

欠陥を有する構造物の健全性評価・リスクベースメンテナンス

東京大学大学院 酒井信介

概要

機械製品や社会インフラにおけるものづくりの三本柱は、設計、製造およびメンテナンスであるが、我が国の規制上においては、メンテナンス段階の取扱いが不明瞭な状態が長期間続いてきた。検査時に欠陥が検出された場合には、補修・取替えをするのが原則であったが、破壊力学の進歩とともに健全性評価をした上で判断をするいわゆる適性評価基準の考え方が普及している。近年は、これに加えてメンテナンス上優先順位の高い部分をリスクにより評価し、必要な資源を集中することにより合理化とするリスクベースメンテナンスの考え方が広まりつつある。このような技術の現状と展望について述べる。

目次

1	供用適性評価技術	3
1.1	背景	3
1.2	概要	3
1.3	わが国の規格動向	4
1.4	健全性評価手順	5
1.5	健全性評価の例題	8
1.6	わが国における適用状況・問題点	12
2	リスクベースメンテナンスによる保全計画の合理化	13
2.1	リスクベースメンテナンスの背景	13
2.2	確率論的取扱いの基礎	15
2.3	リスクベースメンテナンスの動向	15
2.4	リスクベースメンテナンスの概念	16
2.5	具体的手順	17
2.6	リスク評価手順	18
3	まとめ	22

1 供用適性評価技術

1.1 背景

プラントなどの機械製品については、出発点からゴールまでに至るプロセスにおける三本柱は設計、製造、維持である。わが国の安全規制の考え方では、これらの三本柱の中で、どちらかという設計段階、つまり設計規格に長い間、重きが置かれてきた。設計規格によって、維持の段階の安全を確保する場合には、「政策時の状態が供用段階においても維持される」ことが要求される。しかし、機械設備は人間の体同様に、時間の経過とともに必ず劣化が進行する。ここに安全保守の実践と、法遵守の精神との間にギャップを生ずることとなり、安全保守の実践のつもりが、法に反するというような矛盾が露見されるようになってきた。欧米では、維持の段階では設計規格とは独立の規格が必要であることの認識が早くから持たれていた。つまり、設計、製造によって設備が供用段階に入ると、以後はその供用の状態を適切に評価し、その評価に基づいて安全を評価することの重要性が認識された。このように供用 (Service) の状態を適切に評価する技術を供用適性評価技術 (Fitness For Service、以後 FFS と略す) と呼ぶ。FFS の概念に基づく規制を維持規格¹⁾と呼び、欧米ではわが国よりも30年近く早く導入されている。維持規格の導入によって、設計段階と供用段階で安全管理が区別して取り扱われるようになる。維持規格の導入の意義は次のように考えることができる。まず、設計段階においては、荷重や損傷モードについては、あくまで予測に過ぎない。もし、手元に使用する材料の強度が存在しなければ、加速実験によってデータを求めなければならないかもしれない。負荷される荷重も、あくまで予測であり、運用開始後に大きく負荷が変わることは度々経験されることである。また、設計時には、全ての損傷モードを把握できるとは限らず、当然ながら予測には限界がある。従って、設計はあくまで予測行為であり、大きな不確定性が内在している。

一方、供用段階においては、機械製品が存在しており、実際に負荷している荷重を計測できる。また、検査時のデータを積み重ねることにより、予想外の損傷モードを把握でき、損傷の進行速度もより正確に把握できる。つまり、設計段階で予測した事項に対して、実際に確認するプロセスであるとも考えることもできる。従って、設計段階で有していた不確定性は、データの実証によって小さくすることが可能である。このことを反映して安全率の用語は、近年設計段階と供用段階で区別されるようになってきている。例えば、アメリカ機械学会ボイラと圧力容器規格 (ASME Boiler & Pressure Vessel CODE) においては、安全率に相当する用語として、設計規格 (Sec.)²⁾では設計係数 (Design factor)、メンテナンス規格 (Sec. XI)³⁾では、構造係数 (Structural factor) が用いられ、区別して用いられる。

1.2 概要

維持の段階で、設計規格に基づいて安全規制を行う場合には、常に設置時の状態を保持することが求められる。この場合、定期検査のときに欠陥が検出された場合には、補修・取替により設置時の状態に復帰すること以外選択肢はないことになる。つまり「検査→補修・取替→設置時復帰」のループを繰り返すことになる。このような管理方式においては、欠陥のサイズや応力のレベル、材料の劣化度を考慮した上で、欠陥を許容するということはない。このような考え方をとる範囲においては、検出された欠陥が、構造物の強度や安全性に与える影響について、「評価」することは不要である。現実には、検査において検出される欠陥が明らかに無害であるほど小さいこともあるのであり、検出される欠陥のサイズの大小にかかわらず補修・取替を行うことは現実的でないことは明らかであろう。

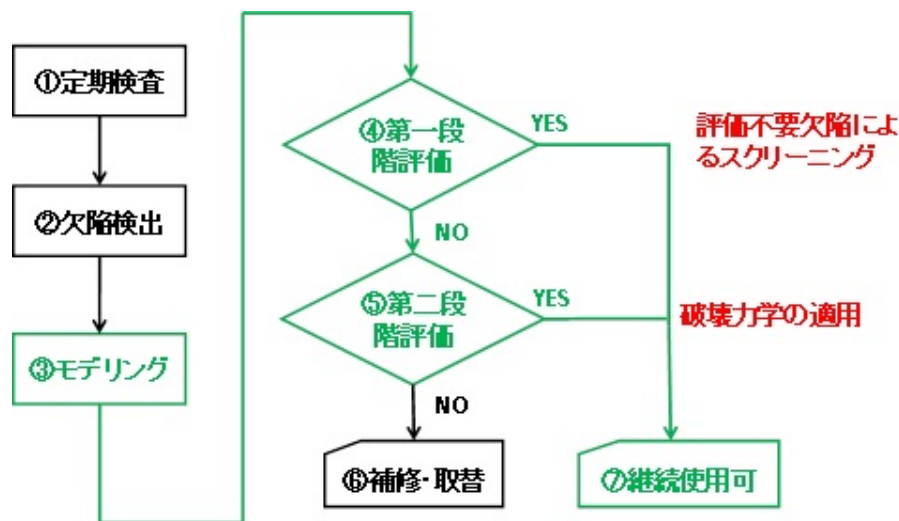


図 1.1 維持規格の考え方

一方、維持規格の導入により、欠陥評価という行為が導入される。評価の結果、構造強度への影響がないと判断されれば、欠陥を許容することができる。図 1.1 に、維持規格に基づく欠陥評価の考え方を示す。薄い線で表示した部分が維持規格によって導入された流れである。つまり、導入以前では、の定期検査時に欠陥が検出された場合にはの補修・取換に進むパスしか存在しないので、欠陥が許容されることはなかった。一方、維持規格では、以降の評価のプロセスに進む。評価においては破壊力学が駆使されるが、その手順が容易となるように手続きが規格上に示されている。例えば、一般に非破壊検査で検出される割れ状の欠陥の形状は、きれいな幾何学形状ではないが、破壊力学の適用手順で提示されている体系では、き裂状欠陥は楕円形状、半楕円形状、円形、長方形などの理想形状に対して評価法が示されている。このため、検出された欠陥形状に対して破壊力学評価手順が適用できるように、のモデリングを適用して理想形状への置き換えを行う。モデリングにあたっては、安全裕度を考慮する。あらゆる欠陥に対して、破壊力学による評価を行うことは、作業負荷の観点から現実的とはいえず、まずはごく大雑把なスクリーニングを適用する。このため、明らかに評価が不要な欠陥に対しては、直ちに許容する手順が決められている。このような欠陥を評価不要欠陥とよび、これによる判断を行う手順が図 1.1 の第一段階評価である。第一段階評価がクリアできればに進み継続使用が認められる。一方、第一段階評価をクリアできなければに進み、破壊力学による詳細評価を行う。この段階を第二段階評価と呼び、き裂の進展も考慮に入れた上で、次回の定期検査までの健全性を評価する。この段階の評価をクリアできれば、の継続運転が可能となり、クリアできない場合に、の補修・取換を行う。

に至るパスが存在することにより、次回の定期検査までの期間について許容される欠陥を認めることになる。事業者にとっては、欠陥が検出されたタイミングでの補修取換えではなく、次回の定期検査にまわすことができることを意味するので、計画的な保全の遂行が可能となる。このことは、定期検査期間の短縮にもつながることなので、合理化にもつながることになる。

1.3 わが国の規格動向

維持規格は、原子力分野とこれ以外の一般産業の分野では、区別して扱われている。表 1.1 に、ASME ボイラ・圧力容器規格における維持規格を設計規格とともに示す。

表 1.1 ASME Code における維持規格などの分類

	設計規格	維持規格
原子力発電	Sec. III	Sec.XI
一般産業	Sec. VIII	Post Construction Std.

これに対応する我が国の民間規格を表 1.2 に示す。

表 1.2 我が国における民間規格

	設計規格	維持規格
原子力発電	日本機械学会 設計・建設規格	日本機械学会 維持規格
一般産業 (化学産業など)	Sec. VIII	日本高圧力技術協会 圧力設備の亀裂状欠 陥評価基準

ただし、一般産業としては化学産業などのプラントにおける圧力機器にかかわる部分について代表的に記載している。原子力発電向けの維持規格は 2000 年に日本機械学会より発行された¹⁾のに対して、一般産業向けの維持規格は 2001 年に日本高圧力技術協会 (HPI) から発行されている⁴⁾。両者は共通する部分も多いが、一般産業向けのものは、原子力産業用のものを参考にしつつ、実情にあうように修正したものとなっている。また、米国石油協会 (API) では、ASME Post Construction Std. の活動と連携しつつ維持規格 API 579 を 2000 年に発行している⁶⁾が、HPI の規格では API579 も参考にしている。

1.4 健全性評価手順

図 1.1 を、もう少し詳しく記したものを図 1.2 に示す。供用前検査 (PSI) もしくは、供用期間中検査 (ISI) の際に、き裂が検出されると超音波探傷試験などでき裂寸法を測定し、平面き裂にモデル化を行う。

検出されたき裂に対して、許容するかどうかの判定は二段階で行う。第一段階評価はスクリーニングの位置づけで、評価不要許容基準を適用した上で、可否を決定する。もし、き裂寸法が、許容き裂寸法以下であれば、運転継続が可能と判断される。

き裂寸法が、許容き裂寸法を超える場合、第二段階に進み、き裂進展評価とともに破壊評価を実施する。評価期間としては、次回の供用期間中検査時期、もしくは耐用期間末期とし、その末期において予測き裂寸法が許容基準の限界き裂寸法を下回れば、評価期間末期までの運転継続が許容される。予測き裂寸法が限界き裂寸法を超えてしまった場合には、補修・取り替えが求められる。なお、第二段階に進むことなく、補修・取り替えを選択することも可能である。

応力拡大係数は一般的には式 (1.1) のように表現される。

$$K = M\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1.1)$$

検出されたき裂から疲労き裂が進展する条件は、式 (1.2) で示される。

$$\Delta K = \Delta K_{th} \quad (1.2)$$

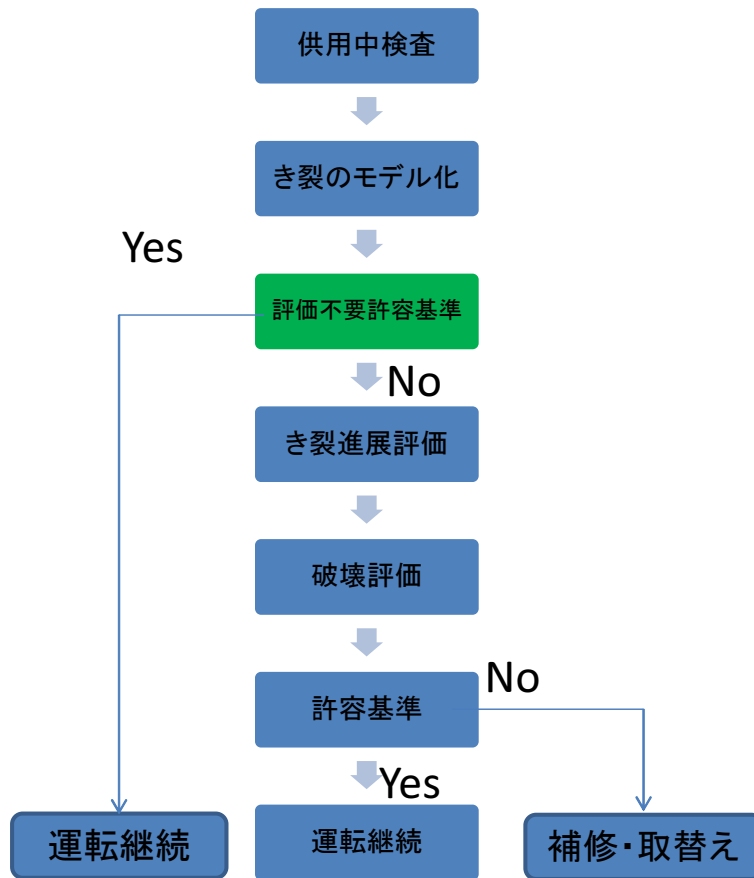


図 1.2 健全性評価手順

ここに、 ΔK_{th} は下限界応力拡大係数範囲である。式 (1.1) と組み合わせることにより、疲労き裂の開始条件は式 (1.3) で示される。

$$a_{th} = \frac{1}{\pi M^2} \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta \sigma} \right)^2 \quad (1.3)$$

従って、式 (1.3) の a_{th} 以下であれば、き裂は疲労き裂進展を開始しないことになる。このような考え方に基づいて評価不要許容基準が設定される。

一方、線形破壊力学の範囲の破壊条件は式 (1.4) で与えられる。

$$K = K_c \quad (1.4)$$

式 (1.1) と式 (1.4) を組み合わせることにより、評価期間中の最大応力 σ_{max} で破壊しない限界き裂寸法 a_c は、式 (1.5) で与えられる。

$$a_c = \frac{1}{\pi M^2} \left(\frac{K_c}{\sigma_{max}} \right)^2 \quad (1.5)$$

検出き裂寸法が a_{th} 以上であっても、評価期間末期の予測寸法 a_f が a_c 以下であれば、疲労き裂進展の結果として破壊は生じない。線形弾性破壊の場合、第二段階の許容基準は、このようにして設定されている。塑性崩

壊の場合には、式 (1.5) の代わりに式 (1.6) を用いて最大応力 σ_{max} を制限する。

$$\sigma_{max} = \sigma_f \quad (1.6)$$

ここで、 σ_{max} はき裂による断面積の減少を考慮した実断面応力 σ_{net} で、限界き裂寸法 a_c によって定まる。また、 σ_f は流動応力である。

1.4.1 破壊評価線図

先に、線形破壊と塑性崩壊という典型的な二つの破壊モードを紹介したが、実際には両者の中間的な状況で破壊が起きる。破壊評価線図法は、破壊形態によらず破壊を一つの方法で判定できるように考案された方法で、二つのパラメータを使用することから 2 パラメータ法とも呼ばれる。き裂のある部材の形状・寸法、負荷、材料の破壊靱性および降伏応力から二つのパラメータ K_r と L_r を計算し、 (L_r, K_r) を座標軸とする平面である破壊評価線図にプロットし、破壊の限界を示す曲線、つまり破壊評価曲線の外側にあれば、破壊、内側にあれば破壊しないと判定する。この手法は元英国中央手電力庁 (CEGB) で開発され、R6 法⁸⁾とも呼ばれる。

Ainworth は、代表的な 4 種類の構造材料について破壊評価曲線を検討し、安全側に包絡する曲線を R6 法-Rev.3 の Option 1 の破壊評価曲線⁹⁾とし、式 (1.7) を与えた。

$$K_r = (1 - 0.14L_r^2) [0.3 + 0.7\exp(-0.65L_r^6)] \quad (1.7)$$

ただし、以下の破壊評価曲線は以下の塑性崩壊条件で打ち切る。

$$\begin{aligned} L_r &\leq L_r^{max} \\ L_r^{max} &= \sigma_f / \sigma_Y \\ \sigma_f &= (\sigma_Y + \sigma_u) / 2 \end{aligned} \quad (1.8)$$

図 1.3 に破壊評価曲線を描画したものを示す。

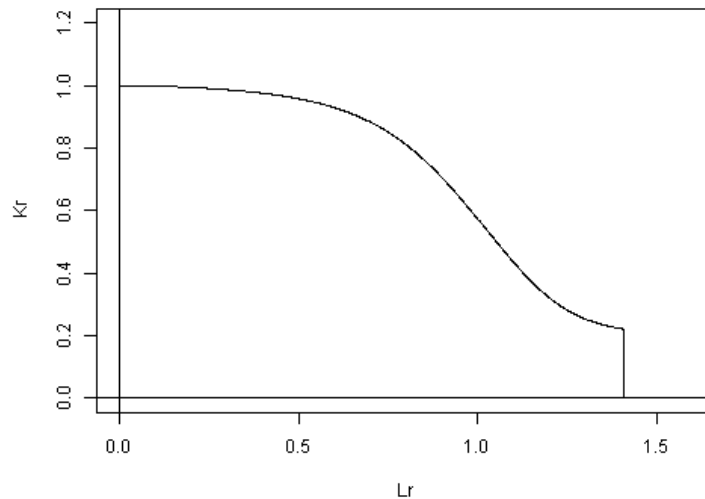


図 1.3 R6 法-Rev.3 の Option 1 破壊評価曲線

1.5 健全性評価の例題

文献¹⁰⁾に掲載されている例題をもとに、具体的な計算手順を示す。

1.5.1 代表的な応力拡大係数計算

図 1.4 のように平板内に存在する表面き裂に、 $\sigma_m = 200\text{MPa}$ の応力が作用する場合の表面点および最深点の応力拡大係数を評価する。ただし、以下の二ケースについて計算する。

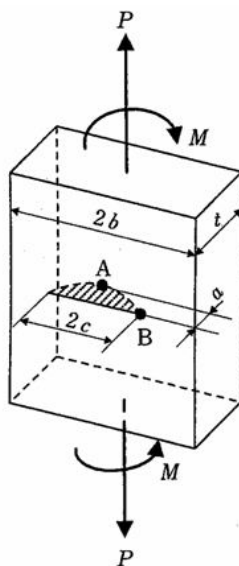


図 1.4 平板内の半楕円表面き裂

ケース 1

$$2b=50\text{mm}, t=10\text{mm}, 2c=12\text{mm}, a=6\text{mm}$$

ケース 2

$$2b=50\text{mm}, t=10\text{mm}, 2c=20\text{mm}, a=6\text{mm}$$

解答 応力拡大係数の解として、以下の Raju-Newman の解が知られている¹¹⁾。

$$K^A = F^A(\sigma_m + H\sigma_b)\sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (1.9)$$

$$\sigma_m = \frac{P}{2bt}, \sigma_b = \frac{3M}{bt^2}$$

$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65}$$

$$F^A = \left[1.13 - 0.09 \frac{a}{c} + \left\{ -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + a/c} \right\} \left(\frac{a}{t}\right)^2 + \left\{ 0.5 - \frac{1}{0.65 + a/c} + 14(1 - a/c)^{24} \right\} \left(\frac{a}{c}\right)^4 \right] g f_\phi f_W$$

$$g = 1, f_\phi = 1, f_W = \left[\sec \left(\frac{\pi c}{2b} \sqrt{\frac{a}{t}} \right) \right]^{1/2}$$

$$\begin{aligned}
H &= 1 + \left[-1.22 - 0.12 \frac{a}{c} \right] \frac{a}{t} + \left[0.55 - 1.05 \left(\frac{a}{c} \right)^{0.75} + 0.45 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.5} \right] \left(\frac{a}{t} \right)^2 \\
K^B &= F^B (\sigma_m + H \sigma_b) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \\
\sigma_m &= \frac{P}{2bt}, \sigma_b = \frac{3M}{bt^2} \\
Q &= 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65} \\
F^B &= \left[1.13 - 0.09 \frac{a}{c} + \left\{ -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + a/c} \right\} \left(\frac{a}{t} \right)^2 + \left\{ 0.5 - \frac{1}{0.65 + a/c} + 14(1 - a/c)^{24} \right\} \left(\frac{a}{c} \right)^4 \right] g f_\phi f_W \\
g &= 1.1 + 0.35 \left(\frac{a}{t} \right)^2, f_\phi = \sqrt{\frac{a}{c}}, f_W = \left[\sec \left(\frac{\pi c}{2b} \sqrt{\frac{a}{t}} \right) \right]^{1/2} \\
H &= 1 - 0.34 \frac{a}{t} - 0.11 \frac{a}{c} \frac{a}{t}
\end{aligned} \tag{1.10}$$

式 (1.9), (1.10) に条件を代入することにより以下の計算結果が得られる。

ケース 1

$$K_A = 19.64 MPa\sqrt{m}, K_B = 24.08 MPa\sqrt{m}$$

ケース 2

$$K_A = 28.44 MPa\sqrt{m}, K_B = 27.01 MPa\sqrt{m}$$

表面き裂長さの増大により、最深点の応力拡大数の方が、表面より応力拡大係数の増加率が大きいことが分かる。

1.5.2 疲労き裂進展評価

応力 σ_m が $200 MPa$ と $20 MPa$ の間で変動する場合、繰返し増分 $\Delta N = 100$ として、この ΔN 回の繰返し負荷によるき裂進展量 Δa および Δc を求める。ただし、 ΔN 回の間では、疲労き裂進展速度は一定であると仮定する。疲労き裂進展速度には、以下に示す JSME 維持規格における炭素鋼および低合金鋼の大気中における疲労き裂進展特性を用いる。

$$\begin{aligned}
da/dN &= C \Delta K^n \\
n &= 3.07 \\
C &= 3.88 \times 10^{-9} S \\
S &= 25.72(2.88 - R)^{-3.07} (0 \leq R < 1)
\end{aligned} \tag{1.11}$$

解答

応力 σ_m が $200 MPa$ と $20 MPa$ の場合の応力拡大係数は、式 (1.9), (1.10) に代入することにより以下のようになる。

$$K_{A,max} = 19.64 MPa\sqrt{m}, K_{A,min} = 1.96 MPa\sqrt{m}$$

$$K_{B,max} = 24.08 MPa\sqrt{m}, K_{B,min} = 2.81 MPa\sqrt{m}$$

応力拡大係数変動幅 ΔK は両者の差として求まるので、

$$\Delta K_A = 17.68 MPa\sqrt{m}, \Delta K_B = 21.67 MPa\sqrt{m}$$

となる。これを、式 (1.11) に代入することにより、一サイクルあたりのき裂進展量が下記のように求まる。

$$\begin{aligned}
da/dN &= C \Delta K_A^n \\
&= 2.921 \times 10^{-5} mm/cycle
\end{aligned} \tag{1.12}$$

$$\begin{aligned} dc/dN &= C\Delta K_B^n \\ &= 5.457 \times 10^{-5} \text{mm/cycle} \end{aligned} \quad (1.13)$$

従って、 $\Delta N = 100$ の間の進展量は以下ようになる。

$$\Delta a = (da/dN)\Delta N \approx 2.92 \times 10^{-3} \text{mm}$$

$$2\Delta c = 2(dc/dN)\Delta N \approx 1.09 \times 10^{-2} \text{mm}$$

1.5.3 健全性評価の例題

炭素鋼の平板について供用中検査において、表面き裂が検出され、その条件が表 1.3 で与えられる。この条件について 2 パラメータ法を用いて健全性を評価する。応力拡大係数は 1.5.1 に示した Raju-Newman の式

表 1.3 供用中検査における検出き裂の条件

項目	内容	
解析対象	平板内の半楕円表面き裂	
構造形状	板幅 b	100mm
	板厚 t	40mm
き裂形状	き裂長さ 2c	30mm
	き裂深さ a	20mm
荷重	引張荷重 P	200kN
	曲げ荷重 M	0
材料定数	引張強さ σ_u	490MPa
	降伏応力 σ_Y	270MPa
	流動応力 σ_f	380MPa
	縦弾性係数 E	192GPa
	ポアソン比 ν	0.3
	破壊靱性 J_{IC}	0.1MN/m

で評価される。 K_r については、式 (1.14) から算出される。

$$K_r = \frac{K}{K_{Ic}} \quad (1.14)$$

$$K_{Ic} = \sqrt{\frac{E \cdot J_{Ic}}{1 - \nu^2}}$$

なお、平板内の楕円表面き裂の塑性崩壊式は Dillström らによって式 (1.15) のように与えられている¹²⁾。

$$\begin{aligned} L_r &= \frac{(1 - \zeta)^{1.58} \frac{\sigma_b}{3} + \sqrt{(1 - \zeta)^{3.16} \frac{\sigma_b^2}{9} + (1 - \zeta)^{3.14} \sigma_m^2}}{(1 - \zeta)^2 \sigma_Y} \\ \zeta &= \frac{al}{t(l + 2t)} \end{aligned} \quad (1.15)$$

σ_m, σ_b は、板厚内のき裂面に直行する応力分布を次式で近似した係数である。

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_b \left(1 - \frac{2u}{t}\right) \quad (0 \leq u \leq t) \quad (1.16)$$

表 1.3 の条件を入力して Kr, Lr を計算し、健全性評価線図上にプロットすると図 1.5 が得られる。プロットが破壊評価曲線内にあるので、検出されたき裂は、破壊には至らないことが確認できる。

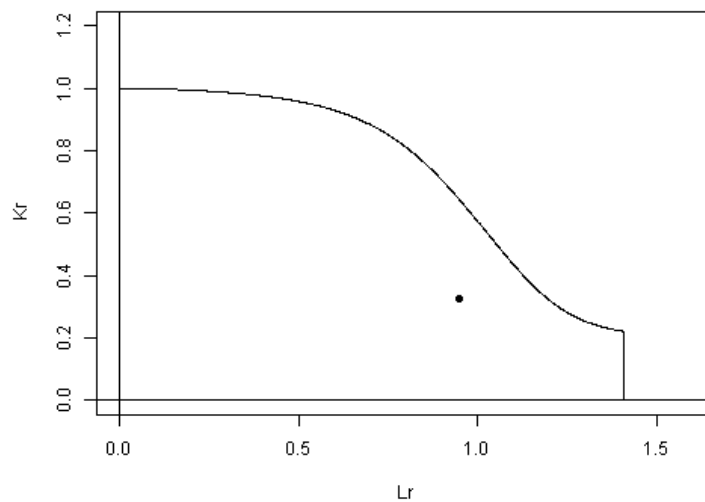


図 1.5 表 1.3 に対する健全性評価線図上のプロット

1.5.4 疲労き裂進展後の健全性評価

1.5.3 の検査時期から、次回検査時期までの疲労き裂進展を評価し、健全性評価を行う。疲労き裂進展の条件は表 1.4 で与えられる。図 1.6 が疲労き裂進展後の健全性評価線図上のプロットである。プロットは破壊評

表 1.4 次回検査時期までの疲労き裂進展条件

項目	内容	
疲労き裂進展条件	進展評価	表面点、最深点の応力拡大係数評価
	荷重範囲	800kN
	荷重分類	片振り
	疲労き裂進展曲線	室温大気中炭素鋼データ
	荷重繰り返し数	3.0×10^5 回

価曲線の外であり、次回検査時期までに破壊が起きることを示している。従って、検出された欠陥を残したまま運転を継続することは許容されない。

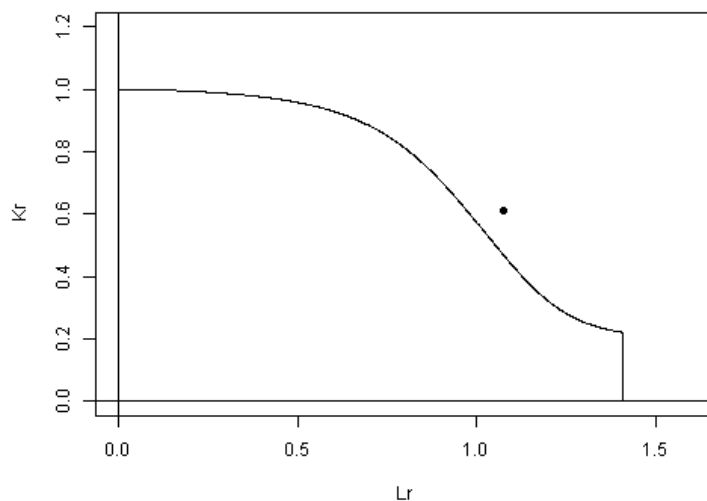


図 1.6 疲労き裂進展後の健全性評価線図上のプロット

1.6 わが国における適用状況・問題点

上述の維持規格の適用対象とする損傷は主としてき裂状の欠陥であるが、配管等の圧力機器における主要な損傷モードの一つとして、減肉も存在する。減肉は配管内部に流体が流れることにより起きる損傷モードである。また、腐食環境の中で、外面側の塗装が剥がれたり、保温材下で検査が行き届かない場所でも減肉が起きる。減肉に対する健全性評価は、本来はき裂状欠陥と同様に維持規格としての取扱がなされるべきであるが、わが国では原子力、一般産業いずれについても維持規格としての取扱がなされていない。まず、この問題について以下に示す。

減肉のメカニズムは、電気化学的作用に代表される腐食 (corrosion) か機械的作用に代表される壊食 (erosion) と考えることができ、両者が何らかの形で関与している。どちらが支配的であるかはケースバイケースで、明確に判断できない場合も多い。配管内面側の減肉についてはエロージョン/コロージョンと表現することもある。減肉の形状の特徴は図 1.7 のように表現することができる。

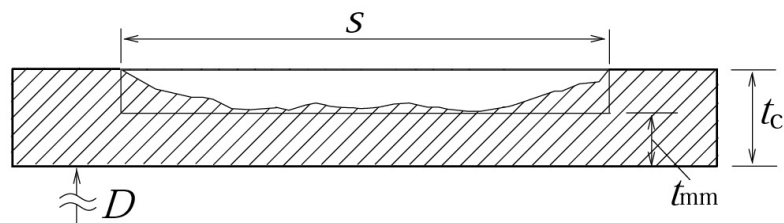


図 1.7 減肉の典型的な形状

減肉には、大別すると全面減肉と局部減肉がある。図 1.7 に示したのは局部減肉の例である。純粋な腐食の

ように、一様に全面にわたって減肉する状態を全面減肉と呼び、この場合には許容最小肉厚値による管理が行われる。一方、エロージョン/コロージョンでは、局部減肉となる場合が多く⁵⁾、この場合には破壊限界としては貫通による流体の漏洩が想定される。わが国においては、これまで局部減肉と全面減肉を特別に区別することなく、一律に許容最小肉厚値による管理が行われてきた。しかし、明らかに局部減肉である場所に許容最小肉厚値による管理を適用すると、あまりにも過大な安全裕度を与えてしまうことが考えられる。例えば、図 1.8 には、(a) 設計肉厚 (b) 全面減肉 (c) 局部減肉を例示している。設計肉厚による管理が行われる場合には、減肉部の最小肉厚のみで判断が行われる。この結果として (b) はぎりぎり許容されるのに対して (c) は許容されない。配管内面の全周にわたって減肉が起きている状態を想定すれば明らかな通り、(c) は (b) よりも強度は高い。にもかかわらず、全面減肉による規制では (c) が許容されない。一方、米国石油協会規格 API579 で

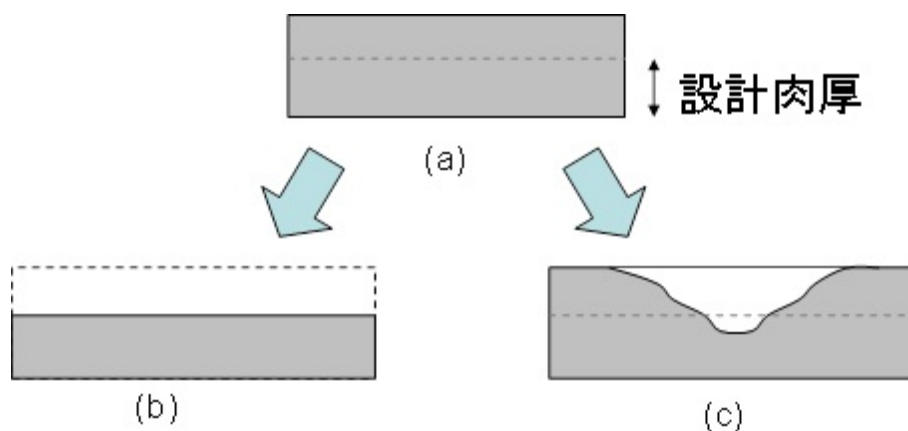


図 1.8 全面減肉と局部減肉の法規上の問題点

は、すでに維持規格による減肉の管理が行われている⁷⁾。しかし、わが国にこのような考え方を導入するにあたっては、局部減肉の安全裕度の考え方を巡ってさまざまな議論が行われている。安全裕度に関する定量的取扱は信頼性工学の適用により、より明瞭になるが API579 の許容限界の状態を安全裕度の観点から行われた研究例もある⁷⁾。割れ状欠陥が維持規格による管理が行われるのと同様に、減肉についても維持規格としての取扱が望まれるところである。

2 リスクベースメンテナンスによる保全計画の合理化

2.1 リスクベースメンテナンスの背景

設備機器の保全は、機器の故障が発生する都度、保全を行うのでは安全性、信頼性の観点から望ましくなく、いばかりではなく、大きな事故と結び付く場合にはトータルコストの面でも思わぬ被害が発生することがある。このような方式を事後保全と呼ぶのに対して、故障の発生を何らかの手段で予測し、故障が発生を未然に防ぐことを目的とする方式を予防保全と呼ぶ。機械設備の設備機器では、多くの場合予防保全が採用されているものと考えられる。予防保全で多く採用されている方式は、確定的な機器の検査間隔ごとに定期検査が実施される。このような方式を時間計画保全と呼ぶ。確定的であるのは、検査間隔のみではなく、検査対象とする設備機器、特定の設備機器に対する検査範囲、使用する検査装置なども固定的であることが多く、基準や検査マニュアルの規程に従って実施される。このようにメンテナンスにかかわる多くの要素を固定的に取り扱う方

式を決定論的方法と呼ぶ。これに対して、設備機器の運転中においても、機器の状態を何らかの測定手段で把握し、監視するという考え方もある。この場合、運転中の異常を検知できるために、時間計画保全よりも、より迅速に対応することが可能となる。このような保全方式を状態監視保全と呼ぶ。故障の未然防止という観点からは、状態監視保全は有効であるが、状態監視をするための装置の開発、その測定装置の出力からの異常の検知の合理的判断基準を策定することが課題である。

我が国の保全方式は、基本的に決定論的方法が採用されているといえるが、近年、この方式のみに依存することに対する問題点が浮かびあがりつつある。図 2.1 は、安全概念の日本と欧米の対比としてよく用いられる図である。つまり、日本流の決定論的方法では安全と危険は二者択一であり、その境界は明確な許容値で示される。その値以下であれば安全であるが、その値を一步でも越えるととたんに危険な領域に突入する、とする考え方である。欧米流の考え方では、明らかな安全と、明らかな危険領域の間には多くのグレイゾーンが存在し、この領域では明確に安全とも危険とも判断せず、その危険の程度を把握して少しでも安全な方向に改善するよう努力する、とする考え方である。欧米流の考え方の代表的なものはリスク概念の適用であろう。我が国においても近年、リスク概念を導入した安全評価の考え方は浸透しつつあり、このようなことは理解している、と主張する人も多いかもしれない。しかし、概念としては理解していたとしても、結果としては旧来の日本流の安全概念は変わっていないというのが現実ではないであろうか。

図 2.1 の日本流の考え方は、単純で理解しやすく、一般の人にも受け入れやすいものと考えられる。しかし、この考え方には大きな事故に結び付く潜在的な危険性が存在するのである。それではいったい何が問題なのであろうか。事業者が規制当局、あるいは社会に対して説明するとき、「安全」か「危険」かの二者択一しかないのであれば、かならず「安全」と説明するであろう。「安全」というスタンプが押されれば、説明する側もされる側も安心することとなろう。しかし、このような構図は、その状態からさらに安全に対する改善をしようとするインセンティブは働きにくい。一方、欧米流の考え方では、多くの設備機器が安全・危険の中間のグレイゾーンに含まれる。日本流の基準の安全領域に入っている、グレイゾーンに含まれることが多くなる。グレイゾーンにある限りは、安全側にシフトするよう努力することが求められる。日本流の考え方は、許容値を厳しめに設定することによって、安全を高めようとするのに対して、欧米流では多くの範囲に対して危険性を判断し、危険性を下げる努力をするという形となって出てくるのではないであろうか。その結果、日本流では、許容値を設定した項目に対しては、厳格な安全が確保される一方で、万が一見落としがあるとそれが再び安全評価の俎上に上りにくく、極めて危険な状況にさらされる、という構図が浮かび上がる。

大きな事故を防止するという観点から、旧来の日本流のやり方は限界があり、欧米流に移行することが必要であろう。そのためには、荷重や強度などの安全評価にかかわる諸量を確定値で考えるのではなく、不確定性のあるものととらえて、危険性の程度を何らかの尺度で判断し、意思決定に結び付けていくプロセスが必要になる。その指標として効果が期待される量がリスクである。リスクは、事故の起きる発生確率と、その事故が起きた場合の影響度の関として定義される。リスクを指標とした上で、メンテナンスの合理的判断を行う手法をリスクベースメンテナンス (RBM) と呼ぶ。

このような安全面での、メンテナンスの合理化に加えてメンテナンスコストにかかわる合理化という問題も無視できない。つまり、我が国の産業においては、長期化している不況の中で、プラント設備の新設は頭打ちの状態となり、老朽化設備の多くが様々な延命策によって今日も現役で稼働して、生産を支えている。それにもかかわらず、国際競争力が急速に失われてきているという現実があり、あらゆる経費の削減なくしては産業基盤の存続が困難な状況となっている¹³⁾。特に、生産活動に直結しない設備メンテナンスの経費は、厳しい削減の対象とされている。老朽化設備の寿命延伸には適切なメンテナンスの実行が不可欠である。一方、設備の長期連続運転は生産効率を上昇させるだけでなく、メンテナンスの経費削減をもたらす。したがって、メ

メンテナンスのあり方には必然的に科学的合理性と経済性の両方が求められる。さらに、メンテナンスの科学的合理性と経済性は、産業の安全確保に対する社会的責任を果たすものでなければならない。この観点からも RBM は重要な役割を果たすことが期待される。



図 2.1 安全と危険に関する考え方の相違

2.2 確率論的取扱いの基礎

2.3 リスクベースメンテナンスの動向

産業界における RBM 活動の促進のためには、RBM に関係する規格の動向が大きく関係してくる。まず、世界的にリスクベース検査 (RBI) の規格として参照されているのが、米国石油協会 (API) の RP-580(2009)¹⁴⁾ および RP-581(2008)¹⁵⁾ である。なお、RBI という用語は、RBM と類似しているが、特に検査に重点が置かれる場合に使われる。なお、原子力の分野では類似の用語として RII(Risk Informed Inspection) が用いられるが、米国 NRC では Risk Based と Risk Informed の用語は明確に区別しているので注意が必要である。本稿はあくまで、Risk Based にかかわる技術の紹介である。欧州では、2001～2004 年の間に実施された RBM に係る活動プラットフォームである RIMAP(Risk Based Inspection and Maintenance Procedure) の成果をベースとして、EN 規格化¹⁶⁾ が進められている。韓国では、ガス安全公社が高圧ガス総合告示において RBI を含む規格を発行しており¹⁷⁾、また KEPRI(韓国電力中央研究所) が電力設備に関する RBI 構築と法規化¹⁸⁾ を実施している。中国においても、RBI を含む中国国家規格 SY/T6653¹⁹⁾ が発行されている。

一方、我が国では多くの企業で RBM の重要性は認識されているものの、規格・基準がなければ、運用の開始を躊躇するところも多いものと推測される。このような事情に鑑み、非原子力分野の圧力設備について、RBM の国内外の技術を調査し、我が国で共通して適用できる民間基準を作成することを目標に日本高圧力技術協会 (HPI) において平成 13 年度より規格策定のための活動が開始された。平成 22 年度には、HPIS Z106:2010「リスクベースメンテナンス」が RBM の基本的考え方を示す規格として発行された。さらにこれを補強するためのハンドブックとして HPIS Z107-1TR～4TR が平成 23 年度までに発行済である。

相対リスク

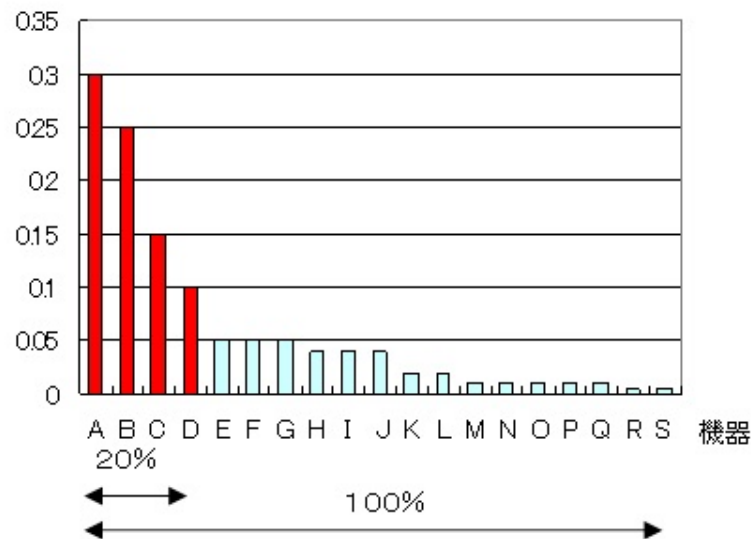


図 2.2 システム内のリスクの分布の概念図

2.4 リスクベースメンテナンスの概念

保全計画において決断が求められることとして、検査対象箇所の選定や、検査部位の検査周期、採用する非破壊検査法などが挙げられる。リスク保全技術においては、優先順位を明確にするための指標としてリスクを採用する。リスクは検査対象部位に破損が発生する確率と、もし破損が発生した場合に周辺に及ぼす影響度の積として与えられる。つまり、リスクは影響度の期待値を意味している。システム全体の機器が保有しているリスクの分布を概念的に表したものが図 2.2 である。

横軸の A～S はシステム内の機器を、縦軸は各機器が保有する相対リスクを示す。システム全体のトータルのリスクのうちの 80% は、実はシステム全体の中のわずか 20% の機器に集中していることを示している。もし、そうであれば全ての機器に同じ優先順位で検査を実施することは明らかに不合理であり、確実に 20% の機器を特定した上で、検査プログラムの優先順位を高めることが重要である。これが、リスク保全技術の基本的考え方である。このような考え方を 80-20 の経験則（パレート則）と呼ぶ。特に検査の視点に重点を置くときにはリスクベース検査 (RBI) と呼ぶ。最終的な意思決定にあたっては、コストなども加味した上で、リスク緩和のための決断が行われるが、この段階まで含めるときにはリスクベースメンテナンス (RBM) と呼ぶ。しかし、これらの区別は必ずしも明確ではなく、RBI/RBM などと記述されることもある。本稿においては、RBM で表現することとする。図 2.3 に RBM の一般的手順を示す。まず、評価のために必要となるデータおよび情報の収集を行う。これに基づき、対象部位ごとにリスク評価を実施する。リスクは破損の影響度と発生確率の積として評価する。リスク評価の結果に基づいて、検査に対する優先順位の決定を行う。これに基づき、検査プログラムの作成を行う。その結果、リスク値がどのように緩和されるかを示し、提案を行う。提案に対して、現行法規などと照らし合わせて再評価し、問題があれば最初に戻って作業を繰り返す。

工学におけるリスクは、「故障確率×影響度」で定義されるが、予備的解析の段階ではこれらのデータを完

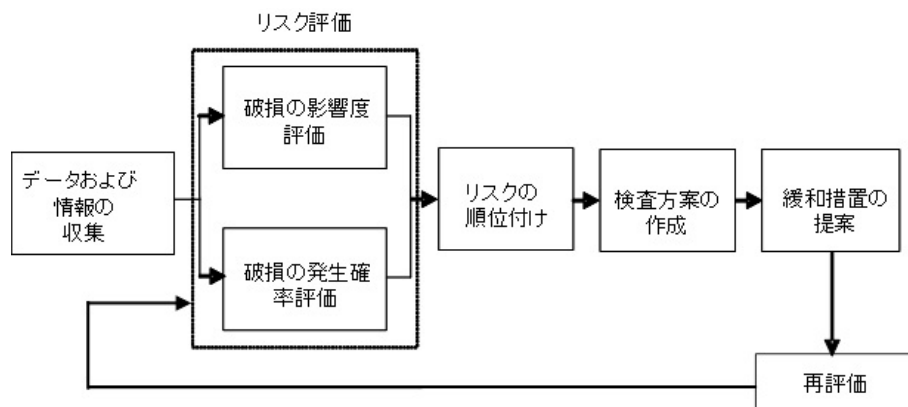


図 2.3 RBM の一般的手順

全に収集することは困難であるので、まずは主観に基づいていくつかの階層レベルに分類する。例えば、図 2.4 に典型的なリスク表示図を示す。ここでは、故障頻度と影響度を各々三段階ずつに分類しているが、分類数については必要度に応じて適宜決定すればよい。このようにして構成した二つの軸から表現したマトリックスのことをリスクマトリックスと呼ぶことがある。両者のレベルの程度に応じてリスクを分類し、本図においてはリスクの大きさを濃淡の濃さで表現している。例えば、高リスクと判定された機器を中リスクに移動するよう、点検政策を考えたり、あるいは低リスクと判定された機器は点検政策の見直しにより中リスクとなるようにするなどの検討を加えることができる。このように、主観に基づいてリスクのランクづけを行う解析手法を定性的リスクアセスメントと呼ぶ。定性的リスクアセスメントは、複数の検討対象の相対的な比較に用いられ、評価されるリスクは絶対的尺度を示すものではない。従って、より厳密なリスク評価を行うためには定量的リスク評価を行う。一般にプラントにおいては、対象とする検査機器の数は膨大となるので、いきなり全ての機器について詳細な解析を実施するわけにはいかない。そこで、必ずスクリーニングのプロセスが必要になる。定性評価はスクリーニングのプロセスとして位置づけられる。これ以外に、定量的リスクアセスメント、半定量的リスクアセスメントの段階があるが、これらの詳細については後述する。

2.5 具体的手順

HPIS Z106 と Z107TR を参照しながら、RBM の具体的手順を要約する。この規格の適用範囲は、「耐圧部を含む産業用設備」であるが、破損と影響度の定義を適用対象により適宜変更することにより、リスクベースメンテナンスは種々の産業に適用可能である。HPIS Z106 には、リスクベースメンテナンスを実施する手順が図 2.5 のように示されている。このフローは図 2.3 をより、詳細化、具体化したものである。以下に各段階の概要を述べる。RBM は以下の四段階に分けて実施する。

a) リスクベースメンテナンスの準備

リスクベースメンテナンスを始めるにあたり確認しておかなければならない事項、必要データ、情報の収集について述べられている。評価対象が必要とするデータ量や情報のレベルと詳しさは、保全計画の範囲、計画が処理する問題や、その実施レベルに依存することが示されている。

b) リスクアセスメントの実施

評価対象の破損の原因となる各種機械的損傷の同定、その結果発生する破損モード、その起こり易さ、

頻度	影響度		
	低	中	高
高			
中			
低			

	高リスク
	中リスク
	低リスク

図 2.4 リスクマトリックスの例

その影響度、結果として定義されるリスク評価の基本的方法論について述べられている。すなわち、破損発生確率の評価、破損影響度の推定、リスクの決定作業に関する作業に相当する。これはリスクマネジメント計画の作成や実行につながることになる。

c) 意思決定と保全計画

リスクに基づいた保全の基本的考えについて述べられている。その中には検査計画以外のリスク低減方法、リスクベースメンテナンス評価の見直しと更新についても検討することが述べられている。

d) 再評価と文書化

リスクベースメンテナンスの適用期間を明確に定め、期間が経過した、あるいは使用条件、破損の原因となる損傷状態などに変更があった場合に実施される再評価について述べられている。また、リスクベースメンテナンス評価にあたり収集されたデータ及び情報、また得られた結果について、最低限記録、保管される事柄についても示されている。

2.6 リスク評価手順

RBM は前節に記載した手順で進められるが、この中でも特に重要であるのが、リスク評価のプロセスである。リスクの計算は、破損確率と影響度の積で与えられるが、ここでは、HPIS の場合を例にとりて、リスク評価方法について概説する。

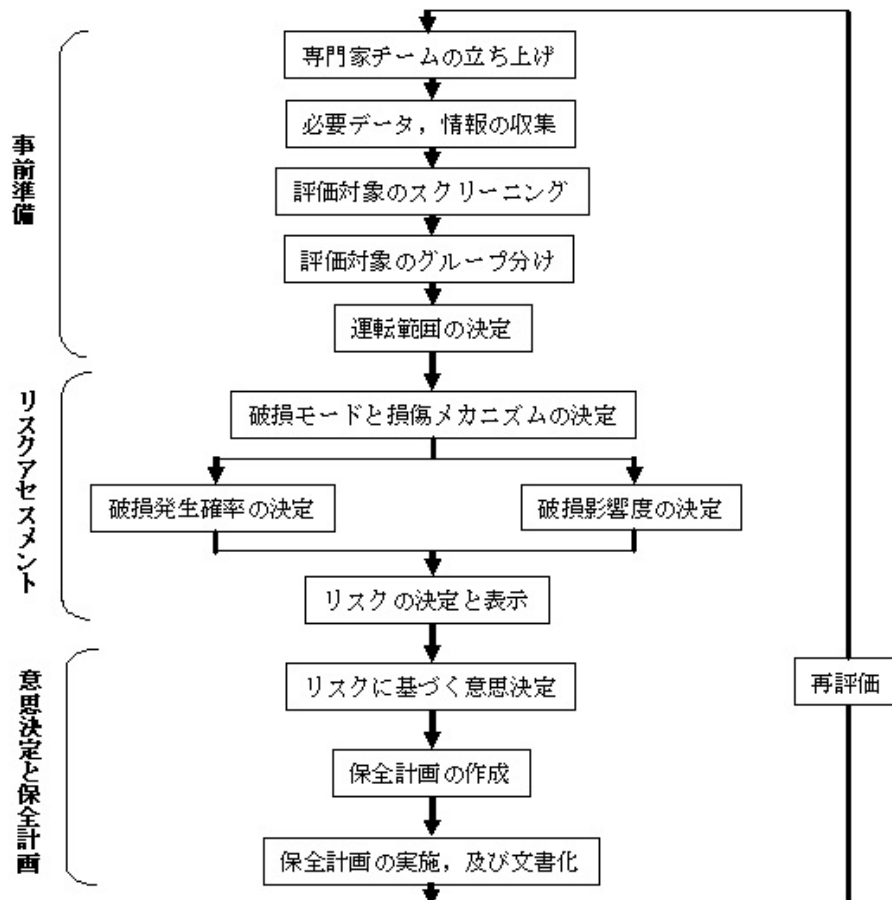


図 2.5 リスクベースメンテナンスの実施手順

2.6.1 RBM の評価レベル

一般にプラントなどの機械構造物の部品点数は膨大となるので、いきなり全ての機器に対して詳細な解析をすることは効率的であるとは言えない。まずは、ごく大雑把な評価によりスクリーニングを行うプロセスが必要である。この段階では、エンジニアリング判断と、経験に基づき簡単な質問に答える形で点数付けが行われ、破損確率、影響度の両者について高、中、低というような簡単なカテゴリーに分類した上で、評価が行われる。このような評価レベルを定性的リスクアセスメントと呼ぶ。この評価で、優先順位が高く判断されたものについて、次の評価レベルに進むことになる。最終的に図 2.4 に示したリスクマトリックス上にプロットした上でスクリーニングを行う。

次に、設備設計、運転条件、運転履歴、構成部材の信頼性、作業員の行動、事故時の環境や健康への影響などの評価を定量的に評価する段階が定量的リスクアセスメントである。定量的な評価であるので、数値データを確実に入手することが重要であるが、対象機器が膨大であるときには、多くの労力を要する。そのため、定性的リスクアセスメントにおいて、低リスクの機器をスクリーニングで除いておくことが、効率の面では極めて重要である。定量的リスクアセスメントは、多くの労力を要する反面、その評価結果の説明性は高くなる。特に、破損影響度による安全の喪失の程度、設備損失あるいは営業上の損失の程度が甚大であるときに

は、定量的リスクアセスメントが望まれる。

最後に定性的リスクアセスメントと定量的リスクアセスメントの両者の中間段階に位置するのが半定量的リスクアセスメントがある。このレベルでは、破損確率と影響度について、必ずしも直接的な物理量の評価を求めない。例えば、破損確率の評価としてそれに代わる経験やエンジニアリング的な判断があるのであれば、代替えることが可能である。影響度についても、直接的に影響を与える物理量でなくとも、それと密接な関係のある量で代替えることもできる。通常、このレベルの解析方法は、完全に定量的なレベルほど厳密ではないが、厳密でない分、経験に基づく判断の余地があり多くの対象物に対する評価が可能となる。このため、プラントなどの RBM では、このレベルの評価が多く用いられる。HPIS Z107-TR における評価は、基本的にこの評価レベルを採用している。以下、半定量的リスクアセスメントにおける、破損確率と影響度の評価手順を示す。図 2.6 には、HPIS 規格における RBM 評価手順を示す。

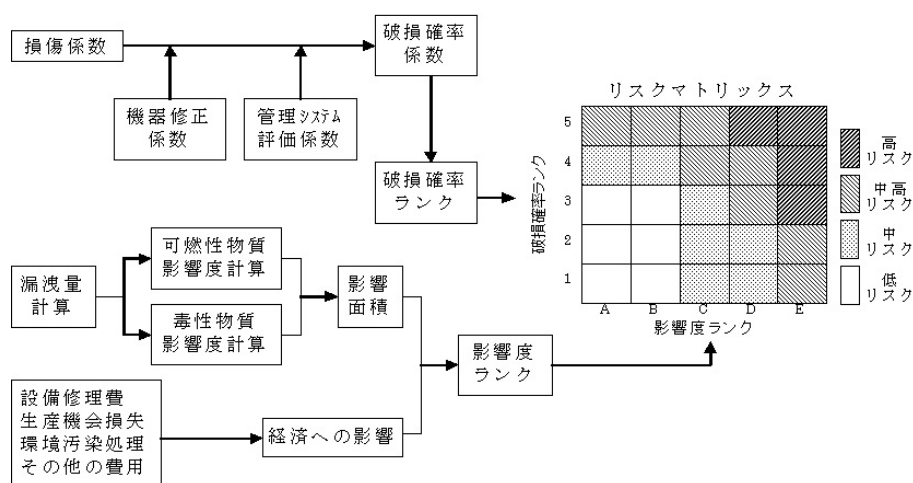


図 2.6 HPIS における RBM 評価の手順²⁰⁾

2.6.2 破損確率評価

図 2.6 に示されるように、破損の起き易さを破損確率という物理量で直接評価するのではなく、5 段階の破損確率ランクのいずれに属するかを判断している。破損確率ランクは、規格開発の中で新たに定義した破損確率係数 (Failure Probability Index, FPI) の評価値を以下のテーブルによって換算することにより行われる²⁰⁾。

FPI は、直接的に破損確率のような物理量を示すものではないが、検査対象の機器に関して、破損の起き易さに比例する量と考えればよい。つまり、機器の破損の起き易さは、機器が保有する損傷の程度に応じて決まる破損確率と関係づけられることは明らかである。以下では、破損確率に対応する量として、損傷係数という基準化した量を用いている。しかし、機器の破損の起き易さは、同じ破損確率であったとしても、管理方式がずさんであると、増大することは明らかであろう。さらに、同じ損傷の程度であったとしても、機器の周辺の環境の状態などによっても破損の起き易さは影響を受ける。従って、対象とする機器に固有の状況も反映する必要がある。これらの全ての要因を加味した上で、破損の起き易さを数値として表現したものが FPI である。以下、もう少し詳しく述べる。

表 2.1 FPI と破損確率ランクとの対応 ²⁰⁾

破損確率ランク	FPI
1	≤ 2
2	$2 < \text{FPI} \leq 20$
3	$20 < \text{FPI} \leq 100$
4	$100 < \text{FPI} \leq 1000$
5	$1000 <$

FPI の数値は下式により計算する。

$$FPI = \text{損傷係数} \times \text{機器修正係数} \times \text{管理システム評価係数} \quad (2.1)$$

ここで、損傷係数とは、評価対象とする設備に使用されている材料と使用環境から、損傷モードを抽出した上で、使用年数と採用する検査方法、検査回数に基づいて評価される損傷の程度を示す数値である。基本的考え方は、損傷速度から使用年数後の損傷の程度を予測することに基づく。ただし、検査方法に依存してその測定精度は異なるので、その影響をも加味する。損傷モードごとの損傷速度は、HPIS Z107 2TR～4TR に与えられている。損傷係数は 1～5000 までの数値で与えられるものであるが、あくまで同一の使用材料、使用環境のもとでの数値である。利用者が実際に特定の機器に適用するにあたっては、どうしてもその機器に特有の条件が発生し、損傷係数の数値がそのままあてはまらないことが多い。このような評価対象の機器の固有の条件を反映するために、機器修正係数を定義し、乗算の形で修正することとしている。例えば、プラントの立地条件として海岸付近に立地しているときには、係数に 2 点加算する、活断層が近くにあるときには 4 点加算するなどの補正を行う。また、対象とする機器の複雑度に応じて係数の加算、減算を行い、設計規格のフォローの程度、使用年数、安全装置の設置状況、過去の運転安定性などに応じた修正が行われる。次に、プラントの管理状況に応じた修正が行われる。このために、管理システム評価係数の評価を行う。この係数は、プラントの運転管理、保全活動、オペレーター訓練、情報伝達、技術伝承の可否を評価し、プラントの機器の破損や事故を未然に防げる状態にあるかどうかを評価した上で係数を決定する。

最終的に、損傷係数に機器修正係数、管理システム評価係数を乗じて、破損の起き易さの指標 FPI を計算する。このように、半定量評価では厳密に破損確率を評価するわけではないが、エンジニアリング判断を交えて、実態の破損の起き易さを簡便に評価できる利点がある。

2.6.3 影響度評価

影響度の尺度の代表的なものは健康 (H)、安全 (S)、環境 (E) があり、略して HSE という用語が用いられる。HPIS では、簡略化のために、影響面積と経済への影響の 2 種類のみを考慮している。利用者は、評価の目的に応じていずれかを選択すればよい。この影響度については、適用する産業分野ごとに異なるため、利用者が適切な指標を考案してよい。例えば、故障時の修理に要する期間が保全コストと直結するような場合には、故障時の修理日数などを指標としてもよいであろう。

HPIS の場合には、対象がプラントであるので、影響面積としては内容物の最大保有量から、可燃性物質と毒性物質に応じた影響面積の簡便評価法を提供している。また、経済の影響については、破損設備の修理費、停機による生産機会の損失、関係機関への届け出、環境汚染の処理費などを考慮して決定する。影響度ラ

ンクについても、破損確率ランクと同様に 5 段階のランク付けが行われる。影響度については、たとえ同じ影響面積や経済面積であっても、その地域特性や企業の規模によって被る被害の程度は異なる。従って、金銭に換算して影響度を評価する場合には、このようなことにも配慮が必要である。

3 まとめ

参考文献

- 1) 原子力維持規格の概要、保全学、Vol.4、No.3、p.11-16 (2005).
- 2) ASME Boiler & Pressure Vessel Code、Sec. 、 Construction of Nuclear Power Plant Components、(2001).
- 3) ASME Boiler & Pressure Vessel Code、Sec. XI、 Rules for In-service Inspection of Nuclear Power Plant Components、(2001).
- 4) 日本高圧力技術協会、圧力機器の亀裂状欠陥評価方法-第 1 段階評価 Z101-1-2008.
- 5) 小林英男、「エロージョン／コロージョンの損傷事故と解析」、材料と環境、第 57 巻、第 1 号、p.5-8、(2008).
- 6) API 579、 Recommended Practice for Fitness-For-Service、(2000).
- 7) 最上雄一、他 3 名、「API579-1/ASME FFS-1 の局部減肉評価基準への信頼性手法の適用」、圧力技術、Vol.47、No.5、p.329-339(2009).
- 8) Harrison.R.P., Loosemore,K.,and Milne,I.:Assessment of the Integrity of Structures containing Defects, CEGB Report, No.R/H/6,Central Electricity Generating Board, U.K.,1976.
- 9) Milne,I.,Ainsworth,R.A., Dowling,A.R., and Stewart, A.T.:Assessment of the Integrity of Structures containing Defects, CEGB Report, No.R/H/6-Reevision3, Central Electricity Generating Board, U.K.,1986.
- 10) 構造健全性評価ハンドブック編集委員会 編、「構造健全性評価ハンドブック」、共立出版、2005.
- 11) Newman,J.C. Jr.,and Raju,I.S.:Stress-Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies Subjected to Tension and Bending Loads,NASA Technical Memorandum, 85793, NASA, 1984.
- 12) Dillström,P. and Sattari-Far, I.:Limit Load Solutions for Surface Cracks in Plates and Cylinders, RSE R & D Report,No.2002/01, Det Norske Veritas AB,2002.
- 13) 小林英男,「リスクベース工学の提案」, 日本機械学会誌,Vol.106,No.1020,pp.866-868, 2003.
- 14) API Publication 580 Risk-Based Inspection Base Resource Document, 2009
- 15) API Publication 581 Risk-Based Inspection Base Resource Document, 2008
- 16) Steinbeis Advanced Risk Technologies;" Upgrading of the CWA 15740:2008 towards the European Norm(EN)" , Kick-off meeting of potential stakeholders, march 29,2012.
- 17) Song-Chun Choi, "Development of LNG-RBI Technology and Introduction of LNG-RBI Program" , Technical Seminar for Risk Assessment of LNG Plant, Yeosu, Korea, March 22,2012.
- 18) Bum-Shin Kim, Current Status of RBM Application in Korean Fossil Power Industry, RBE-5 5th International Workshop on Risk-Based Engineering, Beijing, China, Nov. 16-18,2010.
- 19) Shan-Tung Tu, Risk Assessment Practices in China, 4th Int. workshop on Risk-Based Engineering,

Tokyo, Nov. 2008.

- 20) 政友弘明、RBM 専門研究委員会から発行予定の RBM ハンドブックによる評価方法の紹介、圧力技術、第 46 巻、第 6 号、p.378-383,2008