

## 応力下における圧力容器鋼の照射欠陥挙動

平金, 晶憲  
九州大学総合理工学府

渡辺, 英雄  
九州大学応用力学研究所

吉田, 直亮  
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/27065>

---

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 137, pp.161-163, 2009-09. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

# 応力下における圧力容器鋼の照射欠陥挙動

平金 晶憲<sup>\*1</sup> 渡辺 英雄<sup>\*2</sup> 吉田 直亮<sup>\*2</sup>

(2009 年 7 月 31 日受理)

## Effects of applied stress on pressure vessel steels under irradiation

Akinori HIRAGANE, Hideo WATANABE, Naoaki YOSHIDA

E-mail of corresponding author : hiragane@riam.kyushu-u.ac.jp

### Abstract

To understand the effects of applied stress on pressure vessel steels during irradiation. Compact tensile testing machine was designed. In this paper, the detailed design of this machine and the result of ion irradiation were discussed.

**Key words :** pressure vessel steels, tensile test, ion irradiation

## 1. 緒言

軽水炉に関わる今日の問題点として、新規原子力発電所の立地上の制約や建設時の膨大なコスト等が挙げられ、既存する原子力発電所の運転期間の延長が避けられない状況にある。そこで、長期間にわたり安全に軽水炉を稼働させ続ける為にも、運転期間中に交換できない圧力容器鋼の照射脆化程度を正確に把握する必要がある。具体的に、PWR 型圧力容器胴部には、約 150(Mpa)の膜応力が負荷されており、また原子炉圧力容器設計の段階では、応力比(発生応力/降伏応力)が 0.6~0.7 の範囲に収まるように設計されているが、実機圧力容器を模擬する監視試験片には、応力が負荷されていない状態で置かれている。従って、監視試験片と実際の圧力容器で脆化程度の違いが懸念される。そこで、応力の影響により局所的な歪場が生じた状況での格子間原子の拡散挙動、転位周辺への溶質原子の拡散、転位ループや析出物の形成などに、応力がどのような影響を及ぼすのかを検討する必要がある。そこで今回、実機の状況に近い応力環境下で照射し、応力の損傷組織・照射欠陥形成プロセスへの影響とメカニズムの解明や、引張応力下における重イオン照射法の確立を目的とし、タンデム型加速器ビームライン上に設置可能な動的照射効果観察ステーション(以下:小型引張試験機)を作製した。

ここでは、この装置の詳細と、この装置を用いて行った模擬実験結果、ならびに今後の研究予定について示す。

## 2. 実験方法

### 2.1 小型引張試験機の概要

Fig.1(a)に小型引張試験機の全体写真を、Fig.1(b)に試験機を横から見た場合の設置概略図をそれぞれ示す。今回作製した試験機は、全長:230(mm)、横幅:120(mm)、奥行:100(mm)で、最大単軸引張荷重は 100(N)、最大引張可動範囲は 0~10(mm)、試験可能温度範囲は室温から 700(°C)である。加熱方法は通電加熱を用い、電源電流は最大 12(A)である。加熱温度の計測方法は、試料裏に取り付けている放射温度計を用いる。また、試験片中心に熱電対を取付け実温度の測定を行い、200~500(°C)の温度範囲での温度補正を行い非常に良い温度の一致を得ている。これを九州大学応用力学研究所設置のタンデム型加速器チャンバー内に設置した。

Fig.2 に、小型引張試験片の全体図ならびに寸法を示す。ここでは全長 16(mm)、試料厚さ 0.12(mm)、有効長 5(mm)の試料を用いた。今回の試料材料は、小型引張試験機の性能と所定の動作の確認を行う模擬実験の目的により、これまでの照射下で報告例の多い JPCA2(SUS316)を用いた。熱処理は真空中で行い、条件は温度 1050(°C)とし熱処理時間を 0.5(h)とした。

\*1 九州大学 総合理工学府 院生

\*2 九州大学 応用力学研究所

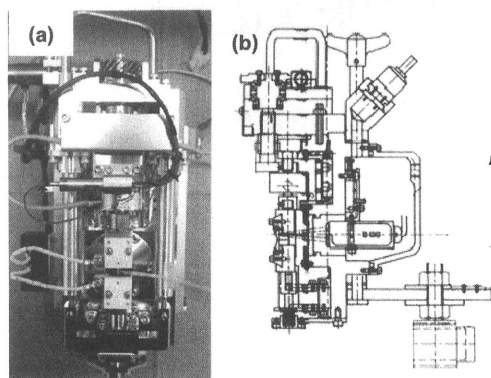


Fig.1 Compact tensile testing machine

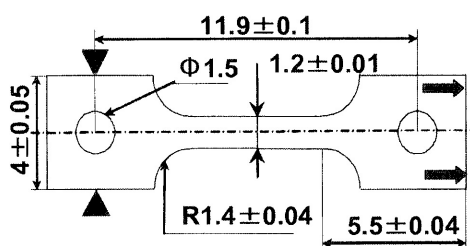


Fig.2 Test Pieces for tensile test, d/mm

## 2.2 照射ならびに照射後試験の概要

重イオン照射は、3.25(MeV)のNi<sup>3+</sup>イオンを5dpaまで照射した。照射時の温度は室温と400(°C)で、応力負荷条件は50(N)と負荷なし(0(N))の2種類で行い、照射中は1時間のおきにビーム位置およびビーム量の確認を行った。照射前後の硬度試験は、超微小押し込み硬さ試験機(Erionix社製 ENT-1000)を用いた。条件は、荷重1000(mgf)、試料台温度28(°C)である。測定結果については、未照射材を用い超微小押し込み硬さ試験機より得られた結果(Berkovich硬度)と通常の硬度測定機より得られた結果(Vickers硬度)とで硬度変換の式を算出する事により導出した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 引張試験結果(応力-歪曲線)

Fig.3に小型引張試験機を用いて得られた、JPCA-2の室温での引張実験結果として応力-歪曲線を示す。Fig.3両図に示した丸印の箇所に注目した時、試験片取り付け方の改良前として示すFig.3(a)の応力-歪曲線では、降伏応力が31(N)、降伏時変位量が430(μm)という結果が得られた。また試験片取り付け方の改良後として示すFig.3(b)の応力-歪曲線では、通常の引張試験機(島津製作所 AG-20kNG)より求めた結果(降伏応力が32(N)、降伏時の変位量が80(μm))に近い結果になった。

今回、同一の小型引張試験機を用いた場合でも、降

伏時の変位量に大きな差が生じているが、これはチャック部(試験片固定箇所)の影響が大きいと考えられる。Fig.4にチャック部の模式図を示す。今回の実験では試験片両端に開けられた空孔に固定ピンを差込む固定方法を用いており、その結果試験片空孔部分に局所的な伸びが発生していることが確認できた。その結果、有効長部分に加わる応力値に誤差が生じ、結果的に求められた降伏時の変位量の値が通常の引張試験機から求めたものよりも、大きくなったと考えられる。

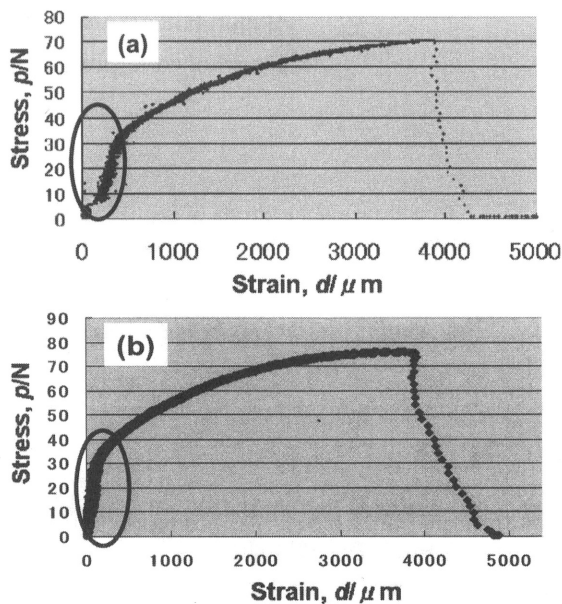


Fig.3 Stress strain diagram

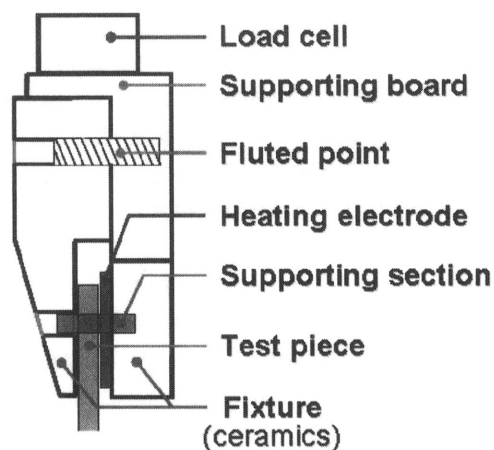


Fig.4 Supporting section diagrams

### 3.2 照射後試験結果(超微小硬度測定)

Fig.5に室温および400(°C)における照射前後の引張試験片の微小硬度測定結果を示す。この図より照射領域(中心からの距離が0(mm))近傍において、著しい硬度上昇が測定された。また、応力を負荷させた場合、ビ

ームが当たっていない未照射領域の硬度より約100近く硬度が高いことが分かり、硬度の上昇幅は応力を負荷させない場合よりも大きいことが分かる。また、400(°C)にて照射を行った場合の方が、室温で照射を行った場合よりも硬度の上昇幅が大きいことが分かる。硬度の上昇幅が増大した理由については、今後内部組織観察を行い検討していく予定である。

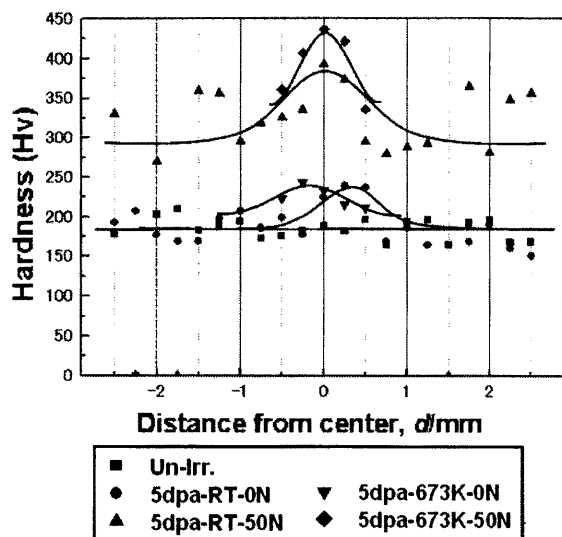


Fig.5 Measurements of Vickers microhardness

今回の実験では、試験片全体の硬度が非荷重の場合よりも上昇している。上昇した理由は、負荷応力値が降伏応力値を超えているために転位が導入された事で説明される。今後、一層正確な硬度の上昇幅を検討していくために、弾性領域内での照射を行い応力の与える影響を検討する。

また重イオン照射を行った場合、損傷ピーク領域が試料表面から深さ約500(nm)で、その領域厚さが、およそ100(nm)程度であるため、結果として損傷領域の深さ領域が、試験片全体の厚さに対して1/200程度しかない。その為、引張試験より得られた応力-歪曲線では、照射損傷の状態を把握することは不可能である。従って、超微小押し込み硬さ試験機やバックシニング(背面研磨)、集束イオンビーム加工装置(FIB)を用いて、損傷領域の内部組織や硬度測定から照射効果と応力との相関関係を追及する。また照射による内部の応力緩和については、有限要素法を用いる事で、欠陥が蓄積された際に試験片全体への応力の影響を検討予定である。

#### 4. 結言

タンデム型加速器ビームライン上に小型引張試験機を作製して、所定の動作および性能を確認し、重イオン

照射模擬実験を行った。当初小型引張試験機と通常の引張試験機より得られた応力-歪曲線とは、弾性領域広さに大きな差があったが、チャック部に試験片を取付ける際の方法を再検討した結果、その後大きな差は見受けられなくなった。また硬度測定の結果より、照射領域における硬度上昇が確認できた。今後、A533B鋼のモデル合金のFe-Mn,Fe-Si,Fe-Ni等のモデル合金を用いて重イオン照射を行い、応力下における照射欠陥挙動を硬度測定および内部組織観察を用いて観察し、引張応力影響下での添加元素効果を明らかにする。

#### 5. 参考文献

- (1) S.B.Fisher,J.T.Buswell,Int.J.Pres.Ves.&Piping,**27** (1987) 91.
- (2) G.R.Odetee,G.E.Lucas: Radiation Effects and Defects in Solids . **144** (1998) 189
- (3) W.J.Phythian,C.C.English,J.Nucl:Master,**205**(1993) 162
- (4) H.Watanabe,S.Masubuchi,N.Yoshida:Master**2**,**47** (2008) 620
- (5) H.Watanabe,T.Imamura,S.Masubuchi,N.Yoshida, Y.Kamada,S.Takahashi:Report of research Institute for Applied Mechanics,Kyusu University,**133**(2007) 161-165