

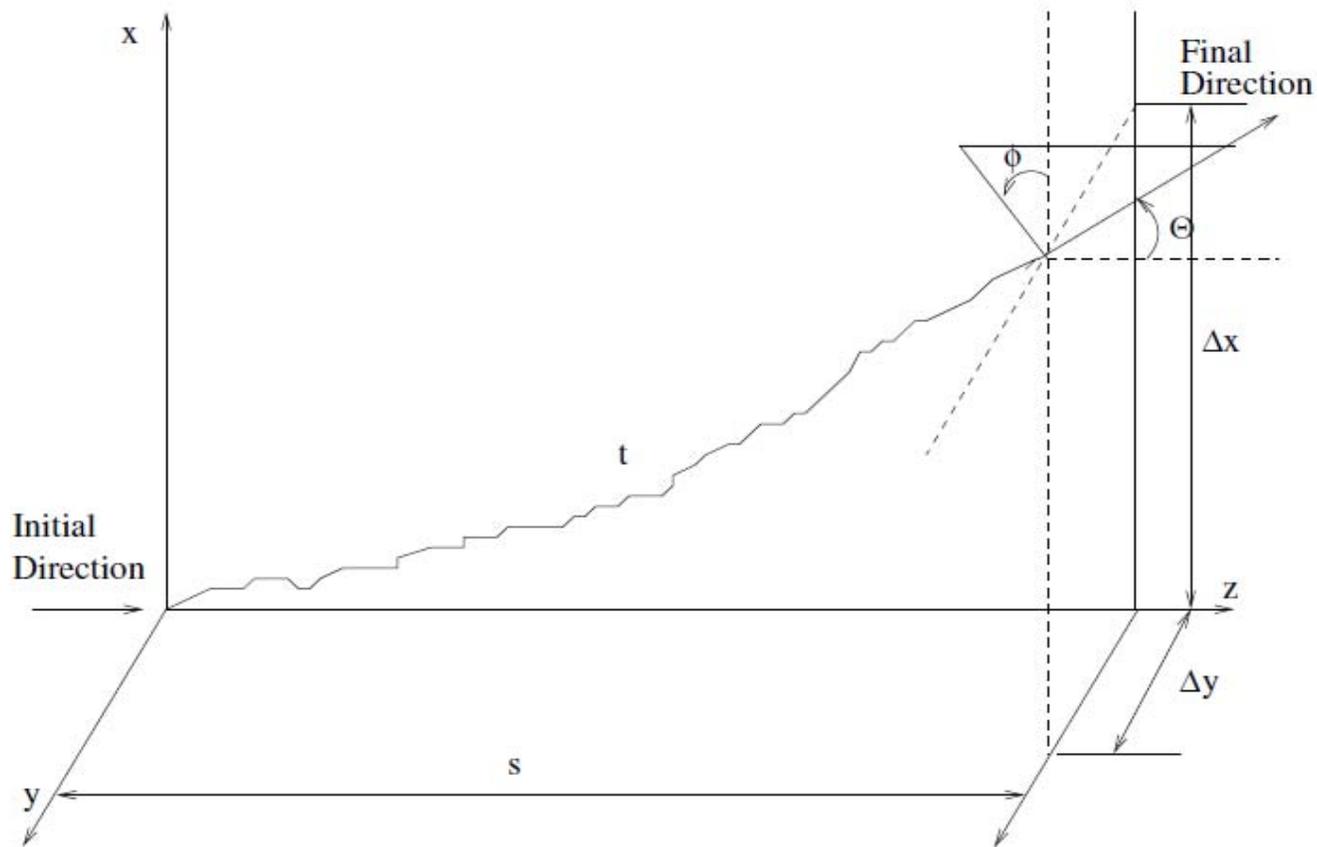
EGS5 での電子輸送の扱い

平山 英夫、波戸 芳仁

KEK, High Energy Accelerator
Research Organization

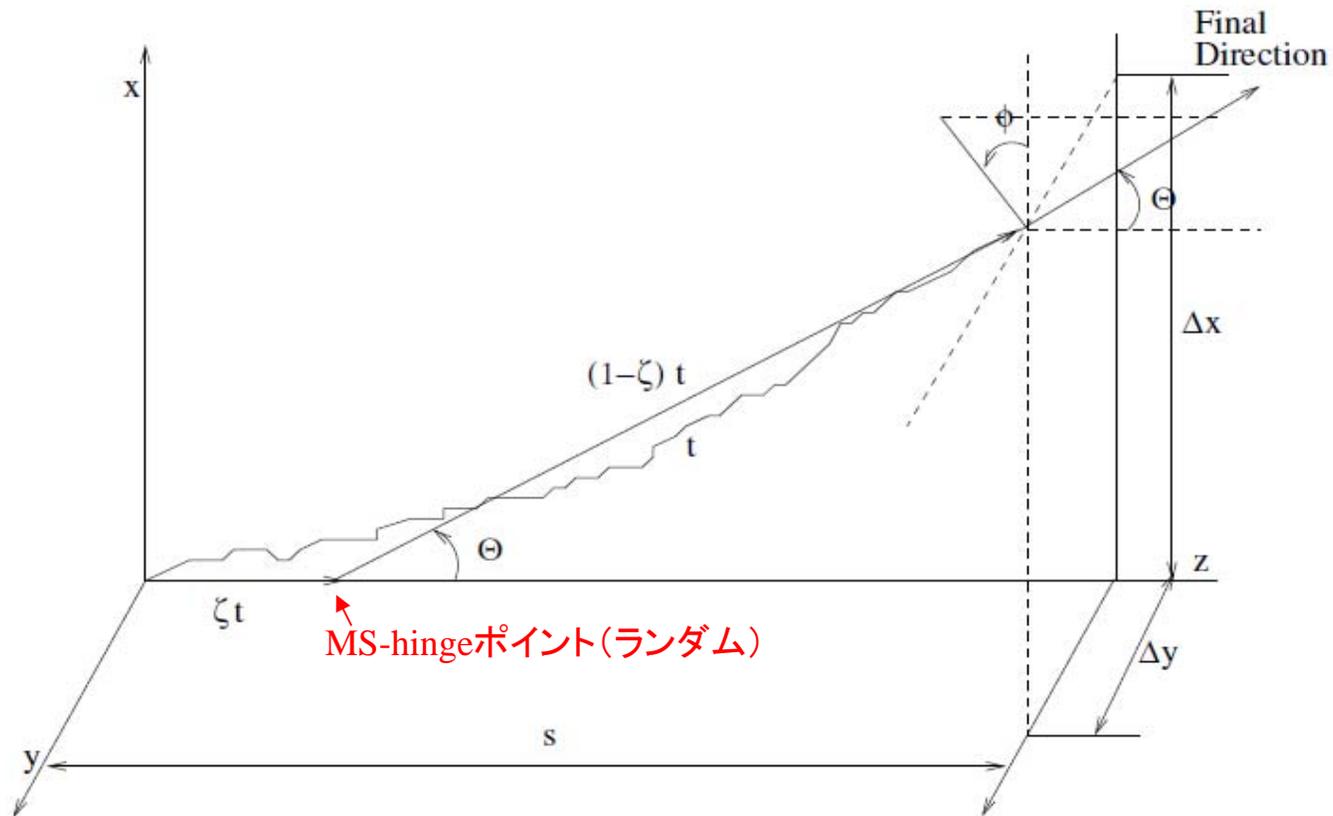
多重散乱の扱い

- 電子・陽電子(以下、総称して電子)は、物資中で非常に多数回の弾性散乱をする。
 - 散乱断面積が大きい。(mfpが短い)
 - 個々の散乱を扱うことは、原理的には可能であっても、計算時間との関係で特別な場合を除いて実際的ではない。
- Condensed History Techniqueの使用
 - 電子の飛跡をステップに分け、多重散乱モデルを使用して、直線距離から実際の飛程の変換、方向や位置の変化を組み入れ



EGS4での扱い

1. 多重散乱ステップサイズ (s : 直線距離) を決める。(ESTEPEを使用して、デフォルト値より小さくすることも可能)
2. 直線距離 (s) に対して、ステップ移動後に、多重散乱モデルを使って、電子の移動距離 (t : 曲線距離)、散乱角度 (θ)、位置の変位 ($\Delta x^2 + \Delta y^2$) を求める
3. $t \times (dE/dx)$ を付与エネルギーとする



EGS5の多重散乱ステップ(その①)

移動に伴うエネルギー損失を無視した場合には、この Random hingeモデルで、 t/s 及び $\langle \Delta x^2 + \Delta y^2 \rangle$ を正しく計算できる。

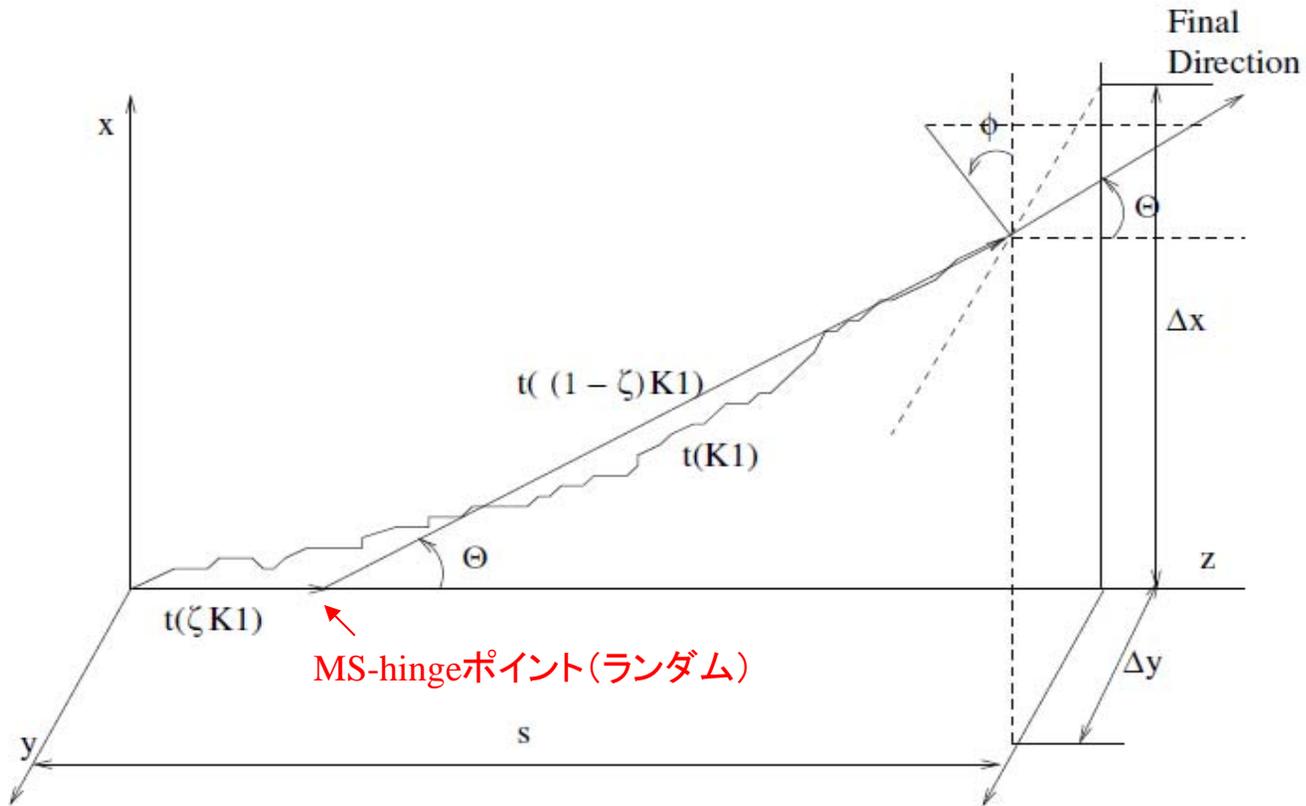
電子の移動に伴うエネルギー変化 を加味したrandom hinge

- “ t ”を使用したrandom hinge は、電子のエネルギー変化を含めた実際の状況との比較で、平均直線距離 $\langle s \rangle$ を過小評価し、位置の変位($\langle \Delta x^2 + \Delta y^2 \rangle$)を過大評価 Fernandez Varea et al. (1993)
- Scattering strength $K_1(t)$ を用いたrandom hinge

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

$$G_1(t) = 2\pi \int d\mu \Sigma(\mu; t) [1 - P_1(\mu)]$$

ヒンジの位置は、 $t(\xi K_1)$



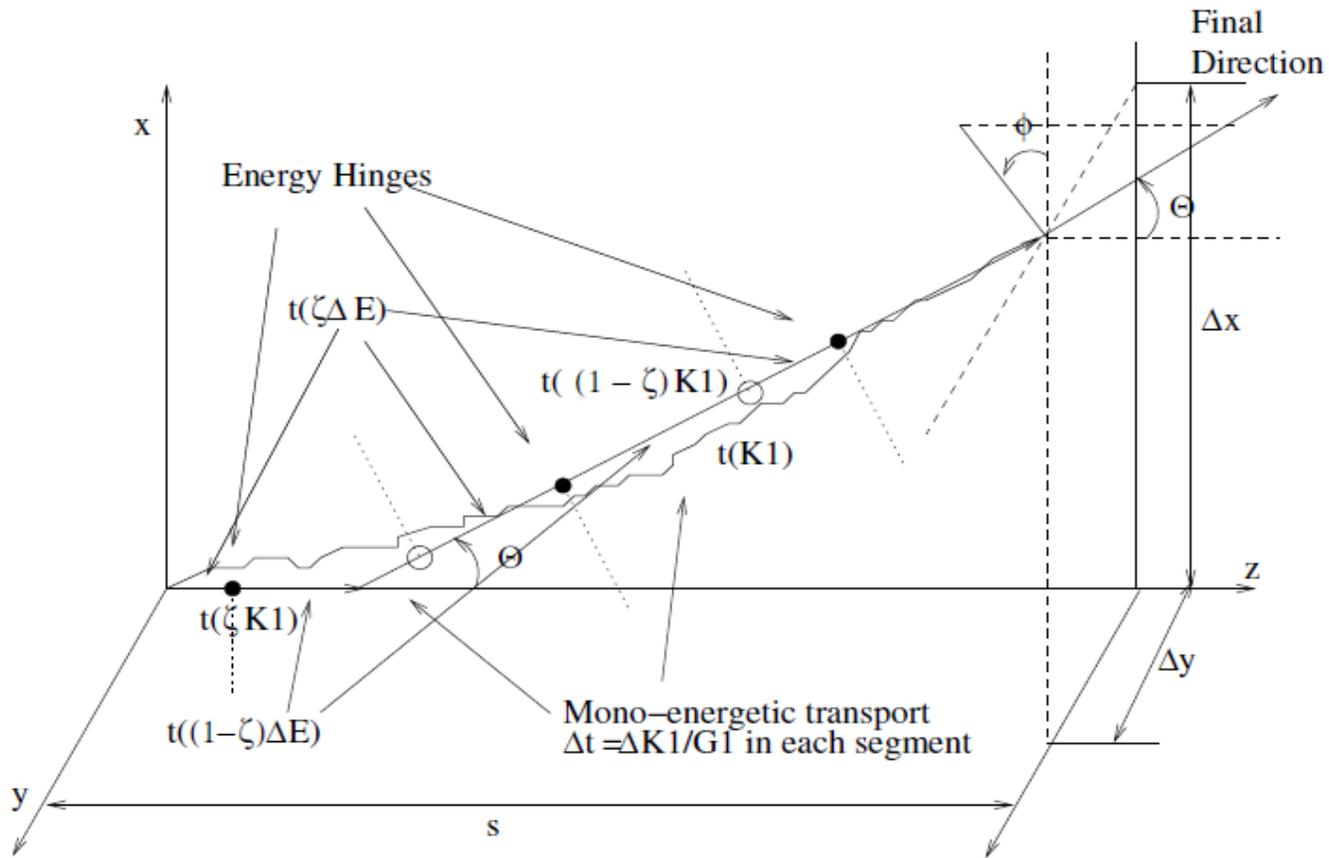
EGS5の多重散乱ステップ(その②)

1. 当該物質、当該電子エネルギーに対応した $K_1(t)$ と乱数(ξ)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
 ☆直線距離 s は使用しない

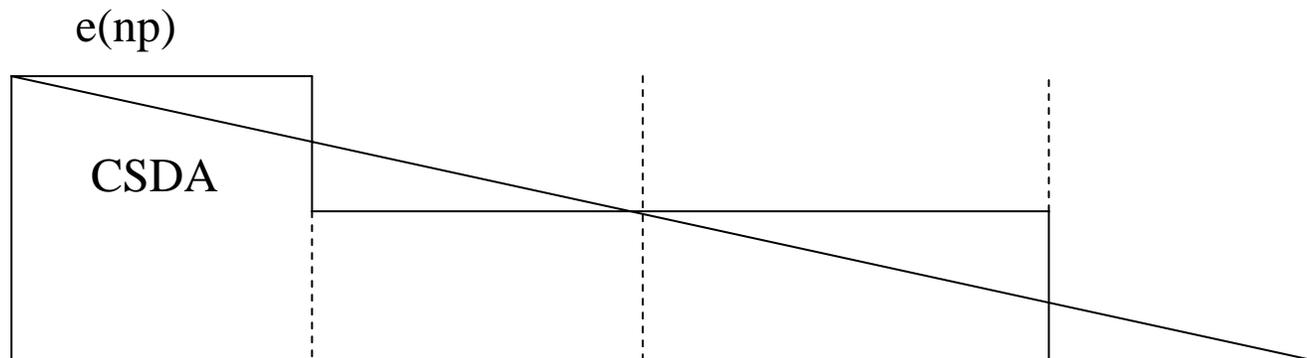
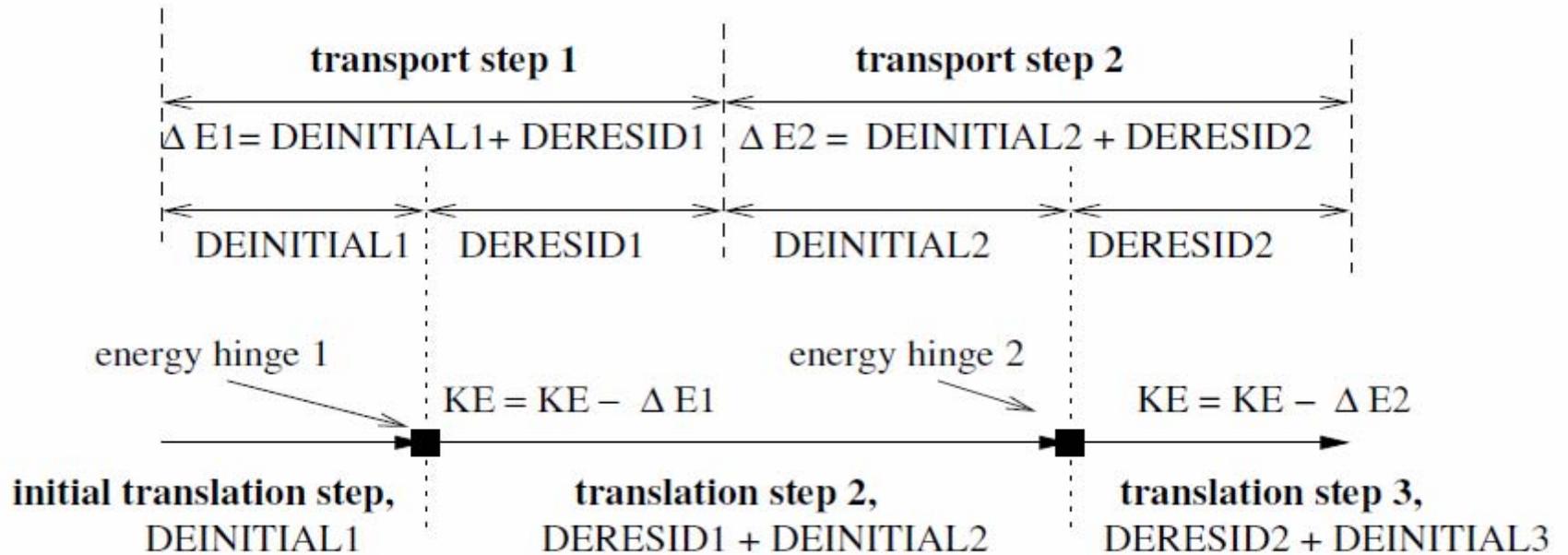
Energy Hingeの導入

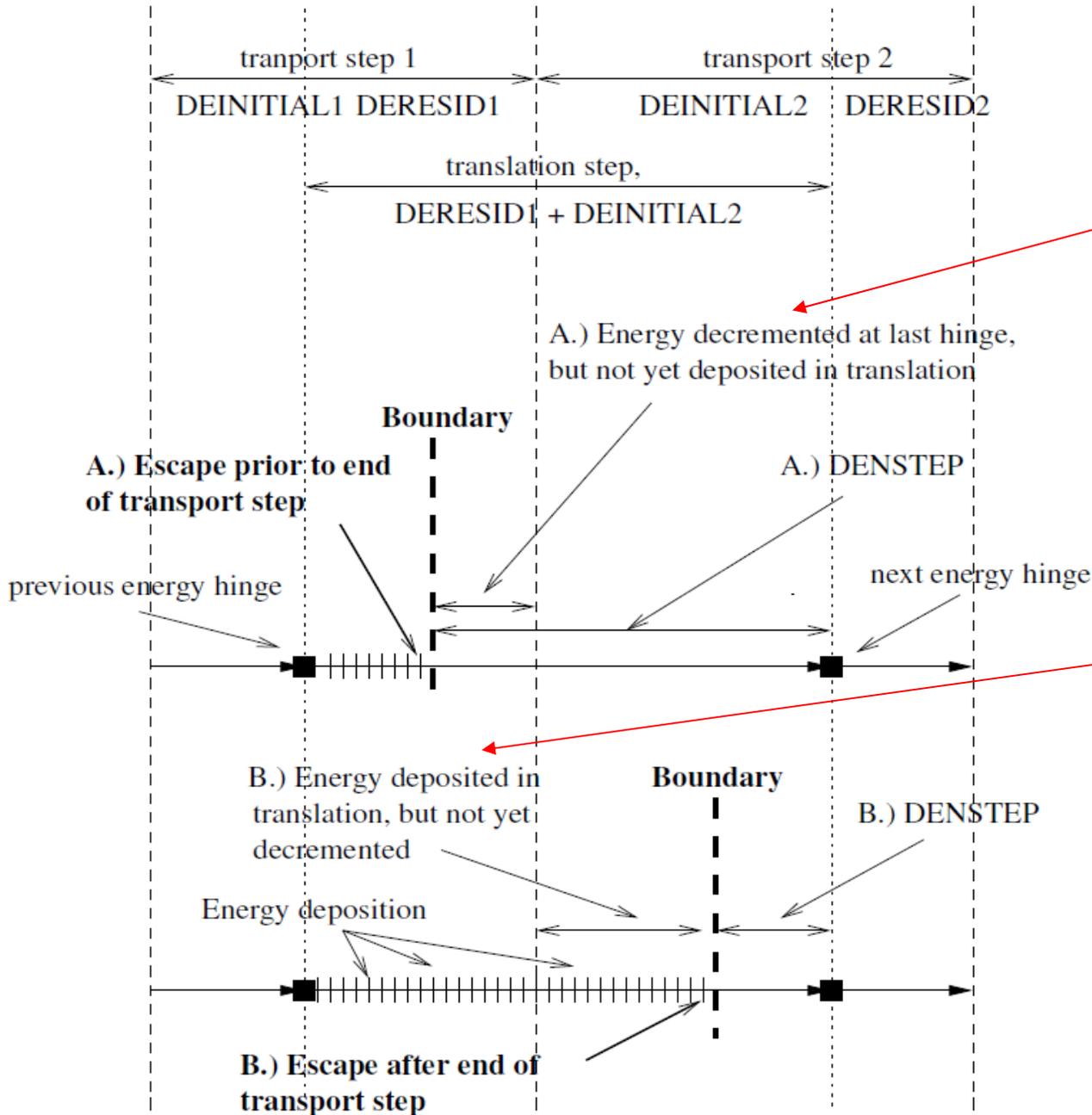
- 電子は物質中を移動する際に、物資中の電子と衝突してその運動エネルギーを失い、軌道電子が外側の軌道に移り原子が励起状態になるか、原子から電子が放出され原子が電離される
- 電子の運動エネルギーの一部が原子の励起エネルギーや電離エネルギーのように運動エネルギー以外のエネルギーになることから非弾性散乱と呼ばれる
- 非弾性散乱も弾性散乱同様に回数が非常に多い
- 非弾性散乱によるエネルギー減少は、連続エネルギー減衰(CSDA)として扱われる
- 結果として電子は移動に伴い連続的にエネルギーが変化することになり、この点からも扱いが複雑になる。
- Energy hingeの導入
 - エネルギー損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間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以外でのエネルギーが変わらないとする扱いが可能に
 - 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_1 が一定となり、多重散乱ヒンジ位置 $t(\xi K_1)$ の計算が容易となる。

$$t(\xi K_1) = \frac{\xi K_1}{G_1}$$



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



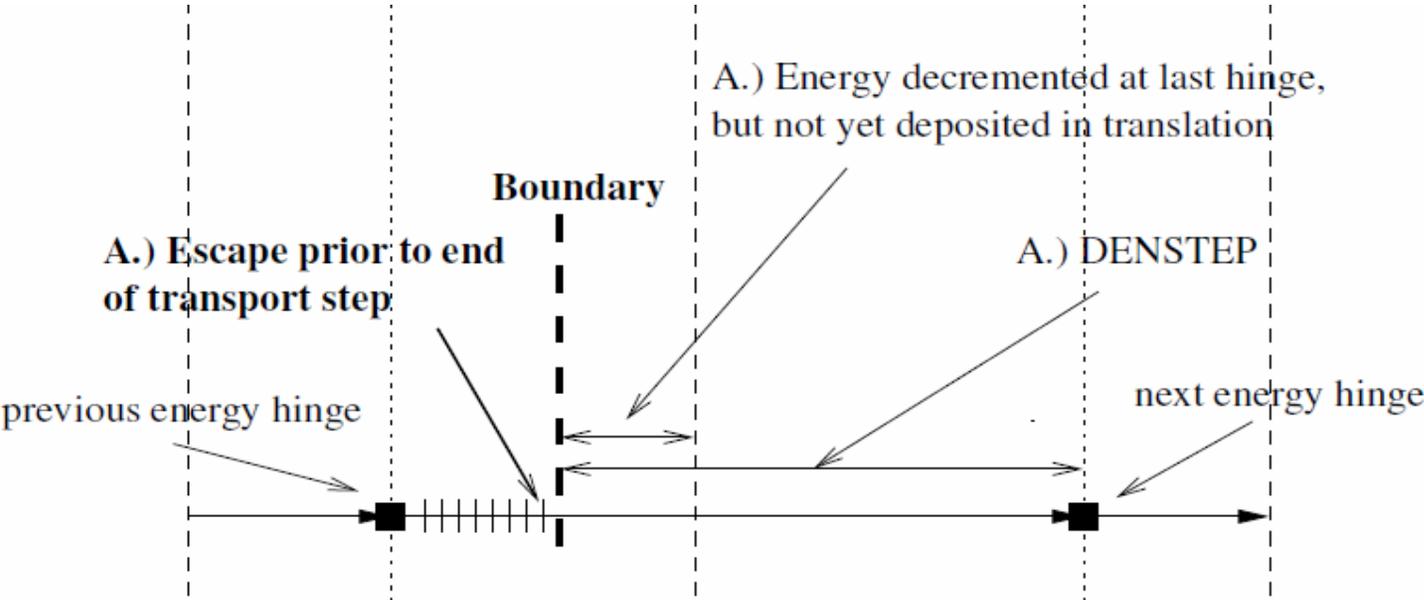
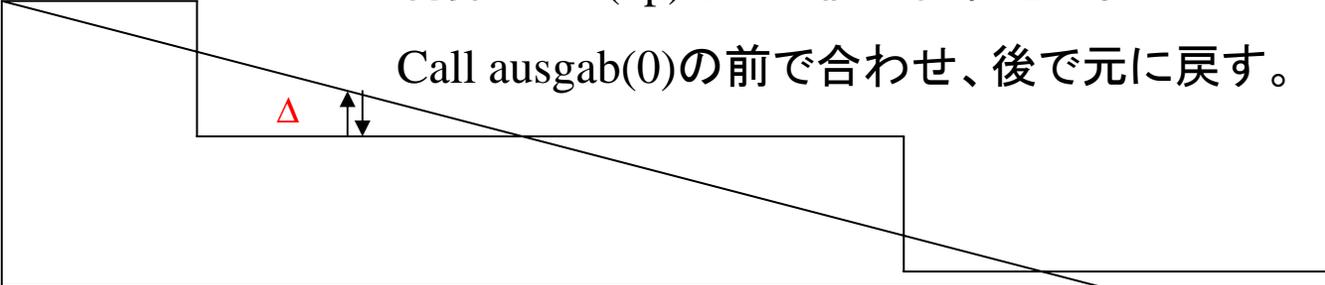


Step 1のhinge pointでエネルギーをboundary内側で付与しているが、本来は、次の領域でのエネルギー付与となるべきもの

Step 2のhinge pointでboundaryの外側に付与することになっているが、本来は、内側の領域に付与すべきもの

境界でのe(np)はcsda値に合わせる。

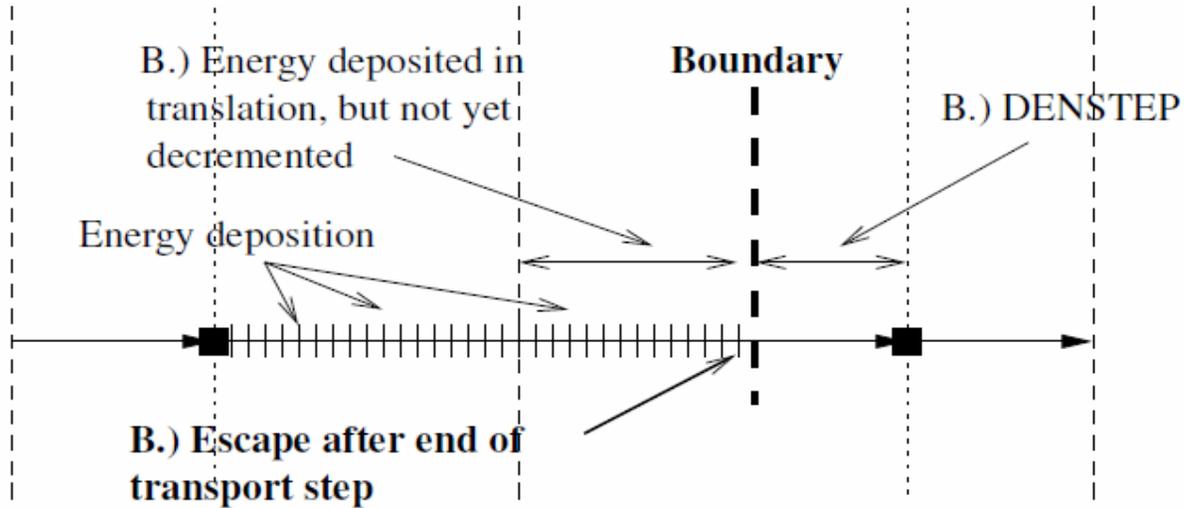
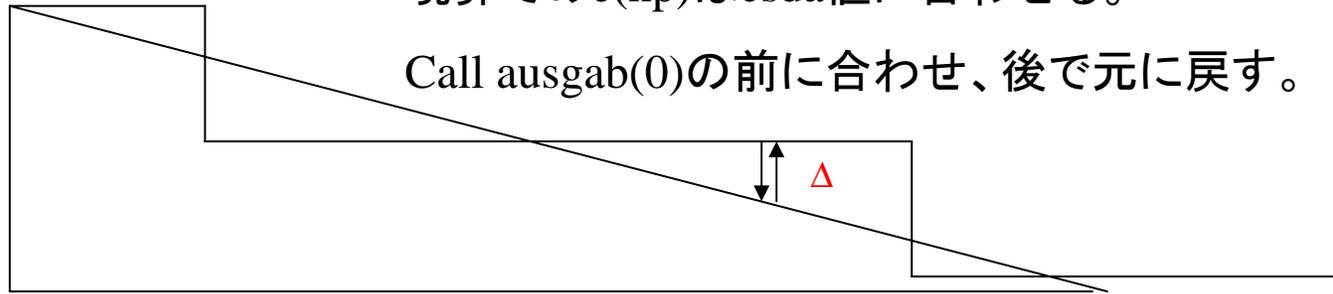
Call ausgab(0)の前で合わせ、後で元に戻す。



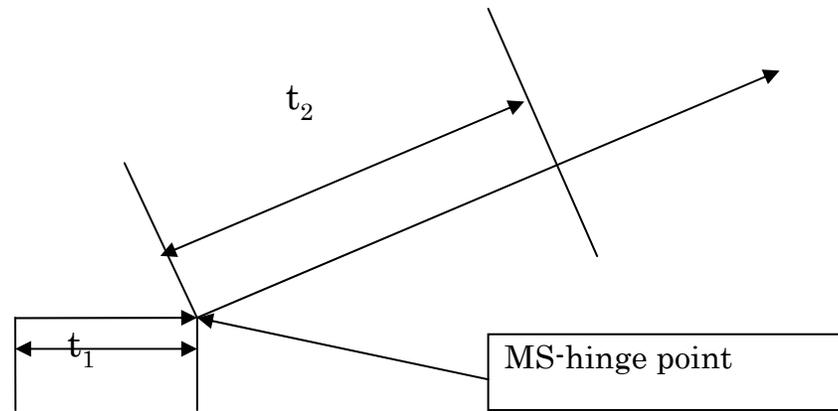
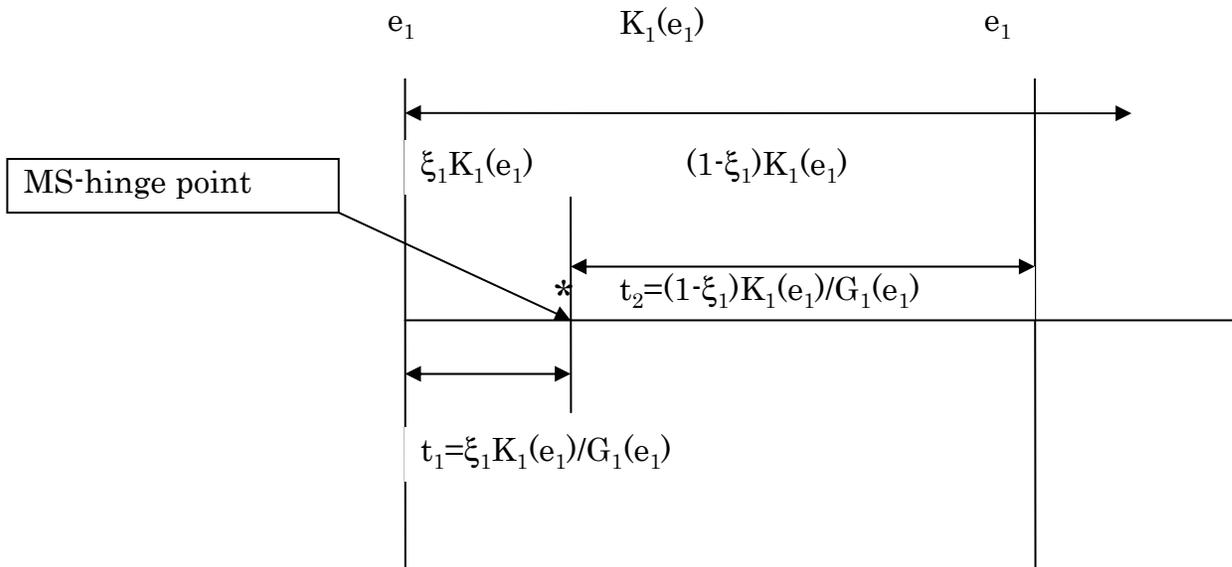
$$\Delta = -DEINIT + DENSTEP$$

境界での $e(np)$ はcsda値に合わせる。

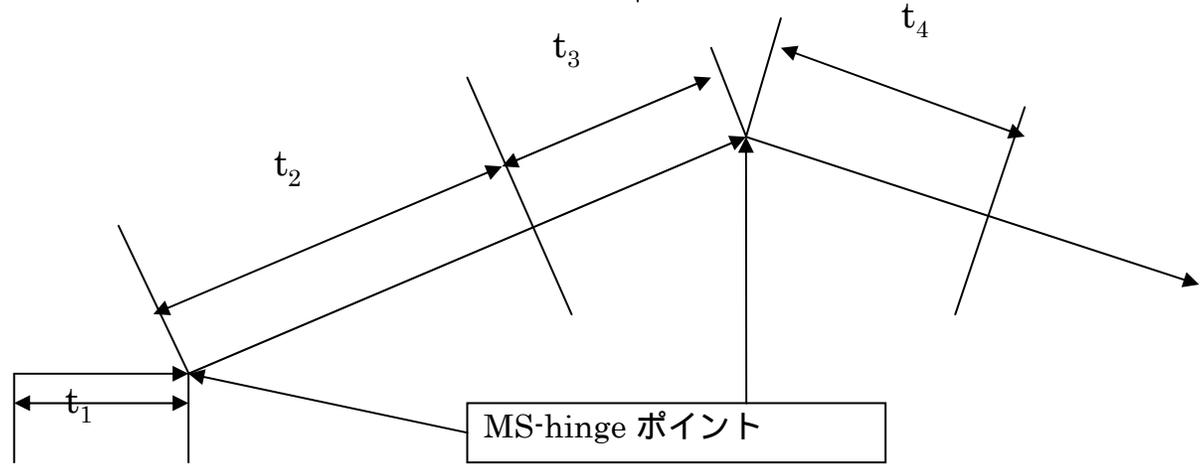
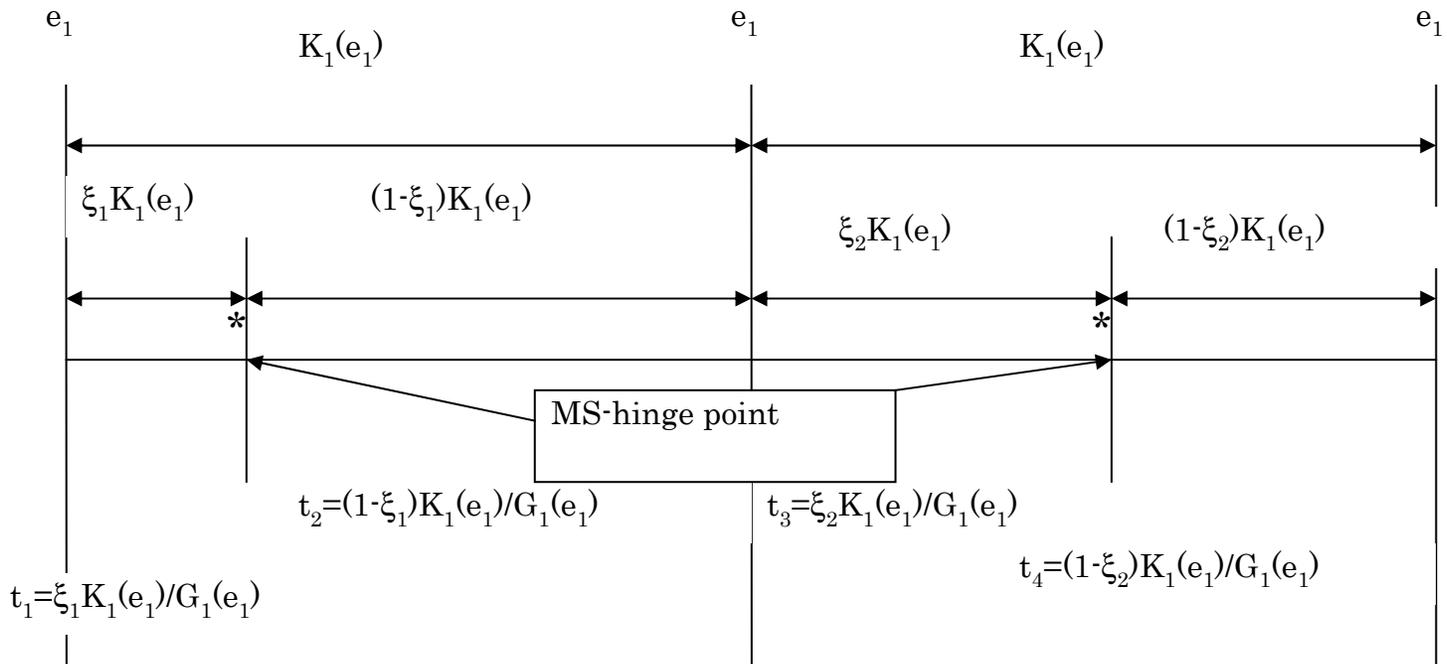
Call `ausgab(0)`の前に合わせ、後で元に戻す。



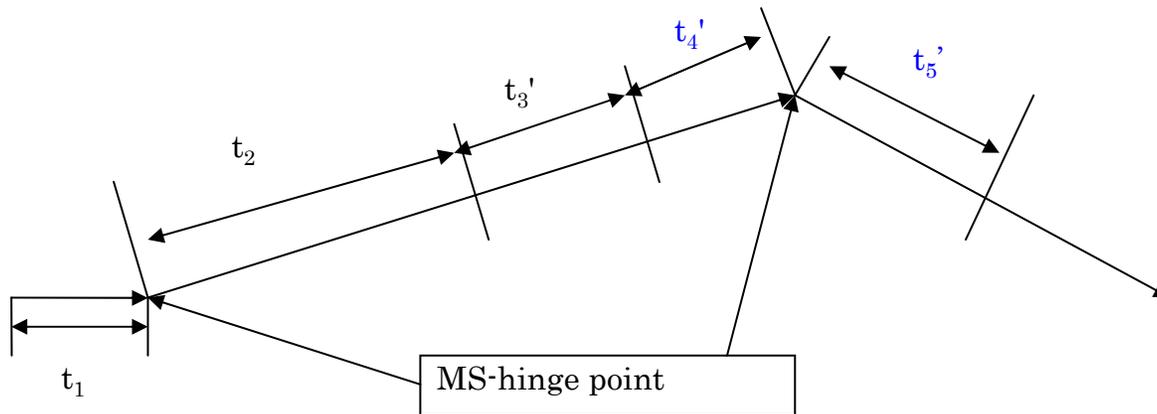
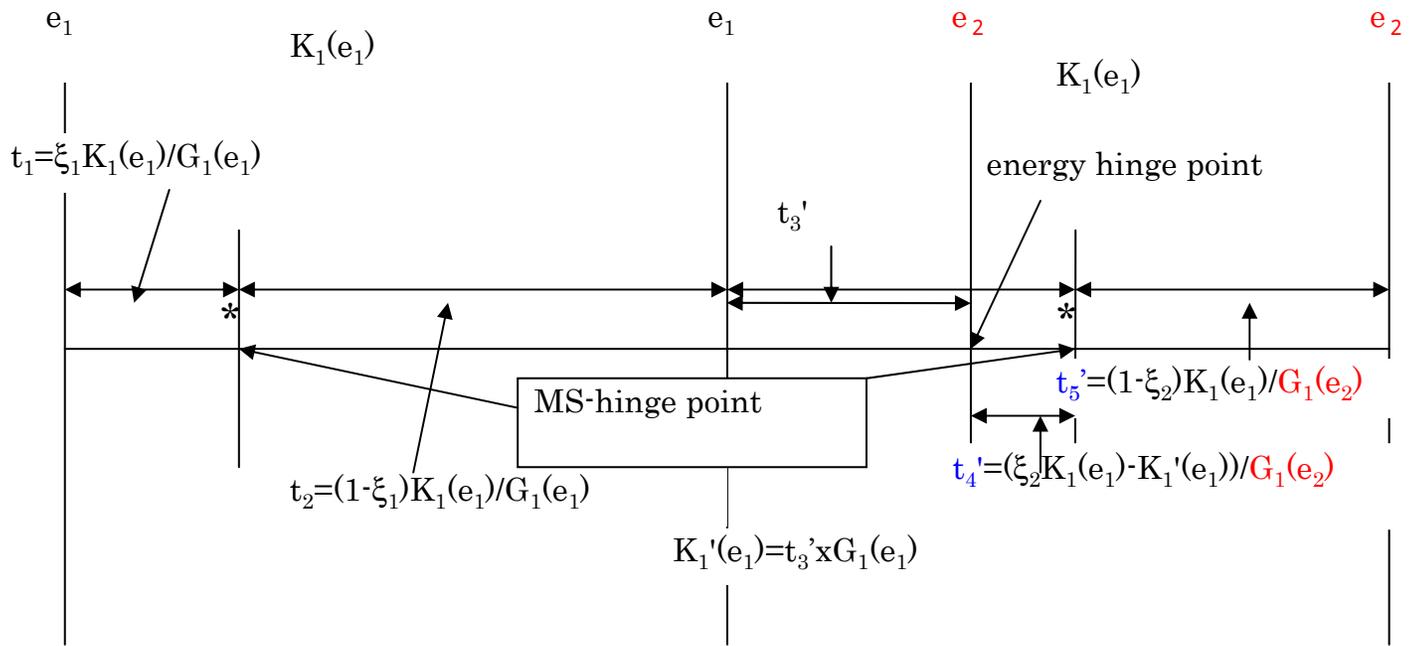
$$\Delta = -DEINIT + DENSTEP$$



単一のMS-ステップ



2個の連続したMS-ステップ



エネルギー損失ポイントを含むMS-ステップ ①

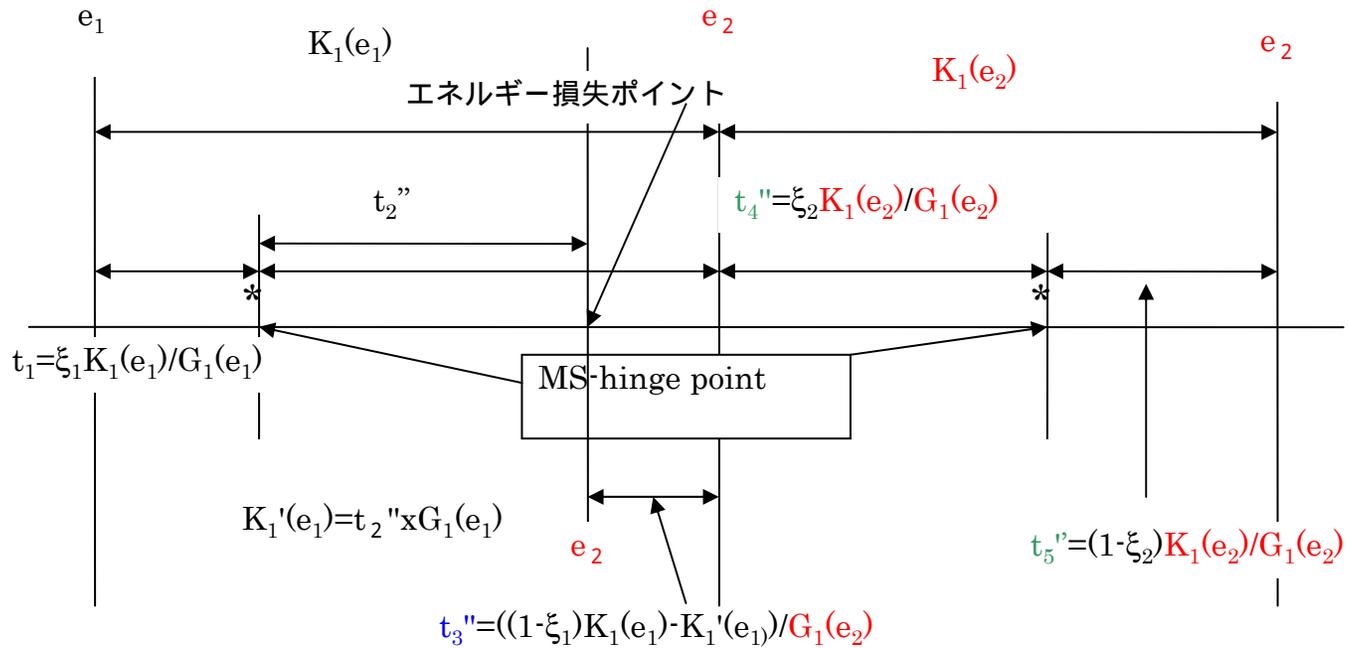


図 9

エネルギー損失ポイントを含むMS-ステップ②

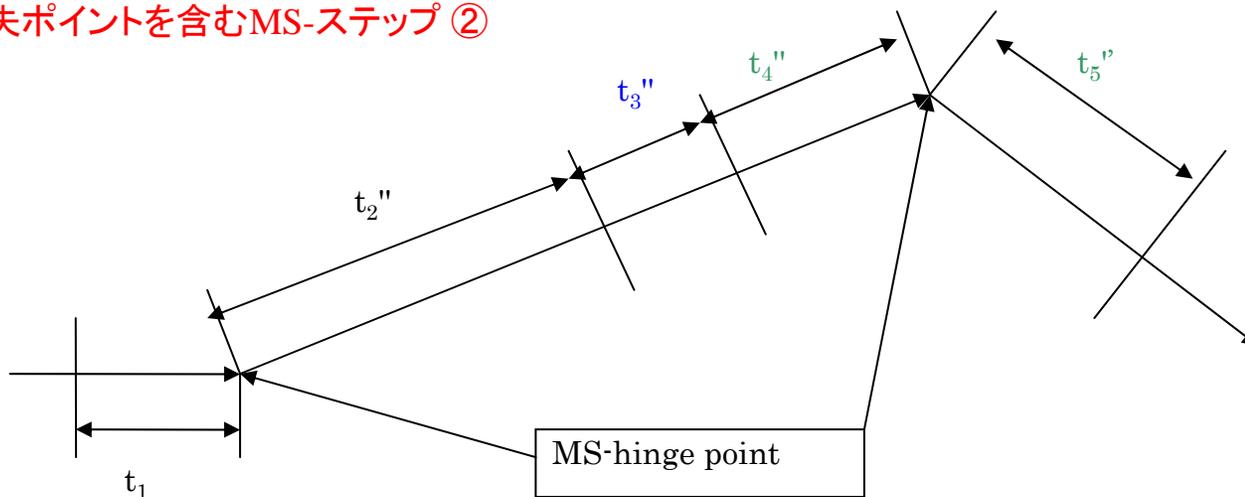


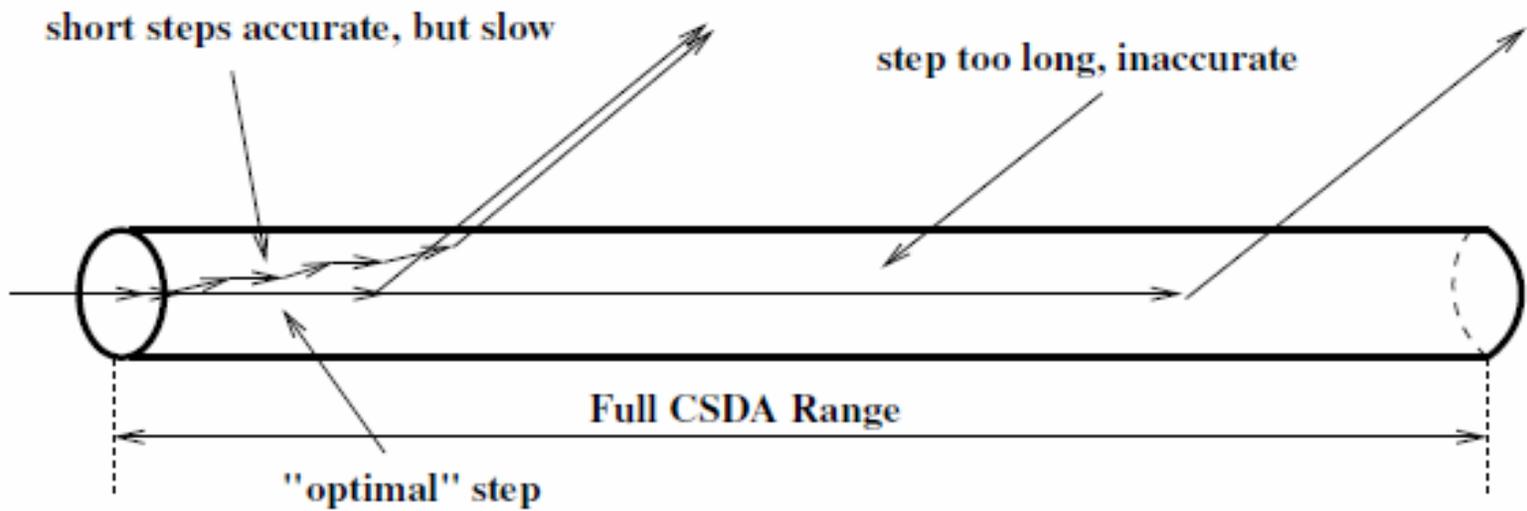
図 10

エネルギー付与の扱い

- 粒子が移動する毎に、EGS4と同じように $edep(=ustep*dedx)$ を求め、call `ausgab` を実行する。粒子のエネルギーは変わらないので、 $dedx$ は一定。
- エネルギー損失ステップの途中で境界が生じた場合には、その境界までの距離を移動距離として、エネルギー付与を求める。
- エネルギー損失ステップの途中でMS-hingeポイントが生じた場合も同様の扱いをする。

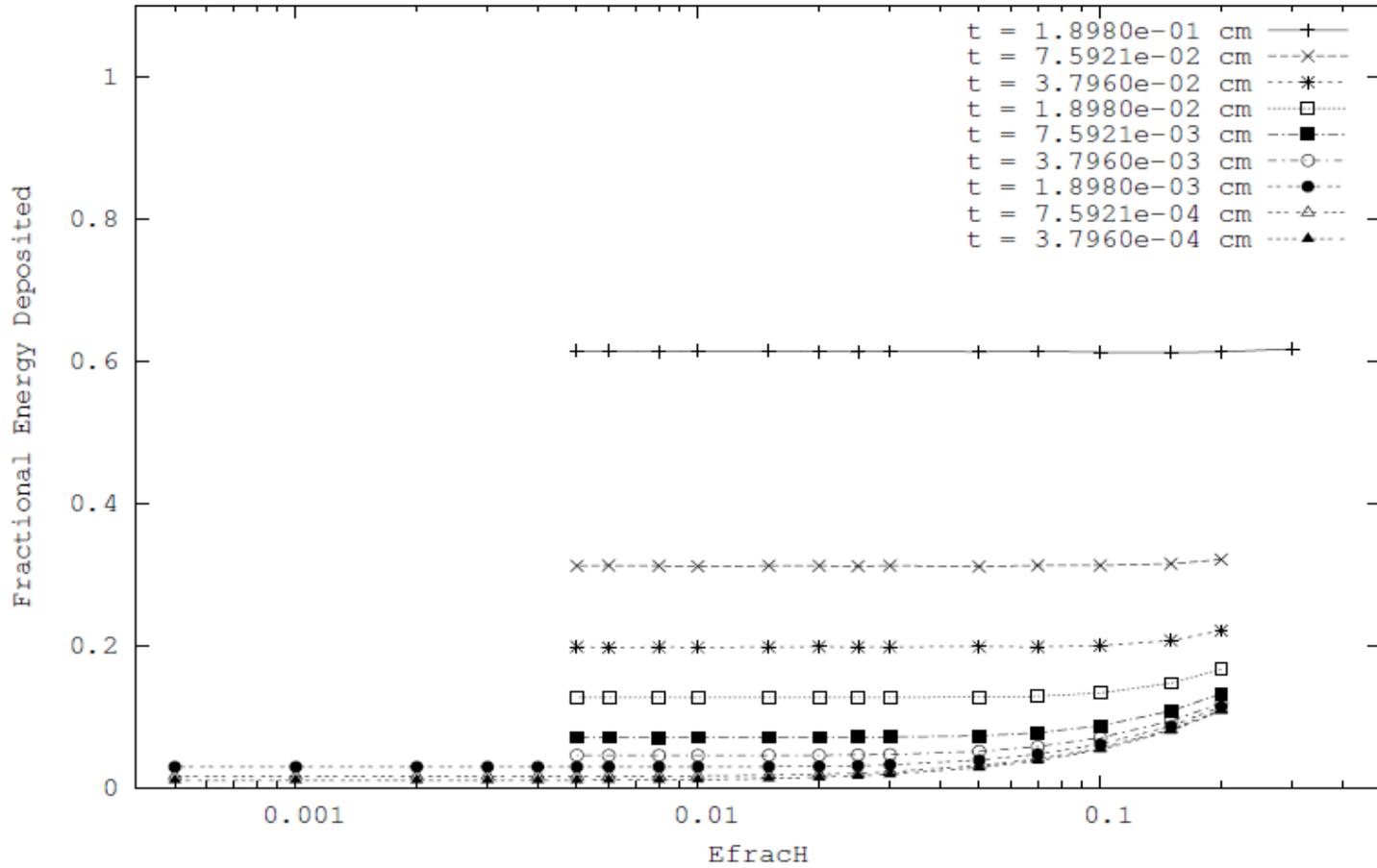
Step sizeのコントロール

- 多重散乱に関するstep sizeの制御
 - エネルギー損失の割合に対応するstep size
 - efrac(最高エネルギー)、efrac1(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
 - スコアする領域の大きさに対応するパラメーター“Characteristic Distance”による制御
 - Characteristic Distanceに対応する $K_I(E)$ をpegsで計算し、各エネルギーに対応する $K_I(E)$ 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



「ほうきの柄」問題の図解

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



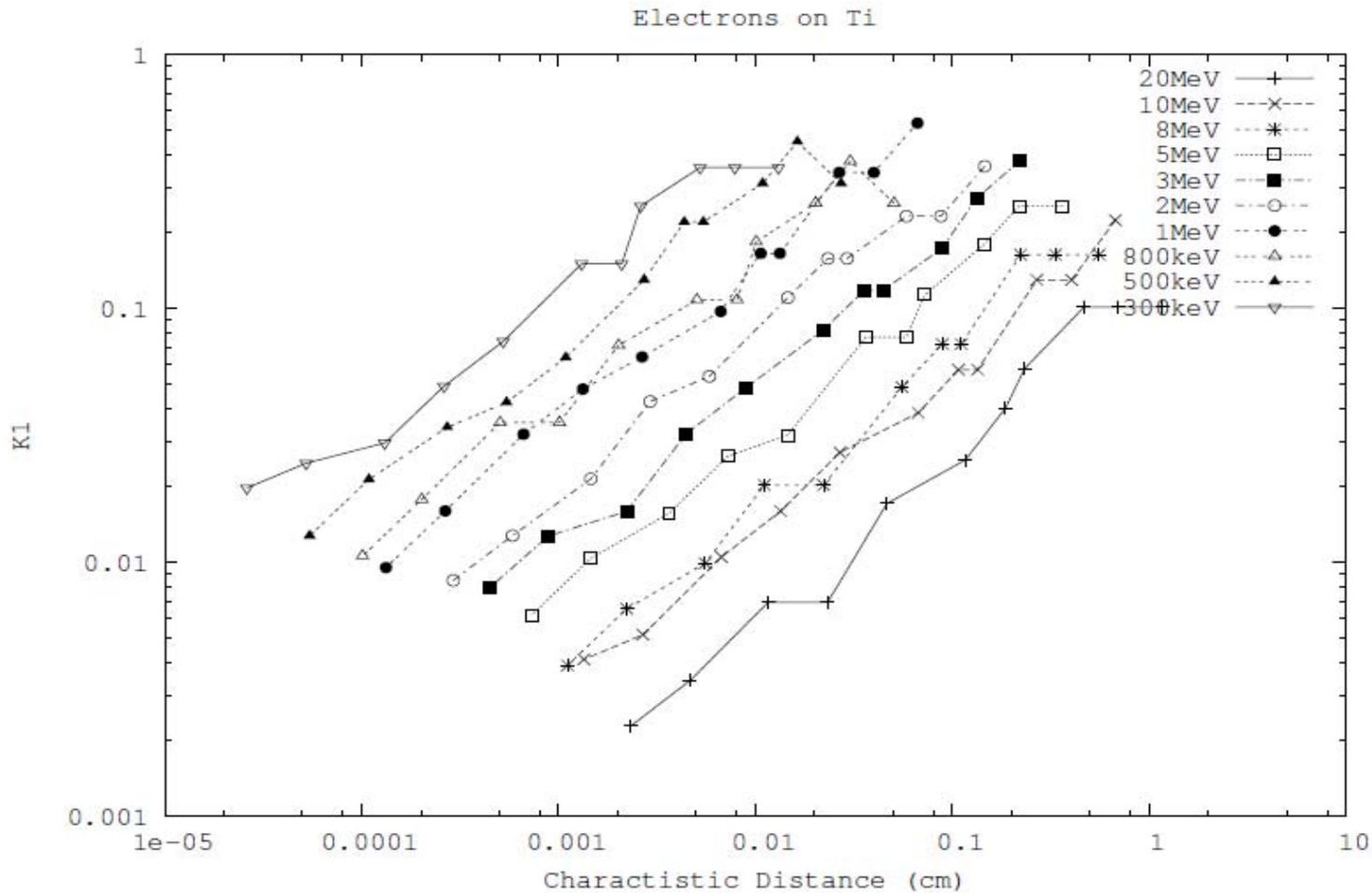
「ほうき柄」領域へのエネルギー付与の収束。物質は銅。
電子の運動エネルギーは 5MeV(EGS5マニュアル[1] Fig. 2-16)

Characteristic Distanceの導出

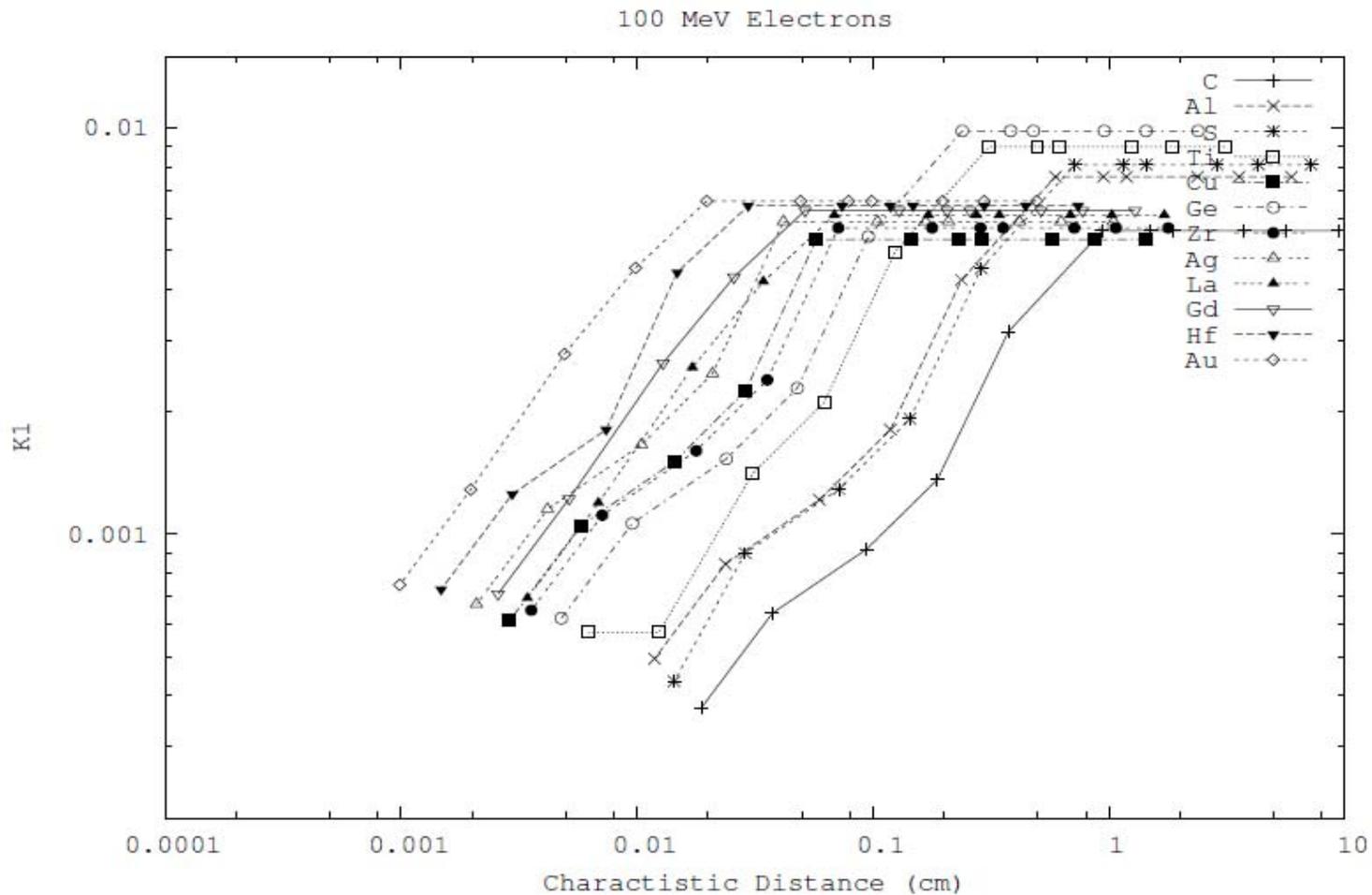
- 円筒中の吸収エネルギーが一定となる最も大きい E_{fracH} の値を求め、電子のエネルギーが e から $e(1-E_{\text{fracH}})$ に変化する移動に伴う K_I を計算する。

$$K_1(t = 0 \rightarrow t) = \int_0^t G_1(t') dt' = \int_{e_1}^e \frac{G_1(e')}{(dE/dx)} de'$$

$$-de = \left(\frac{dE}{dx} \right) dt, \quad e_1 = e \times (1 - E_{\text{fracH}})$$



最適な初期散乱強度K1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)

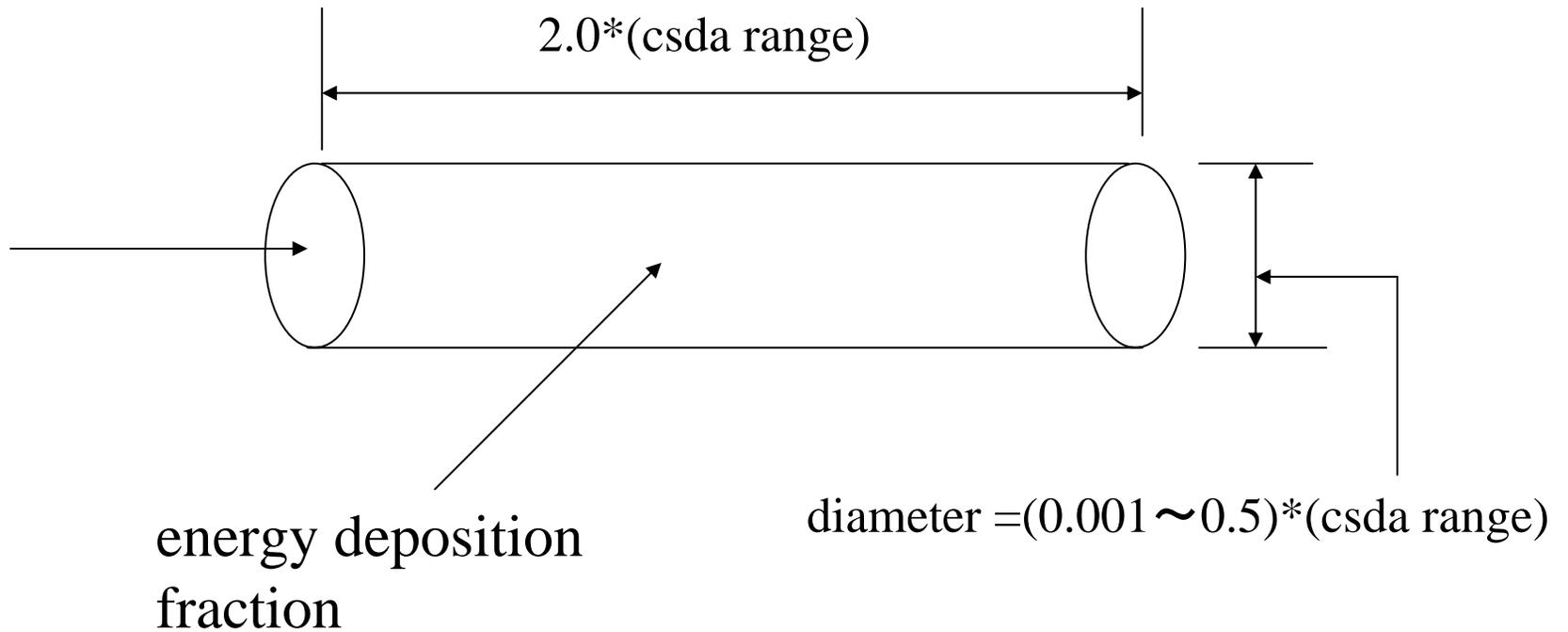


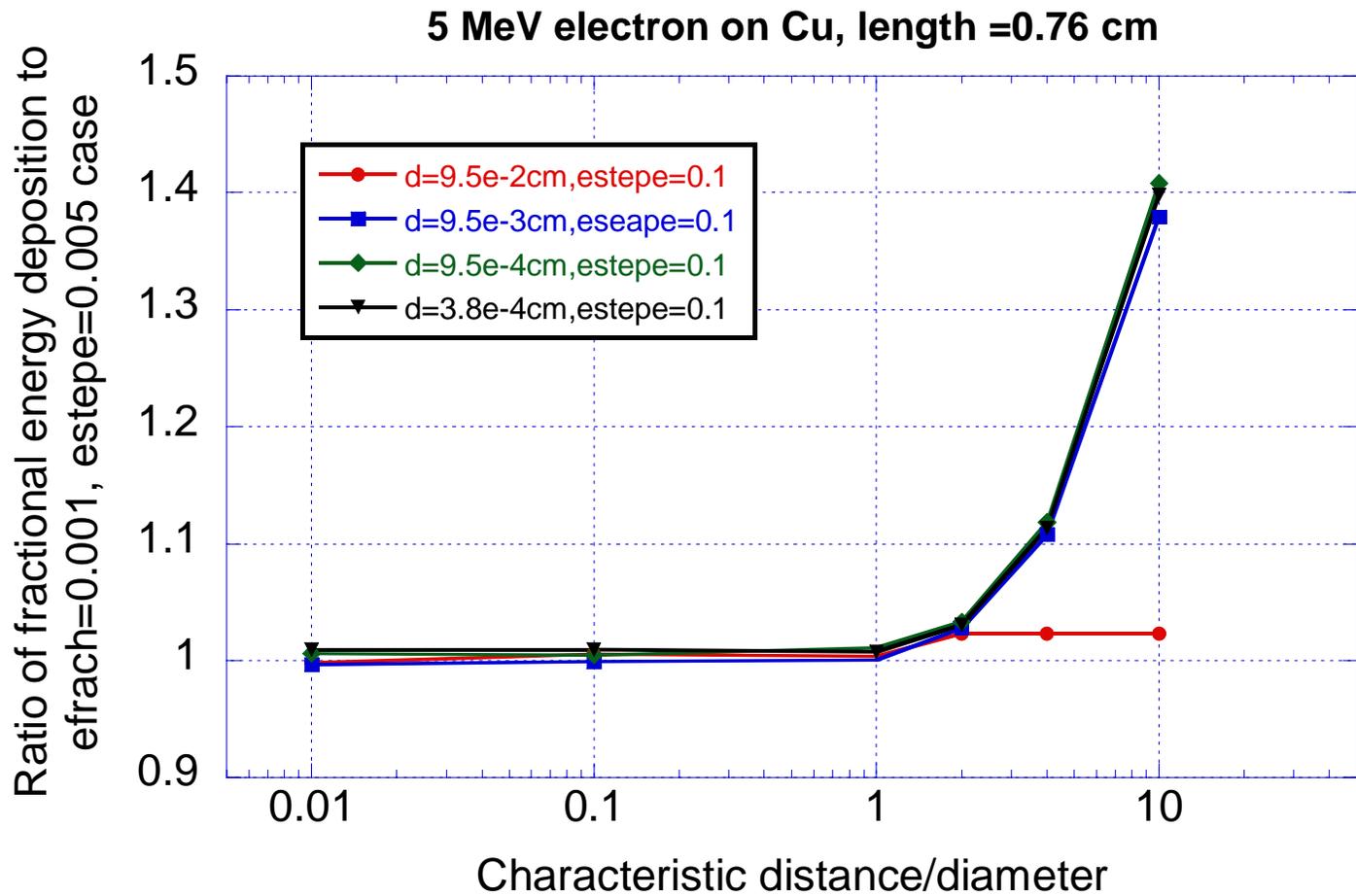
最適な初期散乱強度 $K1$ 対ほうき柄の直径。100MeV電子に対する物質による違い。(EGS5マニュアル[1] Fig. 2-18)

Energy Hinge の制御

- 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

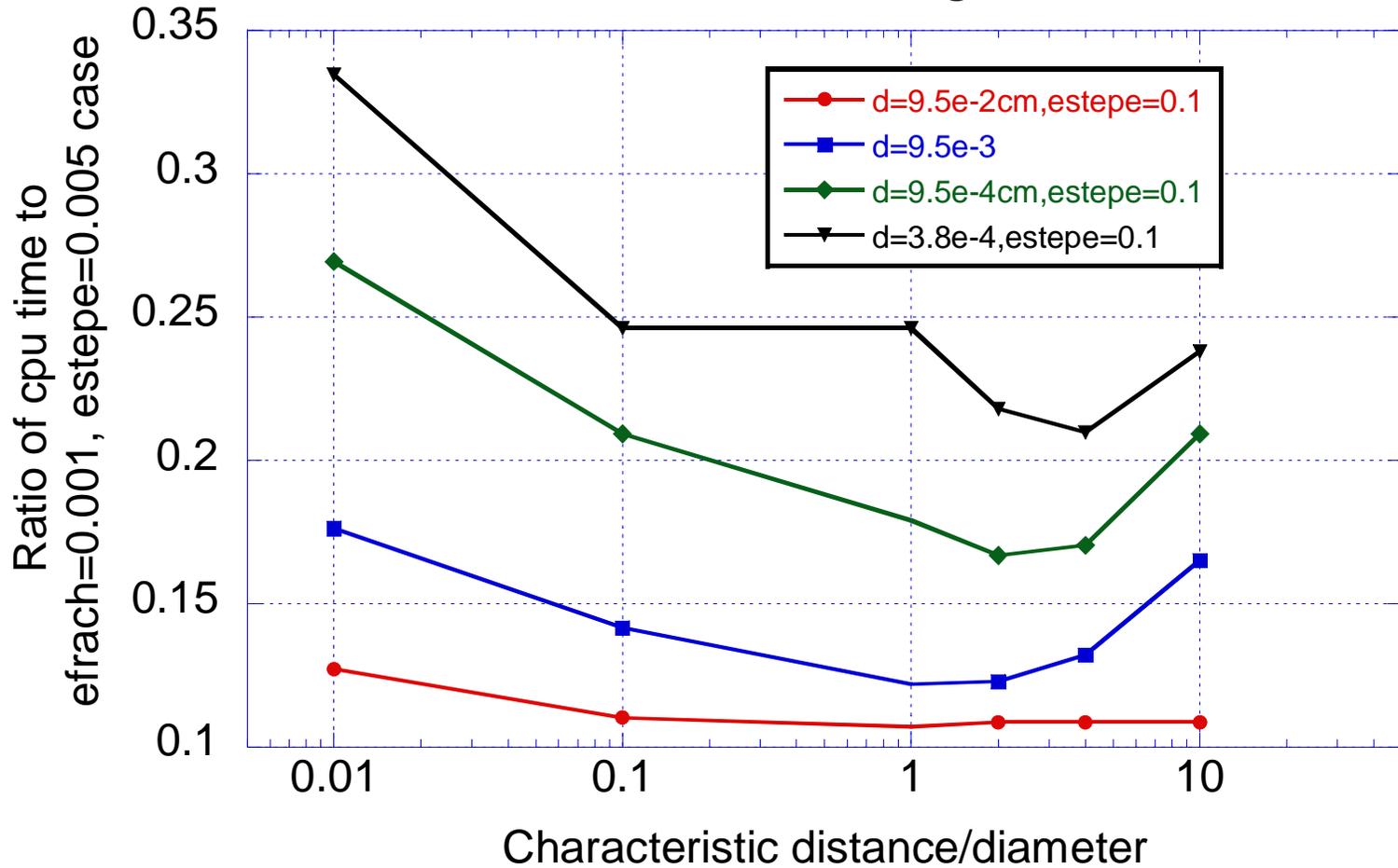
ucbroomstick_t.f





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)

ucetrans_t.f

