

検査技術及び検査規格体系に関する調査



2002年3月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2002

R100

(KO)

検査技術及び検査規格体系に関する調査

－ 検査技術及び検査規格体系に関する調査 －

定廣 大輔*

要 旨

高速炉の開発においては、経済性が重要な課題となっているが、従来の高温構造基準では設計係数が大きく、経済性向上を制約する要因となっていたと考えられ、裕度の適正化を狙った「システム化規格」の検討・開発が進められている。

本研究は、システム化規格の開発に資することを目的に、検査技術及び検査規格体系について調査・検討を行ったものである。本年度の成果は、以下の通りである。

(1) 検査の位置付けの整理

現行規格・基準の調査・整理を行うとともに、裕度交換手法の1つと考えられるリスク評価例の調査を行い、システム化規格での規格化項目案として、検査精度、検査間隔、検査の種類、検査箇所及び検査方法等を摘出した。摘出した項目に対して、調査結果に基づいて検査の合理化への影響を検討した。この結果、特に検査精度と検査間隔の合理化への寄与が大きいと考えられた。

(2) 検査技術に関する調査

(1) の検討で、検査精度が重要な項目と考えられたため、ISI の体積検査手法の1つである超音波探傷法について、現状の技術動向を調査するとともに、検査の合理化に有効と考えられるモニタリング技術について調査を行った。

超音波探傷法について、検出限界の推定は困難であるが、き裂深さ 1~2mm 程度の検査精度は見通せるものと考えられる。モニタリング技術としては、疲労モニタ、き裂モニタ等の導入により機器の交換時期の適正化等の合理化が期待できる。

(3) 規格体系に関する検討

上記の調査結果に基づき、システム化規格での規格化項目を摘出し、システム化規格で考慮する範囲及び検査に関する部分基準の枠組みを検討した。システム化規格は具体的な方法論を与える基準であると考え、現行の JEAC、JEAG 等を対象とするとともに、告示の材料検査等も含めるものとした。

また、摘出した規格化項目により、他の部分基準との裕度交換ルートを検討し、検査に関する部分基準の枠組みを暫定した。

本報告書は、核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務の成果である。

契約番号 ; 1304A01374

担当者 ; 大洗工学センター 要素技術開発部 構造信頼性研究グループ 川崎 信史

* ; 富士電機株式会社 電機システムカンパニー 原子力・放射線事業部 設計部

March, 2002

— Investigation study for inspection technique and flame of code for inspection —

D. Sadahiro*

ABSTRACT

Plant economics is one of important items in FBR development. In present FBR design, large design factor provided in design standards is considered to be one of restriction for the improvement of FBR economics. From such a background, FBR Integrity System Code (FISC), which is for settlement of appropriate design margin, is now under development.

Aim of this study is to contribute to the development of this code, and investigation study on inspection technique and flame of code for inspection has been performed. The results of this study are as follows.

(1) Study of position of code for inspection

The present code and standard for inspection and evaluation examples for risk assessment, which is one of method for margin exchange, have been investigated, and inspection accuracy, inspection interval, type of inspection and inspection procedure etc. have been extracted as the standardization item. In these items, first two items, in particular, have a large contribution to rationalization.

(2) Investigation of inspection technique

Because the inspection accuracy is one of important item from study item (1), present status of Ultrasonic Testing (UT) technique, which is the one of the method used for ISI, has been investigated. And, monitoring technique, which is effective for rationalization of inspection, has been also investigated.

Concerning UT, estimation of detection limit is difficult, but it is considered that detection of 1~2mm depth crack can be detected by present UT technique. On monitoring technique, fatigue or crack monitoring can contribute to maintenance schedule.

(3) Study of flame of code for inspection

Based on the above study results, the standardization items in code for inspection have been extracted, and area and flame of this code have been studied. Because FISC is considered to provide the concrete design procedures, present code and guideline such JEAC and JEAG is considered to be covered in this code. Material inspection included in design code is also included.

Route for margin exchange between another code has been studied using the extracted standardization items, and flame of code for inspection has been settled preliminarily.

This study was performed by Fuji Electric Co.,Ltd. under the contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

Contract No. ; 1304A01374

JNC Liaison ; Mr. Kawasaki, Structural Mechanics Reserch Gr., O-arai Engineering Center

* ; Design Department Nuclear Power Division Energy & Electric Systems Company Fuji Electric Co.,Ltd

目 次

	頁
1. まえがき	1
2. 研究計画	1
3. 研究内容	2
3.1 検査の位置付けの整理	3
3.1.1 用語の定義	3
3.1.2 現行の規格・基準等の整理	7
3.1.3 リスク評価に関する調査	18
3.1.4 検査の影響に関する検討	41
3.2 検査技術に関する調査	52
3.2.1 検査精度の調査	52
3.2.2 モニタリング技術の調査	64
3.3 規格体系に関する検討	71
4. これまでの成果と今後の課題	80
5. あとがき	82
6. 参考文献	83

図リスト

	頁
図3.1.3-1 検査を考慮した欠陥分布	27
図3.1.3-2 検査技術によるPOD及び欠陥分布の違い	27
図3.1.3-3 ISIデータの欠陥分布への適用例	28
図3.1.3-4 配管系の構造信頼性評価フロー	32
図3.1.3-5 欠陥検出性に関する前提条件	34
図3.1.3-6 PWR(プラントA)での評価	34
図3.1.3-7 PWR(プラントB)での評価	35
図3.1.3-8 BWRでの評価結果	35
図3.1.3-9 ISI間隔と検出確率の影響	36
図3.1.3-10 破損確率が増加する場合のISIの影響	37
図3.1.3-11 評価に用いる検出確率	37
図3.1.3-12 検出確率による信頼性の向上効果	37
図3.3-1 システム化規格で考慮する範囲(案)	76
図3.3-2 システム化規格の枠組み(案)	77

表リスト

	頁
表3.1.1-1 用語の定義	6
表3.1.2-1 現行の規格・基準等で規定される検査.....	8
表3.1.2-2 もんじゅ ISIの概要(1/3) (; 平成4年度 供用期間中検査指針より)	12
表3.1.2-2 もんじゅ ISIの概要(2/3) (; 平成4年度 供用期間中検査指針より)	13
表3.1.2-2 もんじゅ ISIの概要(3/3) (; 平成4年度 供用期間中検査指針より)	14
表3.1.2-3 検査に関する規格体系と規格化項目案(1/2)	16
表3.1.2-3 検査に関する規格体系と規格化項目案(2/2)	17
表3.1.3-1 RBIに関する文献調査リスト(1/5)	19
表3.1.3-1 RBIに関する文献調査リスト(2/5)	20
表3.1.3-1 RBIに関する文献調査リスト(3/5)	21
表3.1.3-1 RBIに関する文献調査リスト(4/5)	22
表3.1.3-1 RBIに関する文献調査リスト(5/5)	23
表3.1.3-2 検討例における適用ISIデータ	28
表3.1.3-3 リスク評価における初期欠陥深さ	33
表3.1.3-4 ISIスケジュール	33
表3.1.3-5 リスク評価における影響因子(1/2)	39
表3.1.3-5 リスク評価における影響因子(2/2)	40
表3.1.4-1 システム化規格における規格化項目と関連先 ; ISI (1/4)	45
表3.1.4-1 システム化規格における規格化項目と関連先 ; ISI (2/4)	46
表3.1.4-1 システム化規格における規格化項目と関連先 ; ISI (3/4)	47
表3.1.4-1 システム化規格における規格化項目と関連先 ; ISI (4/4)	48
表3.1.4-2 システム化規格における規格化項目と関連先 ; ISI以外	51
表3.2.1-1 超音波探傷法に関する調査結果(1/5)	55
表3.2.1-1 超音波探傷法に関する調査結果(2/5)	56
表3.2.1-1 超音波探傷法に関する調査結果(3/5)	57
表3.2.1-1 超音波探傷法に関する調査結果(4/5)	58

	頁
表3.2.1-1 超音波探傷法に関する調査結果(5/5)	59
表3.2.1-2 超音波探傷法による検出可能な欠陥サイズ；板厚比で整理(1/2)	60
表3.2.1-2 超音波探傷法による検出可能な欠陥サイズ；板厚比で整理(2/2)	61
表3.2.1-3 超音波探傷法による検出可能な欠陥サイズ；深さで整理(1/2) ..	62
表3.2.1-3 超音波探傷法による検出可能な欠陥サイズ；深さで整理(2/2) ..	63
表3.2.2-1 モニタリング技術に関する調査結果(1/3)	68
表3.2.2-1 モニタリング技術に関する調査結果(2/3)	69
表3.2.2-1 モニタリング技術に関する調査結果(3/3)	70
表3.3-1 システム化規格での規格化項目(案)	74
表3.3-2 規格化項目のイメージ	75
表3.3-3 検査に関する規格の体系案(1/2)	78
表3.3-3 検査に関する規格の体系案(2/2)	79

1. まえがき

高速増殖炉の開発においては、建設コスト及び発電コスト等のプラント経済性が重要な課題となっており、経済性要求を達成し得るプラント概念の構築を目的とした「実用化戦略調査研究」が進められている。この研究の中で、将来の革新技術等を取り込んだプラント概念の検討が行われており、信頼性を確保しつつ、経済性向上に寄与できる設計技術の開発が必要となってきた。

高速増殖炉では、ナトリウム等の液体金属冷却材を用いているため、沸点が高く、1次系の高温化・低圧化が可能である。このような特徴を考慮して、従来から高速増殖炉向けの高温構造設計基準の検討が行われている。原型炉「もんじゅ」向けには BDS (; Basic Design Standard) が策定され、その後計画された実証炉では BDS を基盤とする DDS (; Demonstration FBR Design Standard) の検討が行われ、高温構造設計基準の合理化検討が進められてきた。

上記の基準は、ASME Section III 等と同様に、弾性解析をベースとして簡易な設計を可能とする基準であったことから、プラントの信頼性確保のために種々の設計係数を用い、十分な設計裕度を確保している。この結果、プラント機器は板厚が増加する等の必要以上の物量を要求されることとなり、経済性向上を制約する一要因となっていた。

これらの設計裕度を適正化することは、高速増殖炉の経済性向上に有効と考えられ、実用化戦略調査研究の一環として、高温構造設計基準のみでなく、製作、運転、維持等を含めた広い範囲を統一的に規格化し、設計裕度の適正化を図る「システム化規格」の検討・開発が立ち上げられ、検討が進められている。

本検討は、システム化規格のうち、検査に関する部分基準の策定に資するものである。

2. 研究計画

2.1 研究目的

本調査研究の目的は、FBR プラントの材料、設計前提事項、設計、製作・使用前検査、運転、供用期間中検査、評価、補修・取替のすべてを範囲とするシステム化規格を策定するために、コスト削減、高信頼性化、長寿命化を実現しうる検査分野における技術を調査し、その開発課題と効果を評価することである。

本研究では、上記の全体目的に基づき、検査に係る範囲に対して調査研究を行い、システム化規格の策定に資することを目的とする。

3. 研究内容

本年度の研究内容は、以下の通りである。

(1) 検査の位置付けの整理

システム化規格での検査基準を検討するに当って、設計や製作・据付等の他の部分基準と裕度交換を行う項目(以下、「規格化項目」とする)を摘出する必要がある。

本検討では、現行基準体系から考えられる規格化項目を摘出するとともに、ASME 等で取り入れられている RBI(; Risk Informed Inspection)について調査を行い、リスク評価から考えられる規格化項目を摘出した。

また、摘出した規格化項目に対して、過去の検討例等を参考に、他基準に与える影響を検討した。

検討結果は、3.1 に示す。

(2) 検査技術に関する調査

(1) の検討結果に対して、検査技術の現状について調査・検討を行った。検査技術としては、リスク評価は ISI が中心であることから、ISI で重要な体積検査(超音波探傷試験)に重点をおくとともに、検査の合理化に友好と考えられるモニタリング技術について調査を行った。

検討結果は、3.2 に示す。

(3) 規格体系に関する検討

(1) 及び(2) の検討結果に基づいて、システム化規格での検査に関する部分基準での規格化項目を整理し、検査に関する部分基準の体系を検討した。

検討結果は、3.3 に示す。

3.1 検査の位置付けの整理

システム化規格では、設計、検査等を統合した規格体系を構築し、裕度の適正化を狙っている。一方、現行の基準では、設計、検査等の各基準は独立して規定されており、システム化規格の検討に当って、検査に関する基準の位置付けを整理する必要がある。

3.1.1 用語の定義

システム化規格で対象とする検査について、その定義は重要であることから、ここでは、現行の規格・基準で規定される検査について、その定義について整理するとともに、システム化規格での定義内容について検討を行った。

(1) 各種文献等での定義内容

表 3.1.1-1 に、各検査に対して、各種文献等で定義される内容を示す。

検査の定義については、供用前検査や供用期間中検査 (JEAC4205) のように、規格・基準の中で明確に定義されているものもあるが、その他の検査のように規格・基準内で明確に定義されていないものについては、その定義を明確にする必要がある。また、定期検査と ISI については、その区分けが明確になっていないため、システム化規格ではこれらを定義する必要がある。

なお、本検討では定期検査と ISI は別の定義として取り扱うものとする。ISI は定期検査の一部で同義と考えられるが、検査内容に差異があり、3.1.3 に示すリスク評価の場合には供用期間中検査の位置付けが重要であること及び JEAC4205 は ISI のみを対象とした規定であり、定期検査に関する規定ではないことから、本検討では定期検査と供用期間中検査は分離して考える(別検査の扱い) ものとする。システム化規格での定期検査と ISI の区分けについては、両者の名称の区分をなくすことも含めて検討が必要である。

(2) システム化規格での定義(案)

各検査に関する定義(案)は、以下の通りである。定義に当って、現行規格等との整合性を考慮して、法規や JEAC 等で定義されているものについては、そのままシステム化規格にも適用することとし、法規・規格で定義されていない検査については、その他の原子力の関連文献等を参考に定義した。

(a) 材料検査

設工認申請書本文及び構造図に示されている材料について、公的試験機関、JIS 認定工場等が発行した材料検査成績証明書により、素材の化学成分、機械的性質等

が所定の規格値又は規定値を満足していることを確認するための検査。

(b) 使用前検査

原子炉施設の工事と性能について、製作・据付の各段階毎に主務大臣が原子炉設置者に対して実施する検査。

(c) 溶接検査

法令に基づき、発電所内の主要な機器の溶接に対して、定められた溶接の工程ごとに実施する検査。

(d) 定期検査

原子炉設置者、再処理事業者及び廃棄物管理事業者が、「電気事業法」、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」、「原子炉の規制に関する法律施工令」等に基づいて、毎年1回実施する官庁検査。

なお、定期点検には、JEAG4101：原子力発電所の品質保証の基礎と指針に示されるように、①法律に基づく検査、②保安規定に基づく検査がある。法律に基づく検査としては、分解点検、機能・性能検査、耐圧・漏えい試験がある。また、保安規定に基づく自主検査には、工学的安全設備等の機器の機能が健全であることを確認するための定期試験(非常用 DG の機動試験、ECCS 系ポンプの機動試験等)がある。

(e) 供用前検査(PSI)

発電所の最初の運転開始前又は供用期間中における補修・取替後の運転開始前までに、設備の基本データを採取し、供用期間中検査の試験結果と比較するために行う検査。

(f) 供用期間中検査(ISI)

供用期間中に設備の非破壊試験又は漏えい試験を行い、設備の経年変化が生じているか、又は生じていてもその経年変化が許容できる程度であることを試験結果の判定基準と比較して確認する検査。

なお、JEAG4101 によれば、ISI は定期検査のうちの法律に基づく検査となっており、定期検査の一環として実施されるものである。但し、本検討においては、(l) に示したように、現状調査の対象規格が異なること等の理由から、別検査の扱いとしている。

また、上記の (a) ~ (f) においては、“検査”あるいは“試験”と呼ばれる項目があり、

これらについては、他の原子力関連基準との整合を考慮して、「IEAG4101：原子力発電所の品質保証の基礎と指針」に基づき以下で定義するものとした。

・検査(Inspection)：

試験、観察又は測定により、材料、部品、機器、系統、構築物並びにプロセス及び要領が、予め定められた品質要求事項に合致することを判定する行為。本定義は、IAEA「安全基準 50-C-QA (Rev. 1)」に相当し、検査には材料、非破壊試験(Examination)、外観寸法検査等がある。

・試験(Testing)：

製品を一連の物理的、化学的、環境的又は運転条件下に置くことにより、その製品が定められた要求事項に適合することを判定又は検証すること。本定義は、IAEA「安全基準 50-C-QA (Rev. 1)」に相当し、試験には単体及び系統の耐圧漏えい・機能・性能試験、プラント試運転、施工方法及び装置の認定試験、プロトタイプの認定・耐久試験がある。

表 3. I. 1-1 用語の定義

	原子力辞典	原子力百科辞典 ATOMICA	JEAC	その他(電事法、内規等の条文)	システム化規格での定義(案)
材料検査	—	—	—	設工認申請書本文及び構造図に示されている材料について、公的試験機関、JIS認定工場等が発行した材料検査成績証明書により、素材の化学成分、機械的性質等が所定の規格値又は規定値を満足していることを確認する。また、材料検査成績証明書と素材又は部材との照合を行う。	設工認申請書本文及び構造図に示されている材料について、公的試験機関、JIS認定工場等が発行した材料検査成績証明書により、素材の化学成分、機械的性質等が所定の規格値又は規定値を満足していることを確認するための検査。
使用前検査	—	—	—	原子炉設置者は、主務省令に定めるところにより、原子炉施設の工事及び性能について主務大臣の検査を受け、これに合格した後でなければ、原子炉施設を使用してはならない。	原子炉施設の工事と性能について、各段階毎に主務大臣が原子炉設置者に対して実施する検査。
溶接検査	溶接検査自体は定義されていないが、"溶接検査申請"の中に以下が記述されている。法令によって、発電所内の主要な機器を溶接する場合には、定められた溶接の工程ごとに経済産業大臣の検査を受けて、合格しなければならないと規定されており、この規定に基づいて溶接の施工者が検査に先立って経済産業大臣に検査の申請をするということをいう。	—	—	原子炉容器その他の主務省令で定める原子炉施設であって溶接をするものについては、主務省令に定めるところにより、その溶接につき主務大臣の検査を受け、これに合格した後でなければ、原子炉設置者は、これを使用してはならない。	法令に基づき、発電所内の主要な機器の溶接に対して、定められた溶接の工程ごとに実施する検査。これに合格した後でなければ、原子炉施設を使用できない。
定期検査	電機事業法第47条により蒸気タービン(1回/2年)を除いて毎年1回発電所を停止して行う官庁検査。この定期検査時に、点検、保守及び燃料取替等を行う。	原子炉設置者、再処理事業者及び廃棄物管理事業者は、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」に基づいて、毎年1回の定期検査が義務付けられている。定期検査は、国の検査官が立会い、安全上重要な部分は全て検査され、一定期間以上使用した部品は交換される。なお、定期検査を受ける各施設は、それぞれ「原子炉の規制に関する法律施工令」に定められている。原子力発電所では電気事業法に基づき行われており、この定期検査の際、燃料取替、保守なども行われている。	—	発電用のボイラー、タービンその他の電気工作物のうち、公共の安全の確保上特に重要なものとして経済産業省で定めるものであって、経済産業省令で定める圧力以上の圧力を加えられる部分があるもの並びに発電用原子炉及びその附属設備であって経済産業省令で定めるものについては、これらを設置する者は、経済産業省令で定める時期ごとに、経済産業大臣又は経済産業大臣が指定する者が行う検査を受けなければならない。	原子炉設置者、再処理事業者及び廃棄物管理事業者が、「電気事業法」、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」、「原子炉の規制に関する法律施工令」等に基づいて、毎年1回実施する官庁検査。
供用前検査	原子炉設置者は、原子炉施設の工事と性能について、各段階毎に主務大臣の検査を受けて、これに合格したあとでなければ、原子炉施設を使用することができない。	—	発電所の最初の運転開始前又は供用期間中における補修・取替後の運転開始前までに、設備の基本データを採取し、供用期間中検査の試験結果と比較するために行う検査をいう。なお、本検査は供用期間中検査のためのデータ採取を目的として実施される試験ではあるが、慣習的に"検査"と称している。	—	発電所の最初の運転開始前又は供用期間中における補修・取替後の運転開始前までに、設備の基本データを採取し、供用期間中検査の試験結果と比較するために行う検査。
供用期間中検査	運転中のプラントに対して、ある期間毎に運転停止して実施する検査。例えば、軽水冷却軽水減速の原子炉を有する原子力施設においては、公衆の衛生と安全を保護することを目的として、原子炉冷却系統、関連補機系統および緊急炉心冷却系統の耐圧機器に関して検査する。検査細目は供用中検査規則により定められている。	原子力発電所など原子力施設は、安全性を重視するため、通常の運転休止期間中に非破壊検査を実施し、機器に要求される安全上の機能の確認を行っている。このような検査を供用期間中検査(ISI)と呼んでいる。ISIに関する具体的方針は、1970年に米国の ASME コードに定められたものが最初であり、日本では電気技術規定 JEAC4205 が発行されており、検査範囲、検査程度、検査方法などが詳細に定められている。	供用期間中に設備の非破壊試験又は漏えい試験を行い、設備の経年変化が生じているか、又は生じていてもその経年変化が許容できる程度であることを試験結果の判定基準と比較して確認する行為をいう。	—	供用期間中に設備の非破壊試験又は漏えい試験を行い、設備の経年変化が生じているか、又は生じていてもその経年変化が許容できる程度であることを試験結果の判定基準と比較して確認する検査。

3.1.2 現行の規格・基準等の整理

(1) 目的及び手順

ここでは、①システム化規格における検査の位置付けを明確にすること、②検査に関する規定での規格化項目案を抽出することを目的として、現行規格体系の調査を行い、考えられる規格化項目を検討した。

上記の目的に基づいて、検査に関して現行の規格・基準で規定されている項目を整理し、システム化規格での規格化項目の候補を抽出した。調査対象は、軽水炉及び高速炉(もんじゅ)とした。

(1) 現行の規格・基準等で規定される検査

a. 検査に関する規格・基準の整理

表3.1.2-1に、検査に関する現行の規格・基準を整理した結果を示す。表においては、①規定する法規、②要求される検査内容をまとめた。また、これらに対して、対応が考えられるシステム化規格での部分基準をまとめた。

各規格・基準で規定される内容について、システム化規格の部分基準として何を規定していくかは、別途示すものとし、ここでは各検査項目とシステム化規格の部分基準の大枠での対応を示すのみとする。

各検査では非破壊検査や耐圧・漏えい試験等の他に、"試験(Testing)"と定義される作動・性能試験が規定されている。表3.1.2-1では、"試験(Testing)"に分類される検査項目は、システム化規格で考慮する"構造健全性"の確保とは直接的に関係しないため、システム化規格の部分基準の範囲外と考えられる。

なお、これについては、今後システム化規格の適用範囲を拡張する場合等については、検討が必要である。

表 3.1.2-1 現行の規格・基準等で規定される検査

検査名	規定する法規、規格・基準等	要求される検査内容		規定される部分基準
材料検査	<ul style="list-style-type: none"> (・電気事業法及び施工通則)^{注1)} (・原子炉等規制法及び施工令) (・省令 62 号) ・告示 501 号 ・JIS 規格 	検査	<ul style="list-style-type: none"> ・化学成分 ・外観及び寸法検査 ・熱処理 ・機械試験(引張、曲げ、破壊韌性試験 等) ・耐圧試験 ・監視試験片 等 	材料
		試験 ^{注2)}	—	
溶接検査 (溶接自主検査)	<ul style="list-style-type: none"> ・電気事業法及び施工通則 ・原子炉等規制法及び施工令 ・省令 123 号 ・電気工作物の溶接の技術基準の解釈について(旧省令 81 号) ・JIS 規格 	検査	<ul style="list-style-type: none"> ・非破壊検査(RT、UT、PT、MT 等) ・機械試験(引張、曲げ、破壊韌性試験 等) ・耐圧試験 	検査(PSI)
		試験	—	
使用前検査 (使用前自主検査)	<ul style="list-style-type: none"> ・電気事業法及び施工通則 ・原子炉等規制法及び施工令 ・省令 62 号 ・告示 501 号 ・省令 123 号 ・各種内規 ・その他の関連基準(機器固有の適用基準等) 	検査	<ul style="list-style-type: none"> ・材料検査 ・外観及び寸法検査 ・据付検査 ・耐圧試験 	検査(PSI)
		試験	<ul style="list-style-type: none"> ・制御棒作動検査 ・スクラム検査 ・インターロック検査 ・臨界試験 ・高及び低出力試験 等 	
供用前検査	・JEAC 4205 軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査	検査	(検査項目は、供用期間中検査と同様)	維持(検査)
		試験	—	
定期検査 (定期自主検査)	<ul style="list-style-type: none"> ・電気事業法及び施工通則 ・原子炉等規制法及び施工令 ・省令 62 号 ・告示 501 号 ・JEAG 4209 原子力発電所の設備点検指針 ・各種内規 	検査	<ul style="list-style-type: none"> ・外観及び寸法検査 ・分解・開放検査 ・耐圧・漏えい検査 等 	維持(検査)
		試験	<ul style="list-style-type: none"> ・ポンプ作動試験 ・主要弁作動試験 ・制御棒引抜、挿入試験 ・スクラム検査 ・インターロック検査 等 	
供用期間中検査(ISI) ^{注3)}	<ul style="list-style-type: none"> (・電気事業法及び施工通則) (・原子炉等規制法及び施工令) (・省令 62 号) (・告示 501 号) (・省令 123 号) ・JEAC 4205 軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査 	検査	<ul style="list-style-type: none"> ・1種機器の耐圧溶接部の溶接検査 ・第3種機器の耐圧溶接部の溶接検査 ・耐圧・漏えい試験 ・支持構造物の溶接検査 等 	維持(検査)
		試験	—	

注 1) 上表において、()付の規格は、直接の規定はないが、間接的に規定すると考えられるものを示している。

注 2) 試験は作動試験等の機能的な検査として区分している。

注 3) ISI は定期検査の一環と考えられるが、本検討では重要な位置付けであることから、別枠を設けるものとした。

b. 高速炉での ISI 指針

a. に示した現行の規格・基準については、現状の商用炉である軽水炉を対象としたものである。原子炉等規制法等の上位基準については、高速炉にも適用される基準であるが、構造等の技術基準(告示 501 号)や溶接基準(省令 123 号)等については、ナトリウム冷却炉用に別途策定されている。但し、一部の内容の相違を除けば、規格・基準の体系に差はないものと考えられる。

一方、ISI については、①目視確認が困難であること、②ナトリウム漏えい等、2 次系に対しても冷却材バウンダリへの要求が大きいこと等のナトリウム冷却炉の特徴を考慮して、高速炉用の ISI 指針(「もんじゅ」の場合は、「高速増殖炉もんじゅ発電所用の供用期間中検査指針(案)」)を用意していることから、現状の高速炉での ISI の考え方を調査する必要がある。

国内のナトリウム冷却炉については、「常陽」、「もんじゅ」、「実証炉」(設計)の 3 つがあるが、ここでは実際の運用に近いものであるとの考え方から、「もんじゅ」の ISI 基準について、その考え方と現状の ISI 計画について調査を行った。

(a) ISI 指針の考え方

「もんじゅ」での ISI の基本方針では、適用範囲及び規制内容について軽水炉向けの JEAC4205 の精神を踏襲するとともに、高速炉は軽水炉とは安全性評価の考え方や機器構造が異なることから、ナトリウム冷却炉用の指針である ASME Section XI Division 3 を参考として検討が行われている。

ナトリウム冷却炉機器の特徴(軽水炉との違い)として、以下が考慮されている。

- ① バウンダリ構成機器の材料は、延性を有するオーステナイト系ステンレス鋼であり、高い韌性を有する温度領域で使用される。
- ② 破壊により大きなエネルギー解放を伴わない。
- ③ 外部へのナトリウム漏えいは、プラント運転中に速やかに、確実に検出が可能である。

上記の特徴から、ナトリウム漏えいが生じても瞬時破断に至らないことが確認された場合には、漏えい検出を目的とした連続監視及び肉眼試験を主として適用することとしている。また、1 次及び 2 次主冷却配管に対しては、高温構造等の健全性を確認する観点から、温度、構造、接近性等を考慮して適切な部位で体積試験を実施することとしている。

(b) ISI の位置付け

軽水炉での ISI は、定期検査のうちの法律に基づく検査(官庁検査)として実施されている。一方、「常陽」では、開発炉の位置付けであり、検査の実施と並行して検査機器の開発や ISI の基本原則採用の検討等が必要であったことから、定期検査の一環ではなく、設置者の自主検査と位置付けられている。「もんじゅ」でも、同様の考え方から、設置者の自主検査と考えられており、軽水炉とは位置付けが異なる。

ISI 実施の目的は軽水炉と同様で、「当該機器に要求される安全上の機能を確保する手段」として位置付けられている。このため、ISI の方法としては、肉眼検査等の試験により欠陥検出を行うとともに、耐圧・漏えい試験やナトリウム漏えい監視等により漏えいの有無の確認及び早期発見を行っている。

(c) 「もんじゅ」での ISI の実施内容

「もんじゅ」での ISI の具体的な内容(案)を、表 3.1.2-2 に示す。なお、本表については、「高速増殖炉もんじゅ発電所用の供用期間中検査指針(案)」(平成 4 年)より抜粋したものである。

i. 策定に当っての着眼点

ISI 指針の基本的な考え方は、(a) 及び (b) に示した通りであるが、機器の構造上の特徴や制約事項等、策定に当っての具体的な着眼点は以下の通りである。

- ① ナトリウム加熱のための保温構造があり、検査時の脱着が困難である。
- ② 冷却材がナトリウムであること及び軽水炉より線量率が高いことから、接近性が悪い。
- ③ ナトリウム漏えい対策設備により、機器への接近、目視検査が困難である。
- ④ 目視検査にはナトリウムドレンが必要であるが、崩壊熱除去運転のため、ナトリウムドレンは不可能である。

ii. JEAC4205との違い

軽水炉向け JEAC4205 ともんじゅ ISI 指針とを比較すると、以下の相違がある。

- ① 原子炉容器等の対象機器については、構成機器の違いを除けば大きな違いはない。また、溶接部の検査程度について、JEAC4205 では全長の 10%、5% 等としているのに対し、もんじゅ指針では 3 ループであることを考慮して、1 検査間隔当たり 1 ループ分(33%) を実施することとしている。なお、これについては、各ループは同一の使用条件下にあることに基づいている。

- ② JEAC4205 では、支持構造物を除き、ほとんどの場合が体積検査(あるいは表面検査)を規定しているのに対し、もんじゅ指針の場合には肉眼検査及びナトリウム漏えい監視が主な検査項目となっている。
- ③ もんじゅ指針では、ガードベッセルや保温材等のナトリウム冷却炉特有の機器に対する配慮が行われており、これらの機器を考慮した検査項目の区分が行われている。
- ④ 目視検査は、軽水炉に比べて困難となるため、機器構造等の観点から目視検査が困難な箇所に対する注意が払われている(対象箇所への対応については、課題とされている)。
- ⑤ 検査スケジュールについては、もんじゅ指針でも JEAC4205 と同様に、10 年で 100%検査となるスケジュールを基本としている。
- ⑥ 耐圧試験については、以下の考え方方が示されている。軽水炉では通常運転時の圧力が高いことから実施することとなっているが、高速炉の場合過圧状態が優位な頻度で生じることがない。また、バウンダリ溶接部は、関連法規及び基準に基づいて溶接施工及び試験が行われていることから、過圧状態での耐圧試験は不要である。
- ⑦ 漏えい試験についても、以下の考え方方が示されている。ナトリウムバウンダリについては、溶接構造や多重シール構造を採用するとともに、多重シール部は中間加圧によるシール部単独の検査が可能となっている。また、通常運転時に「系の漏えい監視」を規定しているため、JEAC4205 で規定されている「系の漏えい試験」は不要である。

表 3.1.2-2 もんじゅ ISI の概要 (1/3) (; 平成 4 年度 供用期間中検査指針より)

機器	対象部分	機器区分	検査項目	検査方法	検査程度/検査間隔	備考
原子炉容器	原子炉冷却材バウンダリ (G/V に囲まれた部分)	第 1 種容器	肉眼 ナトリウム漏えい監視 体積 (材料監視)	VTM-2 ^{*1} SID、DPD EMAT ^{*2}	溶接部 33% 溶接部 100% 溶接部 未定	*1; 目視検査装置による *2; 体積検査装置による
	原子炉冷却材バウンダリ (G/V に囲まれた部分より上)	第 1 種容器	肉眼 ^{*1} ナトリウム漏えい監視 放射性力バーガスモニタ	VTM-2 ^{*1} SID、DPD C/G モニタ	溶接部 33% 溶接部 100% 溶接部 100%	*1; Na 漏えい時 G/V に流れる Na を目視検査 装置により監視
	原子炉カバーガスバウンダリ ^{*1}	第 3 種容器	放射性力バーガスモニタ ナトリウム漏えい監視	C/G モニタ SID、DPD	溶接部 100% 溶接部 100%	*1; カバーガスシール、ボルトシールキャップ、中間ツールプレ ート
	支持構造物 ^{*1}	第 1 種支持構造物	肉眼	VTM-3 (実施不可)	支持構造物 100%	*1; ツールプレート、据付ボルトナット、パッカーブレート
しゃへいプラグ	原子炉カバーガスバウンダリ	第 3 種容器	放射性力バーガスモニタ	C/G モニタ	溶接部 100%	
	固定プラグ取付ボルト	第 3 種容器	放射性力バーガスモニタ	C/G モニタ	100%	
1 次主冷却系循環ポンプ	原子炉冷却材バウンダリ (外ケーシング)	第 1 種ポンプ	肉眼 ナトリウム漏えい監視 放射性力バーガスモニタ	VTM-2 ^{*1} SID、DPD C/G モニタ	溶接部 33% 溶接部 100% 溶接部 100%	*1; 遠隔肉眼試験装置で実施
	原子炉カバーガスバウンダリ	第 3 種容器	放射性力バーガスモニタ	C/G モニタ	溶接部 100%	*1; ケーシングカバー及びボルト
	支持構造物	第 1 種支持構造物	肉眼	VTM-3 (実施不可の部分あり)	支持構造物 100%	*1; 取付ボルト、基礎ボルト *2; 一部保温材外表面より実施
	支持構造物	第 1 種支持構造物	肉眼 ^{*1}	VTM-3 ^{*2}	支持構造物 100%	*1; コンクリート、サボート胴、ツールプレート、取付ボルト、 基礎ボルト *2; 直接肉眼と遠隔肉眼試験装置の併用。一部保温材外表面より実施。
1 次主冷却系中間熱交換器	原子炉冷却材バウンダリ (伝熱管を除く)	第 1 種容器	肉眼 ナトリウム漏えい監視	VTM-2 ^{*1} SID、DPD	溶接部 33% 溶接部 100%	*1; 遠隔肉眼試験装置で実施
	原子炉冷却材バウンダリ (伝熱管)	第 1 種容器	漏えい監視	1 次系、2 次系の OF/T 液位を監視	バウンダリ 100%	
	2 次ナトリウムバウンダリ (胴体上部ブレナム)	第 3 種容器	肉眼 ナトリウム漏えい監視	VTM-2 ^{*1} SID、DPD	溶接部 33% 溶接部 100%	*1; 遠隔肉眼試験装置で実施
	2 次ナトリウムバウンダリ (上部ベローズ)	第 3 種容器	ナトリウム漏えい監視	SID、DPD	溶接部 100%	
	支持構造物	第 1 種支持構造物	肉眼 ^{*1}	VTM-3 ^{*2}	支持構造物 100%	*1; コンクリート、サボート胴、ツールプレート、取付ボルト、 基礎ボルト *2; 直接肉眼と遠隔肉眼試験装置の併用。一部保温材外表面より実施。
1 次主冷却系配管	配管 (R/V、G/V 内)	第 1 種管	肉眼 ナトリウム漏えい監視 体積 (材料監視)	VTM-2 ^{*1} SID、DPD EMAT ^{*2}	溶接部 33% 溶接部 100% 溶接部 未定	*1; 目視検査装置による *2; 遠隔体積検査装置による
	配管 (IHX 及び 1 次主ポンプ G/V 内)	第 1 種管	肉眼 ナトリウム漏えい監視	VTM-2 ^{*1} SID、DPD	溶接部 33% 溶接部 100%	*1; 遠隔肉眼検査装置による
	配管 (IHX 及び 1 次主ポンプ G/V 外)	第 1 種管	肉眼 ナトリウム漏えい監視 体積 (材料監視)	VTM-2 ^{*1} SID、DPD UT ^{*2}	溶接部 33% 溶接部 100% 溶接部 33%	*1; 遠隔肉眼検査装置による *2; 遠隔体積検査装置による
	支持構造物 (R/V、G/V 内)	第 1 種支持構造物	肉眼	VTM-3、4	支持構造物 100%	*1; ボルトアーマー取付溶接部、入口配管レストレイン、 出入口配管ハンガースナップ
	支持構造物 (R/V、G/V 内以外)	第 1 種支持構造物	肉眼	VTM-3、4	支持構造物 100%	*1; ハンガースナップ、パイプクランプ、ブリケット、レスト レイン
1 次主冷却系逆止弁	原子炉冷却材バウンダリ (弁箱)	第 1 種弁	肉眼 ナトリウム漏えい監視	VTM-2 ^{*1} SID、DPD	溶接部 33% 溶接部 100%	*1; 遠隔肉眼検査装置による
	ボルト	第 1 種弁	ナトリウム漏えい監視	SID、DPD	100%	
炉心支持構造物	炉内構造支持構造物、炉心支持板、 炉心槽	炉心支持構造物	材料監視 ^{*1}			*1; ASME Sec III Div. 3 では VTM-3、JEAC4205 では VT を要求
原子炉容器ガードベッセル	原子炉冷却材バウンダリ (胴体)	第 3 種容器	肉眼 (材料監視)	VTM-1、3 ^{*1}	溶接部 33%	*1; 目視検査装置で実施 リニアスケール測定実施
	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼	VTM-3	支持構造物 100%	*1; 入口 G/P 支持ボルト、下部支持構造物、 据付ボルトナット、コンクリート、サボート胴等

表 3.1.2-2 もんじゅ ISI の概要 (2/3) (; 平成 4 年度 供用期間中検査指針より)

機器	対象部分	機器区分	検査項目	検査方法	検査程度/検査間隔	備考
1 次主冷却系中間熱交換器ガードベッセル	胴体	第 3 種容器	肉眼	VTM-1、3 ¹¹	溶接部 33% 支持構造物 100%	*1；内面より遠隔肉眼試験装置で実施 *1；スカート胴、リールプレート取付ボルト、基礎ボルト
	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼	VTM-3	支持構造物 100%	*1；スカート胴、リールプレート取付ボルト、基礎ボルト
1 次主冷却系循環ポンプガードベッセル	胴体	第 3 種容器	肉眼	VTM-1、3 ¹¹	溶接部 33% 支持構造物 100%	*1；内面より遠隔肉眼試験装置で実施 *1；スカート胴、リールプレート取付ボルト、基礎ボルト
	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼	VTM-3	支持構造物 100%	*1；スカート胴、リールプレート取付ボルト、基礎ボルト
1 次ナトリウムオーバーフロー系配管	配管、弁	第 1 種管	ナトリウム漏えい監視	SID, DPD, 接触型	バウンダリ 100%	*1；R/V 爐内配管の ISI 実施不可
	支持構造物	第 1 種支持構造物	肉眼	VTM-3、4	支持構造物 100%	*1；ハンガ、スナップ、パイプクランプ、ブレケット
	配管、弁	第 3 種管	ナトリウム漏えい監視	SID, DPD, 接触型	バウンダリ 100%	
	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼	VTM-3、4	支持構造物 100%	*1；ハンガ、スナップ、パイプクランプ、ブレケット
1 次ナトリウムオーバーフロー系オーバーフロータンク	胴体	第 3 種容器	肉眼 ナトリウム漏えい監視	VTM-2 SID, DPD, 接触型	溶接部 33% 溶接部 100%	
	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼	VTM-3	支持構造物 100%	*1；スカート胴、リールプレート取付ボルト、基礎ボルト
1 次ナトリウム充填ドレン系配管	配管、弁	第 1 種管	ナトリウム漏えい監視	SID, DPD	バウンダリ 100%	*1；1 次主冷却系より第 1 止弁
	支持構造物	第 1 種支持構造物	肉眼	VTM-3、4	支持構造物 100%	*1；ハンガ、スナップ、パイプクランプ、ブレケット
	配管、弁	第 3 種管	ナトリウム漏えい監視	SID, DPD	バウンダリ 100%	
	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼	VTM-3、4	支持構造物 100%	*1；ハンガ、スナップ、パイプクランプ、ブレケット
1 次メンテナンス冷却系配管	配管、弁	第 1 種管	ナトリウム漏えい監視	SID, DPD	バウンダリ 100%	
	支持構造物	第 1 種支持構造物	肉眼	VTM-3、4	支持構造物 100%	*1；ハンガ、スナップ、パイプクランプ、ブレケット
	配管、弁	第 3 種管	ナトリウム漏えい監視	SID, DPD	バウンダリ 100%	
	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼	VTM-3、4	支持構造物 100%	*1；ハンガ、スナップ、パイプクランプ、ブレケット
1 次メンテナンス冷却系中間熱交換器	胴体	第 3 種容器	肉眼 ナトリウム漏えい監視	VTM-2 接触型	溶接部 33% 溶接部 100%	
	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼	VTM-3	支持構造物 100%	
1 次アルゴンガス系配管	配管、弁	第 3 種管	放射性カバーガスモニタ	C/G モニタ	溶接部 100%	
	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼	VTM-3、4	支持構造物 100%	*1；ハンガ、スナップ、パイプクランプ、ブレケット
1 次アルゴンガス系原子炉容器ミストトラップ	胴体	第 3 種容器	放射性カバーガスモニタ	C/G モニタ	溶接部 100%	
	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼	VTM-3、4	支持構造物 100%	*1；ハンガ、スナップ、パイプクランプ、ブレケット
1 次アルゴンガス系原子炉容器ベーパトラップ	胴体	第 3 種容器	放射性カバーガスモニタ	C/G モニタ	溶接部 100%	
	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼	VTM-3、4	支持構造物 100%	*1；ハンガ、スナップ、パイプクランプ、ブレケット
2 次主冷却系循環ポンプ	外ケーシング	第 3 種ポンプ	肉眼 ナトリウム漏えい監視	VTM-2 接触型	溶接部 33% 溶接部 100%	
	ケーシングボルト	第 3 種ポンプ	肉眼	VTM-3	支持構造物 100%	
	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼	VTM-3、4	支持構造物 100%	*1；リールプレート、据付ボルト *2；一部保温材外表面より実施
2 次主冷却系循環ポンプオーバーフローコラム	胴体	第 3 種容器	肉眼 ナトリウム漏えい監視	VTM-2 RID	溶接部 33% 溶接部 100%	
	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼	VTM-3、4	支持構造物 100%	*1；ハンガ、スナップ、パイプクランプ、ブレケット *2；一部保温材外表面より実施
蒸気発生器	胴体	第 3 種容器	肉眼 ナトリウム漏えい監視	VTM-2 RID	溶接部 33% 溶接部 100%	
	伝熱管	第 3 種容器	体積 水漏えい監視	ECT, UT 水漏えい監視装置	バウンダリ 未定 バウンダリ 100%	*1；体積試験装置 *2；ナトリウム及びガーベガス中への水漏えい監視
	フランジボルト	第 3 種容器	ナトリウム漏えい監視	RID	100%	*1；Na 液位、ガーベガス圧、ガーベガス供給量も併せて監視
	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼	VTM-3、4	支持構造物 100%	*1；一部保温材外表面より実施

表 3.1.2-2 もんじゅ ISI の概要 (3/3) (; 平成 4 年度 供用期間中検査指針より)

機器	対象部分	機器区分	検査項目	検査方法	検査程度/検査間隔	備考
2 次主冷却系配管	配管	第 3 種管	肉眼 ナトリウム漏えい監視 体積	VTM-2 ¹ RID UT ²	パウンダリ 未定 パウンダリ 100% パウンダリ 未定	*1 ; 一部保温材外表面より実施
	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼	VTM-3	支持構造物 100%	*1 ; ハンガ、スナップ、パイプクランプ、アラウト *2 ; 一部保温材外表面より実施
蒸気発生器出入口止弁	弁箱	第 3 種弁	ナトリウム漏えい監視	RID、接触型	パウンダリ 100%	
	ボルト	第 3 種弁	ナトリウム漏えい監視	RID	100%	
	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼	VTM-3、4	支持構造物 100%	*1 ; 一部保温材外表面より実施
補助冷却設備空気冷却器	伝熱管	第 3 種管	ナトリウム漏えい監視	RID	パウンダリ 100%	
	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼	VTM-3	支持構造物 100%	
補助冷却設備配管	配管	第 3 種管	肉眼 ナトリウム漏えい監視 体積	未定 RID 未定	パウンダリ 未定 パウンダリ 100% パウンダリ 未定	
	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼 ¹²	VTM-3	支持構造物 100%	*1 ; ハンガ、スナップ、パイプクランプ、アラウト *2 ; 一部保温材外表面より実施
	弁箱	第 3 種弁	ナトリウム漏えい監視	RID、接触型	パウンダリ 100%	
補助冷却設備空気冷却器出入口止弁	ボルト	第 3 種弁	ナトリウム漏えい監視	RID	100%	
	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼	VTM-3、4	支持構造物 100%	*1 ; 一部保温材外表面より実施
	配管、弁	第 3 種管	ナトリウム漏えい監視	RID	パウンダリ 100%	*1 ; 2 次主冷却系より第 1 止弁
2 次ナトリウムオーバーフロー系配管	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼	VTM-3、4	支持構造物 100%	*1 ; ハンガ、スナップ、パイプクランプ、アラウト *2 ; 一部保温材外表面より実施
	配管、弁	第 3 種管	ナトリウム漏えい監視	RID	パウンダリ 100%	*1 ; 2 次主冷却系より第 1 止弁
2 次ナトリウム充填ドレン系配管	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼	VTM-3、4	支持構造物 100%	*1 ; ハンガ、スナップ、パイプクランプ、アラウト *2 ; 一部保温材外表面より実施
	配管、弁	第 3 種管	ナトリウム漏えい監視	RID	パウンダリ 100%	*1 ; 2 次主冷却系より第 1 止弁
炉外燃料貯蔵設備炉外燃料貯蔵槽	胴体	第 3 種容器	肉眼 ナトリウム漏えい監視	VTM-2 DPD	溶接部 33% 溶接部 100%	
	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼	VTM-3	支持構造物 100%	
炉外燃料貯蔵設備炉外燃料貯蔵槽しゃへいプラグ	胴体	第 3 種容器	未定			
	支持構造物	第 3 種支持構造物	肉眼			
炉外燃料貯蔵設備冷却系配管	配管	第 4 種管	ナトリウム漏えい監視	DPD	溶接部 100%	*1 ; 膨張タンク、ナトリウム加熱器を含む
	支持構造物	その他支持構造物	肉眼	VTM-3、4	支持構造物 100%	*1 ; ハンガ、スナップ、パイプクランプ、アラウト
炉外燃料貯蔵設備空気冷却器	伝熱管	第 4 種管	ナトリウム漏えい監視	DPD	溶接部 100%	
	支持構造物	その他支持構造物	肉眼	VTM-3	支持構造物 100%	*1 ; 一部保温材外表面より実施
アニュラス循環排気装置	弁	第 3 種弁	未定			
1 次アルゴンガス系収納施設	収納施設パウンダリ部(容器)	第 3 種容器	未定			
	収納施設パウンダリ部(管、弁)	第 3 種管、弁	未定			
	収納施設パウンダリ部以外(容器)	第 4 種容器	未定			
	収納施設パウンダリ部以外(管)	第 4 種管	未定			

VTM-1 ; 機器表面の直接肉眼試験
 VTM-2 ; Na の滞留、蒸気、液滴等を直接又は間接的に検査
 VTM-3 ; 離脱部品、破片の有無、締結部の健全性、溶接部の状態の検査
 VTM-4 ; 機械的状態を有する装置、機器の取付状態、作動性の検査

SID ; ナトリウムイオン化式検出器
 (Sodium Ionization Detector)
 RID ; 放射線イオン化式検出器
 (Radiative Ionization Detector)
 DPD ; 差圧式検出器
 (Differential Pressure Detector)
 接触型 ; 接触型ナトリウム漏えい検出器

c. 規格化項目案の抽出

a. 及び b. での調査結果に基づき、表 3.1.2-3 に、検査に関する現行の規格・基準及び規定内容を整理した。本表では、現行の法規・規格・基準で規定される項目を踏襲して、システム化規格での規格化項目を選定することを前提に検討を行っている。

(a) 規定する規格・基準等

表 3.1.2-3 では、規定する規格・基準を上位、中位、下位に区分して記載した。

上位及び中位の基準は、国が制定する法規であり、材料検査を除いてはほぼ機能性要求のみとなっている。下位については、中位までの法規の規定内容を具体化したものであり、具体的な規定となっている。

システム化規格では、民間規定の位置付けを考えた場合、現行規格の下位に示した規定に対応するものと考えられる。但し、告示 501 号については、材料試験等の詳細が規定されており、システム化規格に含めるべきと考えられる。

(b) 規格化項目案

(a) での整理の結果に基づき、以下に表 3.1.2-3 中での下位規定での規定項目が、システム化規格での規格化項目になると想定して、規格化項目案を抽出した。

- ① 検査項目；非破壊検査、耐圧・漏えい試験等の実施すべき検査項目
- ② 検査箇所；検査対象機器(原子炉容器、蒸気発生器等)及び対象機器内での検査部位及び範囲(第 1 種容器の周方向溶接部、蒸気発生器伝熱管等)。なお、検査範囲として、溶接部の 10% 等を規定する。
- ③ 検査の種類；放射線透過試験、超音波探傷試験等の使用する検査の種類
- ④ 検査方法；超音波探傷試験での校正方法や使用する超音波探触子など、JEAG や JIS に規定されている具体的な検査手順
- ⑤ 検査時期；使用前検査の実施時期(5 時点)や定検間隔等
- ⑥ 判定基準；許容する欠陥長さ、欠陥深さ等

表3.1.2-3 検査に関する規格体系と規格化項目案 (1/2)

法規等で規定される検査	規定する法規等			規定内容の概要	規格化項目(候補)	システム化規格での部分基準	
	上位	中位	下位				
溶接検査	(1) 電気事業法及び施工通則 (2) 原子炉等規制法及び施工令			<ul style="list-style-type: none"> ・溶接(自主)検査の義務¹⁾ ・溶接自主検査実施体制、組織、検査方法、工程管理の届出義務²⁾ ・対象機器³⁾ ・申請時期⁴⁾ ・検査申請内容⁵⁾ ・合格基準(構造基準への適合要求)⁶⁾ <p>・機能性要求のみ</p>	特になし 特になし		
		(1) 省令123号		<p>(1) 電気工作物の溶接の技術基準の解釈について <関連JIS規格></p> <ul style="list-style-type: none"> - JIS Z 3104 鋼溶接継手の放射線透過試験方法 - JIS Z 3104 透過写真によるきずの像の分類方法 - JIS Z 0565 鉄鋼材料の磁粉探傷試験方法及び磁粉模様の分類 - JIS Z 2343 浸透探傷試験方法及び浸透指示模様の分類 - JIS Z 3121 突合せ溶接継手の引張試験方法 - JIS Z 3122 突合せ溶接継手の曲げ試験方法 - JIS Z 2202 金属材料衝撃試験片 - JIS Z 2242 金属材料衝撃試験方法 	<ul style="list-style-type: none"> ・検査箇所の表面状態⁷⁾ ・検査対象箇所(機器区分、溶接区分) ・各区分での適用検査の種類(UT、PT等) ・代替試験 ・機械試験の種類 ・耐圧試験 ・試験方法(具体的な方法) ・判定基準 	<ul style="list-style-type: none"> ・検査箇所 ・検査項目 (非破壊検査、機械検査、耐圧試験等) ・検査の種類 ・検査方法 ・判定基準 	<ul style="list-style-type: none"> ・製作・据付 ・検査(PSI)
使用前検査	(1) 電気事業法及び施工通則 (2) 原子炉等規制法及び施工令			<ul style="list-style-type: none"> ・使用前(自主)検査の義務¹⁾ ・合格基準(構造基準への適合要求)⁶⁾ ・使用前自主検査実施体制、組織、検査方法、工程管理の届出義務²⁾ ・対象機器³⁾ ・検査時期⁴⁾ ・検査方法⁴⁾ ・検査申請内容⁵⁾ <p>・機能性要求のみ。 ・使用前検査で確認すべき機能、構造について規定。</p>	検査時期 特になし		
		(1) 省令62号 (2) 告示501号 (3) 省令123号		<p>・内規 ・機器固有の適用基準 ・JEAC 4209 原子力発電所の設備点検指針 等</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・内規については、過去の経験やJEAC 4209等に基づくものと考えられる。一般的に、以下が規定されている。 - 検査項目(部位)、検査方法 - 検査時期及び立会区分 - 判定基準 	<ul style="list-style-type: none"> ・検査項目 ・検査時期 ・判定基準 ・検査方法 	<ul style="list-style-type: none"> ・材料 ・製作・据付 ・検査(PSI)
材料検査	(1) 電気事業法及び施工通則 (2) 原子炉等規制法及び施工令			<ul style="list-style-type: none"> ・材料検査は、使用前検査の一項目である。⁵⁾ 	特になし		
		(1) 省令62号 (2) 告示501号 (3) 省令123号		<p>(1) 電気工作物の溶接の技術基準の解釈について <関連JIS規格></p> <ul style="list-style-type: none"> - JEAC 4202 フェライト鋼の落重試験方法 - JEAC 4206 破壊韌性の確認試験方法 - JIS G 5101 炭素鋼鉄鋼品 - JIS G 4108 特殊用途合金ボルト用棒鋼 - JIS Z 2344 金属材料のパルス反射法による超音波探傷試験方法通則 - JIS G 0581 鋳鋼品の放射線透過試験方法及び透過写真的等級分類方法 ・その他、溶接検査に関するJIS規格と同様 	<ul style="list-style-type: none"> ・材料の規格への適合性要求 ・熱処理 ・破壊韌性試験の方法及び判定基準 ・非破壊試験の種類(検査の種類) ・試験方法(具体的な方法) ・検査項目(機械強度、化学成分) <p>・試験方法(具体的な方法及び手順)</p> <p>・欠陥の分類方法</p> <p>・試験時期</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・検査項目 ・検査の種類 ・検査方法 ・判定基準 	<ul style="list-style-type: none"> ・検査方法 ・判定基準(結果の分類方法を含む) ・試験時期

表3.1.2-3 検査に関する規格体系と規格化項目案 (2/2)

法規等で規定される検査	規定する法規等			規定内容の概要	規格化項目(候補)	システム化規格での部分基準
	上位	中位	下位			
定期検査	(1) 電気事業法及び施工通則 (2) 原子炉等規制法及び施工令	(1) 省令62号 (2) 告示501号	(1) 内規 (2) JEAG 4209 原子力発電所の設備点検指針	<ul style="list-style-type: none"> 定期(自主)検査の義務* 合格基準(構造基準への適合要求)* 定期自主検査実施体制、組織、検査方法、工程管理の届出義務* 対象機器⁶⁾ 検査時期 検査方法⁷⁾ 検査申請内容* <ul style="list-style-type: none"> 定期検査で確認すべき機能及び構造を規定 特に、定期検査に関する規定はない。 <ul style="list-style-type: none"> 内規については、過去の経験やJEAG 4209等に基づくものと考えられる。JEAG 4209での規定内容の概要は、以下の通り。 定期点検の内容(検査項目)⁸⁾ 定期点検の時期⁹⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> 検査箇所 検査時期 検査方法 <ul style="list-style-type: none"> 特になし <ul style="list-style-type: none"> 検査項目 検査時期 	維持(検査)
10) ISI(及びPSI)	11) (1) 電気事業法及び施工通則 (2) 原子炉等規制法及び施工令	11) (1) 省令62号 (2) 告示501号	(1) JEAC 4205 軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査 (2) JEAC 4206 軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験指針 (3) JEAC 4208 軽水型原子力発電所用蒸気発生器伝熱管の供用期間中検査における渦流探傷試験指針 (4) JSME 発電用原子力設備規格 維持規格(案) (5) (高速炉用) 供用期間中検査指針	<p>JEAC及びJEAG</p> <ul style="list-style-type: none"> 検査対象箇所 検査項目 検査プログラム(検査間隔) 検査方法(検査手順を含む) 検査範囲 校正方法 検査精度 <p>維持規格</p> <ul style="list-style-type: none"> 評価方法 評価時期 判定基準 	<ul style="list-style-type: none"> 検査箇所 検査項目 検査間隔(頻度) 検査の種類 検査方法 評価方法 判定基準 	維持(評価) ・維持(補修、取替)

* : 本項目については、法規等で規定されるものと考え、システム化規格での規定内容から除外するものと考える。

- 1) 電事法での規定は「ボイラ等」及び「格納容器等」に属する機器であり、施工規則で詳細が規定されているが、系統毎の規定である(機器個々ではない)。
- 2) 非破壊検査を行う表面は、「滑らかで、段がつかないように」との規定があるが、この規定は「製作・据付」に含まれる項目である。
- 3) 対象機器は、事業用電気工作物であり、個々の機器に対する規定はない。
- 4) 検査方法については、「技術基準への適合が確認できるために、十分な方法で行うこと」のみ規定されている。
- 5) 材料検査は、使用前検査の一環であり、個別の規定はないが、システム化規格では材料の規格等への期待が大きいことから、個別に取上げることとする。
- 6) 対象機器については、使用前検査と同様に、「タービン、ボイラ、その他の電気工作物」との規定のみである。
- 7) 検査方法については、「変形、異常の発生状況が確認できる方法」、「機能及び作動状況が確認できる方法」と規定されるのみである。
- 8) a. 点検、b. 試験に区分して規定されており、分解・開放点検、非破壊試験、機能・性能試験、漏えい試験等が規定されるとともに、PWR及びBWRの具体的な試験・点検項目が記載されている(規定ではない)。
- 9) 基本的には電事法での規定に基づくものとなっているが、機器の寿命や運転実績等を勘案して、適切に設定することとなっている。
- 10) ISIについては、定期検査で実施される検査の一つであるが、検討上重要であることから別枠とした。
- 11) ISIは定期検査に含まれる検査であるため、電気事業法及び省令等で規定される。

3.1.3 リスク評価に関する調査

ASMEでは、現行規格は発電所全体の健全性を効果的に確保するには適した体系ではないと考えられることから、供用期間中検査・試験の合理化を図ることを目的としてリスクベース評価手法の検討が行われ、多数の検討結果が示されている。リスクベース評価手法は、ASME Code Case N-577, 578に規定され、供用期間中検査に対しては1991年、供用期間中試験に対しては1993年より使用されている。

システム化規格では、他の部分基準と裕度交換を行うが、リスク評価に基づく方法が裕度交換手法の1つと考えられている。ここでは、ASME等でのリスクベース評価手法について調査を行い、この観点からシステム化規格での規格化項目案を摘出した。

(1) リスクベース評価手法の評価例^[3.1.3-1~8]

表3.1.3-1に、リスクベース評価手法の評価検討の一例を示す。

a. 調査方法

評価検討例の調査に当っては、"Risk Informed Inspection"あるいは"Risk Based Inspection"等をキーワードとして公開文献の検索を行った。文献は、大別してリスクベース評価手法の概要が示されたものと実際の検討例を中心に記載されたものがある。本検討では、リスク評価による裕度交換を考えた場合に、検査による合理化への寄与を検討することが目的であることから、後者の文献を中心に調査を行っている。特に、検査精度や検査間隔等の規格化項目になり得る項目に対する評価に着目して調査を行った。

表 3.1.3-1 RBI に関する文献調査リスト (1/5)

タイトル	Calculation for Risk Informed Inspection and Cost Effective Maintenance Using Probabilistic Fracture Mechanics
著者	MAEDA N, NAKAGAWA S, YAGAWA G, YOSHIMURA S
出典	SMiRT-15, No. Vol.10, P X 537-X 544
発行年	1999
要約	

1. 概要
原子力プラントの維持費を低減するために、検査周期をパラメータとしたコスト最適化解析により、種々の条件に対する溶接補修費、検査費及び事故対策費を検討し、経済性に対する維持(検査、補修)の影響をまとめている。コスト最適化解析においては、検査周期を最適化するために、PFM(Probabilistic Fracture Mechanics)が用いられている。
本検討では、PC-PRAISE Code により、疲労による配管の破損確率とき裂の検出確率を求め、これらの確率から事故対策費や補修費を求めている。これらの費用に基づき、コストミニマムとなる検査周期の算出を行っている。

2. 計算手順

(1) 評価対象
10ヶ所の溶接部を有する配管系 (溶接の詳細は記載なし)(2) 計算手順
本検討での計算手順は、以下の通りである。

- ① 全ての溶接部に対して、検査周期(10年間の検査回数)を設定する。
- ② PFM 法に基づくモンテカルロ法により、疲労による溶接部の破損確率及び検査でのき裂検出確率を計算する。
- ③ 2つの確率を用いて、事故対策費及び補修費を算出する。

3. 計算条件

(1) 入力条件
入力条件は、以下の通りである。

- ① 評価対象; STS410 材からなる 16B 配管系(溶接箇所; 10ヶ所)
- ② 対象とする破損モード; 疲労($\Delta S_n = 122.6 \text{ MPa} \times 33 \text{ サイクル/年}$)
- ③ 欠陥存在確率; 1 溶接部について 0.01
- ④ 欠陥が検出できない確率; LLNL 及び PNL での検討結果に基づき、以下を仮定

$$\cdot \text{LLNL 式}; P_{ND}(a) = 0.5(1 - \varepsilon) \operatorname{erfc} 1.33 \ln(A/A^*) + \varepsilon$$

$$A = \pi/2ac \text{ or } \pi/4aD_B, \quad A^* = (\pi/4)a^*D_B$$

ここで、 D_B :超音波探傷法の平均ビーム直径(25.4mm)、a:欠陥深さ、c:欠陥長さ、 a^* :50%の確率で検出できない欠陥深さ(6.35mm)、 $\varepsilon = 0.005$ 、 $\nu = 1.60$ である。

 $\cdot \text{PNL 式};$ フェライト鋼に対する式

- poor ; $P_{ND} = 1 - \operatorname{erf}[0.432 + 0.163 \ln(a/t)]$ (ASME Section XI での平均検査員レベル)
good ; $P_{ND} = 1 - \operatorname{erf}[0.432 + 0.163 \ln(a/t)]$ (ASME Section XI 認定の中で最も優れたレベル)
advanced ; $P_{ND} = 1 - \operatorname{erf}[0.432 + 0.163 \ln(a/t)]$ (貫通き裂; 0.999、0.1t のき裂; 0.9 の確率で検出)

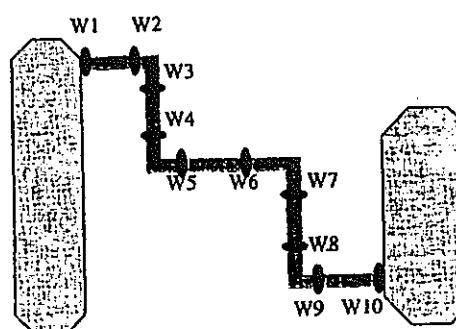


Fig.1 Analyzed Piping System

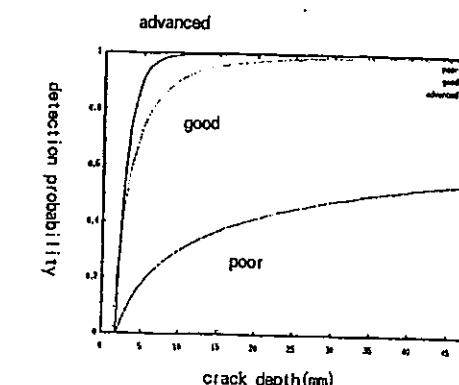


Fig.3 P_D by PNL

- ⑤ き裂深さ a とアスペクト比 c/a の分布
確率変数とし、確率密度は以下の関数を仮定。

$$P(a) = \frac{\lambda \exp(-\lambda a)}{[1 - \exp(-\lambda a)]}$$

$$P(c/a) = \frac{C}{(c/a)S\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(c/a) - \ln M}{S}\right)^2\right\}$$

ここで、 $\lambda = 0.16/\text{mm}$ 、 $M = 1.336$ 、 $S = 0.538$ 、 $C = 1.419$ である。

- ⑥ 破損の判定条件
漏えいを破損と見なし、漏えいが 3gallon/min 以上の場合に破損と判定する。

⑦ コスト評価

コスト評価は、以下をベースとして実施する。

- ・発電損失と溶接補修費の合計; 100,000,000 円/日 × 60 日
- ・溶接補修費 ; 10,000,000 円/1 溶接部
- ・検査費 ; 1,000,000 円/1 溶接部(LLNL 式に基づく検査員)
- ； 500,000 円/1 溶接部(PNL 式 poor の検査員)
- ； 1,000,000 円/1 溶接部(PNL 式 good の検査員)
- ； 1,500,000 円/1 溶接部(PNL 式 advanced の検査員)

(2) 出力

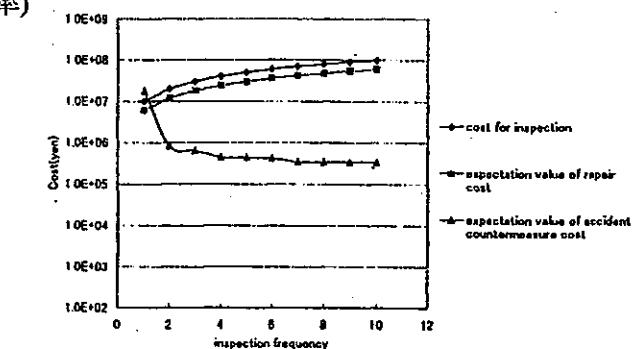
本検討での出力は、以下の通りである。以下の 2 つの費用と検査費の比較を行い、コスト最適化を行う。

- ① 溶接破損の場合の事故対策費
(事故対策費) = (発電損失と溶接補修費の合計) × (全溶接部の全破損確率)
- ② 計画停止期間中に補修が完了し、発電損失は生じないとした場合の補修費
(補修費) = (溶接補修費) × (ISI での欠陥検出確率)

4. 計算結果及び結論

結論は、以下の通りである。

- ① 検出性の高い検査により、事故対策費は、2 衍低減する(破損確率の低下によると考えられる)。
- ② LLNL 式による欠陥検出確率は、PNL 式の "good" にほぼ等しい。
- ③ 検査周期の最適化は、事故対策費と補修費の合計が最小値となるようを行う。

Fig.6 Cost-Benefit Analysis using "good" P_{ND} of PNL

検査との関連項目

本文献中で、検査との関連は、以下となっている。

1. 事故対策費(=発電損失と溶接補修費の合計) × (全溶接部の全破損確率))

検査に関する項目	費用評価への取り込み方	関連項目
検査精度	検査員のグレードを欠陥検出確率(P_{ND})の中で考慮	破損確率
検査方法	UT ビーム直径(固定)を欠陥検出確率(P_{ND})の中で考慮	破損確率
検査周期	事故対策費に対するパラメータとして考慮	破損確率

2. 補修費

補修費は、破損溶接部の数に比例する。溶接部の破損確率への影響として、1.と同様の関連がある。

3. 検査費

検査費は、検査員のグレードと検査溶接箇所に比例する。よって、検査箇所により検査と関連がある。

表 3.1.3-1 RBI に関する文献調査リスト (2/5)

タイトル	A Study of Risk-Based Non-Destructive In-service Inspection	(6) 破損確率 (5)までのき裂分布を用いて、以下により破損確率を算出する(詳細は省略)。 ・検査前の破損確率 $F(n) = \int_a^{\infty} f_{a(n\tau)}(x;2)dx$; 検査周期 τ 、回数 n に対して、クリティカル寸法を超えるき裂分布の積分値 ・検査後の破損確率 $\bar{F}(n) = \int_a^{\infty} f_{a(n\tau)}(x;2)[1 - POD(x)]dx$; 検査後には補修、交換を実施のため、検出できない確率(1-POD)を考慮 ・検出できないき裂(a_0 以下)による破損確率; $q(n) = \int_{a_0}^{\infty} f_{a(n\tau)}(x;2)POD(x)dx + q(n-1) \times \left[1 - \int_{a_0}^{\infty} g(x)dx \right]$																																	
著者	WU W-F, SYAU J-J																																		
出典	Nucl. Eng. Des., Vol. 158, No. 2/3, P409-415																																		
発行年	1995																																		
要約	<p>1. 概要 確率論的破壊力学に基づいて、特に ISI による破損確率の低減効果に着目し、非破壊検査の考え方が示された。解析評価式を示し、数値解析により ISI による破損確率の低減効果が定量的に検討されている。</p> <p>2. 検討手順とパラメータ及び出力 (1) 検討の出力; 機器の破損確率(具体的な機器の記載はない) (2) パラメータ; ISI 間隔(定期的な ISI と不定期な ISI を考慮) (3) 検討手順 ① 3.に示す項目を入力条件として、パラメータである検査周期 τ を設定する。 ② ①での条件に対して、PFM 法に基づいて、破損確率を計算する。 ③ 得られた破損確率に基づいて、ISI の機器の信頼性への影響を検討する。</p> <p>3. 評価方法 (1) 評価対象 ・評価対象物; 記載なし ・対象とする破損モード; き裂進展 ・簡単のため、構造物中の 1 点が破損した場合に、構造物自体が破損すると仮定 ・検査によりき裂が検出された場合、元の状態に補修あるいは交換する。</p> <p>(2) き裂の発生及び進展挙動の考え方 レファレンスとするき裂サイズ a_0 の達した場合にき裂発生とする(a_0 までは検出不可能)。初期疲労量(IFQ)は、き裂サイズ a_0 に達するまでの時間の関数として、式(A)で表される。</p> $f_T(t) = \frac{\log e}{(2\pi)^{1/2} t \sigma_t} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log t - \mu_t}{\sigma_t} \right)^2 \right] \quad (\mu_t, \sigma_t; \text{体数正規分布のパラメータ}) \quad (A)$ <p>き裂発生後は、簡単のために Paris 則(式(B))に従って、運転中の発生応力により進展する。</p> $\frac{da}{dt} = Z Q a^b \quad (a; \text{き裂サイズ}, Q \text{ 及び } b; \text{材料特性, } Z; \text{不確定要素を考慮した値}) \quad (B)$ <p>(3) き裂の検出 ・検査方法; 記載なし ・欠陥検出確率; 下記にて定義</p> $POD(a) = \frac{\exp(\alpha + \beta \ln a)}{1 + \exp(\alpha + \beta \ln a)} \quad (a; \text{き裂サイズ, } \alpha \text{ 及び } \beta; \text{POD 分布の中心値と広がりを示す定数}) \quad (C)$ <p>(4) 検査によるき裂存在確率への寄与 ・詳細の記載はないが、き裂検出確率(POD)として検査を考慮 ・定期的な ISI のみでなく、不定期な ISI も検討対象とし、検査周期 τ をパラメータとして考慮</p> <p>(5) き裂存在確率 き裂存在確率の算出では、以下を考慮する。 ・検出可能なき裂サイズと検出できないき裂サイズを区別して考慮する。 ・初期にはき裂でないものに対して、期間 τ 後に進展により検出可能となるものは、き裂として考慮する $f_{a(n\tau)}(x;2)$。初期からき裂として検出可能なものは、別途評価($f_{a(n\tau)}(x;2)$)する。 ・詳細は省略するが、以下によりき裂サイズ、検査周期 τ、検査回数 n 及びき裂検出確率 POD を考慮してき裂存在確率を算出する。</p> $f_{a(n\tau)}(x;2) = q(n-1)g(x) \quad (n \geq 2)$ $f_{a(n\tau)}(x;2) = \int_0^{\infty} \left(\prod_{m=1}^{n-1} [1 - POD[A_1(x; m\tau, z)]] \right) \times f_{a(0)}[Y_1(x; n\tau, z); 2] J_1(x; n\tau, z) \times f_z(z) dz$ $+ \sum_{i=0}^{n-2} q(i) \int_0^{\infty} \left(\prod_{m=1}^{i-1} [1 - POD[A_2(x; m\tau, z)]] \right) \times g[Y_2(x; (n-i-1)\tau, z); 2] J_2(x; (n-i-1)\tau, z) f_z(z) dz \quad (n \geq 2)$																																		
	<p>3. 計算結果 得られた結果の概要は、以下の通りである。</p> <p>① き裂が検出された場合、補修あるいは交換を行うため、ISI を考慮することで破損確率は低減する。 ② 破損確率の低減程度は、ISI の実施時期により異なる(プラント寿命に渡って同様ではない)。 ③ 寸法の大きいき裂は、ISI での検出により補修されるため、ISI 前後ではき裂の確率密度のテールが短くなる。よって、ISI の実施により、破損確率に用いるき裂の確率密度は緩和される。 ④ 検査周期を一定としない場合、一定の破損確率に抑えるように検査計画を策定することが可能である。破損確率を 10-5 以下に制限する場合には、最初の ISI 間隔は 2 回目以降の約 2 倍とすることができる。</p>	<p><定期的な ISI による破損確率への効果></p> <p><検出したき裂サイズの分布></p>																																	
	<p><使用した数値></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>式番号</th> <th>シンボル</th> <th>値</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>(A)</td> <td>μ_t</td> <td>3.602</td> </tr> <tr> <td></td> <td>σ_t</td> <td>0.350</td> </tr> <tr> <td>(B)</td> <td>b</td> <td>1.046</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Q</td> <td>6.650×10^{-4}</td> </tr> <tr> <td></td> <td>μ_Z</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td></td> <td>σ_Z</td> <td>0.128</td> </tr> <tr> <td>(C)</td> <td>α</td> <td>0.660</td> </tr> <tr> <td></td> <td>β</td> <td>3.950</td> </tr> <tr> <td>共通</td> <td>a_0</td> <td>0.084mm</td> </tr> <tr> <td></td> <td>ac</td> <td>9.400mm</td> </tr> </tbody> </table>	式番号	シンボル	値	(A)	μ_t	3.602		σ_t	0.350	(B)	b	1.046		Q	6.650×10^{-4}		μ_Z	0		σ_Z	0.128	(C)	α	0.660		β	3.950	共通	a_0	0.084mm		ac	9.400mm	
式番号	シンボル	値																																	
(A)	μ_t	3.602																																	
	σ_t	0.350																																	
(B)	b	1.046																																	
	Q	6.650×10^{-4}																																	
	μ_Z	0																																	
	σ_Z	0.128																																	
(C)	α	0.660																																	
	β	3.950																																	
共通	a_0	0.084mm																																	
	ac	9.400mm																																	
	<p>検査との関連項目</p> <ol style="list-style-type: none"> 検査周期(検査間隔) 定期的な ISI の場合、検査周期を短くすることで、破損確率は低減する。また、不定期な ISI の場合、破損確率を一定値に制限することで、初期の検査周期を長くすることが可能。 検査精度 POD(き裂検出確率); 破損確率の算出には、入力条件の 1 つとして POD を用いており、検査精度により POD が変化し、破損確率に影響する。 <p>a_0(検出可能欠陥寸法); 本検討では、a_0 以下の寸法のき裂は検出できないとしているが、検査精度を高めることで a_0 が小さくなり、き裂寸法分布は変化する。この結果、破損確率に影響する。</p>																																		

表 3. I. 3-1 RBI に関する文献調査リスト (3/5)

タイトル	Probabilistic risk ranking
著者	CHAPMAN O J V, DAVERS G A
出典	SMiRT-9, No. M, P197-202
発行年	1987
要約	<p>1. 概要 ISI は期間や費用の観点で、コスト高となっており、プラントや系統の中で重要な箇所に注力して実施することが望ましい。この場合、対象とする箇所をランク付けする必要があるが、この方法としてリスクを用いた方法がある。リスク評価では、破損確率と重大さを考慮する必要があるが、これらを考慮したモデルの構築が必要である。 ここでは、溶接継手を対象としたモデルの検討を行い、破損確率により ISI のためのランク付けを行っている。</p> <p>2. パラメータ及び出力 (1) 検討の出力；溶接部の破損確率(具体的な機器の記載はない) (2) パラメータ；特になし(ただし、検査の有無に対して比較を行っている)</p> <p>3. 評価方法 (1) 評価対象 ・評価対象物；溶接部(数値例では、3"OD、14"OD、20"OD の配管) ・対象とする破損モード；溶接中及び溶接後のき裂発生、その後の進展 (2) モデルの考え方 a. モデル全体 ・破損確率の算出のために、①条件付破損確率、②その条件での欠陥の発生確率を求める。 (条件付破損確率の具体的な条件は、記載されていない) ・条件付破損確率の算出では、溶接中の欠陥存在位置に対して①内表面、②内表面近傍、③板厚中心、④外表面近傍、⑤外表面の 5 つの領域を考え、各領域でのデータを基に全体の破損確率を求める。 b. 欠陥の発生 (a) 溶接中に発生する欠陥 i. 欠陥の発生率 ・欠陥の発生を検討するために必要な入力条件； - 初期欠陥の深さ - 欠陥の面あるいは幅の分離状況 - 欠陥長さ - 欠陥の発生位置と角度 ・溶接中に発生する欠陥の発生率は、溶接ビードの長さに比例すると考え、欠陥の発生率は溶接ビードの単位長さ当たりに対してランク表を作成する(盛り溶接等も長さに考慮する)。 ii. 欠陥密度分布 ・欠陥深さは、ワイル分布を仮定し、ワイルパラメータがビード深さの関数とする。 ・欠陥の多数は、溶接に沿って発生すると考える。 ・欠陥の長さは、き裂深さの関数と考える。 (b) 溶接後に発生する欠陥 i. 欠陥の発生率 ii. 欠陥密度分布 ・溶接後に発生する欠陥は、クラスターが主のため、欠陥サイズで記述する。 c. 条件付破損確率の算出 ・初期き裂の進展は、線形破損メカニズムにより決定する。 ・欠陥深さ a に対して、タフネス値の繰返し範囲 ΔK を与えるが、ΔK は決定論的に求める。 ・き裂進展は、確率論的に評価する。 ・き裂進展に対しては、空气中データを基に評価を行うため、他の条件に対しては補正が必要。 d. 検査の効果 詳細は記載されていないが、放射線透過試験、超音波探傷試験等の効率を考慮したルーチンを設けている。</p>
4. 評価結果	<p>(1) 検査無しの場合の計算結果</p> <p>3" O.D. PIPE TOTAL NO. DEFECTS 0.3</p> <p>14" O.D. PIPE TOTAL NO. DEFECTS 70</p> <p>20" O.D. PIPE TOTAL NO. DEFECTS 16</p> <p>(2) 検査ありの場合の計算結果</p> <p>検査ありの場合では、欠陥サイズに対する確率密度分布が異なり、ワイル分布は修正される。この結果、検査の考慮により破損確率は低減する。</p> <p>3" O.D. PIPE TOTAL NO. DEFECTS 0.075</p> <p>14" O.D. PIPE TOTAL NO. DEFECTS 2.4</p> <p>20" O.D. PIPE TOTAL NO. DEFECTS 6</p> <p>(3) 破損確率の評価例</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検査を考慮した場合の破損確率； 3"OD; 2×10^{-6} 14"OD; 3×10^{-6} 20"OD; 3×10^{-6} ・上記により、3"OD の配管は、他に比べてリスクランギングは低くなる。
検査との関連項目	<p>1. 検査方法； 詳細については記載がないが、RT や UT 及び表面検査による検査効率を考慮しており、検査方法によってワイル分布の形状は異なる。また、評価の入力条件となる①初期欠陥の深さ、②欠陥の面あるいは幅の分離状況、③欠陥長さ、④欠陥の発生位置と角度は、検査方法によって異なると考えられる。</p>

表 3.1.3-1 RBI に関する文献調査リスト (4/5)

タイトル	Risk-Based Probability of Detection Criteria for Inspection of Reactor Pressure Vessels
著者	SIMONEN F A, HATCHELL B K, HEASLER P G, DOCTOR S R
出典	ASME PVP, Vol. 241, P101-108
発行年	1992
要約	

1. 概要

RBI 手法の開発において、検査装置、検査手順及びヒューマンファクターによる非破壊検査の信頼性に関する検討を行っている。これらについて、欠陥が検出できない確率(PND; Probability of Non-detection)を指標に用い、機器の破損確率を所定の値に向上させるために、検査装置等への要求を示している。

本手法は、目的の破損確率を獲得するために、検査に要求される精度(POD; Probability Of Detection あるいは PND)を評価するというアプローチを取っており、この手法により必要とする検査精度の検討を行っている。

2. 評価方法

(1) 考え方

検査の有効性を示す指標の 1 つに POD あるいは PND(=1-POD)がある。理想的に考えると、PND は欠陥サイズのみの関数となるが、現実には検査方法、検査手順、検査対象の状態等を考慮する必要がある。

本手法では、理想的に考えられる PND 曲線に対して、これまでの実績や工学的の判断に基づいた補正を行い、実用的な PND 曲線を開発している。

(2) PND の算出方法

a. 定義

·s; 板厚に対する欠陥深さ

· $\lambda_0(s)$; 深さ s の欠陥を有する場合の破損確率

· Λ_{NI} ; 検査無しの場合の条件付破損確率 ($= \int_0^{\infty} \lambda_0(s) f(s) ds$)

· Λ_I ; 検査ありの場合の条件付破損確率 ($= \int_0^{\infty} pnd(s) \lambda_0(s) f(s) ds$)

·f(s); 初期欠陥分布

·T; 破損確率の向上目標値(検査前後での破損確率の比; $= \Lambda_{NI}/\Lambda_I$)

b. PND の評価式

·理想的な場合の PND(s) = $\frac{\Lambda_{NI}}{T\lambda_0(s)f(s)}$

·PND は 1 を超えないこと及びある欠陥サイズ S_0 以上に対しては、高い検出確率があることを考慮した補正;

$$PND_1(s) = \begin{cases} \frac{\Lambda_{NI}}{T\lambda_0(s)f(s)} & \text{for } s < S_0 \\ \frac{\Lambda_{NI}}{T\lambda_0(S_0)f(S_0)} & \text{for } s > S_0 \end{cases} \quad (S_0; \text{一定値})$$

·実際の検査経験等を基に、最小 PND(pnd_{min})を考慮した補正;

$$PND_2(s) = \begin{cases} \frac{\Lambda_{NI}}{T\lambda_0(s)f(s)} + pnd_{min} & \text{for } s < S_0 \\ \frac{\Lambda_{NI}}{T\lambda_0(S_0)f(S_0)} + pnd_{min} & \text{for } s > S_0 \end{cases} \quad (S_0; \text{一定値})$$

評価は、PND2 を用いて実施し、この場合破損確率の向上目標 T' は、理論値 T に対して以下となる。

$$T' = \frac{T}{1 - Tpnd_{min}}$$

(3) 評価内容

·評価対象; 加圧熱衝撃を受ける PWR の原子炉容器

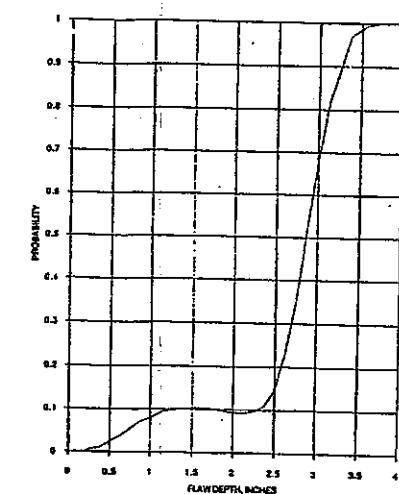
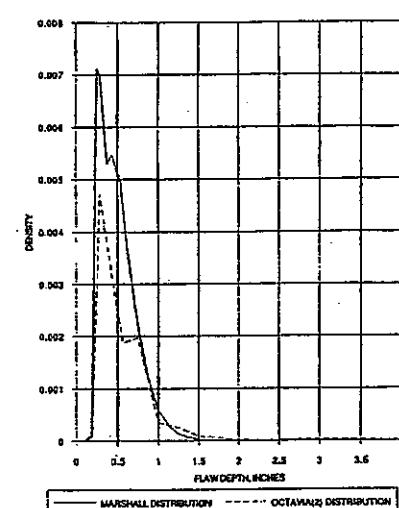
·評価条件; 欠陥深さをパラメータとして、0~4 インチの欠陥深さに対する破損確率を算出

·評価内容; 検査により破損確率が 1/10 となる($T'=10$)ような検査精度(PND)を求める。

この際、原子炉容器の形状、材質、熱過渡条件等に対する λ_0 に対して、f(s)に検査精度(PND)を考慮して Λ_{NI} と Λ_I の比を算出する。

3. 評価結果の例

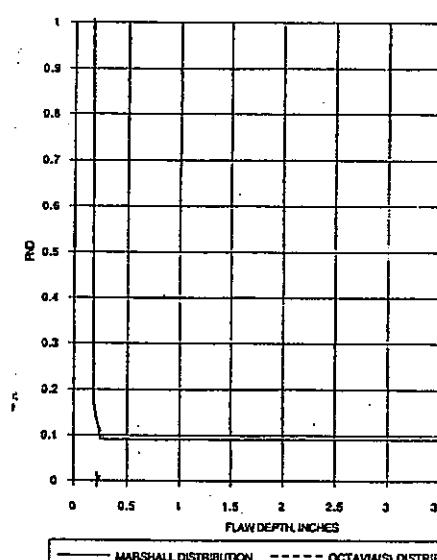
·PND 曲線は、欠陥サイズ分布 f(s)の関数とする。また、f(s)には Marshall 分布と OCTAVIA-2 分布を仮定。

Fig. 3 $\lambda_0(s)$ versus Flaw Depth<入力条件とした λ_0 >

① ISI を考慮することで、破損確率は低減される。この場合、ISI には破損確率に応じた欠陥検出確率が要求され、この要求については本手法で評価可能である。

② PND 曲線は、ターゲットとする破損確率に依存するものであり、目標とする破損確率によって検査の種類や検査方法を設定する必要がある。

<入力条件とした f(s); 2 種類>



<破損確率を 1/10 するために必要な PND 曲線>

検査との関連項目

1. 検査の種類

実際の検査に当たっては、PND を決定する要因の 1 つに、RT や UT 等の検査の種類がある。

2. 検査方法

実際の検査に当たっては、PND を決定する要因の 1 つに、検査手順等を含めた検査方法がある。

3. 検査精度

目標とする機器の破損確率に対して、検査に要求される検査精度(POD、PND)は異なる。

表 3.1.3-1 RBI に関する文献調査リスト (5/5)

タイトル	米国におけるリスクベース規格・基準の動向
著者	樋口 雅久
出典	安全工学 Vol. 39, No.39, P150-158
発行年	2000
要約	

1. 概要

米国におけるリスクベース規格・基準の現状を整理するとともに、リスクの評価プロセスの概要を示している。また、米国の検討において実施されたパイロットプラントでのリスク評価を例示し、その効果を示している。

この結果、現行の ASME Section XI に対して、リスク評価を導入した場合には、検査箇所で約 1/10 程度(検査対象による)、また IST においても現行の約 1/2~1/15 の合理化が期待できることが示されている。

2. 評価例

(1) ISI; 供用期間中検査(非破壊試験又は漏えい試験により、経年変化の有無等を確認する行為)

a. 評価プロセス

- ① 機器の機能により系統境界を決め、機器の劣化モードに対して最小機能を確保する判定基準を設定する。
- ② 機器の損傷及びその影響を基に、各機器及び要素の重要度の重み付けを行う。
- ③ 以下により炉心損傷確率を求め、その結果により機器の重要度ランクを決定する。

$$P_{cd} = P_{fi} \times \sum P_{si} \times R_i$$

ここで、 P_{cd} : 炉心損傷確率、 P_{fi} : 対象とする機器の損傷確率、 P_{si} : 機器が故障した場合に炉心損傷に至る条件付確率、 R_i : 運転員の復旧失敗確率である。

b. 評価例

ASME Section XI での要求に対して、CDF の観点で評価を行うと、健全性確認の重要性ランクは異なる(原子炉冷却系配管の溶接部よりも、低圧注入系配管の溶接部が重要度が高い)。

機器の重要度クラスのみでは、検査要求度は決まらない。

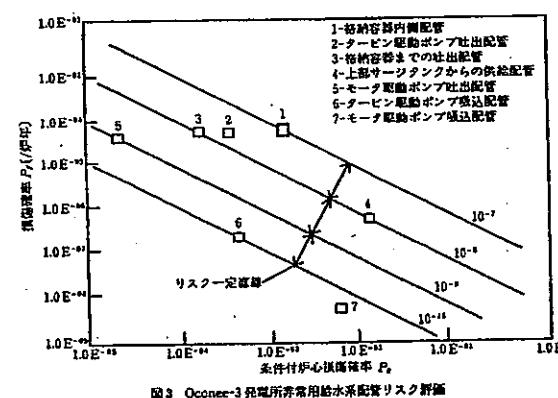


図 3 Oconee-3 発電所非常用給水系配管リスク評価

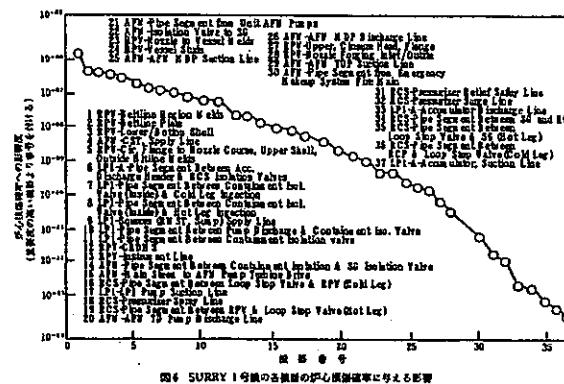


図 4 SURRY 1 号機の各機器の炉心損傷確率に与える影響

配管	機器損傷確率/炉年	炉心損傷確率/炉年	ASME Section-XI カテゴリ 検査要求	
			クラス 2	クラス 3 (目視検査)
格納容器内部 S/G までの配管	3.2E-03	1.1E-07	クラス 2 (目視検査)	クラス 3 (目視検査)
ターピン駆動ポンプ吐出配管	7.1E-04	2.4E-08		
ポンプ吐出共通ヘッダから				
格納容器外隔離弁まで	3.5E-04	1.3E-08	クラス 3 (目視検査)	
上部サージタンクからの供給配管	1.5E-02	7.8E-09	クラス 3 (目視検査)	
モータ駆動ポンプ吐出配管	3.1E-05	7.9E-10	クラス 3 (目視検査)	
ターピン駆動ポンプ吐出配管	8.0E-04	1.2E-10	クラス 3 (目視検査)	
モータ駆動ポンプ吸込配管	7.4E-03	3.9E-11	クラス 3 (目視検査)	

注: クラス 2 表面+体積検査
クラス 3 目視検査

c. 評価結果

現行の ASME Section XI に対して、リスク評価を導入した場合には、検査箇所で約 1/10 程度の合理化が期待できる。

(2) IST; 供用期間中試験(機器や系統が意図した機能を有していることを確認する手順)

a. 評価プロセス

- ① 機器を部品レベルに分解して損傷確率を算出することが難しいため、重要度指標を用いて重要度を決める。
- ② リスク指標として、FV 値及びリスク達成値(RAW)を用い、システムレベルで重要度指標を求める。

$$FV = (R_0 - R_i)/R_0, \quad RAW = R_i/R$$

R_0 : 全事象の基準損傷確率におけるリスク、 R_i : 機器が損傷しないとした場合のリスク

R_i : 機器が損傷すると下場合のリスク

- ③ 機器レベルに順次詳細な評価を行う(RAW=2 以上が重要機器)。

b. 評価例

表 4 システム重要度指標 (BWR)

システム	系統説明	FV	RAW
BOP AC	Balance of Plant AC	5.0E-02	31 900.0
EES AC	Essential AC	2.9E-02	604 000.0
CS	Core Spray	7.6E-02	83.1
DC	DC Power (125 & 250 V)	8.8E-03	6 250.0
EDGSW	Emergency Diesel Gen Service Water	2.9E-02	368.0
FW/CND	Feed Water/Condensate	6.8E-02	86.5
MS IBYP	Main Steam Bypass	3.5E-03	1.5
HPCI	High Pressure Coolant Injection	2.2E-01	282.0
RCIC	Reactor Core Isolation Cooling	8.8E-02	200.0
CRDH	Control Rod Drive Hydraulics	3.1E-05	1.0
SLC	Standby Liquid Control	2.6E-02	54.8
ECCS	ECCS Logic	1.4E-02	18 600.0
RHR	Residual Heat Removal	1.9E-02	379.0
SW	Service Water	5.4E-03	3.2
CNST MU	Condensate Makeup	1.2E-02	1.9
RHR SW	RHR Service Water	1.8E-02	2.3
SRV	Reactor Depressurization	3.1E-02	188.0
FP	Fire Protection	3.7E-02	126.0
RPS	Reactor Protection System	1.7E-01	16 700.0
125 VDC	125 DC Power	4.8E-03	4 670.0
250 VDC	250 DC Power	1.7E-03	1 400.0

表 5 電動弁重要度指標 (PWR)

弁番号	説明	FV	RAW
MV-32024	MFW to SG B In j.	8.6E-05	1.0
MV-32060	CVCS In j	3.8E-03	1.8
MV-32065	RHR SDC to SG Cold leg	1.7E-02	45.0
MV-32075	RHR Sum p A train A Suction	9.0E-03	26.0
MV-32076	RHR Sum p A train B Suction	8.9E-03	25.0
MV-32077	RHR Sum p B train A Suction	9.0E-03	26.0
MV-32078	RHR Sum p B train B Suction	8.9E-03	25.0
MV-32079	SIRWST suction	9.5E-03	19.0
MV-32080	SIRWST suction	9.9E-03	19.0
MV-32081	SIBAST suction	2.6E-03	4.2
MV-32082	SIBAST suction	2.6E-03	4.2
MV-32093	Com p Cooling to RHR Hx A Valve	2.4E-02	43.0
MV-32094	Com p Cooling to RHR Hx B Valve	2.3E-02	43.0
MV-32120	Com p Cooling trains Header Crosstie Valve	6.0E-03	39.0
MV-32121	Com p Cooling trains Header Crosstie Valve	6.1E-03	40.0
MV-32145	Com p Cooling Hx A Valve	7.8E-03	4.4
MV-32146	Com p Cooling Hx B Valve	1.6E-02	26.0
MV-32162	SIRWST Suction	1.2E-03	3.8
MV-32163	SIRWST Suction	1.3E-03	3.5
MV-32164	SDC Suction from SG A	8.6E-04	4.3
MV-32165	SDC Suction from SG A	8.6E-04	4.3

表 7 リスクベース供用期間中試験採用によるメリット

サンプル プラント	プラント-1		プラント-2		プラント-3	
	ポンプ	弁	ポンプ	弁	ポンプ	弁
現行の試験要求	24	435	38	537	27	584
リスクベース試験要求	9	38	16	26	18	32

c. 評価結果

現行の ASME Section XI に対して、リスク評価を導入した場合には、約 1/2~1/15 の合理化が期待できる。

検査との関連項目

本文献は、リスクベースで評価を行った場合の合理化効果を示すものであり、検査との関連に関する具体的な記述はない。

b. ISI データのリスク評価への適用方法例

調査結果の一例を表 3.1.3-1 に示したが、ここでは調査結果のうち ISI データのリスク評価への適用例を示す。以下の例は、実機での ISI の結果を用いたリスク評価例を示しており、システム化規格での検査に関する部分基準の検討にも有効と考えられる。

(a) 軽水炉の原子炉容器での評価例^[3.1.3-6~7]

i. リスク評価の現状

リスク評価においては、①欠陥サイズの確率分布、②欠陥の発生確率(欠陥密度の確率分布)を入力として欠陥分布が作成され、欠陥分布として Marshall の検討結果等が一般的に用いられている。但し、実際には評価対象とする機器毎に欠陥分布は異なっており、上記の一般的な分布では十分な精度が得られないとともに、保守性が必ずしも明確ではない。このことから、欠陥分布の決定に ISI データを用いる方法が検討されている。

ii. 欠陥分布の評価法

欠陥分布を決定するためには、対象機器の ISI データが必要であるとともに、欠陥のサイジング精度及び検出限界等の検査システムの性能を考慮する必要がある。以下では、ISI データの適用方法の概要を示す。

(i) 欠陥サイズ分布

Weibull 分布は、欠陥サイズ分布を表す関数であり、真の欠陥サイズ x に対して、以下の関数で与えられている。

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} x^{\beta-1} \exp\left\{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\beta\right\} \quad (3.1.3-1)$$

ここで、 β ；形状係数、 α ；スケール係数である。この分布は、真の欠陥サイズに対する関数であり、検査(検出性能)に関する情報は含まれていない。よって、ISI データを活用するには、欠陥サイズ分布に以下の補正を加える必要がある。

- ① 検出限界；検出可能な欠陥サイズの上限、下限
- ② 各欠陥サイズに対する検出確率(POD ; Probability Of Detection)
- ③ サイジング精度

(ii) 検出限界

実際の欠陥サイズの上限は検査対象の板厚であり、また下限は測定方法毎の検

出限界である。上限に対しては、板厚以上のサイズは切り捨てるべきである(但し、元々大きい欠陥の存在確率は非常に小さく、上限に対する補正は無視できるものと考えられる)。一方、下限については、検出限界サイズ x_{th} である。式(3.1.3-1)に検出限界を考慮すると、以下で表される。

$$f(x) = K \frac{\beta}{\alpha^\beta} x^{\beta-1} \exp\left\{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\beta\right\} \quad \text{for } x \geq x_{th} \quad (3.1.3-2)$$

$$f(x) = 0$$

$$K = \exp\left(\frac{x_{th}}{\alpha}\right)^\beta$$

この効果を取り入れた Weibull 分布を、図 3.1.3-1 に示した。なお、図 3.1.3-1 中では検出限界(下限)を 2mm とした場合を記載した。検査精度(検出限界)により欠陥分布は変化し、検査精度はリスク評価に影響を与えることになる。

(iii) 各欠陥サイズに対する検出確率(POD ; Probability Of Detection))

欠陥の検出確率は、評価例では欠陥寸法によらず一定と考えている。この場合、欠陥の検出確率 POD に関わらず、欠陥サイズ分布は一定となるため、確率分布は変化しない。なお、詳細は示されていないが、実際には図 3.1.3-2 に示すように、検査技術及びその組合せによって POD 及び欠陥分布も異なることが示されており、検査方法による検査精度の違いにより欠陥分布は異なるものと考えられる。

(iv) サイジング精度

ISI データを用いた欠陥分布を作成するには、Weibull 分布に検査技術毎のサイジング精度を考慮する必要がある。誤差の上限及び下限を、それぞれ e_u , e_l とすると、誤差を考慮した場合の Weibull 分布は以下となる。

$$f_{xe}(x) = \frac{K}{e_u - e_l} \left[\exp\left\{-\left(\frac{x_{th}}{\alpha}\right)^\beta\right\} - \exp\left\{-\left(\frac{x - e_l}{\alpha}\right)^\beta\right\} \right] \quad \text{for } x_{th} + e_l \leq x \leq x_{th} + e_u$$

$$f_{xe}(x) = \frac{K}{e_u - e_l} \left[\exp\left\{-\left(\frac{x - e_u}{\alpha}\right)^\beta\right\} - \exp\left\{-\left(\frac{x - e_l}{\alpha}\right)^\beta\right\} \right] \quad \text{for } x_{th} + e_u \leq x \leq \infty \quad (3.1.3-3)$$

図 3.1.3-1においては、サイジング精度 $\pm 10\%$ と $\pm 30\%$ の場合を併せて示した。検出下限の場合と同様に、サイジング精度の違いによっても、欠陥分布が変化するため、サイジング精度もリスク評価に直接的に影響を与えると考えられる。

iii. ISI データの適用例

上記手法の適用例として、4種類のPWRの原子炉容器に対して超音波探傷試験を行い、そのデータに基づいて評価を行った結果が示されている。表3.1.3-2に、解析に用いられたISIの結果を示す。表3.1.3-1に示す結果に基づいて、欠陥分布を設定した結果は、図3.1.3-3に示す通りである。この結果、ISIデータを用いれば機器毎に適切な欠陥分布を用いることができ、リスク評価の結果を改善することが可能と考えられる。なお、ASMEにおいては、PTS(Pressurized Thermal Shock)に対する原子炉容器の健全性を評価することを規定しているが、評価において、欠陥分布の違いにより、破損確率は約3桁改善できると評価されている。

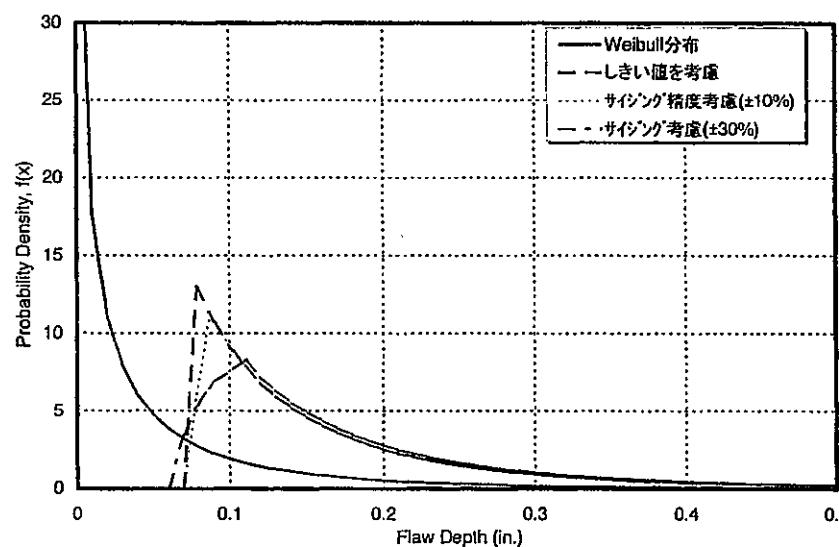
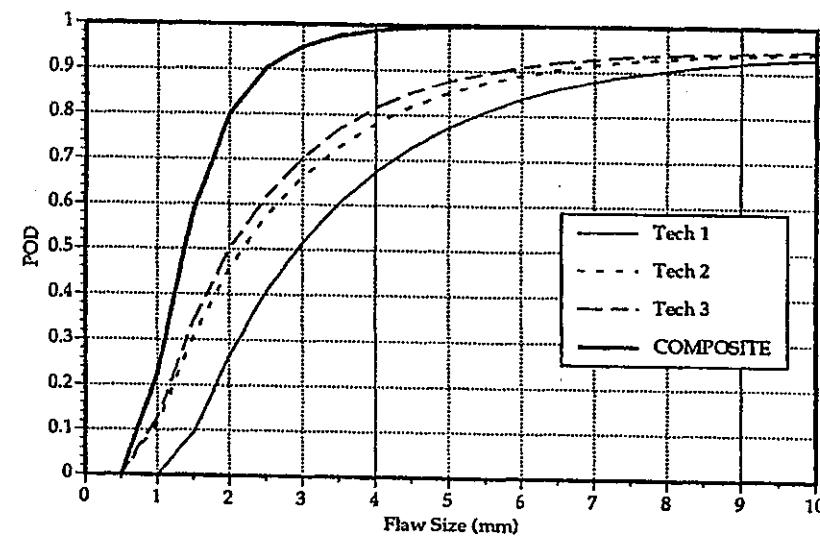


図 3.1.3-1 検査を考慮した欠陥分布



(a) 検査技術の POD への影響

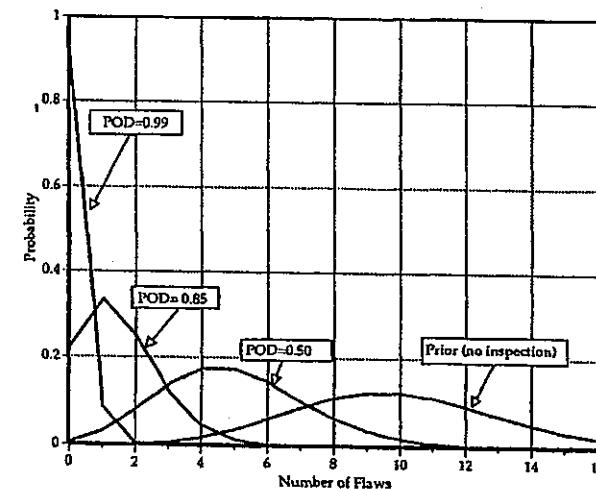
(b) POD の欠陥分布への影響
図 3.1.3-2 検査技術による POD 及び欠陥分布の違い

表 3.1.3-2 検討例における適用 ISI データ

Vessel	Flaw Size Range in mm (in.)	Total Number of Flaws	Fraction of Flaws 1/4 Thickness
A	1.52 - 6.86 (0.06 - 0.27)	3	0.00
B	1.78 - 5.59 (0.07 - 0.22)	6	0.33
C	0.76 - 2.79 (0.03 - 0.11)	188	0.33
D	2.03 - 18.03 (0.08 - 0.71)	27	0.26

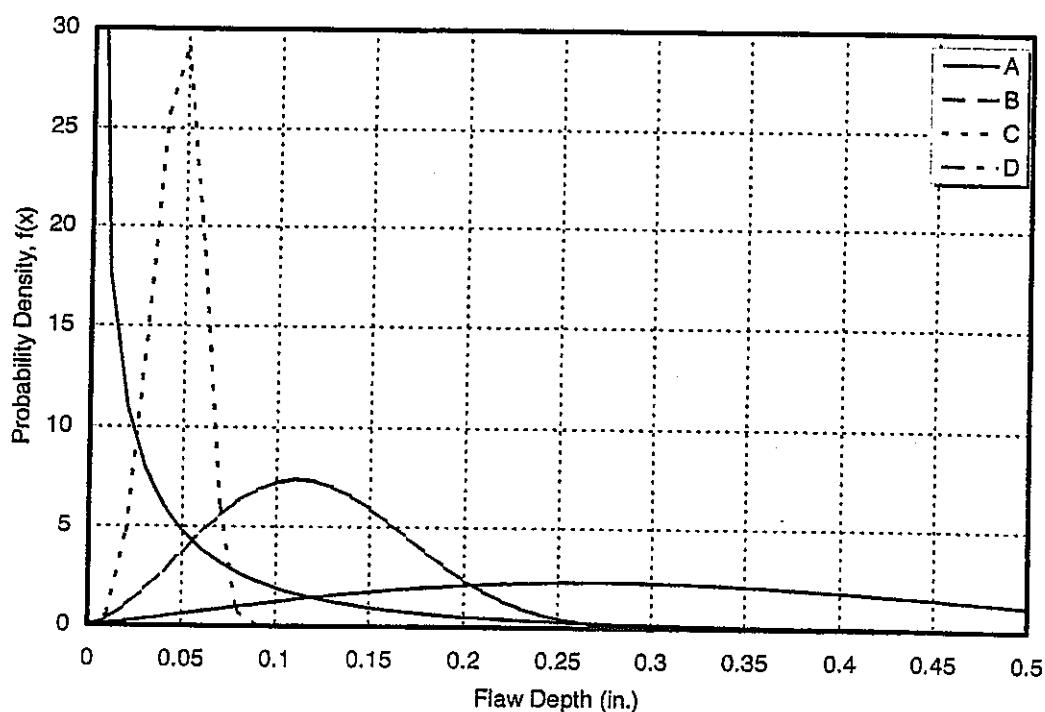


図 3.1.3-3 ISI データの欠陥分布への適用例

(b) 軽水炉の配管系での評価例^[3.1.3-8]

ISIによる機器の信頼性向上に関する検討として、軽水炉機器でのき裂評価において欠陥検出精度及びISI間隔に主眼をおいた影響整理が行われている。

i. 検討対象

検査対象は、以下の通りである。

① PWR 蒸気発生器の給水配管ノズル；2基(プラントA及びB)

・配管サイズ； (給水配管) 16inch. × Sch. 80、(ノズル) 16inch. × Sch. 60

・材質 ; (給水配管) A106 GrB、(ノズル) SA508

② BWR 再循環配管のセーフエンド部；1基

・配管サイズ； (セーフエンド) OD. ϕ 13.2inch × t1.15inch.

・材質 ; Inconel 600 (データ不足によりステンレス鋼として評価)

ii. 評価方法及び検討条件

配管系の信頼性評価フローの概要を、図 3.1.3-4 に示す。本評価での確率変数には、以下の7つが用いられている。

(i) 材質及び材料特性

各検討で用いられた材料は、i. に示した通りである。

(ii) 配管構造、断面形状

各検討で用いられた配管構造及び断面形状は、i. に示した通りである

(iii) 初期欠陥深さ分布

初期欠陥について、詳細は示されていないが、表 3.1.3-3 に示す初期深さが仮定されており、測定結果と一致するように外挿により求められている。

(iv) 荷重及び発生頻度

荷重については、想定した過渡状態に対して応力計算から求められている。

(v) 欠陥成長モデル

本評価では、PWR に対しては疲労き裂、BWR に対してはSCCを評価対象としており、それぞれのき裂進展に対応する成長モデルを仮定している。

(vi) 欠陥検出確率

欠陥検出確率に対しては、検査員のグレード(検査精度)を3段階に区分して定義している。また、対象機器の材質によって欠陥の検出確率が異なることから、フェライト鋼及びステンレス鋼で異なるPOD曲線を仮定している(図 3.1.3-5)。

なお、検査員のグレードは、“Poor”、“Good”及び“Advanced”的3区分となっており、以下ではこれらの区分を用いて記載した。

(vi) ISI スケジュール

ISI スケジュールは、表 3.1.3-4 に示すように、ASME Section XI で規定されているスケジュールを基準として間隔を短くした場合について検討されている。

iii. 検討結果の例

図 3.1.3-6～8 に検討結果を示す。得られた結果の概要は、以下の通りである。

なお、以下の内容をまとめて、図 3.1.3-9 に模式図を示す。

(i) PWR(プラント A)

- ① 対象とする破損が運転初期に発生する(検査無しの場合、5 年以内で破損確率は 1) 場合、スケジュール 3 以外は ISI 間隔の低減による効果が小さい。
- ② 検査員のグレードによる違いは、検査間隔が短い場合にのみ現れる。
- ③ スケジュール 3 は現実的な間隔ではないため、実質的に ISI 間隔の低減によるメリットは出ない。
- ④ 破損発生時期が早い場合、検出確率よりも ISI 間隔の方が重要度が高い。

(ii) PWR(プラント B)

- ① プラント A と異なり、検査無しの場合の破損確率の増加が緩く、1 に達するのに 25 年程度かかる。各検査スケジュールでの第 1 回目の検査は 25 年以内に行われるため、ISI 間隔の低減による効果は大きい。
- ② 検査員のグレードは、検査間隔によらずほぼ同程度に影響する。

(iii) BWR

- ① 対象とする破損が運転後期に発生する(検査無しでも、破損確率は約 40 年で 1) 場合、“Poor”では ISI 間隔による破損確率の低減効果は小さい。
- ② “Good”と“Advanced”的な場合では、ほぼ同程度の破損確率が得られており、ISI 間隔を短くすることで、破損確率は低減する。
- ③ 対象とする破損が運転後期に発生する場合は、まず検出確率を確保することが重要であり、その後 ISI 間隔により破損確率の低減が可能である。

iv. その他のき裂進展メカニズムに対する検討

iii. までの評価例は、破損確率が時間とともに減少していく場合であるが、別途時間とともに破損確率が増加する場合についても検討が行われている。この場

合、図 3.1.3-10 に示すように、ISI を考慮することによる信頼性の向上効果は大きいと考えられる。検討は、EPRI からのデータを基に行われているが、図 3.1.3-11 に示す PND を用いた場合、機器の信頼性は ISI 頻度に応じて向上する(図 3.1.3-12)。

検討内容の概要は、以下の通りである。

- ① "Poor"の場合、ISI 間隔を 1 回/年とした場合でも、信頼性は 2 倍程度にしか向上しない。
- ② "Good"の場合には、"Poor"と同様の 2 倍までは容易に達成可能で、ISI 間隔を 1 回/年とした場合には約 10 倍まで向上効果が見込める。
- ③ "Advanced"の場合には、約 30 倍まで向上効果が期待できる。

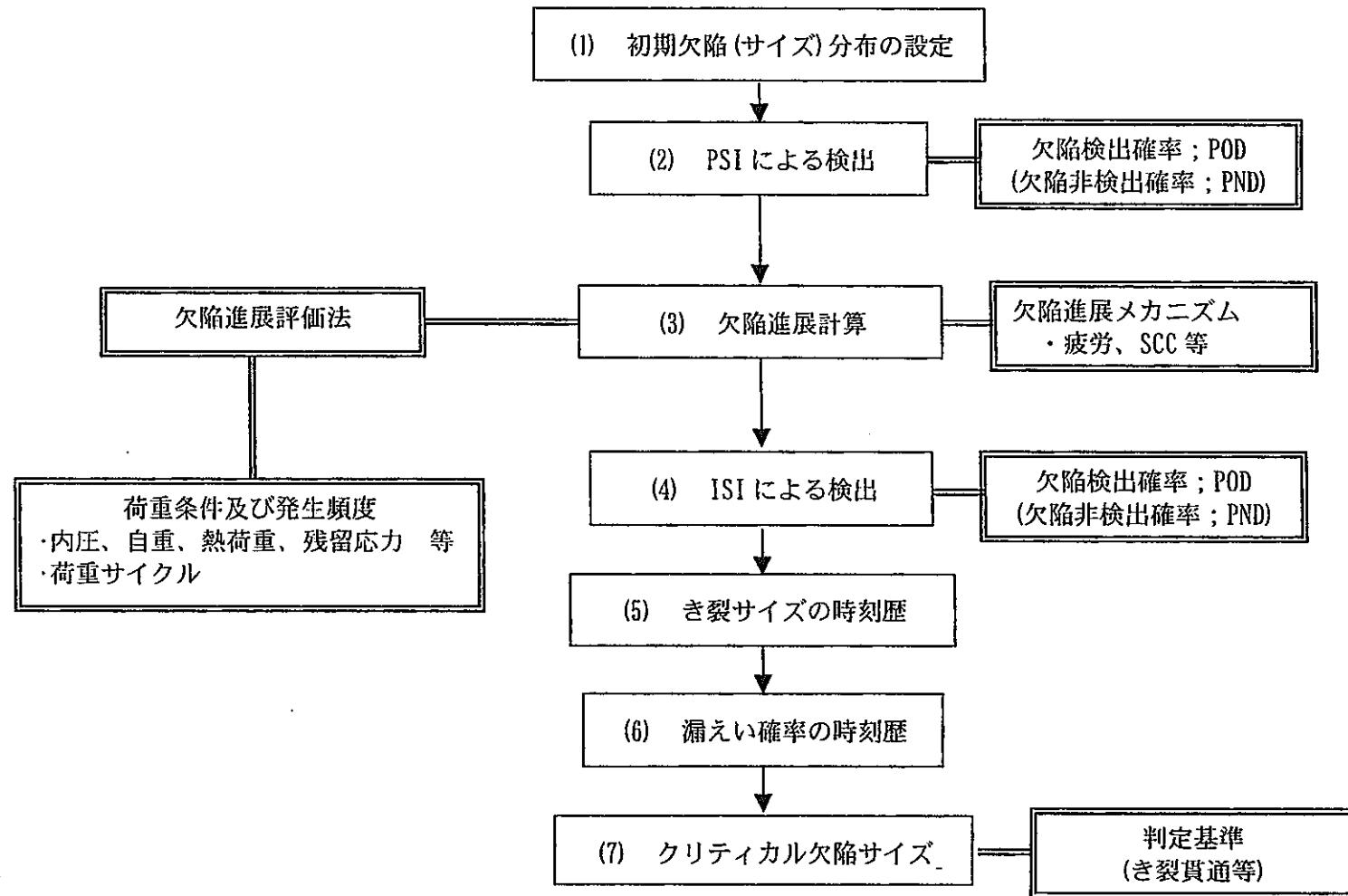


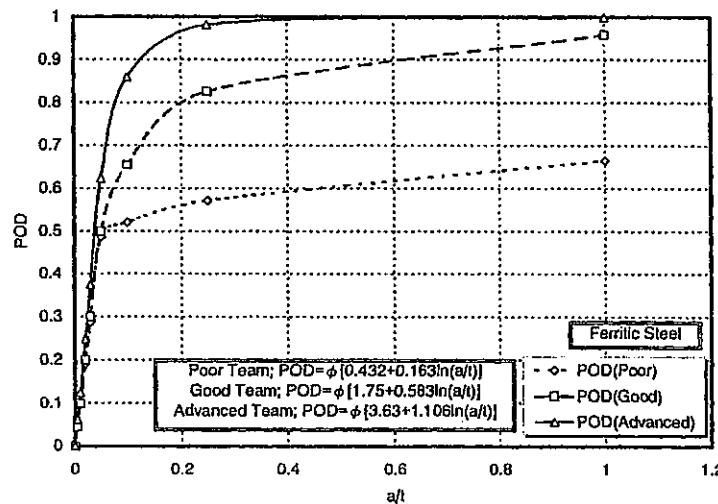
図 3.1.3-4 配管系の構造信頼性評価フロー

表 3.1.3-3 リスク評価における初期欠陥深さ

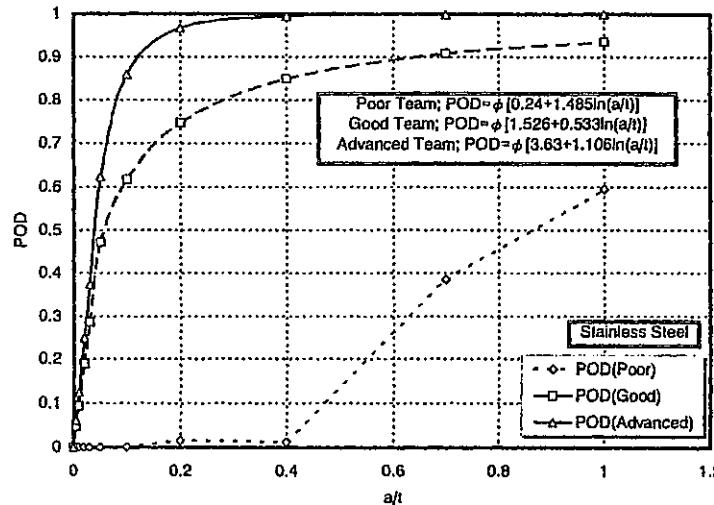
プラント	検査時期	板厚 (inch)	欠陥深さ (; 測定値) (inch)	初期欠陥深さ (; 計算値) (inch)
A	11ヶ月	0.57	0.57	0.021
B	33ヶ月	0.875	0.238	0.057

表 3.1.3-4 ISI スケジュール

番号	スケジュール	検査時期
1	ASME Program A	3, 10, 23, 40
2	ASME Program A の 1/2 周期	1.5, 3, 6.5, 10, 16.5, 23, 31.5, 40
3	ASME Program A の 1/5 周期	0.6, 1.2, 1.8, 2.4, 3, 4.4, 5.8, 7.2, 8.6, 10, 12.6, 15.2, 17.8, 20.4, 23, 26.4, 29.8, 33.2, 26.6, 40
4	ASME Program B	10, 20, 30, 40
5	ASME Program B の 1/2 周期	5, 10, 15, ……, 40
6	ASME Program B の 1/5 周期	2, 4, 6, ……, 40

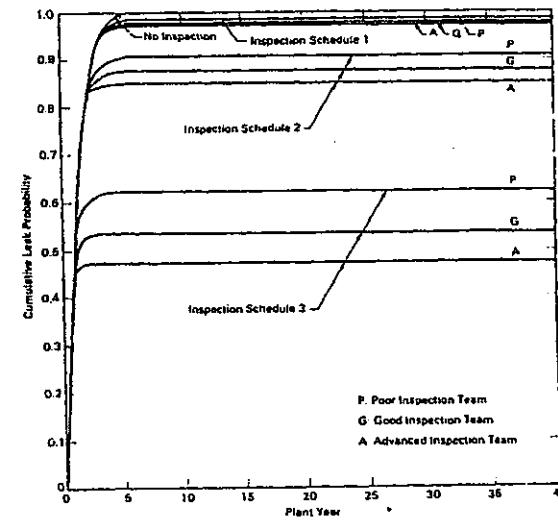


(a) フェライト鋼に対する POD 曲線

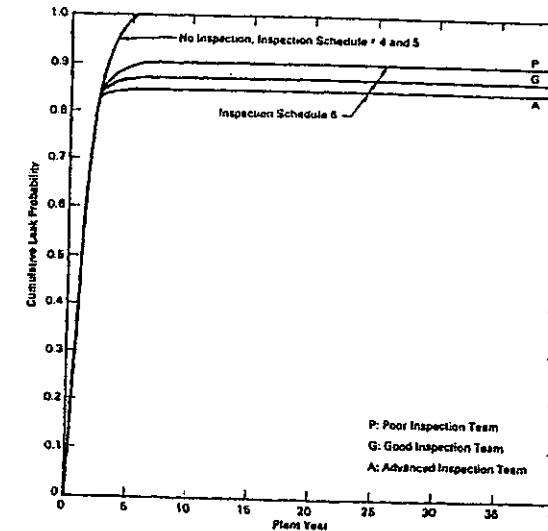


(b) ステンレス鋼に対する POD 曲線

図 3.1.3-5 欠陥検出性に関する前提条件

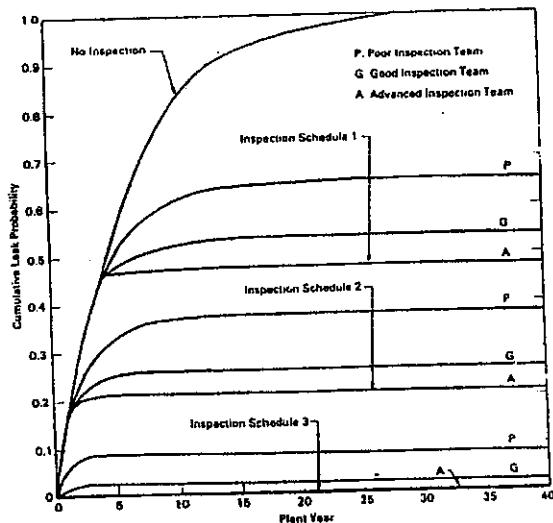


(a) スケジュール A

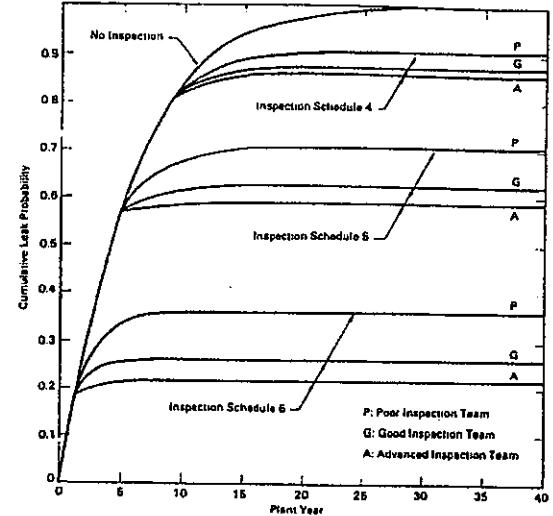


(b) スケジュール B

図 3.1.3-6 PWR (プラント A) での評価

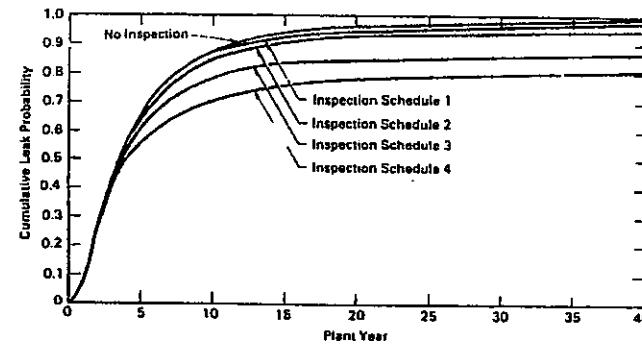


(a) スケジュールA

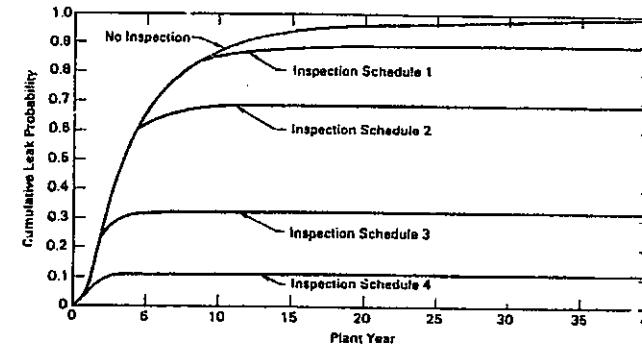


(b) スケジュールB

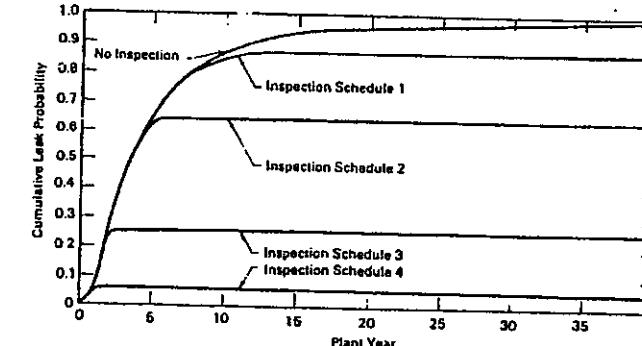
図 3.1.3-7 PWR(プラントB)での評価



(a) Poor の場合

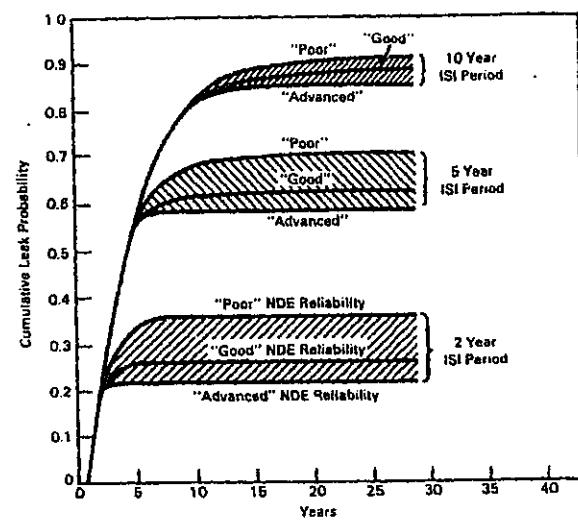


(b) Good の場合

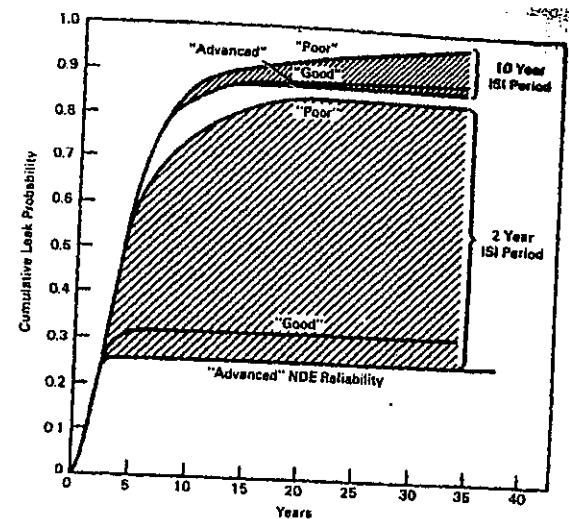


(c) Advanced の場合

図 3.1.3-8 BWR での評価結果



(a) 疲労き裂の場合



(b) IGSCC の場合

図 3. 1. 3-9 ISI 間隔と検出確率の影響

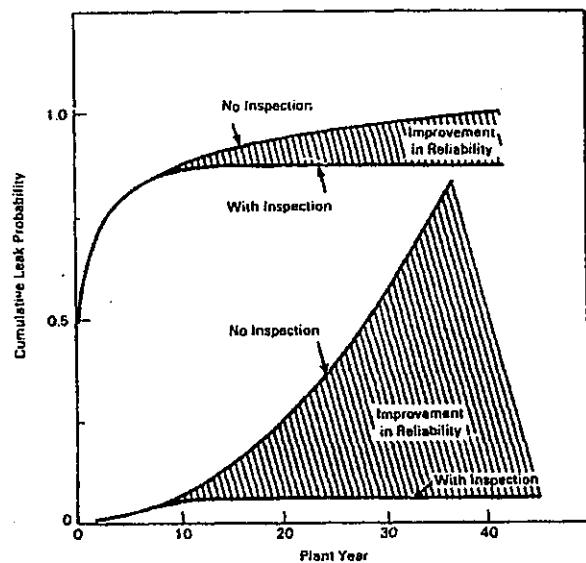


図 3.1.3-10 破損確率が増加する場合の ISI の影響

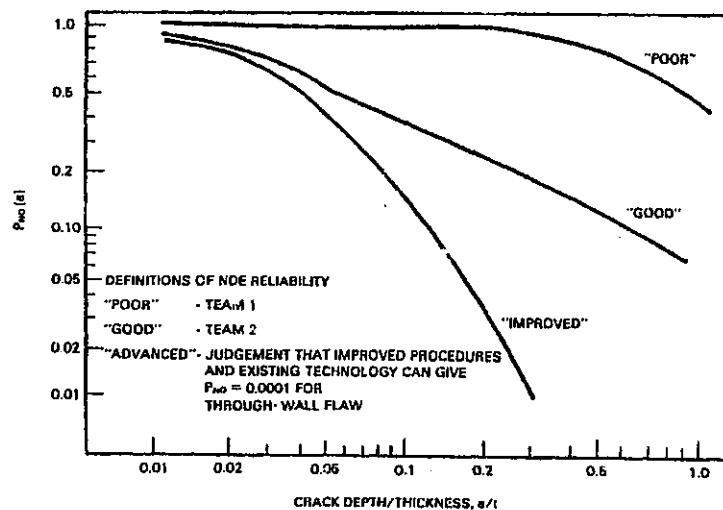


図 3.1.3-11 評価に用いる検出確率

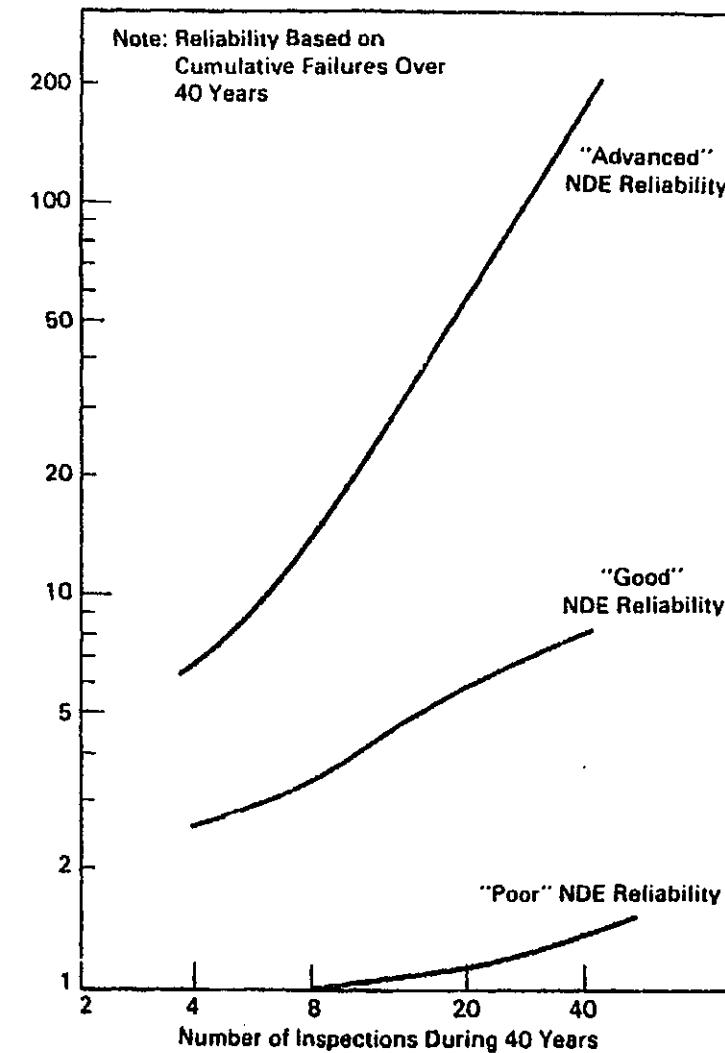


図 3.1.3-12 検出確率による信頼性の向上効果

c. 規格化項目案の抽出

b. での調査結果を基に、リスクベース評価の観点からシステム化規格の規格化項目案を抽出した結果を、表 3.1.3-5 に示す。システム化規格では、裕度交換方法の候補としてリスク評価が考えられており、リスクに影響を与える要因は規格化項目の候補となると考えられる。よって、表 3.1.3-5においては、調査文献中でリスクに影響を与える要因として記載されたものをすべて挙げている。

また、これらの要因は具体的な規定内容になるものと考え、これらをまとめて規格化項目案として記載した。

この結果、リスク評価の観点からは、以下を規格化項目として抽出した。

- ① 検査精度；検査に使用する検査技術で測定可能な欠陥寸法等
- ② 検査間隔；ISI の頻度で、現状基準のスケジュール A 及び B に相当
- ③ 検査方法；体積検査、表面検査等、あるいは RT、UT 等の具体的な方法
- ④ 検査項目；非破壊検査、耐圧・漏えい試験等の実施すべき検査項目
- ⑤ 検査箇所；検査対象機器及び検査部位、検査範囲
- ⑥ 判定条件；許容する欠陥長さ、欠陥深さ等

表3.1.3-5 リスク評価における影響因子 (1/2)

項目	影響因子			影響内容
	部分基準	項目	因子	
破損確率	設計	材料	材質	・検討例でも、オーステナイト鋼とフェライト鋼で異なるPOD曲線を用いており、同一の検査技術を使用した場合でも、材質によってリスク評価の結果は異なると考えられる(3.1.3(1)参照)。
		設計条件	機器形状、寸法	・左記の項目は相互に関連すると考えられるが、発生応力によってリスク評価の結果は異なると考えられる。発生応力については、機器形状や熱過渡条件等により異なるため、これらについても考慮しておく必要がある。
			応力	・設計条件は、システム毎あるいは同一システム内でも異なっている場合があり、これらについては個別に考慮する必要がある。
			熱過渡条件	
			運転温度	
			運転圧力	・左記の項目は、設計条件あるいは設計の結果として決まるものであり、設計条件としてまとめられる。
		破損(劣化)機構	熱疲労	
			腐食割れ	
			微生物学的腐食	
			エロージョン-コロージョン	・検討例でも、疲労き裂とSCCによるき裂の場合で破損の進展状況が異なり、リスク評価の結果は異なると考えられる(3.1.3(1)参照)。
			キャビテーション	・上記に対しては、破損(劣化)機構毎に、適切な検査方法、検査精度等があり、これらによってもリスク評価の結果は異なるものと考えられる(3.1.3(1)参照)。
			小口径配管の振動	
			流体加速腐食	・左記は、破損に至るメカニズムを示したものであり、破損(劣化)機構としてまとめられる。
			経年劣化	
			中性子脆化	
		欠陥の存在確率		・検討例でも示したように、欠陥の存在確率によるリスク評価への影響は大きく、リスク評価での前提条件として重要である(3.1.3(1)参照)。 ・検討例でも示したように、検査方法、検査間隔等により欠陥の存在確率は変化するため、リスク評価での前提条件として重要である(3.1.3(1)参照)。
	製作	溶接管理		・溶接時には欠陥の発生が想定され、初期欠陥分布を左右する要因である。よって、溶接管理によって、初期欠陥分布の想定が異なることになり、検出確率及び破損確率ともに異なる。
		製作状態	材質	・製作状態により、初期欠陥分布等が異なり、破損確率への影響は大きいと考えられる。
			溶接ワイヤ	・原子力基準を満足する場合には、製作状態のみによる破損には至らないと考えられるが、過去の運転経験では想定外の現象による破損や溶接施工不良による破損等が確認されている。
			熱処理	・左記については、製作状態としてまとめられる。
	運転	運転状態	流動条件	・左記の項目については、破損(劣化)機構に影響を与えると考えられる。
			液体の質(1次系、過熱蒸気)	・直接的にその影響を定量化することは困難であるが、発生応力や破損機構を考慮することによりリスクとして評価可能と考えられる。
			ケミカルコントロール	
			湿度	・左記については、運転状態としてまとめられる。

表3.1.3-5 リスク評価における影響因子 (2/2)

破損確率	検査	運転	運転経験	・運転経験により、対象とする機器あるいは位置での破損機構が適切であるかの確認が可能である。
		運転	運転履歴	・運転履歴は、熱過渡条件等の一部と考えられ、経年劣化等による機器の状態に影響を与える。
		欠陥の検出確率 (検査精度)	検査方法	・放射線透過試験、超音波探傷試験等の検査方法により、欠陥の検出確率が異なる(3.1.3(l)参照)。 ・バースコ-法、飛行時間データ等、同一の検査方法でもその手法によって検出確率が異なる(3.1.3(l)参照)。
			欠陥タイプ	・疲労き裂、スラグ、気孔等の検査対象とする欠陥の種類によって、検出確率が異なる。
			検査チームの習熟性	・検査チームの習熟性は、検査精度そのものであり、欠陥検出確率等、リスク評価に与える影響は大きい(3.1.3(l)参照)。 ・検査の継続時間や時期(昼間、夜間等)によっても欠陥検出確率に差異が生じることが示されている。
			表面粗さ	
			欠陥形状	
			欠陥長さ	・欠陥の種類と同様に、欠陥の大きさ及び形状により欠陥検出確率は異なるため、リスク評価の結果は異なると考えられる。
			欠陥深さ	・表面粗さ等、検査対象物の状態による検査精度への影響を考慮しておく必要がある。
			アスペクト比	
			位置	
		検査周期 (前回検査からの時間)		
				・検査周期は、維持コストへの影響があるとともに、検査周期によって破損確率は異なる。 ・破損(劣化)機構等に応じて、適切な検査周期を設定することでリスクの低減が可能である。 ・一定の破損確率を維持する場合には、運転初期に検査周期を長くすることも可能である。 ・3.1.3(l)参照
		検査方法	UTのビーム直径	・ビーム直径等のUTの試験手順によっても検出可能な欠陥が異なる(3.1.3(l)参照)。
			体積検査、表面検査	・体積検査、表面検査により、検出可能な欠陥の種類が異なるため、対象によって検出確率は異なる。 ・左記については、検査方法としてまとめられる。
		検査数(検査項目、検査箇所)		・検査部位や検査範囲等によって、リスク評価のためのISIデータに差が生じるため、リスク評価の結果は異なると考えられる。
		判定条件		・欠陥と見なすサイズや密度等、判定条件のレベルによってリスク評価の結果は異なると考えられる。
破損影響	設計	破断寸法		・微小破損による影響は小さいと考えられ、評価上は無視されており、解析等では大破損の想定となっている。
		破損の隔離性		・システムにより、隔離弁や自動操作弁、あるいは運転員による対応が可能な場合には、破損影響は低減される。
		空間効果		・冠水、スプレー等がある場合には、破損影響は設備的に低減が可能である。
		起因事象		・DBEでの起因事象により、発生確率が異なるとともに、その後のシーケンスが異なるため、破損影響は異なる。
		冗長性		・隔離性と同様に、冗長性がある場合には、破損の影響は低減される(バックアップによる機能確保)。
		維続時間		・事象の維続時間により、他の破損モードの発生等、破損影響は異なる。

3.1.4 検査の影響に関する検討

3.1.3までに、現行の規格・基準等の調査及びリスクベース評価手法に関する調査を行い、システム化規格での規格化項目案を摘出した。ここでは、摘出した規格化項目が検査の合理化等に与える影響について、調査結果を基に検討した。

(1) 目的

3.1.3までの検討では、考えられる規格化項目をすべて摘出しているが、ここでは摘出した規格化項目案に対して、検査の合理化やリスク評価への影響を整理して、規格化項目案を摘出することを目的とする。

なお、システム化規格での検査に関する部分基準では、検査の合理化等、プラント経済性への効果の大きい項目を規格化する一方、設計あるいは検査の制約条件とならないように、メリットの小さい項目については敢えて規定しないことも選択肢として考えられる。以下で摘出した規格化項目について、具体的な規定内容については今後の検討が必要である。

(2) 検討方法

3.1.3までに摘出した各規格化項目案に対して、調査結果に基づき検査の合理化あるいはリスクへの影響を整理する。現行の規格・基準の調査からは、定量的な影響は評価できないため、考えられる合理化案の摘出を行う。リスクについては、検討例を参考にリスクに対してどの程度の影響を有するかを定量的に整理する。

この結果に基づいて、想定される合理化案を検討し、合理化案の考えられる項目について規格化項目とする。

(3) 検討結果

検査の影響についての検討結果を、表3.1.4-1～2に示す。表においては、各項目の検査に与える影響を整理するとともに、考えられる合理化案及び関連する他の部分基準を併せて示した。なお、リスク評価において、ISIの影響に関する知見が多いため、ISIとその他の検査に分けて示している。

a. ISI

表3.1.4-1に、検討結果を示す。

(a) 現行法規体系に基づく場合

現行体系では、システム化規格での各部分基準に相当する規格・基準が独立に設けられており、相互の連携は設けられていない。システム化規格では、過度な保

守性を排除するために各部分基準と連携を図る計画であるが、現行基準では共通の指標がないため、検査の合理化は限られるものと考えられる。

現行法規体系で考えられる合理化項目は、以下の通りである。なお、上記の通り、現行体系では共通指標がないため、定量的な効果は明確ではない。

① 機器区分の見直し

現状では、1種、3・4種等の機器区分に基づいて、検査項目や検査間隔等が規定されている。これについては、機器の重要度(機器区分)を見直すことにより、合理化が可能と考えられる。

② 使用条件による区分

現状では、機器区分に基づいて検査項目や検査間隔等が規定されているが、温度や熱過渡等の使用条件に対応した区分を設けることで、第1種機器でも使用条件の緩い機器では検査要求が低減する可能性がある。

③ モニタリングの活用

現状の規定では、モニタリングに関する規定は設けられていないが、比較的保守・補修性の容易(運転中でも可能)な機器については、モニタリングで異常を検知できれば定検での検査を不要とすることも可能と考えられる。

④ ISI スケジュールの見直し

現状の ISI スケジュールに対して、経年変化を考慮して運転後期で間隔を短くすることや過去の ISI で異常の見られない機器は間隔の延長を可能とする等、柔軟なスケジュールを許容することが考えられる。

⑤ 耐圧、漏えい試験の見直し

もんじゅ指針でも考慮されているように、ナトリウム冷却炉は過圧される状態が生じにくいくこと及び溶接検査及び ISI でバウンダリの健全性を確認、監視していることから、耐圧・漏えい検査は削除も可能と考えられる。また、耐圧・漏えい検査を実施する代わりに検査箇所を削減することも考えられる。

b. リスク評価に基づく場合

リスク評価に基づく場合については、破損確率を共通指標として検査の影響が検討されている。表 3.1.4-1 では、得られた知見に基づいて、考えられる合理化案と合理化への検査の影響を示している。

主な合理化効果は、以下の通りである。

(a) 検査箇所

検査箇所について、リスク評価を行った場合、原子炉容器のノズル部(現状では、体積検査 100%)等より補給水系の復水貯蔵タンク供給ラインの影響が大きいことが示されている。このことは、原子炉容器でもベルトライン領域は重要であるが、その他についてはリスクへの影響は小さいことを示している。

このような評価により、第 1 種機器等の機器区分によらない検査部位及び検査範囲の設定を行うことで、プラント全体での検査箇所の適正化が可能と考えられる。

(b) 検査項目

検査項目については、上記 (a) と同様に、リスク評価への影響が小さい部位については非破壊検査は不要とし、耐圧試験のみを実施する等の簡素化が可能と考えられる。なお、検査項目については、(a) 検査箇所と併せて検討されると考えられる。

(c) 検査間隔

現状では、機器区分毎に定められた検査スケジュールに基づき検査を実施することとなっているが、破損機構や検出精度にも依存するものの、検査間隔を 1/10(1 年と 10 年) とすると、機器の信頼性は 5~30 倍と大幅に向上する。また、製作状態等により運転初期に破損に至る場合や運転中の経年劣化により運転後期で破損に至る場合等、破損機構によって検査間隔のリスクへの寄与は異なり、破損機構を考慮した柔軟な検査間隔の設定により、リスクの低減が可能である。実際には、プラントの稼働率等の経済性も考慮して設定する必要があるが、検査間隔に自由度を持たせることによる合理化効果は大きいと考えられる。

(d) 検査の種類

現状では、検査箇所毎に非破壊検査(体積、表面)、耐圧漏えい試験等が規定されているが、オンラインモニタリングに関する規定はない。オンラインモニタリングにより、機器の状態データから設計裕度の確認が可能であり、これらのデータに基づき ISI 計画にフィードバックすることで、合理的な ISI 計画とすることが可能と考えられる。

(e) 検査方法(検査手順)

現状では、JEAG や JIS に具体的な検査方法が規定されている。リスク評価を行う場合、欠陥検出確率が重要な入力条件となるが、欠陥検出確率は検査方法によ

って異なり、検出確率で 3 倍程度異なる場合がある。検査する材料によっても異なる等、試験片を用いた校正方法も重要と考えられる。

また、既存の ISI データを活用することも効果が大きいと考えられる。

検査方法については、現状の規定内容が適用可能と考えられるが、検査の合理化の観点からは検出精度を明確にすることを前提に、簡易検査法や種々の検査の組合せ等、柔軟な選択を許容することが考えられる。

(f) 検査精度

検査精度については、現状でも試験員及び評価員の資格、検査対象の表面状態等が規定されており、検査精度への影響が考慮されていると考えられる。リスク評価によれば、検査方法に含まれると考えられるが、検査技術自体に加えて試験員のレベルによっても欠陥検出確率に数倍の差が生じる。さらに、初期欠陥に対する確率密度は、検査精度によって異なり、検査精度を高める方が初期欠陥分布は小さい側にシフトし、破損確率は低減する。

検査精度については、現状の規定内容が適用可能と考えられるが、リスク評価を行うには試験員や検査対象物の状態等の定量化が必要である。

(g) 判定条件

検出した信号に対しては、信号レベルに応じて欠陥の判定を行う。この場合、信号のしきい値を低くし、より微小な信号を欠陥と判別することにより、破損確率の低減が可能である。一方、上記の場合、欠陥のサイジング精度は低下することを考慮する必要がある。

表3.1.4-1 システム化規格における規格化項目と関連先; ISI (1/4)

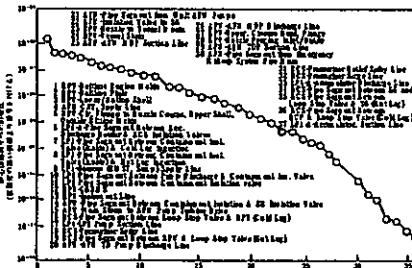
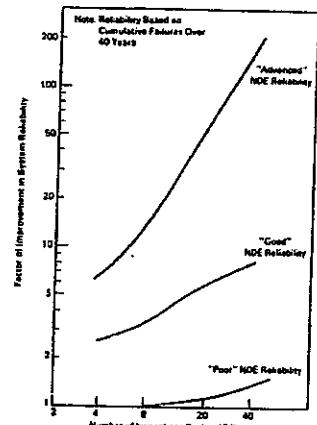
検査	現行法規体系			リスク評価				パラメータ (裕度交換項目)	他の部分基 準																													
	規格化項目	考えられる合理化案	具体的な規定内容(案)	規格化項目	合理的への影響	考えられる合理化案	具体的な規定内容																															
ISI	検査箇所	—	・現状通り	対象箇所	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉容器のクロージャ、ノズル等に比べて、補助給水系の復水貯蔵タンク供給ラインの炉心損傷確率への寄与は大きい。 原子炉容器でも、ベルトライン溶接部以外の検査は重要度が必ずしも高くなく、検査項目の見直しが可能。  <p>・カテゴリ1: 50%, カテゴリ2&3: 25%, カテゴリ4&5: 10%</p> <table border="1"> <caption>Table 1-1 リスクマトリクス</caption> <thead> <tr> <th rowspan="2">リスクカテゴリ</th> <th colspan="4">破壊影響カテゴリ</th> </tr> <tr> <th>HIGH (高)</th> <th>MEDIUM (中)</th> <th>LOW (低)</th> <th>LOW (低)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>高-CA1&2-3 中-CA4&5 低-CA6&7</td> <td>HIGH (高)</td> <td>MEDIUM (中)</td> <td>LOW (低)</td> <td>LOW (低)</td> </tr> <tr> <td>変化後影響 カテゴリ</td> <td>LARGE (大)</td> <td>カテゴリ5</td> <td>カテゴリ6</td> <td>カテゴリ4</td> </tr> <tr> <td>変化後影響 カテゴリ</td> <td>SMALL (小)</td> <td>カテゴリ6</td> <td>カテゴリ6</td> <td>カテゴリ4</td> </tr> <tr> <td>変化後影響 カテゴリ</td> <td>HIGH (高)</td> <td>カテゴリ4</td> <td>カテゴリ4</td> <td>カテゴリ4</td> </tr> </tbody> </table>	リスクカテゴリ	破壊影響カテゴリ				HIGH (高)	MEDIUM (中)	LOW (低)	LOW (低)	高-CA1&2-3 中-CA4&5 低-CA6&7	HIGH (高)	MEDIUM (中)	LOW (低)	LOW (低)	変化後影響 カテゴリ	LARGE (大)	カテゴリ5	カテゴリ6	カテゴリ4	変化後影響 カテゴリ	SMALL (小)	カテゴリ6	カテゴリ6	カテゴリ4	変化後影響 カテゴリ	HIGH (高)	カテゴリ4	カテゴリ4	カテゴリ4	<p>・機器の重要度は、第1種、3種等で規定しており、この区分にしたがって検査区分を設けている。</p> <p>↓</p> <p>・リスクベースで機器の重要度を決定し、この結果に基づいて適切な検査対象機器を選定する。また、検査部位や検査範囲についても、ASMEのようなリスク区分に応じて適切に定め、プラント全体の検査範囲を適正化する。</p>	<p>・規定内容素案</p> <ul style="list-style-type: none"> ・リスクに応じて検査対象機器を規定する。 ・リスクに応じた検査部位及び検査範囲を規定する。 <p>・内容のイメージ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・リスクマトリクス ・検査部位 ・検査範囲 	機器区分	設計
リスクカテゴリ	破壊影響カテゴリ																																					
	HIGH (高)	MEDIUM (中)	LOW (低)	LOW (低)																																		
高-CA1&2-3 中-CA4&5 低-CA6&7	HIGH (高)	MEDIUM (中)	LOW (低)	LOW (低)																																		
変化後影響 カテゴリ	LARGE (大)	カテゴリ5	カテゴリ6	カテゴリ4																																		
変化後影響 カテゴリ	SMALL (小)	カテゴリ6	カテゴリ6	カテゴリ4																																		
変化後影響 カテゴリ	HIGH (高)	カテゴリ4	カテゴリ4	カテゴリ4																																		
検査項目	<ul style="list-style-type: none"> ・機器区分の見直し等による重要度に応じた検査項目の設定 ・温度、熱過渡条件等の使用条件区分による検査項目の設定 	<ul style="list-style-type: none"> ・機器区分 ・使用条件区分 	検査項目	上記に含まれる。	上記に含まれる。	上記に含まれる。	上記に含まれる。	上記に含まれる。																														
検査間隔	<ul style="list-style-type: none"> ・機器区分の見直し等による重要度に応じた検査間隔の設定 ・温度、熱過渡条件等の使用条件区分による検査間隔の設定 ・運転後期をベースとして、初期は検査間隔を延長する。 ・前回検査結果を反映したISI計画の見直し 	<ul style="list-style-type: none"> ・機器区分 ・使用条件区分 ・ISIスケジュール(現状からの見直し) ・前回ISI結果の反映方法 	検査間隔	<ul style="list-style-type: none"> ・検査精度にもよるが、ある程度の検査精度を確保しておけば、検査間隔を1/10(1年と10年)とすることで、5~30倍程度向上する。 ・検査間隔が機器の信頼性に与える影響は大きい(検査精度とセットで考える必要がある)。 	<p>・機器区分毎に検査スケジュールを規定し、決められたスケジュールに乗っ取って検査を実施する。</p> <p>↓</p> <p>・使用する検査精度(検査の種類、検査方法及び検査項目による)に対してリスク評価を行い、所定のリスクが達成できる検査間隔を設定する。</p> <p>・稼働率への影響を考慮する必要があるが、同じ機器区分でも異なる検査間隔の設定が可能であり、1回検査当たりの検査箇所の削減等も可能と考えられる。</p>	<p>・標準的と考えられる検査方法を示すとともに、リスク評価の結果に基づいて検査間隔を設定することを許容する。</p> <p>・機器区分ではなく、機器毎の検査間隔の設定を許容する。</p> <p>・内容のイメージ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検査スケジュールの設定方法 ・検査方法(標準) ・検査の種類 ・検査項目 	<ul style="list-style-type: none"> ・検査方法 ・検査精度 ・検査の種類 ・検査項目 	維持(検査)																														

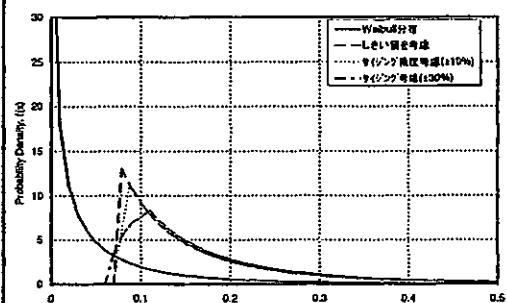
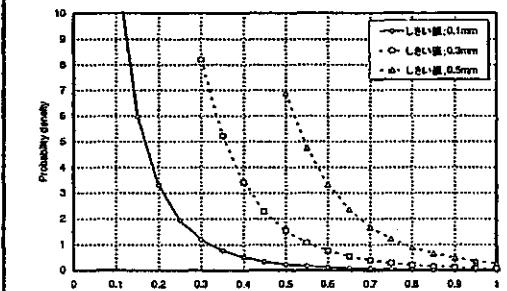
表3.1.4-1 システム化規格における規格化項目と関連先; ISI (2/4)

検査	現行法規体系			規格化項目	リスク評価	パラメータ (裕度交換項目)	他の部分基準	
	規格化項目	考えられる合理化案	具体的な規定内容(案)		規格化項目	合理的への影響		
	検査間隔	((1/4)に記載)	((1/4)に記載)	検査間隔	<p>・破損(劣化)機構により、破損に至る時期が異なるため、検査間隔の設定には考慮が必要である。</p> <p>・運転初期に破損が発生するような機器の場合には、検査精度よりも検査間隔を短くする方が有効である。</p> <p>・運転末期に破損に至るような機器の場合には、検査精度を高めることが有効である(検査間隔はその後)。</p>	<p><現状></p> <ul style="list-style-type: none"> ・検査箇所や検査の種類の中で案に破損機構を考慮しているものと考えられるが、機器区分毎に一義的に検査間隔が設定される。 <p>↓</p> <p><合理化案></p> <ul style="list-style-type: none"> ・最終的にはリスク評価により設定するが、機器毎の支配的な破損機構を考慮して、検査の種類、検査精度(検査方法)や検査間隔を設定する。 ・検査の種類として、モニタリングを導入する。 	<p><規定内容素案></p> <ul style="list-style-type: none"> ・標準的と考えられる検査方法を示すとともに、リスク評価の結果に基づいて検査間隔を設定することを許容する。 <p>↓</p> <ul style="list-style-type: none"> ・設計で想定される破損機構を考慮して、リスク評価に基づき検査方法や検査項目及び検査間隔を設定することを許容する。 <p><内容のイメージ></p> <ul style="list-style-type: none"> ・検査スケジュールの設定方法 ・検査の種類 ・検査方法(標準) 	<ul style="list-style-type: none"> ・破損機構 ・検査方法 ・検査精度 ・検査の種類 <p>・設計 ・維持(検査)</p>
ISI	検査の種類	<ul style="list-style-type: none"> ・モニタリングを活用した検査項目の削減等 ・許容する検査の種類(非破壊検査、モニタリング等) 		検査の種類	<p>・定量的な影響について検討例はない。</p> <p>・但し、オンラインモニタリングにより、機器の状態データから設計裕度の確認が可能なことが示されている。この結果、オンラインモニタリングの結果を検査計画等へフィードバックすることが可能と考えられる。</p>	<p><現状></p> <ul style="list-style-type: none"> ・各検査箇所に対して検査の種類が規定されている。 ・軽水炉ではモニタリングは規定されていないが、高速炉では漏えい監視にモニタリングが用いられている。 <p>↓</p> <p><合理化案></p> <ul style="list-style-type: none"> ・もんじゅ等のISI指針が適用可能と考えられる。 ・破損機構を考慮して、モニタリングあるいは従来の定期的な非破壊検査を選択する。 ・オンラインモニタリングのデータに基づき、ISI計画等の適宜見直しを許容する。 <p><内容のイメージ></p> <ul style="list-style-type: none"> ・標準的な検査の種類 	<p><規定内容素案></p> <ul style="list-style-type: none"> ・モニタリングを含めて、各検査箇所に対して標準的な検査の種類を規定する。 <p>・従来の高速炉機器の特徴及び接近性の他に、破損機構を考慮して検査の種類を規定する。</p> <p><内容のイメージ></p> <ul style="list-style-type: none"> ・標準的な検査の種類 	<ul style="list-style-type: none"> ・破損機構 ・検査箇所 <p>・設計 ・維持(検査)</p>
	検査方法	—	・現状通り	検査方法	<p>・欠陥寸法にもよるが、検査の種類あるいは検査方法により、欠陥検出確率は3倍近く変動する。</p> <p>・欠陥検出確率の差により、リスク評価は大きく異なる。</p>	<p><現状></p> <ul style="list-style-type: none"> ・JEAGやJIS、告示501号で、UT、RT等の具体的な実施要領が記載されており、これに基づいて検査を実施する。 <p>↓</p> <p><合理化案></p> <ul style="list-style-type: none"> ・検出精度等を明確にすることが前提であるが、簡易な検査方法や精度向上を狙った適切な検査方法を許容する。 <p><内容のイメージ></p> <ul style="list-style-type: none"> ・検査の種類毎の検査手順 	<p><規定内容素案></p> <ul style="list-style-type: none"> ・JEAGやJISに相当する試験方法を標準的な方法の位置付けで規定する。 ・欠陥検出確率等が明確な場合には、他の方法を用いても良いこととする。 <p>・欠陥寸法 製作状態や運転履歴、設計条件等による</p> <p>・検出精度</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・設計 ・製作 ・運転 ・維持(検査)

表3.1.4-1 システム化規格における規格化項目と関連先;ISI (3/4)

検査	現行法規体系			リスク評価				パラメータ (裕度交換項目)	他の部分基 準
	規格化項目	考えられる合理化案	具体的な規定内容(案)	規格化項目	合理化への影響	考えられる合理化案	具体的な規定内容		
ISI	検査方法	((2/4)に記載)	((2/3)に記載)	検査方法	<ul style="list-style-type: none"> 同一の検査方法でも、検査対象とする材料によって欠陥検出確率は異なる。 検査精度の欠陥検出確率への影響は、材料によって異なる。 	<p><現状></p> <ul style="list-style-type: none"> 検査対象とする材料と同一の試験片で校正を行い、検査を実施する。 <p>↓</p> <p><合理化案></p> <ul style="list-style-type: none"> 現状の規定でよいものと考えられる。なお、欠陥寸法に対する検出確率の設定は必要。 強度の問題がなければ、検査に有利な材料を使用することで、欠陥検出確率の向上が可能。 	<p><規定内容素案></p> <ul style="list-style-type: none"> 現状のJEAGやJISでの規定内容を設けておく。 <p><内容のイメージ></p> <ul style="list-style-type: none"> 検査方法の具体的手順 	<ul style="list-style-type: none"> 材料 欠陥寸法 製作状態や運転履歴、設計条件等による 	<ul style="list-style-type: none"> 材料 設計 製作 運転
					<ul style="list-style-type: none"> ISIデータを反映することで、欠陥存在確率は大きく変動する。例としては、欠陥深さで0.05~0.3mmの差が生じている。 	<p><現状></p> <ul style="list-style-type: none"> ISIの結果については、所定の判定基準を満足することを確認する。 ISIの結果、欠陥が発見された場合には検査範囲を増やすことや次回ISIで再度試験する等、安全側のフィードバックが行われている。 <p>↓</p> <p><合理化案></p> <ul style="list-style-type: none"> ISIの結果に基づき、再度リスク評価を行う。この結果に基づいて、ISI計画の見直しを行い、適性化を図る。 	<p><規定内容素案></p> <ul style="list-style-type: none"> 前回ISIの結果に基づきリスクの再評価を行い、ISI計画(検査間隔)の見直しを行う。 ISIデータの適用方法について規定する。 <p><内容のイメージ></p> <ul style="list-style-type: none"> ISIデータの活用方法 (ISIデータの評価方法) 	<ul style="list-style-type: none"> 検査間隔 	<ul style="list-style-type: none"> 維持(評価)
	検査精度	一	・現状通り	検査精度	<ul style="list-style-type: none"> 検査員のグレードにより、破損確率は2~4倍程度異なる。 	<p><現状></p> <ul style="list-style-type: none"> 原則的に、以下を規定している。 評価員；認定規程の特級又は3種 試験員；認定規程の2種又は1種 <p>↓</p> <p><合理化案></p> <ul style="list-style-type: none"> 現状でよいと考えられるが、試験員あるいは評価員の等級に応じた欠陥検出確率の定量化が必要である。 	<p><規定内容素案></p> <ul style="list-style-type: none"> 検査員のグレードを規定する。 欠陥寸法に対して欠陥検出確率を、検査員のグレード毎に規定する。 <p><内容のイメージ></p> <ul style="list-style-type: none"> 検査員の資格 検査員の等級 等 	<ul style="list-style-type: none"> 欠陥寸法 製作状態や運転履歴、設計条件等による 	<ul style="list-style-type: none"> 材料 設計 製作 運転

表3.1.4-1 システム化規格における規格化項目と関連先; ISI (4/4)

検査	現行法規体系			規格化項目	合理化への影響	リスク評価		パラメータ (裕度交換項目)	他の部分基 準
	規格化項目	考えられる合理化案	具体的な規定内容(案)			考えられる合理化案	具体的な規定内容		
ISI	検査精度	((3/4)に記載)	((3/4)に記載)	検査精度	・定量的な検討例はない。	<現状> ・試験部の表面状態について、清浄かつ滑らかであることを規定し、表面状態による検査への影響を考慮している。 ↓ <合理化案> ・現状のままでよいと考えられるが、その他検査に影響を与える要因については追記する。	<規定内容素案> ・検査部位の表面状態等、製作状態に関する規定を設ける。 <内容のイメージ> ・表面粗さ ・段付高さ 等	・製作状態	製作
					・検査精度に基づく検出限界により、欠陥存在確率は寸法の大きい側にシフトする。 ・この結果、破損確率は増加し、検出精度を高めることが有効である。		<規定内容素案> ・現行基準と同様に、試験機材、試験片、校正方法等の規定を設け、最低限の検査精度を規定する。 ・試験方法や欠陥の種類によって検査方法が異なるため、検査方法毎に手順を規定する。 <内容のイメージ> ・検査手順(機材、校正法等を含む) ・検出限界	・検査方法	維持(検査)
ISI	判定条件	—	・現状通り	判定条件	・信号のしきい値(欠陥と判定するレベル)が低いほど、微小欠陥の確率密度が高くなり、破損確率は低くなる。 ・信号のしきい値が低いほど、誤検出の頻度が高くなる傾向にある。	<現状> ・超音波探傷の場合、PSIではDAC20%、ISIではDAC50%等のレベルを設定している。 ↓ <合理化案> ・最終的にはリスクで評価可能なため、任意に判定レベルを設定できるものとする。	<規定内容素案> ・信号レベルによる欠陥判定は任意に行えるものとし、リスク評価に反映する。	— 特に限定するパラメータはない。本項目は欠陥分布に影響を与えるものであり、リスク評価のインプット条件に体して全てと交換が可能と考えられる	—
					・欠陥サイジング精度により、確率密度が異なり、破損確率は増加する。		<規定内容素案> ・上記に併せて、必要なサイジング精度を規定する。 ・ISI結果の評価法として規定。 ・評価不要欠陥との比較を行うため、評価不要寸法設定根拠等を踏まえて必要なサイジング精度を規定する。 <内容のイメージ> ・評価不要欠陥 ・欠陥サイジング精度	・検査間隔 ISI結果の評価法と 考えられ、結果に基 づきISI間隔の見 直し等が可能	・維持(評価)

(2) ISI 以外の検査

表 3.1.4-2 に、ISI 以外の検査に対する検討結果を示す。

a. 材料検査

(a) 現行法規体系に基づく場合

ISI の場合と同様に、現行法規体系に基づく場合、裕度交換のための共通指標がなく、検査の合理化は限られるものと考えられる。

現行法規体系で考えられる合理化項目は、以下の通りである。なお、上記の通り、現行体系では共通指標がないため、定量的な効果は明確ではない。

① 機器区分の見直し

現状では、機器区分に基づいて、検査項目が規定されている。これについては、機器の重要度(機器区分)を見直すことにより、合理化が可能と考えられる。

② 使用条件による区分

現状では、機器区分に基づいて検査項目や検査間隔等が規定されているが、温度や熱過渡等の使用条件に対応した区分を設けることで、第 1 種機器でも使用条件の緩い機器では検査要求が低減する可能性がある。

(b) リスク評価に基づく場合

材料については、化学成分や熱処理等により材料強度にバラツキが生じ、構造強度の不確定要因となる。これらについては、製造過程で生じるものであり、検査により規定できるものではない。

従来の検査では、使用した材料が実際に告示 501 号等の基準を満足していることを確認するものであり、この際検査自体の不確定性が生じる。よって、リスク評価の観点からは、適切な検査方法あるいは高い検査精度により検査自体の不確定性を下げることが合理化として考えられる。

b. 使用前検査

使用前検査の位置付けは、設計の上がりとして設計通りに製作されていることを確認するものである。このため、機器の健全性を定期的に確認する定期検査等とは性格の異なる検査である。

また、材料検査を除けば、使用前検査での対象は外観・寸法、作動試験等であり、システム化規格で対象とする構造健全性の確保には直接寄与しない項目である。

以上のことから、今後の検討が必要であるが、本検討では使用前検査については、システム化規格の規定範囲外とするものと考えた。

c. 溶接検査

(a) 現行法規体系に基づく場合

現行法規体系で考えられる合理化項目は、以下の通りである。なお、現行体系では共通指標がないため、定量的な効果は明確ではない。

① 検査項目

現状では、RT 等の非破壊検査を実施するとともに、耐圧・漏えい試験の実施を規定している。一方、ナトリウム冷却炉の場合、耐圧要求は小さいことから、非破壊試験に合格すれば加圧試験は不要と考えられる。逆に、耐圧試験を実施する場合には、非破壊検査要求を低減可能と考えられる。

② 検査箇所

機器区分の見直しあるいは使用条件に基づく区分を設ければ、1種機器でも重要度が低減する場合があり、検査要求の低減が可能と考えられる。

③ 検査方法

現状では、製作検査としての溶接検査と供用前検査としての溶接検査を実施している。特に、製作検査としての溶接検査では、RT 主体(代替試験あり)の規定となっているが、PSI、ISI では RT、UT 及び ECT が体積検査として用いられているため、必ずしも両者が整合しているわけではない。よって、ISI と溶接検査を共用することで、検査の合理化が可能と考えられる。

(b) リスク評価に基づく場合

リスク評価の場合には、上記に加えて欠陥に関するデータが期待される。リスク評価では、欠陥寸法や存在確率を入力として用いるが、初期データとしての溶接検査結果を活用すれば、合理的な評価が可能と考えられる。

上記を考慮すると、ISI の場合と同様に、適切な検査方法や高い検査精度が有効と考えられる。

表3.1.4-2 システム化規格における規格化項目と関連先;ISI以外

検査	現行法規体系			リスク評価					他の部分基準
	規格化項目	考えられる合理化案	具体的な規定内容(案)	規格化項目	考えられる合理化案	合理化への影響	具体的な規定内容(案)	裕度交換項目(パラメータ)	
材料検査	検査項目	・機器区分の見直し等による重要度に応じた検査項目の設定	・機器区分	規格化項目	考えられる合理化案	合理化への影響	具体的な規定内容(案)	裕度交換項目(パラメータ)	
		・温度、熱過渡条件等の使用条件区分による検査項目の設定	・使用条件区分						
	検査の種類	—	・現状通り						
	検査方法	—	・詳細はJISに基づくものである。 ・JISの見直しの取り込みを容易とする。	検査方法	<現状> ・検査方法は、JISにより規定 ↓ <合理化案> ・高い検査精度により、材料仕様の不確定性を低減する。	・材料強度に関する検討例はないが、材料強度はリスク評価のインプット条件であり、材料仕様の明確化により破損確率の低減が期待できる。	・各種の検査方法に対して、具体的な検査手順を規定する。	・材料仕様(機械強度、化学成分)	材料
	判定条件	—	・詳細はJISに基づくものである。 ・JISの見直しの取り込みを容易とする。	判定条件	—	・現状通り	・材料仕様に対して、許容される範囲を規定する(機械強度、化学成分等)。	—	—
				検査精度	・検査方法と同様。	—	・規定する検査方法は、検査精度を考慮したものであり、検査精度を個別には規定しない。	—	—
使用前検査	・検査箇所	・使用前検査は、設工認記載の箇所について検査を行うものであり、申請通りに製作されているかの検査であり、ISIとは性質が異なる。 ・使用前検査は、材料検査を除けば、外観・寸法、作動試験等であり、構造健全性を対象とするシステム化規格の対象外と考えられる。	・現状通りとともに、システム化規格では使用前検査は対象外とする。	検査方法	同左	同左	—	—	—
	検査時期								
	検査方法								
	検査項目			判定条件					
	判定条件								
溶接検査	検査項目	<現状> ・耐圧・漏えい試験の実施を規定 ↓ <合理化案> ・耐圧試験の削除あるいは耐圧試験による検査箇所の削減	・耐圧試験との組合せを考慮した検査項目	検査項目	<現状> ・耐圧・漏えい試験を規定 ↓ <合理化案> ・耐圧試験の削除あるいは耐圧試験による検査箇所の削減	・耐圧試験の効果を、リスクとしてどのように評価するかは課題であるが、検査の合理化が期待できる。	・圧力等を判定して、耐圧試験の削除を許容する。 ・耐圧試験を実施する場合の検査箇所を規定する。	ISIでの検査箇所 (ISIにより、健全性のモニタリングが必要)	
	検査箇所	・機器区分の見直し等による重要度に応じた検査項目の設定 ・温度、熱過渡条件等の使用条件区分による検査項目の設定	・機器区分 ・使用条件区分	検査箇所	<現状> ・全溶接箇所について実施 ↓ <合理化案> ・リスクに応じた検査箇所(範囲等)を設定する。	・溶接部個々にリスクへの寄与を考慮する必要があり、困難と考えられるが、検査の合理化が期待できる。	・リスクに応じた検査箇所(検査部位、範囲等)の規定を設ける。		設計
	検査の種類	—	・現状通り。	検査の種類	—	・現状通り	・現状通り	—	
	検査方法	<現状> ・RT、PT等(代替試験あり)が規定されている。 ↓ <合理化案> ・ISIでの検査方法との整合を図り、供用前検査との供用を図る。	・現状規定からの大幅な変更はないが、規定試験と代替試験を見直す。 ・ISI計画に乗っ取って実施した場合には、供用前検査と見なせることとする(JEAC4205で記載済み)。	検査方法	<現状> ・RT、PT等(代替試験あり)が規定されている。 ↓ <合理化案> ・ISIでの検査方法との整合を図り、供用前検査との供用を図る。	・溶接検査あるいは供用前検査の合理化が可能。	・現状規定からの大幅な変更はないが、規定試験と代替試験を見直す。 ・ISI計画に乗っ取って実施した場合には、供用前検査と見なせることとする(JEAC4205で記載済み)。	検査方法	維持(検査)
	判定条件	—	・詳細はJISに基づくものである。 ・JISの見直しの取り込みを容易とする。	判定条件	—	・詳細はJISに基づくものである。 ・JISの見直しの取り込みを容易とする。	・判定基準を規定。 ・その他、判定基準の考え方を規定する。	—	—

*1) 定期検査については、ISI以外では分解点検等が主要な検査であり、システム化規格の対象外と考えられるため、本表には記載しないものとした(ISIについては、表3.1.4-1参照)。

3.2 検査技術の調査

3.1までの検討により、リスク評価においては検査精度が重要と考えられたため、ここでは、実際の検査を考慮して、検査技術に関する調査を行った結果を示す。なお、対象とする検査技術については、ISIで広く用いられる超音波探傷法と、検査の合理化に有効と考えられるモニタリング技術とした。

3.2.1 検査精度の調査^[3.2-1~12]

3.1での検討により、機器の健全性をリスクで評価する場合、欠陥検出確率(POD)等の検査精度を入力条件とすることから、検査精度が裕度交換に有効な項目と考えられる。ここでは、ISIに広く用いられる超音波探傷法を対象として、検査精度に関する調査を行った結果を示す。

(1) 目的

リスク評価の検討例においては、欠陥分布に関する入力条件が重要であるが、この場合、欠陥検出の信頼性、欠陥のサイジング精度及び欠陥位置の把握等の検査精度が重要である。よって、公開文献を対象とした調査を行い、検査精度に関する知見を得ることを目的とする。

(2) 調査方法

検査精度については、検査方法によって異なるが、裕度交換にはISIの寄与が大きいと考えられるため、ISIで広く用いられている超音波探傷法を対象に調査を行う。

また、本調査では、どの程度のサイズの欠陥が、どの程度の精度で検出できるかを把握することが目的であるため、この観点から調査結果の整理を行う。

(3) 調査結果

超音波探傷法について、調査結果を表3.2.1-1に示す。また、表3.2.1-2~3では、調査結果に基づいて、検出可能な欠陥サイズを整理した結果を示す。表3.2.1-2~3は、それぞれ検出可能な欠陥サイズを板厚比及び深さで整理した結果を示している。なお、6.参考文献に示す文献の他、以下の資料に記載された検出性能についても併せて整理した。

「供用期間中の体積試験方法とその欠陥検出性に関する調査(I), (II) 成果報告書」、動力炉・核燃料開発事業団、昭和60年

主な調査結果の概要は、以下の通りである。

a. 適用例

調査範囲においては、超音波探傷法の実機 ISI への適用性を評価するための試験結果が多く、直接的に実機での測定結果を示す文献は見当たっていない。但し、各文献とも、実機への適用性を把握するために、材質等実機条件を模擬したものとなっている。

超音波探傷法は、主に ISI での機器の健全性確認に用いられており、ISI では耐圧溶接部の検査が規定されている。よって、容器とノズルの溶接部、バルブや配管等の配管溶接部での検討例が示されている。

また、オーステナイトステンレス鋼のような粒子組織が粗く、超音波の減衰が大きい等の超音波探傷に向きと考えられる材質への適用性検討が行われている。

検討例は軽水炉を対象としたものが多いが、高速炉の場合には高温条件であること及び配管等にナトリウムを内包していること等から、高速炉条件での検討例も示されている。

b. 対象欠陥

対象欠陥については、一部の文献で疲労き裂やクリープ疲労き裂等の記載があるものの、ほとんどの文献で明らかにはなっていない。各試験とともに、板厚方向にノッチ等を人工的に付与し、その深さをパラメータとした測定が行われている。

なお、超音波探傷法は ISI の体積検査の 1 手法であり、軽水炉では維持の観点から検出性の検討が行われていることを考えると、き裂を対象としているものと考えられる。

また、一部の試験では、ピンホール欠陥を人工的に設けた試験が行われている。

c. 検出限界

検出限界については、どの文献においても詳細は記載されておらず、試験条件として付与した欠陥に対してどの欠陥まで検出できたかに留めている。現状のところ、試験において検出できた欠陥サイズを検出限界と考えれば、1~2mm 程度の深さの欠陥は検出可能と考えられる。なお、詳細については、検査対象物の材質、検査手法(超音波の周波数等)、検査箇所(母材、溶接部等)によっても異なるため、一律的に検出限界を推定することは困難である。

また、一部の文献にも示されているように、検査員の技量によっても検出可能欠陥は異なってくる。

d. サイジング精度

サイジング精度については、各文献ともに明確な記載はないが、影響を与える要因として、欠陥の種類、位置及び検査方法等がある。サイジング精度に関する知見としては、以下が挙げられている。

- ・超音波のエコー高さのみでは、高いサイジング精度は期待できない。
- ・欠陥検出率が高い場合(しきい値を下げた場合)、欠陥を大きめに評価し、合格欠陥を不合格と判定する誤検出率が高い。
- ・検査方法自体ではなく、検査員、作業環境等のヒューマンファクタによっても精度は異なる。

表 3.2.1-1 超音波探傷法に関する調査結果 (1/5)

	概要	材料	適用箇所	対象欠陥	検出性能		その他の知見
					検出サイズ	検出精度 (サイング精度)	
1	Na 中で最適な探傷を行うために、超音波の種類、屈折角、周波数及び製作法を検討し、以下の UT センサを試作してその性能確認を行っている。	SUS316 鋼 (板厚 50mm)	FBR 実証炉の炉内構造物を想定	人口スリット欠陥 板厚の 20% ⇒スリット深さ ; 10mm	内面スリット (板厚の 20%) ; S/N=9 外面スリット (板厚の 20%) ; S/N=7	— (記載無し)	・液体ナトリウム中での体積検査が可能であることが確認された。
				<p>手法の特徴</p> <ul style="list-style-type: none"> ・Na中に没することが出来る探触子の開発 ・振動数 2 MHz、屈折角 45° 横波 ・探触子と Na のぬれ性を改善するために探触子前面に金メッキを施行 			
2	外側からの検査が困難な蒸気発生器伝熱管について、電子走査式アレイ複合プローブを用いて、管内面から各種欠陥を同時に高速で探傷可能なシステムを開発した。	2.25Cr-1Mo 鋼 SUS321 鋼 (管径 31.8mm、肉厚 3.5~3.8mm)	もんじゅ蒸気発生器伝熱管	<ul style="list-style-type: none"> ・軸方向欠陥 (5, 10, 20% 深さ、長さ 3mm) ・周方向欠陥 (5, 10, 20% 深さ) ・減肉欠陥 (5, 10, 20% 深さ) ・ピンホール欠陥 	<ul style="list-style-type: none"> ・軸方向欠陥；板厚の 5% ⇒欠陥深さ ; 0.2mm ・周方向欠陥；板厚の 5% ⇒欠陥深さ ; 0.2mm ・減肉欠陥；板厚の 5% ⇒減肉量 ; 0.2mm ・ピンホール欠陥 ; ϕ 0.5mm 	— (記載無し)	<ul style="list-style-type: none"> ・管全面の検査に要する探傷速度を従来の 0.2m/min から 4m/min に高速化した。 ・複合アレイプローブにより、各種欠陥の同時探傷が可能となった。
				<p>手法の特徴</p> <ul style="list-style-type: none"> ・超音波振動子を電動機で回転させて探傷する従来法にかえて、電子走査式アレイ複合プローブを開発 ・二探触子、水浸法 ・軸、周方向欠陥用探触子 周波数 5 MHz、各 32ch ・減肉欠陥用探触子 周波数 10 MHz、32ch 			
3	原子力機器への高品質要求を達成するために、適切な非破壊検査法の選択が示されている。適用事例として、原子炉容器及びパッキン先で超音波探傷試験を実施し、その有効性を確認している。	オーステナイト系ステンレス鋼 (実験では炭素鋼を使用)	<ul style="list-style-type: none"> ・ノズルとキャップの溶接接合部 (小型薄肉) ・原子炉容器の Y ピース 	<ul style="list-style-type: none"> ・溶接中の欠陥 (試験体では、ノッチ ; 深さ 0.3mm(10%)、幅 0.6mm) ・横穴ドリルホール ; 直径 2mm 	<ul style="list-style-type: none"> ・ノズル部 板厚の 10% ⇒欠陥深さ 0.3mm 幅 0.6mm (焦点型探触子を用いた水浸法による) ・原子炉容器； 横穴ドリルホール ; 直径 2mm 	— (記載無し)	特に無し。
				<p>手法の特徴</p> <p>ほぼ確立された検査手法により特殊形状溶接部の欠陥検出の可否について検討</p>			

表 3.2.1-1 超音波探傷法に関する調査結果 (2/5)

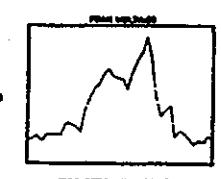
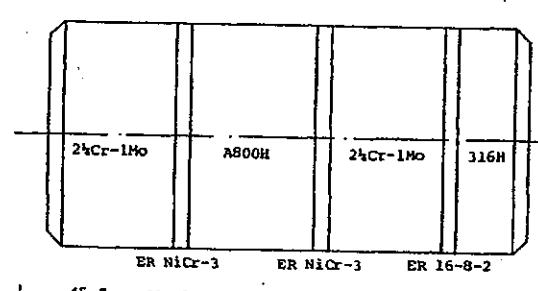
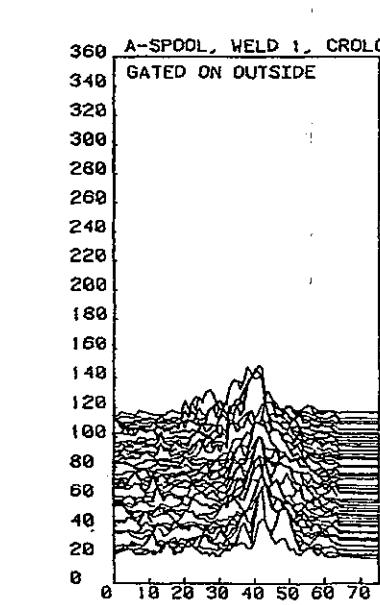
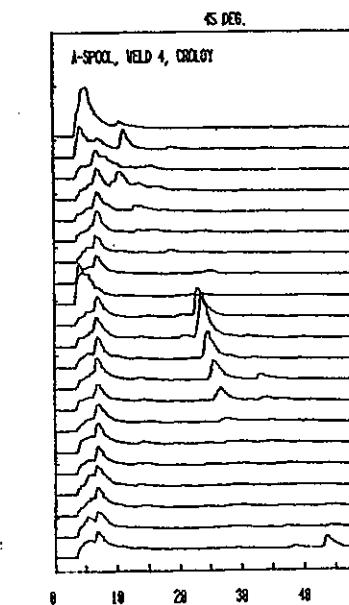
	概要	材料	適用箇所	対象欠陥	検出性能		その他の知見	
					検出サイズ	検出精度 (サイン精度)		
4	高速炉の主要機器は、オーステナイト鋼製であるが、その健全性を ISI で確認することが重要である。しかし、軽水炉に比べて放射線及び熱的な環境条件が厳しく、遠隔操作性が要求される。ここでは、配管を対象として、高速炉条件下で高温実証試験が行われている。	・オーステナイトステンレス鋼 ・SUS304 鋼 (レデューサ)	・高温 Na を内包する配管及び溶接部 オーステナイト鋼鋼管 SUS304 鋼鋼管	16B Sch40 8B Sch40	・8B Sch40 25~50% t ノッチ (周方向、軸方向) ・8B Sch40 (Sch160 より削り出し 9.5t) 25~50% t 疲労き裂 (周方向) ・16B Sch80 5.3~53% t ノッチ (周方向 45°)	204°C Na 内包 (滞留) ⇒欠陥深さ ; 0.7mm ・疲労き裂 ; 50% t 以上 ⇒き裂深さ ; 4.7mm (20% 疲労き裂も確認されるが再現性なし) 204°C Na 内包 (流れ) ・Na の流れによる妨害信号はあるが、技術的には問題がない。	— (記載無し)	・高温及び Na 内包の条件と、実験室条件では、き裂に対して屈折角等に敏感であるとともに、S/N 比の低下が見られるが、スキャン装置の仕様変更により同等の性能が得られる見通しである。   
5	FBR では 2 次系と SG が異材継手により接続されている。熱影響部については、放射線透過試験によるき裂の検出が困難であり、超音波探傷試験が行われる。FBR に要求されるき裂の検出について、熱過渡を模擬した体系でクリープ疲労き裂を発生させ、超音波探傷法による検出性能を測定した。	・2 1/4Cr-1Mo — SUS316 (異材継手)	・2 次系と蒸気発生器間のオーステナイト鋼とフェライト鋼の異材継手を想定	・2 1/4Cr-1Mo 鋼 (熱影響部) ; クリープ疲労き裂 ・オーステナイト鋼 (SUS316 熱影響部) ; 人工欠陥 (ノッチ) ・溶接金属 ; 人工欠陥 (ノッチ)	・2 1/4Cr-1Mo 鋼 ; 板厚の 0.5% t ⇒き裂深さ 0.13mm ・オーステナイト鋼 ; 板厚の 3% t ⇒欠陥深さ 0.76mm ・溶接金属 ; 板厚の 8~10% ⇒欠陥深さ 2~2.5mm	— (記載無し)	・オーステナイト鋼では、フェライト鋼より低周波を用いることにより、所定の検出性能が得られる。 ・き裂のサイン精度は、超音波のエコ-高さのみでは精度が期待できないが、クリーピング損傷を考慮すれば、サイン精度は高まる (モニタリング)。   	

表 3.2.1-1 超音波探傷法に関する調査結果 (3/5)

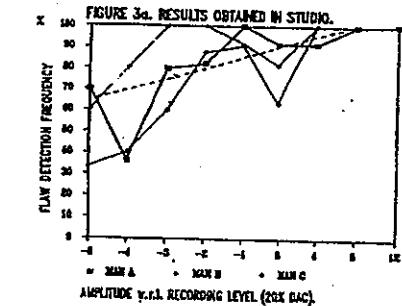
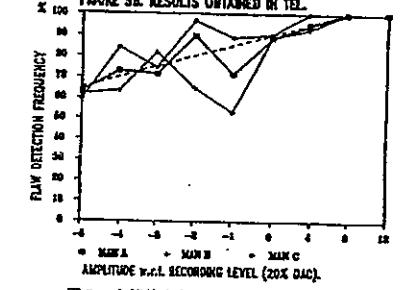
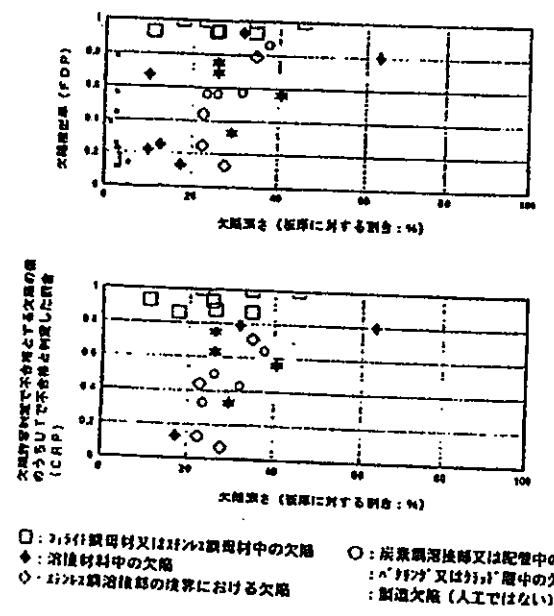
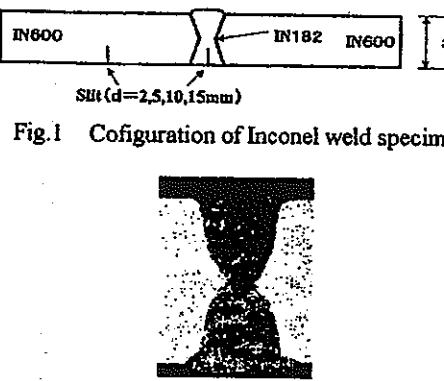
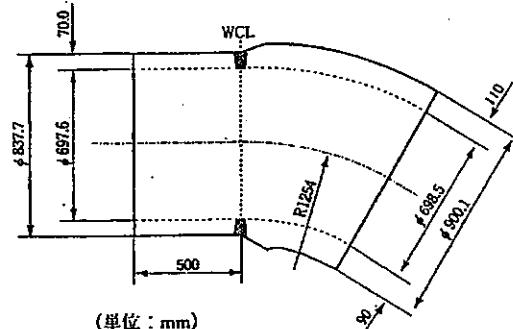
	概要	材料	適用箇所	対象欠陥	検出性能		その他の知見
					検出サイズ	検出精度 (サジング精度)	
6	<p>超音波探傷の信頼性を調査するために行われた PISC プログラムにおいて、自然欠陥を対象に検出性の評価が行われている。ここでは、異種金属溶接部での信頼性評価及びヒューマンファクターに関する信頼性について、試験結果が紹介されている。</p>   	<ul style="list-style-type: none"> ・炭素鋼 ・ステンレス鋼 ・ステンレス鋼グレード ・ステンレス鋼鋳鋼 ・インコネル溶接部 ・ステンレス鋼溶接部 	<ul style="list-style-type: none"> ・BWR 壓力容器のインレットノズル ・BWR セーフエンド ・PWR セーフエンド 	<ul style="list-style-type: none"> ・製造時の欠陥 ・人工欠陥 	<ul style="list-style-type: none"> ・母材中の欠陥；一 ・溶接金属及びセーフエンド；板厚の 5% <p>⇒欠陥深さ 2mm 以上</p>	板厚方向；±5mm	<ul style="list-style-type: none"> ・欠陥検出率が高いと、欠陥を大目に評価し、合格欠陥を不合格判定する傾向にある。 ・検査員、作業環境及び検査方法による違いがあり、ヒューマンファクタとして信頼性に影響する。 ・セーフエンド溶接金属中の微小欠陥は現状技術では検出が難しい。
7	<p>原子力機器に使用されるインコネルは、超音波探傷による欠陥検出及びサジングが困難とされている。</p> <p>ここでは、斜角リニア探傷法とワーストライ UT 法のインコネル溶接部への適用性を検討するために、人工欠陥に対する試験を実施し、検出性及びサジング性に関する検討を行っている。</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・母材；インコネル 600 ・溶接金属；インコネル 182 	炉内機器	<ul style="list-style-type: none"> ・き裂 (試験体では、母材、溶接金属に 2, 5, 10, 15mm スリット [板厚 35mm]) 	<ul style="list-style-type: none"> ・母材、溶接金属 ；欠陥深さ 2mm (板厚の約 6%) 	<ul style="list-style-type: none"> ・母材；±1mm ・溶接金属；±1mm (上記は、ワーストライ TDFD 法による場合で、斜角リニア探傷法の場合、溶接金属部での精度が±2mm となる) 	<ul style="list-style-type: none"> ・溶接部の場合、溶接組織による超音波の散乱、減衰の影響等により、母材に比べてエコー高さが減少する。

表 3.2.1-1 超音波探傷法に関する調査結果 (4/5)

	概要	材料	適用箇所	対象欠陥	検出性能		その他の知見
					検出サイズ	検出精度 (サizing 精度)	
8	PWR の 1 次冷却系配管には、鋳造ステンレス鋼が用いられているが、結晶構造が複雑で超音波探傷に不利な条件となっている。ここでは、鋳造ステンレス鋼に適する超音波探傷試験法を開発し、その検出性能の評価を行っている。	ASTM A182 CF8M	PWR 1 次系冷却材配管部 (直管部；板厚 70mm) (エルボー部；板厚 90~110mm)	・溶け込み不良(製造時) ・疲労クラック ・スリット(人工欠陥)	・溶け込み不良；20% t ⇒欠陥深さ 14mm ・疲労クラック；30% t ⇒欠陥深さ 21mm ・スリット；10% t ⇒欠陥深さ 7mm	— (記載無し) ⇒画像データ上で 14mm と過大評価。	・従来型探触子に比較して S/N 比を大幅に改善した。しかし、検出率が向上した分、誤識率は増大した。
9	バルブ等ではオーステナイトステンレス鋼鋳造品が用いられているが、粒子が粗く超音波の減衰が大きく、超音波探傷法の適用が困難である。ここでは、局所的な鍛造を実施することにより、減衰係数を低減し、超音波探傷法の適用を可能にするとともに、欠陥検出性の試験を行っている。	オーステナイトステンレス鋼鋳造品 (SCS16A)	バルブの入口/出口ノズル (直径 600A と 300A の 2 種類の模擬試験体を用意)	・疲労き裂 (楕円形状、アスペクト比 1:3) ・600A の場合 -熱影響部；9~28% t -溶接金属；7~27% t ・300A の場合 -熱影響部；6~17% t -溶接金属；6~22% t	・600A(下向き溶接) -熱影響部；9% t 以上 -溶接金属；7% t 以上 ・300A(下向き溶接) -熱影響部；6% t 以上 -溶接金属；7% t 以上 ・300A(横向き溶接) -熱影響部；7% t 以上 -溶接金属；6% t 以上	・600A(下向き溶接) (熱影響部；13% t) (溶接金属；8% t) ・300A(下向き溶接) (熱影響部；13% t) (溶接金属；7% t) ・300A(横向き溶接) (熱影響部；7% t) (溶接金属；13% t)	特になし。



手法の特徴

- S/N 比向上のため、大型二振動子探触子(縦波斜角 45° 焦点型 振動数 1 MHz 局部水浸)を開発。
- データの画像表示。

部品	仕様
直管	材料 : ASTM A182 CF8M 製造法 : 遠心鍛造
エルボー	材料 : ASTM A182 CF8M 製造法 : 静鍛造

表6 欠陥の種類、大きさ、場所、個数

種類	大きさ	個数
溶け込み不良	20% t	1
疲労クラック	30% t	1
EDMスリット*	10~40% t	4

*: Electron Discharge Machining (放電加工)スリット

手法の特徴

- 鋳造品の局部を鍛造(板厚の 10%程度)することにより、一般の超音波探傷手法の適用を可能とした。
- 縦波斜角 55° 周波数 2 MHz 2 分割型探触子

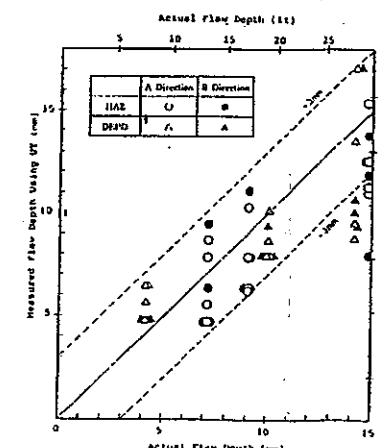
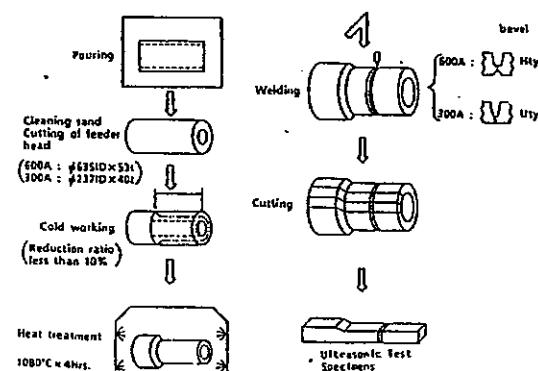


Fig.10 Flaw Sizing Accuracy for 600A Specimen

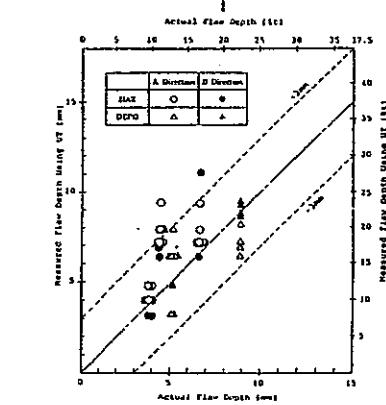


Fig.11 Flaw Sizing Accuracy for 300A Specimen (Horizontal Position)

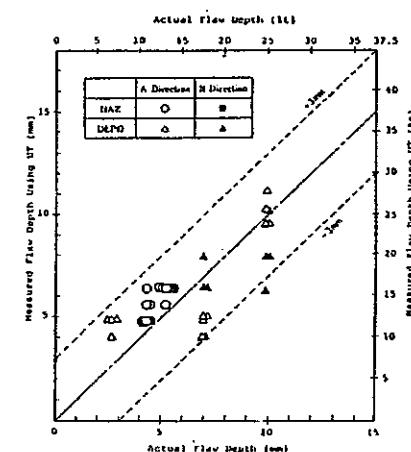


Fig.11 Flaw Sizing Accuracy for 300A Specimen (Flat Position)

表 3.2.1-1 超音波探傷法に関する調査結果 (5/5)

	概要	材料	適用箇所	対象欠陥	検出性能		その他の知見
					検出サイズ	検出精度 (サイング精度)	
10	超音波探傷法は、低合金炭素鋼等の粒子が波長に比べて小さい場合は有効であるが、原子力発電所で一般的に用いられるオーステナイトステンレス鋼の鋳物や溶接等の粒子の大きい材質に対しては、散乱が大きい等から測定が困難となる。ここでは、オーステナイト鋼の鋳物でできたPWR冷却材ポンプケーシングに対して低周波での超音波探傷を行い、その性能を確認している。	オーステナイトステンレス鋼 (鋳造品)	PWR 冷却材ポンプのケーシング (代表板厚: 200mm)	— (特に記載無し)	・横穴ドリホール: $\phi 4\text{mm}$ ・表面ノッチ; 深さ 4mm	— (記載無し)	・オーステナイト鋼の鋳物や溶接部のような組織が粗い場合にも、低周波とすることで欠陥計測が可能(ここでは、0.5MHz)。
11	原子炉容器内面及び冷却材入口ノズルを対象として、超音波探傷による欠陥検出性の評価が行われている。 原子炉容器内面のオーバーレイクラッドを考慮した種々の試験体が製作され、超音波探傷法により欠陥検査が行われている。	— (記載無し)	・原子炉容器(炉心部)の内面の溶接部 ・冷却材入口ノズルの内側コーナー一部	①クラッド下割れ ・繰返し曲げによるき裂 後にオーバーレイクラッド (深さ: 1.8, 2.7, 4.8, 7, 8, 10mm、長さ: 50mm) ・ノッチ作成後にオーバーレイ クラッド (深さ: 4, 6, 8mm、長さ: 40mm) ②表面ノッチ(オーバーレイクラッド 表面) (深さ: 1~6mm、長さ: 10mm) ③オーバーレイクラッドから母材 に達するノッチ	・原子炉容器 -欠陥深さ: 1.8mm以上 (オーバーレイクラッド下のき裂) -欠陥長さ: 20mm以上 ・冷却水ノズルでも同様 [ドイツ規格に準じて記録 すべき感度を超えるものを 検出サイズとした。]	— 記載無し [エコー高さか ら欠陥のサイング をすることは困 難]	・特に無し。

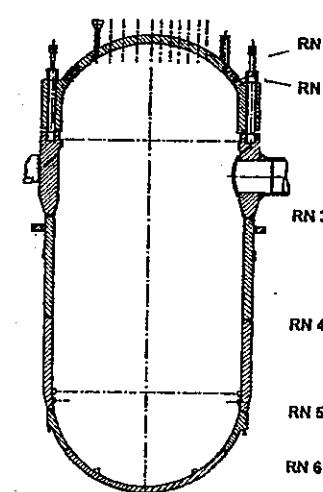
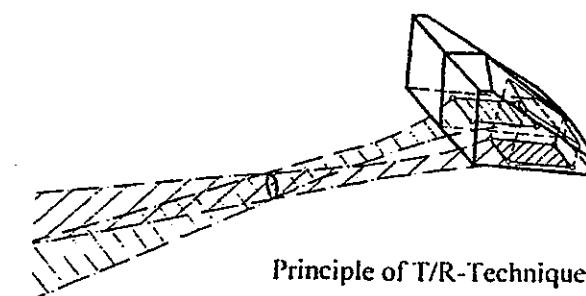
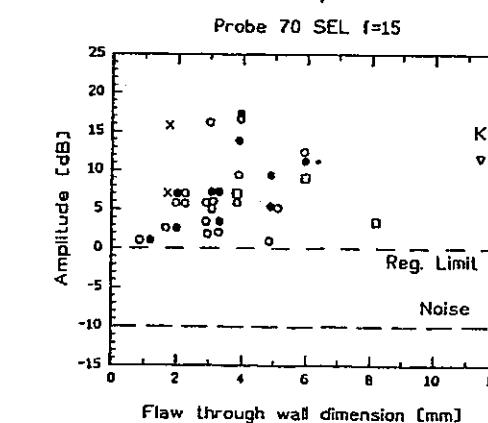


Fig. 1. Reactor pressure vessel at Stade (KKS).



Principle of T/R-Technique



(a)

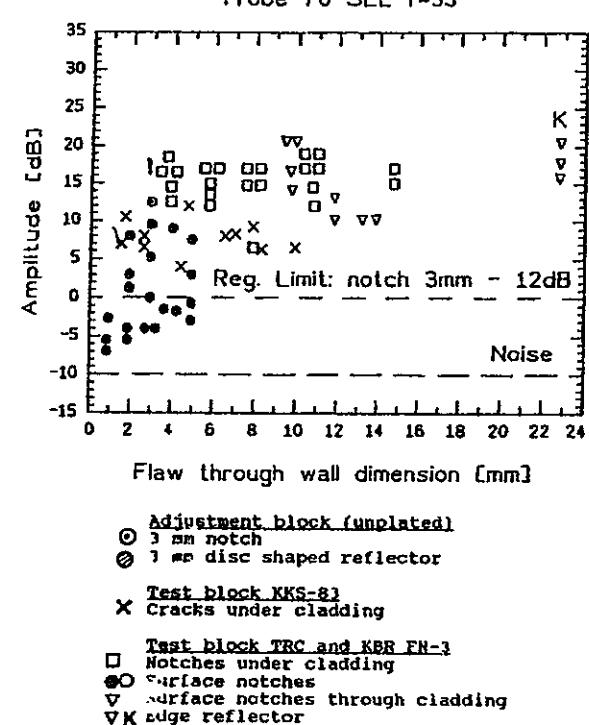
Fig. 4. Test flaw results for RPV cylindrical shell: (a) $f = 33$;
(b) $f = 15$.

表3.2.1-2 超音波探傷試験による検出可能な欠陥サイズ；板厚比で整理 (1/2)

1. SUS

文献番号	欠陥の種類	材質	検出欠陥の深さ (%t)											備考
			0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	
1	人口スリット欠陥	SUS316												FBR実証炉の原子炉容器を想定
2	軸方向欠陥	SUS321												
2	周方向欠陥	SUS321												もんじゅ蒸気発生器の伝熱管
4	平面欠陥	SUS304												
4	疲労き裂	SUS304												高温Naを内包する配管
8	溶け込み不良	ASTM A182												
8	疲労き裂	ASTM A182												PWR1次系冷却材配管部
8	スリット	ASTM A182												

2. 溶接部

文献番号	欠陥の種類	材質	検出欠陥の深さ (%t)											備考
			0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	
5	クリーフ疲労き裂	2.25Cr-1MoHAZ												
5	人口欠陥	SUS316HAZ												
5	人工欠陥	溶接金属												
6	人工欠陥	溶接金属												BWRインレットノズル、セフエンド
7	き裂	溶接金属												イコ社182、炉内機器
9	疲労き裂	SCS16A HAZ												
9	疲労き裂	溶接金属												バルブの入口/出口ノズル
11	き裂	—												原子炉容器内面、冷却材入口ノズル

表3.2.1-2 超音波探傷試験による検出可能な欠陥サイズ；板厚比で整理 (2/2)

3. 炭素鋼

文献番号	欠陥の種類	材質	検出欠陥の深さ(%)											備考
			0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	
3	溶接欠陥													容器とバスルの溶接部、R/VのYヒーラス

4. インコネル600

文献番号	欠陥の種類	材質	検出欠陥の深さ(%)											備考
			0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	
7	き裂													炉内機器

表3.2.1-3 超音波探傷試験による検出可能な欠陥サイズ；深さで整理 (1/2)

1. SUS

文献番号	欠陥の種類	材質	検出欠陥の深さ (mm)																									備考	
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
1	人口スリット欠陥	SUS316																											FBR実証炉の原子炉容器を想定
2	軸方向欠陥	SUS321																											
2	周方向欠陥																												もんじゅ蒸気発生器の伝熱管
4	平面欠陥	オーステナイト鋼 SUS304																											
4	疲労き裂																												高温Naを内包する配管
8	溶け込み不良	ASTM A182																											
8	疲労き裂																												PWRI次系冷却材配管部
8	スリット																												

2. 溶接部

文献番号	欠陥の種類	材質	検出欠陥の深さ (mm)																										備考
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
5	クリープ疲労き裂	2.25Cr-1MoHAZ																											
5	人口欠陥	SUS316HAZ																											2次系と蒸気発生器間の異材継手
5	人工欠陥	溶接金属																											
6	人工欠陥	溶接金属																											BWRインレットノズル、セーフエンド
7	き裂	溶接金属																											イコリ182、炉内機器
9	疲労き裂	SCS16A HAZ																											
9	疲労き裂	溶接金属																											バルブの入口/出口ノズル
11	き裂	—																											原子炉容器内面、冷却材入口ノズル

表3.2.1-3 超音波探傷試験による検出可能な欠陥サイズ；深さで整理 (2/2)

3. 炭素鋼

文献番号	欠陥の種類	材質	検出欠陥の深さ (mm)																										備考
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
3	溶接欠陥	炭素鋼																											容器とノズルの溶接部、R/VのYピ-ス

4. インコネル600

文献番号	欠陥の種類	材質	検出欠陥の深さ (mm)																										備考
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
7	き裂																												炉内機器

5. 材質不明

文献番号	欠陥の種類	材質	検出欠陥の深さ (mm)																										備考
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
12	—	鋼材試験片																											電子走査式超音波探傷法
12	溶接欠陥	鋼材突合せ溶接																											電子走査式超音波探傷法
12	人工欠陥	鋼材及び溶接部																											電子走査式超音波探傷法
12	—	一般厚肉材																											開口合成法
12	—	Alの角材																											開口合成法
12	き裂	SUS304																											超音波散乱法、配管
12	人口ノッチ	A508 (Ni-Cr-Mo)																											AE法
12	—	丸棒																											電磁超音波法

3.2.2 モニタリング技術の調査^{[3.2-[3~19]]}

3.2.1では、超音波探傷法を対象として、検査精度に関する調査を行った。ここでは、検査の合理化に有効と考えられるモニタリングについて、現状の技術調査を行い、その効果について検討した。

(1) 目的

3.1の検討により、システム化規格での規格化項目として検査の種類が挙げられた。検査の種類としては、ISI等で用いられる体積検査や表面検査があるが、機器の状態等を監視するモニタリングもその1つである。

モニタリングについては、プラントの状態把握を行い、その結果を ISI 計画にフィードバックする等により検査の合理化が期待できる。よって、①何が、②どのように、③どの程度測定可能かを把握し、モニタリング導入による合理化の可能性を検討することを目的として、モニタリング技術の調査を行った。

(2) 調査方法

モニタリングは、機器の状態把握を目的とした行為であり、機器の故障が生じる前に定期的に状態を監視するという広い意味では定期検査もモニタリングとして位置付けられる。ここでは、これらは調査範囲に含めないものとし、モニタリングを検査の合理化が可能な手段として位置付け、オンラインモニタリングの技術を調査対象とした。

また、原子力施設で適用あるいは適用のために開発されている技術を対象として実施した。

(3) 調査結果

表 3.2.2-1 に、モニタリング技術に関する調査結果を示す。また、その概要を以下に示す。

a. モニタリングによる検査対象

モニタリングによる検査対象としては、以下のような項目がある。

① 疲労モニタ；

プラント寿命の長い原子力プラントでは、起動停止や熱過渡等に伴う熱サイクル数が多く、強度評価上疲労は重要な項目である。モニタリング技術についても、疲労モニタに関する適用事例が最も多く挙げられている。

② き裂(SCC等を含む)

これまでの原子力プラントでは、き裂の発生を許容せず、き裂が検出された場合、機器の補修、交換等が必要となっていたが、軽水炉でも維持基準が策定されたように、検査結果を評価し継続使用等を可能とする動きにある。き裂は疲労や SCC 等、種々の要因により発生するが、き裂進展の監視等を目的にモニタリング技術の開発が行われている。

③ 材料の熱脆化及び中性子脆化

材料は熱及び中性子照射により脆化するため、告示 501 号でも監視試験片を設置することが規定されている。本技術は、監視試験片ではなく、通常の機器に対して脆化を監視するものである。

④ 容器、配管等の減肉

冷却材による腐食等により容器、配管の減肉が生じ、強度低下あるいは破損に至るため、定期点検等でも減肉測定が行われている。本技術は、減肉のモニタリングを行うものであり、検査の合理化が期待できる。

⑤ ポンプの振動

①～④については、材料の状態把握の手段であるが、事例は少ないものの、その他機器の作動状況を把握する技術も開発されている。特に、ポンプ等の回転機器で異常時に発生する振動等を利用している。これらの技術については、定期検査時の作動試験等の合理化に寄与するものと考えられる。

b. 測定精度

測定精度については、ほとんどの文献で記載されていない。また、振動や材料の特性変化測定による脆化の測定、あるいは試験片を用いたき裂モニタ等、直接的に測定する例も示されてはいるが、ほとんどの場合は温度、流量等のモニタリングを行い、これらのプラント状態から計算により推定する方法が多く、疲労モニタの場合はほとんどがこれに当る。

c. 適用事例

間接的なモニタリングではあるが、疲労モニタやき裂モニタ等については、国内外の軽水炉で既に多数適用されている。その他の場合でも、実験室レベルではその適用性が確認されている。

現状のモニタリング技術については、十分適用性があるものと考えられるが、実験室レベルでの技術については、その信頼性等について確認が必要と考えられる。

d. モニタリングによる効果

調査結果により、モニタリング導入によるメリットとして、以下が考えられる。

- ① 最終的な構造健全性の確認は、定期的な ISI 等に期待するとしても、モニタリングと併用することで、検査の削減が可能であるとともに、その頻度を低減することが可能と考えられる。文献 1 に示すように、実際に UT とモニタリングの併用により、PT 検査の削減が可能となっている。
- ② き裂が発生した場合でも、モニタリングで進展状況を把握することにより、運転の継続が可能である。現状では、き裂発生により補修を行う必要があるが、上記により補修の必要性は低減する。文献 2 では、実際にき裂モニタを行うことにより、1 燃交期間の継続運転が可能となっている。この結果、不要な炉停止期間の削減が可能と考えられ、プラントの稼働率向上等コストメリットは大きいと考えられる。
- ③ 実機での疲労モニタを行うことで、設計裕度の確認が可能であり、寿命延長が可能である。文献 4 では、実際に疲労モニタの結果に基づき、設計ベースでの疲労評価は裕度が大きいとの知見が示されている。この結果、疲労モニタの結果に基づき、機器の寿命を実態に合わせて評価し、寿命延長につなげることが可能と考えられる。
- ④ モニタリングを機器の作動状況等に適用することにより、運転員のプラン状況の把握が容易となり、緊急時等での対応性が向上する。また、機器の作動状況を把握することにより、定検や補修計画への反映が可能となる。
- ⑤ モニタリングにより異常の早期発見が可能であり、事故の拡大や補修期間の低減が可能である。これは、②と同様に、不要な炉停止期間の低減が可能となる。

(4) モニタリング導入のシナリオ

a. モニタリングの現状

(3) までに示したように、種々の破損モードに対してモニタリング技術が確立され、既に実機に適用された技術も多数ある。一方、現行の法規・規格体系では、オンラインモニタリングは取り入れられておらず、定期的な分解検査、作動検査等の定期的な状態確認しか規定されていない。

一般産業や海外原子力プラントでは、3.1.3 に示したリスク評価にも見られるよ

うに、運転中の状態把握を合理的に取り入れることやオンラインモニタリングを取り込むことが行われているが、国内原子力プラントについては十分に整備されていないのが現状である。

b. (オンライン) モニタリングの導入効果

a. での現状に対して、システム化規格でリスク評価等により検査を合理化するには、(オンライン) モニタリングの導入は重要な位置付けと考えられる。(3) に現状調査に基づくモニタリングの効果を摘出したが、その他以下の効果が考えられる。

① 定期検査時の検査項目は、非常に多く、法規に基づき国が実施する検査項目だけでも 70 項目にもなる。個々の検査に対してヒューマンエラー等を考慮すると、必ずしも現状の検査体系が適切とは言いきれない。

プラントの設備信頼性を向上させるには、現状の検査項目のうち可能なものについてはモニタリングで代用することが有効と考えられる。

② 原子力プラントでは、設計寿命 30~40 年 (現状は 60 年を考慮) が一般的であるが、個々の機器の寿命は異なっており、適切な状態把握の時期がある。現状では、1 年毎の定期検査が義務付けられているが、この結果不要な検査が発生し得ると考えられる。モニタリングを導入することで、個々の機器の状態が把握でき、コストインパクトを考慮した上で交換時期等の適正化が可能と考えられる。

③ 検査スケジュール等については、運転経験の積み上げ等をデータベースとして決められるが、その際モニタリングにより機器の挙動等を把握することが有効と考えられる。

定期的な検査よりも、モニタリングから得られた知見を基に検査スケジュールを定めることで、合理的な検査体系が構築できるものと考えられる。

表 3.2.2-1 モニタリング技術に関する調査結果 (1/3)

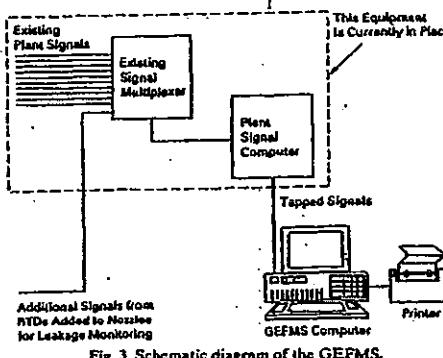
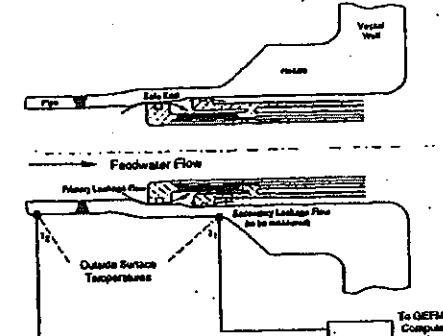
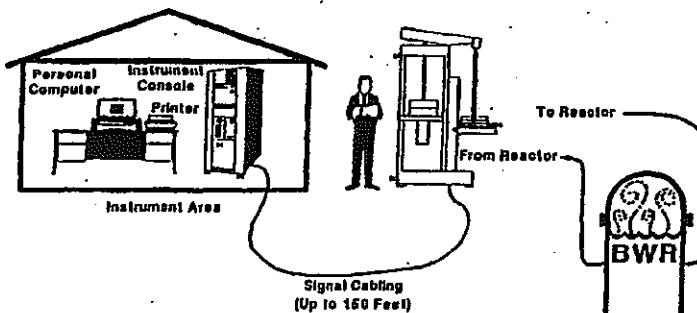
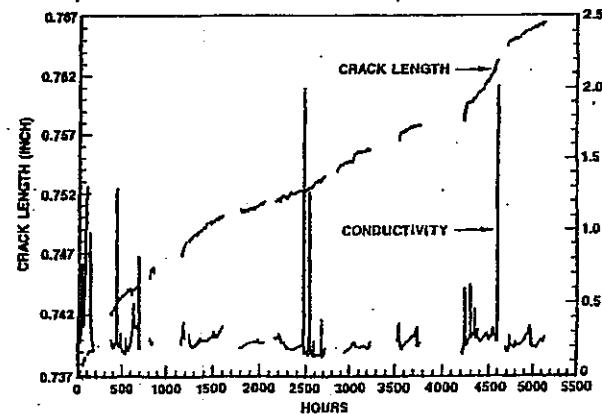
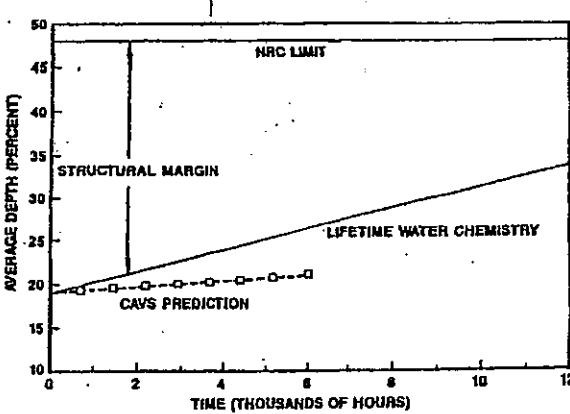
番号	測定方法の概要	検査対象	測定精度	適用事例	導入によるメリット (期待される効果)	その他の知見
1	<p>高度な UT 技術と疲労／漏洩モニタを組み合わせた手法 (GEFMS) による給水ノズルの管理手法を紹介している。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高度な UT 手法；自動探傷を用いた 3D グラフィックによるデータ解析。 ・疲労モニタ；運転温度、圧力等をプロセス測定器から入力し計算機による疲労評価。 ・漏洩モニタ；ノズル外表面温度を測定し、サーマルスリープのシールの漏洩を監視。 	<p>・き裂 ・疲労モニタ (BWR 給水ノズルのセーフエンド)</p>  <p>Fig. 3. Schematic diagram of the GEFMS.</p>	— (記載なし)	不明	<p>NRC で規定するサーマルスリープ内面スパージャーの PT 検査を省略でき、コスト及び被ばくが低減できる。</p>  <p>Fig. 6. Thermal sleeve leakage monitoring process.</p>	特になし
2	<p>運転中の原子炉圧力容器ノズルや配管の常時モニタリング手法を概説している。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・き裂進展に伴う電位降下法 <ul style="list-style-type: none"> ①CAVS 法 (Crack arrest/advance verification system) 引張力を付与したき裂入り CT 試験片を実機環境と同一の流体内に置き、CT 試験片のき裂進展を電位降下法により測定し、実機に外挿する。 ②PCM (Pipe crack monitoring system) 配管外面にアレイセンサーを取り付け、電位降下法により内面のき裂進展を検出する。 ・疲労モニタ プラントコンピューターから温度・圧力等のデータ入手し、マイクロコンピューターで累積疲労計算を実施。  <p>Fig. 3. CAVS and reactor system.</p>	<p>・疲労モニタ (BWR 原子炉容器、給水/再循環ノズルセーフエンド等)</p>	<p>・CAVS 法 CT 試験片のき裂深さを ± 0.001 インチ精度で測定。</p>	<p>・CAVS 法 CT 試験片のき裂深さを ± 0.001 インチ精度で測定。 (UT により欠陥を検出したが、CAVS 法によりモニタし、補修せずプラントを稼働した。)</p>	<p>米国 BWR プラント再循環ラインノズルのセーフエンドに適用 (CAVS 法) き裂の補修により炉を長期間緊急停止せず、CAVS 法によるモニタで 1 燃料サイクル期間運転が可能であった。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・炉水の水質管理に応用が可能。 ・プラント固有のき裂進展速度を決定できる。  <p>Fig. 12. Crack length versus total time-on-test for type 304 stainless steel.</p>  <p>Fig. 13. Predicted crack growth in safe end.</p>

表 3.2.2-1 モニタリング技術に関する調査結果(2/3)

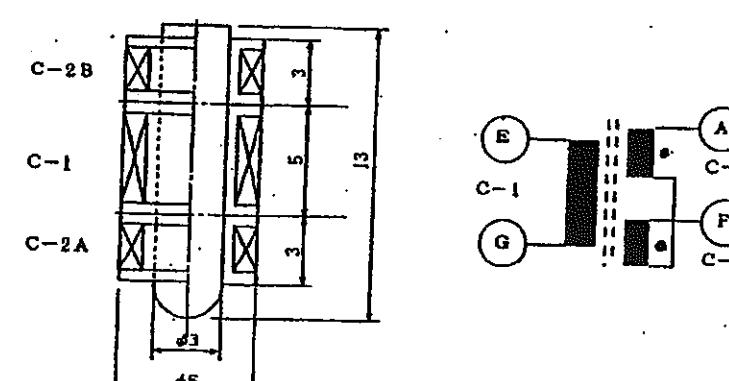
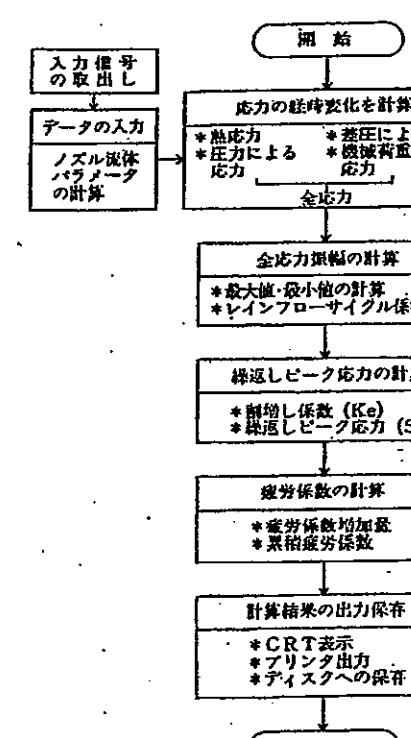
番号	測定方法の概要	検査対象	測定精度	適用事例	導入によるメリット (期待される効果)	その他の知見
3	<p>材料が劣化すると誘電率、透磁率等が変化する。コイルにより渦電流を発生させ、そのインピーダンス変化をとらえ材料劣化の状況を確認する。</p>  <p>Fig. 2 Mutual induction, self differential coil</p>	二相ステンレス鋼の熱脆化	— (記載なし)	(試験体で実験済み)	装置及びセンサーが軽量小型であり、制限の多い作業環境でも使用できる。	熱脆化の度合いは、コイルのリフトオフ効果を演算処理した電圧の複素平面表示により明確に区分可能であった。
4	<p>給水ノズル部の温度・圧力及び流量のデータを採取し、発生応力の経時変化を計算し、更に疲労計数の計算を行う。</p>  <p>Fig. 5 疲労計算フローチャート</p>	疲労モニタ(熱疲労負荷) (原子力給水ノズル)	(熱負荷を、信頼性高く且つ正確に追跡・評価できる)	敦賀発電所1号機(BWR)	設計ベースの疲労評価に比較して原子炉圧力容器の疲労モニタの疲労評価結果が低く、寿命延長を検討する一助となる。	原子炉圧力容器は、設計ベースの疲労評価に対してかなりの余裕を持っている。

Table 1 Fabrication condition of thermal aging specimen

Material	Abbreviation
CP8M (SCS14A : JIS G5121) Ferrite Content 10%	A
Ferrite Content 25%	B
CF8 (SCS13A : JIS G5121)	C
Aging Temperature 350°C, 400°C, 450°C	
Aging Hour 0, 3 × 10 ³ , 1 × 10 ³ , 3 × 10 ³ , 1 × 10 ⁴ , 3 × 10 ⁴	

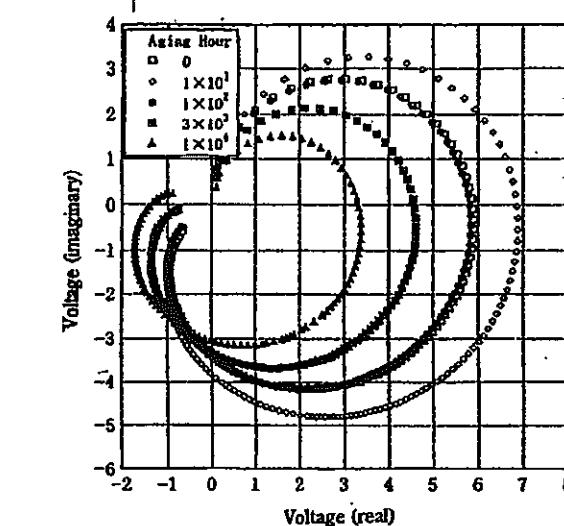
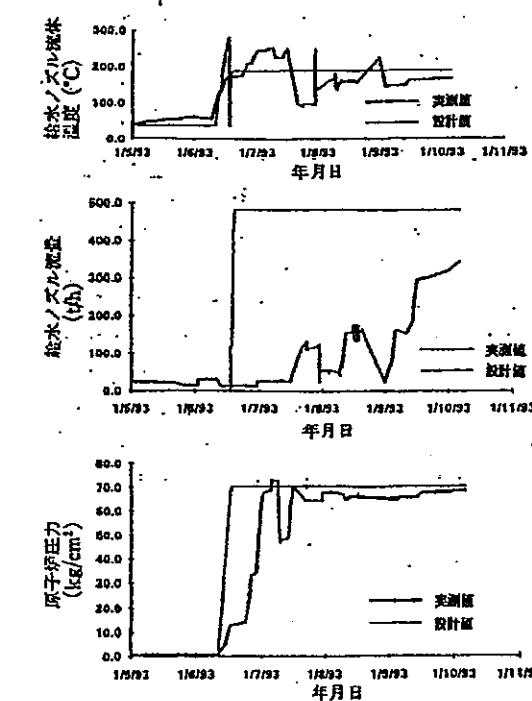
Fig. 6 Trajectory of output voltage with frequency change
(CF8M (Fe 25%) specimen : B, aged at 450°C)Fig. 8 各パラメータの実測値と設計値の比較
(プラント起動事象)

表 3.2.2-1 モニタリング技術に関する調査結果(3/3)

番号	測定方法の概要	検査対象	測定精度	適用事例	導入によるメリット (期待される効果)	その他の知見
5	<p>次のオンラインモニタリング手法を開発中である。</p> <ol style="list-style-type: none"> ポンプの振動診断オンラインモニタリング ポンプ運転中の振動データを分析・蓄積し、計算機による異常診断システム確立のための診断アルゴリズムを作成する。 容器・配管類の亀裂・減肉に対する超音波診断モニタリング 高温用超音波探触子、信号処理装置の開発を行い、高温下における超音波探傷の基礎技術を確立する。 	<p>1. ポンプの振動</p> <p>2. 容器・配管類の亀裂・減肉</p>	— (記載なし)	(モックアップ試験中)	<ul style="list-style-type: none"> 運転員への情報支援 定期検査計画や補修計画の最適化 緊急時の対応性向上 	実機オンライン診断技術として有効な技術と判断されたが、まだ実験段階である
6	<p>圧力バウンダリーの AE モニタリング法を開発し、ASME 規格化の動きがありその現状等を紹介している。</p> <p>技術的トピックとして、以下を検討している。</p> <ul style="list-style-type: none"> AE 信号パターンの認識 (酸化皮膜破損時とき裂発生時の AE 信号は分離可能) IGSCC と AE 信号の関連 (現在実験が進行中 : SCC 未発生) 遅いき裂進展と AE 信号の評価 (試験が初期段階であり、重要なデータは未入手) 	各種き裂モニタ (圧力バウンダリーを構成する機器、原子炉圧力容器)	— (記載なし)	Watts Bar 1号炉 Millstone 1号炉	<ul style="list-style-type: none"> 初期き裂の早期発見 配管の IGSCC を常時監視 冷却水漏れの早期発見 	技術的に、AE モニタリングの実現性が認められた。
7	原子炉圧力容器の高速中性子照射脆化を検出する非破壊測定方法の可能性を提案している。その方法は、照射による保磁力の変化(増加)を電磁気的に測定する方法である。	中性子照射脆化 (原子炉圧力容器)	— (記載なし)	(実験段階)	<ul style="list-style-type: none"> 設備が小型・軽量であり遠隔操作が可能 	特になし

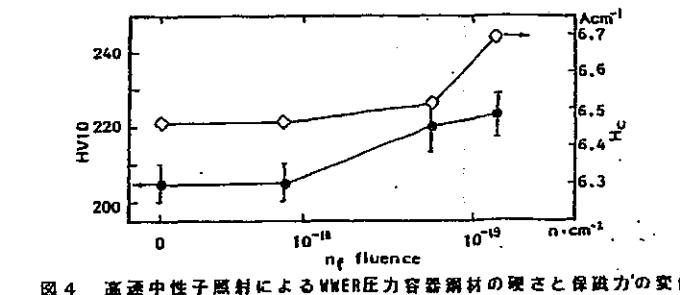


図 4 高速中性子照射による WER 壓力容器鋼材の硬さと保磁力の変化

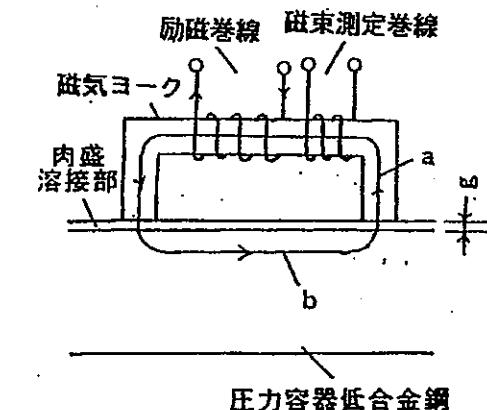


図 6 壓力容器劣化非破壊測定の原理

3.3 規格体系に関する検討

3.1で現行規格体系及びリスクベース評価において、システム化規格での規格化項目となり得る項目を摘出した。ここでは、この結果に基づいて、システム化規格での規格化項目及び検査に関する部分基準の体系について検討を行った。

(1) システム化規格での規格化項目

3.1で摘出した規格化項目は、表3.3-1に示す通りである。また、システム化規格全体の体系検討での結果に、表3.3-1の結果を反映して規格化項目のイメージとしたものを、表3.3-2に示す。本表では、検査に関する部分基準のみを示している。

なお、3.1では、現行の規格・基準を考慮して、定期検査と ISI を別の検査と位置付けて検討を行ってきたが、システム化規格は実用高速炉向けの基準であることから、本項では ISI は定期検査の一環として実施されると考え、定期検査で代表させている。この構成については、別途検討が必要である。

(2) システム化規格で考慮する範囲

図3.3-1に、システム化規格で考慮する範囲(案)を示す。図では、検査に関する部分基準のみでの考慮すべき範囲を示している。

a. 考え方

システム化規格は、実用高速炉の構造健全性に関する規定であることから、現行規格体系との比較において、検査の義務付け等を行う管理要求及び担保すべき性能を規定した機能要求を境界と考える。

b. システム化規格で考慮する範囲

現行の規格・基準は、図3.3-1に示すように、その規制の程度から上位、中位、下位に分類できる。上位については、実質的な内容についての規定ではなく、検査の義務付け等の最低限の内容に留まっている。中位については、上位に比べて規定内容は細かくなっているものの、設計や検査で担保すべき構造や性能が規定されているのみである。但し、材料検査については、告示501号の中で詳細な規定が設けられている。

検査については、告示501号の材料検査に関する規定を除き、具体的な内容については JEAG、JEAC、JIS 等の民間規定及び発電所使用者が個々に設ける内規で規定されている。

システム化規格は、構造健全性の確保を目的として、具体的な方法論を与える規

格と考えられることから、現段階では下位に位置付けられる部分を対象とするものと考える。なお、材料検査については、告示に詳細規定があることから、この部分はシステム化規格の範囲内に含まれるものと考える。また、検査間隔に自由度を持たせる場合、電気事業法等での1回/年の規定は障害となる可能性があり、この部分についてはシステム化規格側で規定することを考える。

作動試験については、構造健全性とは直接的に関連しないため、範囲外とする。

なお、システム化規格で機能性要求まで踏み込む場合には、現行の中位基準がシステム化規格に含まれるものと考えられる。

(3) 検査に関する部分基準の規格体系に関する検討

図3.3-2に、検査に関する部分基準の規格体系の枠組み(案)を示す。本結果は、3.1.4での規格化項目(案)の検討結果に基づいている。

a. 材料検査

材料検査については、構造設計及び維持(検査)との裕度交換が可能と考えられる。

材料仕様については、設計の強度評価に用いるものであるが、材料検査の結果をデータベースとして蓄積し、次回設計に対して材料強度のばらつき等が反映可能と考えられる。

また、材料検査の結果を用いたリスク評価を行い、材料検査の結果を反映した定期検査計画を策定することで、定期検査の適正化が可能と考えられる。

b. 溶接検査

溶接検査については、製作検査として実施するが、供用期間中検査の初期データとして活用可能である。溶接検査の結果を用いたリスク評価を行い、溶接検査の結果を反映した定期検査計画を策定し、適正化を図る。

また、溶接検査の検査精度に影響を及ぼす要因として、表面仕上げ等の製作状態がある。表面状態への要求と溶接検査の検査精度の間で、裕度交換が可能と考えられる。

c. 定期検査(ISIを含む)

定期検査(ISIを含む)については、構造設計、材料、検査(PSI)及び維持(評価)と広い範囲での裕度交換が可能と考えられる。なお、上記の通り、本項ではISIは定期検査の一環として実施されると考え、定期検査で代表させている。

主な内容は、以下の通りである。

- ① 系統構成(多重性等)や使用条件(熱過渡条件等)を考慮して、リスクに基づく重要度に応じて検査計画を適正化する。
 - ② 機器の破損機構を考慮した検査方法、検査間隔等を設定し、検査計画の適正化を図る。また、破損機構に応じてモニタリングを適用する。
 - ③ 設計での想定欠陥に応じて、適切な検査方法、検査精度とする。また、検査を考慮した材料選定を行う。
 - ④ 試験員のグレードを条件に、設計での欠陥分布を設定する。
 - ⑤ 維持(評価)の中で ISI データの評価方法を規定し、ISI データを用いたリスク評価により、次回定期検査計画の適正化を行う。
- (4) 検査に関する部分基準の規定内容(素案)

表 3.3-3 に、検査に関する部分基準の規定内容の素案を示す。具体的には、今後詰めていく必要があるが、ここでは概略の規定内容のイメージを示した。

表 3.3-1 システム化規格での規格化項目(案)

検査	規格化項目	定義
材料検査	1. 検査方法	
	2. 検査精度	
	3. 検査項目	
	4. 検査の種類	
	5. 判定条件	
使用前検査	※1	(1) 検査方法; RT、UT 等の各検査の具体的な実施手順 (2) 検査精度; 各検査での測定可能な欠陥寸法 (3) 検査項目; 非破壊検査、耐圧試験等の実施すべき項目 (4) 検査の種類 RT、UT 等の使用する検査の種類 (5) 判定基準 許容する欠陥長さ、欠陥深さ等
溶接検査	1. 検査箇所	
	2. 検査項目	
	3. 検査方法	
	4. 判定条件	
	5. 検査の種類	
定期検査	1. 検査箇所	
	2. 検査項目	
	3. 検査間隔	
	4. 検査の種類	
	5. 検査方法	
	6. 検査精度	
	7. 判定条件	
ISI (PSI を含む)	※2	

※1; 使用前検査では、構造健全性の確保に関する項目はないと考えられるため、システム化規格の対象外と考えている。

※2; 実用高速炉を考えると、ISI は現行軽水炉と同様になると考えられるため、定期検査の一環と考えている。

表 3.3-2 規格化項目のイメージ

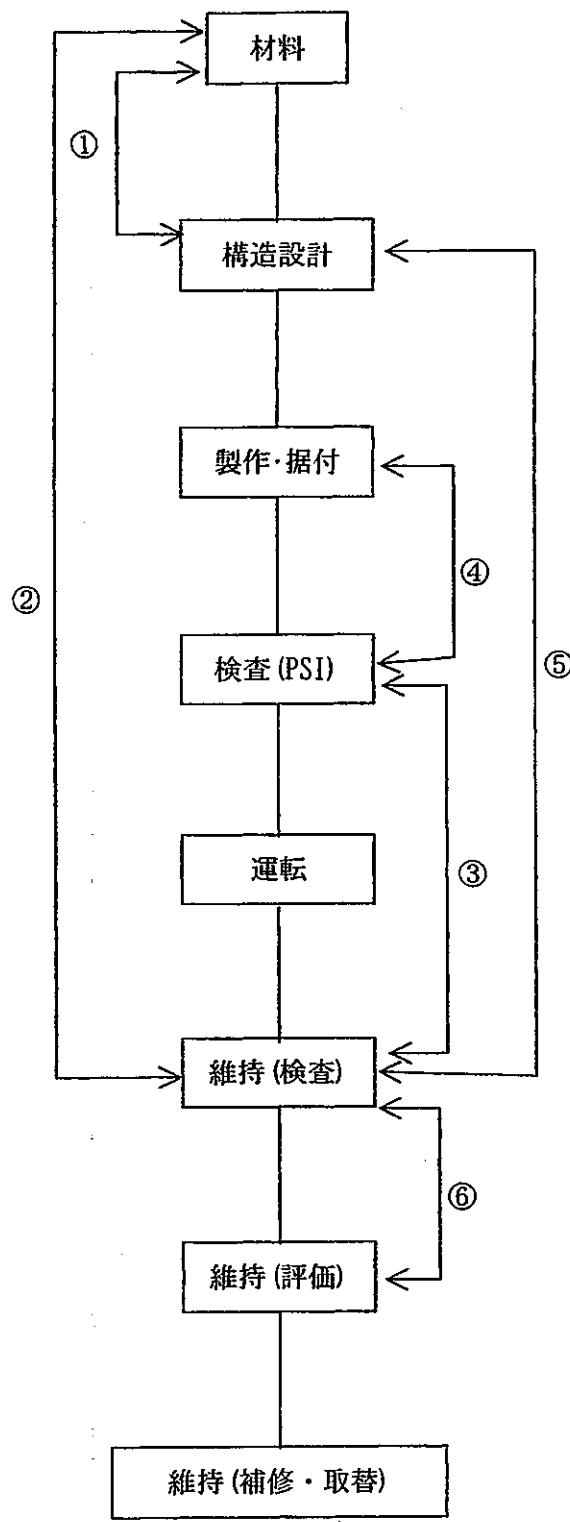
部分基準	材料	検査 (PSI)	維持 (検査)
	1. 材料仕様 • 化学成分 • 熱処理 2. 材料強度(許容値) 3. 材料検査	1. 検査 (・使用前検査) *1 • 溶接検査	1. 検査 • 定期検査 (・ISI) *2 • モニタリング
基本確率変数 (裕度交換項目)	材料検査 • 検査方法 • 検査精度 • 検査項目 • 検査の種類 • 判定条件	1. 溶接検査 • 検査項目 • 検査箇所 • 検査方法 • 検査の種類 • 判定条件 (2. 使用前検査)	1. 定期検査 • 検査箇所 • 検査項目 • 検査間隔 • 検査の種類 • 検査方法 • 検査精度 • 判定条件 (2. ISI) 3. モニタリング • 検査箇所 • 検査項目 • 検査の種類 • 検査方法 • 検査精度

*1) 使用前検査については、システム化規格で機能性も考慮する場合には必要となる。

*2) 実用高速炉を想定すると、ISIは定期検査の一環として実施されると考えられ、定期検査の部分基準の中に含まれると考えられる。

上位	中位	下位
<ul style="list-style-type: none"> ・電気事業法 ・原子炉等規制法 	<ul style="list-style-type: none"> ・省令62号 ・告示501号 ・省令123号 	<ul style="list-style-type: none"> ・JEAG ・JEAC ・JIS ・内規 等
<ul style="list-style-type: none"> ・管理要求 -検査の義務付け -届出、申請の義務 	<ul style="list-style-type: none"> ・構造に対する健全性の要求 -検査で確認すべき構造 	<ul style="list-style-type: none"> ・具体的な検査方法
<ul style="list-style-type: none"> ・検査要求 -使用前検査 -溶接検査 -定期検査 	<ul style="list-style-type: none"> ・機能性要求 -検査で確認すべき性能 	<ul style="list-style-type: none"> ・検査スケジュール
<ul style="list-style-type: none"> ・検査の適用範囲 -対象とする系統 		<ul style="list-style-type: none"> ・実施する検査の種類
<ul style="list-style-type: none"> ・検査時期 -定期検査は1年に1回 	<ul style="list-style-type: none"> ・材料 -化学成分 -機械強度 	<ul style="list-style-type: none"> ・検査箇所(機器、部位)
<ul style="list-style-type: none"> -使用前検査は、可能となった時期 	<ul style="list-style-type: none"> -実施すべき検査 	<ul style="list-style-type: none"> ・検査スケジュール
<ul style="list-style-type: none"> ・合格基準 -中位規定での構造基準への適合要求 		<ul style="list-style-type: none"> ・作動試験、性能試験等

図 3.3-1 システム化規格で考慮する範囲(案)



検査	関連する部分基準	裕度交換項目	内容	課題
材料検査	①構造設計	(1) 検査方法 (2) 検査の種類 (3) 検査精度	設計で用いる材料仕様について、左記の項目により材料強度の低減が可能である。この結果を蓄積して、材料仕様に関する設計データとしてフィードバックする。	・検査の種類、検査方法毎に、検査精度を定量化する。
		(1) 検査方法 (2) 検査の種類 (3) 検査精度	材料検査の結果は、左記の項目により信頼性が異なる。実際の材料検査結果を用いたリスク評価を行うことで、リスクの低減が可能である。この結果を基に、定期検査計画の適正化を図る。	・リスク評価法 ・検査の種類、検査方法毎に、検査精度を定量化する。
溶接検査	③維持(検査)	(1) 検査項目 (2) 検査箇所 (3) 検査方法 (4) 検査の種類 (5) 判定条件	溶接検査は、製作時に実施するが、供用期間中検査の初期データとして使用可能である。これにより、溶接検査の結果を基に、定期検査計画を策定し、適正化を図る。	・
		(1) 検査精度	溶接検査時の検査精度に影響する要因として、検査対象機器の表面状態等の製作状態がある。表面処理等と検査精度の間で裕度交換が可能である。	・製作状態の検査精度への影響の定量化
定期検査(ISIを含む)	⑤構造設計	(1) 検査箇所 (2) 検査項目 (3) 検査間隔 (4) 検査の種類 (5) 検査方法 (6) 検査精度	・系統構成(多重性等)や使用条件(熱過渡条件等)を考慮して、リスクに基づく重要度に応じて検査計画を適正化する。 ・機器の破損機構を考慮した検査方法、検査間隔等を設定し、検査計画の適正化を図る。また、破損機構に応じてモニタリングを適用する。 ・設計での想定欠陥に応じて、適切な検査方法、検査精度とする。また、検査を考慮した材料選定を行う。 ・試験員のグレードを条件に、設計での欠陥分布を設定する。	・リスク評価方法 ・重要度区分の設定 ・モニタリング技術の開発(破損機構との関連を含める) ・検査精度の欠陥分布への影響の定量化 ・試験員のグレードの定量化
		(1) 検査間隔	維持(評価)の中で ISI データの評価方法を規定し、ISI データを用いたリスク評価により、次回定期検査計画の適正化を行う。	・ISI データの評価方法 ・ISI データの反映方法

図 3.3-2

システム構造操作の枠組み(案)

表3.3-3 検査に関する規格の体系案(1/2)

部分基準	検査	規格化項目(案)	記載内容(案)
材料	材料検査	検査項目	・非破壊検査、機械試験等の検査項目については、現状通りの規定でよいと考えられるが、安全重要度に応じて見直しを行う。
		検査の種類	・RT、UT等の検査の種類に対しては、現状規定でよいと考えられる(JEAG、JIS等)
		検査方法	・各種の検査方法に対して、具体的な検査手順を規定する(JEAG、JIS相当) ・JIS等の呼び込みが行われると考えられるため、改訂への対応を容易とする。
		判定条件	・従来通りJISによるが、見直しが容易な体系とする。 ・判定条件として、材料仕様(機械強度、化学成分等)に対して、許容される範囲を規定する。
検査(PSI)	使用前検査	検査項目	・圧力等を判定として、耐圧試験の削除を許容する。 ・耐圧試験を実施する場合には、条件付で検査箇所の削減を可能とする。
		検査箇所	・リスクに応じた検査箇所(検査部位、検査範囲)の規定を設ける。
	溶接検査	検査の種類	・RT、UT等の検査の種類に対しては、現状規定でよいと考えられる(電気工作物の溶接に関する技術基準の解釈について等)
		検査方法	・現状の規定と同様と考えられるが、溶接検査の代替試験としてUT等、PSIとしての適用を考慮した規定とする。 ・材料によって、適用可能な検査方法を配慮する。
		判定条件	・従来通りJISによるが、見直しが容易な体系とする。 ・判定基準の考え方を記載し、リスク評価に基づく製作、検査等の要求緩和を可能とする。

表3.3-3 検査に関する規格の体系案(2/2)

部分基準	検査	規格化項目(案)	記載内容(案)
維持(検査)	定期検査 (ISIを含む)	検査箇所 検査項目	<ul style="list-style-type: none"> ・リスクに応じて検査対象機器を規定する。 ・リスクに応じた検査部位及び検査範囲を規定する。
		検査間隔	<ul style="list-style-type: none"> ・検査間隔は検査精度にもよることから、標準的と考えられる検査方法を規定するとともに、リスク評価の結果に基づいて検査間隔を設定することを許容する。 ・機器区分ではなく、リスクに応じて機器毎に検査間隔が設定可能とする。 ・機器毎の破損機構を考慮して、機器毎に検査間隔が設定可能とする。 ・前回ISIの結果によりリスクの再評価を行い、定期検査計画の見直しを行う。 ・ISIデータの評価方法について規定する。
		検査の種類	<ul style="list-style-type: none"> ・モニタリングを含めて、各検査箇所に対して標準的な検査の種類を規定する。 ・高速炉機器の特徴及び接近性のほかに、破損機構を考慮して検査の種類を規定する。
		検査方法	<ul style="list-style-type: none"> ・JEAGやJISに相当する試験方法を標準的な方法の位置付けで規定する。 ・欠陥検出確率が明確な場合には、他の方法を用いても良いこととする。
		検査精度	<ul style="list-style-type: none"> ・検査員の資格、等級等、グレードを規定し、欠陥寸法に対する検出確率を示す。 ・検査部位の表面状態等、製作状態に関する要求を規定する。 ・JEAGやJIS等と同様に、試験片、校正方法等の具体的な手順を規定する(最低限担保すべき検査精度を規定)。

4. これまでの成果と今後の課題

(1) これまでの成果

これまでの検討では、システム化規格での検査に関する部分基準の体系化を目的として、①現行の規格・基準の調査・整理、②リスク評価手法の調査を行い、これらの結果に基づいて検査に関する部分基準の体系検討を行った。また、部分基準の体系検討に反映することを目的に、検査に関する技術動向の調査として、非破壊検査技術の調査及びモニタリング技術の調査を行った。得られた成果は、以下の通りである。

- ① 現行の規格・基準体系は、設計、検査等が独立に規定されており、各基準間に共通指標がないため、システム化規格での裕度交換による合理化効果は限られるものと考えられる。裕度交換には、共通指標の導入が必要である。
- ② 裕度交換のための共通指標の1つであるリスクについて、リスクに対する検査の影響は大きく、特に、検査精度及び検査間隔によって1~2桁程度破損確率を向上できると考えられる。
- ③ 検査精度の高度化により破損確率の低減が期待できるが、ISIで広く用いられる超音波探傷法では検査精度は使用条件によって異なり、検出限界の推定は困難であるが、き裂深さ1~2mm程度は見通せるものと考えられる。
- ④ モニタリング技術としては、疲労モニタ、き裂モニタ等があり、これらの導入により検査項目の削減や機器の交換時期の適正化等の合理化が期待できる。導入に当たっては、測定精度等を明確にする必要がある。
- ⑤ 上記の調査結果に基づき、システム化規格での規格化項目を摘出するとともに、システム化規格で考慮する範囲及び検査に関する部分基準の枠組みを暫定した。

(2) 今後の課題

これまでの検討結果に基づき、今後の検討課題として以下が考えられる。なお、下記においては、裕度交換と直接関係する項目を(A)、直接関係しない項目を(B)として区分している。

- ① 実用高速炉での検査の考え方の整理(B);システム化規格の体系検討

これまでの検討結果に基づき、実用高速炉での検査の考え方を整理する必要がある。特に、現行規格・基準との整合性や妥当性を考慮するとともに、他の部分基準との裕度交換を想定した考え方の構築が必要である。

② 規格化項目の選定 (B) ; システム化規格の体系検討)

これまでの検討では、リスクに対して影響を与える項目を規格化項目として摘出しているが、今後システム化規格全体の方針を踏まえて、必要な項目を選定する必要がある。

③ 裕度の定量化 (A) ; 裕度交換手法の検討)

検査に関する部分基準での規格化項目を摘出したが、裕度交換を行うには各規格化項目をリスク評価等に取り込むための定量化を行う必要がある。また、裕度交換手法について検討し、定量化の方針についても検討が必要である。

④ 裕度交換手法の具体化 (A) ; 裕度交換手法の検討)

検査に関する項目は、裕度交換に寄与すると考えられるが、現行規格・基準は独立して設けられていたため、設計裕度への反映方法が確立されていない。よって、③とも関連して、検査を考慮した裕度交換手法を具体化していく必要がある。

⑤ 検査技術に関する試験 (B) ; 検査技術に関する検討)

高速炉では、機器内に Na があることや温度条件が厳しくなることから、軽水炉用の試験結果等が適用できるとは限らないため、検査精度等への Na や高温の影響を把握する必要がある。

⑥ 破損と検査結果の関連付けに関する試験 (A) ; ISI データの活用方法の検討)

システム化規格では、ISI 結果の検査(評価)への反映等が考えられるが、その評価法を構築するとともに、試験により検査結果と構造物の実挙動を関連付けるための試験が必要と考えられる。例えば、疲労試験により、破損繰返し数と実際の欠陥寸法を求めるとともに、検査による検出寸法の比較を行う。

5. あとがき

高速増殖炉の経済性向上の一環として、製作、検査、運転等に範囲を広げた「システム化規格」の検討が行われている。本検討では、検査に関する部分基準の構築を目的として、基準体系の検討及び検査技術の調査を行い、検査による合理化効果を検討した。今後、調査・検討結果を下に評価方法の具体化等、システム化規格全体の検討を進めることで、競争力のある高速炉概念の構築が期待される。

6. 参考文献

- [3. 1. 3-1] MAEDA N et. al., "Calculation for Risk Informed Inspection and Cost Effective Maintenance Using Probabilistic Fracture Mechanics", SMiRT-15, No. Vol. 10, P X 537-X 544, 1999
- [3. 1. 3-2] WU W-F, "A study of risk-based non-destructive in-service inspection", Nucl. Eng. Des., Vol. 158, No. 2/3, P409-415, 1995
- [3. 1. 3-3] CHAPMAN O J V et. al., "Probability risk ranking", SMiRT-9, No. M, P197-202, 1987
- [3. 1. 3-4] SIMONEN F A et. al., "Risk-based probability of detection criteria for inspection of reactor pressure vessels", ASME PVP, Vol. 241, P101-108, 1992
- [3. 1. 3-5] 樋口 雅久, "米国におけるリスクベース規格・基準の動向", 安全工学 Vol. 39, No. 39, P150-158, 2000
- [3. 1. 3-6] V. Dimitrijevic, F. Ammirato, J. Lance, "Flaw Distributions and Use of ISI data in RPV Integrity Evaluations", PVP, Vol. 251, P75-80, 1993
- [3. 1. 3-7] T. Rosinski, L. Kennedy & R. Foulds, "Development and Application of an LWR Reactor Pressure Vessel-Specific Flaw Distribution", ASTM Spec. Tech. Publ., No. 1175, P223-235, 1994
- [3. 1. 3-8] F. A. Simonen, H. Woo, "Analysis of the Impact of Inservice Inspection Using a Piping Reliability Model", NUREG/CR-3869 PNL-5149, P41, 1984
- [3. 2. 1-1] 武石 雅之, 釣 房太郎, "ナトリウム中体積検査用センサの開発", 日本機械学会関西支部講演会講演論文集, Vol. 255, P35-36, 1997
- [3. 2. 1-2] S. Sasaki, H. Tsuda, & H. Sakamoto, "Ultrasonic examination techniques for steam generator tubing", Fast Breeder Reactor Experience and Trends Vol. 2, P163-175, 1986
- [3. 2. 1-3] M. Palaniappan, R. Subbaratnam, A. Baskaran, & R. Chandramohan, "The role of non-destructive examination in improving the quality for pipeline and pressure vessels-case studies", Int. J Pressure Vessel Piping, Vol. 73, NO. 1, P33-3, 1997
- [3. 2. 1-4] S. J. Mech, J. D. Martin, "Ultrasonic Inspection of Liquid-Metal-Filled Austenitic Stainless Steel Piping Welds", US DOE Rep. 6P, 1982
- [3. 2. 1-5] Rovert A. Day, "Ultrasonic Examination and Inservice Inspection of LMFBR

- Transition Joint Welds", American Society of Mechanical Engineering, 8P, 1983
- [3. 2. 1-6] 古村 一郎, "非破壊検査技術と信頼性向上", 材料信頼性シンポジウム講演論文集, Vol. 15, P34-40, 1997
- [3. 2. 1-7] 平澤 泰治, 古村 一郎, 成瀬 克彦, "フェーズドアレイ UT 法を用いたインコネル溶接部欠陥検査への適用", 超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, Vol. 8, P131-134, 2001
- [3. 2. 1-8] 黒住 保夫, "鋳造ステンレス鋼の超音波探傷検査技術の開発", INSS J, Vol. 7, P159-171, 2000
- [3. 2. 1-9] Y. Tanaka, T. Shirai, M. Kawajiri, "Improvement of Ultrasonic Flaw Detectability for Austenitic Stainless Steel Casting Using Local Forging Technique", 13th Int. Conf. NDE Nucl. Pressure Vessel Ind. 1995, P83-91, 1995
- [3. 2. 1-10] P. Dombret, P. Caussin, P. Rorive, "Developing Ultrasonic for PWR pump bowl In-service Inspection", Nucl. Eng. Int., Vol. 35, No. 430, P42-44, 1990
- [3. 2. 1-11] T. Just, "Flaw Detection Ability of NDT techniques on Clad Surfaces of Reactor Pressure Vessels", Nuclear Engineering and Design, Vol. 151, P531-537, 1994
- [3. 2. 1-12] 「供用期間中の体積試験方法とその欠陥検出性に関する調査(I), (II) 成果報告書」、動力炉・核燃料開発事業団、昭和 60 年
- [3. 2. 2-1] T. L. Chapman et. al., "Application of advanced ultrasonic test techniques coupled with fatigue and leakage monitoring to assure integrity of BWR feedwater nozzles", Nucl. Eng. & Des., Vol. 144, p389-397, 1993
- [3. 2. 2-2] E. Kiss & S. Ranganath, "On-Line Monitoring to Assure Structural Integrity of Nuclear Reactor Components", Int. J. Ves. & Piping, Vol. 34, p3-15, 1988
- [3. 2. 2-3] 前田 宣喜, 山口 篤憲 他, "プローブ型渦電流センサーを用いた原子力発電施設の材料劣化の検出について 一その 1 2 相ステンレス鋼の熱脆化の検出", 非破壊検査代 45 卷 8 号, 1996
- [3. 2. 2-4] 徳永 克己, 青木 孝行 他, "原子力圧力容器用オンライン自動疲労モニタ", 火力原子力発電, Vol. 45, No. 3, p249-256, 1994
- [3. 2. 2-5] 原田 徳治, 二木 昌雄 他, "軽水炉発電設備 運転中診断モニタリング", 火力原子力発電, Vol. 42, No. 5, p595-600, 1991
- [3. 2. 2-6] P. H. Hutton, R. J. Kurtz et. al., "Progress For On-Line Acoustic Emission

Monitoring of Cracks in Reactor Systems", US DOE Rep., NUREG-CP-72-VOL-2, p553-564,
1986

[3. 2. 2-7] 荒 克之, 中島 伸也 他, "原子炉圧力容器劣化測定方の一提案", 電気学会
マグネティックス研究会資料, Vol. MAG-93, No. 216-223, p19-38, 1993