

中性子照射を受ける FBR 炉心材料の 機械的性質の評価に関する研究

学位論文内容の要旨

FBR 炉心材料の開発においては、炉内材料の中性子照射特性の把握と機械的性質に及ぼす照射効果評価等の目的から、高速実験炉「常陽」等を利用した材料試験が精力的に実施されてきた。しかし照射スペースの制約や照射と材料試験等に長期間を要するため、短時間で材料特性評価を行うことが、迅速な材料開発のために最も重要である。加えて、コストと放射性廃棄物発生の低減が従来にも増して求められ、効率的な試験・評価システムの開発が要望されている。

このような背景の下、本研究は FBR 炉心材料の照射後機械試験について、①機械的性質の諸特性を得るための種々の照射後試験技術とそれらの相関性を明らかにし、②高速中性子照射による機械的性質の変化のメカニズムと定量的モデルの構築を試み、これらの結果から③機械的性質を評価するための最適な試験方法と評価システムを提案すること目的とした。

第 1 章では、世界のエネルギー事情と核燃料サイクルの必要性を概説し、その中核となる高速増殖炉 (FBR) の炉心材料に要求される諸特性、炉心材料開発及び関連する照射・照射後試験技術に係る課題を示し、本研究の目的を示した。

第 2 章では、FBR 炉心材料開発に必要な照射後機械試験として引張試験、急速加熱バースト試験、炉内クリープ試験、照射後内圧クリープ試験、及び計装化シャルピー衝撃試験を取り上げ、機械的性質と設計側から見た各種試験の目的と試験技術上の特徴と課題を明らかにした。被覆管のリング引張試験や微小シャルピー衝撃試験では、試験片形状・サイズ効果評価が不可欠であり、一方、安全評価に関連した燃料被覆管の健全性・寿命評価のためには、従来の急速加熱バースト試験に加えて照射後内圧クリープ試験を組み合わせた被覆管寿命評価手法の確立が必要であることを指摘した。

第 3 章では、オーステナイト鋼の強度・延性特性に及ぼす照射速度とひずみ速度依存性を明らかにした。低照射速度で照射した 12%冷間加工 316 ステンレス鋼について引張試験と微細組織評価を行った結果、照射量 51dpa、照射温度 371~444°C の範囲ではスエリング挙動は照射速度に影響されたが、 10^{-7} ~ 10^{-6} dpa/s の範囲では引張強度・延性特性に及ぼす明確な照射速度の影響はない。一方ひずみ速度は、 1×10^{-7} ~ 1×10^{-3} /s の範囲では明らかな影響はなく、照射材の脆性破壊には照射量の影響に加えて温度を含めた環境因子が大きな役割を果たしている。

第 4 章では、高照射量まで照射された PNC316 及び 15Cr-20Ni 鋼被覆管の強度と延性に及ぼす照射の影響を考察した。PNC316 及び 15Cr-20Ni 鋼被覆管の引張試験及び急速加熱バースト試

験を行い、 $2.3 \times 10^{27} \text{ n/m}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$)までの範囲では、照射量の増加に伴う著しい強度劣化や脆性破壊は発生しない。急速加熱時の破裂強度維持の要因としてTiによる転位のピン止め効果とボイドの移動の抑制効果が重要である。さらにスエリングが10%程度発生しても、機械的性質の劣化は顕著ではなく、照射後でも延性を維持している。

第5章では、酸化物分散強化型(ODS)フェライト鋼被覆管の照射後強度・延性特性を検討した。リング引張試験等の結果、特性改善のための組織制御の効果が有効であった。ODS鋼では微細に分散した酸化物粒子が照射欠陥の有効なシンクとして働き照射硬化を抑制する結果、照射後でも良好な強度・延性特性を維持すると考察した。ただし、現状の照射データは目標に対してかなり低いため、高照射量データの拡充が必要である。

第6章では、フェライト鋼を炉心材料に適用する上で重要な課題である照射脆化に関して、PNC-FMS鋼の照射後シャルピー衝撃特性を評価した。照射後ハーフサイズシャルピー衝撃試験とその後の組織観察の結果、照射温度500℃ではUSE及びDBTTは受け入れ材と概ね同様であったが、650℃ではUSEは低下し、DBTTは60℃程度上昇して顕著な衝撃特性の低下を示した。熱時効材との比較により、DBTTの上昇は主としてラスマルテンサイト組織の消失とラス境界の幅の広がり起因しているとの見解が示された。一方USEの低下に関してはもっぱらLaves相等の照射誘起析出挙動に大きく支配されていると推察した。

第7章では、前章までの結果に基づきFBR炉心材料の機械的性質に及ぼす照射効果を総合的に評価し、今後の照射後試験の方法とシステムを検討した。照射スペースの有効活用や試験コスト削減と放射性廃棄物の低減などの要求を満足しつつ効率的試験を行うためには、微小試験片の活用と微細組織変化から機械的性質を推定するシミュレーション手法やモデル化が不可欠である。すなわち、従来の比較的大型の機械試験に代わり、照射硬化の評価のための微小硬さ試験や加工硬化性評価のための微小曲げ試験に加えて、微細組織データベースに基づく機械的性質の評価・モデル化が有効である。一方、燃料照射試験は検体数を減少させるものの、従来サイズの機械試験から燃料ピン等の健全性評価は必要である。このような先進照射後試験システムの実現には、データベースの整備と寸法・形状効果評価法や標準化法の確立が重要である。

以上、本論文ではFBR炉心材料の機械的性質の評価を照射後機械試験から整理し、照射後の機械的性質、特に強度・延性特性及び照射脆化等を明らかにした。またこの結果に基づき、より効率的な照射試験・照射後試験システムを検討して具体策を提案した。これは、FBRのみならず核融合炉を含めた未来型エネルギーシステムの材料開発に係る試験技術や解析技術の高度化システムにも有効であろう。

学位論文審査の要旨

主査	教授	大貫	惣明
副査	教授	工藤	昌行
副査	教授	成田	敏夫
副査	教授	市野瀬	英喜
副査	助教授	三浦	誠司
副査	教授	幸野	豊 (室蘭工業大学大学院工 学研究科)

学位論文題名

中性子照射を受ける FBR 炉心材料の 機械的性質の評価に関する研究

本論文は、FBR 炉心材料の中性子照射による機械的性質の変化について種々の試験法から検討したものである。さらに、結果の相関から、照射後試験として最適な評価システムを提案した。その主要な成果は次の点に纏められる。

- ① 炉心材料の材料強度の要求性能を評価するために、照射後の機械的試験法として引張試験、急速加熱バースト試験、炉内クリープ試験、照射後内圧クリープ試験、許装化シャルピー衝撃試験を取り上げ、それぞれの有効性と技術的課題と相関を検討した。主要な項目は照射硬化と延性低下であり、特にフェライト鋼では照射脆化も重要なことを明らかにした。また、照射硬化と延性低下は引張試験の強度と伸びの結果から評価できることを示した。
- ② 被覆管形状に対する引張試験は管軸方向と周方向の2種類が不可欠であり、ODS フェライト鋼のように高強度で異方性のある材料では、周方向のリング引張試験が最も有効なことを明らかにした。また引張試験では、強度と伸びのほかに、照射温度と試験歪速度、さらにスエリング等の照射組織の影響が重要であることを指摘した。
- ③ 照射後の急速加熱バースト試験と照射中の内圧クリープ試験は、燃料集合体の安全性評価、特に熱過渡時強度評価を目的とした特徴的な試験である。これらのデータ評価では、熱過渡時の温度と応力の履歴についての短時間・長時間の強度データを統一的に扱う手法を示した。
- ④ シャルピー衝撃試験では、照射スペースの有効利用と廃棄物の最小化のために微小試料による試験が切望されているが、形状・寸法効果の評価法の確立が最重要である。照射脆化の通常の評価法はシャルピー衝撃試験による DBTT の上昇であるが、これに
- ⑤ 加えて、破壊靱性値や引張試験の変形・破壊挙動の相関が重要なことを指摘した。

- ⑥ 照射した材料の機械的性質は、照射欠陥の導入による組織変化にも強く依存するため、そのモデル化に当たっては、転位ループ、ボイドおよび析出物等の照射硬化への寄与分の積算が基本的な方法であり、さらに照射量と照射速度も重要な因子であることを示した。
- ⑦ 材料強度基準の整備と設計データの取得のために、各種の試験を組み合わせた近似的式による強度・延性特性のモデル化が有効なことを示した。特に、照射に影響される降伏応力やDBTTの増減を簡便に表す近似式を提案した。
- ⑧ これらの結果と考察から、照射スペースの有効活用、コスト削減、および放射性廃棄物の低減を実現する照射後試験法と評価システムを示した。たとえば、従来の炉心材料の評価では設計データを個別の試験から取得し、その後に燃料集合体としての健全性を確認する方法が取られており、各試験データの互換性は乏しく、直列的な試験評価となり、さらに照射特性の全体の評価に長期間を要していた。しかしながら、今後の照射後試験システムは、取得済みのデータによる照射挙動シミュレーションと機械的性質のモデリングを主体とするべきであり、材料特性の基礎データとしての硬度と微細組織の変化を中心として、これにリング引張り、急速バースト、内圧クリープ、シャルピーなどの試験結果を加える機械的性質評価システムが有効であるとした。

これを要するに、著者は、FBR 炉心材料の機械的性質の評価を目的として各種試験を実施し、その関連の検討から強度、延性および脆化の挙動を明らかにすることに成功した。またこれらの結果に基づき、精度よく効率的な照射後試験システムを提案した。これは、照射損傷を伴う他の未来型エネルギーシステムの材料開発についての試験技術や解析技術の高度化にも有効であり、材料工学の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。