

**重粒子線がん治療装置等共同利用研究課題申請書 (平成 15 年度)**  
**Proposal for Research Project with Heavy Ions at NIRS-HIMAC (FY \_\_\_\_\_)**

*1 課題整理番号 Project No.						平成 14 年 12 月 13 日 Date(yy/mm/dd)		
*2 分類 Category	<input checked="" type="checkbox"/> 新規 New	<input type="checkbox"/> 継続 2 年目 2nd year	<input type="checkbox"/> 継続 3 年目 3rd year	<input type="checkbox"/> 治療・診断 Clin & Diag	<input type="checkbox"/> 生物 Biology	<input checked="" type="checkbox"/> 物理工学 Physics	<input type="checkbox"/> 装置共用 C.U.	
研究課題名 Title of Research Project	陽子ノックアウト反応による原子核構造の研究							
*3 課題申請者 Spokesperson	氏名 Name	Last/First/M	小林 俊雄		職名 Title	教授		
	所属機関名、部署名 Institution		東北大学大学院理学研究科物理専攻					
	住所 Address		〒9 8 0 - 8 5 7 8 仙台市青葉区荒巻字青葉					
	電話 phone: 022-217-6448		fax: 022-217-6455		放医研での身分 Status at NIRS	共同研究員		
e-mail: kobayash@lambda.phys.tohoku.ac.jp								
所内対応者 Liaison at NIRS	氏名 Name	高田栄一		所属部課 Division	重粒子治療センター運転課 内線 ext.			
*4 研究分担者 List of Participants (Last/First/M)	氏名 Name	所属 Institution		職名 Title	放医研での身分 Status at NIRS			
	小林俊雄	東北大学理学部物理		教授	共同利用研究員			
	岩佐直仁	同上		助教授	共同利用研究員			
	大津秀暁	同上		助手	共同利用研究員			
	大関和貴	同上		博士3年	共同利用研究員			
	渡辺極之	同上		博士2年	共同利用研究員			
	松田洋平	同上		修士2年	共同利用研究員			
	関陽子	同上		修士2年	共同利用研究員			
	石元茂	KEK 素粒子原子核研究所		助教授	申請中			
	鈴木 祥仁	同上		技官	申請中			
高橋豊	大阪大学RCNP		研究員	申請中				
高田栄一	重粒子治療センター運転課		室長	所員				
研究の目的と意義 Objective of Project	<p>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、炭素同位体の空孔状態の研究を行う。</p> <p>特に、中性子過剰核側での深く束縛された陽子の空孔状態をS/N良く観測する為に、今までに用いてきたCH<sub>2</sub>(ポリエチレン)の代わりに厚さ5mmの固体水素標的を用い、<sup>11</sup>Be, <sup>12,16</sup>Cビームを用いた測定を行う。</p>							
MTに関する希望 Beam Time Request	加速粒子 Particle	エネルギー Energy (MeV/u)	強度又は線量率 Intensity	日数又は時間 Hours Requested	ビームコース Beam Line			
	<sup>1</sup> H	230 MeV/A	2.0x10 <sup>6</sup> ppp	1日	SB2			
	<sup>12</sup> C	250 MeV/A	1.0x10 <sup>6</sup> ppp	1日	SB2			
	<sup>13</sup> C	290 MeV/A	1.8x10 <sup>9</sup> ppp	2.5日	SB2			
	<sup>18</sup> O	350 MeV/A	1.1x10 <sup>9</sup> ppp	2.5日	SB2			
該当する項目があればチェック Special Requirements	<input type="checkbox"/> 動物実験 Live Animals	<input type="checkbox"/> 非密封 RI 実験 Radioisotopes	<input type="checkbox"/> 組換え DNA 実験 Recombinant DNA	<input type="checkbox"/> 有害物質使用 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。  
 Additional information should be presented on separate sheets in either Japanese or English. <sup>\*1</sup>Office use only. <sup>\*2</sup>Check categories. <sup>\*3</sup>All correspondence will be sent to the spokesperson. <sup>\*4</sup>A separate sheet may be used to complete the list.

課題申請者名  
整理番号\*1

小林俊雄

## 研究経費内訳 (単位：千円)

年 度	総 額	費 目			
		備品費	消耗品費	役務	賃金
平成 15 年度	3950 千円	1750 千円	2200 千円	0 千円	0 千円

### 費目毎の内訳

#### 備品費

品 目	金額 (千円)
冷凍機用減圧器 / 昇圧器	700
DC用Amp/Discriminator	300
3290用PCI Interface	750

#### 消耗品費

品 目	金額 (千円)
ケーブル類	300
Drift Chamber用ガス	300
真空散乱箱改造費用	1500
標的用ガス類	100

#### 賃金 (アルバイト)

作業内容	金額 (千円)

#### 役務 (業務委託)

役務内容	金額 (千円)

#### 他の補助金、助成金等への応募状況

科学研究費－特定領域
------------

\*1 放医研側で使用するので記入しないこと。

## 研究計画詳細：陽子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の研究を継続して行う。

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、核子が平均場中の粒子軌道を運動するという描像に基づいている。この単一粒子軌道の特徴付ける物理量に、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 反応の測定から直接得る事ができる。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実験手法を用いることにより、ベータ不安定核をも研究対象にする事が可能となった。

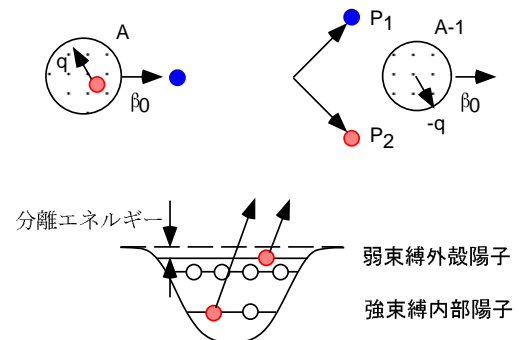


図1：ノックアウト反応の模式図

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 施設の特徴をいかせる実験の一つである。

以下の項目に重点をおきながら研究を進める。

#### (1) 深く束縛された陽子軌道の変化

不安定核に特異的に現われるハロー構造は最外殻核子の弱束縛性に起因するが、反対の核子にも注目すると、陽子過剰核側では陽子の弱束縛と中性子の強束縛が、中性子過剰核側では中性子の弱束縛と陽子の強束縛が起こっている。これまで弱く束縛された外殻核子に注目した実験は数多く行われている。しかし、陽子/中性子が非対称な系において、核の内側で強く束縛された核子軌道がどう変化するか調べる事も非常に興味深い。本研究では、陽子過剰核から中性子過剰核にわたる広い領域で、陽子単一粒子軌道がどう変化しているかを陽子ノックアウト反応を用いて調べる。具体的には、炭素同位体や酸素同位体の陽子過剰核から中性子過剰核を用い、(p,2p)反応により分離エネルギーが20 MeV から50 MeV にわたる陽子  $1s_{1/2}$  状態の空孔状態 (deep hole state) を観測する。

#### (2) 固体水素標的を用いた実験手法の確立

これまでの実験では、陽子標的の代用としてポリエチレン(CH<sub>2</sub>)を用いていた為、分離エネルギーが大きな高励起状態では炭素からのバックグラウンドが多く、測定が困難であった。現在、厚さが一様な薄い固体水素標的の実機を製作中であり、バックグラウンドを低減して測定が可能になると期待している。

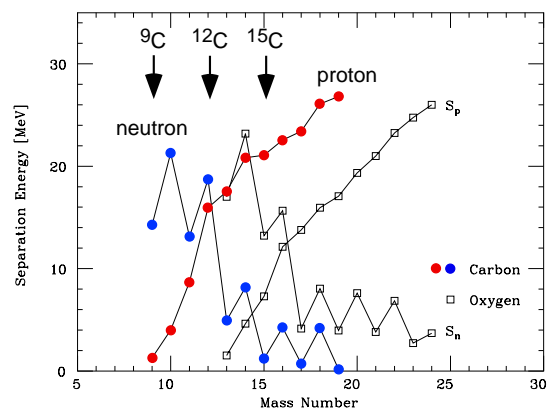


図2：陽子/中性子の分離エネルギー

### (3) 中性子 $2S_{1/2}$ 軌道を持つ中性子過剰核の研究

軽い中性子過剰核の領域では、ハロー現象は中性子  $2S_{1/2}$  軌道と密接に関係している。外殻中性子が  $2S_{1/2}$  軌道にある中性子過剰核からの陽子ノックアウト反応を用いて、娘核の励起状態を研究する。

## 2. 研究計画

装置に関しては、これまで、(1) 2次ビーム検出器系、(2) 2アームの陽子検出器系、(3) 前方粒子用磁気分析器、(4) 高速データ収集系の整備をほぼ終了した。現在、(5) 固体水素標的を整備中である。

次の目標は、(6) 前方磁気分析器の運動量(質量)分解能向上の為の順次改良と、(7) 固体水素標的を用いた測定手法の確立である。

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。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15年2月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5mmで、真空とは4ミ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。固体水素標的の使用に伴う検出器架台の変更と、前方検出器の運動量分解能改善の為の位置検出器の増強も同時に行った。最終的な検出器系を図3(次ページ)に示す。

固体水素に関しては、固体水素が入っている真空箱表面の陽子用真空窓の強度など色々問題が考えられるが、なるべく早く実験手法を確立したい。SB2ラインに変わってから、空間的制約によりF2のmass slitから2次標的までの間に収束要素が無くなり、2次標的上でビームサイズを小さくできないのも、固体水素を用いる上で一つの制約になるかもしれない。

実験計画としては、測定装置の改良や実験手法の確立と平行して、 $^{11,12}\text{Be}$ ,  $^{11,12,15,16}\text{C}$ ,  $^{20}\text{O}$ などの2次ビームを用いて陽子ノックアウト反応の測定を行う。平成15年度には、少なくとも2種類の2次ビームを用いた測定を行いたい。

## 3. これまでの研究経過(別紙)

### 4. マシントイムの見積

2次ビーム1種類に対して必要な時間を概算する。

(1) 全検出器系の調整： 1-2 晩

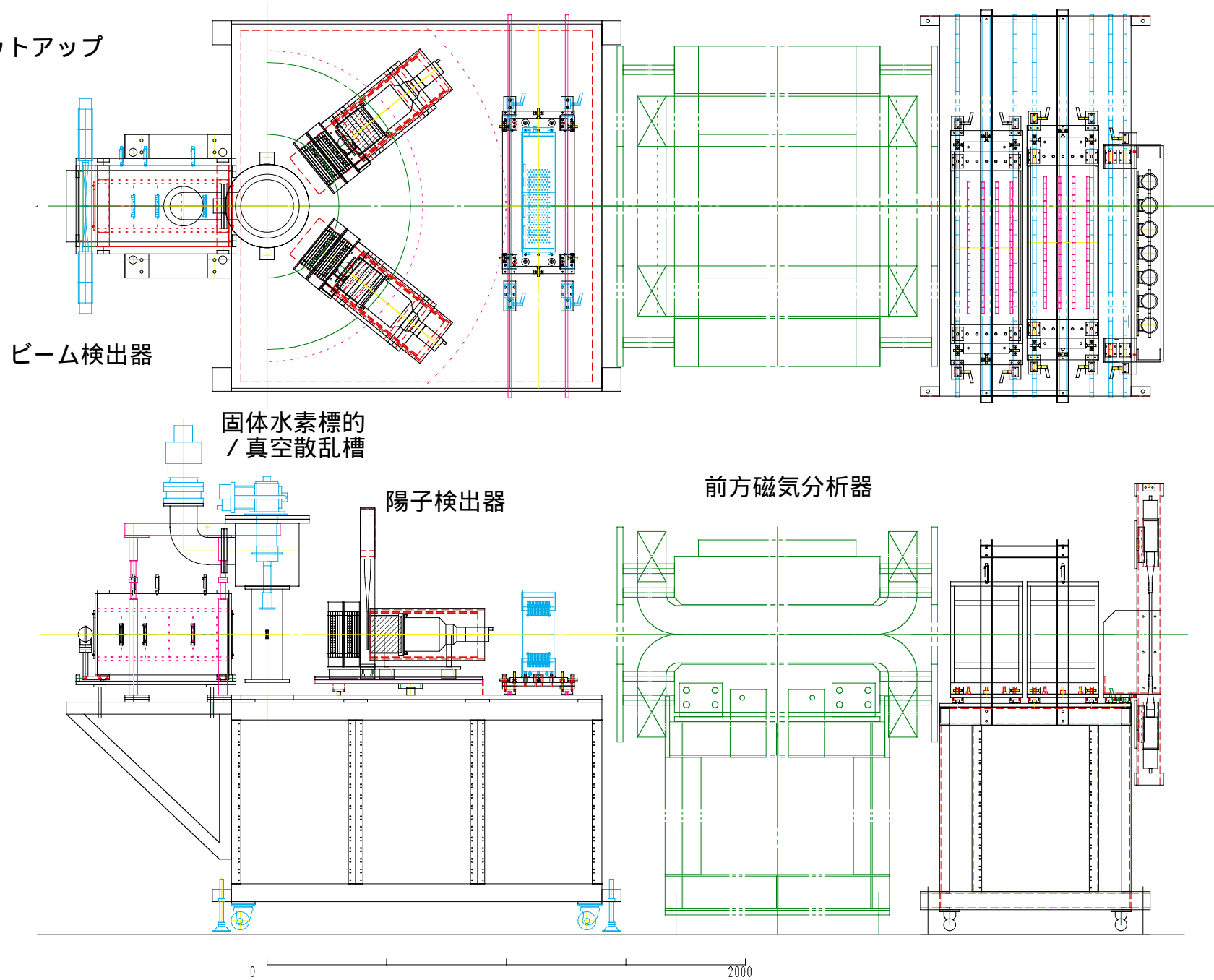
(2) 230MeV 1次陽子ビームによるNaI(Tl)検出器のエネルギー校正： 1 晩

(3)  $p(^{16}\text{C}, 2p)^{15}\text{B}$  反応の測定(例):  $^{18}\text{O}$  1次ビームを用いると約  $50 \times 10^3/\text{spill}$  程度の2次  $^{16}\text{C}$  ビームが得られる。実際には、ビーム検出器の読出回路(TDC)が高計数率に対応していない為に、強いビームでも  $1 \times 10^4/\text{spill}$  程度にしぼって測定を行っている。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、正味約2-3日間の測定が必要になる。

### 5. その他

検出器系の設置/調整に毎回10日間以上の準備期間が必要な事から、連続したマシンタイムをアレンジしていただけると、非常に時間の節約になります。平成15年2月の実験結果を見てから、具体的な方針をたてたいと考えています。

図3：  
実験のセットアップ



## これまでの研究経過

平成12年度—14年度の3年間にわたり、P051「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」を行ってきた。その経過と結果をまとめる。

### 「1」平成12年度

#### (1-1) $p(^8\text{He}, 2p)^7\text{H}$ 反応による超重水素 $^7\text{H}$ の探索

$^{13}\text{C}$  ビームから作った 190 MeV/A、強度 2000/spill の  $^8\text{He}$  ビームを用いて  $p(^8\text{He}, 2p)^7\text{H}$  反応測定を行った。結果を図11に示す：炭素からの background が多く、構造は見えているが、統計が悪い。この時は前方磁気分析器が無く  $^7\text{H}$  崩壊からの  $^3\text{H}$  を同時計測できなかったため、エネルギースケール確認も含む再測定を行いたい。

#### (1-2) 前方磁気分析器の建設

2次ビームを逆運動学で用いた陽子ノックアウト反応の最大の長所は、反応で生成される残留核やその崩壊粒子が入射核破砕片として超前方に放出される事である。角度分布の巾が狭い為、小さな検出器でその殆どを検出する事ができる。この長所を最大限生かす為の前方磁気分析器を製作した：図3参照。

磁気分析器は、H型電磁石（重量約6トン、磁場積分値は約0.6 Tm）荷電粒子運動量を測定する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る。運動量分解能は  $A/Z=2$ 、250 MeV/A の粒子に対して約1.5%であり、図12に示すように、 $p(^{12}\text{Be}, 2p)$  反応において前方に放出された粒子 ( $^2, ^3\text{H}$ 、 $^4, ^6, ^8\text{He}$ 、 $^7, ^8, ^9, ^{11}\text{Li}$ ) が分離可能である。

#### (1-3) $p(^{12}\text{Be}, 2p)^{11}\text{Li}$ 反応によるハロー核 $^{11}\text{Li}$ の構造

$^{11}\text{Li}$  の外殻中性子は、 $p_{1/2}$  軌道と  $2s_{1/2}$  軌道が混合している考えられている。一方  $^{12}\text{Be}$  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、遷移確率は二つの原子核の波動関数の重なりに比例する。

$^{15}\text{N}$  一次ビームから生成したエネルギー250 MeV/A、強度  $12 \times 10^3$ /spill の  $^{12}\text{Be}$  ビームを用いて  $p(^{12}\text{Be}, 2p)^{11}\text{Li}$  反応の測定を行った：図13に示すように直接  $^{11}\text{Li}$  基底状態への遷移が観測された。励起状態に関しては、分解能が悪く状態を完全に分離はできないが、1.3, 5.0, 7.0 MeV の励起状態が基底状態とほぼ同じ強度で生成されているようだ。これらは、(p, 2p) 反応が空孔状態を選択的に生成するという考え方で理解する事は困難であろう。このエネルギー領域での (p, 2p) 反応の理論の整備が必要だと思われる。

### 「2」平成13年度

#### (2-1) 前方磁気分析器の修理と整備

磁気分析器に用いた磁石は旧核研で永年用いられていた物で、 $^{12}\text{Be}$  実験中にレイヤーショートを起こし磁場が時間的に変動した。その為コイルを新規に製作し、磁場0.8Tでの安定動作が可能になった。

#### (2-2) SB2 ビームラインのビーム光学の確認

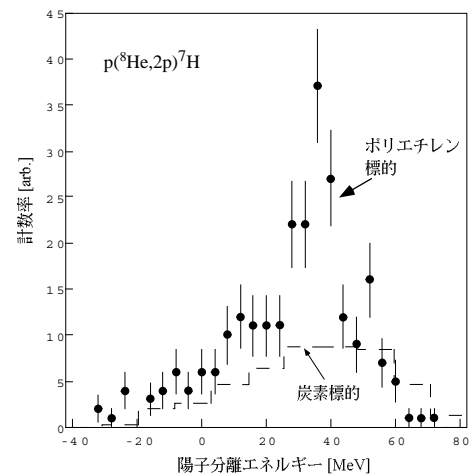


図11: 陽子分離エネルギー分布

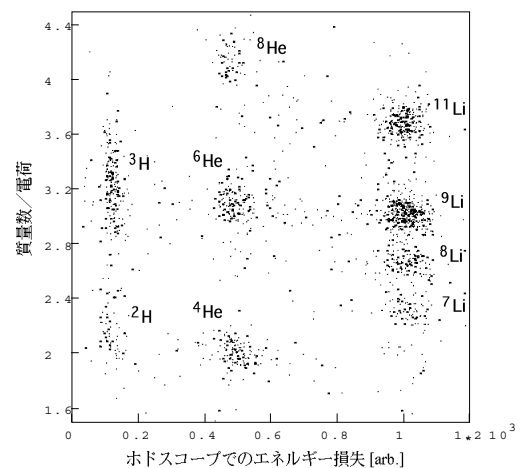


図12: 磁気分析器による粒子識別

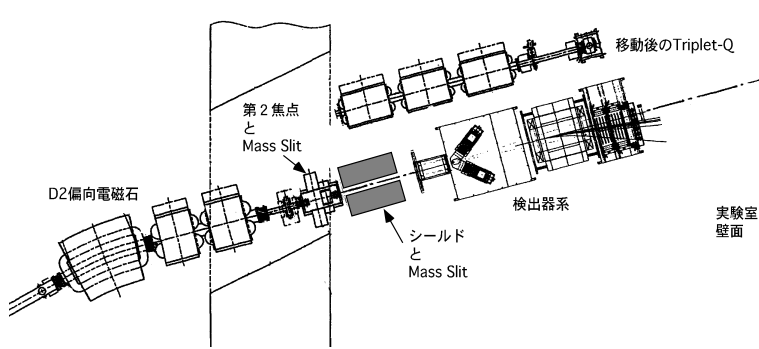


図 1 4 : SB2 ラインでの配置

平成 13 年度から、これまで使用していた 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 ラインの通常配置では、最終焦点 F3 と壁の距離が約 3m であり、全長約 5m ある当実験の測定器系が置けない。その為図 1 4 の様に、通常 F2-F3 間に置かれる 3 連 4 重極磁石を移動し、F2 の直後に検出器系を置いた。F2 には、F1 でのウェッジ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  $^3\text{H}$ ,  $^6\text{He}$  等の軽い粒子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が問題になる。

実験状況下で色々な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となった。しかし、(1)  $A/Z=3$  の  $^3\text{H}$ ,  $^6\text{He}$ ,  $^9\text{Li}$  等による実験が不可能である事、(2) 独立な収束エレメントが無くなった事から 2 次標の上でのビームの大きさが増加する、等の問題点が残っている。

又、ビームラインの変更に伴う大量の信号線の更新も行った。

### (2-3) $p(^{11}\text{Be}, 2p)^{10}\text{Li}$ 反応による $^{10}\text{Li}$ 共鳴状態の研究

中性子ハロー核  $^{11}\text{Li}$  の構造の理解には  $^{10}\text{Li}$  ( $^9\text{Li}+n$ ) 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。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  $^{11}\text{Be}$  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。

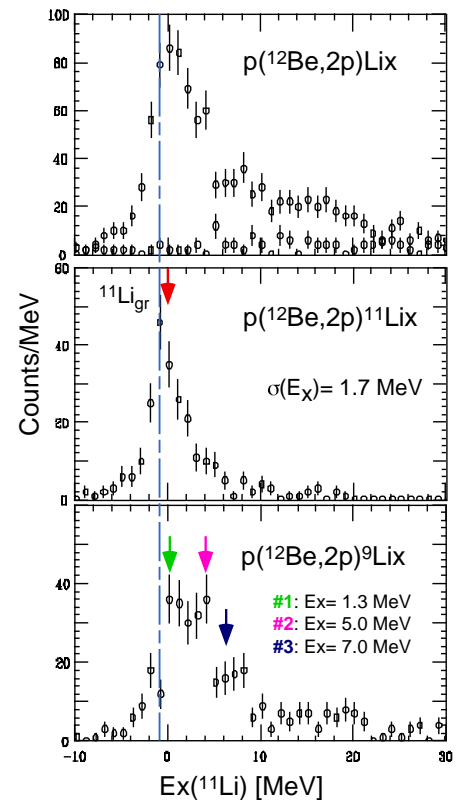
$^{13}\text{C}$  1 次ビームから生成した、エネルギー 250 MeV/A、強度  $90 \times 10^3/\text{spill}$  (3.5 秒) の  $^{10,11}\text{Be}$  ビームを用いて

$p(^{10,11}\text{Be}, 2p)^{9,10}\text{Li}$  の測定を行った。 $^{10}\text{Li}$  崩壊からの中性子と  $^9\text{Li}$  との相関を調べる為に、前方 5 度程度を覆う 8 本の中性子検出器 (面積  $100\text{cm} \times 50\text{cm}$ ) を置いて約 250MeV 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。

### (2-3) $p(^{15}\text{C}, 2p)^{14}\text{B}$ 反応による中性子過剰炭素同位体の深い空孔状態の研究

中性子過剰核では、陽子はより深く束縛される：中性子過剰核側での  $1s_{1/2}$  陽子準位の空孔状態の変化を良く知られている  $^{12}\text{C}$  核での陽子空孔状態と比較する為、中性子過剰核  $^{15}\text{C}$  を用いた  $p(^{15}\text{C}, 2p)^{14}\text{B}$  反応の測定を行った。又、 $^{15}\text{C}$  と  $^{14}\text{B}$  は基底状態が中性子  $2s_{1/2}$  状態であり、核構造の点でも興味深い。

測定は、 $^{18}\text{O}$  1 次ビームから生成した、エネルギー 250 MeV/A、強度約  $1 \times 10^5/\text{spill}$  (3.5 秒) の  $^{15}\text{C}$  ビームを用いて行った。 $^{14}\text{B}$  の励起エネルギー分布を図 1 5 に示す。生成された状態についての解釈は、低い励起状態に関しては、 $^{12}\text{Be}$  の場合と同様に選択性に関する疑問が残る。高い励起状態に関しては、空殻状態が陽子を放出して崩壊する場合には、その 95% 以上がバックグラウンドであり、明確に深い空孔状態を分離する事が

図 13:  $^{11}\text{Li}$  の励起エネルギー分布

できなかった。しかし、Be 同位体へ崩壊する場合の同時計測によると、励起エネルギー30 MeV 付近に構造が見られる。

「3」 平成14年度

**(3-1)  $p(^{11,12}\text{C}, 2p)^{10,11}\text{B}$  反応の測定**

炭素同位体の比較の為に、 $^{12}\text{C}$  1次ビームと  $^{11}\text{C}$  2次ビームを用いて  $p(^{11,12}\text{C}, 2p)^{10,11}\text{B}$  反応の測定を行った。実験データはまだ解析中である。

**(3-2) 固体水素 / 真空散乱箱 / 検出器架台の製作**

深い軌道からのノックアウト反応をバックグラウンド無しで測定できるように、これまで用いていたポリエチレン(この中の炭素が主なバックグラウンドの原因)標的にかわり、厚さ 5mm の固体水素標的が使えるようなシステムを製作中である。完成予定は平成14年12月下旬で、平成15年2月に予定されているマシンタイムに使用する予定である。

最初の経験でもあり、色々な問題が生じる可能性があるが、順次改善し、実験手法をなるべく早く確立させたい。

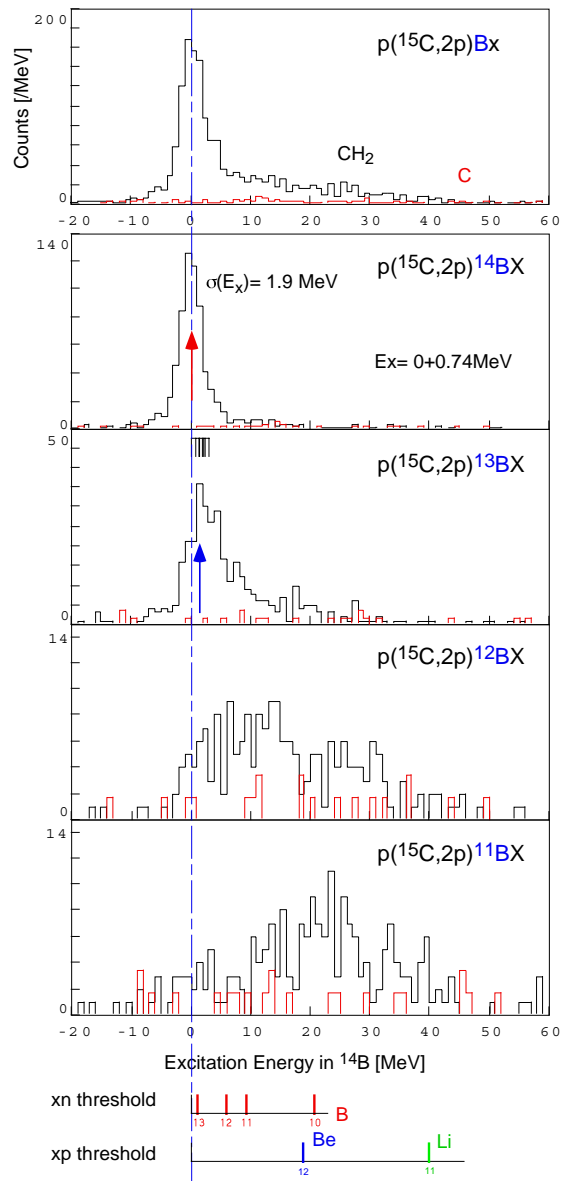


図 15:  $^{14}\text{B}$  励起エネルギー分布