

高濃度に He を注入した 316 ステンレス鋼の 高温における破壊挙動

宮原一哉*・伊藤 彰*²・茅野秀夫*³・細井祐三*

Fracture Behavior at Elevated Temperature of a 316 Stainless Steel with High Concentration of Helium Implanted

Kazuya MIYAHARA, Akira ITOH, Hideo KAYANO and Yuzo HOSOI

1. 緒 言

核融合炉照射環境下では、14 MeV の中性子と材料構成原子核との核反応によりヘリウムが 1 dpa (displacement per atom) 当たりおよそ 20 appm 生成され、そのため実験炉あるいは商用炉の第一壁構造材料中では数百あるいは数千 appm のヘリウムが蓄積されると予想されている。原子炉照射 (米国, オークリッジの HFIR) で、ヘリウムが 4000 appm 蓄積した場合 (76~121 dpa), 316 鋼を 873 K 以上の温度で変形すると弾性変形領域において破断すると BLOOM らは報告している¹⁾²⁾。著者らは加速器を用いて 2000 appm のヘリウムを 316 ステンレス鋼に注入し、室温及び 773 K の破壊挙動を引張試験で調べた。その結果、室温変形では粒界破断する場合があること、773 K では粒内破壊であることを報告した³⁾。今回は 500~2000 appm のヘリウムを 316 鋼に注入後、873 K, 973 K における破壊挙動を調べ、ヘリウム脆性挙動に対するヘリウム照射量の影響を前回の結果と併せて報告する。加速器による照射では 2000 appm ヘリウム注入においても照射損傷量は非常に小さく、およそ 0.4 dpa であるので、ヘリウム脆性に対するヘリウムの影響がより明確に現れたと考えられる。

2. 実験方法

実験方法は著者らが以前に報告したものとはほぼ同様である³⁾。実験に供した材料は 27.5 μm 厚の SUS316 鋼箔片試料 [0.05 mass% C (以下 mass% を略す), 10.41 Ni, 16.86 Cr, 1.06 Mn, 0.031 P, 0.005 S, 0.28 Cu, 2.23 Mo, 0.066 N] で、これを 1373 K にて溶体化処理 (1373 K \times 3.6 ks \rightarrow 水冷) した。平均オーステナイト粒径は 30~40 μm である。この箔片試料より金型打抜き

にて極微小引張試験片³⁾⁴⁾を作成した。

He 注入は東京大学原子核研究所の SF サイクロトロンを用い 30 MeV α 粒子照射により行った。試験片の厚さ方向の中央部に深さ 20 μm の領域にわたり、一様に He を注入するようにエネルギーディグレーダーとして 7 μm 厚さのアルミフォイルを使用した。注入量は、500 及び 2000 appm He とした。照射温度は 673~773 K と推定される³⁾。照射及び非照射試験片の引張試験は Ar 雰囲気中で行い、試験温度は 873 K および 973 K, 歪み速度は $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ である。破断後には、破面の走査電顕 (SEM) 観察を行った。

3. 実験結果及び考察

Fig. 1, 2 にそれぞれ 2000 appm および 500 appm He の注入及び非注入試験片の 873 K, 973 K での引張試験

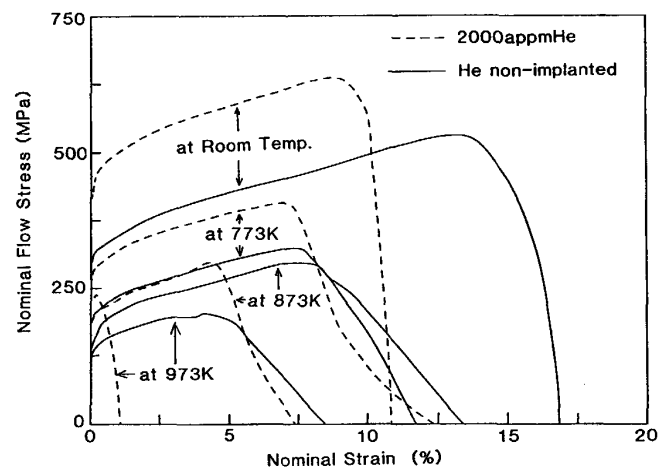


Fig. 1. Stress-strain curves at various temperatures for 2000 appm He-implanted and He non-implanted specimens.

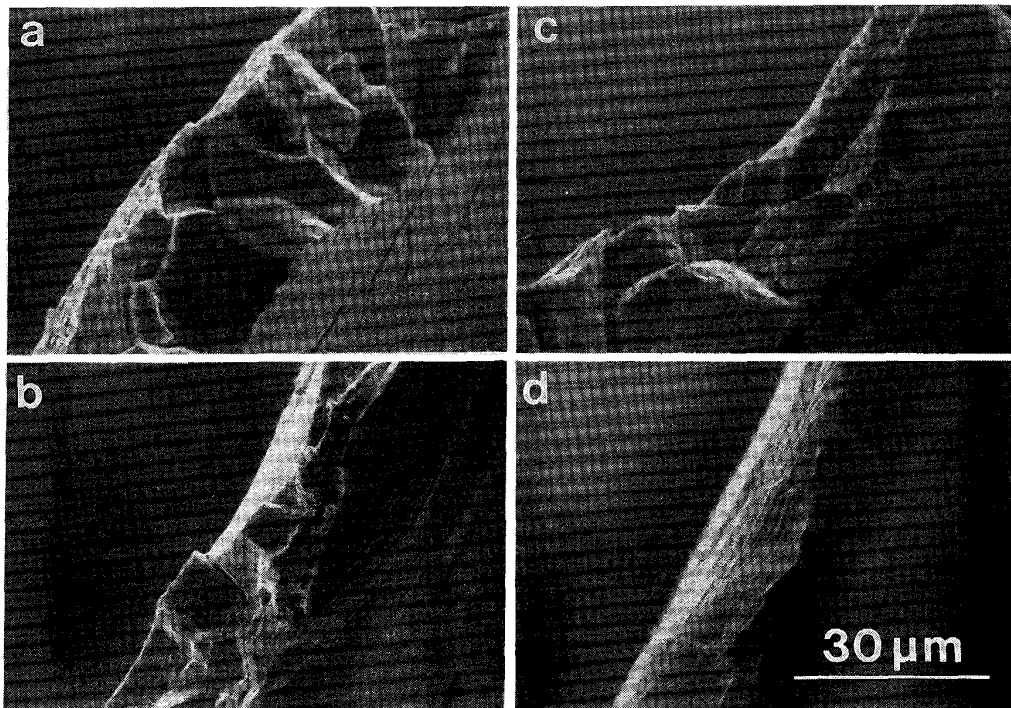
平成 3 年 6 月 10 日受付 (Received June 10, 1991)

* 名古屋大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464-01)

*² 名古屋大学大学院 (Graduate School, Nagoya University)

*³ 東北大学金属材料研究所 工博 (Institute for Materials Research, Tohoku University)

Key words : type 316 stainless steel ; α particle irradiation ; helium embrittlement ; high temperature strength ; fracture behavior ; intergranular fracture ; transgranular fracture.



a : 2000 appm He, 973 K test
b : 2000 appm He, 873 K test

c : 500 appm He, 973 K test
d : 500 appm He, 873 K test

Photo. 1. Fracture surface of 2000 appm or 500 appm He-implanted specimens tested at 873 K and 973 K.

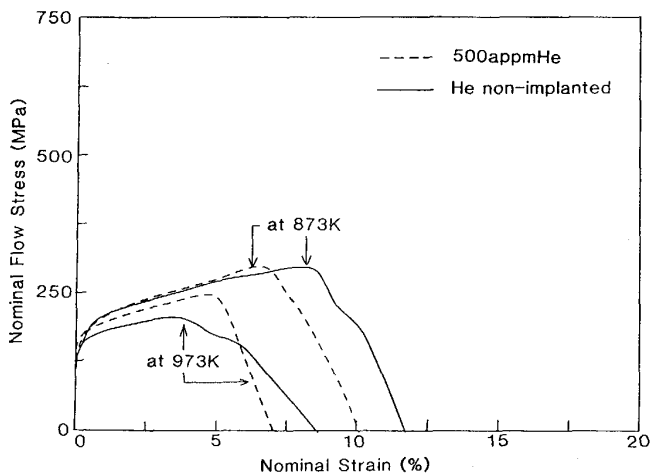


Fig. 2. Stress-strain curves at various temperatures for 500 appm He implanted and He non-implanted specimens.

結果を示す。実線が He 非注入試験片の、破線が He 注入試験片の応力-歪み曲線を表す。873 K 及び 973 K のいずれの温度においても He 注入試片は He 非注入試片に比べ、変形応力は増加し、破断伸びは減少している。特に、973 K において、その傾向が著しい。また、He 注入により変形強度が増加し、延性が減少する傾向は著者らが前に報告した室温及び 773 K での実験結果³⁾と一致している。

Photo. 1 に He を 2000 appm 及び 500 appm 注入した試験片の 873 K および 973 K での引張試験後の破面の SEM 観察結果を示す。2000 appm He 注入後の 773 K における引張試験では粒内延性破断により破壊した³⁾のに対し、2000 appm He 注入後の 873 K, 973 K における引張試験では明瞭な粒界破断を示している (Photo. 1 b, a)。一方、500 appm He の注入後の 873 K における引張試験では粒内延性破断を示したのに対し、973 K における試験では粒界破断が認められる (Photo. 1 d, c)。これに対し、He 非注入試片の室温、773、873 及び 973 K での試験ではいずれも粒内延性破断のみを示していた。以上より、He 注入後の材料の粒内延性破壊-粒内破壊の遷移温度は注入ヘリウム量に依存し、高濃度の He 注入により破壊様式の遷移は低温側に移行することが見出された。2000 appm He を注入した場合の遷移温度は ~ 823 K, また 500 appm He を注入した場合は ~ 923 K であった。

BLOOM は 316 鋼に高速炉 (He/dpa 比; 小) を用いて照射した場合と HFIR (He/dpa 比; 大) を用いて照射 (照射損傷量は共に ~ 50 dpa) した場合との結果を比較し、HFIR 照射により高濃度に形成された He (~ 4000 appm) が 873 K 以上の高温延性を著しく減少させることを示した¹⁾²⁾。また、本実験では加速器による α 粒子照射であるため、照射損傷量は 2000 appm He 注入器においても非常に小さいが (~ 0.4 dpa), やはり 873 K 以

上の高温での延性は著しく減少したことより、数千 appm He を含有する 316 鋼の高温延性劣下は照射損傷量依存性が非常に小さく、主として高濃度ヘリウムに起因することが確認された。

一方、ULLMAIER らは、加速器により 800 appm He を注入した 316L 鋼の疲労試験では 773 K から 873 K にかけて粒内延性破壊から粒界破壊に破断様式が遷移することを報告している⁵⁾⁶⁾。この遷移温度は、上で述べた本実験での 500 appm He 注入における破壊様式遷移温度とはやや異なるが、その原因としては試験方法が異なること、また He 注入量が多少異なることが考えられる。

4. 結 論

高濃度にヘリウムを注入した 316 鋼の高温引張試験を行い、高温破壊様式が、試験温度の増加と共に粒内延

性破壊から粒界破壊に移行すること、また、その遷移温度はヘリウム注入量と共に低温に移り、2000 appm He 注入の場合 ~823 K、また 500 appm He 注入の場合 ~923 K であることを明らかにした。

文 献

- 1) E. E. BLOOM and F. W. WIFFEN: *J. Nucl. Mater.*, **58** (1975), p. 171
- 2) E. E. BLOOM: *J. Nucl. Mater.*, **85, 86** (1979), p. 795
- 3) 宮原一哉, 坂本康裕, 茅野秀夫, 細井祐三: *鉄と鋼*, **76** (1990), p. 964
- 4) K. MIYAHARA, Y. OKAZAKI, M. MOCHIZUKI, Y. HOSOI and H. KAYANO: *J. Nucl. Mater.*, **155-157** (1988), p. 1054
- 5) I. S. BATRA, H. ULLMAIER and K. SONNENBERG: *J. Nucl. Mater.*, **116** (1983), p. 136
- 6) H. TRINKHAUS and H. ULLMAIER: *J. Nucl. Mater.*, **155-157** (1988), p. 148