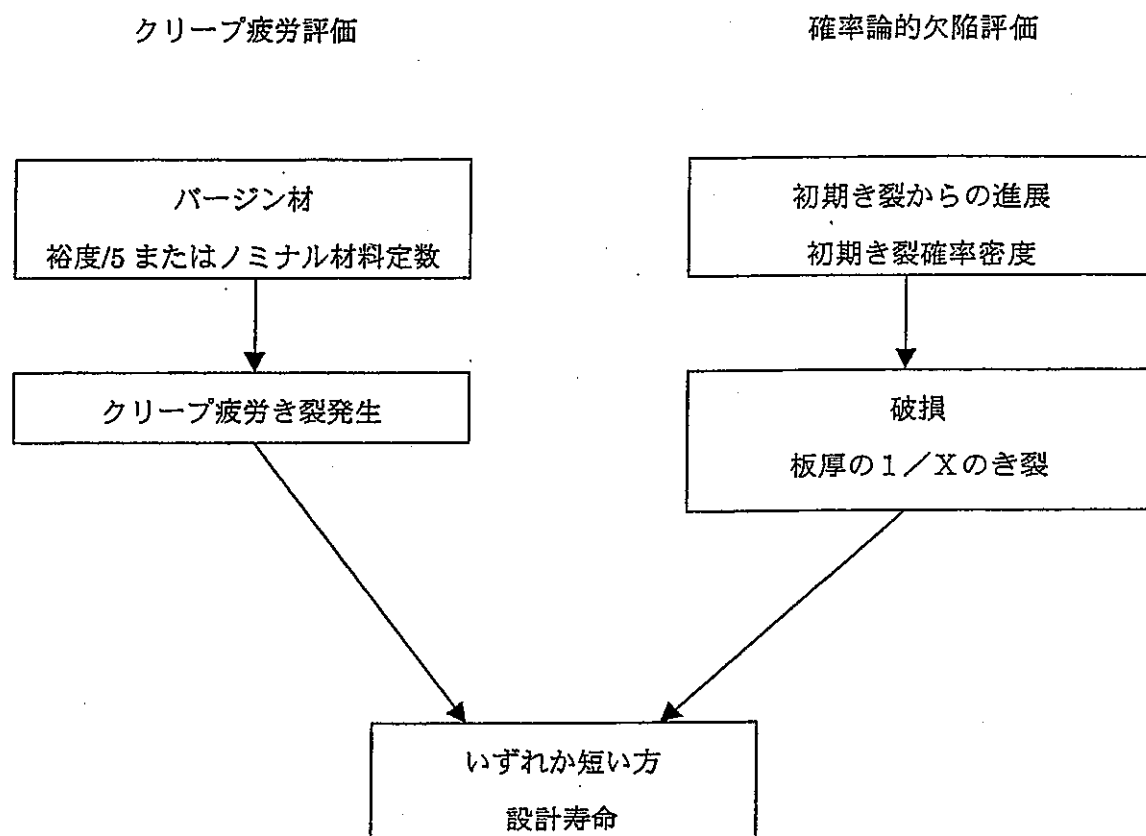


図 A2.2.2(2)-2 き裂進展評価の流れの例

(3)確率論的破壊力学による検討

a. 緒言

現行の設計基準は構造物にき裂が発生しないように作成されており、き裂が発生した後破損に至る過程は考慮されていない。したがって、構造物の破損を基準にとれば、裕度はき裂発生までの裕度とその後破損に至るまでの裕度の2種類からなることになる。

一方、現行の設計基準に対しては、すでに相当な合理化が図られているので、残る裕度は、き裂が発生してから構造物が破損するまでの過程である。ところが、疲労あるいはクリープ疲労に関し、損傷過程を詳細検討した R&D は余りみあたらない。

本資料は、き裂が発生してから構造物が疲労あるいはクリープ疲労によって破損するまでの過程を、決定論的に検討したものではなく、確率論的破壊力学の手法を使って検討したものである。

ただし、そのためには、疲労あるいはクリープ疲労により発生する欠陥分布により発生する欠陥分布が知られている必要があるが、現在のところ、みあたらないので、今回は、確率密度関数を次のように仮定した。

①疲労あるいは、クリープ疲労で発生するき裂の深さ分布、アスペクト比分布を、溶接欠陥の分布関数と置きかえられるものとする。

②316FR 鋼の溶接欠陥の公開データはないので、316FR 鋼の溶接欠陥を圧力容器鋼溶接欠陥の分布データと置き換えられるものとする。

このような欠陥存在下で、設計荷重のうち S_n が最も大きいひずみが繰り返され、およびそのひずみが保持された時、非線形破壊力学を用いてき裂進展計算を行い、破損確率を計算する。さらに、設計荷重を増加させたり、設計荷重の繰返し数を増加させた時の計算をおこない、破損確率を計算する。そして、それらの値を、安全と考えられる値（たとえば 10^{-6} ）と比較し、安全裕度を検討する。

b. 計算モデル

(a) 計算対象

計算対象モデルは外径 2750mm、肉厚 30mm の IHX 上部管板構造

材料は 316FR 鋼

(b) 荷重条件

上部管板評価断面 1 で S_n が最も大きくなる事象を選択した。

最高金属温度は 550℃ で、応力を膜応力、曲げ応力に換算すると

一次膜応力 11.6 Mpa

一次曲げ応力 27.2 Mpa

二次膜応力 177.0 Mpa

二次曲げ応力 115.5 Mpa

寿命中の回数は 3 回である。

c. 確率計算

(a) 確率計算方法

層別サンプリング法

(b) 確率分布関数

確率変数としては、き裂深さ(a)、き裂のアスペクト比(c/a)を考慮した。316FR 鋼の溶接欠陥について、き裂深さ、き裂のアスペクト比についての公開データは存在しないので、圧力容器鋼の溶接欠陥についての海外のデータをそのまま使うことにした。き裂深さ確率密度関数については次式の指数関数 [1] を使用した。

$$P(a) = \frac{\exp(-a/\mu)}{\mu(1 - \exp(t/\mu))}$$

ここで, $\mu = 6.248 \times 10^{-3} \text{ m}$

$t = 0.2 \text{ m}$

アスペクト比の確率密度関数としては、次式の対数正規関数 [2] を使用した。

$$P(c/a) = \frac{\alpha}{c/a \cdot \gamma \sqrt{2\pi}} \exp \frac{-\ln^2(c/a/\beta)}{2\gamma^2}$$

ここで、 $\alpha=1.035$

$$\beta=1.336$$

$$\gamma=0.5382$$

(c) き裂進展計算

き裂進展計算は、非線形破壊力学に基づいて行った。

き裂進展速度は、疲労き裂進展速度とクリープき裂進展速度の和であると仮定した。

$$\frac{da}{dN} = C_1 \cdot \Delta J_f^{m_1} + C_2 J'^{m_2}$$

疲労 J 積分範囲 ΔJ_f 、クリープ J 積分 J' の算出方法及び疲労き裂進展速度、クリープき裂進展速度の材料定数は、電中研指針 [3] に従った。後者のき裂進展速度の定数は以下のものを使用した。

$$C_1=6.3424 \times 10^{-5}$$

$$m_1=1.3742$$

$$C_2=7.4095 \times 10^{-3}$$

$$m_2=0.8830$$

(d) 破損の判定

破損の判定として、き裂深さが板厚の 0.8 倍に達した時と見なした。

(e) 荷重条件

(b)で述べた設計荷重条件に基づいて、次のような解析ケースを設定した。

ケース 1～3 は寿命中の繰返し数はそのままにして、応力値を増やしたもの、

ケース 4 は設計応力値はそのままにして、繰返し数を 10 倍にしたものである。

解析ケース	寿命中の繰返し 数	保持時間／回 (年／回)	応力値
ケース 1	3	1 0	設計応力× 1
ケース 2	3	1 0	設計応力× 2
ケース 3	3	1 0	設計応力× 3
ケース 4	3 0	1	設計応力× 1

(f) 解析結果

図 A2.2.2(3)-1, A2.2.2(3)-2 にケース 1 ～ 4 の計算結果を示す。図より、

- ①設計荷重を 3 倍まで増加させても、30 年後の累積破損確率は 1.0×10^{-6} 以下である。
- ②繰返し回数を 10 倍に増加させると、30 年後の累積破損確率は、ほぼ 1.0×10^{-6} になる。

参考文献

- [1] Marshall,W, An assessment of the integrity of PWR PVs.,1982
- [2] LO,T.Y. et.al, Probability of pipe failure of the reactor coolant loop of combustion eng., NUREG/CR-3663,1985
- [3] Nakayama,Y, ASME PVP-vol.5, Fatigue,fracture,and high temperature design metsods in pressure vessel and piping.,1998

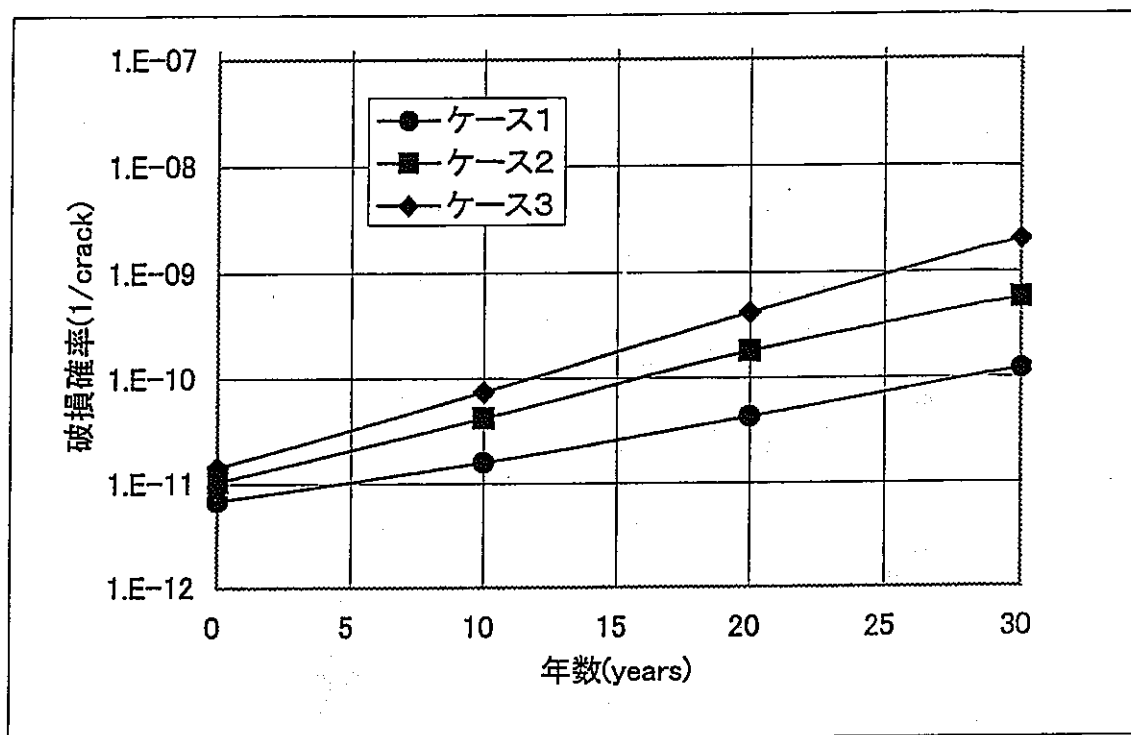


図 A2.2.2(3)-1 破損確率 (ケース1～ケース3)

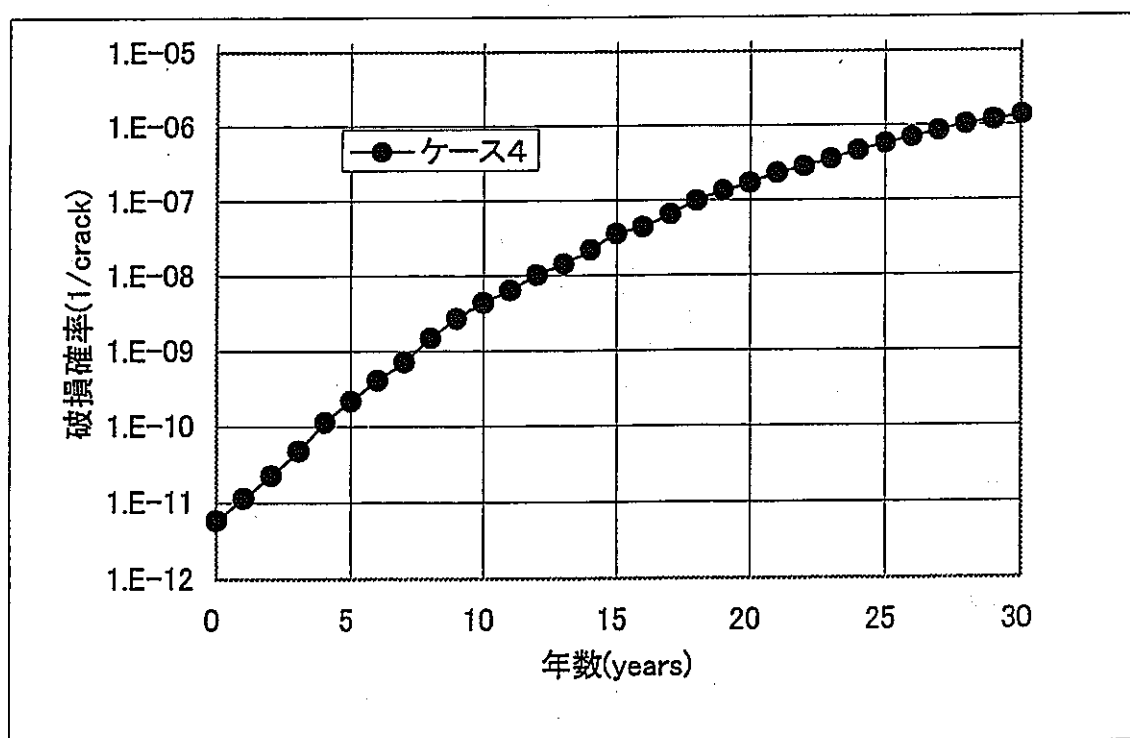


図 A2.2.2(3)-2 破損確率 (ケース4)

(4) 合理化効果の算定

a. 実施条件

(3)項でき裂発生確率が十分低いことが確認された。次に、き裂発生評価（クリープ疲労損傷評価）を実施し合理化効果を算定する。

検討条件は以下の通り。

事象組合	S_n (MPa)	想定回数	備考
1 ポンプ軸固着－ 外部電源喪失＋DG 1 台起動失敗	585.5	3	き裂進展量が 小さいため進展 評価では無視
外部電源喪失＋DG 1 台起動失敗－ SG 入口放出弁誤開	382.5	3	
手動トリップ－ SG 入口放出弁誤開	123.6	260	
外部電源喪失－ 外部電源喪失	118.7	40	

項目	設定値	備考
高温保持時間	1000時間/回	但し、緩和は総保 持時間30万時間 まで考慮
最高温度	550℃	
弾性追従係数（弾塑性、クリープ）	3	
レファレンス寿命	30年	

クリープ疲労評価における安全裕度は以下のように設定した。

	疲労線図の裕度	クリープ疲労評価の裕度
レファレンス	回数で20倍または、ひずみ 範囲で2倍（設計基準）	$\alpha_c = 1$ $\alpha_R = 10$ 追加安全係数 = 2
ケース1（裕度5）	回数で5倍 または、ひずみ範囲で2倍 （設計基準）	$\alpha_c = 1$ $\alpha_R = 5$ 追加安全係数 = 1
ケース2（裕度1）	回数で1倍 または、ひずみ範囲で1倍 （設計基準）	$\alpha_c = 1$ $\alpha_R = 1$ 追加安全係数 = 1

b. 定量化手法

定量化は、以下の3つの場合について実施する。

(a) 損傷値の比較

レファレンスの条件でのクリープ疲労損傷評価結果に対し、クリープ疲労損傷の安全裕度を引き下げた場合の損傷値の減少を示す。

(b) 応力増大効果

各ケースを採用した場合に、レファレンスと同等の損傷値となる応力値を求め、レファレンス応力との比をとり増大率とする。

各事象の応力は、すべて同一の比率で増大すると仮定する。損傷値の合計が同一となることとし、内訳である累積疲労損傷値、累積クリープ損傷値の値は異なる。

(c) 寿命延長

各ケースを採用した場合に、レファレンスと同等の損傷値となる事象発生回数を求め、レファレンスの事象発生回数との比をとり増大率とする。

各事象の回数は、すべて同一の比率で増大すると仮定する。また、発生回数が整数とならない場合も採用した（例：発生回数 2.3 回）。損傷値の合計が同一となることとし、内訳である累積疲労損傷値、累積クリープ損傷値の値は異なる。

c. 定量化結果

評価の結果を図 A2.2.2(3)-1～A2.2.2(3)-3 に示す。

安全裕度を 2.0 から 5 程度にするだけでも、十分な合理化効果が期待できる。応力増大効果は、クリープ疲労損傷のみに着眼して記述しており、破断の防止、ひずみの制限などを考慮していないため、クリープ疲労以外の制限により必ずしも図の値まで拡大できるとは限らないが、他の制限の拡張なども想定した可能性を示すものである。

寿命の増大は、当然ながらほぼ安全裕度の削減と比例する。ただし、寿命延長 1.0 倍（事象発生回数 1.0 倍）以上は、き裂進展による破損確率が増大するため成立しない。

表 A2.2.2(4)-1 定量化試算結果のまとめ

	損傷値	応力増大	寿命増大
レファレンス	1	1	1
確率論的欠陥評価 裕度 5	0.49	1.7	4
確率論的欠陥評価 裕度 1	0.34	3.3	20

確率論的欠陥評価の導入

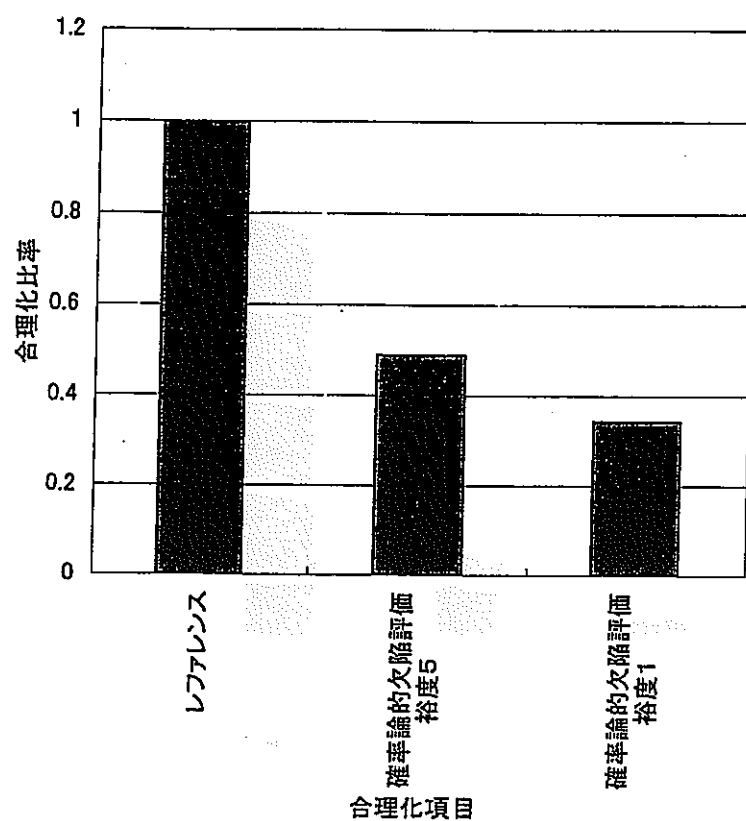


図 A2.2.2(4)-1 合理化における損傷値の比較

応力増大効果

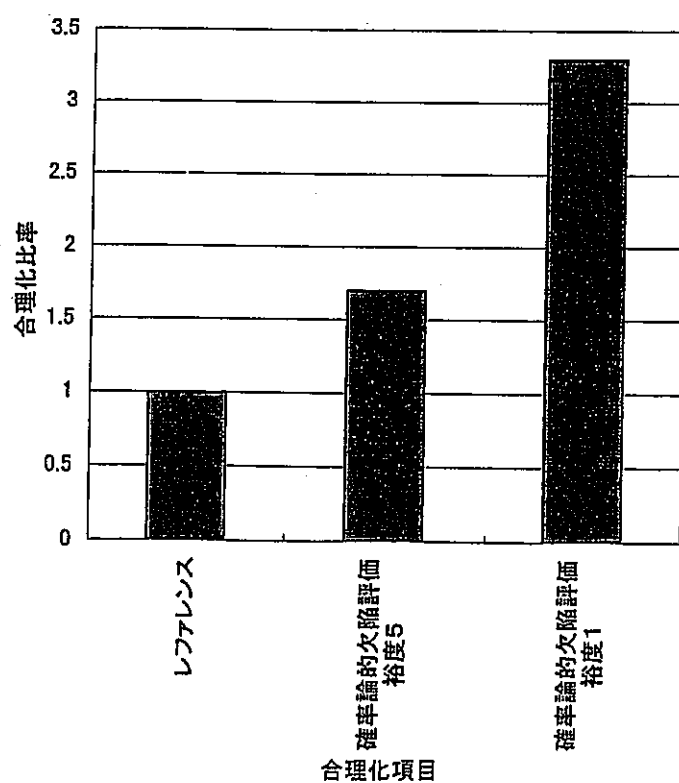


図 A2.2.2(4)-2 合理化における応力増大効果の比較

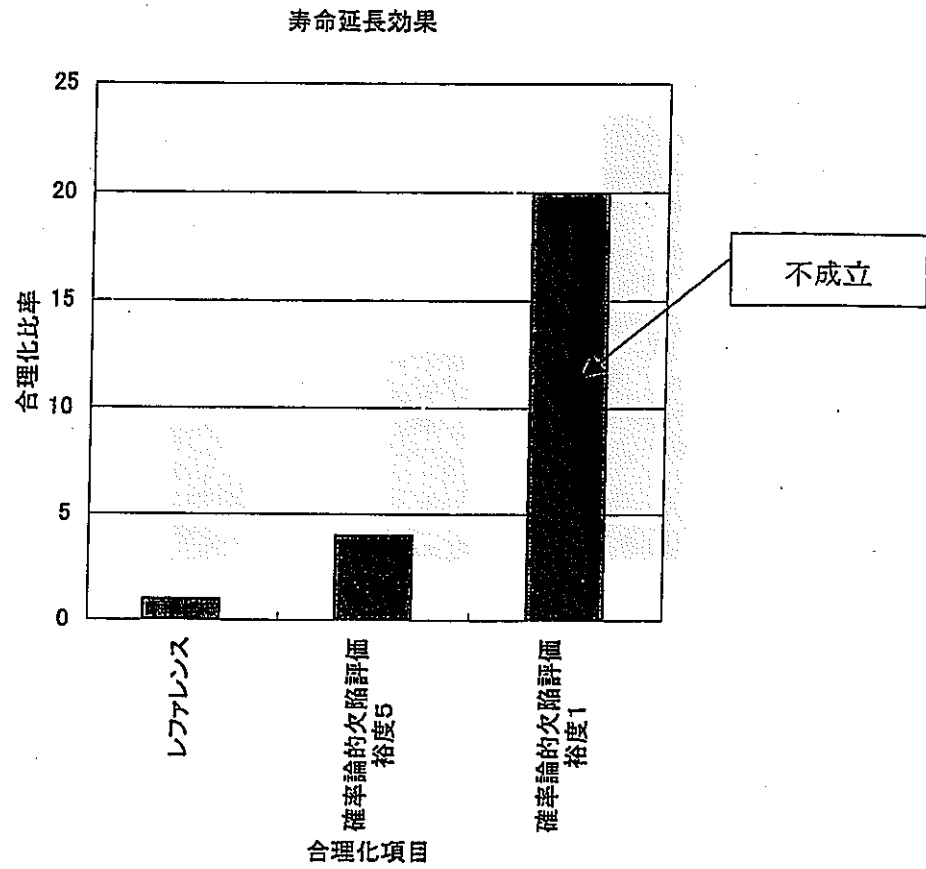


図 A2.2.2(4)-3 合理化における寿命延長効果の比較

(5)合理化効果の組合せ

A2.2.1 項とA2.2.2(4)項までに検討した、熱荷重による合理化と確率論的欠陥評価の導入による合理化を組み合わせた場合の合理化効果を試算した。

それぞれの組合せは

- ・ 熱荷重の合理化 : プラント側との調整による熱荷重低減
- ・ 確率論的欠陥評価の導入 : クリープ疲労裕度 5

の場合を代表として選定し、その両者を組み合わせた場合の効果を求めた。

結果をこれまでと同様に損傷値、応力増大率、寿命延長の観点からまとめて図 A2.2.2(5)-1～図 A2.2.2(5)-3 に示す。

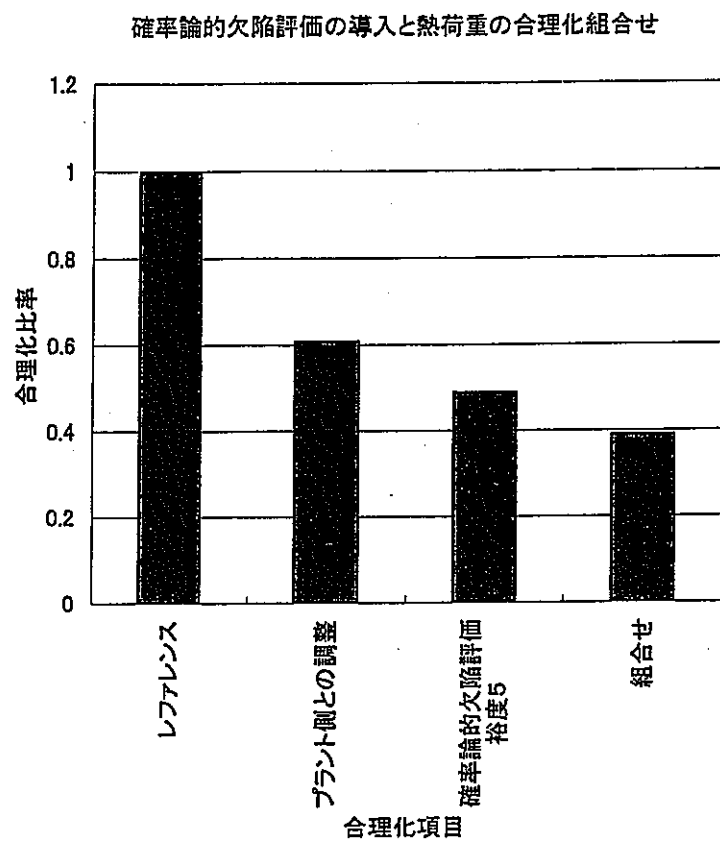


図 A2.2.2(5)-1 損傷値の比較

応力増大効果

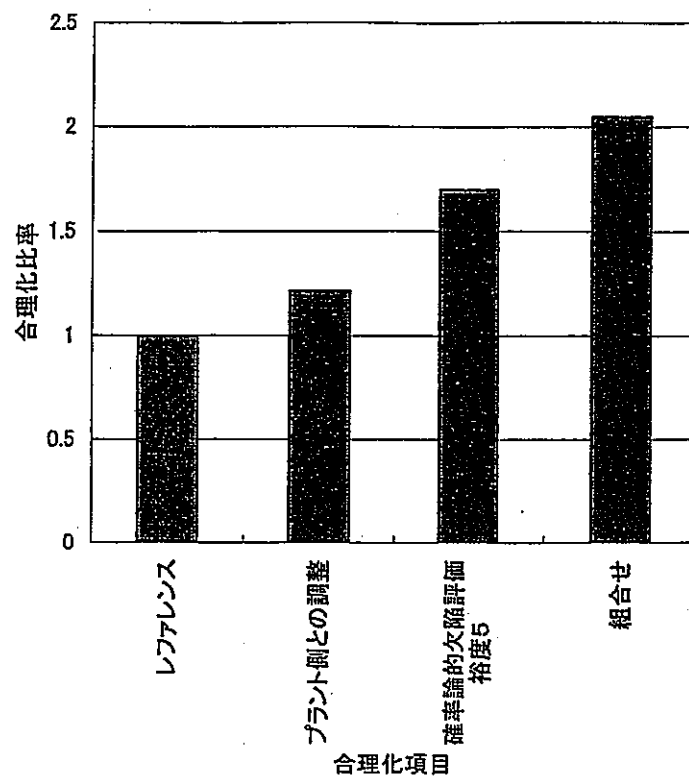


図 A2.2.2(5)-2. 応力増大率の比較

寿命延長効果

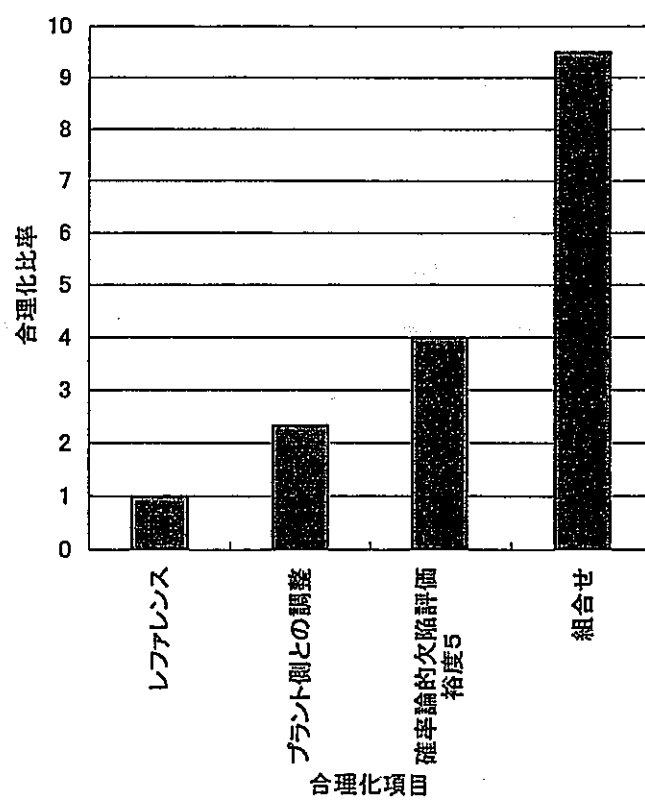


図 A2.2.2(5)-3 寿命延長の比較

A2.2.3 表面処理、非弾性解析、維持基準の効果

(1) 概要

「FBR のコスト低減と長寿命化に関する調査」でピックアップされた候補技術について定量評価モデルを作成し、実証炉中間熱交換器の上部管板の設計を例に定量化を実施した。

(2) 合理化定量評価モデル

定量化を実施する候補技術として、以下を選定した。

- ・ 表面処理
- ・ 非弾性解析
- ・ き裂を考慮した設計(決定論)
- ・ 維持基準の導入
- ・ 熱過渡条件の合理化

それぞれについての合理化シナリオならびに評価モデルの考え方を表 A2.2.3-1に示す。

表面処理効果については、電中研で試験したショットピーニング材の疲労試験データ(図 A2.2.3-1)を用いている。材料は 316FR で、試験温度は 550℃である。疲労寿命の差は平均応力効果であるという仮定を設け、疲労寿命の差から修正 Goodman で平均応力を推定した。図 A2.2.3-2にひずみ範囲と残留応力の関係を示す。弾性範囲では約 300MPa の残留応力で、塑性とともに残留応力の値は小さくなり約 1.2%の $\Delta \varepsilon$ で残留応力効果が無くなるという回帰線を求めてモデルに組込んでいる。定量評価では、この平均応力が疲労のみに寄与する場合と、クリープにも寄与する場合の 2 ケースについて寿命計算を行った。

非弾性解析の効果は、笠原らの研究結果から非線形の弾性追従挙動を想定し、簡易的に予測した。

き裂を考慮した設計では、従来のき裂発生に対して規定されている許容繰返し数に達した時点において表面長さ 10mm のき裂が発生していると仮定し、それを初期き裂とするき裂進展解析を実施した。設計裕度としては、従来通り 20 とした場合と 10 とした場合の両者を検討した。また、寿命の定義として板厚の 1/2 までき裂が進展した時点と、板厚の 80%までの時点の両者を比較している。

維持基準の適用の考え方としては、維持基準で管理していくことから設計裕度を合理化できるとのコンセプトを採用している。設計裕度としては、5と2の両者について検討した。本来、維持基準はき裂発生後の健全性評価のために位置付けられ、設計としてはあくまでき裂発生を損傷の基準とすべきである。よって、維持基準を前提とした設計でき裂進展を含んだ寿命を持って来るのは、過度な合理化となるが、感度を見るために進展ありも計算した。

熱過渡条件の合理化については、JNC 殷系統熱過渡研究を引用し、プラントシステムと調整した場合の例から各 S_n を 380/462 倍した。

合理化効果の算定に用いる DDS の寿命は、 $\alpha_c=1.0$ として、疲労線図も A 線図 (10^{-8} mm/mm/sec) を使用した。これは、非弾性との比較において $\alpha_c=3.0$ を用いると弾性解析と非弾性解析との直接の対応が取りにくいためである。また、ひずみ速度についても表面処理のデータが通常の FF 波で試験されたもので、それとの比較を行うために合わせている。

(3) 定量化のための計算対象

合理化効果の定量評価の対象として、中間熱交換器 (IHI) 上部管板を選定した。IHX は、炉心から流れてくる一次ナトリウムと蒸気発生器へ出て行く二次ナトリウムが直接熱交換する安全上重要な機器である。特に、管板部は一次ナトリウムと二次ナトリウムの温度差が熱応力として作用する上に、構造上の不連続部も多くクリープ疲労評価上最も厳しい部位の一つである。構造の概要を図 A2.2.3-3 に示す。材料は、316FR 鋼である。

a. 評価箇所

図 A2.2.3-4 に示す上部管板シュラウド付け根の内面を評価対象として選定した。

b. 荷重条件

i. 熱過渡条件

表 A2.2.3-2 に示す熱過渡事象とその繰返し数を想定した。クリープ疲労評価用に組合せたものを表 A2.2.3-3 に示す。

ii. 機械的荷重条件

i) 圧力

通常運転時の一次側と二次側の差圧として 5kg/cm^2 と設定した。

ii)自重

評価部に加わる構造物の重量を考慮した。

(iii)地震荷重条件

地震時の応力は、別途実施された全体耐震解析結果を引用した。全体耐震解析は、動的解析および静的解析を実施し、評価部位の応力で厳しい方を使用した。また、水平方向地震力と鉛直方向地震力の組合せは、評価結果が厳しくなるよう方向を組合せた。熱荷重との組合せは、独立事象中の任意時刻点、または従属事象の熱過渡開始後継続時間内の時刻点と1回のみ重ね合わせた。地震の等価繰返し回数は120回とし、熱過渡事象と1回重ね合わせた残りの地震サイクルのみの疲労損傷評価を行った。

(4) 合理化効果計算結果

a. 許容繰返し数比の増大

各候補技術の適用による許容繰返し数比の増大効果を図 A2.2.3-5に示す。この中で最も長寿命化効果の大きい技術は、表面処理による圧縮残留応力の付与である。圧縮残留応力が疲労にのみ寄与するとした場合には長寿命化効果は少ないが、クリープ疲労に寄与する場合には、非常に合理化効果が大きいという予測になった。この効果を取り入れるためには、データの取得が不可欠と考えられる。表面処理に次いで寄与が大きいのは、非弾性解析の適用である。き裂進展を考慮した設計の効果は比較的少なく、それよりも維持基準の整備を前提として設計裕度を20→5に切詰めた方が効果が大きい。熱過渡の合理化による効果も弾性解析ベースでは少なくなっている。この理由としては、弾性解析ベースの評価ではクリープ基底応力 S_g が設けられているために、個々の応力の合理化効果が直接に現れにくいためであろうと考えられる。

き裂の進展を考慮した合理化効果について図 A2.2.3-6に示す。現状の設計裕度のままに単にき裂進展の考え方を導入しただけでは合理化効果は少なく、維持基準の導入を前提とした設計裕度の切詰め効果の方が大きいことが判る。設計裕度と許容繰返し数比の関係はほぼ線形であり、き裂進展を考慮した場合にはしない場合に比べ約1.5倍の寿命延長となっている。

非弾性解析を適用した場合の合理化効果について図 A2.2.3-7に示す。非弾性解析

を適用し、かつ維持基準を整備して設計裕度を切詰めた場合には、非常に大きな合理化効果が期待できる。この場合には、き裂進展の考慮の有無は影響が少なくなっており、非弾性解析の効果はき裂発生評価への寄与が大きいことが判る。

熱過渡条件を合理化した場合の合理化効果を図 A2.2.3-8に示す。弾性解析ベースでは S_g の設定によって合理化効果が現れにくい、非弾性解析との重畳効果では顕著な合理化効果となってあらわれている。さらにき裂進展を考慮する効果も評価しているが、き裂進展の考慮の影響は比較的少ない。き裂進展の考慮の効果が比較的少ない原因としては、現状のき裂発生寿命と表面長さ 10mm のき裂を対応させており、き裂進展期間が寿命の壮年期からに対応しているためであろうと考えられる。

定量評価したすべての技術について図 A2.2.3-9に示す。表面処理効果をクリープ疲労に期待した場合や、非弾性解析と維持基準や熱過渡の合理化を組合せた場合に顕著な合理化効果が期待できる事が判る。

なお、ここで検討した許容繰返し数の増大効果はクリープ疲労寿命が支配的な破損モードであるという前提に立ったものであり、長寿命化に伴い他の破損モードが顕在化してくることに對しては十分な注意が必要であるものと考えられる。

b. 負荷条件の増大

設計温度、負荷回数を固定し、現状の DDS ベースで計算される損傷和の裕度と同じ値の裕度(限界値は各技術毎に設定)となる負荷応力値の比率(許容応力比)を、各候補技術について計算した。なお、き裂進展の考慮の効果が比較的少ないことから、ここではき裂進展は考慮していない。評価結果を図 A2.2.3-10にまとめて示す。

許容応力比についても非弾性解析と維持基準や熱過渡の合理化を組合せた場合に顕著な合理化効果が期待できる事が判る。

許容繰返し数比で大きな効果が期待された表面処理については、許容応力比で見た場合には効果が殆ど期待できない。これは、図 2.3-2 でも判るように表面処理による圧縮残留応力効果が 1%以下のひずみ範囲に限定されていることから、負荷応力の増大には寄与しないものと考えられる。

c. 各候補技術の効果

各候補技術について、応力に対する合理化効果(応力比)と寿命に対する合理化効果(損傷比)を図 A2.2.3-11、図 A2.2.3-12 に示す。各応力比、損傷比は表 A2.2.3-3 の条件での DDS 評価を 1.0 として無次元化したもので、図 A2.2.3-11 は損傷比 30 までの結果、図 A2.2.3-12 は損傷比 5 までの結果を拡大して示している。

現状 DDS や熱過渡の合理化、ショットピーニングの効果を疲労にしか期待しない場合には、応力に対する損傷の変化は少なく、安全裕度を合理化した場合でも損傷比として線形的にしか増大しない。

非弾性解析を適用した場合には、応力の変化に対する損傷の変化も大きく、非弾性の適用による合理化効果は現状の応力レベルで最も大きく、応力を高く取るにつれて非弾性解析による合理化効果は相対的に少なくなってくる。熱過渡の合理化効果は、弾性解析ベースの評価では顕著に現れなかったが、非弾性と組合せて適用した場合には顕著な効果をあらわす。これは、非弾性解析の適用によって、荷重に対する感度が高くなったためである。

ショットピーニングによる効果をクリープ疲労に期待した場合には、現状の荷重条件では大きな長寿命化が期待できるが、荷重の増大に伴いその効果は急激に減少する。

表 A2.2.3-3 の荷重条件で得られた各シナリオでの損傷で無次元化した損傷比を縦軸にとると上記傾向がより明確に理解できる。

表 A2.2.3-1 各候補技術の定量化シナリオと評価モデル

合理化技術	シナリオ、モデル	引用データ	パラメータ
表面処理	・残留応力による疲労寿命の増大 ・残留応力によるクリープ損傷の低下	・電中研 316FR 鋼ショットピーニング材高温疲労データ。 ・残留応力は疲労寿命の増大割合から修正 Goodman を用いて推定し、クリープ損傷評価に反映。	無し
非弾性解析	DDS で検討中の非弾性モデルを使用	DDS 平成 11 年度報告書	無し
き裂を考慮した設計(決定論)	・き裂発生寿命、平均寿命/20 ・$a=5\text{mm}$, $2c=10\text{mm}$ の欠陥を想定。 ・き裂進展速度、20 倍	電中研高温欠陥評価法	・安全裕度 ; 20 と 10 ・寿命の定義 ; 板厚の 50%、80%
維持基準の導入(決定論)	・維持基準の適用を前提とし、従来設計の裕度を切詰める。 ・基本的には、寿命を単軸クリープ疲労ベースで定義するが、オプションとしてき裂進展も考える。 ・$a=5\text{mm}$, $2c=10\text{mm}$ の欠陥を想定。 ・き裂進展速度の裕度 = き裂発生寿命の裕度	電中研高温欠陥評価法	・設計裕度 ; 5、2 ・き裂進展考慮の有無
熱過渡条件の合理化	・プラントシステムと調整した場合の例から、各 S_n を 380/462 倍する。	JNC 殿系統熱過渡研究	無し

表 A2.2.3-2 上部管板評価用熱過渡事象

運転事象	事象名	回数	備考
I	通常起動	427	
	通常停止	120	
	日負荷追従	13140	
II	手動トリップ	240	
	SG 入口放出弁誤開	20	
	外部電源喪失	40	
III	一次ポンプ軸固着	3	
	外部電源喪失+DG1 台起動失敗	3	

表 A2.2.3-3 上部管板クリープ疲労評価用熱過渡事象

運 転	Sn (MPa)	回 数 (n)	保 持 (h)	評 価 (°C)	ひずみ 中 係
III	585.5	3	705	502	1.0
III	382.5	3	705	502	1.0
II	123.6	260	705	502	1.0
II	118.7	40	705	502	1.0
I	118.7	121	705	502	1.0

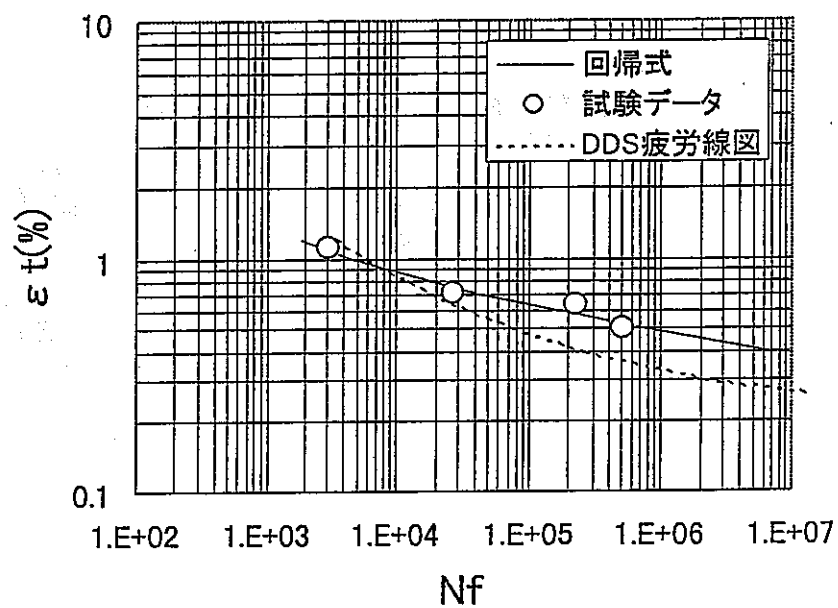


図 A2.2.3-1 ショットピーニングによる高温疲労寿命の増加(316FR 鋼、550°C)

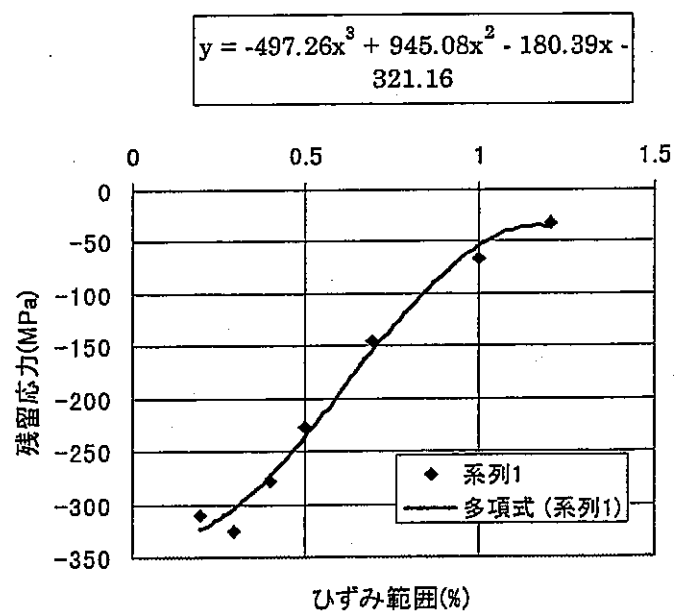


図 A2.2.3-2 ショットピーニングによる残留応力の推定値(316FR 鋼、550°C)

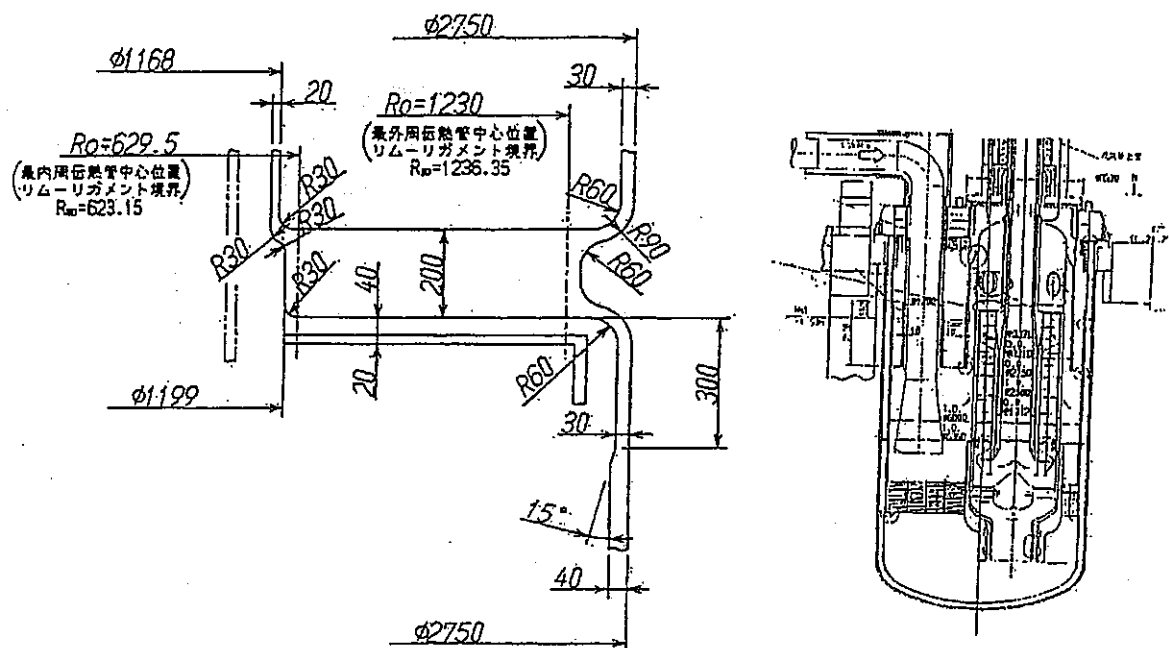


図 A2.2.3-3 IHX 上部管板構造概要

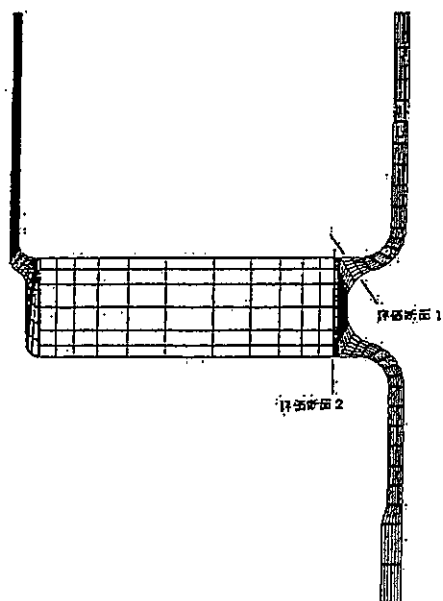


図 A2.2.3-4 IHX 上部管板評価断面

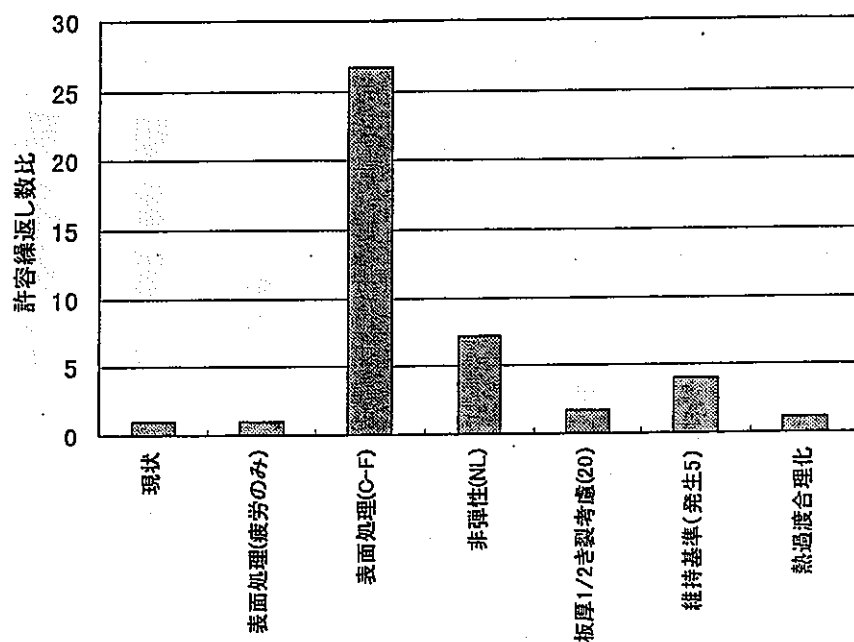


図 A2.2.3-5 各候補技術の適用による許容繰返し数比の増大効果

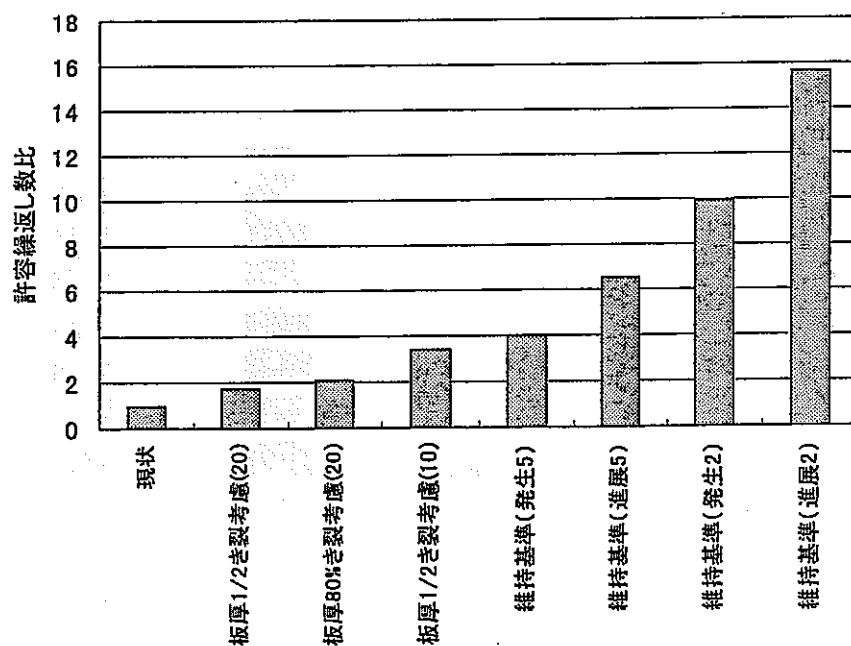


図 A2.2.3-6 き裂進展の考慮(設計 or 維持基準)による許容繰返し数比の増大効果

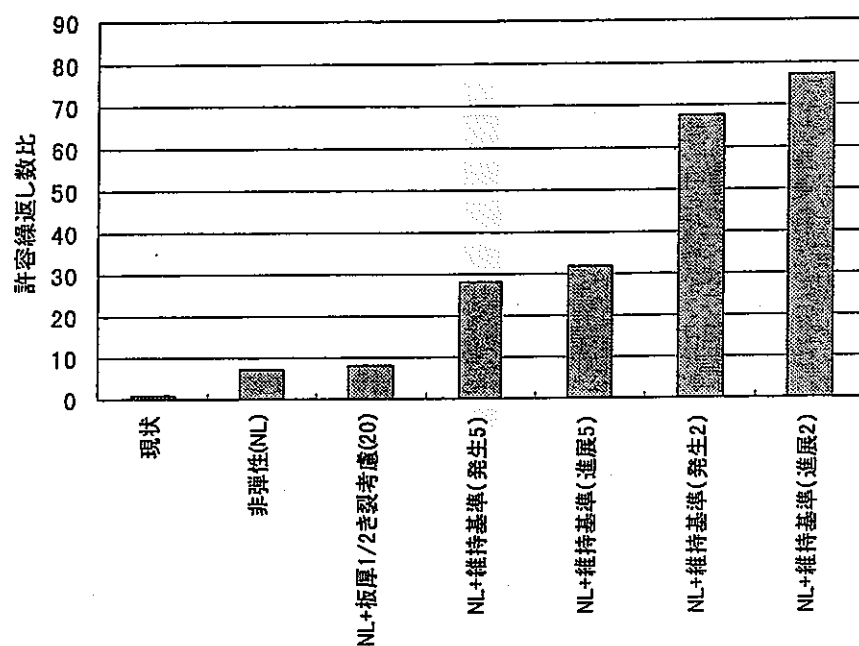


図 A2.2.3-7 非弾性解析とき裂進展評価による許容繰返し数比の増大効果

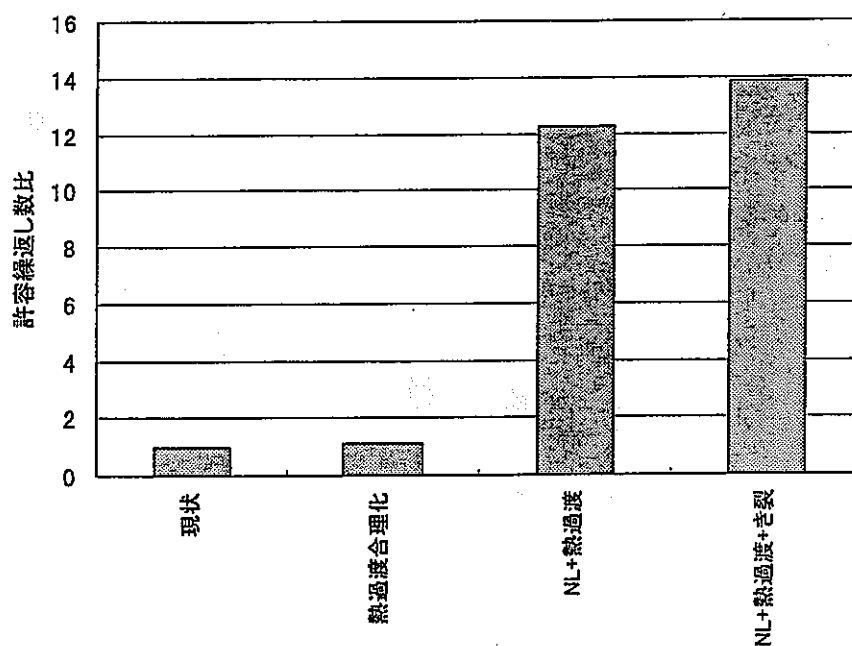


図 A2.2.3-8 非弾性解析と熱過渡合理化による許容繰返し数比の増大効果

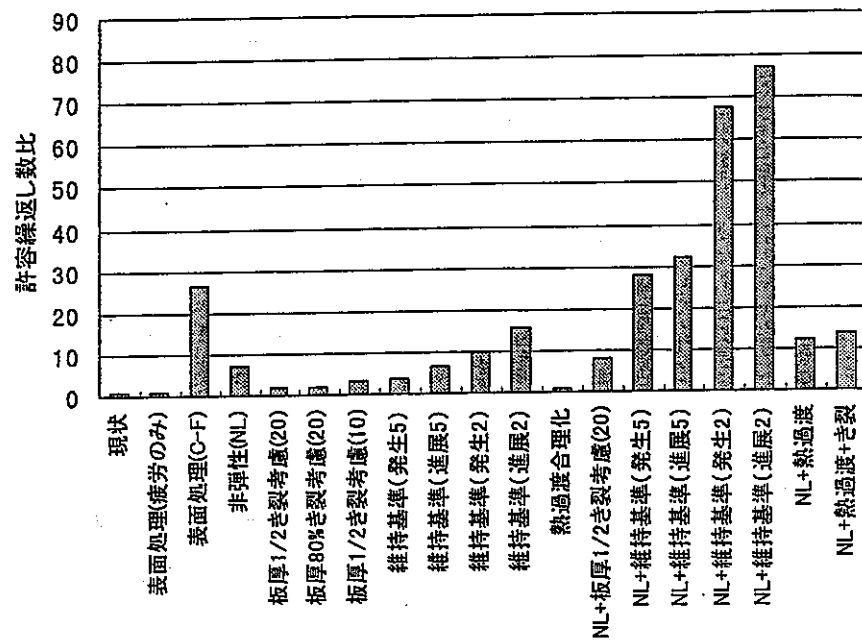


図 A2.2.3-9 許容繰返し数比の増大効果

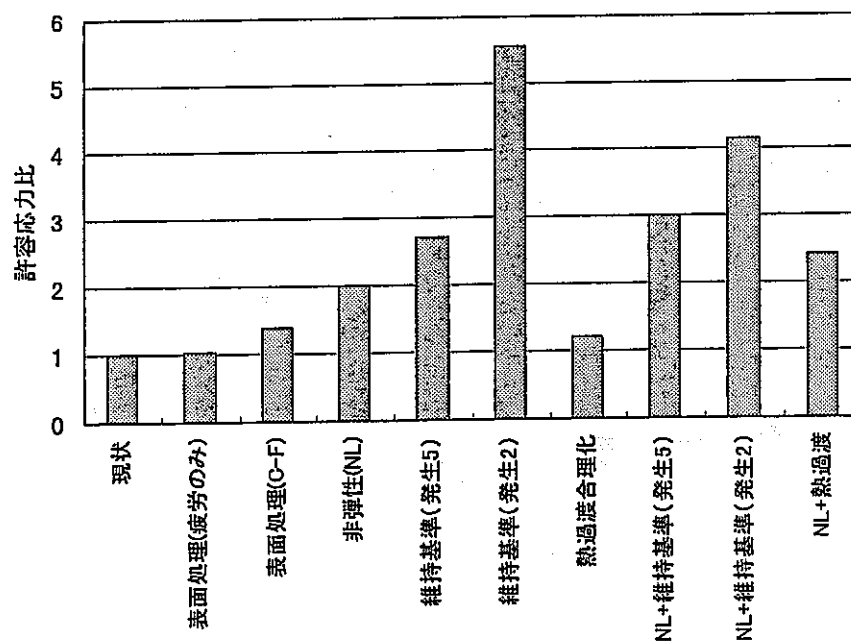


図 A2.2.3-10 許容応力比の増大効果

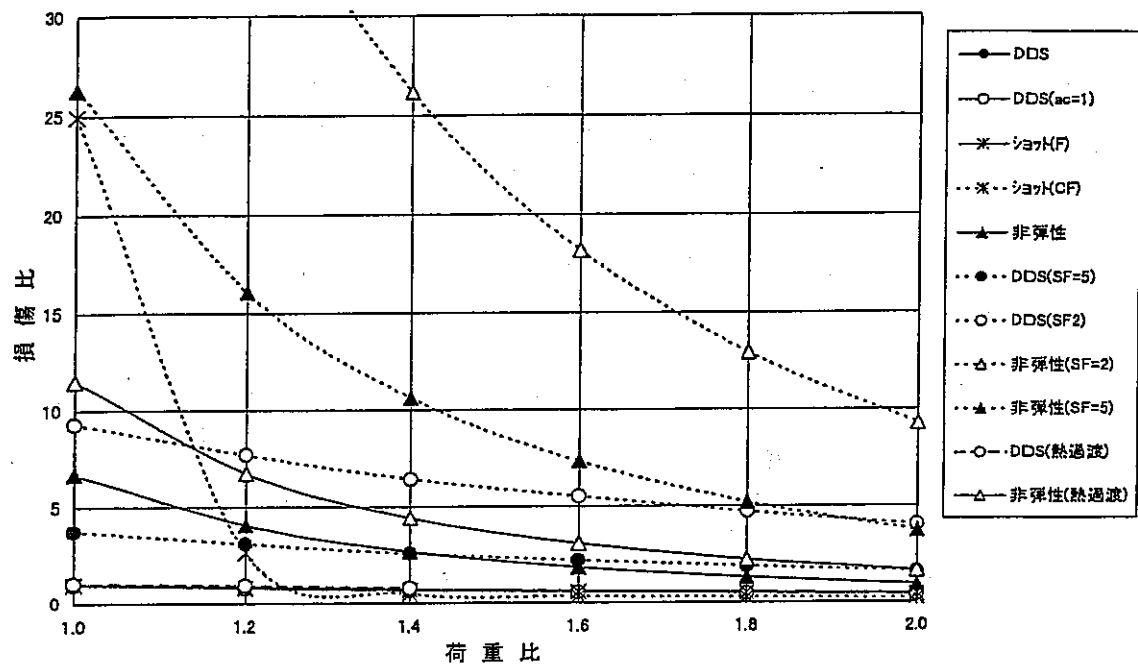


図 A2.2.3-11 各候補技術の荷重と損傷依存性

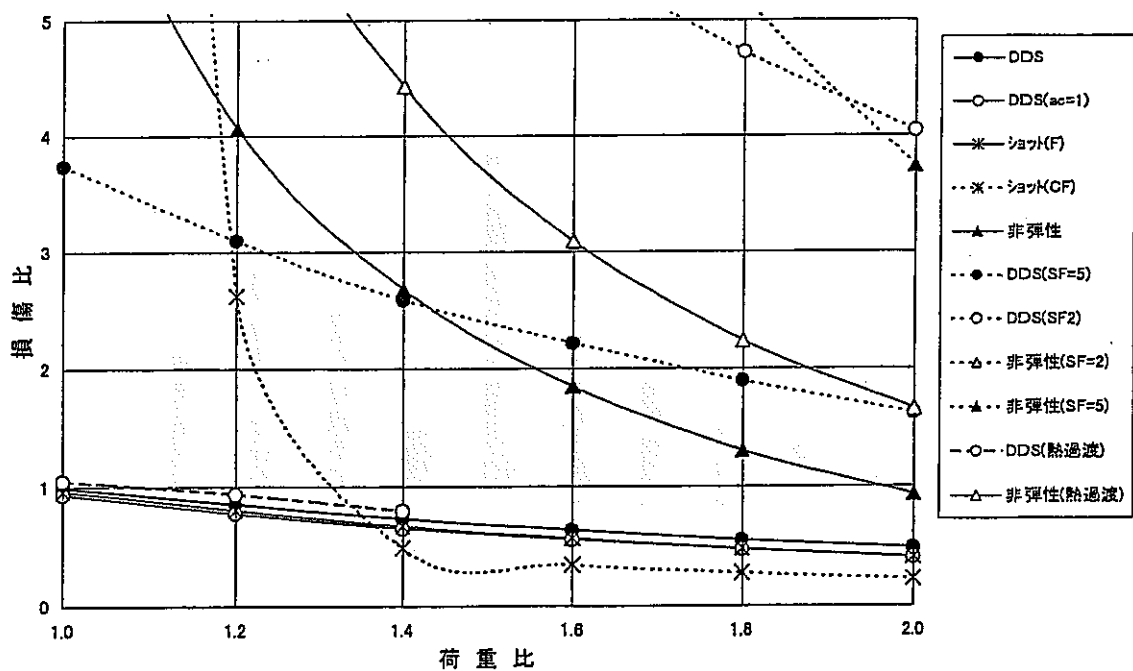


図 A2.2.3-12 各候補技術の荷重と損傷依存性(拡大図)

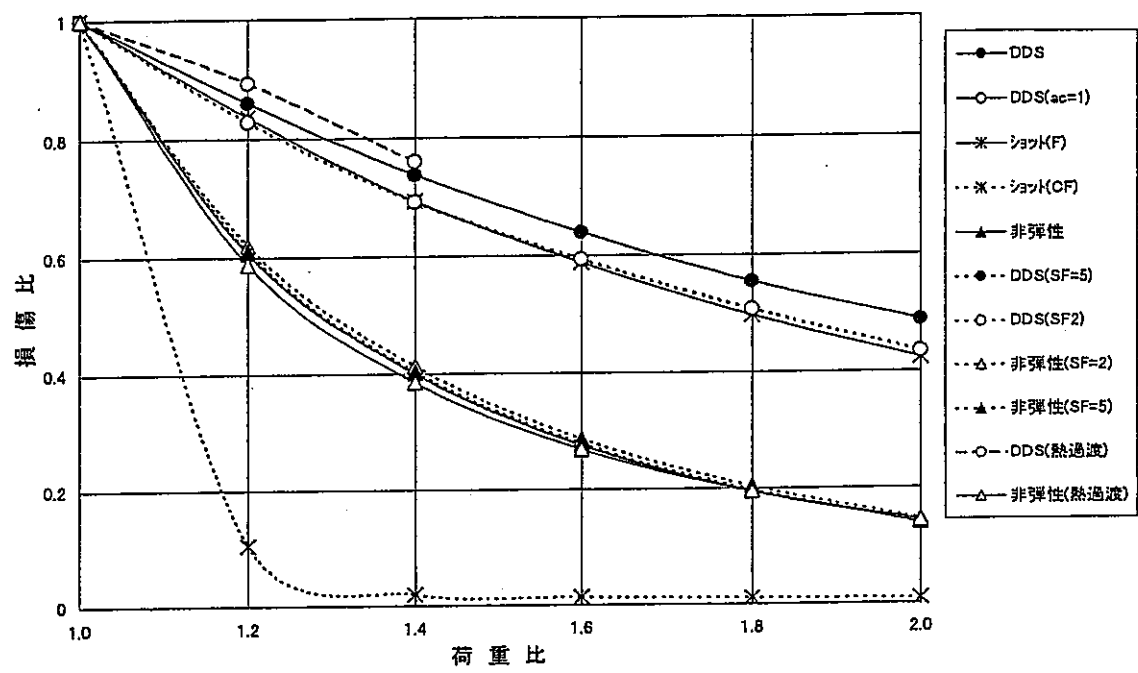


図 A2.2.3-13 各候補技術の荷重と損傷依存性(現状荷重で無次元化)