

重粒子線がん治療装置等共同利用研究課題申請書 (平成 17 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 12 月 2 日
^{*2} 分類 Category	<input type="checkbox"/> 新規 New	<input checked="" 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"/> 物理学 Physics
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					<input type="checkbox"/> 装置共用 C.U.
^{*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	高田栄一	所属部課 Division	医用重粒子物理学 研究部 内線 ext6852		
^{*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	
	松田洋平	同上		D2	共同利用研究員	
	日下理太郎	同上		M2	共同利用研究員	
	遠藤奈津美	同上		M2	共同利用研究員	
	岡村弘之	東北大学サイクロトロンラジオアイ ソトープセンター		教授	共同利用研究員	
大関和貴	同上		講師	共同利用研究員		
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 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。 今年度は昨年度 に引き続いて、全反射型 Cherenkov 検出器、Multiple-sampling Ionization Chamber な どの試験を Ar ビームで行い、又さらに重い粒子(Kr など)に対して試験を行う。</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	
	⁴⁰ Ar	290	2x10 ⁸	8h x 3	SB2	
	⁸⁴ Kr	約 350	1x10 ⁸	8h x 5	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。^{*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 (かなりの部分が昨年度申請書と重複します)

「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2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。

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。

平成 16 年 12 月末に Ar ビームを用いて、上の項目のうち(1, 2, 3, 4)の試験を行う予定である (Proposal 記入時：2004/12/02 にはまだ行っていない)。今年度は Ar ビームを用いて(1,5,6)の試験を行い、又より重い粒子 (現在は Kr を考えている) に対して各種検出器の試験を行う。

「2」 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 β 、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

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 β 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 5σ 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 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 4m に対して $\sigma_T/T = 19 \text{ psec}/22 \text{ nsec}$ となり、約 20psec (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 種類の方法を考えている。

「3」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 検出器を考えている：図 1。

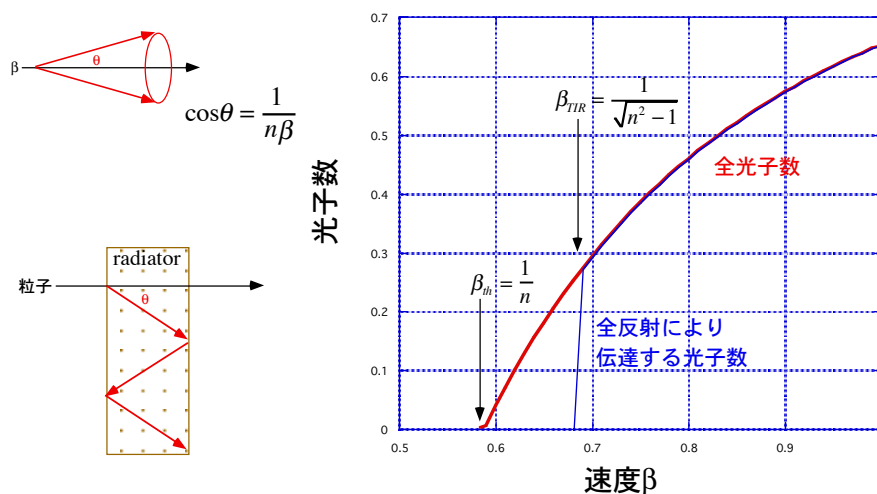


図 1：全反射型 cherenkov 検出器

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 θ 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 β_{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 ($n=1.458$) を用い、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。平成 16 年度に試験する予定の物質は、透明セラミック ($n=2.1$, $E=180$ MeV/A) であるが、分散が大きい、減衰長が短いなど色々な問題が考えられる。200-300 MeV/A の領域で使用可能なより良い光学的性質を持つ物質を探し、TAFD30 ($n=1.88$, ホヤ製) を候補として考えている。

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。

ビーム試験時には、Cherenkov 検出器の前に 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。

(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}Ar と ^{84}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。

「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の 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 μm 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 μm (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 を製作した。試験ベンチで宇宙線を用いた試験では、位置分解能 0.1mm(rms) という非常に良い値が得られている。重イオンではさらに位置分解能が良くなると考えられ、低物質量と高位置分解能を兼ね備える検出器として有望と考えている。

(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 入力には 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。平成16年度には、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 ボードを製作した。理研で 80MeV/A の C ($z=6$)ビームに対して高計数率でも非常に安定に動作し、又敷居値も 5 fc と非常に低い値でも安定に動作した。手持ちの 6 角セル型 drift chamber と組み合わせて、 $Z=18, 36$ に対する試験を行う。

(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) 平成16年度に行う(予定の)試験:

平成16年12月末にマシンタイムがあり、290 MeV/A Ar ($z=18$)ビームを用いて、(1) 透明セラミックを用いた全反射型チェレンコフ検出器、(2) 平板型 Ge 検出器+Si 検出器、(3) 低圧 Multiwire Proportional Chamber、(4) 低圧カソード読出型 drift chamber、(5) 四角セル型 drift chamber、(6) 6 角セル型 drift chamber、(7) RIBF 1 期実験で使用を考えている SMART F1 drift chamber、(7) NaI(Tl)検出器、の試験を行う予定である。

(5-2) 平成17年度に行う試験

平成17年度は、Ar ビームを用いて、(1) TAFD を用いた全反射型チェレンコフ検出器、(2) Multiple Sampling Ionization Chamber、の試験を継続する。平成16年度では予算の関係で、新しい ASD ボードは製作できたが、読出用の VME-multihit TDC は準備できなかった。今年度は drift chamber + ASD + VME-TDC の組み合わせを用いて、試験を行う。又、より重いビームである Kr ($z=36$)を用いて試験を繰り返す。

(5-3) 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。

(5-4) 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使用する事を希望する。

(5-5) マシンタイムの見積もり:

(5-5-1) Ar ($z=18$)ビームを用いた試験： 合計3晩

1. TAFD を用いた全反射型チェレンコフ検出器：Ar ビーム2晩

drift chamber を用いて粒子の入射位置／方向を特定し、degrader を用いてビームエネルギーを微調整する。ビームエネルギーに閾値としてチェレンコフ検出器からのチェレンコフ光量を測定し、速度分解能を推定する。今年度試験する TAFD は平成16年度に試験した(予定の)透明セラミックよりも光学的性質が少し良いはずである。

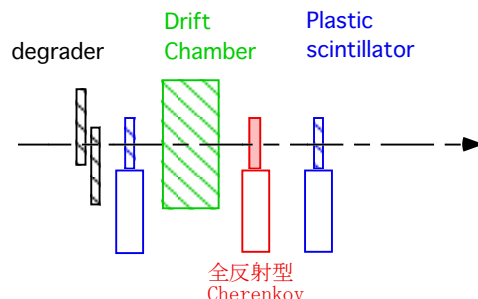


図3A：全反射型Cherenkov検出器試験

2. Multiple Sampling ionization chamber： Ar ビーム1晩

木村方式のイオンチェンバーで、周囲の dead region の割合の小さな物を製作し、昨年度試験した平板型 Ge 検出器と組み合わせて、dE-E 検出器としての粒子識別能力を確認する。

(5-5-2) Kr ($z=36$)を用いた試験： 合計5晩

試験したい検出器は、

1. TAFD を用いた全反射型チェレンコフ検出器、
2. Multiple-Sampling Ionization Chamber + 平板型 Ge 検出器 / NaI(Tl)検出器
3. 新 ASD ボード+VME TDC を用いた drift chamber：セルは4角と6角
4. 低圧 Multiwire Proportional Chamber、
5. 低圧カソード読出型 drift chamber
6. RIBF 1 期実験で使用を考えている SMART F1 drift chamber
7. 薄い plastic と大形 plastic を用いた TOF 検出器

であるが、組み合わせを考えて5晩程度で行う事を考えている。今まで、 $z>20$ のビームを用いた経験が無い為、ダイナミックレンジなど色々な問題点が出ると思われる。

「6」 要望事項

平成16年度の試験を計画した際にわかった事ですが、数種類の検出器を一度に試験しようとする、大学の実験室が空になるような量の検出器や荷物の移動(仙台と千葉間)が必要になります。そのうちかなりの部分がデリケートな物なので、自分達でトラックを借りて運ぶのは危ないし、専門の業者に運送を依頼する必要があります。以前の実験で固体水素標的を何度か運搬した事がありますが、1往復に約30万円程度かかります。

又、drift chamber、低圧 MWPC、イオン Chamber などは色々なガス(He+C₂H₆, iso-C₄H₁₀, C₂H₆ など)を用い、大学で使っているガスポンペを運ぶ必要がありますが、法律改正のため自分達で運搬する事はできません。かえって千葉付近の業者から購入した方が价格的

には安くなります。

これらの理由で、2回程度の運搬費用と、ガス購入費用の一部を援助してはいただけないでしょうか？

以下概算です。年に2回実験をするとして、

* 物品の輸送代： 2往復、コンテナ付きのエアサス車両を使用
300 千円 x2 往復

* 検出器用ガス： 1回目に購入し、2回に分けて使用

He+C2H6： pre-mix, 30 気圧、47l ボンベ： 3 本 80 千円 x 3

C2H6： 10l ボンベ、5kG： 160 千円

iso C4H10： 5kG： 約 100 千円

合計： 約 1100 千円

「7」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.