

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04835

研究課題名(和文)高精度3次元軌跡解析による電子・不安定核弾性散乱

研究課題名(英文)Electron scattering from unstable nucleus with 3-dimensional trajectory analysis

研究代表者

塚田 暁 (Tsukada, Kyo)

東北大学・電子光物理学研究センター・助教

研究者番号：10422073

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,800,000円

研究成果の概要(和文)：SCRIT電子散乱施設にある電子スペクトロメータの前段飛跡検出器を新しく作り変えたことで、散乱電子の軌跡を3次元的に再構成することが可能となった。また、本研究課題で製作した3次元駆動型3次元磁場測定装置を用いることで、電磁石内の磁場マップを作成、スペクトロメータの運動量分解能向上を図った。さらに、新たに製作した炭素薄膜標的を用いることで、散乱電子の運動量スペクトルに見られる弾性散乱ピークの幅からスペクトロメータの性能評価を行った。特に、弾性散乱ピークの隣に炭素の第一励起状態(4.4MeV)のピークを分離して観測することに成功した。これにより、来る不安定核標的を用いた実験の準備は完全に整った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子散乱は物質の構造を調べる上で強力な手法である。これは原子核構造に対しても同様で、1950年代にその有用性が示されて以来、原子核の基本的な性質の多くが電子散乱によって明らかにされてきた。近年世界中で活発な研究が行われている、短寿命・不安定核の性質を電子散乱で調べることを可能にするのがSCRIT法である。本研究課題では、SCRIT実験にて使用する電子スペクトロメータを要求性能を満たすように改良・発展させるもので、ほぼ成功裏に完了した。

研究成果の概要(英文)：By remodeling the forward detector of the electron spectrometer in the SCRIT electron scattering facility, it became possible to reconstruct the scattered electron trajectory three-dimensionally. Moreover, by using the three-dimensional drive type three-dimensional magnetic field measuring device manufactured in this research project, a magnetic field map in the spectrometer magnet was created and the momentum resolution of the spectrometer was improved. Furthermore, the performance of the spectrometer was evaluated from the width of the elastic scattering peak found in the momentum spectrum of the scattered electrons by using the newly manufactured carbon thin film target. In particular, we succeeded in separating and observing the peak of the first excited state (4.4 MeV) of carbon next to the elastic scattering peak. This is completely ready for the experiment with the coming unstable nuclear target.

研究分野：原子核物理

キーワード：電子散乱

1. 研究開始当初の背景

我々は電子散乱という強力なツールを用いた不安定核構造研究の実現を目指している。原子核の構造研究において、電子散乱実験は極めて重要で本質的な情報を与えることが分かっている。以下の特徴的な性質、(a)電子自身が内部構造を持たない素粒子であること、(b)電磁相互作用は非常に良く分かっている精度の高い計算が可能であること、(c)強い相互作用をする陽子散乱などとは違って原子核深部まで見ることができること、などから電子散乱の実験データは原子核の内部構造を詳細に反映し、かつ理論計算との直接比較が可能である。そこには陽子や原子核ビームをプローブとした実験とは違い、モデル依存性が介在する余地はない。

実際に、天然に存在する安定(かつ分離可能)な原子核に関しては半世紀に渡って電子散乱実験が行われ、原子核の内部構造に関する詳細なデータが得られていることは広く知られている。一方で、陽子数と中性子数が大きく異なるような不安定で短寿命な原子核に関しては、標的として準備することが量的にも時間的にも極めて難しいため、電子散乱による研究を実行することは不可能と考えられてきた。我々は SCRIT 法[1]を発明し、不安定原子核を標的とした電子散乱実験を世界で初めて遂行すべく、理化学研究所に SCRIT 電子散乱施設を建設した。SCRIT 法とは、電子ビームによるイオン捕獲現象を利用し標的イオンを電子ビーム上に 3 次元的に繋ぎ止める全く新しい手法で、大量に用意するのが難しい不安定原子核でも電子弾性散乱に必要なルミノシティ($\sim 10^{27}$ [cm²s⁻¹])を達成することができる[2]。

SCRIT 電子散乱施設完成後、2016 年より安定な原子核を用いたコミッションを開始した。これまでに鉛(²⁰⁸Pb)と、安定核だが電子散乱の測定例がなかったキセノン(¹³²Xe)に対する電子散乱を実行し、共に僅か 10⁷ 程度の原子核標的からの弾性散乱の同定ならびに弾性散乱の角度分布から原子核電荷分布の情報を引き出すことに成功している[3]。

図 1 に ¹³²Xe 標的の測定結果を示す。縦軸は得られた反応断面積を Mott 断面積(点電荷に対する断面積)で割ったもので、原子核の形状因子に対応する。横軸の運動量移行は散乱角度とビームエネルギーから決まる。¹³²Xe のサイズを半径 C=5.42[fm]、表面のぼやけ t=2.71[fm]と世界で初めて決定した[3]。原子核の形状因子測定の準備はほぼ整っており、不安定核を標的とした実験が間もなく始まる予定である。

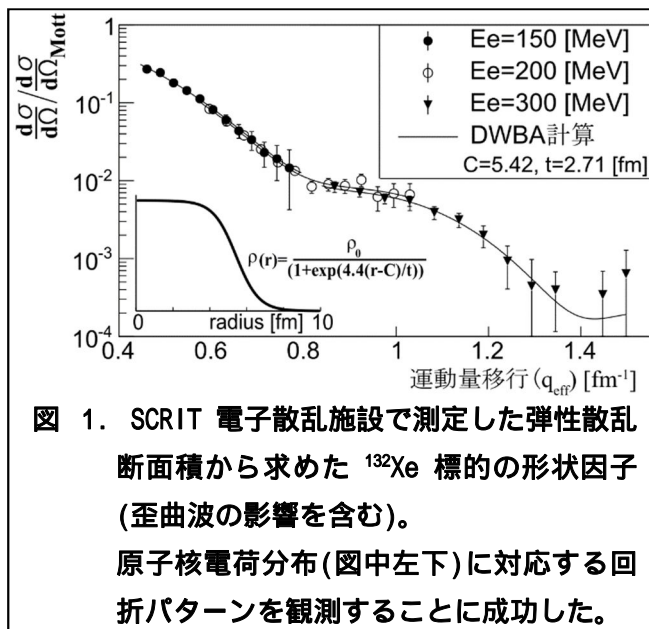


図 1. SCRIT 電子散乱施設で測定した弾性散乱断面積から求めた ¹³²Xe 標的の形状因子(歪曲波の影響を含む)。原子核電荷分布(図中左下)に対応する回折パターンを観測することに成功した。

- [1] M. Wakasugi, *et. al.*, Nucl.Instrum.Meth. B317 (2013) 668-673
- [2] T. Suda, *et. al.*, PTEP 2012(2012) 03C008
- [3] K. Tsukada, *et. al.*, Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 262501

2. 研究の目的

図 2 に電子ビームエネルギー 300MeV 時の散乱電子運動量分布を示す。¹³²Xe からの弾性散乱ピークがはっきりと観測されている。また、弾性散乱ピークの下(低運動量側)に輻射テール(核内電磁場との相互作用によるエネルギー損失)と非弾性散乱の寄与が見える。網掛は標的イオンを SCRIT 内に入れずに測定したバックグラウンドを示しており、真空チャンバー内の残留ガス(酸素など)からの弾性散乱も見えている。2つのピーク位置のずれは原子核質量の違いによる。図 3 に現在までに得られた各電子ビームエネルギーに対する散乱電子の運動量分解能の結果と、シミュレーションによる目標値を示す。例えば

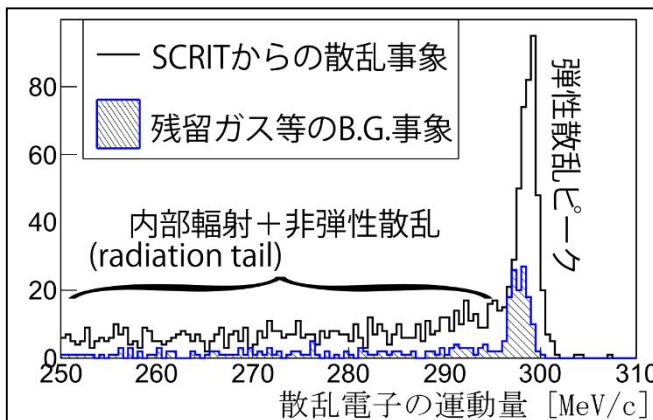


図 2. 散乱電子の運動量分布。弾性散乱ピークが見えている。網掛は標的イオンなしで求めたバックグラウンド分布。

300MeV では $dp/p=2.6\times 10^{-3}$ 、目標値 1.8×10^{-3} であり、50%程度の改善が必要であることがわかる。運動量分解能は弾性散乱ピークを選び出す際に極めて重要である。信号と雑音の比(S/N 比)を上げることで誤差の少ない測定が可能となり、また原子核の比較的大きな励起を伴う非弾性散乱の混入を防ぐことができる。

我々の散乱電子スペクトロメータは、大立体角双極電磁石の前後に飛跡検出器を置き、磁場中の軌跡を再構成することで散乱電子の運動量を導出する(この構成は研究方法の中で図示している)。目標運動量分解能が達成できていない原因として、双極電磁石の磁場分布の理解度、及び前段の飛跡検出器が2次元(水平)情報のみを測定するタイプであるために3次元的な軌跡の再構成に不定性が生じているためと考えられる。これはスペクトロメータのアクセプタンス見積りにも影響し、角度分布の導出すなわち原子核の形状因子決定精度にも関わってくる。

そこで本研究では、(a)電磁石内部の磁場測定を行い、かつ(b)前段の飛跡検出器を3次元(水平+高さ)情報を測定するものに作り変えることで磁場中での高精度3次元軌跡解析を行い、目標運動量を達成する。我々は既に ^{138}Xe 、 ^{132}Sn といった不安定原子核を生成し輸送することに成功し、SCRIT 内部に導入できる標的イオンの数を増やすために生成量や輸送効率の改善が現在も進行中である。本研究のスペクトロメータアップグレードによって、不安定原子核の形状因子を高い信頼度で決定することを目指す。

3. 研究の方法

本応募研究では、我々が建設した SCRIT 電子散乱施設の散乱電子スペクトロメータの運動量分解能を改善し、不安定原子核である ^{138}Xe と ^{132}Sn を標的とした電子散乱を実施することを目指す。

図4に我々が建設したスペクトロメータの概観図を示す。SCRIT 法の特性上、標的は電子ビーム方向に 50cm 程度の長さを持つため、散乱電子測定系として点源を仮定した光学系を考えるわけにはいかない。そこで我々のスペクトロメータは広い間口(横 1700mm×高さ 290mm)を持つ大型電磁石を採用し、電磁石前後にあるドリフトチェンバーによって軌跡及び運動量が再構成される。高さ方向の大きな間口によって電子・不安定核散乱に必要な大立体角を実現している。この場合、磁極近くを通過する軌跡も3次元的に正確に再構成する必要があるため、磁場マップ及び散乱電子の電磁石に対する入射角と出射角の精度が重要となる。

4. 研究成果

図5に、本研究課題にて新たに製作した3次元飛跡検出器を示す。すでにスペクトロメータ電磁石に取り付けた状態である。これは荷電粒子の飛跡検出のための金属ワイヤーが鉛直方向だけでなく水平方向にも張ってあることで、荷電粒子の飛跡の鉛直成分にも感度を持つ。

データ読み出しには、最新のネットワーク読み出し機能付き、信号増幅・デジタル化機能一体型の RAINER カードを用いている。荷電粒子の検出効率及び位置分解能が要求性能を満たしていることは、確認済みである。

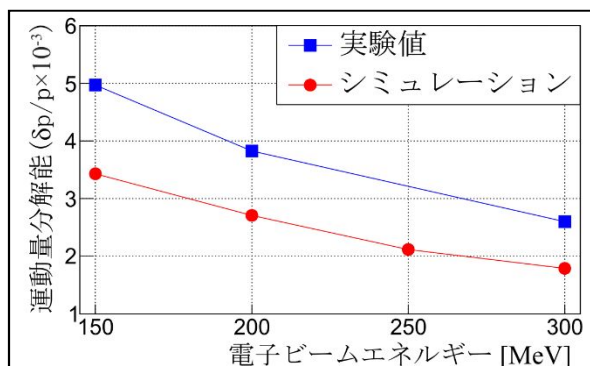


図 3. 実験から求めた運動量分解能とシミュレーションの比較。

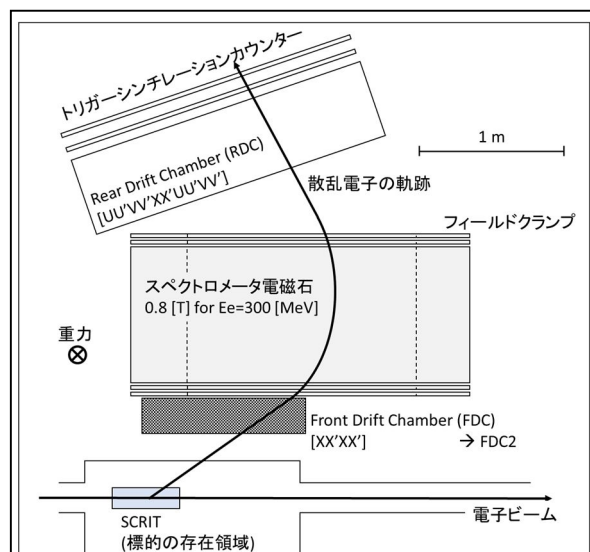


図 4. 散乱電子スペクトロメータの概観図
電磁石前後のドリフトチェンバーによって電子の軌跡を決定する。

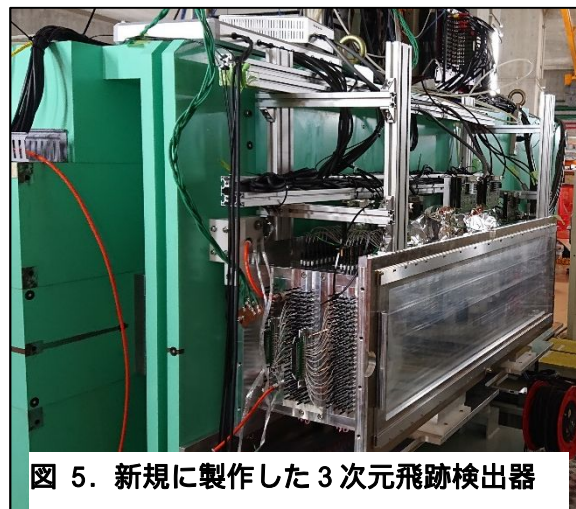


図 5. 新規に製作した3次元飛跡検出器

図6は本研究課題にて製作したスペクトロメータ電磁石内部の磁場測定装置である。磁場の3成分を同時に測定するためのプローブヘッド及び、それを3次的に駆動しデータをコンピュータに取り込む装置群からなる。この装置を用いて磁場マップを作成し、電子散乱実験データの解析を通じて運動量分解能の評価を行った。

これにより、電磁スペクトロメータに関する不定性はほぼなくなり、不安定核供給が十分な量得られれば、電子・不安定核散乱実験はすぐにでも始められる状態に持てることができた。

今のところ、SCRIT 電子散乱施設における不安定核供給量は十分ではなく、電子・不安定核散乱実験は行っていない。代わりに、本研究課題期間中に新たに設置した炭素薄膜標的を用いた検証実験を行った。図7はその時に再構成された散乱電子運動量スペクトルである。弾性散乱だけでなく、非弾性散乱ピークがはっきりと見えている。第一励起状態の4.4MeV という値は、SCRIT プロジェクトにおいて目標としている標的 ^{132}Sn の第一励起状態は4 MeVと近く、スペクトロメータが実験遂行に必要な性能を有していることを実証している。

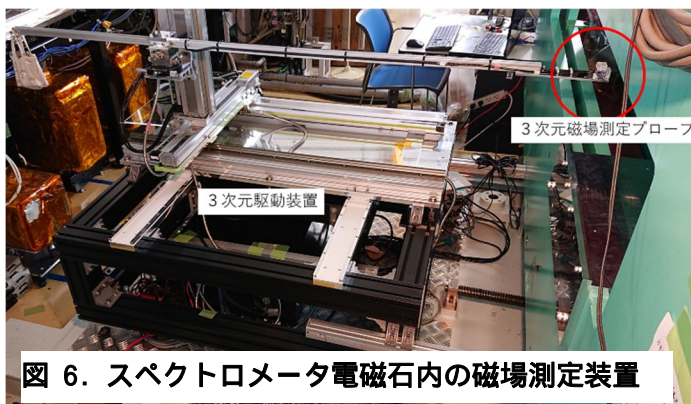


図 6. スペクトロメータ電磁石内の磁場測定装置

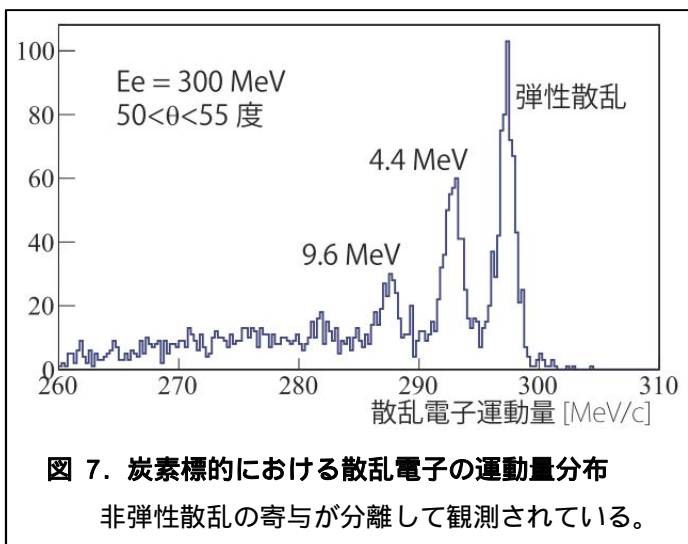


図 7. 炭素標的における散乱電子の運動量分布

非弾性散乱の寄与が分離して観測されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tsukada Kyo, Adachi Kousuke, Enokizono Akitomo, Fujita Takahiro, Hara Masahiro, Hori Toshitada, Hori Mitsuki, Ichikawa Shin-ichi, Kasama Keita, Kurita Kazuyoshi, Namba Kazuki, Ohnishi Tetsuya, Suda Toshimi, Tamae Tadaaki, Togasaki Mamoru, Wakasugi Masanori, Watanabe Masamitsu, Yamada Kouhei	4. 巻 240
2. 論文標題 Electron scattering from 208Pb and 132Xe ions at the SCRIT facility	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Hyperfine Interactions	6. 最初と最後の頁 102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/s10751-019-1635-2	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 Enokizono A., Ohnishi T., Tsukada K.	4. 巻 28
2. 論文標題 The SCRIT Electron Scattering Facility at RIKEN: The World's First Electron Femtoscope for Short-Lived Unstable Nuclei	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Physics News	6. 最初と最後の頁 18~22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/10619127.2018.1427951	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 Enokizono A., Ohnishi T., Tsukada K.	4. 巻 28
2. 論文標題 The SCRIT Electron Scattering Facility at RIKEN: The World's First Electron Femtoscope for Short-Lived Unstable Nuclei	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Physics News	6. 最初と最後の頁 18~22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/10619127.2018.1427951	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 K. Tsukada, A. Enokizono, T. Ohnishi, K. Adachi, T. Fujita, M. Hara, M. Hori, T. Hori, S. Ichikawa, K. Kurita, K. Matsuda, T. Suda, T. Tamae, M. Togasaki, M. Wakasugi, M. Watanabe, and K. Yamada	4. 巻 118
2. 論文標題 First Elastic Electron Scattering from 132Xe at the SCRIT Facility	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 262501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.118.262501	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 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 和宇慶ひかり、青柳泰平、榎園昭智、大西哲哉、栗田和好、佐藤蒼、須田利美、高木周、高山祥汰、瀧大祐、玉江忠明、塚田暁、本多佑記、若杉昌徳、渡邊正満
2. 発表標題 SCRIT電子スペクトロメータの3次元磁場測定
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Tsukada for the SCRIT collaboration
2. 発表標題 Present status and prospects of the SCRIT electron scattering facility
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (NuSYM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Tsukada for the SCRIT collaboration
2. 発表標題 Present status of SCRIT electron scattering facility
3. 学会等名 The 14th Asia-Pacific Physics Conference (APPC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塚田暁
2. 発表標題 炭素標的を用いたSCRIT実験用電子スペクトロメータの性能評価
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名	K. Tsukada, Y. Honda, K. Kasama, K. Namba, T. Suda, S. Takayama, T. Tamae, K. Tsukada, H. Wauke, A. Enokizono, M. Hara, T. Hori, S. Ichikawa, T. Ohnishi, M. Wakasugi, M. Watanabe, K. Kurita, M. Nakano, S. Sato, R. Ogawara
2. 発表標題	Present status of the SCRIT electron scattering facility
3. 学会等名	fifth joint meeting of the Division of Nuclear Physics of the APS the JPS (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	K. Tsukada for the SCRIT collaboration
2. 発表標題	Present status of the electron scattering experiments at the SCRIT facility
3. 学会等名	ECT*研究会 “ Probing exotic structure of short-lived nuclei by electron scattering ” (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	K. Tsukada for the SCRIT collaboration
2. 発表標題	Electron scattering from ^{208}Pb and ^{13}Xe ions at the SCRIT facility
3. 学会等名	The 7th International Conference on Trapped Charged Particles and Fundamental Physics (TCP2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	塚田暁
2. 発表標題	The SCRIT electron scattering facility: Toward the world's first study of unstable nuclei by electron scattering
3. 学会等名	PRL 60周年シンポジウム、日本物理学会2018年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名 塚田暁、青柳泰平、笠間桂太、須田利美、高山祥汰、玉江忠明、南波和希、本多佑記、和宇慶ひかり、市川進一、大西哲也、榎園昭智、原雅弘、堀利匡、若杉昌徳、渡邊正満、栗田和好、佐藤蒼、中野萌絵
2. 発表標題 電子・不安定核散乱実験用ドリフトチェンバーの開発と性能評価
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和宇慶ひかり、青柳 泰平、笠間 桂太、須田 利美、高山 祥汰、玉江 忠明、塚田 暁、南波 和希、本多 佑記、市川 進一、榎園 昭智、大西 哲哉、原 雅弘、堀 利匡、若杉 昌徳、渡邊 正満、栗田 和好、佐藤 蒼、中野 萌絵
2. 発表標題 SCRIT実験に用いる電子スペクトロメーターの精密磁場測定
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塚田暁、市川進一、内田信昭、榎園昭智、大西哲哉、笠間桂太、栗田和好、笹村新之介、須田利美、玉江忠明、戸ヶ崎衛、南波和希、原雅弘、堀利匡、堀充希、本多佑記、若杉昌徳、渡邊正満
2. 発表標題 SCRIT実験：安定核標的による成果と今後
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高山祥太、青柳泰平、笠間桂太、須田利美、玉江忠明、塚田暁、本多佑記
2. 発表標題 SCRIT電子スペクトロメーター性能向上に向けた飛程検出器の開発
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Tsukada
2. 発表標題 First result from SCRIT electron scattering facility with ^{132}Xe target
3. 学会等名 The 10th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----