

第1章

加速器科学

～原子核・素粒子の世界を究める～

20世紀に入って始まった量子論は、やがて原子核、素粒子の研究へと発展する。その研究の道具として誕生した加速器も大型化し高性能になって、今日では自然界の根元に迫り、宇宙の誕生から物質の創成に至る道筋を解き明かす研究に使われている。このような科学研究の流れの中で、理研は大きな役割を果たしてきた。

財団理研の研究活動が軌道に乗って来た時期は、原子構造の発見（1911年）に始まり、中性子の発見（1932年）、加速陽子による原子核壊変（1932年）、人工放射能（1934年）、核分裂（1938年）の発見が続いた時期である。理研では、大サイクロトロンの建設と並行して小サイクロトンによる原子核物理や生物学の研究を行い、また、朝永振一郎に代表される理論グループが研究を進めていた。

第2次大戦後、1952年に理研は駒込に小型サイクロトロンを再建し、さらに1966年には和光に重イオン加速を主目的にした160cmサイクロトロンを建設して、後に加速器科学と呼ばれる幅広い分野の研究を開始した。これ以後、理研の加速器科学研究は重イオンを中心に進められてきた。1986年、リングサイクロトロンを建設して放射性同位元素（ラジオアイソトープ；RI）をビームとして利用する技術を確立し、この分野で世界をリードする。さらに、1996年からは、重イオン核物理をさらに発展させるためにRIビームファクトリー建設計画を進め、新しい研究分野の開拓を目指している。

また、海外の大型加速器を用い、英国ラザフォード・アップルトン研究所にミュオン利用実験施設を建設（第Ⅲ編第5章）して「理研RAL支所」を設置し、さらに、米国ブルックヘブン国立研究所（BNL）の相対論的重イオン衝突器（RHIC）を用いてスピンの物理の研究を進めるために、1997年9月に「理研BNL研究センター」を設立した（第Ⅲ編第5章）。

なお、加速器科学の新しい発展として、大型放射光施設SPring-8（第Ⅱ編第2章）を建設し、広範な分野で利用研究を進めている。

第1節 理研の加速器－前史－

加速器の誕生

原子核の内部構造を調べその性質や挙動を研究する原子核物理学は、量子論の誕生から始まった自然界の構成要素を探求する人類の活動の第一幕である。原子核の存在を世界で

初めて実験的に証明した英国の物理学者、アーネスト・ラザフォード（1871～1937年）は、1919年に放射性物質から出るアルファ（ α ）線を窒素原子核に照射して酸素原子核に変えることに成功した。そして、「やがて人類は

「1枚の手紙」

ゲッチンゲンからボーアに宛てた仁科の嘆願

1998年11月、「ニールス・ボーア研究所」(NBI)にM・オレセン所長を訪ねた。かつて1920年代、仁科芳雄は大ボーアの庇護の下で、世界中から集まった若い俊秀らとともに量子物理学の創生に参加した。そのほぼ80年後、T・D・リー・センター長は、「理研BNL研究センター」をNBIのような影響力のある世界的研究拠点(COE)にしたいと宣言した。そうしたことを踏まえた訪問であった。

ところで、アーカイブ館長のF・アーセルドは『この手紙を知っていますか』と問い、「これは、仁科博士がボーアに宛てた最初の手紙です」と10数行の手紙を手渡して見せた。

そこには、『1年前にケンブリッジに見えたとき、私はキャベンディッシュ研究所で先生にお話をしました。昨年9月、ドイツ語を勉強するためにゲッチンゲンに来ており、コペンハーゲンで先生の

指導の下で研究することを切望しています。私の研究所は、2年以上の欧州滞在を許さないが、私の第一の希いは、先生の理論と原子構造の詳細を研究することであります。もし、だれかが実験や計算の手助けが必要なとき、喜んで手伝おうと思っています』と記されていた。

その手紙を受けて、ボーアは仁科の滞在費のために奔走し、幸いにも、エルステッド財団の奨学金を得、仁科を招聘したという。

こうして、幸運にも仁科は以後5年間、量子物理学を学び、「コペンハーゲン精神」(CG)を

体得して帰国する。後に、CGが「理研精神」に与えた影響も計り知れない。いま「理研精神八十八年」の編集に際して、改めて思う。やがて、理研史に奔流をなす「加速器科学」の幕をあけた、この「1枚の手紙」の重さを一。



荷電粒子を人工的に加速し、原子核破壊を起こせるようになるだろう」と予言する。その後、J・D・コッククロフトとE・T・S・ウォルトンは、1929年ラザフォードの指示の下に独自の電圧増幅回路を考案し、1932年には陽子を直流高電圧で加速してリチウム原子核の人工壊変に成功した。ちなみに、仁科芳雄は、

1920年「土星型原子模型」の提唱で知られる長岡半太郎の研究室に入り、1921年からヨーロッパに留学し、ラザフォードが所長を務めるケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所で1年間修行する。そして、1922年から1年間、独・ゲッチンゲン大学の滞在を経て、さらに1923年から5年間、量子力学のメッカ

といわれたコペンハーゲン（デンマーク）のニールス・ボーア研究所に滞在し、量子力学の成立に貢献した唯一の日本人である。

一方、米国・カリフォルニア大学のアーネスト・O・ローレンスは、1931年、粒子を円軌道に走らせて加速する円型加速器を考え出す。一様な磁場の中を高速に進む荷電粒子（イオン）は円軌道を描くが、その半径は速度に比例して大きくなり、1周する時間は速度によらず一定（等時性）になる。このことに気が付いたローレンスは、この原理に基づく新しい加速器を発明し、「サイクロトロン」と名づけた。仁科がサイクロトロン建設を計画したのは、これより僅かに4年後のことである。

なお、これより前にR・ヴィデレ（スイス）は、交流電圧で荷電粒子を加速する線型加速器を開発する。その後、1928年にヴィデレは3個の中空の円筒電極を直線的に並べ、全体を真空のガラス管の中に置いて隣り合う電極に交流電圧をかけ、ナトリウムイオンの加速に成功した。この場合、円筒電極の長さは速度に比例して長くする。ローレンスは等時性を発見してヴィデレの線型加速器の加速原理と組み合わせ、サイクロトロンを発明したのである。

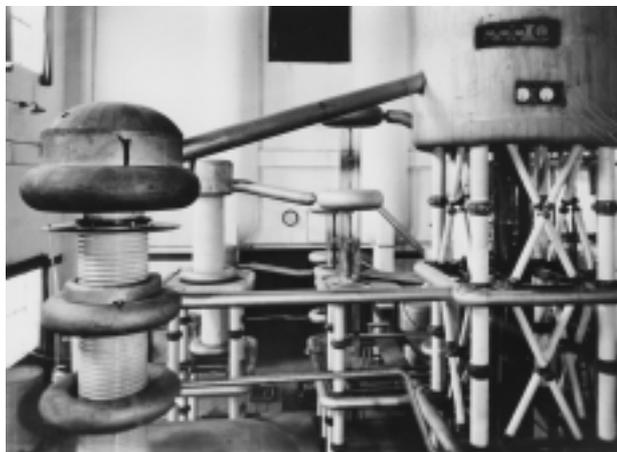
直流加速器は絶縁破壊という問題があり、装置の高電圧化には限界があった。また、線型加速器にはエネルギーが高くなるにつれてどんどん長くなるという問題がある。そのため、高エネルギー加速器はサイクロトロン、シンクロトロン、衝突器（コライダー）へと発展してきた。

理研の加速器

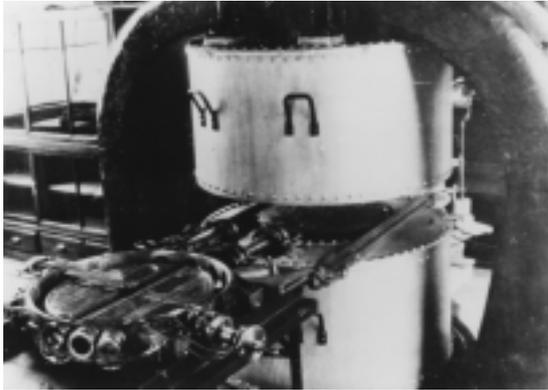
〈加速器事始め〉

理研では早くから量子論の研究が行われていた。西川研究室では西川正治主任研究員と菊池正士研究員が1～6万V（ボルト）に加速した均一エネルギーの電子で回折が起こることを発見して発表している（1928年）。仁科研究室は1931年に開設され、量子論、宇宙線、原子核物理学、生物学の研究を始めたが、すぐに300kVの高電圧装置をつくり、また、数百ミリキュリーのラドン-ベリリウム（Rn-Be）の中性子源を用意して、原子核物理と生物学の研究を行った。仁科研究室の最初の実験は、アルミニウムにラドン管からの α 粒子を照射して生成した燐の同位体（ ^{30}P ）の崩壊で出る陽電子を測ったもので、ジョリオ・キュリー夫妻による人工放射能の発見（1934年）と同じ年に発表した。

その後の発展は、1938年に大河内正敏理研所長の還暦を記念してまとめられた「研究室



理研の加速器研究のはじめは、コッククロフト・ウォルトン加速器



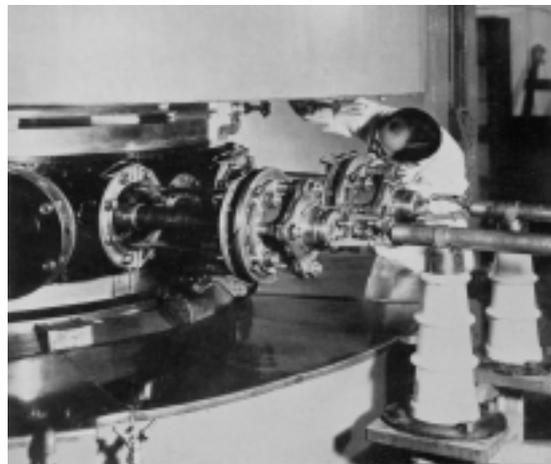
わが国初の直径65cmの電磁石を使った小型サイクロトロン（第1号サイクロトロン；1937年4月）

の既往業績」に詳しい。それによると、仁科研究室は西川研究室と共同して1935年に原子核実験室を整備し、原子核物理学、生物学、その他関連した問題の広範なる研究を意図して、重量100トン以上の電磁石をもつサイクロトロンと、100万V級のコッククロフト・ウォルトン(CW)加速器の建設を計画した。当時米国では、カリフォルニア大学バークレーのローレンスが電磁石200トンの大サイクロトロン建設を始めており、仁科も同様の計画を考えたのであろう。その準備として、仁科は、日本無線電信株式会社寄贈の電磁石（重量23トン）を改造して小サイクロトロンを製作することにし、1936年より設計に着手、1937年4月に完成させた。このサイクロトロンは300万電子ボルト（3MeV）で世界最高強度 50μ アンペアの重水素イオンを加速したが、これはわが国が開発した自動電圧安定化電源を用いた磁場の安定化技術の賜である。

日本学術振興会から大サイクロトロンの予算を得た仁科は、当時バークレーに留学して

いた嵯峨根遼吉（長岡半太郎の4男、理研主任研究員）からの情報で、米国の200トン電磁石と同じものを作ることを決め、ローレンスに依頼して材料を米国で購入し、石川島造船所に加工を頼んで1938年6月、その組立据付を終えた。また、真空チェンバーおよび加速電極は、石川島造船所と理研工作係で製作し、120kWの高周波発振器は東京電気無線株式会社で製作した。しかし、真空が良くならず、また、高周波発振器が難航してイオンが加速できなかった。

そこで仁科はローレンスのもとへ、矢崎為一（西川研究室、のちに山梨大学教授）ら3名を派遣した。日米関係は険悪になっていたが、矢崎らはローレンスの特別の計らいにより設計図を入手して帰国した。そこで早速、大サイクロトロンの改造を行い、1944年、16MeVの重陽子ビームを得ることに成功した。しかしこのサイクロトロンは使われることなく、1945年12月に進駐した米軍によって破壊され東京湾に沈められた。



完成間近の大サイクロトロン

一方、創設されたばかりの大阪帝国大学教授に赴任した菊池（兼理研・菊池研究室主任研究員）は、まずコッククロフト・ウォルトン装置を建設し、1937年には、理研とほぼ時を同じくして重陽子エネルギー4MeVのサイクロトロンを完成させた。しかし、関西のサイクロトロンも、京大で建設中のものを含めて、すべて進駐軍によって破壊された。

理研創立25周年（1942年3月20日）を記念してまとめられた「研究二十五年」は、原子核実験室の内部施設として、加速電圧1MVのコッククロフト装置、重陽子エネルギー3MeVの小サイクロトロン、同じく15～20MeVの大サイクロトロンがあり、さらに長岡半太郎主任研究員が主宰する長岡研究室杉浦義勝研究員の実験室に0.8MVのコッククロフト装置、西川研究室に0.3MVの加速器が整備されているほか、阪大に付置された菊池研究室には0.6MVのコッククロフト装置と重陽子エネルギー5MeVのサイクロトロンがすでにある、バンデグラフ加速器を建設していると記している。

〈加速器科学研究の誕生〉

第2次大戦前の理研では、6月と12月に全研究室が最新の

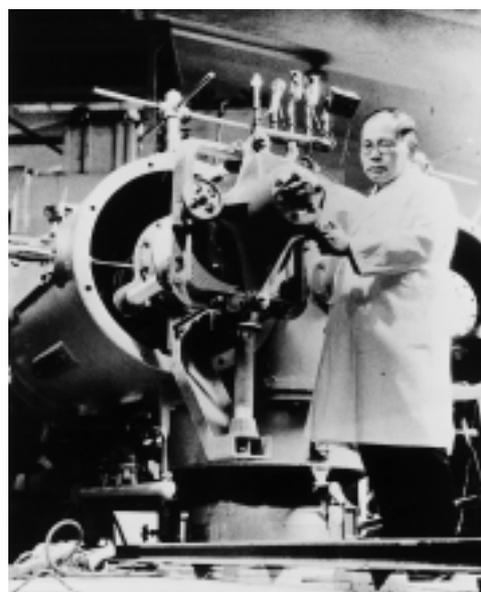


加速器研究棟群（右奥が、電源室やサイクロトロンの研究室の35号館、左奥が、コッククロフト加速器の研究室の37号館、手前は、蓄電池室の39号館）

研究成果を発表する「理化学研究所学術講演会」を開いていた。「理化学研究所彙報」に収録されているそのプログラムと講演要旨から、当時理研で行われていた研究内容をうかがうことができる。なお、阪大の菊池研究室



仁科が自ら指揮し、組み立てた大サイクロトロン（1938年に組み立て据付を完了するが、高周波発生器の真空に問題が・・・）





大サイクロトロンは、16MeVの重陽子ビームを発生させる（1944年）。(完成を祝って記念撮影。前から2列目、左から6人目が仁科芳雄、7人目が長岡半太郎、前列に座っている左から6人目が嵯峨根遼吉)

も学術講演会で毎回発表しているが、そのメンバーである青木（熊谷）寛夫が、後に理研の第4号160cmサイクロトロンの建設を主導することになる。

理研の加速器利用研究は、中性子の散乱／吸収、人工放射能、生物実験に分けられていた。原子核研究では、中性子散乱断面積／中性子非弾性散乱の系統的測定、重陽子照射あるいは中性子照射による新同位元素の生成と半減期／ベータ（ β ）線スペクトルの測定のほか、対称核分裂の発見などが著名な成果である。また、木村一治（後に東北大教授）は、散乱体が単結晶であるか否かで緩中性子の散乱強度が変化することを見いだしている。一方、生物／化学の研究では、中性子の動物、植物への照射効果、 ^{24}Na による植物の吸収や動物の新陳代謝の研究、蚕卵における産卵後の感受性の時間変化、 ^{13}N を用いた窒素置換反

応の研究など、注目すべき研究が行われた。

仁科のサイクロトロン計画は、戦争によって前段の小サイクロトロンを用いた研究で成果を上げた段階で幕を閉じたが、この夢は戦後に引継がれていく。とくに「世界最先端の加速器を建設し、幅広い研究（加速器科学）でパイオニアの仕事をする」という仁科の信念は、その後、1986年完成のリングサイクロトロン、1997年完成の大型放射光施設SPring-8となり、現在の「RIビームファクトリー（RIBF）」計画となって生き続けている。

設SPring-8となり、現在の「RIビームファクトリー（RIBF）」計画となって生き続けている。

破壊されたサイクロトロン

大サイクロトロンが完成したころ、日米の戦局は悪化の一途をたどっていた。空襲で理研が被弾するなか、小サイクロトロンは、破損して運転不能に陥ったが、大サイクロトロンはほとんど無傷で生き残り、戦後の日本の原子核物理研究を牽引するはずであった。しかし悲劇が起こる。

連合軍司令部（GHQ）で働いていたポーエン・C・ディーズ（物理学）が、多くの未公開史料に基づいて著した「占領軍の科学技術基礎づくり」に次のように記している。

1945年11月に強行された連合国による日本占領期における4基のサイクロトロン（理研

2、京大1、阪大1)の破壊ほど、一般から非難された間違いはなかった。そして、その中で、最も重要なのは理研の大サイクロトロンであった。終戦直後、原爆調査団をはじめ多くの調査団が理研を訪問したが、いずれの調査団も仁科の無傷の大サイクロトロンは使用することを許可されるべきであると報告した。同年10月15日、仁科は、連合軍最高司令官ダグラス・マッカーサーに書簡を送り、「サイクロトロンを生物学、医学、化学、冶金学で使用するための中性子や放射性物質を製造、検査」するために使うつもりだと書いた。10月20日、GHQ経済科学局産業課長ジョセフ・A・オハーン少佐は「仁科の要請は受理しても安全であり、仁科の研究は科学全般にいくらか価値があると考えている」として



東京湾の4,000フィートの海底に沈められたサイクロトロン（全米の科学者が憤激し抗議…）

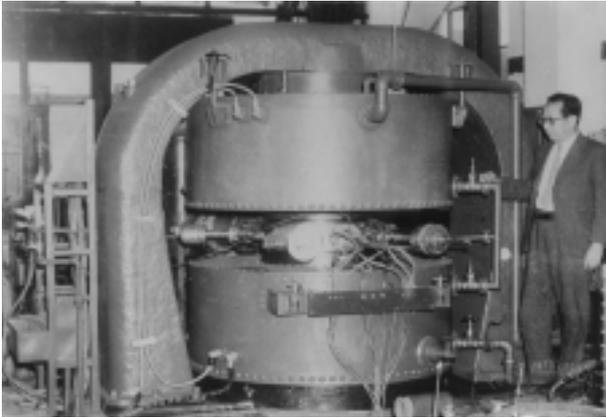
許可した。

しかし、その1週間後に事態は違う方向に向かった。そして、「化学、冶金学においてではなく、生物学、医学の分野においてのみ許可する」とし、「この決定に関して意見を求めるために、問題全体がワシントンに照会される」と述べた。10月31日、「原子力または関連問題のすべての研究施設は押収され、研究従事者は拘留され、研究活動は許可されない」という極秘無電文が、統合参謀本部からマッカーサー宛に送達された。

11月9日、さらに「特定の人物のみが閲読可能な」特別極秘防護無電文（10月31日付W79907）を受け、GHQ参謀長は、経済科学局長レイモンド・クレマー大佐に対して「すべての技術的、実験的データが確保された後、理研、京大、阪大のサイクロトロンは破壊されること」との命令を出した。

そして、11月24日朝、理研の2つのサイクロトロンの解体は、第8軍支隊によって開始された。ただちに、その状況については、星条旗誌（The Stars and Stripes）やライフ誌をはじめ多くの報道が伝えた。その中でとくに、ニューヨークタイムズ紙による「原子爆弾製造施設であるサイクロトロンを破壊した」との報道に対し、全米科学界やオークリッジでマンハッタン計画（原爆開発）に従事していた科学者たちが猛然と憤激し抗議した。すでに「仁科サイクロトロンによる研究の継続は許可されるべきである」と報告していた調査団長カール・T・コンプトン（MIT学長）らも抗議した。

その後、だれが破壊を命じたか、陸軍省は、



第1号サイクロトロンの子備の電磁石を使って再建した第3号サイクロトロン（電磁石の大きさは65センチメートル、破壊を免れた部品を集め、医療用短寿命RIの製造や高分子の中性子効果などの研究に活用）



マッカーサーに責任を押しつけたが、その後、陸軍長官パターソンは、特別極秘無電文による「破壊命令発出の責任」を認めた。しかし、「長官名義の無電文は自分が知らないうちに出了のであり、間違いであり・・・それは不幸な出来事であった」と語った。後に、マンハッタン計画の責任者レスリー・R・グローブス中将は、長官名義の無電文の起草を認めたが、それはサイクロトロン問題の協議の中で部下の一参謀の誤解によって作成され、自分の知らないうちに長官宛に送達されたと語っている。もし、11月24日付の「破壊開始」を伝えるマッカーサーからの無電文を見ていたら、破壊は即座に中止されていただろうと、グローブスは書いている。では最終的に、パターソン長官配下のだれがマッカーサー宛のこの極秘無電文の急送を許可したのか、不明だという。

解体に立ち会った田島英三（仁科研究室、のちに立教大教授）は、「7、8年手がけ、よ

うやくビームが出てこれから実験というときに。自分の手が切られる思いだった」と、当時の心境を語っている。

サイクロトロンの再建

その後、GHQにより理研も解体されるが、その直前、第4代理研所長に就いた仁科は、株式会社化により理研（科学研究所に改称）を存続させ、その復興に骨身を削るが、1951年（昭和26年）1月に逝去する。その4ヵ月後、理研のサイクロトロンの歴史が再び動き出した。

その年、突然わが国を訪れたローレンスは、サイクロトロンによる研究を促すとともに、とくに理研には小サイクロトロンの再建を勧めた。そこでサイクロトン建設の経験がある理研と阪大が名乗りを上げ、理研は第1号サイクロトロンの子備として残されていた電磁石を使い、通産省から鉦工業助成金600万円の交付を受けて1952年12月、磁極直径65cm

の第3号サイクロトロンを完成させた。建設費総額は1,172万円で、**杉本朝雄**（主任研究員、後に原研理事）が建設を主導した。このサイクロトロンは短寿命RIの生産を主目的としたもので、高周波源など第1号サイクロトロンをほとんどそのまま踏襲している。なお、同サイクロトロンの真空チェンバー（加速電極ディーを含む）が国立科学博物館（上野公園）に展示されている。一方、阪大の110cmサイクロトロンは1954年に完成した。

第3号サイクロトロンは、大和町移転の直前までの10余年間、破壊を免れた部品のバラックセットながら何とか持ちこたえて運転を続け、主として ^{24}Na など医療用短寿命RIの製

造、あるいは高分子化合物における中性子の放射線効果の研究に活用した。本格的な核物理の研究に用いることはほとんどなかったが、RIの ^{15}O （半減期122秒）などを作り、国立中野療養所の患者に対して肺機能検査に用いる研究が進められた。これは今日の核医学の走りといえるものであった。

1958年、特殊法人として再発足した理研は、初代理事長・**長岡治男**（長岡半太郎の長男）のもと、第4号サイクロトロン（160cmサイクロトロン）の建設に取り組むことになる。この第4号サイクロトロンは仁科の大サイクロトロンと同規模のものであり、理研再建のシンボルとして長岡が強く推進した。

第2節 特殊法人化以降の取り組み

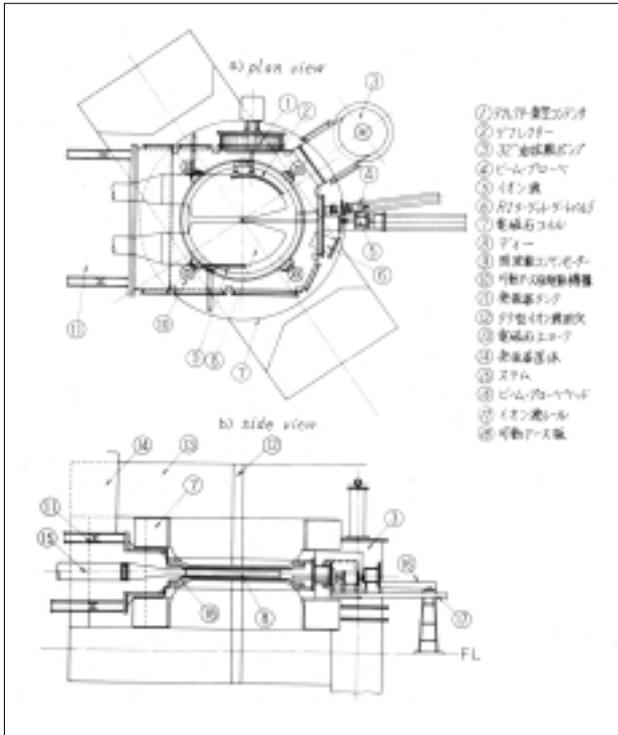
160cm（第4号）サイクロトロン

理研再興のシンボル

長岡は、当初から「サイクロトロンを持たない理研は考えられない」と語り、大型サイクロトロン施設を理研の物理系分野の1つの柱とする抱負を示していた。1958年、特殊法人として再発足した理研は、新天地・埼玉県北足立郡大和町（現・和光市）に理研再興のシンボルとして第4号サイクロトロンの建設を打ち出した。磁極の大きさから「160cmサイクロトロン」と呼ばれたこのサイクロトロンは、1962年に建設が始まり1966年10月に完成した。同様に、仁科の大サイクロトロンは「60インチサイクロトロン」と呼ぶことがある。

160cmサイクロトロンは、第5号になるリングサイクロトロンの建設完了に伴って1990年に運転を停止した。その総運転時間は、高周波加速装置が9万9,753.5時間、イオン源が10万6,148.4時間であった。その後、9年間保管されたあと、RIビームファクトリー計画が始まったので、1999年春、160cmサイクロトロンは、その建物共ども解体撤去された。敗戦後ゼロから出発した理研の加速器科学研究を再び世界と肩を並べるところまで引き上げ、名実共に理研再興のシンボルとなる役割を果たした。その大なる役割を記念して、電磁石の本体部分が和光本所内の一角にモニュメントとして展示されている。

以下に、160cmサイクロトロンの建設から



磁極の大きさから160cmサイクロトロンと呼ばれた第4号サイクロトロン設計図

リングサイクロトロン建設に至る歴史をたどりながら、理研の加速器科学研究が世界の主要研究拠点になるまでの軌跡を明らかにする。

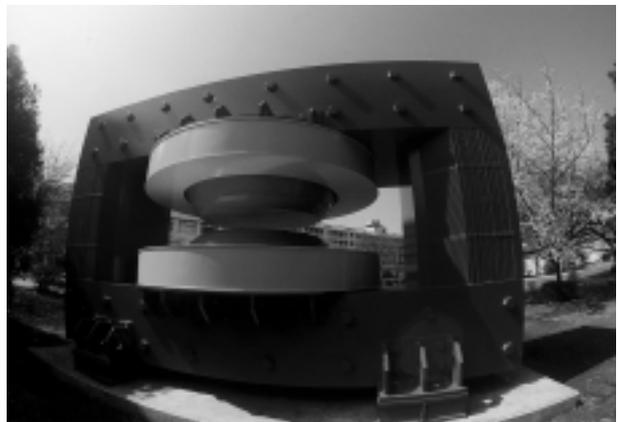
原子核研究の新しい息吹

1952年4月に連合国との講和条約が発効し、わが国で原子核研究ができるようになると、全国規模の大型加速器を建設する計画がもち上がった。1954年に原子核研究所（核研）設立準備委員会が発足、翌1955年に東大付置の全国共同利用研究所として設立された。核研が最初の加速器として建設した160cm可変エネルギー・サイクロトロン（FFサイクロトロン）は、1953年から設計を始め1957年に完

成した。核研の初代所長は菊池で、熊谷をサイクロトロン建設の責任者にして真田順平、松田一久らを集めて新しいサイクロトロンの設計研究を始めた。仁科の60インチサイクロトロンとほぼ同規模であったが、世界で初めて可変エネルギー型にし、さらに周波数変調（FM）型に転換して陽子をより高いエネルギーに加速できるようにした。サイクロトロンの完成後、核研は中間エネルギー共鳴現象の発見など数々の成果を上げるとともに、多くの人材を育てた。

一方、理研は特殊法人化から3年後の1961年（昭和36年）秋から、所内外の学識経験者を含めた「サイクロトロン専門委員会」を設置し、新サイクロトロンの検討を始めた。この委員会（熊谷委員長）¹⁾には、所内から6名の主任研究員*と所外からは菊池、熊谷など6名の学識経験者が参加し、新サイクロトロンのコンセプトを検討した。

理研では当初、設計目標として、FMサイクロトロンによる陽子加速、あるいは各国が



再建・新天地和光へのシンボルとして大役を果たした160cmサイクロトロン本体。和光キャンパスのモニュメントになっている

建設を開始していたAVF型による陽子、 α 粒子など軽イオンの加速も検討した。ところが理研には、サイクロトロンあるいは大型加速器の経験者²⁾が少なく、殆どゼロからの出発という状態だったので、委員会は次のような新サイクロトロン建設の基本方針を立てた。それは理研の特長を生かすために、①新サイクロトロンは、核研のFFサイクロトロンと同様のものとし、重イオン加速が可能なものにする（わが国で最初）、②多目的型とすること（理研には加速器を広い分野の研究に用いる伝統があり、160cmサイクロトロンは原子核研究以外にも利用可能にする）、③中心となる技術は自己開発することであった。この時点で重イオン加速を決めたのは英断で、当時は、重イオンが将来原子核研究の主要な手段になるとは誰も想像していなかったであろう。



サイクロトロンの建設現場から眺めた理研の敷地（わずかに、本館研究棟（第1期、2,000坪）が建っただけであった）

こうして理研の新サイクロトロンは、世界最後の従来型サイクロトロンになったが、多目的利用と重イオン加速で、1970年代のわが国の加速器科学を担うことになる。

- 1) 菊池、熊谷、千谷利三*、橋口隆吉*、野中到、齋藤信房*、瀬藤象二、篠原健一*、菅義夫*、柘植芳夫、山崎文男*
- 2) 主要メンバーは小寺正俊（東工大）、唐沢孝（核研）、元永昭七（理研）



サイクロトロン本棟の建設現場



準備研究から建設開始へ

1962年6月、核研の熊谷教授を兼任主任研究員とするサイクロトロン研究室が発足し、放射線研究室（山崎主任研究員）と共同してサイクロトロンの設計および工程案の作成作業を開始した。また、松田（核研）ほか4名の専門家³⁾を研究囑託として招き、技術上の相談相手とした。

熊谷は、サイクロトロンの建設チームを数個の



サイクロトロンコントロール室



主電磁石を奥にした本体



磁場測定中の主電磁石

グループに分割し、各グループには責任者を決めて、必要に応じて研究開発を行いながら設計を進めた。こうして放射線研究室から移

籍した人も含めた10名近くのサイクロトロン研究室のメンバーは、自由な雰囲気の中で、核研の設計資料や運転経験等を参考にして設計研究を進め、予算が認められた際に直ちに発注できるように準備した。

1962年度（昭和37年度）予算に、総額約12億円のサイクロトロン計画全体が5ヵ年計画で認められた（ちなみに理研の1963年度認可予算は13億円である）。建設チームの大半は

駒込キャンパスで設計作業を続けたが、わが国ではじめての重イオン加速のために、サイクロトロン本体の建設予算2億7,000万円に対して9,000万円を準備研究（設計試験用設備）にあて、重イオン源

テストベンチ、共振系と3分の1モデル電磁石などを作った。これらを初年度末には移転先の和光地区に完成する物理実験棟に据え付けて使用する計画であった。

1963年3月30日付で懸案の和光地区の移転が政府決定され、同年度から建物建設を開始した。サイクロトロン建物の建設は、1964年度から和光地区に建設が始まったが、なかでも物理実験棟の使用が急がれたので、理研にまだ引渡しが済んでいない段階で1965年2月にモデル電磁石と重イオン源テストベンチの据え付けを強行し、設計研究を始めた。

サイクロトロン本体の契約は、1963年春に日本原子力事業（瀬藤社長：専門は電気工学

で長らく理研の主任研究員を勤めた」と結ばれた。同社は東芝の子会社で、設計と製作は東芝の鶴見工場をメインに、小向工場（発信器）、府中工場（制御）などが分担した。加速器建設にあたってメーカーと建設チームとの打ち合わせが2年以上にわたってほとんど毎週行われた。東芝は核研サイクロトロンを製作したので、今回は「設計図の多少の手直しで製作可能」と考えたようであったが、実際には新加速器の開発と同様に多くの技術的問題が生じ、「可動アース板」のように実物大のモデルを作って試験をした後に実機を製作することもあった。

この時期には、松田が核研から理研に副主任研究員として移り、サイクロトロン建設の中心的役割を果たす。また、建設要員も増加し、本格的な共同利用が始まった1968年（昭和43年）には、サイクロトロン研究室は総数30名の大研究室になっていた。

3) 真田、佐治義夫、馬場明、林巖雄

和光キャンパスの最初の住人

当時、稼働している重イオン源は、世界でも数少なく、基礎的な技術開発が求められたので、**河野功**を中心とするイオン源グループは、サイクロトロン本体の工場製作に並行して、重イオン源開発を行った。一方、サイクロトロンで重イオンを加速するために本体電磁石の磁極を改良する必要があった。そのため、元永らは3分の1モデル電磁石を使って、基礎データを測定し電磁石の設計を進めた。この2チームが和光キャンパスの最初の住人で、トイレもない物理実験棟で日夜研究開発



全重量350トンの主電磁石据付けが完了（磁場測定を終えて総合組立てへ）

に従事した。

重イオン加速には、電磁石、加速高周波発振器、重イオン源などと克服すべき多くの技術的課題があった。磁石系では、磁場の可変範囲を、陽子の加速に使用される0.4テスラから重イオン加速に必要な2テスラまでに広げるために、テストベンチで取った基礎データを基に磁極形状を最適化し、さらにトリムコイルを取り付けて補完した。また、高周波系は小寺のグループが担当し、4分の1波長型共振器に大電力自励振発振器を取り付け、周波数微調整のために可動アース板を開発するとともに、重イオン加速に必要な高電圧を発生させることに成功した。このほかにも多くの技術開発を行ったが、例えば、インターロック系に電話用リレーや電磁コンダクターを初めて使用して、制御操作ユニット回路の互換性を確保し故障の検出と修理を容易にしたこと、また、高周波発振器の450kW電源や偏向/集束用磁石系の電源も半導体化を進め、これによって装置の高信頼化を実現したこと

などである。なお、わが国初のヘリウム3 (^3He) 加速も計画して、 ^3He の循環回収装置も開発した。

1965年秋には全重量350トンの電磁石が、コンクリートの臭いも抜けないサイクロトロン棟に搬入された。建設チームの全員が和光キャンパスで建設作業に従事し、磁場分布の最終測定が終わると直ちに総組み立てを行った。引き続いて高周波発振器の試運転が夜を日に継いで実施した。ところが、和光キャンパスには、サイクロトロン関係者以外の住人はほとんど居らず、近くに食堂がないためプレハブの建物に専用の食堂を設置し、また、夏のバーベキュー、年末の餅つきなどの行事も行った。以来約40年、この2つの行事はにぎやかに行われ、谷の西側（研究本館）の住人たちをうらやましがらせた。

製作費が大幅予算超過

こうして、サイクロトロン専門委員会と各担当グループによる検討は順調に進行して行った。長岡は「先生方は、おカネの心配はしないで、世界一を作ってください」と号令を發した。いきおい議論は白熱化し、理研サイクロトロンの性能、設計仕様を同年度内に決定するに至らなかった。そうした状況を踏まえて、長岡は、NAIG（日本原子力事業）への発注を「基本契約」と「個別契約」の2本立てで行うこととした。基本契約書は、きわめて巧妙に「理研とNAIGは、東芝による核研サイクロトロン製作に関する技術的経験、実績を踏まえて、3者は緊密な連携の下で、世界最高性能のサイクロトロンの建設を達成

するために研究開発、製作を進めるものとする」と定めた。

したがって、主電磁石、加速電極、共振系、真空・制御系等々の各部分に関する個別契約では、それぞれの性能、設計仕様を核研サイクロトロンを基本とした概略仕様とし、また、請負金額については認可予算額（債務負担行為の額）と同額をもって概算契約額として発注した。そして契約後に、早期に詳細設計仕様等を確認し、詳細見積りを徴して契約額を確定することとした。

ところで、専門委員会と各グループによる検討の結果、性能、設計仕様は、予想どおり拡大膨張を続け、数々の特色をもった「理研160cmサイクロトロン」の最終的性能仕様がまとまってきた。核研サイクロトロンで大赤字を出していた受注側2社は、請負金額内での製作が極めて困難であると不安、警告を發した。そうした中、移転建設事務室長の田中武雄は、NAIGに早急に見積書の提出を求めた。当時、わが国の経済状況はきわめて悪く「どん底景気」に突入し、東芝は無配欠配に陥り、巷間、I社に吸収されるとの噂さえ囁かれていた。諸状況は悪化を続け、契約時に民間出身理事長、長岡がひそかに期待した、いわば大乘的赤字解決策が許せるような客観状況ではなかった。

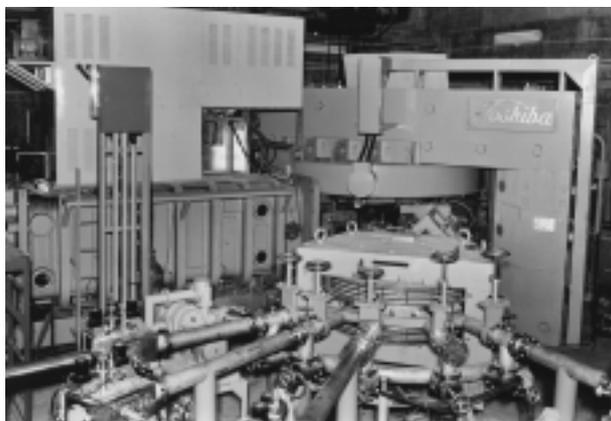
果たせるかな、提出された見積額は認可予算額の2倍を超えた。しかし、理想に燃えていた各担当グループは安易な性能仕様の削減を拒否。以後、移転建設事務室はNAIGに原価計算書を提出させ、研究陣と共同で工賃、材料単価、工数について詳細に点検、折衝し

た。これを数次にわたって繰り返し、赤字解消に向け格闘した。他方、請負契約における中間出来形払いの支払限度額に関する大蔵省への省令等の調査、折衝を経て、値引き交渉を行った。また、可能なものについては、所内工作利用により製作費の削減も行った。

こうして、新天地和光へのシンボル、最初の大プロジェクトであった「理研160cmサイクロトロン」の所期の性能、設計仕様を、熊谷をはじめとする研究陣と事務が一体になって奮闘し、認可予算の範囲内で辛うじて、しかし見事に確保したのだ。その陣頭で辣腕をふるった田中は、長岡が発した号令「世界一のサイクロトロン製作」の夢の実現に向けて奮闘し、やがて2期8年の任期を終える長岡への饞に間に合わせた。

ビーム加速に成功

160cmサイクロトロンは、当初、1966年3月末に「総合組立て、調整」を確認して完成とし、引き渡される予定であった。しかし、



1966年10月4日にファーストビーム(陽子)加速に成功し、160cmサイクロトロンは完成

陽子ビームの加速をもって完成とすべきであるとの長岡の指示が出される。そして、10月4日、初めて陽子ビーム加速に成功して完成を見た。この2週間後の10月20日付で長岡は理事長を退任した。

建設グループは、1966年10月4日に陽子の加速に成功したあと、引き続いてヘリウム3を加速した。その頃の作業の進捗振りをスケッチすると次のようになる。ヘリウム3の加速成功後、外部ビーム取り出しと方向決定の調整および一部の手直しを行い、65MeVの窒素ビーム加速にも成功した。さらに、ビーム輸送系や実験装置の建設も急ピッチで進めて利用実験の準備を整え、1967年2月から24時間運転を行って、試験的に幅広い分野の共同利用を実施した。1967年12月から翌年3月まで、マシンタイムを再び中断して改造を行い、陽子20MeVを除いて重陽子25MeV、 α 粒子50MeV、重イオン120MeVの初期の目標を達成した。さらに、集束磁気チャネルを開発して取り出しビーム強度を3~5倍にして本格的な共同利用を開始した。

一方、重イオン源の改良は、テストベンチで続けられた。数時間で消耗する電極の寿命を延ばすために、イオン発生部の形状や材質の検討が試みられ、主要部分がグラファイトで作られていた重イオン源を水冷式の全金属製に改良して、長寿命化に成功した。

運転開始当初は、週番、当番オペレーター、夜番を置き、全員が交代で運転に当たりながら、サイクロト

ロンとビーム輸送系、実験装置の建設、調整、修理改善などの作業に従事し、研究も行っていった。ところが、性能の向上が一段落し共同利用が軌道に乗るにつれて、主に研究に従事するグループと装置の運転維持改善を主にするグループに分かれていき、前者は研究成果を上げることに重点を移した結果、定常運転に問題が生じてきた。

そこで、安定的な運転を日常的に確保するため、技術グループが「改善作業」を行うことにした。1972年から74年までの2年半にわたり、宮沢佳俊、逸見政武を中心に技師／オペレーター12名が「改善グループ」を結成し、「機器、部品の規格化と信頼性の向上」を目指した作業を行った。その効果が実り、1年間のビーム時間が5,000時間を越えるようになり、これ以降のサイクロトロンの安定運転と、それに基づく性能向上に計り知れない貢献を

した。

総合研究の展開

1966年度から、サイクロトロン研、放射線研、核分析化学研、生化学第一研、放射線生物学研、放射線化学研、金属物理研、磁性研の各研究室と安全管理室が参加して、原子力特別研究「160cmサイクロトロンによる総合研究」が発足した。理研では1学問分野に1研究室という伝統的な研究室制度があり、サイクロトロンの利用研究に参加した各研究室はそれぞれの専門分野での研究を進めていた。しかし、サイクロトロン研究室のみは加速器・原子核物理研究を行うのに加えてサイクロトロンの運転・維持管理も担当した。なお、所外利用は1969年暮れから始まった。

「160cmサイクロトロンによる総合研究」は1982年度をもって終了し、翌年度からは「重イオン加速器による総合研究」と合わせて「重イオン科学総合研究」が発足した。

サイクロトロン全体の運営は所内の運営委員会が大綱を決め、マシンタイム委員会が研究テーマ検討とビーム利用時間の配分を行った。委員には利用グループの中心的人と加速器運転の責任者がなっており、マシンタイム配分はいつも真剣なやり取りの連続であった。当初、マシンタイム配分の大綱として、「利用分野を原子核物理、それ以外



完成したサイクロトロンとともに、サイクロトロン研究室員による記念撮影
(1966年：中央、背広姿が熊谷主任研究員)

の分野、RI生産の3つに分類し、それぞれに3分の1のマシントイムを割り当てる」ことにしたが、故障が多いこともあってこの原則を維持するのが難しく、1ヵ月（4週間）のマシントイムは、原子核実験に半分、それ以外の分野およびRI生産はそれぞれ4分の1ずつとなった。その後、改善グループの努力が実って安定運転が実現すると、マシントイム配分も定常的に推移するようになった。

本格的な利用段階へ

1971年3月末で熊谷がサイクロトロン研究室主任研究員を定年退職し、松田が次期主任研究員に就任する予定であったが、直前の3月29日に不慮の事故で死去した。主任研究員会議は、急遽「選考委員会」を開催して、仏国サークレ研究所に長期出張から帰国したばかりの上坪宏道を後任の主任研究員に推した。1971年7月に就任した上坪は、160cmサイクロトロンで優れた成果を挙げるための方策として、①重イオンを用いた研究に重点をおく、②実験の質と効率を上げるためにサイクロトロンの安定化を目指した「改善作業」を進める、③室員はサイクロトロンの運転・維持・管理、加速器技術開発、原子核研究など主業務を決めて責任を明確にする、④サイクロトロンを積極的に外部の利用に供することを決めた。この結果、既に述べたように、改善作業は成功して年間ビームタイムが5,000時間、重イオンは4,000時間に達したほか、次期計画や超小型サイクロトロンの開発など、新しい技術開発が本格的にはじまった。

160cmサイクロトロンは「重イオン科学」

を中心に本格的な利用段階に入り、新しい時代を拓いて行くことになった。

外部に開かれた理研加速器施設

外部の共同利用／共同研究が始まる

1960年代の後半から10数年間は、わが国の原子核研究にとって厳しい時期であった。1957年に完成した核研FFサイクロトロンは老朽化してFMサイクロトロンに切り替わり、50MeV陽子を用いた研究を行ったが、ビームタイムが不足していた。一方、理研では160cmサイクロトロンで重陽子、ヘリウム3、 α 粒子を用いた研究を進めており、また、重イオンを用いた原子核物理研究を活発に行っていたので、多くの大学や研究機関の研究者が理研サイクロトロンを利用して研究を行った。そのうえ、理研は、1971年に当時わが国で最も高性能な大型コンピューター（FACOM 230-75）を導入、多くの理論研究者が利用するようになり、理研は急速に全国共同利用研究所的な役割を果たすようになった。

最初の外部利用は、東大理学部山崎敏光教授のグループによる原子核の磁気能率測定の研究である。その後、陽子など軽イオンを用いたスピン反転など原子核反応機構の研究に多くの大学の研究者が参加した。さらに、重イオン核反応の研究が理研サイクロトロンの主要な研究テーマになるにつれて、共同研究に参加する外部研究者が増加してきた。所外研究者のサイクロトロン利用率は、1968年から1971年までは20～30%であったが、1972年から以降は40～50%になっている。

新しい研究の花開く

160cmサイクロトロンの特徴は、ヘリウム3と重イオンの加速であり、ヘリウム3と重イオンの散乱／核反応を積極的に研究した。一方、 α 粒子はインビーム分光学の研究のほか材料照射に用いた。

ヘリウム3の加速は、まだ珍しく、弾性／非弾性散乱や核子移行反応を精力的に行い、多くのデータを得たが、とくに核分析化学研究室の野崎正副主任研究員らが行った高純度半導体中の不純物（炭素、窒素、酸素）の放射化分析は、国際標準となる基礎データを出して世界的に高い評価を受けた。この業績で野崎は、1975年に科学技術庁長官賞（研究功績者）を受賞した。

カリフォルニア大学バークレー研究所（LBL）で、イオンビーム分光法を用いて核磁気能率の測定に成功した東大の山崎は、帰国後も理研で実験を継続することにし、 α 粒子を用いて研究を発展させた。後に山崎は一連の研究の成果である「原子核磁気能率における中間子効果の発見」により学士院恩賜賞を受賞する。ちなみに、当時大学院生として理研に滞在し、この研究で大活躍した永宮正治は、後年、東大を経て米国のコロンビア大学の教授となり、ブルックヘブン国立研究所（BNL）の超高エネルギー重イオン加速器RHICにおける研究プログラムを主導し、現在は高エネルギー加速器機構（KEK）と日本原子力研究所（JAERI）の共同事業である大型加速器施設（J-PARC）の建設計画を指揮している。

1970年代の中期を迎え、重イオンを用いた

核物理研究が活発になると、世界的に注目される成果が続々と得られるようになった。まず、野村亨らの行ったインビーム α 分光法は、重イオンと原子核の衝突で生成される複合核から生じる短寿命状態の α 崩壊を調べる方法として注目され、これにより多数の α 崩壊核が新たに見いだされた。

野村らは、さらに、複合核反応の研究を進め、前平衡状態として高速の α 粒子を放出するホットスポットが形成されることを明らかにした。野村は、リングサイクロトロンの設置に当たり、この現象を利用した超重元素の新しい生成法を提案し、超重元素研究を開始するが、これが、後々、原子番号113元素の生成に成功する研究のきっかけとなった。また、河野、上坪らは筑波大学の三雲昂教授のグループと共同で重イオン多核子移行反応の系統的な研究を進め、断面積に関する実験則を明らかにした。

一方、石原正泰、稲村卓、上坪らは、ガンマ（ γ ）線の多重度から残留核の角運動量を決定する方法を提案し、疑似弾性散乱や深部非弾性散乱などの大質量移行反応（マッシュプトランスファー反応；入射重イオンが標的核との衝突で2つに分かれ、重い方が吸収される原子核反応）の反応メカニズムの研究に新たな方途を拓いた。この研究の過程で発案した大質量移行反応を用いたインビーム・ガンマ線分光法も、世界的に注目され、原子核の回転や振動を調べる有力な手法として一世を風びした。この手法は、直接反応として大別される反応群にインビーム・ガンマ分光法を適用した最初の試みであるが、現今、こうし

た方式は、リングサイクロトロン等における高速RIビームを用いた核構造研究において、最も威力のある分光法の1つとして盛大に利用されている。

さらに、石原、上坪や**旭耕一郎**（現東工大教授、理研旭応用原子核物理研究室主任研究員）らは、阪大**杉本健三**教授（後に東大核研所長）との共同研究により、大質量移行反応の残留核がスピン偏極する現象を発見し、そのメカニズムを解明するとともに、それを用いた原子核のスピン偏極法を確立した。この偏極法はリングサイクロトロンの登場とともにさらに発展し、今日では、容易で普遍的な不安定核のスピン偏極法として定着し、核モーメント等の研究に広く供されている。

160cmサイクロトロンにおける、このように斬新で多彩な重イオン核物理研究は、1970年代の中期から後期にかけて一気に開花した。これらの成果は世界的にも高く評価される処となり、重イオン核物理分野で世界をリードする研究所の1つとしての、理研の地位が確立した。160cmサイクロトロンの成果は、また、従来、軽イオンに偏重してきた日本の核物理研究分野に巨大な一石を投ずることになり、重イオン研究に対する国内の関心が急速に増大し、後に登場するリングサイクロトロンなどの大型重イオン加速器を待望する機運が高まった。

160cmサイクロトロンによる重イオン研究は原子核分野に限定されたものではなく、広く多分野で進められた。その典型は原子物理分野の研究で、**栗屋容子**（放射線研究室、後に原子過程研究室）らにより多価イオン衝突

による内殻励起の研究が精力的に進められた。このほか、磁性研究室の**坂井信彦**、金属物理研究室の**塩谷巨弘**らは、サイクロトロンで作った短寿命RIを用いて、陽電子消滅法や γ 線角度相関法による物質研究を発展させた。また、金属物理研究室の**坂入英雄**らは α 粒子や重イオン照射による金属の放射線損傷の研究で、放射線化学研究室、放射線生物研究室は重イオンのLET測定や重粒子照射の生物効果の研究で成果を挙げてきた。

こうした多分野での研究の進展は、重イオンビームが応用・学際研究の幅広い分野で極めて有用であるとの認識を強く惹起させるもので、後に、日本原子力研究所が、高崎研究所にイオン照射研究施設TIARAを設立し、高速イオンビームにより生物・物質・材料等に特化した研究を展開するに至る流れにも、有力な契機を与えた。

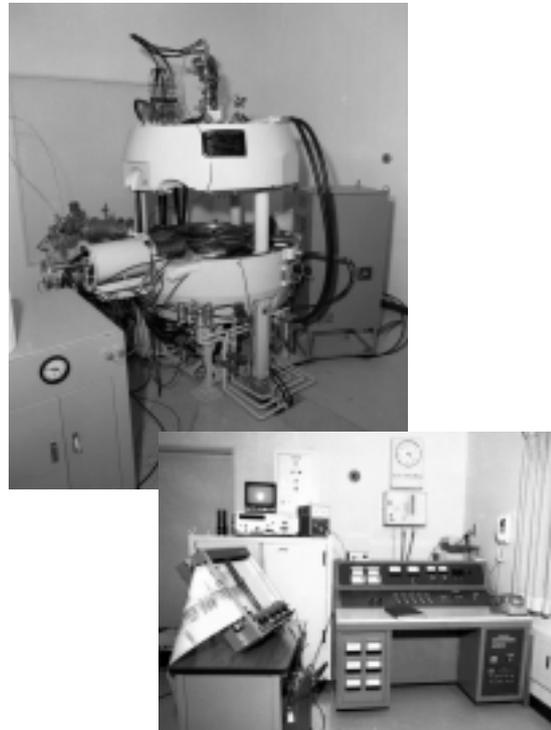
PET事始めと「ベビー・サイクロトロン」の誕生

1970年から短寿命RI（ ^{18}F 、 ^{28}Mg 、 ^{43}K 、 ^{52}Fe 、 ^{67}Ga 、 ^{111}In 、 ^{123}I など）を製造して医学研究者に定期的に提供する共同研究が始まった。翌1971年には、科学研究費補助金「サイクロトロンによる短寿命ラジオアイソトープの医学利用に関する研究」（2年間、代表者**宮川正東**大教授）、引き続いて「サイクロトロンによるラジオアイソトープの病態分析および診断利用に関する研究」（2年間、代表者**寛弘毅**千葉大教授）が行われ、理研は短寿命RIの製造（**浜田達二**主任研究員、唐沢）、分離精製（**野崎**）、標識化合物合成（**田原昭**

主任研究員)、ポジトロン対消滅後のガンマ線の測定(岡野真治)を分担した。わが国最初の本格的な単一ガンマ線断層撮影(Single Photon Emission Computed Tomography, SPECT)や陽電子断層撮影(Positron Emission Tomography, PET)の基礎研究となった。この推進のため短期研究グループ「サイクロトロンによる医学利用RIの生産」をつくり、上記の研究者と放射線医学総合研究所の井戸達夫、国立中野病院の飯尾正明らが参加して、RIや ^{18}F 標識化合物の合成、消滅放射線測定法などについて研究開発や動物実験を行った。シンチグラム用の、 $^{197\text{m}}\text{Hg}$ を製造し、できた単体RIおよびRI標識化合物はラジオアイソトープ協会を介してすぐ病院に運んで検査に使用した。夜中に ^{43}K を作って朝の一番機で九大病院に送ることもしばしばで、全国的な共同研究となった。

この研究で、照射を担当したサイクロトロン研究室の唐沢副主任研究員は、短寿命RI製造専用の「超小型サイクロトロン」のアイデアを実行した。PETでは ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O など半減期が20分以下のRIを利用するので、サイクロトロンは病院内に設置する必要がある。そのため専用サイクロトロンの開発は、重厚な放射線の遮蔽が不要で、スイッチ1つで運転できるものを実現しなければならない。

唐沢は、まず自己遮蔽型を考案して遮蔽を軽減し、次いで加速粒子を陽子と重陽子に限定してそのエネルギーを12MeVに固定し、調整箇所を極度に減らして運転の簡易化を図った。大きさは、幅と奥行きが約2.4m、高さ約2.2m、重量約20トンで、スイッチを入れると



スイッチを入れるだけで動く調整不要のコンパクトサイクロトロン(「ベビー・サイクロトロン」と名付けられ、1号機は国立中野病院に納入)本体(上)と制御室(下)

調整不要でビームが出るようにした。これは、これまで原子核研究者が中心になって開発してきたサイクロトロンのコンセプトを根底から変えるものであった。このコンパクトサイクロトロンを理研と特許実施契約を結んだ(1973年)日本製鋼所が試作器を製造した。第1号機は1976年に完成して「ベビー・サイクロトロン」と名付けられ、国立中野病院に納入された。

超小型サイクロトロンは、市場も注目するところとなり、国内外のメーカーが独自の設計で開発した製品が主要な国立大学病院などに納められ、PETに利用されていった。「ベ

Episode

仁科芳雄と記念切手

多彩なRI利用50年の節目に発行



ラジオアイソトープ (RI) 利用50周年を記念した切手が、1990年 (平成2年) に発行された。切手の顔は仁科芳雄が飾っている。仁科は日本の原子核物理研究の基礎を拓いた「原子核物理学の父」。1937年 (昭和12年) に自ら完成させた日本初のサイクロトロンを使ってRIを人工的に作り出すことに成功した。記念切手は、仁科の功

績を称え、RI利用50年の節目に発行された。

第2次大戦後、仁科が製作したサイクロトロンがGHQにより東京湾に投棄され、日本では原子力研究は一切禁止され、RI製造やその利用について空白の時代があった。仁科らの要請を受けたGHQのポーエン・ディーズらの尽力により、日本の戦後復興に大きな効果を発揮する工口ア資金 (米国の占領地復興援助費) を利用し、昭和25年に米国原子力委員会 (AEC) から4,000ドル分のRIが1年分提供された。これにより、日本のRI 関連研究が再開され、著しい発展を遂げる。

また、仁科が蒔いたRIのタネは、およそ70年後の今日、理研リングサイクロトロンによって「21世紀の粒子線・RIビーム」として発展、世界に普及し、物理学、工学、化学、分子生物学、医学など広範な領域で大輪の花を咲かせている。

ビー・サイクロトロン」は、これまでに19台が販売され使われている。なお、唐沢は「超小型サイクロトロン開発」の功績で科学技術庁長官賞 (研究功績者) を1980年に、また、井上春成賞を1983年に受賞した。

2004年7月現在で67施設が、PET撮影を行っているが、わが国のPETは、1975年に始まった160cmサイクロトロンの共同利用から出発したのである。

2003年10月、独立行政法人理研の初代理事長に就任した野依良治は、就任早々、奇しくもPET関連施策の緊急性を政府に指摘し、独立行政法人放射線医学総合研究所など理研外

の研究者を糾合して「分子イメージング協力計画」を打ち出した。

産業利用と契約ユーザー

160cmサイクロトロンによる総合研究で生み出された研究成果やビーム技術は、企業も注目するところとなり、利用希望が増えていった。当初開発した研究室との共同研究の形をとっていたが、やがてビーム照射サービスやRI製造サービスは契約に基づいて行うことにして、その推進を図るようにした。1970年代後半からは、河野を責任者とするサイクロトロン運転管理グループが契約ユーザーに対

する照射サービスを担当して積極的に進めることになった。その内容は、大学医学部あるいは付属病院と契約して医学利用が目的のRI及びその他に利用するRIの製造、放射化分析による高純度半導体中の軽元素不純物分析、原子炉材の照射損傷試験や高分子材料の照射試験、太陽電池や半導体素子など人工衛星搭載機器の照射試験などである。なお、80年代後半にはサイリスタの陽子ビーム照射による高性能化試験が注目され、我が国の主要メーカーが照射試験を行った。

契約による照射は、全期間を通して総計81課題行われ、そのうち46課題を22の企業が行っている。160cmサイクロトロンは運転終了で、これらの研究の多くは、原研高崎研究所の多目的加速器「TIARA」に移っていった。

人材育成

1960年代から70年代の初期には、理研で採用する研究者は学部卒が多かった。これらの研究者は160cmサイクロトロンの実験で相次いで学位論文を書き博士号を取得した。1973年から5年間に5名が、その後の10年間に5名が博士号を取得している。

一方、1973年から、160cmサイクロトロンで学位論文の研究をする大学院生を研修生として積極的に受け入れることにし、長期にわたって理研に滞在する大学院学生は、派遣元の大学の承認と学生保険への加入を条件に受け入れた。サイクロトロン研究室を例にとると、1971年から1985年までの15年間に20名を超える大学院生が長期滞在しており、16名が博士の学位を、7名が修士号を取得しており、

そのほか理研が共同研究を進めていた外国の研究所の実験で博士論文を書いたものが数名いる。1973年からは受け入れた大学院生は毎年5～8名にのぼり、1978年には8名の大学院生が所属しているが、そのうち6名は博士課程の大学院生である。

また、博士研究者（ポスドク）のために1974年から「特別研究生」の制度を設け、博士研究員を毎年1～2名を採用したが、1976年には「流動研究員制度」を発足させて、博士研究員だけでなく外国から研究者を招聘するなど、より柔軟に運営されるようになった。なお、特別研究生や流動研究員に必要な経費は、主に「160cmサイクロトロンによる総合研究」の予算で賄われたが、それができたのは理研の事務関係者の並々ならぬ努力の賜である。

既に述べた70年代中期頃からの160cmサイクロトロンによる重イオン研究の爆発的な発展も、こうして受け入れられた大学院生や博士研究者の活躍に負うところが大きい。とくに原子核物理分野では全国から多数の若手研究者が結集した。例えば、そのなかの一人であった**本林透**（現本林重イオン核物理研究室主任研究員）は、原子核のクラスター現象の解明に単独で挑戦し、 α 粒子の移行反応による研究を発展させた。その他の若手研究者には、前出の旭をはじめ、**山崎良成**（現原研研究主幹）、**橋本治**（現東北大学教授）、**沼尾登志男**（現TRIUMF（カナダ）上級研究員）、**福田共和**（現大阪電気通信大学教授）、**池添博**（現原研部長）、**三明康郎**（現筑波大学教授）、**下田正**（現阪大教授）、**家城和夫**（現立教大

教授)、宇都宮弘章(現甲南大教授)、杉立徹(現広島大教授)など、現今の日本の重イオン研究の中核を担っている研究者が多数含まれている。

また、理論関係の特別研究員も定常的に受け入れられた。その総数は、多数であるが、鈴木敏男(現福井大教授)や滝川昇(現東北大助教授)らはその皮切りになった。

他方、核化学の領域での若手研究者の活躍も顕著であった。特に、都立大の中原弘道教授のグループは、河野や野村らと共同で、重イオン核融合反応の系統的な研究を精力的に進めたが、これを担った若手研究者には、矢野倉実(現理研広報室長)、工藤久昭(現新潟大助教授)、永目論一郎(現原研主任研究員)、末木啓介(現筑波大助教授)などが含まれる。

国際交流の展開

160cmサイクロトロンが稼働し始めたときは1ドル=360円の時代であり、国際会議や国際シンポジウムの主催は財政的に大きな困難を伴った。そこで、理研は、わが国で開催される国際会議のサテライトシンポジウムとして独自の国際シンポジウムを主催した。1967年の国際シンポジウム「 ^3He による原子核直接反応」、1972年のシンポジウム「重イオン反応によるインビーム分光」がそれである。一方、外国の研究者を招聘して行う国際シンポジウムは核研と共催した1975年の「原子核のクラスター構造と重イオン反応」が最初で、重イオン反応の専門家10名を理研が招聘した。この会議は理研の重イオン核物理の

成果を世界に知らしめる良い機会になり、理研の重イオン研究は外国人参加者に強い印象を与え、これ以後、国際シンポジウムや国際会議への招聘が増加した。

また、1977年に箱根で開催した国際シンポジウム「重イオン反応と前平衡過程」は、理研における重イオン研究の諸成果を高らかに喧伝する場となり、理研の名声を一段と高めた。この会議の成果の1つとして、1978年には、「重イオン反応におけるスピンの偏極発生現象」に関する米国のテキサスA&M大学との共同研究が、先方の加速器施設で始められた。石原は下田らの若手研究者を率いて現地へ赴き、高エネルギー性能に優れる先方の重イオン加速器を用いて、大質量移行反応における偏極発生現象の解明を図った。

1980年代に入ると理研が主催した加速器利用研究関連の国際会議／シンポジウムが急増している。1990年までに原子核以外の分野を含めて全部で24の国際集会在開催されているが、シリーズとして開催される国際会議を主催／共催したのは、1986年の第11回「サイクロトロンとその応用」国際会議、1988年の第5回「原子核およびサブ原子核系におけるクラスターの様相」国際会議である。

1976年に上坪と元永は、中国科学院の招待で訪中し、科学院傘下の研究所を訪問して研究交流について話し合った。この訪中の結果、日中シンポジウム「核科学研究用加速器技術とその応用」や、蘭州の近代物理研究所との研究交流が始まった。

その後も国際研究協力は積極的に進められ、1982年には、前記の共同研究の実績を踏

まえて重イオン核物理の研究協力がテキサス農工大学と始まり、次いで1985年には仏国の国立原子核素粒子物理研究所（IN2P3）および国立重イオン加速器施設（GANIL）、翌1986年には独国の重イオン科学研究所（GSI）との国際協力へと広がっていった。

新しい大型重イオン加速器施設の建設へ向けて、国際的にも国内的にも大きな流れができていったのが、1970年代から80年代半ばの時期である。

重イオン科学の幕開け

新しい時代に向けて動き出す

160cmサイクロトロンが軌道に乗った1970年代半ばから、核物理学研究における重イオン利用研究の占める割合が高まっていった。当初は加速重イオンが比較的軽い元素のイオンに限られ、そのエネルギーは核子当たり10MeV程度であった。例えば160cmサイクロトロンは、元素周期表でいえば原子番号20（ネオン）までの、元素としては比較的軽い範囲の元素のイオンまでしか加速できなかった。ところが、1980年代に入ると、新しい研究領域の開拓を目指して、より重い元素イオンをより高いエネルギーまで加速する加速器計画が、世界各地で進められるようになった。

1960年代末から理研では、サイクロトロン研究室主任研究員の熊谷が主導して次期計画の検討を始め、3つの案を作成した。第1は応用核物理研究所構想、第2は中間子工場構想、第3が新型サイクロトロン構想である。第1は「120MeV陽子リニアック」を建設し、

将来はこれを1GeVまで延長して中間子工場にする計画であり、第2は0.7~1GeVの「大強度陽子加速器」を建設する中間子工場の案である。第3は「セクター型サイクロトロンと入射器」を組み合わせて陽子からウランまでを広いエネルギー範囲に加速する案である。その後、第3案をさらに検討することになり、1971年度からは松田新主任研究員を中心にして準備研究を開始することになっていたが、前述のように松田は、主任研究員就任直前に事故に遭い死去した。

新計画の3分の1が認められる

1971年7月に新しく主任研究員に就任した上坪は、第3計画案を継承して正式な建設計画にまとめ、1972年1月に7研究室（サイクロトロン、放射線、金属物理、磁性、核分析化学、放射線化学、放射線生物の各研究室）連名の「新しい加速器の計画について」を主任研究員会議に提案した。この計画は、前段加速器2基と主加速器からなる複合加速器系の建設計画である。前段加速器（入射器）はイオンを予備的に加速して主加速器に入射するもので、線型加速器（リニアック）とAVFサイクロトロンを想定した。一方、主加速器は4つのセクター電磁石（扇形の磁極を持つ電磁石）からなる分離セクター型サイクロトロン（「リングサイクロトロン」とも言う）で、イオン価数が大きいほど高エネルギーまで加速できる。高速重イオンは薄膜を通過すると電子を剥ぎ取られてより多価のイオンになるので、この現象を利用して、入射器と主加速器の間に炭素薄膜を置き、重イオ



わが国経済がオイルショックの影響を受け物価高騰が続く状況の中でウランまでの重イオンを加速する重イオン科学用加速器「RILAC」の建設が確定（1976年4月）

ンをより多価のイオンにしてリングサイクロトロンに入射する。このように2段階加速方式で、加速粒子の種類に応じて、最も効率的に高エネルギーまで加速することができる。ところが当時、リングサイクロトロンは陽子加速用に建設中の2基（スイス、カナダ）のみであり、仏国のGANIL（国立重イオン研究所）が検討中であった。

入射器には、重いイオンを加速するのに適したリニアックと、比較的軽いイオンの加速に適したAVFサイクロトロンを用いる。後者には160cmサイクロトロンを改造して用いることにしていたが、それでもリングサイクロトロンを含めた計画は、建物を除いて概算で

35億円になる巨大プロジェクトであった。

新加速器建設計画の提案を受けた主任研究員会議は、江本栄議長の計らいで、全体計画は認められないが入射器（リニアック）のみの建設を認めるとし、その諾否を上坪に求めた。上坪は、全体計画の第1段階に進む意義を評価してこの提案を受け入れた。

当時の理研にとっては、リニアックの建設だけでも巨大プロジェクトであった。主任研究員会議がどのような議論の末にこの計画を受け入れたのかは不明であるが、松田の不幸な出来事の後で極めて短時間に10歳以上も若い主任を選んだので、室員30名の大研究室をまとめる求心力が必要と判断したのかもしれない。

その後、新加速器（リニアック）建設計画は正式に理研の計画として認められ、1973年8月に、4年間の「重イオン科学用加速器の建設」計画として概算要求された。この計画は1974年の単年度予算として一部の建設が認められたので、これ以後、リニアックは予算上「重イオン科学用加速器」と呼ばれることになる。

重イオン科学用加速器「RILAC」の建設開始

新加速器の設計・開発研究は1971年から開始され、線型加速器開発グループ（リーダー 小寺正俊副主任研究員）が数種類のモデル共振器を製作して、特性測定、軌道計算、ドリフトチューブなどの設計を行った。1973年の概算要求は、準備研究の成果を基にして開発グループが算定したもので、建物を含めた全体計画の総額は11億8,000万円であった。

1974年に建設する共振器1基は住友重機械

株式会社（住重）が受注したが、予算額が余りにも過少見積りであることが判明し、翌1975年度の概算要求で予算計画を大幅に改訂することになった。たまたま第4次中東戦争が勃発して「オイルショック」が起こり、物価が急上昇したので、それを理由に建設費総額を23億円に改定して概算要求した。1975年度の予算折衝は困難をきわめたが、事務当局の多大の努力で「重イオン科学用加速器の建設」予算の改訂が認められ、国庫債務負担行為も含めた予算案で決着した。

重イオン科学用加速器は「RILAC」と命名され、ウランまでの重イオンを核子当たり1~4MeVに加速して、原子核、物質・材料、化学、生物学など広い分野の基礎的・応用的研究（これを「重イオン科学」と呼んだ）に利用する加速器である。ところがこれは、高エネルギー重イオン加速器の前段加速器として計画されたものなので、当面、主加速器建設の見込みは立たないものの、入射器としての性能を重視して設計した。

1975年4月から、電子計測研究室（仁科研究室から分かれた杉本研究室を引き継ぐ）を継承して小寺を主任研究員とする新研究室（1976年4月にリニアック研究室と改称）が発足する。新研究室には千葉好明、戸沼正雄、宮沢、逸見らサイクロトロン研究室の中核メンバーが移籍してリニアックの建設に従事した。これ以後、重イオン科学用加速器の建設はリニアック研究室が担うことになった。

世界初の周波数可変重イオンリニアック

サイクロトロンもリニアックも高周波で加

速する加速器であり、両者を連結し、1つの加速器として運転する場合、両者の加速周波数を整合させなければならない。異なる重イオンを加速するのに、サイクロトロンは磁場の強さと加速高周波の周波数を変えなければならないが、リニアックは加速電圧を変えるだけでよい。ところが両者を連結して加速する場合は、サイクロトロンに合わせてリニアックの加速高周波も周波数可変にしなければならないので、世界初の周波数可変型リニアックを開発することになった。

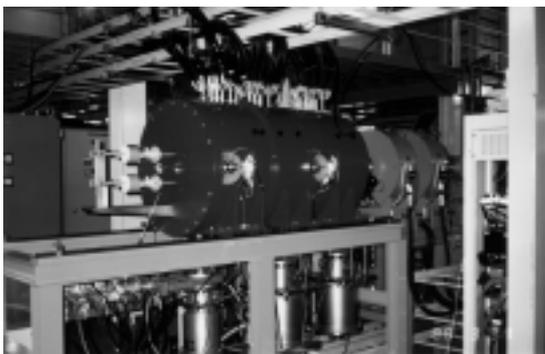
「RILAC」は複合加速器で、イオン源を収納したドームを50万ボルト（500kV）の直流高電圧ターミナル上に載せた前段加速器と、周波数可変型リニアックおよびビーム分配系で構成されている。RILACの主要部分は6基の共振器とその大電力励振器であるが、可変周波数の範囲が（17~45）MHzと極めて広く、その開発は大きな困難を伴った。当初、可動パネルによる周波数可変方法を検討したが、可変範囲が広く取れず、サイクロトロンの共振系に用いられた4分の1波長同軸型を取り入れて実現した。また、全系の真空系や制御系の設計・建設や多価イオン源の開発なども並行して進められたが、これらのR&Dと建設作業は、小寺主任研究員を中心にして、リニアック研究室員および工作部の竹下勇夫、横山一郎らが参加して行った。

イオン源は、当初160cmサイクロトロン用の改良型を高電圧ドーム内に設置し、光ファイバー／光通信を利用した遠隔操作で制御した。後にこのイオン源は電子サイクロトロン共鳴型（Electron Cyclotron Resonance）イ



重イオンリニアック用新入射器

オン源に置き換えられた。なお、ECRイオン源の仕組みは、強い磁場の中に閉じこめられているプラズマ中の電子がマイクロ波によって加熱（加速）され、原子に束縛されている電子を叩き出す、これを繰り返すことによって多数の電子が剥ぎ取られた多価イオンを作



ECRイオン源

ることができるのである。

RILACは、ヴィドレー型線型加速器で、本体は長さ3m、幅1.8mのレーストラック形をした深さ3.3mの共振タンクが6基直線状に並んでおり、各共振タンク内には、上端に高電圧側ドリフトチューブが取り付けられた長さ2m、幅0.5mの中心導体（ステム）が立っている。共振高周波は音叉と同じように、ステム下部が振動せず最上部が最大電圧で振動する高周波で、波長はその4倍になる。周波数可変にするために、タンク内壁とステムの両方に接触する可動ショート板を取り付け、それを上下に動かして共振高周波の波長（周波数）を変えている。実際には、ステム上部に取り付けられ、そのドリフトチューブの間にアース側のドリフトチューブが並んでいて、両者の間に生じる高周波電場で重イオンを加速している。共振タンク内は高真空になっており、また、アース側ドリフトチューブ内には、イオンビームを集束させるため4極電磁石が収納されている。この世界で初めての周波数可変重イオンリニアックは、こうした多くの技術的な困難を乗り越えて完成した。

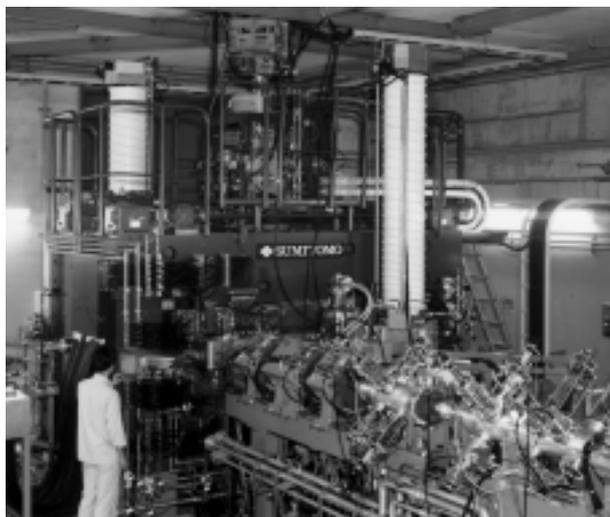
1979年9月に共振タンク6基の据え付けを終り、第1共振タンクで1価の窒素（N）イオンの加速に成功したが、施設全体は予定より3年遅れて1981年に完成した。RILACから軽イオンで核子当たり4MeV、鉛などの重イオンで核子当たり約1MeVのビームが得られて、ターゲット室でテスト実験を開始した。入射器として使用しないときは単独で利用して、原子物理や物性研究を中心とした低エネルギー重イオン実験を行っている。

AVFサイクロトロンと外部イオン源

リングサイクロトロンのもう1つの入射器は、軽い元素イオン用のAVFサイクロトロンで、周回するイオンの軌道に沿って磁場が変化する周回方向変動磁場（Azimuthally-Varying Field）型サイクロトロンあるいは扇形集束（Sector-Focus、SF）型サイクロトロンと呼ばれ、陽子や重陽子などの軽いイオンの加速には非常に有効な加速器である。入射器として使う場合は、2つのサイクロトロンの組み合わせる整合条件を満たす必要があり、また、重イオンは外部イオン源で発生させるので、垂直入射するための貫通孔も必要である。そのため、160cmサイクロトロンを大幅に改造するよりも、住友重機械製のAVFサイクロトロンを部分的に改造することが有利であると判断し、後藤彰研究員らがメーカーを指導して改造し、1989年に完成した。

このサイクロトロンは、わが国最初の外部イオン型サイクロトロンで、イオン源からの重イオンはサイクロトロン中心部に垂直に入射される。リングサイクロトロンの入射器として使用しない場合は単独で運転され、原子核や物性の実験、RIの製造に利用される。またこのサイクロトロンは、炭素、酸素のような軽イオンを核子当たり8MeVまで加速でき、クリプトンまでの重イオンは核子当たり4MeVまで加速できる。ここに上げたエネルギーは、リニアックの加速可能エネルギーより高いので、重イオンをより高エネルギーまで加速するときは、AVFサイクロトロンを入射器にしている。

リングサイクロトロンでは、重イオンばか



わが国初の外部イオン型サイクロトロンとなったAVFサイクロトロン

りでなく偏極陽子、偏極重陽子も加速して原子核研究に利用している。この研究施設では、重イオン用にECRイオン源、重陽子用に偏極イオン源を開発した。偏極イオンの加速は、160cmサイクロトロンで熊谷主任研究員が計画したもので、その20年後にリングサイクロトロンで実現した。

ECRイオン源の開発は、中川孝秀らが中心になって推進したもので、その後マイクロ波の周波数18GHzまで高め、多価イオンの強度が極めて大きい世界最高性能のイオン源を実現した。

科学技術の転換期と理研の加速器科学研究

1970年代後半から80年代は、生命科学や物質科学を中心にして、科学技術が大きく変貌し多様化した時代である。このような時代の潮流と、「160cmサイクロトロンによる総合研

究」で活発な研究を展開していた研究室の多くの主任研究員が定年を迎える時期が重なり、理研の加速器科学研究にも大きな変化が生じた。

まず、1982年に原子過程研究室（渡部力主任研究員）が創設され、原子物理の理論的、実験的研究を開始したが、実験的研究は栗屋が主導した。一方、放射線研究室は1984年に石原が主任研究員に就任して核物理に研究の重点を移し、また、入射器建設のために創設されたリニアック研究室は、リニアック完成直後に定年退職した小寺の後を谷畑勇夫が継いで、RIビームによる核物理研究に専念した。そのため、サイクロトロン研究室は加速器の研究開発が中心になった。

また、物質科学の分野では、1984年に永嶺謙忠が金属物理研究室主任研究員に就任してミュオンを用いた物質研究とミュオン触媒核融合の開始し、磁性研究室でも1986年に関沢尚主任研究員が勝又紘一に交代すると、中性子や超高磁場ESR（電子スピン共鳴）を利用するなど、研究手法が多様化した。核化学研究室は1987年に野崎が定年になり安部文敏がRI利用を発展させてマルチレーザーの開発などを進めたが、放射線化学研究室は主任研究員が今村昌から吉良爽に交代し、また、放射線生物研究室は花岡文雄が主任研究員に就任して研究室の重点を遺伝子分野へ移した。しかし、理研の加速器科学の研究は新しい発展を続け、マルチレーザー技術の開発や重イオン照射育種法の開発など幅広い分野で世界に先駆けた成果を挙げている。

世界最先端の重イオン加速器施設を建設

重イオン科学展開への環境づくり

1970年代後半から1980年代にかけて、わが国には複数の大型加速器の建設計画があった。高エネルギー物理学研究所（KEK）のトリスタン計画、理研のリングサイクロトロン計画のほか、重イオンを核子当たり10億電子ボルト（1GeV）のエネルギー領域に加速する核研のニューマトロン計画と、原研の20MVタンデムバンデグラフ計画である。

理研の加速器関連研究は、国の「原子力予算」で行われている。したがって、大型加速器計画は原子力委員会が5年毎に策定する「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画（原子力長計）」に盛り込まれる必要があるが、1972年の原子力長計には「政府としては、重イオン加速器、（中略）など大型共同利用施設を設置することが必要」と記されている。

日本原子力学会は、原子力の総合的開発のためには重イオン科学の研究が非常に有効であり、その振興を多角的、総合的に検討する必要があるとして、1971年に「重イオン」研究専門委員会を設置した。委員長は伏見康治で、理研から今村、松山晃、上坪らが参加した。この研究専門委員会はI期、II期と続き、重イオン科学推進のために、優れた加速器の設置に加えて測定技術、利用技術の開発体制の確立を提言した。

同じ頃、がん治療の新しい方法として高LET放射線の利用が取り上げられ、わが国では重イオンとパイ中間子のどちらを選択する

かについて、科学技術庁では専門委員会を設置して検討した。この委員会には加速器側の委員として上坪も参加したが、その審議が重イオン加速器の必要性を広く認識させるのに役立った。

このような動きを受けて、重イオン科学の重要性が1982年の原子力長計に取り上げられ、原研のタンデムバンデグラフ、理研のリングサイクロトロンの実現を後押しした。

リングサイクロトロン計画の始動

一方、核研の平尾泰男教授と上坪主任研究員が中心になって文部省科学研究費（科研費）特定研究「重イオン科学」を提案し、1975年から4ヵ年計画で採択された。理研からも多くの研究グループが参加したが、その分担研究の1つである「リングサイクロトロンによる重イオン加速の基礎研究（代表者上坪）」では、セクター電磁石の1/4モデル2基を製作し、設計のための研究開発を実施した。科学技術庁傘下の研究所が進める将来計画の準備研究が、文部省の科学研究費で支援された初めてのケースである。

1976年秋には、160cmサイクロトロン10周年を記念して施設を一般公開した。官庁、研究所、大学の関係者や学識経験者を多数招待して160cmサイクロトロンの研究成果や建設中のリニアックおよびリングサイクロトロンの1/4モ



セクター電磁石の4分の1モデルで、リングサイクロトロンの次期計画をアピール

デル電磁石など準備研究の状況を公開して、次期計画の必要性と技術力をアピールした。

本格的なリングサイクロトロンの設計研究は1975年から始まった。リニアック研究室の発足後、サイクロトロン研究室は、原子核研



実現が困難視されたリングサイクロトン計画に茅誠司元東大総長、宮島龍興原子力委員、伏見康治日本学術会議会長、武見太郎日本医師会会長の賛同を求めて、難局を乗り切る

究グループ（責任者：石原）、160cmサイクロトロンを運転・維持管理を主務とするグループ（責任者：河野）とリングサイクロトロン設計グループ（責任者：元永）の編成になった。設計グループには熊谷教孝、矢野安重、後藤らが博士研究員（特研究生/流動研究員）として加わり、また、理研工作部の竹下、横山、長瀬誠、清水和男も参加して強化され、さらに運転・維持管理グループが密接に協力して、本格的な研究開発や設計研究が進められた。

1977年末には準備研究もほぼ終了したので、1978年夏に「理研リングサイクロトロン建設計画」の準備費を概算要求したが認められなかった。そこで翌年に改めて9ヵ年計画で総額135億円の「リングサイクロトロンの建設」の概算要求を行った。

その頃理研は、日米エネルギー協力の一環として「光合成」研究（第II編第5章）を進めており、1980年度予算で太陽光エネルギー科学研究グループの設置とアルガトロンの建設を最優先項目として要求していたので、リングサイクロトロン計画の実現は困難視され

ていた。そこで、上坪は関理夫企画課長とともに、伏見日本学術会議会長、宮島龍興原子力委員、武見太郎日本医師会会長および茅誠司元東大総長を訪問して計画を説明し、その重要性を訴える科学技術庁長官宛の文書の提出を要請して、予算要求の重要参考資料にした。

しかし、この大型計画の予算は予想どおり厳しく、再度原子力局から予算折衝への支援を求められた。最終段階で、西本靖理事の仲介により宮崎友喜雄副理事長が廣江運弘経済企画庁審議官（元大蔵省主計官）に会見して支援を要請することになった。宮崎の状況説明に対して、かつて主計官時代にリニアックの予算を担当した廣江は、「リニアックの後段加速器としてリングサイクロトロンがあったとは知りませんでした」としながら「調べ



世界最高のリングサイクロトロンを目指し、連続加速エネルギー135MeV、高制御性などを決めた

て見ましょう」と言った。その結果、「全計画を認めたわけではない」との注釈付きで、1980年度予算にセクター電磁石1基の製作(2.8億円)が認められた。この後も毎年セクター電磁石を1基ずつ作る状態が続いたが、実際には翌1981年度に少額ではあったがリングサイクロtron棟の建設予算が認められて、1989年完成の9ヵ年の建設計画が正式に始動した。

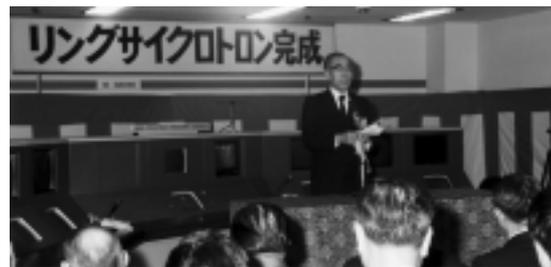
なお、1981年度予算では文部省のトリスタン計画が認められ、ニューマトロン計画は見送りになった。当初、理研の計画推進能力への不信を露わにする人もいたが、科学技術庁の支援と努力により、リングサイクロtron計画が順調に進みだすとコミュニティの期待も高まり、その後は重イオン加速器を科学技術庁が進める体制になった。

世界最先端の加速器施設をどう作るか

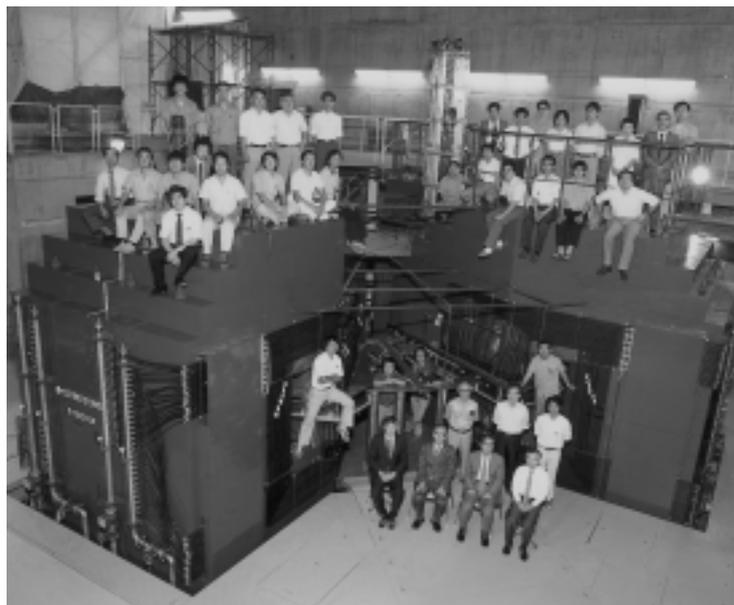
リングサイクロtron計画を検討し始めた頃、米国・ミシガン州立大(MSU)で世界最初の超伝導サイクロtronが建設されており、重イオンには超伝導サイクロtronが有利であるとの考えが広がっていた。そこでMSU計画の中心人物の一人であるF・G・レスミニを2ヵ月間招聘し、超伝導サイクロtronの可能

性と問題点を議論した。さらに、リングサイクロtronの利点と問題点を議論するため、仏国からGANIL計画の責任者M・ルフォーを1ヵ月招聘した。なお、この滞在中にGANIL計画が正式に認められてルフォーは急遽帰国したが、GANILは1976年に建設が始まり、1982年に完成した。

これらの検討の結果、世界初の成果を上げ得る加速器施設を目指して、未踏のエネルギー領域で質の高いビームを得る加速器と多目



完成式典で挨拶する宮島理事長(1986年12月)



リングサイクロtronの完成を祝って集まった研究者たち
前列左から、上坪主任研究員、宮島理事長、中根副理事長、小寺主任研究員

的利用の最先端実験装置を実現することにした。こうして、①連続ビームで世界最高である核子当たり135MeVの加速エネルギー、②装置全体の高安定化、③清浄真空、④高い制御性を実現するリングサイクロトロン建設計画がまとめられた。

1981年に策定した建設予算は総額135億円で、リングサイクロトロン本体が約39.5億円、AVFサイクロトロン11.2億円、ビーム分配系11.2億円、実験装置21.4億円、加速器棟50.3億円などであった。リングサイクロトロンの完成予定は1886年で、ビーム分配系や実験装置は1985年に設計し、翌年から建設を始める計画で、全体計画の完成は1988年であった。なお、本計画は当初予算内で、予定性能を達成して、予定どおりに完成したわが国では珍しい計画である。ちなみに、高エネルギー物理学研究所（当時KEK）のトリスタンも1986年に完成した。

実験装置の建設は、リングサイクロトロン完成（1986年）後に予定されていた。そこでサイクロトロン研究室は、できるだけ原子核研究グループを国外の研究施設に派遣し、実験装置の具体的な設計作業が始まる直前まで最先端の研究を続けるようにした。当時、原子核研究が大きく変わり始めていたので、この方針は最も先端的な実験装置の建設に大きな弾みをつけたといつてよい。

リングサイクロトロン

リングサイクロトロンの建設グループは、軌道解析（矢野、後藤ら）、磁石（元永、矢野ら）、真空（池上九三男、褰碩喜ら）、高周

波（藤沢高志、原雅弘ら）、入射・取り出し（矢野、後藤ら）、ビーム輸送系（畑中吉治ら）、放射線遮蔽（藤田新ら）、制御（和田雄ら）などのチームに分かれていたが、ほとんどの研究者、技術者が幾つものチームに参加していた。特に矢野を筆頭に後藤、畑中らは、加速器建設に初めて参加した新鋭の研究室であったが、軌道解析、ビーム輸送、入射、取り出しなどほとんどすべての作業に積極的に取り組みリングサイクロトロン建設の中核を担った。その後、ビーム診断系の開発に加わったリニアック研究室の加瀬昌之や久保敏幸を含めて、ビーム加速試験にも重要な役割を果たすことになる。

理研リングサイクロトロンは、新しい考え方や技術を積極的に開発、導入して建設した重イオン加速器である。実現した基本仕様を列挙すると、加速エネルギーは当時の未踏領域、すなわち、ウランなどの重い元素でクーロン障壁以上、中重核で核子当たり40MeV程度、軽い重イオンでは核子当たり135MeVまで加速可能で、重イオンだけでなく、陽子、重陽子、 α 粒子と偏極陽子／重陽子も加速できる。なお、この加速エネルギーはサイクロトロンでは世界最高であった。

一方、質の高いイオンビームを実現するため、装置全体を安定化し、クライオポンプによる清浄な高真空を実現したほか、高精度モニターと計算機による高い制御性を確保した。なお、安定化にはとくに留意して、磁場の安定度を 10^{-6} とし、加速高周波は基準発振器・パワー増幅器（MOPA）方式で電圧安定度 10^{-4} 、位相安定度1度以内を実現したが、

これらの値はすべて当時の加速器の常識を破るものであった。こうして、シングルターン引き出しが可能になり、低エミッタンスでエネルギー広がり小さい重イオンビームの利用が可能になった。また、これらの高出力電源から出るノイズが計測機器に与える影響を減らすために細心の注意を払った。

高周波加速系は、藤沢研究員がムービングボックス型共振系を考案した。これは周波数を変えるのにムービングボックスを用いて、共振系の全長を短くするとともに、摺動部接点の電流密度を大幅に減らすことに成功した優れた発明である。この結果、機械的な安定性が確保され、リングサイクロトロン全体の安定運転に貢献した。また、共振タンクは銅・ステンレス鋼のクラッド鋼板を用いたが、銅版に冷却水の通る溝を付け、その面をステンレス鋼板と拡散溶接で接合した鋼板を加工して製作した。このため、通常の共振タンクに比べると格段に冷却効率が良くなった。

加速器の制御は、サイクロトロンとして初めてCAMACネットワークを用いた。経費を減らすために、インターフェースデバイスは横山らが回路を設計し、ソフトも自作した。

こうして完成した重イオン加速器研究施設は、多様な元素のイオンを世界最高のエネルギーまで加速し、連続ビームとして取り出すことができ、また、実験に必要なエネルギーのビームを容易に作れるという柔軟性のあるのが大きな特長である。施設完成後も、加速器グループの努力によってその潜在的な能力が大きく発展し、長期にわたって世界的な研

究成果を挙げ続けて来た。わが国のこれまでの加速器のあり方を大きく変えた加速器とすることができる。

1986年（昭和61年）12月、リニアックで加速したアルゴンビームをこのリングサイクロトロンに入射し、840MeVのビームとして引き出すことに成功した。その後10年間にリングサイクロトロンが加速したイオンの種類とエネルギーの組み合わせは90を超える。軽イオンはAVFサイクロトロンを入射器として、核子当たり135MeV、ビーム強度 3×10^{12} 個/秒（pps）まで加速。核子当たり45MeV以下の軽イオンやクリプトンより重いイオンの加速には、リニアックを入射器として使用する。性能は、連続ビーム重イオン加速器の中では世界最高レベルであり、特に軽元素RIビームの発生に不可欠な核子当たり100MeV以上の大強度軽イオンビームは、際立った特長となっている。また、イオンビームの性質も、エネルギーの拡がり0.1%、パンチ（イオンの塊）の時間幅300ピコ秒以下、エミッタンス10mm・mradと、高品質なものが得られている。

利用計画の立案と基幹実験装置の建設

リングサイクロトロンは、従来の国内水準を遥かに超えたビーム性能を有する大型の重イオン加速器であるため、理研内外の研究グループから広い関心を集めた。とりわけ、原子核物理の研究者からの利用希望が強く、全国の原子核研究者の意思を代表する核物理委員会（委員長：八木浩輔筑波大教授）は、当時の宮島理事長に対して書面を送り、理研の

リングサイクロトロンへの開放を強く要望した。これを受けて、理研では、全国の研究者からの研究計画の提案を歓迎、奨励するとともに、実験装置の設計・建設に関しても、理研内外の研究者が当初より協力して当たることにした。この際、外部の研究者が理研の研究計画に当事者として参画し、責任を分担することを可能にするため、客員主任制度が導入された。なお、特別研究生、流動研究員や客員主任研究員は、サイクロトロン研究室が研究推進上必要であるとして提案し、制定された制度である。

建設すべき実験装置は、1983年11月に、全国からの多数の核物理研究者も参画して理研シンポジウムを開いて基本方針を検討し、テーマ別にワーキンググループを作って実験装置計画を練り上げることになった。また、リングサイクロトロンの総合的な研究計画を立案し、効果的な装置計画の実現に努めることとした。さらにリングサイクロトロンの研究計画に関する助言を得るために、全国の専門家からなるPAC（研究プログラム助言委員会）を設置することにした。

こうした原子核物理分野の実験計画の立案・編成を担当していた石原は、1984年、放射線研究室主任研究員に就任し、本格的な検

討作業を開始した。1984年の3回など合計8回のシンポジウムを開いて検討を重ね、さらに、数回にわたるPAC（委員長：市村宗武東大教授）での審議を踏まえて、入射核破砕片分離装置RIPS、反跳核複合分析装置GARIS-IGISOL、高分解能磁気分析器

SMARTと大型散乱槽ASCHRAを基幹の実験装置として建設することに決定した。このうちSMARTとASCHRAは、大学の研究グループが中心になって建設が進められた。実験装置の建設は、当初、1986年から開始する予定



核反応で放出される荷電粒子を捕まえる大散乱槽“阿修羅；ASCHRA”



新しく生まれたばかりの高エネルギーの生成核種を直接的に捕まえる核反応生成核種分離装置“RIPS”（重イオン科学の要となる装置）

であったが、実際には1年遅れて1987年から始まった。しかし幸いなことに1987年度に大型補正予算が計上され、8億円に近い予算で測定装置の建設が加速された。

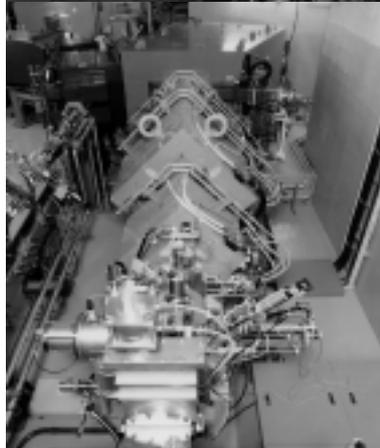
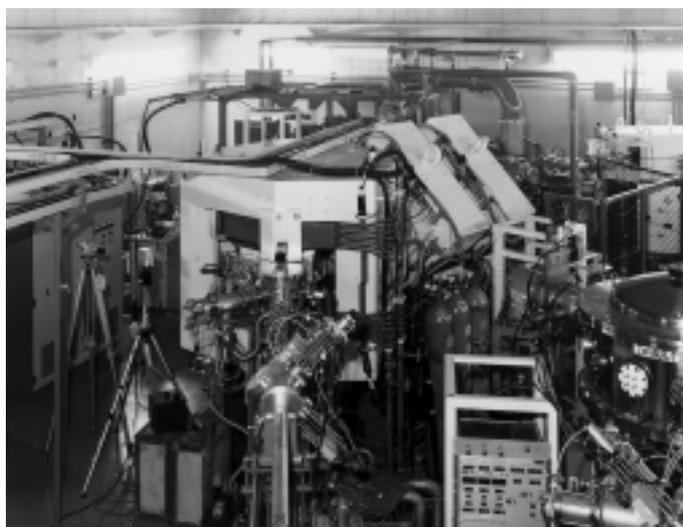
一方、基幹実験装置が配置される諸実験室の整備や、それらに重イオンビームを配送・供給するためのビームライン全般に関しては、稲村、畑中（現阪大教授）らが設計・建設に当たった。また、実験データを収集・解析するための計算機系やネットワークシステムは、市原卓らにより構築された。

後にリングサイクロトロンで最も注目される成果を挙げたRIPSは、重イオンの入射核破砕反応で生じる放射性同位元素（RI）を2次ビームとして供給するための装置で、当初計画には入っていなかった。

1983年、石原は新たに理研研究員になった畑中らとともに、リングサイクロトロンでRIの2次ビームを取り出す装置の検討を始めた。その後、1985年には畑中らによるLISE（仏国・GANIL）でのRIビーム生成実験や国際会議での討論などを重ね、世界最高性能の入射核破砕片分離装置RIPSを設計した。

RIPSは、RI生成標的及びその下流に設置されている同位

体分離装置、さらに標的の上流に置かれるビーム・スウィンガーから構成されている。同位体分離装置は偏向電磁石2基と集束電磁石を組み合わせたものである。第1の偏向電磁石では、「質量数/電荷（A/Q）」が同じ値を持つ入射核破砕片を分離する。重イオンのエネルギーは（数10～100）MeV/核子と高いので、入射核破砕片は電子がすべて剥ぎ取られて電荷Qは原子番号Zに等しい。次にこれらの破砕片をエネルギー減衰板に通す。エネ



高融点元素や短寿命核種の分離を可能とするオンライン同位体分離装置（ガス充填型同位体分離器（GARIS）とイオンガイド型同位体分離機（IGISOL）からなる同じ装置を角度を変えて見る）

ルギーの減衰率は、RI種により異なるため、その下流にある第2偏向磁石では、同じ(A/Z)値をもつRIのうち特定のZ(またはA)のRIのみが選別され、RIビームとして取り出される。RIPSの特長は、電磁石系の立体角と運動量アクセプタンスを極力大きくしてできるだけ多くの破砕片を受け入れ、また、偏向電磁石の磁場を高くして中性子過剰な不安定核を取り出せるようにしたこと、また、ビームスインガーでビームを曲げて、偏極RIを取り出せるようにしたことである。このような工夫を凝らしたRIPSが所定の性能を発揮するためには、面積の広い実験室が必要であった。幸いビーム分配系とリングサイクロトロン棟第3期工事の設計変更に関わり、理想的なRI発生装置の建設が可能になった。高次光学設計や建設の段階では久保が大いに活躍し、RIPSは1989年に完成した。

GARIS-IGISOLは原子核の融合反応などで生成される低速の残留核を分析するための装置で、超重元素探査を主目的にして野村(当時、東大核研教授)、森田浩介らにより設計・建設された。GARIS(気体充填型同位体分離器)とIGISOL(イオン・ガイド型同位体分離装置)は、それぞれ、独国とフィンランドのグループにより発明されていたが、これらを結合して重イオン反応の反跳核の分析に用いる試みはこの計画が最初であった。GARISは、重イオン融合反応で生じた反応

生成核を、磁場で分離する装置であるが、希薄気体の充填している空間に分析磁場がある場合、生成核の進む軌道は生成核の(A/Q)によらないで、原子番号Zと質量Aで決まることを利用している。この分析法は反応生成核が重い場合に有効で、超ウラン元素の生成・発見に用いられた。その後、GARISをリニアック実験室に移し、世界に先駆けて超重元素113番を生成するのに用いられた。

一方、稲村や若杉昌徳らは、フィンランドのユバスキュラ大や原子核研究所のグループとも協力して、IGISOLとレーザー核分光技術の開発を進めた。

SMARTは高分解能の反応粒子エネルギー分析器で、大沼甫東工大教授をリーダーとする研究グループ(理研および東工大、東大、東北大、山形大など)が建設した。2基の偏向磁石で構成された高分解能磁気分析器と、イオンの入射方向を変える巨大なビーム・ス



高分解能磁気分析器 (SMART)

Episode

「ファットマン」とリョウキチ・サガネ

長崎への原爆投下をめぐる日米科学者の友情

1945年8月9日、長崎に原子爆弾「ファットマン」が投下された。同時にパラシュートで観測用ゾンデが投下され、爆心地から50km離れた諫早市郊外の田んぼで海軍によって回収された。その中に、破れた封筒に無造作に折りたたまれた鉛筆書きの1枚の手紙。以来、そのことは極秘にされ、一切知られることはなかった。

その年の9月末、佐世保の元海軍鎮守府で宛名人に手渡され、事の真相が明らかになる。手紙は、開戦前に「理研のサイクロトロン」製作のためにカリフォルニア大学のE・O・ローレンスの下に留学した嵯峨根遼吉（後に理研研究員）に宛てたもので、『アメリカ滞在中の科学研究の同僚であった3人の友より』（無署名）とあった。要旨は、「嵯峨根教授よ。優れた原子核物理学者として、日本参謀本部にこの戦争を続



けると日本国民が恐るべき結果を蒙ることを説得してもらいたい。アメリカでは、すでに原爆製造工場を建設し、24時間操業の全生産品が日本の上で爆発することを疑う余地がない。もし戦争を継続するならば、日本の全都市は絶滅されるほかはない。この生命の破壊と空費を停止するために全力を尽くしてもらいたい。われわれは科学者として、優れた発見がこのような用いられるのをまことに残念に思う。日本が即時降伏しないならば、原子爆弾の雨が猛威を加えるであろうと確信せざるを得ない」と。

その後、差出人が判明し、1949年にその1人L・W・アルバレー（1968年にノーベル物理学賞）は嵯峨根に会い手紙に署名した。極限状況下での戦争終結に向けた日米科学者たちのぎりぎりの友情であった。

ウィンガーを持っている。とくに、核子当たり100MeVを超えるビーム・エネルギーと放出角0度で高分解能計測ができるSMARTの特性を組み合わせ、重イオンによる荷電交換反応や放出粒子が非束縛粒子（ ^2He は実際には2つの陽子）である（ $d, ^2\text{He}$ ）反応などのスピン・アイソスピン励起反応に関する精密実験が行われ、市原、大沼らによるアイソベ

クトル4重極巨大共鳴の発見など、巨大共鳴の研究で多くの成果が得られた。

さらに、東大の酒井英行教授のグループは、重水素スピン偏極イオン源を開発してリングサイクロトロンに導入し、SMARTを用いて偏極重水素ビームによるスピン・アイソスピン反転反応と少数多体系の研究を精力的に進めた。加速した重水素ビームを標的核に照射

する際、標的上での重水素のスピンの方向は、偏極イオン源で制御・決定されたスピン軸と一意的に対応する。これは、前代未聞のことで、単軌道のビーム取り出しが安定して可能であるリングサイクロトロンに由来している。原子核における3体力の発見は重水素ビームによる研究の顕著な成果である。

他方、原子核以外の分野でも、様々な新機軸の装置が提案・建設された。これらの計画は、理研内の複数の加速器関連研究室の主導で進められた。即ち、原子物理研究室の栗屋主任研究員は多価イオン分析用の原子衝突実験装置を、核化学研究室の安部文敏主任研究員はRI製造装置「落送管」を、ミュオン科学研究室の永嶺主任研究員は大立体角ミュオン測定装置「ラージΩ」を、それぞれの研究室の最重要研究課題に供する基幹実験装置として設定し、研究室を挙げて建設に当たった。さらに、生物・医学照射の重要性も強く認識され、専用の照射室とビームラインが設置された。谷田貝文夫、高橋旦らの努力に負うところが大きい。

このうち、RI製造装置「落送管」は、RI製造用照射試料をすばやく簡便に取り出す装置で、短寿命RIを含む「多種元素RI混合物」を一挙に生成・処理することを可能にした。この装置は、安部文敏、安部静子が開発した「マルチトレーサー法」のための、放射線源発生装置として、大いに威力を発揮した。他方、「ラージΩ」の開発は、後にミュオン科学研究室が英国のRAL研究所で大々的に展開する「ミュオン科学」プログラムのための基礎研究に貢献した。

一方、生物・医学照射装置は、多種多様なイオンビームが使える、また、空気中に置かれた試料の照射も可能なため、動植物の照射実験に広く便宜に用いられた。リングサイクロトロンの高エネルギー重イオンビームを大量のラットに照射し、重粒子線の生物効果を系統的に測定した研究（放射線医学総合研究所との共同研究）や、重イオン照射による突然変異を積極的に利用した新しい育種法や品種改良法の開発研究が代表的な利用例である。

理研加速器研究施設 (RARF)

理研加速器施設を用いて行う「重イオン科学総合研究」プログラムは1983年から始まったが、リングサイクロトロンが完成すると研究課題を一新し、1986年に「超重元素および新不安定同位元素の研究」、「高温・高密度原子核の研究」、「中間子・ミュオン粒子、中性子および放射性原子の発生とその応用研究」、「高エネルギー高電離重イオンによる原子物理の研究」、「重イオンによる生物効果研究」が始まった。さらに1991年には「不安定核ビ



重イオン科学用加速器施設を完成披露し、講演会も開く

ームを用いた核科学の研究」が加わり、RIPSによる研究が本格化した。一方、研究を効果的かつ効率的に進めるため、理研内加速器関連研究室からなる、理研加速器研究施設(RARF)を所内措置でつくり、責任体制を明確にして加速器利用研究の総合的、組織的な展開を図った。

加速器については上坪の後を継いだ矢野主任研究員が中心になり、多くの改善・高度化を行って優れた研究成果をあげる原動力になった。その主な点を以下に列挙する。

〈加速イオンの多様化と大電流化〉

中川らのイオン源グループは、永久磁石(NEOMAX) ECRイオン源、金属ロッドによる金属イオンの大電流化、18GHz ECRイオン源の開発などを行って、世界最高の多価イオン生成に成功した。

リニアックでは、イオン源の下流に上垣外修一らが発明した可変周波数RFQリニアックを設置したほか、リニアックの入射・加速効率を上げる目的で第2高調波バンチャを追加設置して、ビーム強度を上げるなどの開発を積み重ねて、ターゲット上のビーム強度を100倍以上に増大させた。

また、後述するように、東大原子核科学研究センターとの研究協力により、東大予算で建設した6基の重イオン・エネルギー増幅器(ヴィドレー型線型加速器)をリニアックの後段に設置し、RILACからの重イオンのエネルギーを核子当たり4MeVから6MeVまで引き上げた。

これらの努力により、RIPSのRIビーム利用

が中重核領域まで広がった。

〈偏極方向制御と単バンチビーム〉

偏極イオン源の直後にスピン回転器(ウィーンフィルタ)を設置して、リングサイクロトロンで加速された偏極重陽子のスピンの向きが自由に換えられるようにした。また、AVFサイクロトロンの上流で、電場を用いてビームを振ることによってビームの間引きを行う単バンチセレクタを開発した。これによって、連続ビームからただ1つのバンチのみを選び出せるようになった。

〈磁場の時間変動の計測と磁場の高安定化〉

マイクロチャンネルプレート(MCP)を用いたビーム位相測定器を開発して、リングサイクロトロンの磁場の時間変動をモニターできるようにした。また、この装置を用いて、リングサイクロトロンおよびAVFサイクロトロンにおいて、シングルターン取り出しがそれぞれ行われているかどうかをチェックできるようにした。

〈安定運転の確保〉

冷却系、真空系、制御系、電源、高周波系、ビーム診断系の改善により、故障点数の減少と的確な故障診断を可能にして、迅速な起動・調整と安定運転が実現した。

〈実験実時間の効率化〉

リングサイクロトロン加速で、質量対電荷比がほぼ同じであるイオン種を、エネルギーを固定して短時間で切り替える技術が確立

し、実験実時間の効率を上げた。

リングサイクロトロンを全国の研究者に開放するため、共同利用研究所方式を一部取り入れるようになった。ユーザー組織を作り、加速器利用研究の課題審査のために外部の専門家も参加する「プログラム助言委員会(PAC)」を新規に編成した。研究課題の提案は多数で、かつ多岐にわたっているので、原子核物理分野とそれ以外の分野に対して別個のPACを設けている。外部研究者が参画する研究課題も多いが、それらの大半は理研内の協力研究室が主宰・管轄する共同研究として執行されている。ビームタイムの配分は、全体の7割がPACの判定に委ねられ、残りの3割が、施設固有の契約的研究事業や緊急・緊要の課題に供するため、RARF統括責任者の裁量に委ねている。

多数の研究課題に対応するため、加速器は週末も含め終夜運転されている。リングサイクロトロンの入射器は、重イオン線型加速器(RILAC)とAVFサイクロトロンの2機種であり、交互にリングサイクロトロンと組み合わせられて使われる。そこで、加速器の最大活用を図るため、空いた入射器は単独でも運転され、固有の利用研究に供されている。なお、先に述べたエネルギーアップの改造がRILAC単独利用の増進に大きく貢献した。

2002年度のデータに従い、リングサイクロトロン運転と利用の状況を示すと、年間の運転時間は6,000時間を超え、そのうち4,400時間が実験に用いられた。また、年間利用者数は1,240名に達し、その58%は外国人62名を含む

理研外の研究者である。これらの外部研究者は共同研究者として、また、大学院生は研修生として理研の協力研究室に受け入れている。

加速器を利用する外部研究者の大半は大学に属し、大学院生や、ポスト・ドクトラルなどの若手研究者が多数含まれている。1990年代後半に理研に導入された基礎科学特別研究員とジュニア・リサーチ・アソシエイト(JRA)の制度は、こうした若手研究者の理研施設の利用を促した。

RIPSによるRIビーム実験の進展

RIPSは、世界で初めての本格的なRIビーム発生装置で、最大の特長は発生ビームの強度が、仏国・GANILのLISEや米国LBLのベバラック・ビームラインなどの既存の施設に比べて、3桁も4桁も高いことであった。このため、不安定核による様々な核反応過程の精密測定が可能になり、安定線から遠く離れた原子核に関する核構造研究や天体核現象研究の方途が一挙に開かれた。

1990年に始まったRIPSによる原子核研究は、1986年にリニアック研究室主任研究員に就任した谷畑勇夫のグループや石原、本林、旭らのグループにより精力的に進められ、数々の先駆的な実験成果が生み出された。RIPSのRIビームを利用する研究の比率は年々増大し、今日では、リングサイクロトロンの全ビームタイムの7、8割を占めるに至った。これらの成果が世界に与えた影響は著しく「RIビーム科学」ともいえるべき、広範な研究分野が新たに形成される端緒を開き、RIビー

ム施設の世界的な建設ブームに拍車をかけた。

RIPSのRIビームを用いる実験の大半は、不安定核ビームがさらに2次標的核と衝突して引き起こす、様々な核反応を観測するものである。これらの断面積の小さい（ミリ・バーン程度に及ぶ）核反応の観測を可能にしたのは、RIPSのビーム強度に加えて、新しい実験手法の開発である。

中でも特筆すべきものに、「高エネルギー・クーロン分解反応による放射捕獲反応断面積測定法」と「不安定核直接反応を用いたインビーム・ガンマ線分光法」がある。これらは、RIビームの特性に適合した高効率の実験手法で、立教大の本林や東大の石原（1986年以降；東大教授、放射線研主任研究員兼務）らにより開発され、今日のRIビーム実験の隆盛を支える原動力になっている。

前者は、天体中での主要な核反応過程である放射捕獲反応の断面積を、逆反応に相当するクーロン分解反応を用いて決定するものである。順反応実験に比べ、実験効率は7～8桁も高く、不安定核の関与する天体核反応の測定に道を拓いた。この方法の基本は、高エネルギー分解反応から発生する粒子の運動量を逆運動学で観測し、それに普遍質量法を適用する点にある。このような「逆運動学普遍質量法」は下浦亨らにより初めて導入され、RIビームによる不安定核の非束縛状態の研究全般に活用されてきた。

他方、後者の手法は、直接反応により励起された不安定核が崩壊する際に放出する γ 線を測定するもので、不安定核の束縛励起状態

の精密分光に利用される。様々な直接反応の選択則を組み合わせることで原子核の魔法数や集団運動などに関する的確な情報が得られる。反応チャンネルを特定するために出射粒子が同時計測されるが、逆運動学と厚い標的により、極めて高い実験効率が得られ、不安定核の核構造研究に盛大に利用されている。

RIPSの特性の1つであるスピン偏極したRIビームは、旭（東工大）や石原らにより開発されたもので、入射核破碎核反応の破碎片核が自発的にスピン偏極する現象を利用して生成される。入射ビーム用スウィンガーをRIPSと併用するだけで、偏極した不安定核のビームが得られる。この偏極生成法は、簡便な上、いかなる元素の同位体にも適用できる利点があり、多数の不安定原子核の核モーメントの決定に利用された。

RIPSから得られるRIビームのオプションには、郷農靖之九大教授らにより開発されたアイソマー・ビームがある。これは、原子核融合反応で生成される極めて高スピン（スピン値が約 $20\hbar$ ）のアイソマー（長寿命励起状態にある原子核）を、その反跳を利用してビーム化するもので、これを用いた2次反応で超高スピン状態の原子核を生成し、高速回転する原子核の極限的な状態を調べることを目指している。究極の目的である超変形原子核の生成には至っていないが、高スピンのアイソマー・ビームによる世界で最初の実験として、 ^{174}Hf アイソマーのクーロン励起が測定された。

東大原子核科学研究センター（CNS）との研究協力

1997年、高エネルギー物理学研究所、東大原子核研究所および中間子科学研究センターの3機関を統合して、高エネルギー加速器科学研究機構が発足した。これに伴って、原子核研究所の一部が東大に残り、原子核科学研究センター（CNS）として東大における原子核物理分野の研究・教育の中核を担うことになった。当初、CNSは中型サイクロトロンを新設して原子核科学の研究を進めることを計画したが、敷地問題と予算問題で行き詰まり、窮地に立たされた。その打開策として考えられたのが、RARFの入射器であるAVFサイクロトロンを用いる計画である。

そこで、石原CNSセンター長（石原は理研放射線研究室主任研究員を兼務）と矢野加速器研究施設（RARF）責任者が協議し、理研の加速器施設を用いた共同研究を1999年度より実施し、それに必要な研究施設を理研内に

建設すること、その一環としての連携大学院の協力を2000年度（平成12年度）から開始することで合意した。それを受けて、1999年12月に理研の小林俊一理事長と東大の蓮實重彦総長が協定書に署名して、2007年3月31日までの理研RARF－東大CNSの共同研究が始まった。

その後、CNSは実験準備棟を和光キャンパス内に建設し、AVFやRILACのビームラインに自らの実験装置を建設・設置し、独自のRARF利用実験プログラムを展開した。一方、RARFは、CNSの研究プログラムに対してビーム供給を優先的に行うとともに、CNS装置の共同活用を図ることにした。また、東大大学院理学系研究科物理専攻に、理研の研究者による連携講座が設けられた。

CNS-RARF共同研究の初期の成果は、2003年3月にCNSとRARF両者により編集された「研究協力5年の成果」にまとめられているが、以下に共同研究で行った主なものの概略



AVFサイクロトロンが切っ掛けとなり、理研内に東大原子核科学研究センター（CNS）の実験施設が整備



を述べる。

〈RARF加速器施設の整備・増強〉

理研加速器グループの協力も得て、Deflector、Dee電極の整備、フラット・トップ加速によるAVFサイクロトロンビーム性能の改善と最大加速エネルギーの向上（約70%）。

RILACの後段加速器（VOIDレー型線型加速器）6基の新設による核子当たりのエネルギーの向上（4MeVから約6MeVまで）。

〈RIビーム発生装置CRIBの開発〉

AVFのビームを利用した低エネルギーRIビーム発生装置CRIBを開発し、主として、天体核物理分野の実験研究に利用。

〈CNS独自の研究〉

位置検知型ゲルマニウム検出器アレイと偏極陽子標的などの実験技術の開発。米国BNL研究所の超高エネルギー加速器RHICを用いた「重イオン物理」研究。

〈原子核の理論研究〉

特に、量子モンテカルロ法に基づく「モンテカルロ殻模型」の開発と、理研との共同で開発した超高速の並列計算機（「アルフリート」および後続機）を用いた不安定核に対する大型殻模型計算。新魔法数や殻構造の進化などについて殻模型研究。

〈若手研究者の育成〉

1998年から2002年の間に取得された学位数

は、博士12名、修士26名。なお、CNSで研究する若手研究者の総数は現在約30名。

〈CNS・RARF共催の研究集会〉

2002年までの国際的研究会の総数は15件、さらに毎年、理研の共催による国際サマースクールを開催。

国際協力研究の推進

RARFでは、外国研究者を理研加速器施設に招いて行う研究や、逆に理研の研究者が外国加速器施設に出向いて行う研究を、国際協力事業として積極的に推進した。加速器利用に関わる国際研究協力は、既に160cmサイクロトロン時代に始められたが、リングサイクロトロンへの移行期から一挙に拡大、拡張し、最盛期にはRARFに関与する国際協力協定は20件近くに達した。

その中でも特に活発だったのは、対中国、対ロシアなどの近隣諸国や対独国、対仏国、対イタリアなどの西欧諸国との研究協力である。中国に関しては、蘭州の近代物理研究所（IMP）との協力が、70年代以来続けられた。とりわけ、原子核実験の分野ではIMPの若手研究者が順次理研に派遣され、郷農や石原らの研究指導を受けた。ここで育った研究者たちの多くは、現今、IMPの中核を担う研究者として活躍している。後に、谷畑らはアジア連携大学構想の一環として北京大学との協力を進め、現地における夏の学校の開催などにより、中国の若手原子核研究者の育成に貢献した。

ロシアとの協力は、モスクワのクルチャト

フ研究所及びドゥブナ原子核研究所との間で進められてきた。前者は谷畑らのRIビーム科学研究室が主宰するもので、クルチャトフ研究所から同研究室の研究員に迎えたA・コルシェニンニコフを中心に、水素、ヘリウムの超重同位元素の研究をリングサイクロトロン等により進めてきた。一方、後者の研究協力で特筆すべきは森田などによる研究で、ドゥブナにおける新超重元素の探査実験に強く貢献してきた。

仏国との研究協力はCNRSに属する原子核・素粒子物理国立研究所（IN2P3）との協定に基づくもので、仏国全土の原子核研究機関が対象となる。リングサイクロトロンの建設時から開始され、当初は郷農らによるストラスブルグ原子核研究所における高速回転原子核の研究が中心であった。やがて旭らによるGANILでの偏極RIビーム実験がRIPS実験の前哨戦として行われ、さらに、リングサイクロトロンの始動時には、本林らがゲルノーブル大学のグループと協力してRIPSのRIビームを用いた天体核反応の断面積測定に成功した。IN2P3との研究協力のハイライトは隔年

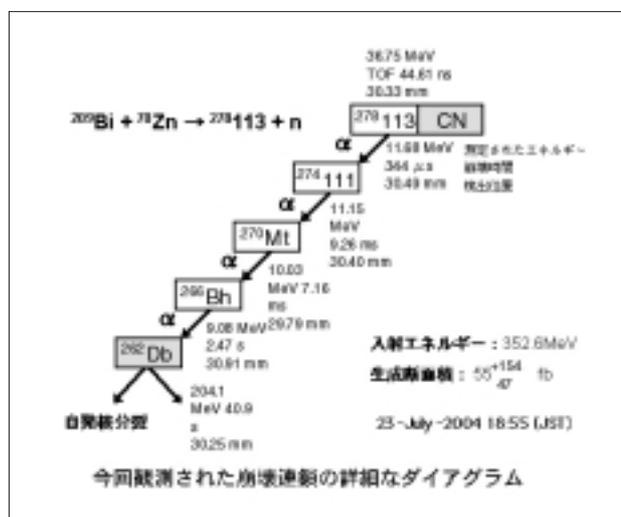
に行われた合同シンポジウムであった。

イタリアとの研究協力は、INFNとの協力協定により進められ、隔年に合同シンポジウムが開催されている。イタリアには先端的なRIビーム施設が存在しない。そこで、パドヴァ大学のC・シニョリーニは、伊国のグループを率いて来訪し、吉田敦や福田共和らと、RIPSによる中性子ハロー核の融合反応の研究を進めてきた。

重イオン加速器SISを用いた独国のGSIとの研究協力は活発で、顕著な成果を挙げている。SISは、理研のリングサイクロトロンに比べ、加速エネルギーが高く、また、より重いイオンを供給できる点に特長があり、RARF施設とは補完的な研究を可能にする。とくに谷畑らはSISを用いてNa同位元素などの核半径を系統的に測定し、中性子スキンの研究を発展させた。近年、東欧諸国との協力もともに活発になった。特に本林らが進めるハンガリーのATOMKIとの研究協力は、検出器開発も含



80日間の連続照射実験で産み出した新超重元素“113”の発見について記者会見する森田前任研究員（中央）、野依理事長（右）と上坪統括調整役（左）



む濃度の高いものである。

輝く成果

リングサイクロトロンを中心とする重イオン加速器施設を利用した研究の成果は多岐にわたっている。それらのうち、代表的な事例を以下に列挙する。1) から7) は原子核物理に、8) から10) は他分野に関わる研究である。

1) 原子番号113の新超重元素の発見

2004年7月23日の夕方に原子番号113の超重元素が、森田らの研究グループにより、理研のRILAC実験室で生成された。これは、RILACからの ^{70}Zn イオンビームを ^{209}Bi の標的に照射し、両原子核を融合させて合成したものである。低速で前方に飛来する核融合反応の生成核は、GARISを通過して分析・収集される。総計昼夜80日間にも及ぶ照射実験の末、4回の α 崩壊を連ねた後、核分裂で終えんする、一組の連鎖崩壊の事象が観測された。これは、生成された原子番号113の原子核が崩壊する姿を映し出したものである。新超重元素の崩壊時間は344マイクロ秒であった。

元素探査の長い歴史のなかで、日本人が新元素を見いだした事例は初めてである。RIBF計画に向けて強化されたRILACのビーム性能と反跳核分析装置GARISのユニークな特性がこの成功を支えている。

2) 新しい同位元素の発見

リングサイクロトロンの重イオンビームで起こる様々な様式の核反応を用い、これまで

存在が確認できなかった多くの新放射性同位元素 (RI: 不安定原子核のこと) が発見された。このうち、 ^{196}Rn 、 ^{197}Rn 、 ^{200}Fr は森田らのGARISグループにより、超重元素探査研究の過程で見いだされた。一方、桜井博儀らの東大グループはRIPSを用いて、入射核破碎反応から作られる中性子過剰の新同位元素を多数見いだした。その数は、1996年までに5種 (^{31}Ne 、 ^{37}Mg 、 ^{38}Mg 、 ^{40}Al 、 ^{41}Al) であったが、1999年には、さらに、 ^{31}F の存在と ^{28}O の不存在を見だし、また2002年には、 ^{34}Ne 、 ^{37}Na 、 ^{43}Si の3種を発見するとともに、 ^{33}Ne 、 ^{36}Na 、 ^{39}Mg は原子核として存在し得ないことも見いだした。これにより中性子のドリップラインは酸素同位体まで確定し、また、F (フッ素) からAl (アルミニウム) にわたる中性子過剰核の領域が一気に拡大した。

一方、水素やヘリウムの超重同位元素の探査研究が、コルシェニンニコフに率いられるロシアのクルチャトフ研究所のグループと谷畑らにより推進された。1994年には、RIPSの ^{11}Li ビームを用い、重水素標的に対する2次核反応を観測することにより、最も重いヘリウム同位元素である ^{10}He (その原子核は陽子2個と中性子8個からできている) が見いだされた。これらは、原子核が達成しうる中性子過剰の限界を明らかにした重要な研究である。

3) 「中性子 (陽子) ハロー」、 「中性子 (陽子) スキン」 の発見

原子核内の陽子数と中性子数のバランスがくずれると「中性子 (陽子) ハロー」「中性子 (陽子) スキン」などの現象が発生す

る。「中性子ハロー」は、米国のLBL研究所において、谷畑や杉本らの東大原子核研究所のグループにより、1985年に、最初に見いだされた。「ハロー」というのは後光の意で、中性子ハローとは、原子核の外側の広い領域に中性子が拡散分布している状態を指し、その拡がりは、全反応断面積の測定により決定される核半径の大きさから求められる。

中性子ハローは、ドリップラインに近く束縛が弱い ^{11}Li や ^{11}Be などの原子核に見いだされた。中性子ハロー核に特有な現象に、ソフト双極子励起と呼ばれる巨大励起がある。中村隆司、下浦らの東大グループによる ^{11}Be や ^{19}C のクーロン分解反応の測定により、その特性と機構が明らかにされた。

「中性子スキン」は、原子核中の中性子が過剰になると、陽子は原子核の中心部に偏在し、原子核の外側には中性子の皮膜（スキン）が形成される現象である。中性子スキンは谷畑らにより、 ^8He （陽子が2個、中性子が6個）などに対して、最初に見いだされた。さらに、鈴木健、小沢顕、谷畑らは、GSIとの共同研究により、ナトリウムの多数の同位元素（ $^{26}\text{Na}\sim^{32}\text{Na}$ ）に「中性子スキン」を確認した。一方、「陽子スキン」は ^{20}Na で見いだされた。

4) 変遷する「魔法数」の発見と新「殻模型」の進展

殻模型は、かつて、マリア・G・メイヤーとヨハネス・H・D・イェンゼンにより提唱され、1963年にノーベル物理学賞を受賞した

理論で、原子核の成り立ちの基本を説明するものである。この理論を特長づけるものは「魔法数」で、ちょうど元素の周期律表における希ガスの如く、中性子や陽子の数が魔法数に一致する場合に原子核の安定性が著しく増大する。このように原子核の特性を支配している、魔法数は、未来永劫、不変のものと考えられてきたが、RIビームによる核構造研究の進展により、中性子過剰の原子核ではそれらが著しく変転することが見いだされた。

この研究の端緒を開いたのは、本林や石原らによるマグネシウム同位体 ^{32}Mg の4重極転移強度の測定である。 ^{32}Mg は陽子12個に対して中性子20個をもつ原子核であるが、測定された4重極転移強度は異常に強く、通常核に対しては良き魔法数である20が、中性子超過の ^{32}Mg では魔法性を喪失することが示された。さらに、青井考や岩崎弘典らは、ベリリウム同位体 ^{12}Be とその周辺核の分光研究から、中性子過剰核における魔法数8の消滅を明らかにした。一方、小沢らは束縛エネルギーの系統的变化を調べ、新魔法数として、中性子数16を提唱した。

これらの実験成果は新しい殻模型の発展を促した。とりわけ、東大の大塚孝治らは、理研との協力研究により、テンソル力の効果を適切に考慮した新しい殻模型を提唱し、原子核の領域に応じて変遷する魔法数の法則を明らかにした。

5) 中性子過剰核の異常変形の発見

通常の原子核では、陽子と中性子は協調的、均一的に運動し、分布の形状が相似性を示す

ことが一般的である。それに反して、中性子過剰な原子核では、中性子と陽子が分離、独立して振る舞う特異な現象が見いだされた。

その一例は、過剰中性子がボンドの役割を果たし、複数のクラスターが分子状に結合した状態で、コルシェニンニコフらにより、 ^{12}Be の励起状態に見いだされた。一方、炭素同位体 ^{16}C では、卵型の異常変形状態が**今井信明**や**桜井**らにより見いだされた。陽子と中性子の分布が著しく異なり、陽子分布は卵の黄身の如くほぼ球形にも拘らず中性子分布は白身の如く大きく変形しているのが特徴である。

6) 3体核力の発見

複数の陽子や中性子が結合して原子核が形成される根源は、陽子や中性子などの核子の間で働く核力の存在にある。通常認識では、核力は2個の粒子の間で働くものと考えられているが、果たして、3個の核子が同時に関与する3体力が存在するか否かが長い間のパズルになっていた。

東大の**酒井**や**関口仁子**らは、重水素ビームと水素標的との弾性散乱を精密に測定し、後方角度への散乱強度から3体力の存在を見いだした。これにより、3体力を包含した原子核理論を構築する世界的動きが一挙に加速した。この発見は、リングサイクロトロンの重水素ビームと粒子分析器SMARTの優れた性能に負うところが大きい。なお、**関口**は、2003年度に「重陽子-陽子弾性散乱による3体力効果の探索」で、井上科学研究奨励賞を受賞した。

7) 天体核物理ルネッサンスの勃興

重力と並んで、星や宇宙の進化を司るものは、原子核現象で、とりわけ、不安定核が関与する核反応が重要な役割を果たしており、それらの反応断面積の大小が、星の燃焼や爆発の様相を決定する因子になっている。RIビームの出現により、これらの不安定核反応の断面積を本格的に測定することが可能となり、天体核物理研究のルネッサンスが招来された。

それに先鞭をつけたのは、**本林**、**石原**らによるホットCNOサイクルに登場する ^{13}N の陽子放射捕獲反応の研究で、逆反応である ^{14}O のクーロン分解反応を測定し、その反応断面積を決定した。これは、「高エネルギー・クーロン分解反応による放射捕獲反応断面積測定法」を最初に適用したものであるが、測定効率が極めて高いこの測定法の出現により、不安定核放射捕獲反応の断面積測定が広く行われるに至った。太陽ニュートリノの発生頻度を支配する ^7Be の陽子放射捕獲反応に関する、**岩佐直仁**らの研究は、代表的な事例である。なお、**本林**は、1998年に、「不安定核の電磁破碎反応による恒星燃焼課程の研究」で井上学位賞を受賞した。また、**岩佐**らは、1997年に、「クーロン分解法による $^7\text{Be}(\text{p},\text{g})^8\text{Be}$ 反応の研究」で物理学論文賞を受賞した。

8) 「マルチトレーサー法」の開発

核化学研究室の**安部文敏**や**榎本秀一**、無機化学物理研究室の**安部静子**らは、物質や生体の中を元素がどのように移動するかを調べる方法として、マルチトレーサー法を開発した。

これは、多種類の元素のRIを一挙に製造できる理研リングサイクロトロンの特長を活かしたもので、多種類の元素について同時に、かつ同一条件下で追跡（トレース）することを可能にした、画期的なトレーサー法である。

高エネルギー重イオン反応で生成される多種類の不安定核RIを同時に収集し、この“混合物”を化学的に処理し、マルチ化したトレーサーにして実験対象物に注入する。この方法によって、1回の実験で、同時に10種類から数10種類の異なったRIの追跡が行われる。この技術の応用は化学、生化学、生物学、薬学、医学などの多様な分野に広がり、元素の移動、循環、堆積などに関する貴重なデータを生み出された。なお、「マルチトレーサー製造法」は1997年の注目発明に選ばれ、安部文敏は1998年に科学技術庁長官賞（研究功績者）を受賞した。

9) 植物の新育種法の開発

吉田植物機能研究室の吉田茂男主任研究員や阿部知子研究員らがサントリー基礎研究所の協力を得て、花持ちのよい園芸用パーベナの品種改良に成功、商品化も果たした。パーベナは約2cmの小花が多数集まって5～6cmの丸い花房を形成し、春から秋にかけて開花するが、従来品種は通年開花性（花持ち）が若干弱い。そこで従来品種に窒素イオンビームを照射するとともに、次世代の植物として発達する種子をつけない「不稔性」が認められる系統を選抜するなどによって実現した。同様に、ピンク色のペチュニアや花卉数の多い赤色ダリアの新品種が商品化された。

重イオンビームで標的遺伝子を狙い新品種植物を創成。サントリーなどの産業界との共同研究へ発展



高エネルギー重イオンビームを用いた植物の突然変異誘発技術では、標的以外の遺伝子を傷つけないので、変異株そのものが新品種となり、育種期間が2～3年と従来の手法よりも短縮された。理研が世界に先行して開発した技術で、わが国独自の基礎技術として注目されている。なお、吉田、阿部、鈴木賢一の3名は、2002年に「重イオンビームによる突然変異誘発法の開発と応用」で日本植物細胞分子生物学会・技術賞を受賞した。

10) RIビームによるオンライン物質研究

旭応用原子核物理研究室の旭や上野秀樹らは、自ら開発したスピン偏極RIビームにより、偏極不安定核を物質試料に打ち込み、崩壊ベータ線の角度分布を指標にする、超高感度のNMR法を開発した。この方法によれば、ごく少数の不安定核を打ち込むだけで物質の診断

が可能となり、さらに、ビーム・エネルギーを制御することにより、表面やバルクの物性が調べられる。旭らは手始めに、BからAlにわたる諸元素に対して、20種に及ぶ不安定同位体の核モーメントを決定した。

一方、**小林義男**（同研究室）らは、RIPSからの得られるマンガン同位体 ^{57}Mn のビームを用いた、オンライン・メッサウワー分光法を開発した。RIビームを利用する方法では、放射線源に短寿命核を用いることが可能になり、メッサウワー分光を新しい元素に拡張する方途が拓かれた。なお、旭は、2001年に、「入射核破碎反応におけるスピン偏極現象の発見とそれを用いた不安定核の構造の解明」で井上學術賞を受賞した。

RIビームの世界

相次ぐ発見

リングサイクロトロンによる重イオン科学の研究が進むのに伴い、RIビームの果たす役割がすこぶる重要なものとなってきた。

前述したように、RIとは放射性同位元素のことであるが、原子核物理学では「不安定原子核」のことを指す。「安定核」は我々の身近に定常的に存在する原子核で、陽子数と中性子数がほぼ同数であるため、自らは決して崩壊することがない。これに対して、「不安定原子核」であるRIは、陽子数と中性子数のバランスがくずれており、一方が過剰に多かったり少なかったりするため、放射線を放出して、短時間のうちに、安定な原子核に壊変する。このため、「不安定原子核」は、燃焼

している星の内部や加速器を用いた人為的な核反応などの、特殊状況においてのみ生成される。

自然界に存在する安定な原子核は約260種類に限られているのに対し、不安定原子核の総数は、理論的には、6,000~7,000種類あるといわれており、これまで約2,500種類が実験的に確認されている。ちなみに理研では、前節で述べたように、2002年までに ^{10}He をはじめとして13種類の新同位元素を見いだした。2004年には、原子番号113の新しい超重元素も発見された。

元素誕生の仕組みや宇宙誕生の謎に迫るには、星や宇宙の進化を司る、不安定原子核の構造や反応の研究が欠かせない。こうした不安定原子核の研究では、まず数千種類あるといわれるRIを、1つでも多く探し出すことが出発点であり、さらに、それらをビームとして利用することが肝要である。

従来、RIの発見やRIビームの生成が困難であった主な理由は、加速器性能の限界に帰せられる。RIビームは、安定な原子核を壊して作るのだが、それには、標的核に衝突させる重イオンの速度を光の速度の数10%程度に上げることと、重イオンビームの強度が極めて高いことが特に重要である。この2つの要請は、リングサイクロトロンなどの先端の高エネルギー重イオン加速器の出現により、徐々に満たされつつあり、次に述べる「入射核破碎反応」の適用により、多様なRIビームを容易に取り出す道が開かれた。

入射核破碎反応と入射核破碎片収集装置「RIPS」

入射核破碎反応というのは、高エネルギーの重い原子核（入射核）のイオンビームを標的核に衝突させた際に起こる代表的な反応過程であり、その特長として、入射核の一部は弾き飛ばされるが、残りの部分は元の速度をほぼ保ったまま前方へ飛び出すという、便利な性質をもっている。この性質を用いれば、高エネルギーの重イオンビームを標的に当てることにより、入射核より軽い質量の不安定原子核が多種多様に作り出され、ビームとして取り出せることになる。この現象は、1979年に、米国のローレンス・バークレー研究所（LBL）においてT・J・サイモンやG・D・ウエストフォールらによって見いだされた。

80年代の初頭に至り、杉本所長（当時）に率いられた東大原子核研究所のグループは、この現象を積極的に利用することを思い立ち、入射核破碎片をRIビームとして用い、不安定核の反応全断面積を測定する実験を提案した。LBLの高エネルギー加速器ベバラックを用いて行われたこの実験は、谷畑や、**浜垣秀樹**、**小林俊夫**ら若手研究者の活躍により、1984年に最初の測定に成功した。観測された ^{11}Li などの断面積が異常に大きいことから、中性子ハローの現象が見いだされた。一方、ほぼ同時期に、仏国の国立重イオン研究所GANILでも、多荷イオン原子のための分析装置LISEを転用して、RIビームの生成実験が試行され、その際、多数の新同位元素が見いだされた。

入射核破碎片分離収集装置「RIPS」は、こ

れらの先駆的・試行的研究の成功を受けて、理研リングサイクロトロンの中核的な実験装置として提案され、1989年に完成した。この装置は、十全な強度を実現した、世界で最初の本格的なRIビーム発生器で、前節で述べたように、不安定核に関する未開の研究領域を一挙に切り開き、RIビーム利用研究に画期的な進展をもたらした。

こうして緒についたRIビームによる不安定核の研究は、程なく、世界の重イオン加速器施設を席卷した。米国のミシガン州立大（MSU）、独国のGSI研究所、仏国のGANIL研究所などを筆頭にRIビーム施設の新設（または増強）計画が、世界各地で進められ、「RIビーム科学」の広範な研究分野が急速に伸張するに至った。こうした第1世代RIビーム施設における赫々たる成果を受けて、今日では、「次世代RIビーム」を目指す大型施設の建設計画が、日、米、欧の3極で競われている。

新たな挑戦

RIPSの開発と利用研究の成果により、「RIビーム科学」の先達としての自負と自信を深めた理研は、更なる発展をめざして新しい挑戦を始める。

現存の理研リングサイクロトロンは、本来、アルゴン（Ar）程度までの比較的軽い領域のイオンの加速に重点を置いたものである。即ち、軽い元素のイオンであれば光速の40%まで加速できるが、ウランのように重い元素のイオンの場合は、15%までにしか加速できないのである。このため、現在、RIPSのRIビームが威力を発揮できるのも、原子番号が15程

度以下の軽い元素に限られている。

一方、RIビームに対する需要は、元素の全領域に及んでいる。広い元素領域のRIビームを生成するためには、重い原子核のイオンを十分なエネルギーに加速することが求められる。エネルギーが低いと入射核破碎核反応が起こり難く、また、生成された破碎片原子の電子剥離が不十分になるため強度の高いRIビームの生成が困難になるためである。そこで、

第3節 むすび

こうして、仁科に始まる加速器科学は、さまざまな時代を超えて大河となり今日に至る。仁科のサイクロトロン第1号と2号は、第2次大戦の悲運に遭った。しかし、仁科による第3号で辛うじて灯を繋ぎ、熊谷の第4号によって世界に復活を告げた。その後、上坪の第5号のリングサイクロトロンにより世界の先端に躍り出、そしていま、矢野の第6号によって究極の重イオン加速器として世界の頂点を目指す。

とりわけ、上坪の「第5号」リングサイクロトロンの成功は、原子炉開発に重点化した国の原子力政策の中で辛うじて実現し、理研加速器科学に大きな転換期をもたらした。それは、上坪自身による世界最強の放射光SPring-8を生み出し、また、永嶺のRAL「ミ

ウランに至る全元素領域にわたって十全なエネルギーと強度を持ったイオンビームの加速を実現するための、新しい加速器計画が構想されるに至った。現存のRARF加速器を前段加速器に使い、それに強力な後段加速器を接続して、全元素にわたってRIビームを生成しようとする「RIビームファクトリー」計画である。「次世代RIビーム」施設の世界の先駆けとして、1995年より建設が開始された。

ユオン科学」協力や石原によるBNL「スピン物理」協力の成功へと展開して来た。

2003年、上坪はSPring-8の本格稼働を見届けて高輝度光科学研究所長を退き、和光研究所（所長）に戻り、翌年4月にRIビームファクトリー（RIBF）計画の統括として重イオン加速器科学の現場に復帰した。その間、上坪は科学技術庁長官賞（科学技術功労者、1991年）と紫綬褒章（1999年）を受けた。

いま上坪は、「仁科から熊谷」、「上坪」そして「矢野」への展開を「ホップ」「ステップ」「ジャンプ」と称しながら、2年後のファースト・ビームを期して、RIBF建設の現場で陣頭指揮をとる矢野の御意見番として、仁科の源流に思いを馳せながら、理研加速器科学の前途を見守る。