解 説

高エネルギー加速器の放射線防護

小佐古 敏 荘^{*1}

(1990 年 10 月 4 日 受理)

Radiation Protection for High Energy Accelerators

Toshiso KOSAKO^{*1}

KEY WORDS: high energy accelerators, radiation protection, radiation shielding, induced activities, dosimetry, radiation control, interlock systems

1. 高エネルギー加速器

“高エネルギー”という形容詞はかなりあいまいに使用されているが、一般には粒子の加速エネルギーが 100 MeV 以上をいっている。これは反応の面から見ると、電子加速器では電子が物質と電磁カスケードシャワーを起こすエネルギーであり、陽電子加速器では陽子が物質と核カスケードを起こすエネルギーである。これらの反応においてはともに放射線粒子の増殖が起こっている。

電磁カスケードの一般的様相は第 1 図に示すとおりである。物質内に入射した高エネルギー電子が制動放射 (Bremsstrahlung) により高エネルギー光子を放出し、自身は物質内を進んでいく。生成された高エネルギー光子は電子対生成により、電子と陽電子を生成する。陽電子は消滅光子を生成する。場合によっては高エネルギー光子は原子核と光核反応により光中性子を発生する。これらの電子、陽電子、光子による散乱、制動放射、電子対生成、陽電子消滅、光中性子の発生等のカスケードを電磁カスケードと呼んでいる。これらの反応の線量当量率への寄与を単位電子ビームパワー当りにまとめると第 2 図のようになる。

他方、核カスケードの一般的様相は第 3 図に示される。高エネルギー陽子等のハドロン (陽子、中性子等の

重い素粒子の総称) が物質中に入射した場合は原子核の内部の核子との相互作用によるカスケード (核内カスケード) を起こしたり、それにより核外に放出された粒子が他の原子核と相互作用しカスケード (核外カスケード) を起こす場合があり、これらを核カスケードと呼んでいる。これらの反応においては入射粒子により核が蒸発過程を経て粒子を放出したり、核破碎 (spallation) 反応が起こったりしながらカスケードが続くことになる。100 MeV を越えていれば π 中間子やその壊変生成物である μ 粒子もカスケードに寄与することとなる。

本稿では、これらの高エネルギー加速器の放射線防護を考えてゆくわけであるが、第 1 表には世界の高エネルギー加速器のうち、GeV 級の主要な加速器を一覧にした。

2. 高エネルギー加速器の放射線防護

高エネルギー加速器の放射線防護の問題としてはどのような点が考えられるのであろうか。まず考えられるのは放射線遮蔽の問題である。これは従前にはないエネルギー領域での扱いが必要となる点でむずかしい問題をかかえている。次には放射化の問題、個人被曝管理や空間線量分布測定時のドジメトリーの問題、インターロック等を含む出入管理の問題、被曝低減化や保健物理組織を含む放射線管理の問題、などが考えられる。ここではこれらの点を順に述べるが、適宜、従前の文献^{4~9)}も参照されたい。

^{*1} 東京大学原子力研究総合センター; 東京都 文京区 弥生 2-11-16 (〒113)

Research Center for Nuclear Science and Technology, The University of Tokyo, Yayoi 2-11-16, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan.

第1図 電磁カスケードの様相¹⁾

Bは制動放射，Pは電子対生成，Nは中性子の生成を示している。

第2図 単位入射電子ビーム出力当りの線量当量率¹⁾

入射：電子ビーム，ターゲット厚い（図中の幅は材質と厚みの違いを示す）。

2次粒子：光子，中性子， μ 粒子。

3. 放射線遮蔽の問題

電子加速器と陽子加速器では放射線遮蔽の考え方が異なるが、いずれも主要部の遮蔽体厚みは、主として、生成された高エネルギー中性子により決定される点がポイントである。

まず放射線の生成量であるが、電子加速器の場合は、実験値等により評価することも多いが、現在では、モンテカルロコード、ETRAN¹⁰⁾や EGS¹¹⁾によって電磁カスケードを計算する方法もある。この場合には光中性子

の発生はカスケードとは別途の計算により見積もることになる。便利なのは、電子ビームからの放射線発生の際の簡便計算法で、SWANSON¹²⁾により次式が与えられている。

原子番号の大きい厚いターゲットの場合（100 MeV以上で）ターゲットより 1 m 位置での光子の線量当量率は

0° 方向

$$\dot{H}_1 [(\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}) (\text{kW} \cdot \text{m}^{-2})^{-1}] \sim 3 \times 10^2 E_0 [\text{MeV}] \quad (1)$$

90° 方向

$$\dot{H}_1 [(\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}) (\text{kW} \cdot \text{m}^{-2})^{-1}] \sim 50 \quad (2)$$

また、中性子発生については単位電子ビーム当りの中性子生成率グラフが有用である。これを第4図に示す。

電子加速器の場合は発生した光子と中性子の双方の減衰を考える必要がある。中性子線量の評価は発生項評価を除いて、陽子加速器と同様の手法を用いることになるので、後述の陽子加速器の場合を参照されたい。光子の遮蔽計算については SWANSON やドイツ電子シンクロトン研究所 (DESY) の DINTER らにより簡便式等が提唱されている。実用的には第5図の減衰曲線等が有効に利用できる。

陽子加速器については、ターゲット部より生成された光子の遮蔽は通常あまり大きな問題とはならない。高エネルギー陽子が物質に当たった場合、発生する中性子数は陽子エネルギー、ターゲット物質の種類、形状により異なるが、第6図に代表的な物質についての入射陽子当りの発生中性子数をまとめて示す。発生項評価の次には、種々の遮蔽物質中での中性子減衰を考えていくことになるが、第7図に見られるように代表的遮蔽物質であるコンクリートの場合は、200 MeV 以上のエネルギーの中性子入射に対しては減弱距離 (λ [g/cm²]) はエネルギーによらずほぼ一定（約 117 g/cm²）、それ以下のエネルギーでは単調減少という形をしている。これは 100 MeV 以上のエネルギー領域で中性子の非弾性錯乱断面積がほぼ一定になることに基づいている。高エネルギー中性子の減衰係数は低エネルギーのそれに比べて小さいため、遮蔽体透過後の線量率の減衰は高エネルギー中性子成分に大きく依存している（たとえば第8図参照）。遮蔽体が十分な厚みをもつ場合には減速された熱中性子等による捕獲中性子反応によるガンマ線の2次放出も問題となりこれらの評価にも十分な配慮が必要である。

高エネルギー加速器遮蔽に関する他の問題としては(a)側壁遮蔽の問題（加速器の長いトンネル状遮蔽等の場合には前方方向の遮蔽とは若干扱い方が変わる。代表的な解析モデルとしては MOYER モデル¹⁴⁾等がある）、(b)遮

第3図 核カスケードの様相³⁾

路、ダクトスリットストリーミングの問題（人のアクセス部、ケーブルダクト、遮蔽部スリット等の放射線ストリーミングの評価の問題、数値の減衰がある場合のストリーミングの評価はむずかしい問題である）、(c)スカイシャイン問題（天井方向の遮蔽は壁方向に比べて相対的に薄い。上空に向けて放出された放射線が空気と弾性散乱し、思わぬ遠い距離の境界線量を高める場合がある。文献 15）など）、(d)μ粒子の遮蔽の問題（10 GeV 以上のハドロン遮蔽の場合、π中間子の壊変生成物であるμ粒子がきわめて強い方向性を持ち、強い透過力で厚い遮蔽体を通過する。ビームの下流のかなり近い距離でも

問題となる場合もある）。

4. 放射化の問題

高エネルギー加速器での放射化は原子炉あるいは核融合炉の場合¹⁶⁾と異なり生成核種が多様である点で特徴的である。第2表に、高エネルギー電子および陽子の場合についてのおおの代表的な材料についての放射化生成物の例を掲げる。これらは加速器のターゲット部、構造部、ビームダンプ等において生成される核種である。KEK 陽子シンクロトロンでの銅ターゲットのγ線スペクトル測定例を第9図にあげる。また、第10図には500 MeV 陽子により生成された放射能の時間減衰を銅、

第1表 世界の主要な大型高エネルギー加速器³⁾

電子線形加速器（リニアック）

場	所	加速器略称	エネルギー (GeV)	全長 (m)	備 考
スタンフォード線形加速器センター	（SLAC）		22.5	3,050	1966 完成
高エネルギー物理学研究所	（KEK）		2.5	400	1982 完成
オルセー原子核研究所		DCI	2.1	228	放射光専用 1959 完成

電子シンクロトロン

場	所	加速器略称	エネルギー (GeV)	直径 (m)	備 考
コーネル大学ニューマン研究所			10	250	1967 完成
ドイツ電子シンクロトロン研究所		DESY	7.5	100	1964 完成
エレバン		ARUS	6.1	70	1967 完成
ボン大学物理研究所			2.5	22	1965 完成

陽子シンクロトロン

場	所	加速器略称	エネルギー (GeV)	直径 (m)	備 考
フェルミ国立加速器研究所	（FNAL）	—	500	2,000	1972 完成
		TEVATRON II	1,000	2,000	1984 完成
ヨーロッパ合同原子核研究所	（CERN）	CPS	28	200	1960 完成
		SPS	400	2,200	1967 完成, 現在衝突 突器としても使用
セルプコフ高エネルギー物理学研究所	（IHEP）	—	76	472	1967 完成
		UNK	3,000	6,000	1988 完成予定
ブルックヘブン国立研究所	（BNL）	AGS	33	257	1960 完成
高エネルギー物理学研究所	（KEK）	KEK-PS	12	108	1976 完成
アルゴンヌ国立研究所	（ANL）	ZGS	12	55	1963 完成 1979 中止
ドブナ合同原子核研究所		シンクロファゾ トロン	10	72	1957 完成
ラザフォード研究所	（RL）	NIMROD	8	53	1963 完成 1980 中止
理論・実験研究所	（ITEP）	ITEP-PS	7	80	1961 完成

衝突型加速器

場	所	加速器略称	粒子	エネルギー (GeV)	直径 (m)	備 考
ヨーロッパ合同原子核研究所		ISR	p, p	28	300	1971 完成
（CERN）		SPS	$\bar{p}$, p	270	2,200	1982 完成
		LEP	e^+ , e^-	50	8,486	1989 完成予定
ドイツ電子シンクロトロン研究所		DORIS	e^+ , e^-	5.1	55×110	1974 完成
		PETRA	e^+ , e^-	20	734	1979 完成
スタンフォード線形加速器センター		SPEAR	e^+ , e^-	4	74	1972 完成
（SLAC）		PEP	e^+ , e^-	18	700	1980 完成
		SLC	e^+ , e^-	50	600	1987 完成
コーネル大学ニューマン研究所		CESR	e^+ , e^-	8	245	1979 完成
フェルミ国立加速器研究所	（FNAL）	TEVATRON I	$\bar{p}$, p	1,000	2,000	1986 完成
高エネルギー物理学研究所	（KEK）	TRISTAN	e^+ , e^-	30	960	1986 完成

鉄、アルミニウムについて示した。これら放射化物の保管あるいは廃棄の方法にも加速器保物としての考え方が要求される。放射化反応は、この外にも加速器の冷却水、空気やダクト等にも起こる。冷却水中にみられる代表的な核種は、 ^3H , ^7B , ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}Fe 等であるがこれらの中には核粉碎反応により生成されたものも多くあり、通常は閉ループとなった冷却水ループ中にイオン交換樹脂を入れトラップする（この“汚れた”イオン交

換樹脂の扱い方もまたポイントである）。空気あるいはダストについては代表的には ^3H , ^7Be , ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O ,

第4図 単位電子ビームパワー (kW) 入射時の各厚肉ターゲットからの中性子発生¹⁾

第6図 各種ターゲット物質ごとの入射陽子に対する中性子生成数¹²⁾

第5図 電子ビーム (E_0) 入射時の厚肉ターゲットからの制動放射線 (光子) の遮蔽材中の減衰¹⁾

(a) 普通コンクリート (2.35 g/cm^3), (b) 鉄 (7.8 g/cm^3), (c) 鉛 (11.35 g/cm^3)

第 7 図 入射中性子エネルギーごとのコンクリートの減弱距離の変化¹³⁾

第 8 図 陽子加速器のコンクリート遮蔽中での中性子減衰の評価例¹³⁾
陽子ビーム (単色, 図中表示), ターゲット (厚肉の銅), 遮蔽状況 (ターゲットより 1 m 位置から遮蔽が始まる)

第 2 表 高エネルギー加速器施設でみられる誘導放射能

(a) 電子加速器の場合

ターゲット物質 (照射材料)	生成放射能
コンクリート	^{11}C , ^{15}O , ^{22}Na , ^{23}Mg , ^{26}mAl , ^{27}Si , ^{38}K , ^{53}Fe
鉄	^{46}Sc , ^{48}V , ^{51}Cr , ^{52}Mn , $^{52\text{m}}\text{Mn}$, ^{54}Mn , ^{56}Mn , ^{52}Fe , ^{53}Fe , ^{55}Fe , ^{59}Fe
銅	^{58}Co , $^{58\text{m}}\text{Co}$, ^{60}Co , ^{63}Ni , ^{61}Cu , ^{62}Cu , ^{64}Cu , ^{66}Cu

(b) 陽子加速器の場合

ターゲット物質 (照射材料)	生成放射能
プラスチック, オイル コンクリート, アルミニウム	^7Be , ^{11}C 上記プラス ^{22}Na , ^{24}Na , ^{32}P , ^{42}K , ^{45}Ca
鉄	上記プラス ^{44}Sc , $^{44\text{Scm}}$, ^{46}Sc , ^{47}Sc , ^{48}Sc , ^{48}V , ^{51}Cr , ^{52}Mn , $^{52\text{m}}\text{Mn}$, ^{54}Mn , ^{56}Mn , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{57}Ni , ^{55}Fe , ^{59}Fe
銅	上記プラス ^{65}Ni , ^{61}Cu , ^{64}Cu , ^{63}Zn , ^{65}Zn

^{41}Ar などの核種である。HEPA フィルターでこれらのかなりの部分を除去することになる。陽子ビームによる放射化放射能は NMTC¹⁷⁾, HETC¹⁸⁾ などの計算コード

でも評価できるが、現状では減衰傾向を大まかに把握するのに用いられている。

第9図 陽子ビームにより照射された銅片の放射化放射能 γ 線スペクトル測定例⁷⁾ (KEK 陽子シンクロトロン遅い取出し部, 照射後約1時間後 (Ge(Li) 検出器にて測定)

第10図 陽子ビームにより照射された銅, 鉄, アルミニウムの放射化放射能の時間減衰²⁾ (陽子ビームエネルギー 500 MeV, 15 分照射, 強度 3.2×10^{13} protons)

5. ドジメトリーにおける問題点

必要なドジメトリーは, 個人被曝線量測定と作業環境モニタリング, 一般環境モニタリングである。いずれも中性子成分をどのように評価するかが重要であり, その点でむずかしい。

個人モニタリングはフィルムバッジ, TLD, 飛跡検出器等を用いるが, それらの線量換算係数をどうするかが重要な問題となる。線量換算を通常の $^{241}\text{Am-Be}$ や ^{252}Cf 中性子線源によるものを用いると, 現実の加速器場では過小評価になりうる場合があり十分な配慮が必要である。

作業環境モニタもそうであるが, 高エネルギー用の検出器をどのように備えるか, また, それらの検出器応答関数をどうするかが問題となる。加速器場での中性子測定は, 一般には, 低エネルギー側で構成された減速材型中性子検出器 (たとえば文献 19), 高エネルギー側で反跳陽子型有機液体シンチレータ (たとえば NE-213 など) やカーボン箔 (高エネルギー側で $^{12}\text{C} (n, 2n) ^{11}\text{C}$ 反応がほぼ一定の断面積 22 mb をもつ積分型検出器) 等を組み合わせて用いる。さらに加速器より放出される放射線がパルス状である場合は電離箱等の測定でも検出器内の電荷収集時間との関連で, 測定値が現実よりも過小評価になる場合もありえ, 評価上考慮すべき点となる。

6. 出入り管理

とくに、大型の加速器施設になると、施設が広い範囲にわたって広がり、放射線発生場所を広く管理する必要が出てくる。通常これらの区域管理にはインタロックシステムを用いるが、加速器の運転モード、ビームトランスポートの状況、各管理区域相互の関係など多岐にわたる論理を組み合わせることで入口扉を制御することになる。とくに入口扉の変更や管理区域の変更を施設設置後に行う場合は十分に配慮が必要である。通常、これらの安全関連施設はハードワイヤでシステムを組み上げることが要求されるが、加速器内の人の退出確認などの人の絡むソフト的な部分の介在は避けられない。加速器による放射線事故の多くがインタロックシステムに起因するものであることは記憶にとどめておくべきことである。

加速器運転の停止後にも放射化による残留放射能が存在する場所もあり、エリアモニタと連動したインタロックシステムがあれば有効である。最近の新しい施設では入退システムに入域情報を含む個人 ID、TLD などの個人モニターを組み合わせたものも使用され始めている。

7. 放射線管理上の問題点

加速器を保守するグループの集団被曝線量のコントロールが重要な問題となる。被曝は加速器構造部の放射化による外部被曝と空気、ダストあるいは放射化物の加工等に伴って生ずる内部被曝とである。この被曝低減化には ALARA の考え方が基本にされるべきで、たとえば米国ロスアラモス国立研究所の LAMPF、加国ブリティッシュコロンビア大学の TRIUMF 等ではロボットやマニピレータを積極的に導入し被曝低減化を図っている。

加速器の施設設置者側に保健管理・管理組織に正しい“理解”のない場合も間々みられ、保健物理の組織や仕事パートタイムジョブである場合は、ときとして多くの問題を生ずる。高エネルギー加速器保体では、生じている核反応に対する高度な知識、管理実務にも明るい保健物理研究者、十分な遮蔽、防護を保障する資金の、知・人・金の三つがきわめて重要となる。第 11 図に米国ブルックヘブン国立研究所での保健物理組織例をあげる。

8. 結 語

近年、大型高エネルギー加速器は基礎研究面でのみならず、応用研究や産業界でも、癌治療用の医療用重イオン加速器、LIC リソグラフィー用の大型放射光施設などが積極的に導入されてきている。これまで述べてきたように、これらの施設の“高エネルギー”と“高出力”は従前の X 線や RI、原子炉を中心とした放射線管理とは本質的に異なる世界を作り出してきている。加速器保健物理はその意味でも現在成長中の学問分野であり、今後

第 11 図 米国ブルックヘブン国立研究所における保健物理の組織例 (1990)

の発展を期待したいところである。

参 考 文 献

- 1) W.P. SWANSON; IAEA Technical Report Series, No. 188 (1979).
- 2) H.W. PATTERSON and R.H. THOMAS; "Accelerator Health Physics," Academic Press, New York (1973).
- 3) 東京天文台(編); "理科年表", 丸善, 東京 (1989).
- 4) 加藤和明; 日本原子力学会誌, 18, 20 (1976).
- 5) 中村尚司; 保健物理, 16, 343 (1981).
- 6) 加藤和明, 小佐古敏荘; 原子力工業, 28(10), 42 (1982).
- 7) 近藤健次郎; 保健物理, 19, 33 (1984).
- 8) 中村尚司, 平山英夫, 伴 秀一; 日本原子力学会誌, 22, 231 (1980).
- 9) 近藤健次郎, 柴田徳思; 日本原子力学会誌, 32, 37 (1990).
- 10) M.T. BERGER and S.M. SELTZER; NBS Rep. 9836, 9837 (1968).
- 11) R.L. FORD and W.R. NELSON; SLAC-210 (1978).
- 12) A. TESH; Rad. Prot. Dosim., 11, 165 (1985).
- 13) IAEA; IAEA Technical Report Series No. 283 (1988).
- 14) B.J. MOYER; Report UCRL-9769 (1961).
- 15) T. NAKAMURA and T. KOSAKO; Nucl. Sci. Eng., 77, 168 (1981).
- 16) 小佐古敏荘, 関 泰; 日本原子力学会誌, 32, 33 (1990).
- 17) RSIC of ORNL; CCC-161/NMTC Code Packages (1976).
- 18) K.C. CHANDLER and V.W. ARMSTRONG; ORNL-4744 (1972).
- 19) 小佐古敏荘, 中村尚司, 道川太一, 加藤和明, 中沢正治, 辻本 忠, 木村逸郎, 関口 晃; 日本原子力学会誌, 24, 139 (1982).