

JAERI-Tech
98-009



大型放射光施設SPring-8の 放射線遮蔽と安全評価

1998年3月

浅野芳裕・笛本宣雄

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

大型放射光施設SPring-8の放射線遮蔽と安全評価

日本原子力研究所関西研究所大型放射光開発利用研究部
浅野 芳裕・笹本 宣雄

(1998年1月30日受理)

大型放射光施設SPring-8で用いられた遮蔽安全設計評価法についてまとめた。第3世代放射光施設であるSPring-8は、蓄積電子エネルギー8GeV、ビームエミッタス $5.5\text{nm}\cdot\text{rad}$ という世界最大級の性能を持つ放射光施設であり、同施設に対して適用された遮蔽安全評価の項目は多岐に渡り、しかもその手法には最新の知見も必要とされた。本レポートでは、SPring-8に対して使用された遮蔽安全評価法である、バルク遮蔽、放射光ビームライン遮蔽、スカイシャイン計算、ダクト及び迷路のストリーミング計算、空気や水、構造物の放射化計算、ビームの異常事象時の被曝評価について、それらの計算手法と計算条件を、それらの妥当性の検討結果とともに記述した。

Radiation Shielding and Safety Analysis for SPring-8

Yoshihiro ASANO and Nobuo SASAMOTO

Department of Synchrotron Radiation Facility Project
Kansai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Mikazuki-cho, Sayou-gun, Hyogo-ken

(Received January 30, 1998)

The methods of shielding design and safety analysis applied to SPring-8 are summarized. SPring-8, a third generation synchrotron radiation facility, is the facility with the highest stored electron energy of 8GeV and very low beam emittance of 5.5 nm · rad. Because of these distinguished features, a variety of radiation issues have to be taken up, requiring the latest information for analyses. In this technical report are described the calculational methods and the conditions for the following shielding matters as well as verification of the validity ; a bulk shielding, synchrotron radiation beamline shielding, skyshine, streaming through ducts and mazes, induced activities in air, cooling water and targets, and incident analysis due to abnormal beam losses.

Keywords: SPring-8, Synchrotron Radiation, Shielding Design, Safety Analysis

目 次

1.はじめに	1
2.加速器遮蔽計算手法	3
2.1 バルク遮蔽計算式	3
2.1.1 前方計算	3
2.1.2 側方計算	5
2.2 スカイシャイン計算法	12
2.3 ストリーミング計算式	26
2.3.1 ダクトストリーミング	26
2.3.2 迷路ストリーミング	28
2.4 放射化生成物の評価	34
2.4.1 空気の放射化	34
2.4.2 冷却水の放射化	36
2.4.3 固体の放射化	36
3.加速器遮蔽計算条件	40
3.1 ビーム損失の仮定	40
3.2 線量当量評価点と線源位置	44
3.3 電子ビーム異常事象時の被曝評価	56
3.4 放射化計算の条件	57
4.放射光ビームライン遮蔽	59
4.1 計算手法	61
4.2 シナリオ	65
4.2.1 運転モード	65
4.2.2 ハッチ壁漏洩計算	65
4.2.3 ビーム輸送パイプ	65
4.3 線量当量評価点及び評価対象線源	74
4.4 放射光源	82
4.5 グランドシャイン	84
5.まとめ	88
謝 辞	88
参考文献	89

Contents

1. Introduction	1
2. Accelerator Shielding Calculation Method	3
2.1 Formula for Bulk Shielding Calculation	3
2.1.1 Formula of Forward Direction for Bulk Shielding	3
2.1.2 Formula of Sideward Direction for Bulk Shielding	5
2.2 Skyshine Calculation	12
2.3 Streaming Calculation	26
2.3.1 Duct Streaming	26
2.3.2 Maze Streaming	28
2.4 Estimation of Induced Activity	34
2.4.1 Activity Induced in Air	34
2.4.2 Activity Induced in Cooling Water	36
2.4.3 Activity Induced in Target and Other Solid Materials	36
3. Calculated Condition of Accelerator Shielding	40
3.1 Beam Loss Assumption	40
3.2 Dose Estimation Point and Source Term	44
3.3 Dose Estimation for Incident by Abnormal Electron Beam	56
3.4 Calculated Condition of Induced Activity	57
4. Synchrotron Radiation Beamline Shielding	59
4.1 Method of Calculation	61
4.2 Scenario	65
4.2.1 Operational Mode	65
4.2.2 Leakage Dose Calculation Outside Hutch Wall	65
4.2.3 Beam Transport Pipe	65
4.3 Dose Estimation Point and Source Term	74
4.4 Synchrotron Radiation Source	82
4.5 Ground Shine	84
5. Concluding Remarks	88
Acknowledgements	88
References	89

1. はじめに

1988年に理化学研究所と日本原子力研究所とで共同チームが結成されて以来、大型放射光施設 SPring-8 の建設が進められ、1997年10月に放射光ビームラインが予定どおり順調に共用開始された。この間、共同チーム安全設計グループでは線形加速器、ブースターシンクロトロンおよび蓄積リングやその付属施設の遮蔽安全設計・評価を進めてきた。また、放射光ビームラインについても加速器本体と並行して遮蔽設計・安全評価を実施してきた。ビームラインについては今後も引き続き建設が予定されており、現在、設計・評価を継続中である。

SPring-8 は周長が 1.5 kmにもおよぶ蓄積リングを中心として、入射器系の線形加速器およびブースターシンクロトロンから構成される巨大な電子・陽電子加速器システムである。線形加速器は全長 140 m であり、電子で 1.2 GeV、陽電子 0.9 GeV まで加速可能である。その最大尖頭電流は電子で 100 mA、陽電子で 10 mA、繰り返し周波数は 60 Hz、パルス幅は 1 – 2 μ秒の性能を有する。線型加速器で所定のエネルギーまで加速された電子・陽電子は周長 396 m のブースターシンクロトロンに入射され、8 GeV まで加速された後、蓄積リングに入射される。蓄積リングは、その最大蓄積電流が 100 mA の性能を有する低エミッタンス ($5.5 \text{ nm} \cdot \text{rad}$) が特徴の加速器である。蓄積電子の寿命は 10 時間以上と評価されており、遮蔽設計上は安全側に 10 時間の寿命を仮定している。また、この蓄積リングには、23 本の偏向電磁石ビームライン、38 本の挿入装置ビームライン（そのうちの 4 本は長直線部）が設置できるよう設計されている。ここで得られる放射光ビームは、蓄積電子ビームが低エミッタンスでもあることから、未だかつて存在しなかった程の高輝度、高強度ビームであり、かつ高エネルギー成分が多いという特徴を有する。

このように SPring-8 は、放射光専用施設では蓄積電子エネルギーが 8 GeV と世界最大であり、かつ放射光施設として最適化されているため、既設の施設と比較して数多くの特徴を持っている電子加速器である。したがって、遮蔽設計・安全評価には従来の加速器遮蔽の知見に加え、新しい技術・手法も取り入れられており、さらには評価対象として放射光ビームラインが新たに付加されるなど、設計・評価は従来のものに比較して多岐に渡っている。

現在、SPring-8 の他に多くの第3、第4世代放射光施設が計画されている。これらの施設は小型であっても、放射線遮蔽の観点から見た厳しさは、

SPring-8 と同等かそれ以上であり、そのため SPring-8 と同様に最新の技術ときめ細かい遮蔽安全設計・評価が求められる。そこで、新たに開発されたものも含め、SPring-8 で用いられた手法、評価対象について簡潔にまとめ、今後の設計・評価の一助としたい。

2 加速器遮蔽計算手法

高エネルギーに加速された電子が正規の軌道を逸脱して周りの加速管等と衝突すると、電磁カスケード反応により制動放射線や中性子が生成し、電子は運動エネルギーを失い物質に吸収される。電子の加速エネルギーが 1GeV を超える加速器では、 μ 粒子の発生が無視できなくなる。また、超高真空の加速管内の残留ガスと電子の相互作用により発生するガス制動放射線も考慮しなければならない。制動放射線は極めて前方優位な非等方角度分布を示し、中性子は比較的弱い非等方角度分布を示す。また、 μ 粒子およびガス制動放射線は入射電子と同じ方向にしか発生しないことができる。図 2.1 に、高原子番号の物質に電子が入射したときの、0° および 90° 方向の制動放射線の発生角度分布を示す¹⁾。

したがって高エネルギー加速器遮蔽計算においては、これらの放射線の非等方性を精度良く再現する必要がある。しかし、0° 方向を含む全方向線源角度依存性を 1 種類の式で取り扱える遮蔽計算式は存在しないため、遮蔽計算は前方計算（0° 方向）と側方計算（90° 方向）に分けて行う必要がある。側方計算が適用されるのは、加速器施設の遮蔽構造の大半を占める、加速管に並行して設置される遮蔽体であり、前方計算が必要とされるのは、電子／陽電子コンバータ部近傍、ビームダンプ近傍や放射光取出部（いわゆるラッchet 部）等に対してである。

2. 1 バルク遮蔽計算式

遮蔽計算に用いた計算式を、前方計算と側方計算に分けて、放射線源の種類毎に以下にまとめて記述する。計算式で使用したパラメータの意味はまとめて後述する。

2. 1. 1 前方計算

当初 SPring-8 の前方遮蔽計算は、 $(1/r^2)$ 則による減衰を無視した Swanson の式¹⁾ を用いていた。これは、前方方向の主たる線源である制動放射線の前方指向性が極めて強く、ビーム自体の拡がりはほとんど無視できるとの考えに基づくものである。ESRF Safety Report²⁾ では $(1/r^2)$ 則を無視して前方計算を行っており、SPring-8 においてもより安全な評価の観点からこの考え方を採用したものである。ところが後になって Dinter 等の論文³⁾ で、前方の制動放射線の計算において $(1/r^2)$ 則を考慮すべきであることが示され、これを受け ESRF では beam end port の遮蔽計算の見直しを行い、結果として大幅な遮蔽の軽減化に成功した。電子ビーム損失により発生する制動放射線は、強い前方指向性を

示すものの有限の放出立体角を有すること、加えて、後述するように、同じく強い前方指向性を有する μ 粒子の前方計算式において $(1/r^2)$ の項が考慮されることから、SPRING-8ではESRFの式に $(1/r^2)$ の項を付加したものを採用した。

μ 粒子については遮蔽体による散乱効果を考慮したSwansonの式¹⁾を使用し、ガス制動放射線については、Ban等によるEGS-4を用いた評価値⁴⁾に基づいた評価法を採用した。

(イ) 中性子²⁾

高エネルギー中性子：

$$H_{nf} = (P/r^2) \times 4.0 \times \exp(-d/\lambda_2) \times 2.0^* \quad (\text{Sv/h}) \quad (2.1)$$

巨大共鳴中性子：

$$H_{nf} = (P/r^2) \times 22.7 \times \exp(-d/\lambda_3) \times 2.0^* \quad (\text{Sv/h}) \quad (2.2)$$

*¹⁾ 中性子の線質係数を従来の2倍とする。

(ロ) 光子²⁾

$$H_{\gamma f} = (P/r^2) \times 10^6 \times \exp(-d/\lambda_1) \quad (\text{Sv/h}) \quad (2.3)$$

前方計算の減弱距離を表2.1に、同線源項を表2.2に示す。なお、光子の減弱距離に関しては、前方、側方計算によらず、コンプトン・ミニマムに相当する値を採用した。

(ハ) μ 粒子¹⁾

$$H_\mu = \frac{25}{25 + X/X_0} \cdot \frac{X(E_e) - X}{X(E_e)} \cdot H_0 \quad (X(E_e) > X)$$

$$H_\mu = 0.0 \quad (X(E_e) \leq X) \quad (2.4)$$

ここで、 H_0 は遮蔽体の無いときの線量当量率であり、次式で与えられる。

$$H_0 = 8.0 \times 10^{-15} \times J \times E_e \times (1/r^2) \quad (\text{Sv/h}) \quad (2.5)$$

(2.4) 式で使用する放射長 X_0 を表 2.3 に、 μ 粒子の最大飛程 $X(E_e)$ を表 2.4 に示す。

(二) ガス制動放射線

高速電子ビームと加速管内の残留ガスとの電磁カスケード反応を通して生成する制動放射線による線量当量は、伴の評価値に基づいて評価した⁴⁾。伴等は、EGS4 コード⁵⁾を用いて、真圧度 $1 \mu\text{Pa}$ 、蓄積電流 1mA 、電子軌道長 1m の条件で蓄積リング内で生成するガス制動放射線数を、 100MeV 以上および 0.03MeV 以上に分けて電子エネルギーの関数として計算した。さらに同コードを用いて生体組織模擬物質の平板体系に 100MeV 以上の単位ガス制動放射線が入射した場合の吸収線量を、 1cm 線量当量および最大線量の 2 種類について評価した。蓄積リング内で生成する規格化ガス制動放射線数を表 2.5 に、吸収線量を表 2.6 に示す。これらの評価値を用いて以下の手順により、ガス制動放射線による遮蔽体前表面での吸収線量を計算した。

- 1) 真圧度 (μPa)、蓄積電流 (mA)、電子軌道長 (m) の各パラメータを表 2.5 の値に適用して、SPring-8 の条件に相当するガス制動放射線数を求める。
- 2) 表 2.6 に与えられた吸収線量に、1) で求めたガス制動放射線数をかけて、遮蔽体前表面の吸収線量を決定する。

表 2.6 には、直径 5cm の円内で平均化した線量と、ビームに垂直な広い面上での線量の面積分値の 2 種類が与えられており、ビーム軸と遮蔽評価点の位置関係からいずれか一方の値を選択する。SPring-8 の放射光取出部の遮蔽計算では、直径 5cm の円内の平均線量を採用した。その理由は、ビームの断面積が 1cm^2 以内という細いガス制動放射線のビームが、直接放射光取出部の遮蔽壁をたたくことはないと考えられるからである。

3) 上で決定した線量 D (pGy/h) は遮蔽体入射表面での線量当量率であり、この値を初期値として遮蔽体透過後の線量当量率 H_{br} を求めることができる。光子の前方計算式である ESRF の式を用いて遮蔽計算を行う。

$$H_{br} = D \times 10^{-12} \times \exp(-d/\lambda_1) / r^2 \quad (2.6)$$

λ_1 は (ロ) の光子の計算に用いた値と同じ光子減弱距離である。

2. 1. 2 側方計算

側方計算式としては、光子に対しては Swanson の式¹⁾、Jenkins の式⁶⁾、DESY の式⁷⁾ が、中性子に対しては Jenkins の式⁶⁾、O'Brien の式⁸⁾ 等が提案されてい

る。これらの中で光子と中性子に対する計算式が同一形式で与えられるということ、および生成する放射線源の角度依存性が考慮できることの2つの理由により、SPring-8 の側方計算として光子、中性子共に Jenkins の式を採用した。表 2.7 に Jenkins の式で用いる側方計算の光子、中性子減弱距離を与える。これらの式はスタンフォードの PEP における 15GeV 電子加速器を用いた遮蔽透過実験の結果に基づいて導出した半経験式である。15GeV の実験値をそれよりも低いエネルギー領域に適用するために、オリジナルな Jenkins の式に線源強度補正項 f_1 、 f_2 ⁹⁾ を導入している。

(イ) 光子

光子の減衰は、右辺第1項の制動放射線の減衰と、第2項の高エネルギー中性子による2次ガンマ線の減衰に分けて表現される。

a) 点状線源問題⁶⁾

$$H\gamma s = 3.6 \times 10^{-14} \cdot J \cdot E_e \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \left[\frac{133 \cdot \exp(-d/\lambda \sin\phi)}{(1 - 0.98 \cos\theta)^{1.2}} + \frac{f_1 \cdot 0.267 \cdot \exp(-d/\lambda_1 \sin\phi)}{(1 - 0.72 \cos\theta)^2} \right]$$

(30° < θ < 130°) (Sv/h) (2.7)

b) 線状線源問題¹⁰⁾

$$H\gamma s = \frac{3.6 \times 10^{-14}}{r} \cdot E_e \cdot \frac{J}{L} \cdot \left[\frac{\theta_2}{\theta_1} \left\{ \frac{\exp(-d \cdot \operatorname{cosec}\theta / \lambda)}{(1 - 0.98 \cos\theta)^{1.2}} + \frac{f_1 \cdot 0.267 \cdot \exp(-d \cdot \operatorname{cosec}\theta / \lambda_1)}{(1 - 0.72 \cos\theta)^2} \right\} d\theta \right]$$

(30° < θ < 130°) (Sv/h) (2.8)

(ロ) 中性子

中性子に関しては、高エネルギー中性子（平均エネルギー；約 100MeV）、中間エネルギー中性子（同；約 10MeV）、巨大共鳴中性子（同；約 1MeV）の3群近似である。

a) 点状線源問題⁶⁾

$$\begin{aligned}
 H_{ns} = & 3.6 \times 10^{-14} \cdot J \cdot E_e \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \left[\frac{f_1 \cdot \exp(-d/\lambda_1 \sin\phi)}{(1-0.72 \cos\theta)^2} \right. \\
 & + \left. \frac{f_2 \cdot 10 \cdot \exp(-d/\lambda_3 \sin\phi)}{(1-0.75 \cos\theta)} \right] \\
 & + 3.79 Z^{0.73} \cdot \exp \left(\frac{-d}{\lambda_2 \sin\phi} \right) \times 2 \quad (*) \\
 (30^\circ < \theta < 130^\circ) \qquad \qquad \qquad (Sv/h) \qquad \cdots \cdots \quad (2.9)
 \end{aligned}$$

b) 線状線源問題¹⁰⁾

$$\begin{aligned}
 H_{ns} = & \frac{3.6 \times 10^{-14}}{r} \cdot E_e \cdot \frac{J}{L} \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left[\frac{f_1 \cdot \exp(-d \cdot \text{cosec}\theta / \lambda_1)}{(1-0.72 \cos\theta)^2} \right. \\
 & + \left. \frac{f_2 \cdot 10 \cdot \exp(-d \cdot \text{cosec}\theta / \lambda_3)}{(1-0.75 \cos\theta)} \right. \\
 & + \left. 3.79 Z^{0.73} \cdot \exp \left(\frac{-d \cdot \text{cosec}\theta}{\lambda_2} \right) \right] d\theta \times 2 \quad (*) \\
 (30^\circ < \theta < 130^\circ) \qquad \qquad \qquad (Sv/h) \qquad \cdots \cdots \quad (2.10)
 \end{aligned}$$

ここで

$$\theta_1 = \tan^{-1}[r/(L/2)] \quad (\text{rad})$$

$$\theta_2 = \pi - \theta_1 \quad (\text{rad})$$

(*) 中性子の線質係数を従来の値の2倍とする。

(2.8)式と(2.10)式において右辺の角度 θ に関する積分は、ガウス・ルジヤンドル法を用いて数値積分により求める。

バルク遮蔽計算式(2.1)式～(2.10)式において使用したパラメータの意味は以下の通りである。

- H : 評価点における線量当量率 (Sv/h)
- J^* : ビーム損失割合 (electrons/s)
- E_e : 電子加速エネルギー (GeV)
- r : 線源から評価点までの距離 (m)
- d : 遮蔽体厚さ (cm)
- L : 線状線源の長さ (m)
- λ_i : 減弱距離 (cm) [i=1:光子、i=2:高エネルギー中性子、i=3:巨大共鳴中性子] {前方計算で使用}
- P : ビーム損失相当の出力 (kW)
- S : 線源 ($Sv \cdot h^{-1} \cdot m^2 \cdot kW^{-1}$)
- X_0 : 放射長 (cm)
- $X(E_e)$: μ 粒子の最大飛程 (cm)
- λ : 光子の減弱距離 (cm) : {側方計算で使用}
- λ_1 : 高エネルギー中性子の減弱距離 (cm) : {側方計算で使用}
- λ_2 : 巨大共鳴中性子の減弱距離 (cm) : {側方計算で使用}
- λ_3 : 中間エネルギー中性子の減弱距離 (cm) : {側方計算で使用}
- θ : 電子ビーム方向からの角度 (度)
- ϕ : 遮蔽体の傾き (度)
- f_1 : 高エネルギー中性子に対する線源低減補正係数
- f_2 : 中間エネルギー中性子に対する線源低減補正係数
係数 f_1 、 f_2 は、10 GeVでの線源強度に対する相対値で表現。(図2.2を参照)

*) ビーム損失率は次式で求められる。

$$J(e/s) = \frac{(尖頭電流値[A]) \times (パルス幅[s]) \times (繰返数[s^{-1}])}{(電子1個当たりの電荷量[C/e])} \\ \times \frac{\text{ビーム損失割合 [%]}}{100}$$

ここで電子1個当たりの電荷量は 1.602×10^{-19} (C/e) である。

(2.1)式～(2.10)式で得られる計算値は線量当量率 (Sv/h) であり、週間積算線量は、これらの値に50時間を限度として、線量当量率に加速器の使用時間をかけて得ることができる。

表2.1 前方バルク遮蔽計算に使用する減弱距離

しゃへい材	減弱距離 (cm)		
	$\lambda (\gamma)$	$\lambda (N)$	$\lambda (n)$
鉛	2.1	66.7	23.8
鉄	4.5	58.8	18.5
重コンクリート	9.6	32.3	13.3
普通コンクリート	19.0	41.8	17.7

$\lambda (\gamma)$: 光子、 $\lambda (N)$: 高エネルギー中性子
 $\lambda (n)$: 巨大共鳴中性子

表2.2 前方バルク遮蔽計算に使用する線源項

線 源	線源項 ($Sv \cdot h^{-1} \cdot m^2 \cdot kW^{-1}$)
光 子	1×10^6
巨 大 共 鳴 中 性 子	22.7
高エネルギー中性子	4.0

表2.3 加速器遮蔽材の放射長と密度

しゃへい材	放 射 長		密 度
	g / cm^2	cm	g / cm^3
鉛	6.4	0.6	11.3
鉄	13.8	1.8	7.8
重コンクリート	25.7	7.4	3.5
普通コンクリート	25.7	11.7	2.2

表2.4 加速器遮蔽材に対する μ 粒子の最大飛程

しゃへい材	R (g/cm ²)				密 度 (g/cm ³)
	0.3 GeV	1 GeV	7 GeV	10 GeV	
鉛	233	809	4857	6696	11.3
鉄	176	629	3968	5522	7.8
重コンクリート	161	575	3650	5085	3.5
普通コンクリート	144	526	3324	4624	2.2

表2.5 規格化ガス制動放射線数

残留ガス圧力 : $1 \mu\text{Pa}$ ($Z=10$)蓄積電流 : 1mA 直線軌道長 : 1m 温度 : 20°C

電子エネルギー (MeV)	光子数 (photons/s)	
	> 100MeV	> 0.03MeV
400	230	2100
600	310	2200
1000	420	2300
2500	620	2500
6000	830	2800
10000	950	2900

表2.6 制動放射線の平板ファントム入射の場合の線量

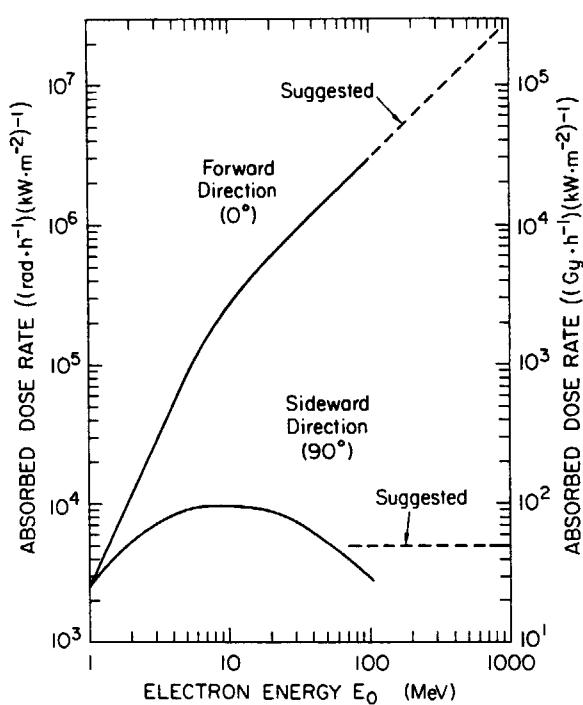
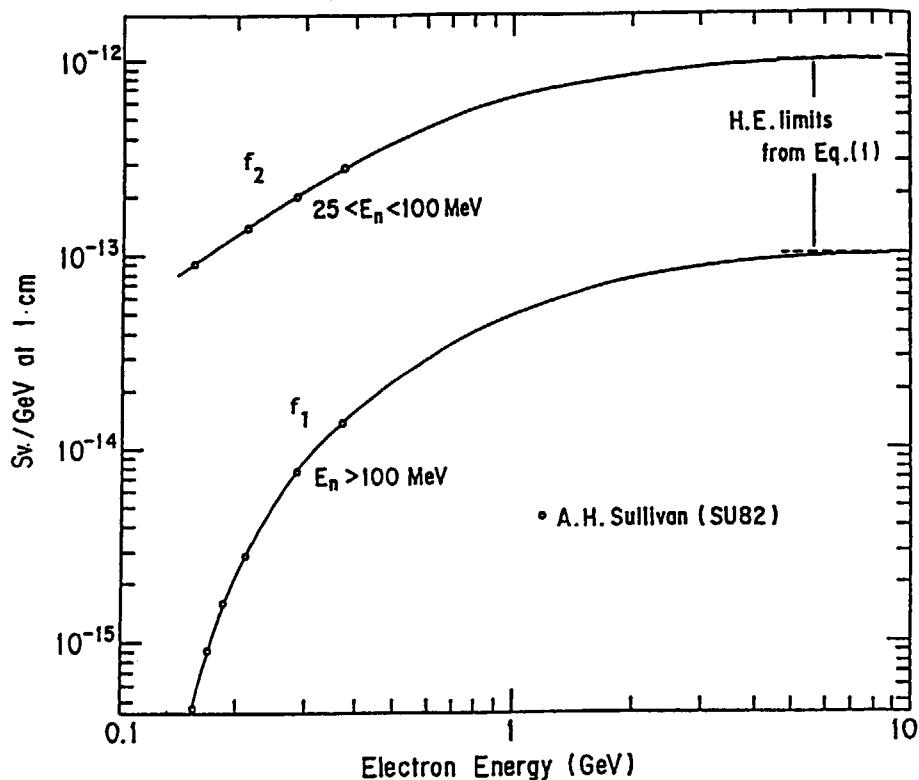
(100MeV以上の入射光子 1 個当たりに規格化)

最大光子 エネルギー (MeV)	ファントム中の吸収線量			
	(pGy · cm ² · photon ⁻¹) ビームに垂直な広い面 上での面積分値		(pGy · photon ⁻¹) ビーム軸を中心とした 直径 5 cm 円内の平均値	
	深さ 1 cm	最大値	深さ 1 cm	最大値
600	44	350	2.3	15
1000	36	350	1.9	16
2500	28	360	1.5	16
6000	24	380	1.3	17
10000	23	400	1.2	18

表2.7 側方バルク遮蔽計算に使用する減弱距離

しゃへい材	A_{eff}	密度 g/cm ³	減弱距離 (cm)			
			λ	λ_1	λ_2	λ_3
鉛	207.2	11.3	2.1	22.7	10.0	18.3
鉄	55.9	7.8	4.3	21.3	6.8	12.4
重コンクリート	25.5	3.5	13.0	36.6	9.7	17.7
普通コンクリート	21.0	2.2	18.9	54.6	13.7	25.0

 A_{eff} : 実効質量数 λ : 光子 λ_1 : 高エネルギー中性子、 λ_2 : 巨大共鳴中性子、 λ_3 : 中間エネルギー中性子、

図2.1 高原子番号の厚いターゲットからの制動放射線による吸収線量率¹⁾図2.2 厚い銅ターゲットに対する実効的線源強度²⁾。Jenkinsの式で用いる f_1 、 f_2 は、10 GeVでの値に対する相対値として与えられる。

2. 2 スカイシャイン計算法

敷地境界における線量当量は、施設から放出された漏洩放射線が空気中の原子との衝突、散乱により再び地上に降り注ぐスカイシャイン線と、大気中を透過して直接評価点に到達する直達線による線量当量の重ね合わせにより評価することができる。

SPring-8 のスカイシャイン計算式として半経験式の Stevenson-Thomas の式¹⁾¹⁾ を採用した。本式を用いるための前提条件として、遮蔽体外壁面での光子線量当量と中性子線量当量の合計がすべて中性子による寄与であり、さらにそこでのエネルギースペクトルを $1/E$ であると仮定した。また、中性子と空気との相互作用により生成する 2 次ガンマ線の影響は無視できるとした。以下に、これらの仮定の妥当性、すなわちこれらが安全側の仮定であることを検証した。

1) Stevenson-Thomas の式の適用の妥当性

遮蔽設計に用いる計算式選択の基準は、その取扱いが単純であり、合理的な精度の範囲で常に安全側の結果を与えるという点である。この観点からよく使われている Stevenson-Thomas の式と Rindi-Thomas の式¹⁾²⁾ について比較計算を行い、その結果を図 2.3 に示した。この図から、距離の増大とともに、Stevenson-Thomas の式が徐々に Rindi-Thomas の式を過大評価する傾向を示すことがわかる。この結果に基づき Stevenson-Thomas の式を採用した。

2) 光子線量当量を中性子線量当量で代表させることの妥当性

Stevenson-Thomas の式を使用するためには、光子による全線量当量への寄与分を中性子の寄与に置き換える必要がある。高エネルギー加速器施設の厚い遮蔽体から漏洩する中性子と光子のスペクトルは近似的に各々 $1/E$ 、 $1/E^2$ とすることができる。これらのスペクトルを用いて、遮蔽体表面において同一の線量当量を与える中性子束と光子束を線源とし、簡易スカイシャイン計算コード SHINE-II¹⁾³⁾（本コードが取り扱うエネルギー上限値は 20 MeV）を用いて、中性子と光子のスカイシャイン計算を行った。その結果を図 2.4 に示す。この図から SPring-8 の計算の対象となる距離 1000m までの範囲では、常に中性子が光子よりも過大評価となることは明らかである。したがって光子線量当量を中性子線量当量に置き換えることは安全側の仮定となる。

3) 2 次ガンマ線無視の仮定の妥当性

SHINE-II コードを用いて、中性子とそれによる 2 次ガンマ線のスカイシャイン計算を別個に行い、中性子線量当量と 2 次ガンマ線線量当量の比較を行った。その結果、2 次ガンマ線線量当量の割合は距離と共に増大するが、300m を超え

るとほぼ一定の約 0.3 %以下の値に漸近する傾向を示した。このことから 2 次ガンマ線が中性子に比べて十分無視しうる量であることが分かった。

4) $1/E$ 中性子スペクトルの仮定の妥当性

6.3 GeV 陽子シンクロトロン BEVATRON での漏洩中性子スペクトルの実測値¹⁴⁾は図 2.5 に示すとおりであり、次式で関数近似できる。

$$\Phi(E) = 1/E + 1/E^{1.8} \quad ; \quad (\text{境界エネルギー: } \sim \text{数 } 10 \text{ MeV})$$

このスペクトルと比較して、全エネルギー領域にわたり仮定した $1/E$ スペクトルは相対的に高エネルギー領域が強調されたスペクトルとなり、したがって安全側の線源条件となる。

直達線を含むスカイシャイン計算は、基本的には、①電子ビーム損失により発生した二次放射線（光子、中性子）による遮蔽外表面での線量当量率の評価、②線量当量率から漏洩放射線束への変換、③点状線源を仮定したスカイシャイン線量当量、直達線線量当量の計算、とから構成される。以下にスカイシャイン計算の各ステップを具体的に記述する。

S-1) 遮蔽外表面での線量当量率

加速管内における電子ビーム損失に起因する遮蔽体外表面での中性子、光子の線量当量率を、Jenkins の式 { (2.7) ~ (2.10) 式 } を用いて計算する。図 2.6 はマシン収納部等の断面図を示したものであり、電子ビームの進行方向は紙面に垂直であるとする。同図から明らかなように、外表面での線量当量率は均一ではなく一定の分布を持つため、この分布を考慮して、線量当量率に遮蔽体の表面積をかけた線量面積分値を計算する。

ある一点でビーム損失が発生した時の左壁外壁での線量当量率を Jenkins の式で計算する。この時、実効的遮蔽厚さ及び線源-評価点間の距離により外壁での線量当量率は分布を持つため、それらを Q_1, Q_2, Q_3, \dots と表す。図 2.6 の遮蔽体を左側から見た平面図上に描かれた円環状の線量当量率等高線図を図 2.7 に示す。各円環領域での線量当量率の代表値を Q_i として、その値に円環領域の面積をかけ、それを全領域について合計することにより、線量面積分値を計算する。

$$Q_0 = Q_i \times \pi r_i^2 + \pi \sum Q_i \times (r_i^2 - r_{i-1}^2) \quad (\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^2) \quad (2.11)$$

円環領域をどこまで考慮するかは、結果が明らかな過小評価とならないようにケースバイケースで判断して決めればよい。同様に、右側面、天井面についても Q_0 を求める。なお、(2.11)式で用いた線量当量率は、光子と中性子の値を合計した全線量当量率であるが、これが全て中性子の寄与によるものであるという安全側の仮定を行った。

S-2) 線量当量率から中性子束への変換

遮蔽外表面の全線量当量率が全て $1/E$ スペクトルを持つ中性子の寄与によるものであると仮定し、線量当量率に相当する中性子束を以下の手順により求めれる。Stevenson 等¹¹⁾ は $1/E$ スペクトルを前提に、電子加速エネルギーの関数として中性子束一線量当量率の換算係数 a [nrem/(n · cm⁻²)] を与えている。これらの値を表 2.8 に採録して示す。

$X(\text{Sv}/\text{h})$ に相当する中性子束 ϕ は、 $X(\text{Sv}/\text{h}) = X \times 10^{11}$ (nrem/h) であるから、換算係数 a を用いて以下のように求められる。

$$\begin{aligned}\phi &= X \times 10^{11} / a && (\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}) \\ &= X \times 10^{11} / a / 3600 && (\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \\ &= 2.778 \times 10^7 \times X / a && (\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})\end{aligned}\quad (2.12)$$

(2.11)式により求めた線量面積分値 Q_0 (Sv · cm² · h⁻¹) は単位ビーム損失率 (=1.0e/s) に相当する値であるから、ビーム損失率 J に相当する毎秒当たりの中性子放出数 S は以下の式により求められる。

$$S(\text{n} \cdot \text{s}^{-1}) = 2.778 \times 10^7 \times Q_0 \times J / a \quad (2.13)$$

S-3) スカイシャイン線量の計算

上で得られた線源強度 S を持つ点状線源を仮定して、以下の Stevenson-Thomas の式によりスカイシャイン線量計算を行う。

$$H_{\text{sky}}(r) = 3 \times 10^{-13} \cdot \exp(-r/\lambda) \cdot (1/r^2) \cdot S \cdot 3600 \times 2.0 \quad (\text{Sv}/\text{h}) \quad (2.14)$$

ここで r : 線源から評価点までの距離(m)

λ : 実効空中減弱距離(m)

S : 線源強度(n · s⁻¹)

である。 λ は Stevenson 等¹¹⁾ により、 $1/E$ スペクトルの上限中性子エネルギー

の関数として与えられている。(図 2.8 参照)

(2.14)式は 1 カ所のビーム損失に起因する線源に基づく線量を与えるもので、SPring-8 のように広大な範囲に線源が分布している場合は、それらをまとめて 1 カ所の線源とすると、計算誤差の増大を招く恐れがある。そこで SPring-8 の計算では図 2.9 に示すように施設全体を 26 カ所の区域に分割して、それぞれの区域を点状線源とする線量当量を合計することにより評価点の線量としている。

S-4) 直達線線量の計算

(2.13)式で得られる中性子線源強度は、左壁、右壁、天井方向からの漏洩放射線を合計したものであるが、直達線線量当量計算のための線源は、評価点を直接見込む遮蔽外壁面からの漏洩線だけを考慮すればよい。その値を $S'(n/s)$ とすると、 $1/E$ スペクトルを仮定して直達線線量 H_{dir} は次式により与えられる。

$$H_{dir}(r) = \left\{ S' \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{(100 \cdot r)^2} \cdot \exp\left(-\frac{r}{\lambda}\right) \cdot C \int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{R(E)dE}{E} \right\} \cdot 2 \times 3600 \quad (\text{Sv/h}) \quad (2.15)$$

ここで $R(E)$; 線束一線量変換係数 $[\text{Sv} \cdot h^{-1} / (n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1})]$

表 2.9、表 2.10 に ICRP 51¹⁵⁾ による線量当量一線束変換係数値を示す。また、参考資料として ICRP 21 に与えられた、高エネルギー領域から低エネルギー領域までを網羅した変換係数のグラフを図 2.10 に示す。

C ; $1/E$ スペクトルの全強度を 1.0 に規格化するための定数

$$C = \frac{1}{\int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{dE}{E}} = \frac{1}{\ell n(E_{max}) - \ell n(E_{min})} \quad (2.16)$$

(2.15)式に現れる $\int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{R(E)dE}{E}$ の積分は、 E_{max} を電子加速エネルギーに、 E_{min} を 1eV (固定) とし、 $E_{max} \sim E_{min}$ のエネルギー領域を複数のエネルギー領域に分割し、第 i 番目のエネルギー領域での変換係数の代表値 R_i を用いて

次式により計算する。

$$\begin{aligned}
 \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \frac{R(E)dE}{E} &= \sum_{i=1}^{\max} R_i \cdot \int_{E_i}^{E_{i+1}} \frac{dE}{E} \\
 &= \sum_{i=1}^{\max} \left\{ \frac{R_i}{\ell n(E_{i+1}) - \ell n(E_i)} \right\}
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

(2.15) 式を用いて得られる線量は、スカイシャイン線量の場合と同様に 1 つの線源の寄与によるものである。したがって評価点における直達線線量は図 2.5 に示した 26 カ所の線源区分からの寄与を合計したものとして与えられる。

5) 敷地境界線量当量

図 3.13 に示す敷地境界上の評価点における 3 カ月の積算線量当量 H_o は、(2.14) および (2.15) 式で得られる線量当量を合計し、3 カ月間に想定される SPring-8 の運転時間 1375 時間をかけて求めることができる。

$$H_o(r) = \{H_{sky}(r) + H_{dir}(r)\} \times 1375 \quad (\text{Sv}/3 \text{ 月}) \tag{2.18}$$

表2.8 $1/E$ 中性子スペクトルの上限エネルギー E_0 に対する
中性子束当たりの線量当量¹¹⁾

上限エネルギー (MeV)	スペクトル平均化線量当量 [nrem/(n · cm ⁻²)]
1.6	3.9
2.5	4.8
4.0	5.6
6.3	6.4
10	7.2
16	7.9
25	8.6
40	9.4
63	10.1
100	10.9
160	11.7
250	12.5
400	13.4
630	14.6
1000	16.2
1600	18.4
2500	21.2
4000	25.0
6300	30.0
10000	36.5

表2.9 I C R U球に面平行ビームとして入射する中性子についての、
主軸上深さ0.07mm、3mmおよび10mmにおける単位フルエンス
当たりの線量当量⁽¹⁵⁾

中性子 エネルギー (MeV)		換 算 係 数 (10^{-12} Sv cm^2)		
		0.07mm	3 mm	10 mm
2.5	10^{-8}	7.20	8.80	8.00
1.0	10^{-7}	5.50	8.50	10.4
1.0	10^{-6}	3.70	6.90	11.2
1.0	10^{-5}	2.80	5.30	9.20
1.0	10^{-4}	2.50	4.40	7.10
1.0	10^{-3}	2.80	3.90	6.20
1.0	10^{-2}	8.90	9.20	8.60
2.0	10^{-2}	18.2	18.3	14.6
5.0	10^{-2}	46.6	48.1	35.0
1.0	10^{-1}	95.0	95.0	69.0
2.0	10^{-1}	168	186	126
5.0	10^{-1}	219	266	258
1.0	10^0	292	332	340
1.5	10^0	292	344	362
2.0	10^0	283	335	352
3.0	10^0	305	358	380
4.0	10^0	329	387	409
5.0	10^0	301	358	378
6.0	10^0	302	364	383
7.0	10^0	312	384	403
8.0	10^0	341	407	417
1.0	10^1	368	446	446
1.4	10^1	359	520	520
1.7	10^1	421	610	610
2.0	10^1	516	670	650

ここに示した換算係数の値は、1985年以前の定義に基づく中性子の線量当量に関するものである。1985年に中性子について再定義された(ICRP,1985)線量当量を求めようとする場合は、これらの換算係数に係数2をかけるべきである。

表2.10 厚さ30cmの半無限平板ファントムに面平行ビームとして入射する中性子についての、単位フルエンス当たりの最大線量当量、および、深さ10mmにおける単位フルエンス当たりの線量当量⁽¹⁵⁾

中性子 エネルギー (MeV)	換算係数 (10^{-10} Sv cm 2)	
	Max.	10 mm
2	3.30	3.30
10	4.10	3.60
20	4.25	3.66
60	4.50	3.60
100	4.69	3.51
200	5.08	2.95
400	6.30	2.80
700	10.5	7.09
1 000	13.1	8.10
1 500	15.8	9.70
3 000	19.5	11.5
5 000	23.4	12.3
10 000	30.3	12.8
30 000	44.0	13.0
100 000	55.0	14.0

ここに示した換算係数の値は、1985年以前の定義に基づく中性子の線量当量に関するものである。1985年に中性子について再定義された(ICRP,1985)線量当量を求めようとする場合は、これらの換算係数に係数2をかけるべきである。

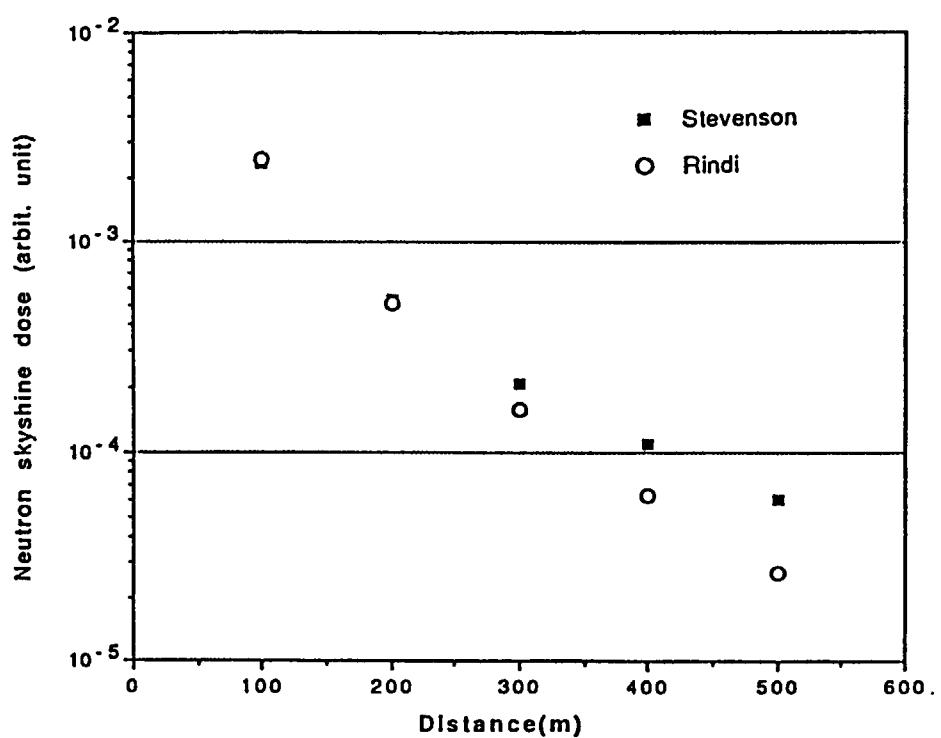


図2.3 Stevenson-Thomasの式とRindi-Thomasの式の比較

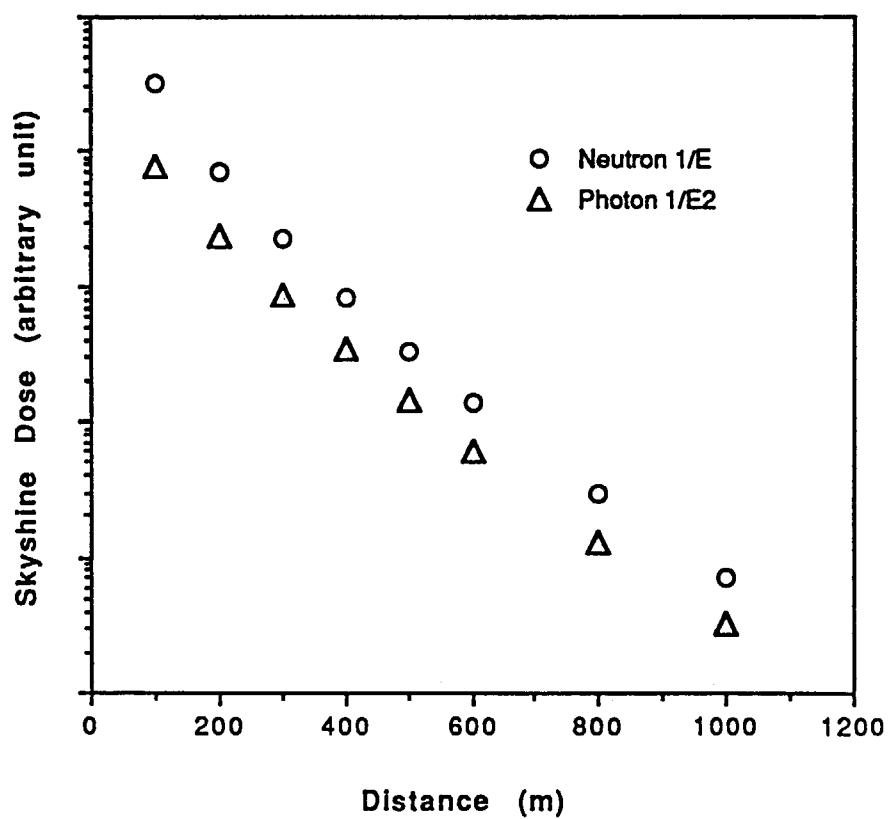


図2.4 中性子と光子のスカイシャイン線量の比較

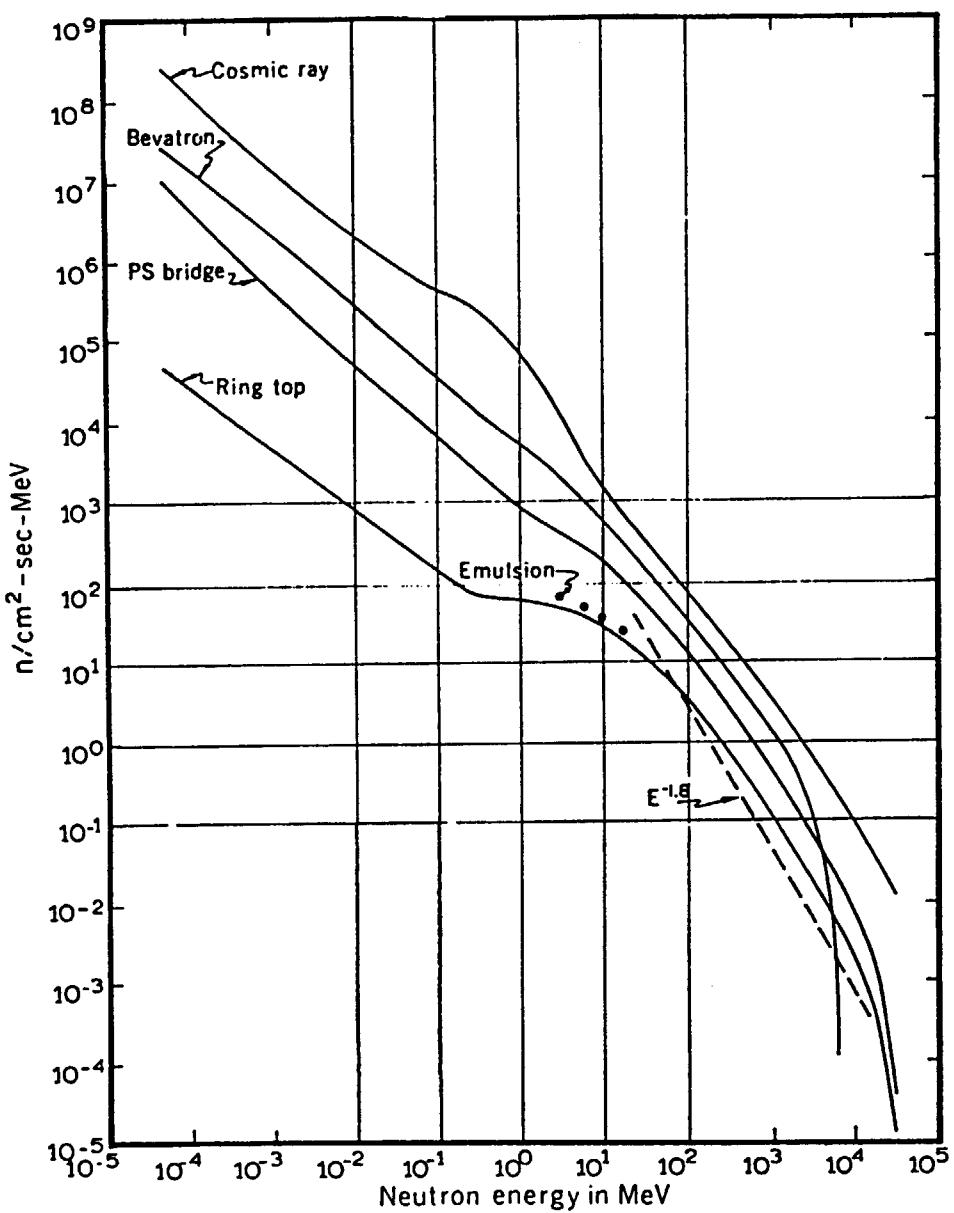


図2.5 典型的な高エネルギー加速器からの中性子スペクトル

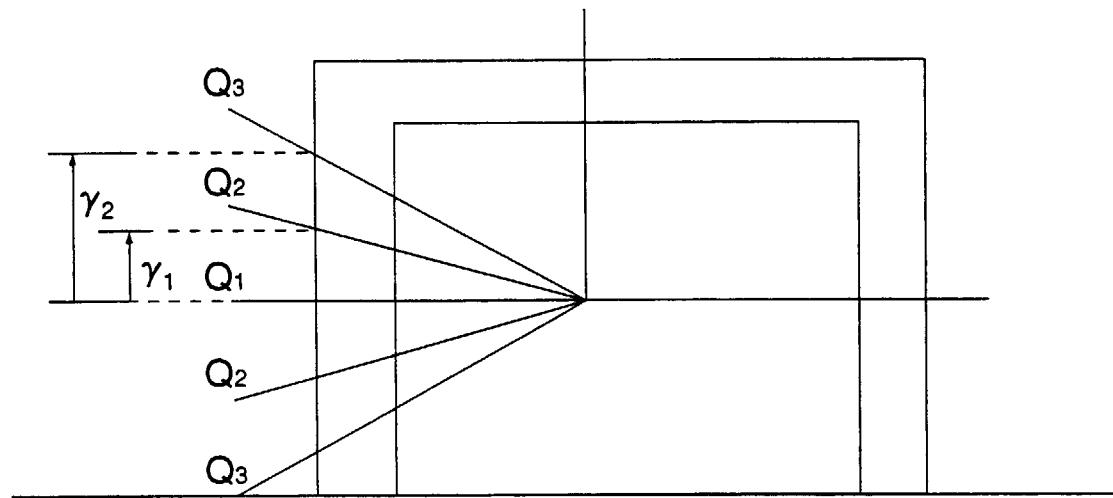


図2.6 マシン収納部断面図

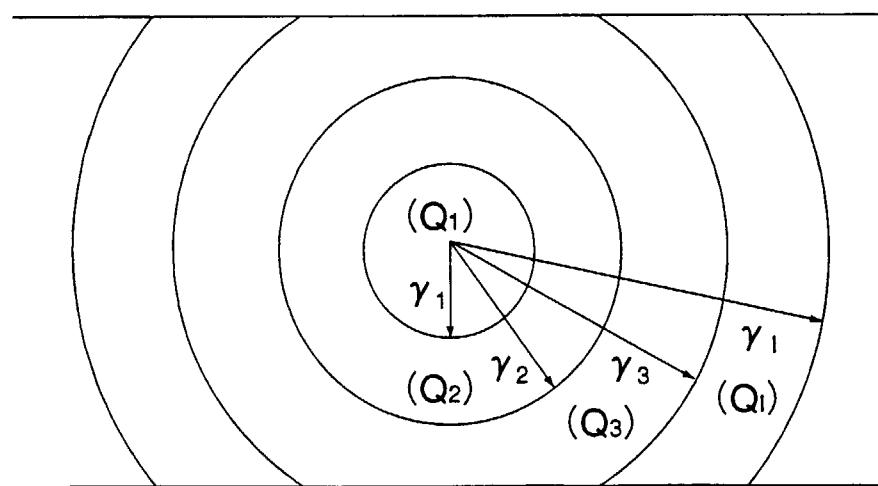


図2.7 側壁面での線量当量率等高線図

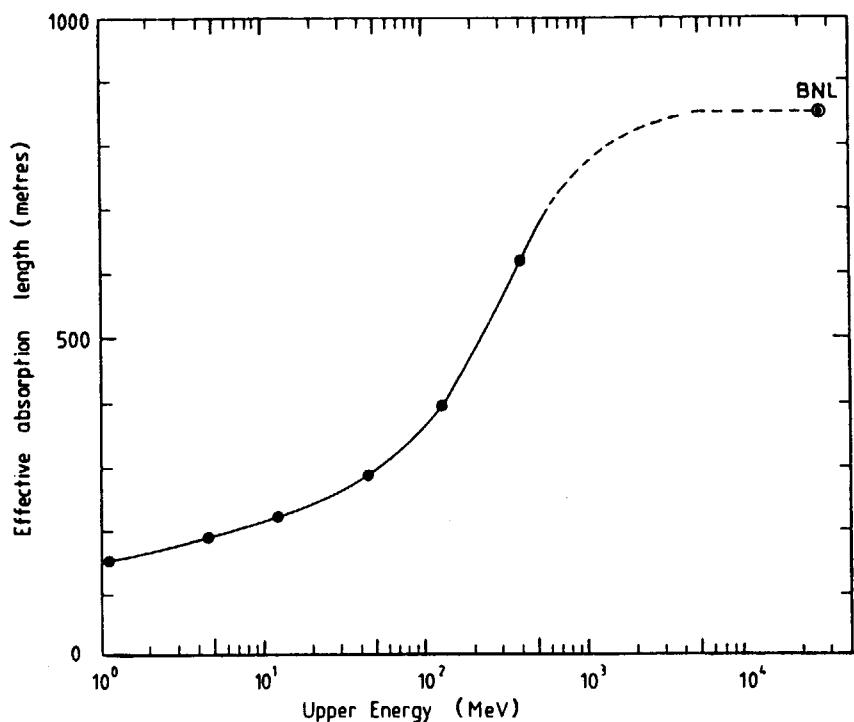


図2.8 $1/E$ スペクトルの上限エネルギー E_0 の関数としての実効減衰距離 $\lambda^{(1)}$

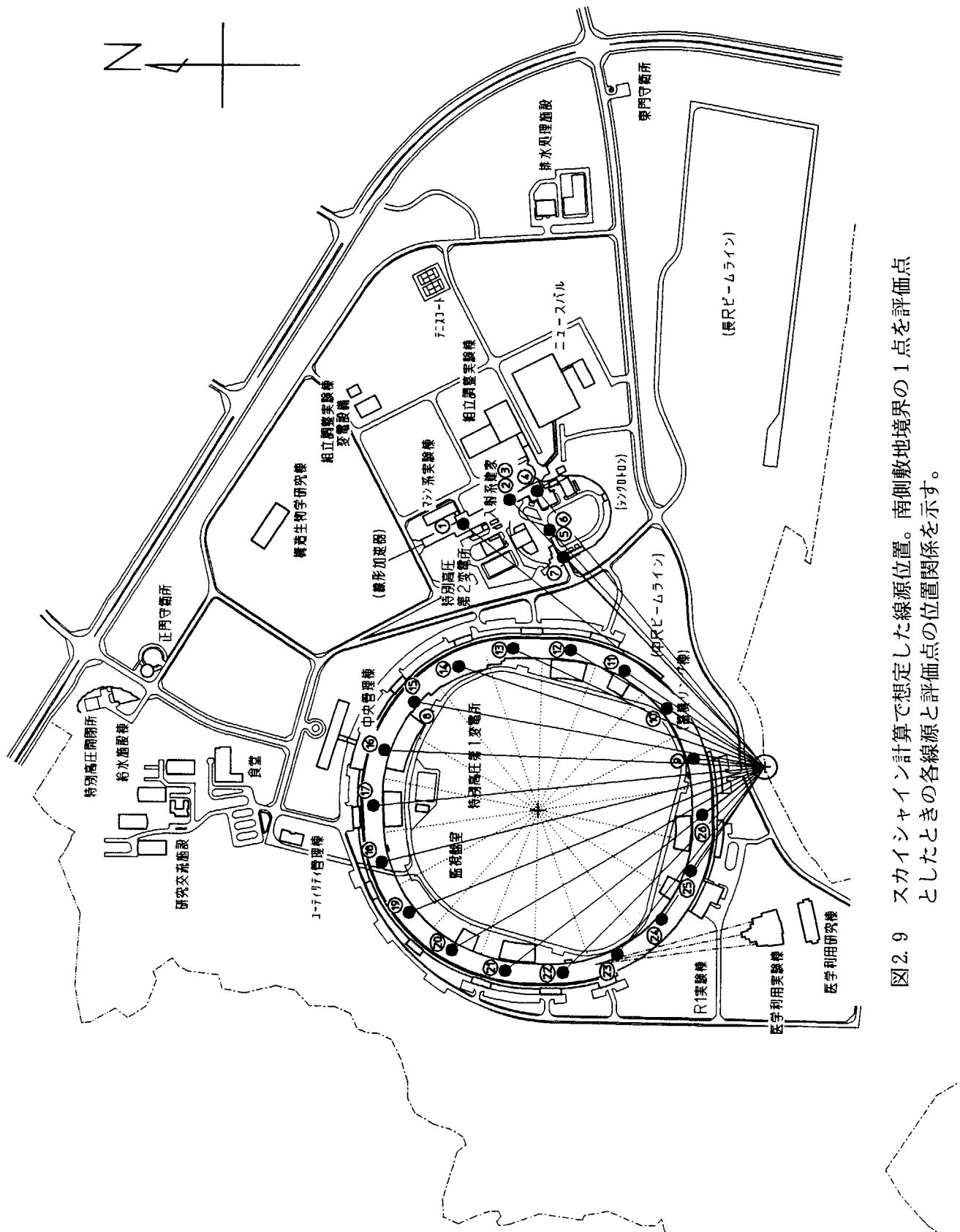
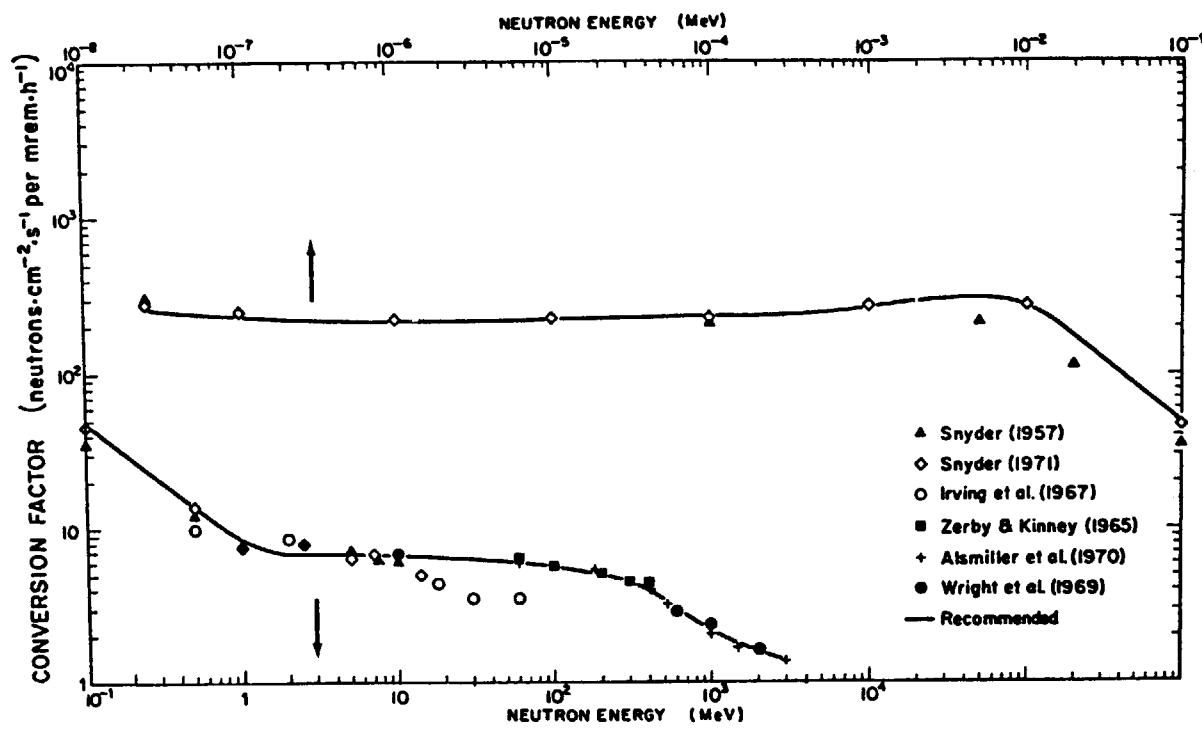


図2.9 スカイシャイン計算で想定した線源位置。南側敷地境界の1点を評価点としたときの各線源と評価点の位置関係を示す。

図2.10 線量当量／中性子束変換係数¹⁾

2. 3 ストリーミング計算式

2. 3. 1 ダクトストリーミング

概して SPring-8 の放射線場においては、ダクト入口での線量当量は中性子と光子の成分がほぼ同程度であり、ダクトストリーミングの計算では両者を等しく考慮する必要がある。ところが高エネルギー加速器施設を対象としたダクトストリーミング計算式がいくつか提案されているが、中性子と光子を統一的に取り扱える計算式は見あたらない。そこで、原子炉のストリーミング計算で従来幅広く使用してきた Simon-Clifford の式¹⁶⁾を SPring-8 へ適用することとし、その適用可能性を検討した。この式は中性子、光子の両方についてダクト内の減衰挙動を表現するもので、以下に示すように両者の差は定数係数 2 のみである。

(1) 光子

$$\begin{aligned} \Phi / \Phi_0 = & \exp(-\Sigma_g \cdot L_i) \cdot (1/8) \cdot (d/L_i)^2 \\ & \times \prod \{ \exp(-\Sigma_g \cdot L_i) \cdot (1/8) \cdot (d/L_i)^2 \cdot (\alpha / \sin \theta_i) \} \end{aligned} \quad (2.19)$$

(2) 速中性子

$$\begin{aligned} \Phi / \Phi_0 = & 2 \times \exp(-\Sigma_n \cdot L_i) \cdot (1/8) \cdot (d/L_i)^2 \\ & \times \prod \{ \exp(-\Sigma_n \cdot L_i) \cdot (1/8) \cdot (d/L_i)^2 \cdot (\alpha / \sin \theta_i) \} \end{aligned} \quad (2.20)$$

ここで	Φ_0 :	ダクト入口での放射線束 ($c m^{-2} \cdot s^{-1}$)
	Φ :	ダクト出口での放射線束 ($c m^{-2} \cdot s^{-1}$)
	d :	ダクト直径 ($c m$)
	L :	ダクト長さ ($c m$)
	Σ_g :	光子除去断面積 ($c m^{-1}$)
	Σ_n :	速中性子除去断面積 ($c m^{-1}$)
	θ :	屈曲角度 (度)
	α :	全アルベド

である。速中性子の定数係数 2 は、速中性子に対してのみ考慮される安全係数である。(2.19)、(2.20)式において全アルベド α を速中性子に対して 1.0、光子に対して 0.1 を仮定すれば十分に安全側の結果を与えることが一般に知られている。

オリジナルの Simon-Clifford の式では、ダクト内壁での放射線の多重散乱を考慮しているが、そこでの反射率を 0.1 のオーダーであると仮定すると多重散乱成分は無視できて、その結果、上式に示す通りのダクト形状のみで決定され

る非衝突線束の式が得られる。このことは、定性的には本式が原子炉に比して高エネルギー放射線を取り扱う SPring-8 の計算にも適用可能であることを示している。

次に定量的に適用可能性について検討する。秦はダクト内の中性子、光子のストリーミングを、そこでの直達線スペクトルと散乱線スペクトルの計算に基づいて評価する方法を導出した¹⁷⁾。この方法に基づいて DUCT コードが開発され、原子炉のストリーミング解析によりその精度は検証されている。そこでまず本コードを用いて光子についての計算値を、高エネルギー加速器施設およびアイソトープ線源を用いたストリーミングの実測値および Tesch の式¹⁸⁾と比較した。その比較を図 2.11 に示す。これらの比較から三者の一致は概ね良好であり、本コードが高エネルギー加速器での光子ストリーミング問題に対して適用可能であることが分かった。そこでつぎに、口径が 20 cm のダクトに対してダクト長 200 cm までの範囲で、光子及び中性子のストリーミング計算を Simon-Clifford の式および DUCT コードを用いて行った。DUCT コードの計算において仮定した線源スペクトルは、光子、中性子に対してそれぞれ $1/E^2$ 、 $1/E$ である。光子および中性子計算の結果を比較したものをそれぞれ図 2.12、図 2.13 に示す。これらの図が示すように、光子の計算では両者の一致は良好であり、一方、中性子については Simon-Clifford の式は常に DUCT コードの値を過大評価しており、両者の差は距離と共に増大し、ダクト長 200 cm 位置で約 3 倍の過大評価となる。以上の結果から、Simon-Clifford の式を SPring-8 のストリーミング計算に適用することは妥当であると結論づけられる。

SPring-8 に用いられる各種のダクトは、原則的に天井面、側壁面に垂直に貫通し、しかもダクト出口からは線源が直視できない構造となっている。そのため放射線はダクト入口に対して斜めに入射するのが普通であり、入射部近傍での放射線の散乱効果等を考慮することが、合理的なストリーミング計算を実施する上で必要である。そこでこれらの効果を補正係数により考慮した Simon-Clifford の式を新たに導出した。

図 2.14 はダクトが側壁面を貫通する場合の 3 次元体系図である。図 2.15 はダクトが天井面にある場合、図 2.16 は側壁面にある場合の体系の立面図である。評価点は図 2.16 に示すように軸上のダクト出口面とダクト開口部から一定距離はずれた点の 2 点を想定した。

$$D_N = D_N^0 \times F_1 \times \alpha_N \times F_2 \times (1/4) (d/L)^2 \times F_3 \quad (2.21)$$

$$D_\gamma = D_\gamma^0 \times F_1 \times \alpha_\gamma \times F_2 \times (1/8) (d/L)^2 \times F_3 \quad (2.22)$$

ここで

D_N^0	: ダクト入口での中性子線量率(Sv/h)
D_γ^0	: ダクト入口での光子線量率(Sv/h) D_N^0, D_γ^0 は Jenkins の式から計算する。
F_1	: 斜め入射によるダクト入口の見込角補正係数 $= \cos \theta$
α_N	: 入射角及びエネルギー関数のコンクリート全中性子アルベド (ここで入射角は垂線からの角度)
α_γ	: 入射角及びエネルギー関数のコンクリート全光子アルベド (ここで入射角は垂線からの角度)
θ	: 線源からダクト入口面への入射角 (平面からの角度) $\theta = \tan^{-1}\{\delta_x / \sqrt{(\delta_y)^2 + (\delta_z)^2}\}$
δ_x	: 線源から見たダクト入口位置の X 軸成分 (cm)
δ_y	: 線源から見たダクト入口位置の Y 軸成分 (cm)
δ_z	: 線源から見たダクト入口位置の Z 軸成分 (cm)
F_2	: ダクト入口コーナー部透過成分補正係数 $F_2 = 1 + \{(d/2)/(\mu/\cos \theta)\}^{-1}$ $\mu : \mu_N$ (中性子／マクロ除去断面積) μ_γ (光子／減弱距離)
d	: ダクト直径 (cm)
L	: ダクト長さ (cm)
F_3	: $= 1.0$ ($\delta_r \leq d/2$) $= \{(d/2)/\delta_r\}^2$ ($\delta_r > d/2$)
δ_r	: ダクト出口中心から評価点までの距離 (cm)

2. 3. 2 迷路ストリーミング

迷路構造をした通路のストリーミング計算に採用した計算式は光子及び中性子に対する Tesch の式^{17, 18)}である。ただし、中性子の式については、線源が第 1 脚末端から直接は見込むことはできないとして第 2 脚目以降の式を用いた。

(1) 光子の式

イ) 第 1 脚目の減衰割合 (線源を末端から直接見込まない)

$$g_1 = 0.22 \times (d + L_1)^{-3.0} \quad (2.23)$$

ここで d : 通路幅の半分の長さ (m)
 L_1 : 第 1 脚の脚長 (m)

である。

ロ) 第2脚目以降の減衰割合

$$g_i = 0.22 \times (d + L_i)^{-2.6} \quad (i=2, 3, \dots) \quad (2.24)$$

ここで L_i は第 i 脚の脚長 (m) である。

(2) 中性子

第 i 脚目の減衰割合

$$f_i = 2 \cdot \frac{\exp(-L_i/0.45) + 0.022A^{1.8} \exp(-L_i/2.35)}{1 + 0.022A^{1.8}} \quad (2.25)$$

ここで A は通路の断面積 (m^2) 、 L_i は第 i 脚の脚長 (m) である。ただし、最終脚の評価式の場合のみ定数係数 2 は無視される。

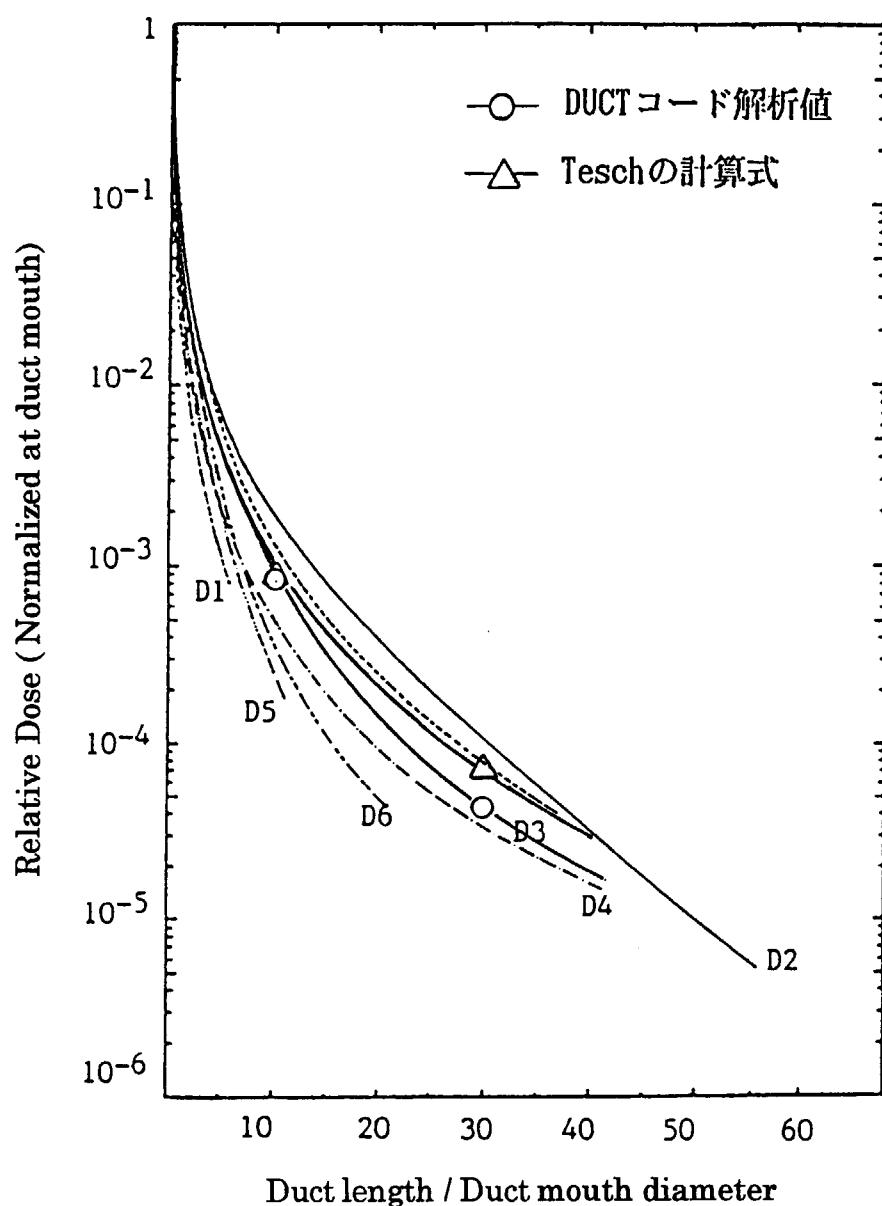


図2.11 DUCTコード、Teschの計算式と実測値との比較。線量当量はすべてダクト入口の値に規格化したものである。図中に示した実験値の識別記号(D1～D6)の説明は下記の通りである。

- D1 : 2,250 MeV 電子線型加速器 ($e-\gamma$ 迷走放射線)
- D2 : 3.7～5.3 GeV 電子、陽電子蓄積リング DORIS 入射点近傍 ($e-\gamma$ 迷走放射線)
- D3 : 蓄積リング DORIS (放射光)
- D4 : 17 GeV 電子、陽電子蓄積リング PETRA (放射光)
- D5 : ^{137}Cs (662 keV)
- D6 : ^{137}Cs (662 keV)

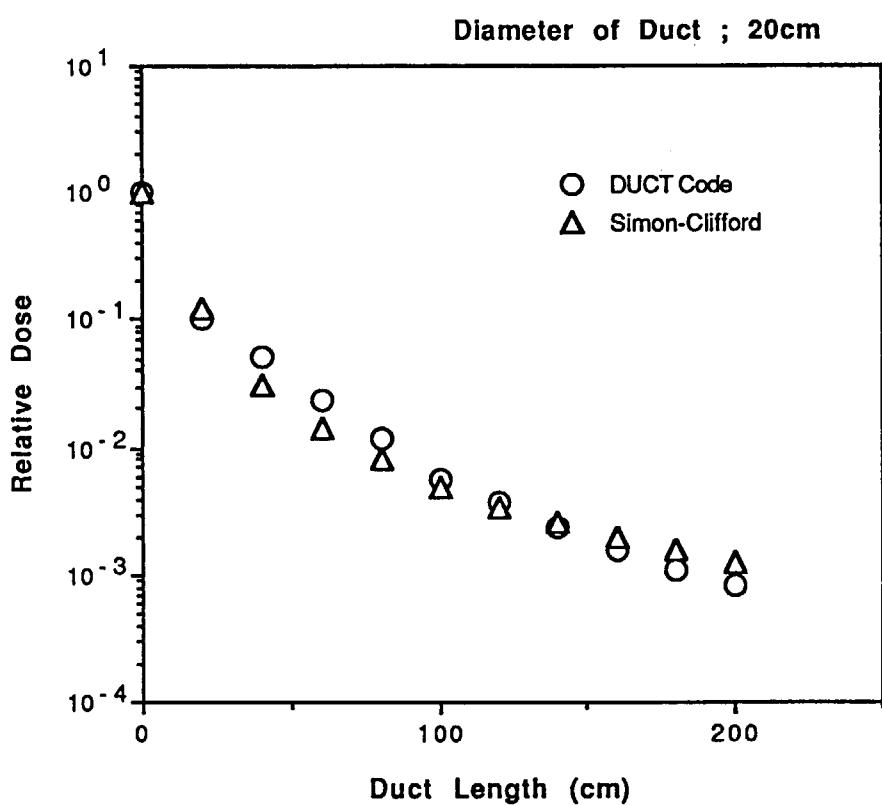


図2.12 Simon-Cliffordの式とDUCTコードの比較（光子ストリーミング）

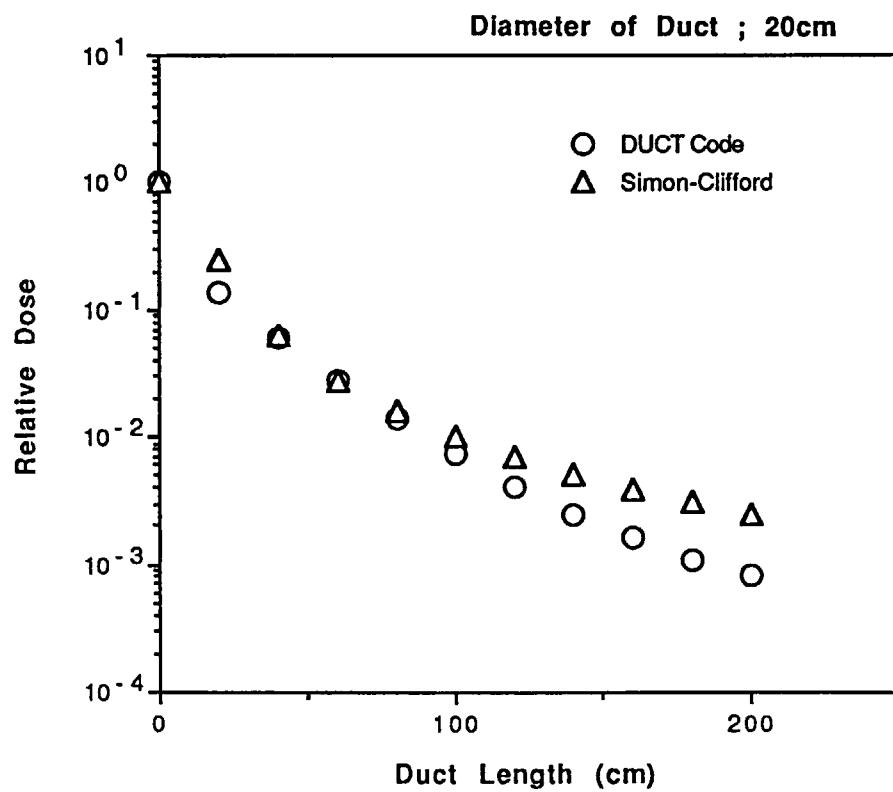


図2.13 Simon-Cliffordの式とDUCTコードの比較（中性子ストリーミング）

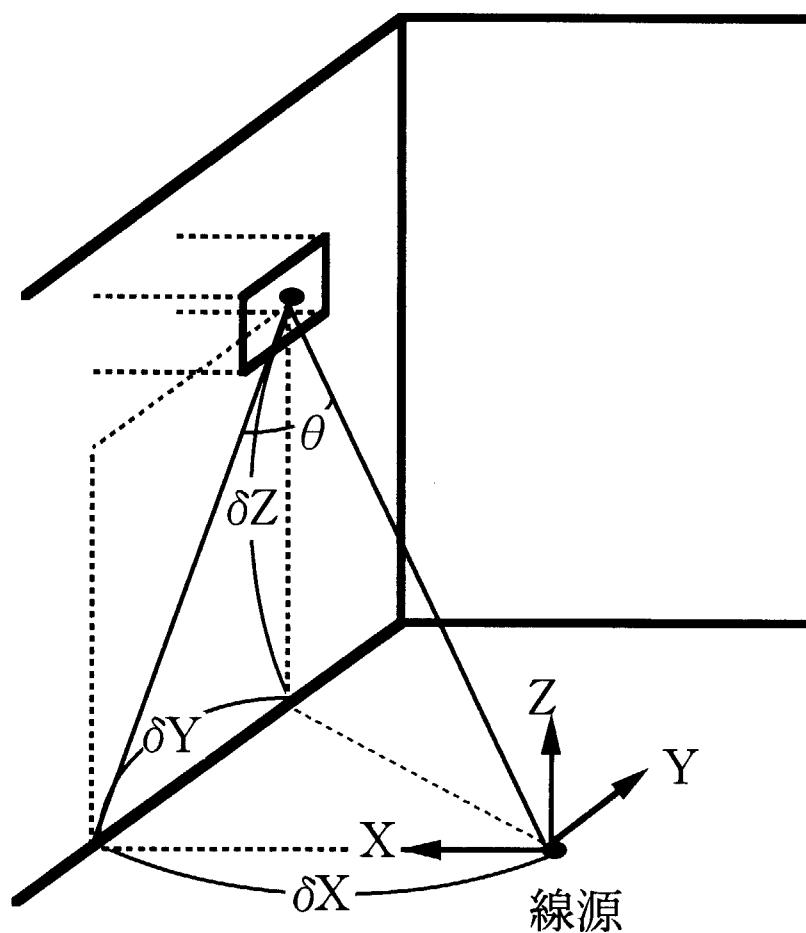


図 2.14 側壁面をダクトが貫通する 3 次元計算体系図

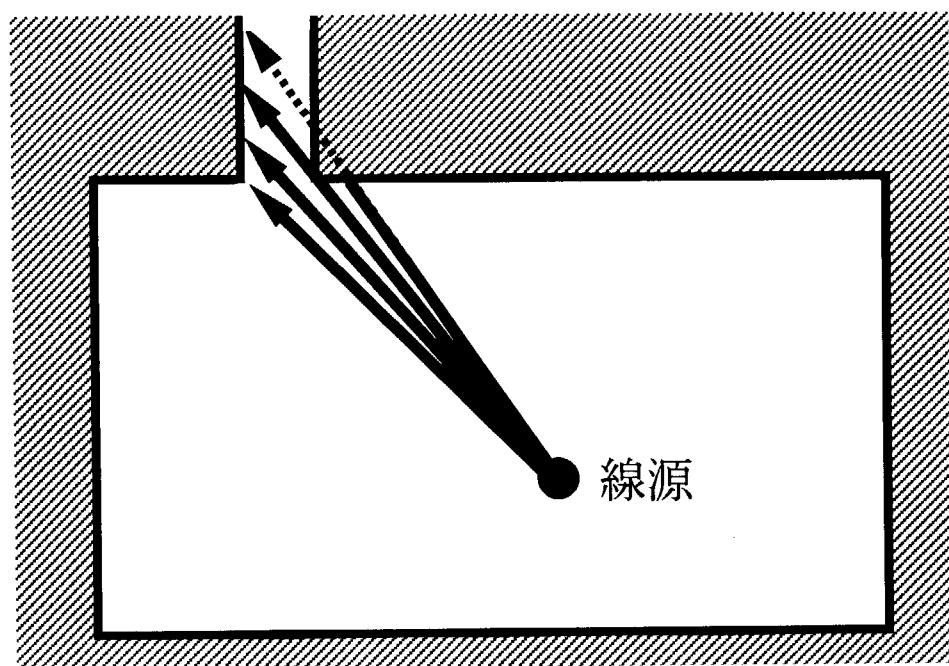


図2.15 天井をダクトが貫通する体系立面図

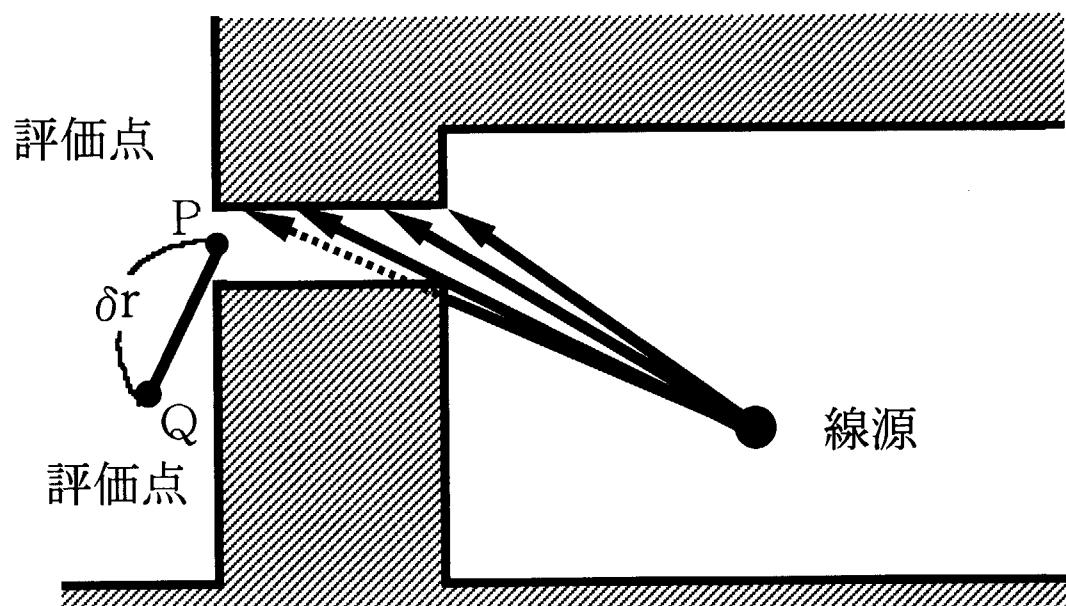


図2.16 側壁面をダクトが貫通する体系立面図

2.4 放射化生成物の評価

電子ビームの損失に伴い発生する制動放射線と、空気や加速器周辺機器等の光核反応で生成される放射化生成物の放射能は、IAEA Report¹⁾ に記載されている電子ビームの単位出力当たりに生成される飽和放射能を用いて評価することができる。

2.4.1 空気の放射化

制動放射線により空気中に生成される放射化生成物は、下記の（2.26）及び（2.27）式を用いて算出することができる。また、光核反応により発生した中性子による放射化生成物は、（2.28）式を用いて算出することができる。

(1) 制動放射線による放射化生成物 [(γ , n) 反応]

$$A(t) = \frac{S_A}{\lambda} \cdot \{1 - \exp(-\lambda T)\} \cdot \exp(-\lambda t) \dots \quad (2.27)$$

ここで、

S_A	: 生成速度	(GBq $\cdot h^{-1}$)
A_{AS}	: 飽和放射能	(GBq $\cdot kW^{-1} \cdot m^{-1}$)
P	: 電子ビーム損失出力	(kW)
X_m	: 空気中を制動放射線が通過する距離 (m)	
λ	: 崩壊定数	(h^{-1})
$A(t)$: 電子ビーム停止 t 時間後の放射能	(GBq)
T	: 電子ビーム照射時間	(h)
t	: 電子ビーム停止後の経過時間	(h)
F_1	: 損失電子の放射化に寄与する割合	

表2.11に空気中の放射化生成物の飽和放射能 A_{As} を示す。

(2) 中性子による放射化生成物 [(n , γ) 反応]

$$S_A = \frac{\lambda \cdot \sigma \times 10^{-24} \cdot N \cdot Y \cdot e \cdot X_{cm}}{10^9} \quad \dots \dots \dots \quad (2.28)$$

ここで、

S_A	: 生成速度	$(\text{GBq} \cdot \text{h}^{-1})$
λ	: 崩壊定数	(h^{-1})
σ	: 中性子捕獲断面積	(cm^2) ($= 0.64 \text{ b}$)
N	: 空気中における ^{40}Ar の原子個数密度	(cm^{-3}) ($= 2.3 \times 10^{17} \text{ n/cm}^3$)
Y	: 電子 1 箇当たりの中性子発生量	$(\text{neutrons/electron})$
	$Y \approx 2.4 \times 10^{-3} (E_e - 0.2)$	E_e : 電子のエネルギー (GeV)
e	: 電子ビーム損失率	(s^{-1})
X_{cm}	: 中性子が空気中を通過する距離	(cm) (50cm)
10^9	: 放射能換算係数	(GBq/Bq)

(^{41}Ar 以外で、中性子により空気中に生成される核種は、生成量が ^{41}Ar の1/1000以下であり、評価の対象から除外した。)

加速管室等において、電子ビーム照射中に換気を行う場合の換気空調系の放射能バランスは、(2.29)式で表すことができる。

ここで、

Q	: 換気空調系の空気総量	(m^3)
T	: 電子ビーム照射時間	(h)
S_i	: 核種 i の生成速度	($\text{GBq} \cdot \text{h}^{-1}$)
λ_i	: 核種 i の崩壊定数	(h^{-1})
C_i	: 核種 i の放射能濃度	($\text{GBq} \cdot \text{m}^{-3}$)
q	: 換気風量	($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)

この(2.29)式を、 $t = 0$ 、 $C_1 = 0$ の条件下で解くと、電子ビーム照射中の放射能濃度を求めることのできる(2.30)式が得られる。

$$C_i = \frac{S_i / Q}{\lambda_i + q / Q} \cdot [1 - \exp \{-(\lambda_i + q / Q) \cdot T\}] \quad \dots \dots \quad (2.30)$$

ここで、電子ビーム停止 t 時間後の加速管室等における放射能濃度は、電子ビーム停止直後の濃度を $C_1(0)$ とすると (2.31) 式で表すことができる。

$$C_i(t) = C_i(0) \cdot \exp \left\{ - (0.693 / T_{i(\text{eff})}) \cdot t \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (2.31)$$

ここで、

$C_i(t)$: 電子ビーム停止 t 時間後の放射能濃度 ($\text{GBq} \cdot \text{m}^{-3}$)
 t : 電子ビーム停止後の経過時間 (h)
 $T_{i(\text{eff})}$: 核種 i の実効半減期 (h)

$$T_{i(\text{eff})} = \frac{T_{i(\text{phy})} \times T_{(\text{vent})}}{T_{i(\text{phy})} + T_{(\text{vent})}}$$

$T_{i(\text{phy})}$: 核種 i の物理半減期 (h)

$T_{(v_{end})}$: 空調系の半減期 [0.693 / 換気回数] (h)

一方、電子ビーム照射中の排気口における3月平均排氣中放射能濃度は、(2.30)式及び排気口における希釈割合から(2.32)式で表すことができる。

$$C_i = \frac{S_i / Q}{\lambda_i + q / Q} \cdot [1 - \exp \{-(\lambda_i + q / Q) \cdot T\} \cdot F_2] \dots \dots \quad (2.32)$$

ここで、 F_2 : 排気口における希釈割合
(加速器運転中の排気量 / 3月間の排気総量)

2.4.2 冷却水の放射化

制動放射線が冷却水中で吸収され、放射化に寄与した場合、冷却水中の放射能及び放射能濃度は、(2.33) 及び (2.34) 式で評価することができる。

$$S_w = \lambda \cdot A_{ws} \cdot P \quad \dots \dots \dots \quad (2.33)$$

$$C_{wi} = \left[\frac{S_w}{\lambda} \times \{1 - \exp(-\lambda T)\} \cdot \exp(-\lambda t) \right] / V_w \quad \dots \dots \dots \quad (2.34)$$

ここで、

S_w : 生成速度 $(\text{GBq} \cdot \text{h}^{-1})$

A_{ws} : 鮫和放射能 $(\text{GBq} \cdot \text{kW}^{-1})$

C_{wi} : 冷却水中の放射能濃度 $(\text{GBq} \cdot \text{m}^{-3})$

V_w : 冷却水量 (m^3)

その他の記号は、(2.26) 及び (2.27) 式と同様である。

表2.12に水中の放射化生成物の鮫和放射能 A_{ws} を示す。

2.4.3 固体の放射化

制動放射線による固体の放射化は、「2.4.2 冷却水の放射化」と同様に下記の (2.35) 及び (2.36) 式により求めることができる。

$$S_s = \lambda \cdot A_{ss} \cdot P \quad \dots \dots \dots \quad (2.35)$$

$$A(t) = \frac{S_s}{\lambda} \times \{1 - \exp(-\lambda T)\} \cdot \exp(-\lambda t) \quad \dots \dots \dots \quad (2.36)$$

ここで、

S_s : 生成速度 $(\text{GBq} \cdot \text{h}^{-1})$

A_{ss} : 鮫和放射能 $(\text{GBq} \cdot \text{kW}^{-1})$

その他の記号は、(2.26) 及び (2.27) 式と同様である。

(2.36) 式で求めた放射能からの線量当量率は、簡易 γ 線遮蔽計算コード (QAD-CGGP2) により求める。加速器機器の放射化生成物の評価は、人の接近する可能性が高く、最も電子ビーム損失の多いコンバータ部について行う。コンバータの材料は、ターゲットをタンクスチンとし、被覆材をアルミニウムとステンレスとする。

表2.13にコンクリート、アルミニウム、鉄、銅、タンクスチン中の放射化生成物の鮫和放射能 A_{ss} を示す。

表2.11 空気中の放射化生成物の飽和放射能¹⁾

生成核種	半減期	生成反応	飽和放射能A _{AS} (GBq · m ⁻¹ · kW ⁻¹)
H-3	12.262 a	(γ,H-3)	5.00E-03
Be-7	53.6 d	(γ,sp)	1.00E-03
C-11	20.34 min	(γ,n)	1.90E-05
		(γ,sp)	1.00E-02
N-13	9.96 min	(γn)	5.20E-01
O-15	123 s	(γ,n)	5.60E-02
N-16	7.14 s	(γ,np)	2.00E-05
Cl-38	37.29 min	(γ,np)	2.20E-04
Cl-39	55.5 min	(γ,p)	1.50E-03
Ar-41	1.83 h	(n,γ)	-

表2.12 水中の0-16からの放射化生成物の飽和放射能¹⁾

生成核種	半減期	生成反応	飽和放射能A _{ws} (GBq · kW ⁻¹)
O-15	123 s	(γ,n)	3.30E+02
O-14	70.91 s	(γ,2n)	3.70E+00
N-13	9.96 min	(γ,2np)	3.70E+00
C-11	20.34 min	(γ,3n2p)	1.50E+01
C-10	19.48 s	(γ,4n2p)	3.70E+00
Be-7	53.6 d	(γ,5n2p)	1.50E+00
H-3	12.262 a	(γ,H-3)	7.40E+00

表 2.13 固体中の放射化生成物の飽和放射能¹⁾

(コンクリート)

生成核種	半減期	生成反応	飽和放射能A _{ss}
			(GBq · kW ⁻¹)
C-11	20.34 min	(γ,n)	1.30E-01
O-15	123 s	(γ,n)	9.60E+01
Na-22	2.62 min	(γ,n)	3.70E+00
Mg-23	12.1 s	(γ,n)	2.70E-01
Al-26m	6.37 s	(γ,n)	3.40E-02
Si-27	4.14 s	(γ,n)	7.40E+01
K-38	7.71 min	(γ,n)	3.70E+00
Fe-53	8.51 min	(γ,n)	3.70E-03

(アルミニウム)

生成核種	半減期	生成反応	飽和放射能A _{ss}
			(GBq · kW ⁻¹)
Be-7	53.6 d	(γ,sp)	4.80E+00
C-11	20.34 min	(γ,sp)	1.90E+00
N-13	9.96 min	(γ,sp)	5.00E-01
O-15	123 s	(γ,sp)	2.50E+00
F-18	109.7 min	(γ,sp)	5.20E+00
Ne-24	3.38 min	(γ,3p)	1.10E-01
Na-22	2.62 min	(γ,3n2p)	9.30E+00
Na-24	14.96 h	(γ,1n2p)	1.00E+01
Al-25	7.24 s	(γ,2n)	1.40E+00
Al-26	7.40E+05 a	(γ,n)	3.30E+02
Al-26m	6.37 s	(γ,n)	3.30E+02
Mg-27	9.46 min	(γ,π ⁺)	5.90E-01

(鉄)

生成核種	半減期	生成反応	飽和放射能A _{ss}
			(GBq · kW ⁻¹)
Sc-46	83.9 d	(γ,sp)	7.40E+00
V-48	16 d	(γ,sp)	1.50E+01
Cr-51	27.8 d	(γ,sp)	1.50E+01
Mn-52	5.6 d	(γ,np)	1.30E+00
Mn-52m	21.1 min	(γ,np)	1.30E+00
Mn-54	303 d	(γ,np)	2.20E+01

Mn-56	2.576 h	(γ ,p)	1.20E+00
Fe-52	8.2 h	(γ ,2n)	2.10E+00
Fe-53	8.51 min	(γ ,n)	2.70E+01
Fe-55	2.6 a	(γ ,n)	4.90E+02
Fe-59	45.6 d	(n, γ)	-

(銅)

生成核種	半減期	生成反応	飽和放射能 A_{ss}
			(GBq · kW ⁻¹)
Co-58	71.3 d	(γ ,sp)	2.40E+01
Co-58m	9.2 h	(γ ,sp)	2.40E+01
Co-60	5.263 a	(γ ,n2p)	2.40E+01
Ni-63	92 a	(γ ,np)	1.70E+01
Cu-61	3.32 h	(γ ,2n)	3.20E+01
Cu-62	9.76 min	(γ ,n)	4.07E+02
Cu-64	12.8 h	(γ ,n)	1.85E+02
Cu-66	5.1 min	(n, γ)	-

(タンゲステン)

生成核種	半減期	生成反応	飽和放射能 A_{ss}
			(GBq · kW ⁻¹)
Ta-180m	8.15 h	(γ ,np)	1.80E+00
Ta-182m	16.5 min	(γ ,p)	1.30E+01
Ta-182	115.1 d	(γ ,p)	1.30E+01
Ta-183	5 d	(γ ,p)	2.30E+01
Ta-184	8.7 h	(γ ,np)	1.80E+00
Ta-185	50 min	(γ ,p)	2.10E+01
W-181	140 d	(γ ,n)	3.30E+02
W-183m	5.3 s	(γ ,n)	3.20E+02
W-185	75 d	(γ ,n)	3.00E+02
W-185m	1.62 min	(γ ,n)	3.00E+02
W-187	23.9 h	(n, γ)	-

3 加速器遮蔽計算条件

3. 1 ビーム損失の仮定

遮蔽計算の前提となる線源条件を決定するのはビーム損失の条件である。加速器施設におけるビーム損失はビームダンプやコンバータ・ターゲットなど特定の箇所を除けば、一意的に損失割合や損失位置を特定するのは難しいといわれているが、SPring-8 ではビーム損失の仮定を、文献²⁰⁾ や既設の加速器施設での実績を基に、さらに SPring-8 固有の特性を考慮して設定した。以下に線型加速器、シンクロトロン、SSBT ライン、蓄積リングに分けて、それぞれのビーム損失仮定を記述する。

(1) 線型加速器におけるビーム損失

一般に線型加速器はビーム損失の少ない加速器と考えられており、複数個のスリットにビーム損失を集中させる設計になっている。遮蔽設計で仮定した各線源箇所（L 1～L 7、ビームダンプおよびコンバータ・ターゲット）におけるビーム損失割合を表 3.1 に示し、それらの線源位置を図 3.1 に図示する。図中でハッチを施した箇所は重コンクリート領域を示している。

線型加速器の運転方式は、加速粒子の種類により電子モードと陽電子モードに分類される。電子モードは電子を蓄積リングに貯める運転方式であり、陽電子モードは陽電子コンバータを用いて蓄積リングに陽電子を蓄積する運転方式である。運転方式の違いによりそれぞれのパルス幅は $2\mu\text{s}$ 、 10ns と大幅な違いがある。遮蔽計算上は、それぞれの線源箇所において電子（陽電子）ビームの損失パワーが大きい方の運転方式の条件を採用した。

(2) シンクロトロンにおけるビーム損失

シンクロトロンにおけるビーム損失は、入射時、加速時、出射時（電子ビーム取り出し時）に分けて考える必要がある。電子が線型加速器からシンクロトロンに入射するときに 95 % 損失すると仮定する。そのうちの 80 % が入射部のセプタム電磁石近傍の 1 点で失われ、残りの 20 % のビーム損失が、入射部を除く、単位セル（偏向、四極、六極電磁石の配列で構成される加速器の構成単位）毎に 1 カ所ずつ存在する分散関数の大きい点 32 カ所に等分配されると仮定する。電子が 1GeV から 8GeV まで加速する間に 20 % の損失が起こるとし、それらがシンクロトロン全域の各単位セルに対応した分散関数の大きい点 32 カ所に等分配されると仮定する。また、損失は電子ビームが 2GeV に加速されるまでにすべて起こると仮定した^{*)}。出射時には 30 % 損失すると仮定して、そのうちの 90 % が出射部のセプタム電磁石近傍の 1 点で、残りの 10 % が出射

部を除く分散関数の大きい32カ所で発生するとした。

(3) SSBTラインにおけるビーム損失

シンクロトロンからSSBTラインに入った最初の約2mの領域では、任意の1点で10%のビーム損失を仮定し、残りの領域では任意の1点で1%のビーム損失を仮定した。

(4) 蓄積リングにおけるビーム損失

通常運転期間における蓄積リングでのビーム損失は、入射調整時、入射蓄積時、放射光利用時に分けて考える。また、蓄積電流の寿命は10時間を想定し、10時間毎に1回入射を行うとする。

入射調整時には、シンクロトロンからの最大尖頭電流を定格値の1/5の2mAに落として運転し、100%のビーム損失を仮定する。この時、10時間当たりの必要調整時間を最大15分と仮定する。損失の80%が入射部の1点で起こり、残りの20%が入射部以外の任意の5点に等分配されるとする。入射蓄積時のビーム損失は90%とし、10時間当たりの必要入射時間を6分と仮定する。損失の80%は入射部の1点で、残りの20%が入射部を除く領域の単位セルに対応する分散関数の大きい44カ所に等分配されるとする。入射時に損失を受けずに蓄積リングを周回するビームも、最終的には同じ44カ所に等分配されるとする。また、ガス制動放射線による遮蔽計算は、現実には寿命にしたがって一定割合で減少し続ける蓄積電流が、常に定格の100mAを維持し続けるという安全側の仮定の下に行っている。シンクロトロンと蓄積リングにおけるビーム損失の仮定は相当複雑であるため、ここでのビーム損失の考え方を図示したものを見ると图3.2、图3.3に示す。

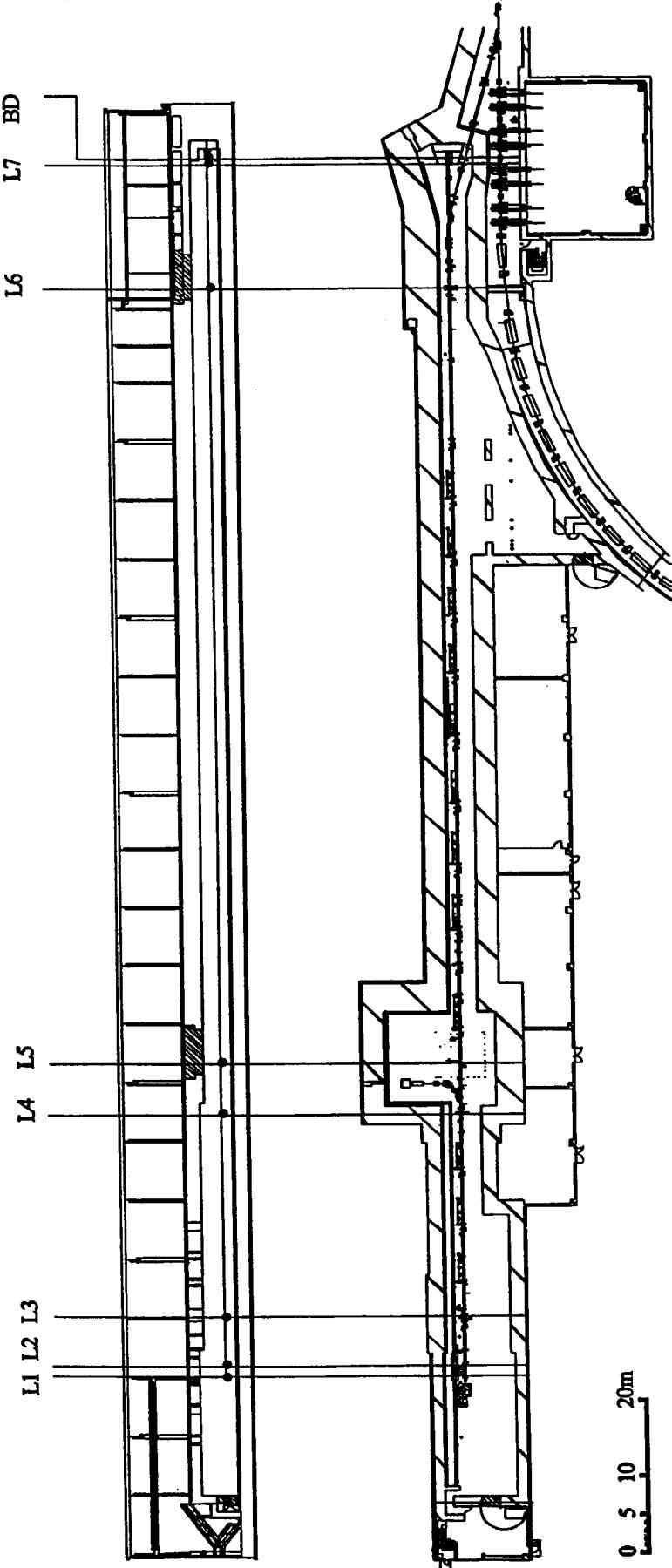
高速でリング内を回っている電子が上述したような一定の条件でビーム損失を起こすとき、その点で集中的に電子が損失を受け、点状線源を形成するというシナリオは物理的に考えにくく、むしろ損失箇所が一定範囲に分布し、その結果線状線源を形成すると考えた方が合理的である。そこでシンクロトロンにおいては8mの線状線源を仮定した。一方、蓄積リングにおいては、この加速器が低エミッタスを最大の特徴としていることから、安全側に点状線源を仮定した。

*) 入射した電子のエネルギーは、最初の数ミリ秒の間は約1GeVを保持したままシンクロトロンを数1000回以上周回することになり、この間にビーム損失は全て完了すると考えられる。したがって、多少余裕をもってビーム損失が2GeVにまで加速される間に起こると仮定した。

表3.1 線型加速器における線源箇所およびビーム損失割合

線源位置	ビーム損失
L 1 : 電子銃スリット	9 0 %
L 2 : バンチング部	3 3 %
L 3 : 入射部スリット	1 0 %
L 4 : スイッチヤード部スリット	2 %
L 5 : コンバータ部ターゲット	1 0 0 %
L 6 : メインライナック部スリット	2 %
L 7 : L S B T ラインスリット	1 0 %
B D : ビームダンプ部	1 0 0 %

L: 線源位置
L₁, L₂, ..., L₇, BD はしゃへい計算で仮定した位置を示す。



線型加速装置の平面図及び立面図

図3.1 線型加速装置の平面図および立面図

3. 2 線量当量評価点と線源位置

SPring-8 および同敷地内で合計 35 評価点を定め、線量当量の評価を行った。35 点の内訳は、1) 常時立入可能な管理区域境界で 10 点、2) 管理区域境界で 22 点、3) 事業所及び居住区域の境界で 3 点である。

図 3.4～図 3.13 に線量当量評価点(E1～E35)を、線源位置(S1～S15)と共に示す。また、表 3.2 には評価点と計算上考慮した線源位置の対照表を示す。ほとんどの評価点は単一の線源からの寄与を考えれば良く、残りの評価点においては 2カ所の線源を考慮しなければならない。

表 3.2 遮蔽評価点および線源位置

評価点	線源位置		評価点	線源位置
E1	S1		E19	S9
E2	S1		E20	S9
E3	S2 & S3		E21	S9
E4	S2 & S3		E22	S10
E5	S3		E23	S10
E6	S2 & S3		E24	S11 & S12
E7	S2 & S3		E25	S11
E8	S3		E26	S13 & S14
E9	S2 & S3		E27	S14
E10	S4		E28	-
E11	S4		E29	-
E12	S4		E30	-
E13	S5		E31	S15
E14	S5 & S6		E32	S15
E15	S8		E33	S13
E16	S8		E34	S13
E17	S7		E35	S11
E18	S8			

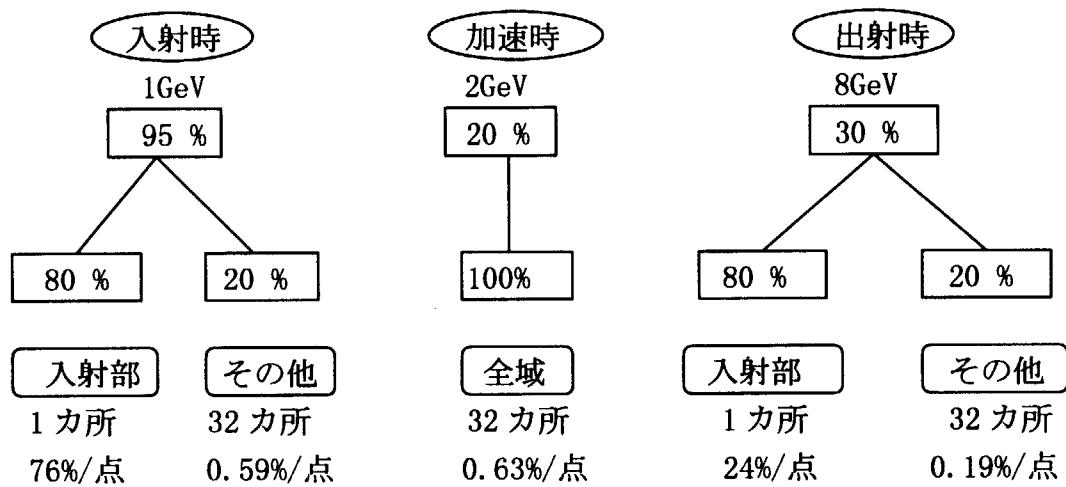


図3.2 シンクロトロンにおけるビーム損失仮定

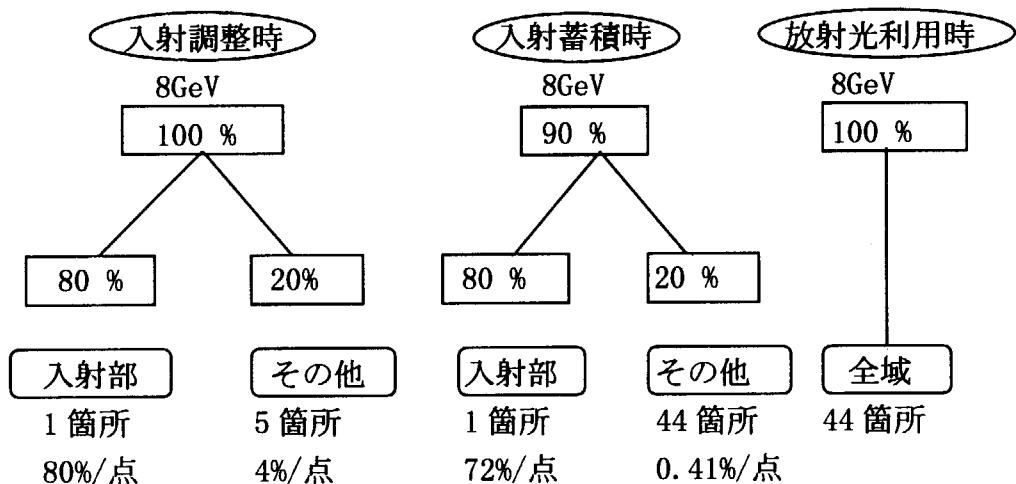
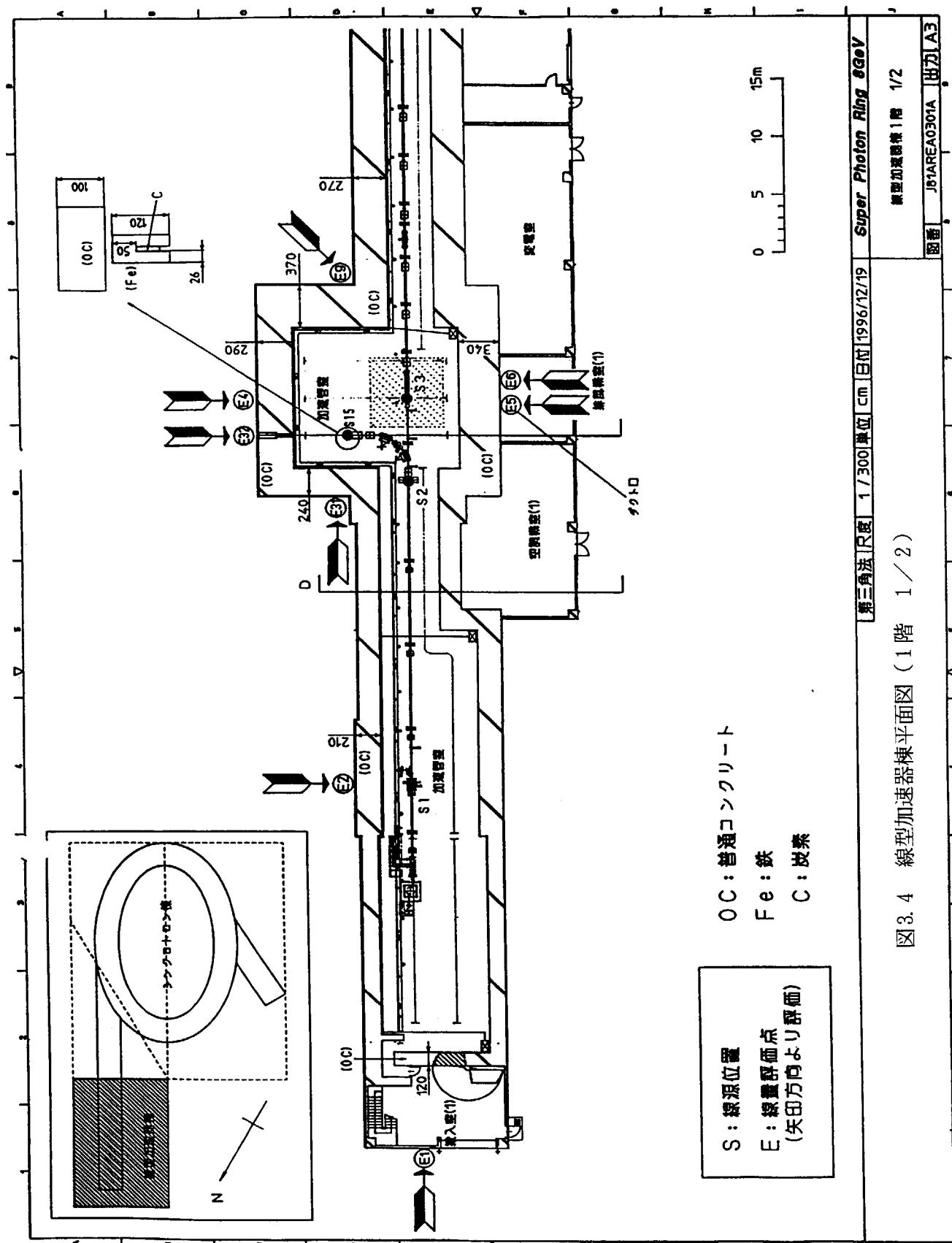
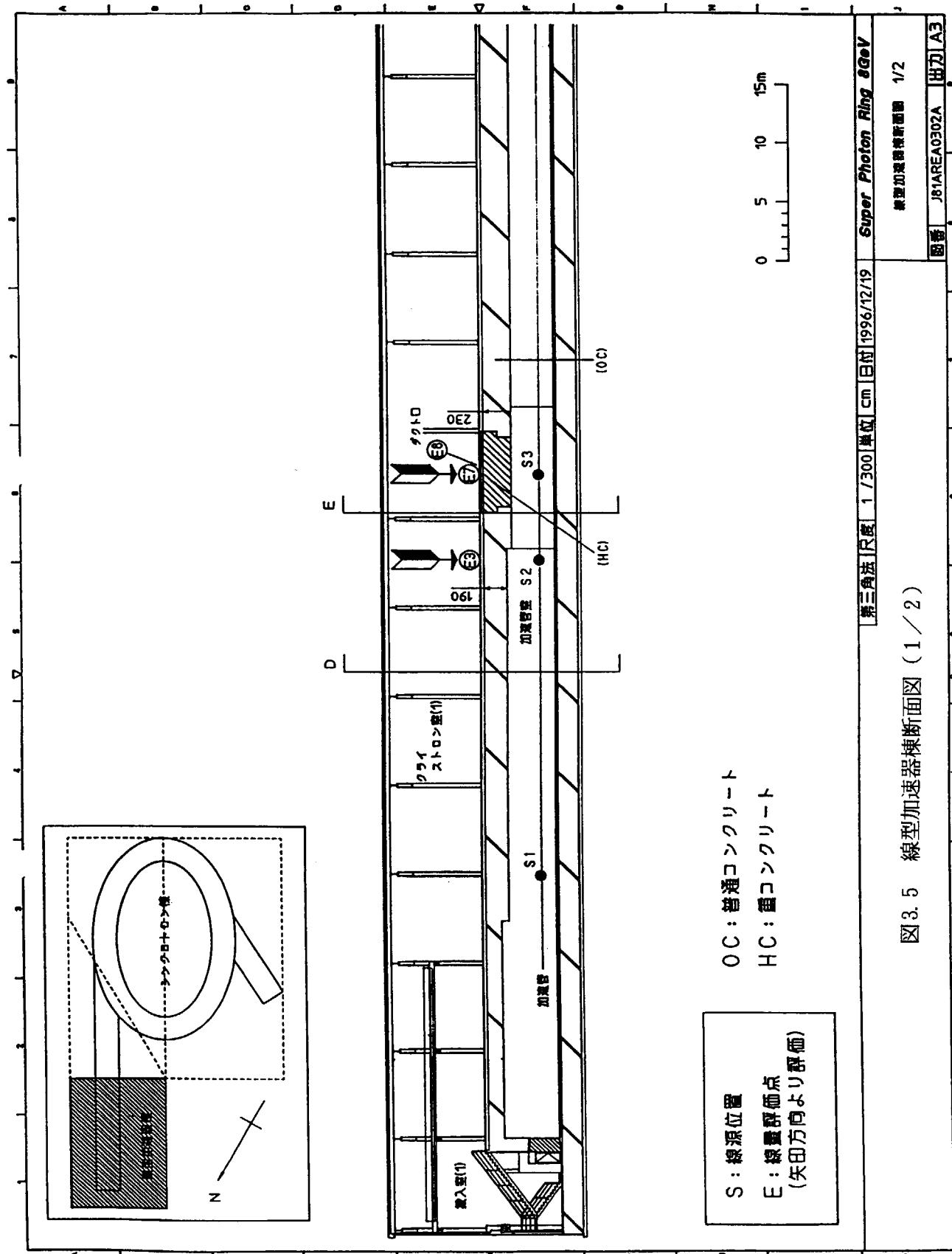
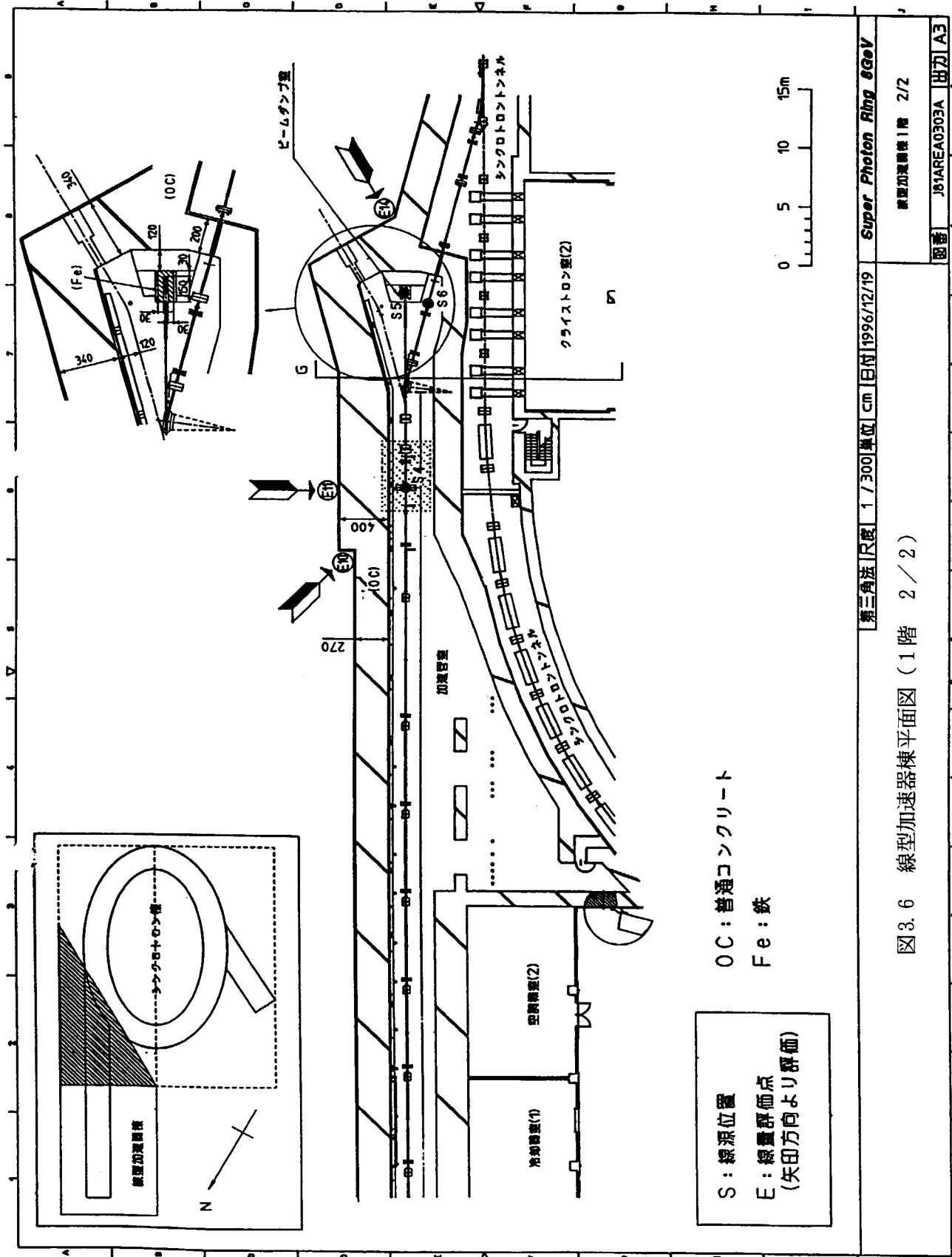


図3.3 蓄積リングにおけるビーム損失仮定







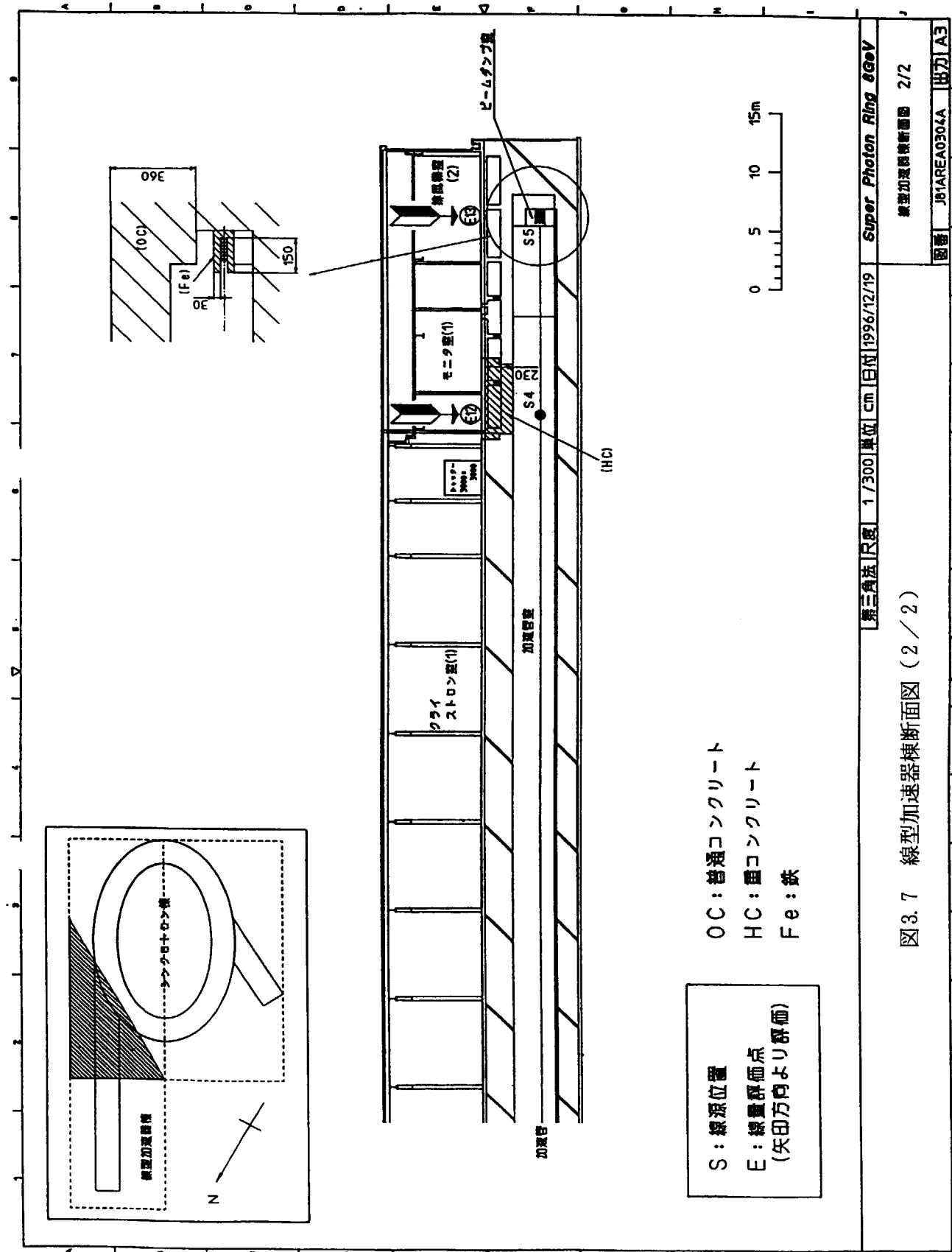
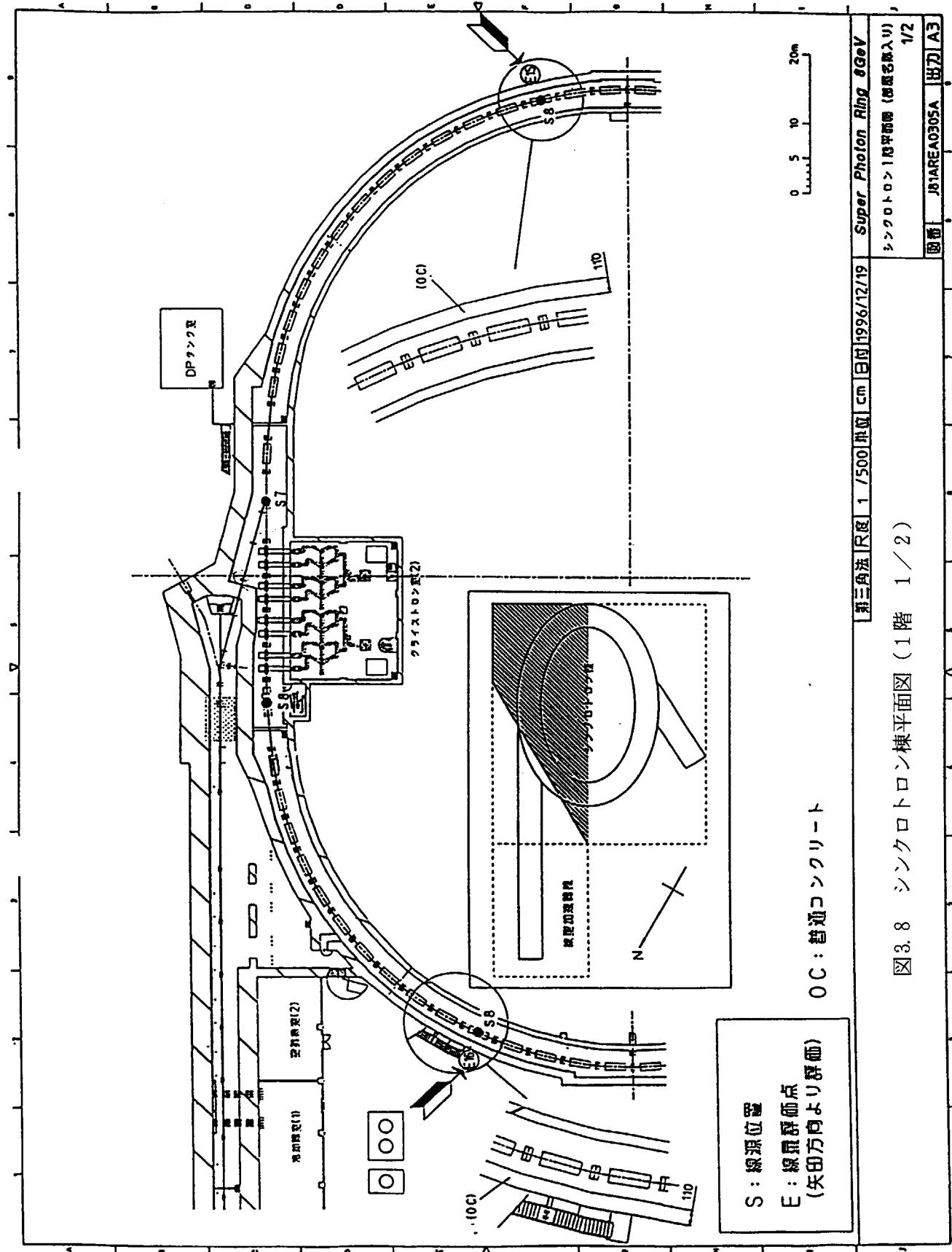
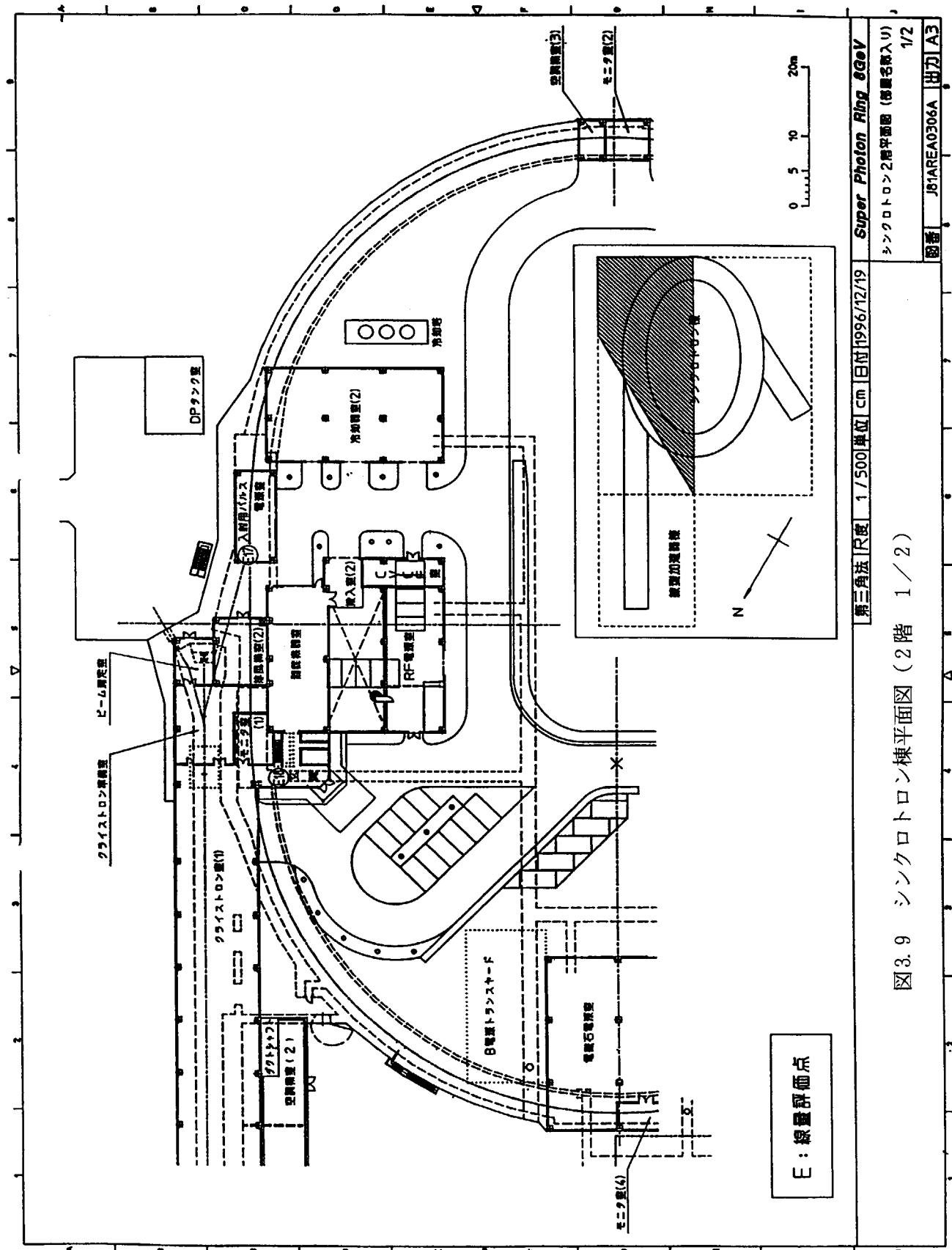


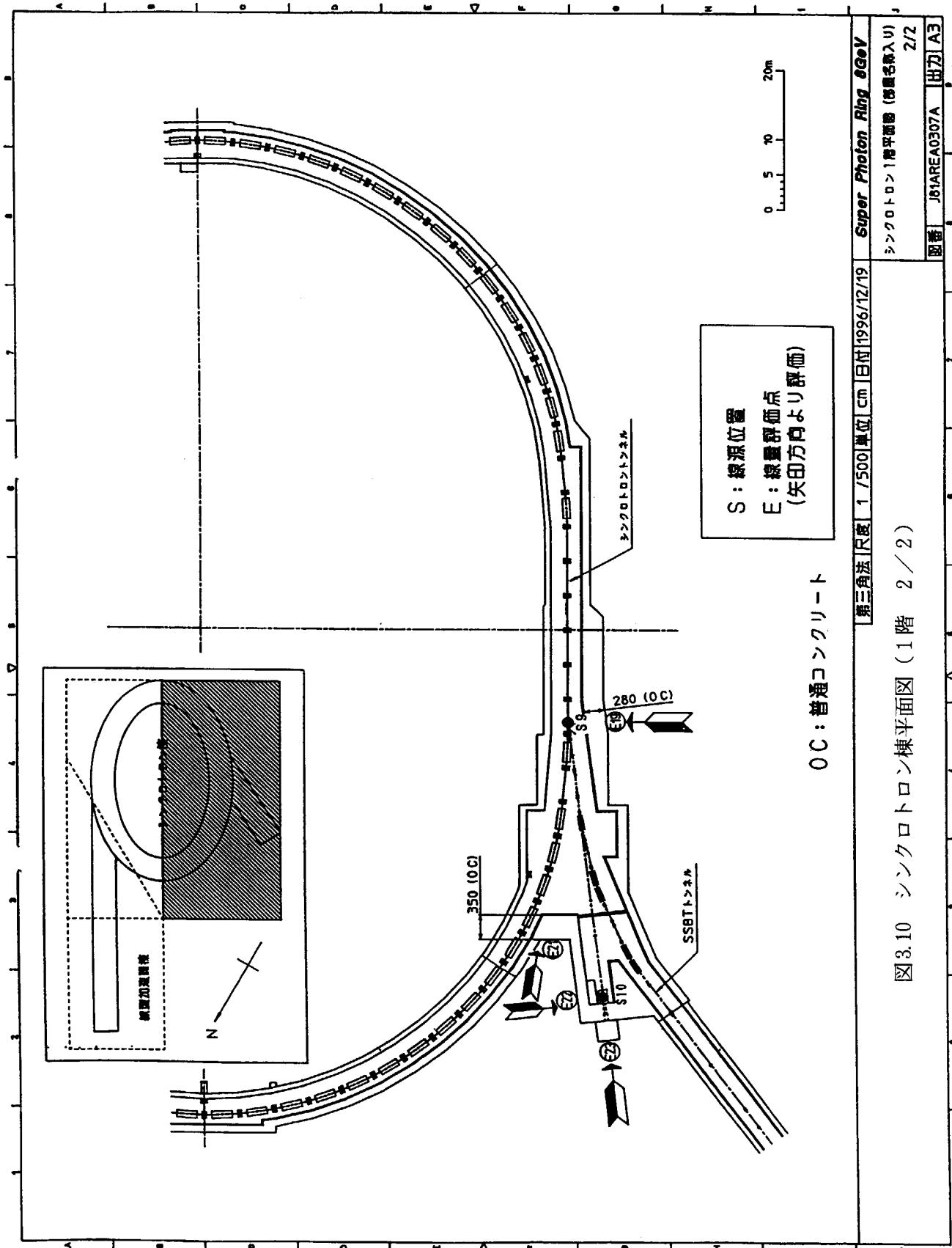
図3.7 線型加速器構造面図(2/2)

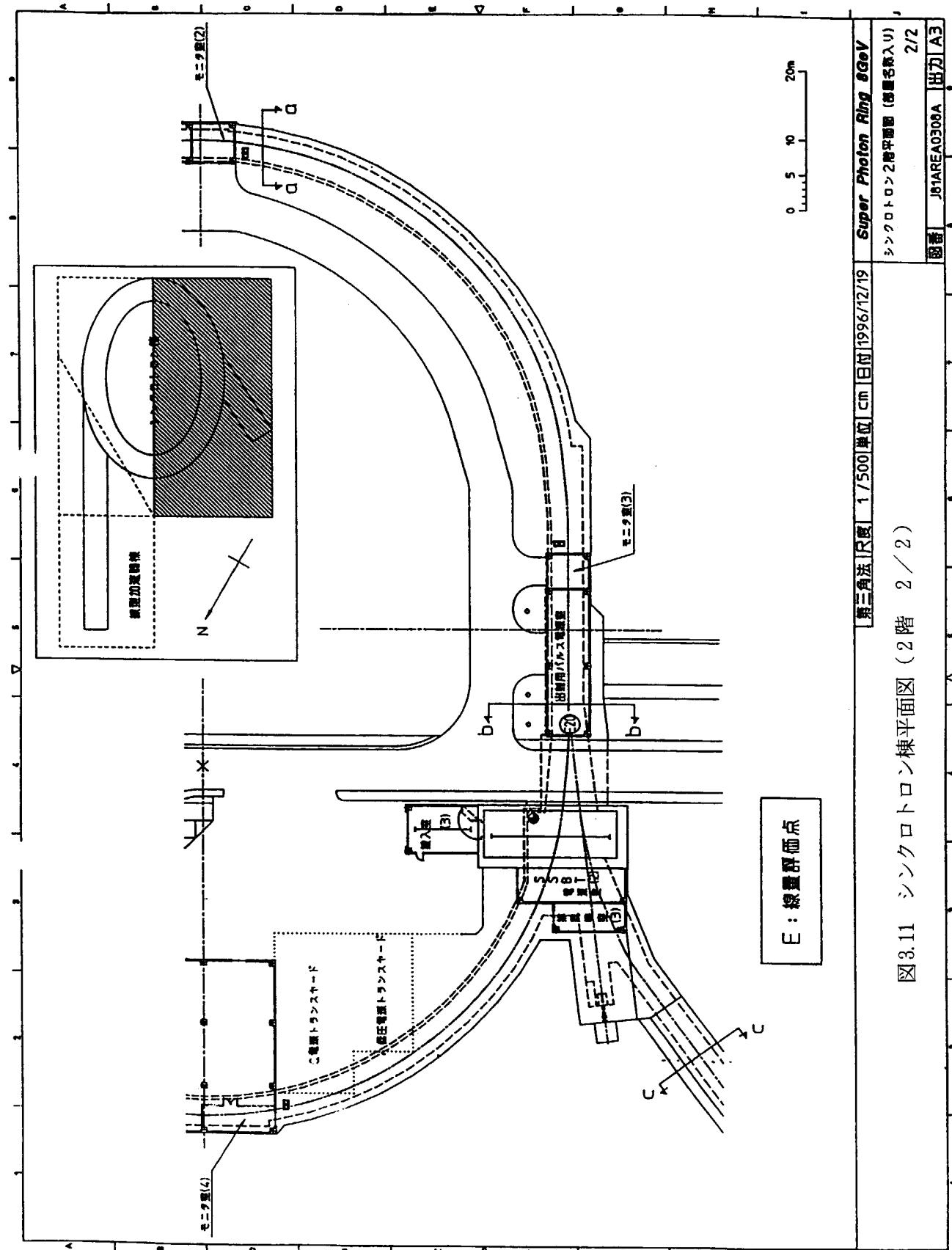
第三角法 [尺度] 1/300 [単位] cm [日付] 1996/12/19 [題名] Super Photon Ring 8GeV

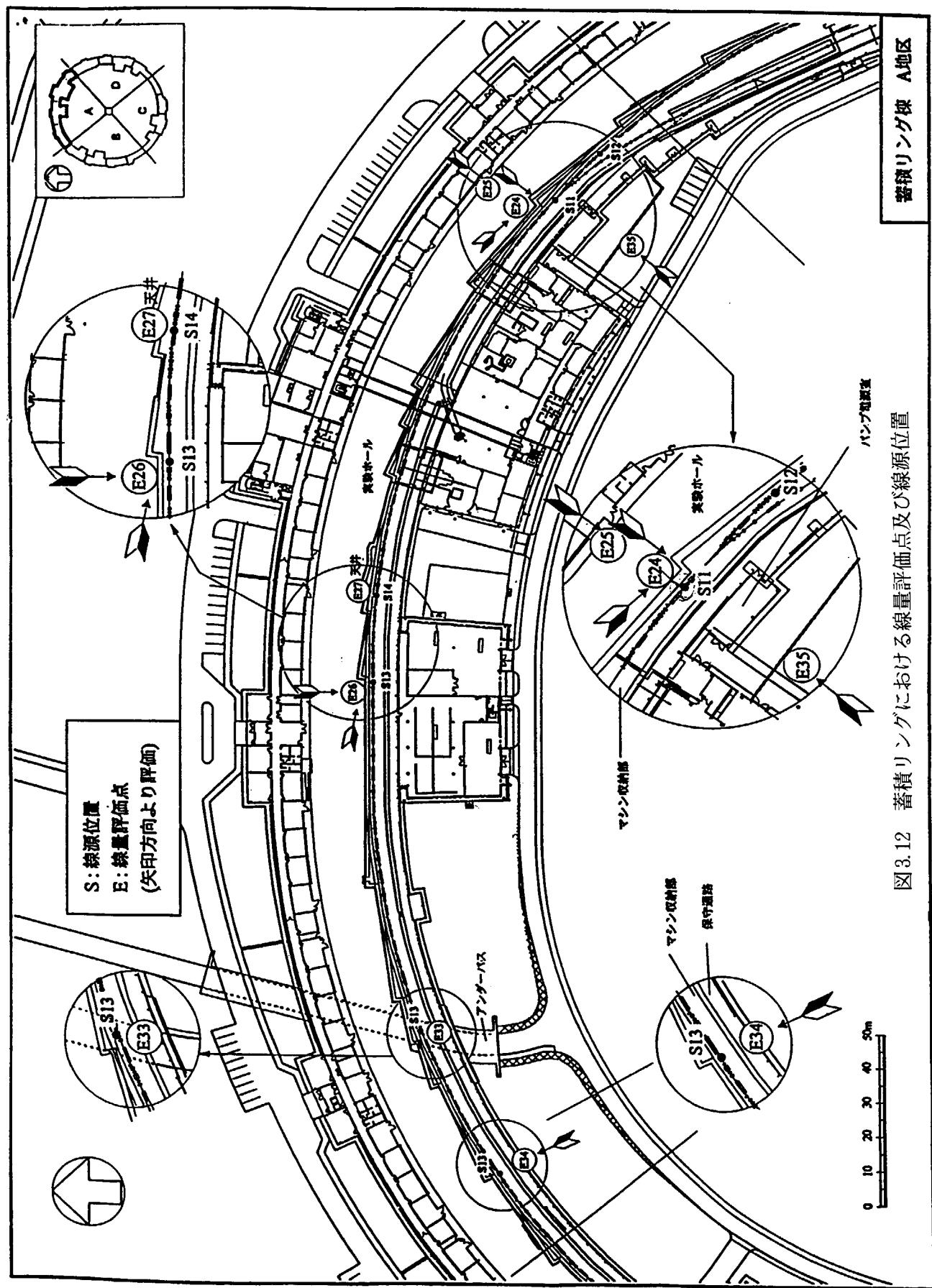
線型加速器構造面図 2/2
図番 J81 AREA0304A 出力 A3











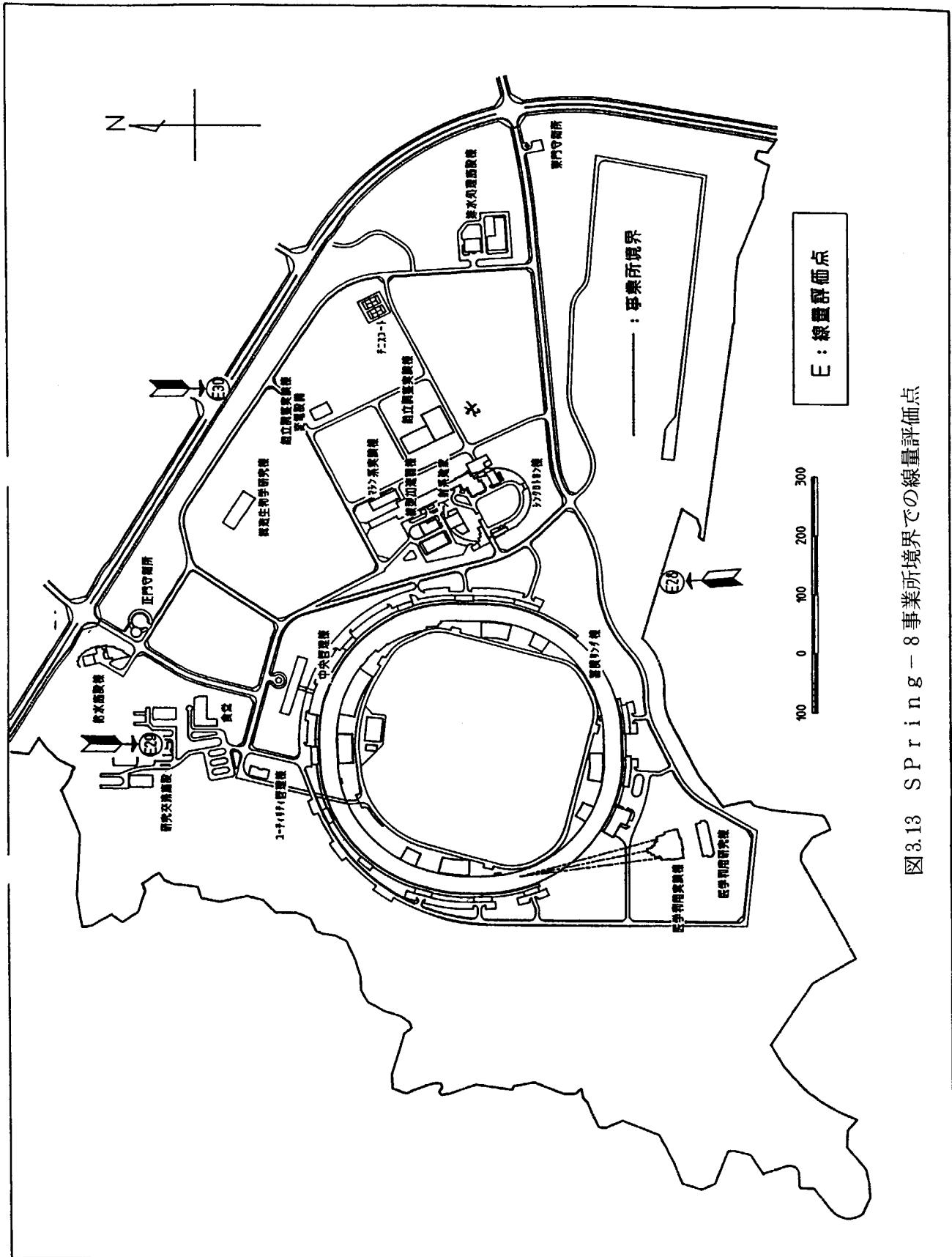


図3.13 Spring-8事業所境界での線量評価点

3. 3 電子ビーム異常事象時の被曝評価

SPring-8 の入射器および蓄積リングにおいて定常運転時に不測の事態が生じ、局所的に過大なビーム損失が発生する可能性がある。線型加速器、シンクロトロン、蓄積リングそれぞれについて事故シナリオを想定し、そのシナリオに基づく被曝線量評価を行った。

1) 入射器（線型加速器、シンクロトロン）

入射器においては、電磁石の電源異常等により電子ビーム経路内において局所的に過大なビーム損失が発生するという事象が想定される。この状態が長時間にわたり持続すると、特に大電流での運転時においては、この領域で電子ビームが連続的に失われ局所的な線量増加が長時間にわたり継続するため、過大な被曝を招く恐れがある。しかし、このような放射線安全上問題となる不測の事態が発生した場合には、制御室内の運転員が以下の情報により異常を察知し、電子ビーム停止等の対応がとられ、長くとも 10 分以内に異状状態の解除が行われるものと想定される。

- ① 放射線モニターによる空間線量の増大の警報
- ② 電流モニターによる電流パターンの変化
- ③ 電流モニターによるピーク電流値または平均電流値の低下
- ④ 真空モニターによるダクト内の真空度の低下、等

したがって、ビーム損失事故について安全側の被曝評価を行うため、次に示す事故シナリオを想定する。

- ① 任意の一点において、
- ② 100 % のビーム損失が発生し、
- ③ その状態が 10 分間継続する。

2) 蓄積リング

蓄積リングにおいては、放射光利用時に電磁石の異常等により、蓄積された電子が 1 点で全て瞬間に失われるという事象が想定される。

このようなビーム損失事象の被曝評価においては、次の事故シナリオが想定される。

- ① 任意の一点において、
- ② 蓄積電流がすべて、
- ③ 瞬間に失われる。

1 回の事象当たりの積算線量当量の評価は、入射器の場合は、Jenkins の式を用いて評価点での線量当量率(Sv/h)を計算し、それに異常事象継続時間 (10

分) (=1/6 hour)を掛けることにより得られる。一方、蓄積リングの場合は全蓄積電流が1秒間で失われるとして、Jenkins の式により評価点での線量当量率 (Sv/h)を計算する。この値は1時間継続するとしたときの線量当量を表しているので、それに異常事象継続時間(1秒) (=1/3600 hour)を掛けることにより得ることができる。

3.4 放射化計算の条件

SPring-8施設の換気空調系は、入射器系において排風機室①（線型加速棟）、排風機室②（線型加速器棟－シンクロトロン棟）、排風機室③（シンクロトロン棟）及びLi-3・NS系の4系統、蓄積リング系において排風機室(A)、(B)、(C)及び(D)の4系統がある。しかし、Li-3・NS系、及び蓄積リング系は、1時間あたりの損失電子数が、約 1×10^{14} 個程度以下であり、放射化生成物の発生は無視できる。したがって、排気口における評価は、排風機室①系、排風機室②系、及び排風機室③系について実施し、運転中の加速管室等の評価は、線型加速器棟の上流部及び下流部、シンクロトロン棟の入射部及び出射部について実施した。それぞれの排気系統に係わる電子ビーム損失箇所のパラメータを表3.3に、電子ビーム照射時間を表3.4に、排風機系統及び排気風量等を表3.5に示す。表3.5は、排気を行う場合について示したものであり、換気は必要に応じて行われる。

冷却水は、加速器の運転停止後直ちに直接一般環境に排出することではなく、廃液タンクで100時間程度の減衰時間（放射能濃度分析に要する時間）を考慮することができる。電子ビームパラメータは、表3.3と同様である。ただし、コンバータ部については、完全閉回路であり他の冷却水と混合しないこと及び廃棄もしないことから、ビームダンプについては、冷却水を使用しないことの理由で評価の対象から除外した。

表3.3 電子ビームパラメータ設定値

電子ビーム 排気系統	電子ビーム 損失箇所	電子ビーム エネルギー (GeV)	電子ビーム損失数		
			(W)	(A)	electrons/s
排風機室(1)系統	コンバータ	0.3	1,100	3.6×10^{-6}	2.3×10^{13}
	スリット(1)	0.046	64	1.4×10^{-6}	8.7×10^{12}
	スリット(2)	0.33	85	2.6×10^{-7}	1.6×10^{12}
排風機室(2)系統	スリット(3)	1.2	288	1.7×10^{-8}	1.5×10^{12}
	スリット(4)	1.2	38	3.2×10^{-8}	2.0×10^{11}
	ビームダンプ	1.2	14,400	1.0×10^{-5}	7.5×10^{13}
	シンクロ入射部	1.2	18	2.6×10^{-9}	9.5×10^{10}
排風機室(3)系統	シンクロ出射部	8.0	22	1.0×10^{-8}	1.7×10^{10}

表3.4 電子ビーム照射時間

電子ビーム の条件 ビーム損失箇所	電子ビーム照射時間 (h / 3月)	制動放射線	
		透過距離 (Xm)	寄与割合 (F ₁)
電子・陽電子コンバータ	138 (550h/年)	0.5	0.01
線型加速器スリット	1,375 (5,500h/年)	0.5	0.01
線型加速器ビームダンプ	138 (550h/年)	0.5	0.01
シンクロトロン入射部	1,375 (5,500h/年)	0.5	0.01
シンクロトロン出射部	138 (550h/年)	0.5	0.01

表3.5 排気口系統別排気風量

排気風量 排気系統	排気口に接続され ている排気系統	排気風量 (m ³ /h)	排風機運転時 間 (h/3月)	換気回数
				(回/h)
排風機室(1)	線型加速器棟上流側	2,100	2,184	1.0
	排風機室(1) [非汚染]	1,500		-
	合計排気風量	3,600		-
排風機室(2)	線型加速器棟下流側	2,100	2,184	1.0
	シンクロトロン入射部	3,700		-
	排風機室(2) [非汚染]	1,600		-
	合計排気風量	7,400		-
排風機室(3)	シンクロトロン出射部	3,700	2,184	1.0
	排風機室(2) [非汚染]	1,100		-
	合計排気風量	4,800		-

4. 放射光ビームライン遮蔽

放射光ビームラインはX線回折実験等、放射光を利用した実験を円滑に進めるためのもので、放射光源によってウィグラー・ビームライン、アンジュレータ・ビームラインおよび偏向電磁石・ビームラインに大別される。これらの放射光ビームラインは、挿入光源装置（ウィグラー、アンジュレータ）や偏向電磁石（ベンディングマグネット）から発生する放射光の取り出しと遮断、蓄積リング側の真空保持などの機能を備えた部分と、分光器などの光学系や放射線防護機能を備えたハッチ、インターロックシステム等より構成される。放射光ビームラインは、ビームラインの研究目的によって各々独自の特徴を持つ。

主ビーム1系統の場合の放射光ビームライン安全設計に関する機器概念図を図4.1に示す。ここで、偏向電磁石や挿入光源装置より取り出された放射光ビームは、ビームを遮断する放射光ビームラインシャッター、ビームスペクトルを整形するフィルター、ビームの広がりを防ぐコリメータ等の機器間を通過後、蓄積リング遮蔽壁外側に導かれる。遮蔽壁外側に導かれた放射光ビームは、分光器（モノクロメータ）により分光された後、実験ハッチに導かれ実験装置に導入される。この時、実験ハッチ手前に放射光ビームを遮断する下流シャッター（D S S T）と実験中に実験ハッチ後方の線量率が上昇するのを防ぐエンドストップを設置する。また、放射光ビームに混入してくる高エネルギー光子がビームライン後方に広がるのを防ぐガンマストップを設置する。放射線防護のために必要に応じて遮蔽ハッチを設け、モノクロメータ（分光器）やガンマストップ、下流シャッター（D S S T）をその中に設置する。放射光ビームラインシャッター（M B S）や下流シャッター（D S S T）と光学ハッチや実験ハッチへの人の出入りは、インターロック制御することにより不慮の被ばくを防止する。放射光は、ビーム状態で蓄積リング遮蔽壁の外側に導かれる。

蓄積リング遮蔽壁外に取り出された放射光は大強度で、かつ指向性が非常に強い。そこで、第2章および第3章で述べた SPring-8 施設の遮蔽設計・安全評価の前提条件の他に、以下の SPring-8 ビームライン特有の遮蔽設計の基本的な考え方を採用した。

- (1) 光源の種類（ウィグラー、アンジュレータ、偏向電磁石）によってビームラインを3種類に区分し、遮蔽設計を行う。
- (2) ビームラインに入射してくる放射線は非常に指向性が強いので、局所遮蔽を有効に使用する。
- (3) 軟X線ビームラインを除き、ビームラインはハッチ構造とする。
ハッチは光学素子類を入れる光学ハッチと、実験機器等を入れる実験ハッチとに区分する。すなわち白色放射光が入射するハッチを光学ハッチ、分光された単色放射光が入射するハッチを実験ハッチとする。

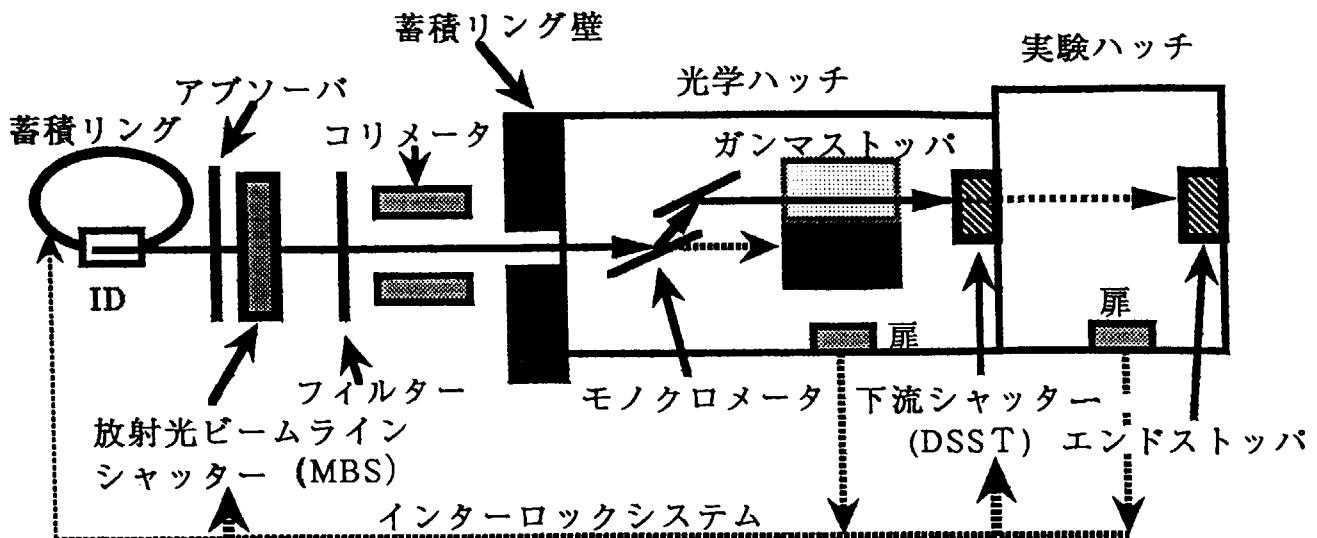


図4.1 主ビーム1系統のみの遮蔽安全設計に係わる放射光ビームライン概念図

ID ;挿入光源装置（アンジュレータ、ウィグラー）及び偏向電磁石

放射光ビームラインシャッター；通常状態でMBSで閉まれば、蓄積リング壁外側で基準線量率以下となる能力を持つ。

アブソーバ；余分な熱を除去する装置で、MBSその他の機器の熱負荷を軽減する。

フィルター；放射光スペクトルを整形するためのもので、主に使用しない低エネルギー成分を除去する。

コリメータ；放射光、ガス制動放射線、ビーム損失等による放射線の広がりを防ぐもので、光学ハッチの負担を軽減する機能を有する。

モノクロメータ；放射光を分光し、単色化する装置。

ガンマストッパー；主にガス制動放射線、ビーム損失等によって発生する高エネルギー光子がビームライン後方に広がるのを防ぐ。

下流シャッター(DSST)；実験者がハッチ内に入室して調整等を可能にするために放射光を遮断し、ハッチ内での線量率が基準値以下となる遮蔽能力を持つ。

エンドストッパー；実験中にハッチ後方の線量率が放射光のために上昇することを防ぐもので、DSSTと同等の遮蔽能力を持つ。

光学ハッチ；光学ハッチ等からの散乱線による線量率の上昇を基準値以下にするために設置されるもので、放射光使用時の不用意の被曝を防ぐ囲い。

実験ハッチ；放射光及び散乱線から実験者の安全を確保するための囲いであり、実験中はハッチの周囲で基準線量率以下となる遮蔽能力を持つ。

4. 1 計算手法

(1) 放射光を線源とする遮蔽計算

放射光を線源とする計算における特記すべき点を挙げると、第1に放射光発生装置の種類によりエネルギースペクトルが著しく異なることから、解析対象となるビームライン特有の放射光スペクトルを計算しなければならない。第2に、光学素子などで散乱された放射光を散乱角度毎、エネルギー毎に計算する必要がある。時には、シャッター背後での線量計算の場合のように放射光透過計算をしなければならない。また、通常放射光は偏光しているので、場合によっては偏光依存の散乱放射光を計算しなければならない。第3に、散乱放射光を線源に遮蔽壁外側での漏洩線量を計算しなければならない。

SPring-8 では放射光を線源とする遮蔽計算に、日本原子力研究所で開発された STAC8 コード⁽²¹⁾を使用している。このコードは、挿入光源装置（アンジュレータ、ウィグラー）及び偏向電磁石の放射光源スペクトルから、フィルター（アブソーバ）における熱負荷量及び透過スペクトルの計算、光学素子等からの散乱放射光によるビームラインの漏洩線量の計算を、直線偏光による散乱や再生効果も考慮して一貫してできるコードである。

(2) 蓄積電子ビーム損失にもとづく遮蔽計算

蓄積電子ビーム損失により発生する中性子、光子、 μ 粒子の計算には、以下に示す前方方向のバルクしやへい計算式と同じ式を用いる。

$$\text{中性子} ; H = (P / r^2) \times S \cdot \exp(-d / \lambda_i) \times 2.0 \quad (4-1)$$

$$\text{光子} ; H = (P / r^2) \times S \cdot \exp(-d / \lambda_i) \quad (4-2)$$

$$\begin{aligned} \mu\text{粒子} ; H &= \{ 25 / (25 + X/X_0) \} \cdot \{ (X(E_e) - X) / X(E_e) \} \\ &\quad \cdot H_0 \end{aligned} \quad (X(E_e) > X)$$

$$H = 0.0 \quad (X(E_e) \leq X) \quad (4-3)$$

ここで、Hは Sv/h 単位で表される線量当量であり、Pは蓄積電子ビーム損失出力である。蓄積電子ビーム損失出力 P は以下のように求める。

加速器の運転モードは第3章、第3. 1項(4)に述べられているように、10時間 を 1 サイクルとして、168時間(1週間)あたりに4.2時間を入射調整、1.7時間を入射蓄積、残り162.1時間を放射光利用時とする。作業者の作業時間を50時間として、最も安全側の評価を行う。すなわち、50時間あたりに4.2時間を入射調整、1.7時間を入射蓄積、残り44.1時間を放射光利用時として、第3章、第3. 1項に記載されている各運転モードでの電子ビーム損失割合から、50時間平均での1mA蓄積電流あたりの蓄積電子ビーム損失出力 P を計算する。蓄積電子ビーム損失出力 P は、各々入射部(BL01

B 1 ビームライン)において $P = 1.51 \times 10^{-4}$ (kW/mA)、入射部以外において $P = 3.27 \times 10^{-6}$ (kW/mA)、放射光利用時のみにおいて $P = 2.43 \times 10^{-8}$ (kW/mA)である。

S は線源項で高エネルギー中性子に対して $S = 4.0$ ($\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kW}^{-1}$)、巨大共鳴中性子に対して $S = 22.7$ ($\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kW}^{-1}$)、光子に対して $S = 10^6$ ($\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kW}^{-1}$) である。 d は遮蔽体の厚さ、 λ_i は減弱距離、 X_e (E_e) は μ 粒子の最大飛程、 X_0 は放射長、 H_0 はしやへい体の無いときの線量当量率であり、

$$H_0 = 8.0 \times 10^{-15} \times 1.95 \times 10^7 \times 8 \times (1/r^2) \quad (\text{Sv}) \quad (4-4)$$

で表される。

タンクスチーン、鉛および鉄の減弱距離を表 4.1 に示す

表 4.1 蓄積電子ビーム損失に対する遮蔽計算に用いる減弱距離

遮蔽材	減弱距離 (cm)		
	$\lambda(\gamma)$	$\lambda(N)$	$\lambda(n)$
タンクスチーン	1.3	37.6	13.1
鉛	2.1	66.7	23.8
鉄	4.5	58.8	18.5

タンクスチーンに対する放射長と μ 粒子の最大飛程の値に適当なデータが見当たらなかった。そこで安全側の値として、タンクスチーンに鉛の値を用い、各々 0.35 cm、286.4 cm とした。他の物質に対する放射長と μ 粒子の最大飛程の値は表 2.3、表 2.4 に記載されている。

(3) 残留ガス制動放射線に対する遮蔽計算

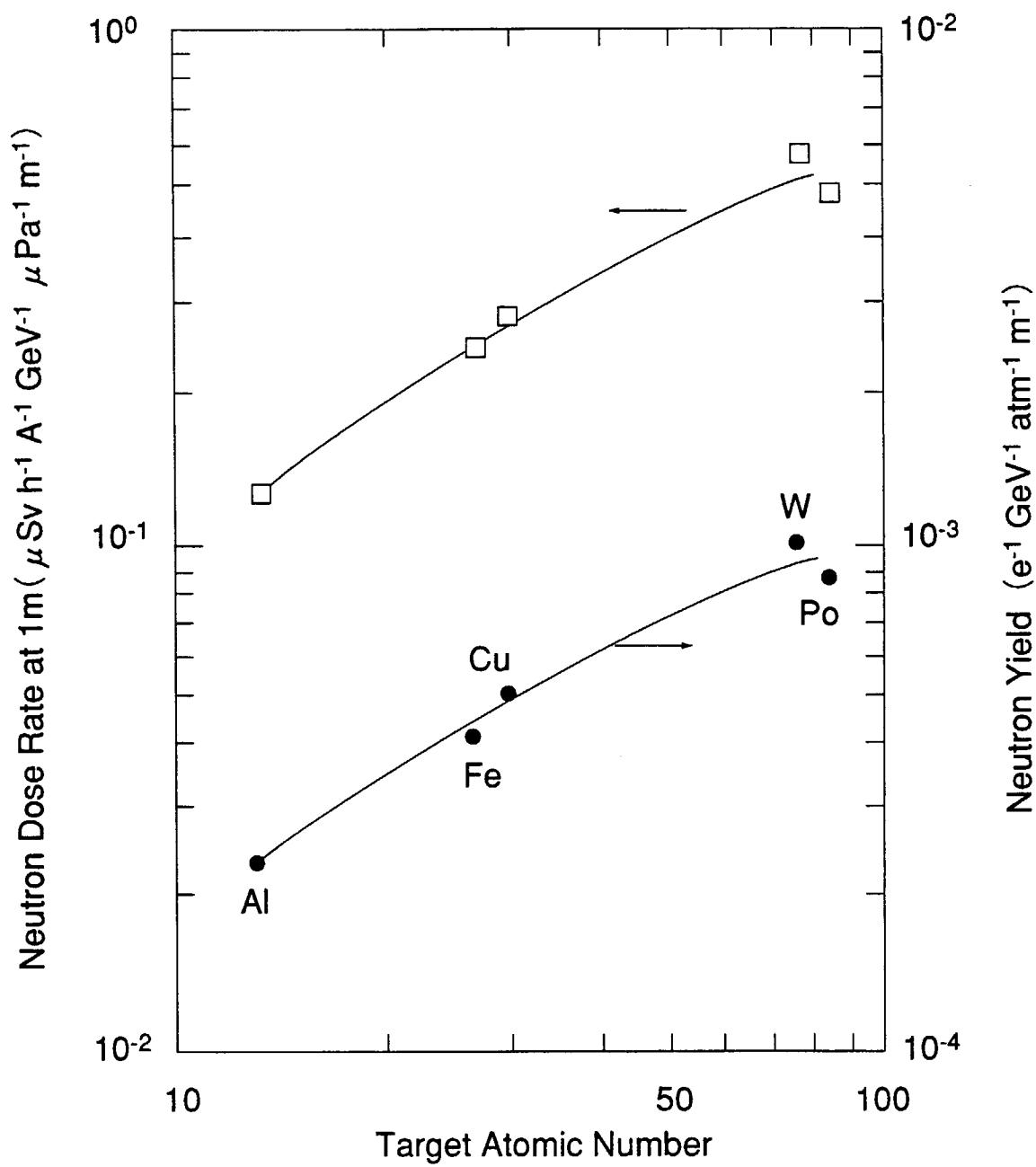
残留ガス制動放射線には前方方向のバルクしやへい計算と同じ伴の方法⁽⁴⁾ を用いた。ただし、残留ガス制動放射線はペンシルビーム状であると想定され、なおかつビーム状被曝に対する線量計算が明確でないことから、ここでは 390 pGy · cm²/photon を用いた。また、残留ガスによって発生した高エネルギー制動放射線がビームラインに混入し、厚い標的（放射光ビームラインシャッター及びガンマストップ等）に入射して光核反応によって発生する中性子の評価には、十分に厚い標的に対して、蓄積リングの真空度、蓄積電流値、蓄積電子のエネルギー、直線軌道長で規格化された文献値⁽²²⁾（図 4.2 参照）を

用いる。ただし、告示に従い、線量換算係数を2倍にする（十分に厚い鉛標的の中心から1mの位置で 24 nSv/h/mA ）。また、この光核反応中性子を遮蔽するためにポリエチレンを用いた場合には、その中性子減弱距離に5.6 cm⁽²³⁾、⁽²⁴⁾を用いる。

放射光ビームラインは種々の機器で成り立っており、複雑な形状の遮蔽計算等を行う必要がある。それらの計算には上記手法の他にモンテカルロ輸送計算コード等を用いる場合がある。SPring-8 で今までに用いた解析手法を、線源と対比させて表4.2に示す⁽²⁵⁾。

表4.2 放射光遮蔽評価に用いた線源毎の計算手法

線源	計算手法	確認詳細計算
放射光 γ (X)	STAC8	G33-GP2 ITS3.0
蓄積電子ビーム損失 γ 、n、 μ	ESRF の式 Jenkins の式 Swanson の式	EGS4 MORSE-CG (HIL086R)
ガス制動放射線 γ 、n	伴の方法(KEK) Liu の方法(SLAC)	EGS4 MCNP4a

図4.2 ガス制動放射線によるビームライン構成機器からの発生中性子線量率⁽²²⁾

4. 2 シナリオ

4. 2. 1 運転モード

放射光ビームラインシャッター（MBS）、下流シャッター（D S S T）の開閉状態により、光学ハッチおよび実験ハッチへの出入り状態は異なる。各シャッターの開閉状態と各ハッチへの立入許可状況の関係を図4. 3に示す。ここで、光学ハッチに立入不可となる時は、実験待機中及び実験中であり、実験ハッチは実験中に立入不可となる。また、実験ホールには入射調整時、入射蓄積時及び放射光利用時とも立入可能である。各運転モードに従い、遮蔽評価点及び評価対象線源を選定する。

4. 2. 2 ハッチ壁漏洩計算

SPring-8 の通常のビームラインにおける放射線遮蔽はハッチ構造である。放射光は極めて指向性が高く、かつビーム軸上にはガス制動放射線などの種々の高エネルギー放射線が混在する。またこれらの放射線を遮蔽するためのガンマストッパーやエンドストッパーなども設置される。そこで遮蔽安全評価は、（1）直接線の透過問題を取り扱うビーム軸上での解析、（2）散乱線を取り扱うビーム軸上以外での解析、に区別する。ここで、ビーム軸上の解析例としては、光源を出発点として、放射光ビームラインシャッター背後の蓄積リング遮蔽壁外側での漏洩線量評価、下流シャッター、エンドストッパー背後での漏洩線量評価などである。ビーム軸上以外での解析例としては、ハッチ側壁、天井壁、後壁での漏洩線量評価である。この時の線源としては散乱放射光およびガス制動放射線の後方散乱等を考慮する。散乱角度は通常、最大漏洩線量を与える角度を取る。但し、ガンマストッパーや局所遮蔽などが存在する場合にはそれらも考慮した散乱角度を想定する。

放射光の散乱物質として、光学素子などが考えられる。光学素子は通常シリコン結晶体が用いられるが、SPring-8 では安全のため一般に銅を仮定する。自己遮蔽効果を考慮すると銅散乱体の厚さは 1 cm あれば十分である⁽²⁶⁾。但し、光子エネルギーが低いことなどの理由により、銅を想定するよりもシリコン散乱体を想定した場合の方が、漏洩線量が高くなる場合があり、その時には散乱体にシリコンを想定する。

4. 2. 3 ビーム輸送パイプ

ハッチ構造である HX ビームラインの他に、光学ハッチから実験ハッチ、ステーションまでの輸送系が長い場合には真空パイプを用いる場合がある。特に軟 X 線（光子エネルギーが 10 keV 以下の軟 X 線領域）放射光を用いる場合にこの真空パイプを用いることが多い。そこで、真空パイプでビームを輸送して

も安全が確認されることが必要である。例として、ミラーを用いた場合でのビーム輸送パイプの安全解析シナリオを以下に示す。

ビーム輸送パイプの安全解析として、(1) ミラー反射光がビーム輸送パイプに入射する場合、(2) ミラー散乱光がビーム輸送パイプに入射する場合を考える。

(1) ミラー反射光

放射光光源の放射光スペクトルを $\phi_0(E)$ 、ミラーの反射率を $R_i(E)$ とする。ここで E は光子エネルギー、 i は第 i 番目のミラーである。ミラー反射光は次式で表される。

$$\phi(E) = \phi_0(E) \cdot \prod_i R_i(E). \quad (4-4)$$

ここでミラー反射光 $\phi(E)$ はビーム輸送用真空パイプにより実験ステーションに導かれるものとする。このミラー反射光 $\phi(E)$ が何らかの原因により真空パイプに斜入射したときの真空パイプからの漏洩線量を評価する。

ミラー反射率 $R_i(E)$ には Henke のデータ⁽²⁷⁾ を用いた。ビームが斜入射するときの漏洩線量率評価には、1回散乱解析コード G 3 3 - G P 2⁽²⁸⁾ を用いた。1例として BL 2 5 S U ビームラインの評価結果を示す。図 4. 4 に BL 2 5 S U ビームラインの概略図を示す。図に示されているように、BL 2 5 S U ビームラインは光学ハッチ内でミラー反射を2回繰り返した後、実験ステーションに真空パイプで放射光を導く。この時の光源スペクトル、1回反射および2回反射スペクトルを図 4. 5 に示す。ミラー反射光子が真空パイプに斜入射するときの G 3 3 - G P 2 コードによる計算モデルを図 4. 6 に示す。この時のビーム最大斜入射角度は光学ハッチ内最終段ミラーの位置と真空パイプの径で決定される。BL 2 5 S U ビームラインの場合、真空パイプの径 62.5 mm、最終段ミラーは光学ハッチ後壁より 1655 mm に設置される。したがって最大斜入射角度は 1.2 度である。G 3 3 - G P 2 コードにおける散乱位置は図 4. 6 に示されているように、真空パイプ中の管壁内光子進行経路周辺にとる。漏洩線量計算位置は入射位置から、出射位置までを想定する。真空パイプの肉厚を 0.5 mmとしたときの計算結果を図 4. 7 に示す。

(2) ミラー散乱光

光源から導かれる放射光には高エネルギー成分も含まれる。この高エネルギー光子がミラーの基盤物質であるシリコンによって散乱され、その一部が真空パイプに混入する可能性が存在する。この散乱光による真空パイプ漏洩線量の評価をミラーが 2 台設置された場合について以下の手順により実施する。(a) 第 1 ミラーによって散乱される光子は全入射光子の 0.1 倍 (ガンマ線全アルベド値) と仮定、(b) 第 1 ミラーから第 2 ミラーに入射する散乱光

子の確率は第1ミラーから第2ミラーを望む立体角で決定、(c)第2ミラーを散乱点として、真空パイプに斜入射する光子漏洩線量をS T A C 8 コードで計算する。

B L 2 5 S Uビームラインの場合、第1ミラーと第2ミラー間の距離2m、第2ミラーの大きさ $4\ 5\ 0 \times 4\ 0\ mm$ である。従って第1ミラーから第2ミラーを望む最大立体角は $7.\ 2 \times 10^{-4}$ 、真空パイプに入射する最大斜入射角度は1.2度である。この時の真空パイプの肉厚を1.8mmとしたときの漏洩線量計算結果を図4.8に示す。

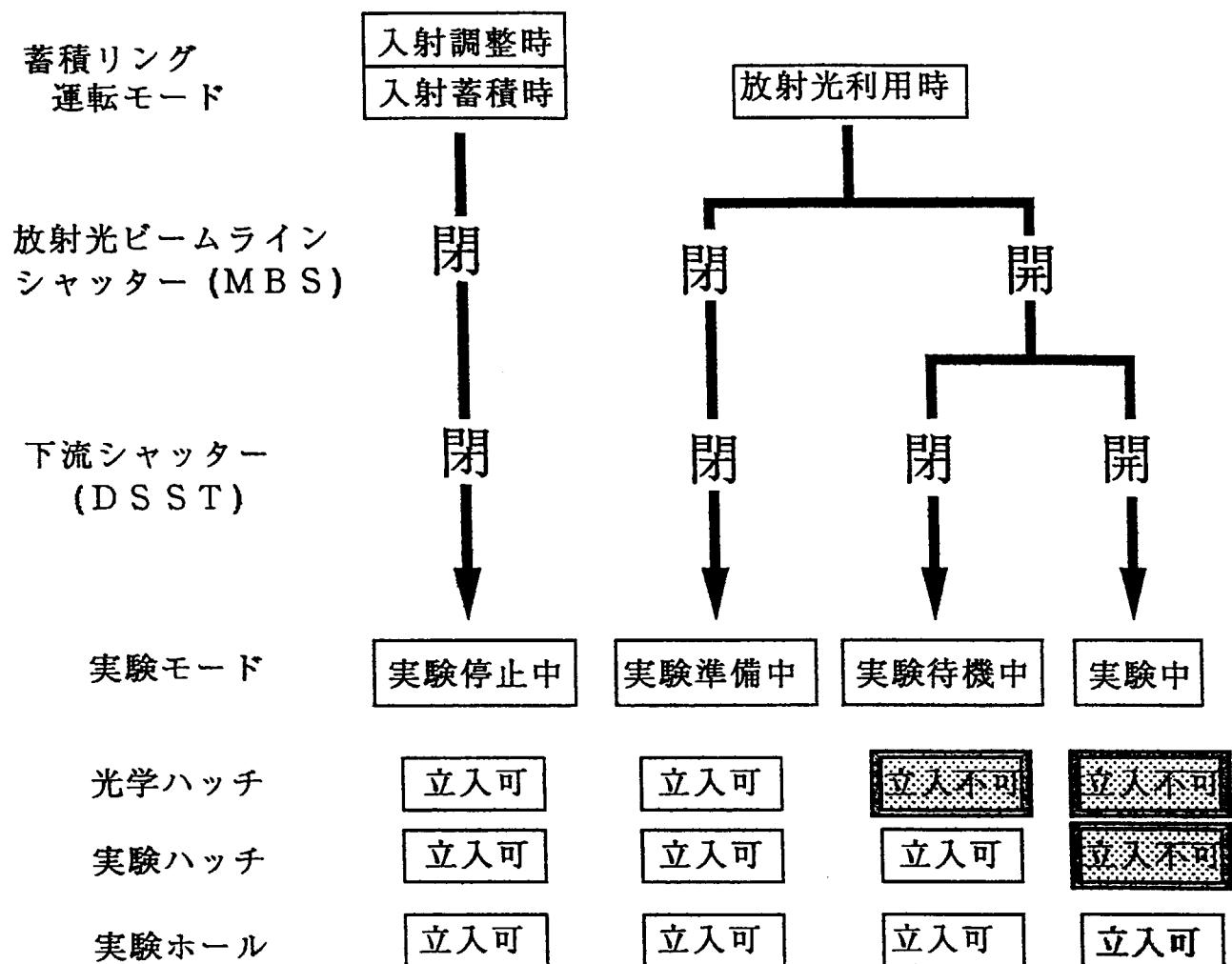


図4.3 SPRING-8 ビームライン実験モード図

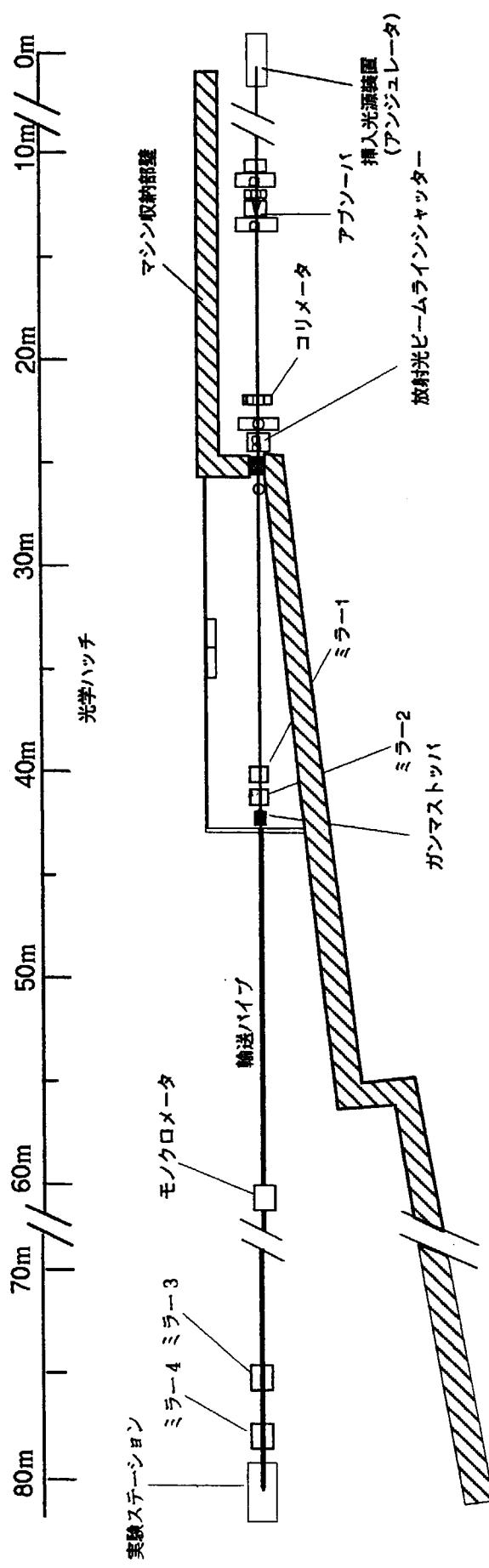


図4.4 アンジュレータービームライン (BL 25 SU)

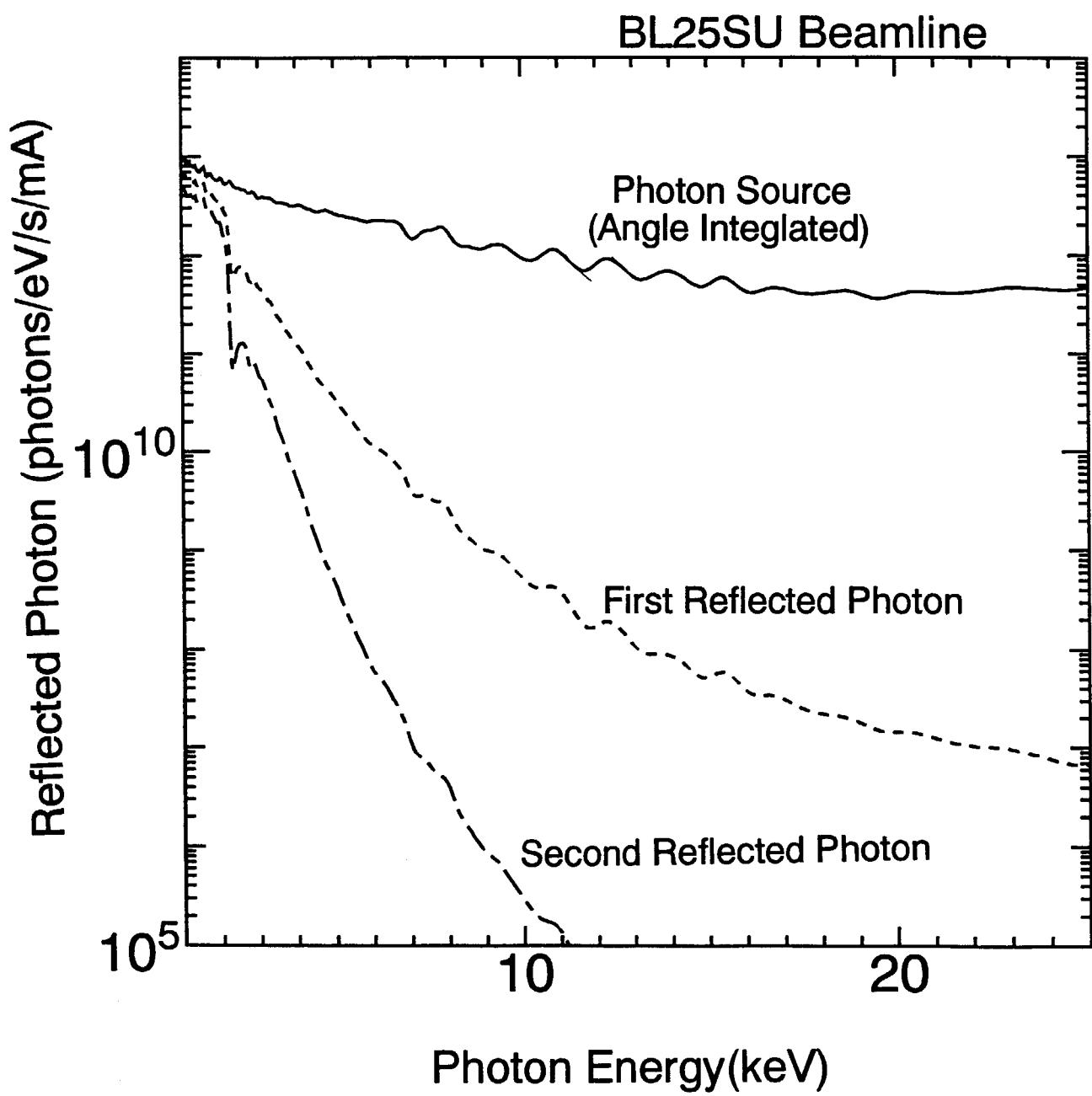


図4.5 ミラー反射放射光スペクトル (BL25SU)

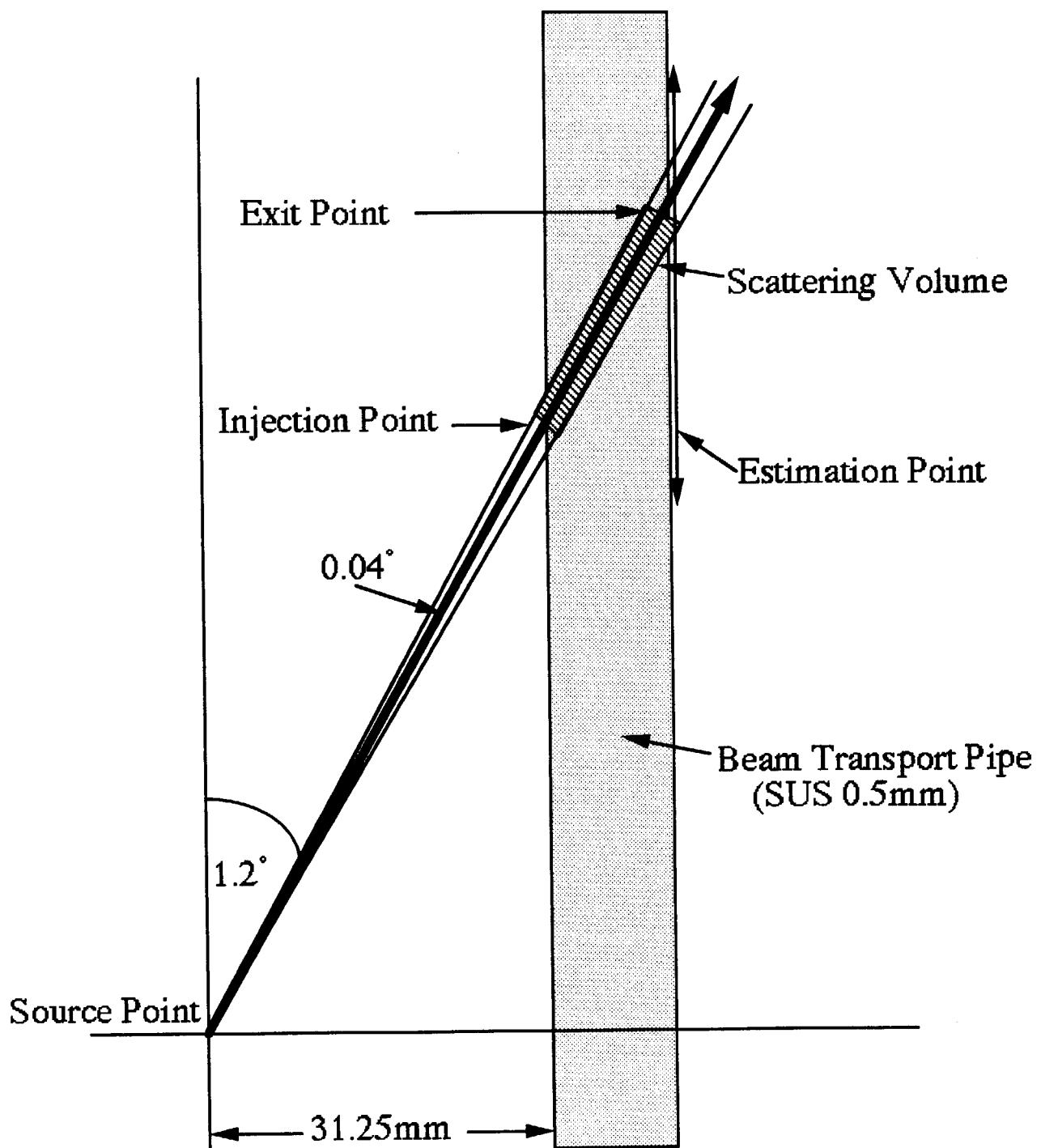


図4.6 G33-GP2の計算モデル概略図

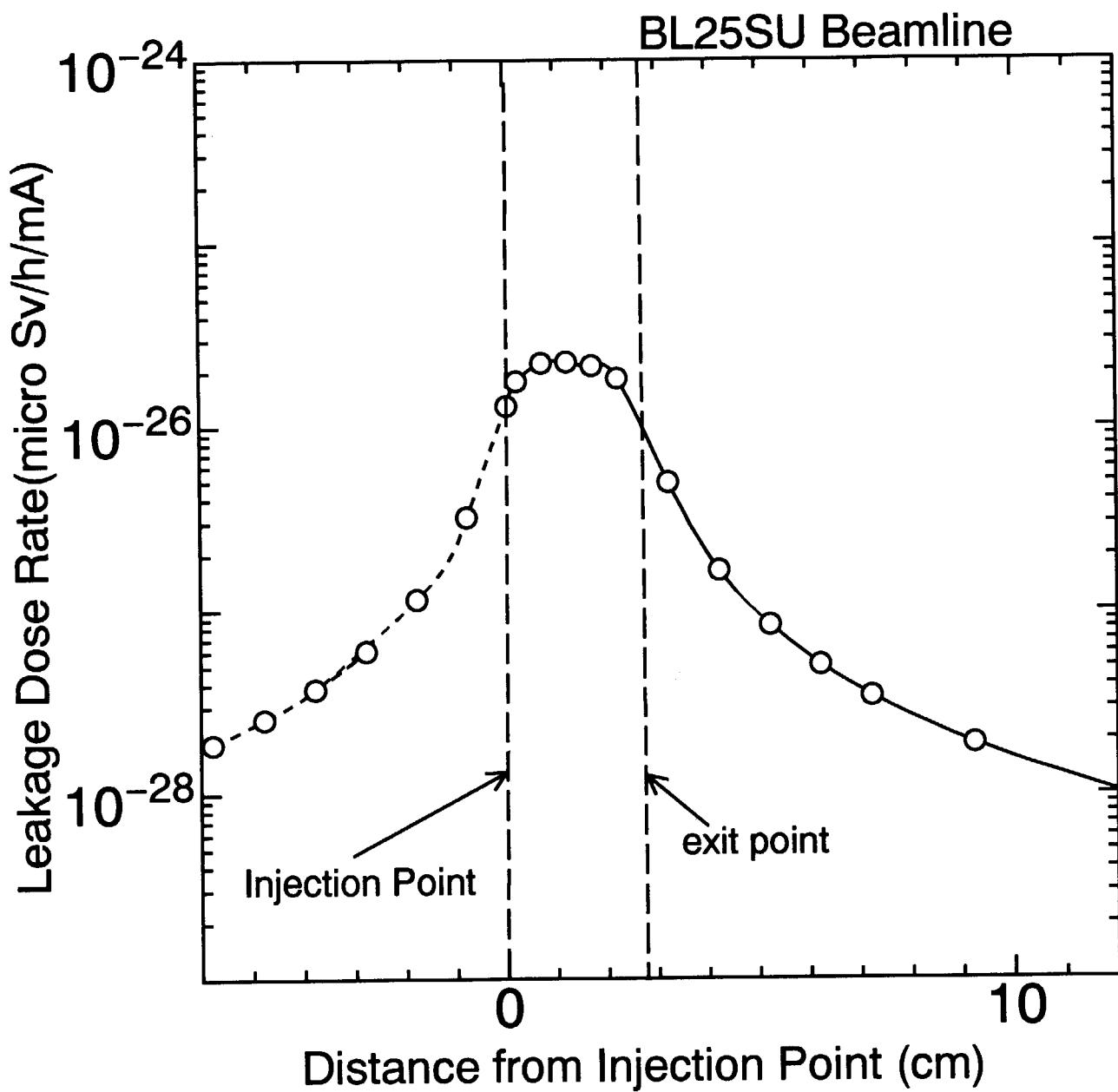


図4.7 ミラー反射放射光によるビームパイプ漏洩線量率

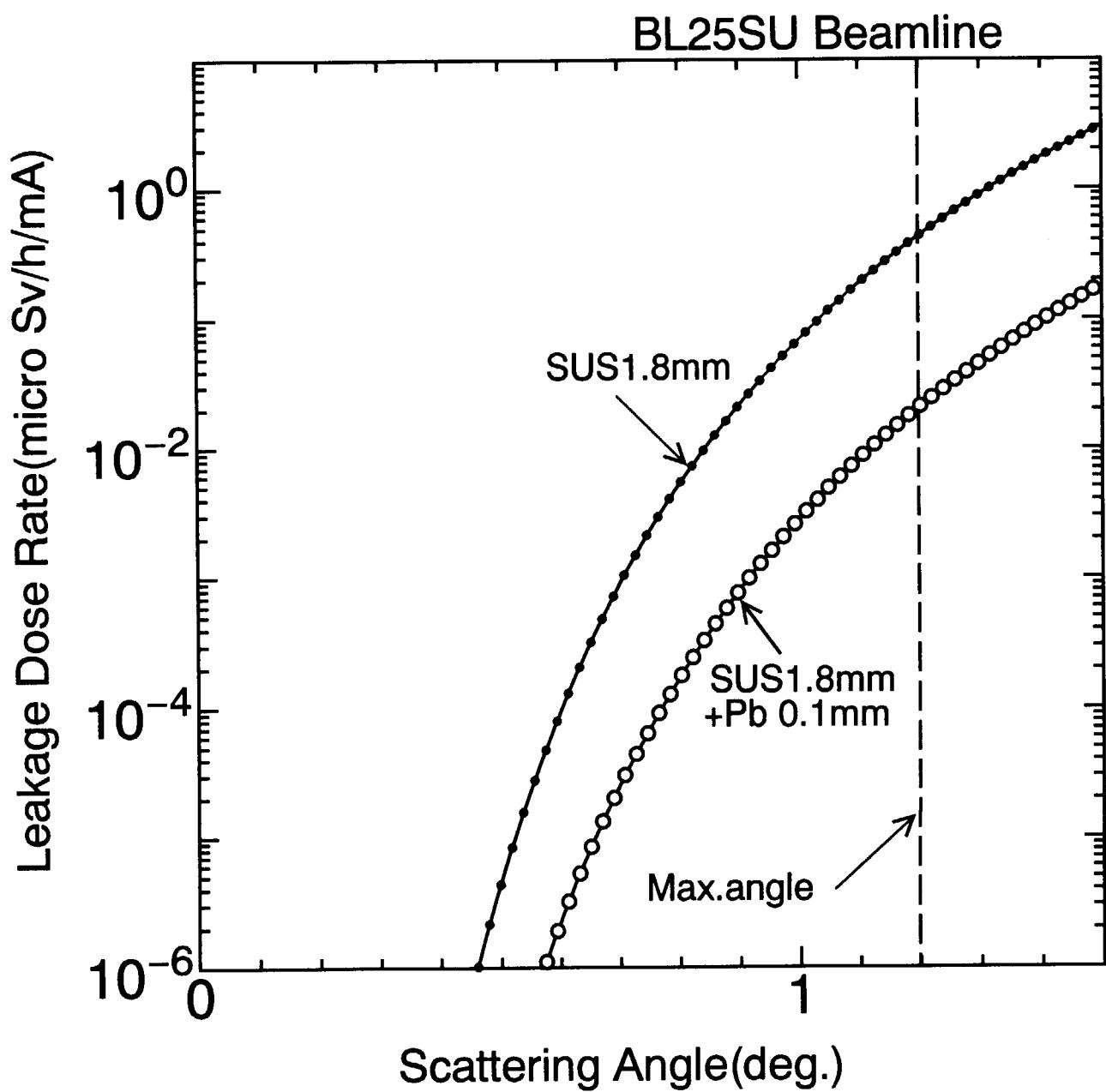


図4.8 ミラー散乱放射光によるビームパイプ漏洩線量率

4. 3 線量当量評価点及び評価対象線源

放射光ビームラインの遮蔽安全に係わる機器の遮蔽性能を評価する上で考慮した線源を表4. 3に示す。ここで、遮蔽性能を評価する上で考慮しなかった線源は、機器遮蔽性能上無視できるほど漏洩線量が低くなることが明らかな場合である。

SPring-8 での代表的なウィグラービームライン、アンジュレータビームラインおよび偏向電磁石ビームラインについての漏洩線量評価点を以下に示す。ここで、ウィグラービームラインには高エネルギー非弾性散乱実験ビームラインBL08W、アンジュレータビームラインには生体高分子構造解析ビームラインBL41XU、偏向電磁石ビームラインには蛋白構造解析ビームラインBL44B2を選定した。

(1) ウィグラービームライン (BL08W)

ウィグラービームライン (BL08W) における評価点を図4. 9に示す。ここで、

- P 1 : 放射光実験停止中で蓄積リングしゃへい壁外側のビーム軸上
- P 2 : 放射光実験準備中で光学ハッチ側壁
- P 3 : 放射光実験準備中で光学ハッチ後壁 (散乱角2度)
- P 4 : 放射光実験待機中で下流シャッター1に最も近い実験ハッチ1内ビーム軸上
- P 4' : 放射光実験待機中で下流シャッター2に最も近い実験ハッチ2内ビーム軸上
- P 5 : 放射光実験中で実験ハッチ1側壁
- P 5' : 放射光実験中で実験ハッチ2側壁
- P 6 : 放射光実験中で実験ハッチ1後壁 (散乱角3度)
- P 6' : 放射光実験中で実験ハッチ2後壁 (散乱角3度)
- P 7 : 放射光実験中でエンドストップ1に最も近い実験ハッチ1外のビーム軸上
- P 7' : 放射光実験中でエンドストップ2に最も近い実験ハッチ2外のビーム軸上
- P 8 : 放射光実験中で実験ハッチに最も近い管理区域境界点である。

(2) アンジュレータビームライン (BL 41XU)

アンジュレータビームライン (BL 41XU) における評価地点を図4.10に示す。ここで、

- P 1 : 放射光実験停止中で蓄積リングしやへい壁外側のビーム軸上
- P 2 : 放射光実験準備中で光学ハッチ側壁
- P 3 : 放射光実験準備中で光学ハッチ後壁 (散乱角 3 度)
- P 4 : 放射光実験待機中で下流シャッターに最も近い実験ハッチ1 内ビーム軸上
- P 5 : 放射光実験中で実験ハッチ1 側壁
- P 5' : 放射光実験中で実験ハッチ2 側壁
- P 6 : 放射光実験中で実験ハッチ1 後壁 (散乱角 3 度)
- P 6' : 放射光実験中で実験ハッチ2 後壁 (散乱角 3 度)
- P 7 : 放射光実験中で可動式エンドストップに最も近い実験ハッチ1 外のビーム軸上
- P 7' : 放射光実験中で固定エンドストップに最も近い実験ハッチ2 外のビーム軸上
- P 8 : 放射光実験中で実験ハッチに最も近い管理区域境界点である。

(3) 偏向電磁石ビームライン (BL 44B2)

偏向電磁石ビームライン (BL 44B2) における評価地点を図4.11に示す。ここで、

- P 1 : 放射光実験停止中で蓄積リングしやへい壁外側のビーム軸上
- P 2 : 放射光実験準備中で光学ハッチ1 側壁
- P 3 : 放射光実験準備中で光学ハッチ1 後壁 (散乱角 1 度)
- P 4 : 放射光実験待機中で光学ハッチ1 後壁ビーム軸上
- P 2' : 放射光実験中で光学ハッチ2 側壁
- P 3' : 放射光実験中で光学ハッチ2 後壁 (散乱角 3 度)
- P 4' : 放射光実験中で光学ハッチ2 後壁ビーム軸上
- P 2'' : 放射光実験中で光学ハッチ3 側壁
- P 3'' : 放射光実験中で光学ハッチ3 後壁 (散乱角 3 度)
- P 4'' : 放射光実験中で光学ハッチ3 後壁ビーム軸上
- P 8 : 放射光実験中で光学ハッチ3 に最も近い管理区域

境界点
である。

各々の評価点で考慮した線源は以下の通りである。

(1) ウィグラーービームライン (B L 0 8 W)

- P 1 : 放射光（白色）、電子ビーム損失による光子と中性子、 μ 粒子及びガス制動放射線と光中性子
- P 2 : 放射光（白色および単色）及びガス制動放射線と光中性子
- P 3 : 放射光（白色）、放射光利用時における電子ビーム損失による光子と中性子、 μ 粒子及びガス制動放射線と光中性子
- P 4 : 放射光（分光後の 3 次高調波までのエネルギーで最大被ばく線量を与える光子）、放射光利用時における電子ビーム損失による光子と中性子、 μ 粒子及びガス制動放射線と光中性子
- P 4' : 放射光（分光後の 3 次高調波までのエネルギーで最大被ばく線量を与える光子）、放射光利用時における電子ビーム損失による光子と中性子、 μ 粒子及びガス制動放射線と光中性子
- P 5 : 放射光（分光後の 3 次高調波までのエネルギーで最大被ばく線量を与える光子）
- P 5' : 放射光（分光後の 3 次高調波までのエネルギーで最大被ばく線量を与える光子）
- P 6 : 放射光（分光後の 3 次高調波までのエネルギーで最大被ばく線量を与える光子）
- P 6' : 放射光（分光後の 3 次高調波までのエネルギーで最大被ばく線量を与える光子）
- P 7 : 放射光（分光後の 3 次高調波までのエネルギーで最大被ばく線量を与える光子）
- P 7' : 放射光（分光後の 3 次高調波までのエネルギーで最大被ばく線量を与える光子）
- P 8 : 放射光（分光後の 3 次高調波までのエネルギーで最大被ばく線量を与える光子）

(2) アンジュレータビームライン (B L 4 1 X U)

- P 1 : 放射光（白色）、電子ビーム損失による光子と
中性子、 μ 粒子及びガス制動放射線と光中性子
- P 2 : 放射光（白色）及びガス制動放射線と光中性子
- P 3 : 放射光（白色）、放射光利用時における電子
ビーム損失による光子と中性子、 μ 粒子及びガス
制動放射線と光中性子
- P 4 : 放射光（分光後の3次高調波）、放射光利用時
における電子ビーム損失による光子と中性子、
 μ 粒子及びガス制動放射線と光中性子
- P 5 : 放射光（分光後の3次高調波）
- P 5' : 放射光（分光後の3次高調波）
- P 6 : 放射光（分光後の3次高調波）
- P 6' : 放射光（分光後の3次高調波）
- P 7 : 放射光（分光後の3次高調波）
- P 7' : 放射光（分光後の3次高調波）
- P 8 : 放射光（分光後の3次高調波）

(3) 偏向電磁石ビームライン (B L 4 4 B 2)

- P 1 : 放射光（白色）、電子ビーム損失による光子と
中性子、 μ 粒子及びガス制動放射線と光中性子
- P 2 : 放射光（白色および単色）及びガス制動放射線
と光中性子
- P 3 : 放射光（白色）、放射光利用時における電子
ビーム損失による光子と中性子、 μ 粒子及びガス
制動放射線と光中性子
- P 4 : 放射光（白色）、放射光利用時における電子
ビーム損失による光子と中性子、 μ 粒子及びガス
制動放射線と光中性子
- P 2' : 放射光（白色および単色）及びガス制動放射線
と光中性子
- P 3' : 放射光（白色）、放射光利用時における電子
ビーム損失による光子と中性子、 μ 粒子及びガス
制動放射線と光中性子
- P 4' : 放射光（白色）、放射光利用時における電子
ビーム損失による光子と中性子、 μ 粒子及びガス

制動放射線と光中性子

P 2" : 放射光（白色および単色）及びガス制動放射線と光中性子

P 3" : 放射光（白色）、放射光利用時における電子ビーム損失による光子と中性子、 μ 粒子及びガス制動放射線と光中性子

P 4" : 放射光（白色）、放射光利用時における電子ビーム損失による光子と中性子、 μ 粒子及びガス制動放射線と光中性子

P 8 : 放射光（白色）、放射光利用時における電子ビーム損失による光子と中性子、 μ 粒子及びガス制動放射線と光中性子

表4. 3 放射光ビームライン機器に対する遮蔽解析上考慮した線源の種類

ビームライン機器	蓄積電子ビーム損失 (γ 、n、 μ)	ガス制動放射線及び光中性子	放射光 γ (X)
放射光 BL シャッター	○	○	X
下流シャッター (*)	X	X	○
ビームストッパー (*)	X	X	○
ガンマストッパー	○	○	X
光学ハッチ	○	○	○
実験ハッチ	X	X	○
リング遮蔽壁	○	○	X

(*) 分光された後の単色放射光を想定する。

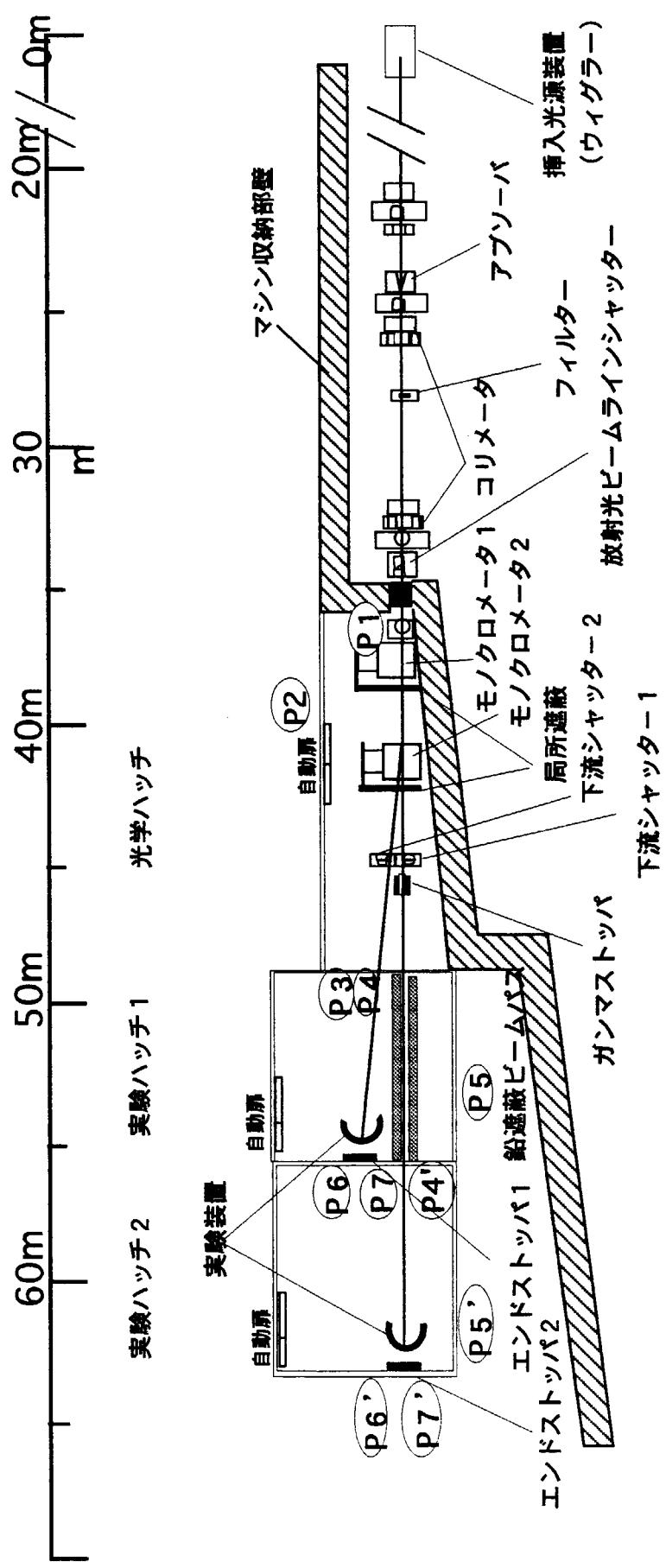


図4.9 ウィ格子-ビームライン (BL 0.8W)

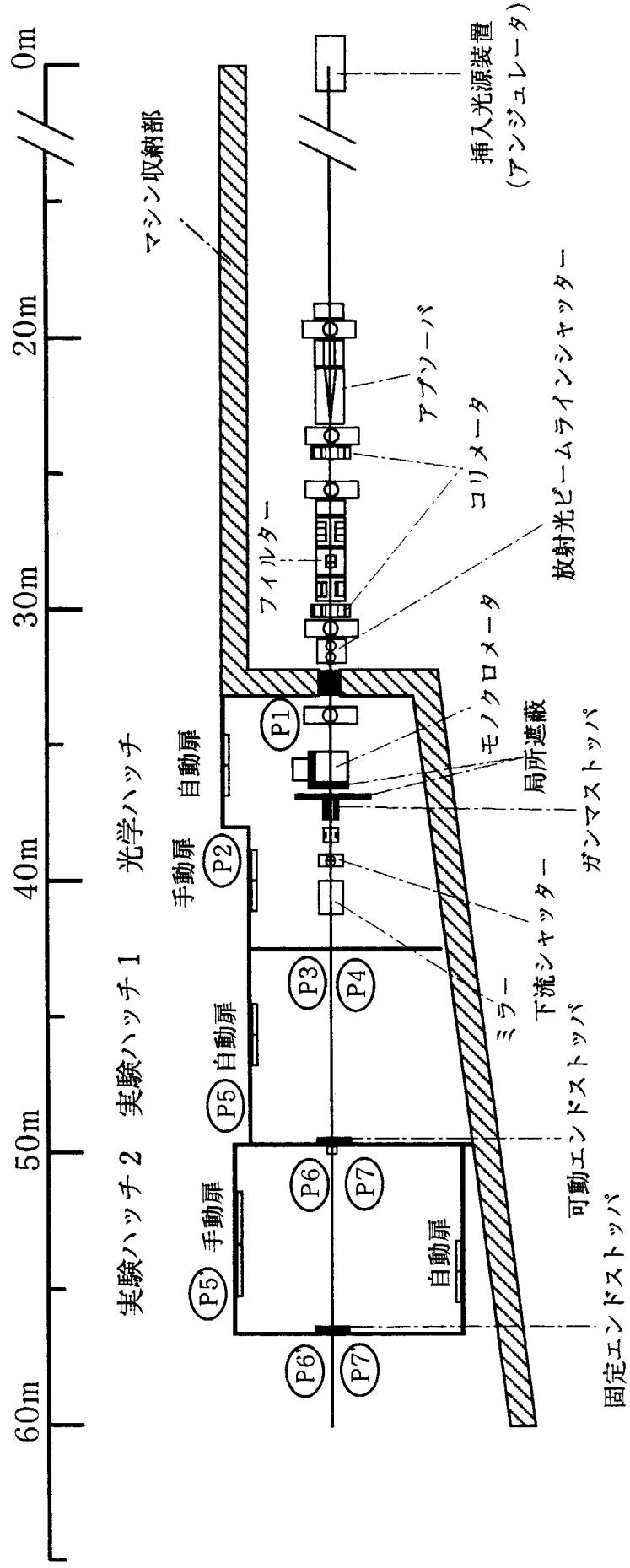


図4.10 アンジュレータービームライン(BL 41 XU)

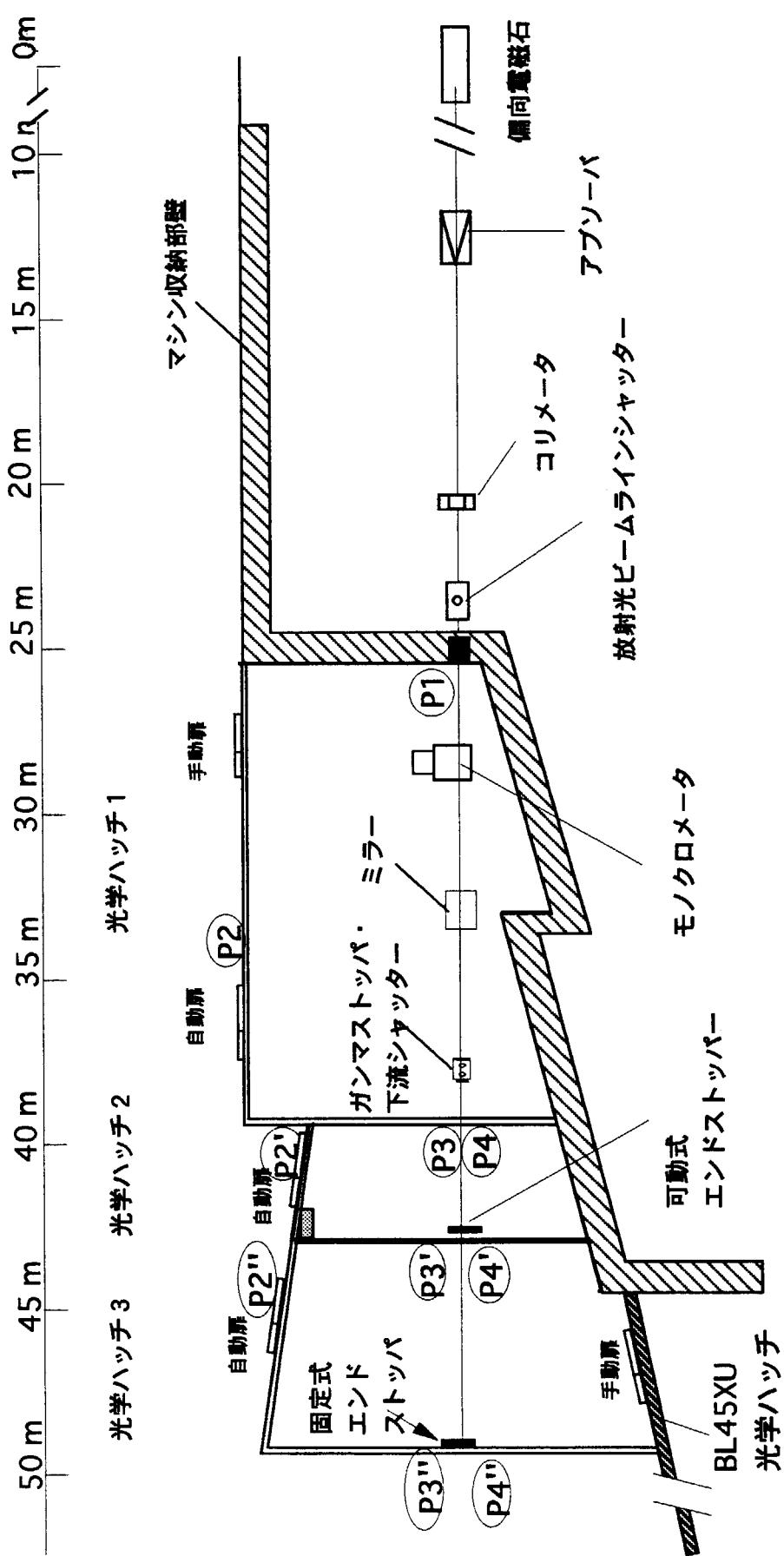


図4.11 偏向電磁石ビームライン (BL44B2)

4. 4 放射光源

SPring-8 の代表的な放射光源、3種類⁽²⁹⁾について以下に示す。

(1) ウィグラーービームライン（高エネルギー非弾性散乱ビームライン）の光源諸定数を表4. 4に示す。

表4. 4 ウィグラーービームラインの光源諸定数
(高エネルギー非弾性散乱ビームライン)

出力	0. 18 kW/mA
磁場周期長	12 cm
磁場強度	1 T
周期数	37
臨界エネルギー	42.7 keV
最大開き角	水平方向 1.4 mrad 垂直方向 0.4 mrad
電子軌道直線部の長さ	19 m
分光後の最大使用エネルギー	300 keV
エネルギー幅	4.5 keV

(2) アンジュレータービームライン (BL41XU) の光源諸定数 (真空封止型) を表4. 5に示す。

表4. 5 アンジュレータービームラインの光源諸定数
(BL41XU)

出力	0. 11 kW/mA
磁場周期長	3.2 cm
磁場強度	0.78 T
周期数	140
1次高調波エネルギー	4.8 keV
電子軌道直線部の長さ	19 m
分光後の最大使用基本波エネルギー	36 keV
分光後のエネルギー幅	18 eV

(3) 偏向電磁石(ベンディング)ビームライン(BL02B1)の光源諸定数を表4.6に示す。

表4.6 偏向電磁石(ベンディング)ビームラインの
光源諸定数(BL02B1)

出力	1.5W/mrad/mA
曲率半径	39.3 m
磁場強度	0.68 T
臨界エネルギー	29.0 keV
最大開き角 水平方向	1.5 mrad
分光後の最大使用基本波エネルギー	50 keV
分光後の エネルギー幅	25 eV

以上の3種類の光源スペクトルと他の施設の光源スペクトルを図4.12に示す。

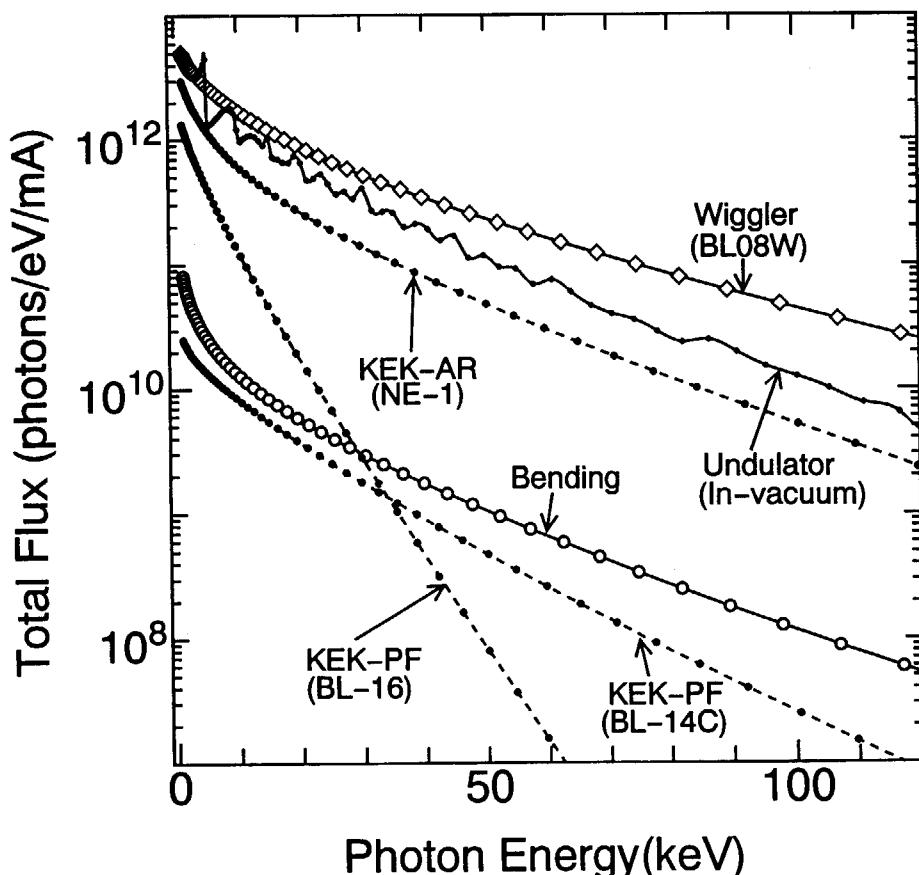


図4.12 放射光光源スペクトル

4. 5 グランドシャイン

SPring-8のような大型の第3世代放射光施設では、蓄積電子エネルギーが高く、その結果放射光エネルギーが相対的に高いこと、その上、かつて無かつた程放射光強度が強いことにより、ビームライン安全設計上、今まで問題とされなかつたビームラインハッチ床面からの散乱放射線（グランドシャイン）を評価する必要がある。評価方法として（1）散乱放射光スペクトルの計算、（2）散乱スペクトルを線源、床を散乱区域としたハッチ壁外床面での漏洩線量計算、を行う。散乱放射光スペクトルの計算にはS T A C 8 コード⁽²¹⁾が、ハッチ壁外床面での漏洩線量計算にはG 3 3—G P 2⁽²⁸⁾ コードを使用する⁽³⁰⁾。

グランドシャイン対策として、（1）ハッチ内側の床面に鉛板を敷設する方法、（2）ハッチ外側の床面に鉛板を敷設する方法、（3）ハッチ鉛壁をコンクリート床面に埋め込む方法、が考えられる。図4. 13, 4. 14, 4. 15に各々の方法に対応する計算モデルを示す。

例として、偏向電磁石ビームラインの光学ハッチ壁外床面での漏洩線量計算結果を図4. 16, 4. 17, 4. 18に示す。この場合のハッチ遮蔽壁の厚さには鉛1 cm+鉄1 cmを想定した。図には比較のため、グランドシャイン対策を施さない場合でのモンテカルロコード I T S 3. 0⁽³¹⁾ の計算結果も示した。また、線源と同じ高さHでのハッチ壁外側での線量、評価点での直接線による漏洩線量の最大値も示した。図に示されているように、グランドシャイン対策を施さない場合にはハッチ壁外床面で高い漏洩線量となる。SPring-8の場合、設計基準目標値が $0.07 \mu\text{Sv}/\text{h}/\text{mA}$ であるので、（1）モデル1の場合、鉛厚さ4 mm、（2）モデル2の場合、鉛厚さ3 mm、幅25 cm、（3）モデル3の場合、ハッチ埋設深さ7 cm、が必要である。

どの方法を採用するかはハッチの構造等から決定されるが、放射線遮蔽上からは、モデル2のハッチ外側の床面に鉛板を敷設する方法が最も有効である。

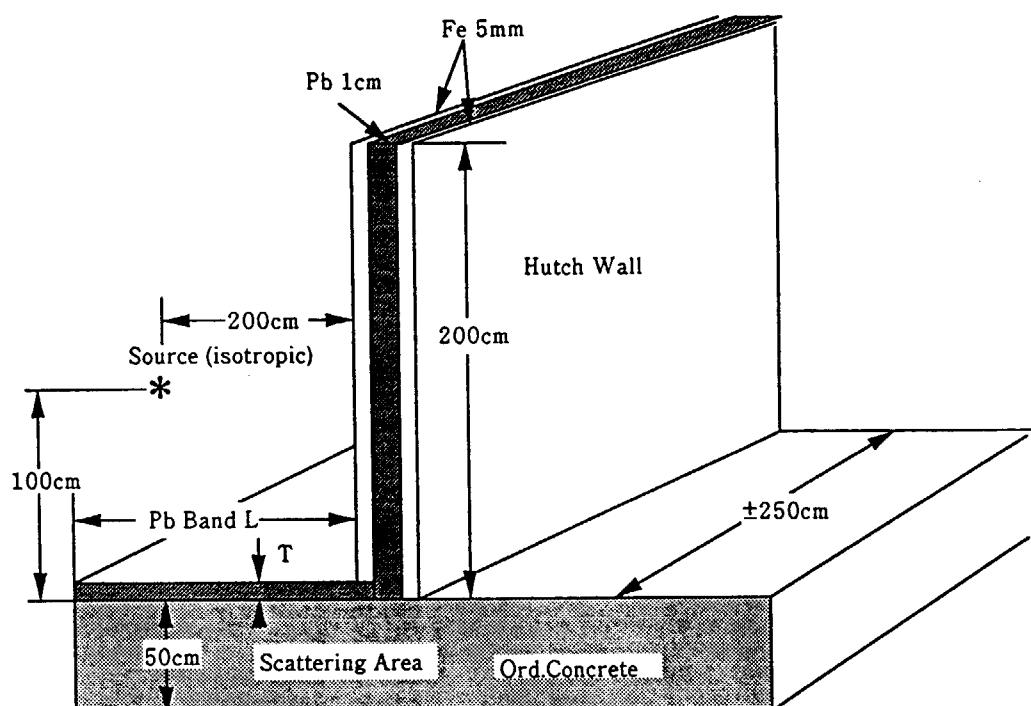


図4.13 G33-GP2によるグランドシャイン評価用計算モデル1
(厚さT cm、幅L cmの鉛遮蔽材をハッチ内側に敷設)

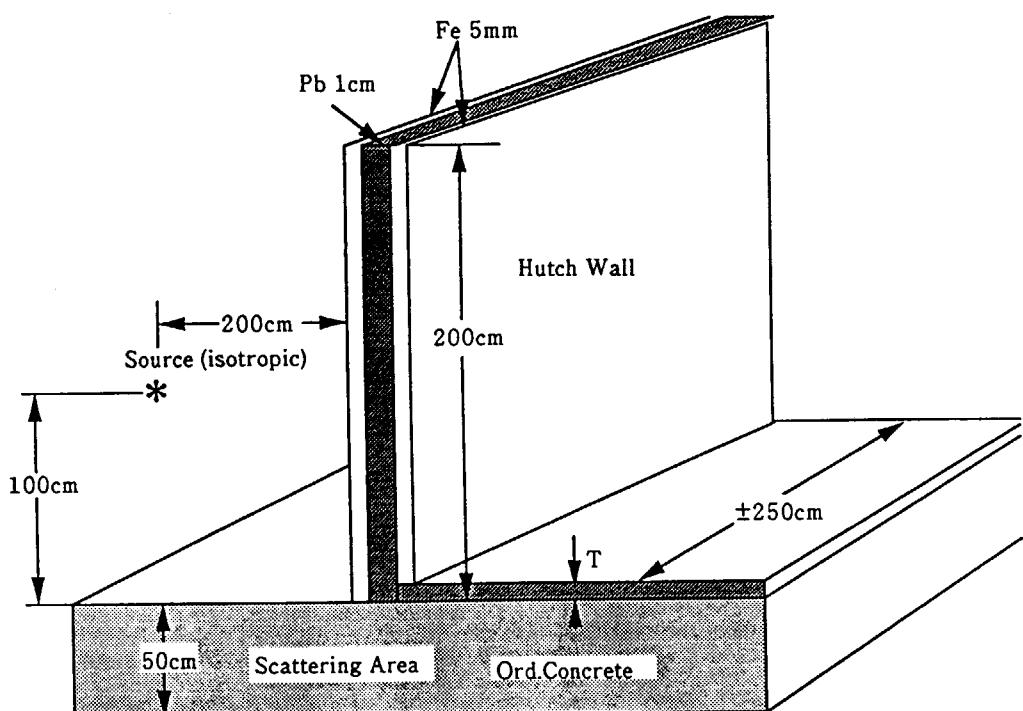


図4.14 G33-GP2によるグランドシャイン評価用計算モデル2
(厚さT cmの鉛遮蔽材をハッチ外側に敷設)

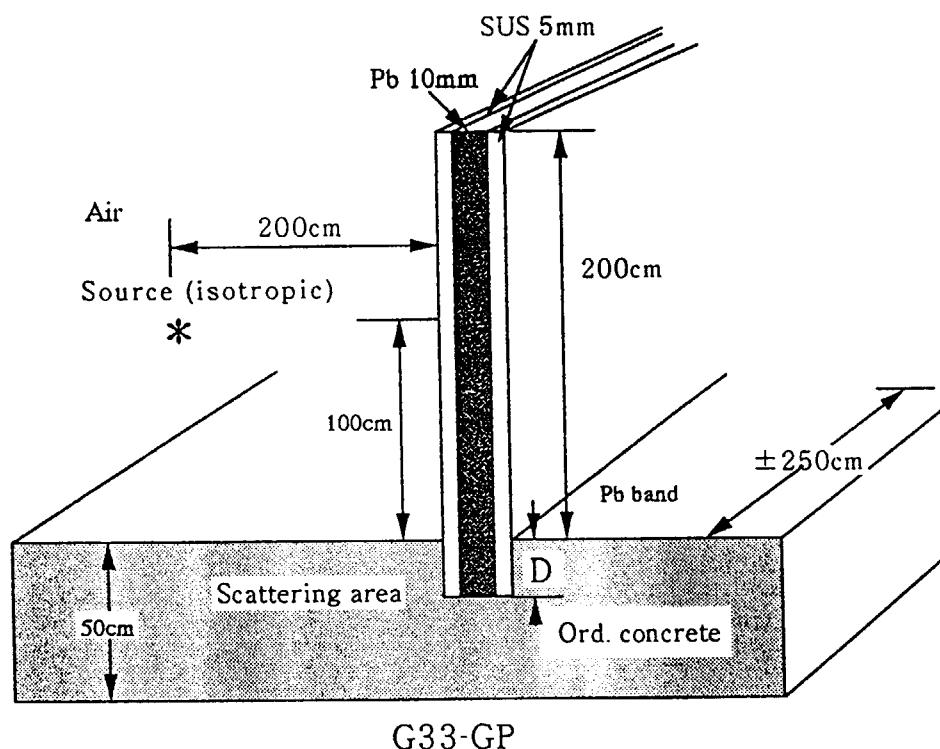


図4.15 G33-GP 2によるグランドシャイン評価用計算モデル3
(ハッチ壁を深さD cm埋設)

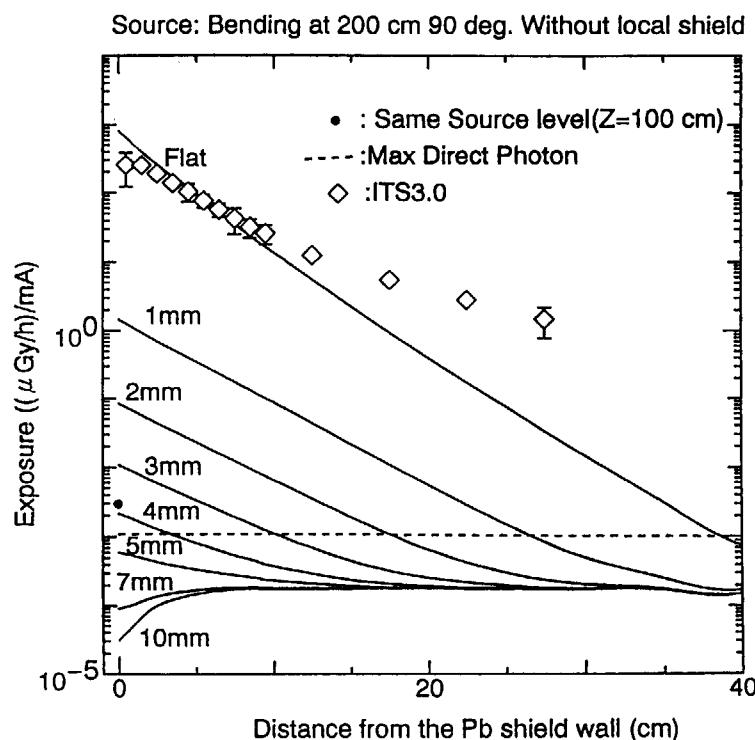


図4.16 Model(1)におけるSPRING-8偏向電磁石ビーム
ラインのグランドシャイン線量計算結果
(散乱角度 90度、各数字は敷設鉛厚さTを示す。)
(●；線源と同じ高さでのハッチ壁外の漏洩線量率)
(………；直接線による最大漏洩線量)

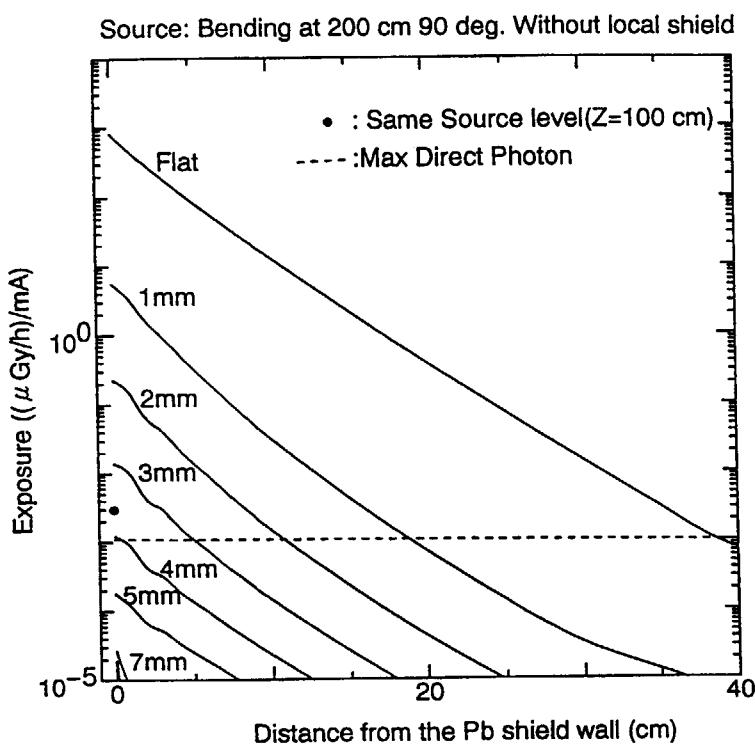


図4.17 Model 1(2)における Spring-8 偏向電磁石ビーム
ラインのグランドシャイン線量計算結果
(散乱角度 90度、各数字は敷設鉛厚さ T を示す。)

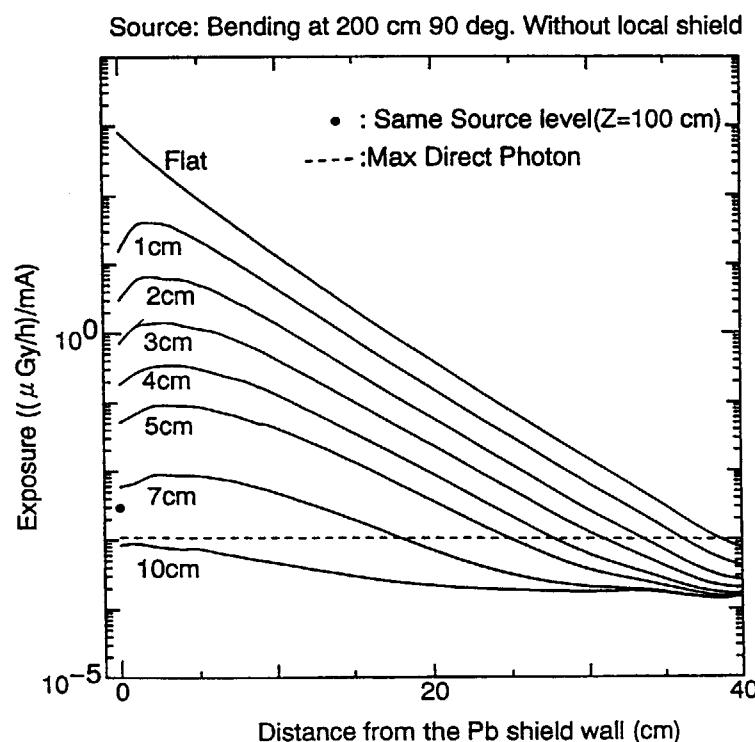


図4.18 Model 1(3)における Spring-8 偏向電磁石ビーム
ラインのグランドシャイン線量計算結果
(散乱角度 90度、各数字は埋設壁深さ D を示す。)

5. まとめ

大型放射光施設 SPring-8 の遮蔽設計・安全評価で用いた、加速器バルク遮蔽、放射光ビームライン遮蔽、スカイシャイン計算、ダクトおよび迷路のストリーミング計算、空気や水、構造物の放射化計算、電子ビームの異常事象時の被曝線量評価法やそれぞれに付随する計算条件を、その妥当性の検証結果とともにまとめた。これらの計算方法や計算条件については、適宜、日本原子力研究所・理化学研究所大型放射光施設推進共同チームに設置された大型放射光施設安全性検討委員会の議論・検討を経て、その都度妥当性を確認の上、SPring-8 の遮蔽設計・安全評価に反映させてきたものである。最終的には審査当局の専門家による審査も経て妥当性が確認された。

平成 8 年 1 月に入射器（線型加速器）のコミッショニングが開始されて以来、シンクロトロンブースターおよび蓄積リングも含めて SPring-8 は順調な運転を続けている。また、ビームラインについても現在までに 18 本認可されており、これらも順調に運転ないしは建設を続行中である。加速器やビームラインなど放射線発生装置使用室およびその他の遮蔽構造物等はその使用開始前に必ず放射線漏洩検査を実施している。また、使用中は放射線モニター等で常時監視されている。その結果、今までに予期しない放射線漏洩等は観測されず、SPring-8 で採用した遮蔽設計・安全評価手法の妥当性が検証された。

加速器遮蔽に係わる計算条件のうちで、電子ビーム損失位置や損失率等線源条件を規定するビーム損失仮定は、加速器の型式および性能に大きく依存し、遮蔽設計・安全評価に大きく影響をおよぼすものである。今後、より精度の高い最適化された遮蔽設計手法の確立を目指して、ビーム損失条件など、本加速器システム特有の性能やそれに起因するより詳細な放射線情報や高エネルギー加速器遮蔽データ等を蓄積するとともに、遮蔽実験を通して遮蔽評価手法の検証を重ねていくことが緊急の課題である。

謝辞

大型放射光施設 SPring-8 に対するバルク遮蔽および放射光ビームライン遮蔽の計算手法の確立やビーム損失条件の設定に当たり数々の貴重なご教唆をいただいた高エネルギー加速器機構、平山英夫教授および伴秀一助教授に深く感謝いたします。放射化生成物評価法のまとめに協力していただきました日本原子力研究所、原田康典氏、宮本幸博氏、植田久男氏に厚くお礼申し上げます。また、数々の貴重なご意見、検討をいただいた大型放射光施設安全性検討委員会、浜田達二委員長をはじめ諸先生方に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) W. P. Swanson, "Radiological Aspects of the Operation of Electron Linear Accelerators", Technical report Series No. 188, IAEA (1979).
- 2) E. Brauer, "Radiation Shielding for the 6 GeV ESRF", ESRF/SHIEL/88-04, Oct. (1988). (revised)
- 3) H. Dinter , et al., "Calculation of Electron-Photon Doses Behind Beam Absorbers at High Energy Electron Accelerators", Radiat. Prot. Dosim. , 28, 207 (1989).
- 4) S. Ban, et al., "Estimation of Absorbed Dose Due to Gas Bremsstrahlung from Electron Storage Ring", Health Physics Vol. 57, No. 3 (1989).
- 5) W. R. Nelson, et al., "THE EGS4 CODE SYSTEM", SLAC-265, UC-32 Dec. (1985).
- 6) T. M. Jenkins, "Neutron and Photon Measurements through Concrete from a 15 GeV Electron Beam on a Target - Comparison with Models and Calculations", Nucl. Instrum. Meth. 159, 265 (1979).
- 7) H. Dinter and K. Tesch, "Dose and Shielding Parameters of Electron-Photon Stray Radiation from a High-Energy Electron Beam", Nucl. Instr. Meth. , 143 (1977).
- 8) K. O'Brien, "Tables for the Determination of the Lateral Shielding Requirements of High Energy Electron and Proton Accelerators", IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-16, 3 (1968).
- 9) H. Hirayama and S. Ban, "Neutron Dose Equivalent Outside the Lateral Shielding of an Electron Linear Accelerator Operating at 0.85 GeV", Health Physics Vol. 56, No. 6 (1989).
- 10) N. Sasamoto, "Bulk Shielding Calculation of High Energy Electron Accelerators with Linear Source Assumptions", JAERI-M 90-095 (1990).
- 11) G. R. Stevenson and R. H. Thomas, "A Simple Procedure for the Estimation of Neutron Skyshine from Proton Accelerators", Health Physics Vol. 46, No. 1, 115 (1984).
- 12) A. Rindi and R. Thomas, "Skyshine - Paper Tiger", Particle Accelerators, 7, 23 (1975).
- 13) 林 克己、他、"ダクトストリーミング簡易計算コード DUCT-II およびスカイシャイン簡易計算コード SHINE-II", JAERI-M 91-013 (1991).
- 14) H. W. Patterson and R. H. Thomas, "Accelerator Health Physics", Academic Press (1973).
- 15) ICRP, "体外放射線に対する防護のためのデータ" ICRP Publ. 51 日本アイソトープ協会 東京 (1988)
- 16) T. Rockwell III (Ed.), "Reactor Shielding Design Manual", McGraw-Hill Book Company Inc. (1956).

- 17) K. Shin, "Evaluation Formula for Radiation Duct Streaming", J. Nucl. Sci. Technol., 26[12], 1067 (1989).
- 18) K. Tesch, "Attenuation of the Photon Dose in Labyrinths and Ducts at Accelerators", Radiat. Prot. Dosim., 20, 169 (1987).
- 19) K. Tesch, "The Attenuation of the Neutron Dose Equivalent in a Labyrinth through an Accelerator Shield", Particle Accelerators, 12, 169 (1982).
- 20) (財)放射線安全技術センター：昭和60年度科学技術調査作成委託調査報告書「高エネルギー加速器施設の安全管理に関する基礎的調査」(1986).
- 21) Y. Asano & N. Sasamoto, "Development of Shielding Design Code for Synchrotron Radiation Beamline" Radiation Phys. & Chem., Vol. 44, 133 (1994).
- 22) J. C. Liu, W. Nelson and K. R. Kase, "Gas Bremsstrahlung and Associated Photon-Neutron Shielding Calculations for Electron Storage Ring", SLAC Pub. 6532 (1994).
- 23) NCRP, "Neutron Contamination from Medical Electron Accelerators", NCRP No. 79 (1984)
- 24) N. E. Ipe and A. Fasso, "Gas Bremsstrahlung Considerations in the Shielding Design of the Advanced Photon Source Synchrotron Radiation Beamlines", Nucl. Inst. & Methods in Physics Research A351 (1994)
- 25) Y. Asano & N. Sasamoto, "Shielding Design Calculation for Spring-8 Insertion Device Beamline", Proc. of IRPA9, p4-582 Vienna (1996).
- 26) Y. Asano, "Synchrotron Radiation Shielding Calculation using STAC8", Proc. of International Technical Workshop on Accelerator Radiation Aspects at SRRC", Hsinchu, Taiwan (1997)
- 27) B. L. Henke, E. M. Gullikson and J. C. Davis, "X-ray Interaction; photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at E=50-30000eV, Z=1-92" Atomic Nuclear Tables, Vol. 54 (1993).
- 28) Y. Sakamoto and S. Tanaka, "QAD-CGGP2 and G33-GP2: Revised Versions of QAD-CGGP and G33GP", JAERI-M90-110 (1990).
- 29) (財)高輝度光科学研究センター“挿入光源ハンドブック”(1996).
- 30) 浅野芳裕, “放射光ビームラインハッチ床面からの散乱光子による漏洩線量評価”, JAERI-Research 97-058 (1997).
- 31) J. A. Halbleib et. al., "ITS Version 3.0: The Integrated Tiger Series of Coupled Electron/Photon Monte Carlo Transport Codes", SAND91-1631 (1992)

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, l
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- ECE関係理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ³ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^3 \text{ St(ストークス)(cm}^2/\text{s)}$$

力	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻¹	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	5L7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605J (計量法)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184J (熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855J (15°C)
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868J (国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仮馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻¹	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499W
	1.60218 × 10 ¹⁹	1.63377 × 10 ²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270 × 10 ⁻¹⁰		1	100
	3.7 × 10 ¹⁰	1		0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻¹	1

線量率	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

大型放射光施設SPRING-8の放射線遮蔽と安全評価