

氏 名	さい とう きよし 齋 藤 潔
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 53 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学専攻
学 位 論 文 題 目	原子炉圧力容器の監視試験に関する破壊力学的研究
指 導 教 官	東北大学教授 鈴木 正彦
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 鈴木 正彦 東北大学教授 横堀 武夫 東北大学教授 萱場 孝雄

論 文 内 容 要 旨

原子炉圧力容器の中性子照射による破壊靱性劣化の問題は、軽水炉型原子炉の安全性評価の上で最も重要かつ緊急を要する研究課題の 1 つである。現在稼働中の原子炉内には監視用の小型シャルピー-V字切欠試験片が挿入されており、これを定期的に取り出して試験し圧力容器材の靱性劣化度を評価する監視試験が行なわれているが、従来の監視試験法では正確な破壊靱性値の測定が出来ず、定量的な安全性評価は出来ない状態である。

使用中の原子炉の安全性を定量的に保証するには、現在のところ破壊力学の手法を用いて許容応力、許容欠陥寸法を評価するのが最良の方法であるが、これを原子炉監視試験法に適用し圧力容器の安全性を評価するにあたっての問題点は次の通りである。

- (1) 小型試験片による平面ひずみ破壊靱性値評価法の確立。
- (2) 破壊靱性値に及ぼすひずみ速度、切欠形状の影響を明らかにする。

(3) 溶接材の破壊靱性値を正確に評価する方法の確立。

(4) 全面延性破壊によって破断するような高温領域（セルフ温度領域）での破壊靱性値の意味を明確にする。

本論文は以上の問題点を解明し、小型試験片を用いた衝撃試験によって材料固有の破壊靱性値を正確に評価する方法を検討し、原子炉監視試験法に関する新しい提案を行うものである。

第2章においては、供試材、中性子照射条件、試験方法、計装化シャルピー試験による吸収エネルギー測定の詳細について述べている。

第3章においては、再結晶法によって観察される切欠先端の高ひずみ域（図1 b）に費される塑性ひずみエネルギー W_p^0 とJ積分との関連性を詳細に検討した結果得られた新しい破壊靱性パラメーター K_{IC}^* が、大型試験片によって求められる平面ひずみ破壊靱性 K_{IC} 、 K_{Id} と等価であることを実験的に示した。またこの K_{IC}^* による破壊靱性評価法を計装化シャルピー衝撃試験及び静的曲げ試験に適用し、小型のシャルピー試験片を用いた実験結果から材料固有の破壊靱性値を評価する方法を具体的に述べている。標準シャルピー試験片の場合不安定破壊するまでに試験片全体に費された仕事量を U_c とすると、 U_c は荷重-変位曲線あるいは荷重-時間曲線（図1 a）から得られ、 K_{IC}^* は次式によって求められる。

$$K_{IC}^* = 6.51 Y \sqrt{a} \sqrt{U_c} \quad (1)$$

ここで、 a はき裂長さ、 Y は試験片形状に依存する修正係数である。

第4章においては、シャルピー試験片を用いた計装化シャルピー衝撃試験及び静的曲げ試験を行った結果から種々のひずみ速度における K_{IC}^* の温度依存性を(1)式を用いて求め、さらに種々の材料における平面ひずみ破壊靱性値 K_{IC} の実測結果を参照し、破壊靱性値の温度、ひずみ速度依存性、及び切欠形状依存性を明らかにした。図2は原子炉圧力容器用鋼材、A533B鋼（165 mm板厚）について得られた、種々のひずみ速度、切欠形状における破壊靱性値 K_{IC}^* の温度依存性曲線を熱活性化整理したものである。図中の $\dot{\epsilon}$ は切欠先端でのひずみ速度であり、き裂開口変位 δ を切欠先端半径 ρ の2倍で割った工学ひずみ量 e の時間微分で与えられる。疲労き裂の場合は ρ の代りに有効切欠先端半径 ρ_0 を用いた。この図から明らかなように、見掛け上の頻度係数として $\dot{\epsilon}_0$ を採用し、温度としては $\frac{1}{T_0}$ を基準とした相対温度 T_{eff} を採用すれば、同一の破壊靱性値を示す温度とひずみ速度の間には次式のような熱活性化過程を示すArrhenius型の関係式が成立していることがわかる。

$$\frac{Q}{R} = T_{eff} \ln \frac{\dot{\epsilon}_0}{\dot{\epsilon}} \quad (2)$$

ここで $T_{eff} = \frac{T_0 T}{T_0 - T}$ あるいは $\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}$ (3)

Rはガス定数 (1.98 cal/mol °K), Qは活性化エネルギー, Tは絶対温度 (°K), $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度 (1/sec) である。したがって(2)式の右辺 $T_{\text{eff}} \ln \frac{\dot{\epsilon}_0}{\dot{\epsilon}}$ をパラメーターとすれば, 破壊靱性値は温度, ひずみ速度を含めて統一的に表示できることがわかる。以後このパラメーターを修正 rate parameterと呼ぶことにする。図3は破壊靱性値を修正 rate parameter によって整理したものである。この図から破壊靱性値 K_{c}^* と材料によって定まる定数 K_0 の差 $K_{\text{c}}^* - K_0$ は, 修正 rate parameter と対数グラフ上で直線関係にあり, 各き裂形状に対応する直線は平行になっていることがわかる。この直線を実験式で表示すれば次式ようになる。

$$K_{\text{c}}^* - K_0 = \beta B_F \left(T_{\text{eff}} \ln \frac{\dot{\epsilon}_0}{\dot{\epsilon}} \right)^\alpha \quad (4)$$

ただし β は切欠形状に依存する定数で

$$\begin{cases} \beta = 1 & (\text{疲労き裂}) \\ \beta = \beta_F^S = 4.0 & (\text{slit}) \\ \beta = \beta_F^V = 5.6 & (\text{V切欠}) \end{cases}$$

A 533 B鋼の他に数種の低強度鋼について同様な実験整理を行い, 破壊靱性値はいずれの場合も(4)式の形で表示できた。

以上まとめると, 種々の鉄鋼材料についての破壊靱性値は温度及びひずみ速度の関数として(4)式によって統一的に表示され, 材料によって定まる定数 T_0 , $\dot{\epsilon}_0$, K_0 , α , B_F 及び材料に依存せず切欠形状のみに依存する定数 β を定めることにより任意の温度及びひずみ速度について求められることがわかった。

第5章においては, 第4章の結果を中性子照射を受けた種々の鉄鋼材に適用し, V字切欠シャルピー衝撃試験から中性子照射材の破壊靱性値を正確に評価する方法について述べ, さらに破壊靱性値の中性子照射量依存性を明らかにした。(4)式からV字切欠衝撃試験において得られる破壊靱性パラメーター $K_{\text{c},v}^*$ は次式のように表示できる。

$$(K_{\text{c},v}^* - K_0)^{-\frac{1}{\alpha}} = \frac{(\beta_F^V B_F)^{-\frac{1}{\alpha}}}{\ln(\dot{\epsilon}_0/\dot{\epsilon})} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (5)$$

(5)式から明らかなように, 中性子照射材について得られた $K_{\text{c},v}^*$ の実験点を, 縦軸を $(K_{\text{c},v}^* - K_0)^{-\frac{1}{\alpha}}$

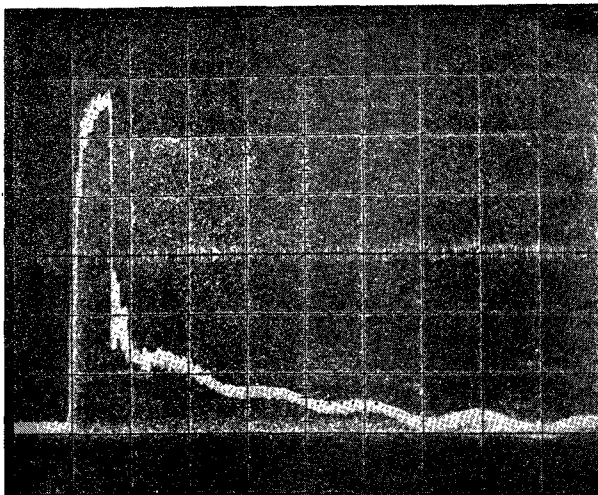
横軸を $\frac{1}{T}$ としたグラフ上にプロットすればそれは傾き $\frac{(\beta_F^V B_F)^{-\frac{1}{\alpha}}}{\ln(\dot{\epsilon}_0/\dot{\epsilon})}$ の直線で表され, 直線と横軸との切片が $\frac{1}{T_0}$ を与えることがわかる。したがって K_0 , α , $\dot{\epsilon}_0$ が中性子照射によって変化しないと仮定してすでに求められている非照射材の値を用いれば, 実験点を結んだ直線と横軸との交点から T_0 が, また直線の傾きから B_F が求められる。図4中の1点鎖線は, A 533 B鋼の中性子照射材のV字切欠に対する破壊靱性値 $K_{\text{c},v}^*$ の実験点(図中の●)をもとに, 以上のような方法に

よって求めた中性子照射材についての破壊靱性値を支配する諸量を用いて予想した疲労き裂の動的負荷状態における破壊靱性値 $K_{Ic,F}(\dot{\epsilon}_{D,F})$ の温度依存性曲線を示したものである。図中の▲は疲労き裂を有するシャルピー試験片を用いた計装化シャルピー試験により得られた $K_{Ic,F}(\dot{\epsilon}_{D,F})$ の実測点であり、予想曲線とよく一致している。このことから以上のような方法による中性子照射材の破壊靱性評価法は妥当なものであることが確かめられた。

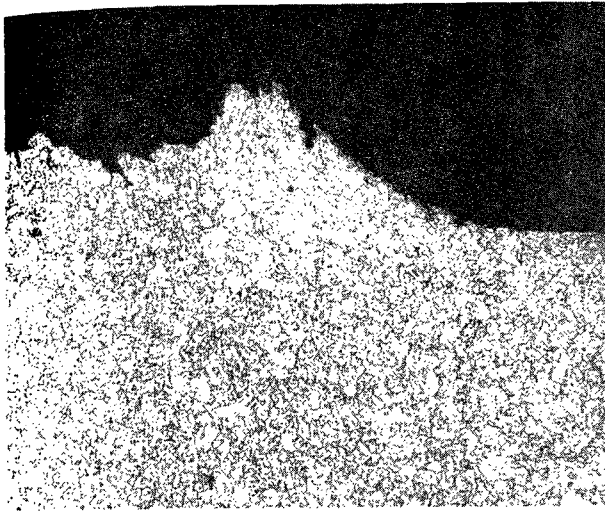
第6章においては、4章、5章で得られた母材についての破壊靱性評価の手法を溶接熱影響部組織及び溶着金属組織に適用し、各組織固有の破壊靱性値及びその中性子照射量依存性について検討した。この結果、溶接熱影響部組織及び溶着金属組織固有の破壊靱性値も(4)式によって表示でき、中性子照射材についても母材と同様な手法で評価できることがわかった。

第7章においては前章までに得られた結果にもとづき、従来の監視試験法の問題点を解決し、照射材の破壊靱性値を正確に評価できる新しい監視試験法を提案した。またこの新しい原子炉監視試験法を実際の原子炉に適用することにより、原子炉の安全限界圧力を各温度に対して定め、安全な運転条件あるいは耐圧試験条件について検討した。

第8章は結論であり、本論文の全体を総括している。



(a) Load time trace
neutron fluence
 $1.3 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$
Temp: 74 °C
Uc : 2.5 kg·m
Jc : 62.5 kg mm/mm²
V. S. = 375 kg/div
H. S. 0.5 msec/div



(b) Recrystallized zone at the notch tip

$$W_p^C = 5.95 \text{ kg mm/mm}$$

図1. A533B鋼中性子照射材における荷重-時間曲線及び再結晶組織写真の1例

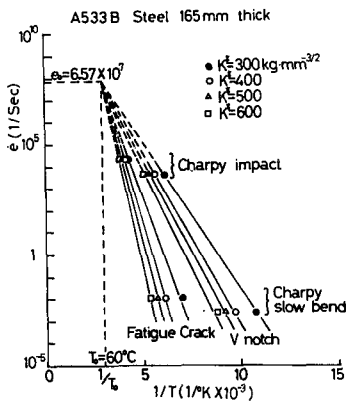


図2. 破壊靱性値に関する熱活性化整理

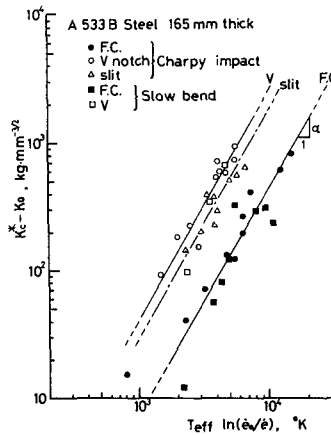


図3. $K_{IC}^* - K_0$ と修正 rate parameter の関係

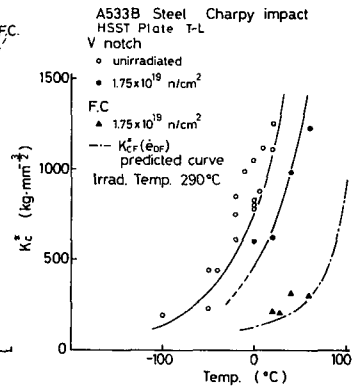


図4. K_{IC}^* の温度依存性

審査結果の要旨

原子炉圧力容器の中性子照射による脆化は炉の安全性に直接関連する重要な問題である。このため炉内に挿入されたシャルピー試験片を用いていわゆる監視試験が行われている。しかしこの試験法では許容欠陥あるいは許容運転条件を定めるための定量的な安全性評価ができ難い。本論文は原子炉圧力容器用鋼及びその溶接継手の破壊靱性値を温度、ひずみ速度及び試験片形状をふくめて統一的に表示する実験式を導き、これをもとにして原子炉圧力容器の監視試験に関する新しい提案を行っているものであり、8章よりなる。

第1章は序論であり、監視試験の現状と解決すべき問題点をあげている。

第2章は実験法であり、計装シャルピー試験による吸収エネルギー測定法を述べている。

第3章では非照射材で成立するき裂先端の高ひずみ域で費される塑性ひずみエネルギーとJ積分との関連性は、照射材においても全く同一であることを見出している。この関連性にもとづきこれまで平面ひずみ破壊靱性値 K_{IC} を求めることの出来なかったシャルピー試験片についての破壊靱性値 K_{δ} を定め、これが大型材によって求められた K_{IC} に等価であることをしめしている。

第4章では新しいパラメータを導入することにより、前章で求められた K_{δ} を温度、ひずみ速度及び切欠形状の関数として与えかつこの関数関係にふくまれる定数を定めている。

第5章では中性子照射をうけた標準V字切欠シャルピー衝撃試験についての著者の結果及び国際原子力機構共同研究の結果を用い、前章で与えられた K_{δ} 値を支配する定数の照射量依存性を明らかにしている。

第6章では原子炉圧力容器溶接継手の熱影響部及び溶着金属について破壊靱性値 K_{δ} の評価及びその中性子照射量依存性を検討し、原子炉圧力容器の監視試験の上で特に注目すべき組織領域を指摘している。

第7章では前章までに得られた破壊靱性値の正確な評価ならびに中性子照射によるその低下を考慮して稼動状態の原子炉の安全性を検討し、これより原子炉の安全限界圧力を各温度に対し定め、安全な運転条件あるいは過圧条件を与えている。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は稼動中の軽水炉に挿入されている監視用のV字切欠シャルピー衝撃試験片によって原子炉圧力容器用鋼、溶接熱影響部及び溶着金属の平面ひずみ破壊靱性値を正確に評価出来る手法を開発し、これをもとにして新しい原子炉圧力容器の監視試験法を提案したものであって、機械工学ならびに原子力工学上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。