

加速器・ビーム科学部会セッション

大電流電子線加速器の現状と応用展開

High-current electron accelerators and applications

(1) 京大炉 L バンド 10kW 電子ライナックの多目的利用

(1) Multi-quantum beam utilization with the 10kW L-band KURRI-LINAC

*高橋 俊晴¹¹京都大学

1. はじめに

原子炉実験所の電子線型加速器（以下、京大炉ライナックと表記）は、研究用原子炉(KUR)が初臨界を達成した翌年の1965年（昭和40年）に米国 High Voltage Engineering 社より購入および据え付け作業が行われ、1966年（昭和41年）から利用開始、1968年（昭和43年）には全国共同利用装置としての運用がスタートした。実験所にライナックが導入された目的は、連続的で絶え間ない中性子を利用する原子炉とは別に、間欠的なパルス状の強力中性子を利用して、中性子飛行時間分析法により核データを取得することであった。1965年当時、国内研究機関のパルス中性子源としてはコッククロフト型重陽子加速器が一般的であったが、実験所では、より強力で汎用性の高いライナックの導入にいち早く踏み切り、共同利用実験や研究会など、原子炉物理、中性子物理、放射線計測などの研究分野において先導的な役割を果たしてきた。後述するように、現在では汎用性の高さで全国共同利用装置としての使い勝手の良さを生かして、中性子線のみならず電子線やγ線、放射光などの多様な量子ビームを用いた実験研究が、幅広い研究分野で実施されている。

設備としては、1972年に加速管を増設し2本となり、同時期から1986年にかけて入射器やモジュレータの大幅な改造を行うことにより、最高エネルギー46 MeV（無負荷）、ビームパワー10 kWの現在の姿の基本形が完成した。その後も、2005年にビーム品質を上げるため入射器の全面更新を行うなど、安定性あるいはビーム品質を向上させるための改造・更新を随時行っている。

ライナック棟内の管理区域では密封RIの取扱いができるほか、照射室（京大炉ライナックではターゲット室と呼ぶ）では非密封RIが簡易密封の形態で使用可能である。また、RI管理区域内の各室で核燃料物質の取扱いができることも特徴の一つである。

2. ライナックの性能

京大炉ライナックは2本の進行波型加速管を持ち、一般的なライナックで用いられるSバンド(2.8 GHz)とは異なり、波長の長いLバンド周波数(1.3 GHz)の大電力マイクロ波で電子を加速する装置である。発生できる電子ビームのエネルギーは6~46 MeV、パルス幅は2 ns~4 μs、パルスの繰返し最高360 Hzとなっており、高速のアバランシェパルサーを用いることによりシングルバンチの発生も可能であるなど、広い可変範囲を持つことが特徴の一つとなっている。最高ビームパワーは10 kWであり、平均電流330 μAは数十 MeVクラスのライナックとしては国内最高である。仕様の詳細を第1表に示す。短パルスモード(過渡モード)と長パルスモード(定常モード)でモジュレータのパルス幅を切り替えている。

電子銃はYU-156 (EIMAC)、入射器の高電圧は直流で75~90kV、グリッドパルサーはロング用(0.1~4 μs)、ミドル用(33, 47, 68, 100 ns)、ショート用(2, 5, 10, 15, 22 ns)があり、ショート用とシングルバンチ用

第1表：電子ビームの仕様

	長パルスモード	短パルスモード
エネルギー	6 MeV ~ 46 MeV	
ビームパワー	最大 10 kW	
繰返し周波数	1~180 Hz, single shot (間引き入射で1 Hz以下も可)	1~360 Hz, single shot (間引き入射で1 Hz以下も可)
パルス幅	0.1~4 μs	2~100 ns, single bunch
ピーク電流	500 mA (@4 μs)	5 A (@100 ns)
平均電流	最大 330 μA (@4 μs)	最大 180 μA (@100 ns)

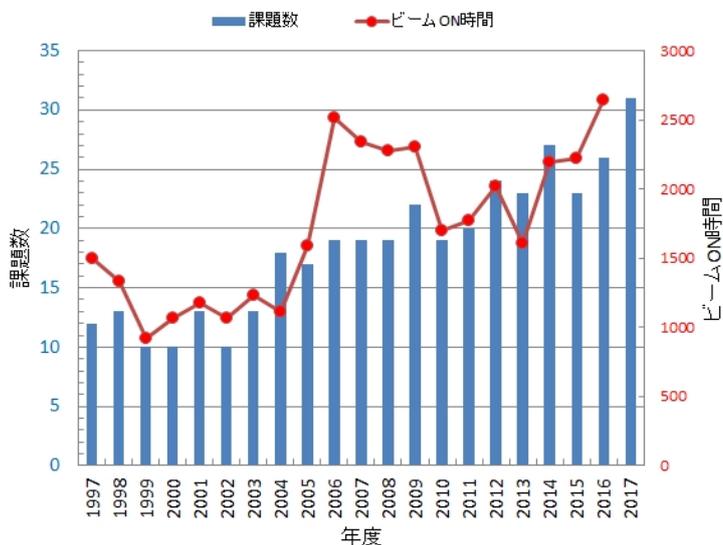
のアバランシェパルサーは、当時の技術職員（高見）が長年にわたり開発・製作してきた CR 放電型多段伝送線式パルサーである。

加速部の構成には一般的に使用されるバンチャー管は含まれず、1 空洞のプリバンチャーの直後に加速管がくるためビーム損失や品質に影響している。

モジュレータについては加速管 2 本に対応して 2 基あり、共振充電方式により PFN に充電し、スイッチ素子はサイラトロン L-4888B(L3 Communications)、クライストロンは TV-2022B(Thales)を用いている。

3. 稼働状況

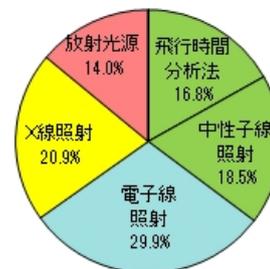
京大炉ライナックは、承認使用に関する規制による 3 か月 1080 時間の運転制限以外は、年間を通じて利用期間の制限を設けていない。ユーザーが希望すれば夜間・休日の運転も可能である。利用希望者は実験所の共同利用研究として申し込みマシンタイムの割り当てを受けるほか、マシンタイムに余裕があれば随時の所内利用も受け付けている。2016 年度の運転実績は、運転日数 197 日、ビーム出射時間 2639 時間、共同利用課題数 26、延べ利用者数 1083 人・日であった。ビーム出射時間と共同利用課題数の直近 20 年間の推移を第 1 図に示す。どちらも全体的に右肩上がりになっており、設置から 50 年が経過した現在でも活発に利用されていることがわかる。



第 1 図：共同利用研究課題数とビーム出射時間の直近 20 年間の推移

4. ビーム利用研究

実験に利用する量子ビームを中性子、電子線、制動放射 X 線、THz 帯放射光の 4 つに分類し、2016 年度のビーム出射時間に占める割合を第 2 図に示す。パルス中性子利用がもっとも多く約 3 分の 1 強を占め、次が電子線照射の約 3 分の 1 弱である。残り 3 分の 1 が制動放射 X 線と THz 帯放射光の利用である。このほか、京大工学研究科原子核工学専攻の院生実験が毎年 1 週間行われている。以下に量子ビームごとの利用の概要を述べる。



第 2 図：2016 年度ビーム出射時間の利用分類割合

4-1. パルス中性子利用

30 MeV 電子ビームをタンタルターゲットで止める際に発生する制動放射線がターゲット内部で起こす核反応(γ, n)反応で生じた高速中性子を、ターゲット周囲に置かれた水などの減速材で熱中性子に減速して利用する。10 m と 12 m の飛行距離を持つ中性子飛行管を使った中性子飛行時間分析法に加え、国内で唯一設置されている、鉛ブロック 1,600 個を積み上げた鉛減速時間スペクトロメータを使った中性子減速時間法も利用可能である。短パルスから長パルスまでの電子ビームを利用し、またパルス繰り返しも 300 Hz で一週間の連続運転を行うなど、京大炉ライナックの性能をフルに生かした実験が行われている。最高中性子発生量は約 10^{13} n/s である。長寿命核廃棄物の核変換処理研究に必要な核データの取得や高精度化の技術開発を行っているほか、次世代核燃料の健全性評価のための非破壊分析技術の開発研究を行っている。また、中性子照射場としての利用も行っている。

4-2. 電子線利用

金属が強い放射能を浴び続けると原子配列に欠陥ができ脆くなるが、そのデータを次世代金属材料開発の基礎とするため、各種材料に電子線を照射し、欠陥の生成・消滅の様子や、欠陥の導入による材料物性の変化を詳しく調べる研究が行われている。近年は、照射試料が強い放射能を帯びないよう 10 MeV 以下

の低エネルギー電子ビームが使われるようになった。この低エネルギー電子は、2本の加速管のうち1本目だけにマイクロ波を投入して加速し、2本目を通過する際に減速する手法で発生させており、ピークエネルギー6 MeV程度まで可能である。試料の照射温度は300度までの精密制御を行っているほか、液体窒素温度での照射も可能である。照射する電子線は短パルスである必要はないので、4 μ sの長パルスモードで運転が行われ、試料温度をモニターしながらパルス繰り返し数を調整している。

4-3. 制動放射 X線利用

白金ターゲットからの制動放射線を使って、原子炉では製造することが難しい中性子不足核種といった放射性同位元素(RI)を製造し、環境中の元素の動きを追跡するための環境トレーサや、メスbauer分光装置の線源として利用している。また、PET検査やSPECT検査などの核医学検査に使用される医療用RIを効率よく製造する方法の研究開発のほか、光放射化分析法による微量元素の分析も行われている。RI製造では京大炉ライナックの性能を生かしたフルパワーに近い運転が行われる。

4-4. THz帯ミリ波帯放射光利用

高エネルギーの電子ビームを磁石で曲げるなどの加速度を与えると放射光が発生するが、ライナックにおける短バンチビームでは、ミリ波からテラヘルツ波の波長領域においてコヒーレント放射光と呼ばれる、他の光源では得られない大強度の放射光が利用でき、生体関連物質を中心とした顕微イメージング分光、超イオン導電体などの光物性、微生物へのテラヘルツ波照射影響などの研究が行われている。このほか、コヒーレントチェレンコフ放射などの放射光以外の光源開発も進行中である。分光装置や光輸送管などの専用ビームラインが実験室に常設されており、ターゲット室に光源容器を設置するだけで利用可能である。Lバンドライナックではバンチが長く、利用できるのがミリ波やサブミリ波の長波長帯となるが、バンチ内電子数を大きくできるためより大強度のコヒーレントな放射が発生できる。

4-5. 超微弱電子線利用

加速管内にマイクロ波を投入した時に電界電子放出により発生する暗電流を利用する。1 pA以下の超微弱ビームも発生でき、人工衛星などに搭載する検出器開発や、電子部品の耐放射線の研究が行われている。ターゲット室に設置されている偏向電磁石を用いることにより単色エネルギーの微弱電子を取り出すことが可能である。現在運用中のジオスペース探査衛星「あらせ」(宇宙航空研究開発機構 JAXA)に搭載されている高エネルギー電子検出器の性能試験が行われたほか、J-PARCにおいて計画されているミュオン電子転換過程探索実験に用いる電子検出器の開発試験、木星系水衛星探査機搭載レーザー高度計受光部の開発試験が行われている。

5. おわりに

設置から半世紀を迎えたとはいえ加速管以外の周辺装置や部品は性能向上のためにその都度最新のものに更新しており、潤沢とは言えない装置維持費の中で加速器の健全性維持に日々努力している。また、歴代の技術職員による適切なメンテナンスによりダウンタイムが少なく、ビーム強度の安定性が非常に良いのもユーザーにとって魅力のひとつとなっている。ライナックは基本的にシングルユーザーのマシンであるが、実験ごとにターゲット室において照射ターゲットや試料の取扱い、実験体系の設置を行う場合があり、高出力がゆえにターゲット室は常に高線量となっているため、作業員の被ばく低減が課題となる。放射線管理については、実験所のRI主任者グループや放射線管理部が一括して担当しているため、施設側担当者の負担が少なく助かっている。また、装置維持費や運転経費は実験所から手当てされるため非常にありがたい。現在は更なる性能向上を目指し加速管本体の更新やビーム振り分けによる照射室の拡張を含めたりリニューアルを検討中である。実験所は2018年4月に「複合原子力科学研究所」に衣替えるが、今後も、大学が保有し多目的に利用できる共同利用装置、複合量子ビーム利用の主要装置のひとつとして運用を続ける予定である。

* Toshiharu Takahashi¹

¹Kyoto Univ.