解	説
---	---

生活環境中における γ 線および宇宙線線量率分布とその特徴長岡 鋭*¹, 森内 茂*¹

(1991 年 3 月 7 日受理)

Distribution and Characteristics of Gamma and Cosmic
Ray Dose Rate in Living EnvironmentToshi NAGAOKA*¹ and Shigeru MORIUCHI*¹

A series of environmental radiation surveys was carried out from the viewpoint of characterizing the natural radiation dose rate distribution in the living environment, including natural and artificial ones. Through the analysis of the data obtained at numbers of places, several aspects of the radiation field in living environments were clarified. That is, the gamma ray dose rate varies due to the following three dominant causes: 1) the radionuclide concentration of surrounding materials acting as gamma ray sources, 2) the spatial distribution of surrounding materials, and 3) the geometrical and shielding conditions between the natural gamma ray sources and the measured point; whereas, the cosmic ray dose rate varies due to the thickness of upper shielding materials. It was also suggested that the gamma ray dose rate generally shows an upward tendency, and the cosmic ray dose rate a downward one in artificial environment. This kind of knowledge is expected to serve as fundamental information for accurate and realistic evaluation of the collective dose in the living environment.

KEY WORDS: gamma ray, cosmic ray, dose rate, living environment, collective dose, environmental condition, dose rate variation, human activity

I 緒 言

自然放射線(ここでは γ 線および宇宙線を対象とする)線量率は、種々の環境要因によって変動する。屋外平坦地のような典型的な自然環境下では、 γ 線線量率は地質、降雨、積雪等により、宇宙線線量率は緯度・高度により変動する。一方、家屋内、地下、電車内等の人工環境下では、建材中の放射性核種濃度、遮蔽状況などによる大きな線量率変動が見られる。

人間は1日の時間のうち80%以上を屋内、すなわち、人工環境下で過ごす。そのため、自然放射線による被曝線量をより高精度かつ現実的に評価するためには、自然環境中のみならず人工環境中での放射線特性(エネルギースペクトル、方向特性、線量率分布およびそれらの変動等)をよく理解しておかねばならない。従来は自然環境中での放射線挙動に関する研究に重点が置かれ、自然環境放射線の基本的な特性についてはかなり明らかにされてきた¹⁻⁶⁾。一方、人工環境中での放射線場の特性は、自然環境放射線に関する知識を基にある程度推察できるが、種々の環境について実際の様子、すなわち線量率分布やその変動の程度を把握しておくことが大切であることはいうまでもない。このような知識から、人間の存在場所(環境条件)と線量率との関係が得られる。一方、人間の生活行動形態や居住環境に関する統計調査デ

*¹ 日本原子力研究所環境安全研究部環境放射線物理研究室; 茨城県那珂郡東海村白方 2-4 (〒319-11)
Environmental Radiation Physics Laboratory,
Department of Environmental Safety Research,
Japan Atomic Energy Research Institute; 2-4,
Shirakata, Tokai-mura, Ibaraki-ken, 319-11
Japan.

Table 1 バックグラウンド線量率実地調査に用いた測定器

測 定 器	検 出 器	測定時間	調査場所	備 考
DBM 型	3"φNaI (Tl) シンチレーション検出器	10~60秒(連続)	路上(徒歩)電車路線	約 13 kg
SWING 型	3"φNaI (Tl) シンチレーション検出器	10~60秒(連続)	路上(徒歩)電車路線	約 7 kg
走行サーベイシステム	5"φNaI (Tl) シンチレーション検出器	10秒(連続)	路上(車)	車載型

* DBM : Discrimination Bias Modulation

SWING : Spectrum Weighting Instrument for Gamma-ray measurement

ータ⁷から、存在場所と存在時間に関する情報が得られる。したがって、場所を媒体としてそこでの線量率と存在時間とを結びつける集団線量評価モデルを構築すれば、より高精度かつ現実的な集団線量評価が可能となる。

このような観点から、まず実際の生活環境中での放射線場の様子を明らかにするため、典型的な人工環境である東京都を中心とした線量率分布の実地調査を行ってきた。また、その結果から生活環境中放射線場の主要な特徴が明らかになった^{8,9)}。本報では、通常的生活環境における γ 線および宇宙線線量率の分布とその特徴、線量率変動の要因とその程度について述べる。

II 測 定

1. 測定の方法

実験室外で放射線を測定する際には、通常商用の交流100 V 電源を使うことができないため、バッテリー駆動式の測定器(記録計を含む)が必要である。バッテリーには充電式(Ni-Cd など)と使い捨て式(マンガン電池、アルカリ電池、リチウム電池など)があるが、入手の容易さ、価格、寸法、重量、容量、安定性、操作性などの点で一長一短があり、状況に応じて選択せねばならない。また、移動を容易にするため測定器全体をコンパクトにし、ケーブル、検出器なども一体にしてキャリアバッグに収納するような工夫も必要である。

環境放射線の測定には、ある1地点において一定時間測定を行う定点測定と、場所を移動しながら連続的に測定・記録する移動測定とがある。今回の場合は、ある地域での平均的な線量率を把握するとともに、その局所的な変動を観測してその要因と程度を知るという観点から、徒歩、電車、車による移動測定を行った。測定場所としては市街地、地下街、電車路線、主要道路など日常的に遭遇する典型的な生活環境を重点的に選び、通常的生活行動パターンを模擬し、かつ注目している要因による変動を観測できるように測定コースを設定した。

1 データ当りの測定時間は、場所の特徴と線量率の変

動パターンとを関連づけられるよう10~60秒とした。今回用いた測定器で数10 nGy/h 程度の線量率を測定した場合、10秒測定でも統計誤差は10%弱であり、また必要に応じて数データの平均値をとることで、精度上の問題はとくにない。

2. 測定器

用いた測定器をTable 1に示す。前節に述べた測定時間等の条件も併せて示す。徒歩および電車内での測定では、3"φ球形NaI (Tl) シンチレーション検出器を用いたバッテリー駆動式の携帯型線量測定器(DBM型およびSWING型)を使用した。DBM型、SWING型ともにスペクトル線量変換演算法(G(E)関数法)に基づいた測定器である。DBM型は、検出器からの信号パルスを波高分析し、電子回路によってパルス波高に対応するエネルギー荷重演算を行う。詳しくは文献10~15を参照されたい。また、SWING型は、エネルギー荷重演算をROM(Read Only Memory)に記憶されたG(E)関数と小型コンピュータによって行う。これは多重波高分析器による信号パルスの波高分析と、波高に対応するG(E)関数との荷重演算を同時に行うことに相当する。詳しくは文献16,17を参照されたい。両測定器ともに γ 線線量率と3 MeV以上の宇宙線計数率が連続測定データとして得られ、DBM型では測定中に逐次マイクロカセットテープに記録される。またSWING型ではいったんコンピュータのメモリーに記録され、測定終了後に磁気カードへ転送される。

車による測定では、検出器(5"φNaI (Tl) シンチレーション検出器)を車体屋根上に、測定装置および発電機を車内に設置し、走行しながら連続的に γ 線波高分布を測定し、G(E)関数法により線量率換算するとともに磁気テープに記録する。また、磁気センサーと走行距離計を用いて、基準地点からの移動方向の変化および距離も記録し、測定データと測定位置とを対応づけた。

3. 宇宙線線量率の評価

自然環境中に存在する主要な γ 線の内最も高いエネル

Fig. 1 世田谷区住宅街-八重洲地下街における線量率分布

ギーは、 ^{208}Tl から放出される 2.61 MeV のものであり、通常環境 γ 線の線量率換算対象エネルギー範囲は 3 MeV 以下としている。一方、NaI(Tl) シンチレーション検出器は宇宙線に対しても感度を有し、3 MeV 以上のパルス計数率は宇宙線強度の指標として利用できる。宇宙線線量率は、緯度、高度、遮蔽状態によって変動するが、日本での値は海面レベルで約 30 nGy/h である¹⁸⁾。同じ場所での 3"φ 球形 NaI(Tl) シンチレーション検出器の 3 MeV 以上の計数率は 90 cpm である。そこで、90 cpm が 30 nGy/h として、計数率と線量率との間に比例関係があるとして宇宙線線量率を評価した。屋外においては、緯度や高度が多少変化してもこの関係が問題なく適用でき、簡便な宇宙線線量率評価法としてよく用いられる。しかし、ビル内や地下等、宇宙線に対する厚い遮蔽体が存在する場合には、宇宙線成分のスペクトルの変化に伴い、3 MeV 以上の計数率と線量率との関係も屋外とは異なってくる。宇宙線に対する遮蔽体の厚みによって異なる計数率-線量率換算計数を用いる試みもなされているが¹⁹⁾、今回は便宜的に屋外での関係をそのまま屋内に適用して宇宙線線量率を評価した。

4. 測定値の補正

測定値には、本来の測定目的である外部からの放射線以外に、検出器自体に存在する ^{40}K による自己汚染分および 3 MeV 以下の領域に入る宇宙線成分が含まれる。これについては文献²⁰⁾ に述べた方法で評価し差し引いた。 ^{40}K による自己汚染は検出器によるが、検出器光学窓にカリウム濃度の低い石英ガラスを用いた場合には 0.数 nGy/h 相当以下、3 MeV 以下の宇宙線成分は屋外で約 2 nGy/h、屋内ではそれ以下である。

検出器と測定器を一体としてキャリアバッグに入れて携行したことにより、外部から入射する放射線に対して

検出器が遮蔽を受ける。これについては、類似の環境条件下で、検出器をキャリアバッグに入れた実際の移動測定状態での値と、検出器をバッグから出した遮蔽されない状態での測定値を比較することにより補正した。また測定中におけるゲインの変化については、測定前後のゲインチェックにより補正した。

III 場所による線量率変動の実例

1. 線量率分布パターン

実際の生活環境における一連の線量率分布実測データの中から特徴的なものを Fig. 1~6 に例示するとともに、その特徴の原因について述べる。Fig. 1~6 の測定時間はいずれも 10 秒であるが、宇宙線成分については計数率が低く統計的変動が大きいため、環境条件の違いによって現れる宇宙線線量率分布の特徴を損わない程度に 3~5 分ずつまとめ、その間の平均値を示した。また、気象条件などの自然要因による変動が測定値に含まれることがある。自然変動の内最も急激なものは、降雨初期に見られる空気中 Rn 娘核種の rainout および wash-out によるものであるが、今回のデータにはこのようなものは含まれていない。このほか、空気中 Rn 娘核種濃度、土中水分の変化などによる変動がありうるが、これらは短時間のうちに大きく変化することではなく、今回の目的である人工環境による変動分を見る上ではとくに問題にはならない。

Fig. 1 は世田谷区の住宅街から地下鉄（東急新玉川線、営団地下鉄半蔵門線、銀座線、丸の内線）を經由して東京駅まで移動し、八重洲地下街を歩行したときの線量率分布である。住宅地地上部分での γ 線線量率の変動は、歩行経路周辺の道路、ビル等人工建造物に含まれる放射性核種濃度が建造物毎に異なり、また検出器に対す

Fig. 2 銀座における線量率分布

る建造物等の配置ジオメトリーが場所場所で複雑に変化するためである。住宅地地上部分での宇宙線成分については、ビルなどで一部遮蔽されることにより若干変動することもあるが、 γ 線ほど顕著ではない。しかし地下鉄三軒茶屋駅へ入るときに見られるように、宇宙線が上部の土、建造物で徐々に遮蔽されることにより宇宙線レベルが下がる。地下鉄内での宇宙線線量率はほぼ一定であるが、これは地下鉄の深度があまり変化していない(8~12 m)²¹⁾ため、深度が大きく変化したり、地上部分を走行する時には宇宙線線量率も変化を示す。一方、 γ 線線量率は環境条件の変化に伴い明確な変動を示す。とくにプラットフォーム上および駅(停車中車内)で線量率が高くなる傾向を示す。この原因は、地下鉄のトンネル用建材とプラットフォーム用建材との放射性核種濃度の違い、ドアの開閉に伴う遮蔽状態の違い、検出器-線源(建材)間のジオメトリーの違いなどである。地下街の中だけで見ると、 γ 線、宇宙線ともに顕著な変動はない。部分的に γ 線線量率が増動することはあるが、おもに内外装材が店舗ごとに異なることと地下空間の大きさが場所によって異なるためであろう。この測定コースは、居住地から都心への通勤や買物といった生活行動に対応するが、住宅地、地下鉄、駅、地下街と人工的な環境条件が変化するにつれて複雑な線量率変動があることを示している。

Fig. 2は銀座の歩道上での線量率分布である。狭い地域内では、屋外での宇宙線線量率はほとんど変動しない。一方、 γ 線線量率は、歩道上で高く交差点で低くなるという周期的な上下変動を示す。また、交差点が大きいほど変動量も大きい。これは、歩道や周辺ビルの建材(コンクリートや花崗岩系の岩石が主体)に含まれる天然放射性核種濃度が、車道の建材(アスファルトが主体)に

含まれるものより高いためである。交差点内では、より強い線源である歩道やビルから遠ざかり、それに従って線量率が下がっている。モンテカルロ計算コード²²⁾による計算では、均一な半無限体積線源上1 mの地点における γ 線線量率の約70%が半径5 m以内にある線源からの寄与である。すなわち、線量率レベルの異なる複数の環境が混在している場合でも、一つの環境が10 m程度の大きさをもっていれば、その環境からの影響が支配的となる。建物、壁等地面からの立ち上がりがある場合にはさらにその影響が強調され、Fig. 2に示すような局部的変動が生ずる。

Fig. 3は代々木公園および明治神宮における線量率分布である。Fig. 2と同様にこの場合も屋外なので、宇宙線線量率はほとんど変動しない。一方 γ 線線量率は、代々木公園内芝生上で約13 nGy/h、歩道上および参道(砂利敷き)で30~35 nGy/h、参道内の橋、本殿前、神宮橋など花崗岩系岩石と思われる建材で造られた物の上では70~90 nGy/hと、狭い地域内での測定であったにもかかわらず大きな変動を示す。芝生上での値がこの付近の本来の地質(もともとの自然環境)を代表していると考えれば、地面上に築かれた人工建造物によって70 nGy/h以上の線量率上昇がありうることを示している。

Fig. 4に、電車内測定の一例として西武新宿-所沢-池袋(西武新宿線・池袋線)における線量率分布を示す。駅やデパート内で γ 線が高く宇宙線が低くなる傾向があるが、この原因はFig. 1~3の例と同じで、コンクリート等の建材が γ 線については線源として、宇宙線については遮蔽体として働くためである。一方、走行電車内ではどちらもほぼ一定値を示した。この電車路線の走行する郊外地域は、都心に比べて高層ビル等による局所的な変動要因が少なく、比較的自然な状態に近い環境である。

したがって高架、切通し、トンネルのような部分的・人工的条件がなければ、ほぼその走行地域に対応する値を示すものと考えられる。

この路線を含めて、JR11、私鉄 18、地下鉄 10 の路線で行った電車内線量率分布を **Fig. 5** に示す。JR お

よび私鉄はおもに郊外の地上を走行する。また地下鉄は主に地下（トンネル内）を走行する。走行形態の似ている JR と私鉄とは、 γ 線、宇宙線ともにほぼ同程度の線量率値を示し、地下鉄での値とは異なる。 γ 線線量率については、JR および私鉄より地下鉄のほうが高い。こ

れは、線源としての周辺物質が下方だけでなく上方にも存在するという線源ジオメトリの違い、周辺物質の違い（土とコンクリート）による放射性核種濃度の違いなどによるものである。路線ごとの線量率の違いは走行地域の土地利用や地質の差に起因するところが大きい。一方、宇宙線線量率については、地下走行部分の長い地下鉄の方が低い。これは、土、建材等の上部遮蔽物により宇宙線が減衰するためである。東京の地下鉄は、新しい路線ほどトンネル深度が深い傾向がある。その結果、宇宙線線量率も半蔵門線など新しい路線ほど低い傾向が見られる。

Fig. 6 は、車により測定した都内主要道路上における線量率分布である。図中の各点は、走行測定地域を2 km四方のメッシュに分け、そのメッシュ内の通過経路での平均 γ 線線量率を示したものである。したがって、必ずしもそのメッシュ全体の代表値を示すものではなく、場合によっては道路建材の影響のような局所的な特徴を強調してしまうこともあるが、全体的な傾向を把握する上では有益な情報となる。全体的な傾向として、都心部と西部地域で比較的高く、東部地域で低い傾向が見られる。都心部で比較的高い値を示しているのは、道路周辺の建造物からの寄与という都市環境の特徴によるものである。郊外での値は、道路という人工環境の寄与も含まれているが、その地域の平均的地質をある程度示している。また北東部に連続的に高い値が示されているが、これは常磐高速道路上での値であり、道路建材の影響を表している。

東京都の環境放射線レベルは、地表面が厚い関東ローム層で覆われているため比較的低い（10~30 nGy/h 程度）といわれている。しかし実際には、人工環境の存在により線量率が2倍以上に高められる場合や、逆に1/2以下に下がる場合など、複雑な変動特性を示している。

IV 生活環境放射線場の変動要因とその程度

Ⅲ. に述べたような実地調査結果を基に、生活環境放射線場の変動要因およびその程度についてまとめる。

場所・環境条件の変化による γ 線線量率変動の様子を**Fig. 7**に示す。ここに示した値は、原則として今回の調査で観測されたものである。条件によっては変動幅が変化することはいうまでもなく、この程度の変動がありうるという目安として認識されたい。 γ 線線量率の変動要因を整理すると、大きく、(1) 周辺物質中の天然放射性核種濃度(放射能レベル)の違い、(2) 線源としての周辺物質の分布・配列、(3) 測定場所と線源間の遮蔽状態、の三つに分けられる。とくに屋内や歩道上で見られるように、

Fig. 6 東京都内主要道路上における線量率分布

建材等周辺物質に含まれる放射性核種濃度が変化することに伴う線量率変動のケースが多い。またこのような場所の多くは不連続に並んだ建造物によるため、建材とともに構造、外形も変化し、線源分布や線源に対するジオメトリの変化による変動も同時に伴う。また、エレベータ、車両等金属による遮蔽に起因する変動とともに、満員電車内での人体による相互遮蔽という場合もある。

一方、宇宙線線量率については、標高や緯度の上昇によってレベルが上昇することはあるが、人工環境の存在によって上昇することはない。レベルが変動（下降）する場合は、何れも上部にビル、土等の厚い遮蔽物が存在するような環境下である。**Fig. 8**に、同一場所における γ 線線量率および宇宙線線量率の変動の様子を示す。上述したように、宇宙線線量率は上部遮蔽体による減衰のみを示し、 γ 線線量率は三つの変動要因の程度に応じて幅広い変動を示す。一般的に、人工環境下では宇宙線線量率は下がる傾向が、 γ 線線量率は上がる傾向が見られる。

今回の調査データのうち、線量率のとくに高い例および低い例を**Table 2**に示す。宇宙線の高い例は人工環境と関係ないため省く。総じて γ 線線量率は地下街、ビル内等で高い。これは建材中放射性核種濃度が高いことと、床および天井にはさまれているというジオメトリ条件による。また低い値は川の上すなわち水で地殻 γ 線が遮蔽されるような条件下で観測された。水上以外での場合では、郊外で約8 nGy/hの場所があった。宇宙線線量率は、地下鉄トンネルなど上方に厚い遮蔽体がある場合に低い。半蔵門線永田町駅および千代田線国会議事堂前駅は、営団地下鉄路線内でも最も深い位置（36~38 m；他の駅は6~24 m）にあり²¹⁾、深度と宇宙線線量率との関係を裏付けている。

Fig. 7 環境条件による γ 線線量率レベルの変動とその要因

γ 線線量率の変動の主要因は次の三つ。①周辺物質中放射性核種濃度の違い (放射能レベル), ②線源としての周辺物質の配列・分布の違い (線源分布), ③放射線の遮蔽状態の違い (遮蔽状態)。

Table 2 観測した線量率の高い例および低い例

	ガンマ線 (nGy/h)	宇宙線 (nGy/h)
高い例	104 池袋地下街 101 八重洲地下街 97 T デパート	—
低い例	3 矢切の渡 6 鉄橋 8 郊外走行中電車内	2 半蔵門線永田町駅 2 千代田線国会議事堂前駅

V 集団線量評価上の考察

集団線量評価に環境放射線の変動を考慮する場合, 変動分の影響は, ① 変動の程度, ② その変動に出会う頻度と出会う人数, ③ その変動要因が存在する環境中に滞在する時間に応じて強くなる。日本人の平均的生活行動時間を見ると, 1 日の内屋外で 1~6 時間, 屋内で 18~

23 時間を費やしている⁷⁾。また Fig. 7 に示した変動では, 人工構造物の建材に関連のある物が主要な線量率上昇要因であることから, 滞在時間の長い住居やオフィスビル等での実態の把握が重要である。線量率のレベルはコンクリートより花崗岩系の岩石のほうが高いが, 日本には花崗岩製の住居は多くなく, 居住人口の多いコンクリート建屋に関するデータの入手が望まれる。

Fig. 8 同一場所における γ 線および宇宙線線量率の変動

コンクリート、花崗岩などの建材は、一般に放射性核種濃度が高く従って線量率も高い（母材に放射性核種の低い砂等を用いたコンクリートの場合には低線量率を示すこともある）という側面とともに、重量物であるために外部放射線に対しての遮蔽体としての側面ももつ。したがって、このような屋内での γ 線線量率は屋外値とまったく関係のない値を示すこととなる。そのため、関東地方のように屋外バックグラウンド線量率の低い地域では屋外よりもコンクリートビル内のほうが高いが、屋外バックグラウンド線量率の高い地方では逆にコンクリートビル内のほうが低いこともありうる。一方、木材など軽い建材は、一部の新材を除いて一般に放射性核種濃度が低く、遮蔽能力も小さいため屋内値と屋外値の間に相関関係が期待される。

屋外においては、通勤・通学形態による変動が重要である。東京都民が通勤・通学に費やす時間は平均約1時間⁷⁾であり、屋外活動の中でこれらが占める比重は高い。通勤・通学ではアスファルト、コンクリート、裸地など種々の環境条件を通過することなどから、単に居住地での屋外バックグラウンド線量率値を用いて被曝評価するだけでは不十分であろう。

通勤・通学や訪問、買物などに伴う移動に関連の深い電車内での線量率について考察するため、実測した各路線毎の平均線量率を年間乗車人数で荷重平均して、電車利用に伴う線量率を試算した。その結果、前述のように γ 線線量率は JR・私鉄（平均 17 nGy/h）より地下鉄（平均 34 nGy/h）が高く、宇宙線線量率は地下鉄（平均

12 nGy/h）より JR・私鉄（平均 30 nGy/h）が高いが、 γ 線と宇宙線の合計では JR、私鉄、地下鉄のいずれも 40~50 nGy/h とほぼ同じ値であった。この結果は、電車利用に伴う集団線量評価モデル作成上で興味深いことである。

以上述べたように、人工建造物をはじめとするさまざまな要因により、生活環境中自然放射線レベルは複雑に変動し、またその変動幅も広い。すなわち、ある1カ所での線量率を基にして一般人の環境中被曝線量を評価することは精度上不十分である。逆に、すべての変動要因・程度を考慮に入れ、1人1人について被曝線量を評価することも現実的ではない。緒言でも述べたように、線量変動解析により存在場所と放射線情報とを結合するとともに、人間の行動形態（どのような環境に1日何時間滞在するか）をモデル化することによって高精度かつ現実的な被曝線量評価が可能になると考える。

VI 結 語

東京都周辺における環境放射線の実地調査結果を基に、生活環境下における γ 線および宇宙線線量率分布の特徴について述べた。 γ 線線量率については人工建造物による変動が大きく、宇宙線線量率については地下やビルの下部において上部に存在する土、建材等による減衰が顕著である。これらの知識は人間の生活行動形態を考慮に入れた現実的な被曝評価モデルの構築上非常に有用なものとなる。今後はさらに実測データを蓄積するとともに、上述したような研究を進めることが必要とされよう。

参 考 文 献

- 1) 長岡 鋭, 坂本隆一, 堤 正博, 斎藤公明, 森内 茂; 保健物理, **23**, 309 (1988).
- 2) 長岡 鋭, 森内 茂; JAERI M 85-058 (1985).
- 3) H. HAYAKAWA; *Hoken Butsuri*, **22**, 47 (1987).
- 4) S. ABE et al.; *J. Nucl. Sci. Technol.*, **18**, 21-45 (1981).
- 5) 高田和正, 斎藤公明, 森内 茂; JAERI-M 84-101 (1984).
- 6) S. MINATO; *J. Nucl. Sci. Technol.*, **17**, 461-469 (1980).
- 7) 総理府統計局; 昭和 61 年社会生活基本調査, 日本統計協会 (1987).
- 8) 長岡 鋭, 坂本隆一, 堤 正博, 斎藤公明, 森内 茂; 日本原子力学会誌, **32**, 403 (1990).
- 9) 長岡 鋭, 坂本隆一, 堤 正博, 斎藤公明, 森内

- 茂；日本原子力学会誌，**32**，507（1990）.
- 10) S. MORIUCHI and I. MIYANAGA；*Health Phys.*，**12**，541（1966）.
- 11) S. MORIUCHI and I. MIYANAGA；*Health Phys.*，**12**，1481（1966）.
- 12) 宮永一郎，森内 茂；日本原子力学会誌，**9**，440（1967）.
- 13) 森内 茂，宮永一郎；日本原子力学会誌，**9**，518（1967）.
- 14) 森内 茂；JAERI 1209（1971）.
- 15) 森内 茂；JAERI M 7066（1977）.
- 16) 清水和明，熊原忠司，森内 茂；日本原子力学会「昭 59 年会」要旨集 F23（1984）.
- 17) 森内 茂，堤 正博，斎藤公明；保健物理，**25**，121（1990）.
- 18) K. YAMASAKI *et al.*；1038-1041, IRPA 6th International Congress, Berlin (West), May (1984).
- 19) 湊 進，高森和英，池辺幸正；名古屋工業試験所報告，**32**，14（1983）.
- 20) 長岡 鋭，斎藤公明，森内 茂；保健物理，**23**，201（1988）.
- 21) K. SAITO and S. MORIUCHI；*Radiat. Prot. Dosim.*，**12**，21（1985）.
- 22) 帝都高速度交通営団；'87 営団地下鉄ハンドブック（1987）.