

# 福島第一原子力発電所の事故 で放出された広く分布した放射 性核種の評価へのEGS5の応用

高エネルギー加速器研究機構

平山 英夫

# 福島第一原子力発電所の事故

- 多くの国民が放射線とその影響に関心を持つように
- 線量、放射線防護の考え方は、判りにくい
  - 3つの概念で使われるシーベルト
    - 実効線量
    - 等価線量
    - 実用線量(周辺線量当量、1cm線量当量)
  - 「放射線防護に用いられる線量概念」 日本原子力学会誌 2013年2月号 (KEK Preprint 2012-44)
- 事故に伴い環境に放出された放射性核種による場
  - 放射線測定や管理の専門家でも理解が十分ではない
- 事故に伴う放射線場や計測、放射線防護について必要な情報を提供することが重要

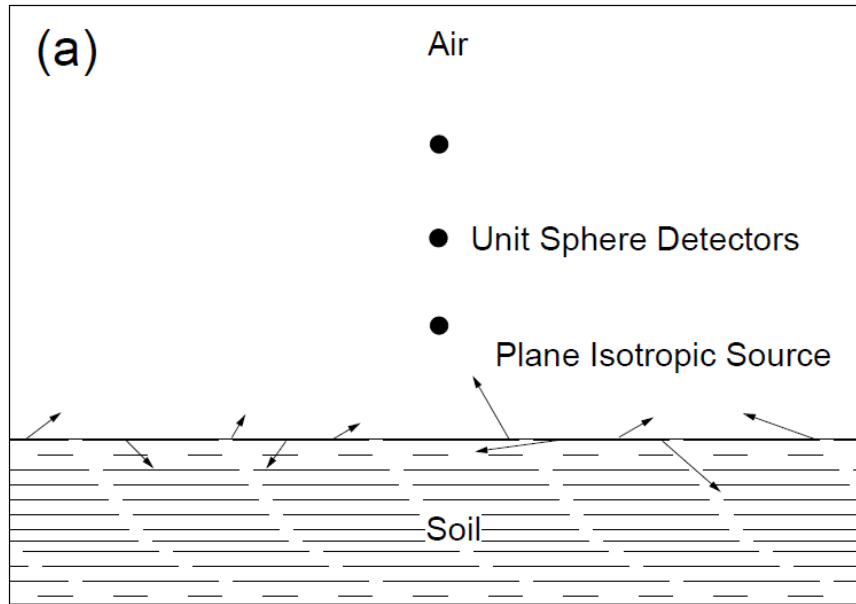
# 福島第一原子力発電所の事故に伴う放射線場

- 通常の放射線作業環境との違い
  - － 広く分布した放射性核種による放射線が対象に
  - － 面又は体積線源は、点線源と異なり距離への依存性が直感的に理解しにくい
    - 空気がなければ、密度が薄くても無限に広がった線源による線量は、無限大となる
- 線量率や被ばくを考える上では、広く分布した放射性核種による放射線場を評価することが不可欠

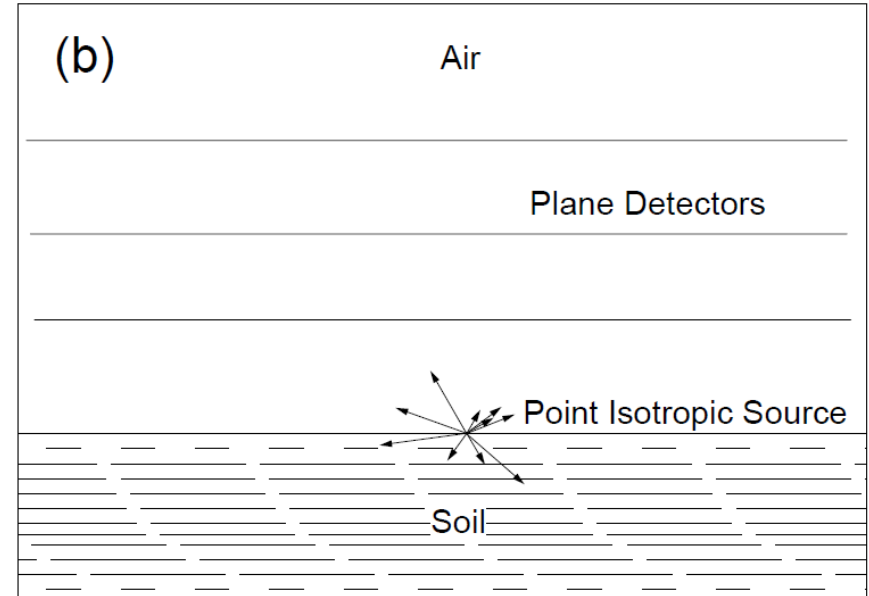
# 地表に広く分布した放射性核種による 放射線場の評価

- 広い領域に分布した線源による計算は容易ではない
  - モンテカルロ計算で行うことは可能だが、非常に効率が悪い計算となる
  - SN計算では、地表面近く( $\sim 1\text{m}$ )でRay effectの影響が大きい
- 「面等方線源からのガンマ線束を線源と検出器を置き換える」手法をモンテカルロ計算に適用することにより、効率良い計算が可能に
  - Namito et. Al., J. Nucl. Sci. Technol, 49, 167-172 (2012) (KEK Preprint 2011-13)

# 面等方線源を点等方線源と面検出器に置き換える手法



Original problem



Trans-formed problem

- ・点等方線源から放出された放射線を無限広さの面検出器で評価すれば、無限に広がった面等方線源による放射線場を効率よく計算できる。
- ・面検出器の領域を制限することにより、有限な面線源からの放射線場を評価できる。

# 手法の妥当性（実測値との比較）

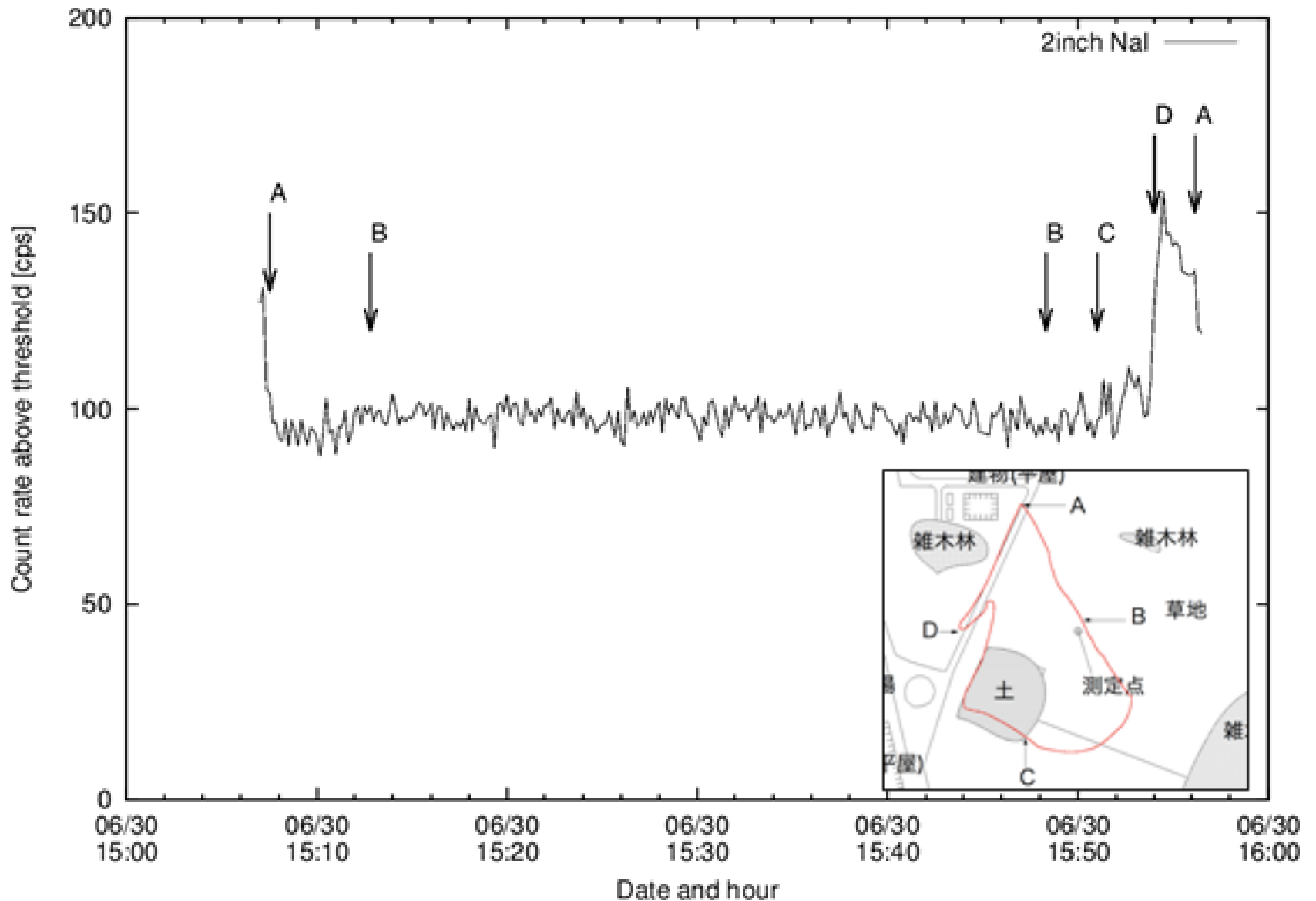
- 手法の検証は、欧文誌に示されているが、測定値との比較（線量等の積分量ではなく、スペクトルの様な微分量）により妥当性を検討することが必要
  - 可能な限り、一様な密度でセシウムが広く分布した場所での測定
  - 検出器の大きさや構造に不確かさが少ないもの NaI(Tl) 検出器
  - 検出器の波高分布を比較
    - unfoldingによる影響を避けるため
- 「モンテカルロコードegs5を用いた地表に広く分布した放射性物質による地表1mでのガンマ線スペクトルの評価」 日本原子力学会和文論文誌Vol.12, No.3 (2013.9.01発行予定) (KEK Preprint 2013-5)

# 測定場所

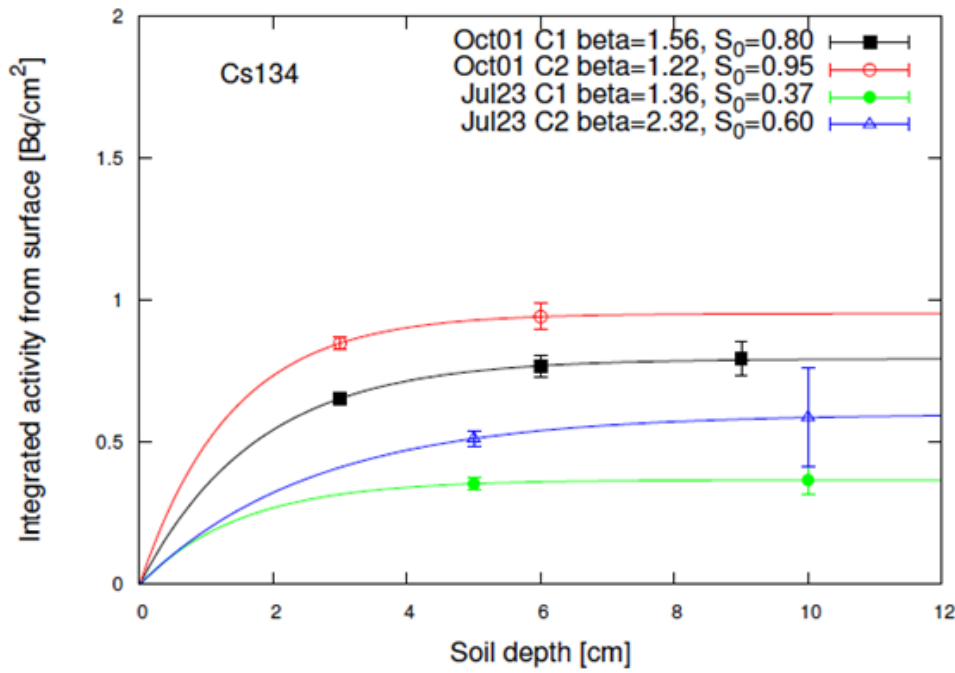
- 計算結果と比較する測定を行うのに望ましい場所
  - － 広い平坦な場所で、樹木等地表面以外に線源がない
  - － 土壌の密度、地表面の放射能密度と地中への沈着状況が測定可能である
  - － 地表面の放射能密度にばらつきが少ない
  - － 自然放射能による波高分布が無視できるか、同じ場所で、同じ型の検出器による事故前から存在する天然核種（バックグラウンド）による測定値がある
- 実験のような理想的な場所はない
  - － KEKの南側グラウンド
  - － 平坦な広い場所で、事故前の波高分布の測定値は無いが、KEK内のモニターハウスでの測定値から推定が可能
  - － グラウンドなので、土壌の放射能測定等が可能





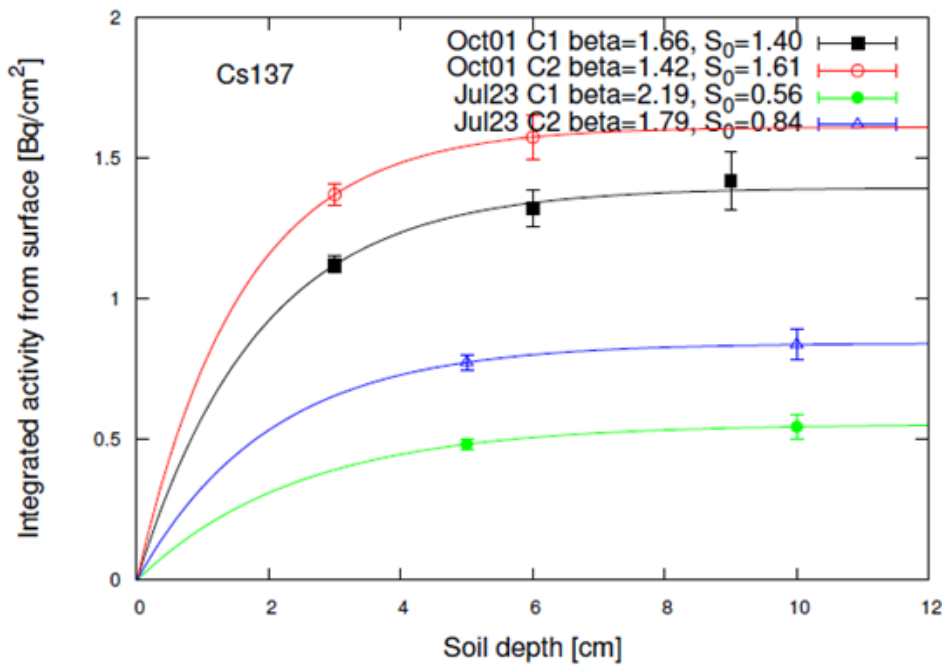


バックグラウンド計数率は、50 cps程度。アスファルト路面(D→Aの領域)での上昇を考慮に入れてもグラウンド周辺のセシウムによる線量率はおおむね2倍程度の範囲に収まっている。



$$I(t) = S_0(1 - \exp(-t \cdot \rho / \beta))$$

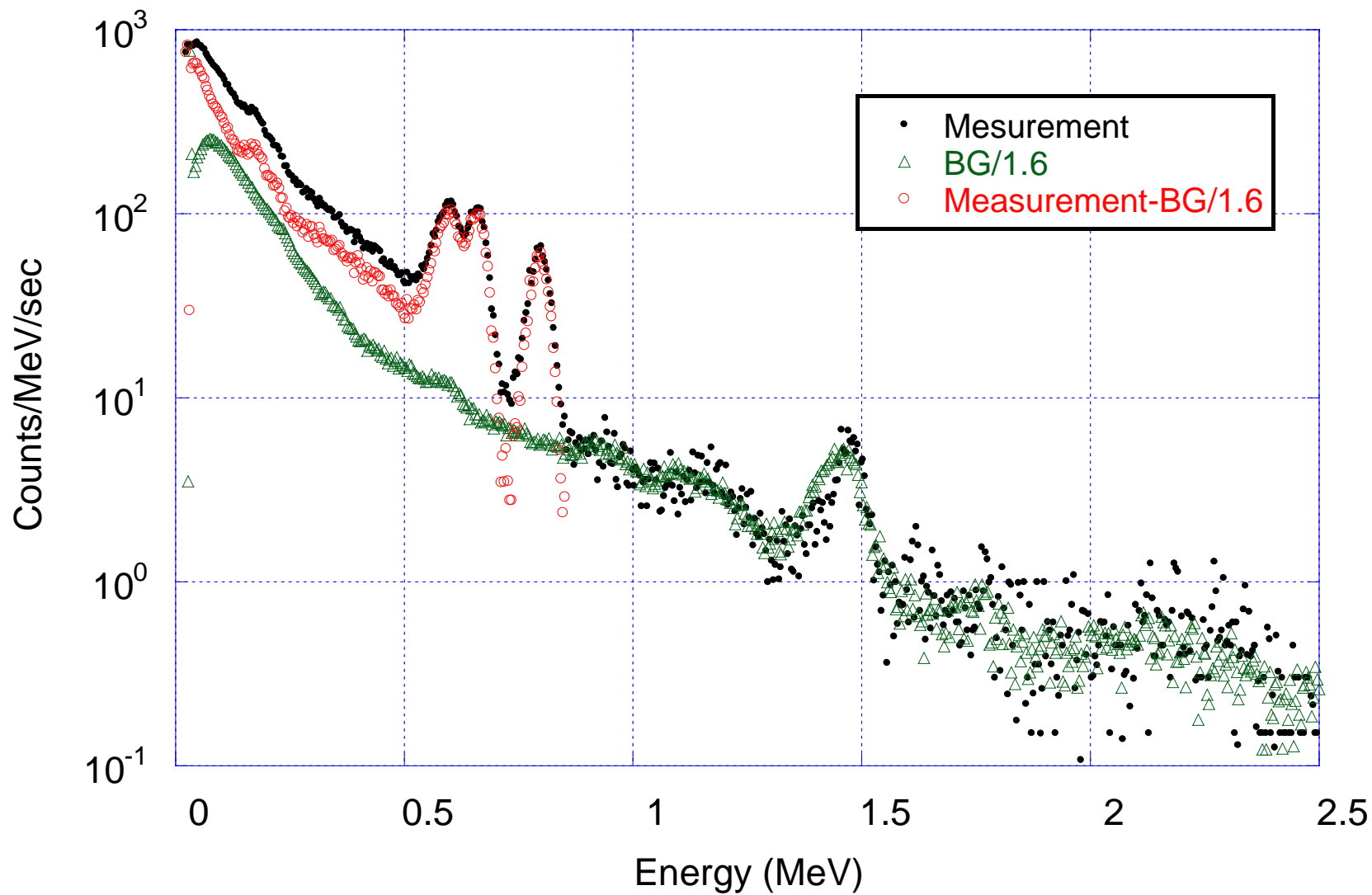
$I(t)$ : 地表面から深さ $t$ [cm]までの単位面積あたり放射能密度の積分値[Bq/cm<sup>2</sup>]  
 $S_0$ : 単位面積あたり放射能密度[Bq/cm<sup>2</sup>]  
 $\rho$ : 土の密度 [g/cm<sup>3</sup>]  
 $\beta$ : 土壌中への浸透が指数関数で表されるとしたときの減弱距離[g/cm<sup>2</sup>]



土の密度は、採取したサンプルの平均から0.9 g/cm<sup>3</sup>

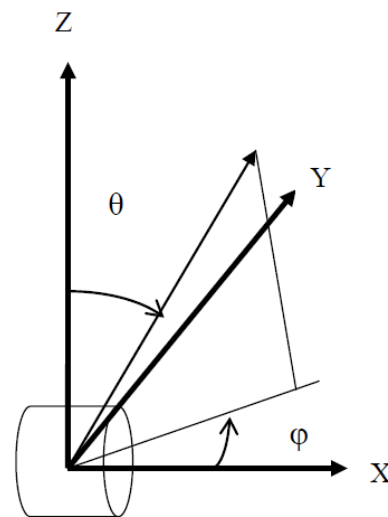
# Cs-134及びCs-137による波高分布

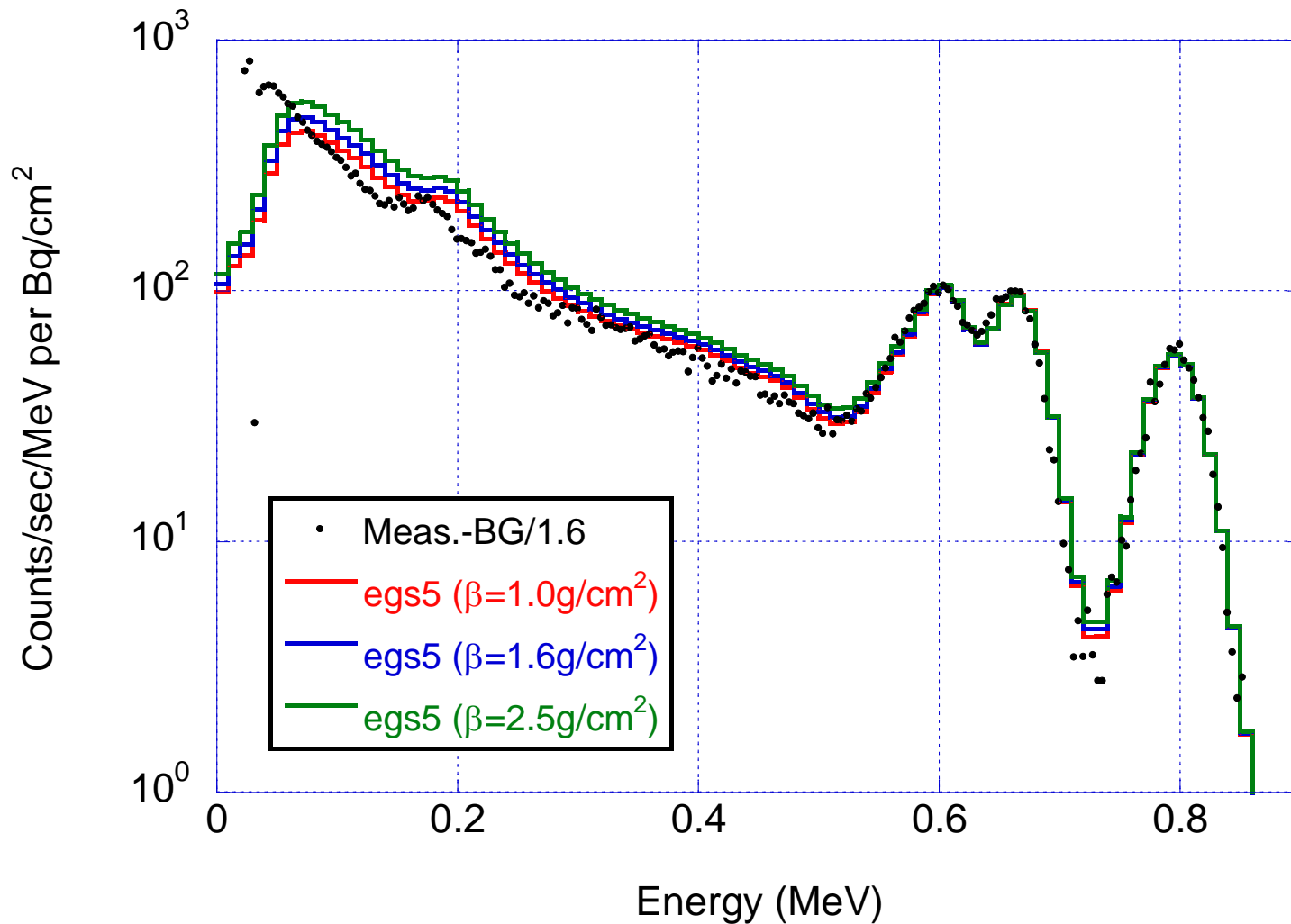
- バックグラウンド波高分布の推定
  - KEKの敷地内におけるバックグラウンドの核種組成は同じで、放射能密度のみが異なると仮定
  - Cs-134の796 keVのピーク部より高い波高成分の積算値で規格化した波高分布をバックグラウンド波高分布と仮定
    - 測定箇所のバックグラウンドは、事故前の測定値があるKEK内のモニターハウスでの波高分布の 1/1.6
  - 周辺環境の違いから、796keV以下の波高分布の形が異なる可能性がある



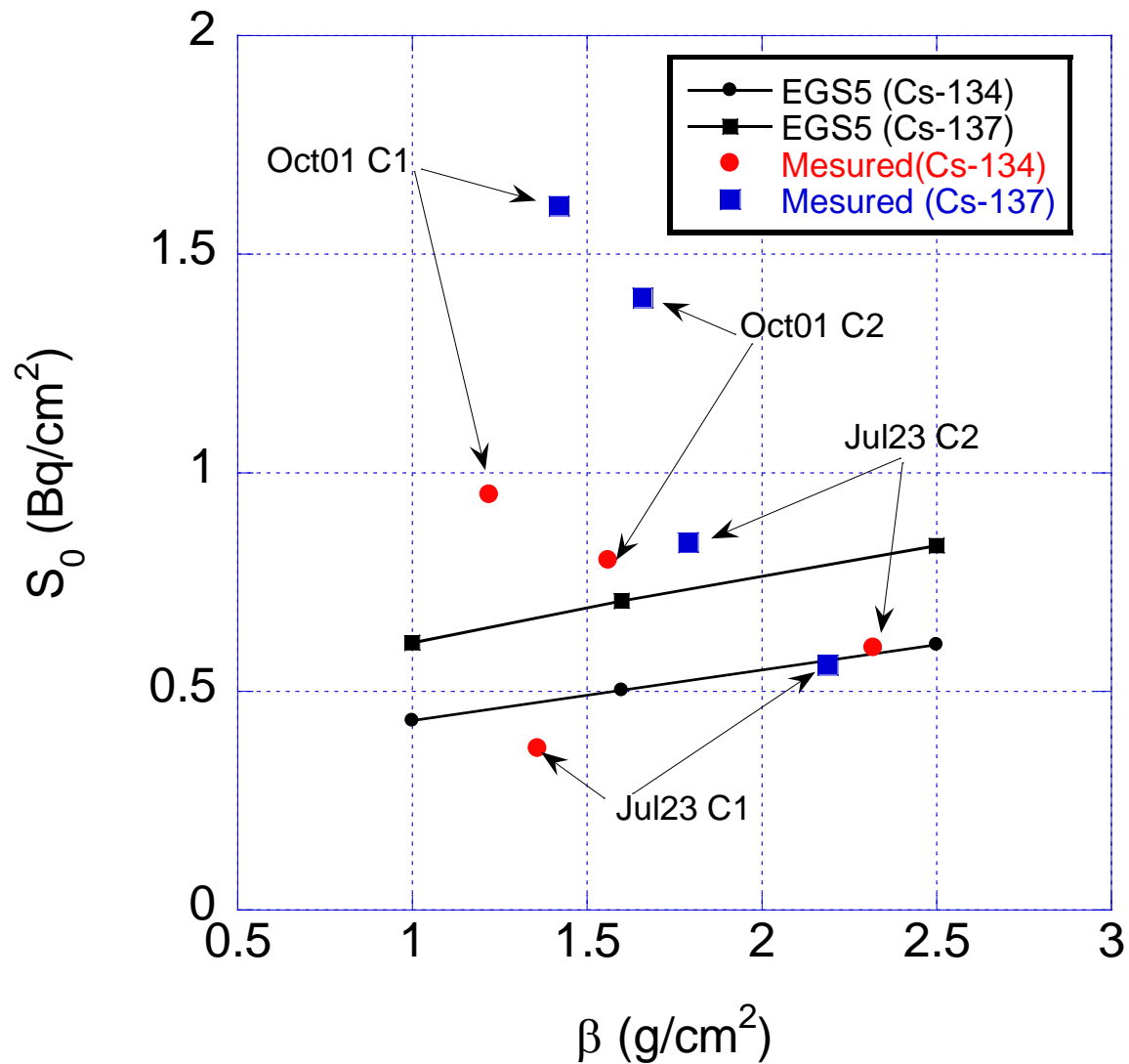
# egs5による波高分布計算

- Cs-134又はCs-137が深度分布パラメータ $\beta$ (1.0-2.5g/cm<sup>2</sup>)で、1Bq/cm<sup>2</sup>の密度で無限に分布している場合の1m高さでのスペクトルを「面等方線源を点等方線源と面検出器に置き換える手法」を用いたegs5で計算(土壌の厚さは6m、空気層は2000mで、密度は高さによらず1.2046g/cm<sup>3</sup>とする)
  - $\cos\theta$ の区分毎( $\cos\theta$ を0.2間隔の10等分に)
- 測定と同様に、円筒形状のNaI(Tl)検出器の軸を地面に平行に地面から1mの高さに設置した状態で、 $\cos\theta$ 区分毎に、 $\varphi$ 方向には一様に光子を入射するとして、検出器中の吸収エネルギーを計算
  - 0.796 MeVガンマ線のFWHMが0.05 MeVという測定結果を用いて、検出器のエネルギー分解能を加味
  - Cs-134については、0.796 MeVの、Cs-137については、0.662 MeVのガンマ線のピーク面積が測定値に一致するそれぞれの放射能密度 $S_0$ を算出
  - 得られた $S_0$ を使って測定場所の波高分布を求め、測定値と比較





**Comparison of pulse-height distribution between measurement and egs5 calculation.**

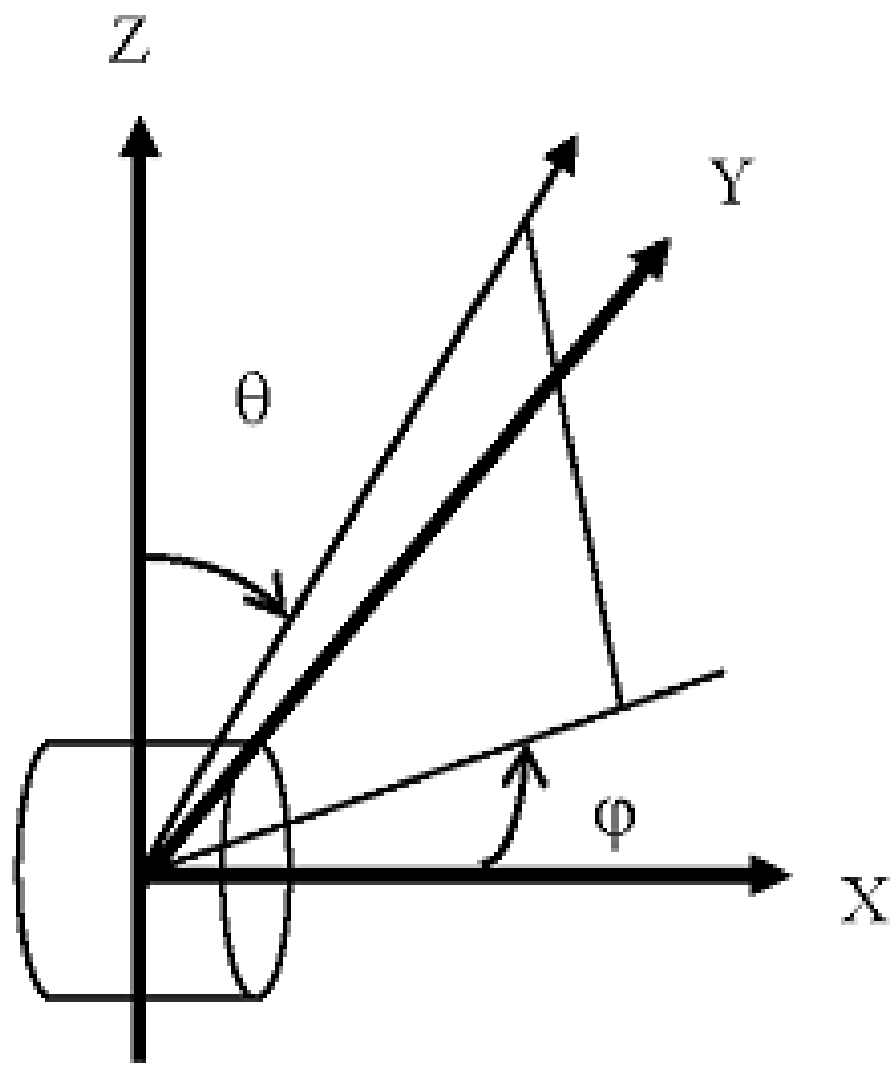


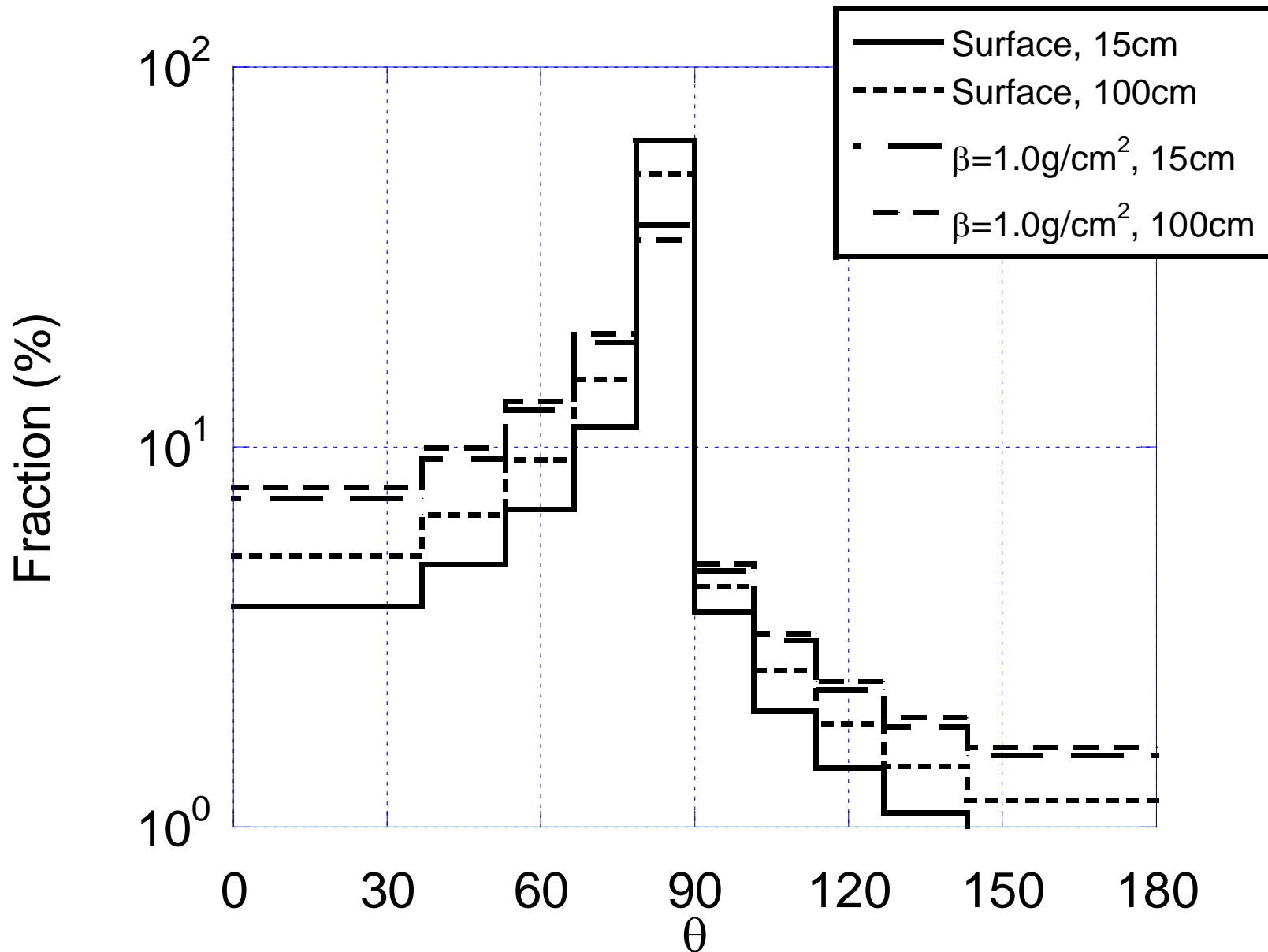
**Relation between  $\beta$  and Cs concentration**

# 広く分布した放射性核種による線量評価

- 点等方線源の土壌中分布を適用することにより、土壌中分布を持った広く分布した放射性核種による線量を評価することができる
  - $\theta$ が0から90度の寄与が90%程度
  - 線源半径による周辺線量当量への寄与率
    - 20m以内の寄与が80%
    - 80mより外部の寄与が10%
  - 地表から5cmと100cmでの周辺線量当量率の比から、実効的な線源半径を知ることができる
    - ホットスポットの寄与が、限定的
    - 広域除染とホットスポット除染

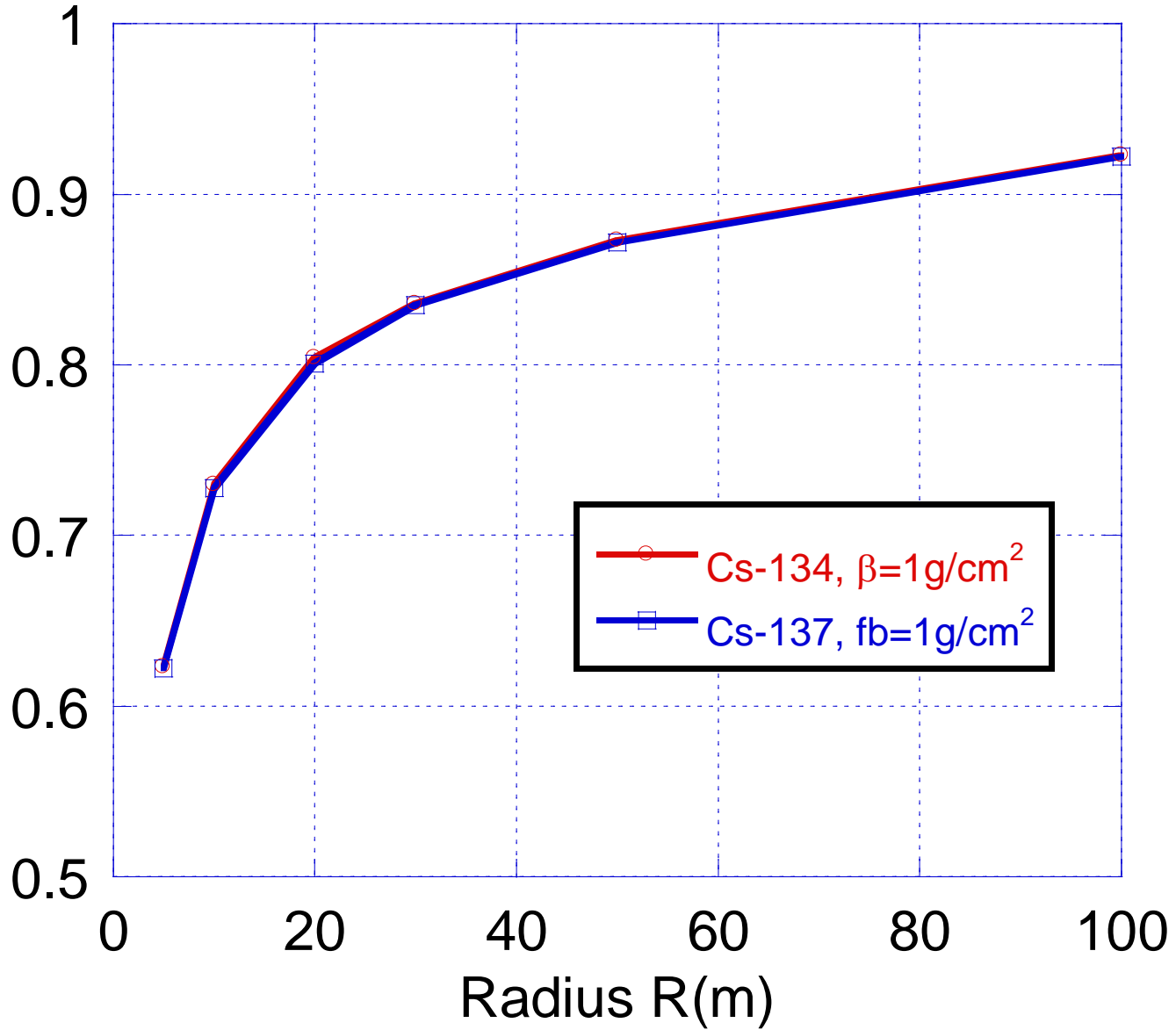




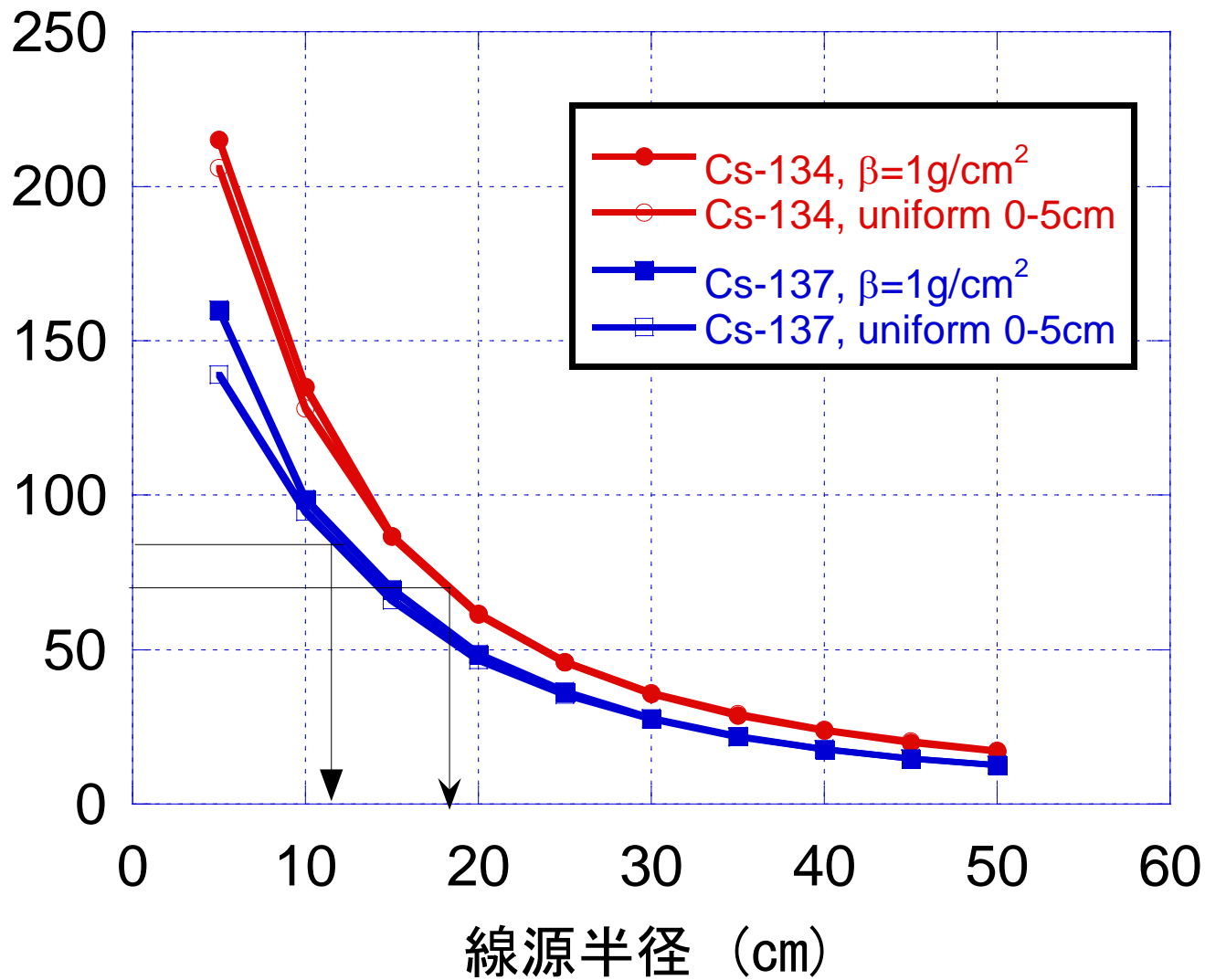


広く分布したCs-134による  
 周辺線量当量への各角度区分の寄与率

Dose fraction from activities within radius R



5cm位置での線量率／100cm位置での線量率



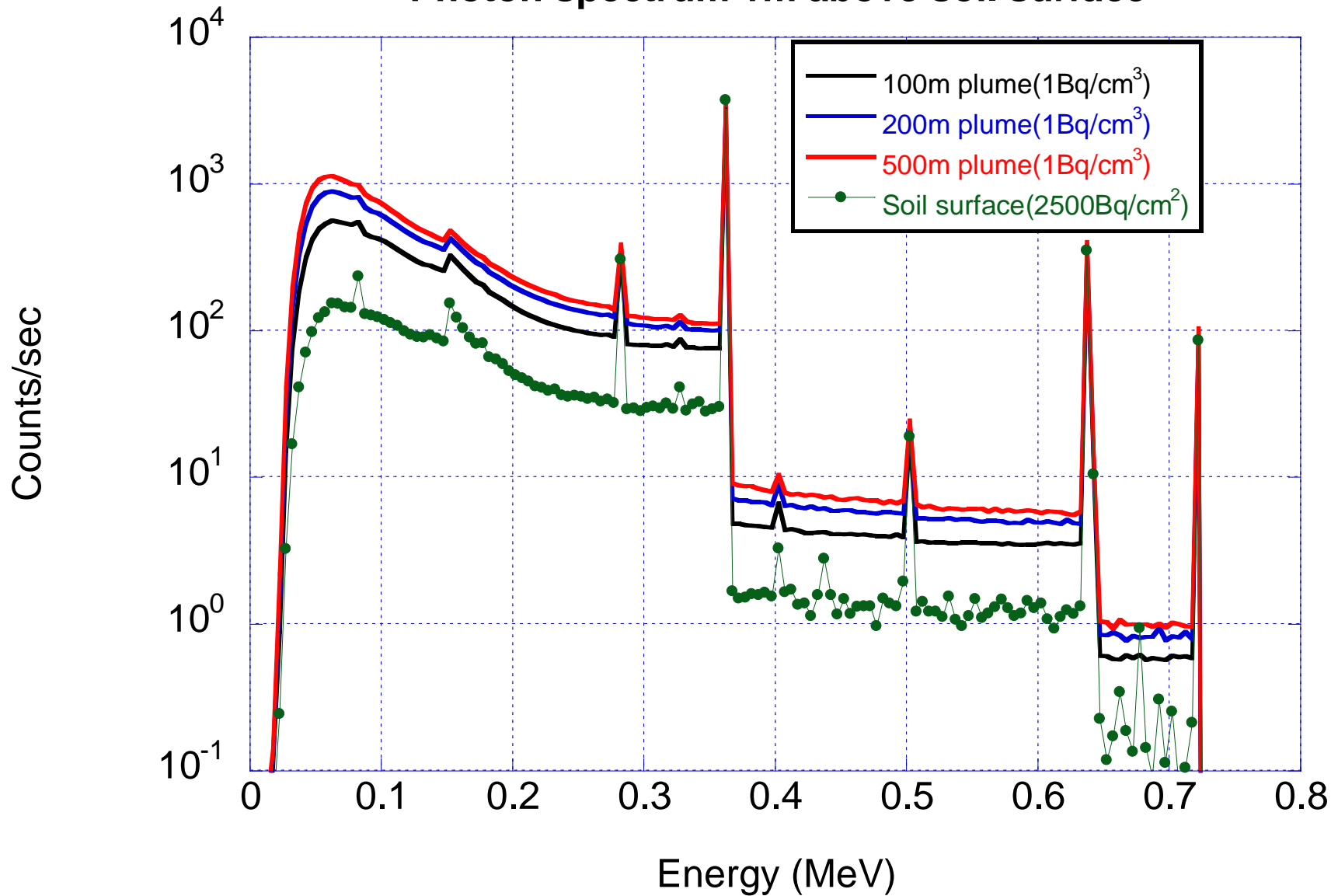
# 波高分布データによる プルーム中放射性核種濃度の推定

- 一様な濃度で放射性核種を含むプルームによる評価にも、適用ができる
- 事故初期のプルーム中I-131濃度は、放射線誘発甲状腺がんリスク評価の観点から重要
  - プルーム中の放射性核種濃度の直接測定は、福島第1原子力発電所から離れた限られた場所でのみ実施されておらず、地表に沈着したI-131の密度からの推定が最も直接的な方法となっている
  - I-131の半減期が約8日と短いことから、Cs-134やCs-137に比べて測定データは非常に限られている

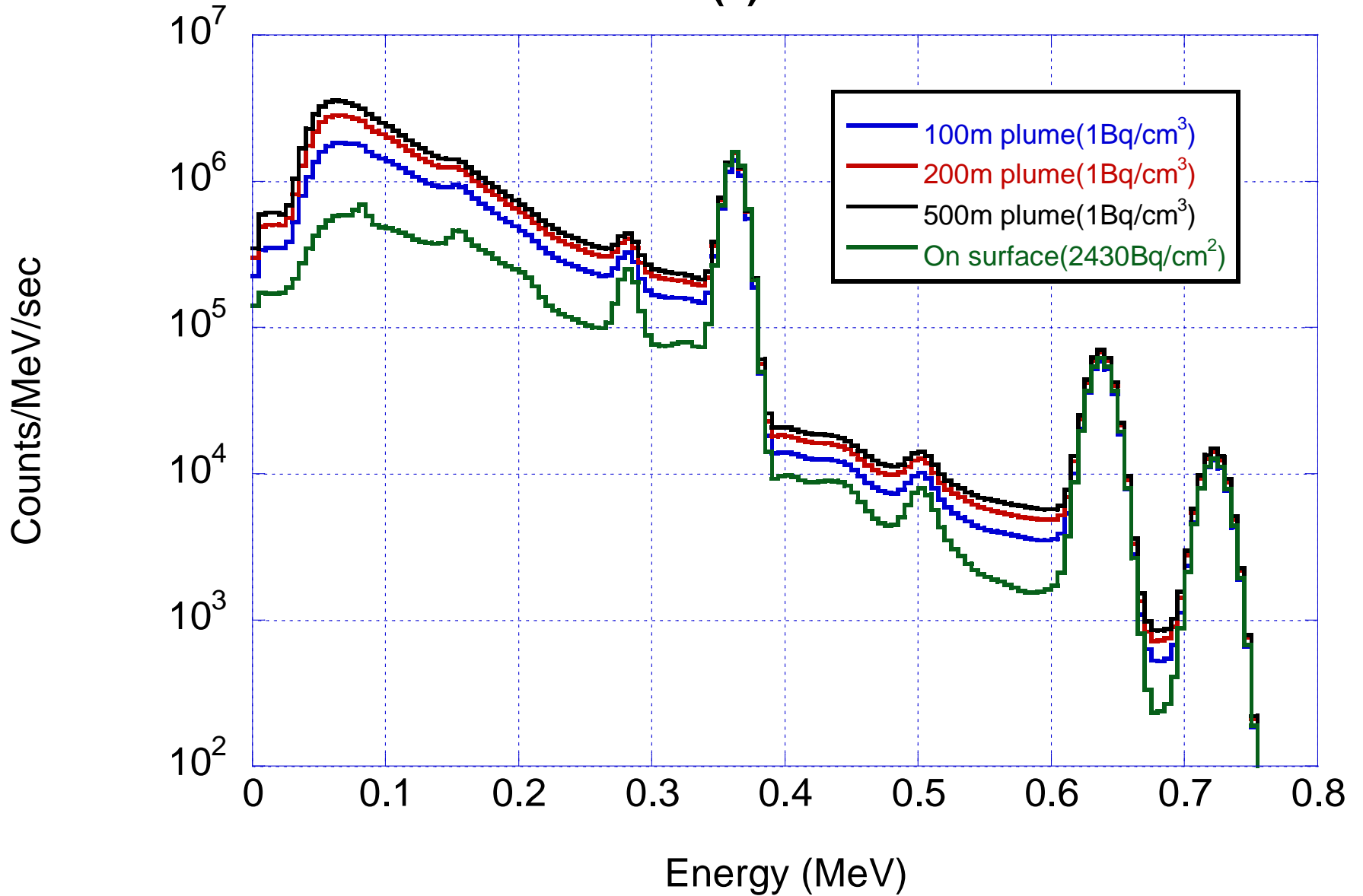
# 波高分布データによる プルーム中放射性核種濃度の推定

- 事故初期の波高分布データとプルーム中の放射性核種による検出効率を使うことによりプルーム中放射性核種濃度を推定することが可能
- 松村等が、2011年3月15日に、1.5”φx1.5”のLaBr<sub>3</sub>シンチレーションスペクトロメータで高速道路で測定した波高分布を用いた推定の試み
  - H. Matumura et al., “Diffusion of Radiactive Materials from Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Obtained by Gamma-Ray Measurements on Expressways”, Trans. At. Energy Soc. Japan, **10**, 152-162 (2011) . [in Japanese] (KEK Preprint 2011-2)
- 日本原子力学会、和文誌に投稿中

# Photon spectrum 1m above soil surface



(a) I-131



LaBr<sub>3</sub>検出器の応答



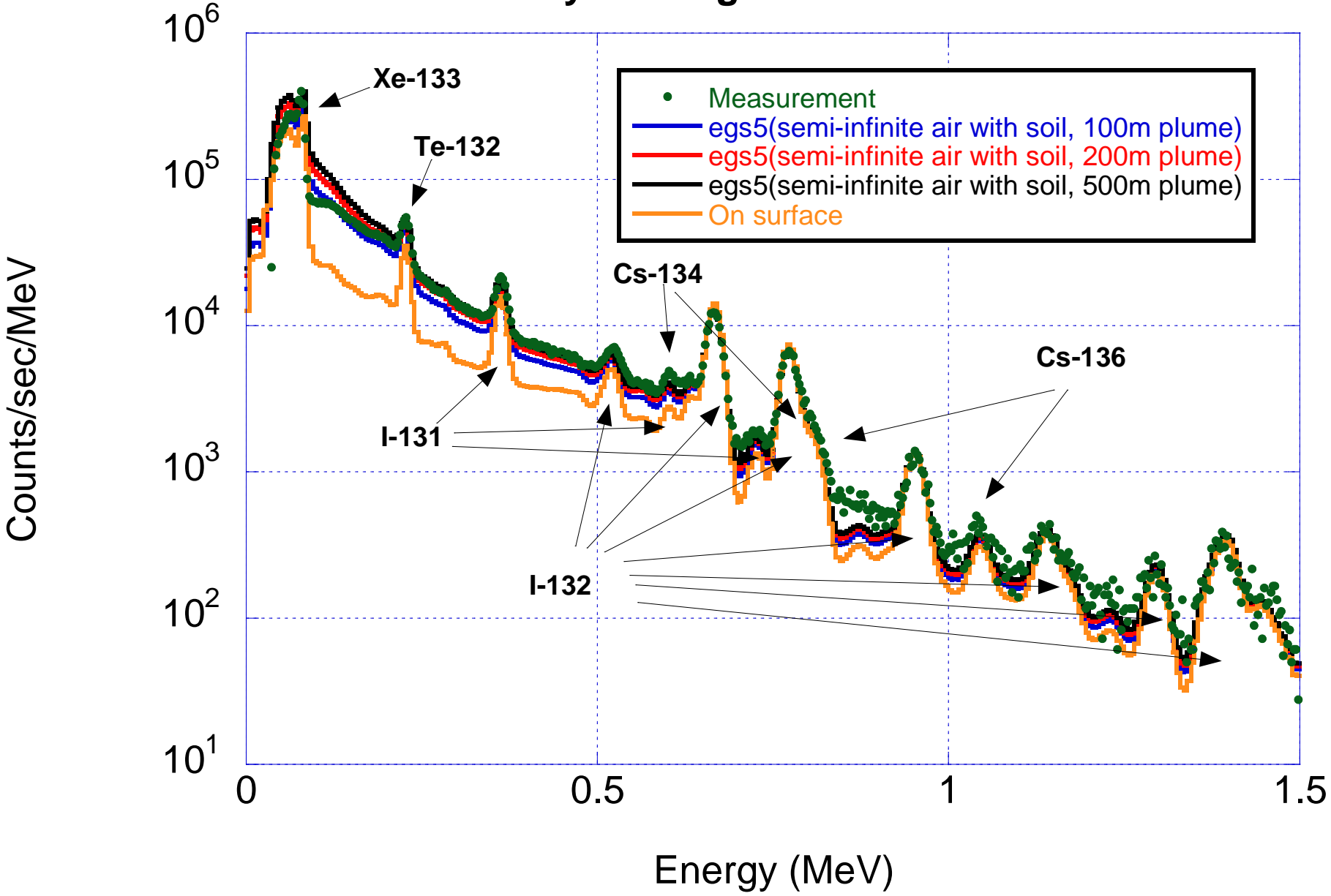
# 放射性核種濃度の推定方法

- Te-132, I-132, I-131, Xe-133, Cs-134及び Cs-136を同定するピークエネルギーの選定
  - 他の核種との影響が少ないエネルギー
  - Te-132 --- 228 keV、I-132 --- 955 keV、I-131 --- 365 keV、Xe-133--- 81 keV、Cs-134--- 605 keV、Cs-136--- 1048keV
- 測定値から同定された核種のテール部分を差し引いたピーク計数率を求める(A)
- 各核種について計算で求めた波高分布からテール部分を差し引いた対応するピークの1Bq/cm<sup>3</sup>当たりピーク計数率を求める(B)
- B/Aを求める放射能濃度(Bq/cm<sup>3</sup>)とする

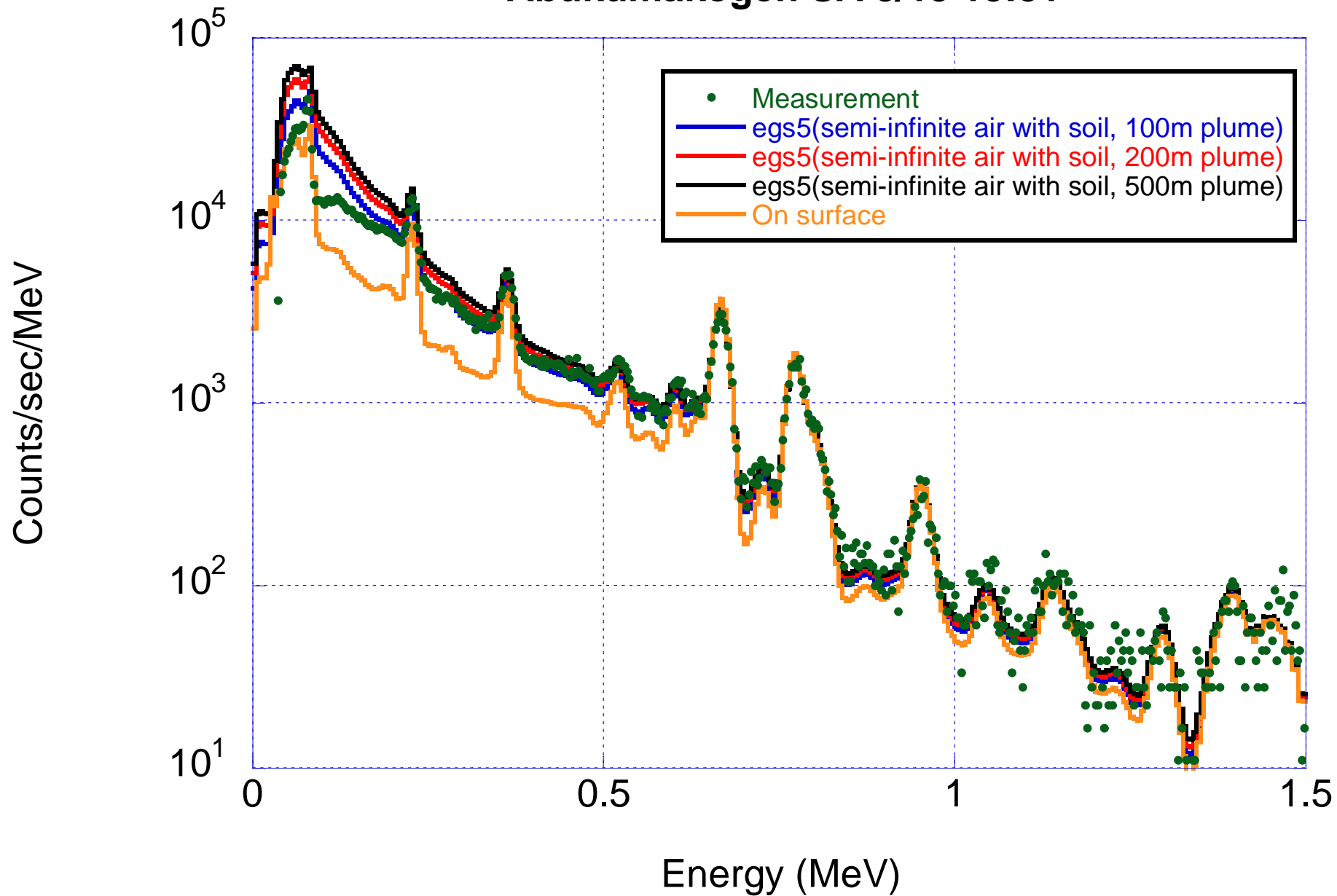
# 再構築した波高分布の比較

- 郡山東IC 西方 52.4 km
  - 3月15日15時25-26分の測定結果
  - 西方での測定で、Xe-133の計数率が最も高かった場所
- 阿武隈高原SA 西方 38.3 km
  - 3月15日15時51-52分の測定結果
  - 高濃度の放射性核種を含むプルーム通過後、濃度が低いプルーム中での測定と思われる

# Koriyama-Higashi IC 3/15 15:25



# Abukumakogen SA 3/15 15:51

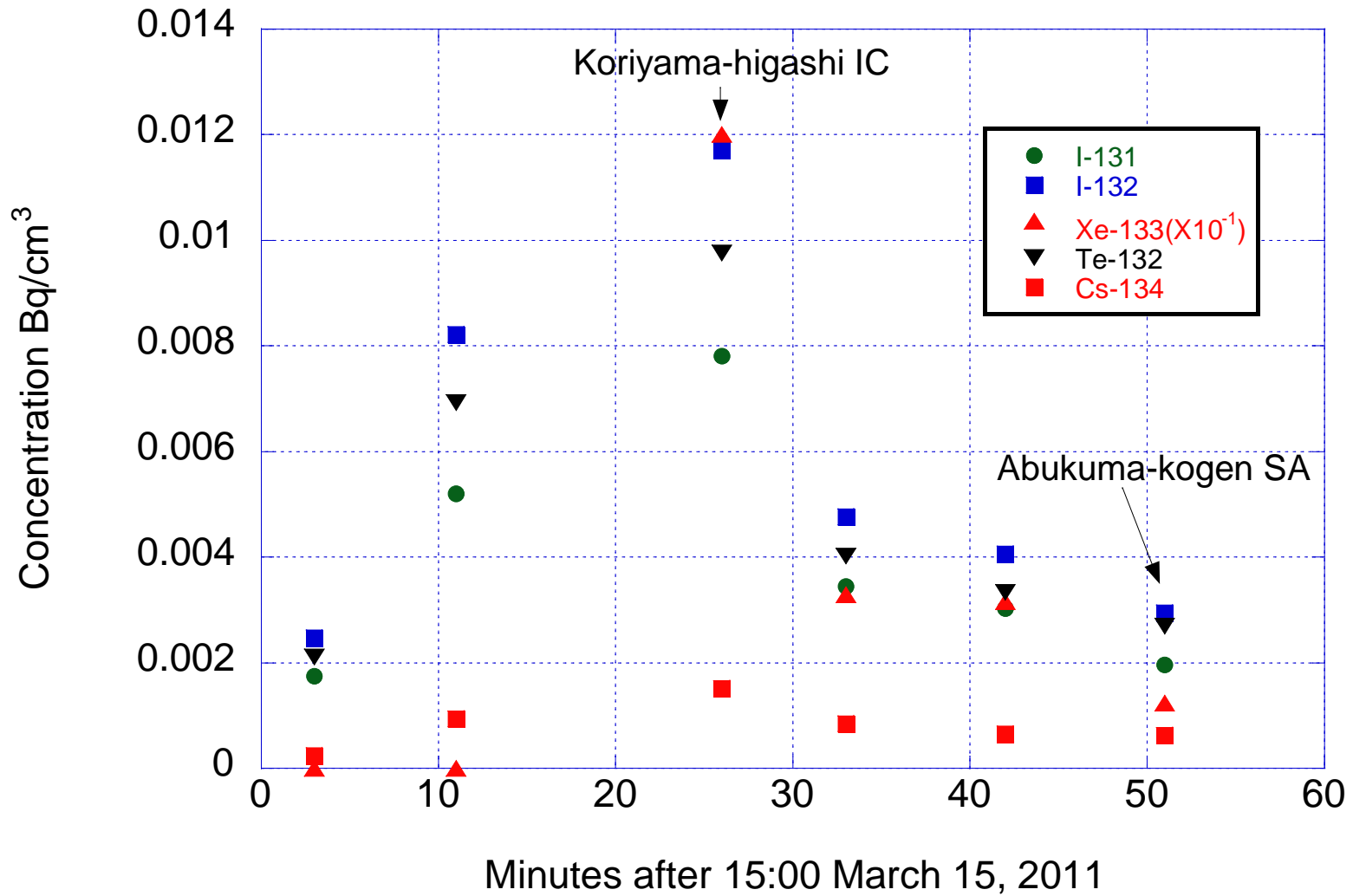


# 西方向へのプルーム飛来の状況

- 西方向で38.3-57.4kmでの、2011年3月15日15時3分から52分間の測定結果から推定
  - 全てプルーム中の放射性核種によるとした結果
  - プルームの高さは、200m

測定場所	時刻	測定時間	福島第1原子力発電所からの距離
安達太良SA	15:03	60 sec.	56.0km
本宮IC	15:11	60 sec.	57.4km
郡山東 IC	15:22	60 sec.	52.4km
三春 PA	15:33	60 sec.	47.5km
船引美春 IC	15:42	60 sec.	41.7km
阿武隈高原 SA	15:51	60 sec.	38.3km

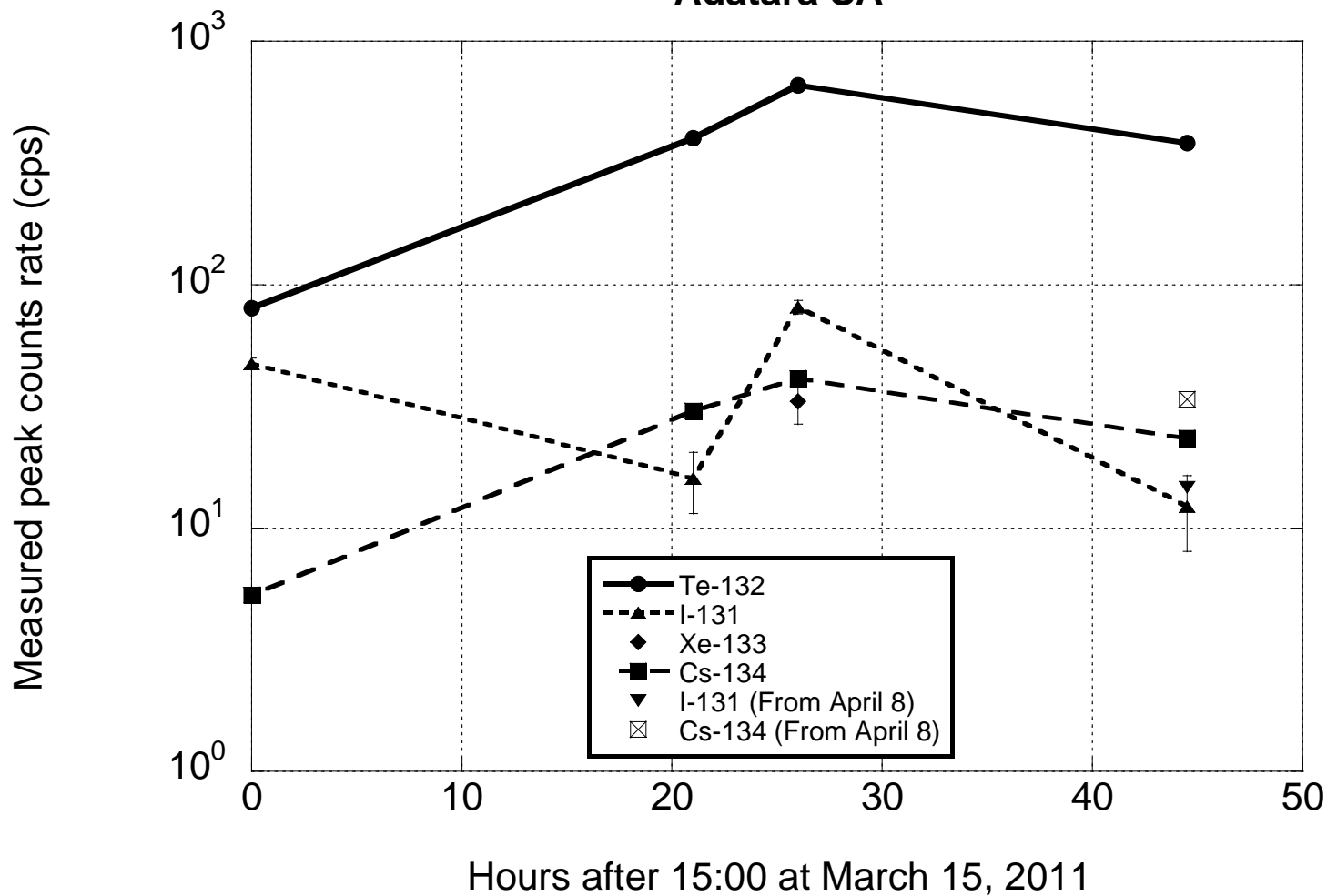
# Time variation of concentration at west direction from Fukushima No.1 NPS



# 地表等への沈着の寄与

- 測定時は、霧雨であった。プルームの通過に伴い、地表等への沈着があり、沈着した放射性物質による波高分布への寄与があると思われる。
  - － 高速道路での測定は場所を変えた測定なので、1箇所での連続的な測定のように時間変化から沈着の寄与を推定することは難しい
  - － グラウンドの様に一様な広い場所への沈着であれば、波高分布での寄与の違いから沈着の寄与を推定可能と思われるが、測定場所はこの条件には合致しない
  - － ほぼ同じ場所での3月16, 17及び4月8日の測定結果からの推定
    - 福島第1原子力発電所から西方向の7箇所中3箇所での評価では、3月15日の測定時点で、I-131の場合、最大で30%

### Adatara SA





# 個人線量計

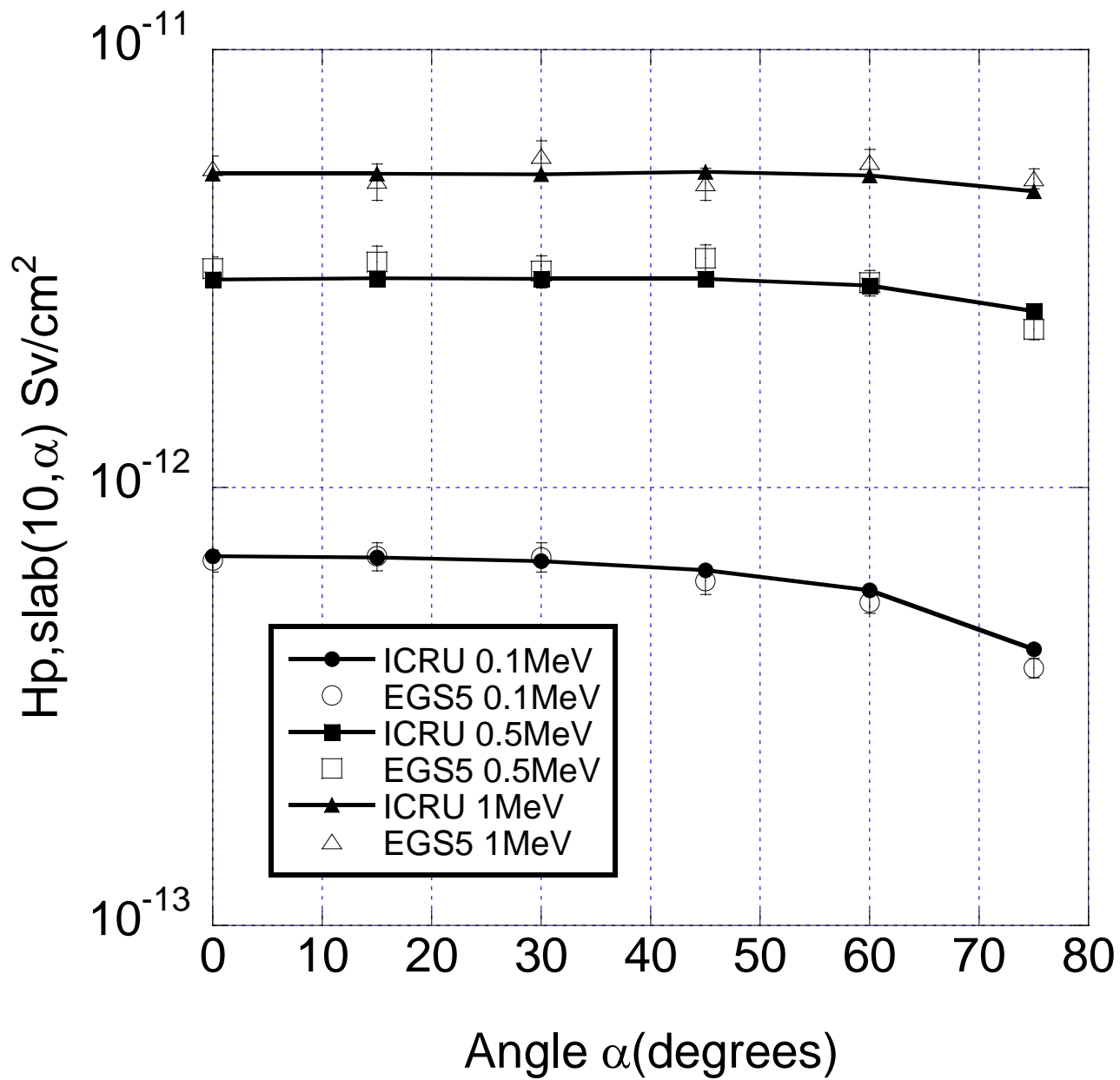
- 個人線量計は、人体と似たような散乱状況を模擬できるアクリルのファントム上に線量計を装着して、平行ビームがファントムに垂直に入射した場合の応答が、 $H_p,slab(10,0^\circ)$ の値になるように作られている
- $H_p,slab(10,0^\circ)$ は、平行ビームがICRUが採用したISOで定義された<sup>1)</sup> 30cm × 30cm × 15cmの大きさを持つICRU組織等価物質のスラブファントム（以下「ICRUスラブファントム」という。）に垂直に入射した場合の入射面中央での深さ10mmにおける線量当量である

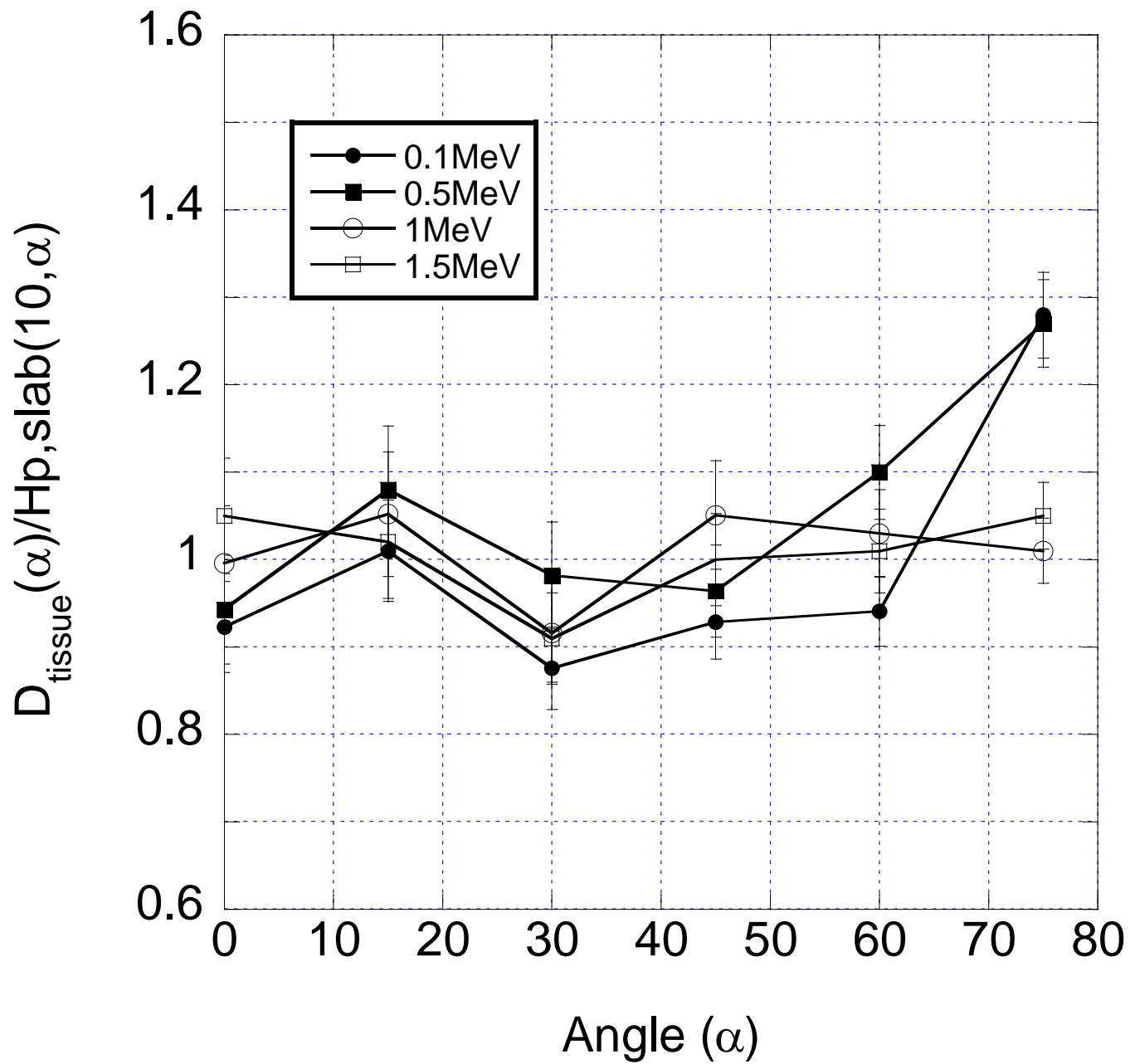
# 福島等で使用されている個人線量計

- 様々な線量率の場所で生活している個々人の実際の被ばく線量を知る上では有効な方法
- 通常の放射線作業と異なる被ばく
  - 四方八方から来る直接線と散乱線を測定することになり、線量計に入射する放射線が人体による減衰・散乱の強い影響を受ける
  - 線量計の値は、実用量である個人線量当量 $H_p(10)$ に対応しているのか？
- 計算による評価を試みた
  - 「地表に広く分布した $^{134}\text{Cs}$ および $^{137}\text{Cs}$ を対象とする個人線量計の評価」、RADIOISOTOPES. Vol. 62, 325-345(2013) (KEK Preprint 2012-43)

# 計算による個人被ばく線量計の評価方法

- ICRUスラブファントムファントム中心軸上で、ファントム前面から0.5cmおよび1cmの位置での人体等価物質カーマを使用
  - 真空の検出器領域の光子スペクトルと人体等価物質の質量エネルギー吸収係数から算出
- 得られた個人線量計の値が、 $H_p,slab(10,\alpha)$ に対応しているかを調べる
  - $H_p,slab(10,\alpha)$ は、入射角度が $\alpha$ の時のファントムの入射面中央から深さ10mm位置での線量当量





# 照射方向の影響

$^{134}\text{Cs}$

$\mu\text{Sv/h per cm}^2/\text{sec}$

AP irradiation		
$H^*(10)$ (A)	0.0140	Ratio to A
Personal Dosimeter	0.0141 $\pm$ 0.00013	1.01
LAT irradiation		
Personal Dosimeter	0.0148 $\pm$ 0.0003	1.06
PA irradiation		
Personal Dosimeter	0.00711 $\pm$ 0.000092	0.51

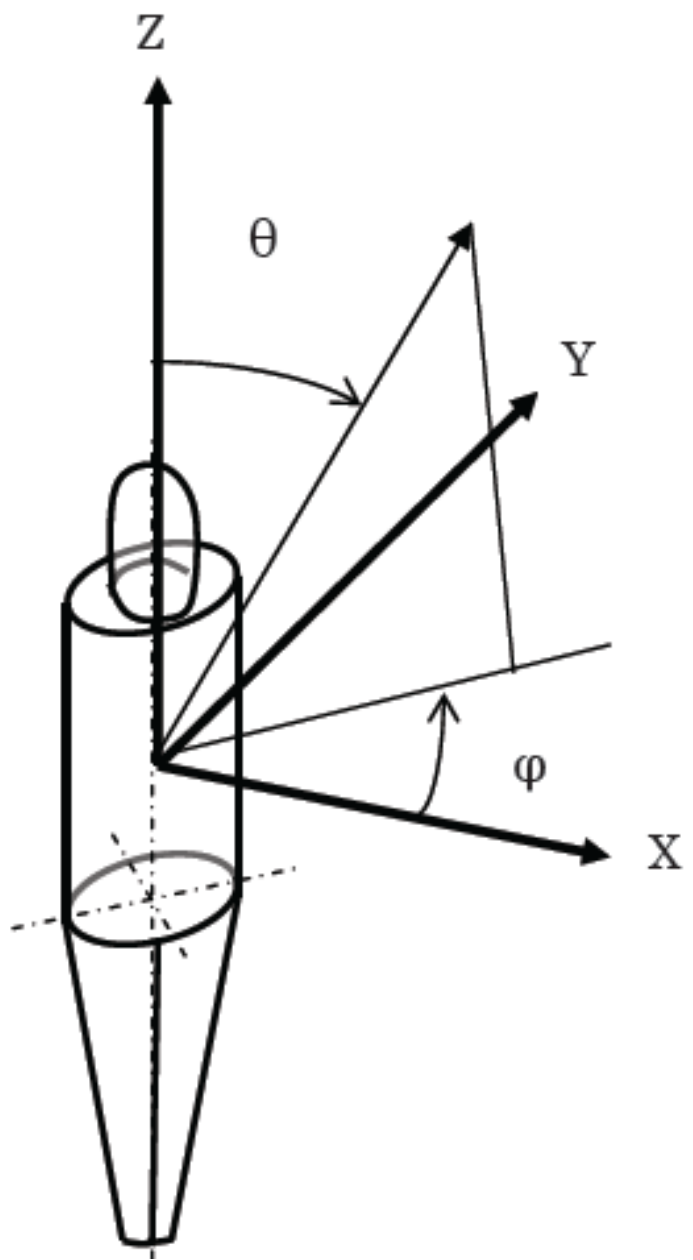
$^{137}\text{Cs}$

$\mu\text{Sv/h per cm}^2/\text{sec}$

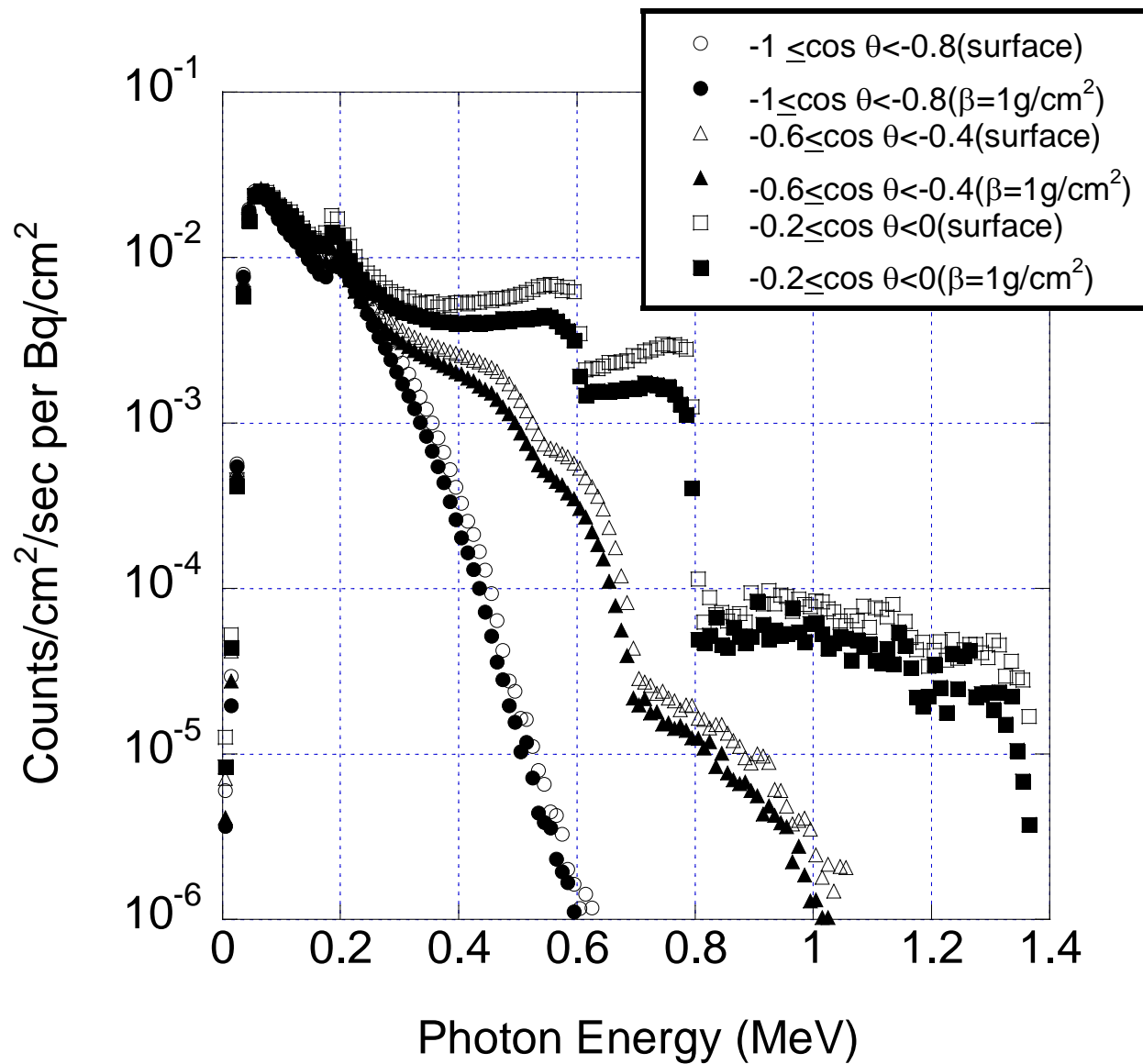
AP irradiation		
$H^*(10)$ (A)	0.0135	Ratio to A
Personal Dosimeter	0.0136 $\pm$ 0.00012	1.01
LAT irradiation		
Personal Dosimeter	0.0139 $\pm$ 0.00028	1.03
PA irradiation		
Personal Dosimeter	0.00651 $\pm$ 0.000085	0.48

# 地表に広く分布した $^{134}\text{Cs}$ または $^{137}\text{Cs}$ による 光子スペクトル

- 放射性核種の濃度を一様と見なすことができる場合には、面等方線源と単位球検出器を点等方線源と面検出器に置き換える手法を用いることによりモンテカルロ法で効率よく計算することができる。
- 実際の環境では、土壌中の放射性核種の濃度にはばらつきがあることが知られているが、広い領域からの寄与を考える場合には、一様と仮定することにより平均的な情報を得ることが可能
- EGS5にこの置き換える手法を適用して、地表・地中に広く分布した $^{134}\text{Cs}$ および $^{137}\text{Cs}$ による地表15, 50, 100cm高さでの光子スペクトルを計算

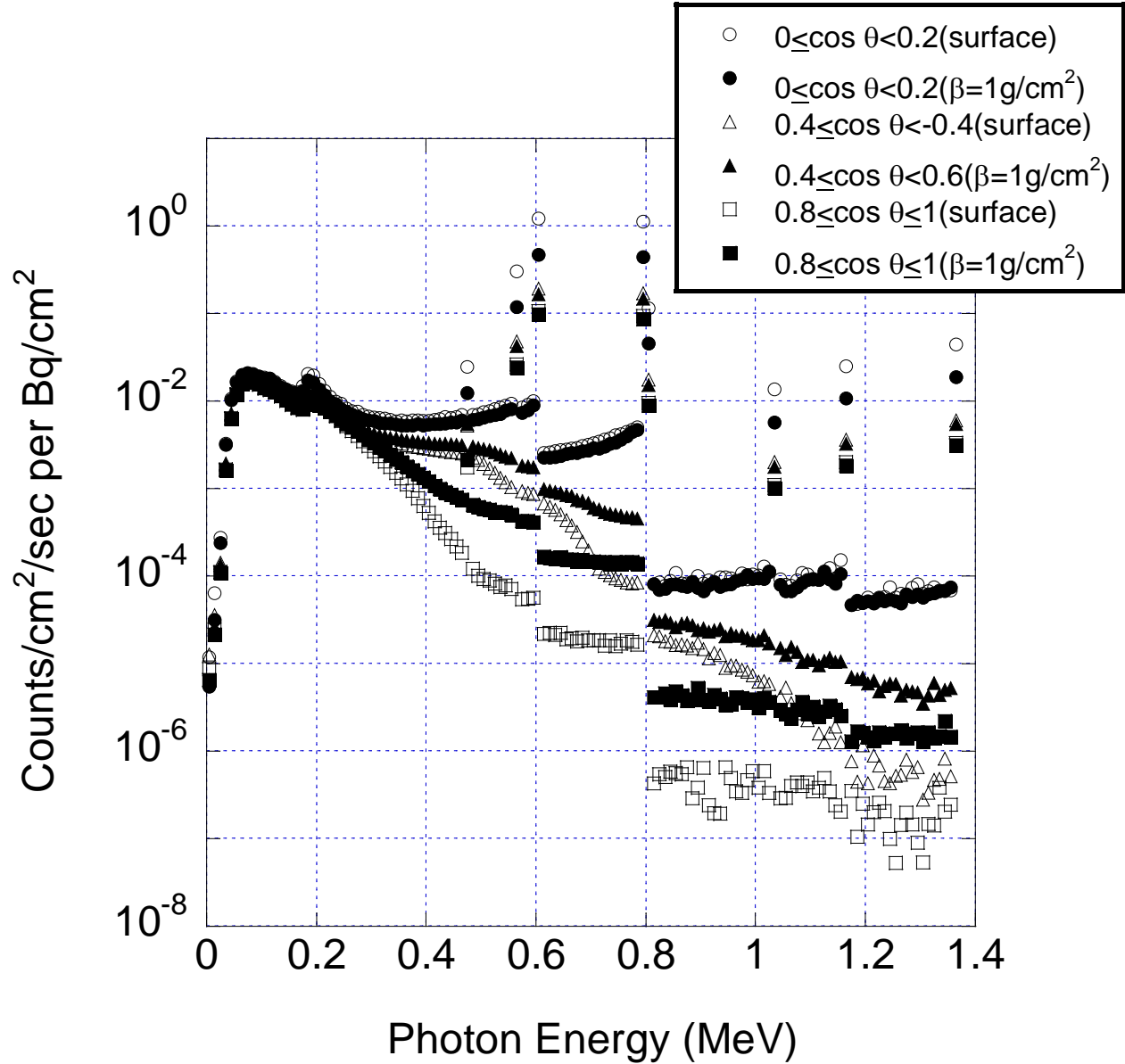






(a)  $^{134}\text{Cs}$ ,  $\cos \theta < 0$

地中への沈着の影響



(b)  $^{134}\text{Cs}$ ,  $\cos \theta \geq 0$

地中への沈着の影響

**Cs-134 1Bq/cm<sup>2</sup>, μSv/h**

**at 100cm height, β=1 g/cm<sup>2</sup>**

<b>H*(10) (A)</b>	0.0558	±	3.3E-05	Ratio to A
<b>Rotation Effective Dose</b>	0.0369	±	2.2E-05	0.661
<b>Isotropic Effective Dose</b>	0.0308	±	1.9E-05	0.553
<b>Personal Dosimeter on Adult Cristy phantom</b>	0.0385	±	0.00061	0.690
<b>Effective Dose</b>	0.0385			

**at 100cm height, surface distribution**

<b>H*(10) (A)</b>	0.0857	±	5.7E-05	Ratio to A
<b>Rotation Effective Dose</b>	0.0569	±	3.9E-05	0.664
<b>Isotropic Effective Dose</b>	0.0478	±	3.3E-05	0.558
<b>Personal Dsimeter on Adult Cristy phantom</b>	0.0595	±	0.00087	0.694
<b>Effective Dose</b>	0.0589			

**Cs-137 1Bq/cm<sup>2</sup>, μSv/h**

**at 100cm height, β=1 g/cm<sup>2</sup>**

<b>H*(10) (A)</b>	0.0206	±	1.1E-05	Ratio to A
<b>Rotation Effective Dose</b>	0.0135	±	7.5E-06	0.655
<b>Isotropic Effective Dose</b>	0.0112	±	6.3E-06	0.544
<b>Personal Dsimeter on Adult Cristy phantom</b>	0.0142	±	0.00022	0.689
<b>Effective Dose</b>	0.0140			

**at 100cm height, surface distribution**

<b>H*(10) (A)</b>	0.0313	±	0.00001	Ratio to A
<b>Rotation Effective Dose</b>	0.0207	±	1.3E-05	0.661
<b>Isotropic Effective Dose</b>	0.0173	±	1.1E-05	0.553
<b>Personal Dsimeter on Adult Cristy phantom</b>	0.0214	±	0.00032	0.684
<b>Effective Dose</b>	0.0212			

# 成人ファントムでの結果

- 個人線量計の値
  - 人体形状ファントムを使って求めた実効線量とほぼ同じ
  - ROT照射形状の実効線量より若干大きめ
  - 周辺線量当量の70%程度
- 地表に広く分布した $^{134}\text{Cs}$ または $^{137}\text{Cs}$ による被ばくを個人被ばく線量計で測定した場合、数値的には実効線量に相当する線量となる
  - このことを理解して使用すれば、個人線量計は被ばく評価の有用な手段となる