528 熱時効ステンレス鋳鋼管の弾塑性破壊評価について

室屋 格 北条 公伸 長崎 武晴
野村 友典 清田 雅彦 河本 貴寛

Elastic-Plastic Flaw Evaluation on Thermal Aged Duplex Stainless Steel Pipes

Itaru MUROYA, Kiminobu HOJO, Takeharu NAGASAKI,
Tomonori NOMURA, Masahiko KIYOTA and Takahiro KAWAMOTO

Fracture toughness of stainless steel casting (duplex stainless steel) is reduced under the condition about 300 °C by the thermal aging. For the flaw evaluation on thermal aged duplex stainless steel pipes, Fracture Assessment Curve (FAC) of R6 Option2 method is calculated using the stress-strain curve and J-resistance curve of thermal aged duplex stainless steel. To evaluate the fracture load on thermal aged duplex stainless steel in simple method, corrective factor is prepared in order to convert limit load based on net section criteria to fracture load based on R6 method.

Key Words: Elastic-Plastic Flaw Evaluation, Duplex Stainless Steel, Thermal Aging, LBB, Net Section Criteria, Nuclear Power Plant, Pipe

1. 緒 論

ステンレス鋳鋼品(2相ステンレス鋼)は、300℃前後の高温に長時間曝されると、フェライト相の相分離により靱性が低下することが知られている(ステンレス鋳鋼の熱時効)。そこで、熱時効後のステンレス鋳鋼の材料特性(破壊靱性、引張特性)を用いて、R6法のオプション2により、熱時効ステンレス鋳鋼の破壊評価曲線(FAC)を定めた。

また、算出した破壊評価曲線(FAC)を用いて極限荷重に対する補正係数を定めた。この補正係数を用いることで、熱時効後のステンレス鋳鋼管のき裂安定性評価が簡便に実施可能となった。

2. 弾塑性破壊力学評価

2.1 評価対象

国内のPWR型原子力発電所の1次冷却材管にはステンレス鋳鋼が使用されている。そこで評価対象としては代表的な1次冷却材管(外径882mm、板厚72.7mm)とした。

また、想定き裂は、「原子力発電所配管破損防護設計技術指針」(JEAG 4613)に基づき、き裂全長が板厚の5倍の貫通き裂とした。

2.2 評価手法

評価はR6法オプション2に基づいて行った。ただし、保守的な評価とするために、物性値の一部に、実測値より低い「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」(以下告示501号と記載)の値を使用した。

(1) 破壊評価曲線(FAC)

以下の式により算出した。

$$Kr = \left[\frac{E\epsilon}{\sigma} + \frac{L_r^3 \sigma_y}{2E\epsilon} \right]^{-0.5}$$

$$L_r = \frac{\sigma}{\sigma_y}$$

$$L_{max} = \frac{S_f}{S_y} \quad (\text{カットオフライン})$$

Kr, L_r : R6法の評価パラメータ

ϵ, σ : 次に示すRamberg-Osgood近似曲線上の歪みと応力

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_t} = \frac{\sigma}{\sigma_y} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^n$$

- σ_y : 実測の0.2%耐力
 S_y : 告示の設計降伏点
 S_f : 告示の設計降伏点と設計引張強さの平均値
 (2) き裂進展評価曲線 (DCGL)
 以下の式により算出した。

$$Kr' = \sqrt{\frac{Je(a + \Delta a)}{J_R(\Delta a)}}$$

$$Lr' = \frac{M}{M_0}$$

$$Je(a + \Delta a) = \frac{K(a + \Delta a)^2}{E'}$$

Je : J積分の弾性成分

E' : ヤング率/(1-ポアソン比の2乗)

$J_R(\Delta a)$: 材料のJ-R特性

M_0 : 告示 501 号の S_y による塑性崩壊モーメント

2.3 材料特性

熱時効後の破壊靱性は材料のフェライト量に依存することが知られている。そこでフェライト量を変えた材料試験を実施した。また、代表的な溶接金属に対しても試験を行った。各材料に対する破壊靱性を図 2-1 に示す。

2.4 評価結果

熱時効後のステンレス鋼(フェライト量別に 3 種類)に対して作成した破壊評価曲線を図 2-2 に示す。

3. 簡易評価手法の検討

配管の破壊荷重を算出する際に、実断面応力基準による塑性崩壊荷重を R6 法による破壊荷重に換算するための補正係数を算出しておけば有用である。そこで以下のような補正係数 (H_p) の検討を行った。

$$M' = M_{of} / H_p$$

M' : R6 法による破壊モーメント

M_{of} : 告示 501 号の記載値による流動応力から算出した塑性崩壊荷重

前項の破壊評価線図を用いて各材料に対する H_p 係数を算出した。結果を表 3-1 に示す。母材(フェライト量約 23.5%)の材料の H_p 係数が最も大きく、この H_p 係数を用いることで、ステンレス鋼材の破壊荷重を安全側に予測できると考えられる。

謝辞

本稿は、関西電力、北海道電力、四国電力、九州電力、日本原子力発電及び三菱重工業により実施された共同研究の成果である。

図 2-1 ステンレス鋼の J- Δa 曲線

図 2-2 熱時効後の母材の破壊評価曲線(FAC)

表 3-1 各材料に対する H_p 係数

評価材料	解析結果
	H_p 係数
母材 (フェライト量約 10.5%)	1.13
母材 (フェライト量約 17.5%)	1.29
母材 (フェライト量約 23.5%)	1.45
溶接金属 (TIG)	1.37
溶接金属 (SMAW)	1.42