

極限環境材料研究のためのレーザー加速電子による イメージングシステムの最適化

島根大学 荒河 一渡

目指す姿

本プログラムにおいて、レーザー加速 XFEL 実証のためのレーザー加速要素技術の開発が進められてきた。この要素技術開発において達成される加速エネルギー GeV レベルの極短パルス電子は、加速エネルギーの MeV レベルへの変更によって、極短パルス電子そのものをプローブとするレーザー加速パルス電子イメージングシステムへと発展させることが可能と期待される。このシステムは、高エネルギー粒子照射、衝撃変形、および高圧水素印加といった、さまざまな極限環境における材料挙動の原子～ナノスケールかつフェムト～ピコ秒スケールでの解明に役立つ。これらは、核融合炉材料、耐衝撃材料、および高圧水素貯蔵材料といった、極限環境材料の革新的開発に直接繋がるものである。以て、本研究開発は、安全・安心な社会の実現に資することを旨とするものである。本研究開発では、H30年度より、レーザー加速パルス電子イメージングシステムの実現およびその応用のための基礎的検討をおこなった。

課題

本研究開発では、次の二つの課題に取り組んだ。

(1) レーザー加速パルス電子によるイメージングシステムの最適化

本プログラムにおけるレーザー加速要素技術を基盤とした、レーザー加速パルス電子をプローブとするイメージングシステムの実現を目指し、パルス電子源およびシステムに要求される性能を検討する。

(2) 極限環境における原子～ナノレベル材料挙動の観測

本システムの極限環境材料研究への応用を見据えて、従来型の非パルス電子源を備えた電子顕微鏡によって極限環境における材料挙動の原子～ナノスケールでの観測をおこない、基礎となる知見を獲得する。

成果

(1) レーザー加速パルス電子によるイメージングシステムの最適化

XFELに代表されるパルスX線源は、材料研究において極めて有用なプローブである。一方で、極限環境材料挙動の鍵を握ると考えられる材料中の結晶格子欠陥の挙動を捉えるには、パルス電子源が極めて有効と期待される。これは、電子波はX線に比べて、物質との相互作用が桁違いに強いこと及び逆空間におけるエバルト球の半径が桁違いに大きいこと、そのために回折が多波かつ動力学的であることに由来する。

これまで、RFフォトカソード・パルス電子源によるパルス電子回折(図1)計測は既に為されている。しかし、その適用は、材料の様な相変態に留まり、極限環境材料挙動の鍵を握ると考えられる欠陥挙動の計測には至っていない。本課題では、レーザー加速パルス電子イメージングシステムによって、世界に先駆けて、シングルショットで積層欠陥(図1)等の欠陥挙動を捉えるための諸条件—逆格子点の欠陥由来の変調の検出が可能となるような、パルス電子源のビーム・ダイバージェンス、電子数、エネルギー分散、およびシステムのジオメトリー等—を検討した。

(2) 極限環境における原子～ナノレベル材料挙動の観測

極限環境材料においては、しばしば原子～ナノスケールの欠陥の挙動が材料全体のマクロな性質を支配する。したがって、極限環境材料を安全・安心に使用するには、材料中の欠陥挙動を正確に理解し制御する必要がある。

レーザー加速パルス電子イメージングシステムは、極限環境における欠陥挙動の原子～ナノスケールかつフェムト～ピコ秒スケールでの観測に適用され得る。しかし、そのような測定結果の解釈には、より長い時間スケールでの欠陥挙動についての正確な知見が役立つと期待される。また桁の異なる時間スケールにおける観測結果の結合によって、極限環境における欠陥挙動の全貌が解明されると期待される。ここでは、従来型の非パルス電子源を備えた透過電子顕微鏡によって極限環境における欠陥挙動の原子～ナノスケールでの観測をおこない、ミリ秒スケールの欠陥挙動に関する知見を獲得した。この手法では、実空間におけるイメージングによって欠陥挙動の空間的非一様性までも含めた知見が得られる。ここでは、その時間スケールはミリ秒程度に限られるが、この時間スケールに適合した遅いナノスケール欠陥の挙動であれば直接観測できる(K. Arakawa et al. Science 318(2007)956)。

具体例として、核融合炉ダイバーターに対する核融合中性子照射環境を模した、自己イオン照射下でのタングステンにおける欠陥形成過程の観測をおこなった。また比較のために、高エネルギー電子照射下での欠陥形成過程の観測もおこなった。これらの実験のために、大阪大学超高压電子顕微鏡センターの超高压電子顕微鏡およびフランス・オルセーのJANNuS-Orsay施設における重イオン加速器結合型電子顕微鏡をそれぞれ使用した。高エネルギー電子照射下では、極微小な欠陥が生成し徐々にナノスケールへ成長した(図3)。これに対し、自己イオン照射では、通常の透過電子顕微鏡の時間分解能である0.03 s以内に、ナノスケールの欠陥形成が突然におこった(図4)。詳しい解析から、本来は極めて移動度が高く材料中に留まらないはずの欠陥を材料中に安定化させる因子、すなわち核融合炉材料劣化の支配因子を同定しつつある(MMM国際会議(大阪10月)招待講演)。このような観測結果は、近い将来のレーザー加速パルス電子イメージングシステムによる、欠陥生成過程のフェムト～ピコ秒スケールでの観測結果と結合されることによって、核融合材料の劣化過程の全貌の解明に繋がると期待される。

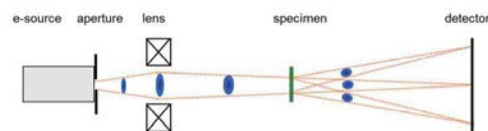


図1 パルス電子回折システムの概図

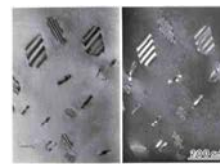


図2 銅における積層欠陥の透過電子顕微鏡像



図3 タングステンへの2 MeV 電子照射下での欠陥形成(透過電子顕微鏡像)。白い粒状のコントラストは、欠陥周りの歪をイメージングしたものである。

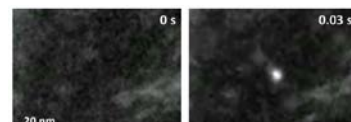


図4 タングステンへの500 keV 自己イオン照射下での欠陥形成(透過電子顕微鏡像)

今後の展開

本プログラムにおけるレーザー加速要素技術を基盤とした、実際のレーザー加速パルス電子源を用いた、イメージングシステムの開発およびその応用を世界に先駆けて実現させてゆく必要がある。