

5 MeV バン・デ・グラーフ形粒子加速装置

5 Me Van de Graaff Accelerator

末松 茂*
Shigeru Suematsu

杉本 光昭*
Mitsuaki Sugimoto

菅ノ又 伸 治**
Shinji Suganomata

内 容 梗 概

電荷運搬用ベルトの特性改善と加速管ローディング現象の対策を行なうことにより、国産最初の 5 MeV バン・デ・グラーフ形粒子加速装置を完成することができた。本装置により加速されたイオンビームのエネルギー安定度は $\pm 0.1\%$ であり、原子核の精密実験に使用される。

1. 緒 言

1931年に R. J. Van de Graaff⁽¹⁾ によって最初のベルト起電機式の加速装置が報告され、次いで 1935年に R. G. Herb など⁽²⁾ によって初めて圧力形の装置が建設されてから今日まで、バン・デ・グラーフ形加速装置 (Van de Graaff Accelerator, 以下 V. d. G. と略す) は多くの人々によって研究され、その成果が報告されている⁽³⁾。しかし、これらの多数の V. d. G. に関する仕事は、その大部分がアメリカにおいてなされたものである。わが国においては大学の研究室やメーカーなどにおいて研究が行なわれてきたが、いずれも加速エネルギーが 3 MeV 程度にとどまっていた。

最近の原子核実験の発展によって、精密測定のエネギー範囲がさらに高い領域まで拡張され、V. d. G. に対してより高い電圧 (エネルギー) が要求されるようになり、10~20 MeV のタンデム形 V. d. G. が出現している現状である。

今回完成した 5 MeV V. d. G. は、さきに完成した 3 MeV V. d. G.⁽⁴⁾ の経験をもとにして製作された国産最初のものであり、国内技術をもってより高いエネルギーの V. d. G. を製作する足掛かりとなるものである。本装置は東北大学理学部に納入され、原子核の精密実験に使用される。

2. 装置の構成

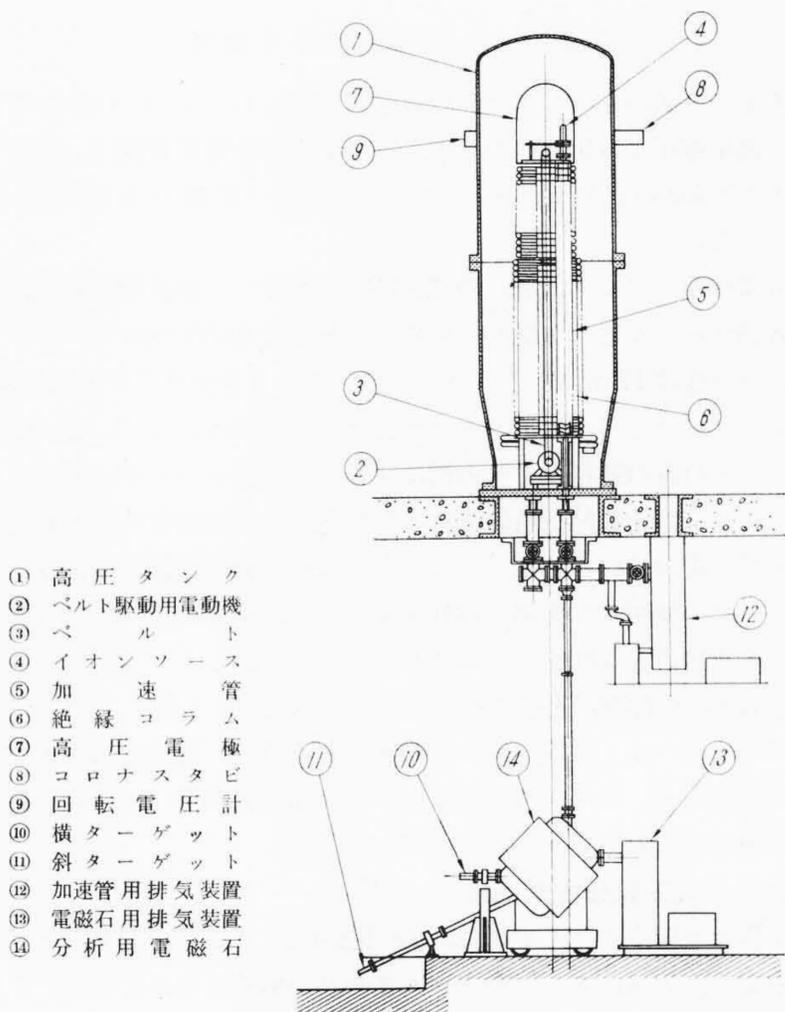
2.1 起電機部

本装置は圧力形 V. d. G. であり、起電機部および加速管は高圧タンク内に收容されている。第 1 図 (a) は加速器本体のだいたいの構成を示したもので、(b) は起電機部の写真である。本装置は縦形であり、2 階以上に高圧タンクなどが配置され、加速されたイオンビームは 1 階で原子核実験に使用される。高圧タンクは高さ約 8 m の鋼板製で 2 分割してあり、その溶接部は X 線による検査を行なっている。ガスを充てんするときは 1,500 l/min のトラップ付油回転ポンプで、タンク内を十分に排気乾燥させたのち、貯蔵タンクから N₂ と CO₂ の混合ガスを圧縮機で充てんする。ガス系統を第 2 図に示す。

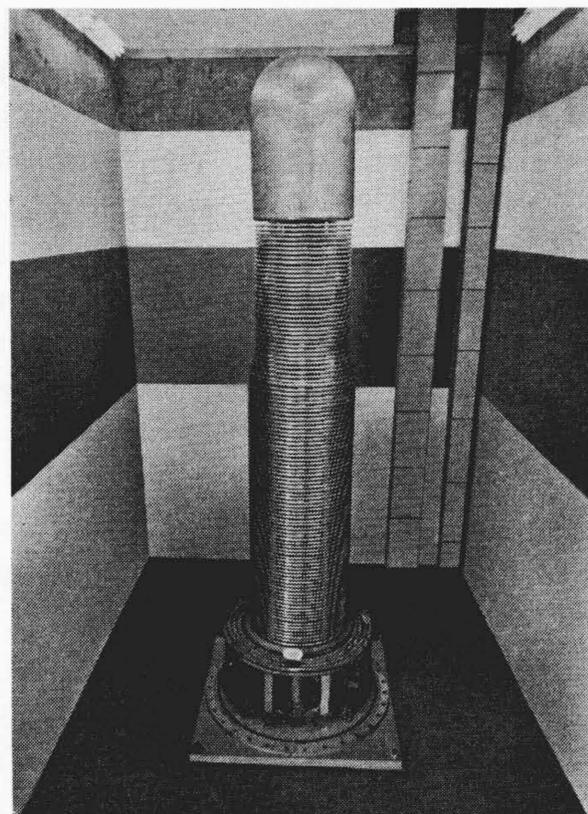
絶縁コラムは 4 ブロックに分割され、各ブロックは短冊形の支持がい子とフープとを接着したものからなっている。これらのブロックは精密に仕上げられた継ぎ金具で結合されている。本 5 MeV V. d. G. では特にフープの表面電界強度を緩和し、コラムの静電遮へい効果をあげるためにだ円フープを使用している。コラムの各段間は分圧抵抗で接続して電位分布を均等にし、また火花ギャップを取り付けて異常電圧を防止している。分圧抵抗体には耐湿性、耐コロナ性の向上のため特殊樹脂加工を施している。

絶縁コラムの上部には、絞り加工のアルミニウム製高電圧電極が取り付けられる。その表面は十分に仕上げられており、タンク内面

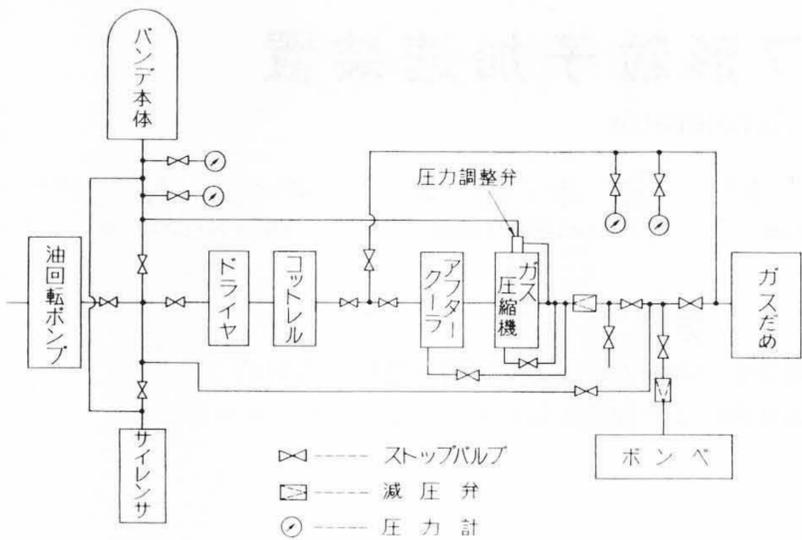
* 日立製作所国分工場
** 日立製作所日立研究所



第 1 図 (a) 5 MeV バン・デ・グラーフ構成図



第 1 図 (b) 5 MeV バン・デ・グラーフ起電機部



第2図 ガス回収装置系統図

の仕上げとあいまってコロナ放電などが起こらないようにしてある。発生電圧が5.5 MV のとき、電極側面での電界強度は、充てんガス圧15 kg/cm²におけるガスの耐圧に比べ余裕のある設計となっている。

電荷を運ぶベルトは2台の7.5 kW (10 HP) 三相誘導電動機により直結プーリを通して駆動される。回転数は3,000 rpm で、ベルトで走行速度は17 m/sある。ベルトのばたつきを少なくするために、ベルトフープとベルトスペーサが交互に各段にはいつている。さらにベルト自身の運行をより円滑にするために軽いゴム含浸形のベルトを使用し、比較的抵抗値を低くして電荷の局部的集中や摩擦電気の影響を避けている。ベルトに電荷のをせる荷電用針電極にはステンレス針を使用して先端の消耗を少なくし、高圧電極における集電子の集電効率を100%に近づけるように配置している。

V. d. G. を長時間運転するとタンク内の温度が上昇し、ラジアルスパークやベルト放電が起こりやすくなるので、適当な冷却を行なう必要がある。本V. d. G. ではフロン冷凍機を用いて冷却し、長時間運転時における温度上昇を防いでいる。

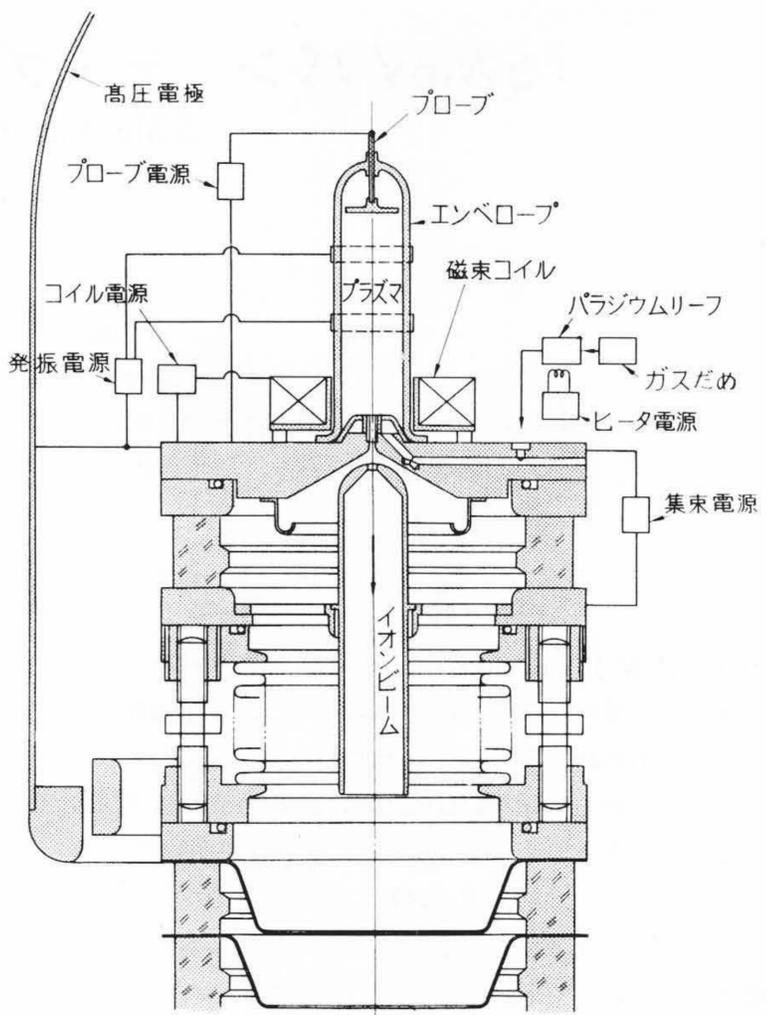
2.2 高電圧電極内の装置

高電圧電極内にはイオン源、RF 発振器、プローブ電源、ビーム集束電源、ガスだめ、パラジウムリークが組み込まれている。これらの装置に必要な電力は、ベルトの上部プーリに組み込まれた1 kVA、100 V、200 c/s のプーリ発電機によって供給される。イオン源や集束電源などは6本のアクリル棒を介して操作され、セルソノモータを用いて制御機より遠隔操作される。

イオン源はRF形⁽⁵⁾であり、50 Mc、40 W の発振器でイオンを発生する。小発振出力でもイオンの発生、取り出しの効率をあげるためにコイルによって磁束を加えている。イオン源に使用するガスはガスだめよりパラジウムリークを通し、流量調節されながら供給される。イオンは5 kV までのプローブ電圧を適当に調節印加してイオン源から押し出され、50 kV まで可変の集束電圧で集束される。RF イオン源は原子イオン収量がよく、70% 以上に達しており、全イオンビームが200 μA 程度取り出せる。高圧電極内の各装置の機能図を第3図に示す。

2.3 加速管と真空系

加速管はベルトとともにV. d. G. の最も重要な部分である。設計にあたっては、高真空中の耐圧、ガラス管の沿面耐圧、真空排気コンダクタンスやさらにビームの集束作用まで考慮されている。加速管はアルミニウム電極とガラス管を交互に接着して製作し、全体が3分割できる。加速管電極は2.1に述べたコラムの各段と1対1の対応をしている。フープと加速電極との接続はインダクタンスを持ったバネで行なわれ、サージが加速管に侵入しないようにするとともに、加速管には火花ギャップを取り付けて異常電圧を防止してい



第3図 イオン源ブロック線図

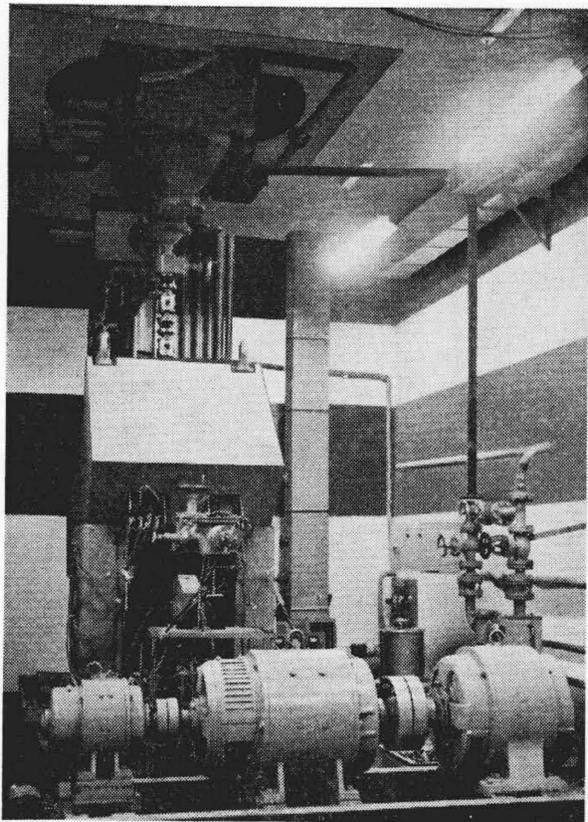
る。

加速管を排気する真空装置としては10インチ油拡散ポンプと600 l/min の油回転ポンプを使用した。油の逆拡散を防ぐために液体窒素のトラップを使用している。到達真空度は 1×10^{-6} mmHgであり、ガスリークによって 5×10^{-5} mmHg までの範囲を調整できる。また加速管に接続するビームダクトや分析電磁石用真空箱などの排気のために6インチ油拡散ポンプと150 l/min の油回転ポンプを備えている。なお真空系の保護のためにサーミスタ真空計と連動するニューマティックバルブを取り付けている。

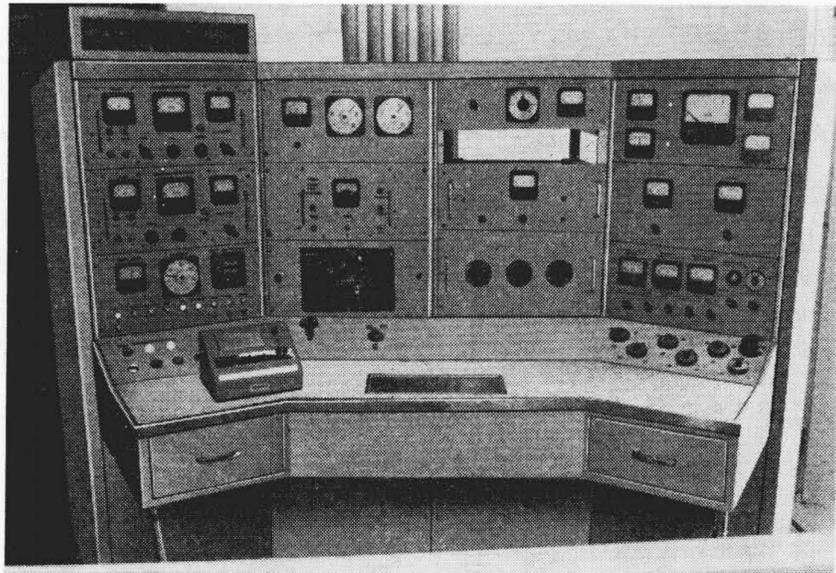
2.4 分析電磁石

加速されたイオンビームは、分析電磁石の磁界によって質量とエネルギーの撰択が行なわれ、ターゲットに導かれる。この分析電磁石は縦形V. d. G. によって垂直に加速されたビームを水平方向に90度偏向する役目も兼ねている。電磁石の磁極間げきには、ビームが通る真空箱と核磁気共鳴吸収磁束計のプローブがはいる。ビームの入口と出口の磁極部には回転シムがあり、これを調節することによってビームの集束や位置を調整でき、ビームに二方向の集束作用を与える。最大磁束密度は12,500 ガウスで5 MeV He⁺ イオンまで分析できる。励磁電流の安定度は2/10,000であり、空間的な磁束密度の変動も 10^{-4} の程度である。

ビームは分析電磁石の入口と出口に設けたビューワによって観察することができ、入口および出口スリットと電磁石の磁界とはエネルギーと質量の分析系を形成する。出口スリットはコロナポイントによる電圧安定装置のビームエネルギー変動検出部になっている。電磁石の出口側には真空箱から二つのビームダクトが出ており、それぞれ軌道半径65 cm と91.9 cm のビーム軌道に対応する。この二つのビームダクトは、原子ビームを90度偏向したときに、分子ビームが64度偏向してダクトにはいれるようになっている。スリットとビューワはそれぞれ二つのダクトに取り付けてあり、分子ビームは電圧安定装置を動作させ、原子ビームをスリットで絞らず、そのままターゲットにあてることもできる。第4図に分析電磁石とビームダクトの一部を示す。



第4図 分析用電磁石

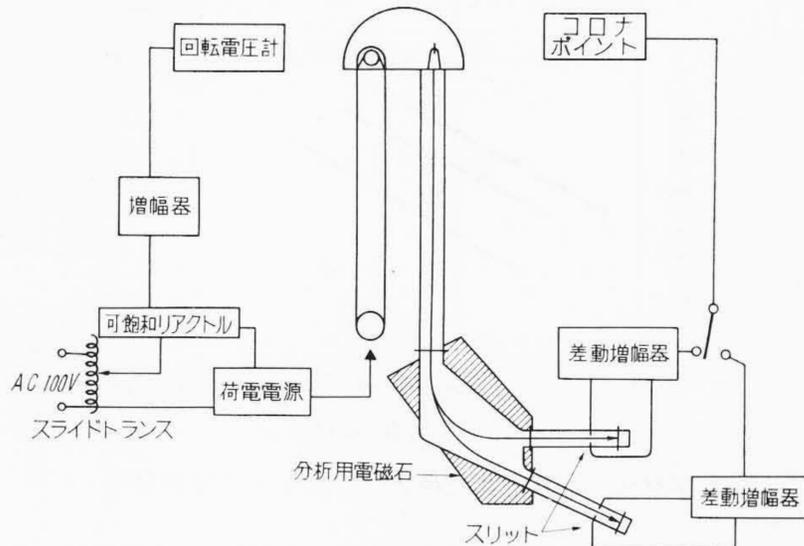


第5図 制御機

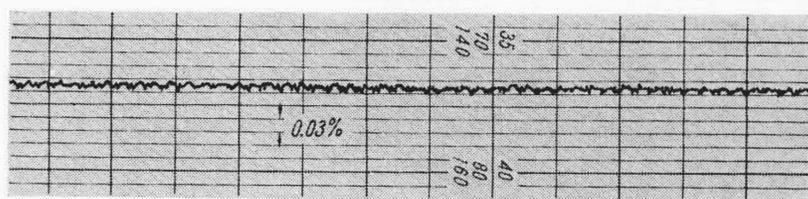
2.5 制御装置

V. d. G. の各部はすべて制御機より遠隔操作される。第5図は制御機である。発生電圧はベルトの運ぶ電荷量によって変わるが、その増減はベルト荷電電源の1次側にあるスライドトランスによって行なわれる。電圧の測定には既知の核反応によって更正されている回転電圧計⁽⁶⁾を用いている。この電圧計は電圧安定装置の検出部も兼ね、その出力の一部を交流および直流増幅器で増幅して荷電電源1次側の可飽和リアクトルに導き、ベルトの荷電を変えて発生電圧を調整する。この制御方式は通常スプレスタビライザと呼ばれている。これによってV. d. G. 発生電圧の変動は±1%以下に押えられる。

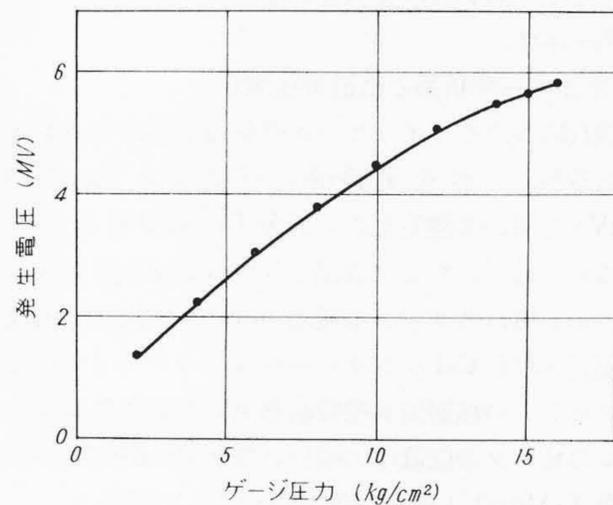
V. d. G. を原子核実験に使用する場合には、スプレスタビライザのほかにコロナポイントスタビライザ⁽⁷⁾を使用し、電圧安定度をさらによくしている。V. d. G. の負荷としてはビームと分圧抵抗の電流とがあるが、これにコロナポイントのコロナ電流を追加し、この電流を増減して発生電圧を変えることができる。コロナポイントの電流は電子管6BK4で制御する。電圧変動の検出は2.4に述べたビーム分析系の出口スリットで行なう。検出された信号は差動増幅器によって増幅し電子管6BK4のグリッドに導かれる。コロナポイントスタビライザは応答が早く、スプレスタビライザと共用することによって電圧安定度は 10^{-3} 程度にすることができる。第6図にこれら電圧安定回路のブロック結線図を示す。



第6図 高電圧安定装置ブロック線図



第7図 分析電磁石の電流安定度



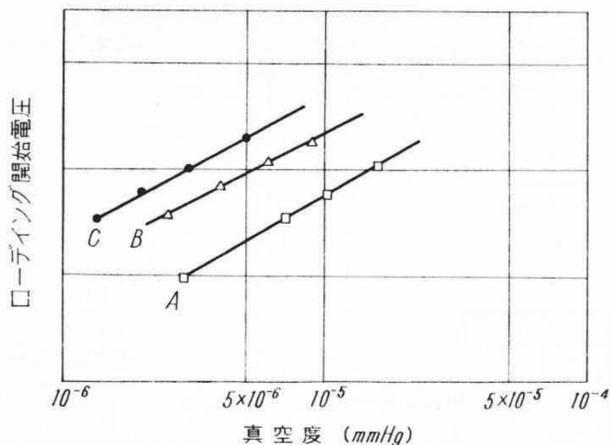
第8図 ガス圧と発生電圧の関係

一般に精密核実験を行なう場合には、回転電圧計はエネルギーの目安であり、正確なエネルギーの尺度としては分析電磁石の磁界強度を使用する。またビーム分析系はエネルギー安定装置の重要な要素であり、分析電磁石の磁束密度は 10^{-4} 程度の安定度が要求される。また励磁電流の安定度も 10^{-4} 程度でなければならない。電磁石の電源には13kW, 200Vの電動直流発電機を使用し、チョップ形直流増幅器を主体とする電子管制御装置で励磁電流を制御している。なお電流の変動はマンガン基準抵抗によって検出し、水銀電池による基準電源の電圧と検出電圧を比較している。第7図は励磁電流の長時間記録の一部であるが、電流の変動は±2/10,000以下で非常によい。

3. 電圧特性とイオン加速

3.1 電圧特性

V. d. G. においてはベルト、絶縁ガス、加速管の耐圧が非常に重要である。ベルトは2.1に述べたように、ゴム含浸形の低抵抗ベルトを採用することにより特性が著しく改善され、ベルトの放電は問題になっていない。ベルトの放電が起らないとV. d. G. の電圧はガスの耐圧で決まる。発生電圧はタンク内のガス圧とともに上昇し、ラジアルスパークによって押えられた。第8図はゲージ圧力と発生電圧との関係である。



第9図 加速管真空度とローディング開始電圧

加速管に電圧を印加した場合に、まず問題となるのはいわゆる violent discharge よりも管内のローディング現象である。5 MeV V. d. G. ではイオンビームを加速しながらフォーメーションを行なったところ、3 MeV V. d. G. の場合に比べ短時日にローディング開始電圧をあげることができた。すでに 3 MeV V. d. G. の場合にも述べたように⁽⁴⁾、ローディング開始電圧はガスリークによっても上昇させることができる。加速管内に N₂、H₂ などのガスリークをして真空をわるくしていったときに、ローディング開始電圧がどこまで高められるかは、加速管のフォーメーションの度合や使用履歴によって異なる。第9図は加速管真空度とローディング開始電圧の関係の一例を示す。

3.2 エネルギー分析系の軌道半径測定

分析電磁石におけるイオンビームの軌道半径は90度偏向で65 cm の設計であるが、これを実験的に確認するために P²¹⁰ の α 線 (5,304 MeV) を用いて測定した。線源 P²¹⁰ は分析系の入口スリットの上方面におかれ、これより放出された α 線は分析電磁石の磁界で90度偏向され、出口スリットを通る。α 粒子の計数は、出口スリットの後方に配置された CsI シンチレーションカウンタで行なった。磁束密度はプロトンの核磁気共鳴吸収磁束計で精密に測定した。α 線スペクトルのピークの位置は共鳴周波数 f=21.695 Mc/s であった。共鳴周波数 f (Mc/s) と磁束密度(ガウス)との関係は、

$$B = 234.865 \times f \dots\dots\dots (1)$$

で与えられるので、エネルギーと Bρ との関係

$$B\rho = \frac{1}{zec} (W^2 + 2m_0c^2W)^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

ρ: 軌道半径

ze: 粒子の電荷

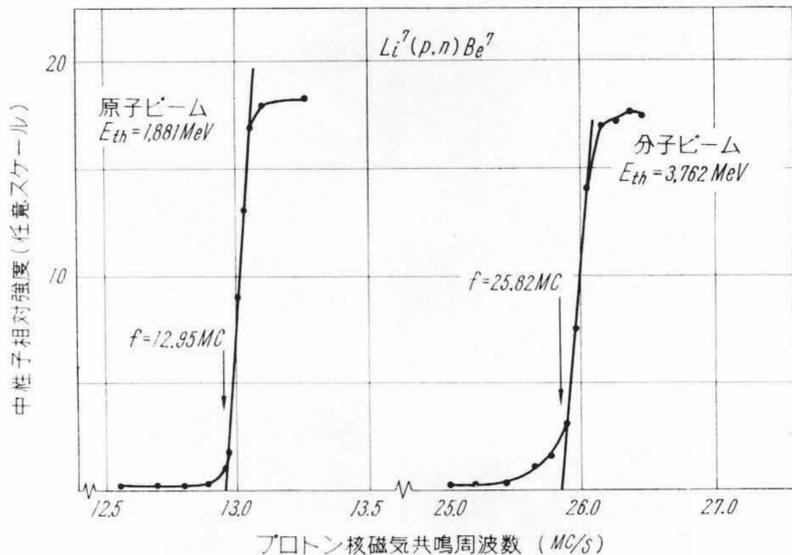
c: 光速

m₀c²: 粒子の静止エネルギー

を用いて、数値を入れて計算すると ρ=65.09 cm となり、設計値と一致することがわかった。

3.3 イオン加速とエネルギーの測定

加速されたイオンビームは、分析系の入口スリットに集束される。ビームスポットは、入口スリット付近のビューワで観測して、1~2 mmφ まで絞ることができた。集束系は 3 MeV V. d. G. における経験を生かし、M. M. Elkind⁽⁸⁾と同様の考えで設計したが、加速電圧と集束電圧との比は110~120ではほぼ設計値と一致した。2.5 に述べたスリットスタビライザを動作させると、加速電圧の安定度は非常によく、ターゲットに達するビームエネルギーの変動は ±0.1% であった。



第10図 Li⁷(p,n)Be⁷ によるビームエネルギーの測定

エネルギー分析系を通り、ターゲットを衝撃するビームのエネルギーは磁束密度 B と軌道半径 ρ から求められる。しかし、ビームエネルギーを実験的に確認し、分析系の再現性を調べるために、Li⁷(p,n)Be⁷ 反応のスレッシュホールド値を測定した。この反応については多くの精密な測定が行なわれており、そのスレッシュホールド値は 1,880.7 ± 0.4 keV⁽⁹⁾ である。ターゲットとしてはアルミニウムに蒸着した LiF の厚いターゲットを用い、原子ビーム (H₁⁺, 1,881 MeV) および分子ビーム (H₂⁺, 3,761 MeV) の両方で実験した。中性子の計数には、日立 RDN-2 形中性子カウンタを使用した。プローブは日立 EB 125 形 BF₃ 計数管とパラフィンとを組み合わせた、Bouner & Butler⁽¹⁰⁾ の用いたものと同様な構造とした。中性子収量はビームインテグレータでモニタした。スレッシュホールドの測定結果は第10図に示したようであり、数回の測定により再現性が非常に良いことがわかった。

4. 結 言

本 5 MeV V. d. G. は国産で初めてのものであり、製作にあたっては、3 MeV 器の経験を十二分に取り入れた。特に、低抵抗含浸ベルトに対するフォーメーションやガスリークの対策は、本器の性能を著しく向上せしめ、国内でも 5 MeV 級の V. d. G. を製作できる自信を得た。今後、原子核実験や放射線物理の分野において、国産 5 MeV 級 V. d. G. の活躍が期待される。

終わりに、終始ご激励、ご指導を賜った東北大学木村教授、森田教授、ならびに藤平、梶山両先生ほか関係者のかたがたに厚くお礼を申しあげる。

参 考 文 献

- (1) R. J. Van de Graaff: Phys. Rev. 38, 1919 (1931)
- (2) R. G. Herb, D. B. Parkinson & D. W. Kerst: R. S. I. 6, 261 (1935)
- (3) たとえば、R. G. Herb: Handbuch der Physik XLIV edited by Flüge (Springer-Verlag, 1959) p. 64
- (4) 末松, 杉本, 菅ノ又: 日立評論 43, 2007 (昭36-11)
- (5) 菅ノ又, 俵, 末松, 森山: 第2回原子力研究総合発表会要旨集 p. 143 (1961)
- (6) 奥山, 笈川: 電気学会昭和33年東京支部大会予稿 20
- (7) W. E. Bennet, et al: R. S. I. 13, 128 (1942)
- (8) M. M. Elkind: R. S. I. 24, 129 (1953)
- (9) J. B. Marion: Rev. Mod. Phys., 33, 139 (1961)
- (10) T. W. Bouner & J. W. Butler: Phys. Rev. 83, 1091 (1951)