

STATUS OF THE KYOTO UNIVERSITY PROTON LINAC AND DEVELOPMENT OF THE 4-ROD RFQ ION IMPLANTER

Makoto INOUE, Hideki DEWA, Hirokazu FUJITA,
Hiroshi FUJISAWA, Masanori IKEGAMI,
Yoshihisa IWASHITA, Shigeru KAKIGI,
Akira NODA, Hiromi OKAMOTO
and Toshiyuki SHIRAI

Institute for Chemical Research, Kyoto University
Uji, Kyoto 611, Japan

ABSTRACT

The ICR 433MHz proton linac has been improved since the successful first beam acceleration. A pulsed power supply system has been constructed for the ion source. Properties of the ion source and the 2MeV-RFQ linac beam have been measured. The intensity of the 7MeV proton beam has been obtained to be $240\mu\text{A}$ without an RF buncher at the matching section between the RFQ and Alvarez cavities.

A cw 34MHz 4-rod RFQ linac for ion implanter has been also developed at the ICR accelerator laboratory in collaboration with a company. This linac has successfully accelerated the light-heavy ion of which charge to mass ratio is larger than 1/16. Measurements of the properties of the beam are now in progress.

京大化研陽子加速器の現状と 4ロッド重イオンRFQの開発状況

1. はじめに

京都大学化学研究所附属原子核科学研究施設は宇治地区にイオン線形加速器実験棟を新築して1989年に蹴上地区より移って以来、サイクロトロンに代わって線形加速器の建設・開発を行ってきた。蹴上時代に既に中間子発生用のコンパクト化した陽子線形加速器の計画のために準備研究を行っていたが、移転にともない433MHzの高周波四重極(RFQ)型およびアルバレ型よりなる7MeVの陽子加速器を設計製作することになった。限られた予算の中で手作り部分を含む工夫をしつつ、なんとか1992年1月22日に7MeVまでの陽子ビームの加速に成功した。このときのビーム強度は、イオン源の電源がパルス化されていない手作りのものであり、 μA の程度であった。その後パルス化電源を製作してイオン源から出るビーム強度を上げたほか、RFQからの2MeVのビームの性質を詳しく測定している。またRFQとアルバレの間にバンチャーを製作中である。またアルバレから出た

7MeVのビームの性質を測定する準備も進行中である。現在バンチャー無しでアルバレからのビーム強度は $240\mu\text{A}$ 程度であるが、これらの調整により強度増をはかりたい。

一方、このような線形加速器開発の研究的雰囲気のもとで民間との共同研究もいくつかスタートした。陽子加速器については、 $4\pi-2\pi$ DTLキャビティなどの小型高効率化に対するアルミモデルによる研究を行っている。

またより実用段階になっているものとしてイオン注入用の4ロッドRFQの開発がある。このイオン注入用RFQは1992年の暮れから1993年の初めにかけて、ヘリウム1価、窒素2価、炭素1価のビーム(核子当たり83keV)の加速に次々と成功した。50kW程度のcw運転が可能である。現在ビームの特性を測定中である。

以下7MeV陽子加速器とイオン注入用の4ロッドRFQの現状を中心に報告する。

2. 陽子線形加速器

2-1. イオン源と入射ビームライン

7 MeV陽子線形加速器のレイアウトは図1のようになっている。将来的に正負のイオンを同時に加速することも考慮したため入射ビームラインが長いにもかかわらず予算不足で大強度ビームに適したものになっていない。当初DC運転であったイオン源電源をパルス化電源と置き換えて図2のようなものを製作した。

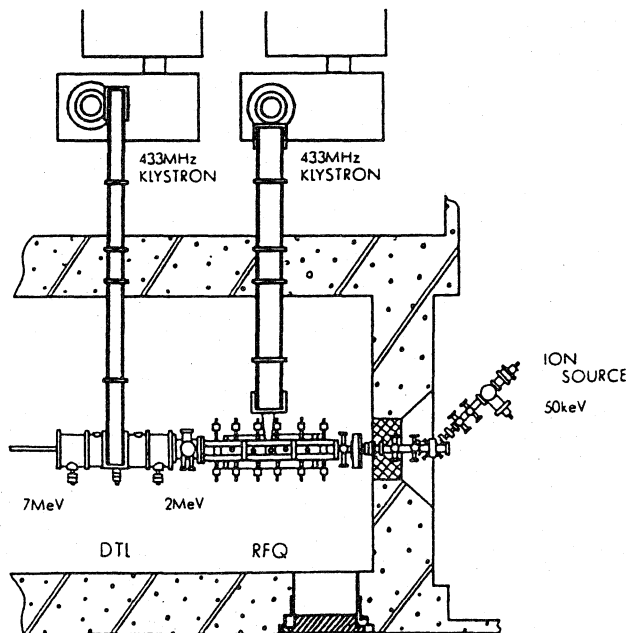


図1. 京大化所7 MeV陽子線形加速器

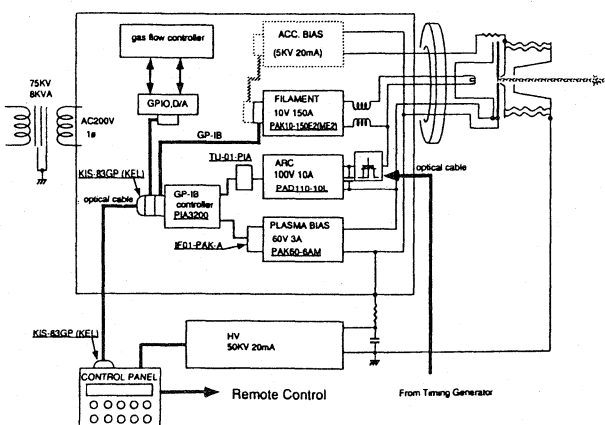


図2. イオン源用パルス化電源ブロック図

この結果分析後の陽子ビームの強度が3 mA程度になった。低エネルギーのビーム輸送系 (LEBT) も空間電荷効果を考慮しないものをまず製作したが、実際には10 mA級になると現在のシステムはビーム径が

小さい所があるため、空間電荷効果が大きくエミッタンスが大きくなってしまいますのでRFQへの入射電流を上げられない。ネックとなる磁石の間隙を大きくすることや、RFQの直前に特製の永久磁石による集束要素を取り付けることを検討している。

2-2. RFQのビーム特性

ビームのエネルギーとその幅を測定するためRFQとアルバレの間に小型の分析電磁石を取り付けた(ただし、アルバレまで加速するときにははずす)。場所が狭いのでヨークだけ真空中に入れる構造にした。測定の結果は、 $2.00 \pm 0.02 \text{ MeV}$ で、その幅は80 keV FWHMで設計値と一致している。なお高周波電力を規定値より下げていくと、低いエネルギーの粒子が出てくるのが観測された。図3に運動量スペクトルのRF電力に対する変化を示す。

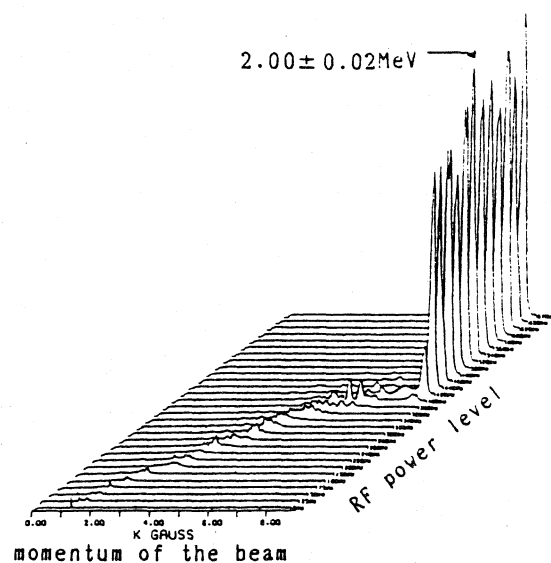


図3. RFQビームの運動量スペクトル

現在、ビームプロフィールモニター、エミッタンスモニターを製作してビームの特性を測定している。この測定ではビームの検出に蛍光体 (Desmarquest, AF995R) を用い、CCDカメラで発光量を測定してパソコンで処理するシステムを製作した。なお加速器はパルス運転であるので、この測定も各パルス毎にできるようになっている。この測定の場合は上述のエネルギー測定用の磁石を取り出し代わりにエミッタンスモニターを設置して行なう。アルバレまで加速するときには撤去することは同様である。測定の結果は、図4に示すよ

うに、X方向およびY方向についてそれぞれ、 $42\pi\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ および $30\pi\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ であり、X方向は計算値よりやや大きい。

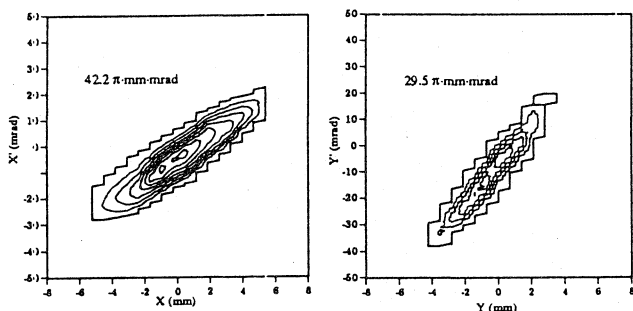


図4. RFQビームのエミッタンス

2-3. バンチャーとマッチングセクション

RFQとアルバレの間でビームのマッチングをとるためにQ磁石およびRFバンチャーを必要とする(MEBT)。まずQ磁石だけ取り付けてアルバレまでの加速を行なった。その状態で、現在アルバレの出口で、7 MeVのビームの強度は $240\mu\text{A}$ である。1/4波長型2ギャップRFバンチャーを製作した。数kWのRF電力を必要とするがそのパワーテストには成功しており、予備的なビームテストを行なっている(本研究会21-P29)。

2-4. アルバレとその後のビーム輸送系

アルバレは電源電力に余裕がある。当初サーキュレータ無しで運転していたが、安定した運転のためアルバレ側にもサーキュレーターとダミーロードを設置した(なおRF系については本研究会21-P23)。ダミーロードに使う吸収体の性質が同じにならなかったため、この部分の性能がやや劣る。

RFQが真空ポンプ、RFカップラーの取り付けの関係でベーンが水平・垂直に対して45度傾いているためアルバレのドリフトチューブ内の永久Q磁石も同様に面が傾いている。しかしアルバレを出たビームは水平の磁石で曲げられるのでそのままでは適当でない場合がある。そこで適当なskew Q電磁石を設置してX、Y方向ともほぼ同じ大きさで平行ビームに近いビームにしてより後ろのビーム輸送系に渡すことにした。このためQ電磁石のダブレットを2組製作した。現在、アルバレのビームのエミッタンス測定準備と

このQ電磁石の設置の準備を行なっている(本研究会21-P18)。

3. RFQとアルバレの組合せの最適化

陽子線形加速器の小型化を進めるためその構成の最適化について民間との共同研究を行なっている。一つのキャビティに 4π と 2π のドリフトチューブを入れた構造についてアルミのモデルを製作し電場測定を行なった(本研究会21-P33)。

4. イオン注入用4ロッドRFQ

4-1. 基本的な構造

陽子加速器とは別に、民間との共同研究でイオン注入用の重イオン加速器を開発してきたが、実機を製作しビーム加速に成功した。4"ロッドRFQであるが、ロッドの部分は断面がよくあるような円形ではなく、長方形で先端は3次元加工してQ電場を発生するようになっている。この4本の"ロッド"を支える支持板はモデルを使って検討した結果、2枚ずつ対にして配置するというよりも、むしろ全て等間隔に配置する方がよいことが判明した。当初ドイツで提案された4ロッドの共振構造の概念に対する変更をせまるものと考えられる。周波数34 MHzのタンクが直径60 cmという小型にできたことは、特筆すべきである。

4-2. RFパワーテスト

最も心配したのは、構造的には簡単であるが、全ての電極類がばらばらにできるようにしてあるので、発熱が多くてcw運転ができないのではないかとということであった。実際にはパワーテストの結果、50 kW程度まで問題なくcw運転ができた。パワーの増加とともに冷却水の温度の上昇が見られ、共振周波数が下がる。しかし実用上問題はなく、cwでの加速テストが可能であった。

4-3. ビーム加速テスト

加速テスト時の全体の配置図は図5に示す。イオン源はフリーマン型でヘリウム+アルゴン、窒素、2酸化炭素のガスを用いてテストした。ヘリウム1価、窒素2価、炭素1価のイオンの加速に成功しており、ビーム強度はそれぞれ $32\mu\text{A}$ 、 $13\mu\text{A}$ 、 $220\mu\text{A}$ (いずれも $\text{p}\mu\text{A}$)であった。またRFQの入口から

出口までの透過率はヘリウムでは90%、窒素と炭素で80%に達している。

り詳しく得られているので、詳しい解析に耐えられると思われる。計算例を図8に示す。

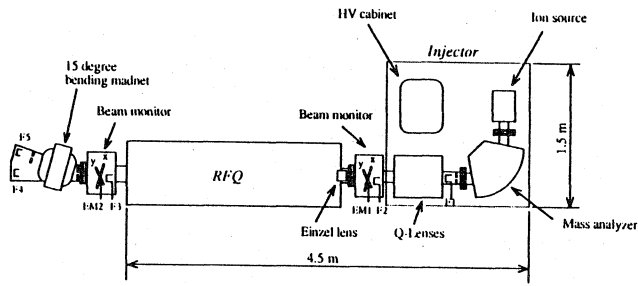


図5. 4ロッドRFQ配置図

エネルギーは15度の偏向角の電磁石で測定し、ヘリウムは0.35MeV、炭素は1.07MeV、窒素は1.17MeV(いずれも誤差は2%)であった。さらにイオンビームをシリコンのウェファに注入してその様子を調べた(SIMS)。図6は窒素2価のイオン注入した時のSIMSによるスペクトルである。窒素イオンのレンジのピークは、1.6μmであり、よそでのデータとよく合っている。

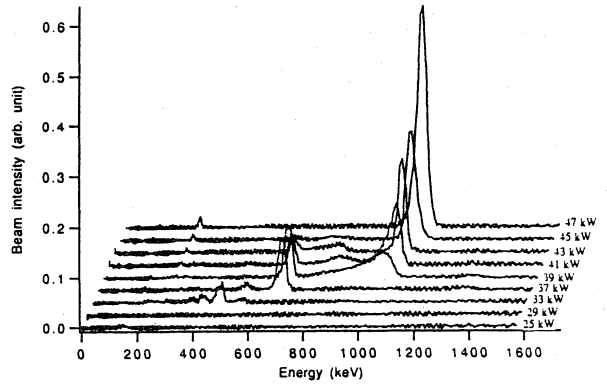


図7. C+ イオンのエネルギースペクトル(実験)

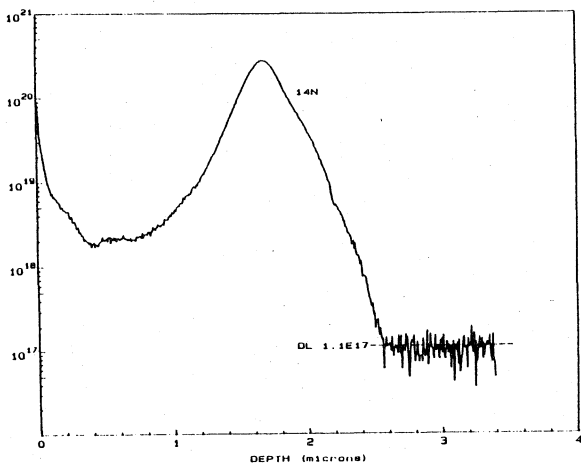


図6. シリコン中の窒素イオンの飛程(SIMS)

この場合も陽子加速器の場合と同様、RF電力が定格以下でもビームが加速されている。図7にその例を示す。計算で調べたところ、電力の値は異なるが、定性的にはそのようなスペクトルが再現されることが判明した。ロスアラモスでのデータおよび解析もあるが我々の陽子加速器および重イオン加速器のデータはよ

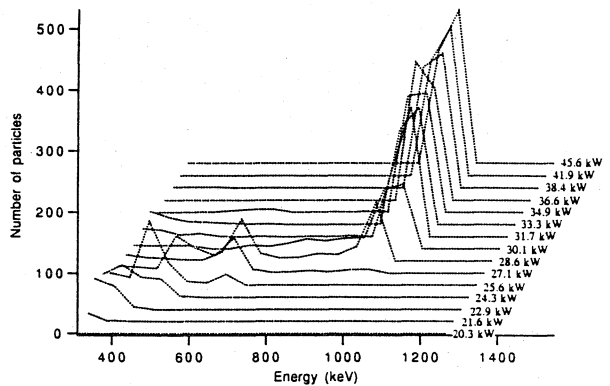


図8. スペクトルの計算機シミュレーション

エミッタンス測定については、モニターの検出部が陽子加速器のものとは異なりマルチワイヤできている。そのワイヤの間隔が大きすぎたため精度が悪くて計算との比較が定量的にできないが、定性的には合っている。

このRFQだけではエネルギーの可変性がないので後にスパイラル型2ギャップのキャビティを接続することを考え現在組立中である。秋には一応の完成をめざしており、その後は共同で開発した会社に移設し、ホウ素などイオン源での取扱に注意を要するガスを用いるイオンの加速を行なう予定である。

なお今回製作したものは別に可変周波数型の4ロッドRFQの開発研究も進めている(本研究会21-P24)。