

HTTR の臨界試験

日本原子力研究所

田中 利幸

tayer@httr.oarai.jaeri.go.jp

1. はじめに

高温工学試験研究炉（HTTR）は、平成 10 年 7 月 1 日から燃料装荷を開始し、11 月 10 日に 19 カラム炉心で初臨界を達成した。引き続き燃料装荷を進め、21、24、27 及び 30 カラム炉心で核特性試験を実施し臨界試験を終了した。初臨界は 16 ± 1 カラム炉心で達成するものと当初予測していたが、予備解析を見直し、再評価を行い、 18 ± 1 カラム炉心で初臨界を達成することが分かった。以下に予備解析の内容及び再評価結果について示す。

2. 予備解析の内容

解析には、モンテカルロ計算コード MVP¹⁾を用いた。18 及び 30 カラム炉心の解析モデルの水平断面を第 1 図及び第 2 図に示す。拡大した図を第 3 図に示す。垂直断面を第 4 図に示す。モンテカルロ計算の入力には、これらの図に示す形状・寸法及び組成・密度を用いる。入力に当たり、以下の点を留意した。

- (1) 黒鉛部は炭素を主成分とするが、微量のほう素 (B)、ガドリニウム (Gd)、カドミウム (Cd) 等の不純物がある。Gd、Cd 等は、ほう素等量に換算して、ほう素の一部として入力した。模擬燃料体は、全炉心を構成した状態では全て炉心から取り出すことから、高純度化しない黒鉛 (IG-11) を使用した。不純物量には、炉内に装荷しなかった模擬燃料体の一部を切り出し、これを分析評価した結果を使用した。分析結果では、ほう素量が 2.1ppm、Gd、Cd 等の不純物のほう素等量が 0.4ppm であったことから、解析には合計値の 2.5ppm を使用した。なお、燃料体、制御棒案内ブロックのように炉心を構成する要素に使用する黒鉛 (IG-110) の不純物量（ほう素等量）は約 0.4ppm と小さい。黒鉛内には微小な空孔があるが、臨界試験は大気圧ヘリウム雰囲気で行うため、そこに空気は残留しないものとした。
- (2) 燃料コンパクト内には約 13,000 個の被覆燃料粒子が不規則に充填されており、これらの形状・寸法を 1つ1つモデル化することは困難である。このため、被覆燃料粒子内の各物質量を保存するようにして燃料コンパクト内で均質化した。被覆燃料粒子を均質化したことによる反応度効果は、別の解析（衝突確率法）で $+1.2\%\Delta k/k$ と評価

し²⁾、得られた結果に加算した。

第5図に予備解析結果を示す。約15.5カラムで臨界となっているが燃料は1カラム単位で装荷することから臨界カラム予測値の最確値は16カラムとなる。モンテカルロ計算では、炉心内での中性子の移動及び核反応を1つ1つ計算で模擬し、その平均値から実効増倍率を評価する。予備解析では、約40万個の中性子について計算し、実効増倍率を評価した。計算結果の統計誤差は、標準偏差の3倍の±0.36%Δk/kとした。また、核データ及び計算コードそのものが有する解析誤差は、高温ガス炉臨界実験装置(VHTRC)で反応度調整材を装荷した炉心の臨界実験結果を解析し、解析値と測定値の差から求め、その値は0.66%Δk/kであった。この誤差は、元来系統的誤差であったが、モンテカルロ計算の計算結果の統計誤差と合計し、予備解析の予測誤差は、約±1%Δk/kとした。この予測誤差により、±1カラムの幅を持つことになり、初臨界カラム数は16±1とした²⁾。

3. 再評価の内容

再評価では、形状・寸法、組成・密度及び解析誤差について見直した。その内容を以下に示す。

① 燃料コンパクト (+0.1%Δk/k)

計算モデルの燃料コンパクトの寸法に合わせて物質量を保存するように、構成物質の重量とモデル上の体積から原子数密度を求めた。

② 黒鉛スリーブ (-0.2%Δk/k)

黒鉛スリーブのスペーサを考慮するなど黒鉛量を保存し、また、燃料コンパクトと黒鉛スリーブの間の隙間を考慮した。

③ 黒鉛ブロック (-0.3%Δk/k)

ダウエルピンとダウエルソケットの隙間、ブロック面取り、燃料体底面の座ぐりの空隙、冷却孔のテーパ等の詳細な形状を考慮し、物質量を保存するようにモデル化した。

④ 反応度調整材の位置 (+0.1%Δk/k)

反応度調整材を、燃料体黒鉛ブロックの周辺部に2箇所装荷している。燃料棒の配列の延長上にあるとしていたが、実際には3mm程度内側にあり、再評価ではこの点をモデル化した。

⑤ 黒鉛ブロックのつかみ孔 (+0.2%Δk/k)

黒鉛ブロックにはつかみ孔がある。制御棒案内ブロック及び模擬燃料体については無視していたが、燃料体と同様、つかみ孔の体積を保存して円柱状にモデル化し

た。

⑥ 制御棒のショックアブソーバ ($-0.1\%\Delta k/k$)

制御棒先端のショックアブソーバをモデルに加えた。

⑦ 被覆燃料粒子の非均質性

被覆燃料粒子が燃料コンパクト内に点在する非均質性効果を $+1.2\%\Delta k/k$ と評価し、解析値に加算補正してきた。評価方法により $0.84\sim1.08\%\Delta k/k$ の範囲で異なると文献に記載されていることから⁽³⁾、補正が大きすぎた可能性がある。このため、再評価では、補正値 $+1.2\%\Delta k/k$ に加えてその不確定さとして ±0.4 を考慮した。

⑧ 黒鉛内部の空気 ($-0.4\%\Delta k/k$)

黒鉛の内部には微少な空孔が数多くあり、体積割合でも20%以上になる。その空孔には空気が残留していると考えているが、予備解析では、原子炉圧力容器内はヘリウム雰囲気であるため、この黒鉛ブロック内の残留空気を無視していた。再評価では空孔内には空気が残留しているとした。

⑨ 模擬燃料体の不純物量 ($-0.3\%\Delta k/k$)

予備解析では、模擬燃料体の不純物量を約2.5ppmとしていた。再度、炉心内に装荷しなかった模擬燃料体の一部を切り出し、分析を行った。再分析では、ほう素を分析し、ほう素のみで2.7ppmあることが分かった。この値に従来のGd、Cd等のほう素等量0.4ppmを加算し、不純物量はほう素等量で3.1ppmとして再評価した。

⑩ 第2リング(R2)制御棒の挿入分 ($-0.2\%\Delta k/k$)

R2制御棒は、他の制御棒に比べ上限位置が低く全引き抜き状態でも上部反射体内に挿入された状態になり、モデル化の範囲に含まれる。この部分の中性子吸収材を予備解析では黒鉛としていたが、再評価では炭化ほう素に修正した。

⑪ 黒鉛ブロック組成の変更 ($-0.2\%\Delta k/k$)

予備解析では固定反射体、模擬燃料体の一部の組成を間違えていたので修正した。

⑫ 中性子発生数

モンテカルロ法では、数多くの中性子が炉心内で核反応することを模擬し実効増倍率を計算するが、予備解析では計算時間の関係から発生させる中性子数を少なくしていた。再評価では中性子数を400万個にしたところ、 $+0.4\%\Delta k/k$ の効果があつた。また統計誤差としては標準偏差の3倍を考慮し $\pm0.24\%\Delta k/k$ とした。

⑬ VHTRCでの実験解析(核データ等の誤差： $-0.66\%\Delta k/k$)

VHTRCでの臨界実験の結果と解析を比較すると計算結果が $1\sim0.2\%\Delta k/k$ 大きく異なる結果が得られている⁽⁴⁾。そこでこれを統計誤差として $\pm0.66\%\Delta k/k$ としていた。

再評価では、この効果を $-0.66\%\Delta k/k$ とし、さらに不確定さとして $\pm 0.4\%\Delta k/k$ を考慮した。

以上、再評価の際に見直した効果の合計は $-1.6 \pm 1\%\Delta k/k$ となった。

4. 再評価結果と考察

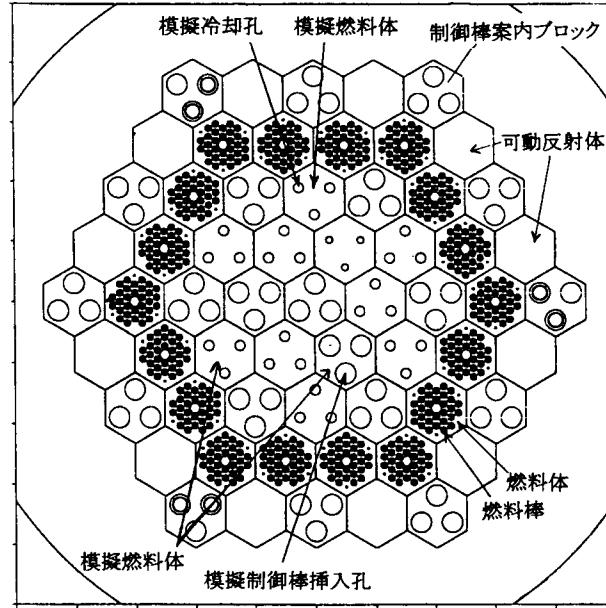
第 5 図に再評価の解析値を示す。この結果、 18 ± 1 カラムで初臨界を達成する結果を得た。

再評価の期待値が測定値の 19 カラムにならない理由として、模擬燃料体の不純物量が過小評価されている可能性がある。第 6 図に示す臨界制御棒位置の測定値と解析値の比較では、模擬燃料体がまだ炉心内に 9 カラム存在する 21 カラム炉心では、再評価した解析値が測定値に比べ 110mm 深く挿入された状態であったが、全ての模擬燃料体を取り除いた 30 カラム炉心では、解析値が 27mm 浅くなかった。このように、炉内の模擬燃料体数が少なくなるに従い、解析値と測定値が一致したことは、模擬燃料体の不純物量の分析結果が、模擬燃料体全体の代表値を示していない可能性がある。仮に不純物量を 5ppm とした場合、解析値が測定値とほぼ一致することを同図に示す。

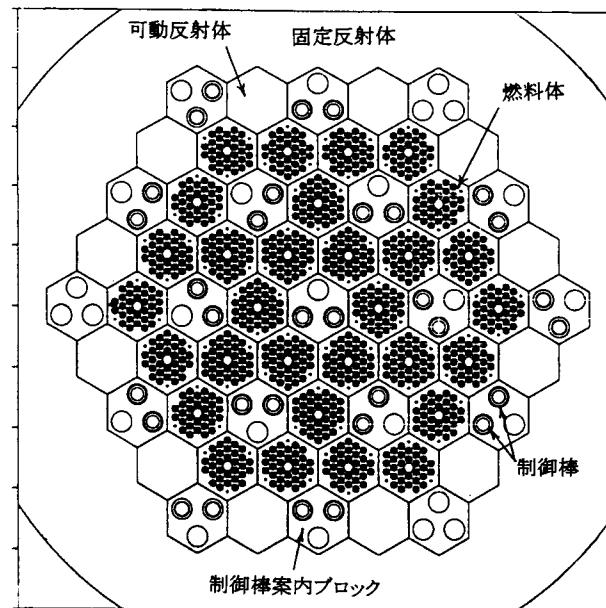
なお、30 カラム炉心の過剰反応度の解析値及び測定値はそれぞれ $12.5\%\Delta k/k$ 及び $11.9\%\Delta k/k$ であり、 $1\%\Delta k/k$ 以内の誤差に収まっている。また、これらの過剰反応度は原子炉出口冷却材温度 950°C 運転で 660 日運転するのに必要な反応度 $11.1\%\Delta k/k$ を上回っており、所定の運転を行うことができる。

引用文献

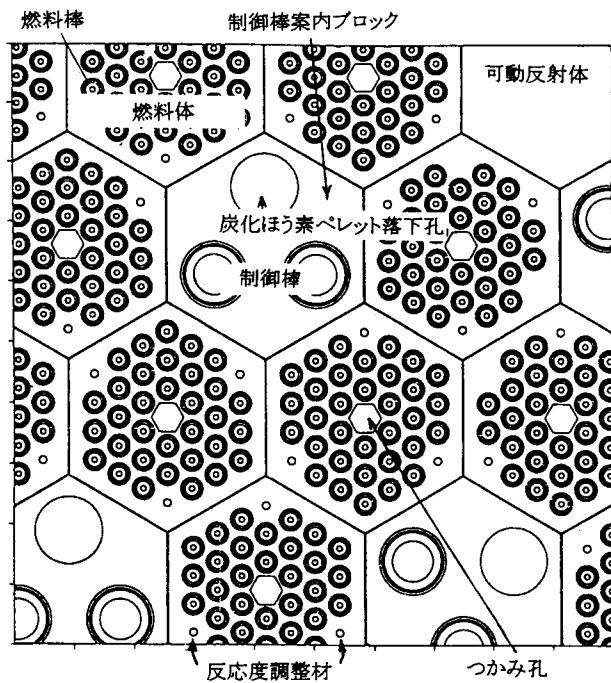
- 1) 森貴正、中川正幸：JAERI-Data/Code 94-007, “MVP/GMVP 連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード”, (1994)
- 2) 野尻直喜、中野正明、安藤弘栄、他：JAERI-Tech 98-032, “高温工学試験研究炉（HTTR）臨界試験の予備解析結果－モンテカルロコード MVP に基づく解析－”, (1998)
- 3) K. TSUCHIHASHI, Y. ISHIGURO, and K. KANEKO, “Double heterogeneity effect on resonance absorption in very high temperature gas-cooled reactor”, J. Nucl. Sci. Technol., 22, 1, 16 (1985)
- 4) 野尻直喜、山下清信、藤本望、他：JAERI-Tech 97-060, “VHTRC 炉物理実験の解析によるモンテカルロコード MVP の精度評価－臨界時の実効増倍率、反応度調整材反応度、ボイド反応度－”, (1997)



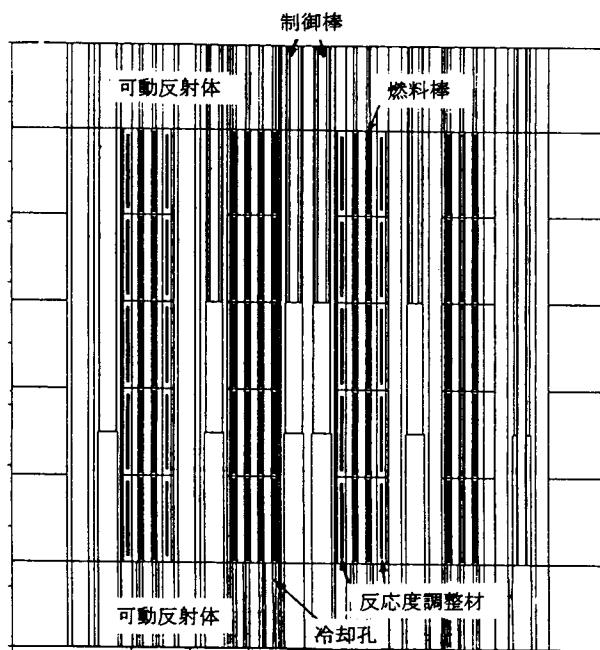
第1図 18カラム炉心の解析モデル水平断面



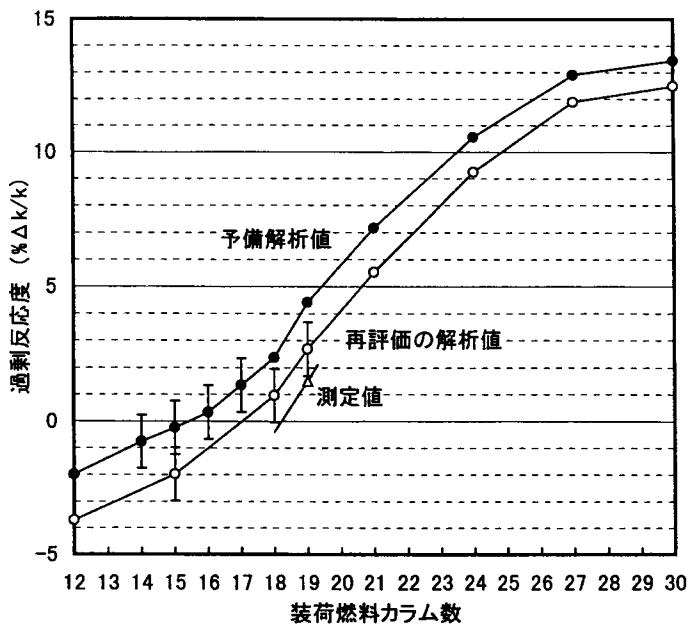
第2図 30カラム炉心の解析モデル水平断面



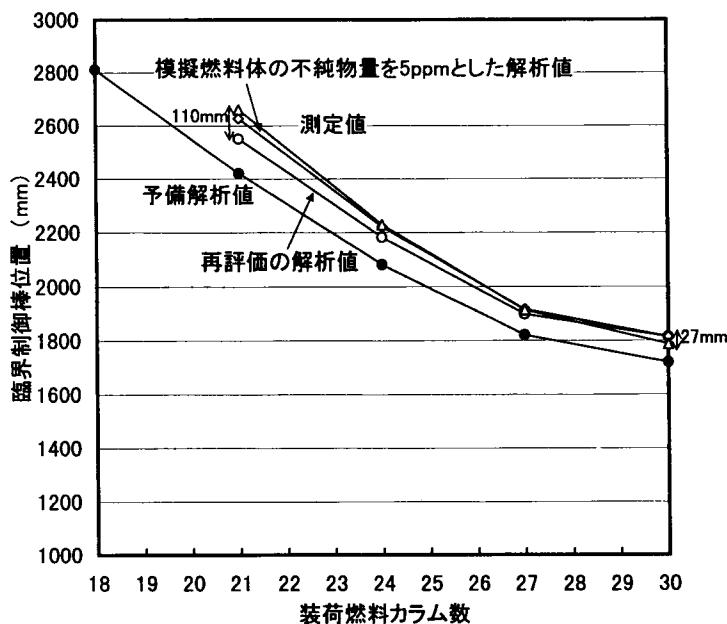
第3図 解析モデル水平断面の拡大図



第4図 解析モデル垂直断面



第5図 過剰反応度の解析値



第6図 臨界制御棒位置の解析値と測定値