

# 重RIビーム粒子識別用検出器の開発 Detector Developments for Heavy RI Beam Identification (16P181)

小林俊雄<sup>a</sup>, 大津秀暁<sup>a,b</sup>, 松田洋平<sup>a</sup>, 遠藤奈津美<sup>a</sup>, 佐藤良輝<sup>c</sup>, 高田栄一<sup>d</sup>  
T. Kobayashi<sup>a</sup>, H. Otsu<sup>a,b</sup>, Y. Matsuda<sup>a</sup>, N. Endoh<sup>a</sup>, Y. Satou<sup>c</sup>, E. Takada<sup>d</sup>

## Abstract

We have developed and tested various detectors for the particle identification of heavy RI beams in the few hundreds/nucleon energy region. These are drift chambers with hexagonal cell structure operated at atmospheric and low pressure, low-pressure cathode-readout drift chambers for tracking, Cherenkov detector operated at the total internal reflection threshold for velocity measurement, and HP-Ge, NaI(Tl), and CsI(Tl) detectors for total-energy measurements. They have been tested using 150- 350 MeV/A secondary RI beams, produced from 400 MeV/A <sup>40</sup>Ar and <sup>84</sup>Kr beams, at SB2 beam line.

## 1. 研究の目的とバックグラウンド

RI Beam Factory (RIBF)での原子核実験に用いる大立体角磁気分析器(Samurai)とその検出器系の設計・開発を行っている。RIBFでは250-350 MeV/Aエネルギー領域の中重核RIビームに重点が置かれており、Samuraiを用いた実験での最大の課題点は、反応で超前方に放出される重い入射核破砕片(重イオン)の粒子識別である。粒子の質量数Aと原子番号Zを識別するには、電荷Z、運動量R(magnetic rigidity)、速度 $\beta$ 、全エネルギーEのうち3種類の独立な測定が必要となる。例えば質量数A=100に対し質量分解能 $\sigma_A=0.2$ が必要とすると、運動量R=2.2 GeV/cに対して $\sigma_p/p=1/700$ の運動量分解能、速度 $\beta=0.6$ に対して $\sigma_\beta/\beta=1/1000$ の速度分解能、又は全エネルギーE=25GeVに対して $\sigma_E/E=1/1000$ の全エネルギー分解能が必要となる。これらのどれを取っても検出器技術的には非常に困難な問題を含み、又これまで殆ど調べられた事がない。

250MeV/Aエネルギー領域で質量数100程度までの重イオンの粒子識別に必要な色々な検出器を系統的に調べる為、HIMACで各種検出器のビーム試験を行った。

## 2. 今年度の研究内容と結果

今年度は400 MeV/Aの<sup>40</sup>Ar(Z=18)、<sup>84</sup>Kr(Z=36)1次ビームと、それから作った250-300 MeV/A、10<Z<35, 20<A<80の2次RIビームを用いて検出器試験を行った。測定は2回に分けて行い、7月にはHP-Ge、NaI(Tl)全エネルギー検出器、低圧力カソード読出型drift chamber、6角/4角セル型drift chamber、全反射型Cherenkov検出器、12月にはCsI(Tl)、NaI(Tl)全エネルギー検出器、2種類の6角セル型低圧力drift chamberのビーム試験

を行った。

## 2.1 全エネルギー検出器

粒子識別を、運動量/電荷/全エネルギーの3測定から行う場合は、粒子を検出器に止めて測定する全エネルギーの精度として0.1-0.2%(rms)という高分解能が必要になる。検出器の候補として、HP-Ge、NaI(Tl)、CsI(Tl)の3種類を試験した。

### (2.1.1) HP-Ge全エネルギー検出器

高分解能全エネルギー検出器の第一候補としてHP-Ge半導体検出器を準備した。使用した結晶は直径60mm、厚さ30mmのsemi-planar型と直径60mm、厚さ10mmのplanar型の2種類で、液体水素冷却系を持つ自作真空箱の中に入れて、夫々<sup>40</sup>Arからの80MeV/A <sup>38</sup>S、<sup>86</sup>Krからの230MeV/A <sup>80</sup>Asビームを用いて試験を行った。両方とも表面の汚れが原因と考えられる漏れ電流が大きく、又電荷積分型前置増幅器(PA)のfeedback capacitor C<sub>F</sub>を250-500pFと大きくする必要のある事から不安定動作の場合もあった。最良で $\sigma_p/E=0.35\%$ @3GeVのエネルギー分解能が得られたが、なぜこのように分解能が悪いのかよく理解できていない。

### (2.1.2) NaI(Tl)全エネルギー検出器

全エネルギー検出器の第2候補としてNaI(Tl) scintillation検出器を準備した。結晶は直径3"、厚さ3"と一辺3"立方体の2種で、直径3"の光電子増倍管でscintillation光を測定する。光量が多すぎる為、通常1.5KV程度の高電圧を0.3KV程度で使用する必要があり、動作が不安定になりがちな事が問題点としてあげられる。又anode出力を直接電荷積分型ADCで測定するよりは、計数率の問題はあるが電荷積分(emitter follower)型PAを使用した方が分解能が良い。最良の場合で約250MeV/A <sup>81</sup>Geに対して $\sigma_p/E=0.15\%$ @20GeVの分解能が得られた。これは質量数80程度で粒子識別を行うのに十分な分解能である。しかし、(1)結晶の個体差があり0.2-0.4%程度の分解能のばらつきがある、(2)PMTのベースを特殊にしないと線形性が保てない、(3)分解能に比べて大きな入射位置依存性がある、事などの問題点もあった。LEDなどを用いたベンチ試験も含めて、検出器大型化に向けて開発と試験を続ける予定である。

### (2.1.3) CsI(Tl)全エネルギー検出器

CsI(Tl)結晶のphotodiode(PD)読出は、光電子数がNaI(Tl)+PMTの約2倍である事、潮解性が小さ

な為ハウジング／反射材がコンパクトな事、modular結晶を組合せて大型化が可能な事、gainは電荷積分型PAの $C_F$ により調整可能な事、などの長所を持つ。結晶 ( $1.8^2 \times 4$ ,  $3^2 \times 4$ ,  $4^3$ ,  $5^3$  cm<sup>3</sup>)、大型PD(有効領域 $1^2$ ,  $1.8^2$ ,  $2.8^2$  cm<sup>2</sup>)、表面(鏡面とdiffuser)、反射材、ライトガイド、ハイブリッド型PA 3種類の色々な組合せについてエネルギー分解能を測定した。γ線を用いたベンチ試験では、小型結晶は鏡面と3M-ESR反射材、大型結晶はdiffuserと3M-ESR反射材の組合せが分解能が良く、大型結晶と大型PDの組合せでも充分<sup>60</sup>Coのピークが分離する。重イオンに対しては、エネルギー250-300 MeV/A、質量26-82の2次ビームを用いて試験を行った。エネルギー分解能は、質量数(26-82)、全エネルギー(8-20GeV)の広い領域でほぼ一定の $\sigma_E/E = 0.36-0.4\%$ であった。従って現時点ではNaI(Tl)の方がCsI(Tl)よりも分解能が良い。分解能を制限している原因は、結晶での発光の飽和、PDでの電荷収集、大きな $C_F$ 付のPAと色々考えられるが、まだ特定できていない。

## 2.2 速度検出器

粒子識別を、運動量／電荷／速度の3測定から行う場合は、速度測定精度として $\beta = 0.7$ に対して約 $\sigma_\beta/\beta = 0.1\%$ が必要になる。TOF法で行う場合、飛行距離10mに対して50 psec(rms)の時間分解能が必要になり、薄いstart検出器なども含めて考えるとかなり難しい。代用として別な方法を開発した。

### (2.2.1) 全反射型Cherenkov検出器

250-300 MeV/A領域で全反射型Cherenkov検出器を使用する場合、高屈折率のradiatorが必要になる。昨年度、屈折率2.1の透明セラミックを試験したが満足する結果が得られなかった。今年度はより光学的性質が良いTAFD30( $n=1.92$ )を用いて試験を行った。Degradarにより150から320 MeV/Aまでビームエネルギーを変化させCherenkov光を観測した。 $Z=18$ ,  $z=30-34$ の両方に対して270-290 MeV/Aの領域で全反射によるものと考えられる鋭い立ち上がり観測でき、実際に質量数80の領域で質量分離に成功した。これは粒子を検出器中に止めてしまう全エネルギー検出器とは異なり、通過型検出器として非常に有望である。

## 2.3 位置検出器

粒子識別に必要な運動量分解能は $\sigma_R/R = 1/1000-1/700$ である。この値を得るには偏向角を増やす以外に、多重散乱の少ない低物質質量で、かつ高位置分解能を持つ位置検出器が必要である。数種類の位置検出器の開発と試験を行った。

### (2-3-1) 6角セル型drift chamber

6角セル型drift chamberは電場が回転対称性を持つことから大型焦点面検出器の第一候補である。物質質量を減らす為にHe+50% $C_2H_6$ ガスを用いた場合

の重イオンに対する検出効率と位置分解能の高電圧依存性を測定した。6mmセルに対しては $Z=5$ から17に対して位置分解能 $\sigma = 120\mu\text{m}$ から $70\mu\text{m}$ が、10.5mmセルに対しては $z=32$ に対して $\sigma = 30\mu\text{m}$ という非常に良い位置分解能が得られた。

### (2-3-2) 低圧力カソード読出型drift chamber

Drift chamberはカソード読出を行う事で、 $L/L_c < 10^{-4}$ という低物質質量とさらに高位置分解能を得る事が可能である。真空中での動作可能性を合わせ持つ、低圧カソード読出型drift chamberを開発し試験を行った。検出器ガスとしてはavalancheからの紫外光feedbackを減らす為に $C_2H_6$ や $iC_4H_{10}$ を用い、圧力として20-250 torrの領域で動作特性を測定した。300MeV/A <sup>84</sup>Kr( $z=36$ )に対して $\sigma = 70-80\mu\text{m}$  @50torr,  $\sigma = 50\mu\text{m}$  @20torrという非常に高位置分解能を得る事ができた。

### (2-3-3) 低圧力6角セル型drift chamber

6角セル型drift chamberは重イオンに対して高位置分解能を持つ事がわかったが、検出器の物質質量の50%以上を占めるガスを減らす事と、位置検出器を磁気分析器の真空箱中で使用する為の低圧力動作の為に、6角セル型drift chamberの低圧力動作特性を測定した。

250MeV/A  $z=5-34$ の粒子に対し $iC_4H_{10}$ ガスを用いた場合、圧力50 torrでも充分長いplateauを持ち動作する。又位置分解能として $\sigma = 90\mu\text{m}$ という高い位置分解能が得られた。

これら3種類のdrift chamberについては、重イオンに対する基本的動作特性は一応理解したと考えている。しかし、最適なセル構造、ノイズ、ダイナミックレンジなどにまだ色々な問題が残っており、来年度も継続して開発研究とビーム試験を続ける予定である。

## 3. まとめ

エネルギー250-300 MeV/A、質量数20-100領域での粒子識別に必要な、高精度全エネルギー検出器、速度検出器、位置検出器の開発を行い、小型試験機に関しては、原理的には要求を満たす事を確認できた。来年度は欠けている部分を補うと共に、大型の実機製作に向けた開発研究とビーム試験を続ける予定である。

- a. 東北大学大学院理学研究科
- b. 理化学研究所
- c. 東京工業大学大学院理工学研究科
- d. 放射線医学総合研究所 加速器物理工学部