

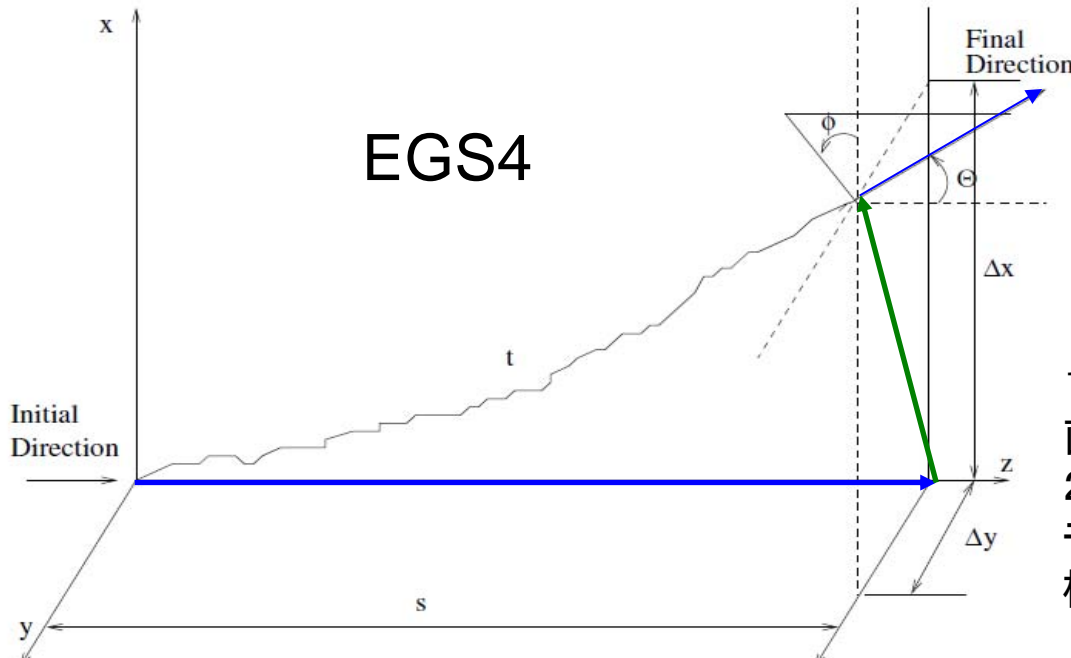
# EGS5 での電子輸送の扱い

平山 英夫、波戸 芳仁 (KEK)

Last modified on 2006-08-02

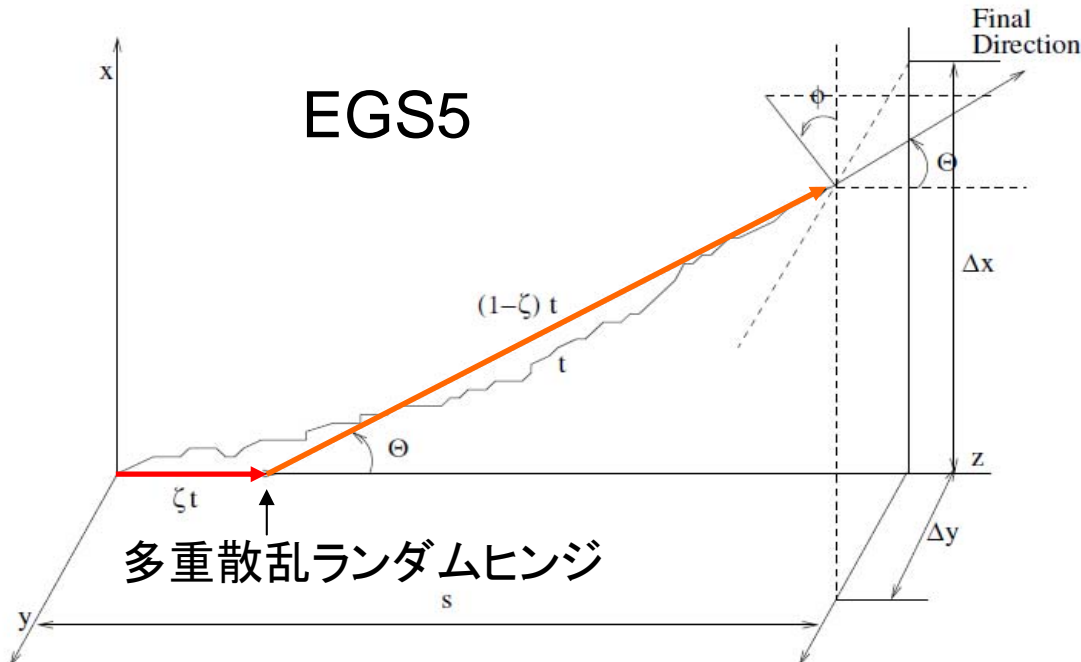
# 電子輸送の新しい物理モデル

ミシガン大で開発  
(協力:KEK)



EGS4

1. 多重散乱ステップサイズ(s: 直線距離)を決める。
2. 直線距離(s) 移動後に、多重散乱モデルを用い、曲線距離(t)、散乱角( $\theta$ )、横変位( $\Delta x^2 + \Delta y^2$ )を求める。



EGS5

多重散乱ランダムヒンジ

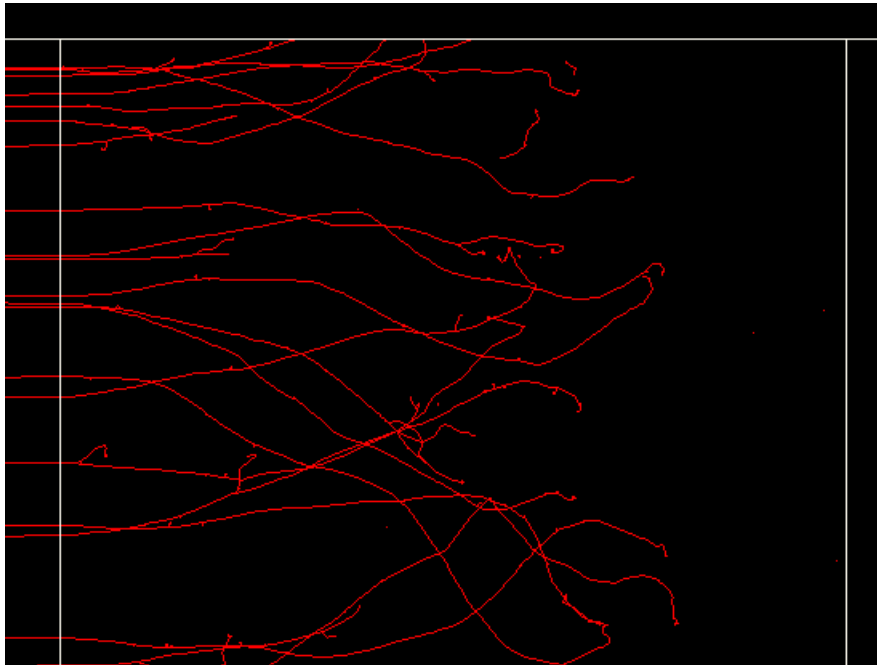
1. 曲線距離 t 内で1点をランダムサンプリングし「多重散乱蝶番点」とする。
2. 同点で、多重散乱モデルにより電子の方向を屈曲させる。

この Random hingeモデルで、 $\langle t/s \rangle$  及び  $\langle \Delta x^2 + \Delta y^2 \rangle$  を適切に計算できる。(ただし移動に伴うエネルギー損失を無視した場合)

# エネルギー損失による誤差

10 MeV e<sup>-</sup>  
→

アクリル5cm厚

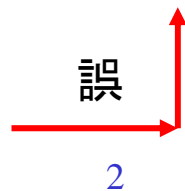
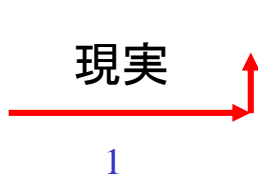


エネルギーが高い所  
では「曲がり」は少ない

エネルギーが低く  
なるとよく「曲がる」

- 「最初から最後まで一定の割合で曲がる」、すなわちhingeまでの“ $t$ ”をサンプリングする random hinge<sup>2</sup> は、電子のエネルギー変化を含めた計算<sup>1</sup>に比べて「最初からドンドン曲がる」
- すなわち平均直線距離 $\langle s \rangle$ を過小評価、横変位( $\langle \Delta x^2 + \Delta y^2 \rangle$ )を過大評価

– Fernandez Varea et al. (1993)



# 電子の移動に伴うエネルギー変化 を加味したrandom hinge

- 散乱強度(Scattering strength)  $K_1(t)$ を用いたrandom hinge

$$K_1(t) = \int_0^t dt' G_1(t')$$

$$G_l(t) = 2\pi \int d\mu \Sigma(\mu; t) [1 - P_l(\mu)]$$

ここで、

$G_1$ : 「輸送断面積」 or 「輸送平均自由行程の逆数」 or 「散乱能力」(cm<sup>-1</sup>)

Scattering Power

$\Sigma$ : 巨視的単一弾性散乱断面積(cm<sup>-1</sup>)

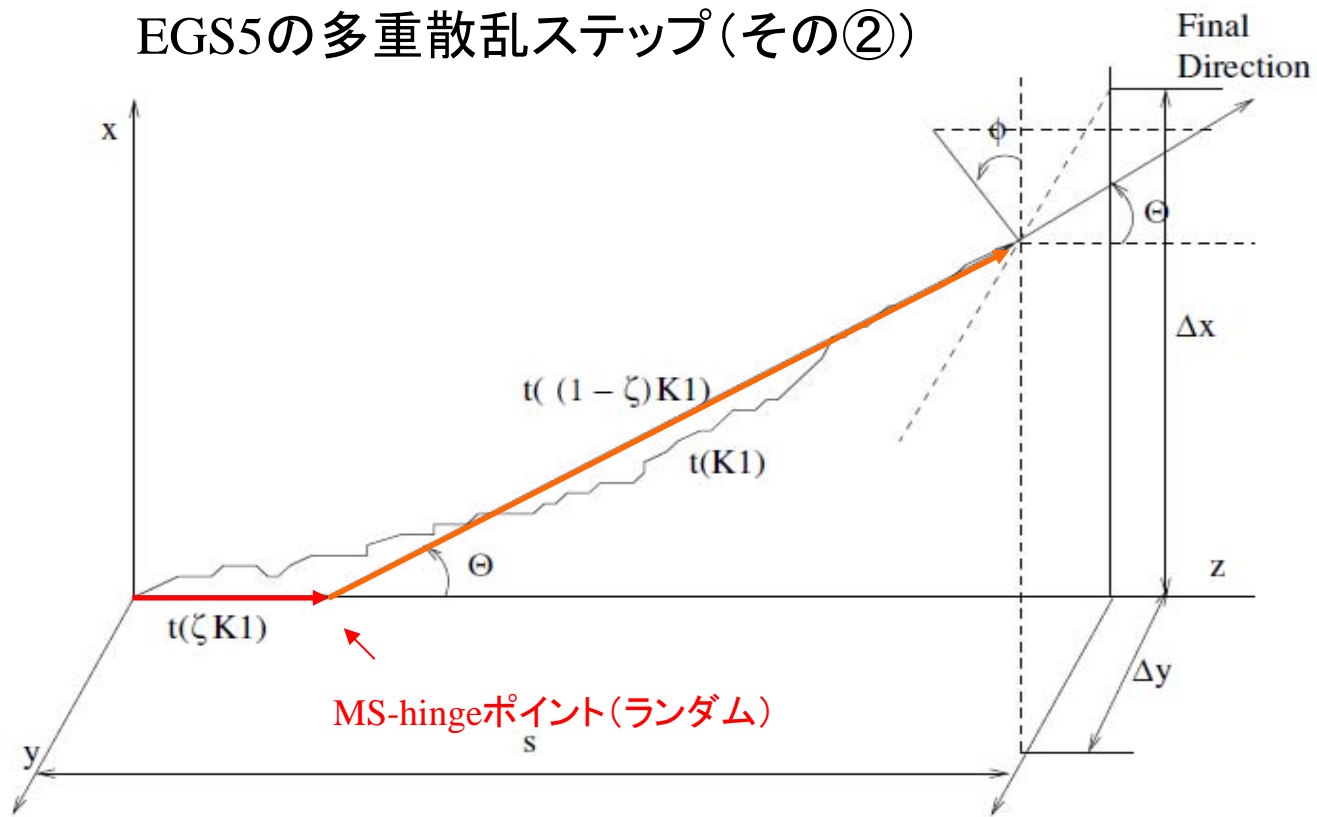
$P_l$ : ルジャンドル関数  $P_0(\mu)=1$ ,  $P_1(\mu)=\mu$ ,  $P_2(\mu)=1/2(3\mu^2-1)$

$\mu = \cos(\theta)$

$$\langle \cos(\theta) \rangle = \exp(-K_1)$$

ヒンジの位置は、 $t(\xi K_1)$

## EGS5の多重散乱ステップ(その②)



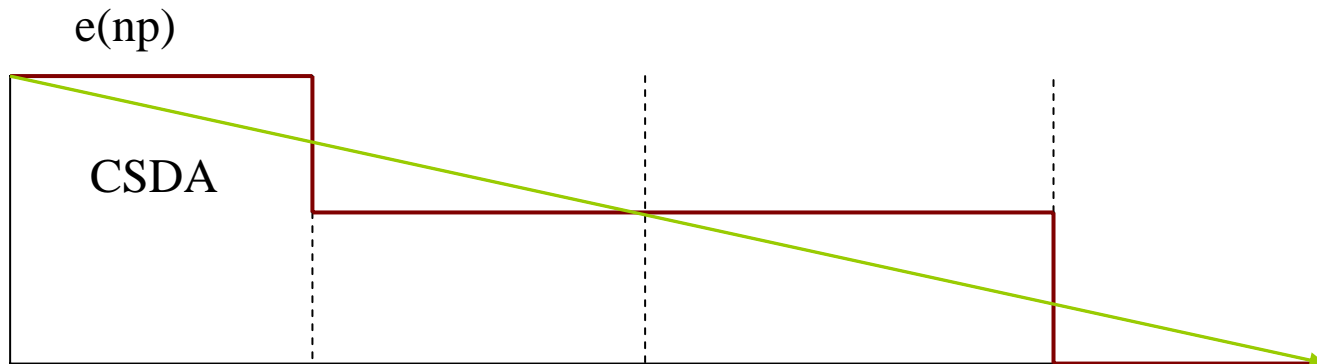
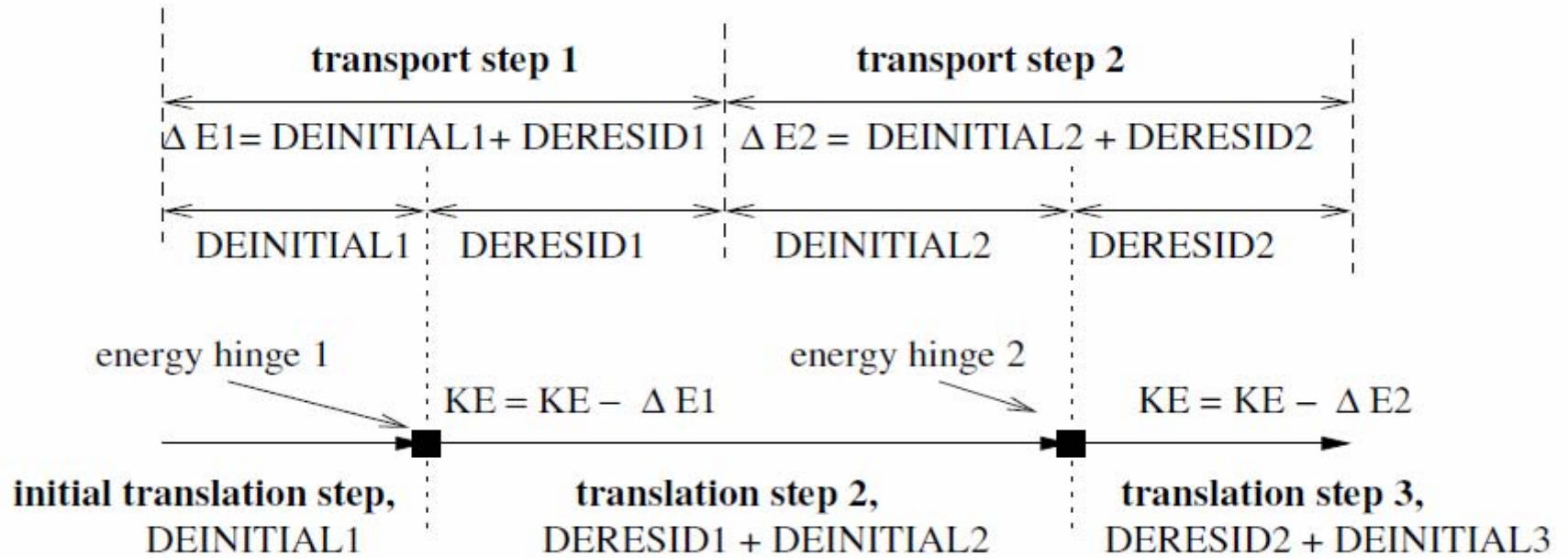
1. 当該物質、エネルギーに対応した $K_1(t)$ と乱数( $\xi$ )を用いて $\xi K_1(t)$ をもとめ、 $\xi K_1(t)$ に対応する移動距離 $t_1$ (MS-hingeポイントまでの距離)と $(1-\xi)K_1(t)$ に対応する移動距離 $t_2$ (MS-hingeポイントからMSステップの終点までの距離)を求める
2. MS-hingeポイントで、多重散乱モデルに従い、方向を変える
3.  $t_1$ 又は $t_2$ に阻止能を掛けた値を付与エネルギーに
4.  $t_1, t_2$ は、EGS4での曲線距離に対応する移動距離

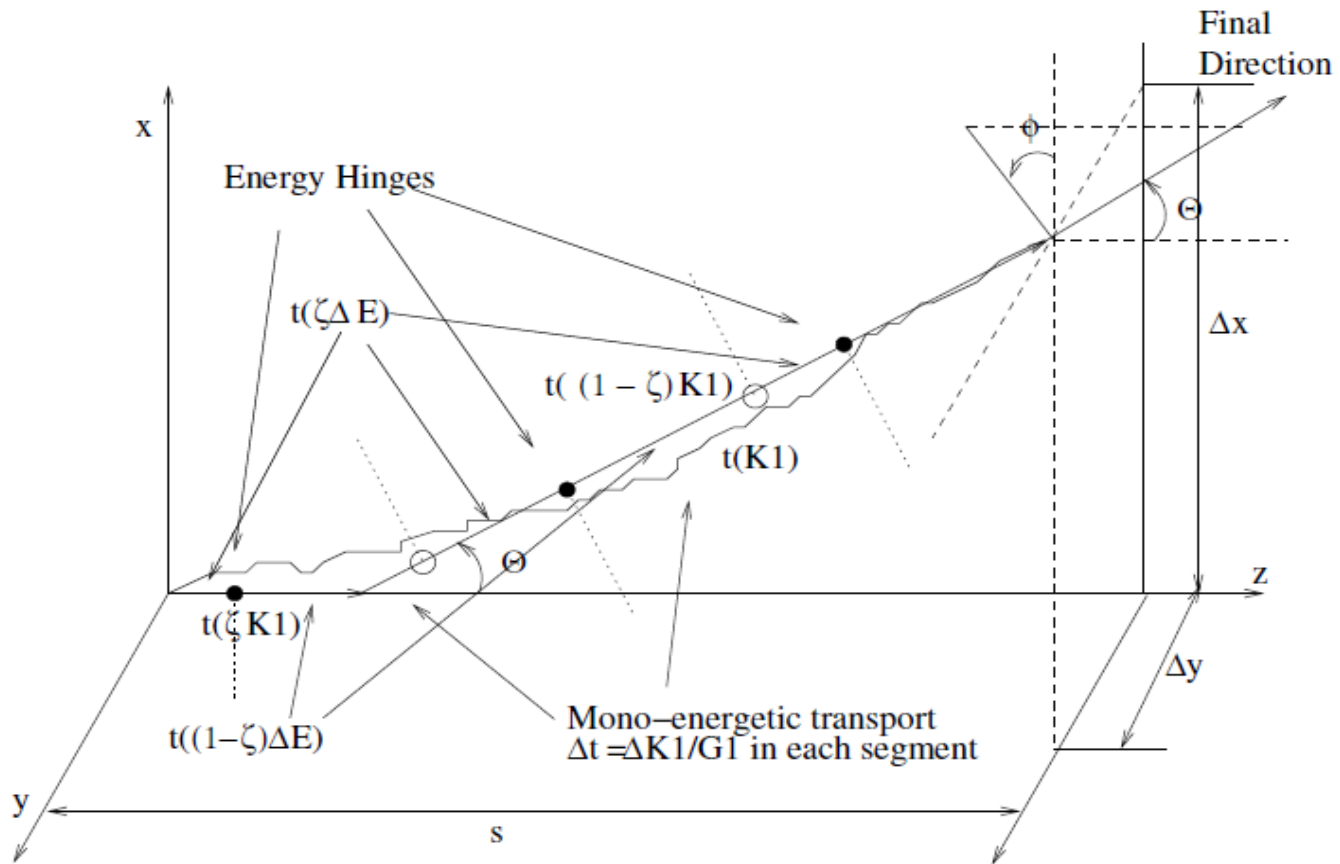
# Energy Hingeの導入

- 電子は物質中を移動する際に、物質中の電子と衝突してその運動エネルギーを失い、軌道電子が外側の軌道に移り原子が励起状態になるか、原子から電子が放出され原子が電離される
- 電子の運動エネルギーの一部が原子の励起エネルギーや電離エネルギーのように運動エネルギー以外のエネルギーになることから非弾性散乱と呼ばれる
- 非弾性散乱も回数が非常に多いため、**連続減速近似(CSDA)**を用いる
- CSDAでは、電子は移動に伴い連続的にエネルギーが変化するため、多重散乱ヒンジのサンプリングの計算がきわめて煩雑。
- **Energy hingeの導入**
  - エネルギー損失ステップ間のエネルギー損失を、乱数を用いてステップ内の一ヶ所で集中的に行うとする
  - エネルギー損失ポイント間の電子のエネルギーが一定であることから、その間での $G_l$ が一定となり、多重散乱ヒンジ位置 $t(\xi K_l)$ の計算が容易となる。

$$K_1(t(E)) = \int_0^t dt' G_1(t'(E)) \quad \longrightarrow \quad t(\xi K_1) = \frac{\xi K_1}{G_1}$$
$$G_l(t(E)) = 2\pi \int d\mu \Sigma(\mu; t(E)) [1 - P_l(\mu)]$$

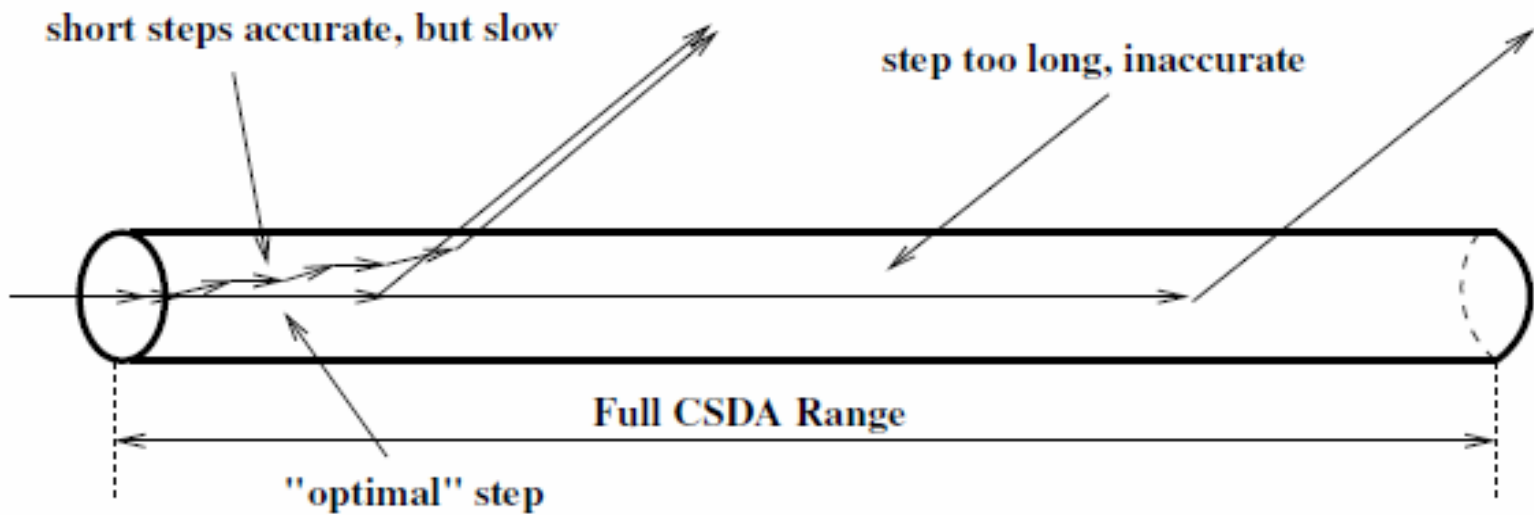
Transport Steps,  $\Delta E = E \times \text{ESTEPE}$







- 無限大の計算形状に対しては、OK
- 有限サイズの計算形状ではどうか？



「ほうきの柄」問題の図解

ブルームスティック・プロブレム

# 多重散乱Step Sizeのコントロール(1)

- K1 (散乱strength) を制限

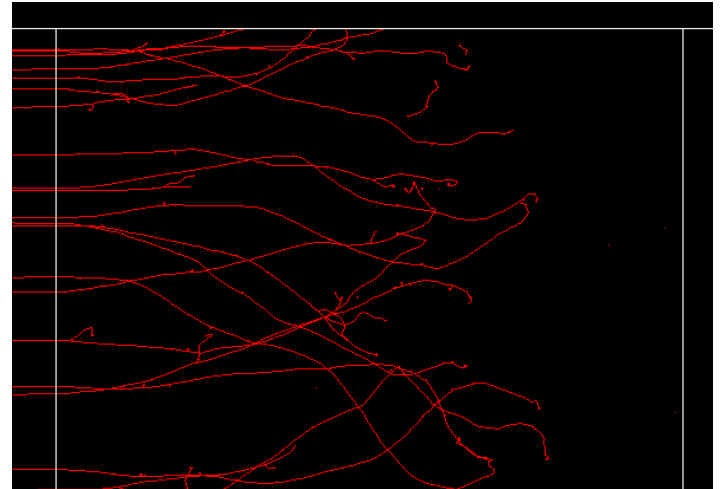
- 問題点:

- エネルギーが低い  
ところでよく曲がるため  
低エネルギーに  
計算時間の多くが  
費やされてしまう

例: 10 MeV電子の2%エネルギーロスに対応するK1は  
500 keV電子の0.3%エネルギーロスに対応するK1と同じ

10 MeV e<sup>-</sup>

アクリル5cm厚

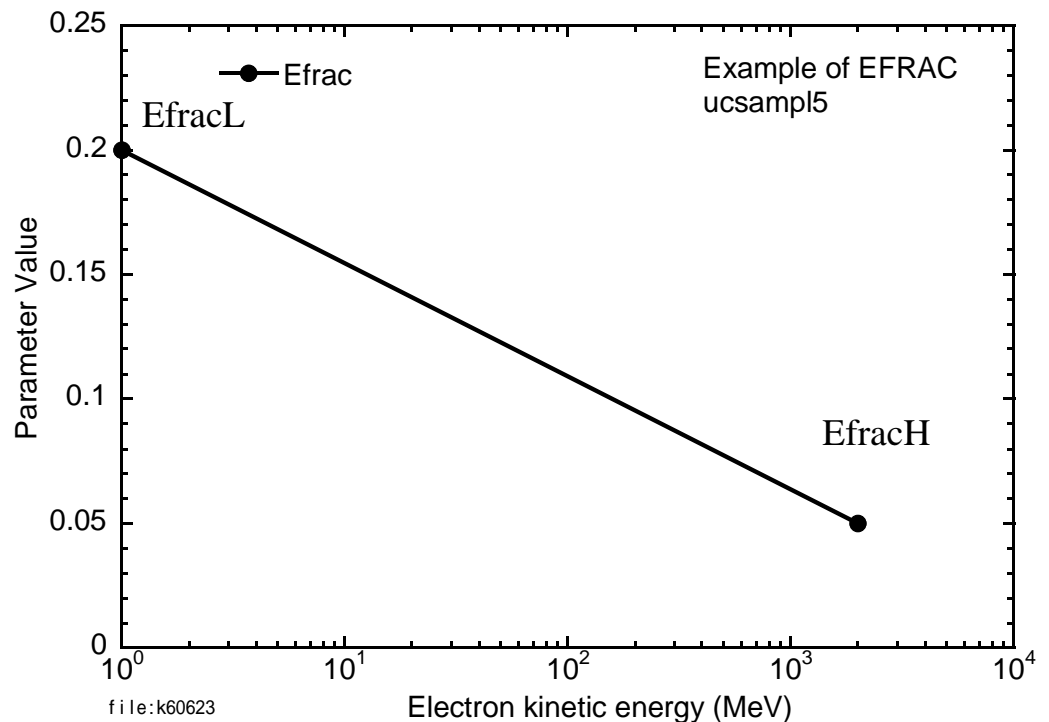


エネルギーが高い所 エネルギーが低く  
では「曲がり」は少ない となるとよく「曲がる」

# 多重散乱Step sizeのコントロール(2)

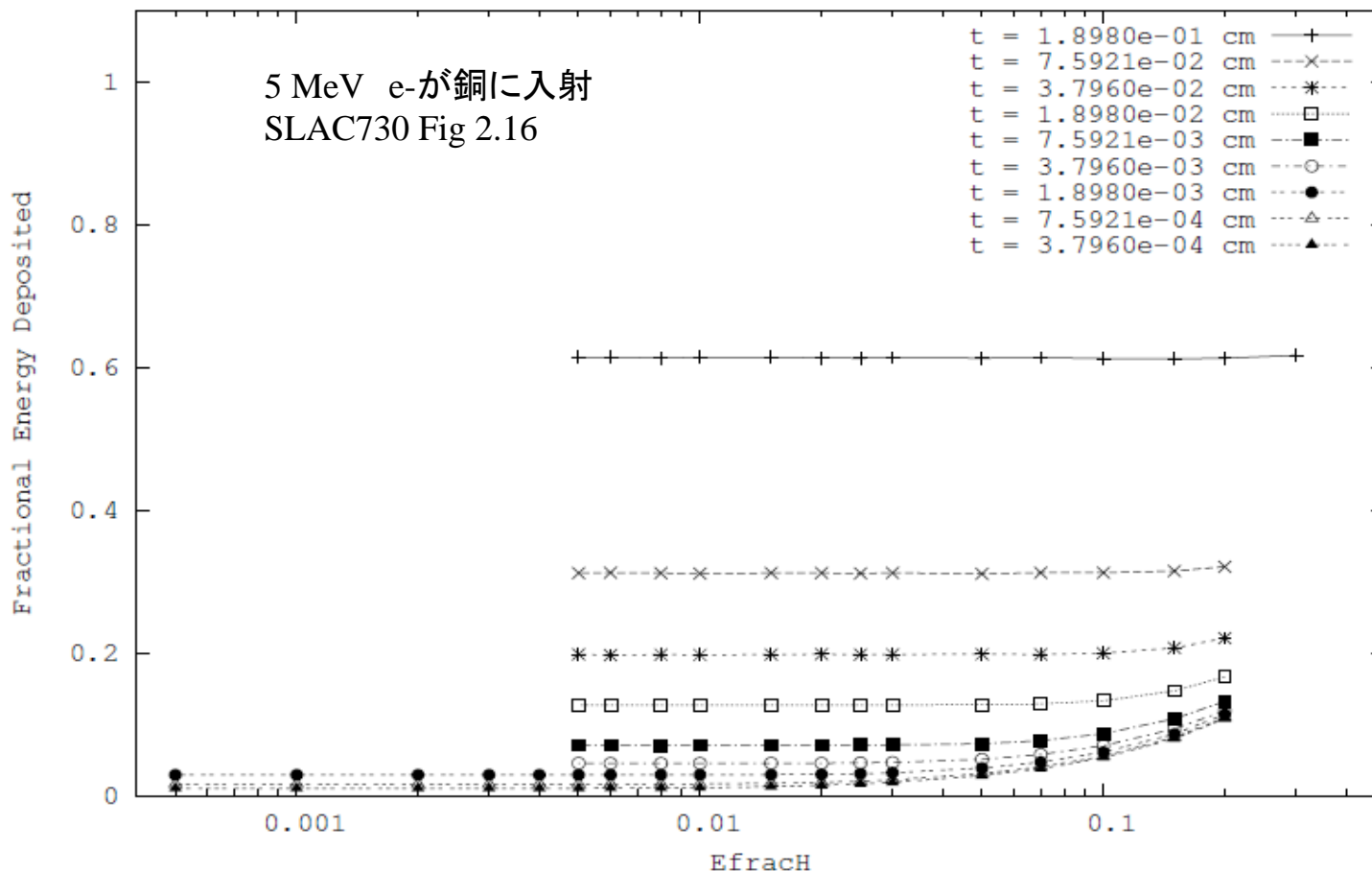
- エネルギーに依存するstep size

- efrac(最高エネルギー)、efracL(カットオフエネルギー) --- 途中のエネルギーについてはlog内挿
- どの程度小さくとれば良いのかを決める目安を付けにくい
- 2004年試行版



# 「ほうき柄」領域へのエネルギー付与の収束

5 MeV electrons on Cu, R = 3.796037e-01



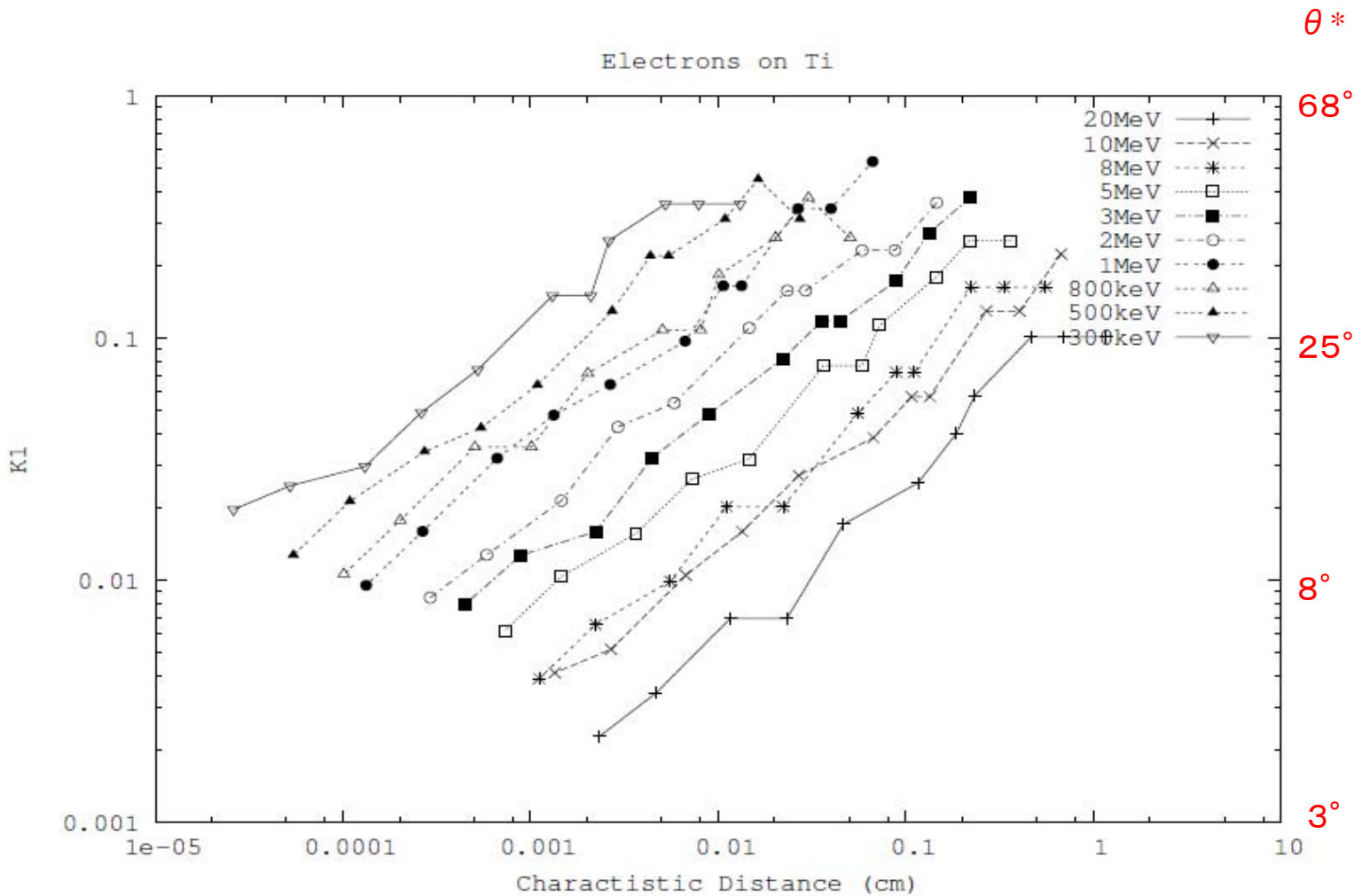
吸収エネルギーを収束させるEfracHの上限値がある。

→対応する $K_1$ を計算に使用する

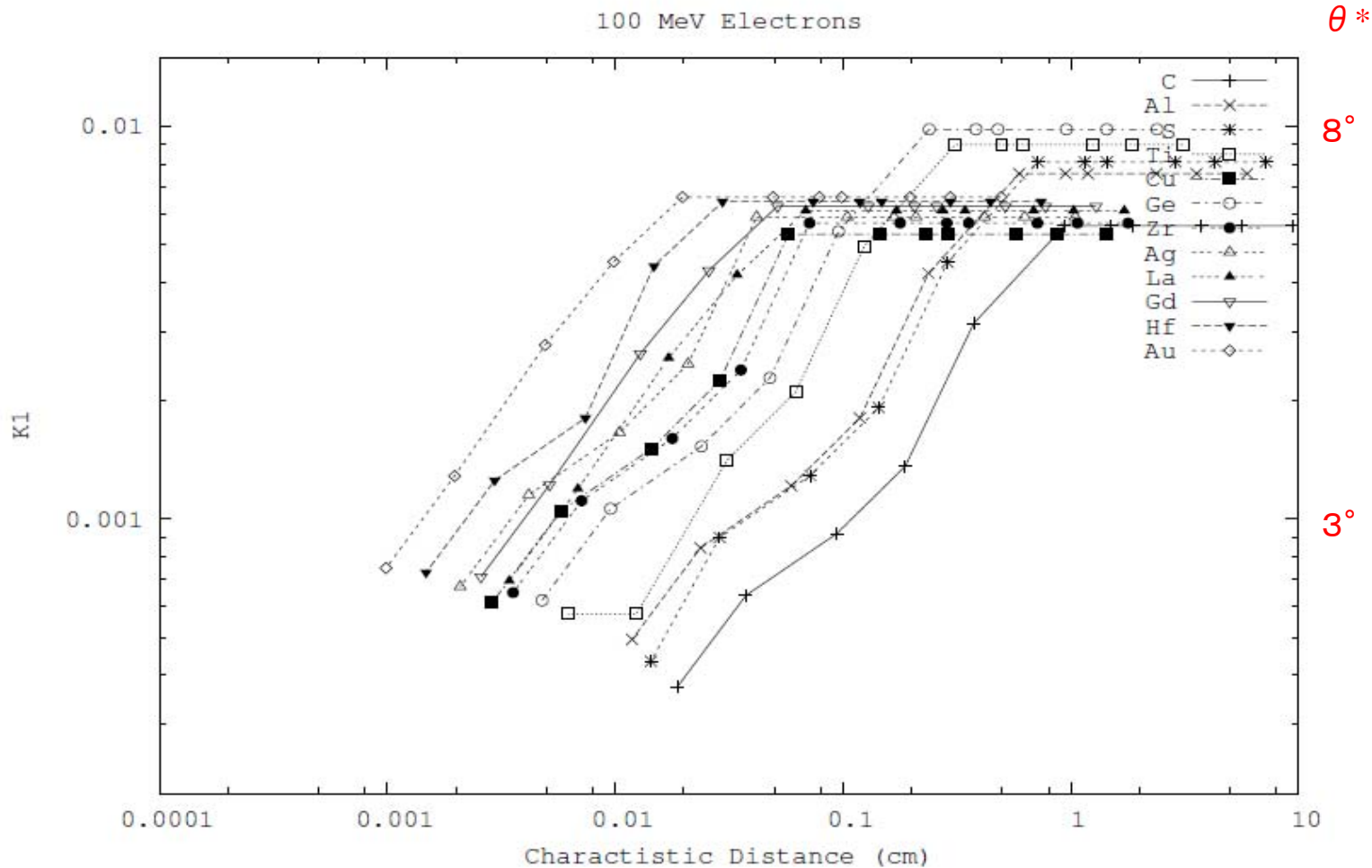
$EfracH = f(\text{筭の柄の直径, エネルギー, 物質})$

# 多重散乱Step sizeのコントロール(3)

- スコアする領域の大きさに対応するパラメーター  
**Characteristic Dimension**による制御
  - Characteristic Dimensionに対応する $K_1(E)$ をpegsで計算し、各エネルギーに対応する $K_1(E)$ をstep sizeとして使用
  - 当該物質で構成するリージョンに対応する大きさという目安が可能
  - 2005年試行版から使用



最適な初期散乱強度 $K_1$ 対ほうき柄の直径。Tiの場合のエネルギーによる違い。(EGS5マニュアル[1] Fig. 2-17)

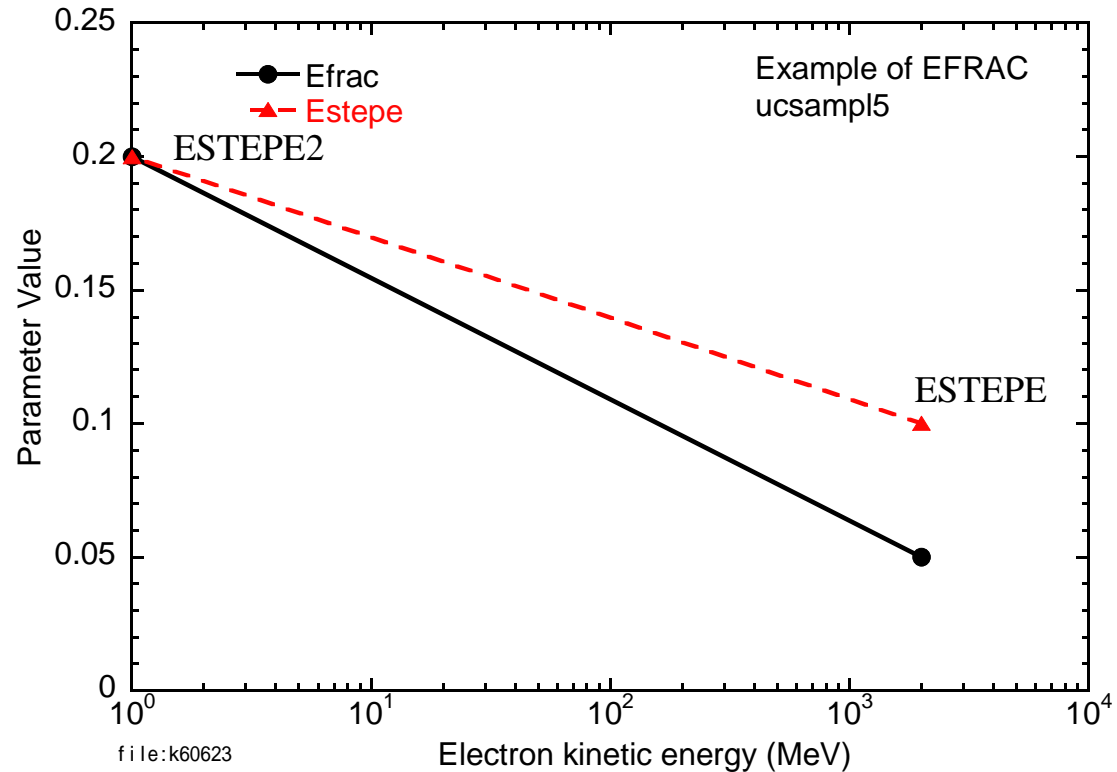


最適な初期散乱強度K1対ほうき柄の直径。100MeV電子に対する物質による違い。(EGS5マニュアル[1] Fig. 2-18)



# Energy Hinge の制御 (2005版)

- estepe – 最高エネルギーの電子の場合について  $\Delta E = e * \text{estepe}$  に対応する長さを energy hinge とする
- estepe2 – 同様にカットオフエネルギーの電子について  $\Delta E = e * \text{estepe2}$  に対応する長さを energy hinge とする
- 他のエネルギーについては、log内挿で割合を決定

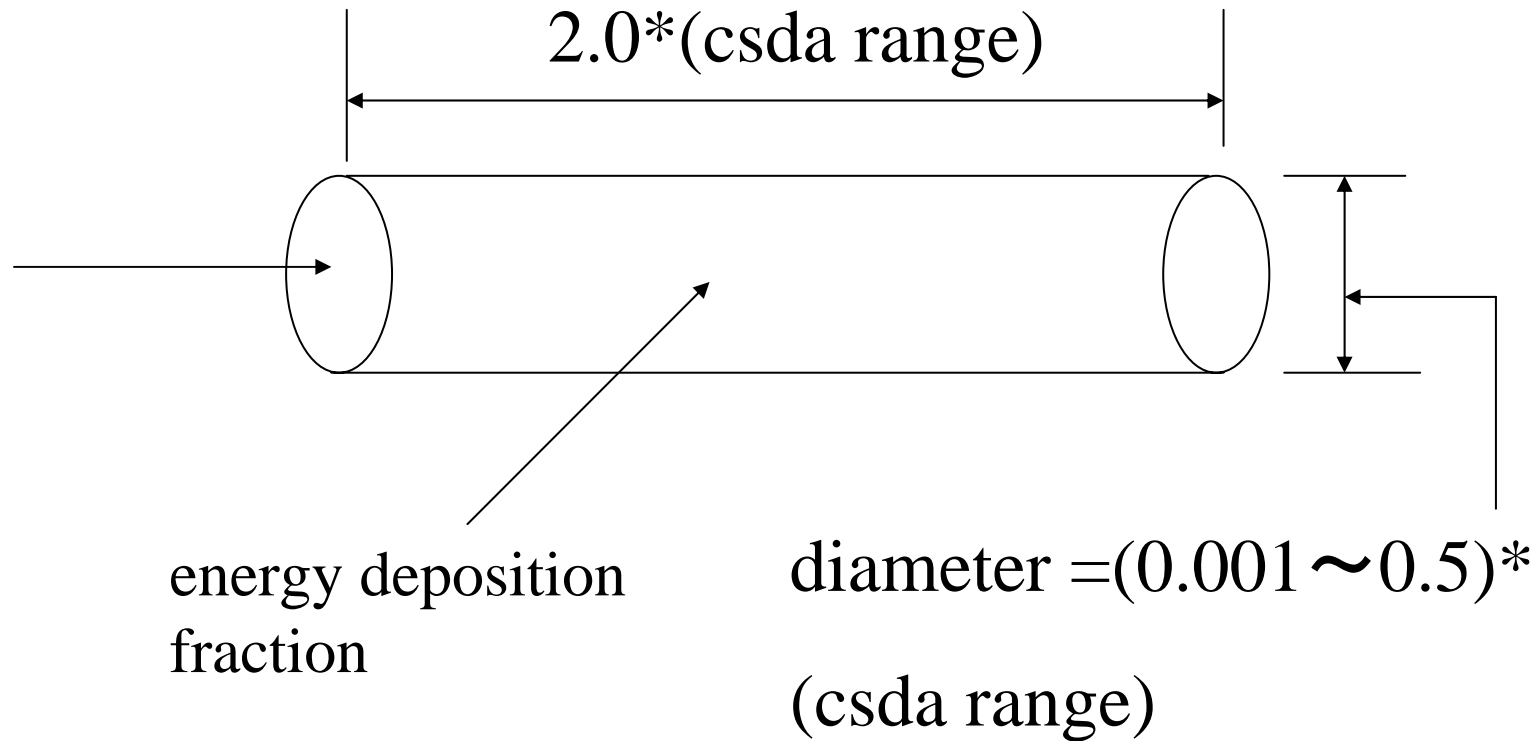


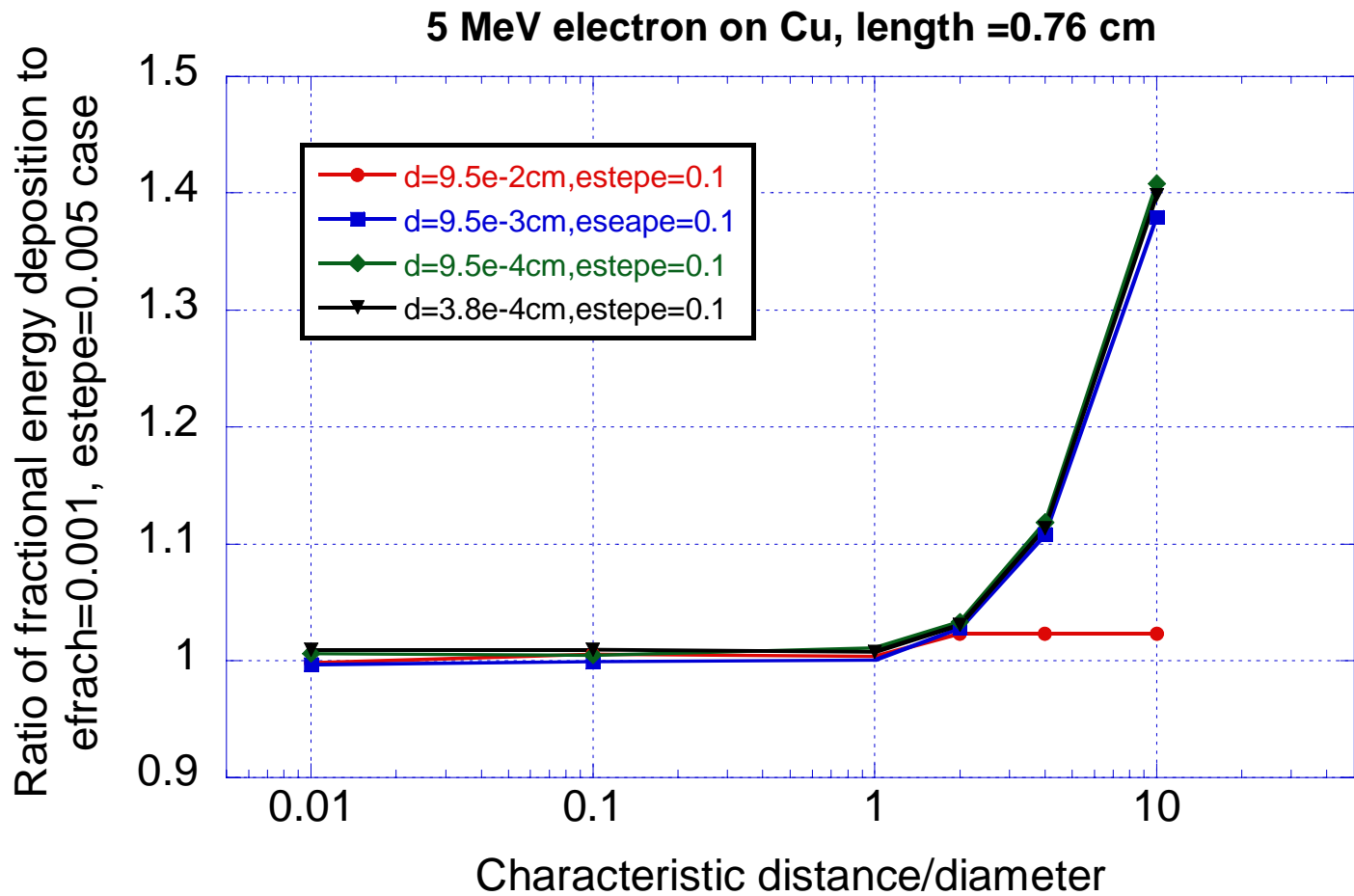
# EGS5 $\beta$ -2006-03-30版

- Energy Hinge: 自動設定
- 多重散乱 Hinge: 有限のBloomstickから飛び出す電子の角度分布に基づき設定
- 詳しくはWilderman 講演

以上

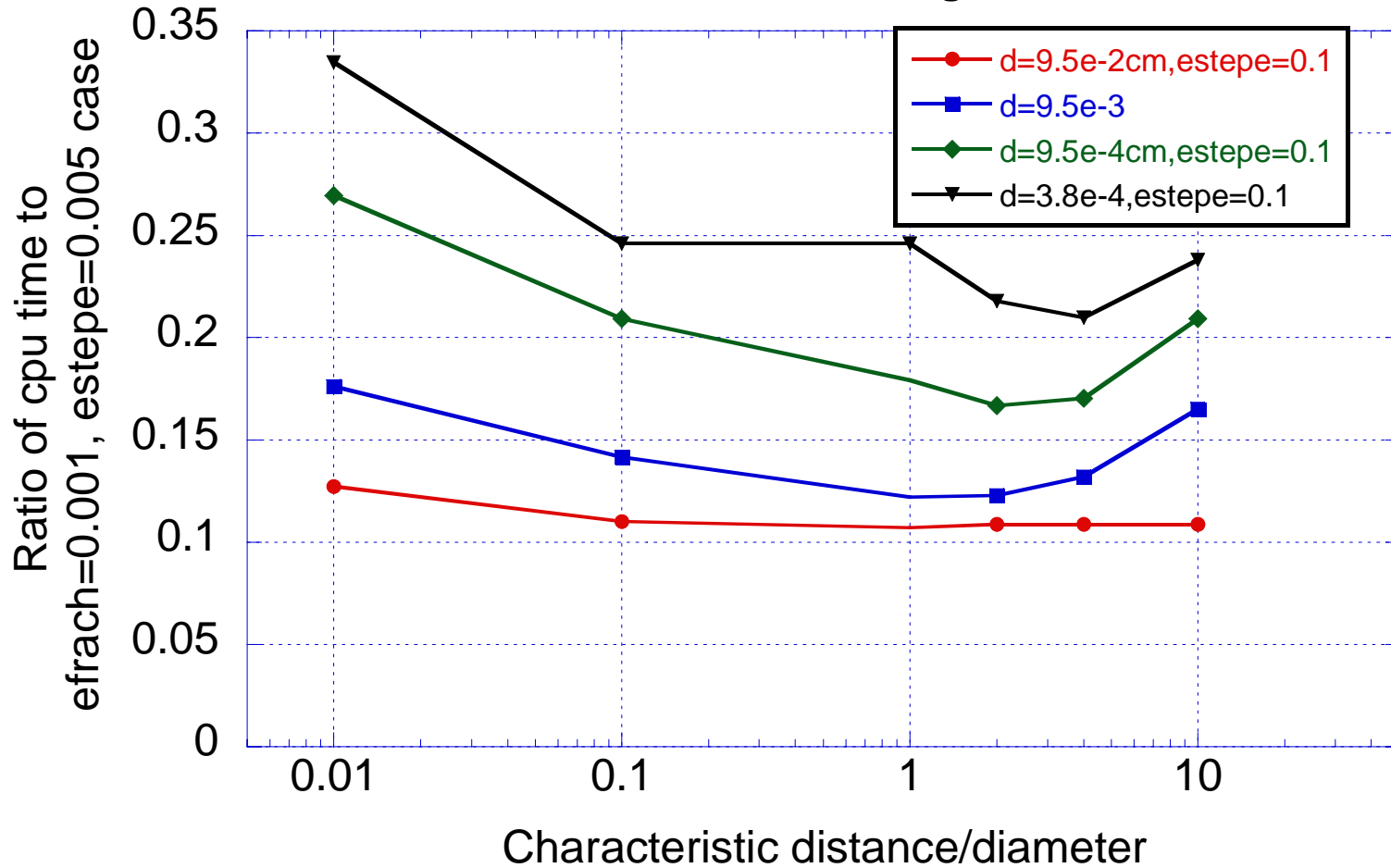
# ブルームステイック試計算





Ucbroomstick\_t.fの結果例(円筒中でのエネルギー吸収)

### 5 MeV electron on Cu, length = 0.76cm



Ucbroomstick\_t.fの結果例(計算時間)