

私の EUREKA

日本原子力研究所 岡嶋成晃

okajima@fca001.tokai.jaeri.go.jp

執筆を依頼された時、「実験では『失敗』は山のようにあると思えるが、果たして『EUREKA』があるのだろうか？」と思った。最近、「失敗学」なる言葉を耳にする。「失敗学」とは、失敗したときの教訓を広く共有して予防に役立てようという学問だそうである。まさに、実験はこの「失敗学」を代表するものであり、失敗の経験こそ重要であると思う。そこで、「失敗」を多くの人に知って貰うのも、この企画の意図するところであると勝手に考え、これまで行ってきた高速炉臨界集合体 (FCA) を用いた炉物理実験の中から、実効遅発中性子割合 (β_{eff}) 国際ベンチマーク実験 (1996-98年)⁽¹⁾に先立って実施した β_{eff} 予備測定について紹介することにする。

実効遅発中性子割合 (β_{eff}) は、測定された反応度 (ドル単位) を計算値 ($\Delta K/K$ 単位) と比較する際の単位の変換係数 (反応度スケール) として用いられ、原子炉の動特性において重要な炉物理パラメータである。反応度スケールであることから、たとえ高精度で反応度が測定されても、反応度の予測精度は β_{eff} の精度に依存する。この β_{eff} は、炉心の大きさや炉心組成に依存し、とりわけ高速炉を始めとする Pu と U を燃料とする原子炉の β_{eff} では、世界の主要な評価済み核データファイル間で、 ^{239}Pu 、 ^{238}U の遅発中性子収率に大きな相違があり、 β_{eff} 評価用炉物理実験データの信頼性が乏しいため、 β_{eff} の信頼性向上が求められた。そこで、 β_{eff} の予測精度向上を目的として、1990年フランス Cadarache 研究所の高速炉臨界実験装置 MASURCA を用いた国際ベンチマーク実験が提案され、1993-1994年に行われた。実験は、組成の異なる3つの炉心において、4研究機関がそれぞれの方法で β_{eff} を測定し、測定結果の相互比較から β_{eff} の測定精度を、また実験解析から総合的に β_{eff} の予測精度を評価するものであった。しかし、3番目の炉心での実験が中止となり、当初の目標達成が困難になった。このため、1994年 FCA を用いた新たな国際ベンチマーク実験が立案された。同時に、国内で炉物理実験を実施している機関にベンチマーク実験への参加が呼びかけられ、FCA 以外には名古屋大学の参加があった。名古屋大学は、1990年代前半に KUCA において Bennett 法を用いて β_{eff} 測定を行っていた。しかし、高速炉系での経験がないことから、ベンチマーク実験に先立ち、FCA チームとの共同で測定経験を積むこととした。

Bennett 法とは、炉内においた中性子検出器 i からのパルス信号を一定の時間間隔 (ゲート時間 τ) で測定した中性子計数の時系列データ $C_m^{(i)}(\tau)$ について、検出器 i と j の局所変化 $\delta i_m^{(i)}(\tau)$ の積 (すなわち、局所共分散) について注目したものであり、次式で表される。

$$\sigma_{12}^2(\tau) = \frac{1}{M-2} \sum_{m=2}^{M-1} \{\delta u_m^{(1)}(\tau) \cdot \delta u_m^{(2)}(\tau)\} = \frac{\overline{v_p(v_p-1)}}{F \tau_f^2 \alpha^2 \tau} \left\{ \frac{3}{2} - \frac{10 - 15e^{-\alpha\tau} + 6e^{-2\alpha\tau} - e^{-3\alpha\tau}}{4\alpha\tau} \right\}$$

$$\text{ここで、} \delta u_m^{(i)}(\tau) = \frac{C_m^{(i)}(\tau) - \frac{1}{2} \{C_{m-1}^{(i)}(\tau) + C_{m+1}^{(i)}(\tau)\}}{\langle C^{(i)}(\tau) \rangle}$$

この方法は中性子相関実験の一種であり、Bennett (米国、ANL) は米国の高速炉臨界実験装置 (ZPR) での β eff 測定に適用した⁽²⁾。我国では、唯一名古屋大学が熱中性子炉系である KUCA で適用し、 β eff を測定した⁽³⁾。測定では、炉内に置いた 2 本 (またはそれ以上の本数) の中性子検出器からのパルス信号を時系列データとして記録し、そのデータから局所共分散等を計算すればよい。FCA ではパルス信号を処理する多くの経験を有し、また、測定システムとして特別なシステムの準備も不用である。これらの理由から、Bennett 法による β eff 測定を選定した。上記理論式に基づく計算結果を図 1 に示す。局所共分散 σ とゲート時間 τ の関係を見ると、 τ が数 100 μ sec のとき σ がピークをもつことが分かる。高速炉系であるために τ が小さいことを除けば、この様相は熱中性子炉体系での結果と類似している。このことから、この手法による β eff 測定の見通しは明るいと思われた。

そこで KUCA での実験経験を活かしつつ、高速炉体系での予備実験を開始した。その結果の一例を図 2 に示す⁽⁴⁾。図 1 と比較すると、両者は大きく異なっていることが分かる。いくつか測定条件を変えて測定を実施したが、いずれも同様の結果であった。

これらは、全く予想だにできなかった結果であり、解決の糸口について皆目検討がつかなかった。そこで、測定系等の信号処理システム、共分散等を計算するデータ処理システム等を見直し、何らかのミスがないかどうか調べたが、それらを見出すことはできなかった。

一方、理論式についても再検討を行った。理論式を以下のように変形すると、左辺は一定値に漸近することが分かる。そこで、この新しい考え方に基く理論式を図 1 に併せてしめし、データ整理をした結果を図 3 に示す。図 3 を見ても、一定値に近づくようには見受けられない。さらに、局所平均及び局所共分散を計算する時の対象隣接ゲート数を増やすことも考えた。この対象隣接ゲート数を ∞ にすると、共分散による Feynman- α 法に等しい。しかし、これらの結果も、決して解決の糸口を与えるものではなかった。

$$\sigma_{12}^2(\tau) \cdot \tau = \frac{\overline{v_p(v_p-1)}}{F \tau_f^2 \alpha^2} \left\{ \frac{3}{2} - \frac{10 - 15e^{-\alpha\tau} + 6e^{-2\alpha\tau} - e^{-3\alpha\tau}}{4\alpha\tau} \right\}$$

統計的精度を向上するには、頻度数を増加させること (すなわち、平均計数率と繰り返し数と増加) が考えられる。そこで、中性子検出器 (ここでは、BF3 を使用) の平均計数率をカタログで保証された範囲の上限 (約 10,000cps) 近傍まで増加するように未臨界面を浅くして試みたが、芳しい結果を得ることはできなかった。ここで、平均計数率が約 10,000cps

で、不感時間が数 μsec の場合、数え落としが数% ある状態である。データ処理では共分散を利用するので、数え落としは存在しても構わない。とはいえ、これ以上に計数率を増加させるのは、検出器自体の性能の保証が損なわれる危惧があった。また、繰り返し数についても、100回から150回へと増加させたが、増加したことによる傾向の変化は見られなかった。

一般に、中性子相関実験の Feynman- α 法は、連鎖反応による中性子家系が非常にたくさんある体系（すなわち、浅い未臨界）に適している。一方、Rossi- α 法では、中性子家系の寿命が長く、それぞれの家系が分離できるような体系（Feynman- α 法よりは、比較的深い未臨界）での測定に適している。また、Feynman- α 法およびその類似の手法では、 τ をあまり小さくすることは回路的にも問題があり、計数回路の不感時間の影響が大きく、補正が重要かつ困難になる。このため、中性子寿命の長い熱中性子系の方が適しており、高速系ではよほど注意しないと難しいと言われている⁽⁵⁾。一方、Rossi- α 法は種々の点で Feynman- α 法と逆の傾向にあり、両実験は互いに相補的であると言われている⁽⁵⁾。Bennett 法は Feynman- α 法に類似していることから、Feynman- α 法と同様の条件であると思われる。これらの理由から、Bennett 法による β_{eff} 測定は、当初の見通しとは逆に、かなり困難である印象を持ち始めた。

予備測定を開始して半年以上が過ぎ、 β_{eff} 国際ベンチマーク実験が始まり出した。ベンチマーク実験では、1測定機関/測定手法当たり2週間のマシンタイムが割り振られた。いよいよ第1炉心（U炉心）での Bennett 法による測定の順番がやって来た。測定を始めて1週間経っても予備測定と同様の結果を得るのみで、試行錯誤を繰り返していた。2週目に入ったある日、「計数率 10,000cps」について、もう一度考え直した。「計数率 10,000cps」とは、約 100 μsec 毎に中性子を検出していることになる。一方、測定では σ vs. τ の詳細なプロファイルを得るために $\tau=10 \mu sec$ を採用していた。すなわち、10ゲート毎に、1カウントあることになる。これでは局所平均や局所共分散を計算するのが困難であることが判る。そこで、検出器が壊れてもよいことを覚悟の上で平均計数率を 20,000cps まで大きくすることにした。さらに、 $\tau=50 \mu sec$ とした。これは、1ゲート当たり1カウント存在することに相当する。この条件で 16,000ゲートの時系列データを測定し、この測定を 1,000回繰り返した（全ゲート数は、16百万ゲートになる）。こうして得られた結果を、図4に示す。図4より、明らかなように、ようやく測定できたことが分かる。この結果を得たのは、第2週目の最終日の深夜であったので、余計に印象深かった。その後の第2炉心（U/Pu炉心）及び第3炉心（Pu炉心）での測定は、ここで蓄積された経験と得られた知見をもとにして、首尾良く測定を行うことができた。これら3つの炉心での理論式、測定手法及び結果は、参考文献（6）に詳述されている。

ここでは、試行錯誤の連続の末、最後には「計数管を壊してもいい」というある種の開き直り（これが、「ブレイクスルー」？）によって、どうにか旨く測定ができた。ここで示

したように、たった一つの測定データであっても、それはいろいろな失敗や試行錯誤の上に成立しているものであることは言うまでもない。さらに、この失敗や愚行とも思える試行錯誤を実施するには、実験装置を運転するスタッフ達の温かい理解と協力がなければ実現しないことも申し添えておきたい。

高速炉系での動特性実験では、中性子寿命が熱中性子炉体系に比べて非常に短いために、周波数解析では 1kHz 以上の領域が、時間領域では μsec 領域が重要である。この領域での時間変化を捕らえようとすると、高い計数率が必要である。しかし、高い計数率では不感時間が問題になったり、応答の早い信号処理回路が求められる。また、中性子スペクトルが硬いために、検出器の計数率は熱中性子炉系に比べると小さくなる。これらの点から、高速炉系での測定は非常に難しいことが分かる。反面、このような厳しい条件下で測定が成功裏に終わると喜びも一塩であることから、チャレンジ精神を大いにかきたてられる。

最後に、本原稿執筆の構想を練り始めた頃、「失敗学の設立」について紹介された新聞記事(朝日、2002. 8. 15 付)の最後に記されていた言葉を、紹介して筆を置くことにする。「何も行動せず前例をまねるだけなら失敗はしない。だが、そうした態度が今の閉塞状況を招いている。未知に挑戦して犯した失敗を袋だたきにしないで、積極的に活用すべきである」

参考文献

- (1) S. Okajima, J. L. Rowlands ed. ; Progress in Nucl. Energy, 35 No.2 (1999).
- (2) E.F. Bennett; ANL-81-72 (1981).
- (3) 山根義宏 他; 日本原子力学会誌、37 巻、6 号、513 (1995) .
- (4) 竹本吉成; 実習報告書 (1995) (私信) .
- (5) 古橋晃、飯島勉; 実験物理学講座 29 原子炉 (伏見康治編) 9. 中性子関連の測定、共立出版 (1972) .
- (6) Y. Yamane, et al. ; Progress in Nucl. Energy, 35, 183-194 (1999).

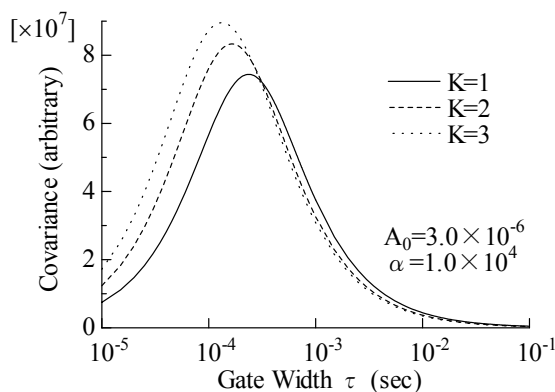


Fig. 5 Theoretical covariance curves (Bennett 法の理論式による曲線)

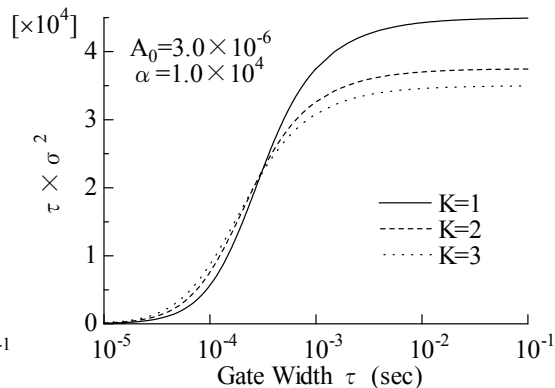


Fig. 6 Theoretical curves of σ vs. $\tau \times \sigma^{-4}$ for $K=1, 2$ and 3

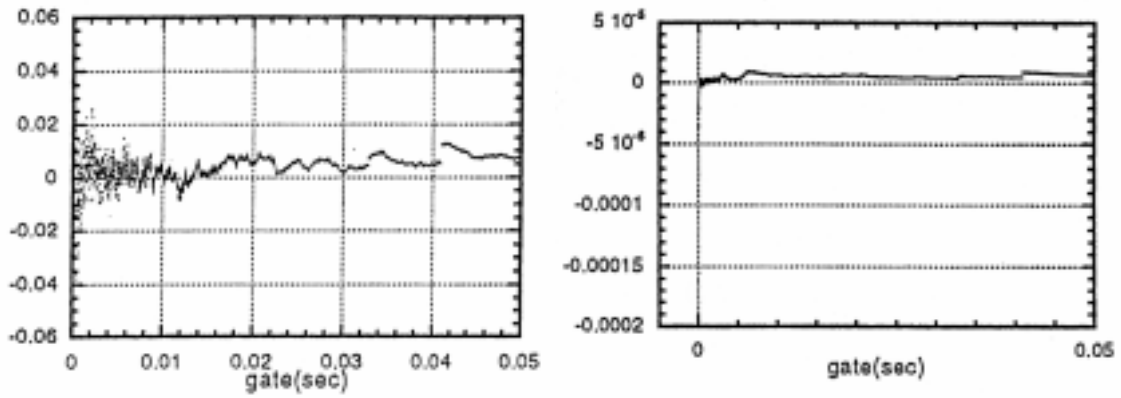


図2 予備測定の結果 (σ vs. τ) ⁽⁴⁾ (左図: 0.6W、右図: 5W)

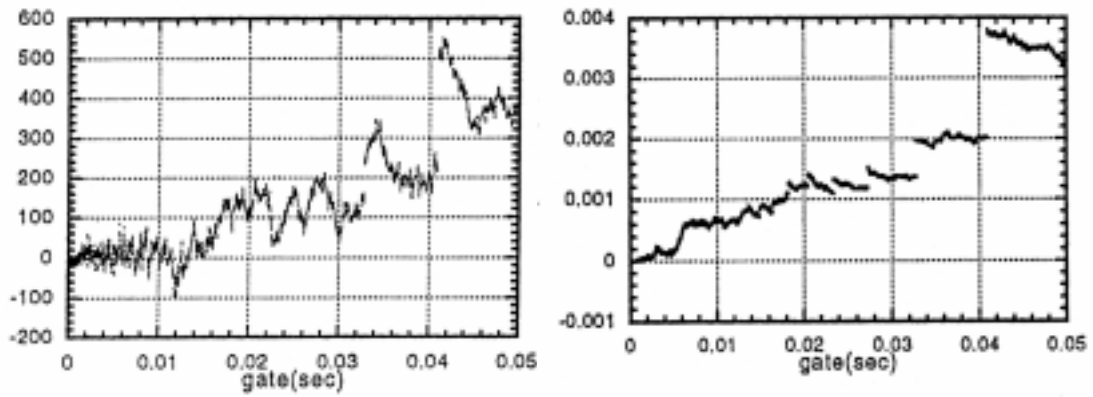


図3 予備測定の結果 ($\sigma \cdot \tau$ vs. τ) ⁽⁴⁾ (左図: 0.6W、右図: 5W)

