

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	Se同位体の光核反応断面積測定と線強度関数法による ⁷⁹ Se中性子捕獲反応断面積の研究
Title(English)	Measurements of Photo-Nuclear Reaction Cross Sections of Se isotopes and Study of Neutron Capture Reaction Cross Sections of ⁷⁹ Se using the γ -Ray Strength Function Method
著者(和文)	北谷文人
Author(English)	Fumito Kitatani
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9948号, 授与年月日:2015年7月31日, 学位の種別:課程博士, 審査員:井頭 政之,千葉 敏,小原 徹,赤塚 洋,原田 秀郎
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9948号, Conferred date:2015/7/31, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

Se同位体の光核反応断面積測定と γ 線強度関数法による ^{79}Se 中性子捕獲反応断面積の研究

北谷文人

第1章 序論

原子力発電でエネルギーを得る際、使用済み燃料の処理は、必須の項目になる。我が国では、現在、使用済み燃料を再処理して、そこに含まれる再利用可能な核燃料物質を分離・回収して使用する核燃料サイクルを採用している。この時、発生する高レベル放射性廃棄物は、ガラス固化体として安定な地層中に埋設する地層処分を行うことが想定されている。この高レベル放射性廃棄物には、種々の核種が含まれている。これらの核種を処理することでガラス固化体の地層処分に係わる環境負荷を低減できる可能性がある。特に非常に長い期間放射能を発生する長寿命核分裂生成物（LLFP）を分離・除去して、これを短寿命の放射性核種へ変換できれば、高レベル放射性廃棄物の処分にとって非常に有効となる。これが、長寿命核種の分離・変換技術と呼ばれ研究されている。

^{79}Se は、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、 ^{79}Se 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、 ^{79}Se 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もられている。

一方、核分裂生成物の中には $^{76,77,78,80}\text{Se}$ の安定同位体も存在する。したがって、同位体分離を行わない核変換システムの研究・開発では、LLFPの ^{79}Se のみならず $^{76,77,78,80}\text{Se}$ の核反応断面積の精度良いデータが必要である。しかし、Se安定同位体の光核反応断面積データの精度は不十分な現状である。また、 ^{80}Se 光核反応断面積から、逆反応である ^{79}Se 中性子捕獲反応の断面積を計算する際に必要となる重要な物理量である γ 線強度関数（ γ SF）についての情報が得られる。さらに、 ^{79}Se 及び安定Se同位体のkeV中性子捕獲反応断面積は恒星中の元素合成のslow neutron capture（s）過程の研究に、光核反応断面積はphoto-disintegration（p）過程の研究に重要である。

以上から本研究では、 $^{76,77,78,80}\text{Se}$ の光核反応断面積の測定を (γ,n) 反応のしきい値から $(\gamma,2n)$ 反応のしきい値の領域で行い、得られた光核反応断面積を基に γ SFを求め、求めた γ SFを用いてLLFPである ^{79}Se の中性子捕獲反応断面積を統計モデルによって計算し、不確定性を明らかにした ^{79}Se の中性子捕獲反応断面積データを提供することを目的とした。

第2章 レーザ逆コンプトン散乱 γ 線を用いたSe同位体の光核反応断面積測定

光核反応断面積測定の光源としては、レーザ逆コンプトン散乱 (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光核反応断面積の測定を精度良く行うことができる。今回、実験で用いたLCS γ 線は (独) 産業技術総合研究所つくばセンターの電子線蓄積リングTERASで発生させた。入射レーザとしてスペクトラ・フィジックス社製 LD励起YVO₄レーザINAZUMAを用いる。発生する γ 線のピークエネルギーは、蓄積された電子ビームのエネルギーで調整する。 γ 線のピークエネルギーが6 MeV~17 MeVの範囲では、入射レーザ光は2倍波 (532 nm) を用いる。実験配置図をFig.1に示す。

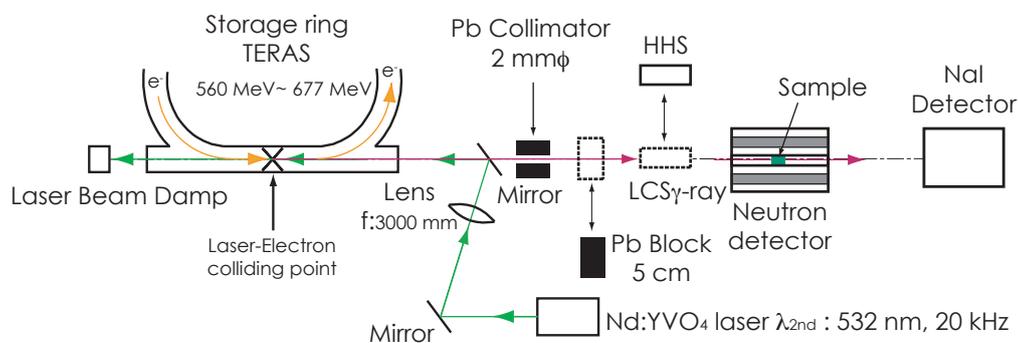


Fig.1 実験配置図

測定される光核反応断面積で、しきい値近傍の値は、中性子捕獲反応断面積を計算する際の γ SF 決定に非常に重要である。この測定には、^{76,77,78,80}Se の高純度に同位体濃縮した試料を用いた。

Fig.1に示すように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 (HHS)、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。

特に、入射 γ 線のエネルギースペクトルは、HHSの応答関数を決定することでアンフォールディングによってコンプトン成分を除去し、正確に求めることができた。

Fig.2, Fig.3, Fig.4に⁸⁰Se, ⁷⁶Se, ⁷⁸Seについて光核反応断面積測定結果を過去の測定例と共に示す。

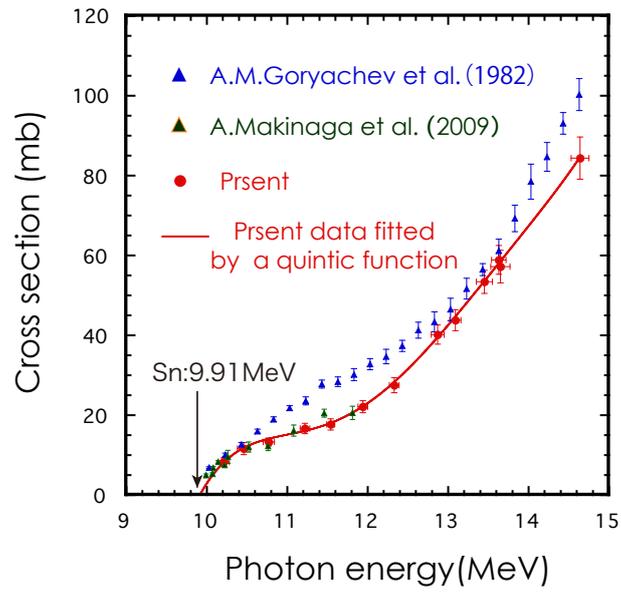


Fig.2 ^{80}Se 光核反応断面積測定結果

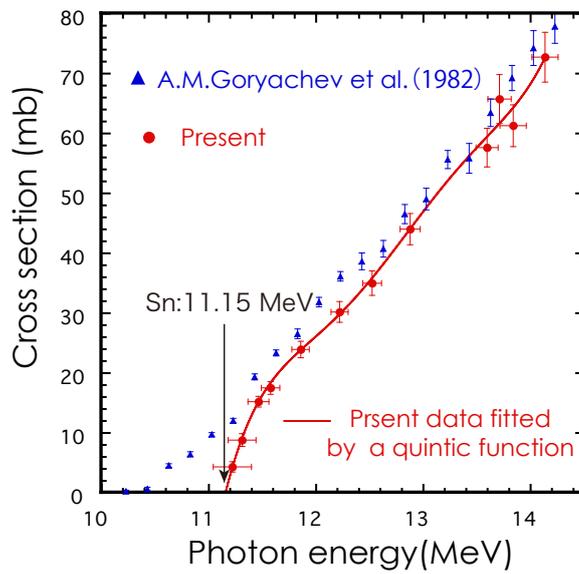


Fig.3 ^{76}Se 光核反応断面積測定結果

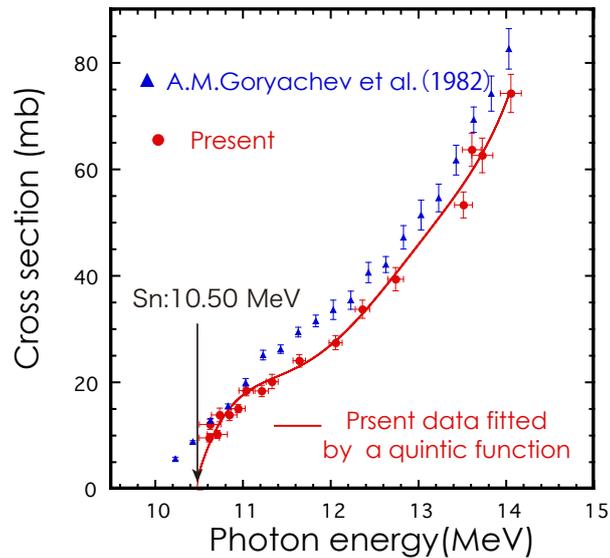


Fig.4 ^{78}Se 光核反応断面積測定結果

光核反応断面積は、入射LCS γ 線のエネルギー分布により補正されて求められている。 ^{80}Se の光核反応断面積は、A.M.Goryachevらの測定結果に比べ、10.5から12.5 MeVのエネルギー範囲で20 %程度小さい値となっている。また、14.6 MeV近辺でも、20 %程度小さい値となっていて、牧永らの測定結果を支持している。

^{80}Se について、 ^{76}Se , ^{78}Se は同時期に測定を行っている。これらのA.M.Goryachevらの測定結果は、反応しきい値以下でも有意な値を持っている。しかし、今回は、 ^{78}Se についてLCS γ 線の最大エネルギーを10.5 MeVに設定して測定を行った結果、単位時間あたりの中性子の発生量は 15 ± 70 個となり、しきい値以下では発生中性子数に統計的に有意な値は観測されなかった。また、今回求めた ^{76}Se , ^{78}Se の光核反応断面積は、A.M.Goryachevらの測定結果に比べ全体的に小さな値となっている。 ^{76}Se については、12.5 MeV付近で20%程度の違いがある。 ^{78}Se については、11.2から12.2 MeVにかけて35%程度の違いがある。

^{77}Se についても測定を行い、過去のA.M.Goryachevらの測定結果と誤差の範囲で一致する結果を得ている。

これらの光核反応断面積測定の結果、 (γ, n) 反応のしきい値から $(\gamma, 2n)$ 反応のしきい値の γ 線エネルギー領域で $^{76,77,78,80}\text{Se}$ の光核反応断面積を精度良く得ることができた。特に (γ, n) 反応のしきい値近傍では、過去の測定結果と比較して非常に精度の良い結果が得られた。

第3章 統計モデル計算による ^{79}Se 中性子捕獲反応断面積の計算

^{79}Se の中性子捕獲反応断面積の計算には、直接測定が困難な核種の捕獲反応断面積を見積もる一手法である γ SF法を用いた。 γ SF法は、中性子捕獲反応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に必要な物理量の γ SFに対して、中性子捕獲反応の逆反応である光核反応の断面積を用いて実験的な制約を与え、捕獲反応断面積計算の確度を向上させる方法である。 γ SFには、Fig.5 に示すような手法で制限を与える。

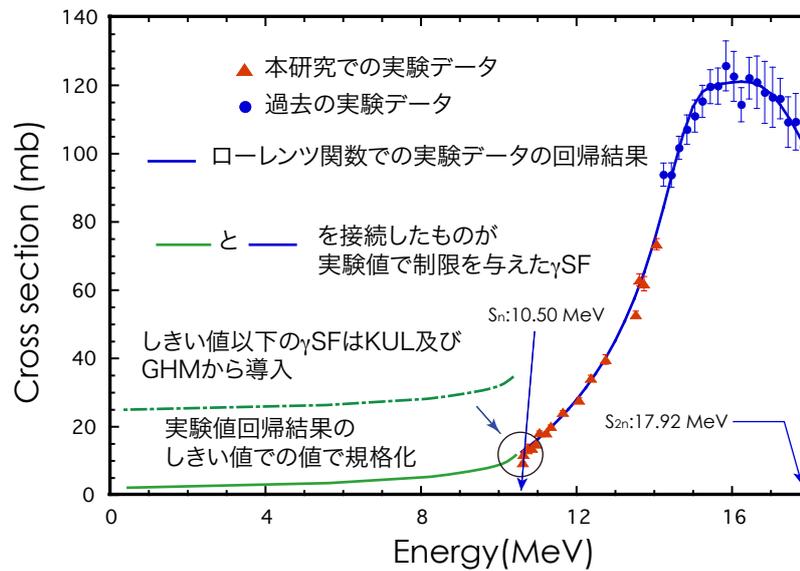


Fig.5 実験値で制約を与えた γ SFの導出方法

計算においては、まず、本研究で得た ^{77}Se と ^{78}Se の光核反応断面積の測定結果を用いて ^{77}Se と ^{78}Se の γ SFに実験的な制約を与えた。しきい値以下の γ SFは、CCONEで用いられるモデルであるKopeky-Uhlの補正されたローレンツ関数(KUL)及びGorielyの複合モデル(GHM)を採用する。さらに、統計モデル計算で断面積を計算する上でもう一つの重要な物理量である原子核準位密度は、これについては今回、本研究での実験から得られる情報がないので、一般的なGilbert-Cameronのモデルを採用する。

次に、これらの制約を与えた γ SF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中性子捕獲反応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中性子捕獲反応断面積及び捕獲 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定性を見積もった。続いて、 ^{80}Se の光核反応断面積測定結果を用いて ^{80}Se の γ SFに実験的な制約を与え、 ^{79}Se の中性子捕獲反応断面積を計算した。最

後に、 ^{76}Se と ^{77}Se の中性子捕獲反応断面積計算結果から見積もった不確定性を基に、不確定性を明らかにした ^{79}Se の中性子捕獲反応断面積データを得ることができた。

第4章 結論

本研究では、LLFP核変換研究及び恒星中での元素合成研究に重要なSe同位体 ($^{76,77,78,80}\text{Se}$) の光核反応断面積についてLCS γ 線を用いて測定した。測定では、応答関数を精度良く決定した高エネルギー γ 線測定装置であるHHSでLCS γ 線のエネルギー分布を正確に測定することで光核反応断面積の測定精度を向上させた。既存の測定結果の ^{76}Se , ^{78}Se では、しきい値以下のエネルギー領域で断面積が有意な値を持つ結果が報告されていた。しかし、LCS γ 線を光源としてHHSでエネルギー分布を正確に測定することで、しきい値近傍でも入射 γ 線のエネルギーを正確に決定でき、しきい値以下のエネルギー領域で断面積が有意な値を持つことなく精度良く光核反応断面積を測定できた。これにより、光核反応による核変換研究及び恒星中のp過程元素合成研究に重要な核データを供給することができた。また、光核反応断面積の測定結果から統計モデル計算で光核反応と中性子捕獲反応に共通な物理量である γ 線強度関数を導出した。

この γ 線強度関数を用いてSe安定同位体について中性子捕獲断面積を計算して既存の実験値と比較した。また、中性子捕獲反応に伴って放出される γ 線のスペクトルについても計算値と実験値を比較し、両者は良い一致をしていることを確認した。これらから実験的制約を与えた γ 線強度関数を用いると、Se同位体の中性子捕獲反応断面積の計算精度が向上することが確認された。

また、統計モデル計算で γ 線強度関数と並んで重要な物理量である原子核準位密度については、一般的なモデルであるGilbert-Cameronのモデルを採用して計算を行った。

以上の結果を踏まえ、 ^{79}Se について同様の手法で中性子捕獲反応断面積を計算し、直接測定することが困難な ^{79}Se の中性子捕獲反応断面積について不確定性を含めて得た。

このことにより、 ^{79}Se 中性子捕獲反応断面積の測定結果が無い現状では、 ^{79}Se 中性子捕獲反応による核変換研究及び恒星中のs過程元素合成に重要な核データを供給することができた。

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。