

拠点大学交流事業評価報告書

電子加速器における
加速器、高エネルギー物理学と放射光科学の研究

平成 21 年 9 月 25 日

拠点大学交流事業評価委員会

拠点大学交流事業評価報告書

1. はじめに	3
2. 拠点大学交流事業の概要	5
2. 1 趣旨	5
2. 2 背景と経過	5
2. 3 事業の研究内容	5
3. 各国の状況	6
3. 1 中国	6
3. 1. 1 概要	6
3. 1. 2 SSRF	6
3. 1. 3 IHEP	8
3. 2 韓国	10
3. 2. 1 概要	10
3. 2. 2 PAL	11
3. 3 インド	14
3. 3. 1 概要	14
3. 3. 2 VECC	14
3. 3. 3 RRCAT	16
3. 3. 4 IUAC	18
3. 3. 5 TIFR	18
3. 3. 6 BARC	20
4. 各プロジェクトの成果と評価	22
A1, A2, A3, A4, A5, A6	22
B1, B2, B3, B4	42
C1, C2	55
5. 総括と総合評価	60
5. 1 事業の役割と国際協力への貢献	60
5. 2 各国の現状	61
5. 3 各プロジェクトの顕著な成果	62
5. 4 中間評価の提言の遂行についての検証	63
5. 5 今後の発展に向けた課題	64
結語	65

6. 補足資料	66
I 評価委員会構成メンバーリスト	66
II 評価委員会議事日程	66
III 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構拠点大学交流事業 (加速器科学分野) 研究計画委員会規程	67
IV 拠点大学交流事業 (加速器科学分野) 研究計画委員会委員リスト	68
V 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構拠点大学交流事業 (加速器科学分野) 評価委員会の組織、運営等に関する要項	69
VI 拠点大学交流事業参加グループリスト	70
VII 略語表	72

1. はじめに

日本学術振興会の拠点大学交流事業の一環として「加速器科学」の研究事業が発足したのは2000年であったが、10年間の予定で始められた事業なので2010年をもって終了する。その終了にあたり、この事業を顧みてその成果を総括し評価する為に本評価委員会が発足した。

この事業は、アジアにおける長期にわたる組織的な加速器科学分野の交流を目的とした初めての試みとして内外からその成果が注目されている。

この10年間のアジア諸国の経済的発展と科学の進歩は目を見張るものがあったが、そのような歴史的な流れの中であって、この事業が加速器科学の発展に大きな役割を果たしたことは特筆すべきことであった。更にこの期間中のこの分野の発展に伴って事業の果たすべき役割に大きな変化があったことは見過ごせない出来事であった。

この事業の研究テーマは、1. 電子加速器に関する研究、2. 素粒子物理学に関する研究、3. 放射光科学に関する研究の3分野に大別される。

この事業の前半が終了した2004年にそれまでの事業の成果を総括し、後半に実行すべき活動の指針を示す為に中間評価委員会が組織され、報告書が提出された。その委員会の構成メンバーは長島順清（大阪大学：高エネルギー物理学、委員長）、野田章（京都大学：加速器科学）、太田俊明（東京大学（当時）：放射光科学）、辻村達哉（共同通信）の4名であった。

中間評価報告が提出された時点での相手国は中国一国で、その実施に当たる拠点機関は中国科学院高能物理研究所、協力機関は上海応用物理研究所などであった。

2005年より韓国が、また2006年よりインドが相手国として加わり、それに伴って研究分野も多岐にわたることとなった。

この事業の終了にあたり、この事業全般の実績を点検して、その科学的、社会的意義を評価して、将来の国際交流と共同研究に対する提言を行うべく最終的な報告書を提出することが本評価委員会の目的である。

委員会は政池 明（京都大学：素粒子物理学、委員長）、太田俊明（立命館大学：放射光科学）、小泉成史（科学ジャーナリスト、金沢工大客員：科学論）、栗木雅夫（広島大学：加速器科学）の4名で構成された。

委員会ではまず各プロジェクトの日本側代表者よりそれぞれの研究の概要、成果、問題点、今後の計画などについて口頭および文書による報告を受けた。プロジェクトの数は加速器関係6件、素粒子物理学関係4件、放射光科学関係2件である。

続いて委員会は相手国の拠点機関と協力機関を訪問して、共同研究の経過、実施状況、将来計画などについて説明を受け、研究現場の視察を行った。

訪問した研究機関は下記の8機関である。

中国： 高能物理研究所（北京）

上海応用物理研究所（上海）

韓国： PAL (Pohang Accelerator Laboratory, Pohang)

インド： VECC (Variable Energy Cyclotron Centre, Kolkata)

RRCAT (Raja Ramanna Centre for Advanced Technology, Indore)

IUAC (Inter-University Accelerator Centre, Delhi)

TIFR (Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai)

BARC (Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai)

本報告書はこれらの報告と調査に基づいて作成された。

この評価報告が今後の国際共同研究の指針を立てる上で少しでも役立つならば幸いである。

なお、この報告書を作成するにあたり高エネルギー加速器研究機構の黒川眞一、野崎光昭、山内正則、細山謙二、本田融、前田憲司の諸氏に協力をお願いし、一方ならぬお世話になりましたことを心より感謝申し上げます。

2. 拠点大学交流事業の概要

2.1 趣旨

アジアにおける加速器科学の研究・開発は、本事業の参加国である日本、中国、韓国、インドの4カ国で最も活発に行われている。この交流事業は、アジア域内の研究交流促進により、アジア全体の加速器科学研究の水準向上、更には将来の対等な協力関係構築の礎となること目指している。

2.2 背景と経過

歴史的に見ると加速器の開発は素粒子・原子核の研究が牽引しており、CERN や Fermilab 等のように欧米では素粒子研究に特化した加速器研究所が存続している。一方、加速器科学の後発であるアジアの加速器研究所では、日本の KEK や中国の IHEP 等のように加速器開発の中核研究所においては素粒子・原子核研究用加速器だけでなく、放射光源や中性子源の開発にも力を入れている。従って、加速器科学分野におけるアジアの拠点機関間の共同研究は、素粒子・原子核物理学から物質・生命科学まで多岐にわたることが必然であり、そのことが分野間の研究交流の輪を広げ、学際的研究の芽を育てる土壌ともなっている。

加速器分野のアジア拠点大学交流事業「電子加速器における加速器、高エネルギー物理学と放射光科学の研究」は、2000年に日本-中国間でスタートした。2005年からは韓国が加わり、更に2006年からインドも参加して幅広い交流事業として発展し、10年経過した2010年にいよいよ最終年度を迎える。

本事業により様々な共同研究が行われ、セミナーが開催された。数多くの大学院生・若手研究者が支援を受けて研究成果をあげた。本事業開始前後の状況は、日本からの一方的な技術援助の色彩が強かったが、この間に交流相手国、とりわけ中国の加速器科学の水準は飛躍的に向上し、対等な協力関係の構築が出来る環境が整いつつある。

2.3 事業の研究内容

研究テーマは電子加速器そのものに関する研究と、電子加速器を用いる研究に大別され、また後者は、素粒子物理学及び放射光科学という2分野からなり、具体的なテーマは以下のとおりである。

(1)電子加速器に関する研究

リニアコライダーと呼ばれる直線型電子陽電子衝突型加速器、KEKB や BEPC-II のような円形型電子陽電子衝突型加速器、そして放射光発生用円形加速器に関して、加速器の高性能化に関する研究を行う。

(2)素粒子物理学に関する研究

リニアコライダーを用いて行う素粒子物理学に関しての理論的な研究と、研究に用いられる測定器についての研究を行い、また、円形電子陽電子衝突型加速器である B ファクトリー (KEKB) およびタウチャーム・ファクトリー (BEPC-II) を用いた実験的な研究を行う。

(3)放射光科学に関する研究

放射光発生用円形電子加速器から発生する放射光を用いて、物質の構造や機能を研究する。

3. 各国の状況

3. 1 中国

3. 1. 1 概要

a. 中国の科学・技術政策

急速に経済発展を遂げている中国はその経済力を背景に科学技術大国への道を邁進している。文化大革命(1966-1976)で研究者は迫害され、科学技術は停滞した。しかし、70年代末、鄧小平副首相による近代化路線で状況は一変した。科学は将来の発展計画の主要な推進力として見直され、重点的研究分野としてコンピューターや宇宙開発などが指定された。その流れで、有人宇宙船「神舟」の打ち上げに成功するなどの成果があがっている。

2006年2月に発表された「国家中長期科学技術発展計画」は2020年までの目標を設定している。基本的な考え方は「自主创新・重点飛躍・未来牽引」であり、創新=イノベーションを重視している。数値目標として研究開発費の対GDP投資比を2.5%以上にすること(2006年は1.43%、2010年までに2.0%)、中国人による発明特許・科学論文引用数を世界5位以内にするなどなどを挙げている。

中国の研究開発の総額は急激に増加しているが、日、米、欧に比べてまだ少ない。研究開発費の内訳では、基礎研究は少なく、応用研究や開発研究が多い。研究論文数も飛躍的に増えており、論文総数では日本と同じレベルにあるが、論文の質を示す相対引用度はまだ低いレベルにある。個別分野での論文比較では材料科学、化学などと並んで物理学が目立っている。物理学は論文数で世界第4位、トップ10%論文数第7位、被引用度数第6位となっている。(日本は論文数2位、トップ10%論文数3位、被引用度数3位)

全分野の研究者数は2006年で中国122.4万人と米国やEUと同じレベルで、日本の71万人を大きく上回っている。また、将来の研究者予備軍となる大学入学者数は日本の約7倍でその約半数が理工系に進んでいる。これに対し日本の大学進学者の理工系への進学は約3割にすぎない。さらに高校レベルをみると科学オリンピックでは中国は他を圧倒している。こうした中、欧米の研究機関は中国との連携を図るべく動き始めており、特に豊富な人材への関心が高まっている。

b. 全体の印象

2008年北京でオリンピックを成功させ、2010年には上海で万博開催を予定している中国は、今や世界においてアメリカと並ぶ経済大国として近年著しい発展を遂げている。2004年の中間評価以降、この5年間にさらに大きな変貌を遂げた。北京では5年前高能研の近くにたくさんあった庶民的な街並みは姿を消し、広い道路に変わっていた。上海の変わりようも目覚ましく、5年前にはただの畑地でしかなかった広大な敷地にモダンな放射光施設(SRRF)が建ち、その周辺にも科学関連の企業が林立している。市の中心にある世界貿易センタービルに案内してもらったが、高さ492mのアジアで最も高いビルである。その展望台からみる上海の街は高層ビルの立ち並ぶ近代都市としての発展ぶりと、晴れた日にも関わらずどんよりとかすんで遠くはほとんど見えない環境問題の深刻さの両面を印象づけるものであった。

3. 1. 2 SSRF (Shanghai Synchrotron Radiation Facility)

a. 放射光科学の現状

中国におけるこの5年間の最大のイベントは上海放射光施設 SSRF(Shanghai Synchrotron

Radiation Facility)の建設とその稼働である。SSRFはSINAP(Shanghai Institute of Applied Physics)の附属施設であるが、これは中国科学院(CAS)、上海地方政府、中央政府の3者が共同で1.5億US\$ (人件費、土地代を除く)の予算を出し合ったもので、2004年に建設が始まった。建物はドーム状で上から見るとアンモナイトの形をした垢ぬけたデザインである。

2007年にリングのコミッショニングを開始し、現在すでに多くのユーザーが利用を開始している。中国にはほかに、北京の高能研にあるBSRF、合肥市の中国科学技術大学のNSRLがあるが、前者はパラサイト利用であり、後者は軟X線リングとして、過去5年間にはそれほど顕著な進展は見られなかった。

b. 加速器

上海放射光はエネルギー3.5GeVの第三世代放射光である。150MeVライナックと3.5GeVブースターシンクロトロンからなる入射部を持ち、周長432mの蓄積リングに電子ビームがフルエネルギーで入射される構成となっている。DBA型ラティスで、エミッタンスは3.9nmである。2007年12月24日に初めてビーム蓄積に成功し、その後設計値である300mAのビーム蓄積を達成している。コミッショニングではトラブルのあった超伝導空洞にかわり、KEKから貸与された常伝導RF空洞が使用され、その後の順調な立ち上げを支えた。拠点大学交流事業で築かれた人的繋がりが活かされていると言える。

c. 測定器

直線部は6.5mが16個、12mが4個あり、40台の偏向磁石と合わせて、合計60本のビームラインの建設が可能である。現在、7本のビームライン(蛋白構造解析、XAFS、X線回折、硬X線顕微鏡、X線イメージング、軟X線分光、LIGA)が建設、一部稼働を始めている。現時点で250~300の申請があり、実験時間待ちの状態にある。

第2期には、さらに5本の蛋白構造解析などを含めて20本に増設予定とのことである。

d. 放射光利用研究

これまでもHESYLでの蛋白構造解析などで素晴らしい成果が挙げられているが、世界的には今一つという感がする。SSRFは光源の性能の素晴らしさからも、これから期待される施設であり、次の5年には多くの成果が出てくることであろう。ただ、北京と上海の間には人材交流もコミュニケーションもあまりなく、どちらかといえばライバル意識を持っている感じを受けた。

e. 拠点事業の役割と成果

SSRFでの加速器の立ち上げにおいては、KEKの役割は大きく、超伝導技術の導入、ビームモニターを用いたビーム診断法の確立、そして、真空封止型アンジュレーター開発技術など、SSRFとKEKの相互派遣は活発に行われ、拠点事業の役割は十分に果たしたといえよう。特に、KEKからRFキャビティを貸与したことでSSRFの加速器立ち上げ計画が予定より4か月も早まったことに関して、SSRF側から感謝の言葉があった。

将来計画としては、SINAPで以前から進めているFEL計画、北京近郊での5GeVクラスの放射光施設建設計画の話がでたが、まだ具体化は先のようなのである。SSRFのビームライン増強計画においては、KEK・PFというよりもSPring-8との共同研究に関心があるようである。KEKは

加速器科学としては一流であるが、放射光科学 (PF) では必ずしもそうではなくなったことが印象付けられた。

一方で、中国南部で建設中のイオン加速器、中性子利用研究に関しては J-PARC との共同研究に強い関心もたれており、中国側としては今後もし本事業が延長されるならば、電子だけでなく、イオン加速器も含めた加速器科学にしてもらいたい様子であった。

3. 1. 3 IHEP (Institute for High Energy Physics, Beijing)

a. 総論

IHEP では 2.5GeV を重心系エネルギーとした BEPC(Beijing Electron Positron Collider)を 2 リングとし、かつ超伝導空洞を導入して大電流化をはかった BEPC-II が順調に稼働を開始している。この過程でビーム物理学的考察と超伝導空洞および低温技術について、本交流事業により研究が進展し、順調な立ち上がりにおおいに貢献したことは疑いようがない。他にも FEL など将来計画の検討や、光陰極 RF 電子銃等関連する学術的および技術的交流、EPICS 制御システムの導入と中国の研究開発拠点化、CSNS と J-PARC という共通する各々のプロジェクトについての情報交換、技術および人的交流、ILC など国際共同実験に対しての取り組みなど、IHEP との交流事業により広範な協力関係が築かれており、大きな成果が得られている。

b. BEPC-II のための超伝導 RF の開発

Wang 博士は評価委員会での講演で”SRF system of BEPC-II is one of the co-operation flowers between JSPS-CAS (KEK-IHEP) , just same as the blooming SAKULA at YU YUAN TAN park of BEIJING.” と述べ、BEPC-II の超伝導 RF 建設に対する KEK 及び学振の貢献に心からの謝辞を述べた。

実際、BEPC-II のための最初の 2 台の超伝導 cavity の製作、加工処理、テストは KEK で行われた。その後 KEK の協力で BEPC-II の RF system の commissioning がなされ、更に KEK で coupler の high power test が行われた。これらの KEK の努力が BEPC-II の成功に大きく寄与したことは日中両国の科学者にとって忘れがたい出来事であったといえよう。

この成果を踏まえて IHEP で spare cavity の製作に取り掛かるなど中国が独り立ちできるまでに成長したことは日本の低温超伝導技術の伝承という点からも評価される。

この共同研究を通して、IHEP の低温超伝導研究者が育てられ、日中の人的交流に果たした役割も大きい。

c. ビーム不安定性の研究

KEK と IHEP の電子加速器におけるビーム不安定性の共同研究は拠点交流事業が発足する以前の 1996 年に始められ、拠点交流では一貫して重要課題として進められてきた。IHEP で行われた電子雲不安定性の実験は KEKB の世界最高ルミノシティの達成と BEPC-II の性能向上に寄与した。

特に電子雲不安定性の研究は BEPC における観測と確認、シミュレーションプログラムの開発、解決法の研究などで世界的な貢献をした。更に最近 octapole 電磁石を用いて BEPC-II の電子雲による coupled bunch instability を抑制できた事は注目される。

また beam-beam interaction についての理解が進んだこともこの事業の成果であった。

IHEP 側としてもこの課題のこれまでの成果を踏まえた今後の共同研究の発展に期待しているとのことであった。

d. ILC のための開発研究

IHEP では ILC に向けて KEK と協力して精力的に研究開発を行っている。

その一つとして、KEK との共同開発によって 34 個の Q-電磁石と 3 個の dipole 電磁石を IHEP で製作し、KEK の ATF-2 に設置して ILC 開発研究のための共同研究に供している事があげられる。ATF-2 は ILC の最終収束系で採用される予定の local chromaticity correction の実証、それを支えるビーム測定・制御技術開発を目的に国際協力が進められている。ATF-2 は 2009 年早々にビーム輸送に成功し、すでに精力的に研究がすすめられている。また、ATF のメインリングに光学空洞を設置し、電子ビームとレーザーを連続的に衝突させて、逆コンプトン散乱から発生するガンマ線による陽電子生成を目指す実験も成果をあげつつある。

また、超伝導 cavity 開発を精力的に行っている。既に 6 個の LL-Type の single-cell cavity を製作したが、そのうち 2 個は large grain cavity である。EP なしに最高 40MV/m の加速電圧を得た事は興味深い。この成果をもとに、現在 9-cell の cavity を中国で製作しており、2009 年中には KEK で テストを行う予定とのことである。

更に KEK における ILC のための cryomodule の設計、high power coupler, 熱 shield などの設計のための simulation に大きく寄与した。また IHEP は自前の超伝導技術開発のために実験施設を整備中であり、その構築に KEK のスタッフが助言等を通じて貢献をした。上のような成果だけでなく、研究体制の構築に協力することでアジア地域全体の研究レベルの底上げにつながる活動をしたことは評価されるべきである。

また、ILC の主 Linac における emittance 増大をテーマに中国から大学院生が KEK に滞在する形で研究が進んでいる。coupler による wake 場やバンチ圧縮時の emittance 増大などの simulation を行うなどの成果を出している。

e. Belle Collaboration

C. Zhang (IHEP)から、Belle Collaboration における中国側の寄与と成果についての報告があった。特に $D^0 \rightarrow K^+\pi^-$ 崩壊による $D^0D^0\text{-bar mixing}$ の発見は IHEP グループの主導で行われた。ただその確認には Super B による更に統計の良い実験が必要とのことであった。なお、このチャンネルで CP 非保存は見出されなかった。また、 $B^+ \rightarrow J/\psi\Lambda p\text{-bar}$ の branching を測定した。更に X(1835) 及び X(1812) の詳細な研究が続けられている。

C. Z. Yuan (IHEP)の話では、Belle 実験における charmonium physics は BES 実験の延長線上にあり、大きな成果が得られているとのことであった。特に、多くの新しいエキゾチック粒子が発見されたのは意義深い。例えば

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$ に於ける Y(4008)の発見

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\psi(2S)$ に於ける Y(4660)の発見

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\phi$ に於ける Y(2175)の確認

などは重要な研究成果であった。更に現在進行中の実験では

$e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma J/\psi$ などによる Y の新しい崩壊モードの探索

をはじめ多くの新現象、新粒子の探索が進められている。

総合的に見てこれらの研究に対する本事業の果たした役割は非常に大きかったと判断される。IHEP が寄与した Belle 実験の成果は 22 編の論文に発表されている。

特にこの事業が若手の教育にとって重要であったことは、中国側で 6 編以上の博士論文がまとめられた事からも明らかである。また、将来計画としての Super-B への期待は大きい。

f.その他

Laser-Plasma 加速の研究が日中共同で中国工程物理研究院等において行われ、GeV 級の電子ビームの加速実験に成功したことは中国側でも高く評価されている。

また、EPICS 導入、spallation neutron sources 建設などの経過と現状の説明があり、KEK の真摯な協力が極めて重要な役割を果たしたことに對して謝辞が述べられた。

更に、BEPS による synchrotron radiation research の現状について説明があった。

3. 2 韓国

3. 2. 1 概要

韓国の科学・技術政策

韓国は日本と同じような資源小国であるため科学技術振興は重要な政策となっている。朝鮮戦争後の復興の際には政府主導の産業政策・経済政策が打ち出され、科学技術は経済成長のための重要な要素とされてきた。当初は日本からの製造設備の輸入と安価な労働賃金を生かした製造業が中心で、80 年代以前には日本・米国の技術の模倣による研究開発が多かったが、80 年代以降、独自の研究開発を目指している。

90 年代からは、世界先端レベルの研究開発を目標にした政策を打ち出し、1996 年に OECD に加盟した。97 年の IMF 通貨危機で経済的苦境に陥ったが、これを乗り越え 1999 年には「2025 年に向けた科学技術発展長期ビジョン」を打ち出した。

さらに、2008 年の李明博政権は「科学技術強国建設」を標榜している。その中には李大統領が立候補前の 2006 年にスイスの CERN や日本の KEK を視察し、その時、着想を得たという大型科学施設を核とした地域づくり「国際科学ビジネスベルト構想」も含まれている。具体的には重イオン加速器を活用したガン研究のリサーチホスピタル、アジア基礎科学研究所などが想定されている。

韓国の研究開発投資は 2006 年には対 GDP 比率 3.23 % だったが、李大統領は公約でこれを 5 % にするという目標を掲げている。2001 年以来、5 年ごとに策定されている科学技術基本計画の「2008-2012 年」では IMD(スイス)による国際科学競争力ランキングで 2012 年に 5 位以内に入ることを目標の一つにしている。(2007 年には 1 位米国、2 位日本、7 位韓国、)。

加速器関連の研究施設は国内の数か所に分散しているが、最大規模のものは今回訪問した Pohang の放射光施設 (PAL : Pohang Accelerator Laboratory) である。Pohang は韓国の田舎町であったが、一時は世界最大となった製鉄企業の発展により鉄鋼の町となり、我が国の製鉄業界が下降気味になった後を受けて大きな利益をあげた。その利益の社会還元として Pohang 工科大学(POSTECH)が設立されたという。それから時を経ずして科学技術の先端施設として PAL が建設された。今では、Pohang は韓国の科学技術都市に変貌している。

拠点事業に関しては、中間評価以後、2005 年に始まったが、PAL を中心にいくつかの複数の施設との共同研究が実施されている。

3.2.2 PAL

1980年代は放射光施設建設のラッシュ時代であった。我が国のフォトン・ファクトリー (PF)、米国 Brookhaven 研究所の NSLS などが稼働を開始して、放射光の有用性が一気に認識され、同時に高輝度光源を目指した第三世代施設の建設が世界各地で始まった時代である。韓国でも 1988 年頃から建設の機運が盛り上がり、1989 年には中国の IHEP との技術提携が始まり、1991 年サイトが Pohang に決定して建設が始まり、1994 年に予定通り 2 GeV で稼働を始めた。

a. 放射光加速器

これまで韓国ではこのような大型加速器建設の経験がなく、国際協力に頼らざるを得なかったが、当時国交の道が閉ざされていた中国の高能研に協力をもとめ、小型線形加速器を建設することから始まった。日本への技術援助の要請はなく、専ら中国やソ連の協力に頼ったようである。当時としては意欲的なデザインではあったものの、立ち上げ初期はずいぶん難航したようで、ビームも不安定で蓄積電流がたまらないという状態が長く続いた。最初蓄積エネルギーは 2 GeV であったが、ユーザーのニーズを満足するためにはもっとエネルギーを上げることが課題となっていた。2002 年に 2.5 GeV の運転が実現し、長年の硬 X 線ユーザーの要望に応えることができた。

b. ビームライン

このプロジェクトはトップダウン的に決められたもので、稼働を始めてもちゃんとしたユーザー組織がなく、広い実験ホールには XAFS とトヤマ製の軟 X 線分光 (TGM) の 2 本のビームラインだけの状態が長く続いた。その後、韓国の急速な経済成長、半導体産業の発展と相まってビームラインの建設が急ピッチで進み始め、今では、軟 X 線、VUV のビームライン 9 本、硬 X 線ビームライン 19 本が建設され、ほとんど全周を埋め尽くした。軟 X 線のビームラインは光電子分光が主体であり、硬 X 線のビームラインの内訳は X 線回折・散乱 10 本、蛋白構造解析 3 本、XAFS 2 本、X 線顕微鏡 3 本、そして、マイクロマシン 1 本である。他の施設に比べて X 線散乱の割合が多いのが印象的である。

c. 放射光利用研究

現在では PAL の利用者は年間延べ 2500~3000 人、採択率は平均 50% とのことである。特に採択率の低いビームラインは X 線散乱、蛋白、XAFS だそうで、散乱実験に関しては、現所長 Moonhor Ree 氏の専門であるが、この分野はアクテビティも高く、国際的にも競争力がある。蛋白構造解析は Nature, Science の表紙を飾る定番であるが、最近、初めて純国産の研究者による成果が Science に載ったことが強調されていた。装置的には特に斬新なものではなく、PF とほぼ同等の性能を持つビームラインが建設されており、後はユーザーの能力にかかっている。

d. 放射光の将来計画

ここ数年の間に、韓国の放射光利用ユーザーは質、量ともに上がってきた。このような状況の中、もう一つの放射光施設をソウル近郊に作る話が浮上したが、結局、新施設を建設する代わりに PAL をアップグレードすることになり、80 億円の予算がついた。アップグレードには 3 点あり、(1)2.5GeV から 3GeV へのエネルギー増強、(2)エミッタンスを 18nmrad から 5nmrad へ縮

小、(3)直線部を 10 本から 20 本へ増加、である。このため現在のラティスを総入れ替えするようであるが、周長を変えないで行う改造なので直線部の距離はかなり短くすることになり、ミニアンジュレーターを導入することになろう。Top up mode での運転も試みているそうで、かなり大幅な改造を行うことになる。もっぱら上海の施設と共同研究を行っているようであり、我が国では PF よりも Spring-8 の方をパートナーにしたいようであった。

さらに近い将来計画として既存のライナックを用いたテラヘルツ光源の開発とその利用がある。長期計画として XFEL を検討しており、これには理研西播磨の技術を導入する模様である。日米欧に対抗する新しい研究施設を建設しようとする意欲を持っているが、実際に計画がスタートして利用可能になるには 5 年程度必要なので後発の装置でどのような成果をだせるのかは明らかでない。また、予算が認められるかどうかに関しては、我が国と違う予算申請と認可の仕組みがあるようなので、現時点での予測は難しい。

e. 加速器開発

PAL では拠点大学交流事業の一環として、fast-ion 不安定性、電子雲不安定性、光陰極 RF 電子銃、超伝導加速技術、ビーム計測技術などの研究開発を行ってきた。PAL は韓国唯一の大型加速器施設として加速器科学研究の拠点としての地位を占めており、多くの成果をあげている。

Fast-ion 不安定性 は PLS の加速器において初めて観測され、加速器科学上の成果として大いに評価される。また、電子雲不安定性について KEKB と共同研究を行い、KEKB の性能向上に大きな役割を果たしたことは "give and take" 的な協力関係のモデルといえる。

KEK で現在立ち上げが進みつつある ILC のための試験加速器 ATF2 プロジェクトにおいては、ナノメーターの精度をもつ BPM (Beam Position Monitor) を KEK と共同開発した。本 BPM は ATF2 プロジェクトにおいて、極めて重要な役割を果たす計測装置であり、本事業の大きな成果の一つである。

光陰極 RF 電子銃は短パルス高輝度電子ビームが発生可能な先進的デバイスであり、PAL が将来計画としてあげている THz 光源や FEL などへの応用も視野にいれ、開発を行っている。

今回 PAL で開催された拠点大学交流事業の評価のためのレビュー会議では、PLS の放射光加速器の増強計画 PLS II については報告されたが、残念なことに韓国での他の研究施設での将来計画について触れられておらず、将来計画の全体像がはっきりしなかった。しかし、最近、次のような計画が明らかになった。

韓国の次期の大型加速器計画を巡ってのホットな議論の結果、最終的には、重イオンの超伝導線形加速器の建設が決定された。対抗馬であった放射光関連の大型建設計画は見送られ、そのかわりに、約 80 億円の予算で PAL の放射光施設 PLS の増強計画を行うという。

会議で報告された PAL の増強計画では、放射光の性能向上には 1.5GHz の共振周波数の超伝導のランダウ空洞が必要で、それに向けて開発を計画しているとの説明があったが、PLS-II ではビームエネルギーとビーム電流の増強を行うため 500 MHz の超伝導加速空洞の採用が必須であると考えられるが、これについては言及されることは無かった。KEKB で開発され採用・運転されている超伝導加速空洞はこの目的に適合していると考えられる。

PAL では、KEK の支援を受けて超伝導空洞の開発を精力的に行っており、1.3 GHz のニオブ製の単空洞を完成させ、現在、ニオブ製の 9 連空洞を製作中である。空洞の設計や成形、電子ビームによる組立ては韓国の企業の協力のもと PAL で行い、表面処理や冷却・高周波特性の測定等

は、グローバルな協力体制を利用して、KEK や米国 JLAB などの協力のもとで行っている。これらの開発研究は予算の問題でこれ以上続けることができないという。

超伝導関係の研究は冷却のための附属設備が必要で、成果を得るには時間がかかり、根気よく継続することが非常に重要である。超伝導関係の開発・研究を成功させるためには、自前で開発の拠点を持ち、国際的な協力はもちろんのこと、韓国内の大学や企業と緊密に連携して、要素技術の開発を含めた地道な研究活動を行うことが肝要であり、このようにしてのみ、将来の大型プロジェクトに必要な人材の確保と育成が可能になると考えられる。

超伝導の研究開発の進め方には、インドと韓国では、大きな違いがあるように感じられるが、この分野の研究活動が韓国で開始されたことで、今後、大きく発展しようとしているように思われる。

f. Belle Collaboration

Belle Experiment について Eunil Won (Korea Univ.)より説明があった。2005年より Yonsei Univ., Korea Univ., Kyungpook N.U., Hanyang Univ., Seoul N.U., Sungkyunkwan Univ.などから 26人が参加し、3人の Ph.D と 6人の MS を生んだ。これまでに

B \rightarrow $\pi l \nu$

CP violation in B \rightarrow K π / search for B \rightarrow $\pi^0 \pi^0, \gamma \gamma$

TCP of B \rightarrow J/ ψ π^0

Study of hadronic penguin B decays

Study of 3-prong τ decays

Search for B \rightarrow $\Phi \pi$ decays

Lepton- flavor-violating B decays

等の Data 解析を行い、数多くの物理的成果を得ている。

更に Belle II のための detector R&D としては silicon strip sensor (strip pitch 160 μ m, 2.0M Ω , 16pF/cm)を試作し、KEK で測定した。また readout electronics の開発を行い、⁹⁰Sr によるテストを行っている。DAQ, trigger 及び S/W framework の開発も手がけている。

韓国はこの計画に 5 年前から中途参加したにもかかわらず、非常に active な印象を受けた。

特に、Belle Data の解析への寄与は評価される。また Belle II への積極的な参加が始まっており、今後の国際協力の重要なパートナーとして期待される。

今後はこの事業だけでなく、KEK との直接の研究協力の枠組みが望まれる。

g. Physics and Detector Researches for the e⁺e⁻ Linear Collider Experiment

韓国におけるリニアコライダー関連の物理研究及び測定器開発については、慶北大学の H.B. Park 氏からの報告を H.O. Kim 氏が代理で発表した。PAL が放射光科学を目的とした加速器研究所であるため、LC 関連の研究開発は PAL ではなく大学を中心に推進されている。韓国グループが特に力を入れているのは、韓国で開発されたシリコン検出器を用いた内部飛跡検出器の開発である。この飛跡検出器の導入による測定器全体の性能向上については、日本と韓国の研究者が共同研究を進めている。

しかしながら、本事業による日韓交流は今年度派遣・受入計画がないことから伺えるように必ずしも活発とは言えない。韓国は韓国製の検出器を開発する力をつけており、共同研究の促進

により give-and-take の関係が構築できるものと期待する。

3. 3 インド

3. 3. 1 概要

インドは人口 11 億人と中国に次ぐ人口大国で BRICS の一つとして近年急速な発展をしている新興産業国である。特に 90 年代以降、IT やソフト産業を中心に年平均 8 % の経済成長を遂げ、世界中から注目されている。1947 年の独立以来、外資参入や製品輸入を厳しく制限する閉鎖的な政策をとったため経済的には沈滞していたが、1984 年に発足したラジブ・ガンディー政権の「新コンピューター政策」により状況は著しく変わった。この政策はハードウェアの輸入関税が引き下げられるなどコンピューター産業勃興の契機となった。また 1991 年の湾岸戦争では深刻な経済危機に陥ったが、IMF の指導により経済自由化路線をとり経済成長が始まった。

一方で貧困問題は未だに深刻で一人当たりの GDP は約 796 ドル (2006 年) と低く、人口の約 3 分の 1 が 1 日 1 ドル以下で生活する貧困層であるという資料もある。また、隣国のパキスタンとはいまだに紛争が続き、最近でもムンバイでの爆弾テロがおきたばかりである。このような国内外の厄介な問題を抱えながらも急速な経済成長を続けていくインドが今後どのように進もうとしているのか、特に自然科学分野の今後はどうなのかということは注目すべきところである。

インドは科学技術で独自の道を進んできた。70 年に発効した核不拡散条約に対して、不平等性を理由に加盟を拒否し、74 年に独力で核爆発実験を行った。その結果、米国を中心とする原子力先進国から国際協力の道を絶たれていた。しかし、国際情勢の変化により、米国は 07 年に米印原子力協定を締結した。インドが目指す核燃料サイクルはウランではなくトリウムを使うユニークなものだ。なお、インドの「加速器科学」は IUAC 以外の研究所は核エネルギー開発を担当する原子力庁 (DAE) の傘下にある。インドの研究開発費は増加しており、「科学技術政策 2003」では 2007 年までに対 GDP 比 2 % に伸ばすことを目標にしていたが、現在、0.8 % 程度の水準に留まっている。また国全体の「第 11 次五ヵ年計画 (2007-2012)」では、貧困、格差問題への対応が主眼であるが、科学技術では衛星開発、新エネルギーシステム開発 (新型原子炉、ナノテク) などが重点分野とされている。

科学技術の国際交流の観点から見ると、インドはアジアに位置しているものの、日本、韓国などと距離的に遠いということもあって、もっぱら欧米諸国との交流の方が盛んである。

今回の視察では、政府直轄の施設を 5 か所訪問したが、いずれも核物理、核エネルギー利用研究を主とする施設であった。いずれも巨大な敷地と巨大な研究設備、多くのスタッフを抱えており、これまでのインド政府の科学技術、特に核エネルギー利用研究に対する力の入れようが窺えた。

3. 3. 2 VECC (Variable Energy Cyclotron Center)

a. 可変エネルギーサイクロトロン

1964 年に H. J. Bhabha の提案により、磁石の直径 224 cm で、陽子を 60 MeV まで加速できる大型の可変エネルギーサイクロトロン VEC (Variable Energy Cyclotron) を建設することになり、DAE (Department of Atomic Energy) の研究所として Kolkata に VECC (Variable Energy Cyclotron Center) が設立され、1970 年に加速器の建設が開始された。この加速器は 1977 年に完成、ビーム運転に成功して、インドの最初の加速器として営業運転を開始し、原子核物理を

じめとする各種の実験の共同利用施設として利用されてきた。その後、イオン源の増設により酸素、窒素、ネオン、アルゴンなどの重イオンビームの加速を行っている。

重イオンビームエネルギーの増強を目的に、重イオンビームエネルギーを 200 MeV/nucleon まで加速できる可変エネルギー超伝導サイクロトロンが計画され、1997 年に建設が開始された。超伝導磁石は直径 142 cm、最大磁場 5.8 T で、NbTi 製の超伝導コイルを液体ヘリウムで侵漬冷却する方式が採用された。超伝導磁石の性能を決める超伝導コイルの製作は、研究所内に専用の巻線機とチームを作って、自力で完成させると同時に、冷却に必要なクライオスタットやヘリウム冷凍装置、液体ヘリウムトランスファーラインなどの機器や、ビームの加速に使用される共振周波数が 9・28 MHz の範囲で可変な複雑な形状の共振空洞などの RF 装置も緻密な計画のもとに完成させている。超伝導コイルは既に冷却・励磁され詳細な磁場測定を終了し、これからビーム試験を行う予定になっている。

加速器の医療への応用として、診断用の PET などで使用されるアイソトープの製造があげられる。DAE は全国的にアイソトープを供給できる 30 MeV, 500 A の医療用のサイクロトロン施設を Kolkata に建設することを計画しているが、この設計・建設・運転維持は VECC が担当する。また、インドでも放射線治療用の多数の加速器が必要になると考えられる。それに向けて医療用の 250 MeV 超伝導陽子サイクロトロンの建設が計画されている。

VECC では 224 cm 可変エネルギーサイクロトロン VEC の開発・建設・運転を経験することにより、多くの知識が蓄積され、同時に若い人材が育成され、次の開発研究への展開の拠点になっている。

「研究開発の予算は充分ですか？」という質問に、「必要な予算は手に入るので問題はない」「予算は充分だが、マンパワーが不足している」という答えが返ってきた。日本と比べて多数の研究スタッフがいるので、不思議な気がした。「ある目的のために短期的に成果をだすことも重要であるが、開発の拠点をつくり、長期にわたってじっくりと研究を継続することがより重要である」と考えているようで、インド独特の時間スケールでの開発研究の進め方があるとの印象を受けた。

b. 高エネルギー重粒子加速器による国際共同研究

VECC では 1990 年代の初めから 20 年近くにわたり欧米諸国との間で国際協力によって高エネルギー重粒子衝突の実験を行ってきた。まず CERN-SPS の WA98 グループに参加し、158GeV の Pb + Pb 実験を行った。更に米国 BNL の RHIC-STAR 実験では PMD (Photon Multiplicity Detector) の製作、運転を担当し、STAR 実験の成功に貢献した。さらに、CERN において本年より稼動する LHC では ALICE 実験装置の建設に初期の段階から参加して、PMD の製作にかかわってきた。また、LHC のデータ処理をリアルタイムで行うために VECC 内に Grid Tier 2 センターを設置して LHC の国際協力に積極的に取り組んでいる。一方ドイツの GSI では FAIR (Future Facility for Antiproton and Ion Research)への参加を表明し、ウラン、陽子を加速して二次粒子の高エネルギーの rare isotopes や anti-proton を用いた研究を計画している。

これらの国際協力でこれまでの経験に基づいて大規模な実験の一翼を担うまでになっている事は注目に値する。マンパワーがやや不足しているため研究のペースで諸外国と足並みをそろえるのが難しいとの評判があるものの、最近では資金的に余裕があるため、測定装置の重要部分を分担している。日本との国際協力はこれからとの感がある。

c. Neutrino 研究プロジェクトについて

インドにおける宇宙線研究は1960年代の地下実験での日本との共同研究に見られるように40年以上にわたって続けられている伝統的な分野である。現在の最大の課題は大型の宇宙線地下実験施設の建設で、現在サイトの選定、研究テーマの検討、測定器開発が精力的に進められている。プロジェクトの第一段階として、現在大気 neutrino の研究が進められている。中でも測定器の開発はかなり進んでおり、Bakelite 方式の RPC(Resistive Plate Chamber)の開発が進められている。日本との共同研究を強く望んでおり、最近の KEK と宇宙線研究所の使節団の来印はそれを進める上での一歩であったと位置づけられている。

実験室視察の際、独自の方法で RPC の開発を行い、興味深い結果を得ていることが印象的であった。研究の進展はかなりゆっくりしているが、独自の着実なペースによる進展が期待される。将来、共同研究として neutrino 研究を一つの課題として含める事が、日印両国にとって有益であろう。

d. その他

ヘリウム純化装置の開発と地震発生時の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比などについて興味深い研究がなされている。

3.3.3 RRCAT

RRCAT は DAE の傘下にある BARC の activity の中で、特にレーザーと加速器のフロンティア科学を発展させるために Indore 郊外に1984年に設立された施設である。現在の Director は専門が固体物理の Dr. Vinoh C. Sahni である。スタッフは全部で1300人で、うち研究者は65%を占め、レーザー科学と放射光などを中心にした加速器科学を研究している。

a. 超伝導技術の開発

RRCAT では CERN の大型の超伝導加速器 LHC に使用された超伝導補正コイルの製作を担当し、その開発と性能評価をするための超伝導・低温研究施設が建設され、そこを拠点に、超伝導技術の開発研究が行われてきた。RRCAT と KEK 間の拠点大学交流事業の一環として RRCAT の若手の研究者が国費留学生として総研大の博士コースに入学して超伝導マグネットの安定性の研究を行っている。

超伝導空洞の分野では、インドで建設が計画されている大型の大電流超伝導線形陽子加速器に使用する超伝導加速空洞の開発が検討されている。RRCAT では ILC 計画に参加することにより将来必要な超伝導加速空洞および関連する要素技術の習得が可能と考えている。現在、ILC 用の超伝導加速空洞用のクライオモジュールの開発に参加して、支持構造の設計を担当している。

b. 放射光科学の現状

多くの核物理関係の施設があるインドにおいて、放射光施設はわずかに Indore の RRCAT だけである。そこには、2台の電子蓄積リング、INDUS-1, INDUS-2 が稼働している。

INDUS-1 は電子エネルギー450 MeV、電流170mA、4個の偏向磁石からなる周長19 m の真空紫外・軟X線専用リングであり、装置として順調に稼働している。一方、INDUS-2 は電子エネルギー2.5 GeV、周長172mのDBA型のラティスを持つX線リングである。その規模はKEK-PF とほぼ同じであり、エミッタンス126 nmrad も初期の PF とほぼ同程度である。8本の直線部が

あり、そのうち 5 本は挿入デバイスのために利用できる由である。2006 年にコミッショニングを始めてすでに 3 年経過した今もフル稼働しているとはいえ、まだ問題山積の状態である。

b-1 加速器

INDUS の加速器では、電磁石からビームダクト、真空ポンプに至るまでほとんどすべてのハードウェアをインド国内の開発で調達している。INDUS-1 は順調に稼働しているが、INDUS-2 はまだいくつかの課題が残されている。INDUS-2 は 2005 年よりコミッショニングを開始し、2008 年夏には 2.5 GeV までの加速に成功しているが、いまだ入射効率や蓄積寿命に問題があり、安定に放射光実験を行える段階には達していない。ブースターリングを含む入射系が貧弱なため入射エネルギーを 550 MeV まで下げざるを得ないことが安定な運転を難しくしていると考えられる。

入射の安定性を向上させるため、光陰極 RF 電子銃と線形加速器からなる入射系に大々的に変更する案が検討されている。初段のマイクロτροンの安定性など、現状の入射器に多くの課題があることは事実のようである。しかし線形加速器を入射部として採用した場合、実験ホールの大さから、さらに入射エネルギーが制限される可能性が高く、放射光リングのダンピング時間の増大など、それ自身がさらなる入射効率の低下を招く懸念がある。

最大蓄積電流は 100mA、(目標値 300mA)、寿命は数時間というのが現状である。寿命を決めているのは真空であり、まだまだ焼きだしが足りない感じがした。当面は現状の構成における問題点を明確化し、その対策を練ることが課題であろう。

b-2 ビームライン

INDUS-1 には 7 本のビームラインが建設されている。その内訳は、反射率 1 本、光電子分光 2 本、極紫外分光 2 本、光物理 1 本、そして赤外分光 1 本である。また軟 X 線領域までカバーするビームラインが現在建設中である。これでほとんどのビームラインが埋まった状態になる。

INDUS-2 は広い実験ホールの中、まだ 3 本のビームライン (XAFS、粉末 X 線回折、エネルギー分散型 X 線回折) が稼働しているだけであり、2 本のビームライン (斜入射 X 線散乱、X 線光電子分光) が建設中、さらに、可視、X 線を用いたビーム診断用ビームラインを含む 10 本の建設を予定している。これらは主として BARC と RRCAT の共同開発によるものであるが、どのようなビームラインをいつまでに建設をするかという明確な時間軸をともなした目標がなく、日本や欧米との研究風土の違いを感じさせる。

b-3 放射光利用研究

インド全体の研究者の中に占める放射光利用研究者 (あるいは、放射光を利用する物性、バイオ研究者) の数は、他国と比べて圧倒的に少ない。ただ、非常に著名な研究者もおり、彼等はもっぱら ELLETRA, ALS, PF など海外での共同研究で成果を挙げているのが現状である。

b-4 日印協力の将来

上記のように、加速器に関しても測定器に関しても問題山積の INDUS である。所長の話では、当面入射器をマイクロτροンから LINAC に変更して、入射の問題を克服することを検討、挿入デバイスも、真空封止型アンジュレーターの導入を検討しているとのことであった。これらに関

して KEK への期待は大きい。ただ、2006 年に始まった拠点事業も、中国などと比べると距離的に遠いこともあって、それほど活発とは言えない。放射光利用ユーザーの PF への派遣、KEK-PF 加速器、測定器専門家の RRCAT 訪問によって有益な情報が伝わっているはずであるが、それが具体的な形としてはまだ見えてこない。一つの障害は日本メーカーのインド輸出に対する自主規制がある。3 本のビームラインに設置された測定器はいずれもヨーロッパ製で必要以上に大きく、高価な感じがした。本当は日本のメーカーも参入して競うことで、より性能の高いビームラインをより安く建設することが可能であろう。

一方、SINP の Sanyal 教授が中心になって、PF の不要になったビームラインをインド専用ビームラインとして利用することになったことは本拠点事業の成果として特筆すべきことであろう。このビームラインを通して、日印科学者の交流がより盛んになることが期待される。日印の物性関連の JST 交流事業も走っており、これらと上手な連携をしていくことが肝要であろう。

3.3.4 IUAC (Inter-University Accelerator Center)

ニューデリー市内にある IUAC はインド大学連合の共同利用研究施設であり、重イオンビームを利用した原子核実験研究を行うとともに、精力的に超伝導加速器の開発研究を行っている。

1990 年に運転を始めたペレトロン加速器からの重イオンビームを利用して原子核物理の研究を行ってきた。世界に通用する加速器施設の実現にむけて、ペレトロン加速器からの重イオンビームを 97MHz の共振周波数のニオブ製の 1/4 波長の同軸空洞で構成される線形加速器で加速し、ビームエネルギーを増強する。この計画を実現するために、米国の ANL の指導のもとで 10 年以上にわたって、ゆっくりではあるが確実に計画を進めてきた。計画の実現のために、冷凍機チームを含む開発チームを立ち上げ、研究施設に超伝導空洞の開発・製作に必要な電子ビーム溶接機や空洞の表面処理施設を整備し、超伝導加速空洞とクライオスタットから構成される超伝導線形加速器を完成させたことは高く評価される。

現在は本格的なビーム運転に向けて調整中である。

超伝導・低温装置開発の拠点を持つ IUAC、KEK 間の共同研究の進め方として、かつての KEK が一方的に技術等を提供する形態から、両研究所が相互に乗り入れする共同研究に変える時期がきたと考えられる。

3.3.5 TIFR (Tata Institute for Fundamental Research)

TIFR は Bhabha によって設立された自然科学研究所であり、7 部門 (物理 5、化学 1、生物 1) からなるインドにおける基礎科学の最先端の研究を推進しているところである。

a. ILC プロジェクトへの参加

ILC プロジェクトに強い関心を示し、TIFR ではそのための detectors の開発を精力的に手がけている。特に VME module, pulse generator, amplifiers, CAMAC system などのエレクトロニクスや各種 scintillation counters などを準備してそのテストを開始している。これらは日本を始め国際的な協力の一環として進めているものである。

b. Silicon Vertex Detector の開発

Wafer として n-type silicon を用いた resistivity 20 Kohm-cm の大型 silicon detectors を完成

させた。また大型の *double sided silicon detectors* など実用化されている。これらは国際協力計画の一環として進められているもので、TIFR における独自の研究開発によって種々の成果が得られている。

c. Cosmic Ray Physics

この分野の研究のうち特に *muon* の地下実験は 1965 年の Kolar Gold Fields における日印共同研究による最初の *atmospheric neutrinos* 観測以来続けられている TIFR の伝統ある研究の一つである。

最近では *muon* の *angular distribution* の研究や *nucleon decay, monopole* 探索実験などで地道ではあるが着実な成果をあげている。特に国内外との研究協力による *Extensive Air Shower (EAS)* 実験は注目される。中でも *resistive plate chamber (RPC)* のテストや *magnetized iron calorimeter (ICAL)* の開発は興味深い。これらの研究開発における日本の研究機関や企業との協力は今後益々重要になってくると考えられる。中でもエレクトロニクス、観測装置の部品の提供やテストなど日本との共同開発の可能性は高い。これまでの長年にわたる着実な共同研究を踏まえたこれからの発展に期待したい。

なお、現在理研や首都大学との加速器を用いた原子物理の国際協力が続けられており、将来 FEL 開発における東北大学との協力も期待されている。

d. B-Factory

KEK における B ファクトリー実験 Belle は 1999 年の実験開始以来、活発に成果をあげ続け、10 年間で 300 を超える論文を発表している。また小林、益川両博士が 1973 年に発表した理論を実験的に検証し、両博士が 2008 年にノーベル物理学賞を受賞するきっかけを作ったことは特筆すべきである。この研究グループには世界 15 ヶ国 59 の研究機関から約 400 名の研究者が参加するが、インドからは TIFR の他にパンジャブ大学、インド工業大学 (グワハティ)、数理科学大学 (チェンナイ)、インド工業大学 (マドラス) の 5 つの機関から 13 名が参加し、データ解析を中心に活躍している。近年にインドの研究者が中心となって発表した論文は次の 5 編である。これらはいずれも B 中間子の崩壊に関して新しい知見を与えるものとして高く評価されている。

- “Evidence for $B^0 \rightarrow \chi_{c1} \pi^0$ at Belle,”
R. Kumar, J. B. Singh *et al.* (Belle collaboration), *Phys. Rev. D* **78**, 091104 (2008).
- “Observation of $B^\pm \rightarrow \psi(2S)\pi^\pm$ and search for direct CP -violation,”
V. Bhardwaj, R. Kumar, J. B. Singh *et al.* (Belle collaboration), *Phys. Rev. D* **78**, 051104 (2008).
- “Observation of $B^\pm \rightarrow \chi_{c1} \pi^\pm$ and search for direct CP violation,”
R. Kumar, J. B. Singh *et al.* (Belle collaboration), *Phys. Rev. D* **74**, 051103 (2006).
- “Measurement of branching fractions for $B \rightarrow \chi_{c1(2)} K(K^*)$ at Belle,”
N. Soni *et al.* (Belle collaboration), *Phys. Lett. B* **634**, 155 (2006).
- “Observation of near-threshold enhancement in the $D^0 \bar{D}^0 \pi^0$ invariant mass in $B \rightarrow D^0 \bar{D}^0 \pi^0 K$ decay,”
G. Gokhroo, G. Majumder *et al.* (Belle collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **97**, 162002 (2006).

KEK では B ファクトリーを 40 倍のルミノシティを持つ衝突型加速器へとアップグレードする計画が進行中であり、ここでは B 中間子、 τ レプトンなどの崩壊現象における SUSY などの新し

い物理の寄与が観測されるものと期待されている。インドから参加する研究者は、これまでの研究においてすでに高い実績を有しているため、このアップグレード計画においても重要な役割を果たすことが強く期待される。また、さらに多くの優れた研究者がインドから参加することも期待したい。

e. BARC-TIFR Heavy Ion Accelerator Facility

1988年に運転を開始したペレットロン加速器を中心に核物理実験を行っている。2002年には、この加速器からの重イオンビームをさらに増強するために、鉛メッキした銅製の共振周波数 150 MHz の 1/4 波長の同軸空洞から構成される線形加速器が完成し、インドに於ける最初の超伝導重イオン加速器として運転が開始され、その後、順調に実験がおこなわれている。冷凍装置を含めて、完成度が高い実用機として超伝導加速器が建設され、順調に運転されている。これらを通して得られた貴重な経験及び人材は、今後の超伝導・低温技術の発展に大きく寄与すると考えられる。

研究所内に工作工場があり、多くの技術者が生き生きと働いているのが印象的であった。

3.3.6 BARC (Bhabha Atomic Energy Center)

BARC は Mumbai の郊外の Trombay にあり、Bhabha が核エネルギーの平和利用を目指して創立したものである。設立時は AEET(Atomic Energy Establishment, Trombay)と呼ばれていたが、Bhabha の不慮の事故のあと 1967年時の首相 Indira Gandhi によって BARC と改称された。センターでは広大な敷地の中で 14,000 人が働いているとのことである。

S. Banerjee (Director, and Atomic Energy Commission.)のインドのエネルギー問題についての話は興味深いものであった。

以下、彼の発表を要約する。現在のインドの hydrocarbon の消費量は世界の消費量の 2.5% であるが、今世紀半ばには 10% になると予想されるので、エネルギー問題についての paradigm shift が必要である。特に primary energy として solar energy と nuclear energy を活用すべきである。トリウムに対する関心が高まっているが、そのエネルギーとしての優れている点は relatively stable core reactivity, low minor actinide generation, proliferation resistance, rapid disposition of plutonium などにある。

現時点と近未来のインドの原子炉としては pressurized heavy water reactors (PHWRs), light water reactor (LWR), fast breeder reactor, innovative reactors, advanced heavy water reactor (AHWR) があげられる。しかし、将来の先端エネルギーとしてはトリウムの利用を考慮して、更に新しい技術を導入する必要がある。例えば

- Hydrogen as energy carrier
- Accelerator-driven sub-critical systems
- International thermonuclear experimental reactor

などを検討せねばならないであろう。以上が彼の提案であった。

続いて P. Singh (SO/H, NPD) は具体的な加速器開発プログラムについて説明した。特に Tandem 重イオン加速器 6MV (14 UD Pelletron)と加速器駆動型エネルギー増幅器 (ADS)の開発の現状が示された。後者は効率の良い中性子発生源ともなる。

ADS のための加速器計画として ECR Ion Source, RFQ(3MeV), DTL(20 MeV, 30 mA),

Super-conducting DTL(100MeV), SC Linac(1GeV), Spallation Target(liquid Pb, Pb+Bi:W)などの開発が進められている。

両氏の話は他の国では見られないインド独自のエネルギー政策を具体的に示しており、これから世界的に検討すべき大きな問題を含んだ示唆に富む内容であると痛感させられた。

実験室視察では DO_2 を減速材と冷却材として用いた 100 MW Natural U 原子炉、ILC の為の cavity 開発、Tandem van de Graaf とそれによる実験、LHC-CMS 用の μ RPC (1m x 1m の開発及び製作、ニュートリノ実験用 μ -chamber の開発、RFQ の製作などが示された。

いずれも研究のスピードをあまり問題とせずに、着実に進めている感が強い。ただ LHC などの国際協力では時間的制約が厳しいため苦勞している様子が伺える。

4. 各プロジェクトの成果と評価

A1

【研究課題名】 電子加速器に必要な超伝導・低温技術に関する研究

【研究代表者】

日本側代表者：KEK 加速器研究施設 教授 細山謙二

KEK 加速器研究施設 教授 古屋貴章

中国側代表者：IHEP 加速器部 教授 王光偉

【研究の概要及び目的】

現代の加速器には必須の技術となった超伝導空洞、超伝導磁石とその冷却システムに関して、システムの設計や製作、安定に機能させるための運転や制御などに関する研究を行い、新たな応用や建設計画に対して共同でその問題解決を図るとともに、超伝導技術の新しい応用を開拓するための研究を行う。この目的のため、日本側は現在稼動中の KEKB 超伝導加速空洞を主な研究対象として、また中国側は IHEP 研究所の BEPC-II 加速器に採用された超伝導加速空洞の開発を軸として研究交流を行うものである。

【研究実施状況及び成果】

KEK：

平成 11 年から衝突実験を開始した KEKB は、本拠点事業が開始された平成 12 年以降次々とその蓄積電流を更新し平成 14 年 10 月に電子リング (HER) が 1 A を達成、KEKB の超伝導加速空洞は世界で唯一のアンペア級超伝導加速空洞となった(図 1)。平成 18 年には 1.4A に到達、ルミノシティも $1.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成したが、この間の空洞の挙動を調査分析することで大電流用途の超伝導空洞技術を確立した。

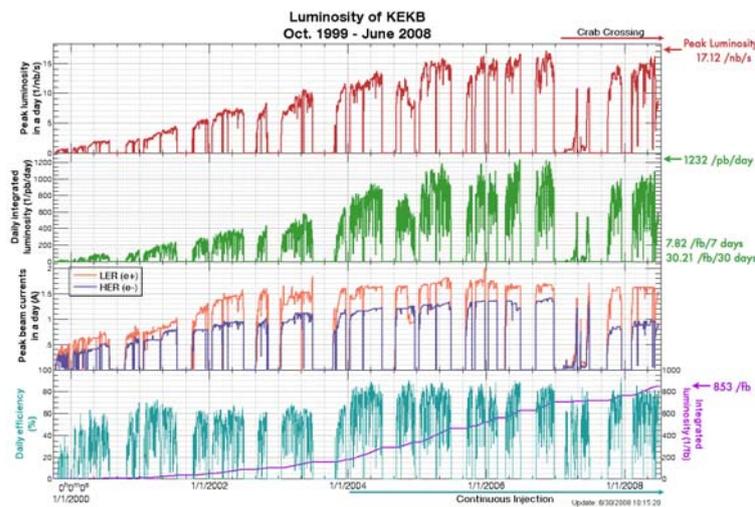


図 1 KEKB 性能の推移

調査内容としては、空洞本体の性能、周波数チューナーなどの周辺部品の動作機能、高調波減衰器の吸収電力などのほか、高速多チャンネルのデータロガーを使っての超伝導空洞の動作診断を行った。8 台の空洞の電圧とともにビーム電流やシンクロトロン位相などを同時に取り込み、ビーム OFF 時の各信号の反応を解析することによって、空洞トリップの原因が明確にできるよ

うになった。種々の信号がいくつかの側室に集められ（図 2）、空洞や加速器自体の診断に使われた。図 3 はそのようにして得られた 2002 年以降のすべてのビームトリップの原因の統計である。

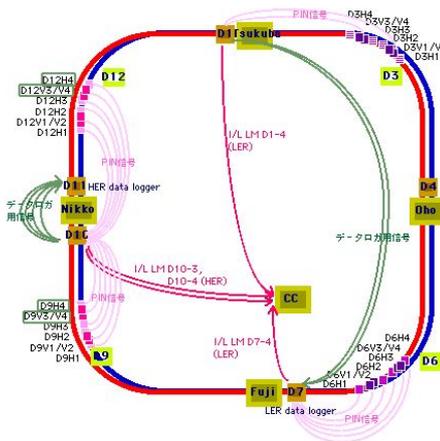


図 2 構築した診断信号系

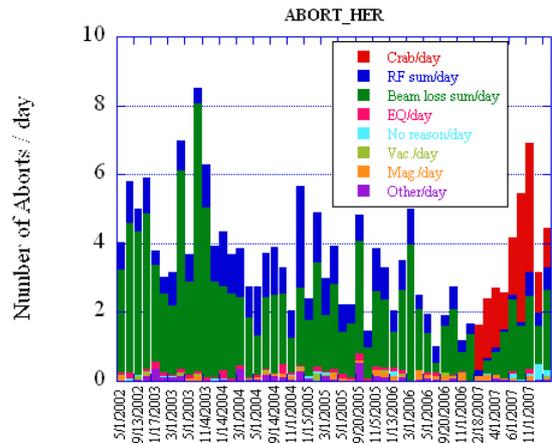


図 3 分析したビーム OFF 原因の分類結果

IHEP :

KEKB 加速空洞をベースにして BEPC-II 用 500MHz 空洞を設計し、性能測定や組立て作業などを日中が共同で行うことによって技術伝承を果たし、冷凍設備を含めて平成 18 年には独自で立上運転するまでになった。BEPC-II 計画への超伝導空洞の導入決定に際してはその機能や威力、世界の趨勢および実用運転などに関するセミナーを行い、BEPC-II 加速器への超伝導技術導入の意義と技術的可能性を示した。その後の加速器技術評価委員会にも参加し、BEPC-II 建設推進に向けての技術的助言を行ってきた。稼働を開始して以降は放射光モード、衝突モードの両運転モードにおいて超伝導空洞は極めて安定に運転を続けており、500mA の蓄積電流の達成、 $3.0 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のルミノシティ到達など、加速器性能向上のための重要な構成要素としての機能を果たしている。最近では空洞運転の傍らで予備の入力カップラーを独自で開発し、さらには空洞本体の製作も計画するなど、IHEP は中国における超伝導空洞開発の中心に位置するに至った。

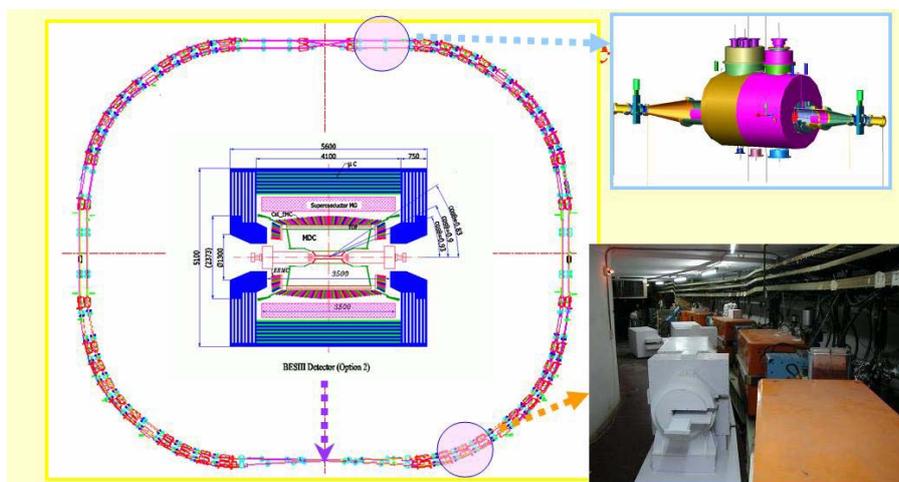


図 4 IHEP:BEPC-II 加速器

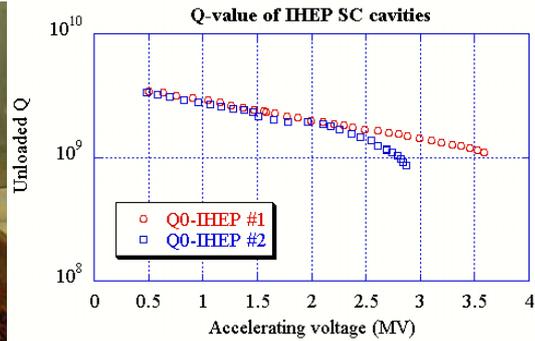


図5 製作中の IHEP 空洞と空洞性能試験

上海放射光：

第3世代放射光施設建設（SSRF）が行われ、その蓄積リングの高周波加速には超伝導空洞が設置されることになった。超伝導空洞採用の決定に際しては超伝導空洞技術に関する説明と助言をするとともに、基礎技術開発のための超伝導ラボの建設に協力し、その基盤とするための小型ヘリウム冷凍機設備を移設した（平成18年）。建設が開始されてからは、主にそのヘリウム輸送ライン建設に KEKB 冷凍機グループの技術支援が貢献している。

【問題点等】

- 1) IHEP の改造計画（BEPc-II）に KEKB 型の超伝導空洞2台を導入し、成功した。また立ち上げ運転は中国側がほぼ自力で成し遂げることができた。
- 2) 先方には超伝導についての基盤が全くないところからの立ち上げであったが、KEKB 超伝導空洞の建設直後であり、会社側を含めて体制が残っていたことと人的交流に拠点事業の支援が得られたことが大きい。
- 3) IHEP との超伝導空洞導入に関する協力事業としては、超伝導加速空洞の輸出ではなく、超伝導空洞技術の伝承を目指した。そのために当初は超伝導空洞の機能や実現のための技術の必要性の解説が、また設計製作の段階では技術指導などの直接的な対話が大変重要であった。この点で、拠点事業に支援された人的交流は大きく貢献した。
- 4) 新しい技術の導入に対する意識の違い、契約や性能保証などに関する問題は山積している。
- 5) 日本からの物流の制限（輸出貿易管理令）が余計な労力を必要とする。担当部門を設置するなど機構側の支援が必要である。
- 6) IHEP 側の予備空洞へ向けて自力で調達しようとする活動は、技術輸出が順調に進んだ証と考える。
- 7) BEPC-II 用超伝導空洞の導入により IHEP は中国における超伝導空洞開発の中心に位置することになった。今後さらに世界との超伝導空洞の協同研究を進めるためには、超伝導・低温に関する技術開発の継続と実用への積極的な挑戦が必要である。

【今後の計画】

KEK では KEKB の性能向上をめざした実験が続けられるとともに、新しい超伝導空洞応用であるクラブ空洞や ERL 空洞の開発が進められる。一方、IHEP では稼働を開始した BEPC-II 空洞制御の高度化や予備空洞製作に向けての施設整備などとともに、次期計画への超伝導空洞応用なども検討されており、超伝導空洞応用の基礎研究を共同で行うことになる。

【評価】

超伝導加速技術およびそれに必要な低温技術は、現代の先進的加速器において重要な役割を果たしていることは論を待たない。KEKのKEKB加速器およびIHEPのBEPC-II加速器において、超伝導空洞はその高い加速勾配と大きなエネルギー蓄積量によって、大電流の安定蓄積に大きな役割を果たしている。本研究はそれらの性能向上等を目的として、研究交流を行うものであった。研究期間中にKEKBは蓄積電流にして1.4A、ルミノシティ $1.7 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を達成し、一方BEPC-IIは蓄積電流500mA、ルミノシティ $3.0 \times 10^{32} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を達成している。この課題ではこのように大きな成果をあげており、高く評価される。

BEPC-II加速器の超伝導空洞および冷却システム等はKEKからの技術移転により構築された。ハードウェアの移転だけでなく、システムの組み立てや性能測定、調整作業を共同して行い、最終的には中国側独自で運転立ち上げを行った。そこに至るまでには、BEPC-IIへの超伝導空洞の導入検討や世界の技術動向などについてのセミナーの積み上げがあった。IHEPは現在中国の超伝導技術の開発の中心となっており、上海放射光施設への超伝導空洞の導入の際には、日本側からの関与に加えて、IHEPからの協力があった。課題A3「ILC建設のための加速器に関する共同開発」においても、後半の課題にILC用超伝導空洞開発が加わる等、KEKとIHEPはさらなる超伝導空洞の性能向上や将来計画における技術開発などを進めており、本事業でまかれた種は大きく育っている。最初は日本から中国側への技術移転という段階から、中国での技術開発拠点の形成、そして対等な共同研究への発展というパターンは、本事業のモデルケースとすべきものであり、本研究は事業の意義を体現したのものとして高い評価をされるべきである。

以上のような技術移転から研究拠点の形成という段階を経る上で、空洞や冷却システムの輸出という機械の移転に加え、セミナー、技術指導、調整作業など情報および人的交流が非常に重要であった。そのような点からも、本研究課題においては、本交流事業が大いに活用されたと言える。

海外への技術移転においては、性能保証などの契約上の問題、認識の相違など文化的な障壁など様々な問題があり、研究交流を進める上で、現場の研究者に大いに負担になっているようである。このような複雑な事務的手続きについて、専門部署の設置など、知識とノウハウを蓄積する仕組みを整えることで、今後の同様の海外との研究交流がよりスムーズになるであろうことを助言する。

A2

【研究課題名】電子加速器によるビーム不安定性の研究

【研究代表者】

日本側代表者：KEK加速器研究施設 准教授 福間均

中国側代表者：IHEP加速器部 教授 Qing Qin, 教授 Guo Zhiyuan

韓国側代表者：慶北大学 教授 Eun-San Kim

【研究の概要及び目的】

1. 研究目的

電子加速器でのビーム不安定性に関する共同研究を行い、KEKのBファクトリー(KEKB)およびIHEPの電子陽電子衝突型加速器(BEPC, BEPCII)の性能向上に貢献する。また、相手国間との派遣・招聘やセミナーの開催により、ビーム不安定性に関わる日中韓研究者の研究交流を促進する。

2. 研究概要

本課題では上記目的を達成するため以下の研究を行った。

A)電子雲不安定性に関する研究、B)イオンによるビーム不安定性の研究、C)ビームービーム相互作用の研究、D)バンチ振動抑制システムの研究、E)ビーム計測システムの研究、F)ビーム調整方法の研究。

当初は、A)のみであったが、研究交流が進むにつれて、B)・F)を研究課題に含めていった。

【研究実施状況及び成果】

A)電子雲不安定性に関する研究

電子雲不安定性とは、放射光やビームハローがチェンバ壁に当たって放出される電子が陽電子あるいは陽子ビームに引きつけられて”電子雲”を形成し、その電子雲がビームと相互作用をしてビームが不安定になる現象である。電子雲は電子がチェンバ壁に当たって放出される二次電子放出によって増幅される。電子雲不安定性は、Bファクトリーの様な稼働中の加速器の性能に影響を与えていることに加え、CERN LHC、KEKB アップグレードおよびリニアコライダー用ダンピングリングの様に稼働間もないあるいは計画中の加速器にも影響を与え得る重要な現象であり、現在世界中で精力的に研究が進められている。

KEK と IHEP は平成 8 年から BEPC を用いて電子雲不安定性の共同研究を実施してきた。この研究を本事業で継続することが共同研究の第一の課題であった。これまでに実施した共同研究は、1) BEPC での電子雲不安定性に関する実験、2)シミュレーションプログラムの開発、3) BEPCII での電子雲不安定性に関する実験、である。

BEPC での実験は 1 年に 1 ないし 2 回実施され、各実験には 2 名程度日本側から参加した。実験内容は、1)電子測定用モニタを製作し電子量および電子のエネルギー分布を測定して電子の存在の直接的な確認すること、および、2)ビーム不安定性の抑制方法を探ることであった。実験により、1)については、電子測定用モニタを用いた測定で、50eV 以下の低エネルギー電子が電子の大部分を占めることが確かめられた。2)については、静電電極による電子の除去およびソレノイド磁石による電子の除去がビーム不安定性の抑制に効果があることが実証され、クロマチシティを増やすことでビーム不安定性を抑制できることも確認された。

シミュレーションプログラムの開発に関しては、BEPCII での電子雲効果を計算するため、1)チェンバ中の電子雲の成長を計算するプログラムと 2)電子雲による単バンチおよび結合バンチビーム不安定性を計算するプログラムが KEK の協力のもとに IHEP で製作された。1) ではアンテチェンバの使用や TiN コーティングをチェンバ表面に施すことが電子雲密度を減らすために有効であることが示され、2)では、BEPCII では単バンチ不安定性が起こらないことと結合バンチビーム不安定性はバンチ毎フィードバックシステムにより抑制可能であることが示された。いずれも BEPCII 設計段階での電子雲不安定性対策の検討、特に BEPCII の真空システム設計を決定するために役立った。

BEPCII での電子雲不安定性に関する実験はまだ始まったばかりであるが、陽電子リングに多バンチを入射し結合バンチ不安定性によるビーム振動のスペクトルを観測した結果、1)垂直方向振動に電子雲不安定性によく似たスペクトルがみられたこと、2)ソレノイド磁場が上記垂直方向振動抑制に効果的であることが示されている。また、ビーム振動はバンチフィードバックシステムで抑制できることが示された。

B)ビームービーム相互作用の研究

ビームービーム相互作用とは、衝突型加速器で互いのビームがビーム衝突点で電磁力を及ぼし合うことである。この相互作用によってビームが不安定になりルミノシティの低下が起きるため加速器物理の重要な研究テーマの一つである。本研究課題では、KEK と IHEP 共同でビームービーム相互作用のシミュレーションプログラム開発を行い BEPCII でのビームービーム相互作用の評価を行った。その結果、設計値の動作点（ベータトロンチューン）よりもルミノシティが高い動作点が発見された。また、実現可能ルミノシティの詳細な評価が可能となった。他に KEKB でのクラブ交差衝突のコミッションングへの中国側研究者の参加、クラブウエストスキームでのビームービーム効果の共同研究も行われた。

C)バンチ振動抑制のためのフィードバックシステムの研究

バンチ振動抑制のためのフィードバックシステムは、ビーム不安定性によって振動するビームの位置を検出し、振動を抑えるようにビームにキックを与えるシステムである。大ビーム電流・多バンチの加速器を安定に運転するために重要なシステムである。本研究課題では、IHEP に研究者を派遣して、BEPCII での横方向フィードバックシステムに関する研究協力（フィードバックキッカーの検討および性能測定、システム開発用実験への参加）を行い、BEPCII での横方向フィードバックシステムの建設・調整に寄与した。また、上海放射光施設、Hefei の放射光リングにおいても、実験やシステムの検討を共同で行った。

D)イオンによるビーム不安定性の研究

イオンによるビーム不安定性は、チェンバ内部の残留ガスを電子ビームがイオン化してできるイオンと電子ビームが相互作用しビームが不安定になる現象で、近年はシングルパスのビームが不安定になるいわゆる”速いイオン不安定性”が大電流・低エミッタンスの加速器で問題となっている。速いイオン不安定性の研究に関しては本事業が始まる前から韓国のポハン加速器施設(PAL)で韓国の研究者と共同実験を行ってきた。本研究課題では、引き続き韓国と共同研究を行った。2004 年度に計 2 回ポハン加速器施設で速いイオン不安定性に関する実験を行い、ヘリウムガスをリングに注入して、垂直方向ビーム振動とビームサイズを真空圧の関数として測定した。データ解析の結果、振動の成長率は真空圧と共にリニアに増加しヘリウムガスを仮定した計算機シミュレーションと良く一致することが分かった。

E)その他（ビーム計測システム、ビーム調整方法の研究等）

研究者交流によって以下の項目について情報交換・議論を行った。

- 1)ターン毎ビーム位置モニタを使ったビーム診断、
- 2)バンチ毎のチューンおよび軌道測定、
- 3)放射光モニタ、
- 4)ビームロス測定、
- 5)ワイヤスキャナによるビームプロファイル測定、
- 6)応答行列に基づくビーム光学補正の研究、
- 7)縦方向ビーム不安定性の研究、
- 8)高周波加速空洞内の高次モード電磁場に起因するビーム不安定性の研究、
- 9)ビームを使ったリングインピーダンス測定、
- 10)大強度陽子加速器でのインピーダンスおよび集団効果の研究。

【問題点等】

KEKB では、ルミノシティ性能等そのときの加速器の状態に合わせて加速器スタディの実施日を決めるため実施日が実施直前まで決まらないことが多い。中国側研究者を日本に招聘するときビザの取得に時間が必要なため、中国側研究者の加速器スタディへの参加が難しいことがあった。

【今後の計画】

1. H21年度の計画

BEPCIIではBESIII測定器を設置した状態でのコミッショニングが本格的に始まった。H21年度は、昨年度に続きBEPCIIのコミッショニングに関連するビーム不安定性の研究を主に行う。以下に共同研究を行う予定の項目を示す。

1)電子雲不安定性に関する研究、2)BEPCIIでの縦方向結合バンチ不安定性に関する研究、3)ビーム不安定性抑制のための高速フィードバックシステムの研究、4)衝突型加速器でのビーム-ビーム効果の研究、5)電子リングでのイオンおよびダスト効果の研究、6)ビーム不安定性観測等のためのビーム診断装置の研究。

2. 拠点大学交流事業終了後の活動

アジアにおいては、中国の BEPCII、上海放射光施設、CSNS (中国中性子源)、韓国の PLS-II (ポハン放射光施設アップグレード) 等、新しい加速器が活動開始あるいは建設開始を迎えている。また、日本でも KEKB アップグレードの計画が進められている。もし、拠点大学交流事業に類する事業が継続されるなら、10年にわたる拠点大学交流事業で得られた経験を生かし上記加速器の性能向上に貢献していきたい。

【評価】

1997年から行われてきた KEK と IHEP の電子雲不安定性に関する共同研究が 2000 年以降この拠点大学交流事業に引き継がれた。日中両国の研究者が参加して IHEP の電子陽電子衝突型加速器(BEPC)で電子雲不安定性に関する実験が実施された。

この実験結果から得られた知見は、すでに稼動を始めていた KEK-B の陽電子リングのビーム不安定性の抑制、それによる世界最高ルミノシティの達成に大きく寄与した。

また KEK の協力の下に IHEP でビーム不安定シミュレーションプログラムが開発され、実際に IHEP の新しい大型加速器である BEPC-II の真空システム設計に生かされた。BEPC-II でも引き続き電子雲不安定性の研究が継続されている。

この電子雲不安定性の研究は、目に見える形で大型加速器の性能向上に寄与し、実験成果につながったという点で、本事業で行われた共同研究のハイライトのひとつと言えるであろう。

その他本プロジェクトでは、IHEP におけるビーム衝突点でのビーム-ビーム相互作用のシミュレーションプログラムの開発、IHEP や上海、合肥におけるバンチフィードバックシステムの共同開発、韓国 PAL の放射光リングにおける速いイオン不安定性に関する実験実施等の成果が上がっている。

当プロジェクトに関わる本事業の問題点として、中国側研究者を日本に招聘する際のビザ取得に時間を要するため、日本での加速器共同スタディの日程調整に困難があったことが指摘されている。

電子蓄積リングとしてエネルギー、蓄積電流値、ルミノシティなどにおいて世界的に高い性能を達成した KEKB の技術や経験を生かし、アジアの新しい加速器 BEPC-II、上海放射光源リング、CSNS (中国中性子源)、PLS-II (PAL の新規計画)、Super KEKB などの設計や性能向上に寄与する共同研究が今後とも推進されることが期待される。

A3

【研究課題名】 ILC 建設のための加速器に関する共同開発

【研究代表者】

日本側代表者：KEK 加速器研究施設 教授 浦川順治

中国側代表者：IHEP 加速器部 教授 Pei Guoxi

韓国側代表者：浦項工科大学 教授 In Soo Ko

インド側代表者：Raja Ramanna CAT 教授 Satish Chandra JOSHI

【研究の概要及び目的】

ILC 開発研究用加速器 ATF および STF で行っている研究成果と今後の研究目標について、中国・韓国・インドのアジア研究拠点の立場から検討を行い、アジア多国間の ILC 研究開発に関する理解を深める。日本、中国、韓国、インドで共同開発を行っている光高周波電子源については研究成果と今後の共同開発の具体的な案を議論する。また、超伝導加速空洞開発の共同研究に関する意見交換と技術交流を行う。特に、高電界超伝導高周波加速空洞製作試験と超伝導空洞用クライオモジュール製作に関する共同開発案を作成して、共同研究を推進する。

マルチバンチ高品質電子ビーム生成技術の開発、空洞型 IP-BPM、小型電磁石および超伝導加速空洞(1.3GHz)技術の共同開発であり、ILC に必須の先端加速器技術開発をアジア国際協力下で進める。

マルチバンチ高品質電子ビーム生成技術の開発では光高周波電子源の性能を研究者が良く理解して、既の開発した装置改良を行う。この装置の共同製作と共同実験によって、高度な加速器技術、電子生成・加速過程でのビーム物理学及び小型加速器X線発生やFEL（自由電子レーザー発振）に関する相互理解を深める。

空洞型ビーム位置検出器開発では2nmの分解能を実現するために、高品質電子ビームを使って改良研究を継続する。この装置はILCのBDS(Beam Delivery System, or Final Focus System, ビーム収束系)で使用するものであり、ATF2 projectのビーム調整実験用として開発を進める。この10年におよぶ共同実験により最先端ビーム調整技術を確立する。

小型電磁石の共同開発は中国・高能研と行い、全てATF2に設置した。現在、ATF2のBeam Commissioningを進めている。ビームによる制御技術開発後、電子ビームを最終収束点で37nmまで絞り込む実験を開始した。

【研究実施状況及び成果】

本共同研究実験は主に本研究機構の試験加速器 ATF と STF で以下の 3 研究項目について行っている。

1. 光高周波電子源の開発および実用化の共同研究:ATF では高周波電子源空洞内に 120MV/m 以上の高電界を生成して、光電子バンチを加速し、電子源として運転に供している。マルチバンチ電子ビーム生成も順調に行えるようになった。本開発技術は、高能物理研究所・精華大学・上海放射光・PAL-第四世代放射光計画・インド高輝度電子源開発計画で進められている FEL 用電子源に応用できる。本研究成果は ILC 用マルチバンチ電子ビーム生成の基礎技術になる。

2. 高精度ビーム軌道測定: KNU と PAL の協力により製作した Cavity BPM を使って、取り出しビーム軌道の精密測定をナノメートルレベルで行っている。ここで得られた技術と成果は今後 BEPC-II、小型電子ライナック及び FEL 計画の加速器の性能向上のために利用する。例えば、電子・陽電子ビームの状態を最適に保つための、フィードバックシステムのビーム軌道測定に応用でき、またナノビームの衝突を安定化する基礎技術開発にも使える。一方、ATF において開発された One Pass ビーム軌道測定技術と Beam Based Alignment(BBA)の解析方法を発展させるために、種々のテスト実験を進める。この実験は 4 月～5 月と 10 月～翌年 3 月に実施して、その解析方法の実用性と軌道測定精度に関する報告書をまとめる。本研究成果は ILC 用ダンピングリングのビ

ーム調整技術およびビーム収束と衝突に必須の基礎技術開発になっている。

空洞型 IP-BPM の共同開発は韓国慶北大学(KNU)と PAL 研究所の研究者および技術者と設計検討を行い、高性能空洞型 IP-BPM 製作を行った。電子ビームを使った本格的な実験により 8.7nm 位置分解能を達成できた。

3. 1.3GHz 超伝導加速空洞の共同開発：STF では 9 cell 超伝導加速空洞 4 sets をクライオモジュール内に設置した。この装置に大電力高周波を入れて、超伝導空洞の研究開発実験を進めている。韓国・中国・インドから若手研究者が本研究開発に協力している。単セル空洞による基礎開発は KEK、韓国、中国、インドでそれぞれ行いながら、技術交流のために 35MV/m 用 9 cell 超伝導空洞の開発研究を STF にて 4 国間で協力して進めることになる。アジアの若手研究者の育成が大きな目的であり、本研究開発の目標達成には 3 年以上の地道な基礎研究が必要であると考えている。この共同開発プログラムにより超伝導加速空洞の若手専門家を育成して、将来 ILC 建設に貢献できる人材を増やす状況になった。

【問題点等】

アジア拠点事業で KEK、中国、韓国、インドの研究設備の差によって、先端加速器技術開発に関しては KEK が中心拠点になっている。共同開発研究のテーマと協力項目の内容を良く検討しなければ、KEK の装置と人材協力により得られた成果を単に共有しているにすぎない状況になってしまう。

【今後の計画】

2000 年から 5 年間、高品質電子ビーム源開発および ATF でのビーム物理研究をリニアコライダー先端加速器技術開発のテーマとして推進した。2005 年から現在まで、ILC-GDE の組織に協力することを考慮して、本拠点の本課題事業にアジアでの超伝導加速空洞開発協力を含めることになった。今まで 2 回の ILC アジア研究開発セミナーを開催した。本事業の活動によって、アジアの研究機関および大学との協力体制構築を進める。

先端加速器開発とその利用を推進する機運が世界的に高まり、この機会にアジア研究機関および大学との連携をより高めて、技術交流を推進することはアジアにおける日本のリーダーシップを示す良い機会である。国際交流を通じて、多くのアジア若手研究者が活躍するようになることが、国際協力による ILC 建設で日本がリーダーシップを発揮する環境作りにつながる。本拠点事業から今後重要性が増すと思われるテーマを選び、国際交流と国際協力実験の枠組みを堅持することがより効率的な事業展開であると思われる。

【評価】

ILC(International Linear Collider)は ICFA(International Committee for Future Accelerator)という世界委員会のもとで進められている素粒子物理学の国際共同プロジェクトであり、ヒッグス機構の解明など、ノーベル賞級の研究はもちろんのこと、世界観に大きな革新をもたらす人類の英知をかけた大プロジェクトである。本事業は KEK の ATF (Accelerator Test Facility)および STF (Superconducting Test Facility)という ILC 加速器開発の拠点においてアジア各地域と共同研究をすすめるものである。加えて光高周波電子源など先進的かつ応用可能性の大きい関連技術について、技術移転および今後の研究の展開について検討を行うことが目的であった。

KEK-ATF は世界に先駆けて光高周波電子源を実用化し、マルチバンチ電子生成を行っている。IHEP、精華大学、上海放射光、PAL、RRCAT などアジアの多くの研究所において次世代放射光源の一つとして FEL が検討されており、各研究所とも光高周波電子源を FEL の中核技術として注

目している。セミナーを数回にわたり開催し、技術交流および今後の研究の展開について議論するとともに、多くの研究者が KEK-ATF で共同研究を行った。このように光高周波電子源は先進性と広い応用可能性から各国の独自のプロジェクトでの利用を前提として共同研究が進んでおり、技術交流と人材交流がアジア地域全体のレベルアップにつながっており、高く評価してよい。光高周波電子源は STF でも導入予定であり、ILC の電子源としても応用される予定である。

KNU(Kyungpook National University, 韓国) と PAL の協力により、空洞型ビーム位置測定装置が開発され、ATF でビーム軌道の 8.7nm という超精密測定が実現した。また ATF で開発された BBA(Beam Based Alignment)技術は、ビーム自身の応答により蓄積リングでの軌道補正を極めて精密に行う技術である。これらのビームの精密測定・制御技術は ILC や FEL など極めて重要な役割を果たすもので、大きな成果である。

STF では ILC 用超伝導空洞の研究開発を行っている。STF に韓国、中国、インドから若手研究者が来日し、ILC 用の 9 セル空洞の研究を共同で行っている。また超伝導空洞の基礎開発として、単セル空洞を各国の研究所で独自に研究を進めている。本課題は当初は先進的電子源開発と ATF におけるビーム物理研究を目的として開始されたが、ILC 計画の進展に従い、超伝導空洞の開発も含めることとなった。これは超伝導についての技術交流と若手育成を通じて、アジア全体の技術の底上げと将来の ILC 建設の際のための人材育成に寄与するものである。この体制は課題 A1「電子加速器に必要な超伝導・低温技術に関する研究」の成果の上にたったものであり、技術供与・交流から共同研究への段階的発展という本交流事業の想定するモデルを体現していることに加え、課題間の相乗効果が発揮された例として、高く評価される。

一方で、アジア全体の状況をみると、日本、特に KEK はまだ突出した存在であり、共同研究はともすると KEK における研究に外部の研究者が単に参加しているだけ、という状況に陥る危険性がある。課題の研究対象については、その学術的意義に加えて、将来的に各国・研究所への広がりアジア全体のレベルアップにつながるものであるかどうかを吟味する必要があるだろう。

ILC はアジア、欧州、米州の三極の共同で推進されている。現状ではアジアでは日本が圧倒的な存在感をもって研究が進んでいるが、世界で存在感をより高めるためには、アジアを欧米と匹敵するような研究の極として発展させることが重要であり、それがひいては日本の存在感を更に高めることになる。そのような観点からも拠点大学方式のような人材育成、技術移転、そして各国での研究開発拠点の形成を通じてアジア全体の研究レベルの底上げを意図した事業の意義は大きい。

A4

【研究課題名】 EPICS 共同開発研究

【研究代表者】

日本側代表者：KEK 加速器研究施設 准教授 山本昇

中国側代表者：IHEP 加速器部 准教授 Ge Lei

韓国側代表者：浦項工科大学 教授 In Soo Ko

インド側代表者：Raja Ramanna CAT 教授 P. Fatnani

【研究の概要及び目的】

加速器の制御システムでは計算機およびネットワークを用いた統合制御システムの構築が主流となってい。また技術の成熟の進歩により、基盤ソフトウェアを共有し、その上に高度な制御シ

システムを構築すると言う手法が広がっている。EPICSはこのような基盤ソフトウェアとして世界中の加速器研究施設で使用例が広まっている。アジアにおいても、このような制御分野でのソフトウェア共有を進めることが今後の加速器研究の上に於いても重要である。EPICSの使用経験と言う面で、アジア各国の中では日本特に KEK は長い実績と実運用の経験を持っており、アジア各国での共同研究を主導する責任がある。KEK/日本で得られた経験を EPICS セミナーを通じ、EPICS を中心とした技術・知識の共有を進め、その基盤の上に更なる制御システム共通の技術についての共同研究を進めるのがこの研究の目的である。

【研究実施状況及び成果】

これまで、中国（高能研、上海放射光施設、合肥シンクロトン放射光施設）、インド（VECC、RRCAT）で EPICS セミナーを開催してきた。これらのセミナーの実施により、EPICS を基盤とした加速器制御システム構築の技術は順調にこれらの各国でも定着し、各国で建設中の加速器の制御システムで採用されている。また、それに伴いソフトウェア共有も進められている。近年は KEK で開発された EPICS の基本ソフトウェアを組み込んだ PLC(Programable Logic Controller)の利用について、性能評価やソフトウェア改善等の共同研究／開発が活発化してきている。

【問題点等】

加速器制御は加速器に基づく研究推進のための基盤ではあるが、その成果はそれぞれの加速器のソフトウェア／ハードウェアの構築と言う形でしか表現されないものが多い。これを正当に評価していただくことの難しさを感じている。

【今後の計画】

拠点大学交流プログラムに基づくこれまでの EPICS セミナーの実施により、アジア各国での EPICS 利用を広める事ができた。これにより、より広範な共同研究を進めるための基盤が出来上がったと言える。この基盤の上に立ち、次世代の加速器制御システムのための基盤を確立するための共同研究／開発を進めたい。当面は、高度化する組み込みコントローラーでの EPICS の適用とそれに基づく制御システムの構築に関する研究／開発が中心となっていくと考えている。

【評価】

EPICS とは Experimental Physics and Industrial Control Sytem の略称である。加速器は様々なデバイスが統合的に動作することが必要であり、そのため制御システムには高い信頼性とメンテナンスの容易さ、再利用性などが要求される。また技術の急速な進歩に対応するため、基盤ソフトウェアを共有し、その上に高度な制御システムを構築するという手法が主流になっている。こうした背景のもと、1990 年代から米国において基盤ソフトウェアとして EPICS が開発され、多くの加速器で採用が進み、現在事実上の標準となりつつある。経済の発展とともに加速器建設が進むアジアにおいても、基盤ソフトウェアを共有することが、研究の上で重要である。

KEK はアジア諸国の中で EPICS の長い使用実績、運用実績を持っており、アジアの加速器研究の基盤整備という観点から、EPICS についての知識と技術の共有を進める責任があるといえる。その基盤整備を行い、さらに高度な制御システム構築の共同研究を進めるのが本課題の目的である。

本事業において、日本（KEK および総研大）、中国（高能物理研究所 IHEP、上海放射光施設 SSRF、合肥シンクロトン放射光施設 NSRL）、インド（VECC, RRCAT）においてセミナーを開催し、EPICS の普及を推進するとともに、共同研究を進めてきた。セミナーを通じて、教育用

の教材や教育手法の確立が進んだ。これらの教材は WEB で公開されており、EPICS 普及に役立っている。また、韓国とも人材交流を進め、KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Reactor) で EPICS が採用されている。EPICS を基盤とした制御システムは各国で普及が進み、ソフトウェアの共有も行われている。KEK で開発された EPICS の組込み PLC (Programmable Logic Controller) の利用について、性能評価やソフトウェアなどの共同研究と開発が進んでいる。

本事業発足当初は日本側からの一方的な技術あるいは知識の供与という側面が強かったが、各国における技術レベルの向上および EPICS の実際の加速器システムへの普及が進み、共同研究が進展している。本事業により行われたセミナーを中心とする人材交流が果たした役割は非常に大きい。

今後本事業で確立された EPICS の共同研究という成果を引き継ぎ、当面は高度化する組込みコントローラーの EPICS への対応とそれによる制御システムの構築を課題として共同研究を進めていくべきと考える。そして次世代加速器制御システムを共同で開発することが次の課題である。

EPICS などの制御システムは加速器のような巨大システムを動かす上で必要不可欠なものであり、その出来如何で全体性能が左右されかねない重要な要素である。しかしその結果はシステム構築という形でしか表現されず、その研究成果がなかなか正当に評価されないのが問題である。

A5

【研究課題名】 先端加速器研究開発

【研究代表者】

日本側代表者：KEK 加速器研究施設 教授 中島一久

中国側代表者：IHEP 加速器部 教授 Jie Gao

韓国側代表者：GIST 教授 Hyyong Suk

インド側代表者：RRCAT 教授 P. D. Gupta

【研究の概要及び目的】

新しい原理や手法を用いる粒子加速器や放射光源の研究開発を行う。特に高強度超短パルスレーザーの進歩によってビームのエネルギー、質ともに実用レベルに近い技術が次世代加速技術として完成されつつあるレーザープラズマ加速法の研究開発を行う。高強度レーザー開発とその応用研究を熱心に進めている中国、韓国、インドとは、レーザープラズマ加速に必要な要素技術開発とともに、各国の高強度レーザーや加速器施設を相互に利用した新しい加速器や放射光源の実験的研究、技術開発を推進することを目的とした共同研究を行っている。

本共同研究は、平成 18 年度より開始され、中国では中国工程物理研究院(CAEP)の 100 テラワット級レーザーを用い、日本側は KEK、総研大、日本原子力機構(JAEA)、中国側は CAEP の他、清華大学および中国科学院高能物理研究所(IHEP)が加わりレーザープラズマ加速実験を実施し、アブレーション型のキャピラリープラズマチャンネルを用いて GeV 級の高品質電子ビーム加速実験に成功した。平成 20 年度からは、上海にある中国科学院上海光学精密機械研究所(SIOM)と応用物理研究所(SINAP)、および北京の中国科学院物理研究所(IOP)において、ペタワット級のレーザーを用いた 10GeV 級の電子加速実験、200MeV 級の陽子加速に関する共同実験計画を始めた。韓国との共同研究は、平成 19 年度より光州科学技術院(GIST)の 100TW 級レーザーを用いたキャピラリープラズマ加速器開発と電子加速実験を実施した。本研究は、韓国 GIST において、

平成 20 年に英国オックスフォード大学、日本から KEK、JAEA が参加して実施し、ガス充填型のキャピラリー加速器の開発、高強度レーザーパルス伝播実験を行った。インドとの共同研究は、平成 18 年よりインドラジャラマナ高等技術センター(RRCAT)の 10TW 級レーザーを用いてレーザープラズマ加速実験を実施した。平成 19 年度に 1mm 長のガスジェットを用いて 40MeV 準単色電子ビームの発生に成功した。

【研究実施状況及び成果】

平成 18 年度：中国では前年度より共同研究の始まっている中国工程物理研究院(China Academy of Engineering Physics,以下 CAEP)の世界最高出力フェムト秒レーザーシステム SILEX-I(300 テラワット、30 フェムト秒)を用いたレーザープラズマ加速共同実験を 2006 年 5 月から 9 週間実施した。この内、6 週間は長焦点光学系の調整と日本製ガスジェットシステムによる単色ビーム発生実験を実施し、200 テラワット以上のレーザーパルスを集光することにより 200MeV から 300MeV でエネルギー幅 20%の準単色電子ビームを発生させることができた。その後 3 週間は、総研大においてイスラエルとの共同研究で開発したキャピラリープラズマ導波路を用いた電子加速実験を実施した。4cm アクリル製キャピラリーでプラズマ導波路を生成する、アブレーション型キャピラリーに、24 テラワットのレーザーパルスを伝播させ、エネルギー 0.56GeV、エネルギー幅 1%の電子ビームを加速することに成功した。本共同研究の成果は、一流科学雑誌である nature photonics でも採り上げられ、高い評価を受けた (RESEARCH HIGHLIGHTS “LASER-PLASMA ACCELERATORS Capillary action”, nature photonics 2, 456, 2008)。

インドとの共同研究は、平成 18 年に、Raja Ramanna Center for Advanced Technology (以下 RRCAT)が 10 テラワット 50 フェムト秒の高強度レーザー装置を整備したのに伴い、レーザープラズマ加速に関する共同研究が始まり、2006 年 11 月に 3 週間実施された。プラズマ加速器となる超音速ガスジェットは、実績のある日本製装置を購入してもらい、6 テラワットの出力を用いたレーザープラズマ加速実験で 70MeV 以上の電子の発生を確認した。

平成 19 年度：中国では、CAEP の世界最高出力フェムト秒レーザーシステムを用いたレーザープラズマ加速共同実験を前年度に引き続き、2007 年 6 月に約 1 ヶ月間実施した。今回の実験は、同じ 4cm のキャピラリーを用い前回の実験を再確認することから始め、ガイディング光の測定システムを充実し、そのプロファイルのほか、分光スペクトルの変調 (光子加速) の測定も行い、前年度の実験結果の妥当性を証明することができた。

韓国では 2007 年 8 月に浦項工科大学(POSTECH)で開催されたアジア太平洋物理学会 (APPC10) に出席し、「レーザープラズマ加速研究」に関する招待講演を行い、最近の世界の研究動向と拠点交流事業で行った日中、日印共同研究の成果について報告した。この際、GeV 級キャピラリー加速に関する実験計画について議論し、韓国との間で早急に共同実験を立ち上げることに合意した。計画の内容は、光州科学技術院(GIST)の 100TW レーザーを利用し、LBNL で 1GeV の加速に成功したオックスフォード大学グループ開発のガス充填型キャピラリー放電プラズマチャンネルを用いて 1GeV 以上の高品質電子ビームの加速を実現しようとする計画である。その後、実験に関する覚書を KEK、日本原子力機構関西光科学研究センター(JAEA-KPSI)、GIST、オックスフォード大学の間で取り交わし、具体的な研究計画について 4 者で打ち合わせを行った。

インドとの共同研究は平成 18 年度に引き続き RRCAT においてレーザープラズマ加速実験を 2007 年 11 月に約 2 週間実施した。今回は、RRCAT においてレーザーが 10TW の最高出力を達

成し、前年度日本から導入したガスジェットシステムも整備され、レーザープラズマによる電子ビーム加速の準備が整っており、1mm のガスジェットから 40MeV の単色ビームの発生に成功した。

2007 年 9 月中国科学院上海光学精密機械研究所(SIOM)を訪問し、開発中のペタワット高強度レーザーを見学し、世界最高の 0.9 ペタワットを達成しビーム調整をやっており、実験装置も含め実験装置完成後、レーザー加速実験についても議論し、次年度から共同研究を始めることで合意した。

平成 20 年度：韓国 GIST とは、2008 年 5 月から約 1 ヶ月間、キャピラリーレーザープラズマ加速実験を実施した。本共同研究は、1GeV 加速に成功しているガス充填型キャピラリープラズマ導波路を開発した英国オックスフォード大学のグループと KEK および日本原子力機構のレーザー加速グループが、韓国 GIST の 100TW レーザーを用いて、将来コンパクトな X 線 FEL に応用可能な GeV 級の高品質電子ビーム源を開発する目的で、前年度に取り交わした覚書に基づいて行われた。ガス充填型キャピラリーの製作および放電回路に関する情報をオックスフォード大学から譲り受け、GIST と KEK で、それぞれ独自にキャピラリーシステムを開発した。実際の実験にはオックスフォード大学から 1 名の大学院学生が参加し、日本からは実験に使用する光学系や測定器を持参し、3 名が参加した。電子加速は確認できなかったが、装置が所定どおり作動し、3cm キャピラリーに高強度レーザーパルスを伝播させることができた。

中国上海にある SIOM では出力 800 テラワットが出力可能なレーザーが完成しており、真空チャンバー等の実験装置の整備も済み、2008 年 11 月と 12 月に共同実験の目的と進め方について議論した。電子加速についてはキャピラリーを用いた 10GeV 加速をめざした安定な高品質電子ビーム源の開発、イオン加速に関しては、がんの陽子線治療応用が可能な 200MeV の単色陽子ビーム源の開発をめざした加速実験を SIOM のペタワットレーザーを用いて行うことで合意した。電子加速のためのプラズマ加速器となるキャピラリーは、新たに KEK で電子入射用キャピラリーを開発し、SIOM で 2009 年 2 月からベンチテストを開始し、安定なプラズマ生成、プラズマ密度測定およびレーザーパルスの 5cm プラズマチャンネルガイディング実験に成功している。また陽子加速のためのナノ薄膜ターゲットの開発については、NTT 基礎研究所の協力が得られることになり、水素吸着カーボンナノチューブを成長させたナノ薄膜ターゲットの製作開発を 2009 年 3 月に行った。

中国北京 IOP においてもレーザープラズマ加速の共同研究を開始することになった。IOP とは 2005 年から JST の「高強度レーザーに関する日中韓研究協力」のもとで共同研究が進行しており、2005 年には IOP の 10 テラワットレーザーを用いて予備的なレーザープラズマ加速実験が行われていたが、小型ペタワットクラスレーザーが完成し、最高出力 760 テラワットを達成したのに伴い、レーザープラズマ加速実験に供したいという意向を受け、2008 年 12 月に IOP ペタワットレーザーを用いたレーザープラズマ加速実験に関する打合せを行った。IOP のペタワットレーザーによるガス充填型のキャピラリーを用いたレーザープラズマ加速実験を実施することに合意した。

インド RRCAT とは、本年度は研究所訪問による共同実験は行われなかったが、前年度の共同研究により完成した超音速ガスジェットシステムを用いて、RRCAT で独自にレーザープラズマ加速実験を行い 1MeV エネルギー幅の高品質電子ビームの発生に成功した。この結果は、テラヘルツ光源として非常に有望であると期待できる。

【問題点等】

3年間の共同研究で、アジアにおける高強度レーザーの発達・普及と相俟って、参加研究機関は高エネルギー高品質電子ビームのレーザー加速技術を修得、最先端の成果を世界に発信できるまでになった。本共同研究は、中国、韓国、インドなどアジアの先進国において開発されたレーザー施設を用い、日本で開発した新たな装置を持ち込みプラズマ加速技術をテストするという形態で実施され、日本の加速器施設を用いた従来の加速器技術の共同研究とは逆方向の交流であった。このため人的交流だけでなく、物的交流が大きな部分を占め、これらの国々との交流において研究機器の輸出入に一般商業品と同じ規制が適用される場合があり、それにより研究内容、成果が制約されることになった。今後、アジアの国々との研究交流には物的交流面の規制緩和が望まれる。

【今後の計画】

レーザー加速研究の世界の動向は、電子加速はキャピラリーを用いて1GeV級が達成され、次のステップは、10GeVクラスの高品質電子ビームを安定に発生させ、コンパクトなX線放射光源、X線FELあるいは高輝度テラヘルツ光源に応用することにある。またイオン加速は、世界の多くの高強度レーザー関連の研究機関で、がん治療のためのコンパクトな粒子線治療機器の開発をめざした研究が盛んになっているが、陽子のエネルギーで70MeV-250MeVと言われる医療の窓エネルギーに現状の研究では達しておらず、この陽子ビームの「医療の窓エネルギー」の達成が当面の目標となる。これらレーザープラズマ加速に関するアジアにおける研究活動は、平成18年の本事業における「先端加速器研究開発」共同研究の開始以来、中国、韓国、インドにおける本事業参加の主要な大学、研究機関で活発化し、一流学術雑誌の記事にも採り上げられ、高い評価を受けるまでになった。本共同研究課題は、今年度はまだ4年目であるが、各国において研究体制、基盤設備、実験技術が今までの事業を通じて整備されている。この相手先研究機関の研究資源を有効に活かし、各研究機関の研究方針と特色に合わせた、長期的視野で共同研究を構築するための研究課題を最終年度に実施する。

【評価】

本課題は、レーザーによる新しい加速方式、特に近年進歩が著しいレーザープラズマ加速の研究開発をアジア各国と共同して行うことを目的とする。中国、韓国、インドはともに高強度レーザーとその応用について熱心に取り組んでおり、各国のレーザー装置や加速器施設を相互に利用した共同研究を行っている。

中国工程物理研究所(CAEP)には100テラワットクラスのレーザーがあり、日本側からはKEK、総研大、日本原子力機構(JAEA)、中国側はCAEPに加えて、高能物理研究所(IHEP)、清華大学が参加し、アブレーション型キャピラリープラズマチャンネルにより、0.56GeV、エネルギーひろがり1%という電子ビーム加速実験に成功し、画期的な成果をあげた。本実験の成果はNature Photonicsで紹介され、世界的にも高く評価されている。2008年度からは上海光学精密機械研究所(SIOM)、応用物理研究所(SINAP)、および中国科学院物理研究所(IOP)と共同で、ペタワットクラスレーザーによる10GeVクラス電子ビーム加速、および200MeVクラスの陽子加速実験についての研究を開始した。

韓国との共同研究として、光州科学技術院(GIST)の100テラワットクラスレーザーを用いた電子加速実験に取り組んでいる。日本からKEKとJAEA、それにイギリスのオックスフォード大学が参加し、ガス充填型ガラスキャピラリーを開発し、加速実験を行った。

インドの RRCAT では 10 テラワットクラスのレーザーを用いて、レーザープラズマ加速実験を行った。長さ 1mm のガスジェットにより、40MeV の準単色電子ビームの生成に成功した。

レーザープラズマ加速の世界的動向をみると、GeV クラスの達成がなされ、次の課題として 10GeV クラスの電子ビーム加速、安定性の向上、単色ビームの品質の向上などが挙げられる。今まではレーザー加速をすること自体が研究の目的であったが、将来的には高品質 GeV クラス電子ビームを生成し、X 線 FEL に代わる放射光源につなげるなど、利用も視野にいたした開発に向かうと思われる。本事業で構築された研究所間・大学間のネットワークをさらに発展させ、相互の研究資源の利用、共同開発、基盤整備、などを進める必要があるだろう。

本課題の中心であるレーザープラズマ加速は、大強度レーザーとプラズマチャンネルやガスジェット装置など、従来型加速器に比べると小規模な施設で実施可能な点が特長である。レーザーはそれ自身が極めて進歩の早い装置であり、かつ基盤技術として各国が力をいれて開発をすすめており、中国、韓国、インドも例外ではない。本課題においては、各国にある大強度レーザー開発の拠点間にネットワークを形成し、その装置を利用することで効率的に最先端の科学研究の成果を挙げている点で、注目に値する。一般的な技術交流においては、キャッチアップ、共同研究あるは競争という段階的な発展を経るのが常であるが、本課題においてはレーザーの進歩、およびレーザー加速の研究の進捗が極めて速く、早い段階から対等な共同協力関係が構築されていることが特徴的である。レーザーやプラズマ研究の基盤があったことが、セミナーなどレーザープラズマ加速の啓蒙活動から、比較的短期間で最先端の共同研究が立ち上がった理由だろう。以上のように、他の課題とは理由は異なるが、人材交流を基本とした本事業が有効に利用された例として、高い評価をしてよい。

A6

【研究課題名】大強度パルス中性子に関する研究開発および利用研究

【研究代表者名】

日本側代表者：(加速器班) KEK 教授 小林 仁
(中性子科学班) KEK 教授 鳥飼直也

中国側代表者：FU, Shinian
WANG, Fangwei

韓国側代表者：REE, Moonhor

【研究の概要及び目的】

(加速器班)

J-PARC MR は 2007 年度より、本拠点事業に参加した。2007 年度および 2008 年度は建設期間中のため、加速器から JSPS 加盟機関への研究者派遣数はゼロである。中国 SNS 計画からの来訪研究者との技術情報交換、ビームコミッショニングなどを中心に活動を展開した。

(中性子科学班)

KEK 中性子科学研究施設 (KENS) は、1980 年に物質研究のための本格的な陽子加速器駆動のパルス中性子実験施設を世界に先駆け立ち上げ、2006 年度末のシャットダウンに至るまで、アジア地域における唯一のパルス中性子実験施設として高性能の実験装置およびデバイス開発、パルス中性子を利用した最先端の物質研究を推進してきた。平成 20 年 (2008 年) 度には KEK の装置としてそれぞれ設置目的・性能を異にする 5 台のパルス中性子実験装置を J-PARC に立ち上

げ、コミショニング及び一部共用実験が開始されている。一方、中国においては中国核破砕中性子源（CSNS）計画がオフィシャルに認められ、デイ・ワン実験装置についての設計が本格化している。しかし、CSNS 計画の装置担当者はパルス中性子を利用した実験の経験はあっても、実験装置を一から設計・設置し、立ち上げた経験には乏しい。そのため、J-PARC 実験装置の立ち上げ当初にコミショニングに参画することは、CSNS 計画の装置担当者にとっては何にも代え難い経験であり、CSNS における実験装置の設計にも大いに活用されることになる。本中性子科学班では、アジア地域の中でも主に中国、韓国を相手国として、J-PARC における実験装置のコミショニング作業への参画のため装置担当者の滞在を受入れるとともに、研究会等を通じて今後展開するサイエンスの方向性、協力アイテムについて議論していく。このような人的な交流を通じて、アジア地域におけるパルス中性子科学に関する研究交流体制を構築し、本邦が誇る最先端の中性子実験装置・デバイス技術に基づいた、当該地域全体の中性子科学分野の研究レベルの向上を目的とする。

【研究実施状況及び成果】

(加速器班)

中国 SNS (CSNS) グループからの来訪者とキッカーシステムの開発をテーマに技術交流を展開した。MR の大電流化に向けて検討中の速い取出しキッカーシステムは、中国 SNS 計画においても考えられている。特に、ビームが誘起するウェーク場吸収において、J-PARC の方式が検討されている。本拠点大学交流事業で得られた、技術検討の概略を次に示す。

1. キッカー電磁石のパルス磁場エネルギー源：

集中定数型(PFN、Pulse Forming Network)とケーブル型 (PFN、Pulse Forming Line) が候補としてあげられる。

CSNS (中国 SNS) はケーブル型 PFL を検討している。ここで使用するケーブルの総長は 50km を予定している。この方式を J-PARC に当てはめると、ケーブル総長は 30km (6,000 円/m) となる。ケーブルが高額なことから、故障が発生した場合の修理が困難なため、J-PARC の MR では導体コイルとコンデンサーで構成する集中定数型 PFN を技術選択した。本方式の PFN は、磁場の立ち上がり時間はケーブル型 PFN に比較して遅くなるが、出力波形調整が可能であり、また故障からの復帰が容易などの利点がある。実際、MR の速い取出しに用いているキッカーの出力波形の平坦度は 1% 以下を実現している。

2. 周回ビームのウェークエネルギー吸収：

大ビーム強度においては、周回ビームが真空容器を含むキッカー内に誘起する電磁場エネルギーを速やかに吸収することが必要である。これはビーム自身がキッカー内部に誘起する電磁エネルギーの蓄積が、エミッタンス増加を助長し、ビーム損失を増大するからである。そのため、ウェークエネルギー吸収は、将来の MW 級ビーム強度に向けて重要な技術の一つである。

ここでは、ウェークエネルギーの吸収方法として、過飽和リアクトルと無誘導抵抗器 (15~30Ω) を組み合わせた吸収回路の検討を行った。

CSNS：電源側に吸収回路を設置する案は、米国 SNS の方式に近いものである。この場合、全ての部品を地上部の電源室に配置することが可能である。一方、キッカーを励磁するエネルギーが当該回路にも流れ込むため、全体のエネルギー損失が大きくなる。

J-PARC：吸収回路は電源側ではなく、キッカー本体側に配置する。これにより、当該回路に流れ込むマグネット励磁エネルギー量を低減可能である。回路のウェークエネルギーの吸収は発生

源からの距離が短いほど効果的なので、技術的な困難さはあるが真空容器内に実装するのが理想である。但し、これに対応するには、R&Dが必要であり、時間が必要と思われる。

3. 低ノイズ化：

キッカー電源の変調器部全体は高ノイズ源である。そのため、装置全体を絶縁オイルを充填した金属ケースに組み込むことが最も直接的な低ノイズ化対策である。すなわち、回路のファラデーゲージ化を行い、ノイズを出さない、入れないを実現する。CSNSおよびJ-PARCにおいて同様の方式が検討されている。また、同方式はKEKが理研X-FEL（C-band 8GeV電子リニアック）向けに実用化し、全て（約70台）の変調器電源に採用されている。

4. 保守性の向上：

年間5,000時間の共同利用に対応するため、高保守性は非常に重要である。ここでは回路のモジュール化を行うことを検討している。具体的には絶縁オイルを満たした金属ケース天板に、変調器部の全回路を実装し、短時間で回路群の交換を実現する手法である。CSNSおよびJ-PARCにおいて同様の検討されている。また、同方式は理研X-FEL向けにKEKで開発し、実機稼動中である。

（中性子科学班）

中性子グループは、加速器班（代表者：小林仁）と中性子科学班（代表者：鳥飼直也（平成21年4月より三重大学への異動のため代表者は清水裕彦氏に交代））の二班により構成され、平成18年度に本拠点大学交流事業に参画した。中性子科学班では、これまで主に中国と韓国を相手国として、人的な研究交流体制の構築を進めてきた。中国で進められている中国核破砕中性子源（CSNS）計画では、中国国内の研究動向や利用者との議論を踏まえ、粉末回折装置、反射率計、小角散乱装置の3台がデイ・ワン実験装置として位置づけられ、それら装置のデザインが急がれている。しかし、CSNS装置担当者の殆どは中性子実験装置を一から設計、設置した経験がないため、J-PARCにおいて実際にパルス中性子を使った装置のコミッショニングに参加することは、これから装置の詳細設計を行う上で何にも代え難い経験であり、実験装置の設計にも大いに活用され得る。そのため中性子実験装置の設計に関する意見交換、J-PARC既設装置（BL08粉末回折装置、BL16反射率計）で実施されるコミッショニング作業および実験への参画を目的として、CSNS計画のデイ・ワン装置に関わる研究者3名（L. HE氏、T. ZHU氏、J. TAO氏）の滞在を1ヶ月間受入れた。ただし、小角散乱装置については、J-PARCにまだ装置が存在していなかったためKENSにおいて長年小角散乱装置の開発や実験に関わり豊富な経験と知識を有する古坂道弘氏（北海道大学）の下に装置担当者（J. TAO氏）が滞在し、その滞在中の議論を通じてCSNS小角散乱装置の設計方針が固められた。また、中性子実験装置にとって不可欠な中性子検出器、中性子スーパーミラーの開発担当者として、それぞれZ. SUN氏とT. ZHU氏の滞在を受入れ、J-PARCにおける新型検出器のテスト測定への参画受入れ、国内のミラー光学系開発研究者（京大原子炉・日野正裕氏）との実質的な意見交換が行われた。さらに、KEKの粉末回折装置のポスドクとして、中国から優秀な若い研究者が応募し、公正な審査を経て実際に採用に至っている。一方の韓国に対しては、中性子科学分野において毎年両国で交互に開催している日韓中性子科学研究会に日本人研究者が出席し、J-PARCの現状報告とサイエンスの展望についての意見交換を継続して行ってきた。また、放射光X線を利用した斜入射小角散乱法の専門家である韓国Pohang工科大学のM. REE氏およびそのグループメンバーの滞在を受入れ、J-PARCのBL16反射率計におけるコミッショニング作業の一環として、中性子の特長の一つである物質透過性の高さを利

用した固液界面に関する反射率のテスト測定が実施された。

【問題点等】

(加速器班)

夫々の加盟機関で目指すテーマや緊急性が異なることや、期待する人材を相互に派遣できない場合がある。このことは拠点事業に限ったことではないが、何らかの工夫が必要と思われる。また、加盟国が限定されているため、例えば台湾の研究者との交流ができないなどがあげられる。

(中性子科学班)

中性子科学分野では、J-PARC への装置提案や二国間研究会の開催など関係の深い台湾との交流が制度上サポートされないこと、また J-PARC 中性子施設を外からみた時に、KEK と JAEA という二つの窓口があることが手続きなどを複雑にするなどが問題点として挙げられる。

【今後の計画】

(加速器班)

J-PARC はビーム強度 MW 級を目指した加速器であり、世界的にも未踏の領域である 99.999% のビーム加速と取り出しを目指した、人的および技術開発を継続することが重要である。実務を担当する事務局の設置などの強化も必要と思われる。

1. キッカーマグネットの技術情報交換と支援：

J-PARC の主リングに使用するキッカーマグネット電源はパルス化したエネルギーの伝播に反射が生じないようにインピーダンス整合という概念を始めて導入し、同軸ケーブル型 PFL 回路を用いること無く、1%以下の平坦なパルス磁場を実現した画期的な装置である。また、大電流化に向けてウェークエネルギーを吸収する方式についても、エネルギー損失を低減可能とするように、吸収回路をマグネット側に配置する方式を検討しており、その理論回路解析を進めている。共同研究のテーマの一つとして支援を継続する予定である。

2. 薄いセプタムマグネットの技術情報交換と支援：

J-PARC の MR では、大電流の薄いセプタムを実用化し、実機運転に用いている（遅い取出しビームライン）。低ビーム損失でビームを引き出すためには、セプタムコイル厚を出来るだけ薄くする必要がある。MR の速い取出しビームラインでは 7 mm 厚のセプタムコイルに数千アンペアのパターン電流を印加する。コイルの電気絶縁、励磁電流によるパルスの発熱やコイルが発生する磁場による振動保持は高度な技術が必要である。従来から用いられている電気絶縁材料のポリミドは長時間運転に問題が残されている。これらは他の機関においても問題になっており、早急の改善が望まれている。

MR では、セプタムコイルの電気絶縁方法として、耐放射線に優れるセラミック粉末をコイルの表面に気中プラズマ溶射したものを開発し、実機で稼動中である。セラミック溶射層の密着強度は実用レベルにあるが、より大きな振動が生じるようなパルス励磁のマグネットへの応用において、更なる R&D の必要がある。耐久性と剛構造を目指して、8mm x 8mm サイズの非常に細かい MIC (Mineral Insulated Cable) 構造の薄いセプタム用の試験的な製作を行った。サンプル MIC コイル屈曲による電気絶縁抵抗の保持などの基本性能を確認している。MIC は銅の外皮とコイル間にシリカなどの無機材料を充填して電気絶縁をする 2 重構造を有する。そのため、セラミック溶射と同様に耐放射線性に優れ、容易に剛構造が得られる利点がある。但し、市場に流布する MIC は 20mm~25mm 角のサイズであり、本件のように細いものについては、試験的なレベルであり、共同研究のテーマの一つとして開発を継続する予定である。

3. 安全管理(Personal Protection System, PPS)の技術情報交換と支援：

加速器を運転する場合、万が一にも人体への被爆があってはならない。多種多様の機器群で構成する加速器の運転と安全を両立する方法は、各機関で色々な試みがされているが、未だ問題を抱えているのが現状である。J-PARC では PPS (Personal Protection System) と MPS (Machine Protection System)が協調し安全を担保する概念を導入し、非常に完成度の高い安全システムを実現している。共同研究のテーマの一つとして支援を継続する予定である。

(中性子科学班)

相手国としては実際にパルス中性子源の建設計画が進む中国を中心に、J-PARC におけるコミッション作業への参画のため装置担当者を受入れるとともに、今後パルス中性子により展開していく具体的なサイエンス、また双方にとって意義のある共同開発アイテム等についての議論、相互の研究・開発協力によりアジア地域全体の中性子科学分野の発展へと結びつける。

【評価】

1980年に、KEKは原子核研究に用いられていた陽子加速器を応用し、世界最初の実用陽子加速器駆動型パルス中性子源(KENS)を成功させた。これ以後、米国や英国に同様の施設が建設された。2000年代に入りパルス中性子源施設に対する要望はさらに高まり、1MW級パルス源施設の建設が開始された。米国のSNS計画(2006年稼働)、日本のJ-PARC計画(2008年稼働)、欧州のESS計画(最近、建設サイトが決定した)である。この世界の三大拠点のひとつとして、日本はアジア・オセアニア地域の中性子科学の拠点として、特徴ある世界最先端科学を推進していくことが重要である。

中国は、サブ1MWクラスのパルス中性子源であるCSNSを建設しつつある。しかし、加速器や中性子源、測定装置などの経験が乏しく、また、中性子を利用した物質生命科学の経験も乏しい。この現状を踏まえ、中国側では教育を含む基盤整備にも力を注いでいる。J-PARCなどの大強度中性子源では、いままでにない桁違いに精密な制御、例えば空間電荷効果を考慮したビームチューン管理、ビーム軌道の制御などが必要となる。本事業では多くの中国研究者がJ-PARCのコミッションへ参加したが、これは相手側のニーズにまさに合致したものといえる。また早い取り出しのためのキッカーシステムについて、CSNSグループと技術交流を進め、ケーブル型と集中定数型を候補として検討を進めている。

韓国にも大強度陽子加速器を利用した中性子源計画が存在するが、現状ではむしろ原子炉施設の高性能化(冷中性子源を付加)が先行して進められている。大強度パルス中性子源の建設の一方で、原子炉を用いた中性子科学の革新は着々と進んでいる。また、韓国側からJ-PARC利用の要望も多く、韓国も中性子科学にたいするニーズは高い。中国の場合とは状況は異なるが、J-PARCを拠点とした交流事業の意義はやはり大きい。

中国、韓国の中性子科学の現状をふまえると、当該拠点事業が実施した諸事項はまさに当を得たものである。多くの中国や韓国の中性子科学研究者を我が国の中性子科学研究者と結びつけ、その人的交流を図れたこと、相手国の研究推進に貢献できたことは事業の第1歩としては大成功であった。

最先端の研究を推進するためにも、J-PARCをアジア・オセアニア地域の中性子科学研究拠点として、地域全体の底上げの必要がある。そこで重要になるのは、研究者レベルの交流に加えて、相手国の教育基盤への貢献であり、わが国のシニア研究者の派遣などを行うことを検討すべきである。

今後、J-PARC における研究を始めとして、アジア・オセアニア研究者の短期・長期滞在参加による中性子科学（物質生命科学）が盛んになっていくものと思われ、その基盤整備を行うことが必要である。例えば、中性子科学は学際的分野であり、多くの研究者そして研究機関が存在し、J-PARC へのアクセスも良いつくば地区をアジア・オセアニアの中性子科学の拠点として整備することが挙げられる。

B1

【研究課題名】電子・陽電子リニアコライダーのための物理および測定器の研究

【研究代表者名】

日本側代表者：

2000 年度～2004 年度：KEK 教授 松井孝幸

2005 年度～2009 年度：KEK 教授 宮本彰也

中国側代表者：

2000 年度～2005 年度：IHEP Zhao Zhengguo

2006 年度～2009 年度：IHEP Li Weiguo

韓国側代表者：

2005 年度～2009 年度：Kyongpook Nat. Univ. Hwanbae Park

インド側代表者：

2006 年度～2009 年度：TIFR Atul Gurtu

【研究の概要及び目的】

電子・陽電子リニアコライダーは、エネルギーフロンティアで衝突実験を行い、世界最先端の研究を行うことを目指している。リニアコライダーでは、従来の円形コライダーでは到達不可能な超高エネルギーにおいて高輝度衝突実験が実現でき、宇宙創世の謎に迫る成果が得られることが期待されている。本研究では、リニアコライダーにおける物理を検討し、測定器の準備研究を行うことを目的としている。

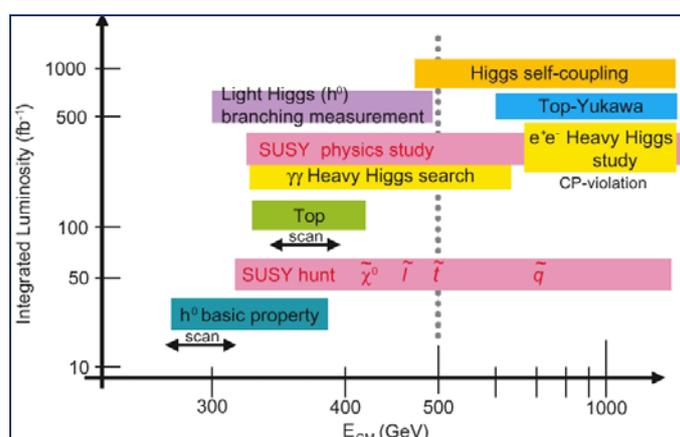


図 1：ILC の物理と、必要な重心エネルギーと積分ルミノシティ

日本におけるリニアコライダーの準備研究は平成年代初頭より始まった。一方、アジア諸国でも加速器科学に関する取組みが進むとともに、リニアコライダーへの期待が高まり、平成 10 年には ACFA(Asian Committee for Future Accelerators)のもとにメンバー国を母体とするリニ

アコライダーの物理と測定器に関するワーキンググループが設置された。本研究は、このワーキンググループのメンバーであるアジア諸国の研究者とともに進めてきたものである。

平成 16 年にはアジア・北米・欧州におけるそれまでのリニアコライダーに関する研究を進展させ、国際リニアコライダー (ILC) として全世界が共同して計画を進めていくという合意がなされた。その合意を受けて、我々アジアの研究者が中心になって、ILC 実験のための GLD 測定器コンセプトを創出し提案した。GLD 測定器の主な特徴は、(1)衝突点近傍に設置した薄型ピクセルバレーテックス測定器により、 b クォークや c クォークを高効率で同定すること[論文 1]、(2) シリコン検出器とガス飛跡検出器を組み合わせ、高精度の荷電粒子測定を行うこと、(3)大口径ソレノイド磁石の中に設置した超細密読みだしのカロリメータを活用し、Particle Flow Algorithm (PFA)を適用して高精度なジェット再構成を行うことができることなどである。ILC エネルギー領域では、生成したヒッグス粒子、トップクォーク、 W/Z 粒子などは多数ジェットとして測定される。従って、GLD の持つジェットの高精度測定性能とクォーク同定能力は、ILC 事象を素粒子レベルで測定していくうえで不可欠なものである。

GLD コンセプトは、GLD DOD (Detector Outline Document)としてまとめ発表された。その後、ILC 測定器準備研究を加速器の準備研究と歩調を合わせて進めていくために、工学設計に向けた LOI の提出が ILCSC(ILC Steering Committee)により呼びかけられた。LOI 提案においては、GLD と同種の測定器を提唱しているヨーロッパの LDC グループと合同で提案することが適切であると考え、合同して ILD グループを結成した。測定器パラメータに関しては、物理反応過程を用いたシミュレーションによる最適化作業にもとづき、ILD 基準測定器パラメータを決めたのち物理性能を評価して、平成 21 年春、ILD LOI を提案するに至った。ILD 測定器の概念図を図 2 に示す。

GLD/ILD の測定器コンセプト研究と並行して、測定器要素技術の研究開発を中国や韓国などの研究者と共同して進めてきた。GLD/ILD の準備研究にお

いて、韓国はシリコンストリップ半導体検出器の設計開発を行い、両面読み出しセンサーの開発やシミュレーションによる性能研究を行った。また、シンチレータカロリメータの開発も共同で行い、押し貫き法により安価にシンチレータを作成する方法とその性能に関する研究を行った。中国の研究者とは、TPC 開発研究を進めた。LCTPC 国際共同研究グループに参加し、日中共同で GEM 端部検出器を開発し、ビームテストによる研究を進めている。

また、測定器に関する研究と並行して、ILC の物理に関して、ヒッグス粒子や余剰次元現象など新しい物理に関する探索可能性に関する研究もすすめた[論文 2,10,12]。

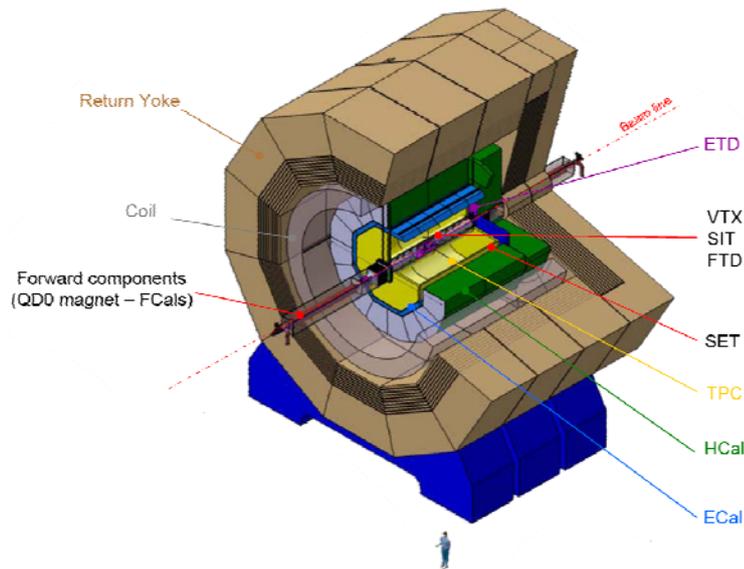


図 2：ILD 測定器の概念図

本研究の期間、日本および中国・韓国・台湾・インドにて ACFA Workshop を開催し、リニアコライダーの物理と測定器に関する研究交流と活発な議論を行った。平成 18 年度からは、ILC 加速器の開発を行っている GDE の会合と合同して Workshop を開催している。これはアジアにて ILC の開発研究に参加している研究者の間での意見交流の貴重な場となっている。

【研究実施状況及び成果】

平成 15 年度までの実施状況と成果については中間報告にまとめられているので、ここではそれ以降の状況について記述する。

平成 16 年度

平成 16 年夏、電子・陽電子リニアコライダーの加速器技術に関する技術選択が行われ、プロジェクトを International Linear Collider (ILC) として建設準備を進めていくという合意が世界の主要加速器研究所間でなされた。加速器の準備研究は、GDE(Global Design Effort)が世界的枠組みで進めているが、測定器の建設準備も加速器開発に並行して進めるために、Detector Outline Document(DOD)を作成することが WWS(World Wide Study on Physics and Detector for Linear Collider)組織委員会により提唱された。これをうけ、11 月に台湾で開催された第 7 回 ACFA Workshop においては、アジアの研究者が中心となり、GLD コンセプトグループが結成された。GLD グループではシミュレーションによる測定器性能や ILC の物理の可能性に関する検討[論文 2,3]をすすめるとともに、測定器の要素技術の開発研究を行った。これらのことに関して議論・検討を行うために KEK より 1 名 (松井) を中国高能物理研究所および清華大学に派遣した。

また、1 年間の物理と測定器の研究を総括するために、平成 17 年 3 月に岩手県安比高原にて研究会を開催した。素粒子物理学と宇宙物理学の接近にかんがみ、研究会では宇宙観測などの近接研究者にも検討に加わっていただいた。ACFA4 カ国および台湾から 34 名の参加を得て、各々の地域で進められてきた研究活動についての総合的な検討とまとめを行った。

平成 17 年度

中国の清華大学に宮本、山下、山本を派遣し ILC 計画の進行状況と、GLD 概念設計に関する議論を行った。

また、この年より韓国が共同研究に参加した。GLD コンセプトに関する検討を進めるために韓国コリア大学に宮本を派遣し、シミュレーションに関する講習会を開催した。韓国グループは GLD コンセプトにおける半導体軌跡検出器の概念設計と性能研

究を行い、検出器のレイヤー数を 2 から 4 に増やすことにより、運動量測定精度が 20%程度向上することを示した (図 3)

また、第 8 回 ACFA ワークショップを韓国・テグ市で開催し ILC の物理と GLD 測定器の概念設計の検討を進めた[論文 10]。GLD 測定器については、Detector Outline Report(DOD) として平成 18 年 3 月にインドで開催された、LCWS2006 の際に発表した[論文 6]。

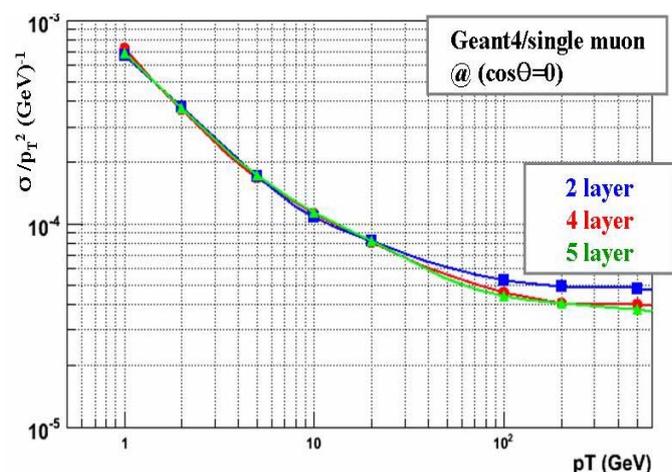


図 3 半導体検出器のレイヤー数が 2, 4, 5 の場合について運動量分解能を示す。

一方、測定器の要素技術開発として TPC 開発を進めた。前年に行ったビームテストデータの解析のために、フィリピンから学生が来日してデータ解析を進めるとともに、中国の清華大学から研究者が来日し、TPC 研究の進め方について打ち合わせを行った。

平成 18 年度

ILC の物理と GLD 測定器の性能に関するシミュレーションによる研究を継続して進めた。測定器シミュレーションに関しては、韓国グループと協力して半導体検出器の軌跡再構成プログラムを開発するとともに、Particle Flow Analysis (PFA)プログラムの開発を進めた。PFA は高性能軌跡検出器と大口径ソレノイド磁石内に設置された超精密読み出しカロリメータという GLD の特徴を生かし、ジェットエネルギー測定性能を究極まで高めることを目指すものである [論文 8,16]。この開発により、 Z^0 粒子エネルギーのジェットに関しては、 $30\%/\sqrt{E}$ という目標性能を達成した。より高いエネルギーのジェットに対する性能は不十分であり PFA の改良を進めた。

これらの結果は、中国・北京の高エネルギー物理研究所で開催された ACFA Workshop の場で報告と議論が行われ、世界中の ILC 測定器研究者が共同して作成する Detector Concept Report [論文 7,9] にまとめて発表された。ACFA Workshop はこの回より、GDE と共同して開催され、加速器・物理・測定器について総合的に議論される場となった。

測定器の概念設計と平行して、測定器の要素技術の研究が進められた。このうち、TPC 飛跡検出器に関しては、平成 16 年度および 17 年度に KEK で行われた国際協力ビームテストとその後のデータ解析の結果 [論文 11,14]、TPC ガス中の電子ドリフトの拡散係数(Cd)と実効一次電子数(Neff)により、位置分解能のドリフト依存性が記述できることが確立した (図 4)。これは、その後 TPC 測定器を設計する際の指針となった重要な成果である。

また、上記ビームテストが萌芽となり LCTPC 国際コラボレーションが新たに形成された。これは欧米の研究者も参加した世界的なコラボレーションである。アジアからは中国・清華大学と日本の ILC-TPC 研究者が参加し、協力して GEM(Gas Electron Multiplier)を用いた端部検出器の開発とその性能の研究を進めた。このために、日本から相次いで中国の清華大学と IHEP を訪問し、共同研究における分担内容や、研究スケジュールに関する打ち合わせを行った。

カロリメータに関しても、韓国グループとともに CALICE 国際コラボレーションに参加し、シンチレータ電磁カロリメータの共同開発研究を行った [論文 5]。韓国グループは安価な大量生産に適した押し貫き法によるシンチレータを作成し、日本グループが準備した光検出器 (MPPC) と組み合わせて電磁カロリメータを作成した。その性能はビームテストなどを行い研究した。

平成 19 年度

ILCSC(ILC Steering Committee)は測定器工学設計を目指すグループに LOI(Letters of Intent)の提出を呼びかけた。LOI は加速器と同程度の建設期間が必要だと想定される測定器の準

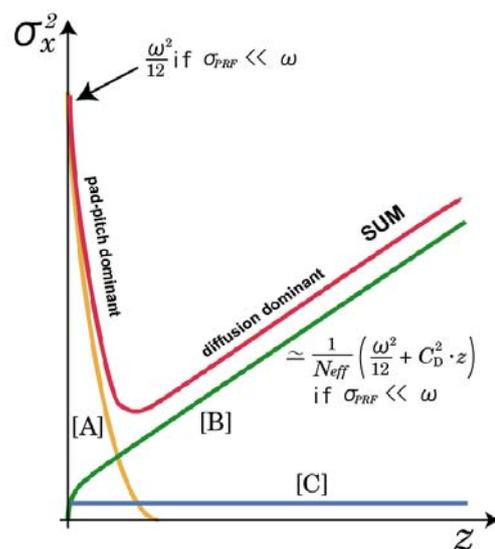


図 4：TPC の位置分解能とドリフト距離との関係

備開発研究を、加速器の準備開発研究と歩調を合わせて進めていくためのものである。LOI の作成に際し、アジアの研究者を中心とする GLD グループとヨーロッパの研究者を中心とする LDC グループは合同で LOI を作成することに合意し、ILD グループを結成した。GLD と LDC は飛跡検出器として TPC を採用し、ソレノイド磁石内に設置した細密読みだしのカロリメータを活用して PFA による高精度ジェットエネルギー測定を行う、など類似点があるが、磁場の強さやカロリメータの内径など詳細は異なっている。そこで、ILD 提案をまとめるために、ILC 物理反応による測定器パラメータの最適化を行う合同計画を立案し、シミュレーション研究を行った。並行して ILC ビーム衝突点設計や実験室設計にかかわる部分も検討を進めた。

上記、ILD 測定器最適化と LOI 準備に関する議論のために 2 名（宮本、杉本）を中国 IHEP および清華大学に派遣した。また、仙台市で開催された ACFA Workshop と GDE との合同ミーティング(TILC08)の際にも議論を行うとともに、日常的には TV 会議を活用して活発な検討と議論を進めた。

一方、TPC の技術開発に関しては、LCTPC による中型 TPC のテスト準備を中国清華大学の研究者と共同して進めた[論文 13]。日本が GEM の開発を担当し、清華大学が多層基板の開発を担当した。これに関する打ち合わせのために延べ 6 名（藤井、松田、杉山、房安）を派遣した。また、1 月の訪中に合わせて TPC 技術と ILC に関する 5 日間の学校が北京の CCAST にて開催された。約 50 人の学生及び若手研究者が聴講する有意義な講習会となった。さらに、12 月には清華大学の研究者が KEK を訪問し、大型電磁石を利用した TPC の性能テストを行った[論文 15]。

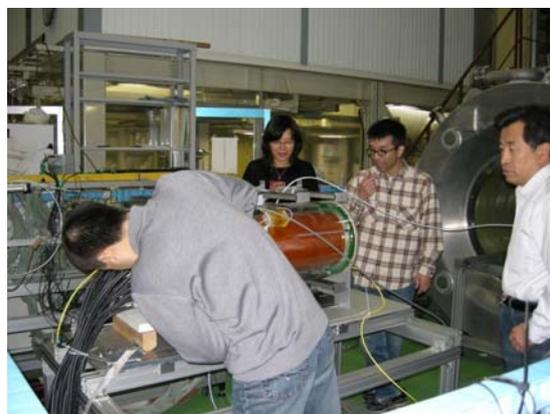


図 5：清華大学チームによる KEK における TPC テスト風景

平成 20 年度

平成 20 年度はシミュレーションによる ILD 測定器パラメータの最適化を、電子・陽電子衝突によるヒッグス粒子、タウ粒子、トップクォーク、SUSY 粒子生成反応などを用いて進めた。その結果、ソレノイド磁場 3.5 テスラ、カロリメータの内径 1.82m などの基本パラメータが定められた。そのうち、重心系エネルギー 250 GeV と 500 GeV のモンテカルロデータサンプルの作成と ILD 測定器の物理測定性能の検討が系統的に行われた。その結果は、測定器要素技術設計と合わせて ILD LOI としてまとめられた。LOI をまとめるに際して、2 名を中国に派遣し、中国研究者と LOI に関する議論を行った。韓国の ILD 研究者らと第 3 回



図 6：第 3 回 ILD ワークショップ

ILD ワークショップを韓国ソウルにて開催し、LOI の記述に関する打ち合わせを行った。

TPC に関しては、中国・清華大での TPC 端部基盤の開発と、日本における GEM およびデータ収集システムの開発が完成した。このシステムのビームによるテストは平成 21 年春に行われ、現在データ解析を進めているところである。

【問題点等】

本研究プロジェクトは、日本や中国を始めとするアジアの実験研究者がリニアコライダーでの物理と測定器の計画を立案していくうえでの基盤であった。これにより、アジアがリニアコライダーの測定器研究において世界の 3 極（アジア・欧州・北米）のうちの 1 極として重要な役割を果たすことができ、また日本はアジアの核としての役割を果たしてきた。リニアコライダー計画は世界的国際共同研究になったが 3 極構造は引き続き維持されている。そして、アジア諸国の研究者が ILC 実験を進めていくうえで、日本がアジアの核としての果たすべき役割は依然大きい。

今後は ILC 測定器研究を進めるに際しては測定器要素技術の開発とその実証が不可欠な課題である。しかしながら、日本も含めアジアにおける測定器開発予算は必ずしも十分とは言えない。本研究で培ってきたアジア諸国との絆をさらに発展させていくには測定器開発予算と体制の充実が不可欠である。

【評価】

電子・陽電子リニアコライダー（ILC）計画の推進の為にその計画の 1 極を担うアジアの国々が ACFA のもとに協力してその物理を検討し、測定装置の開発を行うことが重要である。

その目的のためにこのプロジェクトの果たした役割は大きかったと考えられる。

ILC 計画では、測定装置は当初 1 または 2 台しか建設する事ができないので、必然的に世界的な共同研究を行わざるを得ない。

そのためにプロジェクトの開始以来ワークショップを頻繁に開催し、問題点についての理解を深めると共に、共同作業と仕事の分担を行ったことは評価される。

ACFA ワークショップにおいてアジアの研究者が中心になって、GLD グループが結成され、日本、中国、韓国が中心となって共同研究が進められた。

特に韓国との共同研究によって半導体検出器とカロリメータの開発が始められ、大きな進展があった。また中国との間では TPC の共同開発に成果があった。

2009 年 GLD がヨーロッパの LDC グループと合体して、ILD グループとなった後にもこれらの協力によって得られた成果はアジア側の業績として引き継がれ、ILD の建設に向けて大いに役立てられることが期待されている。

将来の課題としては、ILC への参加を表明しているインドグループとの密接な協力も必要と思われる。また他のアジア諸国との連携も視野に入れた共同開発研究を積極的に進める事が望まれる。これから ILD 計画は具体的な設計の段階になると予想される為、本拠点事業終了後もアジア諸国共同での ILD 研究開発と ILC の物理の検討を持続的に続けていく事が必要であろう。

B2

【研究課題名】 BELLE 実験

【研究代表者名】

日本側代表者： KEK 教授 堺井義秀

中国側代表者： IHEP 教授 Zhang, Changchun

韓国側代表者：延世大学 教授 Kwon, Youngjoon

インド側代表者：Panjab 大学 教授 Singh, Jasbir

【研究の概要及び目的】

現在進行中の高エネルギー加速器研究機構の KEKB 電子・陽電子非対称衝突型 B ファクトリー加速器での Belle 実験のデータ収集および物理解析を共同で進め、交流および研究を促進する。相手国側から研究者を招聘し、特に学生が十分長期間滞在することにより若手研究者の教育・養成に貢献する。物理解析は、いくつかのテーマを重点的に進め、日本側からも相手国を訪問し打合せ・議論を行い研究の促進をはかる。

【研究実施状況及び成果】

上記の目的に沿って、相手国側より各年度 35-45 人月程度の研究者・学生を招聘し Belle 実験のデータ収集および物理解析を共同で進めた。また、日本側より各年度 2-4 人(15-30 人日)程度相手国側を訪問し物理解析の議論を行った。平成 18 年度に韓国、19 年度に中国で Belle の全体ミーティングを開催した。

物理解析では、初期には D 中間子混合およびチャーモニウムを含む B 中間子の崩壊の解析を重点的に進めた。D 中間子混合は平成 19 年について発見されたが初期段階から共同で解析を進めてきた中国グループの貢献は大きい。その後平成 17 年度より韓国とインドも参加し、さらに新共鳴粒子の探索・測定やバリオン粒子を含む B 中間子の崩壊等に解析の重点を広げた。韓国・中国グループを中心に Y(4008)、Y(4660)や Z(4330)⁺などの通常のチャーモニウムと性質のことなるエキゾチック新共鳴粒子の候補を発見した。これらの解析結果は、科学論文雑誌（査読有）に掲載され、また学生の博士論文として纏められた。また、相手国で Belle のグループミーティングを開催するなど交流・研究・若手養成に成果を上げた。

【問題点等】

Belle 実験は KEK での実験なのである程度は仕方がないが、経費の使用は相手国側の KEK 滞在費に偏っている。初期段階では、相手国側の機関では物理解析環境が十分整っていなかったため、学生・若手研究者が KEK に長期滞在し教育・解析技術などの養成を行うことが最も効率のよい方法ではあった。その後、相手国側の機関で物理解析環境が徐々に整ってきたが、その整備を効率的に促進し状況に応じてバランスを変えることなどを考慮する余地もあったかと思われる。

【今後の計画】

Belle 実験は、平成 21 年度も本格的なデータ収集を続ける予定であり、引き続きデータ収集および物理解析に集中することで、相手国側と了解を得ている。今までの年度と同様に多くの研究者を相手国から招へいし、これまで行ってきた研究を継続していくとともに、新たな物理解析テーマにも取り組んでいきたい。拠点大学事業は、平成 21 年度が最終年度であるが、その後も継続して物理解析を中心に議論・共同研究を続けていきたい。

【評価】

KEK の主要な研究テーマである「Belle 実験」への中国、韓国、インドの参加はアジアにおける高エネルギー物理学の共同研究の大きな柱と位置づけられ、その意義は大きい。

この事業によって進められた研究は主として実験データの収集と物理解析であるが、そのための相手国からの研究者の招聘と若手の長期滞在、相手国への訪問などによる交流は実質的な成果をあげていると判断される。

初期段階の中国との共同研究による D 中間子混合と B 中間子崩壊の解析で中国側の貢献が非常

に大きかった事は、この事業の成果として評価される。

さらに最近中国だけでなく、韓国やインドもこのプロジェクトに参加して、B 中間子崩壊の際の新共鳴粒子を数多く発見し、注目を集めている。

これらの研究は博士論文などを通してアジア諸国の若手研究者の養成にも大いに役立てられていると考えられる。共同研究の成果が国際誌に掲載され、目に見えた成果として発表された事は高く評価されてしかるべきであろう。

このようなプロジェクトはともすると一方的な援助のみに終始しがちであるが、中国を始め相手国が主体的に研究を進め、独自の成果を生み出した事は注目される。

将来、相手国の研究環境の発展に応じて経費の負担割合を再検討することが望ましいと判断される。

また、今後解析における緊密な協力関係を強める為には、data grid 方式などを含むネットワーク網を利用した共同研究を進めることも考慮すべきであろう。

またこのプロジェクトの発展として考えられる KEK-B の次期計画では、研究計画の初期の段階からこれらのアジア諸国の参加を求め、測定装置を含むハードウェアの建設を共同で推進する事が望まれる。そのような体制を築く事で真の意味の対等な国際共同研究に近づけられると考えられる。

B3

【研究課題名】 コライダーの物理と素粒子理論

【研究代表者名】

日本側代表者：KEK 教授 萩原 薫

中国側代表者：IHEP 教授 TAO, Huang

韓国側代表者：Korea Institute for Advanced Studies 教授 KO, Pyungwon

インド側代表者：Indian Institute of Science 教授 GODBOLE, Rohini

【研究の概要及び目的】

B3 グループの研究目的は、加速器科学分野の拠点大学交流事業に関連する理論研究を、事業の対象国である中国、後半は中国に加えて韓国と印度の素粒子理論研究者との共同研究として進め、研究者間の交流を深めると共に、加速器科学を含む素粒子物理学研究の発展に寄与することであった。関連する分野としては当初、電子陽電子ビーム衝突型加速器である、KEK の KEKB と北京 IHEP の BEPC の物理を想定して課題名も「コライダーの物理と素粒子理論」としたが、実際の研究交流は、電子陽電子コライダーの物理に留まらず、J-PARC 施設のニュートリノビームを利用した加速器ニュートリノ振動実験の物理、素粒子理論と密接な関連を持つ宇宙物理学、宇宙論の研究、そして後半は、CERN の陽子陽子コライダーLHC の物理等、事業対象国の理論研究者との共通の興味に基づく共同研究がなされた。

【研究実施状況及び成果】

1) ニュートリノ物理

B3 グループの最大の研究成果は J-PARC から中国、韓国へ向けた長基線ニュートリノ振動実験の可能性とその物理的意義を明らかにしたことだと思ふ。この研究のきっかけは、本交流事業が開始された 2000 年度に、中国側拠点である高能物理学研究所の研究者達が、J-PARC の高輝度陽子加速器を用いたニュートリノビームを中国に照射する超長基線振動実験の共同検討を依頼し

てきたことである。萩原は既に研究を進めていた中国側研究者と完全に独立な研究グループを国内に作る方針をたて、当時京大におられた西川公一郎他 3 名の実験家と萩原他 2 名の理論家による検討チームを結成した。この研究は中国側研究者との交流を通じて進められ、中国側と日本側の成果が独立に発表された。この作業の中で、日本チームの小林隆が高エネルギー狭域ビームを考案した。一方、中国側研究者は水チェレンコフカロリメータを提案し、我々はその特性を生かして将来のニュートリノファクトリーで電荷は判別不能でも電子と μ の判別可能な検出器の物理を提案した。

転機は 2004 年の国際会議で萩原が、T2K 実験のニュートリノビーム中心が韓国東海岸近傍に出現し、韓国東海岸地域で中心からのずれ角の小さい、高エネルギーニュートリノが検出可能なことに気がついたときに訪れた。同一ビームに沿って、神岡と共に韓国にも巨大な検出器を設置する T2KK 実験のアイデアはその後展開され、T2K に続く最も有力な将来計画と目されるまでになった。

2) チャーモニウム、ボトモニウム生成の物理

本交流事業開始当時唯一の相手国であった中国の理論研究者は重クォーク系の物理に関心を持つ者が多かった。日本には関心を持つ研究者が殆どいなかったため、KEKB の Belle 実験のチャーモニウム生成に関するデータが当時の非相対論的 QCD の予言と全く合わないことが明らかになったときに、それに関する共同研究を C.F.Qiao、Z.H.Lin、S.Dulat、J.X.Wang 等と進めた。これらの研究は非相対論的 QCD 研究者を刺激し、多くの理論的発展を導いた。その中に韓国の理論研究者が含まれ、現在、Belle 実験とハドロンコライダー実験結果との整合性に関する共同研究を進めている。

3) 電弱対称性の破れの物理

研究代表者萩原の主要な研究テーマである電弱対称性の破れの物理に関しては、中国精華大学出身の Q.S.Yan、北京大学出身の Q.Li、印度デリー大学の S.Dutta との共同研究が成果をもたらした。ヒッグスボソンが存在しないシナリオでの輻射補正の一般論とその現象論への適用、軽いヒッグスボソンが存在する場合にその特性を将来のリニアコライダーで精密測定する可能性の定量的検討、大きな余剰次元があるモデルでの重いグラビトン生成の物理等の論文が発表され、本交流事業への謝辞が掲載された。

4) 宇宙物理

本研究グループの研究は主に、中国側代表者の T.Huang の推薦による中国の若手研究者との共同研究を中心に進められたが、高能物理学研究所の X.M.Zhang と神奈川大学の長沢倫康の π ストリングに関する研究、X.M.Zhang と彼の学生 B.Feng、東京大学の横山順一等による暗黒エネルギーの可変質量ニュートリノ模型に関する共同研究にも、本交流事業が寄与した。

5) 国際研究集会 APPI の企画運営に協力

本交流事業の一環として 2005 年まで素粒子実験グループが企画運営した APPI セミナーに、東北大学の隅野行成と萩原が協力することで実験家、加速器研究者と理論家間の有益な交流を実現させた。欧米の Moriond 会議シリーズや Aspen 研究所に習い、参加者がスキーを楽しみながら研究交流をするこの会議は新鮮で、多くの参加者からその再開が望まれている。

6) 中国出身の若手理論研究者の育成

高能物理学研究所の Z.H.Lin、B.Feng、B.Gong、精華大学の Q.S.Yan、北京大学の Q.Li は本交流事業に参加した当時は大学院生であり、中国側研究者の推薦で来訪した。上に列挙した彼ら

との共同研究の直接的成果だけでなく、彼らが理論研究者として羽ばたく手助けをしたことも、本交流事業の成果とするべきだと思う。

【問題点等】

拠点大学交流事業では、来訪研究者の海外旅費は先方負担という建前になっている。B3 グループの場合、中国、韓国、印度の全ての場合、先方からの旅費負担はゼロであった。先方研究代表者を通じて要望を出してもらったが、一度も要望が通ることはなかった。結果としてある程度長期間滞在していただき、本人の外国出張経費負担を少しでも軽減してもらうことになった。先方の予算を考慮しない協定によるこの種の取り決めは円滑な交流の阻害要因にしかならない。

もう一つの問題点として、本交流事業に台湾在住の研究者を招聘できなかったために、KEKBの物理に対する寄与が充分なされなかったことがあげられる。アジア地区の素粒子理論研究の層はまだ薄く、台湾の研究者が得意とする分野を他国の研究者がカバーすることはできない。自然科学分野でこそ、政治の壁を突き破る努力が必要である。

【今後の計画】

拠点事業の最終年度であるので、B3 グループの主要な研究成果を全て論文として発表することで、将来の、特にアジアに於ける素粒子物理学研究の発展に寄与することを今年度の目標とする。

- ・今年度に開始される T2K 実験のニュートリノビームを韓国でも観測する T2KK 実験提案については、韓国側代表者の KO 氏を共同研究者とし、相互訪問によって将来計画の展望を示す。
- ・KEKB の Belle 実験結果を基礎にした重クォークonium生成機構の再検討に関しては、韓国研究者との共同研究で、ハドロンコライダー実験へのインパクトを明らかにする。
- ・将来のリニアコライダー物理に於ける精密実験の可能性に関するインドの DUTTA 氏との共同研究を完成させる。
- ・本事業の前半に検討した J-PARC から中国北京への超長基線ニュートリノ振動実験について、T2KK に続く将来計画としての物理的意義と展望を再検討する。

【評価】

当初は電子陽電子ビーム衝突型加速器に関係のある理論だけを想定していたが、実際にはニュートリノビームによる物理、CERN の LHC による物理、宇宙物理、宇宙論など相手国の理論研究者との共通の興味に基づいて共同研究が行われた。

特にニュートリノ振動実験を日韓、日中の共同研究として行なう可能性を理論的観点から検討した事は当初の分野からやや離れているとはいえ、有意義であったといえよう。初期には J-PARC からのニュートリノビームを中国で観測する長基線振動実験が日中両国から提案された。更に T2K ビームの中心からわずかにずれた高エネルギーニュートリノが韓国東海岸で検出可能な事を明らかにして、理論実験両研究者による T2KK 実験のアイデアとして発展したことは注目される。

中韓両国の理論家とともにチャーモニウム、ボトモニウムの生成に関するデータを非相対論的 QCD の観点から解析し、理論的発展に貢献した。

また、弱電対称性の破れに関しては、中印両国の研究者と共に LC による Higgs boson の特性の精密測定の可能性、剰余次元がある場合の重いグラビトン生成の物理等への寄与も見逃せない。

更に π ストリング、暗黒エネルギーの可変質量ニュートリノモデルなど宇宙物理に関する研究も興味深い。

このような多岐にわたる理論的研究を日中韓印の共同で進める事が出来たのは本事業の成果として評価される。

「コライダーの物理」という研究課題にとらわれず、研究の進展に応じて柔軟に研究分野を広げる事によって大きな成果を挙げたことは評価される。ただ、この種の拠点形成事業ではカバーする研究分野の範囲にどのようなガイドラインを設けるかが今後に残された課題となろう。

また、今後の理論の国際的共同研究にあたって旅費の扱いを如何にすべきかが今後検討すべき課題である。

B4

【研究課題名】北京高能物理研究所電子陽電子衝突スペクトロメーター (BES) J/ψ 崩壊データの解析による中間子状態の系統的研究—カイラル粒子探索—

【研究代表者名】

日本側代表者: 2002年-2004年 KEK 教授 都留常暉
 2005年-2009年 KEK 教授 黒川真一

中国側代表者: IHEP 教授 李衛国 Weigu Li

【研究の概要及び目的】

SU(3)非相対論的クオーク模型(NRQM)に基づくハドロンの分類はクオーク・反クオーク対から成る中間子の描像を描き、大きな成功を収めている。しかし、近年の実験成果は、NRQM の分類に収まらない、いわゆるエキゾチック中間子と呼ばれている中間子状態を多く見出している。それらは、NRQM の理論的枠組みの上に、強相互作用するグルーオン(gluon)が直接関与する状態、glueball 或いはクオーク・反クオーク対とグルーオンが相互作用する状態、Hybrid 或いは4クオーク状態などと期待されてきたが、未だそれらの確証を得るに至らず、ハドロン構造に関わって統一的な説明がついていない。特に、基底状態を構成する低質量中間子群について混迷が深い。

我々、シグマグループは $\pi\pi$ 及び $K\pi$ phase shift data を解析して、それぞれ、 $\sigma(555)$ 及び $\kappa(900)$ を検証した。散乱過程のみならず、生成過程で確証を得ることが重要である。pp 中心生成過程に $\sigma(555)$ を検証し更に、種々の生成過程、 J/ψ 崩壊過程、 $p\bar{p}$ 消滅過程及びY崩壊過程においても $\sigma(555)$ の検証を果たした。 $\sigma(555)$ はカイラル対称性の自発的破れに基づく、南部・ヨナラシニヨによって提唱された新しいスカラー中間子、質量を持たないボゾンとしての π 中間子のカイラルパートナーと考えられる。一方、これら低質量中間子は閉じ込められたクオーク・反クオーク対系を相対論的に扱った理論体系の下に於いて、初めて、中間子分類上の席を得る事が出来る。シグマグループは実験的解析を主とする研究者と理論的考察を主とする研究者が共同研究する、特徴のある、研究者集団である。 $\pi\pi$ 散乱の位相差解析において長年 σ 粒子の存在が否定され、またそれを根拠に、生成過程において検証された σ 粒子の存在を否定し、この分野に大きな混乱を引き起こしてきた。散乱過程の振幅と生成過程の振幅の相互関係を正しく見ていなかったことに依るもので、シグマグループの理論家メンバーは、この問題を明快に解き明かし、理論的に決着をつけた。また、 σ 粒子および κ 粒子の本性の解明と共に、新しいノネットを同定した。即ち、閉じ込められたクオーク・反クオーク対系を相対論的に扱う新しい枠組み、 $SU(6)_{F_0} \otimes SU(2)_\sigma$ の上に、 $\tilde{U}(12)_{SF}$ level classification scheme を提唱し、中間子群に新しいノネットの枠組みを与えた。この分類は、これまでの NRQM の分類を内包し、更に新しい中間子に席を与え、中間子構造とそ

の分類に広い展望を与えるものである。種々の生成過程において新しいノネットを検証することは極めて興味深く、且つ重要である。このカイラル対称性の破れによって生じる低質量中間子とノネットを、我々は、カイラル粒子及びカイラルノネットと名付けている。

本研究は、軽クォーク中間子分光学の研究を通じ、カイラルノネットの確立を目指し、ハドロン構造と真空構造の理解を得ることにある。

【共同研究発足の経緯】

中国高能物理研究所(IHEP) 前所長 鄭志鵬(Zhipeng Zheng)教授に特に請われて、我々シグマグループが IHEP の e^+e^- 衝突加速器(BEPC)に設置された粒子検出器(BESII)によって得られた J/ψ 崩壊事象における中間子群の解析研究に参加した。2000 年高エネルギー物理学国際会議(大阪)の際、IHEP 陳和生(Hesheng Chen)所長及び KEK 菅原寛孝機構長の合意の下、BESII 研究グループ及びシグマ研究グループの共同研究発足が確認された。2001 年に共同研究のための「Memorandum」を交わし、2002 年に JSPS の支援のもと、「Agreement」を作成し、共同研究が形を整えた。共同研究の主題を「カイラル粒子の探求」とした。その発足に先行して、解析研究は 2000 年後半から始められた。

1974 年に発見された J/ψ 粒子は、その崩壊によって生じる中間子を研究することによって、中間子状態研究に大きな弾みを与えた。IHEP の BEPC に設置された BESII は、2000 年迄に、 J/ψ 崩壊事象を 6 千万事象収集し、世界の研究者は高統計データに拠る解析結果に大きな期待を寄せた。それらデータはカイラル粒子研究に大きな場を与えてくれる。とりわけ、ストレンジクォークを含む $K\pi$ 複合系である $\kappa(900)$ 研究にとって絶好の場を与えてくれる。

研究は、KEK 及び日本大学理工学部量子物性研究所と短大部を基幹研究機関とし明星大学理学部、東京都立高専および宮崎大学工学部が参加するシグマグループが担った。IHEP 側は、副所長・BES 責任者(当時)李衛国 Weiguó Li 教授、 J/ψ グループ責任者 沈肖雁 Xyaoyan Shen 教授が対応し、解析研究において研究員宇吳 Ning Wu 博士が直接対応し緊密な連携を図った。

【研究実施状況及び成果】

1) 研究実施状況及び成果

2002 年より相互訪問・滞在により研究を進展した。IHEP への訪問は毎年 7-10 名×1 週間(平均)、招聘は 1 名×(1-2)週間(平均)行い、精力的な交流と解析・検討を図った。BES 年会には例年 2-3 名参加した。共同研究の開始にあたって、先ず、 J/ψ 崩壊に $\kappa(900)$ を検証することに焦点を据え、更に、他の基底状態カイラル粒子の探索に努力を集中した。即ち、

1. 6 千万事象の J/ψ 崩壊、 $J/\psi \rightarrow K^*(892)^0 K^+ \pi^- \rightarrow K^+ K^- \pi^+ \pi^-$ 崩壊における $K^+ \pi^-$ 系解析に中性 κ 粒子を検証・同定(2006 年)。又、 $J^{PC}=0^{++}$, extra κ のヒントを得る。
2. 荷電 κ 粒子を $J/\psi \rightarrow K^*(892)^\pm K_S \pi^\mp \rightarrow K_S K_S \pi^+ \pi^- \rightarrow 3\pi^+ 3\pi^-$ 崩壊の $K_S \pi^\pm$ 系に検証・同定。現在、その論文を共同研究の審査を経て出版の予定。荷電 κ 粒子の解析においては $\pi^+ \pi^-$ に崩壊する K_S 事象の同定が重要である。とくに 6 個の π 中間子事象から二つの K_S を有する事象を同定することは容易でなく、BES 共同研究にあつては解析経験が乏しかった。本解析における 6π 事象($3\pi^+ 3\pi^-$ 事象)に $K_S K_S$ を同定する処方は今後の BES データ解析にとって一つの標準的手法を与えるものとなる。
3. $J/\psi \rightarrow K^+ K^- \pi^+ \pi^-$ における ρK および KK 系にそれぞれ軸性ベクトル及びテンソル中間子を観測し、現在、論文を作成中。
4. 一方、低質量ベクトル中間子は、諸反応過程の実験結果が錯綜して、解明が待たれている。

$\tilde{U}(12)_{SF}$ level classification scheme に在って低質量ベクトル中間子の存在は重要な位置を占める。BESII 以外の実験データ、SMD 及び BABAR に依るデータ、 $J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ の解析に、 $\omega(1250)$ の存在を同定し、論文に纏める。近日中に投稿予定。

5. $\pi\pi$ 及び $K\pi$ phase shift data 解析における σ 粒子及び κ 粒子を検証した結果が直に学会に受け入れられたわけではない。理論的な枠組みと共に、散乱過程及び生成過程の相関他に多くの理論的解明が為された。

6. 軽 - 重クオーク系中間子：軽クオーク - 重クオーク系は重クオークの質量が非相対論的に扱うに十分大きく、従って軽クオークの相対論的振る舞いが直接的に扱えて、軽 - 重クオーク系に chiralon の特性が顕著に現れる。 $\tilde{U}(12)_{SF}$ level-classification scheme のもと、基底状態の新しいスカラー X_B と X_D 及び軸性ベクトル X_B^* と X_D^* の存在を予想した。実際、 $D^{*+}\pi^-$ の質量分布を CLEOII のデータ、 $Y(4S) \rightarrow D^{*+}\pi^- + \dots$ 、及び DELPHI のデータ、 $Z^0 \rightarrow D^{*+}\pi^- + \dots$ 、又、 $B\pi$ 質量分布を L3 のデータ、 $Z^0 \rightarrow B\pi + \dots$ において再解析し、新しいカイラル軸性ベクトル中間子、 D_{1c} ($m=2312$ MeV、 $\Gamma=23.0$ MeV)、及び新しいスカラー中間子、 B_{0c} ($m=5530$ 、 $\Gamma=19.7$ MeV) の存在を確証した。これらの結果は、重クオーク中間子分光学に新しい光を投げかけた。

7. 実験的解析結果及び理論的解明の結果は、隔年に開催されるこの分野の中規模国際会議 "International Conference on Hadron Spectroscopy" 他に報告されている。また日本物理学会において口頭発表されている。Hadron Spectroscopy 国際会議は 1985 年以来昨年で 12 回を重ね、シグマグループメンバーの一人はその国際組織委員を務め、分野の発展に寄与してきた。

8. 共同研究展間の間、基礎物理研究所支援で国際ワークショップ(2000年6月京都)を開催、研究の展望を図って以降の研究の軌道を定めた。また、KEK、日本大学の支援を得て、国際シンポジウム(2003年3月東京)及び国際ワークショップ(2003年3月つくば)を開催し、相対論的扱いに依るカイラル粒子研究の現状分析と BES データ解析・研究の展望を図った。

9. セミナー:2006年、支援を得てセミナーを IHEP 及び北京大学で開催した(2006年2月北京)。中性 κ 粒子を BESII データに解析を終え、BES データにカイラル粒子を探索する解析の展望を議論する上で、最良のタイミングでセミナーを開催できた。IHEP Seminar 及び北京大学における satellite seminar 両セミナーで、若手・中堅研究者を励まし、ハドロン分光学研究の展望を与えた。

【成果の纏め】

1. 解析を中心に、理論・実験家が緊密な連携を図って行う共同研究の好個のスタイルを確立し、その基板の上に、IHEP との共同研究を遂行してきた。
2. Covariant level classification を指針として、基底状態中間子群を散乱・生成過程に探索し、ハドロン構造と真空構造の理解に貢献。カイラルスカラーノネットを確立した。
3. 軽クオーク中間子分光学を通じ、Hadron Physics の重要性を、改めて、浮上させた。
4. 特に、中性及び荷電 κ 中間子探索によって、BES 共同研究に重要な寄与を行い、且つカイラル粒子研究の位置づけを果たす。又、多重 K_s 事象の選別において、選別コードの標準化に寄与した。
5. 論文成果は以下の通り：発表論文(2000-2008)：学術誌 13 編、国際研究集会 45 編、学術誌発表準備 4 編。
6. 共同研究旅費(2002年－2008年：派遣・招聘：11,000,000 円 (IIHEP・56 人/350 日、国内・11 人/81 日、招聘・1 人/26 日)。セミナー：800,000 円 (6 人/24 日)。

【今後の計画】

わが国のハドロン物理学研究の一翼を担い、一層分野の発展に貢献したい。理論・実験面相互にうまく連携した、好個の共同研究であると自負しているシグマ共同研究グループの枠組みを保ち、研究の推進を継続したい。

当初 10 年計画に従って、BESII データ解析に全力を注ぎたい。状況が許せば BESIII データ解析に参加を行いたい。BESII は 60 million の J/ψ 崩壊データを誇ったが、BESIII においては、10,000 million J/ψ 崩壊及び 3,000 million $\psi(2S)$ 崩壊事象の収録を期待している。中間子分光学研究、とりわけ基底状態を中心に、カイラル粒子探索にとって極めて興味深い。成果のところで述べた、extra κ , $\kappa'(1150)$ の探索が、先ず、第一の研究対象に挙げられる。また、 χ_c decay 事象を解析が重要である。シグマグループは本拠点研究に関わって、IHEP 以外の研究機関のデータ(Novosibirsk、DM2、BABAR、CLEO 他)のデータ解析も行ってきた。今後、BELLE データの解析に、力量と事情の許す中で関わって行きたいと考えている。

【評価】

非相対論的クォークモデルに基づいた中間子の分類は大きな成果をもたらしたが、いわゆるエキゾチック中間子に関しては未解決の問題が数多く存在している。

このプロジェクトでは、IHEP の電子陽電子衝突スペクトロメーターによる J/ψ 崩壊のデータを解析し、中間子のカイラル粒子を探索することを目的として研究を進めてきた。

特にこのグループが $\pi\pi$ 及び $K\pi$ 系の phase shift 解析によってこれまで永い間議論の対象となっていた $\sigma(555)$ 及び中性及び荷電 $\kappa(900)$ を検証した事は評価される。さらに、精力的な解析によって多くのエキゾチック状態についての情報が得られつつある事は注目される。

この研究が日本側の理論的提案により始められ、北京の高エネルギー物理学研究所の電子陽電子衝突実験データを日本側のイニシアチブで解析した事はこの拠点事業の他のプロジェクトと異なったアプローチによるユニークな研究協力として興味深い。

報告からは解析にあたっての中国側の寄与が見えにくいのが、小規模ながら日本以外のアジアの加速器を用いた初めての高エネルギー物理の共同研究として評価したい。

BES-III のデータ解析を行うのであれば、将来若手研究者が中心となってプロジェクトを進めていくことが期待される。

C1

【研究課題名】 シンクロトロン放射光源用加速器の高度化に関する共同研究

【研究代表者名】

日本側代表者：KEK 教授 春日俊夫

中国側代表者：IHEP 教授 胡天斗

韓国側代表者：PAL Senior Researcher Sung-Ju Park

【研究の概要及び目的】

中国における既存放射光施設(BSRF、NSRL)と日本における既存放射光施設(PF、PF-AR、UVSOR、HISOR)との間で、放射光源の高度化のための技術開発に関して共同研究を行い、放射光科学の活性化を計る。また、次世代放射光施設として計画されている上海放射光施設(SSRF)の光源建設のための開発研究に関して共同研究を行なう。

そのため、中国側各施設の研究者と日本側施設・大学の研究者が交流を行ない、共同研究を推進する。また、韓国、インドの放射光施設の光源加速器の高度化のための共同研究を行う。

【研究実施状況及び成果】

日本、中国、韓国、インドの研究者が、放射光用電子ストレージリング（挿入光源を含む）の性能向上のための共同研究を行った。主要な共同研究のテーマは、光源を構成するコンポーネントの開発、光源からの光ビームの安定化、新方式の光源の開発等とした。運転に入った上海放射光施設のビーム運動学上の諸問題、特にビーム安定化のためのフィードバック系の開発研究に対し協力をを行った。この成果は、同施設の順調な運転開始に貢献したものと思われる。

中国科学技術大学の放射光実験所および高能物理研究所の北京放射光施設の既設両光源のビーム診断系の高度化、ビーム安定化のための共同研究を行った。高エネルギー加速器研究機構のPF・PF-AR 両蓄積リング、分子科学研究所 UVSOR 蓄積リング、広島大学 HiSOR 蓄積リングを用いてビーム運動学の実験研究を共同で行った。この共同研究の成果は両光源の、安定な運用に資している。

なお、本課題 C1 は C2 課題と一体となって共同研究を推進した。

以下は各施設との共同研究およびその成果である。

中国科学技術大学国立放射光実験所 NSRL との共同研究、研究成果

- ビーム診断法、PF でのビーム不安定現象抑制の研究に参加
- 入射問題
 - ・具体的成果（NSRL 入射率増加）
 - ・入射キッカーチェンバー変更、八極磁石組み込み
- NSRL でのマシンスタディに参加
 - ・具体的成果（NSRL 大電流蓄積）

上海放射光施設 SSRF との共同研究、研究成果

- ビーム診断学
- 加速器付帯設備（冷却水系等）
- 真空システム）
- 加速高周波系、PF 空洞供用・大電力入力現地試験
 - チューナー制御器不具合発見＞対策＞大電力
- 光源制御
- 光学的モニター
- 入射問題
- 挿入光源

北京放射光施設 BSRF との共同研究、研究成果

- ビーム診断学装置の研究
- ビーム安定化のためのフィードバック研究
- 光学的ビーム診断装置の開発
- 挿入光源の研究

【問題点等】

1. 既設放射光施設においては、現有施設上の制約から共同研究によって得られた成果をそのまま現実化するのが困難であることがあった。たとえば NSRL の場合、フルエネルギー入射でないこ

とが、大きな制約となっている。

2. ユーザーがついている放射光施設では、運転スケジュールにより共同研究が大きな制約を受けることがあったが、これは止むを得ないことである。

3. 反対に **SSRF** とは、建設途上での共同研究であったため、その成果は同光源の迅速な運転開始に貢献している。

【今後の計画】

放射光施設にとって、光源の信頼性の向上、放射光の安定化、高度な放射光（高輝度、短い光パルス）の実現は永遠の課題である。これらを追求するために、本交流事業での共同研究の成果をふまえて、参加施設、研究者の交流、共同研究を継続したい。

【評価】

中国：上海放射光施設（**SSRF**）での加速器の立ち上げにおいては、拠点事業の果たした役割は大きく、**KEK** の協力による超伝導技術の導入、ビームモニターを用いたビーム診断法の確立、そして、真空封止型アンジュレーター技術開発などは高く評価すべきであろう。他の放射光施設、**HESYL**, **Hofei** などでは中間評価以後特筆すべき事業はなかったように思われる。

インド：遅れてスタートしたインドとの拠点事業計画は、放射光の分野ではまだ特筆すべき成果は出ていない。しかし、放射光加速器に関しては解決すべき課題が多くあり、今後の **KEK** の協力には大きな期待が寄せられている。

韓国：**Pohang** 加速器研究所（**PAL**）は、韓国唯一の放射光施設であり、遅れてスタートした本事業ではあるが、**KEK** と対等な共同事業として、**fast-ion** 不安定性、電子雲不安定性などで短期間に数多くの成果を挙げている。将来計画として掲げている **XFEL** の開発では我が国の技術協力、特に、理研西播磨の協力は欠かせないものになるであろう。ただ、これが本拠点事業の範疇にはいるものになるかどうかは検討しなければならない。

C2

【研究課題名】シンクロトロン放射光ビームラインの高度化及び利用研究に関する共同研究

【研究代表者名】

日本側代表者：**KEK** 教授 河田洋

中国側代表者：上海放射光施設 副所長 徐 洪杰

インド側代表者：**SINP** Professor **SANYAL**, Milan Kumar

【研究の概要及び目的】

中国における既存放射光施設（**BSRF**、**NSRL**）と日本における既存放射光施設（**PF**、**PF-AR**、**UVSOR**、そして **HISOR**）との間で、放射光実験・ビームライン技術開発に関して共同研究を行い、放射光科学の活性化を計る。

次世代放射光施設として計画・建設そして現在稼動に至っている上海放射光施設（**SSRF**）のビームライン技術開発研究、新しい放射光実験の開発研究に関して共同研究を行なう。そのため、各施設の研究者と日本の放射光施設・大学の研究者が交流を行い、それぞれの計画の設計に関して協力する。

韓国、インドの放射光施設の利用研究に関して交流を通してそれぞれの放射光研究の活性化を図る。

【研究実施状況及び成果】

日本、中国、韓国、インドの放射光利用研究者が、それぞれの放射光施設の状況（計画段階、建設段階、改造段階、定常運転段階）に合わせて、その時点で最適な重要テーマに対して、人的交流をベースに共同研究を行った。主な研究テーマは放射光ビームラインの設計開発、実験装置のコントロールシステム開発、放射光実験の手法開発とそれらを用いた共同研究を行い、それぞれの放射光施設の建設をはじめとする更なる高度化に貢献した。

BSRF とは BCPCII の加速器の改造に伴い、マルチポールウィグラービームライン、XAFS、構造生物学ビームラインの新設、改造を行う時期とこの共同研究に時期が重なった。本プログラムでは、それらのビームライン設計、分光結晶の製作、実験手法の確立などのさまざまな分野で交流を行うと同時に開発研究を行った。また、BSRF は上海放射光が稼動開始するまで、中国ではただひとつの X 線領域の放射光源であるため、構造生物学、X 線イメージング、X 線回折、X 線円二色性、マイクロビーム X 線蛍光分析の分野で実験手法の開発とその共同研究を行った。

中国科学技術大学では VUV、SX 領域の放射光化学が展開されており、特に VUV、SX 領域にビームライン技術に関して人的交流による技術移転を行うと同時に、共同研究は光電子分光を中心として広島大学の HiSOR と精力的に行った。

上海放射光とは正に本プログラム中に計画段階、建設段階そして稼動段階と状況の変化に合わせた共同研究を行った。計画段階では、高熱負荷対応の液体窒素冷却装置の KEK での開発に協力するとともに、数々のビームライン開発要素に関してその技術移転を行った。建設段階、稼動段階では、マイクロビーム X 線蛍光分析、構造生物学、X 線回折、軟 X 線アンジュレータービームライン等のビームライン技術、実験装置、コントロール技術に関して人的交流を図り、その建設に大きく貢献している。特にビームラインの設計に関して日本放射光学会が主催したワークショップに伴うサテライトの研究会を KEK で行い、多くにビームライン技術に関する議論の場を持ち、現在の稼動に結びつけている。

インドとの交流は昨年度から放射光利用研究者の交流が開始され、特に PF 内にインドビームラインを建設するに当たり、そのための交流を行ってきている。

以下は各施設との共同研究およびその成果である。

北京放射光施設 BSRF との共同研究、研究成果

●BSRF のマルチポールウィグラービームラインの設計と建設

- macro-molecule beam line and end station
- XAFS beam line
- intermediate energy X ray beam line

●高熱負荷ビームライン要素技術の設計研究

●たんぱく質構造解析実験・ビームライン技術

●マイクロビーム蛍光 X 線装置技術

●屈折イメージングをベースにした X 線イメージング技術

●X 線移相子をベースにした X 線円二色性測定装置技術

中国科学技術大学国立放射光実験所 NSRL との共同研究、研究成果

●HiSOR を中心にした光電子分光実験による共同研究

●VUV、軟 X 線領域のビームライン光学設計に関する共同研究

●XAFS 実験による共同研究

上海放射光施設 SSRF との共同研究、研究成果

- 高熱負荷 X 線光学設計研究
 - ・液体窒素冷却技術開発研究
- 第 3 世代放射光源ビームライン設計研究
 - ・X 線アンジュレータービームライン技術開発、X 線マルチポールウィグラービームライン技術開発、フロントエンド技術開発
- 放射光科学研究普及のために実験装置技術の普及
 - ・構造生物学実験装置、XAFS 実験装置、X 線回折実験装置、小角散乱実験装置、軟 X 線実験装置に関する装置技術とそれらを用いた共同研究

インド放射光施設関係者との交流

- インドビームライン設置に伴う、ビームライン技術移転

【問題点等】

- 放射光利用技術と利用研究との切り分けが困難な場合があり、一般の共同利用実験として行うべきものと考えられる提案があり、その対応に関して理解いただくのに時間を要した。
- 技術開発において、実質的には共同研究というよりも技術移転に近い状況が数多くあった。そのような場合には、放射光科学の活性化という考え方でこのプログラムを行ってきたが、明確な線引きの考え方が必要であると認識している。
- 韓国との具体的な交流が現実のものとはならなかったのが残念である。

【評価】

中国：SSRF は順調に立ち上がり、ユーザーの利用が始まった。今後ビームラインを次第に増設することになり、拠点事業での役割はこれから大きくなることが考えられるが、利用研究は多種多様である。現在でも、いろいろなチャンネルの相互協力事業が進行しており、本拠点事業だけではなく、新しいスキームでの共同研究事業を考えるべきかもしれない。

インド：2005 年に始まった拠点事業も、インドが遠いこともあって中国などと比べるとそれほど活発とは言えない。ビームラインに関しても問題山積であり、PF とスケールもほぼ同等であることから KEK に期待される役割は大きい。また、我が国のビームラインメーカーの参画も期待されている。特筆すべきは、SAHA 研究所が PF にインド専用ビームラインを作ることになったことである。本ビームラインを通して人的交流、技術交流が盛んになっていけば本拠点事業の大きな成果となるであろう。ただ、日印の物性関連の JST 交流事業も走っており、これらとのすり合わせも今後の検討課題となる。

韓国：ビームライン高度化に関しては、具体的な拠点事業は走っていないが、J-PARC 関連で中性子の利用研究に関する拠点事業がスタートした。PAL では小角散乱実験が活発に行われており、放射光と中性子の併用による新しい物性研究に期待が寄せられている。放射光に関しては PAL では我が国の Spring-8 との共同研究に関心が向いているようである。

5. 総括と総合評価

本交流事業の終了にあたり、委員会としての事業に対する総合評価を記し、報告書の総括とする。

5. 1 事業の役割と国際協力への貢献

総合科学技術会議は2008年5月、「科学技術外交の強化に向けて」という意見具申を公表した。これはこれからの外交の一環として、日本の持つ科学技術力を途上国支援に生かそうという発想である。この中で3つの重点項目として「技術移転から人材開発」、「先端分野の科学技術協力を推進」、「人材の育成・ネットワークの強化」を挙げている。

本事業はこうした戦略を10年前に先取りして、中韓印三国との「加速器科学」における人材ネットワークを築きあげてきたものとして高く評価できる。

これからの課題としては日本から相手国への支援という関係から徐々に脱却して対等な“give and take”の関係となることが理想的である。事実、現在までにこの事業のいくつかのプロジェクトでは対等な研究協力にまで発展していることは評価すべきであろう。それを全てのプロジェクトで短期間に達成するのは難しいと思われ、長期的視野に立つ必要が求められる。その視点に立ち、相手国の優秀な人材を将来日本で積極的に生かすなどの構想もあってよいのではなかろうか。

さて、本事業の遂行された過去10年間を振り返ってみると、アジア各国の経済的な発展と科学技術の進歩に驚かされる。

かつては経済的に開発途上国といわれた諸国が今や先進国の仲間入りをし、20世紀末には科学研究において後追いの傾向が強かった国々の研究機関が今や世界的に注目を集める存在にまでなったことは驚くべき変化といわざるを得ない。

10年前には、畑だった場所に近代的な研究所が立ち並び、最先端の研究が進められているのを見ると今昔の感を持つ人も多いだろう。

このような激動の時代に本事業がアジアにおける科学の国際協力の礎を築くことに少しでも貢献できたことは幸いであった。

近年、米国などでは tax payer の目を気にするあまり、自らの国益に役立たないように見える途上国からの若手研究者の受け入れを制限したり、途上国の基礎科学支援に消極的になったりする傾向にある。しかし技術供与や留学生の受け入れが、お互いの国に基礎科学の進歩をもたらす国際協力へと発展し、長い目で見れば国益に大きく貢献するようになることを本事業が示したことは大きな収穫であった。

今では加速器科学の分野では一国の規模を超えた国際共同建設、共同研究が不可欠となっている。日本がこの分野でアメリカやヨーロッパと肩を並べて研究を進めていくにはアジア諸国との連携が必須であることは論を待たない。たとえば、日本が主体的に取り組もうとしている ILC の建設は全世界的な規模で計画が進められているが、この計画で日本を含むアジアの科学者がリーダーシップを十分発揮するためにはアジア諸国のこの分野におけるレベルが欧米と同等かそれより優れていなければならない。本事業がこのような形での研究協力を先鞭をつけたことは高く評価される。

勿論現在でも日本からの技術供与、留学生指導が重要であると思われる分野も多いが、10年前に比べ各国のレベルが見違えるようになり、現在では日本側がこれらの諸国から学ぶことも多くなったことを痛感する。

本事業はアジアのなかで日本の存在意義を示すためにも有意義なものであるが、その重要性

が日本の市民の間にほとんど認知されていない。相手国においても同様と思われる。いかにして本事業の趣旨を関係国の一般市民に少しでも認知させるかは今後の課題であろう。

5.2 各国の現状

2009 年前半に本事業と関係する各国の研究機関を訪問した際、特に印象深かったことを記す。

5.2.1 中国

中国の科学者、学生層の厚さはわが国をはるかに凌いでおり、科学研究のポテンシャルの高さは我々の想像以上である。

日本との国際協力は本事業以前から始まっていたが、本事業の開始以来さらに積極的に共同研究が進められるようになった。過去 10 年間の中国におけるこの分野の発展は目を見張るものがあり、共同研究の成果は日中双方にとって大きな財産となったといえよう。

SSRC の加速器とビームラインの建設に対する KEK の寄与や BEPS II の加速空洞、ビームの物理的考察、超伝導・超低温技術、EPICS、ビーム不安定の研究、レーザー加速などに対する技術協力など本事業によって初めて可能になった協力事業は枚挙に暇がない。

また、Belle 実験のデータ解析では中国チームがリーダーシップをもって D⁰ 崩壊や charmonium の物理的な研究成果を発表し、PhD を多く輩出するなど、中国の若手の育成にも大いに役立てられた。一方 BES-II のデータを日本の独自の発想で解析したことはユニークなアプローチとして注目される。

さらに、ILC 建設の為に加速器や測定器の共同開発の着実な進展も大いに評価される。

共同開発、共同建設、ワークショップ、スクールなどの交流を通じて培われた研究者の人的な結びつきは非常に大きい。毎週のように行われる電話会議や、緊急の際の協力依頼に対しては電話一本で、翌日には対応出来る体制を構築できるまでになったことは高く評価される。

5.2.2 韓国

近年の韓国の経済的な発展は眼を見張るものがあり、いまや韓国は先進国の一つと考えられている。科学研究分野の進歩も著しく、着々と研究成果を積み重ねつつあるとあってよい。

韓国が本事業の対象国となったのは 2005 年であるが、短期間の間に緊密な協力関係を築く事が出来たのは両国の科学者の努力に負うところが大きい。

ただ、今回の訪問は Pohang の PAL のみに限られていたため、その全容を知るまでには至らなかった。

PAL は韓国唯一の大型放射光施設で、2.5GeV の第 3 世代リングとして建設当初から注目されていた。現在では利用者が年間延べ 2500-3000 人に及び、蛋白質構造解析、X線小角散乱、XAFS などのビームラインが活発に利用されている。現在その up grade 計画が進行中である。

PAL では世界で初めて fast-ion 不安定性を観測し、更に、KEK と共同で電子雲不安定性の研究を行い、KEKB の性能向上に大きな役割を果たした事は特筆すべき事であろう。また KEK の支援で超伝導空洞の開発を精力的に行ってきたことも注目される。超伝導・低温関係の協力は将来の大型プロジェクトにつながるものとして期待されている。更に光陰極 RF 電子銃、ビーム計測技術、レーザー加速、パルス中性子などの研究開発が精力的に行はれ、それぞれの分野で大きな成果をあげている。

Belle 実験には 6 以上の大学が参加し、B 中間子の多数の崩壊モードのデータ解析を行い、多くの物理的成果を得ている。この解析は大学院生の教育にも役立てられ、韓国で PhD 3, MS 6 の論文を生んだ。更に Belle II のための detector 開発にも積極的に参加しており、今後の KEK との直接の研究協力の枠組みが期待される。

5.2.3 インド

インドは独自の文化を守ってきた伝統を持っており、他の先進諸国とは異なる研究手法を用い、マイペースで研究を進めていることは興味深い。著名な物理学者達のリーダーシップによって独創性に富んだ研究が行われて来たこともその特徴と言えよう。

これまでは主に欧米諸国、特に CERN, 米国 BNL, 独 GSI などと共同研究を行ってきた。特に CERN との協力関係は 20 年以上続けられ、種々の成果をあげている。

日本との共同研究は 1960 年代の地下金鉱でのニュートリノ実験、気球による宇宙線の観測に始まり、その分野における協力関係は歴史的にも意義がある。

本事業による交流は 2006 年に始まり、ILC のための超伝導 cavity と検出器の開発、EPICS 使用、レーザー加速などで成果を挙げている。とくに KEK との協力による超伝導 cavity の製作や日本にはない大強度レーザーを用いた研究は注目される。これからの Super-Belle 計画への研究協力が強く望まれている。

人的交流の障害になっていたインド人の日本入国ビザの発給問題は本事業の日本側責任者であった黒川真一氏の努力によって解決し、将来の更なる共同研究への道が開かれたことは重要な出来事であった。

インドの各研究所では研究に必要な予算を確保することはそれほど困難ではないが、科学者、技術者のマンパワーは未だ不十分であるとの印象を受けた。

5.3 各プロジェクトの顕著な成果

本交流事業によって得られた特に顕著な研究成果としては次の点があげられる。

- A1: 初期の BEPS-II および SSRC への超伝導空洞と冷却システムなどの技術移転とその後の拠点形成などは本事業の成功例のモデルケースといえる。
- A2: IHEP の電子雲不安定性の実験は KEKB の世界最高ルミノシティの達成と BEPC-II の性能向上に寄与した。PAL の速いイオン不安定性の研究も大きな成果となった。
- A3: ATF によるビームの精密測定・制御技術の研究と STF での超伝導空洞の共同開発は ILC の基礎実験として重要なだけでなく、アジアのこの分野のレベルアップにも繋がった。
- A4: 加速器の制御システムの基盤ソフトウェアの技術をアジア諸国に提供することにより、各国のレベルの向上と人材の国際交流に役立てられた。
- A5: 中、韓、印の大強度レーザーを用いた加速の研究は、わが国にはない施設を用いて日本側のアイデアで行ったものが多く、本事業が有効に利用された良い例となった。
- A6: 中、韓両国のパルス中性子計画推進のために、両国の科学者が J-PARC のコミッショニングに参加するなどして、両国の研究推進、教育基盤の整備に貢献した。
- B1: ILC の測定装置建設のために、アジアの研究者が GLD の設計開発を行い、欧州グループと合体して ILD の共同開発がなされているが、この計画への本事業の寄与は大きい。
- B2: Belle 実験への中、韓、印の参加は共同実験の大きな柱である。今までのデータ解析への貢

献だけでなく、**Belle II** の測定器開発に対しても大いに期待されている。

B3：アジアにおける素粒子理論の共同研究に道を開いた意義は大きい。**J-PARC** からのニュートリノを中韓両国で検出するアイデアは対等な国際的共同研究の提案として評価される。

B4：**IHEP** の **BES** のデータ解析により、軽い **glueball** などの存在を検証したことは小規模な研究ながら評価される。日本以外のアジアの加速器を用いた素粒子研究としてユニークである。

C1：**SSRF** 建設期の **KEK** の超伝導技術の導入、真空封止型アンジュレーター開発などは評価される。**PAL** との **fast-ion**、電子雲不安定性などの共同研究の成果は大きい。

C2：**SSRF** は順調に立ち上がり、拠点事業での役割はこれから大きくなる。また **SINP** が **PF** にインド専用ビームラインを作るので、交流が更に盛んになると期待される。

5. 4 中間評価の提言の遂行についての検証

中間評価報告での委員会の意見が、その後如何に実行されたかについて検証する。

5. 4. 1 中間評価の提言「研究支援・技術提供型交流から相互互惠型の対等な交流に向けた努力の成果はすでにみられるが、より一層の努力をすべきである。」

相手国の経済成長、科学技術のレベルアップに従って、技術提供から相互互惠型の研究協力に脱皮したプロジェクトが多い。これは本事業を通してのお互いの努力によるところが多く、最も大きな成果であると考えられる。未だ一方的な技術提供や若手教育に偏っているプロジェクトもあるが、長い目で見ればこれらの協力も必ず日本側に利益をもたらすと考えられる。

5. 4. 2 中間評価の提言「上海放射光施設（SSRF）の建設とその利用研究の策定にあたっては、より密接な共同研究をすべきである。」

SSRF の建設においては、最初の計画段階から密接に関与し、加速器分野では、超伝導キャビティの開発、真空封止型アンジュレーターの開発などに大きな貢献をした。また **SRRF** でトラブルのあった **RF** キャビティを **KEK** が貸与することで計画の遅れを防いだりしたことなど、加速器建設に関しては緊密な共同研究が行われた。一方、施設の利用研究の策定については本事業では特に何もなされていないが、アジア・オセアニア放射光会議などで情報交換が密接に行われており、今後対等のパートナーとしての関係が築かれていくと考えられる。

5. 4. 2 中間評価の提言「拠点事業対象国を韓国、インドなどを含むアジア諸国にひろげるべきである。」

2005年より韓国、2006年よりインドを対象国として追加した。対象国によって状況は異なるが、それなりの成果が上がってきている。さらにタイ、台湾、インドネシア、ベトナムなど、他のアジア諸国に事業の範囲を広げるかどうかは今後の課題となろう。

5. 4. 4 中間評価の提言「プログラムの対象をハドロン加速器(J-PARC)等にも広げるべきである。

拡張に際しては慎重な検討の上、相手国のニーズに応じて効率よい事業が遂行できる可能性の高い領域に的を絞りを絞って、順次広げていくのがよいと思われる。」

中、韓両国の科学者が **J-PARC** の中性子施設のコミッションングに参加するなどして、自国のパルス中性子施設の建設に向けた研究の推進、教育基盤の整備を行ったことは中間報告の答申に

沿った活動の一つといえる。

5.4.5 中間評価の提言「幅広い参加協力大学からの若手研究者の活用をより一層促進すべきである。」

中韓両国の諸大学から多くの若手研究者が Belle 実験に参加したのは評価される。更に他のプロジェクトへの大学の多くの若手研究者の参加が望まれる。

5.4.6 中間評価の提言「日中両地域に分断されがちな研究活動の一体化へ向けた環境整備の努力を心がけるべきである。」

研究活動の一体化の要望は強く、一部のプロジェクトでは既に進展が見られるが、総体としてはその実現は未だ十分とは言えない。渡航費、滞在費などに対する予算の配慮、事務手続きの簡素化に加えて将来は data grid system などの整備が不可欠であろう。

5.4.7 中間評価の提言「ワークショップやサマースクール等への若手参加の機会を増やすと共に、長期滞在を可能にする方策実現に向けて一層の努力をすべきである。」

ワークショップやサマースクール等への若手の参加については当事者達の努力によってかなりの改善が見られる。一方、長期滞在に関しては予算をはじめその他の環境整備がまだ不十分であると言わざるを得ない。今後の改善を期待したい。

5.5 今後の発展に向けた課題

5.5.1 研究の国際協力事業を推進するに当たり、対等な研究協力が望まれることは論を待たない。しかし、相手国の研究機関の事情を配慮して先方の望んでいる事に重点をおいて技術支援、若手育成を行うことの重要性も忘れてはならない。そのような支援が長期的な視野に立った互恵の研究協力関係を築く事に役立てられる事はこの事業自体が示しているといってもよい。

5.5.2 若手研究者の育成は今後の最重要課題の一つといえる。サマースクール等の一層の充実が望まれるとともに、双方の研究者や大学院生が相手国の研究機関に長期滞在することによって、若手研究者の育成と国際交流を促進することが望まれる。

5.5.3 この事業の終了後に発足する新たな事業がやや縮小した形でスタートするならば、次の点に配慮して進めるべきであると考えられる。

- a) 加速器科学ではグローバルな共同研究が必要不可欠なので、世界的視野に立った枠組みの一環と位置づける事が重要である。
- b) KEK の主要研究課題の国際協力については大規模な共同研究として進める必要のあるものもあると考えられるので、KEK としてこのような事業とは別の枠組みで共同研究を進める体制を作る方が望ましいと考えられる。
- c) トピックスを厳選して、最重要なプロジェクトを重点的に支援すべきであろう。
- d) 萌芽的なプロジェクトを優先的に採択すべきである。
- e) 人材育成の観点を重視すべきである。
- f) 相手国はそれぞれ事情が異なっているので、相手国の研究機関のニーズに十分配慮し

- て、方針を決める事が望ましい。
- g) 相手国を中国、韓国、インド以外のアジア諸国にも広げる事が望まれる。

結語

これまで 10 年間に果たした本事業の役割とその成果は非常に高いものであり、事業の終了にあたり、本委員会はこれを高く評価する。

本事業によってまかれた共同研究の種が今後大きく開花し、真の国際的な相互互惠の共同研究として更に発展することを切望する。

6. 補足資料

I 評価委員会構成メンバーリスト

	氏名	ふりがな	所属・職
委員長	政池 明	まさいけ あきら	京都大学・名誉教授
委員	太田 俊明	おおた としあき	立命館大学・教授
委員	栗木 雅夫	くりき まさお	広島大学・教授
委員	小泉 成史	こいずみ せいし	科学ジャーナリスト、 金沢工業大学・客員教授

II 評価委員会議事日程

1. 拠点大学交流事業評価委員会議事日程 1月27日 (KEK)

- ・各委員自己紹介
- ・委員長の選出
- ・機構の概要説明
- ・拠点大学交流事業の概要説明（アジアにおける加速器研究所の説明含む）
- ・各プロジェクトの研究状況報告
- ・評価委員会の進め方について
- ・現地視察のスケジュール等について
- ・その他

2. 拠点大学交流事業評価委員会現地視察（インド） 2月14日～20日

- ・可変エネルギーサイクロトロンセンター (VECC)
- ・ラジャ・ラマンナ先端技術センター (RRCAT)
- ・大学共同利用機関加速器センター (IUAC)
- ・タタ基礎研究所 (TIFR)
- ・バーバ原子核研究センター (BARC)

3. 拠点大学交流事業評価委員会現地視察（中国） 4月6日～8日

- ・上海放射光施設 (SSRF)
- ・高能物理研究所 (IHEP)

4. 拠点大学交流事業評価委員会議事日程 6月30日 (KEK)

- ・これまでの経過と委員会の進め方
- ・報告書の概要と執筆分担
- ・インド、中国視察のまとめ
- ・各プロジェクトの評価
- ・総括と展望
- ・今後のスケジュール
- ・資料の収集について

5. 拠点大学交流事業評価委員会現地視察（韓国） 7月29日

- ・浦項工科大学附属加速器研究所 (PAL)

Ⅲ 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構拠点大学交流事業（加速器科学分野）研究計画委員会規程

平成16年4月19日

規程第60号

改正 平成17年3月29日規程第25号

改正 平成21年3月31日規程第46号

（設置）

第1条 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構（以下「機構」という。）に、拠点大学交流事業（加速器科学分野）研究計画委員会（以下「委員会」という。）を置く。

（任務）

第2条 委員会は、独立行政法人日本学術振興会（JSPS）と中国科学院（CAS）、韓国科学財団（KOSEF）及びインド科学技術庁（DST）との間で調印された、「日本学術振興会と中国科学院との拠点大学方式による学術交流（加速器科学分野）の実施大綱」、「日本学術振興会と韓国科学財団との拠点大学方式による学術交流（加速器科学分野）の実施大綱」、「日本学術振興会とインド科学技術庁との拠点大学方式による学術交流（加速器科学分野）の実施大綱」により実施される本機構と中国高能物理研究所（IHEP）、韓国浦項加速器研究所（PAL）、ラジャ・ラマンナ先端技術センター（RRCAT）を各拠点大学とする加速器科学分野における拠点大学交流事業（以下、「交流事業」という。）に関する日本側の事業計画等について審議する。

（組織）

第3条 委員会は、次の各号に掲げる委員をもって組織する。

- (1) 交流事業における日本側コーディネーター
- (2) 副所長
- (3) 素粒子原子核研究所の職員のうちから 2人
- (4) 物質構造科学研究所の職員のうちから 2人
- (5) 加速器研究施設の職員のうちから 2人
- (6) 機構外の学識経験者 若干人
- (7) その他機構長が必要と認める者

（任期）

第4条 前条第4号から第8号に掲げる委員の任期は、5年とし、再任を妨げない。ただし、その欠員が生じた場合の補欠委員の任期は、前任者の残任期間とする。

（委員長）

第5条 委員会に委員長を置き、日本側コーディネーターをもって充てる。

2 委員長は、委員会の会務を総理する。

3 委員長が委員会に出席できない場合には、あらかじめ委員長が指名する委員が、その職務を代行する。

（招集）

第6条 委員会は、必要に応じ、委員長が招集する。

（議事）

第7条 委員会は、委員の過半数の出席が無ければ、議事を開き議決することができない。

2 委員会の議事は、出席した委員の過半数をもって決し、可否同数のときは、委員長の決すると

ころによる。

(評価委員会)

第8条 委員会に、交流事業を評価するため、評価委員会を置く。

2 評価委員会の組織、運営等については、機構長が別に定める。

(庶務)

第9条 委員会の庶務は、研究協力部国際企画課において処理する。

(雑則)

第10条 この規程に定めるもののほか、委員会の運営に関し必要な事項は、別に定める。

附 則

1 この規程は、平成16年4月19日から施行し、平成16年4月1日から適用する。

2 この規程の施行後、第3条第4号から第8号に掲げる最初の委員の任期は、第4条の規定にかかわらず、平成17年3月31日までとする。

附 則 (平成17年3月29日規程第25号)

この規程は、平成17年4月1日から施行する。

附 則 (平成21年3月31日規程第46号)

この規程は、平成21年4月1日から施行する。

IV 拠点大学交流事業(加速器科学分野) 研究計画委員会委員リスト

氏名	ふりがな	所属・職	備考
野崎 光昭	のざき みつあき	高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設・教授	コーディネーター *
山内 正則	やまうち まさのり	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・副所長	*
池田 進	いけだすすむ	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所・副所長	*
若槻 壮市	わかつき そういち	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所・副所長	*
徳宿 克夫	とくしゆく かつお	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・教授	
幅 淳二	はば じゅんじ	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・教授	
春日 俊夫	かすが としお	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所・教授	
河田 洋	かわた ひろし	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所・教授	
赤井 和憲	あかい かずのり	高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設・教授	
古屋 貴章	ふるや たかあき	高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設・教授	

黒川 眞一	くろかわ しんいち	高エネルギー加速器研究機構 名誉教授	
日笠 健一	ひかさ けんいち	東北大学 大学院理学研究科・教授	
相原 博昭	あいはら ひろあき	東京大学 大学院理学系研究科・教授	
笹尾 登	ささお のぼる	京都大学 大学院理学研究科・教授	
野田 章	のだ あきら	京都大学 化学研究所・教授	
新竹 積	しんたけ つもる	理化学研究所 播磨研究所・主任研究員	

* 役職指定

V 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構拠点大学交流事業（加速器科学分野）評価委員会の組織、運営等に関する要項

平成16年4月23日

高エネルギー加速器研究機構長裁定

改正 平成21年3月31日

（設置）

第1条 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構拠点大学交流事業（加速器科学分野）研究計画委員会（以下「研究計画委員会」という。）規程第8条第2項の規定に基づき、拠点大学交流事業（加速器科学分野）評価委員会（以下「委員会」という。）を置く。

（任務）

第2条 委員会の任務は、次に掲げるものとする。

- (1) 拠点大学交流事業（加速器科学分野）について基礎資料の収集及び意見聴取
- (2) 実地調査
- (3) 評価委員会報告書の作成及び同報告書の研究計画委員会への提出

（組織）

第3条 委員会の委員は、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構以外の学識経験者をもって構成する。

（任期）

第4条 委員の任期は、委嘱の日から、評価委員会報告書を研究計画委員会へ提出する日までの間とする。

（委員長）

第5条 委員会に委員長を置き、委員の互選によって定める。

2 委員長は、委員会の会務を総理する。

（招集）

第6条 委員会は、必要に応じ、委員長が招集する。

(雑則)

第7条 この要項に定めるもののほか、委員会の運営に関し必要な事項は、別に定める。

附記

この要項は、平成16年4月23日から施行し、平成16年4月1日から適用する。

附記

この要項は、平成21年4月1日から施行する。

VI 拠点大学交流事業参加グループリスト

日本側実施組織

事業主体	日本学術振興会 (JSPS)
拠点機関	高エネルギー加速器研究機構 (KEK)
実施組織代表者	鈴木 厚人・KEK 機構長
コーディネーター	野崎 光昭・KEK 教授
協力機関	東北大学・大学院理学研究科 多元物質科学研究所 茨城大学・工学部 東京大学・大学院理学系研究科 素粒子物理国際研究センター 物性研究所 東京農工大学・工学部 首都大学東京・大学院理学研究科 早稲田大学・理工学部 総合研究大学院大学・教育研究交流センター 新潟大学・大学院自然科学研究科 名古屋大学・大学院理学研究科 大学院工学研究科 自然科学研究機構・分子科学研究所 京都大学・大学院理学研究科 基礎物理研究所 大阪大学・大学院理学研究科 神戸大学・理学部 広島大学・大学院先端物質科学研究科 放射光科学研究センター 佐賀大学・理工学部

中国側実施組織

事業主体	中国科学院 (CAS)
拠点機関	高能物理研究所 (IHEP)
実施組織代表者	CHENG, Hesheng・IHEP 所長
コーディネーター	ZHANG, Chuang・IHEP 副所長

協力機関	中国科学院上海放射光施設 中国科学院理論物理研究所 北京大学 清華大学 中国科学技術大学 山東大学 浙江大学 中国高等科学技術中心 復旦大学
------	--

韓国側実施組織

事業主体	韓国科学財団 (KOSEF)
拠点機関	浦項工科大学付属加速器研究所 (PAL)
実施組織代表者	REE, Moonhor・PAL 所長
コーディネーター	KO, In Soo・PAL 教授
協力機関	浦項工科大学 ソウル国立大学 慶北大学 高麗大学校 延世大学校 全南大学校 全北大学 李花女子大学 成均館大学 慶尚国立大学 韓国高等科学院

インド側実施組織

事業主体	インド科学技術庁 (DST)
拠点機関	ラジャ・ラマンナ先端技術センター (RRCAT)
実施組織代表者	SAHNI, Vinord Chandra・RRCAT 所長
コーディネーター	JOSHI, Satish Chandra・RRCAT 教授
協力機関	デリー大学 パンジャブ大学 大学共同利用機関加速器センター タタ基礎研究所 インド科学研究所 可変エネルギーサイクロトロンセンター サハ原子核物理研究所

VII 略語表

ACFA	: Asian Committee for Future Accelerators
ADS	: Accelerator Driven Sub-critical System
AEET	: Atomic Energy Establishment, Trombay (Trombay, India)
AHWR	: Advanced Heavy Water Reactor
ALS	: Advanced Light Source (Berkley, USA)
ATF	: Accelerator Test Facility (KEK, Japan)
BARC	: Bhabha Atomic Energy Centre (Mumbai, India)
BBA	: Beam Based Alignment
BEPC	: Beijing Electron Positron Collider (Beijing, China)
BES	: Beijing Spectrometer (Beijing, China)
BPM	: Beam Position Monitor
BSRF	: Beijing Synchrotron Radiation Facility
CAEP	: Chinese Academy of Engineering Physics
CAS	: Chinese Academy of Science (Beijing, China)
CIOM	: Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics (China)
CSNS	: Chinese Spallation Neutron Source (China)
DST	: Department of Science and Technology (India)
DTL	: Drift Tube Linac
ECR	: Electron Cyclotron Resonance (Ion Source)
ELLETRA	: ELLETRA Synchrotron Light Source (Trieste, Italy)
EP	: Electro-polishing
EPICS	: Experimental Physics and Industrial Control System
ESS	: European Spallation Source
FAIR	: Future Facility for Antiproton and Ion Research (GSI, Darmstadt, Germany)
FEL	: Free Electron Laser
GIST	: Gwangju Institute of Science and Technology (China)
GLC	: Global Linear Collider
GLD	: Global Large Detector (for ILC)
GSI	: Gesellschaft für Schwerionenforschung (Darmstadt, Germany)
IHEP	: Institute for High Energy Physics ((Beijing, China)
ILC	: International Linear Collider
IOP	: Institute of Physics (China)
KSTAR	: Korea Superconducting Tokamak Advanced Reactor
ILD	: International Large Detector (for ILC)
IMD	: International Institute for Management Development
IUAC	: Inter-University Accelerator Centre (Delhi, India)
J-PARC	: Japan Proton Accelerator Research Center (Ibaraki, Japan)
JSPS	: Japan Society for the Promotion of Science (Tokyo, Japan)
KNU	: Kypmok National University (Korea)

LDC : Large Detector Concept (for ILC)
LHC : Large Hadron Collider (CERN, Geneva)
LIGA : Lithographie, Galvanoformung, and Abformung
LL-type : Low Loss Type (superconducting cavity)
LWR : light water reactor
NSLS : National Synchrotron Light Source (Brookhaven National Laboratory, USA)
NSRL : National Synchrotron Radiation Laboratory (Hefei, China)
PAL : Pohang Accelerator Laboratory (Pohang, Korea)
PF : Photon Factory (KEK, Japan)
PHWR : Pressurized Heavy Water Reactor
PLC : Programmable Logic Controller
PMD : Photon Multiplicity Detector
POSTECH : Pohang University of Science and Technology (Pohang, Korea)
RHIC : Relativistic Heavy Ion Collider (Brookhaven National Laboratory, US)
PLS : Pohang Light Source (Pohang, Korea)
RFQ : Radio Frequency Quadrupole (Accelerator)
RPC : Resistive Plate Chamber
RRCAT : Raja Ramanna Centre for Accelerator Technology (Indore, India)
SC : Super-conducting Cavity
SINAP : Shanghai Institute of Applied Physics (Shanghai, China)
SINP : Saha Institute of Nuclear Physics (Kolkata , India)
SSRF : Shanghai Synchrotron Radiation Facility (Shanghai, China)
STF : Superconducting RF Test Facility (KEK, Japan)
TIFR : Tata Institute of Fundamental Research (Mumbai, India)
VECC : Variable Energy Cyclotron Center (Kolkata , India)
VUV : Vacuum Ultra Violet
XAFS : X-ray Absorption Fine Structure