

大型加速器と小型加速器

1 大学の1研究室における加速器開発研究雑感
〈IHQ型線形加速器の実証機の巻—1985~1989—〉

服部 俊幸*

Essay of Accelerator R & D in a Small Laboratory of a University
〈Prototype of IHQ Linac —1985-1989—〉

Toshiyuki HATTORI*

1. はじめに

加速器学会誌編集委員長の安東さんから依頼され、大学の小研究室の悲喜交々を書いてみようと思った。しかし、1回完結では済みそうもなく、隔号で10回連載ぐらいと返事をしたが、少し心配になり始めた。

私は東京工業大学理学部の4.75 MV ヴァンデグラフ静電加速器（当初は大阪大学理学部と同じKN4000型4 MVのものであったが、8~9年ぐらいいして4.75 MVの加速管に置き替えられた）建設の最終年度（1970年）に学部4年生であった。この加速器は物理学科の小田先生、堀江先生、千葉先生、池上先生（後に阪大核物理センター）、応用物理学科の久武先生、武谷先生等の努力下、阪大理学部と同年に概算要求が通ったHVEC社の同型機である。しかし、阪大は縦型、東工大は横型であった。東京大学、京都大学のタンデムヴァンデグラフも予算化されていたが、このことは後に知った。筆者は武谷研究室の所属で、卒業論文はヴァンデグラフの粒子分析電磁石の集束位置を、 $Po-\alpha$ を使って測定するものであった。 Po のソースを昔の東芝のNAIGで作成したり、SSD検出器で α 粒子を検出したり、分析電磁石のシムを動かして2重集束を図ったり、真空排気をしたりと、ビームハンドリングの基礎的技術を勉強したのが、加速器との付き合い始めである。その測定点にスリットをセットし、陽子ビームが出てからAl(p, γ)反応を利用して、分析電磁石の軌道半径を決定した。そして30数年経た現在でも、東工大ヴァンデグラフの分析電磁石の軌道半径は筆者等が決めた値を使用している。

修士、博士課程では4 MV ヴァンデグラフ加速器

を用いた核物理研究をおこなっていた。卒業後は東大原子核研究所（核研）の研究生になり、重イオンの核物理がやりたかったので、サイクロトロングループに1年間所属した。ちょうどSFサイクロトロンの上り時期で、重イオン加速用のパルス重イオン源の開発を佐藤さん（現 阪大核物理センター）、桜田さん（現 株式会社アルバック）と3人で開始した。さらに1年後には、ニューマトロン準備室の一員となり、本格的な加速器屋になってから核研で約10年、東工大原子炉研で約20年が経とうとしている。

編集委員長からは小型加速器（あるいは限界に挑戦する加速器）開発というテーマで原稿を頼まれたが、加速器を大小で分類することには抵抗感がある。というのも、筆者が研究している加速器は多くが原理実証機であり、本来は大型のものでも、小型で実証可能なように工夫しながら開発しているため、そのサイズだけで小型加速器と判断されたくないのである。ケシカランが、まあいいかということで、これまでに手がけた加速器開発研究の、とくに非加速器学的部分について雑感を記していこうと思う。ただし、筆者の研究室が取り組んでいる研究テーマは線形加速器を中心に幅広いので、その時間的な順序は無視し、〈~の巻〉として書きやすいものからボチボチ始めるとしよう。

本稿表題の「1大学の1研究室における加速器開発研究雑感」は筆者が東工大に移った時点から始まっているが、最も表題に適した最初の研究が副題の〈IHQ型線形加速器の実証機〉だと思うので、あえてこの雑感シリーズの最初にお話ししたい。

* 東京工業大学原子炉工学研究所
Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology
(E-mail: thattori@nr.titech.ac.jp)

2. IHQ 型線形加速器

IHQ 型線形加速器の加速器学的な特長は、加速電力効率の良いインターディジタル H 型加速空洞 (IH 型空洞) に高周波四重極集束 (RFQ 集束) 用のフィンガーを取り付け、低エネルギーからビームを加速・集束できる点である。この一石二鳥の IHQ 型構造 (IH プラス RFQ で IHQ 型と名付けた) の原理実証研究をおこなった。IH 型空洞の電力効率が低エネルギー領域で他の線形加速器の空洞より数倍から 20 倍程度高いため、他の線形加速器に比較して、小型化や省電力化が見込める。これに関しては別の巻でお話しする予定である。

集束方法については、まず IH 型線形加速器からお話しする必要がある。東工大原子炉研に移ってから筆者が製作した材料照射研究用の大型の IH 型線形加速器では、ビーム集束のためにドリフトチューブ内に強磁場勾配 (5 kG/cm) の四重極電磁石が装荷されている。運転周波数は 48 MHz、入射エネルギーは 240 keV/u であり、水素イオンから塩素イオンまでを加速するために小型のタンデム型静電加速器を入射器としていた。効率的なビーム集束にはある程度の大きさと長さのドリフトチューブが必要なため、加速空洞径を大きくして運転周波数は 48 MHz に設計した。この構造を 100 MHz の運転周波数に適用すると、入射エネルギーは 1 MeV/u 程度となる。そこで、より低いエネルギーからビームの入射・集束・加速が可能な RFQ 集束構造を IH 型に取り入れることを考えた。そして、ドリフトチューブにフィンガーを取り付けてビーム集束用の四重極電場を発生する構造が IHQ 型線形加速器である。

このフィンガー付ドリフトチューブは、すでに 1960 年代にパリ南大学 (フランス・オルセイ) の D. Boussard が重イオン複合加速器システム (アリス) のレッヘル線型の線形加速器に使用することを目的に、陽子用の原理実証機をテストしたが、採用されることはなかった。IHQ 型線形加速器の研究を始めたころは、GSI 研究所 (ドイツ) の R. W. Muller がフィンガー集束 RFQ として研究し、テスト機が 1~2 台運転されていた。

筆者の研究室で開発した IHQ 型線形加速器の原理実証機は、運転周波数が 101 MHz で空洞内径が 54 cm、空洞内側の長さが 92 cm、セル数は 10 セルである。原理実証機であるものの、陽子を 0.8 MeV から 2 MeV まで加速し必要な高周波電力は 16 kW である。その主要パラメータを表 1 に示す。

表 1 IHQ 型原理実証線形加速器の主要パラメータ

Parameters of Prototype IHQ Linac	
Acceleration Particle	Proton
Energy Input	0.8 MeV
Output	2.0 MeV
Operation Frequency	101 MHz
Synchronous Phase	- 30°
RF Power	16 kW
Number of Cell	10
Focusing Sequence	FD
Element	RFQ with Finger
Drift Tube Bore Diameter	16 mm
Outer Diameter	48 mm
Stem Diameter	24 mm
Gap Distance	40 mm
Voltage	145 kV
Tank Inner Diameter	54 cm
Length	92 cm
Ridge Width	6.4 cm
Length	72 cm
Height	27 cm
Vacuum System	520 l/s TMP

3. 線形加速器の設計

3.1 基本設計

この IHQ 型線形加速器の開発研究を行ったのは、筆者と修士学生の鈴木君 (現 日本原子力研究所) であった。彼は学部 4 年生のときから服部研に所属しており、卒業論文研究として、ちょうど立ち上げ時期にあった材料照射用の大型の IH 型線形加速器の電場分布測定や真空テスト、陽子加速テスト等を経験していた。

核研型 IH の原理実証機は陽子テスト機で、高周波 300~500 W 投入で 15 keV~160 keV まで加速するものであったので、今回の IHQ 型線形加速器の実証機はハイパワーで MV オーダー加速することを考えた。また入射器として、核研の RFQ 型線形加速器 (TALL) の 0.8 MeV を予定した。

フィンガー電場の解析は、磁場との類似性を利用して磁石モデルを製作し、膨大な 3 次元磁場分布データをホールプローブで測定し、電場に変換することでおこなった。このデータを利用して、材料照射用 IH 型線形加速器の設計でも利用した理研の軌道計算プログラム LINOR を電場集束用に拡張してビーム軌道解析をおこなった。フィンガー (外径 16 mm) 付ドリフトチューブ (外径 48 mm) は、全てのギャップを同じサイズ (40 mm) とし、ほぼ一定電圧として計算をおこなった。その結果、陽子を 0.8 MeV から 7

MeVまで加速する構造がデザインされたが、空洞長が4~5 mもあり、とても製作費を準備できないことから、別の解を探した。そして最終的に、加速エネルギーが2 MeV、出射時のエネルギー幅が $\pm 1\%$ 、空洞内面の長さが92 cmの解が有ることが分かり、原理実証機として製作することにした。運転周波数は入射器である核研 TALL に合わせて101 MHzとし、加速空洞はフィンガー付ドリフトチューブを精度良くセットできるように3枚おろし構造とした。

3.2 1/2 スケールモデル

原理実証機の各種パラメータについては、ビーム軌道計算の結果にしたがって真鍮製の1/2スケールモデルを製作し、電圧分布など高周波特性を測定・評価することで、最終的に決定することにした。1/2スケールモデルの製作は、日本製鋼所 (JSW) の営業担当の吉田さん (営業らしからぬ人物であり、部署が変わった現在もお付き合いさせていただいている) から紹介を受けた、蒲田の町工場に依頼した。1/2スケールのフィンガーがドリフトチューブにネジ止めになっていたり、空洞長が40~64 cmの範囲で変えられるなど、鈴木君のアイデアが盛り込まれた複雑なものであったが安価に製作してくれた。磁場測定のところでもお話ししたように、等ギャップのフィンガー構造として、部品の種類を減らす方法を取った。しかし、モデル空洞の高周波特性を完全なものにするため空洞端板とリッジの間を可動にし、安定な電圧分布が発生するよう調整した。鈴木君が測定データを山のように取り、その結果、加速電圧分布も共振周波数も安定な構造にすることができた。

ドリフトチューブ間のフィンガー電場は摂動法により測定するため、糸を通したアルミ球 ($\phi 1$ mm) を静かに移動させながら、入力信号とピックアップ信号の位相差をベクトル電圧計で検出し、その変化をレコーダーで記録するシステムとした。しかし、測定開始から2~3分もすると、高周波電場の変化信号と同じか、それ以上のノイズが入ることが分かった。測定ではアルミ球が振動ないようにモーター速度は遅くしてあり、全長移動に5分程度かかるため、必ずノイズが入ってしまうことになる。その原因は窓の外を見てすぐに解かった。筆者の研究室は6階建て校舎の6階で、30~40 m離れた場所に東急大井町線の緑が丘駅があり、ちょうど研究室から大井町線と目黒線 (当時は目蒲線であった) の立体交差を見下ろせる場所にある。つまり、電車の通過がこの6階建ての校舎を振動させていた。鉄道路線が2本もあるためダイヤがどんなにずれていても5分以内に1本は

電車が来てしまう。そこで、鈴木君は泊まり込んで、終電過ぎの午前1時頃から午前5時頃の始発までの間に測定を行うことになった。しかし、その時間帯にも保線車両が時々通ることがあり、鈴木君は何日も真夜中に測定をしなければならなかった。建物が安普請のせいなのかどうか分からないが、2人の間ではそう決め付けて笑いの種にしている。

モデル空洞は厚さ1 mmの薄い真鍮板でできていることもあるが、少し触っただけで大きく周波数に変化することを観測できる。電車の振動がアルミ球を振動させるのか、全体空洞に歪みを作るのか解らないが、このことでノイズが発生していたことになる。この原理を使ってGHzオーダーの超伝導空洞を作るとクオリティファクター (Q値) は 10^{10} となり、位相検出を行えば 10^{-14} m程度の歪みが検出できるように思えた。東大の平川研がおこなっていた大きなアルミブロックによる重力波共振器 (最初はメリーランド大学のJ. Weberの方法) やその後の超伝導共振器と同じなのかどうか分からないが、原理は少し異なるような気がする。現在の重力波検出は長ければ感度が上がるということで、全てレーザ干渉方式になってしまったが、超伝導方式とどっちが良いか分からない。そのうちに少し勉強しようと思うが、これはトンチンカンなことかな？

4. 加速空洞の製作

4.1 空洞本体

このIHQ型線形加速器のために申請した科学研究費補助金 (一般研究B) が認められ、1986年~1987年に690万円 (その当時、一般研究Bは最大1,000万円だった) の予算が交付された。これで研究を開始し、服部研の最初の備品となるベクトル電圧計と500 l/secのターボ分子ポンプを購入した。しかし、他にも1/2スケール真鍮モデル、入出射系用真空部品、各種モニター、誘導性チューナー (Lチューナー)、容量性チューナー (Cチューナー)、銀のコンタクター、共振周波数自動制御用駆動装置などの予算が必要であった。このため、加速空洞の製作費としては講座費を投入しても200~300万円しかなかった。

JSWの吉田さんが紹介してくれた鉄工所からは、図面とともに500万円を超える見積りがでてきた。しかしとても払い切れないので、どういう経緯で探し出したか忘れてしまったが、板橋にある半田産業という鉄工所が200万円程度で製作してくれることになった。この会社は都営地下鉄三田線の板橋本町駅裏で大きな駐車場を運営している機械輸入取り扱い業者

で、鉄工所も兼業していた。昔ながらの鳥居と社が庭にある、鉄の溶接と製缶の技術により压力容器の製作を得意とする町工場であった。工場の床は大部分が土で、溶接機、旋盤、ボール盤程度の工作機械しかない工場であったが、工場長の佐々木さんの腕がよく、IHQ型加速空洞に適した良い工作方法を色々と伝授してくれた。精度の必要な加速空洞のフライス加工には、川向いの川口市の町工場を利用していたことは後に知った（この工場ではミラノプレーナーを用いて、3枚おろし構造において精度を必要とする溶接後の中間板をミーリング加工しており、最大3mぐらいの物まで削れるようであった）。

溶接完了後、東工大から真空排気装置一式とQマス分析器などヘリウムリークテストに必要なものを半田産業のトラックで運び、リークテストをJSWの吉田さんと2人でおこなった。空洞図面ができあがった頃、鈴木君は修士課程を修了して放射線医学総合研究所（放医研）の非常勤研究員に採用されていたので、空洞製作は筆者が1人で対応していた。リークテストによってリークがあることがわかり、溶接をしなければならなかった。その時、核研でも一度経験したが、压力容器製作時のカラーチェックの現場も見学した。溶接をし直した後はリークテストもOKとなり、次の日に、旭研鍍工業という横浜の鍍金工場に運び込んだ。核研型IH構造と異なる3枚おろし構造のため部品点数が増えて高くなったが、無理をお願いして半値の50万円でメッキをしてもらった。この会社の小杉さんの話は、別の巻でお話しする予定である。

4.2 フィンガー付きドリフトチューブ

10本のフィンガー付きドリフトチューブは、無酸素銅の銀ロウ付に適した構造にしてあった。町工場に見積りを頼むと、最初は50万円程度と言っていたが、用途や精度を理解してもらおうと100万円を超える金額に見積りし直されてしまった。そこで、それまでに何度か「何かお手伝いしたい」と伝えてきていた東芝の小平さんと河津さんに協力をお願いしたところ、東芝の研究所にある5軸のNCフライスで製作してくれることになった。届けられた最も加工が難しい第1番目のドリフトチューブの試作品を見ると、計算ミスにより重要度が低い部分で1ヶ所だけ多く削られていたこと以外は、パーフェクトであった。これは記念品として、現在も服部研に保管している。そして全てが良い精度でできているために、本体とのアライメントは易しかった。ドリフトチューブをセットした時の写真を図1に示す。

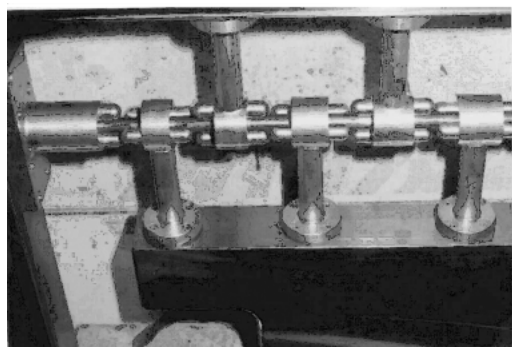


図1 アライメント中のドリフトチューブ

5. 高周波電源

5.1 NHKのFM放送機のこと

高周波電源では色々苦労した。IHQ型線形加速器には核研TALL用として東京電子技研（IDX）が製造した周波数100MHz、出力25kWの高周波電源を使用することにしたことから、その代替品として、3~5kWの高周波電源が必要になった。東工大で材料照射用として製作したIH型線形加速器システムの後段加速空洞の高周波電源として、すでにNHK福岡放送局の10kWテレビ放送機を譲り受けていたが、今回は5kW程度のFM放送機を希望してNHK技術部の方に相談した。

最初はNHK横浜放送局のFM放送機ということで、横浜市で一番高い山の頂上近くの無人送信所にNHKの職員さんと見学に行った。テレビ放送の場合は2台の放送機があり、そのうち1台はバックアップ用として電源を常時入れたまま待機しているのだが、FM放送機は1台だけであった。このためFM放送がストップしている午前2時~午前5時頃に、新しい放送機に交換するとのことであった。

しかし実際に譲ってもらえたのは、NHK千葉放送局の周波数82MHz、出力5kWのFM放送機であった。総武線の最終電車で午前1時頃に津田沼駅に降り立ち、タクシーに乗り換えて小高い丘の上の送信所に着いてみると、もうすでに作業は始まっていた。譲り受ける古い放送機は8F管を最終段に用いた芝浦製のもので、NEC製のオールトランジスター型5kWのもの（1kW×5台のタイプ）に置き換えられるとのことであった。午前4時頃に東工大で頼んでいた運送会社のユニック車が到着して積み込みを開始し、必要なものを全てを東大核研に輸送した。このとき、FM放送機2ラック程度のFM変調部は必要ないと思いトラックに積み込まなかったのだが、後のシ

ステム運転時に、この部分のインターロックが問題になった。また、送風用のダクトと放送機が置かれていた架台は再利用するとのことで、譲ってもらえなかった。

この放送機を譲り受けるあたりでは、東工大原子炉研事務の経理掛長（当時）の古川さんのお世話になった。NHK 福岡放送局から譲り受けたときは僅かながらも有償（運送費含む）であったが、NHK 千葉放送局のものは古川さんの尽力により、大学に寄付してもらえることになった（そのかわりトラックを手配して引き取りに行く必要があった）。面倒な仕事にも情熱を持って取り組んでくれる人物で、原子炉研から異動した後も時々居酒屋でバッタリ会うことがあり、彼が当時住んでいた大岡山の公務員宿舎にもお邪魔して、長年経理畑を歩いてきた彼の愚痴とも自慢ともいえる津軽訛りを聞いたものだった。その後、長野高専の事務長として栄転したことを学内誌で知って嬉しかったが、風の便りに若くして亡くなられたと聞き、惜しい人をなくしたと深く感じた。

5.2 放送機の周波数変更とテスト

全ての部品が揃った頃、放医研の非常勤研究員になっていた鈴木君が IHQ 型線形加速器の開発に再び協力してくれることになった。そこで 2 人で NHK から運び込んだ高周波電源を組み立て始めた。まずは、NHK 時代の放送機の写真を見ながら譲ってもらえなかった送風ダクトと架台を製作した。架台はチャンネル材を購入して必要な長さに切り、核研工作工場の溶接場で電気溶接してもらった。オリジナルの送風ダクトは金属製であったが、我々には技術がないので、ベニヤ板とタル木による木製ダクトを日曜大工的に製作し、巻き貝型送風機にドッキングして間に合わせた。

NHK の FM 放送機を IHQ 型線形加速器の実証機の加速テストするためには 2 つの問題点があった。1 つは幾重ものインターロックの処理と、核研 TALL にあわせて運転周波数を 82 MHz から 101.5 MHz に調整することであった。

第 1 の問題であるインターロック系は、不要と思いつまみに積み込まなかった FM 変調部の構成が分からず、図面から判断して（さらに図面からも幾つか変更がなされていた）、その部分のインターロック機能を全て解除させることにした。最終的に動くようになるまで、筆者と鈴木君は核研に 2 週間通い詰めであったが、ほとんどのインターロックを解除したので、必要な時インターロックが動作するのかと心配であった。そして、最初のテストとして 82 MHz で運

転を試みた。NHK では 82 MHz で 5 kW の送信をしていたが、ステップアップトランスの出力電圧切り替えで、10 kW と 5 kW が変えられる構造になっていた。そこで、10 kW に切り替えて出力側真空コンデンサーを調整したところ、12 kW まで出力することができた。この放送機で 10 kW 以上を出力したのは工場出荷前試験の時だけということで、少し愉快であった。

運転周波数を 101.5 MHz に再調整する作業はかなり大変であった。FM 放送機の初段の固体アンプは調整できないので、核研サイクロトロンの大城さん（現東大原子核科学研究センター）から RF ラボの 20 W ワイドバンド増幅器を借り、ヒューレット・パッカートの信号発生器からの高周波信号を入力して増幅した。また、前段と後段の 2 個の真空コンデンサーと、空洞のショート板のチューニングだけでは調整しきれず、核研サイクロトロンの高周波系を担当していた藤田さんからサンスイ製の共振メーターを借りて測定すると、最終段のグリッド側の共振周波数が低くて悪いことが分かった。このメーターの原理は正確には理解できなかったが、ハム用の製品らしかった。最終的にはインダクタンスを直線パイプにして小さくし、キャパシタンスはバリコンをゼロにしてやっとまじになったが、やはり共振点はずれていた。それでも構わずに運転すると、8.5 kW が最大出力であった。しかし、核研 TALL での陽子加速には 4~5 kW で良いことから OK とした。これまで各種の高周波電源の修理やテスト等をおこなってきたが、NHK の放送機的设计は非常にしっかりしており、セオリー通りで高品質の部品が利用されているという印象がある。

この NHK の放送機の改造中に、ダミーロードの代わりに IHQ 加速空洞に 1~2 kW のパワーを入れてみると、窓ガラスを通してピンク色に電極間が放電していた。空洞内部は真空排気をしておらず 1 気圧であり、非常にきれいな大気圧放電であった。計算上は電極に 20~40 kV 程度が印加されていたことになる。後にトカマク型核融合の研究をしている教授が、自分のトカマク装置で大気圧放電ができると誇らしげに話していたが、筆者らは気付かないまま 10 年位前におこなっていたことになる。

6. 放射線発生装置の申請

核研の RFQ 型線形加速器がある部屋は放射線発生装置室となっており、RFQ 型線形加速器で 800 keV、IHQ 線形加速器で 2 MeV になると、加速器の増設ということになり、科学技術庁に変更申請をおこなう必

要があった。核研の放射線管理室の上養さん（現 理化学研究所）が丁寧に教えてくれたので、その通りに申請書を作った。それだけで済んでしまった。実験は3ヶ月間で終わるが、書類は通常設置と同じ手続きを必要とした。法律はなんと矛盾が多いことか！以後もこれらの手続き作業は各種あったが、東工大と比較して核研は放射線管理室による集中管理だったため、非常に作業は楽であった。

7. 実証機の低電力試験と装置の設置

加速空洞を横浜の鍍金工場から核研に輸送し、真空テストをおこなった後、摂動法で電場分布を測定した。共振周波数は核研 TALL に比べて+0.5% になるのも設計どおりで、電場分布もモデルテストの結果とほぼ一致していた。周波数の+0.5% の違いは C チューナーで十分補正でき、核研 TALL の運転周波数に合わせる事ができた。また、加速空洞の共振周波数は、共振器のもつインダクタンスとして空洞断面積の調整によりかなり正確に合わせられることが判明した。しかしこの時の自信が、のちの失敗を生むことになったが、これはあらためてお話ししたい。

核研 TALL と分析電磁石の間に、約 1 m のスペースを空けて IHQ 型原理実証機を設置した。完成した IHQ 型線形加速器の加速テスト装置を図 2 に示す。核研 TALL には NHK の FM 放送機を、IHQ には IDX の 25 kW の高周波増幅器を接続して、加速テストを筆者と鈴木君で開始した。低レベル回路系は RFQ 用と IHQ 用に自動ゲイン制御 (AGC) と自動共振周波数制御 (AFC) が各 2 台、自動位相制御 (FC) が 1 台、パルシング回路と電源から構成されている。これは関連研究ということで、放医研の準備研究費により住友重機械工業が製作をおこなった。AFC 回路の RFQ 側は、これまで核研 TALL にあっ

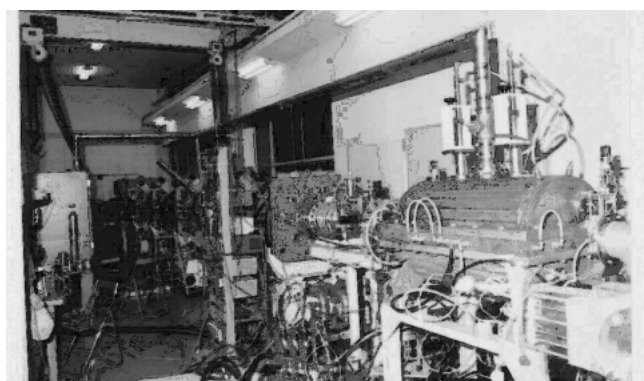


図 2 核研入射 RFQ 型線形加速器の後段にセットされた IHQ 線形加速器加速

た 4 台の L チューナーのステッピングモーター駆動回路に接続した。IHQ 側は空洞中央にあるプランジャ型チューナーのインダクションモーターに接続し、1 度以内の精度での高周波制御を可能にした。

8. IHQ 型原理実証機の加速テスト

各々の線形加速器に高周波増幅器から低電力を入力している間は良かったが、加速試験を開始して 2 台の増幅器を励振すると、IHQ 側の IDX 製の高周波増幅器に「うなり現象」が生じ、暴走することが分かった。信号発生器の出力信号を 100 mW 程度に増幅して伝送し、アッテネーターで減衰後、IDX の 25 kW 増幅器のトランジスターアンプに入力することで「うなり現象」はなくなった。

筆者が核研時代に設計、製作したイオン源系や分析系を通じて RFQ に 8 keV の陽子ビームを入射して 0.8 MeV まで加速した後、3 台の四重極電磁石で集束させながら IHQ に入射して 2 MeV まで加速した。2 台の高周波システムが安定していると、安定したビーム加速をおこなうことができた。加速位相は -30 度で設計しているため、これが 0 度の所で正確な実効シャントインピーダンスを測定できる。高周波電力と陽子ビームエネルギーの関係の測定結果を図 3 に示す。核研 TALL の出射直後において 30 度のビームバンチは IHQ 入射位置で 120 度に拡がり、IHQ のもつ 90 度のアクセプタンスの中で、ほぼ計算通りに 2.0 MeV まで加速された。これより、フィンガー集束のためにパワーを取られているにも関わらず実効シャントインピーダンスは設計どおりの 132 M Ω /m で、核研型 IH 空洞プラスフィンガー付ドリフトチューブ型の IHQ でも高い値を得られることが分かった。

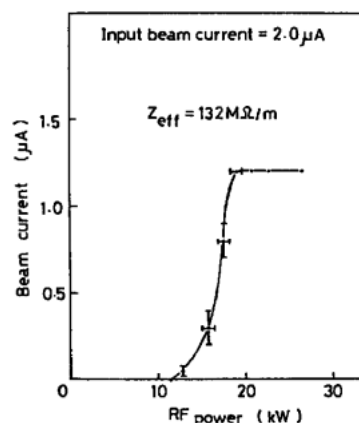


図 3 2 MeV 陽子強度と入力 RF パワーの関係

9. 新型加速器研究における日本初の生粋の加速器学博士のこと

放医研の非常勤研究員であった鈴木君が日本原子力研究所の SPring-8 計画（当時はまだニックネームはなかった）に移ることになった頃、この新しい IHQ 型加速器の加速特性のデータはほぼ測定し終えていた。修士課程の2年間と、その後の加速までこぎつけた1~2年間に鈴木君のおこなった研究成果は、フィンガー付ドリフトチューブの磁場測定等の準備研究、ビーム軌道計算、1/2 スケールモデルの設計・製作、高周波特性試験、実機設計、各種高周波部品の設計、低電力試験、加速テスト装置全体のアライメント、加速特性試験・解析・評価となっており、十二分に博士論文となる内容を持っていた。学部4年生の卒業論文研究において、すでに大型線形加速器の低電力試験から加速試験までを経験し、修士課程プラス2年間で新型加速器の基本検討から始めて、原理実証機の設計・製作から、加速試験までおこなうという内容を経験した、日本初の生粋の加速器学博士になれるはずであった。しかし、加速器開発の経験者として、SPring-8 の建設などで忙しく活躍する日々が続き、残念ながら IHQ 型線形加速器の実証機研究による博士論文は作成されなかった。筆者も学術雑誌に投稿することをためらっていたので、これに関する論文は、1989年の PAC における筆者の発表原稿のみである。しかし、鈴木君は SPring-8 での研究成果を博士論文にまとめ、2001年に東工大の工学博士を取得した。

10. ま と め

この IHQ 型原理実証線形加速器の研究で、筆者の研究室における、すなわち「1大学の1研究室の加速器開発研究」の手法が決まったような気がする。最初のきっかけは核研型 IH の原理実証機の開発研究にあると思うが、そのあたりは番外の巻でお話しすることにしてしよう。

大学で加速器の研究をおこなうには、研究の主体となる加速器については自前の予算で是が非でも製作し、これがなかなか実際には困難であるが、加速器のビーム加速テストができる土地と（放射線シールドがなされているとさらに良い）、実験用の電力や冷却水

が十分にあることが最低条件である。IHQ 型線形加速器の研究では、これらが核研の実験室に揃っていただけでなく、入射用の加速器、実験機用の高周波電源や一部の高周波回路系なども整った理想的な土地であった。また、2台の線形加速器のタンデム運転に必要なローレベル回路系の製作には、関連研究として放医研の準備研究予算を利用することができた。そして優秀な学生が居たことである。

ここで今後の参考として、IHQ 型線形加速器の開発研究を進めるにあたりどの程度の予算が必要だったか概算してみた。

- | | |
|--------------------|------------------------------|
| 1. IHQ 型線形加速器 | : 1,000 万円 |
| | (科研費+講座費3年間) |
| 2. RFQ 型線形加速器 | : 6,500 万円 |
| | (本体 4,000 万円+高周波電源 2,500 万円) |
| 3. RFQ 型線形加速器の周辺機器 | : 2,000 万円 |
| | (イオン源, 分析系, 集束系など) |
| 4. NHK の高周波増幅器 | : 1,500 万円 |
| | (実質価格のため実際はもっと高い) |
| 5. 高周波制御系回路系 | : 500 万円 |
| 合 計 | : 11,500 万円 |

以上より、研究の主体である IHQ 線形加速器の開発研究費は 1,000 万円程度の予算で何とかできるが、付帯設備を持った土地は除いて、その他に必要な関連装置の予算が 10,500 万円ほど必要なことが分かる。その費用については直接的もしくは間接的に、核研、放医研および NHK が協力してくれたことになり、まさにこの三者には足を向けて寝られない。

したがって、ときには例外もあるが、これ以降の本研究室の加速器研究スタイルは、土地を借りて、周辺装置については現有品、譲り受けた物、借りた物を組み合わせて利用しながら、可能な限り高性能の新型加速器を設計し、手持ちの予算を最大限に有効利用して（安く）製作することになった。このため IHQ と同様に、腕の良い小さな町工場を探してきたり、外国の工場を利用したり、こちらも労力を惜しまず性能向上とコストダウンを続けてきた。また、共同研究できる土地があれば、遠くてもどこでも出向いていくことになった。その辺も追々お話ししていく予定である。

この巻を終わるにあたって IHQ 型線形加速器の原理実証研究に協力していただいた各機関および皆様に心より御礼申し上げます。