

**重粒子線がん治療装置等共同利用研究課題申請書 (平成16年度)**  
**Proposal for Research Project with Heavy Ions at NIRS-HIMAC (FY\_\_\_\_\_)**

*1 課題整理番号 Project No.						平成16年6月29日 Date(yy/mm/dd)	
*2 分類 Category	x 新規 New	継続2年目 2nd year	継続3年目 3rd year	治療・診断 Clin & Diag	生物 Biology	x 物理学 Physics	装置共用 C.U.
研究課題名 Title of Research Project	重 RI ビーム粒子識別用検出器の開発						
*3 課題申請者 Spokesperson	氏名 Name	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学専攻					
	住所 〒 Address	〒980-8578 宮城県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	共同利用研究員	
	e-mail:	kobayash@lambda.phys.tohoku.ac.jp					
所内対応者 Liaison at NIRS	氏名 Name			所属部課 Division	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	東北大学大学院理学研究科		教授	共同利用研究員		
	大津秀暁	同上		助手	共同利用研究員		
	前田和茂	同上		助教授	共同利用研究員		
	大関和貴	同上		D4	共同利用研究員		
	渡辺極之	同上		D3	共同利用研究員		
	松田洋平	同上		D1	共同利用研究員		
	三木俊也	同上		M2	共同利用研究員		
	篠原督和	同上		M2	共同利用研究員		
	直井由紀	同上		M2	共同利用研究員		
日下理太郎	同上		M1	申請中			
遠藤奈津美	同上		M1	申請中			
研究の目的と意義 Objective of Project	<p>放医研 HIMAC 施設と RIBF 施設において、エネルギー200-350 MeV/A、質量数20-100 の RI ビームによる実験を、大立体角磁気分析器を用いて行う場合に必要を検出器技術、特に粒子識別に必須な検出器技術の開発を行う。項目は、全反射型 Cherenkov 検出器、平板型 HP-Ge 検出器、低圧力カソード読出型 Drift chamber、焦点面用 drift chamber、Multiple-sampling Ionization Chamber など。今年度はこのうち全反射型 Cherenkov 検出器と平板型 HP-Ge 検出器の試験を行う。</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>40</sup> Ar	290	2x10 <sup>8</sup>	8h x 9	SB2		
該当する項目があればチェック Special Requirements	動物実験 Live Animals	非密封 RI 実験 Radioisotopes	組換え DNA 実験 Recombinant DNA	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。\*1 放医研側で使用するので記入しないこと。\*2 該当するものにチェック。\*3 課題申請者は放医研との事務連絡も担当する。\*4 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. \*1 Office use only. \*2 Check categories.  
 \*3 All correspondence will be sent to the spokesperson. \*4 A separate sheet may be used to complete the list.

## 研究計画詳細

### 「 1 」 研究目的

現在日本国内には、放医研 HIMAC と理研加速器施設の 2 つの RI ビーム施設が存在する。両施設の特長としては、放医研がシンクロトロン、高エネルギー、軽核、低強度なのに対し、理研はサイクロトロン、低エネルギー、中重核、高強度である。又 3 年後に実験開始の予定で建設が進んでいる理研 RIBF 施設は、サイクロトロン、中高エネルギー、中重核、高強度と言う事ができる。RIBF での RI ビームは、Kr や Xe ビームの入射核破砕反応を用いるものと、U ビームの fission 反応を用いる 2 つの方法が考えられているが、どちらかというと後者を用いた中重核 RI ビーム発生に重点が置かれている。又 RI ビームのエネルギーは 200-350 MeV/A 程度で、現在の HIMAC 施設と等しいか又は低い。この中間エネルギー領域と中重核の質量領域の組み合わせは過去に例が無く、ユニークである反面、大立体角磁気分析器を用いた粒子識別には非常な困難が予想される。現在私達は RIBF での大立体角磁気分析器建設計画に関与しているが、エネルギー 200-350 MeV/A、質量数 40-100 の入射核破砕片の検出と粒子識別用の各種検出器に関して明確な答えを持っていない。そのような検出器技術の開発や試験無しには、施設はできたが実験はできないという事にもなりかねない。

この研究では、放医研 HIMAC 施設と RIBF 施設において、エネルギー 200-350 MeV/A、質量数 20-100 領域の RI ビームを用いた実験を、大立体角磁気分析器を用いて行う場合に必要な検出器技術の開発を目的とする。

開発、試験が必要な検出器は、

- 1) 全反射型 Cherenkov 検出器：
- 2) 平板型 HP-Ge 検出器：
- 3) Drift Chamber (DC)：
- 4) 低圧力カソード読出型 MWPC：
- 5) DC, MWPC 用 ASD(Amp-Shaper-Discriminator)：
- 6) 高強度用 multiple-sampling Ionization Chamber：

である。このうち今年度は、高精度速度測定用の全反射型 Cherenkov 検出器と、高精度全エネルギー測定用の平板型 HP-Ge 検出器の試験を主に行う。

### 「 1 」 RI ビーム実験での粒子識別

大立体角磁気分析器を用いて RI ビーム実験を行う場合、反応で発生する入射核破砕片の粒子識別（原子番号  $z$  と質量数  $A$ ）が最も重要であり又困難でもある。

理研加速器施設に建設した c 型磁気分析器では、エネルギー 50-100 MeV/A、質量数 16 以下の領域で、C 型 2 重極磁石、drift chamber を主とした位置検出器、plastic scintillator hodoscope の組み合わせにより、運動量、エネルギー損失、飛行時間を測定し、速度  $\beta$ 、原子番号  $z$ 、質量数  $A$  を求め粒子識別を行っていた。HIMAC 施設でも、エネルギー 250-300 MeV/A、質量数 16 以下の領域用に同様な磁気分析器を建設し、粒子識別を行ってきた。

しかし、この方法をそのまま 200-350 MeV/A、質量数 30-100 の領域に拡張する事には

非常な困難がある。質量数  $A$  と原子番号  $z$  による粒子識別を、運動量  $R$  (重イオンの場合は magnetic rigidity と呼ばれる運動量 / 電荷)、電荷  $z$ 、速度  $\beta$  の測定により行う場合、質

量分解能は、 $\frac{\sigma_A}{A} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 + \left(\gamma^2 \frac{\sigma_\beta}{\beta}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_z}{z}\right)^2}$  で表される。  $A=100$  に対して  $5\sigma$  分離

( $\sigma_A = 0.2$ ) を要求すると、運動量と速度測定の寄与がほぼ等しく、粒子を  $250 \text{ MeV}/A$ 、 $A/Z=3$  として、

$$\text{運動量分解能: } \frac{\sigma_R}{R} \approx \frac{1}{710} \text{ for } R = 2.2 \text{ GeV}/c$$

$$\text{速度分解能: } \frac{\sigma_\beta}{\beta} \approx 9 \times 10^{-4} \text{ for } \beta = 0.62$$

$$\text{電荷分解能: } \frac{\sigma_z}{z} \approx \frac{0.2}{50}$$

が必要となる。運動量測定は、粒子を  $60$  度曲げるには  $BL = 6.4 \text{ Tm}$  必要なことから、かなり強力な磁石が必要になる：これは原理的には大形超伝導磁石によって実現可能である。速度測定を TOF 法で行う場合、磁気分析器に典型的な飛行距離  $4 \text{ m}$  に対して  $\sigma_T/T = 19 \text{ psec}/22 \text{ nsec}$  となり、約  $20 \text{ psec}$  (rms) の時間分解能が要求される。TOF 検出器が  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  程度の領域をカバーする必要があることと、物質的に薄い TOF start 検出器も必要なことを考えると、現実的には非常に難しい。つまり新しい高精度速度測定が可能な検出器の開発が必要である。

これに対し、2 種類の方法を提案したい。

## 「2」高精度速度 / エネルギー測定用検出器

### (3-1) 全反射型 Cherenkov 検出器

高エネルギー重イオンの高精度速度測定を行う方法の一つとして、全反射型 Cherenkov 検出器が考えられる：図 1。

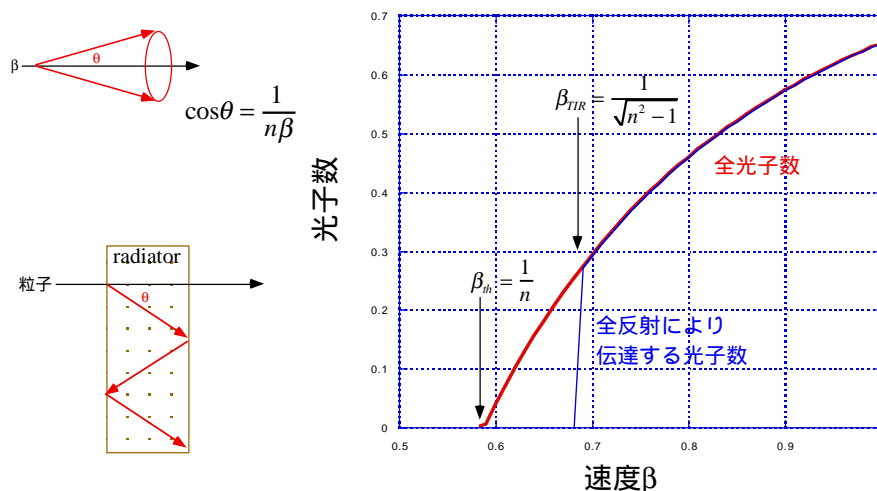


図 1：全反射型 cherenkov 検出器

Cherenkov 検出器では、粒子の速度が屈折率  $n$  の物質 (radiator) 中光速度を超える場合、

つまり  $\beta_{th} \geq 1/n$  の場合に  $\cos\theta = \frac{1}{n\beta}$  の方向  $\theta$  に光が放出され、光子数は  $N_\gamma(\beta) \propto 1 - \frac{1}{(n\beta)^2}$  の

依存性を持ち増加する。 敷居値  $\beta_{th}$  付近では光は前方に放出され、その多くは屈折により物質外に漏れ出てしまい、多数回反射後物質の端にある光電子増倍管(PMT)に到達する光は少ない。しかし Cherenkov 光の放出角が全反射角より大きくなると、Cherenkov 光は全て全反射により物質端の PMT まで到達する。つまり物質端で測定する光量は、全反射 (TIR: Total Internal Reflection) の敷居値  $n_{TIR} = \frac{1}{\sqrt{n^2 - 1}}$  において急激に増加する。実

際には屈折率の波長依存性の為、有限な傾きを持って増加するが、その傾きは充分急であり、光量を測定する事によって速度を高精度で測定する事が可能である。

以前 1-2 GeV/A 領域での粒子識別において同じ問題に直面した時、全反射型 Cherenkov 検出器の radiator として Fused Quartz ( $n=1.458$ ) を使い、1.7 GeV/A において  $\sigma_\beta = 4.0 \times 10^{-4}$  @  $\beta = 0.93$  の分解能を得る事ができた。この技術を 200-350 MeV/A 領域に適用する場合の問題は、 $n=1.77-2.0$  と高い屈折率を持つ透明物質が必要となる事である。現在、エネルギーに応じて透明セラミック( $n=2.1$ ,  $E=180$  MeV/A)、光学ガラス K-PSFn1 ( $n=1.9$ ,  $E=250$  MeV/A)、サファイヤ( $n=1.75$ ,  $E=350$  MeV/A) の 3 種類の radiator を考えている。

高屈折率を持つ物質は分散が大きく、物質中での光の減衰も大きいと考えられる為、これらの材料を用いて全反射型 Cherenkov 検出器の速度分解能を試験し、必要な速度分解能が得られるかどうかの確認を行う。同時にシンチレーション光の影響や、入射角依存性についても試験を行う。

透明セラミックについては、宇宙線と KEK-PS での  $\pi, p$  ビームによる試験を行ったが、両方とも  $z=1$  の粒子である為光量が少なく、分解能について答が出ていない。Cherenkov 光は重イオンに対して  $z^2$  依存性で光量が増加する為、最初は比較的標準的な  $^{40}\text{Ar}$  ビームを用いて試験を行う。

ビーム試験時には、Cherenkov 検出器の前後に drift chamber を置いて検出器を通過する粒子の位置 / 角度を測定し、直前に薄い degrader の厚さを変化させて光量の変化を測定し、速度分解能を求める：図 3 A 参照。

### ( 3 — 2 ) 平板型高純度 Ge 検出器

平板型 HP-Ge 検出器を用いて高精度の全エネルギー測定を行う事により、運動量測定、電荷測定、全エネルギー測定による粒子識別を行う方法も試験する。粒子を物質中の止めて全エネルギーを測定する方法は、核が重くなるとレンジが比較的短くなる為可能となる：250 MeV/A の  $^{40}\text{Ar}$  と  $^{84}\text{Kr}$  の Ge 中のレンジは各々 1.3cm と 0.7cm であり比較的短い。これまでも宇宙線分野でスタック型 Si 検出器により鉄領域での粒子識別が行われてきたが、我々はその技術を持たない為、比較的大口径の結晶が得られるようになった高純度 Ge 結晶を粒子を止める検出器として用いる。不安定ビームを物質中に止める場合

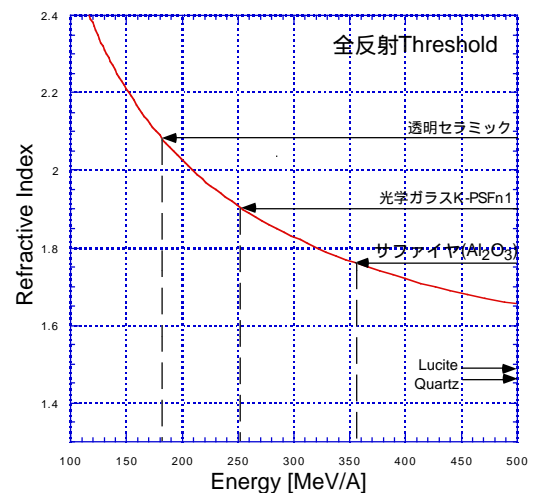


図 2 : 屈折率と全反射の敷居値

には、止まったビームが物質中で崩壊を起こすという問題はあるが、半導体検出器のエネルギー分解能が優れている為、魅力的な方法である。

Ge 検出器として、直径 60mm、厚さ 35mm のセミ平板型 Ge 結晶を用いる。試験では高分解能磁気分析器と組み合わせる事ができない為、2次ビームラインで数種類のアイソトープを同時検出できる状態のもとで、drift chamber で粒子軌跡を同定し、Si 検出器と Ge 検出器による dE-E 法で粒子識別を行いエネルギー分解能に焼き直す。Recombination を防ぐ為に、粒子の斜入射も必要となるかもしれない。PreAmp の feedback capacitor として 100pF 以上という大きな値を用いる必要がある為発振の問題が予想されるが、ビーム試験前にベンチ試験を充分に行う。時間が許せば、より大面積が容易に得られる NaI(Tl) 検出器の試験も行いたい。

本年度の試験は、上の全反射型 Cherenkov 検出器と平板型高純度 Ge 検出器の試験を主に行うが、以下に他の重要な検出器の試験項目を簡単にまとめる。

## 「4」他の検出器

### (4-1) Drift Chamber

これまで色々な形式の drift chamber を RI ビーム実験に用いてきた。四角型セルとしては高強度用の drift 距離 2.5mm から読出チャンネル数低減の為に drift 距離 25mm、六角型セルもビーム強度と目的によって drift 距離を 6mm から 12mm まで変えて使用してきた。これまでは全ての場合に陽子から検出可能なように、直径 16-30 $\mu$ m のアノードワイヤーを用いてきたが、検出粒子の電荷が大きくなるにつれて、必要な高電圧を下げる必要があり、drift 領域の電場がだんだん弱くなり十分な電場がかからない可能性がある。これは、必要な dynamic range と位置分解能間の妥協点を見つける必要があるという事を意味している。実際には、250 MeV/A 付近の Ne (Z=10)、Ar (Z=18)、Fe (Z=26)、Kr (Z=36) ビームに対して、drift chamber の最適動作点、位置分解能、入射角度依存性、ビーム強度依存性などを調べ、実際にどの程度の Dynamic Range が可能であるか試験を行う。

試験に用いる drift chamber としては、大立体角磁気分析器の焦点面検出器の候補である六角セル型 Drift chamber (drift 距離 10mm) と、初期実験に用いる予定の四角セル型 drift chamber の2種類を考えている。

### (4-2) 低圧力カソード読出型 Drift Chamber

2次標的上流には標的に入射するビームの位置と角度を測定するビーム位置検出器が必要である。これまでは drift chamber や MWPC を空気中で用いてきたが、検出器や空気中での多重散乱により角度分解能が制限され、又検出器中での反応の為に実験によっては標的有/無の S/N が非常に悪かった。一方理研では PPAC が多く用いられているが、Z=1 の粒子に対する感度が無い。検出器のエネルギー校正の為に2次陽子ビームが必要な実験を考えている為、位置分解能を 100-150 $\mu$ m(rms) に保ち、検出器の物質量を減らし、かつ Z=1 の粒子から検出可能という条件を満たす、低圧力カソード読出型 drift chamber を現在製作中である。試験ベンチでベータ線や宇宙線を用いた測定を終了後、重イオンに対する動作特性や位置分解能等の試験を行う。

### ( 4 — 3 ) DC/MWPC 用 ASD (Amp-Shaper-Discriminator)

これまで、drift chamber や MWPC の読出回路として、検出器本体上の PreAmp 信号を ASD (Amp Shaper Discriminator)へ送り、ECL に変換した論理信号を Multi-hit TDC へ送り drift 時間の測定を行ってきた。殆ど唯一の選択枝であった LRS 製 multi-hit TDC が製造中止になった為、大量に新しい回路を必要とする場合の選択枝は KEK で開発された VME Multihit TDC に絞られる。この TDC 入力は ECL 又は LVDS 規格であり、ECL 規格の IC はどんどん製造中止になっている事を考慮すると、より消費電力の少ない LVDS 規格の論理信号に統一する良い機会である。今年度、ATLAS 実験用に開発された ASD chip を用いて、検出器本体上に設置する ASD ボードを製作する予定である。このチップは LVDS 論理信号のみではなく analog 信号も引き出す事ができる為、カソード読出型 DC にも使用する事が可能である。DC や MWPC と組み合わせた場合の位置分解能や強度依存性を  $z=10-36$  の粒子に対して試験を行い、可能な dynamic range について情報を得る。

### ( 4 — 4 ) 高強度用 Multiple-sampling Ionization Chamber

これまで粒子の電荷を、plastic scintillator 検出器中でのエネルギー損失を用いて測定してきた。電荷が大きくなると飽和現象により分解能が悪くなる為、Si 検出器又は multiple-sampling Ionization Chamber(MUSIC)を用いる必要が出てくる。その為に九大の木村らにより高強度用 MUSIC が開発された。この検出器は我々の original ではないが、大立体角磁気分析器に合わせた構造の物を製作し、独自の読出回路を含めて配置や動作条件の最適化を行う。

## 「 5 」マシンタイムの見積もり

### ( 5 — 1 ) 検出器の準備状況 :

製作、準備、試験ベンチでの試験が終わったものは、透明セラミックを用いた全反射型 Cherenkov 検出器、低圧カソード読出型 drift chamber、Drift Chamber/MWPC であり、これから製作と予備試験を行うのは、平板型 Ge 検出器、新 ASD、Ionization Chamber である。

### ( 5 — 2 ) 測定場所 :

測定には大量の特殊信号線が必要な事と、2次ビームの使用も部分的に必要な事から、SB2 ビームラインの第3(標準)焦点での測定を希望する。

### ( 5 — 3 ) 測定形態 :

マシンタイムの形態としては、測定間に色々検出器の変更を行う必要がある為に、週末のまとまった時間よりは、通常日の夜間を何日間か連続して使用する事を希望する。

### ( 5 — 4 ) マシンタイムの見積もり :

今年度は主に全反射型 Cherenkov 検出器と平板型 Ge 検出器について Ar ビームを用いた試験を行う。

### ( A ) 全反射型 Cherenkov 検出器 :

#### 1 検出器配置 ( 図 3 A ) :

Crekenkov 検出器上流に degrader、plastic scintillator、drift chamber  
下流に drift chamber と plastic scintillator を設置する。

## 1 必要時間：

Drift Chamber 等検出器の回路調整と予備試験：	1 晩
透明セラミック：	200 MeV/A <sup>40</sup> Ar 2 晩
光学ガラス：	260 MeV/A <sup>40</sup> Ar 2 晩

**(B) 平板型高純度 Ge 検出器：**

## 1 検出器配置 (図 3B)：

Plastic scintillator、Drift Chamber、Si 検出器、Ge 検出器、plastic scintillator  
この試験は全反射型 Cherenkov 検出器と同時には行えない。

## 1 必要時間：

Drift Chamber を含む検出器の回路調整、予備試験：	1 晩
1 次ビームの直接入射：	290 MeV/A <sup>40</sup> Ar 1 晩
2 次ビームの入射：	290 MeV/A <sup>40</sup> Ar から 2 晩

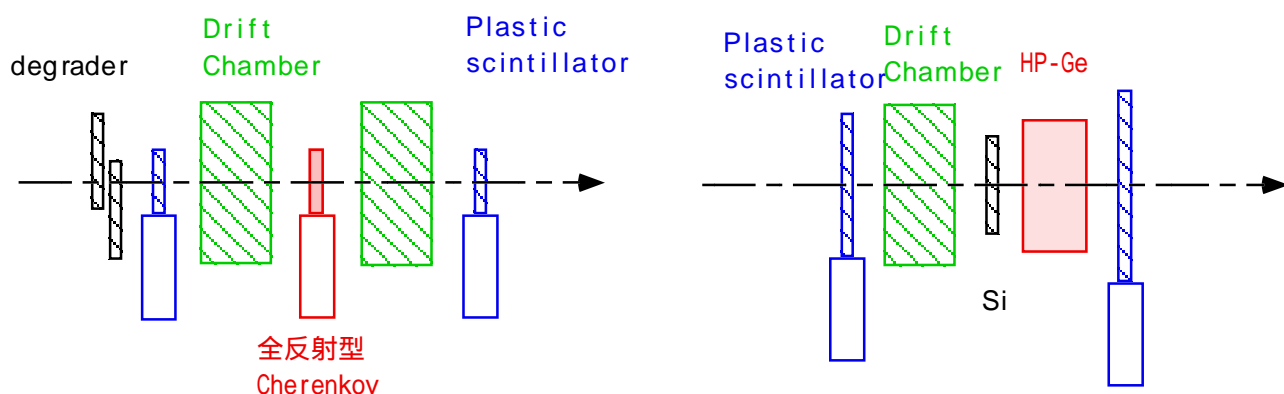


図 3 A：全反射型Cherenkov検出器試験

図 3 B：平板型HP-Ge高検出器試験

**「 6 」 研究業績**

過去に行った関連する検出器開発に関し、かなり古い論文から：

- "A Drift Chamber for High-Energy Heavy Ions"  
Nucl. Instr. and Meth. **A254** (1987) 281.  
T. Kobayashi, F.S. Bieser, T.J.M. Symons and D.E. Greiner.
- "A Detector System for Heavy Projectile Fragments in the Few GeV/nucleon Energy Region"  
Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research **A284** (1989) 381.  
T. Kobayashi, C.E. Tull, D.L. Olson, W.F.J. Müller, J.P. Dufour, J.C. Young, F.S. Bieser, and T.J.M. Symons.
- "Test of Prototypes for a Highly-Segmented TOF Hodoscope"  
Nucl. Instr. and Meth. **A287** (1990) 389.  
T. Kobayashi and T. Sugitate.