

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
〈電子加速器リッジトロンの巻—1997~2000—〉

服部 俊幸*

Essay of Accelerator R&D in a Small Laboratory of an University
〈New type electron accelerator: Ridgetron—1997-2000—〉

Toshiyuki HATTORI*

1. はじめに

この巻ではこれまでの線形加速器の話とは異なり、IH型線形加速器のベースにもなっている、リッジ付導波管共振空洞を使用した電子加速器(リッジロン)を開発した時のこととお話したい。そのオリジナル・アイデアは元理化学研究所(理研)の小寺正俊先生が考案され、1996年には「折畳み軌道高周波電子加速器」という名称で特許出願もおこなわれているものである。

一般的な電子線形加速器では、マイクロ波帯の周波数を利用し、クライストロンなどを高周波源として、パルス運転がおこなわれることが多い。これに対して、リッジロンではVHF帯の周波数を利用して、大電力真空管により連続(CW)運転をおこなう。このため大きなビームパワーを容易に取り出すことが可能である。同じコンセプトをもつ電子加速器としては、IBA社(ベルギー)が販売している同軸型共振空洞を用いたロードロンがある。

小寺先生からアイデアをお聞きして、筆者の研究室では東芝と共同で、1997~2000年にリッジロンの原理実証機の開発をおこない、所期の性能を達成した。この開発研究は、筆者にとって数少ない企業との共同研究であった。

2. 経緯

1996年秋のある日のことだった。小寺先生が筆者の研究室を来訪され、折畳み軌道高周波電子加速器のアイデアを語ってくださった。筆者は加速原理と装

置構造をすぐに理解し、その実現にあたってはIH型加速空洞の技術が役立つと直感した。また、それは筆者の研究室なら実現可能だろうし、それゆえ開発を引き受けるべき使命をもつと考えた。そして数日のうちに、研究ノートのなかには加速空洞とリターンバック用偏向電磁石の概略設計ができあがっていた。

最も大きな問題は研究費であったが、すぐには目途がたたないため、それまで開発してきた多くの加速器と同じく、ケチケチ法で進めていくことにした。例えば高周波源としては、以前に福岡放送から譲渡を受けた放送機(180 MHz/10 kW)を使用する案などを考えていた。しかし、しばらくすると小寺先生が東芝との共同研究の話をもとめてきてくださり、年が明けた頃には、実験場所も含めた開発費について、全面的な協力が得られる見通しとなった。東芝でのリッジロン開発の中心は京浜事業所と重電技術研究所(当時)である。そして、何度か準備打ち合わせしているうちに季節は春になり、新型電子加速器の開発研究ということで、筆者の研究室からは大学院博士課程に進学したばかりの林崎規託君(現東京工業大学)を参加させ、博士論文のテーマとすることにした。

このようにして研究メンバーとしては、考案者の小寺先生、東工大からは筆者と林崎君、東芝の重電技術研究所からは中山光一さんと竹田修さん、京浜事業所から佐藤潔和さんと岩崎啓子さんが参加し、基本設計をスタートすることになった。また、高周波や電子加速器に関するアドバイザーとして、電気興業において産業用電子加速器「エレクトロンシャワー」の商品化開発を終えていた、元理研の藤澤高志さん(現放射線

* 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)

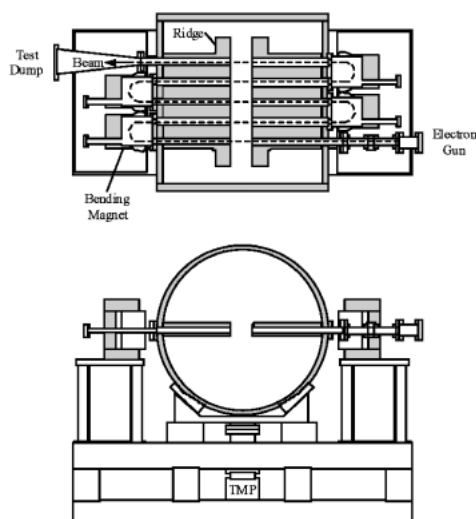


図1 リッジトロンの構成図

医学総合研究所)の協力が得られることになった。同じく電子線形加速器の専門家、日本原子力研究所を退職後、東芝の嘱託をされておられた益子勝男さんからも、主に電子銃関係の技術指導を受けられることになった。

3. 加速原理

ここでリッジトロンの加速原理について簡単にお話しておきたい。この装置では、加速部となるリッジ付高周波キャビティと、その外周部に設置された複数の偏向電磁石、電子銃などから構成される(図1)。本体キャビティには加速ギャップを構成する2本のリッジ電極が取り付けられ、その内部はビーム通過のために中空構造となっている。電子銃より引き出され、ソレノイドレンズを通過して入射した電子ビームは、キャビティ径方向に進行し、リッジ電極間において加速される。そしてリターンバック用の偏向電磁石に到達したビームは再び加速ギャップの方向に反転され、連続的な加速がおこなわれる。また任意の偏向電磁石を無磁場とすることで、最終エネルギー到達前にビームを取り出すことも可能である。したがって一定ステップではあるが、幅広い加速エネルギーに対応可能となっている。加速に用いられる高周波電場は擬TE₁₁₀モードであり、ループカプラーを通じて高周波電力を投入することにより励振される。加速周期は運転周波数の半周期ごとであり、また加速にともなうビームドリフト部分の軌道長の変化については、偏向電磁石の位置を調整することで対応している。

4. 原理実証機の開発

4.1 全体設計

開発が本格的にスタートすると、2週間に1回程度の頻度で、関係者による設計検討会がおこなわれた。そのなかで、原理実証機の性能は、実用機モデルの1/4である加速エネルギー2.5 MeV、ビーム出力6.5 kWに設定された。当初は電子線照射のための実用機として加速エネルギーを10 MeVにする案もあったが、予算の問題などもあって見送りとなった。そして筆者の研究室は、加速空洞の設計、ビーム軌道計算および電子銃の開発を担当することになった。

運転周波数は、CW運転のために高周波電源に四極管を使用することから、100~200 MHzのVHF帯の範囲で検討がおこなわれた。まずは加速空洞径とリッジ電極の寸法を変化させながら、2次元電磁場シミュレーションにより電気的特性を解析し、最終的には消費電力と取り扱いやすい加速空洞のサイズを考慮して運転周波数を100 MHzと決定した。そして、加速電圧分布の平坦化はIH型線形加速器に準じて、リッジ両端部の切り欠き形状を調整することでおこなうことにした。これらの効果は3次元電磁場シミュレーションと1/4縮尺のコールドモデルを用いて最適化をおこない、両者でほぼ同じ結果を得た。

加速ギャップ電圧は、加速回数と消費電力の関係から0.5 MVとした。したがって最終エネルギーまでに加速ギャップを5回通過することから、偏向磁石は4台を必要とし、その曲率半径は65 mmと非常に小さいものになった。そして結果的に、プロトタイプ機本体の設置面積は2×1 mとなった。

4.2 ビーム軌道計算

原理実証機のなかで安定して電子ビームが加速されるように、加速空洞や偏向電磁石の設計とフィードバックをとりあいながら、軌道計算は進められた。リッジトンでのビーム収束は偏向磁石とそのエッジ収束によっておこなわれる。しかし偏向磁石のFringing Field(漏れ磁場)には、垂直方向のエッジ収束力を減少させてしまう作用があり、その大きさは偏向磁石の曲率半径に反比例する。これはリッジトンにおいて大きな問題となるが、磁石とFringing Fieldは不可分の関係にあるので、後者を抑制して制御する構造が必要となる。

軌道計算を始めた頃は、スタンフォード大学の線形加速器センター(SLAC)で開発され、東京大学原子核研究所(核研)における改良後に、筆者の研究室のパソコン上でも動くようになっていた、マトリックス

法による軌道計算コード TRANSPORT を利用していた。そして、まずは弱収束の可能性を考え、偏向電磁石の n 値を変化させて計算してみたが、安定的な解が得られなかった。例えできたとしても、必要な磁場勾配を与えるためには傾斜した磁極面が必要であり、小型の 180 度偏向の電磁石では製作が難しいと予想された。

そこで、偏向電磁石のエッジ角による収束の検討をおこなったところ、ハードエッジ近似を用いていたうちは調子がよく、かなりの角度で安定領域が得られることが分かり安堵した。これを発展させて、前述した Fringing Field の効果を調べてみたところ、垂直方向の収束力が大幅に減少してしまう結果となった。とくにリッジトロンでは、小さな曲率半径をもつ偏向電磁石を必要とするため、その影響が顕著にでてしまった。念のため、偏向電磁石の 3 次元磁場シミュレーションを東芝にしてもらい、その計算データから Fringing Field 部分を取り出してセグメント分割し、小さな理想二極磁場の集合体として再計算をおこなってみたが、やはり安定領域を見つけることはできなかった。このとき筆者は、リッジトロン開発における最大のハードルが来たかなと思った。

それから、各人がアイデアを出して検討したが、この難問をスマートに切り抜ける方法が思い浮かばなかった。そして 1 週間が過ぎた頃、電磁石の偏向角を 180 度以上にして横方向収束を確保し、エッジ角は垂直方向収束だけに使えば、安定解ができるのではないかと、林崎君が言い出した。そのとき筆者や佐藤さんは、偏向角を多少増やしたところで、それほど横方向の収束力は増さないのではとコメントしたと記憶している。しかし、ちょうどその頃導入したばかりの新しい軌道計算コード Power Trace を用いて、林崎君が熱心に計算した結果、ビームエンベロップが水平・垂直両方向ともに ± 8 mm 以内にキープされる安定解が発見された。

そして、この収束法を実現するための方法として、アクティブ・フィールド・クランプという機構を考案した。一般的な偏向磁石には、その Fringing Field の拡がりを遮断するために、強磁性体を用いたフィールド・クランプが取り付けられている。しかしそのままでは遮断効果だけであるため、アクティブ・フィールド・クランプは、偏向磁石本体とは逆極性の磁場を発生させる補助コイルを備え、Fringing Field を効果的に抑制するとともに、偏向電磁石通過後の最終的な偏向角を 180 度に調整する。そして、このアイデアは特許出願がおこなわれた。また、この方法を用いた

偏向電磁石の具体的設計は東芝の山口晶子さんが担当され、綿密な磁場解析によって高精度のものが仕上がった。

このとき痛感したのは、シミュレーションも実質的には実験と同じで、シミュレーション実験ということである。リッジトロンの軌道計算で苦労した後に、それまで何度も眺めていたロードトロンのパンフレットを読み返してみると、その電子ビームは同軸型加速空洞の中心を通るため、自然に 180 度以上に偏向されていることに気付いた。ロードトロンでは構造的に 180 度以上の偏向が必要なので、たぶん我々ほど意識せずにビーム収束ができてしまったのではないかと推測している。このため、我々のほうが偏向電磁石とビーム収束の関係を良く理解しているのではないかと笑話をすることがあるが、あながち嘘でもないような気もする。

4.3 電子銃

原理実証機に必要な 2.5 mA の加速ビームを得るために、低エミッタンス電子銃の設計・製作をおこなった。陰極材料には低真空条件に強い LaB_6 の単結晶を選択し、電極構成はビーム電流量と時間的構造の制御をおこなうグリッド電極をもつ三極管構造とした。引き出し電圧は -20 kV を陰極に印加する設計とし、電子銃用軌道計算コード EGUN によって電極形状の最適化を図った。また、ビームパルスに必要の高周波系の設計・製作にあたっては、東芝の囑託でおられた千葉好明さん（元理研）に協力いただいた。

しかし実際には、その設計途中にちょうどタイミングよく中古の電子銃システムが入手できたため、まずはこれでリッジトロンの試運転をおこなうものとし、益子さんをお願いして、動作確認のためのテストスタンドを林崎君と一緒に製作してもらった。このとき、硫化亜鉛を発光体とするビームプロファイルモニターを製作したが、その記録装置をどうするか悩んでいたところ、当時はまだ珍しかったデジタルカメラだと撮影した画像をリアルタイムで見ることができると聞き、林崎君とともにショールームまで出向いて実物を確認し、さっそく購入して利用したのを記憶している。

5. ビーム加速試験

1998 年の春も過ぎて加速空洞を製作し始めた頃、その年の 3 月に筆者の研究室で大学院修士課程を修了し、東芝に就職したばかりの五十川克士君が、新人研修期間を終えて重電研に配属され、リッジトロンの開発メンバーに加わった。しばらくして加速空洞がで

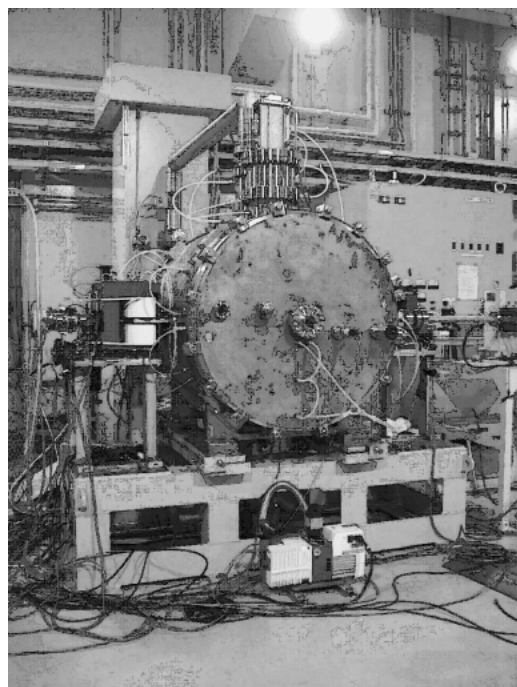


図2 リッジロン原理実証機の外観

きあがってくると、五十川君とともに低電力試験をおこない、共振周波数が 101.4 MHz、Q 値が 23000 という結果が得られた。また、電子銃や偏向電磁石、高周波増幅器の準備も終わり、装置全体を組み立てた(図2)。

そして、加速空洞のエージングが終わり、パルスビームによりビームコミッションを開始したところ、第1ギャップでの加速後のビーム軌道が、水平方向に偏向していることが発光型プロファイルモニターで確認された。これは加速ギャップ空間に高周波磁場が存在していたためで、対策として銅ブロックを追加して電極の改造をおこなうことになった。

3次元電磁場シミュレーションにより最適化された追加ブロックは、空洞端板側にテーパ面をもつものであり、インジウムシートを介してリッジ電極にネジ止め固定された。ブロックの追加によって全体的に偏向磁場強度が減少し、とくに問題となっていた第1加速ギャップでは大幅に改善された。電極ブロックの追加により加速空洞の電気的特性も変化し、共振周波数は 92.8 MHz、Q 値は 21000 となった。また、前者の低下にともない高周波増幅器の再調整もおこなわれた。

この改造によってビーム偏向の問題は何とか解決したため、その後は慎重に1ギャップずつビーム加速を進めていった。そして1999年12月に、最終エネルギーまで無事にビームを加速することに成功し、原

表1 リッジロンの主要パラメータ

	設計値	最終値
運転周波数 [MHz]	100	92.8
入射エネルギー [keV]	20	20
出射エネルギー [MeV]	2.5	2.5
ビームパワー [kW]	6.5	7.0
最大ギャップ電圧 [MV]	0.5	0.5
加速空洞内径 [mm]	966	966
加速空洞長 [mm]	990	990
加速ギャップ長 [mm]	140	140
リッジ電極幅 [mm]	80	80
Q 値	27000	21000
高周波消費電力 [kW]	42	50

理実証をおこなうことができた。そして、その後も五十川君が努力を続けた結果、2000年3月には設計値を超える 2.8 mA の電子ビーム (CW) を加速した。原理実証機で得られた最終性能を表1に示す。

6. 日本発の加速器技術

ここで、日本発の加速器技術について少し振り返ってみたい。細かいものまで含めばきりがないと思うが、筆者にとって印象の強いものをいくつかあげてみる。

まずは線形加速器。これはあまり知られていないが、筆者が長年研究を続けている IH 型線形加速器は、1949年に東京大学の森永晴彦さんによって原理が提案され、1978年にミュンヘン工科大学のタンデム静電加速器のブースター線形加速器として初めて実用化されたものである。また、1966年に高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の西川哲治さんが考案された、陪周期構造 (APS) 型の定在波線形加速器も重要であり、これは後年になってトリスタン加速器の高周波加速空洞として実用化された。

円形加速器については、1953年に東北大学の北垣敏男さんによって発表された、機能分離型強収縮シンクロトロン の原理は有名である。また、1953年に東京大学の大河千弘さんが提案された、固定磁場強収縮 (FFAG) 型加速器もあげられるだろう。これは1950年代後半～1960年頃に、米国の MURA 計画で電子加速用モデルの原理実証がおこなわれている。イオン加速用については、1999年に KEK の森義治さん (現京都大学原子炉実験所) のグループが陽子加速用を実用化した。そして広い分野で応用開発も進んでいる。

このように見てくると、リッジトロンは日本人が考案し、その原理実証にも成功した数少ない純国産の加速器のひとつといえるだろう。しかし、その後実用機を開発しようとして各種の公募研究に応募しても、採択されることはなかった。我が国は科学技術立国、ものづくり振興と表向きには旗を振っているが、本当に日本オリジナルの開発研究に予算がつくことは少ない。欧米諸国においてすでに成功していたり、計画が動き始めていたりするテーマの2番煎じや3番煎じに対して、優先的に予算を配分する傾向があるように思う。これは我が国がめざすべき方向と矛盾しているが、失敗を恐れるあまり、そうになってしまうのだろうか。

7. ま と め

これまでの筆者の研究スタイルとは異なり、リッジトロンの開発は企業との共同研究としておこなわれた。このため、筆者の研究室の機器類や実験室なども部分的には利用したものの、東芝には数々の便宜をはかっていただいた。

この開発研究のなかでは、高周波電源、加速空洞、小型電磁石、電子銃システム（パルス回路、高周波アンプ）、ビームモニタ、出射系の分析電磁石やビームタンブ装置などが、それぞれ設計・製作あるいは購入され、システムとしてまとめられて原理実証試験が行われた

リッジトロンの開発研究は、実用機（加速エネルギー

10 MeV）を目標としつつ、第1ステップとして原理実証機の開発研究をおこない、ビーム加速（エネルギー 2.5 MeV、ビーム電流 2.8 mA）に成功した。もう少し予算確保に奔走していれば、最初から実用機を製作できていたかもしれないが、原理実証機によって設計値以上のビームを加速できたことを振り返ってみると、結果的には幸運であったといえる。しかし、諸般の事情により第2ステップとなる実用機の製作まで至らなかったのは残念である。

いまになって思うと、この開発研究は人材的にも恵まれていた。考案者の小寺先生に監修していただきながら、電子線形加速器の専門家である益子さん、高周波の専門家である藤澤さんや千葉さんなどから直接指導を受けることができた。また、この開発研究を論文研究テーマに選んだ林崎君は、博士課程から取り組み始めたにもかかわらず、筆者の研究室では珍しく3年間で学位を取得した。なお、この新しい電子加速器のニックネームが必要となり、関係者が頭を悩ましていたとき、「リッジトロン」という名称を提案したのも彼である。そして、東芝の多くの皆さんの協力と努力もあって、途中で難しい問題があらわれても、知恵を出しあって解決しながら、無事に原理実証機を完成させることができたと思う。

この巻を終わるにあたり、リッジトロンの開発研究に協力していただいた関係者の皆様に心より御礼申し上げます。