

極低エネルギー水素イオン照射による核融合炉プラズマ対向材料開発研究
Materials development study for plasma-facing component of fusion reactors by
ultra-low energy hydrogen ion irradiation

研究代表者 九州大学応用力学研究所 助教授 室賀健夫
Takeo Muroga, Associate Professor, Research Institute for Applied
Mechanics, Kyushu University

協同研究者 九州大学 大学院博士過程 坂本隆一
Ryuichi Sakamoto, Graduate Student, Kyushu University

九州大学応用力学研究所 教授 吉田直亮
Naoaki Yoshida, Professor, Research Institute for Applied
Mechanics, Kyushu University

英文概要

In-situ observation of microstructural evolution during irradiation with low energy hydrogen ion irradiation has been carried out for the purpose of developing plasma-facing component materials of fusion reactors. The micro-structure and hydrogen retention in Mo and W during hydrogen ion irradiation at low energies (<1keV) were found to be different from those at high energies.

研究目的

本研究は、21世紀の主要エネルギー源として期待されている核融合炉を開発するうえで最大の工学的課題である、プラズマに面する機器表面材料（プラズマ対向材料）を開発する事を目的とする。プラズマ対向材料には、高熱が負荷されるとともに、水素プラズマの不安定性により、多量の水素イオンが注入され、その結果表面材料の強度劣化、形状変化が引き起こされ、炉設計上極めて深刻な問題となっている。さらに、材料中の水素の透過、吸蔵により燃料の輸送、すなわち反応の安定性が大きく支配される。従って水素注入による特性劣化が少ないだけでなく、水素の吸蔵、透過量が少なく特性の安定した材料が必要となっている。現在、このような特性を持ち製造性、加工性に優れた材料は見あらず、水素の挙動と材料劣化の内部機構に基づいた材料開発が必須となっている。

本研究では、この水素注入による材料劣化過程を原子レベルでかつ動的にとらえる事により、その基礎機構を明らかにするとともに、特性劣化の少ない材料、水素吸蔵、透過量の少ない材料の開発の指針を得る事を目標としている。

現有核融合実験装置では、プラズマ対向材料として耐熱衝撃性を考慮し、主に黒鉛系材料が使用されているが、注入水素による損耗と劣化が激しく、将来的には金属系材料に転換せざるを得ないと考えられている。現在のところ、タングステン系、モリブデン系等が候補に上がっているが、基礎情報が少なく、核融合炉環境での特性試験データに乏しいため総合評価が難しく、新材料の開発もスムーズには進んでいない。本研究は、水素注入効果の原理的理解からプラズマ対向材料の開発指針を示す事により、核融合炉を21世紀中期に実現する事に寄与する事が期待される。

研究経過及び成果

本実験は、主として「低エネルギーイオン照射電子顕微鏡」を用いた。まず、プラズマ対向候補高融点金属材料であるモリブデンを取り上げ、水素イオンを 0.2-8 keV のエネルギーで、室温から 600°C までの温度で照射し、内部組織の変化の連続観察を行った。水素照射により転位の他気泡、板状組織など水素の集合体が観察された。組織変化には水素イオンエネルギーの強い依存性のあることが明らかになった。すなわち、実際の核融合プラズマ対向壁で想定される 1keV 以下のエネルギーでは水素の板状集合体が発生するが、従来多くの水素注入シミュレーション実験で用いられている 5-10 keV の水素イオン照射では、転位ループが発生、成長し高密度の転位ネットワークが形成されることが明らかになった。これらの組織の熱安定性は大きく異なり、水素の板状集合体は 300°C 付近から徐々に分解し始めるが、転位は 600°C まで安定である事が分かった。従って、従来の高エネルギー水素注入シミュレーション実験データをプラズマ対向材料で問題になる 1 keV 以下の大量水素イオン注入効果に適用すると、質的に大きな差が生じる可能性のある事が示された。特に、水素による原子弾き出しは、1 keV 以下の水素イオンでは起こらなくなるので、そのことが本質的に異なった組織変化を生じた原因と予想される。また、温度依存性データから、水素が多量の集合体を作る温度域が明確になり、材料劣化と水素吸蔵を抑えるにはプラズマ対向機器をどの温度範囲に保つのが適当であるかが分かるようになった。具体的には、モリブデンを使用した場合、壁温度は 400°C 以上を保つのが望ましいことが示された。

次に、同様な実験をタングステンに関して行った。タングステンでは水素の板状集合体は極限られた条件以外は発生せず、低エネルギー水素イオンでの組織変化は殆ど起こらない事が明らかになった。高エネルギーでも、発生した転位ループが表面に滑り出てしまうため、転位の蓄積が殆ど起こらない事が示された。従って、タングステンにおいては、モリブデンに比べはるかに水素蓄積と損傷が少ない事が明らかになった。ただし、純度の低いタングステンにおいては欠陥の蓄積が大きく、高純度材料の使用が必要である事が分かった。

以上の材料データの蓄積に基づき、核融合装置設計グループ（原研、核融合科学研）との情報交換により、次期、次次期実験装置用のプラズマ対向機器材料として高純度タングステンとその改良材を提案するとともに、その最適な使用条件と限界を示した。

発表論文リスト

R. Sakamoto, T. Muroga and N. Yoshida

Microstructural evolution in molybdenum during hydrogen ion implantation with energies comparable to the boundary plasma

The Sixth International Conference on Fusion Reactor Materials

(Sept.27-Oct.1,1993, Stresa, Italy)

Journal of Nuclear Materials に印刷中

R. Sakamoto, T. Muroga and N. Yoshida

Microstructural evolution induced by low energy hydrogen ion irradiation in tungsten

The Eleventh International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices (May 23-27, 1994, Mito, Japan)

Journal of Nuclear Materials に印刷中