

阪大産研Lバンド及びSバンドライナックの現状

吉田陽一¹、奥田修一、木村徳雄、菅田義英、古澤孝弘、山本 保、磯山悟朗、田川精一

大阪大学産業科学研究所

〒567-0047 大阪府茨木市美穂が丘 8-1

概要

阪大 L バンド、S バンドライナックは、概ね順調に運転されており、共同利用をはじめとした各種の研究がおこなわれている。この一年間の運転保守状況、装置の性能向上、利用状況（サブピコ秒パルスラジオリシス、フェムト秒パルス、低速陽電子 FEL、コヒーレント放射、陽電子）について概要を報告する。

1. はじめに

大阪大学産業科学研究所附属放射線実験所の 38MeV L バンドおよび 150MeV S バンドライナックは、順調に運転が行われており、L バンドの平成 12 年度の年間運転時間は 2210 時間であった。図 1 に月別の運転日数を示した。また、平成 13 年度前期では、32 件の共同利用（学内共同利用：27 件、学外共同利用：5 件）が行われている。研究テーマの内訳を表 1 に示す。

表 1：阪大ライナックにおける共同利用件数
(平成 13 年度前期)

研究内容, テーマ	利用件数
パルスラジオリシス (有機・高分子・その他)	12
パルスラジオリシス (生物系)	3
照射効果	3
フェムト秒パルス発生と利用	2
低速陽電子	3
FEL, コヒーレント	5
ビーム, マシンスタディ	4
計	32

2. 運転・保守状況

2.1 L バンドライナック

L バンドライナックは、大電流の熱電子銃およびサブハーモニックプリバンチャー系により、高強度の単バンチビームが加速できることが特徴である。またマルチバンチビームも多様なパルスモードで利用されている。保守点検および、施設の整備期間を除き、ほぼフル稼働の状況を継続している。日常のわずかな異常の兆候を把握して処置するため、数日以上マシンタイムに影響を与える故障は無かった。昨年初めに行った電子銃出口の磁場レンズの配置の

最適化により、入射特性が向上した。これまで単バンチビームの種々の特性を測定し、最大電荷量 91 nC/bunch が得られた。同程度の電荷量を得られている他のライナックに比べ、エミッタンスは 20% 以下である。現システムでさらにこの電荷量を増加させるために、電子銃グリッドパルサーのパルス特性を改善した。

2.2 S バンドライナック

S バンドライナックの平成 12 年度の運転時間は約 830 時間であった。また、保守作業としては、可動導波管からのリーク修理(2 個)、導波管と方向性結合器とのシール用 O-ring(2 箇所)の交換、1 次側冷却水用フィルターの交換、サイラトロンの交換 (2 台)、インジェクター高圧電源の絶縁用支持棒の交換 (絶縁破壊のため) をおこなった。

2.3 空調設備の更新

L バンドおよび S バンドライナックが設置されているライナック棟の空調設備は老朽化が著しく、故障が頻発していた。平成 12 年度の 2 月から 3 月にかけて、改修工事がおこなわれ、これらの問題点が解消した。また、レーザー同期実験のためのクリーンルームが設置された。

3. 量子ビームの発生と利用

3.1 レーザー同期ピコ秒パルスラジオリシス

図 2 にレーザー同期ピコ秒白色光パルスラジオリシスシステムを示す。励起源として阪大産研 L-band ライナックからの電子線 (パルス幅約 20ps、エネルギー 28MeV) を用い、分析光としてチタンサファイアレーザーからの基本波 (パルス幅 60fs) を水セルに集光させることによって得られる白色光 (パルス幅 200fs、測定可能波長領域 350nm~1000nm) を用い、ストロボスコピック法により高時間分解能を得る。ストロボスコピック法とは電子線パルスとレーザーパルスの時間差をある一点で測定し、その時間差を変化させ測定を繰り返すことにより中間活性種の濃度の時間変化を測定する方法である。この方法の特徴として時間分解能が測定機器の時間分解能に依存せず、励起源と分析光のパルス幅、励起源と分析光の時間ジッターにのみで決まるので高時間分解能を得ることができる。

¹ E-mail: yoshida@sanken.osaka-u.ac.jp

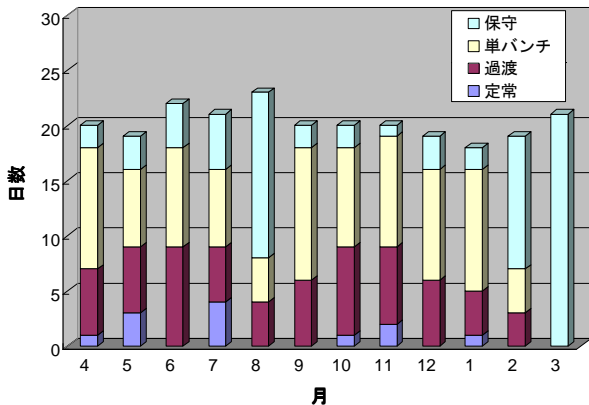


図1：平成24年度Lバンドライナック稼働状況

レーザーシステムはAr-Ionレーザー、チタンサファイアレーザー、Nd:YAGレーザー、再生増幅器から構成されている。再生増幅された基本波はOptical delayを通過し、水セルに集光される。そこで白色光に変換され、サンプルセル中を通過した後、Monochromator, Si detectorに導かれ検出される。Optical delayとは電子線パルスとレーザーパルスの時間差を変化させるための装置である。

レーザーとライナックは共通のマスターオシレーターを使用することにより、RFレベルでの同期を行っている。これらのシステムはGPIBに接続され、コンピューター制御されている。このシステムの時間分解能は約30psである。

3.2 サブピコ秒パルスラジオリシス

阪大産研サブピコ秒パルスラジオリシスシステムは励起源としてフェムト秒電子線ライナック、分析光源としてフェムト秒チタンサファイアレーザー、また、両者の時間差を正確に測定するためのフェムト秒ストリークカメラから構成される。(図3)サブピコ秒パルスラジオリシスシステムは、1psをきる時間分解能800fsを達成したが、光学機器の振動に起因すると考えられるレーザー強度の変動のため、S/N比に問題を残した。このS/N比の劣化は光学機器の振動に起因すると考えられるため、それらの振動を押さえる測定方法を考案し、改善を行った。分析光用レーザーの強度揺らぎによる測定データの揺らぎ(I/O)を5%から0.8%にまで低減することに成功し、S/N比の優れた過渡吸収測定を可能にした。今後、本システムにより、より多くの種類の物質内での放射線誘起反応が、サブピコ秒時間領域であきらかにされていくことが期待される。

3.3 低速陽電子ビーム源の開発と利用

産研・放射線実験所では、他の研究部門と協力して、陽電子寿命測定やSパラメーター測定、陽電子回折、レーザーとの複合照射等を行うことで、物質内での陽電子の挙動解明、物質内部の自由体積評価、表面構造解析などを行うことを考えている。これら

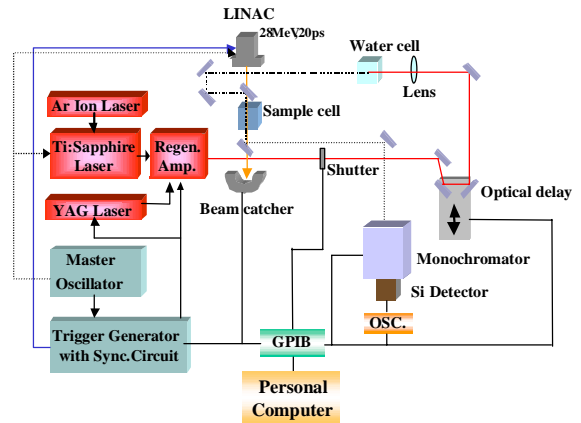


図2：レーザー同期ピコ秒白色光パルスラジオリシスシステム

の実験を行うためには短パルス陽電子ビーム、高輝度陽電子ビームが必要となるため、主としてSバンドライナックを利用した陽電子ビーム装置の開発を行ってきている。

短パルス陽電子ビームの生成に関しては、主としてRFアンプを高出力のものにした結果、550ps程度の時間幅のパルスビームを得ることができた。しかしバックグラウンドが高く、計測に利用できる状態ではないため、このバックグラウンドの原因を調べた結果、リモデレーターからの陽電子ビームのエネルギー拡がりに問題があることがわかってきた。現在、低バックグラウンド化の改良を行っているところである。高輝度陽電子ビームの生成では、磁場輸送系から陽電子ビームを引き出した後、リモデレーターに入射させ、リモデレーターからの再放出陽電子ビームを更にサンプル位置まで輸送した結果、像の倍率は計算値に近い値となったが、輸送効率率は約2%と悪かった。この原因は静電輸送系に対しリモデレーター上での陽電子ビーム径が大きすぎるためであり、このビーム径を小さくする必要があることが判った。このため、陽電子生成部のモデレーター形状を小型にする必要があり、数値計算を用いて小型で高効率のモデレーターの設計を行った。これは現在製作中である。また、高効率リモデレーターとして、

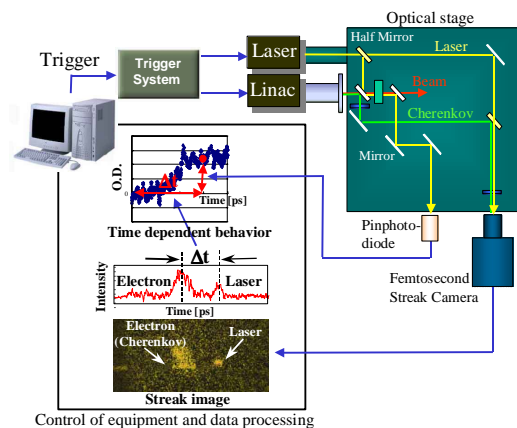


図3：サブピコ秒パルスラジオリシスシステム

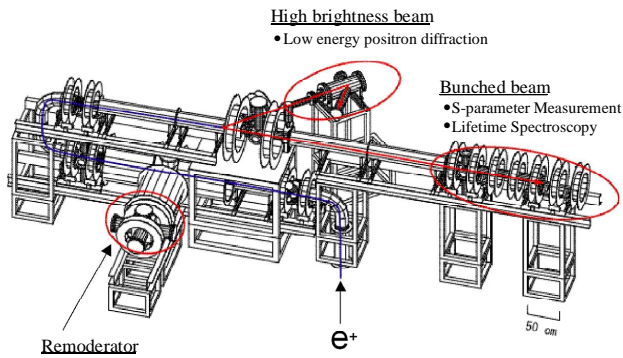


図4：陽電子ビームライン

基本的に自由電子や自由体積などが存在せず、かつ陽電子の拡散距離が 5000\AA と長い、固体アルゴンを用いる実験も行った。固体アルゴンの膜厚を変化させて実験を行った結果、通常用いられているタングステンモデレーターに比べ、約 1.3 倍の再放出陽電子ビームが得られた。再放出効率と構造との関係を調べることは今後の課題である。一方、L バンドライナックで生成される短バンチ電子ビームを利用した、短パルス陽電子発生装置の設計も行った。本装置で生成される短パルス陽電子ビームとレーザーとを同期させることで、固体中でのポジトロニウムの状態を調べる研究を行う予定である。更に、高分子の分子運動が自由体積の変化と同時に放射線化学的な Ps 形成過程に与える影響を調べる目的で、異なる分子量分布を持つ PMMA 試料について、低温で陽電子寿命測定を行い、*o*-Ps 寿命や形成割合の変化を調べた。

3.4 FEL の開発と利用

L バンド電子ライナックを用いて遠赤外線領域の自由電子レーザーの開発研究が行われている。本年度は、波長 $100\sim 140\ \mu\text{m}$ で測定した FEL 増幅率を、理論と計算機シミュレーションにより解析した。FEL 増幅率に大きな影響を与える電子ビームのエネルギー幅は、電子ビームのマクロパルス全体にわたり積分すると 4.4% である。他方、FEL 出力パワーの時間発展より求める FEL 増幅率は、マクロパルスの最後尾での電子ビームと光との相互作用を反映している。そこで電子ビームのマクロパルスの時間幅を少しずつ変えてエネルギースペクトルを測定して、エネルギースペクトルのマクロパルス内での変化を差分法により求めた。これより FEL 増幅率を測定したマクロパルス最後尾部でのエネルギー幅が 2% であることが分かった。FEL 増幅率を 3 次元 FEL シミュレーションコードである TDA3D を用いて計算して実験値と比べた。電子ビームのエネルギー幅が 2% で、ピーク電流が 50 A、規格化エミッタンスが $150\ \mu\text{m mrad}$ の時に、計算値と実験値は良く一致する。この解析により、阪大産研の遠赤外線 FEL では、高増幅率効果と光ガイディングが増幅率に大きな影響を与えることを明らかにした。

L バンド電子ライナックで加速する大強度単バンチ電子ビームと遠赤外線 FEL 装置のウイグラーを用いて、単一通過型 FEL (Self-Amplified Spontaneous Emission, SASE) の赤外領域での基礎研究を行っている。単バンチ電子ビームがウイグラーを通過する時に強い光が放射される。この光強度のウイグラー K 値依存性を測定して、SASE の 1 次元模型理論と比べることにより観測した光を SASE と同定した。ウイグラーの磁極ギャップを 30 から 33 mm の範囲で変えて、回折格子分光器を用いて波長 $80\sim 180\ \mu\text{m}$ の波長範囲で SASE のスペクトルを測定した。これらの波長スペクトルに、基本波のピークと 2 次高調波のピークを観測した。SASE による高次高調波の発生を実験的に観測したのは世界で最初である。観測した 2 次高調波は、理論的に予言されている SASE の基本波の発達に伴う非線形高調波発生によるものと考えられる。

FEL や SASE の実験を行う場合、ライナックが長時間安定に動作することが必須の条件であるが、実際には電子ビームの特性が長時間にわたる変化する。変動の原因を調べるために、電子ビームの加速に使用するマイクロ波のパワーと位相を、これに影響を与えると考えられる AC ライン電圧や周波数と各部の温度と共に測定した。自己回帰モデルを用いて得られたデータを解析した結果、産研 L バンド電子ライナックの長い周期での変動は、クライストロン室の温度変動と電源電圧変動が主な原因であることが分かった。今後も更に詳しい実験と解析を進める計画である。

3.5 コヒーレント放射の計測と光源としての利用

L バンド電子ライナックの高強度ビームは、コヒーレント放射の発生とその分光応用の研究に利用されている。

単バンチビームからのコヒーレント遷移放射のスペクトルを、マーチンパレット型干渉計で測定することにより、バンチ内電子分布における周期 1 mm 以下の成分を評価し、ストリーク測定の結果と比較した。電子バンチの微細構造についての情報が得られると共に、高強度放射を発生するために加速器の運転条件を最適化した。

コヒーレント放射を吸収分光に利用している例は京大原子炉と阪大産研だけである。われわれはこれまで最も高強度のコヒーレント放射を発生させており、パルスレーザー励起によるテラヘルツ波光源に比べてピーク強度は 5 桁以上高い。ライナックの単バンチビーム、マルチバンチビームからのコヒーレント放射の特性を測定し、光源のためのビーム条件を最適化すると共に、比較的高い波長分解で安定に吸収分光が行える系を確立した。現在種々の物質に対して、サブミリ、ミリ波域での吸収分光、イメージング、パルスラジオリシスの実験を行っている。