有限要素法による燃料挙動解析

(日本原子力研究所) 市川達生*

最近、原子炉の工学的安全性の観点から精度の高い燃料挙動解析の必要性が認識されてきた。有限要素法は汎用性を持つため、燃料破損に関係の深い種々の変形解析のほか熱的解析にも用いられ、特にペレット・被覆管の力学的相互作用の解析には威力がある。本稿では、被覆管を有する燃料を対象として、有限要素法による燃料挙動解析について述べる。

I. はじめに

1965年ごろスウェーデン原子力公社の研究者たちが HBWR(ノルウェー、ハルデン)で燃料棒の照射試験を行っていたところ興味ある燃料破損を見付けた^①。破損燃料のジルカロイ被覆管には竹の節状の変形(リッジ)が著しく生じ、その部分より軸方向に割れ(クラック)が発生していた。この燃料棒の出力履歴を調べたところ、比較的低出力で照射したあと出力を急激に上げた時破損が生じたものとわかった。照射後の破壊試験で詳しく調べた結果、ペレット・被覆管の力学的な相互作用(PCMI)によって被覆管に過大な局部的ひずみが生じたために破損したのではないかと推論するに至った**。

その後、商用発電炉からも同様な原因に基づくと思われる破損例の報告があり、PCMIによる燃料破損が関係者の注目を集めることとなった**。

原子炉燃料は稼動中に高温、中性子照射、核分裂生成物の蓄積等により複雑な変化を生ずるので、その挙動解析用として1960年代初めより種々の電算機コード(燃料モデリング)が開発されてきた。例えば CYGR O, BEHAVE, LIFE, SATURN などがよく知られている例である。これらのコードは力学的には単純な平面ひずみモデルに基づいており、平均的な燃料挙動を長期にわたって推定することを得意としているが、局部的なPCMIの解析には適していない。したがって、最初に述べたような PCMI に基づく被覆管の破損解析のためには、新しいモデルが必要となったのである。

有限要素法は本誌の矢川の解説^②にもあるように、複雑な変形、応力条件下で構造力学的、熱的な数値解析が行える方法であるため、これを上記のような燃料問題に適用しようとする試みが1970年ごろから盛んにな

ってきた。

II. 有限要素法による燃料のモデル化

1. 有限要素法

有限要素法の詳細を解説することは誌面の関係で不可能であるので、興味のある向きには専門参考書、例えば Zienkiewicz^③の一読をお薦めする。

一般に構造力学においては、次の3つの条件式が必要とされる。

- (1) 外力と内力との関係を表わす平衡方程式
- (2) ひずみと変位との関係を表わす適合方程式
- (3) 応力とひずみとの関係を表わす構成方程式

連続体の有限要素法では物体を有限の要素に分割し、各要素の節点において上記の関係式より導かれる偏微分方程式を境界条件の下にエネルギー原理を用いて解くわけである。最終的には解くべき式は節点変位と節点力の連立1次方程式(剛性方程式)となり、途中の関係式もマトリックス表示となるので、電算機使用に極めて適している。

燃料挙動解析に有限要素法を適用するためには、他の構造解析と同様に幾何学的なモデル化および材料のモデル化が必要である。

Analysis of Fuel Behavior by Finite Element Method, Michio ICHIKAWA.

(1976年 5月1日 受理)

* 現在、OECD Halden Reactor Project, Halden, Norwayに outward 中。

** その後、核分裂生成物のヨウ素およびその化合物が、この局部的な応力により応力腐食割れを生ぜしめるという説も出てきた。

** 現在では発電炉の出力上昇時には、低出力速度運転を行なってこの現象による破損を避けるよう注意が払われている。

2. 燃料棒の幾何学的モデル化

水炉燃料の形状は基本的にはジルカロイ被覆管に円柱状の UO_2 ペレットを入れ、上部には抑え用のコイルバネを配して He ガスを封入したもので、被覆管の両端には端部プラグが溶接してある。高速増殖炉燃料の場合は材料および寸法が異なるが、構造的には類似のものと考えてよい。燃料ペレットには熱出力上昇とともにクラックが生じ、またペレット端部は拘束が弱いいため全体としてつぶみ形に変形する。この状態は模式的に第1図に示してある⁽⁴⁾。

照射前と高熱出力時の燃料棒の形状⁽⁴⁾

第1図

第2図には、ペレットが出力上昇により径方向に熱膨張した時、ペレットのクラック部に対応する被覆管部分にPCMIにより局所的な応力が発生する模式図とその平面有限要素分割モデルを⁽⁵⁾、また第3図には、3次元モデルの例⁽⁴⁾を示す。主としてリッジ変形解析に用いられる軸対称のモデルは、有限要素がリング状であるという点を除いては3次元モデルと同様である。発電炉用燃料は全長が約4mであるが、有限要素法による解析では計算機容量や計算時間の節約のため例示したように数ペレット長について計算するこ

(a) 燃料と被覆管との間の摩擦力による力学的相互作用

(b) 有限要素メッシュ
第2図 平面モデル例⁽⁵⁾

3次元有限要素メッシュ例⁽⁴⁾

第3図

とが多い。この場合適切な軸方向の力を与えるため、境界条件を工夫することになる。

ペレットのクラックは幾何学的モデルとして考慮することもできるが、2次元の取扱いではクラックを生じた要素は剛性が低下するものとして材料モデルで取り扱うこともできる。

3. 材料モデル(構成方程式)

有限要素法は汎用的な性格を持っているため、他の構造解析のため開発済みまたは開発中のモデルを燃料解析に適用することができる。被覆管には金属構造材料に関する構成方程式、すなわち材料の異方性を含めた非圧縮性物質の降伏、ひずみ硬化、クリープまたは粘弾性の取扱いが応用でき、燃料ペレットは熱応力によるクラックの発生や高温における圧縮性(ホットプレス効果)があるため、コンクリート構造物や土壌・岩石関係で開発した圧縮性物質の構成方程式を適用することができる。

4. PCMI モデル

燃料挙動解析に有限要素法を適用することの大きい利点としては、ペレット・ペレットおよびペレット・被覆管の接触問題を精度よく取り扱えることである。すなわち、局所的な変形に伴う接触状態(非接触、摩擦を伴う滑動、固着)を計算プログラム内の判定条件に従って自動的に変化させてシミュレートできるので、他の方法に比べて格段に計算精度を改善することができる。

この接触問題の扱い方としては、接触条件に従って剛性方程式の一部を修正する方法⁽⁶⁾、あるいは接触表面の相対する節点を仮想的な有限要素(ギャップ要素)で結合する方法⁽⁷⁾などが普通である。接触問題は元来機械要素の設計計算用に開発されたもので、その計算結果の妥当性は、例えば歯車の歯の噛み合い部における光弾性実験結果との比較などで立証されている。

Ⅲ. 有限要素法の燃料挙動解析への応用例

有限要素法の燃料問題への適用はまだ歴史が浅く、かつ開発中のものが多いが、どのような問題に本法が用いられているかを具体的に示すため、代表的例を次に述べる。

1. 2次元モデル

(1) リッジ形成を含む被覆管の径方向の変形

すでに述べたように燃料ペレットは内部の温度分布のため、つぶみ形の変形を生ずる。PCMIにより被覆管にはリッジが発生する。第4図は、リッジ変形例をOECD ハルデン原子炉プロジェクトの報告から示したものである。同プロジェクトは炉内の燃料計装技術

第4図 燃料棒の照射下における直径測定によるリッジ変形例

が著しく優れており、図の結果は照射下において差動トランスを利用した直径測定素子を燃料棒表面で軸方向に走査させて得られたものである。第5図には、前図に示したリッジ変形を重ね合せたものと筆者の計算結果との比較した例⁽⁶⁾を示す。計算は軸対称で行い、PCMIは剛性方程式を修正する方法、クリープとホットプレス効果を含む材料の非線形性および材料モデルによるペレットのクラックを考慮している。

第5図 リッジ変形解析例、測定値と計算値との比較⁽⁶⁾

本例では、ペレットと被覆管の製造時のギャップが小さいので、軸対称モデルで同心円状の配置モデルで計算結果が測定値と比較的よく一致するが、ギャップが大きい燃料の場合は、ペレットが被覆管に接触する

までは被覆管の計算上の変形はごくわずかとなる。しかし実際には、PCMIは低熱出力より生ずることが実験的にわかっている⁽⁷⁾ので、筆者はペレット端部でくさび状の破片が生じてギャップをうずめるというモデル⁽⁸⁾とか、ギャップが存在してもPCMIを生ずるという統計的なモデル⁽⁹⁾を上記の計算に加えて解析を行なっている。リッジ形成の解析にはこのほかいくつかの報告があるが、最近岩野ら⁽¹⁰⁾は炉外における燃料棒の中心加熱実験と軸対称有限要素法計算との精密な比較を行なって良い一致をみている。

(2) ペレットクラックによる被覆管の局部ひずみ
すでに述べたように、径方向に生じたペレットクラックに対応する被覆管の局部的なひずみは燃料破損解析上重要であり、発電炉燃料棒の出力上昇速度の上限を検討する際に有用である。この問題の場合は、3次元に起る現象を平面モデルとして近似することができ、さらに幾何学的モデルでクラックの数や大きさなどに仮定をおくと計算上便利で、既出の第2図はRandら⁽⁶⁾のモデルである。彼らはギャップ要素を用いたPCMIの取扱い、クリープ、ホットプレス効果を含めた材料の非線形性を考慮して、被覆管のひずみ集中を計算している。その結果によれば、クリープを考慮することによりひずみ集中の度合いは緩和されること、このため高出力に達したあとと出力を一定に保持するとひずみ緩和が著しく生ずること、ペレットと被覆管の間の摩擦係数を小さくすると* ひずみ集中が小さくなることなどを定量的に示している。第6図には被覆管内のひずみ分布の計算例を示す。

摩擦係数: 1.0
燃料クラック部に対応する被覆管内のひずみ分布⁽⁵⁾

第6図

(3) 被覆管のコラプス

UO₂ペレットは、製造法が不適当であると照射初期に相当量の体積減少を生ずることがあり、焼きしまり(デンシフィケーション)と呼ばれている。この現象によりペレット柱の軸方向にギャップを生ずることがあり、とくにPWRの場合は1次冷却水の圧力が高いため、被覆管に局部的な扁平化(コラプス)を生じた例が

* グラファイト等による潤滑が実用燃料のため試験された例がある。

報告されている。このコラプスの解析は、いわゆる板殻理論により解析的に行う例が多いが、種々の仮定をおいての計算となる。この問題は有限要素法ではほとんど仮定なしに解くことができるので、現実的な解析が可能となる。例えば Tang ら⁽¹²⁾は SAFE-COLAPS と称する大変形を許容する有限要素コードを開発し、問題を時間非依存の弾塑性バックリングおよび時間依存のクリープコラプスの場合について解いている。そして単純な有限要素を使用しても、被覆管の肉厚を6領域程度に分けることにより短い計算時間で満足する解が得られるとしている。クリープコラプスの場合、有限要素法による解は解析法によるものよりかなり大きい変形を示し、前者の方が信頼性はあると思われるが、実験による裏付けが必要である。

(4) 被覆管内のクラックの伝播(破壊力学)

被覆管には製造時より微細な欠陥が内面に存在している。これらの欠陥に PCMI による応力が作用するとクラックに成長する場合があります。その先端部には応力集中が生ずる。この応力集中の度合いはいわゆる K 値(応力拡大係数)で表わし、クリープ破壊、疲労破壊などの破壊モードに対応してクラックの伝播速度を K 値の関数として示すことができる。 K 値は有限要素法により計算することができる。

Chopra⁽¹³⁾は、ステンレス鋼被覆管に内圧を加えて(PCMIの模擬)、実験より求めたクラックの伝播速度と計算による K 値との関係を得ている。

K 値の計算はペレット、被覆管の変形を考慮した全体的な解析に含めることができるので、例えば、本例とⅢ-1(2)項の計算とを組み合わせ被覆管の破損を破壊力学の立場から予測することも可能と考えられる。

なお Chopra の結果によれば、クラックの伝播速度と K 値との関係は応力腐食雰囲気中で大きく変わるので、応力腐食割れという化学的な問題を破壊力学の取扱いを通じて燃料挙動の数値解析に持ち込むことができよう。

2. 3次元モデル

(1) 変形、応力およびひずみ分布

3次元モデルでは、種々の方向に入るペレットクラックを実際に近い形に模擬できるため、2次元モデルに比べてさらに現実的な変形および応力、ひずみ分布が計算できる。問題は節点数、要素数の増大による記憶容量、計算時間のことであるが、Levy ら⁽⁴⁾は比較的単純な有限要素を用い、対称性を仮定して既出の第3図のモデルで計算している。ペレットに及ぼす軸方向の力および PCMI は仮想的なスプリングで模擬してい

る。ペレットは全体として径方向のクラック位置で分割したくさび型のモデルとなっているが、その円周部の長さ、すなわち径方向クラックの総数は、ペレット要素内での円周方向の引張応力がペレットの破壊応力を越えないことという判定条件で予備計算の結果求めている。その代表的な計算結果を第7図に示す。全体の変形図でもわかるように、くさび型ブロックは中心部が高温のためパイメタルのような変形を生じ、軸応力としてはペレット表面および中心線部の両方に引張応力が働いている。このパイメタル式の変形により、全体としてのつづみ型の変形は低熱出力においては2次元モデルで計算されるものより大きくなり、実験結果に近いものが得られると考えられる。

3次元モデルによる変形(上)と軸方向応力分布(下)⁽⁴⁾

第7図

(2) 冷却水喪失事故時の被覆管変形および温度

水炉では安全性を考慮する場合の最大仮想事故としては、炉圧力容器に付属する最大口径管のギロチン破断であり、冷却水の喪失を仮定する。事故発生とともに原子炉は停止するが、燃料に蓄積された熱および核分裂生成物の崩壊熱のための冷却水がなくなると、ペレットおよび被覆管の温度は上昇を始める。この事故時の温度解析は、原子炉冷却系が全体として複雑なふるまいをすること、被覆管が高温になると燃料内圧によって変形しやすくなりギャップを増大させてギャップコンダクタンスを悪化させること、などのため通常の解析的方法では種々の仮定をおくことになる。

有限要素法はこのような過渡時の計算も可能であり、被覆管の変形計算精度が優れていること、変形と温度計算が同一の有限要素を用いて有機的かつ合理的にできるという特徴がある。

Kendall ら⁽¹⁴⁾は、汎用有限要素プログラムを用いて PWR 事故時の圧力変動を安全審査用データから入力し、ギャップコンダクタンスを改良した Ross-Stoute 式を使用して計算している。計算結果は、炉内圧力が急激に低下する期間、すなわちブローダウン時の燃料温度はギャップの変化にあまり影響を受けないが、その後の温度はブローダウン終了時のギャップの大きさ

に著しく依存するため、本例のように精度のよい変形計算が重要であることを明らかにしている。この応用例は非定常時の燃料挙動への有限要素法の適用という点で興味がある。

IV. おわりに

以上述べたように、有限要素法による燃料挙動解析は、燃料製造者、電力関係者にとってはより安全な燃料の設計や使用法の指針を与え、また発電炉の安全審査関係者には燃料の安全解析の信頼度を高めることに役立つものである。それは、本法が他の燃料モデリングに比べて仮定が少なく理論的に厳密であり、また汎用的であるため幾何学的モデルや材料モデルを選ぶことが容易だからである。しかし、大規模な問題、例えば長尺にわたる計算とか、細かい出力履歴を追う解析などは、電算機容量とか計算時間の関係で現状ではおのずから制限がある。したがって、与えられた問題に対して適切なモデルを工夫し、実験値でモデルの有効範囲を検証した上で必要な情報を得るという態度が肝要である。

他の燃料モデリングにもいえることであるが、被覆管や燃料の物性値が不足していることを、ここで改めて指摘しておきたい。とくに照射を受けた材料の物性値はまだ満足すべきデータがほとんどないといっても過言ではない。有限要素法は精密な計算法であるので、それに釣り合う精度のよいデータの整備が望まれるゆえんである。

さらにモデルの検証のためには、限られた量であっても照射下での信頼度の高い測定値を得ると同時に、統計的に意味のある量の実用的なデータの収集が必要である。発電炉で使用した燃料で照射前の特性がわか

っているものについては、照射後試験データは重要なものとなろう。その意味ではわが国で建設中の大型ホットラボ施設は早期の稼動が望まれる。

最後に有限要素法のプログラムについて触れておきたい。燃料問題を取り扱う以上は材料の非線形性の問題は不可避であり、接触問題や3次元問題まで含めると、プログラムの開発には多大の費用と労力を要する。燃料挙動解析には従来専用プログラムを開発してきた例が多いが、最近是非線形問題に対して優れた商用の汎用プログラムが出て来たので、それらを燃料問題に適用しようとする試みがいくつか行われている。

いずれにしても有限要素法による燃料挙動解析は、燃料・材料関係者と構造解析関係者の密接な協同作業が必要とされる分野であり、今後の発展が期待されるところである。

— 参考文献 —

- (1) DJURLE, S., et al.: A/CONF-49/P/315, (1972).
- (2) 矢川元基; 本誌, 16(12), 614 (1974).
- (3) ZIENKIEWICZ, O.C.: "The Finite Element Method in Engineering Science", (1971), McGraw Hill.
- (4) LEVY, S., et al.: 2nd SMRT, D1/5, (1973).
- (5) RAND, R.A., et al.: 3rd SMRT, C2/3, (1975).
- (6) TSUTA, T., et al.: "Theory and Practice in Finite Element Structural Analysis", (1973), 東大出版会.
- (7) YUZUGULLU, O., et al.: ACI J., 77, 474 (1973).
- (8) ICHIKAWA, M.: Enlarged HPG Meeting, Sanderstølen, (1976).
- (9) idem: HPR-190, (1975).
- (10) 岩野義彦: 本会昭50分科会予稿集, G10, (1975).
- (11) 小泉益通, 他: 本会昭51年会要旨集, G29, (1976).
- (12) TANG, H.T., et al.: Proc. 2nd Nat. Congress Pressure Vessels and Piping, San Francisco, (1975).
- (13) CHOPRA, P.S.: Nucl. Eng. Design, 29, 7 (1974).
- (14) KENDALL, J.M., et al.: 文献(2).

「和文誌」・「欧文誌」各専用

◇合 本 ファ イ ル ◇

簡単な操作で自由に入替えてできるファイルです。布装幀で、金文字の和文、欧文の各誌名が入った美麗・堅牢なもの。

1冊 ¥ 400円(〒 200円)

核融合研究の進歩と動力炉開発への展望

1976年8月中旬発行予定

(B 5判タイプオフセット印刷 約500ページ)

「核融合炉調査」研究専門委員会(主査 吹田徳雄氏, 1971年10月～1975年9月)および「核融合炉」研究専門委員会(主査 山本賢三氏, 1975年10月～)において収集した諸資料を纏めた成果報告書で、9月上旬開催の「核融合炉工学講習会」に間に合わせるため、目下最終的な編集作業中であります。