

話題・解説

2015 年度核データ部会賞

学術賞

—⁷⁷Se(γ ,n)断面積測定と⁷⁹Se(n, γ)断面積の不確かさ評価—

日本原子力研究開発機構
原子力センシング研究グループ

北谷 文人

kitatani.fumito@jaea.go.jp

はじめに

⁷⁹Se は長寿命核分裂生成物 (LLFP) の一つで、使用済み核燃料の地層処分負荷軽減のために、短寿命核種・安定核種への核変換の対象としてあげられている。したがって、⁷⁹Se の核変換研究・開発のためには核変換反応である中性子捕獲反応や光核反応の断面積データが必要である。しかし、現時点では ⁷⁹Se は、断面積測定用試料の入手が極めて困難で、核変換反応断面積の直接測定ができない。そのため、⁷⁹Se の核変換反応断面積は原子核反応統計モデル計算等を用いて見積られている。このため、計算値は不確かさが付与されていない不十分なものであった。この問題を解決するために、中性子捕獲反応の逆反応である光核反応から、統計モデル計算の共通物理量である γ 線強度関数を導出して中性子捕獲反応断面積の精度高めることを試みた。そのとき、Se 同位体についても、これまで測定してきた ^{76,78,80}Se の光核反応断面積に加え ⁷⁷Se の光核反応断面積の測定を(γ ,n)反応のしきい値から(γ ,2n)反応のしきい値の領域で行い、 γ 線強度関数を導出し、安定核の中性子捕獲反応断面積の計算値及び実験値を比較することで計算の不確かさを明らかにした。これから、不確かさを明らかにした ⁷⁹Se の(n, γ)断面積データを提供した。研究の詳細は、文献[1-3]に記載されている。本レビューでは、研究手法及び得られた結果について解説する。

● ⁷⁷Se(γ ,n) 断面積測定

⁷⁷Se(γ ,n)断面積測定の光源としては、レーザー逆コンプトン散乱 (Laser Compton-Scattering : LCS) γ 線を用いた。LCS γ 線は低バックグラウンドで波長可変の準単色 γ 線光源である。これを用いることで、(γ ,n)反応しきい値近傍の小さい(γ ,n)断面積の測定を精度

良く行うことができる。このしきい値近傍の (γ, n) 断面積は、中性子捕獲反応断面積を計算する際の γ 線強度関数決定に非常に重要である。今回測定を行った ^{77}Se の測定用試料としては、99.66%に同位体濃縮した試料を用いた。光核反応で発生する中性子の測定には、 4π 中性子検出器を用いた。入射 γ 線のエネルギースペクトルの測定には高分解能・高エネルギー光スペクトロメーター、入射 γ 線の光子数の測定には大容量 NaI(Tl)検出器を用いた。

測定解析手法は、以前の Se 同位体測定結果 Ref[1,2]から過去の測定に比べ (γ, n) 反応のしきい値近傍での測定精度が高いことが分かっている。 ^{77}Se についても同様の測定解析を行った結果を過去の測定結果と共に Fig.1 に示す Ref[3]。これから、今回の測定結果は過去の測定を支持していることがわかる。

● $^{79}\text{Se}(n, \gamma)$ 断面積の不確かさ評価

^{79}Se の (n, γ) 断面積の計算には、直接測定が困難な核種の捕獲反応断面積を見積もる手法である γ 線強度関数法を用いた。 γ 線強度関数法は、 (n, γ) 断面積を見積もるために用いる原子核反応統計モデル計算で必要な物理量の γ 線強度関数に対して、 (n, γ) 反応の逆反応である (γ, n) 反応の断面積を用いて実験的な制約を与え、 (n, γ) 断面積計算の確度を向上させる方法である。計算においては、まず、本研究で得た ^{77}Se と先に測定した ^{78}Se の (γ, n) 断面積の測定結果を用いて ^{77}Se と ^{78}Se の γ 線強度関数に実験的な制約を与えた。次に、これらの制約を与えた γ 線強度関数を用いて、原子核反応計算コード CCONE を用いて ^{76}Se と ^{77}Se の keV 領域の (n, γ) 断面積の計算を行った。そして、計算結果を既存の ^{76}Se と ^{77}Se の keV 領域の (n, γ) 断面積及び中性子捕獲 γ 線スペクトルの測定結果と比較することで、計算結果の信頼性の確認と計算結果の不確かさを見積もった。Fig.2 に ^{76}Se と ^{77}Se の keV 領域の (n, γ) 断面積の計算結果を示す。これから、 (γ, n) 反応の断面積を用いて実験的な制約を与えた γ 線強度関数を用いた方が実験値を良く再現することがわかる。続いて Fig.3 に ^{77}Se の中性子捕獲 γ 線スペクトルの実験値と計算値を示す Ref[3]。これからも、実験的な制約を与えた γ 線強度関数を用いた計算結果が実験値を良く再現する。よって、この実験的な制約を与えた γ 線強度関数を用いる手法の有効性が分かったので、続いて、 ^{80}Se の (γ, n) 断面積測定結果を用いて ^{80}Se の γ 線強度関数に実験的な制約を与え、 ^{79}Se の (n, γ) 断面積を計算した。この結果を Fig.4 に JENDL-4.0 での (n, γ) 断面積と共に示す Ref[3]。 ^{79}Se の (n, γ) 断面積計算値の不確かさは、 ^{76}Se と ^{77}Se の (n, γ) 断面積計算と実験値の差異から計算の不確かさを 21%として、 ^{80}Se の (γ, n) 断面積測定結果から γ 線強度関数を算出する際の不確かさが 15%あるとして、その 2 乗和の平方から 26%とした。これより、実測値が存在しない ^{79}Se の (n, γ) 断面積について、不確かさを明らかにした計算値を示すことができた。

● まとめ

^{79}Se の (n, γ) 断面積データを提供することを目的に、これまで、測定した $^{76, 78, 80}\text{Se}$ の (γ, n)

断面積に続いて ^{77}Se の (γ, n) 断面積測定を実施した。その結果、測定値は、過去の測定結果を支持する結果を得た。

続いて、不確かさを明らかにして ^{79}Se の (n, γ) 断面積を計算するために γ 線強度関数を測定された (γ, n) 断面積から求めることで実験的な制約を与え統計モデル計算の精度を向上させた。安定核での (n, γ) 断面積の計算値と実験値の差異から統計モデル計算の不確かさを明らかにして、 ^{79}Se の (n, γ) 断面積について不確かさを明らかにした計算値を示した。この結果、不確かさは $\pm 26\%$ で、JENDL-4.0での値と比べ、 $1/3 \sim 1/4$ と大きく異なる値を得た。本研究成果がJENDL-4.0等の核データライブラリに取り入れられて、広く研究者に利用されることが期待される。

参考文献

1. F. Kitatani, H. Harada, S. Goko, H. Utsunomiya, H. Akimune, T. Kaihori, H. Toyokawa, K. Yamada, Journal of Nuclear Science and Technology Vol. 47 p.367-375 (2010)
2. F. Kitatani, H. Harada, S. Goko, H. Utsunomiya, H. Akimune, H. Toyokawa, K. Yamada, Journal of Nuclear Science and Technology Vol. 48 p.1017-11024 (2011)
3. F. Kitatani, H. Harada, S. Goko, H. Iwamoto, H. Utsunomiya, H. Akimune, H. Toyokawa, K. Yamada, M. Igashira, Journal of Nuclear Science and Technology on-line (2015)

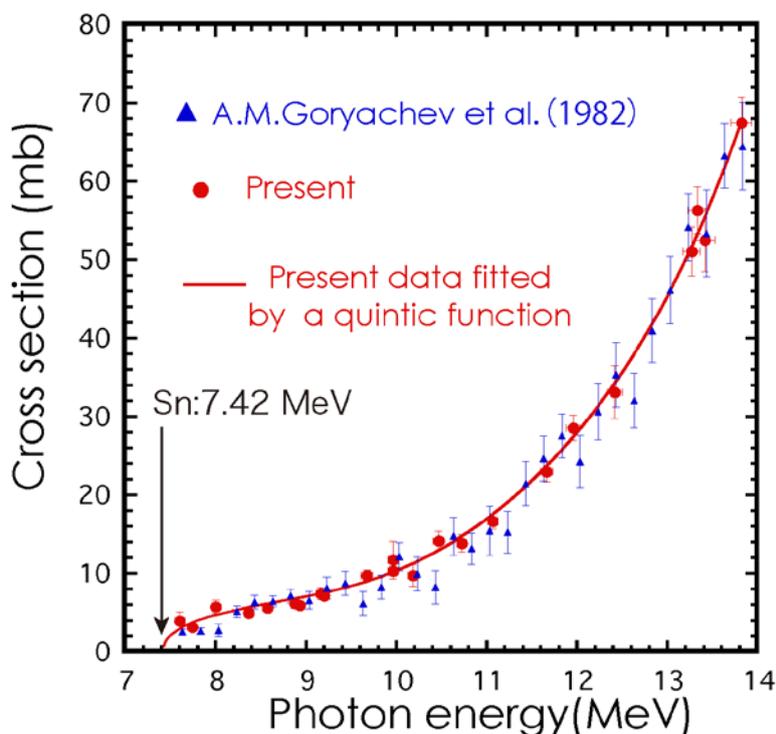


Fig.1 $^{77}\text{Se}(\gamma, n)$ 断面積測定結果

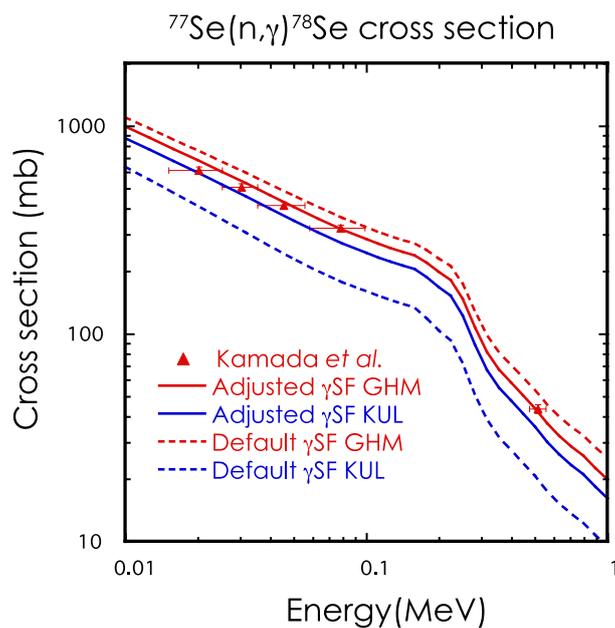
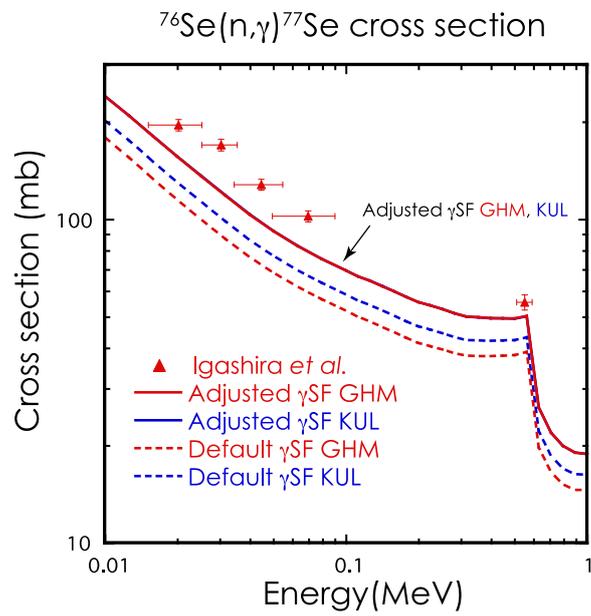


Fig.2 ^{76}Se 及び $^{77}\text{Se}(n,\gamma)$ 断面積計算及び実験値

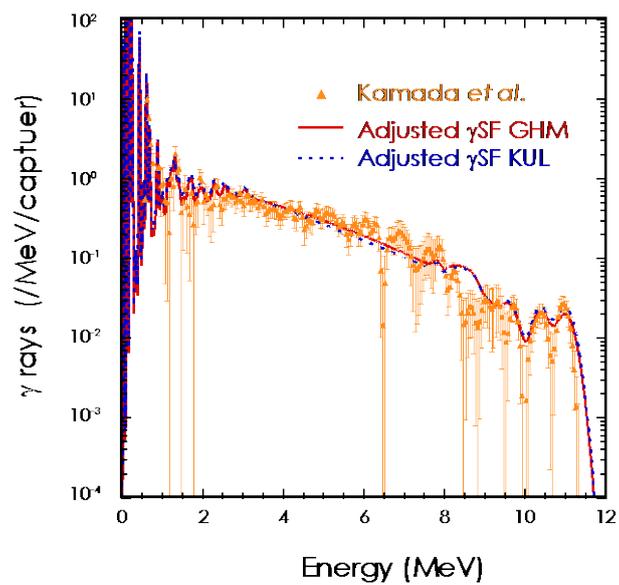
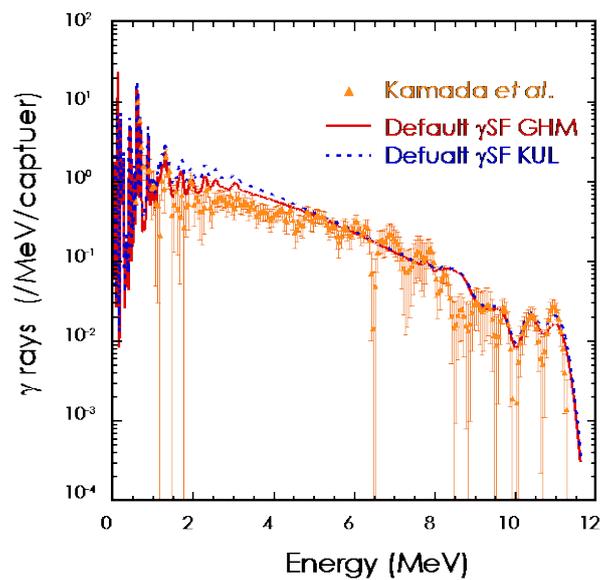


Fig.3 ^{77}Se 中性子捕獲 γ 線スペクトル実験値及び計算値

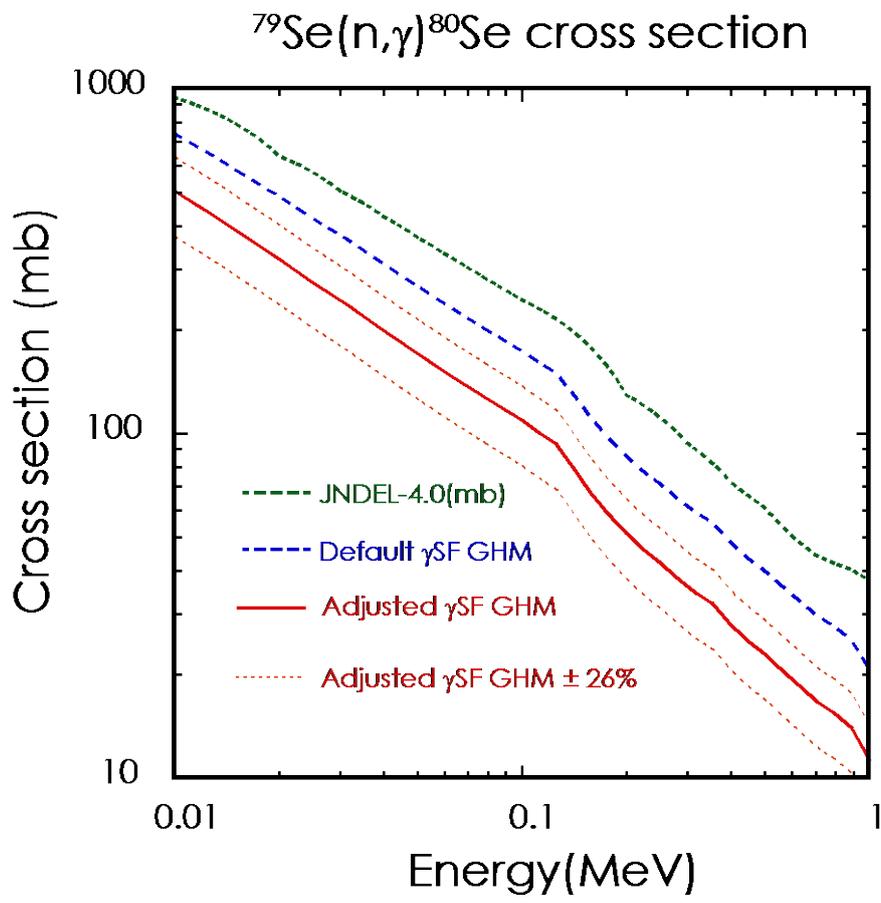


Fig.4 $^{79}\text{Se}(n,\gamma)$ 断面積