

**重粒子線がん治療装置等共同利用研究課題申請書 (平成 19 年度)**  
**Proposal for Research Project with Heavy Ions at NIRS-HIMAC (FY \_\_\_\_\_)**

平成 18 年 11 月 24 日

|  |  |   |  |  |  |  |                                       |  |
|--|--|---|--|--|--|--|---------------------------------------|--|
| *1 課題整理番号<br>Project No.                           |  |   |  |  |  | Date(yy/mm/dd)                                     |                                       |  |
| *2 分類<br>Category                                  | <input checked="" type="checkbox"/> 新規<br>New  | <input type="checkbox"/> 継続 2 年目<br>2nd year        | <input type="checkbox"/> 継続 3 年目<br>3rd year         | <input type="checkbox"/> 治療・診断<br>Clin & Diag          | <input type="checkbox"/> 生物<br>Biology | <input checked="" type="checkbox"/> 物理学<br>Physics | <input type="checkbox"/> 装置共用<br>C.U. |  |
| 研究課題名<br>Title of Research Project                 | <b>He, Li 同位体の内殻陽子電荷分布半径の測定</b>  |   |  |  |  |  |                                       |  |
| *3 課題申請者<br>Spokesperson                           | 氏名<br>Name   | 小林 俊雄   |  |  | 職名<br>Title                            | 教授   |                                       |  |
|  | 所属機関名、部署名<br>Institution   | 東北大学大学院理学研究科物理学専攻                                   |  |  |  |  |                                       |  |
|  | 住所 〒<br>Address  | 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉                            |  |  |  |  |                                       |  |
|  | 電話 phone:  | 022-795-6448  | fax:   | 022-795-6455   | 放医研での身分<br>Status at NIRS              | 共同利用研究員  |                                       |  |
|  | e-mail:  | kobayash@lambda.phys.tohoku.ac.jp                   |  |  |  |  |                                       |  |
| 所内対応者<br>Liaison at NIRS                           | 氏名<br>Name   | 高田栄一  | 所属部課<br>Division                                     | 加速器物理学部  | 内線 ext.6852                            |  |                                       |  |
| *4 研究分担者<br>List of Participants<br>(Last/First/M) | 氏名<br>Name   | 所属<br>Institution                                   |  | 職名<br>Title  | 放医研での身分<br>Status at NIRS              |  |                                       |  |
|  | 小林俊雄   | 東北大学大学院理学研究科  |  | 教授   | 共同利用研究員                                |  |                                       |  |
|  | 松田洋平   | 同上  |  | D3   | 共同利用研究員                                |  |                                       |  |
|  | 來山益久   | 同上  |  | M1   | 共同利用研究員                                |  |                                       |  |
|  | 大関和貴   | 東北大学サイクロトロンラジオアイソトープセンター                            |  | 機関研究員  | 共同利用研究員                                |  |                                       |  |
|  | 大津秀暁   | 理化学研究所  |  | 研究員  | 共同利用研究員                                |  |                                       |  |
|  | 竹田浩之   | 同上  |  | 基礎特研   | 共同利用研究員                                |  |                                       |  |
|  | 寺嶋知  | 同上  |  | 基礎特研   | 共同利用研究員                                |  |                                       |  |
| 高田栄一   | 放射線医学総合研究所 加速器物理学部   |   | 室長   | 共同利用研究員<br>所員  |  |  |                                       |  |
| 研究の目的と意義<br>Objective of Project                   | <p>原子核の電荷半径は、重要な物理量の一つであり、以前に行った P051 実験で、炭素同位体中の内殻陽子分布半径が中性子過剰核側で収縮しているのではないかという結果を得た。この研究では、レーザー分光法による全電荷半径のデータのある 2 つのアイソトープについて、<sup>3,4,6</sup>He(p,2p)、<sup>6,7,8,9</sup>Li(p,2p)、の測定を入射エネルギー 250MeV/A で行い、He 同位体については電荷分布半径を、Li 同位体については 1s/1p 軌道の陽子分布半径を求める。</p> |   |  |  |  |  |                                       |  |
| MT に関する希望<br>Beam Time Request                     | 加速粒子<br>Particle   | エネルギー<br>Energy (MeV/u)                             | 強度又は線量率<br>Intensity                                 | 日数又は時間<br>Hours Requested                              | ビームコース<br>Beam Line                    |  |                                       |  |
|  | p  | 300   | 2x10 <sup>9</sup> /spill                             | 16 時間  | SB2                                    |  |                                       |  |
|  | <sup>4</sup> He  | 330   | max  | 32 時間  | SB2                                    |  |                                       |  |
|  | <sup>11</sup> B  | 300   | max  | 100 時間   | SB2                                    |  |                                       |  |
|  | <sup>13</sup> C  | 320   | max  | 36 時間  | SB2                                    |  |                                       |  |
| 該当する項目があればチェック<br>Special Requirements             | <input type="checkbox"/> 動物実験<br>Live Animals  | <input type="checkbox"/> 非密封 RI 実験<br>Radioisotopes | <input type="checkbox"/> 遺伝子組換え実験<br>Recombinant DNA | <input type="checkbox"/> 有害物質使用<br>Hazardous Materials |  |  |                                       |  |

日本語又は英語で書かれた「研究計画詳細」を添付すること。<sup>\*1</sup>放医研側で使用するので記入しないこと。<sup>\*2</sup>該当するものにチェック。<sup>\*3</sup>課題申請者は放医研との事務連絡も担当する。<sup>\*4</sup>用紙が足りないときは別紙に記入し添付すること。

研究計画詳細： He, Li 同位体の内殻陽子電荷分布半径の測定

1. P051 実験の研究経過

これまで P051 実験として、(p,2p)陽子ノックアウト反応による不安定原子核構造の研究を、検出器系の開発/製作と平行して行ってきた。この反応では、不安定核中陽子と標的陽子の準弾性散乱によって束縛陽子をはじき出して空孔状態を作り、分離エネルギー、運動量分布、角運動量、占有数などの束縛陽子の一粒子軌道情報を得る。又(p,2p)反応により生成した空孔状態はビーム速度系にあり、前方粒子の同時検出により空孔状態の崩壊様式が高効率で測定可能という特徴を持つ。検出器生成反応が準弾性散乱的である為には入射エネルギーが比較的高い必要があり、高エネルギー二次ビームが使用可能な HIMAC 施設での実験に適している。

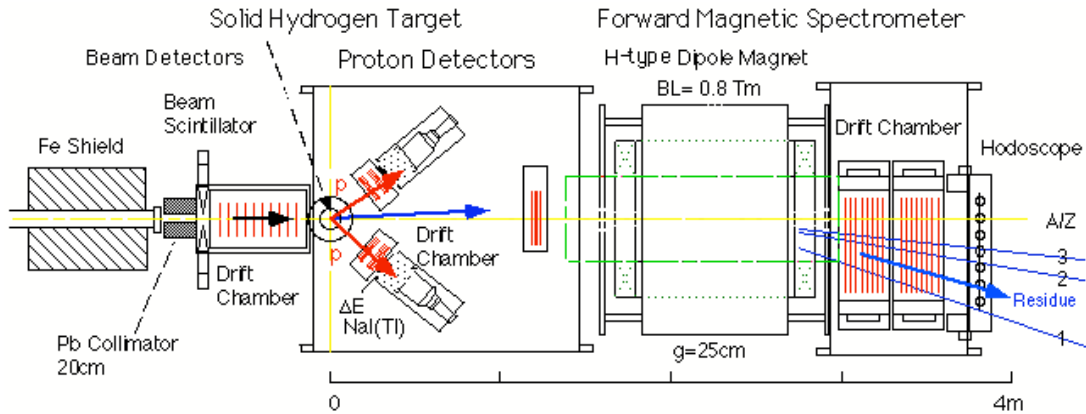


図1：実験装置

実験装置は図1に示すように、ビーム検出器系、固体水素標的(SHT)、陽子検出器系、前方磁気分析器系からなり、SB2 コースの最下流に設置される。なお固体水素標的は、深く束縛された陽子の(p,2p)反応では、測定の S/N の観点から必要不可欠である。

この測定器系を用いて 2003 年の 2 月から 10 月の間に 3 回のマシンタイムを用いて、<sup>9,10,11,12,13,14,15,16</sup>C(p,2p)反応の測定を入射エネルギー250MeV/Aで行った。この測定の目的は、弱束縛(1.3MeV)から強束縛(22.3MeV)にわたる外殻 1p<sub>3/2</sub> 軌道陽子、非常に強束縛(20-50MeV)な内殻(深部) 1s<sub>1/2</sub> 軌道陽子の軌道状態の変化を系統的に調べることであった。

測定の結果をまとめると、

(I-1) 1p/1s 軌道の空孔状態、特に 1s-hole 状態が、初めて系統的に観測された [図2]。分離エネルギー分解能は約 1.3MeV(rms)である。Hole stateの崩壊様式をタグする事により、p/s-hole 状態が分離できた。

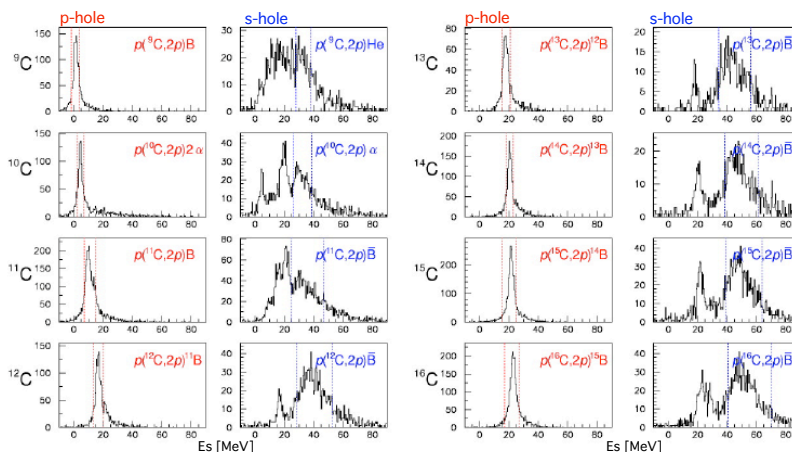


図2：<sup>9-16</sup>C(p,2p)反応の陽子分離エネルギー分布： p-hole(左) & s-hole(右)状態

(1-2) 1p 軌道と 1s 軌道間のエネルギーギャップの質量数依存性が求まった。A=12 で最小値を持ち、陽子／中性子過剰側で広がる傾向を持つ[図 3]。

(1-3) 1p/1s 軌道陽子の運動量分布中の質量数依存性が測定された[図 4]。なお角運動量も殆どの場合に区別する事ができる。P 軌道の運動量分布は、陽子過剰側での弱束縛性の為に陽子過剰から中性子過剰になるにつれ広がる。一方 s 軌道の運動量分布は  $^{12}\text{C}$  まではほぼ一定で、中性子過剰側で増加する傾向を示す。

(1-4) spectroscopic factor に比例していると考えられる(p,2p)反応断面積の相対値の質量数依存性が測定された[図 5]。1p 軌道に対しては弱束縛 p 軌道を持つ  $^9\text{C}$  だけが断面積が大きく、他の同位体はほぼ一定である。又 20-50MeV の分離エネルギーを持つ 1s 軌道は、分離エネルギーが大きな中性子過剰側へ向かい単調に減少している。

これらの測定は、不安定核に対する初めての系統的な(p,2p)陽子ロックアウト反応のデータを提供し、(p,2p)反応を用いることにより、外殻陽子のみでなく非常に強束縛の内殻陽子軌道に関する色々な情報を得る事ができる事がわかった。

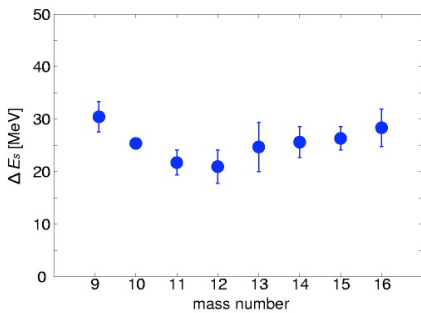


図 3： $\Delta E(1s-1p)$

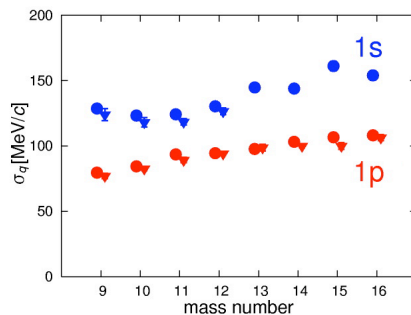


図 4：運動量分布中

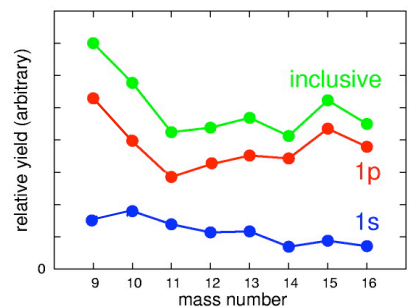


図 5：(p,2p)反応断面積

## 2. 研究動機／目的

(p,2p)反応による 1s 軌道の運動量分布中から求めた  $^{9,10,11,12,13,14,15,16}\text{C}$  同位体中の 1s 軌道電荷分布半径を図 6 に赤丸で示すが、A=12 より重い領域では中性子過剰側で収縮する傾向を示す。同じ図にレーザー分光法による  $^{3,4,6}\text{He}$  電荷半径 (青丸) と  $^{6,7,8,9,11}\text{Li}$  電荷半径、陽子弾性散乱による  $^{6,8}\text{He}$  電荷半径 (青四角) を示す。

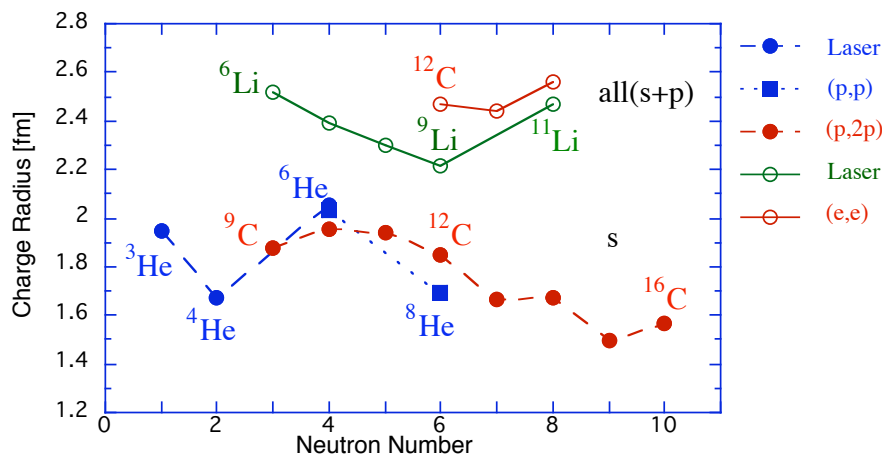


図 6：電荷半径の中性子数依存性

理由はよくわからないが、中性子過剰側で軌道半径が収縮する傾向を持つように見える。He/Li の電荷分布に対しては現在のデータを再現するモデルを含む色々なモデルが存在する。一方分離エネルギーを調整する簡単なポテンシャルモデルや RMF モデルは質量に依存しない一定な電荷分布半径を与える。また内殻陽子軌道半径の収縮減少が、外殻中性子数に依存するのか、陽子分離エネ

ルギーに依存するかもはっきりしない。

レーザー分光法は電荷分布半径測定の標準的な測定方法であるが、(p,2p)反応による運動量分布測定をとおした電荷分布半径測定は、核種によらない、より一般的な実験手法を提供すると考えられる。さらにこの方法は軌道ごとの電荷分布半径を分離して測定可能という特徴を持つ。その為、この研究では、第一段階としてレーザー分光法で電荷半径のわかっている He 同位体について (p,2p)による内殻電荷分布半径を行い、レーザー分光法による値と比較し、電荷半径の測定手法として使えるかどうか確認する。次に第2段階として全電荷半径がわかっている Li 同位体について、(p,2p)方法による内殻陽子半径の測定を 1s/1p 軌道に対して行い、全電荷半径の傾向と比較を行う。

(2-1) :  $^{3,4,6}\text{He}(p,2p)$

$^{3,4,6}\text{He}(p,2p)$ 反応の測定を 250MeV/A で行い、1s 軌道陽子の運動量分布を求める。運動量分布をフーリエ変換により空間分布へ変換する事により 1s 陽子軌道の電荷半径を求め、レーザー分光法による電荷半径データと比較する。なお 1s 軌道の運動量/空間分布はガウス型近似は良く、運動量分布中と空間分布中は反比例するという関係を用いる。2つの測定が一致した場合は、(p,2p)反応による運動量分布測定を用いた電荷分布半径測定は新たな実験手法として確立する事になる。

なお、一番面白い測定は  $^8\text{He}(p,2p)$ 反応による  $^8\text{He}$  電荷半径の測定であり、GANIL で計画されているレーザー分光法による  $^8\text{He}$  電荷半径測定に先駆けて行う事ができれば非常に素晴らしい。しかし 1次  $^{13}\text{C}$  ビームから  $^8\text{He}$  を作った場合、ビーム強度は約 2000 個/spill であり通常の測定時間では十分な統計が得られず、又ビームエネルギーも 190MeV/A に制限される為、計画に含めていない。

(2-2) :  $^{6,7,8,9}\text{Li}(p,2p)$

$^{6,7,8,9}\text{Li}(p,2p)$ 反応の測定を 250MeV/A で行い、1s/1p 軌道陽子の運動量分布を測定する事により 1s/1p 軌道陽子の電荷半径を軌道ごとに求め、レーザー分光法による全電荷半径と比較する。レーザー分光法は軌道ごとの電荷半径を測定する事ができない為、この新しいデータにより、より詳しいモデル計算との比較が可能になると考えられる。 $^{11}\text{Li}$ の場合に全電荷半径が増加するのは陽子  $1p_{3/2}$  軌道と中性子  $1p_{1/2}$  軌道間の引力的相互作用が原因であれば、1s 陽子半径が減少し 1p 陽子半径は増加する傾向が見られる可能性もある。Li 同位体の場合も一番面白い原子核は  $^{11}\text{Li}$  であるが、 $^8\text{He}$  と同様にビーム強度の制限の為に計画に含めていない。

(2-3) : より重い炭素同位体に対する(p,2p)測定

P051 の延長として、 $^{17}\text{C}$  以上の中性子過剰領域の炭素同位体での運動量分布、電荷分布半径、占有数(相対値)を行いたいが、ビーム強度の制限から測定は不可能である。

### 3. 研究の現状

核子ノックアウト反応については、陽子標的ではなく原子核標的を用いたノックアウト反応後の状態をガンマ線で識別する測定が MSU などで行われている。この方法は高分解能で終状態を分離し spectroscopic factor の絶対値を求めるのに適しているが、終状態が s-hole 状態のような粒子非束縛な場合には適用できない。

本研究と同様な(p,2p)反応については、 $^{12}\text{C}$ ,  $^{40}\text{Ca}$  等の安定核ビームを用いた予備実験が GSI で 2007 年に計画されている。ただしビームエネルギーは 700MeV と聞いており、全エネルギー測定型の陽子検出器では検出器中での核反応の為に非常に困難と想像される。

2007 年度から実験が開始される理化学研究所 RIBF では、最初のうちは U/Kr などの重 1 次ビームが優先されると言われており、この実験のような軽い 2 次ビームを用いた実験の見通しに関しては非常に不透明である。RIBF はエネルギー的には HIMAC とほぼ同じであり、又ビーム強度的にははるかに優れているはずだが、軽い質量境域での実験可能性の不透明さから、先に HIMAC で He, Li, C 等のビームを用いて測定を行いたい。

#### 4. 研究計画とマシンタイム見積

##### [4-1] 測定器系の改良

実験を開始する前に、以下の測定器系の改良を行う。

##### (4-1-1) Beam drift chamber の改良

これまで使っていた Beam drift chamber は、セル構造の為に tracking 効率が約 60%と低く、又 drift 距離が 9mm と大きな為、高強度ビーム、特にエネルギー校正の際の高強度陽子ビームに対応できなかった。Drift 距離 2.5mm の high-rate drift chamber に交換する。

##### (4-1-2) Drift chamber 読出回路の改良

これまで、front end は LRS2735 と PreAmp-LRS2735 が、又 TDC は single-hit(LRS4290)/multi-hit(LRS3377)回路が混在していた。今回、front-end は全て高 gain の ASD へ、TDC は全て multi-hit 対応の VME-TDC へ統一する。この改良によりさらに高強度ビームへの対応が可能になる。

##### (4-1-3) Vertex Chamber の追加

P051 実験で得られた分離エネルギー分解能 1.3MeV(rms)は、陽子検出器系の角度分解能でほぼ決まっていた。固体水素標的用の真空 chamber のすぐ外側に 4 層の vertex chamber を追加し、標的付近での位置情報を追加する事により、陽子に対する角度分解能と分離エネルギー分解能を約 2 倍改善する。

##### (4-1-4)運動量分散焦点面 F1 での運動量測定

ESPRI グループで開発/製作した Scintillation Fiber 検出器を使用したい。

##### [4-2] $^{3,4,6}\text{He}(p,2p)$ 測定

He ビームの測定に先立ち、230-300MeV 陽子ビームを用いて p(p,2p)反応により NaI(Tl)検出器のエネルギー校正を 30-200MeV の範囲で行う：1 晩。

$^{3,4}\text{He}$  に関しては、 $^4\text{He}$  ビーム(330MeV/A)のエネルギーを production target/energy degrader で落とした 1 次ビームと、1 次  $^4\text{He}$  ビームから作る  $^3\text{He}$  ビーム(250MeV/A)を用いる。ビームの duty factor を約 1/3、ビーム強度を 2 次ビームの場合にも約  $2 \times 10^5/\text{spill}$  とすると、検出器調整に約 1 晩を用いた後、夫々のビームに対して約 12 時間の測定が必要である：統計は P051 とほぼ同じ量を想定した。又ビームの切り替えと調整には約数時間ずつが必要である。

$^6\text{He}$  ビーム(250MeV/A)は 300MeV/A  $^{11}\text{B}$  ビームから作ると、ビーム強度は約  $9 \times 10^4/\text{spill}$  と予想される。問題としては、SB2 では mass slit のある F2 から SHT まで収束要素がない為、SHT に焦点を合わせると range の長い  $^3\text{H}$  などの background が増える可能性である。を切る事ができないかもしれない事である。測定には約 31 時間が必要である。

$^8\text{He}$  ビームに関して必要時間を予想する： 350MeV/A  $^{13}\text{C}$  ビームを用いて 190MeV/A  $^8\text{He}$  ビーム(エネルギーは SB2 の最大磁気剛性で制限される)を作ると、約  $2 \times 10^3/\text{spill}$  の強度が得られると予想される。 $^6\text{He}$  と同じ統計を得る為に必要な測定時間は約 57 日で、統計を 1/3 に落としたとしても 19 日近くの測定時間が必要となり現実的ではない。

まとめると He 同位体の測定に必要な測定時間は、

|  |           |
|--|-----------|
| 回路と検出器の調整：                                       | 1 晩(8 時間) |
| 陽子ビームによるエネルギー校正：                                 | 1 晩(8 時間) |
| $^4\text{He}$ ビーム( $^4\text{He}$ 1 次ビーム)による測定：   | (4+12)時間  |
| $^3\text{He}$ ビーム( $^4\text{He}$ 1 次ビーム)による測定：   | (4+12)時間  |
| $^6\text{He}$ ビーム( $^{11}\text{B}$ 1 次ビーム)による測定： | (4+31)時間  |

合計： 83 時間

となる。方法論の確認の為に、この測定を最優先で行いたい。

#### [4-3] $^{6,7,8,9}\text{Li}$ (p,2p)測定

Li ビームも約 250MeV/A のエネルギーで用いる。 ビーム生成と測定時間についてまとめると、

| 2次ビーム         | 1次ビーム                    | 2次ビーム強度                       | 測定時間     |
|---------------|--------------------------|-------------------------------|----------|
| $^9\text{Li}$ | 300MeV/A $^{11}\text{B}$ | $8 \times 10^4/\text{spill}$  | (4+35)時間 |
| $^8\text{Li}$ | 300MeV/A $^{11}\text{B}$ | $>2 \times 10^5/\text{spill}$ | (4+14)時間 |
| $^7\text{Li}$ | 320MeV/A $^{13}\text{C}$ | $>2 \times 10^5/\text{spill}$ | (4+14)時間 |
| $^6\text{Li}$ | 320MeV/A $^{13}\text{C}$ | $>2 \times 10^5/\text{spill}$ | (4+14)時間 |
|               |                          | 合計                            | 93 時間    |

#### [5] 研究業績

- \* “(p,2p) Reactions on  $^{9-16}\text{C}$ ”  
T. Kobayashi  
 Proceedings of the Tours Symposium on Nuclear Physics VI, 5-8 Sep. 2006, Tours, France  
 edited by M. Ohta and H. Usunomiya (AIP), to be published
- \* “陽子ノックアウト反応による炭素同位体の陽子空孔状態の研究”  
 大関和貴  
 博士論文、東北大学大学院理学研究科物理学専攻、2006年6月
- \* “Windowless Solid Hydrogen Target”  
 Nucl. Instr. And Meth. **A480** (2002) 304-314.  
 S. Ishimoto, T. Kobayashi, K. Morimoto, I. Nomura, A. Ozawa, S. Suzuki, Y. Takahashi, I. Tanihata,  
 and T. Tsuru.
- \* “Proton Knockout Reactions from RI Beams”  
T. Kobayashi  
 Proceedings of the 4<sup>th</sup> Italy-Japan Symposium on Heavy Ion Physics, 26-29 Sep. 2001, Tokyo  
 edited by K. Yoshida, S. Kubono, I. Tanihata, and C. Signorini (World Scientific, 2002) p.34-41  
 “(p,2p) reactions on C Isotopes”
- \* “Measurements of Interaction Cross Sections for Light Neutron-Rich Nuclei at Relativistic Energies and Determination of Effective Matter Radii”  
 Nucl. Phys. **A691** (2001) 599-617.  
 A. Ozawa, O. Bochkarev, L. Chulkov, D. Cortina, H. Geissel, M. Hellstroem, M. Ivanov, R. Janik, K. Kimura, T. Kobayashi, A. Korshennikov, G. Muenzenberg, F. Nickel, Y. Ogawa, A. Ogloblin, M. Pfeuzner, V. Pribora, H. Simon, B. Sitar, P. Strmen, K. Suemmerer, T. Suzuki, I. Tanihata, M. Winkler, and K. Yoshida.