

学位論文題名

核融合装置用プラズマ対向材料の損耗特性に関する研究

学位論文内容の要旨

核融合プラズマを閉じ込める容器の内壁は、プラズマと直接接することからプラズマ対向壁と呼ばれている。これを構成する材料であるプラズマ対向材料は、プラズマからの高熱負荷および粒子負荷により著しく損耗する。その結果、プラズマ対向壁の寿命が著しく短くなるばかりではなく、プラズマ中に混入した構成物質を不純物源とした放射冷却によってプラズマ温度が急激に低下してしまう。最悪の場合にはプラズマそのものが消滅(ディスラプション)してしまう。従って、プラズマ対向壁の寿命を長くし、かつプラズマのエネルギー閉じ込め特性を劣化させないため、高熱負荷および粒子負荷に対して損耗の小さなプラズマ対向材料が要求されている。特に、工学的観点からは、プラズマ対向材料の損耗特性を明らかにし、損耗しにくい材料の開発とその適合性を評価することが重要な課題となっている。

本研究においては、世界三大トカマク装置の一つであるJT-60のプラズマ対向材料として、熱負荷の大きなリミター部にはTiC被覆Moを、熱負荷の比較的小さなライナー部にはTiC被覆インコネル625を提案した。損耗が最も過酷となるTiC被覆Moに対して高熱負荷試験を行い、その耐熱特性について評価した。特に、プラズマのディスラプション時に予測される瞬間的で極めて高い熱負荷、および通常運転時に予測される繰返し熱負荷に対する耐熱特性について研究を行った。TiCの被覆方法として物理蒸着(PVD)法及び化学蒸着(CVD)法を選択し、耐熱特性、特に、被覆方法や被覆条件の違いが、膜の剥離にいかに関与するかについて検討した。その結果、CVD法が最も耐熱衝撃性に優れた被覆法であること、および高い基板温度(約800°C以上)下での被覆が耐熱衝撃性の向上に効果があることを明らかにした。CVD法で基板温度を900°Cとして作製したTiC被覆Mo材は、ディスラプション時に想定される約20 MW/m²、0.3秒の熱負荷に対して健全であることを確認した。この結果から、TiC被覆Mo材がJT-60の第一期プラズマ対向材料として採用された。実際の放電では、プラズマ対向壁の一部に20 MW/m²を越える熱流束がかかり、TiC皮膜の一部は熔融してしまったが、熔融部近傍の皮膜は全く剥離せず、優れた皮膜の密着性が実証された。放電中のプラズマ対向壁からは、加熱によってガスが放出され、これらが不純物となるため、上記の損耗特性の他、これら材料からのガス放出特性についても評価した。昇温脱離法でTiC被覆Mo及びTiC被覆インコネル625を1000°Cまで加熱し、その間放出されるガス種を定量的に測定した。これらの材料からの主な放出ガスはH₂Oであり、その脱離ピークは約150°Cとなった。この結果から、TiC被覆Mo及びTiC被覆インコネル625からのガス放出を抑えるためには、予め250°Cで18時間のベーキングを行えば良いことがわかった。この結果は、JT-60真空容器のベーキング条件に採用された。

J T-60のTiC被覆Mo及びTiC被覆インコネル625は、良好な耐熱特性を示したものの、スパッタリング等により、Ti等の比較的高原子番号の不純物が混入してしまった。従って、より低原子番号で耐熱特性に優れている黒鉛の適用が考えられてきた。現在の大型トカマク装置の内壁には主として黒鉛系材料が使われており、J T-60を改造したJ T-60Uでも、その内壁は全て等方性黒鉛および炭素繊維強化複合材(CFC)で被われている。黒鉛材の欠点は、500~600°Cでの化学スパッタリングが大きいこと、酸素不純物によりCOの形で著しく損耗されること、水素の吸蔵量が多いことである。一方、B₄Cは黒鉛より反応性や水素吸蔵量が低く、有望な材料である。しかしながら、B₄C材は熱伝導率が低く耐熱衝撃性に劣るため、実機に適用するためには黒鉛にB₄Cを被覆した材料を開発しなければならなかった。そこで、種々の方法でB₄Cを被覆した黒鉛を作製し、これらの耐熱衝撃性を熱負荷試験により評価した。その結果、コンバージョン(CVR)といわれる方法で作製したB₄C被覆材が卓越した耐熱衝撃性を示した。これは、B₄C成分が黒鉛表面から内部に向かって徐々に小さくなるいわゆる傾斜機能材料となっているためと考えられる。また、コンバージョン法で作製したB₄C被覆黒鉛材は、皮膜の厚さが600 μm以上になると表面が熔融されやすくなることがわかった。しかし、多少の熔融があってもJ T-60Uのダイバータの熱負荷条件(10MW/m², 5s)に対してかなりの放電回数にわたって、十分使用可能であることを明らかにし、この成果を基に、J T-60UのダイバータにB₄C被覆CFC材が使われることになった。このB₄C被覆CFC材の使用とボロニゼーションといわれる内壁表面をボロン膜で覆う技術により、J T-60Uでは核融合三重積(プラズマ密度×プラズマ温度×エネルギー閉じ込め時間)の世界最高値を達成することができた。

現在の大型トカマク装置による核融合プラズマの閉じ込め実験の後には、国際協力による国際熱核融合実験炉(ITER)が建設されることになっている。このITERの物理実験の段階では、ダイバータ部のプラズマ対向材料としてCFC材の使用が考えられている。ITERでの熱負荷は著しく大きく(15~30MW/m²)、特にディスラプションと云われる瞬間的にプラズマが消滅する場合には更に熱負荷が大きくなる。特に、ディスラプション時の損耗がこの材料の寿命を決定的にすることから、ディスラプション時の熱負荷条件下でCFC材に対する熱衝撃試験を行った。この結果、損耗量は照射前のCFC温度が高いほど、また、CFCの熱伝導率が低いほど大きくなることを示した。また、損耗は蒸発と粒子飛散の形で起こることを確認するとともに、熱解析によって蒸発および粒子飛散の温度依存性について調べた。これらの結果から、CFC材はITERで想定されているディスラプション条件(10~20MJ/m², 0.1~3ms, 500回)に対して十分使用可能であることを示した。ITERでは、熱負荷に加えて粒子負荷も著しく大きく、粒子負荷による損耗も無視できない。そこで、ITERのプラズマ対向壁への粒子負荷を模擬できる高粒子束低エネルギープラズマ源を開発し、高粒子束下におけるCFCの損耗量を測定した。その結果、粒子束が大きいとスパッタリング率が増大する可能性を指摘した。今後、このデータをも考慮してCFCの損耗量を評価していく必要がある。

以上のように大型核融合装置のプラズマ対向材料として、TiC被覆Mo材およびB₄C被覆CFC材に対して熱負荷条件下での損耗特性を評価するとともに、損耗を低減化できる材料について提言した。これらはJ T-60、J T-60Uのプラズマ対向材料として使用され、プラズマ閉じ込め特性の向上に大いに寄与した。次期核融合実験炉の候補材料であるCFCに関しても熱負荷および粒子負荷に対する損耗量を評価し、この結果は、現在進捗しているITERの工学設計に活かされている。これらのデータおよび提言は次期核融合開発研究にとってきわめて重要なものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 科 俊 郎
副 査 教 授 大 橋 弘 士
副 査 教 授 高 橋 平七郎
副 査 助 教 授 日 野 友 明

学 位 論 文 題 名

核融合装置用プラズマ対向材料の損耗特性に関する研究

核融合プラズマを閉じ込める容器の内壁、すなわちプラズマ対向材料は高熱流束と高粒子束にさらされ著しく損耗する。その結果、プラズマ対向壁の寿命が短くなるとともに、プラズマ中に不純物が混入して放射冷却を高めてプラズマ温度を低下させる。このためプラズマ対向材料の損耗特性を評価して、損耗の少ない材料を開発することが強く要求されている。この課題に関する研究は未開拓の分野であり、今後の発展が待たれる状況にある。本論文は、核融合炉開発にとって、最も重要な研究課題の一つであるプラズマ対向材料の開発研究を行ったものである。

まず世界の3大核融合装置であるJT-60のプラズマ対向材料として、種々の方法で炭化チタン(TiC)を被覆したモリブデン(Mo)及びインコネル625に対する熱衝撃および熱サイクル試験を系統的かつ詳細に実施し、その耐熱特性を評価した。その結果、化学蒸着(Chemical Vapor Deposition, CVD)法が最も耐熱衝撃性に優れた被覆法であることを明らかにした。この成果により、この被覆法による材料はJT-60のプラズマ対向材料として採用され、従来の材料よりかなり損耗が少ないことを実証した。また真空技術を駆使してこれらの材料からのガス放出特性を昇温脱離法で評価し、その結果、主な放出ガスは水であり、ガス放出を抑えるため250°Cで18時間のベーキングが必要となることを提案した。この結果はJT-60の内壁のクリーニング処理法として用いられ、プラズマ閉じ込め性能の向上に寄与した。

次に、JT-60を改造したJT-60Uのプラズマ対向材料としての炭化ホウ素(B₄C)被覆黒鉛材料の開発研究を行い、その耐熱特性を詳細に調べた。その結果、コンバージョン法といわれる新しい方法で作製したB₄C被覆材が、卓越した耐熱特性をもつことなどを明らかにするとともに、JT-60Uに適用され、プラズマ性能の向上に多大に寄与した。ボロン系材料はプラズマ中の酸素不純物の低減にも有効なことから、この材料の使用により、JT-60Uではプラズマ温度、プラズマ密度およびエネルギー閉じ込め時間の積(核融合三重積)の世界最高値を得ることに成功した。この材料の適用は、コンバージョン法で作製したB₄C被覆材が高熱流束負荷に対して極めて安定であるという評価試験結果によるものであり、将来多くの大型核融合装置に利用されるものと期待されている。

現在、核融合三重積で大きな値が達成されており、核融合炉の実現に向かって、国際熱核融合実験炉(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)の工学設計が日、米、EU、ロシアが協力して鋭意進められている。著者はITERのプラズマ対向材料の候補となっている炭素繊維強化複合材(Carbon Fiber Composite, CFC)の熱衝撃試

験を行い、損耗量は照射前温度が高いほど大きくなることなどを明らかにした。また、一連の試験研究から、CFCがITERで十分使用可能であることを示した。さらに、新たに開発した高粒子束低エネルギープラズマ源を用いて、CFCの損耗量と粒子束との関係を系統的に測定し、この材料の寿命の予測を行った。これらのデータはITERのプラズマ対向材料の設計に多くの指針を与えるものであり、国際的にも高く評価されている。

これを要するに、著者は、炭素系材料を中心としたプラズマ対向壁の損耗特性について多くの新知見を得るとともに、これらを実際の大型核融合装置に適用して卓越した成果をあげており、将来の核融合炉用のプラズマ対向材料開発に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。