

「60 吋 (大型) サイクロトロン」建設報告

新聞啓三, 山崎文男, 杉本朝雄, 田島英三

I 緒 言

(昭和二十六年三月三十一日 受理)

この報告は理化學研究所原子核實驗室に建設された 60 吋サイクロトロンの建設報告である。先ず順序として大サイクロトロン*建設の経緯について述べる。

原子核實驗室は 1935 年に三井報恩會, 東京電燈株式會社, 日本無線電信株式會社等の寄附によって創立され, 西川正治, 仁科芳雄, 中泉正徳氏等を中心にして原子核物理學, 放射線生物學及びこれと關聯した問題を廣く研究するために, その施設として, 100 噸以上の大型サイクロトロンと約 100 萬ボルトの高電壓發生装置を建設する計畫であつた。原子核實驗室關係の建物は現在の 29 號館, 31 號館, 33 號館, 35 號館, 37 號館の 5 棟の他戰災のため燒失した 39 號館を含めて 6 棟からなり, これ等は概ね 1937 年の初めまでに竣工していた。大サイクロトン建設の手始めとして 23 噸の小サイクロトロンの建設が 31 號館に於て行われ, これは 1937 年 4 月に完成した⁽¹⁾。その後日本學術振興會の寄附によって大サイクロトン建設の計畫が進められ, これは 33 號館に設置されることになった。當時好都合にも米國カリフォルニア大學でサイクロトロンの研究に従事していた嵯峨根遼吉氏よりの連絡で, 同大學でも大型サイクロトン建設を着手し始めていたことを知つたので, 同大學で建設中のものと同じ大きさの電磁石を作ることにし, E. O. Lawrence 氏にその材料購入を依頼したわけである。この材料の輸入は 1938 年 3 月頃から始められ, これを石川島造船所が加工仕上して, 組立完了したのが同年 6 月頃であつた。又高周波發振装置は東京電氣株式會社が引き受け, その他の部分の製作は理化學研究所の工作課が之に當つた。

この當初の設計による大サイクロトロンの組立は大體 1939 年頃に完了し, 高周波發振装置も同年中には調整が完了したので, 愈々全體の調整に移つたが, 次に述べる三つの理由のため充分の成果を上げることが出来なかつた。即ち

- (1) 電磁石の磁極間隙が廣すぎたため磁場の均一部分の半徑が小さ過ぎたこと,
- (2) イオン加速函の排氣ポンプの速度が足りないために加速函内の眞空度がよくなかつたこと,
- (3) 高周波電壓が充分上らなかつたこと,

等が主な原因であつた。そこで, 大改造することになり, 1940 年に原子核實驗室から渡邊扶生, 矢崎爲一兩氏がカリフォルニア大學の大サイクロトロンの設計の全貌を視察するために渡米した。同氏等が歸朝後この設計を参考にして前記の大改造に取りかゝつたわけである。本報告は専らこの大改造した大サイクロトン建設に關するものであり, 主要部分の設計は殆んどカリフォルニア大學の大型サイクロトロンに學んだわけであつて, 同大學の建設報告は既に發表されている⁽²⁾關係上, 現今の原子核實驗の立場よりすればこの報告には別段目新しいものを含んでいない。たゞ當時この大きさのサイクロトロンは世界に 2 基しかなかつたのであつて, この建設には當時の本邦工業力の最高水準が寄與したともいえるのであり, これ等の點よりして本報告が何等かの参考になれば幸甚と考へて敢えて發表したわけである。尙本報告の發表が今日まで延引した主な理由は終戰後, 我國のサイクロトロン

* 60" 220 噸サイクロトロンを大サイクロトン, 26" 23 噸サイクロトロンの方を小サイクロトンと呼んでいた。

(1) Y. NISHINA, T. YASAKI and S. WATANABE: *S. P.*, 34 (1938), 1658.

(2) E. O. LAWRENCE, et al.: *Phys. Rev.*, 56 (1939), 124.

が一切撤去され、設計圖その他の記録* も一部持ち去られたものが最近返還され、記録發表の自由が與えられたためであり、大サイクロトン建設の中心人物であった仁科前社長追悼號の刊行されるを機會に大サイクロトンの建設に直接關與した者が分擔執筆して本報告書を作成したわけである**。

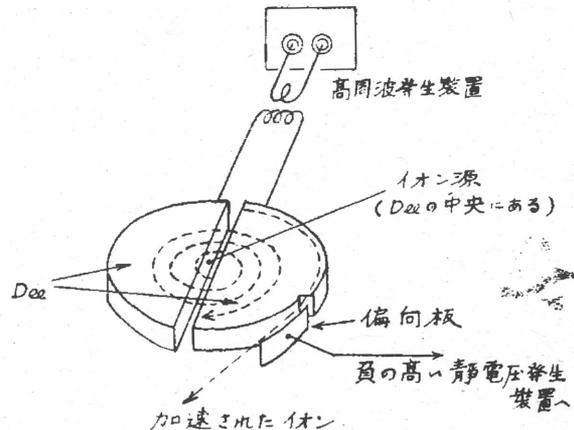
II 總 論

60 吋サイクロトンの各部分の構成を述べる前に、これ等の有機的な關聯を知るためにサイクロトン全體の構成を述べ、併せて大型サイクロトンに於て特に問題となる諸點を擧げることとする。

サイクロトンによってイオンを加速する原理は周知の通りであつて、第1圖はその原理圖を示している。即ち圖のイオン源に於て作られたイオンが二つの半圓形空洞電極 (Dee と呼ばれている) にかゝつた高周波によって加速されるのであるが、イオンの加速は二つの Dee 間で行われるので、イオンが二つの Dee 間を通過する毎に常に同じ向きに加速させるためには、均一磁場の下でイオンを圓運動させ、且つ磁場の強さと高周波電壓の周波數との間に次の共鳴條件を満足させる必要がある。

$$T = \frac{2\pi m}{He} \dots\dots\dots(1)$$

但しこゝで T は高周波電壓の周期、 m はイオンの質量、 e はその荷電、 H は磁場の強さである。



第1圖 サイクロトン原理圖

イオンの圓運動の周期はその軌道半徑に無關係であるから、一旦上の條件が満足されるとイオンは常に Dee 間で高周波電壓で加速され、圓運動の半徑が増大して Dee の壁に達するまでになる。これを Dee から外に取り出すため圖の様にイオン偏倚用の靜電壓をかけて、イオンの軌道方向を変えターゲット室に導き入れるなり、或は適當な窓を通してサイクロトンの外に引き出すのである。この様にして加速されたイオンのもつエネルギー E は、イオンの圓運動の最大半徑を R とすると

$$E = \frac{1}{2} \frac{H^2 e^2 R^2}{m} \dots\dots\dots(2)$$

で與えられる。従つて大きなエネルギーのイオンを得るためには磁場を強くするか、半徑 R を大にするかであつて、磁場の強さには限界があり、普通 1 萬數千ガウス程度までであるから、 R を大き

* 大サイクロトン建設報告は、建設終了後關係者が分擔執筆し、これを仁科先生の手許で取りまとめることになつてゐた。従つて一部既に提出してあつたものは、この取り壞しの際に持ち去られた。

** 分擔は次の通りである：

緒 言	杉本朝雄
總 論	新聞啓三
各 論	杉本朝雄
1. 電磁石關係	新聞啓三
2. イオン加速函及び真空ポンプ	山崎文男
3. イオン源	田島英三
4. 高周波關係	杉本朝雄
5. その他	杉本朝雄
綜合調整とその成果	杉本朝雄

くする、即ち大型のサイクロトロンを必要とすることになる。

R を大きくするには均一磁場を発生する電磁石を大きくすることになり、磁極直径 60 吋のサイクロトロンに對し電磁石の總噸数は 210 噸という大きな値になる。

このサイクロトロンに於て重水素イオンを加速したとすると磁場の強さ $H=13,000$ ガウスとして、高周波の周期は 10 メガサイクル (波長 30 米), $R=50$ cm とすると $E=1.5 \times 10^7$ eV となる。(2) 式より判る様に結局のエネルギーは Dee 電圧に無関係であるが、實はある程度以上電圧がないとイオンの加速が途中までしか行われないうことになるし、又 Dee 内を加速されながら走るイオンの行程が長くなって運動の途中で氣體分子と衝突して軌道をそれるものも多くなり、高速度イオン流の強さが弱められる結果になる。従って高周波電圧は出来るだけ高くする必要がある。以上のことから大型サイクロトロンに要請される條件は、

- (1) 均一磁場半径の大きいこと、
- (2) Dee 電圧の高いこと、
- (3) イオン加速函内の真空度のよいこと、

の三つが主なものであることが分る。

サイクロトロンを作働させているときは一方ではイオン源にガスを流し込んでいるわけであるから、(3) の條件は非常に大きな排氣速度のポンプが必要であるということ、同じになる。

以上大略の説明よりサイクロトロン構成の主要部分として、

- (1) 電磁石及び反勵磁用直流發電機、
- (2) イオン加速函及び真空ポンプ、
- (3) イオン源、
- (4) 高周波發振装置及び高周波回路 (Dee を含む)、
- (5) イオン偏倚用靜電壓發生装置、
- (6) サイクロトロン操作上の必要部分、

安全装置, コントロール室及びコントロール盤, 中性子及びガンマ線遮蔽用コンクリート壁及び水槽等
その他

ということになる。

60 吋サイクロトロン全體の構成を示す便宜のため第 2 圖 (別紙折込参照) を掲げた。以下數節に亘つてこの各部分の構成及び機能について述べることにする。

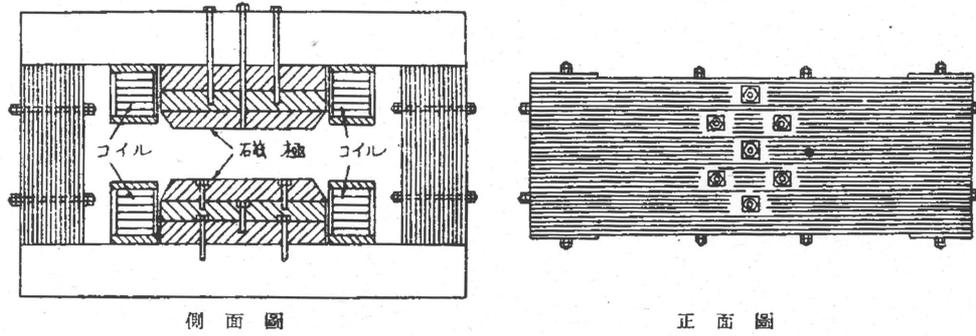
Ⅲ 各 論

1 電 磁 石

60 吋サイクロトロンに用いた電磁石は米國カリフォルニア大學にある同じ大きさのサイクロトロンと同一の設計によつたもので、材料を米國より輸入し、これを石川島造船所に依頼して、加工及び仕上して昭和 13 年 3 月頃から 6 月頃までの間に組立完了したものである。

[1] 構 成

全體の構成は第 3 圖に示されている。ヨークを構成している鐵板はボルトで締め合せた上相互に熔接して、實驗室ピット床上の I 型鐵材に取付けヨークの底部はこの I 型鐵材に熔接した。上部磁極は大型ボルトにより上側ヨークに取り付け、下部磁極の設計はボルトで止めることになっていたが、實際は下部磁極を構成している三部分を相互に周邊に於て熔接し、その底部を下側ヨークに熔接した。尙サイクロトロンを大改造する際磁極間隙を狭くする目的で、上下磁極にそれぞれ 1 吋の圓盤狀の鐵板を附加したが、これはボルトによつて夫々の磁極に締め附けた。尙組立順序は最初にヨーク、次に



第 3 圖 60 吋サイクロトン用電磁石組立圖

下部磁極, 次に下部コイルタンク, 上部磁極, 上部コイルタンクの順序であった。

〔2〕 コイル

電磁石の勵磁用コイルは上, 下各六層から成り, 各層のコイル巻線は銅帯線幅 1 吋, 厚さ 1/4 吋のものを用い, 巻線間の絶縁はファイバーを用いた。各層はファイバーで外装した丈夫な真鍮バンドで形を整え, 各層間の絶縁は丈夫な木片によった。尚電流を通じた場合に上下コイルは全體として夫々上方下方に強い力で押されるから, ヨークとコイル層との接觸を防ぐために強い木片をこれ等の間に挿入した。

電氣結線は各層を直列に継ぎ, 尚上下コイルも直列につないだ。この様にした場合の全抵抗は 1.1 オームで, 重水素イオンを加速する勵磁電流に對して約 54 kW の發熱が起る計算になる。この冷却はタンク内に満した油をポンプによって循環させ, 實驗室外部に作られた大型水槽中に油冷用として蛇管を入れ, これを水道からの流水によって冷却した。油冷ポンプ, 水槽は上, 下各コイルタンクに對し一組ずつあり, 各コイルタンクの上からあふれ出た油は一度地下室の大型油槽で一緒に集り, これから夫々のポンプによって吸い上げられて, 各蛇管に入り, 冷却されて各コイルに返送されることになる。

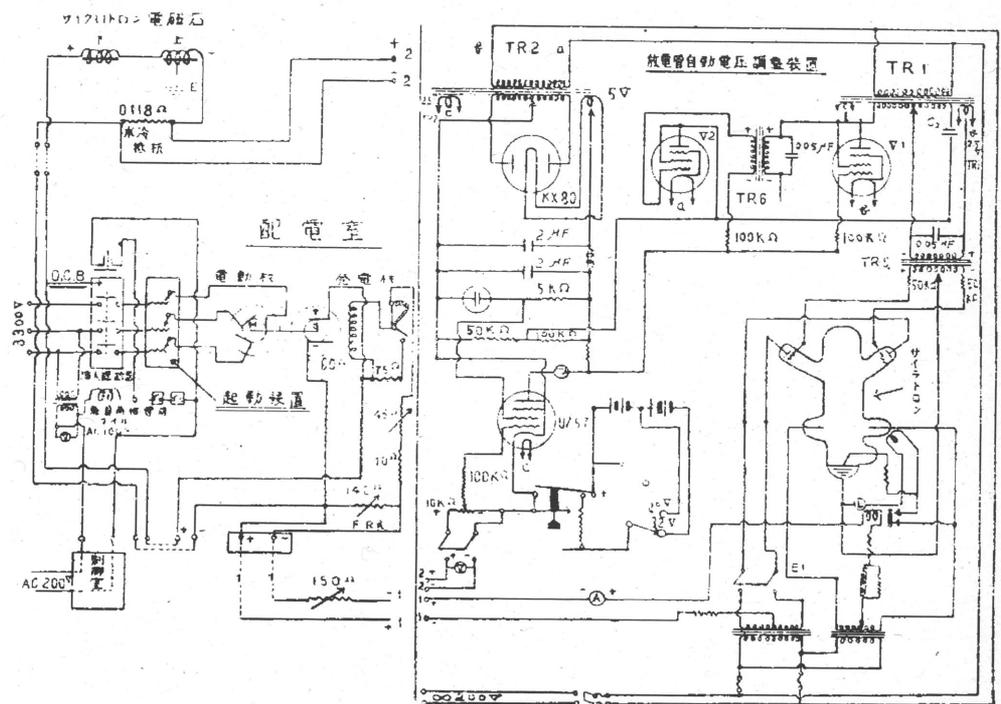
〔3〕 發電機及び電壓調整器

電磁石コイルに通ずる直流は配電室 (35 號館) に設置された 350 kVA の發電機によつた。この發電機の規格は次の通りである。

- 出力 350 kVA,
- 電壓 500 V,
- 電流 700 A,
- 極數 4,
- 回轉 735,
- 分捲,

電磁石勵磁用の電氣回路は第 4 圖の通りである。

電流を一定に保つために圖の如く主電流を 0.118 オームの水冷氣



第 4 圖 サイクロトン電磁石電流結線圖

れた洋銀片を通して流し、この両端に生ずる電位差を自動電圧調整機に導き、電磁石コイルの電流が變れば、上の電位差が變るので、これによって自動電圧調整器から供給されている發電機の勵磁電流が變って發電機の電圧を調整し、主電流を一定に保つことになる。

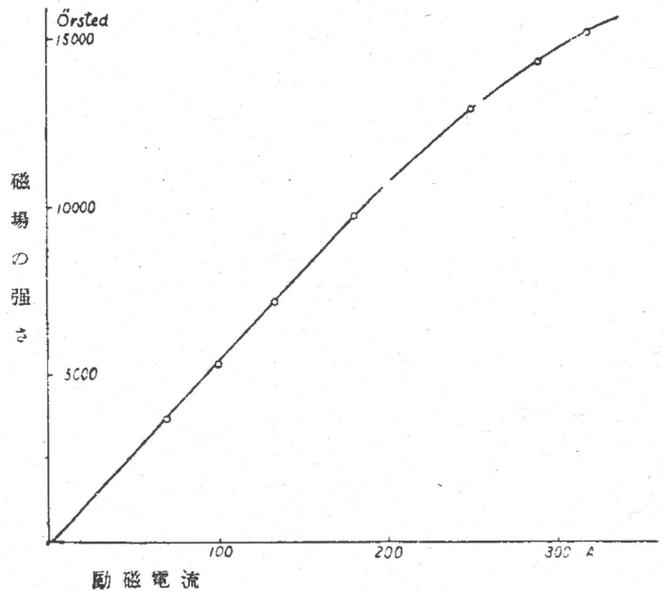
コイルの油冷及び水槽内の蛇管の水冷には安全装置を附して、コイルタンク内の油高、水槽内の水高が適當にならないと自動電圧調整器が、従って發電機が働かせぬ様にしてある。

〔4〕 磁場測定と「シム」

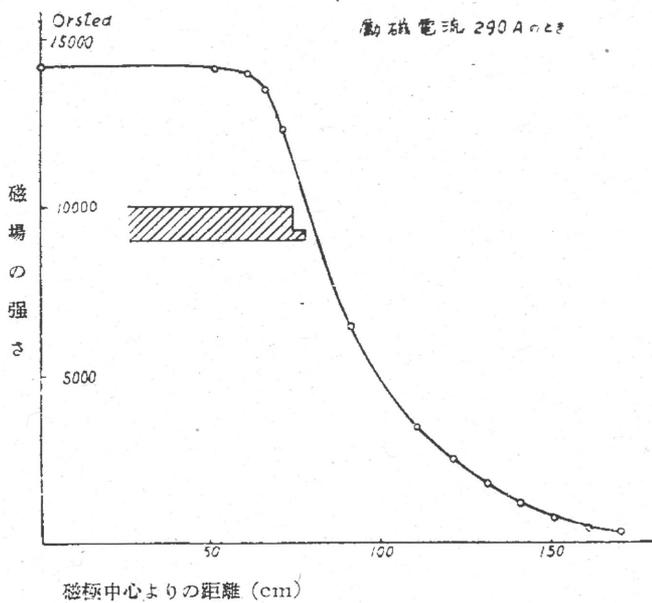
磁場の測定は加速函にその鐵蓋をして、磁極間に入れ、大氣壓のままの状態で行った。

第5圖は「シム」のない場合の勵磁曲線である。又「シム」のない場合の磁場の形は第6圖(A)及び(B)の(1)の曲線で示されている。次に出来るだけ Dee の必要最低電壓を低める様な磁場の形をさがすために、種々の「シム」を加速函の鐵蓋と磁極との間に入れて、磁場の形を測定した。その結果採用した「シム」及びその際の磁場の形を第6圖(B)に示した。

磁場の測定は捜査線輪と「フラックスメーター」を用いた。「シム」による磁場の變形を測定する場合には磁場の強さの小さな違いを精密に知る必要があるので $nA=17,800$ の大型の捜査線輪を作り、これを初め中心におき、次にこれを測定せんとする位置まで急に引き出して平行移動させ、この操作によって起るフラックスメーターの読みから、中心とその位置との磁場の強さの違いを測定して磁場の形をきめた。尙サイクロトロンを操作



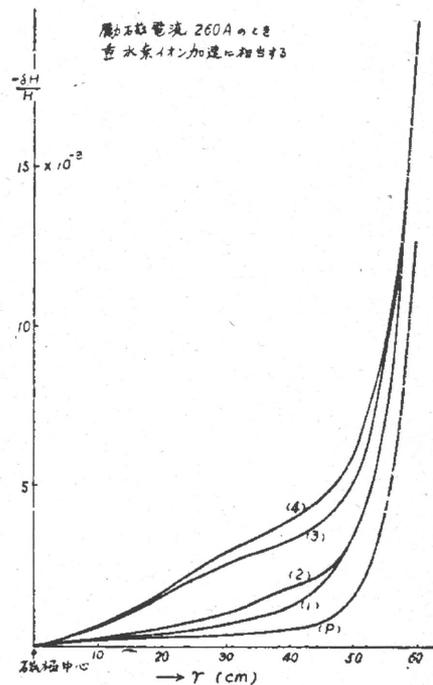
第5圖 中心部に於ける磁場の強さの勵磁電流による變化



第6圖(A) 磁極間とその周辺部の磁場の強さ

- (1) no shim
- (2) 厚さ夫々 1.5mm の鐵板 直径 90, 74, 58, 42, 30 cm のもの 都合 5 枚を重ねた 1 組ずつを上, 下磁極とサイクロトロン鐵蓋の間に入れる
- (3) 厚さ 1.5 mm, 直径 90, 74, 58, 42 cm + 厚さ 10 mm 直径 30 cm の組を上, 下に入れる
- (4) (3) の shim 以外に直径 66~54 の ring shim 厚さ 0.35 mm 8 枚の組を上, 下に入れる 重水素加速に對してはこの shim を用いた

注意 プロトン用 shim は上記 shim と全然別個のものを用いる。圖の(P)は 135 アンペアの proton 用勵磁電流の場合の no shim に對する磁場變化を示す



第6圖(B) 磁間の磁場「シム」極による變化

している際に電磁石電流を精密に讀むために次の様な回路を用いた。

即ち水冷抵抗間の電位差を乾電池で大體對償させ、残りの部分を適當な高抵抗を通してマイクロア

ンメーターで読むことにより非常に微細な電流の變化もよく知ることが出来た。

2 イオン加速函及び真空ポンプ

26 吋の小サイクロトン及び 60 吋の第 1 回試作の経験に基いて、我々が設計したものは第 2 圖に示した様なもので、これを大別すると、加速函と $\lambda/4$ 同軸共振管とに分れる。そして加速函には電極 Dee, イオン源, 容量補償板, ビーム偏向板, ターゲット室が附屬し, $\lambda/4$ 共振管は外管となる導電管, 内管となる圓柱, それを支える支點及び調整装置, 短絡板からなっている。油擴散ポンプは導電管の下部に取付けてある。次にその主要部分について構造を述べよう。

加速函 かたちは偏平の多角形で上下の蓋には厚さ 10 cm, 直径 150 cm の鐵圓板を用いた。側面の部分は砲金の鑄物で、この部分の漏洩を少なくするために、壁面を出来るだけ少くして、骨組だけとし、別に板の砲金鑄物をつくってゴムバックングを使用して蓋とした。加速函の高さは 464 mm で、磁極間の間隙は 515 mm あるから、加速函と磁極との間は上下各々 25 mm ずつとなる。

Dee 電氣的回路の所で述べる。

ビーム偏光板 これも後に述べる。

導電管 $\lambda/4$ 同軸共振管の外管をなすものであって、長さ 370 cm, 径の最も大きいところで 90 cm 最も小さいところで 33 cm となっている。二つの導電管が最後部に於て接合されるところに油擴散ポンプが装置されている。

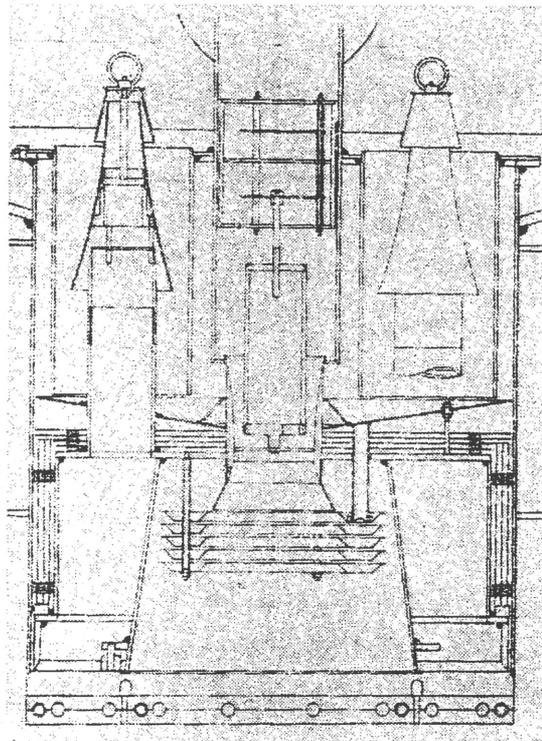
真空ポンプ 油擴散ポンプは第 7 圖に示すように、直径 18 吋の圓筒の中央にジェットをおいて、その周圍に 6 本の 2 段の高真空用ジェットを配列した。即ち 5 吋のポンプが 6 本並列に作動しているのと同等で、壓縮された氣體は中央のジェットを通して廻轉ポンプに連結されている。また凝縮した油は中央下方にある 5 枚の蒸溜板に流れ込んでこゝで分溜されるようになっている。電熱板はニクロム線を絶縁してアルミニウム圓板に鑄込んだもので、入力は 3.5 kW である。廻轉ポンプは Cenco の Hypervac 100 型か、或は Kinney の 600 l/min というポンプを交代で使用した。

ポンプ排氣速度は水素ガスを用いて測って、 10^{-4} mm Hg 乃至 10^{-5} mmHg に於て 2,000 l/sec という値を得た。併し、電熱入力を増加するとこの値は 3,000 l/sec とすることもできたが、擴散油の分解が生じて、實用としては 2,000 l/sec という排氣速度で働かして居た。但し我々の用いていた油は理研 B-Oil, 後に大日本油脂の NO. 2 Oil であった。

真空度測定器としては電離真空計を使用した。我々が最後に得たイオン加速函の真空度は 1×10^{-5} mm Hg で、水素ガスを流してサイクロトンが働いているときの真空度は約 10^{-4} mmHg であった。

3 イオン源

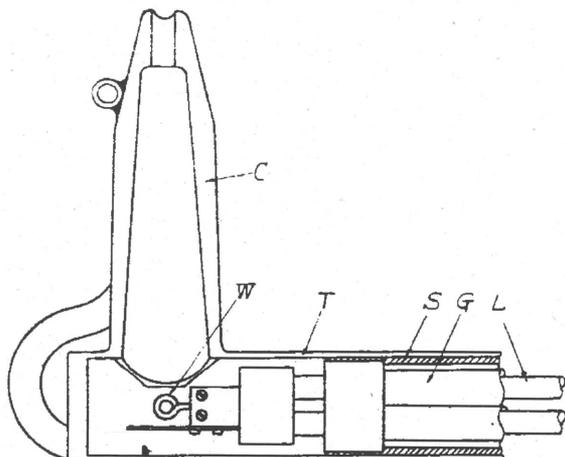
イオン源は他の部分と同様に、Berkeley の 60 吋サイクロトンの設計に従って、低電壓電弧を採用した。Livingston 等⁽³⁾が示したように電弧によるイオン源が磁場中にあるときは、特に陽極を設け



第 7 圖 ポンプ圖

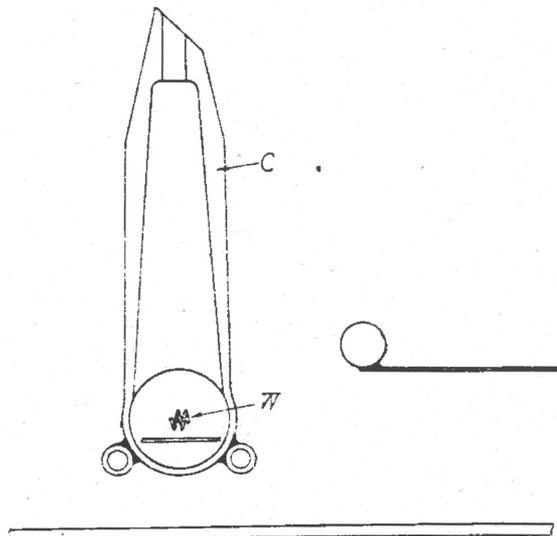
(3) M. S. LIVINGSTON, M. G. HOLLOWAY and C. P. BAKER: *Rev. Sci. Inst.*, 10 (1939), 63.

る必要はない。第8圖(A), (B)にイオン源の断面圖を示した。弧光放電が熱陰極 *W* と圓錐形の銅製の空洞 *C* の間に行われるため、この空洞には直径 6 mm, 長さ 15 mm の細い部分があって、外のよい真空との間に大きな壓力差をつけてある。この孔の出口は加速函のほゞ幾何學的の中心におき、一方の Dee に対して圖に示したように斜に 45° に切つてある。弧光は空洞中では磁場のため垂直に起り、熱陰極から出た電子がそのまゝ孔から出て作ったイオンと合せて、サイクロトロンの中にある青いイ



C: 外筒, W: タングステン陰極, T: 外銅管, G: テレックス管, S: 内銅管, L: 陰極加熱用導線

第8圖(A) イオン源断面圖



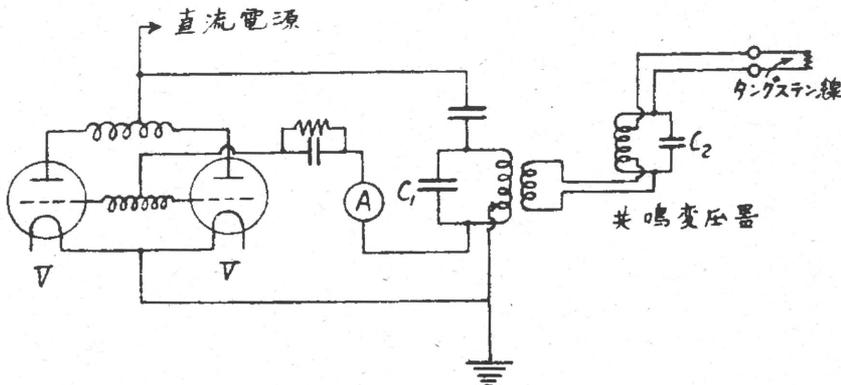
C: 外筒, W: タングステン陰極, F: Feeler

第8圖(B) イオン源断面圖

オンの柱となつてみる事が出来る。Dee につけた feeler *F* によってこのイオンはよいスタートを得て加速されると考えられる。

熱陰極 *W* はタングステン線でその直径は多くの試みの後、0.8 mm のものを用い、これを螺旋状に2回巻いた。この線は大きな電流で熱するので、その導線としては水を流した都合4本の外径 1/4 吋の銅管 *L* を用いた。これらはテレックス管 *G* で互いに絶縁されて外径 1 吋の銅管 *S* の中に納まっている。この *S* は先端に *C* をもつ銅管 *T* の中に挿入されていて、タングステン線の取り換えは、*S* のみをウィルソンシールの助けによって引き出し、小さな真空辨を閉じて全體の真空を損うことなしに行ふことが出来る様になっている。

タングステン線は加熱されたときに、磁場による歪と變形とを妨ぐため、約 300 kC の交流で加熱した。この交流電源としては第9圖に示したような回路を用いた。發振管 *V* は日本電氣の空冷式 TC 522 A を2本並列に用いた。回路中に入れた C_1, C_2 の兩蓄電器が使用中温度上昇を起し、これが



第9圖 熱陰極加熱用高周波電源の結線略圖

ためタングステン線を 70 A 以上に連続使用が出来なかつた。

發振器からの電力は非共振饋電線 (Non-resonant transmission line) で送り、途中に共鳴變壓器を

において、こゝで低電壓、強電流としてタングステン線の加熱に供した。

電弧用の直流電源は三相全波整流により、整流管としてはタンガー TH6 を 6 本使用した。三相のオートトランスを變壓器の一次側に入れて、電壓の調整をした。なお弧光電流の制御のためには 20Ω の可變抵抗を用いた。

このサイクロトロンは主として重水素イオンの加速に用いた。このための重水素は重水を電氣分解して約 2l のガラス容器に最初 1 氣壓にためておき、コントロール室内の操作盤に備えた可變漏洩弁を通してイオン源へと送った。

イオン源の操作に當って、電弧をスタートさせるには重水素の壓力、電弧電源の電壓、又は熱陰極の溫度を一時急に上げることによって行った。多くの場合最後に記した方法をとった。

電弧は通常凡そ 150 V で凡そ 1.5 A で用い、タングステン線が細くなってくると電壓を低くしても電弧はついていた。

タングステン線の壽命は平均で 15 時間位であった。

4 發振器と Dee-回路

サイクロトンによって加速し得る粒子のエネルギーの最大値は、電磁石の磁極の大きさ及び磁場の強さによって限定されていることは勿論であるが、二つの加速電極 Dee の間に印加される電壓の大きさにも依っている。その理由は粒子が Dee の間隙を通過して加速される度に、加速電壓に対する粒子の位相が次の事情によって少しずつ遅れるからである。即ち

- (1) 粒子の質量がエネルギーの増加と共に増大すること。
- (2) 加速された粒子を磁極間の中央平面に収斂するために、磁場の強さが磁極の中心より外に向けて幾分ずつ弱くなっていること。

この粒子の位相のずれが π にまで達すると、どんな粒子も Dee 間に電壓が存在しないときに通過することになるので、それ以上粒子のエネルギーは増加しないことになる。そこで最後に得られる粒子のエネルギーの値を決めると、この値と磁場の分布とから Dee 間に印加しなければならない最小の電圧が存在する。この電壓を最小加速電壓 (minimum voltage)⁽⁴⁾ と呼ぶことにすると、我々のサイクロトロンの場合には 10 MV の陽子に対して最小加速電壓は約 50 kV となる。

併し實際上の立場からいうと、Dee 間の電壓は最小加速電壓より遙かに高い事が強いイオン電流を得るために望ましいのである。その理由は加速電壓が高ければ高い程、

- (1) 高周波電壓の加速に利用出来る位相の部分が益々多くなるし、
- (2) 粒子のエネルギーが餘り大きくなるときに有効な電氣的収斂効果が大になるし、
- (3) 最後に粒子が取り出されるまでに通過すべき粒子の走る長さが小さくなるからである。

かように高い高周波電壓を Dee につくるためには、我々が前に 23 噸の小サイクロトンに用いたような發振器と Dee-回路との結合を磁氣的に行う方法は次の理由によって得策でない。即ち、

- (1) 實際上結合コイルの一次側と二次側の捲線比をそれ程大きくできないので、Dee に印加される電壓は發振管の陽極電壓と大差ない。
- (2) 結合コイルの直流抵抗を非常に小さくすることは出来ないので、通常發振器の出力の 80% 乃至 90% をこゝで失うことになる⁽⁵⁾。
- (3) 磁氣的結合は高周波の高壓絶縁を必要とするので、大型サイクロトンに用いるには工作上の困難がある。

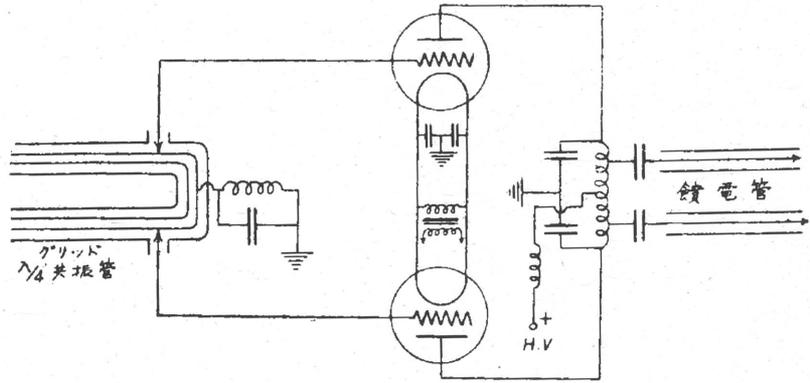
以上のような理由から 60 吋大サイクロトンには $\lambda/4$ 共振方式を用いた。

[1] 發振器

(4) R. WILSON : *J. App. Phys.*, 11 (1940), 781.

(5) WHITE and HENDERSON : *R. S. I.*, 9 (1938), 19.

我々が用いた發振器を圖示すれば第 10 圖のようになる。即ち發振管は TW 530 B (日本電氣製)で、これを 2 本用いた自動の tuned grid tuned plate push pull 發振器である。陽極回路は, trimmer condenser と tank coil (大き 1/2 吋の銅管を直徑 32 cm に 5 捲きにして長さ 16 cm にしたもの)とから成っていて, trimmer condenser の容量を變えることによつても周波數が多少變化出来るようにした。グリッド回路としては, Q-値の大きい $\lambda/4$ 共振回路を用いた。その構造は厚さ 0.5 mm の銅板を直徑 15 cm に捲いた圓筒で、長さは發振波長の約 1/4、即ち 7 m として、その先端から約 30 cm の部分を茶筒の蓋の如くはめ込み式にして、長さを變えられるようにした。この長い圓筒の一端を接地して、その接地點から適當な位置でグリッドと接続した。

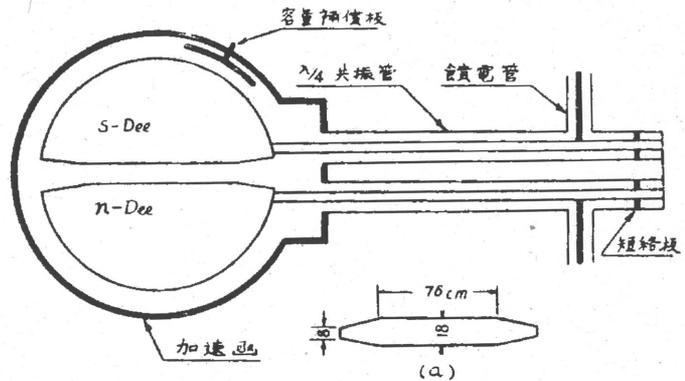


第 10 圖 發 振 器

發振器から Dee-回路に電力を饋電する饋電管は、外徑 40 cm の薄い銅の筒の中心に、2 吋の銅の管を絶縁して支えたもので、外筒は接地され内管の一端は發振器に、他端は Dee-回路の饋電點に接続される。この饋電管は non-resonant line として用いるのであるから、饋電點からみた負荷のインピーダンスが饋電管の特性インピーダンス (130Ω) に等しくなければならない。この饋電管の長さは 3.7 m と 3.2 m であった。

〔2〕 Dee-回路

Dee-回路を圖式的に書くと第 11 圖のようになる。電極 Dee は約半径 67 cm の半圓形をしていて、その斷面圖は同圖 (a) に示す通りである。かような斷面にした理由は、Wilson⁽⁶⁾が示すように、加速函中を走る粒子は垂直方向にも振動しているが、その振幅が半径の増大と共に減少するという事實と、Dee が接地に對してもう電氣的容量を出来るだけ小さくしたいという考慮のためになされたのである。Dee と加速函の上下の蓋との距離は中心に於て共に 4 cm であつて、一つの Dee の接地に對する容量を計算すると約 $400 \mu\text{F}$ となる。これに對して二つの Dee の間の容量は約 $40 \mu\text{F}$ 以下と考えられる。これ等の値は非常に重要な値であるので實測したかつたのであるが、Dee を加速函の中に絶縁して支えることが非常に困難なために測定はしなかつた。



第 11 圖 Dee 回路の圖

これ等の二つの Dee-回路 (s-Dee と n-Dee と呼ぶことにする) は同一の高周波長に夫々共振しなければならないので、電氣的に全く同じでなければならない。そこでその僅かの差を補償するために、容量補償板 C を s-Dee に相對しておいて、Dee との距離を外から増減して同一波長に共振するように調整した。

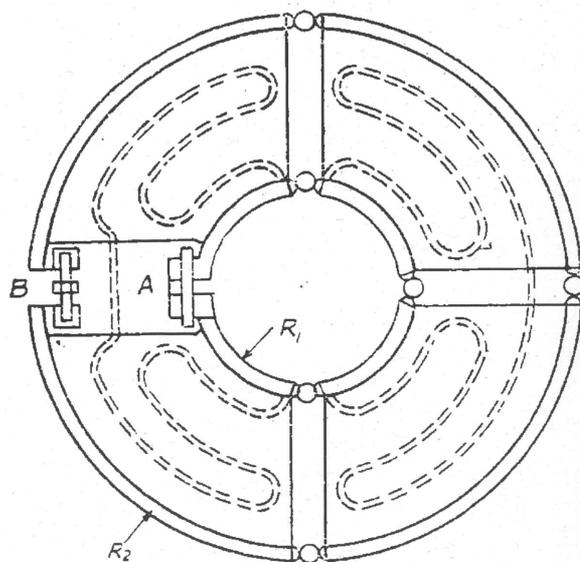
各々の Dee は機械的には同軸 $\lambda/4$ 共振管の内管の一端に取付けられて他端に於て支えられている。この支點の近くで外管と内管とは“短絡板”によって電氣的に短絡されている。短絡板の位置は Dee-

(6) R. WILSON: *Phys. Rev.*, 53 (1936), 408.

回路を特徴づける重要なものであって、後に示すように、二つの Dee-回路が同一波長に共振して、しかも $\lambda/4$ になるような位置に固定したのである。

$\lambda/4$ 共振管は導電管 (外管) と圓柱 (内管) とからなっていて、それ等の径は全長に互って一様でないが、大部分は導電管の内径 765 mm, 圓柱の外径 245 mm となっている。従ってその特性インピーダンスは約 67Ω である。

第 12 圖は短絡板を示す。圖に於て眞鍮の輪 R_1 及び R_2 は 10 個の扇形をした薄い銅板によって、互いに連結されている。 R_1 の内径は $\lambda/4$ 共振管の圓柱の外径に大體等しく、ボルト A によってこれを締めつけることが出来る。また R_2 の外径は導電管の内径に大體等しく、ボルト B によってその内壁に密に接着することが出来るようになってゐる。 R_1 及び R_2 の断面積は何れも $25 \times 30 \text{ mm}^2$ である。



第 12 圖 短絡板

Dee-回路に流れる振動電流は非常に大きいから、回路のオーム抵抗を出来るだけ小さくしなければならない。實際發振器から饋電される電力の大部分は、熱となって消費されてしまうのである。従って回路の銅以外の材料でつくられている部分は薄い銅板で覆った。その銅板の厚さは製作上の便宜の上から決めたものである。何となれば 10 MC の高周波に對する表皮効果の厚さは約 0.02 mm にすぎないからである。

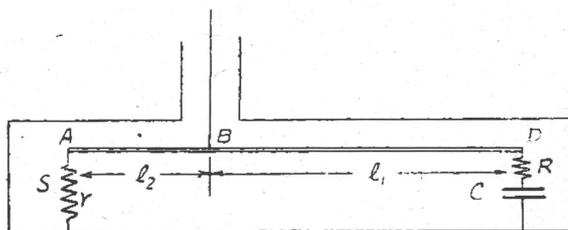
入力の大部分が熱損失になってしまうので、Dee-回路の各部は水冷管によって冷却されなければならない。水冷管には外径 15 mm の銅パイプを用いたのであるが、このパイプが振動電流の流れる回路の表面に直接現われないように考慮した。さもなければ冷却管が放電の原因となったり、また proximity 効果によって、高周波抵抗値を増大する結果となるからである。冷却した主なる部分は、

- (1) Dee, $\lambda/4$ 共振管の圓柱, 短絡板,
- (2) 加速函の上下の蓋, $\lambda/4$ 共振管の導電管, 容量補償板

(2) に含まれる冷却部分はすべて接地電位にあるから、冷却方法も簡単であるが、(1) に含まれる部分は高電圧になるのでそう簡単ではない。しかしこれ等の水冷管を直列につなぐと、幸いに短絡板の外側が接地電位になるので、この點に於て水道との接続及び排水を行った。

〔3〕 等價回路

Dee-回路の電氣的等價回路をかくと第 13 圖のようになる。圖に於て S は短絡板, B は饋電點, D は同軸 $\lambda/4$ 共振管の圓柱と電極 Dee とが接合する點, C は Dee の對地容量である。また抵抗 R は次の 3 種類の抵抗の和である。即ち B と C の間の抵抗及び Dee の抵抗, 電極 Dee が粒子を加速することによって生ずる反作用に相當する抵抗, 及び加速函中の氣體が放電のためにイオン化するが、そのために生ずる損失に相當した抵抗等の和である。このうち最初のものが最も重要な値となって、他の二つは殆んど無視出来る。一方 r は短絡板の接觸抵抗と短絡板及び A, B 間の抵抗の和と考えられるが、後者に比較して接觸抵抗が大きな値となろう。



第 13 圖 Dee の等價回路

この等價回路を、D 點の電位 e_0 を與え、且つ B 點からみた D-回路のインピーダンスが饋電管のインピーダンス Z に等しくなるという条件のもとに解くと、AB 間の距離 l_1 , BD-間の距離 l_2

及び電力 P が次のように求められる。(附録参照)

$$Z_0 \tan \frac{\omega}{c} (l_1 + l_2) = X \dots\dots\dots(3)$$

$$\tan \frac{\omega}{c} l_1 = \frac{X}{Z_0} - \frac{1}{Z_0^2} \sqrt{R_e Z (Z_0^2 + X^2)} \dots\dots\dots(4)$$

$$\tan \frac{\omega}{c} l_2 = \sqrt{\frac{Z_1 R_e}{Z_0^2 + X^2}} \dots\dots\dots(5)$$

$$P = \frac{R_e (\alpha^2 + 1)}{Z_0^2 + \{X - \sqrt{R_e (1 + \alpha^2)} Z\}^2} \frac{e_0}{\alpha^2} \dots\dots\dots(6)$$

但し $R_e = \{(X^2 + Z_0^2)r + Z_0^2 R\} / Z_0^2 \dots\dots\dots(7)$

$$\alpha = (X - R) / Z_0 \quad \omega = 2\pi f \quad X = \frac{1}{2\pi f C} \dots\dots\dots(8)$$

c は光速度, Z_0 は $\lambda/4$ 共振回路の特性インピーダンスである。 $C=400 \mu\mu F$, $Z_0=65 \Omega$, $Z=130 \Omega$ として l_1, l_2, P を計算すると附録の第 18 圖及び第 19 圖の如くなって, これによって調整の大體の見當をつけることが出来る。

[4] 調整

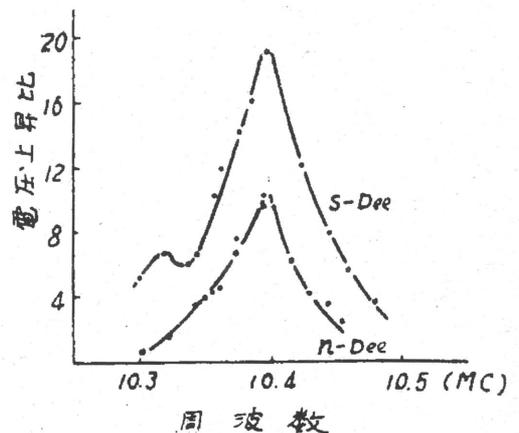
Dee-回路と發振器の調整は次のような方針のもとに行われた。即ち二つの Dee-回路は共に同じ波長の $\lambda/4$ になっていること, 饋電點に於て Dee-回路をみたインピーダンスは饋電管の特性インピーダンス 130Ω になっていること, 及び發振器は充分よい効率をもって必要な波長の安定な發振を行って Dee-回路に充分入力が行われること。

そこで我々は最初に UZ-56 を用いて push pull の試験發振器をつくった。この發振器のグリッド回路は實際の大電力發振器のグリッド回路を用いた。その理由は發振周波數を安定にするためである。加速函が 1 氣壓のまゝでこの試験發振器を用いて, 周波數を變化させながら Dee に於ける電壓上昇比を眞空管電壓計によって測定した。こゝに電壓上昇比とは, 饋電點に於ける電壓に對する Dee の先端における電壓の比である。この電壓上昇比が最大となる波長が Dee-回路の共振周波數となる筈である。そこで二つの Dee-回路の電壓上昇比が同じ周波數に對して最大となるように, 短絡板, 容量補償板等を調整した。その結果は第 14 圖のような曲線が得られて, そのときの諸常數をあげると次のようになる。但し饋電點は第19圖から見當をつけて短絡板から共に 5 cm ということにしておいた。

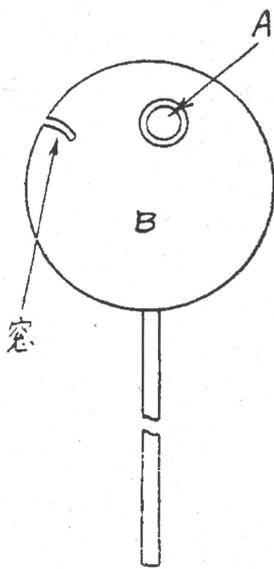
- (1) 共振周波數は 10.39 MC,
- (2) Dee の中央と短絡板との距離は, 308.2 cm (s-Dee) と 302.0 cm (n-Dee),
- (3) 容量補償板と s-Dee の側面との距離は約 3cm。

次に發振器の一應の調整をするために, 饋電管の特性インピーダンスに等しい値, 即ち 130Ω の水冷炭素抵抗を負荷として發振を行った。そのときの入力は充分よく, 發振器の効率は約 50% であった。

そこでこんどはこの強力發振器を用いて, 加速函を眞空にして Dee-回路の調整を行った。しかしこの場合には前に用いた測定器で電壓を測るわけにはいかないのて, 次のような測定器をつくった。即ち饋電點の電壓を測るには第 15 圖に示すような球形の電壓計で, その構造は徑 1/2 吋の銅棒の先に直徑 110 mm の銅の球をとりつける。その球を二つの部分 A, B に分けて, 小さい方の部分 A は



第 41 圖 電壓上昇比 (試験發振器による)



第 15 圖 電 圧 計

それが中心に張る立体角が 0.01 とし、部分 A, B の間には約 2 mm の間隙をつかって絶縁する。また球の内部には小さな高周波電流計を入れて、部分 A から部分 B に流れる電流が B に開けられた小さな窓から読めるようになっている。A の部分が接地に対して有する容量は精確に計算できるから、周波数がわかっておれば電流の大きさから B の電圧がわかることになる。またこの値は整流管と既知の高抵抗で検定しても正しいことを確めた。

一方 Dee の電圧を知るためには、Dee に相対して接地と絶縁された小さな圓盤をおいて、その容量とその小圓盤を通して流れる電流とから測定した。

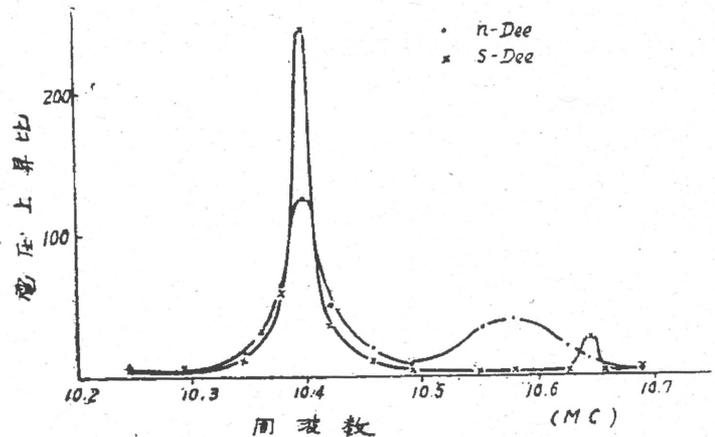
これらの測定器を用いて二つの Dee-回路が同じ共振周波数をもつように調整した。しかしこの場合には前のように調整は簡単ではなかった。加速函、導電管等が真空になっていること、その真空度が充分でないために放電が行われること、すべての操作が大がかりであること等の困難のほか、最も越え難い困難は、二つの Dee-回路の共振周波数に極めて近くなると、發振が急に微弱になって入力に極めて僅かになってしまうという現象である。この現象は恐らく負荷發振器との結合が非常に密なために起きたものと考えられる。

次に饋電点を決めるために饋電管の両端における電流が等しくなるように饋電点を移動した。電流を測るには饋電管の内部で 2 吋の銅管から一定の距離に小さなコイルをおいて、このコイルの面を截る磁力線の變化によって誘導される電流を測定した。

かようにして最後に我々が得た諸常数を書くと次のようになる。

- (1) 共振周波数 10.39 MC,
- (2) 短絡板の位置は Dee の中心から 308.2 cm (s-Dee) と 302.0 cm (n-Dee),
- (3) 饋電点の位置は短絡板から測って共に 14 cm,
- (4) 容量補償板と Dee との距離 3.5 cm.

このときの Dee-回路の共振状態を第 16 圖に示す。



第 16 圖 電 圧 上 昇 比 (強 力 發 振 器 に よ る)

第 1 表

陽 極 電 壓	陽 極 電 流	グリッド 電 流	Dee の電 壓		陽 極 損 失	Dee へ の 入 力	R_e
			n-Dee	s-Dee			
kV	A	A	kV	kV	kW	kW	Ω
5.0	2.72	0.36	19	21	4.3	9.3	0.041
6.0	3.12	0.43	24	26	6.3	12.2	0.036
7.0	3.55	0.46	28	30	8.5	16.4	0.036

この調整で我々が最も苦勞したのは、いかにして Dee-回路に電力をいれるかということであって、前に述べた炭素抵抗の場合には充分よく電力が入ったのであるが、Dee-回路を負荷とした場合には満足する程には入らなかった。最良と思われる發振状態の 1 例と、そのときの Dee の電圧及び入力から (6) 式によって計算した R_e の値を第 1 表に示した。

Dee-回路への入力が充分でなかった原因については、恐らく饋電点からみた Dee-回路がオーム抵

抗にならず、發振器と負荷との matching が完全にとれなかったためと思われるが、調整の要素が非常に多いために、最後まで満足な状態が得られなかった。又 Dee-回路の有効抵抗 R_e は 0.01 オーム程度と豫想していたのであるが、約 0.04 オームとなったのは短絡板の接觸抵抗が大きかったため、改善の餘地があるものと思われる。その他第 16 圖にある様に電圧上昇比が二つの Dee-回路について異っている理由や短絡板の位置が 10 cm も異っている理由は明らかでない。

5 その他

[1] ディフレクター (偏向板)

Dee 内で加速されて高速度に達したイオンを Dee より外に取り出し、更にターゲット室に導き入れて、試料を衝撃させたり、或はアルミニウムの窓を通して、加速函外に導くためには強い静電場でイオンの進行方向を偏倚させる必要がある。この目的のためにディフレクター (偏向板) を Dee に沿って置き、これに高い負の静電圧をかける。

この静電圧發生装置としては 10 kVA の二次電圧 106 kV の變壓器と、容量 0.009 μ F 耐壓 300 kV のコンデンサー 2 個及び 200 kV 耐壓ケネトロン 2 個を、コッククロフト-ウォルトン型の結線としたものを用いた。

又偏向板に送電する方法としては同軸饋電法を用い、一方の Dee の導電管の内部にこれと同軸に金屬管を挿入して偏向板へ結んだ。

且つ偏向板は第 2 圖から判る様に Dee に沿って置かれているだけでなく、Dee に連がる銅板で完全に覆われているので、偏向板は常に Dee と同じ高周波電圧になっており、従って偏向板に静電圧を附加すれば Dee と偏向板の間に強い静電場が得られることになる。

高壓發生装置と同軸饋電管との連結には 150 kV 耐壓の特殊なゴム被覆ケーブルを作ってこれを用いた。

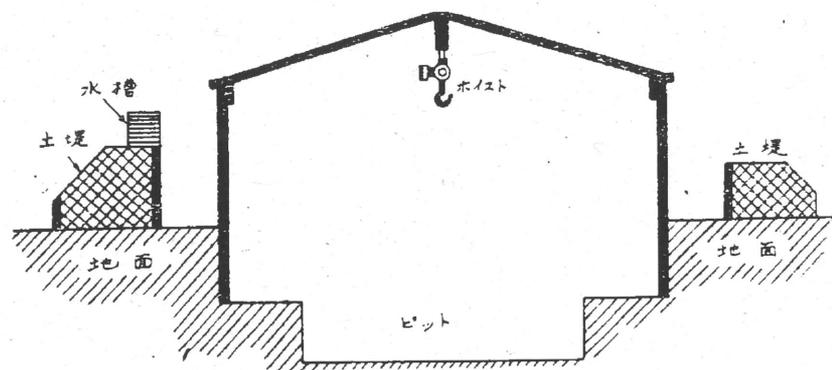
尚偏向電圧を変えるために主變壓器の一次側に 5 kVA の誘導電圧調整器を入れた。又偏向板の位置の調整は後部の支持點と、加速函の外部とから眞空を破らずに行うことが出来る様になっている。偏向板の冷却は變壓器油の循環によった。

[2] コントロール室, 安全装置, 放射線防禦物

サイクロトロンを運轉させる際にはターゲット乃至 Dee イオン加速函の壁等が中性子やガンマ線の強い放射線源となるので適當な防禦を施して實驗しないと操作員乃至部外者に放射線傷害を與えることになる。

先ず部外者に対する防禦としては實驗室 (33 號館) そのものが元々半地下式になっており、更に建物の東方及び西方を厚さ約 3 米の土堤で取りまき、更にその上に大型水槽 (1.25 m \times 0.9 m \times 0.9 m) を並べた。大體の構造を第 17 圖に示した。

操作員は出来るだけサイクロトロンから遠い所から操作することが望ましいが、それでも配線その他からある程度の制限があるので、實驗室の外側の地上



第 17 圖 サイクロトロン室断面圖

部、南方に約 4 坪程の特別なコントロール室を設置し、この周囲を高さ 1.8 m 幅 90 cm \times 90 cm の鐵製水槽で取り囲んだ他、更にサイクロトロン自身の周囲も數個の上と同じ水槽で囲んだ。サイクロトロンの中心とコントロールテーブルの中心との直線距離は約 14 m である。参考のためコントロール

室に於ける放射線 (ガンマ線と中性子線の混合したもの) をサイクロトン室内のそれと比較すると第 2 表の様であった。

第 2 表

場 所	相 對 強 度	絶 對 強 度
發振器附近 (サイクロトン室内北端)	1	Be+D 10 Mev. 10 μ A) のとき 0.003 レントゲン時
下の操作盤附近 (サイクロトン室内南端)	1.9	0.006 レントゲン時
上の操作盤附近 (コントロール室内)	$\frac{1}{8.2}$	0.003 レントゲン日 (但し 1 日 8 時間照射として)

コントロール室にはサイクロトン遠隔操作に必要なスイッチ, メーター及び諸部分の安全装置用リレーを敷設した。後者は主としてサイクロトンに於て水冷, 油冷を必要とする部分に対する安全のためであった。

IV 総合調整とその成果

各部分の構造及び機能は前述の通りであるが, この各部分の機能を有機的に統制してサイクロトン全體としての機能を發揮させるためには, サイクロトンの総合調整が必要である。

昭和 18 年 11 月頃までに高周波電壓を相當程度に高めることが出来たので, その頃から普通の水素 (従ってプロトンビームが得られる筈) によって総合調整を始めた。最初は螢光板と計數管を用い, 磁界電流, イオン源の位置, Dee の位置を變えてプロトンビームをさがした。12 月 8 日初めて螢光板で高速度プロトン (9 Mev) が認められた。その後この強さを強くする様に努め, 1 月以來主としてイオン源の調整を行い, 2 月 15 日にサイクロトンのターゲット室に付けたアルミニウムの窓から空氣中に引き出されたビームが紫色に光るのを肉眼で認めることが出来る様になった。このときのビームの強さは大體 10 分の數マイクロ程度であった。しかし間もなく 4.5 μ A まで引き上げることが出来た。参考のため當時の調整データを挙げると

Dee 間電壓: 90 kV, イオン源弧光電流: 1.9~2.0 A, 眞空度: 2×10^{-4} mmHg,
 偏倚電壓: 60~67 kV, 電磁石電流: 115 A, ビーム電流: 4.5 μ A。

しかし, この時期でも Dee 間の電壓は未だ重水素イオンの加速には低すぎて不適當であったのと, Dee に冷却不良のため加熱されて温度が不當に上昇する部分があることが判ったので, これを改造し, 以後は Dee 間電壓を高める目的で, 主として高周波發振器及び高周波回路の調整に専念することになった。しかしこれに非常に手間取り 6 月中旬漸くサイクロトンの総合調整を再開する段取りとなった。

先ずプロトンについて Dee 間電壓とプロトンビームの強度をしらべた。そのために Dee 間に所謂「内挿ターゲット」を入れてプロトンのエネルギー約 5 Mev の位置でしらべて第 3 表の結果が得られた。

第 3 表

Dee 間電壓	ビーム強度
27 kV	61 μ A
32	110
36	126
40	136

又 Dee 間電壓を一定として内挿ターゲットの位置を變え, 従ってプロトンのエネルギーを變えた場合のビーム強度との関係は第 4 表 (次頁) の通りであった。

第 4 表

プロトンエネルギー	ビーム強度
8 Mev	12 μ A
7	80
6	120
5	150
4	160

同様の実験を重水素イオンについて行った結果は第5表の通りであった。

第 5 表

重水素イオンエネルギー	Dee 間電圧	ビーム強度
16 Mev	38 kV	2 μ A
15	32	3.2
14.2	31	5
12	32~34	12~13
10	35	16
10	47	23

但しイオン源弧光電流 1.2~1 A, 電磁石電流 260 A

以上の様な成績から判断して、内挿ターゲットで実験するには充分であるが、外部にビームを引き出すのには未だ Dee 電圧の上り方が不充分なので、遂に内挿ターゲットで実験することとし、この邊で総合調整を打切って7月10日頃より各自実験に大サイクロトロンを使用することになった。実験は7月中旬より翌年3月位まで殆ど連続して行われた。次に當時の実験題目から主なものを拾ってみる。

題 目

研究 者

放射性同位元素の夜光塗料への應用:

新聞 啓 三

アルファ線源として人工ポロニウムの研究:

杉 本 朝 雄

中性子による U-235 の存在比の測定:

山 崎 文 男

熱中性子による U-235 分裂の研究:

新聞 啓 三

U によるおそい中性子の捕獲の研究:

田 島 英 三

U による熱中性子の吸収の研究:

杉 本 朝 雄

この間 Dee 間電圧を次第に上昇することが出来る様になり、ビームの強度も当初に比較して遙かに強大になった。例えば 10 Mev 重水素イオン 350 μ A~400 μ A; 14 Mev 重水素イオン 180 μ A も容易に得られた。

その後昭和 20 年 4 月 13 日~14 日の大空襲で理化学研究所も半分灰燼に歸したが、大サイクロトロンは幸に被害を免れ、5 月 4 日既に操作を再開して、爾後 6 月下旬まで上記の実験中未終了のものを續行した。7 月に入って実験室員の大部分が他の緊急研究に従事するために他處へ移轉したので、仁科先生自ら殘餘の実験室員を指揮してサイクロトロンの運轉を續行していた。たまたま 8 月 15 日終戦となってサイクロトロンも運轉休止となった。

9 月下旬連合軍司令部より大サイクロトロンを用いて生物、醫學關係の実験を行っても差支えないと云う許可を得て、再び運轉再開の準備をし、再調整をしていた時、不幸 11 月下旬 連合軍の命令によって、日本にあるすべてのサイクロトロンが撤去されることになり、大サイクロトロンも晝夜兼行の破壊作業により僅か 5 日間にして完全に撤去されて仕舞った次第である。

附 録

Dunning, Anderson, Bothe 及び Glasoc がサイクロトロンの Dee-回路に関する論文を發表しているが、その論文にては短絡板の抵抗を無視している。併し我々のサイクロトロンに於てはこれを無視出来ない程大きいと考えられるので、これを考慮した計算を行うと次のようになる。

第 18 圖は Dee-回路の電氣的等價圖であつて、 e_0, R, r, c, X, Z_0, Z は (6) 式に用いた記號と
 同らじ意味を持ち、 e_1, e_2 は夫々饋電點及び短絡板に於ける電位であつて、 i_1 及び i_2 は夫々饋電點か
 Dee 及び短絡板に向つて流れる電流である。そうすると次の式が成立する。

$$e_0 = e_1 \cos \frac{\omega l_1}{v} - j i_1 Z_0 \sin \frac{\omega l_1}{v} \dots\dots\dots(1')$$

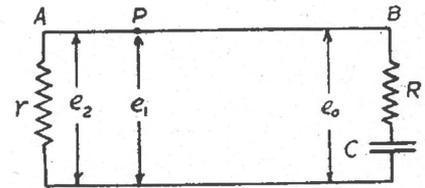
$$i_0 = i_1 \cos \frac{\omega l_1}{v} - j \frac{e_1}{Z_0} \sin \frac{\omega l_1}{v} \dots\dots\dots(2')$$

$$e_0 = i_0 (R - jX) \dots\dots\dots(3')$$

$$e_2 = e_1 \cos \frac{\omega l_2}{v} - j i_2 Z_0 \sin \frac{\omega l_2}{v} \dots\dots\dots(4')$$

$$i_3 = i_2 \cos \frac{\omega l_2}{v} - j \frac{e_2}{Z_0} \sin \frac{\omega l_2}{v} \dots\dots\dots(5')$$

$$e_2 = i_3 r \dots\dots\dots(6')$$



第 18 圖 Dee 等價回路

また負荷が饋電管の特性インピーダンス Z に等しいという條件から次式が得られる。

$$\frac{1}{Z} = \frac{i_1}{e_1} + \frac{i_2}{e_2} \dots\dots\dots(7')$$

(1'), (2'), (3') 及び (4'), (5'), (6') を組合わせて次式が得られる。

$$\frac{i_1}{e_1} = \frac{\cos \omega l_1 / v + j(R - jX) / Z_0 \cdot \sin \omega l_1 / v}{(R - jX) \cos \omega l_1 / v + jZ_0 \sin \omega l_1 / v} \dots\dots\dots(8')$$

$$\frac{i_2}{e_2} = \frac{\cos \omega l_2 / v + j r / Z_0 \cdot \sin \omega l_2 / v}{r \cos \omega l_2 / v + jZ_0 \sin \omega l_2 / v} \dots\dots\dots(9')$$

(7'), (8'), (9') を組合わせると次のようになる。

$$\frac{Z_0}{Z} = \frac{X \sin \omega l_1 / v + Z_0 \cos \omega l_1 / v + jR \sin \omega l_1 / v}{R \cos \omega l_1 / v + jZ_0 \sin \omega l_1 / v - X \cos \omega l_1 / v} + \frac{Z_0 \cos \omega l_2 / v + j r \sin \omega l_2 / v}{r \cos \omega l_2 / v + jZ_0 \sin \omega l_2 / v} \dots\dots\dots(10')$$

(10') 式の左右邊の實數部分と虚數部分とを等しいとおいて、 r^2 及び R^2 より小さい項を無視すると次の式が得られる。

$$\tan \frac{\omega l_1}{v} = \frac{X}{Z_0} - \frac{1}{Z_0^2} \sqrt{R_e Z (Z_0^2 + X^2)} \dots\dots\dots(11')$$

$$\tan \frac{\omega l_1}{v} = \sqrt{\frac{Z R_e}{Z_0^2 + X^2}} \dots\dots\dots(12')$$

茲に

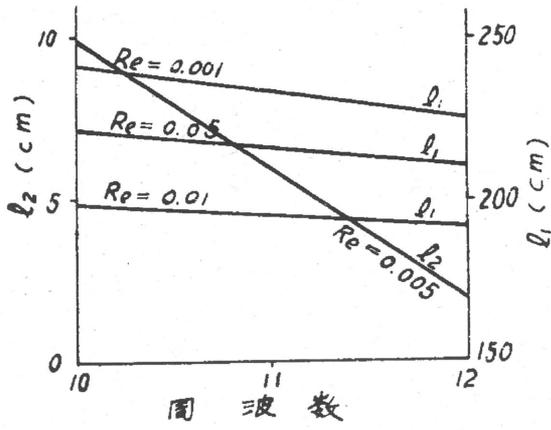
$$R_e = \frac{(X^2 + Z_0^2) r + Z_0^2 R}{Z_0^2} \dots\dots\dots(13')$$

電力の損失は
$$P = \frac{e_1^2}{Z} = \frac{R_e (\alpha^2 + 1)}{Z_0^2 + \{X - \sqrt{R_e (1 + \alpha^2 Z)}\}^2} \cdot \frac{e_0^2}{\alpha}$$

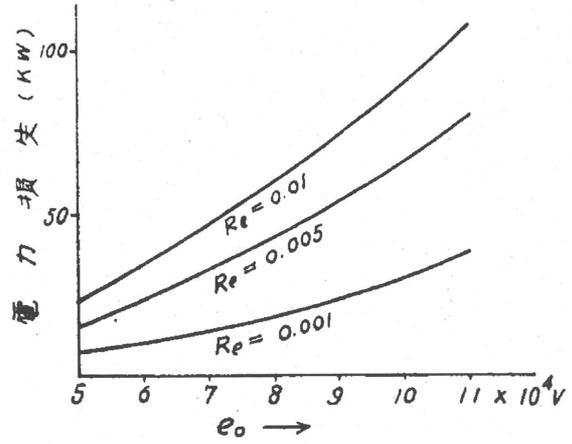
茲に

$$\alpha = \frac{X-R}{Z_0}$$

$Z_0=65 \Omega$, $Z=130 \Omega$, $c=400 \mu\mu F$ として R_e に 0.001Ω , 0.005Ω , 0.01Ω の値を與えて l_1 , l_2 及び P をグラフにすると第 19 圖と第 20 圖のようになる。



第 19 圖 饋電點と周波數



第 20 圖 Dee 電壓と電力損失

