

MVP による放射化計算ベンチマーク問題の解析¹

2025/4/2 改訂 千葉 豪

1次元球体系のベンチマーク問題を対象に、連続エネルギーモンテカルロコード MVP-3 を用いて固有値計算を行った。基準ケース（ヒストリー数 1,000,000、バッチ数 200,000、捨てバッチ数 1,000）に加えて、総ヒストリー数を同一としてヒストリー数とバッチ数を変えた以下の 3 ケース（捨てバッチ数はいずれも 100）について計算を行った。

- ケース 1：40,000 ヒストリー、100,000 バッチ。
- ケース 2：100,000 ヒストリー、40,000 バッチ。
- ケース 3：1,000,000 ヒストリー、4,000 バッチ。

各領域平均の中性子束についてのケース 1 から 3 の計算結果を、線形スケールで Fig. 1 と 2 に、対数スケールで Fig. 3 と 4 に、それぞれ示す。

¹ /Document/Study/Activation..JSPS/MVP.cal

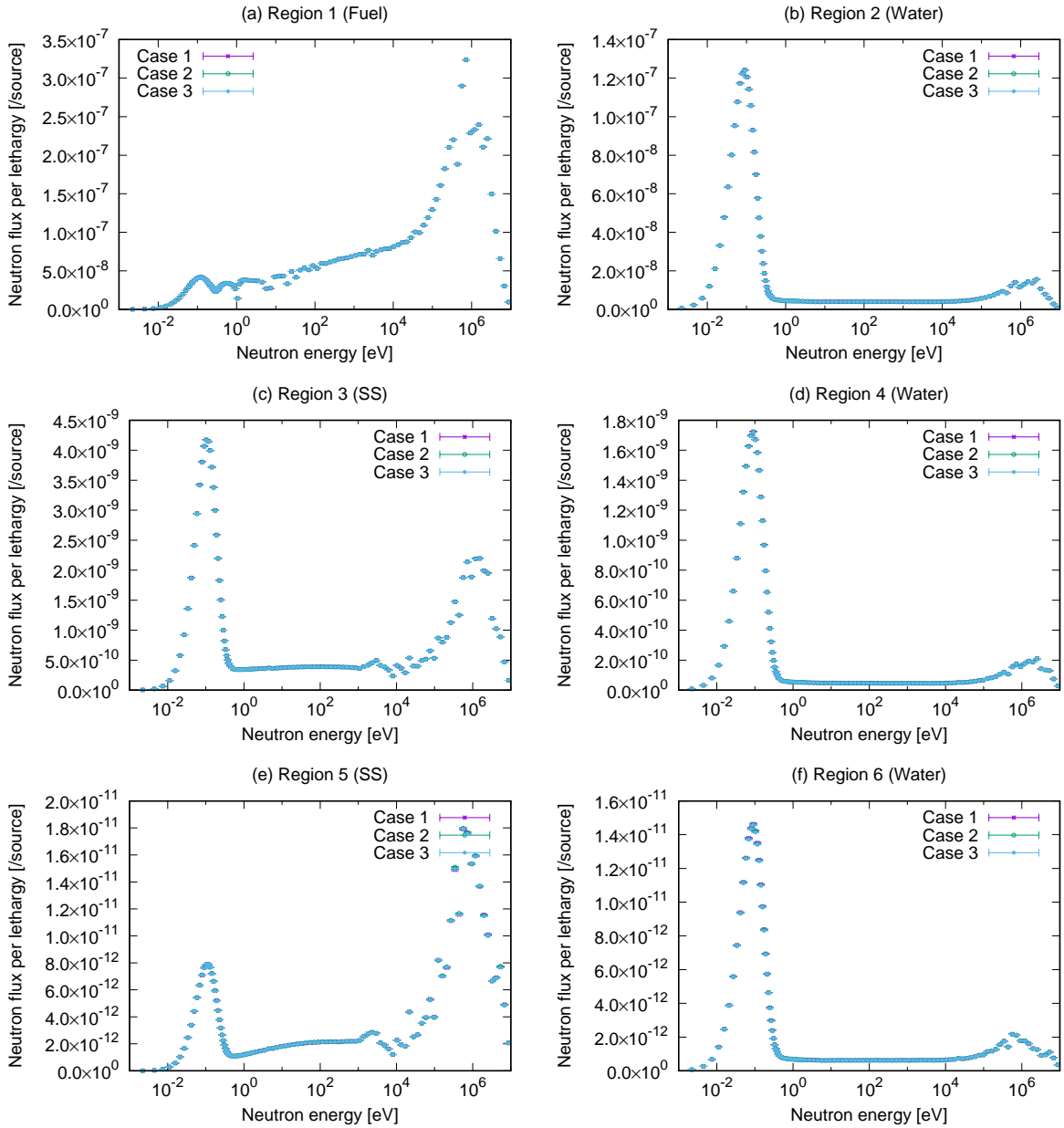


Fig. 1: Region-averaged neutron fluxes obtained by Monte Carlo calculations (linear scale, 1/2)

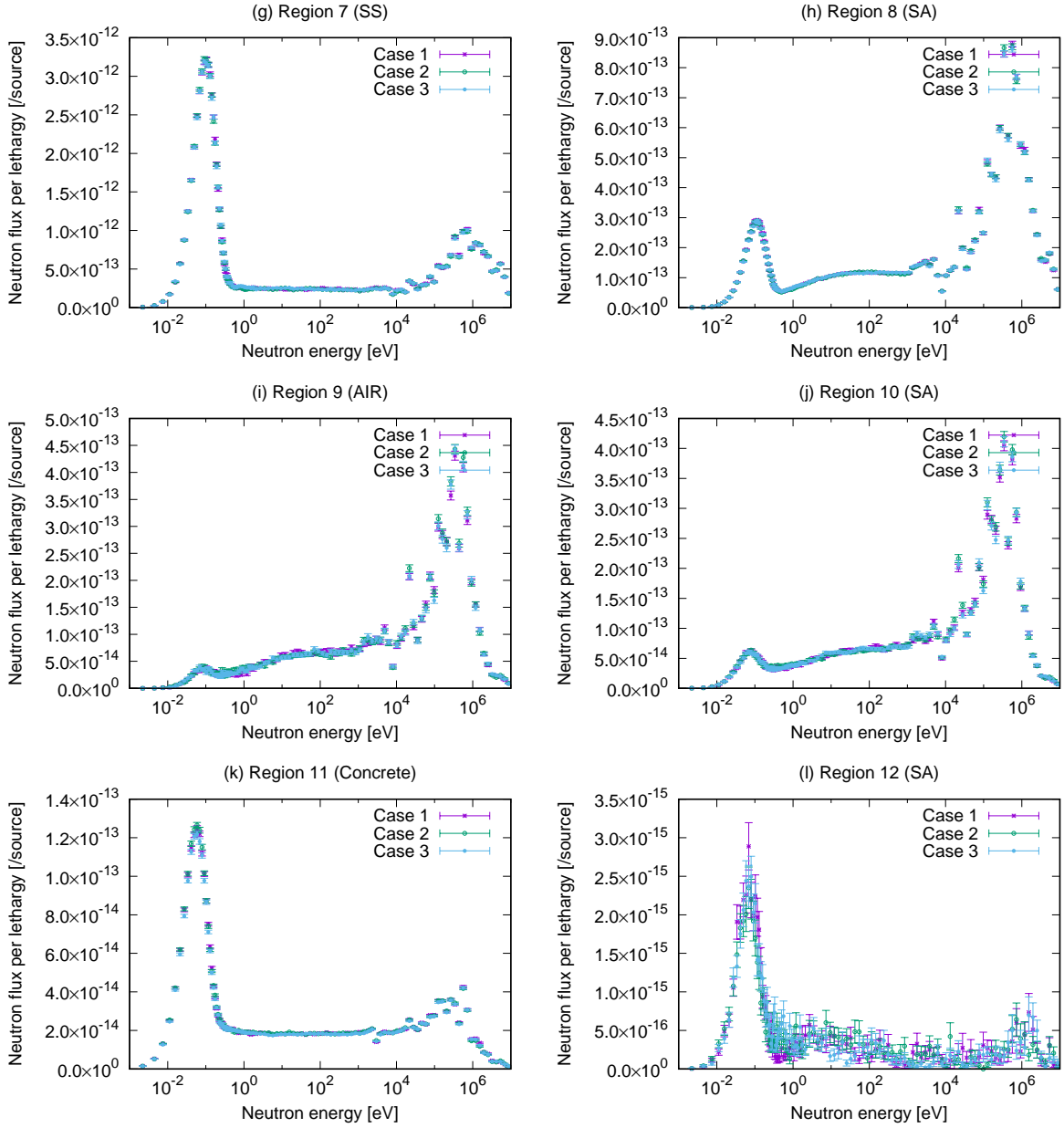


Fig. 2: Region-averaged neutron fluxes obtained by Monte Carlo calculations (linear scale, 2/2)

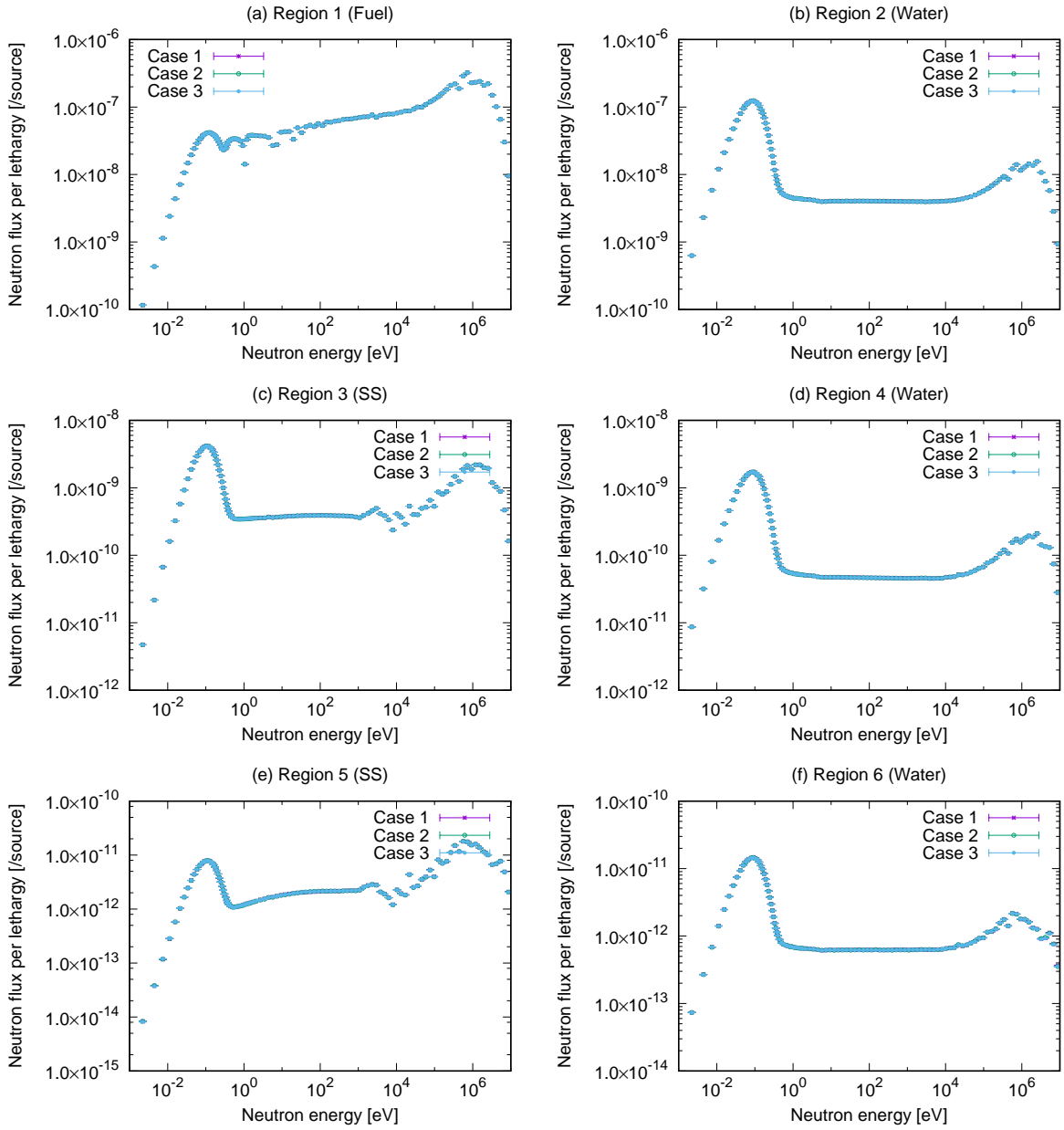


Fig. 3: Region-averaged neutron fluxes obtained by Monte Carlo calculations (log scale, 1/2)

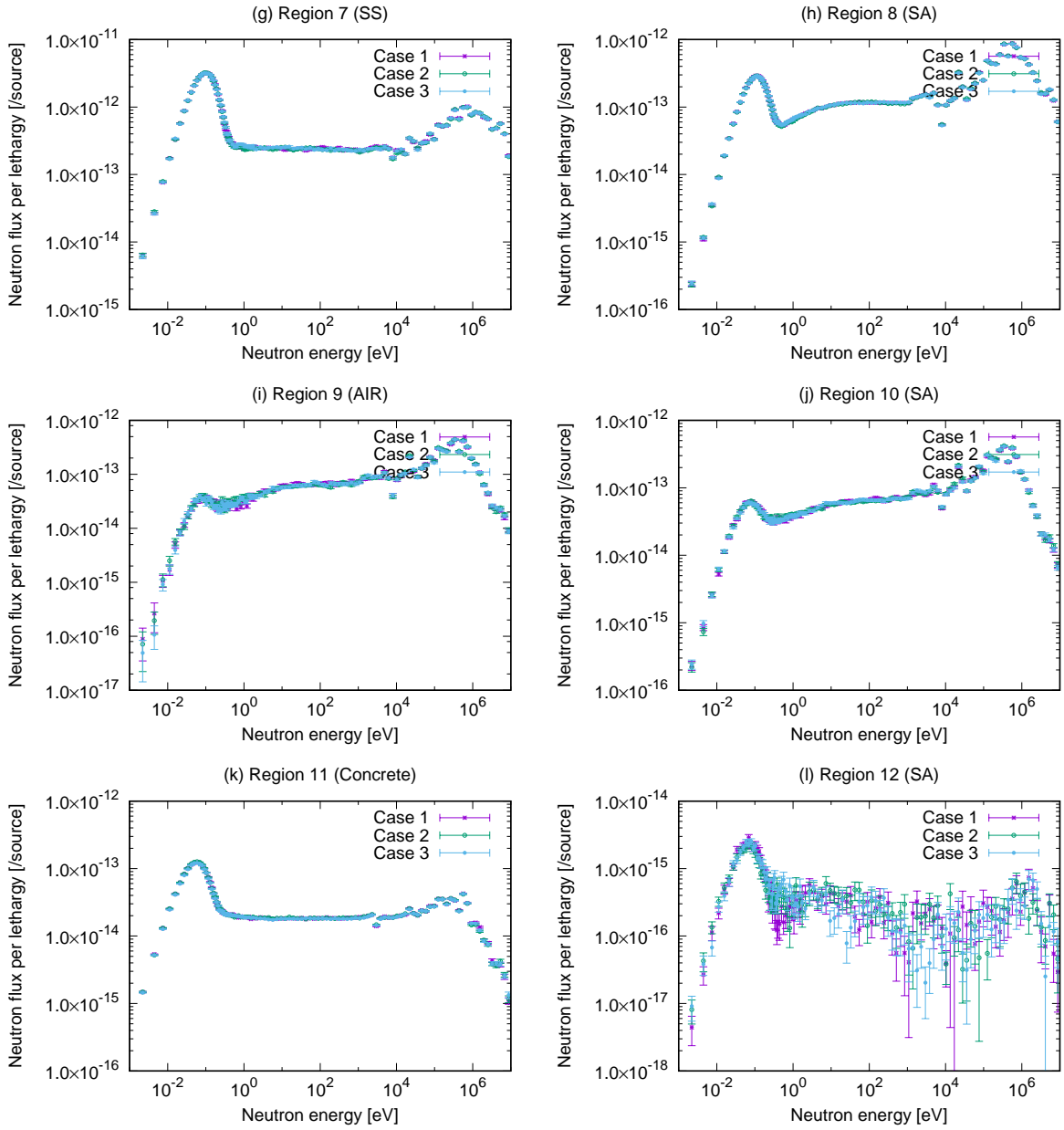


Fig. 4: Region-averaged neutron fluxes obtained by Monte Carlo calculations (log scale, 2/2)

また、3 ケースの結果について、基準ケースの結果に対する比を 1σ 相当の統計誤差とともに Fig. 5 と 6 に示す。いずれのケースも統計誤差の大きさは同程度であるが、パッチあたりのヒストリー数が小さいほど、基準ケースに対する差異（バイアス）が大きくなっていることが分かる。

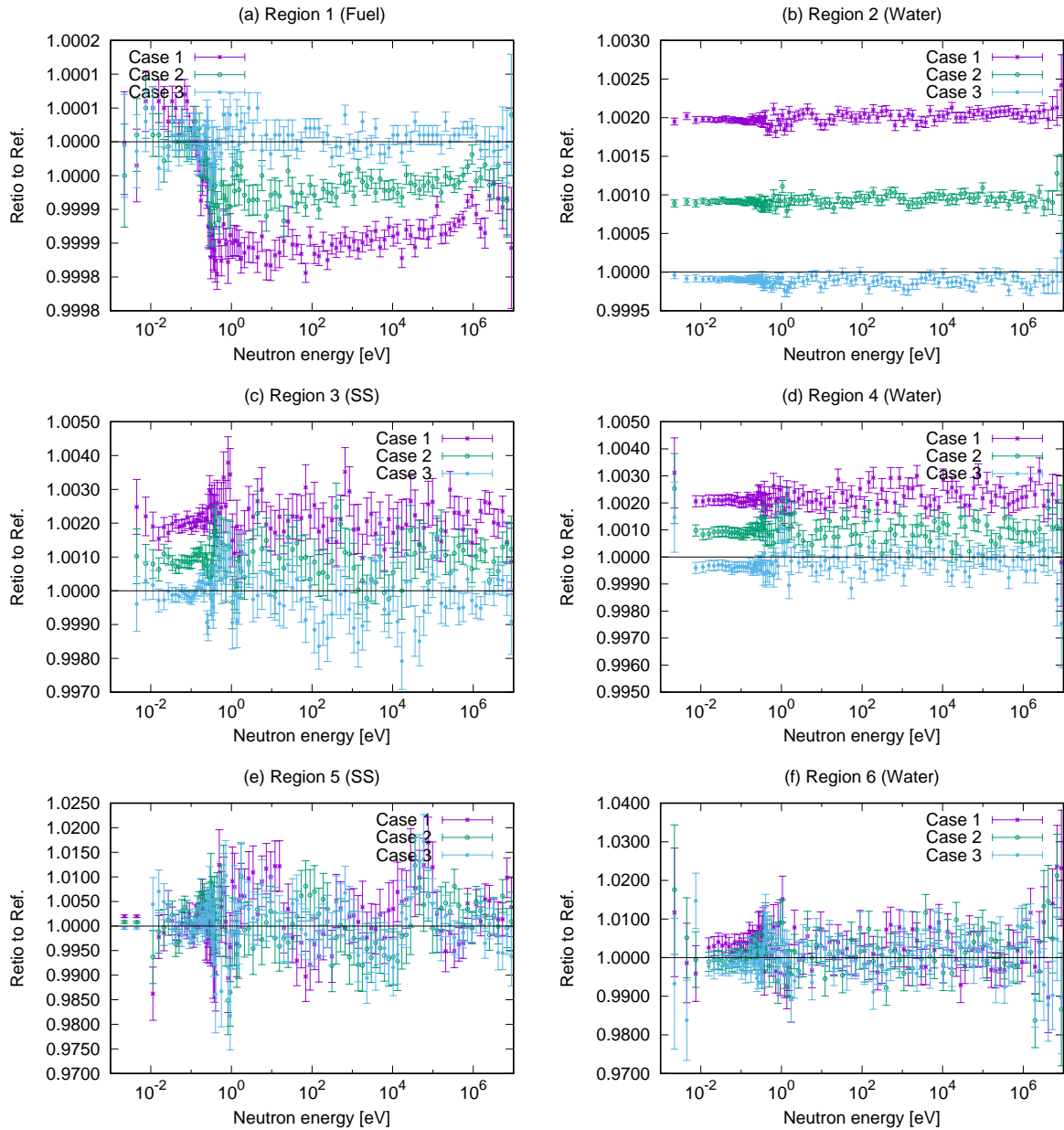


Fig. 5: Ratio of region-averaged neutron fluxes obtained by cases 1, 2, and 3 to the reference (1/2)

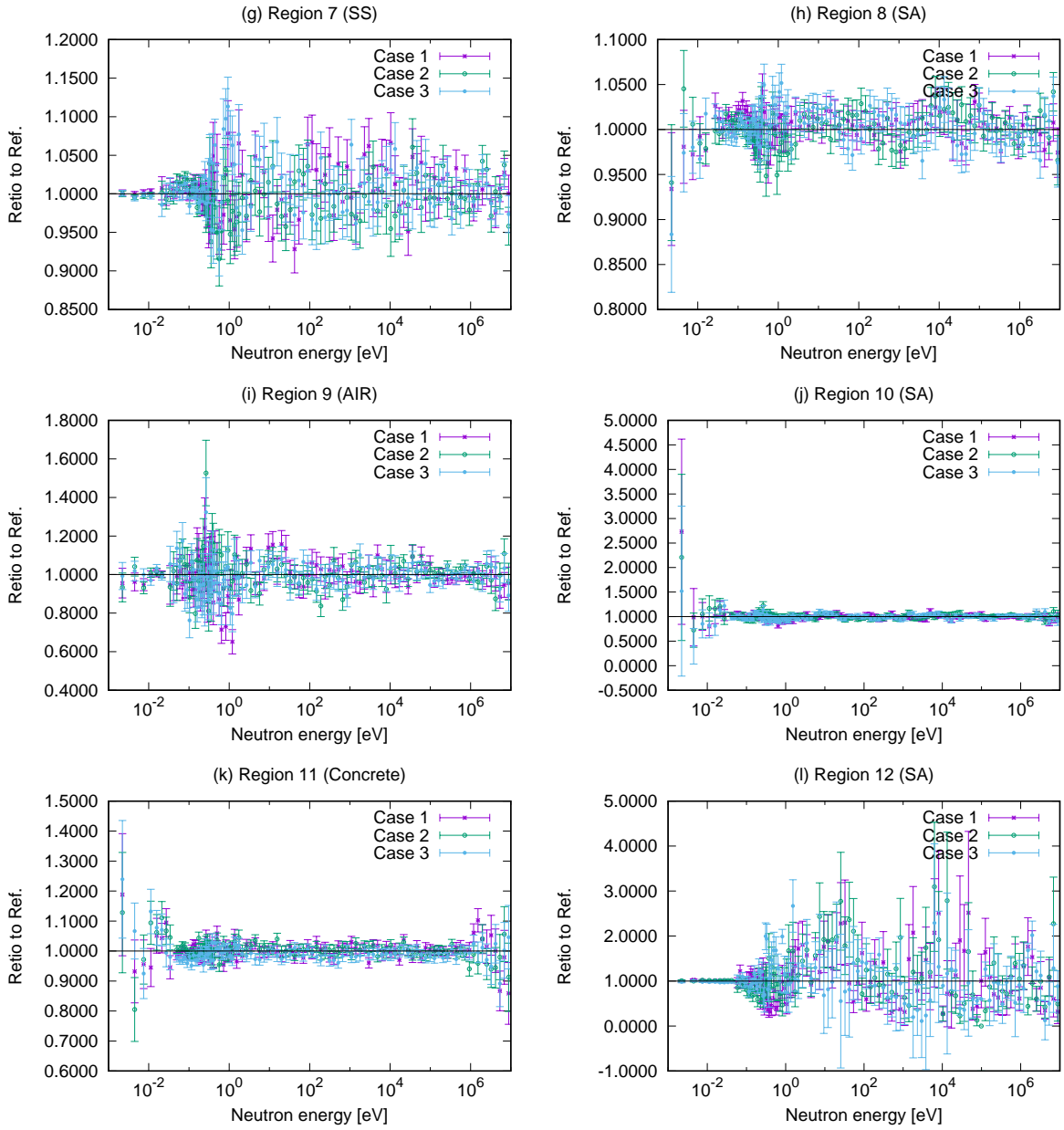


Fig. 6: Ratio of region-averaged neutron fluxes obtained by cases 1, 2, and 3 to the reference (2/2)

さらに、バッチあたりの履歴数が最も小さいケース 1 と同一の条件について、初期乱数を変えた計算を 7 セット行った。基準ケースに対する各セットの結果の比を、 1σ 相当の統計誤差とともに Fig. 7 と 8 に示す。計 7 つのセットのうち 4 セットが Fig. 5 と同程度の偏りを示した一方、残りの 3 セットはさらに大きな偏りを示した。

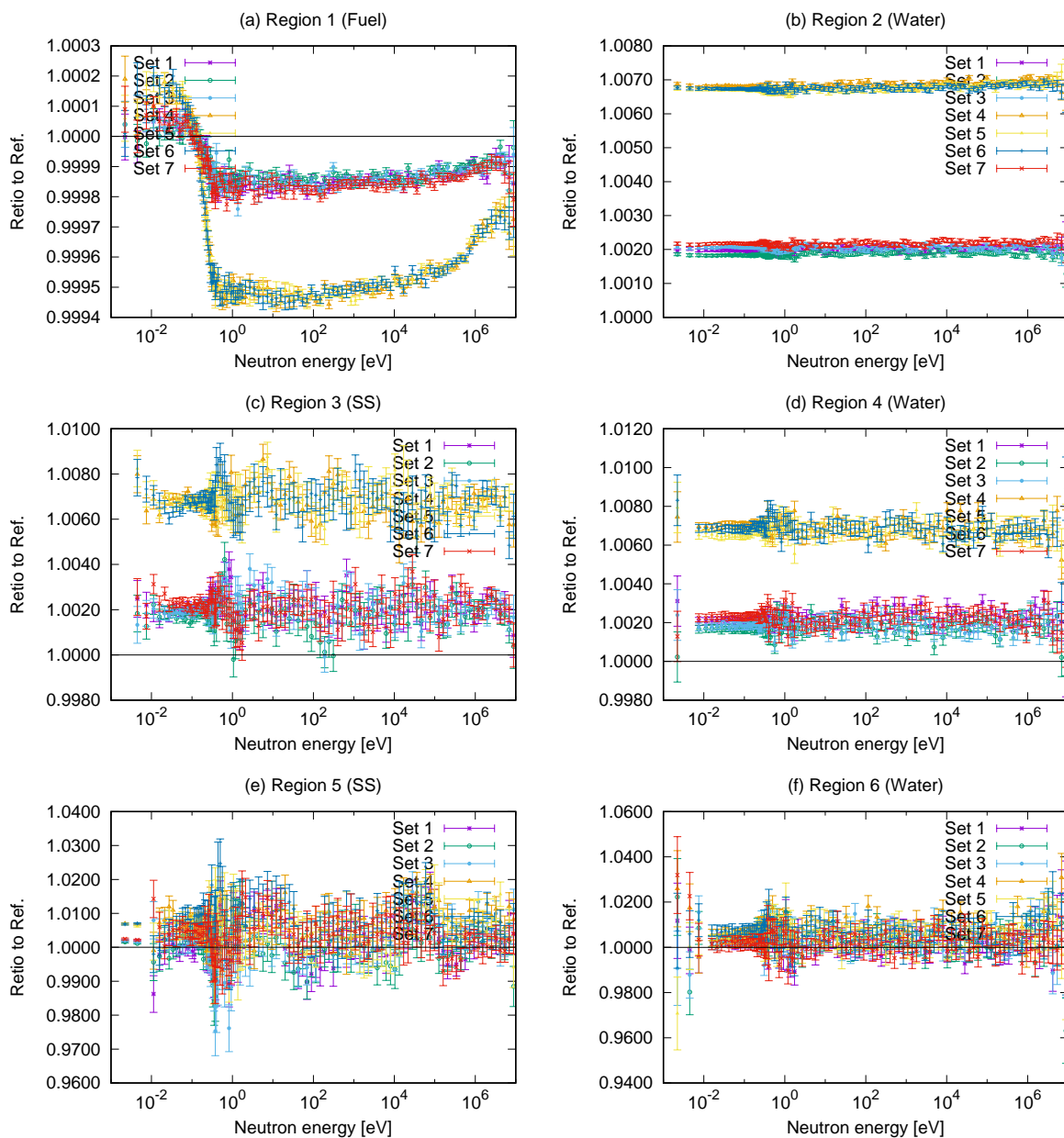


Fig. 7: Ratio of region-averaged neutron fluxes obtained with different random seeds to the reference (1/2)

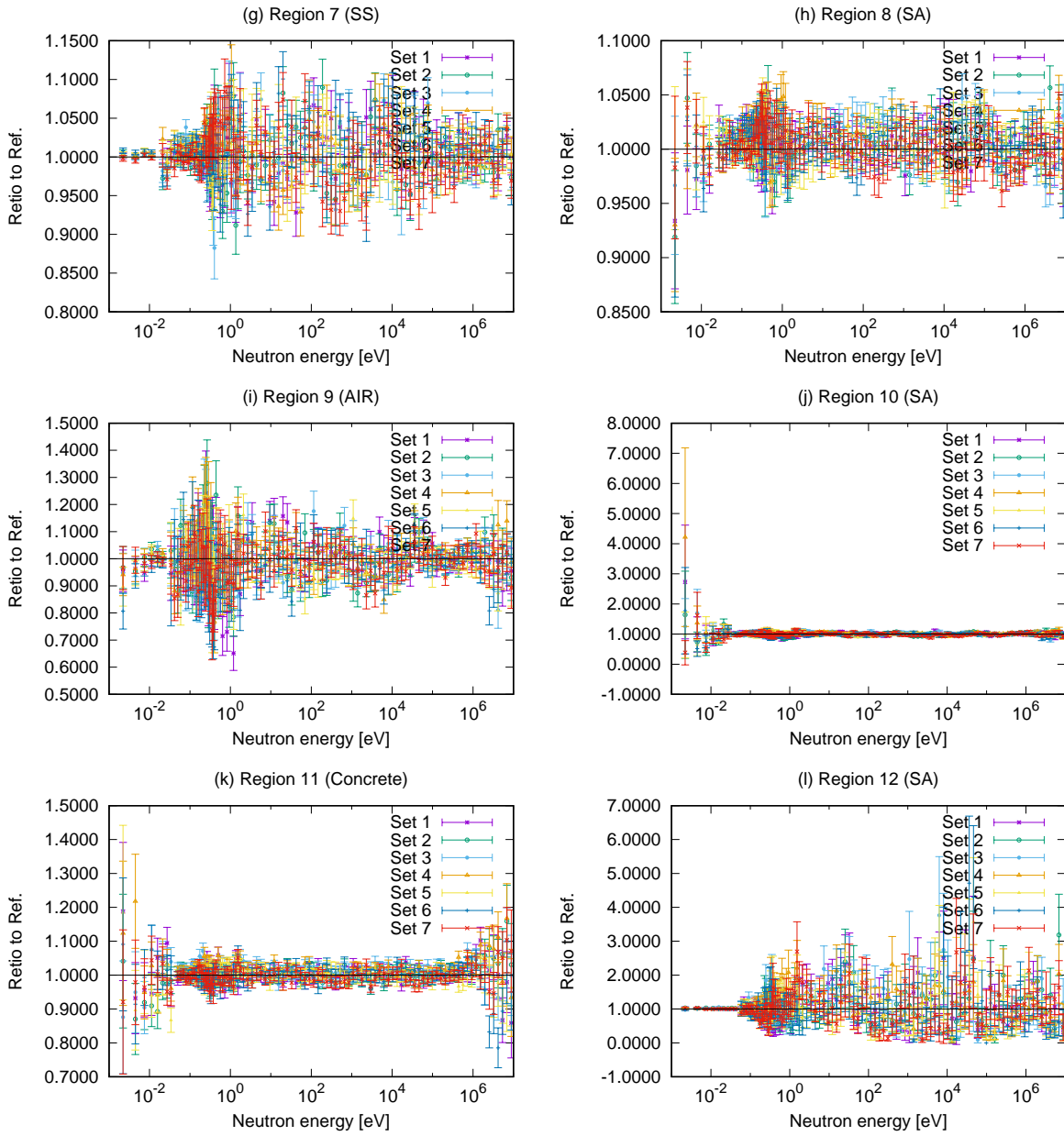


Fig. 8: Ratio of region-averaged neutron fluxes obtained with different random seeds to the reference (2/2)

これら 7 セットの計算における累積バッチ毎の実効増倍率の予測値の推移を Fig. 9 に示す。基準ケースの結果 $0.80839 \pm 0.0001\%$ に対するセット毎の差異の傾向は、Fig. 7 に示した中性子束分布における差異と同様であった。

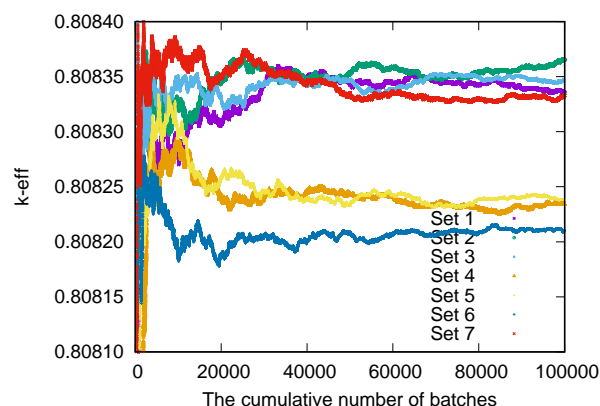


Fig. 9: k_{eff} estimation dependent on the number of cumulative batches

同一の総ヒストリー数であるのに関わらず、ヒストリー数とバッチ数の設定値や初期乱数の違いにより結果が有意に異なる挙動については、計算における並列数が多いことが原因であった。MVP での並列化の仕様では、バッチあたりのヒストリー数の並列数に対する比が 500 を下回ると、適切な計算が行えない場合があるとのことであった [1]。

一般的なモンテカルロコードでは各バッチで並列計算を行っているが、MVP ではバッチの最後で各スレッドで得られた核分裂点（次のバッチの中性子の発生点）を集約していないという特徴がある。そのため、ヒストリー数が少ないと、各スレッドで得られた中性子の発生点に偏りが生じることになり、これが計算結果に偏りを生じさせる可能性がある。この措置は、CPU 数が少なく CPU 間の通信がボトルネックになっていた古い計算機での並列化効率を上げるためのものであり、現在では適切とは言えないものである。なお、MCNP などは各バッチの最後で次のバッチの中性子発生点をまとめ、次のバッチで再度各スレッドに振り分けるという処理を行っているため、スレッドでの中性子の発生点に偏りは生じない [1]。

参考文献

- [1] 多田健一、私信.