

電子顕微鏡のメガ・ボルト化 (I)

I. その問題点

大阪大学工学部 裏 克 己*

はじめに

メガ・ボルトとは100万ボルトの意味である。そこで電子顕微鏡のメガ・ボルト化とは、電子顕微鏡の電子線のエネルギーを100万ボルト以上にするということであり、超高電圧化、高エネルギー化と言っても同じ内容である。

電子顕微鏡のメガ・ボルト化が問題となっているのは何も今に始まったことではなく、これまでも幾度かその機運があったが、電子顕微鏡応用技術が比較的新しいせいもあって応用面での機運が熟せず本格化しなかった。ところが最近に至って、在来形の10万ボルト級電子顕微鏡およびその試料処理関係が整備されるに伴い、応用分野が自然科学、工学の非常に広い範囲に拡って来て、

漸く電子顕微鏡の高エネルギー化の機運が熟して来た。

メガ・ボルト電子顕微鏡の効用については本号の別のところで解説があるので省略するが、各国における50万ボルト以上の電子顕微鏡の設置状況を表1に示す。表から判るように日本の電子顕微鏡メーカーの実力は世界的である。図1と図2に実際の例の写真とその断面図を示す。

電子顕微鏡のメガ・ボルト化のための問題点

電子顕微鏡の電子光学的性能は通常2つの値で評価される。その1つは、分解能である。これはどこまで接近した2点を識別できるかを表すもので、最近の高性能な10万ボルト電子顕微鏡では 10\AA (10^{-7}cm) 以下であり、 2\AA というようなものまで現れている。他の1つは直接

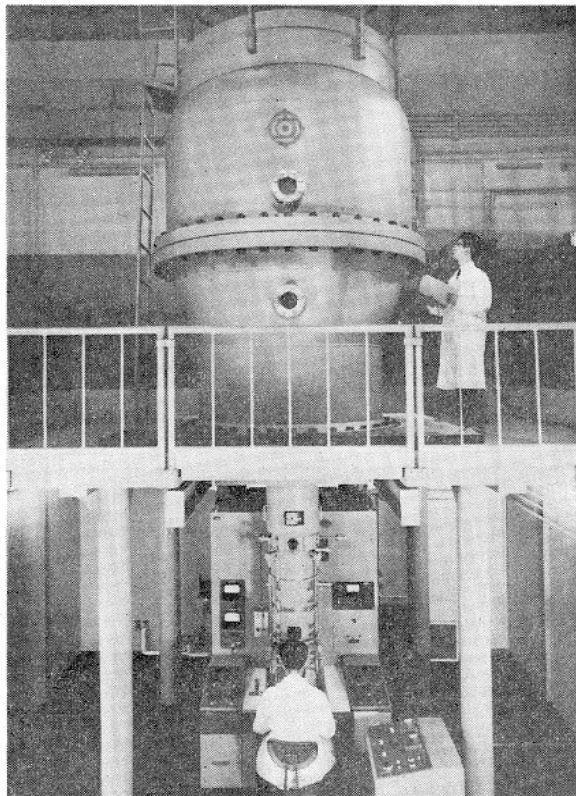


図1 100万ボルト電子顕微鏡の実例
(日立製作所中央研究所)

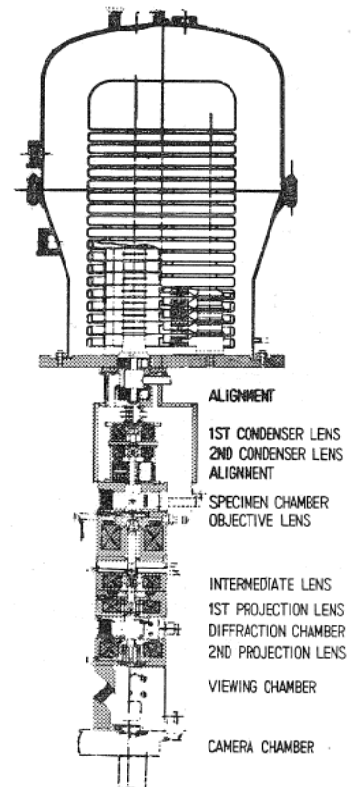


図2 100万ボルト電子顕微鏡 (図1) の断面図

*大阪大学工学部 電子ビーム研究施設教授

表1 加速電圧50万ボルト以上の電子顕微鏡の設置状況

設置場所	電圧 (万ボルト)	使用目的	メーカー
金属材料技術研	50	無生物用(金属)	島津
東京大・物性研	50	無生物用	日立
京都大・化学研	50	無生物用(高分子)	島津
名古屋大	50	無生物用	日立
島津製作所	75	生物および無生物	島津
日立製作所	100	生物および無生物	日立
日本電子	100	生物および無生物	日本電子
イギリス・ケンブリッジ大	75	生物および無生物	鏡体イギリス, 電源スイス
アメリカ・U.S. スチール	100	無生物用(とくに金属)	鏡体 RCA, 電源スイス
フランス・ツールース	120 (公称150)	生物および無生物用	鏡体フランス, 電源スイス

43年度中に設置確定のもの

東北大・工学部	50	無生物用	島津
大阪大・産研	50	生物および無生物	日立
アメリカ・バージニア大	50	無生物用	RCA
カリフォルニア大	65	"	日立
ドイツ・マックスプランク研	65	"	日立
スウェーデン国立金材研	100	"	日本電子
イギリス A. E. R. E.	100	生物および無生物用	イギリス

設置計画のあるもの

大阪大学	200 (鏡体300)	生物および無生物	
フランス・ツールース	300		
アメリカ・アルゴンヌ国立研	500		

倍率であり、電子顕微鏡で直接観察できる倍率で、最近10万倍も珍しくない。電子顕微鏡の電子線のエネルギーを高める目的の主たるものは、観察できる試料厚みを大きくとることである。この際、分解能と直接倍率が従来の10万ボルト級電子顕微鏡に比べて大巾に低下してしまったのではその効用は大巾に減ってしまう。電子線のエネルギーを高めることそれだけなら、種々の粒子加速器の進歩に見られるように、それ程難しいことではない。問題は実に分解能および直接倍率を少くとも従来の10万ボルト級電子顕微鏡のそれと同じにしたままで、電子線のエネルギーを高めるところにある。

これを加速系について言い直すと、エネルギーのよく撞った。(エネルギーの変動または拡がり 10^{-5} 以下)、細くて(直径1ミクロン程度)、平行度のよい(試料への入射角 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ ラジアン)、エネルギーの高い(100

万ボルト以上)電子線を発生させることである。レンズ系については、高エネルギーの電子線に対して、焦点距離が短く、種々の収差が小さいことが要求される。さらに対物レンズに対しては、試料を挿入し、しかも種々の試料条件に置くための附属装置が入るスペースが必要となる。

電子顕微鏡の試料室機構は、その応用における死命を制する。日本の電子顕微鏡が世界的に好評なのはその性能が秀れているということだけでなく試料室に対する色々な附属装置群を整備して、試料に色々な条件を与えながら像を観察できるところにもある。(電子顕微鏡で始めて100万ボルトの線を突破したのはフランス・ツールース(表1参照)であった。(1962年)しかし超高電圧電子顕微鏡の効用を実証したのは日本における50万ボルト電子顕微鏡を駆使したグループであった)。生物関係の研

研究者にとって微生物を生きのまま観察することは長年の夢であるが、その前に生のまま（この意味は死んではいないが、真空中で水分を失って乾からびたものではないという意味。魚屋の店先の魚は死んではいないが生である。）観察することを強く期待している。このためには試料を真空中に曝さないためにカプセルに入れなければならない。メガ・ボルト電子顕微鏡が生物関係における電子顕微鏡応用技術の第2の革命となるためには、このようなカプセルを開発しておくことが必要である。

電子顕微鏡像のコントラストは像の良さを決定する重要な因子である。電子線のエネルギーを増すと、原子との衝突確率が減る。このことが試料透過能を増す原因となるが、一面コントラストを低下させる原因ともなる。コントラスト向上とくに生物切片のように軽い原子から構成されている試料に対して向上させることは従来から色んな方法が試みられている。メガ・ボルト化に当っては、このことも忘れてはならない重要な問題であるが、ここでは省略する。

電子顕微鏡像を観察し、記録するためには現在では蛍光板と写真に頼っているが、電子線のエネルギーが高まると、これらを素通りして行く電子が益々増える。このことは、それらの蛍光効率が減ることおよび感度が減ることを意味するだけでなく、素通りした電子線が最終的にどこかに衝突吸収されて発生する2次電子、X線などによって偽の像が現れることになり得る。

この他、レンズの絞りなどに高速電子線が衝突して発生するX線対策、絞り自体の問題、放電事故、真空事故などの対策等々数え上げればきりが無いが、ここでは加速系とレンズ系に限って解説を試みる。

高速電子線に対するレンズ

レンズとしての要求は前述の通りである。焦点距離が短いことは、直接倍率を大きくとりながら鏡体の長さを過度に長くしないためにはどうしても必要である。（レンズと像面の間の距離を数10cmにし、倍率を100倍にとるには焦点距離が数mmということになる。）また同じ形のレンズでは励磁を強くして焦点距離を短い状態で使用の方がレンズの収差（球面収差と色収差）は小さくなる。

レンズには電界のレンズ作用を用いる静電レンズと磁界を用いる磁界レンズとがあるが、前者では電子線と同程度の電圧を狭い場所に加えねばならないので、高エネルギー電子顕微鏡に用いるには技術的な困難が多過ぎる。

磁界レンズの焦点距離は近似的に

$$\frac{1}{f} = \frac{e}{8mV_0(1+0.98 \times 10^{-6} V_0)} \int_{-\infty}^{\infty} B^2(z) dz \quad (1)$$

で表わせる。ここに m, e は電子の質量および電荷、 V_0 は電子の加速電圧（ボルト）、 $B(z)$ はレンズの軸上磁束密度である。

実際の磁界レンズは励磁コイルを裸のまま使うことは少なく、図3のように磁気回路をつけ、間隙に磁力線

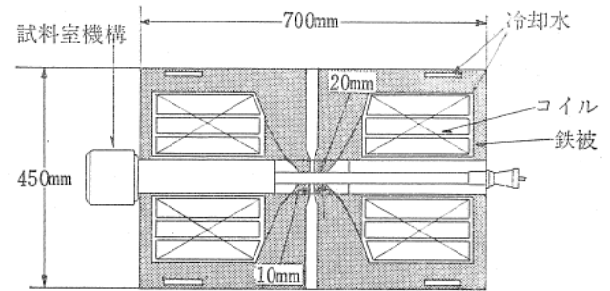


図3 300万ボルト電子顕微鏡用対物レンズ（設計）（日立製作所中央研究所）

を集中させる構造にしている。これはアンペヤの法則によると磁力線に沿っての磁界の線積分 $\oint H dl$ はその磁力線が囲む全電流 NI に等しいので、軸上での $\int_{-\infty}^{\infty} B(z) dz$ は磁界分布に無関係に一定となる。そこで全電流一定とすると、式(1)により磁界をある部分に集中させる方が焦点距離は短くなる。

この磁気回路には実際に磁束が流れているから、余り磁束密度が高いと飽和してしまう。この飽和磁束密度は材料によって異なるが、20キロガウス前後である。そこで軸上の磁束密度はこれで抑えられてしまう。軸上の磁界分布は磁気回路の飽和が進むにつれて、頭が抑えられたまま、集中度が低下して行く。このことは同じ焦点距離を得るためには飽和が起ると、起らないときに比べて余分の励磁電流が必要であることを意味する。

加速電圧が10万ボルト程度以下のときは式(1)から判るように、電圧を2倍にしたときに磁界を $\sqrt{2}$ 倍すれば焦点距離は同じである。これは磁界レンズの一つの特長である。加速電圧が高くなり100万ボルト（ 10^6 ボルト）以上になると、同じく式(1)から判るように電圧を2倍にするためには磁界も2倍近くする必要がある。このことと、前の磁気回路の飽和のために加速電圧100万ボルト以上になると電子線に対する磁気レンズを実現することはエネルギーの増大につれて急速に困難さが増す。従来の形式のレンズでは大体300万ボルト位が限度とされている。図3は300万ボルトで設計された対物レンズであるが、10万ボルトのものに比べるとずいぶん大きくなっている。

この壁を乗り越えるための努力としては、現在2方向の流れがある。1つは超伝導マグネットであり他の1つは4極子レンズである。従来の形式のレンズのものに限界があるその最大の原因は磁気回路の鉄の飽和である。そこで軸上磁束密度を20キロガウス以上にするには鉄などの強磁性体を使って狭い間隙に磁力線を集中する方法を捨てなければならない。軸上磁界分布はポールピースの間隙に一巻きのコイルに電流を流したときのものに大略等しいから、そこにコイルを巻いて非常に大きな電流を流すことができれば、ポールピースを使わなくても所要の軸上磁界が得られる。しかし通常の導線では抵抗損失による発熱のため大きな電流を流し得ない。超伝導の線を用いれば抵抗は零であるから抵抗損失による発熱がなく大きな電流を流し得る。これが超伝導マグネットの

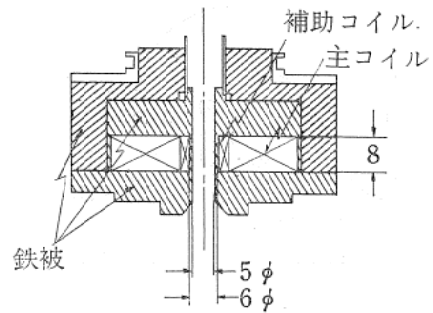


図6 超伝導電子レンズの実例（日立製作所 中央研究所）

考え方である。

しかし超伝導線に幾らでも電流を流し得るかというのではなく、流す電流によって発生する磁界がある値 H_c を越すと超伝導が破れる。この臨界磁界は、超伝導の出現する臨界温度 T_c では零になる。図4は臨界磁界と温度との関係を代表的な幾つかについて示した。超伝導マグネットの線材としては Nb-Zr や Nb₃Sn がよく用いられる。たとえば Nb₃Sn を液体ヘリウム温度 4.2°K で用いることにすれば200キロガウスは可能であることになる。

超伝導レンズに関する研究は各国で行われ、これを用いた電子顕微鏡の試作例の報告もある。図5、6は日立製作所中央研究所の試作超伝導レンズである。Nb-Zr 線の5ミル径のものを3000回巻き、磁界の最大値46キロガウス、300万ボルトにおける焦点距離5.4mmを得ている。液体ヘリウム温度（4.2°K）に最初冷却するまでの液体ヘリウムの消費量は 4L~6L、定常状態における液体ヘリウムの消費量は1~1.5L/時となっている。

超伝導レンズを実用化の段階に持って行くにはまだ色々な問題を解決しなければならない。たとえば試料室は超伝導コイルのすぐ近く数mmに設けねばならないが、その試料室で試料を種々の試料条件すなわち試料を傾けたり、1000°C位まで加熱したりなどのことが可能な試料室と、超伝導コイルとの関係が解決されねばならない。また超伝導コイルは抵抗零だから永久電流を流し得るが、焦点合せのときにそのコイル電流を効率よく変化させることもまだまだ検討の余地がある。

4極子レンズは強集束レンズとも呼ばれ、高エネルギー粒子加速器の集束系として研究され、また実際に使用されている。その動作原理に入る前に従来の回転対称形の磁界がレンズ作用を持つ理由を復習しておく。

図7のように円環状に導線を巻き電流を通

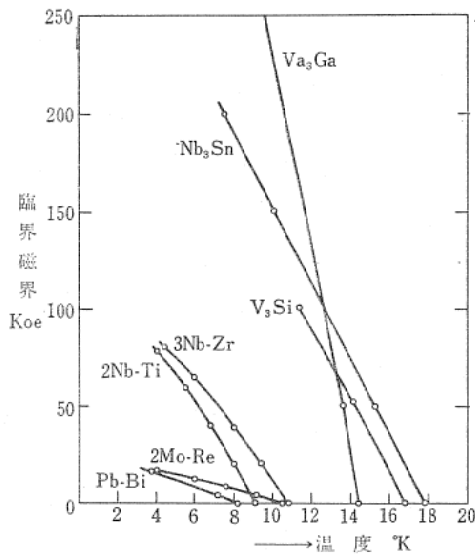


図4 超伝導合金の臨界磁界と温度

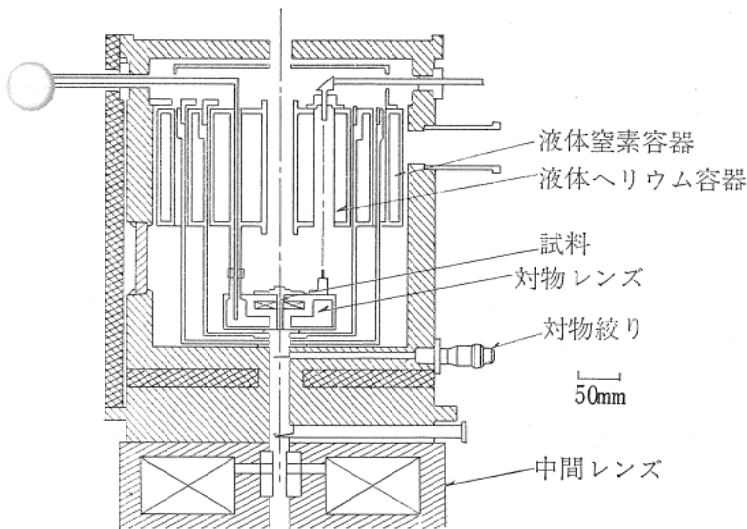


図5 超伝導電子レンズ（対物）用クライオスタット系（日立製作所 中央研究所）

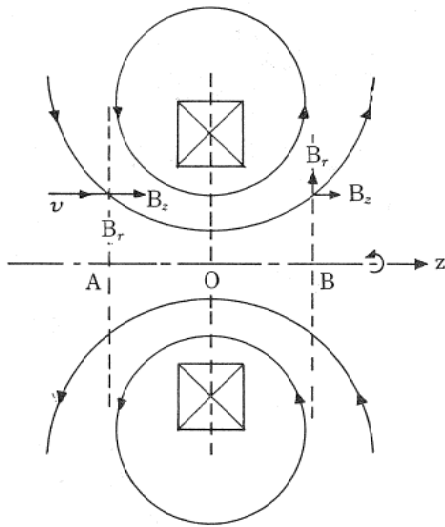


図7 環状コイルの磁界分布

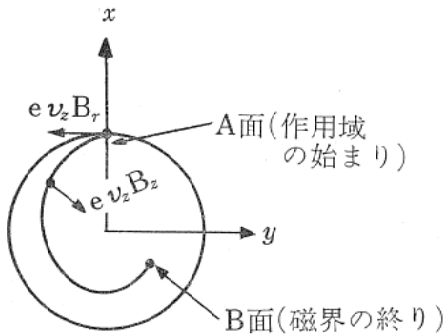


図8 A→Bまでの電子の軌道のxy平面への投射

ずると、磁力線は図のようにコイルをとり巻いて、自分自身に終る。磁力線は円周方向に成分がなく、磁力線の分布は回転対称すなわち、軸を含むどの面の上でも同じである。

電子が左から軸に平行に（電子顕微鏡では電子線が軸となす角は非常に小さく 10^{-2} 以下である）入射して来たとする。レンズの中央より左側では、磁力線のr方向成分 B_r と、電子のZ方向の速度 v_z によって、 θ 方向にローレンツの力 ($e\mathbf{v} \times \mathbf{B}$)（運動の方向と磁界ベクトルに直角である）を受ける。この方向は図7のような磁力線と電子の進行方向のときには図8のように θ 方向である。こうして θ 方向に回転して v_θ を持つと、今度はこの v_θ と B_z によるローレンツ力を受け、r方向の求心力 $e v_\theta B_z$ を受け軸に引き寄せられる。

電子がコイルの中心面を通過するまではこの作用が相加累積される。コイルの中心を通過すると B_r の向きが逆になるので、それまでの飛行で得た v_θ を減速させるように力が働き始め、コイルの磁界が及ばないところまで θ 方向には減速され続けるが、そこで θ 方向の速

度の貯金を使い果して、 $v_\theta=0$ でコイルの外へ投げ出される。O→Bまでは v_θ は減少するが、貯金があるのでこの v_θ と、 B_z とで軸へ引き寄せられ続ける。そして、コイルの磁力線が無くなったところで、求心力が消える。このようにして電子に対して集束作用を及ぼす。

この形式のレンズの集束作用は上に見たように B_r と B_z の協同作業による。しかし磁力線が自分自身に終ることと、回転対称性から B_r と B_z の作用を式(1)に見るような形にまとめることができるのである。

4極子レンズの集束作用は上の回転対称レンズのそれに比べると判り易い。図9にその断面を示す。Z方向の

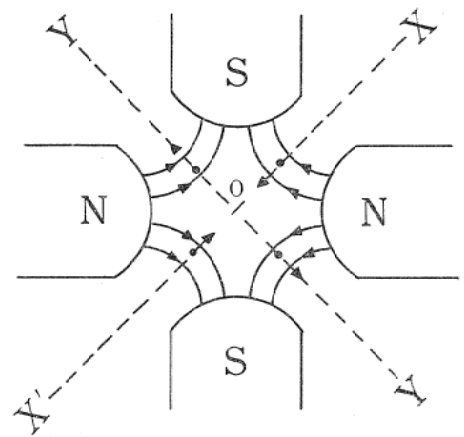


図9 4極子レンズの磁界分布と電子に作用する力の向き

長さは任意である。図のような磁極配置によってその磁力線は双曲線に大略なっている。これにZ軸に平行（紙面に垂直）に電子が打ち込まれると、OX面では集束力が、それに垂直なOY面では発散力が作用する。これだけでは回転対称性を持った集束レンズにならないので、図9のNとSを入れ換えたもう一組の磁極系を並べ、これと組合せて 回転対称な集束レンズにする。この系の特長は磁界の強さが弱くても長さが長ければそれを補うことができることであり、高エネルギーの荷電粒子線の集束に用いられている。一口に言えば従来の回転対称形のレンズは磁界の集中度で、4極子レンズは長さで勝負するとも言える。

しかしレンズとしての焦点の位置がレンズの磁界の作用域に来るので、電子顕微鏡のレンズに応用するときには投射レンズにはともかく対物レンズに使うことは難しい。4極子レンズ系の研究は、収差のより少ないもの、焦点が磁界の作用域の外にあるものを目指して行われている。

電子加速系

これまでの電子顕微鏡では、電子を加速するためには

直流の高電圧を発生し、これを加速電極に印加していた。その直流の高電圧を発生する方法として、数十万ボルト以上はコッククロフト回路が主として用いられていた。

コッククロフト回路は図10(a)のようなものである。まず最初に、整流管 V_1 とコンデンサ C_1 を含む系のみ考える。端子 $1-1'$ に交流電圧 $E_0 \sin 2\pi ft$ が印加されると、整流管 V_1 はその電圧 $1-2$ が正のときのみ通電し、その電荷を C_1 に蓄めるので、 C_1 の両端の電圧 $2-1'$

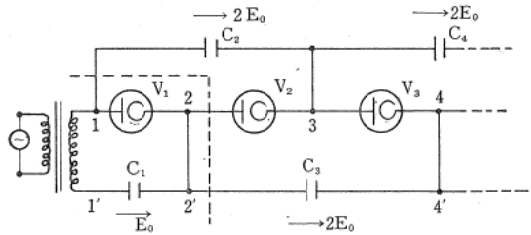


図10(a) コッククロフト回路

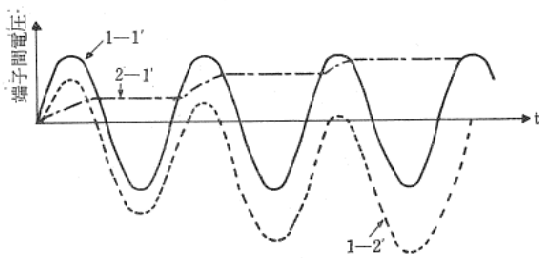


図10(b) スイッチ投入後の第1段部の電圧立ち上り

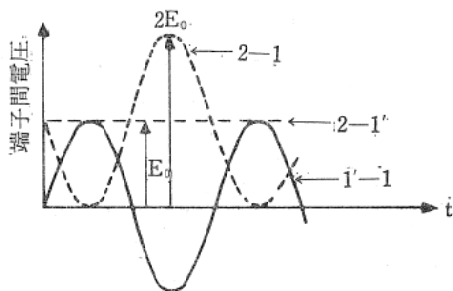


図10(c) 定常状態における第1段部の端子電圧

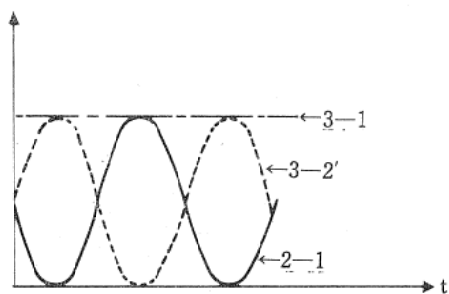


図10(d) 定常状態における第2段目の端子電圧

は図10(b)のように次第に上昇する。そして定常状態に落ちつくと整流管 V_1 には殆んど電流が流れなくなる。(負荷に流す電流は非常に僅かとする)。このときの各部の電圧は図10(c)のようになる。ここで整流管 V_1 の陽極には負の交流電圧が加っていることに注意されたい。

つぎに整流管 V_2 とコンデンサ C_2 の動作を考える。図10(c)に見るように端子 $2-1$ の間には端子 1 を基準にとると図のような電圧 $E_0 + E_0 \sin 2\pi ft$ が印加されている。ところで端子 $1-2$ が整流管 V_2 とコンデンサ C_2 に対して果す役割は、端子 $1-1'$ が整流管 V_1 とコンデンサ C_1 に対して果す役割と全く同じである。(直流 E_0 を除いて)。そこで第2段の端子 $2'-3$, $1-3$, $1'-3$ 間の電圧は図10(d)に示すようになる。そして第3段に対しては端子間 $2'-3$ が図10(d)に見るように $E_0 + E_0 \sin 2\pi ft$ の電源の役目をするので、その各端子間の電圧は図10(d)と 180° 位相が違っただけのものになる。これを繰返して整流管とコンデンサを追加して行くと電圧はどんどん高くなる。この方式の利点は、整流管とコンデンサーの耐圧は最終的に積み重ねられた出力電圧と直接には関係がないことである。しかしアースに対する電位がどんどん高くなるので、これによって最終出力電圧が抑えられてしまう。フロンガスの加圧タンクに入れ、各部に急激な電位の変化が起らないように注意することで200~300万ボルトの高電圧を発生することは、技術的にそう困難でない。図1の100万ボルト電子顕微鏡の電源はこの方式である。フランスでの150万ボルトのものはフロンガスの加圧タンクに収納しない裸のまま試作されている。

さらに発生した直流高電圧を一気に加速電極に印加することは絶縁の問題でよくないので、図2に見るように加速電極を何段にも分割して加速する。

前にも述べたように電子顕微鏡の加速系はその加速された電子のエネルギー変動を 10^{-5} 程度に抑えなければならない。これを電子回路による自動制御で行うことは、技術的には楽なことではないが一応は達せられる。

このコッククロフト方式は低メガボルト領域では実績から言って最も安定で確実である。しかし数百万ボルト程度になると加速器として他の方式も考慮の対象になる。

バン・デ・グラフ方式は比較的古くに電子顕微鏡に適用することが試みられた。バン・デ・グラフ方式は別名静電起重機式と呼ばれる。その原理は図11に示すように回転するベルトにアース側で正電荷を吹きつけ、高圧側までその電荷を運び上げ、そこでその電荷を吸いとるのである。この方式は粒子加速器の中ではエネルギーの均一度が最も良い部類に属するが、電子顕微鏡に適用するには不十分である。その原因の主たるものは機械的な仕事をやる部分(ベルトで電荷を運び上げる部分)がある

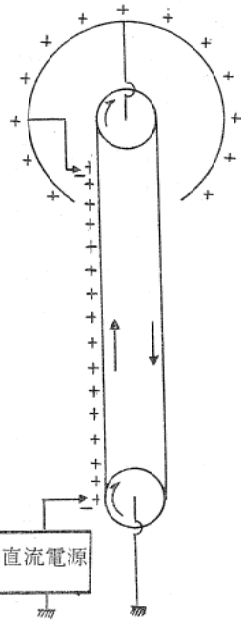


図11 バン・デ・グラーフ装置の原理図

ため、自動制御の精度が抑えられてしまうからである。

コックロフト方式にしる、バン・デ・グラフ方式にしる、とにかく直流高電圧を発生する方式は電圧が高くなるとアースに対する絶縁が非常に難しくなる。これにつれて装置全体が非常に大きくなって、そこに蓄積される静電エネルギーも急激に増加し事時故の損傷も大規模になる。そこで直流で高電圧を発生しないで電子を加速することが問題となる。

線形加速器 (Linear Accelerator, Linac) はその一つの手段である。図12(a)のように金属の円筒を作り、これにその共振周波数に等しい周波数の超高周波を給電すると、その中に大きな超高周波の電圧が発生する。この電圧はその共振器の壁の損失が少なければ少ない程高い電圧を発生する。共振器が決まると、そこに発生する電圧 V の2乗 V^2 と給電電力 P とは比例して大きくなる。この共振器を N 個に増してこれに超高周波電力を給電する

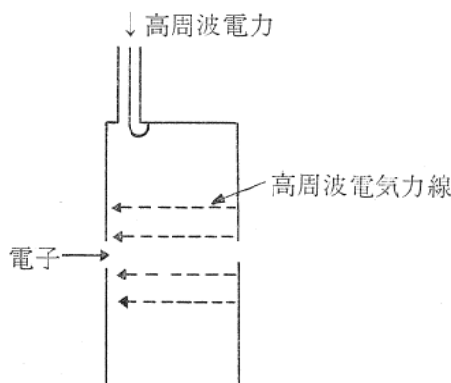


図12(a) 超高周波円筒空洞共振器の電気力線

と1個当りの電力は $1/N$ になるので発生電圧は $1/\sqrt{N}$, これが N 個あるから全電圧は \sqrt{N} 倍になる。それで N 個の共振器を電子の進行方向に並べ、最初の共振器で加速された電子がつぎの共振器に入って来たときに加速され続けるように給電電力の位相を適当に調節してやると、共振器を通り抜ける度に加速されて行く。これが線形加速器の原理である。この方式では超高周波の電圧が金属円筒の中に閉ぢめられているし、共振器の数を増し、超高周波電力をそれに応じて増して行けばエネルギーは幾らでも増すことができる。この場合絶縁の問題は共振器1つ1つの中で問題になるのであって、最終到達エネルギーには無関係である。このために電子の加速エネルギーをある程度以上にしようとするれば、この方式の方が有利となる。実際にこの方式で数百 MeV~数万 MeV の電子加速器が実現されている。

しかしこの方式を電子顕微鏡にそのまま応用することは困難である。その理由の1つは、線形加速器に給電する高周波電力は数百万ボルト用のもので 1000KW 前後を必要とするからである。このような大きな電力を連続的に狭い金属容器内で処理することは到底不可能であるので、1秒間の中で1/1000位給電するパルス動作になってしまう。このパルス動作をしている系を自動制御して電子線のエネルギーを 10^{-5} の変動に抑えることは現在の電子回路技術では不可能である。もう一つの難点は共振器の中で発生しているのは高周波電圧であるので、うまい位相に入射した電子はいつまでも加速されるが、別の位相に入射した電子は都合よくいつまでも同じように加速されない。このためにエネルギーの均一度が悪くなる。現在の線形加速器の技術ではエネルギーの均一度 10^{-3} というのが限度である。

第1の難点は共振器を超伝導化することで救える。超伝導化しても高周波的には抵抗零にできないが、常温の銅を用いたときの損失の $1/10^5$ 程にすることが可能なことは実験的にも理論的にも証明されている。もしこの数字をそのまま使えば所要電力は数十W 程度となり、連続運転が可能であるので、精密な自動制御の道が開け、 10^{-5} 程度に安定化することも可能となろう。線形加速器の超伝導化は米国スタンフォード大学で研究され、

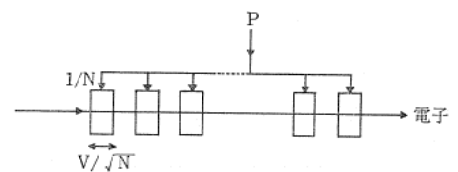


図12(b) N 個の共振器に電力を分割したときの全電圧は $N \times V/\sqrt{N} = \sqrt{N} \cdot V$

600万ボルトの加速実験に成功している。その研究者の説明では、線形加速器の超伝導化には大形のヘリウム液化機が必要であるが、従来の線形加速器が尖頭出力数千KWの高価な大電力真空管とそのパルス高電圧電源を必要とするのに比べて、系全体としてむしろ安価であることを強調している。

第2の難点は所要のエネルギーを持った電子のみをとり出すことで救える。この方法には図13のように2つあ

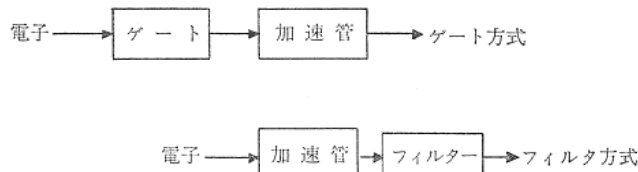
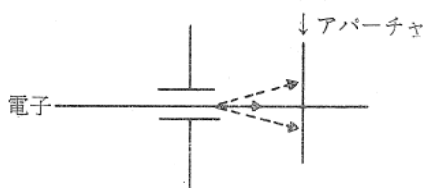


図13 線形加速器の加速電子線のエネルギーを均一にする方法

る。1つはゲート方式で加速管に入射する電子を都合のよい加速位相だけに限定して、他の位相のときには加速管に入射しないようにする。第2の方法は加速管から出てきた色々なエネルギーの電子の中で、都合のよいものだけを振り分けるフィルター方式である。第1の方式では高周波の1周期の百分の1程度の短い時間のみ電子を加速管に入射させることが必要である。これを実現するには、たとえば図14のように偏向板に、加速管に入れる超高周波の一部を印加して電子線を偏向させる。これを少し離れたところに孔のあいた板を立てると、偏向を受けない位相の電子だけが孔を通り抜ける。このように



加速管の給電電力と同期した高周波で電子を偏向させる

図14 極度に短いパルスに電子線を区切るゲート

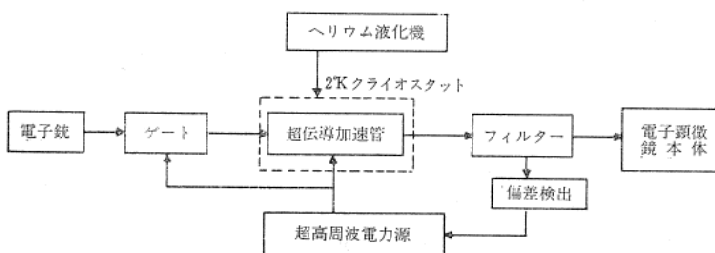


図15 メガ・ボルト電子顕微鏡用超伝導線形加速器系

すれば比較的簡単に、しかも確実なゲートができる。フィルターにはβ線分光器の原理で、エネルギーの異なる電子の軌道が相違することを利用する。β線分光器の最高分解能の記録は 10^{-4} である。β線分光器では分解能を上げることと、線量を増すこととは相反する要求である。(β線は線源から四方八方に一様に出る)。電子線フィルターの場合は少し事情が異なるので 10^{-5} の分解能は必ずしも不可能ではない。

図15に我々の計画しているメガ・ボルト電子顕微鏡用超伝導線形加速器系のブロック図を示した。電子銃としては従来の10万ボルト電子顕微鏡用の電子銃が殆んどそのまま使える。ゲートは図14の原理に基づいたものであるが、効率を上げるため空洞共振器に組み込み、10W前後の超高周波電力で励振する。超伝導加速管は動作周波数1000MHz~2000MHz 1m当りの加速エネルギーは100~200万ボルト、材質は銅に鉛メッキしたものか、ニオブを用いる。加速管の直径は15cm~30cm、長さは3m前後、エネルギーは300~500万ボルト。クライオスタットは加速管を2°Kに冷却するための大形の魔法ビンである。液体ヘリウムの大気圧での沸点は4.2°Kであるが、これを減圧して2°Kにする。その理由は、超高周波の電力がこうすることにより4.2°Kのときの値の20分の1近くまで減らすことができること、および、液体ヘリウムが超流動状態になりその熱伝導が銅やアルミなみになるからである。ヘリウム液化機は約50Wの冷却能力を持たねばならない。現在日本におけるヘリウム液化機の標準機の能力は10W前後に相当する。日本の液化機は外国のものに比べると、未だ小形で、かなり割高であるが、最近かなり改善されつつある。フィルターはβ線分光器の分野で高分解能とされている2重集束形で、エネルギーの変動を検出できるように設計する。フィルターで検出したエネルギー変動の信号は超高周波電力源に戻し、これを自動制御する。発生電力は100W程度、短期間周波数安定度は 10^{-9} ~ 10^{-10} とする。なお要所要所には軸合せのための偏向コイル、集束のための4極子レンズを配置する。

粒子加速器としては他にベータトロン、シンクロトロンなどがあるが、これらは磁石を用いて円軌道を何千回以上も描けて加速するので、電子線の電流が少く、また電子線のとり出しが厄介であるので省略する。

あとがき

電子顕微鏡のメガ・ボルト化に線形加速器などの粒子加速器を応用するという着想は本学菅田栄治教授が長年暖めていたもので、そのための努力が10年以上も前から続けられていた。筆者が電子ビーム研究施設に移ってから具体的にとり組むことになり、41年3月に図15のような超伝導線形加速器方式の構想を固め、そのための活動を開始した。ところが同年5月に米国アルゴンヌで500万ボルト電子顕微鏡製作のためのシンポジウムが開かれ、

そのとき従来の方式の積み重ねと、この超伝導線形加速器方式が有力な提案として残ったことを後で聞かされた。そのブロックと図15とは細部を除いて一致していたので、意を強くすると同時にこれは急がねばならないことを感じた。筆者のところでは共振器の超伝導化の実験と、図14のゲートの実験が一段落し、現在電子の加速実験を目指して実験装置の整備を急いでいる。

貴重な資料を貸して下さった日立、中研木村博一氏と御助言下さった本学藤田広志教授に感謝します。

34頁より続く

いウエストンは世界の科学者の注目を浴びることになるであろう。今、着々と新しい研究所およびその周辺的设计が進められている。

今日、フェルミが初めて原子炉を完成させたシカゴ大学の構内を訪れると、既に建物は壊わされていて、その跡にイギリスの彫刻家ヘンリ・ムアのつくった原子雲を連想させる金色の記念碑が立っている。歩道と車道の間
の芝生の中に、銘をきざんだ銅板が低い石の台の上の

せてある。

ON DECEMBER 2, 1942
MAN ACHIEVED HERE
THE FIRST SELF-SUSTAINING CHAIN
REACTION
AND THEREBY INITIATED THE
CONTROLLED RELEASE OF NUCLEAR
ENERGY