

話 題

理研の加速器小史と RIBF 建設の回想

—日本の加速器科学発祥の地「理研」創立 100 周年に寄せて—

矢野 安重*^{1,2}Retrospective of RIBF Construction and Brief History of RIKEN's Accelerators on the Occasion of the 100th Anniversary of RIKEN, the Birth Place of Japanese Accelerator-Based ScienceYasushige YANO *^{1,2}

Abstract

This year is the 100th anniversary of the RIKEN, the original campus of which was located at Komagome, Bunkyo-ward in Tokyo. There Dr. Yoshio Nishina “the father of Japanese modern physics” initiated “Japanese accelerator-based science” in 1930's and led to the world top level. But after the defeat, its level had been behind America and Europe. Through the long-time struggles, Japan successfully has caught up them, and now is again on the top level. In this article, I describe briefly a history of RIKEN's ion accelerators, and looked back over the construction of the RI Beam Factory (RIBF) unparalleled in RI beam production capability, which we proposed and led.

はじめに

理研は 1917 年 3 月 20 日に東京都文京区本駒込の地に発足した。今年が 100 周年である。我が国の加速器科学を創始したのは日本現代物理学の父と呼ばれる仁科芳雄であるが、仁科が理研に入所したのが翌年の 1918 年であるから、これを日本の加速器史の端緒とするならば以来ほぼ 100 年である。

仁科（主任研究員）は、1935 年に、まずコッククロフト（J. Cockcroft）・ウォルトン（E. Walton）（NB1951：1951 年ノーベル賞受賞。以下同様）型静電加速器を建造し、1937 年にはローレンス（E. O. Lawrence）（NB1939）の実用機 27 インチ・サイクロトロン（1934 年完成）を参考にして世界で 2 台目となる 26 インチ・小サイクロトロンを始動させ、我が国に加速器による原子核・アイソトープ科学、放射線生物学を創始した。さらに、戦時中の 1944 年にローレンスの 60 インチ・サイクロトロンと同規模の大サイクロトロンを完成させるが、敗戦後 1945 年 11 月

に占領軍によって突如破壊されてしまう。この占領軍の暴挙によって当時世界トップクラスにいた我が国の加速器科学は、欧米に大きく水をあけられてしまうことになるのである。

戦後、理研が重イオン加速器で果たした役割は絶大である。まず熊谷寛夫（主任研究員）が 1967 年に新天地・和光の理研で、我が国初の重イオン加速器である 160 センチ・サイクロトロンを始動し、続いて 1986 年には上坪宏道（主任研究員）が理研リングサイクロトロン（RRC）を完成させ、これで世界のフロントランナーに返り咲いた。そして 2007 年に、世界に冠絶する RI ビームファクトリー（RIBF）が本格始動する。

本稿は、RIBF の建設を主導した筆者の回顧録であるが、仁科以来の理研のイオン加速器の歴史も振り返ってみたい。敬称は略させていただいた。

財団法人理化学研究所「理研」発祥の地

JR 山手線の駒込駅を出るとすぐに六義園という有名な旧柳沢家の日本庭園があるが、その六義園の南側に財団法人理化学研究所「理研」が設立

*¹ 仁科記念財団 Nishina Memorial Foundation*² 理研仁科加速器研究センター RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science
(E-mail: yyano@riken.jp)

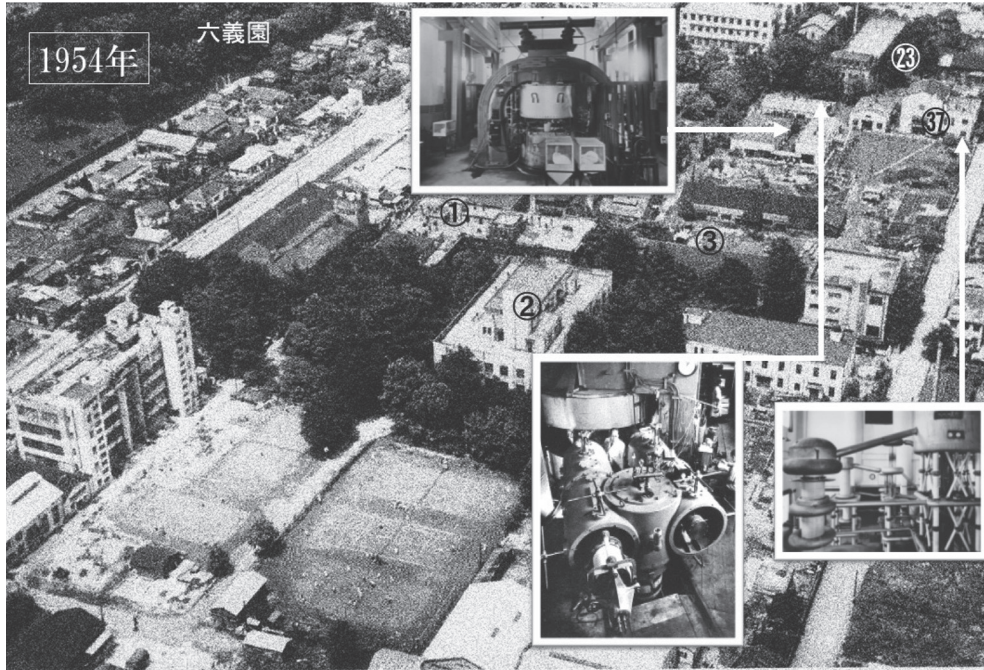


図1 1954年当時の株式会社科学研究所（理研）の航空写真。大小サイクロトロンとコッククロフト・ウォルトン静電加速器はすでにない。丸内の数字は建物番号（朝日新聞撮影）。

された。図1は1954年の航空写真である。六義園が左上にあって、その南側は全部理研の敷地であった。右上隅の建物が「37号館」で、現在の仁科記念財団。そこに仁科の執務室とコッククロフト・ウォルトン静電加速器があり、その上の「23号館」（現在は日本アイソトープ協会）に朝永振一郎（研究員）ら仁科研究室の面々の部屋があった。また、仁科の建造した大小のサイクロトロンがあった建物はすでに解体されている。

理研ができた1917年というのは、1914年の第一次世界大戦開戦のすぐ後である。当時、日本はドイツから主に薬の原材料などを輸入していたので、ドイツの開戦によって、原材料不足に陥ってしまったようである。そのようなとき、タカジャスターゼやアドレナリンの発明で大成功したアメリカ在住の高峰譲吉が、「日本はこのままでは、やがて立ちいかなくなるので、日本も欧米並みに基礎科学から積み上げる研究所をつくらないといけない」と財界の大立役者の渋沢栄一を説得したのが発端で、理研ができたのだそうである。

理研は1917年の創立以来「財団法人」であったが、占領下の1948年、GHQの解体命令から理研を守るために、「株式会社科学研究所」に変身し、仁科がその社長になった。そして4年ほど

経て科学研究所の中の薬の製造部門が独立し、科研製薬という会社ができた。理研のあった場所は、今はほぼ全部が科研製薬で、文京グリーンコート（図2、図1の1954年の写真と同じ角度で撮られている）になっている。その真ん中にある案内板には「理化学研究所ここにありき」とあり「理化学研究所は1917年に御下賜金とか産業界からの寄附とか、それらを基に財団法人として設立された」さらに続いて「歴史的に偉大な足跡を残し、今も日本近代科学の推進役を果たしている。世界初の原子模型を発表した長岡半太郎博士、KS鋼を発明した本多光太郎博士、オリザニン（後のビタミンB₁）抽出に成功した鈴木梅太郎博士、日本初のサイクロトロンを建設した仁科芳雄博士など、数多くの著名な研究者たちがここに参集した。またノーベル賞を受賞した湯川秀樹博士、朝永振一郎博士など多くのすぐれた研究者を輩出した。まさに“科学者たちの自由な楽園”と呼ぶにふさわしい環境だった」と記されている。

仁科芳雄の生涯

仁科は1890年12月6日岡山県里庄の生まれで、理研が創立された翌年の1918年に東京帝国大学工科大学電気工学科を首席で卒業して理研に



図 2 日本アイソトープ協会, 仁科記念財団に当時のまま保存されている仁科芳雄の執務室, 「理化学研究所ここにありき」の案内板 (山口栄一京都大学教授提供)。

入所した。すなわち工学部出身である。入所してすぐ長岡半太郎 (主任研究員) の勧めで, 1921 年から 2 年間イギリスのキャヴェンディッシュ (Cavendish) 研究所に留学し, ラザフォード (E. Rutherford) (NB1908) のもとでエックス線分光学と放射線検出技術を学んだ。そこで, ボーア (N. Bohr) (NB1922) との運命の出会いがあり, 彼のもとで原子物理学を学ぶことを決意する。ボーアの好意を得てデンマークの理論物理学研究所に留学した仁科は, 5 年間, 量子力学を建設したハイゼンベルグ (W. K. Heisenberg) (NB1932), シュレージンガー (E. Schrödinger) (NB1933), ディラック (P. Dirac) (NB1933) から俊英と親交を結んだ。帰国の直前には理論物理学にも才能を開花させ, 発表されたばかりのディラック方程式に基づいてコンプトン (A. Compton) (NB1927) 散乱断面積を説明する「クライン (O. Klein)・仁科の公式」を発表する。これで, 仁科は世界的に著名な原子物理学者に仲間入りすることになる。また, ボーアと彼の弟子のヘベシー (G. Hevesy) (NB1943) の指導を受け RI の生物研究への応用を学んだ。

こうして量子力学を完璧に習得した仁科は, 理研に帰った 2 年後の 1931 年に仁科研究室を主宰することになる。仁科は生まれたばかりの量子力学を啓蒙するために全国の主要な大学を行脚して連続講義を行った。この講義に魅了された湯川秀

樹 (NB1949), 朝永振一郎 (NB1965), 坂田昌一など多くの天才たちが次々と仁科のもとに集結し, 日本独自の原子物理学が醸成されていく。

太平洋戦争中, 仁科は日本帝国陸軍の要請で「二号研究」という原爆開発に携わるが, 実は, 「原爆などつくれぬ」と内心思っていたようである。しかし, 「つくれる」と言い続けて, たいへんな資金をもらい, 当時世界最大のサイクロトロンを完成させたほか, ローレンスの 184 インチ・シンクロサイクロトロンと同じ超大型のサイクロトロンの建設を目論んでいたふしがある。仁科の魂胆は, 戦時研究の名のもとに, 俊英の弟子たちを自分の傍らに置いて戦場に行かせないということだったのではないかとされている。

1945 年 8 月, 広島, 長崎に原爆が投下された。その直後に, 仁科は陸軍の要請で, 広島にも, 長崎にも行き, 果たして“原爆”かどうか, を調査した。放射能の一番強いときに一番強い所にあえて入っていったので, 被曝量は尋常ではなかった。仁科の判定はすぐさま「原爆ナリト認ム」と大本営に打電された。

戦後, 理研は解体の危機に瀕する。それは, 理研が多くの子会社をもっていたために, GHQ により戦争の遂行を支えた財閥と同じとみなされ, アンチトラスト法により「解体」とされたからである。そのようなとき, 大河内正敏 (所長) が戦犯容疑で逮捕されてしまい, 急遽, 仁科が, 主任

研究員から選ばれて財団最後の所長となった。そして、GHQ との粘り強い交渉の末、1948 年に自らが社長になり株式会社科学研究所という民間会社をつかって、辛うじて理研を救った。その奮闘のおかげで今の理研が存在する。

さらに仁科は、日本学術会議の初代自然科学副会長に就き日本の科学者の代表として、科学者が戦争に巻き込まれないような国際的な運動に率先して参加し、日本の科学界の民主化に努めた。この仁科の遺志は、湯川、朝永らの反戦運動にもつながっていく。

そして、我が国の科学技術を復興させる道半ばの、1951 年 1 月 10 日に、60 歳という若さで、肝臓がんのために逝去した。仁科の病気を診断したのは、仁科の弟子であった武見太郎（元日本医師会長）であった。

日本の加速器事始め

理研にはもう一つ原子物理学の研究室があった。結晶学の大家、西川正治（主任研究員：西川哲治（KEK 元所長）の父）の率いる研究室である。西川研の研究員であった菊池正士（理研初代所長の数学者菊池大麓の子息で、東大原子核研究所（核研）の初代所長。阪大でサイクロトロンを建造した）は陰極線管で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）。後に、核研と理研でサイクロトロンを建造した熊谷も西川研であった¹⁾。

この西川研究室と仁科研究室は 1935 年に「原子核実験室」を創設し—我が国の巨大科学推進組織形成の礎である—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、1 MV 級の Cockcroft・ウォルトン加速器の建設を計画した²⁾。当時、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、日本無線電機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^{†1)}、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 3 MeV で世界最高強度 50 μ A の重水素イオンを加速したが、これは理研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（図 1）。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、当時ローレンスのもとに留学していた嵯峨根遼吉（長岡半太郎の四男、後に理研主任研究員、図 3）からの情報で、ローレンスの 200 トン電磁石と同じものをつくることを決め、ローレンスに依頼して材料をアメリカで



図 3 (左) 大サイクロトロン電磁石組み立て完了の記念写真、真ん中に仁科、右に長岡、左に矢崎。(右上) 仁科芳雄と長岡半太郎。(右下) ローレンス家族と嵯峨根遼吉。

^{†1)} 無線通信用のパウルセン (V. Poulsen) 式水素ガスアーク放電発信器のアーク安定化磁束発生に使用されていたが、当時すでに真空管式になってこの発信器は使用されなくなっていた。ローレンスは部下の技術者から製作費のかかるこのマグネットをリサイクルする示唆を受けてこれを改造し、1934 年磁極直径 27 インチのサイクロトロンが実現した。仁科はこのことを知っていたようである。

購入し、石川島造船所に加工を頼んで 1938 年 6 月、その組み立て据付を終えた。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、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）ら 3 名を派遣した。日独伊防共協定締結後で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³⁾の改造を行い³⁾ (図 4)^{†2)}、1944 年、16 MeV 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 11 月に占領軍によって破壊され東京湾に沈められた (図 5)。

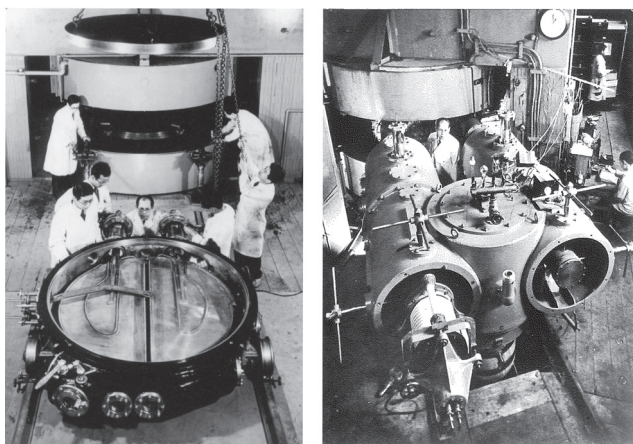


図 4 (左) 大サイクロトロン改造前、(右) 改造後。

昭和 18 年 (1943) の「財団法人理化学研究所案内」に載っている仁科の研究グループのテーマは、①宇宙線、原子核並びに中間子の理論^{†3)}、②固体の量子論、③宇宙線の研究^{†4)}、④元素の変換並びに人工放射能の研究^{†5)}、⑤大サイクロトロンの建設^{†6)}、⑥中性子の研究、⑦同位元素の分離、⑧サイクロトロンによる高速イオンの分光学的研究、⑨原子核物理学の金属学に対する応用、⑩人工放射能の生物学に対する応用並びに影響、⑪中性子並びに宇宙線の遺伝学的作用^{†7)}、⑫中性子の植物に対する作用、となっており、まさに日本の加速器科学の胎動であった。

仁科が逝去した年の 5 月に、ローレンスがビキニ環礁での原爆実験を視察した後、突如理研に来てスペアとして残してあった日本無線電信寄贈のマグネットを見つけ、杉本朝雄らに、これを利用

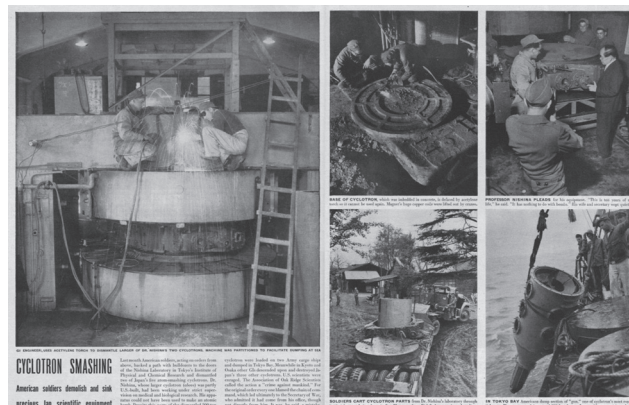


図 5 1945 年 12 月 24 日発行の「LIFE」誌に掲載された理研サイクロトロン解体東京湾投棄の記事。

^{†2)} 特に、高い加速電圧を発生できる空洞共振器への構造変更—旧設計ではこれが決定的な欠陥であると指摘された：初期のサイクロトロンの磁場分布では、等時性というサイクロトン加速の原理を満たしておらず、粒子の回転周期が加速高周波電場の周期に対して常に遅れるようになっていた。加速電圧が低いと回転数が増え周期のずれが大きくなって遂には高周波電場の減速位相に入って、それ以上加速できなくなる。そのため高い電圧が必要であった。小サイクロトンでは簡単な LC 回路で発生する低電圧でも目的のエネルギーまで加速できたが、大サイクロトンでは加速の途中で減速位相に入ってしまった。ローレンスらはこの限界に気づき、高い加速電圧を発生できる空洞共振器と呼ぶ立体 LC 回路を使った。高エネルギーになると相対論的な効果で粒子の質量が加速につれて次第に大きくなるので、位相の遅れはさらに大きくなる。

^{†3)} 湯川、朝永、坂田をはじめ戦後日本の素粒子論を牽引するほぼすべての俊才が集っていた。

^{†4)} 仁科は 1935 年に湯川が予言したパイ中間子を宇宙線中に見つけるため、世界最大のウィルソン (C. Wilson) (NB1927) 霧箱を建造し世界に先駆けてミューオンの質量測定に成功した。パイ中間子はアメリカのパウエル (C. Powell) (NB1950) が 1947 年に坂田のニ中間子論に基づいて高所での原子核乾板中に発見し、湯川のノーベル賞となる。日本の宇宙線研究発祥の地も理研である。

^{†5)} 新同位元素 ²³⁷U の発見—93 番元素の発見であったが、ローレンスの弟子のマクミラン (E. McMillan) (NB1951) に先を越された—や原爆の原理である高速中性子による ²³⁵U の対称核分裂の発見など輝かしい業績をあげた。

^{†6)} マクミランはローレンスの 184 インチ・サイクロトロンをシンクロサイクロトロンに改造し、1948 年にパイ中間子の人工発生に成功する。仁科の頭の中には同様な建設計画があったと思われる。

^{†7)} 世界で初めて中性子によって突然変異を起こさせた。

して小サイクロトロンを再建するように促した。そうして 1953 年に完成したのが理研第 3 号サイクロトロン (図 6) である。これが、戦後日本で最初に稼働した加速器でもあった。しかし、理研が新天地・和光に移るときに解体され、マグネットは日本アイソトープ協会の敷地にモニュメントとなっていて、高周波加速装置は上野の国立科学博物館に展示されている。

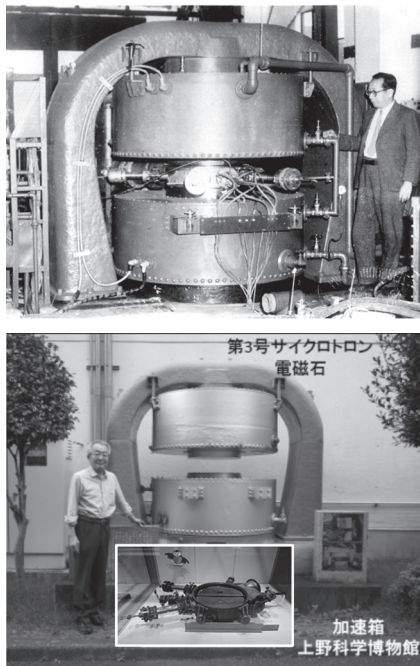


図 6 (上) 理研 3 号 23 インチ・サイクロトロン (右に杉本朝雄) と (下) モニュメント。

和光移転と第 4 号サイクロトロン

1958 年に理研は国の管轄する特殊法人として再出発した。初代理事長は長岡半太郎の長男の長岡治男である。長岡治男は手狭になった本駒込から新天地として現在の和光のキャンパスを選び、第 4 号となる 160 センチ・サイクロトロンを移転の旗頭とした。図 7 左の中央に腰かけている熊谷 (主任研究員) が建設を主導した。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 号が建設される頃には Azimuthally Varying Field (AVF) Cyclotron という、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これが主流になっていた。しかしながら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つきたいという強い願いがあったものと思われる。熊谷は新設の東京大学原子核研究所 (核研) で 160 センチ・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なのだが、これも非等時性で弱収束—を 1957 年に完成させたので、その技術をそのまま理研 4 号に使おうとしたようである。

ただし、4 号には現在の RIBF の成功を占う付加価値が付与された。それは、重いイオンが加速できるようにしたということである—実際フッ素まで加速したようだ。4 号は我が国初で当時世界でもアメリカの Lawrence Berkeley Laboratory (LBL), ソ連の Joint Institute for Nuclear Research (JINR)



図 7 (左) 理研 4 号 160 センチ・サイクロトロンの組み立て完了記念写真と (右) モニュメント。

に並ぶ重イオン加速器となり、1990 年まで 24 年間稼働して現在は RIBF のルーツを顕彰するためモニュメントとなっている。

以来重イオン加速が理研のお家芸となる。重イオン加速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 (F. 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する。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。当時日本では新しかったこの技術の開発のために先輩がたいへん苦労したと聞いている。

お家芸の継承であるが、図 7 左の熊谷の上の上のに立っているのが上坪で、次に述べる重イオン線型加速器 (RILAC) と 5 号のリングサイクロトロン (RRC), 6 号の AVF サイクロトロン (AVF) からなる多段式重イオン加速器施設を我が国で初めて建設した。筆者は上坪のもとでこの施設の建設に参画し、さらにこれを前段加速器にした RIBF を完成させることとなった。

理研リングサイクロトロン (RRC)

上坪が建設を主導した多段式重イオン加速器施設は、RRC が主加速器となっていて、RILAC と AVF がその前段加速器になっている (図 8)。リングサイクロトロン (ring cyclotron, 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さらに強くするため、扇型のマグネット (sector magnet) 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。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。Sector magnet 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すべて連続的に加速、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 Paul Scherrer Institute (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今なお世界最大ビームパワー 1.4 MW の連続陽子ビームを供

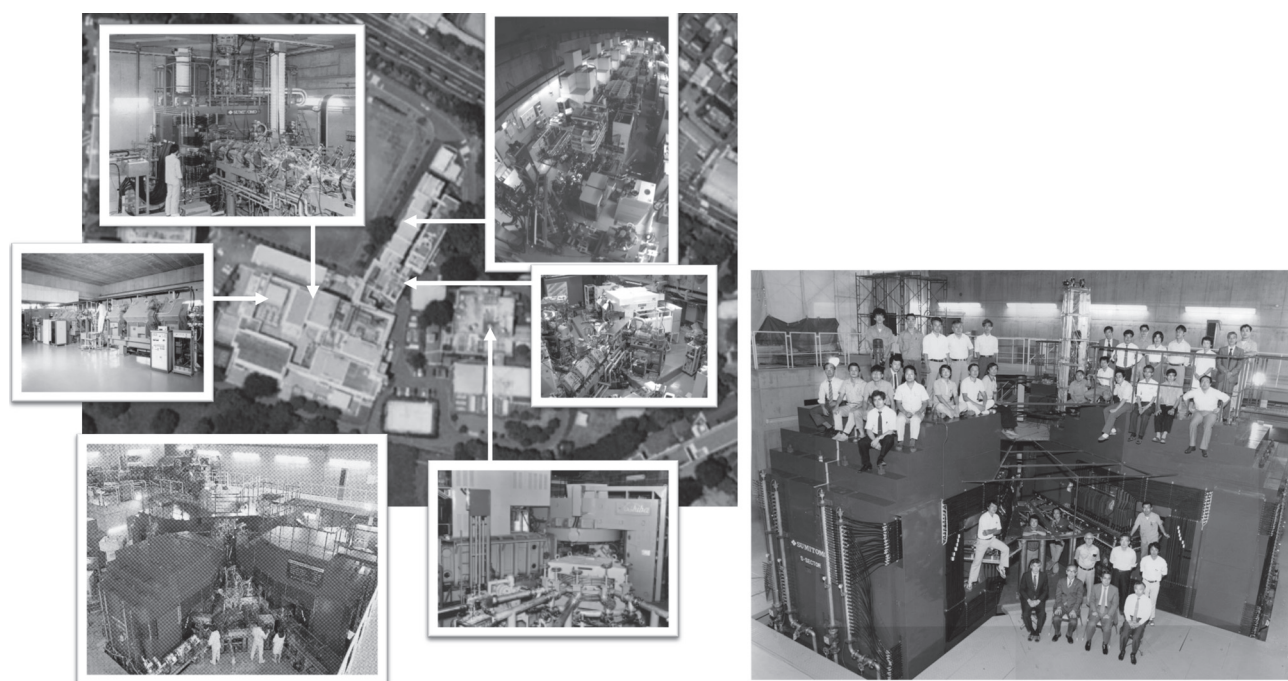


図 8 (左) RRC 施設と 4 号サイクロトロン。RRC から時計回りに、RIPS, AVF, RILAC, GARIS, 4 号サイクロトロン。(右) 1985 年 5 月に RRC の磁場測定が完了したときの記念写真。

給している。

筆者らの AVF はイオン源を外部に設置してイオンを真上からサイクロトロンを中心に入射し螺旋形のインフレクターで第1平衡軌道に導く方式になっていて、この方式は日本では初めてである。イオン源としては我が国初の ECR (Electron Cyclotron Resonance) 重イオン源と偏極重陽子源 (イオン化のためにここでも ECR を使用) 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 イオン源の構成を考えたが、ECR イオン源技術の将来性を見込んであえて ECR 技術に挑戦して現在の外部イオン源搭載型の中型 AVF を実現した。これによって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。但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、それで分子を衝撃するので高電離のイオンができるというわけである。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上がることになる。フランスのプラズマの研究者ゲラー (R. Geller) が発明したものであるが、筆者が採用に踏み切ったときはまだ将来性が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。筆者らは 10 GHz, 18 GHz と周波数の高い ECR に挑戦し、RIBF 用の 28 GHz ECRIS では超伝導電磁石になっていて、世界最高性能を誇っている。

RILAC⁴⁾ は小寺正俊 (主任研究員) の発明で世界唯一の加速周波数可変型である—後段の RRC が周波数可変を想定したために、周波数可変が要請された。

施設建設は 1975 年にまず RILAC から開始し、RRC が 1986 年に、また AVF が 1989 年に完成し、主力実験装置である RI ビーム発生装置 RIPS (RIKEN Projectile fragment Separator) が 1990 年に完成してフル装備になった。15 ヶ年の歳月を

At 15:34 on Dec.16, 1986



図9 第5号RRCサイクロトロンからのファースト・ビーム取り出し成功の記念写真。

要した。因みにニホニウムを発見した⁵⁾ GARIS (Gas-filled Recoil Ion Separator) は 1987 年に完成した。

図8右下は 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, 仁科研), 宮島龍興 (理事長, 仁科研), 上坪である。上坪の真上に筆者がいる。

図9は、1986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とき加速器制御室—RIBFの制御室もここになる—で撮った記念写真である。筆者の一人置いて右に居るのが後藤彰で、その右に居るのが加瀬昌之である。以来RIBF完成まで、この三人は苦勞を共にすることになる。万歳をしているのは元永昭七 (副主任研究員) でRRC施設建設の隊長である。これから20年後の2006年12月28日16時00分に第9号超伝導リングサイクロトロン (SRC) が産声を上げた。因みにこの1986年の11月にはKEKのTRISTANが始動したので、1986年は、戦後欧米に大きく水をあけられていた日本の加速器界にとってはやっと世界に追いついた画期的な年となった。

図10はこれまでにRRCが加速した重イオンビームで、いかに多彩なイオン種を実験に供してきたかがわかる。

RIBFの建設と仁科センターの創設

RIBF⁶⁾が2007年に理研の和光キャンパス (図

11)に完成した。RIBF の完成は「世界に冠絶する」RI ビーム生成能力を誇る重イオン加速器施設が日本で始動したということであり、世界最高性能のサイクロトロンをつくるという仁科の夢の一つが実現したということになるかと思う。

さて、理研仁科センターであるが、このセンターは 2006 年 4 月に仁科研究室の伝統を継承する理研の素粒子・原子核の理論・実験研究グループ、加速器グループ、それに生物や化学への応用研究グループを統合して設立された。その後宇宙線関連の研究グループも加わり、仁科研究室の再来といえるものである。このセンターの設立は筆者が

理事会をお願いした。「ローレンス・バークレイ研究所」を意識していたのだが、理研ではこれまで大先輩の個人名を冠した研究センターはなかったこともあり—おそらく日本でも珍しいと思う—理事会で議論があったが、最終的には野依良治(理事長)の英断で設立に至ることになった。

さて、**図 11** の赤線で囲った部分をクローズアップすると、**図 12** のようになっている。RIBF は上坪が建設した旧施設に新施設を増設したものである。両施設は地下でつながっている。

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 本立っているのを見て取れる。これらは、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

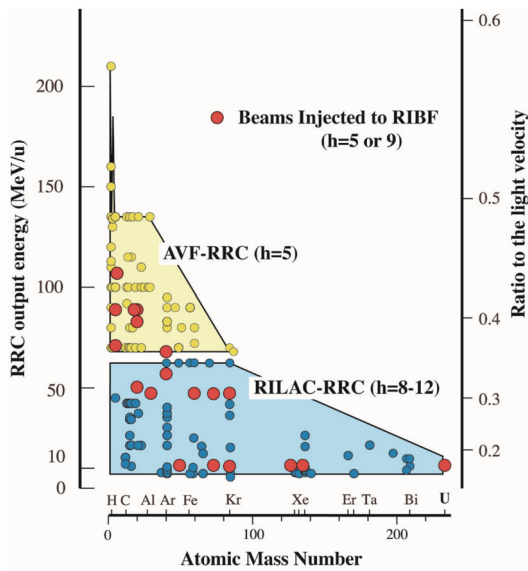


図 10 RRC がこれまでに実験に供した重イオンビーム。

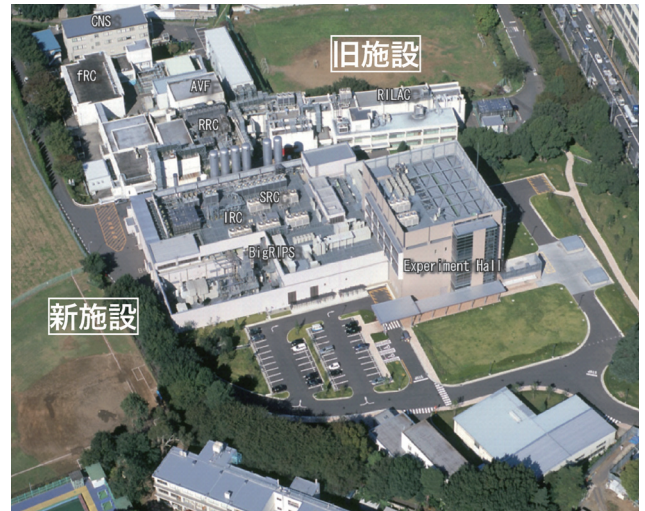


図 12 RIBF 建物全景航空写真。



図 11 理研和光キャンパス(1963年に本駒込から移転開始)の航空写真。赤線で囲った地区がRIBF。加速器と実験設備の大半は地下室に収容されている。RIBFの上側は米軍のAFNラジオ放送アンテナ用地。

態に保つための液体ヘリウム 5,000 リットルと BigRIPS 用 5,000 リットル, 合わせて 10,000 リットルの液体ヘリウムを一時的に高压ガスとして貯蔵する. 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になっている.

建物の左下隅の「BigRIPS」の文字のあたりにコジェネ (Co-Generation System, CGS) が見える. 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 CGS を導入した. CGS は熱電併給設備というのだが, 東京ガスから天然ガスを買ってガスタービンで自家発電する. 電気出力 6.5 MW に加え排出される高温高压の水蒸気を吸収式冷凍機で再利用して 3.3 MW の冷房能力を生み出す. これは, 東京電力からの給電が止まったときでも液体ヘリウムの安定供給ができるようにするための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⁷⁾.

同じく図 12 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) 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, こういう研究推進の体制づくりは仁科研究室からの伝統である. 現在は, さらに KEK の原子核研究グループが RIBF 棟内に支所をつくり共同運営に参画している.

新施設 (図 13) では, 旧施設の主加速器である RRC を前段にして, 後段に 7 号の固定周波数リングサイクロトロン (fixed-frequency Ring Cyclotron, fRC), 8 号の中間段リングサイクロトロン (Intermediate Stage Ring Cyclotron, IRC), そして 9 号の超伝導リングサイクロトロン (Superconducting Ring Cyclotron, SRC) を追加して, RRC で加速したビームの速度を fRC で 2 倍, IRC でさらに 1.5 倍, そして SRC でさらに 1.5 倍にしてウランまですべての元素を光速の約 70% まで加速できるようになっている. 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で破碎されて多種類の高速 RI ビームになる. それらを標的の下流の超伝導 RI ビーム分離装置 Big RIKEN Projectile fragment Separator (BigRIPS)

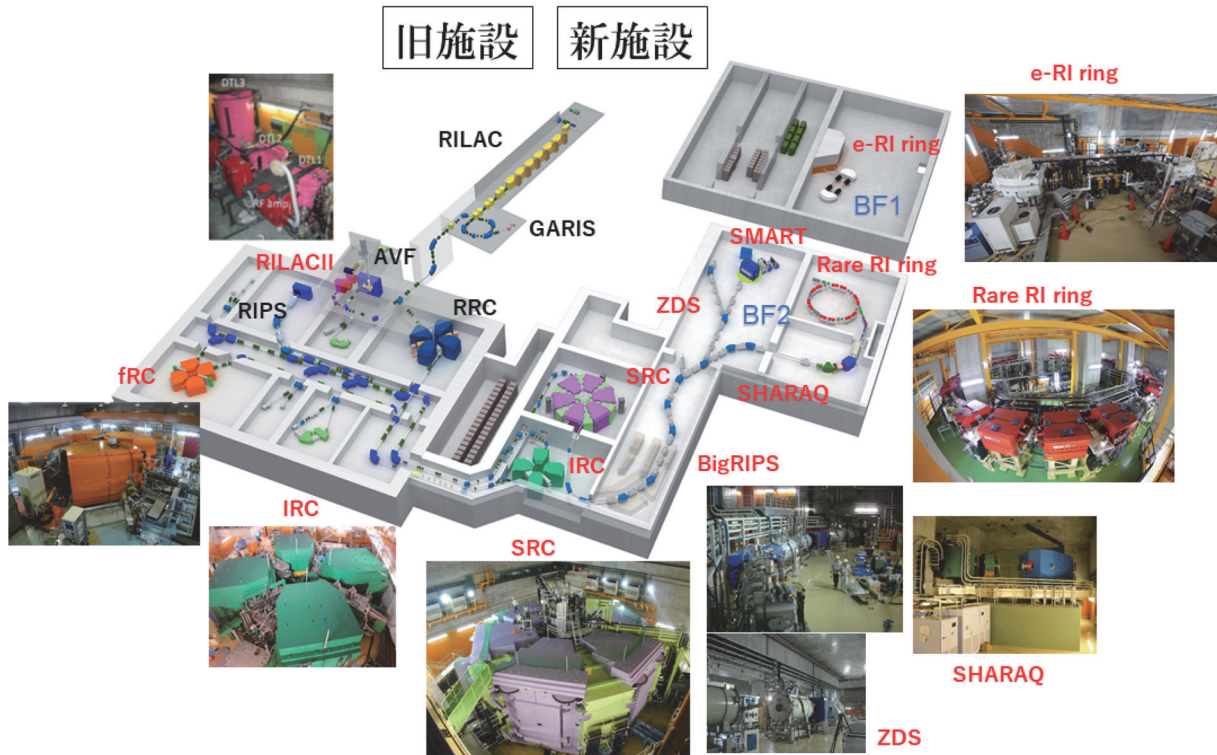


図 13 RIBF 建屋内の加速器と実験設備の配置.

で実験に使用する RI ビームに純化して実験設備に輸送するようにしてある。

RIBF 建設の発案と完成までの紆余曲折

図 14 左は RRC が始動した翌年の 1987 年に雑誌「パリティ」に掲載した記事である。筆者と石原正泰（主任研究員）の共著となっている。RRC の建設 15 年の話の最後に、将来の夢として「RI ビーム工場」を実現したいと書いた。旧施設の建設は予算上、I 期と II 期に分けてあって、石原の主導で建設が進められることになる RIKEN Projectile fragment Separator (RIPS) の構想は I 期で練られて、II 期で着工、1990 年から実験開始となったが、RIPS の構想が「RI ビーム工場」の夢を抱かせた。

やはり同じ年、「原子力の日」記念講演会があって、筆者は「超伝導技術の進展と原子力」のセッションで、理研 RRC 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建設の話をした。図 14 右は筆者が提示した構想図だ。現在の RIBF とは反対側に新施設を建設する計画になっている。因みにこの時点では I 期だけが完成し、II 期の AVF も実験室の下半分も建設されていない。また RIPS もない。この構想図には RI 衝突型リングが描いてあって、まことに空想的なポンチ絵であった。

1990 年に旧施設が現在のようにフル装備になった。そして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), アメ

リカの国立超伝導サイクロトロン研究所 (NSCL), ドイツの重イオン研究所 (GSI) に並んで世界第一級となった。しかし筆者は、世界第一級では飽き足らず、「世界に冠絶する」性能にしたい、そうして世界の優秀な頭脳を魅了し理研に結集させたいと思うようになるが、何しろ建設予算がたいへん大きい。幸運だったのは小田稔（理事長）の後に原子核物理の大家の有馬朗人（元東大総長）が 1994 年理化学研究所の理事長に就任したことである—RIBF 計画は前理事長の時代に仕込んだ。筆者の提案を聞いて早速、こういう大型の施設をやるときには国際評価を受けないといけないことになり、理事長の肝いりで国際的な評価を受けた。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 日付の筆者のメモ「RI ビームファクトリー加速システム構想」があって、その中で『ECR イオン源 → RFQ → RILAC → RILAC II → CS → RILDC → RRC → SRC』の重イオン加速器システムを提案している。これが RIBF の最初の具体的な提案である。『RILAC II → CS → RILDC』の部分は新設である。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 でさらに加速しておいて荷電変換 (Charge Stripper, CS) 用炭素膜に通し、より電荷の高いウランイオンにし、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、まことに加速器屋としては「不本意な」設計なのであったが、当時はまだ ECR イオン源技術が高く

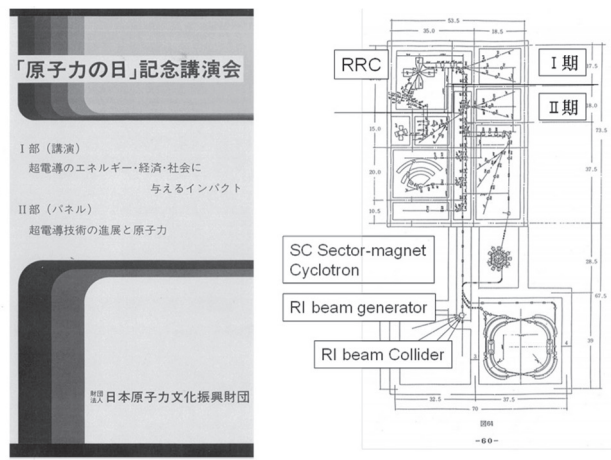
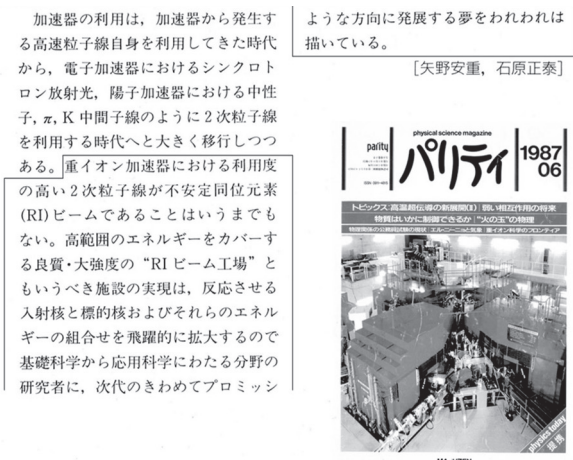


図 14 (左) 1987 年 6 月号の「パリティ」に掲載した理研リングサイクロトロン始動の記事。
(右) 1987 年 10 月に行われた「原子力の日」記念講演会の講演録の中から。

なかったために苦肉の策であった⁵⁾。

真にいろいろな駆け引きがあったが、1995年度に約2億円の準備研究費が認可された。図15は国際アドバイザー会議に提示したRIBF構想だ。RRCで加速した重イオンビームを1台のSRCで核子あたり150 MeV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」を可能にするというものだ。

いくつかポイントがある。まず、入射核破砕反応でRIビームを発生するには核子あたり150 MeVで十分である—これ以上核子あたりの入射エネルギーを上げてはさほどRIビームの強度を上げられないと当時は考えていた。この施設の最大の目的は、こうやってつく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というものであった。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が大きいのでそのまま電子と衝突させてもルミノシティが悪い。それで、Accumulator Cooling Ring (ACR)で蓄積・冷却してエミッタンスを小さくし、次にDouble Storage Ring (DSR)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と衝突させるというものだ。原理的にはこれでいいのであるが、何ともいま一つ釈然としないものになっている。まあ、とりあえずここから行こうかというわけであった。

1995年度に準備研究予算が認可されて、まずはSRCのモデルマグネット^{†8}をつくってどこが

難しいか試してみようということになった。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色々な方式を考案して試してみた。結果は、SRCの中心領域があまりにも狭すぎて、入射装置の設計に無理がありすぎるということになった。SRCの設計はなるほど一筋縄ではいかないと皆で思った最初のことであった。

それで結局どうしたかというところ—図16は1996年にカルカッタ（インド）のVECC研究所との協定締結後、シンハ（B. Sinha）（所長）と所長室で握手をしている記念写真である—このときのインドへの飛行機の中で、巨大な1台のSRCを二つに分ける、二つに分ければ入射ができることに気がついたときのメモである。これで二つのサイクロトロンに分けようと思った。図の中に、大きなSRCをIRC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のではないかと—まあ興奮した。もともと旧実験室はどうなるのだろうと心配していたので、一挙両得というわけである。建物も含めた総建設費もこの方が安いということが後でわかる。このアイデアはインドに着いてすぐ話したので、インドの友人の方が筆者のチームより早くアイデアを知るということになった。

それで帰ってきて建設チームを全員集めて、今までの設計はなしにする—これからサイクロトロンを2台にする—ということで、最終的に図17

RIKEN Accel. Prog. Rep. 29 (1996)

Progress of RIKEN RI Beam Factory Project

Y. Yano, A. Goto, and T. Katayama

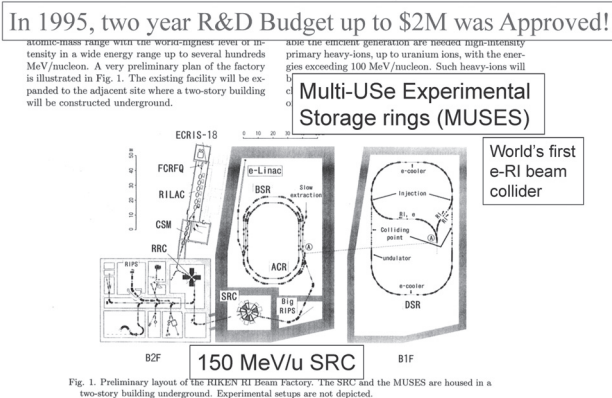


図15 最初のRIBF計画構想。

インド国立サイクロトロン研究所、サーハ研究所との研究協力協定締結式



1996年インド出張中
SRCを2台に分割して
中心領域を広げることを考える

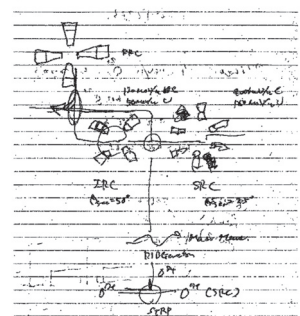


図16 インド出張の写真とSRC分割のメモ。

^{†8} 最近完成したGARIS IIはこれの鉄芯を再利用した。

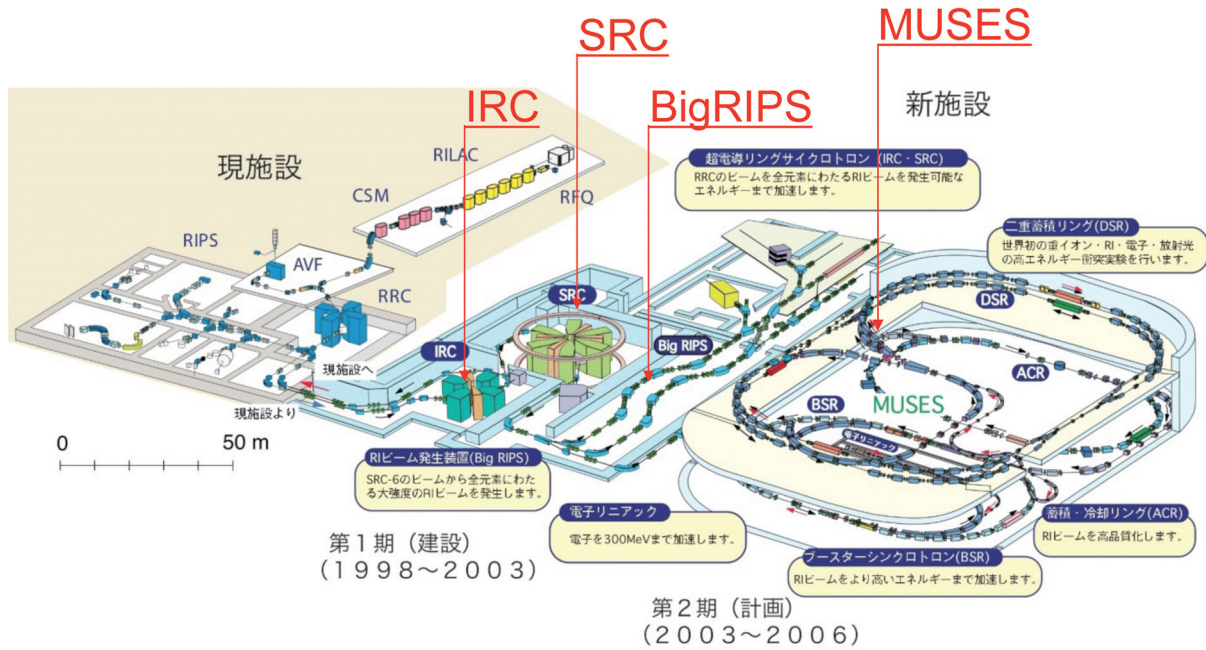


図 17 概算要求した RIBF 計画.

のデザインで建設予算をもらいに行こうということになった。第 I 期で IRC, SRC, 戻しビームライン, BigRIPS と RI ビーム実験装置, 第 II 期で MUSES (Multi-Use Experimental Storage rings) ということである。総工費, 何と 800 億円くらいの予算を最初は要求したわけだ。しかしながらいろいろあって最終的には約 500 億円で決着した。

1996 年, 橋本政権が発足して緊縮財政を敷いた。すなわち新規予算はすべて認めないということになってしまった。困ったことになったのだが, 理事長が「これはもう 2 年前からすでにやっている」「これはすでにある計画で, 新しいものではない」と主張し, 結局, 建設予算が認められることになった。筆者の手許に, 当時の大蔵省主査の「この予算は, 第 I 期だけを認めたものである」という念書がある。この念書をどのようにクリアするかが, 難問として残った。すなわち, 第 I 期の中に MUSES 研究計画を取り込んでしまう方法を考え出さなければならない, ということになった。

RIBF 建設計画は科学技術庁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

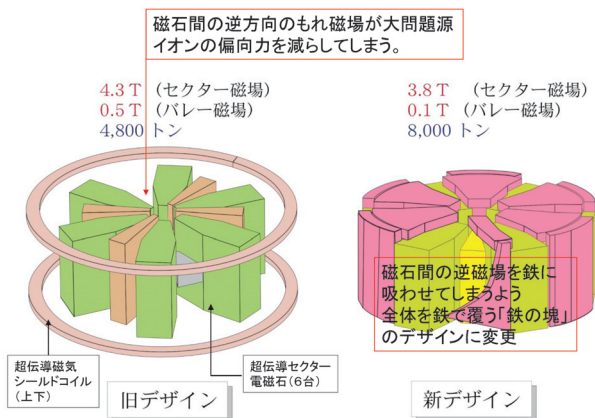
必要があった。長計の中で, 原研の大強度中性子ビーム施設(後の J-PARC MLF), 大強度陽電子ビーム施設(実現されなかった)と理研の RI ビームファクトリー建設計画は最終的に大臣折衝で認められたが, 後に役所からローマ字とカタカナの予算要求はいかなものかとある議員からクレームがついたという話を聞いた。

図 18 の航空写真は RIBF 棟建設の歴史である。右下の 1999 年 7 月の写真に 4 号サイクロトロン棟が見える。これを解体・撤去して RIBF 棟を建てることにしたわけだ。RIBF 棟は図 17 の加速器・実験設備計画に従って一応設計した。従って, 2 階建ての MUSES を収容するようになっている。

4 号棟の右下に見える建物は, 小学校の校舎だ。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であった。まず, 我が国でもっとも放射線安全管理に詳しい外部の先生方に 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を受けた。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。筆者には放射線安全の知識も経験もあまりなかったので凄腕の部下



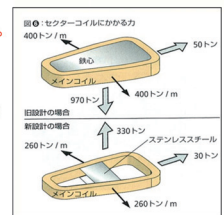
図 18 RIBF 棟建設の歴史.



新しいデザインのもたらすメリット(は絶大)

■メリット

- 必要なセクター磁場が減り、必要な起磁力も減る。
→ 主コイルにかかる力が弱くなる。(構造が安定)
→ 磁極を常温に設置できる。
脆性破壊の不安が解消される。
液化ヘリウム使用量とヘリウム冷却期間が減少する。
- 真空ポンプや高周波励振器を加速器の内部やすぐ傍に設置できる。
- 入射取り出し系の電磁石が常伝導でも使用可能になる。(構造が簡素)
- 超伝導磁気シールドが不要。(構造が簡素)
- 加速器室内壁を鉄板で覆う必要がない。(磁場分布が完全対象)
- 加速器の内外ともに作業者にたいして安全である。
- 建物による遮蔽や(非磁性の)局所遮蔽が減少する。



■デメリット

- ビームの縦収束力が小さくなる
(ビームサイズが大きくなる→取り出し装置の口径が大きくなる)

図 19 SRC 設計大変更の概念図.

たちにすべておまかせであったが、当時もっと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となった。

これで筆者はすっかり自信をもち、放射線安全担当の部下と一緒に、和光市議会、地元自治会への RIBF 建設のお願いを丁寧に説明してまわった。それでいよいよ建設工事開始となったわけである。

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。筆者の部下らが奮闘して首尾よく立派なモニュメントにしてくれた。

建築工法は旧施設と同じにした。20 m くらいの深さのところに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のせるだけだ。杭はまったく打っていない。

建物は加速器棟と実験棟に区別して 2 期に分けて施工した。2003 年に加速器棟が竣工したのがわかる。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。

図 17 の SRC をよく見ると、図 19 の左の「旧デザイン」のようになっている。SRC 設計では先輩であるミュンヘン工科大学 (MTU)、GANIL、NSCL、JINR の超伝導リングサイクロトロンの設計はすべてこのように常伝導のリング

サイクロトロンにセクター電磁石をただ超伝導化するという設計なのである。筆者らもここから出発した。但し、セクター磁場を所期の仕様の 4.3 T まで発生しようとする空間に漏えいする磁場が大きくなりすぎるので、これを巨大な超伝導ヘルムホルツ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わけである。こんな巨大な超伝導コイルをどこで製作するのか大問題であったが、問題の解決を先送りにした。

図 19 の右の挿絵の上側に、「旧デザイン」の超伝導メインコイルのポンチ絵がある。浸漬冷却という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ルを漬けて転移温度約 10 K 以下に冷やす構造である。

超伝導線はアルミの母材の中心に NbTi 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）すぐに大電流 5,000 A 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している。これをアルミ安定化超伝導線という。従来は銅安定化が主流であったが、筆者らはアルミ安定化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 が混合しているが企業秘密だそうである）も十分に安価なところが魅力であった。

メインコイルにかかる甚大な拡張力をどう支えるかが大問題であった。「旧デザイン」では、コイル容器を鉄芯にとめつけて支えようということにしていた。何となくこれで良いのではと思えるが、物量のある鉄芯も冷やさなければいけないので、冷却に数ヶ月というたいへんな時間がかかることになる。でもまあいいかということで、この問題も先送りした。

「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工場を試すことにして 1 台分の鉄ヨークが工場を組みあがった頃、筆者は一大決心をした。

図 19 に「新デザインのメリット」が列記してある。このうちメリットとなっているところは「旧デザイン」では全部デメリットで、問題をすべて先送りしていたことになる。そのうち筆者は夜な夜な鉄芯が低温脆性で割れる悪夢を見るようになった。このままでは、所期の仕様を下げると宣言するしかない、というところまで追い込まれて

しまった。そのとき或る晩、図 19 左の設計大変更と図 19 右の大変更のおぼろげなアイデアが同時に浮かんだ—これが正解かも知れないと思うと居てもた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—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）」という筆者のメモに鉄シールドの提案があり、1999 年 12 月 9 日付の「矢野シールド付 SRC（常温ポール）」に転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。

案の定、部下らは大反対であった。しかしこのまま製作したら我々は大失敗する—必死の思いであった。根負けした部下が少しずつでてきて、このアイデアで先送りしたすべての問題が果たして解決するのか、一から検討し直そうということになった。

筆者はすぐにメーカーのお偉方へ行って、「契約している製作をすべて停止してほしい、但し、設計変更の案があるので、それを製作してほしい、私の見積もりではその方が製作費は安く済むし何しろ構造が簡単で性能が良い」とまあ、無理難題をお願いした。答えは、いとも簡単に「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。

このアイデアのポイントは二つある。

一つは、磁石間（バレー）に発生する漏えい逆磁場を「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。逆磁場が大きいと折角セクター磁場で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、この漏えい逆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という当たり前の問題がこれで解決することに気づいた。漏えい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ることになる。もちろん超伝導磁気シールドは要らない。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

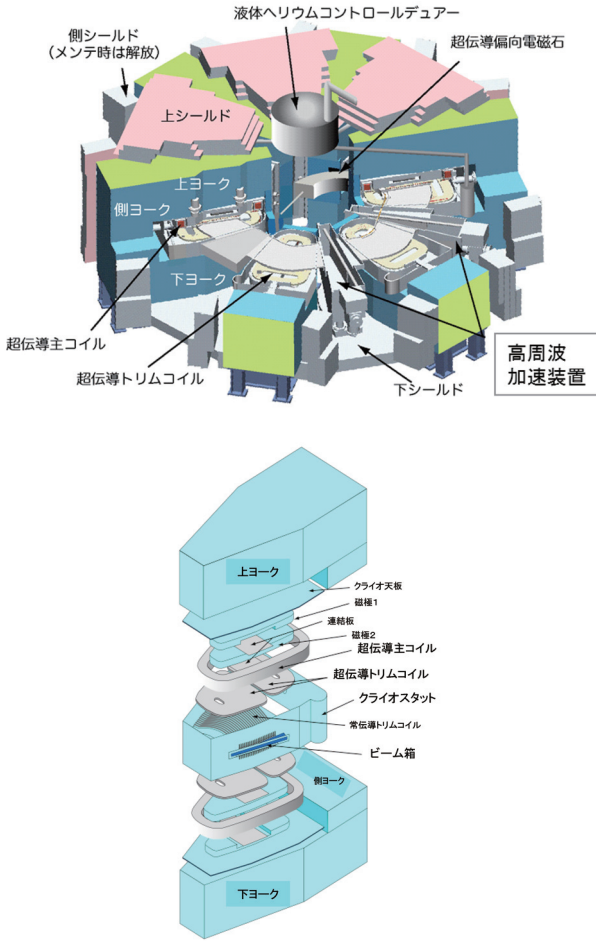


図 20 (上) SRC の全体構造と (下) 超伝導セクター電磁石の展開図.

器の拡張力を支えるというものである。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、等時性磁場をつく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ったことがわかった。最後の難問は、超伝導トリムコイルの構造であったが、部下が間接冷却方式の構造を考えだしてくれて解決した。鉄シールドのおかげで必要な起磁力が下がったために、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のだが、これを使って部下のアイデアの超伝導トリムコイルを新たに調達することなく製作できることになった。「これが正解だったか」と思った瞬間である。やっとよく眠れるようになった。こうやって最終的に図 20 のような構造に決まった。製作をとめて 1 年半が過ぎていた。この概念設計に沿って詳細設計・製造となっていた。旧デザインで契約額は決まっていたが、部品点数が減り、構造が劇的に簡単になったため

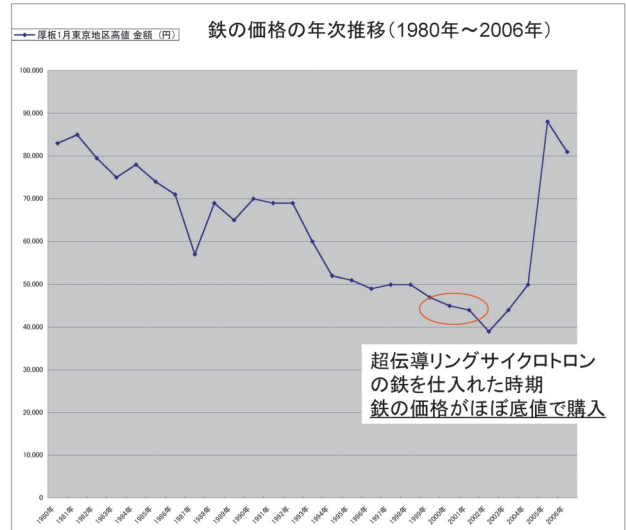


図 21 鉄の価格の年次推移.

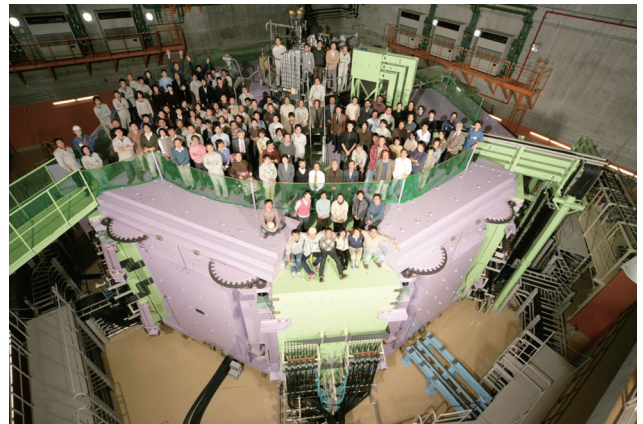


図 22 2005 年 11 月 SRC の定格励磁に成功したときの記念写真.

に製作コストが減ったが、鉄シールドのために約 4,000 トンの純鉄を新たに調達する必要が生じた。

図 21 は、鉄の価格の 1980 年～ 2006 年の年次推移のデータである。これは普通の鉄の厚板の価格なので、純鉄の場合とそのまま同じではないが傾向は同じである。筆者らが全部で約 8,000 トンの純鉄を仕入れた時期はほぼ底値であったことがわかる。筆者は鉄の価格がどんどん下がってきていて「鉄は安い」と思っていたが、後から大幸運であったことがわかった。今では数倍になっていると思う。

ということで結局契約額は変えず仕様変更ということになった。当然理研に責任があるが、ペナルティーには至らなかった。

旧デザインで製作してしまった 1 台のヨークはどうしたのか—鉄を切り貼りして新デザインのように修正したので磁気特性が少し他の 5 台と違ってしまった。この違いは、コイル電流の調整で補正できる範囲内であったので問題にはならなかった。見た目も違っているが、今では「知る人ぞ知る」になっている。

筆者の決断が数ヶ月遅れていたらと思うとぞつとする。

図 22 は、2005 年 11 月に SRC の定格励磁に成功したときの記念写真である。

アメリカ RIA 計画との競争と fRC の追加

1999 年、アメリカで RIBF の性能を凌ぐ 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て「大強度 RI ビームを発生するには、核子あたり 400 MeV（光速の 70%）のウランビームが必要で RIA はそれを目指すが、RIBF は核子あたり 150 MeV なので競争にならない、といって図 23 のような RI ビーム生成率の違いを提示した。これが本当なら、数十倍の生成率の違いになってしまう。

筆者はこのとき初めてウランの核分裂による RI ビーム生成率と核子あたり 400 MeV の威力を

知った。「これは参った。早く言ってくれよ」となったわけである。

さて、どうしたか。部下の雑談からヒントを得た。そして「そうか RRC と IRC の間に小型のサイクロトロンをもう 1 台 (fRC) 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—400 MeV は SRC で発生する磁場の限界から無理でも—核子あたり 350 MeV には行ける」ということに気づいた。

問題は予算である。fRC は年次建設計画書の中にはもちろん書いていない。結論からいうと、年次建設計画書の中に書いてあった 3 台の CGS のうち 1 台は建設し 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。

ところで CGS の導入はそう簡単なものではなかった。事の始まりは、筆者が理事会に RIBF 計画を説明したとき「世界一の加速器施設をつくるのは良いが、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」と指摘されたことである。別の大問題があった。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「受電容量が大きすぎるので、現在の特高変電所を強化しなければならない」といつてきた。試算すると筆者らの想定をはるかに上回る予算が必要ことがわかった。困り果てていたとき、筆者の電気技術者の部下が CGS が有望だと知恵をくれた。部下の示唆に乗って、複数台の CGS で自家発電すればどうかと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（火力の発電効率が約 40% に対して CGS は約 60% もある）。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埒があ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」とお願いがあがった。理事には「加速器が導入して運転も加速器がするのであれば導入を認める」と中庸なご判定をいただいた。それで概算要求に CGS

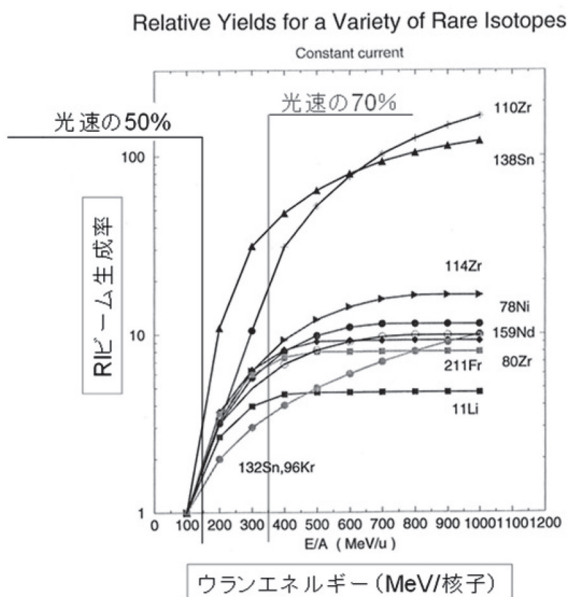


図 23 1999 年のアメリカ RIA 計画のレポートに発表されたウラン核分裂による RI ビーム生成率のウランビームエネルギー依存性。

の建設が盛り込まれることになった。CGSの中央操作室は加速器の制御室の隣につくった。

fRCとCGSがどういう関係があるかという点、CGSは加速器の一部なので、これをどうしようと施設部とは関係がないということになり、先ほどのような予算の組み替えが可能になったわけである。

これでウランを核子あたり345 MeVまで加速できるようになった（なぜ350 MeVでないかという点、350 MeVのときの周波数ではfRCの共振器に寄生振動がのることがわかり、これを避けるため少し下げて345 MeVにした）わけである。

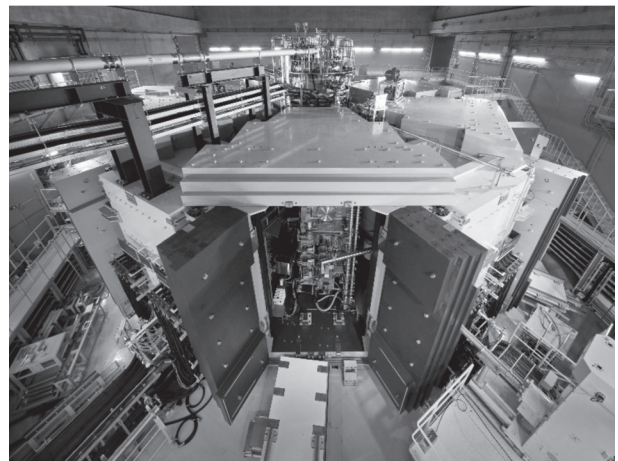
もう一つ問題があった。

ウランの核分裂で発生したRIビームのエミッタンスは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ということである。これ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17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ビームをつく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本はありえない。結局筆者の決断で超伝導にした。決断は正しかったと思っている。

図24は総重量約8,300トン、サイクロトロン史上最強の曲げ力8 TmのSRCの雄姿と、SRCからファースト・ビームを引き出した瞬間の加速器コントロール室の様子である⁸⁾。筆者は国際会議で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・ビームを引き出す」と宣言してきた。12日ほど遅れたが、2006年12月28日16時00分に成功した。理研はこの日の17時20分に御用納めなので、ぎりぎりの成功であった。20時から記者会見を予定していたのでホッとした。大新聞各社が翌朝大きく報道してくれた。また、「Nature」「Science」誌にもRIBF始動の記事が掲載された。

2007年3月にBigRIPSが予定通り完成し、ウ

ランビームからRIビームを生成することに成功した。このとき、6月には原子核に関する国際会議としては最大のInternational Nuclear Physics Conference 2007が有楽町の東京国際フォーラムで開催されることになっていたため、この国際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。図25は筆者が登壇しているところの写真である。発表は「 ^{238}U を核子あたり345 MeV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 ^{125}Pd 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。発表後すぐにRIBF計画の国際諮問委員



First beam extracted from SRC
At 16:00 on Dec., 28, 2006.

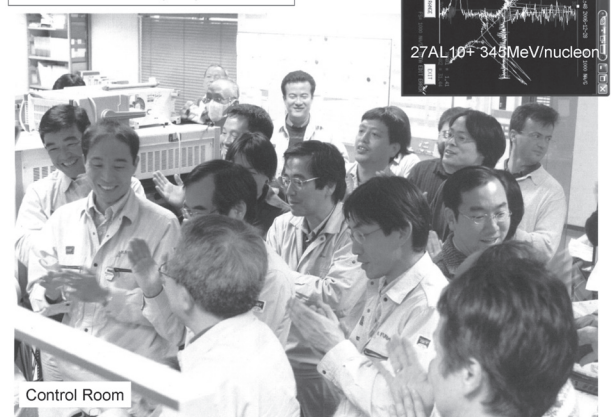


図24 (上) 鉄シールドの観音扉を開けたSRC。中に共振器が見える。右下は励振器。(下) SRCからのファースト・ビーム引き出しに成功した瞬間にコントロール室で沸きあがる面々。



図 25 International Nuclear Physics Conference 2007 での RIBF のデビュー。開会式では、天皇后両陛下がご臨席された。

会の委員長を長らく務めたキンレイ (P. Kienle) (元 GSI 所長) が満面の笑みを浮かべて祝福した。この INPC2007 の後続いてアメリカの Particle Accelerator Conference に招待され、RIBF 始動の報告をした。このときは、講演後 RIBF 国際技術評価委員会の委員長を務めたブロッサー (H. Blosser) (NSCL の創設者) が絶賛した。ご両人も SRC は本当に実現するのかとたいへん心配したが、それは、MTU, GANIL, NSCL, JINR での設計が現実的ではなくすべて幻に終わったことをよく知っていたからだ。

その後 RIBF の性能は部下らの数々の発明と工夫—特に大強度イオン源⁹⁾と寿命無限大荷電変換装置¹⁰⁾の開発では目覚ましいものがある—で飛躍的に向上して、2007 年から 2017 年までに 150 種類を超える新同位元素を発見した。

面白いデータがある。図 26 だ。どの研究所がいくつくらい新同位元素を発見したかというものだ。これによると 1920 年をピークにした英国キャヴェンディッシュ研究所のアストン (F. Aston) (NB1922) の質量分析器による新同位元素発見時代—仁科が滞在していた頃だ—1950 年をピークにしたローレンスのサイクロトロンによる LBL 時代、1970 年をピークにしたフレロフ研究所のサイクロトロンによるソ連の JINR 時代、1990 年をピークにした重イオン線型加速器によるドイツ GSI 時代に続く、今や 150 種類以上になっているので第 5 のピークを RIBF が形成しようとしていることがはっきりとわかる。RIBF はまさに

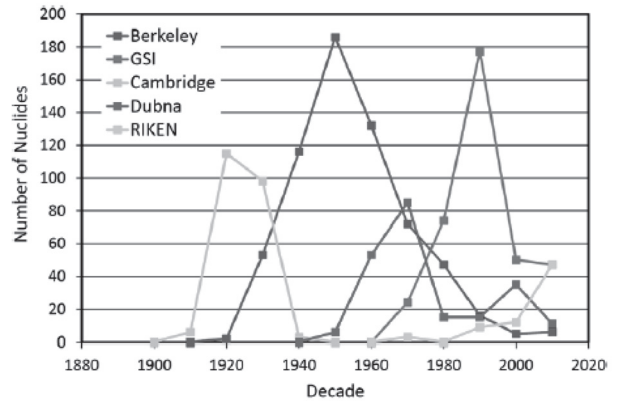


Figure 1. Number of nuclides discovered per decade at the top four laboratories, Berkeley, GSI, Cambridge, and Dubna. In addition, RIKEN is included because of the significant number discovered during the last decade.

図 26 M. Thoennessen, “The Discovery of the Nuclides”, Nuclear Physics News, Vol. 22, No. 3, 20, 2012 より転載。

世界に冠絶する RI ビーム生成能力に至ったといえる。

これらの新同位元素は非常に中性子の多い原子核である。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、メイヤー (M. Mayer) とイェンゼン (J. Jensen) (NB1963) が提唱した「原子核の殻模型」がこんな中性子過剰な原子核でも成立するのか—その検証実験が RIBF でできるようになった。RIBF の最近の実験結果はどうも新しい原子核のモデルが必要だといっているようである。また、元素の起源研究であるが、RIBF で人類はやっと超新星爆発のときに一瞬できて消えてしまった超中性子過剰な原子核を実験室で作りだせるようになってきた。これからが楽しみである。

MUSES はどうなったか

2003 年、筆者は MUSES を取りやめ、代わりに新たに発明した方式での RI と電子ビームの散乱実験装置 (図 13 の e-RI ring)¹¹⁾ と、同じく新発明の RI の精密質量測定装置 (図 13 の Rare RI ring)¹²⁾ を建設するという決断をした。この方が MUSES より格段に建設費が安いと踏んだからである。これで、第 I 期中に第 II 期を取り込むことができることになった。

これにもきっかけがあった。2001 年の GSI の将来計画書で RIBF の MUSES についての記述が

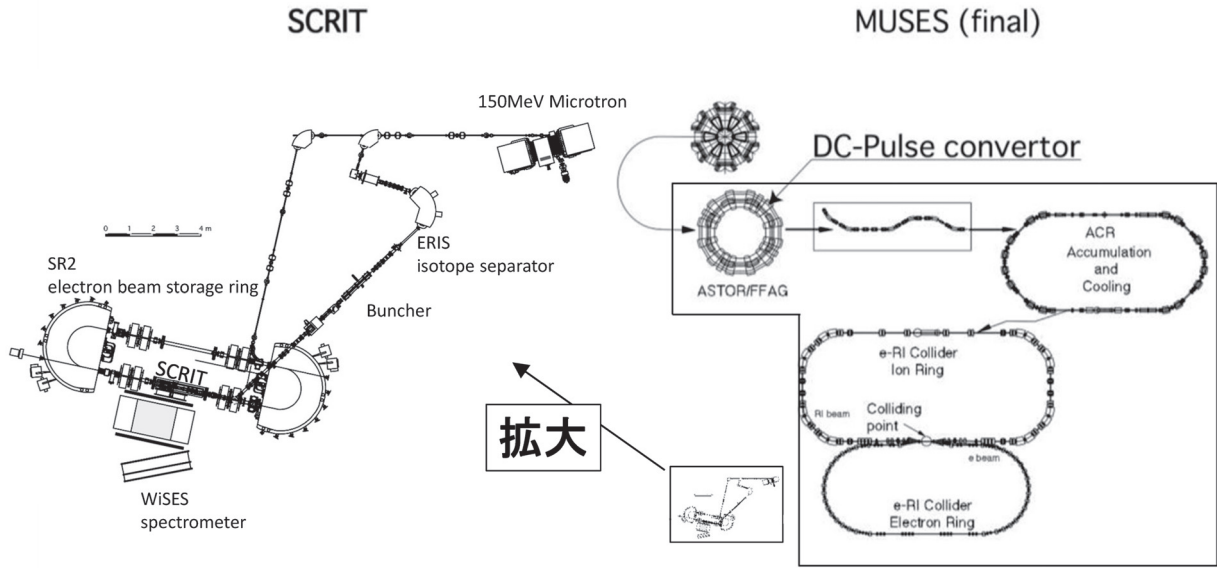


図 27 MUSES と SCRIT 方式の大きさの比較.

あり「GSI の電子とイオン衝突器 eA-Collider はパルスビーム入射であるので衝突効率が良いが、MUSES は DC (連続) ビーム入射なので衝突効率が悪い」とある。要はこのまま MUSES をつくるとこの研究では GSI にはかなわないことになる。筆者らもこのことは当然気にしていた。そこで図 27 のような RI と電子の散乱装置を考えたわけである。

図 27 の右側はその展開図であるが、ASTOR/FFAG なる DC-Pulse convertor を加えている。SRC の DC (連続) ビームをこれ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、これを MUSES に入射するという方式を考えたわけだ。これがうまくいけば GSI の性能を凌げる。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筆者らの発明である。シミュレーションの結果は良好で、うまくいきそうだとなって「大魔神」という名前をつけた。図 13 の実験室右側に SHARAQ という東大の実験装置があるが、この BF2 の部屋は巨大な大魔神を収容するように設計されていて、その上の BF1 に MUSES を収容し BF2 から BF1 に向けて斜めに新 BigRIPS を

設置できるように建物がつくってある、というか、つくってしまったということである。

大問題は、予算だ。巨額の大魔神がないとこの設備をつくる意味がないというところまで追い込まれたとき、アイデアが湧いた。Self-Confining RI Target (SCRIT) 「自己閉じ込め型 RI 標的」方式による不安定核の電子散乱実験装置 (図 27) で筆者らの発明である。

MUSES とその大きさを比較すると矢印のようになる。建設費は約 20 分の 1 で済むことになった。

図 13 の写真の装置 (e-RI ring) が MUSES を収容する予定だった部屋の片隅に組みあがった、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 700 MeV の電子蓄積リングと入射器の 150 MeV のマイクロトロンをただでもらってきたのである。原理実証はできたけれど概算要求できる予算では少なすぎる。どうしようと思いついていた頃、大先輩の住友関連の偉い方と会食する機会があつて、そのとき先輩から「君もよく知っている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」という話を聞いて、すわと、住友重機の偉い方に会って、「オーロラをください」とお願いしたのである。答えは「よろしいです。差し上げます。但し、移設はすべてそちらでお願いします」ということであつた。このオーロラを

改造したものが、写真の装置である。

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 での質量測定方式は、GSI と同じなので、これも GSI になわない。

筆者と後藤と加速器、実験グループの若手で GSI に対抗できる新方式をひねり出した。Rare RI ring というものである。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、1,000 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わ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。筆者と後藤はサイクロトロンには精通しているので、この方式の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。これは、冷却に時間がかかりすぎるからだ。筆者らの方式ではこの制限がない。2016 年、個別入射、取り出しに成功した。

図 13 はこの装置の写真である。実は、このリング、もとは原子核研究所で昔、平尾泰男（元放医研所長）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 である。KEK に眠っているのに気づいてもらってきた。もちろん大改造費がかかったが、概算要求できる予算内では計画のすべてを実現することはできなかった。幸運であった。

こうして MUSES を第 I 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すべて完成させることに成功したわけである。着工してから 17 年の歳月が流れていた。

RIBF 運転 10 周年

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て、組織委員会から会議最初の基調講演に来るように要請されて行ってみた。基調講演の最後のところで講演者のヤンセンズ (R. Janssens) (ANL 教授)

が筆者に起立するように促すので、起立すると会場から核物理学者の大拍手を受けた。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ようであった。

建設に着手した頃は、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 が実現したようである。そして今年には RIBF の 10 周年である。

おわりに

筆者は、40 年近く理研で加速器の建造を満喫させてもらった。数多くの方々からこれまでにいただいたご支援に対し心から感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 上坪宏道：理研の加速器－1910 年代から現在まで－(その 1)、「加速器」Vol. 2, No. 2, 233-237 (2005).
- 2) 上坪宏道：理研の加速器－1910 年代から現在まで－(その 2)、「加速器」Vol. 2, No. 3, 370-378 (2005).
- 3) 上坪宏道：理研の加速器－1910 年代から現在まで－(その 3)、「加速器」Vol. 3, No. 1, 60-68 (2006).
- 4) 小寺正俊：高周波重イオン連続加速装置開発の歩み、「加速器」Vol. 2, No. 3, 280-292 (2005).
- 5) 加瀬昌之：新元素 (Z=113) 発見の原動力となった加速器、「加速器」Vol. 13, No. 1, 12-17 (2016).
- 6) 矢野安重：理研「RI ビームファクトリー」計画、「加速器」Vol. 2, No. 2, 170-175 (2005).
- 7) 藤縄雅, 矢野安重：大型加速器施設用無停電電源としての熱電併給装置の実績と考察、「加速器」Vol. 8, No. 1, 18-25 (2011).
- 8) 福西暢尚：RIBF 加速器のビームコミッションング、「加速器」Vol. 4, No. 2, 112-122 (2007).
- 9) 中川孝秀：ECR イオン源の開発－理研での結果を中心に－、「加速器」Vol. 13, No. 1, 32-39 (2016).
- 10) 今尾浩士, 奥野広樹, 久保木浩功：高速重イオンビームのためのガス荷電変換装置の開発, *Proceedings of the 10th PASJ Meeting in Japan, MOOTA02* (2013).
- 11) 若杉昌徳, 等：SCRIT : RI・電子散乱実験装置の建設, 「加速器」Vol. 7, No. 4, 271-277 (2010).
- 12) 山口由高, 等：理研 RI ビームファクトリー稀少 RI リングの建設, 「加速器」Vol. 12, No. 3, 132-141 (2015).