① 高エネルギー粒子照射下の金属疲労挙動*

永 川 城 正**

Fatigue Properties of Metals under High-Energy Particle Bombardment*

by NAGAKAWA Johsei**

キーワード：疲労，破壊，金属材料，照射，点欠陥

1. はじめに

軽水炉や核融合炉などの炉内構造物の材料は、高いエネルギーをもつ中性子やガンマ線による照射に曝されている。これらの材料中では結晶格子原子の弾き出しが活発に生じ、発生した点欠陥（格子間原子と原子空孔）がダイナミックに動きまわる。その結果、機械的特性を含む種々の材料物性において、非照射時とは機構が根本的に異なる照射下特有の挙動が誘発される。

しかしながら、照射下でのその場計測試験は技術的・経済的に難しく、誘発されると推測される多くの挙動は未だ完全には解明されていない。また、次世代原子炉における照射や応力の状態などの環境を現時点で確定させることは極めて難しい。このため、単に照射下挙動を把握するだけでなく、科学的な理論モデルに基づいた予測に活用できるように試験環境を十分に制御した照射下その場試験を行う必要がある。このような目的には、原子炉実機中での試験より、以下に述べる加速器をもちいた試験の方が適している。

2. 照射下での変形と疲労の重要性

原子炉中心部の構造物材料は、照射を受けるとともに運転にともなう熱応力や溶接を含む製造過程で加わった

残留応力など、様々な応力を受けている。このような環境で発生する機械的挙動として良く知られているのは照射下クリープならびに照射誘起応力緩和である。これらの現象は、次々と生成される点欠陥が応力と特定の方位関係にある結晶面や転位に優先的に析出・吸収される結果、比較的の低い温度領域では本来ほとんど起きないはずの塑性変形を活発に発生させることにより生じる。図1は773 K (500°C) における321 鋼の非照射下熱的クリープ (thermal creep) と照射下クリープ (irradiation creep) の変形速度の応力依存性¹⁾から計算した応力緩和曲線で、照射誘起応力緩和の特徴である初期応力に対する非依存性と、限りなくゼロへと応力が飽和せず減衰して

図1 照射下と非照射時の応力緩和の比較

*原稿受付 平成13年5月30日

** 物質・材料研究機構/九州大学大学院 National Institute for Materials Science/Kyushu University

いく特性が示されている²⁾。これは、照射下におけるクリープ速度の応力依存性が応力のほぼ1乗にしか比例しないことから生じる。ここで、dpa (displacement per atom) とは照射損傷の程度を示す値で、材料の構成原子1個当たり何回格子点位置から弾き出されたかを示す。

原子炉の運転・停止にしたがって、材料の熱応力は変動する。このため、原子炉材料においても疲労破壊の問題は重要である。疲労き裂の発生・進展に際してはき裂先端部近傍での局所的な塑性変形が大きな役割を果たすが、上に述べたように照射下では材料の変形挙動が大きく異なる。よって、原子炉中では照射誘起変形と同様に疲労挙動が非照射時と異なる可能性がある。したがって、非照射における疲労特性がいくら分かっているとしても、照射下で調べなければ実機運転中における疲労破壊挙動を確実に理解できるとは言えない。

3. 軽イオン照射下疲労試験装置

照射下疲労の実験は原子炉中においてもこれまでいくつか試みられている^{3,4)}。しかし、原子炉中では温度や雰囲気などの環境の変動による影響を排除することが難しい。我々は、照射下試験環境を制御し易い加速器からの軽イオンをもちいて照射下疲労試験を行う装置⁵⁾を開発した。

図2に試験装置本体部の上半分(照射チェンバー中に入る部分)を示す。イオンビームによる試料の加熱はヘリウムガスジェット(数十m/s)によって取り除く。さらに、このジェットに試料温度でフィードバック制御した加熱ヘリウムを用いることにより、照射中の温度を所定の値に保つことが出来る。また、赤外線ゴールドイメージ炉による加熱も可能である。試料は、ジェット流やイメージ炉とイオンビームが干渉しないよう、イオンビームに対して45度の角度にセットされている。図3は負荷・変位計測機構を示す。負荷はボールねじとサーボモーターを用い、図2上部のロードセルで荷重を計る。通常、この様な機構ではモーターの回転を制御するのに光学式エンコーダーを用いるが、照射中に発生する中性子やγ線などの放射線による損傷に耐えられるよう、電磁誘導式のレゾルバーを用いている。放射線被曝を避けるため、装置の運転は全てケーブル長で60メートル離れた運転制御室から行う。

後に示すように、イオン照射で均一な原子弾き出しを発生させるためには試料を薄くする必要がある。また、放射化した試料の取り扱いからも、なるべく小型化する必要がある。このため、変位の計測分解能を高くしなければならないが、一方、破壊までの大きな変形量も測定する必要がある。LVDTは分解能が高いほど測定範囲は狭くなる。そこで、2組のLVDTとサーボモーター

図2 照射下疲労試験装置本体部(フランジ板の上)

図3 照射下疲労試験装置本体部(フランジ板の下)

駆動機構の組み合わせを用い、一方が測定中(ソレノイドが停止し、その中の磁性体コアが試料の変形とともに移動)は他方がコアをソレノイドの中央に位置させたまま全体として追跡し、前者が測定限界に達するとコンピュータが両者の状態を切り換えることにより、高分解能かつ広範囲の変位測定を可能にしている。装置の負荷・変位計測機構はコンピュータにより制御され、疲労形式も荷重または変位の正弦波およびランプ波制御が可能である。さらに、荷重または変位の保持を加えることもでき、かつ保持する対象を変えることも可能である。図4に荷重制御と変位保持を組み合わせた例を示す。変位保持中には微小な応力緩和が見られる。図5と6に物材機構サイクロトン加速器と照射チェンバーの写真を示す。

図4 荷重制御-変位保持モードでの応力・歪み応答

図7 333 K (60℃) と 573 K (300℃) での照射下クリープ

図5 物・材機構サイクロトン加速器照射室

図6 疲労試験用アルミ合金製照射チェンバー

4. 照射下での疲労挙動

加速器をもちいた照射下試験は、核融合開発に関連して近年 EU においていくつか行われている^{6,7)}。しかし、ほとんどの実験が 0.1 ないし数%という大きな塑性歪み幅での疲労試験である。これは加速器実験を行う上の時間的制約からくる選択ではあるが、実機における原子弾き出し速度と疲労中の変形とのバランスに即していない。これらの実験では、照射下と非照射時で疲労寿命の違いはあまりないとの報告がなされている。

著者らは、316 ステンレス鋼を 333 K (60℃) で照射した場合、573 K (300℃) よりも照射下クリープが促進されることを見だした⁸⁾。これは、照射により生成される点欠陥のうち、333 K では格子間原子は動けるが原子空孔は移動の活性化エネルギーが高いためにあまり動けず、照射初期には格子間原子だけの活発な活動が生じるためと考えられる。573 K では初めから両者が活動するため、効果の打ち消し合いが起きる。333 K においても照射の進行とともに材料中の原子空孔濃度は上昇し、個々の速度は遅いもののフラックスは大きくなるため、次第に打ち消し合いが強まってくる。このため、333 K における著しい動的照射効果はゆっくりと減速する遷移的な挙動を示す。図 7 に、333 K と 573 K における軽イオン照射下クリープ実験の結果及び、応力下での点欠陥挙動とクリープ変形機構から計算機シミュレーションによって求めた結果を示す⁹⁾。クリープ速度は図の dpa 範囲内では 333 K の方が数十倍も大きいことが分かる。

この様な 333 K (60℃) における動的照射効果の促進を活用して、疲労中の変形に対する照射効果をより大きくした実験を行った。用いた試料は 316 ステンレス鋼 20%冷間加工材であり、最終圧延前の結晶粒度は約 10

図8 照射下疲労実験用の薄板試験片形状

図9 17 MeV 陽子ビーム密度と原子弾き出し速度の関係

μm である。図8に試験片の形状を示す。中央部片側に放電加工によりノッチが付けてあり、疲労試験は上荷重 536.4 MPa、下荷重 236.4 MPa（非照射時の0.2%降伏応力 700 MPa）での引張り—引張り荷重制御による三角波（負荷速度 50 MPa/s）で行った。ノッチ部横断面での上応力は降伏応力の90%に相当する。試験片の厚さは 0.15 mm であり、イオンビームに対して45度をなすように置かれている。この時、図9に示すように17 MeVの陽子ビーム密度 1 mA/cm^2 あたり試料中に平均 $0.5 \times 10^{-7} \text{ dpa/s}$ の原子弾き出しが生じる。全ての照射は $1 \times 10^{-7} \text{ dpa/s}$ で行った。

図10に、非照射時、照射下ならびに照射後（照射下での破断時の損傷量 0.015 dpa を予め与えた後に非照射で試験）の疲労試験結果を示す。縦軸は上荷重での変位を第1サイクル時からの差として示してある。非照射時に比べ、照射下では寿命が2倍以上になっている。一方、照射後の疲労では余り寿命の伸長は見られなかった。それぞれ複数回の実験でもほぼ同様な結果が得られた。

照射の進行とともに、材料中には発生した点欠陥が安定な静止した集合体を形成し、変形（転位のすべり運動）

図10 非照射時、照射下、照射後での疲労挙動の比較

図11 疲労破面上のストライエーション間隔の比較

の障害となる照射硬化現象が進行する。この結果、被照射材の降伏応力は dpa 値の約 1/2 乗に比例して上昇する。照射後疲労においては、この様ないわば静的な照射損傷の影響によって、試料の降伏応力は疲労開始時から既に約 25% 上昇している。観察された寿命の伸長もほぼ同程度であり、照射後の疲労寿命伸長は照射硬化によって理解できる。しかし、照射下疲労においては開始時の降伏応力は非照射時と同じであり、寿命到達時に至ってやっと 25% 高い値となる。したがって、大きな寿命伸長を示す照射下疲労を律するのは照射硬化ではなく、照射中の動的な現象であると考えざるを得ない。

疲労破断面でストライエーション（サイクル毎の疲労き裂進展に対応して形成される縞模様）を走査型電顕で観察した結果、その間隔とノッチ先端からの距離の関係は図11のようになった。ストライエーション間隔はサイクル毎のき裂進展長さに対応することから、照射下においては全き裂伝播過程で伝播速度が非照射時よりも低

く、かつ大きな応力拡大係数になるまで破壊しないことを示している。これに対し、照射後では初期こそ伝播速度が小さいものの、後期には非照射時に近づき、破断時の応力拡大係数も同程度である。さらに、ストライエーションの数と全疲労サイクル数からき裂発生までに費やされたサイクル数とその後の伝播に要したサイクル数を評価すると、照射下では照射硬化がまだ小さいき裂発生までの過程においても抑制を受け、き裂の発生が非照射時さらには照射後よりも遅れていることが示された¹⁰⁾。

照射下疲労挙動のメカニズム解明は基本的には未だ今後の課題ではあるが、被照射材料の破壊に至る変形において重要な転位チャネル（点欠陥集合体が多数存在する中に形成された低欠陥密度の転位の通り道）が大きな役割を担っていると考えられる。すなわち、通常（照射後）はこのチャネルに塑性変形が集中してき裂の発生・伝播を引き起こすが、照射下では発生したチャネル内に次々と新しい欠陥集合体が形成されるために、その中での転位の増殖・すべりが抑制され、き裂の発生・伝播への貢献が長続きしない可能性がある。また、ノッチ及びき裂先端部近傍での変形集中を著しい照射誘起変形が緩和すると考えられ、特にき裂発生までの過程において大きな抑制効果を発揮している可能性がある。

5. お わ り に

ここに示した荷重制御の疲労だけでも、次世代原子炉における照射下挙動の科学的な理論モデルに基づいた予測を可能にするには、さらに多くの実験を行って現象を

解明する必要がある。クリープ疲労重畳状態での挙動についても興味深い結果が得られており、変位制御の疲労も含めて今後さらに研究を進める予定である。

参 考 文 献

- 1) J. A. Hudson et al., The irradiation creep of nickel and AISI 316 stainless steel during 4 MeV proton bombardment, J. Nuclear Materials, 65 (1977), 279-294.
- 2) J. Nagakawa, Calculation of radiation-induced stress relaxation, J. Nuclear Materials, 212-215 (1994), 541-545.
- 3) A. M. Ermi and B. A. Chin, An in situ fatigue crack propagation experiment, J. Nuclear Materials, 103-104 (1981), 1505-1510.
- 4) W. Vandermeulen et al., The effect of neutron irradiation on the fatigue behaviour of AISI 316L, J. Nuclear Materials, 183 (1991), 57-61.
- 5) Y. Murase et al., Creep-fatigue response of 20%CW 316 SS under irradiation at 60°C, ASTM STP 1366, (2000), 713-724.
- 6) P. Marmy, In-beam fatigue of a ferritic-martensitic steel, J. Nuclear Materials, 212-215 (1994), 594-598.
- 7) R. Lindau and A. Moeslang, Fatigue tests on a ferritic-martensitic steel at 420°C, J. Nuclear Materials, 212-215 (1994), 599-603.
- 8) J. Nagakawa et al., Computer simulation of early-stage irradiation creep, J. Nuclear Materials, 179-181 (1991), 986-989.
- 9) J. Nagakawa et al., Irradiation creep at 60°C in SUS 316 and its impact on fatigue fracture, J. Nuclear Materials, 283-287 (2000), 391-395.
- 10) Y. Murase et al., Dynamic irradiation effect on the fatigue cracking of 316 stainless steel, Proc. 6th Japan-China Symposium on Materials for Advanced Energy Systems, (2001), 印刷中.

溶接学会全国大会講演概要 — 第69集 —

2001年9月10日発行
定価 5,000円（送料別）

ご注文その他については、下記へお問い合わせ下さい。

社団法人 溶接学会

〒101-0025 東京都千代田区神田佐久間町 1-11
TEL 03-3253-0488 FAX 03-3253-3059