

加速器が解き明かす科学の謎

《仁科加速器研究センター》

理化学研究所創立から間もない1930年代初頭から、世界では、静電加速器（コッククロフト・ウォルトン型、バンデグラフ型）、線形加速器（リニアック）、円形加速器（サイクロトロンやシンクロトロン）など、さまざまな加速器が開発されてきた。この粒子加速器の登場により、原子核反応を人工的に引き起こすことが可能となり、原子核物理学をはじめとする研究が飛躍的に進展した。中でもサイクロトロンは、大強度の陽子や重陽子ビームを発生できるので、これによって強い放射能を持つRI（放射性同位元素）が製造できるという特徴を備えていた。

理研の仁科芳雄は1937（昭和12）年に国内初（世界で2番目）のサイクロトロンを建造し、わが国における原子核物理、核化学、放射線生物学を総称する「加速器科学」をスタートさせた。例えば、この1号サイクロトロン（小サイクロトロン）によって製造したナトリウム24、リン32というRIは、1940年に生物の代謝研究に用いられている。

1号以来、理研は継続的にサイクロトロンを建造してきた。2号（1943年）、3号（1952年）、4号（1966年）に続いて、5号リングサイクロトロンRRC（1986年）と6号AVFサイクロトロンを建造した。この2基は重イオンリニアックRILAC（1981年）と共に今日では旧施設となった多段式重イオン加速器施設を構成し、RIビーム科学を開拓する役割を担った（**88年史**にはここまで記載されている）。

それ以降、7号サイクロトロンfRC（2004年）、8号サイクロトロンIRC（2005年）、9号サイクロトロンSRC（2006年）が建造された。これらは、旧施設の一部を組み込みながら、RIBF（RIビームファクトリー）という世界最高性能のサイクロトロン施設に結実した。2007年4月に共用運転を開始し、技術開発を重ねて、2017年現在もなお世界一の座を保ち続けている。今後5-6年はその地位を維持し、世界の核科学者は当分和光詣でを続けることになる。70年前に仁科が描いた夢の一つが実現したのである。

RIBFの完成に先立つ形で、2006年4月には、仁科加速器研究センター（理研仁科センターRNC）が誕生した。仁科センターは、加速器を基盤とする研究を総合的に展開するため、素粒子・原子核の理論・実験研究グループ、加速器グループ、さらに生物や化学への応用研究を行うグループを統合して設立された。後に宇宙線関連の研究グループも加わり、2017年現在、かつての仁科研究室の再来ともいえる陣容となっている。

この章では、RIBF建設に至る仁科以来の歴史に始まり、RIBF建設の詳細と経緯、生命科学への応用、RIBFで展開する原子核物理学や元素合成に関わる天体物理学の研究、英国ラザフォード研究所との協力とミュオン・中間子科学研究、米国ブルックヘブン国立研究所との協力とハドロン物理学、さらに理論物理学の

研究について「88年史」以降の活動を中心に記述されている。なお、ニホニウム生成に至る超重元素に関する研究はこの章とは別に記す。

第1節 仁科からRIBFへ

理研のサイクロトロン1号-4号

仁科芳雄の学統を受け継ぐ理研の研究者たちは、仁科小サイクロトロンを1号（1937〈昭和12〉年完成）、仁科大サイクロトロンを2号（1943年完成）、戦後再建された小サイクロトロンを3号（1952年完成）、そして1958年に財団法人から特殊法人理化学研究所になって和光に移転し（1967年）、そこで完成させた160cmサイクロトロンを4号（1966年完成）と呼んでいる（図1）。

図1左上は大サイクロトロンのマグネットが完成した時の記念写真で、中央に仁科が立っており、右側が長岡半太郎、左側が矢崎為一である。撮影されたのは1937年であり、小サイクロトロンが完成した時、すでに大サイクロトロンの建設はここまで進んでいたのである。ローレンス（E. O. Lawrence）の助言がきっかけで戦後再建された3号の傍らに立っているのは杉本朝雄（左上2号の写真では前列右から2番目）である。この3号の完成は1952年で、わが国で戦後最初に運転を始めた加速器である。

4号は写真中央に腰かけている熊谷寛夫（元西川正治研、初代サイクロトロン研究室主任研究員）がリーダーとなって建設した。これは非等時性で弱収束であった大サイクロトロンの再建といえるものである。この4号が建設されるころ

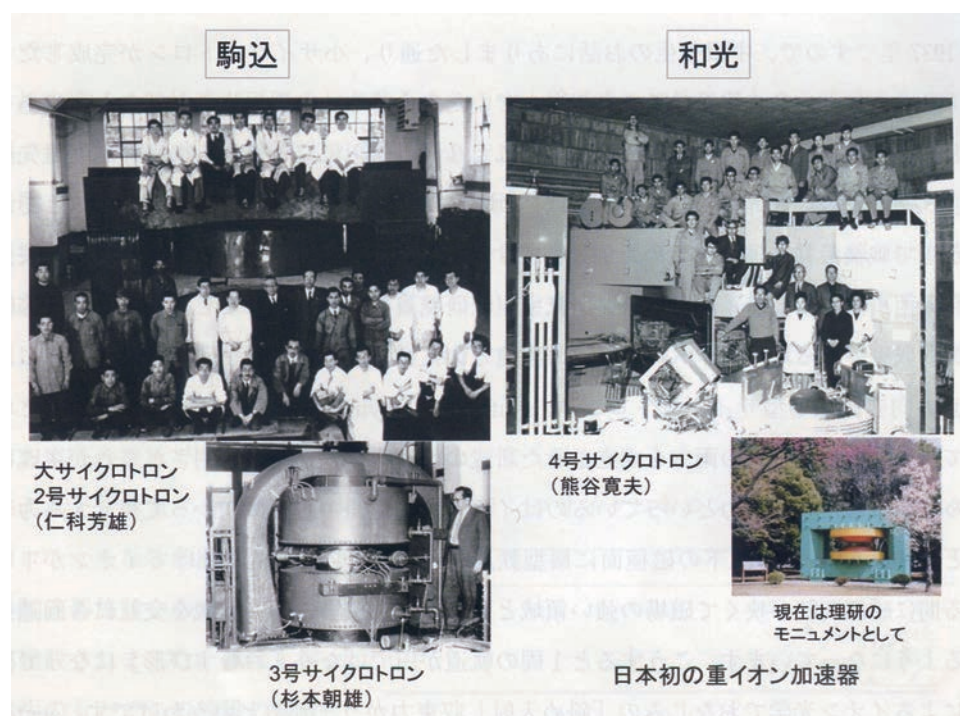


図1 理研2号、3号、4号サイクロトロン

には、周回方向変動磁場型（Azimuthally Varying Field：AVF）サイクロトロンといって、等時性と強収束の両方を成立させた新式のサイクロトロンが発明され、主流となっていた。また、さらに収束力を強くしたAVFも1960年にアメリカのUCLAで完成していた。

にもかかわらず熊谷があえて旧式のサイクロトロンを選択したのは、大サイクロトロンを再建して早く世界に追い付きたいという強い願いがあったからに違いない。熊谷は新設の東京大学原子核研究所（田無市、現西東京市）で160cmサイクロトロン（日本初の可変エネルギーのサイクロトロンであるが、これも非等時性で弱収束）を1957年に完成させており、その技術をそのまま理研4号に使用しようとしたらしい。

ただし、4号には現在のRIBFの成功につながる付加価値が付与された。それが、重いイオン加速である。実際にフッ素まで加速し、実験研究に用いられた。つまり、4号はわが国初の重イオン加速器であり、当時、アメリカのローレンス研究所（LBL）、ソ連のドゥブナ合同原子核研究所（JINR）と並ぶ装置であった。1990年まで24年間稼働して現在はRIBFのルーツを顕彰するモニュメント（図1右下）となっている。

以来、重イオン加速は理研のお家芸となった。その要となる技術は重イオン源である。当時の重イオン源はPIG（Penning Ion Gauge）型といって、ペニング（Frans M. Penning）が発明したPIG真空計と同じように、静電圧で加速した直流電子流で分子のガスを電離した。真空計では残留ガスを電離してイオン電流から真空度を測るが、イオン源ではガスを注入してイオン流を取り出す。電離の効率を良くするために磁場をかけて電子を螺旋状に走らせる必要があるが、当時の日本では新しかったこの技術の開発のために、中心となった河野功をはじめとするサイクロトロン研究室の先人たちが大変な苦勞をした。

1980年代に入って、加速器は粒子ビーム自身（1次粒子ビーム）を利用していった時代から、2次粒子ビームを利用する時代へと大きく展開していった。例えば電子加速器におけるシンクロトロン放射光、陽子加速器における中性子、中間子、ミューオン、ニュートリノ、反陽子ビームなどである。重イオン加速器においては、2次粒子ビームとして新たに登場したのがRIビームであった。これらに共通するのは、加速器技術が高度になって高エネルギー・大強度の1次粒子ビームを発生できるようになったことであり、それが2次粒子ビームの実用化を可能にしたのである。

松田一久が遺したメモ

理研のお家芸はこの後、上坪宏道に受け継がれるが、そこには、熊谷サイクロトロン研究室の副主任研究員であった松田一久の考え方が脈々と流れているといえる。松田は1969年、「理研サイクロトロンの次期計画について」と題する重要なメモを書き残した。それは6章構成になっている（エピソード参照）。

1971年、松田副主任研究員は不幸にも不慮の事故で急死され、上坪が熊谷の後を継いでサイクロトロン研究室の主任研究員に着任した。1972年、上坪の提



理研サイクロトロンの次期計画について

～松田一久の1969年メモから抜粋して解説～

《§ 1. 出発点》「技術的な面から、サイクロトロン建設に要した人的あるいは精神的な資産の水準を維持するためにも、次の段階を考える必要があった。」——このような指摘は大プロジェクトの宿命ともいえる。

「1969年新年にmeson factoryの提案を行った。」——4号サイクロトロンが本格稼働したのは1967年なので、その2年後にはもう次期加速器建設計画が提案されていたことになる。

《§ 2. 理研の現状と今後》「理研では原子核・放射線についての基礎から応用までの研究を行うけれども、原子力の開発という観点から見れば、基礎的研究をうけもつことになる」——理研と原子力研究所の違いがここで強調されている。

「加速器を考えると、その可能性は、AVFサイクロトロン、電子線形加速器、1GeV附近まで陽子を加速するmeson factory、および最近非常に注目されてきた超重元素の生成を目指す重イオン加速器である。」

この指摘の後に、「仁科先生的な大きな考え方にはmeson factoryが合致するが、ロス・アラモス計画のコピーにならざるを得ない」とある。

《§ 3. meson factory》「この提案は、理研に隣接する米軍用地の返却問題ともからんで、400m×1.2kmの用地要求となっているはずである。しかしながら、研究計画はわれわれの日常真剣に取り組むべき問題であり、一方、米軍用地返却は別次元の問題なので、前者が後者にあまり依存することははなはだ好ましくなく、客観情勢によって研究計画が根本的にふりまわされることになる。」——2016年現在も、和光キャンパスの東南部には空き地がある。これは米軍のAFN（旧極東ラジオ放送局FEN）のアンテナ用地（11ha）である。東西冷戦中は潜水艦との通信用の長波のアンテナがあった。

《§ 4. Cyclotronによる私案》この章で複合加速器の構想が示されている。それはInjector→小型sector cyclotron（陽子16MeV）→sector cyclotron（陽子150MeV）→meson factory（陽子750MeV）であるが、重イオンInjector（例えばタンデム加速器）をsector cyclotron（陽子150MeV）の前段に加えることも指摘されている。

《§ 5. 第1段計画》ここで、100kV入射器→2.5MeV加速器→16MeV sector cyclotronの提案をしている。

《§ 6. 準備研究》「この計画に対して重イオンの加速が問題となる。私見ではこの第1弾は重イオンを考えない方が人手からも経済的にもよいのではないかと思う。」

案で重イオンリニアックとAVFを前段加速器としリングサイクロトロンを後段加速器とする重イオン複合加速器構想が実現へ向けて動きだした。

松田の構想にあるmeson factoryをRIBFに置き換えれば、すでにこのころからRIBFへのレールが敷かれていたように見える。それは松田が指摘した「仁科先生的な大きな考え方」の延長線であったに違いない。

旧施設：第1世代RIビーム

4号の写真で熊谷の上の上立っているのがお家芸を受け継いだ上坪である。その上坪が、理研の次の世代である重イオン線型加速器と5号のリングサイクロトロン、6号のAVFサイクロトロンからなる多段式重イオン加速器施設をわが国で初めて建設した。これが旧施設である。

旧施設では、5号の理研リングサイクロトロン（RIKEN Ring Cyclotron：RRC）が主加速器となっていて、理研リニアック（RIKEN Linear Accelerator：RILAC）と6号のAVFサイクロトロン（AVF）がその前段加速器になっている。リングサイクロトロン、別名、分離セクター型サイクロトロン（separate sector cyclotron）というのは、AVFの周回方向磁場の強弱の度合いをさらに大きくして収束力をより強くするため、扇型のマグネット（セクター磁石）を4台分離して配置し、イオンが磁場のある領域とない領域を交互に4回通過させるようにしたものである。そのため、RRCでは1周の軌道は角の丸まった四角形となる。1968年ミシガン州立大学の理論家ゴードン（M. Gordon）が提唱した方式である。

セクター磁石の数を増やせばさらに強い収束力が得られるので、経済性を問わなければ原理的には加速エネルギーをいくらでも高くできる。また、シンクロトロンと違って入射ビームを全て連続的に加速、出射できるので大強度ビームが得られる。1974年にスイスのポール・シェラー研究所（PSI）に世界初の8セクターリングサイクロトロンが完成したが、このサイクロトロンは2017年現在でも、なお世界最大のビームパワー1.4MWの陽子ビームを供給している。

6号のAVFはイオン源を外部に設置してイオンをサイクロトロンの真上から中心にスパイラルインフレクターで入射する方式になっており、この方式は日本では初めてである。イオン源としてはわが国初のECR（Electron Cyclotron Resonance）重イオン源と偏極重陽子源を搭載している。このAVFの設計当初、日本にはECRイオン源の経験がなかったので、大型のAVFと従来のPIGイオン源という構成が考えられたが、ECRイオン源技術の将来性を見込んで、あえて技術的困難に挑戦し、現在の外部イオン源搭載型の中型AVFを実現したのである。これによって旧施設の建設予算を大幅に削減することができた。

ECRイオン源も高エネルギーの電子で、分子を電離するところはPIG型と同じである。PIGは静電場で電子を加速するが、ECRの場合は高周波電場を使う。すなわち電子を磁場中でサイクロトロンのように高周波の電場で加速する。ただし、周波数が高いのでマイクロ波を使うことになる。ECRはPIGより高エネルギーの電子が得られ、それを分子に撃ち当てるので高電離のイオンができる。加速エネルギーは電荷と加速電圧の積なので、重イオン加速器の加速効率が格段に向上する。

これはフランスのプラズマ研究者ゲラー（R. Geller）が発明したものであるが、理研が採用に踏み切った時は、まだ将来性ははっきりしていなかった。ECRイオン源の性能はマイクロ波の周波数を上げれば良くなるが、イオンの電離で生じるプラズマを、より強力なミラー磁場とカスプ磁場で閉じ込める必要が生じる。



図2 RIBF建物全景航空写真(上)、建屋内の加速器と実験設備の配置(下)
 AVFとRILAC以外の加速器と実験設備は全て地下室に収容されている。旧施設と新施設は地下でつながっている。RIBFは第4号160cmサイクロトロンとその研究棟を解体・撤去して建設された。

理研では、10GHz、18GHzと周波数の高いECRに挑戦してきたが、図2の28GHzECRISでは超伝導電磁石を用い、世界最高性能を誇っている。この28GHzECRISを開発したのは、中川孝秀、大西純一で、中川は「大強度ECRイオン源の研究」で諏訪賞を受賞した。

RILACは小寺正俊(元熊谷研、初代リニアック研究室主任研究員)の発明によるもので、世界で唯一の加速周波数可変型加速器である。これは、後段のRRCが周波数可変を想定したためであった。

旧施設の建設は、1975年にまずRILACから開始し1981年に完成、RRCが1986年に、AVFが1989年にそれぞれ完成した。そして主力実験装置であるRIPビーム発生装置RIPS(RIKEN Projectile fragment Separator)が1990年に完成してフル装備となった。全部で15年の歳月を要した。

生物科学への応用：がん治療

次に新施設建設の話になるが、その前に、加速器の生物関係への応用について紹介しておく。

そもそも日本の放射線生物学は、仁科研究室で生まれた。1943年の理化学研究所案内には、武見太郎の名前が見える。武見は元日本医師会長として勇名をさせたが、一方で放射線医学の草分けであった。以来この放射線生物学の伝統は、160cmサイクロトロン施設（4号）にも旧施設（5、6号）にも継承された。図2にも、旧施設の左端にBiologyと記された照射室がある。実はこの照射室は、理研のすぐ隣にある国立埼玉病院と提携して「アルファ線がん治療」を行うために建設されたものであった。患者を運ぶために入り口もエレベータも独立になっている。しかし、1984年、「第1次対がん10カ年総合戦略」の中でがん治療は放射線医学総合研究所が行うことに決まり、理研は基礎研究で協力することになったのである。

照射装置は放医研が作り、理研が重イオンビームを供給することになった。治療のポイントは、体内のがんの位置に重イオンビームのブラッグピーク（細胞に一番エネルギーを与えるところ）が来るようにエネルギーを調節して、がん細胞は殺すけれども、途中の正常細胞にはあまり影響がないようにすることである（ブラッグの名前は、X線回折の研究でノーベル物理学賞を受賞したブラッグ父子にちなむ）。

研究開発は、AVFが完成して核子当たり135MeVの軽い原子核のビームが利用できるようになった1991（平成3）年から始まった。1994年には治療装置HIMACが放医研に完成し、治療が始まることになった。眼球と脳の間にな大きながんできて治療不能とされた初期の患者に、炭素線をうまく照射してがん細胞を殺すのに成功し、治療不能といわれた患者は見事に治癒したのである。今では、重粒子線がん治療装置が、群馬県、兵庫県、佐賀県、福井県、山形県、神奈川県で稼働中か建設中である。

重粒子線による育種

古きよき時代の理研では、主任研究員が一緒によく飲んだ。矢野安重の飲み仲間植物機能研究室の吉田茂男主任研究員がいた。ある花見の夜、吉田主任から、生物学では突然変異体ができるという重要な知見が得られるという話が出た。そこで矢野は、重イオンを生物に照射してみたらどうかと提案した。吉田にとって、それは初めて聞く言葉だったが、放医研の実験の話をしたところ、吉田は乗ってきて「やってみよう」ということになった。何も起こらないか、それとも全部死んでしまうか。吉田も矢野もそう予想した。

照射条件が二つあるところが予想を難しくする。エネルギー付与（つまり物理でいうエネルギー損失）と照射線量の両方とも最適にしないと、うまくいかない。放医研のデータで細胞を殺す量はおおよそ分かっているが、DNAの二重らせんをほどほどに切って再生させて突然変異を起こさせるデータなどどこにもなく、勘で決めるしかなかった。

仕方なく、矢野の勘に基づいて条件を決め、重イオンビームの先に、マウスの代わりにタバコの苗を置いた。この実験結果は生物学者を驚かせた。めったにお目にかかれない変異体、つまり葉緑体のないアルビノ突然変異体がたくさんできてきたからである。矢野の照射条件は、後で分かったことだが、誠に大当たり、まぐれ当たりだった。この成果をたまたま吉田研究室に来ていた全米植物生理学会長のブッキヤナン (Bob Buchanan) カリフォルニア大学教授に話すと、ローレンス夫人が存命なので、彼女にこの理研の成果を話したいと言って帰国した。しばらくしてブッキヤナン教授から矢野に、ローレンス夫人の直筆のお礼の手紙が送られてきた (図3)。この方法は実用化され、花卉園芸、樹木、日本酒、わかめ、米などの有用突然変異の作出に利用されている。生物学者と物理学者がタッグを組んで研究を進めるのは、理研の創立以来の伝統である。

阿部知子と福西暢尚は「重イオンビームを用いた新しい育種法の開発」の業績により「産学官連携功労者表彰文部科学大臣賞」など多くの賞を受賞した (図4)。

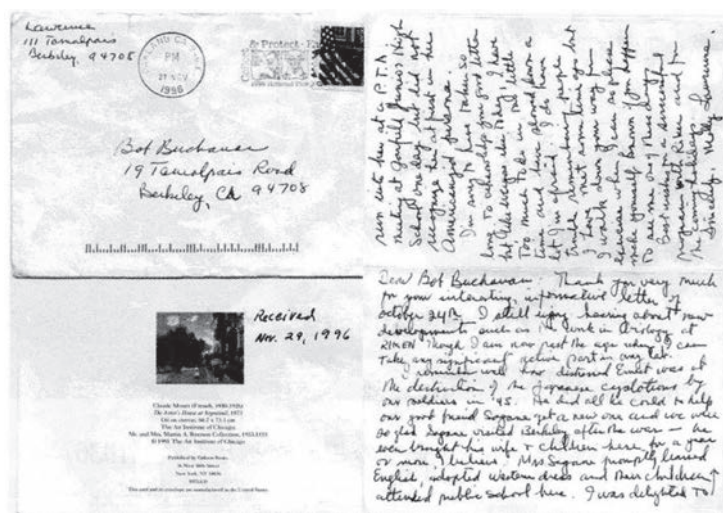


図3 Lawrence夫人から全米植物生理学会長B. Buchananカリフォルニア大学教授への手紙 (1996年11月29日)



図4 平成19年度文部科学大臣表彰科学技術賞授賞式 (右から阿部知子、鈴木賢一 (サントリー)、金谷健至 (同左)、福西暢尚、龍頭啓充)

第2節 RIBFの建設

RIBFの学問的背景

1980年代に始まるRIビームは、天然に存在する安定な原子核やその周辺の核を対象としてきた従来の研究に、大きな変化と進展をもたらした。理研は、いち早くこのRIビームの原子核研究にもたらす可能性に着目し、旧施設に高速RIビームを供給する装置RIPSを建設した。加速器の性能と相まって、軽い原子核のビーム強度は世界を凌駕し、さらに、高速RIビームを用いた新しい研究手法を次々に開発することにより、理研が原子核や元素合成の研究に主導的な役割を果たすことになる。例えば、後にも述べるLi-11核をはじめとするいわゆるハロー核の構造研究、Mg-32核などの変形の観測やF-31核の存在の確認などを通した中性子魔法数20の異常性の発見、宇宙での爆発的要素合成に関わる不安定核の陽子捕獲反応率の決定などである。これらを通じて、大きさによらず密度が一定であるとか、魔法数で特徴づけられる殻構造を持つといった、原子核についてわれわれが持っていた常識が覆されつつあった。

これらの成功は、RIビームによる研究の豊かな将来を予感させた。比較的軽い領域に限られていたビーム核種の拡大や、ビームの大強度化を進めれば、研究が飛躍的に発展すると考えられた。軽い領域で確立した中性子ハローは、より重い原子核でどう現れるのか、魔法数の異常性は、中性子数の大きな領域にも一般的に見られるのかどうか。より重い原子核に見られる変形の多彩な様相を解明する契機となるような新しい現象はあらわれるか。それらの解明を通して、われわれは原子核の本質の理解に至るのか。

また、原子核の存在限界はどこにあるのか。言いかえると、どのくらい中性子と陽子の数のバランスを崩すまで原子核でいられるのか。鉄より重い元素を造り出したといわれるr過程とは、どこでどのように起きているのか。それに関わる不安定原子核の性質はどのようなものか。中性子過剰な核物質の性質と中性子星の生成はどう関わるのか。そうした重要な問いは、拡大された核図表を舞台に多彩な研究を展開することによって、初めて答えることができ、原子核という存在の本質に迫ることができる。そのためには、RIビーム生成能力を飛躍的に増大させる必要があり、RIBFは、世界に先駆けてその要求に応えるべきものとして構想されたのである。

新施設

RIBFの建設には紆余曲折があった。以下、その詳細を記載するが、その前に「結果としてこうなった」というポイントを前もって幾つか挙げておく。

まず施設の構成であるが、すでに述べたように、新施設では、旧施設の主加速器であるRRCを前段にして、後段に、固定周波数リングサイクロトロンfRC (fixed-frequency Ring Cyclotron)、中間段リングサイクロトロンIRC (Intermediate Stage Ring Cyclotron)、超伝導リングサイクロトロンSRC

(Superconducting Ring Cyclotron) の3基を建造した。

これらで、RRCで加速したビームの速度を順に上げていく仕組みとなっている。リングサイクロトロンはイオンの速度の増倍器であり、fRCで2倍になる。そのため、fRCの取り出し軌道の長さは、入射軌道の長さの2倍になっている。IRCでさらに1.5倍、そしてSRCでさらに1.5倍にしており、その結果、ウランまで全ての元素を光速の約70%まで加速できる。

このようにして加速された高速重イオン（安定原子核）は、RIビーム生成標的中の原子核との衝突によって破碎され、多種類の高速RIビームになる。それらを標的下流の超伝導RIビーム分離装置（Big RIKEN Projectile fragment Separator : BigRIPS）により、実験に使用するRIビームへと純化して実験設備

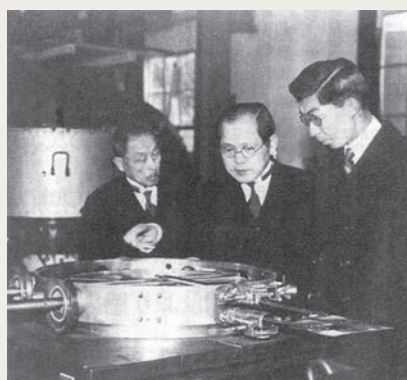


天皇皇后両陛下の研究所行幸啓



RRCの上で天皇陛下にご説明（左）、SRCの前で天皇皇后両陛下にご説明（右）

RIBF建設のリーダーだった矢野安重は、幸運にも、今上天皇に2度もサイクロトロンについてご説明する光栄に浴した。1度目はRRCでやっと成果が出始めた1992（平成4）年の3月である（上の写真左）。天皇陛下の後ろは小田稔理事長である。理研では初めての行幸であり、理研全体が緊張感に包まれていた。2度目は（同右）その14年後で、RIBFが始動する直前の2006年10月であった。この時は皇后陛下もご一緒の行幸啓であった。



1937年11月の秩父宮親王殿下のお成り

天皇陛下の後ろは野依良治理事長である。ちなみに下の写真は、1937年に秩父宮親王殿下（昭和天皇の弟宮）に仁科芳雄が小サイクロトロンの加速装置をご説明している写真である。日本の皇族は世界で最もサイクロトロンに詳しいロイヤルファミリーかもしれない。

に輸送される。これが最終的にでき上がった新施設である。

次は液体ヘリウムに関して。図2のRIBF建物の写真で、新施設と旧施設の間に先端が丸みを帯びた棒状のタンクが6本立っているのが見える。これはヘリウムガスの高圧タンクで、SRCの超伝導NbTiコイルを超伝導状態に保つための液体ヘリウム5000リットルとBigRIPS用5000リットル、合わせて1万リットルもの液体ヘリウムを一時的に高圧ガスとして貯蔵するためのものである。このようにRIBFは日本でも有数の大規模液体ヘリウム冷凍液化施設となっている。

第三はコジェネシステムについて。図2の建物写真のBigRIPSの文字あたりに、コジェネ（熱電併給）施設CGSがある。これもRIBFの特徴の一つで、世界で初めて、大型加速器施設にコジェネシステムを導入した例となった。東京ガスから天然ガスを購入し、ガスタービンで自家発電している。電気出力6.5MWに加え、排出される高温高圧の水蒸気を吸収式冷凍機で再利用して3.3MWの冷房能力を生み出している。これは、東電からの給電が止まったときでも液体ヘリウムを安定供給する非常用電源にもなる。またエネルギー大量消費施設でCO₂排出による環境負荷を減らすことを目指したものである。

第四は東大との関係である。同じ写真の左上端にCNSという文字がある。この建物は東大の原子核科学研究センター（Center for Nuclear Study、歴代のセンター長は、石原正泰、酒井英行、大塚孝治教授で、現在は下浦享教授）で、RIBFに独自の加速器設備と実験設備を建設して、仁科センターとRIBFの共同運営をしている。今やRIBFは日本の原子核研究の中心拠点といえるが、こうした研究推進の体制づくりは仁科研究室からの伝統である。高エネルギー加速器研究機構（KEK）の原子核研究グループもRIBF棟内に和光原子核科学センター（宮武宇也センター長、和田道治教授）を造り、共同運営に参画している。

東大CNSのRIBFへの移転話は、当時CNSの初代センター長であった石原正泰東大教授と理研の矢野との間で立案された。石原が東大を説得し、矢野が小林俊一理事長（当時）を説得して実現した。まだ文部科学省が生まれる前で、役所を説得するのが一苦勞であったが、これによって仁科センターを国際原子核ハブ研究所にする構想が一步前進したのであった。

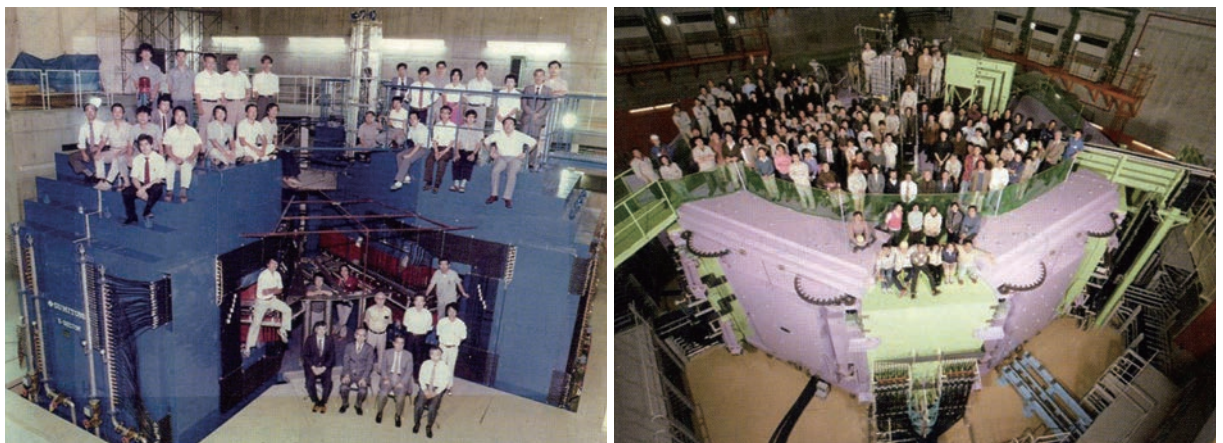


図5 1985年5月にRRCの磁場測定が完了したときの記念写真（左）、2005年11月SRCの定格励磁に成功したときの記念写真（右）

サイクロトロン of 電磁石ができると皆で記念写真を撮るのが理研の仁科芳雄以来の伝統である。図5の左は、1985年5月にRRCの磁場測定が終わって撮った記念写真で、最前列の椅子に腰かけているのは、右から、小寺、中根良平副理事長、宮島龍興理事長（元仁科研究室）、上坪宏道である。上坪の真上に矢野が写っている。図5の右の写真は20年後の2005年11月5日だが、SRCの超伝導電磁石を定格まで励磁することに成功したのを祝って撮った記念写真である。磁石の上に乗っている人の数から、SRCがいかに大きいかがわかる。

RIBFの最初の構想

いつごろからRIBFのような計画が考えられていたのだろうか。図6は、1986（昭和61）年12月16日15時34分にRRCからファースト・ビームを取り出した時、加速器制御室（RIBFの制御室もここになる）で撮られた記念写真である。万歳をしているのは元永昭七サイクロトン研究室副主任研究員で、旧施設建設の現場リーダーである。元永の右の手の位置が矢野である。そして右に順に、一人置いて後藤彰、その右が加瀬昌之であり、この3人がRIBFの完成まで苦労を共にする。この時から20年後に第9号SRCが完成したのであった。

この1986年はどんな時代だったのか。11月にはKEK（当時は高エネルギー物理学研究所）のTRISTANが始動し、戦後欧米に大きく水をあけられていた日本の加速器界が世界に追い付いた画期的な年であった。

しかし理研は問題を抱えていた。8月に160cmサイクロトン実験棟内で核化学の実験者が内部被曝をする事故が起こったのである。これを新聞が大きく取り上げ、理研の構内では加速器の運転がしばらく禁止されてしまった。10月に



図6 第5号RRCサイクロトンからのファーストビーム取り出し成功の記念写真

は第11回サイクロトロン国際会議を池袋で主催したが、残念ながらRRCファースト・ビームの報告ができない事態となった。さらに、12月のファースト・ビームの時にRRCが真空漏れを起こし、これを新聞があたかも放射能漏れのごとく報じたため、役所から「理研は運転体制を整えるまで今後RRCの運転開始はまかりならぬ」というお達しが出してしまった。

それに応えるため、加速器、原子核、応用研究の研究室からなる理研加速器研究施設 (RIKEN Accelerator Research Facility : RARF) という研究体制が生まれた。初代の施設長は放射線研究室の石原正泰主任研究員である。これは「災いを転じて福となす」であった。この経験を通して、理研の原子核・加速器グループは、放射能漏れは決して起こしてはならぬこと、また、良いと思われる計画が多くの人々に支持されるとは限らないことを学んだからである。放射線の安全教育とともに、地元や一般社会に加速器科学の魅力をしっかりと広報することが肝心である。ちなみに、このRARFを母体として「理研仁科センター」が誕生することになる。

RIBFの構想が“公表”されたのは、翌1987年である。矢野と石原の共著で雑誌『パリティ』に掲載した記事の中でであった。リングサイクロトロン建設15年の話の最後に、将来の夢として「RIビーム工場」を実現したいと記された。当時進行中の旧施設の建設は、予算上、Ⅰ期とⅡ期に分けてあり、石原の主導で建設が進められたRIPSは、Ⅰ期で構想が練られた。このRIPSがRIビーム工場つまりRIBFへの夢を膨らませたといえる。

RIBFに結び付く構想は、もう一つあった。同じ1987年、「原子力の日」記念講演会の「超伝導技術の進展と原子力」のセッションにおいて、矢野は理研リングサイクロトロン施設の将来計画として、超伝導セクター電磁石によるリングサイクロトロンの話を持ち出した。その時の構想では、現在のRIBFとは反対側に新施設を建設する計画となっていた。ちなみにこの時点ではⅠ期だけが完成し、Ⅱ期のAVFサイクロトロンも実験室の下半分も建設されていない。もちろんRIPSもない。

RIBFの構想が語られた1987年は、高温超伝導の発見で熱狂した年であった。また小柴昌俊らが超新星1987Aからのニュートリノをカムイオカンデで捉えた画期的な年でもあった。RIBFでの中心的な研究の柱は、超新星爆発による重元素合成メカニズムの実験室での検証としており、くしくも後者のテーマと関係していた。時計を進めると、RIBF建設が始まってすぐ、理研内で「元素誕生の謎にせまる」というビデオ科学映画が製作された(図7)。この作品は文部大臣賞に輝き、担当した望月優子(現、理研仁科センター研究ユニットリーダー)が有馬朗人文部大臣から賞状をいただいた。このビデオ(英語版も制作され、ドイツとハンガリーでは、それぞれの言語に翻訳された)はRIBFの広報に大いに活用されたのであった。

望月はその後、高橋和也、中井陽一と共に南極氷床コア科学を推進し、その業績で「ナイスステップな研究者」賞、湯浅年子賞金賞を受賞した。



図7 望月優子著、RIBF計画推進室監修の教材ビデオ

RIBFの建設

いよいよRIBF建設の話である。1990年に旧RARF施設がフル装備になった。この時点で、重イオンビームの性能はフランスの国立重イオン加速器研究所GANIL、米ミシガン州立大学MSU、ドイツ重イオン科学研究所GSIと並んで世界第一級となった。しかし、なお望み高く「世界に冠絶する」性能にしたいとリーダーの矢野は熱望した。そうして世界中の優秀な頭脳を理研に結集させたい。

建設予算は極めて大きく、それが大問題だった。幸運は、1994年に小田稔理事長の後任として、原子核物理の大家である有馬朗人が理事長に就任したことである。RIBF計画は小田理事長の時代に仕込まれていた。有馬理事長は矢野の提案を聞いて早速、「こういう大型の施設を造るときは国際評価を受けないといけない」と指摘し、有馬自身の肝いりで国際的な評価を受けることになった。この後、RIBF計画はほぼ毎年のように国内外の評価を受けるようになった。

1994年5月21日付の矢野のメモ「RIビームファクトリー加速システム構想」が残されている。その中で、ECRイオン源→RFQ→RILAC→RILAC2→CS→RILDC→RRC→SRCという重イオン加速器システムが提案されている。これがRIBFの最初の具体的な提案である。下線部のところが新設である。このアイデアは、現有のRILACで加速したウランビームをRILAC IIでさらに加速して、荷電変換CS (Charge Stripper) 用炭素膜に通し、より電荷の高いウランイオンにして、それをRILDCでRILAC出口の速度まで減速してRRCに入射する、というものである。実は、このようなことは、加速器技術の常識からは、「まことに不本意な設計」であったが、当時の理研のECRイオン源技術が高くなかったため、苦肉の策といえるものであった。

このRILAC2は、東大CNSの予算を使って新設することになった。図2のRILACの後段にタンクが6台描かれているのが、それである。この部分の増設で超重元素合成実験に必要なエネルギーが得られるようになり、リニアック実験室のGARISという実験装置で、2004年の7月に最初の113番新元素発見のイベントが観測された。森田浩介主任研究員は2005年にこの業績で仁科記念賞を受賞する。そして2012年8月に決定的なイベントを観測した（第I編第5部第5章参照）。

ところで、CSの先のRILDCはどうなったか。製作したが必要ないことが分かって、ただ据え置いているだけになってしまった。このような場合、簡単には諦めないのが理研の伝統で、これは、図2のAVF室の新入射器RILAC IIの主たる部品として再利用された。この新入射器のおかげで、RIBF実験と超重元素実験が同時並行でできることになったのである。

1995年度の準備研究費

紆余曲折を経て、1995年度に約2億円の準備研究費が認可された。国際アドバイザー会議に提示したRIBF構想には、RRCで加速した重イオンビームを1台のSRCで核子当たり150MeVまで加速し、BigRIPSでRIビームにして「世界初の電子とRIの衝突実験」を可能にする、と書かれていた。

ここには幾つかポイントがある。まず、入射核破碎反応でRIビームを発生するには、核子当たり150MeVで十分であるということ。つまり、これ以上核子当たりの入射エネルギーを上げて、さほどRIビームの強度を上げることはできないと当時は考えていた。この施設の最大の目的の一つは、こうして作った不安定核と電子を衝突させて、その電荷分布すなわち陽子分布を正確に測定し、ハロー構造を明らかにすることであった。

RIビームは原子核同士の衝突で生成するために、必然的にエミッタンス（ビーム中の粒子の方向と速度のふぞろいの度合い）が大きく、そのまま電子と衝突させても衝突効率（ルミノシティという）が悪い。そこで、ACR（蓄積冷却リング）で蓄積・冷却してエミッタンスを小さくし、それにDSR（二重蓄積リング）で電子加速リングから入射される高エネルギー電子ビームを衝突させる、というものである（原理的にはこれでいいが、なんとなく釈然としないものが残る。しかし、まあ、とりあえずここから行こう、となった）。

1995年度の準備研究予算が認可され、まずは超伝導リングサイクロトロンモデル電磁石を作って、どこが難しいか検証してみるようになった。その前にサイクロトロンのデザインで一番厄介なのはビームの入射なので、入射軌道のシミュレーションをいろいろな方式を考案して試してみた。その結果、入射装置の設計に無理があり過ぎるということになってしまった。初期の設計では超伝導リングサイクロトロンSRCの中心領域が、あまりにも狭過ぎるのが問題であった。SRCの設計は一筋縄ではいかない、と関係者一同が再認識したのである。

RIBFの設計建設には、理研の加速器チームだけでは人材が不足していた。そこで、わが国を代表するほぼ全ての加速器メーカーに依頼して、それぞれのトッ

ブ設計者を出向の形で出してもらうことになった。この入射軌道のシミュレーションに関わった何人かも、そうした面々である。彼らは理研の人々と10年以上同じ釜の飯を食べることになる。

設計の大変更

それでどうしたか。結論をいうと、1台のSRCを二つに分けるといふ大幅な設計変更をすることになった。それは1996年に矢野がカルカット（インド）のVECC研究所との協定締結に向かう飛行機の中でひらめいた。巨大な1台のSRCを二つに分ければ、うまく入射ができることに気が付いたのだ。

SRCをIRC（中間段リングサイクロトロン）とSRCに分割すれば、SRCの入射領域が広がって入射が可能になるばかりでなく、IRCとSRCの間でビームを二つに分ければ、新実験室と旧実験室での同時ビーム利用ができるようになる、ということである。これに気が付いた矢野は興奮した。もともと旧実験室はどうなるのか心配していたが、これで旧施設も生かすことができ、一挙両得となる。しかも、建物も含めた総建設費は、この方が安いことが後で分かった。矢野はこのアイデアをインドに着いてすぐ話したので、日本のメンバーよりインドの友人の方が早く知ることになった。

帰国した矢野は建設チーム全員を集め、今までの設計は白紙に戻すこと、これからはサイクロトロンを2台にすることにして、最終的に図8のデザインで建設予算の獲得に向かうことを伝えた。第1期ではIRC、SRC、戻しビームライン、BigRIPS、RIビーム実験装置。第2期で、MUSES（Multi-Use Experimental Storage rings）ということである。総工費800億円ぐらいの予算要求だった。最初はデラックスなものを造りたいと提案したが、いろいろあって最終的には約500億円で決着したのであった。

1996年、橋本龍太郎政権が発足して緊縮財政が敷かれた。新規予算は全て認めないという。困ったことになったが、有馬理事長が「これはもう2年前からすでに進めている」、「これはすでにある計画で、新しいものではない」と主張し、

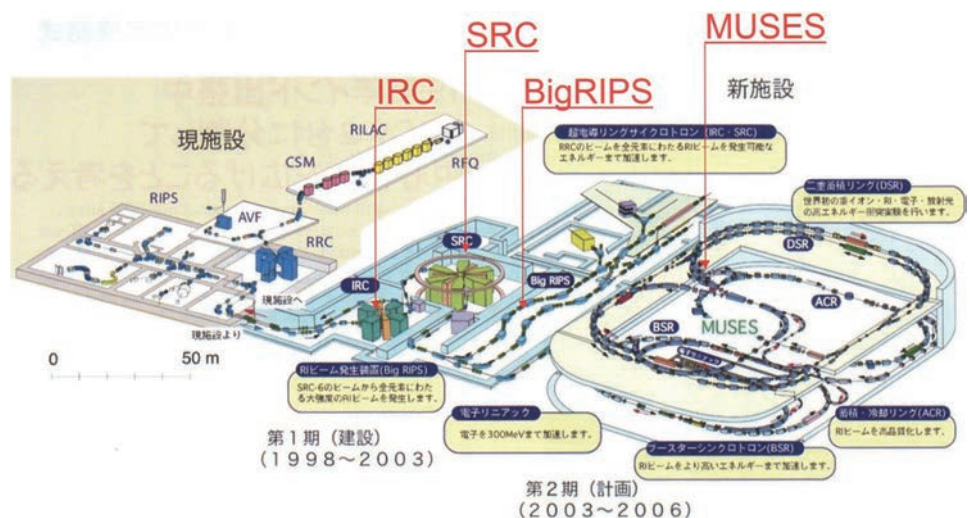


図8 概算要求したRIBF

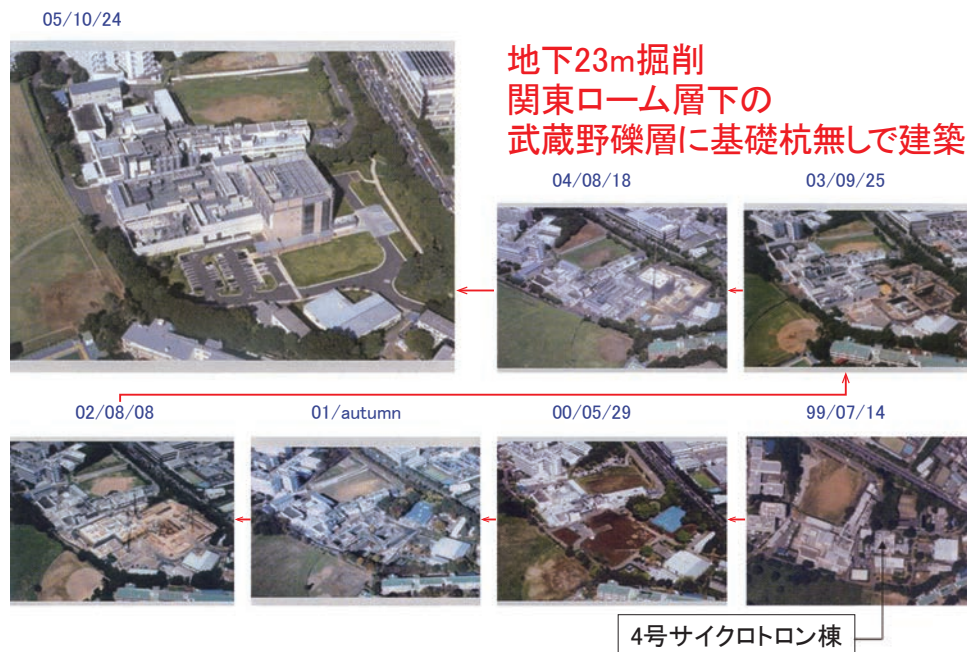


図9 RIBF棟建設の歴史

結局、建設予算が認められることになった。

RIBF建設計画は科学技術庁（当時）の原子力委員会で評価を受ける。原子力委員会は原子力長期計画（長計）を策定し、これに従って計画実現の優先度を決めるので、この長計書の中にまずは記述される必要があった。長計の中で、原研の大強度中性子ビーム施設（後のJ-PARC MLF）、大強度陽電子ビーム施設（実現されなかった）、そして理研のRIビームファクトリーが記述された。RIビームファクトリー建設計画は最終的に大臣折衝で認められたが、後に役所からローマ字とカタカナの予算要求はいかなものか、とある議員からクレームがついたという話を聞いた。

図9の航空写真はRIBF棟建設の歴史である。右下の99年7月の写真に4号サイクロトン棟が見える。これを解体・撤去してRIBF棟を建てることになり、図8の加速器・実験設備計画に従って設計した。2階建てのMUSESを収容するようになっている。

安全管理

4号棟の右下に見える連なった建物は、小学校の校舎である。この校舎のすぐそばに世界有数のRI発生装置を建設することになるので、慎重に進める必要があった。まず、わが国で最も放射線安全管理に詳しい外部の専門家にRIBF棟放射線安全性検討委員会のメンバーになってもらい、評価していただいた。評価は、まずは建築予定の建物は外部に向かっての放射線遮蔽能力が十分あるかである。もちろん建物内部で作業者が放射線被曝をしないような安全対策が十分なされているかも評価された。放射線の安全性に関する知識や経験が豊富な上叢義朋、福西暢尚、伊藤祥子がすご腕を発揮し、最も科学的に妥当な手法で遮蔽能力を定量的に評価しているということで、「安全」のお墨付きをもらうことができた。

これをもとに、放射線安全担当者は和光市議会、地元自治会へRIBF建設のお願いを丁寧に説明して回った。そしていよいよ建設工事開始となったのである。

最初の大事業は、放射化している4号サイクロトロンを除染、放射化物の永久保管、そしてモニュメントへの改造であった。現在、和光キャンパスに整備されているように、伊藤が首尾よく立派なモニュメントに変身させてくれた。

建築工法は旧施設と同じにした。20mぐらいの深さのところは岩盤と同じ硬さの厚い礫層があり、その上にコンクリート造りの建物の躯体を単に乗せるだけで、杭はまったく打っていない。

建物は加速器棟と実験棟に分けて2期に分けて施工した。写真から2003年に加速器棟が竣工したのが分かる。竣工後すぐにSRCの組み立てを始め、2005年10月にRIBF棟の完成となった。

SRCコイルも「新デザイン」に変更！

図8のSRCをよく見ると、図10の左の「旧デザイン」がまだ使われている。ミュンヘン工科大学、GANIL、MSU、JINRの超伝導リングサイクロトロンの設計は全て、このように、常伝導のリングサイクロトロン of セクター電磁石をただ超伝導化する、という設計であった。理研もスタートは同じだった。しかし、セクター磁場を所期の仕様の4.3Tまで発生させようとする、空間に漏れ出す磁場が大きくなり過ぎるので、これを巨大な超伝導シールドコイルでアクティブにシールドしようという設計にしたのである。こんな巨大な超伝導コイルをどこで製作するのが大問題だったが、解決を先送りにしていた。

図11が、新旧デザインの超伝導メインコイルである。「旧デザイン」は浸漬冷却といって、ステンレス製の容器に液体ヘリウムを満たし、その中に超伝導コイ

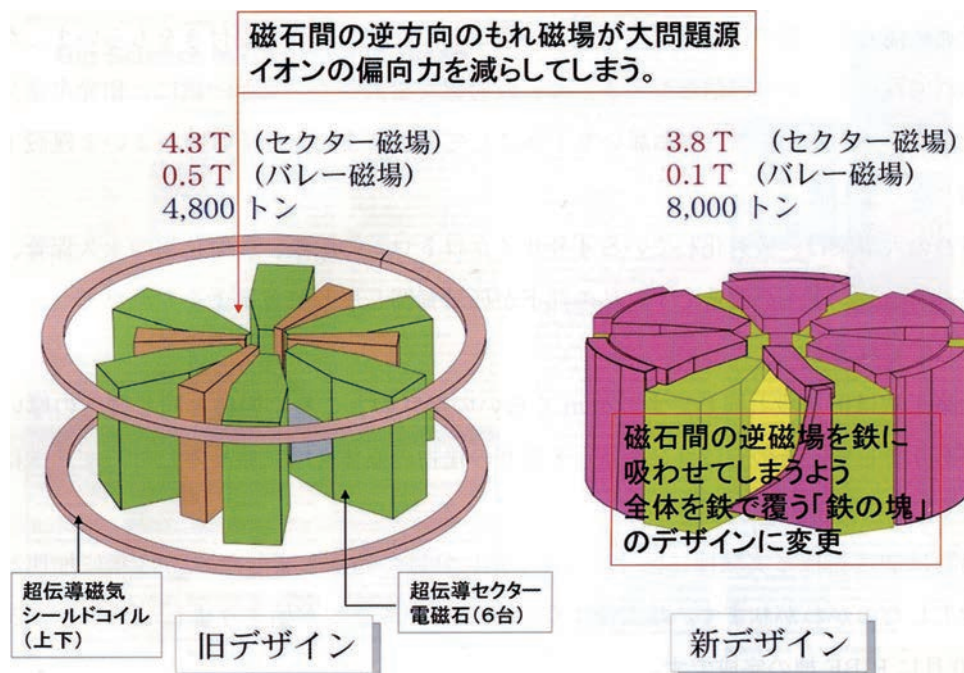


図10 SRCの設計大変更(1)

ルを漬けて転移温度約10K以下に冷やす。

超伝導線はアルミの母材の中心にNbTi（ニオブ・チタン）線をはめ込んだ構造で、何らかの原因で超伝導状態が破れたとき（クエンチしたとき）、すぐに大電流5000Aをアルミの母材にバイパスしてNbTi線が焼損しないようになっている。これをアルミ安定化超伝導線という。従来は銅安定化（超伝導）線が主流であったが、理研ではアルミ安定化線を世界で最初に採用することにした。製作がしやすく剛性（微量の不純物Znが混合している）も十分で安価なところが魅力であった。

大問題は、メインコイルにかかる甚大な拡張力をどう支えるかであった。「旧デザイン」では、コイル容器を鉄芯に留めつけて支えることにしていた。一見するとこれで良いように見えるが、物量のある鉄芯も冷やさねばならないので、冷却に数カ月という大変な時間がかかることになる。この問題も先送りになった。

「旧デザイン」でメーカーと契約し、詳細設計が始まった。超伝導セクター電磁石を1台先行製作して、仕様どおり動作するかどうか、工場で試すことにした。そして1台分の鉄ヨークが工場で組み上がったころ、矢野は一大変更を決意した。SRCの設計を基本的に変えてしまうことにしたのである。当然、電磁石のデザインも変更になる。これは常識破りであったが、しっかりとした理由があった。それは、この段階まで「先送り」してきた諸問題の解決が避けて通れなくなったことと、その解決策がはっきりと見えてきたことであった。その答え、集大成が「新デザイン」であった。

図11に「新デザイン」のメリットが列記してあるが、これら全てが「旧デザイン」ではデメリットであり、先送りしてきた諸問題であった。矢野は次のように回想している。「そのころ、私は夜な夜な鉄芯が低温脆性で割れる悪夢を見る



図11 SRCの設計大変更(2)

ようになった。このままでは、所期の仕様を下げるしか道はない。そんなところまで追い込まれてしまった。しかし、ある晩、図10の設計の大変更と図11のコイルの大変更について、おぼろげなアイデアが同時に浮かんだのだ。これが正解かもしれないと思うと、居ても立ってもいられなくなり、すぐにチームにこのアイデアを話したのである。」

1999年11月29日付の「可変フラッター型SRC（従来方式との製造コストの比較）」という矢野のメモに、鉄シールドの提案が記されている。また、1999年12月9日付の「矢野シールド付SRC（常温ポール）」というメモには、連結板で主コイルの拡張力を支え、ポールを常温にできる構造の提案が残っている。

予想どおり、この提案はチームの大反対に遭った。しかしそのまま製作したら大失敗する、と矢野は必死に説得を試みた。そのうち、根負けしたメンバーが少しずつ出てきて、このアイデアで先送りした全ての問題が果たして解決するのかどうか、一から検討し直そうということになった。

矢野はすぐに自らメーカー幹部に連絡した。契約している製作を全て停止してほしいこと、ただし、設計変更の案があるので、それを製作してほしいこと、見積もりではその方が製作費は安く済むこと、新しい構造は簡単で性能が良いことを挙げ、要するに無理難題を押しつけたのであった。答えは意外にも、「いいでしょう。矢野さんにお任せします」であった。これで少し眠れるようになった、と矢野は昔を思い出す。

デザイン変更による恩恵

ポイントは二つあった。

一つは、磁石間（バレー）に発生する逆方向の漏れ磁場を「新デザイン」のように鉄の磁気シールドに吸収して、イオンビームが走る領域への逆磁場を減らすというアイデアである。逆磁場が大きいと、セクター磁場でせっかく中心に向かって曲げたにもかかわらず、バレーで曲げ戻されてしまい、全体としてイオンビームの曲げ力が大きくなる。サイクロトロンは全体の曲げ力で決まるので、この逆方向の漏れ磁場をセクター磁場と関係なく減らす方法を考えないと、加速能力を大きくできない。

この当たり前の問題に気が付き、「新デザイン」でそれを解決したのである。漏れ磁場が減ったために、必要なセクター磁場も下がり、超伝導コイルにかかる拡張力も小さくなった。もちろん超伝導の磁気シールドは不要になった。さらに放射線の自己遮蔽構造なので、建物のコンクリートの壁厚が減り、建築費も減った。

二つ目は、常温の磁極に横穴をあけてステンレスの連結板を通し、この連結板で超伝導コイル容器の拡張力を支えるというアイデアである。これができれば、低温脆性破壊の問題は解決し、冷却時間も相当に減る。実はこの穴は、等時性磁場を作る超伝導トリムコイルの負荷を軽減するために必要であることが分かった。最後の難問は、超伝導トリムコイルの構造であったが、チームの一人の奥野広樹が間接冷却方式の構造を考案し、問題を解決した。

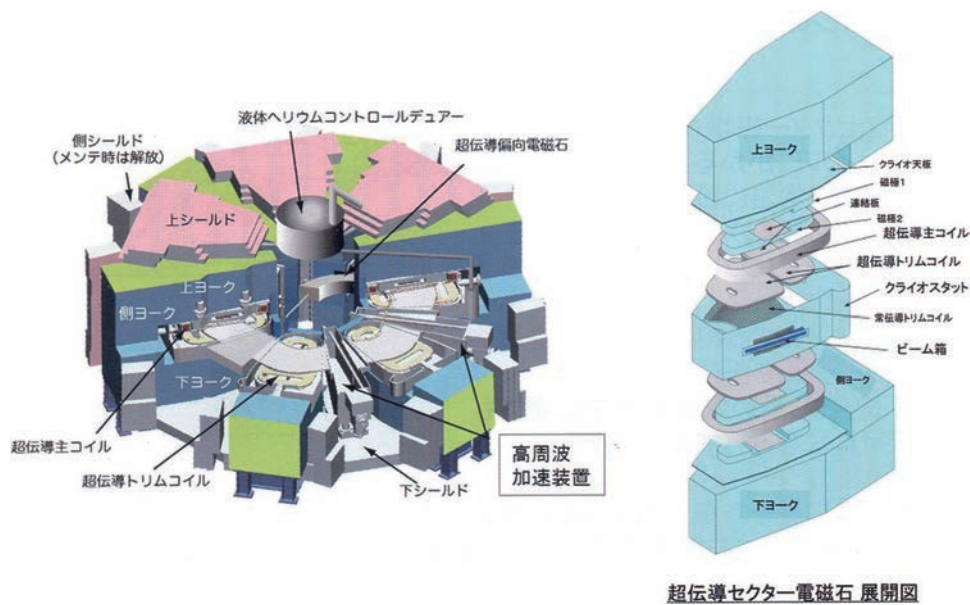


図12 SRCの全体構造と超伝導セクター電磁石の展開図

鉄シールドのおかげで必要な起磁力が下がったため、コイルの巻き数が相当減って大量に超伝導線が余ってしまった。そこで新たに超伝導線を調達することなく間接冷却の超伝導トリムコイルを製作できるようになった。この時、「やはりこれが正解だったか」と矢野は思った。

こうして最終的に図12のような構造に決まった。製作を止めて1年半が過ぎており、異例中の異例であった。ともあれ新しい概念設計が決まって、これに沿って詳細設計・製造と進んでいった。契約額は旧デザインで決まっていた。部品点数が減り、構造が劇的に簡単になったために製作コストは減ったが、その一方、鉄シールドのために約4000トンの純鉄を新たに調達する必要性が生じた。しかし、運良く鉄相場が下がっている時だった。結局、契約額を変えずに仕様変更ということになった。当然理研には責任があるが、ペナルティーには至らなかったのである。

では、旧デザインで製作した1台のヨークはどうなったか。新デザインに合わせるために鉄を切り貼りしたため、磁気特性が他の5台と少し違ってしまった。

この違いは、コイル電流の調整で補正できる範囲内にあったので問題にはならなかった。見た目も明らかに違っているが、今では「知る人ぞ知る」、デザイン変更の象徴である。矢野安重は「世界初の超伝導リングサイクロンを擁するRIBFの実現」で欧州物理学会加速器部会のGersh Budker賞を受賞し(図13)、また、奥野広樹は代表として、大西純一、福西暢尚、坂本成彦、久野和男(三菱)、川口武男(三菱)、



図13 選考委員長から、Gersh Budker Prizeのメダルを受け取った矢野

仙波智行（日立）、密本俊典（住重）と共に、「世界初の超伝導リングサイクロトロンの開発と建造」で諏訪賞を受賞した。

小型fRCの導入と予算のやりくり

1999年、アメリカでRIBFの性能をしのぐRIA計画（後にFRIBとなる）が提案され、分厚い報告書が出版された。その中でRIBFとの性能の違いを強調し、「大強度RIビームを発生するには、核子当たり400MeV（光速の70%）のウランビームが必要で、RIAはそれを目指すのがRIBFは核子当たり150MeVなので競争にならない」とされた。そしてRIビーム生成率の違いをグラフで提示した。これが本当なら、数十倍の生成率の違いになってしまう。

矢野はこの時初めてウランの核分裂によるRIビーム発生率と核子当たり400MeVの威力を知った。「これは参った。早く言ってくれよ」という事態になったのである。

ではどうしたか。ヒントはチームの雑談から得られた。そして「RRCとIRCの間に小型のサイクロトロン（fRC）をもう1台入れて、IRCの前でスピードを上げてやれば、製作中のIRCとSRCをこのままにしても、ウランビームのスピードを核子当たり350MeVにはもっていける」ということに気が付いた。SRCで発生する磁場の限界から400MeVは無理でも、である。

問題は予算である。fRCは年次建設計画書の中には書かれていない。結論から先にいうと、年次建設計画書にあった3台のCGS（コージェネ設備）のうちの1台だけ建設し、2台を取りやめてその予算でfRC（予算書にはビーム入射効率増加装置とした。サイクロトロンとはいっていない）を導入させてほしいということにした。理由は「RIAに負けてしまうから」である。この予算要求が最終的には認められることとなった。

そもそも、CGSの導入にも紆余曲折があった。事の始まりは、RIBF計画を理事会に説明した時で、「世界一の加速器施設を造るのは良いが、京都議定書も話題になっているおりに、電気を湯水のごとく使うのはいかなものか、環境問題に留意せよ」と指摘されたのである。別の大問題もあった。東京電力と受電計画の打ち合わせを施設部と一緒に重ねていくうち、東京電力が「受電容量が大き過ぎるので、現在の特高変電所を增強しなければならない」といつてきた。試算すると想定をはるかに上回る予算が必要なことが分かった。

困り果てていた時、電気技術者の藤縄雅が、CGSが有望だという知恵を授けてくれた。この示唆に乗って、複数台のCGSで自家発電すればどうかを検討してみたところ、こちらの方が建設費は安いし環境にも良いという結論になったのである（火力の発電効率が約40%に対してCGSは約60%もある）。ところが、このCGS導入案に施設部が大反対をした。だいたいそんなものが安定に動くのか、というわけだ。施設部との関係が悪くなってはらちが明かないので、施設担当理事に「CGSを加速器の一部として導入させてほしい」と頼み込んだ。理事には「加速器部門が導入して運転も加速器部門がするのであれば導入を認める」という中庸な判定をもらった。そこで概算要求にCGSの建設が盛り込まれることに

なったのである。CGSの中央操作室は加速器の制御室の隣に造った。

fRCとCGSが予算においてどういう関係にあるかという、CGSは加速器の一部となったので、これをどうしようと施設部には関係がないことになり、先ほどのような予算の組み替えが可能になったのである。

これでウランを核子当たり345MeVまで加速できるようになった（なぜ350MeVでないかという、350MeVのときの周波数ではfRCの共振器に寄生振動が乗ることが分かり、これを避けるために少し下げて345MeVにした）。しかし、もう一つ問題があった。

それは、ウランの核分裂で発生したRIビームのエミッタンスが、入射核破碎反応で発生したRIビームのエミッタンスより格段に悪いことであった。原因は二つの大きな質量の核に分裂するとき互いに反跳するためである。図8のBigRIPSは2本になっているが、これは入射核破碎反応で同時に2種類のRIビームを造って使おうとしたからである。エミッタンスが悪いということは、非常に大きな口径の四重極電磁石が必要ということになり、必然的に超伝導四重極電磁石となる。（口径の小さな常伝導2本か、口径の大きな超伝導1本か、核物理学者の間で激論があった。予算は決まっているので、超伝導2本はあり得ない。結局は矢野安重、久保敏幸、櫻井博儀の決断で超伝導1本になった。）

BigRIPSは、久保敏幸をリーダーとして、稲辺尚人、吉田光一、吉田敦、日下健祐、大竹政雄、柳澤善行、福田直樹、大西哲哉、溝井浩が建設した。

世界に冠絶するRIBF

2006年12月28日16時00分、SRCからファースト・ビームを引き出した。図14の右は、その瞬間の加速器コントロール室の様子である。図14の左は、総重量約8300トン、サイクロトロン史上最強の曲げ力8Tm（テスラ・メートル）のSRCの雄姿である。それまでの間、矢野は国際会議でRIBF建設の進捗状況を発表するたびに、「私たちはRRCからファースト・ビームを引き出した1986年12月16日15時34分のキッカリ20年後に、SRCからファースト・ビームを引き出

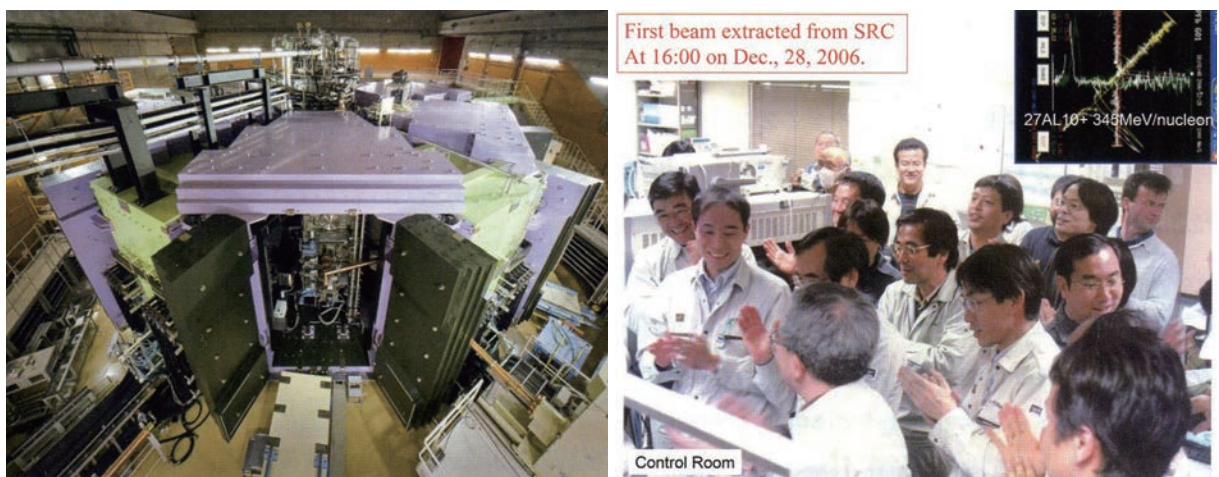


図14 鉄シールドの観音扉を開けたSRC中に見える共振器（左）、SRCからのファーストビーム引き出しに成功した瞬間にコントロール室で沸き上がる面々（右）

す」と宣言してきた。残念ながら12日ほど遅れてしまった。理研はこの日の17時20分が御用納めであり、年内ぎりぎりの成功であった。20時から記者会見も予定されていたので、関係者は胸をなで下ろすことになった。翌朝、新聞各社が大きく報道してくれた。「さすがに涙をこらえることができなかった」と矢野は思い出す。

翌2007年の3月にはSRCとBigRIPSが予定どおり完成し、ウランビームからRIビームを生成することに成功した。6月には、原子核に関する国際会議としては最大の原子核物理国際会議（International Nuclear Physics Conference 2007）が有楽町の東京フォーラムで開催されることになっていた。そこで、会議で最初の実験結果を発表すべく、国際共同実験チームと加速器グループは満を持して初実験に臨んだ。

実験はうまくいって、会議開催の3日前、実験データの最終確認を終え緊急発表することになった。発表は「U-238を核子当たり345MeVまで加速しBe標的で対称核分裂を起こさせ、核分裂片の中に新同位元素Pd-125を発見した」というものであった。このRIBF始動の速報は大喝采を浴び、RIBFはドラマティックなデビューを果たしたのである。

発表後、RIBF計画の国際諮問委員会の委員長を長らく務めたキーンレ（P. Kienle）博士が満面の笑みを浮かべて祝ってくれた（博士は元GSIドイツ重イオン加速器研究所の所長で2013年1月に他界）。矢野は続いてアメリカの素粒子加速器会議に招待され、RIBF始動の報告をした。この時は、RIBF国際技術評価委員会の委員長を務めたブロッサー（H. Blossor）博士が絶賛してくれた（ブロッサー博士はNSCL米国立超伝導サイクロトロン研究所の創設者で2013年3月他界）。実は両博士は、SRCが本当に実現するのかどうか、非常に心配していた。その理由は、ドイツのミュンヘン工科大学MTU、フランスの国立重イオン加速器研究所GANIL、アメリカのNSCL、ロシアのJINRでの設計が、全て幻に終わっていたからにほかならない。

Pd-125の発見は仁科芳雄との関係が深い。仁科は1949年、速中性子によるウランの対称核分裂片の中にPd-112を発見したが、今回のPd-125を発見した核反応はいわばその逆反応になっていて、Pd-112はもしかしたらPd-125の片割れであったかもしれないのである。Pd（パラジウム）の原子番号は46、ウランの原子番号は92なので、ウランが真っ二つに分裂したことになる。

ナンバーワンのRIBF

2006年12月号、*Science*誌と*Nature*誌はRIBFの完成を報じた。しかし*Nature*誌の記事の最後に、「今後5、6年で日本はナンバーワンの座を失うかもしれない」というフランスGANIL研究所のガレス（Sydney Gales）所長の発言が引用されていた。所長はRIBFの国際評価委員でもあった。この時すでに、ミシガン州立大学NSCLのFRIB施設とドイツ重イオン研究所GSIのFAIR施設が建設中で、やがてRIBFに追い付くことになっていた。しかし2017年の時点でもなお、あと5、6年はRIBFが世界のトップであることが確定している。

もちろん2006年に完成したRIBFは、元の姿のままではいたわけではない。その後、数々の発明と工夫、特に、上垣外修一、坂本成彦、山田一成、須田健嗣らの高周波加速装置の増強、福西暢尚、池沢英二、藤巻正樹、渡邊環、込山美咲らの運転制御の高効率化、中川孝秀、木寺正憲、日暮祥英らの重イオンビームの大強度化、奥野広樹、今尾浩士らの寿命無限大荷電変換装置の開発でイオン源と荷電変換装置の開発で目覚ましい進歩があり、また、ベテランの加瀬昌之、渡邊裕が機械部品の不具合を首尾よく改良して、RIBFの性能は飛躍的に向上した。そして2007年から2017年までに約170種類の新同位元素を発見した。

面白いデータがある。図15は、どの研究所がいつ、新同位元素をどれくらい発見したかを示したものである。1920年がピークになっているのは、英国ケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所のアストン (F. W. Aston) が製作した質量分析器による新同位元素発見時代であり、仁科が滞在していたころである。次の1950年をピークにしたのは、ローレンスのサイクロトロンによるアメリカLBL時代である。1970年をピークにしたのはフレロフ研究所のサイクロトロンによるソ連のJINR (ドゥブナ) 時代、1990年をピークにしたのは重イオン線型加速器によるドイツGSI時代である。そして今、第5のピークをRIBFが形成しようとしている。RIBFはまさに世界に冠絶するRIビーム生成能力を持つに至ったと言える。

これらの新同位元素は中性子の非常に多い原子核である。すでに述べたが、これまで安定核とその近傍の不安定核で成り立っていた「核力の飽和性」や1963年のノーベル物理学賞に輝いたメイヤー (M. Mayer) とイェンゼン (J. Jensen) が提唱した「原子核の殻模型」がこんな中性子の過剰な原子核でも成立するのかどうか、その検証実験がRIBFでできるようになった。RIBFの最近の実験結果を見ると、どうやら新しい原子核モデルが必要になっているようである。

さらに、元素の起源については、超新星爆発の時に一瞬間誕生して消えてしまった超中性子過剰な原子核を、人類はやっとRIBFにより実験室で造り出せるようになってきた。今後が非常に楽しみである。

MUSESと「大魔神」を消し去った発明

さて、1996年のRIBF概算要求時点にあったMUSESはどうなったのか。2003年、矢野はMUSESを取りやめ、その代わりに、独自に発明した方式によるRIと電子ビームの散乱実験装置 (図2のe-RI scattering with SCRIT)、同じく独自開発したRIの精密質量測定装置 (図2のRare RI ring) を建設する決断を下していた。MUSESより格段に建設費が安くなると踏んだからである。これにより、緊縮財政下であって、第1期の中に第2期を取り込むことができたのである。

これにもきっかけがあった。2001年のドイツGSIの将来計画書の中に、RIBFのMUSESについての記述があった。「GSIの電子とイオン衝突器eA-Colliderは

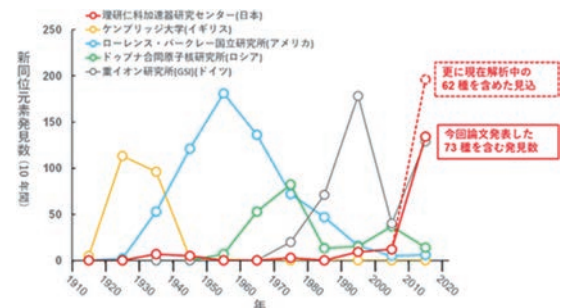


図15 1910年以降、各国の研究所・大学から発見された新RI

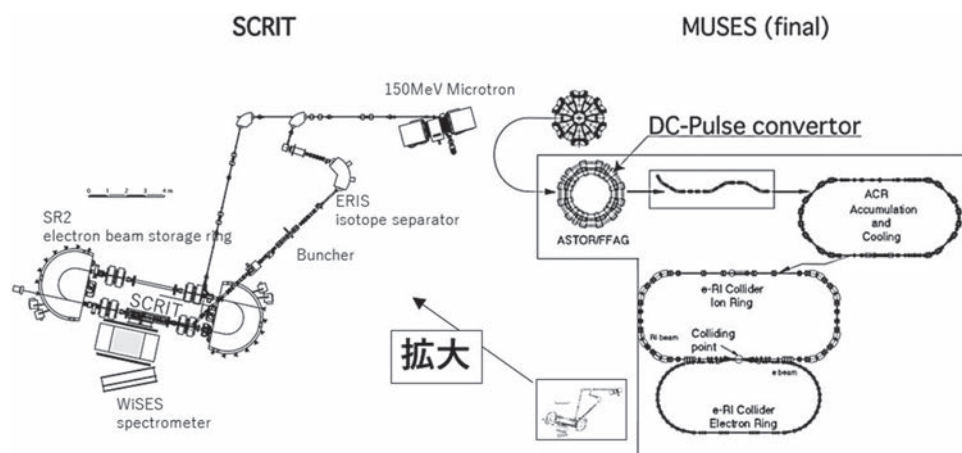


図16 MUSESと新方式の大きさの比較

パルスビーム入射のため衝突効率が良いが、日本の理研のMUSESはDC（連続）ビーム入射なので衝突効率が悪い」という。要は、このままMUSESを造ると、理研はGSIにかなわないことになる。このことは当然理研内でも認識されていた。

図16の右側は最終的に改良設計されたMUSESの展開図だが、ASTOR/FFAGなるDCパルス変換器を加えている。SRCのDC（連続）ビームをここに入射し、時間的に圧縮してピーク電流の大きなパルスビームに変換し、新たなBigRIPSでパルスRIビームを生成して、これをMUSESに入射するという方式を考えたのである。これがうまくいけばGSIの性能をしのぐことができる。ASTOR/FFAGというのは、サイクロトロンなのであるが、適当な半径のところで加速電圧をゼロにする。するとそこでターンが稠密になり、これをシンクロトロン加速電場でさらに加速してキッカーで蹴りだすと、DCがパルスになるという仕掛けである。もちろん理研加速器グループの発明である。

シミュレーションの結果は良好で、うまくいきそうなことが分かり、「大魔神」という名前を付けた。図2（518ページ）で右端にSHARAQという東大の実験装置が見えるが、この地下2階の部屋は巨大な大魔神を収容するように設計されており、その上の地下1階にMUSESを収容し、地下2階から地下1階に向けて、斜めに新BigRIPSを設置できるように建物は造ってある。というか、正直に言えば造ってしまっていた。

問題は、ここでも予算である。巨額の大魔神がないとMUSESを造る意味がないところまで追い込まれた。そしてまた、アイデアが湧いたのである。それが自己閉じ込め型RI標的（Self-Confining RI Target : SCRIT）方式による不安定核の電子散乱実験装置（図16の左）という発明であった。図16の右にMUSESとその大きさの比較を示したが、こんなに小さくなった。建設費はMUSESの約20分の1で済むことになったのである。

SCRITの仕組み

図17にその原理図を示したが、この発明に考え至った物理現象と同じものに、

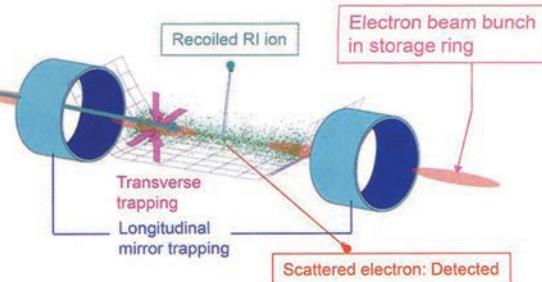
放射光源の電子蓄積リングで起きるイオントラッピングという厄介な現象がある。周回する電子ビームがリング中の残留ガスを電離して軌道にイオンのさやを造り、電子ビームがイオンを引き付けて周回電子ビームが不安定になる、という現象である。これがあると放射光の輝度が悪くなるため、いろいろな対策がとられている。しかし、矢野のグループには、最初は、この知識を持っている人間が一人もいなかった。SCRITのアイデアは、この厄介な現象を逆に利用したもので

Electron - RI Scattering System



Principle: "Ion Trapping" in e-Ring

RI ions: fed from
150 MeV e-beam
driven ISOL



Two P.R.L. papers published
on experimental proof of
principle.



図17 SCRITの原理と電子RI散乱実験装置と建設チーム

ある。

新方式は次のようになっている。リングに入射する電子ビームの制動放射で γ 線を発生させ、これでウランを照射してRIを造る。RIの中から実験に使うRI（電荷は1価）を分離して少し加速し、電子蓄積リングの電子ビーム軌道に入射し、前後に静電場の壁を立てる。そうするとRIは前後にはこの電場で、横方向には電子ビームでトラップされ、RIによる電子散乱が起こる。この散乱を測れば不安定核の電荷分布が正確に測れるということで、京大化学研究所の電子リングを使わせてもらって原理実証実験をやった結果、見事に成功した。

図17の写真の装置（図2のe-RI scattering with SCRIT）がMUSESを収容する予定だった部屋の片隅に組み上がり、最終調整に入った。建設費が激減したとはいえ、まだ相当な予算が必要であった。そこに幸運があった。写真に写っている700MeVの電子蓄積リングと入射器の150MeVのマイクロトロンを、無料で入手できたからである。「原理実証はできたけれど概算要求できる予算では少な過ぎる、どうしよう」と思いあぐねていたころ、住友関連の幹部から「住友重機は半導体製造用放射光源のオーロラを廃棄処分するそうだ」という話を聞きつけた。早速、住友重機に連絡して、「オーロラを下さい」とお願いしたのである。「よろしいです。差し上げます。ただし、移設の費用は全てそちらでお願いします」ということであった。そのオーロラを改造したものが、写真の700MeV電子蓄積リングなのである。

この画期的な電子RI散乱装置は、若杉昌徳と矢野安重の発明である。建設には須田利美、大西哲哉らが参画した。この発明は実証され、若杉は「原子核内の電荷分布を精密測定する新奇な電子散乱方式の発明」で西川賞を受賞した。

Rare RI ring方式

さて、MUSESのもう一つの目的は、RIの質量の精密測定である。MUSESの質量測定方式はGSIと同じ方式なので、これもGSIにかなわない。

そこで矢野と後藤彰および加速器と実験グループの若手により、GSIに対抗できる新方式をひねりだした。それがRare RI ringである。これはどういう方式かというと、BigRIPSで生成したRIを1粒子だけ高速磁場キッカーで蓄積リングに入射し、1000回くらい周回させて取り出し、入射時間と取り出し時間の差から飛行時間を測定し、これを質量が精密に分かっている粒子と比べて、その質量を100万分の1のオーダーで求めるというものである。蓄積リングは等時性になっていなければならないので、加速しないサイクロトロンともいえる。サイクロトロンに精通している矢野と後藤は、この方式による質量測定式を導出した。

GSIとの性能比較はどうか。GSI方式では寿命の非常に短い不安定核の質量を求めることができない。それは、冷却に時間がかかり過ぎるからだ。理研方式にはこの制限がない。実際、2016年、個別入射・取り出しに成功した。

図18はこの装置の写真である。実は、このリングも中古品である。原子核研究所で昔、平尾泰男が主導して重イオンの蓄積と冷却方式の開発研究に使っていたTARN IIなのである。高エネルギー加速器研究機構に眠っているのに気付い

でもらってきた。もちろん改造費はかかったが、概算要求できる予算内では計画の全てを実現することはできなかった。このRare RI ringは、若杉昌徳をリーダーとして、山口由高、大西純一らが建設した。この新奇なイオン蓄積リングを実現するための鍵となるのは高速キッカーであるが、これは若杉と山口が発明した。

こうしてMUSESを第1期の予算計画の中に取り込み、所期の研究ができる実験装置を全て完成させることに成功したのである。着工してから17年の歳月が流れていた。

2014年6月に東大で The 2nd Conference on Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS2014) という原子核の国際会議があった。基調講演の最後にアルゴンヌ国立研究所のヤンセンズ (Robert V. F. Janssens) は、会場に居合わせた矢野に起立を促し、満場の大拍手を受けたのだった。会議では、多くの欧米の核物理学者がRIBFのレイアウト図を見せながら最近の成果を発表していた。RIBFは世界中の核物理学者を魅了しているのである。

建設に着手したころは、無謀なSRC、不毛なMUSESと頭を抱える日々もあったが、意気に感ずる先輩と同僚、後輩たちの総力戦で、盤石なるSRC、豊穡なるRIBFが実現した。

矢野は、2009年9月末にセンター長の任期を終え、10月には延與秀人主任研究員がセンター長となり、仁科精神を引き継いだ。またRIBFを担当する副センター長に元GSI所長のヘニング (Walter F. Henning) を迎えRIBFの国際共用を強力に推進した。さらに初田哲男主任研究員が理論担当の副センター長となり、理研の理論研究をけん引している。この体制は、2015年、RIBF担当副センター長を櫻井博儀主任研究員に替えて世代交代し、仁科センターはさらなる発展へと向かっている。



図18 Rare RI ring全景と建設チーム

第3節 RIBFが拓く原子核と元素合成の研究

RIビームによる原子核研究

世界に「冠絶」する性能を持つRIBFに期待される学問的な展開については、第2節冒頭に述べた。

RIBFでのこれまでの成果を述べる前に、原子核研究、特に不安定原子核と元素合成過程の研究に果たしたRIビームの役割をまとめておこう。

RIBFの最初の2文字RIは放射性同位体 (Radioactive Isotope) のことで、放射線を放出して他の同位体に変換する不安定な原子核と言い換えることができる (注 不安定核によるビームをRIビームとよぶことは、理研の研究者により提唱された。放射性同位元素の利用法として、このような基礎科学研究もある、という意味が込められている)。天然にも幾つか存在するが、大部分は人工的に作られる。1940年代より粒子加速器を用いた核反応により不安定原子核の合成は本格化し、人類が手にする原子核の種類は増え続けて2017 (平成29) 年現在3000を超えている。

その間に特筆すべきことの一つは、1980年代より不安定原子核をビーム (RIビーム) として利用できるようになり、RIを対象とした核反応の研究も可能になったことである。それ以前からもRIビームの可能性は論じられており、例えば、宇宙における爆発的な元素合成過程に寄与する短寿命原子核の研究が夢見られていた。当時は、核反応で生成した不安定核をイオン化して取り出し、加速器でビームにして、それを研究に供することが考えられていた。特定のRIをイオン化して分離するISOL (Isotope Separator On-Line) とよばれる技術はすでに開発されていた。

しかし、最初のRIビームは入射核破碎反応によるものであった。ISOLによる方法とは違って、この方法では光速の30%程度以上に加速した原子核を、標的の原子核に衝突させる。発生する不安定核は方向、速度をほとんど変えずに運動し続けるので、ビームの役割を果たすことになる。約30年前、バークレー国立研究所 (アメリカ) で、高速に加速された原子核による衝突から種々のRIビームがつくられ、陽子に比べて中性子が非常に多いLi-11核において、二次標的核による反応断面積が急に増大することが観測された。これは谷畑勇夫率いる日本グループが中心となって行った実験の結果であり、原子核の中性子分布が異常に広がったハロー (キリスト教絵画などに見られる光背) の存在を示し、原子核の密度が種類によらずほぼ一定であるという教科書の常識が成り立たない場合があることを明らかにした。谷畑のRIビームによる原子核の研究に対して、1989年度仁科記念賞が贈られた。

原子核には原子と同様、系の安定性をもたらす特別な核子 (陽子、中性子の総称) の数が存在する。この魔法数が、中性子数20については中性子過剰領域で崩れる、という可能性が1970年代より指摘されていた。この魔法数消失の問題に新たな光を当てたのが、1990年代に理研で行われた旧施設のRIビームによる

Mg-32核（中性子数20）の研究である。第2節で述べたように、理研では入射核破砕の方法によるRIビームがすでに1990年に実現し、大強度ビームを供給する加速器と入射核破砕片を分離してRIビームを生成する高性能装置RIPS (Riken Projectile fragment Separator) も稼働しており、軽い不安定核の原子核については世界最高の実験性能を持っていた。実験の結果、後にも述べるように、この原子核が励起されやすく、魔法数20を持つ核の性質を持たないことが確かめられた。これも教科書の常識に修正をもたらした例である。これらの成功は、理研が当時、必ずしも有力と考えられていなかった入射核破砕反応によるRIビームを採用した慧眼にもよっている。

一方、ISOLによるRIビームは、遅れて1990年にベルギーの新ルーバン大学で実現された。最初の実験は、小型のサイクロトロンにより再加速されたN-13による陽子捕獲反応である。半減期10分のN-13が赤色巨星などの中でO-14に変換される過程に対応し、天体核物理学者が「夢見ていた」実験の一つである。この反応は同じ時期に理研でも本林透等により研究された。こちらは、入射核破砕によるO-14の高速RIビームを鉛標的に当て、衝突時に生成される仮想光子によって分解して逆反応を実現する、というクーロン分解の方法が採られた。両実験の結果は一致し、RIビームによる天体核物理研究の有用性を示すことになった。

RIビームファクトリーでの研究

1980年代にRIビームが出現して以来、原子核物理学は大きな発展をみた。上に挙げた例から分かるように、中性子ハロー現象が発見され、魔法数に異常性が見いだされ、さらに爆発的元素合成に関わる核過程の研究が可能となった。その中で、理研の旧施設の貢献は、非常に大きいものであった。

これらの研究成果は、RIビームによる研究の豊かな将来を予感させた。RIビームファクトリー (RIBF) は、比較的軽い領域に限られていたRIビーム核種を拡げ「核図表の拡大」を図るものであり、旧施設を大幅にしのぐRIビーム生成能力を持つ施設として構想された。すでに述べたように、この構想は実現し、2006年末に最初のビームが得られ、2007年より実験が始まった。RIBFでは、世界をリードする多くの重要な研究がなされている。幾つかの流れに沿って紹介する。

核図表の拡大

入射核破砕反応はRIビームを造る方法としてだけでなく、不安定原子核そのものを効率良く生成する方法として優れている。例えば、1999年に櫻井博儀らは旧施設でF-31核の生成に成功し、その存在を初めて確認した。

RIBFでは入射核破砕に加え、ウランビームの核分裂を生成機構に導入することとした。核分裂が重い領域での不安定核生成に有力であることは、ドイツGSIの研究から分かっていたが、生成されたRIビームが角度的により拡がる、という難点がある。これに打ち勝ち大きな輸送効率を持つ新しい装置BigRIPSやZeroDegreeを久保敏幸らが中心となって建設された。その結果、強力な加速器

との組み合わせで世界の他施設を大きくしのぐRIビーム供給能力を誇ることになった。2007年の実験開始以来RIBFで生成、確認された新同位体は、2017年末までに約170種を数えている。これは、2017年現在も進んでいる一次ビーム強度の増強とそれに対応した装置開発により、さらに増加すると期待される。現在約3000種類に至った同位体発見の歴史の中で、第2節で触れたように、このところ理研RIBFがトップを走っている（図15）。もちろん、拡大された核図表上では、さらに詳しく原子核の性質を調べる研究が進んでいる。こちらも世界の注目を浴び、多くの海外研究者がRIBFで共同研究を行っている。

中性子ハロー研究の展開

すでに述べたように、中性子ハローは不安定原子核にあらわれる特異な現象である。理研の旧施設では、C-22核でのハローの発見などとともに、下浦享らや中村隆司らによるLi-11核の電磁励起測定などを通して、ハローを持つ原子核の性質が広く調べられた。特に、ハローを構成する二つの中性子が「まとまって」運動することを明らかにした中村隆司らによるクーロン分解反応の研究は強いインパクトを与えた。

RIBFでは、少し重い原子核についてもハロー核の研究が可能となった。武智麻耶らによる相互作用断面積測定から、新たなハロー核Ne-31、Mg-37が発見された。これらの原子核は上述のC-22などとともに、クーロン分解反応によっても研究され、今までのハロー現象とは異なる様相、つまり原子核の変形を伴うこと、有限な角運動量を持つ中性子が関与することが見いだされた。RIBFでは異なる方法を駆使し、このような総合的な研究が可能になり、ハロー現象の理解はより深まっている。

魔法数の消長

原子核における魔法数の異常、すなわち不安定原子核におけるその消滅または出現は、オールドファシリティーにおける本林透らによるMg-32 ($N=20$) や岩崎弘典らによるBe-12 ($N=8$) の研究を皮切りに発展した。実験手法として考案された「逆運動学反応核分光」は、調べたい不安定原子核（もしくはその近傍核）の方をビームとし、反応のプローブとなる粒子を標的とする。そして、直接反応によって励起状態を生成し、その崩壊を測定すると同時に、前方へ放出される反応生成物（残留核）を粒子識別して、反応チャンネルを同定するというものである（図19）。この手法は国際的にも拡がり、RIビームによる核構造研究の大きな流れとなっている。例えば、中性子数 $N=20$ の中性子過剰核では、魔法数が異常を示す「反転の島」が核図表上に予言され、次に示すようにその「探検」がRIBFでも続いている（図20）。

RIビームとして分離された原子核を物質中に止め、 β 崩壊などによりその性質を研究する「崩壊核分光」も、有力な研究手法である。特に、崩壊前の核スピンをコントロールして電磁モーメントを決定する研究が、旭耕一郎、上野秀樹らのグループ（図21）により進められた。電気四重極モーメントは、変形と結び

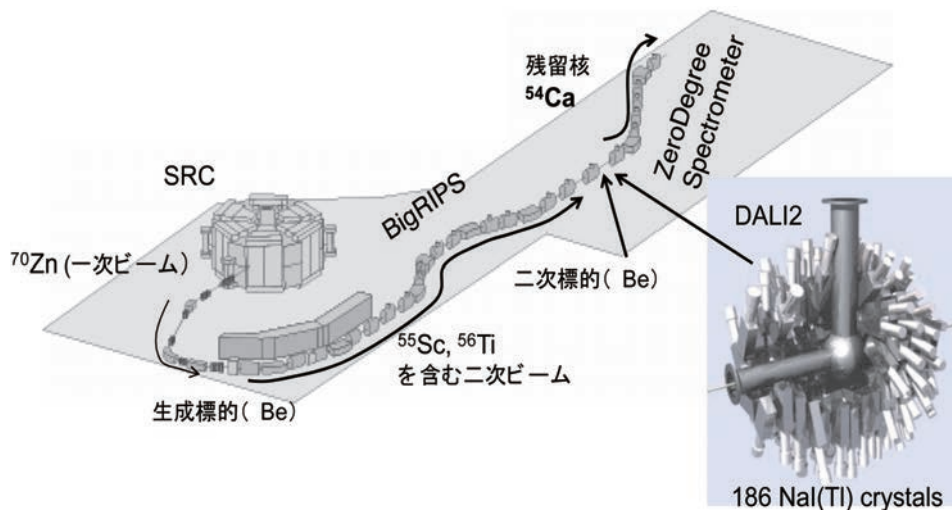


図19 ^{54}Ca の逆運動学反応分光に用いられたセットアップ

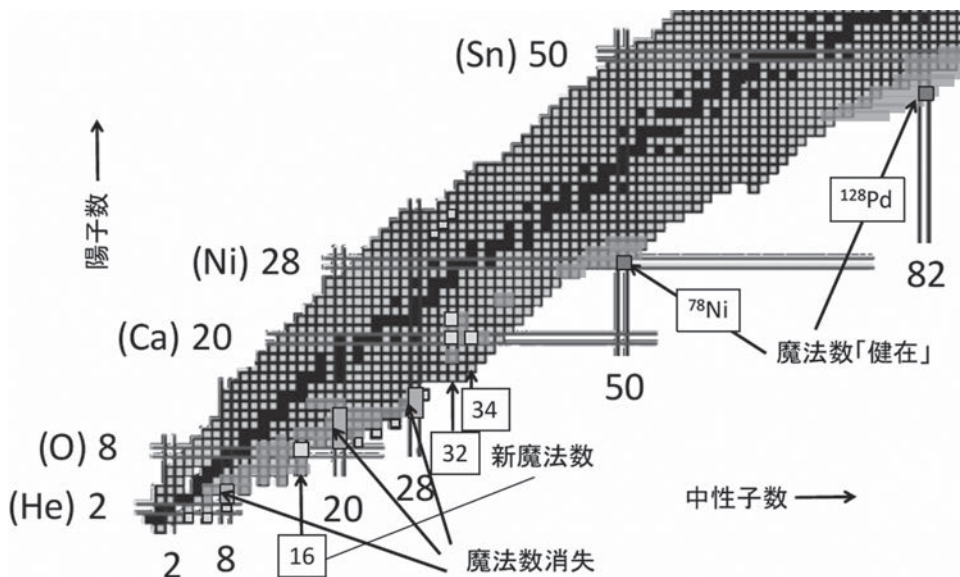


図20 魔法数の消失、出現が観測された原子核

付けることができ、磁気モーメントは核子の配位に敏感であることから、魔法数異常に関する有用な情報を得ることができる。特に、「逆運動学反応核分光」では困難な奇核（陽子や中性子の数が奇数の核）を調べられるのが利点の一つである。例えば、Mg-32の一つ「上」にあるAl-33の電気四重極モーメントの測定から、この原子核が反転の島の境界にあることが分かった。

RIBFでは、そのRIビーム供給能力の飛躍により、魔法数異常の研究が大きく進展している。主な成果は、次のようにまとめることができる。

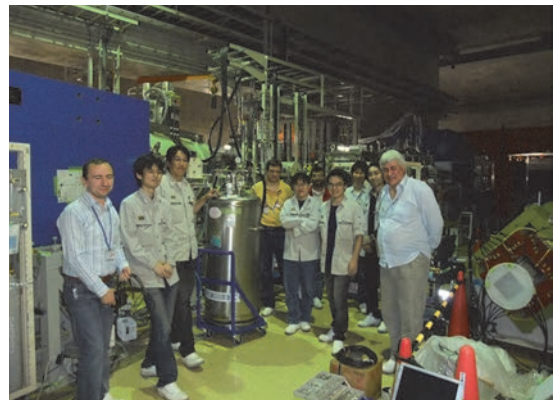


図21 崩壊核分光の実験グループ

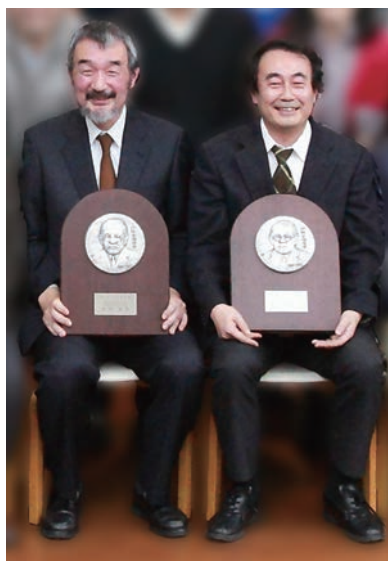


図22 2015年度仁科記念賞を受賞した本林透(左)と櫻井博儀(右)。手にしているのは仁科博士のレリーフを配した記念の盾。

①さらに多くの原子核について逆運動学反応核分光や崩壊核分光が行われた結果、反転の島の全容に迫ると同時に、質量数34以上のMg同位体を中心に、大きく変形した原子核の領域があることがPieter Doornenbal、青井考等による実験により分かりつつある。

②相反する結果が報告されていたSi-42核は、陽子と中性子が共に魔法数を持つにもかかわらず大きく変形していることが分かり、Ca-54核に予言されていた新たな魔法数 $N=34$ を実証し、宇宙での爆発的要素合成にも影響を与える $N=50$ のNi-78、 $N=82$ のPd-128をはじめとする中性子過剰核の魔法性が健在であることが分かった。こうして、魔法数異常に関する懸案が次々に解決しつつある。

このような理研における魔法数異常研究への貢献が評価され、本林透と櫻井博儀は2015年度仁科記念賞を受賞した(図22)。図20に彼らが中心となって研究した中性子過剰核と、見いだされた魔法数の性質をまとめた。

異なる変形の共存

魔法数を生み出す殻構造とともに、変形や振動などの大局的な性質は、原子核を理解するための鍵である。RIBFでは重い原子核のRIビームが供給されるようになり、そのような大局的性質が支配的となる原子核の研究が可能となった。例えば、ラグビーボール型とミカン型という異なる楕円変形が一つの原子核に共存する現象が注目されている。RIBFにより広い領域での系統的研究が可能となり、変形の機構をより深く解明する材料と提供しつつある。この分野の実験研究は、欧米で盛んであり、多くの研究者がRIBFでの共同研究に携わっている。

天体核物理

宇宙での元素合成に関わる原子核反応を実験室で調べる研究は1950年代に始まったが、それは安定な原子核が関与する比較的「静か」な核燃焼過程に関するものであった。それに対し、不安定原子核が関与する爆発的な過程の本格研究は、RIビームの独壇場である。オールドファシリティにおける上述のO-14核や太陽ニュートリノの強度を決めるB-8核のクーロン分解は世界に先駆けて行われ、天体核物理学研究の大きな進展をもたらした。一方、宇宙での核反応の直接測定や、燃焼過程に関わる共鳴状態の探索は、東大CNSが建設した低エネルギーRIビーム装置CRIBを用いて、久保野茂らにより精力的に進められた。

RIBFでの天体核物理研究において特筆すべきことは、人類史上初めてr過程經由核に到達したことである。鉄より重い元素の約半分の量を造り出し、今も造りつつあるr過程がどこで起きるのかは2017年現在確定していないが(超新星爆発と中性子星合体の二つが有力な説)、中性子が非常に多い不安定原子核の中性子捕獲と β 崩壊の連鎖がその実体であることは間違いない。ところがr過程が經由

する核はあまりに安定線から離れているため、実験的にはほとんど手がつけられていなかった。その未踏の領域の一部にRIBFは達し始め、今までは理論予測に頼っていた原子核の特性を明らかにしつつある。その中にはすでに元素合成を予測する計算に修正を迫るものもある。

具体的には、前項で触れた $N=50$ 、 $N=82$ の中性子過剰核に対する分光研究がその一つである。さらに、西村俊二らによる β 崩壊の寿命測定は、「r過程の研究」に大きなインパクトを与えている。RIBFの強力な不安定核生成能力と、適切に設計された β 線、 γ 線の測定器の組み合わせにより、2017年の時点では100種類を超える原子核について新たに寿命を測定することができた。その多くはr過程の鍵を握る

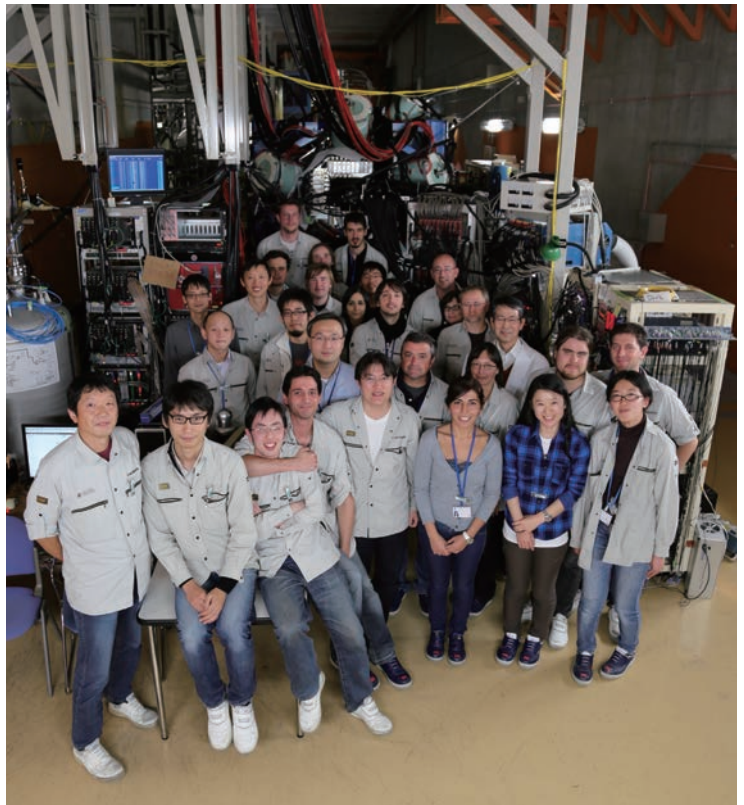


図23 β 崩壊寿命測定の研究グループ

原子核であり、爆発的元素合成を当該原子核の測定値に基づいて研究する時代の幕開けをもたらした(図23)。

今後は、原子核の範囲をさらに広げるとともに、崩壊中性子数の測定、r過程の終端に関連する中性子過剰核の分裂の研究、質量測定などに展開し、この爆発的元素合成の全容に迫る総合的研究が行われると期待される。r過程元素合成の研究者たちは、RIBFからの新しい結果を固唾を飲んで見守る状況が続くはずである。

中性子過剰核物質

それまで手をつけられていなかったが、櫻井博儀、磯部忠昭が中心となり、ミシガン州立大学等のアメリカの研究者との共同研究によって、中性子が陽子に比べて多い原子核の衝突で中性子過剰な核物質を造り出し、その性質を調べる研究がRIBFで始まった。後述する磁気分析器SAMURAI (Superconducting Analyzer for Multi-particle from Radio Isotope Beams) の電磁石間隙の中に検出器を置き、衝突の結果現れる多数の粒子を一度に捕まえて、衝突時の状態を調べて核物質の情報を得よう、というものである。特に、核物質の性質を表す状態方程式に関わる「硬さ」を表す非圧縮率と圧力勾配が、中性子過剰領域でどう変化するかが注目を集めており、この衝突実験もその導出を目指している。他にも低い励起状態にあらわれる双極子型共鳴や、原子核表面に現れる中性子スキンなど、状態方程式に関わる現象の研究も進行中である。RIBFの能力により、中性子過剰度の大きな系を調べることができ、中性子星の構造や、その生成に関す

る理解の進展にもつながることが期待される。

実験装置の開発

上に挙げたさまざまな研究がRIBFで可能となったのは、優れたRIビーム生成能力に加え、各種のユニークな実験装置の開発によるところが多く、さらに新しい開発も進行中である。また、RIBFに特徴的なことは、かなり多くの装置開発が国内外の機関と共同で行われるようになったことである。

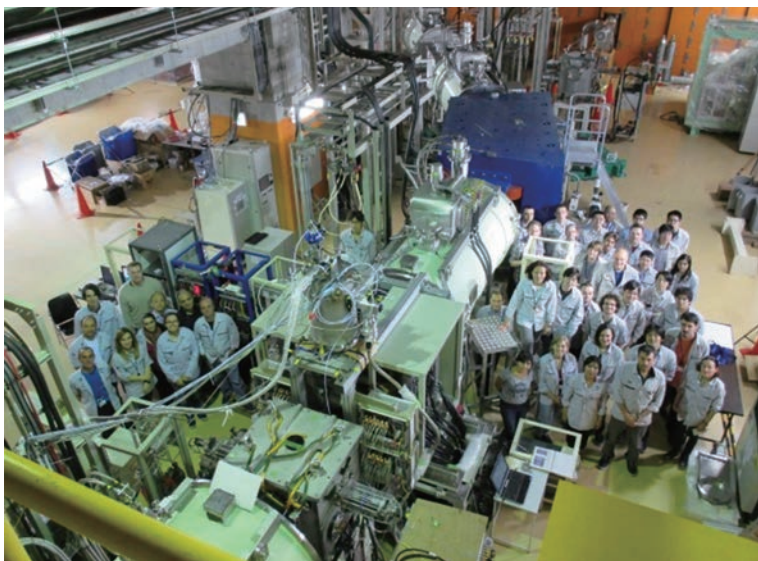


図24 γ 線検出器DALI2を中心とした実験装置

上に述べた逆運動学反応核分光の実験を例にとってその一端を紹介する。BigRIPSにより供給される不安定原子核のビームが入射する二次標的のまわりに、反応生成物の崩壊や標的核の励起に伴う放射線を測定するための装置が置かれる（図24）。DALI (Detector Array for Low Intensity Radiation)、DALI2は、NaI (Tl) シンチレータを多数組み合わせ合わせた高効率の γ 線測定装置で、1990年代に立教大学のグループとの協力により建設された。以降、建設メンバーの武内聡を中心に幾多の

増強、改良を通して現在も活躍している。

二次標的自体の開発も行われ、特にフランスのサクレ研究所のオバテリ (Alexandre Obertelli) 等との協力により建設された液体水素標的MINOS (Magic Numbers Off Stability) は、反応位置を特定する能力を持ち、DALI2等との組み合わせにより、厚い標的を用いた高効率測定が可能である。

RIビームは二次標的により反応を起こすと、原子番号や質量数が変化する。この変化を知ることによって反応の種類が特定される。久保敏幸らによって建設

されたZeroDegreeはBigRIPSと似た構造を持った磁気分析器で、この目的で使用される。高エネルギー反応の特質と、大きなアクセプタンスにより、特定の原子核について、ほとんどの反応後粒子を検出することができる。

反応生成物が中性子や陽子を放出して崩壊する場合は、生成物に近い方向に高速で放出されるので、別の装置が必要となる。SAMURAI (図25) は、大きな角度・運動量アクセプタンスを持った磁気分析器で、東北大学の小林俊

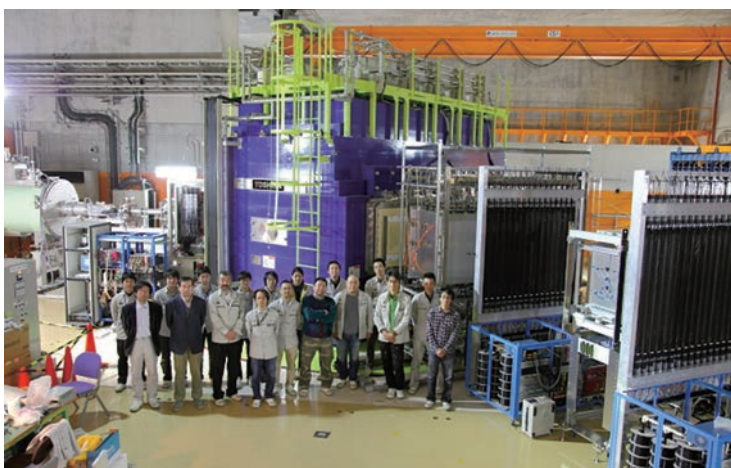


図25 超伝導磁気分析器SAMURAI

雄、東工大の中村隆司を中心としたグループと理研の米田健一郎、後に大津秀暁との協力で建設された。反応生成物と中性子を含む崩壊粒子を同時に検出する能力を持つ。最近の研究例に、中性子が非常に多い酸素の同位体の中性子崩壊の測定がある。O-26核からの二つの中性子の崩壊測定に成功し、さらにO-28核からの4中性子崩壊に挑戦した。O-28の陽子数8と中性子数20は本来の魔法数であり、それが消滅するかは重要な問いである。

さらに、ドイツ・ダルムシュタット大学のオーマン (Thomas Aumann) 等による中性子検出器のSAMURAIへの増強も行われた。

RIBFではこのように他研究機関との本格的共同研究も始まった。すでに述べたが、理研キャンパスに居を構える東京大学原子核科学研究センター (CNS) は、独自の装置を建設して理研加速器のビームを用いた研究を展開している。低エネルギーのRIビームを生成するために久保野を中心に建設されたCRIBは2000年ごろより稼働を開始しており、さらにRIBFにはSHARQAとよばれるユニークな実験装置を酒井英行、下浦亨が中心となり、理研と共同で建設した。逆運動学を用いず、特定の不安定核ビームによる高分解能反応実験を行うことが目的で、分散整合といわれる高度な技術を用い、2009年から実験に使われ、上坂友洋らによる不安定原子核のガモフテラー巨大共鳴の研究、下浦らによる中性子4個のみによる共鳴状態の探索などが行われている。

KEK (高エネルギー加速器研究機構) の原子核素粒子研究所は2015年より理研に分室を置き、和光原子核科学センターとして拠点を構えた。宮武宇也らはKISSとよばれる装置を建設することによって、深部非弾性散乱によって生成された重い不安定核をレーザーによりイオン化し、それを引き出して β 線や γ 線の測定によって研究するプロジェクトを始めている。

一方、崩壊核分光の典型的な実験では、二次標的を用いず、RIビームをZeroDegreeを通して固体中に止める。固体として位置検知能力を持つシリコン半導体検出器を用いると、止めた粒子の種類を高精度で識別できるだけでなく、放出 β 線との位置相関から崩壊連鎖を特定できる。EURICA (EUroball-Riken Cluster Array) はヨーロッパの核分光研究者との大規模な共同研究プロジェクトで、各国で共有している多数の γ 線測定用ゲルマニウム半導体検出器をRIBFの崩壊核分光のために組み上げた。長寿命の原子核励起状態 (アイソマー) や、上に述べた β 崩壊後に放出される γ 線を測定するためのものであり、RIBFの高性能と相まって、多くの研究者が参加した広範な崩壊核分光実験も行われた。副センター長を務めたヘニング (Walter F. Henning) が提唱し、炭電聡之、西村俊二らが建設と整備を主導した。

すでに触れた r 過程に関する寿命測定は成果の一例である。さらに β 崩壊後に放出される中性子を測定するための装置を建設する国際共同プロジェクトBRIKEN (Beta-delayed neutrons at RIKEN) が始まっている。

RIビームをガス中で減速し、イオンのまま引き出して研究を行う目的で和田道治らはSLOWRI (SLOW RI-beam facility) とよばれる装置を開発している。引き出されたイオンを電場により多数回反射させて速度測定を行うMRTOF

(Multi Reflection Time Of Flight) とよばれる装置は、超重核研究用の装置 GARISの焦点面に設置され、未知の質量を測定することに成功した。

原子核の質量は、最も基本的な量であり、また爆発的元素合成を左右する、という意味でも重要性が認識されている。第2節でも述べたように、MRTOFでの高精度測定が不可能な短い寿命を持った原子核の質量を測定する目的で、希少RIリング (Rare RI ring) が建設されている。世界唯一の装置で、若杉昌徳と筑波大の小沢顕らによって計画が進められてきた。r過程経由核のように稀にしかRIBFで生成できない場合でも測定が可能である。

若杉らはもう一つのユニークな装置を須田利美 (現東北大) とともに建設中である。図17に示すように電子蓄積リングに低速RIビームを捕捉させ、電子と不安定原子核の散乱を実現させようというものであり、このSCRIT (Self-Confining RI Target) を基礎に置いた装置 (SR2) は世界から注目されている。

MRTOF、希少RIリング、SR2では、テストを含めた測定が始まっている。

放射性廃棄物に対する核反応

RIBFからのビームには、放射性廃棄物中の原子核によるものも含まれている。櫻井博儀らは、その中でも特に数十万年を超える長寿命の核分裂生成物に着目し、それらを短寿命の同位体に転換するための原子核反応の基礎研究を2015年より行っている。RIBFでは、対象となる放射性核をビームとすることができるため、反応生成物の収量の全容をいちどに正確に知ることができる、という利点があり、中性子や光子による転換をはじめとするさまざまな核反応の可能性を探ることを目指している。

原子核研究の国際的なハブとして

まとめよう。RIBFは2017年末までに約170個の新同位体を造り出し、その威力を世界に知らしめた。不安定原子核研究のフロンティアを拡大しつつあり、新しいタイプのハロー現象、魔法数の消長についての新発見をもたらした。また、初めてr過程経路の原子核に到達し、鉄より重い元素の約半分を合成する爆発的なr過程をようやく実験的に研究できるようになった。中性子星の成り立ちにも関係する中性子過剰核物質の総合的な研究も始まっている。

また、RIBF入射器としての役割も持つ線型加速器からの大強度ビームを用いた超重原子核合成の研究は、113番元素ニホニウムの生成をもたらし、2016年元素名が正式に確定した。大強度ビームの開発は、RIビーム生成能力向上と機を一にしており、この項で主に述べた不安定原子核の研究との相乗効果をもたらした。

国内外の研究者との共同研究が広範に展開しており、例えば、2016年に海外から実験研究にRIBFを訪れた研究者は延べ約360名で、理研全体の4分の1近くを占める。RIBFでの研究は世界の研究者に開かれており、実験提案は内外の理研外研究者による課題審査委員会 (PAC: Program Advisory Committee) で審査され、その結果が施設の責任者であるセンター長に報告される。旧施設でも、

理研外の研究者が多く来訪し研究を行ってきたが、外国からの研究者を多数含む実験研究が本格的になったのは比較的新しい。国際的なPACの形成も対応の一つだが、外部研究者の受入れの仕組みや専門部署（共用促進部）を確立し、酒井英行が2010年以来、部長を務めている。

また、個別の実験にとどまらず、SHARQAに代表される実験装置の建設、MINOS、EURICAなどのような検出装置の持ち込みなど、理研外研究機関の本格的取り組みも多く行われ、RIBFは世界的な研究の中心、ハブ、としての地位を確立しつつある。

現在も加速器の性能向上は続いており、RIビームの種類、強度は当面世界最高である。さまざまな研究手法の開発、実験装置の建設、さらに、第6節で触れる多体問題に関する理論研究の展開と相まって、原子核のより本質的な理解と宇宙での元素合成過程の解明が大きく進展すると期待される。これらの研究を加速し、現在世界各国で建設中の次世代RIビーム施設を凌駕する加速器の本格的増強も計画されている。

第4節 理研-RAL国際協力とミュオン・中間子科学

中間子科学の発展：低温ミュオン

理研-RAL（英ラザフォード・アップルトン研究所）支所は、1995（平成7）年4月からスタートした。初代支所長だった永嶺謙忠は2002年に理研を退職し、あとを継いで岩崎雅彦が主任研究員となり、2017年現在、先端中間子研究室を主宰している。岩崎は理研-RAL施設を発展させつつ、その研究用プローブをミュオンからパイ中間子、ケイ中間子に広げ、ドイツGSI研究所の重イオン加速器、KEK-J-PARCの中間子ビーム、また理研RIBFの重イオンビームなどを用いて幅広く研究を展開した。

正電荷ミュオンを物質中に静止させると、ミュオンが静止した場所における磁性、周囲のスピン状態についての情報を得ることができる。これを利用した物性研究は理研-RAL施設の大きな柱である。中でも、あらゆるものが「凍りつく」絶対零度においてなお、物質中のスピンの量子的に揺らいでいる、という量子スピン液体の本質に迫る研究は、ミュオンの特性を生かした研究として特筆される。

正電荷ミュオンは、物質中で、電子とミュオニウムとよばれる束縛状態を造る。これが物質外へ染み出してきたところにレーザーを撃って解離させると、温度がとて低超低温ミュオンを造ることができる。このアイデアは理研-RALで開花したもので、この超低温ミュオンを再加速することにより、ミュオンの磁気能率の精密測定や物質表面研究に新しい研究手法がもたらされた。その開発は理研-RAL施設の新しい柱となっている。ミュオンビーム高強度化の道は超低密度多孔質体シリカエアロゲルに多数の穴をあけて使うことによって開かれ、解離のた

めのレーザーは理研光量子工学研究領域・和田智之らとの共同研究で完成した。

ミュオン触媒核融合

負電荷ミュオンを重水素とトリチウムの混合系に打ち込むと、ミュオンが周りの原子を引き寄せることにより、両者の核融合が起こる。このミュオン触媒核融合は長く理研-RAL施設の主要研究テーマであり、この過程がエネルギーを継続的に生み出すことを実証してきた。放射性物質であるトリチウムを利用するこの

実験は、理研-RAL施設の独壇場であった。ただ、残念ながらブレークイブンを（反応を起こすために必要なエネルギーと反応から得られるエネルギーが同じになることで、1個のミュオンが何回核融合に貢献できるかが決め手になる）に達することはできなかった。国際諮問委員会の進言もあり、本研究はこの計画をけん引した松崎禎一郎の退職をもって終了したが、① 高压高温（30K、10気圧）の固体D-T系を用いること、また②核融合をパルスビームの間に $10^{11}/\text{cc}$ より多く起こすことができれば、ミュオン触媒核融合がブレークイブンを超える可能性が残されたことを明記しておく（図26）。

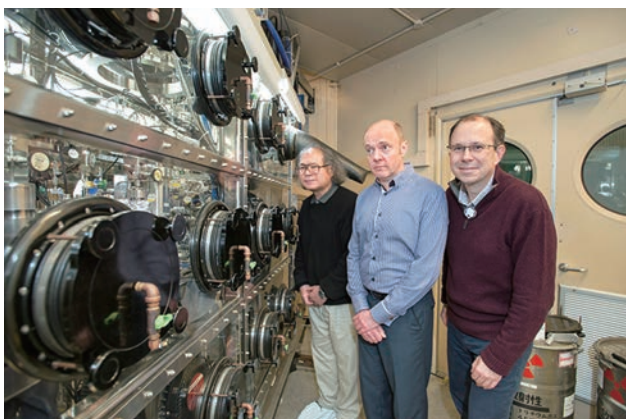


図26 役目を終え、英国原子力公社に引き渡されるトリチウムハンドラ
左から松崎禎一郎、原子力公社のナイプ (S. Knipe)、理研-RAL支所長のキング (P. King)

中間子・核子

1985年以降、中間子を用いた研究が大きく発展した。負電荷パイ中間子が原子核に原子のよう束縛される系を、ドイツGSI研究所において山崎敏光らが発見した。同実験の主要メンバーでもあった板橋健太は、さらに理研RIBFの超伝導アイソトープ分離装置 (BigRIPS) をスペクトロメータとして用いることで、パイ中間子原子の基底状態のみならず励起状態までを一網打尽に調べ尽くす研究手法を確立し、RIBF-BigRIPSの優れた能力を如実に示した（図27左）。本実験は南部陽一郎が提唱してノーベル賞受賞につながった「対称性の自発的破れによる質量生成機構」を実験的に検証する数少ない例である。

負電荷のケイ中間子も、物質中でX線を出しながら脱励起して原子核に束縛される。ケイ粒子は自らの組成にストレンジクォークを持つため、パイ中間子とは異なる振る舞いをする。そこでKEKやJ-PARCの中間子ビームを用いて、ケイ中間子原子のX線の精密測定を行い、ストレンジクォークを含んだ核力の情報を得た。さらにケイ中間子と二つの陽子が束縛した原子核を探索し、その存在自体を実験的に確立しつつある。このような中間子-核子からなる系は、まったく新しい原子核の存在形態であり、また、極めて高密度である原子核をさらに上回る密度を実現している可能性もあり、原子核の構造に関して新たな知見をもたらす期待が高まっている（図27右）。

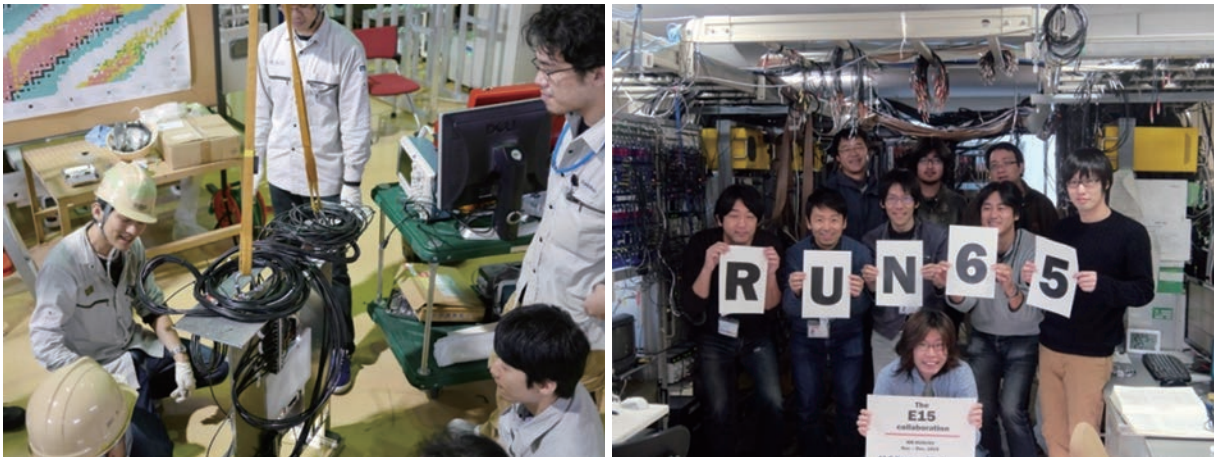


図27 理研RIビームファクトリーでのパイ中間子原子探索実験（左）とJ-PARCハドロン施設でのケイ中間子原子探索実験（右）の様子

理研ではスズの原子核にパイ中間子が深く束縛された状態が、一方、J-PARCでは陽子二つをケイ中間子が結び付けた状態が発見された。

理研-RAL25周年、アジアへの展開と将来

理研が英国SERC（科学工業研究会議）とミュオン科学に関する国際研究協力協定を締結したのは1990年である。以来四半世紀にわたり日本や英国、世界の研究者に施設を開放し、ミュオン科学研究を推進してきた。25周年を祝い、記念ユーザー・ミーティングが2016年2月に開かれ、ケーキ・カットが行われた（図28）。

これまで、延べ900名を超える研究者が理研-RALミュオン施設の実験に参加、発表論文数は380編を超えている。近年の展開として特筆すべきことは、渡辺功



図28 理研-RALの25周年記念ミーティング

左から、永嶺謙忠初代支所長、塩満典子仁科加速器推進室長、キング（Phillip King）支所長、小安重夫理事、岩崎雅彦主任研究員、延與秀人仁科センター長



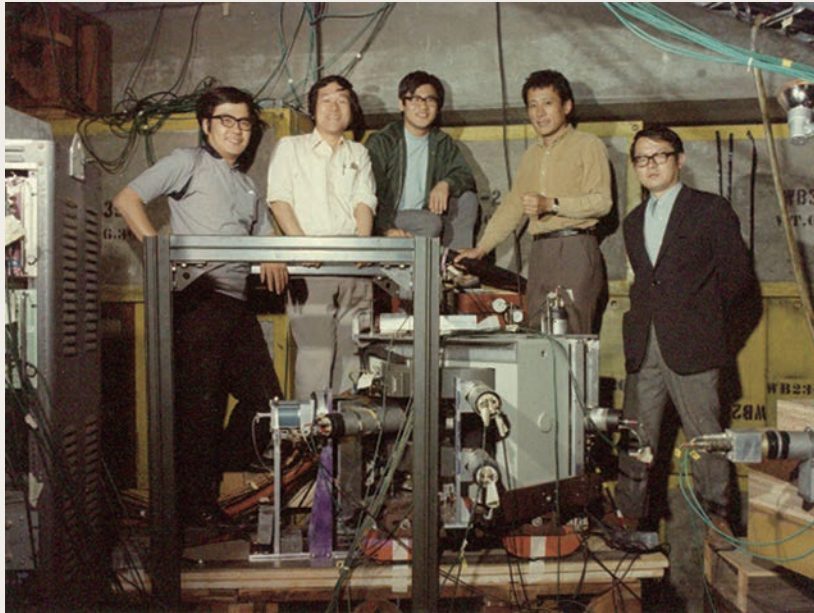
図29 理研-RALミュオン施設の未来を支えるムスリムパワー

雄が先導した東南アジアとの共同研究の発展である。これまで14名の博士課程学生がインドネシア、マレーシア、中国、韓国からIPA（国際プログラム・アソシエイト）やJRA（大学院生リサーチ・アソシエイト）の制度を使って理研の研究に参加しており、2名がすでに博士号を取得した。物性物理から原子核・素粒子物理、さらには技術開発、理論計算まで間口が広いミュオン科学研究の特徴が生きている。仁科センターでの集まりにヒジャブをまとった女子学生が大勢並ぶのは国際協力のあるべき姿を体現して壮観である（図29）。写真のハイライトは、彼女らが自ら作成してくれた貴重な記念ケーキである。理研でも礼拝室の設置など、イスラム圏出身の研究者が過ごしやすい環境を整えることが望まれる。

当初、理研-RALミュオン施設は2018年3月末日をもって閉鎖する予定であった。J-PARCのミュオン施設が理研-RALを凌駕する性能に達し、理研-RALはその使命を終えると考えられていたからである。しかし、J-PARCのミュオン施設は東日本大震災の被害と放射線漏えい事故により大幅に計画が遅れ、瞬間ビーム強度は理研-RALをすでに凌駕しているものの、国内外のミュオンユーザーの要望を定常的に満たす段階には達していない。そのため、2018年度より始まる理研第4中期期間、理研-RALミュオン施設は継続運転されることになった。この期間は理研とRALの共同運営とし、中期終了時に全施設をRALに移管する方針である。



ここからミュオン科学が始まった



創成期（1974年5月撮影）のミュオンスピン共鳴実験の様子である。左から永宮正治、山崎敏光、橋本治（故人）、小林俊一、永嶺謙忠と、そうそうたる面々が並んでいる。日本におけるミュオン科学は、まさにこの実験から始動した。永宮（現在は理研顧問）は、後にコロンビア大学教授として理研-BNL国際協力の立ち上げに尽力し、J-PARC初代センター長を務めた。山崎は、後に東大教授として永嶺とともに世界初のパルスミュオン施設を高エネルギー物理学研究所（KEK）に建設した。第7代東大原子核研究所長となり、113番元素ニホニウムの命名権認定にかかわる橋本（後に東北大学教授）はこの実験で博士論文を書き、理研4号サイクロトロンでも原子核研究を行った。小林（後に第8代理研理事長）は物性物理学の専門家として当実験に参加し、朋友永嶺との唯一の共著論文を書いた。永嶺（後に理研主任研究員）は当時33歳で、1980年に筑波のKEKに世界初のパルスミュオン施設を完成させる。1984年に理研の主任研究員となりミュオン科学研究室を主宰。1996年には英国ラザフォード・アップルトン研究所に世界最高強度のパルスミュオン施設を完成させた。理研初の海外研究施設である理研-RALミュオン施設の立ち上げに関わるさまざまな苦労話は『88年史』（517-527ページ）に詳しく書かれている。

第5節 理研-BNL国際協力とハドロン物理学、関連研究

形を変えてよみがえった加速器RHIC

1969（昭和44）年、フェルミ加速器研究所長であったウィルソン（Robert R.

Wilson) は、提案中の加速器について「それは国防に役立つのか？」と米国議会で問われ、「国防には直接役立ちませんが、わが国を守るに値する国にするのに役立つ」と答えた。この時予算化された加速器はテバトロンとよばれ、後にトッブクォークを発見し、小林誠・益川敏英のノーベル賞受賞につながった。しかし残念ながらアメリカにおける加速器の歴史は平たんではなかった。米国議会は1993(平成5)年には超伝導加速器SSC(Superconducting Super Collider)を途中中止しているし、1983年にもISABELLとよばれる衝突型加速器計画が米国ブルックヘブン研究所に建設途中にして中止され、周長3.8kmの空のトンネルを残して人々の記憶から消えていった。

21世紀を迎え、ISABELL加速器は世界初の重イオン衝突型加速器として、また世界初の偏極陽子衝突型加速器として生まれ変わった。これがRHIC(Relativistic Heavy Ion Collider)である。偏極陽子というのはスピン軸をそろえた陽子のことである。2000年には金の原子核が核子当たり65GeVまで加速され、2001年には核子当たり100GeVまで加速され、総エネルギーにして約40TeVでの衝突実験が行われた。これに引き続き、100GeVまで加速された偏極陽子の衝突実験が開始された。偏極陽子ビームは理研が提案して実現したものであり、その後250GeVに達した。スピン軸をそろえた陽子同士の散乱としては当時も今も世界最高のエネルギーである。

成田から飛行機で12時間、ニューヨークJFK空港から車でロングアイランド島を東へ1時間半、高速道路のまわりがうっそうとした森になってくるとブルックヘブン研究所はすぐそばである。ブルック「ヘブン」といっても天国(heaven)ではない。つづりが違ってこちらは避難所(haven)である。アメリカでは普通だが、自転車で行けるような距離には食堂もなければコンビニもなく、車を飛ばしてもうまい食事にありつける所は少ない。それでも加速器の魅力は全世界の研究者を引き付ける。

偏極陽子衝突実験の意義

ISABELL再生計画を始動するのに大きな力を発揮した指導者が、ノーベル賞学者の李政道(Tsung-Dao Lee)と当時のBNL(米ブルックヘブン国立研究所)所長サミオス(Nick Samios)である。1993年当時の理研では、英国RALにおける理研初の海外施設の完成を間近に控え、次のプロジェクトの議論が起こっていた。RHICで重イオン物理を推進しようという動きと並行して、偏極陽子を加速して陽子のスピン構造を解明しよう、という動きが起きた。中心となったのはフェルミ研究所で偏極陽子を利用した研究を進めていた京都大学の政池明、今井憲一、延與秀人である。

見逃してはいけない学術的要素として、「RHICでは技術的に陽子の偏極加速が可能である」ことが明らかになっていた点がある。RHICでの偏極実験を可能にしようというアイデアは、理研の石原正泰、上坪宏道の強い賛同を得て、有馬朗人理事長の尽力のもと理研の計画として1995年より「RHICスピン物理計画」が始動した。研究成果を最大にすべく、理研ブルックヘブン研究センターが

1997年に設立された。これは理論と実験両面からRHICの物理を推進するための母体で、センター長に李、副センター長には、サミオスを招聘した。

原子核は核子（中性子と陽子）からなり、核子は三つのクォークがグルーオンとよばれる糊粒子で結合された系である。クォークやグルーオンはお互いの距離が離れるほど引力が強くなる性質を持っていて、決して単体で観測されることはない。これを「閉じ込め」とよぶ。しかし、宇宙初期の高温高密度状態ではこの閉じ込めが破れた状態が存在していたと考えられる。

高エネルギーに加速した重イオン同士を衝突させ、高温高密度状態をつくり出し、クォークの閉じ込めが破れた物質相を造り上げる可能性が議論され始めたのは1970年代であった。後にクォーク・グルーオン・プラズマ（QGP）という名称が定着したこの物質は、米国ローレンスバークレー研究所のベバラック加速器、米国ブルックヘブン研究所のAGS加速器、スイスCERN研究所のSPS加速器と、重イオンの衝突エネルギーを上げながら探索が続いたが、決定打となる観測事実は発見できなかった。したがって、RHIC重イオン衝突実験は最後の切り札であった。

さて、三つのクォークが陽子として「閉じ込め」られる機構も理解されているわけではない。クォークは電荷（ $2/3$ ）もしくは（ $-1/3$ ）、スピン（ $1/2$ ）を持つ粒子で、これらが三つ絡み合ってスピン（ $1/2$ ）の陽子や中性子を形成する。三つのクォークが陽子や中性子を造るときにも角運動量保存則が成り立つはずであるが、「クォークのスピンが陽子のスピンを担っている」という単純な予想は、まったく成り立たないことが実験的に分かっている。この謎を解き、失われたスピンの担い手を探すのがRHIC偏極陽子衝突実験である。

幾つもの成果

陽子スピンの謎を解く最大の候補はグルーオンが偏極している可能性であった。RHIC偏極陽子衝突のデータ解析が後藤雄二らを中心に進み、グルーオンがクォークと同程度に陽子のスピンを担っていることを世界で初めて証明した。サイデル（Ralf Seidl）、中川格らにより核内反クォークの担っているスピンの測定にも成功し、当初の目標を達成した。唯一残された疑問が、総和が陽子スピン（ $1/2$ ）に達しているかどうかである。実験精度の制限から、RHICでは調べられない領域でグルーオンがさらに大きな割合で陽子スピンを担っている可能性がある。最終的な結論は、現在米国で計画中の電子イオン衝突実験（electron-ion collider）計画の実現を待つことになる。

クォーク・グルーオン・プラズマ（QGP）はRHICの重イオン衝突実験において、ついにその生成が確認された。それは「液体状」になっており、それも粘性がほとんどゼロであること、さらに、大きな運動量を持つクォークはそのQGP物質の内部で大きなエネルギー損失を受けることが発見された。当初予想していたガス状のQGPとは性質こそ異なっていたが、長きにわたって、さまざまな加速器を用いて研究されてきた高温高密度物質の研究が、ついにその目標を達成したといえる。



図30 小林誠・仁科記念財団理事長より仁科記念賞を受ける秋葉康之



図31 RBRC初代センター長・李政道が旭日重光章顕彰。野依理事長とともに

このプラズマからの熱的輻射を捉え、その温度を決めたのが電子対の測定である。実験当初よりその重要性に着目し、長い間研究をけん引してきた秋葉康之RBRC（理研BNL研究センター）実験グループリーダーが2011年度の仁科記念賞を受賞した（図30）。この測定により高温高密度物質の研究は一つの頂点を迎えた。

理研-BNL共同事業の学術的評価の頂点が秋葉の仁科記念賞受賞にあるならば、組織運営上の評価の頂点がRBRC初代センター長・李の旭日重光

章の叙勲（2006年）である（図31）。「わが国研究者の指導育成および日本・アメリカ合衆国間の学術交流の促進に寄与」した功勞による。李はRBRCの運営指針を定め、多くの若手研究者を育てた。特に大学との兼務を前提としたRHICフェローは、理研におけるクロスアポイント制度の先駆けであり、数多くの若手研究者に大学のテニユア（定年制雇用）職を得る道を開いた。学術の頂点を極めた者が「学術を推進するために最も大切なことをやろう」と発想した制度である。

李は理研が独法化の混乱の真ただ中にある時、以下のような発言をしている。「アジア人でノーベル賞を受賞したものは自分を含め数多いが、自国でなした仕事で受賞したのは日本人だけである（当時）。それがゆえに日本はアジアから尊敬されている。自信をもって進みなさい。」

偏極加速、岡村スネーク、岡村イオン源

RHICで行われる偏極陽子同士の散乱実験は、強い相互作用をする陽子の構成要素おのおのを全てプローブできるところが最大の魅力である。この実験の最も重要なポイントが、偏極した陽子を加速する技術である。磁場の中で陽子は歳差運動をする。この周波数と加速器の周回周波数の比が整数になると共鳴を起し、偏極が失われる。この共鳴に打ち勝ち高エネルギーまでの加速を実現するためのトリックが、サイベリアン・スネーク電磁石（ビーム軌道を蛇のようにうねらせる特殊な電磁石配置）である。RHICでは双極電磁石をねじったような構造のものを製作した。これにより陽子のスピンの向きを周回ごとに180°ひっくり返し、前周回での歳差運動を次の周回でキャンセルする。これによりスピンを保持したまま高エネルギー領域まで加速できる。

偏極陽子加速の原理は確立していたが、実現はそれほど甘いものではなかった。最大の難関は、前段加速器AGSで偏極が失われてしまう（減偏極）という問題

であった。理研・放射線研究室の岡村昌宏はかつて基礎特研としてRHICの主リングのスネーク電磁石のデザインにも深く関与していた。AGSの問題を受け、可変ピッチヘリカルスネーク電磁石をもってこれを解決するという発想に至り、東工大院生の高野淳平らとともにこれを製作した(図32)。提案から完成まで1年という短期間で仕上げた岡村の奮闘でAGS減偏極の問題は早期に解決した。理研の機動力がいかなく発揮された開発研究であった。



図32 可変ピッチヘリカルスネーク完成。製作に貢献した面々による記念写真

岡村はほかに直接プラズマ入射法(Direct Plasma Injection

Scheme)という新しいプラズマイオン源の開発を進めていた。通常のプラズマイオン源は電圧をかけて正イオンを引き出すのであるが、この方式ではプラズマの初期膨張を利用して引き出す。プラズマが中性でいる時間が長いため、空間電荷効果を受けない引き出しが可能になり、パルスイオン源としての強度の世界記録を更新した。

岡村らはレーザー技術を駆使し、BNL加速器群のレーザーイオン源も担当した。当初はNASAがBNLに設置したイオン照射ラボへのビーム供給に使われ、2015年からはRHIC加速器へのビーム供給にも使われている。まさにRHICの母屋を取ったことになる。これらの業績により、BNLにヘッドハントされていた岡村と、次に述べる格子QCD計算でめざましい成果をあげ、RBRC計算物理研究グループリーダーとなった出淵卓は、共にBNLの終身雇用資格を得、研究を终身続けることになる。

理論研究、特に格子QCD専用計算機

強い相互作用をつかさどる量子色力学(QCD)は、原理式は知られているものの、そこから物理量を計算することはとても困難である。この困難に挑戦するために格子QCDとよばれる方法による数値計算が行われる。理研-BNL研究センターは1997年の開所時より一貫して格子QCD専用計算機の開発を行ってきた。初号機QCDSP(Quantum Chromodynamics on Digital Signal Processors)は1998年完成、2号機QCDOC(QCD On Chip)は2005年完成、3号機QCDCQ(QCD Chiral Quark)は2012年に完成している。

特にQCDOC(図33)はIBMのPowerPCを採用、格子QCD計算に必要な相互リンク速度を強化したもので、スーパーコンピュータBlue Gene/Lのひな型ともなり、格子QCD計算に長足の進歩をもたらした。その開発時に理研-BNL研究センターの科学諮問委員を務めていたKEK所長・小林誠は驚き、KEKで納入



図33 QCDOC完成記念

前列左から、チョードリ (Praveen Chaudhari) BNL所長、土肥理事、尾崎BNL顧問、一人おいて李政道初代RBRCセンター長、サミオス (Nick Samios) RBRCセンター長、茅幸二中央研所長

を検討していたスパコンの再検討を依頼したという逸話が残っている。結果として、それまでの日立製ではなくBlue Gene/Lが納入されている。QCDSFとQCDOCはどちらも費用対効果の高い計算機に与えられるゴードンベル賞を受賞した。

RBRCにおける理論研究は、李の指導の下、単一グループによって、核子構造研究に代表される摂動論的QCD理論、高温高密度核物質研究に代表されるQCD現象論、それに格子QCD計算の3本柱で進めていた。李の勇退を受け、マクレラン (Larry McLellan) が2000年より理論グループを率いた。

2011年には格子QCD計算物理学を強化すべく、計算物理研究グループを新規発足させ、そのリーダーとして出渕が着任した。2015年には理論グループの新リーダーとして、かつてRBRCのフェローであったカゼーエフ (Dmitri E. Kharzeev) がその任についた。彼はカイラル物質という新しい概念を提案し、RHICで作られる高温高密度核物質と実験室で造られる新規超伝導物質というまったく異質な研究が、同一の概念で理解できることを示した。新たな境界領域の開拓が始まっている。

研究協力の延長

2001年5月、実験の成功を祝う式典が開催された。日本側からは遠山敦子文部科学大臣、小林俊一理研理事長、この計画を立ち上げた前理研理事長有馬参議院議員、アメリカ側からはマーバーガー (J. Marburger) 大統領補佐官、ポール (P. Paul) ブルックヘブン研究所長代理などが参加、同時に、小林とポールが研究協力の5年延長の覚書に署名した (図34)。調印式の後、遠山大臣と有馬議員は実験装置PHENIXと加速器を見学された。日本語の説明用ポスターを徹夜で準備し、長期滞在している日本人研究者 (男性ばかり) が全員集合した。



図34 2001年実験成功式典および理研-BNL研究協力の5年延長調印式より
前列中央に遠山敦子文科大臣、左に尾崎BNL加速器担当主幹、右に有馬議員、小林俊一理事長 (肩書は当時)

サミオスはジョークが得意で、「次にお越しになった時には半分を女性研究者にしておく」とか、「この実験を見て、よい投資だったと思うか」とか



図35 研究協力の延長に調印

左：2007年1月、野依理事長とアロンソン（Samuel Aronson）所長
 右：2012年5月、川合研究担当理事とアロンソン所長

盛んにやっていた。大臣も笑いながら応答していた。やり取りは自然で、親しみが湧いた。大臣が最後に「日本の経済は苦しいが、ここで行われているような基礎研究は大事にしていきたい」と英語で話され、一同大喝采となった。なお、研究協力の延長は2007年、2012年にも行われている（図35）。

PHENIX測定器の開発

PHENIXのような衝突型加速器用の大型検出器は、衝突点周りに飛跡検出器を構え、衝突点近傍の粒子飛跡情報を得ることが基本である。PHENIXがもともと計画した測定器が不調でその任に堪えられないことが明らかになり、急遽、理研と米国エネルギー省が合同で新しい衝突点測定器を用意することになった。新測定器は4層とし、内側2層にはCERNで開発されたピクセル検出器の技術を導入することとした。外側2層にはBNLのリー（Zheng Li）が温めていた「シリコンの片側加工で2次元読み出しが可能」なアイデアを採用した（後にStripixelと命名）。リーはこの技術で2012年にIEEE技術イノベーション賞を受賞した。

この開発には足かけ7年がかかった。後述のCERN-NA60実験準備に参加し、ピクセルの技術習得することから始めて多くの学生、若手研究者の多大なマンパワーを投入し、全4層を完成させた。シリコン検出器の開発は面白いが大変で、研究者泣かせであった。それでもこの検出器は見事にチャーム、ボトムとよばれる重いクォークを分離し、これらがRHICの高温高密度物質中で流体のごとく振る舞っていることを明らかにするという素晴らしい成果をもたらしたのである。

日本に解析センターCCJを設置

2000年よりRHICは大量のデータを生み出し始めた。これに合わせ、PHENIX実験の主要な計算機資源として、和光地区にPHENIX-CCJ（Computer Center in Japan）を構築し、多くの解析をこなすことになった。市原卓、渡邊康によって立ち上げられたシステムは、当初、LINUX-PC 150台のPCクラスターで

0.7TFlopsの計算資源を提供した。これに400TBの高性能テープストレージ（HPSS）を組み合わせせた計算クラスターシステムは、当時としては斬新で日本初の試みであった。

2004年に、理研和光のスーパーコンピュータがLINUXクラスター化されたので（Riken Super Combined Cluster：RSCC）、CCJとしてもHPSSとCPUを共同運営する体制に移行した。これにより、CCJの専用計算速度は2TFlopsに増強された。2009年にRSCCはさらにアップグレードされRICC（RIKEN Integrated Cluster of Clusters）となるのに伴い、CCJも計算機パワー5TFlops、ディスク容量500TByte、HPSS容量2.5PByteに拡充された。

開設当初以来2016年度末現在まで、83人のユーザーによって107件の解析プロジェクトが実行され、論文38報を出版し、42人の博士を輩出した。今では信じられないことであるが、CCJ開設当時の日米間ネットワークの能力は低く、データはテープ・カートリッジで空輸していた。2005年には空輸を停止し、高速化されたネットワークでの転送に切り替えた。図36にCCJが抱えているデータ容量の推移を示す。最大データ容量は1.7PByteに達した。ネットワークの高速化はどんどん進み、アクセス頻度が低い第一段階の生データを日米両方に所蔵しておく必要がなくなった。このため、データ解析の進捗に合わせ、和光地区にはある程度の解析を終えたデータ・サマリー・テープのみ保存することとし、2015年初頭にHPSSを停止した。

ここで扱っているテラ-ペタバイトのデータ処理は、昨今ビッグデータとよばれているが、このような大量データを処理するボトルネックはデータ転送である。CCJではこれを効率的に行う新手法を生み出した。計算ノードごとに大容量ハードディスクを持たせ、主要データをノードに分散配置して並列処理を行う方式である。四日市悟、中村智昭らがこれを実現し、最適化されたケースでは一般的な

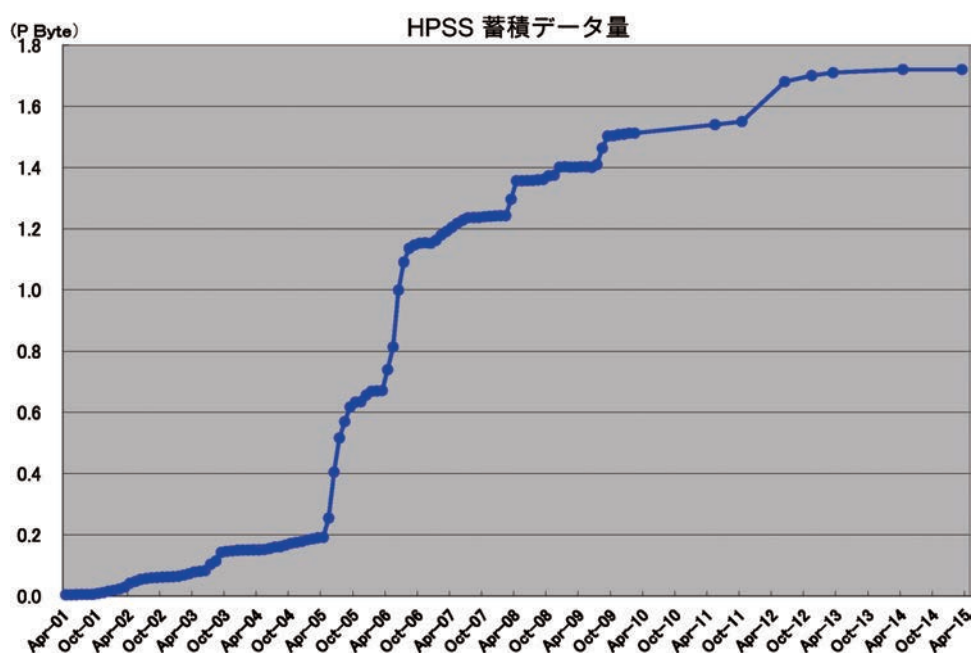


図36 CCJが保持しているデータ量の推移

データ処理法に比べ、10倍以上速い解析を可能とした。

中間子や核子の質量は変化するか

南部陽一郎がノーベル賞を受賞した理論「対称性の自発的破れ」は、素粒子に質量を生み出す機構として素粒子物理学の根本的概念をなしている。しかしながら厳密な意味では実験的検証はなされていない。南部理論が正しければ、温度や密度が異なる環境では中間子や核子の質量が変化することになり、それは実験的に検証することができるはずである。板橋らが行っている中間子原子研究（第4節）は、核物質に束縛された中間子の質量を測るものであるが、核物質中を飛行する中間子の質量を測る方法も考えることができる。特に ρ 、 ω 、 ϕ とよばれる中間子が核物質中で電子対やミュオン対に崩壊するのを捉え、元の中間子の質量を決める方法はある。RHICでは高温核物質を造ることができるが、多くの粒子が発生し、その測定は容易でない。その観点から相補的な物質状態である高密度核物質、その中を飛行する中間子の質量を測ることに挑んだのが、高エネルギー物理学研究所KEKの12GeV陽子シンクロトロンでのE325実験とCERNのSPS加速器でのNA60実験である。前者は陽子と原子核を衝突させ電子対崩壊を、後者はインジウム原子核同士を衝突させミュオン対崩壊を測定した。

E325実験は合計7名の博士論文になった。 ρ 、 ω 、 ϕ 中間子の質量変化を捉えることに成功し、その変化は理論モデルと無矛盾であるとした。一方、大西らとその解析の主体を担ったNA60実験では、質量スペクトルの変化を、中間子の質量変化ではなく、崩壊幅の増大で説明できるとした。両者の実験は、扱っている核物質の状態が大きく違い、物理的解釈が違うことは考えられるが、すっきり



図37 理研とKEKによりJ-PARCハドロン実験施設にE16スペクトロメータ電磁石が完成
中にGEMトラッカーフレームの設置を行う小松雄哉、菅野光樹、四日市悟（左より）。

しない。この問題に最終解を与えるべくJ-PARC-E16実験を準備中である（図37）。もともとのE325は ϕ 中間子の核内電子対崩壊を高統計で、つまり、従来よりもはるかに多い回数 of データを取って統計処理して測った唯一の実験である。E16はさらにその上を行こうという野心的な実験であり、東海の新施設に立ち上がりつつある。

中性子ビームによる画像化技術

1999年から2005年の間、清水裕彦が率いる研究グループ、イメージ情報技術開発室（後にイメージ情報研究ユニットに改名）が存在した。清水の栄転（KEK）で閉室となったが、放射線研究室が最後の3年間をホストしている。閉室時には超伝導検出器製造施設一式をKEKに寄贈、大いに感謝された。この研究ユニットでは主に研究対象からの情報の多次元化を主軸として、検出器や信号処理システムの開発を推進した。特に超伝導トンネル接合素子によるテラヘルツ光検出器開発、中性子ビームを扱う中性子光学素子開発、最高エネルギー宇宙線の宇宙からの観測（EUSO計画）のための集光ミラー開発など、電荷を持たない粒子の計測法の開発に特徴がある。

ここでの研究成果の多くが光量子工学研究領域に引き継がれている。特に、大竹淑恵の率いる中性子ビーム技術開発チームは、理研キャンパス内に小型中性子



図38 PHENIX実験に参加した当初、理研はミュオン測定器の建設を担当した。その思い出深い測定器の解体現場と延與仁科センター長。

源システムを設置、中性子ビームによる新たな非破壊測定を高度化し、「見えないものを見える化する」技術開発を進めている。老朽化が進む橋梁などを直接検査し、老朽化事故を防ぐ方法論である「橋梁透かし撮り装置」を実用化することが目的である。イメージ情報研究として行っていた中性子光学素子開発は、J-PARCの中性子ビームラインの基礎的技術を提供したのみならず、理学と工学が融合した社会知イノベーションを起こす研究へと、理研ならではの研究展開をもたらした。

sPHENIXとアメリカの次期計画

相対論的重イオン衝突装置（RHIC）は世界初・世界最大の衝突型重イオン加速器であったが、2010年にCERNのLarge Hadron Collider（LHC）で鉛原子核の衝突実験が開始され、世界最高エネルギーの座を譲ることになった。PHENIX実験装置は2016年をもって運転を停止し、新時代を担うsPHENIX実験装置に生まれ変わるべく、改造を開始した（図38）。それはRHIC重イオン衝突実験を完遂す

るための大改造である。2020年から実験を開始する予定であり、理研第4中期計画期間での研究となる。PHENIXに小文字のsを付けるのは超対称性粒子にsを付けてスクォークのようによぶやり方に習ったもので、「さらに進化したもの」「素敵」なものにはsを付けると覚えておいてほしい。

RHICは理研とBNLの共同研究事業により、もとの重イオン加速器に特殊な電磁石やら測定器やらを付加し、世界で唯一の偏極陽子衝突型加速器としての機能を持つに至った。日本の予算で外国の加速器にこれほど大掛かりな改造を加えたのは初めてのことである。実験に参加するいわばお客的な立場から、加速器施設の共同経営者になったようなものである。

2015年、米国原子力科学諮問委員会（NSAC）はエネルギー省（DOE）の命を受け、長期研究計画を更新した。次期計画として電子・イオン衝突型加速器の建設が最大優先度として推薦された。日本の学術会議とは異なり、NSACの答申は全て実現されてきた。理研がRHICで開始した核子構造の物理が、アメリカの原子核研究の将来を担うことになる。開始は2025年以降である。この計画に理研はどのように関わっていくことになるのか、それは理研150年史に記載されることになる。

第6節 理研の理論研究

第二次世界大戦前の仁科研究室に所属した朝永振一郎、湯川秀樹をはじめとして、理研には仁科の影響を受けた理論物理学徒が多数在籍した。戦後も仁科に倣い、実験研究を本務とする主任研究員研究室に所属する形で多くの理論物理学者が活動した。

1990年代から2000年代の初めにかけては、加速器施設で展開する実験研究や将来のRIビームファクトリーでの研究発展を理論面から支えるべく、大塚孝治（原子核殻構造）、堀内昶（原子核クラスター構造）、櫻木弘之（原子核反応）を原子核分野の客員主幹研究員として招聘して理論研究の国内拠点を形成した。

その後、和光に移転した東大CNSとの共同研究により大規模計算による原子核理論の研究プログラムが展開され、専用計算機ALFLEETが配備された。また、理研は米国DOEと原子核理論研究者の日米交流事業（JUSTIPEN）をCNSと共同で担った。これらの活動の代表的な成果としては、不安定核領域で顕れるテンソル力など、それまで隠れていた種類の核内相互作用の役割が明らかになったこと、中性子過剰な原子核では、余分な中性子がクラスター同志を結び付ける役割を果たすこと、予言力のある理論に基づく原子核間ポテンシャルが得られ、RIBF領域での核反応解析に用いられるようになったこと、などを挙げることができる。第3節でも述べた大塚らによるCa-54核における新たな魔法数 $N=34$ の予言と、RIビームファクトリーでの実証は、世界をリードする理研の実験と理論研究が相乗的な効果を現した例である。

一方、もう一人の客員主幹研究員として、矢崎紘一は、理研BNL研究センター

の発足に向け、理研和光でのハドロン物理に関わる理論研究を充実させるべく、若手理論研究者を率いた活動を開始した。この理論研究アクティビティは、理研BNL研究センター理論グループの日本側のカウンターパートとして継続され、総勢14名のポストドクもしくはJRAが延興放射線研究室に所属し、核子構造や高温高密度ハドロン物質の理論研究を進めた。後述の橋本数理物理学研究室の発足時に、このアクティビティは橋本幸士准主任研究員の下に移管された。



図39 2012年度仁科記念賞授賞式であいさつする
初田哲男

独立した理論研究室は、1960年代に湯川秀樹が主宰して以来途絶えていたが、2002年に川合光を仁科センターの主任研究員として理論物理学研究室が発足した。その後、2007年には中務孝が原子核理論研究室を、2008年には肥山詠美子がストレンジネス核物理研究室を、2010年には橋本幸士が数理物理学研究室を仁科センター内に立ち上げた。2010年に川合が理研を離れた後、2011年に初田哲男が量子ハドロン物理学研究室を立ち上げることで、仁科センターの理論研究部門は、素粒子からハドロン、原子核に至る広いテーマをカバーする日本有数の理論物理学研究拠点に発展した。初田は「格子色力学に基づく核力の導出」の成果により、2012年度仁科記念賞を受賞した（図39）。

理論研究部門における大きな科学的成果の一つとして、2012年に仁尾真紀子、木下東一郎らによって行われた量子電気力学（QED）を用いたレプトン異常磁気能率の10次計算がある。これは人類史上最も精密な理論計算であり、朝永振一郎が提唱しノーベル物理学賞の対象となった“くりこみ理論”が大きく花開いた成果であり、素粒子の標準理論を越えるための有力な手がかりも与えている。

また、2015年前後から土井琢身らを中心に進められてきた「京」コンピュータを用いた核力の導出は、湯川秀樹が提唱しノーベル物理学賞の対象となった“中間子論”を、南部陽一郎が提唱した量子色力学（QCD）から見事な形で導き出したものであり、原子核や中性子星の構造をQCDから研究する上での現代的な出発点となっている。

一方、日高義将は一般化された南部-ゴールドストーン定理を2013年に証明した。これは南部陽一郎のノーベル物理学賞の対象となった自発的対称性の破れの理論を半世紀の時を経て拡張したものであり、自然界に現れる多くの対称性の破れとそれに伴う集団現象の根本的理解に役立っている。

これら理論物理学における成果に加えて、2013年には、理研内の競争的資金である新領域開拓課題制度のサポートを受けて、物理学、化学、生物学、物質科学、工学などを含むさまざまな理論分野に横串を入れるための、「理論科学連携研究推進グループ」(iTHES) がスタートし、理論研究者が分野を越えて共同研究を行う活動が進められている。さらに2016年には、iTHESに純粋数学も包む形での「数理創造プログラム」(iTHEMS) が発足し、自然科学と数理科学の協働が始まっている。