

# 放射化計算ベンチマーク問題における中性子束の空間分布<sup>1</sup>

初版 2024/6/28、改訂 2024/12/2 千葉 豪

これまでに、放射化計算ベンチマーク問題について、各構成領域における領域平均中性子束を対象とした検討を行ってきた。今後の検討を進めるにあたっては、原子炉遮蔽壁などの領域内部の中性子束の減衰に関する計算精度に注目する必要があることから、ベンチマーク体系のうち、jet pump（第5領域、厚さ約13 cm）、pressure vessel（第8領域、厚さ約16 cm）、原子炉遮蔽壁（第11領域、厚さ約30 cm）について空間的な解像度をあげた上で、中性子束の空間分布を評価することとした。

中性子束については、1 MeV 以上もしくは0.1 MeV 以上の高速中性子、数 eV 以下の熱中性子、数 eV から0.1 MeV までの熱外中性子を評価対象とした。高速中性子の下限エネルギーを1 MeV もしくは0.1 MeV としたのは、NUREG/CR-6115 の pressure vessel ベンチマークにおいてそのエネルギー領域の中性子フルエンスを評価対象としていることが理由である。また、熱中性子領域の上限については、NUREG/CR-7045 において、上方散乱の上限エネルギー 5.043 eV 未満を熱中性子領域としていることに拠った。これらの境界エネルギーについては、BUGLE-46 群構造の群境界と一致させるため、それぞれ 1.0026 MeV（BUGLE の第19群上限）、0.11109 MeV（同第27群上限）、5.0435 eV（同第43群上限）と設定した。従って、全エネルギー領域は4分割されることになり、第1エネルギー領域（1 MeV 以上）はBUGLE の1~18群（VITAMIN-B7 では1~62群）、第2領域（0.1 から1.0 MeV）は19~26群（同63~104群）、第3領域（5 eV から0.1 MeV）は27~42群（同105~163群）、第4領域（5 eV 未満）は43~47群（同164~199群）とした。

MVP の計算は以下のケースについて行った。中性子束は、エネルギーについては上記の4つの領域についてタリーをとり、空間については、jet pump、pressure vessel、原子炉遮蔽壁については決定論コードによる計算と同一のメッシュ毎（それぞれ26、32、30メッシュ）に、それ以外については領域全体でタリーをとった。

- Case 1：ヒストリー数 10,000、バッチ数 410
- Case 2：ヒストリー数 100,000、バッチ数 410
- Case 3：ヒストリー数 100,000、バッチ数 4,100
- Case 4：ヒストリー数 100,000、バッチ数 40,100
- Case 5：ヒストリー数 1,000,000、バッチ数 200,000（JAEA 多田さんに計算を依頼）

決定論的手法による計算では、これまでにSRACの107群構造をベースに検討を進めてきたが、中性子遮蔽計算で標準的に用いられているVITAMIN-B7の199群構造をベースとした群構造に切り替えることとした。これまでの検討から、連続エネルギー相当と見做せる群分割として、20から10 MeVでは $3 \times 128$ の等レサジー分割（ $\Delta u = 0.005414$ ）、10 MeVから10 keVではレサジー幅0.25を128分割（ $\Delta u = 0.00195$ ）、10 keVから1.85 eVはレサジー幅0.25を4分割（ $\Delta u = 0.0625$ ）、1.85 eV未満についてはSRACの群構造を4分割することが推奨されている。この結果に沿って、VITAMIN-B7の199群に対して、10 MeV以上は $\Delta u$ が0.005414未満となるように、10 MeVから10 keVでは $\Delta u$ が0.00195未満となるように、10 keV未満では $\Delta u$ が $0.25/8 = 0.03125$ 未満となるように、各群の詳細化を行い、4412群構造を得た。

MVPによる計算結果（Case 5）とCBZ（4412群）の結果をFig. 1に、CBZの計算結果（4412群、199群、110群、BUGLE-47群）のMVP（Case 5）に対する相対差をFig. 2とFig. 3に示す。なお、各媒質の実効断面積はFRENDYにより計算し、CBZの中性子輸送計算はP5S16で行った。4412群の結果は、全てのエネルギー領域について、jet pumpとその外側の水領域（厚さ約12 cm）においては概ね1%以内、压力容器では概ね2%以内で参照解を再現した。また、コンクリート遮蔽壁とその外側の鋼板領域（厚さ約5 cm）では、参照解の統計誤差の概ね $2\sigma$ 以内で一致した。以上の結果より、4412群の結果は連続エネルギーモンテカルロ計算相当の精度を有すると判断することが出来る。

<sup>1</sup> /Document/Study/Activation\_JSJS/SpatialDist

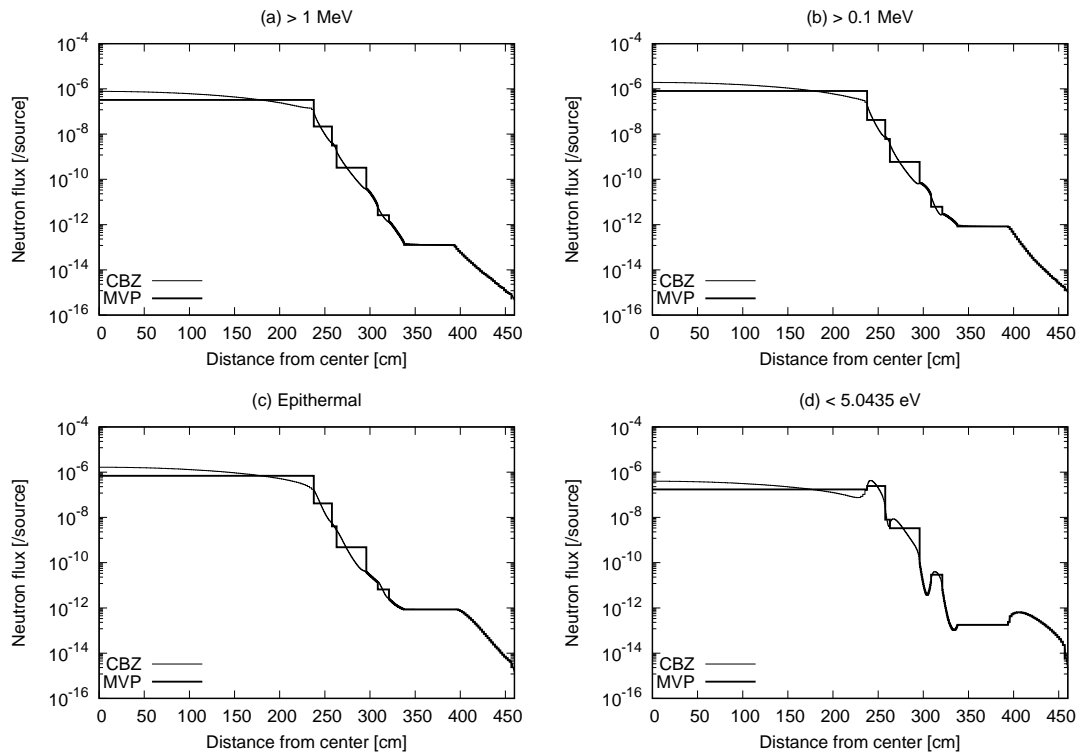


Fig. 1: Spatial distributions of neutron flux

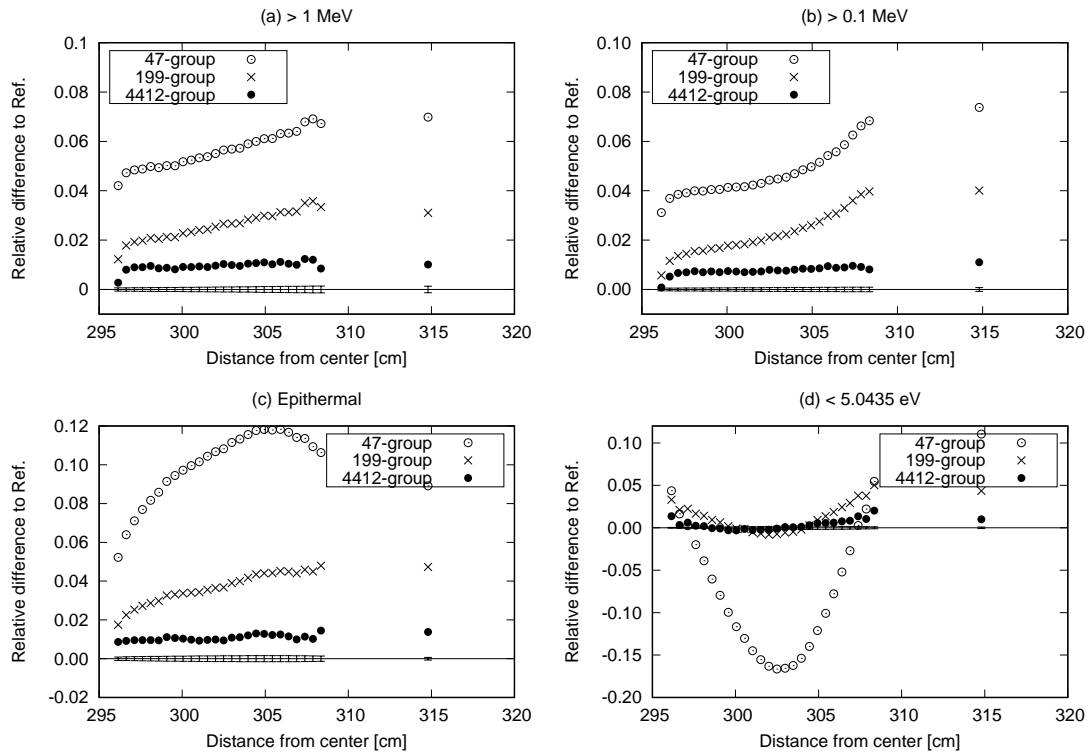


Fig. 2: Spatial distributions of errors in neutron flux in the jet pump and water regions

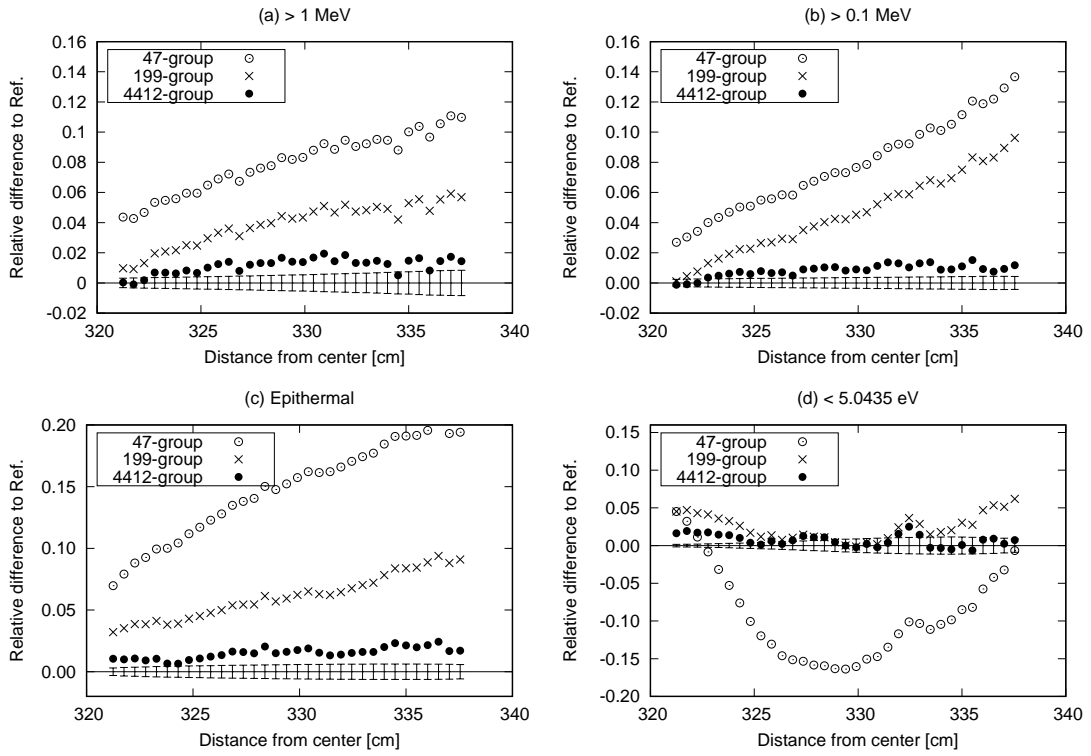


Fig. 3: Spatial distributions of errors in neutron flux in the pressure vessel region

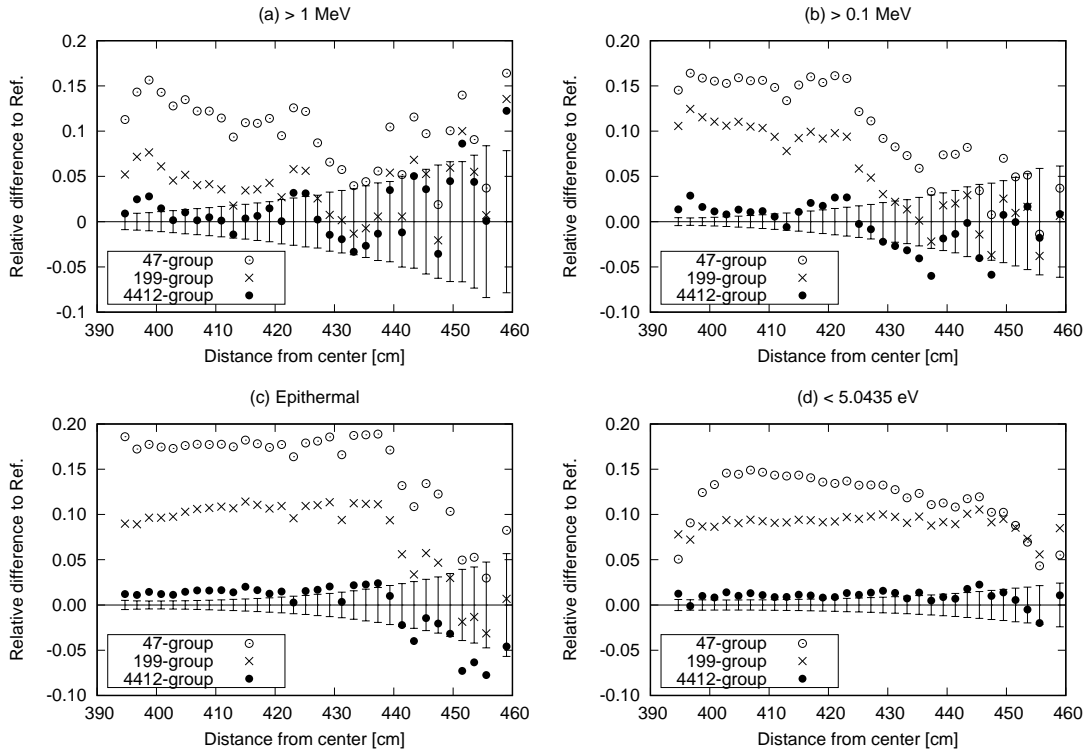


Fig. 4: Spatial distributions of errors in neutron flux in the reactor shielding and outer shell regions

上述の計算では、媒質の実効断面積は FRENDDY により作成していた。そこで、従来の多群ライブラリを用いた方法と比較するための計算を行った。199 群での結果を Fig. 5 から Fig. 7 に示す。これまでの検討では 199 群は 4412 群と比べて過大評価傾向となることが分かっているが、多群ライブラリを用いることで中性子束レベルが全体的に低下するため、多群ライブラリを用いた方が全体的に参照解の再現性が良好であることが分かる。また、特定のエネルギー領域の中性子束の空間分布に対しては、FRENDDY を用いて多群断面積を計算することによる影響は限定的であった。

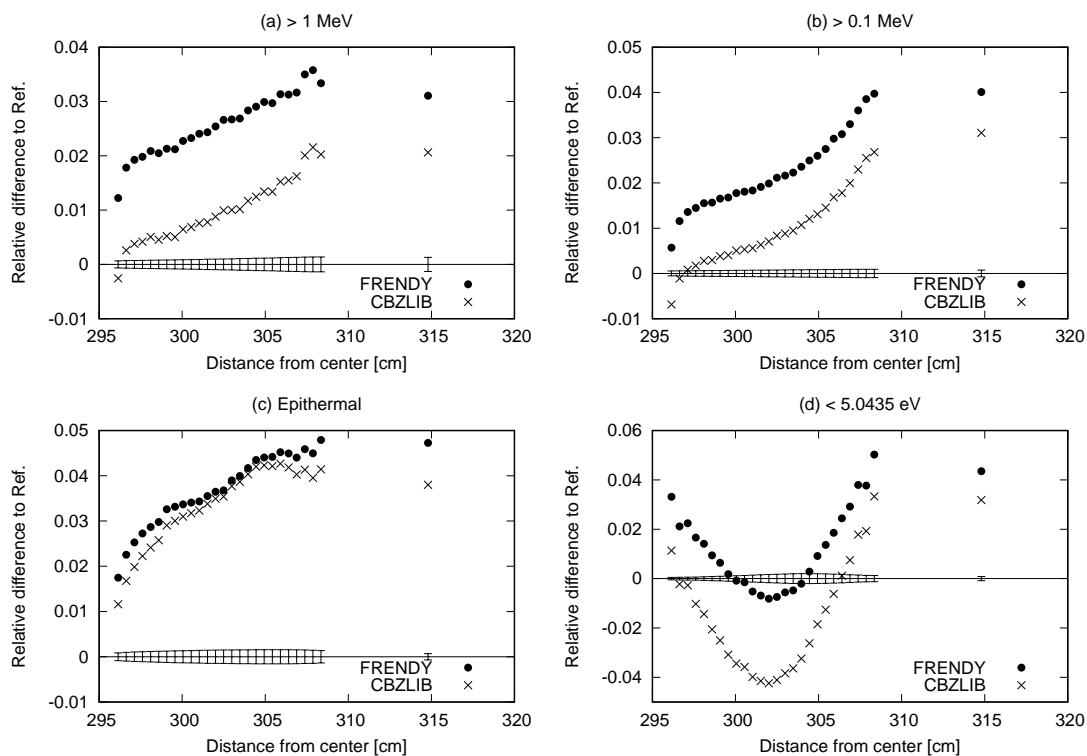


Fig. 5: Spatial distributions of errors in neutron flux in the jet pump and water regions

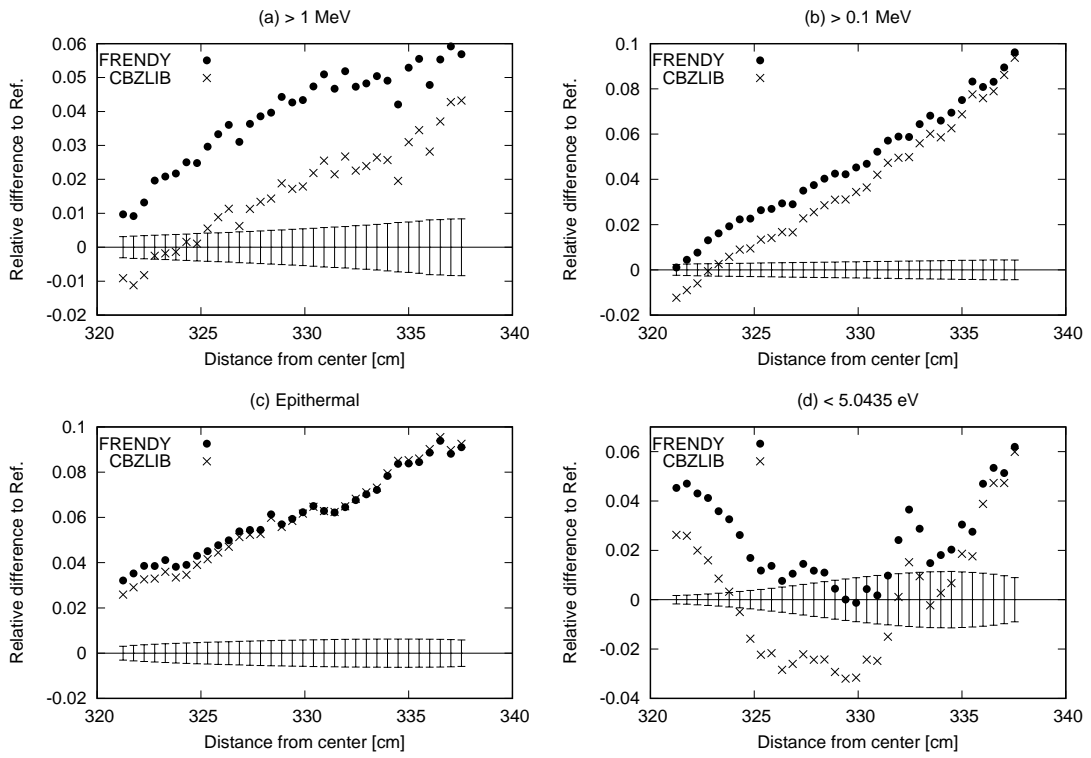


Fig. 6: Spatial distributions of errors in neutron flux in the pressure vessel region

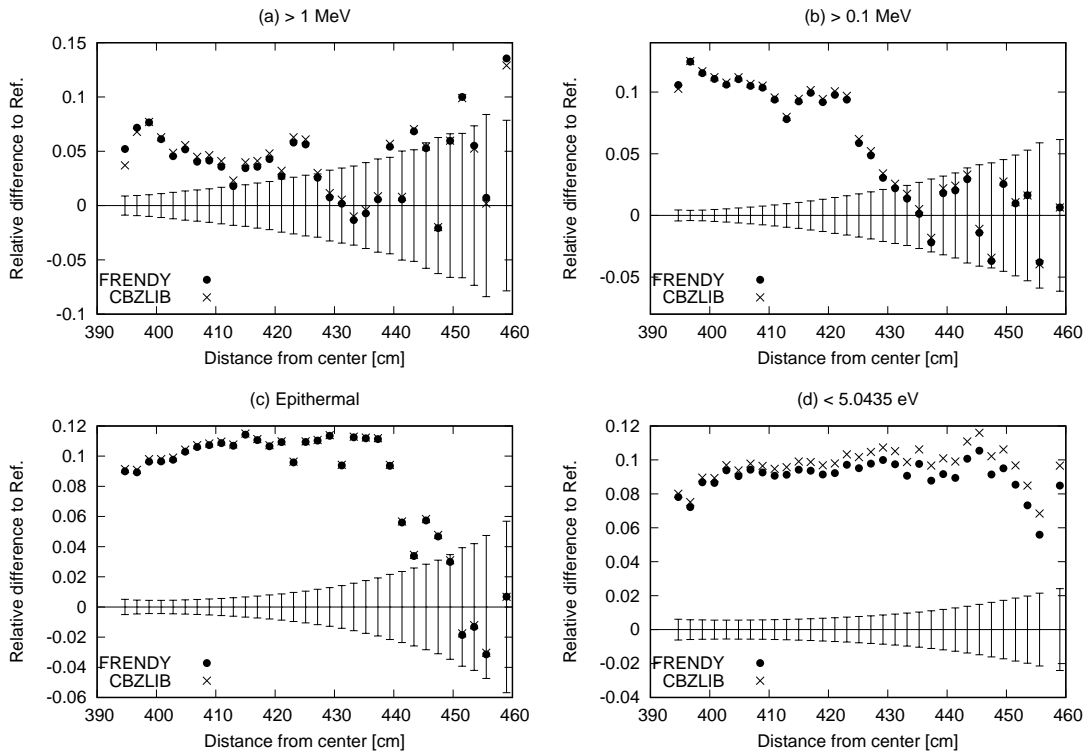


Fig. 7: Spatial distributions of errors in neutron flux in the reactor shielding and outer shell regions

次いで、4412 群の計算で得られたメッシュ毎の中性子束を用いてメッシュ毎に縮約を行ったときの参照解に対する相対誤差を Fig. 8 から Fig. 10 に示す。空間依存の実効断面積を用いることにより、199 群、47 群のいずれの場合でも、参照解の再現誤差が大きく低減していることが分かる。47 群構造であっても、jet pump とその外側の水領域、圧力容器の中性子束を概ね 5% 以内、コンクリート遮蔽壁では概ね 10% 以内で再現できている。

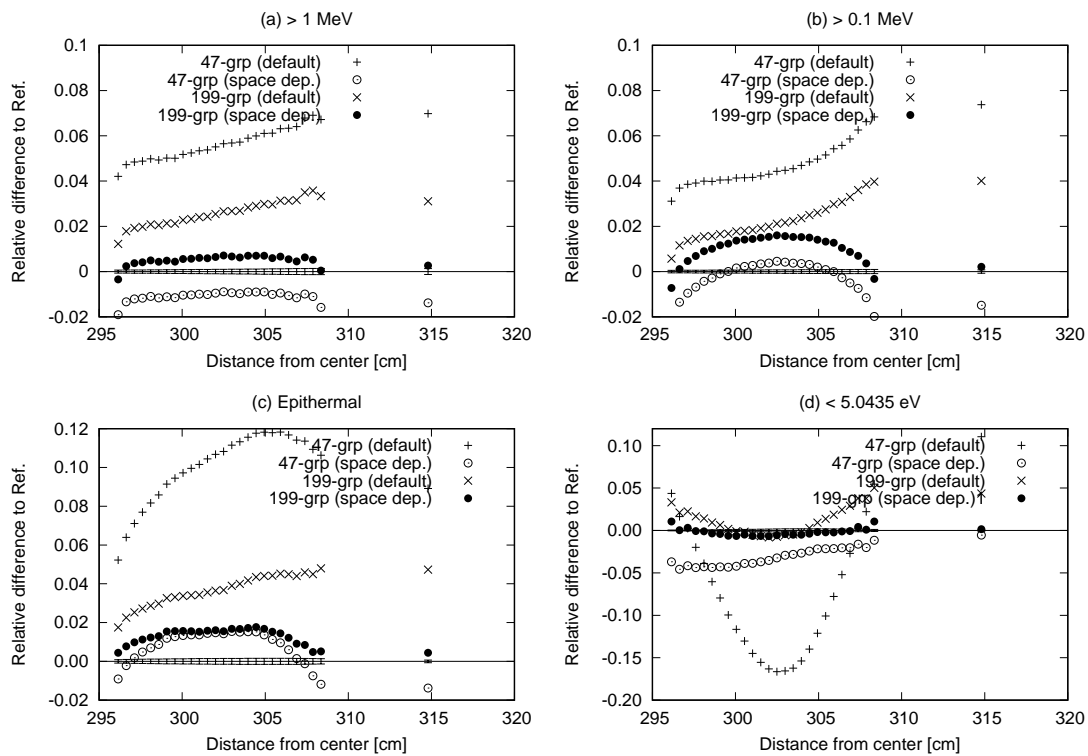


Fig. 8: Spatial distributions of errors in neutron flux in the jet pump and water regions

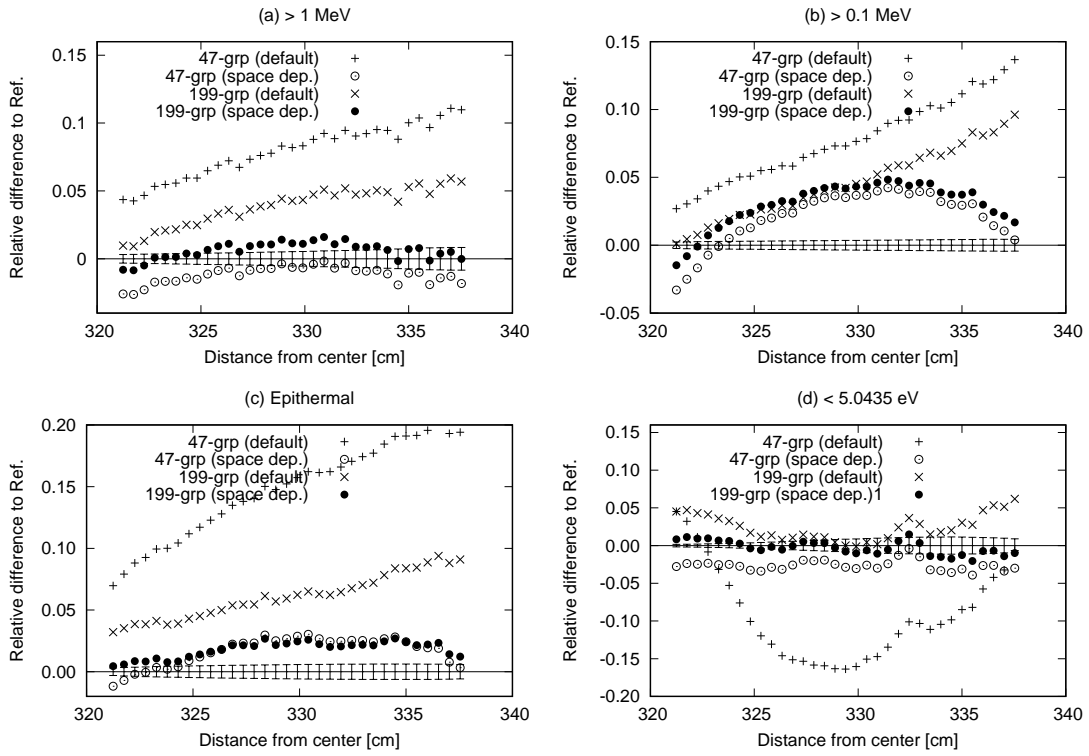


Fig. 9: Spatial distributions of errors in neutron flux in the pressure vessel region

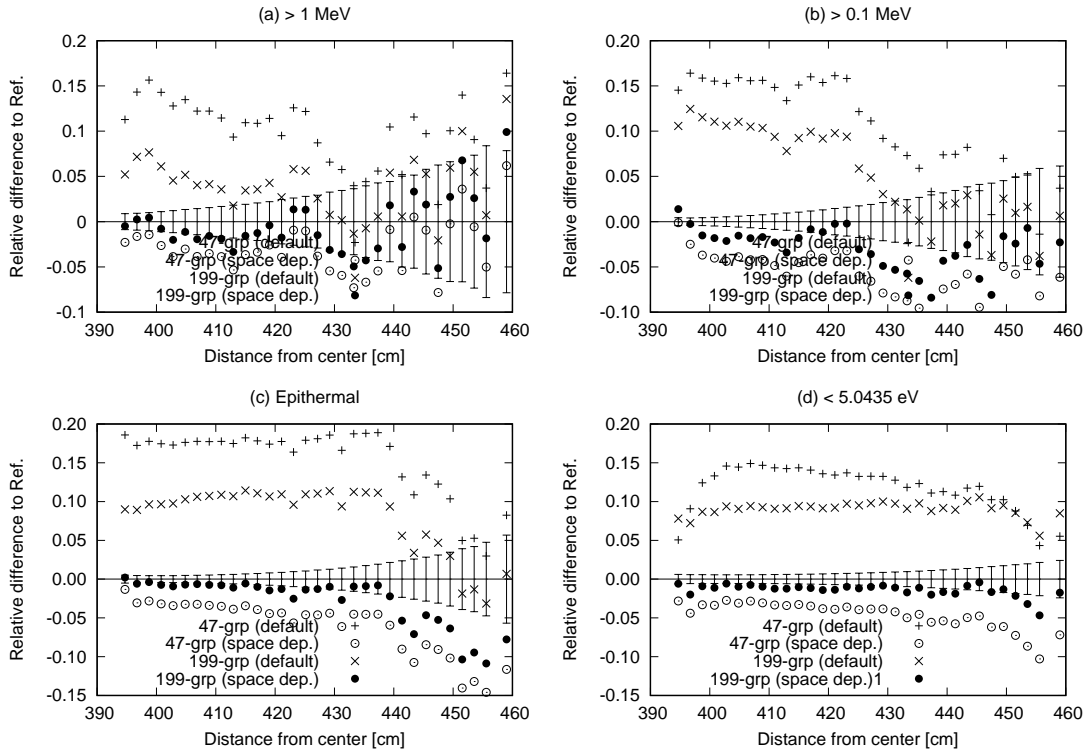


Fig. 10: Spatial distributions of errors in neutron flux in the reactor shielding and outer shell regions

さらに、Consistent P 近似の考え方に基づいて、4412 群の計算で得られたメッシュ毎の中性子束とカレントを用いてメッシュ毎に縮約を行い計算を行った。この際、縮約にはカレントの絶対値を用いた。また、少数群を 199 群としたときに、少数群の輸送計算が正常に行われなかった。原因を調べたところ、最外周の遮蔽壁外側の鋼板 (SA533) の遮蔽壁に接するメッシュにおいて、第 100 群のカレント重み全断面積が  $0.94$  [/cm]、中性子束重み全断面積が  $0.30$  [/cm] となり、それによる自群散乱断面積の P2 成分の補正量が大きいこと由来することが分かった。そこで以降のカレント重みを用いた計算では、カレント重みと中性子束重みの全断面積の差異は P1 散乱断面積のみに対して補正するものとした。縮約群を 199 群としたときの結果を Fig. 11 から Fig. 13 に、縮約群を 47 群としたときの結果を Fig. 14 から Fig. 16 に示す。縮約群が 199 群の場合には、カレント重み全断面積を用いることによる影響はわずかであるが、47 群の場合には明らかな精度の改善が見られた。また、特にコンクリート遮蔽平気とその外側の鋼板領域で顕著であった。

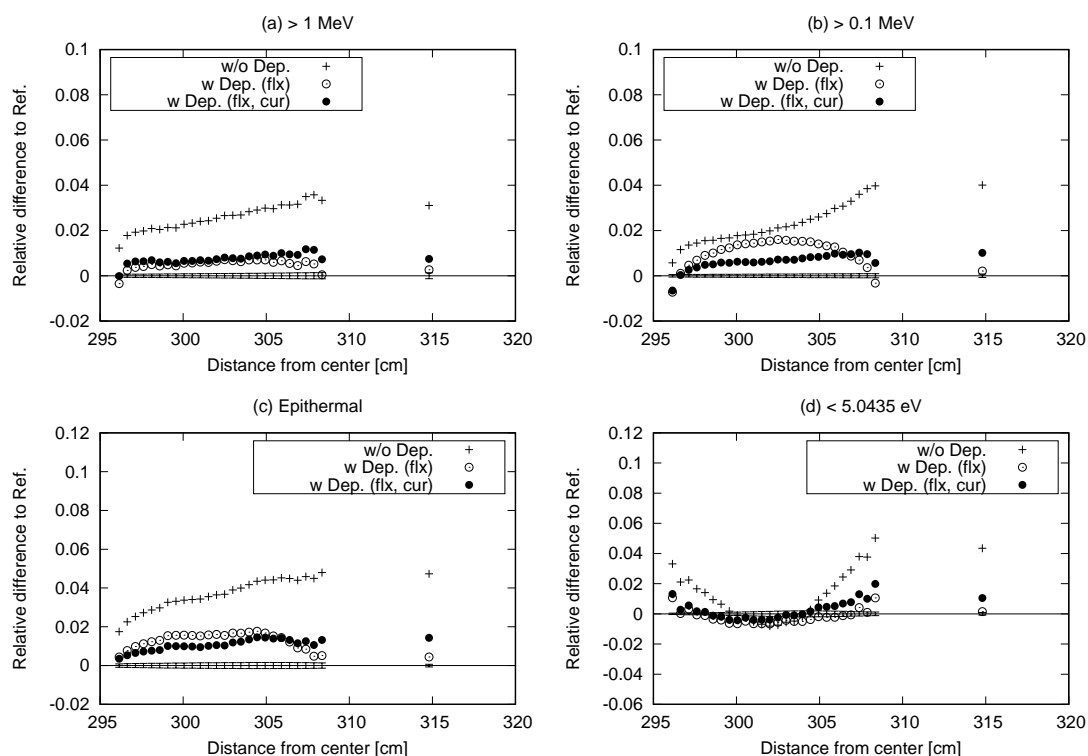


Fig. 11: Spatial distributions of errors in neutron flux in the jet pump and water regions (199-group)



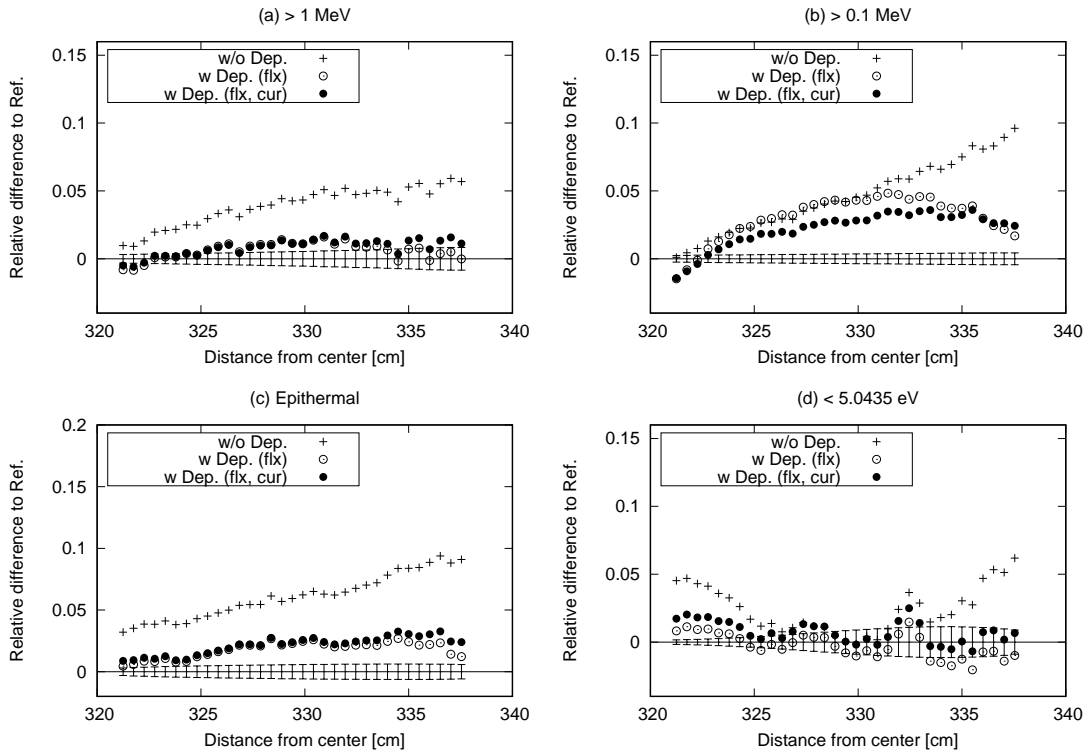


Fig. 12: Spatial distributions of errors in neutron flux in the pressure vessel region (199-group)

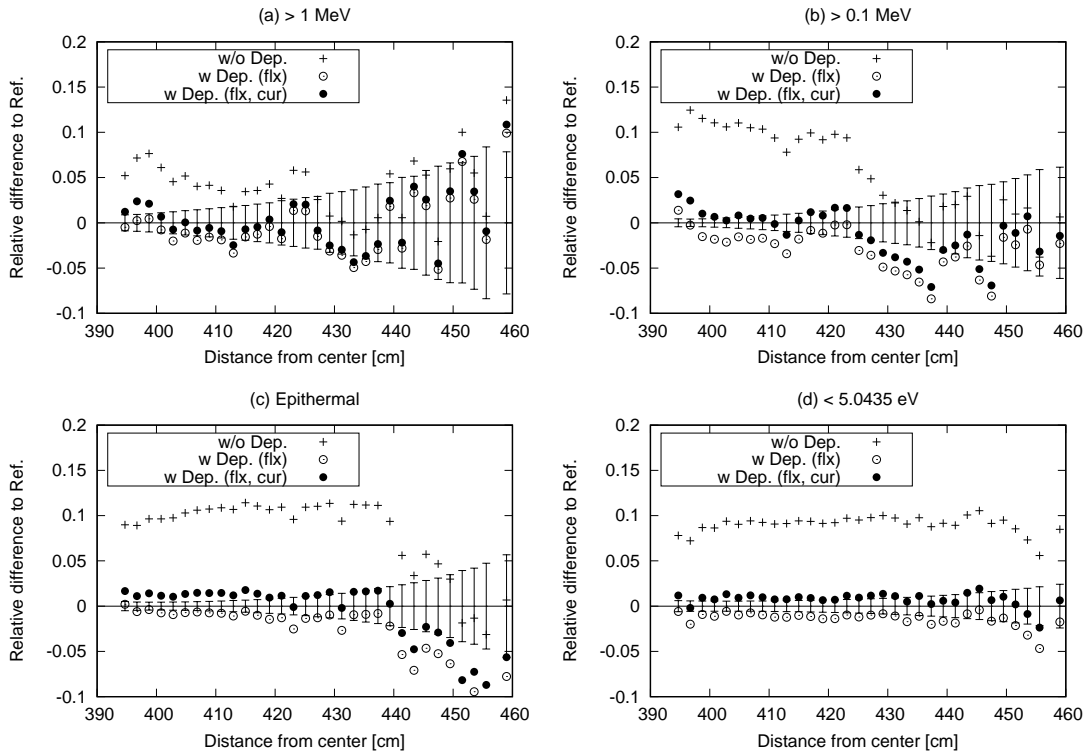


Fig. 13: Spatial distributions of errors in neutron flux in the reactor shielding and outer shell regions (199-group)

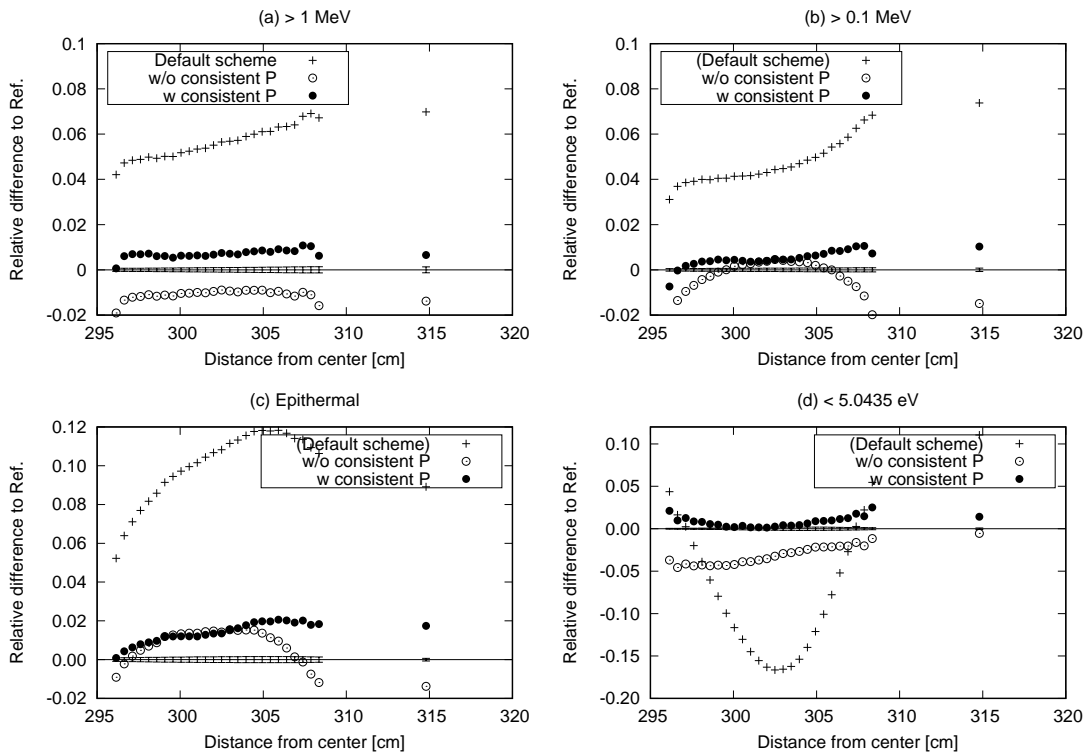


Fig. 14: Spatial distributions of errors in neutron flux in the jet pump and water regions (47-group)

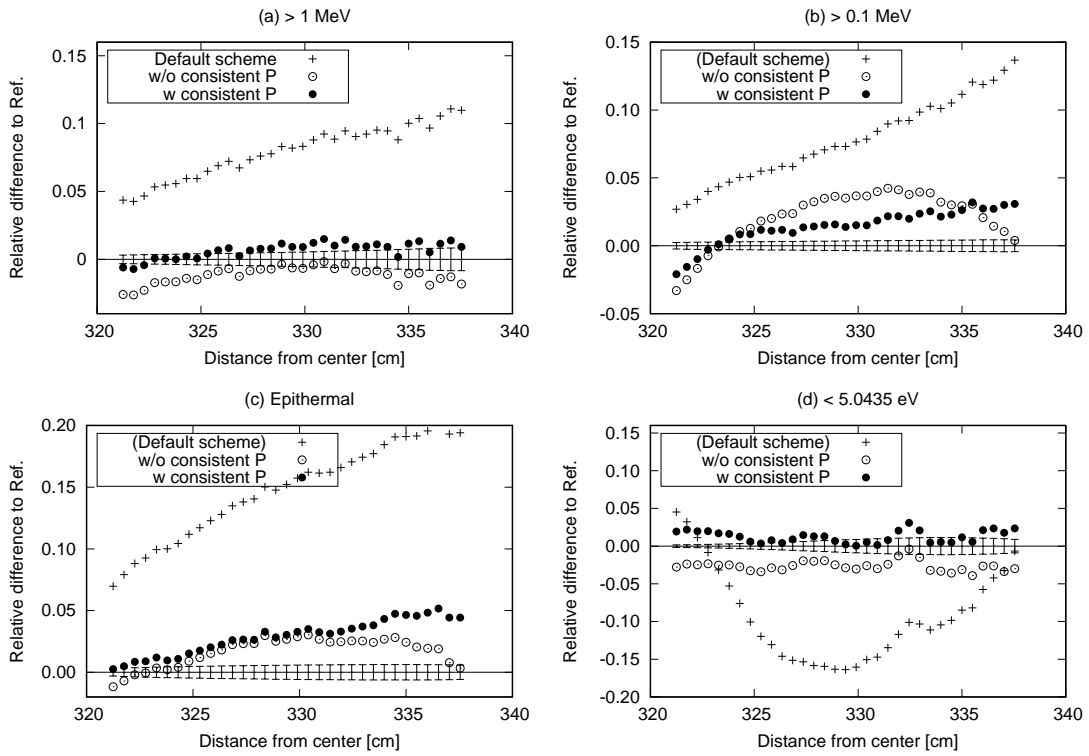


Fig. 15: Spatial distributions of errors in neutron flux in the pressure vessel region (47-group)

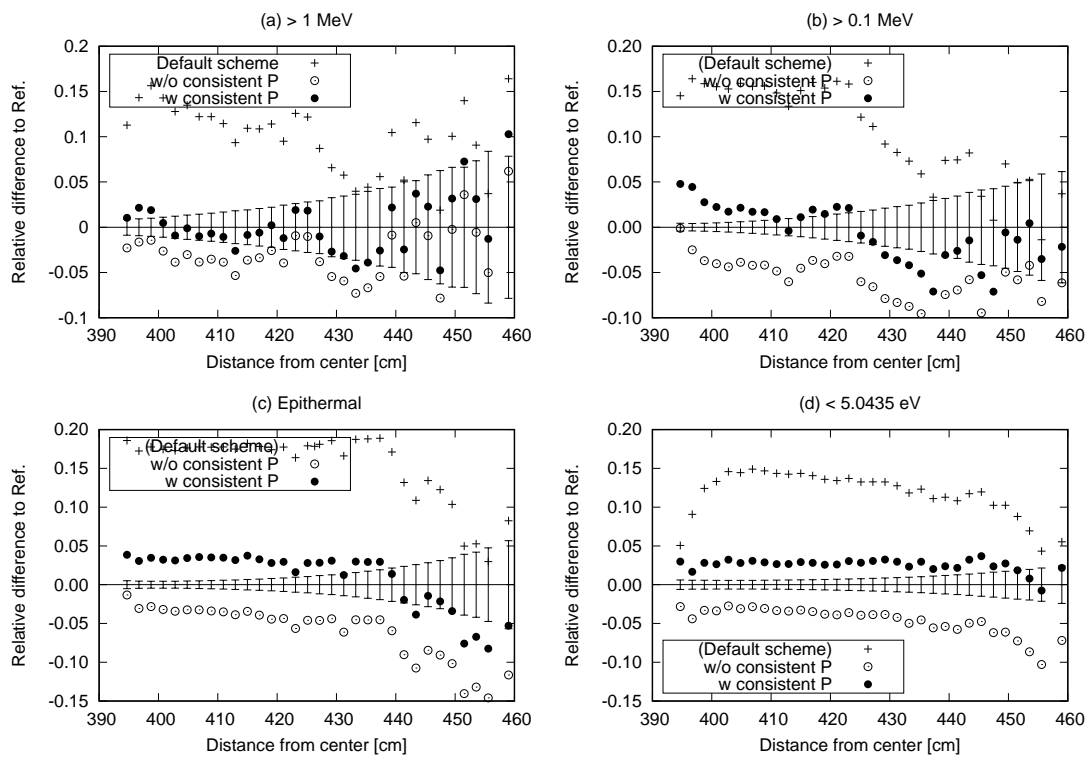


Fig. 16: Spatial distributions of errors in neutron flux in the reactor shielding and outer shell regions (47-group)

以上の検討から、空間依存の中性子束重み及びカレント重み全断面積を用いることで、47 程度の群数であっても良好な解が得られることが分かった。そこで、さらにエネルギー群数を低減させた場合の計算精度を調べるため、BUGLE の 47 群構造を基に、40.868 keV (BUGLE の第 29 群上限) より高いエネルギーではレサジー幅が 0.5 程度、それ以下の領域では 1.0 から 2.5 程度とした 19 群構造で同様の計算を行った。なお、計算精度を評価する対象とした中性子束のエネルギー領域と整合させるため、19 群構造の第 6、7 群のレサジー幅をそれぞれ 0.3、0.2 とした。得られた結果を Fig. 17 から Fig. 19 に示す。カレント重み全断面積を用いることによる精度の改善は見られるものの、縮約群を 49 とした場合と比較して、精度の悪化が観察される。

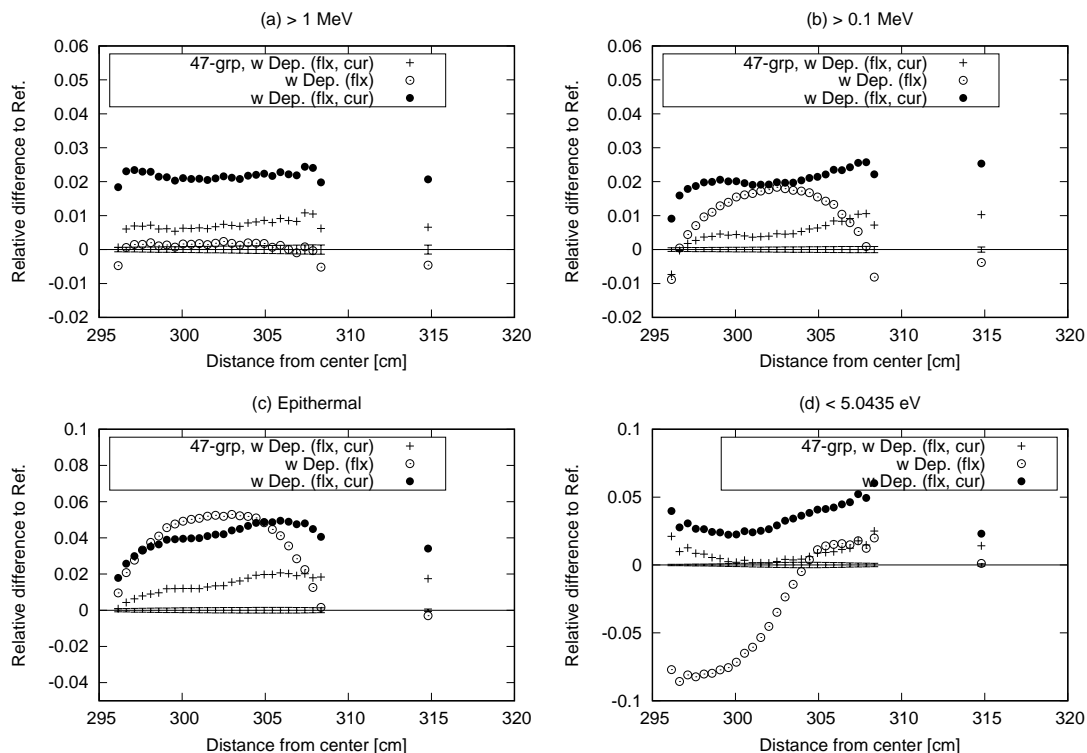


Fig. 17: Spatial distributions of errors in neutron flux in the jet pump and water regions (19-group)

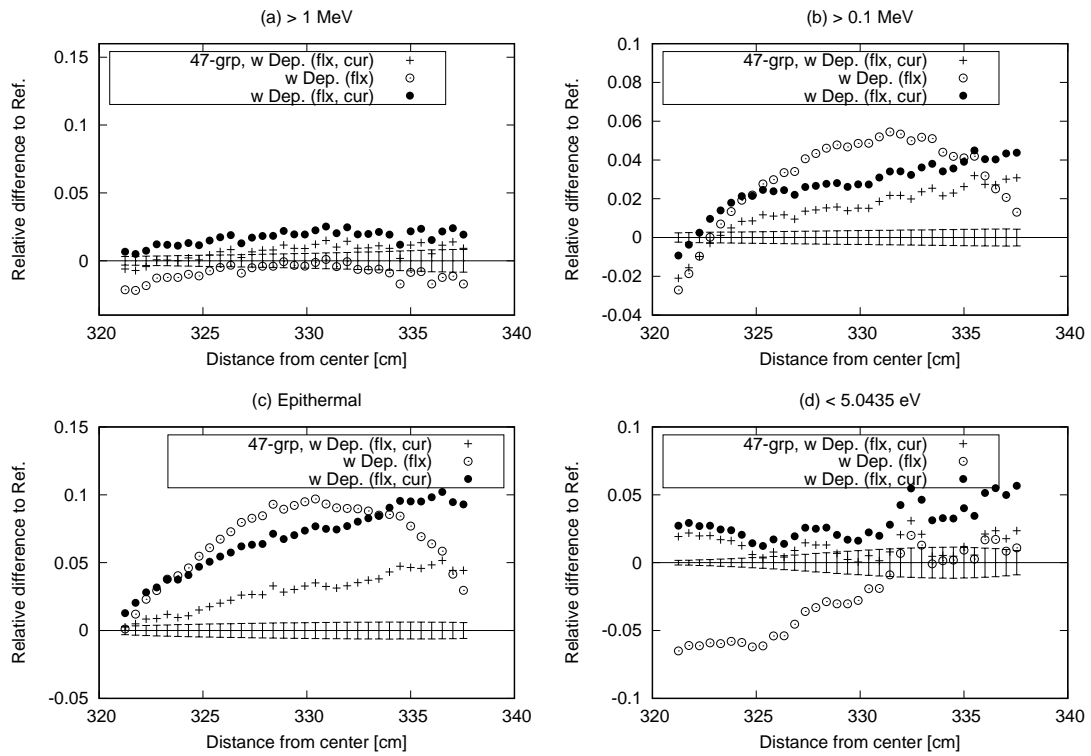


Fig. 18: Spatial distributions of errors in neutron flux in the pressure vessel region (19-group)

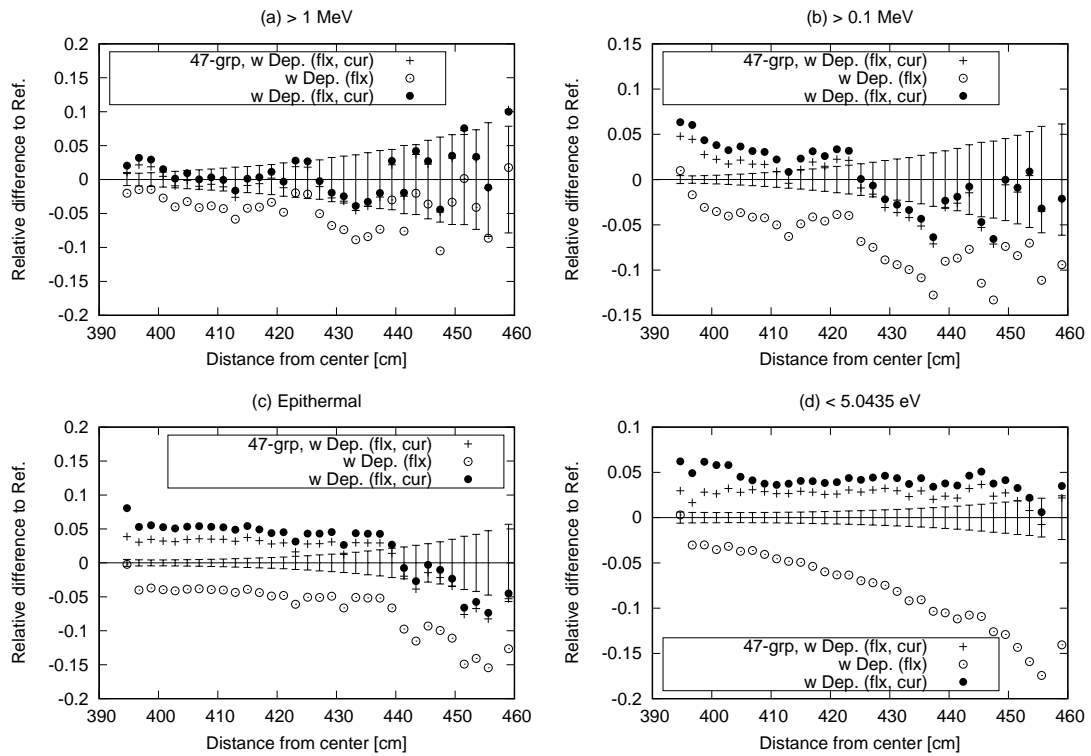


Fig. 19: Spatial distributions of errors in neutron flux in the reactor shielding and outer shell regions (19-group)

前述の19群構造をさらに簡略化した9群構造で同様の計算を行った。得られた結果を Fig. 20 から Fig. 22 に示す。

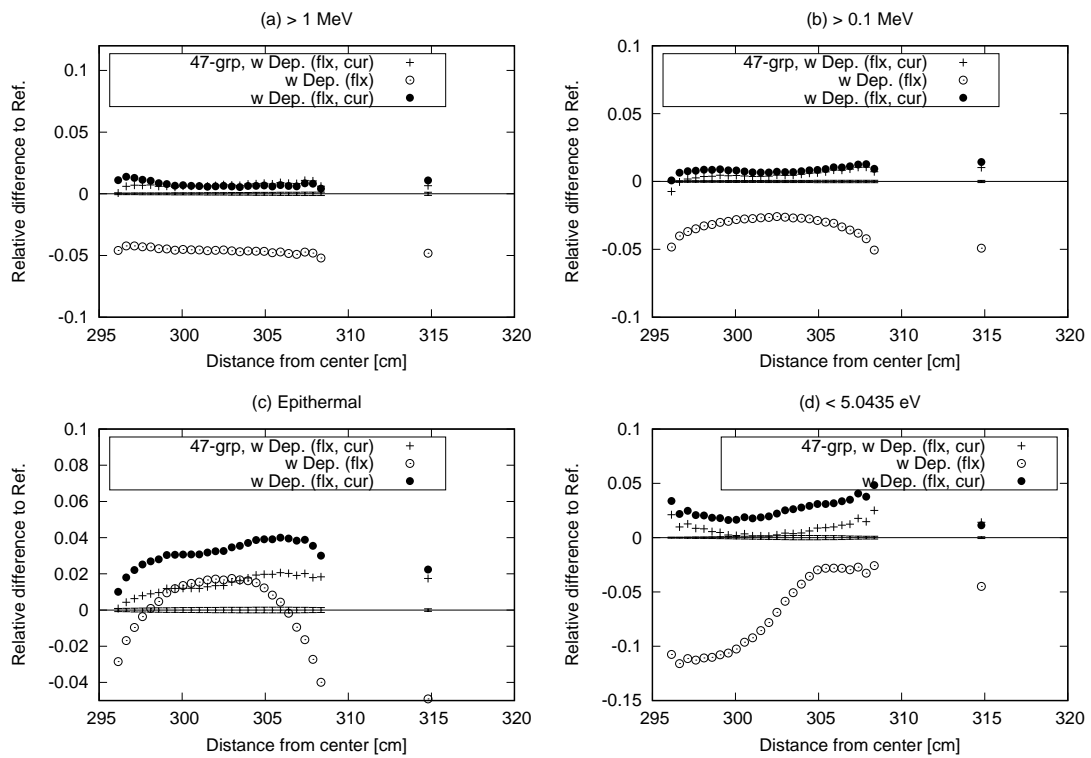


Fig. 20: Spatial distributions of errors in neutron flux in the jet pump and water regions (9-group)

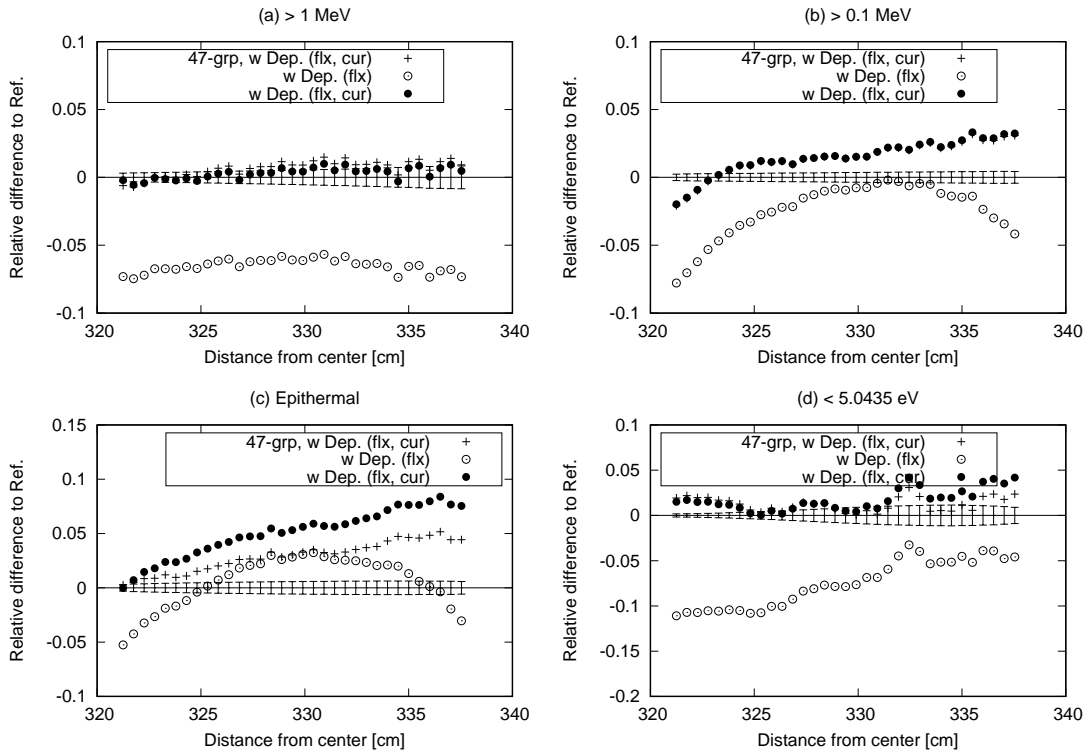


Fig. 21: Spatial distributions of errors in neutron flux in the pressure vessel region (9-group)

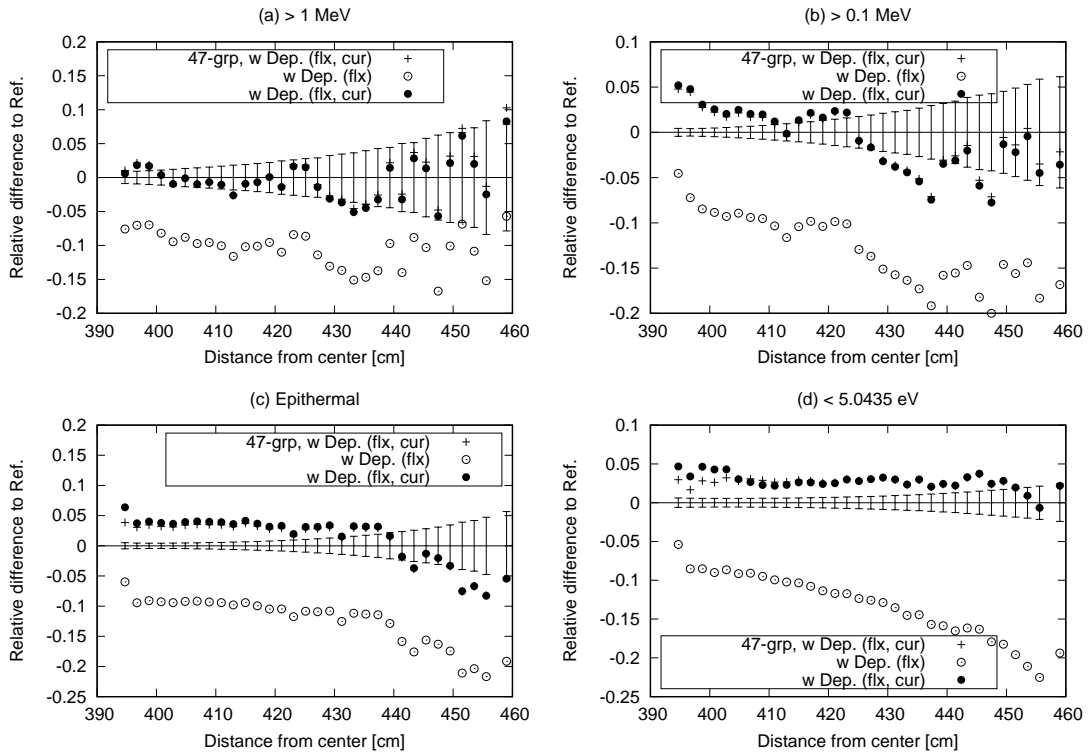


Fig. 22: Spatial distributions of errors in neutron flux in the reactor shielding and outer shell regions (9-group)

Consistent P 近似を用いたときの計算結果を 9、19、47 群で比較したものを Fig. 23 から Fig. 25 に示す。

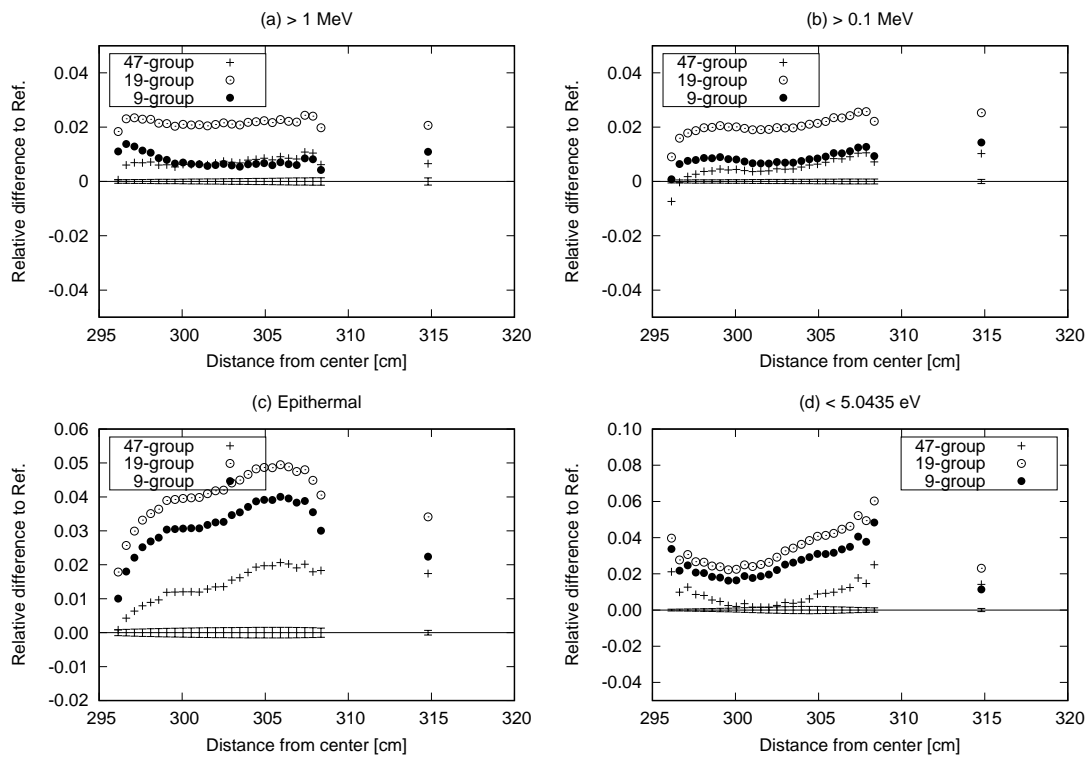


Fig. 23: Spatial distributions of errors in neutron flux in the jet pump and water regions



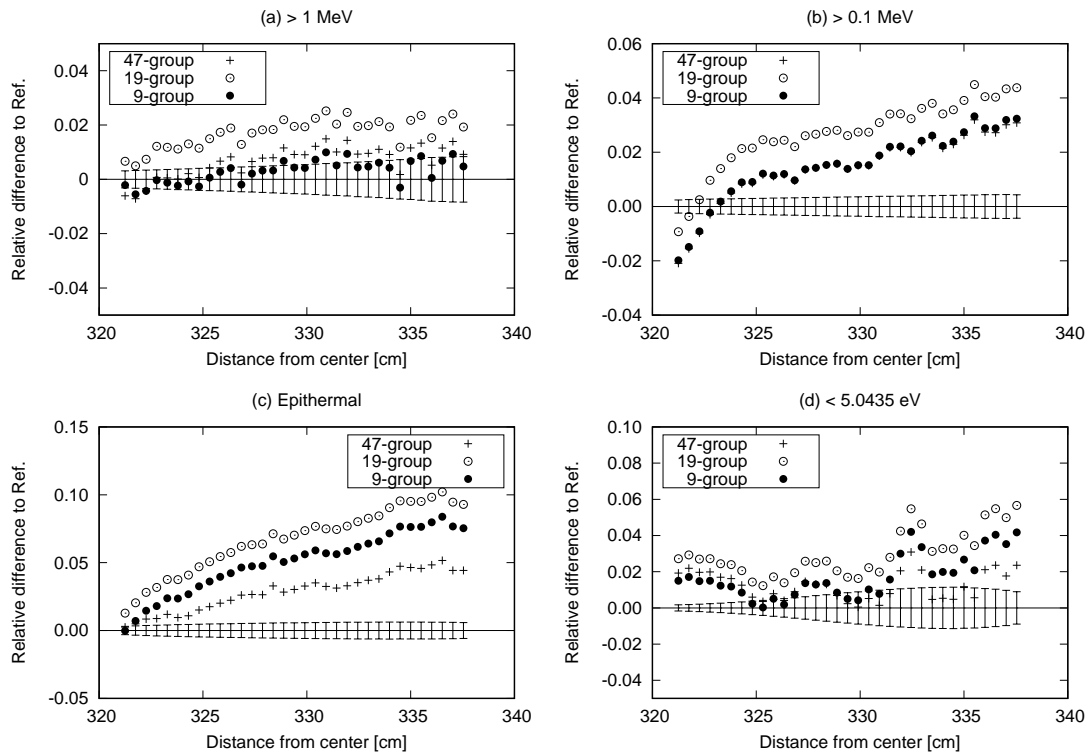


Fig. 24: Spatial distributions of errors in neutron flux in the pressure vessel region

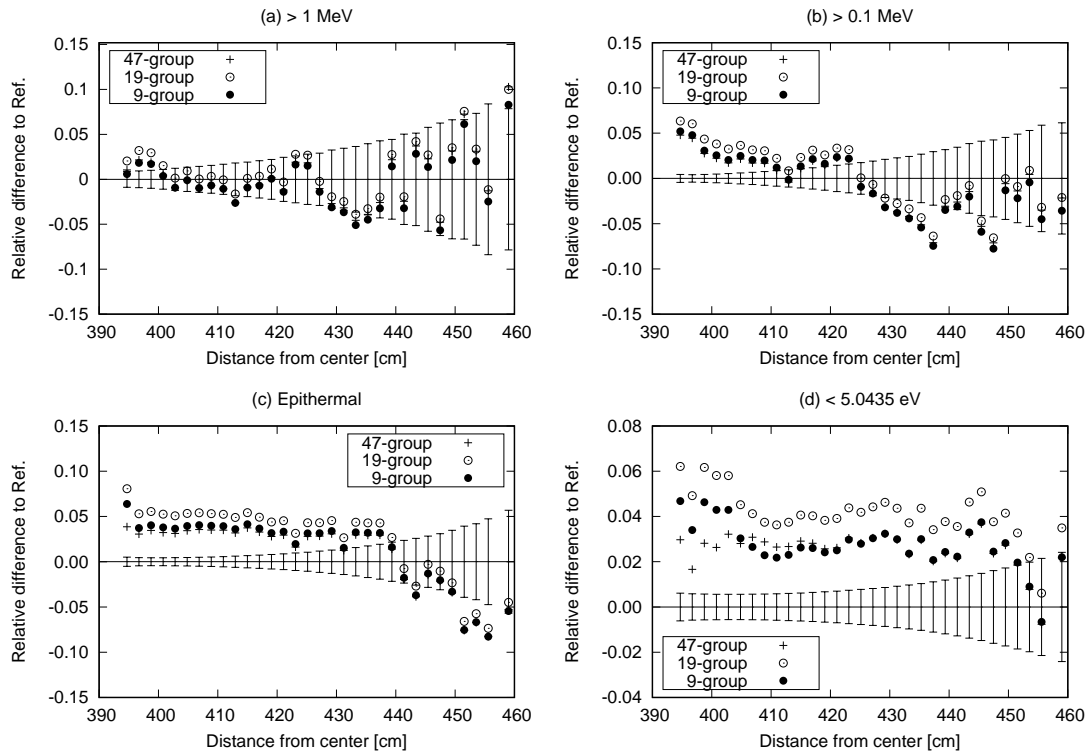


Fig. 25: Spatial distributions of errors in neutron flux in the reactor shielding and outer shell regions

これまでに述べた Consistent P 近似を用いた計算結果は、全てのメッシュについて、その位置での中性子束とカレントを用いて縮約した断面積を用いて得たものである。少数群全断面積の位置依存性は主に SS 領域で見られたことから、SS 領域のみについてメッシュ毎の中性子束とカレントを用いて縮約した計算を、9、19、47 群により行った。メッシュ毎の情報を用いない媒質に対しては、FRENDY で直接的に求めた少数群断面積を用いた。9 群の結果を Fig. 26 から 28 に、19 群の結果を Fig. 29 から 31 に、47 群の結果を Fig. 32 から 34 に、それぞれ示す。

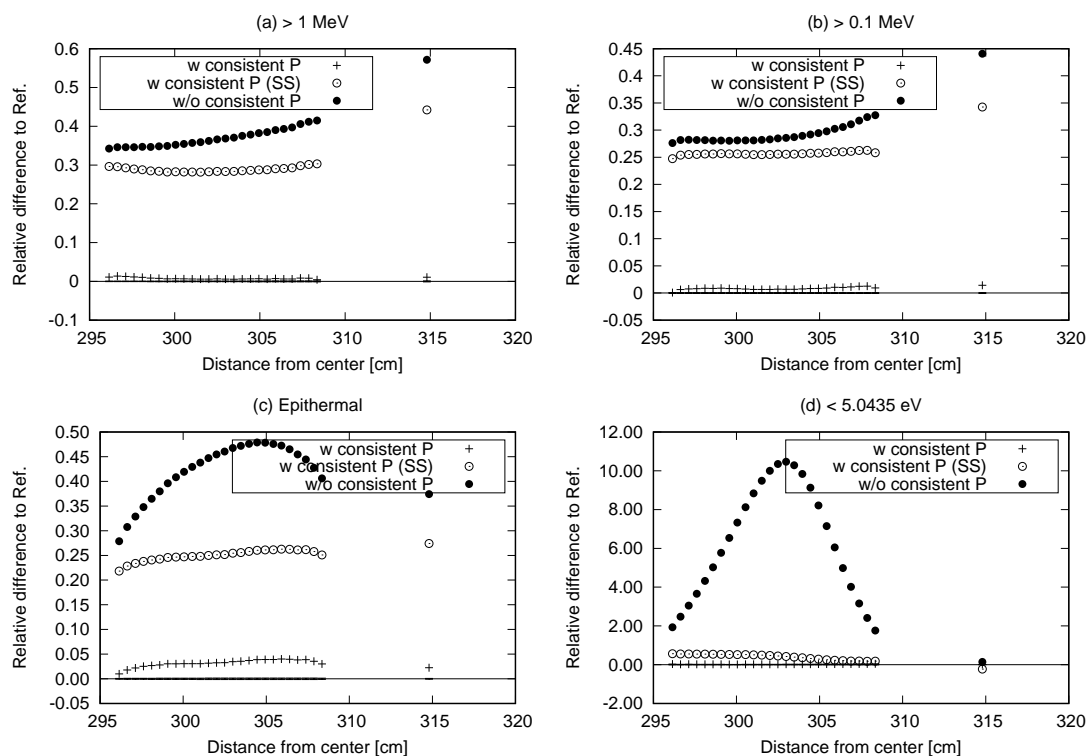


Fig. 26: Spatial distributions of errors in neutron flux in the jet pump and water regions with the 9-group consistent P approximation

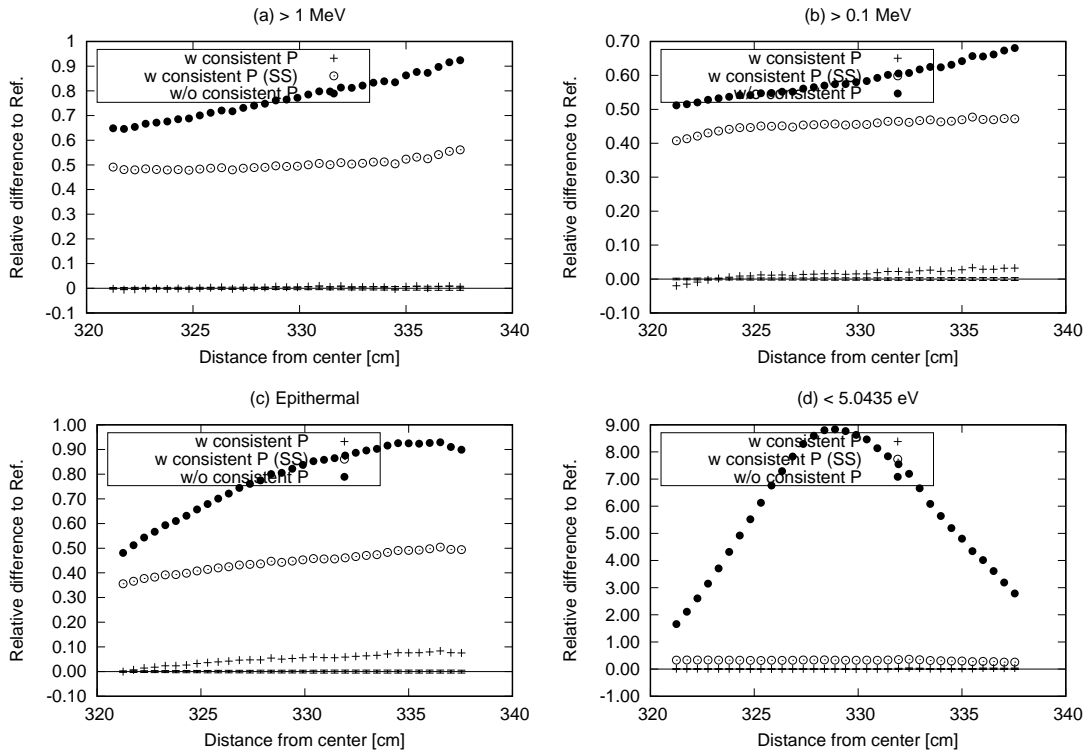


Fig. 27: Spatial distributions of errors in neutron flux in the pressure vessel region with the 9-group consistent P approximation

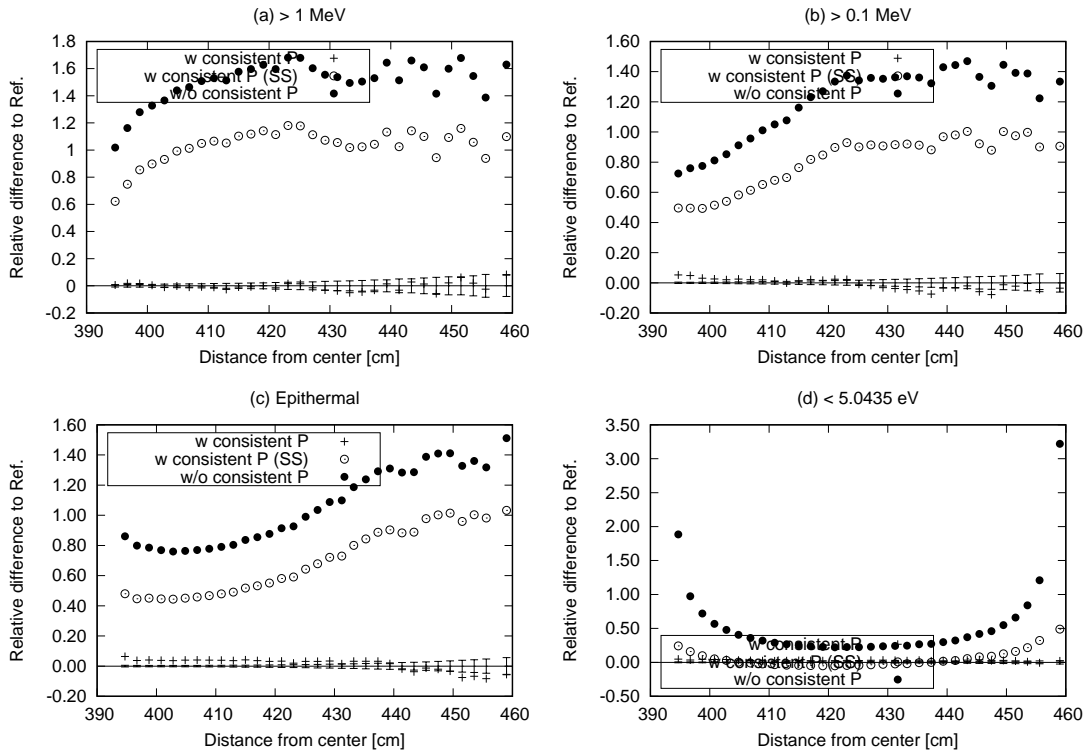


Fig. 28: Spatial distributions of errors in neutron flux in the reactor shielding and outer shell regions with the 9-group consistent P approximation

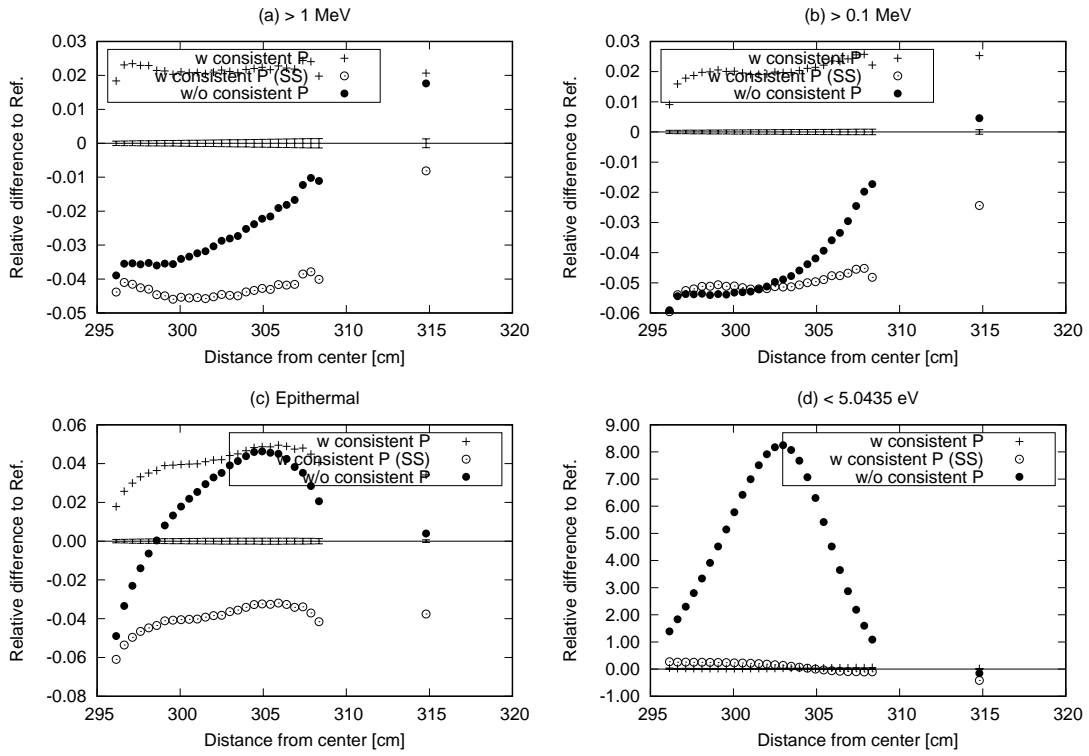


Fig. 29: Spatial distributions of errors in neutron flux in the jet pump and water regions with the 19-group consistent P approximation

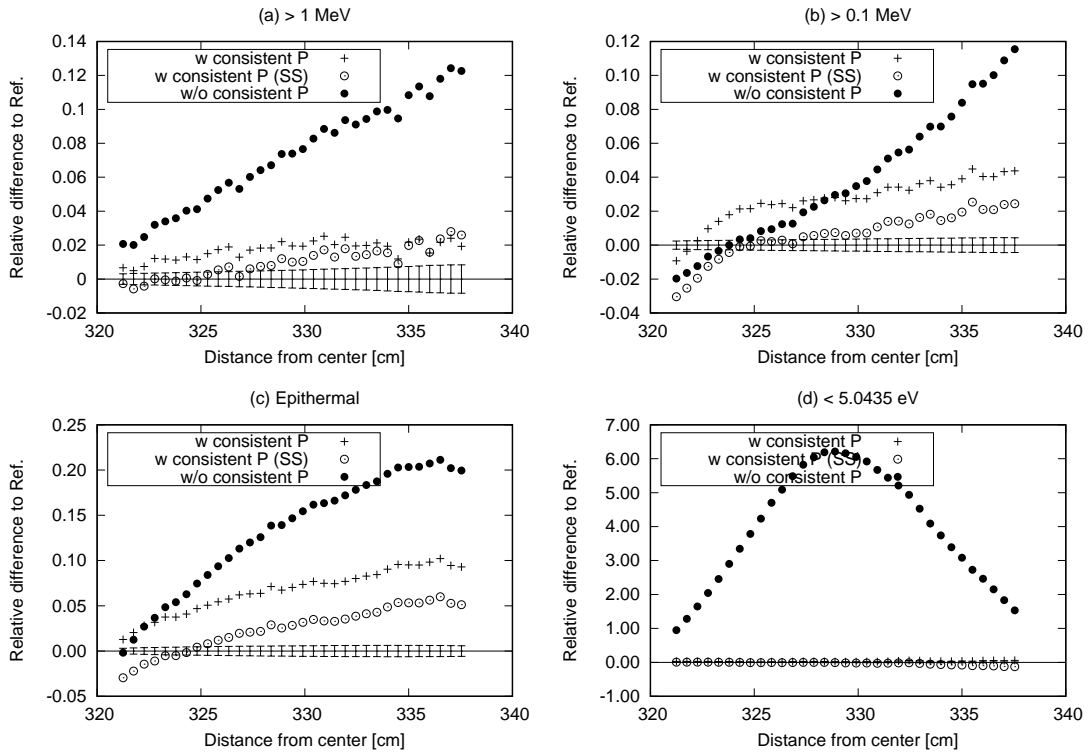


Fig. 30: Spatial distributions of errors in neutron flux in the pressure vessel region with the 19-group consistent P approximation

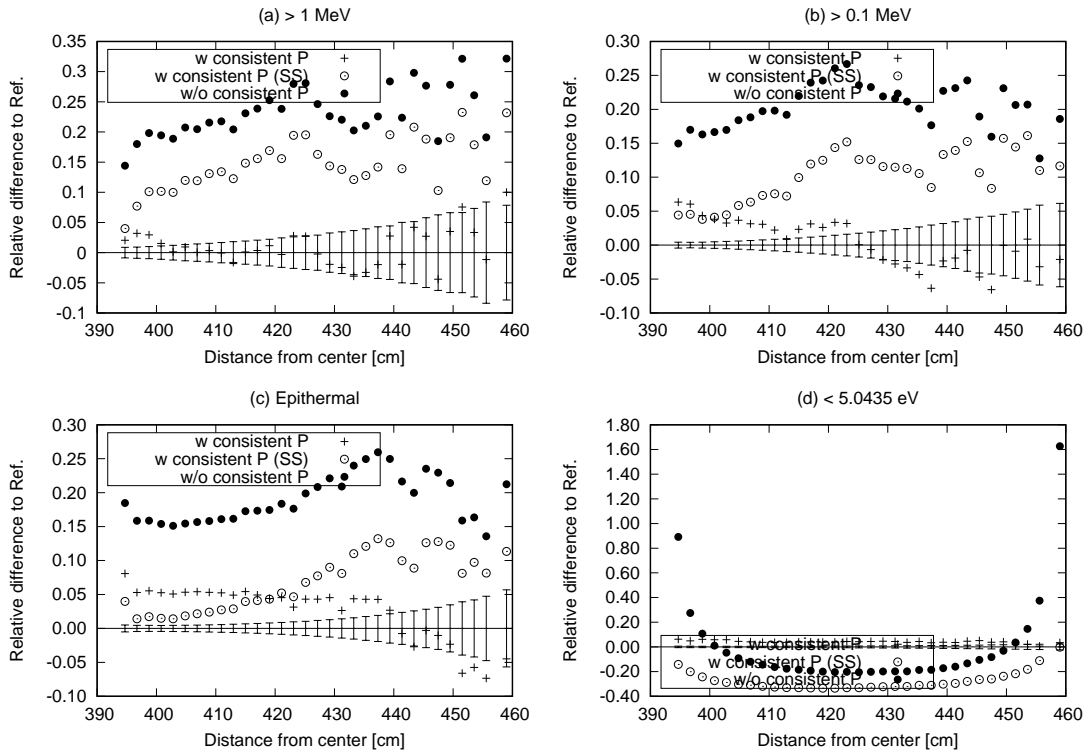


Fig. 31: Spatial distributions of errors in neutron flux in the reactor shielding and outer shell regions with the 19-group consistent P approximation

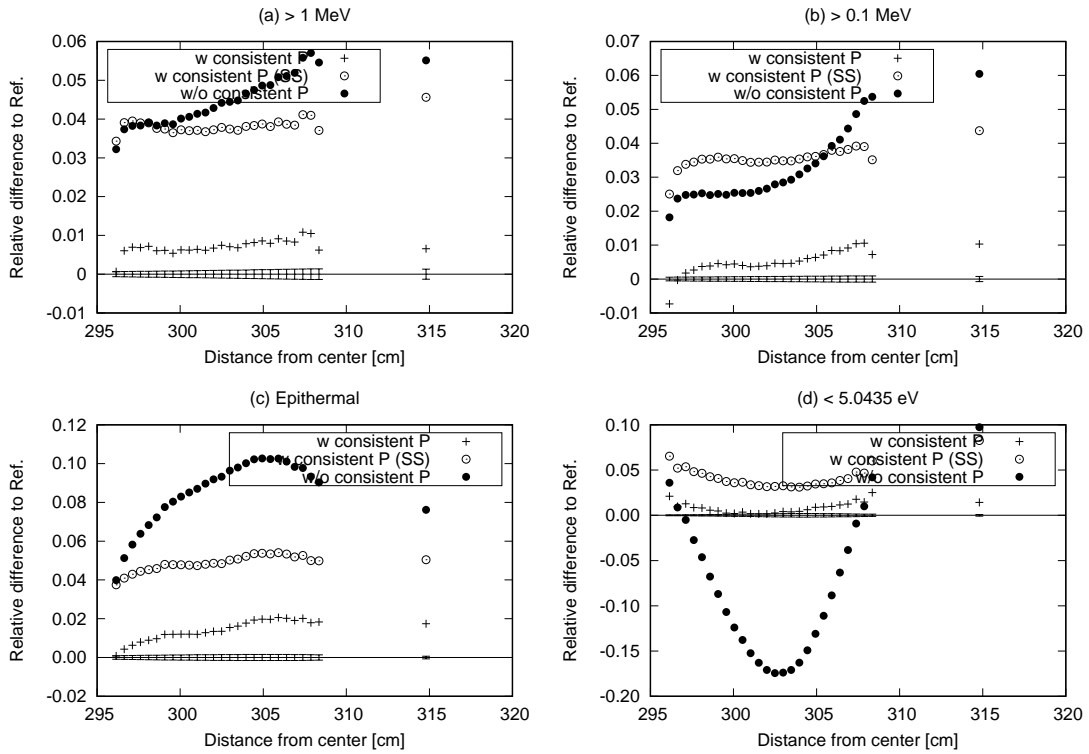


Fig. 32: Spatial distributions of errors in neutron flux in the jet pump and water regions with the 47-group consistent P approximation

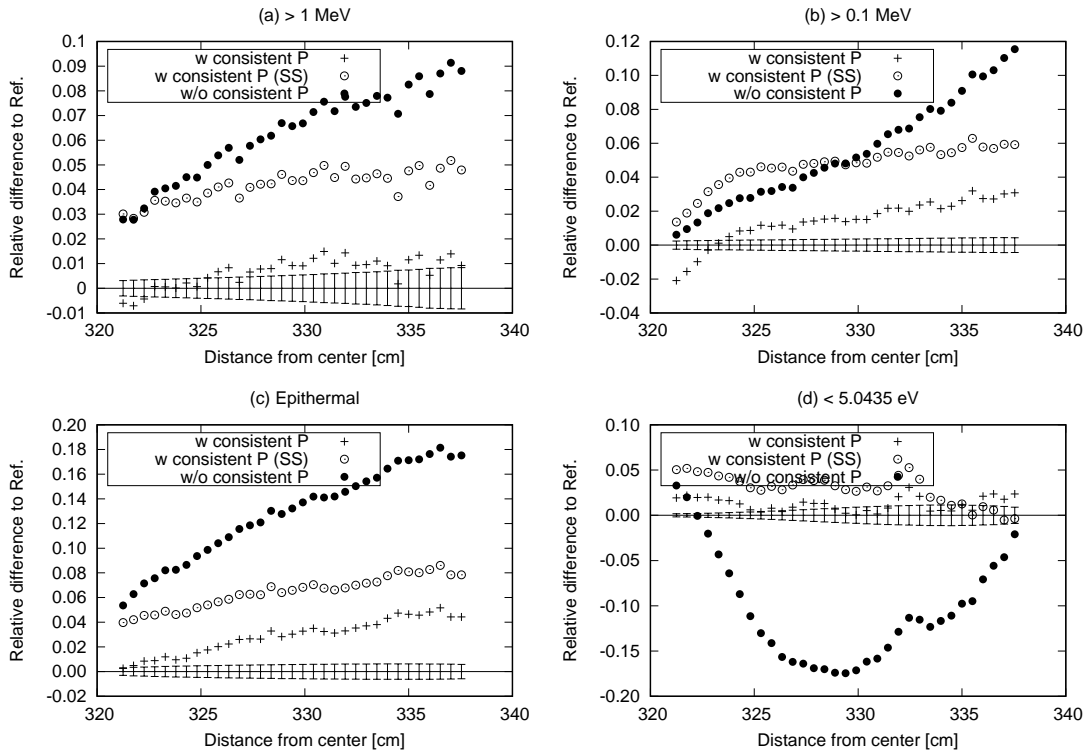


Fig. 33: Spatial distributions of errors in neutron flux in the pressure vessel region with the 47-group consistent P approximation

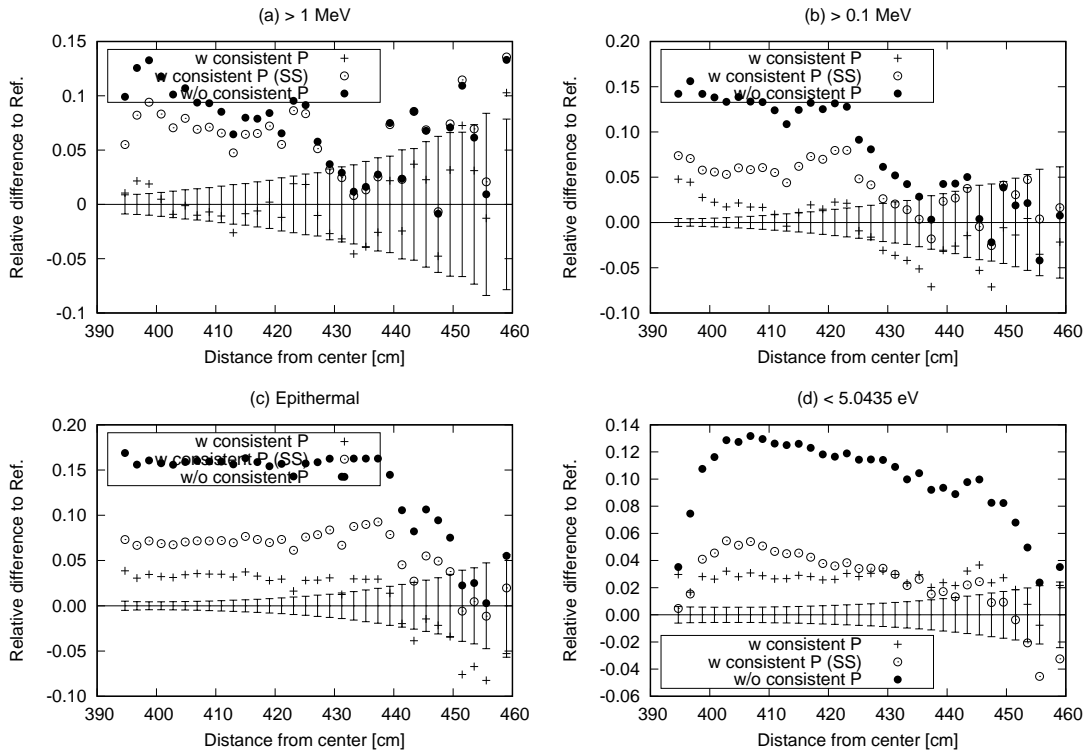


Fig. 34: Spatial distributions of errors in neutron flux in the reactor shielding and outer shell regions with the 47-group consistent P approximation

メッシュ毎の中性子束とカレントを用いて縮約する媒質を限定させた計算を、9、19、47群により行った。9群の結果を Fig. 35 から 37 に、19群の結果を Fig. 38 から 40 に、47群の結果を Fig. 41 から 43 に、それぞれ示す。SS領域以外についても、Consistent P 近似の導入効果が比較的大きいことが分かる。共鳴構造が見られないはずの水領域における効果については、散乱行列を介したものであると考えられる。

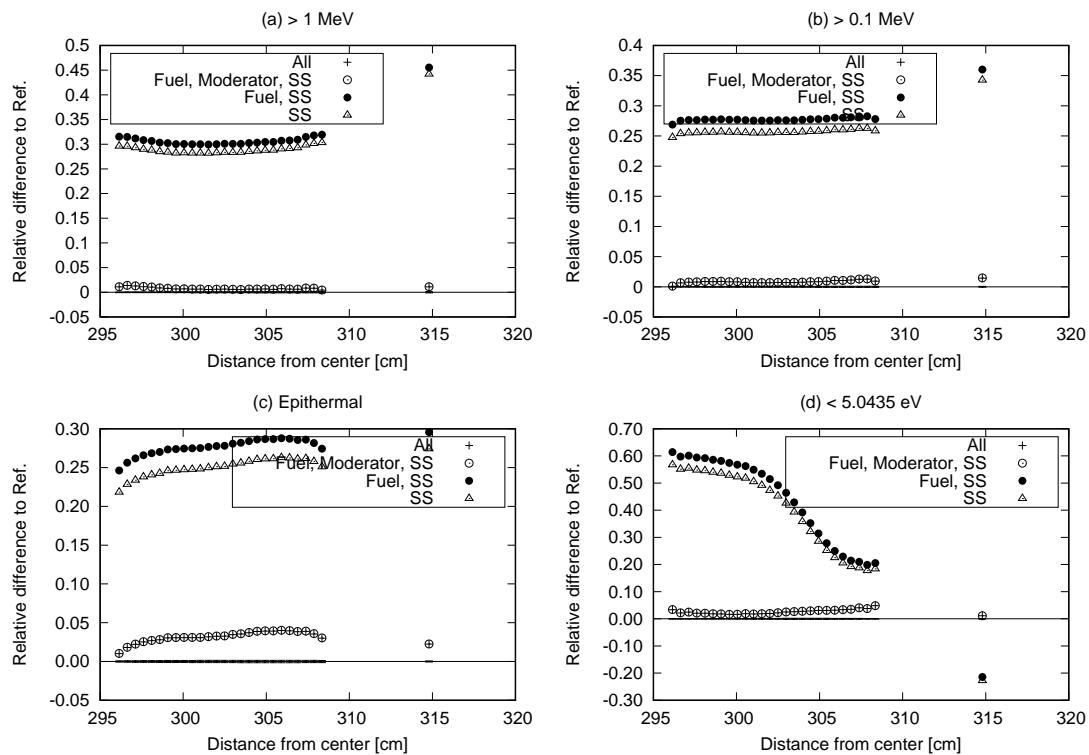


Fig. 35: Spatial distributions of errors in neutron flux in the jet pump and water regions with the 9-group consistent P approximation

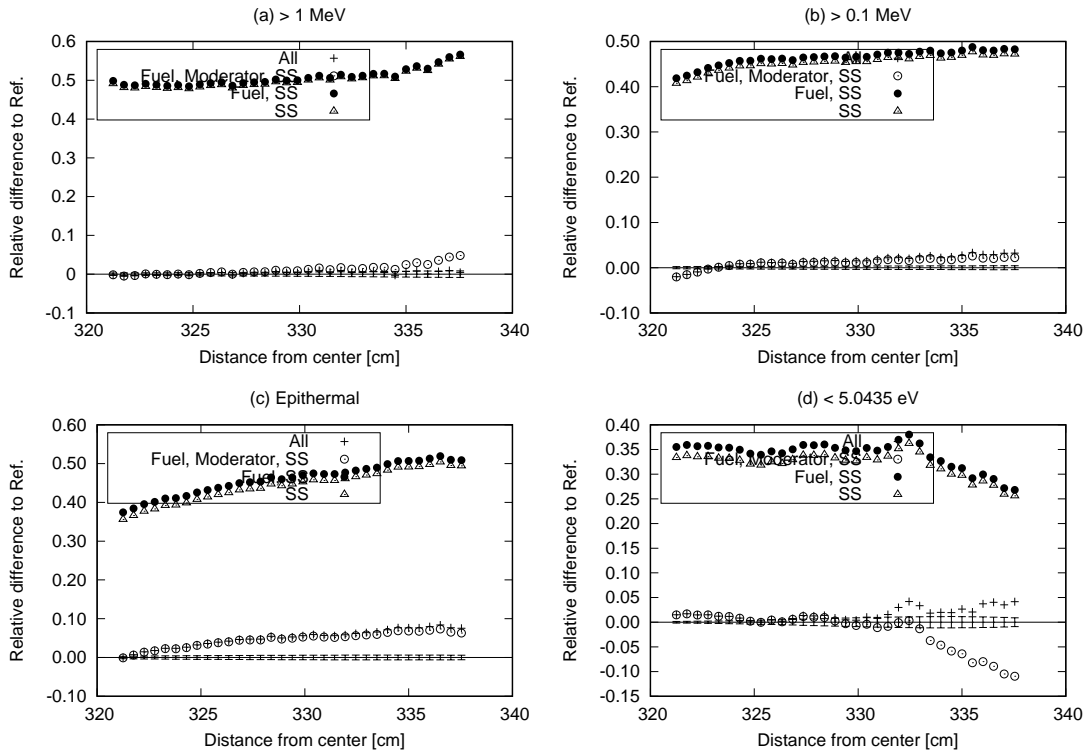


Fig. 36: Spatial distributions of errors in neutron flux in the pressure vessel region with the 9-group consistent P approximation

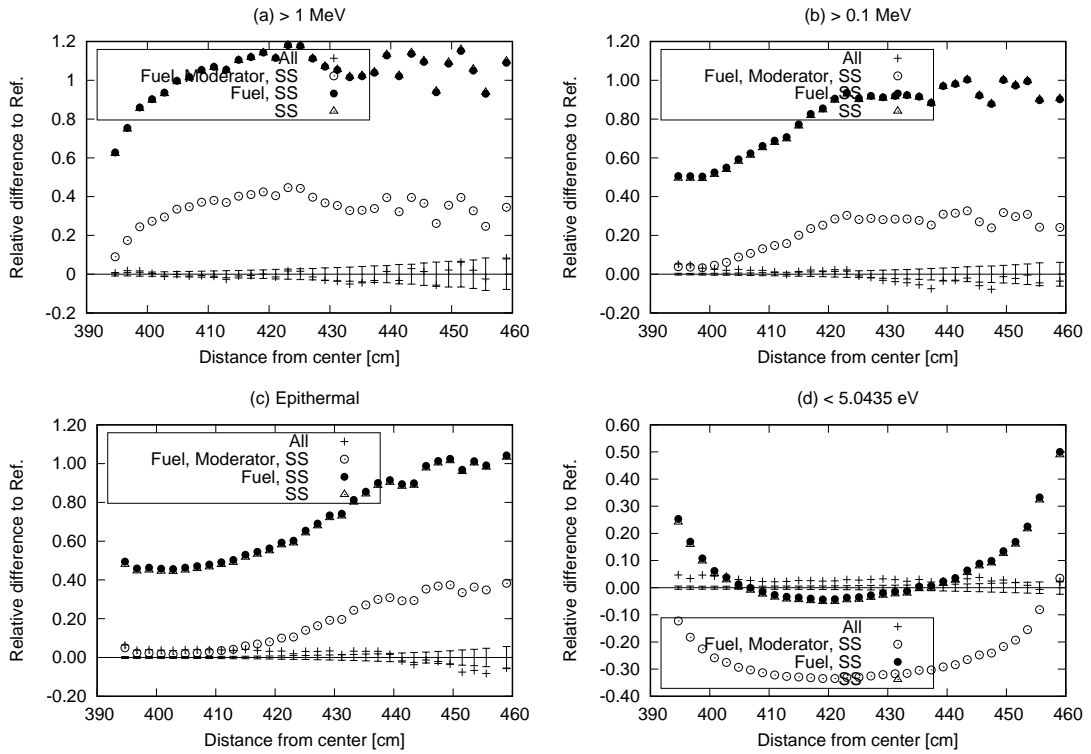


Fig. 37: Spatial distributions of errors in neutron flux in the reactor shielding and outer shell regions with the 9-group consistent P approximation



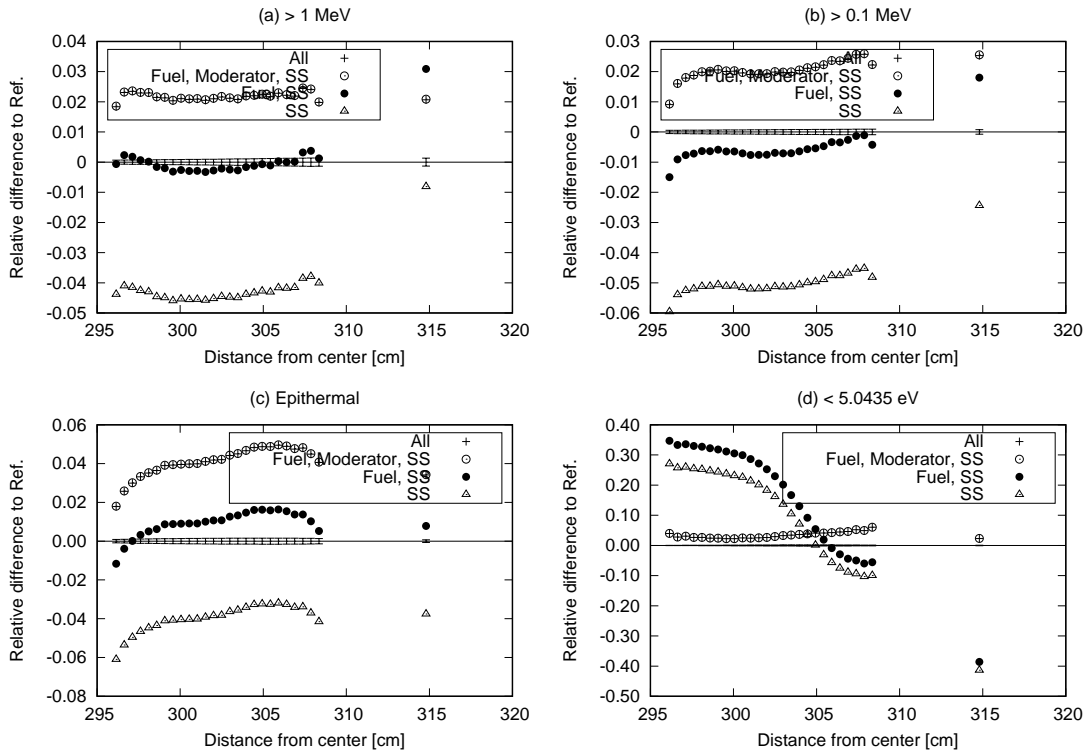


Fig. 38: Spatial distributions of errors in neutron flux in the jet pump and water regions with the 19-group consistent P approximation

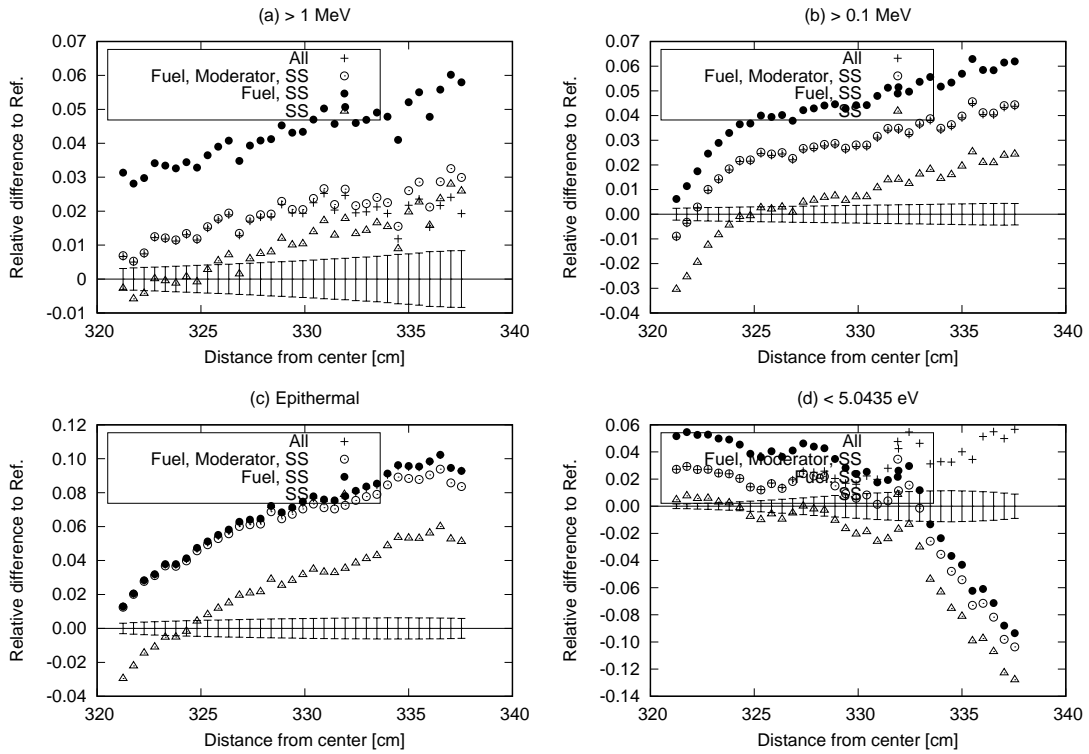


Fig. 39: Spatial distributions of errors in neutron flux in the pressure vessel region with the 19-group consistent P approximation

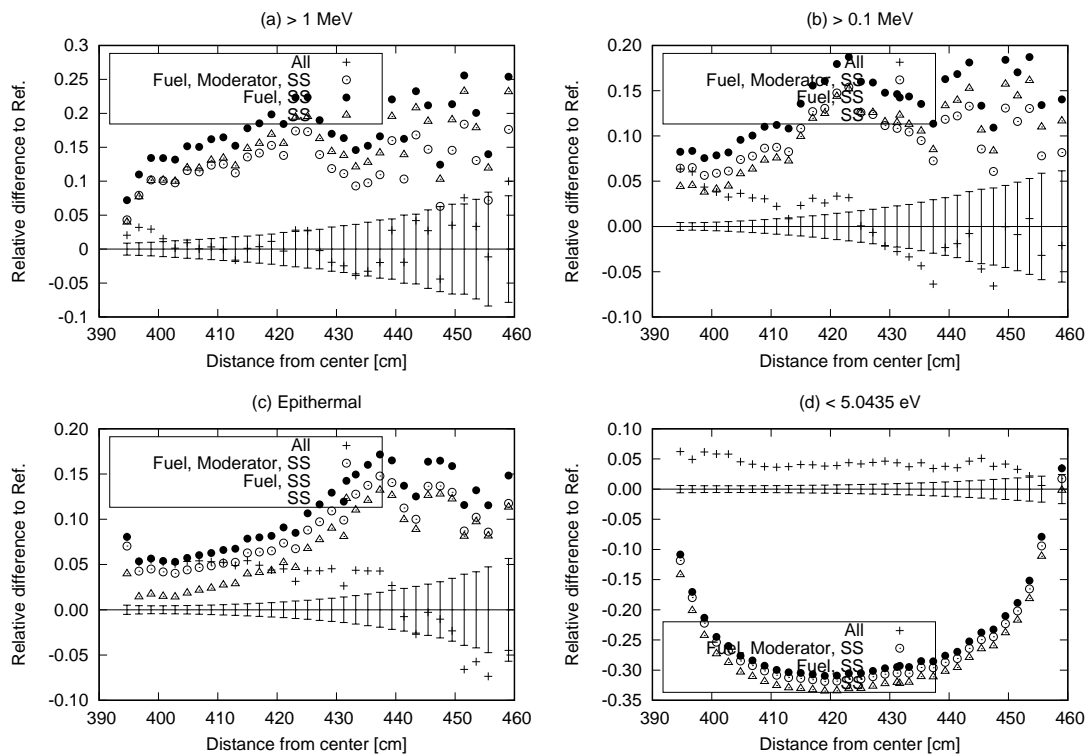


Fig. 40: Spatial distributions of errors in neutron flux in the reactor shielding and outer shell regions with the 19-group consistent P approximation

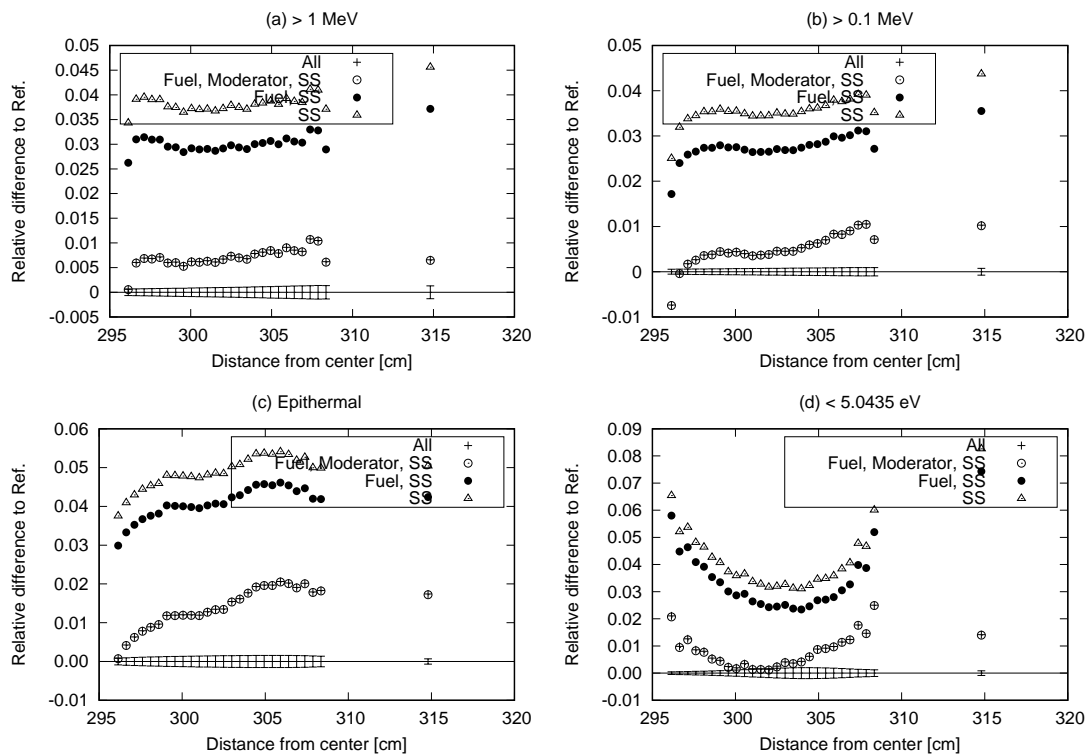


Fig. 41: Spatial distributions of errors in neutron flux in the jet pump and water regions with the 47-group consistent P approximation

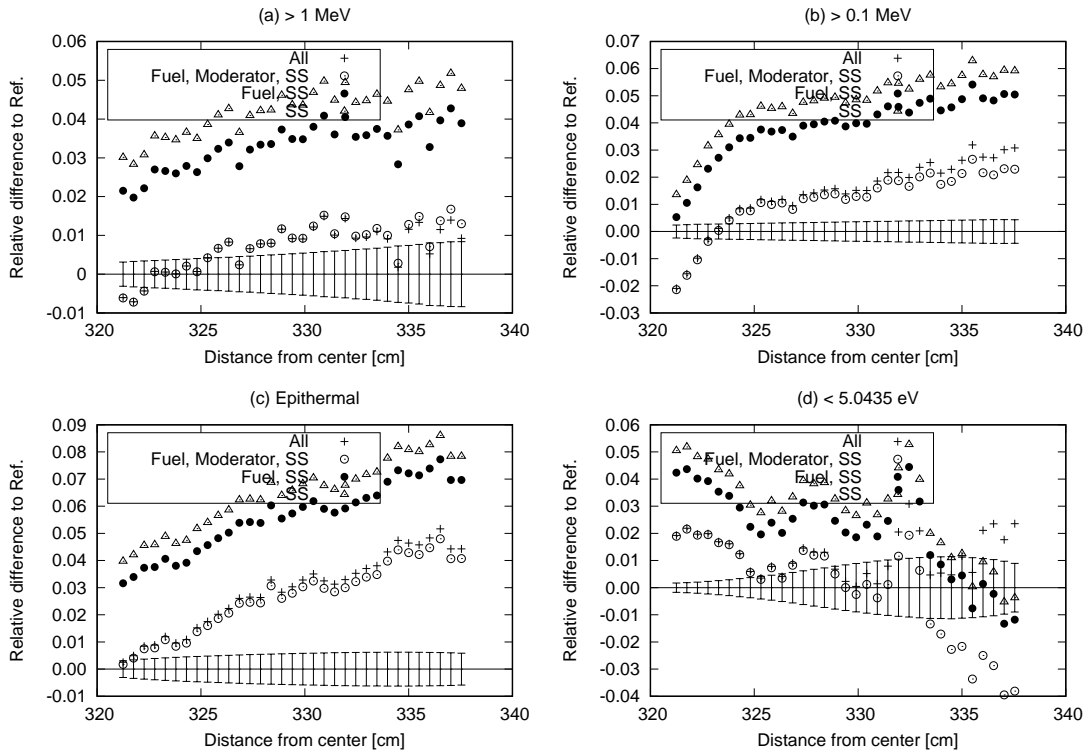


Fig. 42: Spatial distributions of errors in neutron flux in the pressure vessel region with the 47-group consistent P approximation

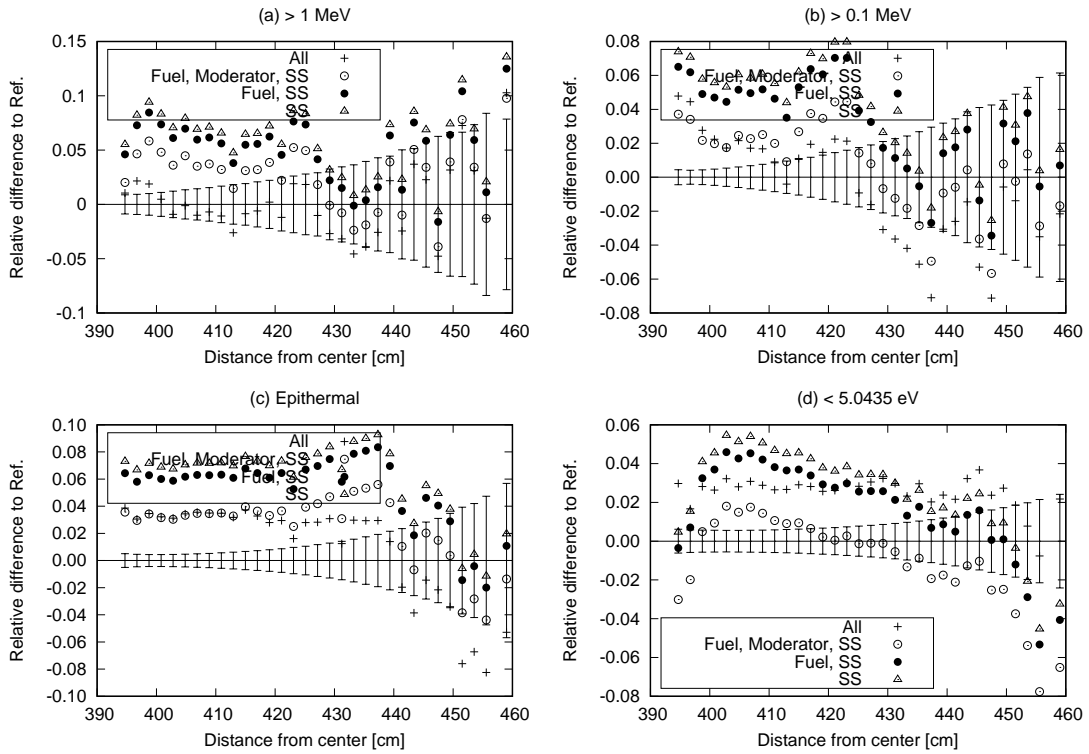


Fig. 43: Spatial distributions of errors in neutron flux in the reactor shielding and outer shell regions with the 47-group consistent P approximation

contribution theory を用いて群構造の最適化を行った検討があり、最適化された 46 群構造が提案されている [1]。この群構造について同様の計算を行った結果を Fig. 44 から Fig. 46 に示す。

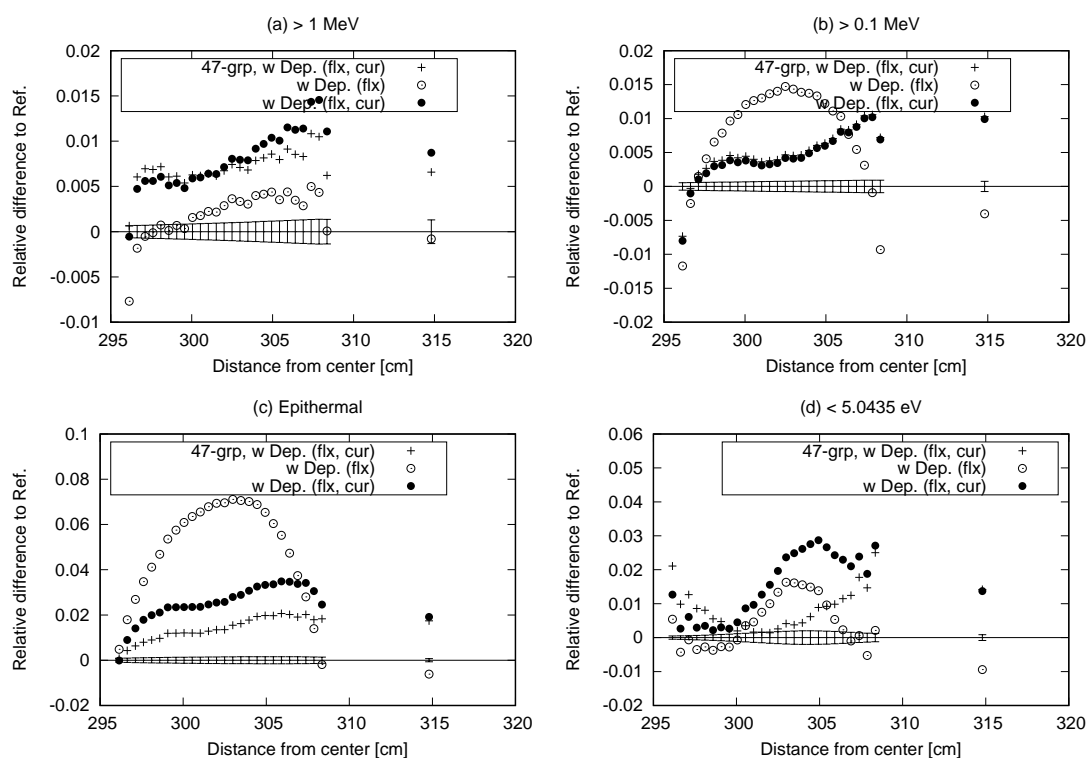


Fig. 44: Spatial distributions of errors in neutron flux in the jet pump and water regions (46-group)

## 参考文献

- [1] J. Hu, B. Zhang, N. Dai, C. Liu, Y. Chen, "Optimization algorithms based on contribution theory for broad-group energy structures in shielding calculations," *Rad. Phys. Chem.*, **186**, 109547 (2021).

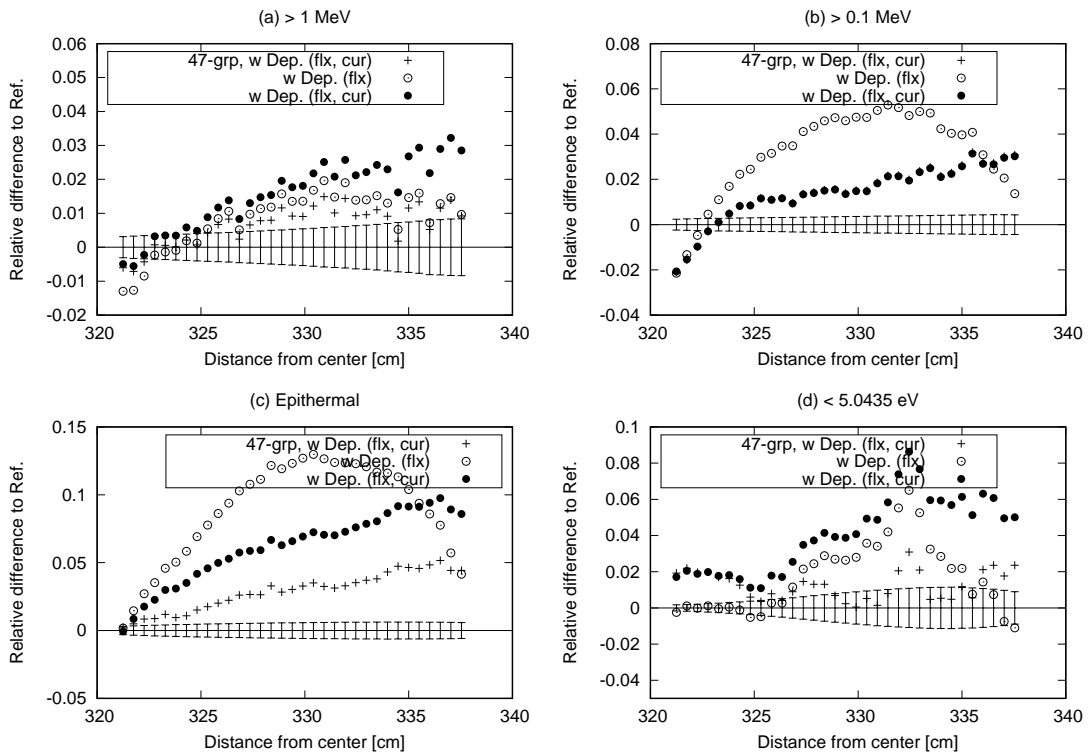


Fig. 45: Spatial distributions of errors in neutron flux in the pressure vessel region (46-group)

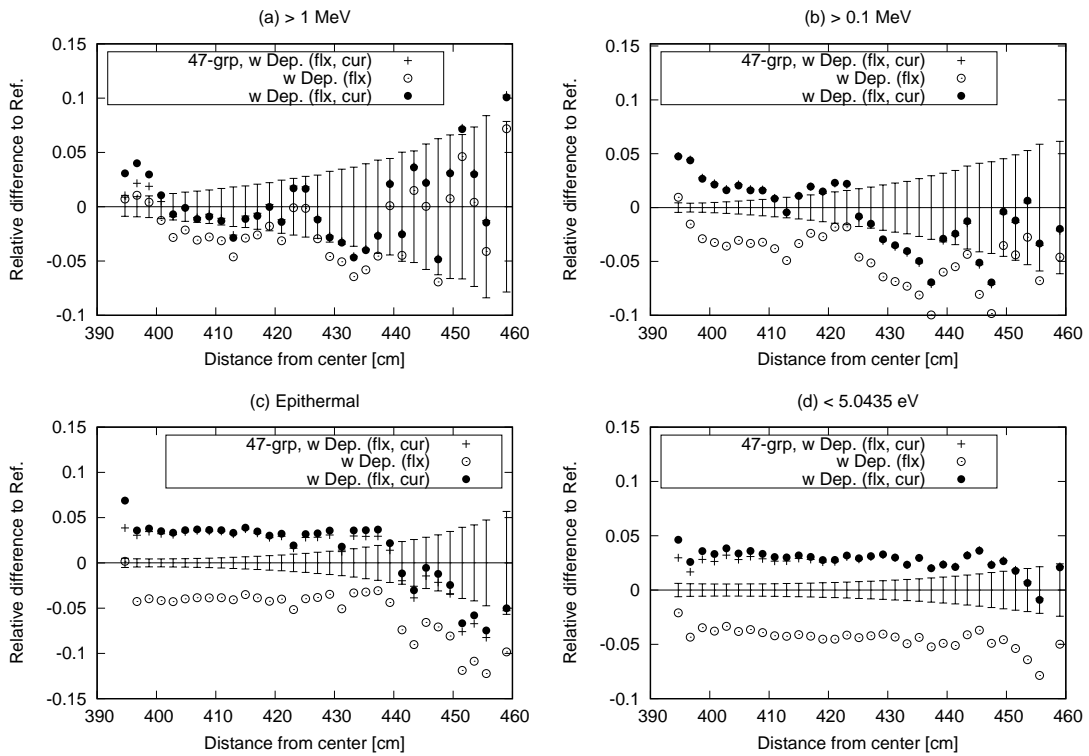


Fig. 46: Spatial distributions of errors in neutron flux in the reactor shielding and outer shell regions (46-group)