

日本機械学会

「発電用原子力設備規格 維持規格(JSME S NA1-2002)

【事例規格】周方向欠陥に対する許容欠陥角度制限

の代替規定(CC-002)」

に関する技術評価書

平成 19 年 5 月

原子力安全・保安院

独立行政法人 原子力安全基盤機構

目 次

1 . はじめに	1
2 . 検討に当たっての基本的な考え方.....	2
2 . 1 検討の基本方針	2
2 . 2 技術的妥当性に関する検討手順	3
3 . 規格の改訂・策定プロセス	5
4 . 「事例規格」の技術的妥当性	7
4 . 1 事例規格と技術基準との対応	7
4 . 2 「維持規格 2002 年版」との相違点と仕様規格としての適切性	9
4 . 3 公衆審査への対応	19
4 . 4 ASME Code Section XI との対応	20
5 . 技術評価まとめ.....	21
5 . 1 技術的妥当性	21
5 . 2 事例規格に対する代替案.....	21
5 . 3 日本機械学会への要望事項.....	22

1.はじめに

原子力安全・保安院（以下「保安院」という。）は、原子力発電施設の技術基準の性能規定化と学協会規格の活用を進めており、平成18年1月には、性能規定化した改正技術基準を施行し、詳細な仕様規定である告示類を廃止し、学協会規格を技術基準の解釈として活用している。

学協会規格の規制における活用のための仕組みとしては、学協会規格に対して、規制当局として規制上の要求を充足するものか否か等の技術評価を行うこととしており、技術評価における具体的な確認事項及び手続きは以下のとおりである（平成16年6月原子炉安全小委員会資料及び平成17年11月同小委員会資料）。

（保安院による技術評価における確認事項）

規格の策定プロセスが公正、公平、公開を重視したものであること（偏りのないメンバー構成、議事の公開、公衆審査の実施、策定手続きの文書化及び公開など）。

技術基準や法令上の要求事項で要求される性能との項目・範囲において対応が取れること（規制の要求範囲との整合性）。

技術基準や法令上の要求事項で要求される性能を達成するための必要な技術的事項について具体的な手法や仕様が表示されること。

民間規格に示される具体的な手法や仕様について、その技術的妥当性が証明されていること。

（技術評価の手続き）

技術評価の手続きは、関係審議会（原子炉安全小委員会及び関係WG等）の意見を聴いて規制当局が技術評価を行い、その結果を技術評価書としてパブリックコメントを求めた上でとりまとめを行い、公開する。

なお、技術評価手続きの迅速化の観点から、原子炉安全小委員会に事前報告をした上で、関係WGの審議を経てパブリックコメント募集に移行することができ、その場合、原子炉安全小委員会に対しては事後報告することとしている。

本事例規格については、平成17年11月の原子炉安全小委員会において、基準評価WGの審議をもって原子炉安全小委の審議に代えることを報告し、承認を得ている。

その後、行政手続法に基づく審査基準や行政文書により、当該学協会規格の規制上の取り扱いを明確にする仕組みとする。その際には、技術評価の結果に基づき学協会規格の活用の際の条件などを付すことがある。

本技術評価書は上記考えに基づき、保安院と原子力安全基盤機構とが共同で維持規格

2002年版の事例規格「周方向き裂に対する許容き裂角度制限の代替規定(CC-002)」(以下、「事例規格」という。)に関し技術的検討を行い、とりまとめたものである。

2. 検討に当たっての基本的考え方

2.1 検討の基本方針

上述した技術評価における確認事項に基づき検討を行い、具体的には、以下の基本方針によった。

【規格策定プロセスに関する検討】

規格策定プロセスが公正、公平、公開を重視したものであること。

(偏りのないメンバー構成、議事の公開、公衆審査の実施、策定手続きの文書化及び公開など)

策定機関である日本機械学会の規格策定手続要領、事例規格の策定手続きについて、公正、公平、公開を重視したものであるか否かにつき検討を行う。

事例規格は発電用設備規格委員会において同委員会規約に基づいて策定されており、委員会において規約を確認した上で、実際の規格策定プロセス(公衆審査、委員会構成等)を確認する。

【規格の内容に関する検討】

技術基準や法令上の要求事項で要求される性能との項目・範囲において対応が取れること(規制の要求範囲との整合性)。

技術基準や法令上の要求事項で要求される性能を達成するための必要な技術的事項について具体的な手法や仕様が示されること。

民間規格に示される具体的な手法や仕様について、その技術的妥当性が証明されていること。

事例規格については維持規格 2002 年版からの変更点についてその技術的妥当性を検討することにより、上記条件を満たすか否かを判断することとした。

2.2 技術的妥当性に関する検討手順

技術的妥当性の確認事項は下記3項目であり、図1に示す流れに沿って検討を行った。

(1) 技術基準との対応

技術基準や法令上の要求事項で要求される性能との項目・範囲において対応が取れること（規制の要求範囲との整合性）。

(2) 仕様規格としての適切性

民間規格に示される具体的な手法や仕様について、その技術的妥当性が証明されていること。

(3) 技術的妥当性

技術基準や法令上の要求事項で要求される性能を達成するための必要な技術的事項について具体的な手法や仕様が示されていること。

要求事項の技術的妥当性については、事例規格の項目に従って、以下の項目について検討を行った。

○補修を行わない配管

- ・角度に応じて許容き裂深さを規定すること。（維持規格2002年版において本制限を規定した背景（解説）ASMEにおける規定を参照しつつ、角度を一律に60度に制限するのではなく、角度に応じて許容き裂深さを規定することの技術的妥当性を確認する。）
- ・管の最小厚さの要件
- ・事例規格に規定する破壊評価法による許容基準を満足すること。（周方向き裂が管の圧縮応力側に及ぶ場合（ $\theta + \beta > \pi$ ）の評価法について技術的妥当性を確認する。）

○WOL補修を行う配管

WOL補修については、事業者側からの照会に基づき、保安院として構造健全性を有するための具体的な仕様を明らかにしており（平成16年6月原子炉安全小委員会）当該考え方と整合がとれていること。

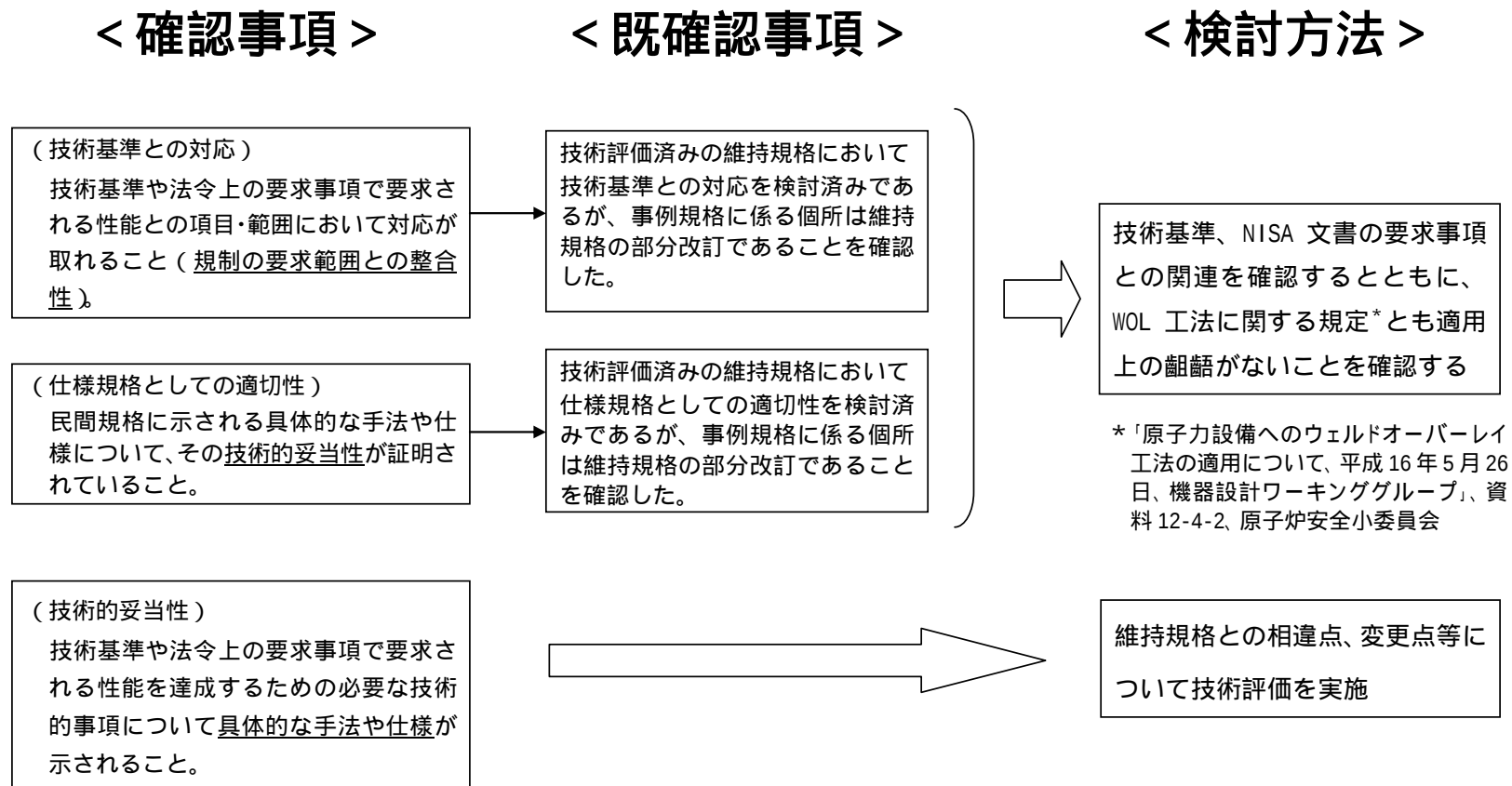


図 1 技術的妥当性の検討フロー

3. 規格の改訂・策定プロセス

本事例規格は、日本機械学会に設置された発電用設備規格委員会、同原子力専門委員会及びその下部の維持規格分科会により、代替規定案が審議され、公衆審査手続きを経て策定されている。

- ・維持規格分科会（2004年6月～2005年9月）：計12回審議
2004年 6/24、8/11、9/6、10/15、11/24（5回）
2005年 1/25、2/17、4/7、5/23、6/22、7/26、9/1（7回）
- ・原子力専門委員会（2005年3月～2005年8月）：実質3回審議
2005/3/8 （第37回） 規格案審議
2005/5/27 （第38回） 2次投票が賛成多数で承認
2005/8/25 （第39回） 規格案が投票により可決
- ・発電用設備規格委員会（2005年3月～2005年9月）：実質3回審議
2005/3/16 （第32回） 規格案審議
2005/6/8 （第33回） 投票結果への対応
2005/9/7 （第34回） コメントへの対応審議。反対票なしで可決。
- ・公衆審査 2005/9/14～2005/11/24 2ヶ月 意見2件

（日本機械学会規約）

日本機械学会における規格策定手続きは、発電用設備規格委員会規約、同専門委員会運営規約に規定されており、公正、公平、公開の観点から以下の規定が設けられている。

・委員会の構成（ともに規約第3条）

発電用設備規格委員会及び同専門委員会は委員30名以内（専門委員会は25名以内）で構成し、委員は、特定の業種から最低5業種が含まれ、かつ同一業種からの委員が委員総数の3分の1以下と規定している。ただし、専門委員会委員長等については例外とされている。

なお、分科会にあっては、委員会構成に関する要件はない。

・決議の手順（ともに規約第8条）

規格の制定、改訂、廃止に当たっては、書面投票が要求され、具体的な手順が規定されている。

投票成立＝ 委員総数の5分の4以上の投票

投票期限＝ 原則30日以内（60日まで延長可能）

1次投票による成立＝ 意見付反対票がなく、投票数の3分の2以上の賛成票

2次投票による成立＝ 反対意見が取り消された場合 又は 挙手による出席者数3分の2以上の承認のもと、2次投票を行い、2次投票の結果3分の2

以上の賛成票

なお、分科会にあつては、委員総数の2分の1以上の出席をもって成立し、決議は挙手により出席委員の過半数の賛成により可決となる。

・公開性

委員会の開催日時はあらかじめ公表し、オブザーバの参加を認める。（ともに第7条）

審議内容は、発電用設備規格委員会は委員会議事録として公表（第8条）専門委員会等は、追跡可能な様式で記録し要求がある場合にこれを公表（第8条）する。

発電用設備規格委員会は、規格の制定等に当たって、2ヶ月間の公衆審査を実施する。一般公衆から意見があった場合には、文書等によりその対応を含め公表し、提案者に委員会の対応を連絡するとともに、審議結果を文書等により公開する。（第8条）

（委員会構成・審議内容等の公開）

・委員会構成

	維持規格分科会	原子力専門委	発電用設備規格委
原子炉製造メーカー	3	4	4
電気事業	4	2	5
建設業	0	1	1
鉄鋼・非鉄業	0	0	2
関係官庁	1	2	3
学識経験者	4	6	8
学術研究機関	5	6	8
機器製造業	0	1	0
合計	17	22	31

・審議内容等の公開

公衆審査を2005年9月14日から2005年11月24日まで実施している。

審議内容については、日本機械学会ホームページにおいて、上記の各委員会の審議内容が公開されていることが確認された。

（公衆審査対応）

公衆審査では2件の意見受け付けがあり、修正は行っていないが、当該質問への回答をホームページで公開している（回答内容の妥当性は技術的妥当性の中で検討）。

（策定プロセスの評価）

事例規格策定プロセスについては、規約により手続き等が明確化されており、また、規約に基づき、委員会構成・公開等が重視されていることが確認された。

4. 「事例規格」の技術的妥当性

4. 1 事例規格と技術基準との対応

原子力発電施設の技術基準（省令 62 号）第 9 条の 2 において、き裂等の欠陥がある場合に以下の要求事項を規定している。

第 9 条の 2（使用中のき裂等による破壊の防止）

1. 使用中のクラス 1 機器、クラス 1 支持構造物、クラス 2 機器、クラス 2 支持構造物、クラス 3 機器、クラス 4 管、原子炉格納容器、原子炉格納容器支持構造物及び炉心支持構造物には、その破壊を引き起こすき裂その他の欠陥があってはならない。
2. 使用中のクラス 1 機器の耐圧部分には、その耐圧部分を貫通するき裂その他の欠陥があってはならない。

維持規格 2002 年版は、保安院が示す技術基準第 9 条の 2 の解釈の中で引用されており、具体的には、クラス 1 機器のき裂評価を行った際の許容基準として位置付けられている。

維持規格 2002 年版では、き裂評価方法、許容基準に加え、以下の制限を規定している。

- a. き裂深さが管の厚さの比で 0.75 以下であること。
- b. き裂角度が 60 度以下であること。ただし、妥当性が示される場合は本制限を除いてもよい。

今回技術評価する事例規格は、管の許容き裂角度の制限に関する代替規定であり、かつ、き裂角度に応じて許容されるき裂深さが定量的に規定されていることから、技術基準との対応が確認された。

（事例規格と技術基準との対応は図 2 のとおり）

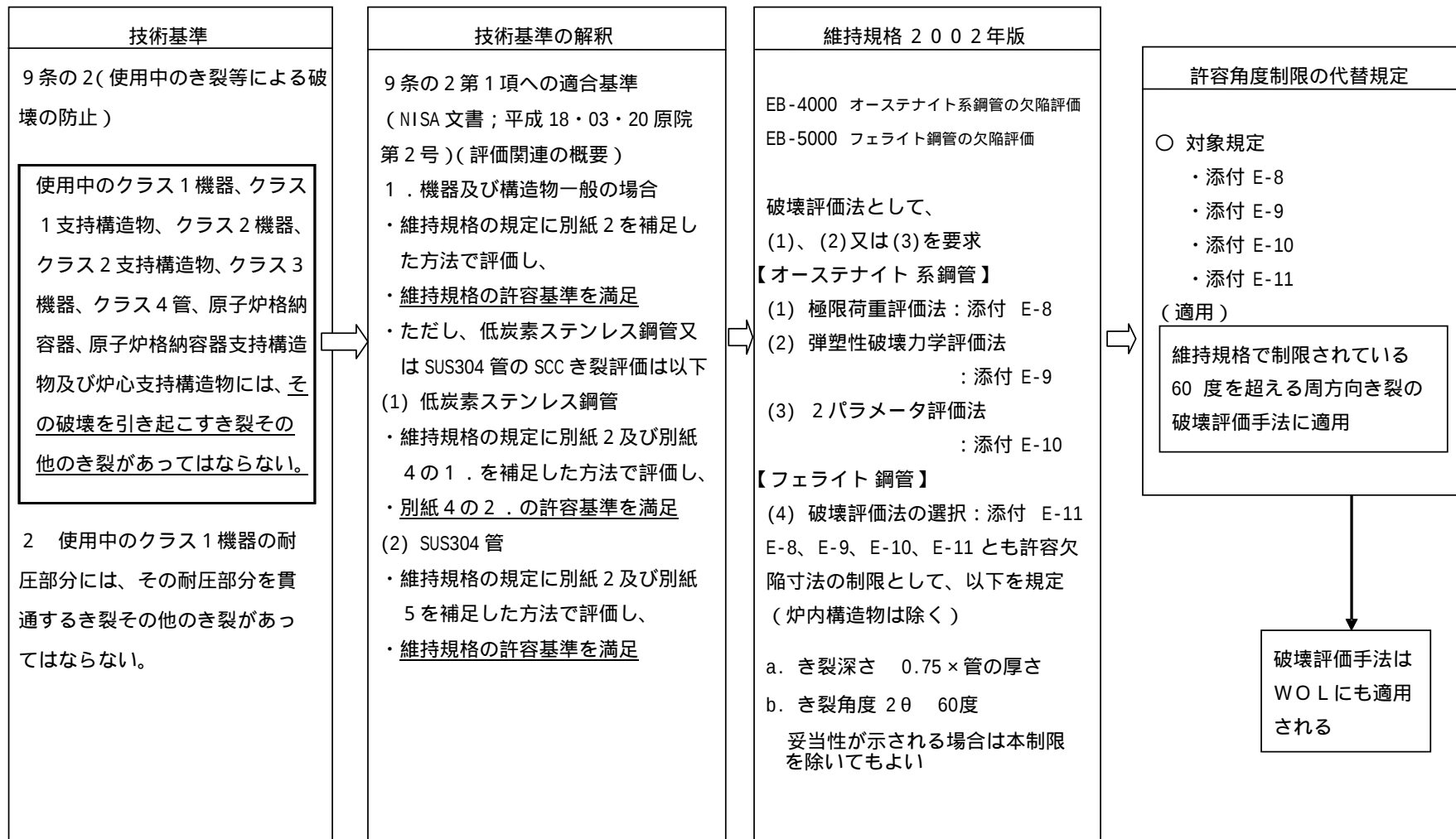


図2 事例規格の技術基準との対応

4.2 「維持規格 2002 年版」との相違点と仕様規格としての適切性

維持規格 2002 年版はクラス 1 配管の周方向許容き裂角度を 60 度以下に制限しているものであるのに対し、事例規格はこの角度制限を撤廃し、周方向き裂角度に応じた許容き裂深さ制限を規定するものである。

維持規格 2002 年版との相違点について、表 1 の項目に分類しその技術的妥当性について検討した。

表 1 「事例規格」と「維持規格 2002 年版」との相違点

項目		維持規格 2002 年版	事例規格	技術評価
4.2.1 LBB (崩壊前の漏えい検出) を考慮しないことについて		LBB を考慮 漏えい曲げモーメントが破断曲げモーメントを上回るよう考慮	LBB を考慮していない	○
4.2.2 許容き裂深さの制限の付加について		以下を前提に崩壊を考慮 ・許容応力を配管の破壊強度とする。 ・角度制限と許容限度上限の 75 % のき裂深さを想定	以下を前提に崩壊を考慮 ・許容応力を同一系統のエルボ又はティーの崩壊強度とする ・制限した角度に応じて、き裂深さの上限を規定	×
4.2.3 適用可能な管厚さ		規定なし	超音波探傷方法の測定限界、PD 制度整備までの測定信頼性を考慮し、適用可能な管厚さを規定	○
4.2.4 周方向き裂評価手法の見直し	4.2.4.1 極限荷重評価法	$(\theta + \beta) < \pi$ のみ	$(\theta + \beta) > \pi$ にも規定き裂面の一部が、圧縮になる評価式を追加	○
	4.2.4.2 弾塑性破壊力学評価法	$(\theta + \beta) < \pi$ のみ ・ 60 度以下での Z 係数	$(\theta + \beta) > \pi$ にも規定 ・ き裂面の一部が、圧縮になる評価式を追加 ・ 60 度を超える場合の Z 係数の拡張	○
	4.2.4.3 2 パラメータ評価法	$(\theta + \beta) < \pi$ のみ	$(\theta + \beta) > \pi$ にも規定き裂面の一部が、圧縮になる評価式を追加	○
	4.2.4.4 破壊評価法の選択	$(\theta + \beta) < \pi$ のみ	$(\theta + \beta) > \pi$ にも規定き裂面の一部が、圧縮になる評価式を追加	○
4.2.5 WOL	WOL 適用時の条件	規定なし	WOL 補修を行う配管への適用に当たっての留意事項を規定	○

4.2.1 LBB（崩壊前の漏えい検出）を考慮しないことについて

維持規格 2002 年版では、角度制限を 60 度に設定する理由として、万一の場合に LBB が成立することを解説に記載している。

角度制限を規定した維持規格 2002 年版では、米国電力研究所等の文献を参照し、ひび割れが長い（角度が大きい）場合にはひび割れも深くなると想定し、(a) 漏えい荷重が崩壊荷重を下回るよう、また、(b) 実機に適用されている配管が崩壊する荷重に対しても健全性を維持するよう、極めて保守的な制限を求めたものと考えられる。

技術基準では、耐圧機能を有するクラス 1 機器に対しては、想定されていない漏えい（ポンプのシール部等の管理された漏えいを除く）を生じるき裂の貫通を認めておらず、破断（崩壊）も認めていない。また、LBB は別途 LBB に関する要求により対応している。

したがって、事例規格において LBB を要求事項としないことは配管以外の機器設計要件とも整合がとれており、技術的に妥当と判断した。

4.2.2 許容き裂深さの制限の付加について

管周方向許容き裂の角度制限を撤廃するために、許容き裂の深さをき裂角度に応じて制限する事例規格の代替案を検討した。

(1) 日本機械学会提案の事例規格

事例規格はその解説に示される考え方に基づき、実機に適用される配管の代表部位（エルボ又はティー）が崩壊しないよう、き裂等の欠陥の深さと長さ（角度）を組み合わせる制限することとしている。

事例規格では、欠陥評価を行う部位に対して、それと異なる部位であるエルボ又はティーの崩壊荷重を適用していることから、規格自体が判りにくくなっており、規格としての説明性に難点を有している。

また、事例規格を設けたことにより維持規格 2002 年版は、欠陥の周方向角度 60 度を境に許容欠陥深さ評価の考え方が異なり、規格全体としての整合性を欠くこととなっている。

以上を踏まえ、当該事例規格については技術的に適切性が十分ではないと判断し、これに代わる代替案を検討することとした。

(2) 事例規格代替案

事例規格代替案では維持規格 2002 年版の角度制限の代わりに許容き裂深さで制限する考え方を取り入れるが、想定する応力を配管代表部位（エルボ及びティー）の崩壊モーメントに基づくのではなく、維持規格 2002 年版で許容される周方向角度 60 度、深さ 75 % のき裂を有する部位における塑性崩壊を考慮した許容曲げ応力を用い、全周欠陥までの亀裂に対する許容深さの制限を設けることとした。

これにより求まる許容き裂深さ制限は、き裂角度が 60 度を超える場合でも 60 度の角度制限を課している維持規格と同等の保守性が与えられる。

この事例規格代替案によるき裂角度と許容き裂深さ制限の関係を模式的に図 3 に示す。

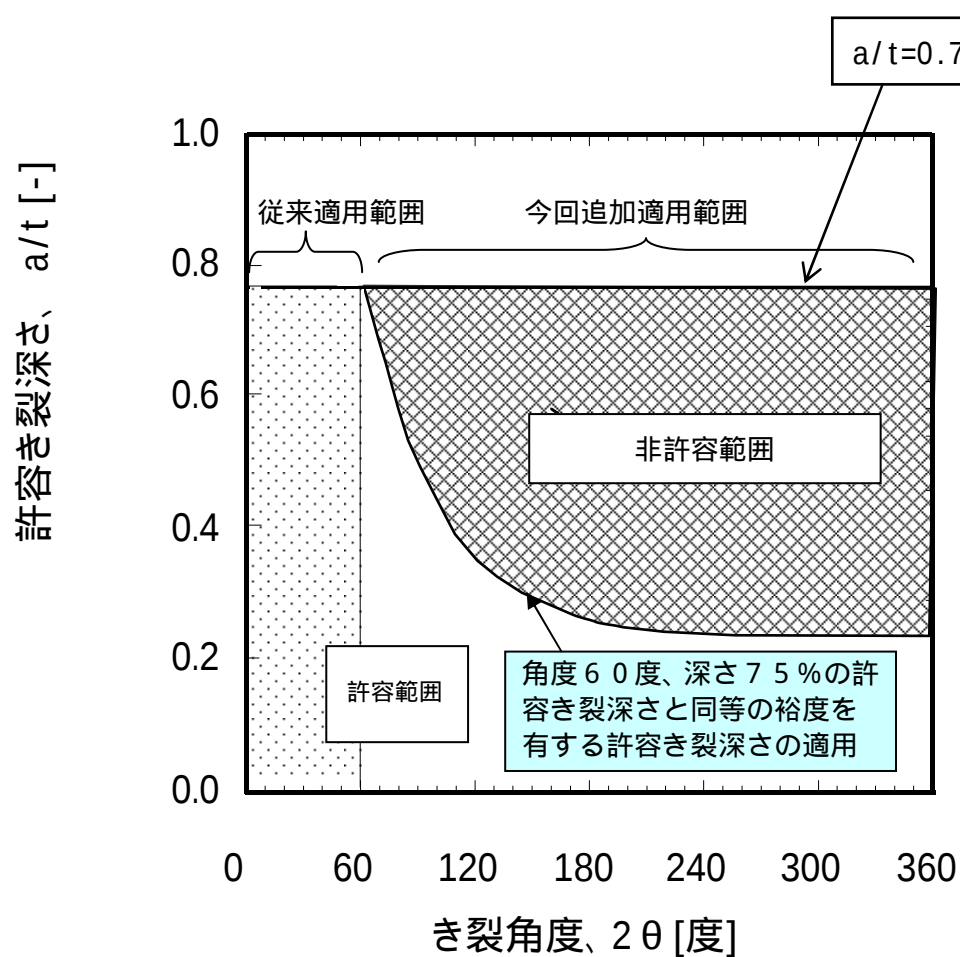


図 3 き裂角度が 60 度を超える場合の深さ制限

許容曲げ応力 S_c と許容き裂深さ a/t の関係は(1)式のように表される。

$$S_c = \frac{1}{SF} \left(\frac{P'_b}{Z} - P_e \right) - P_m \left(1 - \frac{1}{Z \cdot SF} \right)$$

$$\beta \leq \pi - \theta \quad \text{の場合} \quad \left\{ \begin{array}{l} P'_b = \frac{2\sigma_f}{\pi} \left(2\sin\beta - \frac{a}{t} \sin\theta \right) \\ \beta = \frac{1}{2} \left(\pi - \frac{a}{t} \theta - \frac{P_m}{\sigma_f} \pi \right) \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\beta > \pi - \theta \quad \text{の場合} \quad \left\{ \begin{array}{l} P'_b = \frac{2\sigma_f}{\pi} \left(2 - \frac{a}{t} \right) \sin\beta \\ \beta = \frac{\pi}{2 - \frac{a}{t}} \left(1 - \frac{a}{t} - \frac{P_m}{\sigma_f} \right) \end{array} \right.$$

ここで、 SF は安全率、 P'_b は塑性崩壊時の曲げ応力、 P_e は熱膨張応力、 P_m は膜応力、 σ_f は流動応力、 Z は Z 係数、 a はき裂深さ、 t は板厚、 θ はき裂の半角度である。

今回の代替規定では(2)式に示すように、これまで許容されていた角度 $2\theta = 60$ 度、 $a/t = 0.75$ とした場合の許容曲げ応力を、 60 度を超えるき裂角度に対しても同様に適用し、許容き裂深さ制限 a/t を定めることとした。

$$S_c = \frac{1}{SF} \left(\frac{(P'_b)_0}{Z} - P_e \right) - P_m \left(1 - \frac{1}{Z \cdot SF} \right) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{(P'_b)_0}{Z} : 2\theta = 60 \text{ 度の場合} \\ \frac{(P'_b)}{Z} : 2\theta > 60 \text{ 度の場合} \end{array} \right. \quad (2)$$

$$= \frac{1}{SF} \left(\frac{(P'_b)}{Z} - P_e \right) - P_m \left(1 - \frac{1}{Z \cdot SF} \right) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{(P'_b)_0}{Z} : 2\theta = 60 \text{ 度の場合} \\ \frac{(P'_b)}{Z} : 2\theta > 60 \text{ 度の場合} \end{array} \right.$$

ここで、 P_b' は式(1)におけるものと同じであり、このうち $(P_b')_0$ は角度 $2\theta = 60$ 度、 $a/t = 0.75$ のき裂を有する部位に対する値、 (P_b') は角度 $2\theta = 60$ 度を超えるき裂を有する部位に対する値である。

これにより、維持規格 2002 年版と同等の保守性を本代替案に持たせることができる。

4.2.3 適用可能な管厚さ

事例規格で適用可能な管厚さを 8.6 mm 以上と規定している。これは、超音波探傷試験（UT）による検出限界の上限値 2.0 mm に、UT のき裂寸法測定精度として、ステンレス鋼に対するデータの誤差 4.4 mm を考慮したものであり、さらに、き裂深さ制限の 75 % を考慮し、 $(2.0 + 4.4) / 75 \% = 8.6 \text{ mm}$ として算定したものである（図 4）。

維持規格の破壊評価ではき裂寸法として UT の測定値を使用していることから、データの誤差の影響が大きい薄肉管への適用に対して、管厚さに一定の要件を設けたものであり、妥当である。

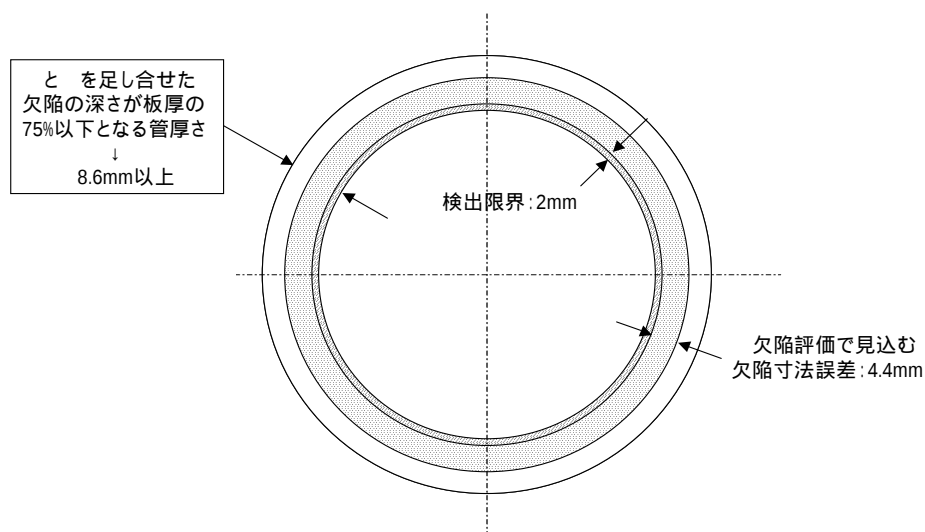


図 4 配管厚さの適用範囲

4.2.4 周方向き裂の評価手法の見直し

維持規格 2002 年版には EB-4000 オーステナイト系鋼管の欠陥評価規定及び EB-5000 フェライト鋼管の欠陥評価規定がある。それぞれの欠陥評価規定の中の破壊評価法では以下に示す添付の規定が引用されている。なお、破壊評価法の選択の添付はフェライト鋼管のための規定である。これらの添付の規定に記載されている評価式は、いずれも角度制限を前提にき裂が管の引張り側に生じることを前提としている。角度制限を撤廃すれば全周き裂までを評価することが必要であり、き裂が圧縮側にわたり存在する場合の評価式も合わせて事例規格では規定している。

○破壊評価法の対象規定

極限荷重評価法	: 添付 E-8
弾塑性破壊力学評価法	: 添付 E-9
2 パラメータ評価法	: 添付 E-10
破壊評価法の選択	: 添付 E-11

4.2.4.1 添付 E-8「極限荷重評価法」

維持規格 2002 年版では、 $(\theta + \beta) = \pi$ であるき裂形状で、管の引張り側に位置する周方向き裂の評価式を規定しているが、事例規格では角度制限が廃止され、き裂が管の圧縮側にわたる場合も評価の対象となることから、 $(\theta + \beta) > \pi$ の場合の評価式を追加規定している。

本見直しは、図 5 のような表面き裂を有する管において、き裂角度が大きくき裂が管の圧縮側にわたる場合($\theta + \beta > \pi$)に、

$$\text{軸力の釣り合い} \quad \dots \quad (\pi - \beta)(t - a)R\sigma_0 - \beta Rt\sigma_0 = \frac{\pi}{2} R_i^2 p$$

$$\text{モーメントの釣り合い} \quad \dots \quad M_{cr} = 2R^2(t - a)\sigma_0 \int_0^\beta \cos \phi d\phi - 2R^2 t \sigma_0 \int_\beta^\pi \cos \phi d\phi$$

の式から塑性崩壊応力を求めたものであり技術的に妥当と判断した。

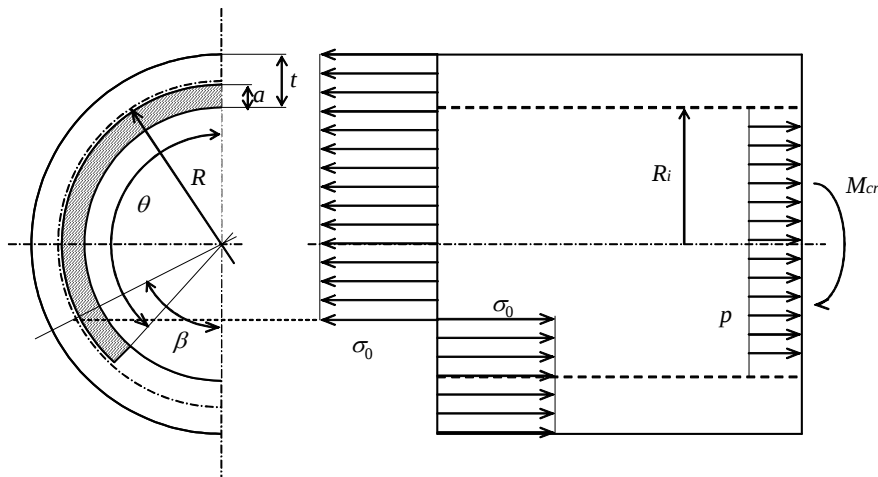


図 5 周方向表面き裂を有する管の塑性崩壊

なお、ASME Code Section XI Article C-5000 にも本評価法でき裂が管の周方向断面の圧縮側にわたる場合の評価式を規定しており、その評価式が同一であることを確認した。

4.2.4.2 添付 E-9「弾塑性破壊力学評価法」

維持規格では、弾塑性破壊力学評価法として、極限荷重評価法において荷重割り増し係数（Z 係数）を考慮することにより極限荷重評価法を適用できるとしている。

(a) オーステナイト系ステンレス鋼管

a-1 TIG(ティグ溶接) 及び SMAW (被覆アーク溶接)

a-2 SAW (サブマージアーク溶接) 及びフェライト量 20%未満の鋳造品

維持規格では、平均半径と管厚さの比 $R/t = 10$ の管において、き裂角度 0 度から 60 度まではき裂角度の増加にともない Z 係数が増加することから、TIG, SMAW, SAW, 鋳造品毎にそれぞれ 60 度における Z 係数を採用している。なお、TIG と SMAW、SAW と鋳鋼についてはそれぞれほぼ同じ値となることから、上記の a-1、a-2 の二つに分類し算定式を規定している。

事例規格においては、き裂角度が 60 度を上回ることを想定し、Z 係数が最も大きくなる角度（き裂角度 108 度）の Z 係数と 60 度の Z 係数の比を用い、同比を維持規格の評価式に乗ずることにより求めている。また、 R/t についても複数のケースについて分析を行い、 $R/t = 10$ において Z 係数が最も大きくなることを確認している（図 6）。

以上より、き裂角度によらず保守性を有するよう Z 係数の評価式を設定しており、技術的に妥当である。

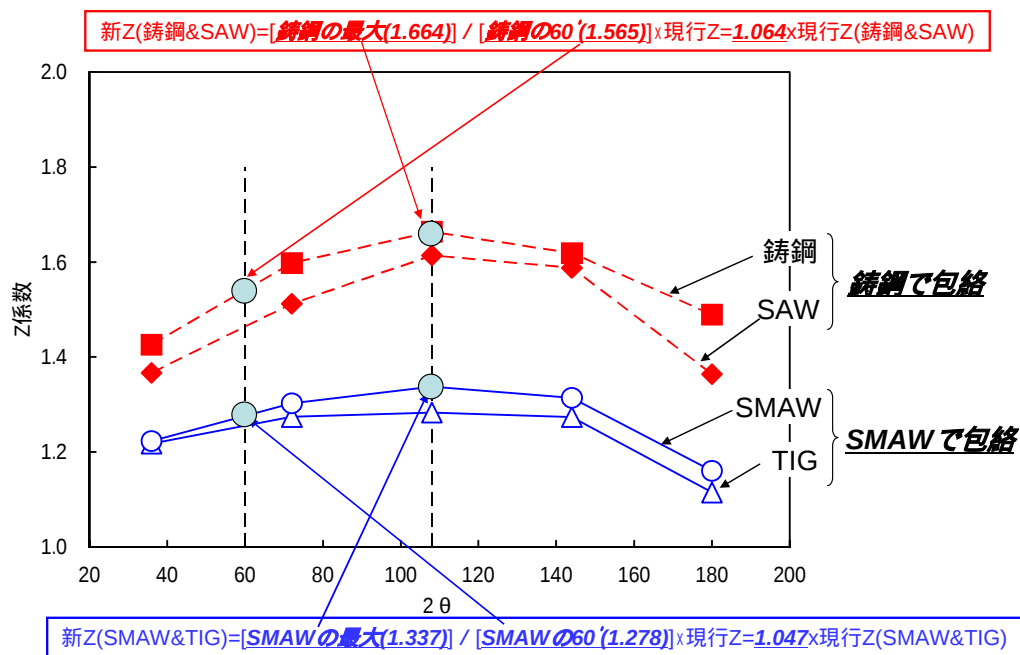


図6 オーステナイト系ステンレス鋼のZ係数 [R/t = 10.0(10B)]

(b) フェライト鋼管

維持規格のフェライト鋼管のZ係数の求め方は、オーステナイト系ステンレス鋼管と同様であり、き裂角度、R/tの二つを変数としZ係数の変化を分析し、Z係数が最大となる場合の数値を適用している。この場合、R/t= 6、き裂角度が60度でZ係数が最大となるとして評価式を規定している。

事例規格においては、同様にき裂角度及び R/t を変数としZ係数が最大となる点を採用しており、具体的には、R/t= 6、き裂角度が120度のときのZ係数を採用し、120度と60度の場合のZ係数の比を維持規格のZ係数評価式に乗ずることにより、Z係数を求めている(図7)。

き裂角度によらず保守性を有するようZ係数の評価式を設定しており、技術的に妥当である。

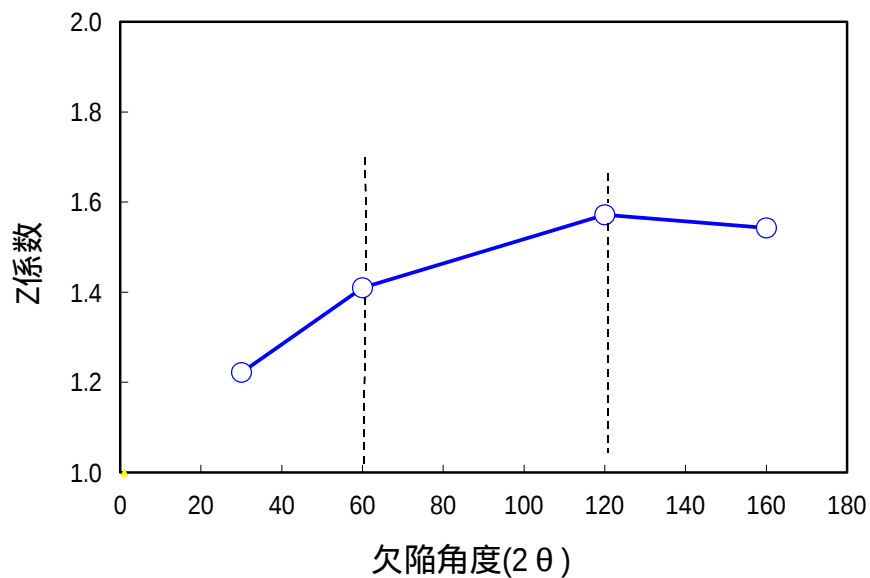


図7 フェライト鋼のZ係数 [30B]

4.2.4.3 添付 E-10「2パラメータ評価法」

4.2.4.1 で評価した極限荷重評価法と同様に、き裂が管周方向断面の圧縮応力側にわたる場合の評価式を規定しており、評価式の見直しに当たって、管の軸力と曲げモーメントの釣り合いの式から求めたことを確認した。

4.2.4.4 添付 E-11 破壊評価法の選択

フェライト鋼管に適用する破壊評価法の選択に当たっての評価手法として、4.2.3.1 及び 4.2.4.3 と同様の見直しを行っており、き裂が管周方向断面の圧縮応力側にわたる場合の評価式を規定していることを確認した。

4.2.5 WOL適用時の条件

【WOLについて】

・技術的内容

WOL工法は、SCCが発生した配管等の周溶接継手に対して、SCC進展の可能性が極めて低い溶接金属（フェライト含有量の高い低炭素オーステナイト系ステンレス鋼溶接材料）を配管の外周にわたって複数層肉盛することによって補修し、供用期間中のき裂進展による漏えいの発生や配管の破断を防ぐことを目的とした工法である。

・保安院としての取組み

WOL補修が必要となった場合の補修基準については学協会規格が未整備であったため、これが制定され国の基準となるまでの間、現行法令に基づく基準への適合性につき専門家の審議も踏まえて、その考え方をとりまとめたところである。（平成16年6月原子炉安全小委員会）

【WOL適用時の条件】

WOL補修では、原配管部に構造強度を期待せず、WOL施工部よりフェライト量減損やき裂のWOL施工部の存在により構造強度が期待できない部分を除いた部分（以下「WOL構造強度部」という）において（図8）構造健全性が確保されることとしている。

日本機械学会「発電用原子力設備規格維持規格」及びASME Code Section XIでは、配管に発生した許容き裂深さは、管厚さの75%以下であることが規定されており、機器設計WG報告書では、WOL施工後についても、原配管を含む全厚さの75%以下になるよう設計することとしている。一方、事例規格においても「欠陥断面における強度上有効な補強部材厚さから評価期間中のき裂進展量を差し引いた厚さが、原配管を含む全厚さの25%以上である場合」と規定していることと合致するものであり、技術的に妥当であると判断した。

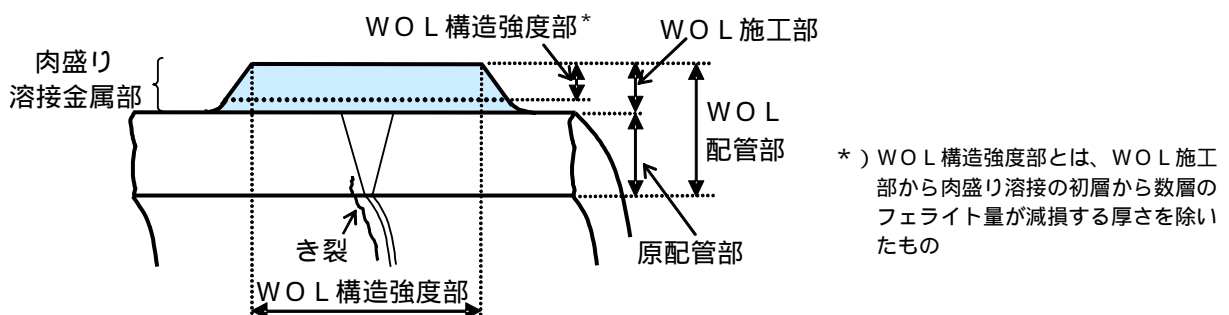


図8 WOL配管部の軸断面

4.3 公衆審査への対応

本事例規格案に対する公衆審査は、前述したとおり2ヶ月間行われており、表3に示すとおり公衆審査における意見に対して、日本機械学会としての考え方がホームページを通じて明確化されている。

同表欄1の回答については、日本機械学会の維持規格との考え方の整合性を確認したものであり、また、本技術評価の中でも検討したものであることを確認した。

同表欄2の回答については、WOL補修後の検査手法であるが、平成16年6月炉小委同様に、今後の検討課題として位置付けることとする。

表3 日本機械学会による公衆審査時の意見への回答

	意見概要	回答概要
1	(補修を行わない配管の本規定適用限界厚さについて) - 補修を行わない配管において、「管の厚さが8.6mm以上であること。」と規定している、これはUTのき裂寸法測定精度から適用配管厚さを規定したものであるが、適用範囲は本来、強度から規定すべきものである。 - UTの精度から決めるのであれば、次のとおりとすべき。 「測定精度 4.4mm 及び検出限界 2.0mm の合計を丸めた 7mm に安全率 50% を考慮した、10.5mm が管厚の 75% となる厚さ 14mm 以上の管を対象とする。」	事例規格では PD 制度が導入されるまでの暫定措置として、検出限界深さ 2mm と SCC き裂の評価で考慮するき裂深さの上乗せ値 4.4mm から、これらを足し合せた 6.4mm が配管厚さの 75% を満足する 8.6mm を適用限界厚さとしている。 維持規格では、ASME Sec. XI と同様に欠陥評価の安全率はき裂寸法ではなく、き裂の安定性評価を行う荷重に対して考慮しており、提案の内容は維持規格との齟齬が生じることから原案どおりとさせていただきます。
2	(WOL工法における構造強度確保の考え方) 「WOL施工後の供用期間中に UT 検査によるき裂進展の監視を義務付けている」としているが、WOL後の UT に関しては実証されていない。また、機器設計WGでは、ASME Sec. XI App. Sup.11 の規定を参考として、UT を手法を適切に設定することにより適用可能としているが、これは UT の性能実証方法を規定するものである。従って、定期的な監視を担保するためには、具体的な検査の方法を明示しておく必要がある。	WOL工法に関しては、事例規格に示した2つの参考* 文献により評価、補修が可能と考える。 補修後の検査に関しては、今後整備を行う方向で準備を進めている。 * [1] 「原子炉再循環系配管の補修技術 (ウェルドオーバーレイ (WOL) 工法) の検討について、平成 16 年 6 月 1 日、原子力安全・保安院」資料 12-4-1、原子炉安全小委員会 [2] 「原子力設備へのウェルドオーバーレイ工法の適用について、平成 16 年 5 月 26 日、機器設計ワーキンググループ」資料 12-4-2、原子炉安全小委員会

4.4 ASME Code Section XI との対応

ASME Code Section XI の管のき裂評価規定との比較を表 4 に示す。

ASME Code Section XI では破壊評価法については維持規格の管のき裂評価規定と同様の評価法を規定している。ASME Code Section XI では管についてき裂の管厚さ貫通を考慮し、許容き裂深さを管厚さの 75 % まで制限しているのに対して、維持規格及び本事例規格のような周方向き裂の角度制限（角度に応じた管厚さの制限）は規定していない。

表 4 維持規格に基づく破壊評価法、事例規格、ASME の比較

	破壊評価法	周方向欠陥角度制限	欠陥深さ制限
維持規格	・添付 E-8 極限荷重評価法 ・添付 E-9 弾塑性破壊力学評価法 ・添付 E-10 2パラメータ評価法	許容欠陥寸法の限界 b. 欠陥角度 許容欠陥角度は、 2θ 60° とする。ただし、妥当性が示される場合は本制限を除いてもよい。	許容欠陥寸法の限界 a. 欠陥深さ 許容欠陥深さは、 $a=0.75t$ 以下とする。 a が $0.75t$ を超える場合は $a=0.75t$ とする。ここで、 t は管の厚さである。
事例規格	維持規格の評価法に欠陥が圧縮側に及ぶ $(\theta + \beta > \pi)$ 周方向欠陥の式を追加	欠陥角度に応じて欠陥深さを制限	(1) 補修を行わない配管 ・き裂部の破壊強度がエルボやティの塑性崩壊強度以上 ・許容欠陥深さが管厚さの 75 % 以下 (2) WOLを行う配管 ・許容欠陥深さが、原配管に肉盛り厚さを加えた全厚さの 25 % 以上
ASME Sec.XI 2004	以下のとおり、維持規格と同様な評価法を規定 NONMANDATORY APPENDIX C ・Article C-5000 (極限荷重評価法) FLAW EVALUATIONS FOR FULLY-PLASTIC FRACTURE USING LIMIT LOAD CRITERIA ・Article C-6000 (弾塑性破壊力学評価法) FLAW EVALUATIONS FOR DUCTILE FRACTURE USING EPFM CRITERIA ・Article C-7000 (線形破壊力学評価法) FLAW EVALUATIONS FOR NONDUCTILE FRACTURE USING LEFM CRITERIA	付帯条件なし	以下のとおり、管厚の 75 % 以下を規定 IWB-3643 Evaluation Procedures and Acceptance Criteria Based on Use of A Failure Assessment Diagram 「... <u>Flaws with depth greater than 75% of the wall thickness are unacceptable.</u> ...」

5 . 技術評価まとめ

5 . 1 技術的妥当性

本技術評価においては、維持規格 2002 年版との対比を通じて技術基準（第 9 条の 2）との対応を確認するとともに、その規定内容から事例規格の配管系に着目した許容き裂の制限に関する部分を除き仕様規定としての適切性を確認した。

また、維持規格からの変更部分の技術的妥当性について、破壊評価法(極限荷重評価法等)に関する前提条件（荷重やき裂長さの想定の方）き裂角度の拡大に伴う管のき裂を含む断面の圧縮を考慮した破壊評価法等の見直し、必要管厚さ、さらに、WOL 補修にも適用できることを確認した。さらに、公衆審査時の意見への対応、ASME との比較も併せて行い、配管系に着目した許容き裂の制限に関する部分を除き本事例規格の技術的妥当性を確認した。

5 . 2 事例規格に対する代替案

本体である維持規格において整合的な配管欠陥評価規定が整備され、保安院により技術評価されるまでは、以下の等価式から求まる許容き裂深さ a/t で許容き裂深さを制限する要件を課すものとする。

$$S_c = \frac{1}{SF} \left(\frac{P'_b}{Z} - P_e \right) - P_m \left(1 - \frac{1}{Z \cdot SF} \right)$$
$$\beta \leq \pi - \theta \quad \text{の場合} \quad \begin{cases} P'_b = \frac{2\sigma_f}{\pi} \left(2\sin\beta - \frac{a}{t}\sin\theta \right) \\ \beta = \frac{1}{2} \left(\pi - \frac{a}{t}\theta - \frac{P_m}{\sigma_f}\pi \right) \end{cases} \quad (1)$$
$$\beta > \pi - \theta \quad \text{の場合} \quad \begin{cases} P'_b = \frac{2\sigma_f}{\pi} \left(2 - \frac{a}{t} \right) \sin\beta \\ \beta = \frac{\pi}{2 - \frac{a}{t}} \left(1 - \frac{a}{t} - \frac{P_m}{\sigma_f} \right) \end{cases}$$

ここで、 SF は安全率、 P'_b は塑性崩壊時の曲げ応力、 P_e は熱膨張応力、 P_m は膜応力、 σ_f は流動応力、 Z は Z 係数、 a はき裂深さ、 t は板厚、 θ はき裂の半角度である。

$$S_C = \frac{1}{SF} \left(\frac{\left(P_b' \right)_0}{Z} - P_e \right) - P_m \left(1 - \frac{1}{Z \cdot SF} \right) \left\{ \begin{array}{l} \frac{\left(P_b' \right)_0}{Z} : 2\theta = 60 \text{ 度の場合} \\ \frac{\left(P_b' \right)}{Z} : 2\theta > 60 \text{ 度の場合} \end{array} \right. \quad (2)$$

ここで、 P_b' は式(1)におけるものと同じであり、このうち $(P_b')_0$ は角度 $2\theta = 60$ 度、 $a/t = 0.75$ のき裂を有する部位に対する値、 (P_b') は角度 $2\theta = 60$ 度を越えるき裂を有する部位に対する値である。

5.3 日本機械学会への要望事項

今回 5.2 において示した代替案は、維持規格 2002 年版で許容される欠陥のうち最も厳しい条件となる周方向角度 60 度、深さ 75% の欠陥を有する配管が塑性崩壊しない許容曲げ応力条件を適用し、全周までの欠陥に対する許容き裂深さ制限を課すものである。したがって、維持規格 2002 年版に含まれる保守性にさらに保守的な前提を加えるものとなっており、より合理的な安全裕度の設定等、見直すべき余地の残されたものであって今回の技術評価において暫定的に設定するものと考えらるべきである。

一方、維持規格 2002 年版は、事例規格を設けたことにより周方向角度 60 度を境に許容欠陥深さ評価の考え方が異なり、規格全体としての整合性を欠くこととなっている。

今後、配管における欠陥評価については、機械学会において以上の点を踏まえて再検討され、整合の取れた規格として整備されることを期待する。