

氏 名 藤 田 一 郎

学位（専攻分野） 博士(工学)

学 位 記 番 号 総研大乙第52号

学位授与の日付 平成10年3月24日

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学 位 論 文 題 目 核融合装置ダイバータ板の損耗および除熱特性に関する研究

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 野田 信明  
教 授 川村 孝弐  
教 授 本島 修  
教 授 吉田 直亮（九州大学）  
教 授 中村 幸男（核融合科学研究所）  
助 教 授 相良 明男（核融合科学研究所）

## 論文内容の要旨

超高温、高密度の核融合プラズマを安定に維持するために、トーラス型核融合装置にはダイバータ配位が不可欠である。核融合プラズマはダイバータ板のみに接することになり、ダイバータ板は非常に高い熱負荷および粒子負荷を受ける。次期大型核融合装置ではダイバータ板に入射する熱流束は $10\text{MW}/\text{m}^2$ に達すると予測されている。耐熱特性に優れた材料を使用するとともに、入射する熱を速やかに除熱する構造がダイバータ板に必要とされる。本研究では、現在建設中の大型ヘリカル装置のダイバータ板の開発において重要な、高熱負荷に対する種々の炭素系材料の損耗特性を実験的に評価するとともに、その炭素系材料を使用してダイバータ板の模擬試験体を作製し、除熱特性を評価した。また、既に稼働中の実機において使用したダイバータ板の表面特性を評価し、炭素系材料を用いたダイバータ板の問題点を明らかにした。本研究の目的は、次期大型核融合実験装置のダイバータ設計に対して指針を与えることである。プラズマの高性能化に伴い、プラズマ対向壁への負荷および粒子負荷が増大した。しかしながら、より優れたプラズマ特性を得るためには、プラズマ対向壁からの不純物放出や水素リテンション量を極力減少させなければならない。酸素リサイクリングによるプラズマ中への不純物混入を抑制するため、炭素系材料にボロンを混入あるいは被覆した炭素系材料を作製した。また、化学スパックリングの抑制および水素リテンション量の低減のために、シリコンを被覆した炭素系材料を作製した。しかしながら、これらの材料中のボロンやシリコンは、高温下で容易に蒸発することが予測されたため、高温下における損耗量を把握する必要がある。等方性黒鉛、ボロン混合黒鉛、炭素繊維複合材（CFC材）、そして表面をボロンあるいはシリコンに転化したCFC材に対して、熱負荷を与え蒸発量を測定し熱的な安定性を評価した。損耗量はシリコン転化CFC材が最も大きく、続いてボロン混合黒鉛、ボロン転化CFC、等方性黒鉛の順で、CFC材が最も損耗量が小さかった。ボロンやシリコンを被覆・混合した改質炭素材料は約 $1500^\circ\text{C}$ 以上で、改質を行っていない等方性黒鉛やCFC材では約 $2500^\circ\text{C}$ 以上で損耗量が著しく増加するのが観察された。ボロンやシリコンを混ぜた改質炭素材料は、まずボロンやシリコンが優先的に蒸発することが明かとなった。照射促進昇華を抑制するという観点から、炭素系材料を $1000^\circ\text{C}$ 以下で使用するならば、ボロンやシリコンによる改質炭素系材料は核融合装置において充分適用可能であることが分かった。

大型ヘリカル装置LHDにおいて、ダイバータ部への入射熱流束は最大 $10\text{MW}/\text{m}^2$ と見積もられている。強制的に冷却を行わなければ、ダイバータ板は溶融・蒸発し、多量の不純物をプラズマ中に放出することになる。そこで、ダイバータ板として、水冷パイプの付いた銅のヒートシンク材に冶金的にCFC材を接合した構造が検討されている。本研究では損耗特性を測定した改質CFC材を用いてダイバータ板を作製し、その除熱特性について評価した。同じ熱負荷に村して、ボロン転化CFC材を用いたダイバータ複合体の表面温度が最も高く、改質を行わないCFC材を用いた接合体のものが最も低かった。これは、CFC材の熱伝導率に対応している。また照射促

進昇華を抑制するという観点からCFC材の表面温度が1000℃に達する熱流束を評価すると、ボロン転化CFC接合体が約8MW/m<sup>2</sup>、シリコン転化CFC接合体が約10MW/m<sup>2</sup>、改質を行っていないCFC接合体が約11MW/m<sup>2</sup>であった。熱負荷にさらされたダイバータ接合体の改質CFC材の表面近傍のボロンあるいはシリコン濃度は、各々約7MW/m<sup>2</sup>、8MW/m<sup>2</sup>以上の熱負荷を加えた場合に減少傾向が見られた。しかしながら、ごく表面層にとどまり、複合体全体の熱伝導特性に劣化は見れなかった。以上の結果より、LHDの運転条件の一つである5MW/m<sup>2</sup>では、いずれの接合体も使用できることが分かった。しかしながら、10MW/m<sup>2</sup>の運転ではシリコン転化CFC接合体とCFC接合体のみが適用可能であることを確認した。熱流束をさらに上げると接合体の度が急激に高くなり、熱伝達特性に劣化が認められた。アーマータイルの表面近傍および接合層の熱拡散率を測定し、熱伝導特性が劣化していることを確認した。

日本原子力研究所のプラズマ試験装置JT-60において、1988年6月から1989年10月まで、黒鉛の第一壁で、下側ダイバータ配位およびリミタ配位で運転が行われた。この期間にダイバータ板として使用された黒鉛タイルの表面分析を行った。黒鉛タイルは等方性黒鉛ETP-10で、タイルを固定する治具に伝わる熱伝導と熱輻射による冷却のみで、強制冷却を行わなかった。ダイバータタイルの損耗はElectron Drift SideとIon Drift Sideのエッジ部分において著しく、損耗深さは最も大きいところで1mm以上であった。また、損耗部分の周辺に再堆積し、盛り上がっている部分が見られた。これらの部分を電子顕微鏡を用いて観察し、損耗している部分も、再堆積層に覆われていることを確認した。さらに、表面より1mmの深さに含まれている気体の量を昇温脱離法を用いて測定し、水素、メタン、水、一酸化炭素、二酸化炭素が主な放出気体であることを明かにした。800℃以上の高温で見られる水素の放出は、水素放電下でのリテンションによるものと考えられ、その放出量は使用前のタイルと比べ、約1桁高くなっていた。ダイバータ部は、プラズマより熱および粒子が著しく入射する部分で、特にエッジはそれらが集中する部分である。このため、熱による蒸発および粒子によるスバッタリングが生じ、損耗が著しくなったことが分かった。ダイバータ部に耐熱および耐スバッタリング特性に優れた材料を使用するとともに、強制冷却を行い温度を低く抑える必要のあることが明らかとなった。また、損耗した炭素が再堆積する際に、水素を取り込み、水素リテンション量が著しく増大することが分かった。

以上のように大型核融合装置のダイバータ板の材料として、JT-60で実際に使用された等方性黒鉛の損耗・再堆積特性を評価し、問題点を明かにした。さらに、ボロン混合黒鉛、C被覆CFCおよびSiC被覆CFC材に対して、熱負荷条件による損耗特性を評価するとともに、冷却構造を備えたダイバータ板のアーマータイルとして使用し、除熱特性について評価した。これらの結果より、改質炭素系材料の使用限界を明かにした。以上の成果は、建設中の大型ヘリカル装置のダイバータ板設計に大いに寄与している。

## 論文の審査結果の要旨

本論文は大型核融合実験装置のダイバータ板材料開発と評価を主題とし、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）をはじめ今後の核融合装置で使うことが想定される各種材料の評価実験結果、日本原子力研究所の大型トカマク装置 JT-60 で実際に使われたダイバータタイルの分析結果、これらに関する考察と結論を内容としている。

LHD 等への適用をめざす新素材開発、評価実験では、炭素・銅ろう付け材料、ボロン、シリコンを表面に添加した炭素材料について、電子ビームによる熱特性評価試験を中心とした一連の実験を行っている。その結果、（１）添加によって熱伝導率は下がるものの化学スパッタリングの問題となる温度領域での使用がいずれも可能であることを示した。さらに、（２）添加元素の昇華が始まる温度を実験的に確認、使用限界を明らかにしたこと、（３）添加元素の昇華と容器壁堆積により、堆積層への不純物ガス吸蔵が起こることによる真空度の向上を確認したこと、（４）ろう付け材料について繰り返し熱負荷によって特性の劣化が起こる限界を各材料について明らかにしたことなど、実用上重要な結果を得ている。ボロン、シリコン添加材について、水冷却を用い、実使用に近い形態で、表面特性、接合部特性の両面から使用可能領域を特定する結果を得た例は他にない。LHD などでの適用について現実的な指針を与える結果として高く評価できる。

JT-60 の使用済み炭素製タイルについては、表面形態、表面構造、タイル内部の不純物および水素分布などを種々の方法で分析し、使用前の状態との比較を行っている。その結果損耗の大きいタイルについて、（１）表面のどの部分も再堆積層で覆われていること、（２）熱負荷の大小に応じて表面形態が異なっていること、（３）使用前に結晶性黒鉛の構造をもっていた表面がアモルファス状に変化していること、（４）不純物として真空容器材料、酸素等が深さ方向に一様に分布していること（５）吸蔵ガス成分は使用前に比べるとひと桁以上増加していることなどを示している。大型装置の使用済みタイルの分析結果を総合的にまとめた論文は数少なく、上記の結果は今後同種の材料をタイルとして使用する上で、貴重なデータを提供するものといえる。また、この研究をまとめた論文は 1992 年に出版されており、大型装置での使用済みタイルの総合的な分析結果を示した研究論文としては世界で初めての論文と認められる。

以上述べたように、本論文はダイバータ材料に関する包括的かつ有用な結果とデータを提示しており、この分野の最先端をきり開く研究成果として評価される。

よって、本審査委員会は、本論文が博士学位論文として十分な水準にあり、本専攻にふさわしい内容をもつものであるとの結論に達した。

学力については、審査委員全員参加によって口頭試問を実施し、論文内容、実験の基礎となる技術に関する知識等について試験を行った。その結果、材料物性、電子ビーム照射技術、熱測定、表面分析技術等、本研究に必要な多岐にわたる知識と技術について精通していると認められた。語学力については、論文要旨の英語版、添付された英文の参考論文等の審査により、十分な能力を有すると認定した。

以上により、本審査委員会は学力審査合格と判定した。