

## 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。

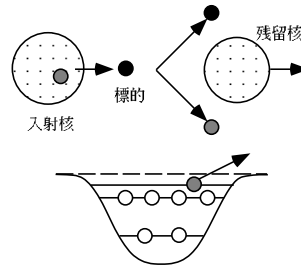


図1(A): 核子Knockout反応

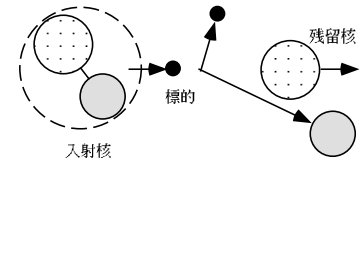


図1(B): クラスターKnockout反応

ノックアウト反応は、いわば”だるまぬき”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施設の特徴をいかにせる実験の一つである。

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<sup>3</sup>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。

### 2. 現在の状況

平成12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た。磁石本体は旧核研で用いられてきたH型磁石を使ったが、製造年月日が古く、片側のコイルがショートして磁場が時間的に変動する問題が生じた。平成13年度にはその修理等を行い再度測定を行った。この磁気分析器により、残留核やその崩壊粒子の原子番号と質量数の測定が可能となり、ノックアウト反応で生成された残留核の崩壊様式測定という逆運動学の特徴をフルに生かせるようになった。

### 3. 平成13年度研究経過

平成12年度は、3回の実験を行った。

#### (1) 新しいSB2ラインのビームスタディ:

平成13年度から、これまでのSB1ラインは治療専用になり、新たに製作されたSB2ラインを実験に用いた。

SB2ラインの通常の配置では、最終焦点F3から壁までの距離が約3mであり、全長約5mある私達の測定器系を置く場所が無い。その為、通常のF2-F3間に置かれる3連4重極磁石を移動できるようにしてもらい、F2の直後に検出器系を置く方法をとった。ただし、検出器系をF2直後に置く為、バックグランド等の増加が考えられた: F2には、F1でのくさび型デグレーダーによって分離された各種同位体を止める質量スリットが置かれるが、そこを通り抜ける軽い粒子(中性子過剰核を測定に用いる場合、主に<sup>3</sup>H, <sup>6</sup>He等)が直接検出器系に入る事によって生じ

るバックグラウンドである。例えば、250MeV/Aの $^3\text{H}$ のレンジは鉄で20cmもあり、これらの粒子を止めるのは中々難しい。実験に使用する状況下で、色々な方式のシールドによる効果を調べ、最終的には厚さ50cm程度の鉄製シールドを用いる事でなんとか測定が可能な状況を作れる事がわかった。しかし、 $A/Z=3$ の $^3\text{H}$ ,  $^6\text{He}$ ,  $^9\text{Li}$ による実験が不可能である事、独立な収束エレメントが無くなった事から2次標的までのビームの大きさが増加する、等の問題が残っている。

又、ビームラインの変更に伴う大量の信号線の更新も行い、以前とほぼ同じ状態でデータ収集が行えるようになった。

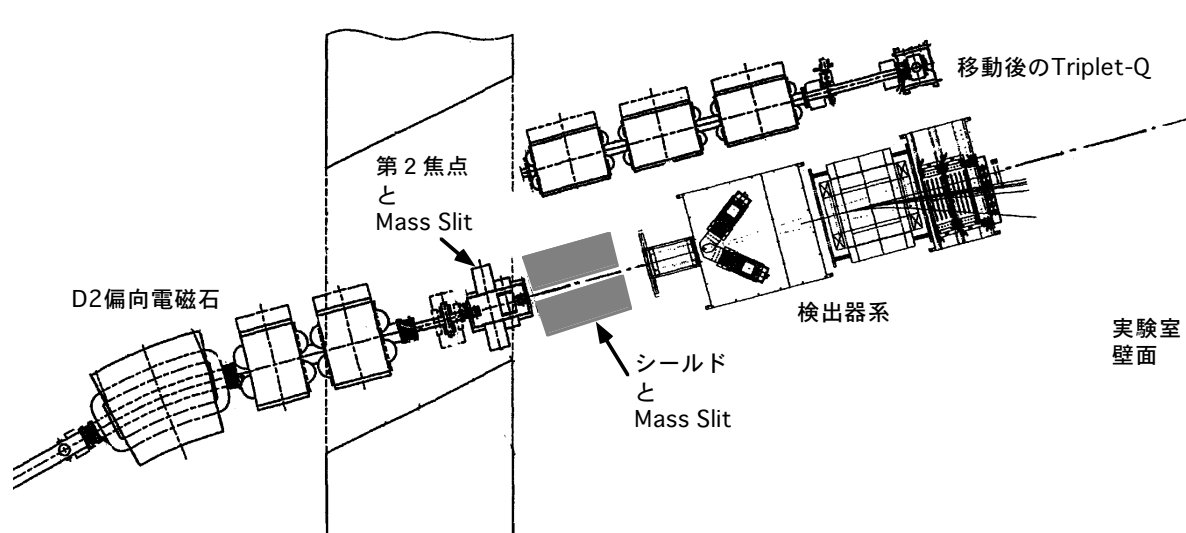


図2：SB2ラインでの実験配置図。最後のTriplet-Qを平行移動して、その場所に検出器系を置く。

## (2) $p(^{11}\text{Be}, 2p)^{10}\text{Li}$ 反応による $^{10}\text{Li}$ のS波共鳴状態の研究：

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。この測定は平成12年度にも行ったが、統計が不足していたのと、前方磁気分析器の磁場がlayer shortの為に変化していたので、再度測定を行った。

又、 $^{10}\text{Li}$ の崩壊からの中性子と $^9\text{Li}$ との相関を調べる為、前方5度程度を覆う8エレメントの中性子検出器 (面積100cm x 50cm) を置いて中性子検出を試みたが、前方磁石の曲げ角が小さい為に中性子検出器に荷電粒子が大量に入射し、そのバックグラウンドの為に意味のある結果は得られなかったと思われる。

結果は解析中であるが、 $^9\text{Li}+n$ のthreshold近くの構造が観測された。

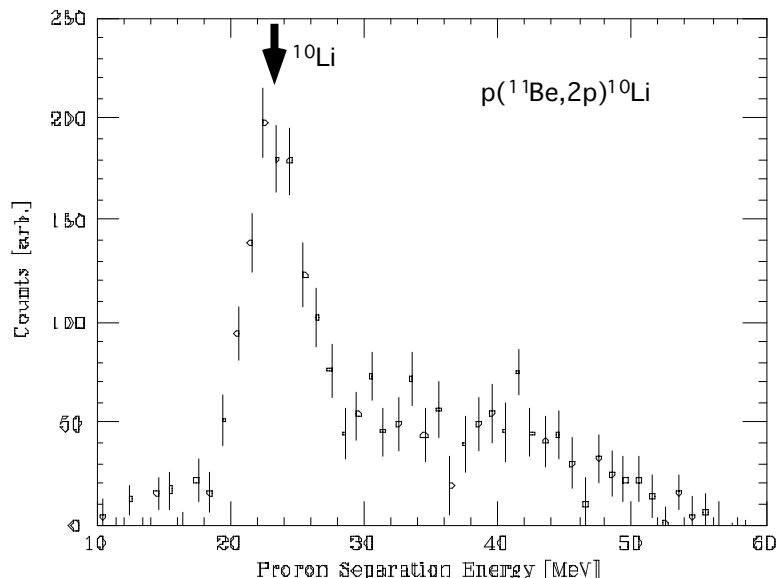


図3： $p(^{11}\text{Be}, 2p)^{10}\text{Li}$ 反応での陽子一分離エネルギー分布

(3)  $p(^{15}\text{C}, 2p)^{14}\text{B}$ 反応による $^{15}\text{C}$ 空孔状態の研究：

中性子過剰核では、陽子分離エネルギーがより大きくなる： 外殻陽子の分離エネルギーは、 $^{9,12,19}\text{C}$ で各々1.4, 16.0, 27.0 MeVである。このような広い同位体範囲で、中性子過剰核ではより深く束縛される $1s_{1/2}$ 陽子準位の空孔状態がどう変化するかを調べる為に、 $^{15}\text{C}$ からの陽子ノックアウト反応を測定した。

このデータもまだ解析中であるが、深い陽子空孔状態と思われる状態は、殆ど中性子のみを放出して崩壊しているという面白い現象が観測された。

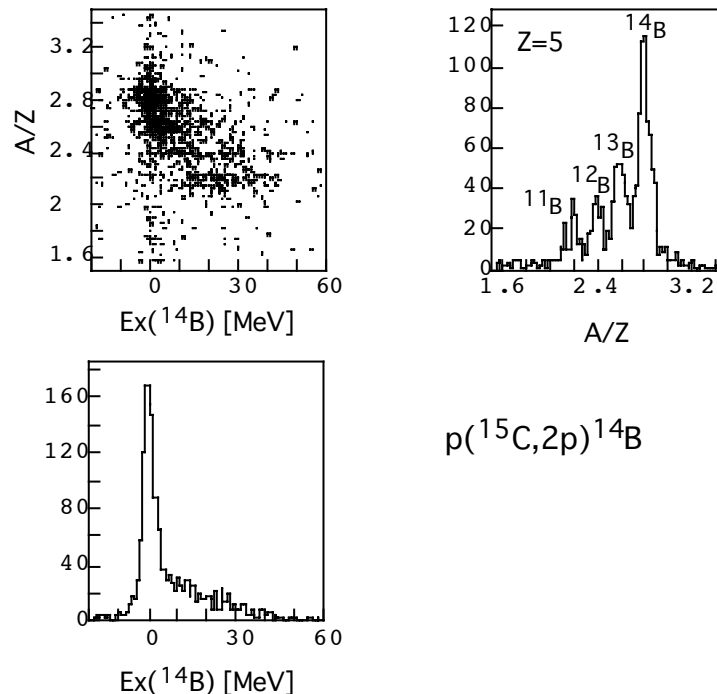


図4： $p(^{15}\text{C}, 2p)^{14}\text{B}$ 反応での陽子-分離エネルギー分布と前方粒子（ボロン同位体）との相関

## 4. 研究計画

## (1) 深い陽子空孔状態測定のための固体水素標的の準備：

陽子過剰核から中性子過剰核にわたる広い範囲での深い陽子空孔状態の測定は、250-300 MeV/nucleonエネルギー領域の特徴を發揮できる実験の一つだと考えている。現在の問題点としては、分離エネルギーが大きくなる程、陽子標的代用のポリエチレン中の炭素からのバックグラウンドが大きくなる事である。このようなバックグラウンドを低減する為に、この数年間固体水素標的の開発を高工研、理研と共同で行ってきた。現在、ミニクライオスタットを用いた固体水素標的生成のめどがたったので、平成14年度中に固体水素標的を用いた測定を行う事を目標に準備を進めている。

固体水素は、直径30mm、厚さ5(10)mmで、真空とは4マイクロン厚のアラミドで隔離される。液体標的と異なり、厚さが一様で、エネルギー損失の非一様性が問題になる重イオン実験に適している。図5にその概略を示す。固体水素標的の使用に伴う検出器架台の変更も同時に行う。

又、これまで少なかった前方陽子のacceptanceを増やす為のホドスコープも磁石前に設置したい。

## (2) 炭素同位体の深い陽子空孔状態の研究：

今年度 $^{15}\text{C}$ を用いた測定を行ったが、平成14年度には、固体水素標的を用いバックグラウンドが無い条件下で炭素同位体の空孔状態の測定を行う。用いるビームとしては、 $^{15}\text{C}$ の他に、 $^{16}\text{C}$ ,  $^{11}\text{C}$ 等を考えている。

図5：ミニクライオを用いた固体水素標的

## 5. マシンタイムの見積り

### (1) 水素標的を用いた(p,2p)反応の予備実験：

\* 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

\*  $p(^{12}\text{C},2p)^{11}\text{B}$ 反応の測定：固体水素標的を用いた測定の予備測定をかね、1次 $^{12}\text{C}$ ビームを用いた(p,2p)測定を行う。ビーム強度はビームライン検出器の制限から約100kHz以下に押さえる必要がある。色々なデバッグを含め、測定には約2日間が必要である。

### (2) 水素標的を用いた $p(^{16,15,11}\text{C},2p)$ 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

\* 全検出器系の調整等： 1晩

\*  $p(^{16,15,11}\text{C},2p)^{15,14,10}\text{B}$ 反応の測定： $^{18}\text{O}$ と $^{13}\text{C}$  1次ビームを用いると、約 $(50-100)\times 10^3/\text{spill}$ 程度の2次Cビームが得られる。5mm厚の固体水素標的を用いると、以前のポリエチレン標的での収量から換算して、各々正味約2日間の測定が必要になる。

## 6. その他

マシンタイムの(2)で述べた実験については、検出器系の設置/調整に毎回10日間程度の期間が必要な事から、可能であれば、連続したマシンタイムをアレンジしていただくと、非常に時間の節約になります。