

核物理からみた加速器

今井 憲一*

Accelerators for Nuclear Physics

Kenichi IMAI*

1. はじめに

“核物理からみた加速器”というのが編集部から与えられたタイトルである。思い起こすまでもなく、そもそも加速器は核物理の研究の手段としてそのスタートをきったものであり、核物理は加速器の生みの親ともいべき学問分野である。したがって“核物理と(ともに歩んだ)加速器”というような題がふさわしいように思えるが、コッククロフトとウォルトンによるはじめての加速器による核反応実験から72年、いまや素粒子原子核から生命物質科学さらに考古学や医療や犯罪捜査にいたる多くの科学研究と応用にその利用範囲を広げていることは周知のことで、核物理はそのうちのひとつにすぎなくなってきた感がある。いまや加速器の技術は生みの親である原子核・素粒子物理を超えてどんどん進んでいるのは確かである。

核物理の実験研究者が加速器をつくり、運転し、核物理の実験をしていた時代があり、結構ながく続いた。私が大学院で核物理をはじめた1970年代はまだその状況が色濃く残っていた時代だった。しかし今では高エネルギー物理はもちろん核物理でも、自分で加速器をさわらなくても実験ができる時代になってすてにながいが。あらためて“核物理からみた加速器”という題で考えてみるのも意味があるように思える。核物理はどちらかというと複線的な発展をとげてきており、わが国も例にもれない。加速器でいうと各大学にある小型の加速器を用いた研究はかつての核物理の中心であったが、いまも一定の役割を果たしている。現在日本の核物理研究は、共同利用研究機関などの加速器を中心に偏極イオン、重イオン、中間子、電子、 γ 線などのさまざまなビームを利用し、世界的にもトップレベルにある。さらに現在建設中の理研のRIBF

や原研—KEKのJPARCは世界最先端加速器施設として21世紀初頭の核物理を担うであろう。以下に簡単に核物理研究に利用されている加速器施設をリストしておく。日本全国で1000台を超える加速器の数とくらべると少ないが加速器の規模を考えるとかなりのものであろう。

長く加速器のお世話になってきた者として、これまでの核物理と加速器の関係を昔話もまじえながら振り返って、現在および今後の核物理の課題とそのための加速器と後継者育成について考えていることを述べてみたい。ただし一口に核物理といっても非常にひろいので、“一核物理屋からみた加速器”ということになることをお許しいただきたい。

2. “中小型加速器”と核物理

わが国の核物理は敗戦とその後の占領軍による原子核研究の禁止という不幸な時代のために、サイクロトロンやバンデグラーフなどの小型加速器(当時はもちろん“小型”ではなかった)による核物理のもっとも華やかな時代(1950年代)には、指をくわえてそれらを見ていざるをえなかった。その後50年代後半から60年代にかけて原子力平和利用という掛け声もあり、主要大学などでサイクロトロンやバンデグラーフが建設された。しかし特筆すべきは、核物理研究者が、全国共同利用研として東大に原子核研究所という、加速器施設の全国センターを作ったことである。共同利用という概念も当時の日本の学会では画期的であったが、核物理としては分野全体で加速器計画を構想するという姿勢が、これ以来核物理の伝統となったという意味で画期的である。私が大学院で研究をはじめた1970年ごろは、60年代の日本経済の高度成長が一段落しつつある時であったが、核物理つまり加速器

* 京都大学理学研究科 Department of Physics, Kyoto University
(E-mail: imai@nh.scphys.kyoto-u.ac.jp)

核物理関連の日本の主な加速器施設

東北大学	電子線形加速器と貯蔵リング, サイクロトロン
原研 (東海)	タンデムバンデグラフ, (JPARC)
筑波大学	タンデムバンデグラフ
KEK	陽子シンクロトロン, (JPARC)
放射線医学研究所	重イオンシンクロトロン
理研	重イオンリニアック, サイクロ トロン, (RIBF)
京都大学	タンデムバンデグラフ
大阪大学	バンデグラフ
大阪大学核物理研究センター	サイクロトロン
SPring-8	レーザー電子光施設
九州大学	タンデムバンデグラフ

は欧米になんとか追いつかなくてはという時代であった。そのためにどうするかということで熱烈な加速器将来計画の議論が行われていた時代であるが、日々の研究はこれらの小型加速器による実験に依拠していた。

このころは旧東大原子核研究所がサイクロトロンと電子シンクロトロンを持つほか、各主要大学がサイクロトロンやバンデグラフなどの小型加速器を持っており、これら小型加速器が核物理の主戦場であり、加速器と核物理は一体といってよかった。私の世代ではコッククロフトを運転しビームをだすことが京大の物理第二教室の実験系学生（修士1年）の実験教育であった。このコッククロフトは戦前に作られた加速器で、高電圧や真空などのトラブルも多く動かすのに大変苦労することも多かったが、一方ブラックボックスの全くない装置で、今から思うと加速器に関する実験技術を学ぶうえでは大変良かったといえる。

その後私自身は京大のタンデムバンデグラフで陽子陽子散乱などの実験をしたが、加速器のいろいろなトラブルの解決に大部分の時間を費やすはめとなった。しかしそれはそれで、大きな装置をみずから動かして実験をするという醍醐味を満喫するという幸せを味わうことができた。小型加速器をもつ大学ではこれらの事情は似たりよったりであったと思う。核物理の実験のためには加速器をちゃんと動かすことが第一で、そのためには加速器のことを自分できっちり理解する必要がある。現在の若い研究者はそのような経験のない人も多くなっているとは思いますが、このようなおかげで核物理分野では研究にとって必要な加速器をやるという精神風土が色濃く残っているのではないかと思う。

京都大学では、1990年にタンデムバンデグラフを

ターミナル電圧8 MVのペレットロンに更新したが、核物理の研究にはあまり用いられず、加速器質量分析などのいわゆる学際研究が主な研究テーマとなっていた。しかし、学部学生（3年生と4年生）の実験には一貫して多くの運転時間をさいてきた。ざっと1/4から1/3の時間を使っている。加速器を使って物理することを学ぶという点が、物理教育として非常に重要なことだと考えているからである。実験テーマは簡単なものから難しいものまでさまざまであるが、加速器にもふれて、加速器を動かして実験をする体験をってもらうことを重視している。核物理、高エネルギー物理、加速器などの分野への人材供給に大いに役立ってきたと自負している。

各大学の核物理を過去には担ってきた多くの小型加速器も、学際研究での利用が多くなってきている事情はどれも同様である。しかもそのほとんどは維持費や運転要員が削減され、停止を余儀なくされることもでており、その維持が極めて困難な状況になっている。核物理委員会などでも常に問題となっているが一般的な妙案はない。地域センターとして再定義して再生をめざすところもある。いずれにせよ大学の小型加速器は各大学の特徴を生かした学問分野で利用されていくのが望ましいし、時代の要請でもある。しかし同時に核物理のみならず、加速器関連分野にとって、各大学の小型加速器は教育とくに加速器関連分野の人材育成にとって不可欠のものであることを強調しておきたい。歴史的経緯もあって核物理研究者が維持運転を担っている加速器施設も多いが、後で述べる核物理の大型加速器計画遂行を考えると、核物理としてできることには限界がある。願わくは加速器関連分野の人材育成という観点から加速器学会などで、全国的な観点で大学の小型加速器の配置、維持、運転といったことを考えていただけるとありがたいと思っている。とりわけ多くの加速器関連の人材とリソースを持つ高エネルギー加速器研究機構などが、大学と連携して大学の加速器での研究教育を盛り立てていただけるとありがたい。

一方大学の研究者も、古い加速器の単なる更新にとどまることなく、他分野の研究者と協力してFELなどの新しい“小型加速器”の導入を図っていくべきであろう。またすこし話は異なるが、京大の物理教室では学部3年生の実験演習のひとつに“加速器をつくる”というテーマをとりあげている。学生の評判は悪くないようである。どんなにprimitiveな装置でもブラックボックスでなく自分たちで作るといえるのは、加速器のみならず実験教育の基本であろう。しかしたと

えばこんなことも大学から加速器が消え、加速器を教えらるる人がいなくなればできなくなる。加速器学会で考えてほしいことのひとつである。

3. 多様なビーム—偏極イオン, 重イオン, 中間子, レーザー電子光

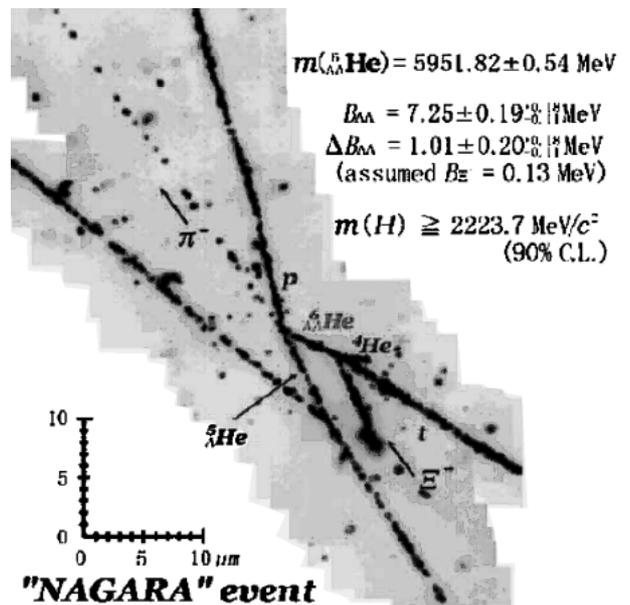
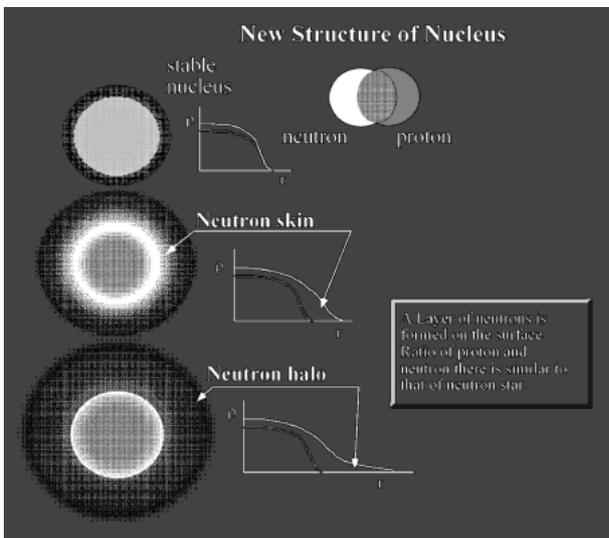
核物理の現代のテーマは、不安定核（安定線から遠く離れた）、超変形核、ハイパー核から高温高密度核物質、核子構造、ハドロン分光にいたるまで実に広範囲にわたっており、それぞれビームつまり加速器の要求が異なる。もちろん大型のものは世界にいくつもある必要もなく、世界的な分業もやむをえない。緒先輩の努力の結果、日本は幸い比較的ひろい核物理の分野の実験が可能で多くの加速器施設に恵まれているといえるだろう。

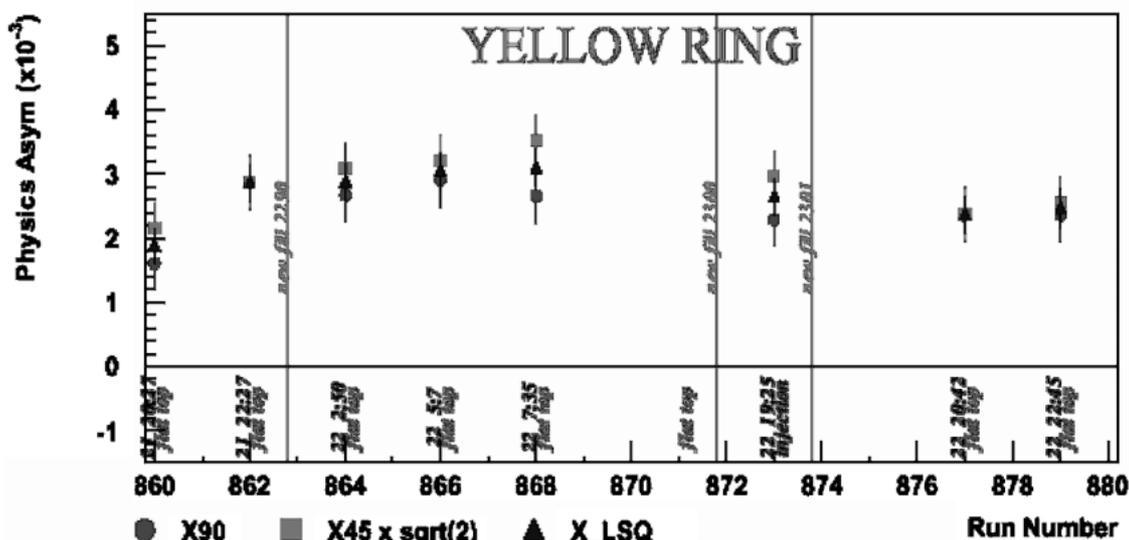
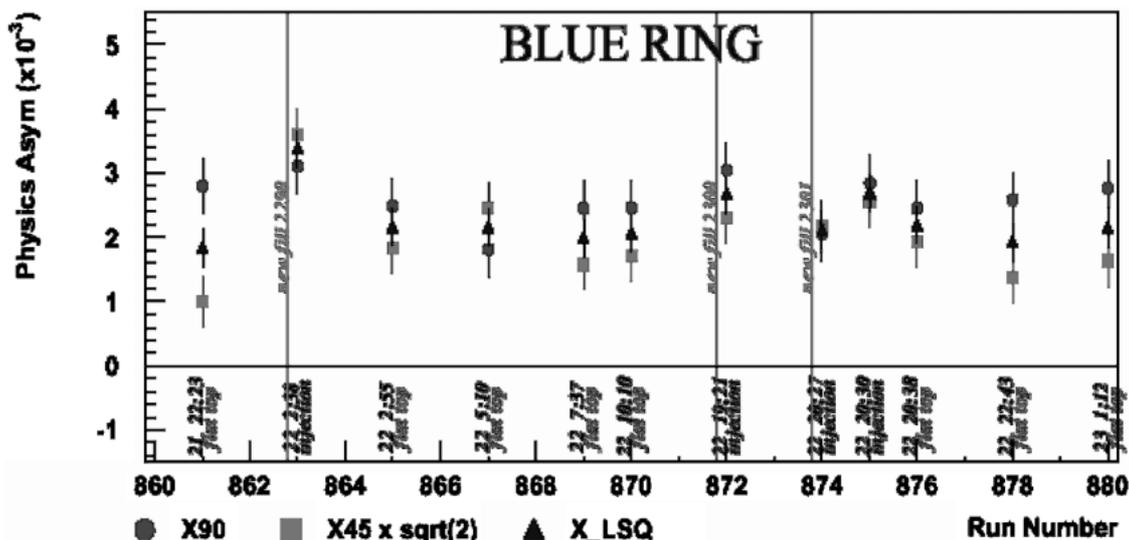
大阪大学核物理研究センター（RCNP）のサイクロトロンではエネルギー分解能のよい軽イオンや偏極イオンビームが利用できて、核構造や核反応の精密な研究が行われている。世界最高のエネルギー分解能を誇る Grand Raiden Spectrometer と組み合わせて、精密核物理のフロンティアを担う加速器施設となっている¹⁾。理化学研究所のリニアックやサイクロトロンでは重イオンビームによる不安定核の研究が精力的に行われている。とりわけ大強度の重イオンビームから生成されるビームフラグメントを不安定核ビームとして利用することで、図にしめすような中性子ハロー核などの新しい形状の核物質の発見や中性子過剰核での原子核の魔法数の変化など、従来の核物理の常識を覆す新しい核構造研究の展開で世界をリードしている²⁾。KEK の陽子シンクロトロンでは、 π や K 中間子ビー

ムでハイパー核などの研究が行われており、近年では“Hyperball” と呼ばれる Ge 検出器による γ 分光の成功で、ハイパー核の“微細構造”が明らかとなり、さらにラムファと呼ばれるダブルハイパー核 (${}^6\text{He}_{\Lambda\Lambda}$) が発見されるなど、この分野でも世界をリードしている。ラムファの崩壊過程は下図にあるように原子核乾板にとらえられている³⁾。

さらに最近では SPring-8 でレーザーコンプトン散乱による質の高い γ ビームでハドロン物理の実験が可能となり、ペンタクォークが発見されたことは記憶に新しい⁴⁾。またクォークグルオンプラズマや核子構造の研究では、日本人研究者は国際協力という形で Brookhaven 研究所の衝突型加速器 RHIC で研究を行っている。このように日本の核物理はかなりの分野で世界のトップにいるが、このことが可能になったのはなんとといっても加速器施設の充実があったからである。

ここまでくるには、核物理屋と加速器屋の緊密な協力と不断の努力があったおかげである。私の経験した 1970 年以降のことについて少し振り返ってみよう。70 年代は大学紛争もあり激動の時代であったが、高エネルギー研究所と核物理研究センターが発足したことで日本の高エネルギー物理と核物理の飛躍の時代でもあった。すでに各大学の小型加速器での核物理研究では限界が見えていて、共同利用研究所である東京大学原子核研究所や核物理研究センターにおいて何とか世界トップクラスの加速器を持ち、核物理のフロンティアを担いたいという気持ちであった。高エネルギーのフロンティアは最高エネルギーの達成にあるが、核物理はエネルギーではなく加速粒子の量、質、多様性





ということになる。そのためにはプラスアルファを持たねばということで、軽イオンの高性能加速器として AVF サイクロトロンを建設した核物理研究センターでは、さらに高エネルギー分解能と偏極イオンビームなどに力をいれた。私自身は京大グループの一員として AVF サイクロトロンのための原子線型偏極イオン源の製作にたずさわった。当時は核物理屋と加速器屋はまだ未分化といってよく、初めてのことでかなり苦労したことを記憶している。したがって初めて偏極陽子をサイクロトロンで加速し、散乱の左右非対称を見たときの感激はいまも忘れることができない。(これはたぶん日本で初めての偏極ビーム加速であったと思う。)

そんなこともあって、私は今にいたるまで偏極イオンビームとは離れられないでいる。偏極イオンビーム

での核物理はその後核物理研究センターのひとつの特徴ある分野となり、2度にわたってスピン物理国際会議を主催することとなった。私自身はその後 KEK の陽子シンクロトロンでの偏極ビームの加速プロジェクトに参加した。ずいぶん加速中の減偏極に苦労したが、KEK の平松氏を中心に、何とか 3.5 GeV までの加速に成功し、実験も行われた⁵⁾。しかしそれ以上のエネルギーへの加速は難しく 12 GeV のエネルギーでの物理実験のテーマに有力なものがないこともあり途中で断念せざるを得なかった。

クォークが核子スピンを 10% 程度しか担っていないという“スピンの危機”が EMC グループから発表されたのは 1989 年である。そこでグルオンスピンの寄与を調べることを第一目標に RHIC で偏極陽子衝突実験が計画された。同様の計画を KEK で検討して

いたわれわれも参加することとなり、一昨年に偏極陽子で 100 GeV という最高エネルギー加速に成功し衝突実験に成功した。右図は Blue と Yellow というふたつのリング内の偏極度モニターでの左右非対称の測定値でこれから 100 GeV のビームが偏極していることがわかる。これには理化学研究所を中心とする日本グループが snake magnet などの偏極ビーム加速に必要な加速器のコンポーネントの作製を、人的にも財政的にもフルにサポートしたことで可能となったのである。また RHIC の偏極イオン源は KEK の森氏らのグループが開発した大強度の偏極イオン源が用いられているなど、日本の寄与の極めて大きいプロジェクトである⁶⁾。京大のグループは主に加速器リング内でのビーム偏極度測定装置開発を担当した。

偏極ビームのことを少し詳しく述べたのは、私の経験してきたことだからだが、核物理と加速器の関係という観点からも良い例だと思うからである。偏極ビームでの実験は通常スピン方向をイオン源で適当な周波数で反転してそのときの反応頻度の変化（非対称）だけを見ればよいので、検出効率などのさまざまな補正が必要なく、統計精度が十分であれば散乱断面積の測定よりはるかにやさしいとされている。これは加速器が実験の半分を行ってしまっているからといってもよい。しかし反面、偏極ビームを作り加速するということは大変な苦勞を要する。シンクロトロンではリング内のビームのチューンなどビーム軌道を正確におさえないとたちまち減偏極してしまう。KEK での偏極ビーム加速はまさに加速器のスタディそのものであったし、RHIC でも snake magnet があっても、何もなくても減偏極なしで加速できるものではなかった。通常ビームの加速よりはるかに精度よく加速器のパラメータを知り調整する必要がある。ビーム偏極度もパラメータを変更するたびに短時間で測定しなくてはならない。強調しておきたいことは、この過程で物理屋と加速器屋が額をつき合わせてものごとをなしとげていったということであり、それこそが加速器に依拠してきた核物理で何ごとかのブレイクスルーをする基本だと私は考えている。私が偏極ビームの魅力から離れられない理由でもある。

最高エネルギーを実現することはいまや難しくなったが、しかしこれが高エネルギー物理の王道であることに変わりがない。核物理はエネルギーの高さではないが、加速器の性能（量、質）が世界でユニークであることが、やはり王道といえるのではないかと思う。偏極ビームや重イオンなど、核物理は加速器に深く依拠しているだけに、今後とも強い協力関係が必要であ

る。

偏極ビームの話が長くなってしまったがここで話を戻そう。70 年代末に RCNP が軽イオンによる核物理のセンターとして確立すると、東大核研は NUMA-TRON という大型の重イオン加速器計画をその将来計画としてかかげることになる。この計画は高温高密度核から不安定核の物理まで当時としては極めて野心的な計画であった。しかし放射線医学研究所の医療用加速器として一部実現することにはなるが、残念ながら核物理のための加速器として実現することはできず、その席をドイツの GSI にゆずってしまうことになった。一方共同利用研究所ではないが、核物理の中心的加速器施設として、理研では中型の重イオン加速器をその軸にすえていくことになる。理研の研究者の努力によりやがてこれが日本の重イオンビームによる核物理、とりわけ二次不安定核ビームによる核物理の世界的な拠点となったことは誰もが認めることである。このことは重イオン源や入射リニアック、サイクロトロンをはじめとする重イオン加速器施設の優秀さが基本となっており、物理実験の多くの成果があいまって、さらに大きな加速器計画である RIBF の建設が認められることとなったのである。

KEK のハイパー核の研究は、トリスタン建設で陽子シンクロトロンがもはや素粒子物理の主要装置でなくなった状況を受けて核物理の主要テーマとしてスタートした。しかし検出器として、過去のいわゆる副産物的実験のものではなく、ハイパー核のための本格的実験装置（SKS スペクトロメーターや Hyperball）をつくってのぞんだのが、世界をリードする大成功のもとであったと思う。しかしいまはビーム強度が、今後の発展のカギとなっていることは明らかで、大強度の K 中間子ビームが得られる JPARC での核物理の中心課題であり、すでに day1 の実験としていくつかの実験が提案されている。

SPRING-8 では核物理センターが中心となって、レーザーコンプトン γ 線のビームと実験施設（LEPS）が建設された。制動放射をつかった γ 線にくらべて、低エネルギーのバックグラウンドが少なく、偏極ビームが容易に得られるなどが特徴で、高品質のビームであるといえる。SPRING-8 自身の電子ビームの質の良さもあいまって、高品質のレーザーコンプトン γ 線ということで、Jlab の大強度電子ビーム施設と十分わたりあえるものとなっている。特にペンタクォークの発見はそのことを見事に証明している。

いずれにせよ、核物理の多くの成果は、みてきたように世界的にユニークな高性能加速器に依拠している

ことは明らかである。

4. 大強度加速器と核物理

高エネルギー物理が最高エネルギーを目指すのにくらべ、核物理は量と質でフロンティアを目指す。核物理は幸いなことに、JPARC と RIBF の二つの大加速器施設が建設中である。これらは間違いなく今後の日本のみならず世界の核物理のフロンティアを切り開くものであると考えている。これらは加速器としては陽子と重イオンという違いはあるが、ともにビーム強度のフロンティアを目指すものとなっていることは興味深い。JPARC では世界最大強度の K 中間子ビームなどによりハイパー核をはじめとする、ハドロン核物理を展開しようとしている。RIBF ではウランにいたる重イオンビームのエネルギーと強度を上げることで、より多くの不安定核を生成し、これまで調べられなかった安定線から遠く離れた原子核を作ることができるようになる。ともに核物理のフロンティアを大きく拡大することが期待される。これらの計画についてはよく知られているので、ここでは詳しく述べない。計画通りの加速器の性能をだすまでには大変な努力が必要なことは容易に想像できる。しかしビーム強度は物理の成果に直結するのでそれぞれの加速器建設チームに大いに期待したい。

NUMATRON が原子核の将来計画として断念されたあと、さまざまな議論があったが、東大核研の将来計画として大強度の陽子加速器に収斂していった。東大核研はいわば全国共同利用の総本山であっただけにその将来計画は核物理の将来計画として最も重いものであり、その実現に古手若手とも多くの時間をさいてきた。前身の関西 KAON Factory 計画から大ハドロン計画を経て現在の JPARC に至るまで、最初の議論からはすでに 20 年たっている。この長い間、核物理のコミュニティは辛抱強く実現をめざした努力をつづけてきた。加速器計画をみんなで実現していこうという、核物理研究者の熱意でなしたことであると思う。JPARC は多目的施設である。大強度の中性子やミュオンの物質科学や生命科学への利用をふくみ、さらに 50 GeV シンクロトロンからのハドロンやニュートリノビームは核物理だけでなく、素粒子物理の重要な施設でもある。しかしこの計画の推進の中心となってきたのは核物理のコミュニティである。これはこの分野のよい意味での伝統だと思う。70 年代はじめの陽子シンクロトロン計画の 1/4 縮小案をめぐるの原子核三者若手夏の学校での徹夜の議論のあの熱をいまも

なつかしく思い出す。KEK と RCNP 誕生前夜のころである。将来計画に対する若手研究者をふくむこの熱意が計画の実現には重要である。多くの研究者の熱意がなければ、どんな計画も絵に書いたもちにすぎない。われわれはこの伝統を大事にしていかななくてはならないと思う。

諸外国もふくめ、原子核素粒子の分野では加速器将来計画を一致して実現することを目指すという精神性がある。そのことは核物理と加速器という見方で考えると非常に重要なことで、端的にいうと分野の将来を加速器計画に託すという姿勢である。

5. おわりに

これまで述べてきたように核物理が発展してきたのは加速器の技術革新のおかげである。核物理は加速器とともに歩んできたといつてよい。いまも核物理から加速器分野に進出する若手研究者は多い。幸い JPARC や RIBF といった大きな加速器施設が建設中であり、世界のトップをいく核物理研究が可能であり、素晴らしい研究成果をあげる責任がある。それにはもちろん加速器が十分な性能をだすことが不可欠である。今後とも核物理屋と加速器屋の協力が必要なゆえんである。

核物理の将来計画はつまるところ革新的な加速器計画である。核物理が将来も発展するためには、加速器技術の革新が不可欠ということになる。そのためには、加速器の人材育成が重要であり、大学の小型加速器もその範疇でとらえていく必要があるのではなからうか。今後大型施設は予算上の制約からどこかで頭打ちになるかもしれない。ただ核物理ははばがひろいのでユニークな加速器であれば新しい発見が期待できる。しかしそれにしても加速器の技術革新は必要である。もしそれが終わったときには核物理も確実に終わるだろう。核物理と加速器はそういう関係にあるものだと思う。

参考文献

- 1) RCNP Annual Reports
- 2) I. Tanihata, The figure was provided by I. Tanihata
- 3) H. Takahashi et al., Phys. Rev. Lett. 87: 212502 (2001).
- 4) T. Nakano et al., Phys. Rev. Lett. 91: 012002 (2003).
- 5) H. Sato et al., Nucl. Instrum. Meth. A272 (1988) p. 617.
- 6) I. Alekseev et al., Nucl. Instrum. Meth. A, **499**: pp. 392-414 (2003).