

|         |                                     |
|---------|-------------------------------------|
| 氏 名     | 菅 野 隆 一 郎                           |
| 学位の種類   | 博 士 (エネルギー科学)                       |
| 学位記番号   | エネ博第 94 号                           |
| 学位授与の日付 | 平成 16 年 3 月 23 日                    |
| 学位授与の要件 | 学位規則第 4 条第 1 項該当                    |
| 研究科・専攻  | エネルギー科学研究科エネルギー変換科学専攻               |
| 学位論文題目  | 低放射化マルテンサイト鋼の組織構成要素とヘリウムの相互作用に関する研究 |

論文調査委員 (主査) 教授 木村 晃彦 教授 香山 晃 教授 小西 哲之

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、核融合炉構造材料低放射化マルテンサイト鋼の組織構成要素とヘリウムの相互作用に関する研究成果をまとめたもので、8章からなっている。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。その中で、まず、従来の低放射化マルテンサイト鋼におけるヘリウム効果の不明な点について整理している。次に、低放射化マルテンサイト鋼のヘリウム挙動のモデル化に関する方法論について検討し、本研究の目的として、低放射化マルテンサイト鋼の組織構成要素とヘリウムの相互作用に関する理解のための基礎的知見を得ることを述べている。

第2章は実験方法であり、合金作製方法、ヘリウム照射方法、ヘリウム照射後試験方法に関して述べている。

第3章は鉄格子中のヘリウム挙動に関する議論を行っている。鉄格子からのヘリウム脱離挙動を調べた結果、主な脱離ピークとして、1) peak-I : 表面からの脱離 (450K 以下), 2) peak-II : 単空孔-ヘリウム対脱離 (HeV) の移動開始に伴う脱離 (700K-800K), 3) peak-III : ヘリウム-空孔集合体 ( $\text{He}_n\text{V}_m$ ) からの脱離 (900K-1200K), 4) peak-IV :  $\alpha/\gamma$  変態に伴う脱離 (1100K), 5) peak-V : ヘリウムバブルの解離および移動に伴う脱離 (1200K 以上) が観察された。ヘリウム注入量の増大に伴い、ヘリウムバブルから脱離するヘリウムの割合が増加した。注入量と脱離量を比較した結果、注入したほとんどのヘリウムが純鉄中に照射によって形成された点欠陥集合体に捕獲されていることが明らかとなった。 $\alpha/\gamma$  変態ピークの存在は、 $\alpha$  相中に比べ  $\gamma$  相中ではヘリウム-空孔集合体 ( $\text{He}_n\text{V}_m$ ) の熱的安定性が低いことを示しており、 $\alpha/\gamma$  変態により一部熱的に不安定になったヘリウム-空孔集合体が崩壊することによりヘリウム脱離が生じたものと解釈した。

第4章は転位とヘリウムの相互作用に関して述べている。圧延加工により転位を導入したFeに対してヘリウム照射、昇温ヘリウム脱離測定および微細組織観察などの実験手法と弾性論や分子動力学法に基づく計算機シミュレーションを行い、以下のような結論を得た。Feの冷間加工材を異なる条件にて焼鈍し、転位密度の異なる純鉄を作製した後、ヘリウム照射後の昇温ヘリウム脱離測定を行った結果、転位密度の増加に伴いピーク高さの増大するヘリウム放出ピークを見出した。すなわち、ヘリウムは転位と強い相互作用を持つことを実験結果として示すことに成功した。さらに、弾性論や分子動力学法に基づく計算機シミュレーションの結果から、このヘリウム放出ピークは、Fe中のらせん転位のジョグに捕獲されたヘリウムの解離に伴う放出であると推測した。さらに、弾性論に基づく刃状転位とヘリウムの相互作用エネルギー計算を行い、刃状転位のヘリウム捕獲半径が50nmという比較的大きな値を示すため、転位がヘリウムを効率良く捕獲する可能性を示した。また、ヘリウム照射後焼鈍によるヘリウムバブル形成挙動を調べたところ、高密度の転位を含むFeほどヘリウムバブルの密度が顕著に低下する傾向が見られ、転位がヘリウムバブルの形成を抑制することが判明した。すなわち、Fe中の刃状転位は、ヘリウムバブルなどの損傷組織形成を抑制することが明らかとなった。

第5章では、マルテンサイト組織を導入したFe-C二元合金と低放射化マルテンサイト鋼に対してヘリウム照射、昇温ヘリウム脱離測定および微細組織観察を行い、Fe-Cやマルテンサイト鋼のようなマルテンサイト組織を有する材料において

高密度に存在する転位がヘリウムを捕獲することを明らかにした。また、マルテンサイト組織の特徴である微細なラス構造に関しては、ラス境界自体のヘリウム捕獲能力は転位と同等か、もしくはほとんど影響がないと結論した。一方、ラス境界上やマトリックス中のバブルの分布状況を詳細に調べ、ラス境界が存在することによって、ヘリウム-空孔対の長距離移動が抑制されることを提案するに至ったと述べている。

第6章では、Fe-Cr二元合金におけるCrとヘリウムの相互作用を調べるため、ヘリウム照射後の昇温ヘリウム脱離測定、照射後焼鈍による内部組織変化を観察し、ヘリウム照射したFe-Cr合金のヘリウム放出ピークはFeで得られたヘリウム放出ピークに類似していることを示し、Cr原子とヘリウムは直接的な相互作用を持たないと結論した。また、照射後焼鈍によるヘリウムバブル形成の透過電子顕微鏡による直接観察と昇温ヘリウム脱離スペクトルから、単空孔-ヘリウム対の移動によるヘリウム放出がCr添加によって抑制されることが明らかになった。

第7章はマルテンサイト鋼の組織構成要素のヘリウム分散化の役割に関して議論し、鉄系合金中の組織構成要素の中で、転位が最も効果的にヘリウムを分散させることを明らかにした。

第8章は総括であり、本論文で得られた成果について要約している。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、核融合炉構造材料低放射化マルテンサイト鋼の組織構成要素とヘリウムの相互作用に関して研究した成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. 鉄格子からのヘリウム脱離挙動と高分解能電子顕微鏡による内部組織観察からイオン照射されたヘリウム-空孔対は、700K近傍から長距離移動を開始し、集合合体することによりヘリウム-空孔集合体を形成し、昇温に伴ってより大きなヘリウムバブルへと成長することを明らかにした。
2.  $\alpha/\gamma$ 変態に伴う脱離ピークを見出した。このピークの存在は、 $\alpha$ 相中に比べ $\gamma$ 相中ではヘリウム-空孔集合体の熱的安定性が低いことを示しており、 $\alpha/\gamma$ 変態により熱的に不安定になったヘリウム-空孔集合体が崩壊することにより、ヘリウム脱離が生じたものと解釈される。
3. Feの加工材を用いたヘリウム照射後の昇温ヘリウム脱離測定において、転位密度に依存する新たなヘリウム放出ピークが800K付近に見出された。このヘリウム放出ピークは、弾性論や分子動力学法に基づく計算機シミュレーションの結果、Fe中のらせん転位のジョグや刃状転位に捕獲されたヘリウムの解離に伴う放出であると解釈される。また、Fe-C合金やマルテンサイト鋼のようなマルテンサイト組織を有する材料においても同様のヘリウム放出ピークが観察され、マルテンサイト鋼中の転位がヘリウムを捕獲することが示された。
4. マルテンサイト組織の特徴であるラス境界とヘリウムの相互作用を調べ、ラス境界自体のヘリウム捕獲能力は転位ほど大きくはないが、ラス境界はヘリウム-空孔対の長距離移動を抑制する働きを持つことを明らかにした。
5. Fe-Cr二元系合金の観察から、Cr原子とヘリウムは直接的な相互作用を持たないことが明らかになった。一方、高Cr合金の観察においてヘリウムバブルの成長の遅れを見出したことから、Cr原子はヘリウム-空孔対の移動を抑制すると提案した。

以上要するに、低放射化マルテンサイト鋼の組織構成要素とヘリウム相互作用に関する基礎的知見を得るため、鉄系合金における組織構成要素（転位、ラス構造、炭化物、Cr原子）とヘリウムの相互作用を個別に調べた結果、鉄系合金におけるヘリウム捕獲サイトの中で高密度の転位がヘリウムの分散化に最も効果的であることを示した。

よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成16年2月20日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。