

JAERI-Tech
98-039



SPring-8における高エネルギー加速器の
放射線管理の現状と問題点

1998年9月

宮本幸博・植田久男・原田康典

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、お申し越してください。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

SPring-8における高エネルギー加速器の放射線管理の現状と問題点

日本原子力研究所東海研究所保健物理部
宮本 幸博・植田 久男⁺・原田 康典⁺⁺

(1998年8月19日受理)

SPring-8における高エネルギー加速器施設の放射線管理の現状と問題点をまとめた。第3世代放射光施設であるSPring-8においては、放射線管理を行う上で、高エネルギー大型加速器特有の問題点が多い。本報告では、パルス状放射線のモニタリング技術、低エネルギー及び高エネルギー放射線のモニタリング技術について現状と問題点を記述するとともに、放射化の問題、電磁波ノイズの問題等について議論した。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

+ 関西研究所管理部

++ 中性子科学研究センター

Present State and Problems of Radiological Protection Monitoring
for High Energy Electron Accelerator Facilities in SPring-8

Yukihiro MIYAMOTO, Hisao UEDA⁺ and Yasunori HARADA⁺⁺

Department of Health Physics
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 19, 1998)

The present state and problems of the radiological protection monitoring for the high-energy electron accelerator are summarized. In the radiological protection monitoring for SPring-8, a third generation synchrotron radiation facility, there are many problems specific to the high-energy electron accelerator. This report describes the monitoring technique of pulsed radiation, high-energy radiation and low-energy radiation, and their problems. The management of induced radioactivity and the effects of electro-magnetic noise to monitoring instruments are also discussed.

Keywords : SPring-8, Radiation Monitoring, Pulsed Radiation, High-energy Radiation,
Low-energy Radiation, Induced Radioactivity, Electro-magnetic Noise

⁺ Department of Administrative Services, Kansai Research Establishment

⁺⁺ Center for Neutron Science

目 次

| | |
|--------------------------------|----|
| 1. まえがき | 1 |
| 2. SPring-8の概要 | 2 |
| 2.1 施設の概要 | 2 |
| 2.2 放射線モニタの概要 | 2 |
| 3. 放射線管理における要件 | 4 |
| 3.1 発生するパルス状放射線に対する放射線管理 | 4 |
| 3.2 放射化物に対する放射線管理 | 5 |
| 3.3 ノイズ等の影響 | 5 |
| 4. 放射線管理上の問題点 | 6 |
| 4.1 パルス状放射線の測定 | 6 |
| 4.2 低エネルギー及び高エネルギー放射線の測定 | 10 |
| 4.3 放射化物の管理 | 13 |
| 4.4 電磁波ノイズ等の影響 | 16 |
| 4.5 その他 | 16 |
| 5. まとめ | 19 |
| 謝 辞 | 20 |
| 参考文献 | 21 |

Contents

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Outline of SPring-8 | 2 |
| 2.1 Outline of Facilities | 2 |
| 2.2 Outline of Radiation Monitoring System | 2 |
| 3. Characteristics of the Radiological Control | 4 |
| 3.1 Radiation Control for Pulsed Radiation | 4 |
| 3.2 Management of Induced Radioactivity | 5 |
| 3.3 Effects of Induced Electro-magnetic Noise | 5 |
| 4. Specific Problems for the Radiation Monitoring | 6 |
| 4.1 Monitoring of Pulsed Radiation | 6 |
| 4.2 Monitoring of High-energy and Low-energy Radiation..... | 10 |
| 4.3 Management of Induced Radioactivity | 13 |
| 4.4 Effects of Induced Electro-magnetic Noise | 16 |
| 4.5 Others | 16 |
| 5. Concluding Remarks | 19 |
| Acknowledgements..... | 20 |
| References | 21 |

1. まえがき

高エネルギー加速器施設においては、発生する放射線の種類とそのエネルギー範囲、放射性物質の生成原理や性状などが原子力施設や放射性同位元素取扱施設とは大きく異なっている。このため、高エネルギー加速器施設の放射線管理においても施設固有の特徴がある。

本報告は、日本原子力研究所（原研）が理化学研究所と共同で兵庫県に建設した大型放射光施設（SPring-8）における放射線モニタの設計及び試験・調整運転（以下、コミッションングという）を通じて得られた、高エネルギー加速器施設における放射線管理上の特徴と放射線モニタリング上の問題について述べたものである。

2. SPring-8の概要

2. 1 施設の概要

SPring-8は、放射光を利用して、構造解析、材料開発、医学診断等の多様な研究を行うための大型加速器施設である。放射光は、光速に近い電子が磁場によって曲げられた時に接線方向に発生する電磁波であり、波長範囲が赤外線領域からX線領域までと大変広く、また、高輝度、強指向性、偏光等の特徴を持っている。

SPring-8は、兵庫県西南部の播磨科学公園都市内の、東西1.5km、南北1.0kmの広大な敷地に建設され、入射器系加速器施設（線型加速器、シンクロトロン）、蓄積リング施設及びそれぞれの加速器をつなぐ電子ビームラインから構成されている。SPring-8の加速器の主な性能を第1表に、施設の配置を第1図に示す。線型加速器は、電子ビーム（電子あるいは陽電子）を約1GeVまで加速し、シンクロトロンへ出射する。シンクロトロンは、約1GeVで入射された電子ビームを8GeVまで加速し、蓄積リングへ出射する。蓄積リング施設は、蓄積リング、放射光ビームライン及び実験ホールから構成されている。蓄積リングは、8GeVで入射された電子ビームを蓄積、貯蔵するためのシンクロトロンであり、この蓄積リングに設置された偏向電磁石またはアンジュレータ、ウィグラー等の挿入光源で発生した放射光を実験ホールへ導き利用に供する。蓄積リングには、約60本の放射光ビームラインを設置することが可能な設計となっている。

本施設の建設は、日本原子力研究所と理化学研究所の共同プロジェクトとして行われ、1997年10月から、(財)高輝度光科学研究センターの運営のもと、供用運転が行われている。

2. 2 放射線モニタの概要

SPring-8の放射線モニタ^{*1), *2)}は、 γ (X) 線（以下、光子という）などの放射線レベルを監視するための放射線エリアモニタと空気中放射能濃度を監視するための空気モニタに大別される。

放射線エリアモニタには、高レンジエリアモニタ（光子用：9系統、中性子用：9系統）、低レンジエリアモニタ（光子用：19系統、低エネルギー光子用：9系統、中性子用：10系統）及び環境レベルエリアモニタ（光子用：4系統、中性子用：4系統）の計64系統がある。高レンジエリアモニタは放射線発生装置使用室内に、低レンジエリアモニタは管理区域内の放射線業務従事者が常時立入可能なエリアに、環境レベルエリアモニタは管理区域境界の非管理区域側に、それぞれ設置され、加速器運転中の放射線レベルが監視できるようになっている。

空気モニタには、排気モニタ（塵埃用：5系統、ガス用：5系統）及び室内モニタ（塵埃用：4系統、ガス用：4系統）の計18系統がある。これらのモニタは、事前評価の結果、放射性ガス及び塵埃の生成が無視できないエリアの排出空気及び室内空気を監視するためのものである。

また、SPring-8の放射線モニタは電磁波ノイズの低減化を図るため、検出部、計測部、電源部を現場に配置し、放射線監視盤と現場機器を光ケーブルで接続し計数信号を光に変えて伝送する新しい光NIM方式を採用している^{*3)}。この光NIM方式では、現場に、計測回路、高圧回路等を内蔵する光伝送器が設置される。一方、放射線監視盤は、NIM規格のBIN、低圧電源、デジタル指示モジュール及び警報回路から構成されている。

3. 放射線管理における要件

3. 1 発生するパルス状放射線に対する放射線管理

SPring-8では、電子の加速エネルギーが最大8GeVと非常に高いため、電子ビームが物質に入射してエネルギーが失われる(以下、これをビーム損失という)際に、電子の制動放射による光子の生成と、光子による電子・陽電子の生成が交互に繰り返され粒子数が増えていく電磁カスケードシャワー(第2図参照)が発生する。また、この過程で高エネルギー光子及び光核反応による中性子が発生する。さらに、高エネルギー光子による μ 粒子対生成や π 粒子の崩壊によりミュオンも発生する。このような放射線は、一般の原子力施設や放射性同位元素取扱施設の放射線と線種、エネルギーが非常に異なるとともにパルス状放射線であるなど様相が異なっている。

線型加速器、シンクロトロン及び蓄積リングで発生するパルス状放射線のエネルギーは、線型加速器の光子に対しては、最大1.2GeV、シンクロトロン及び蓄積リングでは最大8GeV、中性子に関しては、それぞれの加速器において数百MeVまで分布をしている。また、数ps \sim μ sの短いパルス幅を有しており、繰り返し周波数は線型加速器で1 \sim 60Hz、シンクロトロンで1Hz、蓄積リングでは入射時には1Hz、蓄積時には約200kHzとなっている。一方、蓄積リングで発生し、実験ホールへ導かれた放射光は、主要光子の最大エネルギーが数十keV、パルス幅が10ps程度、繰り返し周波数が約200kHzから508MHzである。放射光の形状は直径約0.5mmのいわゆるペンシルビームである。(第2表参照)

以上のことから、SPring-8においては、数keVから数GeVという極めて広範囲のエネルギーを有するパルス状放射線に対する放射線管理が必要となる。

また、加速器では、原子炉のように出力に応じて放射線の発生量が増加する訳ではなく、ビーム損失量に応じて放射線が増加する。このため、大型加速器施設の遮蔽設計においては、一定のビーム損失量を仮定する手法が一般的であり、SPring-8の遮蔽設計においても、他施設の経験データ等に基づいて適切と考えられるビーム損失量を仮定している。このビーム損失量が設計値を超えることは管理区域内外の放射線レベルの上昇に直結する。実際、高エネルギー大型加速器施設においては、コミッショニング時や定期点検後等のビーム調整時に管理区域内外の放射線レベル上昇が頻繁に発生している。また、定常運転時においても予期せぬビーム損失により、急激な放射線レベルの上昇を引き起こすおそれがある。SPring-8の蓄積リングにおいて、電子ビーム制御トラブル時の放射線レベルを推定するため、意図的にビーム損失を発生させた際の放射線エリアモニタ指示値を第3図に示す。この実験は、偏向電磁石で強制的に100%ビーム損失を発生させたもので、ビーム損失位置を変化させて、5分間ずつ、計4回実施した。

このような急激な放射線レベルの上昇に備え、インターロックモニタにより放射線レベルの異常な上昇を検出し加速器を自動的に停止させるシステムが高エネルギー加速器研究機構(KEK)を中心として推奨されており、放射線技術顧問会の答申を受けて、SPring

-8でも十数系統のエリアモニタをインターロックシステムに組み込んでいる。しかし、加速器のインターロックモニタを放射線管理用モニタ、プロセスモニタのいずれに区分するのか、どのような測定系とすべきなのか、どの程度のレベルで加速器を停止させるべきなのか等については、専門家の間でも見解が一致していないため、今後、十分な議論が必要と考えられる。また、このような急激な放射線レベルの上昇に備えるためには、個人被ばく線量管理の観点から、補助線量計を着用し、異常な被ばくを検出できるようにしておくことも重要と考えられる。

3. 2 放射化物に対する放射線管理

高エネルギー光子及び中性子は、加速器構成機器及び冷却水、空気等との相互作用により放射化生成物を発生させる。SPring-8は電子加速器であるため、陽子加速器等に比べ放射化の程度は小さいが、出力の高い線型加速器の使用室内やビーム損失割合の高いシンクロトロンの入出射部、蓄積リングの入射部等では、放射化物に対する管理が必要となる。加速器構成機器に対しては機器表面の線量当量率や廃棄物の管理が、冷却水については配管やタンク表面の線量当量率や排水の管理が、また、空気については室内空気や排出空気の管理が必要となる。さらに、これらの放射化物に起因する汚染による表面汚染の管理が必要となる。

3. 3 ノイズ等の影響

加速器施設内においては、高周波電源、パルスクライストロン、電磁石電源等の影響により、一般の原子力施設に比べ電磁波ノイズや電源ノイズが大きく、また、電磁石からの磁場の影響等があるため、放射線モニタを設置する際や放射線モニタリングを実施する際には、ノイズ対策について十分に配慮しておく必要がある。

4. 放射線管理上の問題点

Spring-8における放射線モニタの設計及びコミッショニング期間中の管理を通じて、放射線管理における問題点の抽出と検討を行った。これらについて以下に述べる。

4. 1 パルス状放射線の測定

一般的に光子用エリアモニタやサーベイメータとしてよく用いられている半導体検出器、NaI(Tl)シンチレーション検出器、GM管等は、検出器からの出力パルスを計数し、これに換算係数を掛けて線量率を算出する方式の測定器（以下、これをパルス方式測定器という）である。これらの検出器の分解時間は、一般的に半導体検出器やシンチレーション検出器で数 μ s、GM管で、数百 μ sとなっている。このため、Spring-8で発生するパルス幅1 μ s程度のパルス状放射線に対しては、原理的に放射線1パルスあたり最大1カウントの計数しかしないため、極端な数え落としの可能性があることになる。

また、パルス状放射線の測定に適しているといわれる電離箱を使用する際にも、再結合と平均化処理という2つの問題がある。再結合の問題とは、パルス状放射線が電離箱に入射した際、電離イオン濃度が高くなりすぎると、電極に収集される前に再結合を起し、出力電流が小さくなるという問題である。また、平均化処理の問題とは、電離箱からの出力がパルス状となるため、これを計測系で適切に平均化しないと、平均線量率を読み取れないという問題である。例えば、この平均化処理を考慮していないサーベイメータで繰返周波数1Hzの放射線を測定すると、1秒周期で指示値が大きく変動し、どの値を読んでいいのか分からないという現象が起こる。

4. 1. 1 パルス方式測定器のパルス状光子に対する応答特性

パルス状光子1パルス当たり n 個の光子が検出器に吸収される確率 $W(n)$ は次式のポアソン分布で表すことができる。

$$W(n) = \frac{\bar{n}^n \cdot \exp(-\bar{n})}{n!}$$

\bar{n} : パルス状光子1パルス当たりに検出器に吸収される平均光子数

パルス方式測定器では、パルス状光子1パルス当たりの検出器からの出力信号パルス数は、 $n=0$ のときに0個で、 $n \geq 1$ のときに1個となる。したがって、パルス状光子1パルス当たり平均 \bar{n} 個の光子が検出器に吸収された場合に、計数される信号パルス数の平均値 n_0 は

$$\begin{aligned} n_0 &= W(1) + W(2) + W(3) + W(4) + \dots \\ &= 1 - W(0) \\ &= 1 - \exp(-\bar{n}) \end{aligned}$$

となる*4)。

この関係式を応用することにより、パルス方式測定器のパルス状光子に対するレスポンスは、次式から算出することができる。

$$\frac{D}{D_0} = \frac{k \cdot f}{D_0} \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{D_0}{k \cdot f} \right) \right\}$$

D : パルス方式測定器の指示値 (Sv/h)

D₀ : 平均線量当量率 (Sv/h)

k : 換算係数 (Sv/count)

f : 繰返周波数 (h⁻¹)

第4図に、原研(東海研究所)のNUCEFやタンデム施設で使用している半導体式エリアマニタ(富士電機製NDM)のレスポンスを試算した結果を示す。50%程度の過小評価を許容したとしても、このグラフから、繰返周波数1Hzではほぼ全測定範囲で使用困難であり、10Hzでは数μSv/h以上、30及び60Hzでは数十μSv/h以上で使用が困難になることが予想される。

第5図及び第6図はNaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータ(アロカ製TCS-161)について、繰返周波数60Hz時及び5Hz時のレスポンス計算結果を実線で、電離箱式サーベイメータの値を基準とした実測データを○で示したものである。これらのグラフから、どちらの場合も、ほぼ全点で実測データが計算値の約2.5倍となっていることがわかる。これは、このサーベイメータがエネルギー補償型であり、DBM方式を採用していることによると考えられる。DBM方式では、検出器からの出力パルスに対しその波高値に応じた線量率変換演算値を加重加算することによって線量当量率を算出しており*5)、今回の試算のように単純に計数率に換算係数を乗じているわけではないため、試算結果とのずれが生じたものと考えられる。

第7図は半導体式線量計(アロカ製マイドーズミニPDM-102)のパルス応答特性を試算した結果である。このグラフから、繰返周波数1Hzでは、10μSv/h以上で、その他の周波数でも100μSv/h以上の場では使用が困難と推定される。第8図は、PDM-102について、繰返周波数1Hz時のレスポンス計算結果及びガラス線量計を基準とした実測データを示したものである。このグラフから、少なくとも数十μSv/h以上の場では実用に耐えないことが確認できる。このような特性は、パルス状放射線による急激な放射線レベル上昇が起こり得る高エネルギー大型加速器施設の補助線量計としては、不適切なものである。SPRING-8では、このようなパルス方式の補助線量計を加速器運転中に使用することは不適切と考え、加速器運転中の補助線量計として、直読型電離箱式ポケット線量計を使用している。しかし、この形式の線量計は、振動・衝撃に弱い、湿度・温度等の環境条件の影響を受けやすい、読取誤差が大きい等の欠点を持つため、新しい補助線量計の開発が望まれる。

4. 1. 2 電離箱のパルス状光子に対する応答特性

SPring-8では、パルス状光子の測定を考慮して、光子用エリアモニタの検出器にパルス応答特性が良好な電離箱を選定するとともに、測定系に対する応答特性を事前の照射実験により確認した。事前確認試験は東海研究所のリニアック（パルス幅40ns及び1 μ s, 光子エネルギー約150keV, 繰返周波数1Hz及び50Hz）及びパルスX線発生装置（パルス幅8ms, 光子エネルギー60keV, 繰返周波数1~20Hz）で実施し、照射時の光子用エリアモニタの指示値を基準の積算線量計から算出した平均線量当量率と比較した。基準の積算線量計としては、型式データから照射実験時に再結合が問題とならないことが保証されており、さらに、リニアックの照射ではTLD及びガラス線量計の同時照射により測定値が適切であることが確認されているラドコン線量計を使用した。第9図に事前確認試験の結果を示す。第9図から、最も応答の悪い繰返し周波数1Hzの条件でも、積算線量計に対し、約0.5の応答特性が得られることが確認できる。この照射実験の結果について、先に述べた再結合と平均化処理の2つの観点から検討した結果を以下に示す。

まず、再結合の問題について述べる。この照射実験で使用した電離箱は充填ガスが空気であるため、ICRUレポート34^{*)}に基づいて電離イオンの収集効率を計算することが可能である。外形及び容積から極板半径等を類推して* 試算した結果を第3表に示す。この結果、本エリアモニタの使用レンジ上限である10mSv/hにおいて、繰返周波数が1Hzでも収集効率が97.7%となり、實際上再結合を問題とする必要はないと考えられる。

次に平均化処理の問題について述べる。X線発生装置で発生したパルス幅8ms、繰返周波数1Hzのパルス状X線に対する電離箱のログアンプ出力（第10図参照）は、立上がり時間（入力継続時間）:150ms、応答時間（時定数）:400msのカーブによく一致する。ICRUレポート34に基づいて電離箱のイオン収集時間を計算すると142msとなり、これが電離箱出力の立ち上がり時間とほぼ一致することから、電離箱の立ち上がり時間はイオン収集時間に依存していると考えられる。したがって、放射線のパルス幅が電離箱のイオン収集時間よりも十分に短ければ、電離箱出力のパルス幅はイオン収集時間によって決まり、測定器の応答は放射線のパルス幅には依存しない。今回の実験においても、第9図から、パルス幅の変化に比して応答の変化が小さいことが確認できる。また、製作メーカーによれば、本測定系におけるデータ処理方法は、ログアンプ出力（電圧出力:0 ~ -1V）を1/8秒周期でサンプリングし、1/8秒毎に直近8データから1秒平均値を算出した後、線量当量率に換算するものである。立上がり時間150ms、応答時間400ms、繰返周波数1Hzのログアンプ出力に対して、データサンプリングのタイミングを10msずつずらして移動平均を求め線量当量率に換算すると応答の範囲は0.77~0.85となり、X線発生装置による照射時の

* 照射実験に使用した電離箱検出器は国外メーカーの製品であり、内部構造を明らかにしないことを条件に輸入しているため、正確な寸法は確認できなかった。このため、試算では推定値を用いている。

応答0.77（第9図、パルス幅8ms、繰返周波数1Hz）に近い値が得られる。しかし、この試算では、リニアックでの照射時に応答が約0.5となったことは説明しきれない。現時点では、リニアック照射時にはエリアモニタと基準線量計を同時に照射しているため、線量当量率の空間分布変動がデータにばらつきを与えたのではないかと推定している。なお、同時照射したTLD及びガラス線量計の測定結果から、リニアック照射時の線量当量率空間分布の変動がかなり大きかったことを確認している。今後、加速器により同様の実験を行う際には、どのようにして空間分布が均一な照射を行うかが重要なポイントであると考えられる。本測定系において、1/8秒周期のログアンプ出力から1秒平均値を算出するのではなく、ログアンプ出力の線量当量率換算値から1秒平均値を算出するようロジックを変更した場合、上記と同様の試算から、応答を0.97~1.0に改善可能と期待される。今後の改良及び実照射による確認が望まれる。

以上のことから、電離箱でパルス状光子を測定する場合には、以下の点に注意することが必要と考えられる。

- ・ 測定レンジで再結合が問題とならないことをチェックするため、イオン収集効率を確認すること。
- ・ 電離箱のイオン収集時間及び応答時間を把握すること。
- ・ 電離箱からの出力を適切に平均化できるデータ処理方法をとること。

収集効率の確認については、ICRU34に2点チェック法という手法が紹介されている。この手法はパルス場に電離箱をおき印可電圧を変えて収集電荷を測定することで収集効率のチェックを行うものである。この方法であれば、ICRU34でパラメータが与えられていない充填ガスの場合でも収集効率を計算することができる。収集時間・応答時間については、パルス場でアンプアウトを実測することが可能である。

一方、平均化処理については、先に示したログアンプ出力移動平均から線量当量率換算値移動平均への改良案のように、得られた収集時間・応答時間を適切に平均化できる処理方法をとることで解決可能と考えられる。また、電離箱からの出力電流を積算した後に微分処理することで線量率を得る方法であれば、収集時間や応答時間に関係なく十分な応答が得られることも期待できる。

4. 1. 3 中性子用測定器のパルス状中性子に対する応答特性

SPring-8において、中性子用エリアモニタとしては、低レンジ用にポリエチレンモデレータ付³He比例計数管（レムモニタ）を、高レンジ用にポリエチレンモデレータ付BF₃比例計数管を採用している。

これらの検出器は、いずれも前述のパルス方式測定器に分類されるものである。しかし、これらの中性子測定器の場合は、パルス状に発生した中性子が遮蔽体及びポリエチレンモデレータで減速されて熱中性子化することにより、ようやく検出器で計数可能となる。このモデレータによる減速過程は、パルス状中性子を時間的に平均化する効果（以下、時間

平均化効果という)を持つと期待される。したがって、モデレータ付測定器については、パルス応答特性の問題は少ないと予想される。

SPring-8における実測データから、パルス状中性子に対する時間平均化効果を確認した。第11図は、加速器を1Hzで運転した際の遮蔽体内部(BF₃ エリアモニタ)及び遮蔽体外部(³He エリアモニタ)における中性子用エリアモニタの指示値をcps 単位で示したものである。両モニタともにガス入り検出器であり、その分解時間は1~10 μ s程度と考えられる。したがって、時間平均化効果がなければ、パルス状光子に対する半導体検出器と同様に、パルス幅1 μ sのパルス状中性子線に対し、1パルス当たり最大1カウントの計数しかしないことになり、第11図の運転条件(繰返周波数1Hz)では、計数率が1cps以上にならないはずである。しかし、実際には、第11図からわかるとおり、両モニタともに1cpsを大きく上回る計数率を示している。このことから、少なくとも、ある程度の時間平均化効果があるものと考えられる。しかし、この効果が平均線量当量率を測定する上で十分かどうかについては今後の検討が必要である。

また、この時間平均化効果に関して、KEKでモンテカルロ計算が行われた例があるとのことであるが詳細は不明である。一方、パルス状光子による妨害や中性子の数え落としを指摘する文献もあり^{*)}、今後、文献調査及び原研独自の検討を行う必要があると考えられる。

4. 2 低エネルギー及び高エネルギー放射線の測定

4. 2. 1 低エネルギー光子の測定

SPring-8の実験ホールでは、主成分が30keV以下の光子である放射光の利用が行われている。一方、一般に使用されている光子用エリアモニタの多くは、30keV以下は一般に感度がない。このため、SPring-8の実験ホールには、通常的光子用エリアモニタの他に組織等価型電離箱を用いた低エネルギー光子用エリアモニタ(X線用エリアモニタ)を設置し、放射光の漏洩を監視するものとした。

また、個人被ばく測定器についても、現在、原研で使用している原研IV型フィルムバッチは光子エネルギー30keV以下で急激に感度が低下し、20keVでは約1/4の感度しか持たない^{*)}ことから、SPring-8の個人線量計としては不適と考え、ガラス線量計を採用した。このガラス線量計(東芝硝子製GD-403)による評価では、従来の線量当量算出式を改良し、 γ 線用窓による読み取り値と低エネルギー光子に感度を有する β 線用窓に対する読み取り値を利用して10keVまでの光子を評価可能な方式を採用している。

第12図にX線用エリアモニタ及びガラス線量計のエネルギー特性を示す。

現在、原研(関西研究所)で、X線レーザー(光子エネルギー:20eV~2keV)やレーザープラズマ軟X線源(光子エネルギー:数100eV~数keV)の開発が予定されており、今後はさらにエネルギーの低い10keV以下の光子の測定が課題となると予想される。

4. 2. 2 高エネルギー光子の測定

高エネルギー光子に関して、現時点における校正場でのエネルギー上限は、 ^{16}N の6.1 MeV と考えられ、これ以上のエネルギーでの照射方法は確立されていない。また、現行の放射線障害防止法においては、告示別表に10MeV 以下のデータしか記載されておらず、1 cm線量当量の定義そのものが明確となっていない。このため、特性評価上は、物理量である吸収線量に対する特性を評価し、これを別に検討した換算係数で1 cm線量当量に換算する方法が適切と考えられる。

換算係数の検討については、ICRPが提示している半無限平板ファントムに対する値を用いる、あるいは、告示別表に示された換算係数と同様にモンテカルロ計算を行う等の方法が考えられる。

測定器の特性評価については、EGS 4等のモンテカルロ計算が有効と考えられる。また、高エネルギー場に、空気等価壁電離箱を基準線量計として持ち込むことで比較校正を行うことも可能である^{*9)}。この方法は、空気等価壁電離箱に様々な厚さのビルドアップキャップを被せて測定を行い、疑似電子平衡の領域の測定値をビルドアップキャップ厚0に外挿して、その点の空気カーマを近似的に求め、これと対象測定器の指示値を比べることで比較校正を行うものである。

SPRING-8で発生する高エネルギー光子については、下記の理由から、既存の電離箱式エリアモニタを使用した場合に感度がない、あるいは極端に応答が悪くなることはないと推定できるため、異常検出用のエリアモニタとしては十分な性能を有しているものと考えている。

- ・ 電離箱の封入ガスと高エネルギー光子の相互反応を考えた場合、1MeV以上100MeV以下で断面積データに極端な変化がない。
- ・ 発生する光子が加速電子の最大エネルギーに最大値を持ち、遮蔽体なしで $1/E$ スペクトル、十分な厚さの遮蔽体透過後で $1/E^2$ スペクトルで近似できることから^{*10)}、光子の実効エネルギーは100MeV以下と考えられる。

しかし、定量的な評価が必要とされる個人線量計やサーベイメータについては、先に述べた手法等により、今後、十分な検討が必要と考えられる。

4. 2. 3 高エネルギー中性子の測定

高エネルギー中性子に関しては、GeV オーダーの加速器施設においても、遮蔽体の外側では、エネルギースペクトルが $1/E$ スペクトルとなることから^{*10)}、数十MeV 以上の成分はあまり多くないと予想される。したがって、放射線管理用としては、数十MeV までの特性データがおさえられていれば十分と考えられる。しかし、中性子の場合、そのエネルギーに応じて線量当量への換算係数が極端に変化するため、校正場と測定場のスペクトル差を把握し、校正場の定数をそのまま使用して構わないかどうかを検討する必要がある。

また、現在使用されている中性子用測定器の多くは、14MeV 程度までの応答しか確認さ

れていないものが多く、数十MeV までのエネルギー範囲でも使用可能なものがどの程度あるか疑問である。

SPring-8で使用している放射線管理用測定器（レムモニタ、レムカウンタ、エッチピット線量計）は、型式データとして14MeV 程度までの応答が保証されているものを採用しているが、上記の理由から、14MeV 以上の高エネルギー中性子に対する応答を評価・確認する必要があると考えられる。

また、20MeV を超える高エネルギー中性子については、現行法令において、1 cm線量当量への換算係数が与えられていないため、高エネルギー光子と同様、管理量である1 cm線量当量等への換算係数を検討する必要がある。

今後は、数十MeV までの校正場の確立、測定場における中性子スペクトル評価法の確立、高エネルギー中性子用測定器の開発等が重要な課題となる。

4. 2. 4 ミュオンの測定

ミュオンに関しては、現行法令に、その測定・評価法の記載がないため、高エネルギー光子及び中性子と同様にして、1 cm線量当量等の放射線防護上の実用線量を検討する必要がある。

また、実用線量を算出するための測定量となる吸収線量の測定については、以下のとおりと考えられる。

①電離箱による測定

ミュオンは物質との相互作用では、原子核とは反応せず、クーロン力による電氣的相互作用のみを起こす。電離箱の場合、 γ 線の照射では、 γ 線と物質との相互作用で発生した二次電子がガスの電離を引き起こすため、ミュオンと γ 線の応答の差は電子とミュオンのW値の差だけに依存することになる。主要な封入ガスである空気、Kr、Xe等においてW値は電子とミュオンで同程度となるため、この差は実用上は無視できる^{*9)}。したがって、電離箱でミュオンを測定する場合には、ミュオンは光子とほぼ同様に扱うことができるといわれており、ミュオンと光子の混在場における測定値はミュオンと光子の線量率を合算したものと考えられる。

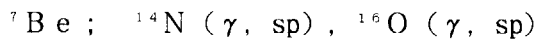
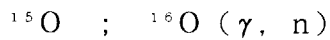
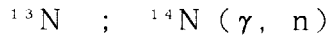
②電離箱以外の測定器による測定

電離箱以外の測定器を用いる際には、十分な検討が必要である。例えば、パルス方式の測定器では、1パルス当たりの吸収線量がいかに大きくても1カウントしかしないため、計数値と吸収線量の関係がエネルギーや線質によって大きく変化すると考えられる。また、ガラス線量計でも、重粒子線の照射により電離密度が上昇すると捕獲中心が飽和し、吸収線量を過小評価することがことが放医研の研究で報告されており^{*11)}、ミュオンに対する特性についても今後の研究が必要と考えられる。

4. 3 放射化物の管理

4. 3. 1 放射化空気のモニタリング

SPring-8のような高エネルギー電子加速器においては、高エネルギー光子及び中性子と空気中の原子の核反応によって放射性ガス及び放射性塵埃が発生する。主要な核種及び生成反応は以下のとおりである^{*1,2)}。



(1) 放射性ガスのモニタリング

加速器で生成された放射化ガスをモニタリングする室内及び排気ガスモニタについては、それぞれ、空気中濃度限度及び排気中濃度限度以下の検出下限濃度を有することが望まれる。しかし、生成が予想される主要核種のうち、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{41}Ar 等については、一般的なガスモニタで、排気中濃度限度以下の検出下限を得ることは困難である。

そこで、SPring-8では、排気ガスモニタとして高感度ガスモニタを新しく開発し導入した。このモニタは、大面積プラスチックシンチレーション検出器の採用及び反同時計数と鉄遮蔽体によるバックグラウンドの低減によって高感度の測定を可能としたものである。実ガス校正の結果、本モニタが、 ^{41}Ar に対して排気中濃度限度($5 \times 10^{-4} \text{Bq/cm}^3$)以下の検出下限濃度を有することを確認している。第13図にSPring-8排気ガスモニタの概略構成図を示す。

本ガスモニタを導入後、コミッショニング期間中に抽出した問題点について以下に述べる。

①濃度換算係数の決定

本ガスモニタは、工場検査において、実ガス校正により ^{41}Ar 及び ^{133}Xe の濃度換算係数を実測したが、SPring-8稼働後、排気中放射性ガスの半減期を解析した結果、主要核種が ^{13}N 及び ^{15}O であることが判明した。(半減期解析グラフを第14図に示す。)このため、放出量の算定を ^{13}N または ^{15}O に対して行う必要が生じ、現在は、 ^{41}Ar が放出する電子のエネルギーと ^{13}N が放出する陽電子のエネルギーが近いことから、 ^{41}Ar に対する換算係数を ^{13}N に適用可能とみなし、 ^{41}Ar の換算係数を用いて ^{13}N の放出量を算定している。しかし、この場合、電子と陽電子でモニタの応答が変わらないことを仮定しており、また、 ^{41}Ar の放出する約1.3 MeVの γ 線と ^{13}N からの511keVの消滅 γ 線の差を無視しているため、厳密にはより詳細な評価が必要と考えられる。今後、加速器施設における主要生成核種に対し、EGS4等によるモンテカルロ計算や様々な線源による特性試験を行い、エネルギー特性データを整備することが重要である。

②外部中性子線によるBG上昇

SPring-8において、線型加速器下流部の排気系ガスモニタで加速器ビーム出力の上昇に伴いガスモニタのBGが上昇することが確認された。設置場所において、 γ 線量率の上昇はほとんど認められず、中性子線量率のみが出力に依存して上昇していることから、中性子線量率の上昇がBG上昇の原因と考えられる**。今後、このタイプのガスモニタを使用する際には、外部放射線による影響のおそれのない位置に設置することが望ましい。ただし、SPring-8における経験から、外部放射線による影響は事前評価結果よりも広範囲にわたることがあるため、設置位置を検討する際には線源からの距離を十分に取っておくことが必要と考えられる。また、中性子検出器を組み込んでBG減算等を行うシステムを開発すれば、設置場所を選ぶ必要がなくなり、スペースの乏しい施設などでは有用と考えられる。

(2) 放射性塵埃のモニタリング

SPring-8の加速管室においては、加速器運転中に(γ , sp)反応で生成した ${}^7\text{Be}$ が有意に検出されている。 ${}^7\text{Be}$ の崩壊形式は電子キャプチャー100%で、放出される放射線は特性X線を除くと477.59keVの γ 線のみであり、その放出率も10.3%にすぎない。一方、ダストモニタや表面汚染計は、ウラン等の標準線源で校正されているため、ダストモニタによる連続監視やHEPAフィルタ交換時の表面汚染モニタリング等を行う際には、測定結果を大きく過小評価してしまう可能性がある。このため、 ${}^7\text{Be}$ の定量測定には、Ge検出器等による γ 線スペクトル分析を行う必要があり、このことが管理業務を煩雑にしている。ダストモニタや表面汚染計に ${}^7\text{Be}$ に対する値付けを行うこと、及び、必要に応じて新しい機器を開発することで管理レベルを満足できる検出下限が得られれば、現場における簡易測定が可能となり、管理上は非常に有用と考えられる。

また、線型加速器の高出力運転後に ${}^{22}\text{Na}$ が有意に検出された例があり、その時点では生成原理がはっきりしなかった。最近、 ${}^{22}\text{Na}$ が ${}^{40}\text{Ar}$ の(n, sp)反応で生成する可能性があるとの指摘もあり、今後の検討が必要と考えられる。

** 本ガスモニタがプラスチックシンチレータを使用していることから、中性子感度が高いことは十分予想できたはずだが、従来の電離箱式ガスモニタ等の経験に基づく「外部放射線によるガスモニタへの影響は γ 線の寄与が最も大きい。」という先入観から、原因調査にかなりの時間を要してしまった。

また、本ガスモニタの設置後、温度特性の極端に悪い検出器が発見されており、工場での温度特性のチェックが不十分であったと考えられる。

この2点は本ガスモニタの設計・製作における大きな反省点であり、今後の教訓として重要と考えている。

4. 3. 2 放射化機器のモニタリング

ビームダンプやビーム収束用電磁石といった加速管周辺の機器は、ビーム損失に伴い放射化される。通常、これらの機器に対しては、線量当量率による管理を行えば十分である。しかし、KEKでは過去のデータから

$$SCD \approx 1.2 \times H_{1cm}$$

ここで、SCD：表面密度 (Bq/cm²)

H_{1cm} ：機器表面線量当量率 (mSv/h)

なる経験式が得られており^{*13)}、機器表面の線量当量率がmSv/h オーダー近くになると表面汚染の管理が必要になるといわれている。今後、原研においてもより詳細なデータの蓄積及び解析が望まれる。また、機器表面などに金属成分の顔料等を含む塗装が行われている場合には、この塗装部分が放射化して剥離することにより表面汚染を引き起こす場合があるので注意が必要である。なお、SPring-8のコミッショニング期間においては、高出力運転直後のリニアックビームダンプで、ごく短半減期の表面汚染が検出された1例を除き表面汚染が検出されたことはなかった。また、SPring-8では、放射線発生装置使用室から放射化のおそれのある機器を搬出する際には、Ge半導体検出器による γ 線スペクトル分析を実施しており、これまでにこの測定で、金属部品類では、⁵¹Cr, ⁵⁴Mn, ⁵⁶Co, ⁵⁷Co, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co等を、コンクリート類では、⁷Be, ²²Na, ⁴⁶Sc, ⁵⁴Mn, ⁶⁰Co等を検出している。これらの主要検出核種に対して、予想される生成反応を第4表に示す。

これらの放射化機器の分解・加工等を行う場合には、当然、表面汚染や空気汚染の発生が予想される。しかし、現時点では、機器の放射化の程度と作業内容から汚染の程度を予測するためのバックデータは不十分である。

また、加速管室等に設置されていた機器を廃棄する場合に、どのような基準で一般廃棄を認めるかについて、SPring-8関係者間でかなりの議論があった。一般に、汚染のおそれのある第一種管理区域において発生した廃棄物は、ある一定の基準を満たす特定の例外を除き、原則的にホット廃棄であり、汚染のおそれのない第二種管理区域で発生する廃棄物は一般廃棄である。しかし、汚染のおそれはないが放射化のおそれのある放射線発生装置使用室（原研では第二種管理区域が多い。）で発生する廃棄物はその扱いが明確でない。

今後、これらの点については、十分なバックデータの取得及び検討が必要と考えられる。

4. 3. 3 冷却水のモニタリング

SPring-8においては、コミッショニング期間中を通じて、DPタンク内の廃水及び加速器停止中の冷却水中で放射性物質が検出されたことはなかった。しかし、高出力運転中には、冷却水のイオン交換樹脂表面等で線量当量率の上昇が認められる（数 μ Sv/h程度）ことから、運転中の冷却水中に短半減期核種である¹⁰C, ¹⁴O, ¹⁵O, ¹³N等が生成していたと推定される^{*12)}。

このような冷却水の放射化に伴う線量当量率上昇や運転中の漏洩による表面汚染、空気汚染に対しても、放射線管理の立場からは注意が必要と考えられる。

4. 4 電磁波ノイズ等の影響

SPring-8においては、施設内の電磁波ノイズのレベルが極めて高くなると予想されたため、前述の光NIM方式を採用することで、ノイズによる影響の低減化を図った。しかし、それでも、低レンジ中性子用エリアモニタ（レムモニタ）検出部で電磁波による指示上昇の事例が発生している。これは、レムモニタ設置箇所近辺のモジュレータ（クライストロン用電源：400kW, 475Aのパルス電源）を、機器パネル開放状態で運転した際に、異常な指示上昇を起こしたものである。第15図に指示上昇時のトレンドを示す。この図から、モジュレータの出力を上げると指示が上昇し、アルミ箔の装着及びモジュレータ出力の低下により指示が下がることが確認できる。このことから、本事例はモジュレータをノイズ源とする電磁波ノイズによる指示異常と判断された。なお、この図では、アルミ箔装着時の指示値が下がりきっていないが、十分時間をおくと、ノイズ源の出力に係わらず指示値が平常値まで下がることを確認している。

また、放射線安全関係の他設備（パーソナルキーシステム及びインターロックシステム）では、現場機器のCPUや通信カードに原因不明の動作不良が発生した事例があり、これもノイズが原因であった可能性がある。

これらのことから、加速器施設の放射線モニタリング設備、安全管理設備を設計する際には十分にフェイルセーフを考慮しておくことが不可欠である。

また、サーベイメータについても、電磁波により異常な指示変動を示した事例があり、静電シールド型測定器の開発が望まれる。なお、サーベイメータについては、電磁石まわりの測定を行う際に磁場の影響で指示不良が発生することがある。また、この際、磁石に検出器が強い力で吸い付けられて、測定者にとって危険であり、かつ、機器を損傷する可能性があるため注意を要する。

4. 5 その他

SPring-8で発生したその他の問題点について以下に述べる。

①耐放射線性の問題

コミッショニング開始後2～3カ月で、蓄積リングマシン収納部内に設置した高レンジエリアモニタにおいて、光伝送器の5V電源異常が次々に発生した。発生した故障が全て5V電源異常であり、故障が積算線量30Sv程度で起きていることから、5V電源用ICが放射線ダメージにより損傷し、動作不良となったものと推定される。SPring-8では、当該機器を遮蔽体外に移設することで対応したが、耐放射線性30Sv程度という値は高レンジモニタ用としてはあまりにも低すぎるため、今後、内部ICの見直しが必要と考えられる。

このSPring-8の例からも明らかなように、市販のICには耐放射線性がかなり低いものがあるため、高放射線レベル下に設置する機器については、十分に内部IC等の仕様を検討しておく必要があると考えられる。なお、一般的には、市販のもので数百Gy、耐放射線仕様のもものでは数千Gy程度の耐放射線性を有したICが入手可能といわれている^{*14)}。

②負荷変動の問題

負荷変動の問題の一例として、電離箱式エリアモニタが加速器の運転による急激な線量率変動にさらされた際に、モニタの安全回路による高圧電源のシャットダウンが発生してしまった事例があげられる。これは、線量率の急激な変動により高圧電圧が変動することと、測定上限を超える入力が有った際にADコンバータが誤動作するため発生したものと考えられる。事例発生時のトレンドを第16図に示す。

加速器施設では、nsオーダーの時間内に使用室内で10桁以上（この例では約11桁）の線量率上昇が発生するため、これを考慮して機器の設計をしておかないと今回の様なトラブルの原因となる。

なお、SPring-8では、ADコンバータに過大電圧が入力されないよう電気回路にダイオードを付加することでこのトラブルを解決している。

③モニタリングポストの指示上昇

モニタリングポスト（環境レベル光子用エリアモニタ）において、加速器停止中の放射線発生の可能性がない時に指示上昇が発生した。当該事例のトレンドを第17図に示す。製作メーカーの見解では、この事象の原因は宇宙線によるものであり、球形加圧電離箱式モニタリングポストでは、他の原子力発電所サイト（全13サイト）でも発生しているとのことである^{*15)}。原発サイトでは、時定数を長くすることによりこの問題を解決しているとのことであるが、加速器ではバースト状に発生する放射線を見逃す可能性があるため、同様の対策をとることには問題がある。いずれにせよ、この件に関する検討は必ずしも十分とは考えられないため、今後、より詳細な調査・検討が望まれる。

④エージング時及び加速器停止時の放射線の問題

加速器においては、ビーム停止中であっても使用室内に高レベル放射線が発生することが起こり得る。

一つのケースは、加速器のエージングと呼ばれる運転によって発生する。エージングとは、加速管に高周波を入力することにより、加速管内の不純物イオン、自由電子等を除去し、真空度を上げることをいう。この場合、加速管内の自由電子は制御されることなく加速され放射線レベルの上昇を引き起こす。エージングに伴う線量当量率上昇の例を第18図に示す。この場合、自由電子は制御されていないため、加速器上流側に自由電子が逆加速されることも起こる。したがって、位置によっては、加速器のビーム運転中よりも瞬間的

に線量当量率が上昇する場合もある。

もう一つのケースは、電子銃を止めても、電子銃からの漏洩電子が加速されるために発生する線量当量率上昇である。この場合も、漏洩電子は十分に制御されていないことが多く、高線量当量率となる場合がある。

加速器の放射線管理を行う際には、加速器の特性を十分に理解していないと、上記のような現象に対応できず、作業者の被ばくを防止できなかったり、運転停止後のサーベイ等で放管員自身が大きな被ばくをしてしまう可能性があるため、十分な注意が必要である。

5. まとめ

以上、述べてきたとおり、SPring-8の経験から多くの知見・成果を得ることができた。これらのうち、主なものをまとめると下記のとおりとなる。

- ・ 半導体検出器やNaI(Tl)シンチレーション式検出器がパルス状光子に対して、十分な応答を持たないこと、及び、その応答が理論式から予測できることを確認した。
- ・ 電離箱式エリアモニタにより、異常検出用としては十分なパルス状光子のモニタリングが可能であることを確認した。
- ・ 中性子用エリアモニタがモデレータによる時間平均化効果を有することを確認した。
- ・ 組織等価型電離箱の採用により、10keV以上の低エネルギー光子に十分な感度を有するエリアモニタが製作可能であることを確認した。
- ・ ガラス線量計の評価式を変更し、従来、低感度であった10~30keVの低エネルギー光子に対する特性を改善した。
- ・ 排気用ガスモニタとして、 $5 \times 10^{-4} \text{Bq/cm}^3$ 以下の検出下限を有する高感度ガスモニタを開発した。
- ・ Spring-8からの排出ガスの主成分が ^{15}N 及び ^{16}O であることを確認した。また、加速器運転中の使用室内に ^7Be が生成されることを確認した。
- ・ Spring-8使用室内の機器から、光核反応や速中性子反応で生成する核種を検出した。
- ・ 電磁波や磁場が放射線モニタリング機器に指示異常を引き起こすことを確認した。

その一方で、本報告で指摘したとおり、高エネルギー大型加速器における放射線モニタリングには、まだまだ多くの問題が残されており、放射線管理手法や施設の安全設計手法も十分に確立されているとはいえない。

今後の課題として考えられるものを第5表に示す。特に重要な課題としては、

- ・ パルス状放射線対応機器や電磁波対策機器といった加速器施設に適した機器を開発すること。
- ・ 従来、測定対象としていなかった高エネルギー放射線及び低エネルギー放射線をモニタリングするため、必要な機器を開発し手法を確立すること。
- ・ パルス場や高エネルギー放射線場での校正や、加速器特有の核種に対する値付けに関する手法を確立すること。
- ・ 加速器に対してはまだ十分に対応がとれていない現在の法令や管理基準の整備を行うこと。

などがあげられる。

現在、原研では、光量子科学研究センター（関西研究所）や中性子科学研究センター（東海研究所）といった加速器関連の大型プロジェクトをスタートさせており、今後、加速器関連の技術開発がより重要となることが予想される。加速器施設の管理、モニタリン

グ等については、KEKや大学関係に多くの知見が蓄積されているため、原研としては、これらの知見を十分参考にした上で、原子力分野で培われた管理手法や安全思想をベースに、より社会に受容されやすい放射線安全管理を確立していくことが重要であろう。また、従来、一部の研究者にしか関わりのなかった高エネルギー加速器が、医療や材料開発等を目的として、一般公衆の身近なものとなりつつある現在の社会情勢を考えると、高エネルギー加速器の放射線安全管理を確立することは、原研が社会に対して果たすべき責務であると考えられる。

謝辞

SPring-8におけるデータ収集にあたり種々のご協力を頂いたSPring-8入射器グループ、蓄積リンググループ、(財)高輝度光科学研究センター安全管理室の方々、考察を行うにあたり様々な資料をご提供頂いた富士電機(株)、アロカ(株)、東芝硝子(株)関係者の方々、測定器の特性試験を実施するにあたりご協力を頂いた線量計測課校正係の方々、本報告の作成にあたり貴重なご意見を頂いた線量計測課遠藤章氏、また、査読修正をして頂いた放射線管理第二課水田誠一課長、同藪田肇課長代理に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 宮本幸博, 植田久男, 原田康典 : SPring-8の放射線監視設備, 保健物理 32(2), 245 ~249 (1997)
- 2) 宮本幸博 : 大型放射光施設放射線監視設備の概要, 保健物理—管理と研究—No. 39, JAERI-Review 97-016, 145 ~148 (1997)
- 3) 青木勝則, 高木俊博, 射場浩史 : 大型放射光施設の放射線監視設備, FAPIG No. 145, 20~25 (1997)
- 4) 押野昌夫, 立田初巳, 村主進 : パルス状X線計測における計数落としおよびパルスの重畳, 応用物理 32-6, 376 ~379 (1963)
- 5) 森内茂 : スペクトル—線量変換演算子による線量評価法とその演算子の決定, JAERI 1209 (1971)
- 6) ICRU Report 34 : The Dosimetry of Pulsed Radiation (1982)
- 7) 日本アイソトープ協会 : 外部被ばくモニタリング, 140 (1986)
- 8) 村上博幸 : 原研IV型フィルムバッチの性能, 保健物理—管理と研究—No. 34, JAERI-M 92-144, 204 ~20 (1992)
- 9) 保健物理学会 : 高エネルギー放射線の線量当量評価法並びに高エネルギー加速器の放射線モニタリングシステムの設計法に関する調査, 37~46 (1990)
- 10) 浅野芳裕, 笹本宣雄 : 大型放射光施設SPring-8の放射線遮蔽と安全評価, JAERI-Tech 98-009, 12-25 (1998)
- 11) 保田, 藤高, 他 : 日本保健物理学会第32回研究発表会 B-20 (1997)
- 12) IAEA Technical Report Series No. 188 : Radiological Safety Aspects of the Operation of Electron Linear Accelerators, 97~142 (1979)
- 13) 日本アイソトープ協会 : 加速器施設における放射化の諸問題, 110 ~111 (1992)
- 14) 上村博 : 耐放射線性強化マイクロプロセッサ, 放射線と産業 No. 66, 14~19 (1995)
- 15) 射場浩史 : 指示のスパイク状上昇に関する見解書, 私信 (1997)

第1表 SPring-8における加速器の主要諸元

| | 線型加速器 | シンクロトロン | 蓄積リング |
|---------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|
| 加速粒子 | e^- または e^+ | e^- または e^+ | e^- または e^+ |
| エネルギー | 約 1.0 GeV | 8.0 GeV | 8.0 GeV |
| 電子数 | 7.5×10^{13} e/s | 6.3×10^{10} e/s | 3.0×10^{12} e |
| 出力 | 14.4 kW | 80 W | 0.77 kW |
| 加速管長さ | 140 m | 396 m | 1436 m |
| 運転周期 | 1~60 Hz | 1 Hz | — |
| ビームライン本数 | — | — | 61 |
| 偏向電磁石 | — | — | 23 |
| ウイグラー、アンジュレータ | — | — | 34 |
| その他の | — | — | 4 |

第2表 Spring-8で発生する放射線の特徴

| | 最大エネルギー | パルス幅 | 繰返周波数 |
|-------------|---------|---------------------|------------------------|
| 線型加速器 | 1.2 GeV | 数十ns \sim μ s | 1 \sim 60 Hz |
| シンクロトロン | 8 GeV | 数十ns \sim μ s | 1 Hz |
| 蓄積リング | 8 GeV | 数十ns \sim μ s | 1 Hz or 200 kHz |
| ビームライン(放射光) | 数十 keV | \sim 10 ps | 200 kHz \sim 508 MHz |

第3表 光子用エリアモニタの電荷収集効率試験結果

| 線量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$) | 周波数 (Hz) | | | |
|-------------------------------|----------|--------|--------|--------|
| | 1 | 5 | 30 | 60 |
| 1×10^0 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 1×10^1 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 1×10^2 | 0.9998 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 1×10^3 | 0.9977 | 0.9995 | 0.9999 | 1.0000 |
| 1×10^4 | 0.9775 | 0.9954 | 0.9992 | 0.9996 |

第4表 SPring-8における放射化機器中の検出核種及び予想される生成反応

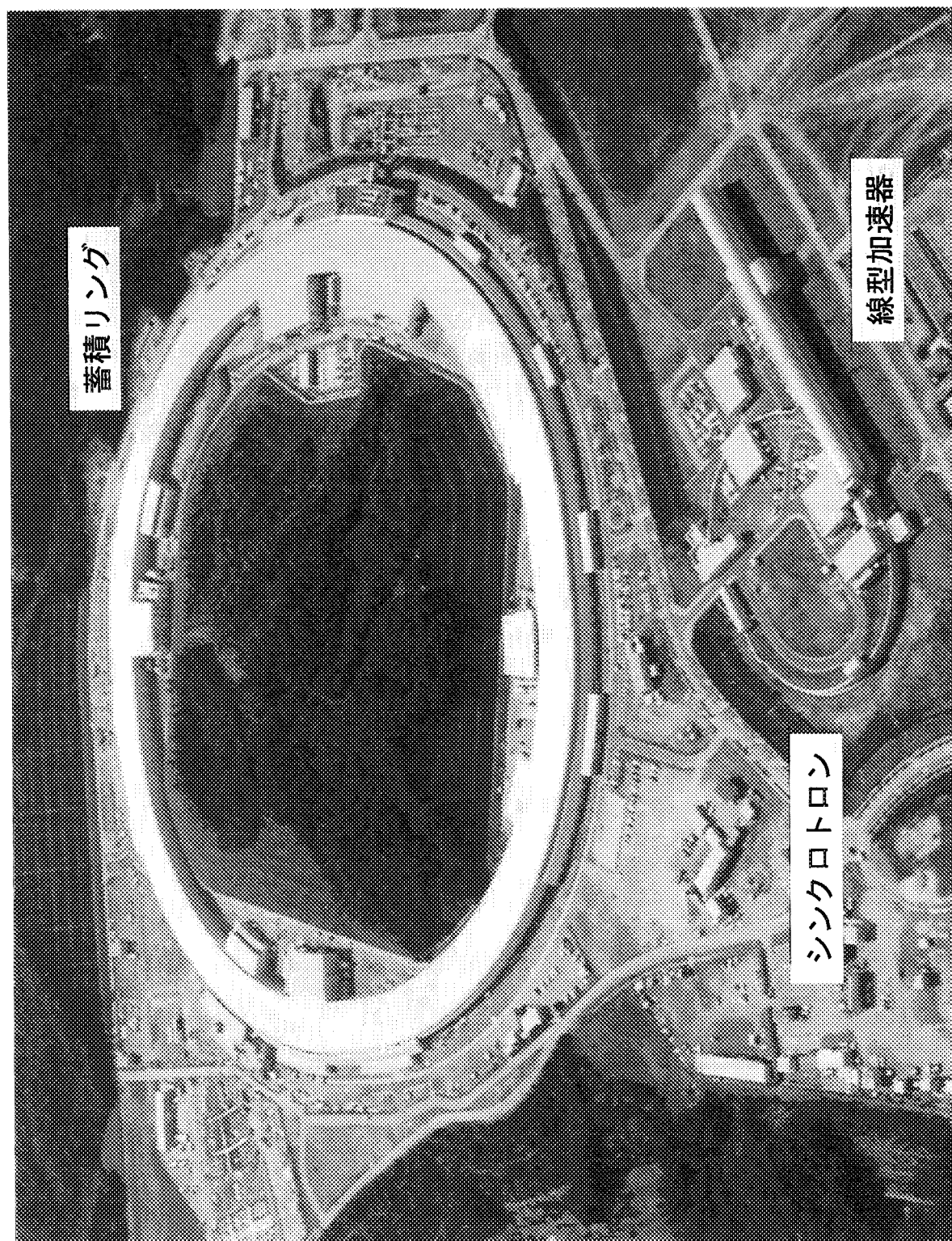
| 金属部品類 | | コンクリート類 | |
|------------------|---|------------------|--|
| 主要検出核種 | 予想される生成反応 | 主要検出核種 | 予想される生成反応 |
| ^{51}Cr | $^{64}\text{Fe}(\gamma, \text{sp})^{51}\text{Cr}$ $^{52}\text{Cr}(\gamma, \text{n})^{51}\text{Cr}$ | ^7Be | $^{16}\text{O}(\gamma, \text{sp})^7\text{Be}$ $^{14}\text{N}(\gamma, \text{sp})^7\text{Be}$ |
| ^{54}Mn | $^{56}\text{Mn}(\gamma, \text{n})^{54}\text{Mn}$ $^{54}\text{Fe}(\text{n}, \text{p})^{54}\text{Mn}^{*1}$ | ^{22}Na | $^{23}\text{Na}(\gamma, \text{n})^{22}\text{Na}$ $^{23}\text{Na}(\text{n}, 2\text{n})^{22}\text{Na}^{*1}$ |
| ^{56}Co | $^{58}\text{Ni}(\gamma, 2\text{n})^{56}\text{Ni}$ $^{56}\text{Ni} \xrightarrow{\beta^-} ^{56}\text{Co}$ | ^{46}Sc | $^{54}\text{Fe}(\gamma, \text{sp})^{46}\text{Sc}$ $^{46}\text{Sc}(\text{n}, \gamma)^{46}\text{Sc}^{*2}$ |
| ^{57}Co | $^{58}\text{Ni}(\gamma, \text{n})^{57}\text{Ni}$ $^{57}\text{Ni} \xrightarrow{\beta^-} ^{57}\text{Co}$ | ^{54}Mn | $^{55}\text{Mn}(\gamma, \text{n})^{54}\text{Mn}$ $^{54}\text{Fe}(\text{n}, \text{p})^{54}\text{Mn}^{*1}$ |
| ^{58}Co | $^{59}\text{Co}(\gamma, \text{n})^{58}\text{Co}$ | ^{60}Co | $^{59}\text{Co}(\text{n}, \gamma)^{60}\text{Co}^{*2}$ |
| ^{60}Co | $^{63}\text{Cu}(\gamma, \text{sp})^{60}\text{Co}$ $^{61}\text{Ni}(\gamma, \text{p})^{60}\text{Co}$ $^{59}\text{Co}(\text{n}, \gamma)^{60}\text{Co}^{*2}$ $^{63}\text{Cu}(\gamma, \text{n}2\text{p})^{60}\text{Co}$ | | |

*1 速中性子反応

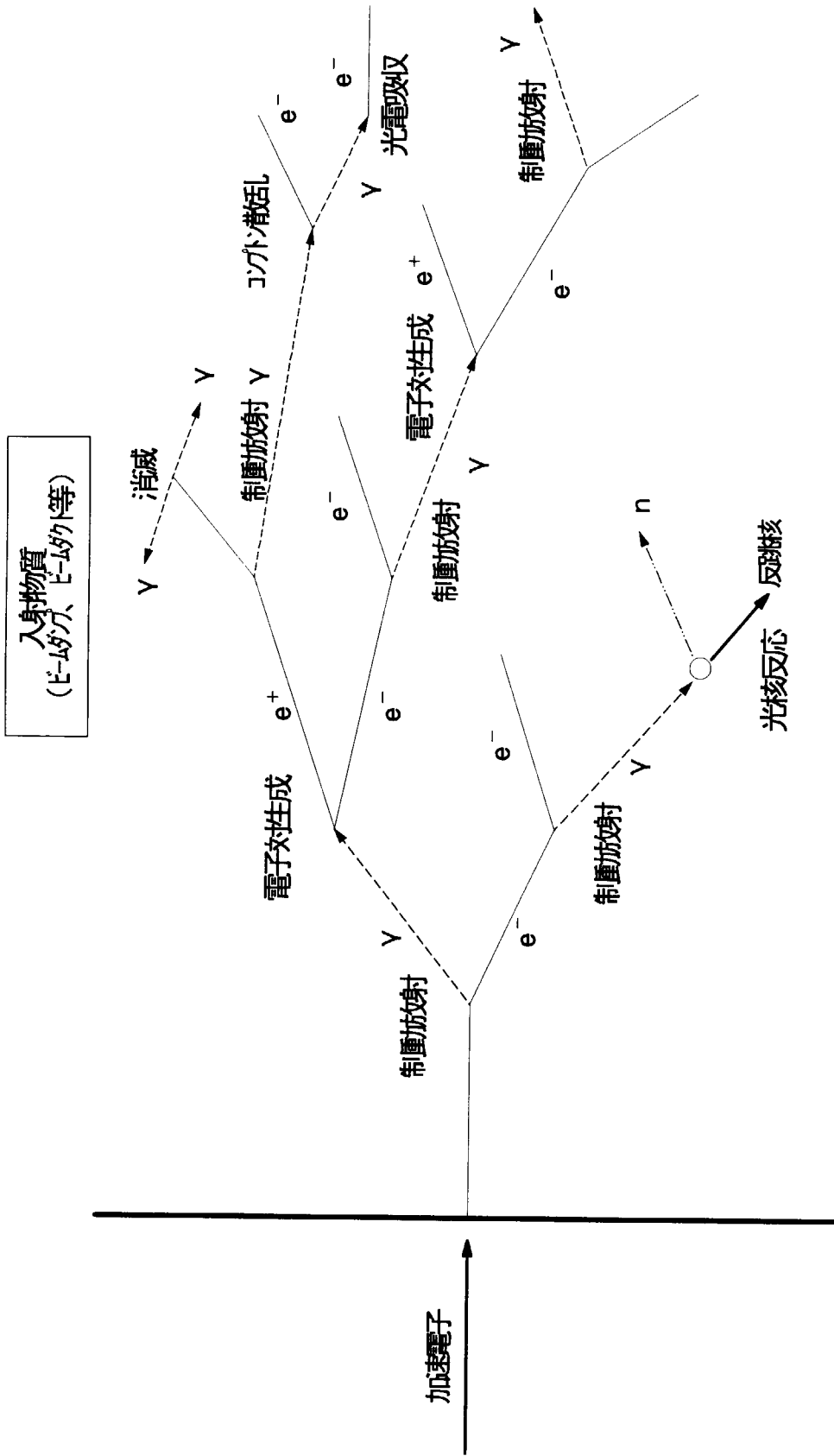
*2 熱中性子反応

第5表 高エネルギー大型加速器における放射線モニタリング上の課題

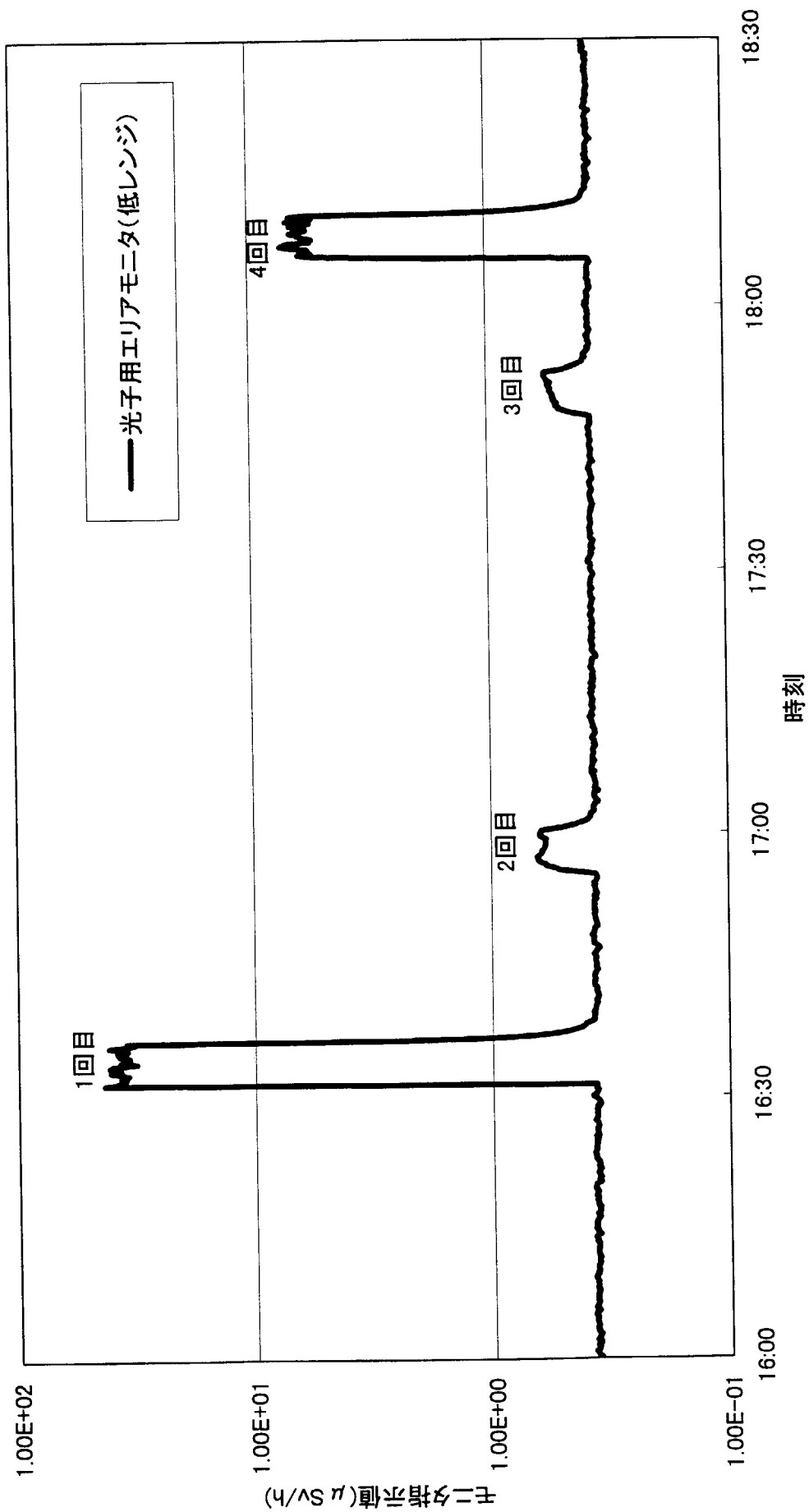
| 問題点 | 今後の課題 |
|--------------|---|
| パルス状光子の測定 | <ul style="list-style-type: none"> ・電離箱における再結合チェック法と平均化処理法の確立 ・適切な補助線量計の開発 |
| パルス状中性子の測定 | <ul style="list-style-type: none"> ・現行測定器に対するパルス応答特性の評価（モンテカルロ計算及び実測） ・パルス状γ線による妨害に関する検討 |
| 低エネルギー光子の測定 | <ul style="list-style-type: none"> ・X線用エリアモニタの高性能化（低線量率領域における直線性及び安定性の改善） ・10keV以下の光子に対する測定法、管理手法の確立 |
| 高エネルギー光子の測定 | <ul style="list-style-type: none"> ・10MeV以上の実用線量（1 cm線量当量等）に関する検討 ・測定機器の特性評価（モンテカルロ計算及び実測） ・高エネルギー校正場の確立 |
| 高エネルギー中性子の測定 | <ul style="list-style-type: none"> ・20MeV以上の実用線量（1 cm線量当量等）に関する検討 ・測定機器の特性評価（モンテカルロ計算及び実測） ・高エネルギー照射場の確立 ・測定場における中性子スペクトル評価法の確立 ・高エネルギー中性子用測定機器の開発 |
| ミュオンの測定 | <ul style="list-style-type: none"> ・ミュオンに対する実用線量（1 cm線量当量等）の検討 ・測定機器の特性評価（モンテカルロ計算及び実測） ・ミュオン校正場の確立 |
| 放射化ガス及び塵埃の測定 | <ul style="list-style-type: none"> ・加速器特有核種に対する値付け法の確立 ・BG放射線による影響低減法の検討 |
| 放射化機器のモニタリング | <ul style="list-style-type: none"> ・放射化機器における表面線量当量率と表面密度の関係に関する検討 ・放射化機器加工時における放射化生成物の飛散率等に関する検討 ・機器廃棄時の基準に関する検討 |
| ノイズ等の影響 | <ul style="list-style-type: none"> ・電磁波ノイズ対策機器の開発 ・安全管理設備に対するフェイルセーフ設計基準の確立 ・磁場対策機器の開発 |
| その他 | <ul style="list-style-type: none"> ・使用部品の耐放射線性に関する検討 ・急激な放射線レベル変動に対する検討 ・球形加圧電離箱に対する宇宙線の影響に関する検討 ・エージング等に対する放射線管理手法に関する検討 |



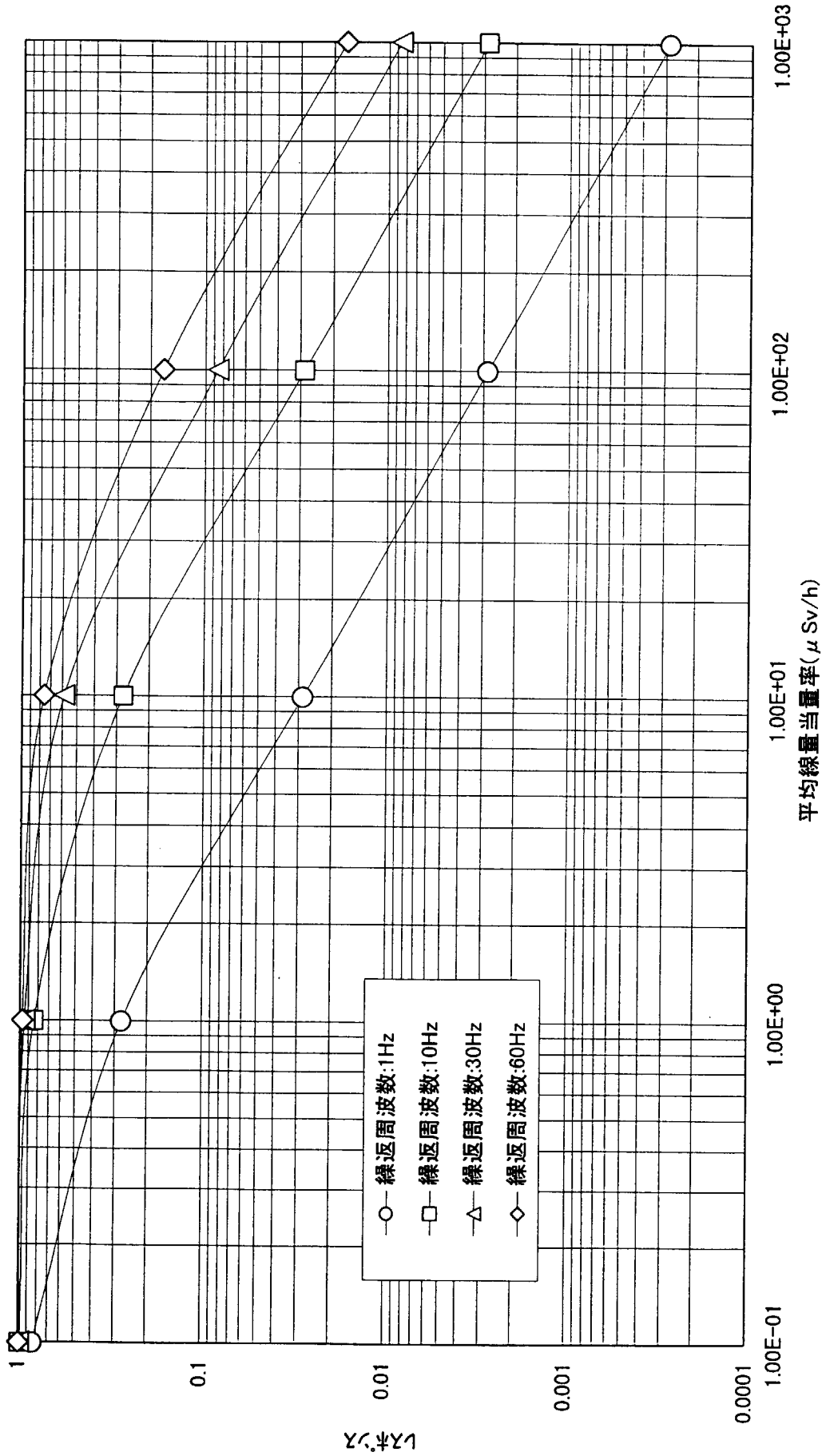
第1図 SPring-8 加速器施設の配置



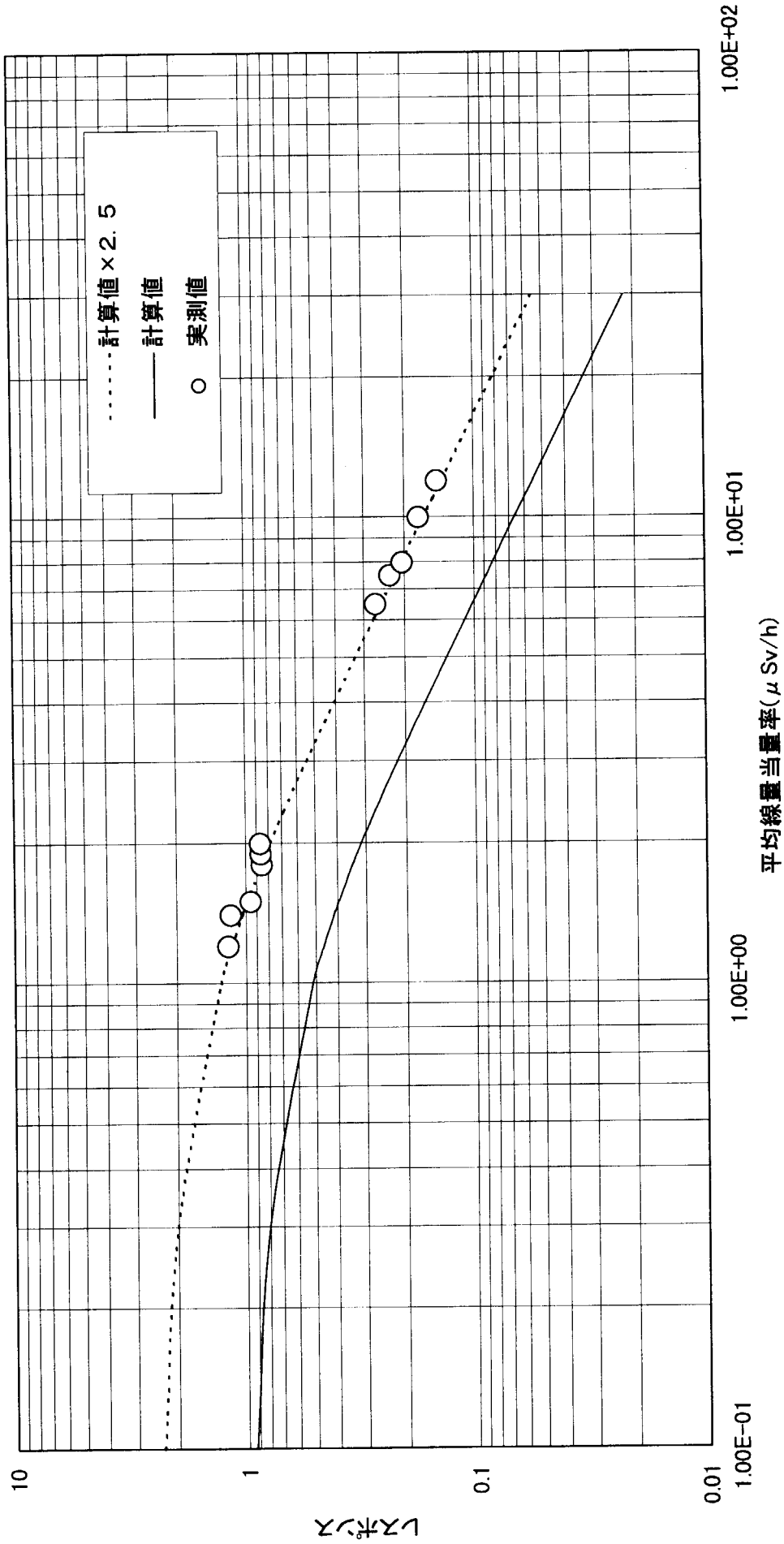
第2図 電子加速器における放射線の生成過程 (電磁カスケードシミュレーション)



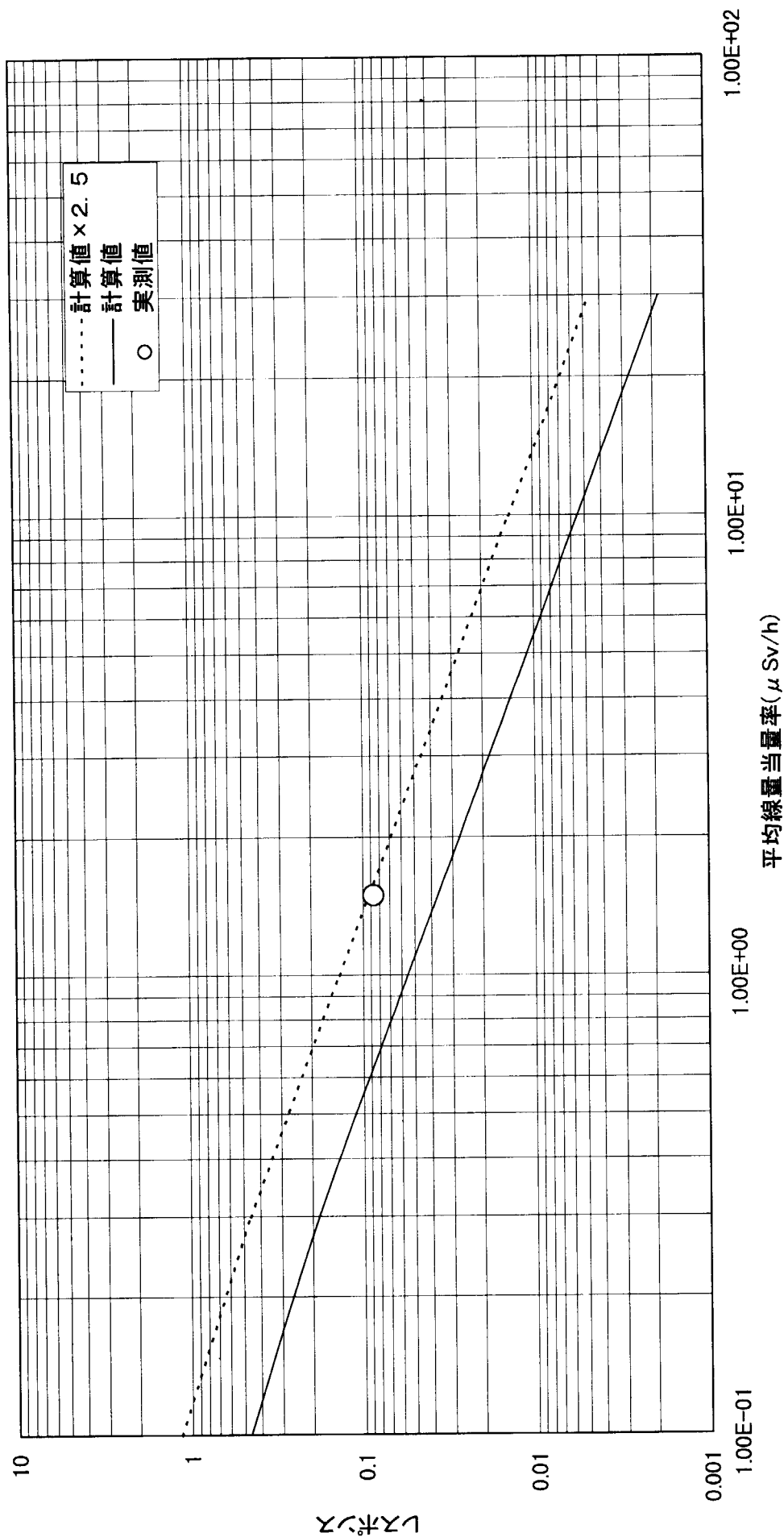
第3図 蓄積リング100%ビーム損失時における放射線エアリアモニタの指示値変化



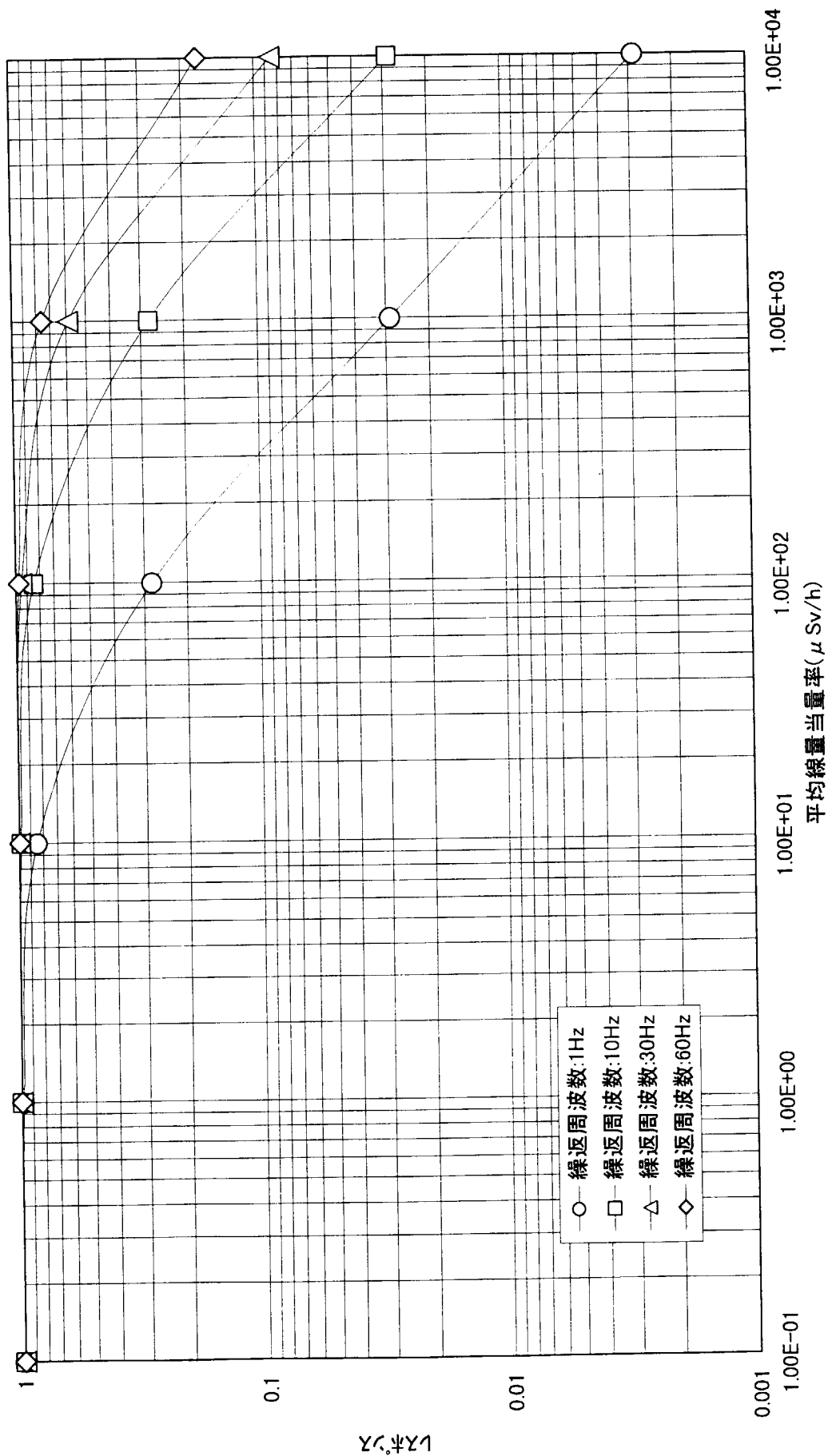
第4図 半導体式エリモニタ(NDM)のパルス状放射線に対する応答(試算結果)



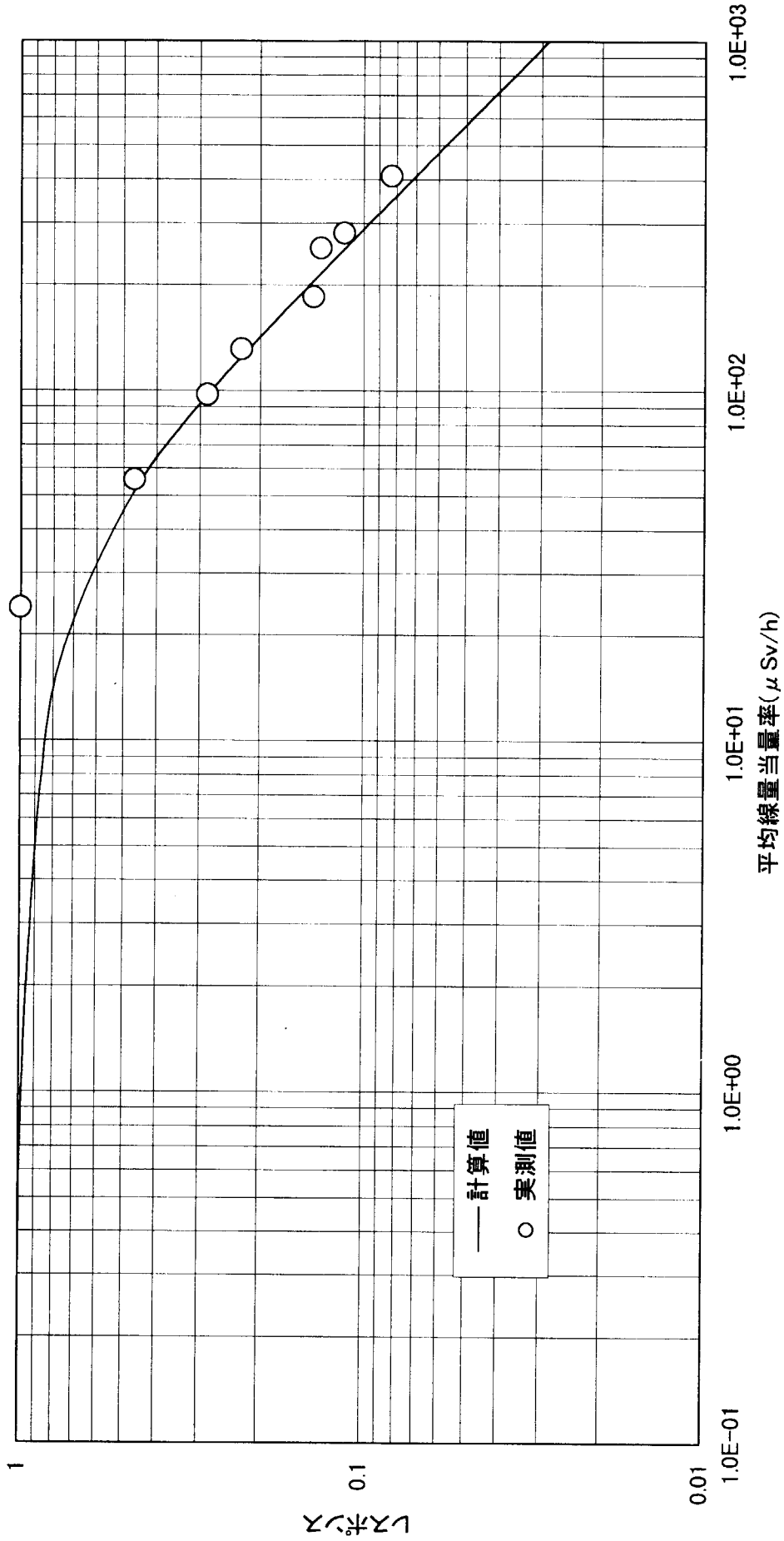
第5図 NaIシンチレーションサーベイメータ(TCS-161)のパルス状放射線に対する応答
 (線源:線型加速器クライストロン、繰返周波数:60Hz)



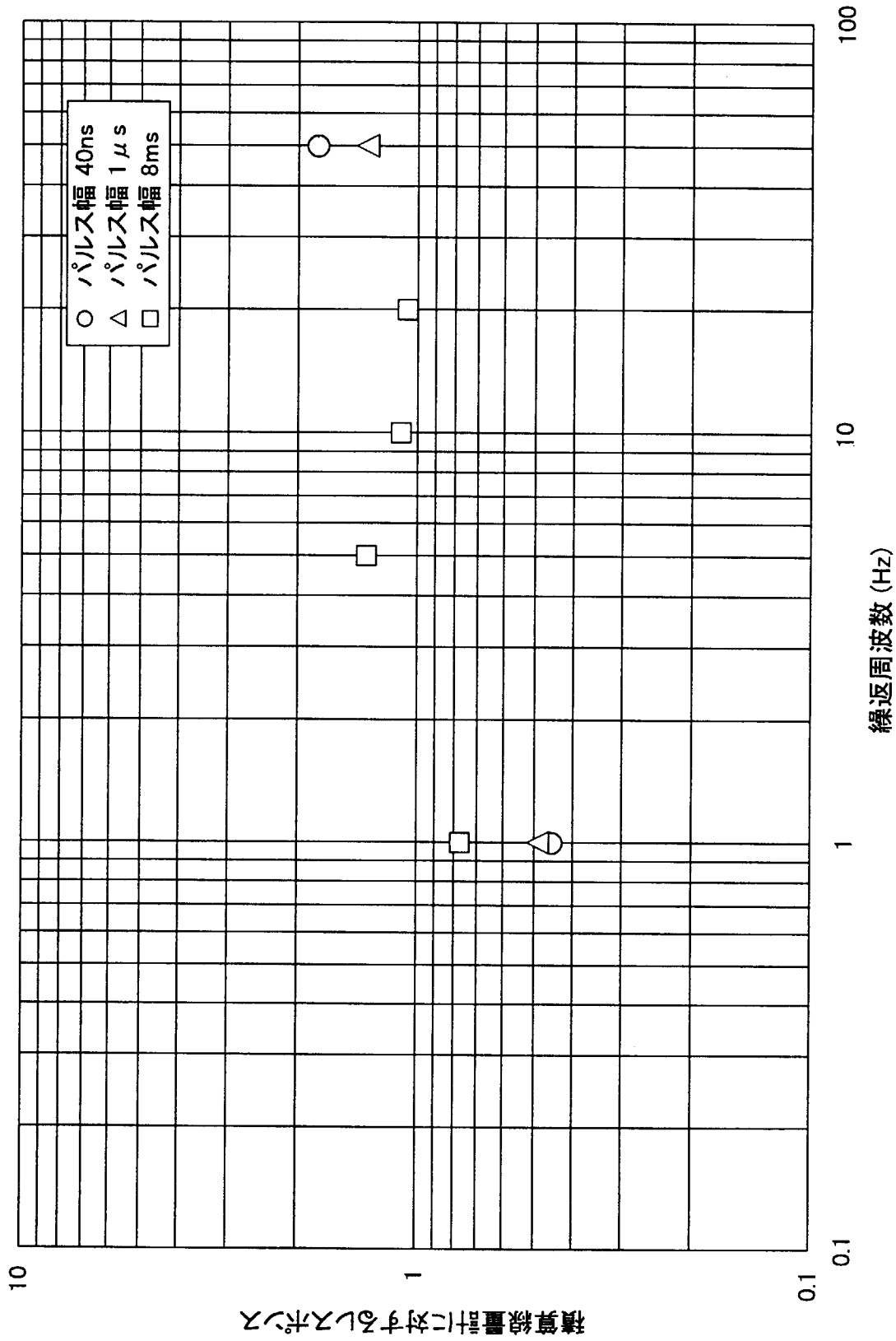
第6図 NaIシンチレーションサーベイメータ(TCS-161)のパルス状放射線に対する応答
 (線源:線型加速器、繰返周波数:5Hz)



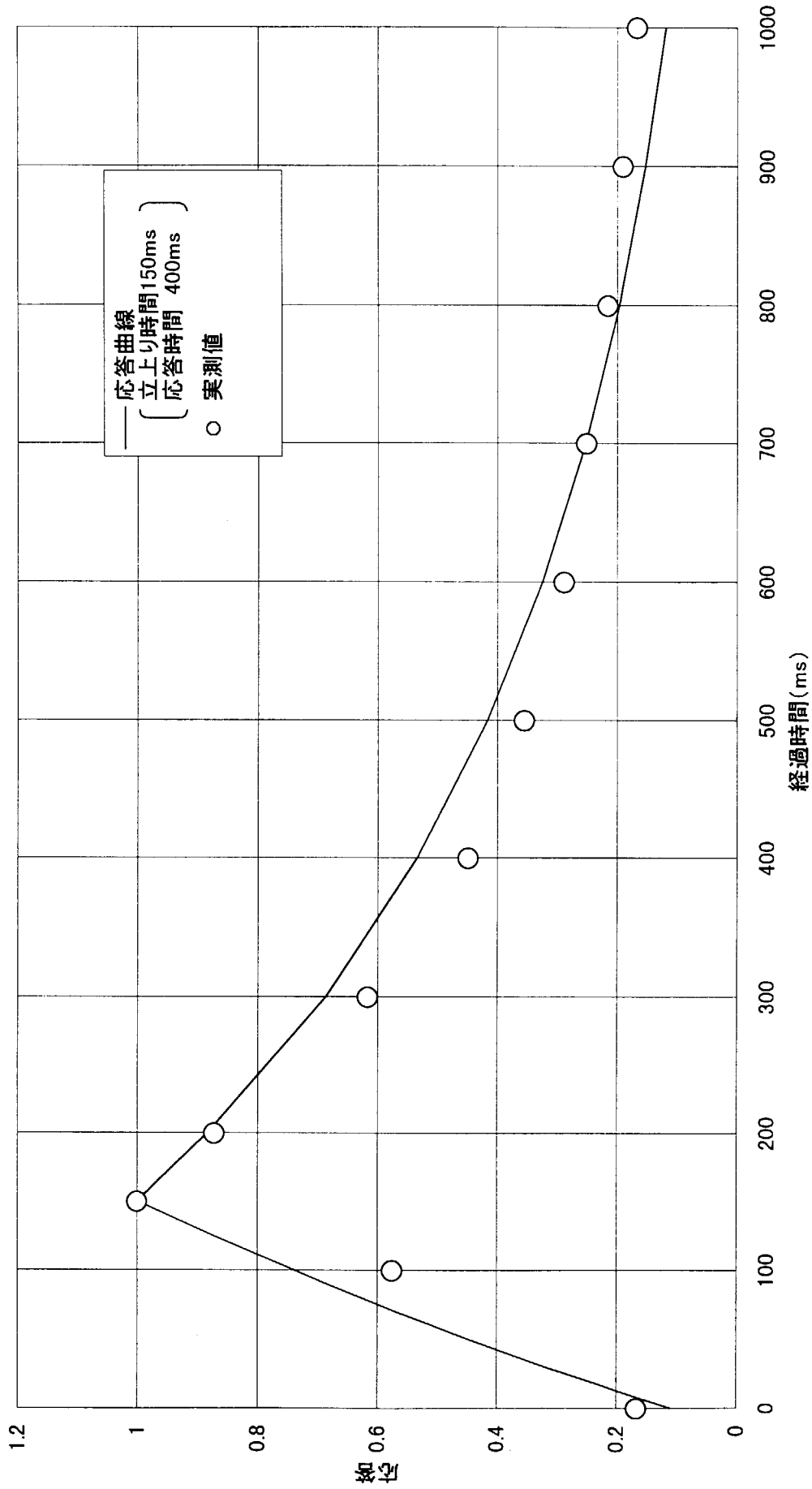
第7図 半導体式線量計(PDM-102)のパルス状放射線に対する応答(試算結果)



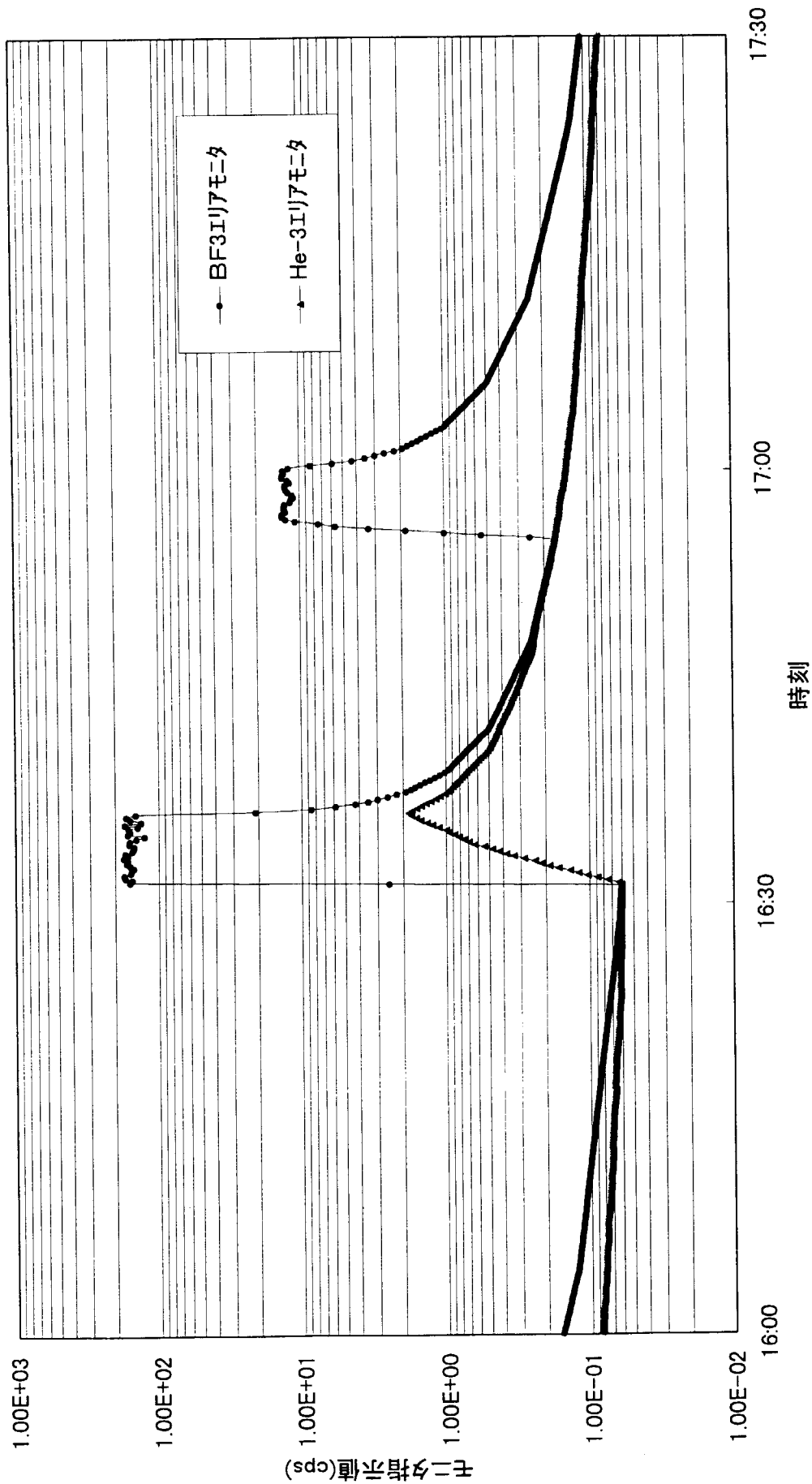
第8図 半導体式線量計(PDM-102)のパルス状放射線に対する応答
(線源:蓄積リング、繰返周波数:1Hz)



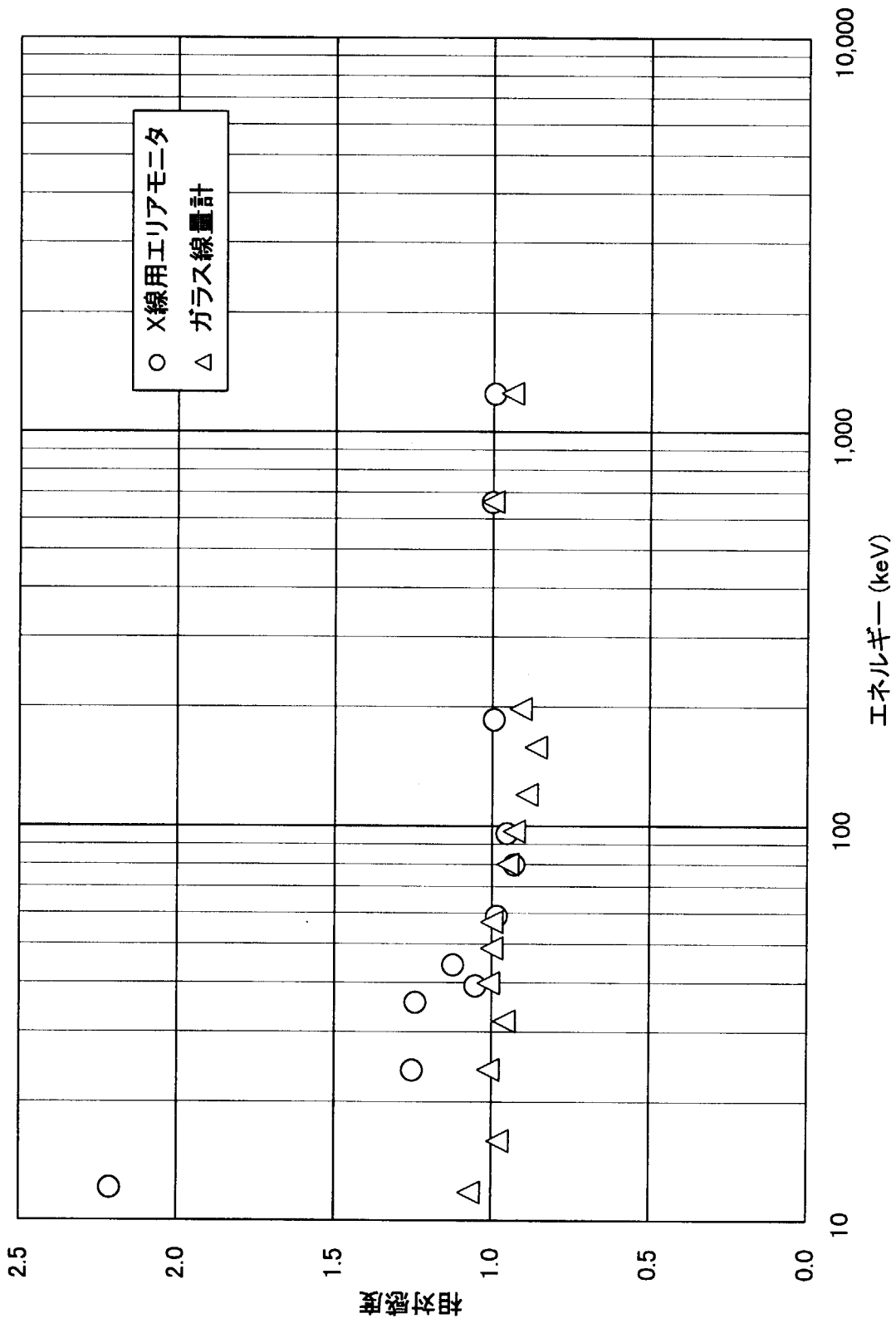
第9図 光子用エリアモニタのパルス応答特性



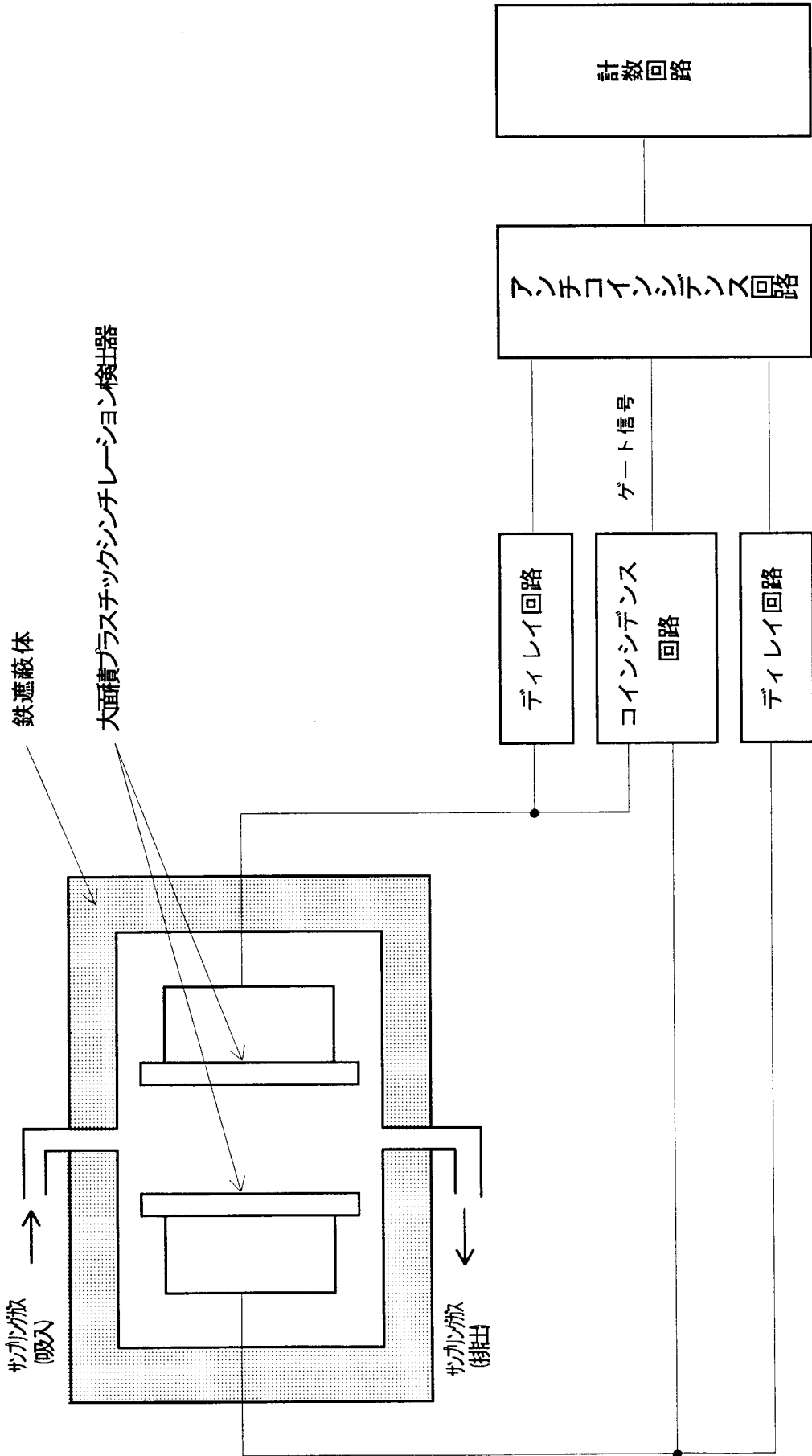
第10図 光子用電離箱のログアンプ出力



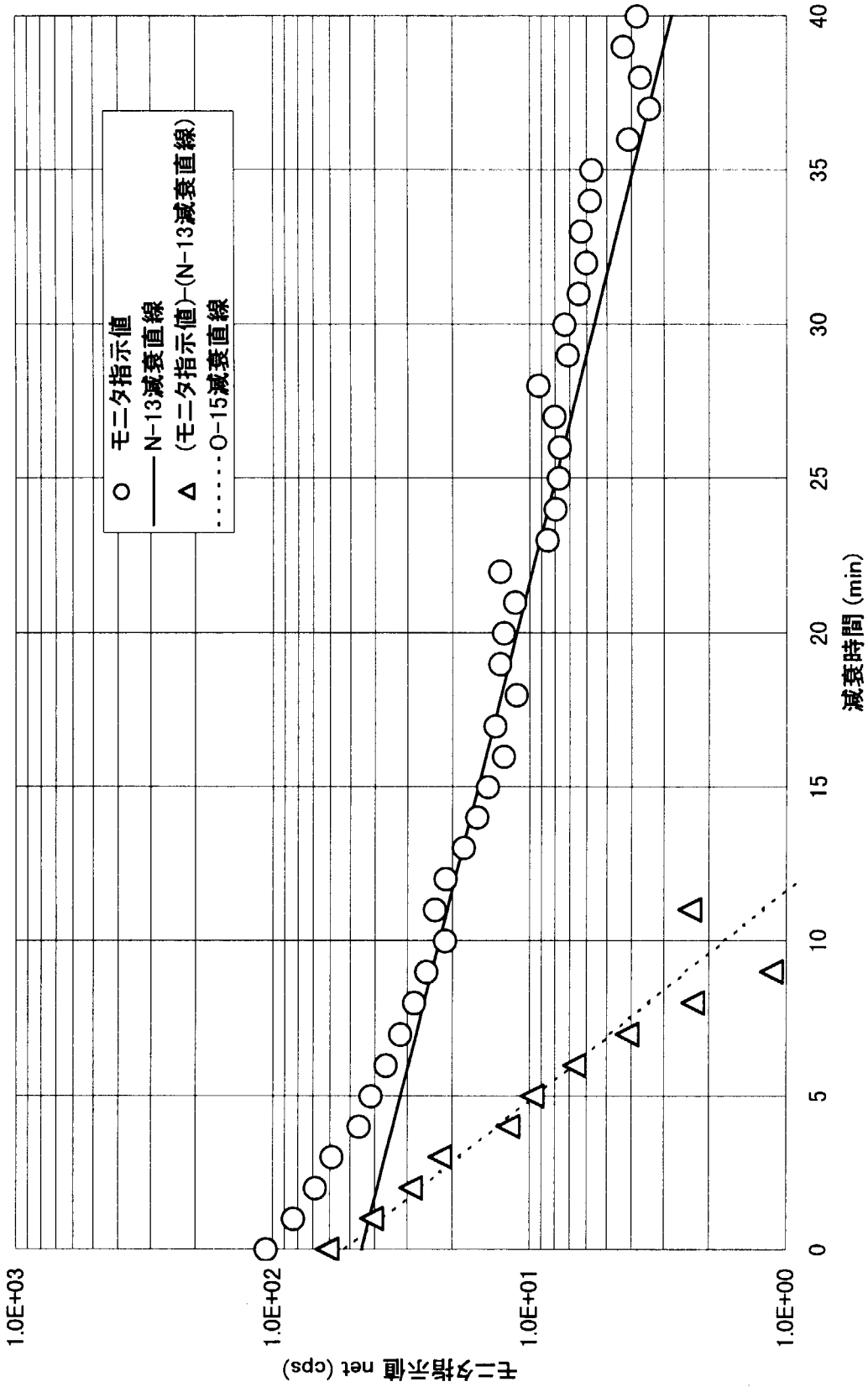
第11図 中性子用エアロモニタのパルス状放射線に対する応答の例(1Hz運転時)



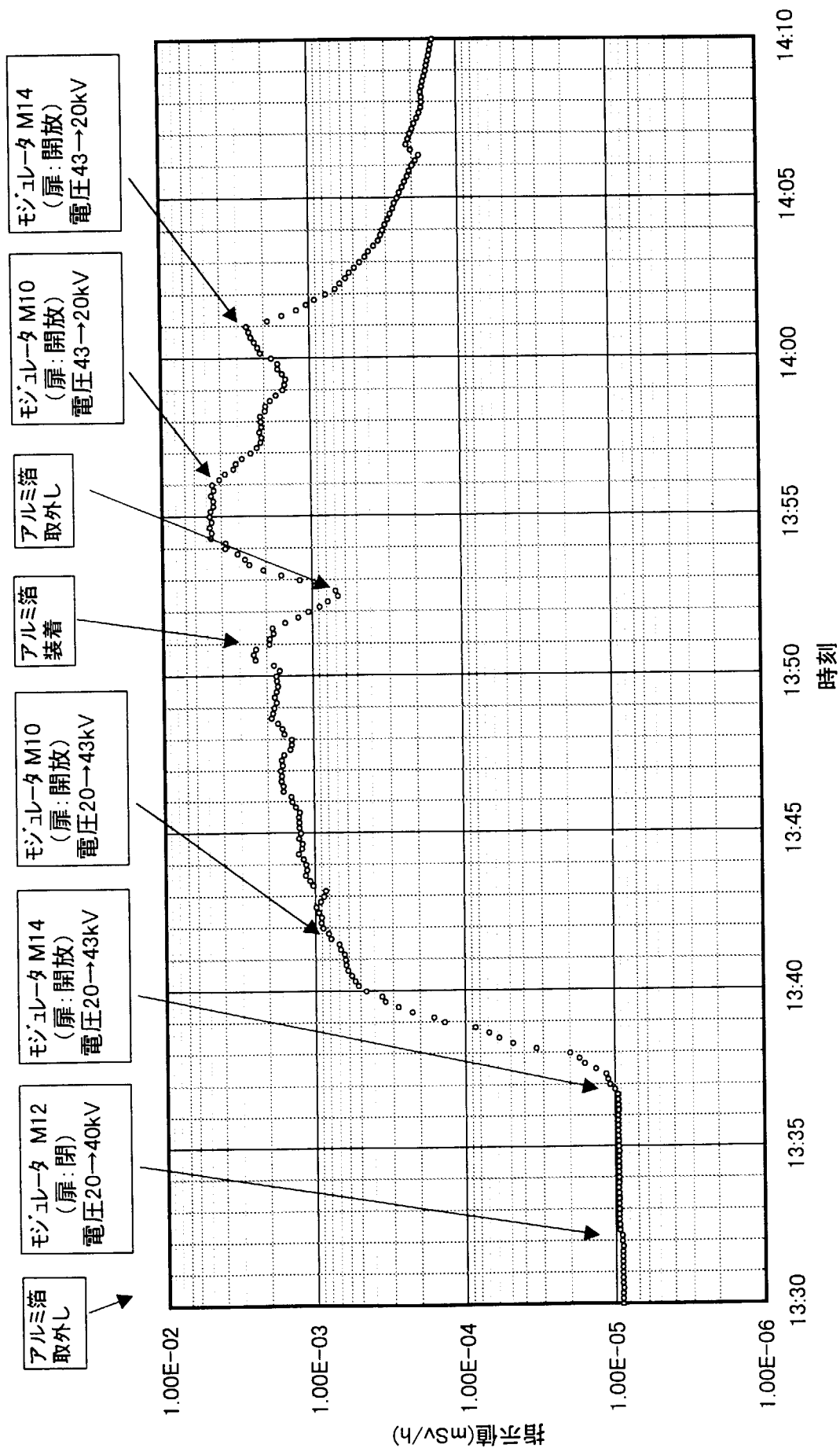
第12図 低エネルギーX線に対するエネルギー特性



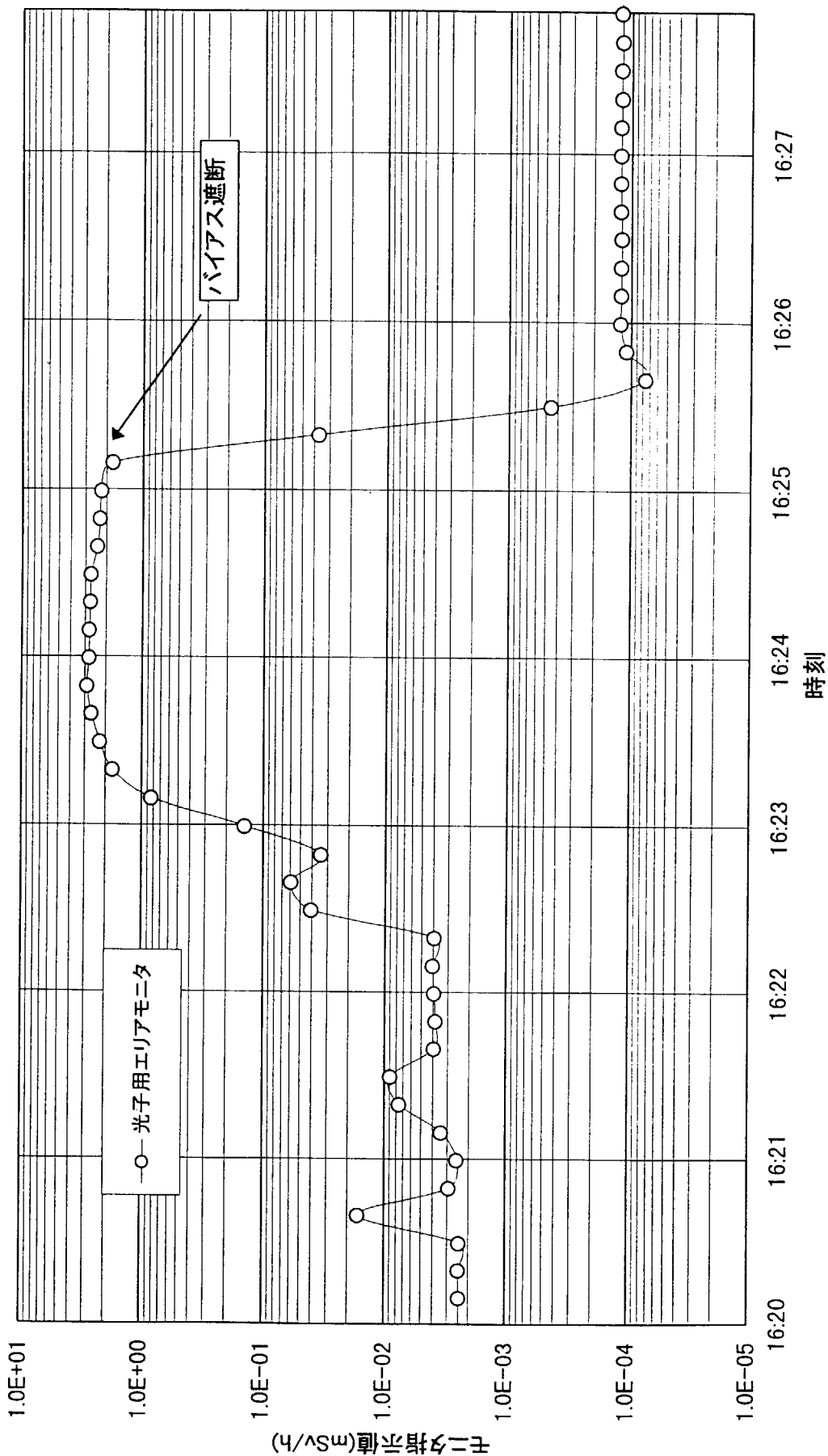
第13図 排気ガスモニタの概略構成



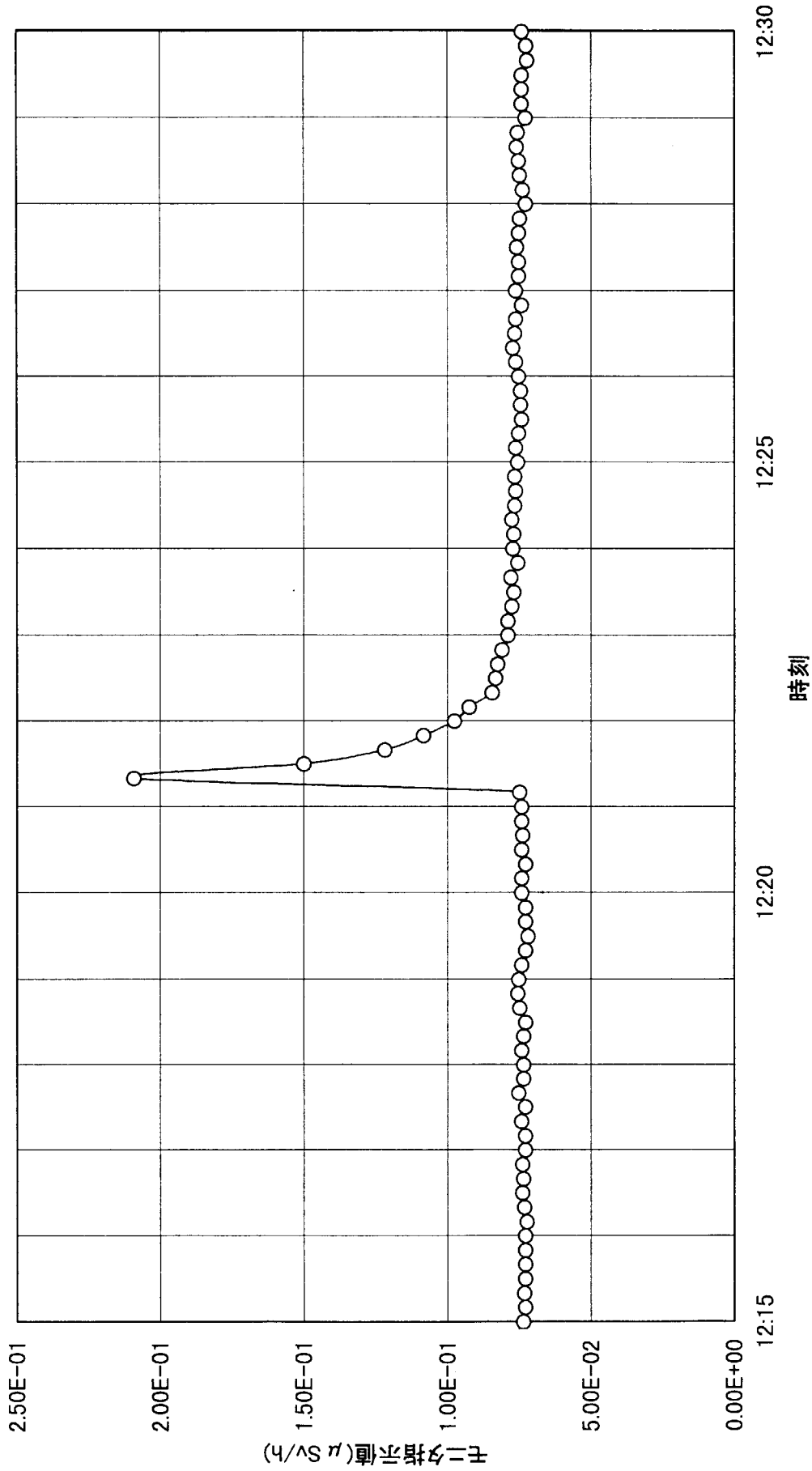
第14図 排出ガスの減衰曲線



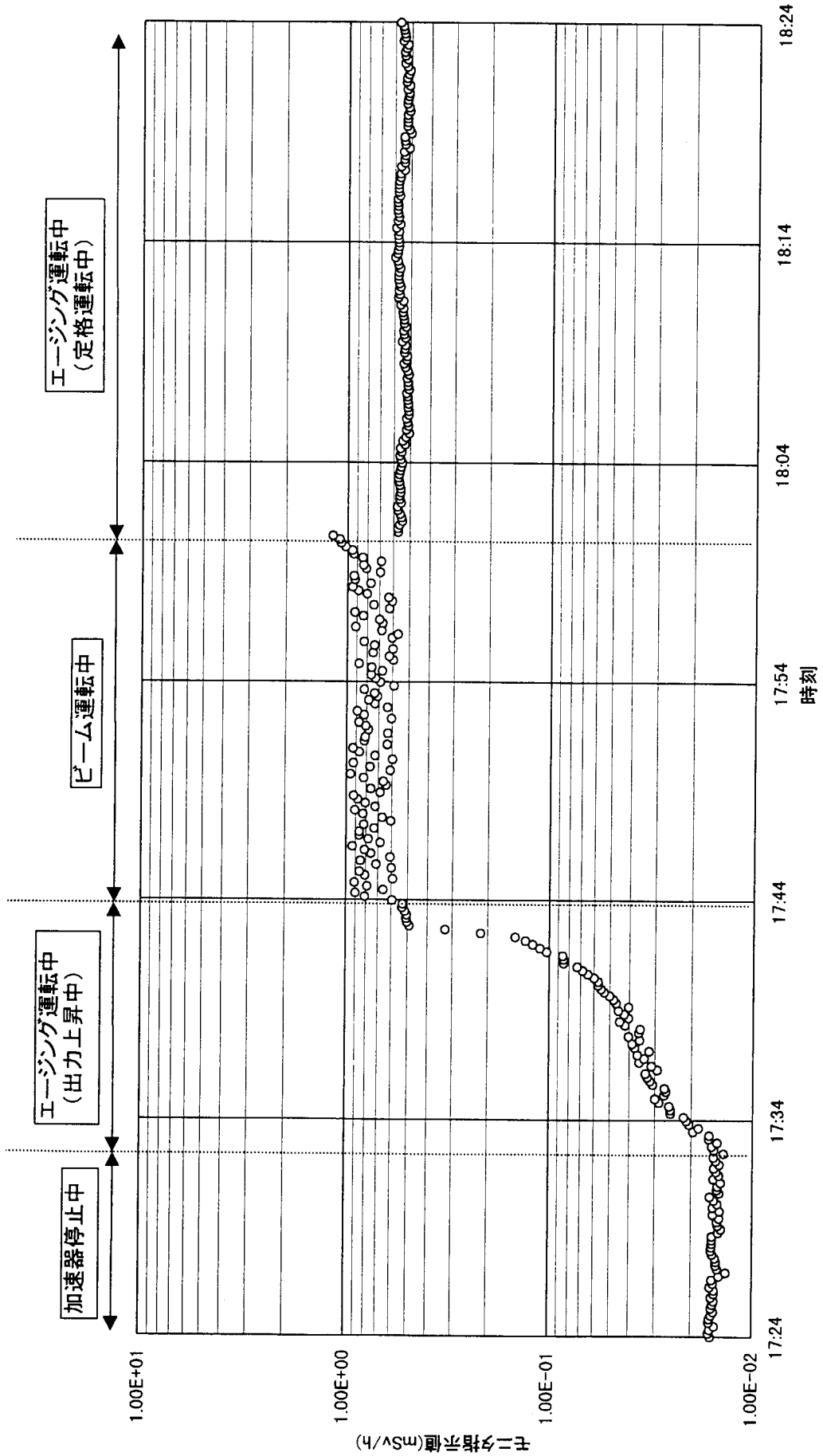
第15図 中性子レムモニタの電磁波ノイズ応答例



第16図 バイアス遮断時のモニタ指示値



第17図 環境モニタリングポストの指示上昇例



第18図 シンクロトロンエージング時のモニタ指示値
(シンクロトロンネル入射部高レゾリューション光子用エリアモニタ)

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 | 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 |
| 照射度 | 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 |
| ガル | 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 fm = 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 | 0.101972 | 2.77778 × 10 ⁻⁷ | 0.238889 | 9.47813 × 10 ⁻⁴ | 0.737562 | 6.24150 × 10 ¹⁸ |
| | 9.80665 | 1 | 2.72407 × 10 ⁻⁶ | 2.34270 | 9.29487 × 10 ⁻³ | 7.23301 | 6.12082 × 10 ¹⁹ |
| | 3.6 × 10 ⁶ | 3.67098 × 10 ⁵ | 1 | 8.59999 × 10 ⁵ | 3412.13 | 2.65522 × 10 ⁶ | 2.24694 × 10 ²⁵ |
| | 4.18605 | 0.426858 | 1.16279 × 10 ⁻⁶ | 1 | 3.96759 × 10 ⁻³ | 3.08747 | 2.61272 × 10 ¹⁹ |
| | 1055.06 | 107.586 | 2.93072 × 10 ⁻⁴ | 252.042 | 1 | 778.172 | 6.58515 × 10 ²¹ |
| | 1.35582 | 0.138255 | 3.76616 × 10 ⁻⁷ | 0.323890 | 1.28506 × 10 ⁻³ | 1 | 8.46233 × 10 ¹⁸ |
| | 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 |

1 cal = 4.18605 J (計量法)

= 4.184 J (熱化学)

= 4.1855 J (15 °C)

= 4.1868 J (国際蒸気表)

仕事率 1 PS (仏馬力)

= 75 kgf·m/s

= 735.499 W

| 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 |

