

燃焼計算用一群定数と 使用済燃料核種組成データベースの作成

日本原子力研究所

須山賢也

kenya@cyclone.tokai.jaeri.go.jp

1 始めに

シグマ委員会核種生成量評価 WG においては、現在軽水炉 (PWR と BWR) ならびに FBR 用 ORIGEN2 ライブラリを作成する作業を行っている。また、同様の使用済燃料の核種組成に関するトピックスとして、それらのデータのデータベース化の作業も進捗している。本報告では、それらに関しての概要を述べることとする。

2 燃焼計算用一群定数ライブラリの作成

ORIGEN2 [1, 2] は、使用済燃料の核種組成、放出放射能、熱、そして毒性を算出する燃焼計算コードである。非常に多くのユーザーが世界中にあり、この分野のコードとしてはもっとも成功したものの一つであろう。そのライブラリを作成する作業は、「JENDL-3.2 の普及のために重要である」との考えにより、数年前から始まった。その作成におけるモデル化の検討、実際のライブラリ作成と作業は進展している。

ORIGEN2 のライブラリはテキストデータであるので、ユーザーがライブラリを変更することが非常に容易である。ORIGEN2 の内蔵ライブラリと、今回ライブラリを作成しようとするものを表 2.1 に示す。

Table 2.1: ORIGEN2 で使用するライブラリとライブラリ作成対象

Library	今回の作業で更新
一群断面積	○
燃焼度依存アクチノイド断面積サブルーチン	○
崩壊および核分裂収率	○
光子	×

一群断面積が、いわゆる「ORIGEN2 内蔵ライブラリ」にあたるものである。また、燃焼度依存アクチノイド断面積は、FORTRAN の SUBROUTINE であって、燃焼度毎の一群断面積が、重要なアクチノイドの核反応に関して与えてある。崩壊および核分裂収率データは、崩壊定数と独立核分裂収率を与えるものである。以上 3 ライブラリが JENDL-3.2 からライブラリを作成する作業の対象とされている。尚、光子ライブラリは、ガンマ線スペクトルの計算に利用されるものであるが、今回の作業からは除外されている。また、断面積ライブラリ以外に BLOCK DATA 文で与えてあるパラメータ等もあるが、「あまり ORIGEN2 本体に手を加えたくない」という考えから、作業対象とはしなかった。

2.1 軽水炉用ライブラリの作成

軽水炉用ライブラリの利用目的が、燃料集合体をベースにした核種のインベントリ計算であることから、作成対象は燃料集合体平均の組成が得られることを目標に設定された。そのために、WG の炉心メーカの委員より集合体に関するパラメータを得て、集合体を代表する単一ピンセルモデルによって計算を行うこととした。

ライブラリ作成対象とライブラリ名を以下の表 2.2 に示す。現在、軽水炉用 MOX 燃料を対象とした作業も開始されており、また、WG での議論も踏まえて、ライブラリ想定最高燃焼度等の見直しがされる予定であり、この表が最終的なスペックにはならないことに御注意いただきたい。この表の中で、NLB とは一群断面積ライブラリの識別番号であり、NLIB(12) とは、燃焼度依存アクチノイド断面積を識別するものである。この値は暫定的なものであり、あとに述べる高速炉用ライブラリとあわせて整合性の取れた値にする予定である。

軽水炉用ライブラリの作成は、SRAC [3](SRAC95 [4]) と ORIGEN2 を組み合わせた SWAT [5] を使用して行っている。このコードは、燃焼度毎の組成を用いて与えられた体系における SRAC の入力を作成して、実効断面積の変化を考慮しつつ燃焼計算を行うシステムである。その処理の途中で ORIGEN2 フォーマットの一群断面積ライブラリを作成しており、それをプログラム群によって必要な一群断面積や SUBROUTINE に変換することで目的とするライブラリを得る。その処理の流れを図 2.1 に示した。このシステムは、SWAT のソースプログラムとともに公開される予定であり、ユーザーが新しいライブラリを必要とした時には、独自のライブラリが作成できるようにしてある。

Table 2.2: 軽水炉用ライブラリー一覧

Library	Fuel	Void Ratio(%)	U235 Enrich (%)	Max Burnup (GWd/t)	NLB	NLIB(12)
BS100J32	BWR STEP-1	0	2.7	40	709 710 711	46
BS140J32	BWR STEP-1	40	2.7	40	712 713 714	47
BS170J32	BWR STEP-1	70	2.7	40	715 716 717	48
BS200J32	BWR STEP-2	0	3.7	40	718 719 720	49
BS240J32	BWR STEP-2	40	3.7	40	721 722 732	50
BS270J32	BWR STEP-2	70	3.7	40	724 725 726	51
BS300J32	BWR STEP-3	0	4.7	40	727 728 729	52
BS340J32	BWR STEP-3	40	4.7	40	730 731 732	53
BS370J32	BWR STEP-3	70	4.7	40	733 734 735	54
PWR34J32	PWR 17×17	-	3.4	55	700 701 702	43
PWR41J32	PWR 17×17	-	4.1	55	703 704 705	44
PWR47J32	PWR 17×17	-	4.7	55	706 707 708	45

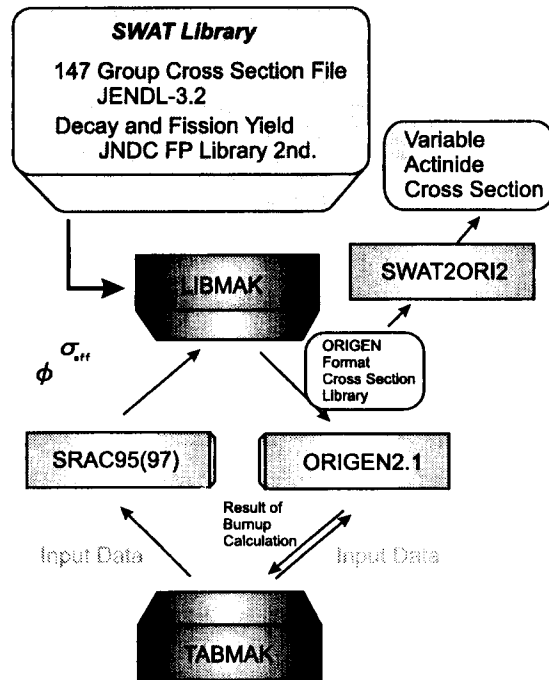


Figure 2.1: SWAT による ORIGEN2.1 用断面積ライブラリーの作成 — LWR

2.2 高速炉用ライブラリ

FBR 用ライブラリも、作成作業が進んでいる。FBR に関しては「常陽」や「もんじゅ」以外には決まったスペックが無いが、現在検討されている中でもっとも一般的であると考えられているスペックをもとに、対象炉心を選択している。それを表 2.3 に示す。

Table 2.3: 高速炉用ライブラリ

Type of Reactor	Type of Fuel	Pu Composition
Small Experimental Reactor(JOYO)	MOX	LWR
Prototype Reactor (MONJU)	MOX	LWR
600 MW Demonstration Reactor	MOX	LWR
600 MW Demonstration Reactor	MOX	FBR
600 MW Demonstration Reactor	METAL	LWR
600 MW Demonstration Reactor	NITRIDE	LWR
1300 MW Commercial Reactor	MOX	LWR
Pu Burner		

その作成の流れを Figure 2.2 に示す。FBR ライブラリの場合、炉心計算をもとにしてライブラリを作成することとなった。すなわち、初めに JENDL-3.2 に内蔵されている 340 核種のデータに関して、pointwise データを作成した。そして、JFS3-J3.2 の作成時に使用したスペクトルと Pu-239 の χ を接続したスペクトルで縮約を行って、73 群断面積セットを作成する。そして、JFS3-J3.2 を使用して、代表的な高速炉を対象にして、70 群の炉心解析を行い、初めに作成した、73 群無限希釈断面積を、上記の炉心計算による中性子スペクトルと Pu-239 の χ を接続したスペクトルで縮約することで、無限希釈一群断面積を作成する。さらに、その無限希釈一群断面積セットについて、一部の核については、共鳴自己遮蔽の効果を取り入れるために、 (n,γ) と $(n,fission)$ 反応について炉心計算の結果求めた(各媒質の密度ならびに温度によって決る)実効一群断面積で置き換えを行う。このようにして作成したライブラリの NLB 番号等は、軽水炉用ライブラリとの整合性をとりつつ決定する予定である。

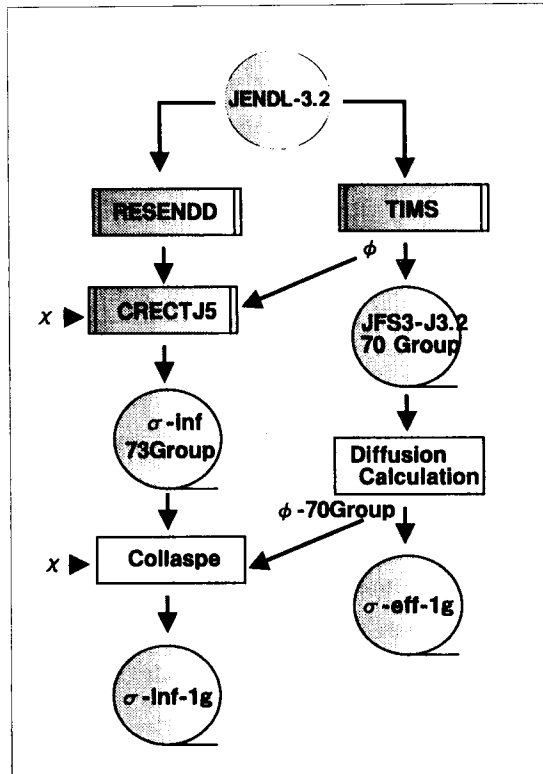


Figure 2.2: ORIGEN2.1 用断面積ライブラリの作成 — FBR

2.3 崩壊ならびに核分裂収率データの作成

崩壊ならびに核分裂収率のデータも更新作業が行われた。JNDC 核分裂ライブラリ第2版[6]においてそれらのデータが与えられているので、そのデータをORIGEN2 ライブラリのフォーマットに変更することとした[7]。JNDC FP ライブラリ第2版の方がORIGEN2 ライブラリより内蔵されている同位体数が多いので、JNDC FP ライブラリ第2版の内容をそのまま変更した場合には、ORIGEN2 自体の配列の変更を必要とする。そこで、JNDC FP ライブラリ第2版のチェーンデータ^{注1}をORIGEN2 ライブラリのチェーンに合わせることにした。よって、結果的にこれまでのライブラリをそのまま置換可能なライブラリとなっている。

JNDC FP ライブラリ第2版における核分裂収率は、高速中性子や熱中性子といっ

^{注1} 各同位体の親子関係を意味する。

た、核分裂を起こす中性子のエネルギーに依存した形で評価してある。そのために、PWR、BWR、FBR といった炉心ごとの代表的な中性子スペクトルから、高速群と熱群での核分裂率をあらかじめ求めておき、その割合を重みとして、JNDC FP ライブラリ第 2 版に内蔵されている核分裂収率を平均化することとした。

このようにして作成されたライブラリは、算出される崩壊熱が JNDC FP ライブラリ第 2 版を使用してもとまる原子力学会推奨値を算出するように作成されており、ユーザーの利便性が大きいものと考えている。

2.4 今後の作業

現在、軽水炉ならびに FBR 用のライブラリは一応作成され、動作も確認されている。よって、今後は、これらのライブラリをまとめてパッケージングして、さらに検証を行う予定である。PWR に関しては、原研において現在照射後試験を行っており、その中でライブラリ作成対象と同一の条件のサンプルのデータが取得されつつある。よって、その解析を行うことで検証を行うことを考えている。

また、軽水炉用の MOX 燃料の使用が計画されている事に伴い、MOX 燃料用ライブラリの作成も、作業スコープの中に入ってきた。これに関しても、 UO_2 燃料と同様の考え方でライブラリを作成することが提案されており、実際そのように作成する事となろう。BWR に関してはスペックが決定され、実作業を行うだけになっている。PWR に関しては、スペックがまだ決まっていないが、早々に決定されるものと思われる。

ここで問題なのは、御本家の ORIGEN2 との整合性である。たしかに JENDL-3.2 からライブラリを作成する作業は進展し、必要ならばユーザーが求めるライブラリを簡単に作成することができるようになった。ライブラリ作成の過程をトレースすることが出来るというのは、問題が起こったときの対処がしやすいという点からしてもうれしいことではある。これらは一見よさそうではあるが、あまり細かくライブラリを作成すると、ORIGEN2 の欠点であり長所である「どんな燃料でもソコソコの計算を行う」という目的から外れてしまいほしくないかという危惧が私のなかにあるのも確かである。つねにベストな値を求めるのも一つの方向性ではあるが、あえてそれを行ってこなかった、ORIGEN2 の良さを損なわないように今後の作業を行う必要があろう。

3 使用済燃料核種組成データベースの作成

ORIGEN2 用のライブラリが完成したところで、その妥当性を検証する必要がある。そのためには、使用済燃料の核種組成測定データの解析がもっとも効率的である。ORIGEN2 ライブラリ自身が特定の照射履歴の燃料の照射後試験を解析するために作成されていないので、直接的な比較はあまり意味が無いのであるが、それでも、ユーザーとしては実験値との比較を行って、コードの計算値の傾向を把握する必要性を感じるものである。

このように、使用済燃料の照射後試験結果は重要ではあるのだが、公開になったデータは少ない^{注2}。また、公開されたデータがあったとしても、その燃料のスペック等を調べるには、関連する多くの資料を拾って集めなければならなかった。そのために、公開された照射後試験の結果や、燃料のデータをまとめたデータベース SFCOMPO [8] が、原研で作成されている^{注3}。

このデータベースに内蔵されているデータを、表 3.1 に示す。

PWR のデータは、1960 年代から 70 年代にかけて精力的に取得されてきたことがわかる。PIE データとしては、各同位体の質量が与えられているものが、計算精度を検証する上で最も有用である。それは、核計算を行う場合に必要な原子個数密度を算出できるかどうかという問題にかかわるからである。その点、同位対比しか与えられていないものは、どこかで絶対値に変換をするだけの情報がなければ、それだけでは原子個数密度に変換できないので、コードの検証の観点からすると、価値は落ちてしまう。もちろん、まったくデータが無いよりは良いことに変わりはないのだが...

SFCOMPO 自身は、多くのデータをまとめるという点において一定の役割を果たしたが、PC で稼動するデータベース上で作成されていたために、公開をする時点で非常に困った問題に出くわすこととなった。つまり、商用の(売り物の)アプリケーションであるデータベース用ソフトウェアを、無償で配布することは出来ないのである。そのため、せっかく作成したデータベースが利用されないという問題があった。もちろん、配布先でそのデータベースソフトを購入すればいいのだが、価格の点(20 万円)でそれはほとんど不可能のように思えた。

^{注2} メーカー等が中心になっておこなった作業もあるであろうが、それらは公開になっていない

^{注3} SFCOMPO はシグマ委員会核種生成量評価 WG と、OECD/NEA/NSC Burnup Credit Criticality Benchmark WG における議論においてその必要とされた経緯がある。

Table 3.1: SFCOMPO にデータが登録されている PIE

REACTOR	COUNTRY	TYPE	MWd/T*	YEAR
Yankee	USA	PWR	13,000-18,000	Before 66
Trino**	ITA	PWR	3,400-26,600	66-71
Obrigheim**	FRG	PWR	15,600-37,500	70-74
Garigliano	ITA	BWR	8,900-14,500	64-67
Gundremmingen**	FRG	BWR	14,400-27,400	69-73
Monticello	USA	BWR	40,300-58,700	74-82
Mihama-3**	JPN	PWR	6,900-31,400	78-82
Genkai-1**	JPN	PWR	36,100	75-79
Tsuruga-1	JPN	BWR	16,300-25,700	72-78
JPDR	JPN	BWR	130- 5,500	63-69
Calvert Cliffs**	USA	PWR	27,400-44,300	77-82
TMI-2	USA	PWR	3,200	79
HB Robinson	USA	PWR	24,500-31,500	Before 75
Cooper	USA	BWR	17,800-33,900	Before 75
Fukushima-2-3* * *	JPN	BWR	17,800-33,900	Before 75

* Burnup is Assembly averaged burnup

** absolute isotopic composition is given

* * * not stored in database(already opened)

そのために、SFCOMPO のデータを、インターネットを經由して検索可能にする作業をおこなった。その作業の結果は、レポートになっているので、詳しくはそちらをご覧ください[9]。このシステムの場合、検索者は World Wide Web のブラウザを用意するだけで、核種組成のデータを検索することが可能になる。ブラウザはご存知の通りに、ほとんど無償で提供され、しかもあらゆるプラットフォームで稼動している実績がある。さらに、画像データも同時に送ることができるので、検索データを描画することもできる。よって、PC 上で作成された SFCOMPO のように、データをプロットするために、他のアプリケーションを起動する必要もない。また、内蔵データのメンテナンスも、手元で出来るので、管理上の問題もクリアされる。

このシステムを使った検索例を、以下の図 3.1 と 3.2 に示す。検索結果は、数値データとして与えられるものと、横軸を燃焼度としてプロットした図の 2 種類である。

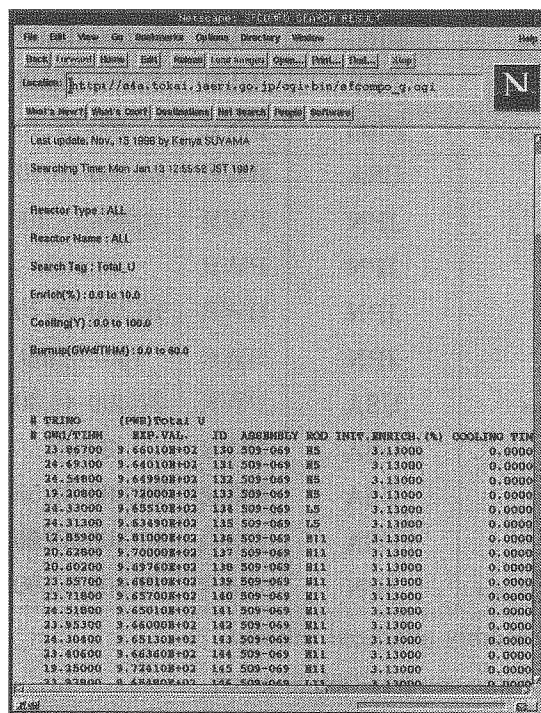


Figure 3.1: SFCOMPO on W3 による 使用済燃料核種組成データの検索例 (数値データの表示)

3.1 問題点

たしかに、PC で構築された SFCOMPO の問題点はクリアされたが、データを公開するにあたって、アクセスコントロールをどうするかという問題が生じた。これまでの原子力コード等は、NEA Data Bank が配布する形で（日本では RIST 経由で）流通していた。ところが、管理者自身がデータの配布までを行うようなこのシステムには、これまでのコード管理の方法と相容れない部分がある。また、原子力関連の情報が規制されることなく、関係のない第三国に流れることへの危惧というのもあった。

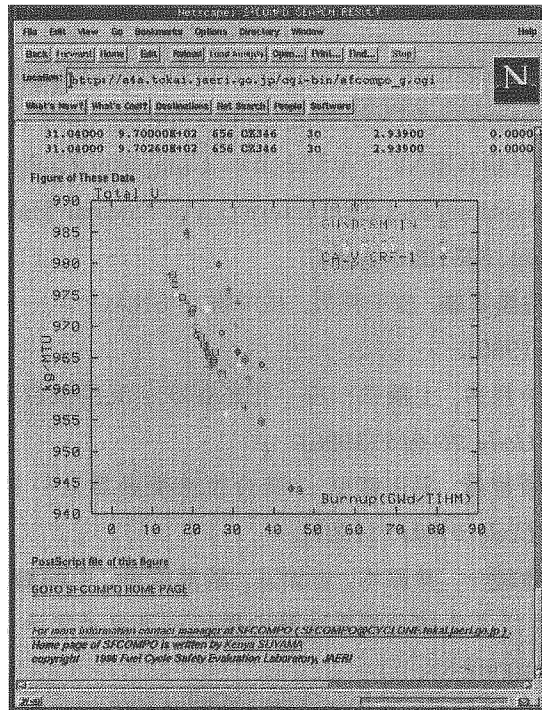


Figure 3.2: SFCOMPO on W3 による 使用済燃料核種組成データの検索例 (データのプロット)

現在は、ユーザー名とアクセスホストに対する認証を用いているが、将来的には、NEA 等が許可したユーザーに対してのみ利用許可を行うといった、統一的な手段が導入されることになろう。また、暗号化等を行った形でデータをやりとりする方法も検討されるかもしれない。ただし、これはブラウザの側でも対応を行う必要があるので、今後の技術的動向も睨みつつの作業となる。

4 終わりに

使用済燃料の同位体組成に関する研究は、最近になってますますその重要性が高くなっているように思われる。そのような中で、ここで紹介したコードやデータが、今後の研究に役立つことを期待している。また今後の活動において、様々な分野の方のご意見をお聞きする機会があると思われる。その時は是非ご協力をお願いいたします。

参考文献

- [1] Croff, A. G.: “ORIGEN2 – A Revised and Updated Version of the Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code”, *ORNL-5621* (1980).
- [2] Croff, A. G.: “ORIGEN2 – A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials”, *Nucl. Technol.*, Vol. 62, pp. 335–352 (1983).
- [3] 土橋敬一郎, 石黒幸雄, 金子邦男, 井戸勝: “SRAC コードシステム 改訂版”, *JAERI-1302* (1986).
- [4] 奥村啓介, 金子邦男, 土橋敬一郎: “SRAC95; 汎用核計算コードシステム”, *JAERI-Data/Code 96-015* (1996).
- [5] 須山賢也, 岩崎智彦, 平川直弘: “統合化燃焼計算コードシステム SWAT”, *JAERI-Data/Code 97-047* (1997).
- [6] 田坂完二, 片倉純一, 井原均, 吉田正, 飯島俊吾, 中嶋龍三, 中川庸雄, 高野秀機: “JNDC による核分裂生成物の核データライブラリー — 第 2 版—”, *JAERI-1320* (1990).
- [7] 片倉純一: “日本原子力学会崩壊熱推奨値を ORIGEN2 コードで再現するための崩壊および核分裂収率データライブラリーの作成”, *日本原子力学会誌*, Vol. 38, No. 7, pp. 609–615 (1996).
- [8] 内藤俣孝, 黒澤正義, 金子俊幸: “軽水炉使用済燃料中の核種組成データ集”, *JAERI-M 93-061* (1993).
- [9] 須山賢也: “WWW を利用した核種組成データベースシステム — SFCOMPO on W3 —”, *JAERI-Data/Code 97-045* (1997).