

杉本先生とアイソトープセパレータの思い出

高エネルギー加速器研究機構
素粒子原子核研究所
J-PARC センター素粒子原子核ディビジョン
田中万博

多分修士の学生だったころ、中井先生の阪大での集中講義で、ヘックマン・グライナーのプロジェクトタイル・フラグメント・セパレータの話がでた。 ^{9}C なんて奇妙な原子核がいとも簡単に生成されてくるというデータを見せてもらい、これはうまく使えば杉本研で進めていたミラ一原子核のベータ崩壊の研究の幅を大きく広げられる可能性があると考えた。しかし周辺の人たちに話をしてみても「高エネルギー重イオン反応では、フラグメントは入射粒子と同じ速度で生成される。よって磁場分析器では Z/A が同じものは分離できない。つまりヘックマン・グライナーのプロジェクトタイル・フラグメント・セパレータでは、純粋なアイソトープ分離ができない。よって役に立たない」というつまらない返事が返ってきただけだった。さらには「高エネルギー重イオンで面白いのは中心衝突で生成する高密度核だよ。フラグメンテーションみたいな周辺衝突には何の面白いことも無い」という、今から考えれば笑止千万な理由が付け加えられていた。私は、いろいろな ISOL 関係の論文を読み、安定線から遠い原子核の生成がいかに困難であるのかを多少は理解していたので、なんとか Z, A の独立した分離が出来ないものかと考えて続けた。とはいへすぐには答えは出なかつたので、いつかは解くべき課題として頭の中にしまいこみ、折に触れて思い起こしては、ああでもない、こうでもない、と悩んでいた。

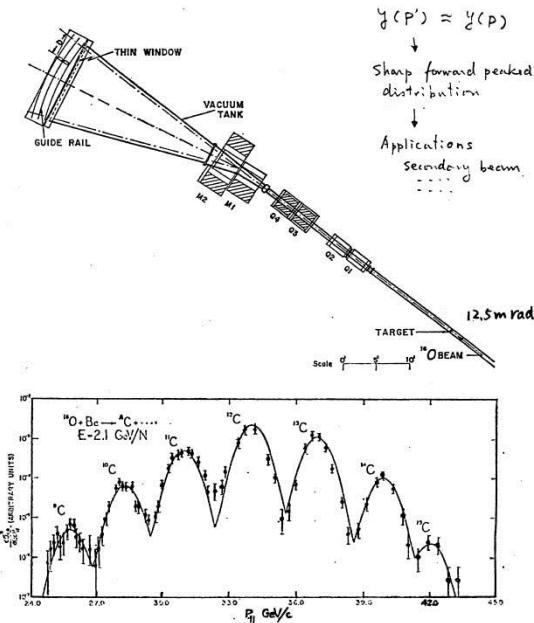


図1, ヘックマンスペクトロメータと酸素ビームのプロジェクトタイルフラグメンテーションで生成される炭素核のスペクトル。 ^{9}C などが簡単に生成している！

修士論文、そして博士論文の課題であった低エネルギー（5~15MeV/u）での重イオン核反応 ($^{14}\text{N}, ^{12}\text{B}$) で生成する ^{12}B の核偏極の測定では、生成する ^{12}B はかなり広いエネルギースペクトルを示す。そのなかから幅 10MeV 程度の範囲の ^{12}B を選び出し、白金箔中に植え込み、 β -NMR 法でその偏極を測定する。このエネルギー選択に用いた方法が飛程（レンジ）-エネルギー法である。白金箔と生成標的の間にアルミニウムの薄い箔を置き、その厚みを調整することにより、白金箔中に停止する ^{12}B の核反応生成時のエネルギー範囲を調整するのである[1]。この方法を確実に実施するためには、 ^{12}B の白金やアルミニウム、さらには生成標的物質中のエネルギーと飛程の関係を定量的に知らねばならない。今のようにコンピュータも Web も発達していなかったので、Nuclear Data Table のなかでまとめられている各種物質中の飛程の表をグラフ用紙の上にプロットしたり、あるいは電卓で簡単に補完したり、二次関数で Fit したりして、任意のエネルギーの ^{12}B を白金箔中に止めうるアルミ箔の厚みを決めていた。そういう中で飛程や dE/dx をうまく使うと、核をその Z^2/A の関数として選べそうなことが判ってきた。つまりヘックマン・グライナーのプロジェクタイル・フラグメント・セパレータの焦点面付近で飛程分析すれば、核種を Z/A の関数のみならず、 Z^2/A の関数として分離できる可能性がある。つまりますプロジェクタイルセパレータで同じ Z/A の核種を分離し（第一段分離）、その後に飛程法による第二段分離を行えば、任意の A, Z について核種分離が可能になる。あとは飛程のストラグリングによる広がりとか、実際のビームの大きさや角度分布（エミッタス）、さらにはフラグメンテーション過程における核子のフェルミ運動から来る横運動量の広がりなどを考慮して、実際に分離可能かどうかをチェックする、というか分離可能になる光学系を設計するのである。

実際にそういう設計を進めているうちに（そうは言っても博士論文のための実験などをやる片手間だったので、なかなか進まなかったが……）、1980 年に NIM に Stevenson 他の論文が出た[2]。これは上記のヘックマン・グライナーのプロジェクタイル・フラグメント・セパレータの焦点面付近にレキサンというエッチング可能な飛跡測定器を置き、実際にいくつかの不安定核種を飛程で見事に分離しうることを示したものである。これを見て、「あっ、先を越されたなあ……」と思ったが、論文の中で検討している核種分離に関するパラメータが、私がすでに検討していたものとほぼ同じであり、かつその検討レベルも「まああんまり大した事無いなあ」と思われる程度だったので、逆に自分が進めていることに関して自信が持てるようになった。

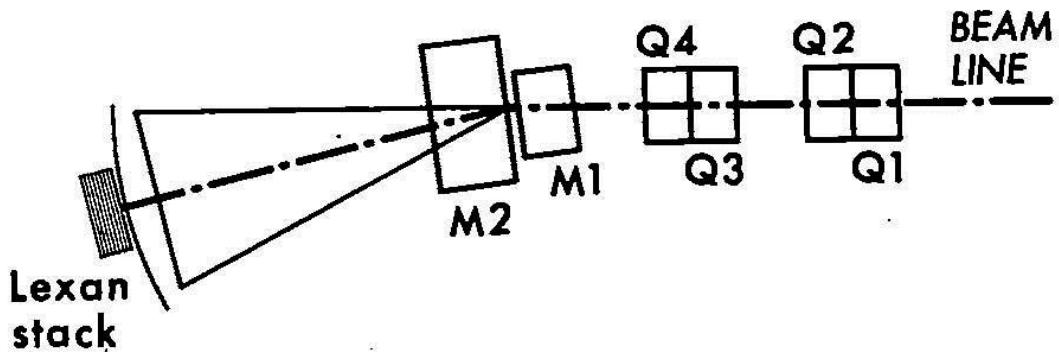


図 2, Stevenson 他がヘックマンスペクトロメータと飛程分析を組み合わせて行った核種分離実験の模式図

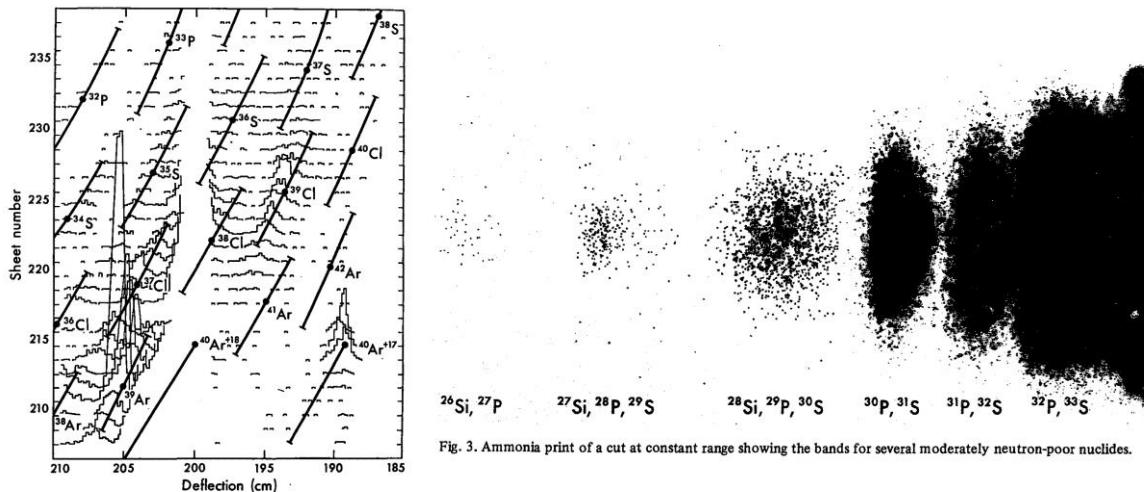


図3, Stevenson 達が示した飛程と磁場分離による核種分離予測と、実測されたデータ（左）、並びに同一飛程における核種分離の実際（右）。磁場分析と飛程分析により核種分離が可能である事を明確に示したが、A, Z のより明確な分離のためには、分離器の焦点面付近における像サインズをさらに絞り込む必要があることが判る。

結局このアイデアを基にいろいろと考えて、ともかくまず磁場による分析で Z/A を決めてしまい、それに飛程あるいは dE/dx の分析を組み合わせれば、(飛程あるいは dE/dx で Z^2/A を分析して) A, Z のほとんど自在な分離ができることが判ってきた。最も簡単な手法は、最終収束点付近での飛程分析による核種分離であるが、別の手法として、二つの双極磁石をアンバランスに励磁しておき、その間に、そのアンバランスの差に対応するエネルギー吸収体を設置する、という方法を考え付いた。こういう形は当時 RCNP で設計が進んでいた DUMA の形状に影響を受けたものである。DUMA の二つの対称なダイポールの間に吸収体をおき、両者をアンバランスに励磁したときの、最終収束点付近での A, Z の分離を数値的に当たってみたりした。残念ながら DUMA のサイズでは中心運動量が小さすぎ、きれいなプロジェクトイルフラグメントーションは起こらない。十分な核種分離を行うためには、もう一桁くらいエネルギーをあげて、スペクトロメータもその分スケールアップしなくてはならない。そういうことはすぐに判ってしまったが・・・・。こうして思いついた一連のアイデアは、つい嬉しくなつていろいろな人に話して歩いた。特に関西地区の原子核三者（素、核、高エネ）若手の勉強会で話した時には、核理論の連中から、「ニューマトロンの物理で、初めて今の研究につながる話を聞いた」という声が出たりして、とても嬉しかった。

1982年の5月に、核研でニューマトロンの測定器に関する研究会があり、そこで上記の検討をふまえて、「偏極した β 放出核をプロジェクタイル・フラグメンテーションで生成分離する方法（スペクトロメータ）」を発表した[3]。これは上記のレンジ分離併用型フラグメントセパレータの最終収束位置に、核種生成時の放出角度の関数としてのみの分散が生じるように工夫を凝らしたものである。実験として β NMRの実施を目標としていたので、生成角度の関数としても生成核を分離して、その核偏極を（あれば）利用しようとしたものである。その結果、かなり凝った光学系となってしまった。研究会では、単にA, Z分離するだけならもっと簡単な方法で可能である、それにはアンバランスーダイポールとエネルギー吸収体の組み合わせ、という方法もある、といった事も付け加えて話した。

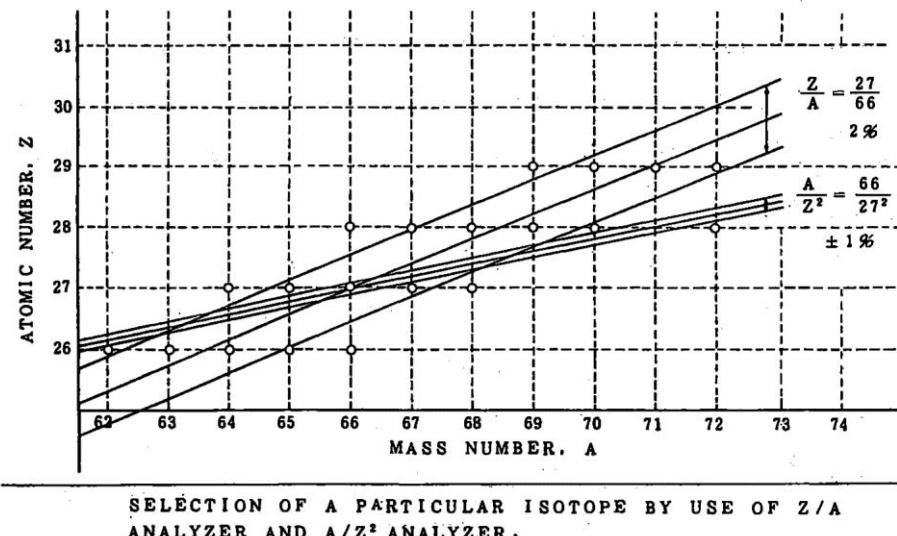
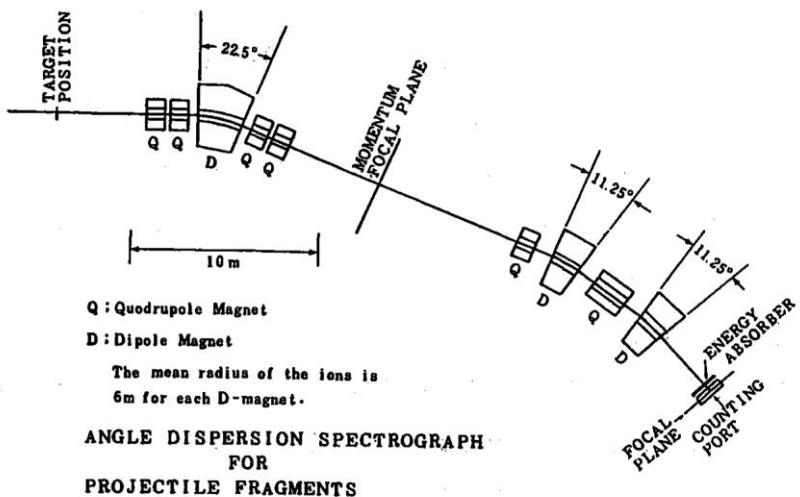


図4、生成核をA,Zのみならず、生成角度でも分離することを目指して設計したスペクトロメータ。 β NMRの実施のために、最終収束面で飛程分離する形にした。

このときすでに博士課程の最終年度になっていて、D論のとりまとめで忙しかったし、かつ当時始まつばかりの筑波大のタンデムを使った別の実験に参加するため、しばしば筑波にかけたり・・・で、本当になかなか時間が取れなくなっていた。しかしこの研究会での発表を目に留められたのか、杉本先生から「万博のセパレータをベバトロンのビームラインを利用して実現出来ないか検討せよ」というご命令が来た。ベバトロンからのビームを、ビームライン中に生成標的、エネルギー吸収体などを設置して、最終的に純粋な不安定核のビームに転換し、

当時建設が進んでいた HISS スペクトロメータに入射する。そこで炭素などの標的との散乱を用いて、不安定核の半径を系統的に測ろうという実験計画であった。そうは言ってもベバトロンのビームラインの情報が手元にあるわけでもなく、適当にポンチ絵を描いて、筑波大からの帰りに核研に杉本先生を訪ねた。するとそこには永宮さんもいて、「こんないい加減な計画でどうする！」とめちゃくちゃ叱られたが、「ダイポール二つとエネルギー吸収体の組み合わせで Z,A の分離ができる、フェルミ運動による広がりや多重散乱、飛程の揺動を勘案しても十分に実用的である」ということは納得していただけたと思う。その前後から杉本先生はあちこちで「 dE/dx は Z^2/A の関数なんや」「磁場で Z/A を分離したら、あとは Z^2/A で連立方程式になる」などとおっしゃってくださって、万博のアイデアもまんざら捨てたものではないのだ、と確認できた気がして嬉しかった。まあ ^8He や ^{11}Li なんて核はその Z/A 比が他に例が無いほど小さいので磁場による分離だけで十分ではあるのだが、不安定核の半径の実験のためには、一連の He や Li のアイソトープを同じような光学系で散乱標的まで持てこなくてはならず。こういう場合には dE/dx 分離が有効になる。

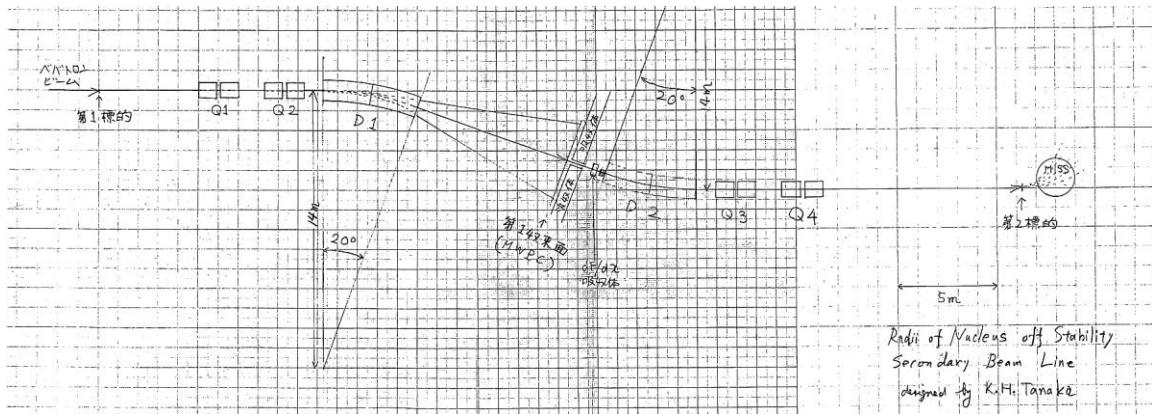


図5、ベバトロンでの不安定核の半径測定の実験のために設計した核種分離装置。これは二つのダイポールの間にエネルギー吸収体を入れる設計にした。最終的にビームとしての不安定核を HISS スペクトロメータ入り口の第二標的に入射する必要があったからである。

結局その後私は東大に職を得て KEK での実験に参加することになる。そこで高電圧セパレータやそれを用いたウイーンフィルターで K 中間子を濃縮分離する方法を学んだりもするのだが、ついに自分自身でレンジ法による不安定核分離を実践する機会は無かった。その間、杉本先生を中心に谷畑さんや小林さんをはじめ、たくさんの方々がベバトロンで ^{11}Li や ^8He の半径の研究を行い、ハロー・スキンという新しい原子核の形を見出すことになる。こういったすばらしい成果に、ちょっとぐらいは私の核種分離のアイデアも寄与しているはずである。さらにあるとき、旭さんや下田さんと話していて、理研のリングサイクロトロンの主要設備であるアイソトープセパレータ RIPS の設計が、私の思いついたアンバランスード・ダイポール方式で進んでいる事を知って驚いた。さらには、RCNP で建設されていた新リングサイクロトロンの不安定核コースの設計もアンバランスード・ダイポール方式だった。もちろんエネルギー吸収体を楔形にするなど、アイデアの精密化は進んでいた。ベバトロンに比べてエネルギーの低いリングサイクロトロンでは、こういうパラメータのファインチューニングは必須である。逆にベバトロンのエネルギーでは簡単な平板の吸収体で十分である。

先日、理研の BigRIPS 関係のレビューがあって、いろいろと最新の話を聞かせていただいた

が、随分と研究の幅が広がっていて感心した。さらに古い RIPS を使って、偏極 β エミッターを使った (μ SR のような) 表面物性の研究などが始まろうとしていた。自分が大学院生のころに思いついたことが、知らぬ間にあちこちで形になっている。原子核業界の 3 割くらいの人々の飯の種になっている感じがする。とはいっても、思いついたのが 30 年前なのだから、その後の進歩のペースを考えると、進歩そのものは遅々としたものである。自分で推進してこなかつた事にそう偉そうな事も言えないが、まあもうちょっとがんばっていても良かったのではないかなどと思ってしまう。さらに言えば原理的な部分では、殆ど何の進歩も無い。こういう基本的なアイデア自体は、私が杉本研に所属させていただいた事によって思い付けた事である。世界中でそのアイデアの真似を続けていろいろな装置を作っているが、そろそろ新しいアイデアが出てきても良さそうな時期である。やっぱり今、世界で不足しているのは杉本研の精神なのだと思う。

つけたし：理研リングサイクロトロンのエネルギー領域でのフラグメントの偏極について、

理研のリングサイクロトロン (RRC) が稼動を開始して、最初の美しいデータは、旭さんのグループによる、一連のホウ素アイソトープの核偏極の系統的な測定である。理論的にも堀内先生の QMD 計算が実用化されつつあった時期で、両者がうまく絡み合って中エネルギー領域での核反応機構の理解が大きく進んだ。残念ながら収量最大の点で偏極はゼロになる。偏極 β エミッターを使った応用研究には、このことが多少の障害になると思われた。この事に関して、まだ核研があったころに、その食堂で杉本先生他と語り合ったことがある。

万博 「あのデーターって、QMD で解析しますけど、基本的にはプリンクモデル以外の何者でもないですよね？」

先生 「全くそうだ。」

万博 「結局は標的と入射粒子の軌道のどの部分がマッチするかを相対速度の関数 (=Q 値) として測定しているわけですね。」

(多分) 小林さん 「では収量最大の所では、一番たくさんの軌道がマッチして、核子クラスターが移行するということですか？」

先生 「だから偏極がゼロなんだよ。」

またあるとき SF サイクロトロンの測定室に、先生がこられて、質問されたことがある。

先生 「万博君、ウラニウムをフルストリップにするには、どれくらいのエネルギーでフォイルやガスを通せば良いか判るか？」

万博 「はい。 $13.6 \times 92 \times 92$ に $931/0.511$ 倍のエネルギーですね。核子あたりのエネルギーで、単位は eV です。」

先生 「なんやそれは？」

万博 「ウランの 1s 電子と同じ速度までウランを加速すればいいということです。電子がフォイルの方の原子に乗り移りやすくなるエネルギーですね。」

先生 「具体的には何ぼなんや？」

万博 「そうですね、 $10 \times 100 \times 100 \times 1000 \times 2$ として、 200000000 eV は 200MeV 、核子あたり 200 ミリオンくらいです。まあその半分くらいから起こり始めると思いますが。」

先生 「まあ正解やな。ところで 13.6 ゆうのは何や？」

万博 「はあ、水素様原子の一番下(1s)の電子のバインディングエネルギーです。 $13.6z^2$ eV にな

ります。」

先生「何でそんな数字を知つるんや？」

万博「大学2年生の時に、先生の原子物理学の授業で習つて、その時に先生が『これくらいは常識やと思って覚えておけ』とおっしゃいましたが・・・？」

先生「そういう事も言ったかなあ？もう忘れてしまったよ。ハハハ。」

実はこれは13.6を覚えていたというよりは、電子のストリップという現象は、原子間の相対速度が電子の速度に等しくなったあたりから始まる、という絵で描いたような先生の説明を覚えていたのである。これは先のブリンクモデルの電子版である。杉本先生の原子物理学の授業は何故かとてもよく覚えている。そう思つて昔の講義ノートを見つけて読み返してみたら、もっとすごい事をいっぱい習つていてびっくりした。結局は学生の質がこの程度だったので、先生のすばらしい講義もあんまり身に付いていないのだが、わずかに身に付いた部分はしっかりと根付いているようである。私が未だに感謝もうしあげていることのひとつである。

References

- 1, K.H. Tanaka, Y. Nojiri, T. Minamisono, K. Asahi, and N. Takahashi, Polarization of ^{12}B Produced in ^{14}N -induced Reactions, Physical Review 34C (1986) p580-p593
- 2, J.D. Stevenson et al., IMAGING AND IDENTIFICATION OF RELATIVISTIC PROJECTILE FRAGMENTS WITH LEXAN SPECTROMERTORY, Nuclear Instruments and Methods, 171 (1980) p93-p99.
- 3, 田中万博、偏極現象と核種分離器、INS-NUMA-44, Published by Institute of Nuclear Study, University of Tokyo, Nov., 1982, p180-p183.