

タングステンにおけるヘリウムバブル形成に及ぼす材料温度の影響

Impact of Temperature on the Helium Bubble Formation in Tungsten

坂本隆一¹, Elodie BERNARD², 吉田直亮³, Matt THOMPSON⁴

Ryuichi SAKAMOTO¹, Elodie BERNARD², Naoaki YOSHIDA³, Matt THOMPSON⁴

⁴核融合研, ⁴Aix-Marseille Université, ⁴九大応力研, ⁴Australian National University

⁴NIFS, ⁴Aix-Marseille Université, ⁴Kyushu University, ⁴Australian National University

室温から 800 °C までの範囲で温度制御したタングステン試料を試料駆動装置を用いて大型ヘリカル装置 (LHD) の第一壁位置まで挿入し、ヘリウムプラズマを照射した。集束イオンビーム (FIB) による微細加工と透過型電子顕微鏡 (TEM) を組み合わせた断面観測により、ヘリウム粒子の飛程 (~15 nm) よりも深い領域 (~70 nm) までバブルが形成し、その分布が照射温度に依存しないことを明らかにした。さらに、TEM 観察で得られたバブル分布を、擦り入射小角度 X 線散乱計測 (GISAXS) によって検証し、TEM による数 10 nm の範囲の観測結果と GISAXS で得られる平均的なバブル分布測定との間で相互に矛盾がない分布が得られることを確認した。

原型炉第一壁は耐損耗性の観点からタングステンが候補材料となっている。ブランケットへの中性子束を確保するためには、第一壁の厚さはできるだけ薄いほうが望ましく、厚さ数 100 μm 程度のタングステン薄膜の使用が想定されている。第一壁は燃料である水素同位体のみならず核融合反応生成物であるヘリウムの照射環境下におかれるが、タングステン中のヘリウムは格子欠陥との相互作用が強く、高温環境下でも微細損傷組織蓄積に影響を与えることが知られており、ヘリウム照射効果の解明は第一壁の寿命を検証する上で必要な課題である。本研究では、ブランケットの使用温度を想定した温度領域でのヘリウム照射効果を調べることを目的として、セラミックヒータにて温度制御されたタングステン試料に、LHD のヘリウムプラズマを約 100 ショット照射し、その照射影響を調べた。EMC3/EIRENE code によると、試料には 1 eV から 2 keV の広いエネルギー範囲の荷電交換粒子が計 $\sim 10^{23} / \text{m}^3$ 入射したと概算されるが、弾き出し損傷の閾値 (~500 eV) 以下の低エネルギー成分が大部分 (96-99 %) であり、マルチエネルギー成分の TRIM code によって、弾き出し損傷 (dpa) に比べてヘリウムの注入割合 (apa) が 2 桁も大きいことが示される。このような照射条件はイオンビーム照射実験等では模擬できない実環境特有の照射条件である。

照射後、試料は FIB 微細加工により照射表面近傍の断面を切り出し、TEM による観察を行い、Fig. 1 に示すように照射温度によらず 70 nm 程度の深さまでヘリウムバブルが存在することを明らかにした。原子空孔がほとんど移動しない 190 °C と、十分に移動可能な 800 °C の照射においてバブルが形成される深さ分布が変わらないことから、バブルの核形成におよぼす原子空孔の役割は限定的と考えられ、ヘリウム同士の結合によりバブルの核形成がなされていることの傍証となっている。一方で、Fig. 2 に示すように 800 °C では 500 °C 以下の温度における照射に比べて大きなバブルの割合が多くなることから、原子空孔の供給によって、バブルの成長が促進されていることが示された。

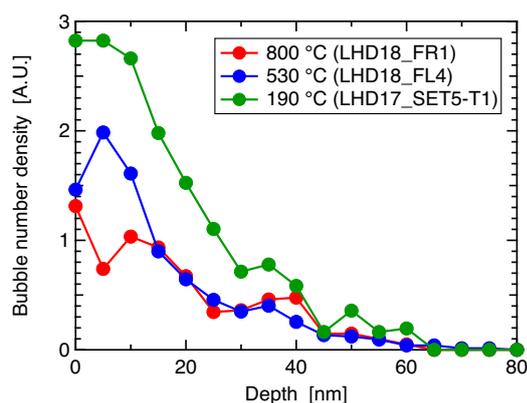


Fig. 1 Depth distribution of bubble number density

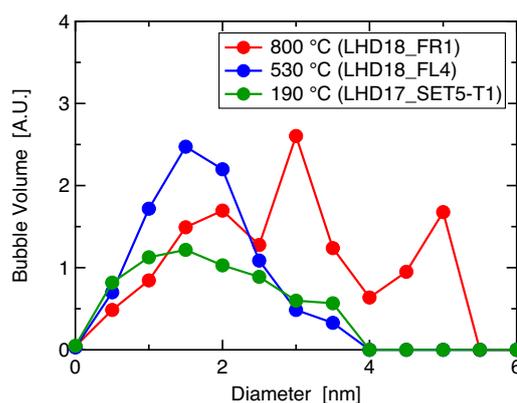


Fig. 2 Bubble diameter distribution