

放医研住民線量評価システムで用いる計算アルゴリズムについて

2011.年 12月 2日
(独)放射線医学総合研究所
緊急時線量評価チーム

放医研で開発した外部被ばく線量評価システム（名称：福島第一原子力発電所周辺住民線量評価システム、以下「本システム」という。）では、県から住民に配布された問診票より得られる個人毎の行動記録を、システムに予め準備した一日ごとの線量率マップと照合することにより、平常時のバックグラウンドを除いた評価対象とする期間（2011年3月12日～7月11日の4ヶ月間）における積算実効線量を算出する。以下、本システムの計算アルゴリズムについて説明する。

1. 行動パターンについて

行動パターンは福島県が作成、配布、回収する問診票の記録を使用する。問診票は紙媒体であるが、本システムの線量計算に必要なデータは福島県立医大が電子化・匿名化を行い、放医研に送付する。図1に示す通り、問診票では一日の時系列で記載を求めているが、先行調査及び基本調査では、一日自宅に何時間滞在したなど、（場所、時間、建物の造り）一日単位の行動パターンを基に線量評価を行う。ただし、今後、事故初期の一時間単位の線量評価の可能性を残すために、3月12日から3月16日までは一時間ごとの入力データとする。

区分 月日	滞在 場所	時 刻						地名・施設名
		0	3	6	9	12	15	
記 入	屋内	①			④			① 自宅 ② 自宅の畑 ③ 車内 ④ 避難所
	移動	③			④			
例	屋外	②(80分)			⑤(120分)			⑤ ○○市××中学校 □ ⑤ ○○市××町字△△

図1：問診票の行動パターン例

(<http://www.pref.fukushima.jp/imu/kenkoukanri/monshin.pdf>)

2. 積算実効線量計算方法について

活動した場所に応じた一日毎の線量を以下の式から計算する。

① 居住場所屋内での線量：

= 居住場所が位置する領域の当該日の屋外の線量率(μ Sv/h) × (居住場所屋内での活

動時間) × 建物の造りによる線量低減係数^{*1}

*1: 本システムで用いる線量低減係数

・国際原子力機関 (IAEA) で設定された沈着した放射性物質のガンマ線による被ばくの低減係数 (表 1) を用いる。(出典: “Planning For Off-Site Response to Radiation Accidents in Nuclear Facilities”, IAEA-TECDOC-225)。実際には、居住場所及び通勤・通学先については建物の構造を問診票で尋ねているため、1) 屋外: 1.0、2) 平屋あるいは 2 階建てコンクリート建屋屋内: 0.2、3) 鉄筋/鉄骨鉄筋コンクリート 3 階建て以上建屋: 0.1 (表 1 の 0.05 を保守的に丸めた。)、4) それ以外の建屋 (例: 平屋あるいは 2 階建て木造建屋屋内): 0.4 の 4 つの係数を用いる。その他の外出先等については、1) 屋外: 1.0、2) コンクリート建屋屋内: 0.2、3) それ以外の建屋: 0.4 の 3 つの係数を用いる。文科省公表の積算線量算出においても屋内は一律 0.4 (平屋あるいは 2 階建ての木造家屋) としている。

・表 2 に浮遊放射性物質のガンマ線による被ばくの低減係数を示す。プルームが通過したと考えられる事故初期は浮遊放射性物質の影響を考慮し、浮遊放射性物質に対する係数を使用する必要がある。(例えば、屋外: 1.0、屋内 0.9 (木造家屋) とするなど。) しかし、線量評価に浮遊放射性物質と沈着放射性物質の低減係数を導入するためには、それぞれの物質による線量寄与の割合を評価する必要がある。後述する線量率マップでは、それらの寄与割合の情報を含んでいないため、線量低減係数については沈着した放射性物質のガンマ線による被ばくの低減係数 (表 1) を用いることとした。

② 居住場所屋外での線量:

= 居住場所が位置する領域の当該日の屋外の線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) × 居住している場所周辺屋外での活動時間 (h)

③ 外出先屋内での線量:

= 外出先が位置する領域の当該日の屋外の線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) × 外出先屋内での活動時間 (h) × 建物の造りによる線量低減係数

④ 外出先屋外での線量:

= 外出先が位置する領域の当該日の屋外の線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) × 外出先屋外での活動時間 (h)

⑤ 移動元から外出先(移動先)までの移動中の線量:

今回の行動調査では、行動パターン入力が煩雑になりすぎることを考慮し、移動経路の質問は行っていない。そのため、本線量評価では、「移動元が位置する領域の線量率」と「外出先が位置する領域の線量率」の平均値に移動時間をかけることで移動中の線量を評価する。

③から⑤については、複数入力されていれば、その分が加算される。ただし、本システムで1日に扱える外出は、任意の8箇所（屋内／屋外）及びそれらの間の移動となる。8箇所を超える場合には、外出時間および移動時間の合計が長い行動を選択する。

上記、①から⑤の合計が一日の線量となり、調査期間における合算値が積算線量となる。

表1 沈着した放射性物質のガンマ線による被ばくの低減係数
(原子力安全委員会「原子力施設等の防災対策について」より抜粋)

場 所	低減係数
理想的な平滑な面上1m (無限の広さ)	1.00
通常の土地の条件下で地面から1mの高さ	0.70
平屋あるいは2階建ての木造家屋	0.40
平屋あるいは2階建てのブロックあるいは煉瓦造りの家屋	0.20
その地下室	0.10以下
各階が約450~900m ² の面積の3~4階建て建物1階及び2階	0.05
その地下室	0.01
各階の面積が約900m ² 以上の多層建築物上層	0.01
その地下室	0.005

表2 浮遊放射性物質のガンマ線による被ばくの低減係数
(原子力安全委員会「原子力施設等の防災対策について」より抜粋)

浮遊放射性物質のガンマ線による被ばくの低減係数

場 所	低減係数
屋外	1.0
自動車内	1.0
木造家屋	0.9
石造り建物	0.6
木造家屋の地下室	0.6
石造り建物の地下室	0.4
大きなコンクリート建物 (扉及び窓から離れた場合)	0.2以下

3. 線量率マップについて

本システムで得られる積算線量の精度は、行動についての記憶とともに、線量率マップの確かさに大きく左右される。放出源や気象条件などに関する最新の正確なデータに基づくマップを作成して適宜これを更新していくことは、信頼に足る線量評価を行う上で極めて重要である。

福島県の健康管理調査のうち、先行調査（対象約2万8千人）及び基本調査（対象約200万人）においては、1日毎の線量率マップに基づく評価を行うこととする。3月12日から14日まではMELCOR（原子力安全・保安院）によるソースターム計算結果を用いたSPEEDI（原子力安全技術センター）の評価結果^{*1}を基に作成したマップにより、また3月15日以降は文科省公表のモニタリングデータ^{*2}に基づくマップにより、それぞれ評価を行う。3月15日については3月16日のモニタリングデータを基に構築した線量率マップを用いる（参考1）。マップの空間メッシュサイズは国土地理院が定める二次メッシュ（経度：7.5分、緯度5分）を5分割した領域：約2km四方とする。上述の線量率データから市販の地図情報処理ソフト（ESRI社製ArcGIS）を用いて、二次元空間分布を求め、各メッシュ領域の平均線量率を算出している。

文科省公表のモニタリングデータを基にした線量率マップの構築手順は以下のとおりである。

- 1) 8月2日に文科省より「文部科学省による放射線量等分布マップ（線量測定マップ）の作成について」で公表された実測値は各地点で連続的に測定されていないため、文科省の「積算線量推定マップ等」の作成において用いられた方法と同様に線量変化が最も急である地点の実測値との比を用いて全日の線量値に換算した。
- 2) 離散データであるモニタリングデータを「Natural Neighbor」法を用いて内挿
- 3) 定義した約2km×約2kmメッシュ領域毎にゾーン集計し、その平均値を算出する。
- 4) 文科省公表のモニタリングデータは周辺線量当量であるため、周辺線量当量から実効線量（成人）への換算係数0.6（参考2参照）を乗じる。
- 5) 本線量評価ではバックグラウンドの線量を除くため、福島県内の平常時のバックグラウンド0.03 μ Sv/hを差し引き、各メッシュ領域の当該日の線量率とする。

SPEEDIは、1時間毎の外部被ばく実効線量（成人）を、参考4に示す領域内（98km×98km）において、1km×1kmのメッシュで出力する。これらは上述した放医研システムの線量率マップメッシュ定義と異なるため、以下の手順で本システムにおいて使用可能な線量率マップを構築した。

- 1) SPEEDI出力結果を1日24時間で平均化。
- 2) 市販の地図情報処理ソフト（ESRI社製ArcGIS）を用いて、本システムのメッシュ定義で再構築。

参考4にモニタリングデータもしくはSPEEDIデータを基に線量率マップが構築可能

な領域を示す。文科省モニタリングデータを基に構築した線量率マップでは、モニタリングデータのない海岸付近および福島県内の新潟県との県境付近では、線量率を算出することができない。これらのメッシュ領域では西隣もしくは東隣のメッシュ領域の線量率を線量評価に用いる。よって、3月15日以降について、本システムで線量評価可能な領域は、参考4に示す福島県全域及び隣接四県（宮城、山形、栃木、茨城）の一部である。3月12日から14日については、SPEEDIが計算可能な領域が本システムで線量評価可能な領域となる。また、これらの領域外に滞在中の線量は加算しない。

*1：住民の被ばく線量推定のためのSPEEDIによる計算の実施について

(<http://www.meti.go.jp/press/2011/06/20110628007/20110628007.html>)

*2：東京電力株式会社福島第1及び第2原子力発電所周辺の放射線量等分布マップ

このデータには文科省測定データのみにならず、福島県が測定したデータも含んでいる。

(http://radioactivity.mext.go.jp/ja/distribution_map_around_FukushimaNPP/)

参考 1: 3月15日の線量マップについて

- ・図2に、文科省公表の一日毎のデータ及び福島県公表のモニタリングデータを示す。(3月15もしくは16日から測定データのある地点)
- ・表3に、モニタリングデータから算出した3月15日の平均線量率と文科省公表データの3月16日の平均線量率の比較を示す。(当該測定時から次の測定までの時間において、当該測定時の線量率が継続すると仮定して算出。)
- ・いわき(原発南方向)、川内村(原発南西方向)、南相馬(原発北方向)を除き、線量の増加は、3月15日正午過ぎからであり、ブルーム通過に起因する明確なピークを形成する成分はなく、12時間以上は $0.1\mu\text{Sv/h}$ 程度である。また、表4に示す通り、文科省公表データの3月16日の線量率は、モニタリングデータから算出した3月15日の平均線量率より高い値であり、3月15日の線量として3月16日の線量を補正なしで用いても、過小評価にはつながらない。
- ・南相馬は12日から線量の増加があり、他の地域に比べ15日0時での線量が高い(約 $2.5\mu\text{Sv/h}$)。また、15日夜に最大約 $5\mu\text{Sv/h}$ にまで線量が増加するが、その後減少し、16日正午には $4\mu\text{Sv/h}$ になる。16-18日の間では、単調に減少し、18日0時の線量は約 $3\mu\text{Sv/h}$ である。よって、一日単位の線量率マップを構築することから考えると、表4からもわかるように、3月15日の線量として3月16日の線量を補正なしで用いても、過小評価にはつながらない。
- ・いわき、川内村では、SPEEDIの風速場とも一致し、15日未明から正午付近にかけ、明らかにブルームが到達したとみられるモニタリング結果が得られている。しかし、この成分を3月16日以降の土壌沈着から推定することはできない。
- ・いわきでは、現状のソースタームを用いたSPEEDI出力は、場所により $100\mu\text{Sv/h}$ を出力しており、モニタリングデータを大きく上回っている。このことから、SPEEDIの値をそのまま用いることは過大評価となる可能性がある。表4から、いわきでは、文科省公表データの3月16日の線量率は、3月15日のモニタリングデータから算出した平均線量率より、 $0.7\mu\text{Sv/h}$ 低い。しかしながら、15日の線量率として、文科省公表データの3月16日の線量率を用いた場合においても、最大 $18\mu\text{Sv}$ の過小評価にすぎない。
- ・川内村でもブルーム通過による線量のピークが見られる。このピークをもたらず風速場の時間において、設定しているソースタームでは放出が少ないためにSPEEDIの線量出力では再現できていない。表4から文科省公表データの3月16日の線量率は、3月15日のモニタリングデータから算出した平均線量率より、 $0.5\mu\text{Sv/h}$ 低い。しかしながら、15日の線量率として、文科省公表データの3月16日の線量率を用いた場合においても、最大 $12\mu\text{Sv}$ の過小評価にすぎない。
- ・上記より、15日の線量率マップとして、16日のモニタリングデータを用いた場合、原発南及び南西部において、周辺線量当量で最大約 $20\mu\text{Sv}$ の過小評価にとどまる。この値は、実際の行動パターンに基づく低減係数、及び、実効線量への変換により、さらに小さ

くなる。これらから、3月15日の線量率マップは、文科省公表の3月16日のモニタリングデータをそのまま用いて構築することとする。

表 3: モニタリングデータから算出した3月15日の平均線量率と文科省公表データの3月16日の線量率の比較

測定地点	モニタリングデータ から算出した 3月15日の 積算線量 [μ Sv]	モニタリングデータ から算出した 3月15日の 平均線量率 [μ Sv/h]	文科省公表データ から算出した 3月16日の 積算線量 [μ Sv]	文科省公表の 3月16日の 線量率 [μ Sv/h]
福島市紅葉山局	117	4.9	384	16
県北保健福祉 事務所（福島市）	167	7.0	442	18.4
飯館村役場	287	12	590	24.6
田村市総合体育館	4.3	0.2	7.7	0.32
南相馬合同庁舎 駐車場	72	3.0	96	3.99
川内村役場	51	2.1	39	1.64
いわき合同庁舎 駐車場	109	4.5	91	3.81

*: 値は周辺線量当量である。

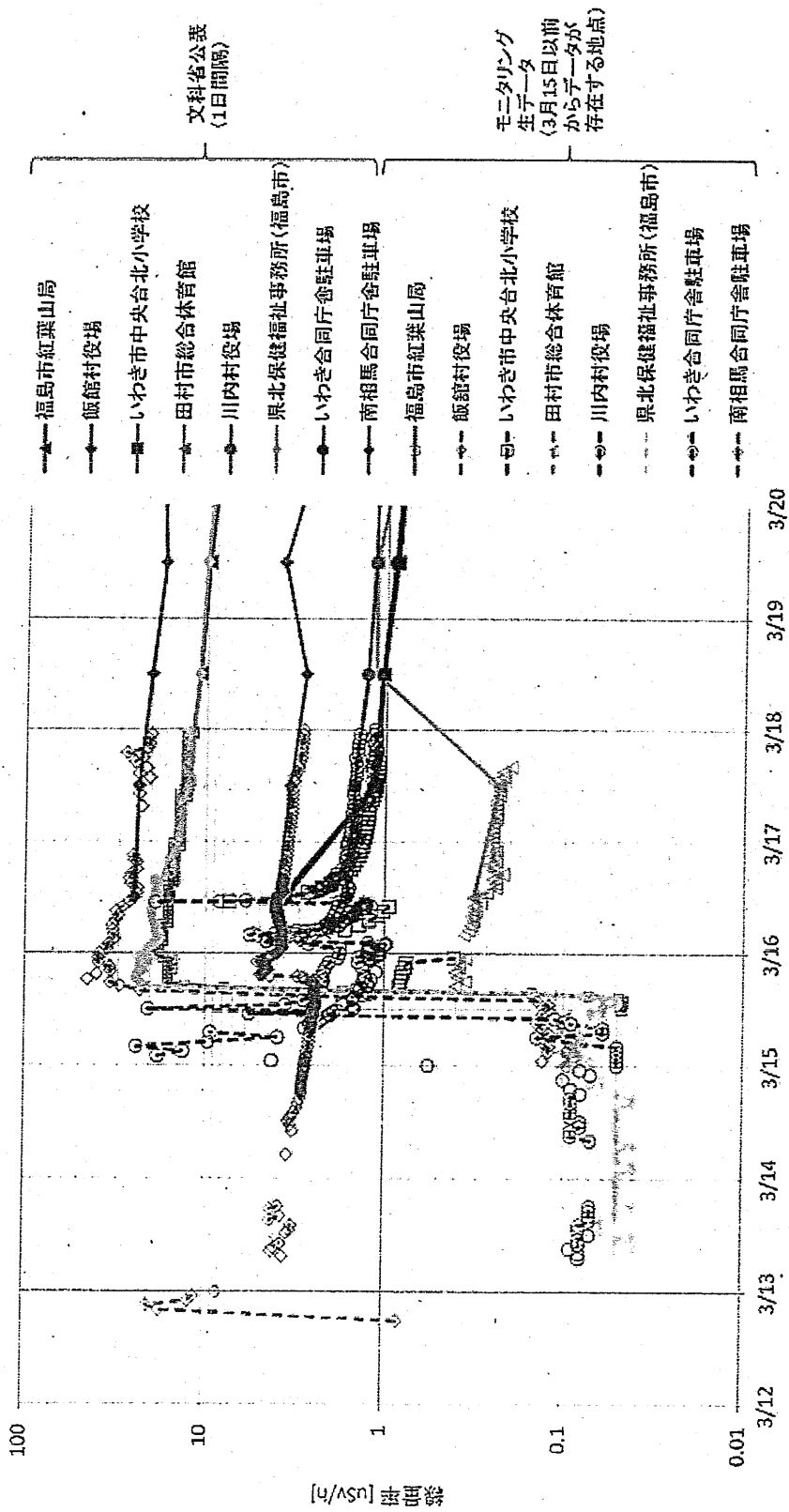


図2：文科省公表の一日毎のデータのモニタリングデータ及び福島県公表のモニタリングデータ (3月16日以前から測定データのある地点)

参考 2: モニタリングデータの実効線量への換算について

1. はじめに

放医研線量評価システムでは、成人の実効線量として実効線量を評価する。SPEEDI の出力は ICRP60 定義の成人の実効線量 (E) であり、一方、モニタリングデータは周辺線量当量 ($H^*(10)$) である。図 3 に光子エネルギーを関数とした空気カーマあたりの周辺線量当量及び等方照射における実効線量 (0 才、5 才、10 才、15 才、成人) を示す。定義上、周辺線量当量は実用量であり、実効線量は防護量であるため、周辺線量当量は実効線量より常に大きくなるよう設計がされている。ここでは、モニタリングデータ (周辺線量当量) を成人の実効線量に変換する換算係数を算出する。

また、図 3 に示す通り、年齢が低いほど、実効線量換算係数は高いことがわかる。つまり、周辺線量当量あたりの実効線量も年齢が低いほど高いこととなる。これは、体内に入射する放射線から臓器を遮蔽する上層組織の量が身体寸法の増加とともに増加するためである (参考文献 1)。本資料において、成人の実効線量換算係数と典型的な体型の小児に対する換算係数の比を与えることで、放医研線量評価システムの出力 (成人の実効線量) から、小児の実効線量へ換算する目安を与える。

最後に、ICRP60 と ICRP103 の実効線量の定義の違いに伴う実効線量換算係数の違いについて言及する。

2. モニタリングデータの実効線量への換算

モニタリングデータは、周辺線量当量: $H^*(10)$ であるので、モニタリングデータに周辺線量当量あたりの実効線量 ($E/H^*(10)$) を乗じることにより、実効線量へ換算する。参考文献 3 より、線量に起因する放射性核種は、事故初期では Xe-133, Te-132, I-132 が、その後は Cs-134, Cs-137 が主である。今回は、それらに I-131 及び Te-129m を加えた 7 核種について、実効線量換算係数、周辺線量換算係数及び周辺線量当量あたりの実効線量を求めた。手順は以下のとおりである。また、ここでは、等方照射による実効線量換算係数を用いる。

- 1) 周辺線量当量換算係数及び成人の実効線量換算係数は参考文献 1 を、0 才から 15 才の実効線量換算係数は参考文献 2 を用いて、 E/ϕ , $H^*(10)/\phi$ を算出する。
- 2) Log-Log 内挿により、各核種が放出するガンマ線エネルギーにおける E/ϕ , $H^*(10)/\phi$ を算出する。
- 3) 次の式を用いて、各核種の実効的な換算係数を算出する。

$$\sum \text{換算係数} \times \text{ガンマ線放出率} / \sum \text{ガンマ放出率}$$

- 4) 3) で算出した実効線量換算係数を周辺線量換算係数で割ることにより、モニタリングデータの実効線量への換算係数を算出する。

表 5 に算出したモニタリングデータの実効線量への変換係数を示す。また、表 6 に成人の実効線量に対する各年齢の実効線量の比を示す。

3. ICRP60 と ICRP103 の実効線量の定義の違いに伴う実効線量換算係数の違い

図4に、Voxelファントムを用いて評価された、ICRP60とICRP103の実効線量の定義の違いに伴う実効線量換算係数の違いを示す(参考文献4)。同じ図では、ICRP74で定義された換算係数も示されている。等方照射の場合、ICRP74ではMathematicalファントムを用いているにもかかわらず、それぞれの値はよく一致している。よって、本線量評価システムでは、ICRP60とICRP103における実効線量の定義の違いに伴う補正は行わないこととする。

4. まとめ

放医研線量評価システムでは、保守的評価にするため、表1に示した5核種のうち最も変換係数の大きい値:0.59を採用し、さらに小数第一位に丸めた“0.6”をモニタリングデータから算出した線量率マップに乗じることとする。また、成人と小児が同じ放射線場に晒されたと仮定した場合、小児の実効線量は成人の実効線量を1.1-1.4倍と見積もることができる。

表5: 周辺線量当量から成人の実効線量(等方照射)への変換係数

Xe-133	Te-129m	Te-132	I-131	I-132	Cs-134	Cs-137
0.44	0.58	0.48	0.53	0.59	0.58	0.57

表6: 等方照射における成人の実効線量に対する各年齢の実効線量の比

Nuclide	Age [year]			
	0	5	10	15
Xe-133	1.3	1.2	1.1	1.0
Te-129m	1.3	1.2	1.1	1.0
Te-132	1.4	1.2	1.1	1.0
I-131	1.3	1.2	1.1	1.0
I-132	1.3	1.2	1.1	1.1
Cs-134	1.3	1.2	1.1	1.0
Cs-137	1.3	1.2	1.1	1.0

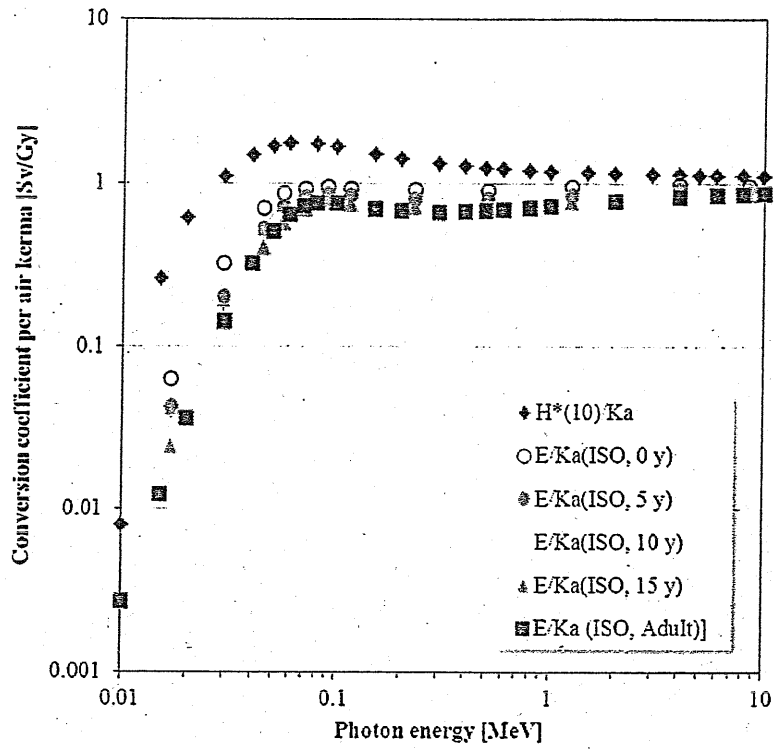


図3: 光子エネルギーを関数とした空気カーマあたりの周辺線量当量及び等方照射における実効線量(0才、5才、10才、15才、成人)(参考文献1,2)

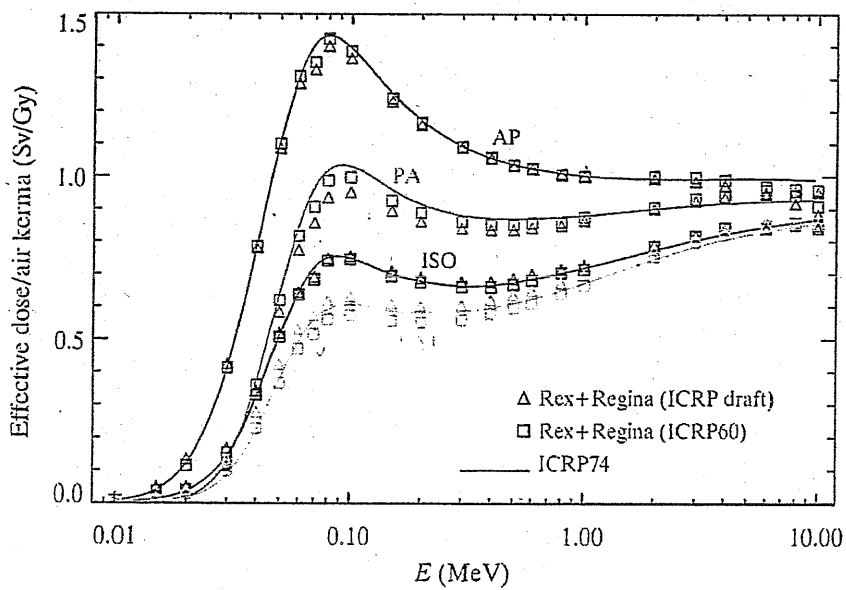


図4: ICRP60とICRP103でそれぞれ定義された実効線量による実効線量換算係数の違い(図中のICRP draftはICRP103で定義された換算係数を意味する。)(参考文献4)

補足：

ICRP は、空気中や土壌中の放射性物質からの照射などの特別な照射に対する実効線量換算係数を示していない。そこで、ここでは参考文献5で求められている空気中及び土壌中の放射性物質からの実効線量換算係数とICRP74の換算係数の比較を行う。図5に各照射方法における換算係数の比較を示す。図からわかるように、空気、土壌中からの照射による実効線量換算係数は、RLAT、LLAT、等方照射の値と類似している。その中で、等方照射はRLAT及びLLATよりも高い値を示すことから、保守的な評価を与えることとなる。また、表7に、空気中及び土壌中の放射性物質からの照射を仮定した場合の、周辺線量当量から成人の実効線量への変換係数をICRP74の等方照射を仮定した場合の結果と共に示す。この表から、本資料の本文で結論付けた周辺線量当量から実効線量への変換係数：0.6は、参考文献5の実効線量換算係数を用いて算出した場合とも一致する。

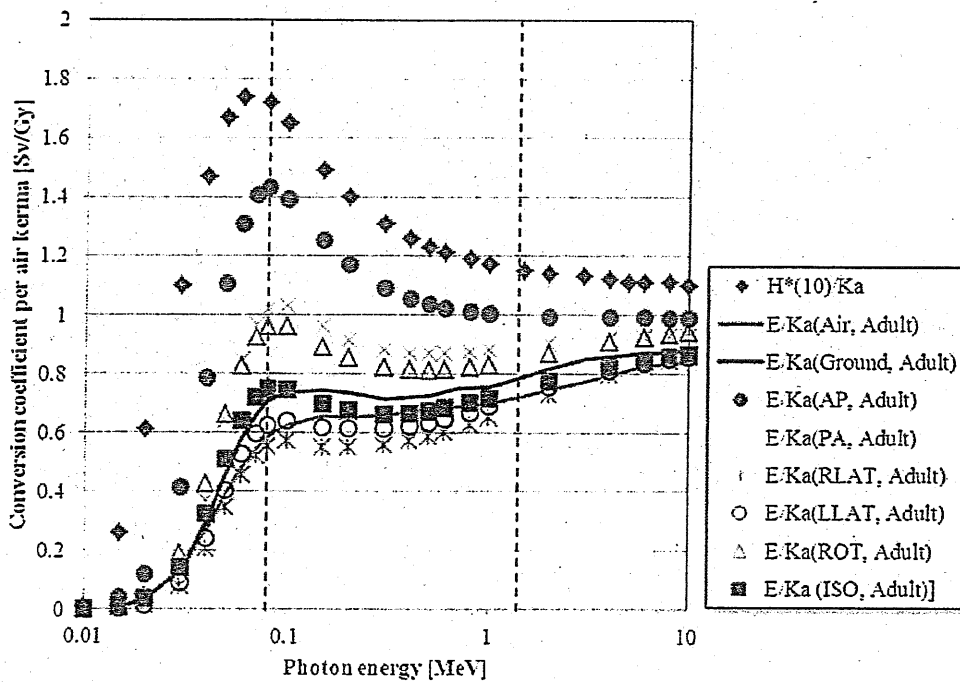


図5： 光子エネルギーを関数とした空気カーマあたりの周辺線量当量及び成人の実効線量(参考文献1, 2, 5) (点線で示す0.08から1.4MeVの領域が今回対象とする放射性核種の放出ガンマ線エネルギーである。)

表7： 周辺線量当量から成人の実効線量への変換係数

Nuclide	Xe-133	Te-129m	Te-132	I-131	I-132	Cs-134	Cs-137
Ground	0.41	0.61	0.51	0.57	0.62	0.61	0.61
Air	0.34	0.57	0.46	0.52	0.58	0.57	0.57
ICRP74(ISO)	0.44	0.58	0.48	0.53	0.59	0.58	0.57

参考文献：

1. ICRP74: Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation (1998)
2. Y. Yamaguchi, "Age-dependent effective doses for external photons," *Radiation Protection Dosimetry*, 55 123-129 (1994)
3. 松村 他, "高速道路上のガンマ線測定により得られた福島第一原子力発電所から飛散した放射性物質の拡散状況," *日本原子力学会和文論文誌*, 10(3), 152-162 (2011)
4. H. Schlattl et al, "Organ dose conversion coefficients for voxel models of the reference male and female from idealized phantom exposures," *Phys. Med. Biol.*, 52, 2123-2145 (2007)
5. K. Saito et al., "Calculation of the effective dose and its variation from environmental gamma ray sources," *Health Physics*, 74(6), 698-706 (1998)

参考 3：福島県内平常時のバックグラウンド値について

本線量評価では平常時のバックグラウンド値を加算しない値を評価する。以下の福島県の公表データを基に、外部被ばく線量評価で用いるバックグラウンド値を決定する。

1. 福島県公表データ：

1) 環境放射能の監視測定 (<http://www.pref.fukushima.jp/nuclear/kanshi/>)

原子力発電所周辺環境放射能測定結果の評価結果（平成 23 年 2 月 23 日、福島県原子力発電所安全確保技術連絡会）(<http://www.pref.fukushima.jp/nuclear/kanshi/H22-3.pdf>)より

・福島県内の 23 地点（広野町 1 地点、楢葉町 4 地点、富岡町 5 地点、大熊町 5 地点、双葉町 4 地点、浪江町 4 地点）における空間線量率の過去の月間平均値：33~54 nGy/h

2) 環境放射能測定結果・検査結果関連情報・県内 7 方部 環境放射能測定結果

(<http://www.pref.fukushima.jp/i/7houbu492.pdf>)より、

・平常時の空間線量率 [μ Gy/h]

- ・福島市：0.04
- ・郡山市：0.04-0.06
- ・白河市：0.04-0.05
- ・会津若松市：0.04-0.05
- ・南会津町：0.02-0.04
- ・南相馬市：0.05
- ・いわき市平：0.05-0.06

2. 外部被ばく線量評価で用いるバックグラウンド値：

- ・1. のデータより、中間値と考えられる 0.04μ Gy/h を採用する。
- ・上記の空間線量率は空気カーマ率を意味している。よって、空気カーマから実効線量への換算係数である 0.75^* を適用することにより、福島県内の平常時のバックグラウンド値は、実効線量率で 0.03μ Sv/h とする。

*：空気カーマから実効線量への変換係数は、参考 2 に示す等方照射における成人の実効線量換算係数を仮定した。参考 2 と同様の算出方法により、最も保守的である Xe-133 の換算係数 0.75 を採用した。

参考 4：使用する線量率マップ

外部被ばく線量評価に用いる線量率マップを図 7 から図 11 に示す。ここで、3月 12～15 日は 1 日毎、以降は 5 日毎のマップとしている。

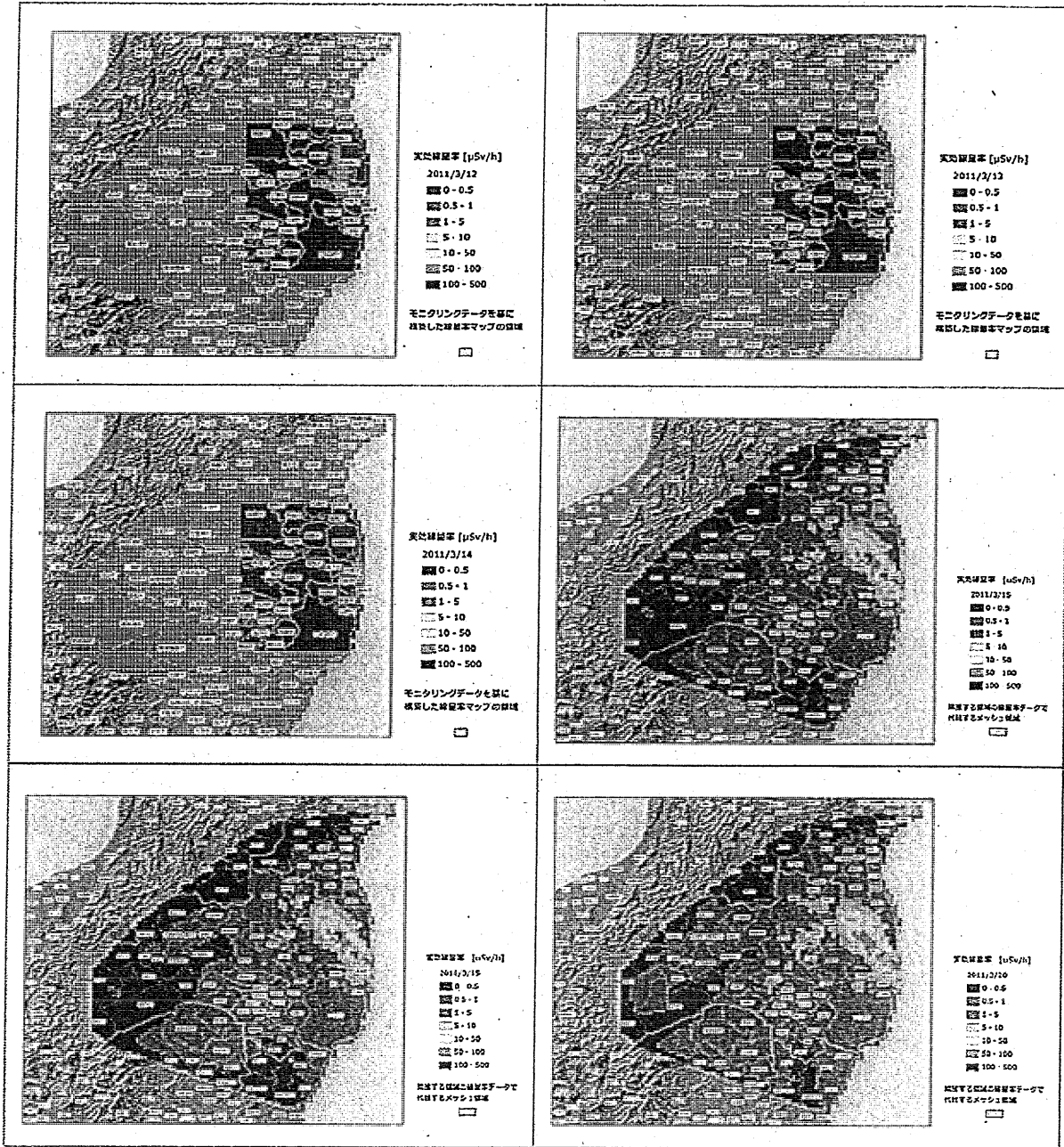


図 7. 先行調査における外部被ばく線量評価に用いる予定の線量率マップ (3月 12日～25日；12～15日は 1日毎、以降は 5日毎)。

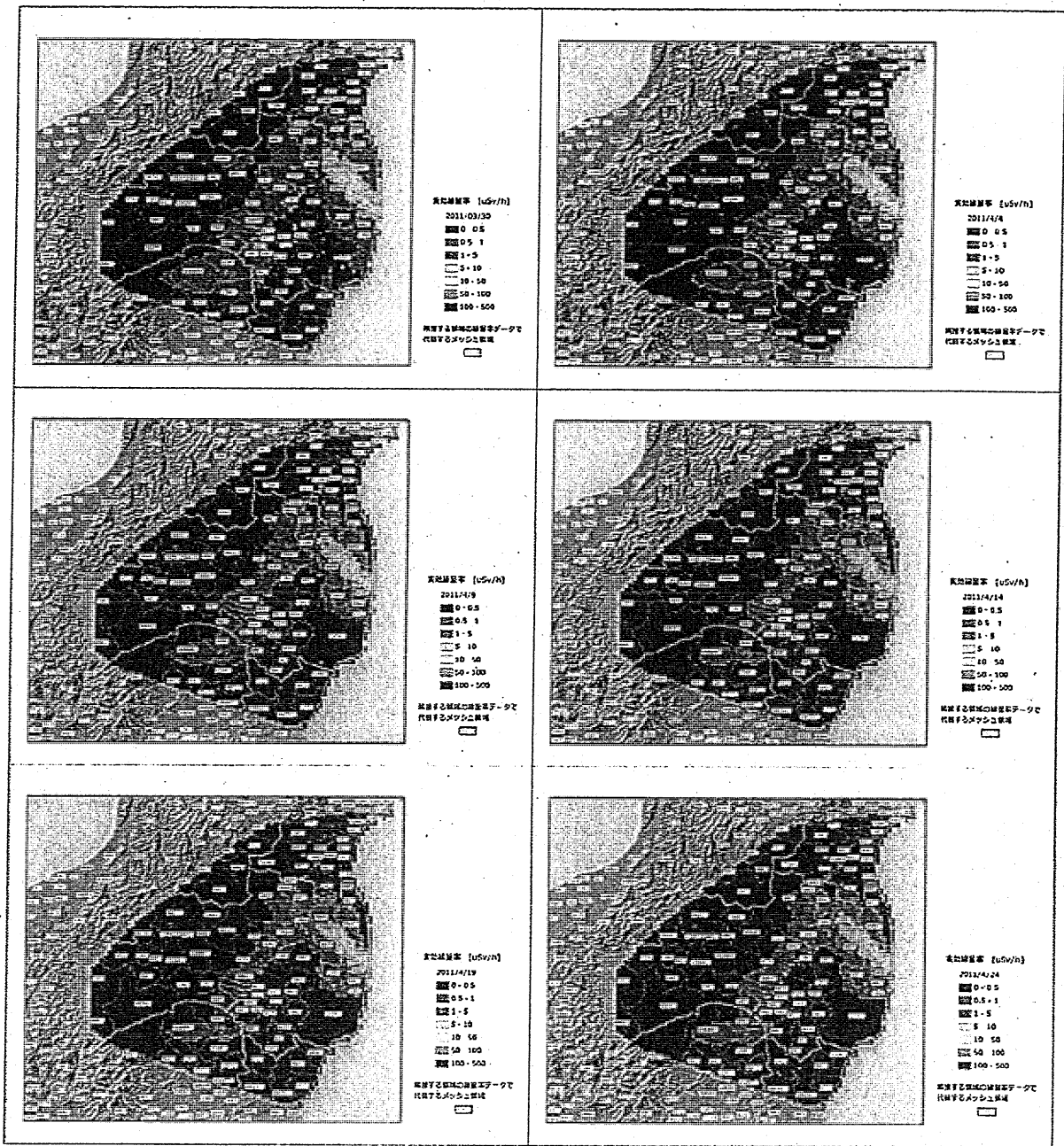


図 8. 先行調査における外部被ばく線量評価に用いる予定の線量率マップ (3月30日～4月24日；5日毎).

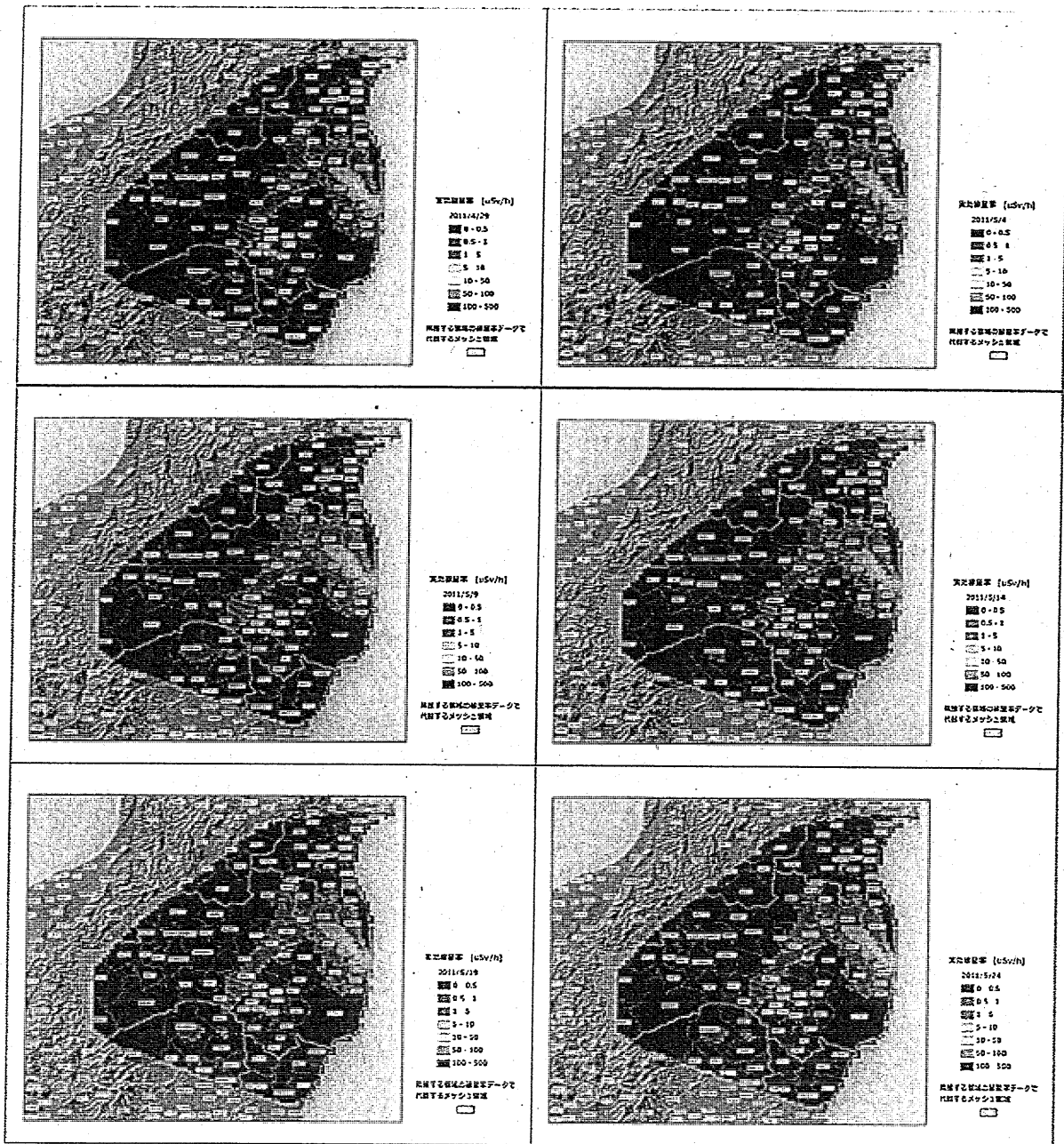


図9. 先行調査における外部被ばく線量評価に用いる予定の線量率マップ
(4月29日～5月24日；5日毎).

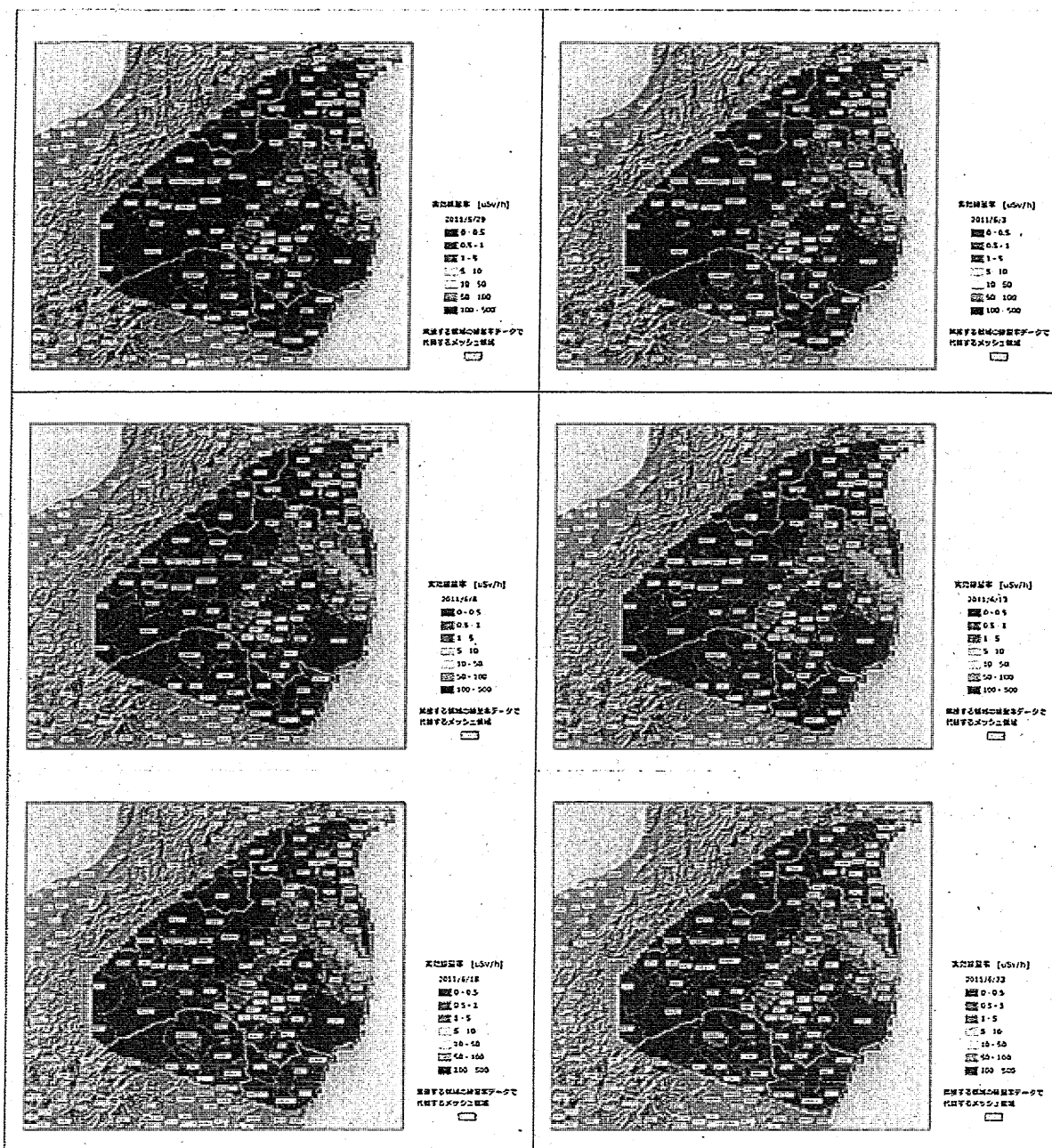


図 10. 先行調査における外部被ばく線量評価に用いる予定の線量率マップ
(5月29日～6月23日；5日毎).

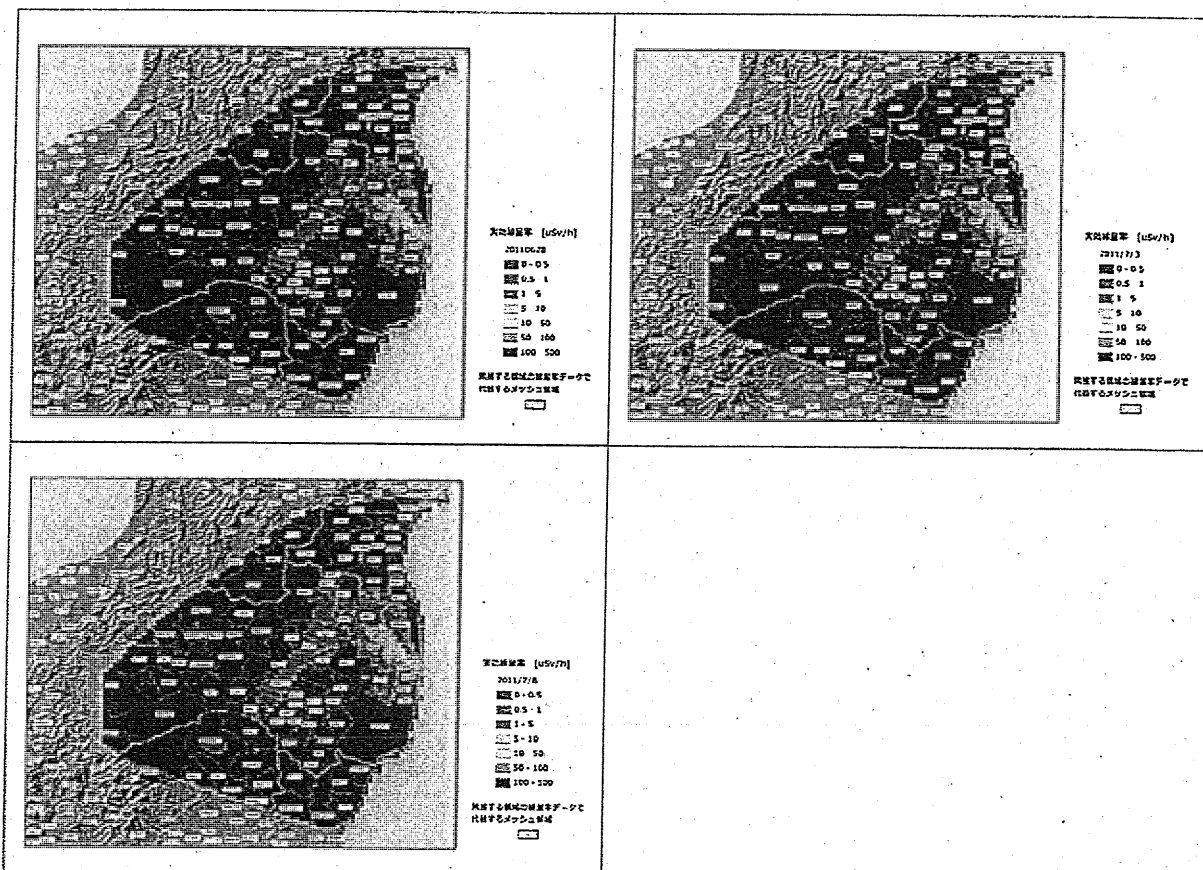


図 11. 先行調査における外部被ばく線量評価に用いる予定の線量率マップ (6月28日～7月8日; 5日毎).