

審査の結果の要旨

氏名 宮代 聡

放射線照射下の材料挙動は、主としてカスケード損傷過程による欠陥形成と、これに起因するマイクロ組織変化によって特徴づけられる。一般に、原子炉構造材料は応力下で供されるため、放射線照射および応力の複合環境下における現象の解明が、未知の照射条件における材料挙動予測のために求められている。特に、中性子照射下では、原子炉供用温度においてすら材料が応力方向に不可逆変形する照射下クリープ現象が発生し、軽水炉構造材料の照射誘起応力緩和、重照射環境におけるクリープ変形等、多様な形態で発現する。このため、本質的なメカニズム解明に基づく適用範囲の広い知見の創出が求められている。このような背景を基に、本論文の目的を、沸騰水型原子炉の炉心シュラウド等、スウェリングが無視できる条件で特に重要となる SIPN (Stress-Induced Preferential Nucleation) /SIPO (Stress-Induced Preferential Orientation) モデルに注目し、応力下における欠陥、特に格子間原子集合体の形成・配向の現象解明においている。

本論文は 4 章で構成されている。第 1 章では背景と研究目的が示されている。第 2 章では、欠陥形成に及ぼす応力影響に関して、欠陥形成個数と欠陥方位の 2 つの観点から解析と議論が行われている。第 3 章では、欠陥の方位変化に及ぼす応力影響について扱っている。第 4 章は結論である。

第 2 章においては、面心立方構造の低積層欠陥エネルギー金属である Cu について、分子動力学 (MD) 法を用いて、応力下における欠陥形成挙動を解析している。第 2 章は二部構成である。前半部においては、欠陥形成個数に対する応力影響を解析した結果を示している。等方圧縮変形で欠陥数が減少した以外では、単軸変形その他、等積変形、ポアソン変形等、試行した全ての変形モードにおいてカスケード損傷過程で形成される欠陥数が増加することを明らかにした。これら様々な変形モードにおける結果を系統的に解析するとともに、欠陥形態を多数のサンプルに基づいて詳細に解析することにより、欠陥増加の原因が異方的な応力印加による大きいサイズの集合体形成促進であることを明らかにした。さらに、大きいサイズの集合体の形成促進の重要性を踏まえ、欠陥集合体のサイズ分布を変化させる因子として第一次はじき出しエネルギーに対する依存性に着目して解析を行い、サブカスケードの形成を軸に現象を整理することで、未知の照射条件における欠陥形成に対する応力影響予測に向けた道筋を示している。後半部においては、カスケード損傷過程で

形成される欠陥集合体方位の偏りを解析し、定量化した。本論文では、応力印加下における格子間原子集合体の形成方位に関して、統計力学モデルの適用性を検討している。カスケード損傷過程は、ピコ秒オーダーにおける急激な温度変化を伴う欠陥集合体形成過程であり、本来は統計力学モデルの適用範囲外である。しかし、定義不能なパラメータを逆に MD 結果へのフィッティングで求めることにより、統計力学モデルがカスケード損傷過程における欠陥集合体形成方位を良く近似することを明らかにした。一方で、集合体サイズに対する依存性の解析等の結果、カスケード損傷過程内部の現象が形成された欠陥集合体方位に影響を与えていることを確認し、統計力学モデルの適用限界を明らかにしている。

第 3 章では、形成後の格子間原子集合体の方位変化について、無ひずみ下、単軸一定ひずみ印加速度下、単軸定ひずみ下の解析を様々な温度条件で行っている。方位変化が容易な高温における微小集合体の方位については、前章で示した統計力学モデルが適用可能であることが明らかになった。一方で、集合体サイズ 37 以上では 1200K、単軸 1%ひずみの高温・高ひずみ条件下でも方位変化確率が極めて低いことを明らかにした。この結果を基に、サイズの大きい格子間原子集合体がカスケード損傷で直接形成された場合、集合体形成方位に対する応力影響モデルである SIPN を中心としたモデルでとらえる必要がある一方で、頻繁に方位変化を起こすサイズの小さい格子間原子集合体については、集合体方位変化に対する応力影響モデルである SIPO を中心としたモデルでとらえるのが妥当であると指摘している。

第 4 章は結論である。

以上要するに、本論文は中性子照射下の欠陥挙動について、応力影響という観点から研究を行ったものである。本論文は、照射下クリープ現象の SIPN/SIPO モデルに対し、原子論的な見地からの解析による統一的なモデル化による現象解明に資するとともに、応力印加による欠陥形成促進効果をはじめとする応力と照射の重畳環境下における材料挙動を理解する上で重要な効果を明らかにしており、原子炉材料分野への貢献が大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。