

理研可変周波数リニアック

理化学研究所

小寺正俊
リニアック建設
グループ

概要

質量の大きい元素のイオンの加速：理研は昭和42年初頭から運転を開始した160cmサイクロトロンにより、リチウムからネオンまでの質量は軽いが重イオンと呼ばれるイオンを加速し、多方面にわたる研究に使用して来た。分野としては、核物理、原子物理、固体物性、核化学、放射線化学、生物学の他、理研以外の機関へのアイソトープの提供、材料の放射線損傷試験の便宜供与にまでわたっている。

しかし、同サイクロトロンは年々5,000時間をこえる加速活動を試運転開始以来4年にわたってつづけて、要修理回数が漸く増加している。また利用分野によつては、性能についての不満が生ずるに到った。この事態を予測してサイクロトロン完成後の早い時期から、検討がすすめられ、昭和46年に複合重イオン加速器施設の案が得られていたが、昭和49年度にその前半部の可変周波リニアックの建設が認可された。全施設が完成すると、任意の入射粒子に対し、任意の標的の原子核のクーロン障壁を十分に越えるエネルギーが得られ、研究領域を大きくひろげることが出来る。具体的には、分離セクター型サイクロトロン(SSC)によりリニアックのエネルギーを増幅し、最も重い元素に対しても核子当り10 MeV以上とする計画である。

低β重イオン加速器：重い元素の加速装置にはイオンの速度の小さい低β領域に困難が多く、その克服が施設の性能を左右することがよく知られている。第一にはイオン源の重い元素に対する性能が重要である。次に、イオンと残留ガス分子との相互作用により荷電が変化する確率を小さくするために、速度が核子当り1 MeV程度に達するまでの走行距離が短かく、加速空間の真空度がよい必要がある。

加速器内部を高真空とするには、真空ポンプの性能もさることながら、ポンプと加速部との距離が短かく、排気コンダクタンスが大きいこと、真空容器の内部の表面積が小さく、ガス放出のすくない材料で構成されていることなどが重要である。さらにガス発生源となるイオン源を主加速部の外に置いて、ガス流入をすくなくできることが望ましい。

加速距離を短くするには大電圧を使用して急速にエネルギーを増加し得る方式の加速器を採用せねばならない。以上の条件を比較的満足する加速方式は、リニアックとタンデムバンデグラフである。我々は、長期の用途と使用経験のある多価イオン源を使用し得るリニアックを低β部分の加速器として選んだ。多価イオンを使用することにより、加速初期におけるエネルギー増加率を大きくすることができる。またリニアックはその構造の長所として、真空ポンプとビーム走行部との間のコンダクタンスを大きくとれる利点がある。

リニアックの短所と可変周波方式の採用：しかしながらリニアックによる重い元素の加速には特有の困難がある。現在のイオン源技術では、元素の原子番号が増加しても、多価イオン源で付与し得る荷電数をそれに比例して増加させることができない。元素の質量は、原子番号より急速に増大するから、イオンの質量と電荷の比は原子番号とともに大きくなる。陽子より重いイオンのリニアックはドリフトチューブ構造をとるが、この方式では軌道の任意位置でのイオンの速度はドリフトチューブの周期の手法と周波数により規定されている。軌道の任意位置のドリフトチューブ周期を L 、加速高周波の周波数と周期を f, T 、イオンの質量数と電荷、エネルギーを A, q, E 、有効加速電圧を V とすると、イオンが常に加速電場を感じるための同期加速条件として

$$L \propto vT \propto \frac{1}{f} \sqrt{E/A} = \frac{1}{f} \sqrt{q/A \cdot zV}$$

と書ける。 zV はイオンがその地場に到るまでに受けた有効加速電圧の和である。低βの範囲であるので、相対論の考慮は不要である。通常、リニアックは使用周波数を変えられないからイオン、したがって q/A が決めれば根号のなかを一定とするために、 $zV \propto A/q$ の比で加速電圧を変えないと、同期条件を保つことができない。上述のように入イオン源で作られるイオンの A/q は軽い元素に小さく、重い元素に大きいから、重い元素の加速には軽い元素よりもはるかに大きな加速電圧を必要とする。計画立案時のイオン源技術の状況では、その倍率は6~7倍であった。高周波電力はその自乗で大きくなることとなる。

もし、加速周波数を可変とすることができれば、加速電圧をこのように大巾にかえす必要はなくなる。たとえば zV を一定とすると、 $f \propto \sqrt{q/A}$ の関係で周波数を変化させれば同期条件は成立する。サイクロトロンの場合には磁場が一定であれば $f \propto q/A$ の関係で変化させるから、リニアックの方が同一の周波数変化比に対し、広範囲をカバーすることができる。しかし、リニアックを可変周波とするには多くの困難があり、技術的問題の解決が必要である。理研のリニアックは周波数変化の容易な $1/4$ 波長同軸共振器を基礎と

して、加速電場分布の周波数依存性、周波数変化方式と微調、電力損失などの問題の解決を目標として製作された。いくつかの回で同様な検討がなされてきたが、実用機として最初のものである。また分離セクター型サイクロトロンの入射器として機能し得るように、サイクロトロンの連続運転を原則としていることも特徴の一つである。

第1表 加速エネルギーと使用周波数の例

| Ion | Ne-20 | Ar-40 | Cu-63 | Kr-84 | Xe-132 | U-238 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| Charge state | 5 | 7 | 6 | 8 | 9 | 10 |
| Frequency (MHz) | 45 | 39 | 31 | 31 | 25.5 | 20 |
| Energy (MeV) | 80 | 120 | 119.7 | 160 | 179.5 | 199.9 |

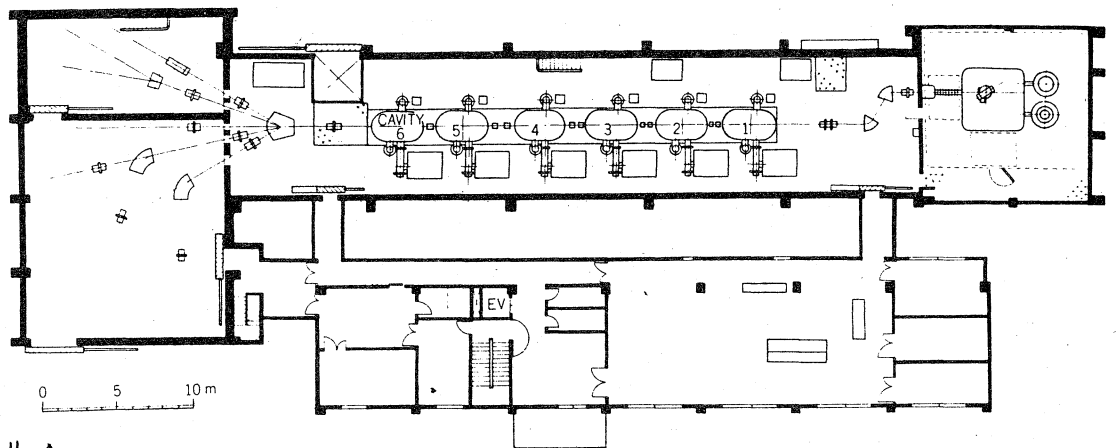
現状： 54年度に加速器およびビームトランスポート系の据付が終り、現在は加速試験と実験設備の据付がおこなわれている。ドリフトチューブ加速器の第一共振器による加速が30MHz以下の周波数においておこなわれ、各部分が設計目標を満していることが確認されている。現在は六ヶの共振器の長期の安定運転に必要を自動フィードバック系ハードウェアの整備と、制御用計算機のソフトウェアの開発がおこなわれており、それらは10月末には終了し、55年末には全共振器を使用する加速運転に入る予定である。

加速器の構成

配置：

Fig.1 はリニアック施設の一階部分の平面図である。

Fig.1 Plan of the linac facility



入射器タ-ミナル：

- イオン源室—H型鋼、アルミ板外装、耐荷重15t、4mW×4mD×2.5mH、耐震0.4g
- イオン源—間接加熱陰極PIG型(磁石重量3t)、および冷陰極axial PIG型
- 高圧電源—高周波コッククロフト、500kV、10mA、安定度10⁻⁴
- 高圧部給電—FRPシャフト駆動電動巻電機、200V、50Hz、3φ、50kVA
- 高圧部冷却—高純度脱イオン純水を地上より循環、100l/min、等価抵抗1000MSΩ
- 高圧部制御—光ファイバー経由のデジタル信号伝送方式による。

主加速部: Fig.2 に概念図を示した変形断面の $1/4$ 波長同軸共振器の開放端に, 外筒と内筒から交互にドリフトチューブをとりつけて, ウィンドロー型加速構造としている。但しこの図は第一加速部に対応するもので, 加速初期の低速イオンの集束のため, 外筒から支持されるドリフトチューブの長さはウィンドロー型の π ではなく, 3π の高周波位相変化に相当するものとなっている。第二加速部以降はすべて π の長さである。この外筒支持ドリフトチューブは小型の四極磁石を収納しており, そのため外径は内筒支持のそれの 10 cm に対し, 16 cm と太くなっている。集束用の磁場勾配は最大 7 kG/cm をビーム開口径 20 mm に対し連続して発生させることができる。コイルの冷却にはフロン-113液を使用している。

共振周波数は同軸長を変えることにより $17\sim 60\text{ MHz}$ におおつて変化させることができるが, 使用するのは 45 MHz 以下である。二組の容量補償板により共振周波数の微調と安定化がおこなわれる。

高周波励振器: RCA 4648 を出力管として最大 300 kW (CW) の励振が可能である。その前段までは非同調としてある。加速器棟内の主加速部と励振器群を Fig.3 に示した。小判型の主加速部と対になった四角い筐体が励振器で, 出力段同調用の同軸スタブのため背が高くなっている。

制御系: 制御卓にミニコン, 加速器室にマイクロコンを配置し, 分散処理制御方式をとっている。多数のパラメータの初期値設定は理論計算値, ディスク記憶の表のいづれでもおこなうことができる。

1) 小寺; 物理学会昭和46年春季年会原子核分科会, 「将来計画シンポジウム」, 昭和46年6月, 東京

Fig.2 Schema of the accelerating structure

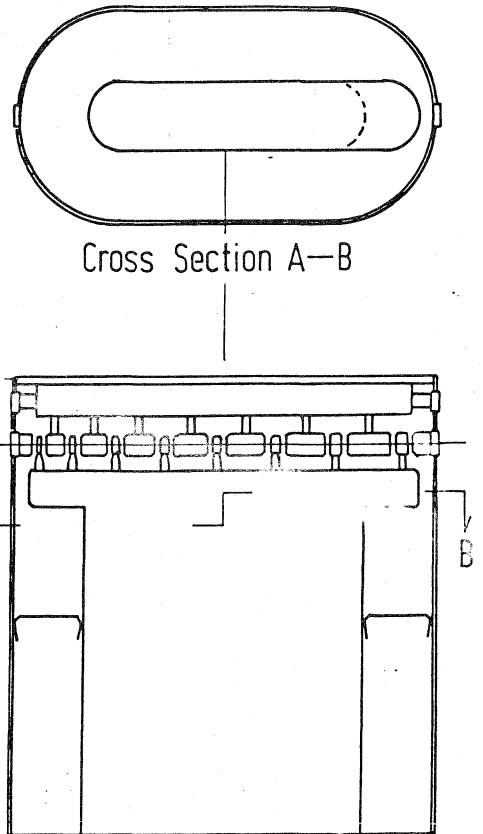


Fig.3. Linac array seen downstream

