

短パルス繰り返しレーザー及び He プラズマの同時照射がタングステンに与える影響

大阪大学 河合俊昇

ITER をはじめとするトカマク型核融合装置の標準的な運転モードである H モードでは、周辺局在化モード(Edge Localized Mode : ELM)と呼ばれる不安定性が生じ、間欠的かつ周期的な熱・粒子の放出現象が起こる。ELM はヘリウム灰等の不純物をコアプラズマから排出するため、良好な閉じ込め状態を定常的に維持できるが、放出される熱や粒子が壁材料に深刻な影響を与える可能性もある。ITER 及び DEMO 炉では、プラズマ対向材料の候補材としてタングステンが検討されているが、ELM の熱・粒子負荷がタングステンに入射すると、入射エネルギーフルエンスが材料溶融の閾値を下回る場合でも、表面にクラックが発生することが分かっている。

本研究では、Spectra-Physics 製 Nd:YAG レーザーを用いて ELM の熱負荷を模擬し、結晶粒の構造の異なる 2 種類のタングステン材料(ITER-grade 材/平行材)に繰り返し照射した後、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いてレーザー照射後の材料表面の状態を分析した。また、レーザー照射では粒子による影響を模擬できないため、実際の現象とは異なるが、He 定常プラズマを短パルス繰り返しレーザーと同時に照射することで粒子負荷の影響を加味し、プラズマ照射の有無がタングステン材料のクラック発生に及ぼす影響を評価した。このとき、レーザーのエネルギーフルエンスは $10\sim 20\text{J/cm}^2$ (同時照射では 10J/cm^2)、レーザーの繰り返し照射回数は $100\sim 10000$ 、He 予照射のフルエンスは $1\times 10^{24}\text{He/m}^2$ である。また、レーザー及び He プラズマ照射時のタングステン材料表面の初期温度は $750\sim 880\text{K}$ である。さらに、SEM による表面分析のほか、有限要素法を用いた解析による数値的なシミュレーションも行った。

レーザーのみの照射を行った場合、照射回数が 5000shots を超えると、照射スポット円周部に長さ $20\sim 30\mu\text{m}$ ・幅 $1\sim 2\mu\text{m}$ 程度のクラックが発生した。一方、He プラズマとの同時照射を行った場合、レーザー照射回数が 500shots であっても、網状の細かいクラックがスポット円周部に発生した。同時照射の場合はさらに、レーザーの照射回数が 5000shots を超えると、損傷がレーザー照射スポット全体に及ぶことが分かった。この結果は材料の結晶粒の構造にはほとんど由来せず、He 照射によってタングステン材料が脆化したことによる相乗効果によるものであると考えられる。また、He との同時照射でレーザー照射回数 10000shots の場合(ITER-grade 材を使用)には、長さ $2\sim 3\mu\text{m}$ 程度・幅 $1\mu\text{m}$ 未満のクラックが損傷の激しいスポット全体に無数に見られたものの、レーザーのみの場合と比べると 1 桁ほど小さなものであり、He との照射によって大きなクラックの発生が緩和された可能性がある。