

量子ビーム科学研究施設



装置紹介

強力極超短時間パルス放射線発生装置(Lバンド電子ライナック)

強力極超短時間パルス発生装置は、通常の電子ライナックと同等の特徴はもとより、電荷量が91ナノクーロン(約 5.7×10^{11} 個の電子)、パルス幅が約20ピコ秒の単バンチ高エネルギー電子線の発生が可能な加速器で、ナノ秒からピコ秒の時間領域(後述する磁気パルス圧縮を行うことでフェムト秒まで可能)における各種反応素過程の解明や通常の照射効果の研究に利用されています。この装置は加速系とビームトランスポート系から構成されています。電子の加速にはクライストロンという装置によって増幅された強力なマイクロ波(周波数 1.3GHz、ピーク電力30MW)が用いられていて、電子銃から入射された電子は、加速管内を通過する時マイクロ波の加速電界の作用を受けて、加速されます。運転モードには3種類有り、用途に合わせた実験が行えるようになっています。単バンチビームを発生させる時は、108MHzと216MHzの周波数で励振される3台のサブハーモニックプリバンチャー(SHPB)を動作させ、さらに、短パルスが必要な場合は磁気パルス圧縮と呼ばれる方法を用いることにより、1 ps以下(最短125 fs)の単バンチビームを発生させることが可能です。この装置で発生する単バンチビームの電荷量は、設置当初は7ナノクーロンであったが、電子銃やマイクロ波系の改良により、現在では世界最高の91ナノクーロンが得られています。

40MeV S-バンドレーザーフォトカソードRF電子銃ライナック

レーザーフォトカソードRF電子銃ライナックは、最先端の低エミッタンス、フェムト秒(10^{-15} 秒)という超短パルス電子線発生装置です。本装置では、電子ビームの発生に1.6セルの加速空洞で構成された最先端S-バンドフォトカソードRF電子銃(加速RF周波数:2856MHz、電場強度:100MV/m以上)を採用し、電子発生用の光カソードの材質には無酸素銅が用いられています。光カソードの光源には全固体Nd:YLFピコ秒パルスレーザーが用いられています。RF電子銃から発生した電子線パルスは、進行波型線形加速器を用いて最大40MeVまで加速され、磁気パルス圧縮法によってフェムト秒電子線パルスとなります。このライナックは、2003年に建設され、2004年に最短98フェムト秒の電子線パルスの発生に成功しました。レーザーフォトカソードRF電子銃ライナックから発生した超短パルス電子ビームを励起源、電子線パルスと時間同期されたフェムト秒レーザー光パルスを分析光としたパルスラジオリシスにより、フェムト秒時間領域における量子ビーム誘起超高速現象の解明やナノ空間内での反応制御に関する研究が可能となり、フェムト秒サイエンスとナノテクノロジーへの展開が期待されています。

150MeV S-バンド電子ライナック

150MeV S-バンド電子ライナックは、低速陽電子、シンクロトン放射光、自由電子レーザー、複合照射効果などの研究用に設置されたもので、大電力クライストロンで増幅された強力なマイクロ波を短い加速管に供給して高勾配の加速電場を発生させ、電子を高エネルギーに加速するコンパクトなライナックです。この装置は、電子銃、プリバンチャー、バンチャー、加速管(長さ2.8m1本、1.9m2本)、周波数2.8GHz、出力35MWのクライストロン(3本)、および小型化されたパルス変調器で構成されており、これまでは低速陽電子ビームの生成に殆ど利用されてきています。

コバルト60照射施設

コバルト60照射設備は、各種物質に対する γ 線照射効果の研究に用いられています。この施設には高レベル線量照射のための重コンクリートに囲まれた6 m^2 と10 m^2 の照射エリアを持つ2基のホットケープがあります。各ホットケープには前面に厚さ1mの鉛ガラスおよびコバルト線源遠隔操作作用のペリスコープとマニピュレーターが装備されています。また、水深4.5mのプールがあり、水中照射も可能です。現在は137.7 TBq(平成30年4月1日現在)のRabbit11をはじめ、3種類の ^{60}Co 線源が利用可能となっています。

連絡先: info_rl@sanken.osaka-u.ac.jp

URL : <http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/rl/index.html>

TEL: 06-6879-8511 FAX: 06-6875-4346



電子ライナックとは

直線状に荷電粒子を加速させる装置をライナックといいます。ライナックという呼び名は linear accelerator を略して linac と英語で書かれますが、これを日本人（関西人）がライナックと呼んだことに因みます（多分）。外国人は普通文字通りリナックと発音します。関東ではリニアックと呼ばれることが多いです。荷電粒子を加速させるためには電場を与えないといけません。電場とは2つの電極に異なる電圧がかかっているときに、その電極間にできる“場”のことです。1.5V の乾電池の+と-を互いに向き合った金属板の夫々に繋いだ時、電場はこの金属板間に発生します。電子の電荷は一なので、もし電子が一極から出てくると、+極に電場により加速されながら移動します。一極（陰極）から+極（正極）まで移動する間に電子が電場で加速されることで得るエネルギーのことを電子ボルト（eV; エレクトロンボルトともいう）という単位で表わします。電極間の電圧差（電位差）が 1.5V であれば、電子は 1.5 eV のエネルギーを得ることになります。この施設にある L バンド電子ライナックで作られる高速電子のエネルギーは 30 MeV（メガエレクトロンボルト）程度なので、このようなエネルギーをもつ電子を作るには電極間に 30 MV（30 メガボルト=3000 万ボルト）の電圧をかけないといけません。このような高い電圧を電極間にかけることは現実的ではありません。そこでこのような電圧まで加速するためにマイクロ波を使います。マイクロ波とは光の一種ですが、通常の可視光の波長が約 400 nm から 700 nm 程度であるのに比べ波長がかなり長く、100 μ m から 1m のものを言います。先程の L バンドライナックで使われるマイクロ波の周波数は 1.3 GHz、波長にすると 23 cm 程ですので、23cm の中の電場の向きが 1 秒間に 13 億回変わっています。このマイクロ波を、入口とそれに対向する出口を 1 つずつ持つ部屋が幾つもつながったようなものに入れ、これらの部屋内の電場の向きが同じになる様な（各部屋の入り口から出口に向かうような）タイミングで、一連の電子を 1 つの部屋入口から入れると、各部屋を通過しながら電子は電場により加速されていき、電子は高いエネルギーを持つようになります。この加速の最中に変調（加速や減速）をかけることで、電子ビームの時間的広がりを圧縮することができ、L バンドライナックでは通常 20~30 ps（ピコ秒）まで圧縮されます。更に特別な圧縮する装置を付けることで 1 ps を切る時間幅の電子ビームを得ることに成功しています。この時間幅を決めている要因は電子銃から発生する電子パルスの時間幅と電子の“質”であり、これ以上時間幅を縮めるためには新しい電子銃を用いるのが効果的です。→RF 電子銃 S バンドライナックを参照

L バンド電子ライナック

L バンド電子ライナックはこの研究施設の主力装置の 1 つで、主に短時間（ミリ秒からピコ秒；ミリは千分の一、ピコは 1 兆分の一）に起こる化学反応（電荷移動反応）を調べ、自然界で起こっている化学反応機構の理解や新材料の開発に役立てる研究に利用されています。電荷移動反応とは電子などが原子や分子間を移動することで分子の構造や分子を構

成する原子の構成比が変化することを言います。このような反応の時間的変化を調べる方法の1つに、物質に短時間の間にエネルギーを与え、その後の化学種（電子、原子、イオンなどの総称）や化学構造の変化を調べる方法があります。このエネルギーを与える時間はその後の化学種・化学構造の変化が進展する時間に比べ十分短い時間でないとはいけません。また物質に付与されるエネルギー量も多い方が多くの変化を物質にもたすため有利といえます。このように短時間にエネルギーを物質に与える手段として高エネルギー電子線を使う手法はパルスラジオリシス法と呼ばれています。エネルギーが高いほど短時間の電子の塊（電子パルス）を作ることができます。Lバンドライナックでは約20ピコ秒の時間内に約0.5兆個の電子パルスを作ることができます。またこの時の電子のエネルギーは約30 MeV（メガエレクトロンボルト；メガは100万倍、エレクトロンボルトは電子1個が1Vの電位差を通過するときを得るエネルギー）です。ですから、ナノ秒（10億分の一秒）のはやさで進展する化学反応などは追跡できることになります。分子は一般にその化学種・化学構造に特有の色の光を吸収します。そこで、光の色の違いや吸収される量の時間変化を調べることで、どのような化学種が生成され、また消滅していくかをパルスラジオリシス法を用いて調べることができます。

Lバンドライナックはこのような化学反応を調べる手法として用いられるだけでなく、自由電子レーザーにも利用されています。一般にレーザーとは分子・原子に束縛されている電子を励起し、同時に脱励起させることで強力なエネルギーや位相の揃った光を生み出す装置です。このため生成される光の波長（エネルギー）は分子・原子の種類に依存しています。自由電子レーザーとは通常のレーザーと異なり、高速電子が蛇行することで放出する光を利用し、位相の揃った高強度の光を生成させる装置で、光の波長は高速電子の蛇行のさせ方である程度任意に設定することが可能であるところに特徴があります。Lバンドを利用した自由電子レーザー光の波長は数10ミクロンから150ミクロン超と赤外光からテラヘルツ光の領域にわたっています。このような超波長で高強度な光を利用して、巨大分子の構造変化などが調べられています。

150 MeV Sバンド電子ライナック

150 MeV Sバンド電子ライナック（Sバンドはマイクロ波の周波数帯を表わし、ここで使われている周波数は2.856 GHz）は高勾配の電場により、高エネルギーまで短距離で加速できるのが特徴です。この加速器はLバンド電子ライナックと異なり、電子ビームの時間的圧縮を行わずに、150 MeVと高いエネルギーの電子ビームを得るのに使われています。150 MeV Sバンド電子ライナックで生成される高エネルギー電子ビームは、主に低速陽電子ビームの生成に使われます。陽電子とは電子の反粒子で電子が負の極性を持つのに対し、正の極性を持っています。陽電子は電子と反応し2本の γ 線を出して消滅します。この γ 線のエネルギーはアインシュタインが言った質量はエネルギーだという有名な式、 $E=mc^2$ （ m は電子の静止質量、 c は光速）で表わされます。電子と陽電子の両方の運動エネルギーが0の

場合は 2 本の γ 線は互いに反対方向に放出され、夫々静止質量に対応した 0.511 MeV のエネルギーを持っています。ところが物質中で陽電子が消滅するときには消滅相手電子が原子核に束縛されていることが多く、電子がある程度運動エネルギーを持っているため、この運動量が消滅 γ 線に上乘せされてきます。一方陽電子は物質中では熱化した後消滅するため熱エネルギー (0.025 eV 程度) 程度のエネルギーしかありません。このため、電子の持つ運動量のため 2 本の消滅 γ 線の放出角は 180 度からずれ、また γ 線のエネルギーもドップラー効果のため、0.511 MeV からの拡がりが大きくなります。この性質を利用すると、物質中での空洞・空間の大きさや電子の運動量分布などを評価することができます。特に陽電子は正の電荷をもつため、電子が多く存在する場所や府に帯電している場所に行き消滅する確率が高いため、感度の高い分析手法になると考えられています。陽電子は一般には陽電子を放出する放射性同位元素 (Radioisotope; 略して RI) を用いて利用されていますが、より多くの陽電子を必要とする場合は電子ライナックを用いて高速電子を生成し、対生成により陽電子を発生させる手法が取られます。これは上でも記した消滅過程と全く逆で、光から電子・陽電子ペアを作る方法です。このため光のエネルギーは少なくとも 0.511 MeV $\times 2 = 1.022$ MeV が必要となります。高速の電子は物質中に入射されると、原子核により散乱され光を出すことでエネルギーを失います。この光が陽電子の生成に使われます。このような高エネルギーの光を生み出すにはエネルギーの高い電子ビームを用いるのが有利であり、この施設では 150 MeV S バンド電子ライナックを用いています。L バンド電子ライナックで生成される電子のエネルギーは 30-40 MeV であるため、陽電子の生成効率は 150 MeV S バンド電子ライナックに比べがよくありません。

40 MeV S-バンドレーザーフォトカソード RF 電子銃ライナック

L バンド電子ライナックを使うと 1 ps 程度の短いパルス電子ビームを発生することができるということはすでに記しましたが、これ以上短い電子パルスを得るためには、従来から使われてきている熱電子銃では不十分です。理由は電子銃から電子を引き出すための電子回路で作れるパルス幅は数 ns 程度であり、これ以上短いパルスを作ることが困難なこと、電子銃から電子を出すために、電子が出てくる場所 (陰極、カソードという) を高温に熱するため、電子があっちこちに行こうとするため、同じ向きに加速するには効率が悪いということが挙げられます。このような問題を解決するために、RF 電子銃という電子銃が考案されました。この電子銃は「電子ライナックとは」で書きましたマイクロ波を入れる“部屋”の奥壁がカソードになっていて、ここを熱する代わりにレーザーを打ち込みます。レーザー光からエネルギーをもらった電子はカソードから飛び出てきますが、飛び出すのに必要なエネルギーと同じ程度のエネルギーのレーザー光を入れると、出てきた電子はほとんど止まった状態になっているため、部屋の中にある電場で効率よく加速できます。また、カソードに当てるレーザーの時間幅に対応して電子が出てくるため、短時間のレーザー光を入射することでピコ秒台の短時間電子パルスを作ることが可能となります。この

ような電子銃に加え、更に電子パルスを圧縮する手法も併用することで、100 fs（100 フェムト秒=0.1 ピコ秒）程度の極短時間電子線パルスを作ることに成功しています。

このような電子ビームを使って極短時間に起こる電子移動反応を調べたり、電子ビームの質の良さを利用して、がん治療の研究等にも使われています。

コバルト 60 照射施設

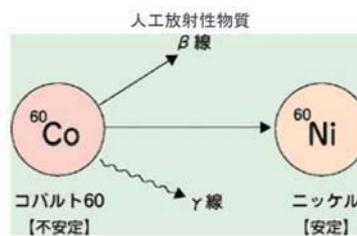
各種物質に対する γ 線照射効果の研究に用いられます。この施設は放射もれ防止のため、厚いコンクリートに囲まれた照射室が2つあります。全面には厚さ1mの鉛ガラスと遠隔操作用ペリスコープとマニピュレーターがあります。また、水深4.5mのプールがあり、水中照射も可能です。以下ではこれまでよくあった質問に対する回答を記します。

Q: γ 線って？

A: γ 線はレントゲン撮影でおなじみのX線と同じ仲間の**放射線**です。大きなエネルギーをもっています。

Q: コバルト 60 って何ですか？

A: **コバルト 60 は人工放射性同位元素**です。とても不安定です。安定なニッケルになるときエネルギーをとって（ β 線と） γ 線を出します。



Q: コバルト 60 って自然界にあるの？

A: **ありません**。コバルトを中性子照射することにより人工的に作った放射性物質です。

Q: コバルト 60 を使って何をするの？

γ 線源として使用され、厚さや密度を計る工業用測定器、がんの放射線治療、および植物の品種改良、食品への放射線照射などに広く利用されています。



照射したじゃがいもと照射していない
じゃがいも(芽が出ている)

Q: コバルト 60 で照射した後の物を触っても大丈夫ですか？照射室内に入っても大丈夫ですか？

A: **大丈夫です**。

コバルト 60 から出る γ 線は核反応を起こしませんので、 γ 線照射された物質は放射化しません。 γ 線照射によって放射性物質が生成することはありません。照射後すぐに触っても問題ありません。また照射室内部のものが放射化することはありません。従って、線源格納後すぐに入っても問題ありません。 γ 線照射されたじゃがいもも安心です。

Q: コバルト 60 を使ってどんな研究をしているの？

A: **医・理・薬・工学部など各学部で広く利用されています**。新しい材料開発や環境保護のための放射線利用、がん治療、様々放射線の影響、医療から宇宙開発まで広い分野での基礎・応用研究に使います。



用語集

放射線

空気を電離できるエネルギーをもつ電磁波や荷電粒子の総称。

γ線

原子核が崩壊する時に発生する電磁波。

ホットケープ

高強度の放射性同位元素を使用する場所。

1eV(1電子ボルト)

電子が1ボルトの電位差を通過するときを得るエネルギー。

電場・磁場

電荷や電流相互間に働く力の場。

自由電子

特定の原子に束縛されずに、真空中または物質中を自由に運動できる電子。
金属の持つ性質の多くは、金属中の自由電子の存在に起因している。

クライストロン

電子などの荷電粒子を加速するためのマイクロ波を 100万倍程度に増幅する電子管。

エミッタンス

ビーム径とビームの発散角の積で決まるパラメータで、小さいほどビームの質がよい。

カソード（陰極）

電子の放出源であり、熱電子銃の場合はその形状からフィラメントと呼ばれることが多く、電界放出型電子銃あるいは、ショットキー電子銃の場合はエミッタと呼ばれることが多い。

有機化合物

炭素を含む化合物の事。（二酸化炭素などの例外もあり）炭素原子からなる骨格を構造の基本とした分子構造を持つ。現在約 1000万の種類が知られ、日用品・医薬品・工業用品などの素材として広く用いられている。

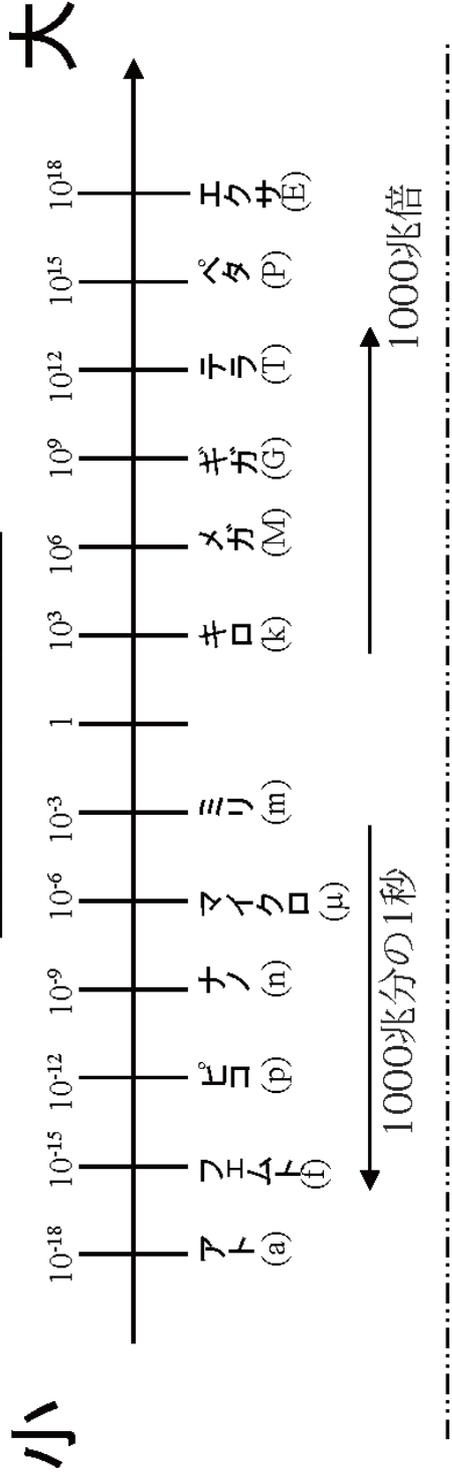
光触媒

光を吸収することで化学反応を引き起こし環境浄化に広く利用されている。

重合体

モノマーを合成することによって作った分子量の大きな物質。

単位の接頭記号



放射線関連単位

放射能 (ベクレル; Bq)
吸収線量 (グレイ; Gy)

原子核が毎秒崩壊する数 (α 線、 β 線、 γ 線、中性子等の放出)
単位質量あたり放射線から与えられるエネルギー

線量当量 (シーベルト; Sv)

吸収線量に線質係数 (線質の違いを反映) を掛けたもの

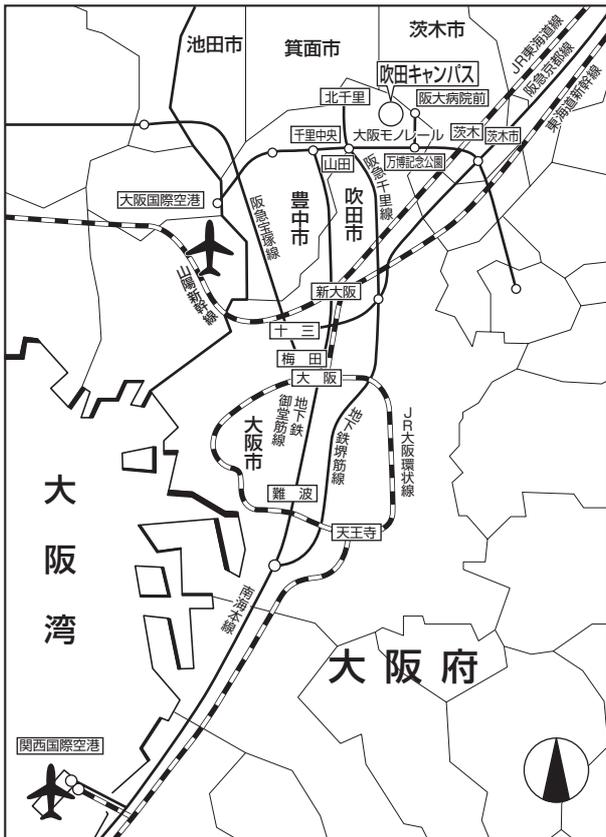
等価線量 (シーベルト; Sv)

各臓器における吸収線量に放射線荷重係数 (線質・エネルギーの違いによる生物影響の違いを反映) を掛けたもの

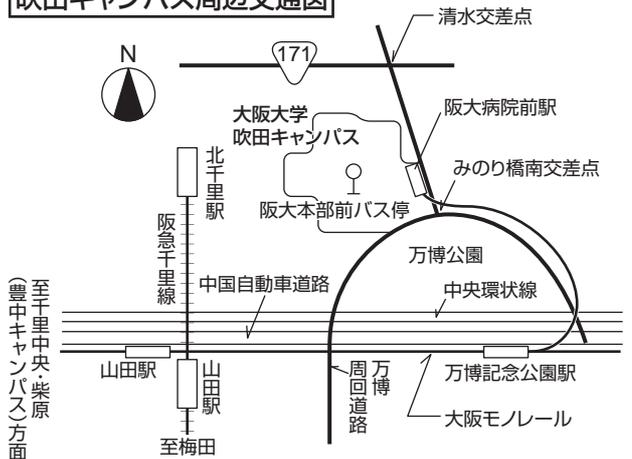
実効線量 (シーベルト; Sv)

各臓器に対する等価線量に組織荷重係数 (各臓器に対する影響) を掛け、全ての臓器に対し総和を取ったもの





吹田キャンパス周辺交通図



- (電車) 阪急千里線 北千里駅下車 東へ徒歩20分
- (バス) 阪急バス 北大阪急行千里中央駅発「阪大本部前行」
近鉄バス 阪急京都線茨木市駅発「阪大本部前行」
(JR茨木駅経由)
いずれも、阪大本部前下車 徒歩10分
- (モノレール) 大阪モノレール 阪大病院前駅下車 徒歩15分
(万博記念公園駅経由)