

JAERI-Research

99-022



JP9950153



SPring-8 におけるガス制動放射線の評価

1999年3月

浅野芳裕

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。

入手の問い合わせは、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、お申し越し下さい。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）で複写による実費領布を行っております。

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, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

SPring-8におけるガス制動放射線の評価

日本原子力研究所関西研究所放射光利用研究部

浅野 芳裕

(1999年2月3日受理)

第三世代大型放射光施設SPring-8のビームライン遮蔽安全上、重要な検討項目の一つである、蓄積リング内残量ガスと蓄積電子との相互作用によって発生する制動放射線について、電磁カスケードモンテカルロコードEGS4を用いて評価した。各々ガス制動放射線スペクトルと放出角度分布について、シミュレーション計算を行う上で重要である、電子カットオフエネルギーやガス圧力依存性を検討し、SPring-8でのガス制動放射線シミュレーション計算条件を示した。また、発生したガス制動放射線を遮蔽するために必要な鉛遮蔽体の大きさを示した。ガス制動放射線はそのエネルギーが8GeVまで存在し、鉛遮蔽体のような厚い標的にあたると光核反応中性子を発生する。この光核反応中性子についても検討を行った。

Simulation of Gas Bremsstrahlung on SPring-8 Beamline

Yoshihiro ASANO

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

(Received February 3, 1999)

Gas bremsstrahlung, which generates the interaction of stored electron with residual gas within the storage ring, is one of the most important issues of radiation shielding and safety of beamlines for the third generation synchrotron radiation facility, SPring-8. Gas bremsstrahlung spectrum and emission angle distribution dependence on electron cut off energy, AE and gas pressure were discussed and the condition of the simulation of the SPring-8 beamline are investigated by using a Monte Carlo code EGS4. The size of the shield block made of lead and photo-neutrons generated by the interaction of gas bremsstrahlung with thick target are also estimated.

Keywords: Gas Bremsstrahlung, SPring-8, Beamline, Photo-neutron, EGS4, Simulation

目 次

1. 緒 言	1
2. ガス制動放射線の発生計算	4
2.1 計算手法	4
2.2 計算結果	6
2.3 検 討	8
3. ガス制動放射線の遮蔽	19
3.1 ガンマストップ	19
3.2 光核反応中性子による線量評価	21
4. 結 論	24
5. 謝 辞	24
参考文献	25
付録1 サブルーチン AUSGAB	26

Contents

1. Introduction	1
2. Gas Bremsstrahlung	4
2.1 Calculational Method	4
2.2 Results	6
2.3 Discussion	8
3. Shield for Gas Bremsstrahlung	19
3.1 Gamma Stop	19
3.2 Dose Estimation Due to Photo-neutron	21
4. Conclusion	24
5. Acknowledgement	24
References	25
Appendix 1 Subroutine AUSGAB	26

This is a blank page.

1. 緒言

第3世代の大型放射光施設であるSPRING-8は、蓄積電子エネルギーが8 GeVと放射光施設として世界最大であり、かつ電子ビームのエミッタンスは5.5 nm.radian という特徴を有する⁽¹⁾。また、放射光源にはアンジュレータやウィグラーなどの挿入装置⁽²⁾が主体であり、得られる放射光はかつて無かった程の高輝度、高エネルギーとなる。

一方、SPRING-8のような大型放射光施設のビームラインでは光学素子等の機器は設置空間の制約とともに放射線損傷の回避や保守等の必要性から遮蔽壁の外側に設置することが一般的である。そのため、挿入装置が設置される蓄積リングの直線部の延長線上にビームラインを設置しなければならなくなり、必然的に蓄積リング内に存在する残留ガスと蓄積電子が相互作用して発生する制動放射線がビームラインに混入してくる。SPRING-8ではこのガス制動放射線のエネルギーが8 GeVまで分布する。また、挿入装置を設置する蓄積リングの直線部は通常の直線部で19 m (ビームラインを望む実際の蓄積リングの直線部であり、挿入装置自身は通常4 m程度)である。SPRING-8の蓄積リングには4箇所40 mにもおよぶ長直線部も設置されている。このことから、ビームラインに混入してくるガス制動放射線は大強度であり、かつ高エネルギー成分が含まれる、極めて危険な放射線であることが予想される。従って、その評価が正確に行われ、適切に遮蔽される必要がある。

ガス制動放射線の評価には電磁カスケードモンテカルロコードEGS4⁽³⁾やFLUKA⁽⁴⁾が用いられてきた^{(5)、(6)、(7)、(8)}。これらは蓄積リング内の残留ガスの真空度が通常133 nPa (10^{-9} Torr)以下に設計されていることを模擬するために、大気圧に近い体系内を蓄積電子が一定の距離を通過したときに発生する制動放射線を計算し、設計値の真空度に外挿することによって求められる。このとき、非常に希薄な圧力下での制動放射線発生を模擬するために、計算条件に種々の工夫をする必要がある。特にシャープなビーム状の放射線であることから、ガス制動放射線による放射線量を計算する場合、線量計算領域の取り方により大きくその値は変化する。したがって、光子のエネルギースペクトルや進行方向分布を正確に模擬しなければならない。しかしながら、今までに計算された例でもその条件は必ずしも一定ではない。また、用いた計算条件の根拠も明確にしめされているわけではない。

いままでに用いられた計算条件等を表1-1に示す。この表が示すように、その主な条件は(1)多重相互作用の抑止、(2)メラー散乱の抑制を目的としている。そのため、ターゲット圧力を0.1気圧に設定するか、メラー散乱の発生を抑制するためにエレクトロンカットオフエネルギーAE値(デルタ線発

生の閾値エネルギーを決定する)を変化させたりしている。特にFerrari⁽⁷⁾らはガス制動放射線の評価上、ターゲット内で次の2つの条件を満足することが必要であるとして提示している。それらは(1)光子の多重散乱が無視できること、(2)電子の相互作用がビーム進行方向で一様であることとしている。特にターゲットとして10mを超える長い直線部を想定する場合、AE値を10MeVと設定した上で(2)の条件を満足させるために圧力を0.1気圧に設定することを勧告している。

Ferrari等が提示した上記2つの条件は、蓄積電子エネルギーが1GeVまでの場合を想定している。必ずしも、SPring-8のような8GeVの蓄積電子エネルギーを持つ場合でのガス制動放射線のエネルギー分布と放出角度分布を模擬するための条件として検証されているわけではない。特に放出角度分布については不明な点が多い。また、SPring-8で設置されている40mもの長直線部を想定しているとは考えられない。そこで、電磁カスケードモンテカルロコードEGS4を用いて、計算条件によるエネルギースペクトルおよび放出角度分布の依存性を検証するとともに、SPring-8でのガス制動放射線発生シミュレーションを行った。

次に、発生したガス制動放射線を遮蔽するのに必要な鉛遮蔽体(ガンマストップ)厚さを知るために、ガス制動放射線が鉛遮蔽体に入射したときの遮蔽体表面からの漏洩線量を算定した。また、ガス制動放射線とガンマストップのような厚い標的との相互作用の結果発生する光核中性子線量についても評価した。

表 1—1 最近のガス制動放射線の主なモンテカルロシミュレーション計算例

著者	所属機関	使用コード	最大電子 エネルギー	ターゲット 長さ	AE 値 (MeV)	AP 値 (MeV)	圧力 (atm)	ガスの 種類	発行年	文献 番号
G. Tromba & A. Rindi	Sincrotrone Trieste	EGS4	10GeV	1m	1.0	0.01	1.0	air	1990	(5)
J. C. Liu	SLAC	EGS4	10GeV	1m	1.511	0.1	1.0	air	1994	(6)
A. Ferrari Et. al	INFN	FLUKA	1GeV	1, 10m	10.0	0.01	1.0, 0.1	air	1993	(7)
N. E. Ipe & A. Fasso	SLAC	FLUKA	7GeV	15m	10.0	0.01	1.0, 0.1	air	1994	(8)

2 ガス制動放射線の発生計算

2.1 計算手法

ガス制動放射線を計算するために、(1) 発生光子の反応制限、(2) 入射電子の相互作用回数制限および反応種類の特定ができるようにEGS4コードのユーザーコードを整備した。

具体的にはサブルーチンAUSGABの中で、(1) 制動放射により発生した光子の電子ビームに対する進行方向を計算出力し、計算を止める。(2) 入射電子の相互作用制限回数を入力することにより、制限回数に応じて計算を実行できるように設定を行い、同時に反応の都度、その種類を出力するようにした。また、必要に応じて倍精度計算を行うようにした。サブルーチンAUSGABを付録1に示す。

作成したユーザーコードを確認するために、Ferrari等がFLUKAコードで計算した、500MeV電子でのガス制動放射線発生角度分布を求めた。このときの計算条件は、ターゲットの厚さを1mに設定し、それぞれ相互作用回数を1回と複数回とした。また、相互作用1回するときの気圧を0.1気圧、複数回するときを1気圧に設定し、Ferrari等と同様の条件とした。

計算結果を図2-1に示す。Ferrari等の計算結果を図2-2に示す。このときの縦軸は両図とも電子が空気圧力133nPa(10⁻⁹Torr)の標的を1m通過したときに発生するガス制動放射線をステラジアンあたり、1電子あたりで示してある。図が示すように、2つの結果は非常に良い一致を示した。この結果、整備したコードはガス制動放射線の発生強度および放出角度分布を模擬できることが確認された。

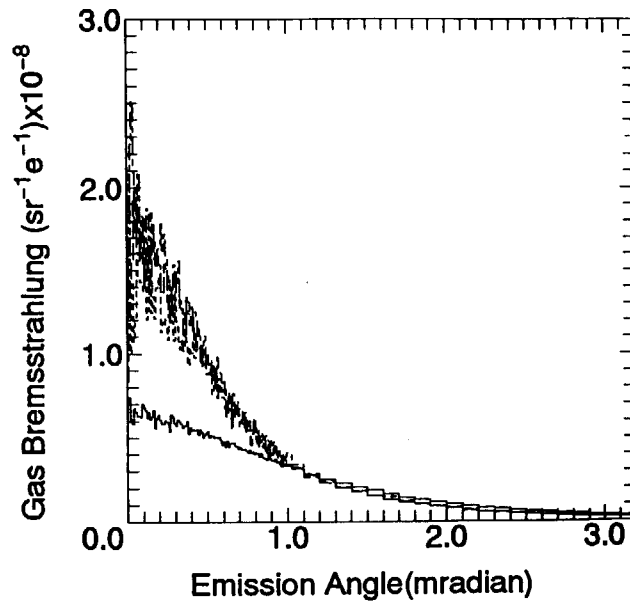


図2-1 500MeV電子によるガス制動放射線の発生角度分布
 計算条件はターゲットを1mの空気層とし、実線は圧力を1気圧、
 相互作用を制限無しとした。点線は圧力を0.1気圧、相互作用
 を1回とした。

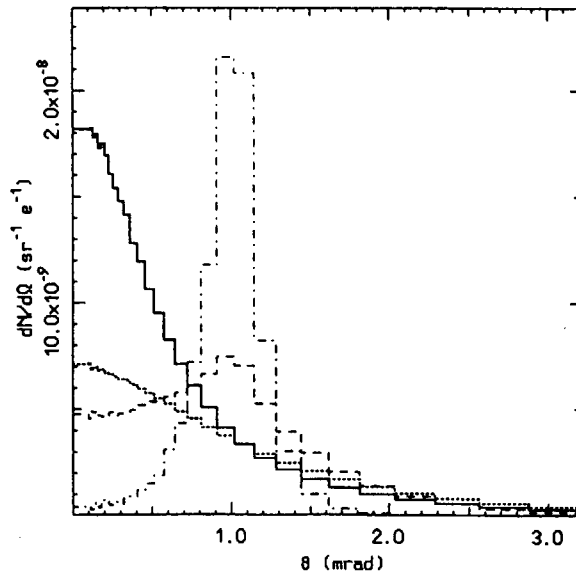


図2-2 Ferrari等のFLUKAコードによる計算結果⁽⁷⁾
 ここで実線は1気圧でFLUKAによる多重散乱無しするとき、
 点線はFLUKAによる多重散乱ありの計算結果、鎖線は
 EGS4での1気圧のときの結果、一点鎖線はEGS4での
 0.1気圧のときの計算結果である。

2. 2 計算結果

ガス制動放射線発生挙動を決定するのは、制動放射線発生スペクトルとその放出角度分布である。そこで、この2つのことについて、(1) 許容相互作用回数依存性、(2) AE値依存性、(3) 電子の走行距離に直接関係するガス圧依存性、を検証した。また、蓄積電子エネルギー依存性についても検証した。この結果をうけて、SPring-8 挿入装置光源ビームラインに混入してくるガス制動放射線を評価した。得られた結果は比較のため、すべて電子1個が真空度 133 nPa (10^{-9} Torr) 中を1 m走行したときに発生する制動放射線で示されている。

(1) 許容相互作用回数依存性

荷電粒子輸送計算時におけるカットオフエネルギー、AE値を521 keV (電子静止質量エネルギーを含む) として、8 GeV電子が空気1気圧、1 mのガス層を通過するとき発生するガス制動放射線のエネルギースペクトルを図2-3に示す。図に示されているINT1、INT2、INT3-INT5は各々相互作用領域で電子とガスとの許容相互作用回数を表す。図から明らかのように、空気1気圧で1 mの相互作用領域を想定したときには、相互作用1回で発生する制動放射線は相互作用3回以上で発生する制動放射線のおよそ60%程度である。

図2-4にガス制動放射線の放出角度分布を示す。計算条件は図2-3と同じである。図に示されているように、許容相互作用回数による放出角度分布の形状に依存性は認められなく、その絶対値が変化するのみである。

(2) AE値依存性

カットオフエネルギーAE値を変化させたときのガス制動放射線エネルギースペクトルを図2-5に示す。それぞれAE値を521 keVから10 MeVまで変化させた。許容された相互作用回数は1回とした。他の計算条件は図2-3と同じである。図から明らかのように、空気1気圧、1 mのガス層を走行するときには、AE値が1.511 MeV (電子の静止質量エネルギーを含む) 以上でガス制動放射線の発生スペクトルは一定値に収束する。

図2-6にガス制動放射線の放出角度分布を示す。計算条件は図2-5と同じである。図に示されているように、制動放射線スペクトルと同様にAE値が1.511 MeV以上で放出角度分布は一定値に収束した。

(3) 気圧依存性

カットオフエネルギーAE値を10 MeV、蓄積電子走行距離を1 mとしたときのガス制動放射線発生エネルギースペクトル電子走行区域空気圧力依存性を

図2-7に示す。許容された相互作用回数は1回とした。図から明らかなように、本計算条件では圧力依存性は無い。

図2-8にガス制動放射線の放出角度分布を示す。図に示されているように、1気圧の計算条件と0.1気圧以下の計算条件とでは放出角度分布に大きな差異が認められた。このことは、Ferrari等⁽⁷⁾が、10mを超える直線部を模擬する場合には0.1気圧にすべきであると勧告していることに関して、すでに1mの場合でも0.1気圧で計算すべきであることを示している。

(4) 0.1気圧下でのAE値依存性

前項での計算結果を受けて、蓄積電子走行距離を1mとしてガス圧力を0.1気圧としたときのAE値依存性を検証した。そのときのガス制動放射線発生エネルギースペクトルを図2-9に示す。ここで、点線で示した図は光子カットオフエネルギーAPを0.01MeVとしたときの値である。図に示されているように、圧力を0.1気圧にしたときにはAE値依存性は認められなかった。

同様にガス制動放射線放出角度分布を図2-10に示す。図に示されているように、放出角度分布においてもAE値依存性は認められなかった。このことはFerrari等⁽⁷⁾が勧告しているように、“ガス制動放射線計算上においてメラー散乱を減らすためにAE値を上げること”は必要がなく単に圧力を下げる等、実効的な蓄積電子の走行距離を短くするだけで良いことを示唆している。

(5) SPring-8挿入装置光源ビームラインでのガス制動放射線

SPring-8蓄積リングの直線部長さは19mと40mである。直線部の長さはFerrari等⁽⁷⁾が指摘しているように、ガス制動放射線による線量計算を行う上で重要である。

電子走行距離を19mとしたときのガス制動放射線発生スペクトルを図2-11に示す。また、放出角度分布を図2-12に示す。図に示されているように、発生スペクトルでは0.1気圧以下でほぼ一定になっているが、放出角度分布では0.1気圧でも一定になっていない。

電子走行距離をSPring-8の長直線部の長さ、40mとしたときのガス制動放射線発生スペクトルを図2-13に示す。また、放出角度分布を図2-14に示す。図に示されているように、発生スペクトルにおいて、0.1気圧でも若干低くなっている。放出角度分布においては19mの場合と同様に0.1気圧でも一定になっておらず、その傾向はより顕著になっている。図より、直線部の長さが40mの場合には圧力を0.01気圧程度に設定した方が良いことが示されている。

(6) ガスの種類

安全解析を行う上では、蓄積リング内の残留ガス成分に空気を仮定する。一方、 100 nPa を超えるような超高真空ではそのほとんどが水素であると推定される。また、場所によってはリングを構成する物質の相違や真空の劣化が考えられ、残留ガス成分も1酸化炭素、2酸化炭素、メタン、空気等が考えられる。そこで、各々を成分とする制動放射線発生スペクトルおよび放出角度分布を圧力1気圧および0.1気圧に想定して計算した。その結果を図2-15、図2-16、図2-17、図2-18に示す。

図より明らかなように、ガスの種類によって発生ガス制動放射線強度に大きな差異が現れる。したがって、蓄積リング内直線部のガス成分を知ることは重要なことである。また、図2-16および図2-18から、水素では他のガス成分と比較して、その放出角度分布におおきな相違は認められない。

(7) 蓄積電子エネルギー依存性

蓄積電子エネルギーを変化させたときの、ガス制動放射線発生スペクトルおよび放出角度分布を図2-19および図2-20に示す。このときの計算条件は圧力0.1気圧、電子の走行距離1mである。

図より、蓄積電子エネルギーが高くなるに従い、制動放射線の放出角度は小さくなり、8GeVでは鋭いペンシルビーム状の放射線になっていることがわかる。

2.3 検討

SPring-8の直線部は通常セクションで19m、長直線部で40mといままでの施設と比較してもかなり長い。ガス制動放射線を模擬計算するうえでFerrari等⁽⁷⁾が指摘した条件は相互作用を1回としたうえで、メラー散乱を抑制するためにAE値を10MeVとすること、10mを超える直線部の場合、想定圧力を0.1気圧とすることであった。この条件をSPring-8の直線部に当てはめると制動放射線の放出角度分布を正確に表現できない可能性があることが第2.2項の検討結果から指摘された。そこで、電子の走行距離に物理的な距離×空気密度をとった時の全発生制動放射線に対する0.1mラジアン内の放出角度に入る制動放射線の割合を図2-21に示す。図では各々直線部の長さを1m、10m、19m、40mと設定し、内部圧力を変化させたときに得られる放出角度分布を示した。

図に示されているように、直線部の長さが異なっても放出角度割合は1つの曲線上の点で表されること、制動放射線の放出角度分布が一定に収束する電子走行距離はおよそ 10^{-2} g/cm^2 であることが示された。このことは直線部が

1 mの場合、圧力を 0.1 気圧に設定すること、40 mの場合には0.0025 気圧に設定すべきであることを示している。

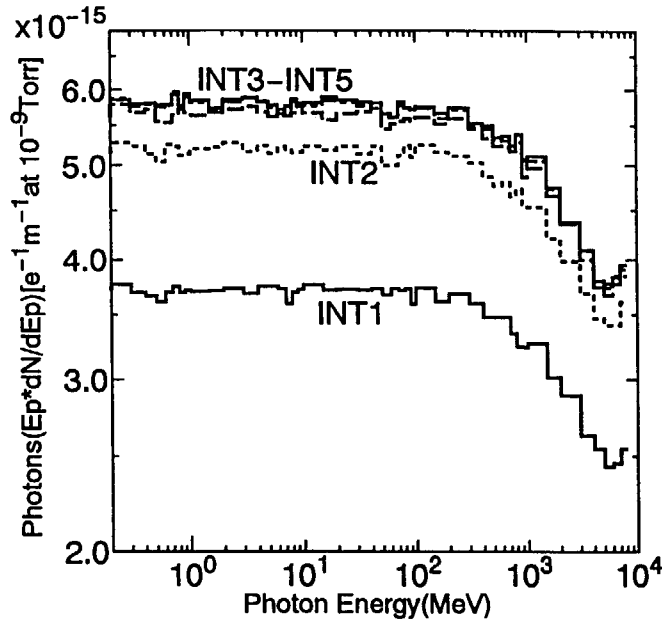


図2-3 空気層0.1205 g/cm²を8 GeV電子が通過したときに発生するガス制動放射線量 (INT1 ; 相互作用1回、INT2 ; 許容相互作用2回、INT3 - INT5 ; 許容相互作用3-5回)

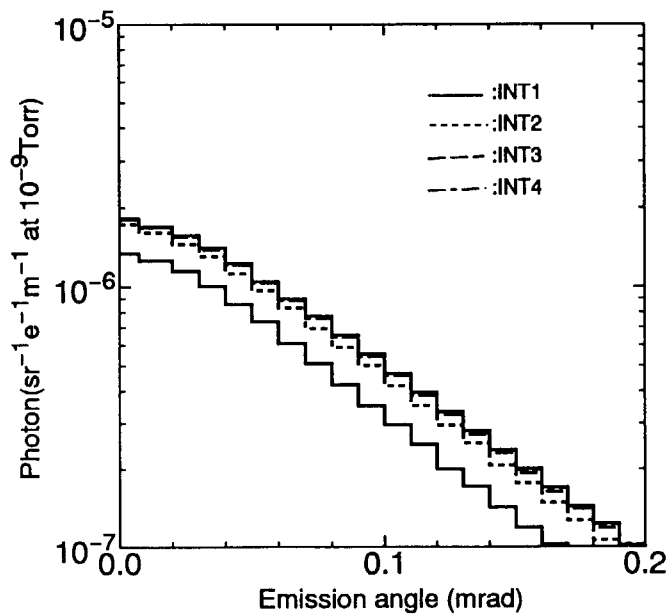


図2-4 空気層0.1205 g/cm²を8 GeV電子が通過したときに発生するガス制動放射線の放出角度分布

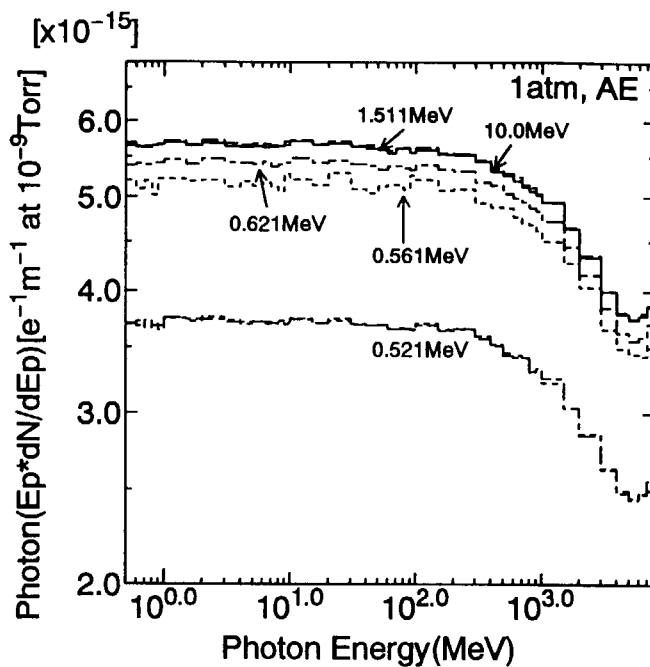


図 2-5 ガス制動放射線発生スペクトル計算時における電子カットオフエネルギーAE依存性 (電子走行距離0.1205 g/cm²)

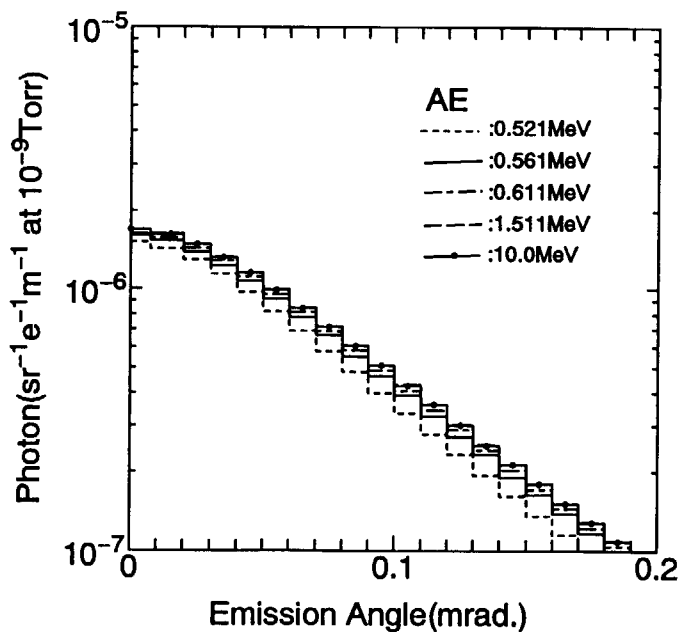


図 2-6 ガス制動放射線放出角度分布計算時における電子カットオフエネルギーAE依存性 (電子走行距離0.1205 g/cm²)

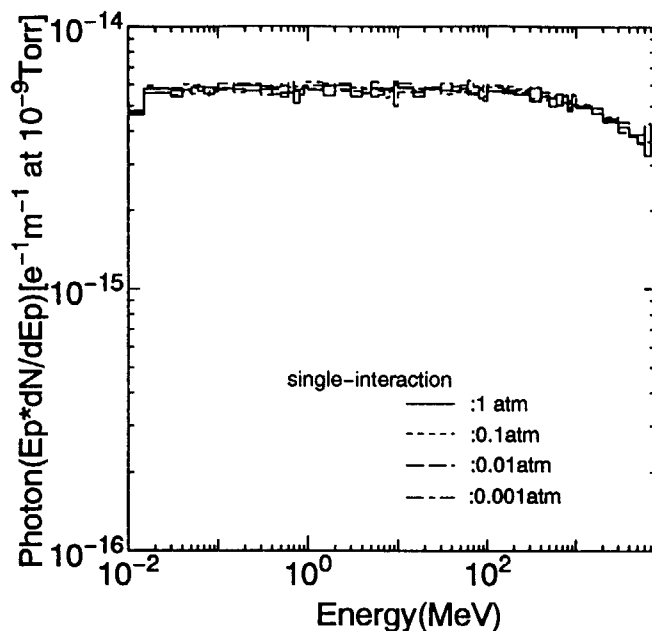


図 2-7 ガス制動放射線発生スペクトル計算時における気圧依存性
(電子走行距離 1 m、AE = 10 MeV)

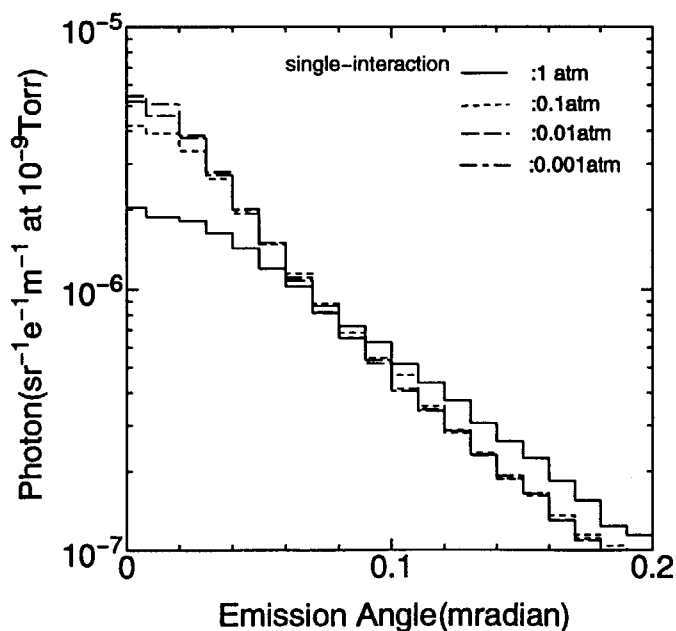


図 2-8 ガス制動放射線放出角度分布計算時における気圧依存性
(電子走行距離 1 m、AE = 10 MeV)

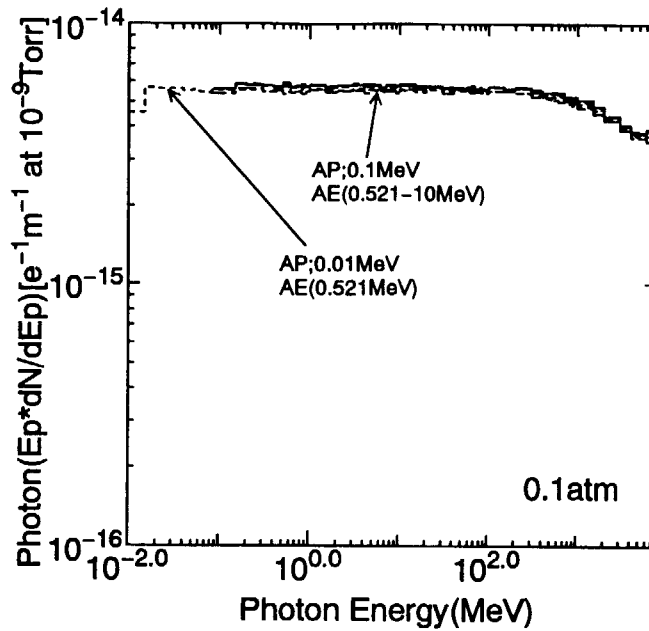


図 2-9 ガス制動放射線発生スペクトル計算時における電子カットオフエネルギーAE、光子カットオフエネルギーAP依存性
(電子走行距離0.01205 g/cm²)

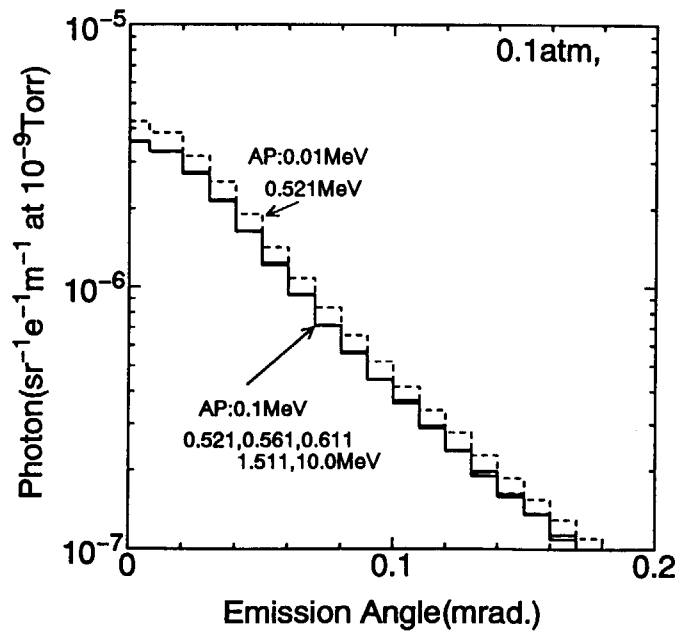


図 2-10 ガス制動放射線放出角度分布計算時における電子カットオフエネルギーAE、光子カットオフエネルギーAP依存性
(電子走行距離0.1205 g/cm²)

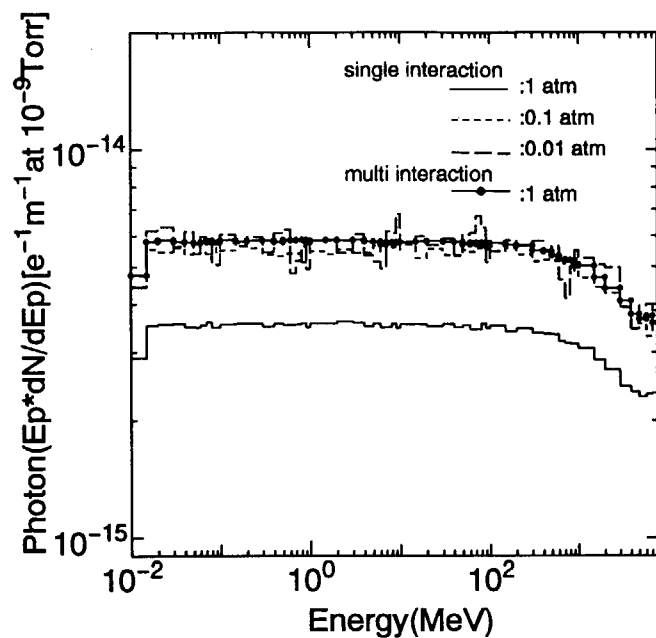


図 2-11 電子走行距離 19 m 時における制動放射線発生スペクトル
気圧依存性

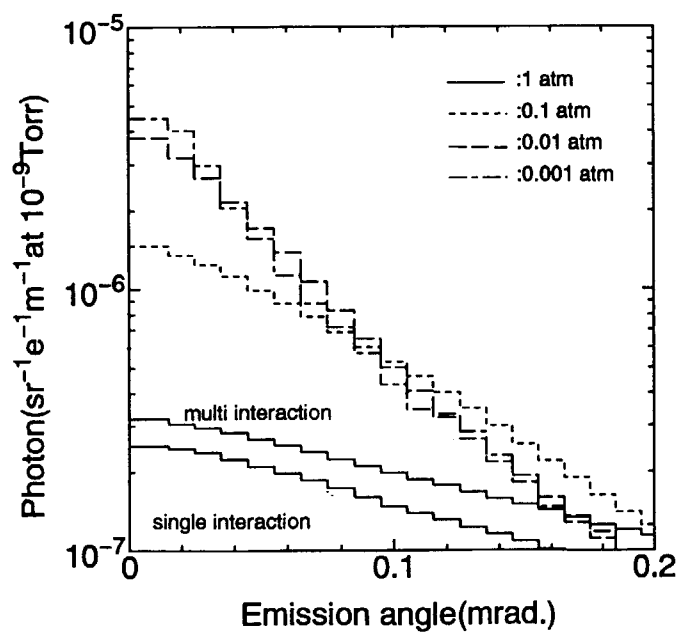


図 2-12 電子走行距離 19 m 時における制動放射線放出角度分布
気圧依存性

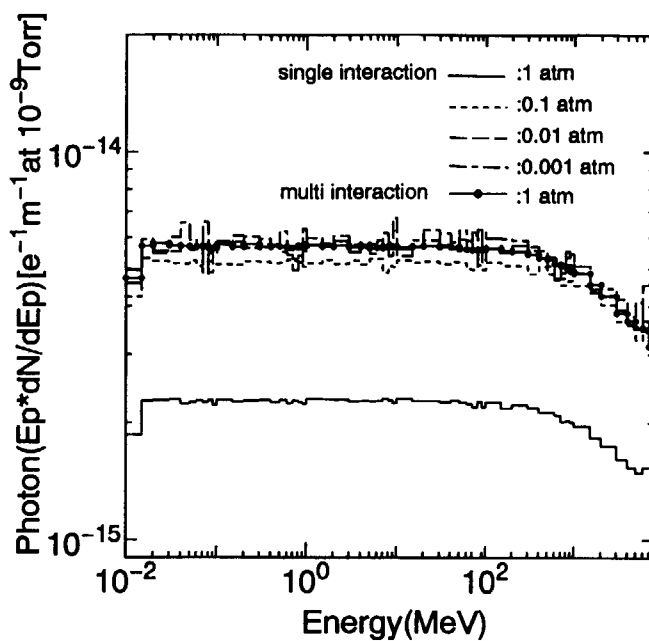


図 2-13 電子走行距離 40 m 時における制動放射線発生スペクトル
気圧依存性

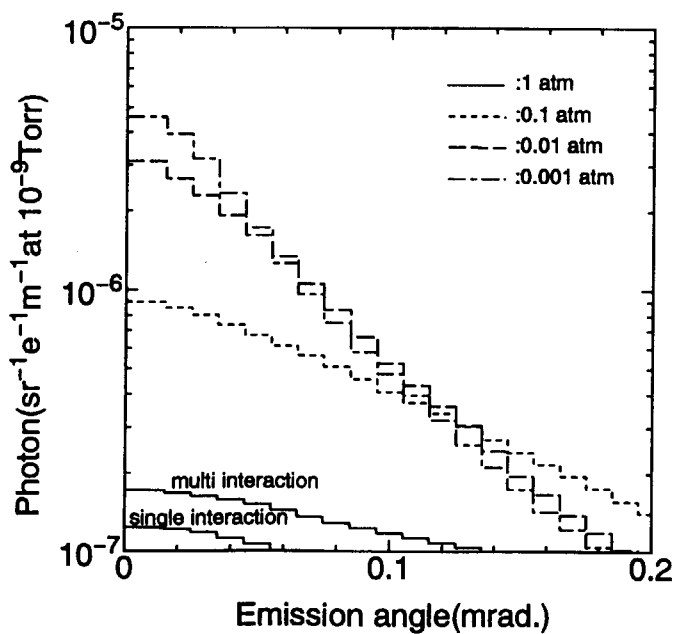


図 2-14 電子走行距離 40 m 時における制動放射線放出角度分布
気圧依存性

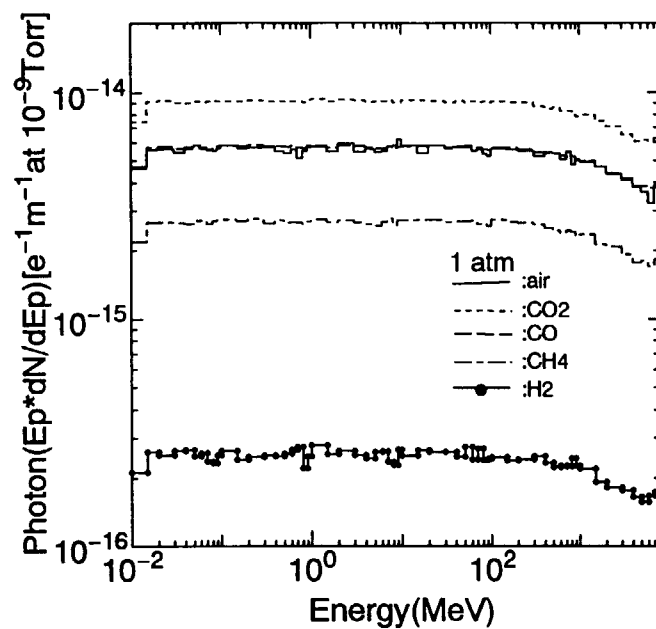


図 2—1 5 ガスの種類による制動放射線発生スペクトル依存性
(圧力 1 気圧で計算)

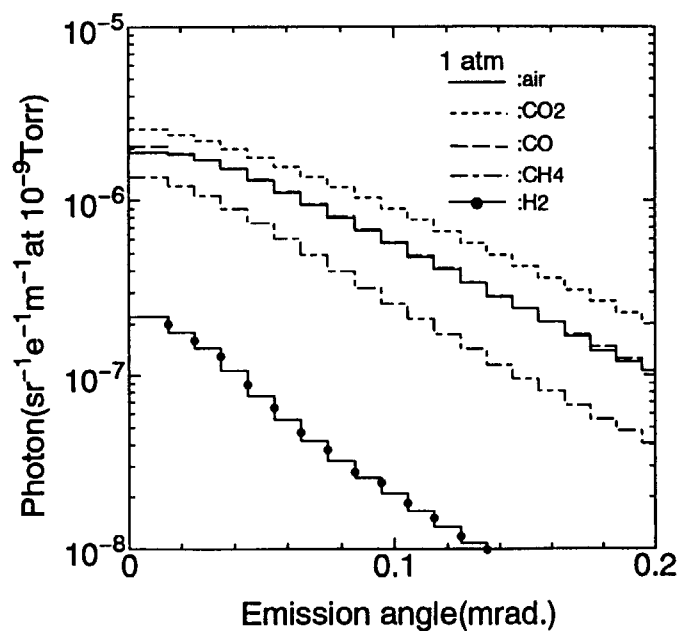


図 2—1 6 ガスの種類による制動放射線放出角度分布依存性
(圧力 1 気圧で計算)

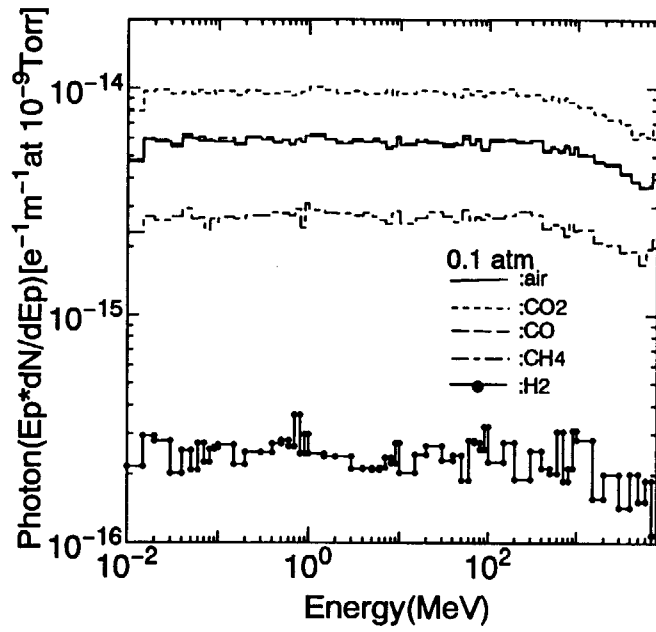


図 2 - 1 7 ガスの種類による制動放射線発生スペクトル依存性
(圧力 0. 1 気圧で計算)

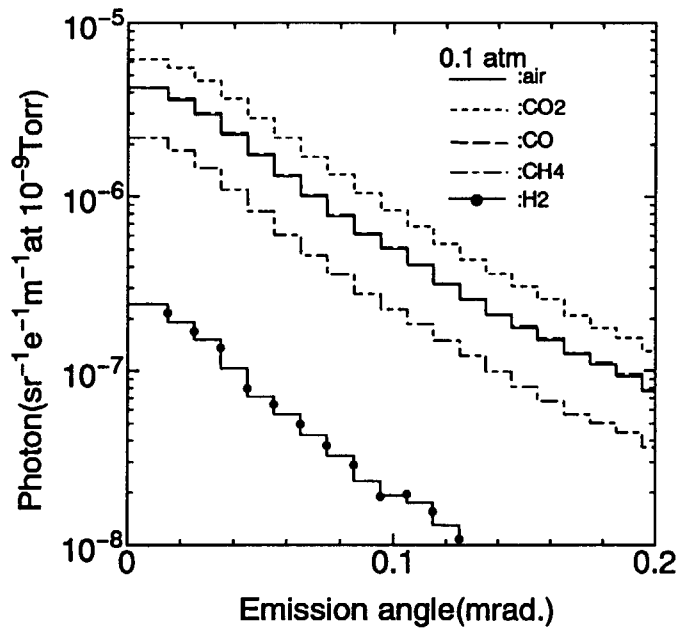


図 2 - 1 8 ガスの種類による制動放射線放出角度分布依存性
(圧力 0. 1 気圧で計算)

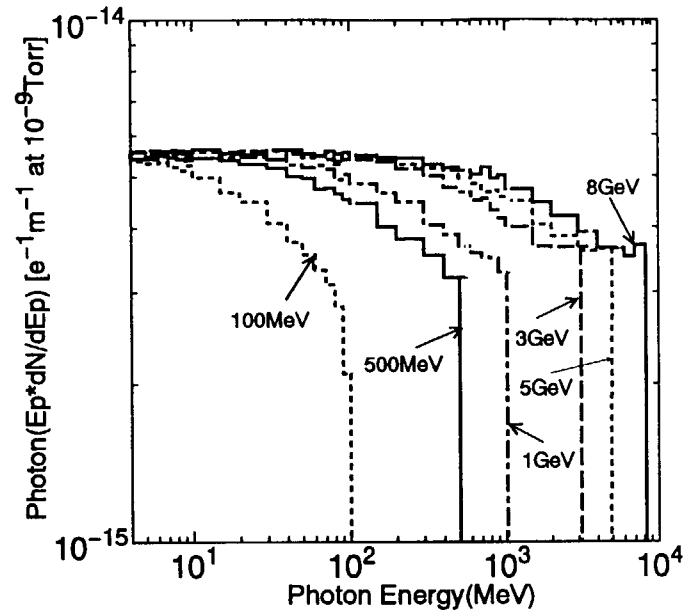


図 2-19 ガス制動放射線発生スペクトルの電子エネルギー依存性
(電子走行距離 1 m、0.1 気圧で計算)

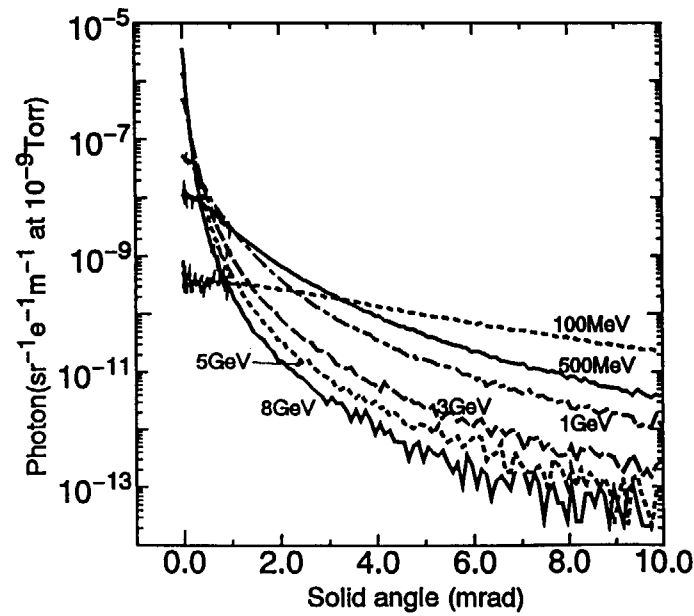


図 2-20 ガス制動放射線放出角度分布の電子エネルギー依存性
(電子走行距離 1 m、0.1 気圧で計算)

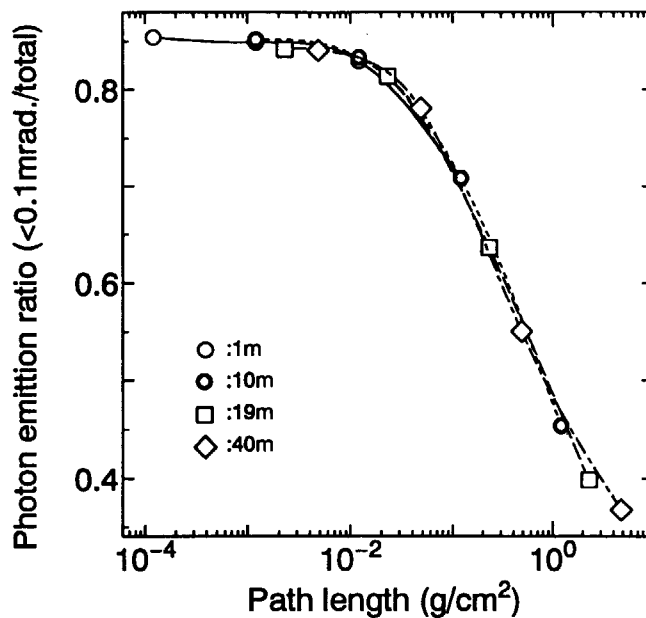


図 2-21 制動放射線放出角度分布の電子走行距離依存性
 (縦軸；全放出制動放射線に対する 0.1 m ラジアン内に
 放出される制動放射線の割合)

3. ガス制動放射線の遮蔽

3.1 ガンマストップ

前章で示したとおり、SPRING-8の蓄積リング直線部で発生し、挿入光源装置ビームラインに混入してくるガス制動放射線は8 GeVまでの光子を含む高エネルギーで強度が強い、きわめて危険性の高い放射線である。このガス制動放射線を効率的に遮蔽するために、ビームライン光学ハッチ内の分光器直後にガンマストップが設置される⁽⁹⁾。ガンマストップはガス制動放射線がビーム進行方向に対して広がることを防ぐだけでなく、ビーム軸に対する側面方向にも有効に遮蔽できなければならない。通常、ガンマストップは鉛で構築される。そこで、ガス制動放射線が厚い鉛遮蔽体に入射したときの鉛遮蔽体表面からの漏洩線量を計算した。使用したコードはEGS4である。

計算体系は円筒形の鉛遮蔽体にガス制動放射線が入射する場合を想定し、円筒形状の鉛遮蔽体表面（側面とビーム軸に対する垂直面）からの漏洩線量を遮蔽体の大きさおよび位置の関数として計算した。計算モデル概念図を図3-1に示す。

計算結果を図3-2、図3-3に示す。ここで、X軸およびY軸は鉛遮蔽体の厚さおよび大きさを半径で表した。また、蓄積電流値は100 mAとして、直線部の長さを19 m、真空度を空気133 nPa(10^{-9} Torr)とした。ここで図3-2は鉛遮蔽体の側面における漏洩線量分布である。図3-3はビーム軸に対し、垂直面での漏洩線量分布を示している。図より、鉛遮蔽体からの漏洩を $1 \mu\text{Sv/h}$ 以下にするためには半径13 cm、厚さ26 cm以上必要であることが示されている。

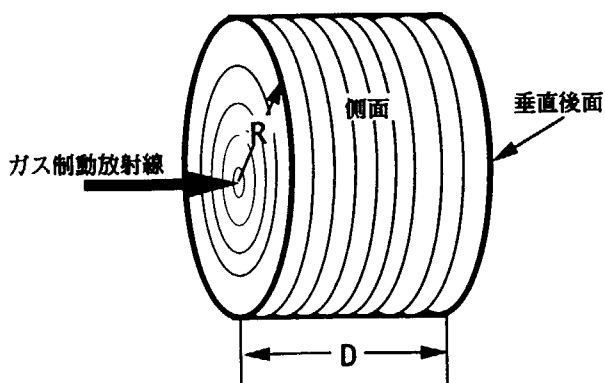


図3-1 ガス制動放射線に対する鉛遮蔽体からの漏洩線量計算モデル図

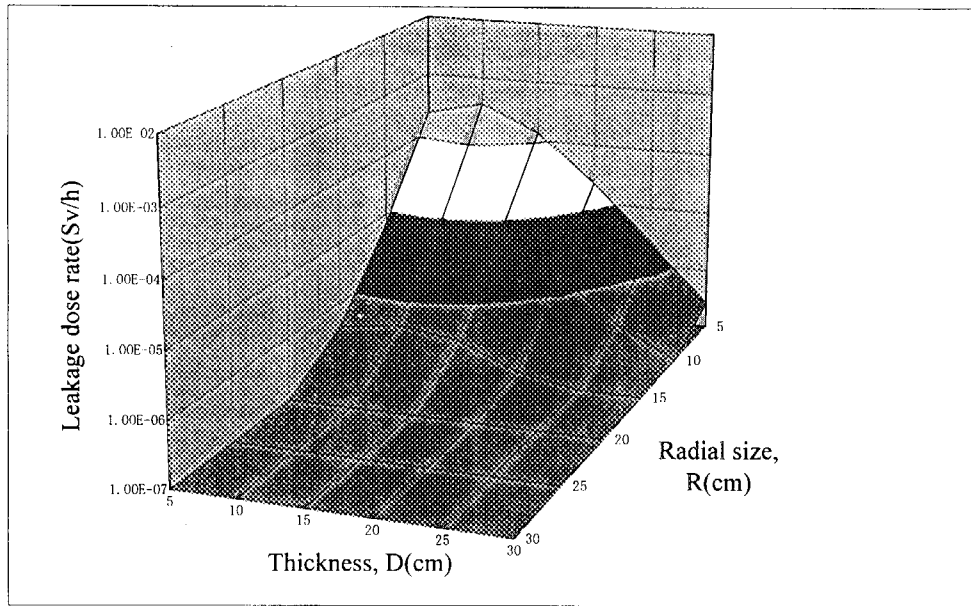


図 3—2 鉛遮蔽体 (ガンマストップ) からのガス制動放射線漏洩線量分布 (円筒形状の側面からの漏洩線量)

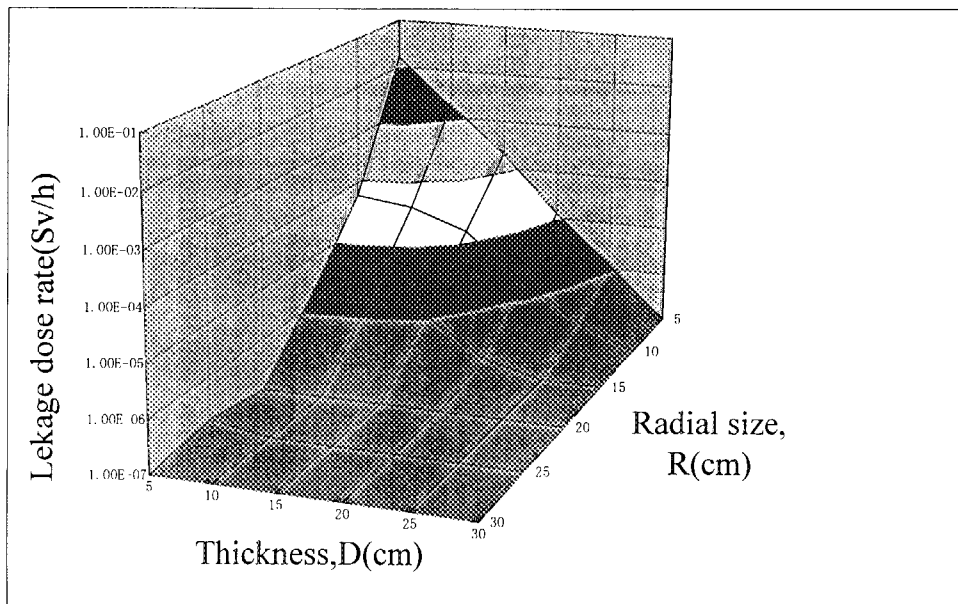


図 3—3 鉛遮蔽体 (ガンマストップ) からのガス制動放射線漏洩線量分布 (円筒形状の垂直後面からの漏洩線量)

3. 2 光核反応中性子による線量評価

光子エネルギーが約10 MeVを超えるとエネルギーが増すに従って、順に巨大共鳴吸収、準重陽子生成、 π 中間子生成過程などの光核反応により中性子が発生する。SPring-8で発生するガス制動放射線の場合、そのエネルギーは8 GeVまで存在する。従って巨大共鳴吸収過程だけでなく、準重陽子生成、 π 中間子生成過程も考慮する必要がある。

光核反応中性子は、(1) 厚い標的(鉛ガンマストップを想定する)内での光子飛跡分布の計算、(2) 光子飛跡に光核反応中性子生成断面積を乗ずる、ことによって得た。ここで、厚い標的(鉛ガンマストップを想定する)内での光子飛跡分布の計算にはEGS4を用いた。計算結果の1例を図3-4に示す。光核反応中性子生成断面積はエキシトンモデルと統計的蒸発モデルに基づくMC PHOTOコード⁽¹⁰⁾と核内カスケードモデルに基づくPICAコード⁽¹¹⁾により作成されたライブラリーを用いた。得られた鉛ガンマストップ内での光中性子発生分布を図3-5に示す。図より、光核反応中性子はガス制動放射線の入射位置に近い位置で大半が発生していることが示されている。発生した光中性子の1 mの地点におけるエネルギースペクトル分布を図3-6に示す。このとき、光核反応中性子吸収断面積にLorentz Fitting⁽¹²⁾を用い、発生中性子エネルギースペクトルにMaxwell分布⁽¹³⁾を用いて得られた分布も合わせて示した。また、中性子放出角度分布情報は現在のところ確かなものが存在しないので、等方放出を仮定した。

標的から1 mの地点での光中性子線量を他の施設の評価値とともに表3-1に示す。ここで、APSのデータ⁽¹⁴⁾は光中性子発生断面積にLorentz Fitting + Maxwell分布を用いた結果である。HAS Y L A BはAnderson-Brawn TypeのREMカウンターで実測した値⁽¹⁵⁾である。ただし、直線部の真空度に測定の不正確さが存在することが報告者より指摘されている。SPring-8の線量算定には、ICRP60勧告に基づき、ICRU球内最大線量当量換算係数⁽¹⁶⁾を用いた。

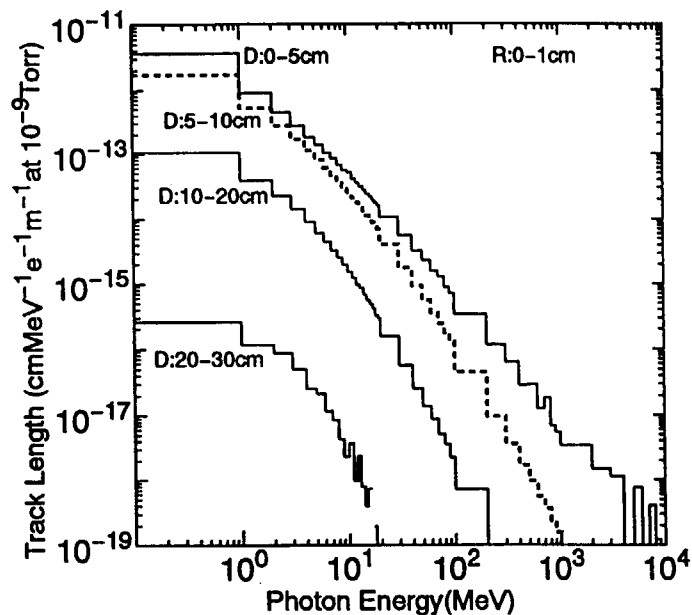


図 3 - 4 鉛標的に入射したガス制動放射線の標的中、半径 1 c m 内での光子飛跡分布 (Dは標的の深さを表す)

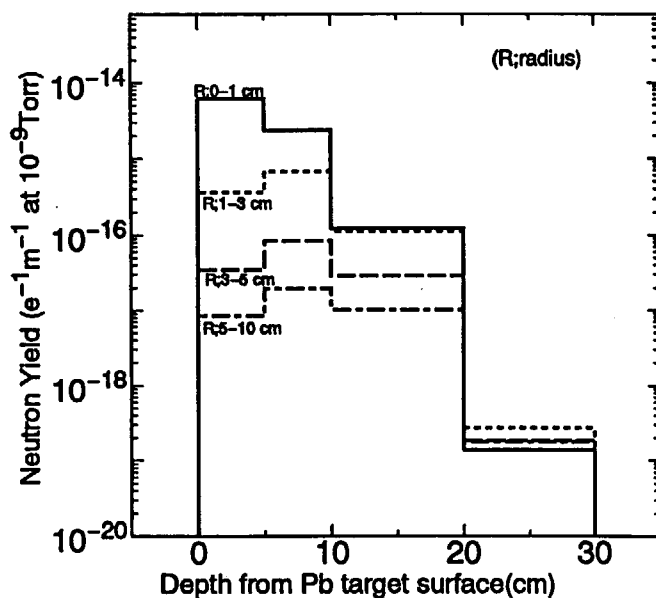


図 3 - 5 ガス制動放射線によって発生する光中性子分布 (Rは標的内の半径を表す)

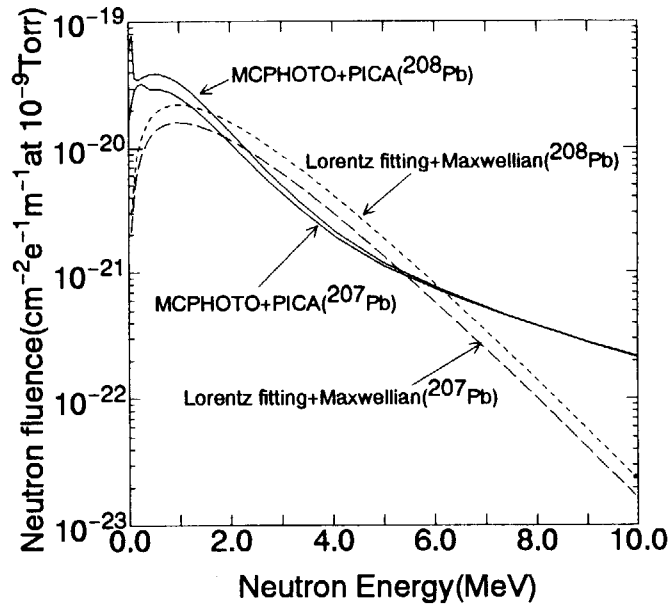


図 3 - 6 鉛標的による光中性子のエネルギーフルエンス
(中性子発生点から 1 m の地点でのスペクトル)

表 3 - 1 第 3 世代大型放射光施設のガス制動放射線による光核反応中性子
線量評価値 (HASYLAB の実測値も含む)

	APS ⁽¹⁴⁾	SPring-8	HASYLAB ⁽¹⁵⁾
Storage ring			
Electron energy	7GeV	8GeV	4.5GeV
Current	300mA	100mA	30mA
Straight section	15m	19m	8.2m
Gas pressure	133nPa	133nPa	1.06μPa
Neutron Dose	6μSv/h at 1.2m	2.0μSv/h at 1m	2.7±1.3μSv/h at 1m

4. 結論

第3世代大型放射光施設 SPring-8 のビームライン遮蔽安全解析に重要な検討項目の1つであるガス制動放射線について、エレクトロンカットオフエネルギーAEや電子走行距離、ガス圧力などのガス制動放射線を模擬計算する上での計算条件を検証した。その結果、従来より主張されてきた、エレクトロンカットオフエネルギーAEを10 MeVに設定することや、電子走行距離が10 mを超える場合には、ガス圧力を0.1気圧に設定することが必ずしもSPring-8のガス制動放射線を模擬計算するうえで正確では無いことを示した。特にメラー散乱を減らすため、エレクトロンカットオフエネルギーAE値を変更することは必ずしも必要ではなく、想定した電子走行距離内の圧力を減ずることで、発生スペクトル、放出角度分布とも正確に模擬できることを示した。また、電子走行距離が1 mの場合でも、圧力を1気圧に設定すると放出角度分布に不正確さが残ること、電子走行距離と空気密度の積が 10^{-2} g/cm^2 以下になるように設定すべきであることを示した。

SPring-8 で発生するガス制動放射線を遮蔽するための鉛遮蔽体（ガンマストップ）の必要な大きさを計算した。その結果、鉛厚さ26 cm以上、半径13 cm以上必要なことが判明した。また、ガス制動放射線と厚い標的（ガンマストップ）との相互作用の結果、発生する光核反応中性子に起因する線量は発生点から1 mの位置で $2.0 \mu\text{Sv/h}$ であることが判明した。

今後は、得られた評価結果を基に、ガス制動放射線を実測することにより、蓄積リング内残留ガスの種類の同定および質量分析などで得られたガスの種類との比較、ガス制動放射線の拡がりや電子ビームのエミッタンスとの比較検討を実施することが望まれる。

5. 謝辞

本研究を進めるうえで有益な議論をいただいた、中性子工学センター、笹本宣雄博士および計算コードの整備に相談にのっていただいた、科学システム研究所、杉田武志氏に感謝します。また、測定実験の実施に関連して、山形大学、清水肇教授をはじめ吉田浩司先生、田島靖久先生、橋本朋幸、松村徹両院生の諸君には活発な議論をしていただいた。ここに感謝します。

参考文献

- (1) JAERI-RIKEN SPring-8 Project Team;" SPring-8 Project Part 1 facility design" Hyogo Japan (1991)
- (2) (財) 高輝度光科学研究センター;"挿入光源ハンドブック" (1996)
- (3) W. R. Nelson et al.;" THE EGS4 CODE SYSTEM", SLAC-265, UC-32 (1985)
- (4) A. Fasso et al.;" FLUKA92" Workshop on simulating radiation environments, 11-15 jan. 1993 Sana Fe New Mexico (1993)
- (5) G. Tompa & A. Rindi;" GAS BREMSSTRAHLUNG FROM ELECTRON STORAGE RINGS:A MONTE CARLO EVALUATION AND SOME USEFUL FORMULAE" Nucl. Inst. & Methods in Phys. Research A292 p700-705 (1990)
- (6) J. C. Liu et al.;" GAS BREMSSTRAHLUNG AND ASSOCIATED PHOTON-NEUTRON SHIELDING CALCULATIONS FOR ELECTRON STORAGE RINGS", SLAC-PUB-6532(1994)
- (7) A. Ferrari et al.;" Estimation of fluence rate and absorbed dose rate due to gas bremsstrahlung from electron storage rings" Nucl. Inst. & Methods in Phys. Research B 83 p518-524 (1993)
- (8) N. E. Ipe & A. Fasso;" Gas bremsstrahlung considerations in the shielding design of the Advanced Photon Source synchrotron radiation beam lines" Nucl. Inst. & Methods in Phys. Research A351 p534-544 (1994)
- (9) 浅野芳裕他;"大型放射光施設 SPring-8 の放射線遮蔽と安全評価" JAERI-Tech 98-009 (1998)
- (10) N. Kishida;"Methods used in photonuclear data evaluation at JNDC" Int. symposium on Nuclear Data Evaluation Methodology BNL 598 (1992)
- (11) T. A. Gabriel;" PICA, Monte Carlo medium-Energy Photon-Induced Intranuclear Cascade Analysis Code System" ORNL CCC-160 (1972)
- (12) S. S. Dietrich & B. L. Berman;" Atlas of photoneutron cross sections obtained with monoenergetic photons" Atomic Data and Nuclear Data Tables 38 (1988)
- (13) W. P. Swanson;" Radiological safety aspects of the operation of electron linear accelerators", IAEA Technical Report No.188 IAEA Vienna (1979)
- (14) N. E. Ipe & A. Fasso;" Nucl. Inst. & Methods in Phys. Research A351 (1994)
- (15) K. Tesch;" private communication (1993)
- (16) A. Ferrari et al.;" Fluence to dose equivalent conversion data and effective quality factors for high energy neutrons" Radi. Prot. dosimetry Vol 76 (1998)

付録1 サブルーチン AUSGAB

```

*****
SUBROUTINE AUSGAB(IARG);

;COMIN/DEBUG, EPCONT, ETALY1, MISC, NTALY1, STACK, SCORE, DETECT, FLUXCM/;
COMMON/LINES/NLINES, NWRITE, NCOUNT, ILINES;
COMMON/CMODEL/NAIOPT, IDBGFG;
COMMON /CKBREM/ISCMAX, IDSCFG, ISCCNT, MRSCNT(5, 25), BRMFLX(281, 70)
, EBRMEG(70);
  "BREMCHK"
REAL*8 DPWT;

IF(IWATCH.EQ.4) [CALL WATCH(IARG, IWATCH);]

IRL=IR(NP); "SET LOCAL VARIABLE"
DPWT=WT(NP);

"KEEP TRACK OF THE ENERGY DEPOSITION -- FOR CONSERVATION PURPOSES"
IF(IARG.LE.4) [
  ESUM(IQ(NP)+2, IRL, IARG+1)=ESUM(IQ(NP)+2, IRL, IARG+1)+EDEP*DPWT;
  NSUM(IQ(NP)+2, IRL, IARG+1)=NSUM(IQ(NP)+2, IRL, IARG+1)+1
]

DO I=1, ICKCNT [
  IF(IRL.EQ.ICKMD(I).OR.(ICKMD(I).LT.0.AND.MED(IRL).EQ.IABS(ICKMD(I)))) [
    IF(IARG.LE.2.OR.IARG.EQ.4) [
      IF(NAIOPT.EQ.MED(IRL)) [ "NAI"
        EDEPSL = EDEP;
        IF(IQ(NP).EQ.0) [EDEPSL=SLEFFP(EDEPSL);]
        IF(IQ(NP).NE.0) [
          EDEPSL=E(NP)-0.5110034;
          EDEPSO=0.0;
          IF(EDEPSL.GT.0.) [EDEPSO=SLEFF(EDEPSL);]
          EDEPSL=E(NP)-0.5110034-EDEP;
          EDEPSN=0.0;
          IF(EDEPSL.GT.0.) [EDEPSN=SLEFF(EDEPSL);]
          EDEPSL=EDEPSO-EDEPSN;
        ]
      ]
    ]
  ]
]

```



```

]
ELSE [
  EDEPSL = 0. ;
  IF(IARG. LE. 2 . OR. IARG. EQ. 4) [
    EDEPSL = EDEP;
  ]
]
DEPE(I)=DEPE(I) + EDEPSL*DPWT;
]
]
]
IF(IARG. LE. 4) [
  IF(IFXCNT. GT. 0) [CALL FLUXSB;]      "FLUX CAL."

  IF(IDBGFG. LE. 0) [
    IF(NCOUNT. LE. NWRITE. AND. ILINES. LE. NLINES) [
      OUTPUT E(NP), X(NP), Y(NP), Z(NP), U(NP), V(NP), W(NP),
        IQ(NP), IRL, IARG; (7G15. 7, 3I5);
      ILINES=ILINES+1;]
    ]
  ]
  "BREMCHK"

  IF(IRL. NE. 3) [
    IF(IARG. GE. 6. AND. IARG. NE. 21. AND. IARG. NE. 22) [IDSCFG=1;]
  ]
  IF(IRL. EQ. 3) [
    IF(IARG. EQ. 7) [
      "  OUTPUT NP, IQ(NP), E(NP), X(NP), Y(NP), Z(NP), U(NP), V(NP), W(NP)  "
      "      ; (2I5, 1P4E12. 3, 3E15. 7);                                "
      IF(IQ(NP). EQ. 0) [
        I=1;
        DO II=1, 70 [
          IF(E(NP). GE. EBRMEG(II)) [I=II+1;]
        ]
        IF(I. GT. 70) [I=70;]
        DARAD=SQRT (U(NP)*U(NP)+V(NP)*V(NP));
        IF(DARAD. GT. 1. 0) DARAD=1. 0;
        DARAD=ASIN(DARAD);

```

```

J=INT(DARAD/1.0E-5)+1;
JJ=J;
IF(J.GT.100.AND.J.LE.1000) [JJ=(J-101)/10+101;]
IF(J.GT.1000) [JJ=(J-1001)/100+191;]
IF(JJ.GT.281) [JJ=281;]
BRMFLX(JJ, I)=BRMFLX(JJ, I)+WT(NP);
]
~ OUTPUT NP-1, IQ(NP-1), ~
~ E(NP-1), X(NP-1), Y(NP-1), Z(NP-1), U(NP-1), V(NP-1), W(NP-1) ~
~ ; (2I5, 1P4E12.3, 3E15.7); ~
IF(NP.GT.1) [
IF(IQ(NP-1).EQ.0) [
I=1;
DO II=1, 70 [
IF(E(NP-1).GE.EBRMEG(II)) [I=II+1;]
]
IF(I.GT.70) [I=70;]
DARAD=SQRT(U(NP-1)*U(NP-1)+V(NP-1)*V(NP-1));
IF(DARAD.GT.1.0) DARAD=1.0;
DARAD=ASIN(DARAD);
J=INT(DARAD/1.0E-5)+1;
JJ=J;
IF(J.GT.100.AND.J.LE.1000) [JJ=(J-101)/10+101;]
IF(J.GT.1000) [JJ=(J-1001)/100+191;]
IF(JJ.GT.281) [JJ=281;]
BRMFLX(JJ, I)=BRMFLX(JJ, I)+WT(NP-1);
]
]
]
MRS CNT(I SCCNT, I ARG+1)=MRS CNT(I SCCNT, I ARG+1)+1;
IF(I ARG.EQ.7.OR.I ARG.EQ.9.OR.I ARG.EQ.11.OR.I ARG.EQ.13) [
ISCCNT=ISCCNT+1;
IF(ISCCNT.GT.5) [ISCCNT=5;]
IF(ISCCNT.GT.ISCMAX) [IDSCFG=1;]
]
]
RETURN;
END; "END OF AUSGAB"

```

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
物質質量	モル	mol
光度	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
工率, 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	
光束度	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
線量当量	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, 日	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 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J

1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m

1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²

1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa

1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²

1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq

1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg

1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy

1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

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, 1 eV および 1 u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。
- EC閣僚理事会指令では 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 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (=N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	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 ⁻⁴	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	51.7149	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 = 4.18605 J (計量法)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J (熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J (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	= 4.1868 J (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 (仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	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	= 735.499 W
	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
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

