

## 論文の内容の要旨

論文題目 Effects of Dose Rate on Irradiation Behavior in Structural Materials

(和訳 構造用金属材料照射下挙動の線量率効果に関する研究)

氏名 沖田 泰良

原子力プラントで使用される材料が他の巨大人工物と比較して、大きく異なる点は、高温・高圧水環境に加えて、放射線環境下で使用されることである。このような複合的極限環境下で使用される炉内構造材料の健全性評価は、原子力プラントの安全性を評価する上で極めて重要な事項である。更に軽水炉高経年化や核融合炉開発には、実証的データの無い材料挙動の予測を行う必要がある。

長期間の照射を受ける構造材料の挙動予測には、材料試験炉や加速器を用いた高線量率（高損傷速度）の照射場を用いた加速試験によりデータが獲得され、主として積算線量によるスケーリングが行われてきた。一方、はじき出し損傷による金属材料のマイクロ組織発達過程では線量率（損傷速度）が大きな影響を及ぼすことが知られている。このため、損傷速度の影響をマイクロ組織ベースで明らかにし、材料特性変化メカニズムに基づいて、加速照射試験結果から低損傷速度で長期間の照射を受ける材料挙動を予測するモデルの開発が求められる。

このような懸念にもかかわらず従来、損傷速度の影響についての研究例は、同程度の損傷量で比較を行うために 2 倍程度の損傷速度の相違での実験したものや、中性子スペクト

ルや照射履歴に相違がある異なる原子炉での比較したものに限られている。

本研究の中心となる実験の最大の特徴は、同一の高フラックスの試験炉で二桁以上損傷速度を変えた照射を行ったことである。これにより、損傷速度の影響のみを広い範囲で抽出することが可能となった。対象材料としては、軽水炉高経年化を念頭に置き、炉内構造物として使用されるオーステナイト鋼とし、マイクロ組織発達過程における損傷速度の影響の基礎メカニズムを実験的に評価した。また、格子間原子に対してバイアスを持ったシンクである転位組織発達に対して、損傷速度の影響をマイクロメカニズムに基づいて取りこんだモデル化を行った。

本論文の第1章では、以上のような研究の背景と目的を述べた。第2章以降については、以下で章を追って要約する。

第2章では、本研究における実験方法についてまとめた。溶体化処理を行った Fe-15Cr-16Ni および Fe-15Cr-16Ni-0.25Ti を米国実験炉 FFTF/MOTA の炉心、上部コア、下部コアの7つのキャンスターにおいて、1サイクル及び2サイクルの中性子照射を行った。FFTFは、炉心で最大の損傷速度を有し、炉心からの距離によって損傷速度が低くなる。損傷速度は、 $8.9 \times 10^{-9}$  dpa/sec から  $1.7 \times 10^{-6}$  dpa/sec の間であり、これに応じて2サイクルの積算損傷量は 0.23 dpa ~ 67.8 dpa となる。照射温度は 389°C ~ 444°C の範囲である。

また、Fe-15Cr-16Ni に関しては、HIT を用いた重イオン照射も行った。 $1.0 \times 10^{-4}$  dpa/sec から  $1.0 \times 10^{-3}$  dpa/sec の間で3種類の異なる損傷速度で、照射量は 0.17 ~ 17 dpa、照射温度は 300°C, 400°C, 500°C である。

これにより、400°C では、 $\sim 10^{-8}$  dpa/sec から  $10^{-3}$  dpa/sec の5桁に及ぶ損傷速度の相違が及ぼすマイクロ組織発達の影響について、実験的に評価することが可能となった。

第3章では、Fe-15Cr-16Ni でのマイクロ組織発達過程に及ぼす損傷速度の影響についてまとめた。低損傷速度では、転位組織発達が促進される。これは、低損傷速度で、転位ループ成長が促進されたためである。転位ループ数密度は、損傷速度の1/2乗に比例して飽和し、転位ループ径は損傷速度の $-1/2$ 乗に比例することがこれまでの研究によって示さ

れ、本研究でも比較的低い積算線量でこの傾向が確認された。しかし、高い積算線量では、転位ループがアンフォールトしネットワーク転位となるため、ループ数密度は減少する。長期間の照射で、転位ループが成長・アンフォールトする過程では、総転位密度の損傷速度依存性をモデル化する必要があることが、本実験により評価された。一方、重イオン照射では、損傷速度が非常に高いため、転位ループが十分に成長せずアンフォールトがほとんど起こらない。このような場合には、低い損傷速度で転位ループ形成が促進されることが評価された。

格子間原子に対してバイアスを持ったシンクである転位組織発達が、低損傷速度で促進されることによって、格子間原子をより多く吸収するシンクが増加する。このため、キャビティ形成及び成長が促進され、低損傷量からスエリングが増加する。しかし、いわゆる定常スエリング率  $1\%/dpa$  は損傷速度によらないが、定常スエリングに至るまでの潜伏線量は損傷速度の影響が強く、ほぼ 1 乗に比例して低損傷速度で小さくなることがわかった。

第 4 章では、Ti を添加したオーステナイト鋼における損傷速度の影響をまとめた。 $\sim 10^{-8} dpa/sec$  から  $\sim 10^{-6} dpa/sec$  の低損傷速度でも、Ti 添加によりキャビティ形成が抑制されることが本研究により評価された。一方で、低損傷速度ではキャビティ成長が促進されることで、スエリングが促進される。

同一損傷速度で比較すると、Ti を添加することでキャビティ数密度は減少し、径は増加する。このように、マイクロ組織発達過程では Ti 添加は大きな影響を及ぼすが、 $400^{\circ}C$  付近におけるスエリングに対しては、影響が無い。また Ti を添加しても、スエリング潜伏線量は損傷速度のほぼ 1 乗に比例し、低損傷速度で短くなることがわかった。

第 5 章では、損傷速度の影響を考慮したモデル構築の際、最も重要なメカニズムについて評価した。1 サイクル照射後と 2 サイクル照射後のキャビティサイズ分布を比較することで、第 2 サイクルの照射で生成したキャビティと成長したキャビティに分離し、キャビティ成長率の損傷速度依存性を求めた。キャビティに流入する点欠陥流速は、単位時間あたり損傷速度の  $1/2$  乗に比例し、単位損傷量あたり損傷速度の  $-1/2$  乗に比例する。

これは、 $10^{-7} dpa/sec$  以下の低損傷速度でも、点欠陥消滅の支配機構が再結合であること

を示す。低損傷速度での再結合は、フレンケル対の 3 次元的ランダム拡散によるものではなく、カスケードから形成された格子間原子集合体の最密方向への非常に速い 1 次元拡散運動により、実効的な再結合体積が増加したと考えられる。

また、同一損傷速度で比較しても、キャビティへの点欠陥流速には、サイズ依存性があり、キャビティサイズが大きいほど点欠陥流速が高いことがわかった。これは、照射誘起偏析によるものであると考えられる。

第 6 章では、転位ループがアンフォールトしネットワーク転位化する過程、ネットワーク転位が上昇運動により増殖する過程、さらに消滅する過程での損傷速度の影響をとりいれた転位組織発達モデルを構築した。

本モデルでは、実験から得られた結果より、以下の妥当と考えられる条件を決定した。

(1) 2 つの格子間原子からなる格子間原子集合体が転位ループ形成の核となる。(2) 転位ループが成長する過程で、他の転位と接触することによりアンフォールする。(3) ネットワーク転位密度の時間変化は、アンフォールトによって生成する項、上昇運動により増殖する項、対消滅によって減少する項の 3 つで示される。(4) 転位は上昇運動の際、主として他の転位にピンニングされて増殖する。(5) 逆符号のバーガースベクトルを持った転位は対消滅する。

上記の仮定をもとに計算した結果、転位ループのアンフォールトが最も起こりやすい損傷量は、損傷速度の  $1/2$  乗に比例して低損傷速度で高く、また、アンフォールトによって生成するネットワーク転位密度は、損傷速度の  $-1/2$  乗に比例して低損傷速度で高いことがわかった。低損傷速度で、転位ループのアンフォールトが促進されることでネットワーク転位組織発達が促進され、他の転位上昇運動の障害物とすることにより、損傷速度の影響を取り入れることができた。

しかし、低損傷速度では、モデル計算よりも高い転位密度増加率を示した。これは、転位ループが他の転位に接触せずにアンフォールする、「自己アンフォールト」に起因すると考えられる。低損傷速度では、転位ループの成長速度が大きいいため、ネットワーク転位発達モデルを構築する際に、自己アンフォールトが重要な機構であることがわかった。

第7章では、本研究の主な結論を述べた。すなわち、

- (1) キャビティへの点欠陥流速は、損傷速度の  $1/2$  乗に比例する。これは、点欠陥の主な消滅機構が再結合によることを示唆している。カスケードにより直接形成された格子間原子集合体の1次元方向への非常に速い拡散により、再結合率が増加したためであると考えられる。これが、マイクロ組織発達に及ぼす損傷速度の影響の最も支配的な機構である。これにより、低損傷速度では転位ループ成長、アンフォールトが促進され、比較的低い損傷量からネットワーク転位を形成する。
- (2) 格子間原子に対してバイアスを持ったシンクである転位組織発達が、低損傷速度で促進されることによって、キャビティ形成及び成長が促進され、低損傷量からスエリングが増加する。スエリングの潜伏線量は、損傷速度の1乗に比例する。この傾向は、Tiを添加しても変わらない。
- (3) カスケード損傷を伴う中性子照射下で、損傷速度の影響を取り入れた転位組織発達モデルを構築した。転位上昇運動の障害物を他の転位と仮定することで、損傷速度の影響を取り入れることが可能となった。
- (4) 損傷速度を取り入れた指標として、「単位損傷量あたりの点欠陥流速」が優れたものである。