

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 〈実用型材料照射用大型 IH 線形加速器の巻—1983～1985—〉

服部 俊幸*

Essay of Accelerator R&D in a Small Laboratory of an University 〈Heavy Ion IH Linac for Fusion Material—1983-1985—〉

Toshiyuki HATTORI*

1. はじめに

このプロジェクトは文部省（当時）における核融合関係の最後の大型予算（大学ではと言うべきか！）と考えられ、東京大学原子力研究総合センターの重照射研究部門の後に、東京工業大学原子炉工学研究所（東工大原子炉研）に予算がついた。その内容は、核融合材料ブランケット研究として、1 年目が超伝導磁石を組み込んだリチウムループ熱工学実験装置、2 年目が核融合材料照射実験装置で 3 億 6,000 万円（これは 3 年目に 3,000 万円の追加予算がついた）、3 年目が同位体分離計測装置とトリチウム・ハンドリング関連装置を整備するものであった。

筆者は当時、東京大学原子核研究所（核研）のニューマトロン計画において、RFQ 線形加速器の後段加速器として採用すべく IH 線形加速器の開発をおこなっていた。そしてすでに、加速ゲインを大きくしても電力効率が低減しない特徴をもつ核研型 IH 加速空洞の開発に成功しており、原理実証機として π - 3π モード構造で、 3π ドリフトチューブにおもちゃのような静電 4 重極レンズを組み込んだ、加速ゲインが 11 倍（入射エネルギー 15 keV、出射エネルギー 160 keV）の装置を製作し始めていた。ちょうどその頃、東工大原子炉研の新井教授より核融合材料照射用加速器を作りたいということで協力を打診されたため、核研型 IH 線形加速器の実用機を作ろうと考え、引き受けることにした。

このようにして、表題の「1 大学の 1 研究室における加速器開発研究雑感」に少しそぐわない形である

が、筆者の大学での開発研究が始まった。

2. IH 線形加速器の特長と応用加速器

ここで筆者の研究室が IH 線形加速器を長年研究し続けていることについて少し述べたい。IH 線形加速器の加速空洞は、図 1 に示すようにリッジ付円形導波管を応用した空洞共振器である。そして、擬 TE₁₁₀ モードの高周波電磁場を励振させ、空洞中のリッジに固定したステム、ドリフトチューブなどの電極により軸方向電場を発生させ、この電場により粒子を加速する。まだ IH 線形加速器が実用化されていない時代にも関わらず、赤い表紙で有名な M. Lapostolle の Linear Accelerators のなかに、すでにその加速電力効率の高いことは CERN の G. Dome によりグラフとともに記述されている。そして現在、IH 型と他のタイプの線形加速器がもつ加速電力効率（シャントイン

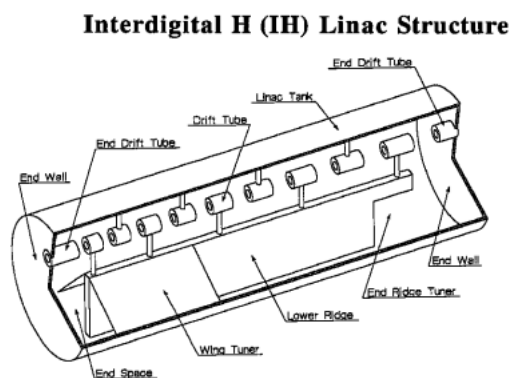


図 1 IH 線形加速器の加速空洞

* 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)

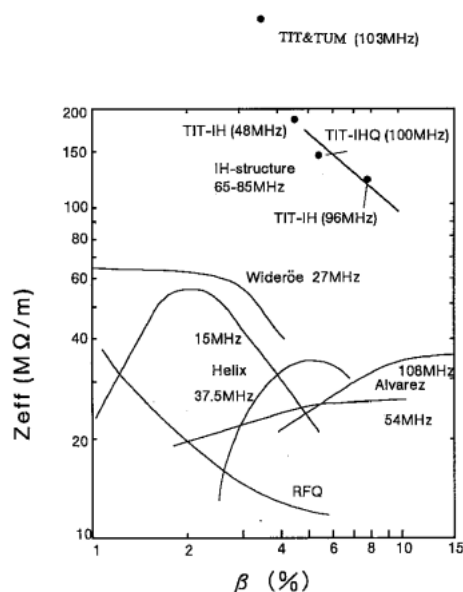


図2 IH型空洞と他の空洞との電力効率の比較

ピーダンス)を比較すると、図2のように示すことができる。これより、粒子速度と光速の比 β が15% (10 MeV/u)程度までは、IH型が5~20倍高いシャントインピーダンスをもつことが分かる。●印は筆者がこれまでに関係したIH線形加速器の、実際の加速実験データから得られた数値である。

シャントインピーダンス Z は、線形加速器の長さを L 、加速電圧を V 、必要電力を P とすると、 $P = V^2 / ZL$ の関係がある。したがって、シャントインピーダンスの大きい線形加速器は、それに逆比例して小さな電力で必要な加速電圧を発生することができる。このため、IH型は他のタイプに比べて、同じ粒子を1/5~1/20の電力で加速できることになる。すなわち省電力型といえる。例えばシャントインピーダンスが9倍よいと、必要電力が1/9で済むため省電力ということになるが、さきほどの関係式より、同じ電力を加えると3倍の加速電圧を発生することができる。このため線形加速器の長さを1/3にすることが可能である。また、これにしたがって必要電力も1/3になる。すなわち、シャントインピーダンスが9倍よいと、1/3の大きさで、1/3の電力消費という、小型・省電力型の線形加速器が製作できることを意味している。

この小型・省電力化は基礎科学研究用の線形加速器ではそれほど重要でない場合もあるが、産業、医療などの応用加速器では最も重要なことである。さらに応用加速器としての線形加速器の加速エネルギーは10 MeV程度までがほとんどであるため、IH線形加速器

の構造が最適といえる。したがって、この構造が応用加速器として利用されなければ、線形加速器の実用機はできないことになる。そこで、IH線形加速器の応用加速器化は筆者の使命と思い、これまで研究を続けてきている。

3. 全体設計

東工大には静電加速器の経験者が多かったため、この材料照射重イオン複合加速器システムのなかに、当時まだ東工大に無かったタンデム型静電加速器を欲しがっていた。そこで、小型のタンデム型ペレット静電加速器(タンデム加速器)を前段入射器とすることにし、重イオン加速用1.6 MVタイプであるNational Electrostatics Corporation (NEC)社製の1.6HS型に決定した。加速イオンとしては、負イオン源で生成しやすい硫黄イオン(^{32}S)などを考え、タンデム加速器で1.6 MVの加速をおこない、荷電変換後、そこそこのビーム強度でIH線形加速器により2~3 MeV/uまで加速することにした。このあとさらに1 MeV/u加速する、次年度予算で製作した第2線形加速器については後にお話する。なお、初年度の予算が確定する前は2台のIH線形加速器を予定し、それらの間に荷電変換部を設けて最大5 MeV/uに加速するシステムであった。

米国ウィスコンシン大学のハーブ教授の会社であるNEC社の日本代理店である伯東より、タンデム加速器(5SDH-H2ペレット静電1.6HS型タンデム)は1.1億円で購入された。重イオンを高強度で加速することから、ペレットチェーンは2本で300 μA 発生できるタイプで、そのためタンク径は1 mとかなり大きかった。そのパラメータを図3に示す。負イオン源は米国General Ionex Corporation社の製品(Hiconex Model 834)で、これは古いトランスミッション型であり、既存のものだったか購入したのか覚えていないが、後にインバーテッド型を購入することになった。質量数100程度までを分析できるタンデム加速器入射側の分析電磁石と、同じく出射側の電磁石とチェンバーは、東工大総合理工学研究科の小川さん(源東工大原子炉研)が設計した。

その後、IH線形加速器の入射側の荷電変換装置、収束用3連4重極磁石から出射側90度分析電磁石、実験室に入ってから45度振り分け電磁石、収束4重極電磁石系までを、チェンバーを含めて筆者が設計した。この100 m^2 の実験室は新設したものである。また、主線形加速器の設置スペースは、以前に中性子発生用の400 kVのコッククロフト・ウォルトン静電

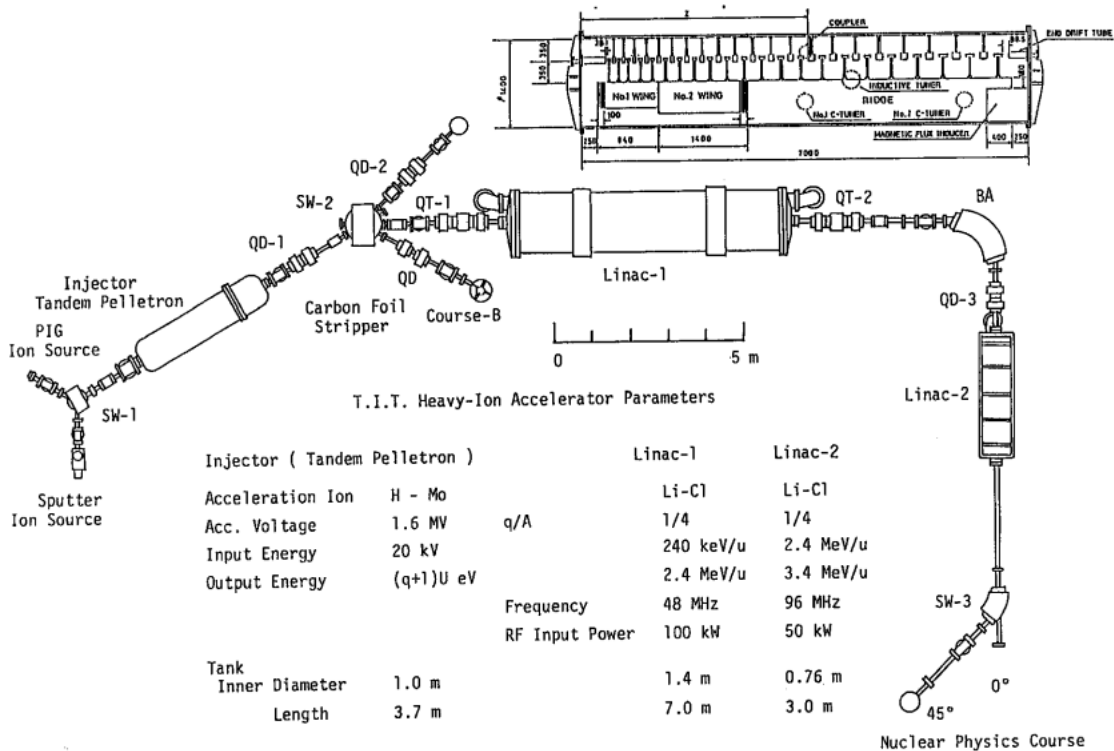


図3 核融合材料照射用重イオン複合加速器システム

加速器本体が置かれていた実験室である。またタンデム加速器は、旧物理学科が利用していたベータトロンの制御室に設置された。材料照射用重イオン複合加速器システムの全体図を図3に示す。

この重イオン複合加速器システムの設計は、それまで核研でニューマトロン計画のためにデータを集め、基礎研究をおこなってきた低エネルギー加速器部分のほぼ全ての研究成果を活用して進められた。

4. ニューマトロン計画での開発技術

この材料照射重イオン複合加速器システムに取り入れられた、核研ニューマトロン計画での開発技術を列挙してみよう。

4.1 核研型 IH 線形加速器の技術

IH 線形加速器の歴史は長いが、ここでは大型タンデム静電加速器のブースター加速器として、実際にビーム加速実験に使用した時からスタートし、より詳細な歴史は別の機会にお話したい。IH 線形加速器の実用化は、1970 年代末にミュンヘン工科大学の森永等により大型タンデム・バンデグラフ加速器の後段加速器としてビーム加速に成功したのが最初である。そして1980年代に入り、核研の将来計画であったニューマトロン計画の主線形加速器として各種の研究がなされた。

大型タンデム静電加速器のブースター加速器の場合には、エネルギーを最大で50%程度ブーストするのに対して、主線形加速器としては3~10倍のエネルギーゲインを必要とする。そのため、入出射時で粒子速度が2~3倍以上も変化し、加速電圧が入射側に偏ってしまうため効率よく加速電圧を発生できない。これを解決したのが図1にあるような核研型 IH 加速空洞である。これは入射側に鳥が羽を上げたようなウィングチューナーを備え、出射側ではリッジをカットしたエンドリッジチューナーにより、電圧分布を誘導的に調整する。これらは容量的調整と異なり、調整によるロスがないため IH 加速空洞のもつ高加速電力効率を保持することができる。この構造の有効性は、1983年に15 keV から160 keV まで加速する1 m 足らずの原理実証機において、陽子加速を成功したことにより証明された。すなわち、エネルギーを10倍以上加速できる主線形加速器が誕生したことになる。

東工大原子炉研の材料照射重イオン複合加速器システムの設計・製作には、この加速ゲインが大きくて省電力という核研型 IH 線形加速器の技術（この時点ではまだ原理実証器（これは番外の巻でお話する予定である）の加速テストは成功していなかった）が用いられている。

4.2 高磁場勾配4重極DC電磁石技術

IH線形加速器のドリフトチューブ挿入用として、ニューマトロン計画では分割スパイラル・コイル型（分割コイル型）の高磁場勾配4重極電磁石の開発をおこなっていた。この構造は理化学研究所（理研）の重イオン線型加速器（RILAC）を建設した小寺さんのグループが開発したもので、理研の宮沢さんに製作方法を教えてもらい、筆者らは核研工作室で試作を繰り返した。1 mm 厚の穴あき電気銅板を必要なターン枚数重ね、片側の中心に切れ目をいれておき、その切れ目をずらして1枚ごとに、溶接担当の山我さんに銀口づけしてもらった。そしてコイルのRをつけ、130度のエポキシ樹脂をセミキュアした紙をはさんでネジ止めし、130度硬化用エポキシ樹脂を真空含浸させた後、核研高エネルギー部の高温槽で6時間高温乾燥させ1コイル・ブロックを完成させた。

このコイル銅ブロックを、核研工作室のフライス名人である小川さんが、治具もあまり作らずに、磁石のポール形状に合わせてミーリング加工で四角く抜いてくれた。何度か失敗があったが、それなりに治具を工夫して高い精度と高い歩留まりで製作できるようになった。難しければ難しいほどファイトを燃やす名人気質を見た思いがした。しかし、筆者が東工大に異動する少し前に亡くなり、非常に残念であった。その小川さんに認められた2代目フライス名人が、同じく核研工作室の坂本さん（現 高エネルギー加速器研究機構（KEK））である。絶縁紙を越えた銅のバリを酸でエッチングして取り、純鉄製の4重極電磁石のヨークとポールの中に組み込み配線をおこなって完成した。目標は10 kG/cmを狙っていたが、少し不足の9.8 kG/cmのものが製作できた。

この技術を使って世界初の重イオンRFQ線形加速器（LITL）の出射側に、50 mmの大口径で3.5 kG/cmの3連4重極DC電磁石を製作した。外径は200 mm（フロン冷却のケーシングを含む）で、ドリフトチューブに装荷することも考慮し、羽村町の立川精密を技術指導しながら製作をおこなった。またこの冷却のために10 kWのフロン冷却システムを大西熱学に製作させ、RFQ線形加速器の冷却水配管用の地下室に設置した。

ニューマトロン計画は瓦解したが、この強力な分割コイル型4重極DC電磁石は材料照射重イオン複合加速器システムに搭載された。また、LITLの経験から30 kWのフロン冷却システムも問題なく製作することができた。

4.3 重イオン荷電変換用長寿命炭素薄膜の技術

長寿命炭素薄膜の開発については、核研ターゲット室の菅井さん（現 KEK）と共同で東工大理学部で4.75 MV ヴァンデグラフ実験室に実験装置類を持ち込み、10~20 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の厚みでは世界最長寿命をもつ炭素薄膜を完成した。また、さらに長い寿命をもつハイブリッド薄膜が完成し、その成果をもとに菅井さんは東工大で博士号を取った。この研究は現在も継続中で、さらに薄い数 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ のものや、より厚い数100 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ のものでも世界最長寿命を記録し、世界各国の研究所で菅井炭素薄膜が採用されているのはご存知の通りである。

ニューマトロン計画では、重イオン線形加速器の加速効率を上げるために加速エネルギー380 keV/uの第1荷電変換部において、炭素薄膜により荷電変換をおこなう予定であったが、既製品では寿命が10~20分で、週に700~800枚が必要になる。このため、1000枚の炭素薄膜を週1回交換する装置のプロトタイプ機として、360枚セットできる装置を核研工作室の藤野さん（後に KEK）と共同開発した。これは、薄膜ホルダーを何段か追加することで1000枚以上をストックして使用できるように設計し、壊れやすい薄膜なので、スムーズに動く圧空によるロボット駆動を考えた。そのついでに、電磁弁を使わず全てを圧空の論理回路で構築した。当時、国内では圧空論理回路を製造している所がなく、小金井製作所が輸入したフランス製の部品を取り寄せて、藤野さんと2人で楽しみながら組み立てた。初めてのテストなので、小金井製作所のエンジニアも興味をもち、部品類はかなり安く購入できたと記憶している。このプロトタイプ機は核研がKEKに統合されるまで、ターゲット室の倉庫に置かれていた。

材料照射用重イオン複合加速器システムでは、菅井型クラスター炭素薄膜を世界で初めて加速器のストリッパー・フォイルとして使用した。炭素薄膜交換機は、菅井炭素薄膜がすでに長寿命化に成功していたので、簡単な10枚程度の手動式交換機を製作して使用した。

5. 材料照射用重イオンIH線形加速器のデザイン

5.1 軌道計算と1/4モデル空洞

硫黄イオンは負イオン源で生成しやすく、1.6 MV タンデム加速器では主に $\text{S}^{4+,5+}$ によって8 MeVまで加速される。タンデム加速器を出射後、加速エネルギー240 keV/uの硫黄イオンは炭素薄膜で荷電変換

され S^{8+} となり、電荷対質量数比が $1/4$ で IH 線形加速器に入射することになる。そこで、IH 線形加速器の実効加速率は 1.3 MV/m と仮定し、出射エネルギーは 2.4 MeV/u として軌道計算を始めた。

加速電圧分布については電圧傾斜型を採用し、セル長とギャップ長を比例させ、ギャップ長に比例した加速電圧が発生するようにした。ビーム軌道計算は理研の重イオン線形加速器 RILAC に使用した LINOR プログラムを使わせてもらい、新井研修士学生の林君がおこなった。これが彼の修士論文研究となり、三菱電機の電子線形加速器の部署に就職したが、よくできる人物で、その後も加速器関係の学会で顔を合わせる。その結果をベースに、長さが 2 m 近い $1/4$ スケールの真鍮製コールドモデルを製作した。しかし、空洞直径と全長の比が大きく、核研型の原理実証機のような単純なウイングチューナーでは加速電圧を制御しきれず、2 段のウイングチューナーとし、空洞直径も小さくする必要があった。また出射側のエンドリッジチューナーの切り欠きも工夫した。そして、より実験しやすくすることと共振周波数を合わすために、直径の変化できるモデルを設計製作した。これらの高周波電場測定は筆者がまだ核研在籍中に開始し、その結果は軌道計算にフィードバックされた。

ちょうどこの頃から、新井研で修士課程を終え日立製作所に就職していた小栗さんが、助手として研究メンバーに加わった。核研ではドイツ GSI 研究所の K. Kaspar の方法による等価回路解析を IH 型空洞に応用していたが、小栗さんは非常に優秀な人で、この大型 IH 型空洞のモデルを使用して解析方法を確立し、短期間で論文博士を取得した。

5.2 ドリフトチューブ用高磁場勾配 4 重極電磁石

ドリフトチューブに挿入する高磁場勾配 4 重極 DC 電磁石の製作方法は、すでに核研で分割コイル型の開発をすでに終えていた。そして、材料照射用重イオン IH 線形加速器には 4 kG/cm の磁場勾配なら十分安全に製作できると予想し、ビーム軌道計算も始めていた。しかし、元請けメーカーの三菱電機は、外注先である東北金属のテープコイル方式であくまでもやろうとする。そこで、雌雄を決するためにテスト磁石を 1 台ずつ製作することになった。分割コイル型は以前に試作させた立川精密が、テープコイル型は東北金属が製作し、それぞれ性能テストをおこなった。

コイルの $1/2$ にしか電流が流れないテープコイル型に対して、分割コイル型は発熱が半分近くのはずであり、どう考えても性能が高い。それゆえ、数年前からニューマトロン計画用として開発してきたのであ

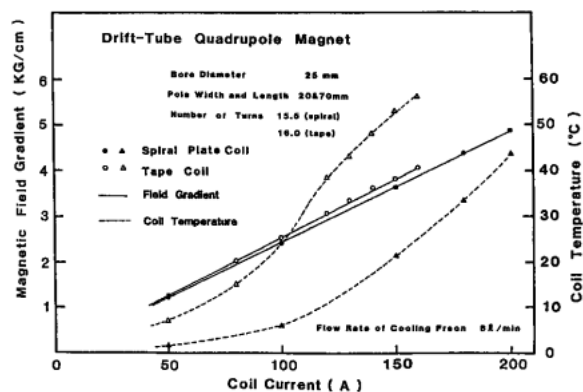


図4 2種類の4重極電磁石の特性

る。そんなことで、テープコイル型が 3.5 kG/cm 近くになると冷却用フロンが沸騰し、危険な状態になったのに対して、分割コイル型は 200 A まで十分安定で 4.8 kG/cm を発生させることができ、 5 kG/cm も可能であった。各方式の実験データを図4に示す。4重極電磁石はアクリルケースで、フロンの沸騰が手に取るように見えた。沸騰電熱で冷却効果が上がり、コイルの温度上昇曲線の傾きが小さくなるのが、グラフからはっきりと分かる。結局、ドリフトチューブ4重極電磁石は分割コイル型で製作することになった。ただし、磁場勾配が $2 \sim 3 \text{ kG/cm}$ でよい入出射部の2台の4重極電磁石は、テープコイル型で製作することにした。

5.3 全体設計

ボア径との比から4重極電磁石の長さが $4 \sim 5 \text{ cm}$ 以上にならないと効率的でないことや、 $\pi-3\pi$ モードでは電力効率が単純には $1/4$ に落ちてしまうにも関わらず、高周波電源は 100 kW 以下にする必要があったため、 π モード加速についても検討した。また 1.6 MV タンデム加速器と加速イオンのことを考慮して、入射エネルギーを 240 keV/u 、出射エネルギーは10倍の 2.4 MeV/u 、加速空洞の運転周波数は 50 MHz を最終案と決めた。

6. 加速器学的意味

この材料照射用重イオン IH 線形加速器では、核研型 IH 加速空洞の構造を使い、加速位相をマイナス (-30°) にとってビームに位相安定性をもたせ、横方向収束はドリフトチューブに内蔵した高磁場勾配4重極電磁石によるものとした。また、加速ゲインが10倍、セル長が3.3倍になるため、アルバレ型のように加速ギャップを3.3倍にし、高周波電場を一定で加速電圧を3.3倍にする傾斜型電圧分布にチャレンジ

した。また、核研型原理実証機では加速実験を優先し、電圧分布制御の完全化の点では手を抜いたため、この大型 IH 線形加速器では新しい試みとして、低エネルギー側での静電容量の増加を補正する誘導性チューナーである、ウイングチューナーを可動型の2段構造とした。そして、軌道計算、コールドモデルテストなどの結果を勘案して、この IH 型線形加速器のパラメータを決定した。製作後の変更も含めた最終的な加速器パラメータを図3に示す。

7. 材料照射用重イオン IH 線形加速器の製作

この材料照射用重イオン IH 線形加速器は三菱電機が元請けメーカーとして受注したが、予算不足ということで、えらく見積りの高いモニター類を切り捨てることで成り立った。そのため、プロファイルモニター、ファラデーカップ、その他ビームハンドリング用モニター類は、別途に製作・購入した。

7.1 加速空洞の製作

実機の設計は1/4モデル空洞の高周波測定データにもとづいておこなった。2段4枚のウイングチューナーでの電圧分布制御には、いろいろと困難があるが、とくに入射側の静電容量が大きくて周波数が下がるために、どうしても加速空洞直径を小さくする必要が生じた。そこで、筆者と学生達で部屋の扉に直径を書いて、実験・保守の作業性に必要な大きさを確かめてみた。その結果、120 cm は小さすぎ、140 cm だとどうにか作業ができるということで、直径を140 cm として運転周波数を48 MHzに変更した。

筆者は、東芝が製作した世界初の重イオン RFQ 線形加速器や、核研型 IH 線形加速器の加速空洞の製作などを通じて、銅メッキに関して経験があった。このように大きな空洞の銅メッキを出来る所は世界に無く、ステンレスと銅のクラッド材で製作する方法しかないと思っていた。しかし三菱電機は、日立造船に外注して造船用のメッキ槽で1 mm 程度の厚メッキをおこなった後、バフ研磨で1.6 ミクロンの表面粗さを保証したいと提案してきた。あんなに長い時間をかけて表面粗さについて検討し、話し合いを重ねたのに、内部に気泡が残し、放電して、毛羽立ち、ダメだと話したバフ研磨を提案するとは、メーカーの論理を理解できないが、絶対に妥協しなかった。そこで、1/4~1/5 スケールの空洞により、提案の手法で銅メッキとバフ研磨をして、加速空洞の Q 値が純銅の90% 以上を達成しないと承認しないことにした。結局、三菱電機はこの宿題をおこなわなかった。

一方、ステンレス銅クラッドは溶接部分が低電気伝

導率となり問題がある。そこで、クラッド材による直径30 cm × 長さ30 cm の空洞を、コンタクトの違いで2種類作り、性能を比較することを考えた。日本製鋼所 (JSW) が製作したステンレス銅クラッド材は上出来で、Q 値は理論値の95% 以上を達成し合格であった。筆者は、冷却を容易にするためクラッド地材にはジャケットタイプになるステンレス材を考えていたが、メーカーに譲歩して鉄でよいことにした。国内で銅クラッド材を加工できるメーカーはJSW と旭化成くらいであるが、このように大きな銅クラッド材はJSW しか対応できなかったため、結果的にJSW が加速空洞の外注先に決定した。しかし、かなり低価格で引き受けたとのことで、後におおいにこぼされた。内径1.4 m × 長さ7 m の空洞製作は冬の北海道 (JSW 室蘭製作所)、梁材の機械加工は名古屋であったため、精度の必要なところは25°C 換算して、それぞれ加工をおこなった。

リッジ、ドリフトチューブなどの構造は三菱電機通信機製作所に設計してもらったが、結局、核研型 IH 加速空洞の原理実証機のとくに、核研工作室の藤野さんと筆者が考えた梁と柱の構造に銅板をネジ止めする方法に落ち着いた。サイズが1桁程度も大きく異なる空洞で、新しい構造が提案されることも期待したが、とくに無かった。しかし、小型の原理実証機の場合は梁材を銅のムク材にできたが、7 m 近いものは不可能なので、機械加工したステンレス材を銅メッキすることにした。この銅メッキは名古屋の特殊溶接材料メーカーのナイスが引き受け、かなり良いメッキができていた。最後の研磨は、三菱電機が何度かやり直しをさせた様子である。この梁材や加速空洞本体の銅メッキについては、IHQ 線形加速器の巻でお話した旭研工業の小杉さんから技術指導を受け、メーカーと話し合いをする時に非常に役立った。この小杉さん親子に関しては別の巻でお話したい。

IH 加速空洞の設計図は、意思の疎通をスムーズにおこない時間を節約するためにも、筆者が夕方になると日比谷のJSW 本社に出かけて行き、図面の承認をおこない、三菱電機経由で東工大に届くようにした。しかし、加速空洞のメッキ方法などでスッタモンダして完成が遅れてしまい、JSW には大きな出費があったと思われる。出来上がった加速空洞は、東工大で真空テストをおこなうことになった。パイプやフランジなどクラッド材の溶接部分も多く、途中で溶接ミスの修正や150°C ベーキングなどもおこないながら、ようやく合格した。

7.2 溶接棒のこと

現在の銅用溶接棒の電気伝導度はかなり良くなっているが、1983年当時は純銅の25%以下であった。JSWのクラッド材が大きいといっても、実際は無酸素銅の1ロット量が小さいので、この内径1.4 m×長さ7 mの加速空洞を製作するには、4枚のクラッド板を溶接する必要があった。計算してみると、母材を作るためだけでも溶接部分が長さ20 m×幅10 cmにもなることが分かり、空洞の高周波特性を保持するために、電気伝導度が低下しない溶接棒の開発を試みた。

そのときちょうど、ヨーロッパ原子核研究センター(CERN)のシンクロトロン入射器である、200 MHz アルバレ線形加速器の前段部空洞が何台か再製作された時の図面を持っていた。確か、核研の佐藤さん(現大阪大学核物理研究センター)が帰国時に持ち帰ったものをコピーさせてもらったと思う。図面には「145 Copper」のアルゴンアークで、銅材どうしを溶接するように指示があった。この規格はドイツのものかと思い、調べてみたが見つからなかった。そこで餅は餅屋ということから、古河電工、古河鋳山、そして古河鋳山の日光研究所まで電話をかけまくって、それは米国規格のもので日本工業規格には存在せず、それゆえ国内では製造されていないことが分かった。また、これはBe含有の銅であり熱伝導性がよいため半田ゴテの先端などにも使われるということも聞き、そのため電気伝導性の面でも有望な溶接材料かと思った。このとき、古河研究所の技術者も非常に興味を持ったらしく、米国からの注文で過去に日本化薬が製造したことがあるので、残っているかもしれないと教えてくれた。これを聞いて厚木の日本化薬に電話して理由を話すと、担当の技術者も非常に興味をそそられたようで、快く直径5 mm×長さ50 cmぐらいの溶接棒的な材料を送ってくれることになった。そして溶接特性が分かったら教えてくれと頼まれた。入手した銅材はすぐにJSWで溶接テストを行ってもらったが、Beと銅だけの材質のため湯の流れに問題があり、そのままでは溶接棒として不適当な材料という結果になった。そこで、さらなる溶接棒の開発はやめ(他にも必要作業が山積していた)、測定結果のコピーを日本化薬に送っておしまいとなった。

このことで強く感じたのは、最先端の研究者や技術者は業界の情報を非常によく知っており、我々が彼らの知らない情報を少しでも持っている、非常に興味を持って何でも教えてくれ、それを辿っていくと、その業界の最先端の状況が面白いほど分かっていくことである。しかし、我々が有益な情報を持っていない

と、こういうことは起こらないことであろう。

本原稿の執筆中に、原子炉研の小栗さんから「古い図面入れを廃棄するが、中の図面はどうしますか?」と言われた。保管されていたのは材料照射用重イオン複合加速器システムを建設した時期のものだったので、必要そうなものを選んで頂戴した。ちょうど、この項を書きながらCERNの溶接棒のナンバーを調べ直そうとしていた矢先だったので、さっそく探してみると「145 Copper」のアルゴンアークで銅材どうしを溶接するような指示が見つかり、正確な銅のナンバーが分かった。

7.3 磁石類の製作として

ビーム輸送系の分析電磁石、振り分け電磁石、4重極電磁石と線形加速器内の37個の4重極電磁石は東北金属が製作した。前述の入出射側エンド・ドリフトチューブの2台がLBL型テープコイル方式で磁場勾配3 kG/cm、上側35個のドリフトチューブに内蔵するのは分割コイル型のもので、外径100 mmで内径25 mm(ビームボア径は23 mm)、励磁電流200 Aで磁場勾配4.8 kG/cmを発生するものであった。

分割コイル型の製作方法はニューマトロン計画で確立したものの東北金属に技術供与して、筆者の指導のもとに1台を設計・製作させた。そこで所定の性能が得られたので35台を製作した。励磁電源については、空洞両端のものを別電源とし、ドリフトチューブ内蔵のものは3グループに分けて台数を節約した。4重極電磁石についても部品点数を節約したが、電源をグループ化したことで、磁極長は別々の長さにした。これを考慮して粒子の軌道計算をやり直した。各電磁石の電源は三菱電機が高砂製作所に発注していたが、安定度が 10^{-3} オーダーで4重極電磁石用としてはよいが、分析電磁石、振り分け電磁石用のものについては安定回路をつけさせた。

8. ドリフトチューブのアライメント

加速空洞へのドリフトチューブの取り付けは、三菱電機通信機製作所の精密システム設置のプロが作業を担当したが、事前に各種検討をおこなった。当時の筆者と同年齢か少し若い技術者は、アライメントに関するプロ中のプロであった。少し前には、野辺山にある国立天文台の大パラボラアンテナのアライメントを手がけたという。そして、新しいドリフトチューブのアライメント方法として、売り出されたばかりのレーザートランシットに、レーザー軸を正確に検出する目的で4枚の太陽電池を組み合わせ、試してみようということになった。そして、レーザートランシットは

東工大が用意することになり、当時唯一の国内メーカーであった東京光学の製品を購入し、太陽電池とターゲットは三菱電機が準備した。

レーザーTRANSHITと太陽電池の組み合わせによるアライメント方法は、非常に高感度であったが、2つの問題点をもっていた。その1つは、購入した東京光学のレーザーTRANSHITのHe-Ne 赤色レーザーが、スポットサイズなどは仕様通りであるものの、レーザー共振モードによりスポット中の光強度にムラがあり、太陽電池による4分割方式に適合しなかったことである。そこで、東京光学に問い合わせた技術者たちとも話し合ったが、レーザー光中の不均一を直すことは無理で、またやる気もなかったようである。土木用の製品なので、粗い測定で十分ということだったらしくあきらめた。それから約10年後に、前述の東工大ヴァンデグラフ実験室でレーザーTRANSHITを購入したが、その時は半導体レーザーに変わっており、ビームスポット中にあまり不均一性が無く、これなら以前の測定はできたと思った。もう1つの問題は、非常に感度が良すぎて夜中に全ての光源（電灯、真空ゲージ、非常灯…）を消して測定する必要があるだけでなく、人の動きまでも検出してしまうことであった。これらの理由により開発を断念することにした。この方式が数年後にKEKでテストされたということは、後に知った。

この他に、筆者はテラレーホブソン・アライメントテレスコープが核研にあること知っていたため、これを使ったテストもおこなうことにした。この有名な装置は、田中さんが核研時代に英国から購入したようである。実際に借用してきてみると、テレスコープ側の固定球は中心やや前方にあるものの、それを受ける半球状の玉受け部品がないことに気付いた。そこでKEKの田中さんに電話をすると「核研の小林君に聞け」ということで、小林さんにも尋ねてみたが知らないということだった。この玉受けが主要部品なので、結局、テラレーホブソンは使用できなかった。しかし、各種の太さの平行線やリングを描いた平行ガラス板の光学パーツがあり、たいした物だと感じた。結果的に、テラレーホブソンと同じ構造の東京光学製のアライメント・テレスコープを三菱電機が持っていたため、これによってドリフトチューブの取り付けをおこなった。アライメントされたIH空洞内部を図5に示す。

テラレーホブソン・チューブを三菱のアライメントのプロに見せると、「話に聞いたことはあるが見るのは初めて」ということで、さきほどの光学部品も含め



図5 IH線形加速器内部の写真
(上側が4重極電磁石を挿入したドリフトチューブ、下側が4重極電磁石なしのドリフトチューブで、TODO収束を採用している。)

て、何やかやと筆者と2人で使い方に議論の花を咲かせた。船のプロペラ回転軸のアライメントに使用するテラレーホブソン・チューブが、英国の造船業が華やかなりし頃に開発され、現在まで受け継がれているものも頷けた。この英国の名品とほぼ同じだが、レンズの倍率を上げ、副尺の精度を上げた東京光学のアライメント・テレスコープは、もしかすると東京光学に就職していた田中さんが製品化したのかもしれないと思えたが、その正否は分からない。

この原稿の執筆中に、所用のため日本原子力研究所東海研究所（原研）を訪問したついでに、J-PARCの建設現場を見学させてもらった。そのとき、線形加速器棟の中で真新しいテラレーホブソン・チューブを発見した。20年ぶりの再会で、「まだ製造されていたのか!」と懐かしくなった。覗いて見ると副尺、倍率ともに上がり非常に鮮明になったような気がした（20年前に借りたものは、すでにレンズに傷が生えていたか?）。そして、これが見つからなくて使用を断念したスコープ玉受けは、思ったより小さい円柱先端が球形に凹んだ部品であった。

この見学を引率してくれたのは、3 GeV シンクロトロングループの鈴木君とリニアックグループの伊藤君で、2人とも筆者の研究室の卒業生である。鈴木君は最初の卒業生で、この巻にもよく登場し、IHQ線形加速器の原理実証機で最初にビームを加速した人物である。伊藤君はIHQ線形加速器を半導体用の重イオン注入機に応用した論文研究で博士号を取っている。ルーマニアで製作したIHQ線形加速器の話は、別の巻でお話しする予定である。

9. 高周波電場測定と調整

9.1 電場測定

ドリフトチューブが ± 0.05 mm以下の精度で取り付けられ、IH加速空洞は東工大に引き渡された。この加速空洞の電場分布測定と調整を、東工大理学部応用物理学科の4年生で、卒業論文研究のために筆者の研究室に入ってきた鈴木君（現 原研）とおこなった。これは真空テストなどを含めて、鈴木君の卒業論文になった。

それまでの摂動法による電場測定の長さは最大でも3 m程度であったが、この実用機では10 mの測定器が必要であった。このため、入出射側のプリーを固定するアームは大きく頑丈なものを設計製作した。摂動体としては、加速ギャップ全体を満たすアクリルロッドと、 $\phi 5$ mmのアルミ球の2種類を用いた。 $\phi 5$ mmのアルミ球の重さはたかが知れているものの、10 mの糸の重さで中心が垂れ下がるため、その補正機構を検討した。懸垂曲線の計算式を用いて、ナイロンテグスの質量や張力用プリーにかけるウェイトの重さなどから中心部の下降量を算出し、それに耐えうる材料と構造をもつ測定装置を製作した。そして、加速空洞の横で張力用ウェイト（鉛ブロック）を変えながら、中心でのアルミ球の下降量をオートレベルのオプティカル・マイクロメータを使って測定した。この測定値は見事に計算値に一致した。使用したニコン製のオートレベルは、筆者の研究室の最初の備品であった。それ以後これまで、測定用の光学機器は借用したり、定年退官の先生より引き継いだりして、どうにか過ごしている。

このことから、どうりで18世紀頃から大きな吊り橋が建設されてきたのが、あらためて頷けた。この頃はコンピュータの性能向上により、ハープ橋の様な吊り橋がシミュレーションで設計できるようになったと聞き、「ああそうだったのか、ニュートンの古典力学はすごいなー」と感心した。電場分布測定中のIH加速空洞を図6に示す(写っている人物は鈴木君である)。

9.2 傾斜型電圧分布の調整

材料照射用重イオンIH線形加速器は、加速ゲインが10倍（入射エネルギー240 keV/u、出射エネルギー2.4 MeV/u）の核研型構造をもち、入射側の電場調整は4枚のウイングチューナーと4本のパイプシステムチューナーにより、出射側の電場調整はエンドリッジチューナーによりおこなっている。アクリルロッドとアルミ球の2方法で電場分布を測定し、4枚のウイングチューナーと4本のパイプシステムチューナ

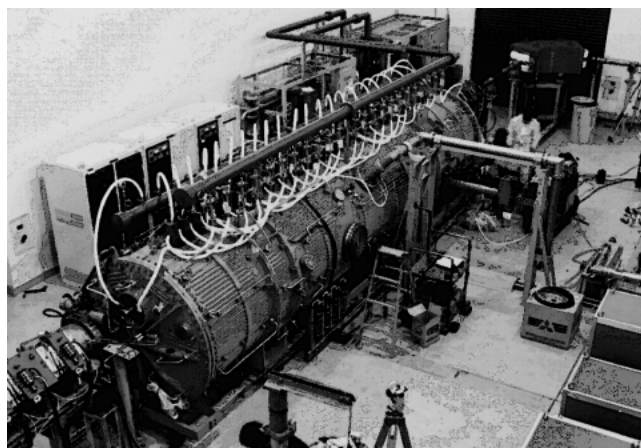


図6 高周波電場測定中のIH線形加速器の写真

で調整したが、これらだけでは出射側の電圧が低下して、加速電圧分布を設計値（等電場型：傾斜型電圧分布）に合わせることがどうしてもできなかった。しかし、得られた電圧分布での軌道計算をおこなったところ、十分加速できる結果がでたので安心した。

実機は1/4スケールモデルによる電場分布をもとに設計・製作されたが、モデルと比べて出射側が変わった時点で、本来ならば高周波特性の設計変更をすべきであった。しかし、元請けメーカーとの非加速器学的な部分のやり取りから生じる納期遅れが気になり、設計変更をおこなわなかった。このことで加速電圧分布が出射側で低下し、後から改造するのに非常に手こずった。この加速器を世界で最も理解しているのは筆者であるから、メーカーが企業の論理を振り回しても、毅然とした態度で対応すべきであった。

10. 高周波電力投入試験と加速実験

10.1 高周波投入試験

高周波電源（周波数48 MHz、最大定格出力80 kW）は外注先の東京電子（IDX）が製作し、すでに出力試験も終わり納品されていた。なお、この電源の設計段階において、性能保証はなくてもよいから最大100 kWが出力可能な電源容量にしておくことをお願いしておいた。

CW運転の線形加速器のエージングとしては、それまで核研の重イオンRFQ線形加速器に立ち会っていたが、マルチパクタリング（MP）放電はなきに等しかった。後でよく考えてみると、運転周波数が100 MHzで、ベイン電極先端の1 cm以内の部分に電場が集中するため、その条件（100 MHz・cm）ではMP放電のアイランドに乗らなかったのである。これと同

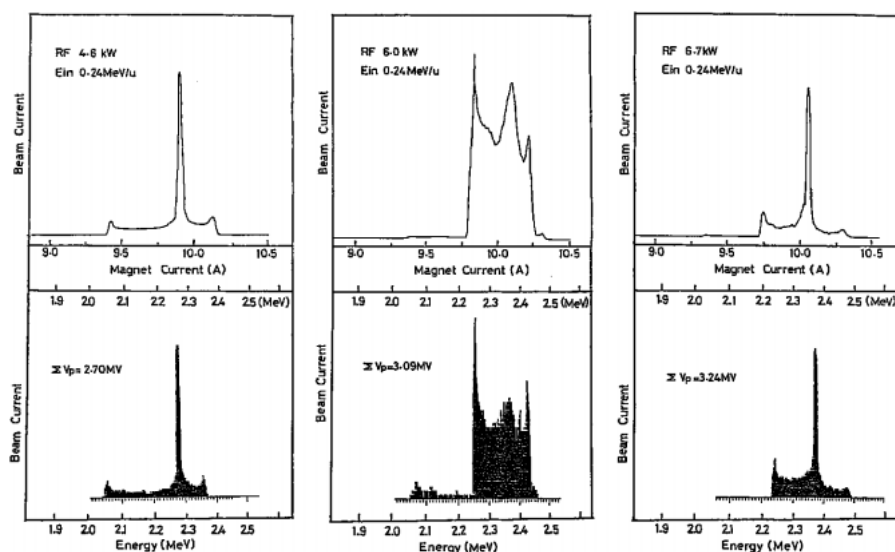


図7 高周波電力に対するエネルギー分布（上が実験値，下がシミュレーション）

様の現象は、1993年に筆者らが東芝と共同で製作した、東工大重イオンRFQ線形加速器でもみられた。

しかし、ドリフトチューブ型のこのIH線形加速器では、運転周波数が48 MHzで加速ギャップも長く連続的に存在し、MP放電の生じるアイランドに十分乗っている。核研などでの経験からすると、サイクロトロンでは最初のエージングだけでなく、新しい周波数で運転するごとに最初ほどではないがMP放電が起こるのは常識で、これを乗り越えるための高周波回路もある。したがって、この加速器も最初のエージングには何日もかかると言われていた。

そんなこともあり、高周波電力が100 W程度で空洞への入力が増加しない現象が起こり、MP放電が発生したことを確認した。このIH線形加速器の場合、十分にMPのアイランドに入ることが予想されていたので、エージングを昼夜続行でおこなうことで、学生の佐藤君、鈴木君と筆者でシフトを組んでいた。すると最初の鈴木君の間に、たしか8時間交代を考えていたので、最初のシフトの8時間以内にエージングが完了してしまった。しかも悪いことに、エージングが完了したため高周波電力がいきなり入ってしまい、後に分かったことだが、エンドリッジ部の銅板が溶けて流れ落ちていた。そしてむき出しになったステンレス材の柱も蒸発して、出射部分の空洞内面をステンレス皮膜が覆っていた。この銀色に蒸着した空洞内部を、JSWの作業員がサンドペーパーとバフ研磨で下地の銅面を磨きだした。このとき、三菱電機から最初に提案された銅メッキ法を採用しなくてよかったと、つくづく思った。その後は、溶けた銅板の応急修理と、リ

ッジ板を固定する部分のステンレス製六角穴付きボルトを銀メッキするとともに、その頭部を固定用銅ロッドに沈める構造に変更した。しかし、20～30 kWを越えるとリッジの切り欠き部分が赤熱するのは変わらなかった。

これより、陽子加速ではCW運転が可能であることが分かったが、完成祝賀会も予定されていたので、重イオンはパルス運転に切り替えることにし、まずは平均10 kW程度の高周波電力で加速することにした。

10.2 加速試験と当時のリニアック研究会

装置全体の真空試験を終えた後、タンデム加速器でのビーム加速試験をおこない、240 keV/uの陽子、炭素イオン、塩素イオンの加速を確認した。タンデム加速器は、図3のように振り分け電磁石を介して2台の負イオン源をもち、固体試料用にはスパッタ型負イオン源を、ガス用にはPIG型負イオン源を使用する。

IH線形加速器のCW運転によるビーム加速試験は、まずは陽子でおこなうことにした。タンデム加速器で加速された陽子は、振り分け電磁石で線形加速器コースに送られ、3台の4重極電磁石で収束してIH線形加速器に入射する。このとき加速空洞中の37個の4重極電磁石は適切に収束強度が設定されている必要があり、入射側と出射側のファラデーカップで電流を測りながら、まずは無加速の状態で全ビームが通過するように磁石電源を調整した。その後、高周波電力を1 kW程度から増加させながら調整していった。その結果、高周波電力によって通過ビーム量が変化することを見つけた。そこで出射系の分析電磁石を併用して、陽子の加速エネルギーを同時に検出することに

した。予想していたことであるが、高周波電力に応じた加速電圧の差により、きれいにビームがシンクロトロンの振動をしていることが分かった。

実際の加速電圧を同定するために、LINOR プログラムによるシミュレーション結果と実際の測定データをいくつか組み合わせて、全てがピッタリ合う解を見出した。その結果を図 7 に示す。IH 線形加速器のシャントインピーダンスは $179 \text{ M}\Omega/\text{m}$ で、他の加速構造よりも 4~5 倍高いことが分かった。約半数のドリフトチューブが 4 重極電磁石付きであるにも関わらず、高シャントインピーダンスであった。これは加速空洞内径 (140 cm) と比較して、4 重極電磁石付きのドリフトチューブ (直径 10 cm) が小さいためと思われる。この当時、LINOR プログラムを使ったビーム軌道計算は、就職した林君の後を継ぎ、新井研修学生の佐藤君がおこなっていた。彼は非常に優秀な学生で、博士課程に進学後は下級生をまとめて、この開発研究をスムーズに遂行してくれた。現在は東芝で活躍しており、「加速器の難しい空洞は佐藤さんに任せれば何とかしてくれる」とも言われ、加速空洞製作で世界の第一人者である。

その後は炭素イオンの加速に成功し、さらに前段の静電加速器が 1.7 MV まで昇圧できたため、パルス運転で塩素イオンの加速をおこない、全エネルギーとしては 84 MeV の高エネルギー重イオンの発生に成功した。

このような開発状況や実験データを当時のリニアック研究会で報告すると、いつも最前列に座っている KEK の田中さんから「君のところのリニアックは発熱したとか溶けたとか大変だね、その IH 型というのはどこが良いのかね?」と、いつもの調子の質問を受けた。こちら「何度もお話ししていませんでしたっけ? IH 型はダントツにシャントインピーダンスが高いという利点をもっています」「アルバレ型のようなパルス線形加速器と違って、CW 運転のプロトタイプ機は新しいだけに色々ありますが、上手く解決して、塩素イオンまで加速しましたよ」と切り返した。

この当時 (1984~1985 年頃) のリニアック研究会は、陽子・電子加速器の KEK の田中さん、電子加速器の東北大学の鳥塚さん、同じく電総研の冨増さんなどが前列を陣取り、少し離れて重イオン加速器の理研の小寺さんがいた。そして誰かが必ず、基本的あるいは専門的な、ときには皮肉的な質問をした時代であった。それを若手が切り返して、互角に渡り合うのも楽しみの一つであった。

11. 第 2 線形加速器の開発

主線形加速器の最終的な加速エネルギーは 2.4 MeV/u となったため、さらに 1 MeV/u 加速し、3.4 MeV/u とする線形加速器を計画した。そして、次年度の 3,000 万円の追加予算に、筆者の研究室の設備費 1,000 万円をあわせた合計 4,000 万円で、第 2 線形加速器 (内径 76 cm, 長さ 3 m) と前段トランジスタ増幅器を製作した。随意契約で元請メーカーは三菱電機であったが、実際の製作は、過去に筑波大学の IH 線形加速器の製作実績をもつ日本真空機械が担当した。トランジスタ増幅器は主線形加速器と同様に IDX が担当したが、出力 600 W は難しく 300 W で落ち着いた。しかし、主増幅器に十分余裕があったので OK であった。

第 2 線形加速器の運転周波数は、主線形加速器の 2 倍の 96 MHz とした。図 3 の表中に第 2 線形加速器の主要パラメータを示す。加速ゲインは 30%, 入射粒子の速度比は 15% なので等電圧構造とし、電場調整はエンドリッジチューナーでおこなうことにした。その加速器学的な特徴としては、2 種類の核研型チューナーのうち、初めてエンドリッジチューナーのみで調整をおこなったことがあげられる。IH 加速空洞の長さとお内径の比がそれほど大きくない場合、この方式により傾斜型加速電圧分布までをほぼ十分に制御できることが後に分かった。ビーム収束については、かなり粒子が加速されているため横方向収束はなくてもよいだろうということで、LINOR プログラムでチェックをおこない、加速位相はミュンヘン工科大学と同じ 0° とした。形状も同様に「3 枚おろし」の構造とし、横浜の旭研鍍工業でメッキをしてもらった。

第 2 線形加速器の開発は、新井研に学部 4 年生で入ってきた密本君が卒業論文研究としてコールドモデル測定を、修士論文研究として実機設計からビーム加速試験までを、助手の小栗さんとともにおこなった。彼もまた非常に優秀な学生で、修士課程を修了して住友重機械工業 (住重) の加速器部門に就職した。少し前までは、理研の RI ビームファクトリー計画において超伝導リングサイクロトロンの軌道計算や磁石設計などをおこなっていたが、現在は放射線医学総合研究所が進めている普及型重イオンがん治療装置の入射用 IH 線形加速器の開発を担当している。

高周波増幅器に関しては、電荷質量比 1/4 の粒子加速に必要な高周波電力が 50 kW 程度になってしまったため、炭素薄膜で荷電変換するとともに、予算もないことから、NHK 福岡放送局の第 1 テレビ放送機

(100 MHz, 10 kW) を輸送費+ α で購入した。これを密本君と小栗さんが96 MHzに調整し、運転できるようにした。

12. 本研究プロジェクトの問題点

この実用型材料照射用複合加速器システムの開発研究は、発注先が大手メーカーを元請けとした多層構造になっており、風通しが悪く、責任の所在が曖昧になることが多かった。これらは最終的に2つ問題を残した。

第1の問題は、主線形加速器の加速電圧がデザイン値と異なり、出射側で急激に低下したことである。これはすでに話したが、加速空洞の運転周波数を50 MHzから48 MHzに変更したとき、納期遅れを恐れて設計変更をできなかったことが原因である。入射側のウィングチューナーにより電圧分布は調整できると思ったが、実際には補正しきれなかった。出射側の加速構造の設計変更を、毅然とした態度でメーカーに要求すべきであった。筆者の弱気がこの問題を引き起こした。しかし最終的には、出射側のリッジ先端に銅ブロックを取り付けて静電容量を増やすことで、デザイン値に近い電圧分布に戻すことができた。

第2の問題は、主線形加速器の出射側エンドリッジチューナー部分が非常に加熱し、銅板の一部が溶融したことである。たぶん温度は800°C~1000°C以上になっているはずである。しかし、冷却用銅パイプが20 cmくらい離れて溶接されているので、簡単な計算でもそんなに温度が上がるはずはなかった。その謎は、加速空洞の捨て穴を通じた直接冷却法に変えるために、エンドリッジの銅板を切り離す時に解明された。冷却パイプが銅板に直接溶接されておらず、戻り点の2点でしか溶接されていないことが判明したのである。戻り点の溶接位置は1 m近く離れており、サポートブロックのみが点溶接的に付いていた。このことを元請けメーカーに連絡したところ、「提出図面に筆者の承認サインがあり、該当部分について修正指示を受けていない以上、改修はできない」とすげない返事であった。この部分を設計する前に、同様の部分で冷却効果をあげるために銅板や銅パイプを単に全溶接するだけでなく、パイプ端に富士山の裾野のような「溶接シロ」を付ける必要ありと、あれだけメーカーと議論、検討したのは何だったのか？ 何の意味もなかったことを痛感した。それならばメーカーが図面通りに製作せず所定の性能が出ない、プランジャー型誘導性チューナーの問題で徹底的に再製作をさせようとしたが、早くエンドリッジ部を改修したいことと、

大人気ないと思ったこともあり、鉾をおさめた。この冷却問題については、博士課程に当時在籍していた佐藤君がいろいろと工夫した案を考えて図面を描き、近くの町工場である斉藤製工に製作させた。これによりメインの発熱部分が冷却できるようになった。また、切り離した部分から手の入る範囲で、銅パイプを銅板に全面的に銀ロウ付けし、これによりかなりの部分が冷却できるようになった。

13. ま と め

この実用型材料照射用複合加速器システムの開発研究は、その後の筆者の研究スタイルとは大きく変わっていた。予算は研究規模に対して潤沢ではなかったが、色々な開発研究ができ雲泥の差があった。例えば、高周波コンタクトについては富士テルモ、臼井国際産業、日本バルカーに開発させてコンペティションをおこない、最も良い日本バルカー製を採用した。施設についても、整備された加速器室や新設の実験室など条件が整っていた。

さてここで、この材料照射複合重イオン加速器システム開発の予算の使途を概算してみると、

1. IH 線形加速器 (第1, 第2)	2.7 億円
2. タンデム型ペレトロン静電加速器	1.1 億円
3. その他自作費	0.2 億円
4. 新設実験室, その他建屋改修費	0.5 億円
合 計	4.5 億円

と、合計4.5億円程度のプロジェクトであったことが分かる。また、正確には分からないが、この装置のために十数年わたって合計3億円程度の維持費が配分され、トータル研究費としては約7.5億円の研究プロジェクトであった。

この加速器開発研究での最大の収穫は、非常に優秀な多くの学生たちと巡り会えたことである。1983年末に筆者は東大核研より東工大原子炉研に移り、1984年4月から理工学研究科原子核工学専攻の大学院生や理学部応用物理学学科の学部4年生が研究室に入学してきた(原子炉研が担当する原子核工学専攻は大学院大学であり学部をもたない)。この開発研究に参加した学生達は、学部からの鈴木君、密本君、大学院からの林君、佐藤君、蒲原君であり、職員は新井さん、小栗さんと筆者であった。そして学生達はこの開発研究に関連した内容で、卒業論文、修士論文、博士論文を書き卒業・修了していった。その研究概要(論文題名ではなく内容)を以下に示す。

・卒業論文

鈴木：大型IH線形加速器加速器の高周波電磁場測

定, 調整と真空テスト

密本: 第2 IH 線形加速器のモデル高周波試験

• 修士論文

林: 大型 IH 線形加速器の粒子軌道計算とモデル試験

佐藤: 大型 IH 線形加速器加速器の加速試験

密本: 第2 IH 線形加速器の設計と加速試験

鈴木: IHQ 線形加速器のモデル試験と実機の設計
(これは最初の巻でお話した IHQ 線形加速器の開発研究に関連している)

蒲原: IH 線形加速器の3次元高周波解析と高次モード IH 線形加速器

• 博士論文

佐藤: 大型 IH 線形加速器加速器の CW 加速試験と IH 空洞の3次元高周波解析

小栗: 大型 IH 線形加速器加速器のモデルによる等価回路解析 (小栗さんは職員であるが, 助手に採用されたときは学生であれば博士2年生であり, 2年間で博士の学位を取った)

確か孔子の教育の話で, 「1隅を持って掲げ教えても, 3隅を持って返えすほど勉強してこない学生には教授しない」という意味の漢文があったと思う. この開発研究に集まった学生たちは1つを教えれば, 1週

間後には3つも4つも問題を勉強・検討し, その発展形まで考えてくる学生で, 教えた筆者がオタオタすることが何度かあった.それほど全員が非常に優秀であった.「学生とは皆こんなに優秀なのか? 筆者は学生の頃あんなにも優秀であったか?」と, 自分のことを振り返って心配であった.しかし何年か学生を指導していると, そうでもない場合もあり, 孔子の言と裏腹に, 3つ教えても, 1つも返ってこない学生もいることが分かってきた.あの当時の学生は優秀だったと, 後に分かるようになった.この加速器開発研究に参加させず, 理研の重イオン線形加速器を使って重イオンの核偏極の研究をしてもらった木下君 (高校の物理教師に就職) もやはり優秀だった.

日立中央研究所の半導体関係に就職した蒲原君以外, この研究に関係した優秀な学生たちの特徴は, 全員が加速器に関連した業界へ就職したことである (佐藤君 (東芝, 加速器), 林君 (三菱電機, 電子線形加速器), 鈴木君 (原研, 加速器), 密本君 (住重, 加速器)).

この巻を終わるにあたり, 材料照射用大型 IH 線形加速器および複合加速器システムの開発研究に協力していただいた各企業, 各研究所ならびに大学関係の皆様は心より御礼申し上げます.