

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 2 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15483

研究課題名（和文）低エネルギー重陽子核反応の高精度計算とそれに基づく小型中性子源の検討

研究課題名（英文）Accurate prediction of low-energy deuteron-induced reactions for development of small neutron source

研究代表者

中山 梓介（Nakayama, Shinsuke）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究職

研究者番号：30758610

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,600,000円

研究成果の概要（和文）：d+Be中性子源のシミュレーションの高度化に向け、9Beに対する高精度の重陽子核反応データベースを開発した。データベース中の核反応データは、重陽子核反応に特徴的な反応過程を考慮した計算手法を用いて評価した。上記のデータベースを用いたシミュレーションにより、d+Be中性子源の性能評価を行った。その結果、可搬型中性子源の有力な候補であるビームエネルギー2.5MeVのp+Li中性子源の設計値から遮へい体の厚さを約1.5倍とすることで、同等の性能を持つd+Be中性子源を1.5や2.0MeVといったより低いビームエネルギーで実現できる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

9Beに対する重陽子核反応が低入射エネルギーでも中性子を発生させることから、d+Be中性子源は可搬型中性子源の有力な候補であるといえる。しかし、重陽子核反応データの精度が不十分であったため、その検討が十分に行えない状況にあった。本研究では、重陽子核反応に特徴的な反応過程を考慮した計算手法に基づいて精度の良い重陽子核反応データベースを開発し、一般に公開した。これにより、上記の状況が打開されたと言える。また、開発したデータベースを用いたシミュレーションも行い、d+Be中性子源の可搬型中性子源への適用性も示した。この結果に基づき、今後、可搬型d+Be中性子源の更なる検討が進むことも期待される。

研究成果の概要（英文）：An accurate deuteron nuclear reaction database on 9Be has been developed to improve the accuracy of the d+Be neutron source simulation. The nuclear reaction data in the database were evaluated using a calculation method considering the reaction processes characteristic of deuteron-induced reactions. The performance of the d+Be neutron source was evaluated by simulation using the database. As a result, it was found that it is possible to realize a d+Be neutron source with equivalent performance at lower beam energies such as 1.5 or 2.0 MeV by increasing the thickness of the shielding by about 1.5 times from the design value of the p+Li neutron source with a beam energy of 2.5 MeV, which is a candidate for a portable neutron source.

研究分野：核データ

キーワード：重陽子 中性子源 PHITS JENDL-5

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我が国の橋やトンネルといったインフラ施設の多くはその建設から30年以上が経過しており、一部では重篤な損傷も発見されている。このため、これらの施設の健全性診断法の確立が喫緊の課題となっている。このような状況の中、インフラ施設の主要材料であるコンクリートを対象とした中性子を用いた非破壊検査法が開発されている[1,2]。これらの方法では、水素などの軽元素に高い感度を持つ中性子の性質を利用し、コンクリート中の空隙や水分を非破壊で検出する。橋などの厚いコンクリート構造物の検査には、高い透過力を持つ0.5～数 MeV のエネルギーを持つ高速中性子が用いられる[3]。しかし、これらの検査法に十分な量の高速中性子を供給できるのは、大型の据置型加速器中性子源に限られている。橋やトンネルなどのオンサイト非破壊検査に向け、車両に搭載可能な可搬型中性子源の開発が望まれている。

${}^9\text{Be}$ に対する重陽子核反応は1.5 MeV 程度の低入射エネルギーでも非破壊検査に適用可能な量の中性子 ($\sim 10^8 \text{ n}/\mu\text{C}$) を発生させる。ビームエネルギーが低いほど加速器システムが小型化できることから、 $\text{d}+\text{Be}$ 中性子源は可搬型中性子源の有力な候補といえる。しかし、中性子源の性能評価のためのシミュレーション中で使用される重陽子核反応データ(放出粒子の量、エネルギー/角度分布)の精度が不十分であったため、その検討は十分になされていない状況にあった。

2. 研究の目的

- (1) $\text{d}+\text{Be}$ 中性子源のシミュレーションの高度化に向け、 ${}^9\text{Be}$ に対する精度の良い重陽子核反応データベースを開発する。この際、可搬型中性子源という観点から、特に低入射エネルギー(2 MeV 前後)での精度に注意を払う。
- (2) 上記の核反応データベースを用いたシミュレーションを行い、可搬型中性子源としての $\text{d}+\text{Be}$ 中性子源の性能を評価する。

3. 研究の方法

- (1) 本研究で対象とする2 MeV 前後での重陽子核反応を精度良く予測するためには、はぎ取り反応と呼ばれる中性子や陽子核反応にはない重陽子核反応に特徴的な反応過程の考慮が不可欠である。そのため、はぎ取り反応に特に注意を払った計算を行い、その計算値を基に重陽子核反応データベースを開発した。
- (2) 粒子輸送シミュレーションコード PHITS を用いて $\text{d}+\text{Be}$ 中性子源のシミュレーションを行った。シミュレーション内で用いる重陽子核反応データには(1)で評価したデータを使用した。現状では、可搬型中性子源の候補としてビームエネルギー2.5 MeV の $\text{p}+\text{Li}$ 中性子源が挙げられている。そのため、 $\text{d}+\text{Be}$ 中性子源のシミュレーションにおいては、取り出し口から供給される高速中性子束および遮へい体側面での線量率が2.5 MeV の $\text{p}+\text{Li}$ 中性子源と同等となるよう、電流量や遮へい体厚さを最適化した。なお、 $\text{d}+\text{Be}$ 中性子源のビームエネルギーについては、加速器システムの小型化の観点から1.5, 2.0, 2.5 MeV を検討対象とした。

4. 研究成果

はぎ取り反応の計算には歪曲波ボルン近似(DWBA)を採用した。DWBA によるはぎ取り反応の計算値は分光学的因子(S 因子)による規格化の必要がある。このため、複合核反応の寄与がほとんど無くなりすべてがはぎ取り反応成分とみなせる入射エネルギー10 MeV 以上での ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ 反応の角度微分断面積について、実験値とDWBA 計算値を比較してS 因子を求めた。対象とする残留核 ${}^{10}\text{B}$ の準位は励起エネルギー6.56 MeV までとした。これにより、後述する中性子源シミュレーションで必要となる入射エネルギー2.5 MeV までの範囲で起こり得るすべての ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ はぎ取り反応について、S 因子を導出した。

上記のS 因子で規格化したはぎとり反応成分に複合核反応成分を加え、 ${}^9\text{Be}$ に対する2.5 MeV までの重陽子核反応データを評価した。また、PHITS や MCNP 等のモンテカルロ法に基づく粒子輸送シミュレーションコード内で利用できるようにするため、評価した核反応データに基づき、シミュレーションコードで読み取り可能な形式(ACE 形式)のデータベースも開発した。なお、本研究で評価した核反応データは、重陽子核反応データベース JENDL/DEU-2020 の一部として2021年2月に一般に公開した。また、JENDL/DEU-2020 のデータは重陽子サブライブラリの一部として2022年12月公開の汎用核反応データベース JENDL-5 にも引き継がれている。

本研究で開発した ${}^9\text{Be}$ に対する重陽子核反応データベースの検証結果の一例として、飛程よりも厚い Be 標的を重陽子で照射した際の中性子生成量に対するものを図1に示す。実線と破線は、それぞれ本研究で開発したデータベースおよび TENDL-2021 を用いて PHITS でシミュレーションを行った結果である。本研究のデータ以外では TENDL シリーズが現状で唯一利用可能な重陽子核反応データベースであり、TENDL-2021 はその最新版である。図1(a)に示すように、全角度での生成量については、両シミュレーションともに最近の実験値と良く一致している。一方、図1(b)に示すように、 0° 方向の生成量については本研究のデータを用いたシミュレーションが TENDL-2021 を用いたものよりも最近の実験値をよく再現している。これは、TENDL-2021 の評価では複合核反応のみを考慮している一方、本研究では放出中性子の前方性が強いはぎ取り反応も考慮しているという違いに起因する。

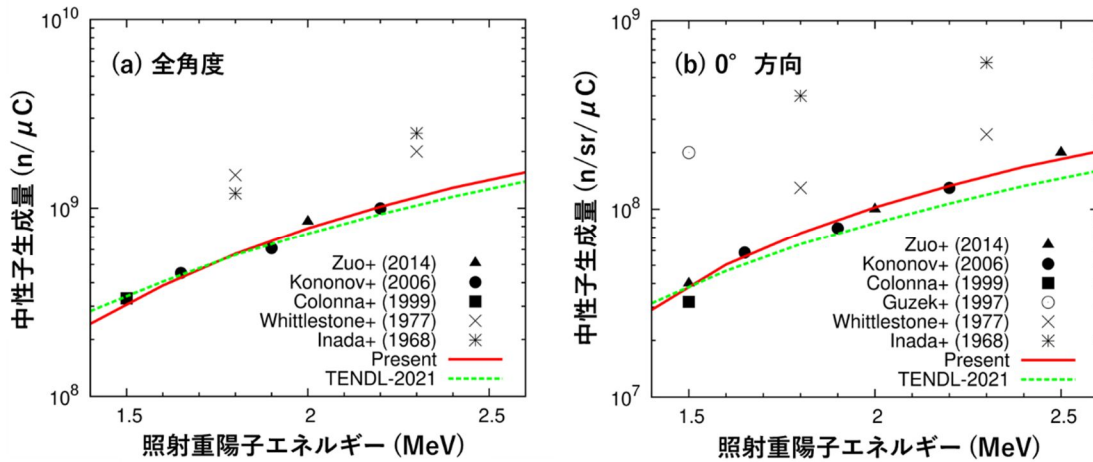


図1 飛程よりも厚いBe標的に重陽子を照射した際の中性子生成量
((a) 全角度、(b) 0°方向)

中性子源の設計では、中性子生成量だけでなくそのエネルギー分布も重要な要素である。そのため、生成中性子のエネルギー分布に関する検証も行った。その結果を図2に示す。なお、図中のColonnaらの実験値の1MeV以上に見られるなだらかな分布は、ピーク成分を平滑化したものである[4]。本研究のデータを用いたシミュレーションでは、Guzekらの実験値に見られる1MeV以上でのピーク構造と0.5MeV付近にあるピークの大きさが良く再現されている。一方で、TENDL-2021を用いたシミュレーションでは、全エネルギー範囲において実験値との不一致が見られる。この違いは、以下の2点に起因している。1つ目は、前述の通り、TENDL-2021でははぎ取り反応が考慮されていない点である。特に、0.5MeV付近にピークを形成する¹⁰Bの励起エネルギー5.11MeVの準位に対応するはぎ取り反応は断面積が大きいので、TENDL-2021によるシミュレーションではこのピークが過小評価されている。2つ目は、TENDL-2021では残留核の離散的励起状態が考慮されていない点である。この結果、中性子スペクトルはなだらかになり、TENDL-2021によるシミュレーションではGuzekらの値に見られる残留核の離散的励起状態に起因する1MeV以上のピーク構造が再現されていない。

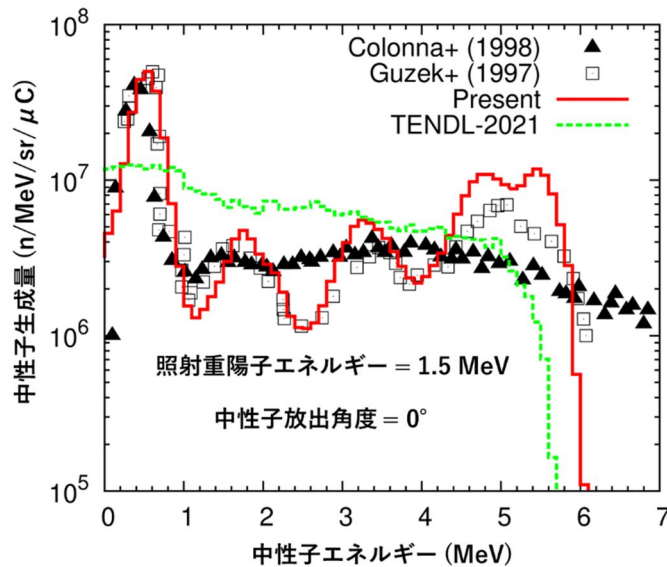


図2 飛程よりも厚いBe標的に重陽子を照射した際の生成中性子スペクトル
(照射重陽子エネルギー1.5MeV、中性子放出角度0°)

以上の結果から、d+Be中性子源のシミュレーションに使用する核反応データベースとして、本研究で開発したものの方がTENDL-2021よりも望ましいと考えられる。そのため、以下では本研究で開発した核反応データを用いてd+Be中性子源のシミュレーションを行い、その性能を評価した結果を示す。なお、本シミュレーションの詳細については、文献[5]に記述している。

現状では、ビームエネルギー2.5 MeV の p+Li 中性子源が可搬型中性子源の有力な候補とされている。そのため、d+Be 中性子源のシミュレーションにおいては、取り出し口から供給される高速中性子束および遮へい体側面での線量率が p+Li 中性子源と同等となるよう、電流量や遮へい体厚さを最適化することとした。そのため、初めに比較対象として、理研で開発された 2.5 MeV の p+Li 中性子源 RANS-II の遮へい体構成（材質・幾何形状）[6]を模擬した中性子源に対するシミュレーションを行った。その体系を図 3 に示す。図 3(a)中の原点に標的が配置されており、立方体状の遮へい体は内側から順に、ポリエチレン（PE）、鉛、ホウ素含有ポリエチレン（BPE）、鉛、鉄、で構成されている。中性子取り出し口の直径は 15cm である。また、図 3(b)に示すように、標的の裏側には内部に冷却用の水を流した銅基盤が配置されている。

図 3 に示した体系において、ビーム電流量を RANS-II と同じ 100 μ A とした p+Li 中性子源のシミュレーションを行った。その結果を表 1 に示す。標的の前方 1m において得られる中性子束は 2.8×10^6 n/cm²/s で、その内コンクリートの非破壊検査に有用な 0.5 MeV 以上の成分は全体の約 31%となる 8.7×10^5 n/cm²/s であった。また、遮へい体側面における線量率は中性子とガンマ線の寄与を合わせて 0.28 mSv/h であった。

次に、ビームエネルギー1.5, 2.0, 2.5 MeV の各ケースにおいて d+Be 中性子源のシミュレーションを行った。この際、前述の p+Li 中性子源と同量の高速中性子束を供給しつつ、遮へい体側面での線量率が同程度以下となるよう、電流量および遮へい体厚さを最適化した。遮へい体厚さの最適化においては、PE および BPE 層の厚さを p+Li 中性子源のものから何倍するかという値を変数とした。

これらのシミュレーションの結果を表 1 に示す。表に示す通り、ビームエネルギーにほぼ依存せず、遮へい体中の PE および BPE 層の厚さを約 1.5 倍にすることで、2.5 MeV の p+Li 中性子源と同等の性能を持つ d+Be 中性子源を実現できる可能性があることが分かった。1.5 や 2.0 MeV といったより低いビームエネルギーは加速器システムの小型化につながる。また、ビームエネルギーを p+Li 中性子源と同じ 2.5 MeV とした場合には、必要なビーム電流量が 1/3 程度になることも分かった。

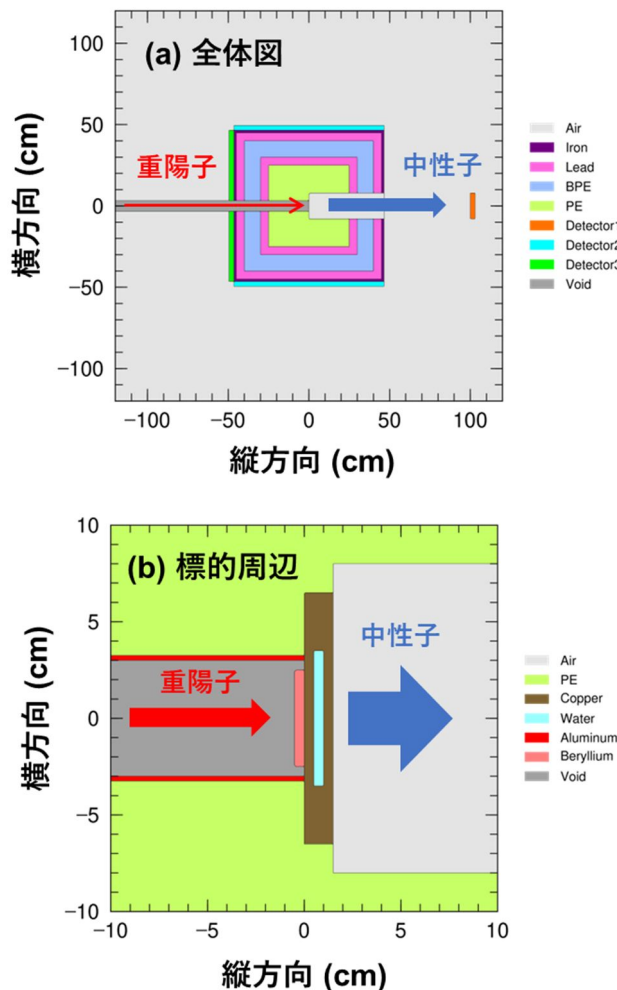


図 3 中性子源シミュレーションの体系
(a) 全体図、(b) 標的周辺拡大図
視認性のため、標的は大幅に厚くしている

表 1 中性子源シミュレーションのまとめ

	p+Li	d+Be		
ビームエネルギー (MeV)	2.5	1.5	2.0	2.5
ビーム電流 (μ A)	100	240	73	34
PE・BPE層厚さの増倍係数	1.00	1.48	1.50	1.51
供給中性子束				
全エネルギー (n/cm ² /s)	2.8×10^6	1.5×10^6	1.4×10^6	1.2×10^6
0.5 MeV以上 (n/cm ² /s)	8.7×10^5	8.7×10^5	8.7×10^5	8.7×10^5
0.5 MeV以上の割合 (%)	31	58	63	70
遮へい体側面線量率 (mSv/h)	0.28	0.28	0.27	0.27

表 1 に示した p+Li 中性子源と d+Be 中性子源の差異は、 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ および ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ 反応の性質、特に Q 値（反応前後でのエネルギー収支）から理解することができる。このことを端的に示した図として、表 1 に示した設計条件における標的前方 1m での中性子スペクトルを図 4 に示す。 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応の Q 値は -1.64 MeV であるので、p+Li 中性子源ではビームエネルギーが 2.5 MeV であっても 0.8 MeV 程度までの中性子しか発生しない。このため、遮へい体内で高速中性子を減速する必要が少なく遮へい体が小型化できるものの、供給される中性子の内コンクリートの非破壊検査に適した 0.5 MeV 以上の成分の割合は少ない。一方、 ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ 反応の Q 値は 4.36 MeV であるため、遮へい体は大型化する必要があるものの、高速中性子を効率よく供給することができる。

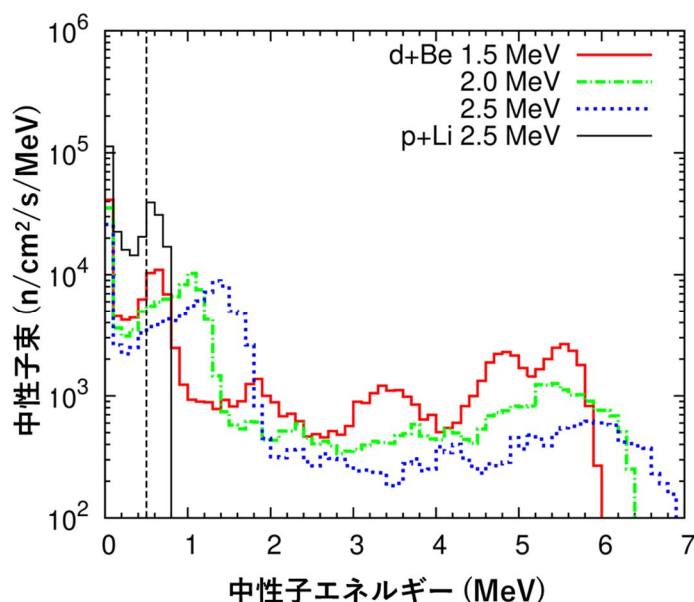


図 4 標的前方 1m における中性子スペクトルの比較

コンクリート中において、数 MeV 程度の中性子の透過力は 500 keV の X 線のものと同等である[1]。ここで、500 keV はコンクリート中の鉄筋の非破壊検査のために提案されている X 線源のピークエネルギーに対応する[7]。中性子と X 線は感度を有する物質が対照的であるので、両者を用いた非破壊検査は相補的な役割を担っている。d+Be 中性子源を用いることにより、中性子による診断を X 線による診断と同程度の厚さのコンクリートに対して実施できることが期待される。

以上、本研究では初めに、d+Be 中性子源のシミュレーションの高度化に向け、 ${}^9\text{Be}$ に対する高精度の重陽子核反応データベースを開発した。データベース中の核反応データは、重陽子核反応に特徴的なはぎ取り反応を考慮した計算手法を用いて評価した。次に、開発したデータベースを用いたシミュレーションにより、d+Be 中性子源の性能評価を行った。その結果、可搬型中性子源の有力な候補であるビームエネルギー 2.5 MeV の p+Li 中性子源から遮へい体の厚さを約 1.5 倍とすることで、同等の性能を持つ d+Be 中性子源を 1.5 や 2.0 MeV といったより低いビームエネルギーで実現できる可能性を示した。また、d+Be 中性子源はコンクリートの非破壊検査に適した高速中性子を効率よく供給できることも示した。以上より、p+Li 中性子源とは異なる特性を持った可搬型中性子源としての d+Be 中性子源の可能性を示した。

参考文献

- [1] Y. Seki et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. **870**, 148-155 (2017).
- [2] Y. Ikeda et al., J. Adv. Concr. Technol. **15**, 603-609 (2017).
- [3] Y. Otake, EPJ Web Conf. 231, 01009 (2020).
- [4] N. Colonna et al., Med. Phys. **26**, 793-798 (1999).
- [5] S. Nakayama, "Simulated performance evaluation of d-Be compact fast neutron source", J. Nucl. Sci. Technol., submitted.
- [6] K. Sugihara et al., J. Nucl. Sci. Technol. **60**, 110-123 (2023).
- [7] M. Uesaka et al., J. Phys. B. **47**, 234008 (2014).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Osamu Iwamoto, Nobuyuki Iwamoto, Satoshi Kunieda, Futoshi Minato, Shinsuke Nakayama, Yutaka Abe, et al.	4. 巻 60
2. 論文標題 Japanese evaluated nuclear data library version 5: JENDL-5	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1~60
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00223131.2022.2141903	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Shinsuke Nakayama	4. 巻 2021-001
2. 論文標題 Theoretical analysis of deuteron-induced reactions and development of deuteron nuclear database	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JAEA-Conf	6. 最初と最後の頁 65-70
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11484/jaea-conf-2021-001	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Shinsuke Nakayama, Osamu Iwamoto, Yukinobu Watanabe, Kazuyuki Ogata	4. 巻 63
2. 論文標題 Theoretical Study of Deuteron-Induced Reactions in the Nuclear Data Field	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Few Body Systems	6. 最初と最後の頁 4_1-4_6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00601-021-01712-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shinsuke Nakayama, Osamu Iwamoto, Yukinobu Watanabe, Kazuyuki Ogata	4. 巻 58
2. 論文標題 JENDL/DEU-2020: deuteron nuclear data library for design studies of accelerator-based neutron sources	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Science and Technology	6. 最初と最後の頁 805-821
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00223131.2020.1870010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Shinsuke Nakayama, Osamu Iwamoto, Jean-Christophe Sublet
2. 発表標題 Deuteron and alpha sub-libraries of JENDL-5
3. 学会等名 15th International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (ND2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中山 梓介
2. 発表標題 JENDL-5 の核データ評価 (6)重陽子・ 粒子反応サブライブラリ
3. 学会等名 日本原子力学会2022年春の年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中山 梓介, 岩本 修, 渡辺 幸信, 緒方 一介
2. 発表標題 重陽子核反応データファイルJENDL/DEU-2020 の開発と検証
3. 学会等名 日本原子力学会2020年秋の大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shinsuke Nakayama
2. 発表標題 Theoretical analysis of deuteron-induced reactions and development of deuteron nuclear database
3. 学会等名 2020年度核データ研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shinsuke Nakayama, Osamu Iwamoto, Yukinobu Watanabe, Kazuyuki Ogata
2. 発表標題 Theoretical study of deuteron-induced reactions in the nuclear data field
3. 学会等名 8th Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics (APFB2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中山 梓介, 岩本 修, 渡辺 幸信, 緒方 一介
2. 発表標題 重陽子核反応データファイルJENDL/DEU-2020 の開発
3. 学会等名 日本原子力学会2020年春の年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

JENDL-5重陽子サブライブラリ公開ページ https://www.ndc.jaea.go.jp/ftpnd/jendl/jendl-5-d.html JENDL/DEU-2020公開ページ https://www.ndc.jaea.go.jp/ftpnd/jendl/jendl-deu-2020.html

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------