

光を安全に取り出す (前編)

小菅 隆 高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1
E-mail: takashi.kosuge@kek.jp

松下智裕 財高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1
E-mail: matusita@spring8.or.jp

谷口真吾 財高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1
E-mail: shingo@spring8.or.jp

1. はじめに

第2回では「光を安全に取り出す (前編)」と題してビームラインを安全かつ円滑に利用するための仕組みについて紹介します。ここで触れるハッチなどの遮蔽やインターロックシステムは、第1回の話にあるようにビームラインを車にたとえると、ブレーキやエアバッグの部分にあたります。いかがでしょう、ブレーキやエアバッグとなると重要性を感じていただけるでしょうか？ ブレーキオイルが無いまま車を走らせたり、ましてやこれらを勝手に改造したりしたら、とんでもない事が起きると容易に想像していただけると思います。

実際の放射光利用実験では放射光を試料に照射し、それによって生じるさまざまな現象を観測することで研究をおこないます。放射光を試料に導く役割を果たすのがビームラインコンポーネントなのですが、「安全に」ユーザに光を使ってもらうために、色々な工夫が施されています。まず、考えなくてはならないのは、光のエネルギーが人体に及ぼす影響です。放射光施設で生成される光は、赤外線、可視光、紫外線、真空紫外線、軟X線、硬X線、 γ 線などの広いエネルギー領域をカバーしています。このうち、赤外線、可視光、紫外線に関しては、ほとんどの放射光源では人体に影響を及ぼさない程度の量です。また、真空紫外光から軟X線は空気吸収されて人体に到達する前に減衰してしまうので、これも人体に影響ないと考えていいでしょう。したがって、赤外線、可視光、真空紫外線、軟X線を利用するビームラインでは、光を導くためのパイプや実験装置がむき出しになっていても大丈夫です (Fig. 1参照)。

それに対し、硬X線や γ 線は空気中を伝播し、人体はこれを大量に浴びると障害を受けてしまいます。したがって、これらの放射線から人体を保護する必要があります。そこで、硬X線や γ 線を利用するビームラインでは、光を導くパイプや実験装置を鉛などで遮蔽します (Fig. 2)。ここで言う遮蔽とは、放射線が周囲に漏れないように吸収

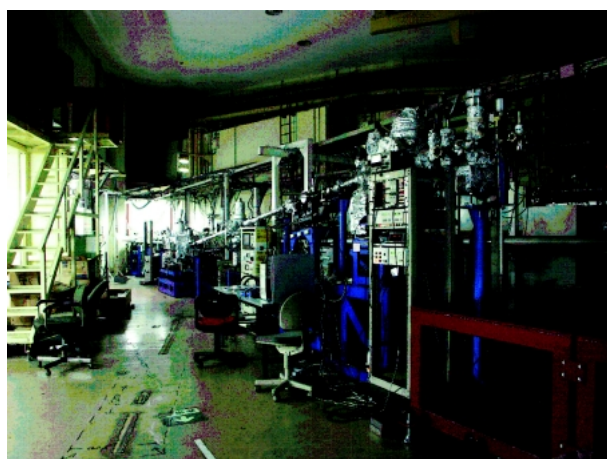


Fig. 1 The view of a VUV beamline.

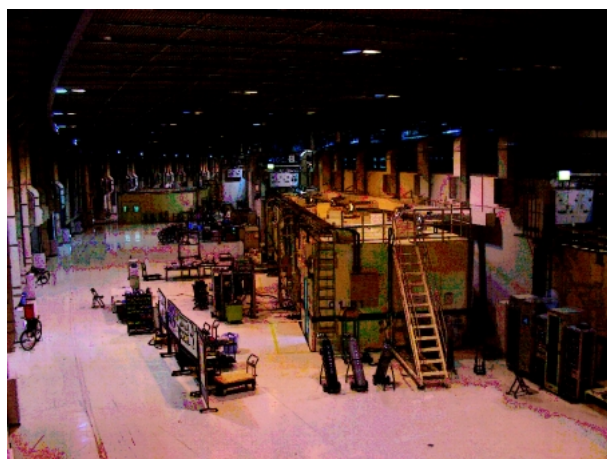


Fig. 2 The view of an X-ray beamline.

材を置くことです。一方、インターロックは遮蔽体があるべきところにあることを保証して安全を確保するためのものです。インターロックにはこの他にも、ビームを正常に供給するために必要な様々な条件を監視・保持する役割が

あります。

この回では、まずビームラインに存在する放射線について述べ、それらの放射線をどのように遮蔽するのか見ることになります。次に、この遮蔽と連携プレーを行うインターロックシステムについて紹介します。

2. 遮蔽

放射線防護の観点からすると、放射光は放射線の一種です。また放射光ビームラインには、放射光以外の放射線もやってきます。それらの放射線から人体を守るために、事前に予想される被曝量を推測して被曝低減の措置を講じる必要があります。放射光施設の場合、被曝の低減には遮蔽をします。以下ではビームラインに存在する放射線について述べ、次いで遮蔽の実例について紹介します。

2.1 ビームラインに存在する放射線

放射光ビームラインに存在する放射線として主なものは放射光とガス制動放射線です。Fig. 3は放射光スペクトル(Photon Flux 黒実線/右軸)とガス制動放射線スペクトル(Photon Flux Brems 橙十字線/右軸)の例です。また、光子が人体に及ぼす影響の尺度として線束-線量当量換算係数(Conversion factor 赤点線/左軸)と、さまざまな物質中における光子の吸収係数(Attenuation coefficient 赤・緑・青・桃色実線/左軸)も一緒に示してあります。

ガス制動放射線は、電子ビームが蓄積リング内の残留気体分子と衝突することによって発生します。Fig. 3のガス制動放射線のスペクトルは、8 GeV、100 mAの電子ビームが 1×10^{-7} Pa 気圧の水素ガス中を1 m 走る時に発生する光子数を計算したものです。ガス制動放射線は蓄積電子のエネルギーまでのエネルギー分布をもち、電子軌道の接線上に発生します。

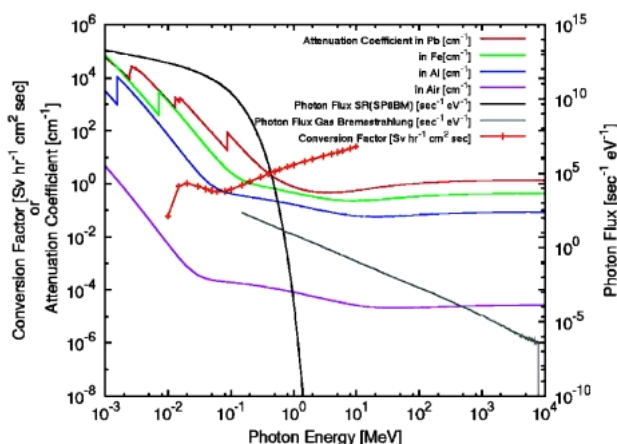


Fig. 3 Photon energy spectra of the synchrotron radiation from SPring-8 bending magnet and gas bremsstrahlung, conversion factor from photon flux to dose equivalent and attenuation coefficients in various materials.

線量当量は放射線が人体に及ぼす影響の指標であり、線束-線量当量換算係数は1個の光子が人体に与える影響の大きさと言うことができます。光子と人体との相互作用はエネルギーに大きく依存しており、Fig. 3に示すようにエネルギーが高い光子ほどより多く人体に影響を与えます。他方、線量当量換算係数の小さい比較的低エネルギーの光子といえども、たくさん浴びると影響が現れます。

放射光ビームラインには、エネルギーは低いかれども数の多い放射光と、数は少ないけれどもエネルギーの高いガス制動放射線とが混在しています。したがって、この両者による被曝量を推測して必要な遮蔽を考えなければなりません。

では、どのような物質を用いて放射線を遮蔽すればいいのでしょうか？ 自明のことですが、放射線をよく吸収する物質、すなわち吸収係数の大きい物質がよいことになります。一般的に、吸収係数は原子番号の大きな物質、密度の高い物質ほど大きくなります。ゆえに、原子番号の大きな物質(鉛など)が放射線の遮蔽に用いられます。

蓄積リングのエネルギーや放射光のスペクトルは施設やビームラインごとに異なっているため、個別に遮蔽を考える必要があります。そこで次節からは例をあげてビームラインの遮蔽について説明することにします。

2.2 放射線遮蔽ハッチ

放射線遮蔽ハッチは光学機器や実験試料などからの散乱線を遮蔽するためのものです。SPring-8の硬X線ビームラインを例にあげると(Fig. 4)、放射線遮蔽ハッチは光学ハッチと実験ハッチの二つに分かれています。光学ハッチはハッチ内に白色光を取り込むもので、その内部では分光器やミラーなどの光学機器やガス制動放射線を止めるためのガンマストッパーなどによって散乱線が生じます。他方、実験ハッチは単色光を取り込むもので、その内部では単色光を受ける実験試料、大気、ビーム軸最下流のエンドストッパーなどによって散乱線が生じます。

Fig. 5はSPring-8の偏向電磁石ビームラインの光学ハッチの壁の断面図です。遮蔽体による放射光の減衰の様子も一緒に示し

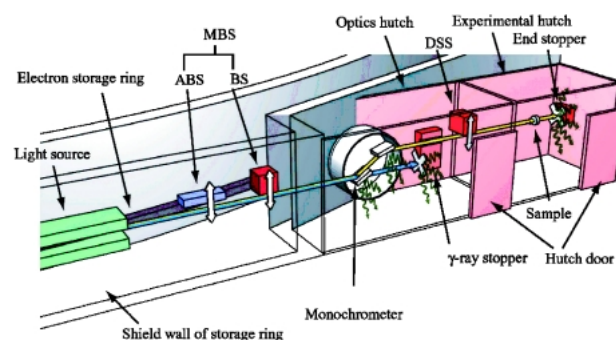


Fig. 4 The schematic view of beamline and radiation shields.

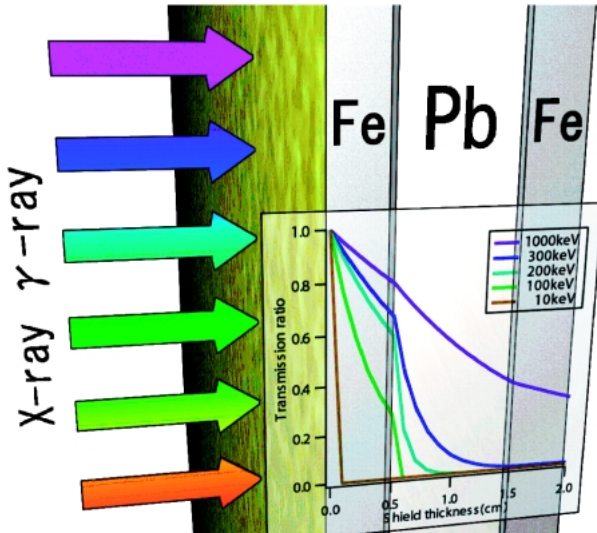


Fig. 5 Cross sectional view of the wall of radiation shielding hutch and attenuation curves of the 100, 200 and 300 keV photons.

てあります。SPring-8の光学ハッチの壁は鉛を鉄でサンドイッチした構造になっており、その厚さはハッチ内に取
り込む光子の数やエネルギーによって変わります。

光学ハッチ内の光学機器のように散乱点が限定されている場合、局所的に散乱点を遮蔽する局所遮蔽を用いることが
あります。SPring-8ではアンジュレータのビームラインで局所遮蔽が用いられており、光学ハッチ内のモノクロ
メータなどに鉛が取り付けられています。

ハッチにはケーブルダクトと呼ばれるケーブルをハッチの外へ通すための穴が設けられています。ハッチに穴があ
いても放射線が漏れないのは、ケーブルダクトが中で何回も屈曲して、まっすぐにしか進めない放射線は屈
曲のたびに減衰するためです。

他の例をあげると、たとえばKEK-PFやSPring-8の軟X線ビームラインには実験ハッチはありません。光子
のエネルギーが低く、光子が大気やビームラインのダクトで止まるため、遮蔽の必要がないからです。またKEK-
PFでは、光学ハッチの無い、局所遮蔽だけで光学機器からの散乱線を遮蔽しているX線ビームラインがたくさん
あります。放射線遮蔽ハッチの材質としては、光子のエネルギーが低いときや数が少ないときは鉄だけの場合もあ
ります。

2.3 ビームストッパー (ガンマストッパー, エンドストッパー)

放射線遮蔽ハッチ内には、放射線を直接止めるためにビームストッパーが設置されています。SPring-8ではガ
ス制動放射線の遮蔽用ビームストッパーをガンマストッパー (Fig. 6)、単色放射光の遮蔽用ビームストッパーを
エンドストッパーと呼んでいます。

ガンマストッパーの材質と厚さは、SPring-8では鉛30

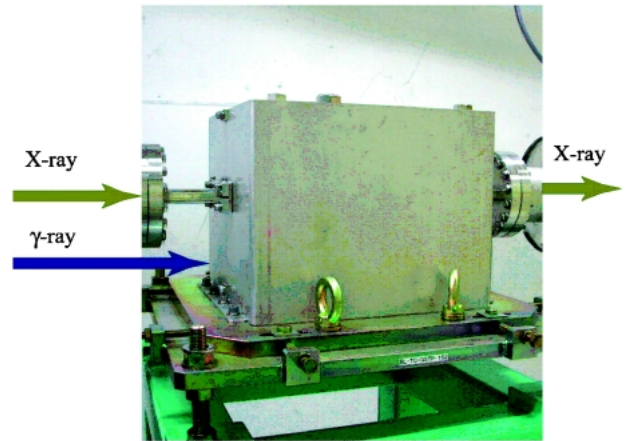


Fig. 6 The photograph of a γ -ray stopper.

cmとなっています。またKEK-PFでは、偏向電磁石光源で鉛20 cm相当、挿入光源で鉛25 cm相当となっており、
PF-ARでは鉛30 cm相当となっています。ガンマストッパーの大きさ (ビームに垂直な方向) は、電子軌道の接線
上に設けられている放射光取り出し口からの放射線を完全に遮蔽できる大きさになっています。ガンマストッパーは
モノクロメータ後方のできるだけ近い場所に設置されており、モノクロメータからの散乱線もこれで遮蔽します。

2.4 ビームシャッター (MBS, BBS, DSS)

ビームシャッターは人がハッチ内に入ることを可能にするためのもので、開閉によりビームを遮断したり、下流へ
通したりします。ビームシャッターを閉じると放射線は遮断され、下流のハッチ内に人が入れるようになります。

SPring-8の硬X線ビームラインでは、電子蓄積リング収納壁内部と光学ハッチ内部に一つずつビームシャッター
が設置されており、それぞれメインビームシャッター (MBS)、下流シャッター (DSS, Fig. 7) と呼ばれていま
す。SPring-8ではMBSはビームシャッター (BS) とア
ブソーバーという2つの機器から構成されています。BS
により放射光やガス制動放射線を遮断し、アブソーバーに
より低エネルギー放射光を吸収してBSへの熱負荷を軽減
します。

KEK-PFの場合、主ビームラインが1本から4本の
ビームラインに分岐しているところが多くあります。その
ようなところではMBSやDSS以外にブランチビームシ
ャッター (BBS) が設置されていて、MBS→BBS→DSS
(必要に応じて) という構成になっています。

BSは放射光とガス制動放射線を同時に遮断する必要が
あるため厚さが厚くなります。また、BSはフロントエン
ドの高真空内に設置されるため、高真空に適さない鉛では
なくタングステンできています。DSSについてはガン
マストッパーとモノクロメータの後に設置されるため、単
色の放射光ビームを遮断できれば十分です。参考までに、

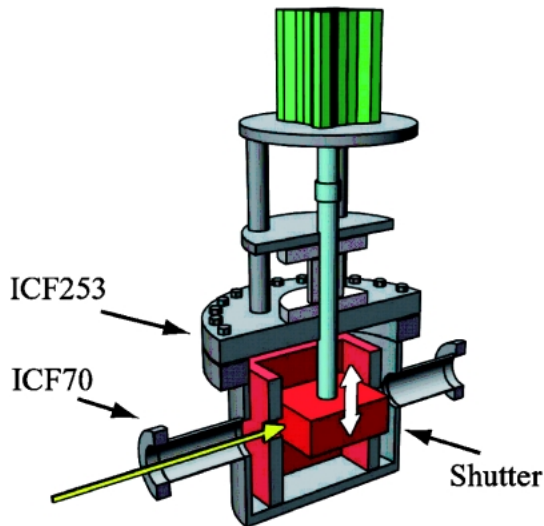


Fig. 7 The schematic view of a downstream shutter (DSS).

Table 1 Materials and sizes of beam shutters

シャッター	材質, 大きさ
SPring-8 MBS	タングステン38 cm
SPring-8 DSS	鉛9.4 cm
KEK-PF MBS (2.5 GeV Ring)	タングステン25 cm または ステンレス40 cm
KEK-PF MBS (AR)	鉛30 cm
KEK-PF BBS (2.5 GeV Ring 偏向電磁石光源)	鉛10 cm 相当
KEK-PF BBS (2.5 GeV Ring 挿入光源)	鉛15 cm 相当
KEK-PF BBS (AR)	鉛30 cm 相当

SPring-8 と KEK-PF のシャッターの材質と厚さを Table 1 に示します。

3. ビームラインインターロックシステム

ビームラインインターロックシステムは、例のごとく車のたとえを用いると、エアバッグの部分にあたります。車の運転に問題がない間は、エアバッグは隠れていて運転手からは見えません。それと同じように、ビームラインが正常に稼働している間は、ユーザがインターロックシステムに備わっている安全保護機構を意識することはほとんどないでしょう。しかし、誤った操作を行った場合や異常が発生した場合に、インターロックシステムは直ちに安全保護機構を作動させてユーザやビームラインを守ってくれます。ここで重要なのは、インターロックの安全保護機構が作動したということは、何か間違った操作を行ったか、あるいは何らかの異常があったことを意味する、ということ

です。車で言うと、エアバッグが開いて運転者や同乗者を守ってくれたことと（一寸言い過ぎかも知れませんが）同じ意味です。インターロックシステムは、深刻な事故を未然に防げるよう慎重に設計されており、定期的に動作試験も行われています。ですから、インターロックシステムを勝手に改造したりすることは絶対にしてはいけません。

さて、ビームラインインターロックは主に3つの目的で設置されます。第一は「人的保護」であり、前章で述べたように人体を放射線から守ります。次は「機器保護」であり、放射光のもたらす熱負荷などから機器を保護します。そして第三は「真空保護」であり、放射光が通るパイプを真空に保ちます。この「人的保護」、「機器保護」、「真空保護」がインターロックの主要な役割であり、そのために様々な安全機構が設けられています。たとえば、「人的保護」や「機器保護」にとって問題となる異常を検出したら、ビームをアポートしたりシャッターを閉じることによって、放射光をビームラインに導くのを緊急停止します。あるいは、真空が悪化したらバルブを閉じます。このように、インターロックの目的は単純です。しかし、規模が大きくなるにつれて、また利便性の向上を図ったり、細かなニーズに応じて行くにつれて、ますます複雑化していきます。ここでは細部に立ち入らず、インターロックのおおざっぱな話をしましょう。

3.1 システムの構成

ビームラインのインターロックでは、一般的にシーケンサー（プログラマブルロジックコントローラー PLC）が利用されます。これはアナログインプット、デジタルインプット、デジタルアウトプットなどがついたコンピューターなのですが、我々が通常利用するコンピューターとは大きく異なります。まず、主に使用する言語がラダー言語と呼ばれるもので、これによりリレー回路図を作成する要領でインターロックの動作を記述します（コラム「ラダー言語とは」参照）。さらに、安定動作が求められるため、内部の回路には高信頼性のパーツが使われています。普通の PC のようにハングアップやリポートなどをされると安全上問題なので、24時間連続運転でも長期間安定に動作するよう設計・製造されています。

3.2 ロジックの概要

インターロックには2つの基本となるロジックがあります。「狭義のインターロック」と「フルプルーフ (foolproof)」です。「狭義のインターロック」とは、ユーザの誤操作や機器の異常を検知した場合、自動的に次の動作ができなくなるよう制御して、故障や事故を未然に防止することです。たとえば、ハッチが開いているのにシャッターが開いた（すなわち放射光がハッチから漏れた）ときは、必ずビームをアポートするという「インターロック動作」をさせれば、放射線に関連する事故を未然に防ぐこと

ができます。しかしながら、これだけではユーザにとって非常に不便です。なぜなら、誤ってハッチを閉めずにシャッターを開ける操作をしたら、ビームアポートしてしまうからです。アポートすると施設の全ユーザに迷惑がかかるため、ユーザはシャッター開閉のたびに神経をすり減らすことになります。そこで、「フルプルーフ」という概念が必要になります。これは安全設計の基本的概念で、「人間はミスをするもの」という前提を設計に取り入れることです。先ほどの例では、ハッチを閉じたときのみシャッターを開くことができるようにするロジックを組み込めば、うっかりした間違いによるビームアポートを防ぐことができます。

さらに踏み込んで、「中に人が入っているのに、別の人が間違っただけでハッチを閉めて放射光を導入してしまった」という事態を避けることを考えてみましょう。すると必然的に、「ハッチを閉める時は、その前にハッチ内を点検する」という操作を導入することになります。これを実現するために SPring-8 ではユーザに「退出シーケンス」というハッチ内の点検手続きを行ってもらうようにインターロックが組み込まれています。

このように、誤操作をも想定してインターロックのロジックは設計されています。さらに、「退出シーケンス」のように安全を担保できる使用方法も考案されていて、それがインターロックのロジックに組み込まれています。このように、ビームラインインターロックシステムには何重もの安全対策が盛り込まれているのです。

3.3 利用上注意すべきこと

万一被曝事故が起きてしまった場合、それは本来「想定外」の何かが起きたことを意味します。そのため、安全性の再検証や、新しいガイドラインの作成、新ガイドラインに沿ったシステムの入替えなどを行うこととなり、長期間にわたって施設の運転を停止せざるをえなくなります。ですからこのような事態が起きないように、ユーザはインターロックによる保護に頼り切るのではなく、自分でも安全な操作を心がける必要があります。たとえば、ハッチ内に入るときはシャッターが閉まっていることを確認してから入るなど、安全上問題のない操作を心がけなければなりません。

4. ビームアポートについて

インターロックの話から少し外れて、SPring-8 と KEK-PF を例にビームアポートにまつわる話をしましょう。ビームアポートはダンプボタンを操作する以外にも、光を通していているときにハッチが開いた場合や、フロントエンド機器の冷却水が停止した場合などでも起こります。ビームアポートすると、全ビームラインの利用実験が完全に停止してしまうため、多くのユーザに被害が及ぶことになりま



(a)



(b)

Fig. 8 The photographs of beam dump buttons at (a) SPring-8 and (b) KEK-PF.

す。その頃、施設を運営する側はビームアポートの調査で一騒ぎです。RF の反射異常などのように速やかに運転を再開できる場合もありますが、フロントエンド機器の故障などでは調査に時間を要することがあり、原因の特定後、該当ビームラインの使用停止などのやむを得ない決定を下さなくてはなりません。この場合、数時間の運転停止を余儀なくされます。さらに大変なのが、ダンプボタンを操作した場合や、被曝事故が懸念されるような事態が発生した場合です。この場合も、原因の特定、現場ユーザの聞き取り調査、被曝の有無の確認などがおこなわれ、安全が確認されるまでリングを運転することができません。幸いにして、今までは間違っただけでダンプボタンを操作した場合がほとんどでした（この場合はユーザに厳重注意。さらに、放射線作業従事者に必要な再教育を受けていただく場合もあります）。

ダンプボタン (Fig. 8) は不測の事態が発生した場合に蓄積リング内の電子を落としたり、ビームラインを非常停止させるためのものです。ダンプボタンを操作すると、KEK-PF の場合、ビームラインの関連するビームシャッターやゲートバルブが全て閉じられ、さらに最上流のビームシャッター (MBS) が開いている場合は蓄積リング内のビームがダンプします。SPring-8 ではダンプボタンに特別な工夫が施されていて、アポート要求信号線が独立の回線をつなぎ込まれています。そのため、万一インターロックシステムに予期できない誤動作が発生しても、このボタンによるアポートは動作するようになっています。何か

放射光を止めなければならないような危険を感じたら、迷わずボタンを使用してください。とにかく、身の安全が何よりも大事なのです。

5. おわりに

ここで、インターロックの現在と未来について考えてみましょう。インターロックは現在利用可能な技術で、建設コスト、信頼性、メンテナンス性を考慮した上で、最も安全を確保するように設計されています。したがって、安全面に関しては将来も同じような基本思想が使われることになるでしょう。利便性については安全性と対立することが多く、その向上を図るのは容易ではありません。それでも、技術革新を受けて、安全性を損なうことなく大きく向上する可能性を秘めています。たとえば、インターロックとデータベースを高速ネットワークで結んで、インターロックの持つ情報の時刻変化をミリ秒単位で記録すれば、各機器の故障の予知ができるようになるかもしれません。さらに、人を検知する高信頼度のセンサーが開発されれば、面倒な「退出シーケンス」をユーザが行う必要はなくなるでしょう。

しかし、どのような実験を行うにしても、安全の確保はとても重要です。そして、放射光利用実験における事故は当事者が被害を受けるだけではなく、他の実験者や施設にまで影響を及ぼすこととなります。ご存知の通り、効率を求めるあまり安全を軽視するとんでもないことが起きるといのは、世の中の事故例を見ても明らかです。たとえどんなに時間が限られていても、決して慌てる事なく、安全をしっかりと確認しながら実験を進める事が絶対に必要です。

今回は遮蔽やインターロックの仕組みなどについてお話ししてきました。この後、本シリーズは「光を安全に取り出す

（後編）」へ続いてゆきます。ここでの話が、実験を進める上での「お役立ち情報」となることを祈って第二回の結びとしたいと思います。ビームラインの安全運転を心がけましょう！！

お願い

本シリーズでは、初心者ユーザが陥りやすい誤りやビームライン担当者の貴重な経験談を募集しています。最終回で紹介する予定です。また、本シリーズに関してご意見・ご要望などがありましたら、合わせて編集担当（SPring-8 JASRI 大橋治彦/hohashi@spring8.or.jp, KEK-PF 平野馨一/keiichi.hirano@kek.jp）までお寄せください。

■コラム ラダー言語とは

シーケンサーで使われるラダー言語は、回路を書くような感じで動作を記述する言語で、BASICやC言語と同様、高級言語に分類されます。言語の基本部分は非常に簡単で、以下の3つの記号から成っています。

- |—：入力が ON であれば、接点が CLOSE になる、A 接点の記号
- |/—：入力が ON であれば、接点が OPEN になる、B 接点の記号
- ：出力の記号

たったこれだけですが、これで1ビットを記憶するロジックも簡単に記述できます。たとえば、フルプルーフの入っていないロジックは左図のようになり、入っているロジックは右図のようになります。ところで、この絵は梯子（ラダー）のように見えますね。これがラダー言語と呼ばれる所以です。この絵を、パソコン上の専用ソフトウェアに入力していきます。入力終了後にシーケンサーにアップロードすれば、このラダーに従ってシーケンサーが動作するのです。

