

四国電力における核データ利用 の沿革について

(四国電力) 今村 康博

1. はじめに

四国電力では、当社伊方発電所運開以前の昭和40年代から、炉心設計の道具として、炉心管理コード・システムSENTAS (SEPCO Nuclear and Thermo-Hydraulic Analysis System) の自社開発を開始し、昭和55年より実運用している。

電力会社にとっては、炉心管理が燃料運用の根幹をなす業務であることから、最適な燃料取替計画の策定、燃料使用技術の探求、炉心解析に要するコスト・時間の低減等を目的として、自前の炉心管理コード・システムを開発したものである。炉心解析の基幹事項を完備することを基本方針として、SENTASは評価済核データの処理から、炉心特性解析までを含めた一貫した構成となっている。

図1にシステム・フローの概略を示すが、直接核データを利用している部分は核データ処理部である。核データ処理部は、中性子に対する媒質核の多数群定数(当社では56群)を計算するのに必要な反応断面積その他一切の核データ値を、入射中性子のエネルギーを散乱角及び媒質核の温度の任意離散点において算出し、群定数計算コードの入力データとして編集するまでの部分である。

本稿では当社における核データ利用に関して、その沿革と、核データ処理に関して気づく点について述べさせていただきたいと思います。

2. 核データ利用の沿革

2.1 開発段階

炉心管理コード・システムの開発に着手した当時、6名のスタッフが昭和48年7月から昭和51年3月の間、原研殿に出張・駐在し、コード開発作業を行っている。原研殿に駐在するメリットとしては、諸先生方の御指導を仰ぐことができるということがむろんあったが、当時の社内の計算機が大型技術計算向きでないという事情もあった。

この時期において、公開され、使用可能な評価済核データ・ライブラリーはENDF/B-III (124核種)であったが、Zr等、軽水炉解析に必要な核種が不十分であったこ

とから、UK-70 (Zr)、BNL-325 (構造材の一部)、COOK (FP) 等からデータを補充している。

核反応としては、原子炉内での中性子平衡条件の計算に十分と考えられるだけの全反応を考慮している。

[捕獲断面積]

(n, γ)、(n, p)、(n, d)、(n, t)、(n, He³)、(n, α)、
(n, 2 α)

[非弾性散乱断面積]

(n, n'), (n, n', α)、(n, n', 3 α)、(n, n', p)

[(n, 2n) 断面積]

(n, 2n)、(n, 2n, α)

[弾性散乱断面積]

[核分裂断面積]

[ν 値]

[核分裂スペクトラム]

また、エネルギー・ポイント数は、高速群については核種によって異なり、熱群は全核種共通で、以下の通りであった。

[高速群] 1.855 eV ~ 10.5 MeV

燃料棒核種 44,723点

制御棒核種 22,964点

バーナブル・ボイズン棒核種 36,166点

コア・パッフル 36,166点

[熱群] 10⁻⁴ eV ~ 1.855 eV

全核種 80点

核データ処理部は6個の機能より成り立っており、その概要と主な使用コードは次の通りである。

機能1：核データの評価

・基礎データから算出されるOKの核断面積を用いて中性子束の標準エネルギー・スペクトラムを重みとする無限希釈の共鳴積分を計算する一方、詳細エネルギー点における値を内挿計算し、プロットする。

(主要コード) RIGEL, RESEND-T, SUPER-TOG, SUPER-POINT

機能2：群定数、共鳴積分の無限希釈値算出

・OKの核断面積を中性子束の標準エネルギー・スペクトラムを重み関数として縮約し、

無限希釈値と、高速領域、熱領域各々における共鳴積分を算出するとともに、無限希釈群定数値のファイル (GIMF) を編集する。

(主要コード) RIGEL, RESEND-T, SUPER-TOG, INFINITE-LINK

機能3：高速中性子領域核断面積の算出

・0Kの核断面積を所定温度に処理するとともに、内挿計算によって高速領域のポイント・データを算出する。これをプロットし、 $1/E$ 中性子束を重み関数とする無限希釈群定数値と共鳴積分とを算出し、ポイント・データを確認する。最後に高速中性子領域のポイント・データ・ファイル (FPF) を編集する。

(主要コード) RIGEL, RESEND-T, SUPER-POINT, WABBLE-PL, INFXST, PPF-LINK

機能4：熱中性子領域核断面積の算出

・機能3と同様、所定温度に処理する一方、所定温度の散乱法則 $S(\alpha, \beta)$ のポイント・データを算出する。これらのポイント・データから散乱行列のポイント・データを算出する。1次元のポイント・データと散乱行列を編集し、熱中性子用データ・ファイル (TPF) を作る。

(主要コード) RIGEL, RESEND-T, SUPER-POINT, GASKET, PIXSE, THERMOS-PL, TPF-LINK

機能5：核分裂中性子エネルギー・スペクトラムの算出

・核分裂中性子のエネルギー・スペクトラムのデータを算出し、これから群定数タイプのスペクトラムとポイント・データを内挿計算し、核分裂スペクトラム・ファイル (FSF) に編集する。一方、群タイプのスペクトラムは群化スペクトラム・ファイル (GFSF) に編集する。

(主要コード) RIGEL, RESEND-T, SUPER-FISSION, WABBLE-PL, INFXST, PPF-LINK, INFINITE-LINK

機能6：全エネルギー領域の散乱マトリックスの算出

・高速中性子に対しては0Kの散乱断面積を群化し、熱中性子に対しては $S(\alpha, \beta)$ を群化する。2つの群化データを結合し、入射中性子エネルギー群毎の0次ルジャンドル成分の和が1.0になるように規格化し、群化散乱行列ファイル (GSMF) に編集する。

(主要コード) RIGEL, RESEND-T, SUPER-TOG, GASKET, PIXSE, LI2DX, SMF-LINK

以上の機能により作成されたファイルは群定数作成のための基本入力データとなる。

昭和50年3月にシステムの主要部が完成し、機能を果たしうる段階に達したことから、昭和52年に予定していた伊方1号機の初臨界計算を実施している。この計算における構成物は、燃料 (U-235, U-238, O-16)、構造材、制御棒、バーナブル・ポイズン (ほう珪酸ガラス) であり、全部で21核種であった。本計算における核データ部の計算結果は、断

面積値、共鳴積分値、 σ_a の2200m/s値、散乱断面積についてBNL-325/3と対比した。評価の結果、BNL-325/3の測定精度の範囲内で十分な信頼性をもつことが確認された。

2.2 運用段階

一連のシステム開発を終え、同時期に社内の計算機の処理能力が向上したこともあり、社内で作業を行うこととした。昭和48年に完成していたENDF/B-Mがこの時点で使用できることとなったことから、以降昭和63年まで、定数プロダクションはENDF/B-Mをベースとした。処理システム自体は開発段階と基本的に同一である。

ENDF/B-Mの利用により、核設計に使用する核データが共通に得られることとなり、また核種数も充実された(213核種)。この段階で、温度処理後のエネルギー・ポイント数について、共鳴ピーク点、群定数境界点を考慮し、検討した結果、次のように固定することとした。

高速群：51,882点

熱群： 117点

ENDF/B-Mで伊方1号機について基本定数を作成し、その妥当性を確認するとともに、発電所定検時の燃料取替計算に利用することでシステム全体としての実証を重ね、昭和55年以降、本格的なコード・システムの運用を行ってきた。

2.3 改良段階

SENTAS自体、開発以降10年以上の時を経ているが、近年電力会社は燃料の高燃焼度化、ガドリニア入り燃料の採用(PWR)、さらに将来的にはMOX燃料の導入を計画しており、こうした燃料ハード面の進展に対応することが課題となってきた。さらに炉物理計算手法、計算機技術に関する進展をコード・システムに反映することとして、昭和63年以降SENTASの改良を行った。

核データ処理部については、特に燃料の高燃焼度化によってTRU核種が重要となることから、従来の核データ・ファイルENDF/B-Mの他に、JENDL-2及びENDF/B-Vの一部を取り入れ、以下の核種を追加し処理核種数を増加した。(213核種→220核種)

U-233, Am-242, Cm-242, Np-239 (以上JENDL-2)

Cm-243, Cm-245, Cm-246 (以上ENDF/B-V)

U, Pu等重要核種はENDF/B-Vは国内では非公開であったため、ENDF/B-Mを使用したが、FP、TRU核種で公開されているものはENDF/B-Vに切り替えている。

処理システムとしては、従来のRESEND-Tに代えて、ENDFシリーズの専用処理コードである以下のコードを原研殿より導入した。

- ・LINEAR：共鳴領域以外の断面積を全てlinear-linearで内挿する
- ・RECENT：共鳴領域の断面積を処理する
- ・SIGMA1：媒質核温度によるドップラーの広がりを計算する

これらのコードは温度点毎に連続実行され、FILE3に温度処理後のスムーズ・データが書き込まれる。処理温度点は核種の重要度に応じて以下の通りである。

- ・U, Pu, Xe-135, Sm-149, Gdを含む重要核種：300, 580, 1000, (1500*) K *後で追加
- ・B, Cd等の構造材核種：300, 580 K
- ・FP核種：1000 K

なお、水素(H-1)の熱領域における散乱断面積は分子構造を考慮したモデルにより計算する必要があるため、従来と同様先ずGASKETにより $S(\alpha, \beta)$ を算出し、PIXSEを改良したMODYと称するコードで散乱断面積を計算し、FILE3の弾性及び全断面積を新しく置き換えるとともに、 $S(\alpha, \beta)$ もFILE7に書き込むこととした。

以上の様に改良後の核データ処理部は割合すっきりした構成となっている。なお、群定数計算は上記の温度処理後のENDF形式のファイルを使用するが、旧システムでは微細エネルギー群構造を固定していたのに対して、減速・熱化方程式を解く(修正RABBLE、THERMOSコード)前段階で、確実に共鳴ピーク点を捕らえること等により、群定数精度を確保しつつ、計算対象に応じて微細エネルギー点を自動設定することとしている。群定数の整理方法については旧システムではGAMタイプであったが、本改良でボンダレンコ・タイプの整理方法に代えた。(この整理方法については本誌No. 39(1991年6月)で原研・長谷川先生が紹介されている)

SENTASの下流側を改良中の平成元年、2年に国内外で最新の評価済核データ・ライブラリーである、JENDL-3、ENDF/B-VIが公開されたことから、平成3年においてこれらについても導入・処理を行った。両ファイルは以前に比べ、核種が充実していることもあり、両ライブラリーは独立に処理し、各々について群定数ファイルを作成し、臨界体系等により、検証計算を実施した。この際に温度点として1500 Kを追加するとともに、核種についても追加した。

3. 核データ利用に関する要望等

軽水炉を対象として核データを利用させていただいている立場として、核データ・ライブラリーに関する苦心点、要望等を若干述べさせていただきます。

3.1 完備性

利用者としては最新のデータを使用したいのであるが、核計算で対象とする構成核種が

揃っている必要があり、また汎用であることが望ましい。例えば昔のENDF/B-IIIの様に、計算対象の必要核種が、(なんらかの理由はあると思われるが)不足している場合であるとか、ENDF/B-Vの様に基本的に非公開の場合には、他のライブラリーと混在させることとなり、ライブラリー自体のバランスを壊すことになってないか、気にかかるところである。

また、バージョンによっては反応種別(MT)の内容が不完全なものもあり、処理できない場合もある。

3.2 エネルギー・ポイント数

バージョンが更新される毎に、温度処理後のスムーズ・データ(FILE3)のエネルギー・ポイント数が増える。これは主に、分離共鳴領域が拡大されてきていることによると考えられ、それ自体は結構なことだが、処理時の計算機記憶容量、CPU時間の増大につながり、計算機側の対応が必要になってくる。勿論このことは核種によるが、例えば最もポイント数の多いU-238の全断面積の、当社での処理結果については以下の通りである。

	ENDF/B-M	ENDF/B-M
エネルギー・ポイント数(OK)	157,040点	558,085点
エネルギー・ポイント数(580K)	19,315点	33,216点
エネルギー・ポイント数(1000K)	16,116点	27,968点

3.3 フォーマット変更

ENDFはバージョン毎にファイル・フォーマットが変更される。また、評価モデルの追加等により、個々のファイルについても変更がなされている。フォーマット変更に対しては、関連する処理プログラムを全て対応させる必要があり、標準的処理コード(LINEAR等)についてはバージョンに応じて改訂版が発行されているが、群定数処理部までを含めると関連コード数は相当数にのぼるのでこれらを逐一修正してゆくのはかなりの労力を要するし、バージョン毎にコードを管理する必要がある。

このため当社ではRIGELコードを改良し、一連の核データ処理の先頭で、不要ファイルをレジュームすることと、全てのフォーマットをENDF/B-M形式に変換する機能を持たせている。今のところはこれで特に支障はないが、将来ファイル固有の情報が増えることがあれば、再検討が必要になるろう。

3.4 改訂

核データ・ライブラリーが公開された後で、その改訂版が発行される場合がある。この場合、群定数作成までの処理を再実行する必要がある、膨大な労力と計算時間を要する。また、1つのバージョンで処理結果が異なることにもなり、いつの時点のライブラリーかが特定されなければならない。できうれば公開後の改訂は次のバージョンに盛り込んでいただいた方が分かり易くなると感じております。

4. むすび

四国電力における核データ利用の沿革と、処理に関して気付いた点について若干述べさせて頂きました。核データに関しては炉心設計コードの基本データとの位置づけから、本誌、原子力学会誌等により随時情報を得させて頂いてますが、本稿は当社における利用形態での話であり、一般的でない面もあると思われます。

核データ、処理コード、資料等の入手につきましては、中川庸雄先生はじめ核データセンターの方々及びNEDACの先生方には大変お世話になっております。この場をお借りしてお礼申し上げます。

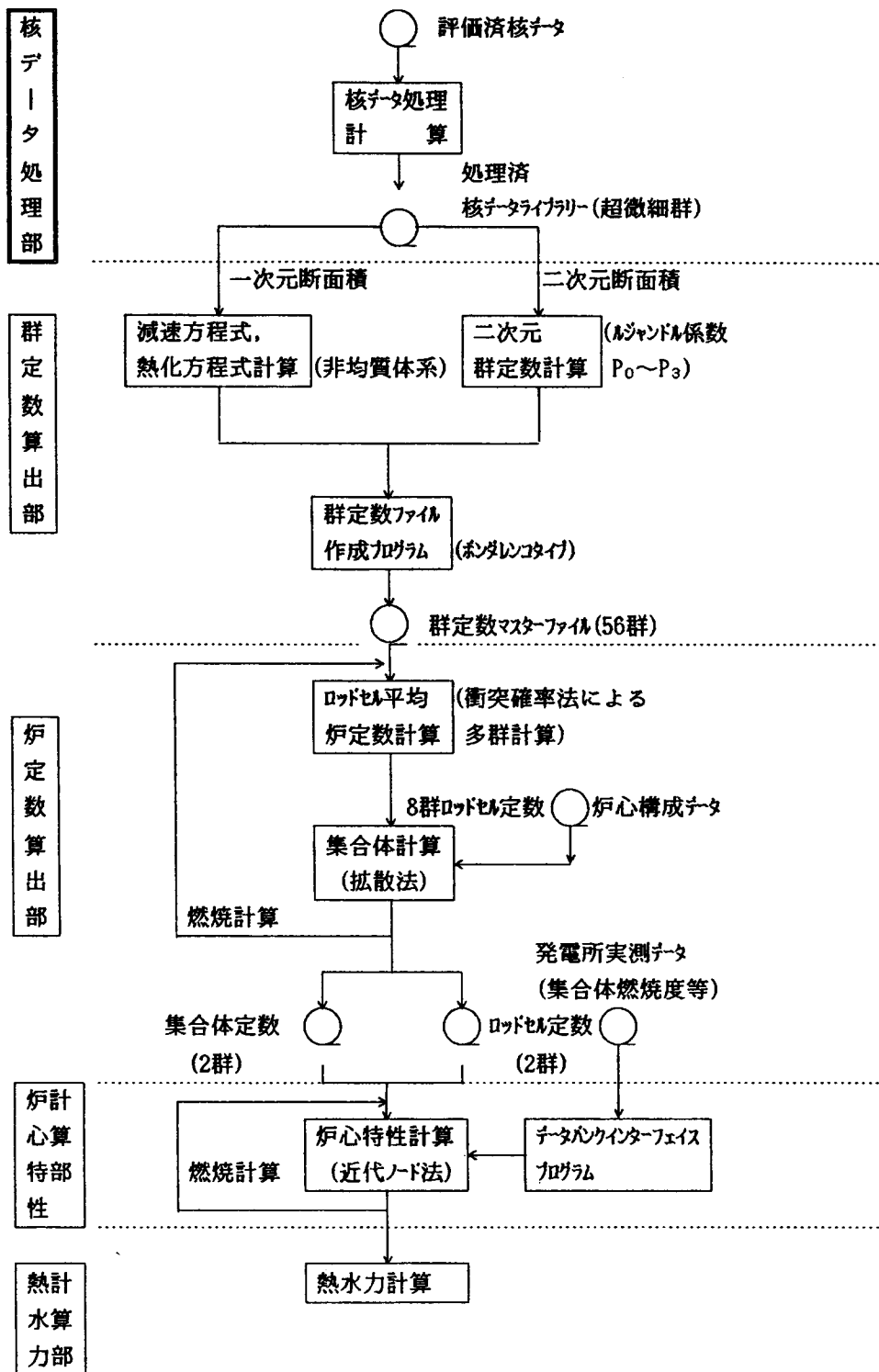


図1 SENTASシステム・フロー