

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25871111

研究課題名(和文)フラグメント生成を考慮した多粒子相関シミュレーションとその応用

研究課題名(英文)Simulation of multi-particle correlation including emission of light mass fragments and its application

研究代表者

萩原 雅之 (HAGIWARA, MASAYUKI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・放射線科学センター・研究機関講師

研究者番号：10450363

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：非平衡過程からの粒子放出を核内カスケードモデル(INCL4.6)で模擬し、平衡過程からの粒子放出を統計マルチフラグメンテーションモデル(SMM)と一般化蒸発モデル(GEM)を組み合わせたモデルで模擬するイベントジェネレータを構築し、陽子入射反応に対する生成二重微分断面積の実験データを基に、フラグメント生成過程の記述の改良(結合させる核子間の相対運動量に上限値($p < 240$ MeV/c)を設定、ピックアップ反応、Q値補正やポテンシャル散乱の導入)を行った。開発したモデルは、入射エネルギー数10 MeVから数GeVのフラグメント放出反応に関して様々な標的核に対して実験値を良く再現する事が分かった。

研究成果の概要(英文)：Double-differential cross sections (DDXs) for nucleon-induced reactions at incident energies from tens of MeV to GeV resulting to the emission of light mass fragments (LMFs) are of particular importance in the microscopic analysis of radiation effects such as soft errors of micro-electronic devices, material damage and human dose. In order to improve the prediction accuracy of physical models, we revised the Liege intra-nuclear cascade model (INCL4.6) for composite particle emissions, by introducing the upper constraint for the acceptable momentum of nucleons (240 MeV/c) in the center-of-mass frame of the running cluster, a pick-up reaction process, Q-value correction and refraction by a nuclear potential, based on the recent experimental data systematically obtained in a wide range of targets and reactions. Besides, we incorporated the statistical multi-fragmentation model (SMM) into the generalized evaporation model (GEM) to reproduce high multiplicity reactions.

研究分野：原子力学

キーワード：核反応 核データ 二重微分断面積 フラグメント 原子核工学 イベントジェネレータ 核内カスケード模型 蒸発模型

1. 研究開始当初の背景

近年の加速器技術の発展に伴い、数 10 MeV から数 GeV の中高エネルギー粒子線は原子核物理等の基礎科学分野のみならず、医療や工学などの多様な分野で応用されている。医療分野での代表的な応用例は炭素線や陽子線を用いたがん治療であり、厚生労働省の先進医療技術として認定されたこともあり、今後ますます一般化していくと考えられる。工学分野での代表例としては原子力発電所から排出される長寿命放射性廃棄物の核変換処理がある。原子力発電所から発生する超ウラン元素などの長寿命核種を中高エネルギー陽子による核破砕反応から生成する中性子を用いて未臨界炉で発電を行いながら燃焼・消滅させようという試みであり、現在、ヨーロッパや日本を中心に研究が進められている。このような中高エネルギー粒子を用いた応用技術の開発を推進するにあたり、中高エネルギー粒子線と標的核(人体や放射性廃棄物等を構成する原子核)との相互作用に関して、詳細かつ正確な情報が求められている。中高エネルギー領域の核反応では、入射粒子によって標的核が破壊される核破砕反応が支配的となり、多くの中性子や陽子、 α 粒子などの軽粒子とともに重粒子(フラグメント)が放出され、様々な照射効果を引き起こす。近年、加速器施設や宇宙環境、航空機で問題となっている半導体機器の誤動作(ソフトウェア)現象は高い線エネルギー付与をもつフラグメントが引き起こす照射効果の代表例である。

しかし、核破砕反応における反応機構は、定性的には理解されているものの現在でも完全には解明されておらず、特にフラグメント放出反応に対して統一的に記述できる物理モデルは未だ実現していない。量子論的に正当性の強いとされる量子分子動力学(QMD)や反対称化分子動力学(AMD)モデルにおいても、過去の研究によってフラグメントのエネルギースペクトルの実験値を大幅に過小評価することが分かっている。一方で、近年、核内カスケード(INC)モデルに核子間相関を組み込むことによって、中性子、陽子、重陽子、三重陽子などの軽粒子放出に対して実験データを比較的再現できることがフランス原子力庁(CEA)サクレー研究所等のグループによって示された。しかし、 α 粒子より重いフラグメントに関しては、モデル開発に必要な実験データが極めて少ないため、その予測精度も未だに低いのが現状である。そのため、ヨーロッパ(EU)では工学応用上重要な核種の核破砕反応データ測定に対して国家横断的なプロジェクトを実施し、数 GeV 陽子入射の実験データの取得を行っている。これに対して、申請者らは数 10 MeV から数 100 MeV 領域の陽子・中性子入射反応に着目し、独自にフラグメント検出器(ブラッグカーブカウンタ:BCC)の開発を行い、 α 粒子からフッ素までのフラグ

メントに対して系統的な二重微分断面積データを取得した。これによって、数 10 MeV から数 GeV 領域の陽子入射反応に対して、フラグメント生成モデルの開発に必要な最低限の実験データが出揃った。

2. 研究の目的

本研究では、大型加速器施設の放射線安全設計、加速器を用いたがん治療、原子力発電所から排出される長寿命放射性廃棄物の核変換処理技術、半導体ソフトウェアの評価・解明等の放射線応用分野で利用される放射線輸送シミュレーション技術の高度化のため、その基盤となる数 10 MeV から数 GeV の中高エネルギー核破砕反応で放出されるあらゆる粒子とその動力学的相関を統一的にかつ微視的に記述できる核反応モデルを開発し、その精度検証を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1)~(4)に示すような方法で、フラグメント生成モデルの開発と最適パラメータの決定を行った。

(1) モデル開発のベースには、CEA サクレー研究所で開発された最新の INC モデル(INCL4.6)を用いた。また、カスケード計算後の残留核の脱励起を計算するモデルには、最新の蒸発モデル(ABLA07, GEMINI++, SMM, GEM)を利用できるような計算システムを CEA と共同で構築した。蒸発モデル(ABLA07, GEMINI++, SMM, GEM)間の比較において、フラグメント生成反応の実験値に対する再現性が最も良かった一般化蒸発モデル(GEM)を主モデルとして採用した。ただし GEM モデルには、高エネルギー核反応(高励起反応)で重要となるマルチフラグメンテーションによる反応機構が考慮されていなかったもので、その反応機構を記述できる統計マルチフラグメンテーション(SMM)モデルと組み合わせ、カスケード計算後の平衡過程からの粒子放出を模擬するイベントジェネレータを構築した。

(2) 開発した核反応コードを用いて、陽子から炭素までの放出粒子に対して、エネルギースペクトルの標的核に対するパラメータ依存性を調査するとともに最適なパラメータを導出した。INCL4.6 モデルで採用されている表面コアレスセンスモデル(標的核から核子が放出される際に位相空間で近い核子同士を結合させて複合粒子を生成するモデル)は現象論的なモデルであるため、多くのパラメータが存在するが、本研究ではなるべく物理的な根拠からこれらのパラメータの数を減らし、実験データのない核種に対しても予測が可能になるようにグローバルにパラメータを決定した。

(3) 100 MeV 以下の低エネルギー入射反応に対して重要である Pick up 反応や反応の Q 値

を考慮するとともに、標的核のポテンシャルによる屈折・反射の効果を導入した。

(4) モデルパラメータの最適化には申請者らがこれまでに取得した陽子 70, 140, 200, 300 MeV の ^{nat}C , ^{nat}N , ^{16}O , ^{27}Al , ^{nat}Si , ^{nat}Ti , ^{nat}Cu 標的の実験データの他に、国際原子力機関 (IAEA) の核反応実験データベースで利用可能な陽子 200, 210, 480 MeV, 1.2, 1.9, 2.5 GeV の ^{27}Al , ^{59}Co , ^{nat}Ni , ^{nat}Ag , ^{197}Au 標的の実験データ等を用いた。

4. 研究成果

結果の一例として図 1 に 300 MeV 陽子入射に伴う Ag 標的からの α 粒子放出 2 重微分断面積 (Double-Differential CROSS section: DDX) の実験データと計算結果の比較を示す。非平衡過程からのフラグメント生成を記述する表面コアレスセンスモデルにおいて結合させる核子間の相対運動量に上限値 ($\Delta p < 240$ MeV/c) を導入することにより、元々のモデルにおいて観測されていた高エネルギー側の過大評価をあらゆる標的核に対し低減することができ、数 100 MeV 領域の入射エネルギー領域において、実験値に対する再現性を向上させることができた。

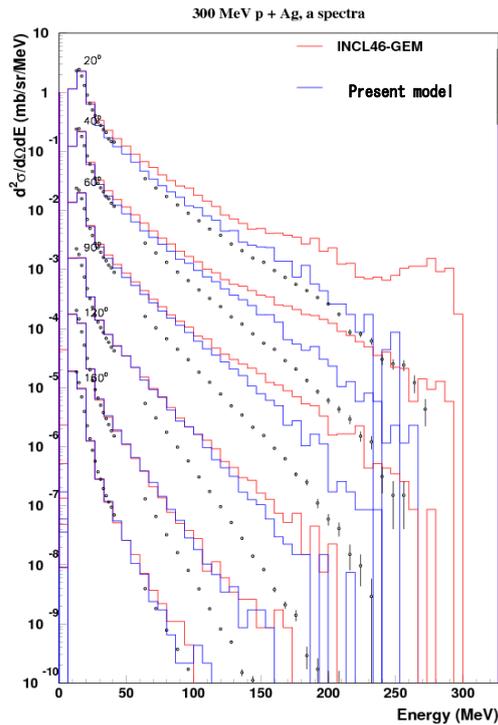


図 1 300 MeV 陽子入射に伴う $^{nat}Ag(p, \alpha)$ DDX 角度毎に 1/10 にスケールしている。

更に、図 2 に 70 MeV 陽子入射に伴う Al 標的からの Li 粒子放出 DDX の実験データと計算結果の比較を示すが、数 10 MeV 領域においては、新たに Pick up 反応を INCL4.6 に組み込み、反応の Q 値を補正することで、実験値の再現性を向上させ、モデルの適用下限範囲を数 10 MeV 領域に拡張することができた。

また、図 3 に示すように入射エネルギーが

数 GeV の領域においては、マルチフラグメンテーション反応の寄与が大きいこともわかった。

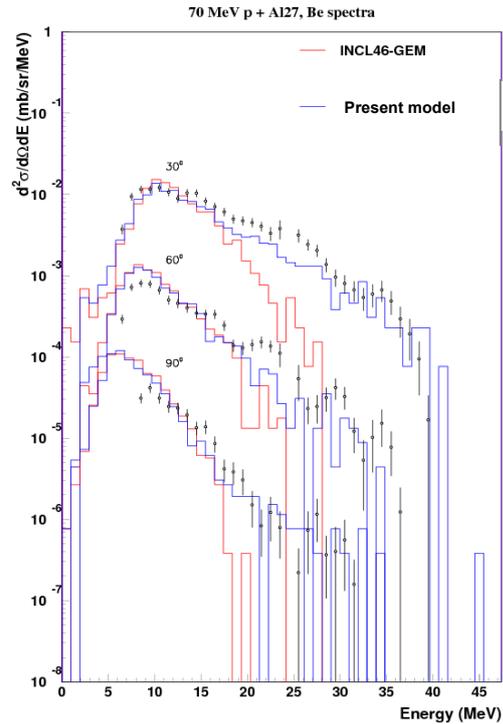


図 2 70 MeV 陽子入射に伴う $^{nat}Al(p, Li)$ DDX 角度毎に 1/10 にスケールしている。

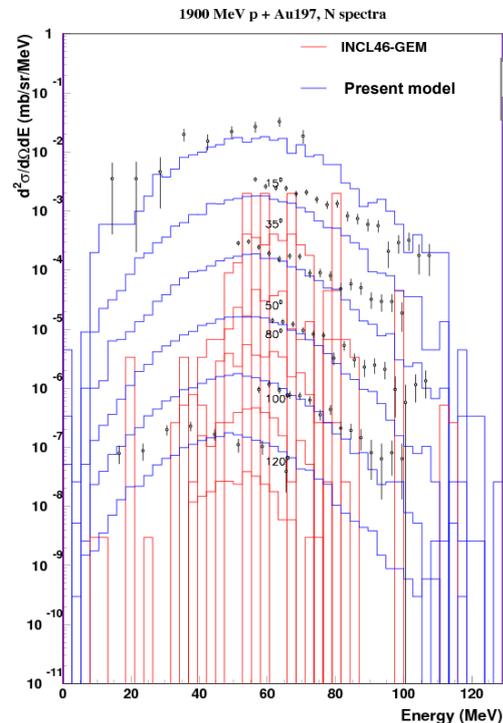


図 3 1.9 GeV 陽子入射に伴う $^{197}Au(p, N)$ DDX 角度毎に 1/10 にスケールしている。

図 4 に 1 GeV 陽子入射によって ^{56}Fe 標的中に生成する二次粒子の質量分布の実験データと計算結果の比較を示す。図 5 には $^{27}Al(p, ^7Be)$ 反応について励起関数の実験デー

と計算結果の比較を示す。

開発したモデルで残留核の質量分布や放射化断面積を計算し実験値と比較したところ、中性子放出反応では差異があるものの、フラグメント放出反応に関しては実験値を比較的良く再現する事が分かった。

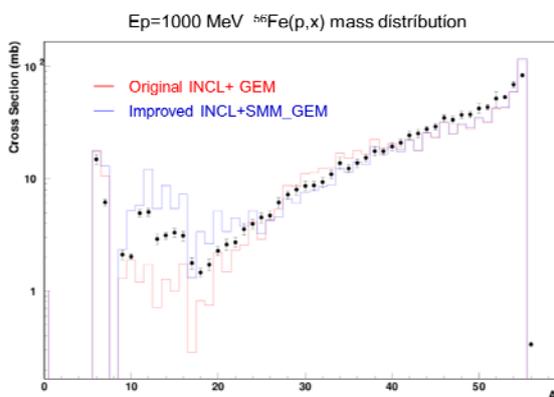


図4 1 GeV 陽子入射によって ^{56}Fe から生成する二次粒子の質量分布

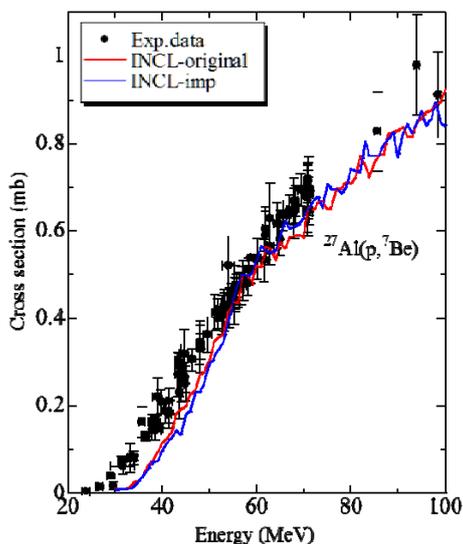


図5 $^{27}\text{Al}(p, ^7\text{Be})$ 反応の励起関数

更に INCL4.6 にポテンシャル散乱の効果を導入することで、数 10 MeV 領域の (p, p') 反応に対する実験値の再現性が向上する事が分かった。62 MeV 陽子入射における鉄標的からの陽子放出の二重微分断面積を INCL4.6 と GEM で計算した結果の一例を実験値と共に図 6 示す。赤線は改良前の INCL4.6 と GEM を用いた計算で、青線は Uozumi らの屈折モデルを組み込んだ結果である。屈折の効果のため、高エネルギー端部分と後方のスペクトルで大きな改善が見られた。

本研究において、数 10 MeV から数 GeV までの幅広い入射エネルギー領域のフラグメント生成反応の実験値に対して良好な再現性を有するモデルを開発することができた。今後、開発したモデルを用いて、加速器施設の高度な安全設計、半導体ソフトウェアの解明や対策の検討を行うと共に、従来検討が進

んでいなかった二次重粒子による被ばく線量や材料損傷の評価の精度向上にも貢献したいと考えている。

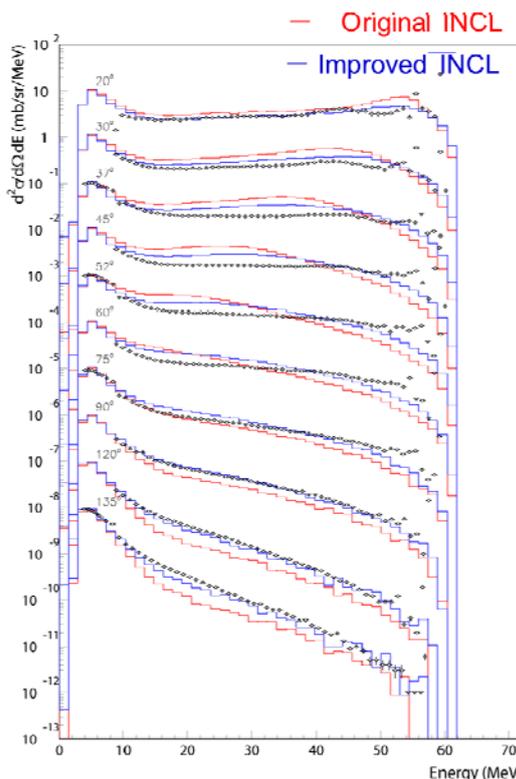


図6 62 MeV 陽子入射に伴う $^{56}\text{Fe}(p, p')$ DDX 角度毎に 1/10 にスケールしている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① H. Yashima, S. Sekimoto, K. Ninomiya, Y. Kasamatsu, T. Shima, N. Takahashi, A. Shinohara, H. Matsumura, D. Satoh, Y. Iwamoto, M. Hagiwara, K. Nishiizumi, M. W. Caffee, and S. Shibata, Measurements of the neutron activation cross sections for Bi and Co at 386 MeV, Radiation Protection Dosimetry, 査読有, Vol. 161 (1-4) 2014, pp.139-143, <https://doi.org/10.1093/rpd/nct334>
- ② M. Hagiwara, H. Iwase, Y. Iwamoto, D. Satoh, T. Matsumoto, A. Masuda, H. Yashima, Y. Nakane, H. Nakashima, Y. Sakamoto, A. Tamii, K. Hatanaka and T. Nakamura, Shielding benchmark experiment using hundreds of MeV quasi-monoenergetic neutron source by a large organic scintillator, Progress in Nuclear Science Technology, 査読有,

- Vol. 4, 2014, pp.327-331, DOI: 10.15669/pnst.4.327
- ③ T. Sanami and M. Hagiwara, Target Mass Dependency of Light Mass Fragment Energy Spectra for Intermediate Energy Proton Induced Reactions, Nuclear Data Sheets, 査読有, Vol. 119, 2014, pp. 241-244, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nds.2014.08.066>
- ④ T. Sanami, Y. Iwamoto, T. Kajimoto, N. Shigyo, M. Hagiwara, H.-S. Lee, E. Ramberg, A. Soha, D. Jensen, A. Leveling, N. Mokhov, D. Boehnlein, K. Vaziri, K. Ishibashi, Y. Sakamoto and H. Nakashima, Systematics of thick target neutron yields for reactions of hundred GeV protons on target, Progress in Nuclear Science Technology, 査読有, Vol. 4, 2014, pp. 341-344, DOI: 10.15669/pnst.4.341
- ⑤ M. Hagiwara, T. Sanami, D. Mancusi, A. Boudard, S. Leray, J. Cugnon, Recent progress in experimental and theoretical studies of proton-induced fragment production cross section at intermediate energies, Proceedings of the 2013 Symposium on Nuclear Data JAEA-Conf 2014-002, 査読有, 2014, pp. 63-68, <http://dx.doi.org/10.11484/jaea-conf-2014-002>
- ⑥ D. Mancusi, A. Boudard, J. Cugnon, J.-C. David, M. Hagiwara, A. Leprince and S. Leray, New capabilities of the Liège intranuclear-cascade model for particle-transport codes, Proceedings of SNA + MC 2013 - Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications + Monte Carlo, 査読有, 2014, 02106, <https://doi.org/10.1051/snamc/201402106>
- ⑦ M. Hagiwara, K. Saito, M. Numajiri, K. Takahashi, J. Kitagawa, H. Matsumura, T. Sanami, T. Miura, K. Masumoto, M. Ieiri, Y. Sato, A. Toyoda, Investigation on Radionuclides Released in the Radioactive Material Leak Incident at the J-PARC Hadron Experimental Facility, JPS Conference Proceedings, 査読有, Vol. 8, 2015, p.051007, DOI:10.7566/JPSCP.8.051007
- ⑧ M. Hagiwara, Y. Iwamoto, H. Iwase, H. Yashima, D. Satoh, T. Matsumoto, A. Masuda, Y. Nakane, A. Tamii, T. Shima, K. Hatanaka, T. Nakamura, Characterization of Hundreds of MeV ${}^7\text{Li}(p,n)$ Quasi-Monoenergetic Neutron Source at RCNP Using a Proton Recoil Telescope and TOF Technique, JPS Conference Proceedings, 査読有, Vol. 11, 2016, p. 050004 [学会発表] (計 13 件)
- ① M. Hagiwara, Recent progress in experimental and theoretical studies of proton-induced fragment production cross section at intermediate energies, 2013 Symposium on Nuclear Data, 2013 年 11 月 15 日, 福井大学 (福井県・敦賀市)
- ② M. Hagiwara, K. Saito, M. Numajiri, K. Takahashi, J. Kitagawa, H. Matsumura, T. Sanami, T. Miura, K. Masumoto, M. Ieiri, Y. Sato, A. Toyoda, Investigation on Radionuclides Released in the Radioactive Material Leak Incident at the J-PARC Hadron Experimental Facility, 2nd International Symposium on Science at J-PARC (J-PARC 2014), 2014 年 7 月 15 日, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市)
- ③ 萩原雅之, D. Mancusi, A. Boudard, S. Leray, J. Cugnon, 核内カスケード模型によるフラグメント生成過程の記述, 日本原子力学会 2014 年秋の大会, 2014 年 9 月 9 日, 京都大学 (京都府・京都市)
- ④ M. Hagiwara, Y. Iwamoto, H. Iwase, H. Yashima, D. Satoh, T. Matsumoto, A. Masuda, Y. Nakane, A. Tamii, T. Shima, K. Hatanaka, T. Nakamura, Characterization of hundreds of MeV ${}^7\text{Li}(p,n)$ quasi-monoenergetic neutron source at RCNP using a proton recoil telescope, The 8th International Symposium on Radiation Safety and Detection Technology (ISORD-8), 2015 年 7 月 15 日, Jeju (Korea)
- ⑤ 萩原雅之, 八島浩, 核内カスケード模型によるフラグメント生成過程の記述 2 - 放射化断面積との比較-, 日本原子力学会 2015 秋の大会, 2015 年 9 月 10 日, 静岡大学 (静岡県・静岡市)
- ⑥ Masayuki HAGIWARA, Davide MANCUSI, Alan BOUDARD, Sylvie LERAY, Joseph CUGNON, Comparison of several state-of-the-art deexcitation models coupled with an intranuclear-cascade model for proton-induced reactions at intermediate energies, 2015 年度核データ研究会, 2015 年 11 月 20 日, いばらき量子ビーム研究センター (茨城県・東海村)
- ⑦ 萩原雅之, 岩瀬広, 岩元洋介, 佐藤大樹, 中根佳弘, 八島浩, 中村尚司, 中島宏, 坂本幸夫, 民井淳, 嶋達志, 畑中吉治, 反跳陽子テレスコープを用いた中性子測

定並びに液体有機シンチレータ NE213 を用いた遮へい実験, RCNP 研究会「高エネルギー準単色中性子照射場を活用した実験と今後の展望」, 2015年11月26日, 大阪大学(大阪府・茨木市)

- ⑧ M. Hagiwara, Y. Iwamoto, H. Iwase, H. Yashima, D. Satoh, T. Matsumoto, A. Masuda, Y. Nakane, A. Tamii, T. Shima, K. Hatanaka, T. Nakamura, Characterization of hundreds of MeV ${}^7\text{Li}(p, n)$ quasi-monoenergetic neutron source at RCNP using a proton recoil telescope and TOF technique, The First International Symposium on Radiation Detectors and Their Uses (ISR2016), 2016年1月20日, 高エネルギー加速器研究機構(茨城県・つくば市)
- ⑨ 萩原雅之, 核内カスケード模型によるフラグメント生成過程の記述3 -入射エネルギー100 MeV 以下の低エネルギー領域における DDX の改良-, 日本原子力学会2016春の年会, 2016年3月28日, 東北大学(宮城県・仙台市)
- ⑩ T. Sanami, Y. Yamaguchi, Y. Uozumi, M. Hagiwara, Y. Koba, Double differential cross section for light mass fragment production on tens of MeV proton, deuteron, helium and carbon induced reactions, International Conference on Nuclear Data For Science and Technology (ND2016), 2016年9月15日, Bruges (Belgium)
- ⑪ M. Hagiwara, Y. Iwamoto, N. Matsuda, T. Sanami, N. Shigyo, T. Nishizawa, H. Nakashima, Y. Sakamoto, Measurements of neutron and charged particle production cross sections on beryllium, carbon and iron bombarded with 13MeV/nucleon neon beam, International Conference on Nuclear Data For Science and Technology (ND2016), 2016年9月15日, Bruges (Belgium)
- ⑫ M. Hagiwara, H. Iwase, Y. Iwamoto, D. Satoh, T. Matsumoto, A. Masuda, H. Yashima, Y. Nakane, H. Nakashima, Y. Sakamoto, T. Shima, A. Tamii, K. Hatanaka, T. Nakamura, Shielding experiments of concrete and iron for the 244 MeV and 387 MeV quasi-monoenergetic neutrons using an organic scintillator (at RCNP, Osaka Univ.), 13th International Conference on Radiation Shielding (ICRS-13) & 19th Topical Meeting of the Radiation Protection & Shielding Division of the American Nuclear Society -2016 (RPSD-2016), 2016年10月5日, Paris (France)
- ⑬ H. Yashima, M. Hagiwara, T. Sanami, S.

Yonai, Measurement of residual activities induced in copper by 148 MeV carbon, 2016年度核データ研究会, 2016年11月18日, 高エネルギー加速器研究機構(茨城県・つくば市)

[その他]

研究ホームページ:

<http://rcwww.kek.jp/research/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

萩原 雅之 (HAGIWARA Masayuki)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・放射線科学センター・研究機関講師
研究者番号: 10450363

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

佐波 俊哉 (SANAMI Toshiya)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・放射線科学センター・教授
研究者番号: 90321538

八島 浩 (YASHIMA Hiroshi)
京都大学・原子炉実験所・助教
研究者番号: 40378972

(4) 研究協力者

Davide MANCUSI
CEA, Centre de Saclay, IRFU/Service de Physique Nucléaire

Alan BOUDARD
CEA, Centre de Saclay, IRFU/Service de Physique Nucléaire

Sylvie LERAY
CEA, Centre de Saclay, IRFU/Service de Physique Nucléaire

Cugnon JOSEPH
Fundamental Interactions in Physics and Astrophysics, University of Liège