

国際協力

アジアにおける加速器科学の現状

黒川 眞一*

Present Status of Accelerators in Asia

Shin-ichi KUROKAWA*

1988年に初めて中国を訪問してから現在までに、私の中国訪問はすでに48回に達した。中国の他には、台湾、韓国、タイ、インド、ヨルダン、ベトナムをそれぞれ1回から数回訪問しており、アジア諸国への延べ訪問回数は70回を超えている。ここでは、これまでの経験に基づき、アジアにおける加速器科学の現状と、国際協力の必要性について書いてみる。これらの諸国と私の接触は、電子加速器に大きく偏っているため、陽子と原子核の加速器については、この記事ではほとんどふれることがないことをあらかじめご了承ください。

1. アジア各国の加速器科学の現状

まず、図1に、アジアにおける主な加速器研究所の位置を示す。

1.1 中国

中国は1950年代終わりまで、ロシアとの緊密な関係を持っており、第一世代の加速器科学者の多くは、ロシアで研究を行ったことがある。例えば、中国科学院高能物理研究所の方守賢教授は、1950年代末に、ロシアのLevedev研究所にて、Kolomensky氏のもとでFFAGの研究を行っていた。ロシアとの関係が悪化した1950年代後半から、文化大革命が終了した1970年代半ばまでは、中国は外国から孤立した状態で、独力で加速器科学の研究を遂行していたと思われる。

文化大革命の終了とともに、中国における加速器科学は再び発展の道をたどるようになった。中国は数多くの研究者を欧米と日本に派遣し、加速器科学を学び、そして1970年代末には50 GeVの陽子シンクロトロン建設計画が策定された¹⁾。

中国では、やがて、50 GeV陽子シンクロトロン建

設計画を破棄し、2 GeVの電子陽電子衝突型加速器BEPC (Beijing Electron Positron Collider)の建設を1980年代初めから開始した²⁾。BEPCは中国が建設した最初の大型加速器であり、その建設に当たっては、米国のSLAC (スタンフォード線形加速器センター)が、Pief Panofsky所長のリーダーシップのもとに全面的な協力を行った。日本は丁度、この時期にTRISTANを建設中であり、BEPCとの協力は極一部に限られざるを得なかった³⁾。BEPCは、1988年に運転を開始し⁴⁾、現在にいたるまで順調に運転を続けてきた。この2005年3月末には役目を終えて運転を停止し、後述のBEPC-IIに道を譲ることになる。

図2に、高能物理研究所の写真を、また図3にはBEPCの概念を示す。BEPCは、最高ルミノシティこそ、 $1.2 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ではあるが、世界ではほぼ唯一のタウ・チャーム領域の電子陽電子衝突型加速器として、重要なニッチを占めることにより、タウ粒子の質量の精密測定、このエネルギー領域におけるRの精密測定など、いくつかの重要な成果を達成している。

BEPCは運転時間の約3分の2を高エネルギー物理学の実験に、残りの3分の1を放射光利用のためにあてている。近年、BEPCにおける放射光用ビームラインの整備と、研究活動の活発化はめざましく、真空封止型マルチポールウィグラーの導入により、ウィグラーに取り付けられた蛋白構造解析ビームラインを用い、SARS関連の蛋白質の構造解析が行われ、昨年、Nature誌の表紙を飾ったことが特筆される。

BEPCは1リング型の電子陽電子衝突型加速器であるが、BEPCのトンネル中にもう一つのリングを設置し、タウ・チャーム領域をカバーする高いルミノシティ ($10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)を持つ2リング型対称エネルギー衝突型加速器を建設しようというのが、BEPC-

* 高エネルギー加速器研究機構 KEK
(E-mail: shin-ichi.kurokawa@kek.jp)



図1 アジアにおける主な加速器研究所の位置

中国北京高能物理研究所

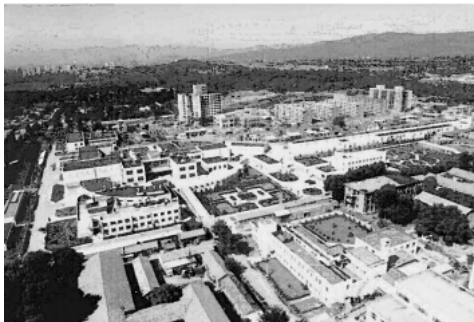


図2 高能物理研究所の写真

II 計画である。この計画は2003年初めに政府の正式な承認を得、すでに建設が始まっている。完成予定は2007年である。図4に BEPC-II の概念図を示し、表1に基本性能をまとめてある。

2000年度からは、学術振興会のプログラムである拠点大学方式共同研究事業が、「電子加速器を用いた加速器科学の研究」を主題とし、高エネルギー加速器研究機構と高能物理研究所を拠点大学として開始された。BEPC-II 計画にかかる日中間の共同研究は、この事業の重要な柱である。BEPC-II においては、KEKB 型超伝導加速空洞を採用することが決まって

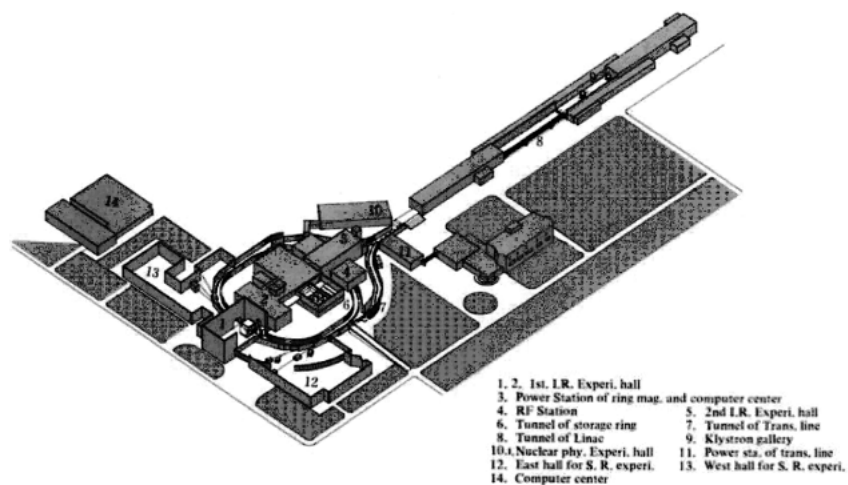


図3 2 GeV 電子陽電子衝突型加速器 BEPC の概念図

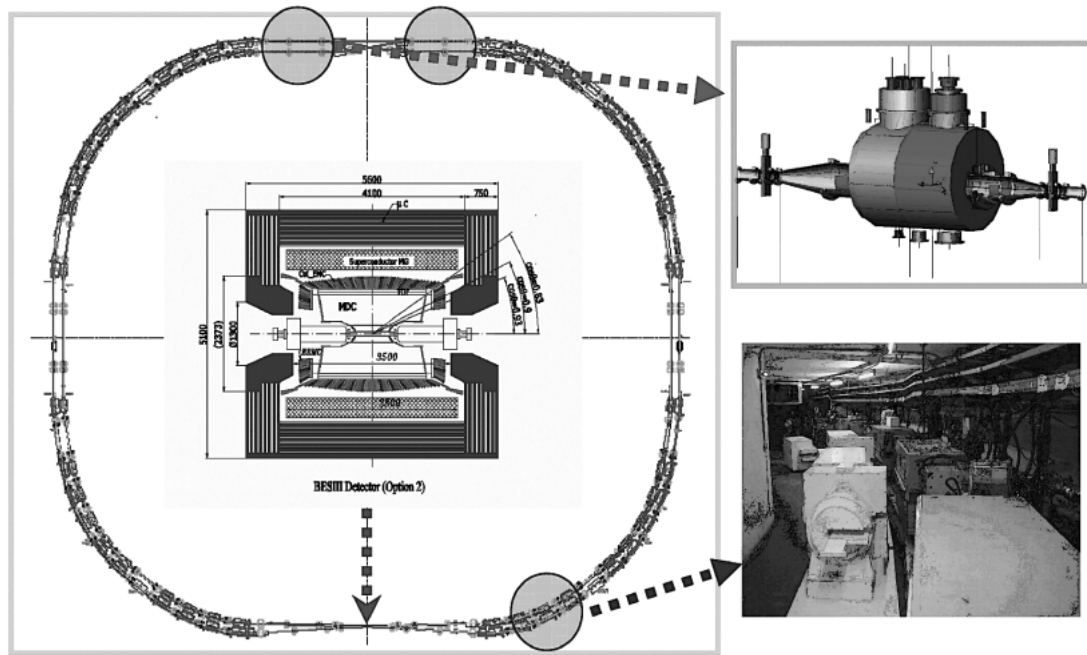


図4 2リング型電子陽電子衝突型加速器 BEPC-II の概念図. BEPC のトンネルの中にもう一つのリングを既存リングに並べて設置される (図右下). また, KEKB 型単一セル単一モード超伝導空洞が, リングあたり各1台設置される (図右上).

表1 BEPC-II の目標値と主要パラメータ

Beam energy range	1-2 GeV
Optimized beam energy region	1.89 GeV
Luminosity@1.89 GeV	$1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Injection from linac	Full energy: $E_{ini} = 1.55 - 1.89 \text{ GeV}$
Dedicated SR operation	250 mA@2.5 GeV

おり, 現在, この拠点大学共同研究の重要なプロジェクトとして, BEPC-II 用の超伝導加速空洞に関する共同研究が進行中である.

上海に3.5世代の放射光加速器, いわゆる上海放射光SSRFを建設しようと, 中国の加速器科学者と放射光科学の研究者は, ほぼこの10年間にわたって地道な努力を続けてきた. 数年前に一度, 建設がほぼ承認されかけ, 活発なR&Dが行われていたが, こししばらく足踏みを続けていた. しかしながら, 今年の1月になって, ついに建設が中国政府によって正式に承認され, まもなく実際の建設が開始される場所である. 上海放射光は, 周長432 m, エミッタンス3 nm という野心的な加速器であり, 周長だけを見ても世界で5番目に大きな放射光となる. SSRFはSPRING-8やKEK-PFと並んで, 硬X線源としての将来

が囑望されるだけでなく, 軟X線領域の第3世代光源ははまだ日本では認められていない状況下での上海放射光施設SSRFの建設は歴史的な快挙であり, 完成すればアジアの軟X線, VUV光源としては最も性能の高いものになることが期待される. 図5に上海放射光の概念図を表2にそのパラメータを示す.

中国には, 原子核物理の研究所として, シルクロードの入り口にあたる甘粛省の蘭州に近代物理研究所があり, サイクロトロンを中心とした加速器を持つが, 始めに述べた理由により, この記事においては取り上げないことにする. 中国においては, 高能物理研究所と中国原子能研究所が中心となり, 100-200 kW のスパレーション中性子源建設に関する研究が開始された.

1.2 インド

インドにおける加速器科学の興隆は1980年代半ばにさかのぼり, この時期に, 3つの加速器研究所が建設された. すなわち, インドール(デリーとムンバイのほぼ中間に位置するデカン高原上の都市)郊外に位置するCAT (Centre for Advanced Technology), カルカッタの郊外のVECC (Variable Energy Cyclotron Centre), そして, デリーのNSC (Nuclear Science Centre) である.

CATは, 加速器およびレーザーの研究を行う研究所であり, 1980年代後半から, 独力で, 450 MeVの放

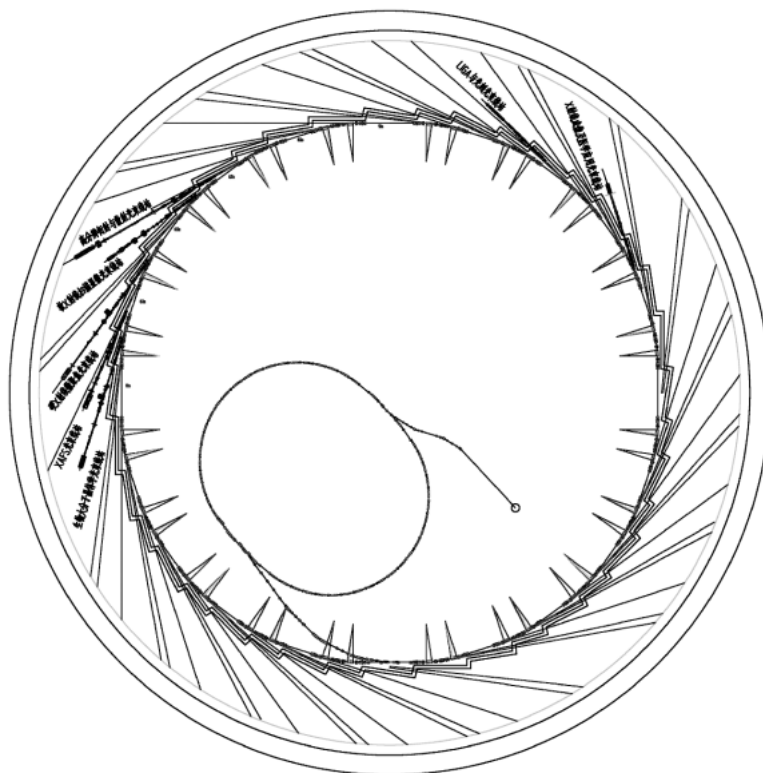


図5 上海放射光の概念図. 100 MeV のライナックからのビームはブースター・シンクロトロンで3.5 GeV まで加速され、蓄積リングに入射される. 図の中央付近にライナックとシンクロトロンが設置される.

表2 上海放射光の主要パラメータ

Beam Energy	GeV	3.5	
Circumference	m	432	
Number of cells		20	
Straight sections (N×L)	m	4×12 m, 16×6.7 m	
Beam current	mA	200~300	
Natural emittance	nm·rad	3.0	
Beam lifetime	hrs	>10	
SR beam stability	μm	~±0.1σ	
Injection Booster	Energy	GeV	0.1~3.5
	Circumference	m	180
	Natural emittance		110 nm×rad

射光加速器 INDUS-I の建設を開始し、2001年に完成させた。続いて、CATは、2.5 GeV の放射光加速器 INDUS-II の建設を始めた。INDUS-II は現在建設の最終段階に来ており、来年には運転を開始する予定である。図6に INDUS-I と INDUS-II の概念を示し、図7に INDUS-II のトンネル内に設置された電

磁石を示す。さらに、CATにおいては、2010年までには、陽子シンクロトロンに基づく100 kW 出力の中性子源を完成させる計画が既に決まっている。

インドにおける加速器科学の進め方の特徴は、すべてのものを独自に作ろうということにある。このやり方は、一見迂遠であり、そのことは INDUS-I の建設に10年上の歳月を要したことに端的に表れている。しかしながら、一旦技術を習得した暁には、すべてのことを自分でできることになり、急速に発展することができるようになる。あまり知られていない事実であるが、CATはCERNのLHC用に2000個以上の超伝導補正電磁石を既に納入しており、CERNのCATに対する評価は非常に高い。また、筆者は INDUS-II 用の電磁石を具体的に調べてみたことがあり、これまでに作られた最も良の電磁石であるという評価である⁵⁾。

なお、インドにおいては、2003年から INPAC とよばれるインド国内の加速器会議が2年毎に開催されることになり、CATで開かれた第1回の INPAC には300名以上の参加者があった。次回は2005年3月1-5日にかけて、カルカッタの VECC で開かれる。INPACにおける発表と議論はすべて英語で行われるため、日本人の出席が可能である。

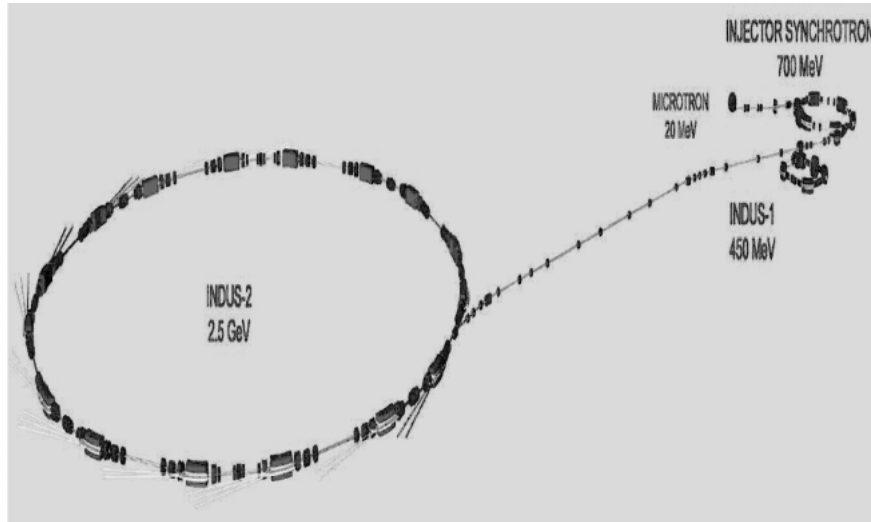


図6 INDUS-I および INDUS-II 概念図

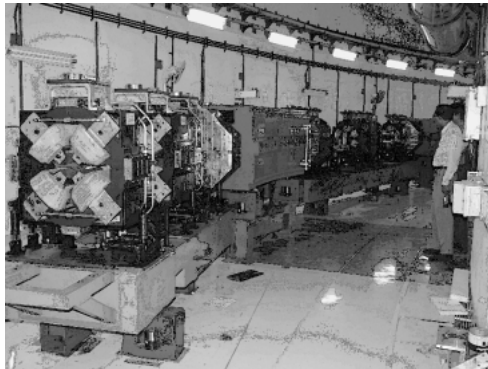


図7 INDUS-II トンネル内に設置された電磁石

1.3 韓国と台湾

韓国と台湾においては、ともに、1990年代に韓国においては浦項工科大学 (POSTECH) の付属研究所である PAL において 2.5 GeV の放射光加速器が、台湾においては、新竹の台湾放射光施設 NSRRC において 1.5 GeV の放射光が稼働を開始し、安定にビームを供給している。これらの地域における放射光ユーザの数も着実に増加をしつつある。図8にPALの放射光施設 (PLS: Pohang Light Source) の概念を、そして図9には PLS の 2004 年 9 月現在のビームラインを示す。図10には台湾の NSRRC の放射光加速器の概念を示す。NSRRC で特筆すべきはことは、同研究所の放射光加速器が CLS (Canadian Light Source) と並んで、世界で初めて、超伝導加速空洞を用いて加速を行おうとしていることである。

韓国においては、今年国際物理オリンピックが

POSTECH にて開催されたときに、大統領が POSTECH を訪問し、置きみやげとして、X線FEL計画に予算を付けることを約束した。現在、詳しい検討が進行中であるが、図11に現時点の概念図を示す。

台湾の NSRRC では、この間将来計画の議論が行われてきたが、現在は、500 m を超す周長を持つ、2.5 GeV の放射光加速器を敷地いっぱいを使って建設しようという方向に収束しつつある (図12)。この放射光は、先に述べた上海放射光に匹敵するものである。上海放射光とこの台湾の新放射光が完成の暁には、東アジアは、SPring-8、上海放射光、台湾放射光という3つの強力な放射光を持つことになる。

1.4 その他の諸国

上に示したように、日本、中国、韓国、インド、台湾においては、加速器科学が著しく発展しつつある。そして、タイ、シンガポール、オーストラリアがこれに続いているが、それ以外の諸国における進歩は遅々たるものである。

タイにおいては、1 GeV のエネルギーを持つタイ放射光が 2001 年から運転を始めた。この放射光施設は、つくばにあった SORTEC という放射光加速器を日本が無償供与し、タイで再組み立てしてできたものである。タイ放射光は、東大名誉教授である石井武比古氏を始めとする日本人研究者の長年にわたる献身的な貢献なくしてはできなかったことをここに示したい。図13にタイ放射光の建物を示す⁶⁾。

シンガポールには、0.7 GeV の超伝導放射光リングを持つ SLS (Singaporean Synchrotron Light Sou-

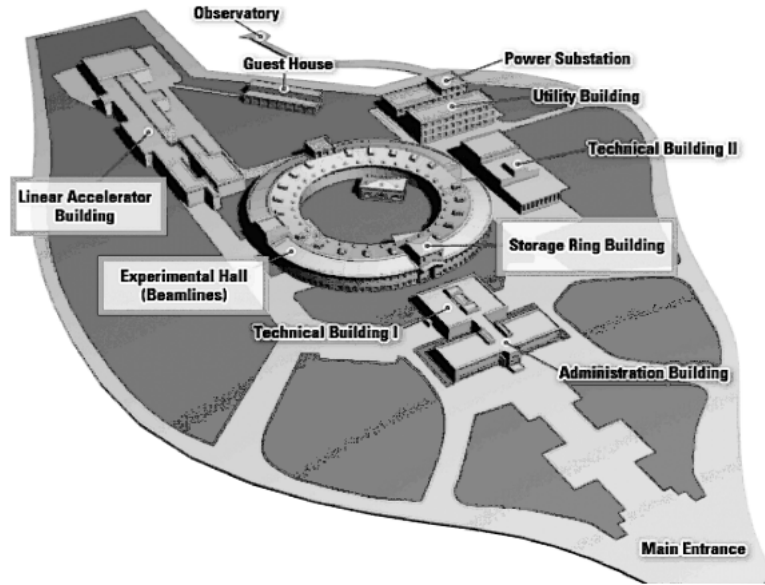


図8 PAL放射光施設(PLS)の概念図

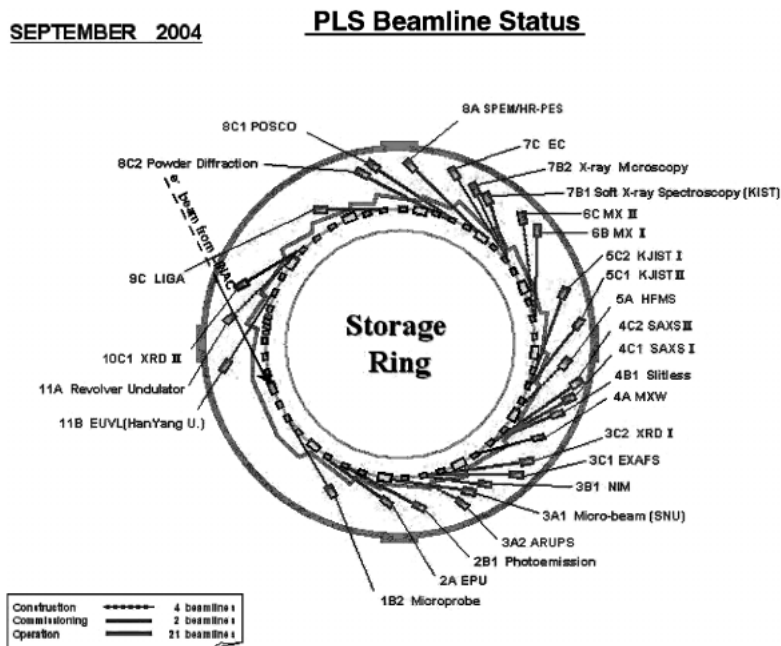


図9 PAL蓄積リングとビームライン

rice)が存在し、わずか20数名のスタッフにかかわらず活発な研究活動を行っている。

オーストラリアにおいては、メルボルンにて2.5 GeVの放射光ALSの建設が始まっている。

2. 中東の加速器計画 SESAME

最後に、アジアにおけるユニークな計画である SESAME について簡単に紹介したい。SESAMEは、Synchrotron light for Experimental Science and Appli-

cation for the Middle Eastの略称であり、2.5 GeVの放射光加速器を中核としてもつ中東地域の国際研究機関である⁷⁾。中東のほぼ中央である、ヨルダンのアンマンの西郊、パレスチナ自治区とヨルダンを分けるヨルダン川から東に30 kmのところに位置する。SESAMEは、中東地域における科学の振興をはかり、また、科学の振興を通じてこの地域に平和を醸成することを主要な目的とする。SESAMEは、ユネスコ的主导のもとに準備が進められ、2004年初めから建物

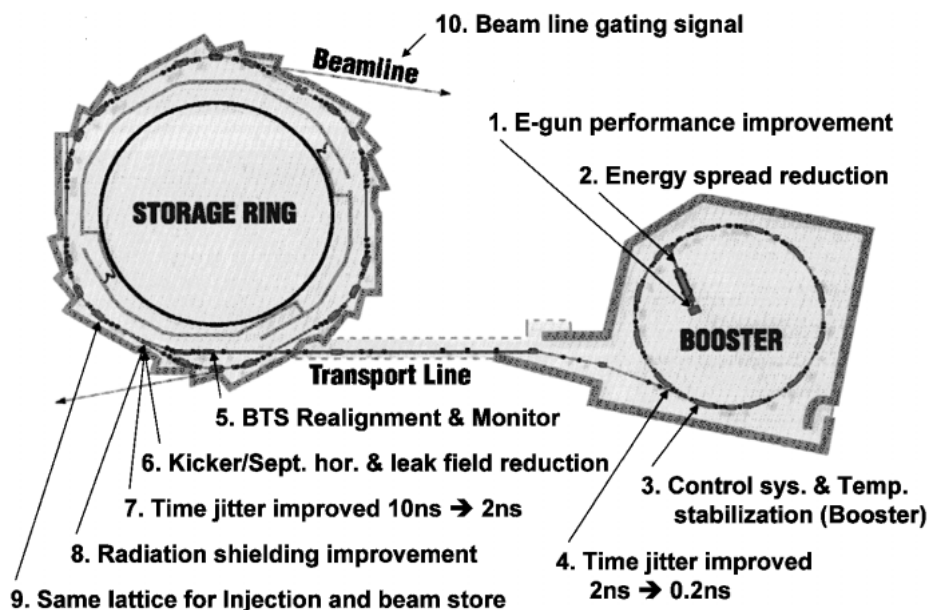


図10 NSRRC 放射光施設概念図

PAL XFEL Layout

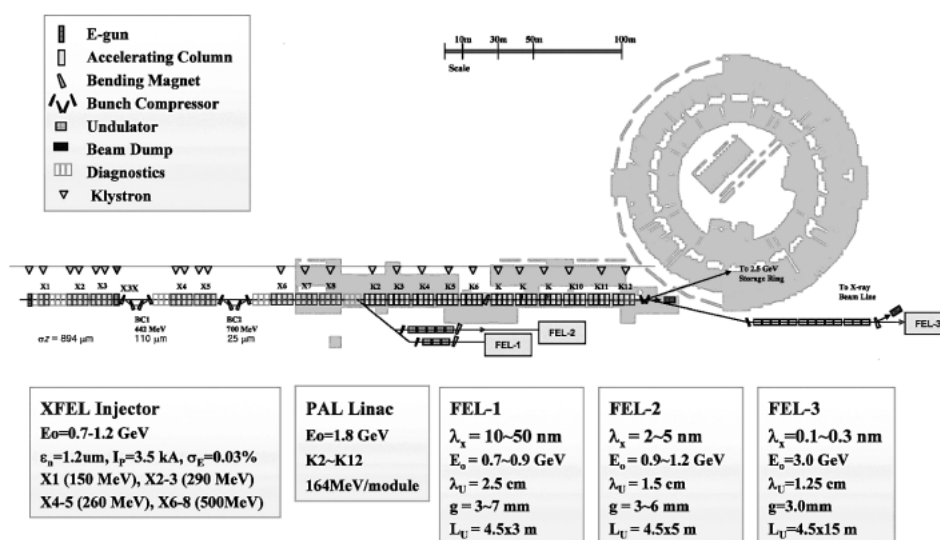


図11 PAL X-FEL 計画

の建設が始まっている。遅くとも2010年ぐらいまでに加速器の運転を開始することが目標である。図14にSESAMEの位置を、図15にSESAMEの加速器の概念を示す。

SESAMEの現時点での参加国は、パレスティナとイスラエルおよび、パキスタン、イラン、トルコ、アラブ首長国連邦、バーレーン、ヨルダン、エジプトの9カ国である。日本は、米国、フランス、イタリア、ドイツなどとともに、SESAMEが正式に発足するま

での暫定理事会のオブザーバー国であり、SESAMEが発足後は、正式なオブザーバー国になるべく準備を進めているところである。

SESAMEを実現し、中東地域における科学の振興を通じてこの地域に平和をもたらすために、日本は協力を惜しむべきでなく、また、日本の果たすべき役割は大きいと考える。



図12 NSRRC 将来計画. 背景に見えるのが現 NSRRC であり, 敷地いっぱいを使って 500 m 以上の周長を持つ放射光加速器を作ろうという計画である.

Siam Photon Laboratory Korat



図13 タイ放射光概念図

3. ACFA の活動

アジア地域の加速器科学の発展をはかるためには, この地域の国際協力を支える組織が必要である. 先にあげたアジア諸国の加速器科学の発展をうけ, 1996 年には ACFA (Asian Committee for Future Accelerators) が結成された. ACFA の加盟国は, 日本, 韓国, 中国, 台湾, マレーシア, インドネシア, インド, パキスタン, オーストラリアの 9 カ国である⁸⁾.

ACFA のもとに, ほぼ 3 年ごとに, アジア加速器会議 (APAC) が開かれることになり⁹⁾, 第 1 回が 1997 年につくばにて開催された. 第 2 回と第 3 回は, それぞれ, 北京で 2001 年, 韓国の慶州にて 2004 年 3 月に開催された. 次回は, インドのインドールにて, 2006 年から 2007 年にかけての冬に開催することが決まっている. APAC には毎回 300-400 名にのぼるアジア地域の科学者が参加している.

ACFA は, このほかに, 加速器に関するスクールの開催, 参加国の加速器計画にたいする支援などの活動を行っている.

4. 国際リニアコライダーへのアジア地域の関与

次期のエネルギーフロンティア加速器は 500 GeV から 1 TeV のエネルギーの電子陽電子線形衝突型加



Synchrotron-Light for Experimental Science
and
Applications in the Middle East

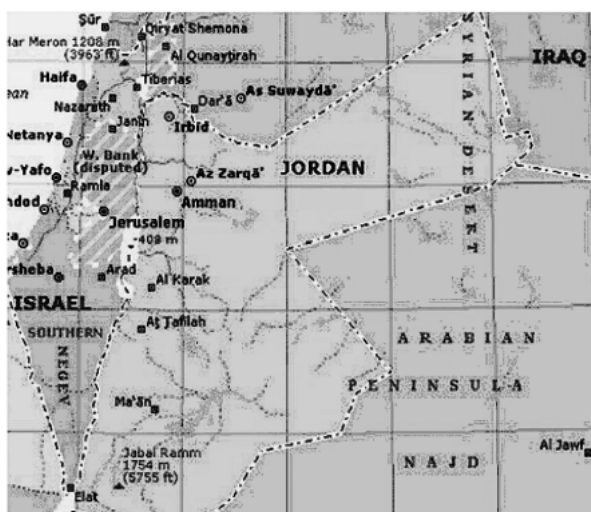


図14 SESAME は図中のヨルダンの首都アンマンの西, ヨルダンとパレスチナの境を流れるヨルダン川とアンマンのほぼ中間に位置する

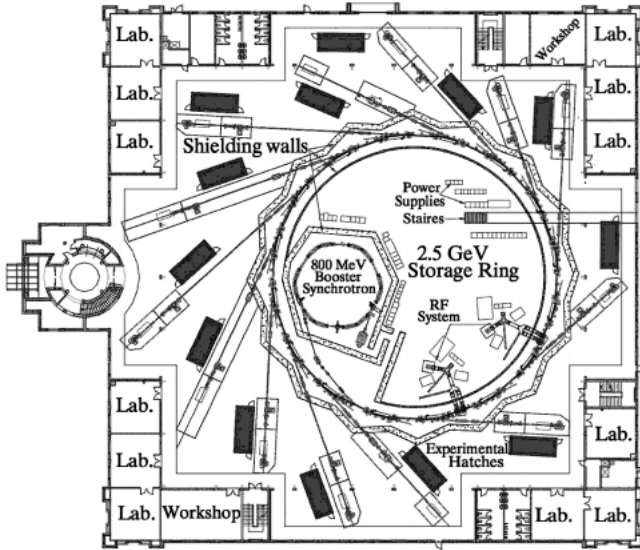


図15 SESAME 放射光の概念図

速器，いわゆるリニアコライダー（以下 LC と略記）であること，また，世界中が一致協力して，一つの LC をどこかにつくらなければならないことについて，世界の高エネルギー物理学者は一致している．この数年，いかにして世界リニアコライダーを実現すべきかについての議論が，IUPUP のもとにつくられた ICFA (International Committee for Future Accelerators) および，加速器科学における世界の 3 地域（アジア，北米，ヨーロッパ）のそれぞれにおいて行われてきた．アジアにおいては，先に述べた ACFA のもとに議論が進行中である．2004 年 8 月には，LC のテクノロジーとして超伝導空洞技術を使うべきであるとの結論がで，来年初めにも，LC の概念設計を行い，世界における R & D を調整する役割を果たす，GDI (Global Design Initiative) という組織が発足する運びである．

この数年アジア地域の加速器科学の進展はめざましいものがあるが，北米とヨーロッパに比べ，まだ，地域内の協力は十分ではない．これはアジア地域が広大であり，各国間の格差が大きいこと，欧米に比べて，遅れて加速器科学に取り組み始めたことなど，いくつかの理由がある．アジアにおける加速器科学の先進国である日本が，積極的な役割を果たし，地域内の国際協力を強力に推進する責務を担うべきであることを痛感している¹⁰⁾．

ACFA は既に LC に関して 3 つの声明を出しており，最後の声明は，2004 年 11 月 2-3 日にカルカタで開かれた ACFA meeting においてだされたものである．付録に，この声明の全文を載せる．

5. おわりに

この論文で説明したように，アジアにおける加速器科学の興隆は著しく，この 10 年から 15 年の間に，日本，中国，インド，韓国，台湾における加速器科学はお互いに肩を並べるにいたるであろう．現在アジア地域においてこの分野で先頭を走っている日本の，現時点での役割は，アジア地域におけるコラボレーションを強化し，来るべき全アジア的な規模の国際協力に備えることであると考えられる．日本人研究者にこのような覚悟が用意があれば，ILC のアジア地域への招致も夢ではないであろう．

注

- 1) 筆者が，たまたま 1978 年に BNL を訪問したとき，その後上海放射光計画の初代責任者と努めることになる，陳森玉教授が，日本からの研究者が BNL に滞在中であることを聞きつけ，わざわざ私の部屋までおいでになり，中国と日本の加速器の将来について話し合ったことは懐かしい思い出である．
- 2) BEPC 計画の紹介が日本で行われたのは，1985 年に，京都で開かれた Lepton Photon Conference において，高能物理研究所の朱洪元教授が行った発表が初めてであろう．
- 3) BEPC 完成後に，高能物理研究所は，記念写真集を出版した．この本の中の数百枚の写真の中で，日本人研究者が写っている写真は 1 枚だけであり，それも，1994 年に北京の原子能研究所で開催された，日中加速器会議の出席者が，高能物理研究所を訪問したときのものである．
- 4) 筆者が初めて高能物理研究所を訪問したのは 1988 年 6 月である．これに先んずる数ヶ月の間，BEPC はビームが貯まらなくて苦勞をしていた．筆者の訪問は，高能物理研究所がこの問題を解決した直後であった．衝突点付近の最終集束用電磁石と電源の対応が間違っていたことが原因であった．人間はどこでも同じような誤りをするものだという好例である．
- 5) 筆者は 1999 年の秋に，北京にて「電子蓄積リングの物理と超伝導技術の応用」という加速器スクールを日本学術振興会の援助を得て行った．このスクールにおいては，実際に小型の超伝導ソレノイドを巻線し，ヘリウム温度に冷やして性能を測定するという実習を行った．このスクールへは CAT から 2 名の参加者がおり，彼らが，その後，LHC 用超伝導補正電磁石の製作に大きな貢献をすることになった．1999 年の段階では CAT は超伝導技術を持っていなかったのかかわらず，2004 までに 2000 個以上の超伝導電磁石を LHC に納入したことは，驚嘆すべきことであり，“Do it Ourselves” 精神の成果であると考えられる．
- 6) タイ放射光は，4 極電磁石の絶縁不良のため，長期にわたって安定にビームを回すことができなかった．最近，4 極電磁石のコイルをすべて新しいものに交換することにより，ビームの安定化と，設計どおりにオブ

ティクスを達成することができるようになった。

- 7) SESAME は、ベルリンにあった BESSY-I という 0.8 GeV の放射光リングをドイツが無償で寄贈し、中東地域の放射光施設としてよみがえせる計画として発足した。DESY の前加速器部長であった、Guss Voss 氏の発案によるものである。その後、検討を進めるうちに、エネルギーは 2.0 GeV, 2.5 GeV と次第に大きくなり、最終的に 2.5 GeV で決着した。図 15 を見ると、放射光リングの中心が建物の中心とずれていることがわかるであろう。2 GeV のリングを想定して設計された建物に、2.5 GeV のリングを納める苦肉の策である。
- 8) 筆者の黒川は、2004 年 11 月から 2 年間の任期で、ACFA の委員長を務めている。
- 9) APAC は、1980 年から 3 年毎に開催されていた日中加速器会議 (China-Japan Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications) を母体として生まれた。先達によるこのような努力なくしては、APAC が始まることはなかったであろう。
- 10) アジア地域においても、超伝導加速空洞に関する研究は、日本の KEK, JAERI, SPring-8、中国の IHEP、北京大学、韓国の KAERI、台湾の NSRCC、インドの TIFR (ムンバイにあるタタ基礎研究所) と NSC (デリーにある原子核研究センター) などで行われている。

付 録

Third ACFA statement on International Linear Collider

In August 2004, ICFA has decided on superconducting technology for the future linear collider (LC), by endorsing the resolution of the international technology recommendation panel (ITRP) created by ILCSC under ICFA. The ITRP report emphasizes the importance of world-wide unified approach as a single team to design the international linear collider (ILC).

ACFA has discussed various issues relating to ILC in the plenary meeting of ACFA at VECC, Kolkata in India on 2-3 Nov. 2004, and ACFA came to the follow-

ing conclusions

- ACFA welcomes the truly international nature of the decision on technology for the ILC. This sets the stage for international collaboration in the design efforts for the ILC.
- ACFA reaffirms that the ILC, the next major high-energy physics project, should be realized by world-wide efforts. In such International collaboration ACFA and scientists in ACFA countries should play crucial and leading roles.
- ACFA reconfirms the importance of hosting ILC in Asia, which will make high energy physics and accelerator science truly global.
- ACFA urges the Japanese Government to fully support the efforts of KEK and Japanese scientists to host the ILC in Japan.
- ACFA reconfirms that KEK is the best suited institute in Asia for hosting the Central Team of GDI.
- ACFA urges KEK to establish the Asian Regional Center for R&D in GDI and encourages other Asian countries to actively participate in GDI.
- With ILC entering this important phase, ACFA urges Governments of Asian countries to support participation of their scientists in GDI.

ACFA feels that Asia has wide expertise in accelerator technology which can be directed to develop SCRF technology required for the ILC, and large trained manpower which can make major contributions to the ILC. Because ILC will pose major scientific and technical challenges, there will be several technological fallouts. ACFA therefore feels that by participating in the ILC not only the scientific community of the participating country but also its industry will benefit.