

話題(I)

OECD/NEA β_{eff} 国際ベンチマーク実験の現状

日本原子力研究所高速炉物理研究室

桜井 健

e-mail: sakurai@fca001.tokai.jaeri.go.jp

1. はじめに

高速炉臨界集合体による炉物理実験では、臨界性や出力分布と共に、原子炉の安全性評価において重要な炉物理量である、制御棒反応度価値、ナトリウムボイド効果やドップラー効果を測定し、その予測精度を評価している。

実験では、遅発中性子データに基づく反応度スケールを単位として、反応度の測定値を直接得ることが出来る。一方、反応度の計算結果は $\rho = (K_{\text{eff}} - 1)/K_{\text{eff}}$ の関係を用いて $\Delta k/k$ 単位で得る。従って、反応度の計算値を測定値と比較する際に、両者の単位を統一するために、通常、反応度スケールを実験値に乗じている。

この反応度スケールは、遅発中性子収率 (ν_d) データ等より計算で求めており、実効遅発中性子割合 (β_{eff}) はその代表的なものである。従って、反応度に関する実験解析では、 β_{eff} 等の反応度スケールの予測精度は重要である。

β_{eff} の予測精度の大部分 (約 80%) は ν_d の精度で決まる¹⁾。NEA/NSC の評価国際協力ワーキンググループ (WPIEC) SG-6 の評価では、 ν_d の現状の誤差 (1σ) は、主要な燃料核種である U-235 で $\pm 3\%$ 、Pu-239 で $\pm 5\%$ 、U-238 で $\pm 7\%$ である^{1, 2)}。ところで、過去に高速炉臨界実験装置で行われた β_{eff} 実験で主なものは、ドイツ SNEAK 及びアメリカ ZPR の計 10 の高速炉モックアップ体系における実験^{3, 4)}である。ENEA-CEA グループによる最新の解析では、これら炉心間での β_{eff} の実験値対計算値比 (C/E) は 0.93 から 1.08 とばらつきが大きい⁵⁾。これらの評価及び解析結果より、Pu や U-238 を燃料とする高速炉では、 β_{eff} の予測精度は特に悪く、現状で $\pm 5\%$ 程度であるとされている^{1, 6)}。

WPIEC SG-6 では、新たな微分測定及び積分 (β_{eff}) 測定の活動成果を利用して、 ν_d と β_{eff} の精度向上を目指している。目標精度は、U-235、U-238 及び Pu-239 の ν_d に関しては $\pm 2\%$ であり、 β_{eff} に関しては $\pm 2.5\%$ である。

これらの活動のうち、高速炉臨界実験装置における β_{eff} 測定としては、フランス

Cadarache 研究所の MASURCA 炉⁷⁾ 及び原研 FCA における β eff 国際ベンチマーク実験がある。これらのベンチマーク実験では、高速炉スペクトルでの核種別の β eff または ρ_a を分離して評価するために、これまでのモックアップ炉心における β eff 実験と異なり、U-235、U-238、Pu-239 の組成を系統的に変化させた単純形状の炉心で β eff を測定する。 β eff の実験精度は、当然 β eff の予測精度の目標である $\pm 2.5\%$ より良くなければならない。ところが、 β eff の実験値は、核分裂率の絶対測定等、系統誤差の影響を受け易い複数の測定値を組み合わせて得る。従って、このベンチマーク実験では、実験精度も確認するために、互いに独立した手法により測定を行い、 β eff 実験値間の相互比較を行う。

これまでに、MASURCA での β eff 実験が一段落し、FCA での β eff 実験を計画しているところである。ここでは、本ベンチマーク実験の現状を報告する。

2. β eff ベンチマーク実験の現状

(1) MASURCA 実験の経過及び FCA 実験の予定

MASURCA では、当初、'R2'、'ZONA2' 及び 'COMPACT' という名称の 3 つの炉心を構築し、 β eff 実験を行う予定であったが、フランス側の研究計画の変更により、3 番目の COMPACT 炉心は中止となった。実験参加機関(国)は、CEA(フランス)–ENEA(イタリア)–AEA technology(イギリス)のヨーロッパグループと IPPE(ロシア)、LANL(アメリカ)及び原研である。IPPE からの参加者は、ロシアの高速炉臨界実験装置 BFS で実験を行っているメンバーである。MASURCA 実験は以下の経過で実施された。

- 1989 年 10 月 NEA/CRP 会合(シカゴ)において、フランス Cadarache 研究所より MASURCA を用いた第 1 期 β eff ベンチマーク実験の提案
- 1990 年 12 月 第 1 回 MASURCA 実験専門家会合(Cadarache 研究所)
- 1992 年 3 月 第 2 回 MASURCA 実験専門家会合(Cadarache 研究所)
- 1993 年 4 月～9 月 R2 炉心実験
- 1993 年 12 月～1994 年 3 月 ZONA2 炉心実験
- 1994 年 10 月 第 3 回 MASURCA 実験専門家会合(Cadarache 研究所)

FCA では、1995 年 11 月から約 2 年をかけて、'XIX-1'、'XIX-2' 及び 'XIX-3' という名称の 3 炉心を構築し、 β eff 測定を予定している。実験参加を予定している機関(国)は、CEA(フランス)、IPPE(ロシア)、LANL(アメリカ)、名古屋大学及び原研である。こ

の他に、KAERI(韓国)がオブザーバーとして加わる。FCA実験は以下の予定で行う。

- 1994年6月 NEA/NSC 会合(パリ)において原研よりFCAを用いた
第2期 β effベンチマーク実験の提案
- 1995年6月 第1回FCA実験専門家会合(原研東海研究所)
- 1995年11月～1996年4月(予定) XIX-1 炉心実験
- 1996年5月～10月(予定) XIX-2 炉心実験
- 1997年1月～6月(予定) XIX-3 炉心実験

(2) β effベンチマーク実験炉心

核種別の β effを分離して評価するためには、理想的には燃料としてU-235、U-238およびPu-239それぞれのみからなる炉心を3つ構築して β effを測定すれば良い。U-235及びPu-239に関しては、この理想に近い炉心がFCAで実現可能である。しかし、燃料としてU-238(または劣化U)のみを用いた臨界体系は実現不可能である。そこで、U-238の β effは、PuあるいはU-235とU-238との混合炉心の β effを用いて間接的

表1 β effベンチマーク実験炉心の特徴

炉心名	燃料	濃縮(富化)度	減速材	炉心容積
MASURCA				
R2	濃縮 U ロッドレット	30%	ナトリウム	460 リットル
ZONA2	Mox ロッドレット	25%	ナトリウム	520 リットル
COMPACT(a)	Mox ロッドレット 劣化 U ロッドレット	11%	ナトリウム	1200 リットル
FCA (予定)				
XIX-1	濃縮 U プレート	93%	黒鉛	170 リットル
XIX-2	Pu プレート 劣化 U プレート	25%	ステンレス	240 リットル
XIX-3	Pu プレート	100%	ステンレス	230 リットル

(a) COMPACT 炉心実験は中止となった。

に評価を行う。この場合、U-238 の β eff の寄与がなるべく大きくなる炉心が望ましい。
この様な考察から、ベンチマーク炉心の構成は表 1 に示す様になった。

図 .1 には、 β eff に対する核種別の寄与割合の炉心間の比較を示す。

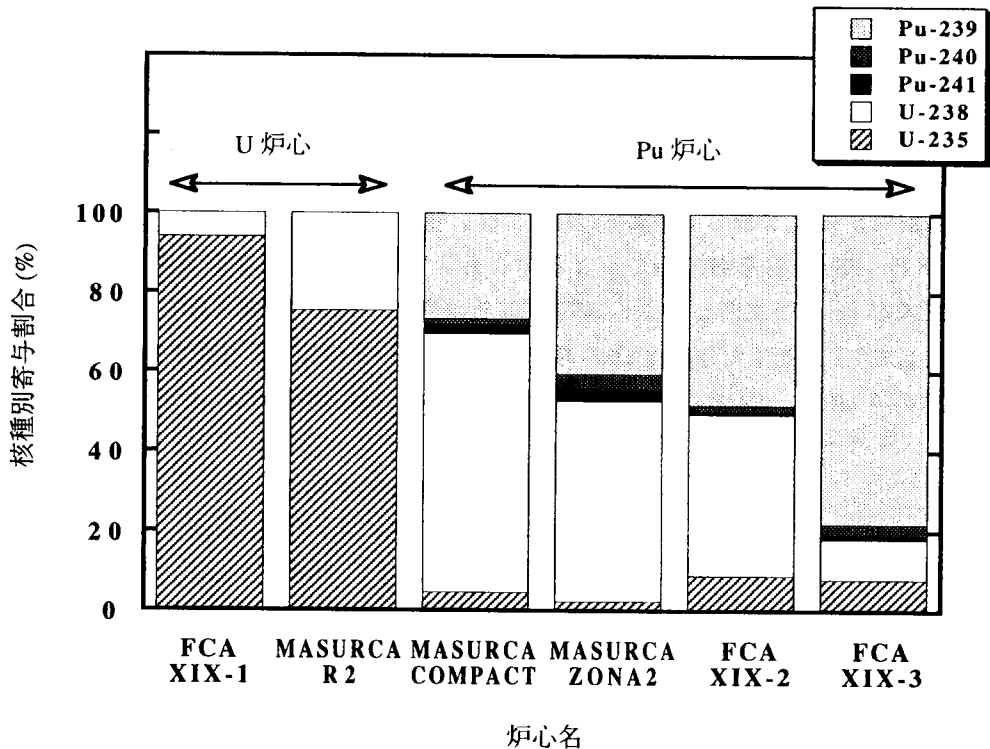


図 1 β eff に対する核種別寄与割合の炉心間の比較

(FCA XIX-3 炉心では、ブランケット中の U-238 の β eff への寄与が約 9% 有る。)

U-235 及び Pu-239 の β eff は、それぞれの寄与が最も大きな FCA XIX-1 及び XIX-3 炉心で評価する。U-238 の β eff は、FCA XIX-2 及び MASURCA の R2 及び ZONA2 炉心で評価する。U-238 の β eff への寄与が最も大きくなる (約 65%)、MASURCA の COMPACT 炉心が中止となったのは残念である。

(3) β eff 実験手法と MASURCA 実験結果

MASURCA 実験及び FCA 実験における、各参加機関の β eff 実験手法を表 2 にまとめ

る。

表 2 β eff 実験手法

MASURCA実験			FCA実験(予定)	
機関	R2炉心	ZONA2炉心	機関	
CEA, ENEA, AEA technology	Cf中性子源法 ³⁾ (a) 周波数解析法 ⁶⁾	Cf中性子源法 周波数解析法	CEA	周波数解析法
原研	Cf中性子源法(b)	Cf中性子源法	原研	Cf中性子源法
IPPE	Rossi- α 法	—————	IPPE	Rossi- α 法
LANL	Nelson-number ⁷⁾	—————	LANL	Nelson-number
			名古屋大学	Bennett法 ⁸⁾

(a) MASURCA の Cf-252 中性子源を用いた測定

(b) 原研 FCA の Cf-252 中性子源を用いた測定

熱中性子炉体系でよく測定される β eff/1eff (1eff: 即発中性子寿命) は、原子炉の周波数折点解析等で直接得ることが可能であるが、 β eff を単独で得るためには、複数の測定量を組み合わせる必要がある。例えば、表 2 の Cf 中性子源法では、Cf-252 中性子源の自発核分裂中性子によるみかけの反応度価値と中性子源強度及び原子炉全体の核分裂率の積分量を組み合わせると β eff を決定する。周波数解析法では、原子炉の周波数解析結果と原子炉全体の核分裂率の積分量を組み合わせると β eff を決定する。

1994 年 10 月の第 3 回 MASURCA 実験専門家会合で、LANL を除く 3 機関より MASURCA での実験結果の報告があった。LANL は、実験データ処理法の改良中のため、この専門家会合では β eff 値を報告していない。実験結果の要点を以下に紹介する。

- β eff の実験誤差 (1 σ) は、Cf 中性子源法で $\pm 2.8\%$ 、周波数解析法及び Rossi- α 法で $\pm 2.6\%$ であった。

- Cf 中性子源法では、MASURCA の Cf-252 中性子源を用いた場合と原研 FCA の Cf-252 中性子源を用いた場合とで、1.5% 以内の良好な一致を得た。
- 3 つの実験手法間で、 β eff 値間に最大で 5.6% に及ぶ相違があった。R2 炉心における周波数解析法と Rossi- α 法間の β eff 値の相違が最も大きかった。

周波数解析法と Rossi- α 法間の β eff 値の相違の原因 (系統誤差) は、現在 CEA と IPPE が共同で検討中である。MASURCA 実験の結果は、LANL の結果を待って、近い将来共著の報告書にまとめる予定である。

3. おわりに

6 ヶ国 7 機関の参加による β eff 国際ベンチマーク実験が MASURCA 及び FCA を用いて進行中である。MASURCA と FCA を組み合わせれば、幅広い燃料組成が模擬可能となる。この特徴を生かして、高速炉の β eff の予測精度改善という課題に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) A.Filip and A.D'Angelo, "On the measurement of the delayed neutron Yields in 'Effectively Infinite Critical Media'," Proc. Topical Meeting on Advances in Reactor Physics, Charlestone (1992).
- 2) J.Blanchot et.al., "Status of Delayed Neutron Data-1990," NEACRP-L-323 (1990)
- 3) E.A.Fischer, "Integral Measurements of the Effective Delayed Neutron Fractions in the Fast Critical Assembly SNEAK", Nucl. Sci. Eng. 62, 105-116 (1977).
- 4) E.F.Bennett and R.W.Schaefer, "Effective Beta Measurements on Uranium and Plutonium Fast Reactor Mockups," NEACRP-A-721 (1985).
- 5) A.D'Angelo and M.Salvatores, "Comparison between Calculated and Experimental Effective Beta Results on ZPPR and SNEAK Fast Facilities," NEACRP-A-840 (1987).
- 6) M. Martini et.al., "NEACRP β eff Benchmark Measurement at MASURCA, Proposal for the Experimental Program," NEACRP-A-1064 (1990).
- 7) G.D.Springgs, "Two Rossi- α Techniques for Measuring the Effective Delayed Neutron Fraction," Nucl. Sci. Eng. 113, 161-172 (1993).
- 8) 山根義宏他, "共分散測定法に基づく実効遅発中性子割合の測定," 日本原子力学会誌 Vol.37, No.6, 513-525 (1995).