

AFAD-2012 に参加して -アジアの加速器駆動中性子源の展開-

北海道大学大学院工学研究院
瞬間強力パルス状放射線発生装置研究室

木野 幸一

k-kino@eng.hokudai.ac.jp

1. はじめに

2012年2月6日と7日に、インドのコルカタ（旧カルカッタ）にある Variable Energy Cyclotron Center (VECC) にて、Asian Forum for Accelerators and Detectors Workshop (AFAD-2012) が開催された（写真1）。この約一ヶ月前に convener から「ハドロンセッションがあり、その中で、北海道大学中性子源または、加速器駆動中性子源を使った中性子利用研究ネットワークの展開を話して欲しい」という依頼が急にあったのだが、うちの施設をアピールする機会だし、中性子を使った他の研究者の状況も知りたいということで、参加すると返事をした。実のところインドで行われるということで、核データニュース No.99 の大塚氏 (IAEA) の記事を読んで、「胃腸が強いとは言えない私が行って



写真1: AFAD-2012 の全体セッション会場

大丈夫だろうか？」という心配もあった。しかし、そうそうインドに行く機会もないから行ってみたいという気持ちもあった。

知らない人も少なくないが、私の所属している北海道大学大学院工学研究院には、40年前から電子ライナックがあり、電子ビームを使ったパルス中性子源が稼働している。良い機会なので、少し宣伝させて頂きたい。電子ライナックは、最高エネルギー45 MeVであるが、最も電子線パワーが得られる、35 MeV、30 μ A、50 pps の運転条件で、最も使用されている。最近では、パルス冷及び熱中性子ビームの発生、電子線を使ったパルスラジオリシスが主要な使用方法である。小型の加速器ではあるが、最適化された固体メタンモデレータのおかげで、パルス中性子透過イメージングや小角散乱などの研究に活躍している。歴史的には特に中性子工学における貢献が大きく、KEK/KENS の固体メタン中性子源や J-PARC/MLF の液体水素中性子源などの開発に寄与している。学内の共用施設として複数の研究室が利用しているが、学外からは学内教員との共同研究という形で、利用することも可能である。

AFAD は、もともとは Joint Asian Accelerator Work Shop (JAAWS) として開かれていた国際会議で、今回名前が改められた。2009 年の中国での開催が最初で、2010 年に韓国で 2 回目が行われて来た。AFAD-2012 は、最初と最後の全体セッションの間に、次の 6 つのワーキンググループによるパラレルセッションが組まれた。

1. Accelerator & Its Related Technologies for Photon Science
2. Accelerator & Its Related Technologies for Hadron (Neutron) Science
3. Detector Technology Development
4. Accelerator & Its Related Technologies for Industrial & Medical Applications
5. Innovative Acceleration Techniques
6. Network & Computing

私は、全体セッションの参加と、2 番目のハドロン（中性子）科学に関するパラレルセッションへの参加、発表を行った。全体の参加者の国籍としては、5 割がインド、4 割が日本（特に KEK の研究者が多い）、残りが韓国、中国、台湾、ロシア、といった感じであった。中国人には、インド入国の手続きが間に合わず不参加になってしまった人もいたようであった。

最初の全体セッションでは、AFAD-2012 の経緯の説明に続き、インドの主要な加速器施設の紹介、特に開催場所である VECC の加速器による研究に関する詳細な紹介があった。インドには大学等にある小さな加速器を除くと、主に次の 5 つの主要施設がある。括弧内は、主要な加速器である（写真 2）。

1. Variable Energy Cyclotron Centre, Kolkata
(224cm Variable Energy Cyclotron, K-500 SC Cyclotron, RIB facility, SC electron linac etc.)

2. Raja Ramanna Centre for Advanced Technology, Indore
(Indus-1&Indus-2 SRS, Booster Synchrotron, 10MeV Industrial Linac, DC Accelerators etc.)
 3. Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai
(7 MeV FOTIA, LEHIPA, Several e-linacs at E-beam centre for Radiation Processing etc.)
 4. Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai
(14 MV Pelletron, SC 150MHz QWR based Linac Booster for energy gain)
 5. Inter University Accelerator Centre, N Dehli
(15 MV Pelletron & SC Linac Modules for energy augmentation, PK-DELIS etc.)
- VECC に関しては、見学会があった。それを含めて後節で紹介する。



写真 2 : 全体セッションでのインドの主要施設の紹介

2. ハドロン（中性子）科学セッション

このセッションでは、13 件の発表があった。うち 1 件はミューオンに関するもので、久野氏（阪大）による、主に阪大 RCNP で行われている MuSIC プロジェクトの解説であった。超伝導マグネットを使ったパイオン捕獲システムの詳細とそれを使って得られたプレリミナリなミューオン強度の測定結果、及び PRISM-FFAG の最新状況や将来計画について紹介された。

その他 12 件は、全て中性子に関するものであった。その発表範囲は広く、中性子発生に必要な加速器から、中性子生成ターゲット、中性子の輸送、実験装置や検出器、研究

や応用、コミュニティー形成、にまで及ぶ。

P. Singh 氏 (BARC, India) からは、ADS のための陽子加速器の開発状況と将来計画が発表された。インドはトリウム資源がオーストラリアに次いで多く、トリウムを基盤とした 3 ステージから成るエネルギープログラムがあり、トリウムを燃料とした原子力発電や U-Pu サイクルの原子炉からの核廃棄物の変換を ADS の目的としている。最終的に超伝導ライナックで 1 GeV まで加速して ADS に使用する計画であるが、現在は 20 MeV-DTL までの設計・製作が進んでいるとの事であった。S.C. Joshi 氏 (RRCAT, India) からも、同様な陽子加速器の話がされた。こちらは、パルス陽子ビームによる核破碎中性子源 (Indian Spallation Neutron Source, ISNS) を目的にしている。650 MeV~1 GeV までリニアック加速+蓄積リングの場合と、150~200 MeV までリニアック加速+Rapid Cycling Synchrotron の 2 通りが提案された。

加速器から研究までの包括的な内容として、畑中氏 (阪大) と山形氏 (理研) から発表がなされ、私も発表を行った。畑中氏からは、阪大 RCNP でのサイクロトロンをベースとした中性子利用の展開が発表された。発生中性子は主に 3 種ある。 ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ を使った単色中性子は、中性子入射反応断面積に関するデータベースの構築や反応モデル研究に使用される。タングステン標的に 400 MeV 陽子を入射して核破碎させることで生じる白色中性子は、LSI に与える放射線ダメージの研究や、 ${}^{100}\text{Mo}(n, 2n){}^{99}\text{Mo}$ 反応による ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ 製造の研究に用いられている。3 つめは、同じく核破碎反応による中性子を超冷中性子に変換しての基礎物理研究である。

山形氏からは、理研で製作中の加速器駆動小型中性子源とそれを用いた研究が紹介された。理研では、7 MeV、100 μA のパルス陽子ビームを出力するライナック (長さ 5~6 m) が納入されており、 ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$ 反応を使った中性子源の設計が進行中である。まず熱中性子ビームの利用を目指しており、2012 年の夏にこのビームを供給する中性子源が完成する予定との事であった。中性子の利用方法として、産業に貢献する中性子イメージングが説明された。バッテリーや構造材の残留応力等に関する自動車産業、CFRPs (carbon fiber reinforced plastics) タービンブレード等に関する航空産業があるとの事であった。また、中性子イメージングのデータも追加されてゆく、VCAD (Volume CAD) システムについても、紹介がされた。

私からは、前節で紹介させて頂いた、北海道大学大学院工学研究院の電子ライナックとそれによるパルス中性子を利用した最近の研究を説明した。パルス中性子であることの利点を生かした透過イメージングの研究が進行している。結晶質のサンプルを中性子波長依存イメージングすると、結晶組織情報のイメージングを行うことができ、鉄鋼材料でその威力を発揮している。更に、日本刀等の文化財にも適用することで、パルス中性子の応用範囲を広げている。また、日本では、北大、KEK、理研、名古屋大、京大を中心とした、加速器駆動小型中性子源のコミュニティー (JCANS) が活動している事に

についても、合わせて紹介した。

核データに関する発表が、木村氏 (JAEA) と G.N. Kim 氏 (Kyongpook Nat. U, Korea) により行われた。木村氏は、J-PARC/MLF/ANNRI での MA, LLFP サンプルの中性子捕獲反応断面積測定について発表された (写真 3)。世界最高強度のパルス中性子ビームと全立体角 Ge スペクトロメータを組み合わせた、これまでに無い測定手法を用いている。特に $^{244,246}\text{Cm}$ の捕獲断面積スペクトルの測定と結果について詳細に報告され、20 MeV 以下の共鳴が世界で始めて測定された事が紹介された。

Kim 氏からは、韓国での核データと基礎中性子物理の状況について、包括的な発表がなされた。核データに関して、(1) Pohang Neutron Facility、(2) MC50 Cyclotron Facility、(3) 米国 RPI の Pulsed Neutron Facility、(4) 東工大 keV-Neutron Facility を使った研究が紹介された。(1)では、TOF 法による中性子全断面積測定例の Mo, Nb, Er サンプルの例、熱中性子断面積の $^{165}\text{Ho}(n,\gamma)$ 反応の例、Bremsstrahlung Activation Method を使った実験の例、Photo Fission の ^{209}Bi や ^{209}Bi サンプル例が紹介された。(2)では、Stacked-foil Activation Method による $^{56}\text{Fe}(p,x)$ 、 $^{57}\text{Fe}(p,x)$ 反応断面積測定が紹介された。さらに、(3)での Gd の中性子捕獲反応断面積、(4)での $^{56,57}\text{Fe}$ の中性子捕獲反応断面積の測定データが示された。また、Asian Nuclear Database Development Workshop の第 3 回が 2012 年に韓国で、第 4 回が 2013 年にインド行われる予定も紹介された。



写真 3 : 木村氏 (JAEA) の発表

3. VECC の加速器施設と市内の見学

VECC の加速器施設を見学する機会が設けられていたので、参加した。最初に見せても

らったのが、K=500 超伝導サイクロトロンであった (写真 4)。このサイクロトロンは、純国産であり、3つのスパイラルと3つの Dee で構成されている。超伝導のおかげで鉄重量が 100 トンに抑えられている。最初のビームは 2009 年 8 月 25 日に得られ、 Ne^{+3} イオン、88 MeV、73 enA だったようである。最近ではビームの取り出しがうまく行っていないようであった。

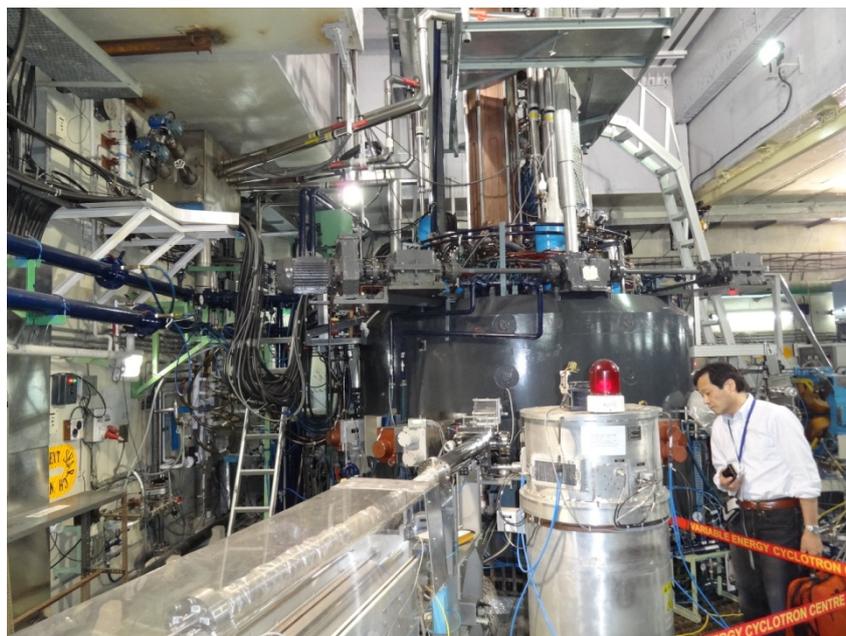


写真 4 : K=500 超伝導サイクロトロン

次に、K=130 サイクロトロンを見せてもらった (写真 5)。1978 年から稼働している古くからあるもので、可変エネルギーサイクロトロン (Variable Energy Cyclotron) と呼ばれ、VECC の名前になっている。見学には含まれなかったが、VECC には、医療用の小型サイクロトロンもある。これらサイクロトロンに加え、Rare Ion Beam (RIB) プロジェクトが進行しており、見学させてもらうことができた。これは、K=130 サイクロトロンまたは 50 MeV 電子ライナックからのビームをターゲットに照射して作られる RIB を分離のち、RFQ 及び 6 段のライナックで加速する計画で、最終的に 1.3 MeV/u のビームとなる。現在、2 段目のライナックまで設置されており、安定同位体の O, Ar, Fe, C, N, He イオンビームが 287 keV/u まで加速できているようである。

帰国までに多少の時間があつたので、日本人 3 人でコルカタ市内を見学した。宿泊ホテルと VECC の往復にはインド側主催者が用意してくれた専用車に乗せてもらったのだが、インド人運転手と地元のインド人で会話が通じていない場面もあつた。専用車でこのようにタクシーで大丈夫か? と心配していたところ、親切な VECC のスタッフにより、専用車を手配して頂いた (ただし、この専用車の運転手さんとも、通じた英語は片言で



写真 5 : K=130 可変エネルギーサイクロトロン

あった)。コルカタは、ムンバイ、デリー、ベンガルールに次ぐインド第4の都市であり、人口は514万人である。1690年にイギリスインド東会社がここに拠点を置いたときには、小さな漁村だったそうである。その後1911年のデリーへの遷都まで植民地インドの首都として栄えた。市内中心部にモイダン公園という大きな公園があり、白亜のヴィクトリア記念堂がある（写真6）。これは、1905年、当時インド皇帝を兼ねていたヴィクトリア女王を記念して建てられたもので、1921年に完成した。タージマハルをモデルにして純白の大理石を使用したそうで、美しく、多くの観光客で賑わっていた。“地球の歩き方”に、ヒンドゥー教のカーリー寺院が紹介されている。毎日午前中にカーリー女神に捧げるためにヤギの首がはねられるそうである。そこに行ってみようかと思案していたが、VECCのスタッフによると、大変混雑していて勧められないということで、市内にある別のカーリー寺院に行く事にした。ガイド役もしてくれた運転手さんにくっついて、裸足になり隣のフーグリー河で手足を清め、参拝をした（写真7）。メインの寺院の他に小さな建物が並んでいて、そこにも神様が祀られていた。ヒンドゥー教ゆえ沢山の神がいるのかと思い質問してみたが、英語が通じなかった。いずれにしても貴重な体験であった。運転手さんは親切な人で、フーグリー河の渡し船や人力車にも乗せてもらう事ができた。写真7は、その渡し船から撮影したものである。カーリー寺院から戻る途中、古くからの中心街を通った。あふれんばかりの車と人のなかで、牛が道路上を悠然としていた（写真8）。人も牛も車を怖がる事無く、それでいて轢かれてしまわないのが不思議であった。



写真 6 : ヴィクトリア記念堂



写真 7 : カーリー寺院とフーグリー河で手足を清める人々



写真 8：コルカタ市内中心街の風景

4. おわりに

この会議に参加して、アジアの加速器中性子に関する研究発表に参加できて有意義であった。今回はインドで開催されたということで、特にインドにおける研究状況について把握することができた。この国際会議のように、アジアでの研究協力は大事であろう。ただ、それが欧米に追いつく事を目標にするのではなく、大型中性子源でも小型中性子源でも、将来を見越して特色を出した加速器や中性子源を最初から設計することが必要であろうと感じた。これにより、それを使う研究の将来へのアドバンテージが違ってくるのではないかと思う。