

話 題 (小型加速器)

1 大学の 1 研究室における加速器開発研究雑感
〈PET 用 RI 製造 IH 型線形加速器の巻—1993~1996—〉

服部 俊幸*

Essay of Accelerator R&D in one Laboratory of an University
〈Schubert IH type Linac for RI Production of PET—1993-1996—〉

Toshiyuki HATTORI*

1. はじめに

PET 用放射性同位元素 (RI) 製造のための IH 型線形加速器の開発は、筆者の研究室で初めての国際共同研究であった。加速空洞をルーマニアで非常に安価に製作し、研究室にある装置やもらった部品を組み合わせ、無いものは新しく作って、新型加速器の開発研究をおこなうことができた。これはドイツのミュンヘン工科大学の大学院生であった、H. Schubert (シューベルト) 君の博士論文になった。このシリーズにおいて、ドイツやルーマニアとの研究は初めての内容なので、そのあたりをここでお話ししよう。

2. 前 史

2.1 PET 用複合構造型単空洞線形加速器の話

誰からの紹介だったか忘れてしまったが、ミュンヘン工科大学正教授の森永さんが、1992 年の神奈川科学技術アカデミーの公募研究で、IH 型線形加速器を用いた PET 装置を作る人を探していると聞いた。森永さんの友人で日本真空技術 (アルバック) の林さんから、公募研究費は 2~3 億円になるだろうとの情報があり、ちょうど同じ頃に理化学研究所から電気興業に移って、1 MeV の 1 ギャップ電子加速器を完成させていた藤澤さんにも加わってもらい、同社のシールドルームで建設することを考えた。

筆者が申請書を書くにあたり、新構造の IH 型線形加速器を考えた。それは 1 台の IH 型加速空洞のなかに RFQ 電極とドリフトチューブ電極を組み込む、複合型空洞である。これを PET 用として開発するプ

ンで申請した。この斬新な構造は、上手くできればよいが、加速電圧分布の予想が非常に難しい。コンピュータ技術が進み、よい解析ソフトウェアも揃っている現在ならば、電磁場シミュレーションも十分可能だが、その当時はコールドモデルを大量に作ろうと思っていた。

しかし、ちょうどバブル経済がはじけた頃で、アカデミーの公募予算に出資企業が集まらず、採用数が大幅に減ったのと一致したためか？ 残念ながら採用されなかった。ちなみに、筆者の研究室では数年前から IH 型加速空洞の 3 次元電磁場シミュレーションをおこなっている。そして現在、これとまさに同じ複合加速構造型空洞を利用した、BNCT 用小型線形加速器の研究を学生とおこなっている。

2.2 トリトン加速器のこと

ミュンヘン工科大の小型サイクロトロンを使って、森永さんはトリチウムビームの加速を一時期おこなっていたことがあり、次は専用の線形加速器ということで、日本アイソトープ協会から予算を受けて開発を進めていた。これはトリチウムを 7 MeV に加速し、 ^{40}Ar ターゲットの $^{40}\text{Ar}(t, p)^{42}\text{Ar}$ 反応で ^{42}Ar を作り、 ^{42}Ar の娘核 ^{42}K が生物や医学利用に適当な 1.5 MeV の γ 線を放出するので、 ^{42}K を使った RI トレーサーを作るというものであった。現在は簡単に製造できないので、 ^{42}K は使われないアイソトープである。そして、入射用に磯矢型ディスクトロンをアルバックから購入、初段の IH 型線形加速器を製作し、第 2 線形加速器の高周波源を電気興業に製作させていた。第 2 線形加速器の製作には、ドイツのバイエルン政府から

* 東京工業大学原子炉工学研究所 Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology
この記事は、Vol. 2 No. 4 に掲載された記事の連載記事です。
(E-mail: thattori@nr.titech.ac.jp)

の予算を予定していたが、グリーンピースなど反原子力勢力が強くなり、予算どころかドイツでの設置そのものが危うい雰囲気であった。

そこで当時は放射線規制がなく、70万kWのカナダ製 CANDU 炉を建設中のため、トリチウムのハンドリング技術の習得を必要としていた。ルーマニアの Institute of Fusica Atomica (原子物理研究所 (IFA)) で第2線形加速器を製作することを考え、実際にミュンヘン工科大で製作を進めていたトリトン加速器が移設された。森永さんがドイツで面倒をみたパスコビッチさんが当時の IFA 研究機構のディレクター (Institute of Fusica and Nuclear Engineering (物理核工学研究所 (IFIN)) の所長も兼務) をしており、このプロジェクトが進んだようである。

3. 原子物理研究所 (IFA)

3.1 IFA 研究所について

森永さんよりルーマニアを見に来ないかと誘われ、1993年の5月頃に IFA を訪ねた。ルーマニアの首都ブカレストはヨーロッパのなかでも非常に大きな都市である。直径20kmが市街地で、直径30kmの列車の環状線 (しかし列車はほとんど来ない) があり、その環状線から郊外に約5km離れた田園地帯の研究学園都市マグレラに IFA はある。その当時は、市街から IFA までの10kmは研究所所有のバスが結んでいた。

IFA のセンターオフィスは生協とホテルのある広場の角柱の様な10階建てで、屋上には原子モデル像が付いていた (図1)。IFA は IFIN を中心として、化学、コンピュータ、機械工学、オプトエレクトロニクス、電子加速器、レーザー・プラズマなどの研究所がジョイントし、ブカレスト大学の理論物理部もつ研究機構である。全体の職員は約4000人で、ソ連の Dubna の JINR と同じような研究所であった。しかし、Dubna は研究所を中心に行行政や金融の機能をもった町であるのに対し、ここはブカレスト大学の理論物理部と学生寮を併設しているものの、多くの職員は市内からバスや車で通勤しているため、町としての機能は少なかった。

それでも、我々のゲストハウスの近くには生協の販売所やホテル、マガジンという雑貨屋、また1~2軒のイタリアでいうパルがあり、朝はバス停留所近くで朝市も開かれていた。また、その頃のルーマニアでは、日本でいうところの文部省と科学技術庁が1つの組織になっており、研究所が大学を併設することは問題ないようであった。



図1 IFA センター・オフィスの建物



図2 IFIN の U160 サイクロトロン (左がオズワルド氏, 中央がドゥドゥ氏, 右が筆者)

3.2 IFIN 研究所の加速器とルーマニア

IFIN は約2000人の職員を擁する、IFA のなかの最大の研究所であった。ソ連製の U160 サイクロトロン (図2) と米国 HVEC 製の 6.5 MV タンデム・バンデグラーフ静電加速器をもち、また 10 MW の研究用原子炉と同位体分離装置もあり、核物理・核工学の研究をおこなっていた。そしてよく聞くと、東大と京大が国産の 5 MV タンデム加速器を導入した頃に、6.5 MV タンデム加速器をもっていたというので、ソ連の Dubna の JINR のように、世界向けのショーウィンドー的役割をもつ研究所と思えた。

さらに驚いたことは、チャウシェスク元大統領の息子が、研究者としてこの研究所にいたことである。彼のグループは、Max Planck Institute (ドイツ) のタンデム用ブースターをコピーしたヘリカル型線形加速

器(図3)を、前述のタンデム加速器用のブースターとして6台製作していた。そして、バンチャー空洞を含めて22台となる、米国ハリス社製の20kWの高周波源が地下室を埋めていた。真空ポンプは大部分がクライオポンプであった。

ヘリカル型線形加速器から取り出された粒子は、ぐるっとレーストラック状に周回して、タンデム加速器の実験室に戻って実験するラインとなっていた(図4)。このヘリカル型ブースター加速器は、チャウシェスク元大統領の息子を含む何人かの研究者や技術者がMax Planck Instituteで技術を習得して帰国し、デッドコピーしたようである。後日、線形加速器の国際会議のプロシーディング集で、彼が第1著者となっている論文を見つけた。

ルーマニア人とその言語は東欧圏で唯一のラテン系である。ルーマニアはROMANIAと書き、すなわちローマを意味している。ローマはローマ時代に黒海沿岸に多くの植民地を作ったが、ルーマニアにも多くの

コロニーがあったようである。ルーマニア(とくにブカレストのあるワラキア地方)は第一次世界大戦の戦勝国として、敗戦国のハンガリーのトランシルバニア地方を併合し、1918年に初めて独立した。2000年間、多くの民族に支配されていた時にも心の支えとなっていたように、我々はローマの末裔としてROMANIAと名付けたのも頷ける。

少し前置きが長くなったが、そういう歴史的背景もあってか、ルーマニア人はローマに愛着があるようで、このヘリカル型加速空洞もイタリアのメーカーに発注したとのことである。しかし、その一部に真鍮を銀ロウ付けした部分があったらしい。高周波電力を初めて投入したとき、真鍮表面に高周波電流が流れて亜鉛が蒸発し、高周波カプラーの絶縁材に蒸着してショートが起こって壊れ、バンチャーを含めて全ての空洞が次々にダメになったと聞いた。友人のオズワルドさんの言を借りると、「ボンッでオールフィニッシュ」ということであった。

3.3 そしてトリトン加速器

ドイツから移送されたトリトン加速器は、サイクロトロン棟の本体室隣の装置実験室に置かれ、そのなかに第2線形加速器の実物大コールドモデルもあった(図5)。これは森永さんの最後の学生であるシューベルト君が製作しており、IFAの予算で実機を製作して7MeVのトリトンを加速することになっていた。

今はなくなってしまったが、当時の文部省の科学研究費補助金(科研費)のなかには、国際共同研究費というものがあった。筆者は、これに日本、ルーマニア、ドイツの三国共同研究を申請して採択された。当時の通常の科研費では外国旅費が使えず非常に苦労したが、この予算だけは利用可能であった(その代わり、物品費はなく旅費だけだった気がする)。

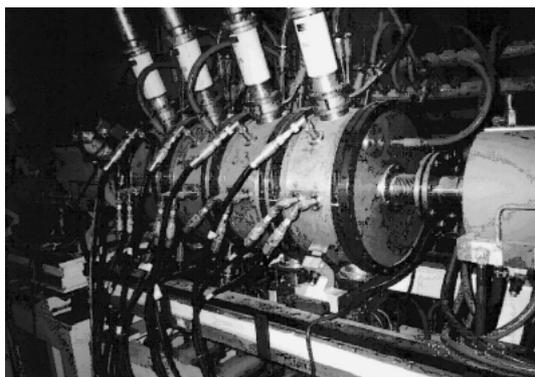


図3 ヘリカル型線形加速器(上方に見えるのは同軸管)

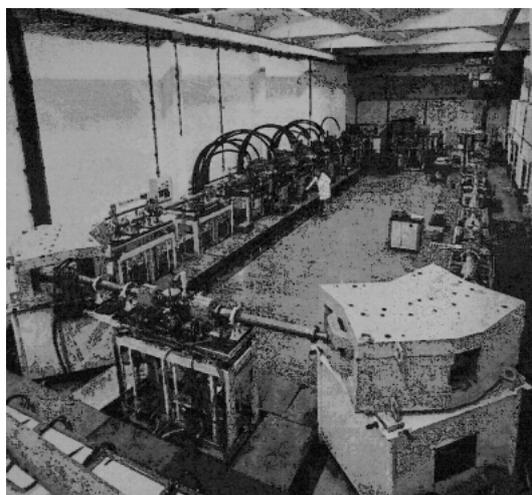


図4 ヘリカル型線形加速器とレーストラック型のビーム輸送系

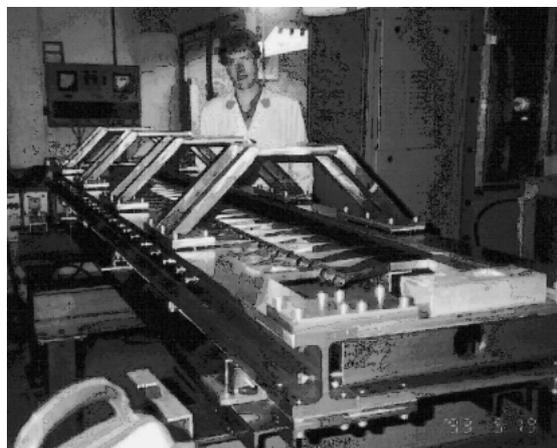


図5 実物大コールドモデルとシューベルト君

翌年に再度 IFA を訪問したとき、第2線形加速器のクールドモデルテストはシューベルト君により終わっていたものの、IFA に予算がなかったため実機製作は全然進んでいなかった。それだけでなく職員の給料も未払いの状態、プロジェクトどころではないのが実状であった。しかし、シューベルト君の博士論文をどうにかしなければならぬ。ルーマニアでのモノ作りはコストが非常に安く、そこそこに技術力もある。そこで、以前に申請した複合型構造とは異なるものの、PET 用線形加速器（シューベルト線形加速器）をルーマニアで製作することに決めた。

4. 加速器の特徴と加速器学的意味

PET 用 RI 製造 IH 型線形加速器を開発するにあたり、本体はルーマニアで製作するものの、それ以外の装置の設計・製作とビーム加速実験は東工大でおこなうことにした。薬剤生成に必要とされる $^{14}\text{N}(d, n)^{15}\text{O}$ 反応を考慮して、本来は 3.2 MeV の重陽子加速をおこないたいが、ルーマニアに比べると放射線管理が厳格な日本での実験になることから、実際の加速粒子は陽子のみとした。また、当時の筆者の研究室の最も大きな高圧電源が 100 kV であったので、入射エネルギーは 100 keV/u、加速エネルギーは 1.6 MeV/u を選んだ。このように大きな入射ゲインに対して、IH 型加速空洞の加速電圧を一定化する必要があり、3種類の空洞直径を用いてインダクティブ調整をおこなう方法を考えた。これはソ連のボンダレンコ等が発案した、円錐形のアポロ宇宙船形空洞を3段階にデジタル化したもので、新しい試みであった。

内部構造はミュンヘン工科大スタイルの富士山形システムをリッジに挟む構造で、そこにドリフトチューブをネジ止めする方式とした。ドリフトチューブをスリムにして容量を減らし、高シャントインピーダンスを狙った。運転周波数は、前述のトリトン加速用の初段線形加速器による測定データと、シューベルト君が作った第2線形加速器の実物大クールドモデルの測定データを参考にしながら、筆者の研究室で用意可能な高周波源にあわせて 100 MHz とした。

加速空洞の詳細設計はシューベルト君が担当した。その基本パラメータを表1に示す。ドリフトチューブの配列は加速位相がほぼ0度であり、少し APF 位相が付いている。しかし、これはほとんど意味がないことが後に分かった。

このようにして、科研費の国際共同研究費で計画していた研究がスタートした。すなわち、日本、ドイツ、ルーマニアが共同で PET 用 RI 製造 IH 型線形加

表1 PET 用 RI 製造 IH 型線形加速器の主要パラメータ

Charge-to Mass Ratio	$\geq 1/2$
Energy Input (MeV/u)	0.1
Output	1.7
Cavity Inner Diameter (cm)	56, 64, 70
Length	189
Number of Drift Tube	28
Drift Tube Inner Radius (mm)	12-22
Operation Frequency (MHz)	103
Synchronous Phase	$\sim 0^\circ$
Shunt Impedance ($M\Omega/m$)	420
RF Power (kW)	12

速器を開発することになったのである。

5. 加速空洞の製作

5.1 ターボメカニカのこと

オズワルドさんの紹介で、首都ブカレストのターボメカニカというジェットエンジンメーカーの見学に行った。ルーマニアのチャウシェスク元大統領は、ソ連とは一線を画すため、空軍の戦闘機はソ連製のミグでなくフランス（ラテン系）のミラージュ、車はルノーというようにそれぞれ技術提携して国産化していた。訪問先はまさに、そのミラージュ戦闘機のジェットエンジンやヘリコプターのエンジンを作る専門メーカーであった。社員は4000人で、その半数が技術者という技術開発を主体にした会社であった。

とはいうものの、1989年の民主化革命後は軍からの注文がゼロとなり、細々とヘリコプターのエンジンの修理をおこなっている程度で、着いてみると工場の大部分は電灯が消えていた。しかし、ドイツ製の5軸 NC ミーリング工作機械や、イタリア製の3次元測定器、筆者が旧東大核研にいた時代に1000万円以上して買えなかった米国 HP 製のスペクトラムアナライザーなどを、技術部門のトップが誇らしく見せてくれた。

確かに高性能のジェットエンジン製作にはこれら高精度の装置が必要だ。だが、ソ連崩壊までには対共産圏貿易規制 (COCOM) があつたはずである。なぜ10数年前の世界のトップクラスの加工・測定装置があるのか？ 1987年に東芝機械のNC工作機械がノルウェー経由でソ連に輸出されていたことが明らかになって日本バッシングが起こり、親会社の東芝の社長の首まで飛んだのはなぜだったのか？ やはり単純なバッシングだったのか？ 世界政治の矛盾を見た思いだった。そして、今から数年前にヤンマーの無線小型ヘリコプターやミットヨの3次元測定器がマスコミを賑

わせたとき、またしても同じことを繰り返すマスコミの愚かしさを思わずにはいられなかった。

そういうわけで、シューベルト君の書いたポンチ絵の図面をもとに、エンジニアと営業の責任者などを含めて各種の検討をおこなった。後日送られてきた見積りは約1万ドル（この他に輸送費等で1万ドルかかった）であったので、このメーカーで製作させることにした。シューベルト君はドリフトチューブ部品を含んだ詳細設計をおこなって、ルーマニアに3ヶ月間滞在し、ターボメカニカとの製作に関する打ち合わせや技術監督を担当し、銅メッキや細かいことなどはオズワルドさんと協力して加速空洞を完成させた。

5.2 加速空洞の輸送とトラック横転

それから3.5ヶ月後ぐらいに、オーストリア航空（全日空が代理店）の運送部から電話があり、加速空洞が成田空港に到着したことを告げられたものの、その当時は加速器の輸入方法など全然知らなかった。全日空の担当者に電話で教えてもらい、輸入代理店を大和カーゴとし、運送も頼むことにした。しかし実際に輸送をおこなったのは、下請けの運送会社で、搬入口が狭いので小型車で来てくれと連絡しておいたのに、大型車で運んで来た。さらに悪いことがふたつあり、ひとつは搬入日の2週間ぐらい前まで実験室に行く途中の広場が残土の山で、すでに整地されていたが、地面のなかはグスグスであったこと、もうひとつは搬入日が大雨であったことである。

そして予想通り、アスファルト道路から広場に入った大型トラックは、加速空洞を積んだままスカルミにはまり込み、横倒しになるぐらいに埋まってしまった。こうなっては全く打つ手がなかったが、午後6時過ぎになって仲間の大型トラックが数台集まり、2台のトラックで埋まっていたトラックをズルズルと引っ張り出した。坂道をのろのろ走るトラックに対し、空荷のトラックの力の強さにも感心した。お礼にビール券5枚を運転手たちに渡した。きちんと下請けに連絡されていたかどうかは知らないが、大手はピンハネするだけで、その分の役目を果たしていない。すでにその日は夜8時近くになっていたもので、実験室への搬入は翌日に持ち越した。2日目は小型トラックに積み替えてあったので、無事に東工大の実験室に入れることができた。そして事前に筆者が準備しておいた架台の上に鎮座させることができた（図6）。

このとき、輸入手数料や税金、成田からの運送料などを、例の国際共同研究費から支払うために経理と一悶着あった記憶がある。あまり覚えていないので、それほど問題はなかったのかもしれない。そして同じ予

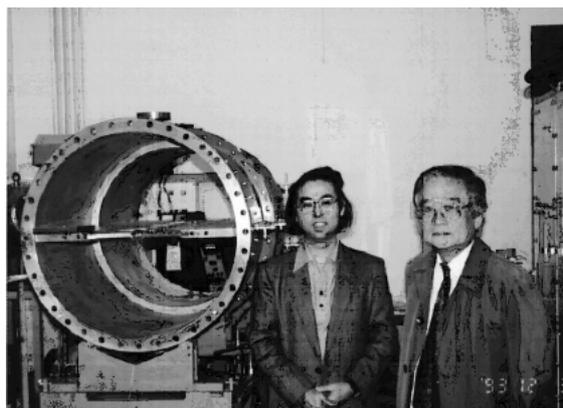


図6 加速空洞が無事に搬入された

算を使ってシューベルト君を日本に招聘して、加速実験に向けて作業を開始することにした。

6. 加速テスト装置と加速試験

6.1 イオン源と入射系

高圧ステーションは、東工大に昔あった400 kV コッククロフト静電加速器で使われていた200 kV 耐圧碍子の上に、東工大 RFQ 線形加速器で10数 μA のビーム生成実績をもつ、永久磁石型シングルミラーの ECR イオン源を搭載した。その冷却はアース側からフロンをギャーポンプで循環させておこない、マイクロ波源は旧東大核研から譲り受けた、CW タイプの IDX 製 (2.45 GHz/600 W) であった。

イオン源から15 kV で引き出された陽子ビームは、高圧ステーションから85 kV でアース側に向けて加速される。加速管に60 kV 以上を印加すると小さな放電があり、同時に大量の X 線が発生する。そこで、周囲にアングルを組んで鉛板を取り付けて、少しずつエージングをしながら電圧を上げていった。

すると、途中で ECR イオン源のマイクロ波源のチョークトランスが絶縁不良になる故障が2回起こった。原因としては、加速管が放電すると影響でチョークトランスに高電圧が直接かかって小さな絶縁不良が起こり、何度も放電するとしだいに絶縁不良部分が多くなって、最終的にチョークトランスが完全に絶縁不良になるようであった。そこで、2.45 GHz のダブルミラー型 ECR イオン源で使用していた、電子レンジの部品を使ったマイクロ波源に切り替えた。

電子レンジのなかには1.5 kW のマグネトロンがあり、他には高電圧ダイオード、ヒーター用絶縁トランスとコンデンサーだけでできており、非常にシンプルである。ただし、ダイオード1個で半波整流のため、デューティは1/2~1/3 である。イオン源用とし

でのマイクロ波の制御は、入力 AC100V をスライダクトランスで 70~80 V に降圧しておこなった。その結果、陽子ビームはパルス化しているが、放電でチョークトランスが壊れることもなくなり、無事に加速テストができるようになった。

この他、入射系のターボ分子ポンプのポンプヘッド、加速空洞入射用 50 kV アインツェルレンズ、ステアリング磁石、ビームモニターなどについては、無いものは設計・製作し、あるものはそれを使った。

6.2 セントエルモの灯

100 kV の加速管は、既存のアルミナ絶縁管を 3 個繋いで自作することにし、実際に使う前に大気中で耐圧テストをおこなった。1 個あたりの定格耐圧が 20~30 kV のアルミナ絶縁管は、50~60 kV を印加すると高圧側のフランジ端の一部（場所は一定しない）が“ポツ”と灯る。そして、しだいに輝点が大きくなるとともに、優雅な曲線を描きながら増殖してアース側のフランジに達すると“バンッ”と音がして放電がストップする。これは空気プラズマなので、灯る色も赤っぽいピンク色である。高圧側のフランジにネジなどで少し突起を作ると、必ずそこが最初の灯る所となり、アースフランジに向かってリボン状のプラズマが増殖していく。1 秒以下であるが、人間の目で分かるぐらいの速度で優雅な曲線を描いてみせる。ちなみに、怖いので高圧電源の電流は絞ってある。

中学生の頃によく読んだ「世界の七不思議」や「海の不思議」などの本にあった、セントエルモの灯がこの現象だと気が付いた。確か、真っ暗な夜の海で走っている帆船のマストの先端が光る現象として書いてあった。その船で死んだ人がある時とか、船員全員が死んでも自走している幽霊船に起こる現象などと読んだ気がする。「不思議」なので、その原因は書かれていなかったと思う。

電流リミットを変えたり、電圧を急激に変えたり、ギリギリの電圧にしたりして、この優雅なピンクのプラズマの舞を楽しんだ。見た人でなければこの楽しさは分からない。セントエルモの灯を考えると、当時の帆船のマストは木でできていたので、絶縁管と同様に絶縁物であり、暗い夜に、真っ黒な雷雲が帆船に近づいて、マストの先端にセントエルモの灯を点す。雷雲の持つ電圧が高ければ、その次に直接海へ放電を開始する。低ければ、放電開始の優雅なプラスマリボンの舞もなく、セントエルモの灯を雷雲が通りすぎるまで灯していたのだろう。

この絶縁管を 3 個繋いで 100 kV まで印加したところ、優雅な放電も起こらず耐電圧テストは終了した。

6.3 加速器の組み立て

シューベルト線形加速器は、実用型材料照射用 IH 型線形加速器システム（加速器 Vol. 2, No. 2, 2005 参照）の実験室に置くこととした。空輸された加速空洞はシューベルト君がほとんど組み立てて、低電力測定をおこなった。加速空洞は 3 種類の直径ごとに 3 分割され、フランジで結合される構造になっている。また、両端の分割空洞にはハットフランジもある。したがって、胴体とフランジの溶接部分が数多くある。これが災いして、不完全溶接が原因で検出に数分から 10 分程度かかる真空漏れが見つかり、約 1 ヶ月を費やして、アラルダイトを盛ることでどうにか止めることができた。冷却水路は空洞外側からリッジ内部に穴があけられているだけだったが、シューベルト君の工夫で、上手く循環的に配管することができた。森永さんの最後の弟子というだけあって、実験屋として大した人物であった。

高周波電源については、筆者と助手の小栗さんで実用型材料照射用 IH 型線形加速器システムの第 2 線形加速器用に使っていた 96 MHz のものを 100 MHz に調整した。しかし、これは NHK 福岡のテレビ送信機が前身であり、もともと 100 MHz で出力 10 kW であったものを 96 MHz に調整して使っていたので、最終段 8F 真空管の共振器のショート板のインダクタンスと、出力側の真空コンデンサーを再調整するだけでよく、原理実証用 IHQ 型線形加速器（加速器 Vol. 1, No. 3, 2004 参照）のときほど大変ではなかった。

しかし実際には、加速空洞の共振周波数が 100 MHz の予定に対して、実機は 103.5 MHz と約 3% の差がでてしまった。すでに高周波源は調整済みであったが、僅かの調整で 10 kW は無理でも 8 kW 程度は可能となった。筆者のそれまでの経験から、4~5 kW の電力で十分加速できると推測されたので、これで可とした。

完成したシューベルト線形加速器を図 7 に示す。シューベルト君の 3 ヶ月間の頑張りによって、ほぼ全ての装置は動作するに至ったが、100 kV の加速管が不安定なため、加速ビームは検出できなかった。

6.4 加速器実験での面白いこと

加速器屋だと、加速器での実験中に色々楽しい現象に出くわすが、ここではサイクロトロンのお話ししよう。

筆者が旧東大核研の研究者になった時、重イオンの核物理がやりたいと騒いでいると、「重イオン源を作ってサイクロトロンで加速せよ」と、当時の低エネルギー部主任の平尾さんは、配属先をサイクロトロン

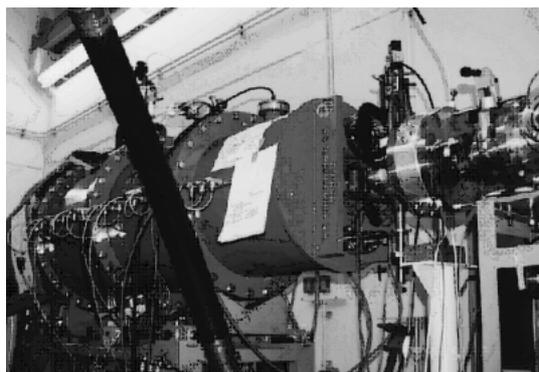


図7 完成したPET用RI製造IH型線形加速器（ビームは右側からインツェルレンズで収束されながら加速空洞に入射する．インダクタンスを調整するために，空洞径が3段階になっているのが分かる．よく見えないが，入射側ハットフランジにターボメカニカの社名と，そのロゴマークが白で刻印されている．黒いパイプは高周波を供給する77Dの同軸管である．）

ループに決めた．そして，重イオン源の本体は桜田さん（現アルバック），パルスアーク電源は佐藤さん（現大阪電通大），そして経験のない服部は，いわゆるイオン源棒を作っておけということになった．半年以上を費やして，それなりに重イオンを加速するのに成功した．さらにコールドカソード型PIGイオン源のパルスアークにより，世界トップ性能も達成した．旧東大核研のSFサイクロトロンは $K=68$ の中型のものであるが，平尾グループが日本で最初に開発・運転に成功したAVFサイクロトロンであった．

そのようななか，パルス重イオン源テスト時に楽しい現象を目撃した．イオン源本体がすぐ壊れるので，サイクロトロンの加速真空箱の覗き穴から監視していたときである．安全のため，ビームプローブをセンターから15 cm程度の所まで入れてイオン源を見ていると，引き出された重イオンは最初の2~3ターンは少しぼけているが，それ以後はプローブの所まで，蚊取り線香のように，というよりも極端に細い蚊取り線香が回っているのがきれいに見える．

実際には蚊取り線香でなく，真っ暗闇のなかの土星の輪のようにビームが光っていて，その途中に黒い隙間があって分離している．水平方向のビーム幅は2~3 mmぐらいと思われるが，垂直方向は1 mmもない薄いディスク状に見えた．まさに宇宙に浮かぶ現代のCD（大きさは30 cmではるかに大きい）のように光っていた．いかにAVFサイクロトロンの垂直収束がよいかを実感した．イオン源の性能が上がるまでは，しばらくすると引き出し口から赤い火花が飛び出して

くるので，マイクで知らせて制御室でアーク電源を止め，イオン源が壊れるのを防止していた．サイクロトロン屋の方と話しても，このことを知る人は少ないのを後に知った．

6.5 100 kV エージングと加速レンズ

高圧ステーションの加速管は60~70 kVを超えるとなかなか電圧が上がらず安定しなかったので，シューベルト君の1度目の招聘中に加速ビームを検出することはできなかった．この放電現象は少しずつエージングすることで，最終的に100 kVを印加できたが，X線の発生が多いことは変わりなく，不思議に思っていた．しかし，林崎君（現在，筆者の研究室の助教でリッジトロン（加速器 Vol. 2, No. 4, 2005 参照）の開発者）の修士論文研究として，東工大RFQ線形加速器による N^+ イオン加速実験の準備をしている時に，この加速管の欠点に気付いた．

シューベルト君は加速管を作るとき，加速レンズ効果が得られるように，アルミナ部分の外側にアルミニウム製のリングをいくつか固定し，分割抵抗を繋いで電圧をかける構造にした．これはHVECやNECの加速管と比較して，大気側からアクセスできる利点があり，さすが森永さんの最後の学生だと思った．しかしよく考えてみると，加速レンズ効果はあるが，電子やイオンが外側の電極に向かっていったとき，金属電極ではなくアルミナにぶつかってしまう．そのためアルミナ部分の内側がチャージアップし，その影響でビームが曲がってしまうはずである．どうりで，この線形加速器を運転すると，最初は加速電流が多いものの，1~2分もすると数分の1に減ってしまう現象があった．また，曲がったビームがアース側のどこかにぶつかって電子が発生し，それがイオン源に向かって逆流してX線が発生していたものと理解できた．このことは，加速管の分解時にアルミナの内部がきれいな茶色に着色されていたことから証明された．

したがって，林崎君の加速管ではシューベルト構造を採用することをやめて，安定に N^+ ビームを加速でき，名実ともに重イオンRFQ線形加速器になった．

6.6 加速テストのこと

最初のシューベルト君の来日時にはビーム加速ができなかったが，翌年度の国際共同研究費でシューベルト君とIFINのサイクロトロン部の技術主任で高周波が専門のドゥドゥさんを1ヶ月招聘した．そして1ヶ月後に，陽子ビームを無事に加速し，陽子の弾性散乱を半導体検出器で測定することができた（図8）．その後，東工大の古川研究室から譲り受けたHVECの振り分け電磁石の架台を製作し，加速ビームのエネ



図8 陽子ビーム加速時の記念写真（左がシューベルト君，右がドッドゥ氏，2人が持っているのは金ターゲットによる陽子の弾性散乱を半導体検出器で検出したポラロイド写真）

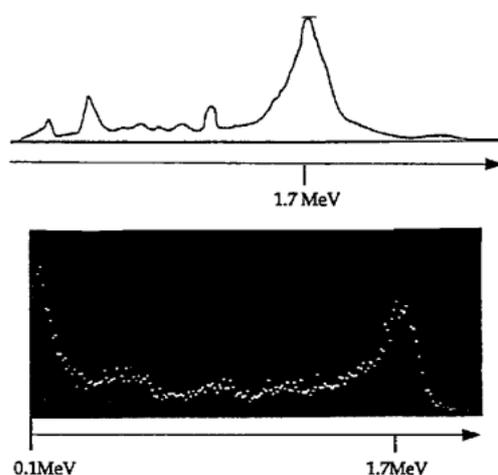


図9 加速陽子ビームのエネルギー分布（上図が磁気分析，下図が半導体検出器分析）

ルギー分析に使用した。その結果，半導体検出器では正確に分からなかった陽子エネルギーが1.7 MeVと分かった。加速ビーム測定データを図9に示す。

このビーム加速によって，17倍という大きな加速率を持ったIH加速空洞が実現可能であることが実証された。しかし加速効率が低かったため，筆者が軌道計算をおこなって確かめてみると，シューベルト君は加速電圧一定型で安定位相を0度に近くセットして±数度のAPF収束を試みていたが，アクセプタンスが小さくなって，あまり意味がなかったことが分かった。

7. 放射線検査について

7.1 放射線発生装置の申請

完成したばかりの装置に放射線発生データがあるはずもないが，なければ書類ができないので，いくつかの仮定をおいてデータを揃えた。また，証明書が必要なので，製作したターボメカニカから送ってもらおうとしたがダメで，設計者で技術監督者でもあるシューベルト君のサインで書類を提出した。

旧東大核研や東工大の他部局と比べて，原子炉研は放射線管理の手続きが非常に大変である。準備した書類を，原子炉研の放射性同位元素等委員会で説明して承認を得た後，さらに全学の委員会で承認を得てから，科学技術庁へ提出しなければならなかった。この儀式は，まだ通るかどうかわからない概算要求の場合でも，加速器を含む計画のときには全て必要であった。また，このことが原子炉研の放射性同位元素等委員会から報告事項として教授会に伝えられると，「ミュンヘン工科大の装置をなぜ置くのか?」「いつまで置くのか?」などと意見が出て，報告事項のはずなのに審議事項となってしまった。そのため，森永教授との国際共同研究という書類を急遽用意して提出した。すでに当時から大学の国際化は叫ばれていたが，今まで本当の意味での国際共同研究はおこなわれていなかったのかと残念に思った。そして，小栗さんの多大な努力により1年以上かかって承認が得られた。

7.2 放射線発生装置の検査

学内での申請手続きがもたついている間にシューベルト線形加速器は完成し，陽子ビームも加速して，博士論文とジャーナル論文2報をまとめあげ，シューベルト君は博士を無事取得してしまった。それからしばらくして放射線発生装置の許可がでたので，ちょうど動き始めた日本学術振興会で外国人特別研究員プログラムに応募し，2度目のトライで3ヶ月分の招聘予算が確保できた。そこでシューベルト君に声をかけて，施設検査の準備を手伝ってもらうことにした。

それまでは加速器室で様子を見ながらおこなっていた試運転も，検査時には制御室からおこなうことになるので，加速器室と制御室の間に十数本のBNCケーブルを引いて対応した。このケーブルは，もともとニューマトロン準備室時代に購入し，東大から阪大産研に移った藤本さんと一緒に自由電子レーザーの実験をおこなったとき，旧東大核研から少しもらって，阪大産研の電子加速器室と実験室の間に引かれていたものである。その後，藤本さんの定年退官と同時に実験も終了したので，全て引き抜いて東工大に持ち帰ってあった。また，加速器室のドアにインターロックスイッチを付けて，ドアが開けられたときには高周波電源への信号発生器の入力信号が止まることにした。このよ

うに、検査日の数日前から準備に入り、放射線も色々測定していたので、安心して検査を迎えた。

原子力安全センターによる施設検査は1時間ほどで終わったので、高周波電源を止めて、加速器室に向かった。すると、ロータリーポンプがポンポンと鳴り響いて、大リークが発生していることを告げていた。検査が終わって高周波を急に止めたため、加速空洞の電気コンタクトと真空シールを兼ねていたアルミニウムワイヤーと、鉄を母材とする空洞フランジでは熱収縮に差があるため、接触面に隙間ができてリークしてしまったらしい。そしてそのまま加速空洞は動かなくなった。そんなことで、PET用RI製造IH型線形加速器の開発研究は終了した。

これは非常に象徴的であるが、新型加速器の開発研究、なかでも原理実証の場合において、運転期間は多くてもトータル1ヶ月程度で、放射線の発生時間もせいぜい数十時間である。それなのに、何十年も設置して放射線を発生する装置と、申請に要する労力が同じなのはおかしい気がする。さらにそれに輪をかけて、最近になって放射線障害防止法が変わり、試運転以前に申請が許可される必要があることになった。この法律を厳密に解釈すれば、新しい加速器の開発研究は永遠に出来ないことになる。今後、加速器学会を挙げてこれを改善するべきであろう。日本で加速器研究ができなくなる日が近付いてきている。

8. 減速型サイクロトロン

線形加速器から取り出した重陽子でPET用RIを製造する場合の利点は、ビーム電流がサイクロトロンの最大100 μA 程度に対して、1 mA 以上を十分に確保できることである。すなわちRIの製造能力が10倍以上に向上する。しかし、 ^{15}O を製造する場合、薄膜で隔てられた N_2 ガス室に重陽子ビームを打ち込んで $^{14}\text{N}(d, n)^{15}\text{O}$ 反応を発生させるが、その薄膜は数十 μA に対しては耐えられても、1 mAは耐えられない。線形加速器でRIを製造する場合は、減速型サイクロトロンを用いたガスターゲットシステムが必要になることを、開発初期の頃から森永さんと話し合っていた。

8.1 減速型サイクロトロンの軌道計算

この減速型サイクロトロンの軌道計算を、プログラミングに強かった、修士課程の中村君がおこなった。3 Torrの N_2 ガス中での重陽子のエネルギーロス、ストラグリング、多重散乱によるビームの拡がり、エネルギーの低下(減速)、エミッタンスの増加などを考慮しなければならない、非常に面白いシミュレーション

である。このとき、旧東大核研のニューマトロン計画の最初の提案書であるNUMA-1のなかで筆者が書いた内容が非常に役立った。ニューマトロン計画は瓦解したが、変なところで計画書が活用できた。

3.2 MeVの重陽子は核反応を起こしながら減速され、その軌道は蚊取り線香が燃えるように小さくなっていく。計算によると、1 MeVまで減速されるとビームが非常に大きく拡がり、使用予定の電磁石の磁極にぶつかってしまうので、電磁石には垂直収束用にn値を付けなければならないことが分かった。そして、n値を0.75程度にしたときに上手く収束し、1 MeVまで無事に軟着陸させることができた。このとき、減速型サイクロトロンに使うことを考えていた、前述の古川研の電磁石の磁極直径は80 cmであったので、最大軌道半径を36cm、磁場強度を1 Tと仮定していたが、1 MeV部分での磁場は2 Tを超えてしまった。そこで、減速2周目でn値を再び変えることを考え、2つめのn値として0.25(1 MeV部分での磁場は1.6 T)と0.125(同1.35 T)を計算し、何とか現実的な解を得た。前者のシミュレーション結果を図10に示す。

8.2 入射部のターンセパレーション

現実的に考えると、減速サイクロトロンでは入射部に工夫を凝らす必要がある。線形加速器側の真空度はビーム加速のために 10^{-6} Torrオーダーであるが、減速サイクロトロンの入射部では 10^{-3} Torr、その内部では3 Torrになるため、差動排気系が必要になってくる。

差動排気系では、コンダクタンスの小さい部分、すなわち細いパイプ状の部分を意図的に追加することで圧力差をつける。しかし、サイクロトロンの入射部を

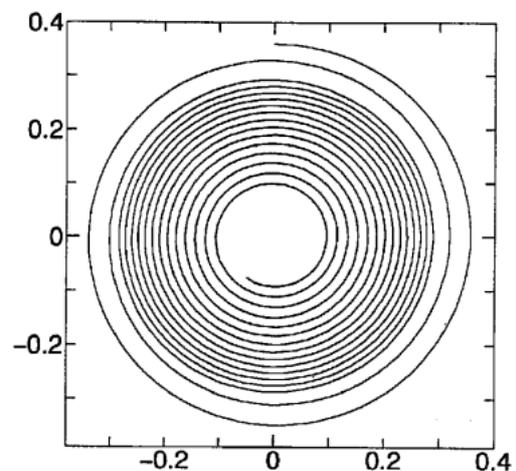


図10 平衡軌道の重陽子の軌跡 ($n_1=0.75$, $n_2=0.25$ で縦横の単位はm)

細くしても長さがとれず、あまり細くすると今度はビームが通らなくなる。そこで、入射部から1ターン程度はパイプ状の隔壁を付けることにした。このとき、1ターン目と2ターン目の軌道セパレーションがよくないと隔壁にぶつかってしまうので、注意深く軌道計算をおこなった。

この隔壁状パイプによる差動排気は真空ハンドブックに載っている公式やグラフを使って設計し、軌道計算に取り入れた。そして、電磁石のフリンジング磁場と n 値を考慮した磁場で、どうにかターンセパレーションが実現できる解を得ることができた。その結果が図10であり、入射後の1, 2ターン間、きれいに分離しているのが分かる。

8.3 差動排気の実験

筆者の研究室では、各学生がテーマにしたがって設計、シミュレーション、製作、組み立て、実験という流れで研究をおこなう。いわゆる最近盛んに言われている「もの作り」の研究室である。しかし、中村君のときは研究期間の問題と、シューベルト線形加速器が動かなくなってしまっていたこともあり、減速型サイクロトロンは製作しないことにした。それでも、このシステムでは差動排気系とターンセパレーションが重要なので、実験的にチェックをおこなった。

中村君は、銅パイプの内径や長さを変えて、コンダクタの自作を始めたので、何種類もあるパイプの取り付け部分はサイズを統一して、部品数を減らす工夫をさせた。そして、高真空側にターボ分子ポンプとメカニカルブースターポンプを、低真空側にロータリーポンプ、リーク弁、ガスポンプを配置した実験装置を組み立てた。その結果は、真空ハンドブックに書かれている公式とかなり一致していたが、粘性流から分子流になる領域では少し一致しないことが実験的に証明された。教育的には良い実験ができたと思えた。

同じ頃、中村君と同学年で重イオン励起レーザーの研究に取り組んでいた富澤君（現 SPring-8）も、RFQ型線形加速器とレーザー発振部を接続するための差動排気系の実験を必要としていた。そこで中村君は、自身が必要とした領域より数十 Torr も低い実験もおこない、そのデータは富澤君の研究に十分役立った。こんなことがあり、ソフトに加えて実験的にも力のある研究者として、中村君は実家に近い九州松下電器に就職した。

9. まとめ雑感

このPET用RI製造IH型線形加速器は、その後の筆者の研究室における加速器開発の進め方に大きな影

響を与えた。この研究の特徴を以下に述べる。

- ① ルーマニアで非常に安価に加速空洞を製作することができた。当時は為替レートが1ドル=100円程度だったので、費用は200万円程度であった。
- ② 高周波電源には既存品（NHK福岡のテレビ送信機）を使用した。
- ③ その他に、ECRイオン源、電子レンジ改造のマイクロ波源、高圧ステーション、ファラデーカップ、アインツェルレンズ、ステアリング電磁石、分析電磁石など、既存品やもらった装置で加速テストがおこなえた。
- ④ 加速空洞用の架台など特別に必要な物が、全部でも100万円程度で準備することができた。
- ⑤ 実験室と必要な電力や冷却水を利用できた。
- ⑥ 国際共同研究費（3年間で850万円）と日本学術振興会の外国人特別研究員プログラム（150万円）により、各国の研究者が行き来することができ、文字通りの国際共同研究に成功した。
- ⑦ 実用型材料照射用IH型線形加速器システムの第2線形加速器がシャットダウンしていたため、高周波電源や実験室が使用できるなど、色々な僥倖が重なった。
- ⑧ この研究にも優秀な学生シューベルト君がいた。森永正教授の最後の学生として、この原稿でも筆者が「さすが」と言っている所があるように、彼は「もの作り」に非常に優秀な学生であった。ドイツ人の目からすると、チャランボラン的気質があるように思われる面もあるが、装置の製作や組み立て作業の開始・終了時に、部品や工具などを完璧に整理整頓する気質などは、まさにドイツ的であった。いまの学生に「爪の垢でも飲ませたい」ものである。

日本、ドイツ、ルーマニアの国際共同研究で、ルーマニアで加速空洞を安価に製作し、日本の設備を利用して、ドイツの学生が研究をおこなった。これは、筆者の研究室における国際共同研究の第一歩となり、加速空洞をリーズナブルに調達できれば、大学の1研究室でも十分研究できることを証明した。学生を含めて色々な人々に助けていただき、この研究ができたことを大いに感謝している。その後、シューベルト線形加速器を含んで4台の一オズワルドさんの言では4台の「SAMURAI」加速器をルーマニアで製作することになる。残りの3台が成功したかどうかは、後の巻のお楽しみとしたい。