

研究課題名

LHD 定常放電における対向材料中に捕捉されたプラズマ粒子の定量評価

研究代表者名

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・時谷政行

研究分担者名

東北大学・金属材料研究所・永田晋二

1. はじめに

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)では、高周波加熱を用いたヘリウムによる長時間放電が行われており、これまでにイオン温度 2keV、電子密度 $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ のプラズマを 48 分間にわたって維持することに成功している。しかしながらその背景には、「壁排気率の動的変化」と「不純物混入によるプラズマ放電の停止」という 2 つの制御困難な問題が潜んでおり、これらはステンレス(SUS)製の第一壁表面への「(1)炭素を主とし、鉄をわずかに含む Mixed-material 堆積層の形成」、「(2)ヘリウム放電による SUS 第一壁への照射欠陥の形成」によってもたらされていることがわかってきた。本研究では、特に(1)に着目し、東北大金研の加速器を利用したイオンビーム分析により、堆積層の厚さと元素組成の定量評価を目指した。結果より、堆積層の成長が放電時間に対してどのように変化するかを放電時間の関数として整理した。

2. 研究経過

LHD で $P_{RF} \sim 1.2, \sim 1.4, \geq 2.0 \text{MW}$ の 3 つの加熱条件(P_{RF})のヘリウム放電プラズマに、異なる時間材料を曝露し、炭素(C)と鉄(Fe)の堆積厚さの放電時間依存性をラザフォード後方散乱法(RBS)を用いて調べた。試料は RBS による計測精度を向上させる観点から Si 試料を用いた。

3. 研究成果

図 1 に、RBS で測定した C と Fe の堆積厚さの放電時間依存性を示す。加熱条件や実施時期(17th or 18th campaign)は図中に直接記入した。また、すべての放電において、イオン温度 2-3keV、電子密度は $1-2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の範囲内であり、材料位置は第一壁位置において照射を行っている。堆積層の組成は約 99% が C であり、1%程度の Fe を含む Mixed-material 堆積層であることがわかった。 $P_{RF} \geq 2.0 \text{MW}$ の条件では、加熱パワーが高いが、 $P_{RF} \sim 1.2, \sim 1.4$ と比較して C 堆積層の成長率に大きな差が無いことがわかる。また、1.4MW, 9062s の条件では、 $P_{RF} \sim 1.2 \text{MW}$, 9860s と比較して加熱パワーに大きな差が無いにもかかわらず、8 倍以上厚い堆積層が形成されていることが明らかになった。18th campaign では、17th campaign よりも C 堆積層が形成されやすい環境であったことが示唆される。また、図 2 のように、透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた堆積層の幾何学的厚さ評価を取り入れることで、堆積層の結晶構造がグラファイト構造であると仮定した場合の見かけの空隙率(Porosity)を導出することが可能となる。その結果、17th campaign では 25%であった空隙率が 18th campaign では 10%に減少していることが明らかになった。放電の実施時期が異なると形成される堆積層の密度に違いが生じることが初めて明らかになった。

4. まとめ

堆積層の物理的特性が放電の実施時期により異なることが明らかになった。この違いは「1. はじめに」で述べた(1)と(2)へ影響を与える可能性があるため、今後はこれら堆積層に捕捉されるヘリウム粒子の定量評価や堆積層の機械的特性評価を実施する予定である。

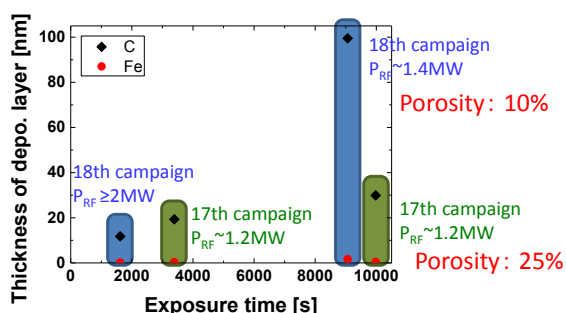


図 1. RBS で測定した C と Fe の堆積厚さの放電時間依存性

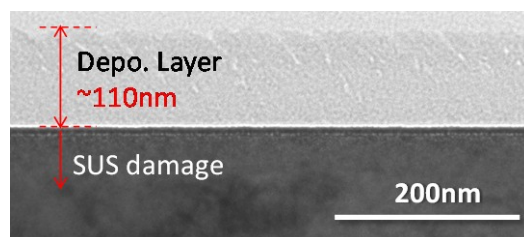


図 2. 18th campaign, $P_{RF} \sim 1.4 \text{MW}$ の条件の SUS 試料の断面 TEM 像

研究課題名

原子炉圧力容器材中の銅富裕析出物形成に対する金属組織影響

研究代表者名

東京大学・大学院工学系研究科・村上健太

1. はじめに

原子力発電プラントの心臓部である原子炉圧力容器 (RPV) は、供用期間中に中性子照射に曝されることにより、破壊靱性が低下する。中性子照射脆化と呼ばれるこの現象は、運転プラントの安全における重要な経年劣化事象として、丁寧に管理されている。RPV は、低合金鋼の圧延鋼板あるいは鍛造品で作られており、照射脆化が想定される領域には溶接部も存在する。そこで、母材に加えて、溶接金属や溶接熱影響部の監視試験片が装荷されており、破壊靱性変化に対する金属組織依存性は考慮されている。一方で、脆化の原因となるマイクロ組織の発達に対して金属組織がどのような影響を与えるかについては、ごく限られた知見しか存在しない。

そこで、申請者は、原子炉圧力容器の母相や溶接熱影響部の金属組織を模擬したモデル合金を作成して、長期間の焼鈍やイオン照射に供することによってマイクロ組織を発達させ、その挙動に対する金属組織の影響を明らかにする実験を考案した。

2. 研究経過

東北大学金属材料研究所では、モデル合金の作成、および圧延を実施させて頂いている。これまでに、高純度鉄 (4N, 5N)、Fe—Cu 合金、Fe—Cu—C 合金、Fe—Cu—Ni 合金、Fe—Cu—Mn 合金、Fe—Cu—Ni—Mn—Si 合金、Fe—Cu—Ni—Mn—Si—C 合金、Cu 濃度を高めた A533B 模擬材などを作成した。これらの合金の一部は、東北大学金属材料研究所の大型圧延機で板材化した。

原子炉圧力容器を模擬した熱処理や、焼鈍やイオン照射によりマイクロ組織を発達させる実験は、東京大学大学院工学系研究科原子力専攻にて実施している。特徴的な金属組織およびマイクロ組織を発現させる熱処理条件を得るための条件を探索している。

マイクロ組織発達を効率的に広い範囲で効率的に測定するために、ナノインデンテーション法の精度向上に取り組んでいる。マイクロ組織発達はマトリクス硬化を引き落とすことから、 $1 \mu\text{m}^3$ 程度の微小領域に対して押し込み試験を実施して硬さを測定し、その分布を得ることにより、金属組織の影響を評価することにした。また、圧痕直下を集束イオンビーム加工装置 (FIB) でマイクロサンプリングして薄膜化し、透過電子顕微鏡観察に供することを試みはじめた。FIB のダメージ層を除去するための電解研磨の条件出しに苦労しているが、マイクロ組織観察結果が得られ始めたところである。

3. 研究成果

得られた成果の一部は、非公開の専門家会議である 18th meeting of International Group on Radiation Damage Mechanisms in Reactor Pressure Vessel Steels (2014年11月、宮崎市) にて紹介し、試験方法についての多くのサジェッションを得たところである。次年度を目途に一定の成果を出せるように、精力的に努力する所存である。

4. まとめ

東北大学金属材料研究所で作成したモデル合金を使用して、原子炉圧力容器鋼中マイクロ組織発達に対する金属組織の影響を、ナノインデンテーションと透過電子顕微鏡を使った実験手法で評価している。