

小型線形加速器開発備忘録

井上 信^{1,A)}

A) 京都大学原子炉実験所

〒590-0494 大阪府泉南郡熊取町野田

概要

小型のイオン加速用リニアックを中心に、これまでかかわった加速器関連の研究について論文発表で述べていないことなどを含めて報告します。話題としては主として7MeV陽子線形加速器、イオン注入用4ロッドRFQリニアック等の建設および小さな研究室で加速器・ビーム物理の研究を進めることなどについてとりあげます。また前史としてのタンデムやAVFサイクロトロン及び今検討中の加速器駆動炉用の加速器についても時間があれば触れます。

1. 前書き

研究者を志した頃にリニアックを作ろうなどと考えていたわけではなく、物理をやりたいけれども理論で飯を食う自信もなく、当時元気そうに見えた実験原子核物理の研究室に入れていただいたというのが私の加速器との関わりの始まりです。その頃京大の理学部ではタンデムヴァンデグラフの建設予算が通り、既に活発に動いていた化学研究所の蹴上分室にあったサイクロトロンでの核反応の実験を行うチームで実験するのと同時にこのタンデムの建設グループに属してメーカーの寮に泊まり込むなどして建設作業を行いました^[1]。工場で完成して大学に搬入した頃、後に核物理研究センターとなる、原子核の将来計画のために大阪大学の建設準備グループに来てほしいといわれて、タンデムでは実験しないまま、阪大に移りました。阪大は中之島から豊中への移転期であり、最初暫く中之島で文献での検討をした後、早速AVFサイクロトロンの小さなモデルマグネットを豊中で組み上げて設計研究を始めました。大学紛争などで遅れましたが、高エネルギー物理学研究所とともに核物理研究センターの計画も認められ、AVFサイクロトロンの主電磁石の設計を担当し、完成後はその保守運転の任務を果たしつつ、利用して核反応の実験をしました^[2]。その後接続計画としてリングサイクロトロンの設計準備研究に取り組みました。その関係でPSI（当時はSINといった）のリングサイクロトロングループに客員として加わったり、その後もユーリッヒのサイクロトロンのクーラー蓄積リング計画グループに参加したりしましたが、阪大に在る間には核物理研究センターのリングサイクロトロン計画は実現しないまま、京大の化研に移りました。

2. 7MEV 陽子線形加速器

このころ京大では中間子科学総合研究センター構想というものがあって、それは丁度今の大強度陽子加速器計画と同様な（京大の計画には陽子および中間子によるがん治療も含まれていた）計画があり、加速器建設の準備研究が化研の竹腰秀邦教授を中心に行われていました。第1期は800MeVの線形加速器を作るということで、当時ロスアラモスでPIGMI計画という中間子治療用の小型の陽子線形加速器の設計研究が行われていましたが、そこに化研は岩下芳久さんを派遣しており、その成果を導入して433MHzのRFQとDTLおよびLバンド(1300MHz)のDAWからなるシステムを検討していました。

たまたま私が赴任したときに、文部省から蹴上の研究室を化研本部のある宇治キャンパスに移すようにいわれ、その機会にRFQとDTL合わせて7MeVの線形加速器の建設予算が認められました^[3]。我々としては中間子科学総合研究センターの準備研究的な位置づけで設計しましたが、もちろん文部省としてはそれ自体で完結する装置として認めたわけです。その後核物理関係者は東大の原子核研究所の大型ハドロン計画（当時は1GeVの陽子線形加速器を主要加速器とするものだったが後に現在のよう大強度陽子加速器計画として実現した）を早期に実現すべき中心計画と位置づけ、関西にはその前にさしあたり核物理研究センターのリングサイクロトロンを建設することをみとめ、本格的な大強度の計画はその後で関西でやるという流れになりました。結局大型ハドロン計画は実現が遅れ最終的に大強度陽子加速器計画となるわけで関西の大型計画は消滅しましたが、大型ハドロン計画には医療が含まれてないので、せめて医療用加速器は作りたいということで努力しましたがそれも認められないまま今に至っています。というわけで関西には核物理研究センターのリングサイクロトロンが実現しましたが、我々の方は7MeVの陽子線形加速器で終わりとなりました。

この加速器は433MHzで運転するもので、この周波数でのRFQおよびDTLは当時最高の周波数でした。高周波はクライストロンを使うことにしましたが、高価なものなので、加速器の試運転時に加速管等で放電して反射波で損傷しては後がないということで、最初なかなか思い切ったテストができませんでした。何とか金を工面して白井敏之さん達

¹ E-mail: inoue@rri.kyoto-u.ac.jp

がサーキュレーターとダミーロードを付設してから安心してテストできるようになり、それからはすぐ定格運転ができるようになったという苦労話もあります^[4]。

D T L に使う集束用の磁石は当時最高の磁場を発生できる鉄とネオジウム・ボロンの焼結体（ネオマックス）を使うことにしましたが、組立を安くするために大学側で工夫したやり方で、大学院生が組み込んだり、磁場精度の測定をするなどの技術開発をかねた製作を進めました。

失敗は真空系でイオン加速器は電子加速器に比べて構造が複雑なうえに433MHzのRFQともなるとコンダクタンスが小さい加速管になるので多くの真空ポンプをつける必要があったのですが、資金不足で減らしたために後で結局増設することになりました。またイオン源からRFQへの入射系も電流値が大きいのに、偏向磁石を小さくしようとしてギャップを小さくし、それだけビームを細くしようとして集束力を強くすると空間電荷効果で逆にエミッタンスが大きくなり集束を弱くして大きい磁石にする必要があったりと、ちぐはぐな失敗もありましたが、竹腰先生の後任に野田章先生が着任してから頑張っ て無事加速に成功しました。

この加速器のビームのエミッタンスを測定すること特に縦方向（エネルギーと位相）のエミッタンス測定のために大学院生の出羽英紀さんが工夫した装置が役に立ち彼の学位論文になりました^[5]。

3. 4 ロッドRFQイオン注入器

我々のRFQの開発状況を知ったイオン注入器を製造している企業が民間との共同研究ということで優秀な技術者（藤澤 博さん）を我々の研究室に派遣してRFQのモデルでの研究をしていました。当時は100keV級のイオン注入器の時代でしたが、次世代のMeV級のイオン注入器の検討をしていたわけです。ある段階で実機を製作する予算を出すということになり、宇治の研究室の中にボロン1価イオンを1MeV程度に加速できる4ロッドのcwのRFQを建設しました。33MHzという低い周波数ですが加速空洞の直径は45cm程度におさえることができました^[6]。完成したときにNHKやいくつかの新聞社が取り上げてくれましたが、肝心の企業が慎重で未だ市場のニーズがないと考えて商品化をためらっている内に別のメーカーが少し原理の異なるMeV級のリニアックを世界中に売りまくって大儲けをしたことは有名な話です。結局我々の4ロッドは市場では日の目を見ず、完成後暫く企業に移設して性能向上を行っていましたが、今はそれも続けられなくなって再び宇治の建物に移して野田先生が活用しようと考えておられるようです。

この4ロッドRFQはボロンを1mA以上のビーム強度（cw）で加速できる優れたものでした^[7]。分解しやすい構造でありながらCW運転にも耐えられるものでした。ロッドを支える支柱はほぼ等間隔にロッド2本ずつを支えるように配置しましたが、実は後に研究室に大学院博士課程の学生として留学し

てきたロシアの研究者（V. Kapinさん）の解析によると支柱は等間隔におくのが電場分布上も良いのだということがわかりました^[8]。KapinさんはさらにマルチロッドのRFQの研究などを行って学位を授与されましたが、残念ながらモデル等の製作までには至りませんでした。

4. 電子線形加速器と蓄積リングの導入

これは新しい加速器を作った話ではありません。原研のリニアックとSpring-8の基礎研究用に作った蓄積リングJSRがあった建物を、原研の陽子加速器開発の建物として使うので、その年度内に持ち出してくれるならリニアックと蓄積リングを譲っても良いという話がありました。幸い蹴上から引越してきた時に建てた宇治の建物は7MeVの加速器だけのためには余裕があったので先の4ロッドRFQの実機も製作できたわけですが、これを企業が工場に引き取って改良試験をするという段階になっていた。その後に移設することは物理的には可能でした。しかし経費と人手を考えるとほんともらって大丈夫かと思いましたが、岩下さんや白井さんはリニアックが魅力、野田さんはリングが魅力があるというので、原研にお願いして両方ともいただくことになりました。経費に関してはその時の化研の所長が本部と内々での算段をしてくださいました。後は野田さん達がデザインし直して宇治の建物に収まるようにするとともに、リングについては形を変えて直線部分を長くするなどして、楽しめるようにしました。私自身は余り関与しませんでした。皆さん頑張っ て放射光も出ているようです。

5. DAWの試作

岩下さんは、ロスアラモスにいたときからDAWの開発に力を入れていました。そのモデルテストと、都合の悪いレゾナンスを避けるための解析等の丹念な仕事は岩下さんの学位論文の仕事になっていますが、残念ながらDAWは高で特長が出せる加速管なので低エネルギーのイオン加速しかできない状況では実機を作るテストはできません。そこで電子線形加速器が導入された際に、電子ビームでのテスト加速を目指した実機の試作をしてみてもどうかと提案し、大学院生の青寛幸さんとSバンドのDAWの実機の加速管を製作しました。私は最後までは見届けませんでしたがこの仕事は青さんの学位論文の仕事になりました^[9]。実機製作上の貴重な経験は得られたようですが、残念ながら予算不足でこれを用いての加速にまでは至らなかったようです。

6. ビーム物理学の試み

私が学生の頃は大学に当時としては最先端の加速器を備えて核物理の研究をするという感じであり、やや大きなものとして全国共同利用の原子核研究所ができた。そのころはまだ加速器を作ることとそれ

を運転して実験することは同じ研究者がやっています。したがって私達は原理的に新しい加速器の発明でもない限り加速器が論文になるとは考えていませんでした。

その後、高エネルギー物理学研究所ができるようになる高エネルギーの分野では加速器を仕事とする者とそれを利用して実験する者とは別々のグループになっていきました。化学研究所で加速器の開発等に興味を持つ研究者・学生がグループをなすようになるにつれて、加速器同好会やリニアック研究会だけでは本拠とするには十分でない彼らが本拠とする学会とか研究者グループが無いのは問題だと感じました。そこで放医研や原研や高エネルギー研などと組んでやる研究も進めるとともに、アメリカの物理学会にビーム物理の分科ができたことにも勇気づけられて、大規模プロジェクトに直接関係しない大学を拠点とする加速器・ビーム物理を学問の分野として作ろうと思いました。同じ思いの、岡本宏巳さん、平田光司さん、安東愛之輔さん達が熱心にその必要性を説いていたので、同志を集めた最初の会合を宇治の化学研究所で開きました。その後毎年Spring-8でビーム物理の研究会を開くようになりました。この流れの中で池上雅紀さん達が活躍しました^[10]。いまでは広島大学に小方さんと岡本さんを中心とする講座ができています。まだまだ小さなグループですが平田さん達の努力で物理学会の分科の予備的な位置づけもしてもらっています。将来の発展を期待しています。

7. 加速器駆動未臨界炉に向けて

熊取にある原子炉実験所の初代所長は木村毅一先生で蹴上のサイクロトロンを作った先生です。原子炉実験所ではKURという熱出力5 MWの研究用原子炉が主要な実験装置ですが、加速器に関しては高見さんが頑張って守ってくれている46 MeVの電子線形加速器（熊取の人はライナックという）および臨界集合体実験装置（KUCA）に付設されているコッククロフト型のD-T中性子源があります。

KURは初臨界に達してから40年近くになり、今後の計画をかねてから全学的に検討してきました。私も全学の委員会や原子炉実験所の運営委員などで関係しておりました。

最初に私が提案したのは未臨界集合体と線形加速器を組み合わせたパルス中性子源の案でした^{[11][12]}。このころはKURに代わる中性子源という観点で考えていました。代谷誠治さん達に協力してもらい燃料集合体を組み合わせたときのパルス特性の変化を計算してもらいました^[13]。

その後エネルギー源としての加速器駆動システムの基礎研究ということを中心に前面に出すようになりました。これは各大学で原子力系の学科が無くなる中で原子炉実験所くらいは原子力の将来について真剣に取り組むべきであろうという考えからでした。しかし単に今までのものの安全研究というようなことではなく革新的な原理的に安全な原子炉システムの研

究ということで、加速器駆動炉とトリウム燃料の研究に取り組むべき主要な課題としたわけです^[14]。

トリウムサイクルの研究はリニアックやKUCA等を利用して早くから原子炉実験所を中心に行われていました。その後加速器駆動炉とトリウムサイクルの研究が日本学術振興会の支援を得て木村逸郎先生や代谷誠治さんを代表者として全国的組織で少しずつ進められていました。加速器に関するところは柴田徳思さんや森義治さんを中心に検討がなされ、今は森さんを中心にしてFFAGの建設が進んでいます。私もサイクロトロンでの可能性などについて検討しました。

平成11年からは所長として原子炉実験所の改革に取り組むことになりました。大学の法人化の問題と重なったうえ、原子力の問題はなかなか難しく学術的なことだけでは進まないところがありますが、加速器駆動未臨界炉を将来計画の主要テーマとすることとして、学術審議会等でも理解をいただきました。KUCAと適切な規模の加速器を組み合わせる加速器駆動炉の基礎研究を早急に行うようにという学術審議会の報告が出たのですが、今のところお金がないということか、概算要求は認められていません。いろいろな可能性を追求したいと思っています。後は若い人達にお願いすることになりますが、全国の皆様方のご支援をよろしく願います。

8. 終わりに

振り返ってみると加速器の関わり初めのタンデムやAVFサイクロトロンの建設は多少時間がかかったとはいえうまく行ったケースです。その当時は核物理屋が自ら装置を作るので十分な性能が出ないのが普通だという雰囲気もあり、成功するかどうかにということで建設チームにはプレッシャーも多かったものですが、AVFサイクロロンが成功した頃から後は加速器は成功するものだという印象が強くなりました。冒険的要素の少ない設計になり、別の言い方をすれば物理屋の装置から工学屋の装置になってきたともいえます。その中で何とか小さくても良いから面白いものを作りたいと努力しました。小型のRFQは製作には成功しましたが実用面ではうまく発展しませんでした。さらにビーム物理の展開も言い出した一人ではありますが、自分ではその発展に寄与できませんでした。将来の計画については計画を軌道にのせることにも至らないまま定年を迎えることになりました。

最後は、敗軍の将兵を語る、のような感じになりましたが、これまでいい環境と仕事を与えてくださった先輩の皆さま方、一緒に楽しく仕事をさせていただいた同僚や若い友人の方々にお礼を申し上げて終わりとさせていただきます。

参考文献

- [1] Tsunahiko Sidei, Jiro Muto, Isao Kumabe, Hiroshi Ogata, Kiyohiko Takiyama, Yasuhiko Okuma, Makoto Inoue, Yoshinori Ogata, Yoshiaki Uemura, Sukeaki Yamashita,

- Gen Imamura, Takashi Takagi, Yasuhiro Yokota, Koichi Inoue, Toshio Takabe and Taro Ohama, Kyoto University TANDEM Van de Graaff, Memoirs of the Faculty of Science, University of Kyoto, Series of Physics, Astrophysics, Geophysics and Chemistry, Vol.XXXII No.1 Article 2, p.1-17 1967
- [2] M. Kondo, I. Miura, T. Yamazaki, H. Ejiri, A. Shimizu, M. Inoue, K. Hosono, T. Saito, Y. Nagai, H. Sakai, N. Matsuoka and S. Yamabe, The Osaka University RCNP 230-cm Isochronous Cyclotron, Proc. 7th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, p.95-98 Birkhauser, Basel, 1975
- [3] M. Inoue, K. Fukunaga, S. Kakigi, T. Ohsawa, Y. Iwashita, H. Fujita, M. Sawamura, H. Okamoto, S. Takama, and H. Takekoshi, Construction of an RFQ Linac, Proc. the 3rd Japan-China Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and their Applications (Wako, 1987) p.64-66
- [4] T. Shirai, M. Inoue, Y. Iwashita, A. Noda, H. Takekoshi and S. Tsuruoka, High Power Circulator for the 433.3MHz Proton Linac, Nucl.Instr.and Meth. Vol.A321 No.3 p.429-433 1992
- [5] H. Dewa, H. Ao, T. Kihara, H. Tonguu, T. Shirai, H. Okamoto, Y. Iwashita, H. Fujita, S. Kakigi, A. Noda and M. Inoue, Longitudinal beam emittance monitor for 433MHz proton linac, Rev. Sci. Instrum. Vol.67 No9 P.3085-3091 Sep. 1996
- [6] Hiroshi Fujisawa, Masayuki Tamada, Yoshihisa Iwashita, Akira Noda, and Makoto Inoue, RF Characteristics of the 33.3MHz 4-rod RFQ, 1992 Linear Accelerator Conference Proceedings (1992. Aug. 24-28, Ottawa) Vol.2 p.766-768 Nov. 1992
- [7] Hiroshi Fujisawa, Kazuhiro Nakao, Masayuki Tamada, Takao Matsumoto, Yoshihisa Iwashita, Akira Noda, and Makoto Inoue, Beam Tests of the "Modified" 34 MHz CW 4-rod RFQ, Proceedings of the 1994 International Linac Conference, (August 21-26, 1994 Tsukuba) p.695-697
- [8] Valeri Kapin, Makoto Inoue, Yoshihisa Iwashita and Akira Noda, Normal Mode Analysis of the Four Rod RFQ as a System of the Transmission Lines, Proceedings of the 1994 International Linac Conference, (August 21-26, 1994 Tsukuba) p.254-256
- [9] H. Ao, M. Inoue, Y. Iwashita, T. Shirai and A. Noda, Model Test of Biperiodic L-support Disk-and-Washer Linac Structure, Jpn J. Appl. Phys. Vol. 39, pp.651-656, 2000
- [10] M. Inoue, H. Ao, H. Dewa, H. Fujisawa, M. Ikegami, Y. Iwashita, S. Kakigi, M. Kando, V. Kapin, T. Kihara, A. Noda, H. Okamoto, T. Shirai, T. Sugimura and H. Tonguu, Linacs and Beam Physics at ICR Kyoto University, Proceedings of the 6th China-Japan Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and their Applications, Chengdu, 21-23 October, 1996, p.74-77 1997
- [11] M. Inoue, A. Noda, Y. Iwashita and T. Shirai, A Pulsed Reactor with a Proton Linear Accelerator, Bull. Inst. Chem. Res., Kyoto Univ., Vol.73, No.1, P.106-110, 1995
- [12] M. Inoue, A. Noda, Y. Iwashita, H. Okamoto and T. Shirai, Pulsed Neutron source based on Accelerator-subcritical-assembly, Proceedings of the 7th International Symposium on Advanced Nuclear Energy Research Recent Progress in Accelerator Beam Application, March 18-20, 1996, Takasaki, Japan, p.462-465, 1997
- [13] Y. Kawase, S. Shiroya and M. Inoue, An Accelerator-assisted Nuclear Fuel Assembly for a Future Project at KURRI, Proc. Of the XIX International Linac Conference August 23-28, 1998 Chicago (1999) 300-302.
- [14] S. Shiroya, H. Unesaki, Y. Kawase, H. Moriyama and M. Inoue, Accelerator Driven Subcritical System as a Future Neutron Source Kyoto University Research Reactor Institute(KURRI)-Basic Study on Neutron Multiplication in the Accelerator Driven Subcritical Reactor, Progress in Nuclear Energy, Vol. 37, No. 1-7, pp. 357-362, 2000