

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2010～2014

課題番号：22224004

研究課題名(和文)電子弾性散乱による短寿命不安定核の電荷密度分布測定

研究課題名(英文) Electron Scattering for Measurements of Charge Density Distributions of Short-Lived Nuclei

研究代表者

須田 利美 (Toshimi, Suda)

東北大学・電子光理学研究センター・教授

研究者番号：30202138

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 156,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、天然には存在しない短寿命で崩壊する不安定核の内部構造を、原子核内部構造の最も強力な研究手法である電子散乱により解明を目指すものである。不安定核構造の解明は、原子核物理学にとってはもちろんの事、宇宙での元素合成過程研究にも必須であるが、電子散乱による研究はあまりに困難であるため今までは不可能と考えられてきた。私達は、この壁を打ち破る短寿命不安定核の電子散乱による研究を可能にする革新的な実験技術、SCRIT法、を発明し、世界初の不安定核専用電子散乱施設を建設し研究を進めた。

研究成果の概要(英文)：We aim at studying the internal structures of production-hard short-lived unstable nuclei by means of electron scattering. Electron scattering is the best probe for such studies and indeed it has played consistently an essential role to reveal the detailed internal structures of many stable nuclei. An innovative technology, named SCRIT, we have invented has been demonstrated to be a way to realize never-yet-performed electron scattering off short-lived nuclei. We have completed the construction of the world's first electron scattering facility dedicated for short-lived nuclei, and started its operation. Recently, the first physics data was obtained.

研究分野：原子核物理学(実験)

キーワード：短寿命不安定核 原子核構造 電荷密度分布 電子弾性散乱 SCRIT法 イオントラップ 光核分裂 中性子過剰核

## 1. 研究開始当初の背景

原子核の大きさや形を表す陽子や中性子の空間密度分布は、質量同様に原子核の最も基本的な物理量であり、原子核の内部構造（波動関数）を直接反映するために原子核の理解には必要不可欠である。電子散乱は、原子核の内部構造を信頼度高く、そして精密に解明出来る最も強力な研究手段である。それは、電子が内部構造を持たず、よく理解されており且つ弱い電磁相互作用を通じて深部を含む原子核全体と散乱するからである。すなわち、電子散乱実験データから曖昧さ無く原子核の内部構造を決定することが出来るのである。米国のHofstadter グループは1950年代に原子核構造研究に電子散乱を初めて適用し、弾性散乱実験により数多くの安定核の電荷密度分布を決定した(1961年ノーベル物理学賞)。

電荷密度分布は、核内陽子それぞれの波動関数の2乗の和であり、如何なる原子核の構造理論も電子散乱で決定する電荷密度分布を再現する必要がある。それ故、電子散乱による安定な原子核の核構造研究は、安定核の内部構造の理解や原子核構造理論の確立に決定的な役割を果たしたことはよく知られている。

近年、加速器技術や実験技術の高度化に伴い、天然には存在しない陽子と中性子数の比が大きく違う短寿命不安定核が実験室での研究対象となってきた。上記電子散乱による研究等により、安定核では半径と質量数の関係や、核子密度の飽和性、そして原子核の安定性を支配する魔法数が発見され確立している。しかしながら、短寿命不安定核の構造研究が進むにつれて、それがいづれも絶対的なものではないことが明らかになりつつある。原子核構造に関する今までの“常識”は、安定核並びに安定核付近の原子核でのみ通用する自体を認識するに至り、短寿命不安定核の内部構造のさらなる詳細な研究が必要になっているのである。

現在まで不安定核構造の研究は、専ら反応確率の大きな強い相互作用を利用して行われてきた。大変複雑な「強い相互作用」が関与しまた主に原子核表面でのみ散乱されるので、実験データから推定される核内部構造情報も反応モデルに強く依存する。電磁プローブによる内部構造研究が求められる所以である。

電子散乱ではこのような不確定さが皆無のクリーンなプローブで、荷電分布密度が曖昧さ無く決定できる。したがって、電子散乱による短寿命不安定核の研究は原子核研究者の長年の夢であった。しかしながら、生成率が小さく短寿命の原子核の標的生成が不可能だったために、今まで全く手つかずの研究分野であった。

## 2. 研究の目的

この未踏分野を開拓するため、我々は自己閉じ込め標的 (SCRIT:Self-Confining RI Target) 法と名付けた実験方法を発明、そしてこれが電子弾性散乱で原子核の電荷密度分布決定に最低限必要なルミノシティ、 $10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、を極少数の標的数で達成出来ることを原理実証実験を通じて示してきた。生成困難で短寿命で崩壊してしまう不安定核を標的とするには、極々少数の標的で(散乱確率の小さな)電子散乱を実現する実験手法の確立が不可欠であった。

SCRIT 法は、放射光リングなど電子蓄積リングで知られている「イオン捕獲現象」を積極的に利用した高エネルギー電子ビームによる全く新しいイオントラップである。図1の様に、SCRIT 法はこの「イオン捕獲現象」を積極的に利用し、短寿命核イオンを電子ビーム自身に捕獲させ電子散乱を実現しようとするアイデアである。

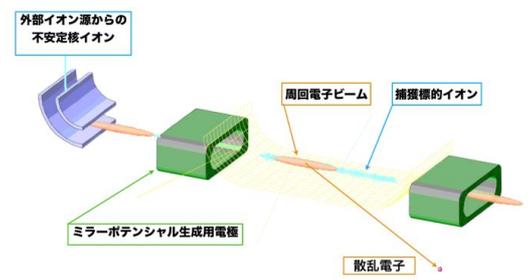


図1. SCRIT装置。外部イオン源からの不安定核イオンビームを電子ビーム上に入射するための偏向電極とミラーポテンシャル生成用の電極対で形成されている。

この成功を受けて我々は、理化学研究所のRIビームファクトリー内に世界初の短寿命不安定核専用の電子散乱施設を建設した。本基盤研究(S)では、この電子散乱施設で実現される $10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のルミノシティで世界初の短寿命不安定核の電荷分布密度測定を目的とした。

## 3. 研究の方法

図2で示すようにこの施設は、電子加速器(入射器と蓄積リング)、不安定核生成装置(ウラン核の電子・光核分裂反応を利用した日本初のISOL)そして散乱電子検出器と制動輻射利用のルミノシティモニターで構成されている。極少数の標的を電子ビーム上に捕獲し電子散乱を実現するSCRIT装置は、電子蓄積リングの直線部に設置されている。

本科研費で、この施設での電子散乱実験のための世界的に前例のない長い標的長(50 cm)に対し十分なアクセプタンスを有し、広い散乱角( = 30 - 60° )を一度に覆う大立体角(100 msr)を有する高運動量分解能の大型散乱電子スペクトロメータを導入した。こ

のスペクトロメータは、不安定核からの弾性散乱事象を曖昧さなく同定し、その角度分布から電荷分布密度を決定する。

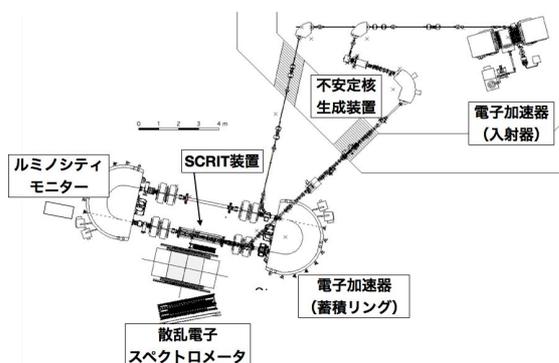


図2. 理研・RIビームファクトリー内に設置された世界初の短寿命不安定核専用のSCRIT電子散乱実験施設。

本スペクトロメータは、既設であった大型結晶シンチレータからなる散乱電子検出器が弾性散乱事象同定する十分なエネルギー分解能を有していなかったために導入することになった。電子散乱実験に使用する電子ビームエネルギーは、想定ルミノシティ並びに散乱角度範囲内で現実的な測定時間（一週間）での実験が可能なる  $E_e = 150 - 300 \text{ MeV}$  とした。弾性散乱事象同定のためには、 $E = 150 \text{ keV}$  程度の励起エネルギー分解能が必要なため、運動量分解能を  $p/p = 10^{-3}$  と設定した。

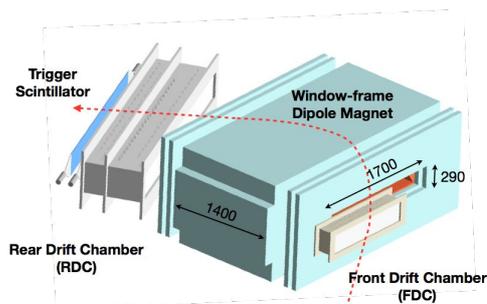


図3. 散乱電子スペクトロメータ (WISES)。SCRITで形成する 50 cm 長の標的を覆い、広い散乱角度 (30-60°) の散乱電子を  $10^{-3}$  の運動量分解能で測定する。

本基盤研究 (S) による研究は、2010 年半ばより上記性能を満たす電磁石スペクトロメータの詳細な設計から開始した。当初申請書で提案した電磁石スペクトロメータに比べ、より覆う散乱角度が広くまた大立体角化が実現できる電磁石のデザインを発見し、急遽設計を変更した。図3に世界初の電子弾性散乱測定用に建設した高分解能大立体角電子スペクトロメータ、WISES (Window-frame Spectrometer for Electron Scattering) を示した。総重量約56トンである。

詳細設計終了後、建設に入る矢先の2011年3月11日に東日本大震災が発生した。設置予定場所である理化学研究所の被害は震源から遠かったために深刻ではなかったが、研究代表者(須田)が所属する東北大学は甚大な影響を受けた。

所属する東北大学電子光物理学研究センターの加速器は実験室内の実験装置と共に破壊され、研究に向けた基礎開発作業が完全にストップした。また共同研究者自身の家や家族を含む震災対策のため、約1ヶ月ほど大学の教育・研究活動に従事できなかった。

さらに、福島第一原発事故により、共同研究者であった中国並びにスウェーデンの研究者はそれぞれの国からの通達により帰国したため、被害を受けなかったPCなどを利用したコンピュータシミュレーションによる検討にも支障が生じ、大変苦しかった。また電線や鉄などの資材が震災復興のために優先され(価格も上昇してしまった)、電磁石建設のスケジュールにも深刻な影響が出た。具体的には平成23年度(2011年度)に完成予定だった電磁石スペクトロメータは、同年度中の完成を断念せざるを得なくなり完成を翌年度に繰り越した。

しかしながら、東北大学電子光物理学研究センターや東北大学そして理化学研究所の支援、電磁石建設業者を含む数多くの業者の献身的な協力、そして何より本研究の共同研究者の大変な努力により、建設・設置の遅れは最少限度(約半年強)に留めることができ、翌年度平成24年度中には完成し実験室に設置することができた。平行して進めていた散乱電子軌道測定用の大型ドリフトチェンバーの建設も震災の影響で若干遅れたが平成25年度中には全て立ち上がり、何とか最終年度の前年にはテスト実験ができる状態に持って行くことができた。

本科研費最終年である平成26年度初頭からは、極細ワイヤー標的(タンゲステン、チタン)を利用した測定系全体の運動量分解能、アクセプタンス測定を行い、SCRIT法による電子散乱実験開始のための準備を進めた。ワイヤー標的は安定核のため電荷分布密度が既知、即ち弾性散乱断面積が既知であることを利用している。その後、安定核であるXe核を利用し到達ルミノシティ向上を目指したSCRIT法並びに本電子散乱実験施設全体の高度化を進めた。極微量、 $\sim 10^7$  程度の標的核で散乱確率の小さな電子散乱を実現するためである。不安定核生成用イオン源(ISOL)の高度化、イオン輸送系の高度化、蓄積電子ビームの電流、軌道等のパラメータ最適化を進めたが、全く前例のないタイプのイオントラップであり、多くの問題点を解決しながらの研究であったため、実際にはルミ

ノシティー向上に時間がかかった。

さらに、測定により明らかになった散乱電子測定時のバックグラウンド対策のため、SCRIT電極形状変更の必要性が生じ、そのため数ヶ月の遅れが生じた。電子蓄積リング全体は高真空、 $\sim 10^{-8}$  Pa、であり、真空を破って内蔵物を交換、全体を250度で約2週間ベーキングし真空度向上を図った後、電子ビームからの放射光を利用した更なる真空度向上作業を数ヶ月間行う必要がある(所謂「枯らし運転」)。そのため、補助事業期間を平成27年度12月まで延長し作業を行った。

その結果、 $10^7$  のイオン数で  $10^{27}$   $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  のルミノシティーの達成に成功し、安定核だがいままでは実験が不可能だったため実験例のない  $^{132}\text{Xe}$  核の弾性散乱測定をおこない電荷分布密度を決定した。データ解析を終了し、現在(平成28年4月)SCRIT 施設での初めての論文を執筆中である。

#### 4. 研究成果

現在論文執筆中の  $^{132}\text{Xe}$  標的の散乱電子スペクトルを図4に示す。電子ビームエネルギーは150 MeVであり、 $E_e = 150$  MeV 付近に弾性散乱過程によるピークが見えている。図中、斜線ヒストグラムは、 $^{132}\text{Xe}$ 標的が無いときのデータで、スペクトル中のバックグラウンドに寄与を示している。これらは、加速器真空ダクト中の残留ガス( $\text{CO}$ や  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  などと考えられる)による弾性散乱事象である。

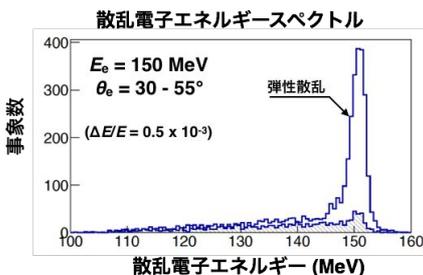


図4. 上図はWISES で測定した散乱電子スペクトル。

前述のように  $^{132}\text{Xe}$ は安定核であるが、過去に Xe 核の電子散乱は行われていないため、これは世界初のデータである。150 MeV 以外に200, 300 MeVでの測定をおこなっている。弾性散乱事象の角度分布も一緒に示す。図5実線は、弾性散乱の理論計算である。電荷分布密度のパラメータは実験データにフィットすることで求めている。実質的な測定時間は3日ほどである。

我々は、 $10^7$  という極微量の標的数で電子散乱により標的核の電荷分布密度分布を決定出来る世界初の短寿命不安定核専用の電子散乱実験施設を完成させた。従来の(安定核を

標的とする)電子散乱実験室にくらべ必要な標的数を  $10^{-10}$  倍ほどに激減させることに成功し、生成困難で短寿命で崩壊してしまう不安定核を標的とした研究を開始する準備が完成した。現在、 $^{132}\text{Xe}$ 原子核の初の電子散乱データ並びに完成した電子スペクトロメータについて論文を執筆中である。

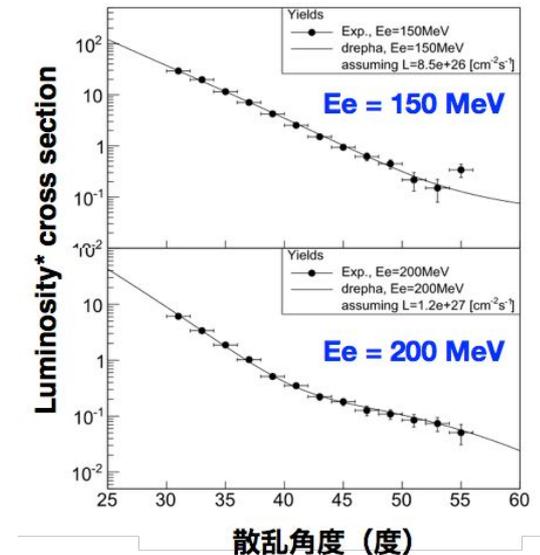


図5. 電子ビームエネルギー150, 200 MeV時の $^{132}\text{Xe}$ 電子弾性散乱断面積の角度分布。図中実線はある荷電密度分布を仮定した理論計算

現在、不安定核生成イオン源(ISOL)も稼働しており、今年(平成28年度)夏には短寿命不安定核を標的とした実験を開始する。いままでも不可能と考えられてきた電子散乱による短寿命不安定核の内部構造研究という新しい研究への扉がいよいよ開く。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計9件)

Toshimi Suda

Electron Scattering for Exotic Nuclei

査読有: Pramana Journal of Physics

83(2014)5, Page 739-747.

若杉昌徳、大西哲也、須田利美、栗田和好

不安定核構造を映す電子顕微鏡をつくる

査読有: 日本物理学会 BUTSURI68 (2013)

810 - 817.

Toshimi Suda, Tatsuya Adachi, Tatsuya Amagai, Akitomo Enokizono, Masahiro Hara, Toshitada Hori, Shin'ichi Ichikawa, Kazuyoshi Kurita, Takaya Miyamoto, Ryo Ogawara, Tetsuya Ohnishi, Yuuto Shimakura, Tadaaki Tamae, Mamoru Togasaki, Masanori Wakasugi, Shuo Wang, and Kayoko Yanagi  
Nuclear physics at the SCRIT electron scattering facility  
査読有 : Prog. Theor. Exp. Phys. 2012, 03C008

学会発表)(計 19件)

須田利美、第38回南アメリカ原子核物理学シンポジウム、

2015年1月8日、ココヨック(メキシコ)

Electron Scattering for Exotic Nuclei (Invited talk)

須田利美、第59回南アフリカ物理学会、2014年7月10日、ヨハネスブルグ(南アフリカ)  
SCRIT Electron Scattering Facility (Plenary talk)

須田利美、International DAE Symposium on Nuclear Physics  
2013年12月4日、ムンバイ(インド)  
Electron Scattering for Exotic Nuclei - The SCRIT electron scattering facility -(invited talk)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

アウトリーチ活動等(5回)

2011年度から毎年1回(3~4コマ)埼玉県立熊谷高校で原子核研究や加速器を利用した研究に関する特別講義を実施。

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

須田 利美 (SUDA, TOSHIMI)  
東北大学・電子光物理学研究センター・教授  
研究者番号 : 30202138

(2)研究分担者

若杉 昌徳 (WAKASUGI, MASANORI)  
理化学研究所・実験装置開発室・室長  
研究者番号 : 70250107

玉江 忠明 (TAMAE, TADAAKI)  
東北大学・電子光物理学研究センター・協同研究者  
研究者番号 : 10133935

栗田 和好 (KURITA, KAZUYOSHI)  
立教大学・理学部・教授  
研究者番号 : 90234559

宮下 裕次 (MIYASHITA, YUJI)  
理化学研究所・実験装置開発室・研究員  
研究者番号 : 30569926

足立 竜也 (ADACHI, TATSUYA)  
東北大学・電子光物理学研究センター・助教  
研究者番号 : 70456911

榎園 昭智 (ENOKIZONO, TOMOAKI)  
立教大学・理学部・助教  
研究者番号 : 20638118

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