158. Two Criteria 法による原子炉機器の 構造健全性評価法

村上弘良*, 長谷川邦夫**, 志田 茂**

(1986年 7月24日 受理)

(1986年 11月26日 再受理)

Assessment of Integrity for Nuclear Components Using Two Criteria Approach

By Hiroyoshi MURAKAMI, Kunio HASEGAWA and Shigeru SHIDA

Since a pressurized water reactor plant was decided to be introduced into England, the integrity of a reactor vessel had been assessed using LEFM (linear elastic fracture mechanics) of ASME Code Section VIII. However, it was pointed out that the assessment based on the LEFM was not suitable for the vessel.

Central Electricity Generating Board (CEGB) had established R-6 method normalized two criteria of the LEFM and plastic collapse concept. The method can be applied to any type of structure but has been derived mainly from consideration of ferritic steel pressure components. The CEGB had evaluated the vessel using the R-6 method. The method is now being used widely in Europe. However, the method is not well known in Japan.

This paper describes the basic concept of the R-6 method, an example of an assessment of a reactor pressure vessel and the Two Criteria Approach taking into account of strain hardening of materials. In addition, remarks, limitations and adaptabilities of the Two Criteria Approach are discussed. It is concluded that the approach is a simple and practical method for assessment of actual component, compared with other conventional methods.

KEYWORDS: crack growth, crack instability, elastic plastic fracture, failure assessment diagram, linear elastic fracture mechanics, plastic collapse, R-6 method, reactor pressure vessel, safety factor, two criteria approach

I. 緒 言

英国では、1970年代に商業用発電計画にガス炉に加えて加圧水型軽水炉(PWR, Sizewell B 110万 kW クラス)を合わせて採用することを検討した。PWRの運転圧力はガス炉に比べ約11倍と大きいので、PWRの圧力容器の健全性が懸念された。このため、英国原子力公社(UKAEA)の W. Marshall を中心に委員会が設置され、同圧力容器の健全性について検討がなされた⁽¹⁾。この健全性の評価は、米国機械学会(ASME)の ASME B&P Code Sec. VIII に基づく線形破壊力学を用いて行われた。

線形破壊力学は、塑性変形が小さい破壊条件のときのみ精度の高い破壊評価が可能となる。しかしなが

ら、一般の鋼構造物は線形破壊と塑性崩壊の間である弾塑性破壊をする例が多い。

このような背景から、PWRの圧力容器に従来の線形破壊力学を用いて健全性評価を行うことは適切でないとの指摘が英国でなされた。

Dowling と Townley は1975年に線形破壊力学パラメータと塑性崩壊荷重の2つのパラメータを用いた Two Criteria Approach を提案した⁽²⁾。さらに英国中央電力庁(CEGB; Central Electricity Generating Board)では、この Two Criteria 法を基に、小規模降伏破壊から大規模降伏破壊に至るまでの広範囲に適用可能

* 日本原子力発電(株)(Japan At. Power Co.)

** 日立製作所 機械研究所 (Mech. Eng. Res. Lab., Hitachi, Ltd.)

で、かつ評価手法が簡便であるという特徴を有する構造機器の健全性評価手法を開発した⁽³⁾。この評価手法は、CEGBの報告書番号 R/H/R6 にちなんで「R-6法」と呼ばれている。

このような状況のもとで、前述の指摘に答えるべく Marshall らは R-6 法を用いて PWR 圧力容器の健全性を再評価し、Marshall 報告の1982年版として発表した⁽⁴⁾。

CEGB が開発した R-6 法は、欧州を中心に実際の構造物の健全性評価に広く用いられつつある。また、米国においても Two Criteria 法の研究が進められている⁽⁵⁾。ASME B&P Code Sec. XI においても同手法を Code の中に織り込むべく審議が進められている。しかし、Two Criteria 法はその基本的な概念や評価法を含めて日本ではあまり知られていない。

本報は、R-6 法の基礎概念、評価手順および原子炉圧力容器への適用例について述べるとともに、R-6 法をさらに発展させた Two Criteria 法と、その評価上の留意点および今後の課題について考察したものである。

II. R-6 法の基礎概念と破壊評価線図

1. R-6 法の基礎概念

亀裂近傍の応力の特異性は、次式で示す応力拡大係数 K で表わされる。

$$K = \sigma \sqrt{\pi c} \quad (1)$$

ここで、 σ : 負荷応力

c : 亀裂長さの半長

(1)式が成立するのは、亀裂先端の塑性域が小さいときである。一般の鋼材では塑性変形が大きいため、亀裂先端に生じる塑性域が無視できなくなる。このため、(1)式は亀裂長さに塑性域を考慮した補正を行う。これは、次式で定義される塑性域補正係数 ϕ を用いて行う。

$$\phi = \frac{c(\text{塑性域補正亀裂長さ})}{c(\text{亀裂長さ})} \quad (2)$$

また、亀裂開口変位(COD; Crack Opening Displacement)を基にすると

$$\phi = \frac{\text{COD}(\text{塑性域補正})}{\text{COD}(\text{弾性解})} \quad (3)$$

となる。この係数 ϕ を用いて(1)式を書き換えると、

$$K = \sigma \sqrt{\pi c \phi} \quad (4)$$

と導かれる。

ϕ は Dugdale モデルによって具体的に求めることができる。すなわち、 σ が作用する無限板に長さ $2c$ の

亀裂があり、亀裂の両端前方に γ_p の塑性域が生じている場合を考える。亀裂断面の応力分布を Fig. 1(a)に示す。このとき、塑性域内の引張応力は一定で、降伏応力 σ_y に等しいとする。この応力分布は、 $2(c + \gamma_p)$ の亀裂長さを仮定した応力分布(Fig. 1(c))、および $2c$ の亀裂長さでその先端の長さが γ_p の部分が降伏して σ_y になっている応力分布(Fig. 1(b))の重ね合せを考えると求められる。すなわち、負荷応力 σ と塑性域長さ γ_p の関係は次のようになる。

$$\frac{\sigma}{\sigma_y} = \frac{2}{\pi} \arccos \frac{c}{c + \gamma_p} \quad (5)$$

また、亀裂開口変位 δ は、Dugdale モデルによれば

$$\delta = \frac{8\sigma_y c}{\pi E} \ln \sec \frac{\pi \sigma}{2\sigma_y} \quad (6)$$

ここで、 E : ヤング率

で与えられる。

Fig. 1 Plastic deformation of Dugdale strip yield model

σ が σ_y に比べ、 $\sigma/\sigma_y \ll 1$ の場合、(6)式は次のように与えられる。

$$\delta = \frac{\sigma^2 \pi c}{\sigma_y E} \quad (7)$$

(6)と(7)式を(3)式に代入すると、具体的な ϕ が求められる。 ϕ は次のように与えられる。

$$\phi = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\sigma_y^2}{\sigma^2} \ln \sec \frac{\pi \sigma}{2\sigma_y} \quad (8)$$

次に、 ξ と η の2つのパラメータを次式のように定義する。

$$\xi = \frac{K_c}{\sigma \sqrt{\pi c}} \quad (9)$$

$$\eta = \frac{\sigma_f}{\bar{\sigma}} \quad (10)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$: 流動応力, σ_f : 破壊応力
 K_r : 破壊発生時の応力拡大係数で
 (4)式で示される。

(4)式を(9)式に代入して整理すれば、 ξ と η の関係は

$$\xi = \eta \sqrt{\phi} \quad (11)$$

となる。

破壊発生時の塑性域補正係数 ϕ_f は、(8)式の σ_y を流動応力 $\bar{\sigma}$ に、 σ を破壊応力 σ_f に置き換えることによって次式で表わされる。

$$\phi_f = \frac{8}{\pi^2} \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_f} \right)^2 \ln \sec \frac{\pi \sigma_f}{2\bar{\sigma}} \quad (12)$$

(12)式を(11)式に代入して整理すれば、 η と ξ の関係は次式のように表わされる。

$$\eta = \frac{2}{\pi} \arccos \left\{ \exp \left(-\frac{\pi^2}{8} \xi^2 \right) \right\} \quad (13)$$

この関係をFig. 2に示す。

Fig. 2 Fracture evaluation combined LEFM and ultimate collapse⁽²⁾

Fig. 2より、(13)式で与えられる線図が破壊評価線図であり、この線図の下側が非破壊領域である。この破壊評価線図は、線形破壊力学(LEFM; Linear Elastic Fracture Mechanics)に従う破壊から塑性崩壊に従う破壊までを取り扱える利点がある⁽²⁾。

しかしながら、この破壊評価法では亀裂の進展挙動を具体的に評価するのが難しい。CEGBは、新たに次式で定義される K_r と S_r を導入した。

$$K_r = \sigma_f / \sigma_e, \quad S_r = \sigma_f / \sigma_u \quad (14)$$

ここで、 σ_e : 線形破壊力学評価で破壊発生すると考えたときの限界応力

σ_u : 引張強さ

σ_u は全断面が流動応力と考えると $\sigma_u = \bar{\sigma}$ とおける。した

がって、 K_r と S_r および ξ と η の関係は

$$K_r = \eta / \xi, \quad S_r = \eta \quad (15)$$

となる。このような新たなパラメータを用いて(15)式を(13)式に代入して整理すれば、

$$K_r = S_r \left\{ \frac{8}{\pi^2} \ln \sec \left(\frac{\pi}{2} S_r \right) \right\}^{-1/2} \quad (16)$$

が得られる。この関係をFig. 3に示す。(16)式で表わされる関係は破壊評価曲線(Failure Assessment Line)であり、同評価曲線を含めたFig. 3は破壊評価線図(Failure Assessment Diagram, 以下FAD線図)と呼ばれている⁽³⁾。

Fig. 3 Failure assessment diagram of R-6 method developed by CEGB⁽³⁾

2. 破壊形態と破壊評価線図

構造物の破壊は種々な形態が存在し、特に亀裂を有する構造物はFig. 4に示す5つの経路のいずれかを経て破壊に至る⁽⁶⁾。どのような破壊経路をたどるかは構造の材質、寸法、亀裂の大きさ等に依存する。

Fig. 4 Fracture morphologies of cracked structures⁽⁶⁾

構造物の破壊評価手法としては、いろいろな破壊形態を統一的に説明できる手法であることが望ましい。R-6法は、この要求に応える1つの手法であるといえる。

R-6法で用いられるパラメータは、前述のように、塑性崩壊の尺度を表わす S_r と線形破壊の尺度を表わす K_r の2つを組み合わせたものである。欠陥を含む構造物がある荷重を受け、その時の S_r , K_r の大きさ S_r' , K_r' をおの次のように求める。

$$\left. \begin{aligned} S_r' &= \frac{P}{P_L} = \frac{\text{作用荷重}}{\text{欠陥を含む構造物の塑性崩壊荷重}} \\ K_r' &= \frac{K_I}{K_{Ic}} = \frac{\text{欠陥を含む構造物の応力拡大係数}}{\text{材料の破壊靱性値}} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

ここで、 P_L : 材料定数である流動応力から求められる荷重

K_{Ic} : 材数定数

欠陥を含む構造物の S_r' と K_r' を求め、評価点(S_r' , K_r')が(16)式で表わされる破壊評価曲線の内側に位置すれば、構造物は破壊しない。一方、評価点が外側に位置すると破壊が生じると判定される。

また、(17)式で $K_r'=1$ のときは線形破壊し、 $S_r'=1$ のときは塑性崩壊によって破壊することを意味している。

FAD線図の有効性に関してChellは理論的考察を行い、破壊評価曲線が任意の鋼構造物に対して工学的に

Fig. 5 Failure assessment points of CT specimens in failure assessment diagram⁽⁸⁾

有効な近似を与えるものであることを示した⁽⁷⁾。また、Harrisonらは、試験片、配管、压力容器等の試験データを解析することにより、FAD線図の有効性を検証した⁽⁸⁾。Fig. 5は、コンパクト試験片等の破壊データをFAD線図上にプロットしたものである。Fig. 5は1点を除いてデータが破壊評価曲線の外側に散在しており、R-6法は適切な評価であることを示唆している。

III. R-6法の破壊評価手順

定期検査時に機器に亀裂が検出された場合、もしくは許容亀裂寸法を想定する場合、Fig. 6に示す手順に従って評価を実施する⁽³⁾。

Fig. 6 Assessment procedures of R-6 method⁽³⁾

このとき、次のような点に留意して評価を行う。

- (1) 評価する欠陥寸法は、ASME Code Sec. VIIIおよび英国規格(BS PD 6494)に基づき決定する。
- (2) 材料特性には、単純引張りによる機械的性質と破壊靱性値が必要である。これらの値は安全側に評価するために最低の値を用いることが望ましい。破壊靱性値はASTM(American Society for Testing and Materials)もしくはBS (British

Standards)の方法に従って定める。

(3) 応力は亀裂面に垂直に負荷している応力に換算し、1次および2次応力も対象として扱う。

(4) S_r' は、塑性崩壊、極限解析、有限要素法およびモデル試験によって決定する。

(5) K_r' は、線形破壊力学によって求められる K_I と、ASTM や BS 等の規格に従って求められる K_{IC} から決定する。

以上より求めた S_r' と K_r' を Fig. 3 の FAD 線図にプロットし、評価対象機器が安全であるか否かが判断される。

破壊の発生は、(16)式で示される破壊評価曲線上で生じる。機器の亀裂を評価した点が、例えば Fig. 7 の A 点に位置したとする。このとき、負荷荷重を増加させると、評価点 A は OA 線の延長線上を移動し、破壊評価曲線と交わった A' 点で破壊が発生する。このことから、破壊に対する安全率 F は図式的に次式のように定義される⁽⁹⁾。

$$F = OA' / OA \quad (18)$$

Fig. 7 Safety factor illustrated in failure assessment diagram

このように、FAD 線図上に欠陥の評価点をプロットすることにより、構造物の安全率が視覚的に理解されることも R-6 法の特徴である。

IV. PWR 圧力容器の評価例

英国では Sizewell B の PWR 型原子炉圧力容器について R-6 法を用いて健全性評価を行なった⁽⁴⁾。その 1 例は、圧力容器の入口ノズル胴部およびベルトラインに亀裂を想定し、各種運転において亀裂深さを 20 mm ずつ増加させて亀裂進展挙動を R-6 法で評価した。

ベルトラインに 1 次元亀裂、半楕円亀裂および半円亀裂を想定したときの定常運転時における評価結果を Fig. 8 に示す。また、亀裂深さを漸次増大させた場合の安全率(または荷重余裕度; Load Factor) F の変化を Fig. 9 に示す⁽⁴⁾。

▽: Extended defect $C_{INT}=0.083$ m
□: Semi-elliptical defect $C_{INT}>0.160$ m
○: Semi-circular defect $C_{INT}>0.160$ m

Fig. 8 Crack growth behaviors of various crack depths of a_{INT} at beltline of pressure vessel under normal operation⁽⁴⁾

Fig. 9 Various defect growth sizes and load factor (safety factor) at pressure vessel beltline⁽⁴⁾

同図から亀裂深さが大になると安全率が低下することがわかる。ここで、 F が 1.0 となる亀裂深さが限界亀裂寸法になる。いずれの亀裂も非破壊検査で検出する亀裂深さであり、現状の検査技術で十分対処することが明確となった。

V. 延性亀裂の成長と不安定破壊

構造物の中には欠陥を起点として不安定破壊を生じる前に、延性亀裂の成長を伴ってから不安定破壊を生じる場合もある。R-6 法で延性亀裂の成長から不安定破壊の発生に至るまでを取り扱った例を Fig.10 に示す⁽⁹⁾。評価点 A は(17)式に従って得られる。評価点 A で定められた亀裂が成長すると新たに再評価することになり、その評価点 (S_r' , K_r') は次式によって求められる。

$$\left. \begin{aligned} S_r' &= \frac{P}{P_L(c+\Delta c)} \\ K_r' &= \frac{K_I(\sigma, c+\Delta c)}{K_Q(\Delta c)} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

ここで、 $P_L(c+\Delta c)$: 亀裂長さ $c+\Delta c$ に対する塑性崩壊荷重

$K_I(\sigma, c+\Delta c)$: 応力 σ , 亀裂長さ $c+\Delta c$ のときの応力拡大係数

$K_Q(\Delta c)$: 延性亀裂抵抗曲線から得られる靱性値

負荷応力 σ はそのまま一定とし、仮想的に亀裂を成長させると Fig. 10 に示す曲線 ABC が得られる。亀裂が成長するにつれて曲線 ABC が下方へ移るのは、 K_I の増加より K_Q の増加の方が大きいためである。また、 S_r' が増加するのは亀裂が進行する部材の残余面積が減少し、塑性崩壊荷重が減少するからである。亀裂の成長に対する FAD 線図はこのようにして得られる。

Fig. 10 Assessment of crack growth and crack instability⁽⁹⁾

不安定破壊の発生は破壊評価曲線上で表わされる。Fig. 10 の原点 0 を中心に曲線 ABC を拡大投影して $A''D''B''$, $A'B'C'$, ……等を得る。このうち破壊評価曲

線と接する曲線 $A'B'C'$ の接点 B' が不安定亀裂伝播をもたらす。これは次の理由による。点 A から荷重を増加すると評価点は OA 線上を外側に移動し、点 F において延性亀裂の成長が開始される。荷重をさらに増加させると点 F は破壊評価曲線上を移動し、点 B' に至る。ここが亀裂の不安定点となる。点 B' からは荷重の増加なしに亀裂が成長し、評価点が FAD 曲線域外になるからである。一方、 $A''D''B''$ は不安定破壊とはならない。点 D'' からはそのままの荷重で亀裂を成長させると点 B'' に至り、破壊評価曲線の内側に位置するためである。

このようにして、延性亀裂の成長とともに不安定破壊の発生が FAD 線図上で表示される。

VI. 破壊評価線図の新提案

破壊評価曲線上で、あるいは破壊評価曲線の外側近傍で破壊が生じないで、同評価曲線から離れた点で生じる場合がある⁽⁹⁾。これは COD 概念を基にした Dugdale モデルによる破壊が実際の評価部材のモデルとかけ離れていることが挙げられよう。

弾塑性応力条件における破壊パラメータとして、COD 概念とともに J 積分概念がある。 J 積分概念は亀裂のポテンシャルエネルギー解放率を表わすものであり、応力拡大係数 K と J 積分の関係から、 J 積分に基づく破壊評価曲線が提案されている。

弾性体においては、 J 積分は応力拡大係数 K_I と次式の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} J &= K_I^2/E \quad (\text{平面応力}) \\ J &= (1-\nu^2)K_I^2/E \quad (\text{平面ひずみ}) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

ここで、 E : ヤング率
 ν : ポアソン比

Bloom らは J 積分評価式に基づき、ひずみ硬化を考慮した FAD 線図を提案した⁽¹¹⁾。 J の評価式は次式で与えられる。

$$J = J^e(c, P) + J^p(c, P, n) \quad (21)$$

ここで、 J^e : J の弾性寄与分
 J^p : 塑性寄与分
 c : 亀裂長さ
 P : 荷重
 n : ひずみ硬化係数

J 積分に基づく K_r は

$$\frac{1}{K_r^2} = \frac{J}{J^e(c, P)} = \frac{J^e(c, P)}{J^e(c, P)} + \frac{J^p(c, P, n)}{J^e(c, P)} \quad (22)$$

ここで、 c_0 : 亀裂先端の塑性域を考慮した有効亀裂長さ

として表わされる。

Bloom らは(22)式を基に、原子炉压力容器に用いる FAD 線図を Fig.11 のように提案した。Fig. 11 の破壊評価曲線は高 S_r 側で $S_r = \sigma_u / \sigma_y$ を上限としている。また、破壊評価曲線は亀裂深さ c に依存している。ここで、 σ_u は引張強さであり、Fig. 11 の t は压力容器の板厚である。

Fig. 11 Failure assessment curves obtained from J -integral concept⁽¹¹⁾

一方、Milne はひずみ硬化特性を経験的に取り入れたひずみ硬化 FAD 線図を提案した^{(12), (13)}。ひずみ硬化を考慮した破壊評価曲線は、

$$\left. \begin{aligned} S_r &= \frac{\sigma}{\sigma_y} + (1 - K_r^{1/2}) \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_y} - 1 \right) \\ K_r &= \frac{\sigma / \sigma_y}{\sqrt{\frac{8}{\pi^2} \ln \sec \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)}} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

として表わす。ここで、材料のひずみ特性は σ_u / σ_y で代表される。(23)式により得られるひずみ硬化破壊評価曲線を Fig.12 に示す。

Fig. 12 Failure assessment curves based on strain hardening⁽¹²⁾

オーステナイト系ステンレス鋼の CT(コンパクト)試験片について、実験による破壊評価曲線、 J 積分による破壊評価曲線および Milne による破壊評価曲線の比較を Fig.13 に示す⁽¹²⁾。実験結果と Milne による破壊評価曲線はよい一致を示している。また、 J 積分に

Fig. 13 Comparison of failure assessment curves and experimental data⁽¹²⁾

基づく破壊評価曲線はひずみ硬化指数の選び方により大きく異なり、低応力側で応力-ひずみ線図とよく一致するような指数を選んだ場合、破壊評価曲線(同図の1の線)は実験結果とよい一致を示している。しかし、このような比較は CT 試験片以外の種々な試験片形状についてなされているわけではなく、試験片形状の変化により Milne の破壊評価曲線とのズレがどの程度明らかでない。

CEGB の R-6 法は $K_r = 1.0$, $S_r = 1.0$ を結ぶ曲線で亀裂の評価を行うものである。その後、上述したように、材料のひずみ硬化特性を考慮し、 J 積分概念の導入を図った破壊評価曲線の見直しが行われた。CEGB でも、ひずみ硬化を考慮に入れた FAD 線図を欠陥評価に用いるべく、Revision 3 で改訂がされた。

Ⅶ. 従来の亀裂評価法との対比

破壊力学と非破壊検査技術の発達によって構造物の亀裂が評価されるようになった。すなわち、経済的あるいは信頼性の観点から、許容される亀裂の規程が各国の民間、もしくは公的機関で制定されたり、整備されつつある。そこで、主な亀裂の評価法を R-6 法と対比して Table 1 に示し、おのおのの亀裂評価法の特徴について述べる。

(1) ASME B&P Code Section II

発電用原子炉構造物については ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. II で、供用前および供用期間中に検出された亀裂寸法の許容値が規定されている。すなわち、検出された亀裂が許容値以下なら、この亀裂はプラントにとって有害なものとみなされず、そのまま運転が継続される。亀裂が許容値を越す寸法るとき、欠陥の時間的進展量を計算解析で推定し、推定した亀裂寸法による構造物の破壊解析が行われる。

ここで、破壊解析においては Table 1 に示すように、フェライト鋼からなる压力容器等に対しては応力拡大

Table 1 Comparison of flaw evaluation methods

Code and Standard		Fracture Parameter	Applicable Components	Fracture Morphology
CEGB R-6 Method		Stress Intensity Factor, K_I Flow Stress, σ_o	Ferritic Components	Brittle~Ductile Fracture
ASME Code Section XI	Appendix A	Stress Intensity Factor, K_I	Nuclear Pressure Vessels	Brittle Fracture
	IWB 3640	Flow Stress, σ_o	Nuclear Stainless Steel Piping	Ductile Fracture
BSI PD 6493		Stress Intensity Factor, K_I Crack Opening Displacement, δ	Welded Components	Brittle Fracture
KTA 3201,4		preparing	Nuclear Pressure Vessels and Piping	——
WES 2805		Crack Opening Displacement, δ	Welded Components	Cleavage Fracture
JEAC 4205		not defined	Nuclear Components	——

係数を基にした線形破壊力学が用いられる。また、高延性高靱性材料であるオーステナイト系ステンレス鋼配管については塑性崩壊基準が破壊解析に用いられる。すなわち、ステンレス鋼配管は、塑性崩壊基準を基にした破壊に対する許容亀裂寸法が規定されている。

このようにして ASME Code Sec. XI では、材料の靱性に応じて破壊クライテリアを使い分けている。しかしながら、フェライト鋼製压力容器に関しては材質の向上や使用温度が高いことから、線形破壊力学で欠陥評価を行うことは精度が悪く実情にそぐわなくなっている。

(2) 英国の BS 規格

BSI (British Standards Institution) の PD6493⁽¹⁴⁾ では、压力容器用フェライト鋼、オーステナイト系ステンレス鋼やアルミ合金の板厚10 mm以上の溶接部について、亀裂の許容評価法が定められている。亀裂の進展は疲労、腐食、クリープによる破壊とともに脆性破壊を対象としている。脆性破壊は破壊靱性値 K_{IC} を用いて判定する。有効な K_{IC} が供試体から得られない場合は COD の限界値 δ_{crit} を用いて行う。すなわち、亀裂は、

$$\left. \begin{aligned} K_I &\leq 0.75 K_{IC} \text{ あるいは } \\ \bar{c} &< \bar{c}_m = K(\delta_{crit}/\epsilon_y) \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

ここで、 $\bar{c}$: 有効亀裂長さ

$\bar{c}_m$: 限界亀裂長さ

ϵ_y : 降伏ひずみ

K : 荷重条件によって定まる定数

のとき許容される。

BS PD 6493 は一般構造物の溶接部の欠陥を対象と

しており、小規模降伏で破壊する構造物の欠陥評価に適用されるものである。

(3) 西独 KTA 3201.4

西独においては、原子力技術委員会(Kerntechnischer Ausschuss)の安全技術規則が軽水炉1次系機器の再起動のための非破壊検査規準を定めている⁽¹⁵⁾。

運転再開に至る亀裂評価過程を Fig.14 に示す。非破壊検査によって亀裂が検出された場合、亀裂が許容値の寸法以内にあればそのままプラントは再起動される。許容値を越す亀裂寸法の場合、亀裂発生の原因調

Fig. 14 Crack evaluation procedure of KTA 3201.4⁽¹⁵⁾

査と亀裂による破壊解析を実施する。この解析により、亀裂をそのまま放置して運転制御処置を講じて再起動するか、あるいは補修して運転を再開するかが判断される。

ここで、KTA 3201.4 では許容される亀裂サイズについては現在準備中であり、また破壊解析に用いる破壊力学手法についても検討中である。

(4) 日本溶接協会規格 WES 2805

一般溶接構造物のための亀裂評価法として、日本溶接協会規格「溶接継手の脆性破壊発生に対する欠陥の評価法」WES 2805⁽¹⁶⁾がある。この規格は低温へき開破壊を生じる構造物を対象とし、COD クライテリアによって構造物の健全性評価を行う。

構造物の亀裂の幾何学的形状、亀裂部の応力・ひずみ状態、材料の塑性状態などによって定まる亀裂開口破壊パラメータ δ と材料の破壊靱性値 δ_c が、

$$\delta < \delta_c \quad (25)$$

を満足する時、この亀裂は許容される。

(5) 日本電気協会 JEAC 4205

日本電気協会の「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査」JEAC 4205において原子力発電所の供用期間中検査の原則が規定されている⁽¹⁷⁾。すなわち、供用期間中に検査を実施する頻度、試験を実施するために必要な接近性、検査員の資格、試験方法、試験結果の評価、処置、補修事項等が記述されている。

供用期間中の検査において亀裂が検出された場合、“補修を含む処置を決定するための評価を行わなければならない”，とされている。具体的に亀裂評価のための破壊力学的手法については触れられていない。現在、JEAC 4205においては、亀裂評価をどう扱うか検討が進められている。

上記に述べた主な亀裂評価に関する規定を Table 1 に比較して示した。ここで、Two Criteria による R-6 法は脆性破壊や延性破壊を表わす破壊パラメータで組み合わされており、かつ亀裂を工学的に容易に評価することができる。Two Criteria を基にした亀裂評価法はプラントの実情にあった手法であるといえる。

Ⅶ. Two Criteria 法の導入上の留意点

Two Criteria 法は評価が簡便で、評価された亀裂がプラントに対し安全であるか否かが明確に判断される。しかしながら、評価するにあたり留意すべき点もあり、これについて述べる。

(1) 破壊評価曲線の一義性

Two Criteria 法で示される K_r と S_r は Dugdale モ

デルから導かれている。Fig. 3 に示されるように、破壊評価曲線は K_r と S_r の座標上で 1 本の曲線として表示される。

しかしながら、Fig. 11～13 に示したように、 K_r に J 積分概念を導入し、材料のひずみ硬化を考慮すると破壊評価曲線は 1 本の曲線に定められない。すなわち、破壊評価曲線は試験片の形状、亀裂深さ、材料のひずみ硬化特性等に依存する。

Dugdale モデルから導かれた R-6 法による FAD 線図を用いる場合、破壊評価曲線は改めて求める必要がない。しかし、ひずみ硬化等を考慮した FAD 線図を用いて構造物の亀裂評価を実施する場合は、その構造物の形状と材料のひずみ硬化を考えた破壊評価曲線を作図しなければならない。あるいは、種々な試験片で破壊評価曲線が提案されているが、評価する構造物に近い破壊評価曲線を利用するのも一方法である。

(2) 塑性崩壊基準による評価

S_r を求めるに当っては構造物の塑性崩壊荷重の推定が必要となる。CT 試験片、環状切欠き円筒、中央貫通亀裂平板等の崩壊荷重は簡便に推定する提案式がある。

一方、ステンレス鋼のような高靱性で、かつ高延性の材料では、亀裂断面は非常に大きな全断面塑性状態で崩壊する。このような高靱性高延性材料からなる構造物においては塑性崩壊基準を基にした破壊の推定式が提案されている。

例えば、軸方向に貫通あるいは未貫通の欠陥を有する高靱性配管は流動応力 σ_0 を基にした Flow Stress Criterion によって破壊を生じる内圧が精度よく推定される⁽¹⁸⁾。また、周方向に貫通あるいは未貫通の欠陥を有するステンレス鋼配管の破壊は Net-Section Collapse Failure Criterion⁽¹⁹⁾によって、あるいは材料の機械的性質を基にした手法⁽²⁰⁾によって簡便に推定される。

したがって、材料によっては塑性崩壊基準で十分に破壊を推定できる方法もあり、このような材料では K_r と S_r を組み合わせた Two Criteria 法で欠陥を評価する必要は必ずしもない。

(3) 亀裂成長に対する評価

FAD 線図上で亀裂の安定成長を考えると、亀裂の成長方向に材料靱性値が異なる場合がある。例えば原子炉压力容器の場合、压力容器の内壁側は中性子照射損傷によって運転年数とともに靱性値が低下する。あるいは压力容器壁に温度分布がある場合、温度に依存した靱性値を用いなければならない。

すなわち、亀裂の成長方向に材料の靱性値が異なる構造物は多数存在するであろうが、このような構造物においては亀裂の成長を評価するとき、逐次その亀裂先端位置における材料の靱性値を考慮しなければならない。

(4) 評価構造物の破壊形態

Two Criteria 法はへき開破壊から延性破壊までの破壊形態を生じる構造物に適用される。ここで、評価する構造物の材料がへき開破壊を生じるとき、欠陥の評価は

$$K_r' = K_I / K_{IC} \quad (26)$$

ここで、 K_{IC} : その温度における材料の破壊靱性値として表わされる。

また、延性亀裂を伴って破壊する場合、 J 積分概念を基にして考えると(26)式は次のようにおきかえられる。すなわち、延性破壊で亀裂の発生までは、

$$K_r' = \sqrt{\frac{J_{IR}(c, P)}{J_{IC}}} \quad (27)$$

で表わされ、延性亀裂の発生を表わす弾塑性破壊靱性値 J_{IC} が用いられる。

さらに、延性亀裂が安定的に成長する場合、 K_r' は次式が用いられる。

$$K_r' = \sqrt{\frac{J_{IR}(c + \Delta c)}{J_R(\Delta c)}} \quad (28)$$

ここで、弾塑性破壊靱性値は J -抵抗曲線である $J_R(\Delta c)$ が使用される。

一方、構造物の破壊の側からみると、延性亀裂の発生・成長からへき開破壊へ遷移する亀裂伝播挙動を生じる例が多数ある。このような破壊形態のときは、プラントの使用条件や損傷程度を前もって上記3つの式の中から評価に用いる式を定めることが必要である。

また、構造物が脆性-延性遷移温度領域で使用されているときは、Two Criteria 法は取扱いに特に注意を払う必要がある。すなわち、欠陥を起点としてへき開破壊が起るのか、あるいは延性亀裂を伴って破壊するかどうかは同一材料の小型試験片では推測できない場合がある。そこで、Two Criteria 法では小型試験片の応力条件はできる限り評価構造物にあわせるよう勤めているが、(26)~(28)式のいずれを用いて評価するのが妥当であるか十分に検討しておかなくてはならない。

これは Two Criteria 法に問題があるのではなく、寸法効果のために小型試験片で構造物の破壊形態を把握しがたいためである。Two Criteria 法による欠陥評価を行う場合、評価を受ける側の構造物の破壊形態も

十分把握しておかなくてはならない。

(5) FAD 線図における安全率

欠陥の評価点が Fig.15 の A で示されるとき、欠陥 A の安全率は次式のように表わされる⁽¹¹⁾。

$$\text{安全率} = \text{OB/OA} \quad (29)$$

A 点で表わされる欠陥が、荷重一定のもとで延性亀裂が進展すると、 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \cdots \cdots 5$ と示され、点 D になる。同時に安全率も順次変化し、D 点では安全率は OC/OD となる。

ここで、Fig. 15 においては D 点における安全率が最大となる。換言すれば、一定荷重下で亀裂が成長しているとき、亀裂は成長した方が安全率が高まることになる。これは一見矛盾するようであるが、亀裂が成長すると(28)式の $J_R(\Delta c)$ が増加して K_r' が低下し、 S_r' の増加はそれほど大にならないためである。

Fig. 15 Safety factors shown in failure assessment diagram⁽¹¹⁾

亀裂が大きくなった D 点は破壊評価曲線から離れるために安全率が高まる。しかしながら、一般的考えによれば、亀裂が伸びれば構造物はそれだけ破壊の側に近づき安全率が低下したと認識される。この場合の FAD 線図上で定義される安全率は亀裂成長荷重に対する安全率である。Two Criteria 法で表わされる安全率と一般的認識の安全率について注意を払っておく必要がある。

(6) 運転状態に対する FAD 線図

Two Criteria 法においては、亀裂の評価点が Fig. 3 の破壊評価曲線の内側に位置すれば、その構造物は欠陥があっても健全であると判定される。

一方、ASME Code Sec. XI では、プラントの運転事象によって健全性を判定する基準を異にしている。例えば、亀裂に対する規定は、

$$\left. \begin{array}{l} \text{定常運転時: } c_f < 0.1c_t \\ \text{緊急・損傷時: } c_f < 0.5c_t \end{array} \right\} \quad (30)$$

ここで、 c_f : 検出された亀裂が次のスケジュールで検査するまでの限定された

期間あるいは設計寿命末期までの期間に成長する、計算により求められた最大欠陥寸法

c_c : 定常運転条件下における限界亀裂寸法

c_d : 緊急および損傷状態における非停止亀裂の進展開始寸法

として表わされている。プラントの運転状態の中で緊急状態は、寿命期間中25回を越えてはならないとされており、また損傷状態は非常に低い確率の設計上の仮想状態である。

ASME Code では、定常運転時の亀裂の許容基準は安全率を大きくとり、確率的に小さい緊急・損傷状態においては安全率を小としている。すなわち、プラントの運転事象によって欠陥の許容判定基準を規定している。

Two Criteria 法は K_r と S_r によって評価される点が破壊評価曲線の内側に位置し、かつ近接しても健全であり、運転事象によって判定が異なる考え方は示されていない。評価点が破壊評価曲線の内側に近接するとき、この評価点が確率的に低い運転事象で位置するのなら亀裂は許容される。しかし、定常的に発生する運転事象で求められた評価点が破壊評価曲線の内側で近接するときは、健全ではあっても安心できるものではない。何らかの裕度を考慮すべきである。

例えば、Fig.16に示すように、破壊評価曲線を運転事象によって区分けし、おのおのの領域内に評価点があれば健全であると判断する考え方ができる。すなわち、(30)式に示す ASME Code のように、定常運転時には安全率を大きくとって健全と示される領域を破壊線のように狭くとる。緊急・損傷時には安全率を小にとって、健全な領域を1点鎖線のように広くとる。このように、プラントの運転事象と安全裕度を組み合わせ

せた FAD 線図を考えることも留意すべきである。

Ⅱ. Two Criteria 法の今後の課題

1. 破壊評価曲線

Dugdale モデルを基にして定められた R-6法の破壊評価曲線は、1本の線として表わされるところに使いやすさがあり、工学的評価の意味があった。しかしながら、その後の研究で破壊評価曲線は試験片形状や材料のひずみ硬化によって異なることが示された。

実際に構造物の亀裂評価を解析するとき破壊評価曲線まで決定するのは容易でない。ひずみ硬化や評価部材の幾何学的形状を含めた弾塑性破壊力学による単一の破壊評価曲線の開発、あるいは工学的に評価が容易な破壊評価曲線の開発が必要である。

2. 伝播亀裂の停止評価

原子炉圧力容器で脆性亀裂が板厚方向に伝播して停止する破壊形態は、ASME Code Sec. XI では亀裂停止の破壊靱性値 K_{Ia} を基に取り扱われる。脆性亀裂が板厚途中で停止すればプラントの機能を損うことなく健全性が保てる場合がある。

Two Criteria 法は、不安定に伝播する亀裂の停止の評価は含まれない。伝播する亀裂の停止現象を FAD 線図上でどのように現すか、今後の課題である。

3. Two Criteria 法の動的解析

Two Criteria 法では降伏応力、引張強さ、破壊靱性値等の材料特性値が用いられる。構造物の動的な亀裂評価を実施するとき、これら材料特性の動的値が用いられることになる。

しかしながら、 K_r や S_r で表わされる破壊評価曲線もひずみ速度の依存性が考えられる。動的荷重を考慮した Two Criteria 法の開発が必要である。

Ⅰ. まとめ

- (1) Two Criteria 法は線形破壊力学による K_r と塑性崩壊による S_r の2つのパラメータを組み合わせたもので、小規模降伏から大規模降伏破壊を生じる構造物の健全性評価が行える。この2つのパラメータの関係は、Dugdale モデルにより導かれたもので、 K_r と S_r を組み合わせた破壊評価曲線は

$$K_r = S_r \left\{ \frac{8}{\pi^2} \ln \sec \left(\frac{\pi}{2} S_r \right) \right\}^{-1/2}$$

として表わされる。

- (2) Two Criteria 法の評価手順は CEGB により規準化され、R-6法としてまとめられた。R-6法を用

Fig. 16 Failure assessment diagram proposed from view point of plant operating conditions

いて、検出された亀裂が有害か否か、あるいは亀裂の進展経路、不安定破壊開始点、安全率等がFAD線図上で簡便に、かつ視覚的に表示される。

- (3) R-6法は英国において、原子炉压力容器の健全性評価手法としてすでに確立された手法であり、導入予定であるPWRの原子炉压力容器について健全性評価を行なった。
- (4) J積分概念や材料のひずみ硬化特性を考慮した破壊評価曲線の見直しが行われている。これらを考慮した破壊評価曲線は1本の曲線として表わされず、試験片形状等に依存することが示された。しかしながら、従来の亀裂評価法と対比するとTwo Criteria法は弾塑性破壊力学によって亀裂を容易に評価することができ、プラントの実情にあった手法であるといえる。

Two Criteria法の調査研究にご尽力頂きました東京工業大学 小林英男助教授、東北大学 高橋秀明教授、大阪大学 中長啓治助手、東京大学 矢川元基教授、日本原子力研究所 柴田勝之氏、電力中央研究所 高橋由紀夫氏を初め、富士電機(株)、日本鋼管(株)、(株)日本製鋼所、パブコック日立(株)、日本原子力発電(株)、(株)日立製作所のTwo Criteria法研究会のメンバーの各位に厚く感謝の意を表します。

—参考文献—

- (1) MARSHALL, W.: An assessment of the integrity of PWR pressure vessels, *UKAEA Rep.*, oct. (1976).
- (2) DOWLING, A.R., TOWNLEY, H.A.: The defects on structural failure; A two criteria approach, *Int. J. Pres. Ves. Piping*, 3, 77 (1975).
- (3) HARRISON, R.P., *et al.*: Assessment of the integrity of structures containing defects, *CEGB Rep.*, R/H/R6-Rev. 2, (1980).
- (4) MARSHALL, W.: An assessment of the integrity of PWR pressure vessels, *UKAEA Rep.*, Mar. (1982).
- (5) BLOOM, J.M.: Validation of a deformation plasticity failure assessment diagram approach to flaw evaluation, *ASTM STP* 308, II-206 (1983).
- (6) HARRISON, R.P., MILNE, I.: Assessment of the defects; C.E.G.B. approach, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A299, 145 (1981).
- (7) CHELL, G.G.: A procedure for incorporating thermal and residual stresses into the concept of a failure assessment diagram, *ASTM STP* 668, 581 (1979).
- (8) HARRISON, R.P., *et al.*: Assessment of the integrity of structure containing defects, *CEGB Rep.* R/H/R6, Suppl. 1, (1979).
- (9) MILNE, I., CHELL, G.G.: Evaluation of flaw tolerance during stable crack growth, *IMEch E*, C 18/80, 85 (1980).
- (10) GULVIN, T.F., *et al.*: The prediction of failure of welded steel plates for pressure vessels, *IMEch E*, C 17/80, 71 (1980).
- (11) BLOOM, J.M., MALIK, S.N.: Procedure for the assessment of the integrity of nuclear pressure vessels and piping containing defects, *EPRI NP-2431*, (1982).
- (12) MILNE, I.: Failure assessment diagrams and J estimates; A comparison for ferritic and austenitic steel, *Int. J. Pres. Ves. Piping*, 13, 107 (1983).
- (13) CHELL, G.G., MILNE, I.: Ductile tearing instability analysis; A comparison of available techniques, *ASTM STP* 803, II-179 (1983).
- (14) British Standards Institution: Guidance on some methods for the derivation of acceptance levels for defects in fusion welded joints, *PD 6493*, (1980).
- (15) Kerntechnischer Ausschuss: Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil; Widerkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung, Sicherheitstechnische Regel des KTA, *KTA 3201.4*, (1982).
- (16) 溶接協会: 溶接継手のぜい性破壊発生に対する欠陥の評価法, *WES* 2805, (1980).
- (17) 電気協会: 軽水炉型原子力発電所用機器の供用期間中検査, *JEAC* 4205, (1980).
- (18) EIBER, R.J., *et al.*: Investigation of the initiation and extent of ductile pipe rupture, *BMI-1908*, (1971).
- (19) KANNINEN, M.F., *et al.*: Towards an elastic-plastic fracture mechanics predicted capability for reactor piping, *Nucl. Eng. Des.*, 48, 117 (1978).
- (20) HASEGAWA, K., *et al.*: Prediction of fracture tolerances for stainless steel pipes with circumferential cracks, *ASME PVP-Vol.* 95, 65 (1983).

○第12回複合材料シンポジウム○

主 催 日本複合材料学会, 協 賛 本会ほか25学協会

日 時 昭和62年10月22日(木), 23日(金) 10:00~17:00

場 所 東京大学生産技術研究所第1会議室

(東京都港区六本木7-22-1. 03-402-6231)

講演テーマ

1. 基材, 力学特性, 2. 応力解析, 3. 物性および機能性
4. 環境特性(耐薬品性, 耐水性, 耐候性, 耐熱性)

5. 試験法および評価法, 6. 加工法および成形法

7. 最適構造設計, 8. 応用, 9. コストパフォーマンス

10. その他

講演申込 所定申込書により9月12日(土)必着で下記宛へ。

原稿締切 10月3日(土)必着

参加申込 所定申込書(郵便振替用紙の裏面通信欄)で送金とともに申込む。

参加費(予稿集含む) 会員 4,000円, 非会員 8,000円

申 込 先 (〒113)文京区本郷2-40-14 山崎ビル4階

日本複合材料学会 (03-817-5831)