

氏名	三木 一 克 み き かず よし
学位の種類	工学博士
学位記番号	論工博第1351号
学位授与の日付	昭和56年1月23日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
学位論文題目	高速増殖炉燃料集合体の湾曲変形に関する研究

論文調査委員 (主査) 教授 岐美 格 教授 大石 純 教授 西原 英 晃

### 論文内容の要旨

本論文は、温度勾配や中性子束勾配によってナトリウム冷却高速増殖炉の燃料集合体及びその内部の燃料要素に生じる湾曲変形を、3次元的に解析する手法を開発して、その変形挙動を研究した結果をまとめたもので、本文は5章から成っている。

第1章は緒言で湾曲変形を3次元的に解析する手法を開発することの必要性と重要性を、従来の研究結果を参照して指摘するとともに、本論文の主要部の構成について述べている。

第2章ではまず、ラッパ管内のワイヤスペーサ型燃料要素群が熱、スエリング、及びクリープによって湾曲変形する現象を3次元的に解析する手法について述べている。燃料要素の配置が正三角形形状であることに着目し、燃料要素群の機械的相互作用を、互いに $\pi/3$ の角をなす3方向のそれぞれについて解析し、各方向ごとに得られた変位成分を合成して3次元湾曲形状を求める。上述の機械的相互作用は、一列上に並ぶ全燃料要素の間に生じる接触荷重と、各接触位置における燃料要素の変位量との間の数学的關係（行列方程式）に基づいて解析する。この際、全燃料要素間の接触位置は、燃料要素が下端でのみ固定されていることを考慮し、自由湾曲から出発して、隣接要素からの強制変形を重ね合せ、反復計算により求める。上記の行列方程式の係数行列は、ブロック三重対角行列で、かつ対称行列であることから計算時間及び記憶容量を縮小することができる。以上の解析手法をもとに、燃料集合体内の燃料要素群の湾曲変形挙動を解析する計算コード SHADOW を開発した。

一方、ラッパ管に水平方向に外部から荷重を加え、それにともなって生じる燃料要素群の変位を光学的に測定して、SHADOW による計算結果と比較し、燃料要素間の間隙が小さく、燃料要素の初期曲りの少ない場合に良い一致を得ている。

さらに、SHADOW と既存の熱流動解析コード DIANA を組合せて反復計算を行い、原型炉クラス（もんじゅ）の炉心及びブランケット燃料集合体の内部の燃料要素群の湾曲変形挙動をしらべ、変形にもなり冷却材温度の変化などについて検討した。その結果、燃料要素群は炉心部中央付近から上側で、ラッパ管の中心方向に圧縮され、そのため内側を流れる冷却材温度が上昇する。それで、半径方向出力勾配

が小さく、冷却材最高温度が内側流路に生じるような燃料集合体の場合ほど、湾曲にともなう冷却材最高温度の上昇幅が大きい。その上昇幅は、燃焼が進むほど大きくなる傾向があるが、この増加幅は、燃焼にともなう出力低下による温度減少幅に比べて十分小さいので、炉心熱設計における燃料要素の湾曲による工学的不確定係数として、半径方向出力分布の平坦な炉心中央近傍の燃料集合体の燃焼初期の値を採用するのが妥当であるとしている。

第3章ではまず、第2章と同様の解析手法により、正三角形状に配列される燃料集合体群の湾曲変形挙動を3次元的に解析するために開発した計算コード BEACON について述べている。このコードは、燃料集合体以外の炉心構成要素にも適用できるとともに、要素下端に存在する間隙も考慮でき、また炉心変形の経時変化も取扱うことができ、ラッパ管に生じるクリープについての評価もできるようにしてある。これを用いて原型炉の平衡炉心について燃料交換1サイクルにおける炉心変形の推移を解析した。原子炉運転時に炉心内で発生する荷重は、主に炉心外周部の拘束機構から、中性子しゃへい体の上部パッド部、さらにブランケット燃料集合体の中間パッド部を経て、内側の炉心燃料集合体及び制御棒要素に伝わる。炉心で発生する最大荷重は、正六角形状をなす炉心の対角線にはさまれた中間領域にある燃料集合体の中間パッド部に生じるので、従来の2次元解析では最大荷重を評価することはできない。さらに、設計上重要な、クリープによる応力緩和、炉心構成要素下端の間隙、中性子しゃへい体の曲げ剛性、並びにスペーサパッドの肉厚と位置などが最大荷重に及ぼす影響を明らかにしている。

第4章は結言で、以上の結果を要約したものである。

第5章では、今後の研究課題について述べている。

## 論文審査の結果の要旨

ナトリウム冷却高速増殖炉の燃料集合体及びその内部の燃料要素は、温度勾配や中性子束勾配によって湾曲変形するが、変形は燃料集合体及び燃料要素の健全性に影響を及ぼすだけでなく、炉心の反応度、燃料集合体内の温度分布、制御棒の駆動性、燃料交換の操作性などに影響するので、湾曲変形を詳細に解明することが要求されている。本論文は、原型炉において多数の燃料集合体及び燃料要素が正三角形状に配列されることに着目し、それらの湾曲変形を3次元的に解析する統一的手法を開発して、変形挙動を明らかにするとともに、それに及ぼす設計上重要な種々の因子の影響を評価したもので、得られた成果の主なものは次の通りである。

(1) ラッパ管内のワイヤスペーサ型燃料要素群が熱、スエリング及びクリープによって湾曲変形する現象を3次元的に解析するために、燃料要素群の機械的相互作用を互いに $\pi/3$ の角をなす3方向のそれぞれについて解析し、各方向ごとに得られた変位成分を合成して3次元湾曲形状を求める計算コード SHADOW を開発した。

(2) ラッパ管に水平方向に外部から荷重を加えたときに生じる燃料要素群の変位を測定し、SHADOW による計算値と比較して、燃料要素間の間隙が小さく、燃料要素の初期曲りの少ない場合に良い一致を得た。

(3) 燃料要素群は炉心部中央付近から上側で、ラッパ管の中心方向に圧縮され、そのため内側を流れる

冷却材温度が上昇する。冷却材最高温度の上昇幅は、半径方向出力勾配が小さく、冷却材最高温度が内側流路に生じるような燃料集合体の場合ほど大きく、また燃焼が進むほど大きくなる傾向があるが、この増加幅は燃焼にともなう出力低下による温度減少幅にくらべて十分小さいので、炉心熱設計における燃料要素の湾曲による工学的不確定係数として、炉心中央近傍の燃料集合体の燃焼初期の値を採用するのが妥当である。

(4) 燃料集合体群の湾曲変形挙動を3次元的に解析する計算コード BEACON を開発した。このコードは、炉心構成要素に広く適用でき、また要素下端に存在する間隙の考慮、炉心変形の経時変化の取扱い、並びにラッパ管に生じるクリープの評価もできる。

(5) 原子炉運転時に炉心内で発生する荷重は、主に炉心外周部の拘束機構から、中性子しゃへい体の上部パッド部、さらにブランケット燃料集合体の中間パッド部を経て、内側の炉心燃料集合体及び制御棒要素に伝わる。

(6) 炉心で発生する最大荷重は、正六角形状をなす炉心の対角線にはさまれた中間領域にある燃料集合体の中間パッド部に生じるので、従来の2次元解析では評価できない。

(7) 最大荷重に及ぼす、クリープによる応力緩和、炉心構成要素下端の間隙、中性子しゃへい体の曲げ剛性、スペーサパッドの肉厚と位置などの影響を明らかにした。

以上要するにこの論文は、ナトリウム冷却高速増殖炉の燃料要素群ならびに燃料集合体群の湾曲変形を3次元的に解析する手法を開発して、それらの変形挙動を明らかにするとともに、設計上必要な多くの知見を与えたもので、学術上、工業上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として価値あるものと認める。