

解説

放射光施設の放射線防護

小佐古 敏荘

東京大学原子力研究総合センター*

Radiation Protection in a Synchrotron Radiation Source Facility

Toshiso KOSAKO

Research Center for Nuclear Science and Technology, The University of Tokyo

1. 大型放射光施設の放射線防護の考え方

大型放射光施設を放射線防護側から見ると、数百 MeV から数 GeV の電子又は陽電子が蓄積リングに蓄積され、相当数のビームラインより X 線から紫外光までのビームを引き出し利用する形となる。この場合考えている電子あるいは陽電子のエネルギーが中小の放射線施設で想定される上限値、数十 MeV を超えているのでその意味で困難が生ずる。ここでのエネルギー領域では電子がいわゆる電磁カスケード¹⁾を起こすことを考える必要がでてくる。電子は制動放射により高エネルギー光子を放出し、この一部は光核反応により中性子を放出する。放出される中性子もエネルギーが高いのでいわゆるフルエンスを放射線線量に換算する換算係数も高エネルギー部ではオーソライズされたものは与えられていない²⁾。当然のことながら電磁カスケードの過程では光電効果、コンプトン効果、電子対生成等は起こり、電子、陽電子の散乱も続くことになる。さらに 150 MeV 近傍の π スレッシュホールドを超えるとパイオンが生成しその崩壊物である μ 粒子も放射線防護上考慮の必要が出てくる。これらの仮定は通常電磁カスケード計算コード EGS³⁾等で評価が行われる。最終的に考えなければならない放射線の種類は、光子、中性子、 μ 粒子で、各々のエネルギーも考慮しつつ評価する必要がある。

放射線防護上考慮すべき事項は、放射線遮蔽設計、放射化問題、作業者に関わる放射線管理、モニタリングに関わる放射線管理、安全設備に関わる放射線管理、環境管理に関わる放射線管理、安全組織などであるがこれらは続く節で簡単に説明したい。

2. 放射線防護の法令

放射線防護の指針は当然国内法（放射線障害防止法）に依拠するわけであるが、世界各国の法令の原則は国際放射

線防護委員会（ICRP; International Commission on Radiological Protection）を拠り所としている。ICRP は1977年に主な勧告⁴⁾をだし現在の国内法もこれに依拠しているが、その後1990年に大幅な改定が行われ、ICRP Publication 60⁵⁾として公表されている。この1990年勧告の国内法令取り入れは政府の放射線審議会が数年にわたり検討が行われ、基本事項の検討、外部被曝、内部被曝の基準となる数値の検討等がほぼ終了しようとしている。2000年位に法制化の予定である。従って新規の大型放射光施設等の設計においてはこの点も十分に考慮の必要がある。例をあげれば、放射線作業者の主な限度は1977年の「年50 mSv」から1990年の「5年平均で20 mSv、但し年50 mSv を越えない」に変わり、実質的な限度値の切り下げになっている。これに伴い管理区域の境界の線量値も切り下げる形になる検討が進んでいるので、注意の必要がある。

法令から見れば一般の公衆の放射線に対する限度は年1 mSv であり、線量拘束値（個々の線源に対する線量の割り当て値）の上限は300 μ Sv と ICRP は考えているが、既に国内の諸施設で、例えば原子炉ではスカイシャインに対して年50 μ Sv を ALARA (As low as reasonably achievable, 「合理的に達成できる限り低く」という考え方の目標値と決めており実際に適用されていること、また国内のいくつかの大型加速器施設においても同じ値を採用している施設もあることもあわせて考える必要があろう。これらの数値も遮蔽設計の目標値に使われるので早期の判断の必要な点である。

さらに直近に、科学技術庁放射線安全課長名で「外部放射線の測定結果に基づく管理区域の設定について」⁶⁾、「放射線発生装置使用施設における放射化物の取扱いについて」⁷⁾との通達が出されているのでこれにも注意する必要がある。前者では従前より踏み込んで申請書の管理区域境

* 東京大学原子力研究総合センター 〒113-0032 東京都文京区弥生 2-11-16
Tel/Fax 03-3818-8625 e-mail kosako@koslabwa.rcnst.u-tokyo.ac.jp

界の線量評価値に実測値をとることを認めようとするもので、後者は加速器施設より発生する放射化物に対する取扱い指針でこの面では初めての通達であり、注目したい。

3. 放射線遮蔽設計

設計段階での最大の関心事は遮蔽設計であるが、その困難さは、考慮している放射線が光子、中性子、 μ 粒子にわたり、高エネルギー、反応の複雑さ、反応断面積データの集積の少なさ等の特性を持つため取扱いが難しいことによって生じている。従って、その設計評価には解析計算以外にも既設の加速器での実測データに基礎を置いた半経験式が多く用いられている（例えばバルク遮蔽のSwansonの式⁸⁾、Jenkins⁹⁾の式など）。

遮蔽計算は通常の方法として次の3つに分けて行う。

(i) バルク遮蔽：平板状の簡単な形状の遮蔽壁を考え、それに対する遮蔽能力を評価する。遮蔽設計の第一番目に行う。加速器施設の場合にはビームの前方方向のバルク遮蔽と側壁方向のバルク遮蔽に分けて考える。放射光施設の場合は電子ビームに対するコンクリート遮蔽壁外側の線量を与える形となり、これを用いて遮蔽壁の厚みを決定する。この遮蔽は施設全体の骨格を決めることになるので十分な配慮が必要である。

(ii) スカイシャイン：通常の施設では側壁に比べると天井の遮蔽は極端に薄い。これはある意味で当然であるが、天井方向にぬけた放射線は大気により散乱を受け地上に舞い戻ってくることになる。通常のセンスではこの量は十分小さいように思うが、敷地境界の環境の線量値が低く設定され、施設からの放射線が強く、施設から境界までの距離が数十から数百メートル位と近い場合には、平方センチメートルあたり1キログラムの空気による放射線の反射効果は無視できないくらい相対的に大きくなり、大変難しい問題となる。対策は天井遮蔽を充分とることであるが、天井部分の重量を考えると困難となる場合もある。他にもビームロスの位置を施設境界から離すこと等の工夫がされることもある。場合によるが、施設から境界までの距離が近いときは放射光施設の遮蔽設計全体を決める重要事項となることもある。

(iii) ストリージング：遮蔽のスリット状、ダクト等の開口部、入退出迷路部、遮蔽欠損部等より内部の放射線が多重散乱を繰り返して外に出てくるものをいう。形状、材質毎にケースバイケースの評価が必要で、遮蔽設計の中ではもっとも複雑な部分である。前述の詳細データがなければ設計ができないので、(細かい開口部等は後の設計になる)施設計画のどの時点でこの評価を行うのかは難しい問題である。

バルク遮蔽問題においては放射線源項をどのように見積もるかは難しく重要である。ビーム損失の場所が線源項になるわけであるがこれを特定するのは相当難しい。これは運転モード（建設期か、ビーム打ちこみ時か、利用モ-

ドが変わるか等々）とも大きな関連を持っている。またビーム異常時の放射線作業員の被曝評価、その際の遮蔽の考え方と作業性の両立等も検討事項となろう。

4. 放射化問題

放射化の問題は高エネルギー加速器についてまわる厄介な問題である。光子、中性子が放射化に寄与するわけであるが、加速器の構成部品、冷却水、空気が放射化の対象物である。加速器の部品の放射化に際して最も強い部所は陽電子生成ターゲット等である。この周囲は部分遮蔽が必要で、ビーム電流値にもよるが、通常の研究用原子炉以上の遮蔽がいていると思っておけばよい。ターゲット周辺の放射化は計算評価をするのみならず、その取り替え作業、放射化部品の保管、処分等にも工夫が必要である。自動化の検討、放射化部品の保管場所の確保等がある。さらに十分な遮蔽が必要なのはビームダンプ（利用後のビームの捨て場所）でこの小部屋は最大の遮蔽を行い、地下等に設置する。この場合は、施設を最終的に解体する場合の取り扱いや、通常運転時の地下水の放射化の問題もクリアする必要がある。

冷却水も放射化が起こりうる。従って冷却水はクローズドサイクルで利用し、イオン交換樹脂で放射性物質をトラップする。意外にもトラップされた放射性物質のゆえにこの部分が強い放射線を出す場合があるので場合によってはこの周囲を遮蔽する。時々交換する樹脂の取り扱いを非密封放射性物質的に取り扱う必要がある。

空気の放射化は空気中の窒素、酸素、アルゴン等が放射化するのみならず空気中のダストが放射化したり、放射化した固体が浮遊して空気が放射能を持つ。設計では空気中の放射化核種濃度を計算し、法令に定められている作業場所における空気中の濃度限度を、裕度をもって満足できるように換気率を決める。排気はフィルターを通して行うが、排出口での濃度限度も満足できるようにする必要がある。議論になるのは空気中の核種の内数秒から分にかけての短寿命核種の評価で、排出口にいたるまでに減衰してしまう効果をどのように評価に入れるかである。一般に、現在は安全側の評価ということでこの種の減衰を認めていないことが多い。そのため、加速器停止後これらの短寿命核種の減衰を待つため入室まで待ち時間を設けている施設もある。現在の1990年勧告の国内法令の取り入れの放射線審議会の議論では、内部被曝評価の部分で短寿命核種の取り扱いに関して現実的な取扱いをしたいとの議論が始まっているので状況は近くよくなるものと思われる。

5. 作業員に関わる放射線管理

放射線作業員の放射線管理は、個人のモニタリングを行い年の限度値、50 mSv を守ることにより行われる。この点は既に述べたように1990年の新勧告の法令取り入れが進行しているので含んでおく必要がある。さらに放射光

施設においては作業場所によると、例えばクライストロンルームの一部や放射光利用実験室の一部では個人モニタリングにかかりにくい低エネルギーの光子が放出されている場合も有りうるので軟X線の個人モニタリングによる測定、線量評価、放射線管理等においては十分な留意が必要である。

大型放射光施設のように数百人を超える多数の共同利用者が放射線作業を行う場合は、作業者の管理に、ネットワーク化されたコンピュータシステムを導入する必要がある。これは従前の、線量の記録等に用いるということだけでなく、入退出のオンライン管理、さらに作業環境モニタリング、教育訓練等の記録、共同利用手続き等統合されたシステムとしてコンピュータシステムを構築する必要がある。

6. 放射線管理実務に関わる諸問題

放射光施設での放射線作業者の安全をハード的に担保するために、作業者の出入りをコントロールするインターロックシステムが用いられる。インターロックシステムは安全に関わる設備としては最重要で、誤動作は直接被曝事故に直結するので、それは許されない。そのためセンサー部に多重性を持たせたり、システム自身を冗長に作る。加速器の運転とも関連を持たせ入室時にはビームが出せないようにする場合も多い。その場合判断条件が複雑になるとこれをソフト的に行うことも考えられ、米国では一部の施設で取り入れられているが、「安全系は重要で、誤動作は許されないのでハードワイヤーで構成する」という古くからの考え方もある。

放射線モニタリングは放射線作業者との接点である管理区域境界、公衆との接点である事業所境界等におかれるが、その数と配置をどのように最適化するのか、いくつかの内部基準を設けて加速器の運転を止めるまでの権限を各々のモニターに与えるのか、その場合には誤動作をどう考えるのか等が問題となる。

7. 安全組織

大型放射光施設のような数百人規模の共同利用者が常に入出入りしている施設では、安全とりわけ放射線安全に対して十分な組織を用意しておく必要がある。既に述べたように建設期においては遮蔽設計、放射化量評価、モニター、インターロックシステムの設計、官庁の許認可申請等、利用開始後は、試運転の立ち会い、官庁検査、共同利用者の登録、教育、利用者に絡むシステム構築、環境放射線等の実測開始等々が続く。

現在の社会は環境リスクとりわけ放射線に対しては非常に厳しいので十分な組織を持って放射光施設の計画を行うべきであろう。ユーザー一人一人から見れば各々のビームライン上で従前からのX線実験に類することをやっていることになるのであろうが、全体のシステムは従前には考えられなかった巨大システムを運用しているのだという自覚がないと大きな失敗を犯すことになる。

関係の方々の協力を得てしっかりした安全組織を確立したいものである。

参考文献

- 1) H. W. Patterson and R. H. Thomas: "Accelerator Health Physics", (Academic Press, 1973) Chapter 3.
- 2) ICRP: "Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation", (Pergamon Press, 1997) Publication 74.
- 3) W. R. Nelson et al.: "The EGS4 Code System", (SLAC; Stanford Linear Accelerator Center, 1985) SLAC Report-265.
- 4) ICRP: "Recommendation of ICRP", (Pergamon Press, 1977) Publication 26.
- 5) ICRP: "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", (Pergamon Press, 1990) Publication 60.
- 6) 科学技術庁原子力安全局放射線安全課長: Isotope News (アイソトープニュース) 536, 39 (1999).
- 7) 科学技術庁原子力安全局放射線安全課長: Isotope News (アイソトープニュース) 536, 43 (1999).
- 8) W. P. Swanson: "Radiological Aspects of the Operation of Electron Linear Accelerators". (IAEA: International Atomic Energy Agency 1979).
- 9) T. M. Jenkins: Nucl. Instrum. Meth. 159, 265 (1979).