

學術振興第五號拔刷

元
素
の
變
換

(12.3.31.清)

仁
科
芳
雄

元素の變換

理學博士

仁科芳雄

〔昭和十二年三月三十一日學振評議員會席上講演〕

錬金術師の夢と自然界の認識

元素の變換とは一つの元素を他の元素に變へる事である。元來元素とは互に變換出来ないものと定義したのであつて、例へば窒素はどうしても酸素とはならず、アルミニウムは何處迄もアルミニウムであつて、これをマグネシウムに變へることは不可能とせられた。尤も太古から鐵を銀にしたり、銅から金を作つたりする試は常に行はれた事であつたが、一として成功したものはない。ところが此錬金術師の果しない夢を今日の物理學は或る程度迄實現するやうになつた。

といつても銅を一足飛びに金にしたり、工業的に多量の金を作つたりするといふやうな事は勿論出来ない。これが果して可能になるかどうかは將來の問題であるが、今日の原理と技術とでは到底不可能である。それでは現在出来るのは何であるかといふと、それは原子量の近い元素の間の變換であつて、而かも其量は極めて微小である。尤も微量であつても用に供し得るものがないでもない。

い。例へば所謂人工ラヂウムの如きものは、出来るのは非常に微量ではあるが、應用の道がある。

然し我々が今日目指して居るのは何かと云へば、それは實用になるかどうかといふ事とは全く別問題に、自然界の出来るだけ正確な認識を深めて行く事である。處で今日工業的の多くの應用がさう云ふ深い理論に基いて居る事は確な事實である、従つて我々は自然に對する深い見透しをつける事を目的とするのではあるが、これがやがて劃期的の應用的基礎をなすに至るかも知れない。

原子

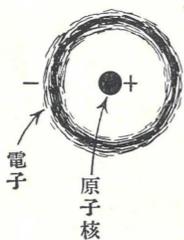
それでは昔出来なかつた元素の變換が、今日では或程度の自由さで行はれるやうになつたのは何故であるか、これを説明するには原子の構造を述べる必要がある。原子とはそれぞれの元素を構成して居る窮極の單位で、各元素をとりこれを出来るだけ細分して行き、それ以上分けると其元素の性質が失はれるといふ最後に達すると、それがその元素特有の原子である。この原子の重さは最も

軽い水素原子が1瓦の

1,000,000,000,000,000,000,000,000,000

の程度で、人の想像を許さぬ小さなものである。即ち1瓦の水素をとりこれを10等分し、その1を探つて又これを10等分する、此操作を大體二十四回繰返して得られるものが水素原子である。

此原子の構造はどうかと云ふと、第1圖に示すやうに、其真中に核があつて陽電氣を帶び、これが原子の質量の殆ど全部を占めて居る。そして其周圍を陰電氣を帶びた電子が取り圍んで居るとせられる。此模型は今日間違のないものと考へられて居るものである。此原子に於て電子を取り去り又は其状態を變化させる事は比較的容易に出来る。例へば今日化學作用と呼ばれるものと云ふ、又ネオンサインの光といふやうなものはこれによつて起されるのである。然しこれでは一つの元素を



第1圖 原子模型

他の元素に變へる事にはならない。取り去られたり、状態を變へられたりした電子は又元に戻り得るからである。それでは一つの元素を永久に他に變へるにはどうすれば好いかといふと、其元素を構成する原子の真中にある原子核を變換させるのである。所がこれは非常に困難な事で、従來はそ

の方法がなかつた。従つて元素の變換といふ事は最近迄不可能と考へられたものである。然るに今日の技術の進歩は遂に原子核を變換させる事に成功し、茲に元素の變換が原理的に行はれるやうになつた。

原子核の變換

それでは原子核の變換を行ふにはどうすれば好いかと云ふに、この原子核に或る物を打突けてこれを破壊又は變換させるのである。何を打突けるかと云へば、電子では効力がない。現在行はれて居るのは、軽い元素例へば水素とかヘリウムの原子核を打突けるのである。所でこれ等のものは前述の通り陽電氣を帯びて居る、變換しやうとする原子核も同様に陽電氣を有つて居つてこれにはね除けられる。それでは傍へ近寄れないから變換は行はれない。そこで目的を達する爲には、打突ける彈丸即ち水素やヘリウムの原子核に非常に大きなエネルギー即ち速度を與へ、これを變換しやうとする原子核に衝突させて變換を起させるのである。

今日の物理学の技術の發展は、これに必要なだけの速度を、水素やヘリウム原子核に與へることを可能ならしめ、依つて元素の變換に成功したのである。従來の方法では、原子の外側にある電子に變換を與へることは出来ても、核を變へ得る方法はなかつた。その爲に鍊金術は凡て失敗に歸したのである。

ラザフォード(Rutherford)の實驗

始めて元素の變換に成功したのは、英國のラザ

フォードであつて、1919年の事である。それは原子核破壊用の彈丸として、ラヂウム其他の放射性物質から放射せられるアルファ粒子即ちヘリウム原子核を用ひたのであつた。此非常に大きな速度を持つたアルファ粒子を、例へば窒素に打突けてやると、窒素原子核に衝突した際これを破壊するだけのエネルギーがある。そして窒素は壞れて酸素と水素とが出来る。今これを化學方程式で表はすと



茲に化學記號の左肩に附けた數字は原子量を示すものである。此式にある通り出来る酸素は普通の酸素と化學的性質には變りないが、其原子量は16でなくて17である。かやうに原子量だけが異つて性質の同じものを同位元素と云ふ。大多數の元素は、殆ど整数の原子量を有つ二つ又は二つ以上の同位元素の混合したもので、其爲に原子量は整数でない様に見える。同位元素は化學的性質が殆ど同じであるから、普通の化學操作で分ける事は出来ない。

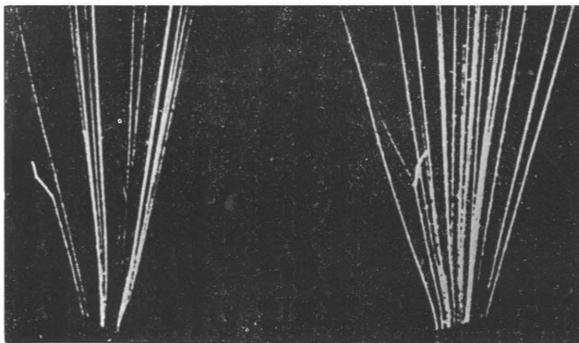
(1)に示した反應は、普通の化學作用と全く其趣を異にするものである。例へば水素と酸素とが化合して水を作る場合には



であつて、此際化學方程式の左邊にある元素の化學記號の數は、右邊にあるもののそれと全く同じである。これは元素が不變であつて只其結合状態の變化を意味する、所が(1)に於ては左邊にある記號と右邊にあるものとは全然別物であつて、これが元素の變換を示して居る。此種的作用は原子核

の變化であるから、これを取扱ふのを核化學とも云ふ事がある。

かやうにして出来る元素の量は極めて僅であつて、これを目に見るといふ事は到底出来ない。然し此個々の變化の跡を目に見る様にする事は出来る。第2圖はこれを示したもので、(1)式の場合を表はして居る。左右の圖は同じものを二つのカメラで撮つた双眼寫眞である。圖の白い直線はア



第2圖 ウキルスン霧函により
 ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$
なる原子核反應の跡を示す

ルファ粒子の直進した跡で、ウキルスン霧函といふ装置により、個々の原子核の走つた通路を白く表はしたものである。所で圖に一つの直線が二つに分岐して居るのが見える。これはヘリウム原子核が飛んで来て窒素の原子核に衝突し、それが(1)式

に従つて酸素と水素とに分れたことを示すものである。細い線の方が水素で太い方が原子量17の酸素である。かやうに個々の原子の行動を目に見えるやうにするといふ事は、驚くべき技術の進歩と云はれなければならぬ。勿論これは原子の通つた路を示すものであつて、原子其物はどんな顯微鏡でも到底これを見る事は出来ない。

ラザフォードは此外硼素、アルミニウム、マグネシウム等十數個の元素を同様にアルファ粒子によつて變換させた。これは誠に劃期的の發見であつて、元素なるものの定義を變更せしめたものである。

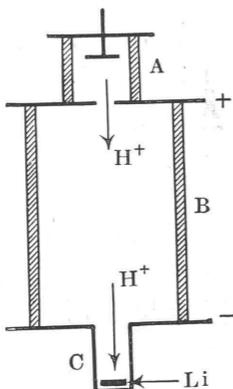
これによつて始めて人為的に元素を變換せしめる事に成功したのではあるが、これに用ひたアルファ粒子にエネルギーを與へたのは人の力ではない。自然に存在するものを使つたのであつた。所が今日はそれを人為的に作り得るやうになつて来た。

高電壓による變換

前述の原子核破壊用の彈丸、即ち水素やヘリウムの原子核に大きな速度を與へるにはどうすれば好いかといふと、これ等のものは陽電氣を帯びて居るから、これを陰陽の電極の間に置くと、陽極からは反撥せられ陰極の方に引かれて加速される。そこで原子核を破壊するだけの速度を與へるには、兩電極間の電壓を非常に高くする必要がある。特別の場合を除いては普通數十萬乃至數百萬ヴォルトの高電壓の直流を用ひなくてはならぬ。これは此講堂の電燈に使はれて居るものの數千倍乃至

數萬倍のものであつて、これが爲には非常に大規模な装置が必要となつて来る。

第3圖は此方法による原子核變換の圖解であつて、例へば水素の原子核を破壊用彈丸として用ひる場合には、Aの放電管で先づ裸の水素原子核を

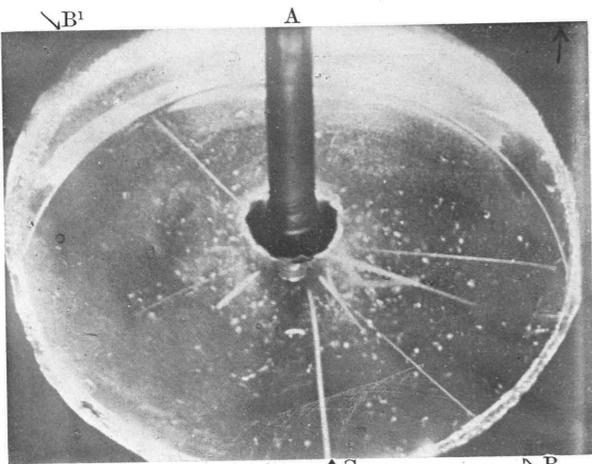


第3圖 高電壓による元素變換装置の圖解

作り、これを真空にしたBなる絶縁管に入れる。Bの上下には上端を陽極とし、非常に高い電壓が加へられて居つて、其爲に水素原子核は加速せられて高い速度を得、これがCなる部分に入れてある、目的の變換しやうとする元素の原子核に衝突してこれを破壊するのである。例へば此處にリチウムを入れて置くと次の核反應を起してヘリウムになる。



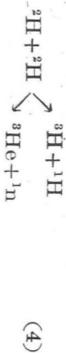
第4圖は此反應の跡をウキルスン霧函により目に見える様にしたもので、理化學研究所で我々の實驗室に於て撮つた寫眞である。約10萬ヴォルトで加速せられた水素イオン(即ち水素原子核)はAなる管の中を下に向つて走り、管の下端にあるBに衝突して(2)の反應を起す。そして出来たヘリウム原子核が非常に速い速度で薄い箔の管壁を通して外に出て来る。それ等が白い線として



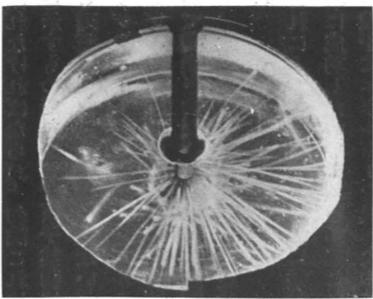
第4圖 ウキルスン霧函により ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He}$ なる原子核反應の跡を示す

以上の元素變換用の彈丸の外よく用ひられるものは重い水素の原子核である。水素には二種の同

位元素がある。一つは普通の水素で其原子量は4
 であるが、他のものは所謂重水素で原子量2
 である。此後者の原子核を前述の方法で加速し、
 色々の元素に衝突させるとこれを變換させること
 ができる。重水素は此目的には極めて有力な武器
 であつて、これにより今日では軽い元素も重い元
 素も變換せられて居る。例へば重水素の原子核を
 重水素に打突けると



なる二種の變換を起す。即ち一方の反應では原子
 量3といふ更に重い水素 ${}^3\text{H}$ と、普通の原子量1
 の水素 ${}^1\text{H}$ とが出来、他の反應では原子量3とい
 ふヘリウム ${}^3\text{He}$ と中性子 ${}^1\text{n}$ とが出来る。第5圖
 はウキルスン霧函によりこれを示したものであつ



第5圖 ウキルスン霧函により
 ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^1\text{H}$
 ${}^3\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{n}$
 なる原子核反應に於て生じた ${}^3\text{H}$ の飛跡を示す

て、やはり我々の實驗室で撮つた寫真である。圖
 にある無数の白い線は上の反應に於て出来た普通
 の水素 ${}^1\text{H}$ の核が、管壁の薄箔を通して外に出て
 來る状態を示して居る。此時相手の ${}^1\text{H}$ は重いから

である。上記(6)の人工放射能の現象を、ウキルス
 ン霧函の方法で目に見える様にしたのが第6圖で
 ある。左右二つあるのはやはり同じものを異なる方
 向から別々の寫真機で撮つたものを示してある。
 圖の中央にアルファ粒子を打突けたアルミニウム
 が入れてあり、これから出る陽電子の通つた跡が
 白い線となつて示されて居る。線が圓形をして居
 るのはこれが磁場の中に置かれた爲であつて、彎
 曲の方向からそれが陽電氣を帯びて居ることが解
 り、又彎曲の半径と磁場の強さから其エネルギー
 が求められる。更に他の例はナトリウムに速い
 重水素を衝突させると、次の反應により原子量23
 のナトリウムの同位元素が出来る。



此同位元素は地上にあるナトリウムと異り不安定
 である。



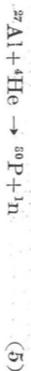
なる式に従ひ、陰電氣をもつた普通の電子(ベ
 タ)線を放射してマグネシウムになつて了ふ。そ
 して其際同時に又ガンマ線をも出す。此ガンマ線
 はラヂウムなどのガンマ線に比べて、人體などの
 透過力が二倍も大きい。此放射性ナトリウムは約
 15時間に其半分がマグネシウムとなつて了ふ。其
 他今日では數へ切れぬ程多數の人工放射性物質
 が、或は中性子により、或は普通の水素により又
 重水素により、若しくはヘリウムによりガンマ線
 により作られて居る。其壽命も非常に長いものか
 ら極めて短いもの迄ある。

此人工ラヂウムの性質は色々である。そしてこ
 れが醫療に使はれるかどうかといふ事は今後の研

外に出て來ない。又下の反應により出來た ${}^3\text{H}$
 も同様に外に出ない。中性子 ${}^1\text{n}$ は外に出て來
 ては居るが、全く電氣を持つて居ない粒子である
 爲に、此裝置では其通路を表はす事は出來ない。
 此中性子は1933年に發見せられた新しい粒子
 であつて、電子や原子核と異り初めから電氣を帶
 びて居ない。そして原子核の中に其構成分子の一
 として含まれて居る。これは物質を透過する能力
 がエックス線やラヂウムのガンマ線同様に強く、
 そしてやはり生物の細胞に著しく作用を及ぼすも
 のであつて、或は癌などの治療に用ひられるので
 はないかと考へられて居る。若し他の放射線より
 も比較的癌の細胞に對する破壊力が強ければ實
 用に供し得る譯であつて、これは目下研究問題と
 なつて居る。又中性子は原子核破壊用の彈丸と
 しては、これが電氣を帯びて居ない爲めに、他
 の手段では行ひ得ない事が出來て、元素變換用
 の大切な武器である。

人工放射能(所謂人工ラヂウム)

以上述べた元素の變換で出來上つた元素は、量
 の多少は別として皆此地上に現存するものではあ
 る。所が場合によつては人工變換によつて此地上
 にならぬ元素を作ることが出来る。例へばアルミニ
 ウムに ${}^2\text{H}$ 粒子即ちヘリウムを打突けると、次の
 反應によつて燐と中性子が出来る。



處で此燐は普通地上にあるもの(原子量31)と異つ
 て、其原子量が30である。そしてこれは核が不

究問題であつて、既に米國ではこれに着手して居
 ると聞いて居る。醫療はともかく、これを生物の
 生理現象の研究に用ひて非常に大切な結果が得ら
 れつつある。例へばこんな人工放射性物質を生物
 に攝取させて置き、これが体内を如何に循環する
 かを、放射性を手だてとして辿つて行く事が出來
 る。それによつて色々元素の循環状態が詳細に
 解つて來つゝある。其他これが利用により多方面
 の研究に新しい武器を與へる事になるであらう。

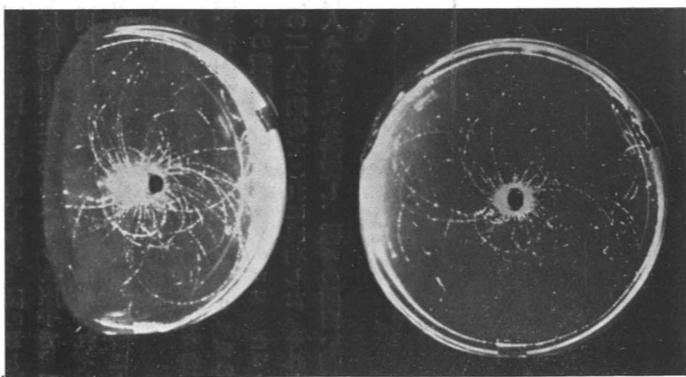
サイクロトロンによる變換

前述の高電壓を用ひる變換方法は誰しも考へ着
 く事であるが、これは既に申した通り非常に大規
 模の裝置を必要とする。數十萬乃至數百萬ヴォ
 ルト更に進んでは一千万ヴォルトをも使ひ度とい
 ふのであるから、其發生には今日大きな電氣機械
 製造會社とか、高壓電子製造會社の試験室に設備
 せられて居るもの、或はそれ以上の高電壓發生裝
 置を備へ付けなくてはならぬ。これは從來の物理
 實驗室の設備に對する概念を根柢から變更させた
 ものと云ふべきである。而かも此方法で達し得る
 電壓は目下の處恐らく300萬乃至500萬ヴォルト
 を越えないであらう。これ以上となると空氣中
 では器械の絶縁といふ事が不可能となつて來る様
 である。又これを入れる建物も、器械から壁に火
 花の飛ばぬ様にする爲には膨大なものとなつて來
 る。そこで器械全部を油の中に入れるとか、高氣
 壓の器に入れるとかいふ様な事が行はれる様にな
 った。英國ケンブリッジ大學では、目下油に入れ
 る方式で300萬ヴォルトの發生裝置を設計中であ

安定なため次式の様に陽電子 e^+ を放射して普通の
 元素となる。

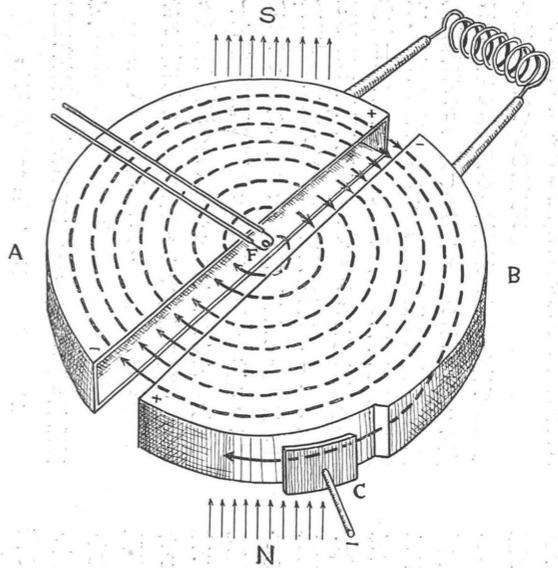


しかもこれが起るのに時間が掛かる。即ち出來た
 ${}^{30}\text{P}$ の半分が ${}^{30}\text{Si}$ となるのに平均3分15秒を
 要する。これは天然の放射性物質、例へばラヂウ
 ム系又はトリウム系の元素でベータ線を出すもの
 とよく似て居る。そこで俗にこれを人工ラヂウム
 と呼ぶ。然しこれは人工で作つたラヂウムといふ
 意味ではなく、ラヂウム類似の物質といふ事なの



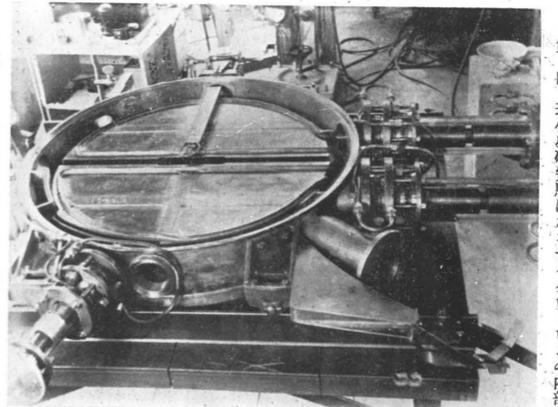
第6圖 ウキルスン霧函により
 ${}^{30}\text{P} \rightarrow {}^{30}\text{Si} + e^+$
 なる人工放射性燐による陽電子の飛跡を示す

るが、現在は此邊で止りではないかと思はれる。
 處が元素の變換には更に高い電壓を要求するの
 で、これが爲には別の方法を用ひなくてはならぬ。
 今日これに使はれて居るのが米國のローレンス
 (Lawrence)教授の考案になるサイクロトロンで
 ある。この方法の原理は水素やヘリウムの原子核
 に、一度に百萬ヴォルトといふ高い電壓を加へな
 いで、十萬ヴォルト位の低い電壓を其通路に沿つ
 て度々加へて加速するのである。例へばこれを10
 回加へてやれば其結果に於ては100萬ヴォルトを
 加へたと同等の速度を得、100回加へれば1000
 萬ヴォルトで加速したと同じ速度を得る。而かも
 此時の絶縁は10萬ヴォルトに對するものさへあれ
 ば充分であるから、絶縁の爲の困難はなくなる。
 此裝置の主要部は第7圖に示す通りであつて、
 恰度豆太鼓形の短い圓筒を真中で二つに切つたや
 うな形の、中空の金屬函から出來て居る。これを
 氣密の外函に入れ真空にし、これに加速しやうと
 する氣體例へば水素ガスを微量(水銀柱1萬分の
 數)入れて置く、此半圓形のA、Bは互に絶縁
 せられ、これに約10萬ヴォルトの高周波電壓を加
 へる。其周波数は1秒間に1千萬回以上も陰陽の
 極を變へるものである。普通の電燈に用ひる交流
 は大抵一秒間に50回極の符號を變へるものであ
 るから、これに比べて其變化の非常に速いもので
 ある。此裝置全體が矢で示した様に圓筒の軸に平
 行な磁場の中に入れてある。
 A、B電極の中間にタンゲステン線Fがあり、
 これに電流を通し白熱すれば電子を出す。此電子
 が周圍にある上述の例へば水素ガスを電離して、



第7圖 サイクロトロン圖解

水素原子核即ち水素イオンを作る。此イオンは陽電氣を帯びて居るから、例へばAの極が陰、Bの極が陽である瞬間には、これはAB間の約10萬ヴォルトの電壓に加速せられてAの函の中に入る。これは金屬屬であるからイオンに作用する電壓はない。従つてこれは直線の路を進むべきであるが、矢で示した方向の磁場がある爲に、イオンは點線で示したやうに、圓形の路を描いて次のA、Bの間隙に來る。處が高周波電壓の周波數と磁場の強さが調整せられ、イオンがA、Bの間隙に出來た時には恰度兩電極は符號を變へ、Aが陽Bが陰となる様にしてある。さうするとイオンは又此處で10萬ヴォルトの加速を受けてBに入る。これを

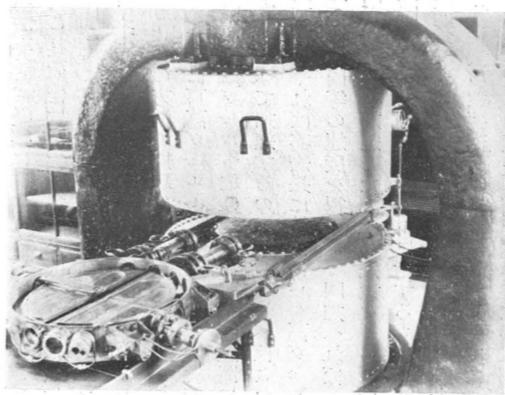


第8圖 理化學研究所にあるサイクロトロンの内部

繰り返すのである。従つてイオンは一回轉毎に20萬ヴォルト宛加速される事となる。そして一度加速せられる毎に其の通路の半徑は増して來る。これを10回とか20回とか繰り返せば、200萬ヴォルトとか300萬ヴォルトとかの高電壓で一舉に加速せられたと同等の速度を得ることになる。そして最後にCなる電極に電壓數萬ヴォルトを加へて此イオンを引き出し、それに色々の元素を當てて其變換を行ふものである。要するにこれを解り易く云へば、今茲に挿鉢の形をした表面の圓滑な器があるとし、此中に玉突の球を入れる。そして挿鉢の一定の所で、球がそこに來る度毎にこれを横の方向に突いてやると、

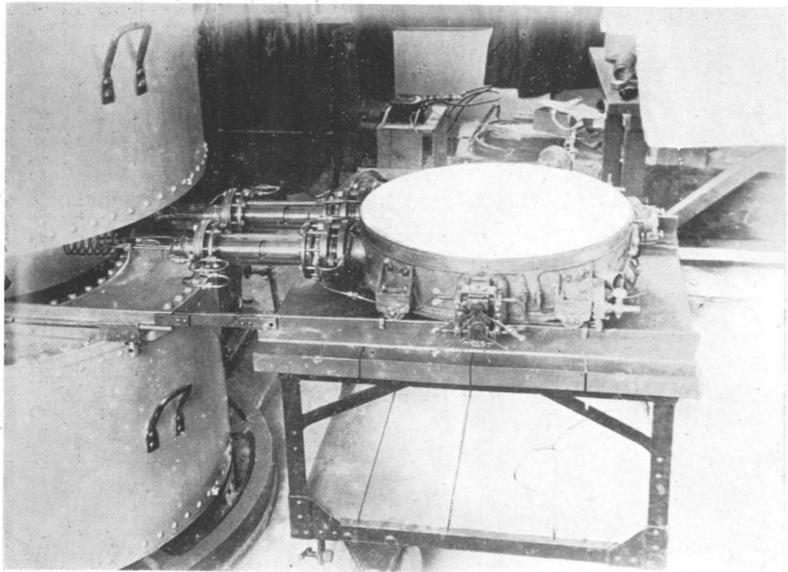
球は鉢に沿ふて圓を描いて廻る。且つ突く度毎に球は速度を増して行く、此時一度に突く力は小さくても、其結果は大きな力で一度突いたと同等の速度となる。此場合の球はサイクロトロンに於ける水素やヘリウムのイオンに當り、挿鉢のやうにイオンに圓形運動をさせるものは磁場であり、球を突く役をするのが高周波電壓である。イオンの通路が螺旋狀をして居る所から、ローレンスはこれをサイクロトロン (cyclotron) といふ俗稱を與へた。第8圖は理化學研究所にあるサイクロトロンであつて、蓋を取除いて内部を示したものである。

今日サイクロトロンの働いて居るもの、並に建



第9圖 理研のサイクロトロンと其マグネット

第10圖 サイクロトロンに蓋をしてマグネットの間に入れる所



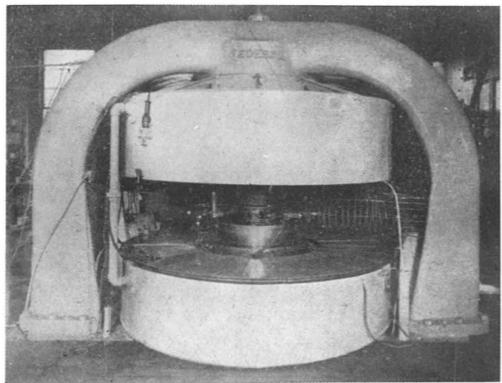
造中のものを合すれば、米國だけで11個、其他の國に於て約9個を數へて居る。そして今日イオンの最もエネルギーの大きいものは、300萬ヴォルトで加速せられたと同等のものが得られて居る。此方法は前にも述べた通り、絶縁上の困難はない

が、其代り高周波電壓の發生裝置と大きなマグネットとを必要とする。前者は今日ラヂオの放送局に使はれて居る發振器と同程度のものが要る。それよりも更に問題となるのはマグネットであつて、現在理化學研究所に設置せられて居るものは23噸の重量を有する。ローレンス教授の持つて居るのは85噸である。かやうに大きなマグネットを必要とするのは此方法の缺點であるが、然し今日エネルギーの點ではこれに及ぶものはない。

第9圖は理化學研究所のサイクロトロンと其マグネットとを示したもので、第10圖は此サイクロトロンに蓋をしてマグネットの間に入れやうとする所である。此マグネットは日本無線電信株式會社の好意により寄贈せられたものに改造を施したもので、元無線電信用として使用せられたパウルセン發振器であつた。此サイクロトロンにより約300萬ヴォルトで加速されたと同等のイオンを發生させることが出来る。第11圖はローレンス教授のサイクロトロンであつて、これも無線電信用のマグネットを改造したものである。

以上述べた所で明なやうに、各國共エネルギーの高い裝置を得やうと互に競争して居る。此處では理化學研究所にあるものは遺憾乍ら他に比べて二流以下と云はなくてはならぬ。所が今度日本學術振興會の第10小委員會の仕事として、23噸のマ

第11圖 ローレンス教授のサイクロトロン(重量八五噸)



グネットを有するサイクロトロンの建造が計畫せられることになつた。これは理化學研究所にある建物並に設備を利用して建設せられる豫定である。此マグネットはローレンス教授の多大の好意により、同教授の設計建造するのと同じものを注文し、少からざる便宜を得て居る。これが完成すれば世界最大のサイクロトロンであつて、豫定通り働けば300萬ヴォルトで加速せられたと同等の速度を有するイオンが作られる筈である。これを以てすれば恐らく變換し得ない元素はないであらう。そして其際生ずる放射線も從來見られなかつたエネルギーのものが出來るであらうと想像して居る。

以上述べたやうに、元素の變換には非常に大規模な裝置を必要とする。従つて從來の物理及び化

學の實驗室とは全く趣を異にし、寧ろ工業的といふべきものが使はれるやうになつた。從來の物理及び化學の研究には、研究者の頭さへよければそれで好いと考へたのであつたが、今日はそればかりでは進めなくなつた。勿論研究者の頭腦及び技術を要求することは今日でも同様であるが、その上に更に財力を必要とするやうになつて來た。上述のやうな大規模の裝置なくしては此方面の開拓は困難なのである。此趨勢は日本の様な貧乏國にとつては誠に困つた事態であるが、困つたと云つて何もしないで只先進國に追隨して居る譯には行かない。此意味に於て日本學術振興會が大サイクロトロン建設に力を致さるるのは誠に有意義の舉である。吾々は皆様の御援助御鞭撻により、先輩の拓かれた道を一途に進み、依て斯界の進展を促し以て我が學界の名をして重からしめんことを期するものであります。(終)