

話 題
-----

# 大阪大学核物理研究センター創設と加速器建設

近藤 道也

Foundation of Research Center for Nuclear Physics

Michiya KONDO

## Abstract

It has been almost 50 years since Research Center for Nuclear Physics (RCNP) was established in Osaka University. In this article, the brief history of RCNP is summarized from the beginning of the study for nuclear physics using the cyclotron accelerators at the faculty of science in Osaka University up to the foundation of RCNP and then the construction of the ring cyclotron.

## 1. はじめに

大阪大学核物理研究センターの創設から既に50年近くになり、当時の状況を知る方々も非常に少なくなりました。創設当時のことを少しでも記述するよるとの加速器学会誌からの依頼があり、私としても記録として今まであまり発表しことがなかったのでよい機会だと有難く思っています。私は1953年に大阪大学理学部大学院に入学でき、菊池研究室において原子核の勉強、研究を始めることができるようになりました。当時菊池正士、伏見康治、伊藤順吉、若槻哲雄諸先生方から講義、研究指導等で直接お話をお聞きし、また質問することができたのはいい思い出ですが、そのような経験のある方々は現在ほんの数える程になってしまったと思います。大阪大学における初期の原子核研究、加速器については諸先生方から直接に多くのお話をお聞きしておりますが、これらについては先輩方の多くの論文、解説等に記述があります<sup>1)</sup>。ここでは私が実際に従事した戦後最初の44インチサイクロトロン建設や、それを用いた核物理研究を阪大理学部で勉強させて頂いたことが後の核物理研究センター加速器の建設に大いに役立ったので、その経験を記します。その後米国 Colorado 大学に留学した際のサイクロトロン、核物理研究、大阪大学理学部における次

期加速器の準備研究、核物理研究センターの創設、新設加速器の建設等について学術的以外の話題も含めて記したいと思います。

## 2. 大阪大学理学部 (中之島キャンパス)

私が原子(原子核)に興味を持ったのは中学校に入学(1942年)して暫くたった頃(1~2年?)のことですが、先輩から世の中には大変な力のあるウランウ爆弾というものがある、マッチ箱位の大きさで富士山が吹っ飛ぶ位の力があると教えられてからです。原爆(当時は原爆という言葉は聞いたことはありませんでしたが)投下の暫く前のことで、その頃から一般の世の中にそのような知識が知られていたのはちょっと驚きです。阪大等の中性子物理学研究者が源ではとも思われますが、その後数年して興味を持っていた大阪大学理学部物理学科に何とか入れてもらえるようになったのは嬉しいことでした。ただ私が中之島の理学部大学院で菊池研究室に配属されたときはコッククロフト・ワルトン装置、バンデグラーフ加速器等を用いて戦後も続けられていた原子核研究は一時休断され次の時代に向けて新しい体制で次期計画を推進中であることが分かりました。当時、戦前のサイクロトロンは既に米占領軍により解体処分されていましたが、300 kV コッククロフト・ワルトン装置は戦後も実験に使用された

\* 大阪大学名誉教授 Professor Emeritus, Osaka University  
(Michiya Kondo E-mail: michiya-kondo@nifty.com)



図1 コッククロフト加速器.

後、実験室、加速器本体はともにほぼ原形のまま残っていました(図1)。

このコッククロフトは現役からは外れていましたが私が研究室に入って数年後、はっきり記憶していませんが1955年頃だと思いますが、一度だけ高電圧を発生させたことがありました。私と同期の溝渕君がたまたま実験室にいるとき先輩の研究者が高電圧を加圧して何かのテストを行っているところに行きあわせました。その時2人の間に誘電による放電が起こり驚いたのを今でも覚えています。当時は大変に古い前世紀の加速器がまだに働くのかという感触で感心していましたが、高々20年程度経過後のことであり今は核物理研究センターのサイクロトロンが50年近く現役で働いていることを逆に不思議に思っています。当時は先輩の先生方が短い期間に新しい発見を含む多くの業績を上げられたことに感嘆しています。私はこの昔の加速器の最後の稼働に立ち会えたのは幸運だったと思っています。今考えても数百kVの電圧の加速器を用いて、零eVから数MeVまでの可変エネルギーの核子を生成し実験に利用できていたのは驚くべきことです。現在このコッククロフトは一部だけが豊中キャンパス内の建屋に保存されています。

### 3. 44インチサイクロトロン(阪大戦後最初のサイクロトロン)

私が研究室に入った1953年頃は、それまでの古い設備に換えて、新しい加速器、研究設備の建設が始められようとしていました。1952年に年度予算が付き、バンデグラーフ加速器は既存の一部の機器を残して全面改良し新しい装置に生まれ変わろうとしており、また戦後阪大で最初となるサイクロトロンも新設されようとしていました。この44インチサイクロトロンの設計や工場での製作は既にほぼ完成しており、加速器の構成機器が阪大キャンパスへ搬入される直前のことでした。このような状況の下で当時阪大の研究者は核物理の実験研究をほとんど行わないでバンデグラーフやサイクロトロンの建設に専念していました。サイクロトロンの計画、設計は私が研究室に入る以前にほぼ完成しており、当時の私には技術的なことは何も分かっていませんでした。しかし、先輩の先生方が大変苦勞されていたことはよく理解できていました。ただ研究室配属後はサイクロトロン機器の搬入や現場での設置、各機器の性能測定にはほぼ最初から参加でき、実際の運転試行も致しましたので多くの知識を得ることができました。当時の建設、運営の環境が現在とは大分異なっていたことを知って頂き、またこの経験が後の核物理研究センターの建設に役立つこともあり、学術論文にない記録を少しでも残しておきたいと思っています。

この戦後初のサイクロトロン建設当時はまだ戦後の混乱が数多く残っており、理学部のあつた中之島のオフィス街でもまだ車も少なく荷馬車が往来していました。サイクロトロンでも小型の機器は馬車で工場から大学まで配送されるような時代でした。真空装置の配送も図2のようでした。

その頃は淀川に架かっていた橋は地盤沈下のため水平でなく弧状に変化しており馬が荷物の荷重に耐えかねて橋上で立ち往生したりしていました。サイクロトロン建屋は若槻先生によると1952年度予算で新しく建設されました<sup>1)</sup>。戦後は放射線防護に留意されるようになり、本体は土塁で囲われた独立の堅牢な建屋に設置されました。ただ、隣の実験室には昔のサイクロトロン本体室がそのまま流用されたそうです。私は当初は山口先



図2 荷馬車と真空ポンプ (44 インチサイクロトロン)。

生の指導の下、主として主電磁石関係装置の設置、測定等を尾崎君や私が助手としてお手伝いしました。主電磁石の磁場測定装置の製作、磁場測定等を行いました。磁場の  $r$  方向、 $\theta$  方向の分布測定、シム板の調整による  $r$  方向磁場の最適磁場の形成等です。これらの作業が終わると、磁石関係は一段落するのでつぎは小田先生の下で発振器グループ等の手伝いをしました。電磁石は住友金属で製作され問題はあまりなかったのですが、発振器は共軸、Dee 電極等を含めて小企業で銅板を打ち出して製作されたようなもので運転には非常な苦勞を要するものでした。この発振器は2共軸のプッシュプル方式で二つの発振器が二つの Dee 間の容量でカップルしているような構造で、両方の周波数が合っていないと電圧の均衡がくずれます。製作上の欠陥もあり、熱変形による二つの発振系の同調のずれの調整に苦勞しました。発振器の立ち上がりにも問題があり安定した運転に苦勞しましたが、あとで分かったのですが主真空ポンプのオイルの逆流防止冷凍機の不良によりオイルが共軸内に数センチも溜まっていた。これも不調の原因の一つだったでしょう。当時は基本的な設計には問題がなくても日本の一般の工業水準と予算の少なさに問題があったと思われます。

予算の僅少による苦勞の一例としては RF 系の発振器真空管を共軸真空槽内に封入、使用したことでした。真空管メーカーから陽極、グリッド、フィラメント等を安価で入手し、フィラメント切れの場合は研究者が交換していました。世界的にも稀有の方法だったと思います。制御系もインターロック方式を加速器で大々的に導入したのは当時の日本では珍しかったと思います。ただリレー等は町工場で製造されコイルに電流を流して

も作動せず、電流を切っても残留磁気でリレーが切れない等のトラブルが頻発しました。昔伏見先生の話によると真空ポンプは水道水を垂れ流して冷却していましたが苦學して大学へ通っていた学生がもったいないと思って水流を止めたため高価な真空装置がだめになったということがあったそうですが、そのような事故は防げるようになったわけです。

事故についても注意されていましたが、幾つか起こりました。高周波機器の電源、ビーム引き出し装置の調整、監視中に感電事故が起こり一時人事不省になるような重症でしたが大学病院が近くにあり直ちに急送治療していただき、無事に経過したのは幸運でした。放射線による場合もありました。加速器の運転を始めて暫くたった頃、少数の運転グループが主になって実験室で加速ビームをアルミ箔を通して空気中へ取り出す実験の準備を行っていました。空気中でのビーム照射はがん治療、動物照射、放射性物質製造等への利用を考慮した実験だったと思います。普通、長時間ビーム停止するには発振器を切断しますが加速器グループだけの現場作業でしたので加速器内部のビームストッパーによりビームを止めただけで作業していました。当時は一度ビームを止めると再び安定したビームを得るにはかなりの時間を要したため、簡単なオン、オフ、のためでした。この作業はサイクロトン関係者のみで行っており、部外者が無断でビームのオン、オフ、をすることは誰も思っていないでした。その時、思い込みは危険だということをもっと知ることになりました。数人の研究者で作業中に私が左手指2,3本に無数の針で刺されたような痛みを感じました。直ちにビームに照射されたことを理解し発振器停止に走りました。そのあとすぐ病院へ行き医師に事情を話しましたが何が起こったか全く理解してもらえず、軟膏を塗り包帯をしてくれておしまいでした。その後しばらくの間水疱ができたりしましたが1~2週間程度過ぎると皮がはがれ目立たなくなったように記憶しています。とにかく痛みを感じる程放射線に照射されたという話は聞いたことがありませんでした。後遺症を気にしていましたが特に問題ありませんでした。陽子エネルギー 5.7 MeV、飛程 0.1 mm、電流は数  $\mu\text{A}$  程度でしたのでよかったですでしょう。もし痛みを感じて

いなければ全員大変なことになっていたと思いきその後安全に特に注意するようになりました。これは放射線障害防止法が制定される前の話です。

サイクロトロンは1955年最初の内部ビームの加速に成功した後、1956年から実験が始められました(図3)。p, d,  $\alpha$ 粒子を用いた核反応研究グループ、核反応ガンマ線研究グループ、RIを用いたベータ・ガンマ分光学研究グループにより加速器に不安定性があるものの世界的に第一線の研究が行われました。このサイクロトロンの性能等は表1に示されています。故障も多く研究者は加

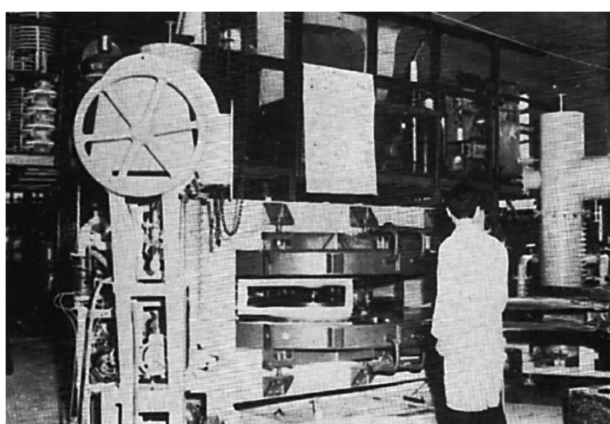


図3 44インチサイクロトロン(中之島)。

表1 44インチサイクロトロン予算, 諸元。

1) 予算

1952年度	サイクロトロン本体, 同付属装置, 建屋	3,000万円
1953年度	校費, 特別設備費, 機関研究費, 輸入機械購入費, 寄付	2,316万円

2) サイクロトロン諸元

主電磁石	直径 112 cm
磁極間隙	14 cm
純鉄重量	45 トン
高周波共振器	2Dee 2 共軸空洞方式, 共振器 (2 真空管プッシュプル), 入力 40 kW
ビーム最大軌道半径	50 cm

3) サイクロトロン性能例

	加速エネルギー	内部電流
重水素イオン D	11.4 MeV	100 $\mu$ A
水素イオン H	5.7 MeV	60 $\mu$ A

速器を修理しては又実験を再開するというのが日常でした。次に加速器を作るときには故障なしのものをと強く思いました。この建設にあたったのは菊池, 若槻, 山口, 小田, 真田, 山部, 吉沢, 武田, 能沢, 岡田, 平尾, 小林, 近藤, 尾崎, 加藤(敏郎), 岡野, 加藤(昌平), 許, 国府でした<sup>1)</sup>。この19名のうち1980年に阪大に在籍しているのは近藤, 加藤昌平のみでいかに多くの方が日本各地で活躍されたかを示しています。

3.1 サイクロトロンの建設記録映画

サイクロトロンの建設記録映画は山口先生の監督, 阪大物理学科卒で後にプロになられた榛葉氏がカメラマンの形で撮影されました。助手, 照明係として平尾, 尾崎, 近藤他が手伝いました。戦前のエルモの撮影機や映写機がどのように手に入れたのか知りませんが, 使われました。この映画は阪大内部では映写されていましたが公開では行われていませんでした。最近, 阪大岸本教授により映画は電子化され2016年9月28日に“大阪大学サイクロトロン建設の記録映画上映会”として会館講堂において好評のうちに一般公開され, 私講師の一人として出席しました。

3.2 第2室戸台風

サイクロトロンによる実験が軌道に乗っていた1961年9月16日に大阪へ第2室戸台風が襲来し, 暴風雨と1mを越す高潮によりサイクロトロンその他の多くの装置が水没し, 大変な被害を受ける事態が起きました。全員で応急修理を行い, 磁石, 真空箱等は使用可能でしたが, 電気系統は殆ど駄目な部分が多くありました。災害復旧には約1年半かかったようです。山部, 近藤はこの頃すでに米国行きがきまっていたので半年から1年足らず災害整理に従事したのみで完全復旧までのお手伝いはできませんでした。復旧後1年実験を行ってから豊中キャンパスへの移転が始まります。阪大ではサイクロトロンのほかに, 杉本先生による核モーメントの優秀な研究等が行われていたバンデグラーフも損傷を受け研究の長期の停滞が余儀なくされました。一方1955年に設立された東大原子核研究所で建設された160 cm サイクロトロンは順調に共同利用実験が行われておりその高性能により日本の核物理研究者に大きなインパクトを与えてきました。大阪大学ではそれまでよりも更に強く将来計画を進めなければならない

との声が大きくなり、関西全体にも広がっていくようにもなりました。

### 3.3 サイクロトロン移転

サイクロトロンは被災後復旧に1年半、その後実験に実験を1年行い、その後理学部は大阪市中之島から豊中キャンパスへ移転することになりました。1964年から始まり1個のDee電極の共振系や制御系も新設され非常に安定、高精度の加速器に生まれ変わりました。更に後程主電磁石にトリムコイルが新設され、広範囲のエネルギー可変性が得られるようになりました。この共振系の技術は後に核物理研究センターの加速器製作に役立ち、逆にトリムコイル新設には理学部で始まっていた将来計画加速器のモデル電磁石の研究データが参考になりました。後から考えるとこの頃から共同利用研究が始まっていたのかもしれませんが。この改良計画に関わっていたのは前の共振系の部分は若槻、平尾、武田、三浦、加藤(昌平)、山崎、高橋(憲明)、井上(光)、清水で後の部分は若槻、武田、加藤(昌平)、高橋(憲明)、柴田、板橋、青木、岡田、川、山縣の諸氏でした。この中の数人は後に核物理研究センターに移籍しています。

### 3.4 国外のサイクロトロン加速器(核物理研究センターと関係の深かった加速器)とのかかわり

若槻先生は早くからAVFサイクロトロンに関心を持っておられ、1960年に、UC Berkeley, UCLA, Univ. Colorado, ORNL等を訪問し討論、研究をして帰国されました。先生の助力を得て山部先生は1962年からAVFサイクロトロンと核物理研究のためBerkeleyへ留学されました。近藤も同様にAVFサイクロトロン研究のため1962年7月から1964年8月までUniv. Coloradoへ、最初の1年は仁科記念財団の援助で、後の1年は同大学の研究員として留学することができました。山部先生は私より数か月前に米国へ行っておられたので私はコロラドへ行く前にバークレーに立ち寄りサイクロトロン研究室を訪問、88インチサイクロトロンや研究設備を見学することができました。

#### 3.4.1 UC Berkeley

Berkeley 研究所には山部先生が私とほぼ同時期に滞在、研究しておられ、研究資料も収集したし、私も数回訪問し知人も多いので多くの有益な提言が得られていました。共通の友人である Prof.

Conzettともよく意見交換、討論していました。我々は後の阪大における研究所新設ではBerkeleyサイクロトロンを超える加速器製作が目標でした。Berkeleyでは早くから外部偏極イオンにより偏極ビーム加速を行っており日本でも当然実現するべきと思っていました。カリフォルニア、バークレー88インチサイクロトロンの主要諸元は、磁極直径: 224 cm, 3セクター、加速粒子(エネルギー): p (60 MeV),  $\alpha$  (140 MeV), C (193.4 MeV)。

#### 3.4.2 Univ. Colorado

Colorado大は同大のProf. Lindが若槻先生の知己であり紹介頂き留学をスタートできました。コロラド州の大学町ボルダーにありAVFサイクロトロンが設置された研究所があります。Prof. Lind, Kraushaar, Rickeyに紹介され各研究室を訪問しました。その際ある研究室で数人の研究者が山崎、近藤、山部が阪大で行った( $\alpha, p$ )反応の論文を広げて議論している所に出くわしました。山崎が見出した直接核反応の角分布が軌道角運動量の移行のみならず全角運動量によっても異なるというj依存の論文です。当時私が著者の一人ということを知らなかったようで驚きました。後に私もColoradoの研究室でも同様のj依存の研究を(p, d)反応等で行う実験に参加したりしました。研究所のサイクロトロンは順調に稼働が始まって以後まだ日が浅く、研究者はいろいろの実験に熱中していました。私もサイクロトロンの勉強の傍ら、原子核実験にも参加し楽しく2年間を過ごすことができました。此処の研究所の研究スタイルは私が阪大理学部でそれまで経験していたのとよく似ているので不思議に思っています。Colorado大のProf. Lind, Kraushaar, Rickey等の研究者は皆、加速器技術に堪能でその設計、製作に参画し、実験研究に際しては加速器運転も行っていました。加速器は精緻によく設計、製作が行われており、非常に安定した加速ビームが得られており感心しました。戦後あまり日のたっていないかった日本では部品の品質が悪く故障の頻度が高かったため製作後数年間は安定度に問題があったわけですが、その後日本でも10年余りのうちに一般工業製品の品質が世界でトップレベルに到達したのは知られた通りです。Prof. Lind, Kraushaarはその後、1986年頃に来日し核物理研究センター加速器を使用してセンター研究者を含めた共同利

用研究に応募し、実験を行ったのは共同利用施設としては嬉しい出来事でした。なおコロラドに在籍していた Rickey, Bardin は後に阪大 AVF サイクロトン建設の頃にインディアナで 200 MeV サイクロトンの建設に従事しました。コロラド大のサイクロトンの主要諸元は、磁極直径：132 cm, 3 セクター, 加速粒子 (エネルギー): p (3–28 MeV), d (3–18 MeV),  $\alpha$  (2–36 MeV)。

#### 4. 核物理研究センターの創設

日本の原子核研究についての一般研究者の意見は 1953 年に発足した原子核談話会で議論されてきました。全国の研究者の意見をもとにして 1955 年に発足した東大原子核研究所はその後目覚ましく発展し、多くの研究業績を上げてきました。一方全国各地の各大学では戦後建設された加速器や原子核研究設備は過少な予算と戦後の日本の産業の立ち遅れから、かなり疲弊した状態でした。このような状況の下で 1959 年 4 月の物理学会の際に将来計画に関するシンポジウムが開かれました。1961 年に原子核特別委員会において低エネルギー将来計画案がまとめられ、1962 年 4 月の学術会議総会に提出、採択され 5 月に政府に勧告されました。その内容は共同利用研究所については東大核研の研究設備の増強を行い、関西地区には数十 MeV の可変エネルギーサイクロトン、タンデム型加速器、精密  $\beta$  線スペクトロメータ等を備えた新しい研究所を建設する計画でした。全国の各大学については教育を重視し、原子力開発等も含めた特色のある研究をするための設備を増強するということでした。共同利用研の大型加速器を使用した研究と各大学の特色ある研究を有機的に融合させる計画でした。新しい共同利用研究所設置場所は東京に次いで研究者の多い関西地区とする案でした。

##### 4.1 概算要求

学術会議から原子核研究将来計画の実施についての勧告を受けた文部省は国立大学研究所協議会に諮問があり、伏見プラズマ研所長を委員長とする原子核小委員会が発足され原子核関係者として渡瀬、野中、若槻、山口 (嘉夫) が委員として参加し、検討が行われ 1963 年 7 月に答申が出されました。その中の低エネルギー核物理の大型加速器については関西地区に設置するという案でし

た。なおこの新型加速器は核研関西支所に設置する計画として東大核研から概算要求されていましたが、その後本省ではほとんど注目されないまま数年の時間が過ぎてしまいました。

##### 4.2 核物理委員会、研究所協議会、阪大核物理研究所設置委員会

核物理研究者の間では共同利用研、大学の研究者の間で将来計画の進行についていろいろの意見が出ており、その調整をするため 1964 年に低エネルギー委員会が作られ討論、推進されましたが進展は見られませんでした。ただ 1965 年に研究所協議会では新研究所は核研関西支所から AVF サイクロトンを設置した大阪大学附属共同利用研究所の設立の計画に改めました。一方阪大理学部では若槻、平尾両先生と学生が小型電磁石を用いて AVF サイクロトンの研究を行っていました。山部、近藤が 1964 年に米国から帰国して後、有志が AVF サイクロトンの製作を見据えた基礎設計やモデルによる研究を始めていました。これは関西における将来計画の具体的計画がいまだ定まっておらず、そのための資料を作るとの意識もありました。サイクロトンはある程度の規模を目標にしていればそれ以上の装置の設計は難しくても、それ以下の規模への変更は比較的容易なところがあります。理学部を主とした研究者の間では基礎研究を通して少なくとも Berkeley の加速器を超えるものを目指そうという意見が強くなりました。予算、その他で小型化が要請されても対応できると考えました。若槻先生はもう少し小型の計画を考えておられたようにも思いますが賛成して下さいました。後には大型の加速器で成功してよかったねと言って頂きました。原子核特別委員会でも核物理研究所準備委員会が作られ所長予定者に若槻教授、加速器責任者に山部教授が指名され研究所設立に向けた体制が整いつつありました。大阪大学内にも核物理研究所設置委員会ができ、1966 年から毎年概算要求が提出されたがなかなか認められませんでした。ただ 1966 年、1967 年度には AVF サイクロトンの準備研究予算計約 8000 万円が交付され加速器モデル装置による実験も実現し、具体的な建設案策定が進捗しました。山部、清水、井上信君等が 1/4 モデルによる磁場測定、軌道計算等を精力的に行い、RF モデルテストは三浦君が主となり清水君らが行い

ました。中心部の電場解析は細野君により電解槽を用いた精密なデータによりなされ効率の良い加速に貢献しました。

#### 4.3 低エネルギー委員会

低エネルギー委員会では核物理共同研究所を関西地区に設置することの研究者の要望書をもって政府に陳情しましたが新しい研究所の新設は難しいと考えるようになりました。1969年6月の委員会では1970年度の概算要求からは研究所新設ではなく、施設として核物理センター設置を要求することになり阪大から提出されました。その結果翌年1970年には理学部原子核実験施設に核構造部門が設置されました。これは何も核物理センターが認められたわけではありませんが、今まで固有の部門がないところに新しい部門が設置されるのは我々としては新しいセンター創設の前兆と理解し明るい希望を持ちました。この核構造部門の教授には近藤が任命されました。

#### 4.4 核物理研究センター発足

翌年の1971年4月には遂に全国共同利用施設として核物理研究センターが設置されることになり山部教授がセンター長に任命されました。これは学会の勧告以来9年目のことであり、建設関係者にとっては非常に長い期間でした。この研究センターという機関の名称は全国初めてのものだったと記憶しています。新しい研究センターの発足と共に核構造部門は原子核実験施設から移設され加速器部門となり、5月には新しく測定器部門が新設され池上教授が責任者として赴任しました。全国研究者は研究部門の新設を熱望していましたが文部省の見解は、核物理研究センターは全国共同利用機関であり全国研究者に加速器を含めた研究装置の利用を提供すればよいというものでした。その後の実情はサイクロトロンを含めた実験装置の製作、運転、運用だけでも内部研究者だけでは全く不足で、学内、学外の併任教官を含めた研究者の助力に頼っている状態でした。後の人員増強でも十分な改善はできませんでした。

#### 4.5 AVF サイクロトロンの建設

1960年代に入って日本の原子核研究用の中型加速器の建設は東大核研創設以後、世界の発展からとり残されつつあり技術的にも遅れを取っている感がありました。その状況の中で一流の装置の建設は難しいものがありました。我々は加速器建

設に際して機器の大規模化は予算的、技術的に困難があるので中型でも多くの特徴をもった装置にしたいと考えました。当時欧米では既に数百 MeV 級の原子核研究加速器が稼働中、或いは建設中でした。我々としては中エネルギー領域であっても、高エネルギー分解能の安定ビームの生成と測定、多種類の軽、重イオンの加速、陽子、重陽子、ヘリウム3の各粒子、その他の偏極イオンの生成、加速等を可能にすることを目標としました。又、池上教授他の研究者によるビームエネルギー、測定器等のエネルギー分解能の高度化を含めて研究領域の広大化が図られると考えました。以上の方針は各種研究会、委員会で随時討議されてきました。

更に注力したのは加速器の安定的運転です。44インチサイクロトロンでは機器の不安定、特に電圧、電流、周波数、温度、位置等の設定、測定等の不安定がビームの安定度に影響を与えました。当時は電源、制御機器、電磁石、高周波機器、真空装置等すべてに問題があり、またその装置を設置する建屋の環境が劣悪でした。AVFサイクロトロンでは機器と共に温度、湿度、地盤等にも注意を払いました。幸い日本の機器、電気製作会社の技術力はAVFの時代には既に世界トップレベルにありよい製品を作ることができました。問題は理想的基準をどのように決めるかです。旧サイクロトロンの時代にはRF系は2-Dee系であり、当時は周波数、電圧を独立、自由に変更するのは難しく、最大ビーム電流を維持するには主電磁石



図4 AVFサイクロトロン。

磁場を常時変更して微調整する変則的運転を行っていました。AVFでは各機器の設定、測定すべてデジタル化することを原則とし、加速前にできるだけ予定値に設定してから運転を行うことにしました。三浦、山崎教授、他の研究者にも協力頂き成功したかどうか分かりませんが他の加速器では見られない試みでした。機器の可動部分もデジタル化し、RF、入射、引き出し系、ビームプローブまでステッピングモーターを用いました。成功したかどうか分かりませんが、今までの加速器にない方式でした。

AVFサイクロトロンは1974年7月30日に陽子エネルギー20 MeVで最初のビームが得られ、その後長期間単独で共同利用実験に使用されてきました。一方将来的には高強度、高エネルギービーム加速、2次粒子生成、原子核、素粒子研究以外の医療など他分野での利用を含めた将来の大型加速器のための入射器にすることも配慮されてきました。このことは阪大吹田敷地内の建屋の配置等を決めるときにも考慮されてきました。サイクロトロン室にも2階に可動式床面を持った広大な外部イオン源室を設置し各種イオン源を常時使用、増強できるようになっています。加速器、測定器の建設は当初は研究センター内所属より外部所属の研究者が多い位の体制でスタートしました。センター所属の研究者は当時近藤、山崎、細野、斎藤、池上、小方、大隈、片山、井上、酒井、藤原であった。阪大他機関からは山部、清水、永井、杉本、江尻、三浦、高木、京大からは小林、玉垣の各先生方が併任教官として赴任されました。そのほか京大の西村、畑中、田村、今井他多数の先生方は大半の時間を割いて偏極イオン源の開発研究をセンター内で行いました。加速器の仕様は研究センターにおける準備研究、全国の研究者による意見をもとに検討専門委員会、運営委員会を経て決定されました。加速器の仕様の大要は表2の通りです。

設計の大綱ができ上がり、製作に入る段階になったが問題がありました。その2,3年前までは加速器製作に意欲のある製作会社は多数ありその多くは大電機メーカーでモデル電磁石等もそのうちの一家で製作されました。しかし各社は原子力関連の事業で繁忙になっている状況であり受注に至りませんでした。最終的には受注に前向きで

表2 AVFサイクロトロンの仕様

電磁石	
磁極径	230 cm
最大平均磁場	16 kG
重量	400 トン
イオン源	
内部・外部 (重イオン, 偏極イオン)	
加速系	
Dee 型 発振周波数	6~8 MHz
加速エネルギー	
陽子	≤75 MeV
重陽子	≤60 MeV
ヘリウム3	≤150 MeV
ヘリウム4	≤120 MeV
重イオン	≤10 MeV/核子

あった機械鉄鋼系の2社のうち適当と判断した住友重機械工業に主要部分の製作を発注しました。同社は加速器製作には全く経験がなく、お互いに苦勞もありましたが同社は技術力もあり真摯に対応してくれたので優秀な加速器を製作することができました。加速器製造の主要部分は住友重機械工業が製造にあたったが基本設計、組み立て調整の基本は阪大側が行いました。同社はその後加速器製作の研究、開発をすべて自社で行える実力をつけ、自社商品として出荷できるようになりました。

外部イオン源は主として京大の研究者が担当しましたが、本体部分は阪大の核物理研究センターと理学部の教官が所属には関係なく一体で作業にあたりました。外部イオン源ビームのサイクロトロンへの入射装置は理学部の江尻教授他の協力で完成し、学内、学外機関の協力成果を示す一例となりました。ビームライン、測定器についても同様の協力が示されています。

#### 4.6 AVFサイクロトロン建設記録映画

AVFサイクロトロン製作の記録映画も、近藤が保存していた50年ほど前の戦前の16 mm フィルムの撮影機を使用して撮影され、最近、森信、斎藤氏らにより電子化されました。44インチサイクロトロンの時と違って、フィルムの高性能に



表3 反応粒子アナライザーの性能.

平均軌道半径	150 cm
測定角度範囲	-50~-140 度
最大運動量	2500 kG cm
分析エネルギー範囲	12%
最大エネルギー分解能	10,000

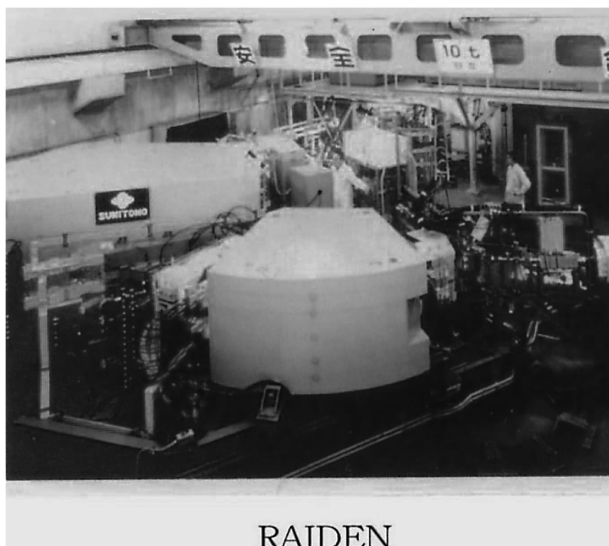


図5 反応粒子アナライザー.

より照明などの助力なしで撮影したが鮮明にでき上がりました。この映画はまだ一般には公開されていないが近いうちに公開したいと思います。

AVF サイクロトロンは1974年7月30日にファーストビームが得られその後同利用実験に供されています。

#### 4.7 反応粒子アナライザー

核物理実験室には池上教授他の研究者により設計、製作された世界最高のエネルギーの分解能を持つ核反応粒子アナライザーが設置され、全国の共同利用研究者に利用されています(図5)。AVF サイクロトロンビームを用いた各種核反応研究にその性能を発揮しています。表3にその性能が示されています。

#### 4.8 加速器, 測定器建設経費

建設経費は潤沢とは言えませんが、大変だった阪大中之島時代と比べると画期的に改善していました。日本が経済的に発展したことが技術面でも世界と競争できるようになった原因の一つでしょう。加速器を含めた研究設備費と建屋設備費の概要は表4に示されています。

表4 設備費.

1970年度	27,200千円
1971年度	381,350千円
1972年度	496,470千円
1973年度	366,190千円
1974年度	486,400千円
計	1,757,610千円



図6 吹田キャンパス(構築前).

#### 4.9 敷地問題

新しい施設設立の際は土地取得が大きな問題となりますが、大阪大学は大阪万博跡地を含めて吹田地区に広い土地を獲得しており、若槻先生のご努力もあり核物理研究センター概算要求の際にすでに学内でもその予定地の目途がついていたのは有り難いことでありました。尤も学内の他研究機関との境界についての調整は難しいものでした。山裾の部分をも更に将来の計画のために獲得予定できたのは幸運でした。そのため道路を少しずらしたのでキャンパス内の池の面積が狭くなり、池の体積を水利の関係からか一定にする必要があるため底を掘り下げたりしました。又以前住民が使用していた道路はキャンパス内であろうと簡単になくせないこと等いろいろ勉強させられながら解決に努めました。とにかく後にリングサイクロトロン製作のときにも特に敷地は問題なくスムーズに建屋増築ができました。放射線問題もありました。当研究センター加速器製作後にキャンパスの隣に移住された住民から放射能について申し入れがあり、いろいろ説明をしました。建屋周辺に放射線モニターを完備し、安全を住民の方々にお知らせすることである程度了解を得ました。

表5 リングサイクロトロン仕様.

加速粒子	最高エネルギー
陽子	400 MeV
重陽子	200 MeV
ヘリウム3	530 MeV
アルファ粒子	400 MeV
重イオン	400 Q <sup>2</sup> /A

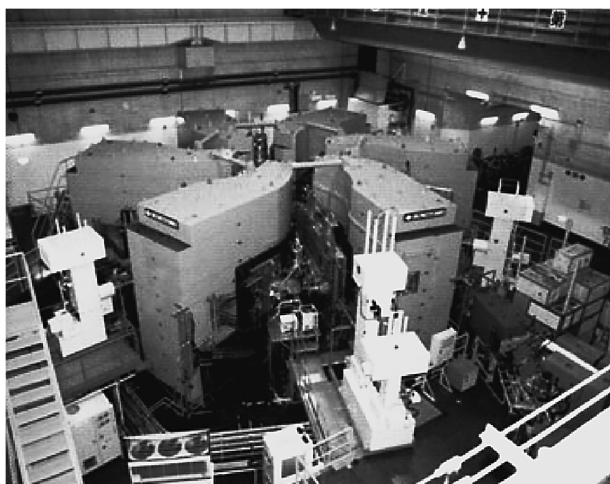


図7 リングサイクロトロン.

#### 4.10 リングサイクロトロンの建設

AVF サイクロトロンの使用が1974年7月より始まり、その後順調に共同利用実験が行われていましたが、並行して次期加速器の検討が続けられていました。1980年頃からはモデルを用いたリングサイクロトロンの準備研究も始められました。日本では唯一の原子核研究用大型ハドロン加速器の建設は核物理研究センターのみで可能であり全国の核物理研究者の間で新型加速器の新設の要望が高まってきていました。1984年、1985年に開催された核物理委員会でも東北大学の電子ライナックと共に議論され文部省に建設要望書が提出されました。核物理研究センターでは三浦教授等が中心になって加速器グループがモデル装置等を製作して準備研究を行い、体制を整えていました。1986年に池上新センター長のもとでリングサイクロトロンの建設が認められ高性能の加速器が完成し、1991年12月20日に最初の引き出しビームが得られました。完成後全国共同研究が始まり大きい成果が得られています。なお現在はリングサイクロトンへの入射加速器である現

AVF サイクロトロンを、高強度ビームの新加速器へ改造することによって全加速器系高性能化する計画が進行中のようです。表5にリングサイクロトロンの仕様が示されています。

#### 5. 終わりに

最後に敦賀市に創設された財団法人若狭湾エネルギー研究センターについて簡単に記しておきたいと思います。私が大阪大学を1994年に退職した後に、この研究所に勤務しないかとのお誘いがありました。原子力、放射線に関する基礎、応用に関する研究やそのための加速器の建設への協力でした。加速器は日立製作所製のタンデムバンデグラフを入射器としたシンクロトロンで、最大陽子エネルギー200 MeVです。垣花理事長、町田専務、清水所長の下で研究員、後に所長として勤務しました。この加速器の粒子線を用いて原子力、基礎物理、化学のみならず、がん治療を含めた医学研究、工学研究他の多分野の研究が関西をはじめとして全国的に行われました。阪大、高エネルギー研関係者の友人等も在籍し、私としては核物理研究センターにおける経験を活かすことができました。

この原稿執筆にあたっては板橋隆久、斎藤高嶺、森信俊平、浦城道男、依田哲彦、その他の多くの研究者の方々に資料収集、助言等でお世話になったことに感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 若槻哲雄先生退官記念事業実行委員会編：友垣：若槻哲雄先生退官記念，同記念事業実行委員会編（1980）。
- 2) S. Kikuchi et al.: Ann. Rep. Fac. Sci. Works, Faculty of Science: Osaka Univ. **3**, 1 (1955).
- 3) 三浦 岩, 山部昌太郎: 日本物理学会誌 **23**, 193 (1968).
- 4) 山部昌太郎, 山崎 魏: 日本物理学会誌 **26**, 29 (1971).
- 5) M. Kondo: "Recent Developments at the Osaka RCNP 230 cm Cyclotron and a Proposal for a New Ring Accelerator," IEEE Trans. Nucl. Sci. NS **26**, 1904 (1979).
- 6) T. Itahasi et al.: "Recent Developments of the RCNP AVF Cyclotron," Eleventh International Conference on Cyclotrons and Their Applications, Tokyo, Japan, October 13-17, (1986).
- 7) I. Miura et al.: Proc. of the 5th Symposium on Accelerator Science of Technology September, 1984, KEK, 403 (1984).
- 8) H. Ikegami, S. Morinobu, I. Katayama, M. Fujiwara and S. Yamabe: Nucl. Instrum. Methods **175**, 335 (1980).