

特集 (日本の加速器の歴史)

高周波重イオン連続加速装置開発の歩み

小寺 正俊*

Development of Radio-frequency CW Acceleration Technology of Heavy Ions

Masatoshi ODERA*

1. はじめに

日本の加速器技術研究は、1945年の位相安定性原理の発見、1952年の強収束方式の提案、と加速器技術の活発な革新の時期に、敗戦とそれに続く占領軍の「核物理研究と加速器保有の禁止」通達により影響を受け、1952年の講和条約締結までは、米国の研究者の米軍への勧告による個々の緩和はあったものの、物理学会での加速器開発報告は、隆盛からは程遠かった。勿論、この期間中も、加速器としての具体化が一目瞭然でなければ、被占領状態の解消を待ちつつ、各種の研究が行われた。例えば、加速器の重要な構成要素である電磁石の磁場分布の磁気飽和現象による変動を、出来る限り強い磁場まで回避できる磁極プロファイルの研究が進められ、講和条約後に新しい性能を持つ小型サイクロトロンが作られたし、真空機器の国産化に向けて、民生用途の真空装置の開発や、真空機器メーカーの設立等の努力も進められた。そして講和条約締結の前後から複数の研究グループが、各種の加速器の開発をスタートさせている。幾つかの有力大学は敗戦で中断していた計画の延長、或いは占領軍に破壊された装置の再建として、バンデグラフ、小型サイクロトロン等の建設を目指したが、他の多くは、敗戦で落ち込んだ日本の経済状況に対応して、ベータトロン、小型電子シンクロトロンなど、建設コストの小さい電子加速装置の建設を選んでいった。例えば、筆者が加わった東工大グループは、当時の大学の定常研究費で手が届く装置として、小型電子シンクロトロンの建設を選択した。今思えば言語道断な僅かの予算で、メーカーの好意と、無給の学生と研究生の貢献に頼り、何とか作り上げて、当時盛んであった光核反応の研究に必要と考えられた数レントゲンのビーム強度を実現し、予定していた研究テーマの光核反応実験に取

り掛かった。然し、一年余りの試みで、幾つかの論文は作れたものの、日本の研究サークルが世界の研究者と比較して、甚だしい情報不足の状態下であり、この装置で可能な光核反応研究は、既に欧米では終わりに近いこと、我々の装置は核反応を起こすことは出来るにしても、数年前に欧米で使用されていた装置の言わばコピーであるので、瞠目すべき新しい成果を得ることは困難なこと、他国の研究者と競争するには、僅かでも明瞭に異なる性能を持つべきこと等を痛感させられることとなった。

以下には、そのような苦い経験が動機の一つとなった「高周波による重イオン加速装置」の、我国の研究分野への導入過程について、やや個人的な記憶を交えて記してみたい。個人的と断るのは、筆者の知らない高周波重イオン加速装置の開発努力が、おそらく同じ時期に我国のどこかでなされていたのではないかと思うので、それらの試みの関係者の方々に、見落としについて予めお詫びをしておきたいと思うからである。

2. 重イオン加速事始め

1950-60年代の核物理研究に使用された GeV 以下のエネルギーの加速器は、電子、陽子、重陽子、アルファ粒子を加速対象としており、より重い元素のイオンは殆んど顧みられなかった。第一の理由は、当時、その構造に未知の部分がまだ多かった原子核の研究には、研究手段の弾丸(プロジェクトイル)は、なるべく構造が簡単なものであるべしと考えられていたことであった。また、荷電個数の大きい重イオンを弾丸とした場合、標的核の電荷との積によるクーロン障壁が高く、これを乗り越えて核反応を起こすには、加速エネルギーを大きくする必要があるので、加速装置の規模が大きくなり、従って建設及び運転コストが大きくなるであろうこと、また、反応が複雑なことが予想さ

* 理化学研究所名誉研究員

れるが、その解析が難しく、重イオンで何を研究すべきかの核物理学理論の指標も当時は整備されていなかったもので、重イオンで何らかの意味のある核物理への寄与をすることは難しいのではないかと、との疑念が研究者の間にあったことが挙げられる。また、その状況下では当然であるが、実験結果の解析手法も整備されていなかったことも、意欲をそいでいた。1960年頃に、当時の原子核理論のリーダーの一人と目されていた先生に、重イオンでどんな研究が出来るでしょうかと質問をしたところ、「全く判りません」との率直な御返事を頂いたことがある。実は、既に1952年に Breit, Hull, Gluckstern¹⁾が、重イオンを使用した原子核研究の可能性について、先駆的な指摘をしていたのであるが、当時の日本の殆どどの研究者はこの指摘に無関心で、上述の弾丸はシンプルであるべしとの意識が、より強力であったように記憶している。

講和後の日本で、1954年頃から始まった東大原子核研究所 (INS) の建設、かなり遅れて1966年にスタートした阪大の核物理研究センター (RCNP) の建設など、少ない研究施設を選んで、国の資金を集中させ、日本の核物理研究を振興しようとした共同利用研究施設構想が、声高に語られるに到った時代においても、重イオンの加速は、1960年代始めにはまだ取り上げられておらず、漸く1960年代後半に入ってから論じられるようになった。欧米においても、米ソの、専用大型加速器による「兵器としての使用に適した核分裂性能を持つ超ウラン元素」の探索競争を除けば、重イオンによる核物理研究に研究者の関心が高まるのは、1960年代も遅くなってからである。

この状況の中で、理化学研究所は、米軍により東京湾に投棄されたサイクロトロンの再建を計画し、1961年に、菊池正士、野中 到、熊谷寛夫などの錚々たるメンバーからなる諮問委員会を設置した。この委員会は理研の長岡理事長の仁科サイクロトン再建の要望に対し、核研のサイクロトンからシンクロサイクロトン機能を除いた装置と、ほぼ同等の規模と性能を目標とすべきことを勧告した。しかし、それでは1962年にスタートして5年後に完成した時には、原子核研究所のサイクロトンから10年余り遅れて、しかも機能を落した装置が誕生することとなる。新しい研究用装置の建設と考えて集まった設計メンバーは落胆したが、大家で構成された、権威のある諮問委員会の勧告に背くことは難しい。

設計研究の実務者の集まりで相談し、当時の大学関係研究所から提案されていない重イオンの加速を追加することで、何とか新しい特徴を持たせようと言うこ

とになった。前記の核理論のリーダーへの質問は、このときに為されたもので、「何があるか判らないと言う御意見は、今後開拓すべき課題が多いと言うことでしょう」と、やや牽強付会の報告をした覚えがある。建設責任者に就任していた熊谷先生は、重イオンは核物理研究に適しないとしながら承認したが、同時に、陽子の最高エネルギーを、核研の16 MeV より高い20 MeV としたらどうかとの意見を付け加えた。設計メンバーにも、核研で到達できなかった高い陽子エネルギーを実現したいと希望する人がおり、熊谷先生の意見はこの希望を汲んだものであった。しかし、当時めきめきと性能を上げてきたタンデムバンデグラフの米国メーカーが、陽子20 MeV を次の目標と定め、ターミナル電圧10 MVの機種を開発を始めたことが報じられており、理研サイクロロンが稼動する頃には、実用状態に入っていると予想された。ビームのエネルギー精度と小さいエミッタンス、エネルギー設定の容易さの点で、タンデムバンデグラフはサイクロロンより断然優れており、これと競争することは有利ではない。また、サイクロロンで重イオンを加速するには、加速周波数を核研の陽子加速のそれより低くしたいのに対し、陽子20 MeV は、核研より高い周波数を要求するので、共振空洞は広い周波数範囲に対応せねばならず、その設計が難しくなるから、なるべく20 MeV は避けたい、との要望もされたが、マシンが働き始めた後の遅い時期でも良いから実現させよとの決着となった。(その方針に従って、1966年に first beam を得てから約1年後の machine study の期間に、高周波空洞の一部に水冷した銅板製の構造物を取り付けて、共振器を変形させる方法で、共振周波数を上げ、20 MeV 加速は実現された。利用者はなかったが。)

サイクロトロンの磁場の中を周回運動するイオンの周回角速度は、

$$\omega = eB/m ; e \text{ はイオンの電荷, } B \text{ は磁束密度, } m \text{ はイオンの質量}$$

で与えられるから、 e/m が小さい重イオンの加速のために加速用高周波の必要周波数が低くなり過ぎる事が予想されるので、まず B を大きくせねばならない。勿論、イオンの charge to mass ratio の e/m を大きくする努力も必要である。

B は、原理的には、サイクロトロンの磁極を構成する材料の飽和特性により上限値が定まるが、その値に到達する前に、磁極の各所で透磁率が局部的に変化する。その影響で磁極の半径方向の磁場分布が低磁場の時と強磁場の時で変化するために、磁性材料が全域で

飽和する遙か前に加速条件が変わり、加速が継続できなくなる現象がある。この現象については熊谷先生の有名な研究²⁾がある。そこでは磁極先端の形状（プロファイル）を選ぶことにより、磁場分布の変動を、従来考えられていたより広い磁束密度範囲に対し小さく出来ることを見出している。そして原子核研究所のサイクロトロンに適用して、広い磁場強度範囲での加速を実現し、サイクロトロンの加速エネルギーを大幅に変化させることが可能なことを、世界のサイクロトロン関係者に初めて示した実績がある。

重イオンの加速を目指す理研のサイクロトロンでは、核研より更に高い磁場強度まで使用する必要があり、その検討チームが作られ、各種の磁極形状の効果をモデル電磁石により比較した。しかし、チームが得た励磁に対する半径方向磁場分布の変化の少ない磁極形状では、目標とする最大軌道半径を実現しようとすると磁石重量が過大となるので、熊谷プロファイルに戻り、その形状の僅かな調整により、実用的に強磁場での部分飽和現象による磁場分布の変化を抑えることに努め、空芯コイルを併用して、最大軌道半径に於いて重イオン加速時の最大磁場強度を約2テスラ近くまで使用することが出来た³⁾。

それでも、加速しようとする炭素や窒素、酸素など、ヘリウムより重いイオンの周回角速度は小さく、加速周波数は核研のそれよりかなり低くならざるを得ない。高周波空洞の構造が核研のそれと全く同じでは、必要な低い加速周波数は実現できないので、鉄のアンクルと太い銅パイプ、それに銅板でモデル共振器を組んで、広範な周波数範囲で使用出来る共振器の開

発と、その大電力高周波発振器との結合設計を行うチームが組織された。このチームは核研の1/4波長レッチェル共振器の長さを変える方法に加えて、その特性インピーダンスを大きくして、インダクタンス分を大きくすると共に、直径2m余りの大きな銅の円盤を加速電極（ディーと呼ぶ）の上下に設置し、加速電極との距離を変化させることにより、共振系の容量分も変化させて、共振周波数を広範に変化させる方法を採用して問題を解決した⁴⁾。サイクロトロンが完成して使ってみると、容量変化により自励振周波数を変化させる方法は、発生周波数範囲の拡大だけでなく、加速エネルギーを選択する作業にも便利で、加速周波数を表示させ、それにより加速エネルギーの細かい変化を知りつつ設定する作業が出来る点が便利であった。

しかし、最も重要で、かつ困難であったのは重イオン源の開発作業であった。1980年以前に使われていたイオン源は、図1に概念図を示す元来は真空度測定用に開発されたPIG (Penning Ion Gauge) 型イオン源が主流であった。そのチムニと呼ばれる細い円筒の中でイオンが発生し、チムニに設けられたスリットから外部に引き出されたイオンは、スリットの近くに接近して設けられた加速電極が作る強い高周波電場により加速されるが、その加速方向や高周波の位相、イオンのe/mなどが、たまたま加速条件に適合したイオンのみが加速を継続し、エネルギーを増大させることが出来る。然し、イオン源で発生したイオンのごく一部がこの加速条件を満たすに過ぎない。

このイオン源で重い元素の多価イオンを発生しようとする、発生するイオンの電荷数、従ってe/mは

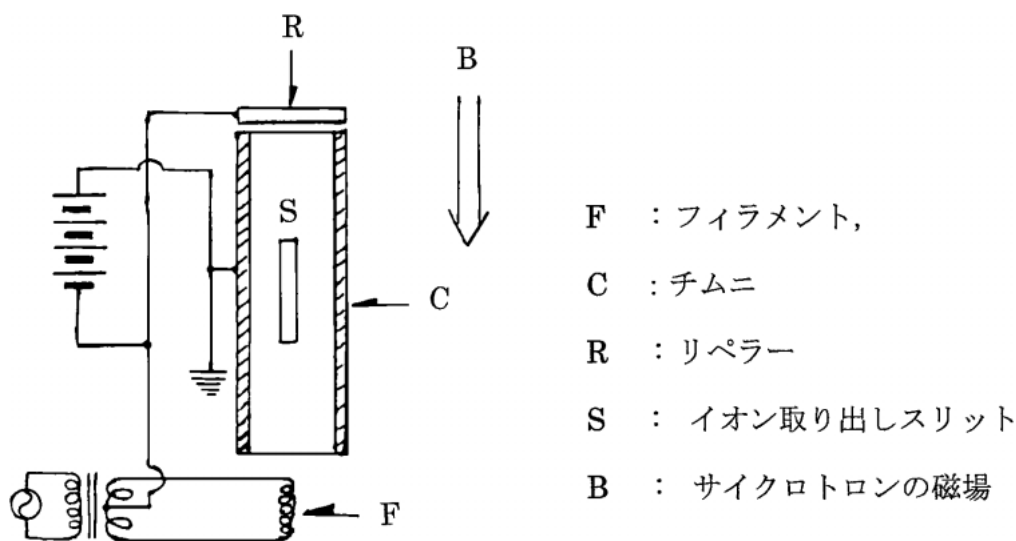


図1 PIG イオン源概念図

広い範囲に分散し、その範囲はチムニ内に存在する加速対象の元素のガス圧力と、チムニに射ち込まれる電子のエネルギーの積に依存し、この積が大きいほど、電子を剥ぎ取られる原子が多く、電荷数の大きいイオンを得る確率も大きくなる。しかし、イオンの収量を多くしようと、むやみにガスの供給を大きくし、アーク電流を増加させても、チムニ内やイオンが通過する空間の気体圧力が大きくなり、ガス分子との衝突によりイオンの電荷数が変化しがちで、加速条件が破れるから、ビーム強度を大きくすることは容易ではない。

更に、イオン化しようとする元素の原子番号が大きくなると、その原子核のクーロン引力による周辺の電子に対する束縛力が大きくなるから、原子核の周りの束縛電子を取り去るにはエネルギーの大きい電子で叩かなければならない。PIG イオン源では、フィラメントの電位をアース電位のチムニより強くマイナスとすることにより、電子のエネルギーを大きくする。ところが、チムニ内で発生した正電荷のイオンの大部分は、チムニのスリットから引き出されずに磁力線に沿って進み、電荷と電位差の積で定まる運動エネルギーで、負電位のフィラメント、あるいはリペラーに衝突し、損傷を与える。このバックボンバードと呼ばれる現象が、フィラメント、リペラーなどイオン源各部の寿命を短くする。水素、ヘリウムなどの軽元素の場合は、フィラメントを太いたングステン、あるいはタンタルの線で作るなどの方法で、次のイオン源の保守作業まで、ある程度の時間を安定に実験に使用することが出来たが、炭素、窒素などのより重い元素の場合は正イオンの衝撃力が大きく、フィラメントは短時間に消耗してしまう。ロシアのドブナ研究所のロシア語文献に、この現象を避けるために、タングステンのブロックを電子線発生源とする案が記されていた⁵⁾。フィラメントとチムニの間にブロックを置き、リペラーもタングステンのブロックとし、フィラメントで発生した電子でフィラメント側ブロックを叩いて加熱し、ブロックを電子発生源とする間接加熱型イオン源である。ロシア語に堪能な人に翻訳をして貰い、それに従って材料を集めて、多価イオン源の開発に取り組んだ。然し、容易なことでは安定して多価イオンを得ることが出来ない。1967年に日本で開かれた核物理国際会議に、ドブナの巨大サイクロトロンを使用した超ウラン元素の製造と研究グループのリーダーの G. N. Flerov が来日したので理研に招待し、イオン源開発装置を見せてアドバイスを依頼したが、「間接加熱イオン源は本質的に (inherently) 不安定である」との御託宣で、がっかりするとともに、ドブナも我々と大

して違わないのかと安心をしたりもした。

結局、理研の重イオン源グループは、自力で細かい改良を粘り強く積み重ねて、炭素からネオンに到る元素の多価イオンのビームを安定的に得ることに成功し⁶⁾、理研のサイクロトロンは、質量数は 20 以下ではあるが、当時は重イオンと呼ばれた弾丸を、我国で初めて 100 MeV 以上に加速し、実験に使用し得る高周波加速器となった。

しかし、こうして漸く加速に成功したが、デフレクターチャンネルを通過できた重イオンビームは、加速箱のビーム取り出し口に達するまでに、磁石の縁の磁場強度が外周に向かって急激に落ちる領域を通過せねばならない。ビームは、この傾斜した磁場の作用を受けて横方向に広がり、ビーム取出し口を通過できるビームはデフレクターを出たビームの一部に過ぎず、実験に利用できるビームの強度が落ちてしまう。この事態を改善するために、デフレクターを出たビームの軌道に沿って、磁極の間に三本の軟鉄の丸棒で構成した磁気チャンネルを設置し、傾斜した磁場の効果を、加速イオンの種類や磁場の値に関係なく自動的に打ち消す方法を考案して、デフレクターを出たビームの殆んどを実験用散乱槽に導き、実験に必要なビームの強度を保つことができた⁷⁾。

このように幾つかの困難を克服して、サイクロトロンによる加速が実現した重イオンビームの、核物理研究への使用例としては、各種の標的に対する弾性非弾性散乱実験や、発生した複雑な反応粒子を幾つかの検出器グループで追跡して、その寿命や、崩壊様式、そのときの放出エネルギー等を測定する方法により、重イオン反応で発生した生成核の構造を調べ、原子核の陽子数と中性子数を横軸と縦軸に取って構成された核図表の中で、安定元素の領域から遠く外れた、ns 程度の極短時間寿命のアイソトープを多く見出したり、重イオン反応により発生する高励起複合核状態を調べたりしたことなどが挙げられる。

また、重イオンと残留ガス分子の衝突により電荷が変わって、加速条件が破れることにより、加速途中のイオンが減少することのないように注意して作られたリークのない真空系の利点を生かして、原子炉で生じたトリチウムの β 崩壊により発生したヘリウム-3 ガスをイオン源に供給し、ヘリウム-3 のビームを得るとともに、大容積のサイクロトロン真空系の排気を液体窒素による循環純化系を繰り返し通過させて、僅かのリークにより混入した空気等を除去し、ヘリウム-3 ガスとして純化してイオン源に戻すことにより、ヘリウム-3 の補充を殆んどせずに、ビー

ムを長時間供給し、多くの元素をターゲットとしたヘリウム-3核反応実験を可能とした。1968年前後の日本の核物理研究のサークルに、理研に独自の機能を持つサイクロトロンが存在することを示すことが出来たと思われる。また、重イオンの種類と加速エネルギーを広範に変えられることを利用して、物質中のエネルギー損失の大きく異なる放射線の生物効果の生物学者による比較研究や原子物理学研究にも使用され、大型加速器の核物理以外の分野への応用の点で、仁科研以来の理研の核物理とは異なる分野への加速器提供の伝統を復活させた。

3. 更に重い元素のイオンの加速器開発の動き

こうして、1970年頃には理化学研究所の重イオンサイクロトロンは、我国の中では一定の存在を主張するに到ったものの、その独自性は強固なものではなく、海外で始まった周期律表にあるすべての元素のイオンを加速しようとする計画に比較すれば、間もなく時代遅れとなることは明らかであった。国内でも、1970年代に入ると強力な大阪大学RCNPのAVF型サイクロトロンによる重イオン加速が始まり、大型タンデムバンデグラフが1975年に筑波大学（ターミナル電圧12 MV）、1982年には原子力研究所（ターミナル電圧20 MV）に設置され、ネオンより重い元素の重イオンを使用する実験も可能な施設が国内に次々に出現する状況となっていた。

この情勢の中で、理研が「独自の存在」の主張を継続し得るためには、新しい発想の加速器を開発する必要があると考える人々が、サイクロトロンが定常運転に入り始めた1967年頃から検討を開始していた。

然し、この検討が新しい重イオン加速装置の開発に進むには、乗り越えるべき多くのハードルがあった。一つは、もっと業績が上がってから新しい計画を検討すべきであるとの意見、また、新装置の開発に積極的ではあるが、重イオン反応は核物理研究の主流ではないから、これまでに培った加速器技術を陽子加速器に集中して、文部省の共同利用研究組織方式ではまだ着手できそうにない200 MeV程度の核物理研究用陽子加速装置の開発に進むべきではないか、更には、理研の他の研究グループから、加速器の開発コストは高すぎる、理研のように多くの研究部門が少ない予算で四苦八苦する研究所には馴染まないのではないかと、との厳しい批判が表明されたりもした。その中で、大形多段重イオン加速器の開発が、よくもスタートできたものとの感慨と、予算獲得に助力して頂いた関係者への

感謝を禁じえない。

3.1 機種選定基準

上述のように、重イオンサイクロトロンの完成直後に、直ちに次の新しい型の重イオン加速器建設が決まったわけではない。漸く1971年の春に、理研で折角育った重イオン加速器技術を更に伸ばすべしとの方針が定まり、それまで非公式に検討されてきた案が、陽の目を見ることとなった。その非公式検討の段階では、機種は、次のような条件により検討されていた。

1. 周期律表上の安定元素のほとんどを、確実に大強度で加速し得ること。
 2. そのためには、大型で強力なイオン源の設置と使用が容易なこと、さらにイオン引き出し部に真空ポンプを設け、低エネルギーイオンの気体分子との接触による電荷変化を防止し得ること。
 3. 非常に重い粒子同志の衝突で起こると予想される複雑な核反応の研究には、コインシデンス技術を多用した複雑な構成の同時測定回路の使用も必要となると考えられるので、測定信号のパイルアップによる同時計数損失を少なくするために、ビームのduty factorが大きい加速方式であること。
 4. 加速エネルギーは、すべての標的核と加速イオンの組み合わせに対し、核反応を起こし得る大きさであること。
- などであった。それぞれの条件の理由について、以下に少し補足をする。

条件1（周期律表上のすべての元素の加速が可能）

この条件は、タンデムバンデグラフを念頭に置いたものである。1969年に西ドイツで開かれた重イオン核物理国際会議で、非常に重いイオンも加速できる装置の提案が各国からなされたが、その多くはタンデムバンデグラフを初段の入射器として、厄介な多価イオン源の開発と、低エネルギー領域での重い元素のイオンの加速の問題をタンデムの技術を利用して回避し、分離セクターサイクロトロン、あるいはAVFサイクロトロンを後段のブースター加速器とすることによって、短期間に広い範囲の元素のイオンを、核子あたり10 MeV以上に加速し得る施設を建設しようとするものであった。世界の10個以上の有名研究所から似た計画が提出されたように記憶している。既存の技術を組み合わせ、最も容易に目的を達しようとする案であるが、かくも多くの研究所のアイデアが一致していたのは驚きであった。おそらく彼ら自身も驚いたであろう。

然し、タンデムバンデグラフは原理的に、負イオン

の発生がその動作に不可欠であるが、負イオンの収量はそれぞれの元素の化学的性質に強く左右される。例えば、不活性元素の負イオンの収量が少ないか、あるいはゼロに近いことは、良く知られている。それらの限界を超える努力が払われてはいるが、幾つかの例を除けば、成功しているとは言い難い。我々の間にも、この機種を理研の加速装置に組み入れようとの意見が無いではなかったが、新重イオン加速器による未知の研究の推進には、研究に必要とされる任意の元素の加速が可能なが必要との理由で、タンデムの使用は選択の範囲から除外された。

条件2 (強力なイオン源を使用し得る構造であること)

重イオンサイクロトロン¹⁾の運転を通じて思い知らされたことは、イオン源で発生したイオンの中で大きい電荷を持つものの割合は少なく、その少ないイオンが加速軌道に乗る確率は更に少ないことである。また、多価イオンの収量を増加させようと放電電力を上げ、ガスの供給を増やしても、器壁のガス放出や真空度の低下により、加速途中のイオンの荷電変換や、放電の発生などの悪影響があり、目的を達するのは容易ではなかった。質量数僅か20以下のイオンでこれでは、質量数200の元素の大強度加速は到底覚束ない。イオン源は、重い元素の多価イオンを豊富に作る事が可能な強力なもので、イオンの初期加速部は、発生した多価イオンを加速軌道に高い効率で乗せ得る機能を持たねばならないし、低エネルギー加速部の真空度を劣化させるものであってならない。

この条件を満たすためには、イオン源は十分な電力をその動作に使用できると共に、それ自身の排気系を持ち、イオン源で発生したガスによる加速部の真空度低下を防止し得なければならない。したがって、従来のサイクロトロンのように、大きい磁石の磁極間の狭い加速空間にイオン源を置く方式は取れない。

タンデムバンデグラフのイオン源は、加速空間の真空度劣化の防止と発生したイオンの効率的な加速の条件は満たすが、1の条件は満たしていない。

条件3 (duty factor が大きいこと)

あらゆる元素の加速が可能な加速器が完成した際に、どんな研究に使用されるかは予測困難であるが、複雑な計測技術も使えるようにしておくべきではないかと考えられる。研究にはビームの時間分布をなるべく広く取り、複数の検出器の間のコインシデンス測定を可能とする要求もあろう。ビームの強度が大きくても、シンクロトロンや通常の線形加速器のように、短いパルス時間内にビームが集中したのでは、その強度を十分に生かせない場合が有り得よう。

したがって、シンクロトロンや線形加速器のような繰り返しの少ないパルス加速方式は使えないこととなるが、線形加速器が全く使えないのかを検討した結果、後のWidroe加速構造の開発の項で説明するように、加速エネルギーを比較的小さく選び、加速周波数を可変として、質量の大きい元素の加速に要する電力を抑制すれば、線形加速器も連続運転が可能となり、多段複合加速器の入射器として、望ましい性能を持つ装置となり得ることを見出した。

条件4 (最も重いイオンでも核反応を起こし得ること)

すべての元素のイオンについて1-3の諸条件を満たし、4の核反応発生が可能なエネルギーまで加速することは、単一の加速装置では困難で、複数の加速器を連結する多段加速方式を使用せざるを得ない。また、入射器と主加速器と言う役割分担は、両者間のビームの入射、取り出しの技術的課題が満足されるならば、4のみならず1-3の条件を満たす上でも好都合である。勿論、運転制御が単一加速装置の場合より複雑になることは避けられない。

4. 重イオン多段加速装置の構想

主加速部としては、1968年に米国ミシガン大学のM. M. GordonがNuclear Instr. & MethodsとAnnals Phys.にその構成の理論を発表し⁸⁾、西ドイツの核物理国際会議での重イオン加速器計画ラッシュに見るように、直ちに多くの加速器関係者に支持された分離セクターサイクロトロン(以下SSCと略称)を採用することとした。理由は、①4あるいは6、あるいは8個の扇型電磁石が磁石のない扇型空間を隔てて置かれ、磁場が方位角方向に強く変化するAVF磁場を構成して、ビームの収束が良好であり、磁場の無い部分が入射器からのビームの導入を容易にしていることで、多段加速システムの主加速部として適していること、②この磁石の無いセクター部分は、高周波共振器の設置に十分なスペースがあり、加速用大電圧の発生が容易なので、ビームの最終軌道とその前の軌道との間隔を大きくすることが可能となるから、加速されたビームの取り出し効率を良好とし得ること、③またこの空間は真空排気のための空間としてもコンダクタンスが大きく、高真空の実現に有利で、加速中の重イオンの荷電変換防止に好都合であること、④既にインディアナ大学で陽子200 MeV、4セクター、スイスで陽子590 MeV、8セクター加速SSCの建設が進んでおり、実現の可能性が確実であること、などが理由である。

また、サイクロトロンと呼ばれる機種は外見がかなり異なったものが多くあるが、それらの異なる装置の

ビームの性質は共通で、SSCの場合もビームの加速周波数と等しい数と間隔の鋭くバンチしたパルスビームから成っており、それぞれのピーク電流値は比較的小さい。シンクロトロンや通常の線形加速器のように、ビーム加速の繰り返しが少なく、パルスのピーク電流値が大きい装置では、同時計数回路が過剰入力により動作麻痺の状態になり、計数損失を起し勝ちであるが、ピーク電流値の少ないサイクロトロンでは、そのような事態は起こりにくい。幾つもの回路を使用した複雑なコインシデンス計数実験においても、連続ビームの感覚で測定可能なことを、理研重イオンサイクロトロンの実験で経験している。加速エネルギーの調整も容易なので、この特性を新しい加速システムの基本的な性格として採用したいと考えた。

4.1 入射器もサイクロトロンとする選択の検討

しかし、SSCの加速周波数は加速イオンの e/m によって変えねばならないので、入射器も同じように、加速イオンの変化ごとに周波数変化が可能でなければならぬ。常識的には、動作機構が同じ通常のサイクロトロンを入射器として組合せるのが自然であろう。我々より約3年遅れてスタートしたフランスのナショナルプロジェクトのGANIL (Grand Accel. National de Ion Lourde) は、通常のサイクロトロンを入射器とし、これに二つのSSCをシリーズに連結した組み合わせを主加速部とする大形多段加速システムで、重い元素のイオンの高エネルギー加速を実現している。その他にも、AVFサイクロトロンとSSC、あるいはAVF同士の組み合わせを採用している研究所が幾つかある。

しかし、条件2で検討したように、イオン源を狭い磁極の間に置く通常のサイクロトロンでは、イオン源の機能が制約され、多価イオンの発生量を大きくすることは容易ではない。漸く発生したイオンも、加速軌道に乗る前にイオン源近傍で失われがちで、強度の大きいビームの加速を目指す目的に適しているとは言い難い。サイクロトロン中心部での損失の十分の一でもまともに加速されるならば、実験に使用されるビーム強度が画期的に大きくなり、反応断面積の小さい核反応の実験が可能になる筈である。従って、イオン源で発生した多価イオンを積極的に収束して、初期加速軌道に高い効率で打ち込む設計が可能な方式が必要である。

サイクロトロンのこの欠点を救うためにイオン源を外部に置き、発生したイオンをサイクロトロンの磁極の中心に設けた垂直の穴を通して、中央部に打ち込み、イオンの飛行方向を磁場の中心で直角に変えて、

サイクロトロン軌道に打ち込み、入射ビームの加速効率を良好とする垂直入射方式が開発されている。この方式に執着するグループには、AVFサイクロトロンのビームを次の段のAVF—例えば超伝導磁石を使用して、到達エネルギーを大きくした超伝導AVFサイクロトロンへ打ち込む案もあった。しかし、 e/m の非常に小さい重いイオンを垂直入射し、方向を変えて、加速することは容易ではなく、これまでのところ、比較的軽いイオンの入射加速に止まっている。一方、線形加速器はパルス運転が1970年当時の常識であったので、SSCの入射器とすることは正に常識外れであった。

4.2 GSIの試みと理研の判断

やはり、あらゆる元素のイオンの高エネルギー加速を目指して、1967年から計画を進めてきたドイツの重イオン研究所GSI (Gesellschaft fuer. Schwer Ionen Forschung) はWidroe型とAlvarez型の2機種の線形加速器をシリーズに連結して、Widroeでは27 MHz、Alvarezでは108 MHzの周波数で、PIGイオン源で作られたイオンをイオンの質量に関係なく、同一速度に加速し、その後、108 MHzで励振されるsingle gap Cavity 20個の共振器を直列に組んだ加速装置に打ち込み、この多数のsingle gap Cavityの高周波位相を調整することによって、加速エネルギーを自由に変えようとする大胆なアイデアの重イオン加速施設計画を、先に引用した1969年の重イオン核物理国際会議に発表し、1972年から建設を始めていた。面白い案ではあるが、加速用高周波の周波数が固定されているので、Widroe, Alvarezのドリフトチューブ列で加速するためには、非常に重い元素のイオンも、軽い元素と同じ速度とする必要がある。それには m/e に比例した大きな高周波加速電圧、従ってほぼ加速イオンの質量の自乗に比例した大きな高周波電力を必要とし、連続加速動作は困難であって、線形加速器の常識どおりにパルス運転を必要としている。従って、duty factorの大きいビームによって、コインシデンス計測を容易にしようとする我々の目標には適しないので、GSIの方式は踏襲できないと結論せざるを得ない。

しかしながらGSIは、線形加速器の利点として、イオン源が直線状のビーム軌道の最初の部分に置かれ、高周波加速部の外部にあるから、イオン源のサイズや、使用電力について制約を受けないので、強力なイオン源を何台も設置して使うことができ、多種類の元素にそれぞれ適合したイオン源を次々と使用することも可能である、また、ビームの軌道が直線的であ

り、イオン源直後に、ビーム集束レンズ系の最初のセットやバンチャーを置くことが出来るので、イオン源で作られたイオンを効率よく加速軌道に乗せることが可能となるから、大きなビーム強度が得られると主張していた。このような利点が GSI の計画にあることは我々は勿論判っていたので、GSI の建設報告を定期的に送ってもらい、彼等のイオン源開発状況などを参考にさせて貰うこととした。

4.3 線形加速器を SSC の入射器とする選択の検討

勿論、線形加速器を SSC の入射器として使用するには、一見、余りにも異なる両者の動作機構の綿密な比較と分析が必要なことは明らかである。我々はその検討をし、Widroe 型線形加速器の加速用立体回路に、サイクロトロン of 立体回路と類似の 1/4 波長同軸共振器を使用し得ることに着目した。この共振器ならば、サイクロトロンが加速周波数を変化させて、加速エネルギーを変えたり、異なるイオンの加速をしたりするように、線形加速器も SSC サイクロトロンと同じ周波数で動作し、イオンを加速して、SSC に入射することが出来る筈である。また可変周波設計により電力消費を比較的少なくできるので、連続運転とすることも可能である。然しその加速エネルギーは余り大きくなく、重い元素のエネルギーを任意の標的と核反応を起こし得る値とするには、後段の SSC に期待せざるを得ない。この線形加速器の設計では、到達エネルギーの目標を、 e/m の最も大きい軽い元素で核子あたり 4 MeV、最も重い元素で核子あたり 1 MeV とした。重い元素に対する推定値は、設計当時の PIG イオン源の最良動作時の推定に基づく値で、イオン源の性能が向上すれば、重い元素の加速エネルギーは大きくなる。事実、その後の ECR イオン源の出現によって、重い元素の加速エネルギーは大幅に上昇している。

サイクロトロンの加速構造によく使用される 1/4 波長共振器は、短絡板を使って長さを変えたり、開放端の電極とアース側の可動容量板との距離を変えて、電気容量を変化させることにより、共振周波数を大幅に変えることが出来る。開放端電極とアース側導体を変形させてドリフトチューブとすることにより、 π モードの可変周波線形加速構造とする可能性の検討を 1967 年から始め、そして、5.2 Widroe 加速構造の開発の項で述べるような共振器の構造についての結論を得た。

5. 技術開発の歩み

5.1 案の公表と海外加速器関係者の反応

1971 年春の物理学会原子核分科会に将来計画シンポジウムが開催されたが、理研のリーダーとなる筈であった松田一久氏が急逝し、後任の上坪宏道氏の要請により、筆者が出席し、「連続加速動作可能な可変周波数 Widroe 型線形加速器を入射器、分離セクターサイクロトロンを主加速部とする重イオンの多段加速システム案」を発表した。その後更に検討を進めて、一年後の第六回サイクロトロン国際会議 (Univ., British Columbia, バンクーバー, 1972 年 6 月) において理研の計画として講演をした⁹⁾。

また、バンクーバーでの発表の約一ヶ月前に、予め世界の幾つかの加速器グループを訪問して、我々の考えを説明し、意見を求めたが、GSI の訪問では、線形加速器を周波数可変とするとは、 Q -値の大きな高周波立体回路の特性をお前は良く知らないのではないかと、移動短絡板の同軸との摺動部には大きな電流が流れて、摺動部が熔ける事故が起こりがちだから、線形加速器の動作に必要な大電圧の発生は困難だと論じられる始末であった。勿論、我々はそのようなことは良く判っている、摺動部の熔融事故はサイクロトロンで経験して、対策は考えており、摺動部電流の推定もしている、可変周波線形加速器の技術開発は可能と考えると反論をした。他のヨーロッパの加速器施設でも似たような懐疑的な意見を聞かされたが、米国の研究所では、「面白い、やってみろ」との意見が多く、ヨーロッパと米国との気風の違いを感じさせられた。カリフォルニア大学のバークレー分校の LBL 研究所では、新しい方式だから試みる価値があるとの意見と共に、この試みに役立つような技術、特に e/m の極端に小さい重イオンビームの収束に必要な、強力な四重極磁石の作り方と、それをドリフトチューブに収容する技術の助言を得ることが出来た¹⁰⁾。その後、設計研究の途中で、メンバーを数ヶ月バークレーに派遣したときにも親切に教えてくれた。加速器発祥の地の大らかな雰囲気にも感謝をしている。なお、バンクーバー会議では各研究所へ予め説明をした為か、これといった質問は無かった。

5.2 Widroe 加速構造の開発

Widroe 線形加速器は、ドリフトチューブと呼ばれる多数の銅製円筒電極の間のギャップに発生する高周波電圧でイオンを加速し、高周波の位相が変化して減速電場となる間は、イオンはドリフトチューブ内部の電場の無い部分を進み、位相が 180 度 (π)、あるいは

は 540 度 (3π) 変化した時にドリフトチューブを出て次のギャップに入り、加速が継続される、いわゆる π モードの加速器である。ドリフトチューブは、イオンが常に加速電場により加速されるように、その部分 (セル) でのイオンの速度に合わせた長さを持たねばならない。

イオンの速度を v 、高周波の周期を T 、周波数を f とすると、セルと呼ばれるドリフトチューブの長手方向の中心と隣り合ったチューブの中心間の距離 (あるいはドリフトチューブの隣り合ったギャップの中心間の距離) を L と書き、速度 v をイオンの運動エネルギー E で書き直すと、 π モードでは

$$L = vT/2 = (1/2 \times 1/f) \sqrt{(2E/m)}$$

と書くことが出来る。

更に運動エネルギーを、そのセルに到るまでにイオンを加速した有効高周波電圧の和 ΣV と電荷の積で表わすと、

$$\begin{aligned} L &= (1/2 \times 1/f) \sqrt{(2E/m)} \\ &= (1/2 \times 1/f) \sqrt{(2e/m \times \Sigma V)} \end{aligned}$$

となる。

この等式によれば、長さ L がドリフトチューブの機械的寸法で定まっているので、周波数 f が一定であれば、加速しようとする元素の質量 m が大きく、 e/m が小さいイオンでは、 ΣV を m/e に比例して、大きくしなければ、等式が成立しない。然しこれは実際問題として容易ではない。周期律表の最も重い元素ウランと例えば炭素のイオンを比較すれば、 m/e の値は一桁近く異なると思われる。ドリフトチューブの加速電圧を m/e の比で大きくすると、ドリフトチューブ構造の放電耐圧が問題であるし、放電耐圧をクリアしたとしても、共振器での電力損失が大きく、高周波増幅器による電力供給に困難が生じるであろう。

しかし、周波数 f を e/m の平方根に比例して変化できれば、ドリフトチューブのセルの長さ L は ΣV のみに依存し、ドリフトチューブの加速ギャップ電圧をイオンの e/m により変える必要が無くなり、非常に重い元素のイオンでも、高い高周波電圧を実現するための、大きな高周波電力を必要としないこととなる。そして、加速元素が変わっても、加速周波数を e/m の平方根に比例した周波数に設定する原則を守れば、加速電圧はどのイオンも同一でよく、容易に同期加速条件は満足される。

勿論、周波数の大幅の変化も、技術的には容易な話ではない。しかし、 m/e の平方根が目標なので、 m/e

に比例する事を要求される加速電圧の変化より、心理的には楽であり、運転方針も立てやすい。高周波加速電圧の上昇は使用電力の上昇、ひいては運転のパルス化を必要とする可能性が大きい。周波数可変運転が実現できれば、加速電圧を大きくする必要がなくなるので、重いイオンを加速するための高周波発生装置の電力負担が大きくなりず済む。また周波数を変える事によって加速エネルギーを変えることが容易であり、更に、線形加速器を構成する 6 ケのキャビティのいずれかの位相を、他のキャビティと僅かにずらすことによって、加速エネルギーの細かい調節をすることも可能なので、目指す核反応に適したエネルギーを選ぶことが可能となる筈である。

このような線形加速器の周波数可変の運転には、ビームバンチの高周波位相に対する存在位置、大きさ、等の監視が必要で、幾つかのバンチ検出器を設置し、加速高周波位相との関係や、バンチの形状の監視に使用することとした。

当然、低い周波数での加速では重いイオンの速度が小さく、核子あたりのエネルギーが核反応を起こすのに不足する場合も有り得る。従って、多段加速器システムを採用して、次段の加速器でエネルギーを増幅させることが必要となる。この次段の装置としては、前にも述べたように SSC が適している。SSC は多段加速装置のブースター装置として、優れた特徴を備えており、重い元素の新しい加速システムとして名乗りをあげた欧米の施設の多くが、主加速部として SSC を採用している。そして初段にはタンデムバンデグラフを使用する企画が多いことは、先にも述べたが、バンデグラフの直流ビームを SSC の加速高周波に適合するバンチしたビームに変調して、主加速部に入射しなければならない。変調と入射の技術は特に難しい技術ではないが、変調により、直流ビームをバンチしたビームに変換して入射する際の、ビームの一部損失は避けられない。また、これも先にも述べたように、タンデムバンデグラフの動作に必要な、重い元素の負イオンの収量を多くするためには、元素ごとの研究開発の必要なことを考えると、可変周波線形加速器技術を開発すれば、既に多くのグループにより開発が進んでいる正の多価イオン源技術を利用し、大強度のビームの加速を期待し得る点で、有利であると判断した。この判断は可変周波数線形加速器の建設が始まった 1975 年前後に、フランスのグルノーブル原子力研究所の核融合関連技術グループの R. Geller が発見し、その後、多くの研究グループによって、活発な開発が進められた ECR イオン源の画期的な多価イオン発生能力

によって、更に力付けられることとなった。強力なマイクロ波を供給し、イオン源の磁場内の電子をサイクロトロン共鳴により高エネルギーに加速し、この電子でイオン化すべき原子を叩いて、束縛された電子を離脱させ、イオン化を効率よく行い得る ECR イオン源は、PIG イオン源では困難であった重い元素の多価イオンや、気化が困難な固体元素の多価イオンも、真空度の低下やイオン源各部の損傷に煩わされることなく、容易に得られる。生じたイオンの取り出しと収束も容易で、イオン源の寿命も長く、PIG 型に遥かに勝ったイオン源である。

この可変周波数方式に必要な、周波数を広い範囲に変化できる可変周波共振構造のモデル試験を 1970 年頃から行い、共振周波数を 17 MHz から 45 MHz の範囲に変えられる共振器の 1/3 サイズモデルを幾つか作って、可変周波運転に適した形状を求めた。サイクロトロン設計の時はモデルは鉄のアンクルと銅版で共振器モデルを構成し、計算はもっぱら電動計算機を愛用したが、線形加速器では実物の形状にできる限り近い構造のモデルを使用し、計算には HP の関数電卓を愛用した。電子計算機は運転制御系に採用したが、設計作業に使用するには導入が建設末期で既に技術検討の時期は過ぎていたし、理研全体の共同利用計算機は、設計現場で使用するには馴染みが少々不足していた。1960 年代末は電磁場分布を計算できるシミュレーションソフトがまだ少ない時代で、共振器内の電磁場の推定にはモデルによる bead pulling 法を最もよく使用した。図 2 に、こうして定めた共振器の概念図、図 3 に第一キャビティの製作寸法図を示す。構造は変形同軸の 1/4 波長共振器で、モデル試験の当初は、中心導体と外周導体を同心の円筒とする案も試みたが、ドリフトチューブ電圧分布が思わしくないので構造を変え、中心及び外部導体がビームの進行方向に長いレーストラック状の断面とした。中心導体とショート板との摺動接触子部には空圧を加えて接触抵抗を少なくし、冷却にも注意を払う設計として溶融事故を防ぐ用心をした。この他にも、モデルでは、周波数を広い範囲に変化させた際にドリフトチューブ列の電圧分布が変わり、その為に加速条件がフラット分布の場合とひどく異なることが無い構造の探求を行った。図 4a、図 4b のドリフトチューブ配列の例に示すように、イオンの速度が増すにつれてセルの長さ L は次第に長くなるので、チューブ列の電気容量分布は様ではなく、終わりに近いドリフトチューブギャップの加速電圧は小さくなりがちである。更に運転周波数により、この加速電圧のフラット分布からのずれは変化

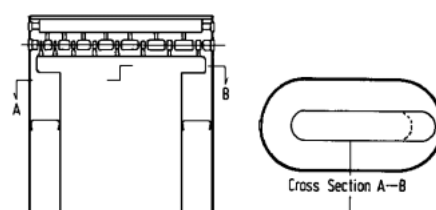


図 2 レーストラック断面の変形同軸共振器概念図。

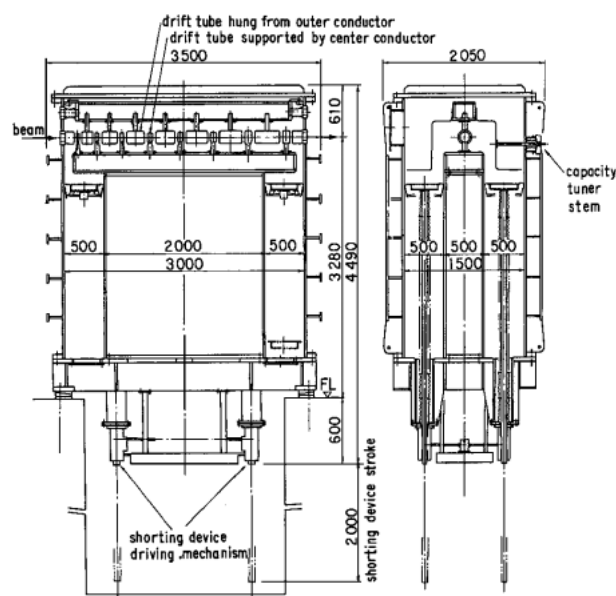


図 3 変形同軸共振器の寸法図。第一キャビティの例。

する。低い周波数では変化は小さいので、高い周波数での加速電場分布のずれが、許容できる値にとどまる最大周波数を求め、各キャビティの下流側のドリフトチューブの外径を僅かに大きくするなどの手段で、45 MHz まで使用が可能な分布が得られた。しかし、使用した高周波出力管の良好な動作はこの周波数までは及ばなかったもので、最大周波数を安全な 40 MHz に留めた。この線形加速器は 1981 年に活動を開始し、RILAC (RIken Linear ACcelerator) と命名された¹¹⁾。

5.3 RILAC の高周波運転

RILAC は、それぞれに異なったドリフトチューブ配列を持つ 6 個のキャビティで構成されている。キャビティ毎にドリフトチューブの寸法と配列が異なるので、加速イオンが変わる度に、イオンの e/m に応じて周波数設定をし、各キャビティの共振周波数をこれにあわせ、高周波振幅を選び、キャビティ同志の位相関係も合わせねばならないから、RILAC の運転はサイクロトロンに比較すれば、単純ではない。

まず、キャビティ毎にそれぞれの共振周波数調整機

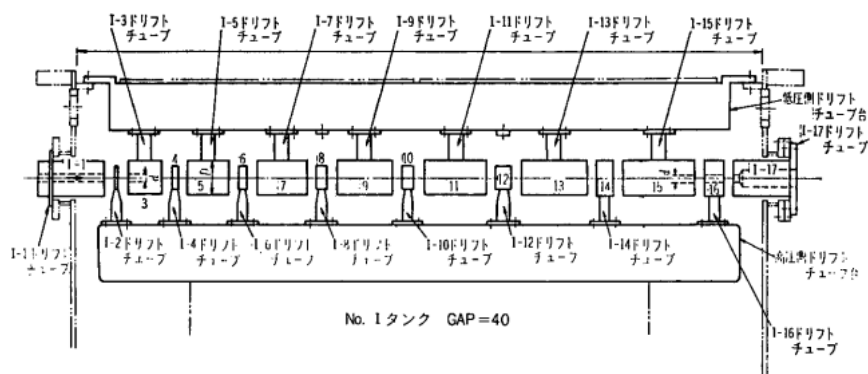


図 4 a 第一キャビティのドリフトチューブ配列. $\pi-3\pi$ 配列を取っており, ドリフトチューブの長さが急速に変化している事がわかる.

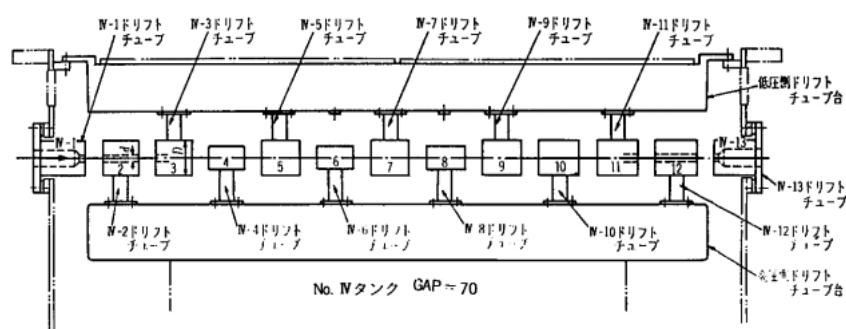


図 4 b 第四キャビティのドリフトチューブ配列. $\pi-\pi$ 配列で, ドリフトチューブの長さの変化は緩やか.

構の短絡板を動かして目標周波数に大体近づける. 次に基準周波数発振器から e/m に対応した周波数信号を各キャビティの小電力励振装置に送り, キャビティの反応を測定しつつ, 短絡板と容量調整板等の共振微調整機構を動かして, 共振状態とする. パルス励振によりマルチパクタリング領域を通過して電力を注入し, それぞれのキャビティの高周波位相が加速条件に対応した関係にあり, また, 各加速電圧が所定の値にあることを確認してイオン源からイオンを導入し, 加速が始まる.

この加速器に重要な周波数設定作業は, 最大 2 m の移動が可能な短絡板と移動量は僅かな微調整用容量板により行われるが, 我々の案に対し高真空キャビティ内の短絡板の移動に原子炉の制御棒に使われている長尺の溶接ベローズを使用することを提案したのは, キャビティの製作を担当した機械メーカーの技術者であった. そのようなベローズが既に存在することを我々は当時知らなかったため, 有難い情報であった.

5.4 イオン源の構成

イオン源は加速構造から独立して, 十分なスペースの確保と電力の使用を可能とすることを目指した. ま

た, 強力な真空排気ポンプをイオン源の直後に設置して, 運転の際に発生するガスを十分に排気することにより, 折角作られた多価イオンの電荷が残留ガス分子との衝突により変化しないように, 高真空が保たれることを設計の目標とした. 具体的には, イオン源は 500 kV の直流電位に保たれた, 4 m × 4 m の広さで高さ 2.5 m のアルミ板で囲われたターミナル室にターボ分子ポンプとともに収容され, 将来, 新しく大規模なイオン源や機器への交換が必要になっても, 充分に対応できるように余裕のある配置とした. 使用する電力は, 地上から絶縁シャフトで駆動される 50 kVA 発電機で供給される. また, この PIG イオン源電磁石は, イオン源で発生した電荷対質量比のまちまちなイオンを選り分ける分析磁石も兼ねていて, PIG イオン源による十分に大きな多価重イオン電流の発生とその電荷別強度の確認を目指した. イオン源と電磁石の制御は光ファイバーにより地上からデジタル信号をターミナルに送って行った.

この PIG イオン源は, 1975 年の建設開始以来テストを重ねて, 多くの改良が施され, 1979 年 7 月にビーム加速試験運転のテスト用ビームの供給を始め

た．主として C, N, O, Ne, Ar, Kr, Xe などの気体元素のイオンの供給を 1986 年まで担当した．また，この期間に，金属用の PIG イオン源も開発され，Al, Cu 等の固体元素イオンの加速もなされた．こうして，世界最初の加速周波数が可変で，連続動作が可能な重イオン線形加速器が運転を開始した．設計方針から見れば当然であるが，重イオンビーム強度は世界のトップと目されている．

6. RILAC 稼動後の発展

6.1 ECR イオン源の全面的な採用

R. Geller によって開拓された ECR イオン源技術は多くの研究者によって改良が次々と進められ，理研でも開発が試みられたが，1983 年頃には専門メーカーによる商品化が開始されるに到った．筆者の退職後の 1990 年に，理研は 8 GHz のマイクロ波を使用するユニットを Geller が設立した会社から購入し，使用を開始した．電荷数の大きいイオンを大量に発生する性能だけでなく，PIG 放電に多かった金属屑等の発生も少なく，保守作業を必要とするまでの運転時間が長いなど，PIG 型イオン源より幾多の優れた性能を持つことが明らかとなり，入射器ターミナルドーム内の PIG 型イオン源はこの ECR 型に置き換えられた．

1996 年には，更に良好な性能の 18 GHz のマイクロ波を使用する ECR 装置が開発設置されたが，その多価イオンを線形加速器の加速周波数に合わせてバンチさせるとともに，それまでイオン源ターミナルの最大 500 kV の出力電圧の調節によって果たされていた，イオンの e/m に対応した周波数でのドリフトチューブ寸法に適合した速度を入射重イオンに与える予備加速も行なって，二つの任務を同時に果たせる世界最初の可変周波 RFQ¹²⁾ が 1999 年に開発，設置された．重い元素の多価イオンの収率が大幅に上昇するとともに，加速されるビーム強度も増加して，大きなイオン源ターミナルは最早不要となった．

RFQ は直流高電圧を使用するイオン源ターミナルより遥かに小さく，またそれまで使用されてきたバンチャーよりも，イオン源から出た直流ビームの大きな割合をバンチさせ，加速位相に乗せる能力が高い．従来のイオン源を内蔵する高電圧ターミナルとバンチャーを組み合わせた，線形加速器の標準的な入射方式は過去のものとなった．

6.2 RILAC の増力による超重元素の探索と 113 番元素の発見

筆者の退任後，RILAC に荷電ストリッパーと倍周波数の加速タンクが追加され，RILAC のみの到達エ

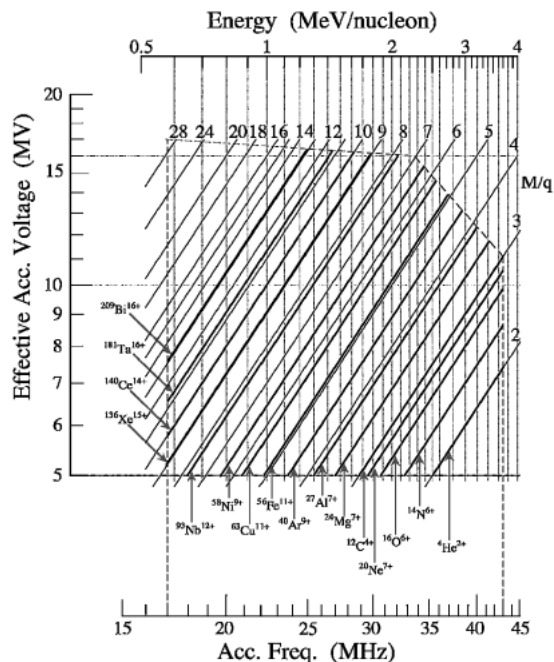


図 5 RILAC の加速可能範囲を示す図．横軸は周波数，縦軸は ΣV ，パラメーターはイオンの m/e ．

ネルギーが約 2 倍となり，これに前記の独自開発の ECR イオン源と RFQ による重い元素の加速強度の向上が加わって，SSC を使用せずに可変周波数連続波線形加速器の特徴を生かした超重元素の探求が可能となった．それにはこの装置が重い元素の原子核間のクーロン障壁の克服を果たしつつ，高速イオンの標的原子核へのソフトランディングのための微妙なエネルギー調節をし得ることが肝心である．長時間の昼夜にわたる根気を要する実験の後，2004 年 7 月に森田氏のチームによる 113 番元素の発見に到った．ビーム強度が大きく，細かいエネルギー調整が可能であり，duty factor が大きい利点が元素の同定を可能にしたと思われる．図 5 に増力前の RILAC の加速動作範囲を横軸を周波数，縦軸を ΣV ，パラメーターを m/e として示してある．周波数は核子当たりの加速エネルギーに対応する．

6.3 主加速部の運転開始

主加速部の SSC の建設は，1979 年の RILAC の運転開始に引き続いて 1980 年に着工，1986 年に完成して，RRC (Riken Ring Cyclotron) と命名された．入射されたイオンのエネルギーを 16 倍とする性能を持つ．ECR イオン源を装着した RILAC と結合して例えば炭素を 64 MeV/核子，ウランを 13 MeV/核子に加速することが出来る．この値はその後の 18 GHz

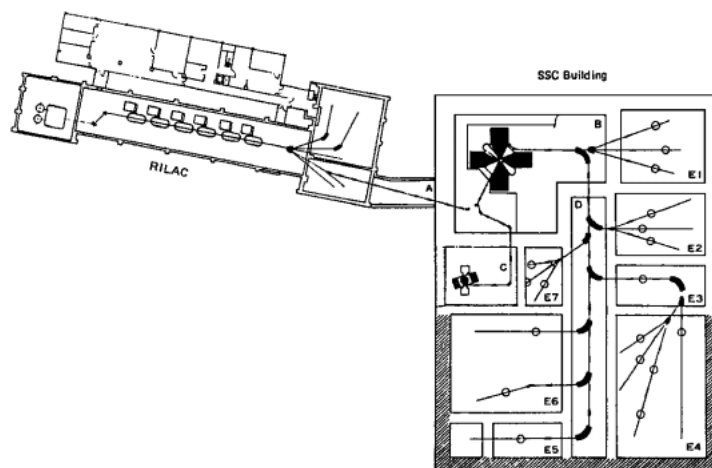


図6 RILACとSSC (RRC)の接続平面図.

ECR イオン源の導入によってイオンの荷電数が大きくなり、また、ドリフトチューブの放電耐圧が向上して ΣV が大きくなったので、更に向上している。図6にRILACとRRCの接続図を示す。1971年にスタートした、「周期律表の全元素の加速が可能な複合加速器施設」の構想は、こうして当初の目標を1986年に達成できたこととなる。

謝辞

この重イオン加速器の開発と完成には、多くの人々から応援をして頂いたことを記し、感謝をしたい。それらの方々の助力がなければ、この装置は存在し得なかった。また各局面での研究室メンバーの、地味だが自発的な努力が、目的の達成を可能にしたことも記しておきたい。また、筆者が退任後、主加速部の建設を引き継いだ姉妹研究室が、望み得る以上に見事に主加速部を完成させ、更にこれを発展させた大規模なRI Beam Factoryを建設中である。これらのプロジェクトの完成とその機能を駆使した研究の成功を待望している。

参考文献

- 1) G. Breit, M. H. Hull and R. L. Gluckstern: *Phys. Rev.* **87** (1952) 74.
- 2) H. Kumagai: *Nucl. Instr. & Methods* **6** (1961) 213.
- 3) N. Nakanishi, S. Motonaga, Y. Miyazawa and T. Karasawa: *J.J.A.P.* **8** (1969) 1229.
- 4) M. Odera, Y. Chiba, T. Fujisawa, Y. Miyazawa and O. Terajima: *Scientific Papers of IPCR.* **67** (1973) 99.
- 5) P. M. Morozov, B. N. Markov and M. S. Coffe: *Atomnaya Energia* **2** (1957) 272.
- 6) Y. Miyazawa and I. Kohno: *J.J.A.P.* **9** (1970) 532.
- 7) M. Odera, Y. Miyazawa, T. Tonuma, M. Hemmi and O. Terajima: *Nucl. Instr. & Methods.* **65** (1968) 247.
- 8) M. M. Gordon: *Nucl. Instr. & Methods.* **58** (1968) 245; *Annals Phys.* **50** (1968) 571.
- 9) M. Odera and T. Tonuma: *Proceedings 6th Intern. Cyclotron Conf. at University of British Columbia, 283* (1972), Vancouver, Canada.
- 10) R. M. Main, J. M. Haughian and R. B. Meuser: *Presented at 1966 Linear Accelerator Conference at Los Alamos. N.M. UCRL-17156.*
- 11) M. Odera, Y. Chiba, T. Tonuma, M. Hemmi, Y. Miyazawa, T. Inoue, T. Kambara, M. Kase, T. Kubo and F. Yoshida: *Nucl. Instr. & Methods.* **227** (1984) 187.
- 12) O. Kamigaito, A. Goto, Y. Miyazawa, T. Chiba, M. Hemmi, M. Kase, S. Kohara, Y. Batygin, E. Ikezawa, T. Nakagawa and Y. Yano: *Review of Scientific Instr.* **70** (1999) 4523.