



## RETRAN - 3D白書<sup>(註1)</sup>

### 1 . RETRAN-3D とは

RETRAN-3D コードは、旧バージョンである RETRAN-02 コードを包含する、第三世代の過渡事象最適評価熱水力コードである。旧バージョンである RETRAN-02 コードも、広範囲にわたる保護条件及び過渡条件をモデル化して、商用原子力産業界に広く用いられてきた。そして RETRAN-02 コードによる解析結果は、許認可及び安全解析のために、電力会社から原子力規制委員会(NRC)へ提出される様々な安全解析報告書の技術的なベースとなっている。実質的に全ての米国の電力及び約 20 にものぼる国外の諸機関は、RETRAN-02 コードを用いた解析結果等を文献や論文として公開し、NRC へ報告書を提出した。更に RETRAN ユーザー会議やワークショップなどの場を利用して、各機関の解析によって得られた知見・検討結果が他のグループ会員へも反映されている。

一連の RETRAN コード開発は、1975 年の RETRAN-01 コードに始まり、現在の RETRAN-3D コードに至っている。コード開発に当たり、資金は米国電力研究所(EPRI)が提供する一方で、モデルの特性やコード開発の方針は、ユーザのニーズにより決定されている。また EPRI への資金提供者は、慎重なコード開発計画を要求しており、そのためにきちんとしたマニュアルや報告書の作成、広範囲なコード検証及び正確なコード保守手順が守られてきた。これにより、既にリリースされた RETRAN コードについては正式な品質保証(QA)管理下におかれ、適切な修正が実施されている。

### 2 . 何故 RETRAN-3D か

RETRAN-3D コードは、EPRI を介して商用原子力発電所所有者が資金を提供し続けている米国で唯一の過渡事象解析コードである。従って、コード特性及び能力は産業界のニーズに焦点が当てられており、プラント運転、燃料交換及び一般的な安全問題等の広範囲に適用されている。

NRC は、最近 RETRAN-3D の広範囲なレビューを完了し、安全評価報告書(SER)を提出した。そこには、「許認可解析用として受け入れられる」との記述がある<sup>(註2)</sup>。

コードの内容、使用方法等の詳細を記述した膨大なマニュアルが整備され、安定した過渡解析ツールを求めている会社や機関にとって、RETRAN-3D コードは以下のような目に見え

<sup>(註1)</sup> 英国政府の報告書が白い表紙をつけていたことに由来する。政府が、外交・経済など各分野の現状を明らかにし、将来の政策を述べるために発表する報告書を本来は意味する。ここでは、RETRAN コードに関する現状と将来について述べた報告書である。

<sup>(註2)</sup> “acceptable for referencing in licensing applications.”



ない特徴を持っている。

**修正履歴の完全な記録** - RETRAN コードは、23 年間にわたり原子力産業界により用いられ、プラントの運転を支援してきた。幾つかの機関では、燃料交換に際し RETRAN を用いた解析結果が妥当であるという NRC の認可 (Transient Topical Methodology with RETRAN) を受けて、燃料交換に際しての許認可解析に適用している。更に多くの機関では、プラント運転を支援するために、各プラント毎の RETRAN 解析モデルの開発と検証を実施してきた。

**複数プラント設計への対応** - RETRAN-3D コードは、PWR と BWR プラントの区別なく広範囲な過渡事象解析に適用できる。従って、異なる炉型の原子力プラントを所有している機関にとって、プラントタイプ毎に異なるコードパッケージの習熟と解析の必要性が無くなることになる。

**組織化されたコード保守体制** - RETRAN Maintenance Group のメンバーは定期的に会議を開催し、事象の解析、コード開発状況及び最近の産業界における問題点などについて発表と検討を行っている。この会議は、ユーザーに会談の機会を与えるものであり、様々な情報を共有すると共に、アイデアについて同じ観点で検討することができる。得られた情報は、ニュースレター形式で配布され、ウェブサイトからも閲覧可能となっている。コードに関連するトラブルレポート情報も、同じくウェブサイトから閲覧可能であり、この情報は毎月更新されている。ユーザーグループの会員は、モデル化に関する疑問、モデル化上の問題点及びコード上の問題点を解決するために、コード開発者に直接コンタクトすることが可能である。

**RETRAN トレーニング** - RETRAN コード利用者のために、申し込みに応じて毎年トレーニングコースを開催している。このコースはコード開発者により開催されており、毎回 10 程度の異なる機関が出席している。このように、少人数に抑えることで教える者と教えられる者が密に接することができ、十分なトレーニング効果を得ることができる。

**バージョン管理** - RETRAN コードは、慎重かつ厳密に維持管理されている。RETRAN-3D コードは毎年、または隔年おきに定期的リリースされており、解析モデルの強化及びバグの修正などが行われている。全ての変更は、QA 手順に従って厳密に実施されている。各バージョンをリリースするに当たっては、以前のバージョンによる解析結果が再現できることを保証するようにしている。これにより不適切な解析結果が出ないようにしている。

**前バージョンとの両立性** - RETRAN-3D コードは RETRAN-02 コードのモデル化能力を包括している。これは、各ユーザーが RETRAN-02 コードで解析した結果を、RETRAN-3D コードへと引き継ぐことを可能にしたものである。これら解析の積み重ねには、長い年月と大きな経費がかかっており、結果の再現をどのバージョンでも保証することは重要であ



り、必要不可欠である。RETRAN-3D コードでは、RETRAN-02 コードのモデルを選択するオプションを指定することで、RETRAN-02 コードと同じ解析結果を再現することができる。これによりユーザーは RETRAN-3D においてもベースラインを維持すると共に、新バージョンによる改良された物理モデルを用いた解析をも行うことができ、モデルの相違による効果についても検討することができる。

**豊富な適用例** - RETRAN コードは、多くの様々な機関で用いられており、また様々なプラント設計に対して、多数の解析が行われている。それらについては公開文献や論文が多数あり、特に RETRAN ユーザー会では使用している解析モデルの検討やモデル化の方法について、専門的な情報交換が行われている。

### 3 . RETRAN-3D コードのモデル化範囲

RETRAN-3D コードには、RETRAN-02 コードと比べ以下の新しいモデルが導入されている。

- ・ 多次元核動特性モデル
- ・ 非平衡状態場の方程式
- ・ 非圧縮性ガスの流れ
- ・ 改良数値解法モデル

RETRAN-3D コードは広範囲にわたるプラント応答を模擬することができる。そこには、あらゆる熱出力レベルでの、設計基準事故(DBA)から DBA を超える事故(BDBA)など、複雑な原子炉過渡事象が含まれている。これらの解析能力は、既に許認可用解析コードとして認められている RETRAN-02 コードや他のほとんどのコードを上回っている。RETRAN-3D コードは、あらゆる過渡事象を解析することができ、大破断 LOCA を除く FSAR の Chapter 15 の事象(日本における設置許可申請書の添付書類第 10 章の事象)、BWR の制御棒落下事象、PWR の制御棒飛出事象、PWR の主蒸気管破断事象などを解析することが可能である。更には、ほう酸希釈や ATWS 事象、原子炉停止時の過渡事象などの一般的な安全問題についても適用可能である。

RETRAN-3D コードでは、核的な三次元空間動特性解析が可能となり、その機能を利用した MOX 燃料装荷炉心の過渡事象解析、新型燃料とウォーターロッドからなる新型燃料設計炉心における過渡事象の模擬を行うことができる。BWR 炉心のモデル化においては、RETRAN-3D コードは炉心流量分布詳細モデルを備えた FIBWR コードの機能を幾つか取り入れている。空間動特性解析用入力データファイルから、詳細なデータを入力することで、そのモデルを利用することができる。空間動特性の核断面積以外のデータには、燃料集合体配置と形状、制御棒の配置と初期挿入位置、核的ノード分割、各ノード点における圧力損失係数などが含まれる。過渡時の制御棒位置は、RETRAN コードの制御系を利用することで、任意の位置の制御棒を任意の速度で出し入れすることができる。

RETRAN-3D コードは、RETRAN-02 コードでの解析実績を引継ぐことを前提にしている。



これまで RETRAN-02 コードは、以下のような規制上の問題を評価するために適用されている。

- ・ BWR のタービントリップによる出力上昇
- ・ BWR の相間不安定性挙動
- ・ BWR の ATWS 事象と原子炉水位制御
- ・ BWR のシュラウド破損
- ・ PWR の崩壊炉心状態下での自然循環
- ・ PWR の蒸気発生器伝熱管破損(SGTR)
- ・ チェルノブイリ事故に類似した正の減速材反応度係数効果
- ・ PWR の加圧熱衝撃

RETRAN-3D コードがリリースされるまで、最適評価することができなかった反応度過渡事象が幾つかある。特に、炉心径方向非対称の出力変化を引き起こす反応度事象に対して、一点近似動特性モデルによって評価する場合には、非常に保守的な仮定を採用することになっていた。これらの事象には、PWR 制御棒飛び出し事故( REA )、または BWR 制御棒落下事故( CRDA )、及び PWR 主蒸気管破断( MSLB )のような反応度投入事故( RIA )が含まれる。

RETRAN-3D コードは、3次元核動特性モデルを有しているため、詳細な核的炉心分割と個々の燃料集合体に対応した定常の流動状態を設定することが可能となっている。

一点近似核動特性モデルの場合と全く異なって、RETRAN-3D コードでは、MSLB の解析で出力にもたらされる安全裕度が明白に示されている。これらの例は、図1に示す TMI-1 の解析事例、及び図2に示すウォルフクリークの解析事例にはっきりと見られる。また、3次元動特性モデルを用いた PWR REA 解析結果により、安全裕度が増加する例を図3に示す。

RETRAN-3D コードでは、原子炉冷却系内の非凝縮性ガスの挙動、例えば蓄圧器が空になるとか、圧力容器上部での気泡形成やミッドループ事象の模擬が可能である。

RETRAN コードは、BWR の安定性事象の解析をするためにも使われてきた。しかしこれらの解析結果から、今までシステムコードで採用されている典型的な数値解法が、安定性事象の解析には不適切であることが判明した。そのため RETRAN-3D コードには、安定性の事象を適切に解析するために、特性曲線法( MOC ) の数値解法が導入された。

RETRAN-3D コードでは、液相と気相間の熱的非平衡を生じる事象の解析を可能にするために、解析モデルが拡張されている。これによりサブクール沸騰や緊急時炉心冷却水の注入を直接的に模擬することが可能となった。

産業界において RETRAN コードが広く容認され、普及している理由は、確固としたコード保守管理、多くのプラントに適用されてきた豊富な使用実績、及びコードの持つ汎用性によるものである。

RETRAN-3D コードは、リスクを考慮した規制に対する原子力産業の動向において、今後さらに重要な役割を担うことになるであろう。RETRAN-3D コードは、全ての出力レベルに対して、また反応度投入事故のような複雑な原子炉過渡事象を含む DBA から DBA を越える事象



(BDBA)における、あらゆる状態におけるプラント応答を模擬する非常に広範囲の適用能力を持っている。これらの能力は、既存の RETRAN-02 コードや他のほとんどのコードの能力を遙かに凌ぐものである。

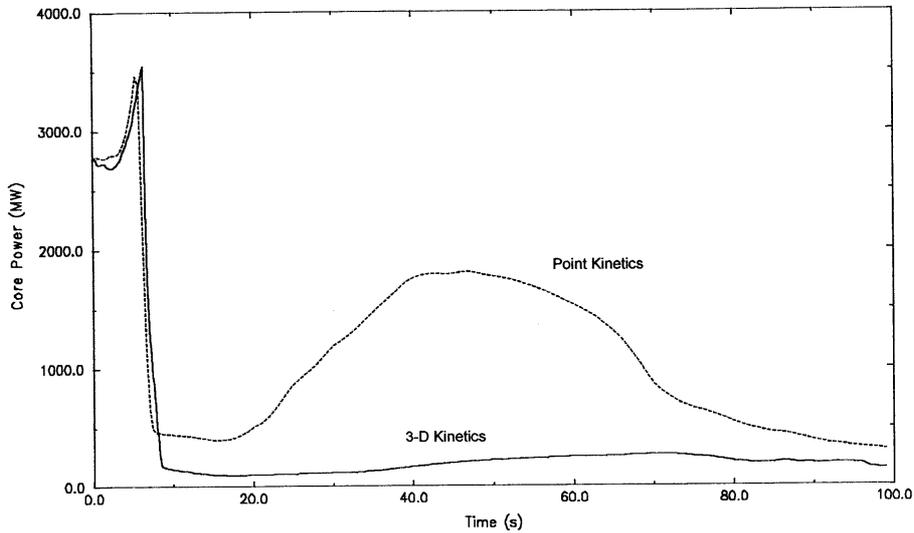


図1 TMI-1の主蒸気管破断過渡時の熱出力応答（1点近似及び3次元解析の結果の比較）

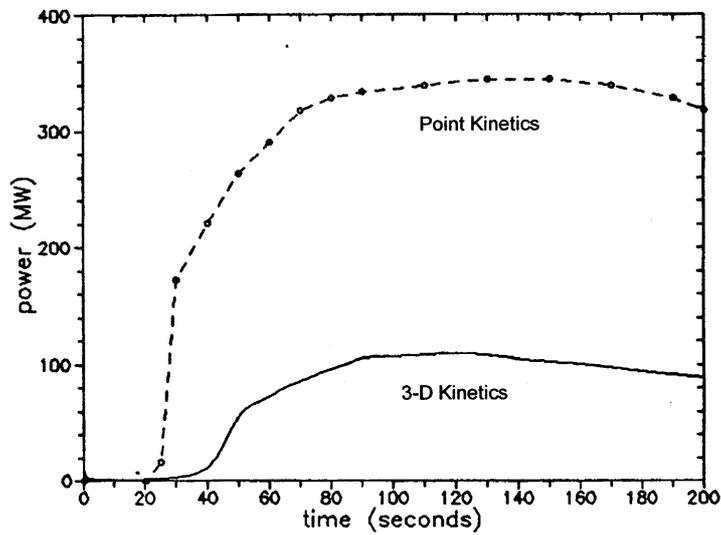


図2 ウォルフクリークの主蒸気管破断過渡時の熱出力応答（1点近似及び3次元解析の結果の比較）

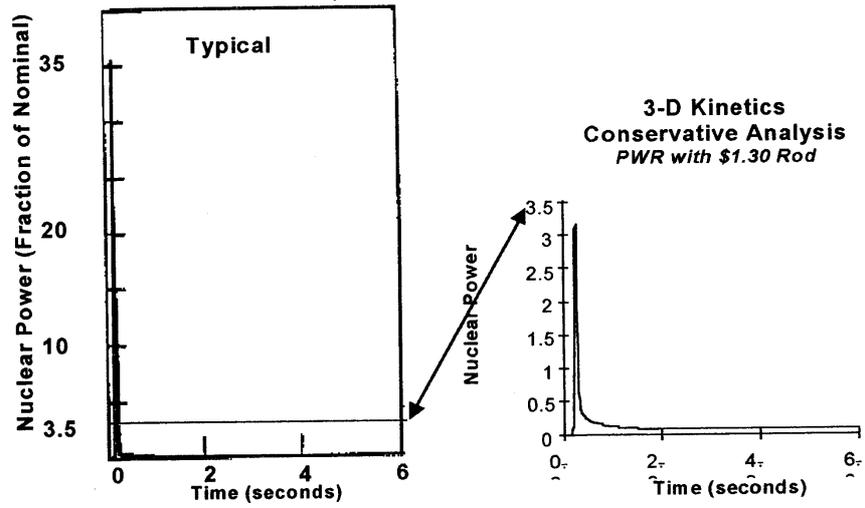


図3 代表的 PWR プラントの制御棒飛出し事故解析における安全裕度の比較