

話題・解説 (II)

International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project (ICSBEP) Working Group の活動

日本原子力研究所

小室 雄一

e-mail : komuro@jrr3fep2.tokai.jaeri.go.jp

1. 序

臨界安全性評価コードシステムの検証を目的に、これまでに多くの臨界実験データの解析を行ってきた。文献の山から適当なものを探し出すのにひと苦労する。英文の臨界実験レポートを読んで、実験体系の幾何形状を計算コードの入力データの中に再現する。この時、実体系をどの程度詳細に計算モデルの中に入入れるか、判断に迷うことがある。体系内の各領域の原子個数密度がレポートに用意されていなければ、組成データをもとにそれを手計算で求めなければならない。原子個数密度は、10人が計算したら、10通りの結果が出てくるものである。Hansen-Roach 16 群断面積を利用する場合には、共鳴核種の識別子を選択するために、さらにもう1回めんどろな計算が必要になるが、この過程でも困ったことに個人差が現れてしまう。

このような煩わしさを解消するために、過去にいくつかの努力がなされた。その一つとして、ENDF-202¹⁾ の編集がある。この文献は1981年に一部改訂と追加が行なわれた²⁾。また、米国の原子力学会予稿集から臨界安全性に関連する発表だけを抜粋して再編集した、LLNL の B. L. Koponen 氏の成果³⁾ も忘れてはならない。さらに彼は、パソコン通信を利用して、抜粋した予稿集をキーワード検索できるように発展させた Nuclear Criticality Information System の運用を開始した。残念なことに、この事業は米国 DOE の予算がつかなくなって停止してしまった。

それから時を隔てることなく、1992年10月、DOEは臨界実験データの鑑定、評価及び編集を行なうプロジェクトを INEL に委託した。プロジェクトの名称は標記の通りである。現在、本プロジェクトは OECD/NEA の下での国際的な活動との位置付けで、進められている。活動の成果は "International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments" (以下ハンドブック) と題する文献⁴⁾ にまとめられ、その内容は年々増加している。本稿では、活動の概要を紹介するとともに、有名な臨界実験データ、Godiva、²³⁹Pu Jezebel 等を例に挙げ、従来のデータ(寸法、原子個数密

度等)と本プロジェクトの評価済みデータとを比較する。

2. 参加国

米国、英国、日本、露国、仏国、ハンガリーの6ヵ国及び OECD/NEA が参加している。これらの国で行なわれた臨界実験が主な評価対象となる。

3. 評価の手順

以下に示す手順を経て、“evaluation” と呼ばれる一つの評価済みデータが完成する。evaluation のもととなる臨界実験データは、既に公開されているものでなければならない。

1. 臨界実験データの鑑定と評価を行なう。
2. 実験者等から聞き取りをしたり、実験に関わる原文書やその改定版を読んで、データを検証する。
3. データを定められた標準的な形式に再編集する。
4. 評価者の国の標準的な臨界計算コード及び断面積ライブラリーを使って、試計算を行なう。その結果を記載する。
5. 以上の一連の作業結果を、評価済みのベンチマーク臨界実験データとして、決められた形式に従って文書化する。

上記 4. の標準的な臨界計算コードとしては ONEDANT、TWODANT、KENO V.a、MCNP 等が使われている。同じく断面積ライブラリーとしては Hansen-Roach 16 群、SCALE 27 群、ENDF/B-IV、ENDF/B-V 等が使われている。こうして文書化された evaluation は、さらに次の過程を経てハンドブックの中に入入れられる。

1. 評価者と同じ組織(施設)に属する別の者が evaluation を閲読する。(internal peer review)
2. 評価者とは別の組織(施設)に属する者が evaluation を閲読する。(independent external peer review)
3. 作業部会構成員等が閲読する。
4. 作業部会会合において採択の可否を判定する。

4. 分類

完成した evaluation は、実験に用いられた燃料の種別で以下のように分類されて、

所定の位置に収められる。

- 第 I 巻： Plutonium Systems
- 第 II 巻： Highly Enriched Uranium Systems
- 第 III 巻： Intermediate and Mixed Enriched Uranium Systems
- 第 IV 巻： Low Enriched Uranium Systems
- 第 V 巻： Uranium-233 Systems
- 第 VI 巻： Mixed Plutonium-Uranium Systems
- 第 VII 巻： Special Isotope Systems

この作業部会では、ウラン燃料の濃縮度を次のように分類している。

$$LEU \leq 10\text{wt}\%^{235}\text{U}, 10\text{wt}\%^{235}\text{U} < 1EU < 60\text{wt}\%^{235}\text{U}, 60\text{wt}\%^{235}\text{U} \leq HEU$$

ウラン燃料を用いた実験の evaluation は、この濃縮度分類に従って第 II 巻から第 IV 巻のいずれかに収められる。なお各巻は Metal Systems、Compound Systems、Solution Systems、Miscellaneous Systems に細分化されている。各巻は evaluation の数により、1冊ないし2冊の loose-leaf 式の頑丈なファイルにまとめられている。作業部会構成員等には全巻分の立派なファイルが配布されていて、新しく採用された evaluation についてはバインダー用の穴があげられて、定期的に送られてくる。全巻を横に並べると、その厚さは1メートルを超える。

5. 日本の臨界実験データ

1994年3月、プロジェクトリーダーの J. B. Briggs 氏から、原研の燃料サイクル安全工学部長宛の手紙で、本プロジェクト作業部会への参加依頼の打診があった。手紙には、日本への打診は E. D. Clayton 氏の示唆に基づくものと書かれてあった。この年以降、日本も参加している。

日本からは、原研の T C A で行なわれた UO_2 燃料棒-水 正方格子配列体系の臨界実験データが初めに採用された。同じく T C A で行なわれた PuO_2 - UO_2 燃料棒-水 正方格子配列体系の臨界実験データが、まもなく2番目の evaluation として採用される見通しである。

日本と関連のあるデータとして、「円環状の均質プルトニウム-ウラン混合水溶液」及び「円筒状の均質プルトニウム-ウラン混合水溶液」の2件が採用されている。動力炉・核燃料開発事業団と DOE がスポンサーとなって、米国の PNL の Critical Mass

Laboratory で行なわれた実験である。

6. データの保存の形態

このハンドブックはその名が示すように、“本”としてまとめられた。ページをパラパラとめくって全体の内容をななめ読みするには、やはりこの形態が適している。loose-leaf 式なので、新しい evaluation を次々と追加できる。もう一つの形態は、CD-ROM である。こちらは臨界コード用の入力データを簡単にカット&ペーストできて便利である。但し、これを送ってもらう時には、「WWW等で流すことは絶対にいたしません。」としっかり誓約書を書かされた。

7. evaluation の例

有名な臨界実験データ Godiva、 ^{233}U Jezebel、 ^{239}Pu Jezebel 及び ^{240}Pu Jezebel をとりあげる。組成は順に ^{235}U 金属球、 ^{233}U 金属球、 ^{239}Pu 金属球、(^{239}Pu + ^{240}Pu) 金属球である。いずれも裸の体系である。各々の寸法、密度及び原子個数密度を ENDF-202 と evaluation(ICSBEF) とで比較して、表 1 から表 4 に示す。 ^{239}Pu Jezebel では、ENDF-202(1981 年版)になって Ga が組成元素の 1 つとして追加された。evaluation 中の説明によれば、プルトニウム合金中には 1.02wt% の Ga が含まれ(残りはすべて Pu)、この存在を無視して臨界計算を行なうと、 k_{eff} が 0.0035 だけ大きくなるため、無視できないとのこと。Ga の存在を考慮した計算結果を表 5 に示す。 ^{240}Pu Jezebel では、ENDF-202 と evaluation とで球半径の違いが大きい。但し、動力炉・核燃料開発事業団の国際特別研究員の Collins 博士(ANL)によると、ENDF の 6.599cm は誤りで、6.65985cm が正しいとのこと。この値は evaluation の値に近い。

以上の 4 例に限れば、幾何形状や組成が単純なため、ENDF-202 と evaluation とで大きな差異は認められなかった。しかし、入力データ作成がめんどろな複雑な配列体系や、原子個数密度計算がやっかいな硝酸水溶液燃料を含む体系になれば、evaluation の真価が十分に発揮されるだろう。

8. まとめ

このハンドブックは次の点で便利である。

- ・臨界実験データの調査のために、膨大なレポートや予稿集等に目を通す必要がない。
- ・臨界計算コード、核データライブラリー、臨界余裕等の評価に利用できる。
- ・評価済みの計算モデル、原子個数密度が決められた形式で表示されている。
- ・標準的な臨界計算コードのための入力データが用意されているので、利用者は自分で入力データを作成する必要がない。但し、全ケース揃っているとは限らない。

臨界計算コードは、モンテカルロ法を採用することで、実験体系の幾何形状の表現が自由になった。中性子エネルギーの取扱いは、“多群”に代って“連続”が主流になった。ワークステーションの発達と普及のおかげで、非常に長い中性子ヒストリのモンテカルロ計算が可能になった。核データファイル(ライブラリ)の改訂の周期も、短くなってきているように感じる。

日本では、原研のNUCEFのSTACY及びTRACYから、低濃縮硝酸ウラニル水溶液の臨界実験データが得られるようになった。諸外国の臨界実験データについては、本稿で述べたように、ICSBEP 作業部会の評価作業により、高精度でかつ利用しやすい形態にまとめられようとしている。

臨界実験データ、計算コード及び核データの精度、及び計算機の処理能力が各々並行して進化している。

本プロジェクトの作業部会は、これまで米国でのみ開催されていた。1997年6月には、米国から初めて外に出て、日本で開催の予定である。

謝辞

ENDF-202 が1981年に改訂されたことを教えていただいた、(株)総合技術情報機構の金子邦男氏に感謝いたします。²⁴⁰Pu Jezebel の臨界寸法についてご教示して下さいました Collins 博士に感謝いたします。

参考文献

- 1) "ENDF-202 Cross Section Evaluation Working Group Benchmark Specifications," BNL 19302 (ENDF-202) (1974)
- 2) "To : Holders of BNL 19302 (ENDF-202) Cross Section Evaluation Working Group Benchmark Specifications," (1981)
- 3) B. L. Koponen and V. E. Hampel, "Nuclear Criticality Safety Experiments, Calculations, and Analyses - 1958 to 1982, Compilation of Papers from the Transactions of the American Nuclear Society, Volume 1 : Lookup Table, Volume 2 : Summaries, UCRL-53369 (1982)
- 4) NEA Nuclear Science Committee, "International Handbook of Evaluated Criticality Benchmark Experiments," Volume I.a, I.b, I.c, II.a, II.b, II.c, III, IV, IV.b, V, VI, VII.a, NEA/NSC/DOC(95)03/I, II, III, IV, V, VI, VII (1995)

表1 Godiva(^{235}U 金属)の臨界実験データの比較

寸法等	ENDF-202(1974)	ENDF-202(1981)	ICSBEP
密度 [g/cm^3]	—	←	18.74
球半径 [cm]	8.741	←	8.7407
原子個数密度 [a/barn cm]			
^{234}U	4.92×10^{-4}	←	4.9184×10^{-4}
^{235}U	4.500×10^{-2}	←	4.4994×10^{-2}
^{238}U	2.498×10^{-3}	←	2.4984×10^{-3}

表2 ^{233}U Jezebel(^{233}U 金属)の臨界実験データの比較

寸法等	ENDF-202(1974)	ENDF-202(1981)	ICSBEP
密度 [g/cm^3]	—	—	18.424
球半径 [cm]	—	5.983	5.9838
原子個数密度 [a/barn cm]			
^{233}U	—	4.671×10^{-2}	4.6712×10^{-2}
^{234}U	—	5.9×10^{-4}	5.9026×10^{-4}
^{235}U	—	1.0×10^{-5}	1.4281×10^{-5}
^{238}U	—	2.9×10^{-4}	2.8561×10^{-4}

表3 ^{239}Pu Jezebel(^{239}Pu 金属)の臨界実験データの比較

寸法等	ENDF-202(1974)	ENDF-202(1981)	ICSBEP
密度 [g/cm ³]	—	←	15.61
球半径 [cm]	6.385	←	6.3849
原子個数密度 [a/barn cm]			
Ga	—	1.375×10^{-3}	1.3751×10^{-3}
^{239}Pu	3.705×10^{-2}	←	3.7047×10^{-2}
^{240}Pu	1.751×10^{-3}	←	1.7512×10^{-3}
^{241}Pu	1.17×10^{-4}	←	1.1674×10^{-4}

表4 ^{240}Pu Jezebel($^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$ 金属)の臨界実験データの比較

寸法等	ENDF-202(1974)	ENDF-202(1981)	ICSBEP
密度 [g/cm ³]	—	—	15.73
球半径 [cm]	—	6.599	6.6595
原子個数密度 [a/barn cm]			
Ga	—	1.38×10^{-3}	1.3722×10^{-3}
^{239}Pu	—	2.994×10^{-2}	2.9934×10^{-2}
^{240}Pu	—	7.88×10^{-3}	7.8754×10^{-3}
^{241}Pu	—	1.21×10^{-3}	1.2146×10^{-3}
^{242}Pu	—	1.6×10^{-4}	1.5672×10^{-4}

表5 evaluation のデータに基づく ^{239}Pu Jezebel の臨界計算結果

コード、ライブラリー	計算結果($k_{\text{eff}} \pm \sigma$)
KENO V. a & ENDF/B-IV(SCALE 27-group)	0.9974 ± 0.0011 (60 万ヒストリ)
ONEDANT & ENDF/B-IV(SCALE 27-group)	0.9978
MCNP & ENDF/B-V	0.9957 ± 0.0012 (25 万ヒストリ)

