

日本の原子力研究と大学における加速器

京都大学原子炉実験所 井上 信

I. 原子力とは

第1回（昭和31年）原子力長期計画

アイソトープや放射線の利用という言葉はあるが加速器という言葉はない。しかし当時既に阪大、京大のサイクロトロンはできていた。これはサイクロトロンによる核物理研究などはいわゆる原子力とは区別していたことのあらわれである。

平成12年原子力長期計画

大強度陽子加速器計画、RIビーム加速器、ITER計画については記述があるが、研究用原子炉が燃料問題で2006年に止まるかもしれないことについての記述はない。研究用原子炉の役割が減少したという認識のあらわれか？

原子力とは核（分裂）エネルギーと考えている人が多いはず。高エネルギー物理学、がん治療、ナノテクノロジー等の手段としての加速器を原子力研究用の加速器という位置づけにすることには疑問がある。

例えば将来予想される高エネルギー物理のリニアコライダーなどは高エネルギー加速器機構がアジアのCERNのようなものを目指すということで、国民に理解を得るべきもので、原子力予算として議論するようなものではないように思う。一方エネルギーとしての原子力は、放射線の利用の利益を説いて国民を説得するのではなく、エネルギーとしての必要性と内容を説明して理解を得るべきもので、他に予算を回せるのであれば原子力予算を減らして良いのではないか。

II. 日本の加速器

1933年頃台北帝大の荒勝文策研究室においてコッククロフトワルトン型加速器が作られアジアで初めての原子核人工変換の実験がなされた。数ヶ月後、阪大の菊池正士研究室でも同様の実験がなされた。さらに理研の仁科芳雄研究室、阪大の菊池研究室、台北から京大に移った荒勝研究室で相次いでサイクロトロンが建設された。またバンデグラフ型加速器も作られた。我が国の加速器の草創期である。

戦後占領軍によってサイクロトロンが全て破壊撤去され、原子核の研究ができなくなった時期を経て、理研、阪大、京大、そして共同利用研究所として東大の原子核研究所のサイクロトロンが作られた。戦後の復興期である。

原子核や高エネルギー研究用の加速器は次々と大型化して、一大学では持てなくなって、原子核将来計画が昭和30年代の後半に立てられ、文部省直轄の大学共同利用機関として高エネルギー研究所ができた。また核物理研究用には全国共同利用の阪大核物理研究センターができた。この時期に一大学で全国共同利用並みに頑張ったのは東北大学で300 MeVの電子線形加速器を建設した。全国共同利用の規模でない加速器の例としては東大、京大などが普及機レベルのタンデム加速器を建設した。他のいくつかの大学でもヴァンデグラーフや小型の電子線形加速器などを購入した。多くは原子核物理研究者が建設したが、原子力の研究者は中性子発生装置としてコッククロフトワルトンや電子線形加速器を購入した。

核現象の研究目的ではない、放射線源としての加速器利用も次第に増えてきた。核研のシンクロトロンによる放射光利用の物性研究と、東北大電子線形加速器で発生するパルス中性子による物性研究がその代表的なものであった。

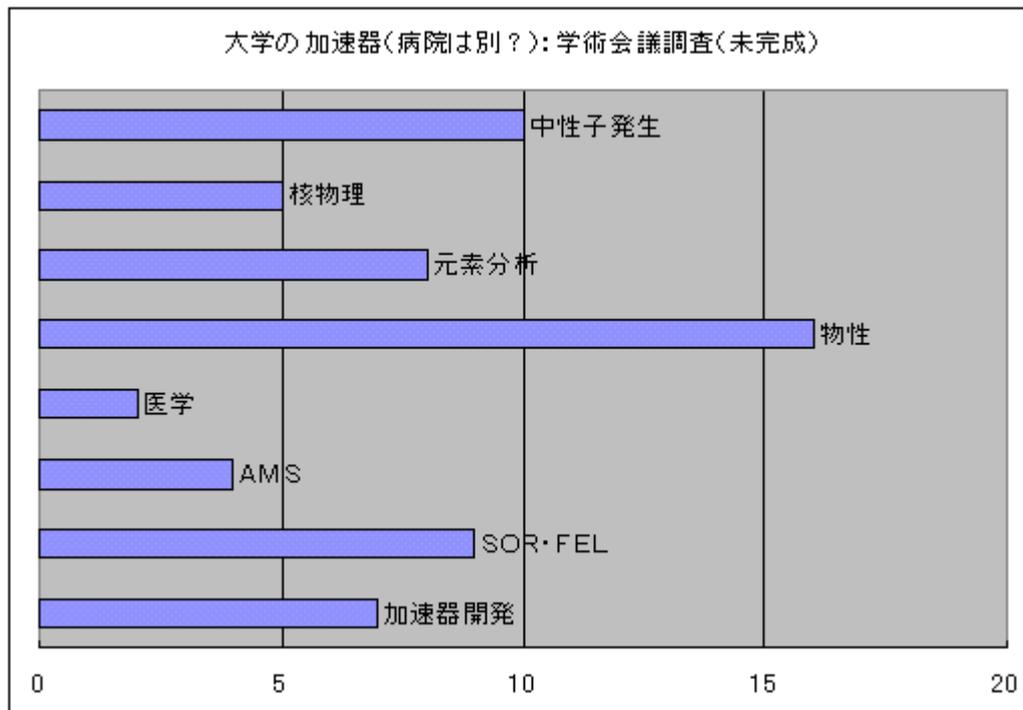
法律的には放射線発生装置に入らない低エネルギーの加速器での照射やイオン注入なども増えてきた。これらは大学の研究段階から次第に民間企業の実用機になっていった。

大学の加速器の議論とはややずれるが、中小型加速器の産業・医療への応用はかなり進んでおり、電線やタイヤの製造、滅菌殺菌など産業に使われる加速器の関わる産業規模は、日本での調査でもアメリカでの調査でも数兆円ないし10兆円規模になっているといわれている。

現在、法律的に放射線発生装置として監督官庁が把握している加速器は日本アイソトープ協会の統計表によると200年3月現在で1100台を越えている。その8割近くは医療用である。特に放射線治療用の小型の電子線形加速器が700台を越えている。また最近ではPET用のRIを作る小型のサイクロトロンが数十台になってきていることも注目すべき点である。教育機関の加速器は58台、研究機関の加速器は163台となっている。大学の加速器はこの統計では教育機関にも研究機関（大学附置研究所・センター等）にも含まれているので大学の加速器の台数だけをみることはこの表からは難しいが数十台といったところであろう。

III. 大学の加速器

最近学術会議の核科学総合研連のワーキンググループで原子力基礎研究関係者が大学等の加速器の調査をした。これによると、大学の加速器は約60台である。この調査は未完成で大学病院のリニアックやPET用サイクロトロンは含まれていないようであるのに、筑波大学の治療用陽子シンクロトロンは含まれていたりするなど若干の不統一もみられるが、一応の参考になる。大まかなくくり方で整理すると、使われ方は以下の表のようになる。



従来のいわゆる原子力系の加速器は中性子発生に分類されているコッククロフトワルトン型加速器や電子線形加速器である。コッククロフトワルトン型の場合、D?T反応による中性子発生を利用するが、これは核融合反応であるために、核融合炉の材料試験等にも使われる。またユニークな例としては、原子炉の炉心設計と人材育成のために作られた京都大学原子炉実験所の臨界集合体に付設されている小型のD?T中性子発生器は、燃料集合体に中性子を注入する形のいわゆる加速器駆動未臨界炉の基礎的な研究をするためにも使われている。まさしく狭い意味の原子力(核分裂エネルギー)研究用の加速器の使い方といえる。

核物理は原子力の基礎研究という位置づけは可能かもしれないが、阪大の核物理研究センターや東北大学の加速器などが含まれているものの、数は多くない。一般の大学で持てる小型加速器ではもはや核物理の先端研究はなされていないことを意味している。核物理の研究は大学共同利用機関や一部の全国共同利用の大学附置センター等でなされている。

多いのは物性というくくり方をしているもので、材料研究やフェント秒解析などを初めとする様々な利用をまとめた部分である。この部分は狭い意味での原子力研究とはいえない。元素分析や加速器質量分析(AMS)のような分析装置としての加速器の使い方も以前からあるが、当初大学での核物理研究用に作られたものが分析用の装置として目的を変えていったものも多い。

加速器開発がやや多いように見えるが、これは東京工大原子炉工学研究所と、京都大学の化学研究所附属原子核科学研究施設の特定の研究者が頑張っている試作的な小規模のものがあるためで、研究室が多いわけではない。

ただし最近、広島大学、立命館大学、日本大学、東京理科大学などで放射光（SOR）や自由電子レーザー（FEL）用の加速器が建設され、この分類表ではSOR・FELにしているが、その周辺では加速開発研究としても有意義な活動がみられる。同様なことは東大、阪大のフェント秒解析用その他電子加速器周辺でも行われていて、上述の東工大、京大化研とともにいわゆるビーム物理というジャンルが開かれつつある。

これらの活動グループは東大の原子核研究所がなくなった今では、最先端の大型加速器をもつ大学共同利用機関や特殊法人等の加速器研究者とともに我が国の加速器科学、ビーム物理学の中核をなすグループである。加速器関係の人材育成面を考えると大学におけるこれらの拠点に対する支援が望ましい。

上述の学術会議のワーキンググループでは「原子力分野における加速器の研究開発について」という報告書をまとめつつある。来年3月に最終報告が出る予定であり、現在入手しているものは中間報告である。これは狭い意味の原子力研究にとどまらず、ここに紹介したように広い範囲を網羅した報告となっている。そこでは我が国の中小型加速器の関係する産業が数兆円産業の規模になっていることから、その基礎となる大学の中小型加速器でのユニークかつ多様な研究の推進、高等教育の実施、京大原子炉実験所の役割、学際分野、地域、社会との交流などの重要性が、大型研究機関の大型加速器を利用する大学関係者の先端的共同利用研究の必要性とともに強調されている。

参考資料 1. 昭和31年第1回長期計画（原子力委員会）抜粋

◆原子力委員会原子力開発利用長期基本計画

わが国原子力行政の基本政策となるべき原子力開発利用長期基本計画については、本誌既報のとおり、本年3月以来原子力委員会および事務当局において種々検討中であったが、9月6日の定例委員会で次のように内定をみた。

すなわち、本計画はさきに決定された「原子力開発利用基本計画策定要領」にもとづき広く関係各方面の意見をきいて策定上の問題点を処理しつつ、幾度か案を練り直した末にでき上ったもので、本年12月頃、石川、藤岡、湯川の各委員ならびに原子力局幹部が海外視察を終えて帰国して後、その調査結果をまっけて再び検討を加えて正式に決定される予定になっている。なお具体的な開発計画は、先般決定された昭和31年度原子力開発利用基本計画等毎年の年度計画および事項別の年次計画にゆずる訳であるが、本計画の大綱は、今後長く一貫してわが国の原子力の研究、開発、利用の基本となるべきものと考えられる。さらに敷えんしていえば、科学技術庁原子力局をはじめ関係各省庁や日本原子力研究所、原子燃料公社などは、関係各方面と協力し、また諸外国と提携しながら、この計画を中心として原子力平和利用の道を邁進することとなるのである。

原子力開発利用長期基本計画

(昭和31年9月6日内定)

原子力委員会

4 方針

(1) 原子力の研究、開発および利用を進めるにあたっては、動力としての利用面と放射線の利用面とを平行的に促進するものとする。

(6) 原子炉に関する研究は、日本原子力研究所を中心として行い、その研究施設は関係研究者に開放することとし、原子炉の建設は当分の間同研究所に集中するものとする。

(13) 大学における研究教育用の原子炉については、わが国における原子力の研究の進展に応じてその設置を考慮するものとする。

5 計画の内容

(2) 原子炉の建設計画

(ロ) 計画の内容

(h) 大学における基礎研究および教育のための原子炉はさしあたり関西方面に1基を設置し、その後必要に応じ漸次考慮するものとする。そのため大学の連合等の運営方法の確立を図るものとする。

体を用いた情報提供等を体系的に組み合わせて実施することが重要である。その際、国や事業者は、原子力活動の便益、意義はもとより、原子力活動に伴うリスクについて、自然放射線や身の回りの他のリスクを含めて広く国民に説明することが重要である。また、今後は、リスクについて関係者が相互に情報や意見を交換、評価し合い、その過程の中で、関係者間の理解レベルの向上が図られるようなコミュニケーション（リスクコミュニケーション）の考え方に基づいて国民と原子力に関するコミュニケーションを図っていくことが必要である。

なお、情報が氾濫する今日の社会において、国民が判断するに足る必要な情報を分かりやすく、かつ正確に報道することがマスメディアに期待されている。このため、国、事業者は、マスメディアが考え、判断するのに必要な素材、要素を的確に提供しよう努めることが必要である。

3. 原子力に関する教育

原子力に関する教育は、エネルギー教育や環境教育の一環として、また、科学技術、放射線等の観点から、体系的かつ総合的にとらえることが重要であり、各教科における学習の充実とともに新しい学習指導要領において新設された「総合的な学習の時間」等を活用することが有効である。このため、原子力やエネルギーに関する体系的な教育カリキュラムの開発、教育関係者への原子力に関する正確な資料や情報の提供、教員への研修の充実、教員が必要な時に適切な情報や教材等が提供されるような教員、科学館、博物館、原子力関係機関、学会等をつなぐネットワークの整備等の支援策を講じていくことが重要である。また、原子力やエネルギー問題については、学校のみならず、施設の見学等の体験的な学習や、科学技術に関する理解増進のための方策の一環としての取組を充実させることも重要である。

4. 立地地域との共生

原子力施設の円滑な立地のためには、まず、電力の消費者である国民が我が国のエネルギー問題の現状についての理解に立って、電源の立地に対する理解を深めることが重要である。このため、国、事業者は原子力発電によって電力供給を受けている電力消費地の住民と立地地域の住民との間の相互の交流活動等を充実させることが必要である。

また、原子力施設立地地域の住民の理解と協力を得るためには、原子力施設の安全確保や災害対策が適切になされていることや適切な情報公開等に加え、原子力施設の運転を通じて事業者と地域社会が共に発展し共存共栄するという

選択の幅を持たせ研究開発に柔軟性をもたせることが重要である。

具体的には、高速増殖炉サイクル技術として適切な実用化像とそこに至るための研究開発計画を提示することを目的に、炉型選択、再処理法、燃料製造法等、高速増殖炉サイクル技術に関する多様な選択肢について、現在、核燃料サイクル開発機構において電気事業者等、関連する機関の協力を得つつ実施している「実用化戦略調査研究」等を引き続き推進する。

また、核燃料サイクル開発機構、日本原子力研究所、電力中央研究所、大学、メーカー等は、国内外の研究開発施設の活用や海外の優れた研究者の参加を含め、高速増殖炉サイクル技術について裾野の広い基盤的な研究開発を行っていく。

高速増殖炉の実証炉については、実用化に向けた研究開発の過程で得られる種々の成果等を十分に評価した上で、具体的計画の決定が行われることが適切であり、実用化への開発計画については実用化時期を含め柔軟かつ着実に検討を進めていく。

このため、国は研究開発の進め方や到達度について随時チェックアンドレビューを行う。その評価に当たっては、研究開発投資の効率性の観点を重視するなど、単なる技術評価にとどまらず、必要に応じ社会的状況の変化などを踏まえて研究開発政策等の見直しを行うことが必要である。

第4章 原子力科学技術の多様な展開

1. 基本的考え方

科学技術には、自然の摂理を明らかにし、あるいは人工世界を極めようとする

応じた応用目的を有する研究開発という二つの側面があり、原子力科学技術もこの二つの側面を有している。加速器や高出力レーザーは、これらを観測手段として活用することにより物質の究極の構成要素や自然の法則を探ったり、ライフサイエンスや物質・材料系科学技術等の様々な科学技術分野の発展を支えるものである。一方、核融合や革新的な原子炉の研究開発は、将来のエネルギーの安定供給の選択肢を与え、経済、社会のニーズにこたえるものである。これらの研究開発を進めるに当たっては、創造性豊かな研究を育む環境を整備し、これらを支える基礎・基盤研究との均衡ある発展を図りつつ、効率的に進めることが重要である。

2. 多様な先端的研究開発の推進

(加速器)

物質の起源の探索、生命機能の解明、新材料の創製等に有効な手段となる大強度陽子加速器計画については、原子力委員会、学術審議会共催で行った評価を踏まえ適切に推進する。また、RIビーム加速器施設については、着実に建設を進める。一般に、大型加速器計画は常に国際的競争状態におかれており、技術主導の性質をもつことから、提案・評価後、遅滞なく評価結果を反映させることが重要である。

(核融合)

未来のエネルギー選択肢の幅を広げ、その実現可能性を高める観点から、核融合の研究開発を推進する。今後達成、解明すべき主な課題は、核融合燃焼状態の実現、核融合炉工学技術の総合試験等があり、国際熱核融合実験炉（ITER）計画はこの観点から重要である。なお、その推進に当たってはITER計画懇談会の評価の結果を踏まえることが必要である。また、核融合科学を広げる研究については、適切なバランスを考慮しつつ進めることが重要である。

(革新的原子炉)

21世紀を展望すると、次世代軽水炉とともに、高い経済性と安全性をもち熱利用等の多様なエネルギー供給や原子炉利用の普及に適した革新的な原子炉が期待される。このため、炉の規模や方式にとらわれず多様なアイデアの活用留意しつつ、国、産業界及び大学が協力して革新的な原子炉の研究開発についての検討を行うことが必要である。

(基礎・基盤研究)

原子力科学技術の基礎研究は原子力の多様な可能性を引き出し、将来の技術革新につながるようなシーズを生み出す。また、この分野の基盤研究は原子力分野のプロジェクト研究及び他の科学技術分野の発展に寄与する。国は、これらの研究について競争的な資金の活用も考慮し、研究者の独創性を重視し、適切な評価を行いつつ推進することが必要である。

3. 研究開発の進め方

3-1. 研究環境の整備

社会のニーズに応えようとする応用研究が基礎科学の新分野を生み、基礎

科学の知的好奇心に基づく基礎研究が逆に新技術を生む可能性に着目して、原子力分野においても、基礎研究と応用研究の連携協力を強化することが重要である。また、研究開発の学際化が進む中で、創造性豊かな研究、革新的技術の開発、円滑な技術移転等が求められている今日の状況に鑑み、個々の研究組織や研究活動の独自性をいかしつつも、これらの間での有機的連携が図られるように、研究活動の相互乗り入れ、ネットワーク化を進めることが重要である。

このため国は、人材養成機能を有する大学の原子力基礎研究活動の維持、発展のために必要な研究資源の確保、充実に努めるとともに、研究開発機関の整備する大型研究施設・設備の共同利用及び異なる組織や分野の間での共同研究の促進を図ることが必要である。また、国内外の人材の流動性の向上、情報通信技術の進展をも考慮した研究データや関連情報の発信と円滑な流通促進のための基盤整備等を進めるなど、多面的な知のネットワークの構築・整備を進めることが必要である。特に、研究成果の民間への移転が重要となる研究開発においては、産学官の役割分担だけでなく、このようなネットワークを活用して関係する研究者が相互に乗り入れ、あるいは結集するなど、柔軟な研究開発実施体制を組んで推進することや、技術移転システム等を活用して積極的に産業化を図るなど社会や市場からの要請にこたえていくことが必要である。

学術研究や基礎・基盤研究、医療、人材養成等に大きな役割を果たしてきた研究用原子炉については、これらの分野における今後の役割を見定めながら、その在り方について検討を行うとともに、その使用済燃料の取扱いについては、高濃縮度のウラン燃料の米国への期限内の返還を含め早急に検討を行うことが必要である。

3-2. 研究評価

研究開発活動の効率化と活性化を図り、一段と優れた成果をあげていくため、国は、研究開発課題及び研究機関について適時適切な評価を実施し、評価結果を資源の配分や計画の見直し等に反映することが重要である。

その際、研究の科学的、技術的な観点だけでなく、社会的意義、実施体制等、研究内容に応じた適切な評価項目の設定による評価が重要である。また、多数の研究者を結集して行うプロジェクト研究の実施に当たっては、強力で適切なリーダーシップが何よりも求められ、このためリーダーの能力と資質を評価の対象とすることも重要である。

第7章 原子力の研究、開発及び利用の推進基盤

1. 人材確保

安全の確保を図りつつ原子力の研究開発利用を進めていくためには、これらを支える優秀な人材の育成・確保は重要な課題である。しかしながら、我が国の原子力産業は、成熟期に入りつつあり、研究者、技術者及び技能者の人員数並びに原子力関連の研究関係支出高は近年減少しており、設計や物作りに関する分野において、今後、人材・技術力を従来通りの規模で維持することは困難になりつつある。

このため、人材養成の中核的機関である大学は、国際的視点も含めながら、研究開発機関、民間事業者等の関係諸機関と連携しつつ、多様かつ有能な人材の養成に取り組むことが必要である。その際、先端的研究開発施設における最先端の研究開発の実務を含めた教育訓練の実施も有効である。

原子力産業の技術力や人材の維持・継承、発展は、物作りを継続していくことによって効果的に達成される。このため、原子力産業界においては、技術力及び製造力の維持・継承、発展を図るため、常に最新の技術を取り込むなどの努力を継続すると同時に、企業内での教育訓練等を充実させ、それまでに蓄積された技術を企業内において発展させ、将来世代へ着実に継承する努力を行うことが期待される。

また、国の研究機関と民間事業者は、その間で共同研究や人材の交流等、相互の人的・技術的交流を促すような体制をつくり、我が国全体としての人材・技術力の維持・継承、発展を図るよう努力することも重要である。

さらには、原子力が我が国にとって重要な役割を担っていること、そしてそれが国際的な平和や安定の枠組みにも貢献し得ることを明らかにしていくことや、原子力の幅広い可能性に挑戦し、若者に夢と希望を与えるような研究開発活動を展開していくことが原子力を志す人材を育む上でも重要である。このため、このような点について原子力に関係する科学者、技術者は国民に積極的に語りかけていくことが期待される。

2. 原子力供給産業の競争力の向上と国際展開

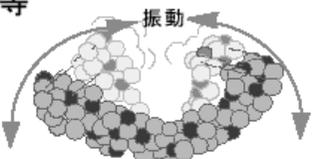
我が国では、新規発電所建設の停滞に伴い電気事業者の設備投資が急激に減少していることなどにより、原子力供給産業の原子力関係売上高は近年減少傾向となっている。一方、海外からの国内電気事業者への納入実績は経済のグローバル化に伴う国際調達の活発化等により増加している。我が国の原子力供給産業は、このような市場構造の変化への対応、経営の効率化を一層進めるとともに総合的な戦略の立案が迫られている。我が国の原子力供給産業においては、

原子力科学技術の展開

未踏領域への挑戦

持続可能な発展

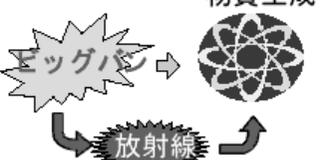
生命科学
分子振動研究、
機能解明、放射線影響
等



タンパク質アミノ酸

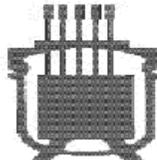
宇宙・物質の根源の探究

物質生成

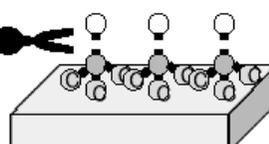


放射線

受動的安全システム
熱利用技術開発



材料創製・加工
新機能材料、微細加工
表面改質等



放射線利用

物理学
生命科学
結晶構造解析等
物質科学
物性研究等

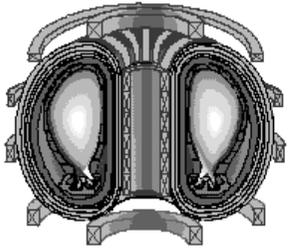
核分裂エネルギー

発電



核融合
炉心プラズマ研究
炉工学要素開発

核融合燃焼プラズマ
核融合炉工学技術



高出力化
高エネルギー化

加速器・レーザー

炉工学、研究炉

革新技術開発
高度化

STATUS OF ACCELERATORS IN JAPAN

Makoto Inoue, ICR, Kyoto University, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

Abstract

Accelerator-based nuclear physics in Japan began in 1934. The Institute for Nuclear Study(INS) which was a symbol of the "renaissance" age was established as a common use laboratory in 1955. The "modern" age began with construction of a 12GeV proton synchrotron at KEK and an AVF cyclotron at RCNP in 1971. A 20MV tandem accelerator at JAERI, an electron positron collider TRISTAN which is now being converted to KEKB at KEK, ring cyclotrons at RIKEN and at RCNP, heavy ion therapy synchrotron HIMAC at NIRS, synchrotron light sources KEK-PF and Spring-8 are typical examples of modern large accelerators. There are also many small or moderate size accelerators for different fields. For example, about 60% of 1000 accelerators in Japan are electron linacs for medical use. There are also many compact cyclotrons for isotope production, some proton therapy accelerators and compact synchrotron radiation sources. On the other hand TARN II as an electron cooler ring at INS (now KEK-Tanashi) is an excellent example of advanced beam science and technology. A few projects may proceed at RIKEN, KEK and JAERI. But in the next century we will be in the "global" age.

1 INTRODUCTION

Two Cockcroft -Walton accelerators of Japan were completed by Prof. Arakatsu of Taihoku University and a few month later Prof. Kikuchi of Osaka University in 1934. In 1937 Dr. Nishina of RIKEN, a father of Japanese quantum physics completed a small cyclotron and then began to construct a large cyclotron with help of Prof. Lawrence. Prof. Kikuchi and later Prof. Arakatsu who moved from Taihoku University to Kyoto University also began to construct cyclotrons at Osaka and Kyoto, respectively. The Nishina laboratory of RIKEN was a leading one in this " Heroic" age of Japanese accelerator history.

But it was interrupted by the war. Immediately after World War II in 1945 all these cyclotrons were destroyed by the occupation forces and Japanese nuclear physics was stopped. It was the "Dark and Middle" age. In 1951 Prof. Lawrence came to Japan to encourage Japanese nuclear physicists and he recommended to the General Head Quarter of Allied Forces that Japan should re-start fundamental nuclear physics. Then the cyclotrons were re-constructed at RIKEN, Osaka University and ICR, Kyoto University. The "Renaissance" age began.

A leading laboratory of the "renaissance" age was the Institute for Nuclear Study (INS), University of Tokyo which was established as a common use laboratory in 1955. Many physicists came from RIKEN, Osaka University and Kyoto University to INS to construct a variable energy cyclotron and an electron synchrotron. In this age some betatrons, electron linacs and Van de Graaff accelerators were also constructed at different universities.

In 1971 KEK for high energy physics and RCNP, Osaka University for nuclear physics were established. Both are common use laboratories, and KEK is the first Monbusho (Ministry of Education, Science, Sports and Culture) national accelerator laboratory which is independent of the university. It was the beginning of the "Modern" age. The KEK has become the leading laboratory in this age. Many "modern" accelerators have been built for many purposes up to now.

At present there are more than a thousand accelerators in Japan as listed in table 1 where electron accelerators with energy less than 1 MeV are omitted[1]. We can see that about 60% of Japanese accelerators are electron linacs for radiation therapy at hospitals. Numbers of accelerators for medical and industrial use are growing up while accelerators for fundamental science are concentrated in a few big laboratories.

In the following sections status of major "modern" accelerators in Japan is briefly reviewed[2]. Details are discussed elsewhere in these proceedings.

Table 1. Number of accelerators in Japan (as of March 31, 1997)[1].
Electron accelerators with energy less than 1MeV are omitted.

Accelerators	Total	Hospitals & Clinics	Educational Organizations	Research Institutions	Industrial Firms	Other Organizations
Total	1061	673	55	155	162	6
Cyclotrons	52	17		16	18	1
Synchrotrons	25		2	18	5	
Linear Accelerators	759	624	7	44	81	3
Betatrons	14	10		1	3	
Electrostatic Accelerators	52		15	26	11	
Cockcroft-Waltons	97		27	33	35	2
Transformer-type	23		1	17	5	
Microtrons	29	22	3		4	

2 BIG ACCELERATORS

TRISTAN was an electron positron collider at KEK for quark physics. It is now converted to a high-luminosity B-factory, KEKB which consists of an 8GeV electron and a 3.5GeV positron rings. The injector linac is also modified for full-energy injection to the rings. Construction and design study of KEKB are done with international collaborations. It will be operated in

this year.

An old 12GeV proton synchrotron at KEK will be supposedly shut down when JHF (Japan Hadron Facility) project will be funded. But at the moment it plays still important roles in the fields of high energy physics, nuclear physics, material science and bio-medical science. A unique project with this synchrotron before the shut-down is a neutrino oscillation experiment in collaboration with Super-KAMIOKANDE which is an underground detector for cosmic neutrino located at Gifu prefecture 250km away from KEK. The synchrotron is being improved for high intensity beam acceleration and fast beam extraction to make this experiment. Fast kicker magnets will be installed in the next year.

SPRING-8 (Super Photon ring 8GeV) at the Harima Science Garden City which is the world highest-energy third-generation synchrotron-radiation light source was opened to users in October 1997. This facility has been constructed by a joint group of JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute) and RIKEN (Japanese name of IPCR: Institute for Physical and Chemical Research) and operated by the newly-established JASRI (Japan Advanced Synchrotron Radiation Institute). All these Institutes are supported by STA (Science and Technology Agency of the government).

On the other hand KEK-PF which is a 2.5GeV storage ring constructed in 1982 is being modified to another third generation light source. The beam emittance was once improved from 460nm-rad to 130nm-rad in 1986. And the goal of the present improvement of the emittance is 27nm-rad which can be obtained by additional focusing magnets. The brilliance is also improved to 1018 photons /sec /mm² / mrad² / 0.1%b.w..

HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) at NIRS (National Institute for Radiological Science) of STA was completed in 1993 and the clinical trials were started in 1994. The HIMAC which consists of two identical 800MeV/u synchrotron rings and an injector linac accelerates at the moment mainly carbon ions for therapy because of good concentration and biological effect. A unique RF knock-out method is applied for high-quality slow-extraction of the beam synchronized with respiratory motion of a patient. The accelerator is also used for basic research and development at night. One of the unique developments in progress is ¹¹C beam production by projectile fragmentation of carbon beam. The ¹¹C can be used as an RI source for PET. Therefore the high energy ¹¹C beam plays two roles simultaneously of irradiation of the tumor and detection of the irradiated point.

The K=540 RIKEN ring cyclotron also accelerates heavy ions for nuclear physics and other applications. Many exotic nuclei like extremely neutron rich nucleus have been discovered by this cyclotron. Thus the next step is reasonably determined to become the RI beam factory. The first phase of the project which is the construction of two-cascade superconducting ring-cyclotron system is already funded. The existing ring cyclotron will be used

as an injector of the super-conducting cyclotron.

On the other hand the K=400 RCNP ring cyclotron accelerates mainly proton and light ion beams with very high energy resolution. Nuclear physicists can obtain high quality spectra with resolution of 10^4 by using the cyclotron and an excellent spectrograph Grand RAIDEN. A unique temperature regulation method has been developed to stabilize high quality beam. An injector cyclotron constructed early 70's has been also improved for high reliability.

3 TANDEM ACCELERATORS

At JAERI-Tokai a super-conducting linac is working as an energy booster for a 20MV pelletron tandem accelerator. The maximum accelerating energy of the linac is 30MeV/q. High energy nuclear spectroscopy experiments with high resolution are performed by using this system.

Tsukuba University 12MV tandem accelerator has also a small booster linac with energy of 2MeV/q.

Two tandem Van de Graaffs of Kyoto University and University of Tokyo have been replaced by pelletron tandems though the original high pressure vessels are again used in both cases. The terminal voltages have been improved from 5MV to 8MV for Kyoto and from 5MV to 6MV for Tokyo.

The laboratory of Kyushu University 10MV pelletron tandem which is a unique high-gradient field home-made machine works as an accelerator center of Kyushu area.

These modern tandem accelerators have been constructed originally for nuclear physics but recently they are applied for not only nuclear physics but also many other fields such as AMS ^{14}C dating. And many small tandems have been constructed for material science and in particular element analysis, for example, Rutherford backward scattering or PIXE with micro beam.

4 CYCLOTRONS

Besides the RIKEN and RCNP ring cyclotrons there are many cyclotrons in Japan. At JAERI-Takasaki a K=110 AVF cyclotron of TIARA (Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application) works for material science, bio-technology and so on in combination with other small accelerators.

The INS SF-cyclotron is now operated by CNS (Center for Nuclear Study), University of Tokyo, because a few divisions have remained with the cyclotron at the University when INS and KEK (national laboratory for high energy physics) have merged to become the new KEK (high energy accelerator research organization) in 1997. The CNS cyclotron still injects the beam into the electron cooler ring TARN II which belongs now to the new KEK-Tanashi.

The TARN II was originally constructed to study of the design of a heavy ion synchrotron for nuclear physics project NUMATRON. Unfortunately the project was not funded. But the TARN II has been effectively used for design study of HIMAC and is now operated for accelerator and beam physics. One of the excellent experiments of the beam physics with the TARN II is precise observation of dissociative recombination (DR) of the molecular ion ${}^4\text{HeH}^+$ with the ultra cold electron beam whose initial transverse temperature of 100meV is reduced to the order of 1meV by changing the electron guiding field from 3.5T to 35mT with a superconducting magnet as an adiabatic expansion device.

Cyclotrons for isotope production are operated at universities, companies and hospitals. Tohoku University Cyclotron and Radioisotope Center (CYRIC) has operated an AVF cyclotron, which will be replaced by a new larger one. The construction of the new cyclotron begins since this year. But a small cyclotron is enough to produce RI for PET in hospital. Therefore Tohoku University will continue RI production for PET by another compact cyclotron during the construction of the new larger cyclotron because needs for PET RI is very high. In fact there are 31 PET facilities in Japan as of November 1997. On the other hand some cyclotrons produce positron emitters such as ${}^{27}\text{Si}$ which is used as a positron beam source for material science though some electron linacs are also used for production of high intensity positron beam.

5 LINEAR ACCELERATORS

The first modern linear accelerator for nuclear physics in Japan is the 300MeV Tohoku University electron linac. It has been also used for accelerator physics. For example coherent radiation from the electron beam was discovered by this linac. On the other hand the pulsed beam is not convenient for recent nuclear physics. Therefore a stretcher and booster ring, STB with highest energy of 1.2GeV has been recently attached after a long term experience of a small stretcher ring. The commissioning of STB has been started since November 1997.

There are some other electron linacs for radiation physics, for examples, a 150MeV S-band and a 38MeV L-band linacs at ISIR, Osaka University, a 45MeV linac at Hokkaido University, a 10MeV PNC-OEC quasi-cw linac for transmutation study in collaboration with Nihon University, a 46MeV L-band linac as a neutron source at KURRI, Kyoto University, the 35MeV twin-linac at NERL, University of Tokyo, a 500MeV ETL linac and a 100MeV linac at ICR, Kyoto University. Some other linacs are used as injectors for SR or FEL, which is discussed in the next section. As mentioned above most accelerators in Japan are electron linacs at hospitals. There are also many industrial electron linacs for non-destructive inspection and radiation processing.

On the other hand ion linacs are not so many. At KEK, NIRS and RIKEN there are

injector linacs of 40MeV protons, 6MeV/u ions and 3MeV/u ions, respectively. A 30MeV/q super-conducting linac at JAERI is a booster of the tandem as mentioned above. A 7MeV RFQ-DTL of ICR, Kyoto University, A 5MeV RFQ-DTL of KEK and a 2MeV RFQ of JAERI are all proton linacs for accelerator physics or test stand of future projects. At RLNR, Tokyo Institute of Technology a few small ion linacs have been constructed for material science. The maximum energy of the RLNR linacs is 3.4MeV/u. Their accelerating structures are IH (Inter-digital-H) and RFQ. Numbers of linacs for MeV-ion implantation are working at industries.

A linac system composed of a 25.5-MHz split coaxial RFQ (SCRFAQ) linac and a 51-MHz IH linac has been completed at INS and is now in operation at the new KEK-Tanashi. This linac has been developed as a prototype of the ISOL post accelerator for E-arena of Japan Hadron Facility (JHF) project. The $^{19}\text{Ne}^{2+}$ ion beam whose half life is 17.3sec has been successfully accelerated. The maximum energy of the system is 1.05MeV/u.

6 SR AND FEL

Recently the accelerator-based photon source has been much developed. The first synchrotron radiation (SR) ring in Japan is the SOR ring of ISSP, University of Tokyo which is attached to the INS electron synchrotron and is still in operation though it will be shut down in the near future. The UVSOR of the Monbusho-national Institute for Molecular Science (IMS) is an SR ring at a region of UV light.

A few SR rings have been developed at ETL of MITI (Ministry of International Trade and Industry). They are an 800MeV ring TERAS for SR research, a 600MeV ring NIJI II for SR processing and 500MeV ring dedicated to free electron lasers.

Some SR rings have been constructed for lithography in the semiconductor processing by some companies though they are not so widely used in the actual processing up to now. For example SORTEC was established for the SR processing as a joint venture of several companies encouraged by MITI. But it could not be continued to maintain the operation by the joint venture. Fortunately the main part of the machine has been transferred to Thailand.

On the other hand same size SR rings are in operation in the field of basic research and development at universities or individual industries. Typical examples are the Ritsumeikan University SR which consists of a compact super-conducting solid-pole ring as an accelerator and storage ring and the Hiroshima University SR which is a room temperature race truck ring. In both cases microtrons are used as the injectors. The Sumitomo-Electric NIJI-III ring which was originally constructed to be attached to the ETL linac was transferred to the laboratory at the Harima Science Garden City where a 120MeV linac has been constructed as a new injector. The low energy section of the linac is also operated as an injector for free

electron laser (FEL). Sumitomo Heavy Industries, Mitsubishi Electric and NTT are also operating their constructed SRs at their laboratories.

Recently HIT (Himeji Institute of Technology) of Hyogo prefecture is also constructing a storage ring for basic science at the Spring-8 site of the Harima Science Garden City. This 1.5GeV ring, New SUBARU is attached to the injector linac of Spring-8. The unique feature of the lattice structure of this ring is its momentum compaction factor varying from +0.0012 to -0.001.

The first lasing of FEL at the SR ring in Japan was made by TERAS of ETL in 1991. The shortest wavelength of 239nm has been obtained by UVSOR of IMS. On the other hand a few linac-based FELs have become in operation. Two dedicated FEL facilities based-on linacs have been constructed. One is the facility of FELI which has been established as a joint venture laboratory partially funded by MITI. The other is SCARLET of JAERI. The FELI laser is driven by a 165MeV room-temperature S-band electron linac. Since the first lasing in December 1995 FELI has provided excellent photon beams with shortest wavelength of 278nm to users in many fields. However the financial support by MITI to this joint venture project has been finished like SORTEC. It is MITI's policy to initiate the new technology for industries. The cooperating companies of FELI are looking for a successor to continue the operation of FELI. Meanwhile the SCARLET of JAERI which is a laser driven by a 23MeV super-conducting linac with operating frequency of 500MHz has recently realized its stable lasing. Nihon University and Science University of Tokyo are also promoting to construct the compact linac-based FELs.

7 PARTICLE THERAPY

The pioneer work of the particle therapy by cyclotron began at NIRS in 1975. Fast neutrons and protons have been used for cancer treatments. The results for fast neutron therapy was not so excellent and the energy of the proton beam was not enough for treatment of thick tissue. Higher energy proton therapy has been begun at the Tsukuba University with proton beams from the 500MeV booster synchrotron of the 12GeV KEK proton synchrotron. After evaluations for the next dedicated machine Japanese radiologists chose a heavy ion synchrotron as the first priority machine. Thus the HIMAC project started.

But the HIMAC is a very expensive big machine, which is not suitable for a usual hospital. According to the experience of HIMAC, the carbon beam is preferable for therapy. Therefore Hyogo prefectural government has decided to construct a smaller synchrotron which accelerates heavy ions up to carbon for therapy at Harima Science Garden City. The building and the accelerator are under construction. Meanwhile Fukui prefectural government has established the Energy Research Center Wakasa Bay where a 200MeV proton synchrotron

with a multi-purpose tandem accelerator as an injector will be applied for proton therapy. The facility will be completed in this year. At Shizuoka prefecture a proton therapy synchrotron is also under construction. These prefectural projects are partially supported by STA. Some other prefectural governments are also thinking to construct particle therapy accelerators.

On the other hand some universities such as Tsukuba University, Kyoto University and Osaka University have planned the construction of dedicated particle therapy accelerators but Monbusho could not fund all projects. Quite recently Tsukuba University has fortunately got Monbusho's financial support to construct a dedicated proton therapy synchrotron. At Kyoto University the ICR accelerator group has studied a combined function compact synchrotron for the medical group in collaboration with a company. A unique multi-feed untuned RF cavity has been developed by this accelerator group. This principle is applied to the Wakasa Bay and Tsukuba University synchrotrons though the Kyoto University project is not yet funded.

Epoch making decision was done by Ministry of Health & Welfare (MHW). The east hospital of National Cancer Center (NCC) of MHW suddenly began construction of proton therapy facility. The 230MeV compact cyclotron has been recently completed. The commissioning of the cyclotron system is in progress. MHW's beginning of the proton therapy will give a great impact to advanced hospitals.

8 ACCELERATOR AND BEAM PHYSICS

In the "Renaissance" age the nuclear experimentalists constructed their accelerators by themselves at many universities. But in the "Modern" age the accelerators for high energy and nuclear physics are concentrated in a few large national laboratories, while the small accelerator comes to be purchasable. Then the accelerator physicists have also gathered to the large national laboratory like KEK, RIKEN, NIRS, JAERI and JASRI. They are mainly involved to their own present or future project. One of the most active accelerator physics groups related to the future project is the KEK-ATF group which has developed the ATF (Accelerator Test Facility) ring for the future linear collider project, JLC.

On the other hand accelerator groups at the universities are diminishing though some accelerator physicists are still working at a few universities. An excellent example is the above mentioned TARN II experimental group at the former INS, University of Tokyo. The beam physics which is not necessarily related to the real large project is important as a fundamental physics at universities for research and education.

Recently some accelerator and beam physicists not only at universities but also at large national laboratories have started to promote fundamental beam physics in Japan. Topics at their symposia are beam halo formation, three dimensional laser cooling, wake field acceleration and so on.

JAERI-Kansai newly established at Kyoto prefecture is promoting photon beam science. A division of the JAERI-Kansai is constructing a test facility for laser-plasma wake-field acceleration. Preliminary experiments have been done by a joint group with KEK and a few universities. This laboratory is one of the hopeful trials if it is well organized in collaboration with universities.

9 IN THE FUTURE

After termination of NUMATRON project the Japanese nuclear physicists have proposed to construct a high intensity proton accelerator as a "future project" of the INS. Thus INS and KEK have merged to become a new KEK in 1997 to realize this project, JHF. The proposed accelerator system of the JHF consists of a 200MeV linac injector, 3GeV rapid cycling booster synchrotron and 50GeV main synchrotron. JAERI is making design study of a 1.5GeV high intensity proton linac as a spallation neutron source. This may be a future up-grade version of N-arena of JHF. There are some other large "future projects" at some laboratories such as the linear collider (JLC) at KEK, electron-ion colliding rings at RCNP, the second phase of RI beam factory MUSES at RIKEN, an accelerator-based hybrid reactor at KURRI (Kyoto University Research Reactor Institute) and so on.

Meanwhile Japanese economics becomes worse. The restructuring of the government has been recently decided by the diet. Monbusho and STA will merge into a new ministry in 2001. Some institutes or some projects will be re-organized. And very large projects like linear collider could not be realized by one country.

Without the economic problem we will make much more worldwide collaborations to promote accelerator science and technology in the 21st century. In the next century we must be in the "post-modern" or "global" age.

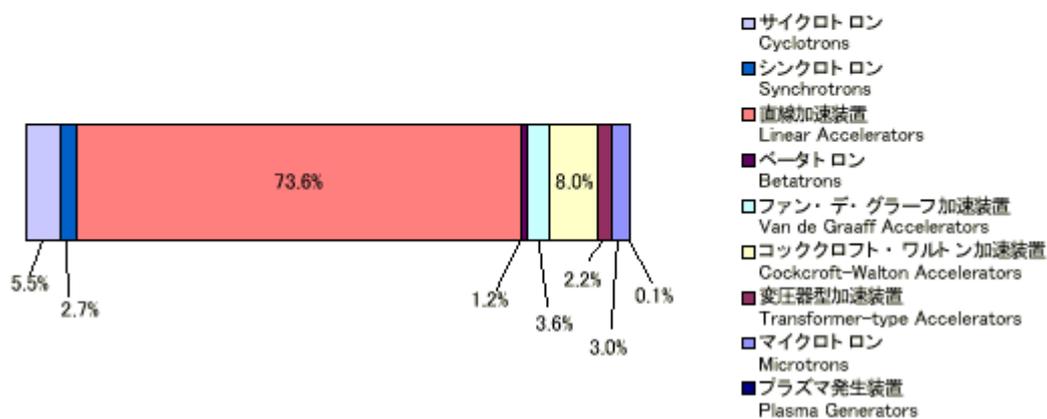
10 REFERENCES

- [1]'Statistics on the Use of Radiation in Japan', published by Japan Radioisotope Association, 1997.
- [2]Information of Japanese accelerators is also obtained in the articles presented at the Japanese accelerator symposium which is held every two years. The latest one was held in October 1997 and the papers of this symposium are published on the 'Proceedings of the 11th Symposium on Accelerator Science and Technology, Spring-8, Harima Science Garden City, Japan,1997'.

1.2.3 発生装置の使用許可台数 (種類別, 機関別)
Number of Radiation Generators in Use (as of March 31,2000)

発生装置 Radiation Generators	機関 Category	総数 Total 構成比 Ratio(%)	医療機関 Hospitals &Clinics	教育機関 Educational Organizations	研究機関 Research Institutions	民間企業 Industrial Firms	その他の機関 Other Organizations
総数 Total		1,136	767	58	163	141	7
構成比 Ratio %		100%	67.5	5.1	14.3	12.4	0.6
サイクロトロン Cyclotrons		63 5.5	25	-	16	21	1
シンクロトロン Synchrotrons		31 2.7	1	3	21	6	-
シンクロサイクロトロン Synchrocyclotrons		- -	-	-	-	-	-
直線加速装置 Linear Accelerators		836 73.6	709	11	47	66	3
ベータトロン Betatrons		14 1.2	6	-	1	7	-
ファン・デ・グラーフ加速装置 Van de Graaff Accelerators		41 3.6	-	16	23	1	1
コッククロフト・ワルトン加速装置 Cockcroft-Walton Accelerators		91 8.0	-	25	33	31	2
変圧器型加速装置 Transformer-type Accelerators		25 2.2	-	1	19	5	-
マイクロトロン Microtrons		34 3.0	26	2	2	4	-
プラズマ発生装置 Plasma Generators		1 0.1	-	-	1	-	-

図4 発生装置の使用許可台数
Fig.4 Number of Radiation Generation in Use (as of March 31,2000)



参考資料 5. 学術会議ワーキンググループ加速器調査						
学術会議調査 (未完成) 病院は除く?						
研究機関	加速器の種類	加速粒子	加速エネルギー	ビーム電流	設置年	主な使用目的
北海道大学						
工学研究科	ライナック	e	45 MeV	60 μ A	1974	中性子発生
東北大学						
工学研究科	ダイナミトロン	p,d, α	0.7- 4.5 MV	3 nA	1974	元素分析
	コッククロフト	p,d, α	0.08-0.6 MV	1 nA	1965	教育
核理研	ライナック	e	30-300 MeV	10 μ A(220MeV)	1966	核物理
	ストレッチャーリング	e	0.62-1.2 GeV	20nA(周回電流)	1999	核物理
サイクロTRIセンター	AVFサイクロトロン	p,d, α ,HI	10- 90 MeV	50 μ A(p)300 μ A(H-)	1998	核物理
	AVFサイクロトロン	p,d	12 MeV	50 μ A(p)	1998	医学利用
電気通信研究所	バンデグラフ	p, α	1- 2.5 MV	150 μ A(p)	1981	半導体研究
金属材料研究所	タンデトロン	p, α ,HI	0.1-1.7 MV	1-10 μ A(α 以外)	1990	材料研究
筑波大学						
加速器センター	タンデムバンデグラフ	p,d,HI	11 MV		1976	多目的
陽子線医学利用研究セ	シンクロトロン	p	250 MeV	4 nA	2001	医学利用
東京大学						
工学研究科	ライナック	e	35 MeV	200nA(1us,peak)	1977	フェムト秒解析
	ライナック	e	18 MeV	1kA (1ps, peak)	1987	フェムト秒解析
原総センター(東海)	バンデグラフ	p,d, α ,HI,微	3.75 MV		1984	微粒子加速
	タンデトロン	p,HI	1 MV		1984	多目的
原総センター(東京)	タンデムバンデグラフ	p,d,HI	5 MV		1995	加速器質量分析
	タンデトロン	p, α ,HI	1.7 MV		1995	分析
東京工業大学						
理工学研究科	バンデグラフ	p, α ,HI	4.75 MV		1978	元素分析
	バンデグラフ	p,d, α	3.2 MV		1976	中性子発生
	タンデムバンデグラフ	p,HI	1.6 MV		1983	元素分析
	ライナック	p,HI	0.24-2.4MeV/u		1984	材料研究
	ライナック	p,HI	2.4-3.4 MeV/u		1985	材料研究
	ライナック (IH)	p	1.7 MeV		1995	加速器開発
	ライナック (IHQ)	p,HI	2.2 MeV		1998	加速器開発
	ライナック (RFQ)	p,HI	0.22-44 MeV		1993	加速器開発
	ライナック (APF-IH)	p,HI	0.085-1.3 MeV		2000	加速器開発
日本大学						
原子力研究所	ライナック	e	125 MeV	200nA(20 μ s)	1998	自由電子レーザー
東京理科大学						
IR FEL研究センタ	ライナック	e	40 MeV	200 nA(5 μ s)	2000	外自由電子レーザー
名古屋大学						

研究機関	加速器の種類	加速粒子	加速エネルギー	ビーム電流	設置年	主な使用目的
工学研究科	バンデグラフ	p,d, α ,e	3.75 MV	0.1-100 μ A	1987	中性子発生
	バンデグラフ	p, α	2.0 MV	20 μ A	1981	表面解析
	イオン注入装置	p,HI	20-200 kV	10mA	1980	材料研究
	年代測定センター	タンデトロン	C	2.5 MV	30 μ A(C)	1986
	タンデトロン	Be(改造中)	1.8 MV	1.5 μ A(BeO)	1980	年代測定
京都大学						
理学研究科	タンデムバンデグラフ	p, α ,HI	7.5 MV			加速器質量分析
工学研究科	タンデトロン	p, α ,HI	1.7 MV	50 μ Amax	1988	イオン物質相互作用
	バンデグラフ	p, α ,HI	2.5 MV	50 μ A	1987	重イオン核物性
	バンデグラフ	e	2 MV	250 μ A	1987	X線照射
	コッククロフト	p,HI	0.25 MV	100 μ A	1978	金属イオン物性
化学研究所	ライナック(RFQ)	p	7 MeV			
	ライナック	e	100 MeV			
	電子蓄積リング	e	300 MeV			
エネルギー理工研	タンデトロン	HI	1.7 MV			元素分析
	タンデトロン(SE)	α	1 MV			元素分析
原子炉実験所	ライナック	e	46 MeV	500 mA(4 μ s)	1965	中性子発生
	変圧型静電加速器	d	300 kV	5 mA	1976	中性子発生
立命館大学						
	超伝導シンクロトロン	e	570 MeV	300 mA(蓄積電流)		放射光
	マイクロトロン	e	150 MeV	3 mA		入射器
	常電導シンクロトロン	e	50 MeV	(周長150m)		放射光、FEL
	マイクロトロン	e	20 MeV	8 mA		入射器
大阪大学						
工学研究科	コッククロフト	d	300 kV	20 mA	1981	中性子発生
	ライナック	e	165 MeV	80 A(24 μ s)		自由電子レーザー
	ライナック	e	20 MeV	40 A(11.2 μ s)		自由電子レーザー
核物理研究センター	リングサイクロトロン	p,d, α ,HI	400 MeV(p)		1991	原子核物理
産業科学研究所	ライナック	e	38 MeV	81nC(ピコ秒単パルス)		フェムト秒分光
	ライナック	e	122 MeV	400 mA(2 μ s)		陽電子発生
近畿大学						
原子力研究所	コッククロフト	d	150 kV		1962	中性子発生
神戸商船大学						
	タンデムバンデグラフ	p, α ,HI	1.7 MV	1 μ A	1997	分析
	パルスビーム発生器	p,HI	0.4 MV	20 kA(60ns)	1980	大強度パルス
姫路工業大学						
高度研	電子蓄積リング	e	1.0 GeV	100 mA(蓄積電流)	1998	放射光
広島大学						
工学部	バンデグラフ	p, α ,HI	0.2-2.5 MV	150 μ A(p)	1983	元素分析、表面解析

研究機関	加速器の種類	加速粒子	加速エネルギー	ビーム電流	設置年	主な使用目的
放射光科学研究セ	電子蓄積リング	e	700 MeV	200 mA (蓄積電流)	1999	放射光
原爆放射能医学研	コッククロフト	p,d, α	3 MeV	1 mA	1982	中性子発生
九州大学						
工学研究科	コッククロフト	d	500 kV	5 mA	1982	中性子発生
理学研究科	タンデムバンデグラフ	p,d, α ,HI	10 MV	1 μ A(p)	1980	核物理
応用力学研究所	タンデトロン	p, α ,HI	1 MV	1 μ A(p)	1991	材料研究
アイソトープ協会						
仁科記念サイクロセンター	サイクロトロン	p,d	8.3MeV,16.9MeV	50 μ A	1990	医学利用
高エネルギー加速器研						
	シンクロトロン	p	12 GeV	0.6 μ A		素粒子物理
	シンクロトロン	p	500 MeV	8 μ A		入射器、中性子源
	ライナック	p	40 MeV	30 μ A		入射器
	ライナック(RFQ)	p	4 MeV	600 μ A		加速器開発
	ライナック	e	8 GeV	0.5 μ A		入射器
	リング・コライダー	e, e+	8 GeV,3.5 GeV	800 mA(e),1A(e+)		素粒子物理
	電子蓄積リング	e, e+	3 GeV	450 mA (蓄積電流)		放射光
	電子蓄積リング	e	6.5 GeV	100 mA (蓄積電流)		単バンチ放射光
	ライナック	e	46 MeV	20 μ A		陽電子生成
	ライナック	e	1.5 GeV	2 nA		加速器開発
	ダンピングリング	e	1.5 GeV	2 nA		加速器開発
日本原子力研究所						
東海研究所	タンデムバンデグラフ	p, α ,HI	18 MV	3 μ A(p)	1982	核物理
	ライナック (超伝導)	e	20 MeV	4mA	1993	自由電子レーザー
	変圧型静電加速器	d	450 kV	25 mA	1981	中性子発生
	バンデグラフ	p,d	4 MV	50 μ A	2000	中性子校正場
高崎研究所	AVFサイクロトロン	p, α ,HI	5- 80 MeV((p)	30 μ A(p)	1993	多目的
	タンデムバンデグラフ	p,HI	3 MV	5 μ A(p)	1993	多目的
	コッククロフト	p,d, α ,e	3 MV	100 μ A(p)	1993	多目的
	イオン注入装置	HI	400 kV	30 μ A(P)	1993	多目的
放射線医学総合研究所						
	シンクロトロン	α ,HI	800 MeV/u	2 \times 10 ⁻⁹ pps	1994	医学利用
	サイクロトロン	p,d,HI	70 MeV(p)	50 μ A(p)	1974	医学利用
	タンデトロン	p,d	3.4 MeV	5 μ A(p)	1999	元素分析
産業技術総合研究所						
	ライナック	e	350 MeV	100 mA (ピーク電流)	1980	陽電子生成
	電子蓄積リング	e	300-800 MeV	300 mA (蓄積電流)	1981	放射光
	電子蓄積リング	e	150-600 MeV	200 mA (蓄積電流)	1989	放射光
	電子蓄積リング	e	250-500 MeV	250 mA (蓄積電流)	1980	自由電子レーザー
理化学研究所						

研究機関	加速器の種類	加速粒子	加速エネルギー	ビーム電流	設置年	主な使用目的
分子科学研究所	リングサイクロトロン	p,HI	540 MeV			核物理
	電子蓄積リング	e	750 MeV	300 mA (蓄積電流)	1983	放射光
若狭湾エネルギー研究セ						
	シンクロトロン	p, α ,HI	200 MeV	10 nA(p)	2000	多目的
SPring 8	電子蓄積リング	e	8 GeV	100 mA (蓄積電流)	1996	放射光
佐賀SL施設	電子蓄積リング	e	1.4 GeV	300 mA (蓄積電流)	建設中	放射光
○原子力委員会事務局 注						
産業技術総合研究所については、上記表の加速器以外に以下の加速器が設置されています。						
	加速器の種類	加速粒子	加速エネルギー	ビーム電流	設置年	主な使用目的
	バンデグラフ	p,d, α ,HI	4 MeV	50 μ A(p)	1983	放射線標準、分析
また、ライナックの加速エネルギーの正確な数値は以下のとおりです。						
誤：350MeV						
正：60-500MeV						

原子力分野における加速器の
研究開発について
(中間報告)

平成 12 年 10 月 1 日

日本学術会議核科学総合研究連絡委員会

原子力基礎専門委員会

「原子力分野における加速器の研究開発」

ワーキンググループ

日本学術会議核科学総合研究連絡委員会原子力基礎研究専門委員会
「原子力分野における加速器の研究開発」ワーキンググループメンバー

北海道大学	鬼柳 善明 教授
東北大学	石井 慶造 教授
高エネルギー加速器研究機構	柴田 徳思 教授
東京大学	中沢 正治 教授
	柴田 裕実 助教授
東京工業大学	服部 俊幸 教授
名古屋大学	山根 義宏 教授
京都大学	今西 信嗣 教授
	川瀬 洋一 教授
大阪大学	田川 精一 教授
座長 九州大学	的場 優 教授

趣旨：加速器は古くから素粒子、原子核、放射線などの研究のための実験装置であったが、近年我が国の一般病院に診断・治療用電子加速器が 800 台以上設置されているなど、その利用は極めて幅広くなっている。医療分野に加えて、非破壊検査、照射処理、材料改質、分析、微細加工など、産業分野での利用の広がりには目覚ましい。素粒子、原子核、放射線はもとより、物性、材料、地球、宇宙、生命、考古などの分野における成果は枚挙のいとまがない。また最近、未来の核廃棄物の核変換処理や新しいエネルギーシステム用として加速器駆動未臨界炉への期待が高まっている。このような状況を考えるとき、原子力分野の加速器の研究開発の現状について十分な検討と議論を行って、これら利用の広がりを支えるとともに、様々な施設の役割を明確にして新たにバランスの取れた研究の推進を図ることが特に必要と考えられる。

現在様々な研究所（日本原子力研究所、高エネルギー加速器研究機構、・・・・・・）の大型加速器施設において多様なプロジェクトが実施され、あるいは計画されている。これらに関わる加速器の研究開発についてはプロジェクトの目的である学問分野を中心に関連する様々な分野を含む広い場で検討されるべき性格のものであり、各プロジェクトについて現在国や研究者グループなどの多くの委員会で継続的に検討されている。一方近年、大学における原子力分野での加速器に関する研究開発については検討が十分でなく国の研究資源の配分から多く抜け落ちていることが指摘される。国の大型プロジェクトが大研究所に集中化されていることに加えて、原子力分野では核分裂炉及び核融合炉についての研究開発の検討が急務とされる傾向にあったことも事実である。加速器の幅広い利用や各種大型プロジェクトを支えているのは大学で教育を受けた研究者・技術者であることが指摘されるべきである。また大学の中小型加速器による工夫されたユニークな研究からも多くの新しい知見が得られてきたことを忘れてはならない。

当然であるが、実験に基づく教育研究は今後とも極めて重要なことは言うまでもない。最近の大学改革の中で大学における原子力の基礎や放射線の計測に関わる実験的教育研究の不足を痛感する研究者も多い。今後新たに教育研究用の原子炉を建設することは残念ながら容易でなく、放射線実験技術に関わる先端的教育研究分野での各大学における中小型加速器施設の果たす役割は大きい。

以上の点から、大学における加速器の研究開発について現状を調査し、将来計画を検討することが緊要である。なお京都大学原子炉実験所については、当施設が原子力研究の大学の全国共同利用研究施設であり、また本ワーキンググループでの検討課題にも関連が深いので、研究用原子炉の今後の取り扱いとともに検討されるべきであると考えられる。

1. はじめに

加速器は 20 世紀の前半、放射線の発見とその計測法の開発に引き続き原子炉の発明と相前後して発明されたものである。現在その利用は当初からの基礎研究用としてとともに、産業用及び医療用として大きく広がっている。この分野の研究開発は、国のいくつかの研究機関を中心に幅広く行われているが、同時に大学の果たしている役割は大きい。日本学術会議核科学総合研究連絡委員会原子力基礎研究専門委員会では、原子力分野の、特に大学における、加速器の研究開発について、これまでの研究成果と現状を調査するとともに今後の研究の進め方について検討するワーキンググループを設置した。ここでは、まずこのような活動を行うことについて、その趣旨と検討の視点について討議の結果を中間報告として報告する。

2. ビーム利用分野の広がり

加速器は古くから素粒子、原子核、放射線などの分野の研究用の実験装置であり、現在もこの分野の研究に重要な役割を果たしている。しかし近年例えば我国の一般病院に電子線形加速器（ライナック）が 800 台以上設置されているなどその利用は極めて幅広くなっている。特に、非破壊検査、照射処理、材料改質、分析、微細加工など産業分野での利用は目覚ましい。素粒子、原子核、放射線はもとより、物性、材料、地球、宇宙、生命、考古など理工学における成果は枚挙のいとまがないほどである。

最近原子力分野における放射線の利用について我が国の国内総生産（GDP）への直接的寄与の形で調査が行われた。調査の結果、放射線利用は 1997 年ベースで約 8 兆円の寄与があると推定された。この額は原子力のエネルギー利用（原子力発電）として知られている 5 - 6 兆円と比較しうる規模のものである。米国においてこの傾向は更に顕著であるとの報告もある。このような大きな経済効果をもたらす利用としては、上述のように特に産業分野と医療分野で著しい。具体的には古く小型の装置で明らかにされた基礎原理が機器の形で利用されている場合が多い。もちろん大型プロジェクトの中で行われた要素機器の開発研究からの寄与も大きいと考えられる。

原子力分野では最近核廃棄物の核変換処理や新しいエネルギーシステム用として加速器駆動型未臨界炉への期待が高まっている。未臨界の体系を大強度中性子ビームによって定常状態に制御し、大量の中性子やエネルギーを発生させようとするものである。21 世紀後半に予想される世界的なエネルギー危機に対する通常の原子炉のオプションとしての役割が期待されている。このような形の原子炉システムの実用化にはコストパフォーマンスに優れた高効率の加速器の開発が鍵を握っているが、同時に定常未臨界体系の性質についての詳細な研究が必要とされる。

原子力分野は古く放射線の発見とその計測技術の開発及び加速器と原子炉の発明から始まったといえるが、原子力発電の実用化により長年にわたって原子炉が大きい存在であった。しかし現在上述のように加速器などによる放射線の利用の広がりが著しく、場の科学の

典型であった原子炉とビームの科学としての加速器が相補う形で発展することになりつつあると言える。今後とも加速器の研究開発について十分な検討と議論を行って、これらの利用の広がりを支え、また新たな技術を生み出すことは大いに期待される場所であるが、特に様々な研究施設の役割を明確にして、バランスのとれた研究の推進を図ることが必要とされている。

3. 加速器に関わる大型プロジェクトの推進

現在様々な研究所の大型加速器施設においては加速器に関する多様なプロジェクトが推進されあるいは計画されている。原子力分野では、日本原子力研究所、高エネルギー加速器研究機構、理化学研究所、放射線医学総合研究所、電子技術総合研究所、SPRING8 などにおける研究が重要な役割を果たしている。この中で、日本原子力研究所は設置目的自体が原子力分野であるが他の研究所は必ずしもそうではない。しかし設置目的が原子力分野であるなしに関わらず、原子力分野への貢献が期待されることも事実である。更に各プロジェクトを支える加速器施設の設計と運用は当然原子力分野との関連が深く、これらのプロジェクトを支える研究者は原子力分野で活躍することも多いことが指摘される。

京都大学原子炉実験所は日本学術会議の勧告などを受けて設立された原子力基礎研究に関わる大学の全国共同利用研究機関であり、5 MW研究用原子炉を中心装置として長年にわたって共同利用を行い、特に中性子ビームの利用に関して、大きな成果を挙げてきている。また併設されている臨界実験装置と電子加速器は原子炉物理あるいは電子ビーム科学の分野の教育研究に全国的に活用されている。現在長年の共同利用研究の歴史を踏まえて、21世紀に向けて新たな形で研究を展開すべく、加速器駆動型未臨界炉の基礎研究を中心とする将来計画が検討されている。特に、京都大原子炉実験所は大学の共同利用機関として、各種の大型研究機関と大学とのインターフェイス的な役割も期待されており、十分な検討を期待する。大学では核燃料物質の取り扱いが年々難しくなっており、核燃料物質を使用する加速器に関わる重要な研究施設として京都大学原子炉実験所が果たす役割は非常に重要なものがある。

最近になって日本原子力研究所の中性子科学研究計画と高エネルギー加速器研究機構の大型ハドロン計画、すなわち両研究所の重要な将来計画が統合されることになった。本プロジェクトは高強度の高エネルギー陽子の核破砕反応からの大量の中性子を利用した中性子利用研究と高強度のイオンビームと同時に発生する π 、 μ 、 K 、 ν などの二次粒子ビームによる新しい原子核・素粒子研究の推進を図るものであり、我が国あるいは世界的に長年にわたって計画の実現が期待されてきた。このプロジェクトの推進によって物質科学及び生命科学の分野の研究に大きな進展が期待される。同時に、核廃棄物の核変換技術の基礎研究が初めて実現する可能性がある。また従来我が国の様々な大型プロジェクトが行政的観点から分断されることが多かったが、この統合計画はそれを打ち破る最初のプロジェクトとしても期待が大きい。

また日本原子力研究所の放射線・ビーム利用学際研究及び光量子ビーム研究における加速器関連研究、高エネルギー加速器研究機構における物質と力の根源の解明を目指す B ファクトリーあるいは新直線加速器研究、理化学研究所における極限状態の元素の性質の解明に挑戦する RI ビーム研究、放射線医学総合研究所における粒子線がん治療あるいは宇宙の人間環境における放射線の影響研究、電子技術総合研究所における電子ビーム技術の高度利用あるいは SPRING8 施設における光量子の高度利用に関する研究は、我が国のみならず世界にとっても重要な研究として位置付けられ、国民の付託と財政的支援を背景に計画の精査を行いつつ推進されることが期待される。

これら国の大型プロジェクトに関わる加速器の研究開発の進め方については、プロジェクトの主目的である学問分野の研究者を中心に関連する様々な分野を含む広い場で検討されるべき性格のものである。各プロジェクトについては現在国や研究者グループなどの多くの委員会組織で継続的に検討されているが、本ワーキンググループでは原子力分野の研究開発の観点から、検討を行うことが適当と考えられる。

4. 大学における中小型加速器研究の役割

大学においては、1960年代から原子力のカリキュラムを総合的に実施している学科・専攻などを中心に、原子力分野の加速器施設が整備され、基礎研究が行われてきた。北海道大学の電子線形加速器によるパルス冷中性子源及び中性子機器と短寿命化学種の高速化学反応機構に関する研究、東北大学のダイナミトロン型静電加速器による粒子ビームによる材料工学、PIXEの医療・環境・考古学等への応用、MeV中性子の核データ研究、東京大学の電子線形加速器による全国共同利用とフェムト秒電子パルスの生成と高速過渡現象の観測研究、東京工業大学の小型の静電加速器、タンデム型と重イオン加速器による keV 領域中性子核データ、重イオン慣性核融合の基礎核データや高強度ビーム応用、ビーム物理学研究、名古屋大学のバンデグラフ加速器による中性子放射化断面積の系統的測定研究、京都大学の小型の静電加速器とタンデム型重イオン加速器による重イオンと物質との相互作用とその応用に関する研究、大阪大学の強力 14MeV 中性子源による核融合中性子工学の研究、近畿大学の小型中性子源による繰り返し放射化法の有効利用に関する研究、神戸商船大学の小型タンデム型静電加速器による海洋環境科学や核融合炉材料分析への応用研究、九州大学のコッククロフト加速器による前平衡過程核データ研究の確立や放射線の位置計測・超伝導計測研究など、特筆すべき成果を挙げてきている。これらの施設のいくつかには臨界（未満）実験装置が設置され、少数であるが加速器との結合が試みられており、新たな展開が期待される。

また、これらの大学に設置されている多様な利用を念頭においた（学際利用を目指した）加速器、例えば東北大学のサイクロトロン及び電子加速器による中性子核物理学、中性子散乱研究、及び RI を用いた生体機能診断（PET）の研究、東京大学のタンデム型加速器や小型軽・重イオン照射加速器による加速器質量分析、二重照射核融合材料あるいは微粒子加

速と衝突に関する研究、東京工業大学バンデグラフ加速器による薄膜の放射性物性、原始地球大気による生命発生アミノ酸分析や環境汚染物質、考古学の PIXE 元素分析などの研究、名古屋大学のバンデグラフ加速器とイオン注入装置を組み合わせたイオンビーム表面反応解析研究、京都大学の電子加速器やタンデム型静電加速器によるビーム物理や加速器質量分析研究、大阪大学の電子加速器やサイクロトロンによるフェムト秒パルスラジオリシス及2次量子ビームによる放射線化学・物理や高エネルギーイオンによる核物理研究、九州大学のタンデム型加速器や小型静電加速器などによる偏極中性子散乱や荷電粒子前平衡核反応研究などは原子力基礎研究の成果として記録されるべきである。このように中小型加速器による工夫されたユニークな研究から多くの新しい知見が得られてきていることを忘れてはならない。もちろん大型研究施設の共同利用研究の中で大学の研究者はユーザーとして重要な成果を挙げているが、自大学に一定の施設を有する研究者グループの寄与が大きいことも指摘されなければならない。

今後とも実験に基づく教育研究が必要なことは言を待たない。最近の大学改革の動きの中で我国の教育研究機関における原子力の基礎や放射線の計測に関わる実験的教育研究の不足を痛感する関係者も多い。今後新しい施設として教育研究用の原子炉を建設することは残念ながら容易ではなく、放射線実験技術に関わる先端的教育研究分野での大学における中小加速器施設の果たす役割は大きい。

以上のように、大学における中小型の加速器施設における研究が様々な面で重要な役割を果たしていることが認識されるが、近年大学における原子力分野での加速器に関する研究開発について検討が十分でなく国の研究資源の配分からも多く抜け落ちていることが指摘される。多くの装置が老朽化し、旧式になっているにもかかわらず、更新が十分にはなされていない。国の大型プロジェクトが大研究所に集中化される傾向にあることに加えて、原子力分野では核分裂炉及び核融合炉についての研究開発の検討が急務とされたことも事実である。大学に於ける原子力分野の加速器の研究開発について早急に施策が打ち出されることが望まれる。

5. 学際分野、地域あるいは社会との交流と協力

前節で一部述べたが大学には幅広い分野の利用を目的とした、いわゆる「学際利用」研究を目指した加速器が設置されている場合も多い。筑波大学のタンデム加速器は長年このような目的で利用され成果を挙げてきているが、最近「電子加速器あるいは放射光施設」が、日本大学、東京理科大学、立命館大学、姫路工業大学、及び広島大学に設置された。これらは原子力分野を念頭においた加速器とは言えない装置であるが、原子力分野としてもユーザー分野として協力し、また活用することが望まれる。

筑波大学では粒子線がん治療を長年高エネルギー加速器研究機構のブースターシンクロトロンを利用して行い、放射線医学総合研究所とともに我が国のこの分野のパイオニアとして重要な役割を果たしてきた。現在、付属病院に新しい独自の治療施設が建設されつつあ

るが、この施設は総合病院に設置された最初の本格的施設として期待が大きい。粒子線がん治療施設としては国立がんセンター、静岡県、福井県、兵庫県に新しい施設が建設されつつある。これらの施設の建設運用には原子力分野として、技術の基礎を支える役割が期待されていることは当然である。福井県の施設は、がん治療だけでなく幅広い利用を念頭に建設が進んでおり、地域の産業の基盤強化としての役割も期待されている。近隣の大学の研究者の協力と活用が特に望まれる。

現在我が国では子供達あるいは若者の理科離れが憂慮される一方で、科学技術立国あるいはIT革命のようなキーワードが叫ばれている。我が国の将来に科学技術が必要であるということ言うまでもないが、これだけでは若者の心をとらえることは難しい。科学あるいは技術が必要不可欠ということとともに、科学し技術することが楽しいものであるということが肌で分かることが重要であろう。子供達あるいは若者が自分達の身近な大学で魅力的な実験装置を前にして新しい学術研究の話聞く機会が特に求められているのではないだろうか。大学の研究の第一線で使われている加速器が市民や中高生の科学技術に対する啓発に大きな役割を果たしている例も多い。

6. おわりに

以上、原子力分野における加速器の研究開発について、主に大学における加速器研究の役割を整理すると次のようにまとめられる。

- 1) GDP への直接的寄与に象徴される近年の加速器利用の大きな広がりには中小型装置による成果が重要な役割を果たしている。中小型装置による研究は今後も重要と考えられるが、近年の明確な応用の広がりを意識した研究はこれから始まると考えるべきである。大学における中小型加速器施設における研究の役割は大きい。(中小型加速器施設におけるユニークで多様な研究の推進)
- 2) 大型プロジェクト研究には大学の研究者や学生の寄与が不可欠なことは言うまでもない。しかし大学において十分な研究が行われずに、直接大型プロジェクトに参加することでは研究者や学生が能力を十分に発揮することは簡単でない。また大型プロジェクトにおける要素機器の開発研究が加速器の利用の広がりには重要な役割を果たしてきているが、このような研究についても各大学における研究が相補う役割を果たしており、この点でも大学における研究は重要である。(大型加速器施設における大学を拠点とする先端的共同利用研究)
- 3) 最近の加速器の幅広い利用や各種大型プロジェクトを支えているのは全て大学において教育を受けた研究者・技術者であることを忘れてはならない。次世代の原子力基礎分野を支える人材養成には全国的な観点から、拠点的に研究施設を整備し、先端的な研究の中で高等教育を行うことが必要される。(加速器・ビーム・放射線などに関する高等教育の実施)
- 4) 京都大学原子炉実験所については長年の中性子ビーム利用に関する成果を踏まえて、

21世紀に向けて新たな形で研究を展開すべく、加速器駆動型未臨界炉の基礎研究を中心とする将来計画が検討されている。場の科学としての原子炉とビームの科学としての加速器をバランスよく配した研究機関として、大型研究機関と大学とのインターフェイス的な役割を果たしつつ新たな出発を迎えることは望ましいところである。大学では最近、核燃料物質の取り扱いが困難になっており、加速器に関わる研究を核燃料物質を使用して挑戦する研究機関としての役割は非常に重要である。(京都大学原子炉実験所の役割)

- 5) 学際的利用や地域の産業の基盤強化を目指した加速器など、他分野の研究を念頭においた加速器施設については、原子力分野も一ユーザー分野として研究に協力し、活用することが望まれる。また我が国では若者の理科離れが憂慮されているが、科学し技術することが楽しいものであることが肌で分かることが大事であり、身近な大学の第一線の加速器施設が市民や中高生のこれからの科学技術に関する啓発に大きな役割を果たすことが期待される。(学際分野、地域、社会との交流と協力)

以上の点から、我が国の特に大学の原子力分野における加速器の研究開発の現状について十分に調査と検討が行われることが必要である。京都大学原子炉実験所については、当施設が原子力研究の大学の全国共同利用研究施設であり、また本ワーキンググループでの検討課題にも関連が深いので、研究用原子炉の今後の取り扱いとともに検討すべきである。

本ワーキンググループでは3年程度の時間をかけて大学の原子力分野における加速器の研究開発について、これまでの成果と現状の調査を行い、将来計画を検討して、最終報告書をまとめる予定である。各方面のご協力をぜひお願いしたい。