

理研の加速器 —1910年代から現在まで—(その3)

上坪 宏道*

Accelerators in RIKEN —from 1910's to the present—(Part Three)

Hiromichi KAMITSUBO*

6. 原子核実験室の設置

1934年10月、国際学術連合総会に出席するためにヨーロッパに海外出張した西川は、ローマでFermiを訪問した直後に仁科宛に手紙¹⁾を書いている。その中で、Fermiのグループが水やパラフィンで中性子が減速される現象を発見したことを図入りで詳細に説明し、「兎に角Neutronの速度に由って、種々の物質に対する作用が非常にselectiveな現象を呈する事は明らかで、はなはだ面白い実験だと思いました。(中略)それから今一つ、これは僅か二日ばかり前に見つかった現象だと言うのを聞きました。Neutronによってactivateされたものは、普通のelectronを出すのがpos. electronは見つからないそうです。夫れで近頃はHeavy Particleを見つけようと試みているそうですが、つい一昨日発見したのはCdから γ -raysを出す事だそうです。これはsourceにPo+Beを用いたもので、Cdに当てるとその間 γ -raysだけを出すそうです。併し後へ残るeffectはないと言って居ました。何だかもっと色々面白そうな事がありそうでしたが、先方も忙しそうでしたから、残念ながらこれだけでわかれしました。兎に角Neutronに関する事件は面白い事が沢山ありそうで、その結果が理論上にも大いに役立つものが出そうで、早く帰ってやって見たいと言うような気が致します」と述べている。

この手紙を受け取った仁科は長岡に相談し、長岡が「原子核実験室」の設置を決めたという²⁾。その頃既にCalifornia大学はBerkeleyにRadiation Laboratoryを設立(1931)しており、長岡はそのようなLaboratoryの必要性を強く認識していたのであろう。しかしこの計画は財政的には一研究所の規模を超えるものであった。ところが幸いなことに、当時わが国では日

本学術振興会が設立され、また、民間財団も設立されて、急速に発展しつつある研究分野への財政的支援体制が整ってきていた。この辺の事情に就いては日野川静枝の研究に詳しい³⁾。それによると、三井報恩会が1934年4月に3000万円の基金で設立され、社会の健全な発達と国力の充実のため「社会公共事業及び文化事業」を助成することを設立目的に掲げている。その一環として理化学研究所の「元素の人工転換と其の放射能の研究」を「緊切なる学術研究にして然も其の費用の嵩める為、着手し能わざる如き研究」と認め、3年間で15万円の助成を行った³⁾。ところが最近見つかった日本学術振興会(学振)の決定通知書(図1)を見る限り、15万円は三井報恩会と日本学術振興会が協議の上学振の助成金として理研に支給したもので、国家事業への助成だったことを覗かせている。また、この計画は推薦者が長岡半太郎、申請者が大河内正敏、仁科芳雄のほか、東大医学部の長与又郎、中泉正徳になっていて、医学利用も大きな目的であったことがわかる。なお、この助成金は60インチサイクロトロン⁴⁾の磁石、真空箱などの製作に使われている。このほか、東京電燈株式会社から10万円の寄付を受けているが³⁾、この寄付は原子核実験室6棟の建設費105,400円⁴⁾に充当されたのであろう。このほか仁科は服部報公会からの寄付も受けているが、服部報公会は1930年10月に300万円の基金(1934年には600万円に増強)で設立され、服部報公賞の贈与のほか「一般学術の特殊なる研究または調査の奨励、援助」も行っていた。

後で述べるように、仁科は手始めに小型サイクロトロンを製作することにし、Lawrenceに倣ってPullsen arc generatorの電磁石を用いたサイクロトロンを建設した。そのため、電磁石は日本無線通信株式

* 理化学研究所 RIKEN
(E-mail: hkamitsubo@riken.jp)

昭和11年4月11日 東京市神田区文部省内 日本學術振興會

住所 本郡区駒込西岸町1061,40

推薦者 長岡半太郎 殿 (主席委員推薦—推薦書)

住所 下谷区谷中清水町1

申請者 大河津正敏 殿 (主席委員推薦—推薦書)

長興又柳殿 沖泉正徳殿 仁科芳雄殿

援助補助申請結果通知

(1) 次記ノ通り援助(補助)ニ決定

受付番号	第 総 務 委員会 第 72 号	第 総 務 部	証 号
申請事項	元素の人工變換並に其放射能の研究		
決定援助補助事項			
金額	額	期 間	貸與器具機械類
75,000	—	10年度	—
75,000	—	11年度	
備考	三井報恩會ニ推薦ス 三井報恩會ニ既ニ挨拶済		

(日本物理協会の推薦書) (東京-107)

図1 學術振興會の援助補助申請結果通知

会社から電動発電機及び付属品一式を含めて寄贈を受けている。これは原ノ町送信所で以前使用していた送信機の一部で、arc generatorの電磁石と発電機、付属品一式を含めたもの2揃いが寄贈された。このうち1揃いは小サイクロトロンに使用され、残る1揃いは戦後サイクロトロン再建の際に用いられたが、後者は現在旧理研の跡地にある日本アイソトープ協会の構内に記念品として保存されている。余談であるが、戦後Lawrenceが来日してサイクロトロンの建設を勧めたとき、理研にはPullsen generatorの電磁石が一揃い残っている筈なので、それを使えばよいと助言した。1935年当時、理研におけるサイクロトロン建設の詳しい情報がLawrenceに伝わっていたのであろう。

7. 原子核実験室における研究

こうした背景の下で、1935年に仁科研究室と西川研究室が協同して原子核実験室を建設したのである。その目的について仁科は「原子核物理学、生物学、その他これに関連した問題の広汎なる研究を企図した」と述べている⁵⁾。また、「実験室は6棟の建築よりなり総建坪数約405坪(1,337 m²)である。此実験室に元素の人工変換装置として二つのものを設置する計画を立てた。其一つは重量100トン以上の電磁石を有するサイクロトロンであり、他は約100万ボルト

の高圧電源を有する装置である」とし、続いて「大サイクロトロンの建設に関しては、まず其準備として日本無線電信株式会社より寄贈せられた重量23トンの電磁石を改造し、これを用いて小サイクロトロンを製作することとした。昭和11年より其の設計に着手し、昭和12年4月これを完成、爾来原子核物理学並に生物学の研究に用いられている。このサイクロトロンにより3~2.6 Mev, 20~50 μ Aの重水素イオンが得られた」と述べ、「計画の大サイクロトロンは、幸いにして日本學術振興會より電磁石購入費を支出せられ茲に実現の第一歩を進めた。又、サイクロトロンの考案者たる米国加州大学教授Lawrence博士は、当時重量約200トンの電磁石を有する大サイクロトロン建設の意図を有して居たので、これと全く同形の電磁石の購入の尽力を依頼した処、快諾して其衝に当たり、あらゆる援助を与えられた。これにより材料を米国より輸入し、東京石川島造船所の好意により昭和13年6月其の組み立て据付を完成した。サイクロトロンの胴体及び付属物は、目下石川島造船所、理研工作係に於いて製作中であり、これに使用する120 kWの発振機は東京電気無線株式会社に於いて組み立て中である。この大サイクロトロンの重量は電磁石約210トン、胴体約4トンである」と記している。さらに仁科は生物学の研究について、サイクロトロンによる最初の生物学的研究は、中性子の動物に対する影響であった」と記して二十日鼠の照射を最初に行った事を述べている。

一方、西川は主たる研究を1) X線に関するもの、2)陰極線に関するもの、3)中性子並びに原子核に関するものとして、3)の研究に(a)中性子の散乱及び吸収、(b)人工放射能、(c)生物実験を挙げている⁶⁾。其の上で3)について「是等の研究に必要な粒子源の設備に関しては仁科研究室の人々と共同で(中略)原子核実験室の設備に従事し、既に小サイクロトロンを完成し、目下大サイクロトロン及び120万ボルトのCockcroft式高圧装置の建設に従事中等である」と述べている。さらに「又中性子源としては癌研究所の厚意により数百ミリキューリーのRn-Be源を使用している。其他当研究室設置の300 kVの高圧装置によりD-D中性子を発生させている」と記し、続いて「中性子が水素核との衝突により、遅緩されることはよく知られているが、これに就いてRn-Be源を用い、パラフィンの散乱体を薄い層に分ってそれによる遅緩を検すると、検出器として使用する被活性元素に特有の緩中性子群が分析される事を知った」と述べて、加速器あるいは中性子の利用が原子核研究だけを目的にしたもの

ではないことを示唆している。実際、1940年からは西川研究室に緩中性子の研究グループ（木村一治、水上生太郎、阿久津寿一）が発足して、物質との相互作用の研究が行われるようになった。

当時、理研では長岡、高嶺、西川、仁科の各研究室は3号館に入居しており、昼食は「西川研究室の食堂」に皆が集まってとることが多く、そこで活発な議論が行われていたと多くの関係者が回顧している。このような雰囲気の中で研究室間の「壁」は無いに等しく、理研に於ける加速器関連研究は仁科研究室と西川研究室が車の両輪になって進められ、今日で言う「加速器科学」研究が発展したと考えることが出来る。

8. 23 インチ (小) サイクロトロンの建設

8.1 国際的背景

簡単に1930年から40年にかけての世界のサイクロトロン状況を述べると、Lawrence と Livingston が最初のサイクロトロンで陽子を1.2 MeV に加速するのに成功したのは1931年⁷⁾である。その後1934年にFederal Telegraph社寄贈のPullsen arc generatorの電磁石を用いてサイクロトロンを建設し3 MeV, 0.3 μ Aの水素分子ビームを得たが⁸⁾、引き続いて重陽子を5 MeVまで加速できることを確かめた。なお、Lawrenceはこの重陽子ビームを空気中に取り出して岩塩に照射して ^{24}Na , ^{24}Mg の生成を確認している⁹⁾。さらにイオン源、磁場分布、ディー、発振器、ビーム取出系などを改良して、1936年には重陽子で4.3~6.3 MeV, ビーム電流20~50 μ Aの性能を実現し、また、11 MeV, 0.1 μ Aのヘリウムイオンビームの加速も行っている¹⁰⁾。このとき、仁科はいち早く嵯峨根をBerkeleyに留学させ、サイクロトロンを用いた実験に参加させている¹¹⁾。なお、嵯峨根は帰国に際してサイクロトロンで照射した一部の試料を持ち帰り、理研で化学処理をして長寿命の放射性核の寿命を測定し、小サイクロトロンの完成後は理研でもその実験を継続して行った¹²⁾。

当時Lawrenceらは更に大きい60インチサイクロトロンの建設を進めており、1939年春には8 MeV, 25 μ Aの陽子ビーム加速に成功した¹³⁾。なお、この頃にはアメリカでサイクロトロンの建設がブームになり、Rochester, Michigan, Chicago, Columbia, Purdue, MIT, Princeton, Yaleなどアメリカ各地でサイクロトロンが建設されており、一部は既に稼動して実験を始めていた¹⁴⁾。仁科はこのような世界の情勢を知っていて、最初から大型サイクロトロンの建設を目指したのは、世界の先頭に立って研究しようという強い意欲

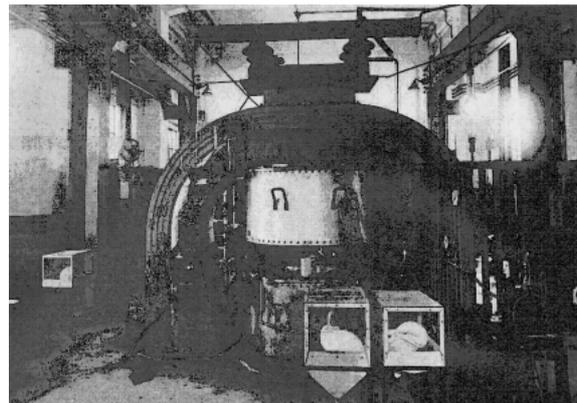


図2 小サイクロトロンの全景写真

の表れであったのであろう。

8.2 小サイクロトロンの概要

仁科は100トンの電磁石を有する大型サイクロトロンの建設を計画したが、手始めに小サイクロトロンを建設したのは賢明な選択であった。仁科はその建設報告¹⁵⁾で、設計から運転までBerkeleyサイクロトロンのやり方に沿ったと記しているが、独自の工夫も行って世界的な成果を挙げる優れた性能のサイクロトロンを完成させている。

図2に小サイクロトロンの写真を示した。手前に置かれているのは中性子照射の影響を調べるのに用いられている兎である。電磁石はBerkeleyよりやや小型のPullsen arc generator電磁石を改造したものである。もとの電磁石は磁極直径が66 cmで励磁コイルは下の磁極にのみ取り付けられていた。これをサイクロトン用に改造して上下同じ長さにした磁極にコイルを取り付け、17.5 cmの磁極間隙をとって図3に示したような加速函（真空函）を挿入している。図3の側面図から分るように加速函は直径66 cm、高さ16.5 cmの円筒形で、その上下には厚さ4 cmの鉄製の蓋と底が取り付けられていて、それぞれ上下磁極の先端部になっている。なお、加速函と磁極の間には磁場補正シムを挿入するため5 mmの隙間があるので、実効的な磁極間隙は9.5 cmである。

励磁コイルは32巻きを一つのコイルとし、上下それぞれ直径120 cmのタンクに32ずつ収めて冷却のため変圧器油を循環させていた。400ボルト、77アンペアの励磁電流で1.28テスラの磁場を実現した。磁物強度は加速電極の縁までは3%以内で一樣であるが、磁極の外縁端では16%ほど下がっていた。なお、コイルを含めた電磁石の総重量は23トンである。

図3のD₁, D₂は半径28 cm（加速イオンの最外周

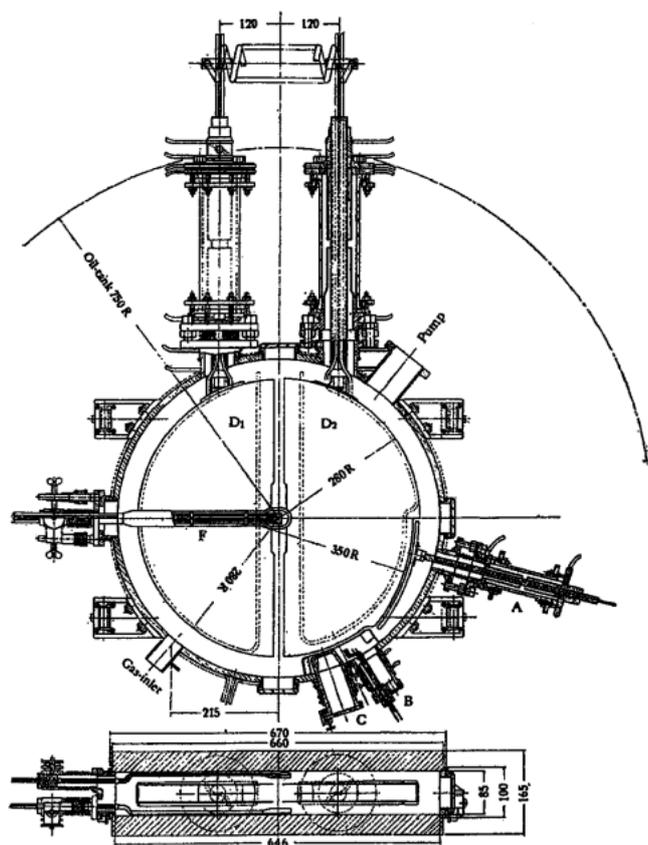


図3 小サイクロトロン加速函 上は平面図, 下は側面図

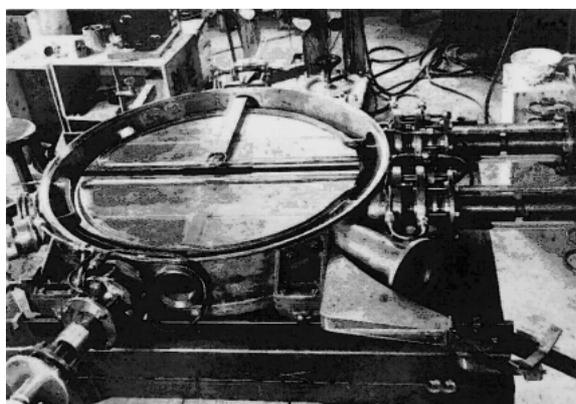


図4 小サイクロトロン加速函の写真

軌道半径は27 cmであった), 高さ3.5 cmの加速電極(Dee)で, 加速ギャップは2 cmである。D2の外側には最外周軌道のイオンを引き出すデフレクタAが取り付けられていて, その出口でのD2の半径は35 cmである。Deeの支持棒は一端が加速函に取り付けられたTerexガラスパイプで絶縁されているが, 2本の支持棒の先端にはコイル(図3平面図の上部)が

取り付けられてD1, D2とともに共振回路を形成している。なお, Dee, 支持棒やコイルは水冷されているほか, Terexガラスを加速函に取り付ける部分はDeeの位置調整機構がついている。

図4は加速函の上蓋を取り外してサイクロトロンの主要部分を示したものである。Deeの上部に直交しているのがイオン源で, Deeの下にも予備のイオン源が取り付けられている(図3)。イオン源は絶縁された水冷銅ブロックに太さ1 mmのタングステンを渦巻状にして固定したもので, 7ボルト45アンペアの直流で白熱させて熱電子を出していた。高周波を遮蔽するため, 熱電子の取り出し部分を除いてイオン源は銅製カバーで覆ってある。当時は局所的に気体を導入することはなく, 重陽子加速の場合には, 重水を電気分解して得られた重水素ガスを加速函全体に満たして(真空度は 10^{-4} Torr程度)熱電子による低圧アーク放電により重水素イオンを発生させていた。なお, 熱電子の引出・加速は高周波電場で行われ, フィラメントの位置がイオン生成位置になるので, フィラメント位置を適当に調整して加速軌道を変えていた。また, 残留ガスイオンが混入するのを防ぐため, 重水素ガスを導入する前に加速函の真空度を一旦 10^{-6} Torrまで良くしてからガスを導入したという。イオン源の先端にイオン取り出しスリットのある円筒をつけ, 其の内部でイオン化するイオン源はこの後建設された60インチサイクロトロンから用いられている。

真空ポンプには直径15 cmと7.5 cmの金属製油拡散ポンプを直列にし, 粗引き側はCenco Megavacの回転ポンプを用いていた。排気速度は 10^{-5} Torrの真空で毎秒200リットルであると報告されている。

加速高周波の周波数は10 MHzで, 国産の短波送信管SN167(定格15 kW)を2本用いたグリッド同調・陽極同調のpush-pull回路により発振し, その陽極回路のコイルとDee共振回路のコイルをインダクティブに結合してDeeに高周波電力を供給していた。発振管の陽極には最高電圧12 kVの高圧電源から電力を供給しているが, 高圧電源は日本電池株式会社製でグリッド付水銀整流管12本を用いた半波整流回路であり, 広い範囲で電圧可変であった。SN167が国産で手にいれるようになったことでこのような高周波加速器系が実現したのである。

加速イオン取出しは, 最高100 kV/cmの偏向電場が得られる設計の静電デフレクタで行っていた。直流高電圧は50 kVのトランスの二次側にケノトロン(整流器)と $0.01 \mu\text{F}$ の平滑用コンデンサーをつけたもので, 一次側の可変抵抗を変えてデフレクタ電圧を

変化させている。なお、イオン源の位置をずらして加速軌道を変えて重陽子のエネルギーを変えていたようである。

8.3 加速器としての性能

小サイクロトロン of の大きな特徴は世界で初めて磁場の安定化を実現したことである。電流安定化装置には逋信省電気試験所（現産業総合技術研究所）の高橋正一が開発した「三極放電管自動電圧調整器¹⁶⁾を用いている。これはグリッド付三極放電管（水銀整流器）の出力電流がグリッド電圧或いはグリッドにかかる交流電圧位相によって変化する特性を利用したもので、直流発電機の出力電圧と標準電圧（乾電池の電圧）との差をこの調整器で界磁電流にネガティブフィードバックし、発電機の出力電圧を安定化している。この装置の導入に就いて矢崎は「サイクロトロンを操作する場合まず遭遇する困難は磁場の強さが一定しないことである。（中略）このことは加州大学のサイクロトロンに就いても実地に見た処でサイクロトロンの一つの大きい欠点であった」と述べ、続けて自分らのサイクロトロンも磁場が 0.5% 変わるとビーム電流が 5 分の 1 に減るので、その改善策として「逋信省電気試験所の高橋正一氏の提案し且つ諸所で試みておられる三極放電管自動電圧調整器を試みてみることにした。幸いに東京電気無線株式会社の好意によって其の工場に使用するために製作されたものを一次借用した処予想以上の好成績を収めた。即ち励起電圧を 0.3% 以内（文献¹⁵⁾には 0.1% と記されている）に調整する結果としてイオンの量も同じ程度に一定に得られる事になった。これは多くの実験に対して非常に都合の良いことであって、加州大学のローレンス教授の処はじめサイクロトロンを既に操作し或いは之から作る処に知らせようと思っている」と記している¹⁷⁾。運転開始後、嵯峨根らはシムを細かく調整して 50 マイクロアンペアの重陽子ビームが得られるようになり、常時 30~50 マイクロアンペアで中性子実験が可能になっていた。

イオン源の改良も行っている。タングステンフィラメントの太さや形を変えたり、銅製カバーの一部をモリブデンにしたりして、長時間安定に稼動させることに成功した。

このサイクロトロンは、重陽子の最高エネルギーが若干低かった点を除けば、当時としては世界最高の性能を持っていたと言ってよいであろう。

9. 60インチ（大）サイクロトロン

9.1 建設の経緯

既に述べたように、仁科らの目標は電磁石重量が 100 トン以上の大サイクロトロンの建設であった。1937 年初めには原子核実験室の建物 6 棟もほぼ完成し、また、同年 4 月には 23 インチサイクロトロンが完成して重陽子イオンの加速にも成功した。さらに、三井報恩会/日本学術振興会からの資金援助も決まって 60 インチサイクロトン建設に必要な条件が整い、大サイクロトロンの建設が開始された。

当時、California 大学 Berkeley 校に留学していた嵯峨根遼吉の手紙で E. O. Lawrence が大型サイクロトロンの建設を開始したことを知った仁科は、それと同規模のサイクロトロンを建設することを決心して Lawrence に書簡を送り、電磁石材料の購入を依頼した。当時のわが国の製鉄技術では、良質の軟鉄厚板は生産できなかったのであろう。この後の経緯は既に 7. で述べた。

ところが全体の運転調整を始めると、1) 磁場の均一部分が狭すぎる、2) 加速函内の真空度が良くない、3) 高周波電圧が十分上がらない、などの問題が続出して、イオンを加速することができなかった。その原因は小サイクロトロンを適当に拡大して大サイクロトロンを設計したため、電磁石、真空、高周波回路などサイクロトロンを構成する主要技術についての理解が十分でなかったため、このようなことになったのであろうか。そこで仁科は大改造を行うことにし、小サイクロトロンを建設した矢崎為一、渡辺扶生をアメリカに派遣して、Berkeley で大サイクロトロンの設計を調査させた。参考のために改造前の大サイクロトロンの加速函の写真を図 5 に示しておく。

この頃、ヨーロッパやアメリカの科学者にはナチスドイツによる原子爆弾開発の懸念が広がっていた。とくにアメリカでは Lawrence, Compton らが国防への科学研究の貢献の重要性を強く認識して、1940 年 6 月には大統領に働きかけて「国防研究委員会」を組織している。翌年にはこの動きが原爆開発検討開始に発展しており、さらに其の翌年にはマンハッタン計画が始まり、また、日米関係も次第に険悪になって来る。矢崎らの訪米はちょうどこの時期に重なっていて Lawrence は多忙を極めていたが、サイクロトロンに関する情報の交換には暖かい配慮を示している。

この訪米の様子は矢崎が仁科に宛てた手紙でうかがい知ることができる。1940 年 8 月に Berkeley から出した手紙には¹⁸⁾、2 日にわたってサイクロトロンを見

学して8分どおり目的を達したこと、Cookseyに設計図の青写真(設計図)を依頼したこと、理研の図面を見せてLawrence, Cooksey, McMillan, Alvarezと議論したところ、皆の意見は一致して大改造しなければ働かないだろうとのことだったと書かれている。さらに矢崎はNew Yorkから仁科に、Columbia大学を訪れてRabi教授にサイクロトロンを見せてもらった

こと、真空ポンプの速度が理研の200-300リッター/毎秒では問題にならないこと、Berkeley, Chicago, Columbia, RochesterがともにKinneyの油回転ポンプを使用していること、Kinneyのオフィスを訪ねて渡辺と「これなら高くても買わなければならない」と決心したことを書き送っている。なお、この渡米では当初目的としたBerkeleyの大サイクロトロンの図面を手に入れることができなかったが、Kinneyポンプは購入して帰ってきている。

矢崎らの報告をもとに行った大改造が成功して1943年秋には大サイクロトロンはほぼ完成し、翌1944年夏に加速重陽子を使った原子核実験が開始された。しかし十分な成果を挙げる暇も無く終戦になり、1945年11月には大サイクロトロンは小サイクロトロンとともにアメリカ軍の手で破壊され東京湾に遺棄された。

大サイクロトロンについては科学研究所報告第二十七輯(仁科社長追悼号)に発表された建設報告¹⁹⁾以外に記録が無いので、ここではこの報告をもとにして紹介する。

9.2 大サイクロトロンの概要

図6は改造後の電磁石を除く大サイクロトロンの平面図である。当時、仁科は重陽子15 MeVに目標を置いて設計したのであろう。電磁石は、磁場強度が1.3テスラ、加速高周波の周波数が10 MHz、引き出し半径50 cmになるように設計されていた。電磁石の鉄材はアメリカから輸入し石川島造船所が製作したが、改造後は当初設計を変更して上下の磁極に1インチの鉄板を追加して、磁極間隙を5 cmほど狭くしている。また小サイクロトロンと同じように、加速函の上下に厚さ10 cm、直径150 cmの鉄製の蓋を取り

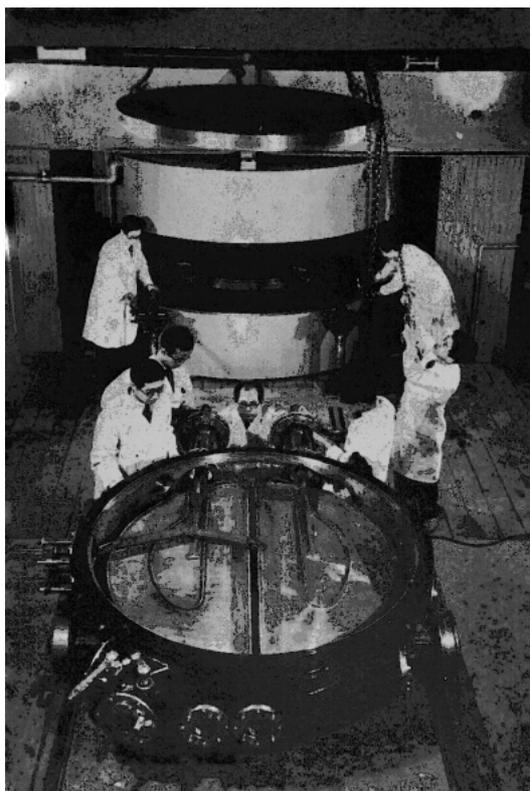


図5 改造前の大サイクロトロンの加速函 小サイクロトロンの加速函を大きくしたものである

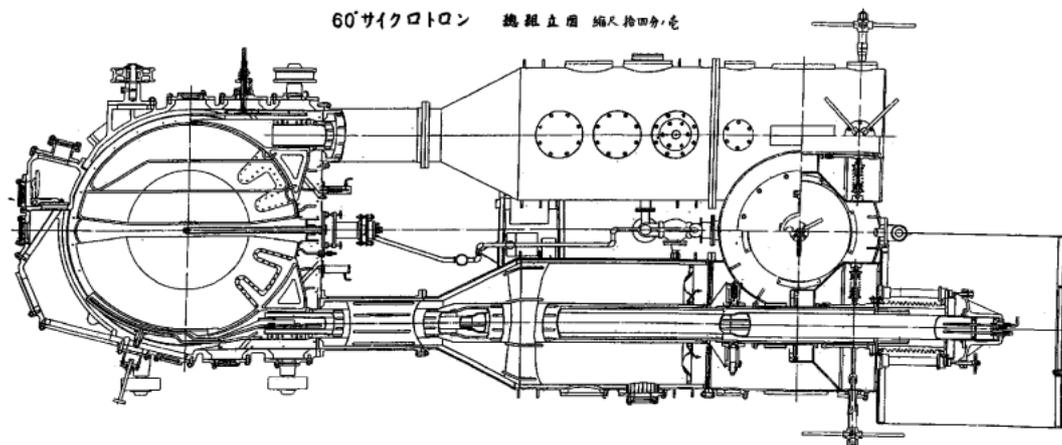


図6 大サイクロトロンの平面図

付けて磁極先端部にしており，上下の鉄蓋と磁極との間には磁場補正用シムを挿入するスペースがとってある。

コイルは上下各々6層で，各層のコイルは幅1インチ，厚さ1/4インチの角型銅線の巻線で，巻線間の絶縁にはファイバーを用いたが，各層間の絶縁には丈夫な木材を使っている。また，ヨークとコイル間の接触を防ぐために強い木材をこれ等の間に挟みこんでいる。コイル全体をタンクに入れ絶縁油を循環させて冷却していたのも小サイクロトロンと同じである。直流電源は出力350 kVA，定格電圧500 V，定格電流700 Aの直流発電機で，サイラトロンを用いた電圧安定化回路で励磁電流を安定化している。

磁場分布はサーチコイルと磁束計を用いて行った。シムによる磁場の変形を測定する場合は磁場強度の小さな変化を精密に知る必要があるので，巻き数の多い大型サーチコイルをつかってそれを初め中心部に置き，次にこれを測定しようとしてい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こる磁束計の読みから磁場強度の差を測定した。大サイクロトロンでは，ディーの必要最低電圧を下げるために外側に行くほど磁場が低くなる分布を，加速函シムを使って実現した。逆に陽子加速には磁場の減り方が少ない磁場分布を作っている。こうして磁場分布の欠陥は改善された。

当初の加速函は小サイクロトロンの加速函をそのまま大型にしたもので，加速電極 Dee は小サイクロトロンと同じ方式（図3平面図）で励振する設計になっていた。しかし製作してみると加速できない。その理由は，大サイクロトロンではより高い加速電圧が必要であり，そのために大電力の高周波を Dee に投入しなければならないが，インダクティブ結合ではコイルでの電力ロスが大きくなって，十分な電力を Dee 回路に供給できなかったのである。そこで矢崎らは帰国後 Berkeley に倣って4分の1波長 ($\lambda/4$) 共振回路方式を採用して，加速高周波系を設計した。

大サイクロトロンは大別すると加速函と $\lambda/4$ 同軸共振管から構成されている（図6）。加速函には Dee，イオン源，容量補償版，デフレクタ，ターゲット室が付属し， $\lambda/4$ 同軸共振管は外管となる導電管，内管となる円柱，それを支える支点及び調整装置，短絡板からなっている。大型の油拡散ポンプは導電管の下部に取り付けてある。このため，新しい加速函は多角形をしており，砲金鋳物製の多角形の骨組みにゴムパッキングのついた上下の蓋と側壁の蓋が取り付けられていた。上下の蓋は鉄製，側壁の蓋は砲金鋳物製である。

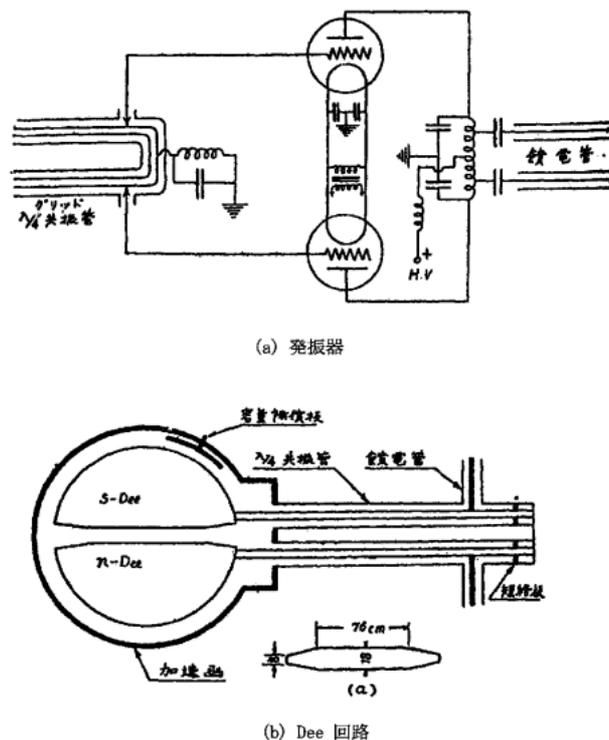


図7 大サイクロトロンの加速高周波系

油拡散ポンプは直径18インチの円筒の中央にジェットを置き，その周囲に6本の5インチ高真空用ジェットを配列した構造で，6基並列に稼働している6本の高真空ポンプで圧縮された気体が16インチジェットを通して回転ポンプに連結されている，3段の真空ポンプの構成になっている。排気速度は $10^{-4} \sim 10^{-5}$ Torr で毎秒2000リットルであり，改造前の10倍である。

イオン源は Berkeley で新しく開発されたものを使用した。タングステン線は磁場による変形や歪を防ぐため300 kHzの交流で加熱し，通常150 V，1.5 Aの低圧アーク放電で気体をイオン化していた。

加速高周波系は発振回路と Dee-回路から構成されるが，最後まで問題が残されていた。図7の概要図(a)に示したように，発振回路は日本電気製の TW530B (定格60 kW) を2本用いたグリッド同調・陽極同調プッシュプル回路である。陽極回路は太さ1/2インチの銅管を直径32 cmに5巻きして長さ16 cmにしたコイルとトリマーコンデンサーで構成される共振回路である。一方，グリッド回路には Q 値の高い $\lambda/4$ 共振回路を用いている。 $\lambda/4$ 共振回路の内筒は厚さ0.5 mmの銅版を直径15 cmに巻いた円筒で，長さは約7 m，先端から30 cmの部分を茶筒の蓋のようなはめ込みにして長さが調節できるようにしてあ

る。この長い円筒の1端を接地して、接地点から適当な位置でグリッドに接続した。

Dee回路へ高周波電力を供給する饋電管（フィーダー）は径40 cmの銅製外筒と2インチの銅管の内筒を組み合わせたもので、内筒の一端を発振器に接続し他端をDee回路に接続している。フィーダーの長さは3.7 mと3.2 mであり、Dee回路との饋電点で見た負荷側のインピーダンスがフィーダーの特性インピーダンスと等しくなるよう調整した。

一方、Dee回路にも図7(b)に示したような $\lambda/4$ 共振回路を採用した。Deeは $\lambda/4$ 共振回路の内筒の一端に取り付けられ、他端で支えられている。この支点の近くで外筒と内筒を短絡板で電氣的に短絡している。なお、二つのDeeの共振周波数を等しくするためにS-Dee側に容量補償板を取り付けてある。

加速高周波系の調整は次のように行っている。まず、低出力の発振器を作って大気圧のまま共振曲線を測定し、共振周波数と短絡板の位置、容量補償板の位置を決めた。共振曲線は、饋電点の電圧とDee電圧を測定し電圧上昇比の周波数依存性として求めている。次いでDee回路の代わりにフィーダーの特性インピーダンスに等しい値の水冷炭素抵抗を負荷として発振器の効率を測定し、妥当な結果を得ている。しかし、その後に行った高出力発振器を用いた真空中の調整は難航し、必ずしも納得のいく結果を得ることができなかった。とくにDee回路に供給できる電力が小さく、高周波電圧があまり高くならず加速イオンの引き出しができなかった。

1943年11月まで高周波電圧の調整を行った後、総合的な水素イオンの加速試験を行って12月初旬に蛍光板でプロトンビーム(9 MeV)を確認し、翌年2月15日に内部ターゲットは大気中にプロトンビームを引き出して紫色に光ることを確認している。

その後重陽子の加速テストを行って高周波電圧を上げるにつとめたが十分な成果が得られず、ついに外部にビームを引き出すことをあきらめて1944年7月から内部ターゲットを用いた実験を開始した。実験は翌1945年3月迄殆ど連続して行われたが、この間にDee電圧も次第に上昇してきてビーム電流も増加し、後には10 MeV重陽子イオン $350\ \mu\text{A}\sim 400\ \mu\text{A}$ 、14 MeV重陽子 $120\ \mu\text{A}$ が容易に得られるようになったという。

1945年4月13日から14日にかけての大空襲で理研も半分灰燼に帰したが、大サイクロトロンは被害を免れ、5月4日から操作を再開して、6月下旬まで実験を続行した。文献18)は報告の最後を「7月に入っ

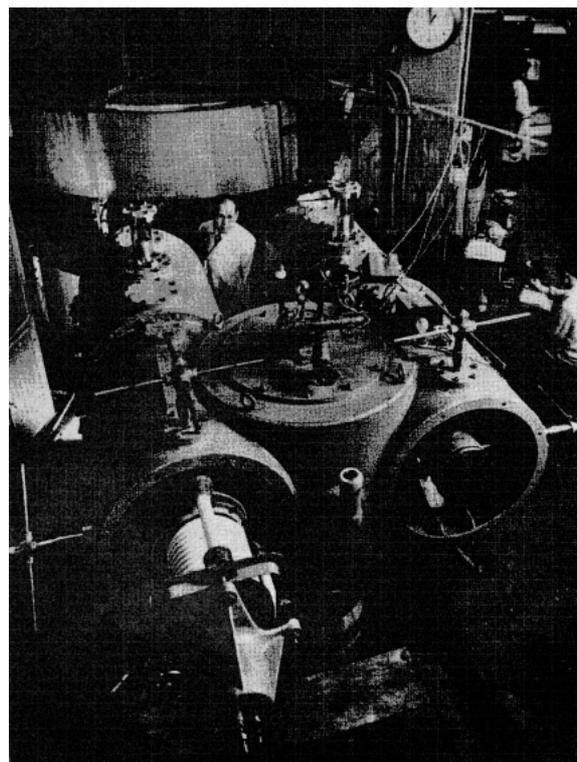


図8 大サイクロトロンの写真 組み立て中の $\lambda/4$ 同軸共振系で中央にあるのが真空ポンプ

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所へ移転したので、仁科先生自ら残余の実験室員を指揮してサイクロトロンの実験を指揮していた。たまたま8月15日終戦になってサイクロトロンも運転休止となった。

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・医学関係の実験を行っても差し支えないという許可を得て、再び運転再開の準備をし、再調整していた時、不幸11月下旬連合軍の命令によって、日本にある全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昼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しまった次第である」と結んでいる。

10. おわりに

戦前・戦中の財団法人理化学研究所におけるサイクロトロンの歴史は10年しかない。しかしこの間に、小サイクロトロンを建設して世界最先端の研究を行うと共に、世界最大級の大サイクロトロンを建設しようとして悪戦苦闘している。後者の建設で直面した主な問題点は、電磁石、真空及び高周波の技術であった。高周波技術については、日野川は大出力発振管の開発が軍需技術としての性格によって影響を受け、必要な

性能の発振管を開発できなかったからとしている¹³⁾。しかし実際は、同軸共振回路など立体回路を含む高周波技術の理解不足と未熟が原因であった。

一方、小サイクロトロンとほぼ同時に建設が始まっていた大阪大学のサイクロトロンも1937年に稼動している。このことは、1937年12月15日の理研学術講演会で菊池、渡瀬 譲、伊藤順吉、佐山好弘が「²H-陽極線にて二三の元素を衝撃して得られる誘導放射能に就いて」と「 β -線のエネルギー譜に就いて」を発表していることから明らかであろう。因みに前者は4.0 MeVの²Hをヴァナヂウムその他の二三の元素に宛てた場合に起こる誘導放射能を調べた結果の報告であり、後者は $^{12}\text{C} + ^2\text{H} \rightarrow ^{13}\text{N} + ^1\text{n}$ によって発生する¹³Nをウィルソン函に導き短飛程の β -線を調べ、 β -線のエネルギースペクトルの低エネルギー部の形を調べた実験の報告である²⁰⁾。なお、阪大ではこの頃も菊池、青木によってコッククロフト装置を用いた中性子散乱実験が精力的に行われていた。

1939年に嵯峨根に呼ばれて東大に移り、バンデグラーフ加速器の建設を始めた熊谷(青木)寛夫は、戦後、東大理工学研究所(航空研究所の後身)に移って真空の基礎研究を始めた。その後、物理実験における電子管回路(エレクトロニクス)の利用、磁気共鳴実験など高周波利用研究などを次々に行い、1952年には「B コンスタント」磁石のアイデアを発表し、磁場強度を変えても磁場分布が一定であることをモデル電磁石で実証している。優れた実験家であった熊谷は、1930年代から1940年代にかけて我が国の加速器建設・利用研究の中心にいて我が国の弱点を実感してきたので、戦後原子核の研究ができなかった時期にそれらの研究を行ったのであろう。

1952年に講和条約が発効してわが国で原子核研究ができるようになると、すぐに原子核研究所が設立され、最初の中心施設として可変エネルギー FF/FM サ

イクロトロンが建設された。その10年後には理研が重イオンサイクロトロンを建設したが、両者とも仁科の60インチサイクロトロンと同規模であった。わが国が世界最大規模の最先端加速器を建設したのは、わが国で最初のサイクロトロンが建設されてから50年後の1986年(KEK トリスタンと理研リングサイクロトロン)である。

参考文献

- 1) 西川正二先生 人と業績 昭和57年, 57 ページ
- 2) 中根良平 私信
- 3) 日野川静枝,
- 4) 理化学研究所案内 昭和14年度
- 5) 理化学研究所彙報第十七輯(1938) 954 ページ
- 6) 同上 950 ページ
- 7) E. O. Lawrence and M. S. Livingston, Phys. Rev. **38** (1931) 834, E. O. Lawrence & M. S. Livingston, Phys. Rev. **40** (1932) 19
- 8) E. O. Lawrence and M. S. Livingston, Phys. Rev. **45** (1934) 608
- 9) E. O. Lawrence, Phys. Rev. **47** (1934) 17
- 10) E. O. Lawrence and D. Cooksey, Phys. Rev. **50** (1936) 1131
- 11) R. Sagane, Phys. Rev. **53** (1938) 212, Phys. Rev. **53** (1938) 492
- 12) R. Sagane, S. Kojima and M. Ikawa, Phys. Rev. **54** (1938) 148
- 13) E. O. Lawrence, L. W. Alvarez, W. M. Brobeck, D. Cooksey, D. R. Corson, E. M. McMillan, W. W. Salisbury and R. L. Thornton, Phys. Rev. **56** (1939) 124
- 14) I. A. DuBridge, S. W. Barnes, J. H. Buck and C. V. Strain, Phys. Rev. **53** (1939) 447
- 15) Y. Nishina, T. Yasaki and S. Watanabe, Sci. Papers, I.P.C.R. **34** (1938) 1658
- 16) 高橋正一, 電気学会雑誌 55 巻 559 号 (1935) 73 頁
- 17) 矢崎為一, 科学 第7巻第7号 (1937) 292 頁
- 18) 中根良平, 私信
- 19) 新聞敬三, 山崎文男, 杉本朝雄, 田島栄三, 科学研究所報告 **27** (1951) 156