

話題・解説 (Ⅲ)

# ベンチマーク実験 ZEUS

日本原子力研究所

小室 雄一

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

山本 俊弘

e-mail : yamamoto@crssl0.tokai.jaeri.go.jp

## 1. 序

米国では、研究炉等で使用された210トン以上の HEU、及び冷戦終結のによって不要となった核兵器から取り出された50トン以上のプルトニウムの処分に関わる研究が盛んに行われている。後者について DOE は1997年の1月に、MOX 燃料に加工して商業炉で燃やす、MOX 燃料の加工に適さない少なくとも8トンのプルトニウムはガラスかセラミックで固化して地中処分することを決定した。

地中処分の安全性について、多くの研究成果が国際会議で発表されたり、レポートとして公開されている。なかでも、ガラスで固めて地中に処分したプルトニウムやウランの臨界性に関する議論が最も白熱しているように思われる。処分された燃料が、乾燥状態でも水浸けの状態でも、超臨界に達する可能性のあることを指摘する研究成果が発表されたり、それに対する反論があったりする。自己触媒的臨界の生じる道筋を体系的に評価した論文も発表されている。

## 2. 実験の目的

ANSI/ANS-8.1-1983 には次のことが書いてある。

「臨界実験の結果と、臨界安全性を評価しようとする手法でその臨界実験を解析した結果との相関から、その手法が持つ偏りを明らかにしなければならない。」

ところで、地中処分した場合、体系の中性子エネルギースペクトルは「高速」と「熱」

の中間的なもの<sup>1</sup>になるという。したがって、地中処分の臨界安全性を評価するためには、中間エネルギースペクトル体系のベンチマーク臨界実験データを解析し、解析手法の持つ偏りを予め把握する必要がある。ところが、適当なベンチマーク臨界実験データが、現実にはない。なければ実験しようということで LANL で立てられた計画が Zeus 実験である。この実験の解析結果を基に、地中処分における臨界安全余裕を導出しようとするものである。

Zeus とはローマ神話にでてくる山の神の名前。プルトニウムを山の地下深く埋めるところから、山の神の怒りを抑えるためにこの名前が付けられたのだろうか？

### 3. 仮想的中間エネルギースペクトル体系

中間エネルギースペクトル体系の臨界実験の必要性を訴えるために、一連の計算が LANL で行われた。計算の対象は、球状の均質  $^{239}\text{Pu-SiO}_2$  燃料の外側に厚さ 100cm、密度  $2.2 \text{ g/cm}^3$  の  $\text{SiO}_2$  反射体を設けた仮想体系である。燃料中の  $^{239}\text{Pu}$  量は、燃料の直径にかかわらず 100kg 一定とする。したがって  $^{239}\text{Pu}$  密度は、燃料領域の直径が大きくなれば低くなり、直径が小さくなれば高くなる。燃料領域に含まれる  $\text{SiO}_2$  の密度は  $2.2 \text{ g/cm}^3$  一定とする。このような条件の下では、燃料領域の直径を変えれば、 $^{239}\text{Pu}$  と  $\text{SiO}_2$  の比率、つまり体系のスペクトルを自由に調節できる。たとえば Si/Pu=90 では、全核分裂の 77% が 1eV から 1MeV の間で生じる。Si/Pu=90 はガラス固化貯蔵に相当するという。

この仮想体系の臨界計算が幾種類もの断面積セットを使って行われた。使用した原子個数密度を表 1 に、計算結果を表 2 に、表 2 のプロットを図 1 に示す。個数密度は LANL の R. G. Sanchez 氏より教えていただいた。計算は同じく P. J. Jaegers 氏によって行われた。ENDF/B-V を使った計算には標準 MCNP ライブラリーを、ENDF/B-VI を使った計算には Rev. 2 MCNP ライブラリーを使った。27 群ライブラリーは SCALE 4.2 のものである。16 群 Hansen-Roach ライブラリーの Si の散乱データは、Los Alamos 版が  $P_0$  成分、Oak Ridge 版が  $P_1$  成分までである。Jaegers 氏によれば、散乱の次数が低いいため、Hansen-Roach ライブラリーを使った計算結果はあまり自信がないとのこと。

これらから、断面積セットによって  $k_{\text{eff}}$  が大きく異なることが分かる。ある断面積セットによる結果は超臨界である一方で、別の断面積セットは十分な未臨界を示した。

この計算では、連続エネルギーと多群の断面積セットの両方が使われた。後者は核データをエネルギー縮約するのに用いた重み関数によって高速系用、熱系用という具合に

---

<sup>1</sup> 序の後半で、「乾燥状態でも水浸けの状態でも」と述べたことと矛盾している。異常時ではなく正常時にはこのようなエネルギースペクトル体系になるのだろう。

それぞれ適用範囲がある。 $k_{\text{eff}}$  の大きな差異の要因は、適用範囲からはずれたエネルギー体系の計算に多群断面積セットを使ったことにあると考える。もちろんそれを定量的に示すために、敢えて使ったのだろうが...

この体系とは別に、さらにもう一つ類似の計算が、鉄反射体付き均質 U(93)-鉄燃料体系についても行われたが、均質  $^{239}\text{Pu-SiO}_2$  燃料の場合と同じように、使用した断面積セットによって  $k_{\text{eff}}$  が大きく異なったという。

さて、図1の LANL の結果の中で最も信頼できるのは、最新の評価済み核データ ENDF/B-VI に基づく連続エネルギー断面積セットと MCNP の組み合わせによる結果であろう。しかしこの結果すら、ベンチマーク臨界実験データの解析による検証が済んでいなければ、どの程度の偏りを持つのか、全く分からない。参考のために、MCNP 4A と JENDL-3.2 の組み合わせで行った我々の計算の結果を、表2の右端及び図1に書き込んだ。粒子のヒストリは LANL の MCNP 計算と合わせ、1世代の粒子数を5000、計算世代数を120、スキップ世代数を20とした。JENDL-3.2による結果は、ENDF/B-VIよりも、ENDF/B-Vに近い。

#### 4. Zeus 実験

LANL で計画している Zeus 実験の概要は次の通りである。燃料として用意される物質の一つは濃縮度93%のウラン金属で、形状は半径26.67cm、厚さ0.3cmの円板である(燃料プレート)。これと同じ形状寸法で、非核分裂物質でできた円板も用意される(中間プレート)。燃料プレートと中間プレートとを交互に積み重ねて円筒状の炉心を作る。燃料の装荷量を抑えるために、炉心全体を反射体で囲む。実験体系の中性子エネルギースペクトルの変更は、中間プレートの材質と厚さ(枚数)を変えて行う。たとえばグラファイトのような軽い物質を中間プレートとして使えば、プレートの厚さを変えるだけで、高速から中間スペクトルまで自由に調節できる。反射体の材質変更によってもスペクトルを変えられる。燃料として  $^{235}\text{U}$  の他に  $^{233}\text{U}$  及び Pu を使用する。中間プレートとしてグラファイトの他に、鉄及び  $\text{SiO}_2$  を使用する。反射体として銅、鉄、グラファイト及びベリリウムを使用する。実験では臨界量の他に、中性子寿命や中性子エネルギースペクトルも測定する。

#### 5. まとめ

HEU やプルトニウムの地中処分は、現在のところ、我が国が直面する課題ではない。しかしこれに関連する実験の一つとして、Zeus 実験が行われようとしていることは、中間エネルギー領域の核データの検証という観点から非常に興味深い。この実験計画に

関するレポートはもうすぐ出来るとのことである。

## 6. 謝辞

e-mail で最新の情報を送ってくれた LANL の P. J. Jaegers 及び R. G. Sanchez の両氏にお礼申し上げます。ところで Jaegers 氏の e-mail の末尾には、いつも、以下の文が添えられている。

*The faster you move, the slower time passes, the longer you live.*

浅学のため意味が分からず、聞くは一時の恥と思って尋ねたところ、次のような解説をしてくれた。

*The meaning of the proverb "The faster you move . . ." is a little joke on the general theory of relativity and the effects of moving near light speed on time.*

## 7. 余録

Nuclear Technology の 9 月号に、連続エネルギー版 KENO V. a の投稿が掲載される予定とのニュースが、5 月 22 日にテネシー大学の Dodds 先生から届いた。

## 参考文献

本稿の執筆にあたり、以下の文献を参照した。

P. J. Jaegers et al., "Nuclear Data Uncertainties in Intermediate Neutrons Spectrum Problems and the Intermediate Neutron Spectrum Experiment," LA-UR-95-4060 (1995)

P. J. Jaegers et al., "Intermediate Neutrons Spectrum Problems and the Intermediate Neutron Spectrum Experiment," LA-UR-96-1232 (1996)

C. D. Bowman, "Current Status and Recommended Future Studies of Underground Supercriticality of Fissile Material," LA-UR-96-1800 (1996)

W. E. Kastenberg et al., "Considerations of Autocatalytic Criticality of Fissile Materials in

Geologic Repositories,” Nuclear Technology, Vol. 115, p.298-310 (1996)

古川和男、他、「第8回『創発的核エネルギーシステム』国際会議と最近のロシア事情」、  
日本原子力学会誌、No. 11, Vol. 38(1996)

原子力産業新聞、平成9年1月30日

M. E. Dunn et al., “Development of a Continuous-Energy Version of KENO V.a,” Trans. Am.  
Nucl. Soc., Vol. 74, p.230-231 (1996)

表1 均質  $^{239}\text{Pu-SiO}_2$  燃料の寸法及び原子個数密度

燃料半径 [cm]	燃料体積 [cm <sup>3</sup> ]	$^{239}\text{Pu}$ [a/barn·cm]	Si [a/barn·cm]	O [a/barn·cm]	Si/ $^{239}\text{Pu}$ [-]
40	$2.681 \times 10^5$	$9.397 \times 10^{-4}$	$2.205 \times 10^{-2}$	$4.410 \times 10^{-2}$	23.47
45	$3.817 \times 10^5$	$6.600 \times 10^{-4}$	↑	↑	33.41
50	$5.236 \times 10^5$	$4.811 \times 10^{-4}$	↑	↑	45.83
55	$6.969 \times 10^5$	$3.615 \times 10^{-4}$	↑	↑	61.00
60	$9.048 \times 10^5$	$2.784 \times 10^{-4}$	↑	↑	79.19
70	$1.437 \times 10^6$	$1.753 \times 10^{-4}$	↑	↑	125.76
90	$3.054 \times 10^6$	$8.250 \times 10^{-5}$	↑	↑	267.28
100	( $4.189 \times 10^6$ )	( $6.014 \times 10^{-5}$ )	↑	↑	(366.64)

註(1) カッコ内の数値は当方で計算して求めた値。それ以外は LANL の Sanchez 氏による。

註(2)  $\text{SiO}_2$  反射体の Si 及び O の原子個数密度は、上表の Si 及び O の個数密度と同じである。

表2 均質  $^{239}\text{Pu-SiO}_2$  燃料の臨界計算結果の比較

燃料半 径 [cm]	$\text{Si}/^{239}\text{Pu}$ [-]	ONEDANT 16群 HR-LA	ONEDANT 16群 HR-OR	MCNP ENDF/B-VI	MCNP ENDF/B-V	KENO 27群	MCNP JENDL-3.2
40	23.47	1.0422	1.0240	0.98266 $\pm 0.00129$	0.97626 $\pm 0.00114$	1.0103 $\pm 0.0013$	0.97277 $\pm 0.00108$
45	33.41	1.0225	1.0065	0.97002 $\pm 0.00120$	0.96065 $\pm 0.00118$	not done	0.96154 $\pm 0.00105$
50	45.83	1.0132	0.99919	0.96998 $\pm 0.00128$	0.95876 $\pm 0.00108$	0.9895 $\pm 0.0015$	0.96124 $\pm 0.00127$
55	61.00	1.0116	0.99936	0.97667 $\pm 0.00124$	0.9646 $\pm 0.00134$	not done	0.96652 $\pm 0.00113$
60	79.19	1.0152	1.0005	0.98834 $\pm 0.00111$	not done	0.9978 $\pm 0.0013$	0.97895 $\pm 0.00112$
70	125.76	1.0309	1.0232	1.0171 $\pm 0.00119$	0.9993 $\pm 0.0013$	1.0213 $\pm 0.0016$	1.00657 $\pm 0.00122$
90	267.28	1.0765	1.0738	1.0799 $\pm 0.0013$	1.0598 $\pm 0.00113$	not done	1.06833 $\pm 0.00121$
100	366.64	1.1002	1.0995	not done	1.0935 $\pm 0.0008$	1.0985 $\pm 0.0014$	1.0990 $\pm 0.00127$

註(1) 最右端以外の計算結果は、LANL の Jaegers 氏による。

註(2) この他、燃料半径 80[cm]の KENO-27 群計算結果は、 $1.0482 \pm 0.0015$  であった。

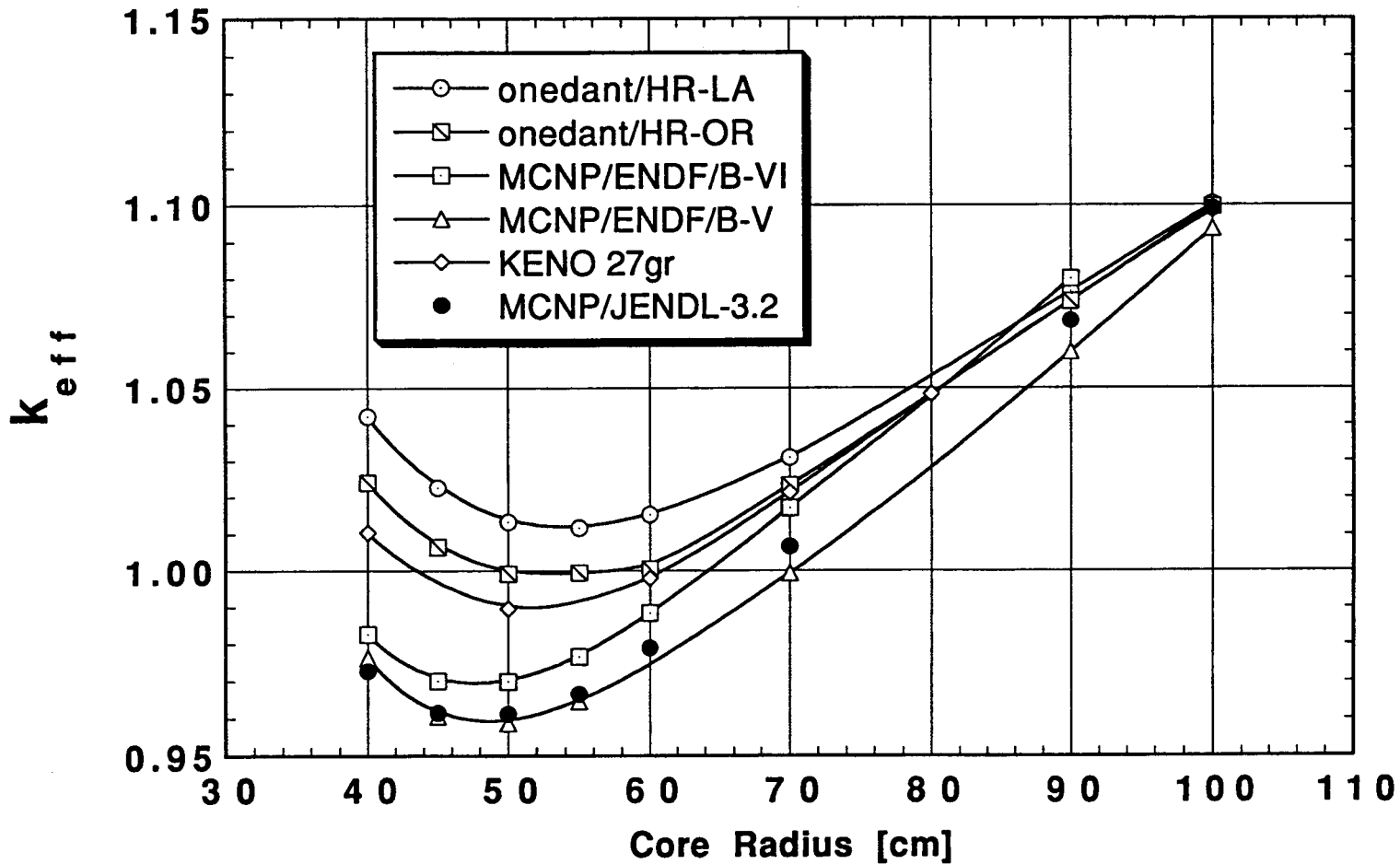


図1 均質  $^{239}\text{Pu-SiO}_2$  燃料の臨界計算結果の比較