



Title	高速炉燃料集合体のピンバンドル変形挙動に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	上羽, 智之
Citation	北海道大学. 博士(工学) 乙第7002号
Issue Date	2016-09-26
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/63379
Rights(URL)	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	theses (doctoral - abstract and summary of review)
Additional Information	There are other files related to this item in HUSCAP. Check the above URL.
File Information	Tomoyuki_Uwaba_abstract.pdf (論文内容の要旨)



[Instructions for use](#)

学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士(工学) 氏名 上羽 智之

学位論文題名

高速炉燃料集合体のピンバンドル変形挙動に関する研究

(Study on deformation behavior of fuel pin bundles of fast reactor fuel subassemblies)

高速炉の実用化に向けては、軽水炉と競合し得る経済性の確保が必然的に要求され、その有力な方策として燃料の高燃焼度化を達成することが指向される。このため、高速炉燃料には、軽水炉燃料と比較してはるかに高い燃焼度と重照射環境下における安全性と信頼性が要求されるようになる。

高速炉のワイヤスペーサ型燃料集合体において、燃料被覆管材料にオーステナイト鋼を用いた場合、燃焼が進み中性子照射量が高くなると、材料のスエリングの発生により燃料ピンバンドルがダクト以上に膨張し、バンドルとダクトとの機械的相互作用 (BDI: Bundle-Duct Interaction) が生じる場合がある。BDI が厳しくなると、ワイヤスペーサ巻きピッチに沿った燃料ピンの湾曲が大きくなり、燃料ピンとダクトの間隔が狭くなる結果、被覆管の冷却性が悪化するなどして燃料集合体の健全性に影響する可能性がある。このため、BDI による燃料ピンバンドルの変形挙動の解明は、高速炉燃料の高燃焼度を達成する上での重要な研究対象であると考えられる。しかし、高燃焼度化によって厳しい BDI を経験したと考えられる燃料集合体の数自体が非常に少ないため、従来の研究は燃料ピンやダクトに最終的に生じた照射後の変形例の調査に留まっている。また、炉外での BDI 模擬試験による変形評価の研究も行われていたが、バンドルの変形挙動の機構に関する詳細な検討は十分になされていない状況である。このような背景から、本研究は、BDI による燃料ピンバンドルの変形機構を解明することを目的として、以下を実施した。

(1) BDI を炉外で模擬するため、模擬ピンにより組み上げたバンドルを、ダクトを模擬した六枚の移動圧縮板で圧縮する「炉外バンドル圧縮試験」を実施し、この試験で得られた圧縮中の模擬ピンバンドルの横断面 X 線コンピュータ・トモグラフィ画像を数値化処理することにより、模擬ピン変位を測定する手法を確立した。また、この測定データから模擬 BDI 下でのピンの変形状態を評価することにより、ピンバンドルが湾曲変形してバンドル最外周のピンと圧縮板との距離が減少するため、圧縮量が大きくなると、ピンと圧縮板がワイヤを介さずに接触する可能性があることを確認した。また、圧縮によって被覆管の断面がワイヤを介した接触荷重 (BDI 荷重) で扁平化することも確認し、ピンバンドル変形の基本原理はピンの湾曲と被覆管の扁平化が主体であることを把握した。

(2) 燃料ピンバンドルを有限要素法で構成し、炉外バンドル圧縮試験や照射下で生じるピンバンドルの変形を機構論的に解析するコード「BAMBOO」を開発した。この開発では、バンドル変形時の隣接ピン間とピン-ダクト (圧縮板) 間の接触・分離解析のための定式化を行うとともに、接触・分離求解のアルゴリズムの工夫により、求解過程での収束計算の安定化を図った。また、炉外バンドル圧縮試験によって得られた知見を基に、被覆管の扁平化とピンの再配置 (ディスパージョン) を解析するモデルを開発した。扁平化については、被覆管寸法 (外径、肉厚) とワイヤピッチ、ヤング率、ポアソン比を考慮し、弾性力学に基づいて任意のピン寸法の扁平化剛性を解析するモデルを

構築した。ディスパージョンはワイヤの巻ずれによる接触点のずれが主な原因であると考えられ、この現象を解析的に表現するには要素節点の中間の軸方向位置での接触を考慮する中間接触概念の適用が必要である。このため、燃料ピンを構成する梁要素に対し、両端の要素節点から外れた軸方向位置での接触条件を判定し、収束計算により接触・分離解析を実行するモデルを開発した。これらのモデルを BAMBOO コードに統合し、炉外バンドル圧縮試験の結果を用いてコードの解析機能とモデルの妥当性を検証するとともに、ピンバンドル変形の支配因子(ピンの湾曲と被覆管の扁平化)を評価した。この評価の結果から、被覆管の扁平化は、被覆管とダクトとのワイヤを介さない接触が開始する時期を遅らせる機構(BDI 緩和機構)の主要因子であることを明らかにした。また、従来まではディスパージョンも BDI 緩和機構に寄与すると認識されていたが、解析的な方法でディスパージョンの影響に関する評価を行った結果、ディスパージョンはピン変位のバラつきを大きくするため、その発生状況によっては BDI 緩和機構として機能せず、ピン-ダクト間距離を減少させる場合もあり得ることを示した。更に、ディスパージョンが生じると、バンドル全体として BDI 荷重を減少させる方向にピンの変位が生じることも明らかにした。

(3)BAMBOO コードをピンバンドルの照射変形解析に適用するため、熱、スエリング、照射クリープ歪みに対応する節点荷重ベクトルを定式化し、これを外荷重ベクトルに追加する処理を加えることによりコードの照射変形解析機能を整備した。また、BDI は燃料ピンの外径増加によって生じることから、外径増加の主要因となる被覆管のスエリングについて、温度と高速中性子照射量から挙動を予測するスエリング式を作成した。国産のオーステナイト鋼の炉心材料(2 鋼種)について作成したスエリング式を BAMBOO コードに組み込み、これらの材料で製造され、米国の高速炉「FFTF」で高燃焼度照射(140GWd/t 超)した 2 体の燃料集合体のピンバンドル照射変形解析を実施した。解析結果と照射試験結果の比較により、BAMBOO コードの照射変形解析機能の妥当性を検証するとともに、照射変形においても、炉外バンドル圧縮試験における変形と同様に、被覆管の扁平化が BDI 緩和の主要機構であることを明らかにした。

(4) 燃料集合体の寿命評価という観点から、高燃焼度を達成した燃料の寿命制限因子について考察した。照射中の燃料ピンは、FP ガスの放出によって内圧が上昇し、被覆管の高温度部ではクリープ損傷が蓄積するようになる。この評価のため、炉内で照射した被覆管内圧クリープ破断試験データを用いてクリープ破断式を作成し、FFTF における上述の高燃焼度燃料集合体における被覆管のクリープ損傷による累積損傷和(CDF)を評価した。同時に、燃料ピンは被覆管のスエリングによって外径増加を生じることから、スエリングとピン内ガス圧による照射クリープで生じるピン外径増加の評価を実施した。実際の照射試験から更に燃焼度を延長した状況を設定して、被覆管の CDF とピン外径増加の履歴を比較した結果、外径増加の方が CDF よりも早期に制限値(本研究で暫定的に設定)に到達した。これにより、オーステナイト鋼被覆管を用いた場合、燃料ピンの寿命は被覆管のクリープ損傷よりも外径増加に支配されることが示された。ピン外径増加は BDI を引き起こす要因となることから、通常運転時においては、BDI によるピンバンドルの変形が燃料集合体の実質的な寿命制限因子になることが明らかとなった。

以上の研究により、高速炉燃料集合体の寿命制限因子が BDI によるピンバンドルの変形に支配されることを示すとともに、被覆管の扁平化が BDI 緩和の主要な機構として働き、高燃焼度まで燃料の健全性が維持されることを明らかにした。