

JAERI-Tech
2002-028



JP0250140



東京消防庁特殊災害対策車輌用 遮へい体の性能評価

2002年3月

佐藤 達彦・藤井 克年・村山 卓・坂本 幸夫・山口 恭弘
佐藤 行雄*・相馬 信行*・藤崎 登*・原 聰*
相川 行雄*・高橋 太*

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 沢城県那珂郡東海村）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 沢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, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

東京消防庁特殊災害対策車輌用遮へい体の性能評価

日本原子力研究所東海研究所保健物理部

佐藤 達彦・藤井 克年・村山 卓・坂本 幸夫・山口 恒弘
佐藤 行雄*・相馬 信行*・藤崎 登*・原 聰*・相川 行雄*・高橋 太*

(2002年1月29日受理)

東京消防庁は、臨界事故等の放射線災害時の救助活動にも適応可能な、放射線遮へい機能を有する特殊災害対策車輌を設計・製作した。この車輌は、鉛で覆われており、 γ 線を遮へいする能力を有している。また、中性子と γ 線の両方による被ばくが問題となる事故時には、鉛の外側にある空隙部に水を注入することにより、中性子に対する遮へい効果も得ることができるように設計されている。しかし、この車輌に用いた遮へい体により中性子または γ 線の線量がどの程度減衰されるか（線量減衰率）は、単一層の遮へい体を仮定した評価のみで、複合遮へい体として扱う、より精度の高い評価が必要とされていた。

日本原子力研究所は、東京消防庁からの依頼により、この複合遮へい体の性能に関する詳細な評価を行った。評価対象は、車輌の側面、背面および前面に使用した遮へい体である。これらの遮へい体に関して、放射線輸送計算コード MCNP4B を用いたシミュレーションにより、3種類の線源 (^{252}Cf 線源、 ^{60}Co 線源および JCO 臨界事故時の放射線場) に対する線量減衰率を導出した。また、車輌の側面および背面に用いた遮へい体の試験体による線量減衰率の測定実験を行うことにより、計算結果の信頼性を確認した。

この結果、最も厚い遮へい体の場合、中性子線源 (^{252}Cf 線源または JCO 臨界事故時の放射線場) からの線量を 10% 程度に、 γ 線源 (^{60}Co 線源) からの線量を 25% 程度に減衰させることが明らかとなった。これは、単一の遮へい体と仮定して評価した結果とほぼ一致しており、特殊災害対策車は期待されている遮へい性能を有することが明らかとなった。

東海研究所 : 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

*東京消防庁

Evaluation of Dose Attenuation Factor of Armored Car against Radiation Accidents

Tatsuhiko SATO, Katsutoshi FUJII, Takashi MURAYAMA, Yukio SAKAMOTO,
Yasuhiro YAMAGUCHI, Yukio SATO*, Nobuyuki SOMA*, Noboru FUJISAKI*, Satoshi HARA*,
Yukio AIKAWA* and Toru TAKAHASHI*

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

(Received January 29, 2002)

The Tokyo Fire Department developed an armored car against radiation accidents. The car is covered by lead shields for attenuating dose from gamma rays. Dose from neutrons also can be attenuated by pouring water into tanks attached to the surface of the car. However, dose attenuation factors of the radiation shields had been determined by an estimation of single-layer shield, and more precise evaluation of multi-layer shield was required.

By request from the Tokyo Fire Department, a precise evaluation of the dose attenuation in multi-layer shield was carried out. The evaluation was made by a Monte Carlo radiation transport simulation code MCNP4B for the shields used in the front, side and back of the car. Three types of the radiation sources (^{252}Cf as a neutron source, ^{60}Co as a gamma ray source, and radiation source corresponding to the JCO criticality accident) were considered in the calculation. Benchmark experiments using neutron and gamma ray sources were also performed for ensuring the evaluation method.

As a result, it was found out that doses of neutron and gamma ray were attenuated to approximately 10% and 25% by the thickest shield, respectively. These values were close to the ones which had already obtained by the estimation of single-layer shield.

Keywords : Armored Car against Radiation Accident, Criticality Accident, Radiation Shielding, MCNP4B, Multi-Layer Shield, Neutron, Gamma Ray

* Tokyo Fire Department

目 次

1. 緒言	1
2. 特殊災害対策車輌の概要	2
3. 計算	2
3.1 計算条件	2
3.1.1 遮へい体の選択	2
3.1.2 線源の選択	3
3.2 計算方法	3
3.2.1 計算コードの選択	3
3.2.2 評価する線量の選択	4
3.2.3 線量減衰率の導出方法	4
3.3 計算結果	4
4. 実験	5
4.1 実験の概要	5
4.1.1 実験目的	5
4.1.2 実験条件	6
4.1.3 実験方法	6
4.2 実験を再現するための計算条件	7
4.3 結果および考察	7
5. 結論	8
謝辞	8
参考文献	9

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Armored Car	2
3. Calculation.....	2
3.1 Calculation Condition	2
3.1.1 Radiation Shield	2
3.1.2 Radiation Source.....	3
3.2 Calculation Method	3
3.2.1 Simulation Code.....	3
3.2.2 Evaluation Dose.....	4
3.2.3 Estimation of Dose Attenuation Factor	4
3.3 Results and Discussions	4
4. Experiment	5
4.1 Experimental Setup and Procedure.....	5
4.1.1 Purpose of Experiment.....	5
4.1.2 Experimental Setup.....	6
4.1.3 Experimental Procedure	6
4.2 Calculation Method for Reproducing Experimental Data	7
4.3 Results and Discussions	7
5. Conclusion.....	8
Acknowledgements	8
References.....	9

1. 緒言

茨城県那珂郡東海村にある株式会社ジー・シー・オー（JCO）東海事業所ウラン加工工場において、我が国初の臨界事故が 1999 年 9 月 30 日に発生した。事故の初期段階で、消防隊員により 3 名の事故現場作業員の病院への搬送が行われた。このような背景から、東京消防庁は、臨界事故を含む放射線災害時にも救助活動等を実施できる、放射線遮へい能力を有する特殊災害対策車輌を設計・製作した。この車輌は、鉛で覆われており、 γ 線を遮へいする。また、中性子と γ 線の両方の被ばくが問題となる事故時には、鉛の外側にある空隙部に水を注入することにより、中性子に対する遮へい効果も得ることができる。一般に、 γ 線に対する遮へい能力は、鉛など原子番号の大きい元素が優れ、中性子*に対する能力は、水素を多く含む物質が優れている。したがって、 γ 線と中性子を同時に効果的に遮へいするためには、原子番号の大きい元素からなる物質と、水素を多く含む物質の複合体を用いる必要がある。

このような複合遮へい体の前後で、 γ 線または中性子の線量がどの程度減衰するか（以下「線量減衰率」と記す。）を簡便に評価する方法はない。線量減衰率が、線源スペクトルや、それぞれの遮へい体の厚さに複雑に依存するからである。特殊災害対策車輌に用いた遮へい体の線量減衰率は、複合遮へい体を单一遮へい体と近似することにより評価していた。

このような背景から、日本原子力研究所は、東京消防庁から特殊災害対策車輌に用いた複合遮へい体の性能に関する、詳細な評価を依頼された。そこで、放射線輸送計算コードにより遮へい体後方での中性子および γ 線のエネルギースペクトルを計算し、複合遮へい体に対する線量減衰率を精度良く評価した。また、車輌に用いた遮へい体の試験体による線量減衰率の測定実験を行った。この線量減衰率の測定結果と、実験を再現したシミュレーション計算結果を比較することにより、計算手法の信頼性を確認した。

本報告書の第 2 章では、この特殊災害対策車の概要を説明する。第 3 章では計算による線量減衰率の評価方法およびその結果、第 4 章では実験による評価方法を示し、その実験値と計算値の比較結果について考察する。全体の結論は第 5 章に示す。

*数 MeV 以上の高エネルギー中性子の遮へいには、鉄原子等の中原子番号を含む物質がよく使われる。

2. 特殊災害対策車輌の概要

東京消防庁で設計・製作した特殊災害対策車の概略を図 2-1 に示す。車輌の大きさは、おおよそ全長 8.5m, 全幅 2.5m, 全高 3.7m である。この車輌には、放射線被ばく事故だけでなく、有毒ガス事故にも救助活動を行うことができるよう、車内を正圧に保てる機能が付いている。

車輌の前面、側面および天井面（以下、側面および天井面をまとめて側面と記す）は厚さ 0.5cm、背面は厚さ 1.0cm の鉛板で覆われている。側面の外側には厚さ 10cm、背面の外側には厚さ 20cm のステンレス製の容器からなる空隙部がある。通常の走行時および放射線被ばく事故以外の災害時には、空隙部に何も入れない。放射線被ばく事故、特に中性子放出を伴う事故時には、放射線遮へい能力を増すため、前面の鉛板の前に厚さ 10cm のポリエチレンパネルを取り付け、側面および背面の空隙部に水を注入できるように設計されている。

東京消防庁による遮へい体の設計では、中性子に対する線量減衰率の目標値を 10%（背面方向から入射した場合）および 30%（側面および前面方向から入射した場合）に設定した。ここで、

- a) 鉛による中性子の遮へい効果はほとんどない、
- b) 同じ厚さの水とポリエチレンは同等の中性子遮へい効果を持つ、
- c) 中性子の捕獲反応で発生する 2 次光子は、鉛板によって完全に遮へいされる、

という仮定を行い、単一層の水に対する中性子の線量減衰率^{*1}から、背面の水層の厚さを 20cm、側面の水層および前面のポリエチレンの厚さを 10cm と決定した。鉛板の厚さに関しては、車輌総重量の制限から、前面および側面に対しては 0.5cm とした。ただし、背面の鉛板の厚さに関しては、水層が厚く、中性子の捕獲反応による 2 次光子の生成率が大きいため、1.0cm とした。

実際の車輌に設置した複合遮へい体における線量減衰率は、次章で述べる詳細な計算によってのみ、精度良く求めることができる。

3. 計算

3.1 計算条件

遮へい体の遮へい能力は、放射線場のエネルギースペクトル及び角度分布によって異なる。しかしながら、想定されうるあらゆる放射線場における特殊災害対策車の遮へい性能を評価することは現実的でない。そこで、典型的な放射線源に対して、車輌各面の複合遮へい体の遮へい性能を評価した。放射線場の角度分布としては、遮へい体に対して垂直に入射した場合を選択した。なぜなら、点等方線源の場合には線量減衰率に距離の逆自乗の項が含まれるが、垂直線源の場合にはその項が含まれず、線量減衰率が最も高くなるからである。

3.1.1 遮へい体の選択

評価対象とした車輌各面における遮へい体の概略を図 3-1 に、その材質および厚さを表 3-1 に示す。遮へい体①～③、④～⑥および⑦⑧は、それぞれ車輌側面、背面、前面に対応している。

* MCNP4B²⁾ コードにより評価した 10cm および 20cm 水層に対する、²⁵²Cf 線源からの中性子の線量減衰率は、27% および 7% である。

車輌側面および背面の遮へい体に対しては、水を注入しない空隙の場合、水を注入した場合および水の代わりに 20°C の飽和ホウ酸水を注入した場合について評価を行った。ホウ酸水に対して評価した理由は、ホウ素中に約 20% 含まれる ^{10}B の熱中性子に対する捕獲断面積が非常に大きいため、水を注入した場合と比べて中性子に対する遮へい効果が大きくなると予想されるからである。

3.1.2 線源の選択

評価対象の線源のスペクトルとして、典型的な γ 線源および中性子線源である ^{60}Co 線源および ^{252}Cf 線源を選択した。 ^{60}Co 線源のスペクトルとしては、1 崩壊当たり 1.173 MeV および 1.333 MeV の光子をそれぞれ 1 個放出するものとした。また、 ^{252}Cf 線源からは、自発核分裂反応によって中性子と γ 線が同時に放出されるが、 γ 線による線量当量率は中性子による線量当量率の 1/10 以下である。 ^{252}Cf から放出される中性子のエネルギースペクトルは、MCNP4B²⁾のユーザーズマニュアルによると、次式により表される。

$$p(E) = C \exp(-E/a) \sinh(bE)^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 $p(E)$ は中性子エネルギー E (MeV) に対する規格化された中性子スペクトルであり、 C はその規格化定数である。 ^{252}Cf 線源に対するパラメータ a および b の値は、MCNP4B²⁾のユーザーズマニュアルによればそれぞれ 1.025 MeV および 2.926 MeV⁻¹ である。また、 ^{252}Cf 線源から放出される γ 線のスペクトルとしては、文献³⁾⁻⁶⁾によって異なる値が報告されているが、本研究では、放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル II⁶⁾に記載されているスペクトルを採用した。

また、これらの典型的な γ 線源および中性子源だけでなく、実際の中性子放出を伴う災害を想定して、JCO 臨界事故時の漏洩放射線場に相当する線源に対しても評価を行った。その際、漏洩放射線のスペクトルとして、遠藤らの解析⁷⁾と同じものを使用した。

3.2 計算方法

3.2.1 計算コードの選択

前節で示した線源スペクトルを用いて、複合遮へい体での線量減衰率を評価するには、線源から放出された放射線の複合遮へい体内での挙動をシミュレーションする必要がある。本研究では、3 次元の複雑形状に対応できるモンテカルロ法の放射線輸送計算コード MCNP4B²⁾を選択した。MCNP4B コードは米国 Los Alamos 国立研究所で開発された連続エネルギーモンテカルロ計算コードであり、20MeV 以下の中性子および光子の輸送計算を行うことができる。また、3 次元の複雑形状を模擬できるため、第 4 章で述べる実験の解析にも有用である。MCNP4B による計算が必要となる断面積データとして、中性子に対しては日本の最新評価済み核データライブラリ JENDL-3.2⁸⁾、光子に対しては MCPLIB02⁹⁾を使用した。

MCNP4B による計算結果を確認する目的から、1 次元放射線輸送計算コード ANISN-JR¹⁰⁾を用いた線量減衰率の評価も行った。ANISN-JR コードは、確率論的手法を用いる MCNP4B と異なり、決定論的手法を用いて計算を行うため、単純形状に対する放射線強度の 1 次元分布をより短時間で計算することができる。このため、平板体系に放射線が垂直に入射する場合の線量減衰率の評価に用いた。計算の際に使用する断面積データには、中性子に関しては MCNP4B コード

による計算時に使用した JENDL-3.2, 光子に関しては PHOTOX¹¹⁾データをそれぞれ採用した.

3.2.2 評価する線量の選択

遮へい体による線量減衰率の値は、対象とする線量の種類に依存する。本研究では、基本的に前方照射(AP 照射)に対する実効線量の線量減衰率を評価した。AP 照射に対する実効線量は、放射線障害防止法等において、遮へい設計を行う際の評価線量として規定されており、数 MeV 以下のエネルギー範囲では、後方照射や等方照射など他の実効線量と比べて大きな値となる。

また、いくつかの例に対しては、サーベイメータで測定される、ICRU 球の 10mm 深さでの線量当量 ($H^*(10)$, 以下、「周辺線量当量」と略す。) に対しても評価を行った。周辺線量当量に対しても評価した理由は、周辺線量当量で評価した線量減衰率の値と、AP 実効線量で評価した値がほぼ等しければ、遮へい体前後でのサーベイメータの読み値の比がそのまま人体に対する線量の比となるからである。中性子および光子のフルエンスから、AP 照射の実効線量および周辺線量当量への換算係数には ICRP Publication 74¹²⁾に示されている値を用いた。

3.2.3 線量減衰率の導出方法

線量減衰率を評価するには、遮へい体前後での線量を計算する必要がある。遮へい体の前方における線量は、線源からの中性子または光子のスペクトルに線量換算係数を乗じることによって導出した。次に、遮へい体後方での線量評価のため、遮へい体の中心軸状に線源からのスペクトルを持った中性子または光子の線状ビームを入射させ、遮へい体背面での中性子および光子のフルエンスを、MCNP4B コードもしくは ANISN-JR コードで計算した。MCNP4B コードでの計算では、遮へい体の側面における粒子の漏れを少なくするために、遮へい体は $2m \times 2m$ の大きさとした。得られたフルエンスに線量換算係数を乗じることによって、遮へい体後方での線量を導出した。これらの遮へい体前後での線量は、中性子または光子 1 放出当たりに規格化している。

このようにして導出した遮へい体前方での線量に対する遮へい体後方での線量の比が、最終的に評価すべき線量減衰率である。その際、線量は全て粒子 1 放出当たりに規格化されているので、中性子と光子の混在する ^{252}Cf 線源や JCO 臨界事故時の放射線場では、中性子と γ 線の線源強度比も考慮する必要がある。その強度比を考慮すると、線量減衰率 R は、

$$R = \frac{D_{Rnn} + D_{Rnp} + ID_{Rpp}}{D_{Fnn} + ID_{Fpp}} \quad (2)$$

となる。 D_{Rnn} , D_{Rnp} , D_{Rpp} は、遮へい体後方での中性子の線量、2 次光子の線量および線源から直接放出される光子(直接光子)の線量であり、 D_{Fnn} , D_{Fpp} は遮へい体前方での、中性子の線量および直接光子の線量である。また I は、線源から中性子 1 放出当たりの γ 線の数であり、 ^{252}Cf 線源に対しては放射線遮へい計算実務マニュアル II⁶⁾に示されている 5.76, JCO 臨界事故の放射線場に対しては遠藤らの解析³⁾で使用したスペクトルから導出した 4.05 を採用した。

3.3 計算結果

MCNP4B コードにより評価した、AP 照射に対する実効線量の線量減衰率を表 3-2 に示す。これらの値に対する統計誤差(相対標準偏差)は、最大でも 5%程度である。表より、 ^{252}Cf 線源と JCO 臨界事故の放射線場に対して、線量減衰率は似たような傾向を示すことがわかる。また、こ

の傾向は、 ^{60}Co 線源に対する線量減衰率の傾向と大きく異なる。空隙部に水またはホウ酸水を注入することにより中性子の線量減衰率が非常に小さくなるが、 γ 線源の場合にはあまり変化しない。

^{252}Cf 線源からの中性子および光子の線量に対するエネルギー別の寄与を図 3-2 および図 3-3 に示す。これらの図は遮へい体前方および車両側面に使う遮へい体（表 3-1 中の遮へい体①および②）後方での線量に対する図である。図の横軸は中性子または光子のエネルギーを表している。縦軸は中性子 1 放出当たり、そのエネルギーの中性子または光子による AP 照射に対する実効線量への寄与、すなわち、中性子または光子のフルエンスにその線量換算係数を乗じた値を表している。図 3-2 より、中性子の線量寄与は、水を注入しない場合はほとんど変化しないが、注入すると大きく減衰することがわかる。図 3-2 と図 3-3 の比較から、光子による線量寄与は、中性子による線量寄与に比べて 1 衍程度小さいことがわかる。したがって、 ^{252}Cf 線源に対する線量減衰率は、中性子に対する線量減衰率とほぼ等しくなる。水を注入した場合に 2MeV 付近の光子による線量寄与が大きくなるが、これは水素原子による中性子の捕獲 γ 線による影響である。

また、車両側面に使う遮へい体に対応した、 ^{60}Co 線源に対する線量寄与を図 3-4 に示す。横軸は光子エネルギーを、縦軸は光子 1 個放出当たりに規格化した実効線量に対する寄与を示している。図より、 ^{60}Co からの線量は、線源エネルギー群での γ 線からの寄与が非常に大きいことがわかる。線源エネルギー群に対する線量寄与が、遮へい体①によって 70% 程度に、その遮へい体に水を注入した遮へい体②によって 50% 程度に減衰していることから、 γ 線に対して鉛 0.5cm と水 10cm は同程度の遮へい効果を持つことがわかる。

^{252}Cf 線源に対する 10cm 水層（遮へい体②）および 20cm 水層（遮へい体⑤）の実効線量に対する線量減衰率は、0.314 および 0.0830 であり、第 2 章で参照した値(0.27 および 0.07)とほぼ同じである。また、10cm ポリエチレン層（遮へい体⑦）の線量減衰率は 0.249 で、同じ厚さなら水よりもポリエチレンの方が中性子に対する遮へい性能が優れている。しかし、10cm ホウ酸水層（遮へい体③）の線量減衰率は 0.294 と、同じ厚さの水層の場合と比べてそれほど変化がなく、実際の事故のような緊急の場合には、手間を掛けてホウ酸水を注入する利点はないと結論できる。

ANISN-JR コードによる AP 照射に対する実効線量の線量減衰率を表 3-3 に、MCNP4B コードによる周辺線量当量の線量減衰率を表 3-4 に示す。両者とも、MCNP4B コードによる AP 照射に対する実効線量の線量減衰率とほぼ一致している。MCNP4B コードと ANISN-JR コードによる結果がほぼ一致していることから、これらの計算の精度が高いことが確認できた。また、周辺線量当量の線量減衰率と AP 照射に対する実効線量の線量減衰率がほぼ一致していることから、遮へい体前後でのサーベイメータ指示値の比が、そのまま被ばく評価の指標となる実効線量の比を表していることがわかる。

4. 実験

4.1 実験の概要

4.1.1 実験目的

第 3 章での計算結果に対する信頼性を確認するために、線量減衰率の実験による評価を行った。実験では、線源と検出器の間に、複合遮へい体の試験体を置いた状態と置かない状態での線量を

測定し、その比を線量減衰率とした。このような実験条件を、前章で説明した計算手法により模擬することにより、計算手法の実験値に対する再現性を検討した。

この章で述べる実験および計算によって求めた線量減衰率は、固有の実験条件に対応する値であり、計算手法の信頼性を確認する目的のみに使われるもので、一般的な条件に対して使える線量減衰率は、第3章の計算により求めた値である。

4.1.2 実験条件

実験は、日本原子力研究所東海研究所放射線標準施設棟にある ^{60}Co ギガ線源および ^{252}Cf 中性子線源を用いて行った。各線源に対する実験体系の概略を図4-1および図4-2に、実験時に撮影した写真を図4-3から図4-9に示す。両実験とも、線源から約1.5m離れた点に検出器を置き、そのほぼ中間点に遮へい体の試験体を設置した。また、 ^{60}Co 線源は鉛によって、 ^{252}Cf 線源はパラフィンブロックによってコリメートされている。 ^{252}Cf 線源実験を行った放射線標準施設棟第4照射室の概略を図4-10に、パラフィンブロックの詳細を図4-11に示す。これらの図中に示してある構造物は、全て後述の計算で考慮した。

実験に使用した試験体は、車輪側面および背面での複合遮へい体に対する試験体であり、それぞれ水がない場合とある場合について実験を行った。試験体の大きさは1m×1mであり、各材質の厚さを表3-1中の遮へい体①、②、④および⑤の欄に示す。

実験に用いた線源の強度は ^{60}Co 線源が約3.2TBqで、 ^{252}Cf 線源が約1.1GBqである。 ^{60}Co 線源は、鉛によって頂角約30°の円錐状にコリメートされており、線源から165cm離れた点での周辺線量当量率は468(mSv/h)と評価されている。また、 ^{252}Cf 線源からの中性子放出率は 1.24×10^8 (n/s)である。ただし、 ^{252}Cf 線源の場合、検出器方向以外はパラフィンブロックで覆われているため、散乱線や2次光子などの影響が大きく、この中性子線源からある距離における周辺線量当量率を簡単に評価することはできない。

光子の周辺線量当量率の測定には、電離箱式サーベイメータ(AE-133V:応用技研製)を用いた。このサーベイメータの指示値は、周辺線量当量率に対して校正されており、指示誤差がフルスケールの2.5%，エネルギー特性による誤差が約10% (30keV以下の光子に対しては約30%)程度である。また、中性子による周辺線量当量率の測定にはレムカウンタ(TPS-451BS:アロカ製)を用い、その計数から周辺線量当量率に変換した。その変換を行う際の誤差は、最大10%である。

4.1.3 実験方法

周辺線量当量率の測定は、最初に各線源とも遮へい体を置かない状態から行った。 ^{60}Co 線源に対しては光子による周辺線量当量率を測定し、 ^{252}Cf 線源に対しては中性子および光子による周辺線量当量率を測定した。

次に、検出器の位置は固定したまま、線源と検出器のほぼ中間点に遮へい体①、②、④または⑤に対応する遮へい試験体を置いた状態で周辺線量当量率を測定した。遮へい試験体後方での周辺線量当量率と、先に測定した遮へい試験体がない状態での周辺線量当量率の比を線量減衰率とした。

4.2 実験を再現するための計算条件

本実験の目的は、第3章で説明した計算手法の信頼性を確認するためである。したがって、実験を再現するための計算は、可能な限りその計算手法と同じ方法を用いるべきである。しかし、第3章の計算は、完全なビーム状の放射線が、周囲に何も存在しない場に置かれた遮へい体に垂直入射する理想的な状態に対するものである。一方、実験の解析ではいくつかの点に関して実験条件に合わせた計算が必要となる。

具体的に第3章の計算手法と違うのは、以下の5点である。

- a) コリメータ等の試験体以外の構造物も考慮した。
- b) ビーム状線源ではなく等方線源とした。
- c) 粒子フルエンスを計算する面は遮へい体の背面全体ではなく、検出器の中心位置から上下方向±5cm、左右方向±5cmの線源に対して垂直な面とした。
- d) 線量換算係数として、周辺線量当量に対する値を用いた。
- e) 線量減衰率は、遮へい体前後の周辺線量当量の比ではなく、遮へい体がない状態とある状態でのフルエンス計算面における周辺線量当量の比とした。

a)の点から、3次元幾何形状を取り扱うことのできる計算コードが必要であることがわかり、MCNP4Bコードにより評価を行った。実験室中には、試験体を吊すクレーンや検出器を置いた台など数多くの構造物が存在するが、それらの線量に対する影響は小さいと予想されたため、図中に示している構造物以外は計算体系の中に含めなかった。

実験解析では、周辺線量当量率の相対値である線量減衰率だけでなく、その絶対値も重要なデータである。計算における線源の規格化条件は、 ^{60}Co 線源に対しては遮へい体がない状態での周辺線量当量率が 468 (mSv/h) 、 ^{252}Cf 線源に対しては中性子放出率が $1.24 \times 10^8\text{ (n/s)}$ である。

また、試験体に水を注入した時、試験体中心から下の部分が多少膨らんでいた。その効果を考慮するため、いくつかの試験体に対して水層の厚さを表中の値より5mm増やして線量減衰率を計算してみたところ、その値は数%小さくなるものの、それほど大きく変化しなかった。そこで、その膨らみは無視し、計算では表中の水層の厚さを用いた。

4.3 結果および考察

表4-1から表4-3に、 ^{60}Co 線源からの光子による周辺線量当量率、 ^{252}Cf 線源からの中性子および光子による周辺線量当量率に対する実験値と計算値をmSv/h単位で示す。周辺線量当量率の測定値に対する誤差は10%程度であり、主に検出器の精度に起因する。一方、計算による周辺線量当量率の統計誤差は、最大5%程度である。

^{60}Co 線源に対する周辺線量当量率の計算値と実験値を比較すると、絶対値で6%程度計算値が実験値より小さくなっているが、線量減衰率に対してはよく一致している。この絶対値の不一致は、実験に用いたサーベイメータが ^{137}Cs 線源で校正されているため、 ^{60}Co から放出されるγ線に対しては、周辺線量当量率を数%程度過大に評価していることが主因と考えられる。

^{252}Cf 線源から放出される中性子による周辺線量当量率の計算値と実験値を比較すると、絶対値に対しては、計算値が実験値より最大10%程度大きくなっているが、線量減衰率に対してはよく一致している。2次光子を含む光子の周辺線量当量率を比較すると、絶対値に対しては、約30%

程度計算値が実験値を下回り、線量減衰率に対する計算値が実験値を下回る。この過小評価の原因として、 ^{252}Cf 線源から直接放出される γ 線のエネルギースペクトルの不確かさ、サーベイメータの精度による実験誤差、計算で考慮しなかった構造物の周辺線量当量率への寄与等が考えられる。ただし、 ^{252}Cf 線源からの γ 線による周辺線量当量率は、中性子線による周辺線量当量率と比べてかなり小さいため、全体の周辺線量当量率に対する線量減衰率の計算値と実験値はよく一致する。

全体として、線量減衰率に対する計算値と実験値はよく一致しており、第3章で述べた計算手法がこのような複合遮へい体の遮へい性能評価に対して信頼性の高い方法であることが確認された。

5. 結論

東京消防庁が開発した特殊災害対策車の放射線遮へい性能を計算によって評価した。その結果、ポリエチレンを装着した車両前面、水を注入した車両側面および背面の遮へい体は、中性子の線量をそれぞれ25%、30%および10%程度に、光子の線量をそれぞれ60%、50%および25%程度に減衰できることが明らかとなった。また、ポリエチレンまたは水のない状態では、光子の線量に対する遮へい効果は車両前面および側面の遮へい体で70%程度に、車両背面の遮へい体で60%程度に減衰させることができるもの、中性子の線量に対する遮へい効果はほとんどないことが確認できた。これらの結果は中性子源として ^{252}Cf 線源、光子源として ^{60}Co 線源を選んだ場合の値であり、より低いエネルギーの粒子が多い放射線場では、さらに高い遮へい効果が得られるものと期待できる。また、これらの結果は、遮へい体を単一層と仮定して評価した結果とほぼ同程度であり、特殊災害対策車は期待されている遮へい性能を有することが確認できた。

計算手法の信頼性を確認する目的で、実験的にも線量減衰率を評価した。実験は、特殊災害対策車の側面および背面に使用する複合遮へい体の試験体を用いて、典型的な γ 線源および中性子線源に対して行った。この結果、実験的に評価した値は計算によって精度よく再現できることが明らかとなった。このことから、計算によって評価した値は十分に信頼できるものであることが確認された。

謝辞

東京消防庁の小杉直樹氏および森孝郎氏には、遮へい体に対する試験体の設計・製作、および線量減衰率の測定実験を行う際に多大なるご尽力を頂いた。原研保健物理部の遠藤章氏および吉澤道夫氏には、MCNP4Bコードによる線量減衰率の計算を行う際に貴重な助言頂いた。原研東海研究所田中俊一副所長には、本研究を実施するにあたって、専門的な見地からご指導を頂いた。以上の方々に心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) K. Ueki, A. Ohashi, Y. Anayama, and K. Hattori, "Shielding Ability of KRAFTON Series and Optimum Arrangement", Proceedings of 8th International Conference on Radiation Shielding, p51, Arlington, Texas USA (1994).
- 2) J. F. Briesmeister, "MCNP - a General Monte Carlo N-Particle Transport Code", LA-12625-M (1997).
- 3) International Commission on Radiological Protection, "Data for Protection against Ionizing Radiation from External Source: Supplement to ICRP Publication 15", ICRP Publication 21 (1971).
- 4) A. G. Croff, R. L. Haese, and N. B. Gove, "Updated Decay and Photon Libraries for the Origen Code", ORNL/TM-6055 (1979)
- 5) A. B. Chilton, J. K. Shultz, and R. E. Faw, "Principles of Radiation Shielding", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632 (1984).
- 6) "放射線施設のしやへい計算実務マニュアル II", 財団法人原子力安全技術センター (1990).
- 7) 遠藤 章, 山口 恭弘, 石榑 信人, "東海村臨界事故における重度被ばく患者に対する線量分布の詳細解析 : 原研・放医研共同研究", JAERI-Research 2001-035 (2001).
- 8) T. Nakagawa, et al., "Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-2: JENDL-3.2", J. Nucl. Sci. Tech., 32, 1259 (1995).
- 9) H. G. Hughes, "Information on the MCPLIB02 Photon Library", LANL Memorandum X-6: HGH-93-77 (1996).
- 10) K. Koyama, et al., "ANISN-JR, A One-Dimensional Discrete Ordinates Code for Neutron and Gamma-Ray Transport Calculations", JAERI-M 6954 (1977).
- 11) D. K. Trubey, M. J. Berger, and J. H. Hubbell, "Photon Cross Sections for ENDF/B-VI", Advanced in Nuclear Computation and Radiation Shielding, American Nuclear Society Topical Meeting (1989).
- 12) International Commission on Radiological Protection, "Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation", ICRP Publication 74 (1996).

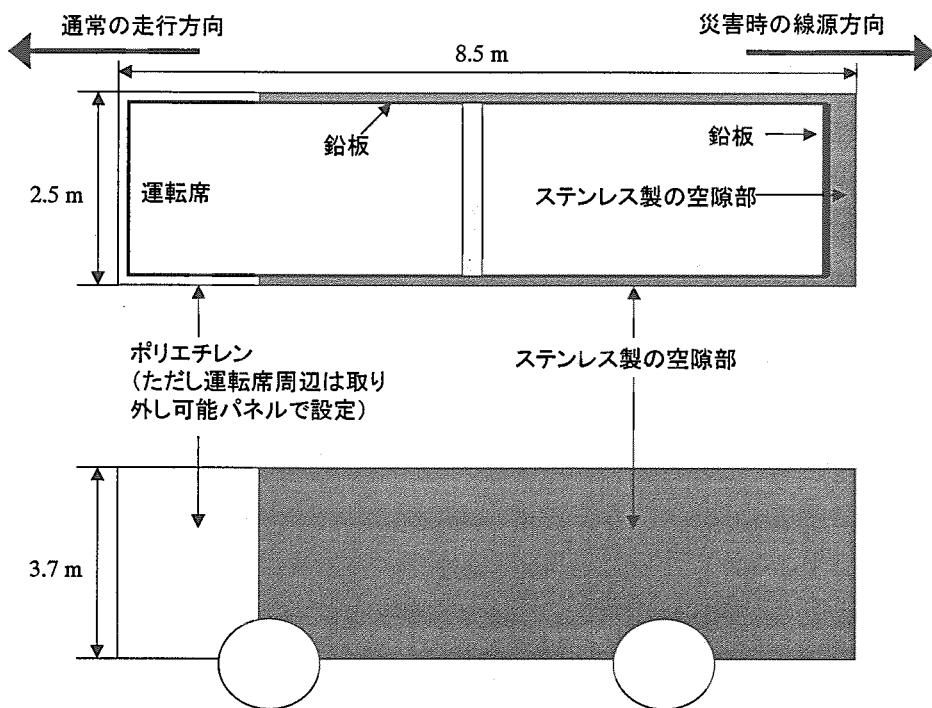


図 2-1 特殊災害対策車の概要.

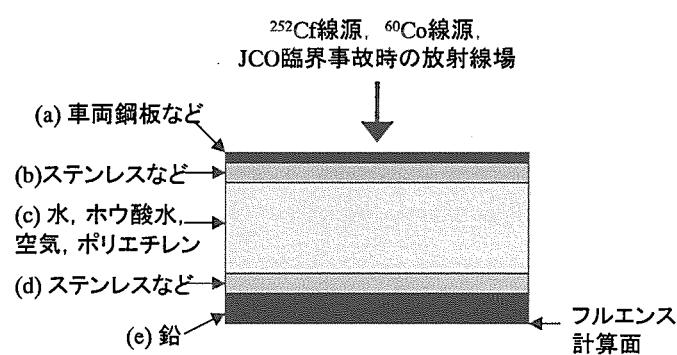
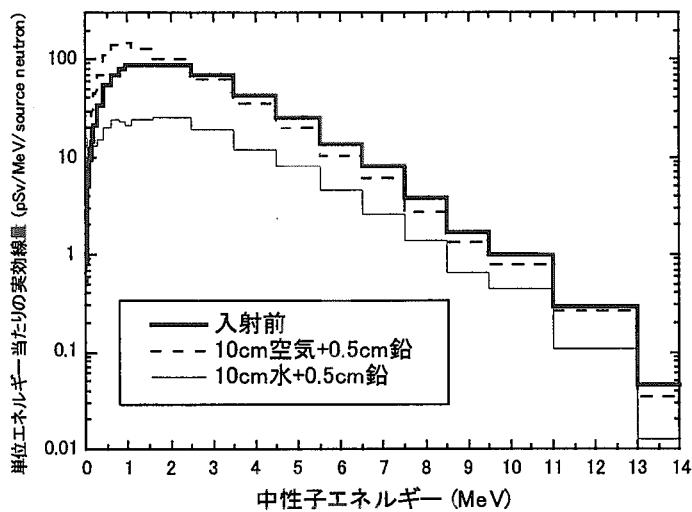
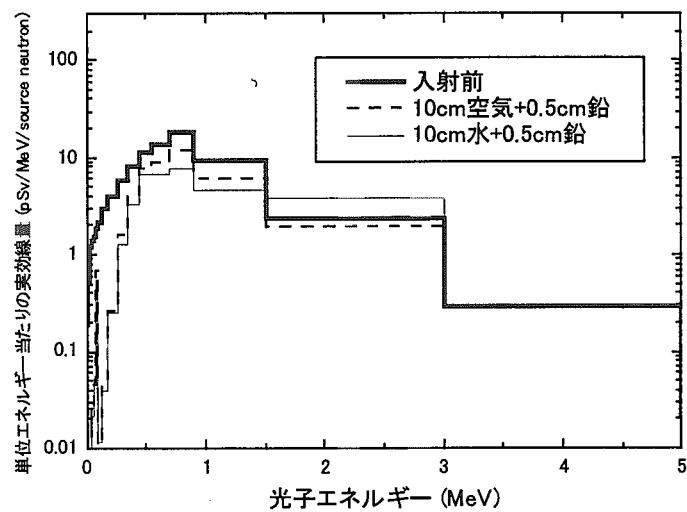
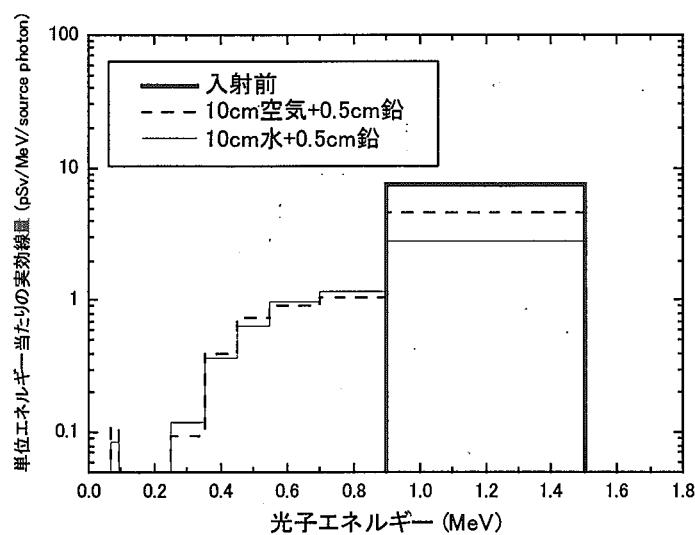
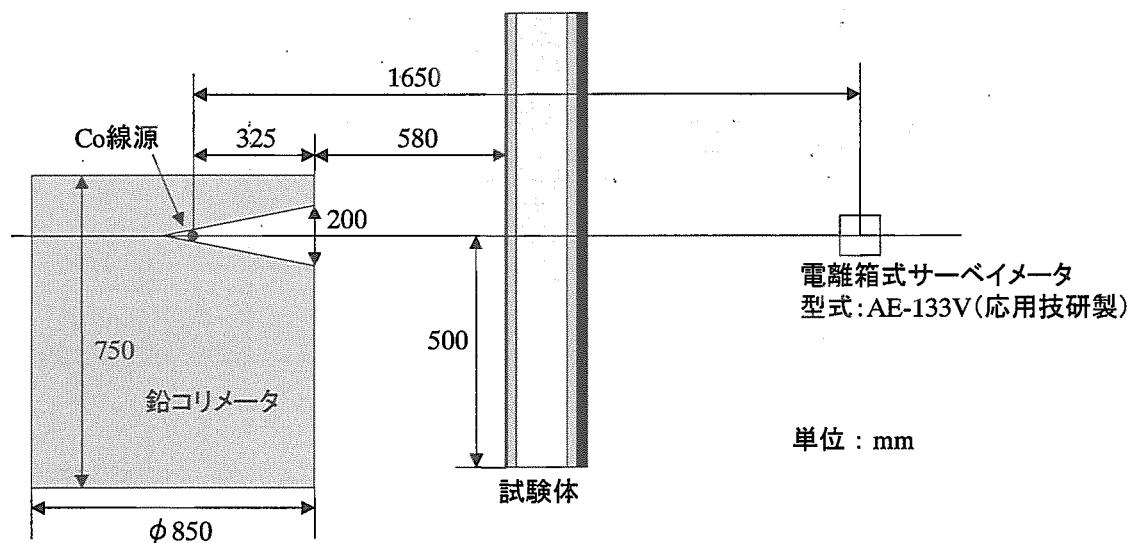


図 3-1 遮へい体の線量減衰率に対する計算体系.

図 3-2 ^{252}Cf 線源からの中性子の線量に対するエネルギー別の寄与.図 3-3 ^{252}Cf 線源からの光子（2次光子も含む）の線量に対するエネルギー別の寄与.

図 3-4 ^{60}Co 線源からの光子の線量に対するエネルギー別の寄与.図 4-1 ^{60}Co 線源による周辺線量当量率の測定体系.

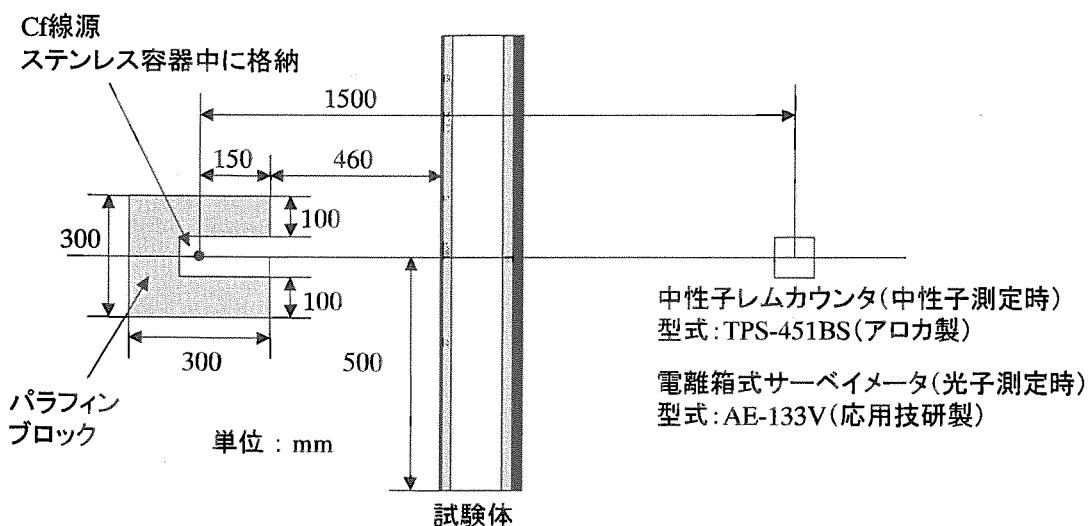


図 4・2 ^{252}Cf 線源による周辺線量当量率の測定体系.

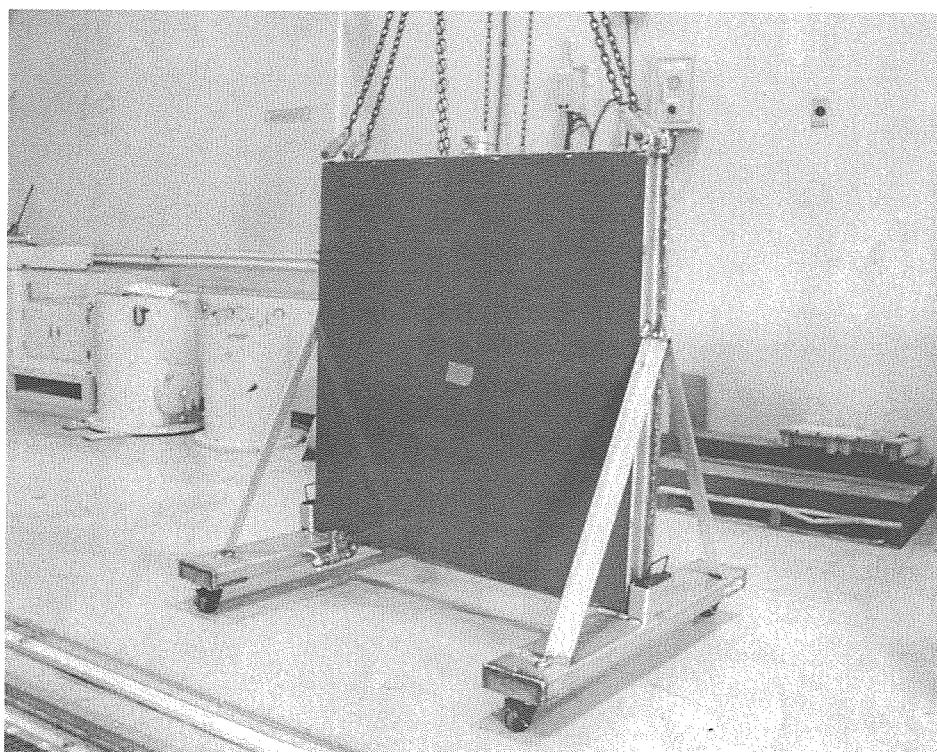


図 4・3 車輌側面の遮へい体に対する試験体（車輌鋼板側）.

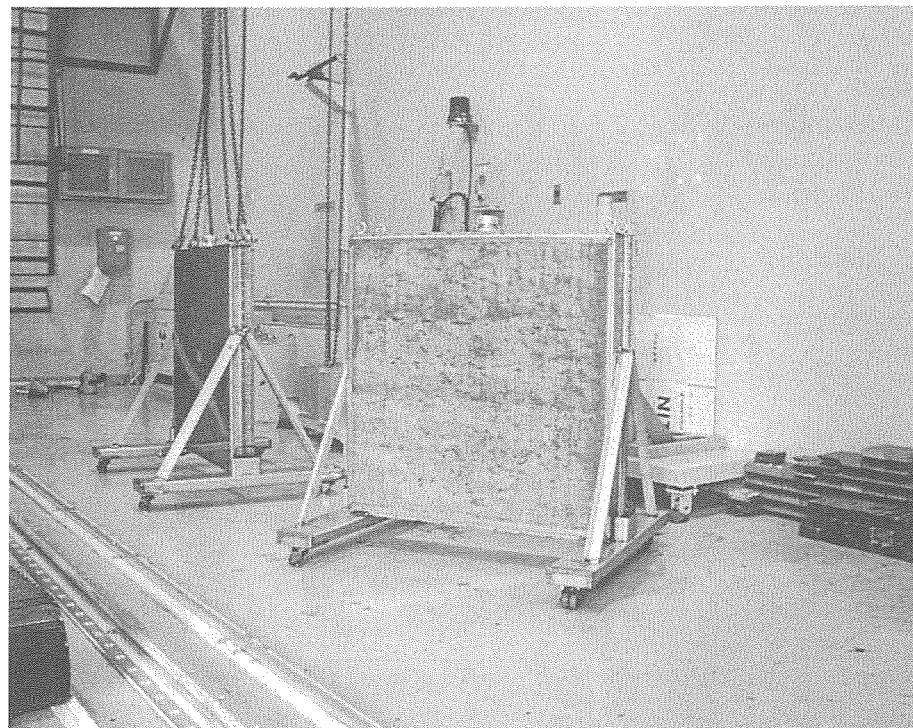


図 4-4 車輌背面の遮へい体に対する試験体（鉛板側）。

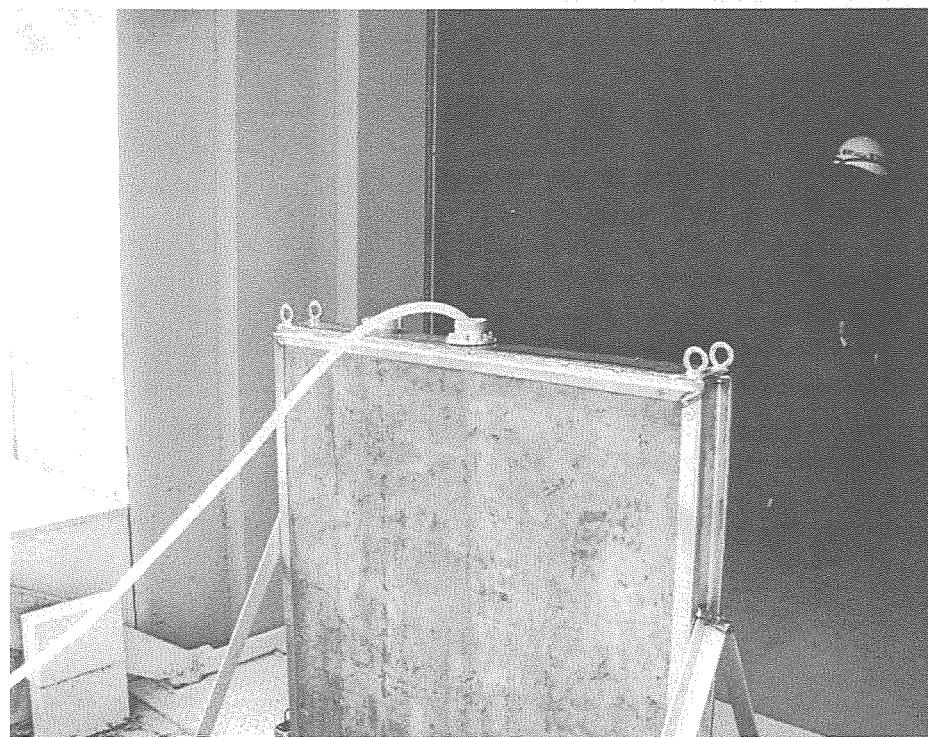


図 4-5 車輌側面の遮へい体に対する試験体（水注入中、鉛板側）。

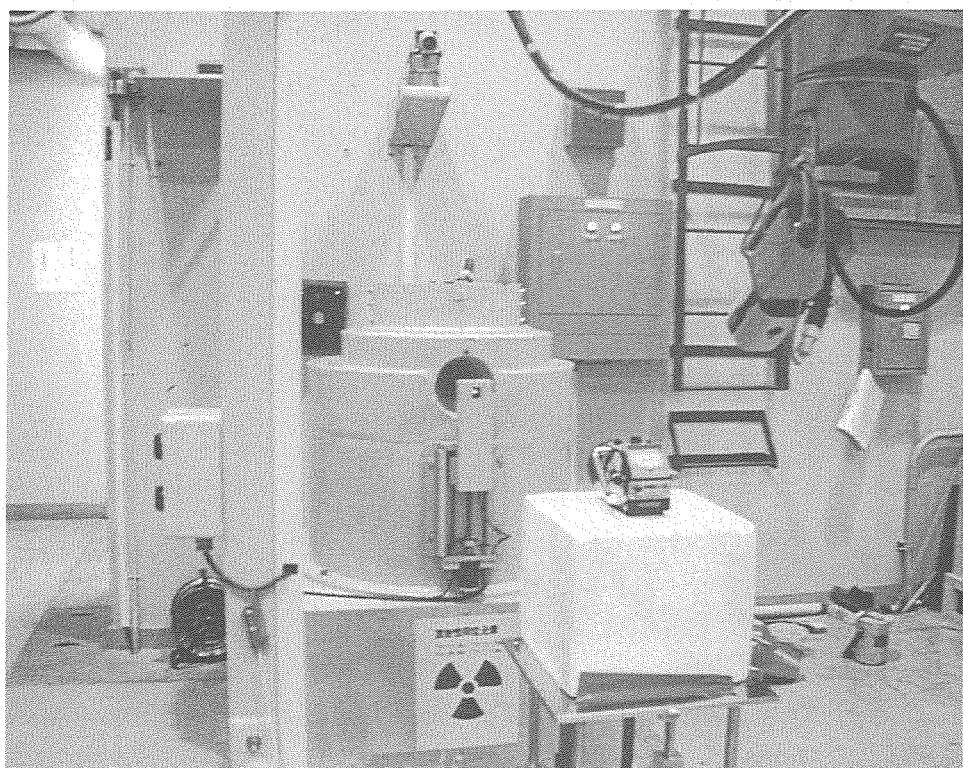


図 4・6 試験体がない状態での、 ^{60}Co 線源による周辺線量当量率の測定体系.

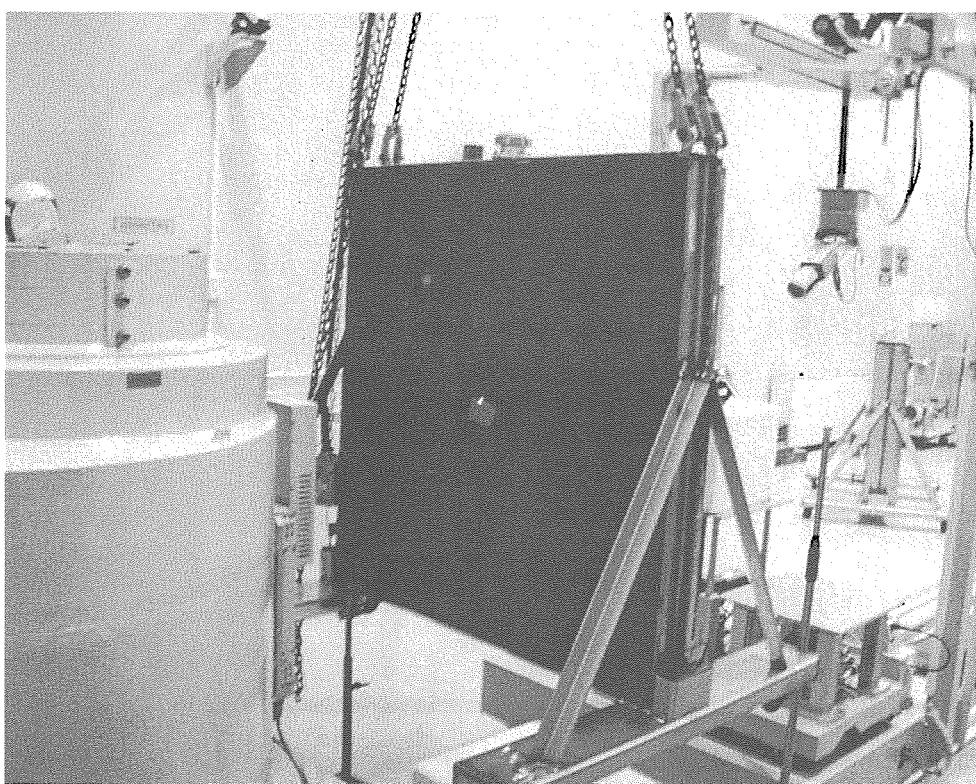


図 4・7 試験体を設置した状態での、 ^{60}Co 線源による周辺線量当量率の測定体系.

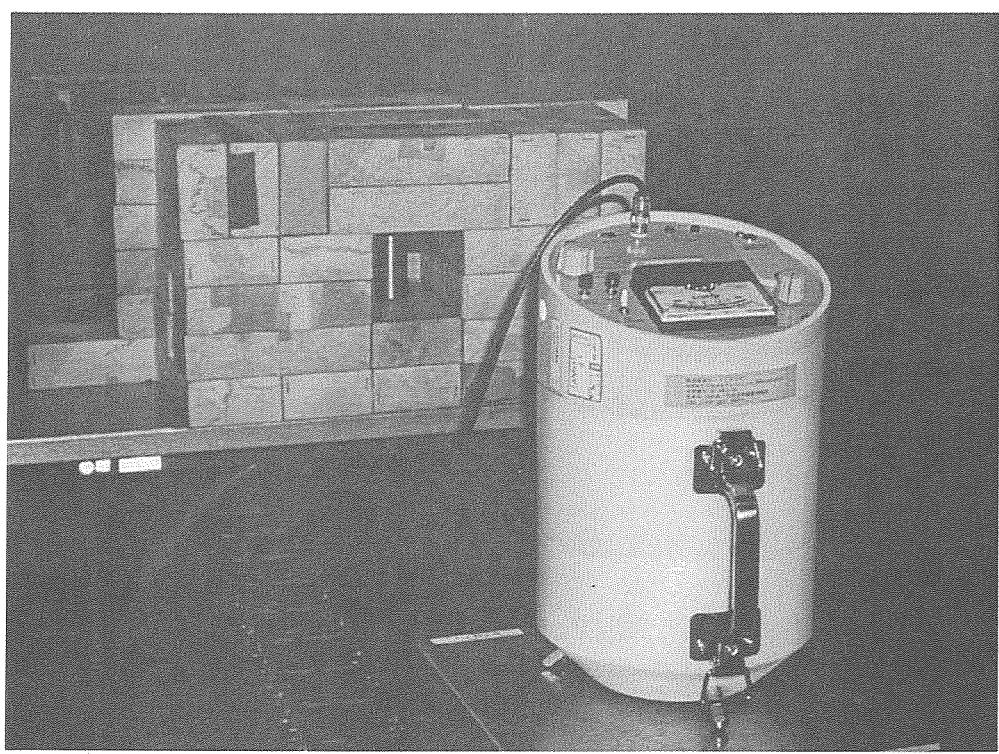


図 4-8 試験体がない状態での、 ^{252}Cf 線源による中性子周辺線量当量率の測定体系.

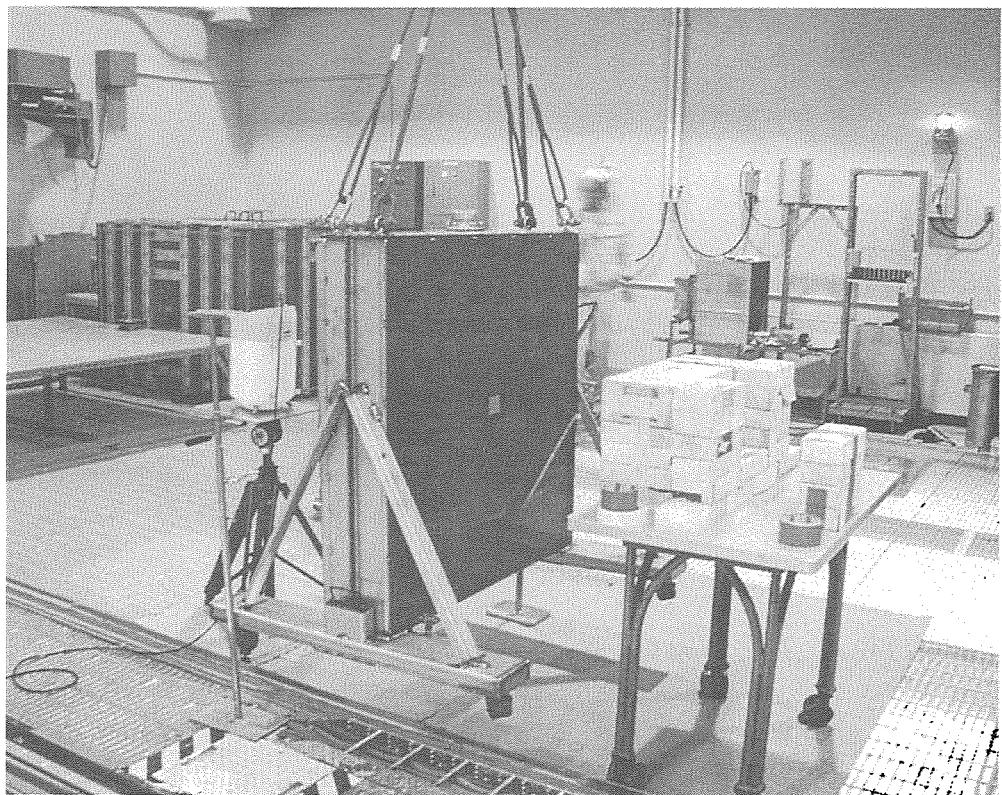


図 4-9 試験体を設置した状態での、 ^{252}Cf 線源による中性子周辺線量当量率の測定体系.

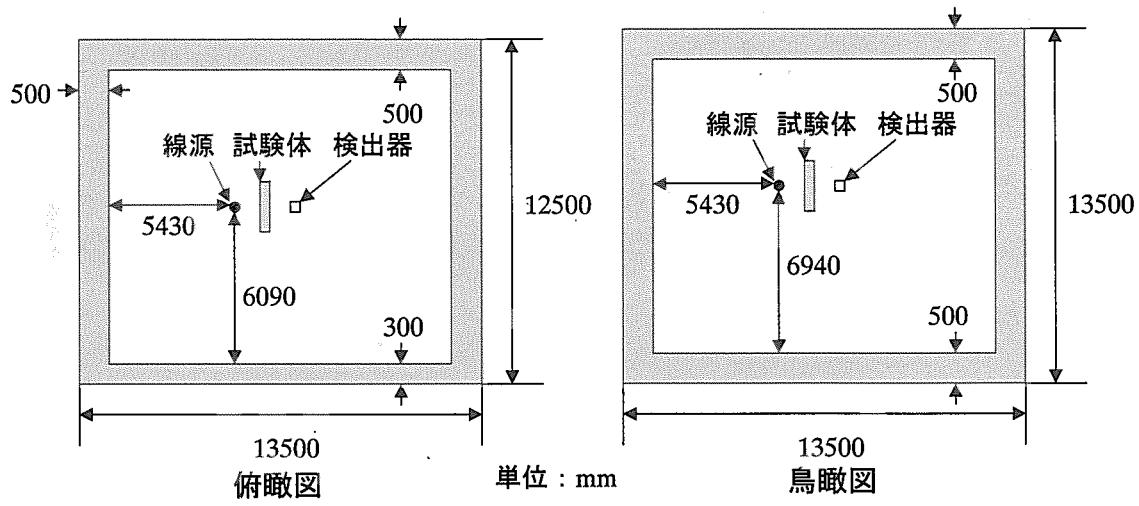
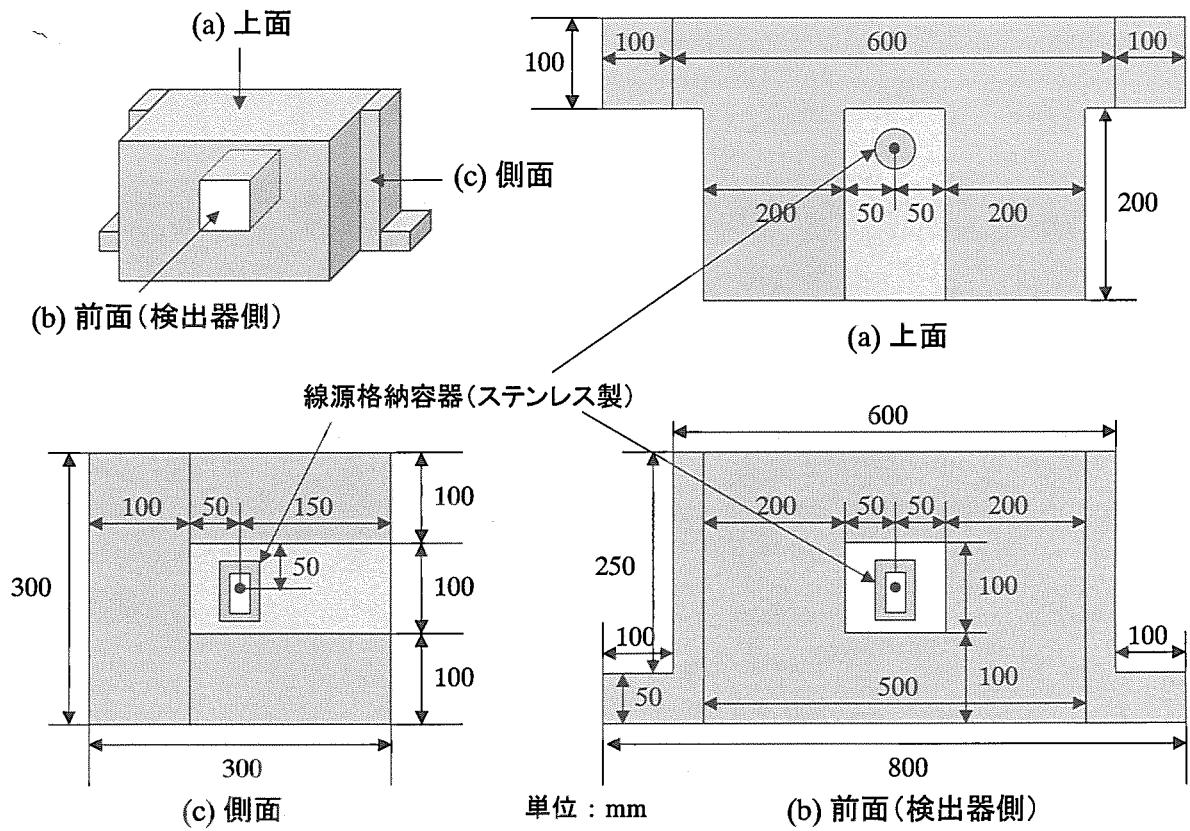
図 4-10 ^{252}Cf 線源を用いた実験を行った放射線標準施設棟第 4 照射室の概略.図 4-11 ^{252}Cf 線源をコリメートするためのパラフィンブロック.

表 3-1 計算で評価した遮へい体の厚さおよび材質.

INDEX	遮へい体①	遮へい体②	遮へい体③
名前	10cm 空気層	10cm 水層	10cm ホウ酸水層
(a)	0.16cm 車両鋼板	0.16cm 車両鋼板	0.16cm 車両鋼板
(b)	0.3cm ステンレス	0.3cm ステンレス	0.3cm ステンレス
(c)	10cm 空気	10cm 水	10cm ホウ酸水
(d)	0.3cm ステンレス	0.3cm ステンレス	0.3cm ステンレス
(e)	0.5cm 鉛	0.5cm 鉛	0.5cm 鉛

INDEX	遮へい体④	遮へい体⑤	遮へい体⑥
名前	20cm 空気層	20cm 水層	20cm ホウ酸水層
(a)	0.16cm 車両鋼板	0.16cm 車両鋼板	0.16cm 車両鋼板
(b)	0.3cm ステンレス	0.3cm ステンレス	0.3cm ステンレス
(c)	20cm 空気	20cm 水	20cm ホウ酸水
(d)	0.3cm ステンレス	0.3cm ステンレス	0.3cm ステンレス
(e)	1cm 鉛	1cm 鉛	1cm 鉛

INDEX	遮へい体⑦	遮へい体⑧
名前	10cm ポリエチレン層	車両鋼板無し 10cm ポリエチレン層
(a)	0.16cm 車両鋼板	なし
(b)	10cm ポリエチレン	10cm ポリエチレン
(c)		
(d)		
(e)	0.5cm 鉛	0.5cm 鉛

表 3-2 MCNP4B による計算によって評価した AP 実効線量に対する線量減衰率.

INDEX	名前	AP 実効線量に対する線量減衰率		
		JCO 線源	^{252}Cf 線源	^{60}Co 線源
遮へい体①	10cm 空気層	0.98	1.0	0.73
遮へい体②	10cm 水層	0.28	0.31	0.49
遮へい体③	10cm ホウ酸水層	0.26	0.29	0.49
遮へい体④	20cm 空気層	0.95	0.97	0.57
遮へい体⑤	20cm 水層	0.081	0.083	0.24
遮へい体⑥	20cm ホウ酸水層	0.074	0.074	0.23
遮へい体⑦	10cm ポリエチレン層	0.23	0.25	0.59
遮へい体⑧	車両鋼板無し 10cm ポリエチレン層	0.24	0.26	0.61

表 3-3 ANISN-JR によって計算した AP 実効線量に対する線量減衰率.

AP 実効線量に対する線量減衰率				
INDEX	名前	JCO 線源	^{252}Cf 線源	^{60}Co 線源
遮へい体①	10cm 空気層	1.0	1.1	0.65
遮へい体②	10cm 水層	0.29	0.31	0.43
遮へい体④	20cm 空気層	1.0	1.1	0.50
遮へい体⑤	20cm 水層	0.084	0.080	0.20

表 3-4 MCNP4B によって計算した周辺線量当量に対する線量減衰率.

周辺線量当量に対する線量減衰率				
INDEX	名前	JCO 線源	^{252}Cf 線源	^{60}Co 線源
遮へい体①	10cm 空気層	1.0	1.0	0.71
遮へい体②	10cm 水層	0.27	0.32	0.47
遮へい体④	20cm 空気層	0.97	0.99	0.56
遮へい体⑤	20cm 水層	0.077	0.081	0.23

表 4-1 ^{60}Co 線源から放出される光子による周辺線量当量率に対する実験値および計算値.

遮蔽体	試験条件	周辺線量当量率(mSv/h)		線量減衰率	
		実験値	計算値	実験値	計算値
遮蔽材なし		500	470		
10cm 水槽+0.5cm 鉛	水なし	300	290	0.60	0.61
	水あり	180	180	0.36	0.38
20cm 水槽+1cm 鉛	水なし	230	230	0.46	0.49
	水あり	92	86	0.18	0.18

表 4-2 ^{252}Cf 線源から放出される中性子による周辺線量当量率に対する実験値および計算値.

遮蔽体	試験条件	周辺線量当量率(mSv/h)		線量減衰率	
		実験値	計算値	実験値	計算値
遮蔽材なし		0.75	0.800		
10cm 水槽+0.5cm 鉛	水なし	0.65	0.67	0.87	0.84
	水あり	0.13	0.15	0.18	0.19
20cm 水槽+1cm 鉛	水なし	0.61	0.65	0.82	0.81
	水あり	0.038	0.040	0.051	0.050

表 4-3 ^{252}Cf 線源から放出される光子による周辺線量当量率に対する実験値および計算値。

遮蔽体	試験条件	周辺線量当量率(mSv/h)		線量減衰率	
		実験値	計算値	実験値	計算値
遮蔽材なし		0.057	0.045		
10cm 水槽+0.5cm 鉛	水なし	0.034	0.023	0.60	0.51
	水あり	0.019	0.017	0.33	0.38
20cm 水槽+1cm 鉛	水なし	0.030	0.017	0.53	0.38
	水あり	0.011	0.0089	0.19	0.20

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	フーラード	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。

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
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レンチゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

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

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

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	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	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100
	3.7 × 10 ¹⁰	1		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

(86年12月26日現在)

東京消防庁特殊災害対策車輌用遮へい体の性能評価

R100
古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。