

## 研究計画詳細：陽子/クラスターノックアウト反応による原子核構造の研究

## 1. 研究目的

陽子標的と2次原子核ビームの反応により、原子核中の陽子を弾き出す(p,2p)-陽子Knockout反応と、 $^3\text{He}$ クラスターを弾き出す(p, $p^3\text{He}$ )クラスターKnockout反応を用いて、安定線から離れた原子核中の陽子軌道状態の研究(図1A)と、反応で生成される共鳴状態の探索を行う(図1B)。

殻模型は原子核の性質を記述するのに有効な模型の一つであるが、核子は平均場中の粒子軌道上を運動しているという描像に基づいている。この粒子軌道の特徴付ける量に、束縛エネルギー、運動量分布、軌道角運動量等の物理量があり、これらはknockout反応の測定から得る事ができる。この方法は従来、高エネルギー陽子ビームと原子核標的の組み合わせにより行われてきたが、高エネルギー2次原子核ビームと陽子標的の反応を逆運動学で行う事ができると、ベータ不安定核を含む全ての原子核を研究対象に拡大する事が可能である。

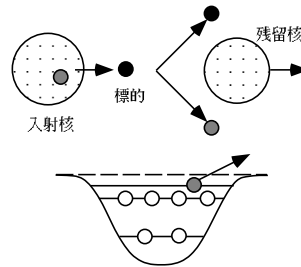


図1(A)：核子Knockout反応

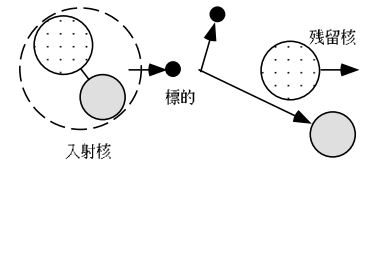


図1(B)：クラスターKnockout反応

ノックアウト反応は、いわば”だるまめき”の反応であり、反応機構が単純である為には、入射粒子のエネルギーが核内核子/クラスターの束縛エネルギー/運動量より充分大きい必要がある。300 MeV/A程度のエネルギーの2次ビームが使用可能な加速器施設としては他にドイツのGSI(重イオン研究所)しかなく、高エネルギーの1次/2次ビームが使えるHIMAC施設の特徴をいかせる実験の一つであると考えている。

目的1：安定線から離れた原子核には中性子ハロー等の安定核にはない面白い現象が見い出されている。この現象は、外殻核子の束縛が弱い事が主な原因であり、その理解には弱束縛核子の粒子軌道の理解が不可欠である。その為、陽子過剰核側の弱く束縛された外殻陽子のknockout反応を行う。又、深い束縛状態である陽子s-hole状態については、その対称性からの議論も行われているが、測定は行われていない。中性子数の増加に従い陽子束縛エネルギーは強くなるので、陽子s-hole状態、特に中性子過剰側での同位体依存性も興味深い。

目的2：中性子ドリップライン上の中性子過剰核からの(p,2p)陽子Knockout反応や(p, $p^3\text{He}$ )クラスターKnockout反応を用いると、安定線の外側にあるexoticな共鳴状態を生成する事ができる。核構造的な興味としては、中性子ドリップライン上にあるハロー/スキン核は通常2個の弱束縛外殻中性子を持っていて、その構造の理解には芯の原子核と1個の外殻中性子の相互作用の理解が必要不可欠であるが、殆どの場合は共鳴状態としてしか存在しない。この実験技術は、この様な共鳴状態を直接反応で生成する方法を提供する。

昨年度に、ノックアウト反応で生成され超前方に放出される残留核や崩壊粒子を測定する前方磁気スペクトロメータがほぼ完成し、残留核やその崩壊粒子の原子番号と質量数の測定ができるようになった。これにより、ノックアウト反応で生成された残留核の崩壊様式をより詳しく調べる事ができるようになった。又、断面積の小さい共鳴状態の生成を、主な崩壊様式からの粒子を前方で検出する事により、測定のS/N比を改善できると思われる。

## 2. 平成12年度研究経過

平成12年度は、3回の測定を行った。

(1)  $^{13}\text{C}$  1次ビームから作った $^8\text{He}$ ビームを用いて、 $p(^8\text{He},2p)^7\text{H}$ の測定を行った。目的は、超重水素同位体 $^7\text{H}$ の存在を調べる為である。 $^8\text{He}$ のエネルギーは2次ビームラインSB1の最大運動量で制限され、約190 MeV/Aであり、ビーム強度は約2000個/スピル(3.5秒)だった。正味1.5日の測定で得られた陽子分離エネルギー分布を図2に示す。陽子標的代用の $\text{CH}_2$ 標的からの事象数は250 event、 $\text{CH}_2$ 中の炭素からのbackground評価の為に行ったC標的からの事象数は140 eventだった。差引後の統計は約100 eventと非常に悪いが、陽子標的からの分布には、炭素標的には無い構造が見えている。この実験の時は、まだ前方磁気分析器が完成していなかった為、 $^7\text{H}$ の主な崩壊様式である $^3\text{H}+4n$ からの $^3\text{H}$ を前方で識別して検出する事ができなかった。

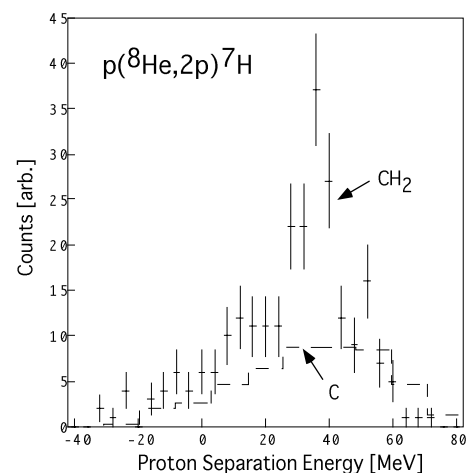


図2：190 MeV/A  $^8\text{He}$ による $p(^8\text{He},2p)^7\text{H}$ 反応の分離エネルギースペクトル。誤差付の点は $\text{CH}_2$ 標的、ヒストグラムはC標的。

$^3\text{H}$ の同時測定によりさらにS/Nが改善されるはずなので、可能であれば再度測定を行いたい。

(2) 2次重イオンビームを逆運動学で用いた陽子/クラスターノックアウト反応の最大の長所は、ロックアウト反応で生成される残留核(空孔状態)やその崩壊粒子が超前方に飛び出てくる事である。角度分布の中が狭い為、比較的小さな検出器でも、その殆どを検出する事ができる。問題は、250 MeV/A程度の粒子の原子番号と質量数を両方とも測定する必要がある事である。今までは、前方粒子の原子番号を、エネルギー損失測定から求めてきたが、質量数の測定は不可能であった。今年度は、逆運動学の特徴を生かす為の前方磁気分析器を製作した。

この検出器系は、重量約6トンのH型電磁石(磁場積分値は約0.6 Tm)、荷電粒子の運動量を測定する2台のDrift Chamber、荷電粒子の電荷と速度を測定するシンチレータホドスコープからなり、概要を図3に示す。1回のマシンタイムを用い、その各種試験を行った。最終的に得られた粒子識別スペクトルを図4-1に示す。H、He、Liの同位体が分離されている。

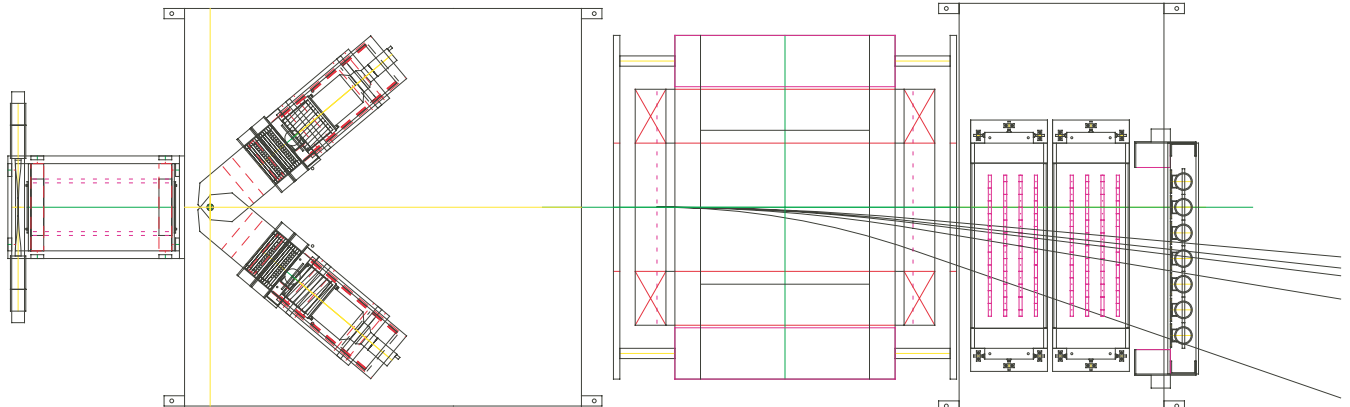


図3：完成した検出器系：2次ビーム検出器(シンチレータ、drift chamber)、陽子検出器(Drift Chamber, plastic scintillator, NaI(Tl) scintillator)、前方磁気分析器(H型電磁石、Drift Chamber、scintillator hodoscope)からなる。平成12年度には、前方磁気分析器の部分がほぼ完成した。

(3) 完成した前方磁気分析器と、 $^{15}\text{N}$ 一次ビームからの約250 MeV/Aの $^{11}\text{Be}$ と $^{12}\text{Be}$ ビームを用いて、 $p(^{11}\text{Be}, 2p)^{10}\text{Li}$ と $p(^{12}\text{Be}, 2p)^{11}\text{Li}$ 反応の測定を行った。ビーム強度としては、各々 $45 \times 10^3/\text{spill}$ 、 $12 \times 10^3/\text{spill}$ 程度が得られた。測定の目的は、

\* 中性子ハロー核として知られている $^{11}\text{Li}$ の構造の理解の為に、 $^{10}\text{Li}$ ( $^9\text{Li}+n$ )共鳴状態の構造の理解が必要不可欠である。特に $^{10}\text{Li}$ の基底状態付近のp波/S波共鳴の位置が重要であると考えられている。p波共鳴は比較的良く知られているので、外殻中性子がs波( $2s_{1/2}$ 軌道)にある事が知られている $^{11}\text{Be}$ から(p,2p)反応で陽子を弾き出し、 $^{10}\text{Li}$ のs波共鳴を選択的に生成する事を試みた。

\*  $^{11}\text{Li}$ では、通常の殻模型が示す外殻中性子が $p_{1/2}$ 軌道に存在する以外に、 $2s_{1/2}$ 軌道にも入っていると考えられている。一方、 $^{12}\text{Be}$ の基底状態にはp-shell成分以外に50%程度のsd-shell成分が混じっている事が知られており、 $^{12}\text{Be}$ から(p,2p)反応で $^{11}\text{Li}$ を生成した場合は、その断面積は二つの原子核の波動関数の重なり程度に比例する。測定では、図4-2に示す様に、直接 $^{11}\text{Li}$ 基底状態への遷移が観測された。

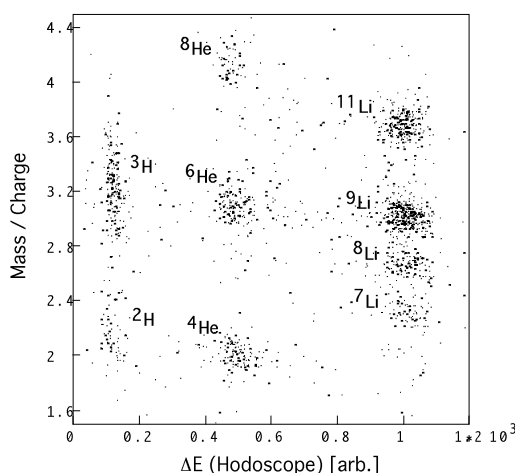


図4-1：Scintillator Hodoscopeによる電荷(X軸)と、磁気分析器による運動量測定から求めた質量数/電荷(Y軸)

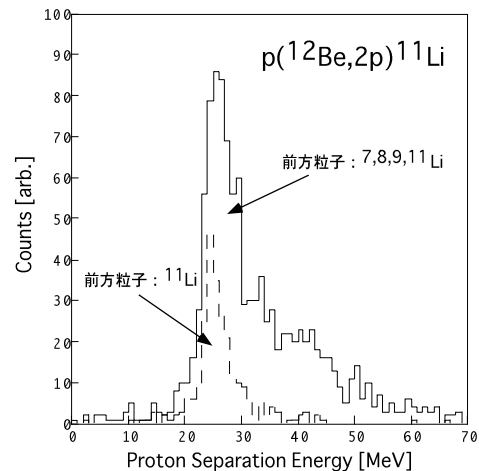


図4-2：250 MeV/A  $^{12}\text{Be}$ ビームによる $p(^{12}\text{Be}, 2p)^{11}\text{Li}$ 反応の分離エネルギースペクトル。

### 3. 研究計画

(1) 現在使用しているSB1ビームラインは平成13年度から治療専用となり、物理実験には使用できなくなる。代わりにSB2ラインが作られるが、SB2の標準第3焦点は壁から約3mの距離にあり、実験用の検出器系を置く場所が無い。その為、最後の3連4重極磁石を移動し第2焦点面のmass-slit直後で実験を行う事を計画している。この変更に伴い、(A) 実験場所の移動に伴う多量の信号線の整備、(B) 実験標的付近でのバックグラウンドの調査、(C) 新ビーム光学系の確認、などの作業を至急行う必要がある。

SB1と同じ状態で実験が行える事を確認後、幾つかの測定を行いたい。

(2) 今年度測定を行った $^{11}\text{Be}(p,2p)$ 反応の統計が不十分な為、再度測定を行う。

(3) これまで、 $^3\text{He}$ クラスターノックアウト反応の予備測定を行い、測定が可能である見通しはほぼたっている。 $(p,p^3\text{He})$ 反応では $(p,2p)$ 反応に比べてS/Nが悪いと予想され、生成される残留核からの主な崩壊様式からの粒子を前方で検出する事が必要不可欠になる。最初に行いたいのは、 $p(^6\text{Li},p^3\text{He})$ 反応による $^6\text{H}$ の探索である。測定では、ノックアウト反応からの $p$ と $^3\text{He}$ 以外に、残留核である $^6\text{H}$ からの主な崩壊粒子であると考えられる $^3\text{H}$ を前方磁気分析器で同時計測する事により、S/N比をあげる。これまで行った $p(^6\text{He},2p)$ 反応による $^5\text{H}$ の測定、予備的な測定を行った $p(^6\text{He},2p)$ 反応による $^7\text{H}$ の測定と組み合わせると、中性子数が奇数/偶数の水素同位体を比較する事により、共鳴状態の安定性にペアリング効果と角運動量障壁の効果がどう影響するか判明すると考えている。

(4) p-shell原子核中のs-hole状態については、その対称性からの議論も行われているが、測定は行われていない。中性子の増加につれて陽子はより深く束縛されるので、s-hole状態の同位体依存性は面白い情報を含む。マシンタイムに余裕があれば、これまで測定を行った炭素同位体 $^{9}\text{C}$ ,  $^{12}\text{C}$ に加え、 $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ の測定を継続したい。

### 4. マシンタイムの見積り

(1) 新SB2ラインに関する試験。

2次粒子の粒子分離/位相空間/強度、2次標的付近でのバックグラウンドなどの確認を、 $^{13}\text{C}$ が $^{15}\text{N}$ ビームからの2次ビームを用いて行う。必要な時間は約2-3晩程度。

(2)  $^{13}\text{C}$ 一次ビームからの $^{10,11}\text{Be}$ ビームを用いた $p(^{10,11}\text{Be},2p)^{9,10}\text{Li}$ 反応の再測定。

\* 230MeV 1次陽子ビームによるNaI(Tl)検出器のエネルギー校正： 1晩

\* 全検出器系の調整等： 1晩

\*  $p(^{10,11}\text{Be},2p)^{9,10}\text{Li}$ 反応の測定： $^{13}\text{C}$ を用いると、約 $50 \times 10^3/\text{spill}$ の $^{11}\text{Be}$ ビームが得られる。約 $0.2\text{g}/\text{cm}^2$ 厚の $\text{CH}_2$ とC標的をくしざしで用いると、以前の測定結果から予想して、 $p(^{11}\text{Be},2p)^{10}\text{Li}$ に対して約1.5日、分離エネルギーの校正に用いる $p(^{10}\text{Be},2p)^9\text{Li}$ に対して約1日の測定時間が必要である。

(3)  $^{15}\text{N}$ 一次ビームからの $^9\text{Li}$ ビームを用いた $p(^9\text{Li},p^3\text{He})^6\text{H}$ 反応の測定。

\* 230MeV 1次陽子ビームによるNaI(Tl)検出器のエネルギー校正： 1晩

\* 230MeV/A  $^4\text{He}$  1次ビームと、2次 $^3\text{He}$ ビームを用いたNaI(Tl)検出器のエネルギー校正： 1晩

\* 全検出器系の調整等： 1晩

\*  $^3\text{He}$ 分離エネルギー軸のエネルギー校正用に、質量が知られている $^3\text{H}$ を生成するまず $p(^6\text{Li},p^3\text{He})^3\text{H}$ 反応の測定を行う。 $^6\text{Li}$ ビームは $A/Z=2$ の為、第一焦点面で運動量を測定する事が困難かもしれない。ビーム強度は充分あるので、約3/4日程度の測定でエネルギー校正ができるだろう。

\*  $p(^9\text{Li},p^3\text{He})^6\text{H}$ 反応の測定：予備実験より考えると、強度約 $30 \times 10^3/\text{spill}$ の $^9\text{Li}$ ビームと、約 $0.2\text{g}/\text{cm}^2$ 厚の $\text{CH}_2$ とC標的をくしざしで用いると、正味約3日間の測定で $^6\text{H}$ のスペクトルが観測できると考えている。

(4) 炭素同位体のs-hole状態の測定は、エネルギー分解能や正確なエネルギー校正を必要としない比較的容易な測定である。SB2の進展状況などを見ながら、マシンタイムに余裕がある場合には行いたい。

### 5. 関係論文リスト

小林俊雄：

Quasifree nucleon-knockout reactions from neutron-rich nuclei by a proton target

T. Kobayashi, A. Ozawa, K. Yoshida, A. Korshennikov, I. Tanihata, E. Nikolski, and T. Nakamura  
Nucl. Phys. A616 (1997) 223c.

今までの結果をまとめて投稿する事を平成13年度の最優先課題とするつもりです。