

| | | | |
|------------|---|---------------|---------------|
| 氏名 | さいとう しげる 齋藤 滋 | | |
| 授与学位 | 博士(工学) | | |
| 学位授与年月日 | 平成19年3月27日 | | |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第4条第1項 | | |
| 研究科, 専攻の名称 | 東北大学大学院工学研究科(博士課程)量子エネルギー工学専攻 | | |
| 学位論文題目 | 核破砕中性子源ターゲット用オーステナイトステンレス鋼の疲労特性に及ぼす照射効果 | | |
| 指導教員 | 東北大学助教授 長谷川 晃 | | |
| 論文審査委員 | 主査 | 東北大学教授 阿部 勝憲 | 東北大学教授 長谷川 雅幸 |
| | | 東北大学教授 松井 秀樹 | 東北大学助教授 長谷川 晃 |
| | | 東北大学助教授 栗下 裕明 | |

論文内容要旨

第1章 序論

中性子科学のためのより強力な中性子源として核破砕中性子源が注目されている。核破砕中性子源は大強度の陽子加速器と重金属の核破砕ターゲットから構成されている。現在、世界の幾つかの研究機関では、核破砕中性子源の建設或いは建設計画が進められているが、出力1 MW以上の大強度のものはいずれも液体金属の水銀をターゲット材に、その収納容器にオーステナイトステンレス鋼を採用している。この大強度の核破砕中性子源開発の課題の一つに高エネルギー陽子/核破砕中性子照射が容器材料の機械特性に与える影響がある。特にパルスのターゲットに照射する高エネルギービームによって発生する圧力波などによる疲労に対する照射の影響は明らかになっていない。

本研究の目的は、オーステナイト鋼の疲労特性に与える高エネルギー陽子/核破砕中性子照射の影響を明らかにし、日本原子力研究開発機構が開発を進めている大強度陽子加速器計画(J-PARC)の核破砕中性子源構造材料であるオーステナイト鋼の健全性や寿命評価を検討することである。そのためにスイスのPaul Scherrer 研究所(PSI)にある加速器のSINQターゲットで590 MeV陽子/核破砕中性子照射を行ったオーステナイト鋼(以下SINQ照射材)について以下の項目を実験的に検討する。

- (1) 引張り試験を行い、照射による材料の引張り特性の変化を明らかにする。
- (2) 曲げ疲労試験を行い、疲労寿命に及ぼす照射の影響を検討する。
- (3) 上記の評価のために微小試験片用曲げ疲労試験機を開発した。さらに微小試験による曲げ疲労特性を理解するため寸法効果試験を行う。
- (4) 透過型電子顕微鏡(TEM)による微細組織観察や核変換ガスの分析を行い、マイクロ組織発達に及ぼすガス原子の影響について検討する。

これらの実験結果を基に、以下の点について明らかにする。

- (1) 高エネルギー陽子/核破砕中性子照射の材料の引張り特性と曲げ疲労特性に与える影響
- (2) 高エネルギー陽子/核破砕中性子照射のマイクロ組織変化やガス原子の存在が曲げ疲労特性に与える影響
- (3) これらのデータを基に、J-PARCの核破砕中性子源ターゲット構造材料であるオーステナイト鋼の健全性と寿命の予測を行う

第2章 実験方法

本研究で用いたオーステナイトステンレス鋼はJPCA及び316F鋼の溶体化処理材である。照射用の微小引張り試験片の平行部は長さ5 mm×2 mm×0.4 mm、微小曲げ疲労試験片の形状と寸法は長さ16 mm×2 mm×0.4 mmで途中にくびれがある形状であった。試験片はいずれも加工後に石英管に真空封入して溶体化処理を行った。

照射試験はPSIで行われ、陽子エネルギーは590 MeV、照射温度は80-360°C、最大照射量は12.5 dpaであった。照射用微小試験片に対応した試験機開発については、CCDカメラと画像解析により非接触で歪みを測定できる引張り試験機と、圧電素子を用いた微小曲げ疲労試験機を開発した。この照射後試験技術開発は微小試験片をホットセル内でマニピレータを用いて取り扱うための技術開発である。

引張り試験の条件は試験温度が室温及び250°Cで、大気中で行った。曲げ疲労試験の条件は試験温度が室温、大気中雰囲気、周波数26 Hzで行った。

微小試験による曲げ疲労特性を理解するため、試験片の寸法効果試験を行った。

照射試料中に含まれる核変換ガスの分析の結果、照射材中には核変換によって生成したガス原子の内、ヘリウムは放出されず材料内にとどまっていることが分かった。一方、水素の同位体であるトリチウムは、推定生成量の15-20%が試料中に残留していることが分かった。

また、TEMによる微細組織観察を行った。

第3章 高エネルギー陽子/核破砕中性子照射による引張り特性の変化

SINQ照射材の引張り試験の結果、本研究の照射条件では、原子炉中性子照射材と比較すると硬化や延性低下がやや大きい、顕著な変化は無いこと、破面の形態ははじき出し損傷の蓄積と共に変化することが明らかになった。高エネルギー陽子/核破砕中性子照射の特徴である大量の核変換ガス原子生成にもかかわらず、引張り特性は原子炉中性子照射材と大きな違いが見られなかった。その理由は、本研究の照射条件では照射温度が低く、生成したガス原子が移動できず、バブルやボイドの発生が起こらなかったためであると考えられる。さらに、破面の形態は照射によって変化したものの、絞りの値はいずれも大きく、転位チャネリングなどの照射誘起の変形現象が影響していると考えられた。

第4章 微小試験片による疲労寿命の評価技術

曲げ疲労試験を照射材と同じSINQ照射試験片寸法(板厚0.4 mm)から4倍の試験片寸法(板厚1.6 mm)まで行い、疲労特性に与える試験片の寸法効果を調べた。その結果、SINQ試験片寸法から2倍の試験片寸法までは疲労寿命が低下するが、3倍及び4倍の試験片寸法では再び疲労寿命が増加することを明らかになった。その理由として応力が高い領域の表面積や結晶粒数の影響があると考えられた。

第5章 高エネルギー陽子/核破砕中性子照射による疲労特性の変化

SINQ照射材の曲げ疲労試験の結果、未照射材と照射材の疲労寿命にはほとんど差が見られなかった。大量のガス原子、特にヘリウムの生成にもかかわらず、今回の照射条件では疲労特性には大きな変化は見られなかった。その理由は、ヘリウムが十分に移動できる温度ではなかったためと考えられる。また破面観察の結果から、き裂の発生、進展のメカニズムや照射や試験条件による破面形態の違いについて考察した。破面は大部分が延性疲労破面であったが、中性子源の想定使用温度を大きく上回る360°Cで12.5 dpa照射された316Fでは粒界破面が現れることを見出し、ヘリウムが十分に移動できる温度では疲労寿命が大きく低下する可能性を指摘した。

第6章 高エネルギー陽子/核破砕中性子照射によるマイクロ組織発達

SINQ照射材のTEM観察の結果、大量の水素やヘリウムなどのガス原子の生成にもかかわらず、JPCAと316Fのいずれの試料においてもキャビティは観察されなかった。その他、フランクループや転位ループが観察され、一部の試料では2nm以下の積層欠陥四面体が観察された。これらの2鋼種は400°C以上の照射では全く異なる微細組織発達を示すのに対し、300°C以下ではほとんど違いがないことを明らかにした。

第7章 考察

(1) 引張り特性と疲労特性の関係

SINQ照射材の引張り特性は大きく硬化し、耐力の増加、延性の低下や加工硬化の低下が見られた。しかし、照射材の曲げ疲労寿命の変化はほとんどなかった。本研究の照射条件では、引張り特性が大きく変化しても、疲労特性には大きな影響を与えないことを示している。一般に材料の強度と疲労寿命は比例すると報告されている。照射された材料は硬化し、強度が増すので、一般的には疲労寿命は伸びると予想されるが、実際に

は低温の照射条件では、疲労寿命は変化しないことが多く、本研究の結果はこれらの結果と一致した傾向が得られた。このような傾向を持つ理由として未照射の溶体化処理オーステナイトステンレス鋼では、曲げ疲労試験の初期に繰り返し加工硬化により硬化すること、一方、照射材は冷間加工材など同様に曲げ疲労試験の初期に繰り返し軟化が起きることが挙げられ、このようなことから、定常状態での両者の強度差は大きくならないと考察した。

(2) ミクロ組織と曲げ疲労特性の関係

疲労特性とミクロ組織とは密接な関係があると考えられるが、SINQ 照射材の曲げ疲労寿命の変化はほとんど無かった。従って、このようなビーム照射により生成した微細組織は、疲労特性に大きな影響を与えないことになる。照射材の場合、試験開始初期に繰り返し軟化することから、照射で導入された高密度の転位やループが繰り返し変形により運動し、消失や合体等を繰り返して定常状態のミクロ組織になると考えられる。照射材及び非照射材の定常状態の組織については詳細は不明であったが、初期状態ほどの大きな差はなくなると考えられる。特に、き裂の発生箇所である表面及び表面近傍のミクロ組織は、転位などのシンクとなるため、定常状態では大きな差がない可能性がある。

(3) 核破砕中性子源構造材料としての健全性と寿命の予測

核破砕中性子源ターゲット容器用構造材料の寿命評価には、高エネルギー陽子/核破砕中性子照射が材料強度に与える影響を考慮しなければならない。しかし照射温度が 300℃以下であれば 10 dpa 程度までは照射硬化や伸びの低下は見られたものの、多量のヘリウムガス原子が生成したにもかかわらず脆化（粒界破面、疲労寿命の低下）は観察されなかった。従って、現在考えられている J-PARC の核破砕ターゲットの使用条件下（200℃、11.4 dpa/y）でも、約 1 年間は健全性を保つことが出来ると考えられる。

第 8 章 結論

高エネルギー陽子/核破砕中性子照射を受けた核破砕中性子源構造材料用オーステナイトステンレス鋼に対し、微小引張り試験や微小曲げ疲労試験及び微細組織観察を行い以下の結果を得た。

(1) 引張り試験：本研究の照射条件では、原子炉中性子照射材と比較すると硬化や延性低下がやや大きい、顕著な変化は無かった。破面の形態ははじき出し損傷の蓄積と共に変化し、かつ絞りの値はいずれも大きくなった。これには照射による不均一変形が寄与していると考えられる。

(2) 微小試験片による曲げ疲労試験：照射材と同じ SINQ 試験片寸法から 4 倍の大きさの試験片までの寸法効果試験を行った。SINQ 試験片は 4 倍の大きさの試験片よりもやや低めの疲労寿命を示すことが分かった。

(3) 曲げ疲労試験：本研究では、微小試験片用に曲げ疲労試験機を開発した。この試験装置を用いて高エネルギー陽子/核破砕中性子照射材の曲げ疲労試験データを世界で初めて取得した。未照射材と照射材の疲労寿命にはほとんど差が見られなかった。360℃で 12.5 dpa 照射された 316F では粒界破面が観察された。本実験の照射条件では疲労特性には大きな変化は見られなかった。

(4) 微細組織観察：いずれの試料でもキャビティは観察されず、転位ループなどが照射硬化に寄与していると考えられる。JPCA と 316F の微細組織発達は、300℃以下ではほとんど違いがなかった。

(5) 引張り特性と疲労特性の関係：照射されたオーステナイト鋼において顕著な照射硬化が見られたが、疲労特性には大きな影響を与えないことが分かった。

(6) ミクロ組織と曲げ疲労特性の関係：本研究の照射条件ではミクロ組織の変化が疲労特性には大きな影響を与えないことが分かった。

(7) 核破砕中性子源構造材料としての健全性と寿命の予測：現在考えられている J-PARC の核破砕ターゲットの使用条件（200℃、11.4 dpa/y）では、約 1 年間は健全性を保つことが出来ると考えられる。

論文審査結果の要旨

本研究の目的は、核破砕中性子源の構造材料であるオーステナイトステンレス鋼の疲労特性に与える高エネルギー陽子/核破砕中性子照射の影響を明らかにし、大強度陽子加速器計画(J-PARC)の核破砕中性子源構造材料であるオーステナイト鋼の健全性や寿命評価を検討することである。本論文は全8章からなり、その構成は以下の通りである。

第1章においては、核破砕中性子源について概説し、オーステナイト鋼を核破砕中性子源構造材料として用いる場合の課題を明らかにしている。さらにオーステナイト鋼の照射研究の現状について述べ、最後に本研究の位置づけと目的について述べている。

第2章においては、研究に用いた材料及び試料作製方法、高エネルギー陽子/核破砕中性子照射試験及び照射後試験について述べ、また微小試験片に対応した試験機の開発を含む照射後試験技術開発や試験方法についてまとめている。

第3章においては、高エネルギー陽子/核破砕中性子照射試験による引張り特性の変化についてまとめている。引張り試験の結果、本研究の照射条件では、原子炉中性子照射材と比較すると硬化や延性低下がやや大きい、顕著な脆化は無いことを明らかにした。

第4章においては、微小試験片による疲労寿命の評価における寸法効果についてまとめている。微小試験片による曲げ疲労試験を、照射材と同じ核破砕中性子源照射実験用の小型試験片寸法から4倍の試験片寸法まで行い、疲労特性に与える試験片の寸法効果を調べ、その寸法効果の機構についても考察している。

第5章においては、高エネルギー陽子/核破砕中性子照射試験による疲労特性の変化についてまとめている。曲げ疲労試験の結果、未照射材と照射材の疲労寿命にはほとんど差がなかったため、その理由を考察している。また破面観察の結果から、き裂の発生と進展のメカニズムや、照射や試験条件による破面形態の違いについて考察している。300℃以下で試験した破面は大部分が延性疲労破面であったが、ターゲットの運転温度を大きく超える360℃で照射された316F-SA材では粒界破面が現れることを見出し、ヘリウムが十分に移動できる温度では疲労寿命が大きく低下する可能性を指摘した。

第6章においては、高エネルギー陽子/核破砕中性子照射試験によるミクロ組織発達についてまとめている。微細組織観察の結果、JPCA-SA材と316F-SA材のいずれの試料でもキャビティは観察されなかった。これらの2鋼種は400℃以上の照射では全く異なる微細組織発達を示すのに対し、300℃以下ではほとんど違いがないことを明らかにした。

第7章においては引張り特性と疲労特性の関係、ミクロ組織と曲げ疲労特性の関係及び核破砕中性子源構造材料としての健全性と寿命評価について考察している。寿命評価については、照射温度が300℃以下であれば10 dpa程度までは脆化は見られないことから、現在考えられているJ-PARCの核破砕ターゲットの使用条件(200℃、11.4 dpa/y)では、約1年間は健全性を保つことが出来ると考えられる。

第8章においては本研究で得られた成果を総括している。

以上要するに本論文では、核破砕中性子源のターゲット用構造材料であるオーステナイト鋼の照射後疲労特性に与える高エネルギー陽子/核破砕中性子照射の影響を明らかにするために、照射材の照射後試験と必要な微小試験技術の開発を行い、重要なデータと知見を得た。特に高エネルギー陽子/核破砕中性子照射材の曲げ疲労試験データを世界で初めて取得した。この照射材の疲労データはこれまでのところ世界で唯一の貴重なデータである。これらの成果によりJ-PARCの核破砕中性子源構造材料であるオーステナイト鋼の健全性や寿命評価を検討することが出来るようになるとともに、量子エネルギー工学の発展に寄与することが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。