

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20340046

研究課題名(和文) 中性子ノックアウト反応による不安定原子核中の強束縛内殻中性子半径収縮現象の研究

研究課題名(英文) Study of shrinking phenomena of strongly-bound inner-shell neutrons in unstable nuclei via neutron knockout reactions

研究代表者

小林 俊雄 (KOBAYASHI TOSHIO)

東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：30186754

研究成果の概要(和文)：不安定原子核中の強束縛内殻中性子半径を中性子ノックアウト反応により測定する実験に必要な大型中性子検出器を製作した。不安定核ビームを用いて(p,pn)中性子ノックアウト反応実験を行う実験計画を理化学研究所 RIBF-PAC に提案し認められた。(p,2p)と(p,pn)反応の測定に用いる検出器系の設置と調整を実験室において完了し、2010年7月に(p,2p)反応の測定データを ${}^6,8\text{He}$ ,  ${}^{7,8,9,11}\text{Li}$  ビームに対し取得した。

研究成果の概要(英文)：We have constructed large neutron hodoscope necessary for measuring radii of strongly-bound inner-shell neutrons in unstable nuclei. Experiment was proposed and approved by RIKEN RIBF-PAC. All the detector system necessary for (p, 2p) and (p, pn) reactions has been installed in the experimental area. Data for  ${}^6,8\text{He}$ ,  ${}^{7,8,9,11}\text{Li}$  (p, 2p) reactions have been collected in June 2010.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	9,500,000	2,850,000	12,350,000
2009年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2010年度	200,000	60,000	260,000
年度			
年度			
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：原子核(実験)

## 1. 研究開始当初の背景

安定線から離れた不安定原子核には中性子ハローや中性子スキンなどの中性子過剰核に特有な現象が見られる。これらの現象は数 MeV 以下に束縛された外殻中性子が原子核表面で引き起こす現象であり、世界中で精力的に研究されている。しかし原子核内部(深部)に関する研究は殆ど行われていない。

中性子過剰核では対称エネルギーの効果により深く束縛された内殻陽子が存在す

る：例えば炭素同位体中の陽子外殻軌道の分離エネルギーは ${}^9\text{C}$  から  ${}^{20}\text{C}$  の範囲で 0.8 MeV から 30 MeV まで変化し、陽子内殻軌道の分離エネルギーは ${}^9\text{C}$  から  ${}^{16}\text{C}$  の範囲で 23 MeV から約 50 MeV まで増加する。私達は ${}^9\text{C}$  から  ${}^{16}\text{C}$  の広い炭素同位体を対象として(p, 2p)陽子ノックアウト反応により強束縛内殻陽子半径を測定した結果、 $1s_{1/2}$  内殻陽子半径は 2.0 fm から 1.5 fm まで収縮する現象を見いだした。ただしこの時点で内殻陽子軌道半径

の収縮現象が分離エネルギーによるものなのか、他の原因があるのかはわかっていない。

この炭素同位体中の陽子軌道半径の測定は私達が放射線総合医学研究所の加速器施設で行ったものであるが、より中性子過剰な原子核に関する測定が可能であるヘリウムやリチウム同位体中の強束縛内殻陽子半径を(p, 2p)反応を用いて測定する為の実験を理化学研究所 RIBF (Radio Isotope Beam Factory) に提案し、認められている。

## 2. 研究の目的

これまで中性子ハローに關与する弱束縛外殻中性子密度分布は色々な方法により精力的に調べられてきたが、強束縛内殻中性子に関する実験研究は皆無である。強束縛内殻陽子半径が収縮するのであれば、強束縛内殻中性子半径はどのように変化するのであろうか？本研究では、(p, pn)中性子ロックアウト反応を用いて、中性子過剰核中の弱束縛外殻中性子から陽子過剰核中の強束縛内殻中性子にわたる広い同位体の範囲で中性子軌道半径を系統的に測定する事を目標とする。

## 3. 研究の方法

不安定核中の束縛中性子の密度分布半径を測るには、(p, pn)中性子ロックアウト反応から重心系で90度付近に散乱された陽子と中性子の4元運動量を測定し、核子核子弾性散乱過程により核内から弾き出された核内中性子の運動量分布を測定する。実空間での中性子密度分布は、運動量空間での密度分布である運動量分布をフーリエ変換する事で求める事ができる。

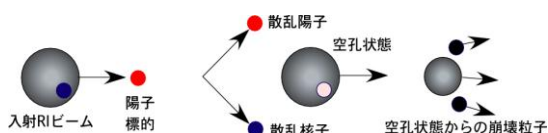


図1：陽子標的による不安定核中束縛核子のノックアウト反応過程

実験的には、重イオン加速器施設で得られる2次原子核ビームを陽子標的にあてるという逆運動学の実験手法を用いて測定を行う(図1)。

不安定核のビームエネルギーは、ロックアウト反応が弾性散乱である250-300 MeV/Aを選択した。反応では、実験室約40度方向にエネルギー20-250 MeVを持つ陽子と中性子が放出される。荷電粒子である陽子の4元運動量測定は難しくはない。しかし中性子である中性子の4元運動量を必要な精度で求める為には大型中性子検出器

を新たに製作する必要がある。中性子検出器に要求されるのは、反応から放出されるエネルギー約20-250 MeVを持つ中性子を、高い検出効率、高い角度分解能/エネルギー分解能で測定でき、かつ大きな立体角を持つことである。

逆運動学では、反応で生成された空孔状態や崩壊後の残留核はほぼビーム速度で零度方向に放出される。これらの重粒子の放出角度は数度以内なので、前方磁気分析器により空孔状態の崩壊モードを高効率でタグする事が可能である。このタグは、内殻中性子ロックアウトと外殻中性子ロックアウトを分離する上で有用である。

## 4. 研究成果

### (1) 中性子検出器の建設

終状態分離の為には、分離エネルギー分解能が少なくとも1.0-1.5 MeV (rms) 必要である。この条件を測定する中性子測定精度に換算すると、エネルギー分解能で約1%、角度分解能で約2 mrad (rms) が必要である。さらに角度アクセプタンスを水平方向約±10度、垂直方向±5度に保つ為に、2 m (水平) x 1 m (垂直)、0.4 m (厚さ) の分割されたプラスチックシンチレータ+光電子増倍管(PMT)の組み合わせを固体水素標的から約6 m 離して設置するデザインを採用した。実際には65 mm x 100 mm x 2000 mm のプラスチックシンチレータの両端にPMTをつけたユニット(図2)を1層16本、合計4層64本を配置し、その前面に荷電粒子と中性子を区別する為の荷電粒子ベト検出器(図3)を4台配置する。

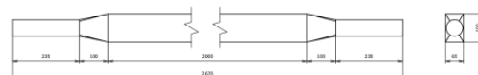


図2：中性子検出器の1要素

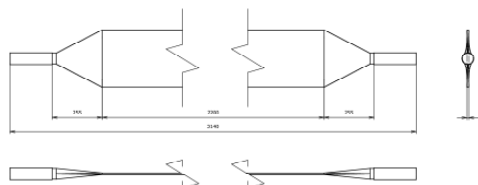


図3：荷電粒子ベト検出器の1要素

中性子検出器64本、荷電粒子ベト検出器4本を製作した後、検出器架台に組み込み、配線を行い、高電圧回路や読出回路を設置した。中性子検出器全体の組立図を示す(図4)。

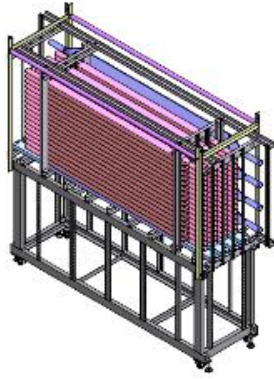


図4：中性子検出器全体の組立図

(2) (p, pn) 中性子ノックアウト反応を用いた中性子軌道半径測定実験の提案と採択

中性子検出器の建設と平行して、軽い中性子過剰核  ${}^3, 4, 6, 7\text{He}$ ,  ${}^6, 7, 8, 9, 11\text{Li}$  同位体の中性子半径の測定を (p, pn) 中性子ノックアウト反応を用いて行う実験提案を 2009 年 6 月開催の理化学研究所第 5 回 RIBF PAC に提案し、NP0906-RIBF16 実験 (Neutron density distributions of He and Li isotopes using (p, pn) neutron-knockout reactions) として採択された。

なおこれより以前に、(p, 2p) 陽子ノックアウト反応を用いて軽い中性子過剰核  ${}^3, 4, 6, 7\text{He}$ ,  ${}^6, 7, 8, 9, 11\text{Li}$  の陽子半径を測定する提案は NP0702-RIBF17 実験 (Studies of exotic nuclei using (p, 2p) proton knockout reactions and construction of a broad-range magnetic spectrometer) として採択されていた。その結果、(p, 2p) 測定と (p, pn) 測定を同じ実験セットアップで実施することが可能になった。

(3) 運動量タグ用の低圧力 MWPC の開発と製作  
2 次原子核ビームは運動量分散を持つ為、各ビームの運動量をタグする必要がある。

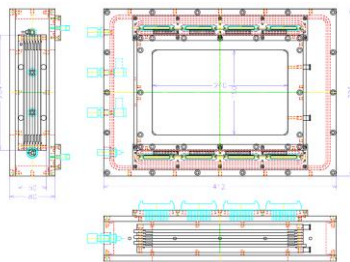


図5：低圧力 MWPC 本体と検出器外箱

加速器施設備え付けの位置測定器は、私達が用いる軽い 2 次ビームに対して感度が無い為、有効領域 250mm x 150mm の 4mm-spacing MWPC を低圧  $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$  ガスを用いて動作させる低圧力 MWPC (図 5) を製作し、運動量分散焦点面 F5 真空箱に設置した。  $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$  圧力

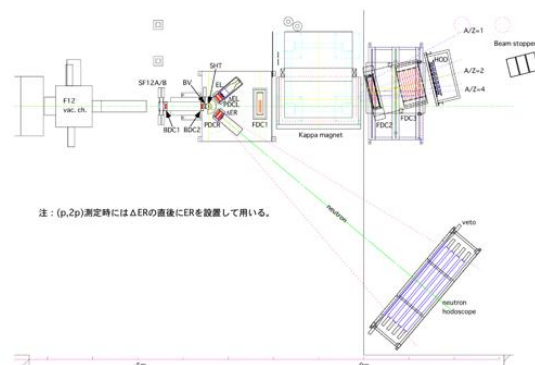
200torr において、電荷 1 の最少電離粒子を 100% の検出効率で測定する事ができる。

(4) NP0702-RIBF17 実験と NP0906-RIBF16 実験

理化学研究所 RIBF において、(p, 2p) 陽子ノックアウト反応による陽子軌道半径の測定を行う NP0702-RIBF17 実験と、(p, pn) 中性子ノックアウト反応による中性子軌道半径の測定を行う NP0906-RIBF16 実験のマシントイムが 2010 年 6 月にスケジュールされた。後者の NP0906-RIBF16 実験が本研究に関係する部分である。

実験のセットアップ (図 6) は、F5 運動量分散焦点面に設置しビーム運動量をタグする低圧力 MWPC、最終焦点面におけるビーム検出器系、固体水素標的、陽子検出器系、磁気スペクトロメータを用いた前方検出器系と今回製作した大型中性子検出器系からなる。(p, 2p) 測定では反応から放出される 2 個の陽子を直径 6"、厚さ 5" の 2 台の NaI(Tl) 検出器で測定する。(p, pn) 測定では、2 台の NaI(Tl) 検出器のうち右側をどけ、NaI(Tl) 陽子検出器と中性子検出器の組み合わせで測定を行う。

図 6：(p, 2p) と (p, pn) 測定実験のセットアップ  
理化学研究所 RIBF 地下 2 階実験室に設置した実験セットアップの写真を図 7 に示す。



左側がビーム検出器系、固体水素標的、陽子検出器系と Kappa 磁石を用いた前方磁気分析器、右側が実験室 3 9 度方向に置かれた中性子検出器系である。

約 1 週間のマシントイムを使い、ビームエネルギー 250MeV/A において、 ${}^6, 8\text{He}$ ,  ${}^7, 8, 9, 11\text{Li}$  (p, 2p) 陽子ノックアウト反応の測定を行い、データ収集を行った。

しかし (p, 2p) 実験の最後に、高強度ビームが原因で加速器に真空漏れが生じビームが止まった。故障箇所の放射線レベルが非常に高い為、迅速な修理を行うことができず、(p, 2p) 実験に引き続いて行われる予定であった (p, pn) 実験 [NP0906-RIBF16] はキャンセルされた。



図7：実験のセットアップ写真：左側の青色の物がKappa磁石、右側が中性子検出器

補足：なお、本研究の中心部分の(p, pn)中性子ノックアウト反応実験であるNP0906-RIBF16実験は、マシンタイムが2011年4月初旬に再度スケジュールされた(2011年1月初旬時点の情報)。しかし、2011年3月の東日本地震の影響により再度キャンセルされた(2011年3月下旬時点での情報)。

#### 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4件)

1.  $^{14}\text{Be}(p, n)^{14}\text{B}$  reaction at 69 MeV in inverse kinematics  
Phys. Lett. B697, pp459-462, (2011)  
査読有  
Y. Satou, T. Nakamura, Y. Kondo, N. Matsui, Y. Hashimoto, T. Nakabayashi, T. Okumura, M. Shinohara, N. Fukuda, T. Sugimoto, H. Otsu, Y. Togano, T. Motobayashi, H. Sakurai, Y. Yanagisawa, N. Aoi, S. Takeuchi, T. Gomi, M. Ishihara, S. Kawai, H. J. Ong, T. K. Onishi, S. Shimoura, M. Tamaki, T. Kobayashi, N. Endo, M. Kitayama
2. One-neutron removal reactions of  $^{18}\text{O}$  and  $^{19}\text{C}$  on a proton target  
Phys. Rev. C79, 014602 (2009)  
査読有  
Y. Kondo, N. Nakamura, Y. Satou, T. Matsumoto, N. Aoi, N. Endo, N. Fukuda, T. Gomi, Y. Hashimoto, M. Ishihara, S. Kawai, M. Kitayama, T. Kobayashi, Y. Masuda, N. Matsui, T. Motobayashi,

- T. Nakabayashi, K. Ogawa, T. Okumura, H. J. Ong, T. K. Onishi, H. Otsu, H. Sakurai, S. Shimoura, M. Shinohara, T. Sugimoto, S. Takeuchi, M. Tamaki, Y. Togano, and Y. Yanagisawa
3. (p, 2p) reactions on  $^{9-16}\text{C}$  at 250 MeV/A  
Nucl. Phys. A805, pp431c-438c, (2008)  
査読有  
T. Kobayashi, K. Ozeki, K. Watanabe, Y. Matsuda, Y. Seki, T. Shinohara, T. Miki, Y. Naoi, H. Otsu, S. Ishimoto, S. Suzuki, Y. Takahashi, E. Takada
  4. Unbound excited states in  $^{19,17}\text{C}$   
Phys. Lett. B660, pp320-325, (2008).  
査読有  
Y. Satou, T. Nakamura, N. Fukuda, T. Sugimoto, Y. Kondo, N. Matsui, Y. Hashimoto, T. Nakabayashi, T. Okumura, M. Shinohara, T. Motobayashi, Y. Yanagisawa, N. Aoi, S. Takeuchi, T. Gomi, Y. Togano, S. Kawai, H. Sakurai, H. J. Ong, T. K. Onishi, S. Shimoura, M. Tamaki, T. Kobayashi, H. Otsu, Y. Matsuda, N. Endo, M. Kitayama, M. Ishihara

[学会発表] (計2件)

1. 小林俊雄  
SAMURAI スペクトロメータ概要  
日本物理学会 第64回年次大会 立教大学 シンポジウム”SAMURAI スペクトロメータで拓く核物理“ 2009年3月27日
2. T. Kobayashi  
(p, pN) Reactions at RIKEN, HIMAC & RIBF  
Trento Quasi Free Scattering Workshop,  
9-Apr-2008, Trento, Italy

[図書] (計1件)

1. 前田和茂、小林俊雄、森北出版、ビジュアルアプローチ 電磁気学、2009、85-182

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)  
名称：

発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小林 俊雄 (KOBAYASHI TOSHIO)  
東北大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：30186754

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：