

# 残留応力場におけるき裂進展シミュレーション

## Crack Progress Simulation Analysis in Residual Stress Fields

遠藤 徹也      大橋 敏樹      奥田 幸彦

■ ENDO Tetsuya      ■ OHASHI Toshiki      ■ OKUDA Yukihiko

BWR (Boiling Water Reactor: 沸騰水型原子炉) プラントでは炉心シュラウド<sup>(注1)</sup>などの溶接線において、応力腐食割れ (SCC: Stress Corrosion Cracking) に起因するき裂がどのように進展するかを予測し、より高精度なき裂進展評価を行う必要性が高まってきている。

溶接残留応力のような多軸応力場においては、き裂の進展方向が変化することが知られていることから、東芝は、シュラウドなどにSCCき裂がある場合の進展予測に対するニーズを想定し、迅速かつ汎用的に評価することができる二次元き裂進展解析手法、及び複雑形状き裂の詳細な進展挙動を把握するための三次元き裂進展解析手法を開発した<sup>(1)</sup>。

In recent years, the need for assessment of the structural integrity of core shrouds with cracks due to stress corrosion cracking (SCC) on welded joints of core shrouds in boiling water reactor (BWR) plants is increasing.

The direction of crack propagation due to welding residual stress is known to change in a multiaxial stress field. In response to the demand for prediction of the propagation of cracks due to SCC, Toshiba has developed a multipurpose two-dimensional crack propagation analysis method that allows rapid evaluation, and a three-dimensional crack propagation analysis method for detailed evaluation of cracks having a complex shape.

### 1 まえがき

炉心シュラウドの溶接線にSCCのようなき裂がある場合に備えて、溶接残留応力下でどのように進展するかを予測し、その後の対策を判断するための適切なき裂進展評価手法が望まれている。

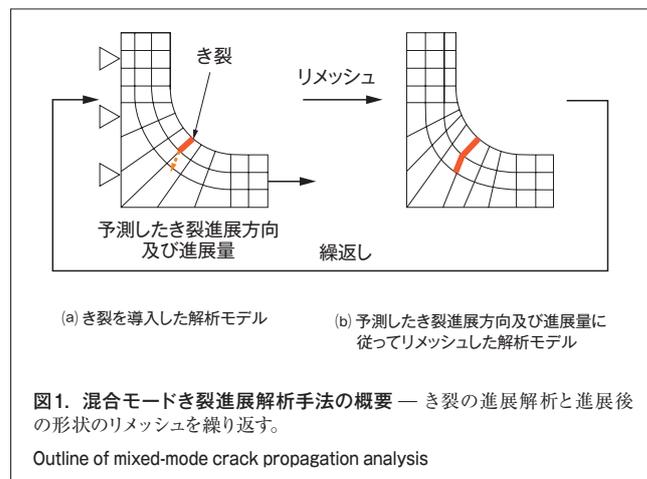
き裂進展評価に関しては、平板や円管などの単純形状の評価手法は既に実用化の段階にあるが、例えばSCCにより発生した複雑き裂(“ノ”の字や“Y”の字型)のように、応力状態に従って進展方向が変化するき裂の評価手法は確立されていない。

今回、東芝は、現状のき裂進展評価手法が前提としている単純形状ではなく、溶接残留応力に代表される多軸応力場での混合モードき裂進展解析手法を開発した。

### 2 混合モードき裂進展解析手法

#### 2.1 解析手法

混合モードき裂進展解析手法の概要を図1に示す。混合モードき裂進展解析は、き裂を有する解析モデルのき裂の進展方向及び進展量を応力解析により予測し、進展後のき裂形状を改めて要素再分割(以下、リメッシュと呼ぶ)する手法を



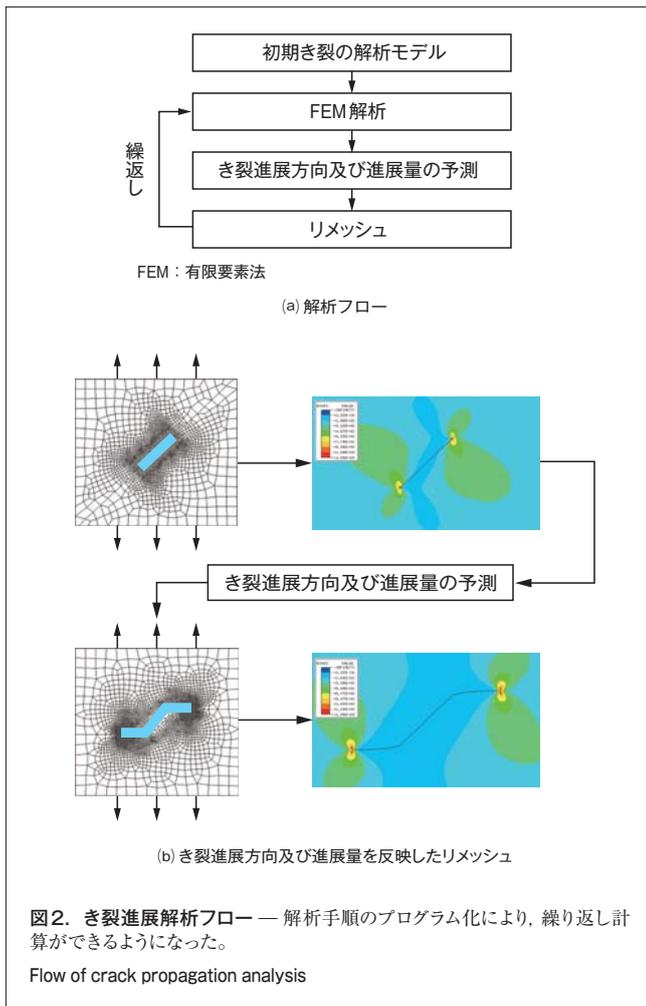
採用した。

解析手順は図2に示される解析フローに従う。まず、初期き裂を導入した解析モデルを作成する。次に応力解析を実施し、解析結果によりき裂の進展方向及び進展量を算出する。その後、それらの算出結果を反映したリメッシュを行い、き裂進展後の解析モデルを作成する。このとき、上記の応力解析からリメッシュまでのフローを繰り返し実施する部分をシステム化した。

#### 2.2 き裂進展方向の決定方法

J.R.Rice教授によって提案されたJ積分は、き裂の進展に伴うエネルギーの開放率を表すものとして、速度依存性のない準

(注1) 燃料集合体や制御棒を収納する炉心支持構造物。



静的な破壊力学問題に通常使用される。線形材料の場合、このパラメータは応力拡大係数に関係付けることができる<sup>(2)</sup>。

$J$ 積分は、き裂の進展に関連するエネルギー開放率として定義される。3次元(3D)物体におけるき裂平面内の仮想き裂進展量 $\lambda(s)$ により、 $J$ 積分は次のように示される<sup>(3), (4), (5)</sup>。

$$J = \int_A \lambda(s) n \cdot H \cdot q dA \quad (1)$$

- $A$  : き裂の先端を囲む面積
- $s$  : 微小き裂の先端幅
- $n$  :  $dA$ の外向きの法線ベクトル
- $H$  : 式の変数化
- $q$  : き裂が進展する局所方向
- $dA$  : き裂の先端を囲む領域の微小面積

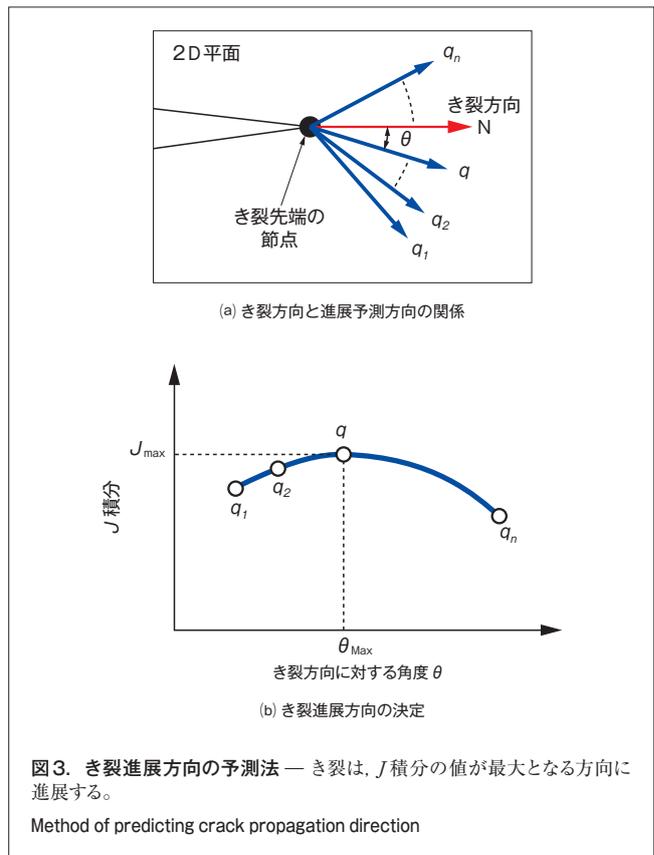
また、 $H$ は以下の式で与えられる。

$$H = (WI - \sigma \cdot \frac{\partial u}{\partial x}) \quad (2)$$

- $W$  : 弾性ひずみエネルギー
- $I$  : 単位マトリックス
- $\sigma$  : 応用テンソル

- $u$  : 変位ベクトル
- $x$  : 座標 (位置)
- $\partial$  : 偏導関数

この手法では、(1)式においてき裂の進展方向を前もって予測することは困難であるので、 $q$ をパラメータとして $J$ 積分が最大となる方向をき裂の進展方向として決定する。き裂進展方向の予測法を図3に示す<sup>(6)</sup>。二次元(2D)平面内において、 $J$ 積分値は、き裂が進展する局所方向 $q$ の角度 $\theta_{max}$ にき裂が進展するものと想定する。更に、 $J_{max}$ を用いてき裂進展則によりき裂の進展量 $\lambda(s)$ を算出することで、リメッシュ後のき裂の先端を予測することができる。



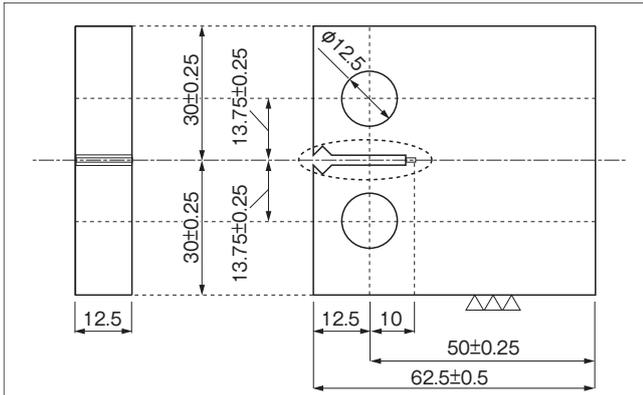
### 3 疲労き裂進展試験

#### 3.1 試験片

疲労き裂進展試験の供試材には、板厚15mmの原子力機器用ステンレス鋼(SUS316NG)を使用した。

疲労き裂進展試験の基礎データとして、ASTM E647<sup>(注2)</sup>に従って、室温における応力比Rが0.1の疲労き裂進展データを取得した。図4に示されるCT(Compact Tension)試験片に

(注2) ASTM (American Society for Testing and Materials: 米国材料試験協会)E647は、疲労き裂進展試験の国際的な標準試験方法。



単位：mm

図4. 疲労き裂進展試験の試験片 — 疲労き裂進展の基礎データを試験により取得した。

Test materials for fatigue crack propagation test

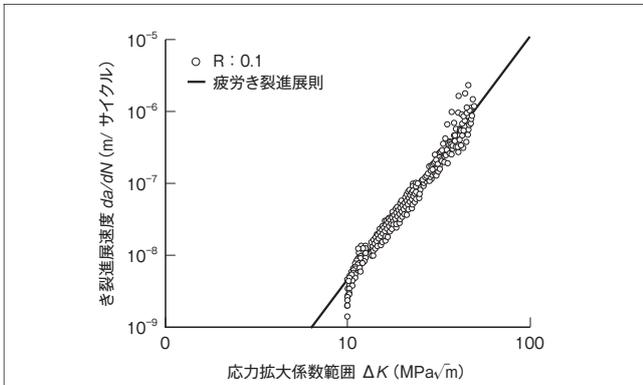


図5. 疲労き裂進展試験の結果 — 試験結果から、疲労き裂の進展予測式が得られた。

Results of fatigue crack propagation test

対して、コンプライアンス法によるき裂長さを用いて算出したき裂進展速度 ( $da/dN$ ) と応力拡大係数範囲 ( $\Delta K$ ) の関係を図5に示す。更に、図5の試験結果を回帰分析することにより、図中に示される次式の疲労き裂進展則が得られた。

$$\frac{da}{dN} = 1.71 \times 10^{-12} \times \Delta K^{3.39} \quad (3)$$

$a$  : き裂の長さ

$N$  : 回数

$\Delta K$  : 応力拡大係数範囲

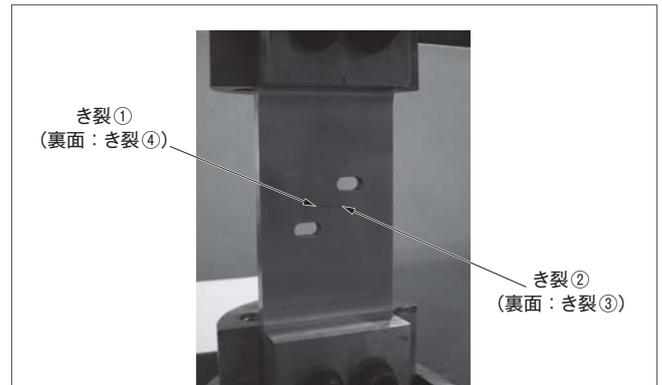
平面ひずみ状態において、モードI (き裂の開口モード) だけを考慮した場合に応力拡大係数はJ積分に書き換えができ、弾性係数 195 GPa、ポアソン比 0.3<sup>(7)</sup>を用いると (3) 式は次のようになる。

$$\frac{da}{dN} = 8.92 \times 10^{-14} \times \Delta J^{1.69} \quad (4)$$

### 3.2 混合モード疲労き裂進展試験

2章の解析手法を検証するために、混合モード疲労き裂進展試験を実施した。3.1項の供試材を用い、進展方向が変化するき裂進展挙動を実現するために、図6に示す試験体を設計した。この試験体は、平行部 (幅: 100 mm, 板厚: 10 mm) の中央に約 22 mm の初期貫通き裂 (疲労予き裂) を導入し、き裂進展方向を制御するための貫通孔を二つ (右上及び左下) 設けた形状である。

この試験体に対して、室温大気中で片振りの繰返し荷重



き裂①: き裂左側の表面  
 き裂②: き裂右側の表面  
 き裂③: き裂右側の裏面  
 き裂④: き裂左側の裏面

図6. 混合モード疲労き裂進展試験の試験体 — 複雑な応力場を得るために、き裂の斜め上下に貫通孔を配置している。

Test body for mixed-mode fatigue crack propagation test

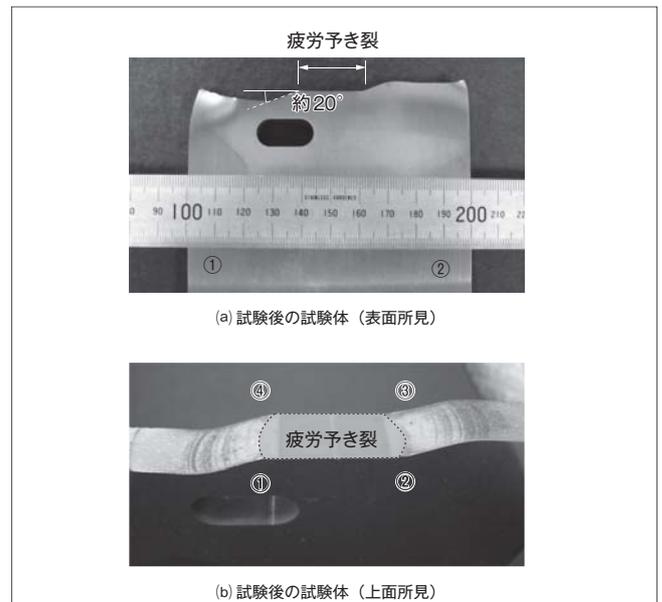


図7. 混合モード疲労き裂の進展方向 — 試験では、貫通孔周りの3D応力により、初期き裂面の進展方向が傾斜している。

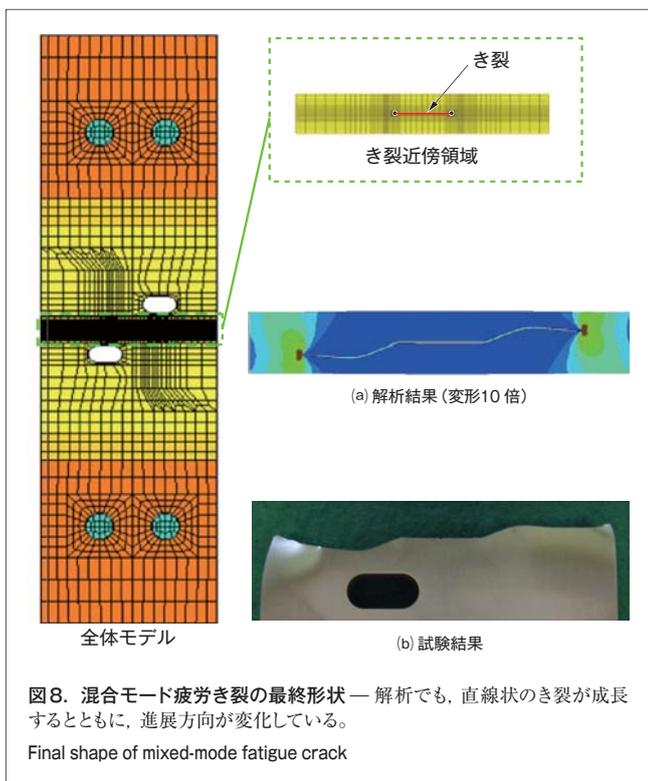
Direction of mixed-mode fatigue crack propagation

(R:0.1, 最大引張荷重:58.8 kN)を負荷する疲労き裂進展試験を実施した。この試験体のき裂は、疲労予き裂から約20°の傾斜で進展し、貫通孔の端部付近に到達すると進展方向を反転し、大きな変形を伴いながら最終破断に至った(図7)。

#### 4 き裂進展解析手法の検証

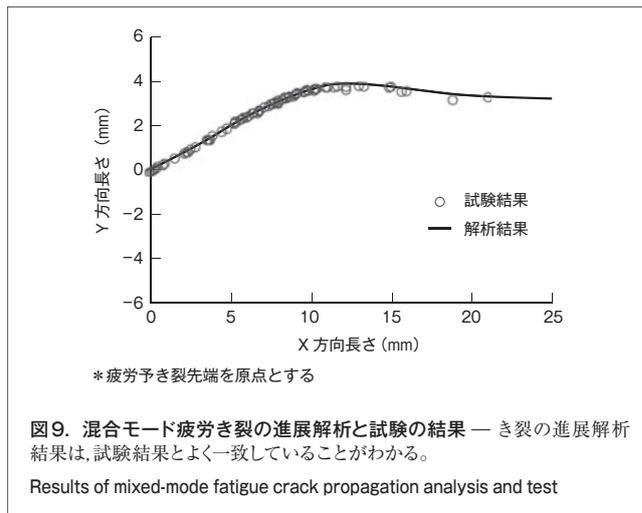
3章のき裂進展解析手法を用いて混合モードき裂進展解析を行い、得られた解析結果を試験結果により検証した。試験体形状を基に作成した解析モデルとき裂進展解析結果を図8に示す。解析モデルを全体モデルとき裂近傍領域とに分けて、き裂の進展に伴ってき裂近傍領域をリメッシュする手順を繰り返し実施することで、き裂進展挙動を効率よくシミュレートした。解析は汎用構造解析ソフトウェアABAQUS™(注3)を使用し、2D平面ひずみ要素を用いてモデル化した。図8には解析で得られた最終き裂形状が示されているが、これは図7の試験体の破断形状とよく一致している。

更に、解析結果と試験結果を重ねて図9に示す。両者のき裂進展挙動はよく一致しており、この解析手法は、疲労き裂の進展挙動を高精度に模擬できるものと考えられる。

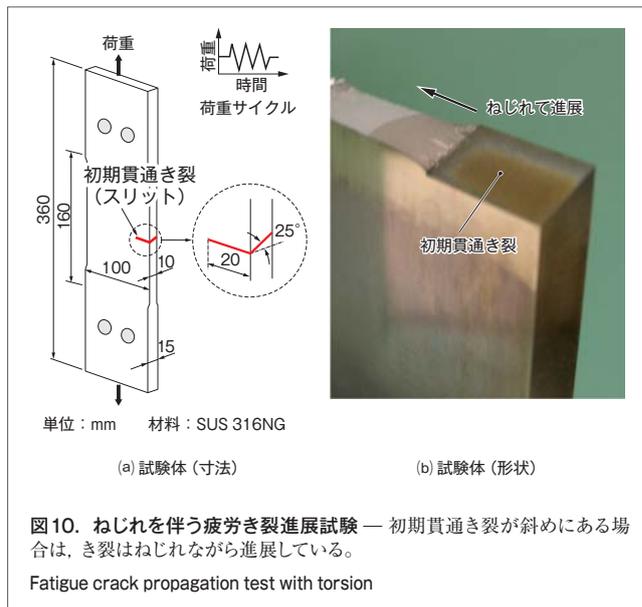


#### 5 3D問題への適用

多軸応力場において有限要素法(FEM)を用いて迅速なき裂進展解析を実現することを目的として、二軸応力場における



混合モードき裂進展を対象とした解析手法を開発した。更に、混合モード疲労き裂進展試験によりき裂進展解析手法の検証を実施し、この解析手法が疲労き裂進展挙動を高精度に模擬できることを確認した。今回の事例は2D問題であるが、図10、図11に示すように、き裂面がねじれながら複雑に進展する3Dの場合でも実験結果とよく一致することが確認されている。



#### 6 あとがき

き裂進展シミュレーションを効率よく実施するためには、FEMを用いた高度な解析技術だけではなく、き裂の進展状態を表現するための3D CADとの連携技術や、自動化のため

(注3) ABAQUSは、ダッソー・システムズ(株)の登録商標。

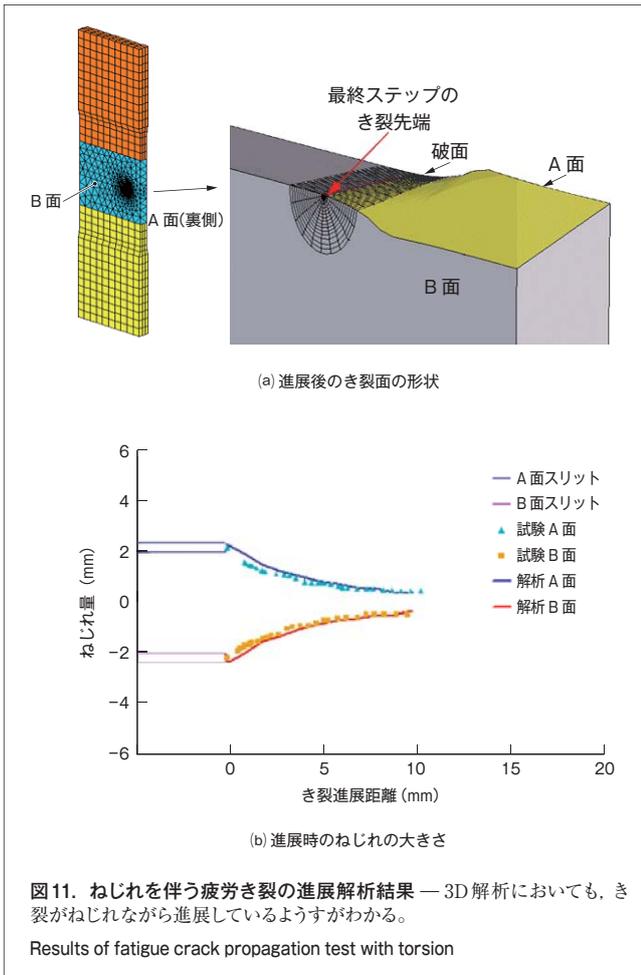


図11. ねじれを伴う疲労き裂の進展解析結果 — 3D解析においても、き裂がねじれながら進展しているようすがわかる。  
Results of fatigue crack propagation test with torsion

の計算機利用技術が必要であった。このため、システムの作成は当社のISセンター及び東芝インフォメーションシステムズ(株)が連携して実施した。  
 今後は、この解析手法を活用し、炉心シュラウドなどのSCCき裂進展評価の高度化につなげていく。

## 文 献

- (1) Okuda, Y., et al. "Crack Propagation Analysis Procedure Using FEM Applied to the Three-Dimensional Stress Field". PVP2005-71060. Denver, Colorado, USA, 2005-07, ASME. New York, USA, 2005. (CD-ROM).
- (2) Rice, J.R. A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks. J. Appl. Mech. **35**, 1968, p.379 - 386.
- (3) Li, F.Z., et al. A Comparison of Methods for Calculating Energy Release Rates. Eng. Fracture Mech. **21**, 1985, p.405 - 421.
- (4) Moran, B., et al. Crack Tip and Associated Domain Integrals from Momentum and Energy Balance. Eng. Fracture Mech. **27**, 1987, p.615 - 642.
- (5) ABAQUS. ABAQUS/Standard User's Manual Version 6.4. ABAQUS, Inc., 2003.
- (6) Claydon, P.W. Maximum Energy Release Rate Distribution from a Generalized 3D Virtual Crack Extension Method. Eng. Fracture Mech. **42**, 1992, p.961 - 969.
- (7) 日本機械学会. 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2005年版). 日本機械学会, 2005-09, 2000p.
- (8) 奥田幸彦, ほか. "多軸応力場における混合モードき裂進展解析手法の開発", 日本保全学会, 第4回学術講演会, 福井大学, 2007-07, 日本保全学会. 東京, 2007, p.411 - 414.



遠藤 徹也 ENDO Tetsuya

ISセンター エンジニアリングシステム推進部参事。東芝全社のCAE活用推進業務に従事。日本機械学会会員。  
Engineering Systems Management Dept.



大橋 敏樹 OHASHI Toshiki

東芝インフォメーションシステムズ(株) エンジニアリングシステム・サービスオフィス MCAE技術担当グループ長。日本機械学会会員。  
Toshiba I. S. Corp.



奥田 幸彦 OKUDA Yukihiko

電力システム社 磯子エンジニアリングセンター 原子力機器設計部主務。原子力機器の構造強度評価業務に従事。日本機械学会会員。  
Isogo Nuclear Engineering Center