

EGS5の紹介とEGS5の放射線治療への適用

川崎医科大学 自然科学教室, 川崎医療短期大学 放射線技術科

辻 修平*・成廣直正**

(平成21年10月29日受理)

Introduction of EGS 5 simulation and it's possibility of applying to the Medical Radiation

Shuhei TSUJI* and Naomasa NARIHIRO**

**Department of Natural Sciences, Kawasaki Medical School,
577 Matsushima, Kurashiki, Okayama, 701-0192, Japan*

***Department of Radiological Technology, Kawasaki College of Allied Health Professions,
316 Matsushima, Kurashiki, Okayama, 701-0194, Japan*

(Received on October 29, 2009)

概 要

電磁相互作用のシミュレーションが、1960年代により開発された。開発目的としては、高エネルギー分野での使用を目的として作られた。その後、EGSと命名され、医学物理分野をはじめより低エネルギー分野へと利用が広がった。本論文では、EGS5の紹介と、放射線物理、特に密封小線源治療への適用の可能性を示す。

キーワード：モンテカルロシミュレーション、EGS5、密封小線源治療、PLATO

Abstract

The simulation of Electromagnetic interactions has developed from 1960s. It was named EGS a few years later. For the first time, EGS was developed in the high energy physics field. It has been useful in the medical field in low energy ranges. We introduce EGS5 simulation and report to adopt EGS5 for brachytherapy.

Key words: Monte Carlo simulation, EGS5, brachytherapy, PLATO

1 序論

1963～65年、Nagelにより、SHOWER1という電磁相互作用のシミュレーションコードが開発された。そのシミュレーションコードは、形状が円筒形状のみで物質も鉛のみというものであった。1966年、Nicolliによって、SHOWER1の拡張版、SHOWER2が開発された。Nicolliバ

ージョンのコードSHOWER2がNagelにより、SLAC（スタンフォード線形加速器センター）に持ち込まれ、SLACでの拡張が始まった。SHOWERという命名はSHOWER1からSHOWER4まであり、その後、EGS1になった。EGSというのは Electron Gamma Shower という頭文字をとったものである。尚、EGS1の開発者

は, FordとNelsonであった。EGS1からEGS4までのバージョンは, PEGSという検出器内の物質等を計算するコードが独立であった。EGS5からは, PEGSというコードはEGSに包括された形となっている。尚, PEGSという名前はA Preprocessor for EGS という語から由来している。SHOWER1からEGSまで, 本来加速器のための高エネルギー分野での使用を目的に作られた。EGS4のバージョンがリリースされて以来, 多くの応用分野で用いられてきた。特に多いのは, 医学物理や放射線測定研究の分野であり, 全ユーザーの6割以上をその分野で占めている。最新のバージョンは5であり, EGS5というコードである。EGS5の開発者は, 平山, 波戸, Bielajew, Wilderman, Nelsonである¹⁾。

今回の報告では, 放射線治療, 特に前立腺癌に有効な密封小線源治療^{2,3)} に関してのEGS5のシミュレーションを従来の治療計画装置PLATO⁴⁾での計算結果との比較を示し, 具体的なEGS5シミュレーションを動かすための環境, プログラムの概略および実行方法を紹介する。

2 実験と結果

EGS5のシミュレーションを行うにおいて, シミュレーションのパラメータとして, 光電子の角度分布のサンプリング, K & L-特性X線の発生, K & L-オージェ電子の発生, レイリー散乱, 光子散乱での直線偏光, S/Z rejection, ドップラー広がり を考慮した。また電子, ガンマ線とも運動エネルギー1keVまで追跡した。使用した密封小線源は, マイクロセレクトロンHDR¹⁹²I線源⁵⁾で, シミュレーションで使うために幾何学的構造を正確に構成した。

2.1 測定とEGS5シミュレーションとの比較

治療計画装置PLATOの計算プログラムと比較する前に, 測定とEGS5シミュレーションの比較を行った。使った線源強度は, 測定時288.18GBqであった。線量計は電離体積0.6mlで, ファーマータイプのPTW N3001を使用した。媒体は, 水と等価なMix-Dpファイントムであり, シミュレーションに使った物質の化学構成も同様とした。測定の幾何学的配置を図1に示す。線源と電離箱検出器は, 8cmと5cmである。それらの結果を表1に示す。測定値は, 距離5cmで, 2.2%, 8cmで2.9%, シミュレーションよりも高い値を示した。尚, シミュレーションの入射ガンマ線の数, 2.5×10^7 回であり, その時の統計誤差は, 1.3%以内となった。

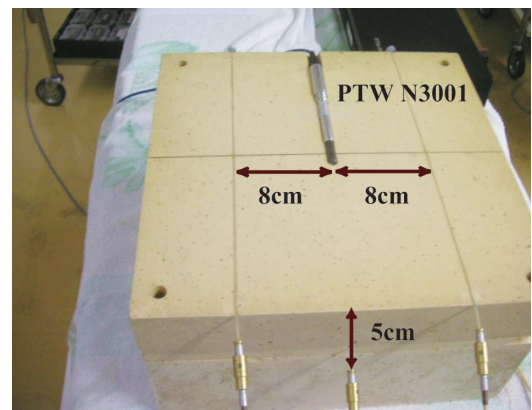


図1 小線源を用いた吸収線量の測定

2.2 治療計画装置PLATOの計算値とEGS5シミュレーションとの比較

放射線治療の治療計画は治療計画装置PLATOで行われる。人体組織は一般に水と等価に考えられている。媒体は水で, 線源中央から10mmずつ, 等間隔で100mmまでのPLATOでの計算結果と, EGS5シミュレーションの結果を比較した。単位放射能, 単位時間当たりの吸収線量の結果を図2に示す。

それぞれの点でのEGS5シミュレーションと

PLATOの計算結果の差は、最大でも5.2%であり、常にEGS5シミュレーションの結果が、PLATOの計算結果よりも低い値であった。

3 発展

治療計画装置 PLATO での計算の場合、媒体は水である。EGS5シミュレーションの場合、媒体を水に限定する必要はない。人体組織の組成でシミュレーションを行った。人体組成は、H, C, N, O, Na, Mg, P, S, Cl, K, Ca, Fe, Znとした⁶⁾。マイクロセレクトロンHDR¹⁹²Ir線源の断面での平面における単位放射能、単位時間当たりの吸収線量の等高線を図3に示す。

図3の左図を等高線にしたものを右図に示す。最も強度が強い点は線源中心部である。右側の等高線には、線源とワイヤーの模式図を等

高線の左に付記している。EGS5シミュレーションは、どのような組織でも組成を詳細に記述すればシミュレーション計算が可能である。

4 EGS5の動作環境と導入、実行方法

4.1 EGS5の動作環境

EGS5は、基本的にはFortran77のコンパイラが実装された環境下で実行できる。代表的なFortran77としては、GNUのg77がある。GNUは、シェルやCコンパイラ、テキストエディタなどを含む一連のツール群に与えられた名称であり、GNUのソフトウェアは、OSのUNIXと完全互換であり、誰もが自由に修正でき、一切の制限なく配布することが求められる⁷⁾。元々は、UNIX搭載のワークステーションでEGSは動いているものと考えられるが、1990年代、パ

表1 測定値とEGS5シミュレーションの結果

距離	実験値(Gy/sec.)	EGS5(Gy/sec.)
5 cm	$(3.8975 \pm 0.0016) \times 10^{-3}$	$(3.8138 \pm 0.0299) \times 10^{-3}$
8 cm	$(1.4690 \pm 0.0024) \times 10^{-3}$	$(1.4280 \pm 0.0174) \times 10^{-3}$

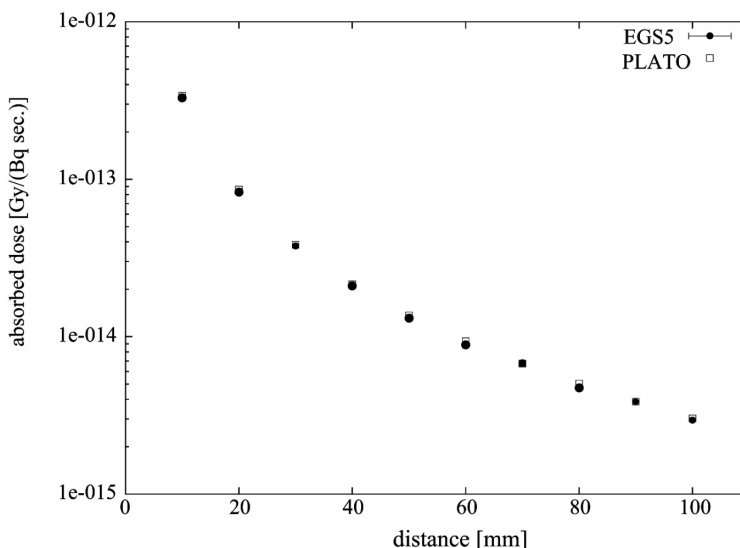


図2 治療計画装置PLATOとEGS5の結果

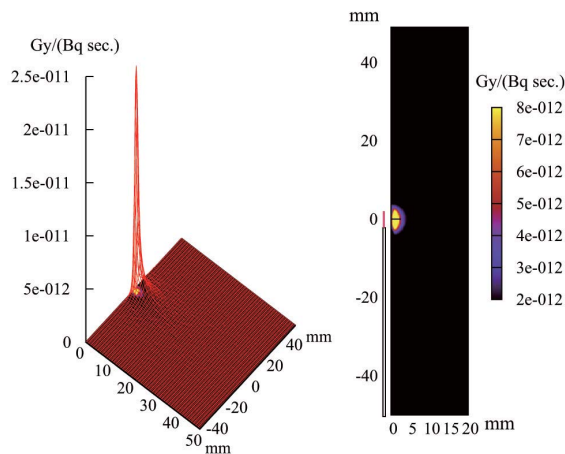


図3 人体組織組成での単位放射能, 単位時間当たりの吸収線量分布

パーソナルコンピュータレベルで搭載できるUNIX, すなわちLinux⁸⁾の出現でより身近に扱えるものとなった。そして, 2000年頃, Windows上で, GNUのプログラムが動くソフトウェアCygwin⁹⁾の普及によって, よりEGSが簡単に扱えるものとなった。図4は, Windows上でのCygwinが起動した様子を示している。

近年では, DOSプロンプトから実行できるg77.exe, または, Lahey fortran や intel fortran などの商用パッケージがあり, これらを使ってWindows上のDOSプロンプトからEGS5を動かすこともできる。

これら, Fortran77コンパイラが動く環境下で, egs5.tar.gzをKEKのサイト¹⁰⁾からダウンロードし, 展開する。egs5のディレクトリにパスを通し, egs5runのテキストの中身を一部編集する。Cygwinを使う場合,

```
BASKET=/home/tsuji/egs5
MY_MACHINE=Cygwin-Linux
OPT_LEVEL=2
```

というように記述する。BASKETの変数には, EGS5のディレクトリを指定する。

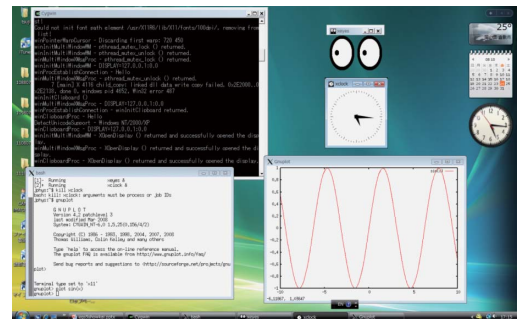


図4 Windows上のCygwinの起動画面

4.2 EGS5に必要なファイル

EGS5シミュレーションを実行するには, 基本的に3つのファイルが必要である。まず, 実際ファイルを実行するためのFortranファイル(拡張子がf), 領域の化学組成や, 粒子のカットオフエネルギー等を記述するinpファイル(拡張子がinp), 構造を記述するdataファイル(拡張子がdata)である。

図5は, メインプログラム(Fortranファイル)の概略である。シミュレーションはStep8のShower-callから行われる。粒子の種類, 全エネルギー, 発射座標, 発射方向の方向余弦, 発射領域, 重みを引数にして, call showerを実行する。call showerを多く実行すればするほど, 統計精度が高まる。粒子は, 電磁相互作用

を繰り返しながら，定められたカットオフエネルギー以下，あるいは，真空領域にたどり着くまで進んでいく。

shower のサブルーチンから，ausgab のサブルーチンが呼ばれる。ausgab の呼ばれる条件はいろいろある。1例としては，ある距離を走ると呼ばれる。ausgab のサブルーチンは，どのような条件の時，どのような物理量を集計するかを記述する。ある領域の吸収線量などの記述は，この ausgab のサブルーチンに記述される。

図 6 は，inp ファイルの 1 部を示しており，化学組成の 1 例として，水を記述している。構成元素数，密度，化学組成比等を記述する。この後，空気，金属等を同じように記述する。ここで，記述した順に番号が付く。（水が 1 番，空気が 2 番，金属が 3 番等。） 図 7 は，data ファイルの 1 部，すなわち構造の記述である。RPP は，立方体を表しており，一行目は，x 軸が - 15cm から 15cm，y 軸が - 25cm から 25cm，z 軸が - 10cm から 20cm の立体であり，その立体は 1 番とされる。2 行目も同様に立方体の記述であり，その立体は 2 番とされる。

Z 1 は領域を示しており，Z 1 の領域は立体 1 番から立体 2 番を引いたものとされる。

別の言い方をすれば，立体 1 番の内側と立体 2 番の外側（マイナス符号は外側を意味する）の論理積 and をとったものである。and は省略形で示され，論理和 or のみファイルに記述する。Z 2 以下同様に立体の and，or によって領域が定義される。最後の 2 1 1.....0 であるが，inp ファイルで記述した順番の物質で満たされることを意味する。inp ファイルに水，空気，金属と記述した場合，水が 1 番，空気が 2 番，金属が 3 番となる。よって，2 1 1.....0 と書いた場合，Z 1 は空気，Z 2 は水，Z 3 も水を意味する。最後の 0 であるが，領域の最外層は真空層で満たす必要があり，真空は 0 で記述される。

図 8 は，EGS5 シミュレーションのフローチ

ャートの概略である。ユーザーは，点線より上の MAIN，AUSGUB，そして場合によっては，HOWFAR を作成する。点線より下の部分は，電磁相互作用の諸現象をシミュレートするルーチンになっており，ユーザーは，記述することはもちろん，意識することなく使い，シミュレーションを行うことができる。

```

-----
|----- main code -----
|-----
| Step 1: Initialization
|-----
|-----
| Step 2: pegas5-call
|-----
|-----
| Step 3: Pre-hatch-call-initialization
|-----
|-----
| Step 4: Determination-of-incident-particle-parameters
|-----
|-----
| Step 5: hatch-call
|-----
|-----
| Step 6: Initialization-for-howfar
|-----
|-----
| Step 7: Initialization-for-ausgab
|-----
|-----
| Step 8: Shower-call
|-----
|-----
| do j=1,ncases          ! Start of CALL SHOWER loop
|-----
|-----
| call shower (iqin,etot,xin,yin,zin,uin,vin,win,irinn,wtin)
|=====
|-----
| end do                ! End of CALL SHOWER loop
|-----
|-----
| Step 9: Output-of-results
|-----
|-----
|-----last line of main code-----
|-----
|-----ausgab.f-----
|-----
|-----last line of ausgab.f-----

```

図 5 メインプログラムの概要

```

COMP
&INP NE=2,RHO=1.00, PZ=2,1, IRAYL=1 /END
WATER H2O
H O
ENER
&INP AE=0.521,AP=0.0100,UE=2.011,UP=1.5
/END
PWLF
&INP /END
DECK
&INP /END
.....
    
```

図6 inpファイル 領域の化学組成等の記述

```

RPP 1 -15.0 15.0 -25.0 25.0 -10.0 20.0
RPP 2 -5.0 5.0 -15.0 15.0 0.0 10.0
.....
END
Z1 +1 -2
Z2 +3
.....
END
2 1 1.....0
    
```

図7 dataファイル シミュレーションの幾何学的構造の記述

4.3 EGS5の実行

egs5runというバッチファイルが用意されている。必要なファイルを準備し、コマンドラインからegs5runと打って実行する。対話形式により訊ねてくるのでそれに従いファイル名を入力すると、シミュレーションのコンパイルおよび実行が始まる。図9は、コマンドラインからの入力の1例を示している。例えば、ファイル名にuc_tsuji.f, uc_tsuji.data, uc_tsuji.inpというファイルを用意する。拡張子以外、ファイル名を共通にしておけば、一度ファイル名を入力するだけで後はリターンの入力のみで実行ファイルが生成される。最後に1を入れれば、そのコマンドライン入力のターミナルで実行が行われる。計算終了後は、計算時間が表示される。

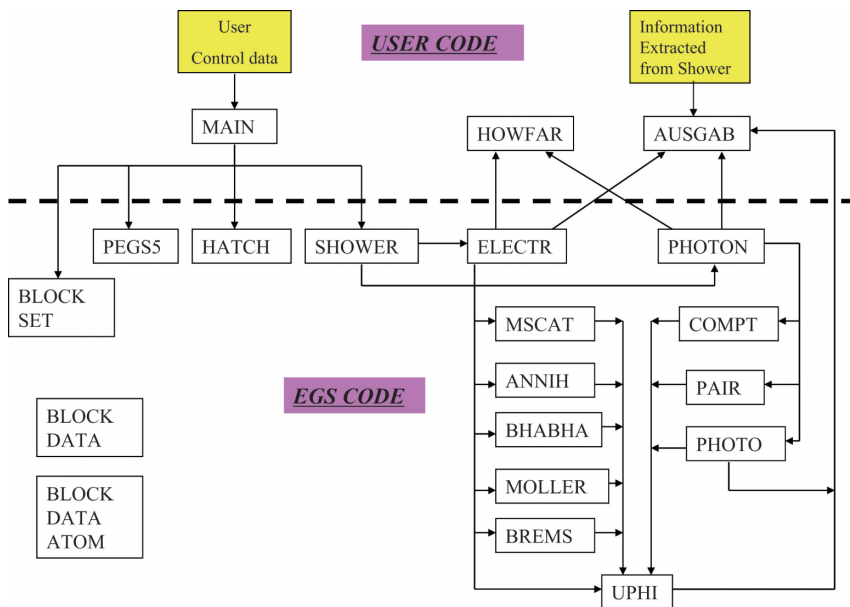


図8 EGS5 シミュレーションのフローチャートの概略


```

$ egs5run
=====
egs5run script has started
=====
working directory is /home/tsuji/EGS/ucsource/uc_tsuji
Erasing files (and links) from previous runs (if they exist)
-----
OS_TYPE = Cygwin-Linux
Your Compiler is g77
-----
Enter name of User Code
(file extension must be '.f')
-----
uc_tsuji

-----
Enter name of READ(4) data file
(file extension must be '.data')
(<CR> for same file name as User Code)
-----
--> uc_tsuji.data copied to egs5job.inp
Enter name of UNIT(25) (pegs input file)
(file extension must be '.inp')
(<CR> for same file name as data file
or same file name as User Code)
-----
--> uc_tsuji.inp linked to pgs5job.pegs5inp

Compiling (with -fno-automatic -finit-local-zero and 02)
.....
.....
-----
Does this user code read from the terminal?
(Enter 1 for yes, anything else for no)
-----
1
*****
* User code uc_tsuji.f has been compiled and is starting *
*****
Ready for user input:

real 1m1.921s
user 1m5.343s
sys 0m0.108s

=====
egs5run script has ended
=====
jphys:~/EGS/ucsource/uc_tsuji$
    
```

図9 EGS 5 シミュレーションのコンパイル、および実行

4.4 出力ファイル

EGS5シミュレーションで一般的に出力されるファイルは2種類ある。egs5job.outと、egs5job.picである。egs5job.outは、Fortranファイルの中のausgabというサブルーチンに記述した、ユーザーが求める物理量のシミュレーション結果の内容である。egs5job.picは、シミュレーションが行われた最初の100例ほどの粒子の飛跡データである。egs5job.picをグラフィカルに見るためにCGVIEW¹¹⁾というプログラムがWindows用とLinux用に準備されている。CGVIEWのプログラムは、単に粒子の飛跡を見て、シミュレーションの実行を視覚的に確かめるばかりではなく、立体を記述したdataファイル内の領域の記述に重複、あるいは欠損があるかど

うかの整合性をチェックする機能も持っている。

図10は、5cm離れたところから、水面にガンマ線を入力した結果を示しており、egs5job.picのデータをCGVIEWによってグラフィカルに表示している。図11は、egs5job.outの一部分の抜粋である。水中の入射当たりの吸収線量の集計結果である。

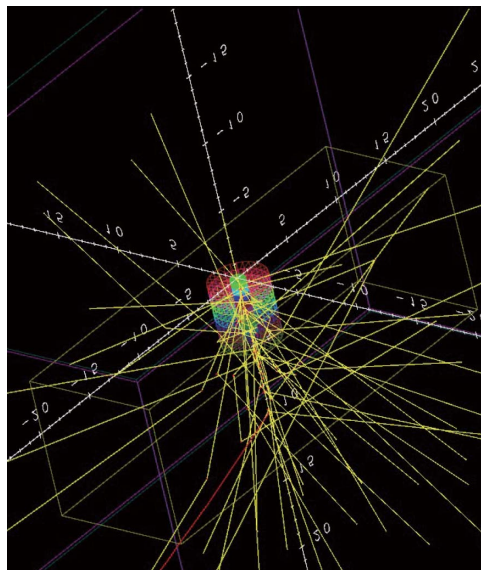


図10 CGVIEWでの飛跡データの出力結果

```

.....
Absorbed energy inside phantom for 1.253MeV photon
Source position 5.0 cm from phantom surface
Within 0.5cm x 0.5cm x pai area after 5 cm air
100000 photons normally incident from front side
Half width of beam is 0.0000 cm for X and 0.0000 cm for Y
At 0.0-- 0.5cm (WATER ,rho: 1.0000)= 0.56348E-11+-0.12313E-12Gy/incident
At 0.5-- 1.0cm (WATER ,rho: 1.0000)= 0.72598E-11+-0.13863E-12Gy/incident
At 1.0-- 1.5cm (WATER ,rho: 1.0000)= 0.70443E-11+-0.13639E-12Gy/incident
At 1.5-- 2.0cm (WATER ,rho: 1.0000)= 0.71286E-11+-0.13756E-12Gy/incident
.....
    
```

図11 egs5job.outの出力結果の一部

5 結論

まず初めに、小線源治療で使われるマイクロセレクトロン HDR¹⁹²Ir 線源による強度の実測値とシミュレーションを比較した。両者の値は、3%程の差で、EGS5シミュレーションは、精

度がよいことを示した。さらに、従来の治療計画装置 PLATO の計算結果と比較したところ、両者の差は、最大でも5.2%であった。

後半では、「EGS5 の動作環境と導入、実行方法」について、概要および一般的な使い方について述べた。EGS5 シミュレーションは、通常のコンピュータ環境で十分シミュレーションができる。

以上から、EGS5 シミュレーションは、放射線治療などの医療分野において有用である。また、シミュレーションを行うにおいて、特別な設備は必要なく、一般の端末レベルで使用できる。

EGS5 等のシミュレーションにおいての問題点は、汎用なコンピュータで詳細なシミュレーション数を増やすと計算時間が多くかかってしまうことである。ちなみに、我々のコンピュータのスペック (CPU : Core 2 Duo 2.4GHz, Memory : 2Gbyte, OS : Windows Vista) で、図 2 の結果を出すのに 1 週間ほどかかる。(粒子数 1.0×10^8 回) 実行時間の短縮のためには、メインプログラムの HOWFAR にある領域に達したならば、粒子の追跡を中止するように記述もできるが、これは、限られたシミュレーションのみ有効な手段である。短時間に結果を出すならば、コンピュータのスペックも高性能なものを使う必要があると思われる。

本論文では、使い方までの概略を簡単に述べたが、さらに詳細に知りたい方は、「EGS 研究会ホームページ」を参照することをお勧めする¹²⁾。

参考文献

- 1) H. Hirayama, Y. Namito, A.F. Bielajew, S.J. Wilderman and W.R. Nelson : The EGS5 Code System. SLAC-R-730 and KEK Report 2005-8 : 2005
- 2) A.T. Porter, J.W. Scrimger, J.S. Pocha : Remote interstitial afterloading in cancer of the prostate : preliminary experience with the MicroSelectron. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 14 3 : 571-575, 1988
- 3) D. Miszczak : Modern Brachytherapy Techniques Real-Time High Dose Rate Brachytherapy for Prostate Cancer. Proceedings of the XLII Zakopane School of Physics, Zakopane 2008, ACTA PHYSICA POLONICA A 115 : 583-585, 2009
- 4) M. J. Rivard et al. : Update of AAPM Task Group No.43 Report : A revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations. Med. Phys. 31 3 : 633-673, 2004
- 5) G. M. Daskalov, E. Löffler, J. F. Williamson : Monte Carlo-aided dosimetry of a new high dose-rate brachytherapy source. Med. Phys. 25 11 : 2200-2208, 1998
- 6) Particle Data Group : http://pdg.lbl.gov/2009/AtomicNuclearProperties/HTML_PAGES/261.html
- 7) GNU オペレーティング・システム : <http://www.gnu.org/home.ja.html>
- 8) 日本 Linux 協会 : <http://jla.linux.or.jp/>
- 9) cygwin : <http://cygwin.com/>
- 10) EGS5 Web Page : <http://rcwww.kek.jp/research/egs/egs5.html>
- 11) Cgview : <http://rcwww.kek.jp/research/egs/kek/cgview/>
- 12) EGS 研究会ホームページ : <http://rcwww.kek.jp/egsconf/index.html>