

## 課題目標・目的及び研究成果

1. 当初の目的・目標	<p>高速増殖炉用MOX燃料ペレット（セラミックス）の照射による損傷挙動は、ペレットの顕著な熱的安定性劣化や燃料・被覆管の機械的相互作用を助長する。しかし、その機構が詳細に解明されていないため、精度の高い照射損傷予測モデルの確立に至っていない。ここでは、セラミックスの照射損傷挙動を三つの要素損傷プロセス（弾性衝突効果、熔融飛跡形成、ガス原子蓄積）ごとに体系化し、その統合モデルを構築することによって、照射による燃料損傷評価を高精度で行うことができる技術を開発する。</p> <p>高速増殖炉用MOX燃料ペレット（セラミックス）の照射損傷挙動を三つの要素損傷プロセス（(1)弾性衝突効果、(2)熔融飛跡形成、(3)ガス原子蓄積）ごとに体系化し、その統合モデルを構築することによって、照射による燃料損傷評価を高精度で行うことができる技術を開発することを目標とする。</p> <p>全体計画</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. 弾性衝突効果に基づいた損傷評価法の検証<ol style="list-style-type: none"><li>1) 低エネルギー粒子の高温照射システムの開発</li><li>2) セラミックスの低エネルギー照射損傷の評価手法の開発</li><li>3) 既存の弾性衝突効果に基づいた損傷評価法による解析</li></ol>上記のシステム開発および照射実験により取得した損傷データを照射パラメータ（照射量・温度）依存性として解析する。また、高照射量領域・高温領域での結晶性劣化を検討することで、弾性衝突効果に基づいた損傷評価法の検証のまとめを行う。</li><li>2. 熔融飛跡形成を考慮した損傷量評価法の構築<ol style="list-style-type: none"><li>1) 高エネルギー粒子の高温照射システムの開発</li><li>2) セラミックスの高エネルギー照射損傷の評価手法の開発</li><li>3) 熔融飛跡形成を考慮した損傷量評価法の開発</li></ol>上記のシステム開発および照射実験により取得した損傷データを照射パラメータ（照射量・温度）依存性として解析する。既存の弾性衝突を想定した損傷評価法を高エネルギー領域・高照射量領域までの拡張を検討することで、熔融飛跡形成を考慮した損傷量評価法の構築のまとめを行う。</li><li>3. F P ガスの蓄積を想定した損傷量評価法の構築<ol style="list-style-type: none"><li>1) ガス原子の高濃度注入システムの開発</li><li>2) セラミックスのガス原子高濃度蓄積による損傷の評価手法の開発</li><li>3) ガス原子高濃度蓄積を考慮した損傷量評価法の開発</li></ol></li></ol>
-------------	---

	<p>上記のシステム開発および照射実験により取得した損傷データを照射パラメータ（照射量・温度）依存性として解析する。ガス原子蓄積を考慮した損傷量評価法の構築のまとめを行う。</p> <p>4. 統合モデルとしての高精度損傷量評価法の構築</p> <p>1) 高エネルギー領域まで拡張可能な損傷量評価法の開発 熱挙動を考慮した上で、高エネルギー領域での照射損傷量評価法開発をまとめる。</p> <p>2) ガス原子蓄積に対応可能な損傷量評価法の開発 熱挙動を考慮した上で、ガス原子蓄積にも対応可能な照射損傷量評価法開発をまとめる。</p> <p>5. まとめ、評価 燃料セラミックスにおける照射による損傷評価について本研究開発の成果をとりまとめる。蛍石型酸化物セラミックスにおける(1)弾性衝突効果、(2)溶融飛跡形成、(3)ガス原子蓄積によるそれぞれの損傷評価について、損傷プロセスを体系化し、それぞれの照射量依存性、温度依存性の特徴を整理する。既存の照射損傷評価法の不備とそれを改善するために必要な損傷モデルを提示し、より高精度の損傷評価技術を開発する。</p>
2. 研究成果	<p><b>【事業項目1】</b></p> <p>蛍石型結晶構造を有する核燃料模擬物質に、低エネルギー（～10MeV）粒子照射および高エネルギー（～100MeV）粒子照射を行い、それぞれの損傷データを比較することにより、以下のことを明らかにした。</p> <p>1) 損傷の量的違い 低エネルギー粒子照射と高エネルギー粒子照射とでは、損傷導入率が大きく異なることを明らかにした。（10MeV Niと120MeV Xeとでは、損傷導入率が一桁も異なる。）</p> <p>2) 損傷の質的違い 高エネルギー粒子照射では、溶融飛跡（いわゆるイオントラック）が形成され、それが損傷導入率の顕著な違いの起源であることを明らかにした。</p> <p>3) 損傷プロセスの分離解析 弾性衝突効果と溶融飛跡形成の効果のそれぞれの損傷を分離解析することができた。</p> <p>4) 既存の損傷予測法の不備 従来の損傷予測法は、弾性衝突効果のみを考慮している。しかしながら、実際には、高エネルギー領域では、溶融飛跡形成による効果が大きく損傷に寄与することを明らかにした。既存の枠組みでは、損傷を桁違いに過小評価してしまうことを実験的に証明した。</p>

### 【事業項目 2】

室温および高温（400℃、800℃）での低エネルギー粒子照射実験および高エネルギー粒子照射実験を行い、高温での損傷形成挙動を解析した。さらに、高温に加熱した照射済み試料について、高温での損傷回復挙動を調べた。その結果、以下のことが明らかになった。

#### 1) 400℃照射と800℃照射の損傷形成の明らかな違い

室温および高温での低エネルギー粒子(10MeV Ni)および高エネルギー粒子(120MeV Xe)の照射実験の結果、室温と400℃との間にほとんど照射損傷データの差異は認められないにもかかわらず、800℃の高温になると損傷形成に明らかな違いが存在することが分かった。800℃の高温になると、損傷の回復が顕著に起こり、損傷が蓄積しにくくなるからと考えられる。

#### 2) 800℃付近に損傷回復のしきい値温度

700℃と800℃との間に、照射損傷が回復するしきい値温度が存在することを明らかにした。この成果の意義は以下の通りである。700℃付近以下までの比較低温では、損傷形成挙動はほとんど温度に依存せず、損傷予測において熱の影響を考慮する必要はないが、800℃以上の比較的高温では損傷形成だけでなく損傷回復を考慮する必要があることを明らかにした。

**【事業項目 3】** ガス原子高濃度蓄積による損傷を評価するために、室温及び高温においてガス原子注入した試料について測定した損傷データを提示した。ガス原子注入による損傷に関して、以下のことを明らかにした。

1) ガス原子注入においても、低エネルギー粒子照射および高エネルギー粒子照射と同様に注入量の増加に伴い損傷が蓄積されることを明らかにした。

2) ガス原子注入の注入温度に関しては、低エネルギー粒子照射および高エネルギー粒子照射と異なり、400℃と800℃との比較において損傷に大きな差異がないことを明らかにした。

### 【事業全体】

事業全体を通じて特に言いたい成果 本事業で問題としている現象は、核燃料中の高エネルギー核分裂片による顕著な照射損傷である。そのような照射損傷は、スウェリングや熱伝導度の低下を引き起こす原因となり、燃料のふるまい予測の上での不確定要因となる。本事業以前は、弾性衝突プロセスのみを考慮した照射損傷評価法が多く使われてきた。金属材料の照射損傷評価の際には、その有効性がある程度立証されてい

る。しかしながら、酸化物材料について、特に100MeVレベルの高エネルギー領域での照射損傷を評価する場合には、損傷評価法として成立しない可能性があった。そこで、本事業では、既存の損傷評価の枠組みを検証するとともに、高エネルギー領域にまで拡張可能な損傷予測法を開発することを目標とした。その方策として、既存の損傷予測法が比較的適用可能と考えられている低エネルギー領域での照射損傷と、拡張したい高エネルギー領域での照射損傷のそれぞれの損傷データを比較し、損傷プロセスを分離解析することを試みた。その結果、損傷プロセスごとの損傷を定量的に分離評価することが可能になった。さらに、そこから導き出された結論は、既存の損傷評価法では、損傷を相当に過小評価してしまうことであった。これは、既存の損傷評価法は、溶融飛跡形成プロセスを無視しているからである。本事業では、さらに溶融飛跡形成プロセスを想定して、高エネルギー領域での損傷予測に必要な補正係数を提示することができた。最終的に本事業により、高エネルギー領域で適用可能な高精度の評価技術を開発することができた。

#### 【得られた成果の外部発表】

- ① 高崎量子応用研究所研究年報2006(JAEA-Review JAEA Takasaki Annual Report 2006) 「Evaluation of Radiation Damage Created via Elastic Displacements in Oxide Ceramics」
- ② 第3回高崎量子応用研究所シンポジウムでの口頭（ポスター）発表 「10MeV Niを高温照射した酸化物セラミックスにおける損傷」平成20年10月9日
- ③ 高崎量子応用研究所研究年報2007(JAEA-Review JAEA Takasaki Annual Report 2007) 「Damage in Oxide Ceramics Irradiated with 10MeV Ni at High Temperature」
- ④ 原子力機構タンデム加速器研究年報2007(JAEA-Review JAEA-Tokai TANDEM Annual Report 2007) 「Evaluation of radiation damage in CeO<sub>2</sub> created by high-density electronic energy deposition」
- ⑤ 原子力機構タンデム加速器研究年報2007(JAEA-Review JAEA-Tokai TANDEM Annual Report 2007) 「Evaluation of radiation damage in CeO<sub>2</sub> created by Xe-implantation」
- ⑥ 原子力機構タンデム加速器研究年報2008(JAEA-Review JAEA-Tokai TANDEM Annual Report 2008)印刷中 「Damage recovery of radiation damage in CeO<sub>2</sub> created by electronic energy deposition」
- ⑦ 第4回高崎量子応用研究所シンポジウムでの口頭（ポスター）発表 「セラミックスにおける弾性衝突を介した照射損傷の損傷評価法

	の研究」平成21年10月8日
--	----------------