

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24561038

研究課題名(和文) 面外拘束パラメータを考慮した照射材破壊靱性値の試験片寸法依存性補正手法構築

研究課題名(英文) Development of a framework to account for the test specimen size effects on fracture toughness of irradiated materials by considering the out-of-plane constraint

研究代表者

飯井 俊行 (Meshii, Toshiyuki)

福井大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10313727

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、照射脆化材の破壊靱性値 $J_c$ の試験片寸法依存性を定量的に補正する手法を構築することにある。ASTM規格等で定められている試験片ではプロセスゾーンがリガメント寸法に比して十分小さく、この場合には力学要因(き裂先端の応力分布差)に基づく補正が可能であることに着目した。成果として、(1)  $J$ の不完全性を確認(2)  $J_c$ の板厚に対する下限値予測手法を提案(3) 修正Ritchie-Knott-Rice破壊評価基準と有限要素解析を用いた試験片間 $J_c$ 補正手法を構築した。その結果、日本で各種試験片を用いて蓄積された $J_c$ データを、IAEA推奨試験片相当の $J_c$ へ換算することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：The object of this work was to develop a framework to account for the test specimen size effects on fracture toughness  $J_c$  of irradiated materials. Our perspective was that a mechanical driving factor such as the stress distribution difference can explain the size effects in  $J_c$ , at least for specimens specified in ASTM E1921 or equivalent. The results obtained were as follows: 1) Demonstrated that the cause of the size effects in  $J_c$  was due to the inability of  $J$  to characterize the crack-tip stress fields accurately. 2) Proposed a method to predict the lower bound  $J_c$  for large thickness specimens. 3) Proposed a framework to convert  $J_c$  between different specimen types and thicknesses by using finite element analysis and the modified Ritchie-Knott-Rice failure criterion. By utilizing these results, it is now possible to convert the  $J_c$  data accumulated in Japan for various specimen types and thicknesses to the  $J_c$  that is expected for a 1 inch CT specimen, recommended by IAEA.

研究分野：破壊力学

キーワード：破壊靱性値 延性 脆性遷移温度域 照射脆化 試験片の寸法効果 き裂先端の拘束 T-stress 有限要素解析 破壊評価基準

1. 研究開始当初の背景

照射脆化した原子炉压力容器のように、延性-脆性遷移温度 (DBTT) 域にあるき裂構造物の健全性評価を行う上で、図1に示す3つの不確実性要因が存在することが知られてきた。

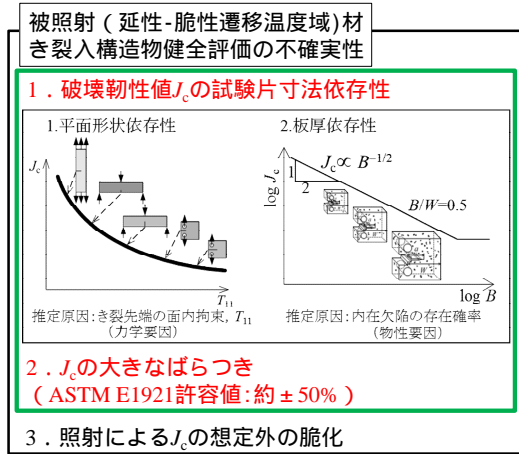


図1. 被照射 (延性-脆性遷移温度域) 材料き裂入構造物健全評価不確実性の3要因

1点目は、き裂部材の材料強度を表す破壊靱性値  $J_c$  に試験片寸法依存性が存在する、すなわち試験片の形状 (平面形状依存性) や試験片の厚み (板厚依存性) が異なると、一定であるべき  $J_c$  が大きく変わるという問題である [1]。

2点目は、同じ寸法の試験片で実験を行った場合であっても、この  $J_c$  が大きなばらつきを示すという問題である。このばらつきは破壊の起点となる第二相粒子の分布に依存し [2]、避けがたいと考えられてきた。たとえば、ASTM E1921 では  $\pm 50\%$  程度のばらつきを  $J_c$  に対し許容している [3]。

3点目は、照射による  $J_c$  の想定外の脆化という問題であり、内外の研究者が脆化予測の改善に取り組んでいる。

このうち、1について IAEA では十分に保守性が期待できる1インチ厚みの CT 試験片 (図1, 板厚依存性の説明図に示す試験片タイプ) を標準とすることで解決しようとしているように思える [4] が、日本ではこの試験片タイプを必ずしも使用してきておらず、これまでに他の試験片タイプを用いて蓄積された  $J_c$  データを有効活用し、かつ国際規格による規制への対応も柔軟に行えるようにするためには、 $J_c$  の試験片寸法依存性を定量的に補正する手法を構築することが必要であると考えられた。

このような  $J_c$  の試験片寸法依存性のうち、平面形状依存性については、き裂先端の面内拘束が原因であるとされており、 $T_{11}$  (き裂深さ方向の T-stress) によりこの拘束の強さを表すことができるとされている (Larsson [5], Rice [6], Bilby [7])。これは、 $J_c$  の試験片平面形状依存性を力学要因により説明したこ

とに他ならない。

一方、 $J_c$  の板厚依存性については、試験片形状を相似的に拡大すると微小欠陥の存在確率が高まる結果、 $J_c$  が低下するという、材料要因による説明がなされており、たとえば1994に Anderson ら [8] は最弱リンクモデルに基づき、 $J_c \propto (1/B)$  なる関係を導いている。これは、 $J_c$  の板厚依存性を材料要因により説明したといえそうである。ただ、Anderson 自らが認めているとおり、この関係には  $B \rightarrow 0$  という矛盾がある。その後、Guo ら [9] はき裂先端の面外拘束も破壊靱性へ影響を及ぼしうる可能性を示唆した上で、 $T_z = \sigma_{33} / (\sigma_{11} + \sigma_{22})$  をこの面外拘束の指標として提案している。これに対し申請者は、 $J_c$  の板厚依存性が  $T_{33}$  (き裂の接線方向の T-stress [10]) と相関があり [11]、この  $T_{33}$  と  $J_c$  が  $B$  の増加に対し収束する傾向がよく対応していることを実験と解析により示してきた [12]。以上により、 $J_c$  の板厚依存性についても、力学要因として説明可能であり、力学パラメータによる異なる板厚の試験片間の  $J_c$  換算が可能になると考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、照射脆化した材料 (DBTT 域材) の破壊靱性値  $J_c$  の試験片寸法依存性を定量的に補正する手法を構築することにある。ASTM 規格等で定められている試験片ではプロセスゾーンがリガメント寸法に比して十分小さく、この場合には力学要因 (き裂先端の応力分布差) に基づく補正が可能であることに着目する。その結果、日本で幅  $W=50$  mm 以外の各種試験片で蓄積された貴重な破壊靱性データを、IAEA 規格で推奨される幅  $W=50$ 、厚み  $B=25$  mm の CT 試験片相当の  $J_c$  へ換算することが可能となり、国際規格による規制への対応も柔軟に行えるようになった。

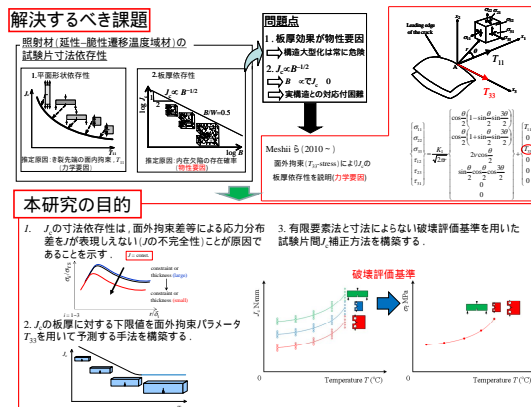


図2. 研究の全体構想

3. 研究の方法

本研究では、DBTT 域にある原子力压力容器鋼 SFVQ1A (ASTM A533Grade B, Class 1 鋼相当) 材、他の材料で得られた破壊靱性試験データに対し、有限要素解析 (FEA) による再

現解析を行い、まず材料、試験温度が同一であれば、破壊時のプロセスゾーン内き裂先端の応力場が同一であることを確認する。つまり、 $J_c$ の試験片寸法依存性(特に板厚依存性)が、き裂先端の応力場を表すとされている破壊力学パラメータ  $J$  が同一であっても、実際に発生している応力が板厚やき裂先端の三軸応力度(拘束に)によって変わる、いわゆる「 $J$ の不完全性」に起因していることを示す(図3)。

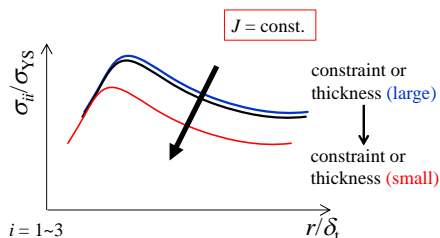


図3. き裂先端の応力場と  $J$  の不完全性

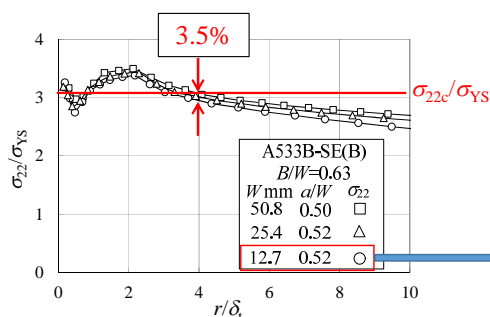
その上で、多様な種類の試験片で得られた  $J_c$  差をこの試験片による応力分布差を補正することにより補正する汎用手法を構築する。さらに、 $J_c$ の試験片板厚に対する下限値については、き裂先端の面外拘束を表す力学パラメータ  $T_{33}$ -stress により予測する簡便手法も提供する。

#### 4. 研究成果

大別すると、3種の成果を得た。

##### (1) $J$ の不完全性の確認[12-14]

$J_c$ の板厚依存性を示すような、試験片寸法を比例的に変化させる場合には、 $J$ とき裂先端の応力場はよく対応していると考えられてきたが(注:このこともあってか、応力差ではなく、最弱リンク説が有力視されてきたと考えられる)、実際には  $J$  が同一であっても応力差が存在し、この小さな応力差によって大きな破壊靱性差が説明できることを示した(図4, [15])。



a case of  $B/W=0.63$ ,  $W=12.7$  mm,

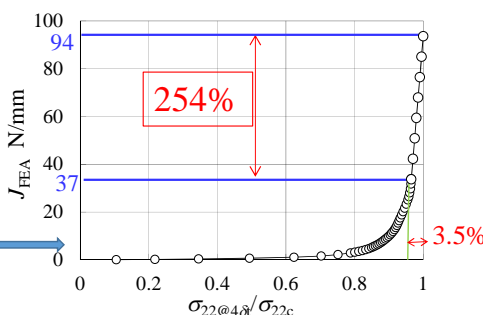


図4.  $J$ 一定時の比例試験片間 ( $W=50.8, 12.7$  mm) の応力差(左)とこの応力差による  $J$  差(右)

##### (2) $J_c$ の板厚に対する下限値予測手法の提案[13]

最弱リンクモデルでは予測し得ないこの下限値を、ASTM E1921 では  $K_{Jc} = 20$  MPam<sup>1/2</sup> ( $J_c \approx 2$  N/mm) と保守側に設定するよう推奨しているが、 $T_{33}$  応力を考慮することにより、この下限値をより現実的に予測する手法を提案した(図5)。

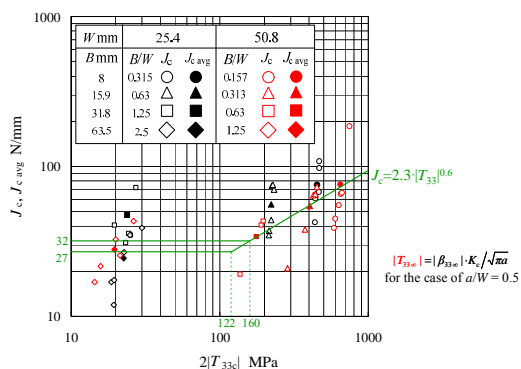


図5. 試験片板厚に対する無次元  $T_{33}$  の上限値  $\beta_{33}$  を用いることによる  $J_c$  の下限値予測

##### (3) 修正 RKR 破壊評価基準と FEA を用いた試験片間 $J_c$ 補正手法の構築

Ritchie-Knott-Rice[16]は、き裂先端の開口応力  $\sigma_{22}$  が材料の強さ  $\sigma_f$  を超える範囲が代表寸法  $l_0$  ( $=2$  結晶粒経) より大きくなるときに破壊が発生するという、いわゆる RKR 破壊評価基準を提案した(図6)。Dodds らは、金属組織と無関係に  $l_0 = 4\delta_i$  ( $\delta_i$ : き裂先端開口変位) とする修正 RKR 破壊評価基準が、 $J_c$  の平面形状依存性を補正しようとしている[17]。

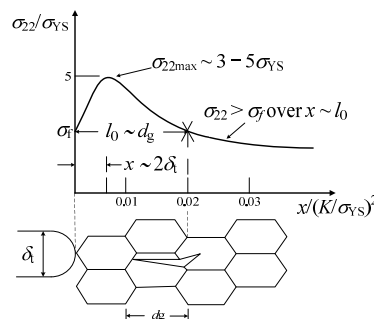


図6. RKR 破壊評価基準[16]

本研究では、この修正 RKR 破壊評価基準が  $J_c$  の板厚依存性の補正に使用できること [11][15]、なおかつこの基準による材料の強さ  $\sigma_{22c}$  のばらつきが 156 本の多様な試験片板厚に対してさえ 4%程度と小さいことを示した [15] (図 7)。

その上で、i)ある試験片に対し破壊靱性試験を行い、 $J_c$ を求め、ii)その再現 FEA 解析を行うことにより修正 RKR 破壊評価基準による材料強さ  $\sigma_{22c}$  を求め、iii)他の種類の試験片に対する FEA を実施し、 $4\delta_i$  位置の  $\sigma_{22}$  が  $\sigma_{22c}$  に達するときの荷重を予想破壊荷重  $P_c$ 、また  $J$  を破壊靱性値  $J_c$  とする、試験片間  $J_c$  補正手法を提案した [15] (図 8)。

材料強さ  $\sigma_{22c}$  のばらつきが小さいので、必要となる試験データが少なくすむという利点がある。また、今後構造健全性評価を  $J$  と  $J_c$  を比較する代わりに  $\sigma_{22}$  と  $\sigma_{22c}$  を比較することにより行うことにすれば、図 1 に示す  $J_c$  の大きなばらつきという課題が解決できると期待される (図 9)。

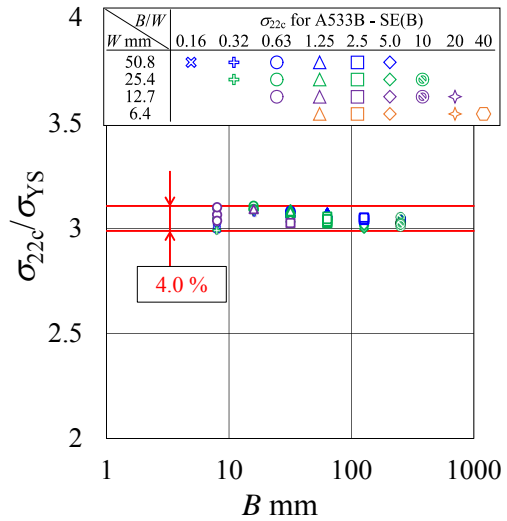


図 7 板厚が異なる 156 本の試験片の修正 RKR 破壊評価基準による材料の強さ  $\sigma_{22c}$  [15]

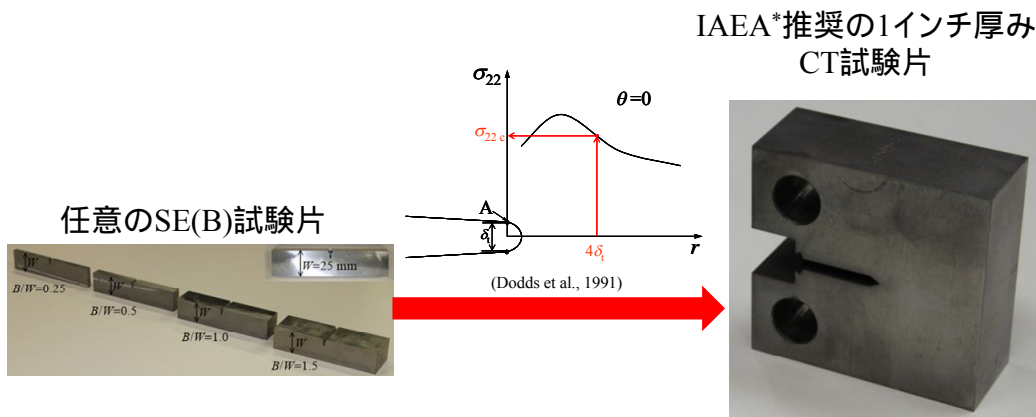


図 8 . 修正 RKR 破壊評価基準を用いた試験片間  $J_c$  補正手法

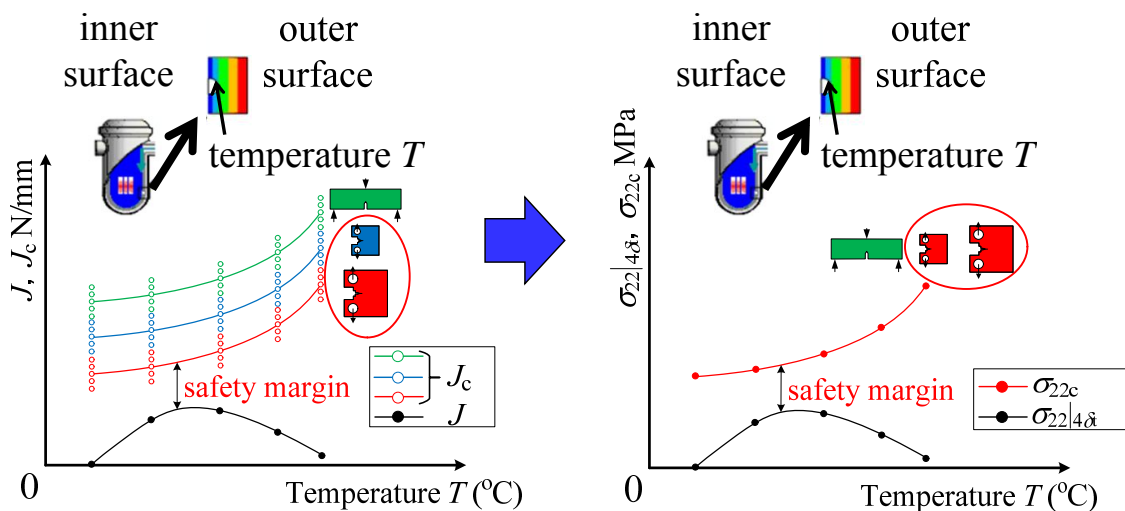


図 9 .  $\sigma_{22c}$  を用いる健全性評価による上の不確実性低減

<引用文献>

- [1] Petti, J. P. and Dodds, R. H. Engineering Fracture Mechanics, 71, 2014, 2079-2103.
- [2] Beremin, F. M., Pineau, A., Mudry, F., Devaux, J. C., D'Escatha, Y. and Ledermann, P. Metallurgical and Materials Transactions A, 14, 1983, 2277-2287.
- [3] ASTM, E1921-10, Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials, 2010.
- [4] IAEA, TECHDOC 1631, 2009.
- [5] Larsson, S. G. and Carlsson, A. J., Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 21, 1973, 263-277.
- [6] Rice, J. R., Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 22, 1974, 17-26.
- [7] Bilby, B. A., Cardew, G. E., Goldthorpe, M. R. and Howard, I. C., in Size effects in fracture. Mechanical Engineering Publications Limited, 1986, 37-46.
- [8] Anderson, T. L., Stienstra, D. and Dodds, R. H., in STP1207, American Society for Testing and Materials, 1994, 186-214.
- [9] Guo, W., Engineering Fracture Mechanics, 46, 1993, 93-104.
- [10] Nakamura, T. and Parks, D. M., International Journal of Solids and Structures, 29, 1992, 1597-1611.
- [11] Meshii, T. and Tanaka, T., Engineering Fracture Mechanics, 77, 2010, 867-877.
- [12] 発表論文 .
- [13] 発表論文 .
- [14] 発表論文 .
- [15] Meshii, T., Proc. ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2015-45070, 2015, 1-6.
- [16] Ritchie, R. O., Knott, J. F. and Rice, J. R., Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 21, 1973, 395-410.
- [17] Dodds, R. H., Anderson, T. L. and Kirk, M. T., International Journal of Fracture, 48, 1991, 1-22.

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

Meshii, T., Lu, K. and Fujiwara, Y., Extended investigation of the test specimen thickness (TST) effect on the fracture toughness ( $J_c$ ) of a material in the ductile-to-brittle transition temperature region as a difference in the crack tip constraint - what is the

loss of constraint in the TST effects on  $J_c$ ?, Engineering Fracture Mechanics, 査読有, Vol. 135, 2015, pp. 286-294, DOI:10.1016/j.engfracmech.2014.07.025.

Lu, K. and Meshii, T., A systematic investigation of T-stresses for a variety of center-cracked tension specimens, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 査読有, Vol. 77, 2015, pp. 74-81, DOI: 10.1016/j.tafmec.2015.02.001.

Lu, K. and Meshii, T., Application of  $T_{33}$ -stress to predict the lower bound fracture toughness for increasing the test specimen thickness in the transition temperature region, Advances in Materials Science and Engineering, 査読有, Vol. 2014, 2014, pp. 1-8, DOI:10.1155/2014/269137.

Lu, K. and Meshii, T., Three-dimensional T-stresses for three-point-bend specimens with large thickness variation, Engineering Fracture Mechanics, 査読有, Vol. 116, 2014, pp.197-203, DOI:10.1016/j.engfracmech.2013.12.011.

Meshii, T., Lu, K. and Takamura, R., A failure criterion to explain the test specimen thickness effect on fracture toughness in the transition temperature region, Engineering Fracture Mechanics, 査読有, Vol. 104, 2013, pp. 184-197, DOI: 10.1016/j.engfracmech.2013.03.025.

[学会発表](計 15 件)

Meshii, T. and Lu, K., Applicability of a deterministic approach to transfer the fracture toughness  $J_c$  between different specimen thickness, ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference, 2015/7/19-23, Boston (USA).

Meshii, T.,  $J$ 's disability could explain all the test specimen size effects observed for the fracture toughness ( $J_c$ ) of a material in the DBTT region, ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference, 2015/7/19-23, Boston (USA).

Meshii, T.,  $J$ 's inability to characterize the crack-tip stress fields accurately could explain all the test specimen size effects observed for the fracture toughness ( $J_c$ ) of a material in the ductile-to-brittle transition temperature region, 13th

International Conference on Engineering Structural Integrity, 2015/5/19-20, Manchester (UK).  
Lu, K. and Meshii, T., Method to convert fracture toughness ( $J_c$ ) of a material in the ductile-to-brittle transition temperature region from SE(B) specimens to the 1-inch thickness (1T) CT specimen, The 3rd Conference on Computational Mechanics, 2014/11/28-30, Beijing (China).  
Yang, M. and Meshii, T., Three-dimensional  $T$ -stresses for compact tension specimens with large thickness variation, The 3rd Conference on Computational Mechanics, 2014/11/28-30, Beijing (China).  
Fujiwara, Y., Lu, K., Takamura, R., Fujita, Y. and Meshii, T., Validation of the ( $4 t, 22c$ ) failure criterion to explain the test specimen thickness of A533 Grade B steel in the ductile-to-brittle transition temperature region, 2014 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, 2014/7/20-24, Anaheim (USA).  
Meshii, T., Lu, K. and Fujiwara, Y., Extended investigation of test specimen thickness (TST) effect on the fracture toughness ( $J_c$ ) of a material in the transition temperature region as a difference in the crack tip constraint, 20th European Conference on Fracture, 2014/6/30-7/4, Trondheim (Norway).  
Lu, K. and Meshii, T., Recompile of the decommissioned Shoreham reactor vessel steel fracture toughness data from the standpoint of the out-of-plane constraint, 10th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2014/4/4-7, Athens (Greece).  
Meshii, T., Lu, K. and Fujiwara, Y., Constraint parameter to describe the test specimen thickness effect on ductile-to-brittle transition region fracture toughness, 10th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2014/4/4-7, Athens (Greece).  
藤原 悠輝, Lu Kai, 高村 亮太, 藤田 裕介, 飯井 俊行, 延性 - 脆性遷移温度域にある材料の破壊靱性値板厚効果に関する A533 grade B を対象とした ( $4 t, 22c$ ) 破壊評価基準の適用性検討, 日本機械学会北陸信越支部第 51 期総会・講

演会, 2014/3/8, 富山県立大学 (富山県・射水市).

Meshii, T., Lu, K. and Fujiwara, Y., Understanding test specimen thickness effect on fracture toughness of a material in the transition temperature region as a difference in crack tip constraint, 2013/11/13-15, 13th International ASTM/ESIS Symposium on Fatigue & Fracture Mechanics, Jacksonville (USA).

藤原 悠輝, 飯井 俊行, 延性 脆性遷移温度域材料の破壊靱性値の板厚効果に関する研究 (標準試験片に対する ( $4 t, 22c$ ) 破壊評価基準の適用性検討), 2013/10/11-14, 日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス, 岐阜大学 (岐阜県・岐阜市).

高村 亮太, 飯井 俊行, 遷移温度域にある材料の破壊靱性板厚効果を説明する破壊評価基準の提案, 2013/10/11-14, 日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス, 岐阜大学 (岐阜県・岐阜市).  
Lu Kai, 飯井 俊行, 遷移温度域にある材料の破壊靱性値板厚に対する下限値の  $T_{33}$ -stress による予測 2012/9/9-12, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 金沢大学 (石川県・金沢市).

Meshii, T., Lu, K., Takamura, R., Validating the mechanical nature of the test specimen thickness effect on fracture toughness in the transition temperature region, 2013 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, 2013/7/14-18, Paris (France).

〔その他〕

ホームページ等

<http://ffg.mech.u-fukui.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

飯井俊行 (MESHII, Toshiyuki)

福井大学・大学大学院工学研究科・教授

研究者番号：10313727