

2007. 8. 8
EGS研究会 @ KEK

EGS5コードへの 電磁場の組み込み

鳥居 建男¹⁾、杉田 武志²⁾

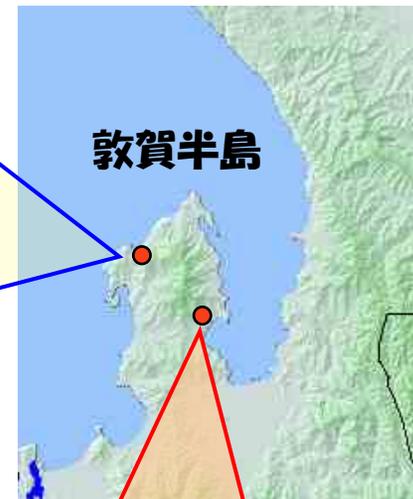
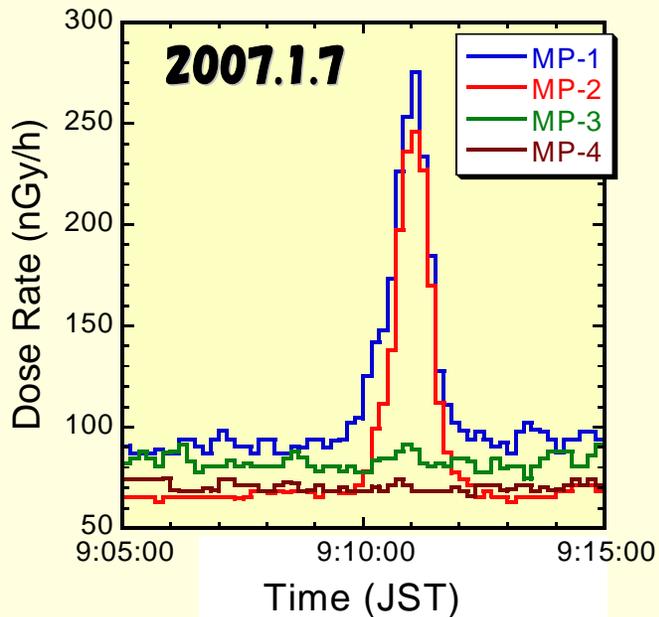
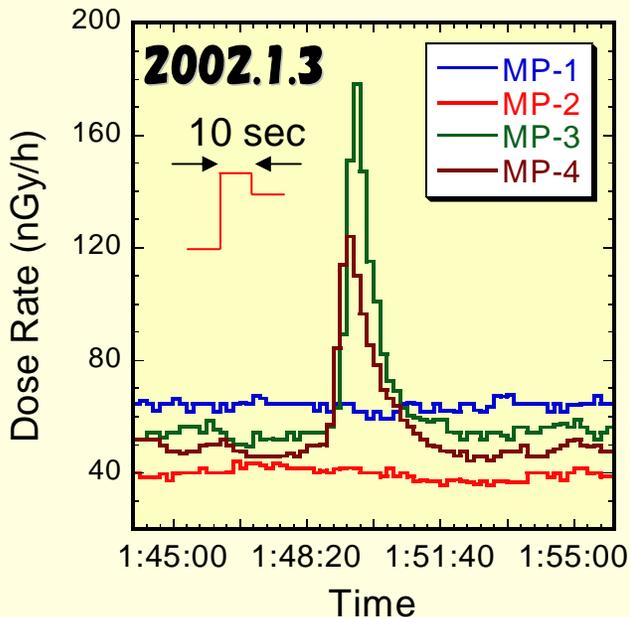
1) 原子力機構 (JAEA)

2) 科学システム研 (SSL)

研究の経緯

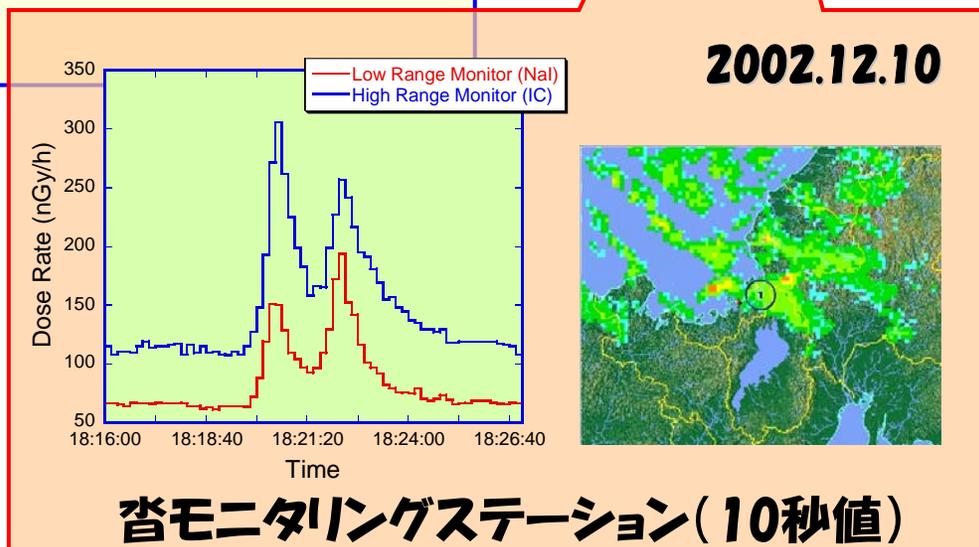
- **冬季雷活動時に放射線レベルが上昇する事象の発生**
 - 冬季雷活動時に限って数10秒程度の放射線量率の上昇を環境放射線モニタで観測
 - 変動エリアは、数 100 m 内がほとんど
 - 雷雲電場による電子加速と電磁シャワーの発生の可能性
- **EGS4コードへの電場の組み込み**
 - 電場：280 kV/m [$@1\text{atm}$]で連続的なシャワー発生
- **逃走絶縁破壊**
 - 雷雲中での電場強度と絶縁破壊（1ケタの差）
- **TGFのメカニズム解析**
 - 人工衛星により雷雲上空で地球起源の放射線バースト（TGF: Terrestrial Gamma-Ray Flash）が観測される
 - 雷雲電場に加えて地球磁場の影響評価が必要 = IGRF
 - 大気密度の高度分布を考慮要（地上～数 100 km） = 連続変化

冬季雷での線量率上昇の観測結果例



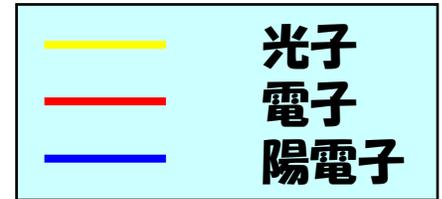
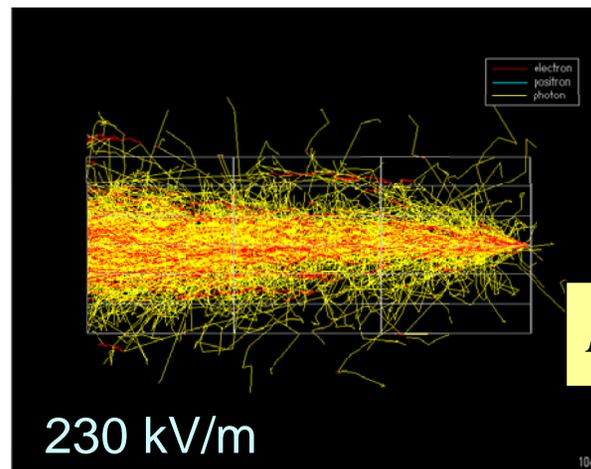
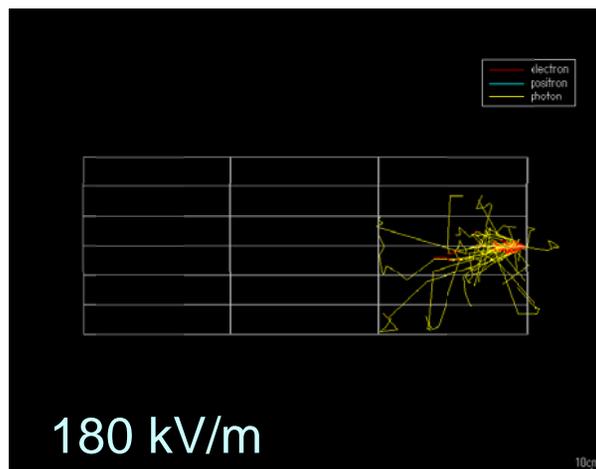
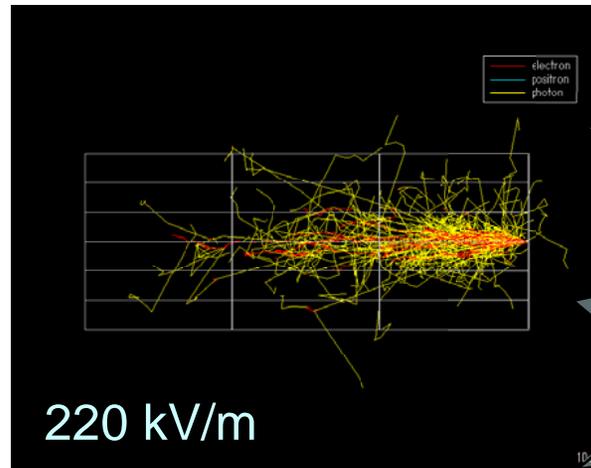
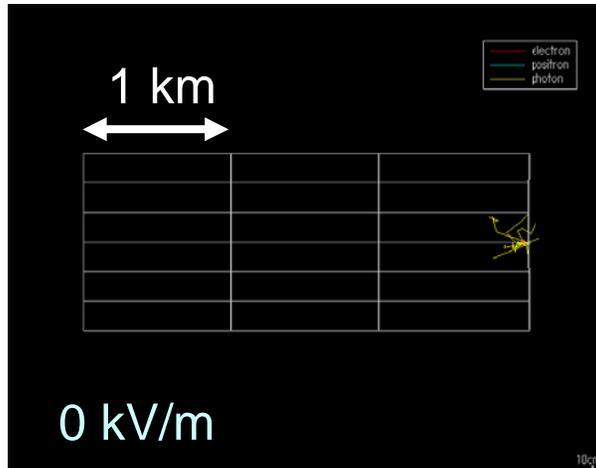
もんじゅ構内(10秒値)

最近は1シーズン
に2, 3回発生



EGS4コードによる電子・光子の飛跡解析

- EGS4コードへの電場の組み込み (~2002)
- 高度 2 km (密度 1.0066 kg/m³)
- 入射電子 : 10 MeV、25 個



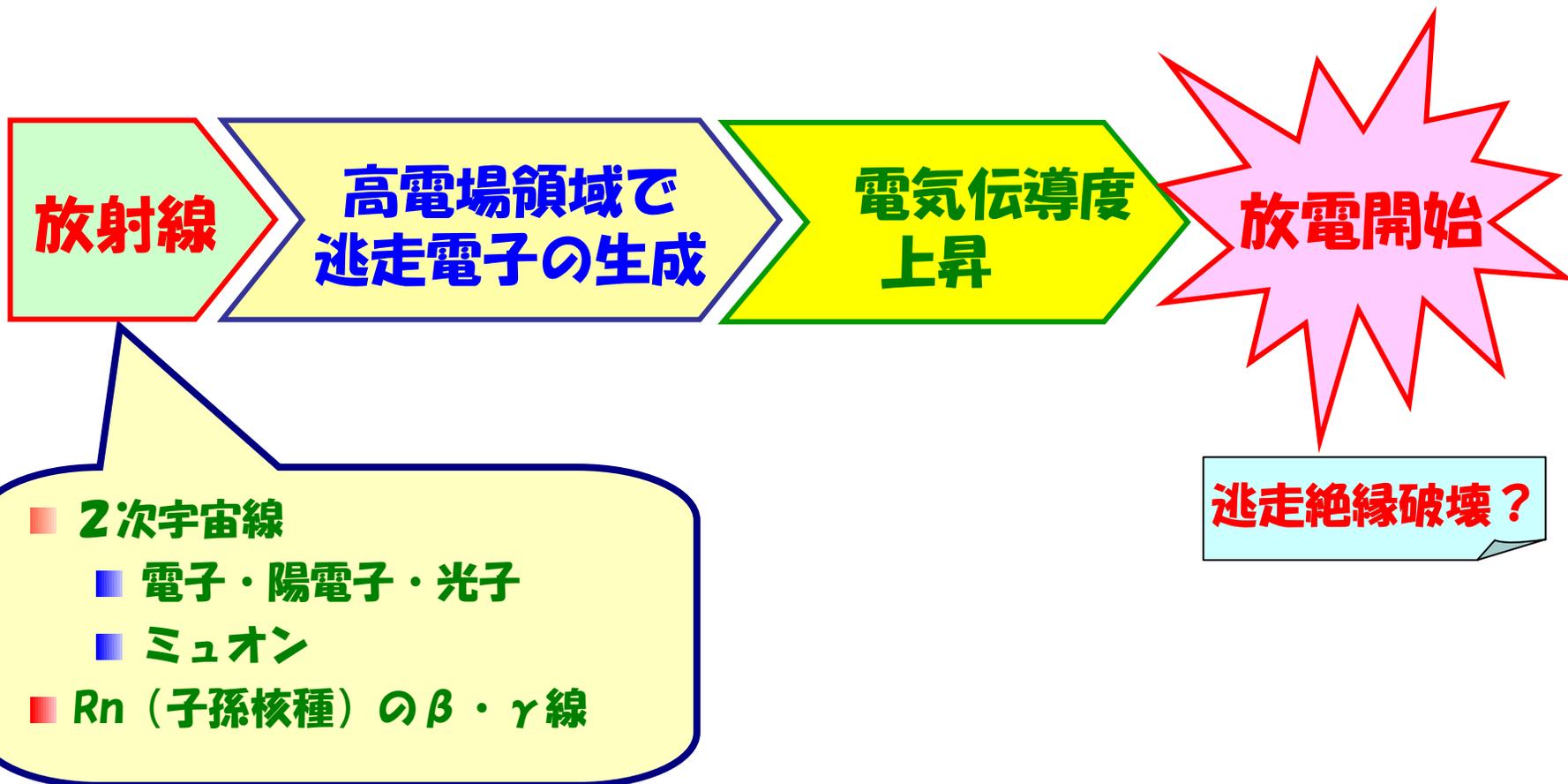
高度2kmでは
230 kV/mで
電磁シャワー
の発生

逃走電子の生成

$$E_{th} \approx 280 \times P [atm] [kV/m]$$

雷放電開始への放射線の寄与の可能性

- 雷雲の電場強度（観測値）が絶縁破壊強度の $1/10$ ($\sim 200 \text{ kV/m}$)
- 逃走電子が連続的に生成される電場（本計算では 280 kV/m-atm ）は雷雲電場と同程度



電場・磁場効果の基本式

① 飛行方向の式

$$\vec{u}_f = \vec{u}_0 + \Delta \vec{u}_{\text{ms. ret}} + \Delta \vec{u}_{\text{em}}$$

$$\Delta \vec{u}_{\text{em}} = \frac{e s}{m_0 \gamma(E_0) v_0^2} (\vec{D}_0 - \vec{u}_0 (\vec{u}_0 \cdot \vec{D}_0) + \underline{\vec{u}_0 \times \vec{H}_0})$$

② 粒子位置の式

$$\vec{x}_f = \vec{x}_0 + \vec{u}_0 s + \frac{s}{2} (\Delta \vec{u}_{\text{ms. ret}} + \Delta \vec{u}_{\text{em}})$$

③ エネルギーの式

$$E_f = E_0 - \Delta E_{\text{ret}} + e \vec{D}_0 \cdot (\vec{x}_f - \vec{x}_0)$$

A. F. Bielajew, Electron Transport in E and B Fields,
in *Monte Carlo Transport of Electrons and Photons*
(T. M. Jenkins, et al. eds., Plenum Press, 1988)

電磁場計算に関連して修正したモジュール

電子・陽電子の電磁場影響を
評価し、計算条件の汎用化

■ egs5本体関係

`egs/egs5_electr.f`

(電子・陽電子の挙動を計算)

■ ユーザー定義関係

`include/user_cg/cghead.f`

`include/user_cg/emfield_common.f`

`user_code/uc_cg.f`

(ユーザー定義mainルーチン)

`user_cgcode/read_emfiled.f`

(電磁場強度ファイル読み込み)

■ 入力設定

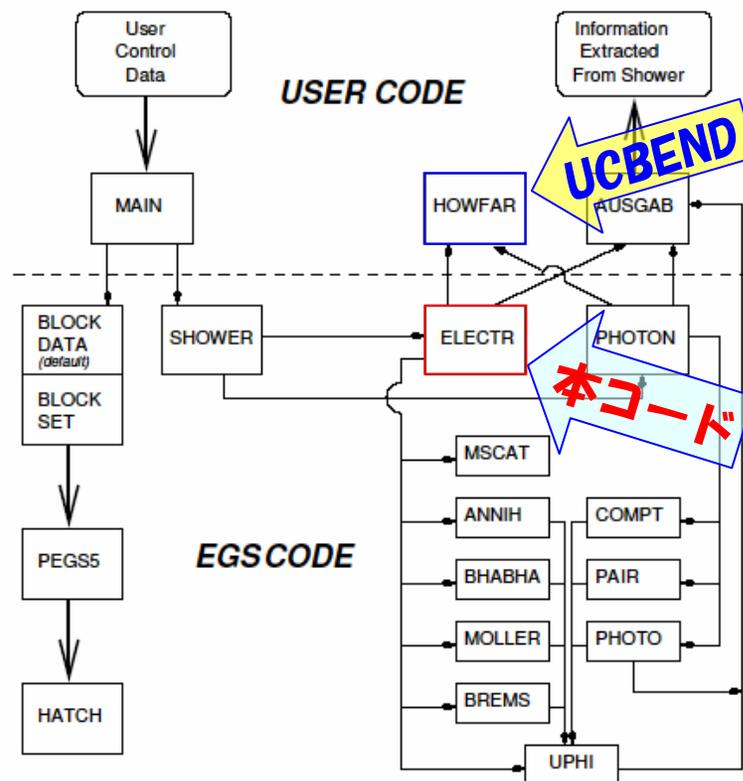
`=EM_FIELD:FILE`

電場

`=BM_FIELD:FILE`

磁場

(同時に設定可能)



サブルーチンelectr内での粒子移動長の決定

$tstep = \text{MIN}(tmscat, tinel, thard)$

① 多重散乱長 ② エネルギー変更点までの長さ ③ 衝突反応点までの長さ

:

$ustep = tstep$

:

$\text{if } (ustep .gt. dnear(np)) \text{ call howfar}$: ④ 領域境界までの長さ

:

⑤ 電場によるエネルギー変動可能性の最大値が一定値(STPEME)になる移動長

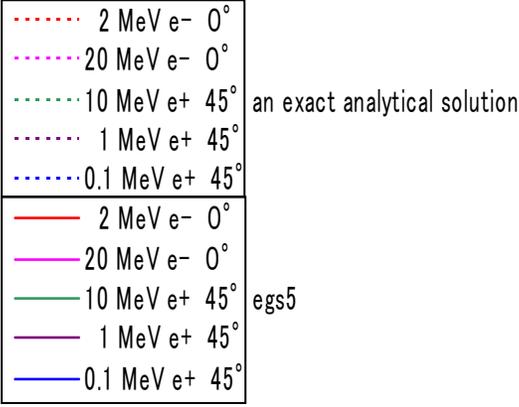
:

⑥ 磁場による角度変更可能性の最大値が一定値(STPBME)になる移動長

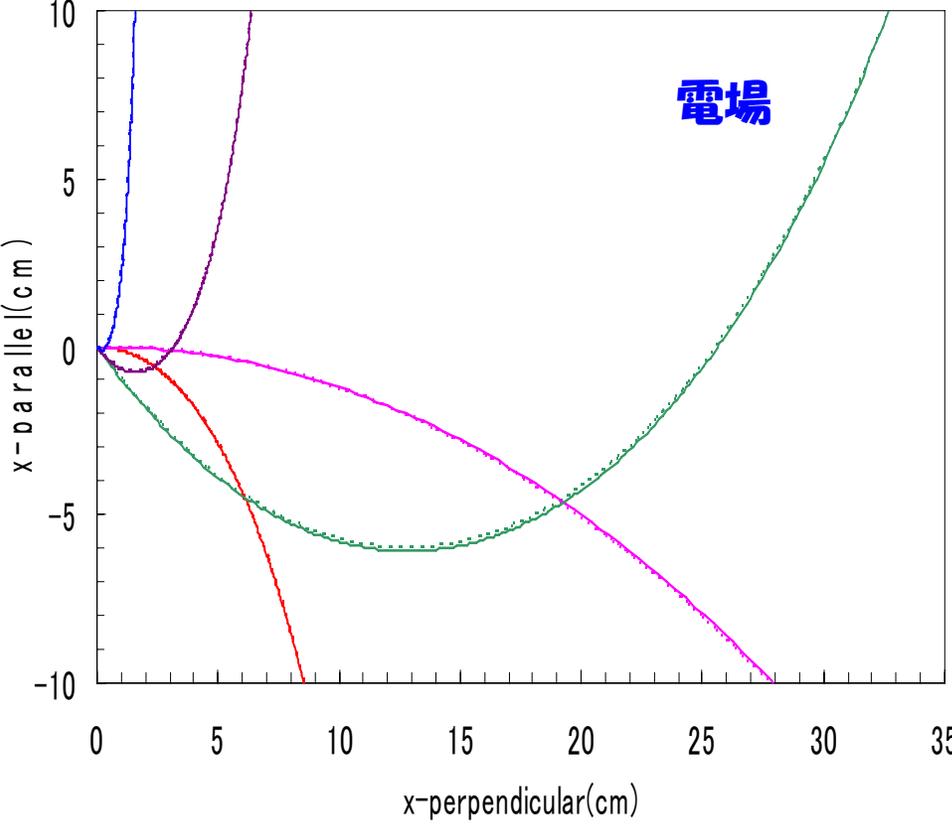
以上6つの長さの最小値を粒子移動長に設定

電磁場影響計算では粒子の移動点でエネルギー・飛行方向の変動評価を行うためSTPEME、STPBMEを使用し、その評価誤差を限定している

理論式との比較



step: 0.01 D: 0.511 MV/cm



理論評価式

電場影響

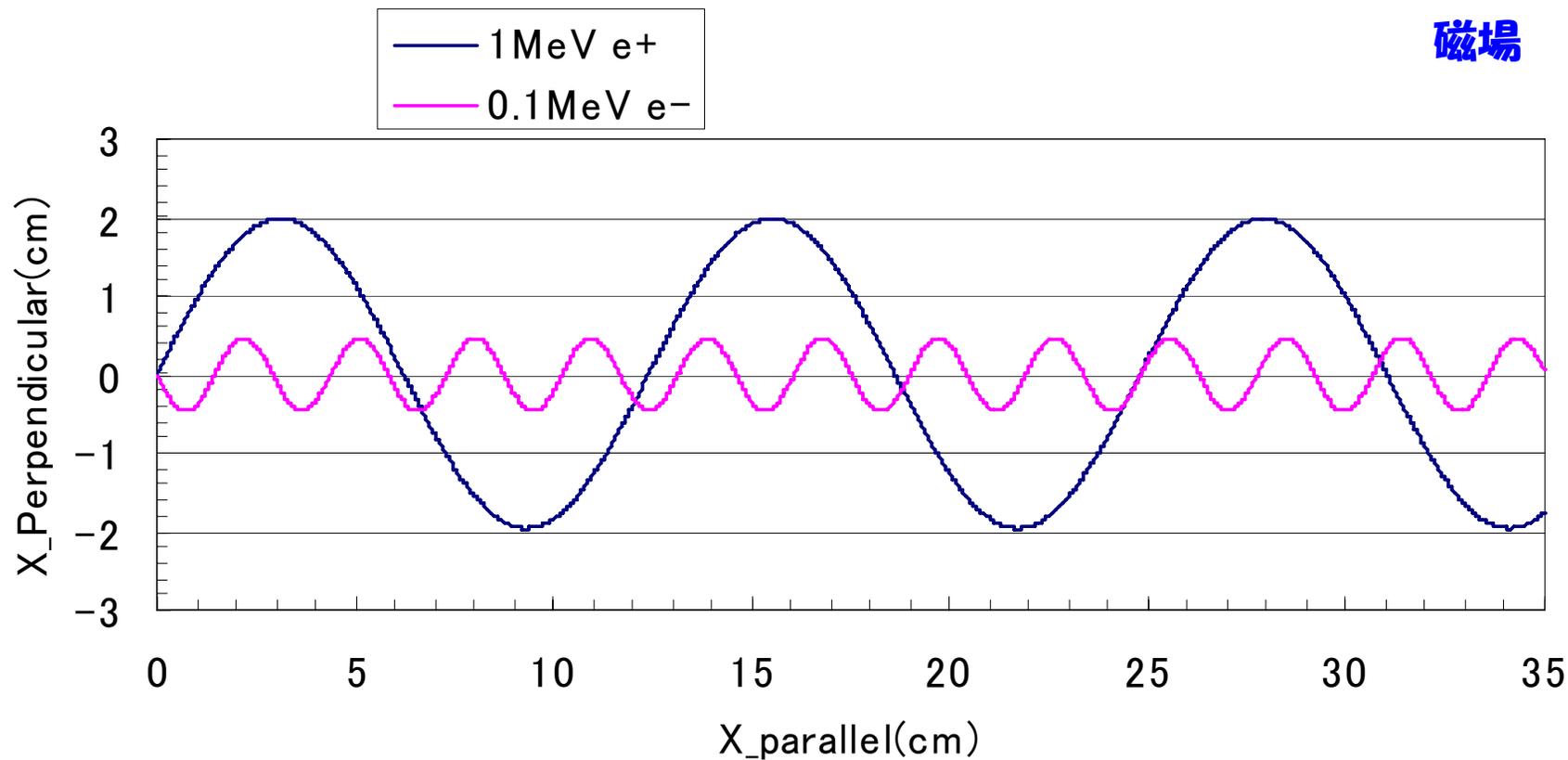
$$x_{\parallel} = \frac{m_0 C^2 \gamma_0}{e E} \left(\cosh \left(\frac{e E_{x_{\perp}}}{m_0 c^2 \gamma_0 \beta_{\perp 0}} \right) - 1 + \beta_{\parallel 0} \sinh \left(\frac{e E_{x_{\perp}}}{m_0 c^2 \gamma_0 \beta_{\perp 0}} \right) \right)$$

磁場影響

$$x_{\perp 1} = \frac{p_{\perp 2}^0}{e B} \left((1 - \cos \left(\frac{e B_{x_{\parallel}}}{p_{\parallel}^0} \right)) \right) + \frac{p_{\perp 1}^0}{e B} \sin \left(\frac{e B_{x_{\parallel}}}{p_{\parallel}^0} \right)$$

$$x_{\perp 2} = \frac{p_{\perp 1}^0}{e B} \left((1 - \cos \left(\frac{e B_{x_{\parallel}}}{p_{\parallel}^0} \right)) \right) + \frac{p_{\perp 2}^0}{e B} \sin \left(\frac{e B_{x_{\parallel}}}{p_{\parallel}^0} \right)$$

磁場



0.17 Tesla中の電子／陽電子の軌跡

連続で大気密度を変化できるようにコード整備

EGS5では物質密度は計算領域毎の設定であるが、大気密度のように連続で変化する場合には**粒子の現在位置の密度を使用**するようにコードを変更

関連モジュール

egs本体関係

`egs/egs5_electr.f`

`egs/egs5_photon.f`

ユーザー定義関係

`include/user_cg/cghead.f`

`include/user_cg/rhofield_common.f`

`user_cgcode/read_rhofiled.f`

`user_cgcode/rd90opt.f`

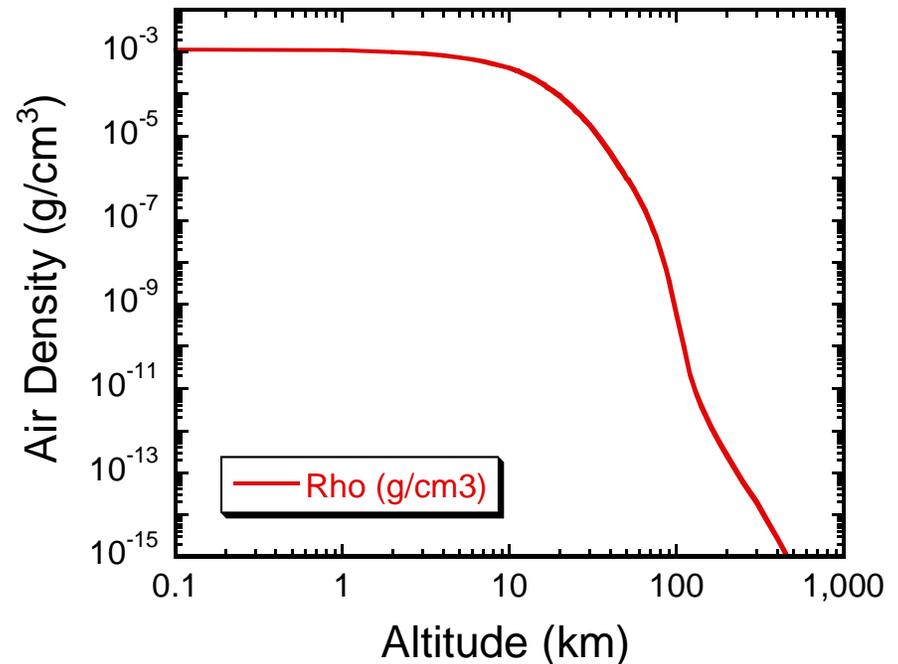
`user_cgcode/rdoptary.f`

`user_cgcode/rdoptcg.f`

`user_cgcode/rdoptrtz.f`

`user_cgcode/rdoptsph.f`

`user_cgcode/rdoptxyz.f`



`Airrho.dat`

(米国標準大気をもとに作成)

`irhofg`を-1に設定し、ファイル名を指定して行う。

Input入力例（電場のみ）

```
=EM_FIELD:ON
*e- spectra with EF
WITH EM FIELD
* MATERIAL COUNT
1
* MATERIAL NAME
AIR
*****
*** GEOMETRY ***
*****
RCC 1 0.0 0.0 -10000.0 0.0 0.0
310000.0
RCC 2 0.0 0.0 50000.0 0.0 0.0
310000.0
RCC 3 0.0 0.0 100000.0 0.0 0.0 60000.0
310000.0
RCC 4 0.0 0.0 150000.0 0.0 0.0 60000.0
310000.0
```

=EM_FIELD:ONで電場評価を行う。
なお、howfarでの粒子毎の強制終了は
=ELECTRON:OFF (電子)
=PHOTON:OFF (光子)
=GAMMA:OFF (光子)
=POSITRON:OFF (陽電子)

```
* iecutsw ipcutsw irhofg iedgesw ipeangsw iraysw ipolarsw incohsw
1 1 1 1 1 1 0 1
* iprofrsw impacrsw iaugerswa
1 1 1
```

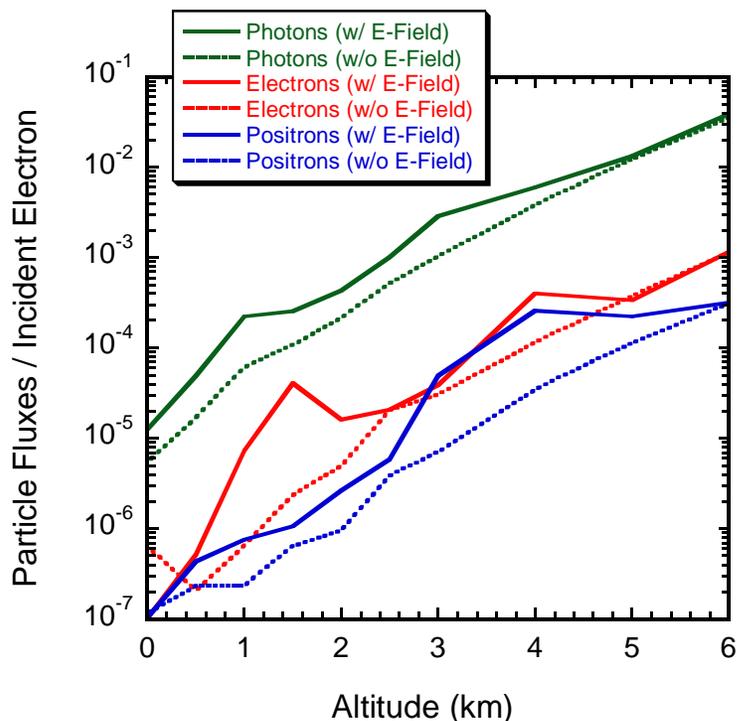
```
*STPEME
0.01
*EM_FIELD(kV/m)
0.0 0.0 3.1E+1
0.0 0.0 3.9E+1
0.0 0.0 2.6E+2
0.0 0.0 2.0E+2
0.0 0.0 6.0E+1
*
0.0 0.0 -8.7E+1
0.0 0.0 -2.0E+2
0.0 0.0 -2.0E+2
0.0 0.0 -1.7E+2
0.0 0.0 -1.4E+2
*
0.0 0.0 -8.3E+1
0.0 0.0 -3.9E+1
0.0 0.0 1.8E+1
0.0 0.0 5.7E+1
0.0 0.0 5.9E+1
*
0.0 0.0 0.0
```

電場

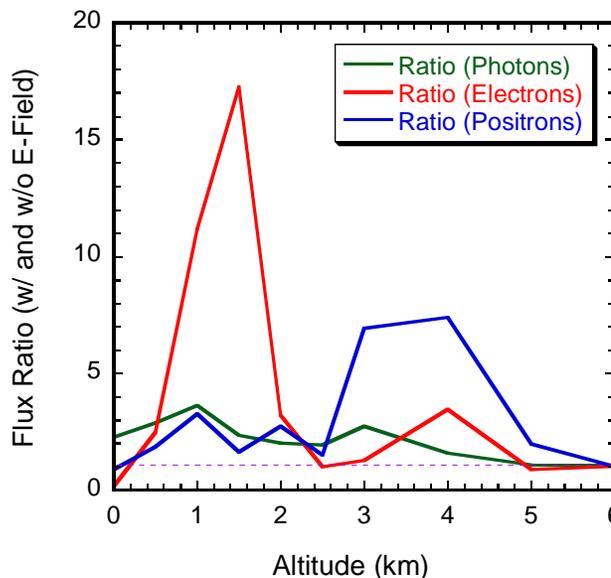
=EM_FIELD:ONを設定した場合のみSTPEME
とEM_FIELD(kV/m)の設定を行う。
STPEMEは電場効果による電子・陽電子移
動長の補正量で、エネルギー変動率の最大
値。0.01では、電場効果によりエネルギー
変動を1%以内に収める。
EM_FIELD (kV/m)は電場の大きさと方向を
x,y,z のベクトルで計算領域毎に指定する。
単位は kV/m。

EGS5コードによる粒子束変動の試計算

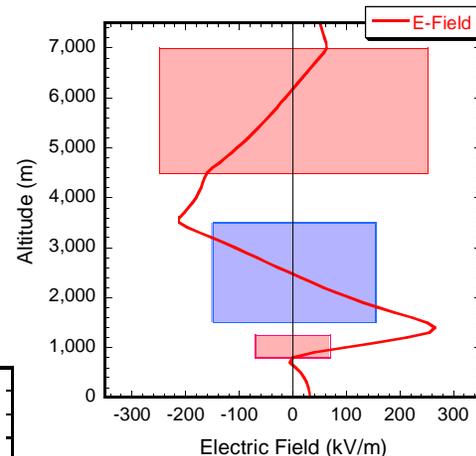
- 大気密度： “U.S.Standard Atmosphere 1976” から作成
- 電場： 冬季雷雷雲3極モデルをFEMコードで計算
- 磁場： 国際標準地球磁場 (IGRF) から編集 (本計算では電場のみ使用)
- 高度 15 Km から100 MeV 電子入射



粒子束の高度分布



電場の有無による粒子束比

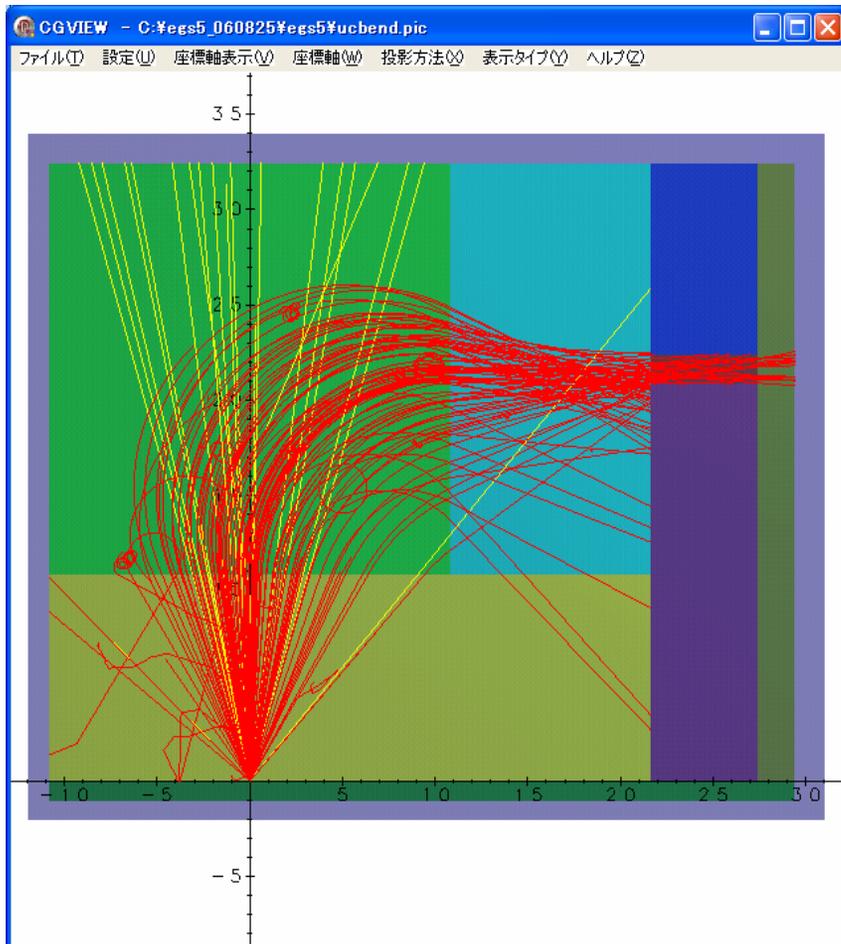


電場の高度分布

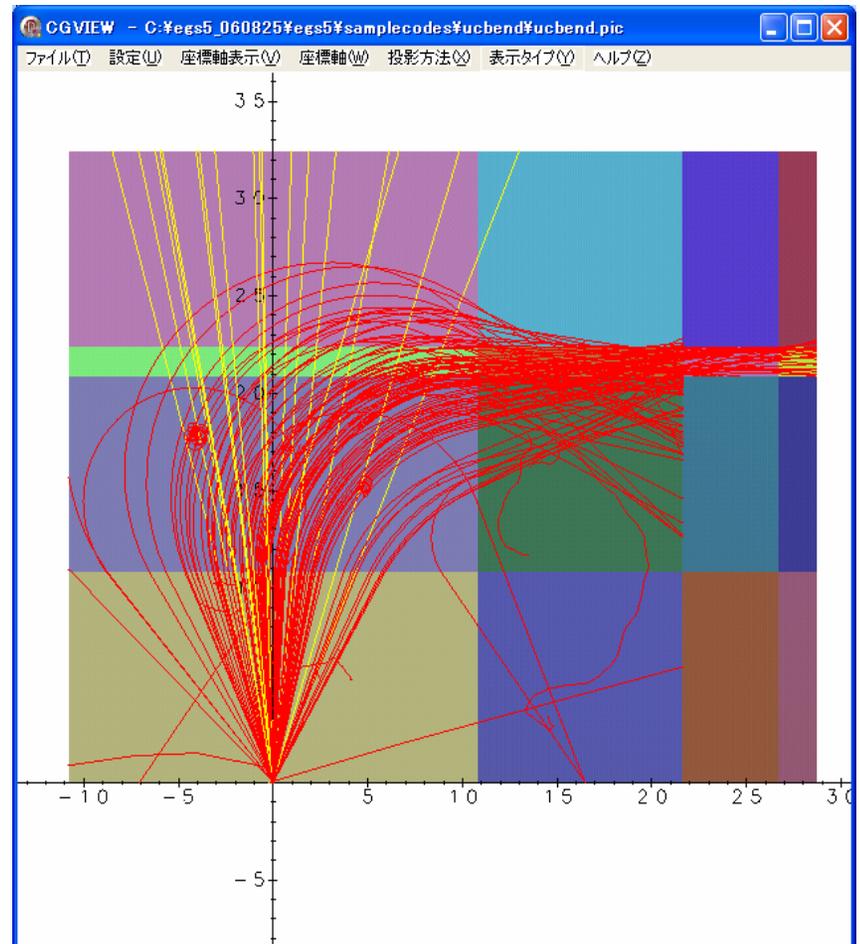
UCBEND条件での比較（磁場）

（電子 8.5 MeV を銅板 0.381 mm に照射、磁場強度Y方向に 0.26 T）
（磁場領域 X: -10.8 ~ 10.8 cm、Z: 10.8381 ~ 32.4381 cm）

左：本コードの結果



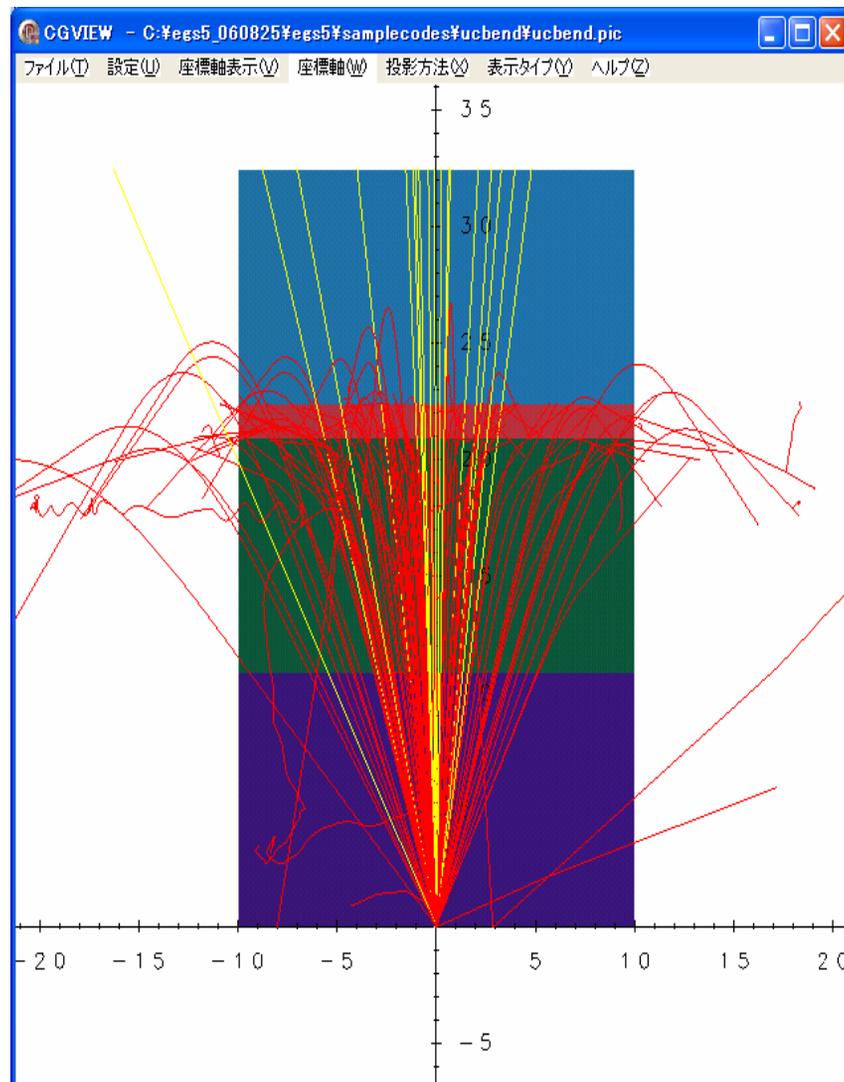
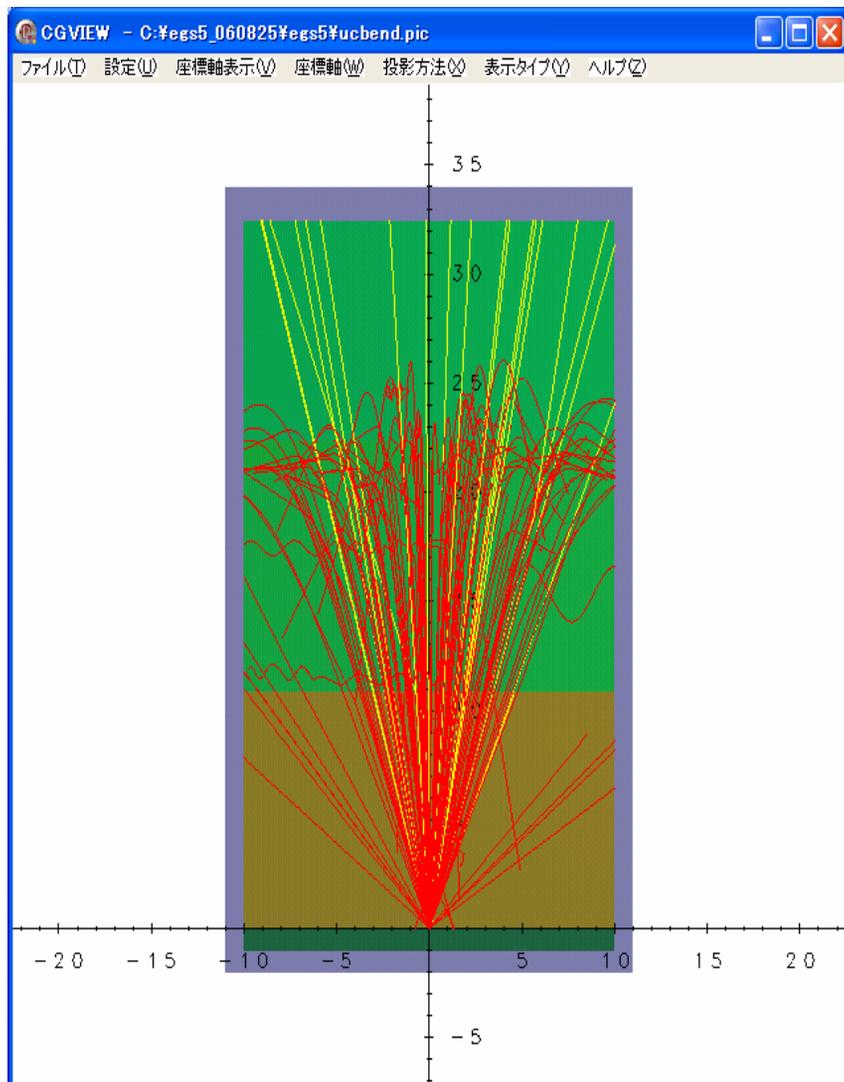
右：UCBENDの結果



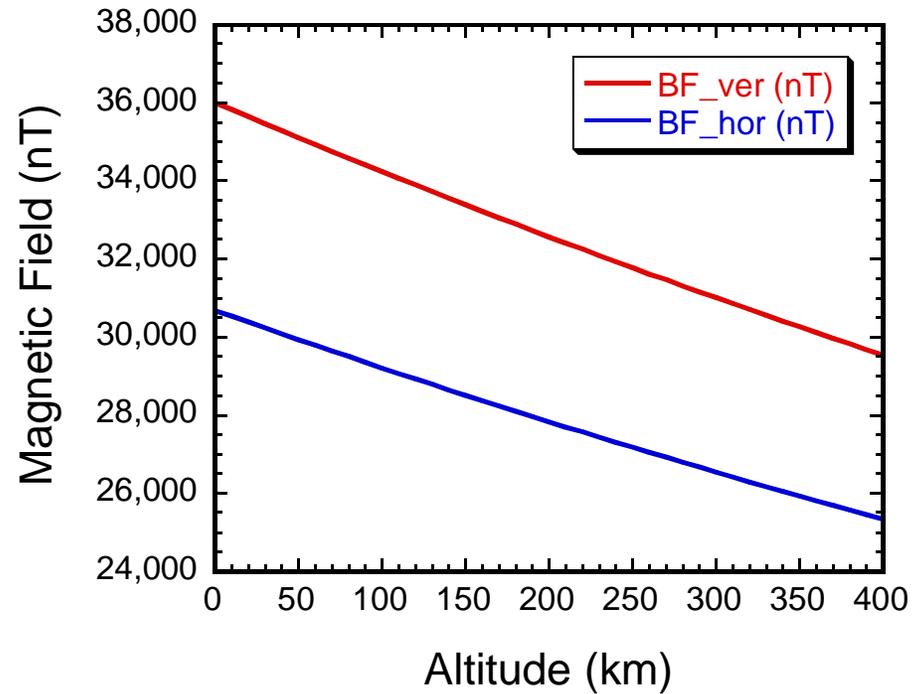
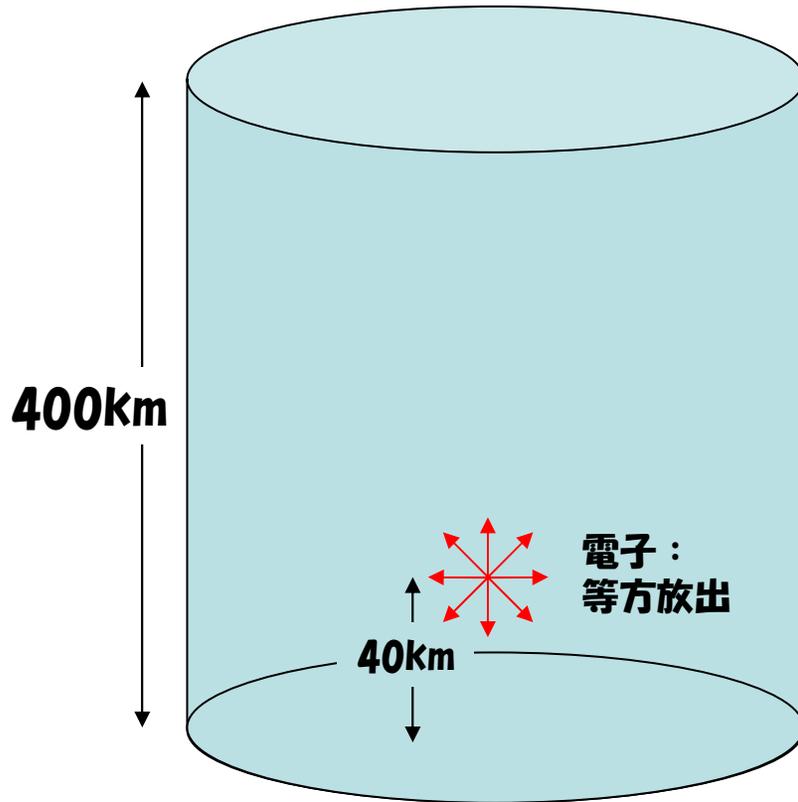
飛跡計算の比較（磁場）

左：本コードの結果

右：UCBENDの結果



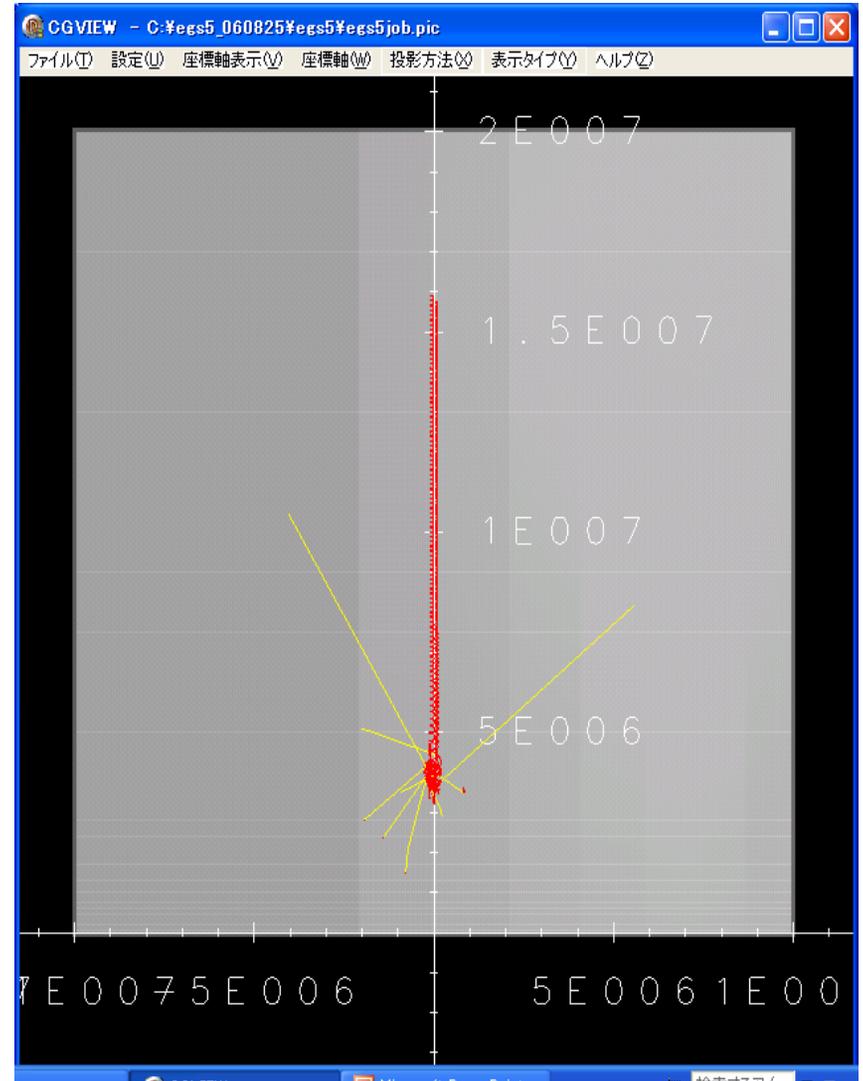
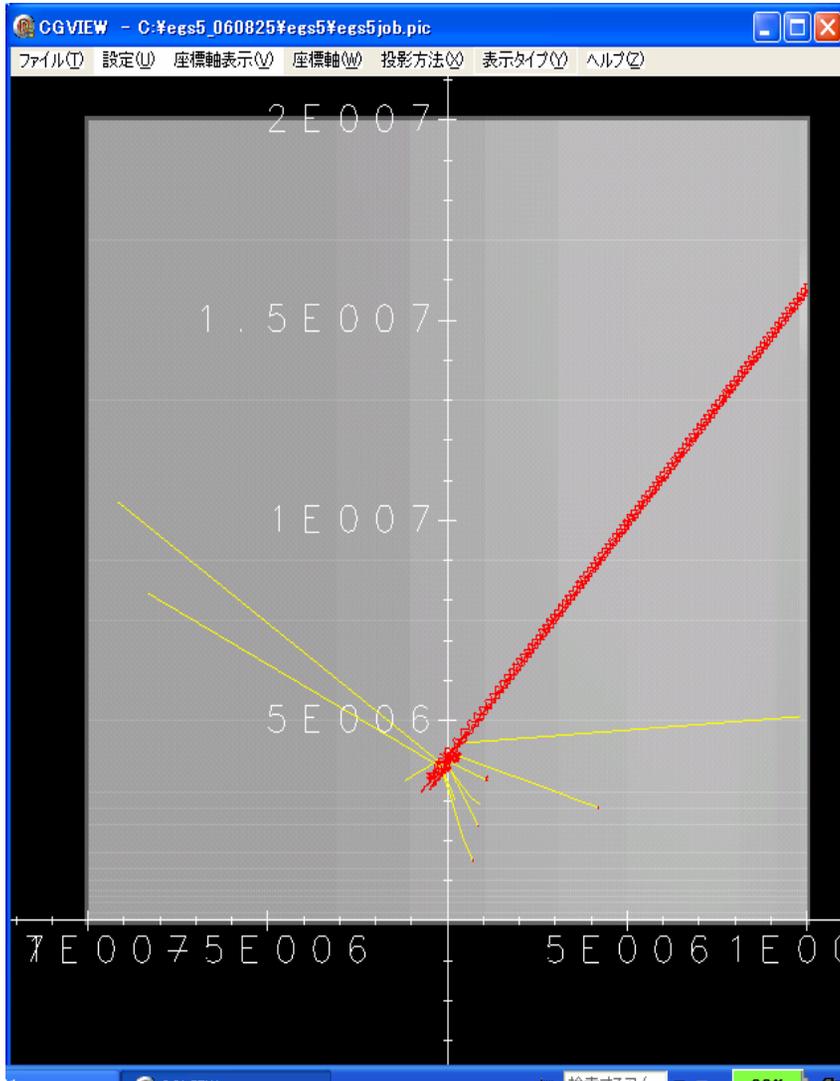
中緯度（もんじゅ付近）での電子挙動



地磁気強度の高度変化
(IGRFデータをもとに作成)

中緯度（もんじゅ付近）の地磁気の影響

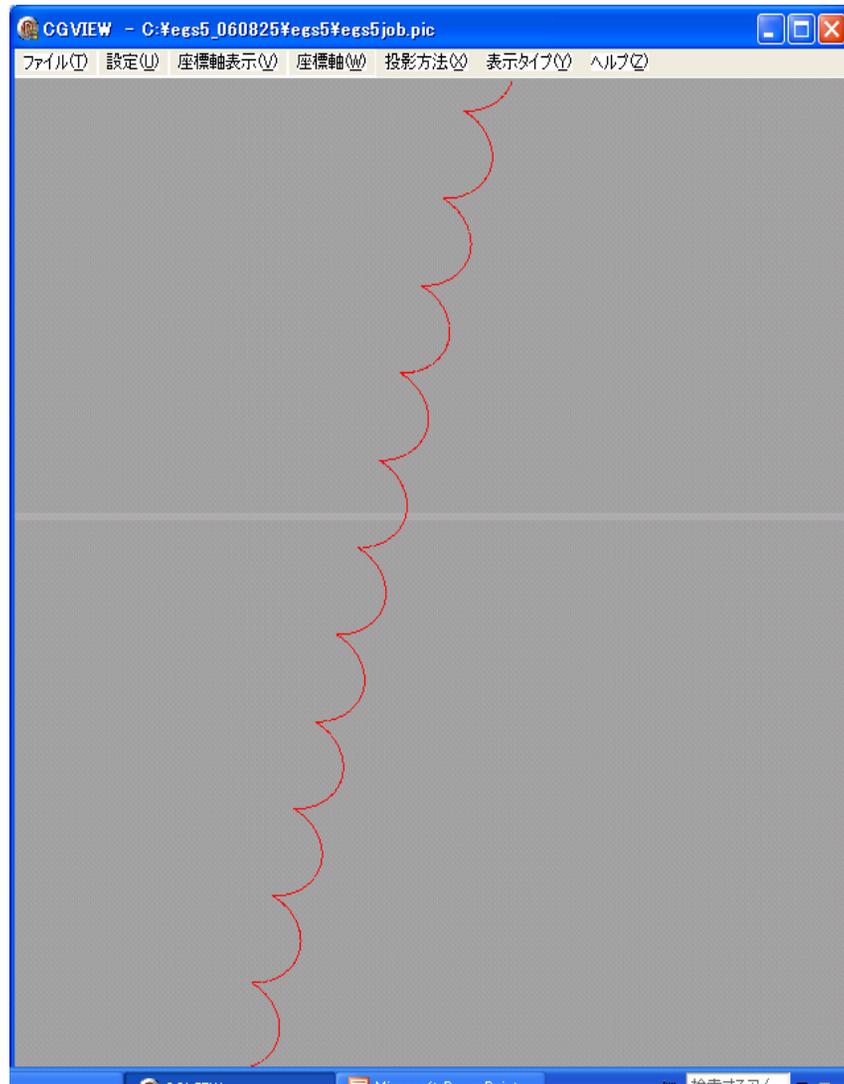
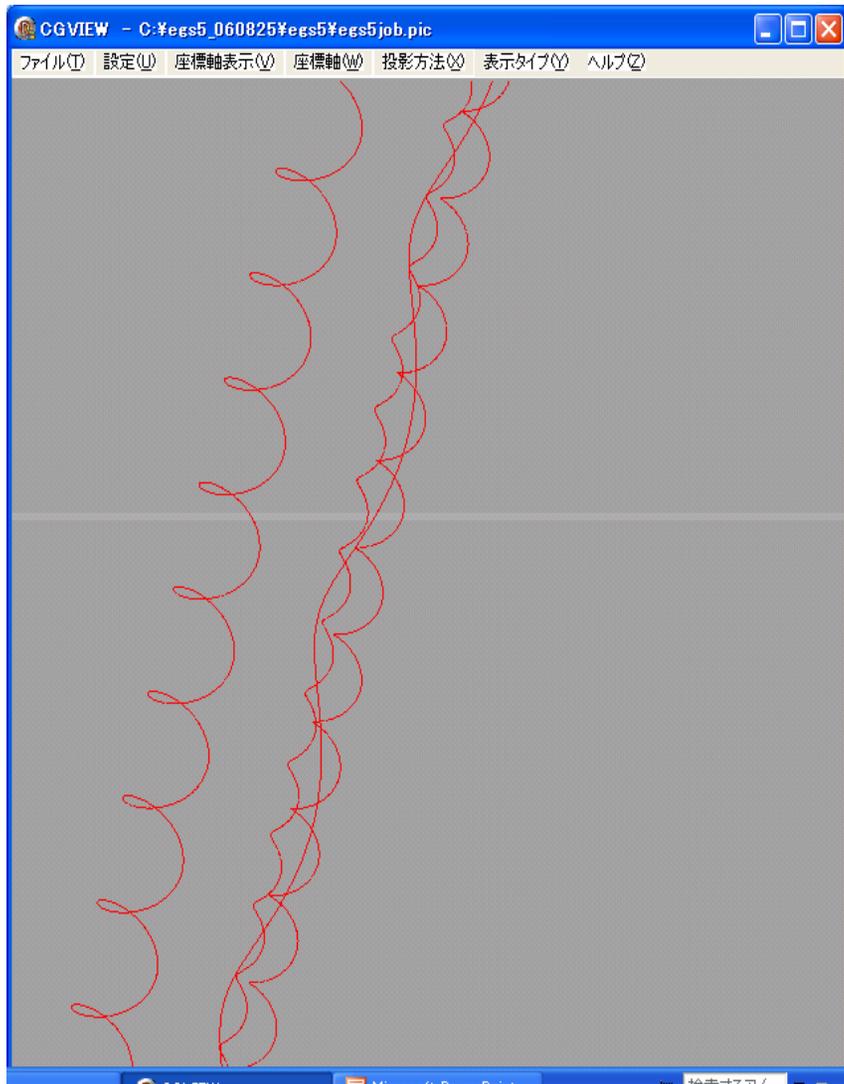
（電子 20 MeV を上空 40 km から等方放出、20粒子）



中緯度（もんじゅ付近）の地磁気の影響 （上空での電子の飛跡）

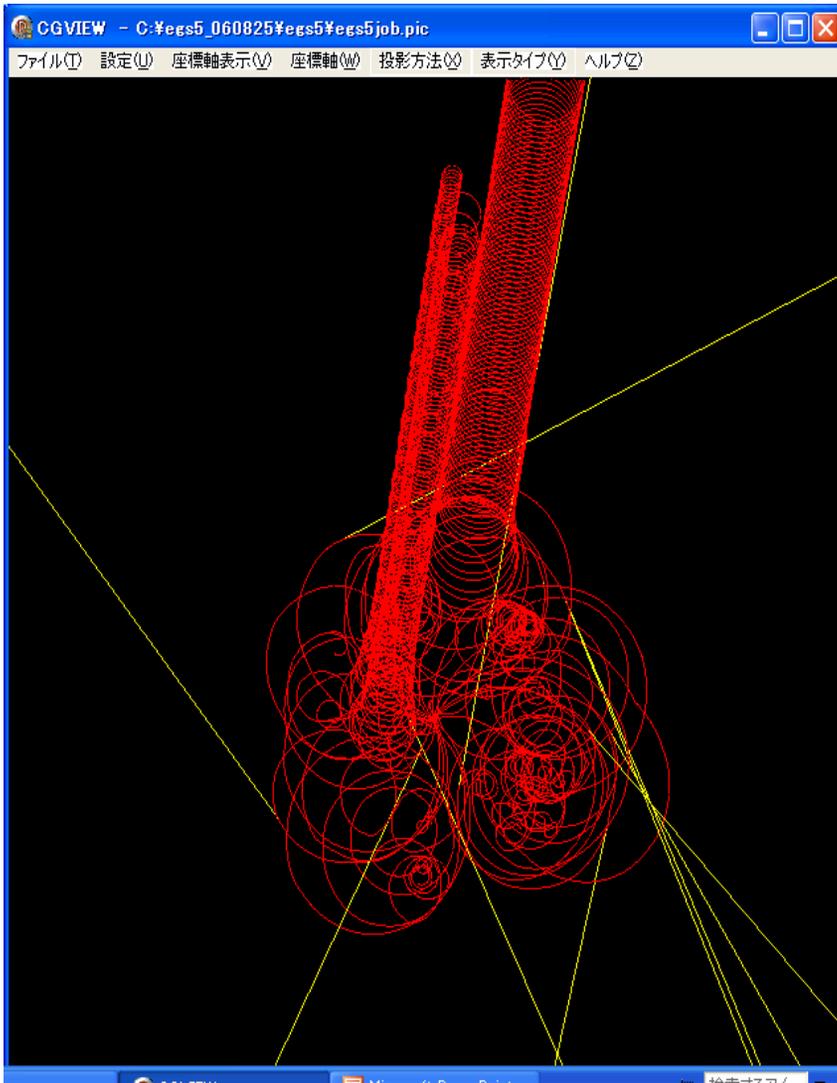
左：全て

右：1本を取り出し

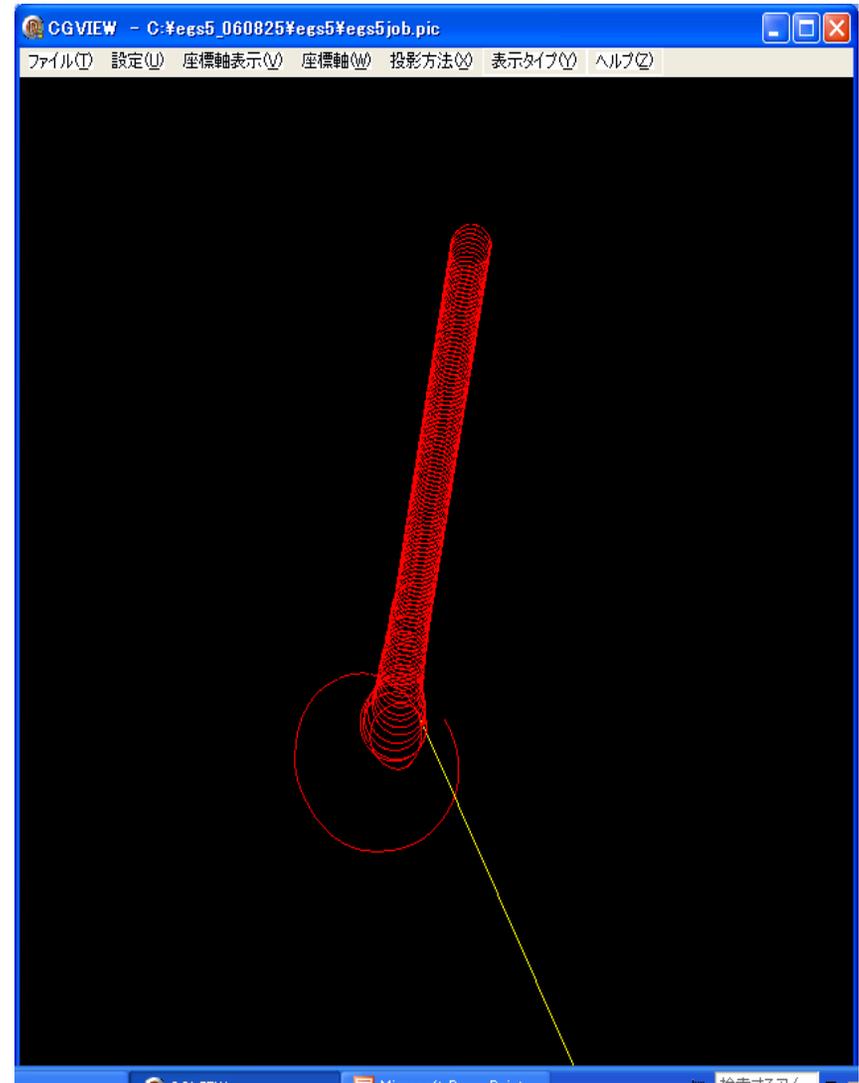


もんじゅ付近の地磁気の影響 (拡大)

左：全て



右：1本を取り出し



まとめ

- TGF事象の解析を目的とし、雷雲電場や地磁気に対する電子の影響を解析するモジュール類の開発とサブルーチンELECTRの変更を行い、EGS5コードに組み込んだ。
 - 電場：理論式（真空中）やEGS4での計算と同様の結果を得た。
 - 磁場：UCBENDと同様の結果を得た。
- 物質密度は計算領域毎の設定であるが、地球大気を模擬して密度を連続的に評価できるようにした。
- 雷雲電場・地磁気影響について中緯度帯（もんじゅ付近）での冬季雷雷雲を対象に試計算を行った。

変更記録

- **2009.9.10 Page 5 と Page 10を削除**