

氏 名	佐藤 建太郎
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和63年10月12日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最 終 学 歴	昭和47年3月 東北大学大学院工学研究科原子核工学専攻 修士課程修了
学 位 論 文 題 目	炭化チタン中にイオン注入された水素同位体の挙動に 関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 山口 貞衛 東北大学教授 平林 真 東北大学教授 阿部 勝憲 東北大学教授 松井 秀樹 東北大学助教授 長谷川雅幸

## 論 文 内 容 要 旨

核融合炉の第一壁はこれまで単なる真空壁とみなされ、プラズマの密度、閉じ込め時間、温度等のパラメーターとは無関係であると考えられていた。しかしながら、磁気閉じ込めの核融合装置においては放電の持続時間（1 sec）と比較し閉じ込め時間は中型の装置で 20m sec 程度と極めて短く、放電の持続時間中燃料粒子を閉じ込めることはできず、プラズマは必然的に壁に到達し壁と相互作用を行う。近年このプラズマ-壁相互作用はプラズマのパラメータに大きな影響を与えることが知られるとともに、その研究の重要性が認識されて来た。

プラズマ-壁相互作用により生ずる核融合工学上の問題点として、(1) プラズマのエネルギーバランス、および燃料粒子バランスに関係する水素同位体リサイクリング、(2) プラズマの温度低下の原因となる、プラズマの汚染、および(3) 壁材の損傷が挙げられる。

したがって、核融合炉第一壁にはプラズマ-壁相互作用により生ずるこれらの諸問題を可能な限り軽減できる材料を選択し使用する必要がある。

高融点金属の炭化物、特に炭化チタンは高融点であること、蒸気圧が低いこと、低原子番号材料であること等、第一壁材料として要求される条件のほとんどを満足している。しかしながら、核融合炉第一壁材料として実際に使用するためには、水素リサイクリング及び壁材の損傷に密接に関係

する水素同位体の保持・放出並びに照射損傷に関する特性を十分に知る必要がある。しかしながら、炭化チタンにおける水素同位体の保持・放出特性に関しては、二、三の研究が行なわれているのみで、研究者により実験結果が異なるなど信頼できるデータの数が著しく不足している現状である。

そこで、本研究は、核融合炉の第一壁材料として有望視されている炭化チタンについて、

- (1) イオン注入された水素同位体の保持・放出特性に与える、炭素の組成の差による影響をイオンビームによる水素同位体分析法により調べ、核融合炉第一壁材料を選択するための基礎データを得ること、
- (2) 炭化チタン中に注入された水素同位体の保持・放出過程を支配する機構に関する知見を得ること、
- (3) イオン・チャネリング実験により、イオン照射された炭化チタン中での照射欠陥の形成と深さ分布を解明すること、

を目的として研究を行った結果をまとめたもので全編6章からなる。

## 第1章 序 論

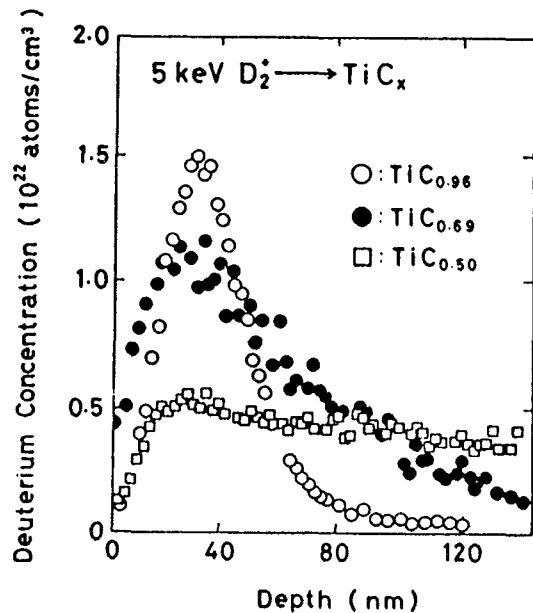
第1章は緒言であり、核融合炉第一壁の候補材料における水素同位体の保持・放出特性に関する従来の研究結果、及び問題点について述べ、本研究の意義を明らかにし、かつその目的を具体的に示したものである。

## 第2章 イオンビーム－固体相互作用

第2章では、まず入射イオンビームと固体の相互作用について概説した。次いで、本研究における主要な研究手段である材料分析方法を述べ、Rutherford 後方散乱分光法、核反応解析法、反跳粒子検出法、及びイオン・チャネリングによる格子欠陥の深さ分布の測定法を説明した。

## 第3章 炭化チタンにおける注入重水素の深さ方向の分布

第3章では種々の組成の炭化チタンにおいて、イオン注入された重水素の深さ方向の濃度分布の差を見出し、その原因を究明した。注入重水素の深さ方向の濃度分布は2.6MeV<sup>4</sup>H e<sup>+</sup>を解析ビームとして用いた反跳粒子検出法により測定した。第1図に5 keV D<sub>2</sub><sup>+</sup>イオンを1×10<sup>17</sup> D/cm<sup>2</sup>注入したTiC<sub>0.96</sub>、TiC<sub>0.69</sub>、TiC<sub>0.50</sub>試料における重水素濃度の深さ分布を示す。



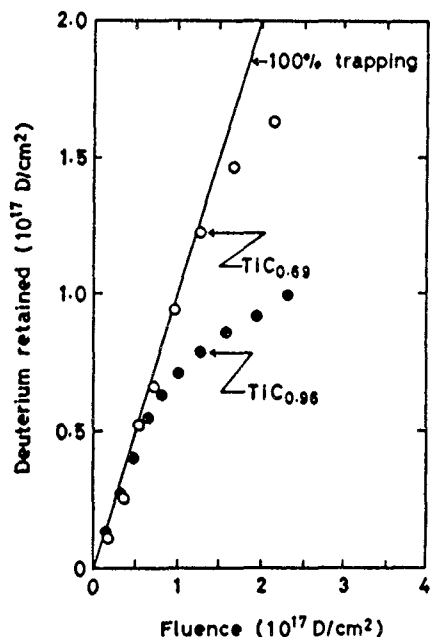
第1図 5 keV D<sub>2</sub><sup>+</sup>、1×10<sup>17</sup> D/cm<sup>2</sup>注入における、重水素濃度の深さ方向の分布。

この図から明らかなように、炭素の組成の減少と共に注入重水素が試料内部へ拡散する傾向が観測された。すなわち、化学量論的組成に近い  $TiC_{0.96}$  試料においては注入重水素はその平均投影飛程付近に局在化している。飽和濃度は  $0.27 \text{ atom/host atom}$  であった。それに対し、化学量論組成からはずれた、炭素の組成の低い試料においては、重水素は速い速度で試料の内部へ拡散してしまい飽和には達しなかった。また、注入重水素の深さ方向の濃度分布を拡散方程式の解と比較することにより重水素の拡散係数を評価した。拡散係数は  $TiC_{0.96}$ ,  $TiC_{0.69}$ ,  $TiC_{0.60}$  試料に対しそれぞれ  $\geq 5 \times 10^{-16}$ ,  $\sim 8 \times 10^{-16}$ ,  $\sim 6 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$  であり炭素の組成が減少するにつれ増加する傾向を明らかにした。

#### 第4章 炭化チタンにイオン注入された重水素の保持・放出

第4章では壁材料中でのトリチウムのインベントリーの研究に関連して、炭化チタン中に注入された(1)重水素の保持量と注入量との関連、(2)重水素と水素の同位体置換過程、及び(3)等時焼鈍による重水素保持量の温度変化について得られた新しい知見を記した。第2図に  $5 \text{ keV } D_2^+$  イオン照射下における  $TiC_{0.96}$ ,  $TiC_{0.69}$  試料の注入重水素の保持曲線を示す。

この図より明らかなように、注入重水素の保持特性は炭素の組成により大きく異なることを見出した。すなわち、化学量論的組成に近い  $TiC_{0.96}$  試料においては  $1 \times 10^{17} \text{ D/cm}^2$  の注入量付近から保持されている重水素量は飽和の挙動を示す。これに対し、炭素の組成の低い  $TiC_{0.69}$  試料においては飽和の挙動は観測されずに多量の重水素を保持することが明らかになった。また、化学量論的組成に近い試料における重水素-水素置換実験の結果は水素濃度の飽和値の存在を仮定した現象論的モデルにより定性的に説明されることが示された。更に、等時焼鈍による重水素保持量の温度変化の測定の結果、重水素は  $400^\circ\text{C}$  付近から放出が始まり、 $800^\circ\text{C}$  でほぼ放出が終わることが明らかとなった。この結果より評価された  $TiC$  中の重水素の結合エネルギーの値は  $2.8 \pm 0.5 \text{ eV}$  であることが分かった。



第2図  $5 \text{ keV } D_2^+$  イオン注入における保持曲線。図で黒丸は  $TiC_{0.96}$  を、白丸は  $TiC_{0.69}$  試料を表わす。

#### 第5章 炭化チタン結晶のイオン照射損傷

第5章では、炭化チタンにおけるイオン照射損傷に関する研究結果をまとめた。  $350 \text{ keV } C^+$  イオン照射により  $TiC_{0.83}$  単結晶試料中に導入された格子欠陥の深さ分布をイオン・チャネリング法により解析し、チタン原子および炭素原子の個々の副格子の損傷の深さ分布を求めた。測定は

1.25MeV  $D^+$ を解析ビームとして用い、チタン原子により Rutherford 後方散乱された重陽子と $^{12}C(d, p)^{13}C$ 核反応により放出された陽子を同一の検出器で同時に検出することにより行った。得られた結果を第3図に示す。

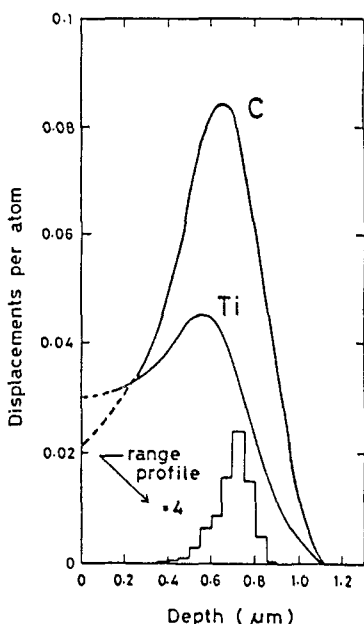
この結果をモンテ・カルロ法を用いた計算機シミュレーションの結果と比較することにより、350 keV  $D^+$ イオン照射された炭化チタン中では炭素原子の副格子の方がチタン原子のそれよりも大きな損傷を受けること。したがって、炭素原子のはじき出しエネルギーのしきい値はチタンのそれよりも小さいことを明らかにした。

## 第6章 結 論

第6章は結論であり、本研究の総括と炭化チタンの核融合炉の第一壁材料としての適性評価を行っている。

炭化チタンを実際に核融合炉の第一壁材料として用いる場合、(1)トリチウムのインベントリーの観点からは、材料中に多量の水素同位体を固溶しないこと、(2)安全取り扱い上の観点からは、水素同位体を材料の表面付近に保持し、内部へ拡散しないことが望まれる。

本研究の結果によれば、炭化チタンは炭素の組成が化学量論的組成からはずれて減少するに従い水素保持量が増加すること、更に、水素の拡散が速くなることが明らかにされた。従って、将来の核融合炉材料としての炭化チタンは、(1)、(2)の観点からは、炭素の組成が化学量論的組成TiCに近い必要があることが結論された。



第3図  
350 keV  $C^+$ 照射によるTiC<sub>0.83</sub>試料中の照射欠陥濃度分布。図のヒストグラムは入射 $C^+$ の飛程分布の計算結果を表す。

## 審 査 結 果 の 要 旨

核融合装置の第1壁は必然的に水素同位体プラズマの照射を受ける。核融合炉を開発するためには、第1壁材料に打ち込まれた水素同位体の挙動の解明が重要である。

本論文は、プラズマの密度と組成の制御、およびトリチウムの装荷量と安全取扱いの観点から、核融合炉の第1壁材としての使用が想定されている炭化チタンについて、イオン注入された水素同位体の保持・放出挙動を明らかにすることを目的として行った研究の成果をまとめたもので、全編6章より成る。

第1章は序論であり、本研究の意義を明らかにし、その目的を示している。

第2章では、まず入射イオンビームと固体の相互作用について概説し、次いで本研究で用いたイオンビーム解析法の原理と解析法を述べている。

第3章では、炭化チタン中にイオン注入された重水素の深さ方向の濃度分布が、組成によって著しい差異があることを見出すとともに、その原因が炭化チタン中の重水素の拡散係数の差にあることを明らかにしている。重水素の拡散係数は、化学量論組成T i Cからのずれが大きい程、大きいことを示している。

第4章は、炭化チタンにおける水素リサイクリングとトリチウムインベントリーに関連して、注入された重水素の保持量と注入量の関係、イオン照射下における水素と重水素の置換過程および等時焼鈍による重水素保持量の温度変化など炭化チタン中の重水素の挙動を解明した結果をまとめたものである。さらに、測定結果から注入水素は主にイオン照射により導入された欠陥に捕捉されていることを明らかにし、その結合エネルギーを定量的に求めている。

第5章では、イオンチャネリング実験により、炭素イオンを照射した炭化チタン中の照射欠陥の深さ方向の濃度分布を解析し、その結果とモンテカルロ法を用いた計算機シミュレーションを比較し、チタンと炭素原子のはじき出しエネルギーに2倍程度の差があることなど重要な知見を得ている。

第6章は結論であり、研究結果の総括と炭化チタンの核融合炉の第1壁材料としての適性評価を行っている。

以上要するに本論文は、核融合炉の第1壁材料としての使用が想定されている炭化チタンについて、イオン注入された水素の保持・放出に関して多くの新しい知見を得たもので、原子核工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。