



KEK Proceedings 93-15  
December 1993  
A/H/R/D

## 第 3 回 E G S 4 研究会

Proceedings of the Third EGS4 Users' Meeting in Japan  
KEK, Japan  
1993. 7. 26. — 28.

編 集：平山 英夫  
波戸 芳仁  
伴 秀一

edited by Hideo HIRAYAMA  
Yoshihito NAMITO  
Syuichi BAN

NATIONAL LABORATORY FOR  
HIGH ENERGY PHYSICS

**National Laboratory for High Energy Physics, 1993**

KEK Reports are available from:

Technical Information & Library  
National Laboratory for High Energy Physics  
1-1 Oho, Tsukuba-shi  
Ibaraki-ken, 305  
JAPAN

Phone: 0298-64-1171  
Telex: 3652-534 (Domestic)  
(0)3652-534 (International)  
Fax: 0298-64-4604  
Cable: KEK OHO  
E-mail: LIBRARY@JPNKEKVX (Bitnet Address)  
library@kekvax.kek.jp (Internet Address)

## はじめに

本レポートは、1993年7月26、27、28日にKEK3号館セミナーホールにおいて、高エネルギー物理学研究所放射線安全管理センター主催で開催された『第3回EGS4研究会』での講演をまとめたものです。

研究会の前半は、昨年同様に「EGS4システム」、「MORTRAN」、「ジオメトリルーチンの書き方」等の基本的な事項についての講演と簡単な実習にあてました。これからEGS4を使用しようとする研究者と、既にEGS4を研究の手段として使用している研究者では関心が異なるので、「入門コース」と「応用コース」に分け、「入門コース」ではEGS4のシステムをインストールし、簡単なユーザーコードを動かすまでを経験してもらいました。

研究会には所外69名、所内17名という昨年を上回る多数の出席者がありました。EGS4を使い始めたばかりの研究者やこれから使いたいという研究者の参加も多くこの研究会がきっかけになって新しいユーザー層が広がってきていることを示しているように思います。国外ではEGS4ユーザーの大部分を占めている医学物理関係の参加者も増えてきています。16件と昨年より増えたEGS4を使用した研究についての講演では、これまで同様幅広い分野の話聞くことができました。専門分野が細分化され他分野の研究についての話を聞く機会が少なくなっている現状で、EGS4という手段を共通とする様々な分野の研究を交流できたことはそれだけでも有意義であったと思います。

忙しい時期にもかかわらず、積極的に講演の申し込みを行い、このレポートに寄稿していただいた方々に深く感謝するとともに、このレポートが今後のEGS4の利用に役立つことを願っています。

1993年12月

世話人 平山 英夫  
波戸 芳仁  
伴 秀一

# 目 次

1. 腔内挿入用 $\gamma$ プローブにおける同時計数に関するシュミレーションについて  
東北大サイクロトロン・RIセンター<sup>A</sup>、東北大加齢医学研究所<sup>B</sup>  
林 喜治<sup>A</sup>、中村 尚司<sup>A</sup>、成田雄一郎<sup>A</sup>、伊藤 正敏<sup>A</sup>、高橋 弘<sup>B</sup> …… 1
2. ライナック電子線による水溶液中のエネルギー付与分布  
北大工<sup>A</sup>、動燃・東海<sup>B</sup> 沢村 貞史<sup>A</sup>、藤原 朋春<sup>A</sup>、北市 雅敏<sup>A</sup>、  
藤田 文行<sup>A</sup>、野尻 一郎<sup>B</sup> …… 5
3. EGS4を用いた高エネルギー光子の線量当量換算係数の計算  
三菱原子力工業<sup>A</sup>、三菱総合研究所<sup>B</sup>、原研<sup>C</sup>  
岩井 敏<sup>A</sup>、佐藤 理<sup>B</sup>、田中 俊一<sup>C</sup> …… 10
4. 核融合 $\gamma$ 線検出器 対生成磁気スペクトロメーターの概念設計  
東大工 原野 英樹、井口 哲夫、中沢 正治 …… 54
5. ガス補集用電離箱の電離効率の計算  
動燃・大洗 鳥居 建男、野崎 達夫、安藤 秀樹 …… 58
6. TLDを用いた光子吸収線量測定における境界面効果の影響  
船研<sup>A</sup>、原研<sup>B</sup>、KEK<sup>C</sup> 成山展照<sup>A</sup>、田中俊一<sup>B</sup>、浅野 芳裕<sup>B</sup>、  
中根佳弘<sup>B</sup>、平山英夫<sup>C</sup>、伴秀一<sup>C</sup>、中島宏<sup>B</sup>、波戸芳仁<sup>C</sup> …… 62
7. 多重層 $\gamma$ 線ビルドアップ係数  
京大工<sup>A</sup>、KEK<sup>B</sup> 秦 和夫<sup>A</sup>、平山 英夫<sup>B</sup> …… 68
8. EGS4コードによる光核反応評価手法  
原研<sup>A</sup>、CRC総合研究所<sup>B</sup> 笹本 宣雄<sup>A</sup>、石塚 龍雄<sup>B</sup>、  
石川 智之<sup>B</sup>、高橋 浩<sup>B</sup> …… 72
9. PEGS4用光子断面積PHOTXデータ  
原研 坂本 幸夫 …… 77
10. 高エネルギー物理学(HEP)ベンチマークプログラム  
KEK<sup>A</sup>、日本DEC<sup>B</sup> 安 芳次<sup>A</sup>、一井 伸吾<sup>A</sup>、八代 茂夫<sup>A</sup>、平山 英夫<sup>A</sup>、  
国府田弘<sup>B</sup>、鈴木 栄伸<sup>B</sup> …… 83

11. EGS4システムのプログラム解析	
KEK <sup>a</sup> 、日本DEC <sup>b</sup> 安 芳次 <sup>a</sup> 、一井 伸吾 <sup>a</sup> 、八代 茂夫 <sup>a</sup> 、平山 英夫 <sup>a</sup> 、 国府田弘 <sup>b</sup> 、鈴木 栄伸 <sup>b</sup> ……………	105
12. ポジトロンファクトリー用電子ライナックおよびターゲット系に関する考察(Ⅱ)	
原研・高崎 金子 広久、岡田 漱平 ……………	118
13. Spring-8電子陽電子変換部のシュミレーション	
原研-理研大型放射光施設計画推進共同チーム 水野 明彦、鈴木 伸介、吉川 博、 堀 利彦、柳田 謙一、為実 健二、古寺 正彦、榊 泰直、横溝 英明 ……	121
研究会プログラム ……………	126
研究会参加者名簿 ……………	129

# 腔内挿入用 $\gamma$ プローブにおける同時計数に関する シミュレーションについて

東北大学サイクロトロンRIセンター

林喜治 中村尚司

成田雄一郎 伊藤正敏

東北大学加齢医学研究所

高橋弘

Simulation of random coincidence effect in  $\gamma$ -probe for intracavity use

Yoshi-haru Hayashi

Cyclotron and Radioisotope Center, Tohoku University

Aoba Aramaki Aoba-ku Sendai, Japan

We are developing a  $\gamma$ -ray endoscope for detecting gamma-rays emitted from radionuclide accumulated in tumor. This endoscope counts gamma-rays in random coincidence mode using two miniature CWO detectors for improving tumor localization. The random coincidence is the event which two gamma rays produce pulses in both detectors simultaneously. The characteristics of the  $\gamma$ -ray endoscope using random coincidence mode would be estimated with the EGS4 code by using the technique that each history number is replaced by the time interval.

## 1、はじめに

核医学とは RI を用いることにより、診断または治療を行う医学分野の1つである。この分野では、腫瘍に集積しやすい放射性薬剤を投与し、そこから放出される放射線を検出することにより、腫瘍部分の位置特定を行うなどの診断が日常おこなわれている。我々が開発している  $\gamma$ プローブは、腔内に挿入し  $\gamma$ 線を検出することによって、腫瘍の位置特定をおこなうシステムである。EGS4 を用いて、様々な体系においてシミュレーションを行い、このシステムの性能を評価、考察しているので、ここで報告する。

## 2、システムの構成

このシステムの構成を図1に示す。図に示してあるように、このシステムは2つの検出器のコインシデンスをとることにより、位置分解能を向上させる処理をしている。ここで計算上の観点からコインシデンスを2つに分けて評価する。

1つは、ただ1つの  $\gamma$ 線が2つの検出器にシグナルを作った場合であり(True-Coincidence)、もう1つは、異なる  $\gamma$ 線が同時刻に、それぞれの検出器にシグナルを作った場合である(Random-Coincidence)。このシステムはランダムコインシデンスを計測することにより、位置分解能の向上を図っており、計算コードにおいて、これをどう評価するかが課題となる。

### 3、計算方法

このシステムでは、回路的には図 2 のような処理を行い計数している。すなわち、2つの検出器からのパルスが共にポジティブのとき同時計数する。この図において、横軸は時間情報であるが、計算上ではこれをヒストリー数として考えることができる。そこで、一方のシンチレータにエネルギー付与があった場合、ユーザー側で指定したヒストリー数の間フラグを立てておき、両方の検出器でフラグが立っていた場合のみカウントをとる。このようにしてランダムコインシデンスを考慮することができる。

我々のシステムにおいて採用している2つの検出器のコインシデンスを用いたデュアルシステムと1つの検出器のみを用いたシングルシステムによる比較を行っており、これによって、このシステムの性能が評価できるであろうと思われる。

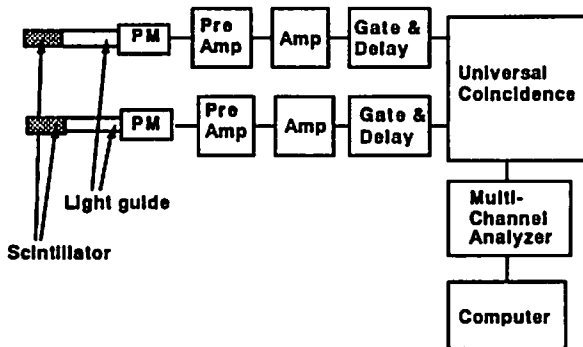


図 1、システムの構成

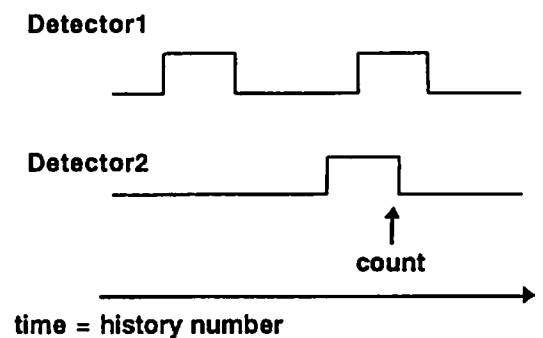


図 2、同時計数の方法

### 4、EGS4 による $\gamma$ プローブ応答の計算結果

#### (1) CWO シンチレータの特性

この  $\gamma$  プローブでは CWO シンチレーターが使われている。このシンチレータの特徴は他に比べ比重が大きく、感度が高いということである。これを検証するために EGS4 を用いて、CWO シンチレータの 500KeV  $\gamma$  線に対するレスポンスを一般に広く用いられている NaI シンチレータのレスポンスと比較した。これを示したのが図 3 である。これは直径 6mm、高さ 6mm の円柱型の大きさをもつシンチレータでの計算結果である。この図が示すように CWO シンチレータは NaI に比べ 2 倍以上の感度を持つことが分かり、高い感度が要求される腔内挿入用  $\gamma$  プローブに適したシンチレータであることが分かる。

#### (2) $\gamma$ プローブ応答の距離に対する変化

$\gamma$  プローブに最も要求される性能は腔内などにある腫瘍の位置を特定するための高い位置分解能である。そのため、腔内挿入用  $\gamma$  プローブは線源とプローブ間の距離に対するカウントの変化が大きくなってはならない。つまり、放射能が集積している腫瘍の極めて近傍でカウントが急激に高くなれば、ユーザー側は腫瘍の位置を特定するのが容易になる。よって、点線源(Cs-137)からの距離に対する  $\gamma$  プローブのカウントの変化を EGS4 でシミュレーションしている。また、こ

の計算結果を実験データと比較し、EGS4 による計算方法の妥当性を評価している。これを図 4 に示す。この図から 2 つの検出器のコインシデンスを用いたデュアルシステムはシングルシステムに比べ、線源からの距離に対するカウントの減少率が大きいことがわかる。また、実験値と計算値がよく一致しており、EGS4 によるシミュレーションが可能であることが確認できる。

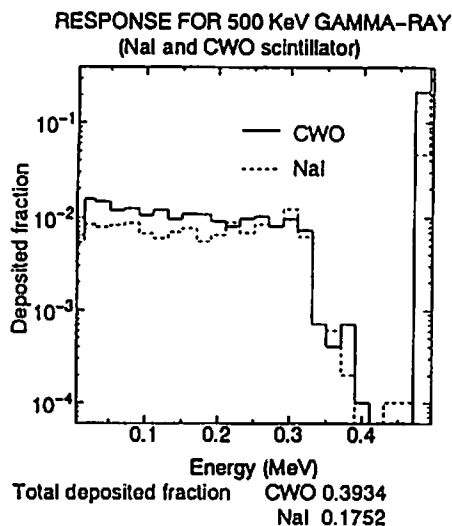


図 3、シンチレータの感度

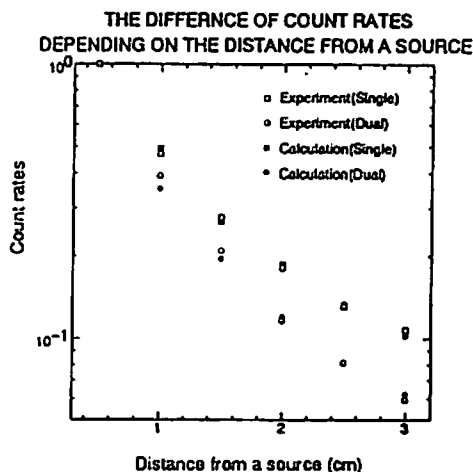


図 4、距離に対する検出器の応答

### (3) $\gamma$ プローブの位置分解能の検証

実際にこの $\gamma$ プローブで腫瘍の位置を特定する場合、腫瘍周辺の正常組織にも放射能が存在するため、このバックグラウンドによる $\gamma$ プローブへの影響を考慮せねばならない。これを EGS4 により評価した結果が図 5 である。この図は直径 1cm の球線源とその周りにバックグラウンドがある時の $\gamma$ プローブのカウントの変化を表す。バックグラウンドの放射能濃度は球線源の濃度の 10%、20%、そしてバックグラウンドがない時について計算している。この図から線源の放射能濃度がバックグラウンドの 5 倍程度であるとき、線源位置でのカウントが周辺数 cm 範囲の約 2 倍になることが分かり、腫瘍への放射能集積率が正常組織の 5 倍以上の場合、この $\gamma$ プローブでの位置特定が可能になるといえる。

### (4) コインシデンスのゲート幅に対する依存性

$\gamma$ プローブが採用しているデュアルシステムは 2 つの検出器のコインシデンスをカウントするため、この条件如何によりカウント値が変化する。例えば、コインシデンスのゲート幅が狭い場合、同時係数をとる確率が減るためカウントは減少する。また、コインシデンスのゲート幅を広くした場合、数え落しが増えるため、これもカウントを減少させる要因となる。よって、最適なゲート幅を選択すればより高い検出効率を得られることがわかる。この最適なゲート幅を考慮するために EGS4 によってシミュレーションした。この時の計算体系は 500KeV  $\gamma$ 線の点線源が検出器の表面から 1cm の距離で等方散乱した場合を想定しており、この時の結果が図 6 である。この図の横軸はゲート幅であるが、単位はヒストリー数である。これを実際に使用される線源の放射能量(Bq)で割れば、ゲー



ト幅を時間の単位で表すことができる。例えば、この図 6 から  $\gamma$  プローブの最大効率を与えるゲート幅は 15 ヒストリーであることが分かるが、仮に点線源が 1MBq の場合、最適なゲート幅は  $15 \mu s$  である。

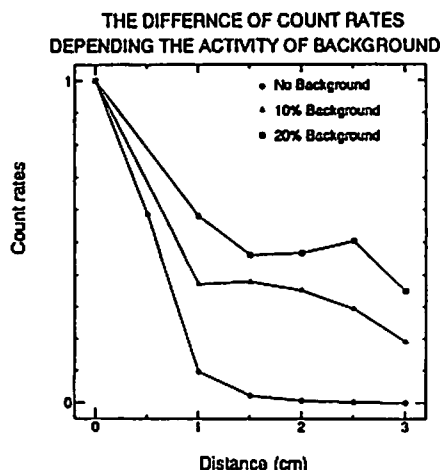


図 5、集積率に対するカウントの変化

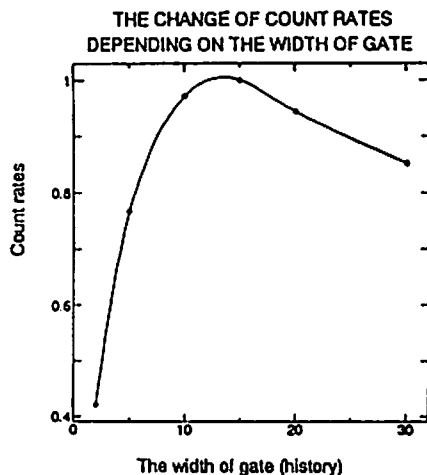


図 6、ゲート幅に対するカウントの変化

## 5、まとめ

EGS4 を用いてランダムコインシデンスを計数するデュアルシステムの評価をすることが可能になり、計算から腔内挿入用  $\gamma$  プローブの性能を考察することができた。また、コインシデンスのゲート幅に対するカウントの変化を考慮することができ、最大効率を与えるゲート幅を推測することができるようになった。デュアルシステムではシングルシステムに比べ効率が低下するので、このような検証を行うことは非常に重要である。

## 参考文献

- 1) G.F.Knoll : Radiation Detection and Measurement Second Edition , Jhon Wiley & Sons, Inc (1991)
- 2) Nuclear Instruments and Systems 86, 87 ,EG &G ORTEC
- 3) N.Tsoufanidis : Measurement and Detection of Radiation, Hemisphere Publication Corporation (1983)
- 4) E. Browne, R.B. Firestone : Table of Radioactive Isotopes, John Wiley & Sons, Inc. (1986)

# ライナック電子線による水溶液中のエネルギー付与分布

北大工<sup>A</sup>、 動燃・東海<sup>B</sup>

沢村貞史<sup>A</sup>、藤原朋春<sup>A</sup>、北市雅敏<sup>A</sup>、  
藤田文行<sup>A</sup>、野尻一郎<sup>B</sup>

DISTRIBUTION OF IMPARTED ENERGY IN WATER IRRADIATED BY ELECTRON BEAMS FROM LINAC

Sadashi Sawamura<sup>A</sup>, Tomoharu Fujiwara<sup>A</sup>, Masatoshi Kitaichi<sup>A</sup>,  
Fumiyuki Fujita<sup>A</sup>, Itirou Nojiri<sup>B</sup>

A: Department of Nuclear Engineering, Hokkaido University  
Kita-13, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo, 060, Japan

B: Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

A modified pulse radiolysis method was developed to measure the depth dose distribution in water irradiated by 4MeV LINAC. The experimental results were compared with the dose distribution obtained by the EGS4 monte calro simulation. The comparison showed that the fraction of energy carried out from the medium by escaped electrons gives large distortion to the distribution.

## 1. はじめに

電子線型加速器（電子ライナック）からの高エネルギー電子線による被曝線量測定・評価を目的として、水溶液中の吸収線量の深度分布を測定する体系を開発している。アイソトープからの $\beta$ 線に比較して、ライナックからの電子線は瞬間強度の高いパルス状の放射線であり、かつ、人体内部まで進入できる程度に高エネルギーである。パルス状の放射線による線量分布測定法に望まれる事項としては、1)放射線バースト当たりの吸収線量及びその分布が測定できること、2)測定器や測定法が分布を乱さないこと、3)迅速応答性を有すること、4)人体の被曝線量が推定できること、等が挙げられる。筆者らは、水溶液を軟組織等価物質として用い、ライナックからの高エネルギー電子線に照射された水溶液中の吸収線量深度分布を、放射線化学の分野における実験手法であるパルスラジオリソ法を用いて測定する事を試みている。ここでは、測定方法・体系と実験結果およびEGS4コードを用いたモンテカルロ計算等について報告する。

## 2. 測定体系と実験結果

測定方法：被照射水溶液中に水和電子（ $e^-_{aq}$ ）やOHラジカル等の放射線化学的初期生成物が生成されたことを”放射線から水溶液にエネルギーが付与された”と表現している。したがって、吸収線量の測定は、放射線化学的には、初期生成物の濃度を測定する事に対応し、吸収線量の深度分布は初期生成物の濃度の深度分布から求めることが出来る。初期生成物は、一般的には短寿命であるため、その測定にはパルスラジオリシス法が用いられる。パルスラジオリシス法で直接的に得られる物理量は吸光度（A）である。吸光度から濃度、さらには吸収線量（D）を得るためには着目した初期生成物の分子吸光係数（ $\epsilon$ ）と放射線化学的収量（G値）が既知である必要がある。

$$D = \frac{A}{G \epsilon l \rho} \times 9.66 \times 10^6 \quad (\text{Gy})$$

ここで、 $l$ は分析光のセル中における光路長、 $\rho$ は媒質の密度である。被照射水溶液中に生成する水和電子に関するG値や $\epsilon$ 値等は既によく知られている。図1に深度分布測定の実験原理図を示す。分析光が通過する位置（深さ）における初期生成物濃度が測定される。したがって、深度分布を測定するためには、分析光を深さ方向に掃引する必要がある。

測定体系と実験結果：

図2に試作した測定体系を示す。基本的には通常のパルスラジオリシス体系と同一である。しかし、分析光（He-Neレーザー光を使用）がセルを通過する位置をパル

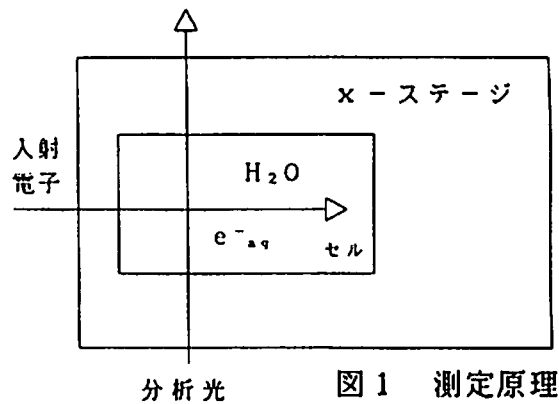


図1 測定原理

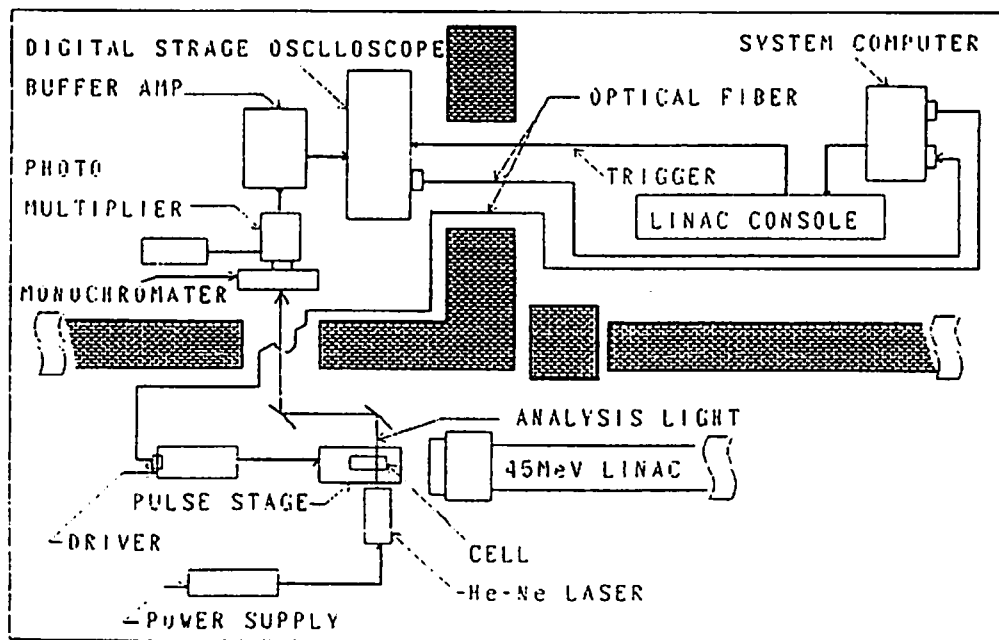


図2 パルスラジオリシス法による深度分布測定体系

ステージで掃引出来るようになってきている。深さ方向の空間分解能は分析光の平行度と幅でほぼ決定され、本装置では約  $200\ \mu\text{m}$  である。時間分解能は、主として、光電変換素子の応答速度で決定され、現在、約  $2\ \text{ns}$  である。図3に  $4\ \text{MeV}$  ライナック（パルス幅： $1\ \mu\text{s}$ ）を用いて得られた水和電子の吸収減衰波形の一例を示す。縦軸はセルを透過した光強度に対応し、横軸は時間で1ワード  $50\ \text{ns}$  である。図3の（a）は高エネルギー電子が入射する側のセルガラス直後の位置における測定結果であり、（b）は深さ  $6.0\ \text{mm}$  における波形である。時間的にはパルス照射直後の吸光度から線量を求める。深度分布測定結果の1例を図4示す（図中●印）。セル（内径  $10 \times 20 \times 30\ \text{mm}$ ）のガラス（厚さ  $1\ \text{mm}$ ）の内面を深さ方向の原点としている。深度分布から飛程を求め、入射エネルギーに換算した値（ $2.9\ \text{MeV}$ ）とビームのエネルギースペクトルから予測される値とはほぼ一致した。また、エネルギー損失を左右する媒質の密度  $\rho$ 、実効原子番号  $Z_{\text{eff}}$ 、実効原子量  $A_{\text{eff}}$  等に対する深度分布の変化も測定され（図6）、本体系では  $\rho (Z/A)_{\text{eff}}$  の変化にして  $15\%$  程度の変化に対応する深度分布の差を測定できることが分かった。 $45\ \text{MeV}$  ライナックを用いた実験も行われた。

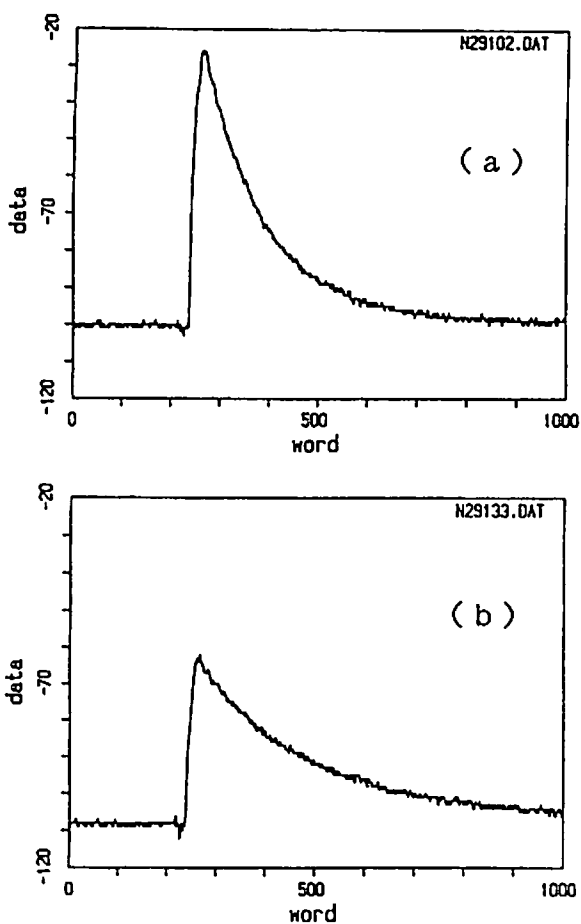


図3 水和電子による吸収減衰波形  
 (a) 入射側セルガラス直後  
 (b)  $6.0\ \text{mm}$

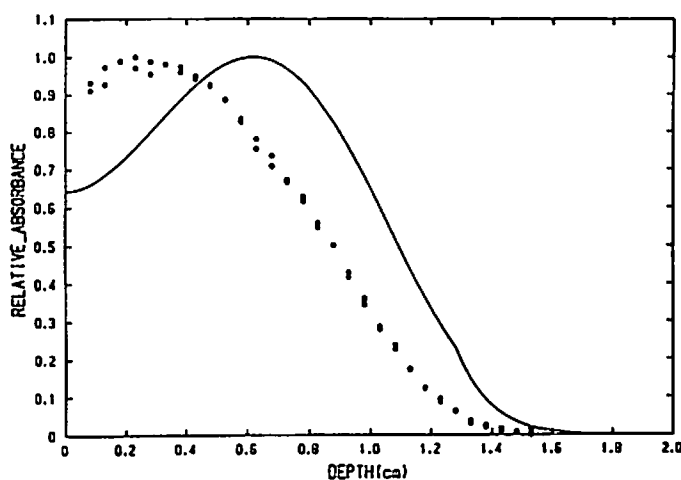


図4 水溶液中の深度分布

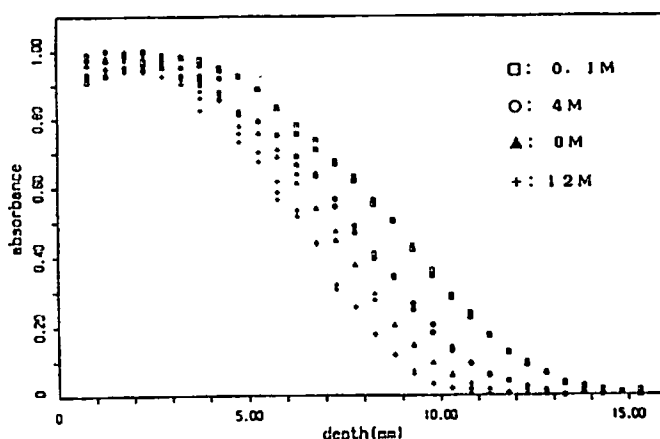


図5 深度分布のNaOH濃度依存性

### 3. 計算結果

TABATA等のアルゴリズム<sup>1)</sup>を用いて、単一エネルギー（セル入射エネルギーから入射面のガラスにおける推定エネルギー損失量を差し引いた値=2.5MeV）の平行電子ビームが半無限大の水溶液に入射したときの付与エネルギーに関する一次元計算を先ず行った。その結果を図4中の実線に示す。測定値との差は大きく入射電子のエネルギースペクトルを考慮しても1次元計算モデルでは実験結果を再現できないことが分かった。測定結果のより妥当な説明には、エネルギースペクトルや角度分布はもちろん、より正確な幾何学的形状を考慮した3次元計算が必要である。そのため、EGS4を用いた計算を開始した。EGS4はSLACで開発された電子、陽電子、光子の輸送をシミュレートするモンテカルロプログラムである<sup>2)</sup>。他のモンテカルロ計算と同様に、EGSにおいても各電子や光子は体系から逃れ出るか、あらかじめ定められたカットオフエネルギーに達するまで追跡される。本計算における電子のカットオフエネルギーは513keV（静止エネルギーを含む）、光子に対しては1keVである。図6に計算に用いた幾何学的体系を示す。(a)は立面図、(b)は平面図である。寸法は実験に用いたセルと一致させてある（内径）。セルは厚さ1mmのガラスで出来ており、その外側は空気層で覆われている。セルの内容積は水で満たされている。電子線源の形状は10mmφの円（図6中の斜線円）であり、セルの入射面よりz軸のマイナス側に1cm離れた位置にある。線源からはz軸と平行に単一エネルギーの電子線を、z軸のプラス側に、放出する。付与エネルギーは1mm×1mm×10mmサイズの領域に与えられたエネルギーとして求めた（図6中に各REGIONを示す）。

図7にEGS4によるシミュレーション結果を示す。入射電子エネルギーは3MeVである。図7には、比較のために、EGS4を用いた半無限体系の水の場合の計算結果も示した。セルの有る場合と無い場合との比較により、セルを構成しているガラスの影響を知ることができる。半無限体系においては、体系の外に逃れる電子はない。したがって、3MeVの電子が1個人射するとき、ほぼ3MeVのエネルギーが水に付与される。セルなしの直方体の水に付与されるエネルギーは

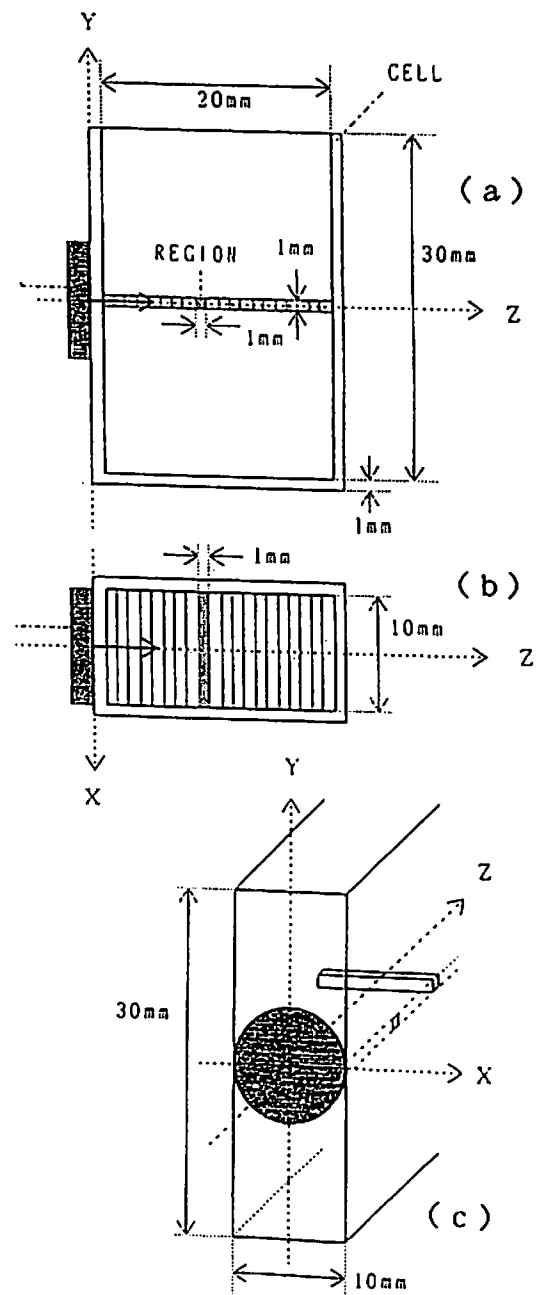


図6 EGS4計算体系  
(a) 立面図、(b) 平面図  
(c) 鳥瞰図

約 2.43 MeV と計算された。0.6 MeV 程度のエネルギーが体系外に運び去られていることが分かる。このエネルギー分によって深度分布にみられるビルドアップの位置や高さを変化させ、強いては分布自体を変えたことになる。さらにセルがある場合に、水に与えられたエネルギーは約 2.08 MeV と計算された。このとき、セル入射側のガラスに約 0.39 MeV のエネルギーが付与されている。したがって、水に実際に入射するときには 2.6 MeV 程度になっている。このことが、セルがある場合のビルドアップの位置をより浅い方向に変化させたと考えられる。図 8 に、セル入射エネルギー 3 MeV の時の EGS4 による計算結果と（棒グラフ）、図 3 の実験結果を同時に示す。未だ、入射点からのビルドアップの仕方に若干の差異がみられるが、半無限の 1 次元計算に比べて、その位置やビルドアップの大きさ、立ち下がりの勾配等を含めて、実験結果を全体的によく再現するようになった。この結果、セルの側壁等から体系外へ逃れる電子の割合がエネルギー付与分布の形に大きな影響を与えていることが分かった。この割合は入射電子のエネルギーに依存する。これまで実験を行ってきた 3 MeV 入射時には平均 30%、45 MeV ライナックを用いた 17 MeV 電子ビーム入射時（セル=10x40x100mm）には 51% が逃れていることが計算で示された。その結果、17 MeV 入射時には、ビルドアップの位置や大きさの違いはもちろんのこと、単一エネルギー入射にも関わらず、立ち下がり部分が指数関数的になることが示された。3 次元計算の結果、3 MeV、17 MeV いずれにおいても、測定値は体系内の各深さに於ける付与エネルギーを表していることが分かった。

参考文献

- 1) Tabata T, Ito R, Tsukui S 1990 Radiat.Phys.Chem. 35 821-825
- 2) Nelson R, Hirayama H, Rogers D 1985 SLAC-265

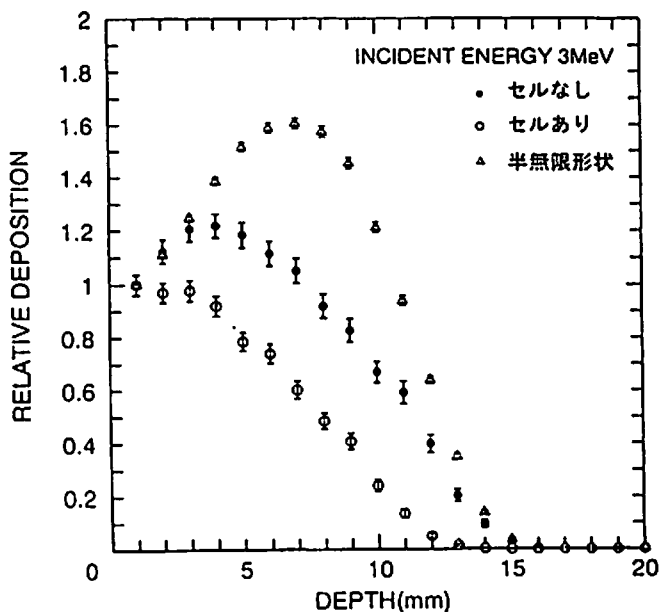


図 7 EGS4 による水溶液中におけるエネルギー付与分布

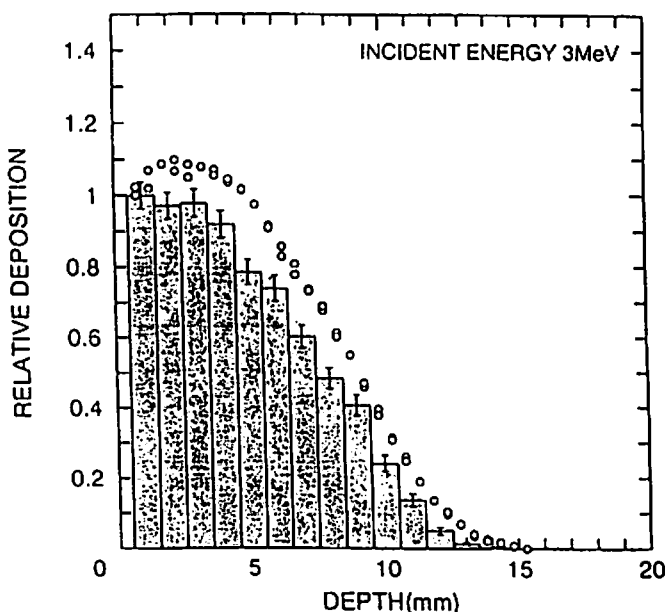


図 8 セルを考慮した水中におけるエネルギー付与分布  
○ : EXPERIMENTAL, BAR : EGS4 CALCULATED  
cell size 10mm x 30mm x 20mm

# EGS4コードを用いた高エネルギー光子の線量当量換算係数の評価

三菱原子力工業<sup>(株)</sup><sup>^</sup> 岩井 敏<sup>^</sup>  
(株)三菱総合研究所<sup>^</sup> 佐藤 理<sup>^</sup>  
日本原子力研究所<sup>^</sup> 田中俊一<sup>^</sup>

Evaluation of Fluence to Dose Equivalent Conversion Coefficients for High Energy Photons

Satoshi IWAI<sup>^1</sup>, Osamu SATO<sup>^2</sup>, and Shun-ichi TANAKA<sup>^3</sup>

- \*1 Mitsubishi Atomic Industries Inc., 1-297 Kitabukuro-cho, Omiya, Saitama-ken JAPAN
- \*2 Mitsubishi Research Institute Inc., 1-18-1 Shimo-meguro, Meguro-ku, Tokyo, JAPAN
- \*3 Japan Atomic Energy Research, 319-11 Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken JAPAN

Due to the increase of high energy accelerator facilities and space development activity, high energy radiation exposure has come to be an important problem. But at present, the fluence to effective dose conversion coefficients for high energy radiations have not been reported in any documents.

In this study, the methodology and basic data have been investigated for evaluating fluence to effective dose conversion factors for high energy radiations up to 10 GeV, according to the ICRP Publication 60.

Effective dose and dose equivalents on the principal axis of the ICRU sphere were also calculated by use of the EGS4 code. The availability of dose equivalents in the ICRU sphere were discussed on the comparison with dose equivalents for high energy photons.

## 1. はじめに

大型加速器施設の増加および宇宙空間における有人活動の増大に伴い、高エネルギー放射線による被ばく線量評価が重要になりつつある。ICRP Publication 51<sup>1)</sup> (以後ICRP 51と記述する。)によれば、光子の単位フルエンスあたりの実効線量当量への換算係数は $1.0 \times 10^{-2} \sim 10 \text{MeV}$ の範囲で与えられている。しかし、この範囲の上限エネルギーを超えるフルエンスと実効線量当量(または実効線量)の換算係数は示されておらず、現状では高エネルギー光子の被ばく線量評価法が十分に確立されているとは言い難い。

本研究では、 $10 \text{MeV} \sim 10 \text{GeV}$ の高エネルギー光子の単色エネルギー平行ビーム照射条件に対する単位フルエンスあたりの実効線量と、ICRU球中のビームに平行な主軸上の線量当量を計算評価した。そして両者の結果を比較してICRU球中の線量当量を実効線量の代用量(または実用量)として、高エネルギー光子についても用いることの問題点について検討した。

なお、計算にはEGS4コード汎用ユーザーズ版<sup>2)</sup>を用いた。

## 2. ICRP Publication 60を考慮した線量評価システム

ICRP 26<sup>3)</sup> (ICRP Publication 26)によれば、線量当量 $H$ は組織の一点における値として

$$H = DQN \text{ ----- (2.1)}$$

で定義されている。ここで $D$ は吸収線量、 $Q$ は線質係数、 $N$ は国際放射線防護委員会が規定したその他すべての修正係数の積(通常は1が用いられる)である。線質係数 $Q$ は、吸収エネルギーの微視的分布が損害に及ぼす効果を斟酌するための量であり、問題とする点における水中の $L_\infty$ (非限定線エネルギー付与)の関数として定義されている。 $L_\infty$ に関してスペクトル分布を持った放射線に対して、線量当量は修正係数を $N = 1$ として

$$H = \int_0^\infty D(L)Q(L) dL \text{ ----- (2.2)}$$

となる。ただし、ここで $L$ は $L_\infty$ を表す。式(2.2)は次のように変形できる。



$$\begin{aligned}
 H &= \int_0^{\infty} D(L) Q(L) dL = \int_0^{\infty} D(L) dL \cdot \frac{\int_0^{\infty} D(L) Q(L) dL}{\int_0^{\infty} D(L) dL} \\
 &= D \cdot \frac{\int_0^{\infty} D(L) Q(L) dL}{\int_0^{\infty} D(L) dL} \dots\dots\dots (2.3)
 \end{aligned}$$

式(2.3)の第2項すなわち  $\frac{\int_0^{\infty} D(L) Q(L) dL}{\int_0^{\infty} D(L) dL}$  は I C R U 19<sup>7)</sup>によれば、実効的な線質係数

$\bar{Q}$ と定義されている。

すなわち、

$$H = D \cdot \bar{Q} \dots\dots\dots (2.4)$$

と表記される。

Qおよび $\bar{Q}$ は線量効果関係の比例性の関係から、式(2.1)~(2.4)は一点のみで成立するだけでなく、器官全体および組織全体にわたる平均値として拡張できる。(Qは放射線の被ばくにより生ずる有害な影響、とくに晩発性の確率的影響と結びつく放射線防護上に用いる量である。)

そのために、組織および器官全体にわたる平均値として組織の線量当量が定義できるし、各組織又は器官の平均線量当量に確率的リスクの割合を表すための荷重係数をかけて合計することによって式(2.5)のように実効線量当量 $H_E$ が定義される。

$$H_E = \sum_T W_T \cdot H_T \dots\dots\dots (2.5)$$

ただし、 $H_T$ は組織又は器官の平均線量当量、 $W_T$ は確率的リスクの割合を表すための荷重係数である。

以上が I C R P 26およびストックホルム会議<sup>4)</sup>の声明で定義された放射線防護に関する量の定義であり、I C R P 51<sup>1)</sup>の単位フルエンスあたりの線量当量の換算係数は、すべてこの定義に基づいて算定されている。しかし、I C R P 60が1991年に出版され、放射線防護に関する量の定義に変化があった。ここでは、I C R P 60に基づき高エネルギー放射線の線量当量換算係数評価のためにはどのような量を評価する必要があるかということに

ついて考察する。

ICRP 60<sup>5)</sup>によれば、以下の新しい定義が行われた。

- (1)  $\bar{Q}$ のかわりに生物学的情報に関する考察、及びいろいろな被ばくの状況、並びに周辺線量当量の慣例的計算の結果の検討に基づいて、放射線荷重係数 $W_R$ が定義された。放射線荷重係数の値をTable 2.1に示す。放射線荷重係数 $W_R$ の明確な定義は示されていないが、式(2.6)の計算により $W_R$ の近似値を得ることができると書かれている。

$$\bar{Q} = \frac{1}{D} \int_0^{\infty} Q(L) \cdot D(L) dL \quad \text{-----} \quad (2.6)$$

ここで、 $D(L)dL$ はICRU球の深さ10mmで $L_{\infty}$ が $L$ と $L + dL$ の間の吸収線量であり、 $Q(L)$ はその位置における $L_{\infty}$ に対する線質係数である。このときの照射条件は明示されていない。

$W_R$ が周辺線量当量 $H^*(d)$ の定義と関連があるとみなせば、照射条件としてはICRU球の主軸に対する平行ビーム入射を考慮するのが適当である。

Table 2.1 Radiation weighting factor <sup>(\*)</sup>

放射線の種類とエネルギー範囲 <sup>(b)</sup>	放射線荷重係数 $W_R$
光子, すべてのエネルギー	1
電子と $\mu$ 中間子, すべてのエネルギー <sup>(c)</sup>	1
中性子, エネルギー < 10keV	5
10 - 100keV	10
100keV - 2MeV	20
2MeV - 20MeV	10
> 20MeV	5
反跳陽子以外の陽子, エネルギー > 2MeV	5
$\alpha$ 粒子, 核分裂片, 重原子核	20

(a) すべての値は身体に入射する放射線、または体内線源についてはその線源から放出された放射線に関するものである。

(b) 他の放射線に対する値の選択については、ICRP60の付録Aに論議されている。

(c) DNAに結合した原子核から放出されるオージェ電子を除く。  
(ICRP60の本文26項目参照)

(2) QとL $\infty$ との関係が変更された。変更の前後の値を比較のためFig. 2.1に示し、変更後の値を関数形でTable 2.2に示す。この変更は中速エネルギー中性子の従来より高いRBE<sub>M</sub>値<sup>6)</sup>の反映と、100keV/ $\mu$ m以上の重イオンによる生物学的効果の減少を反映している。<sup>6)</sup>

Table 2.2 Q - L relationships specified in ICRP 60

限定されない線エネルギー付与, 水中のL (keV $\mu$ m <sup>-1</sup> )	Q(L) <sup>(a)</sup>
< 10	1
10 - 100	0.32L - 2.2
> 100	300/ $\sqrt{L}$
(a) Lの単位はkeV $\mu$ m <sup>-1</sup>	

(3) ICRP 26では1点における線量当量が定義され、それが器官又は組織全体に拡張されて使用されていたが、ICRP 60では組織又は器官の平均吸収線量に放射線荷重係数をかけた量を定義し、等価線量 (equivalent dose) と名付けた。すなわち、

$$H_{T,R} = W_R \cdot D_{T,R} \text{ ----- (2.7)}$$

ここでD<sub>T,R</sub>は放射線Rによる組織Tの平均吸収線量、W<sub>R</sub>は放射線荷重係数である。放射線の種類とエネルギーが多種類にわたる場合は、

$$H_T = \sum_R W_R \cdot D_{T,R} \text{ ----- (2.8)}$$

となる。

(4) ICRP 26で定義された確率的リスクの割合を表わす荷重係数は、ICRP 60では値が変更され、組織荷重係数と呼ばれるようになった。この組織荷重係数W<sub>T</sub>と等価線量 (equivalent dose) の積和が実効線量Eである。

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T \text{ ----- (2.9)}$$

これは、従来の実効線量当量H<sub>E</sub>に相当する量である。Table 2.3にICRP 26とICRP 60のW<sub>T</sub>値を示す。

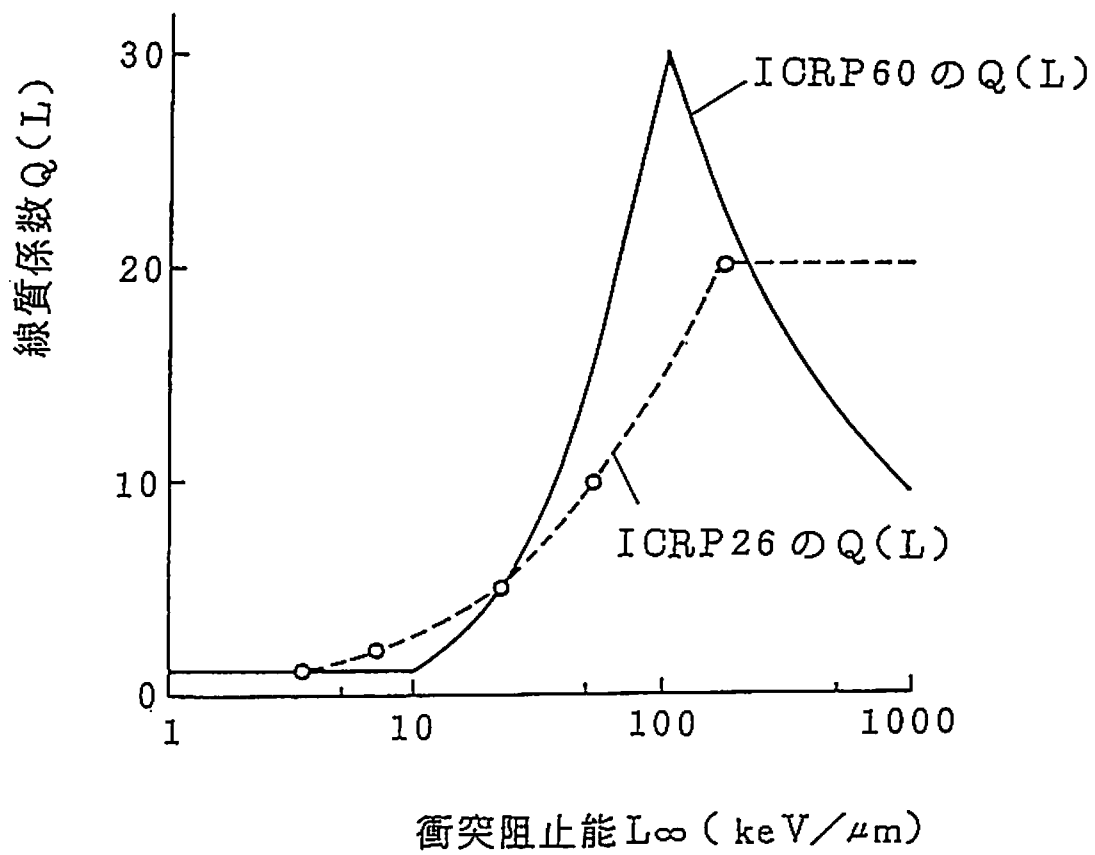


Fig.2.1 Q - L relationships specified in ICRP60 and ICRP26

Table 2.3 Tissue weighting factors in ICRP26 and ICRP60

組織又は器官	ICRP26	ICRP60
生殖腺	0.25	0.20
赤色脊髄	0.12	0.12
大腸（下部）	—	0.12
肺	0.12	0.12
胃	—	0.12
膀胱	—	0.05
乳房	0.15	0.05
肝臓	—	0.05
食道	—	0.05
甲状腺	0.03	0.05
皮膚	—	0.01
骨表面	0.03	0.01
残りの組織	0.03 *	0.05 **

\* 最大5個の組織（又は器官）に割り振る。1つあたり0.06  
\*\* 残りの組織としては、副腎・脳・小腸・腎臓・筋肉・脾臓・大腸上部・脾臓・胸腺および子宮の10の器官の合計である。  
例外として、上記1つの器官が表中の12の器官又は組織より高い線量を受けた場合には、その器官に0.025の荷重係数を割り振り、それを除く他の残りの器官の平均に0.025を適用する。

ICRP26の線量の考え方に基づいてICRP51が作られ、光子、 $\mu$ 中間子、中性子、陽子および電子についてのフルエンスと線量当量の換算係数が評価された。しかし、ICRP51では通常の放射線防護で問題となる光子については10MeV、中性子については14MeVまでを対象としている。そのため、10GeVまでの放射線の換算係数をICRP60の考え方をを用いて評価するためには、以下の事項を検討しなければならない。

(1) 高エネルギー放射線の等価線量を評価するのに、ICRP60で定義された $W_R$ をそのまま用いるのが適切かどうか。

(2) ICRU球に面平行入射する放射線の入射軸上の深さ10mmの点の線量当量を高エネルギー放射線の場合も実効線量に代わる実用量として用いるべきか。

まず(1)の問題について検討する。ICRP60で用いられている $W_R$ 、すなわち放射線荷重係数は、明確な定義は示されていないが、ICRU球中の深さ10mmにおける $\bar{Q}$ を計算することにより、 $W_R$ の近似値が得られるとされている。すなわち、

$$W_R \approx \bar{Q} = \frac{1}{D} \int_0^{\infty} Q(L) \cdot D(L) dL \quad (\text{ICRU球の深さ10mmの位置}) \quad \text{-----} \quad (2.10)$$

$W_R$ は照射条件は示されていないが、ICRU球中の深さ1cmの点で定義されている。

10GeVまでの高エネルギー放射線を対象として線量評価を正確に行う場合、ICRP60の $W_R$ 、すなわちICRU球中の深さ10mmにおける $\bar{Q}$ を別の位置における線量当量評価に用いるのは適切ではなく、むしろ対象とする点又は体積に対する $\bar{Q}$ を用いる方が適切である。

次に項目(2)の問題点、すなわちICRU球の深さ10mmの点の線量当量を高エネルギー放射線の場合も実効線量にかわる実用量として用いるべきかどうかということについて検討する。この量を周辺線量当量 $H^*(10)$ に相当するものとみなせば、ICRP51によれば通常の放射線防護の対象となる15MeV程度までの放射線に対しては、 $H^*(10)$ がすべての照射条件において実効線量をほぼ上回る。しかし、10GeV程度までの高エネルギーの放射線に対しては、最大となる線量当量はより深い点で生ずる可能性が考えられるため、 $H^*(10)$ が実効線量を下回るおそれもある。従ってこのような高エネルギー放射線に対しては、実効線量そのものを評価し、周辺線量当量 $H^*(10)$ が実用量として適切かどうかを判断する必要がある。この検討については第6章で行う。

### 3. 高エネルギー放射線に対する実効線量の評価方法

以下 ICRP 60 の用語の定義に従って、組織又は器官の平均線量当量を等価線量 (equivalent dose)  $H_T$ 、 $H_T$  と組織荷重係数との積和を実効線量 (effective dose)  $E$  と表記する。

組織又は器官 T の等価線量  $H_T$  は、式 (2.2) に示した定義と同様、

$$H_T = \int_0^{\infty} D(L) \cdot Q(L) dL \quad \text{-----} \quad (3.1)$$

となる。ただし、 $D(L)$ 、 $Q(L)$  は対象となる組織又は器官中 (組織又は器官の元素組成と密度は均一と仮定する。) での  $L$  (すなわち  $L_{\infty}$ ) の水中における分布である。(実際にはこの組織又は器官中に存在する放射線が水中に存在した場合の  $L_{\infty}$  の分布である。) 式 (3.1) は次のように変形できる。

$$H_T = \int_0^{\infty} D(L) dL \cdot \frac{\int_0^{\infty} D(L) Q(L) dL}{\int_0^{\infty} D(L) dL} = \bar{D} \cdot \bar{Q} \quad \text{-----} \quad (3.2)$$

但し、 $\int_0^{\infty} D(L) dL$  は対象となる組織又は器官の吸収線量、 $\bar{Q}$  は対象となる組織又は器官中の実効的線質係数であり、式 (3.3) で表わされる。

$$\bar{Q} = \frac{1}{D} \int_0^{\infty} D(L) \cdot Q(L) dL \quad \text{-----} \quad (3.3)$$

たとえば、質量  $m$  の組織 T に入射したエネルギー  $E_0$  の荷電粒子が連続エネルギー損失のみでエネルギーを失い、0 になったとする。そうすると組織 T の吸収エネルギー  $D = E_0$  であり、

$$\bar{Q} = \frac{1}{\left(\frac{E_0}{m}\right)} \int_0^{\infty} Q(L) \cdot D(L) dL \quad \text{-----} \quad (3.4)$$

となる。そして  $D(L) dL$  は  $L$  が  $L$  から  $L + dL$  間の吸収エネルギーであるため、荷電粒子のエネルギーを  $E$  で表わせば、この場合、荷電粒子の損失エネルギーが吸収エネルギーに相等するから、損失エネルギーを組織の質量  $m$  で割ったもの、すなわち  $dE/m$  は対応する吸収エネルギー  $D(L) dL$  に相等する。したがって、

$$\bar{Q} = \frac{1}{\left(\frac{E_0}{m}\right)} \int_0^{\infty} Q(L) \frac{dE}{dL \cdot m} \cdot dL \quad \text{-----} \quad (3.5)$$

となる。 $\frac{dE}{dL \cdot m}$  は対象組織 T の単位体積に対する単位  $L \infty$  当りの吸収エネルギーであり、

次元解析をすると、

$$\frac{dE}{dL \cdot m} = \Delta E / \left[ \frac{\Delta E \cdot m}{\Delta X} \right] = \frac{\Delta X}{m} \quad \text{-----} \quad (3.6)$$

したがって、 $\frac{dE}{dL \cdot m}$  は  $L \infty$  が  $L$  から  $L + dL$  のときの組織 T の単位質量に相等する体積あたりの荷電粒子の飛程（実際は平均飛程）ということになる。

荷電粒子の水中における  $L \infty$  と平均飛程の関係を模式的に図示すると、Fig. 3.1 のようになる。式(3.4)をこの荷電粒子の減速の問題に適用すれば、荷電粒子エネルギーが  $E_0$  から 0 まで減速するとき組織 T 内に分布する  $L \infty$  について式(3.4)又は(3.5)を積分するということである。

(積分面積は Fig. 3.1 における 2 つの斜線部分の合計である。) すなわち、

$$\begin{aligned} \bar{Q} &= \frac{1}{\left(\frac{E_0}{m}\right)} \int_0^{L_0} Q(L) \cdot D(L) \cdot dL \quad (\text{但し、エネルギー } E_0 \text{ の荷電粒子の } L \text{ を } L_0 \text{ とする。}) \\ &= \frac{1}{\left(\frac{E_0}{m}\right)} \int_0^{L_0} Q(L) \frac{dE}{dL \cdot m} \cdot dL \\ &= \frac{1}{E_0} \int_0^{E_0} Q(E) dE \quad \text{-----} \quad (3.7) \end{aligned}$$

となる。ここで  $Q$  は  $L$  の関数から荷電粒子のエネルギー  $E$  の関数に変更される。このためには荷電粒子の水中での  $L \infty$  がエネルギーに関する関数として一意的に表現される必要がある。すなわち、

$$L = f(E) \quad \text{-----} \quad (3.8)$$

の関係が成立し、 $E$  に対して 1 個の  $L$  が必ず存在する必要がある。この関係は電子、陽電子に対しては ICRU 37<sup>7)</sup> に表で示されている。



式(3.7)を用いれば、初期エネルギーが $E_0$ の荷電粒子の $\bar{Q}$ が計算できる。その荷電粒子が組織T内で全エネルギー $E_0$ を連続エネルギー損失により失えば、組織Tの等価線量は式(3.9)すなわち

$$H_T = \bar{Q} \cdot D = \bar{Q}(E_0) \cdot E_0 / m \quad \text{----- (3.9)}$$

(但しmは組織Tの質量)

で計算できる。

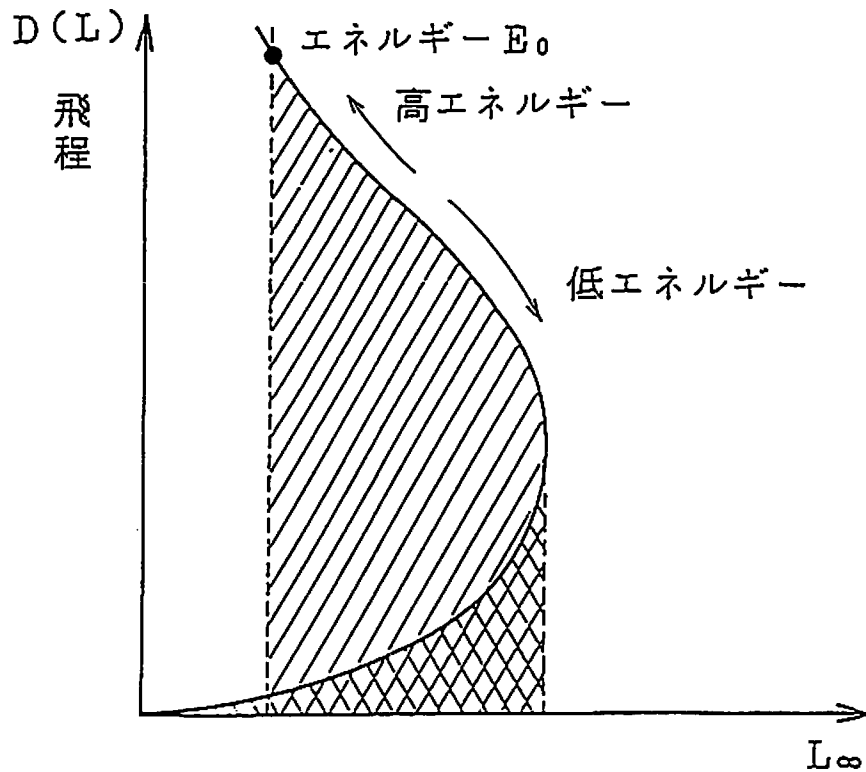


Fig.3.1 Schematic relationship between  $L_\infty$  and mean range of a charged particle in water

荷電粒子が組織 T に入射して、種々の核反応又は制動放射などを生ずる場合は、次のように計算すればよい。すなわち荷電粒子がエネルギー  $E_0$  で入射して、散乱や核反応等で連続にエネルギーが変化したり吸収されたりする直前のエネルギー  $E_1$  とすれば、このときまでの組織 T の等価線量は、

$$H_T = \bar{Q}(E_0) \cdot E_0/m - \bar{Q}(E_1) \cdot E_1/m \quad \text{----- (3.10)}$$

で表わされる。従って組織 T 内における全荷電粒子による組織 T への等価線量（連続エネルギー損失により組織 T に与えられる等価線量）の合計値を求めれば、入射した荷電粒子により生ずる組織 T の等価線量が評価できる。

このようにして求めた組織又は器官の等価線量に ICRP 60 で定義された組織荷重係数をかけて合計することにより、式(3.11)を用いて実効線量 E が求まる。

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T \quad \text{----- (3.11)}$$

非荷電電離性粒子（たとえば中性子、光子）が入射した場合、組織内で散乱し又は核反応を起こして二次荷電粒子を発生させ、その荷電粒子によって組織 T に与えられるエネルギーとそのときの  $\bar{Q}$  を計算し、荷電粒子入射で行ったのと同様の計算を行えばよい。

#### 4. 荷電粒子のエネルギーと $L_\infty$ および $\bar{Q}$ との関係

荷電粒子に対する物質の全線阻止能(linear total stopping power)Sは、線衝突阻止能(linear collision stopping power) $S_{col}$ (= $S_c$ )と線放射阻止能(linear radiation stopping power) $S_{rad}$ 、および原子核の反跳作用すなわち線核反跳阻止能(linear nuclear recoil stopping power) $S_{nuc}$ の合計である<sup>8)</sup>。但し、この中には原子核と核反応等の不弾性散乱(non-elastic scattering)は含んでいない。

$$S = S_c + S_{rad} + S_{nuc} \quad \text{----- (4.1)}$$

ICRU 16<sup>9)</sup>, 33<sup>10)</sup> および ICRP 51 の定義によれば

$$S_c = L_\infty \quad \text{----- (4.2)}$$

である。

ところで ICRP 60 によれば、線質係数 Q は荷電粒子に対する水中の  $L_\infty$  の関数として、Fig. 2.1 および Table 2.2 に示す値で表される。  $S_c$  は、荷電粒子が原子・分子を励起またはイオン化して失うエネルギーを対象とした衝突阻止能である。原子核との相互作用によるエネルギー損失  $S_{nuc}$  は  $L_\infty$  に含まれないことが重要である。

入射粒子が電子または陽電子のとき、水中の $S_{\infty}$ の値は入射エネルギー $0.01\text{MeV}\sim 1000\text{MeV}$ についてICRU37<sup>11)</sup>に示されている。電子はMøller散乱により入射エネルギーの半のエネルギーを持つ電子を散乱する可能性があり、陽電子はBhabha散乱により入射エネルギーと等しいエネルギーの電子を散乱する可能性がある<sup>11)</sup>。これらの散乱で発生した電子のエネルギーは高いことがあるため、入射粒子の飛程近傍から離れてしまう $\delta$ 線となる可能性がある。このことはRossiの線エネルギー付与<sup>12)</sup>の定義、すなわち

(a) 入射粒子の飛程の近傍にエネルギーを沈着すること。

(b) 入射粒子の不連続な(discrete)エネルギー損失は含まないこと。

と矛盾する。すなわち、Rossiの定義に従えば、エネルギーの高い $\delta$ 線の発生は線質係数を評価するときの線エネルギー付与に含めるべきでないということになるが、このことは $L_{\infty}$ と矛盾する。 $\delta$ 線によるエネルギー損失を考慮しなければ $S_{\infty}$ はICRU37の値よりも小さくなる。しかし、ICRU37の $S_{\infty}$ を用いても、Fig.2.1より電子及び陽電子の線質係数 $Q$ は1.0である。従って、エネルギーが $0.01\sim 1000\text{MeV}$ までの電子及び陽電子の $Q$ は、1.0として取り扱って良い。従って、式(3.7)から電子および陽電子の実効的な線質係数 $\bar{Q}$ は1.0であることがわかる。

しかし、入射粒子が陽子など $L_{\infty}$ が $100\text{keV}/\mu\text{m}$ を超える荷電粒子の場合には、線質係数 $Q$ または実効的な線質係数 $\bar{Q}$ を決定する上で、荷電粒子の水中での衝突阻止能 $L_{\infty}$ の精度良い評価が必要となる。

## 5. 人体ファントム

等価線量(組織線量当量)を計算するためには、人体の各組織(器官)の形状を数式で表示することが必要である。本研究ではMIRD-5ファントム<sup>13)</sup>に基づいて山口ら<sup>14)</sup>によって作成された人体数学ファントムにLewisらの論文<sup>15)</sup>に基づいて、次の2点すなわち食道モデルの追加と胃モデルの修正を行った。

### (1) 食道モデルの追加

食道モデルは胸部および腹部に分けられ、以下の不等式群で表わされる。

(i) 胸部

$$\begin{aligned}
 & x^2 + (y - 1.7)^2 \leq (0.7)^2 \\
 \text{かつ } & x^2 + (y - 1.7)^2 \geq (0.3)^2 \\
 & \text{但し } 44 \leq z \leq 70
 \end{aligned}
 \quad \left. \begin{array}{l} \text{-----} \\ \text{-----} \\ \text{-----} \end{array} \right\} \text{-----} \quad (5.1)$$

$$x^2 + (y - 1.7)^2 < (0.3)^2 \quad \text{-----} \quad (5.2)$$

の領域はボイドである。

(ii) 腹部

$$\begin{aligned}
 X &= 0.7980x - 0.5686(y - 1.7) - 0.1995(z - 44) \\
 Y &= 0.5803x - 0.8144(y - 1.7) \\
 Z &= 0.1625x - 0.1158(y - 1.7) + 0.9799(z - 44)
 \end{aligned}
 \quad \left. \begin{array}{l} \text{-----} \\ \text{-----} \\ \text{-----} \end{array} \right\} \text{-----} \quad (5.3)$$

$$Y^2 + Z^2 \leq (0.7)^2 \quad \text{-----} \quad (5.4)$$

但し  $0 \leq X \leq 10$

(2) 胃モデルの修正

胃モデルは回転楕円体で表わされ、MIRD-5ファントムは胃モデルの主軸がz軸と平行であるが、Lwisはこれを解剖学的知見に基づき以下のように回転させた。

$$\left[ \frac{X}{4} \right]^2 + \left[ \frac{y+4}{3} \right]^2 + \left[ \frac{Z}{8} \right]^2 \leq 1 \quad \text{-----} \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned}
 \text{但し、} & X = 0.866(x - 4) - 0.5(z - 36) \\
 & Z = 0.5(x - 4) + 0.866(z - 36)
 \end{aligned}
 \quad \left. \begin{array}{l} \text{-----} \\ \text{-----} \end{array} \right\} \text{-----} \quad (5.6)$$

このファントムの形状をFig. 5.1に示す。

人体数学ファントムの元素組成をTable 5.1に示す。ここではMIRD-5ファントム<sup>15)</sup>、Cristyファントム<sup>16)</sup>及び放医研で使用しているファントム<sup>17)</sup>の3種類の人体数学ファントム元素を比較した。

MIRD-5とChristyのファントムは、人体を3つの組成すなわち軟組織、肺組織、骨組織(無機質骨と骨髄、骨表面組織の混合物)から成るが、放医研で使用しているファン

トムは軟組織か甲状腺が分離している。そして、3種類の間では各組織とも密度および元素組成比が微妙に異なっている。

Table 5.1からわかるように、人体の大半を占める軟組織の密度を比較するとCristyファントムは他の2つより少し高密度であり1.0を超えている。この原因としては隣接する器官による領域の重複（二重定義）を避けるため、密度を上げることにより各器官の大きさを小さくしたと考えることができる。（Cristyファントムのみは成人だけでなく、15歳児、10歳児、5歳児、1歳児、新生児のファントムがある。）

Cristyファントムは本来、内部被ばく線量評価用の目的を主とするために開発、改良されてきたことを考慮して、ここでは換算係数評価の対象としては、MIRD-5ファントムの値を採用する。

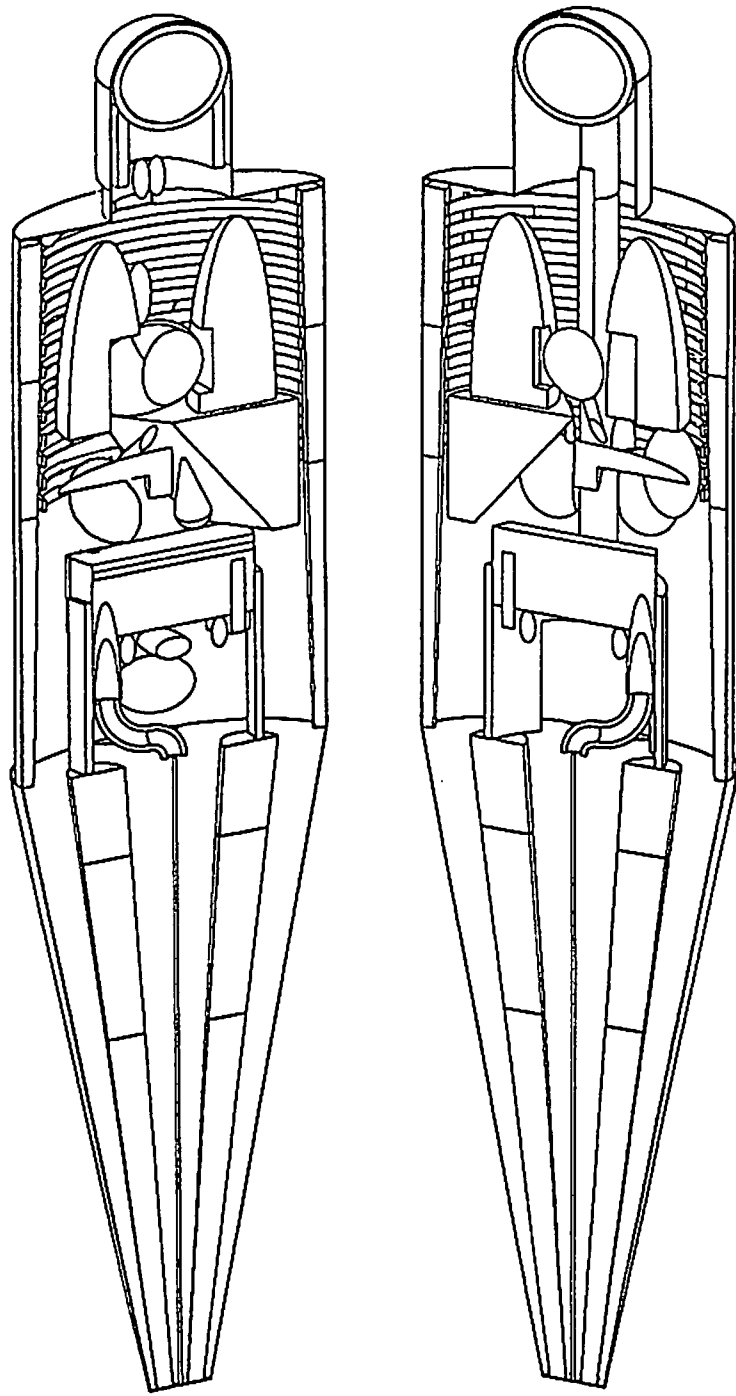


Fig. 5.1 本研究で使用する人体数学ファントム

Table 5.1 Elemental Compositions of tissues in the three kinds of human body phantoms (1)

soft tissue

(単位  $\times 10^{24}$  atoms/cm<sup>3</sup>)

	MIRD-5	ORNL/TM-8381 V1	放 医 研 (甲状腺を除く)
H	6.172-2 *	1.08-1	1.042-1
C	1.139-2	1.96-2	1.916-2
N	9.927-4	1.85-3	1.670-3
O	2.348-2	4.13-2	3.325-2
F	————	————	————
Na	3.361-5	5.07-5	5.655-5
Mg	3.668-6	5.6-6	6.170-6
Si	————	1.1-5	————
P	4.606-5	4.50-5	7.749-5
S	4.077-5	6.62-5	6.860-5
Cl	2.347-5	3.90-5	3.949-5
K	3.192-5	5.53-5	5.371-5
Ca	————	6.2-6	————
Fe	6.704-7	9.-7	1.128-6
Zn	2.908-7	5.-7	4.894-7
Rb	3.963-8	1.-7	6.669-8
Sr	2.306-9	————	3.880-9
Zr	5.212-8	1.-7	8.770-8
Pb	4.589-10	————	7.722-10

密 度 :  $\rho = 0.9869$                        $\rho = 1.04$                        $\rho = 0.9001$

\*  $6.172-2 = 6.172 \times 10^{-2}$

Table 5.1 Elemental Compositions of tissues in the three kinds of human body phantoms (2)

Skeletal tissue

(単位  $\times 10^{24}$  atoms/cm<sup>3</sup>)

	MIRD-5	ORNL/TM-8381 V1	放 医 研
H	6.178-2	1.02-1	1.052-1
C	1.678-2	2.97-2	2.848-2
N	2.433-3	3.05-3	4.147-3
O	2.684-2	4.19-2	4.550-2
F	—	1.8-5	—
Na	1.231-4	1.99-4	2.088-4
Mg	4.001-5	6.45-5	6.787-5
Si	—	1.-6	—
P	1.981-3	2.30-3	3.358-3
S	4.687-5	7.55-5	7.951-5
Cl	3.491-5	5.65-5	5.924-5
K	3.392-5	5.48-5	5.754-5
Ca	2.186-3	3.56-3	3.718-3
Fe	1.267-6	2.-6	2.149-6
Zn	6.490-7	1.-6	1.101-6
Rb	—	3.-7	—
Sr	3.229-7	5.-7	5.478-7
Zr	—	—	—
Pb	4.694-8	7.-8	7.963-8

密 度 :  $\rho = 1.4682$

$\rho = 1.4$

$\rho = 1.5007$



Table 5.1 Elemental Compositions of tissues in the three kinds of human body phantoms (3)

Lung tissue (単位 atoms/cm<sup>3</sup>)

	MIRD-5	ORNL/TM-8381 V1	放 医 研
H	1.804-2	2.98-2	1.296-1
C	1.485-3	2.52-3	2.498-2
N	3.561-4	6.06-4	5.996-4
O	8.487-3	1.40-2	1.425-2
F	—	—	—
Na	1.472-5	2.37-5	2.479-5
Mg	5.423-7	9. -7	9.132-7
Si	—	6. -7	—
P	4.658-6	8. -6	7.846-6
S	1.278-5	2.08-5	2.152-5
Cl	1.357-5	2.22-5	2.285-5
K	9.112-6	1.47-5	1.535-5
Ca	3.112-7	7. -7	5.240-7
Fe	1.180-6	2. -6	1.987-6
Zn	2.997-8	5. -8	5.047-8
Rb	7.708-9	3. -8	1.299-8
Sr	1.199-10	—	2.020-10
Zr	—	—	—
Pb	3.525-10	—	5.936-10

密 度 :  $\rho = 0.2958$

$\rho = 0.296$

$\rho = 0.3001$

Table 5.1 Elemental Compositions of tissues in the three kinds of human body phantoms (4)

Tyroid

(単位 atoms/cm<sup>3</sup>)

	MIRD-5	ORNL/TM-8381 V1	放 医 研 (甲状腺を除く)
H	————	————	1.402-1
C	————	————	1.915-2
N	————	————	1.670-3
O	————	————	3.950-2
F	————	————	————
Na	————	————	5.655-5
Mg	————	————	6.170-6
Si	————	————	————
P	————	————	7.749-5
S	————	————	6.860-5
Cl	————	————	3.949-5
K	————	————	5.371-5
Ca	————	————	————
Fe	————	————	1.128-6
Zn	————	————	4.894-7
Rb	————	————	6.669-8
Sr	————	————	3.880-9
Zr	————	————	8.770-8
Pb	————	————	7.722-10
I	————	————	1.340-11

密 度 :

$\rho = 1.0001$

## 6. EGS4コードを用いた光子の線量当量の評価方法

光子が人体組織に入射すると、人体構成元素とコンプトン散乱、光電子効果および電子対生成を起こし、電子（および陽電子）を生成する。

EGS4<sup>18)</sup>で考慮する電子・陽電子と物質の相互作用は以下の通りである。

- (1) 制動放射
- (2) Møller ( $e^- e^-$ ) 散乱
- (3) Bhabha ( $e^- e^+$ ) 散乱
- (4) 原子核との多重散乱

(1)~(3)の反応で生じたカットオフエネルギー以上の粒子（制動放射の場合はX線、Møller散乱の場合は $\delta$ 線）は、独立の粒子としてその輸送過程がシュミレートされる。カットオフエネルギー以下の粒子については、入射粒子の連続的なエネルギー損失として、BergerとSeltzerにより提唱された“restricted stopping power”<sup>48)</sup>の考え方により取り扱われる。電子または陽電子の輸送の途中での多数の原子核との弾性衝突による散乱（多重散乱）は、電子のエネルギー損失に与える影響は小さいが、粒子の進行方向の変化に大きな影響を与えるため、Moliereの多重散乱近似を用いて取り扱われる。

EGS4コード中でのエネルギー沈着は、以下の2通りの方法で計算される。

- (1) カットオフエネルギー以上の電子および陽電子のエネルギー沈着

カットオフエネルギー以上のエネルギーをもつ電子および陽電子の媒質中でのエネルギー沈着は、Restricted stopping powerの考え方で扱われる。この考え方はカットオフエネルギー以下の $\delta$ 線及び制動放射線については、もとの粒子による物質中の原子の励起およびイオン化によるエネルギー損失と同様に、もとの粒子のエネルギー損失に含めて媒質中にエネルギー沈着するという考え方である。

エネルギー損失の式はBethe-Bloch<sup>19-21)</sup>の式に基づいている。

- (2) カットオフエネルギー以下の電子、陽電子、光子の取扱い

これらの粒子は、カットオフエネルギー以下になった時点で媒質中にエネルギー沈着する。

EGS4コードでは、以上に示した方法で指定した領域に沈着したエネルギー $\varepsilon$ をTの質量mで割れば、式(6.1)に示すように吸収線量Dが求まる。

$$D = \varepsilon / m \quad \text{----- (6.1)}$$

そして、電子または陽電子の実効的な線質係数 $\bar{Q}$ は、第4章で示したように常に1なので、Tの等価線量 $H_T$ は

$$H_T = \bar{Q} \cdot D = D = \varepsilon / m \quad \text{----- (6.2)}$$

となり、吸収線量Dの値をそのまま用いることができる。

## 7. 高エネルギー光子の実効線量および ICRU球中の最大線量当量の評価

この章では10MeV~10GeVの面平行ビームとして入射する光子のICRU球中の主軸上の各点における線量当量と人体ファントムの実効線量を算定した。10MeV以下の光子に対しては、Fig. 7.1に示すようにICRU球主軸上の入射面から1cmの点の線量当量（1cm線量当量）が実効線量当量を少し上回る値として放射線防護上重要な位置が与えられている。ここでは10MeV~10GeVの光子に対しても、1cm線量当量と実効線量の間と同様の関係が成立するかどうかについての評価を行い、ICRU球の有効性を検討した。

### 7.1 10MeV~10GeVの面平行ビーム入射光子に対するICRU球中の主軸上の線量当量

10MeV~10GeVのエネルギーとして代表的な8点、すなわち10, 15, 20, 50, 100, 500 MeV, 1GeV, 10GeVの光子がICRU球<sup>54)</sup>の主軸に平行な単一の面平行ビームとして入射したときの主軸上の29点の線量当量をEGS4コード汎用ユーザーズ版を用いて計算した。PEGS4を用いて物質の光子、電子に対する断面積を計算するのに、光子断面積としてPHOTX<sup>26)</sup>を用い、Radiative stopping powerの計算として、ICRU37<sup>7)</sup>を用いた。主軸上の29点とは入射方向からの主軸上1, 2, … 29cmまでの深さの各点である。計算方法はFig. 7.1に示すように、真空中にICRU球を設定し、主軸上の深さ1, 2, … 29cmの各点を中心とする半径0.4cmの小球領域を設置した。そして、主軸に平行な単一面平行ビームで光子を入射させて発生する2次電子と光子の挙動解析を行い、小球領域中の沈着エネルギーを算定した。光子および電子のカットオフエネルギーはそれぞれ0.1MeVおよび0.5MeVとした（運動エネルギー0.5MeVの電子の飛程は水中で約0.2cm<sup>7)</sup>）。

この小球中の沈着エネルギーから算定した線量当量を主軸上の各点における線量当量とした。その結果をFig. 7.1~7.9に図示し、数値をTable 7.1に示した。なお、Fig. 7.2には、Method 2の方法、すなわち主軸上深さ1cmの点を含む薄い球殻の一部に相等する領域をICRU球中に設定し（Fig. 7.2参照）、EGS4コード汎用ユーザーズ版を用いてその領域のエネルギー沈着量を求めて、それに基づいて算定評価した1cm線量当量の値を付記した。Method 2の方法で求めた1cm線量当量は $5.33 \times 10^{-12} \text{Sv}/(\text{photons}/\text{cm}^2)$ であり、半径0.4cmの小球を設定して求めた1cm線量当量と2cm線量当量（主軸上深さ2cmの点におけるICRU球中の線量当量）の間の中間の値である。このことは次の理由による。

- (1) 沈着エネルギーを求めるには有限な体積を設定しなければならないが、このことは厳密な意味での1cm線量当量を算定できない。
- (2) ICRU球主軸上の深さ1cmの点前後で2次電子によるエネルギー沈着量の勾配が大きく変化していれば、エネルギー沈着量の評価値は、エネルギー沈着量評価に用いられた領域の形状に依存する。

以上の問題点を小さくするためには、深さ1cmの点のまわりにきわめて微少な領域を設定すればよいが、微少にすればする程計算値のモンテカルロ統計誤差が大きくなるために評価値の信頼度は小さくなる。従って、1cm線量当量を正確に求めることは難しいが、 $1 \times 10^{-11} \text{Sv}/(\text{photon}/\text{cm}^2)$ 以下の値になることは確実である。しかし、ICRP 51によればこの点の線量当量は $2.52 \times 10^{-11} \text{Sv}/(\text{photon}/\text{cm}^2)$ である。ICRP 51の値は文献23および24の結果を引用したものである。Fig. 7.2にICRP 51の値と今回の計算で行った2種類のモデルで求めた計算値を示すが、ICRP 51はこれらの計算値より1ケタ高い値を示す。この原因は文献23および24では、ICRU球のまわりには空気層があり、入射光子は空気層で多量の2次電子を生成し、ICRU球表面で2次電子平衡が成立しているとの仮定に基づいて計算しているためである。たしかに、入射光子のエネルギーが数100keV以下ならば、実際の被ばく条件下でICRU球表面で電子平衡が成立していると仮定してもさしつかえない。しかし、光子エネルギーが高くなれば、十分な電子平衡を成立させるためには、かなりの空気層が必要となる。そして、エネルギーが100MeVを超え、ICRU球前の空気層で多量の電子シャワーが発生すると、空気層の厚さによりICRU球中の線量当量が異なる。なお、空気層の厚さの違いによる光子の遮へい効果の違いも線量当量に影響する。したがって、高エネルギー

ギー光子の入射に対しては、ICRU球の前に空気層の存在を仮定すると、かえって問題が複雑になる。そのため真空中にICRU球が存在するという仮定に基づいて解析評価を行う方が適切である。

真空中にICRU球が存在するという仮定に基づいて、EGS-4コードを用いて解析評価を行った結果はFig. 7.1~7.9に示したとおりであるが、この結果から50MeV以下の光子を照射した場合は、ある程度の深さまで線量当量は増大するが、その後は少しずつ減少し始めることがわかる。しかし、100MeV以上ではICRU球の主軸上の最深部の線量当量が最大となっていることがわかる。このことは、光子エネルギーが100MeVを超えるとICRU球中で電子シャワーが増大するため、深部の線量当量が大きくなるためである。

Fig. 7.1 Comparison of effective dose equivalents and dose equivalents at the lcm on the principal axis of ICRU sphere, parallel to the beams for AP and PA conditions

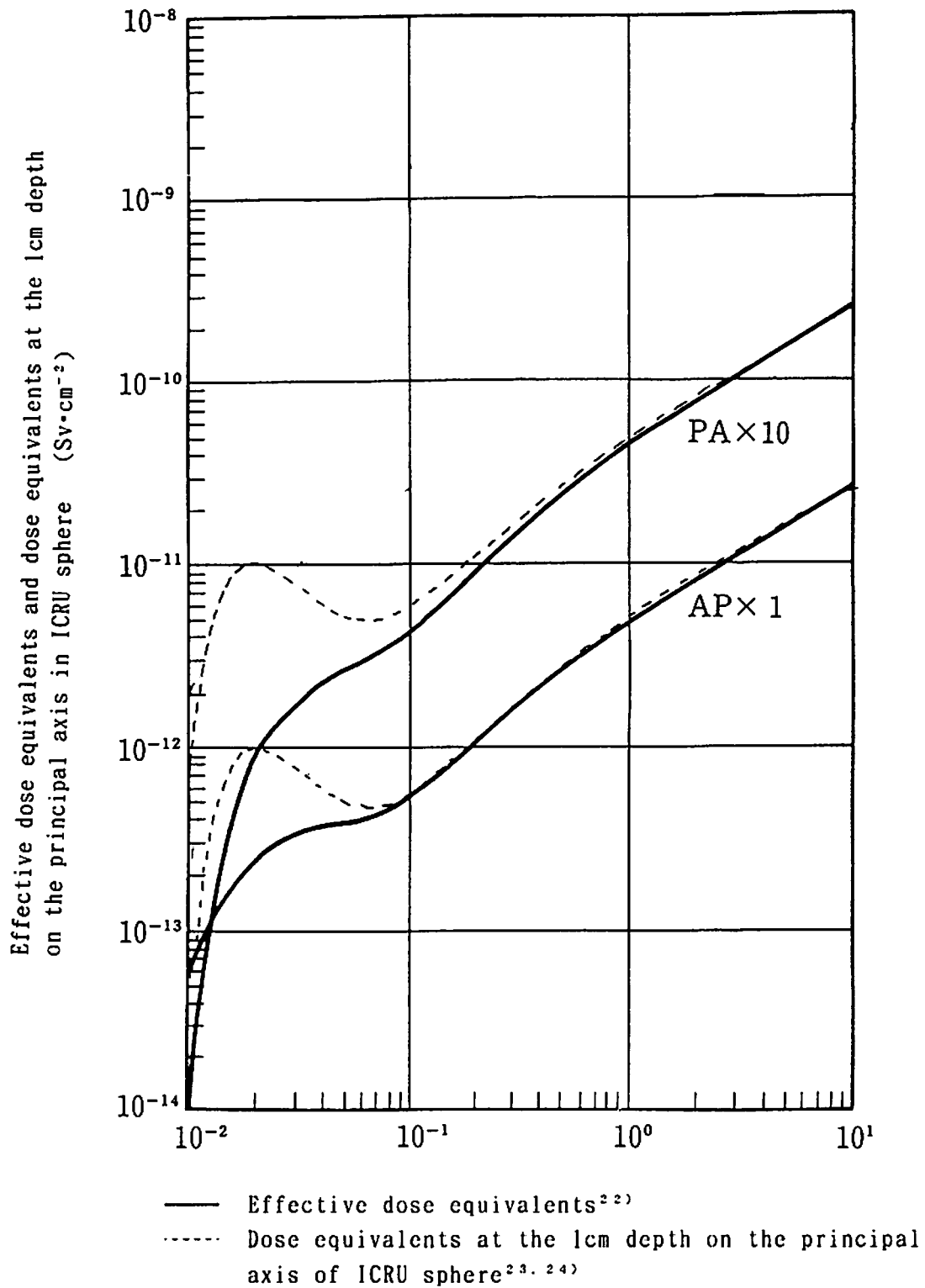


Table 7.1 Dose Equivalents in ICRU sphere irradiated by 10MeV-10GeV parallel photon beam

Unit (Sv/( $10^{12}$  photon/cm<sup>2</sup>))

深さ	入射エネルギー - 10MeV	入射エネルギー - 15MeV	入射エネルギー - 20MeV	入射エネルギー - 50MeV
1 cm	1.79E+00 ± 23.99%	1.63E+00 ± 32.82%	1.39E+00 ± 38.30%	1.93E+00 ± 29.56%
2 cm	1.19E+01 ± 13.28%	9.79E+00 ± 17.73%	1.06E+01 ± 15.60%	1.03E+01 ± 15.54%
3 cm	1.78E+01 ± 9.80%	1.63E+01 ± 12.56%	1.77E+01 ± 12.55%	2.08E+01 ± 11.39%
4 cm	2.60E+01 ± 8.94%	1.92E+01 ± 11.24%	2.40E+01 ± 10.36%	3.24E+01 ± 9.23%
5 cm	2.74E+01 ± 8.85%	2.61E+01 ± 9.44%	2.79E+01 ± 9.31%	3.76E+01 ± 8.79%
6 cm	2.29E+01 ± 9.48%	3.00E+01 ± 9.37%	3.17E+01 ± 8.42%	4.66E+01 ± 7.30%
7 cm	2.18E+01 ± 9.11%	3.40E+01 ± 8.37%	3.65E+01 ± 8.05%	5.04E+01 ± 6.76%
8 cm	2.51E+01 ± 8.77%	3.56E+01 ± 8.46%	3.84E+01 ± 7.87%	5.36E+01 ± 6.39%
9 cm	2.32E+01 ± 9.05%	2.90E+01 ± 8.99%	4.24E+01 ± 7.75%	6.04E+01 ± 5.98%
10cm	2.37E+01 ± 8.83%	2.81E+01 ± 8.86%	4.37E+01 ± 7.44%	7.15E+01 ± 5.62%
11cm	2.65E+01 ± 8.68%	2.91E+01 ± 8.83%	3.67E+01 ± 8.25%	7.10E+01 ± 5.47%
12cm	1.91E+01 ± 9.59%	3.36E+01 ± 8.32%	3.91E+01 ± 7.45%	8.03E+01 ± 5.12%
13cm	1.88E+01 ± 9.93%	3.28E+01 ± 8.47%	3.64E+01 ± 8.12%	8.47E+01 ± 5.04%
14cm	2.18E+01 ± 9.30%	2.95E+01 ± 8.81%	3.63E+01 ± 8.34%	7.98E+01 ± 5.17%
15cm	1.76E+01 ± 9.54%	2.68E+01 ± 9.19%	4.28E+01 ± 7.84%	8.17E+01 ± 5.11%
16cm	2.14E+01 ± 9.10%	3.04E+01 ± 8.55%	4.04E+01 ± 7.89%	8.88E+01 ± 4.91%
17cm	2.06E+01 ± 9.48%	2.69E+01 ± 9.29%	3.98E+01 ± 7.67%	8.96E+01 ± 4.84%
18cm	2.25E+01 ± 9.12%	2.77E+01 ± 9.01%	3.78E+01 ± 7.80%	8.44E+01 ± 4.93%
19cm	1.98E+01 ± 9.54%	3.03E+01 ± 9.04%	3.42E+01 ± 8.31%	8.48E+01 ± 4.96%
20cm	2.35E+01 ± 9.03%	2.93E+01 ± 8.82%	3.20E+01 ± 8.43%	8.80E+01 ± 4.77%
21cm	1.88E+01 ± 9.94%	2.80E+01 ± 9.08%	3.40E+01 ± 8.51%	9.55E+01 ± 4.60%
22cm	2.02E+01 ± 10.13%	2.70E+01 ± 9.79%	3.54E+01 ± 8.16%	8.91E+01 ± 4.85%
23cm	1.61E+01 ± 10.26%	2.11E+01 ± 9.91%	3.99E+01 ± 8.36%	8.90E+01 ± 4.79%
24cm	1.96E+01 ± 9.78%	2.45E+01 ± 9.36%	3.65E+01 ± 8.04%	8.69E+01 ± 4.85%
25cm	1.68E+01 ± 10.03%	2.58E+01 ± 9.07%	3.84E+01 ± 7.77%	8.74E+01 ± 4.92%
26cm	1.84E+01 ± 10.31%	2.37E+01 ± 9.57%	3.52E+01 ± 8.28%	8.06E+01 ± 4.98%
27cm	1.69E+01 ± 10.79%	2.81E+01 ± 9.35%	3.55E+01 ± 8.27%	8.29E+01 ± 4.98%
28cm	1.83E+01 ± 10.59%	2.53E+01 ± 9.48%	3.13E+01 ± 8.61%	8.15E+01 ± 5.08%
29cm	1.68E+01 ± 10.31%	2.87E+01 ± 9.31%	3.20E+01 ± 8.62%	8.24E+01 ± 5.16%
ヒストリ-数	5180 × 600 *	4300 × 600	4300 × 600	5180 × 600

\* 600 histories/batch × 5180batch



Table 7.1 (continued)

深さ	入射エネルギー-100MeV	入射エネルギー-500MeV	入射エネルギー-1GeV	入射エネルギー-10GeV
1 cm	3.58E+00 ± 35.93%	4.88E+00 ± 36.91%	5.35E+00 ± 22.82%	2.86E+00 ± 41.53%
2 cm	1.57E+01 ± 24.24%	1.93E+01 ± 20.85%	1.63E+01 ± 18.03%	1.33E+01 ± 24.93%
3 cm	1.77E+01 ± 22.18%	3.22E+01 ± 16.85%	2.96E+01 ± 12.94%	2.32E+01 ± 20.99%
4 cm	2.77E+01 ± 15.88%	4.70E+01 ± 13.59%	4.10E+01 ± 11.25%	3.76E+01 ± 15.49%
5 cm	3.40E+01 ± 13.87%	6.44E+01 ± 11.70%	5.76E+01 ± 10.02%	5.01E+01 ± 13.12%
6 cm	3.63E+01 ± 13.07%	7.66E+01 ± 11.12%	7.07E+01 ± 8.90%	6.61E+01 ± 11.49%
7 cm	5.13E+01 ± 10.56%	8.43E+01 ± 10.29%	7.90E+01 ± 8.70%	7.82E+01 ± 10.63%
8 cm	6.11E+01 ± 10.50%	1.00E+02 ± 9.40%	9.13E+01 ± 7.77%	9.04E+01 ± 10.26%
9 cm	7.59E+01 ± 9.10%	1.06E+02 ± 9.09%	1.11E+02 ± 6.88%	1.07E+02 ± 9.76%
10cm	7.71E+01 ± 8.71%	1.07E+02 ± 8.78%	1.25E+02 ± 6.67%	1.26E+02 ± 9.34%
11cm	9.58E+01 ± 8.05%	1.16E+02 ± 8.06%	1.32E+02 ± 6.40%	1.39E+02 ± 8.83%
12cm	8.97E+01 ± 8.09%	1.31E+02 ± 7.91%	1.44E+02 ± 6.02%	1.59E+02 ± 8.43%
13cm	9.44E+01 ± 7.67%	1.39E+02 ± 7.33%	1.37E+02 ± 6.19%	1.85E+02 ± 7.95%
14cm	9.62E+01 ± 7.37%	1.53E+02 ± 6.98%	1.59E+02 ± 5.78%	1.98E+02 ± 7.74%
15cm	1.18E+02 ± 7.04%	1.68E+02 ± 6.75%	1.75E+02 ± 5.43%	2.02E+02 ± 7.55%
16cm	1.25E+02 ± 6.77%	1.78E+02 ± 6.41%	1.70E+02 ± 5.47%	2.25E+02 ± 7.01%
17cm	1.22E+02 ± 6.82%	1.87E+02 ± 6.20%	1.91E+02 ± 5.06%	2.38E+02 ± 7.14%
18cm	1.18E+02 ± 6.86%	2.00E+02 ± 6.04%	2.09E+02 ± 4.90%	2.65E+02 ± 6.63%
19cm	1.32E+02 ± 6.41%	2.07E+02 ± 5.76%	2.22E+02 ± 4.87%	2.84E+02 ± 6.53%
20cm	1.27E+02 ± 6.32%	2.31E+02 ± 5.43%	2.34E+02 ± 4.93%	2.96E+02 ± 6.25%
21cm	1.34E+02 ± 6.31%	2.21E+02 ± 5.38%	2.36E+02 ± 4.70%	3.23E+02 ± 6.16%
22cm	1.35E+02 ± 6.26%	2.30E+02 ± 5.36%	2.59E+02 ± 4.36%	3.55E+02 ± 5.96%
23cm	1.49E+02 ± 6.04%	2.44E+02 ± 5.22%	2.77E+02 ± 4.22%	3.72E+02 ± 5.77%
24cm	1.42E+02 ± 6.38%	2.47E+02 ± 5.17%	3.00E+02 ± 4.20%	4.07E+02 ± 5.75%
25cm	1.47E+02 ± 6.02%	2.70E+02 ± 5.00%	3.07E+02 ± 3.98%	4.32E+02 ± 5.57%
26cm	1.56E+02 ± 6.11%	2.73E+02 ± 4.83%	2.96E+02 ± 3.97%	4.57E+02 ± 5.46%
27cm	1.54E+02 ± 5.96%	2.87E+02 ± 4.93%	3.03E+02 ± 3.97%	4.64E+02 ± 5.49%
28cm	1.44E+02 ± 6.12%	2.94E+02 ± 4.82%	3.12E+02 ± 3.79%	5.08E+02 ± 5.23%
29cm	1.52E+02 ± 5.92%	3.04E+02 ± 4.71%	3.51E+02 ± 3.57%	5.26E+02 ± 4.97%
ヒストリ-数	1970 × 600	1970 × 600	3220 × 600	1970 × 600

## 7.2 10MeV～10GeVの面平行ビーム入射光子に対する実効線量

第5章に示した数学ファントム（成人ファントム）にMIRD-5で規定した媒質（Table 5.2参照）を入れて、AP条件（面平行ビーム前方入射）およびPA条件（面平行ビーム後方入射）で各器官の等価線量および実効線量をTable 7.2および7.3に示した。入射エネルギーはICRU球に入射したのと同様の8種類すなわち10, 15, 20, 50, 100, 500MeV, 1GeVおよび10GeVである。光子、電子のカットオフエネルギーは、ICRU球の場合と同じである。実効線量を評価するのに重要な代表的器官（精巣, 卵巣, 乳房）およびICRP60で定義された残りの組織（副腎, 脳, 小腸壁, 腎臓, 筋肉, 膵臓, 脾臓, 胸腺および子宮）の等価線量をそれぞれFig. 7.10～7.13に示す。照射条件は真空中に数学ファントム（成人ファントム）を設定して、EGS4コードを用いて計算を行った。Fig. 7.10～7.13からわかるように精巣、乳房のように前面にある器官はAP条件よりPA条件の方が線量が高く、ファントムの中央にある卵巣およびICRP60で定義された残りの組織は、AP条件およびPA条件ともほぼ同等の値を示している。このことはICRU球の照射について第7.2章で考察した結果とほぼ一致している。すなわち、AP条件において入射面に近い精巣と乳房は、入射面とは遠くなるPA条件のときに比べて数倍～100倍線量が低くなる。このことは人体を表わす数学ファントムにおいても10MeV以上の光子に対しては入射境界では十分に2次電子が発生しておらず、電子平衡が成り立っていないことを表わしている。しかし、ファントムの中央にある器官は丁度ICRU球の中央にあるのと同様にAP、PAどちらの条件で照射してもほぼ同様の値を示す。そのために、10MeV～10GeVの光子エネルギーでは、実効線量はPA条件の方が大きい値を示す。今回、EGS4で計算した結果の妥当性を検討するために、10MeVの光子について計算結果のあるICRP51の値との比較を行った。AP条件およびPA条件それぞれについて結果をTable 7.4 および7.5に示す。

Table 7.4および7.5から次のことがわかる。

- (1) 精巣はAP条件では今回の計算結果はICRP51の $\frac{1}{2}$ 程度であるが、PA条件ではほぼ一致する。ICRP51は入射面における2次電子平衡を仮定しているため、AP条件では大きな値を示すのは前に考察済みである。

- (2) 乳房の等価線量も精巣の場合とほぼ同様のことが言える。乳房についても精巣とほぼ同様の原因が考察できる。
- (3) 卵巣の場合、E G S 4コードで求めた等価線量はA PおよびP A条件ともI C R P 51の値より少し小さいが、よく一致している。
- (4) 赤色骨髄、骨表面は甲状腺、肺では数%以内誤差範囲でかなりよく一致する。
- (5) 実効線量当量 (I C R P 26で定義したEffective dose equivalent) は、A P条件でI C R P 51の方が25%、P A条件で10%程度大きい。その原因は生殖腺と乳房の値について、I C R P 51と今回の計算結果に大きな差異があるためである。

### 7.3 実効線量とI C R U球中の各線量当量との比較

10MeV~10GeVのA PおよびP A条件の実効線量とI C R U球主軸上の各点における線量当量の比較を行った。横軸に入射光子のエネルギーをとり、縦軸にA PおよびP A条件の実効線量、I C R U球主軸上の最大線量当量、I C R U主軸上深さ1cmの点の線量当量(1cm線量当量)、および厚さ30cmの半無限大平板ファントム中の最大線量当量<sup>27)</sup>を比較した結果をFig. 7.14に示す。Fig. 7.14から以下のことがわかる。

- (1) 実効線量は1cm線量当量より1ケタ以上大きい。
- (2) 実効線量はI C R U球主軸上の最大線量当量より最大5倍程度小さい。
- (3) I C R U球主軸上の最大線量当量は、厚さ30cmの半無限大平板中の最大線量当量に比べると、50MeV以下では前者の方がやや大きく、50MeV以上では後者の方がやや大きい。

以上より、10MeV~10GeVの単一方向平行入射ビーム光子に対して、1cm線量当量は実効線量の代用量とはならず、むしろI C R U球中の主軸上の最大線量当量の方が十分な裕度をもった実用量とみなすことができる。(但し、以上の議論はすべてファントムを真空中に置いた場合である。その理由は、ファントムを空気中に設定することにより生ずる高エネルギー光子と空気厚との相互作用を考慮した複雑さを避けるためである。)

Table 7.2 Equivalent doses of target organs and effective dose for parallel incidence of photons  
(unit:Sv/(photon/cm<sup>2</sup>)) (AP condition)

入射光子 照射線 標的器官	10MeV	15MeV	20MeV	50MeV	100MeV	500MeV	1GeV	10GeV
精 巢	1.389-11(4.3) <sup>†</sup>	1.358-11(4.6)	1.314-11(7.1)	1.616-11(4.8)	1.763-11(4.9)	1.979-11(4.6)	2.322-11(5.0)	2.528-11(5.0)
卵 巢	2.256-11(4.8)	3.513-11(4.0)	4.303-11(5.2)	6.722-11(3.0)	8.205-11(3.0)	1.135-10(2.8)	1.151-10(3.2)	1.255-10(3.3)
赤色骨髓	2.042-11(0.4)	2.779-11(0.4)	3.492-11(0.5)	6.742-11(0.3)	9.069-11(0.3)	1.304-10(0.3)	1.421-10(0.3)	1.670-10(0.3)
大腸下部壁	2.323-11(1.3)	2.667-11(1.3)	3.854-11(1.7)	6.198-11(1.0)	7.611-11(1.1)	9.748-11(1.0)	8.552-11(1.2)	9.207-11(1.3)
肺	2.385-11(0.7)	3.134-11(0.7)	3.664-11(0.9)	5.152-11(0.6)	6.043-11(0.6)	7.540-11(0.6)	7.940-11(0.7)	8.492-11(0.7)
胃 壁	2.323-11(1.8)	2.966-11(1.8)	3.353-11(2.5)	4.641-11(1.8)	5.485-11(1.8)	6.590-11(1.6)	7.086-11(1.8)	7.940-11(1.8)
ぼうこう壁	2.355-11(2.0)	2.889-11(1.9)	3.372-11(2.7)	4.143-11(1.9)	5.090-11(1.9)	6.165-11(1.8)	6.826-11(1.9)	6.923-11(2.0)
乳 房	8.553-12(2.6)	7.942-12(2.8)	8.650-12(4.0)	8.640-12(3.0)	9.709-12(3.0)	1.210-11(2.6)	1.177-11(3.0)	1.276-11(3.1)
肝 臓	2.284-11(0.6)	2.936-11(0.7)	3.475-11(1.0)	5.179-11(0.7)	6.289-11(0.8)	8.210-11(0.7)	8.634-11(0.8)	9.335-11(0.8)
食 道	2.127-11(2.3)	2.942-11(2.0)	3.732-11(2.6)	6.333-11(1.5)	8.255-11(1.4)	1.140-10(1.3)	1.223-10(1.4)	1.404-10(1.5)
甲状腺	1.824-11(4.6)	1.826-11(4.6)	1.993-11(6.6)	2.244-11(4.8)	2.378-11(4.9)	2.815-11(4.6)	2.654-11(5.1)	2.948-11(5.1)
皮 膚	1.094-11(0.3)	1.442-11(0.3)	1.764-11(0.3)	3.335-11(0.2)	4.582-11(0.2)	6.678-11(0.2)	7.297-11(0.2)	8.668-11(0.2)
骨表面	2.151-11(0.2)	2.863-11(0.2)	3.477-11(0.3)	5.921-11(0.2)	7.632-11(0.2)	1.050-10(0.2)	1.131-10(0.2)	1.298-10(0.2)
副 腎	2.017-11(4.2)	2.978-11(3.6)	3.704-11(4.7)	8.088-11(2.3)	1.138-10(2.2)	1.634-10(2.0)	1.798-10(2.2)	2.207-10(2.4)
脳	2.214-11(0.8)	2.982-11(0.8)	3.727-11(1.1)	6.520-11(0.8)	8.433-11(0.9)	1.134-10(0.8)	1.213-10(0.9)	1.393-10(1.0)
小腸壁	2.354-11(0.7)	3.186-11(0.7)	3.913-11(1.0)	6.252-11(0.7)	7.527-11(0.8)	9.872-11(0.7)	1.055-10(0.8)	1.171-10(0.8)
腎 臓	2.057-11(1.3)	2.952-11(1.2)	3.898-11(1.5)	5.578-11(0.8)	1.189-10(0.8)	1.738-10(0.7)	1.893-10(0.8)	2.253-10(0.8)
筋 肉	2.009-11(0.1)	2.591-11(0.10)	3.097-11(0.2)	5.184-11(0.1)	6.661-11(0.1)	9.099-11(0.1)	9.821-11(0.2)	1.120-10(0.2)
脾 臓	2.204-11(1.7)	3.142-11(1.6)	3.908-11(2.1)	7.590-11(1.2)	9.520-11(1.3)	1.308-10(1.1)	1.363-10(1.3)	1.514-10(1.3)
脾 臓	2.327-11(2.3)	3.179-11(2.1)	4.151-11(2.7)	6.832-11(1.6)	8.210-11(1.6)	1.089-10(1.5)	1.159-10(1.7)	1.317-10(1.7)
胸 腺	2.073-11(4.0)	2.147-11(4.2)	2.205-11(6.1)	2.541-11(4.3)	2.658-11(4.5)	3.377-11(3.9)	3.492-11(4.3)	3.615-11(4.5)
子 宮	2.276-11(2.8)	3.154-11(2.8)	3.665-11(4.1)	6.087-11(2.7)	7.395-11(2.9)	9.266-11(2.8)	9.859-11(3.2)	1.099-10(3.3)
大腸下部壁	2.301-11(1.2)	3.122-11(1.1)	3.642-11(1.6)	5.151-11(1.1)	6.064-11(1.1)	7.767-11(1.0)	8.500-11(1.2)	9.024-11(1.2)
残りの組織*	2.024-11(1.2)	2.620-11(0.1)	3.140-11(0.2)	5.268-11(0.1)	6.761-11(0.1)	9.226-11(0.1)	9.952-11(0.1)	1.135-10(0.2)
実効線量**	2.146-11(1.1)	2.831-11(1.1)	3.465-11(1.4)	5.366-11(0.8)	6.635-11(0.8)	8.823-11(0.8)	9.096-11(0.8)	1.010-10(0.9)
実効線量当量**	1.982-11(1.4)	2.690-11(1.4)	3.231-11(1.8)	5.097-11(1.0)	6.250-11(1.0)	8.436-11(1.0)	8.834-11(1.1)	9.817-11(1.1)

\* 残りの組織(Remainder)の等価線量および全身の実効線量の評価方法はICRP 60に従う。

\*\* ICRP 26の考え方に従う。

† 1.389-11 = 1.389 × 10<sup>-11</sup> (4.3) = 誤差4.3%

Table 7.3 Equivalent doses of target organs and effective dose for parallel incidence of photons  
(unit: Sv/(photon/cm<sup>2</sup>)) (PA condition)

入射光子 照射 標的器官	10 MeV	15 MeV	20 MeV	50 MeV	100 MeV	500 MeV	1 GeV	10 GeV
精 巣	2.247-11(3.2) <sup>†</sup>	3.098-11(3.0)	3.863-11(2.8)	7.928-11(2.1)	1.098-10(1.9)	1.462-10(2.5)	1.527-10(3.1)	1.631-10(3.3)
卵 巣	2.186-11(4.9)	2.950-11(4.4)	4.191-11(3.8)	7.435-11(2.9)	8.625-11(2.8)	1.158-10(3.5)	1.244-10(4.2)	1.453-10(4.3)
赤色骨髄	2.124-11(0.4)	2.712-11(0.4)	3.185-11(0.4)	4.915-11(0.3)	6.112-11(0.3)	8.165-11(0.4)	8.671-11(0.5)	9.892-11(0.4)
大腸下部壁	2.317-11(1.3)	3.167-11(1.2)	4.150-11(1.1)	7.217-11(1.0)	7.833-11(1.0)	1.064-10(1.2)	1.099-10(1.5)	1.231-10(1.5)
肺	2.408-11(0.7)	3.061-11(0.7)	3.514-11(0.7)	4.604-11(0.7)	5.306-11(0.7)	6.437-11(0.8)	6.735-11(1.0)	7.148-11(1.0)
胃 壁	2.126-11(1.9)	2.970-11(1.7)	3.919-11(1.6)	8.252-11(1.2)	1.137-10(1.2)	1.567-10(1.5)	1.760-10(1.8)	2.072-10(1.8)
ぼうこう壁	2.048-11(2.0)	3.030-11(1.8)	3.876-11(1.7)	8.150-11(1.3)	1.125-10(1.2)	1.606-10(1.5)	1.804-10(1.8)	2.061-10(1.8)
乳 房	2.238-11(1.6)	3.031-11(1.5)	3.940-11(1.3)	7.602-11(1.1)	9.853-11(1.0)	1.317-10(1.2)	1.435-10(1.5)	1.578-10(1.5)
肝 臓	2.228-11(0.6)	3.025-11(0.6)	3.741-11(0.6)	6.617-11(0.6)	8.606-11(0.6)	1.209-10(0.7)	1.270-10(0.9)	1.465-10(0.9)
食 道	1.980-11(2.3)	2.825-11(2.0)	4.102-11(1.8)	7.041-11(1.4)	8.887-11(1.3)	1.220-10(1.6)	1.267-10(2.0)	1.587-10(2.0)
甲状腺	1.928-11(4.2)	2.665-11(3.8)	3.674-11(3.3)	8.444-11(2.3)	1.245-10(2.1)	1.952-10(2.5)	2.161-10(3.0)	2.593-10(3.1)
皮 膚	1.096-11(0.3)	1.437-11(0.3)	1.769-11(0.2)	3.365-11(0.2)	4.608-11(0.2)	6.719-11(0.2)	7.340-11(0.2)	8.766-11(0.2)
骨表面	2.165-11(0.2)	2.823-11(0.2)	3.348-11(0.3)	5.171-11(0.2)	6.358-11(0.2)	8.481-11(0.3)	8.998-11(0.4)	1.017-10(0.4)
副 腎	2.445-11(3.9)	3.052-11(3.6)	3.245-11(3.7)	3.945-11(3.6)	4.867-11(3.5)	6.430-11(4.1)	5.976-11(5.2)	7.506-11(4.9)
脳	2.234-11(0.8)	2.994-11(0.8)	3.699-11(0.8)	6.433-11(0.8)	8.125-11(0.9)	1.130-10(1.1)	1.195-10(1.3)	1.351-10(1.3)
小腸壁	2.272-11(0.7)	3.163-11(0.7)	4.057-11(0.7)	7.558-11(0.6)	9.799-11(0.6)	1.311-10(0.8)	1.423-10(1.0)	1.635-10(1.0)
腎 臓	2.263-11(1.3)	2.498-11(1.3)	2.480-11(1.4)	2.958-11(1.4)	3.449-11(1.4)	3.938-11(1.7)	4.113-11(2.0)	4.587-11(2.0)
筋 肉	2.013-11(0.1)	2.593-11(0.1)	3.106-11(0.1)	5.205-11(0.1)	6.693-11(0.1)	9.183-11(0.2)	9.859-11(0.2)	1.131-10(0.2)
脾 臓	2.384-11(1.7)	3.038-11(1.6)	3.367-11(1.7)	4.367-11(1.7)	4.969-11(1.7)	6.280-11(2.0)	6.351-11(2.5)	7.195-11(2.4)
脾 臓	2.289-11(2.3)	3.115-11(2.1)	4.036-11(1.9)	7.054-11(1.6)	8.933-11(1.5)	1.146-10(1.9)	1.250-10(2.3)	1.448-10(2.2)
胸 腺	1.832-11(4.1)	2.647-11(3.6)	3.579-11(3.2)	8.697-11(2.1)	1.327-10(1.8)	2.351-10(2.1)	2.484-10(2.6)	3.226-10(2.7)
子 宮	2.158-11(2.9)	3.024-11(2.9)	3.790-11(2.8)	7.380-11(2.4)	9.885-11(2.3)	1.205-10(3.2)	1.400-10(3.8)	1.594-10(3.8)
大腸下部壁	2.190-11(1.2)	3.026-11(1.1)	3.894-11(1.1)	7.671-11(0.9)	9.977-11(0.9)	1.363-10(1.1)	1.493-10(1.3)	1.702-10(1.3)
残りの組織*	2.027-11(0.1)	2.618-11(0.1)	3.143-11(0.1)	5.284-11(0.1)	6.789-11(0.1)	9.305-11(0.2)	9.989-11(0.2)	1.146-10(0.2)
実効線量*	2.181-11(0.8)	2.951-11(0.7)	3.785-11(0.9)	6.827-11(0.6)	8.872-11(0.6)	1.210-10(0.7)	1.296-10(0.9)	1.467-10(0.9)
実効線量当量**	2.183-11(0.9)	2.936-11(0.9)	3.726-11(1.1)	6.729-11(0.7)	8.927-11(0.7)	1.219-11(0.9)	1.304-11(1.0)	1.474-10(1.1)

\* 残りの組織(Remainder)の等価線量および全身の実効線量の評価方法はICRP 60に従う。

\*\* ICRP 26の考え方に従う。

† 2.247-11 = 2.247 × 10<sup>-11</sup> (3.2) = 誤差3.2%

Table 7.4 Comparison of dose equivalents of target organs and effective dose equivalent in ICRP51 with those in this work (AP condition)

(単位 Sv/(Photon·cm<sup>2</sup>))

	ICRP51 (男性)	ICRP51 (女性)	今回の計算
精 巣	2.74-11 **		1.39-11 *** (4.3%)
卵 巣		2.35-11	2.26-11 (4.8%)
赤色骨髄	2.19-11	2.19-11	2.04-11 (0.4%)
肺	2.43-11	2.29-11	2.39-11 (0.7%)
甲 状 腺	2.77-11	2.77-11	1.82-11 (4.6%)
骨 表 面	2.29-11	2.29-11	2.15-11 (0.2%)
乳 房		2.55-11	8.55-12 (2.6%)
実効線量当量 *	2.47-11		1.98-11 **** (1.4%)

\* ICRP26で定義したEffective dose equivalentであって、ICRP60のEffective doseではない。

\*\* 2.74-11 = 2.74 × 10<sup>-11</sup>

\*\*\* ( )内はモンテカルロ誤差

\*\*\*\* 生殖腺としてICRP51は精巣を採用しているが、ここでは卵巣の値の方が大きいため卵巣の値を採用。

Table 7.5 Comparison of dose equivalents of target organs and effective dose equivalent in ICRP51 with those in this work (PA condition)

(単位 Sv/(Photon・cm<sup>2</sup>))

	ICRP51 (男性)	ICRP51 (女性)	今回の計算
精 巣	2.37-11 **		2.25-11 (3.2%)
卵 巣		2.43-11	2.19-11 (4.9%)
赤色骨髄	2.26-11	2.15-11	2.12-11 (0.4%)
肺	2.43-11	2.52-11	2.41-11 (0.7%)
甲 状 腺	2.06-11	2.06-11	1.93-11 (4.2%)
骨 表 面	2.40-11	2.40-11	2.17-11 (0.3%)
乳 房		2.24-11	2.24-11 (1.6%)
実効線量当量 *	2.42-11		2.18-11 (1.0%)

\* ICRP26で定義したEffective dose equivalentであって、ICRP60のEffective doseではない。

\*\* 2.37-11 =  $2.37 \times 10^{-11}$

\*\*\* ( )内はモンテカルロ誤差

\*\*\*\* 生殖腺としてICRP51は卵巣を採用しているため、ここでも卵巣の値を採用。

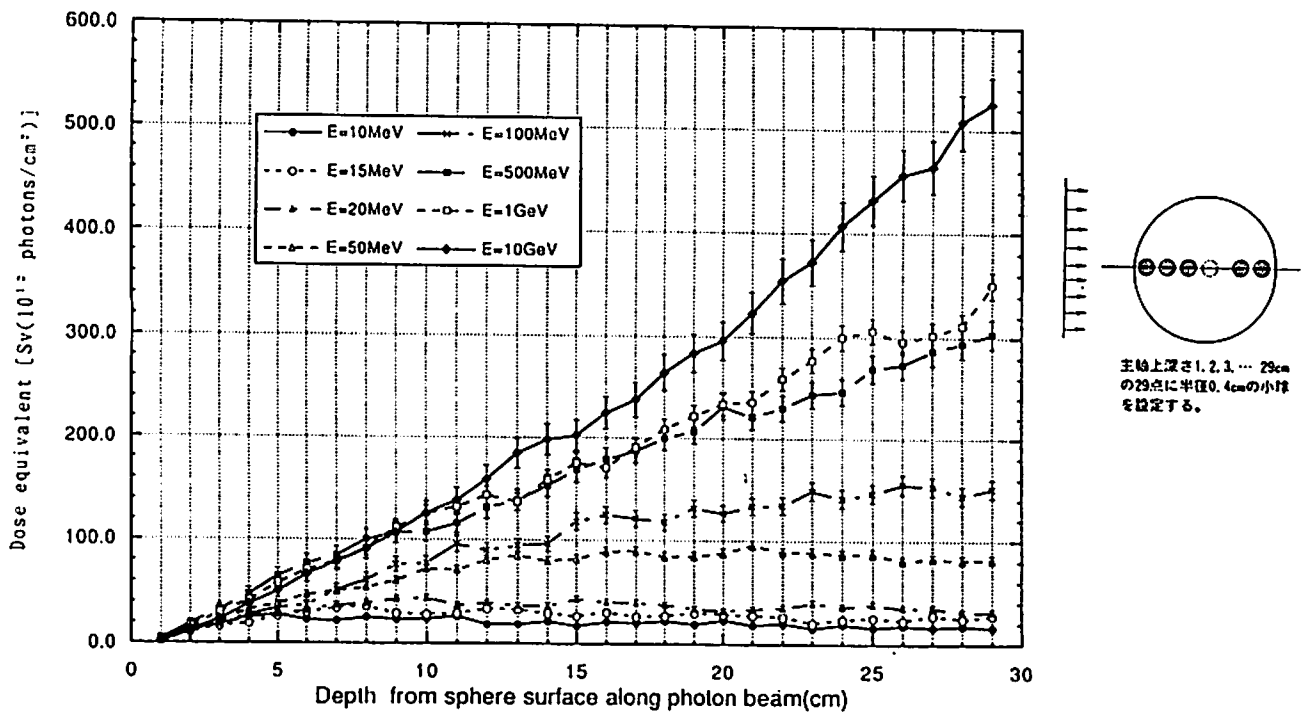


Fig.7.1 Dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 10MeV-10GeV parallel photon beam

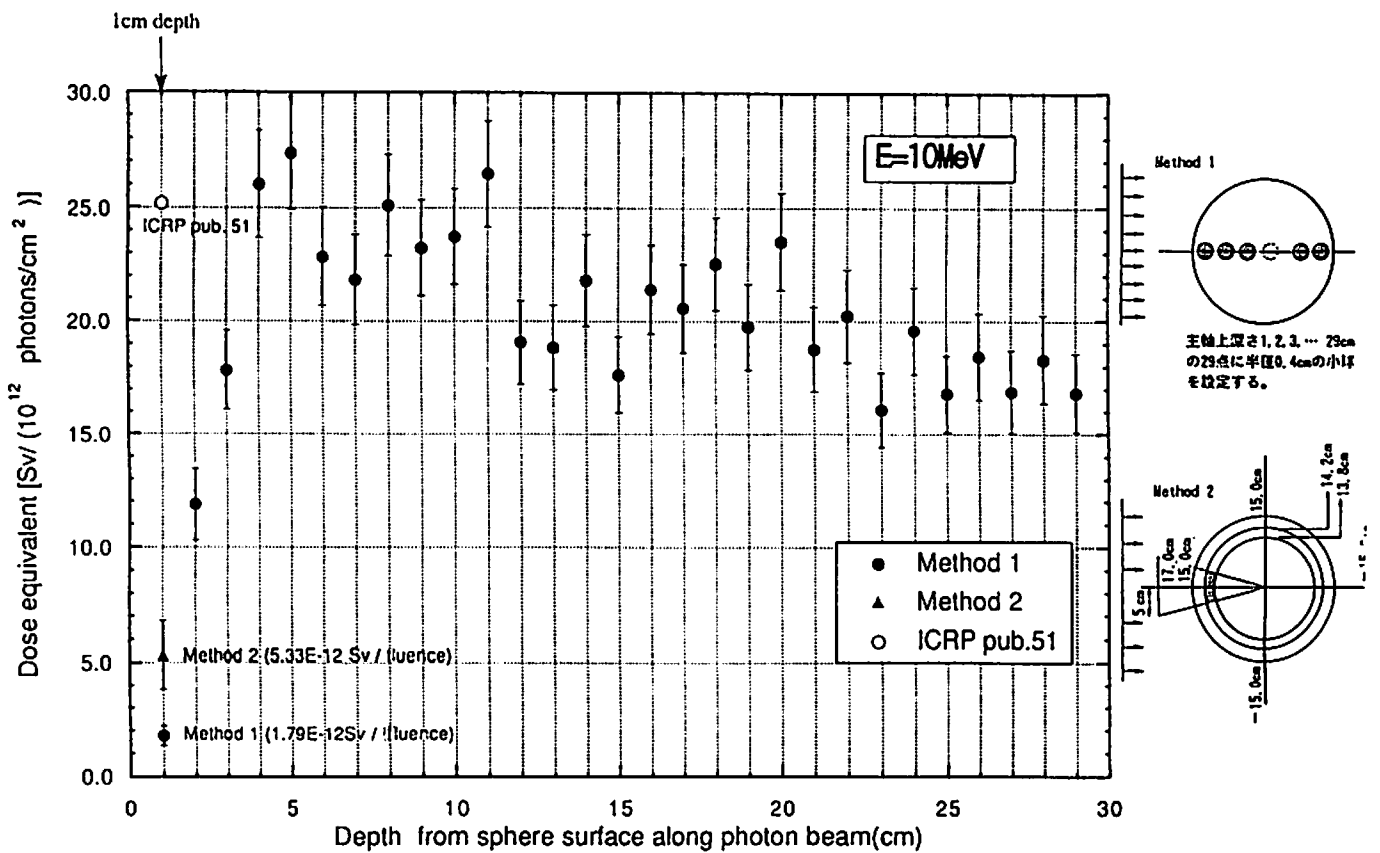


Fig.7.2 Dose equivalent in ICRU sphere irradiated by 10MeV parallel photon beam



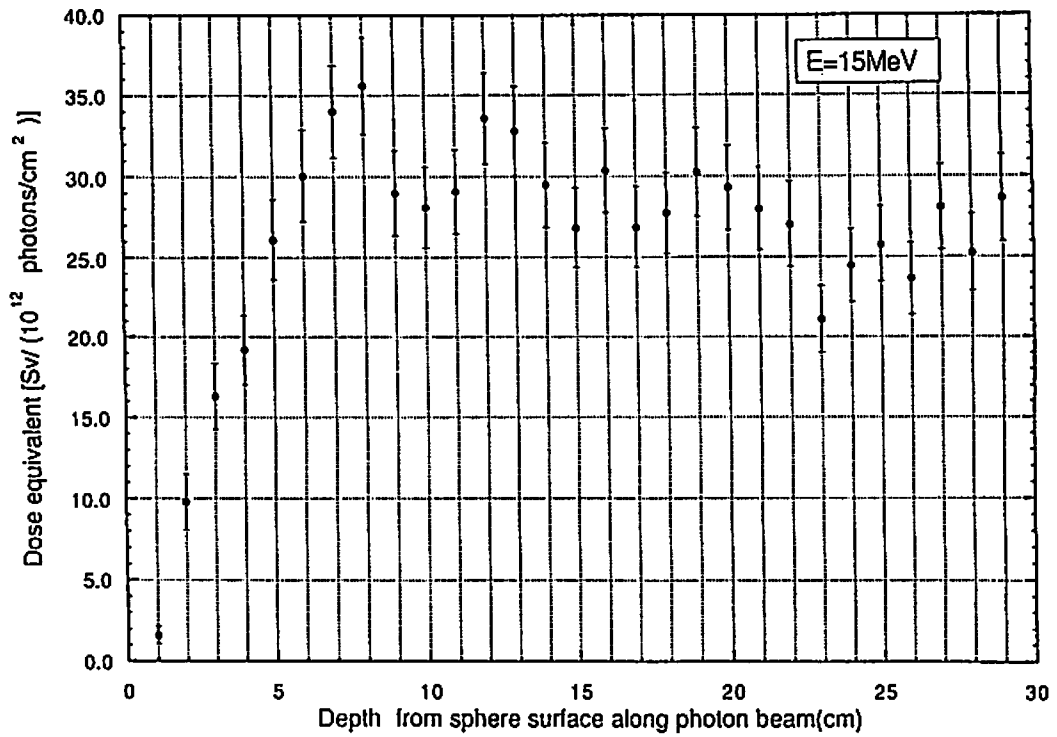


Fig.7.3 Dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 15MeV parallel photon beam

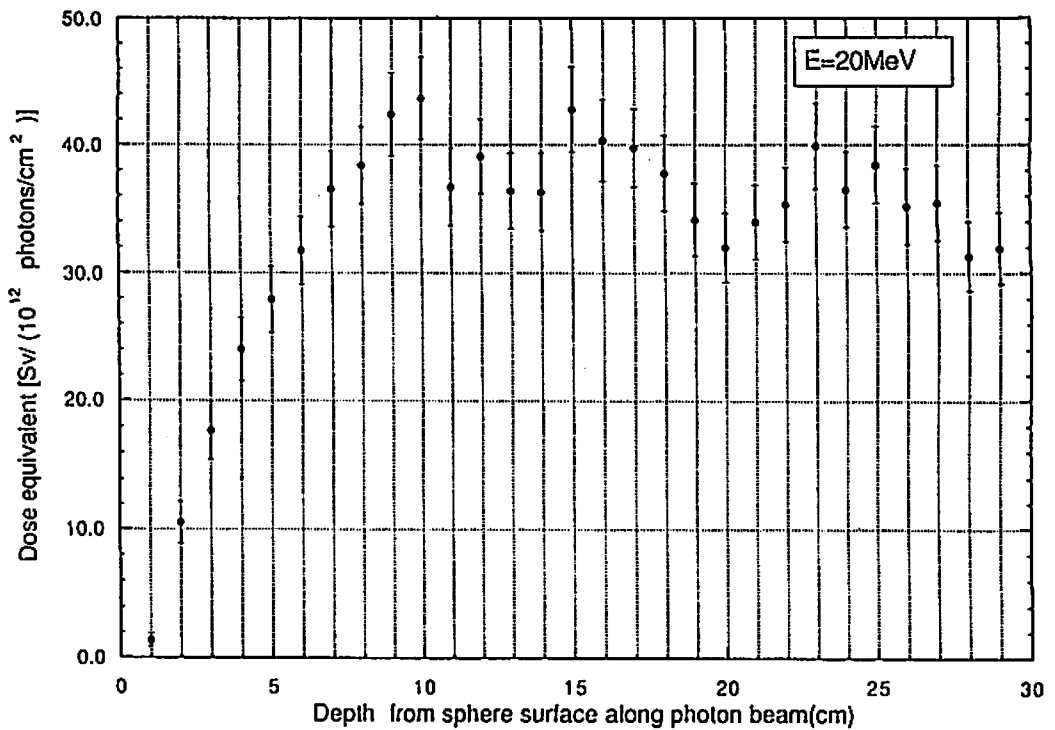


Fig.7.4 Dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 20MeV parallel photon beam

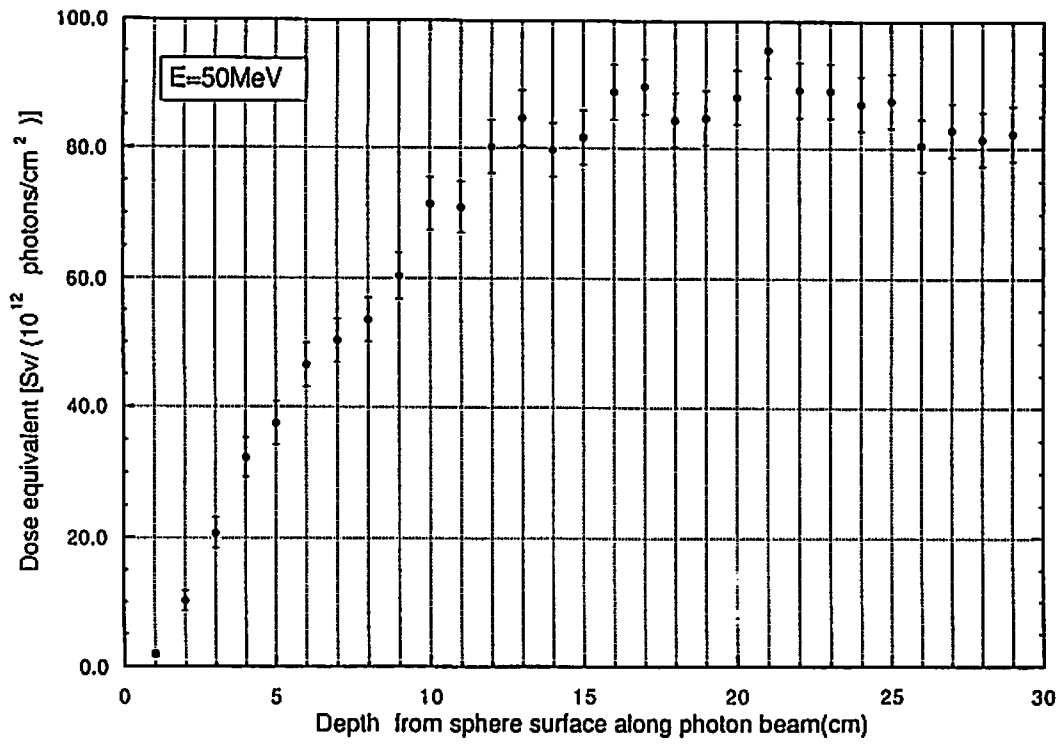


Fig.7.5 Dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 50MeV parallel photon beam

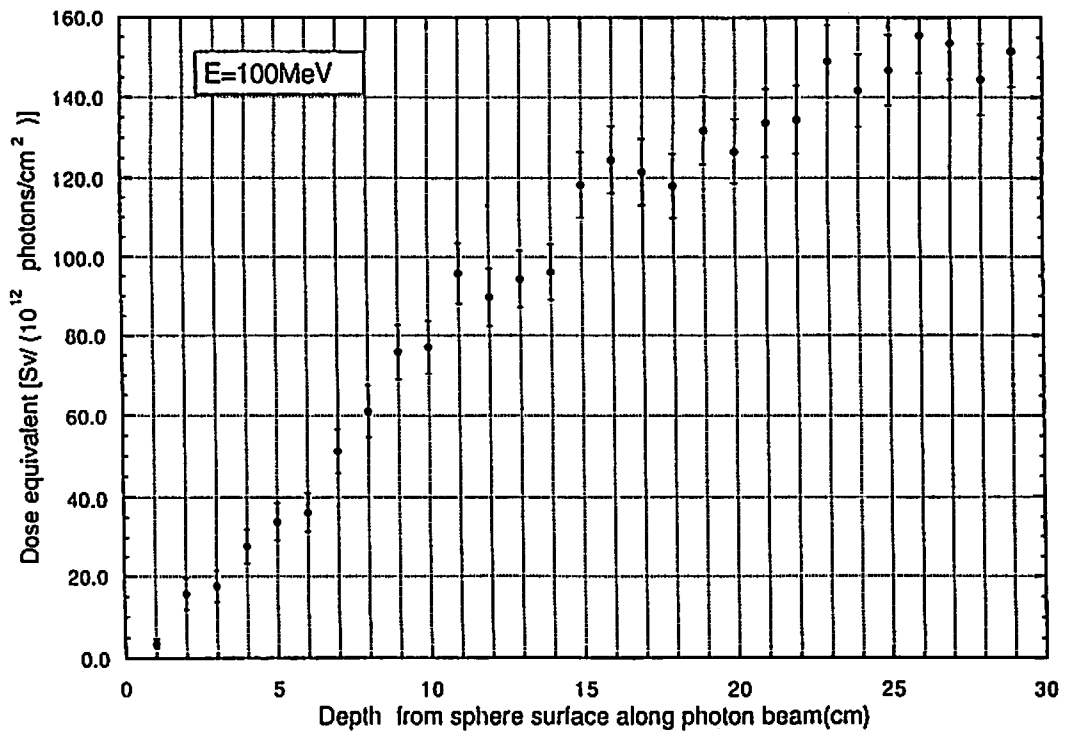


Fig.7.6 Dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 100MeV parallel photon beam

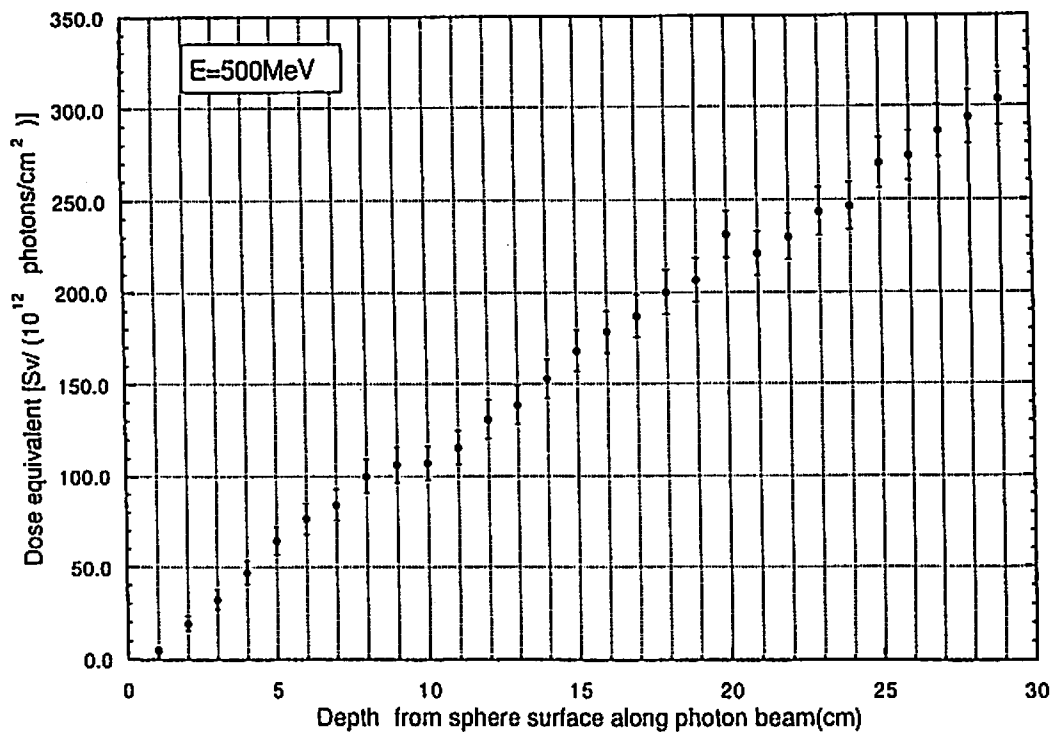


Fig.7.7 Dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 500MeV parallel photon beam

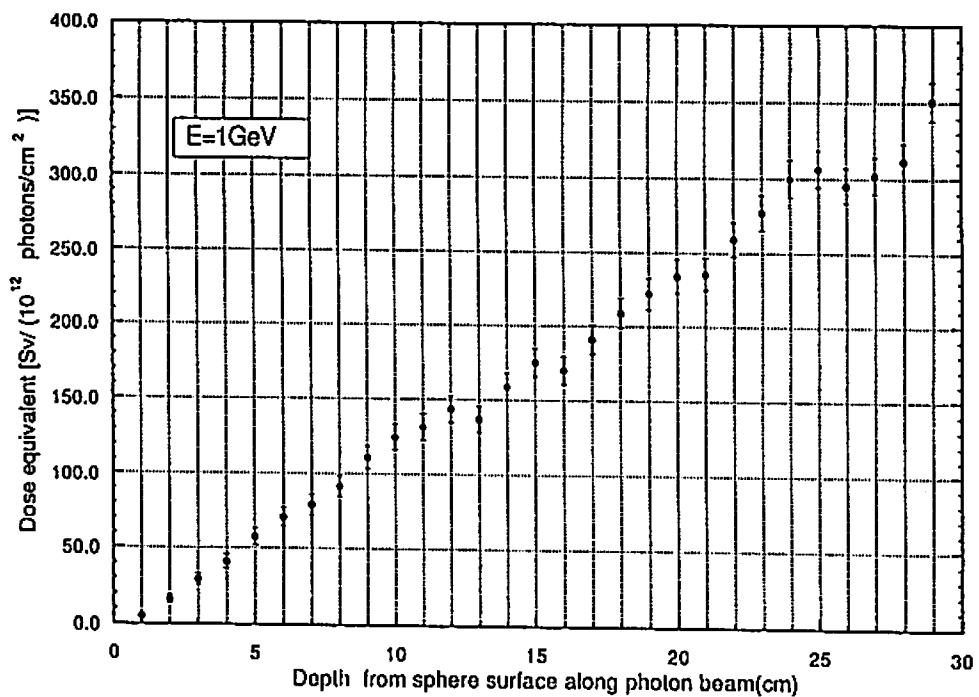


Fig.7.8 Dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 1GeV parallel photon beam

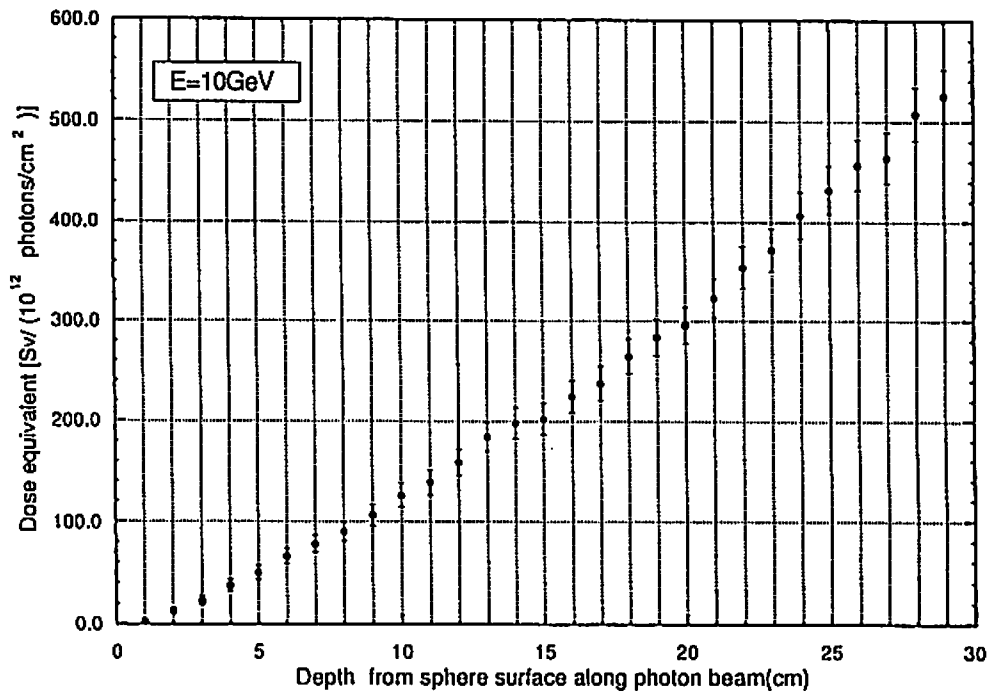


Fig.7.9 Dose equivalents in ICRU sphere irradiated by 10GeV parallel photon beam

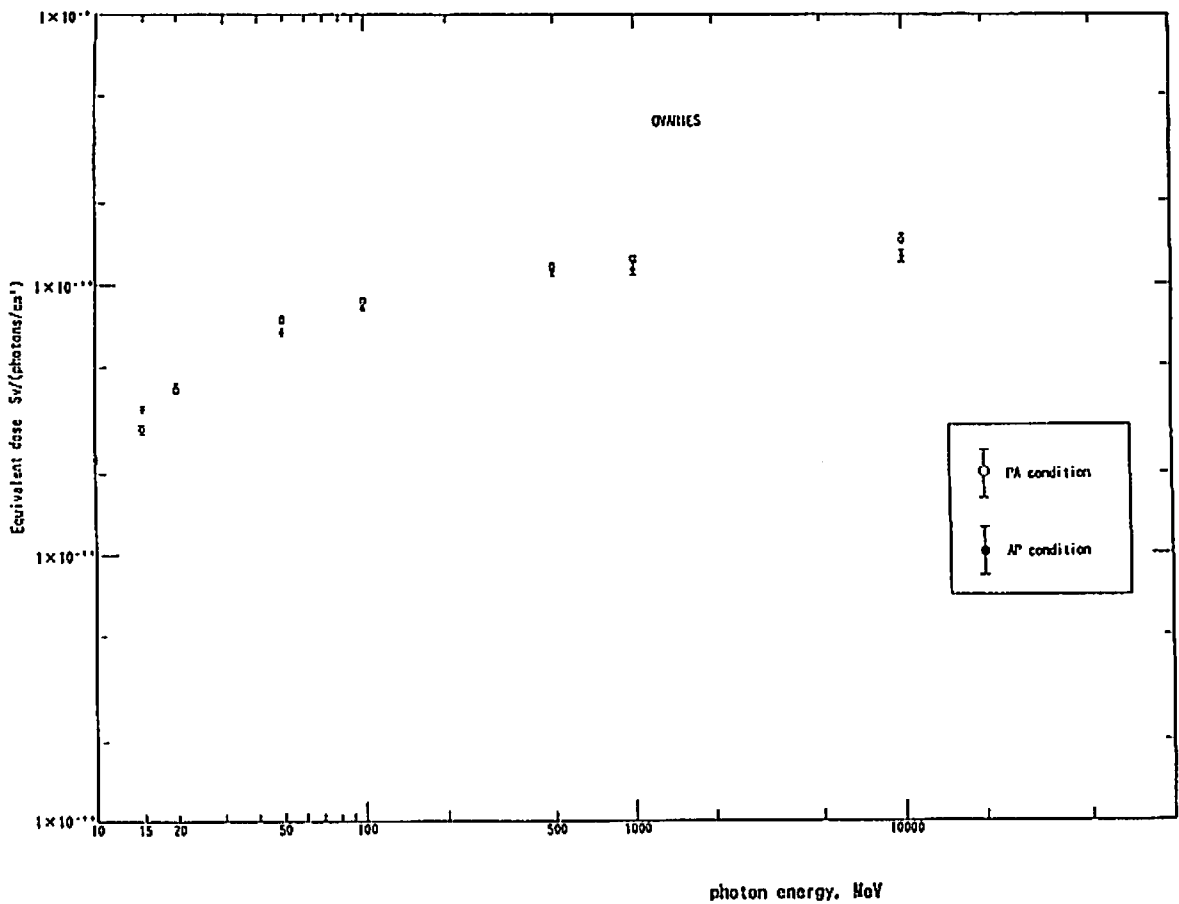


Fig. 7. 10 Dose equivalents of testes irradiated by 10MeV-10GeV parallel photon beam

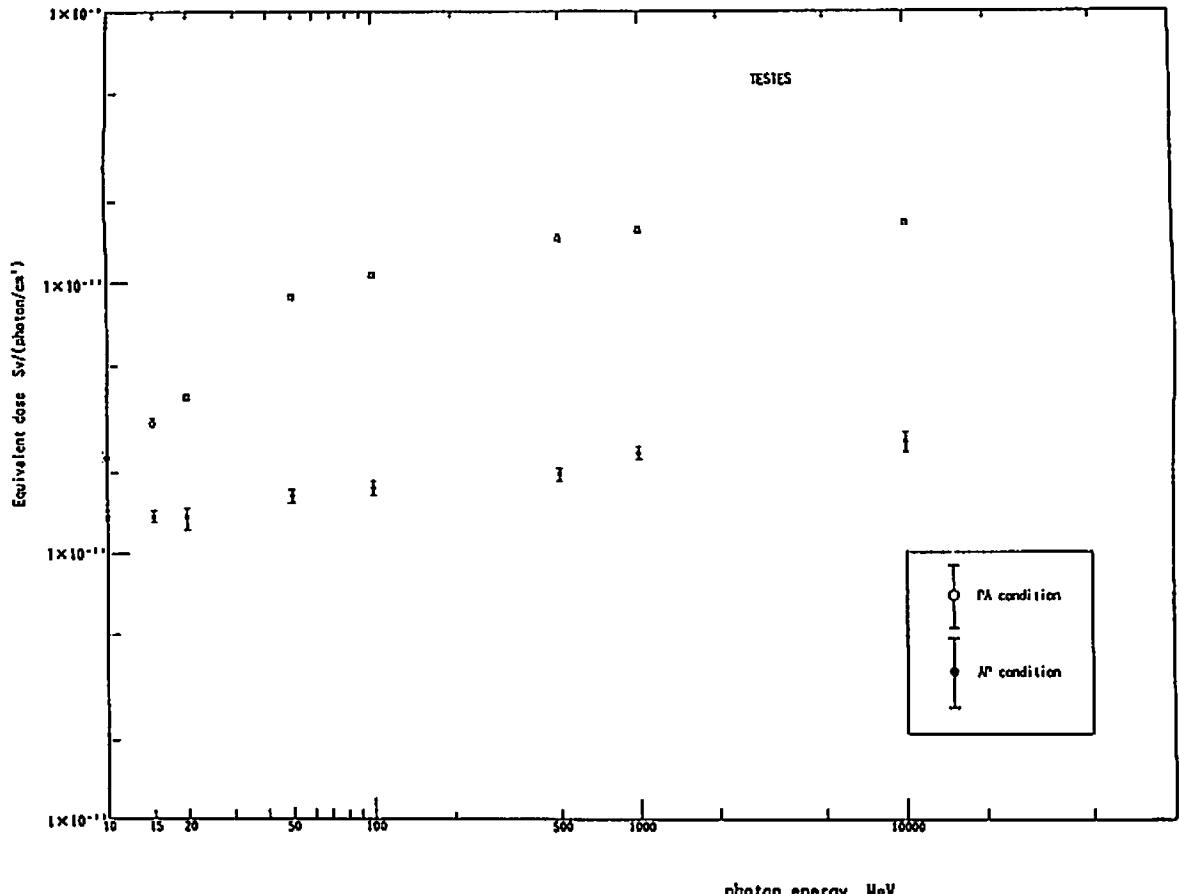


Fig. 7. 11 Dose equivalents of ovaries irradiated by 10MeV-10GeV parallel photon beam

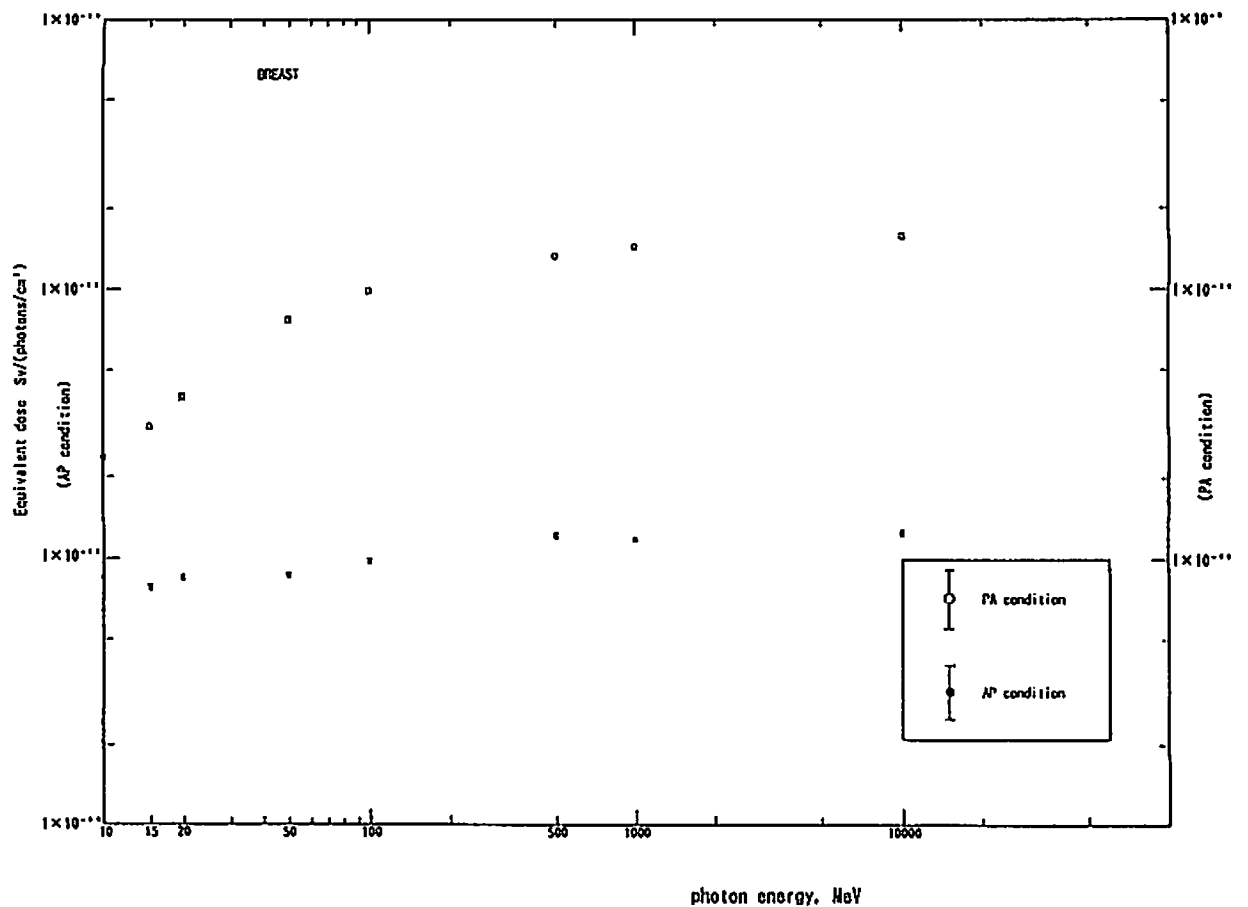


Fig. 7. 12 Dose equivalents of breasts irradiated by 10MeV-10GeV parallel photon beam

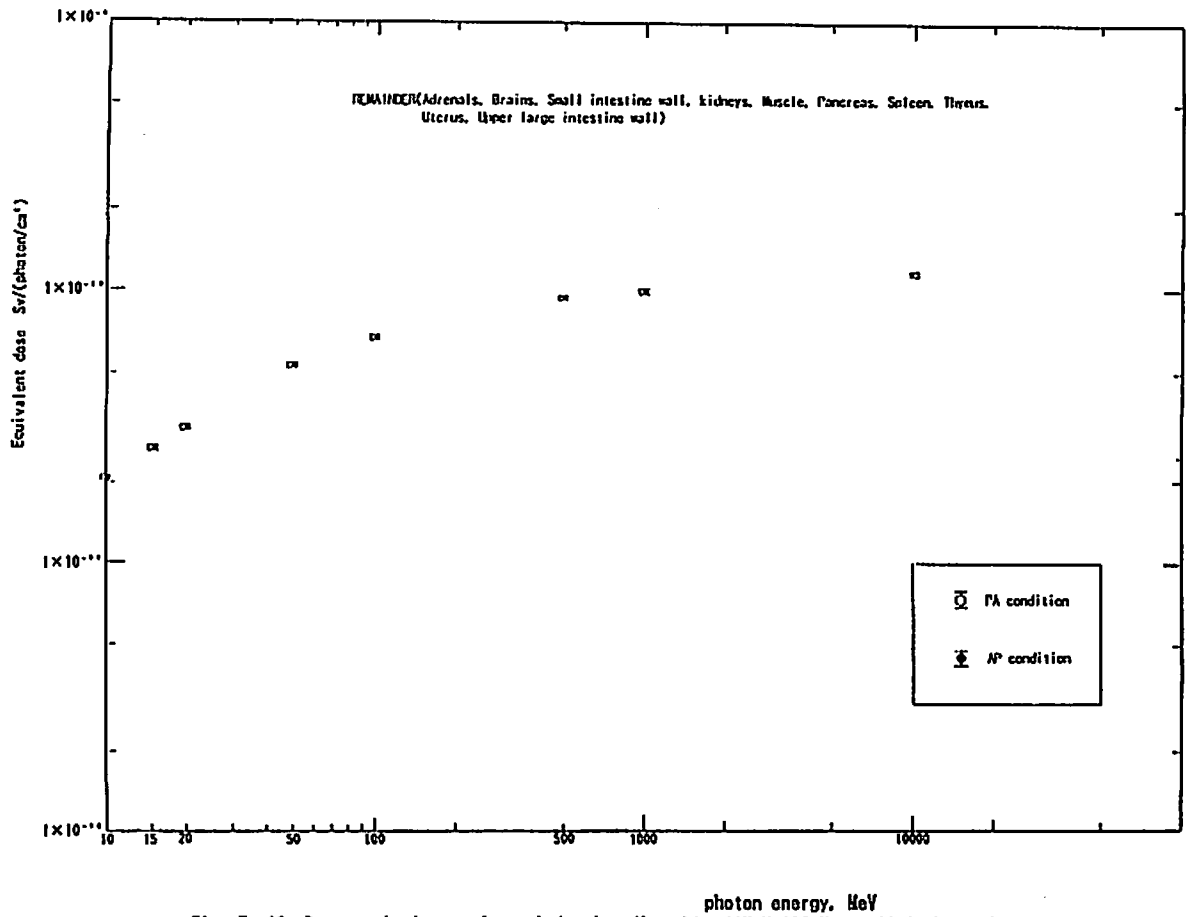


Fig. 7. 13 Dose equivalents of remainder irradiated by 10MeV-10GeV parallel photon beam

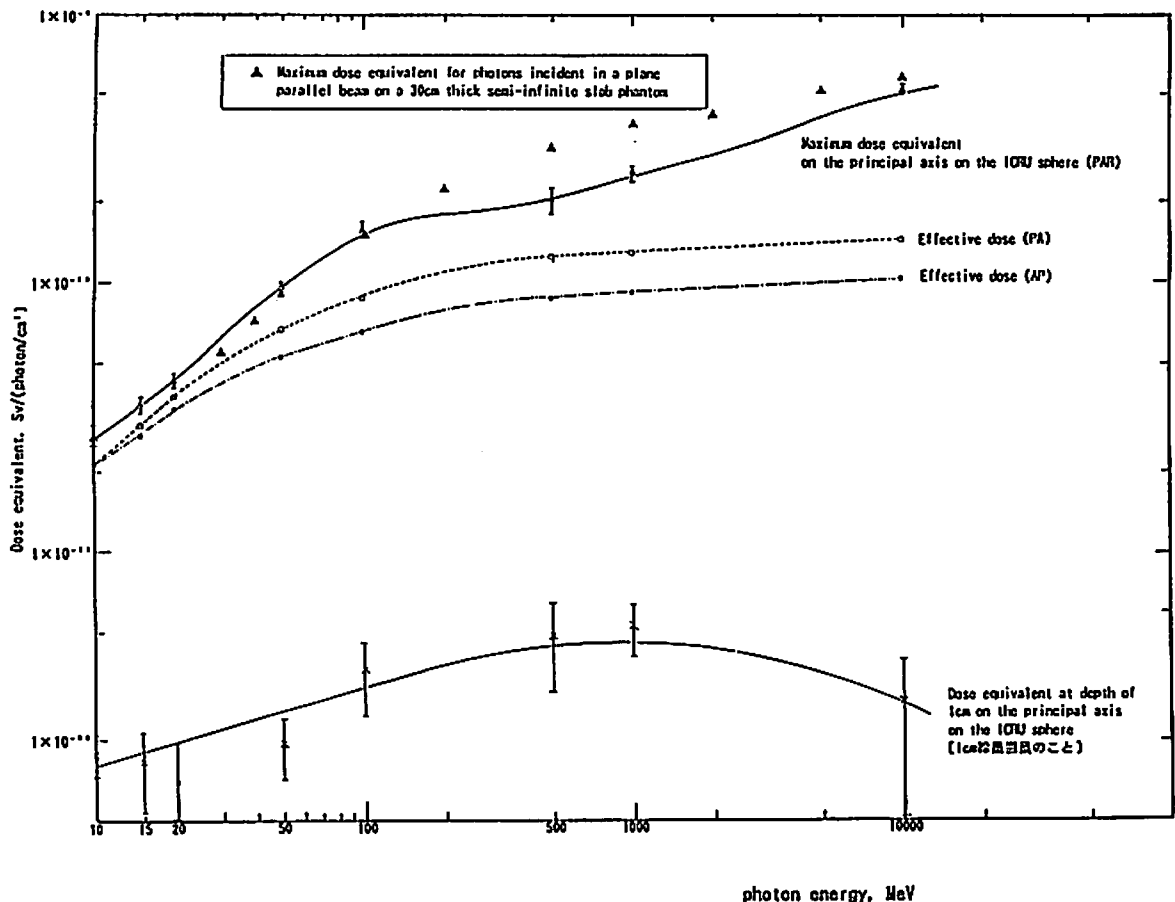


Fig. 7. 14 Comparison of effective doses with dose equivalents in ICRU sphere or semi-infinite slab phantom of 30cm-thickness irradiated by 10MeV-10GeV parallel photon beam

## 8. まとめおよび今後の課題

本研究では、高エネルギー放射線が人体に入射したときの線量当量換算係数（フルエンス-実効線量）を評価するために必要なコードシステムと基礎データと方法論を整備した。それを用いて真空中にファントムを置いた場合の高エネルギー光子（10MeV～10 GeV）に対する実効線量およびICRU球主軸上の線量当量の評価を行った。なお、この方法の検証のため、10MeVの光子に関するICRP51の値と比較した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) ICRP51はICRU球主軸上の線量当量を求めるのに、カーマ近似等の方法を用いている。それが正当化される理由として、ICRU球前方の空気層の存在による球表面での二次電子平衡を掲げている。そして、10MeVの光子に対して真空条件で、EGS4で二次電子の飛跡に沿ったエネルギー沈着により求めた1cm線量当量とカーマ近似で求めたICRP51の値とでは5倍以上の差があることがわかった。そのため、球表面での二次電子平衡の有無は重要である。しかし、電子平衡を成立させるのに必要な空気層の厚さは入射光子のエネルギーにより異なる。したがって、空気層の厚さ、存在をどう仮定するかということは、今後の検討が必要となる。
- (2) ICRU球前方の空気層の存在による仮定条件の複雑化を避けるために、10MeV以上の光子に対しては、すべて真空条件で計算した。

10MeV～10GeVの光子入射について、真空条件での1cm線量当量は真空条件での実効線量に対して常に小さい値を示すため、実効線量の代用量とはならない。ICRU球中の主軸上の最大線量当量は実効線量より常に大きい値を示すため、代用量として使用可能である。

今後の課題として、ICRP51に既に示されている10MeV以下の光子の1cm線量当量と実効線量について、真空条件での精密計算とカーマ近似での評価を行い、1cm線量当量の有効性と二次電子平衡成立の仮定について検討し、空気層の必要性について考察する。

## 参 考 文 献

- 1) ICRP Publication 51. Data for Use in Protection Against External Radiation. Annals of the ICRP17(2/3)(1987)
- 2) 百瀬琢磨, 野尻一郎, 成田脩, 岩井敏, 林津雄厚, 佐藤理, 中村充志: E G S 4 コード汎用ユーザーズ版の開発, 第1回E G S 4研究会, P48, KEK Proceedings 91-14(1991)
- 3) ICRP Publication 26. Recommendations of the ICRP, Annals of the ICRP1(3)(1977) Reprinted (with additions) in 1987. Superseded by ICRP Publication 60
- 4) Statement from the 1987 Stockholm Meeting of the ICRP. Annals of ICRP2(1) (1978)
- 5) ICRP Publication 60. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP21(1-3)(1991)
- 6) Report of the RBE Committee of the International Commission on Radiological Protection and on Radiological Units and Measurements. Health Phys.9 (1963) 357-384
- 7) ICRU Report 37. Stopping Powers for Electrons and Positrons (1984)
- 8) NCRP Report 108. Conceptual Basis for Calculations of Absorbed Dose Distributions (1991)
- 9) ICRU Report 16. Linear Energy Transfer (1970)



- 10) ICRU Report 33. Radiation Quantities and Units (1980)
- 11) 田島英三, 白戸弘二: 放射線と物質との相互作用. 山崎文男 編集: 実験物理学講座  
放射線 (共立山出版株式会社 1973)
- 12) H. H. Rossi: "MICROSCOPIC ENERGY DISTRIBUTION IN IRRADIATED MATTER", RADIATION  
DOSIMETRY Second Edition Vol.(edited by F.H. Attix and W.C. Roesch)  
(Academic Press 1968)
- 13) W. S. Snyder, M. R. Ford, and G. G. Warner: Estimates of specific absorbed fractions  
for photon sources uniformly distributed in various organs of heterogeneous  
phantom. NM/MIRD Pamphlet No.5(revised)J.Nucl. Med..19. Supplement:5-67(1987)
- 14) Y. Yamaguchi, DEEP Code to Calculate Dose Equivalents in Human Phantom for  
External Phantom Exposure by Monte Carlo. JAERI-M 90-235(1990)
- 15) C. A. Lewis and R. E. Ellis, Additions to the Snyder Mathematical Phantom, Phys.  
Med. Biol. Vol. 24 No. 5 pp1019-1024(1979)
- 16) M. Cristy and K. F. Eckerman: Specific Absorbed Fractions of Energy at Various  
Ages from Internal Photon Sources ORNL/TM-8381/V1-V7(1987)
- 17) 本郷昭三 (放射線医学総合研究所 環境衛生部) 私信(1991)
- 18) W. R. Nelson, H. Hirayama, and W. O. Rogers: THE EGS-4 CODE SYSTEM, SLAC-265(1985)
- 19) H. A. Bethe, "Theory of Passage of Swift Corpuscular Rays Through Matter",  
Ann. Physik 5(1930)325

- 20) H. A. Bethe, "Scattering of Electrons" , Z. für Physik 76(1932)293
- 21) F. Bloch, "Stopping Power of Atoms with Several Electrons" ,Z. für Physik 81(1933)363
- 22) G. Williams, M. Zankl, H. Eckerl and G. Drexler. The Calculation of Dose from External Exposures Using Reference Human Phantoms and Monte Carlo Methods, Part II, Organ Doses from Occupational Exposures. GSF Bericht S-1079, September 1985. Gesellschaft für Strahlen-und Umweltforschung mbH, München(1985)
- 23) G. Williams, W. P. Swanson, P. Kragh and G. Drexler. Calculation and Analysis of Photon Dose Equivalent Distributions in the ICRU Sphere, GSF Bericht S-958, December 1983. Gesellschaft für Strahlen-und Umweltforschung mbH, München.
- 24) P. J. Dimbylow and T. M. Francis. The calculation of dose equivalent quantities in the ICRU sphere for photon energies from 0.01 to 10 MeV. Radiat. Prot. Dosim. 9(1984), 49-53.
- 25) Radiation Quantities and Units, Report 33, International Commission on Radiation Units and Measurements, Washington, D. C. (1980)
- 26) Radiation Shielding Information Center Data Package DLC-136/PHOTX Photon Interaction Cross Section Library, contributed by National Institute of Standards and Technology.
- 27) D. W. O. Roger, Fluence to dose equivalent conversion factors calculated with EGS3 for electron from 100keV to 20GeV and photons from 11keV to 20GeV. Health Phys. 46(1984)891-914

# 核融合 $\gamma$ 線検出用対生成磁気スペクトロメーターの概念設計

東大工 原野英樹, 井口哲夫, 中沢正治

## Conceptual design of a magnetic pair spectrometer for fusion $\gamma$ -ray detection

H.Harano, T.Iguchi and M.Nakazawa

Dept. of Quantum Engineering and Systems Science, University of Tokyo.

7-3-1,Hongo,Bunkyo-ku,Tokyo,113,Japan

Fusion  $\gamma$ -ray measurement is one of the most promising plasma diagnostics for aneutronic fusion reactions such as D-p, D- $^3\text{He}$  etc. The concept of a magnetic pair spectrometer is proposed to improve the signal to noise ratio in the measurement, mainly due to neutron and secondary  $\gamma$ -ray contribution to the detector material. Here are presented the results on the conceptual design for a proto-type system.

### 1. はじめに

核燃焼プラズマ中で核融合反応により生じる高エネルギー即発  $\gamma$  線の計測は, 各種イオンのエネルギーや密度等の情報が得られる他, 特に中性子放出を伴わない D-p, D- $^3\text{He}$  プラズマの核燃焼率評価や加熱プロファイル診断の最も有効な手段と考えられている<sup>1)</sup>。従来, 中性子遮蔽用フィルターを付けた NaI や BGO 等の無機シンチレーターや中性子感度の低い NE-226 液体シンチレーター等による測定が試みられているが, S/N 比の低さの点で大きな問題を抱えている。そこで本研究では, 圧倒的に多いバックグラウンド  $\gamma$  線や中性子が混在する場でも選択的に高エネルギー  $\gamma$  線の検出が期待できる対生成磁気スペクトロメーター方式の適用性を検討し, D- $^3\text{He}$  プラズマからの 16.6MeV  $\gamma$  線を対象とした測定システムの設計を試みた。

### 2. 対生成磁気スペクトロメーターの原理

炉心プラズマからの高エネルギー  $\gamma$  線を高 Z 材のターゲットに入射して, 電子対生成反応により  $e^+, e^-$  対に変換する。生成された  $e^+, e^-$  対を, 磁場で曲げて, 捕集し, 2つの向かい合ったシンチレーターまで誘導し, それぞれを同時計数する。(Fig.1 参照。) さらに同時計数した  $e^+, e^-$  対をそれぞれ波高分析し, エネルギーの和を求める。同時計数により, 対生成以外の事象 (コンプトン効果等) は除去されるので, 検出器の応答をシンプルにできる。シンチレーターをビームラインから離すことで, 中性子の影響を抑えることが出来る。

### 3. 設計手順

シミュレーションは全て EGS4<sup>2)</sup>を用い, Pb 箱での変換部と磁場中の輸送部に分けて行なった。

#### 3.1 Pb 箱での変換部

対生成により生じる  $e^+, e^-$  のエネルギーは Fig.2に示したように, それぞれ広く分布するので, 以降の磁場設計を単純化するためには, 変換後の  $e^+, e^-$  対の飛跡の前方性を確保する必要がある。ここでは, 変換効率と  $e^+, e^-$  対の前方性の兼ね合いから, 厚さ 0.5mm の Pb 箱 (1cm 角) を採用した。

## 3.2 磁場中の輸送部

フェライト系磁石を用いることを想定し、磁場強度を 0.3T に設定した。まず、単純一様磁場の場合で計算してみたところ、収集効率は 37.47% と低くなってしまった。これは低エネルギーの粒子が曲がり過ぎてしまう為である。(Fig.3-(a) 参照)。これを防ぐ為、Fig.3-(b) の様なホームベース型の一様磁場を検討したところ、収集効率は 68.26% となり、かなりの向上がみられた。

さらに、収束性を向上させる為に、以下の考察を行なった。 $e^+$ ,  $e^-$  は磁場中をエネルギーで決められたラーマ半径で飛行する。粒子の飛行方向が焦点を向いた時に磁場から解放すれば、積極的に収束させることが出来る。これを実現する磁場配置は Fig.3-(c) のようになり、この収束型の一様磁場で計算したところ、収集効率は 72.25% となった。

次に、希土類系磁石を想定し、磁場強度を 1.0T に設定し、収束型の一様磁場で計算したところ、収束効率は 67.52% となった。また、同時計数された  $e^+$ ,  $e^-$  対のエネルギーの和のスペクトルを Fig.4 に示す。

## 4. 設計結果と考察

設計結果一覧を Table.1 に示す。 $D(^3\text{He}, \gamma)^5\text{Li}$  反応による 16.6MeV  $\gamma$  線に対し、検出効率 1.5% 程度、エネルギー分解能 2.0% 程度 (シンチレータ等の固有のエネルギー分解能は含まない。) が得られ、また、かなりのコンパクト化が実現されており、JT-60U 級実験装置への適用も十分可能だと思われる。また、96.8% の  $\gamma$  線が Pb 箔中で相互作用せずに透過するので、多段構造にすることで、偶然計数を抑えつつ、検出効率を稼ぐことが出来る。例えば、5 段では 7.1%、10 段では 13.1% が得られる。

### 4.1 低エネルギー $\gamma$ 線の除去について

十分なシグナル  $\gamma$  線 (16.6MeV  $\gamma$  線) の計数率を得る為には、中性子だけでなく、低エネルギー 2 次  $\gamma$  線の影響をも抑える必要がある。特に、電子用シンチレータには、低エネルギー  $\gamma$  線によるコンプトン電子が多数入射するので、2 次  $\gamma$  線の影響が深刻である。従って、カットオフエネルギー以下の電子がシンチレータに到達出来ないように、カットオフエネルギーの電子のラーマ半径の幅を持つ矩形の磁場を Fig.5 のように追加した。磁場強度 1.0T、カットオフエネルギーが 1MeV, 2MeV, 3MeV の場合について計算を行なった。Fig.6 に示したように、低エネルギーの電子のみが除去されていることが判る。この磁場制御の効果を調べる為、同時計数により検出されたシグナル  $\gamma$  線の計数率とカットオフエネルギー以上の 2 次  $\gamma$  線強度の比をとり、この比を、磁場制御しない場合の比で規格化した値を FOM とおく。FOM は、シグナル  $\gamma$  線の最大計数率に比例する。ANISN を用いて計算した ITER 体系における 2 次  $\gamma$  線のスペクトル (Fig.7) を用いて、FOM を評価したところ、シグナル  $\gamma$  線の全計数率に占める割合を 2.5 倍程度向上できることが分かった。(Table.2 参照。)

## 5. 結論

核融合  $\gamma$  線計測の為の、対生成磁気スペクトロメーターの概念設計を行ない、特に、コンパクトで、かつ、高 S/N 比を実現する磁場配置を考案した。その結果、現有の核融合実験装置で試みられているシンチレータ法に比べて、遜色のない検出器性能が達成でき、十分実機への適用も可能であることが示された。また、S/N 比や耐放射線性の観点から、ITER 等の核融合実験炉への適用において、より有利になると考えられる。

参考文献

- [1] S.S.Medley, F.E.Cecil, D.Cole, M.A.Conway, and F.J.Wilkinson, III, "Fusion gamma diagnostics", Rev.Sci.Instrum. 56, 975 (1985).  
 [2] W.R.Nelson, H.Hirayama, D.W.O.Rogers, "EGS4 Code System", SLAC-265(1985).

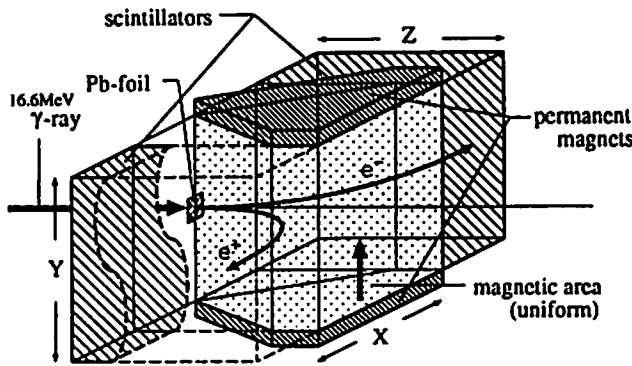


Fig.1. 対生成磁気スペクトロメーターの基本構造。

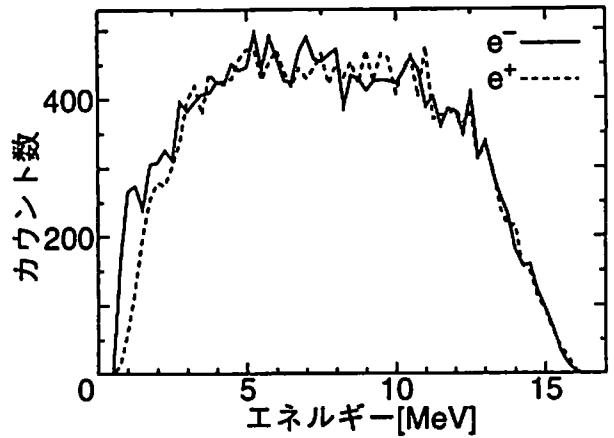


Fig.2. 変換電子, 陽電子のスペクトル。

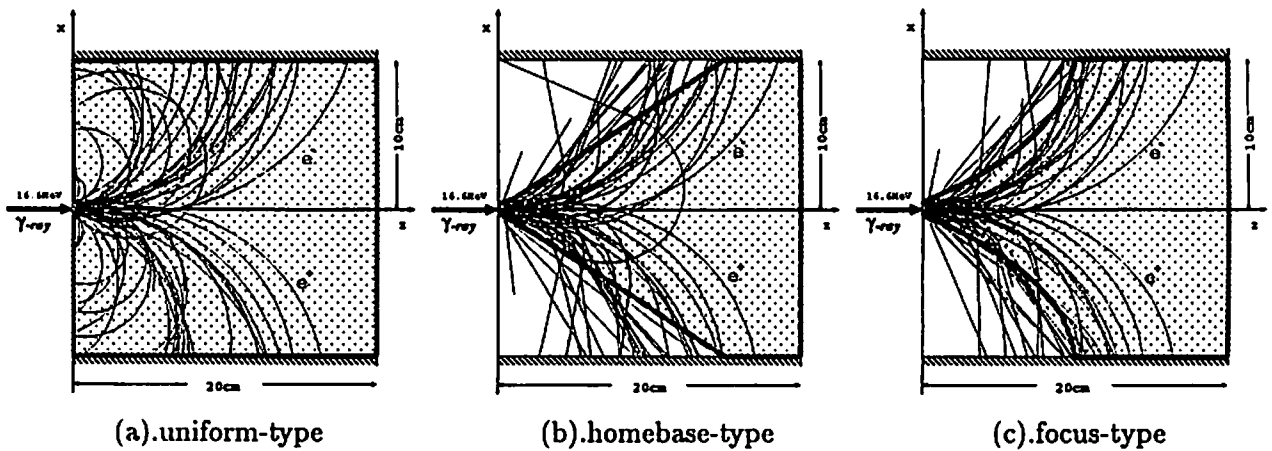


Fig.3. 電子, 陽電子の飛跡。Fig.1を上から見たもので, 磁場領域には網かけしてある。

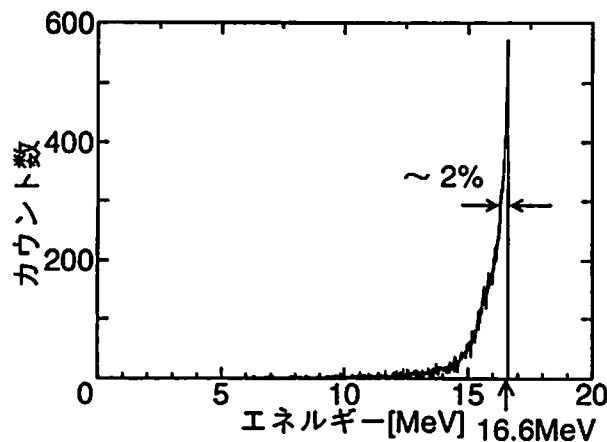
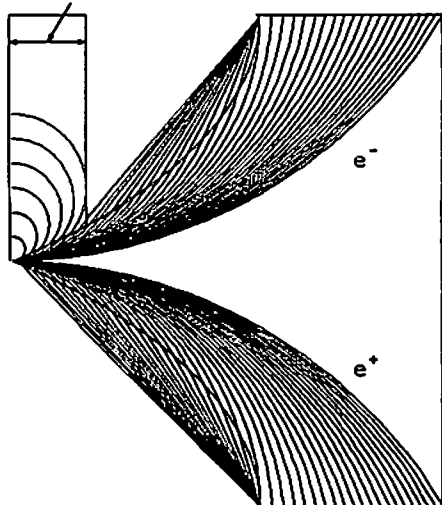


Fig.4. 同時計数された電子, 陽電子のエネルギーの和。

	uniform-type	homebase-type	focus-type	focus-type
magnetic field strength [T]	0.3			1.0
size of magnetic area(X,Y,Z in [cm])	(20.0,17.9,20.0)			(6.0,5.4,6.0)
sensitive area of scintillator [cm <sup>2</sup> ]	357.6			32.2
collection efficiency of magnet [%]	37.47	68.26	72.25	67.52
total detection efficiency [%]	0.78	1.42	1.50	1.41
energy resolution [%]	2.11	1.66	1.96	1.96

Table.1. 設計結果一覧。(X,Y,Z)は、Fig.1中に示した。

カットオフエネルギーのラーマ半径



cut off energy	Without	1MeV	2MeV	3MeV
collection efficiency	67.52%	66.00%	61.93%	58.88%
FOM for DD	1.00	2.61	2.51	2.77
FOM for DT	1.00	1.62	1.72	1.90

Fig.5. 低エネルギーの電子を除去する磁場制御の概念図。

Table.2. カットオフエネルギーに対する FOM の値。

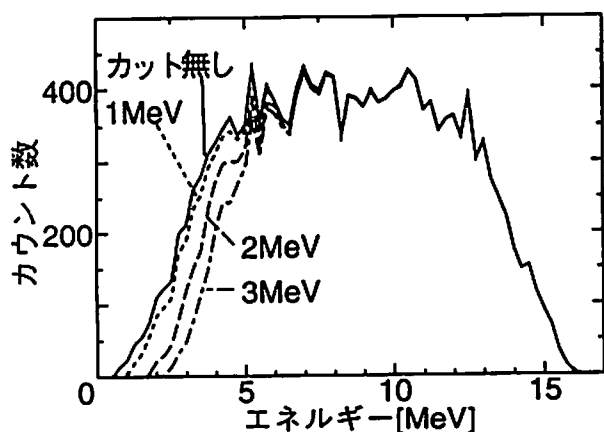


Fig.6. 検出電子のスペクトル。

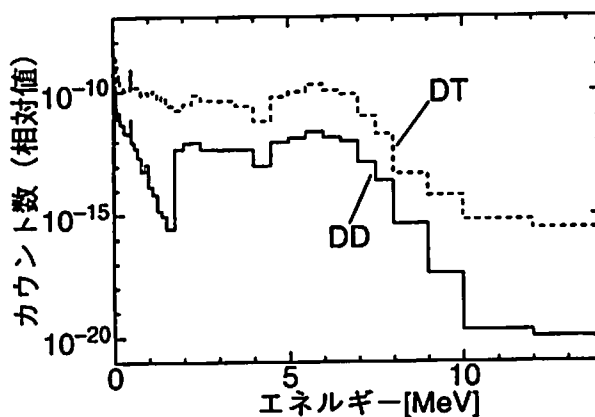


Fig.7. ITER 体系における二次γ線のスペクトル。

# 通気型電離箱の電離効率の計算

動燃・大洗 鳥居建男、野崎達夫、安藤秀樹

## Calculations of Ionization Efficiency of Gas-Flow Type Ionization Chamber

Tatsuo TORII, Tatsuo NOZAKI, Hideki ANDO

O-arai Engineering Center

Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

4002 Narita, O-arai-machi, Ibaraki-ken, 311-13, JAPAN

In order to monitor whether there exist unexpected effluence of radioactive gases at working places and waste gas systems in nuclear facilities, a gas-flow type ionization chamber is often used for measuring concentration of radioactive gas. However the ionization efficiency must be known to evaluate concentration of gas from measured ionization current. This paper presents the calculation of ionization efficiency by using EGS4 code for a cylindrical chamber. The results calculated were in good agreement with those obtained by experiments. Furthermore it became possible to evaluate ionization efficiency for radioactive gases with short half lives, which were hard to obtain by experiments.

### 1. はじめに

原子力施設の放射線作業管理や放出放射能管理において、作業環境やガスシステムの異常監視を目的として、通気型電離箱等を用いてガスを捕集または通気することにより放射性ガス濃度を測定することが多い。この通気型電離箱に1.5ℓ円筒形電離箱が広く用いられているが、電離箱の電離電流から放射能濃度を評価するにあたって、いくつかの問題点があった。第1に、校正データが得られている核種は限られており、短半減期核種等、その他の核種に対する電離効率の取得は困難である。第2に、空気以外の雰囲気ガス（担体）での電離効率、例えばアルゴン雰囲気での電離効率に関する実験データは極めて少なく、高速炉のカバーガス系等のアルゴンガスシステムでは電離箱により直接濃度評価ができない、などである。

そこで、1.5ℓ円筒形電離箱をモデル化し、光子・電子輸送モンテカルロ計算コード EGS4<sup>1)</sup>を用いて種々の放射性ガスに対する電離効率及び換算係数を計算するとともに、実験により電離効率が得られている核種については実験値と比較した。なお、低エネルギー電子についての輸送計算の必要から、本計算ではPRESTA<sup>2)</sup>を使用した。

## 2. ガス捕集用電離箱とそのモデル化

計算対象とした電離箱は、図1に示す円筒形電離箱（ステンレス鋼製、有効容積1,500 cm<sup>3</sup>）であり、放射性ガスのサンプリングや移動型ガスモニタのみならず、ガスモニタ校正用の基準電離箱としても用いられているものである。

この電離箱の電離領域に乱数を用いて任意の位置、方向、及びエネルギースペクトルを考慮した電子（β線、内部転換電子、Auger電子）を発生させるモデルを作成し、電離箱の電離領域内での吸収エネルギーを計算した。β線エネルギースペクトルは、下記のFermi関数を用いた理論式で与え、放出されるβ線の運動エネルギーTをサンプリング法により決定した<sup>3)</sup>。

$$P(T) = k C(T) F(\pm Z, W) p W(T_0 - T)^2 dT$$

ここで、C(T)はスペクトル補正因子、F(±Z, W)はFermi関数、pは放出される電子（陽電子）の運動量、Wは運動エネルギーTの全エネルギーと静止エネルギーとの相対比、T<sub>0</sub>はベータ線の最大エネルギー（MeV）である。また、内部転換電子及びAuger電子については、文献値<sup>4)</sup>を基に単色エネルギーの電子を放出させることとした。計算対象核種は主要な放射性ガスである8核種（<sup>3</sup>H, <sup>14</sup>C, <sup>13</sup>N, <sup>15</sup>O, <sup>41</sup>Ar, <sup>85</sup>Kr, <sup>133</sup>Xe, <sup>135</sup>Xe）であり、それぞれ空気及びアルゴン雰囲気（20℃、1気圧）について計算した。

電離効率ηは、電離領域内に放出された放射線の内、雰囲気ガスに付与されるエネルギーであることから、次式で与えられる。

$$\eta = \left( \sum_{l=1}^L \alpha_l \left( \sum_{h=1}^H E_h^{dep} \right)_l \right) / \left( \sum_{l=1}^L \alpha_l \left( \sum_{h=1}^H E_h^{in} \right)_l \right)$$

ここで、Hは放射線の発生数、E<sup>dep</sup><sub>h</sub>は電離箱内での吸収エネルギーであり、E<sup>in</sup><sub>h</sub>は電離箱内に投入された放射線のエネルギー、またα<sub>l</sub>は放出モードlの放出率である。ヒストリー数は各放出モードに対して10万とし、光子・電子の運動エネルギーの下限値を10 keVとしてそれ以上のものについて追跡した。エネルギーが10 keV以下の内部転換電子やAuger電子については、電離箱内で全て吸収されるとした。

さらに、次式により電離電流から放射能濃度への換算係数Kを求めた。



$$K = W / (V \cdot 1.602 \times 10^{-13} \epsilon^{dep})$$

ここで、 $W$ は気体の $W$ 値(eV)、 $V$ は電離箱の容積 (cm<sup>3</sup>)、 $\epsilon^{dep}$ は1崩壊あたりの平均吸収エネルギー(MeV)である。

### 3. 計算結果と考察

図2に、空気雰囲気での電離箱の電離効率の計算結果を示す。また、比較のため、実ガス校正により電離効率の実験値<sup>5,6,8-10)</sup>が得られている<sup>3</sup>H、<sup>14</sup>C、<sup>41</sup>Ar、<sup>85</sup>Kr、<sup>133</sup>Xeの5核種についてもその結果を記した。図から明らかなように、計算値は実験値と良く一致し、本計算は実験を良く再現していることが分かった。このことから、校正実験が困難な核種についても電離効率の推定が可能となり、実ガスを用いることなく濃度評価できる見通しを得た。また、<sup>133</sup>Xeの電離効率は、エネルギーの割に高くなることが知られていたが、 $\beta$ 線のみを考慮した場合、茅野等の計算値<sup>7)</sup>と同様に電離効率は30数%と低いのに対して、内部転換電子も含めて計算した場合は実験値とほぼ一致し、これは内部転換電子によるものであることが明らかになった。さらに、アルゴン雰囲気での計算結果は空気に比べて換算係数が約20~30%低い値を示し、感度が向上することが分かった(表1参照)。これは、空気とアルゴンの阻止能及び $W$ 値の違いによるものと考えられる。

なお、電子の場合と同様に、 $\gamma$ 線の電離効率への寄与についても計算したが、約0.1%程度と無視できる程度であった。

### 参考文献

- 1) W. R. Nelson, H. Hirayama & D.W.O. Rogers : SLAC-Report-265 (1985)
- 2) A. F. Bielajew & D.W.O. Rogers : Nucl. Instr. Meth., **B18**, 165 (1987)
- 3) S. Tanaka et al. : Int. J. Appl. Radiat. and Isotopes (to be published)
- 4) ICRP Pub. 38 : Radionuclide Transformations (1983)
- 5) 加藤 他 : 応用物理、**32**、380 (1963)
- 6) 岩田 他 : 保健物理、**8**、161 (1973)
- 7) 茅野 他 : 日本原子力学会誌、**21(2)**、191 (1979)
- 8) 原子力安全研究協会 : 環境放射能及び環境放射線の計測に関する研究 (1980)
- 9) 武田、鳥居 他 : 日本保健物理学会第18回研究発表会要旨集 (1983)
- 10) 吉田 他 : RADIOISOTOPES, **42**, 452 (1993)

表1 空気及びアルゴン雰囲気中での各種放射性ガスに対する換算係数

核種	換算係数 (Bq/cm <sup>3</sup> /A)	
	空気雰囲気	アルゴン雰囲気
H-3	2.48X10 <sup>13</sup>	1.93X10 <sup>13</sup>
C-14	4.60X10 <sup>12</sup>	3.27X10 <sup>12</sup>
N-13	5.31X10 <sup>12</sup>	— (*)
O-15	6.02X10 <sup>12</sup>	— (*)
Ar-41	5.25X10 <sup>12</sup>	3.54X10 <sup>12</sup>
Kr-85	4.58X10 <sup>12</sup>	3.08X10 <sup>12</sup>
Xe-133	2.33X10 <sup>12</sup>	1.65X10 <sup>12</sup>
Xe-135	2.86X10 <sup>12</sup>	1.93X10 <sup>12</sup>

\* 想定されるAr雰囲気の場合において<sup>13</sup>N,<sup>15</sup>Oの生成は考えられないため、計算しなかった。

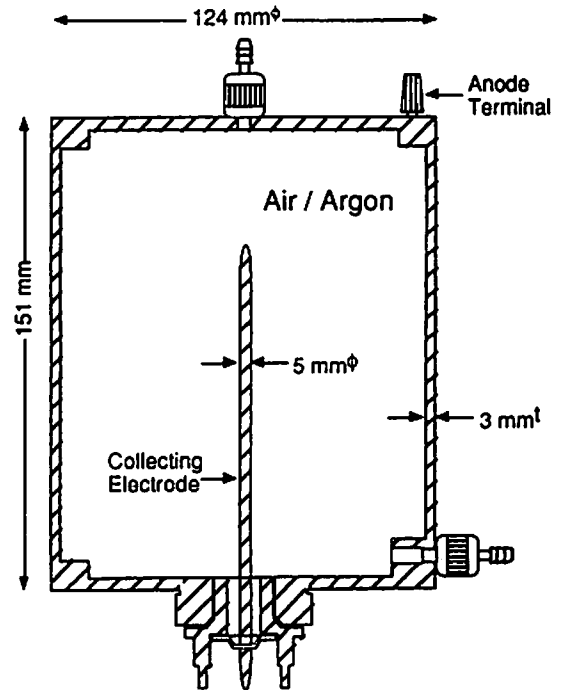


図1 1.5 l 円筒形電離箱

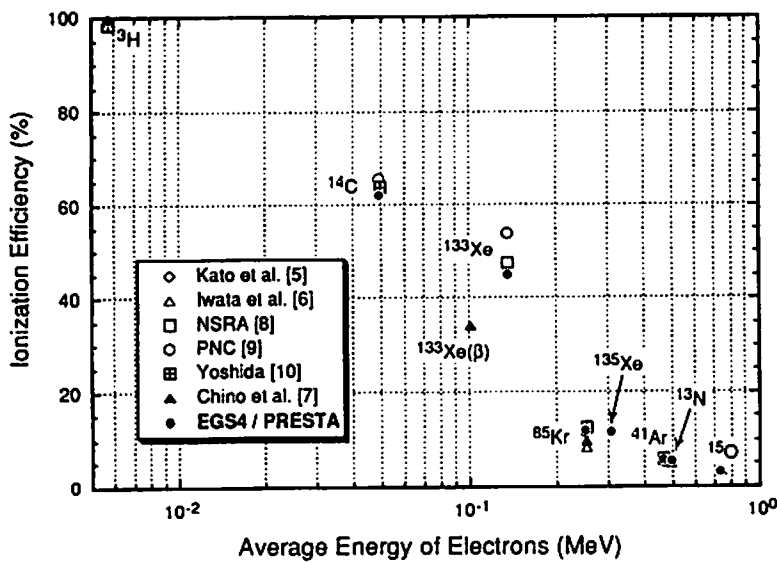


図2 空気雰囲気における電離箱の電離効率

# TLDを用いた光子吸収線量測定における境界面効果の影響

船研<sup>A</sup>、原研<sup>B</sup>、高エネ研<sup>C</sup> 成山展照<sup>A</sup> 田中俊一<sup>B</sup> 浅野芳裕<sup>B</sup> 中根佳弘<sup>B</sup>  
平山英夫<sup>C</sup> 伴秀一<sup>C</sup> 中島宏<sup>B</sup> 波戸芳仁<sup>C</sup>

Influence of Interface Effect in the Measurement of Photon Absorbed Dose using TLDs

Nobuteru Nariyama

Ship Research Institute

6-38-1 Shinkawa, Mitaka, Tokyo, 181 Japan

Shun-ichi Tanaka, Yoshihiro Asano, Yoshihiro Nakane, Hiroshi Nakashima

Japan Atomic Energy Research Institute

Tokai, Naka, Ibaraki, 319-11 Japan

Hideo Hirayama, Syuichi Ban, Yoshihito Namito

National Laboratory for High Energy Physics

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305 Japan

The absorbed dose in the TLDs between various thin foils was measured in the energy region of 30 keV to 200 keV. The results were compared with the values based on the cavity theory, which were 40% smaller than the measured in high Z material. The discrepancy is attributed to the accuracy of the attenuation of electron flux in the cavity theory because the attenuation is different from the calculated with EGS4 which agreed better with the measured.

## 1. はじめに

光子照射されたある媒質内の吸収線量を測定する場合、媒質中に挿入した線量計の物質は媒質と通常異なる。この時、媒質内の吸収線量 $D_m$ は線量計内の吸収線量 $D_c$ から以下の関係式を用いて求められる。

$$D_m = \frac{D_c}{f} \quad (1)$$

$f$ の値は光子エネルギー、線量計の材料、形状、密度、媒質の種類などに依存し、通常空洞理論によって与えられる。中でもTLD（熱ルミネッセンス線量計）のような固体線量計の場合、基本的にBurkin<sup>(1)</sup>の理論が従来適用されてきた。この理論は空洞、つまり線量計が媒質中からの

2次電子の飛程に比べて小さい場合と大きい場合に分け、一般の大きさの場合には各々の成分和とするものである。つまり、小さい空洞の  $f$  を  $f_s$ 、大きい空洞の  $f$  を  $f_l$  とすると、

$$f(E_\gamma) = \bar{d}(E_\gamma)f_s(E_\gamma) + (1 - \bar{d}(E_\gamma))f_l(E_\gamma) \quad (2)$$

と表す。 $\bar{d}(E_\gamma)$  は媒質からの電子による線量が電子束減衰によってどれだけ減少したかを表す関数である。このように、周りの媒質から境界面を通してやってくる電子の影響を調べることは吸収線量を求める上で重要である。そこで、こうした境界面効果 (Interface Effect<sup>(2)</sup>) の影響と空洞理論の関係を調べるため、TLDを用いて低エネルギー X線照射下の各種媒質中での吸収線量測定実験および空洞理論とEGS4による解析を行った。

## 2. 実験

実験は、原研の放射線標準施設棟にて X線発生装置を用いて行った。LiF, CaSO<sub>4</sub>:Tm の 2 種の TLD を Z の異なる各種のホイルではさんで照射し、その吸収線量を測定することによって  $f$  を求めた。LiF TLD の形状は 3.2x3.2x0.38mm、CaSO<sub>4</sub>:Tm TLD は厚さ 100 μm のポリイミドフィルム上に粒径 90 μm の素子を付着させたものである。ホイルの寸法は表 1 に示す。X線の実効エネルギーは 32.1、48.6、80.0、161、203 keV で、線質指標 (実効エネルギーを最大エネルギーで除した割合) は 0.8 である。照射した線量は、 $8.73 \times 10^{-3}$  Gy 程度であり、TLD の読み取りには Harshaw Model 2000 を用いた。各 TLD に対する実験結果を図 1、2 に示す。

## 3. 計算

空洞理論の計算において、小さい空洞の場合電子に対する  $f_s$  は

$$f_s(T_0) = \frac{\rho_m}{T_0} \int_{\Delta}^{T_0} \phi_m(T_0, T) S_c(T, \Delta) dT \quad (3)$$

で表される。ここで、 $\rho_m$  は密度、 $\phi_m(T_0, T)$  は 2 次電子スペクトル、 $S_c(T, \Delta)$  は空洞の restricted 阻止能、 $\Delta$  はカットオフエネルギーである。したがって、エネルギー  $E_\gamma$  の光子によって発生する電子の 1 次電子スペクトルを  $A(E, T)$  とすると、ガンマ線に対する  $f_s$  は

$$f_s(E_\gamma) = \frac{\int_{\Delta}^{E_\gamma} A(E_\gamma, T_0) T_0 f_s(T_0) dT_0}{\int_{\Delta}^{E_\gamma} A(E_\gamma, T_0) T_0 dT_0} \quad (4)$$

となる<sup>(3)</sup>。一方、大きい空洞に対する  $f_l$  は

$$f_i(E_\gamma) = \frac{\left(\frac{\mu_{en}(E_\gamma)}{\rho}\right)_m}{\left(\frac{\mu_{en}(E_\gamma)}{\rho}\right)_c} \quad (5)$$

と表される。ここで、 $(\mu_{en}(E_\gamma)/\rho)_m$ 、 $(\mu_{en}(E_\gamma)/\rho)_c$ は各々媒質と空洞の質量エネルギー吸収係数を表す。一般の大きさの場合、電子に対する重み関数  $d(T_0)$  を

$$d(T_0) = \frac{\int_0^g e^{-\beta(T_0)x} dx}{\int_0^g dx} \quad (6)$$

とすると、式(2)の光子に対する重み関数  $\bar{d}(E_\gamma)$  は

$$\bar{d}(E_\gamma) = \frac{\int_{\Delta}^{E_\gamma} \phi(E_\gamma, T_0) T_0 d(T_0) dT_0}{\int_{\Delta}^{E_\gamma} \phi(E_\gamma, T_0) T_0 dT_0} \quad (7)$$

と定義される。ただし、 $g$ は空洞内の平均行程、 $\beta(T)$ は電子が指数関数的に減衰すると仮定した場合の係数で、その値は電子の飛程を  $R_e$  としたとき、

$$e^{-\beta(T_0)R_e(T_0)} = 0.01 \quad (8)$$

から計算される。本研究では、以上の式を用いて  $f(E)$  の計算を行った。ただし、2次電子スペクトルの計算はCSDA(連続減速近似)に基づき、空洞内の行程  $g$  は  $4S/V$  ( $S$ は表面積、 $V$ は体積)に、カットオフエネルギー  $\Delta$  は  $20 \text{ keV}$  とおいた。

EGS4の計算においては、1次元平板体系で  $ECUT = 10 \text{ keV}$ 、 $PCUT = 1 \text{ keV}$  にて計算を行った。PRESTAを用い、K-X線も考慮した。統計誤差は4~5%である。金箔の場合には、K吸収端が  $80.7 \text{ keV}$  にあり、それ以下の光子エネルギーが光電効果を生ずるとその光子は `discard` され電子の輸送が計算されないため、 $161$ 、 $203 \text{ keV}$  の入射エネルギーに対してのみ計算を行った。

両者の計算結果を図1、2に示す。EGS4と実験値はほぼ一致したが、空洞理論の結果は銅、金媒質中のエネルギー  $80 \text{ keV}$  付近において40%ほど過小評価となった。

#### 4. 考察

空洞理論に基づく計算値が実験値と一致しない理由を調べるため、まず空洞理論式自体の適用性を考察した。媒質が銅や金の場合、媒質から空洞に入射する電子束は空洞内で発生する電

子束より大きい。このような場合の式(2)の適用性を調べるため、式(1)を以下のように変形した。

$$f(E) = \frac{D_c}{D_m} = \frac{D_{c,m}}{D_m} + \frac{D_{c,c}}{D_m} \quad (9)$$

ここで、 $D_{c,m}$ 、 $D_{c,c}$ はそれぞれ媒質から空洞に入射する電子束と空洞中で発生する電子束による吸収線量を表す。また、式(2)も以下のように書きかえることができる。

$$f(E) = \bar{d}f_s(E) + \bar{d}'f_l(E) \quad (10)$$

$$= \bar{d} \frac{D'_{c,m}}{D_m} + \bar{d}' \frac{D'_{c,c}}{D_m} \quad (11)$$

$D'_{c,m}$ 、 $D'_{c,c}$ はそれぞれ空洞中での電子減衰を無視した場合の吸収線量を表す。式(9)と(11)を比較してみると、物理的には重み関数 $\bar{d}$ 、 $\bar{d}'$ は吸収線量 $D'_{c,m}$ 、 $D'_{c,c}$ それぞれの減少の割合を表し、これは式(6)での定義に合致することがわかった。すなわち、電子束の大小にかかわらず本空洞理論を適用できることになる。次に $\bar{d}$ 、 $\bar{d}'$ の式について検討してみた。式(11)から $\bar{d}$ は媒質中からの電子束の減衰、 $\bar{d}'$ は空洞中での電子束のビルドアップを表すから、

$$\bar{d}(E_\gamma) = \frac{\int_0^g e^{-\bar{\beta}(E_\gamma)x} dx}{\int_0^g dx} \quad (12),$$

$$\bar{d}'(E_\gamma) = \frac{\int_0^g (1 - e^{-\bar{\beta}(E_\gamma)x}) dx}{\int_0^g dx} \quad (13).$$

のように表される<sup>(4)</sup>。ただし簡単のため、 $\bar{d}(E_\gamma)$ は実効的な $\beta$ を使って電子に対する重み関数 $d$ に還元されている。この式(12)、(13)において、式自体に電子束の大小は入っていないが、電子スペクトルが違ってくると電子に対する実効的な減衰係数 $\beta$ の値に同じ値を適用できないことがわかった。またこの場合、 $\bar{d} + \bar{d}' \neq 1$ となり、Burlinの理論に矛盾することも明らかになった。しかし、実際には図3のようにEGS4の計算では媒質中、空洞中の平衡状態にある電子スペクトルの相対分布に大きな違いはないので、ここでは実用上問題ないと思われる。それよりも、電子が指数関数的に減衰するとした仮定そのものが線量の減衰を精度よく計算できないことが考えられたので、EGS4を使って重み関数 $d$ の値、すなわち実際の線量を

電子束減衰なしの時の線量で割った値を計算した。その結果と空洞理論に基づく計算値との比較を表2に示す。両計算値の重み関数の違いは最大6倍ほどになり、EGS4の $f(E)$ の計算値の方が実験値をよく再現することがわかった。

その他、カットオフエネルギー $\Delta$ 、平均行程 $g$ に対する依存性についても調べた。図4は、銅、金媒質中でのLiFによる $f(E)$ の $\Delta$ 依存性を計算したものである。 $\Delta = \infty$ 、20 keVの金媒質中で違いが現れたが、銅媒質中では差はないので $d$ 以上の依存性は考えられない。また、平均行程 $g$ についても銅媒質中のLiFで調べたが、違いは見られなかった(図5)。

## 5. まとめ

薄型TLDと各種ホイルを用いることによって、低エネルギーX線に対する $f(E)$ を測定した。この結果を空洞理論に基づく計算値と比較したところ、高Z媒質中で両者が最大40%異なることがわかった。EGS4による計算は、その違いは電子に対する重み関数 $d(T_0)$ の精度に起因することを明らかにした。

## 参考文献

- 1) Burlin, T.E., "A General Theory of Cavity Ionization", Br. J. Radiol., 39, 727 (1966)
- 2) Jenkins, T.M. et al., "Monte Carlo Transport of Electrons and Photons", Plenum Press, New York, 523(1988)
- 3) Tanaka, S. and Sasamoto, N., "Gamma-ray Absorbed Dose Measurements in Media with Plural Thermoluminescent Dosimeters Having Different Atomic Numbers", J. Nucl. Sci. Tech., 22(2), 109 (1985)
- 4) Attix, F.H., "Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry", A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., New York (1986)

表1 ホイルの寸法

ホイル	寸法(mm)
Teflon	50 $\mu$ m
Al	10, 100 $\mu$ m
Cu	2.5, 50 $\mu$ m
Au	1 $\mu$ m

表2 空洞理論とEGS4による $\bar{d}(E, g)$ の比較

	LiF		Cavity		EGS4		Exp. f(E)
	$\bar{d}(E)$	f(E)	$\bar{d}(E)$	f(E)	$\bar{d}(E)$	f(E)	
48 keV	0.0032	0.0224	0.017	0.0323	0.0342		
80 keV	0.0076	0.0489	0.045	0.0828	0.0772		
	CaSO <sub>4</sub> :Tm		Cavity		EGS4		Exp. f(E)
	$\bar{d}(E)$	f(E)	$\bar{d}(E)$	f(E)	$\bar{d}(E)$	f(E)	
80 keV	0.0243	0.179	0.152	0.281	0.308		
200 keV	0.152	0.281	0.426	0.662	0.873		

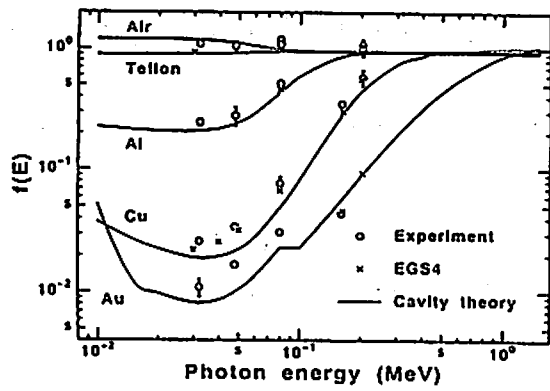


図1 LiF中の $f(E)$  実験値と計算値

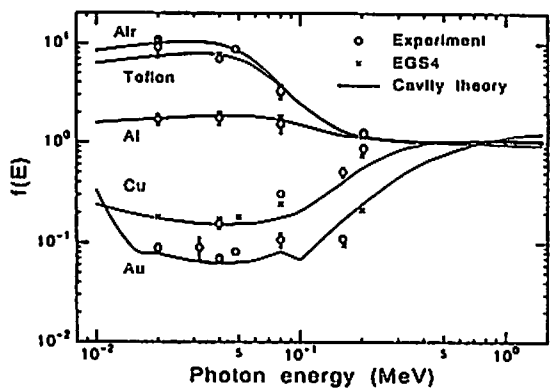


図2  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ 中の $f(E)$  実験値と計算値

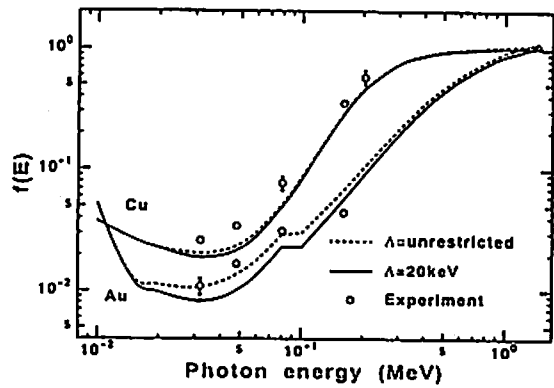


図4 LiF中における $f(E)$  の $\Delta$ 依存性

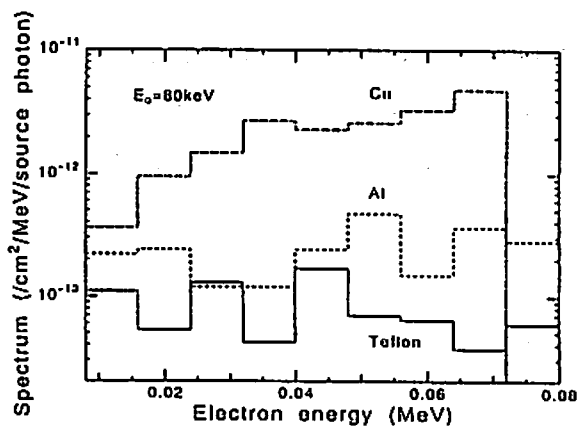


図3 80 keV光子照射時のテフロン、アルミ、銅中の電子スペクトル

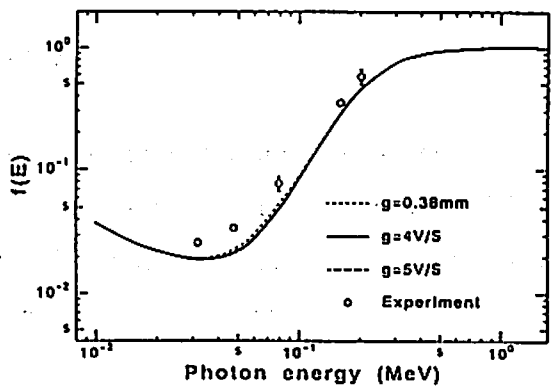


図5 銅中のLiFにおける $f(E)$  の $g$ 依存性



# 多重層 $\gamma$ 線ビルドアップ率の新しい近似表示式

^京大工 〃高エ研 秦 和夫^ 平山英夫〃

## A New Approximation Expression for Gamma Ray Buildup Factors of Multilayered Shields

KAZUO SHIN

*Kyoto University, Faculty of Engineering*

and

HIDEO HIRAYAMA

*National Laboratory for High Energy Physics*

### ABSTRACT

A new approximation expression for gamma-ray buildup factors of multilayered shields is proposed. The expression is formulated based on the vector form and treats the gamma-ray energy spectrum directly. It treats the gamma-ray attenuation by a transmission matrix and the backscattering by an albedo matrix.

Its capability of reproducing the buildup factors for multilayered shields is demonstrated by using those of double layered shields composed of water and lead at 1, 3, 6 and 10 MeV. The data of three layered shields of water, iron and lead are also very well reproduced at 1 and 10 MeV.

## 1. はじめに

$\gamma$ 線のビルドアップ率は点減衰核法のような $\gamma$ 線の簡易遮蔽設計コードの基礎をなす重要なデータである。従来単一層ビルドアップ率についてはよく研究され、近似表示式も整備されて、これらのコードに組み込まれている。実際には、多くの遮蔽体は多重層で構成されており、多重層ビルドアップ率をこれらのコードに取り込むことが求められてきた。しかしながら、現在に至るまでまだ一般的な物質の組み合わせに対して、多重層ビルドアップ率の系統的な記述が可能な表示式は与えられておらず、多重層ビルドアップ率をこれらのコードに取り込むことはできていない。

多重層ビルドアップ率については、古くから研究がなされ多くの経験式が提案されている。しかしながら、多重層体系におけるビルドアップ率の物質間変化を記述するには透過 $\gamma$ 線のエネルギースペクトルの変化を記述することが必要であり、従来のように、これを無視して単一層のビルドアップ率の組み合わせのみで表そうとする試みには限界がある。本研究ではエネルギーインデックスを持った透過マトリクスに基礎を置く、新しいタイプの表示式の提案を行う。

## 2. 近似表示式

$\gamma$ 線エネルギーを群に分割し、透過および反射確率をマトリクス表示すると、N重層（第1層  $n_1$  mfp、第2層  $n_2$  mfp、...、第N層  $n_N$  mfp）物質のビルドアップ率は次のように簡単に表示される。すなわち、各層の透過マトリクスを  $T_1$ 、 $T_2$ 、...、第N層の反射マトリクスを  $R_N$  とし、線源 $\gamma$ 線の強度ベクトルを  $S$ 、 $\gamma$ 線束から線量への換算係数ベクトルを  $C$  として、

$$B = C (I + R_N) \left( \prod_{i=1}^N T^{n_i} \right) S$$

である。これを実用的な表示式にするには、マトリクスの大きさをできるだけ小さくする必要がある。以下、マトリクスの構成法の概略を示す。

入射 $\gamma$ 線のエネルギーを  $E_0$  とし、散乱 $\gamma$ 線の分布する  $0 \sim E_0$  のエネルギー範囲を  $N (=4)$  群に分割する。体系の厚さを線源 $\gamma$ 線のエネルギー  $E_0$  での  $1$  mfpの厚さとする。この層に単位強さのエネルギー群  $l$  の $\gamma$ 線が、入射する場合を考える。ただし、平板体系では垂直入射、球体系では球の中心に点等方線源を考える。このとき体系を透過する $\gamma$ 線束  $\phi_l(E)$  をEGS4で計算して求める。次にこれを使って

$$\phi_{lj} = \int_{E_{lj}} \frac{\phi_l(E) \eta(E) dE}{\eta_{lj}}$$

を計算する。ここで、 $E_{lj}$  は  $j$  群のエネルギー域、 $\eta(E)$  は $\gamma$ 線束-線量換算係数、 $\eta_{lj}$  は  $\eta(E)$  の  $E_{lj}$  における平均値である。

次に、経験パラメータ  $\alpha, \beta, \gamma$  を導入して、

$$T_{11} = \frac{\phi_{11}}{\phi_{11}} = 1, \quad T_{12} = \alpha \frac{\phi_{21}}{\phi_{11}}, \quad T_{13} = \beta \frac{\phi_{31}}{\phi_{11}}, \quad T_{14} = \gamma \frac{\phi_{41}}{\phi_{11}}$$

を定める。

これらを使って、透過マトリクス  $T$  ( $N=4$ の場合を示す) を

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & & \\ T_{21} & T_{22} & & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{41} & T_{42} & \dots & T_{44} \end{bmatrix}$$

とするのである。同様に反射マトリクス  $R$  も定義される。

なお、線源ベクトル  $S$  と  $\gamma$  線束-線量換算係数ベクトル  $C$  は次のように定める。

$$S = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_2/\eta_1 \\ \eta_3/\eta_1 \\ \eta_4/\eta_1 \end{bmatrix}$$

### 3. 2重層および3重層ビルドアップ率への適用結果

ここで提案する近似表示式の適用例として第1層 5mfp、第2層 8mfpの水、鉛2重層平板に 1MeV および 10MeV の  $\gamma$  線が垂直入射した場合のビルドアップ率を取り上げた。ビルドアップ率のデータは EGS4 による計算値を基準とした。経験パラメータ  $\alpha, \beta, \gamma$  (物質毎に異なる) は単1層及び2重層ビルドアップ率データを同時に最もよくフィットするように最急降下法で求めた。図1、2に本表示式と EGS4 の計算結果の比較を示す。エネルギーが高くなると、水、鉛のビルドアップ率の大きさが逆転し、かつアンダーシュートするが、本方法はそれらの挙動をよく再現している。

次に、水、鉄、鉛の2物質の組み合わせの2重層体系のビルドアップ率データを再現するように各物質ごとに  $\alpha, \beta, \gamma$  の経験パラメーターを求めた上で、これらの物質よりなる3重層体系に対してビルドアップ率の計算を行い、EGS4 による直接の計算と比べたのが図3、4である。図のように体系中のビルドアップ率の複雑な変化を、本近似表示式はよく再現しているといえる。

### 4. 結論

多重層体系のビルドアップ率を記述する半経験的な近似表示式を提案した。この式は、マトリクス表示により  $\gamma$  線のエネルギー分布を直接表現したもので、一般的な物質の多重層配置にたいして適用できる特徴がある。適用例のとうり実際に多重層体系のビルドアップ率を精度よく表現しており、点減衰核コードに組み込みことにより、設計計算に適用可能であると思われる。

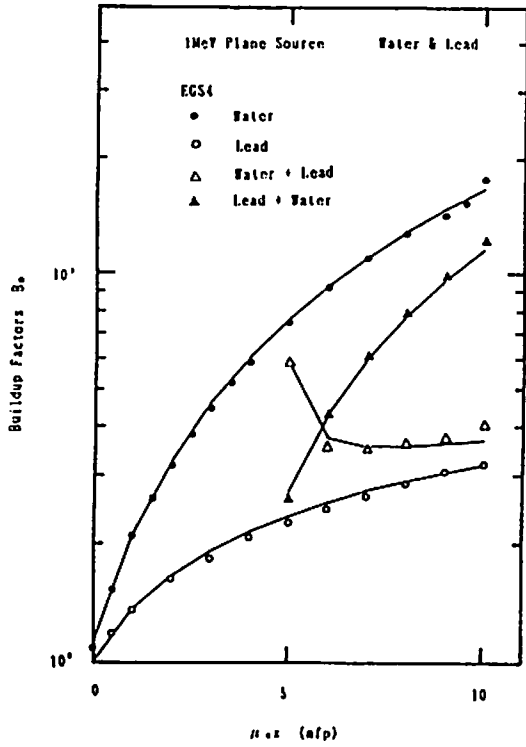


図1 1MeV  $\gamma$ 線にたいする水-鉛二重層のビルドアップ率

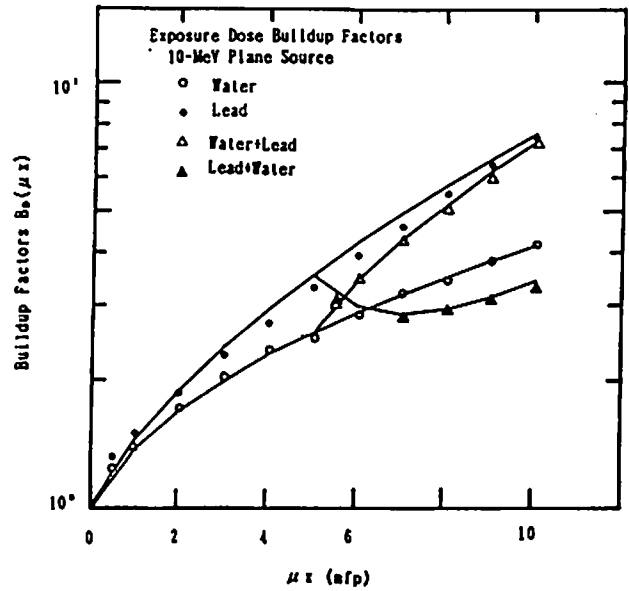


図2 10MeV  $\gamma$ 線にたいする水-鉛二重層のビルドアップ率

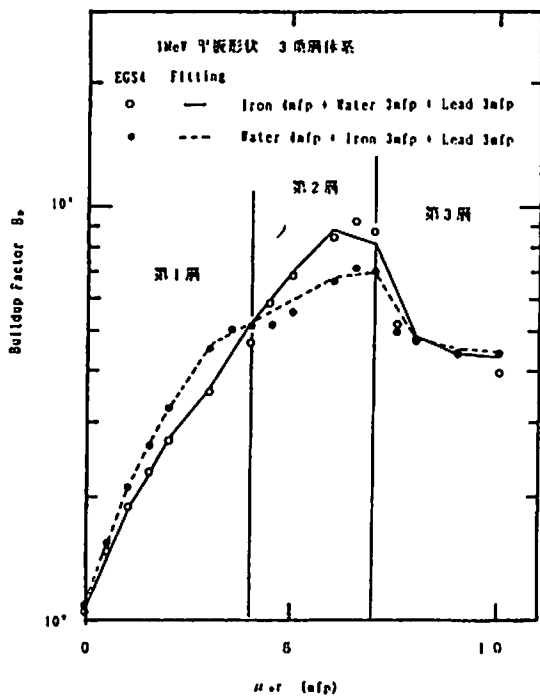


図3 1MeV  $\gamma$ 線にたいする水、鉄、鉛三重層のビルドアップ率

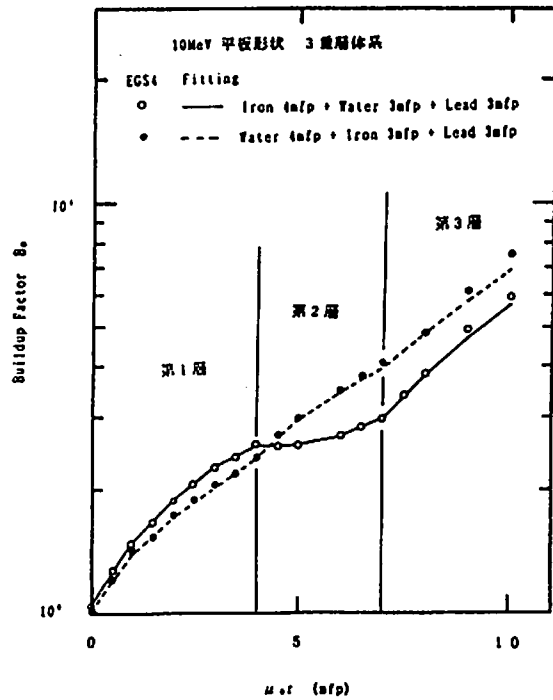


図4 10MeV  $\gamma$ 線にたいする水、鉄、鉛三重層のビルドアップ率

# EGS 4<sup>1)</sup>による光核反応評価法の開発

日本原子力研究所 笹本 宣雄  
CRC総合研究所 石塚 龍雄 石川 智之 高橋 浩

Implementation of Photo-nuclear Process in EGS-4 code

Nobuo Sasamoto

Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-11, JAPAN

Hiroshi Takahashi, Satoshi Ishikawa, Tatsuo Ishituka  
CRC Research Institute, Inc.

1-3-D17, Nakase, Mihama-ku, Chiba-shi, Chiba 261-01, JAPAN

Photo-nuclear processes play an important role in evaluating radiation shielding performance of high energy linear electron accelerators. Recently, the electron cascade code, EGS-4, is becoming the standard shield design tool, however, this code does not include the photo-nuclear processes. The new version of EGS4-PN has been developed to calculate the neutron generation yield due to the photon absorption by nuclei. The implementation of the process into the EGS-4 code, the new bias system to improve the statistical errors of the results and generation of the photo nuclear cross section will be discussed in the present report. The results of the new code agreed with the photo neutron spectra of the Monte Carlo calculation by Alsmiller et al.

## 1. はじめに

高エネルギー電子加速器の遮蔽性能を評価するうえで、光核反応による中性子の発生量を精度良く評価することが重要である。近年、電磁カスケード計算コードEGS 4を詳細な遮蔽計算に適用する傾向にあるが、本コードでは光核反応過程を取り扱うことができない。そこで、EGS 4を改良して光核反応による中性子収率が計算できるEGS 4-PNコードを作成した。本報告では、光核反応のEGS 4コードへの組み込み、必要なバイアス法の導入および光核反応断面積の作成方法について記述する。EGS 4-PNの妥当性は、Alsmiller等<sup>4)</sup>の光中性子スペクトルのモンテカルロ計算値との比較により確認した。

## 2. EGS 4への光核反応計算の組み込み

改良コードEGS 4-PNの計算フローを図1に示す。光核反応計算機能を追加するために、オリジナルのEGS 4で考慮しているコンプトン散乱、電子対生成および光電効果（これらの反応をまとめて光原子反応と記す）と並列に光核反応を追加する。計算は、はじめに乱数を用いて光子反応が、光核反応か光原子反応かを判定する。光原子反応が選ばれると、オリジナルのEGS 4のフロー図に従って計算を行う。一方、光核反応が選ばれた場合は、光核反応が発生した時点における光子のエネルギー、位置(X, Y, Z)および光子数の情報を光核反応専用ファイルに保存し、引き続きその光子エネルギーから計算

を続行する。以上のステップを光核反応が選ばれる毎に繰り返し、その都度ヒストリー・ファイルを作成する。全ヒストリーの計算が終了した段階で、作成した光核反応ヒストリー・ファイルと、別途用意する光核反応断面積から光中性子収率を計算する。

### 3. 光核反応断面積に対するバイアス法の導入

光核反応断面積  $\sigma_N$  は光原子反応断面積  $\sigma_A$  に比較してはるかに小さい。そのためサンプリングの過程で光核反応が選択される確率は極めて小さく、光中性子収率計算値の統計誤差を改善するためには膨大な計算時間を必要とする。そこで計算効率の向上のためバイアス法を導入した。これは光核反応断面積に大きなバイアスを掛け、最終的に得られた光中性子収率を同じバイアスで補正するものである。以下に導入したバイアス法のアルゴリズムを示す。

バイアス法を使用しない場合の各反応の発生確率は次のように表現される。

$$P_A = \frac{\sigma_A}{\sigma_A + \sigma_N} \quad \dots\dots\dots \text{光原子反応の発生確率}$$

$$P_N = \frac{\sigma_N}{\sigma_A + \sigma_N} \quad \dots\dots\dots \text{光核反応の発生確率}$$

ここで  $P_A \gg P_N$  である。バイアス法を使用する場合の確率を、バイアス・パラメータ  $b$  ( $b \geq 1$ ) を用いて以下のように定義する。

$$P_A' = \frac{\sigma_A}{\sigma_A + b\sigma_N} \quad \dots\dots\dots \text{光原子反応の発生確率}$$

$$P_N' = \frac{b\sigma_N}{\sigma_A + b\sigma_N} = C \cdot P_N \quad \dots\dots\dots \text{光核反応の発生確率}$$

バイアス法を使用した場合の光中性子収率は以下のように行う。

光原子反応が発生した場合の収率は

$$Y_A' = W \quad (W : \text{入射光子の収率})$$

$$Y_N' = 0$$

光核反応が発生した場合の収率は

$$Y_N' = \frac{W}{C} \quad (W : Y_A' + Y_N')$$

$$Y_A' = W \left(1 - \frac{1}{C}\right)$$

次に鉛の光核反応による中性子収率の計算を用いて、計算結果のバイアス・パラメータ依存性を調べた。図2に光中性子収率とバイアス・パラメータの相関関係を、表1にパラメータと計算所要時間の関係を示す。bが40以上で計算値に漸近し、計算時間はb=40で約1/10となることがわかった。ただしbの最適値が存在するかどうかは今後の検討課題である。

### 4. 光核断面積の作成方法

近年、エキシトンモデルと統計的蒸発モデルに基づくMCPHOTOコード<sup>2)</sup>、核内カスケードモデルに基づくPICAコード<sup>3)</sup>が開発、整備され、これらのコードを組み合わせ、1個のパイオン生成過程までの光核反応断面積の計算が可能になった。そこでこれらのコードを用いてEGS4-PNに使用する断面積ライブラリーを作成した。ターゲット物質は、<sup>12</sup>C, <sup>27</sup>Al, <sup>28</sup>Si, <sup>52</sup>Cr, <sup>55</sup>Mn, <sup>56</sup>Fe, <sup>59</sup>Ni, <sup>64</sup>Cu, <sup>98</sup>Mo, <sup>184</sup>W, <sup>207</sup>Pbである。エネルギー範囲はSpring-8を想定し7.5MeVから8GeVとし、その間を27群に分割した。入射光子エネルギーが30MeV以下のE1共

鳴領域の計算はMCPHOTOコードを、30 MeV以上の準重陽子領域および $\pi$ 中間子発生領域の計算はPICAコードをそれぞれ使用して行った。また、1 GeV以上の領域についてはPICAコードによる1 GeVでの値を8 GeVまで外挿した。一例として図3に $^{181}\text{Ta}$ の光吸収断面積を示す。

### 5. 光中性子計算手法の検証

EGS4-PNの追加機能および新たに作成した光核反応断面積の妥当性を検証するため、本コードを用いて、150 MeVの電子を厚さ $1X_0$  ( $X_0$ は放射長) および $20X_0$ の $^{181}\text{Ta}$ ターゲットに入射して発生する光中性子スペクトルを計算し、Alsmiller等のモンテカルロ計算値<sup>4)</sup>と比較した。1 $X_0$ および20 $X_0$ 体系のスペクトルを比較した図をそれぞれ図4、5に示す。得られたスペクトルは150 MeVから1 MeVの領域で急激に立ち上がり、1 MeV以上で平坦ないしは漸減の傾向を示す。この領域における両スペクトルの一致は、1 MeV以上でEGS4-PNの計算値の方が勾配が急ではあるが、全体的におおむね良好であることがわかる。

### 6. ま と め

EGS4を改良して光中性子収率計算コードEGS4-PNを作成し、電子の入射エネルギーが150 MeVまでの範囲内でその妥当性を確認した。今後、ベンチマーク計算を通してさらに高エネルギー領域への本コードの適用可能性を検討する必要がある。

### 文 献

- 1) W. R. Nelson, H. Hirayama and D. W. O. Rogers, SLAC-265(1985)
- 2) 岸田則生、角谷浩享, JABRI-memo 02-291(1990)
- 3) T. A. Gabriel, M. P. Guthrie, and W. hermann, "Instrucrtions for the Operation of the Program Pakage PICA. An Intranuclear-Cascade Calculation for High-Energy Photo-Induced Nuclear Reactions," ORNL-4687(1971)
- 4) R. G. Alsmiller, Jr., T. A. Gabriel, and M. P. Guthrie, NUCLEAR SCIENCE AND ENGINEERING: 40, 365-374(1970)

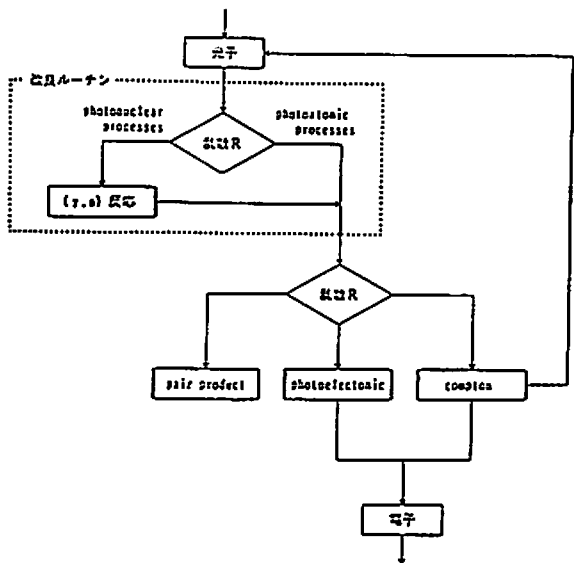


図1 EGS4-PNの計算フロー

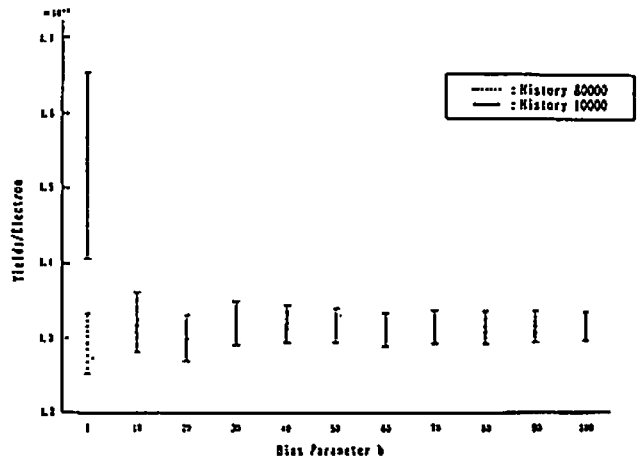


図2 光中性子収率計算値とバイアス・パラメーターの相関

表1 バイアス・パラメーターと計算時間の相関

Bias 数	History 数	光子検出回数	時間 (秒)
1	80000	1936	24319
10	10000	2617	2745

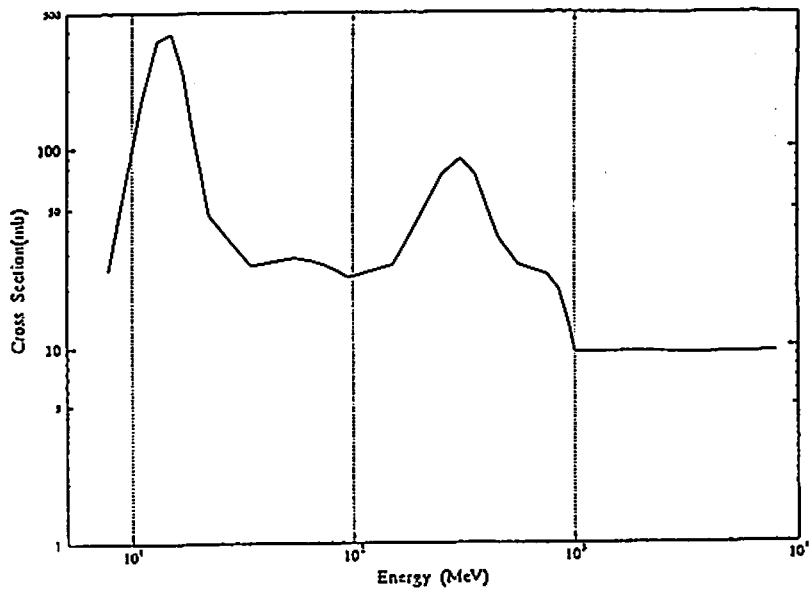


図3 MCPHOTO と PICA コードを用いて作成した<sup>181</sup>Taの光吸収断面積



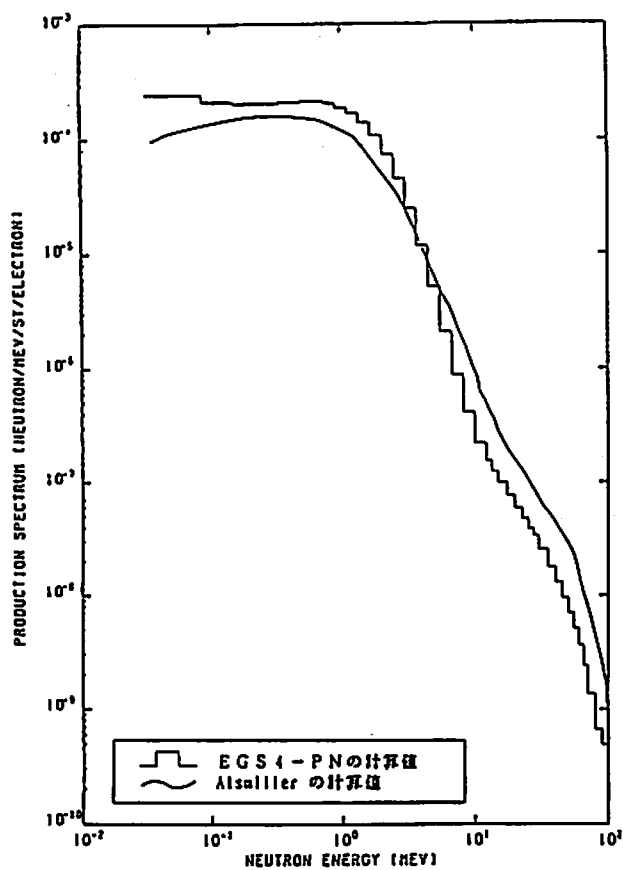


図4  $^{181}\text{Ta}$ ターゲット(1X $\circ$ )150MeV  
電子入射により発生する光中性子スペクトル

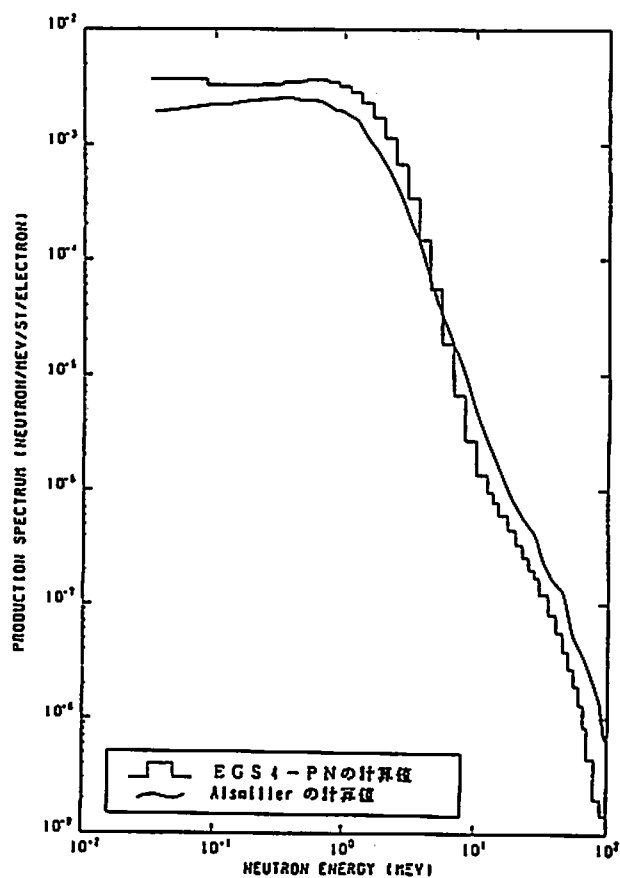


図5  $^{181}\text{Ta}$ ターゲット(20X $\circ$ )150MeV  
電子入射により発生する光中性子スペクトル

# PEGS4用光子断面積 PHOTXデータ

日本原子力研究所 坂本 幸夫

Photon Cross Section Data PHOTX for PEGS4 Code

Yukio Sakamoto

Japan Atomic Energy Research Institute

319-11 Tokai-mura, Naka-gun, Ibarakiken, Japan

Photon cross section data of PHOTX library is adopted in the point kernel shielding calculation data of ANSI and in ENDF/B-VI. In order to check the results of point kernel calculations and Sn transport calculations by EGS4 code, the same cross section data library is needed. PHOTX data for PEGS4 code contain the partial cross section for photoelectric absorption, coherent scattering and pair production. As compared with DLC-15 data used in former PEGS4 code, photoelectric absorption cross section is different in lower photon energy. In the calculations of exposure buildup factors, the attenuation coefficients are different between two photon library but difference of the exposure buildup factors for same mean free path is small.

## 1. はじめに

EGS4コードで用いる光子及び電子の断面積データはPEGS4コードで作成されるが、現在のPEGS4コードの光子の断面積データには1970年のStorm & Israelのデータ<sup>(1)</sup>が用いられている。このデータは米国オークリッジ国立研究所の放射線遮蔽情報センター(RSIC)からDLC-15データライブラリーとして公開されており<sup>(2)</sup>、原子番号が1~100の元素における光子エネルギーが1keV~100MeVの部分断面積がENDF/B形式で格納されている。このため、遮蔽計算用の定数を計算コードで作成する上で有用なデータとなっている。

その後、Hubbellらが光子の断面積を編集したデータ集がNBS-29<sup>(3)</sup>を始めとして文献に発表されている。今回取り上げたPHOTXデータは米国のNIST(National Institute of Standard and Technology、従来のNBS(National Bureau of Standard))から発表されたHubbellらの最新の光子断面積に関する編集データをRSICからDLC-136として公開されたものである<sup>(4)</sup>。PHOTXデータはANSI/ANSから公開された「工学材料に関するガンマ線減衰係数及びビルドアップ係数」の標準データ<sup>(5)</sup>として、またENDF/B-VIの光子断面積の評価済みデータとして採用されている。最新の評価済み光子断面積データをEGS4コードの計算に取り入れること、及びPHOTXデータを用いたSn多群計算やガンマ線の点減衰核計算の検証にEGS4コードを使用するためには光子断面積データの同一性が必要であることからPEGS4コードで使用できるPHOTXデータの整備を行った。本報告では新旧光子断面積データの違いを述べるとともに、低エネルギー光子に対する水、鉄、鉛の線量ビルドアップ係数の計算を巡って光子輸送計算に及ぼす影響を調べた。

## 2. PEGS4コード用PHOTXデータと新旧断面積の比較

PHOTXデータには原子番号1~100の元素に対する光子エネルギー1keV~100GeVの反応別断面積が格納されており、DLC15データに比べてエネルギー範囲が拡大されている。部分断面積としては Klein-Nishina の式で表される自由電子によるインコヒーレント散乱断面積 ( $\sigma_{KN}$ )、束縛電子によるインコヒーレント散乱断面積 ( $\sigma_{inc}$ )、コヒーレント (Rayleigh) 散乱断面積 ( $\sigma_{coh}$ ) の散乱断面積データその他、電子対生成断面積 ( $\sigma_{pair}$ ) 及び光電吸収断面積 ( $\sigma_{ph}$ ) のデータが含まれている。散乱断面積は Hubbell<sup>(6)</sup>、光電吸収断面積は Scofield<sup>(7)</sup>、及び電子対生成断面積は Hubbell<sup>(8)</sup> のデータに基づいている。散乱断面積と電子対生成断面積については Hubbellらが公表している以前の数表と違いはないが、光電吸収断面積については実験値に対する規格化を施していないため補正処理した他の数表と若干の差がある。

PEGS4コードの光子断面積に関するライブラリーデータは PGS4PEPR のファイル中に NAMELIST 文で光子エネルギーに対応した部分断面積として格納されている。電子対生成断面積は 1.022~100MeV の 17 点の光子エネルギーについて、光電吸収断面積及びコヒーレント散乱断面積は 1keV~100MeV の標準エネルギー 41 点及び 1keV 以上の K 殻・L 殻の吸収端エネルギーを挟むエネルギー点について与えられている。また、K 殻の吸収端エネルギーも格納されている。なお、インコヒーレント散乱断面積としては、自由電子に対する散乱断面積 ( $\sigma_{KN}$ ) が用いられ計算コードの中で計算される。

図 1 に酸素、鉄及び鉛の各元素での光子に対する反応別断面積と新旧断面積データの偏差を示す。インコヒーレント散乱断面積において電子の束縛状態の影響が現れるのは低エネルギー領域であり、自由電子の場合に断面積が一定値になるのに対して、束縛電子の場合には断面積が小さくなる。酸素元素では (図 1.1) 電子対生成及びコヒーレント散乱の断面積の差は 2% 以下であり、光電吸収の差は 4% 以下で 10KeV~300KeV あたりで差が大きくなっている。鉄元素の場合 (図 1.2) には、7.1keV に光電吸収の K 殻の吸収端があり、それ以下のエネルギーにおいて光電吸収断面積の違いが 3% 以下となっている。数 MeV 付近の光電吸収断面積の差が約 2% 及び 0.15MeV~3MeV 付近のコヒーレント散乱断面積の差が約 9% となっているが断面積自体が小さいので影響は小さい。鉛の元素の場合 (図 1.3) には、88keV の K 殻の吸収端の他に L 殻・M 殻の吸収端が光電吸収断面積に見られる。コヒーレント散乱断面積の違いが 0.5MeV 以上のエネルギーにおいて 30% を超えているほか、光電吸収断面積の違いが L 殻の吸収端で約 35% ある。図 1.4 は水素元素とモリブデン元素の新旧断面積の差を示している。これらの例から電子対生成の断面積の差は小さく、光電吸収の断面積が低エネルギーで差が大きいこと、コヒーレント散乱断面積の差が大きいことがわかる。

## 3. 線量ビルドアップ係数の比較

新旧の断面積データが光子の輸送計算に及ぼす影響を調べるために水、鉄及び鉛の線量ビルドアップ係数を EGS4 コードで計算した。線量ビルドアップ係数は、検出器位置まで一度も衝突することなしに到達した光子による照射線量と散乱成分を含む全光子の照射線量との比で定義される。この計算ではコヒーレント散乱を考慮していない。また、線量の算出にあたっては評価点における光子のスペク

トルに照射線量への換算係数を乗じている。昨年第2回EGS4研究会における例題UCBFSPのユーザーコードを利用し、ヒストリー数は100万で計算した。計算体系は無限媒質中に点当方線源がある場合である。

図2.1は光子エネルギーが20~150keVにおける水の線量ビルドアップ係数を線源エネルギーにおける光子の平均自由行程(mean free path)単位で示している。線はモーメント法で算出したANSI/ANSの標準データをGP近似式で再現したものであり、EGS4コードの計算結果は○+▲■●で示す。ANSI/ANSの標準データとEGS4の結果との一致は良好であり、EGS4コード計算結果における断面積データの影響は10%以下である。図2.2は鉄の線量ビルドアップ係数の比較であり、50keV~300keVのエネルギーでEGS4の計算結果は標準データのモーメント法の結果を再現しており、2つの断面積データの差は小さい。図2.3は鉛の線量ビルドアップ係数の比較であり、K殻の吸収端エネルギー(88keV)に近づくほど断面積の不連続性と蛍光X線の影響によりビルドアップ係数が大きくなっている。吸収端エネルギー以下の80keVではビルドアップ係数は1.0に近い値となっている。PALLASコードで算出した標準データはEGS4コードの計算結果とほぼ一致している。また、断面積データによる影響数%以下である。

表1に水、鉄及び鉛の2つの断面積データを用いたときの平均自由行程とDLC-15データでの実距離が10mfp相当分のときの指数減衰分の比率を示す。今回計算を行った物質での低エネルギーではPHOTXデータの平均自由行程はDLC-15の平均自由行程よりもほとんどの場合僅かに小さいため非散乱線の指数減衰の効果が大きい。

#### 4. まとめ

- (1) PEGS4コード用の光子断面積PHOTXデータを作成し、従来のDLC-15に基づく値との比較を行った。コヒーレント散乱断面積及び低エネルギー領域での光電吸収の断面積に差が見られる。
- (2) 水、鉄及び鉛のコヒーレント散乱を含まない線量ビルドアップ係数を計算し断面積データの違いによる影響を調べた。平均自由行程単位でのビルドアップ係数の違いはほとんど見られなかった。また、ANSI/ANSの標準データの信頼性が確認できた。断面積データの差は平均自由行程の大きさに現れ非散乱線強度の評価に強く影響する。

#### 参考文献

- (1) Storm, E. and Israel, H.I., Nuclear Data Tables, A7, 565-681 (1970).
- (2) RSIC Data Package DLC-15/STORM-ISRAEL.
- (3) Hubbell, J.H., Natl. Stand. Ref. Data Ser. 29 (1969)
- (4) RSIC Data Package DLC-136/PHOTX.
- (5) ANSI/ANS-6.4.3-1991.
- (6) Hubbell, J.H. et al., J. Phys. Chem. Ref. Data 4, 471 (1975) and Data 8, 69 (1979).
- (7) Scofield, J.H. et al., LLNL Rep. UCRL-51326 (1973).
- (8) Hubbell, J.H. et al., J. Phys. Chem. Ref. Data 9, 1023 (1980).

Z=8 oxygen

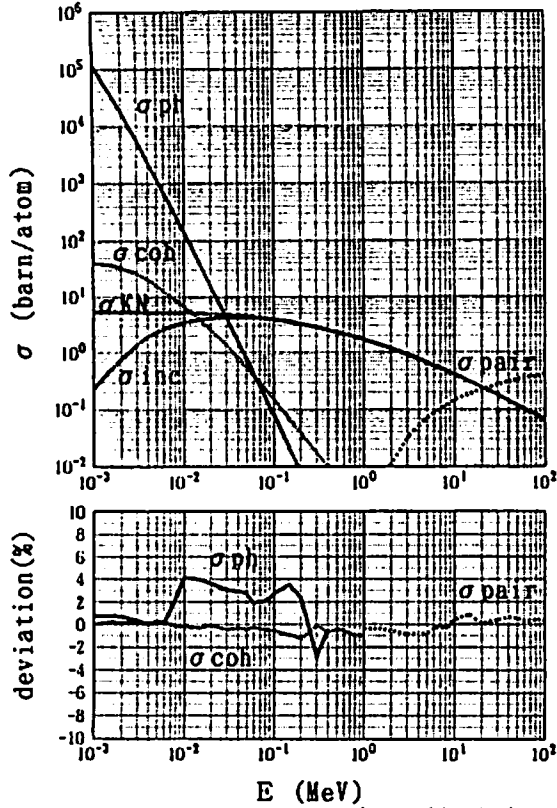


図 1.1 酸素元素の光子断面積

Z=26 iron

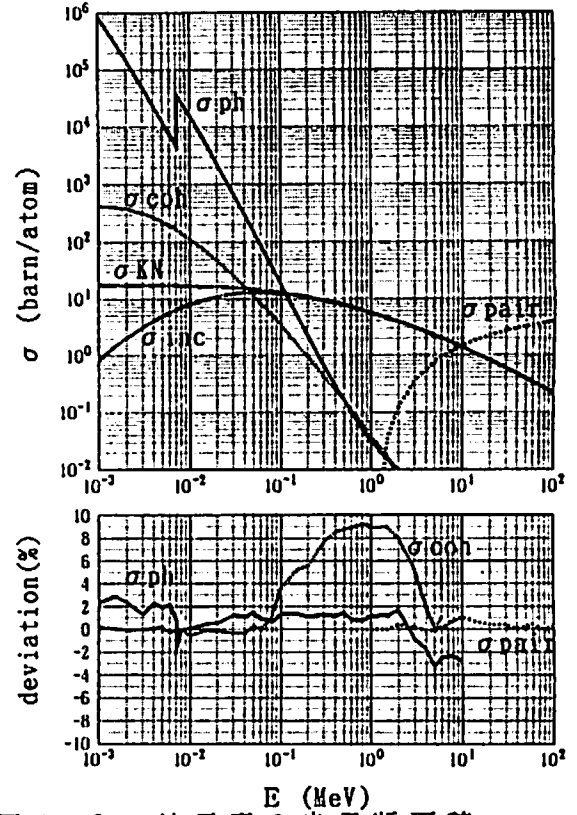


図 1.2 鉄元素の光子断面積

Z=82 lead

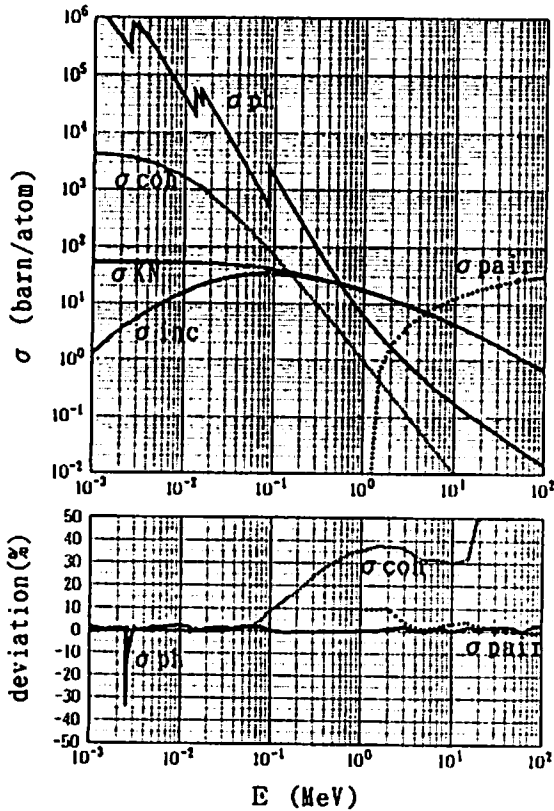
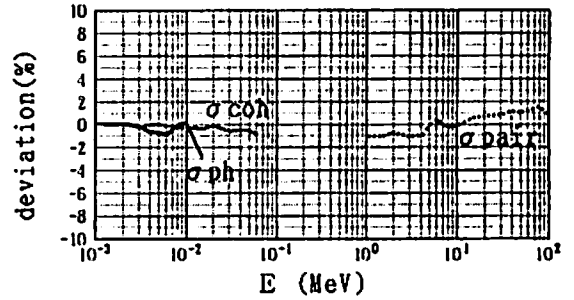


図 1.3 鉛元素の光子断面積

Z=1 hydrogen



Z=42 molybdenum

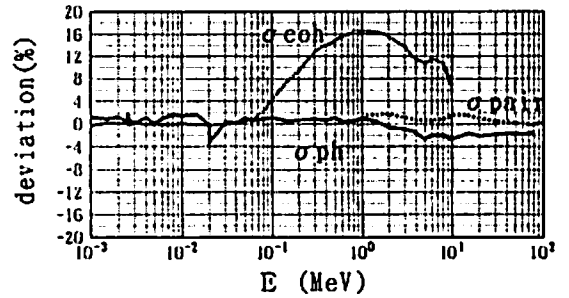


図 1.4 水素・モリブデンの光子断面積の差

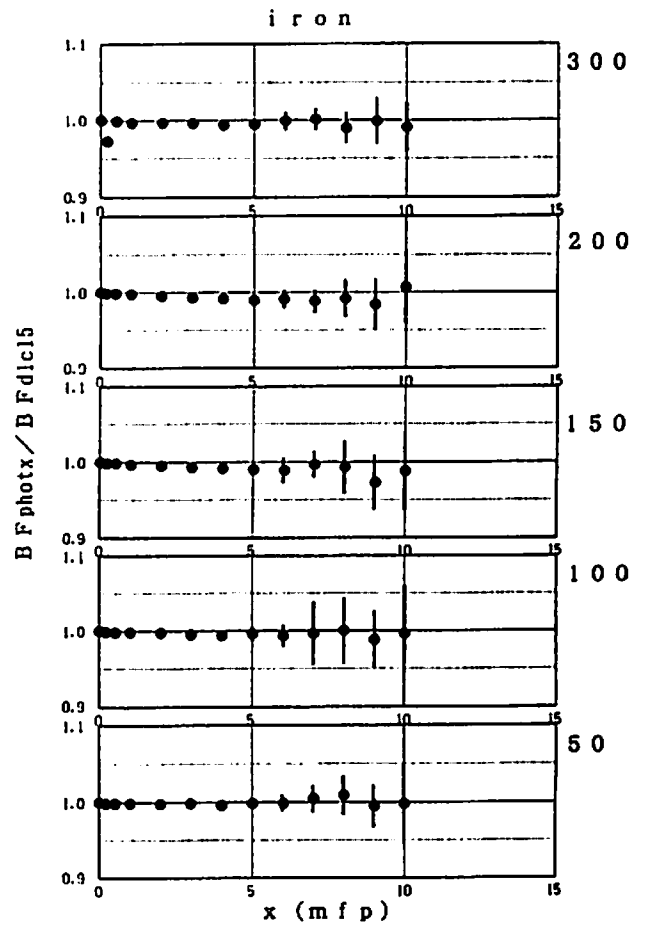
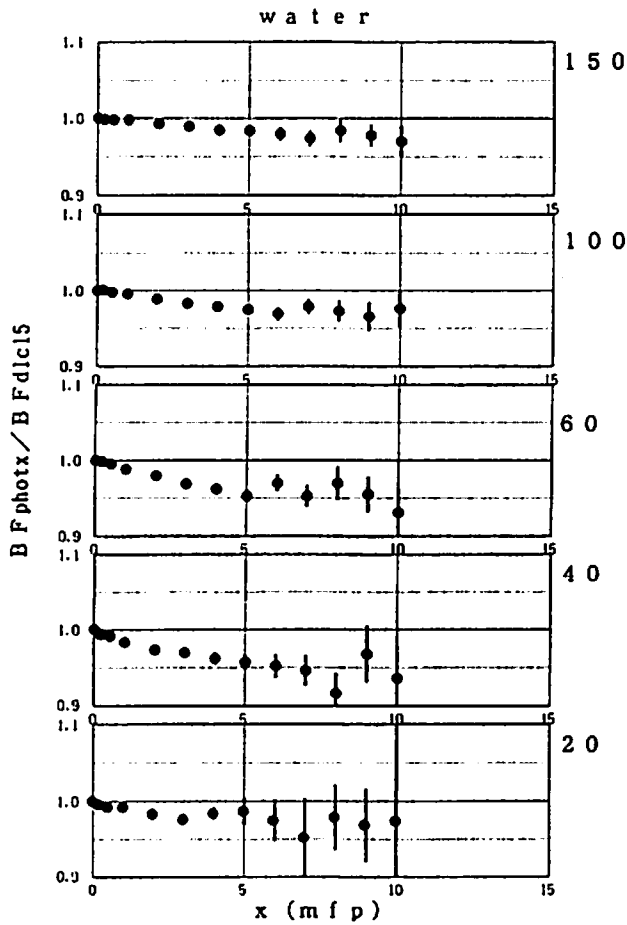
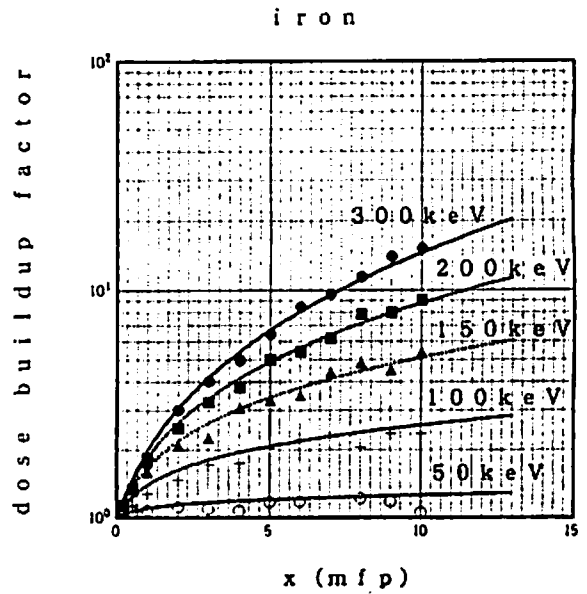
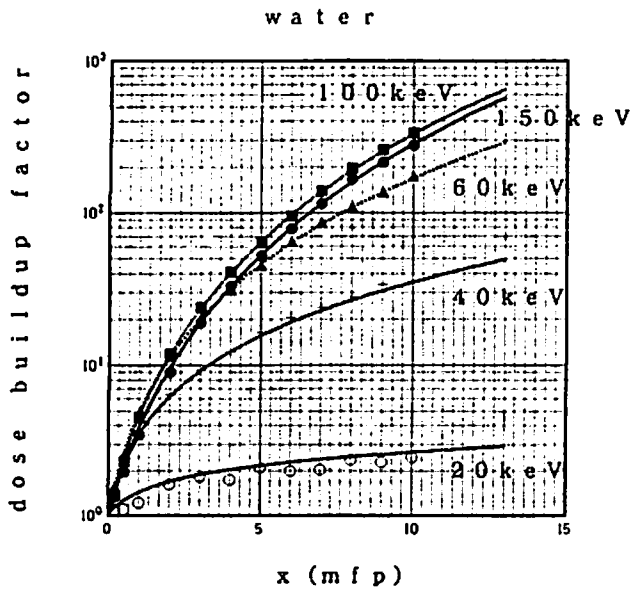


図 2.1 水の線量ビルドアップ係数

図 2.2 鉄の線量ビルドアップ係数

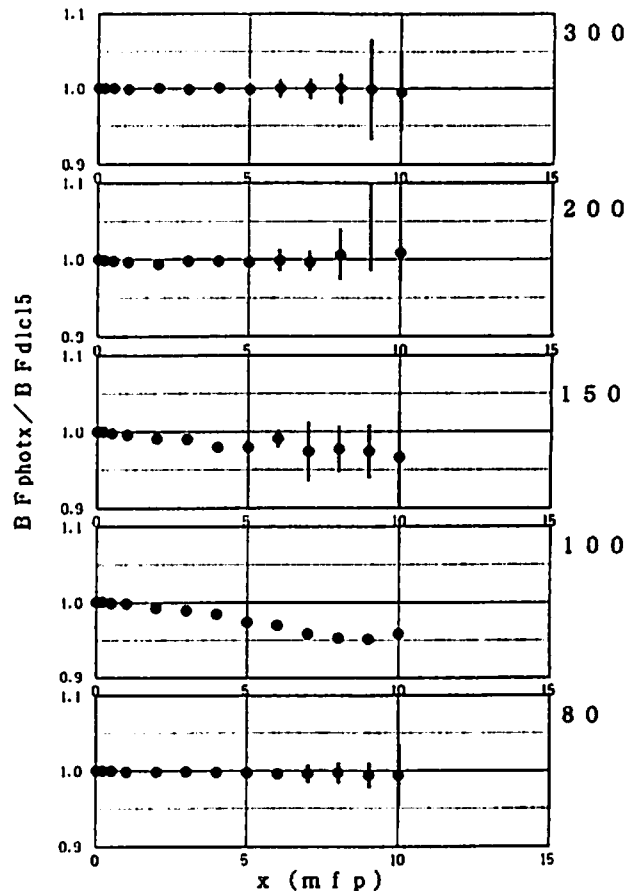
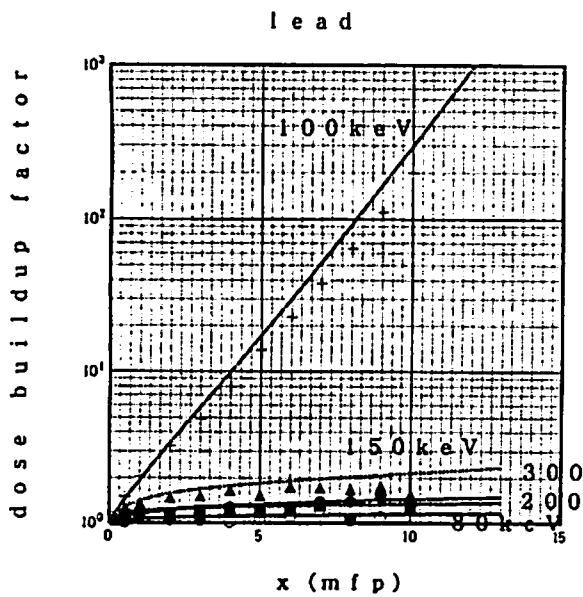


図 2.3 鉛の線量ビルドアップ係数

表 1 水、鉄及び鉛の低エネルギー光子の平均自由行程

Mat.	E (MeV)	DLC15 1mfp	PHOTX 1mfp	$\frac{\lambda \text{ PHOTX}}{\lambda \text{ DLC15}}$	$\frac{\exp(-\mu \text{ PHOTX} \cdot r)}{\exp(-\mu \text{ DLC15} \cdot r)}$ at 10 mfp
Water	0.15	6.7121	6.7110	0.9998	0.9984
	0.10	5.9740	5.9713	0.9995	0.9955
	0.060	5.0753	5.0678	0.9985	0.9853
	0.040	4.0216	3.9953	0.9935	0.9367
	0.020	1.3682	1.3335	0.9746	0.7760
Iron	0.30	1.1970	1.1959	0.9991	0.9909
	0.20	0.92185	0.91998	0.9980	0.9799
	0.15	0.69825	0.69520	0.9955	0.9573
	0.10	0.37495	0.37204	0.9922	0.9505
	0.050	.069909	.068990	0.9869	0.8768
Lead	0.30	0.23343	0.23378	1.0015	1.0151
	0.20	.093287	.093518	1.0025	1.0251
	0.15	.045755	.045932	1.0039	1.0394
	0.10	.016520	.016488	0.9981	0.9808
	0.080	.042041	.041364	0.9839	0.8513

# 高エネルギー物理学 (HEP) ベンチマークプログラム

高エネルギー物理学研究所                      安 芳次、一井信吾、八代茂夫、平山英夫  
日本デジタルイクイップメント株式会社 国府田明弘、鈴木栄伸

## High Energy Physics (HEP) Benchmark Program

Yoshiji YASU, Shingo ICHII, Shigeo YASHIRO and Hideo HIRAYAMA  
National Laboratory for High Energy Physics (KEK)  
Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

Akihiro KOKUFUDA and Eishin SUZUKI  
Digital Equipment Corporation Japan (DEC-J)  
Mitsuiscimci-tsukubagakuen bldg., Amakubo 1-16-10, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

High Energy Physics (HEP) benchmark programs are indispensable tools to select suitable computer for HEP application system. Industry standard benchmark programs can not be used for this kind of particular selection. The CERN and the SSC benchmark suite are famous HEP benchmark programs for this purpose. The CERN suite includes event reconstruction and event generator programs, while the SSC one includes event generators. In this paper, we found that the results from these two suites are not consistent. And, the result from the industry benchmark does not agree with either of these two. Besides, we describe comparison of benchmark results using EGS4 Monte Carlo simulation program with ones from two HEP benchmark suites. Then, we found that the result from EGS4 is not consistent with the two ones. The industry standard of SPECmark values on various computer systems are not consistent with the EGS4 results either.

Because of these inconsistencies, we point out the necessity of a standardization of HEP benchmark suites. Also, EGS4 benchmark suite should be developed for users of applications such as medical science, nuclear power plant, nuclear physics and high energy physics.

### 1 はじめに

最近の計算機の性能向上には目を見張るものがある。ついこの間購入した計算機が1年も経ないうちに新しい計算機に取って変わられ、いつのまにか「古い」計算機になり下がってしまう。また新しい計算機を導入しようと思って業界標準ベンチマークを基準にいくつかのメーカーの計算機を調査しても、はたしてその基準は自分のプログラムにあてはまるものなのかと実際購入しようとする段になると心配になる。

SPECmarkは計算機のCPU性能をはかる産業界の標準ベンチマークプログラムとして位置付けている。大方の計算機ユーザはこのベンチマークプログラムの示す値を計算機購入の重要な指標の1つとしていると思う。SPECmarkはSPECintとSPECfpに分れそれぞれ整数演算性能、浮動小数点演算性能を示す総合的なベンチマークプログラムで、有用である。ただこれは一般的総合的なもので、「あなたのプログラム」の測定結果を示す値ではない。

DEC社のVAX計算機はかつてミニ計算機の標準として多くのユーザに使われてきたが



近年のRISC型計算機の急速な発展に押されて今や「風前の灯」となった感がある。今日の最新のRISC型計算機に比較してさぞや「遅い」計算機になってしまったと多くの方が思っても不思議ではない。しかし、事態はそんな単純ではない。どちらも同じ価格帯にあるVAXステーション4000/90 (VAX4K/90) とHP9000/720 (HP720) の上でEGS4コードシステム (EGS4 CODE SYSTEM) [1] を走らせたとき、VAXの方が30%も速かったと言ったら信じてもらえるだろうか? SPECmarkやDhrystoneなど産業界の主な標準ベンチマークプログラムと比べても、そのVAXが速いと言う値を示しているものはない。だが、それは事実である。業界標準ベンチマークプログラムは必ずしも「あなたのプログラム」の指標にはならない。

昨年欧州連合原子核研究所(CERN)から、CERN Benchmark Suite [2] と呼ばれるベンチマークプログラムを走らせて得られる、VAX8600を基準としたCERNユニット値が発表された。最新の結果をCERNから取り寄せることができる。メインフレームやスーパーコンピュータやワークステーションなどいろいろ含まれていて参考になるが、VAX4K/90の値は含まれていなかった。そこで、KEKの方でその測定を行ない、HP720のそれと比較した。結果はHP720の方が速かった。CERNユニットはSPECint89の約4分の1の値と言われている [3] が、相当の値であった。先程の結果とこの結果には明らかな違いがある。そこで、シミュレーション用に用意されたSSC研究所のベンチマークプログラム、SSC Benchmark Suite [4] を調べてみた。

SSC Benchmark Suiteは粒子シミュレーションプログラムからなり、VAX11/780を基準としたSSCUPと言う単位を使って表される。VAX4K/90とHP720の上でのSSCUPの値はVAX4K/90の方が20%ほど速いと出た。いずれの測定もKEKで行なった。一方、VMS版Alpha AXPモデル400のその値は、CERNユニット値がHP720のそのせいぜい数+%程度速い値を示しているにもから割らず、約2.5倍であった。どうなっているのだろうか? VAX4K/90とHP720との性能比較を表1にまとめる。

以上のような疑問がこれから述べるHEPベンチマークプログラムの調査研究の動機となった。

## 2 調査対象とするベンチマークプログラム

世の中にはたくさんのベンチマークプログラムがある。10個のアプリケーションがあれば10本以上のベンチマークプログラムができる。計算機を購入するとき走らせたいソフトウェアが明確に決まっていれば数がすくなければ、できるものならすべての計算機でそれを走らせ最も速いものを購入すればよい。しかし、これを実現できるユーザは極めて少ない。やはり標準ベンチマークプログラムは必要だ。標準ベンチマークプログラムが確立することによって計算機メーカー側も新しい計算機を作る度にその結果を公表することが可能となる。

ここではHEP用のベンチマークプログラムを調査対象とするが、SPECmark等産業界の標準ベンチマークプログラムも1つの基準として有用なので含める。すでに述べたようにHEP用ベンチマークプログラムとしては1) CERN Benchmark Suite、2) SSC Benchmark Suiteが知られている。また、ベンチマークとして標準化されてはいないが、高エネルギー物理学分野でよく用いられてるGEANTと呼ばれる粒子シミュレーションプログラム、および高エネルギー物理学分野ばかりでなく医療関係を含む低エネルギー分野でも使われているEGS4コードシステムを調査することとした。GEANTについては今回は触れない。EGS4コードシステムについてはコード解析も行なう。EGS4コードシステムのコード解析にはDEC社の新しい64ビット計算機Alpha AXPと従来からあるDECステーションを用いた。また、ベンチマークプログラムの結果を比較する計算機はワークステーションばかりでなくメインフレームも含める。

### 3 業界標準ベンチマーク

最も有名でよく引用されるベンチマークプログラムはSPECmarkである。SPECmarkにはSPECintと呼ばれる整数演算性能を計るものとSPECfpと呼ばれる浮動小数点演算性能を計るものがあり、1992年版のSPECint92及びSPECfp92がある。SPECint92は6個のプログラムからなりすべてC言語で書かれている。GNU Cコンパイラなどを含む。SPECfp92は14個のプログラムからなり12個はFORTRAN言語で2個はC言語で書かれていて、SPICE回路シミュレータや原子炉シミュレーションなどを含む。いずれも実際使用されていてしかも大きなプログラム（例えばGNU Cは約9万行）をベンチマークに用いている。各プログラムのVAX11/780との相対性能の幾何平均値がSPEC値である。値が大きいほど性能が良い。業界標準ベンチマークプログラムとしては、総合的で実際的なものと言える。

このほかにはDhrystoneやLinpackなどがある。前者はOSやコンパイラなどシステム型プログラムの命令出現頻度をソースレベルで調べた文献調査を参考に開発された合成型プログラムである。VAX11/780を1としたDhrystone MIPS値もある。12個のプロシジャーからなり、文字操作の比率が高かったりIF文が多く、整数演算性能を計るベンチマークプログラムと位置づけられている。後者は線形代数サブルーチン集を凝縮したカーネル型ベンチマークプログラムである。特定サブルーチン（倍精度ではdaxpy）に実行時間のほとんどを費やす（ほとんどの機種で90%を越える）[5]。また、ベクタ化可能である。ここではSPECmarkはHEP用プログラムの性格を分析するために、それとの相関関係を見ることに利用する。

### 4 CERN Benchmark Suite

CERNベンチマークプログラムはメインフレーム、スーパーコンピュータ、ワークステーションをベンチマークの対象としてすでに15年間研究されている。CRN1からCRN12までのプログラムの中でCERNユニットの計算に用いられるプログラムは4つである。2つの事象再構成プログラムと2つの事象生成プログラムはそれぞれCRN5, CRN12及びCRN3, CRN4である。各プログラムのVAX8600との相対性能の幾何平均がCERNユニットである。HP720で実行イメージの大きさを調べた。それらのテキスト及びデータサイズ（初期化されないデータ領域を含む）の合計はそれぞれ100から400KBの大きさの範囲に入る。

図1は代表的なワークステーションのCERNユニットをプロットしたものである。この時点ではAlpha AXPモデル500Xが最高の値を示していた。次にCERNユニットとSPECmarkとの相関をプロットし、CERNベンチマークプログラムの性格を分析した。CERNユニットとSPECint92との相関を図2に、CERNユニットとSPECfp92との相関を図3に示す。図2から、Alpha AXPとSPARCは同じ傾向にあり、HP PA-RISCはSPECint92に対しCERNユニットがより大きい傾向にある。VAX4K/90は全くの番外に位置し、そのSPECint92が余りにも小さすぎると感じさせる。一方図3から、SPECint92との関係とは逆に、Alpha AXPとHP PA-RISCは同じ傾向にあり、SPARCはSPECfp92に対しCERNユニットがより大きい傾向にある。VAX4K/90はまだ番外に位置するものの、IBM RS6000/530H (RS530H)がSPECfp92ほどにCERNユニットが大きくない。

これら2つの相関図からCERNユニットは必ずしもSPECmarkとリニアな関係にあるとは言えない。

### 5 SSC Benchmark Suite

SSCベンチマークプログラムはSSC研究所の物理シミュレーション施設の入札のための技術的評価に利用された。SSCUPと言う単位は3つのプログラム、ISAJET、JETSET73及びPYTHIA54のVAX11/780との相対性能の幾何平均値である。HP720、DECS5000/240(DECS5K/240)とAlpha AXPで各プログラムのサイズを調べた。計算機によってサイズの差が出てくるも

の、どのプログラムも1から2MB程度である。

図4は代表的なワークステーションのSSCUP値をプロットしたものである。Alpha AXPが飛び抜けて大きな値を示している。次にSSCUP値とSPECint92との相関を図5に、SPECfp92との相関を図6に示す。図5から、SPARCとPA-RISCは同じ傾向を示している。ただし、HP9000/735 (HP735)は1箇所実行時に問題がありSSCUP値は算出できなかったが、その他のプログラムは正常に結果を出しているので、その結果から類推してプロットしている。ここでもVAX4K/90は全くの番外に位置し、性能が良い。図6から、PA-RISCやMIPSやSPARCが似た傾向を持つ。ここでもRS530HのSPECfp92比は低い値を示している。VAXとAlpha AXPがやはり特異な存在になっている。

なぜAlpha AXPがSPECmarkに比して特に良い性能を出しているのか調べてみる必要がある。

## 6 EGS4コードシステム

EGS4プログラムは電子と光子を対象とする色々な分野で幅広く使用されている電磁カスケードモンテカルロ計算コードである。どのような形状の物質を扱うかで計算コードの内容が変化するので、単純なものと複雑なものとの調べる必要がある。そのため最もジオメトリの単純なものとしてUCSAMPL4Iを、複雑なものとしてXYZDOSを用意した。その他に、EGS4コードシステムの例題に使われているUCSAMPL4を加えた。XYZDOSはすでに色々な計算機で実行されている、いわばEGS4の標準ベンチマーク的プログラムである。それは19センチ立方体の水にエネルギーが2千万電子ボルトの電子を入射したときの電磁カスケードシャワーをシミュレートする。UCSAMPL4IはUCSAMPL4のジオメトリをなくしてしまったものである。つまり、無限大の鉄にエネルギーが10億電子ボルトの電子を入射したときのシミュレーションである。UCSAMPL4は厚さが3センチの鉄になったものである。

図7はUCSAMPL4の $\mu$  VAXIIとの相対性能をプロットしたものである。表2に計算機の種類/実行条件などをまとめた。ワークステーションばかりでなく日立や富士通のメインフレームも含まれる。やはりメインフレームは速かった。しかし、HP735がそれらに迫る値を示している。図8にUCSAMPL4Iを、図9にはXYZDOSを示す。UCSAMPL4Iの結果はUCSAMPL4の結果と似た傾向を持っている。メインフレームでXYZDOSを実行させてはいないので、図9はワークステーションだけのデータになっている。HP735はここでも速かった。

上記の3つのプログラムが適切に実行されているかどうかを調べるためにまず最終乱数を追った。UCSAMPL4Iでは表2にあるほとんどの計算機において最終乱数は一致している。ただし、日立/富士通メインフレームでは自動倍精度にして実行し一致させた。OSによる違い(すなわちUNIXやVMSなど)はなかった。これはどの計算機においても同じパスを通っているとの証拠である。つまり、同じ数だけのFORTRANステップを実行していると考えてよい。UCSAMPL4ではCPUによる差は見えなかったが、浮動小数点演算器による違いがあった。VAXフォーマットとIEEEフォーマットでは最終乱数が異なっていた。XYZDOSはもっと違いが現われている。すべての計算機において最終乱数は一致していない。しかし、すべての計算機(最適化でバグを持つと思われる一部計算機を除いて)において全く最適化をしない場合と最適化をした場合とで完全に最終乱数は一致している。これらの結果をどう考えるか? FORTRANの実行ステップ数は計算機によって異なっているものの、最適化をしない場合とした場合との間に差はなかったことと出力結果の検討から特に異常は見られなかったことを考慮し、3つのプログラムは適切に実行されていると判断した。

次に2つの視点でEGS4コードシステムの解析を行なう。1つは解析ツールであるPIXIEやPCAなどを使って負荷の解析を行なう。2つめはSPECmarkとの相関をプロットし計算機による違いを調査する。

解析ツールであるPIXIEはAlpha/OSF及びMIPS/Ultrixで使用する。Alpha/VMSはPCAを

使う。ここで使用したAlpha AXPはDEC3000/400でMIPSはR3000を載せたDECS5K/240である。PCAはDEC社固有の解析ツールで、プログラムカウンタをサンプリングしたりCPUタイムを計り負荷の解析に利用できるようビジュアル化も可能。PIXIEは同じようにプログラムカウンタをサンプリングしたり、基本ブロックと呼ばれる単位でプログラムを分割し負荷解析のデータを作り出す。これはUNIX共通のツールであるが、ビジュアル化のためのツールは別になる。ここでは上記3つのEGS4プログラムの中でUCSAMPL4Iを対象とし、計算機はAlpha/OSF及びMIPS/Ultrixのみとする。まずコンパイル条件だが、Alpha/OSFは"-O-non\_shared"、MIPS/Ultrixは"-O"オプションをつける。基本ブロックによる解析で表3のような結果がでた。Alpha/OSF及びMIPS/UltrixともUCSAMPL4Iの総ステップ数は同じ程度である。EGS4固有コードであるELECTRルーチンの占める割合に差が出ている。Alpha/OSFはシステム固有なSQRTやLOG関数の割合が相対的にMIPS/Ultrixよりも多い。Alpha/OSFのSQRT関数のステップ数がMIPS/Ultrixのその2倍多いと言う結果を考慮すると、Alpha/OSFはまだシステム関数に改善の余地がありそうだ。SQRTやLOG関数はUCSAMPL4Iのなかで特定のルーチンに集中しているわけではない。ALOG関数は7つのルーチンへ、SQRT、DSQRT関数は10個のルーチンへそれぞれ点在している。Alpha/OSFのヘビーコード解析でSQRT関数が最もヘビーなコードとして7%以上占めた。しかし、MIPS/Ultrixでは最もヘビーなコードUPHIRルーチンでも2%を下回っている。またMIPS/Ultrixではシステム関数が最初に現われるのは26番目である。MIPS/Ultrixの結果から、EGS4コードシステムには特に負荷の高いプログラムコードはないと判断する。ただAlpha/OSFはコンパイルオプションなどのいい条件を作れば改善される可能性がある [6]。

SPECmarkとEGS4コードシステムの関係を調べる。図10にSPECint92と3つのプログラムの相対性能との相関を、図11にSPECfp92とそれを夫々示す。UCSAMPL4及びUCSAMPL4Iは $\mu$ VAXIIを基準にし、XYZDOSはVAX11/780を基準にしているので値がずれている。図10で、PA-RISCが他のRISC型CPUより高い値を示している。それに比べ、SPARCではジオメトリが複雑なXYZDOSでの落ち込みが見られる。Alpha/OSFはそれらの中間程度である。VAX4K/90はやはり番外である。MIPSが比較的高いのに対しRS530Hは低い。一方図11で、SPARCのSPECfp92比は高い値を示している。Alpha/OSFは相対的に低い。PA-RISCは中間程度。VAX4K/90はXYZDOSの落ち込みが大きい。RS530Hは低い。3つのプログラムのコードサイズは、XYZDOSがやや大きい程度で1から2MBである。UCSAMPL4及びUCSAMPL4Iは400から600KB程度である。

## 7 まとめ

HEPベンチマークプログラムを調査研究する環境はほぼ整った。特にEGS4コードシステムについては解析を含め前進した。

HEPベンチマークプログラムからの結果は業界標準ベンチマークプログラムからの結果に合わないばかりでなく、HEPベンチマークプログラムからの結果の間にも不具合が見えてきている。しかしそれでも、HEPベンチマークプログラムはHEPプログラム上での計算機の性格を知るうえで必要な道具であり、標準化が求められる。

すでに述べたようにEGS4コードシステムは医療、原子力、核物理、高エネルギー物理学分野までの広い適応範囲を持つ粒子シミュレーションプログラムである。新しい計算機が作られる度メーカーがそれを実行しユーザに提示できるように、独立したベンチマークとしてEGS4標準ベンチマークプログラム、EGS4 Benchmark Suiteの確立を目指す。

## 謝辞

CERNベンチマークプログラムはCERNのMcIntosh氏からいただいた。それをKEKにコピーするための準備を快く引受られた氏に感謝する。SSCベンチマークプログラムはKEK

データ処理センターの森田氏を通し、SSC研究所のSoren氏からいただいた。快く引受てくれた両氏に感謝する。たくさんの計算機を快適に使うことができたのはKEKオンライングループやKEKデータ処理センターの皆様のご協力に寄るところが多い。関係諸氏に感謝する。

#### 参考文献

- [1] Walter R. Nelson, Hideo Hirayama and David W. O. Rogers : THE EGS4 CODE SYSTEM, SLAC-Report-265, (1985)
- [2] Eric McIntosh : Benchmarking Computers for HEP, CERN CN/92/13
- [3] Sverre Jarp : RISC without RISK? an overview of current RISC systems used in HEP Batch, Proceedings of the International Conference on Computing in High Energy Physics '92, pp. 499-504 (1992)
- [4] W. K. McFarlane : Benchmarks for the SSCL Physics Simulation Computing Facility, SSCL-375, (1991)
- [5] ラインホルト Pワイカー : ほころびが見え始めたベンチマークテスト (前編/後編)、日経バイト、1992年5月号P.245-257/1992年6月号P.317-329
- [6] 安 芳次他 : Alpha AXP上でのEGS4コードの解析、第3回EGS4研究会、(1993)

表1 VAXステーション4000/90とHP9000/720との  
性能比較

	VAXS4000/90	HP9000/720	性能比 (HP720を1として)
SPECint89	26.7	39.5	0.68
SPECint92	16.03	36.4	0.44
SPECfp92	30.17	58.2	0.52
DhrystoneV1.1 (MIPS)	37.35	57.4	0.65
Linpack (n=100, double)	7.27	18.0	0.40
CERNunit	7.92	9.96	0.80
=====			
XYZDOS (EGS4)	29.59	24.27	1.2
UCSAMPL4 (EGS4)	42.35	32.56	1.3
UCSAMPL4I (EGS4)	41.31	33.86	1.2
SSCUPs	35.12	28.75	1.2

なお、SPECmark, Dhrystone, Linpack以外はKEKで測定した結果であり、公式な値ではない。

## 表2 計算機の種類とコンパイル条件

### MicroVAXII :

VAX/VMS V5.3-1, VAX FORTRAN V5.3-50 (MicroVAXII-VMS)

--->\$ for/check=noover ucsampl4.f

--->\$ for xyzdos.fortran and \$ link xyzdos, cputime

--->\$ for/check=noover ucsampl4i.f

### DEC3000/400 :

OpenVMS V1.0, DEC FORTRAN V6.0-289-24AG(DEC3000/400-VMS)

--->\$ for/check=noover/opt=level=4/align=none ucsampl4.f

--->\$ for xyzdos.fortran and \$ link xyzdos, cputime

--->\$ for/check=noover/opt=level=4/align=none ucsampl4i.f

OSF/1 T1.2-2, DEC FORTRAN T3.3-313-26CG (DEC3000/400-OSF)

--->f77 -V -non\_shared -vms -o ucsampl4 ucsampl4.f

--->f77 -vms -o xyzdos.exe xyzdos.f cputim.o

--->f77 -V -non\_shared -vms -o ucsampl4i ucsampl4i.f

OSF/1 RT V1.2, DEC Fortran V3.3-342 (DEC3000/400OSF1)

--->f77 -V -O -non\_shared -o ucsampl4 ucsampl4.f

--->f77 -O -o xyzdos.exe xyzdos.f cputim.o

--->f77 -V -O -non\_shared -o ucsampl4i ucsampl4i.f

OSF/1 V1.2, DEC Fortran V3.3-342 (DEC3000/400OSF2)

--->f77 -V -O -non\_shared -o ucsampl4 ucsampl4.f

--->f77 -O -o xyzdos.exe xyzdos.f cputim.o

--->f77 -V -O -non\_shared -o ucsampl4i ucsampl4i.f

### DEC3000/500 :

OpenVMS V1.0, DEC FORTRAN V6.0-289-24AG(DEC3000/500-VMS)

--->\$ for/check=noover/opt=level=4 ucsampl4i.f

--->\$ for/check=noover/opt=level=4 ucsampl4.f

--->\$ for/check=noover/opt=level=4 xyzdos.f

OSF/1 V1.2, DEC Fortran V3.3-342 (DEC3000/500OSF)

--->f77 -O -non\_shared -o ucsampl4 ucsampl4.f

--->f77 -O -o xyzdos.exe xyzdos.f cputim.o

--->f77 -O -non\_shared -o ucsampl4i ucsampl4i.f

### VAXstation4000/90 :

VAX/VMS V5.5-2, DEC FORTRAN V5.8-155(VAXS4000/90-VMS)

--->\$ for/check=noover ucsampl4.f

--->\$ for xyzdos.fortran and \$ link xyzdos, cputime

--->\$ for/check=noover ucsampl4i.f

### VAX6630 :

VAX/VMS version V5.5-2, VAX FORTRAN V5.7-133

--->\$ for/check=noover ucsampl4.f

--->\$ for xyzdos.fortran and \$ link xyzdos, cputime

--->\$ for/check=noover ucsampl4i.f

### VAX4000/500 :

VAX/VMS V5.5, DEC FORTRAN V5.8(VAX4000/500-VMS)

--->\$ for/check=noover/opt=level=4/align=none ucsampl4.f

Hitachi M680H :

```
HI-OSF/1-MJ, FORT77 V01-01(M680H-OSF)
--->f77 -W0,'opt(o(s))' -o ucsampl4 ucsampl4.f
VOS3/AS-JSS4 02-00, OFORT77 E2 V05-0G
--->// EXEC F7E2CL(M680H/VOS3-DEF)
--->// EXEC F7E2CL,PARM.FORT='SOPT'(M680H/VOS3-SOPT)
```

Hitachi M880 :

```
VOS3/AS-JSS4 02-00, OFORT77 E2 V05-0G
--->// EXEC F7E2CL(M880/VOS3-DEF)
--->// EXEC F7E2CL,PARM.FORT='SOPT'(M880/VOS3-SOPT)
```

SPARCstation 2 :

```
SunOS 4.1.2, Fortran V1.4 1Mar1991(SPARC2-UX)
--->f77 -fast -O4 -Bstatic -o ucsampl4i ucsampl4i.f
--->f77 -fast -O4 -Bstatic -o ucsampl4 ucsampl4.f
--->f77 -fast -O4 -Bstatic -o xyzdos.exe xyzdos.f cputim.o
```

SPARCstation 10 Model 30 :

```
SunOS 4.1.3, Fortran V1.4 Patch Release 8, 26Oct1992(SPARC10/30-UX)
--->f77 -fast -o ucsampl4i ucsampl4i.f
--->f77 -fast -o ucsampl4 ucsampl4.f
--->f77 -fast -o xyzdos.exe xyzdos.f cputim.o
```

SPARCstation 10 Model 40 :

```
SunOS 4.1.3, Fortran V1.4 Patch Release 8, 26Oct1992(SPARC10/40-UX)
--->f77 -fast -O4 -Bstatic -o ucsampl4i ucsampl4i.f
--->f77 -fast -O4 -Bstatic -o ucsampl4 ucsampl4.f
--->f77 -fast -o xyzdos.exe xyzdos.f cputim.o
```

HP9000/720 :

```
HP-UX A.08.07, HP FORTRAN 77 Ver: 8.07(HP9000/720-UX)
--->f77 -V +O3 -K -Wl,-aarchive -o ucsampl4 ucsampl4.f
--->f77 +O3 -K -Wl,-aarchive -o xyzdos.exe xyzdos.f cputim.o
--->f77 -V +O3 -K -Wl,-aarchive -o ucsampl4i ucsampl4i.f
```

HP9000/735 :

```
HP-UX A.09.01, HP FORTRAN 77 Ver: 9.00(HP9000/735-UX)
--->f77 +O3 -K -Wl,-aarchive -o ucsampl4 ucsampl4.f
--->f77 +O3 -K -Wl,-aarchive -o xyzdos.exe xyzdos.f cputim.o
--->f77 -V +O3 -K -Wl,-aarchive -o ucsampl4i ucsampl4i.f
```

Fujitsu M1800/10S :

```
UNIX_System_V 4.0, fortran77 ex v12110
--->frt -Of -o ucsampl4 ucsampl4.f
--->frt -Of -o xyzdos.exe xyzdos.f cputim.o
IV/F4MSP E20, FORTRAN77 EX V12L10
--->EXEC FORTECL,OPT=F (M1800/10S-MSP-EX)
IV/F4MSP E20, FORTRAN 77 V10L31
--->EXEC FORT7CL,OPT=3 (M1800/10S-MSP-F77)
```

Fujitsu M1800/10 :

```
IV/F4MSP E20, FORTRAN77 EX V12L10
--->EXEC FORTECL,OPT=F(M1800/MSP-EX)
```



IV/F4MSP E20, FORTRAN 77 V10L31

--->EXEC FORT7CL,OPT=3(M1800/MSP-F77)

IBM RS6000/530H :

AIX Version 3 Release 1, (RS6000-AIX)

IBM AIX XL FORTRAN Compiler/6000 Version 01.01.0002.0000

--->xlf -qlist -O -gnorndsngl -o ucsampl4i ucsampl4i.f

--->xlf -O -gnorndsngl -o ucsampl4 ucsampl4.f

--->xlf -O -gnorndsngl -o xyzdos.exe xyzdos.f cputim.o

Sillicon Graphics IRIS(Power-seriese 4D/220) :

iris Version 06011629 Release 3.3,(SGI-IRIS)

f77 Mips Computer Systems 2.0

--->f77 -O -static -o ucsampl4 ucsampl4.f

--->f77 -Olimit 1300 -O -static -o xyzdos.exe xyzdos.f cputim.o

DECstation 5000/240 :

ULTRIX V4.2A (Rev. 47), DEC Fortran V3.2-164 (DECS5000/240-UX)

--->f77 -V -O -o ucsampl4 ucsampl4.f

--->f77 -O -o xyzdos.exe xyzdos.f cputim.o

--->f77 -V -O -o ucsampl4i ucsampl4i.f

HITACHI 3050/Rsv(50MHz) :

HI-UX U 01.03 , OFORT77 V01-2A(HITACHI3050R)

--->f77 -W0,'opt(o(s)),list(s)' -o ucsampl4 ucsampl4.f

--->f77 -W0,'opt(o(s)),list(s)' -o xyzdos.exe xyzdos.f cputim.o

( xyzdos.exe -FRUNST(FREC(80))' at run-time)

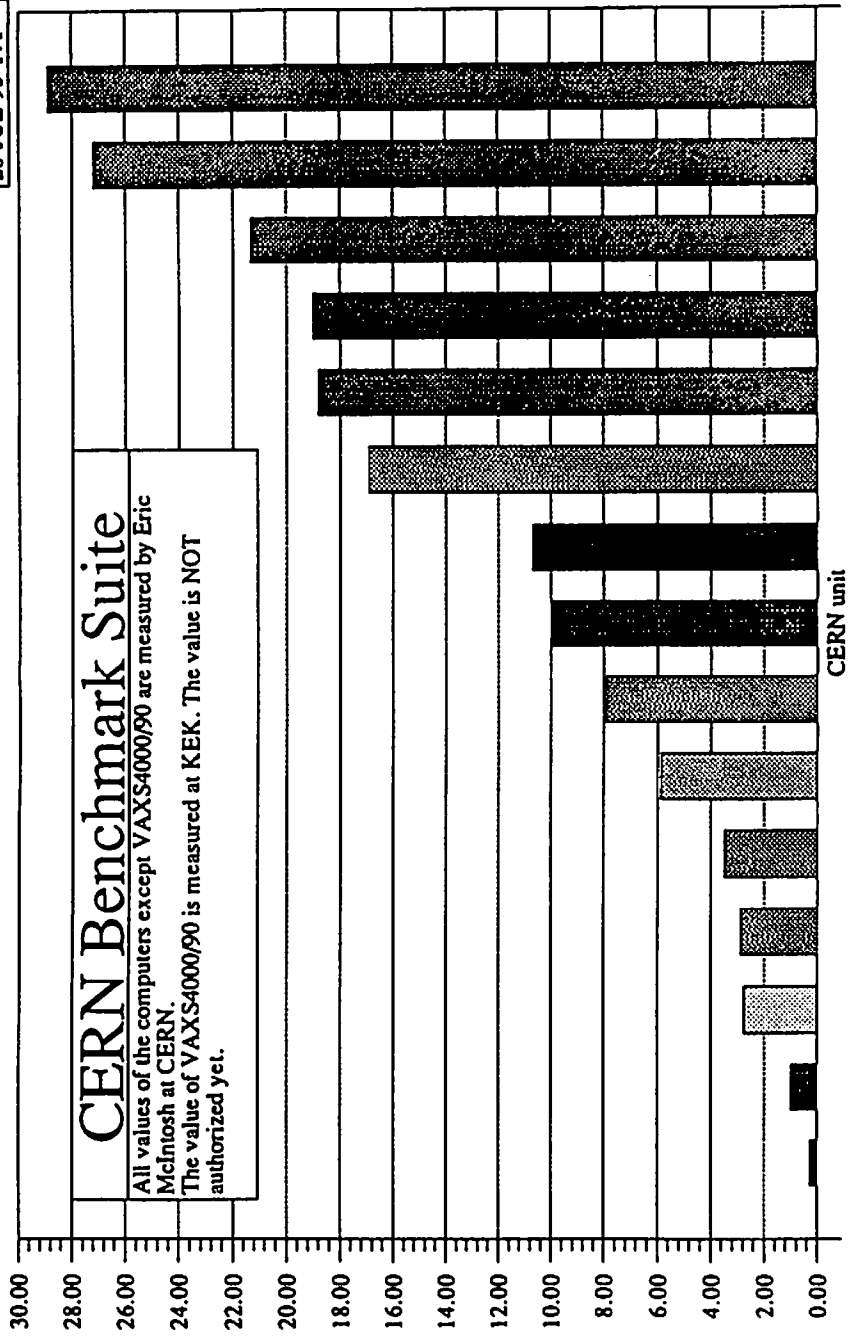
表3 基本ブロックを使っての解析

	Alpha/OSF	MIPS/Ultrix
ucsampl4iの総ステップ数	2,048,728,079	2,087,035,965
electr_のステップ数の割合	22.91%	28.56%
sqrtのステップ数割合	16.8%	8.6%
sqrt, logのステップ数割合	30%以上	20%以下
sqrtのステップ数	81	42

28-JUL-93 Y.Y

# CERN Benchmark Suite

All values of the computers except VAXS4000/90 are measured by Eric McIntosh at CERN.  
The value of VAXS4000/90 is measured at KEK. The value is NOT authorized yet.

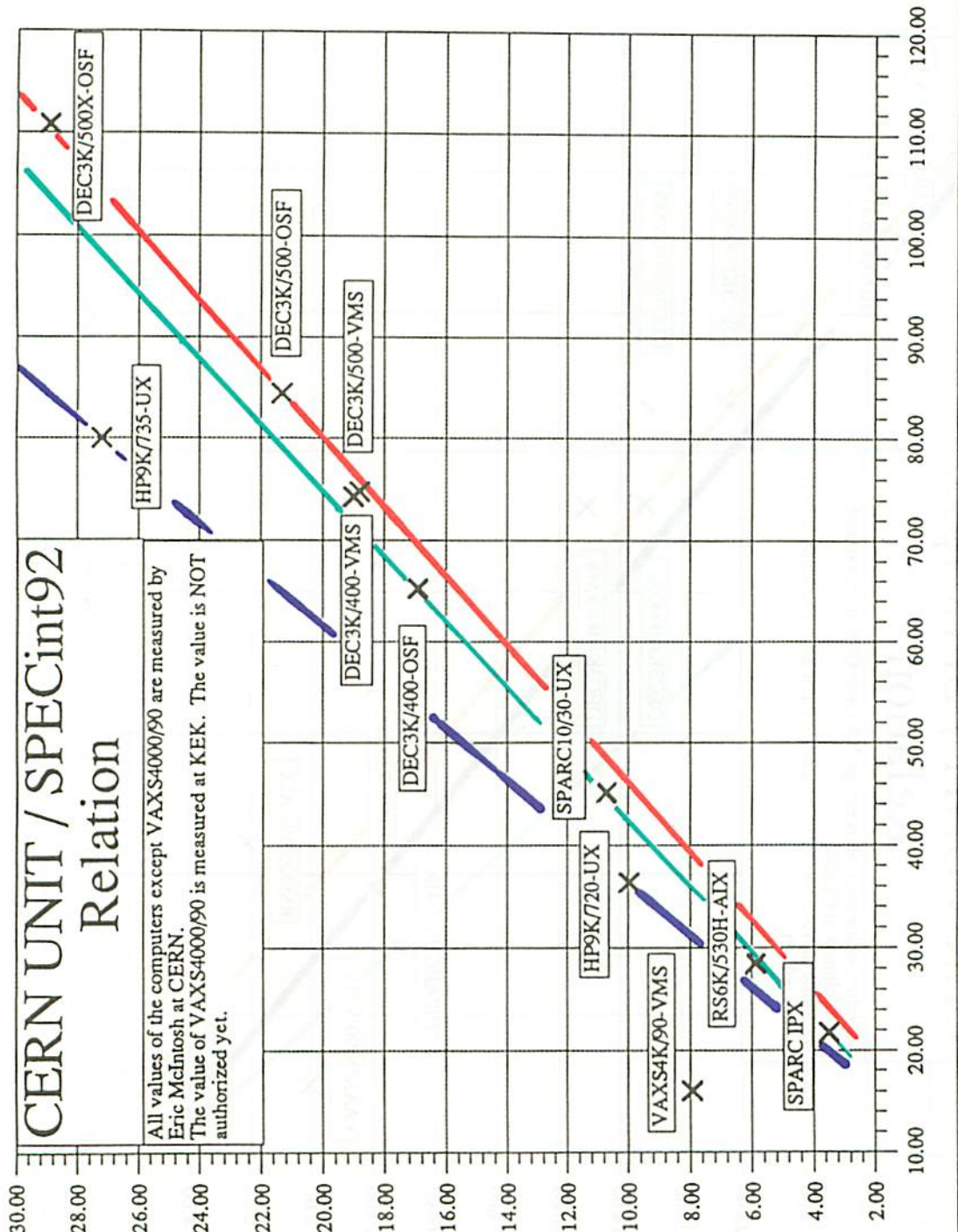


- VAX11/780
- VAX8600
- DECS3100-UX
- VAX4K/60-VMS
- SPARC IPX UX
- RS6K/530-AIX
- VAX S4K/90-VMS
- HP9K/720-UX
- SPARC10/30-UX
- DEC3K/400-VMS
- DEC3K/400OSF2
- DEC3K/500-VMS
- DEC3K/500-OSF
- HP-9K/735-UX
- DEC3K/500X-OSF

図 1

# CERN UNIT / SPECint92 Relation

All values of the computers except VAXS4000/90 are measured by Eric McIntosh at CERN.  
The value of VAXS4000/90 is measured at KEK. The value is NOT authorized yet.

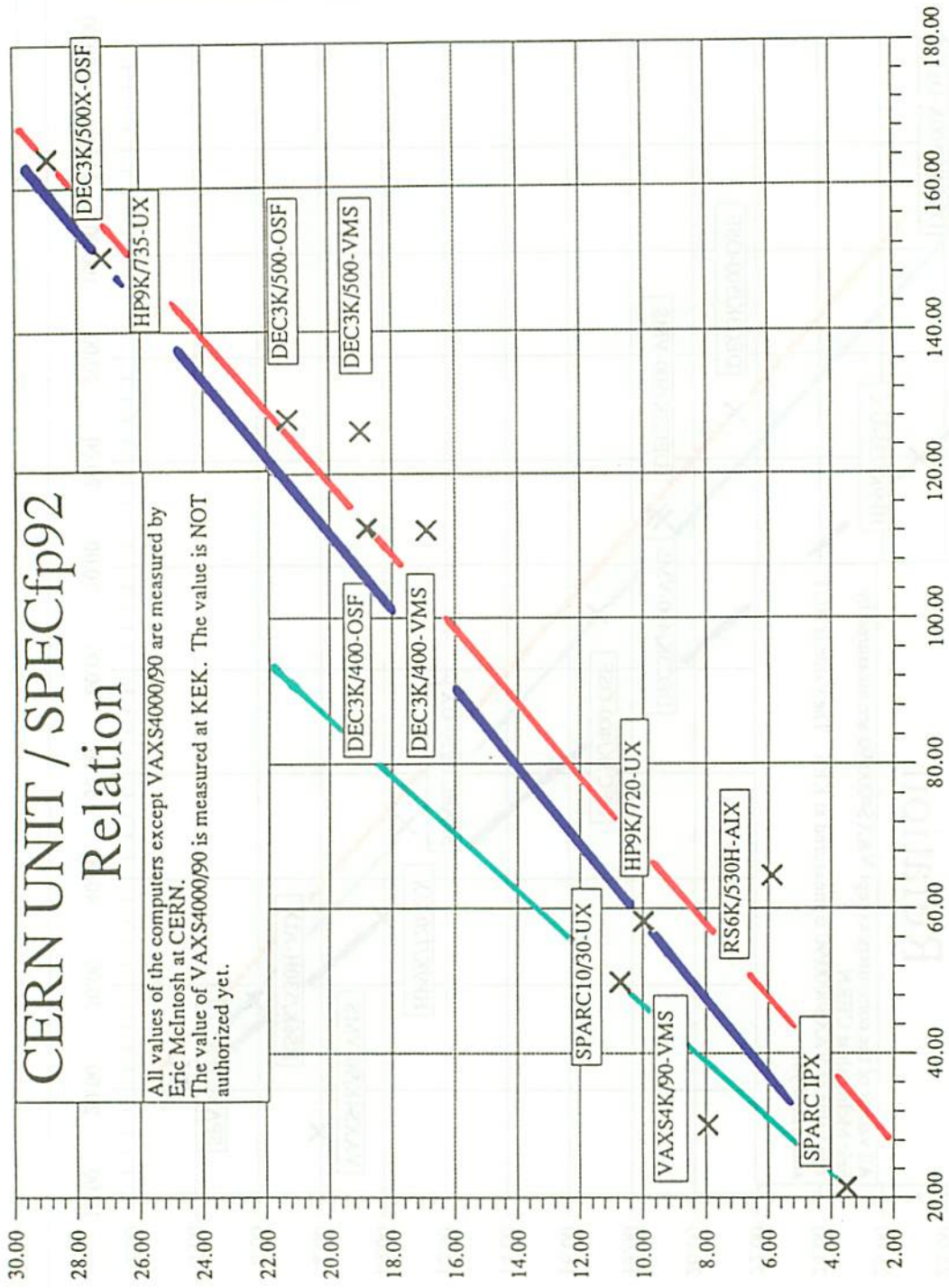


X CERN unit

図 2

# CERN UNIT / SPECfp92 Relation

All values of the computers except VAXS4000/90 are measured by Eric McIntosh at CERN.  
The value of VAXS4000/90 is measured at KEK. The value is NOT authorized yet.



X CERN unit

28-JUL-93 Y.Y

# SSC Benchmark Suite

All values of the computers except SPARC2-UX are measured at KEK. Those values are NOT authorized yet. The value of SPARC2-UX is measured by W.K.McFarlane at SSCL. He is the author of the Suite.

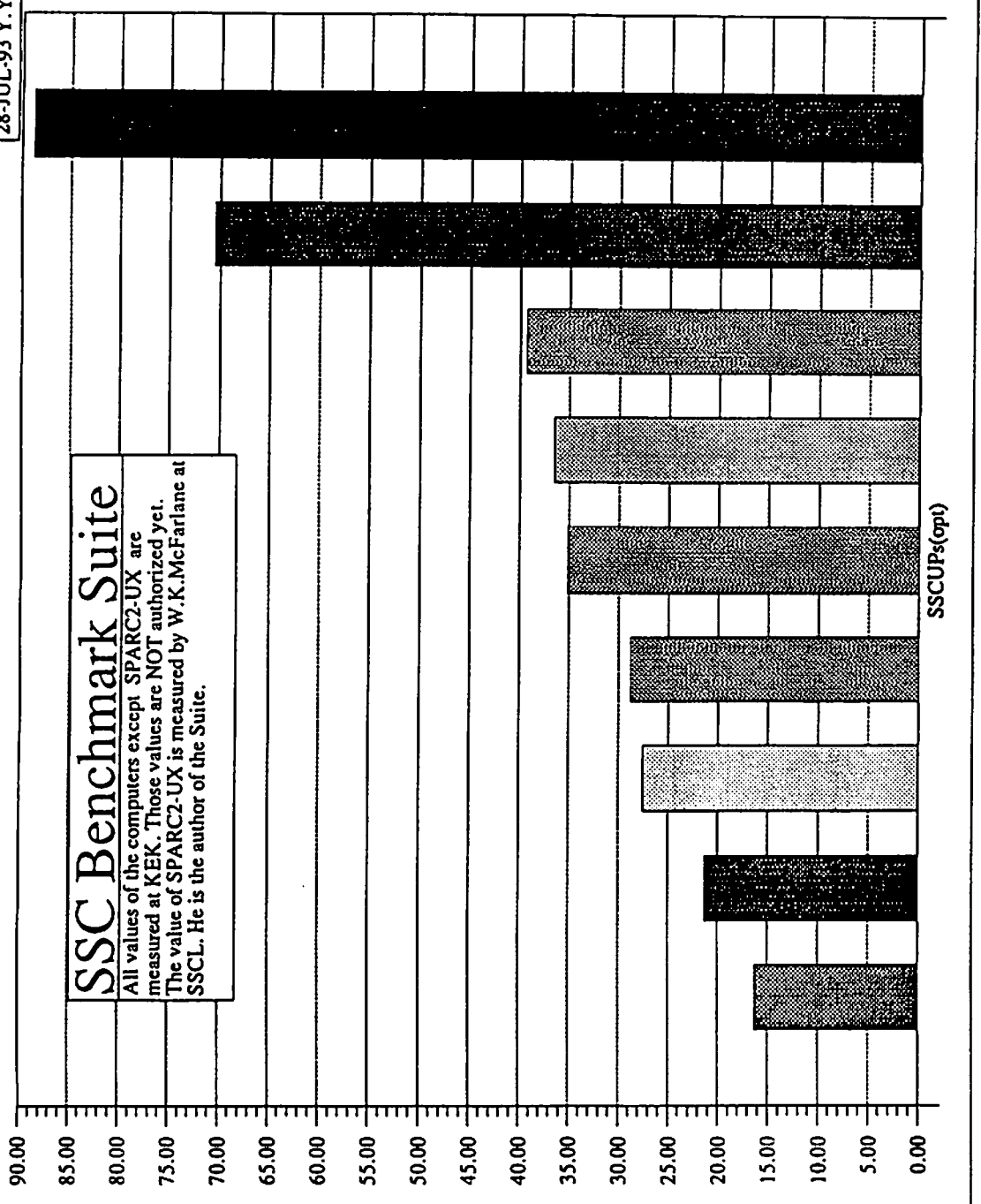
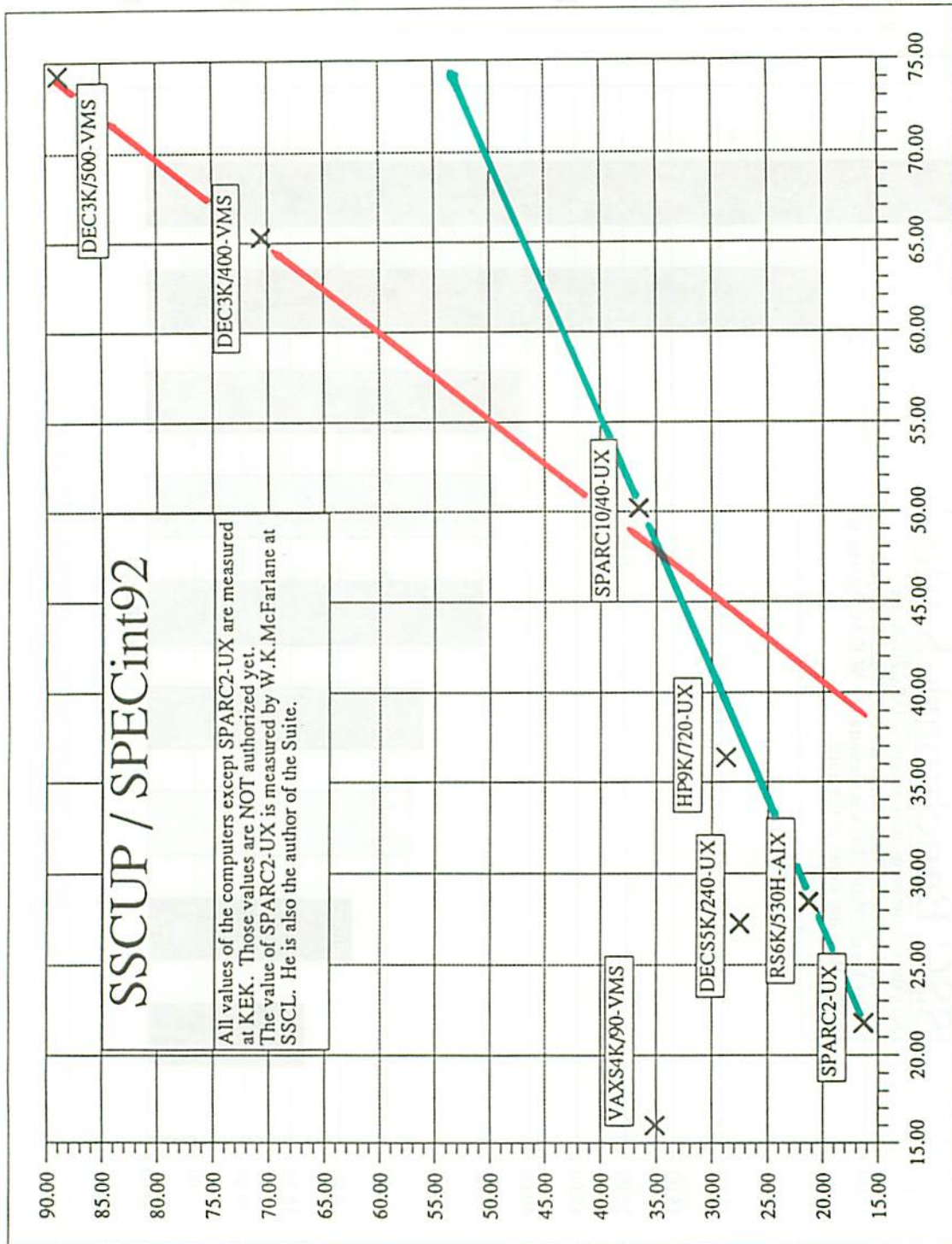


图 4



X SSCUP5(opt)

# SSCUP / SPECfp92

All values of the computers except SPARC2-UX are measured at KEK. Those values are NOT authorized yet.  
 The value of SPARC2-UX is measured by W.K.McFarlane at SSCL. He is also the author of the Suite.

X SSCUPs(opt)

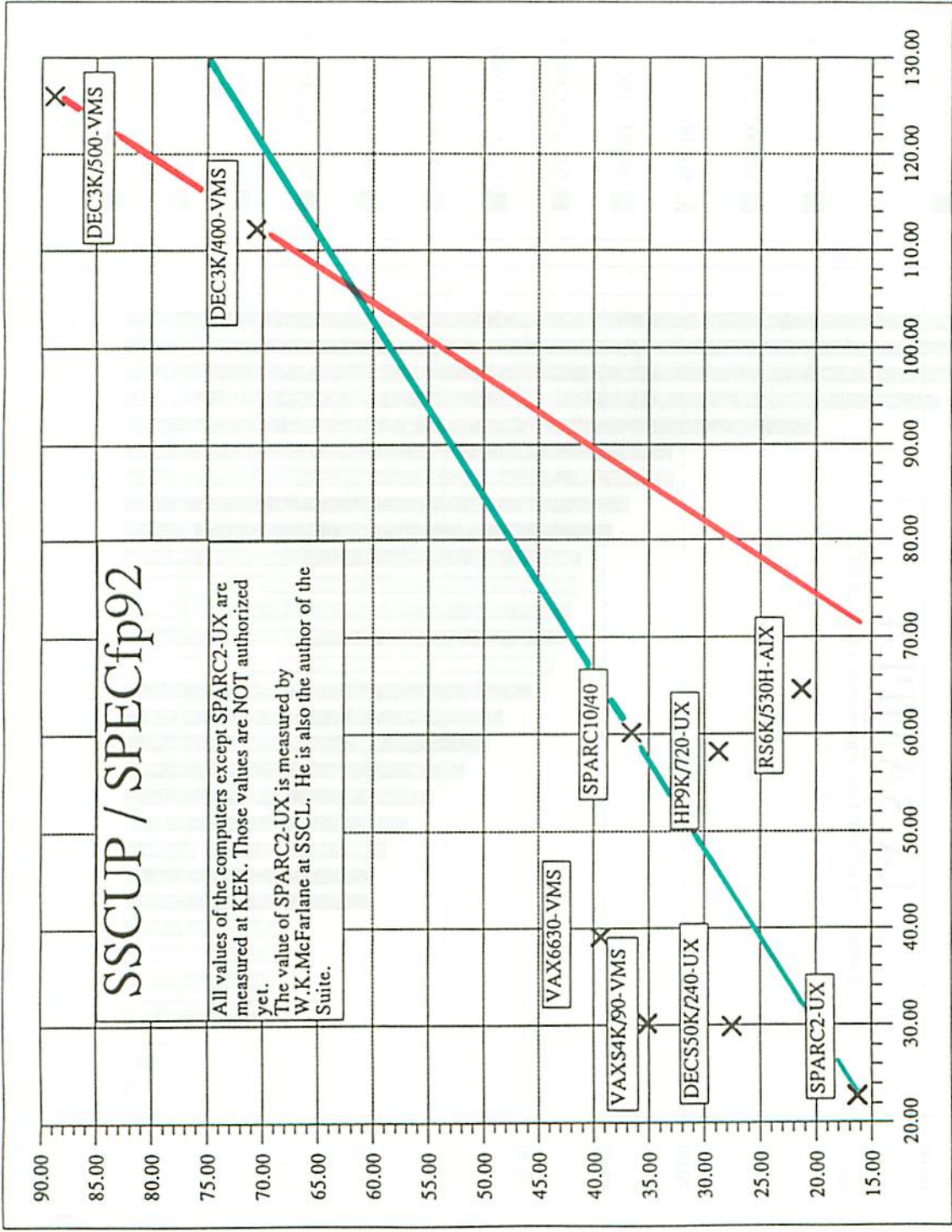


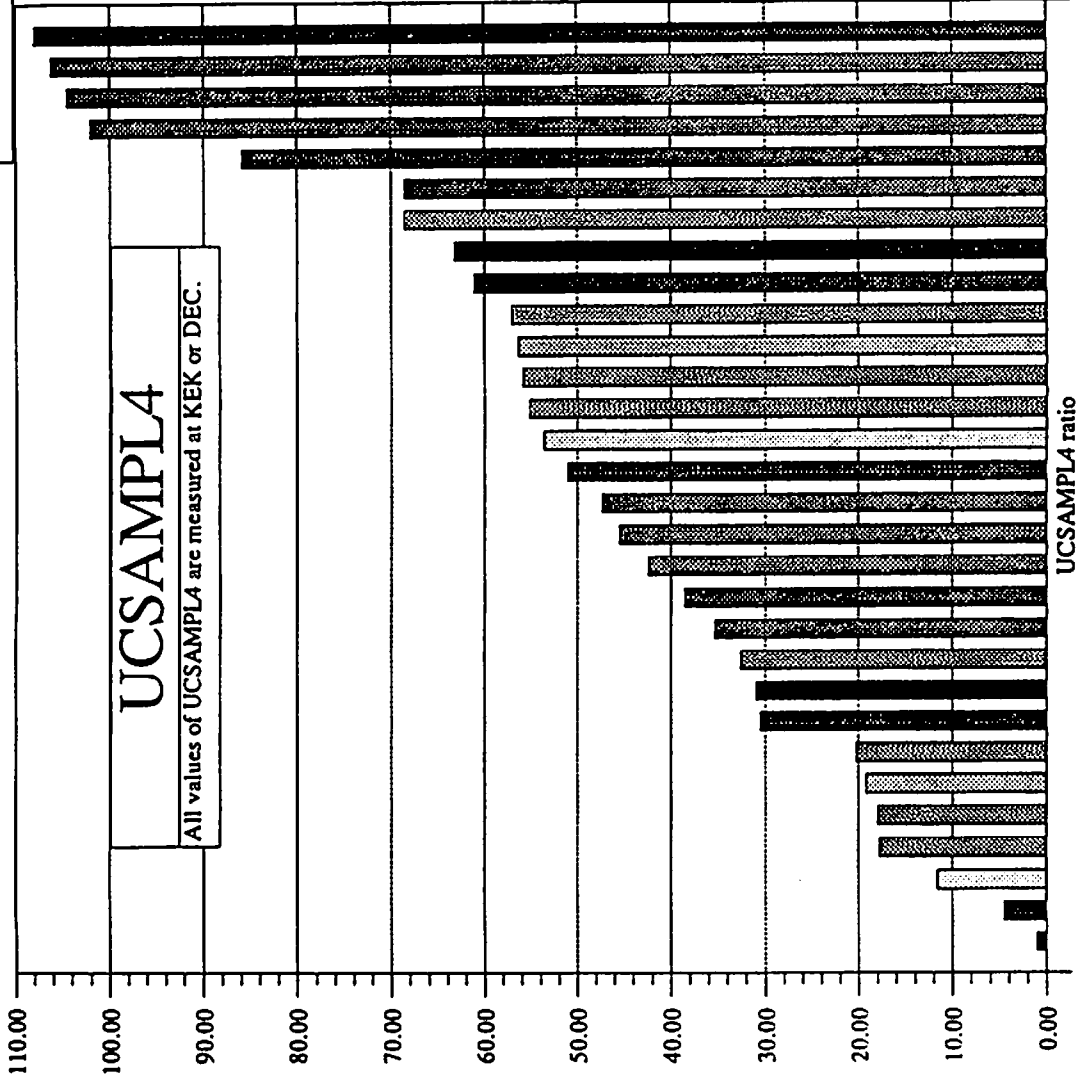
图 6



28-JUL-93 Y-Y

# UCSAMPL4

All values of UCSAMPL4 are measured at KEK or DEC.

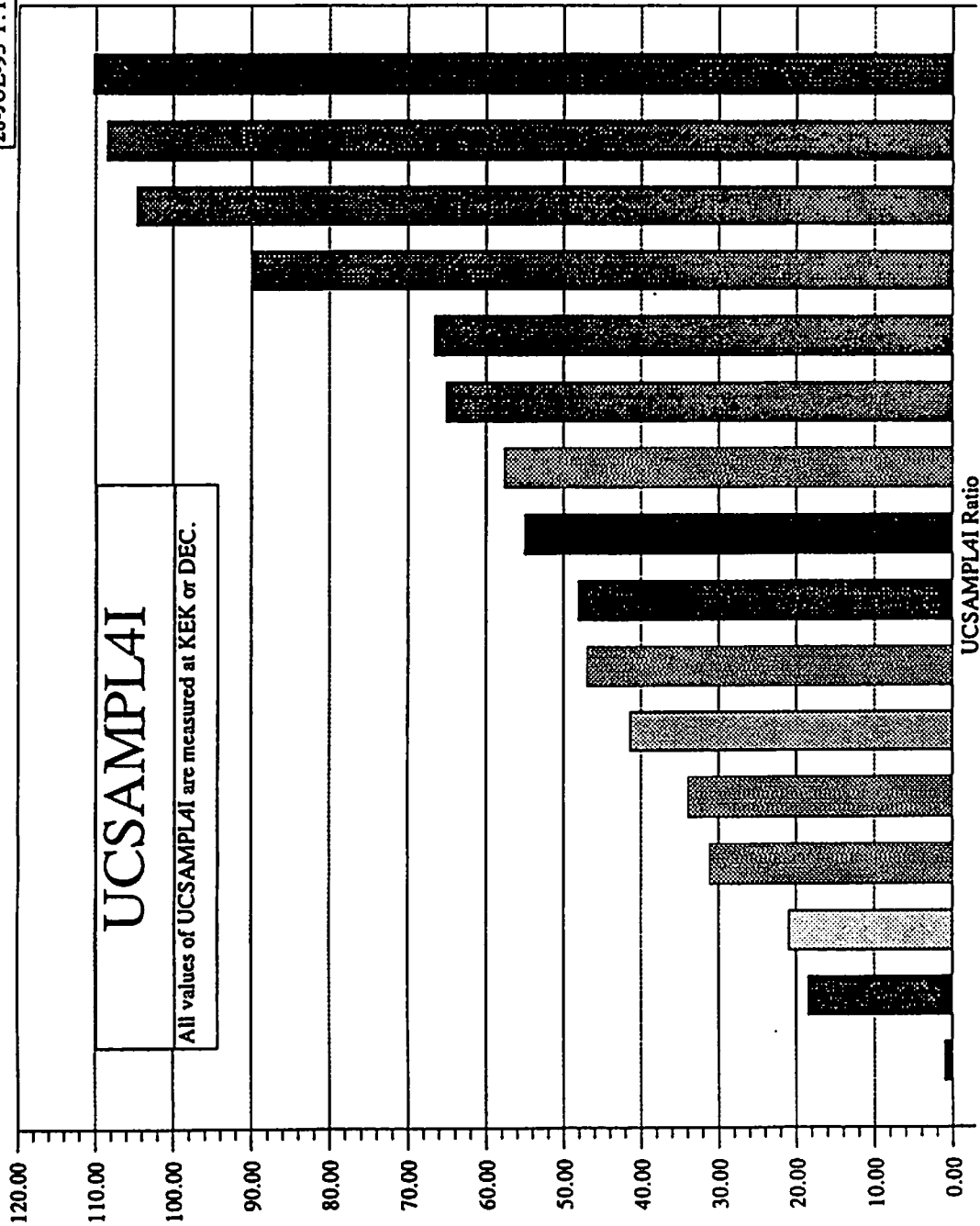


- MicroVAXII-VMS
- DEC3K/400-VMS
- MVAX3800-VMS
- M680H-VOS3DEF
- DEC3100-UX
- DEC3K/400OSF2
- DEC55K/200-UX
- DEC3K/400-OSF
- RS6000-AIX
- M680H-OSF
- SGI-IRIS
- M680HVOS3OPT
- SPARC2-UX
- DEC3K/500-OSF
- DEC55K/240-UX
- DEC3K/500-VMS
- HITACHI3050R
- M1800/10S-UXP
- HP-9K/720-UX
- M1800/10S-MSP
- SPARC10/50-UX
- HP-9K/735-UX
- VAX4K/500-VMS
- M880HVOS3DEF
- VAX S4K/90-VMS
- M1800-MSP-EX
- SPARC10/40-UX
- M880HVOS3OPT
- VAX6630-VMS
- M1800-MSP-F77

28-JUL-93 Y.Y

# UCSAMPLAI

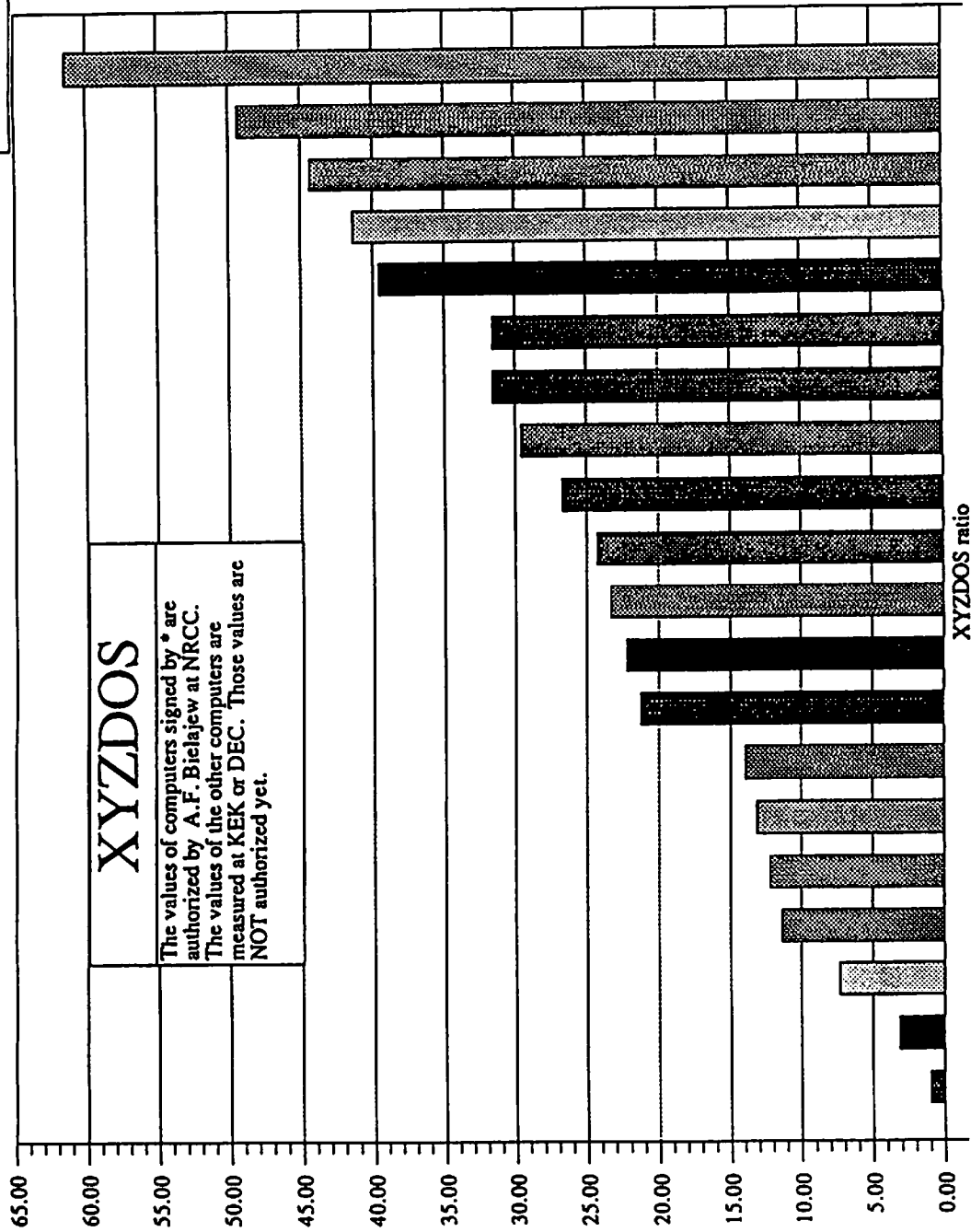
All values of UCSAMPLAI are measured at KEK or DEC.



28-JUL-93 Y.Y

# XYZDOS

The values of computers signed by \* are authorized by A.F. Bielajew at NRCC.  
 The values of the other computers are measured at KEK or DEC. Those values are NOT authorized yet.



# EGS4 / SPECint92 Relation

All values of EGS4 are measured at KEK or DEC.  
They are NOT authorized yet.

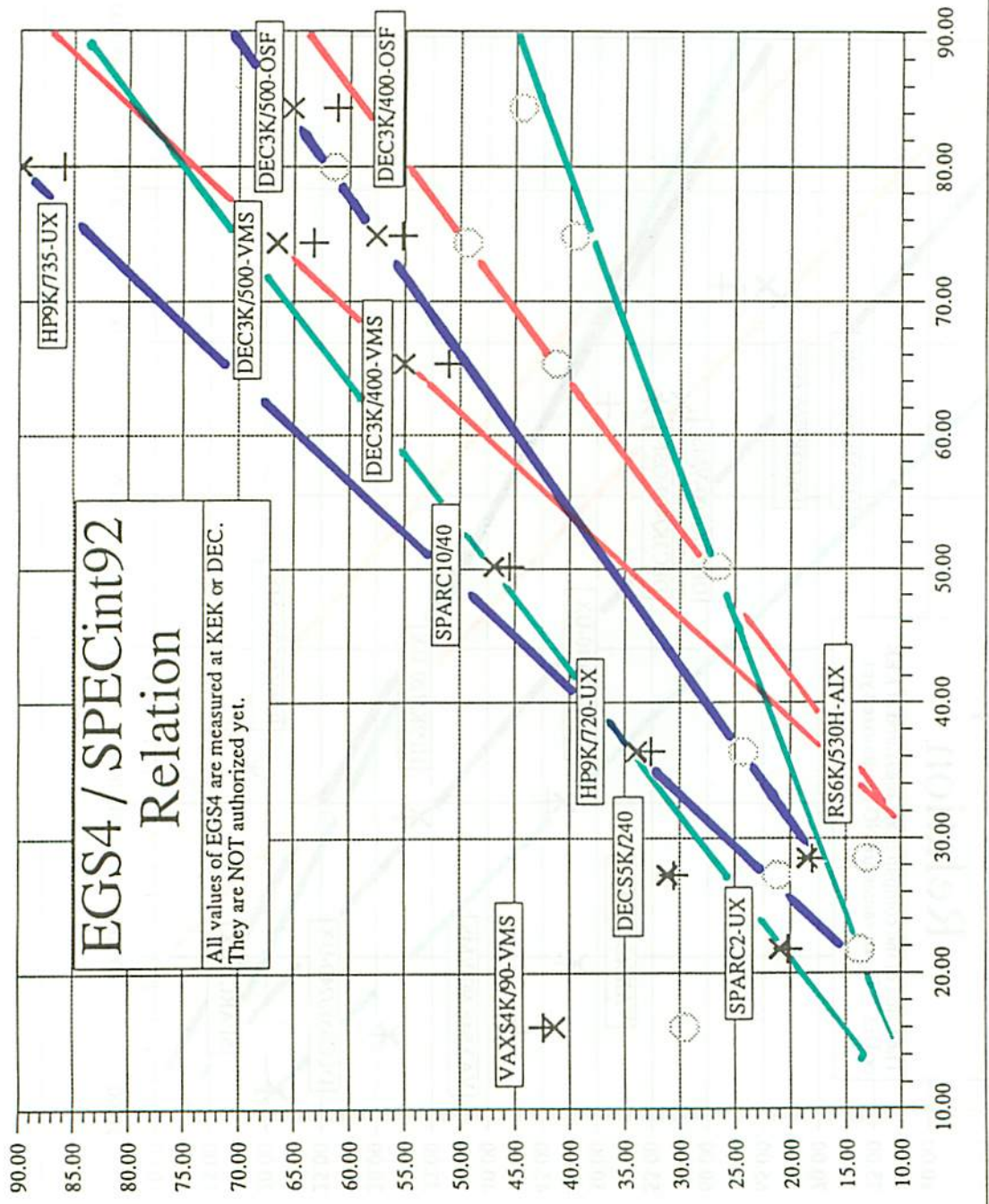
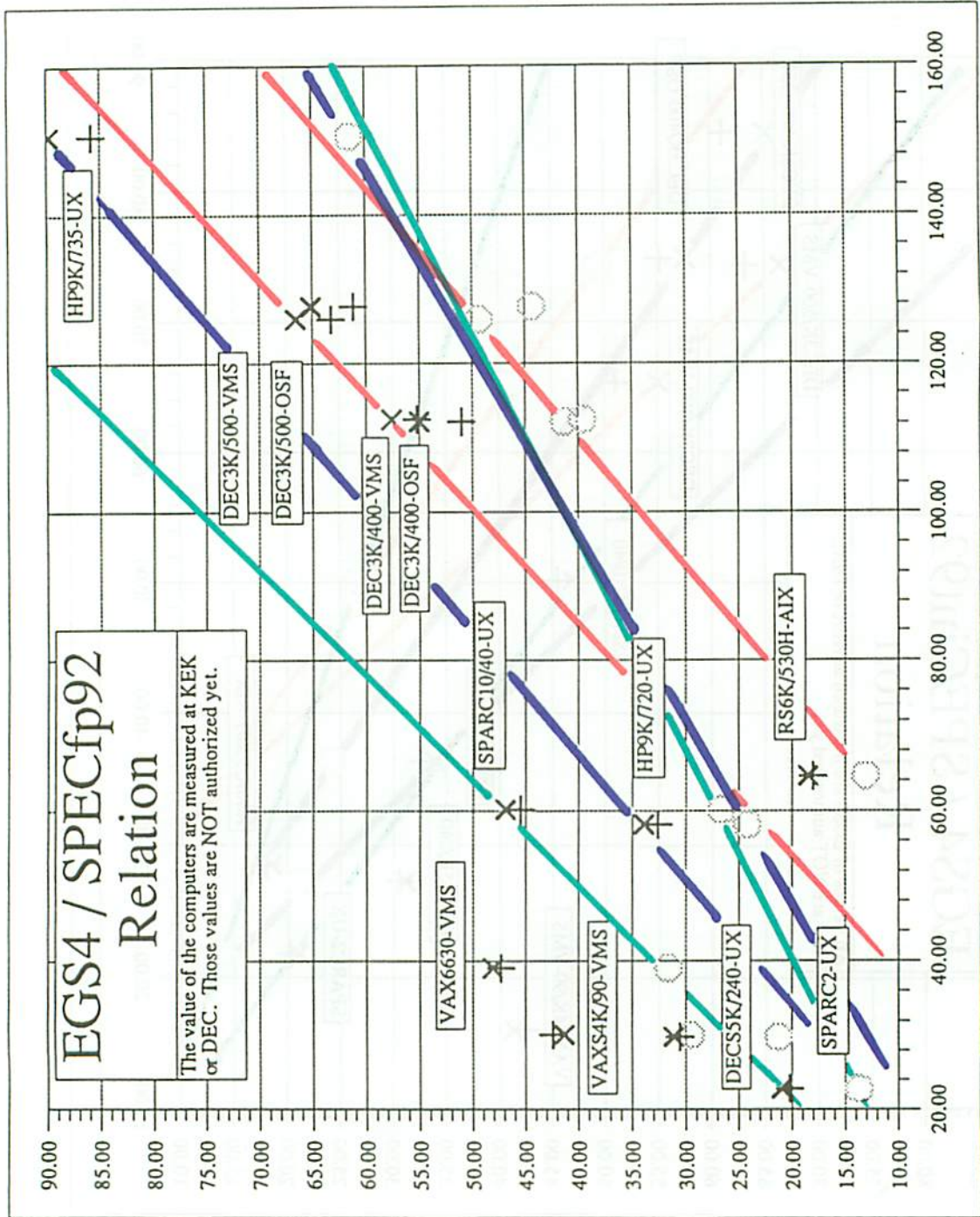


図 10



# Alpha AXP上でのEGS4コードの解析

文部省 高エネルギー物理学研究所  
日本デジタルイクイップメント株式会社<sup>^</sup>  
安 芳次、一井 信吾、八代 茂夫、平山 英夫  
国府田 明弘<sup>^</sup>、鈴木 栄伸<sup>^</sup>

## Analysis of EGS4 code system on Alpha AXP computer

Y. YASU, S. ICHII, S. YASHIRO, H. HIRAYAMA, A. KOKUFUDA<sup>^</sup>, E. SUZUKI<sup>^</sup>

KEK, National Laboratory for High Energy Physics

Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

DEC-J, Digital Equipment Corporation Japan<sup>^</sup>

Mitsuisime-i-tsukubagakucn bldg., Amakubo 1-16-10, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

The Alpha AXP is a RISC computer that has 64-bit address space and was publicly announced in November 1992. The Alpha AXP that features *Superscalar* and *Superscalar* brought us an improved performance and an extended address space.

We investigated the capability of the Alpha AXP for high energy physics applications. We tried to find out (1) how big a performance level can reach in processing speed and (2) under what condition it can achieve such level of performance.

We used an EGS4 program in this study because it is a well known source code for wide range of applications, such as nuclear power plants, medical science, nuclear physics and high energy physics, on many computers.

### 1. はじめに

1992年11月に発表されたAlpha AXP<sup>1)</sup>は、64-bitアドレス空間を持つRISCコンピュータである。スーパーパイプライン(多重命令進行機構)及びスーパースカラ(多重命令実行機構)を採用し、パフォーマンスの向上、アドレス空間の拡大が同時にもたらされた。

この研究・調査では、高エネルギー物理学の分野におけるAlpha AXPの能力を調査することを目的とした。調査項目は主に、(1)どの程度の処理速度を持つのか、(2)どのような方法であればパフォーマンスを向上させる事ができるのか、という点とした。

今回、EGS4<sup>2)</sup>プログラムを研究・調査に用いた。その理由は、ソースコードが良く知られており、さらに原子力関連や、医療、原子物理学及び高エネルギー物理学などにおいて広く使用され様々な計算機上で稼働していることである。

### 2. 実行機種とシミュレーション条件

調査対象の計算機として、Alpha AXPであるDEC3000 Model 500 AXP (64-bit RISC, 150MHz)を選んだ。比較対象として、従来からのRISC CPUである、MIPS社製のR3000A<sup>3)</sup>搭載のDECstation 5000 Model 125 (32-bit RISC, 25MHz)を使用した。OSは、Alpha AXPがOpenVMSとOSF/1、DECstationがULTRIXである。計算機のハードウェアやソフトウェアの環境は、表1の通りである。

EGS4の実行は3つのシミュレーション条件で行なった。はじめは、EGS4のテストプログラムとして使われているUCSAMPL4である。ジオメトリは比較的単純である。二番目はジオメトリが最も単純な条件のUCSAMPL4iである。ジオメトリが最も単純であるためI F文等による分岐命令をあまり含まないP

プログラムである。三番目はXYZDOSで3つの条件のなかで最もジオメトリが複雑な条件である。IF文等による分岐命令を多く含むプログラムである。

### 3. コード解析の手順

高速化のためのコード解析の手順として図1の様な手順をとった。

- 1:コンパイルオプションを使って実行する。
- 2:ツールを使って負荷の分析をする。
- 3:分析結果から負荷の高い所を中心にチューニングを行なう。

EGS4のUCSAMPL4、UCSAMPL4i、XYZDOSそれぞれの負荷の分析をソースコードの各行のレベルまで行なった。分析の結果、行レベルにおいて特に高い負荷が集中している場所が見当たらなかった。そのため、ソースコードを変更することなくコンパイルし、コンパイルオプションを数種用いてそれぞれの実行速度の計測と負荷の分析を行なうことにした。

### 4. 実行速度の計測方法

実行速度はCPUタイムの計測によって行ない、負荷の分析はfuse、pixic及びPCA等のツールによって行なった。

fuseは、サブルーチン構成の図示、実行負荷のグラフ化等の分析機能を持ち、ビジュアルな解析をウィンドウインターフェースを通して行なうことができる。

### 5. コンパイルオプション

EGS4の各プログラムとそれぞれの計算機で適用したコンパイルオプションは表2の通りである。コンパイルオプションの詳細は次の様な内容である。

最適化を行なわない：

文字通り高速化のための最適化を行なわないもの。

最高レベルの最適化：

最高レベルの最適化を実施するもので、これはデフォルトとなっている。局所的な最適化、さらに小さなルーチン等をインライン化する最適化、複数のソースファイルにまたがる広域的な最適化を実施。

高速数値演算ライブラリの付与：

高速数値演算ライブラリの付与を行なう。MIPS/ULTRIXには、このオプションは存在しないため実行#2と#3は計測していない。

ループ中の除算をできるだけループ外で実行する最適化：

ループ中の除算をできるだけループ外で実行する最適化。  
RISC系のCPUは除算が乗算より遅いため存在するオプション。

これらのオプションを組み合わせて実行した。各CPU/OS上でのコンパイル時の具体的なパラメータを表3に示す。

## 6. EGS4コードの解析結果及び考察

コードの解析に先立ち、EGS4のUCSAMPL4/UCSAMPL4i/XYZDOSのAlpha AXP上での動作に関して、シミュレーション実行結果の正当性を確認した。

### 6.1 実行速度

図2がUCSAMPL4、図3がUCSAMPL4i、図4がXYZDOSの実行速度をプロットしたものである。各グラフの上のグループがMIPS/ULTRIX、中がAlpha AXP OpenVMS、下がAlpha AXP OSF/1である。横軸に実行時間を取った。

大きな特徴は各プログラムに共通である。Alpha AXPはMIPSに比べ、いずれのコンパイルオプションの選択によらず3.1～3.8倍の実行速度で動作した。どの計算機においても、同一CPU/OS内の比較では、最高レベルの最適化を行なった場合は行なわなかった場合に比べ実行速度が1.8～2.4倍で動作した。

#### 6. 2 コンパイルオプションによる実行速度の違い

図5～7はコンパイルオプションによる実行速度の違いを見たものである。各CPU/OSで、最適化を行なわない実行#0の実行速度を基準とした。Z軸に実行#0を基準とした相対速度、Y軸にコンパイルオプションを変えた各実行、X軸にCPU/OSをとった。

図5はUCSAMPL4の実行結果である。実行#1～4の結果からAlpha AXP OpenVMS/OSF/1はMIPS/ULTRIXに比べ最高レベルの最適化の効果が大きいことがわかる。OpenVMSでは最高レベルの最適化以外のオプションの効果にあまり差は見られない。実行#2と#3の結果のうちOSF/1では高速数値演算ライブラリの付与の効果が見られる。実行#4の結果からは各CPU/OSで除算をループ外で行なう最適化について効果が認められない。

図6はジオメトリのもっとも単純なUCSAMPL4iの場合である。OSF/1の実行#1～4において最高レベルの最適化の効果がUCSAMPL4の場合に比べ大きい。OpenVMSでは最高レベルの最適化以外のオプションの効果にあまり差は見られない。実行#2と#3の結果のうちOSF/1では高速数値演算ライブラリの付与の効果が見られる。実行#4における除算をループ外で行なう最適化についてはOSF/1で若干の効果が認められる。

図7はジオメトリの複雑なXYZDOSの場合である。実行#1～4の結果から最高レベルの最適化の効果はOpenVMS及びMIPS/ULTRIXで大きくなっている。OpenVMSでは最高レベルの最適化以外のオプションの効果にあまり差は見られない。実行#2と#3の結果のうちOSF/1では高速数値演算ライブラリの付与の効果が見られる。実行#4の結果からは各CPU/OSで除算をループ外で行なう最適化について効果が認められない。

#### 6. 3 CPU/OSによる実行速度の違い

図8～10は異なるCPU/OS間での実行速度の比較を示す。MIPS/ULTRIXを基準とした。実行#2と#3はMIPS/ULTRIXの仕様により計測していないためプロットしていない。

図8はUCSAMPL4の実行結果である。Alpha AXPはMIPS/ULTRIXに比べ実行速度が3.1～3.6倍ほど速い。実行#1～4の結果から最高レベルの最適化を行なったときに効果が大きいことがわかる。OpenVMSはOSF/1に比べて若干速い。

図9はUCSAMPL4iの実行結果である。Alpha AXPはMIPS/ULTRIXに比べ実行速度が3.1～3.6倍ほど速い。実行#1～4の結果から最高レベルの最適化を行なったときに効果が大きいことがわかる。OpenVMSとOSF/1は、ほぼ同じ速度である。

図10はXYZDOSの実行結果である。Alpha AXPはMIPS/ULTRIXに比べ実行速度が3.4～3.8倍ほど速い。OpenVMSはOSF/1に比べて速い。

#### 6. 4 Alpha AXP OSF/1の負荷分布

図11～13はAlpha AXP OSF/1上で各プログラムを実行したときの負荷の分布である。Z軸に負荷の分布の割合を、Y軸にコンパイルオプションを変えた各実行を、X軸にサブルーチンを取りプロットした。

図11はAlpha AXP OSF/1でのUCSAMPL4の負荷分析である。最適化を行なわない実行#0に比べ最高レベルの最適化を行なった実行#1～4では、ELECTR/UPHI/MSCATの負荷が減ってSQRTF/LOGFの負荷が高くなっている。また、最高レベルの最適化を行なった実行#1～4の間で比較すると、実行#2と#3ではSQRTFの負荷が減少しており高速数値演算ライブラリの効果が認められる。

図12はUCSAMPL4iの場合である。UCSAMPL4と同様の特徴がでている。最適化を行なわない実行#0と最高レベルの最適化を行なった実行#1～4の間では、ELECTR/UPHI/MSCATの負荷が最高レベルの最適化の効果によって減っている。逆にSQRTF/LOGFの負荷が相対的に高くなっている。最高レベ



ルの最適化を行なった実行# 1～4の間では実行# 2と# 3ではSQRTFの負荷が減少しており高速数値演算ライブラリの効果が認められる。

図13はジオメトリの複雑なXYZDOSの場合である。最適化を行なわない実行# 0と最高レベルの最適化を行なった実行# 1～4を比較して、最高レベルの最適化を行なった場合にELECTR/MSCAT/HOWFAR/UPHIの負荷が減っている。特に、シミュレーション対象となるリージョンのジオメトリを計算するHOWFARの負荷の減少が顕著である。XYZDOSのHOWFARでは約20行のIF文がほとんどを占めている構成となっており、最高レベルの最適化が大きく効いている。一般に、EGS4などのシミュレーションプログラムはジオメトリが複雑になればなるほどIF文を多用することから、最高レベルの最適化を行なうことは有効である。SQRTF/LOGFに関しては相対的に負荷が高くなっている。また実行# 2と# 3ではSQRTFの負荷が減少しており高速数値演算ライブラリの効果が認められる。

#### 6.5 Alpha AXP OpenVMSの負荷分布

図14～16はAlpha AXP OpenVMS上で各プログラムを実行したときの負荷の分布である。解析ツールであるPCAの仕様のため実行# 0のみを計測した。

図14はUCSAMPL4の負荷分布である。ELECTR/UPHI/MSCATが大きな負荷となっている。

図15はUCSAMPL4iの負荷分布である。大きな負荷はUCSAMPL4と同様であるが、AUSGAB/BREMSの負荷が逆転しているのが目立つ。

図16はXYZDOSの負荷分布である。HOWFARの負荷が目立っている。これはシミュレーションのジオメトリが複雑なことに起因している。

#### 6.6 MIPS/ULTRIXの負荷分布

図17はMIPS/ULTRIX上でのUCSAMPL4の負荷分布、図18はMIPS/ULTRIX上でのUCSAMPL4iの負荷分布である。最高レベルの最適化オプションを適用した場合、FLOG/FSQRTの負荷が相対的に高くなっている。

#### 6.7 解析結果の考察

EGS4コードの解析を通じ以下のことがわかった。

- 1)Alpha AXP OpenVMSのデフォルトオプションである最高レベルの最適化オプションは、高速化の効果を安定して引き出している。
- 2)Alpha AXP OSF/1の高速化の効果には多少ムラがあり、適切なオプションを選ぶことにより高い高速化の効果を実現できる。

### 7. 結論と今後の課題

シミュレーション実行結果の正当性が確認され、Alpha AXP上でEGS4が動作することが確認された。

Alpha AXP上でEGS4を高速化する場合、コンパイルオプションを使用するのが手軽で効果も大きい。この場合コンパイルオプションの機能を良く理解して使用するのが重要である。

プログラムの負荷を細かく分析できる各種ツールを利用することによって、プログラムの速度向上を効率よく行なうことができる。

今後、各機種でのEGS4の実行速度を計測して、さらにデータを採取する予定である。また、プログラムの高速化の手法について、さらに検討していきたい。

参考文献

- 1) 日本デジタルイクイップメント株式会社 監訳、高澤 嘉光 訳：「64ビットRISC Alpha AXP アーキテクチャ概要」、共立出版株式会社、1993.
- 2) Walter R.Nelson, Hideo Hirayama, and David W.O.Rogers : THE EGS4 CODE SYSTEM, SLAC-Report-265, (1985)
- 3) Gerry Kane、前川 守 訳：「mips RISC アーキテクチャ -R2000/R3000-」、共立出版株式会社、1992.

表1 実行環境

	Alpha AXP	DECstation
ハードウェア	DEC3000Model1500 AXP DECchip21064-AA (150MHz) (64bit RISC CPU) 96MByte	DECstation5000Model125 MIPS R3000A (25MHz) (32bit RISC CPU) 128MByte
ソフトウェア	日本語DEC OSF/1 AXP Ver1.2 日本語OpenVMS AXP Ver1.5 FORTRAN Ver3.3	日本語ULTRIX Ver4.2A FORTRAN Ver3.1
性能	SPECmark89           121.5 SPECint92            84.4 SPECfp92             127.7 MIPS (Dhrystone V1.1) 151.6	SPECmark89            19.3 SPECint92             16.0 SPECfp92             17.5 MIPS (Dhrystone V1.1) 26.8
解析ツール	OSF/1 : FUSE Ver1.2 PIXIE VMS : PCA	日本語FUSE for ULTRIX V1.1 PIXIE
EGS4シミュレーションプログラム (実行条件共通)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ucsamp14 : 厚さ3cmの鉄に1GeVのe<sup>-</sup>を入射したときのシミュレーション</li> <li>・ ucsamp14i : 厚さ無限大の鉄に1GeVのe<sup>-</sup>を入射したときのシミュレーション</li> <li>・ xyzdos : 19cm立方の水に20MeVのe<sup>-</sup>を入射したときのシミュレーション</li> </ul>	

表2 コンパイルオプション

	最適化を行なわない	最高レベルの最適化 (デフォルト)	高速数値演算 ライブラリの付与	ループ中の除算を できるだけループ外で 実行する最適化
実行#0	○			
実行#1		○		
実行#2		○	○	
実行#3		○	○	○
実行#4		○		○

表3 各OSでのコンパイルオプションの表記

Alpha AXP (OSF/1)	実行#0 実行#1 実行#2 実行#3 実行#4	<pre>-O0 -non_shared -O -non_shared -O -non_shared -math_library fast -O -non_shared -assume noaccuracy_sensitive -math_library fast -O -non_shared -assume noaccuracy_sensitive</pre>
Alpha AXP (OpenVMS)	実行#0 実行#1 実行#2 実行#3 実行#4	<pre>/check=noover/optimize=level=0 /check=noover/optimize=level=4 /check=noover/optimize=level=4/math_library=fast /check=noover/optimize=level=4/math_library=fast /assume=noaccuracy_sensitive /check=noover/optimize=level=4 /assume=noaccuracy_sensitive</pre>
MIPS (ULTRIX)	実行#0 実行#1 実行#4	<pre>-O0 -O -O -assume noaccuracy_sensitive</pre>

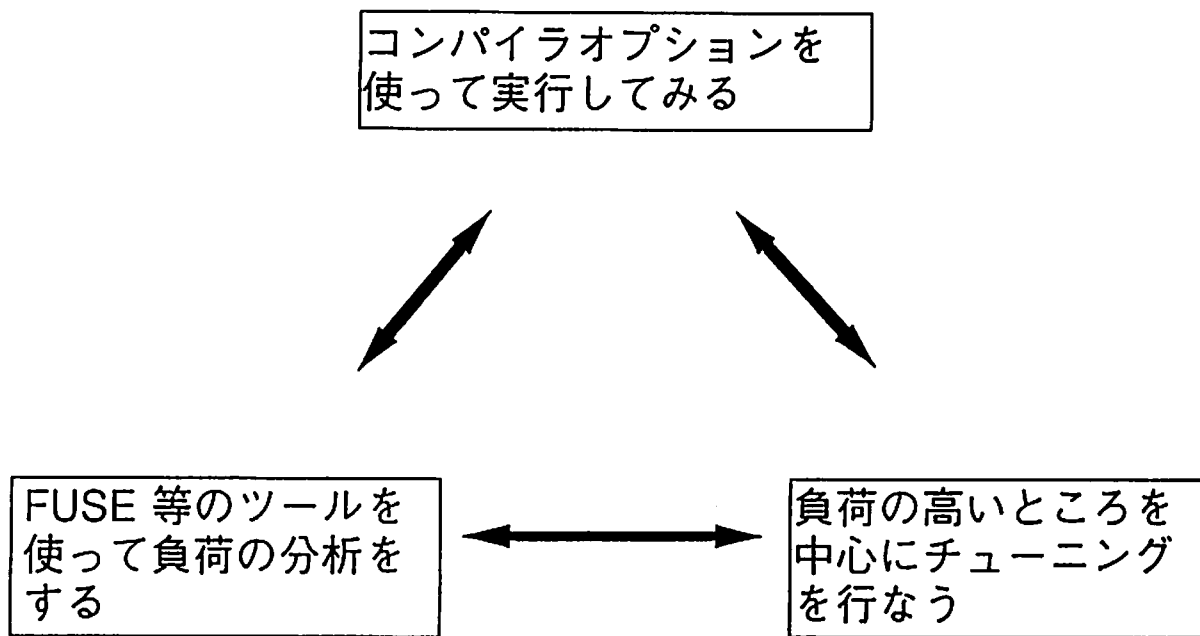


図1 コード解析の手法

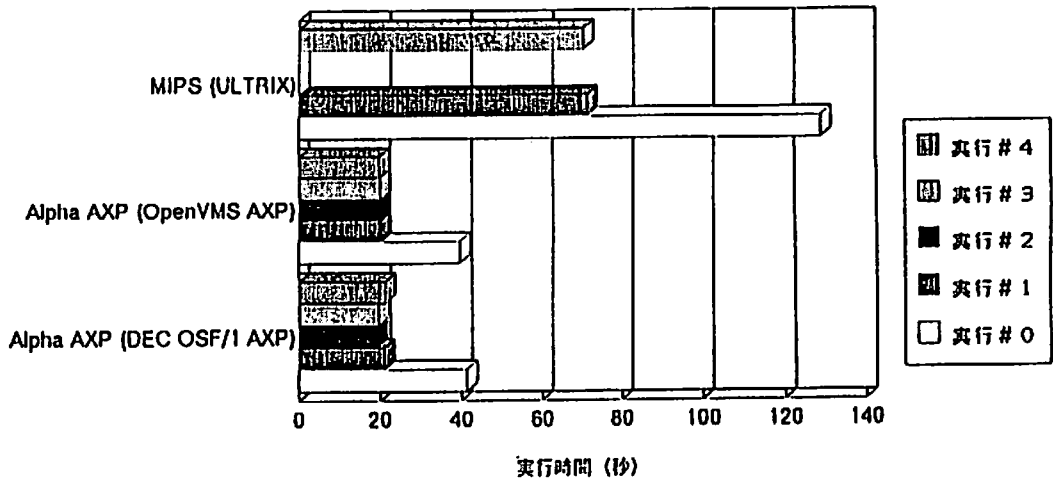


図2 UCSAMPL4 実行速度結果 1

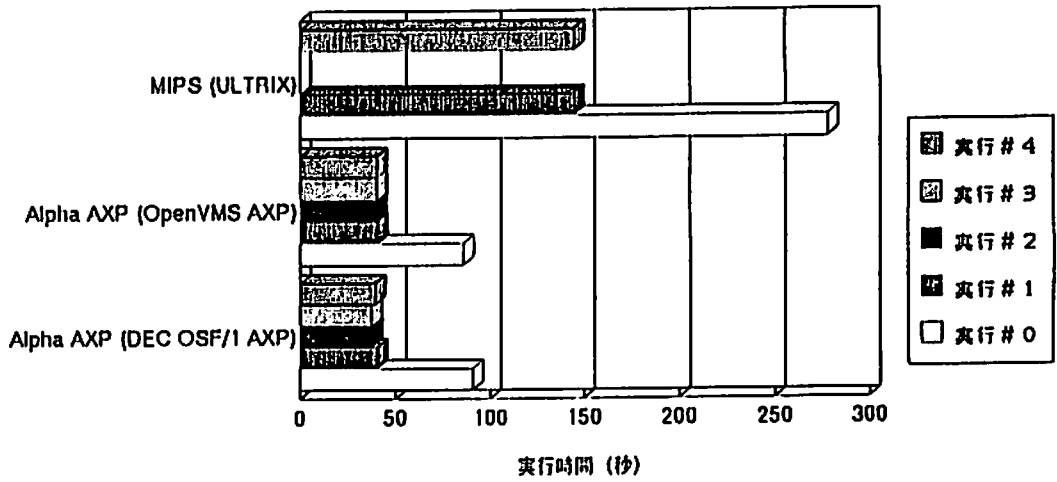


図3 UCSAMPL4I 実行速度結果 1

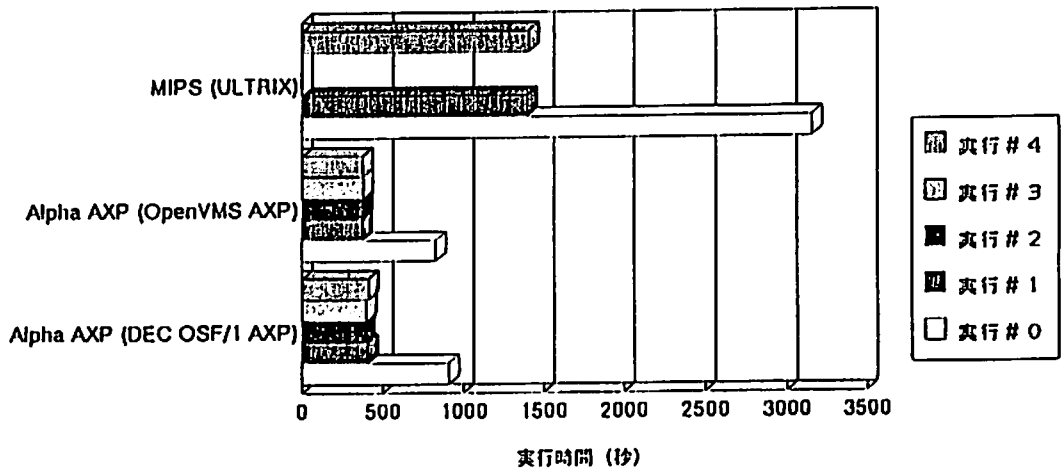


図4 XYZDOS 実行速度結果 1

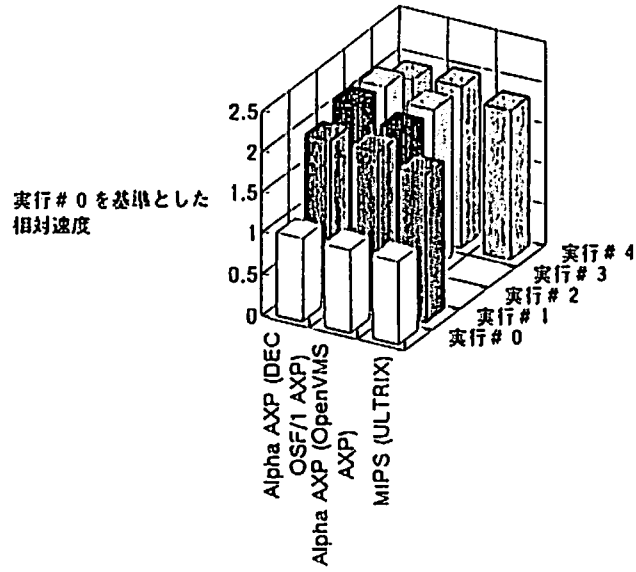


図5 UCSAMPL4 実行速度結果 2

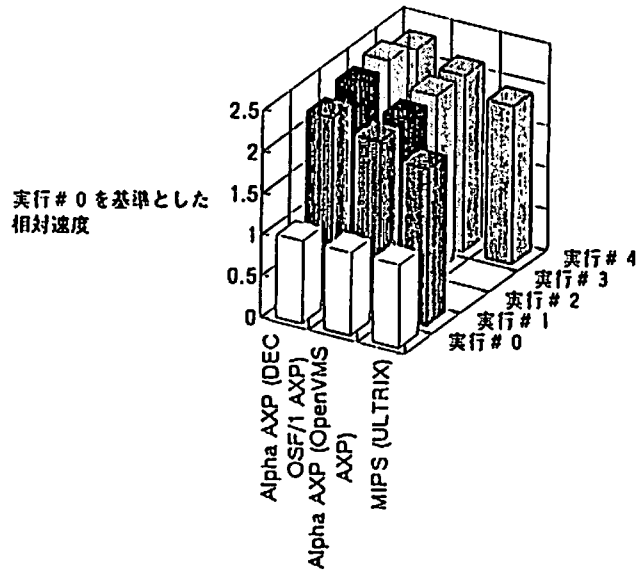


図6 UCSAMPL4i 実行速度結果 2

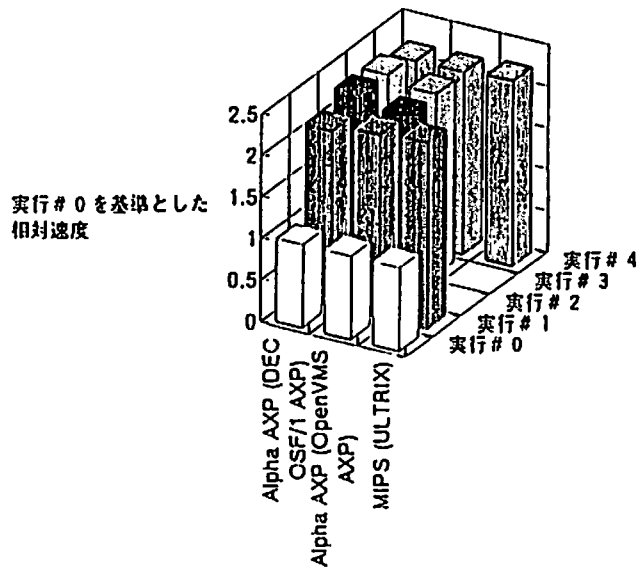


図7 XYZDOS 実行速度結果 2

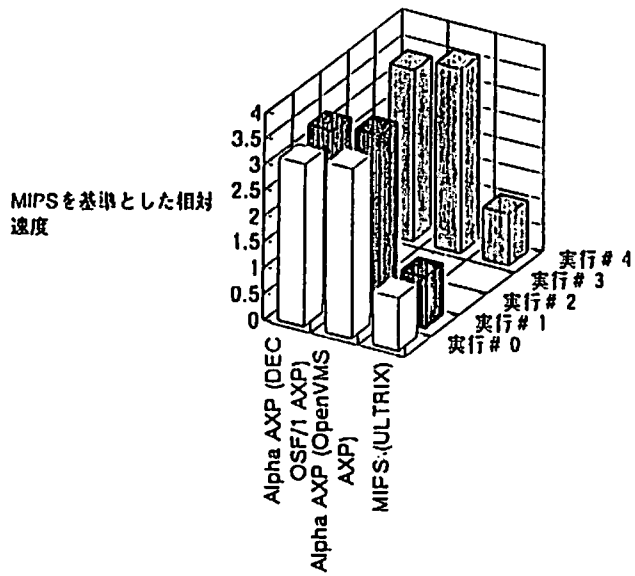


図8 UCSAMPL4 実行速度結果 3

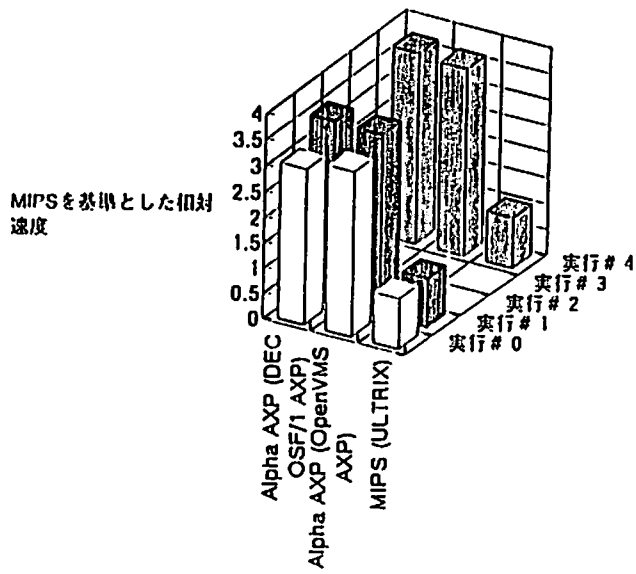


図9 UCSAMPL4I 実行速度結果 3

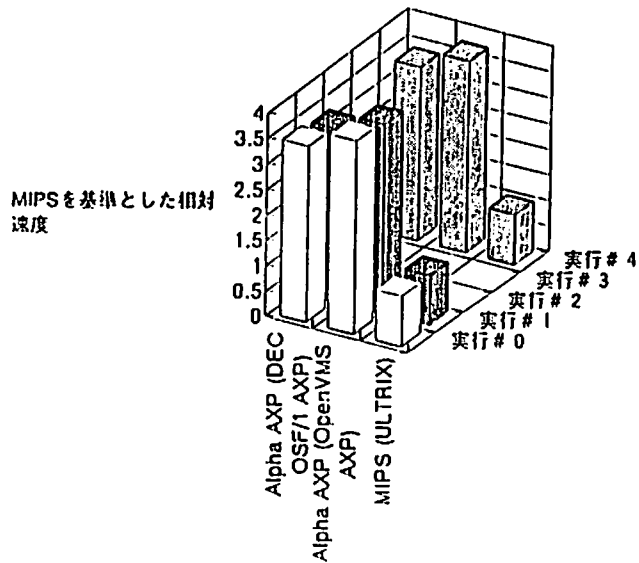


図10 XYZDOS 実行速度結果 3

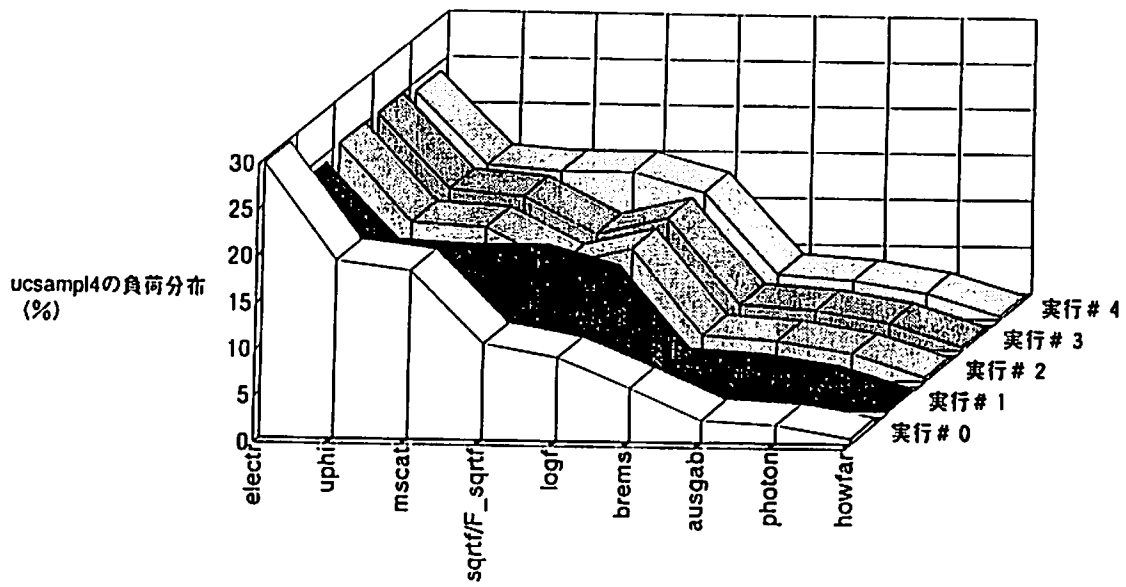


図11 Alpha AXP(OSF/1)負荷分析1

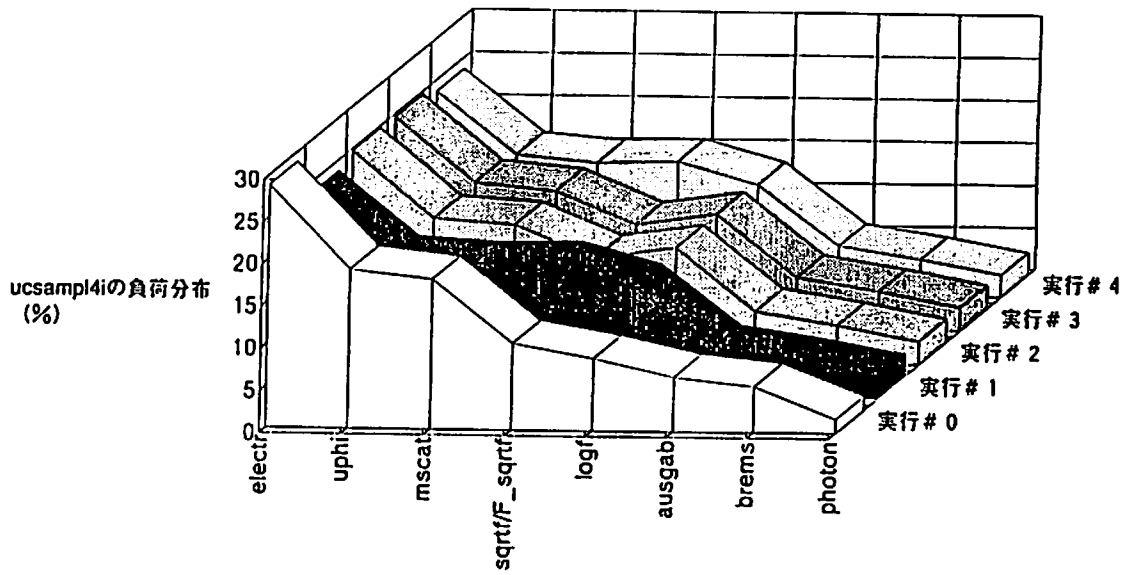


図12 Alpha AXP(OSF/1)負荷分析2

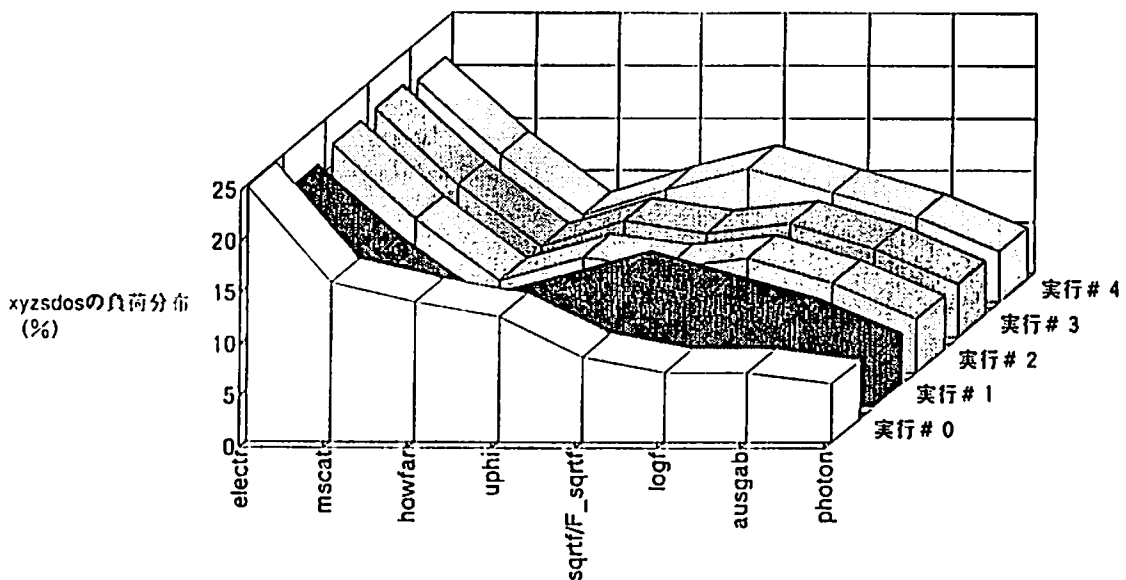


図13 Alpha AXP(OSF/1)負荷分析3



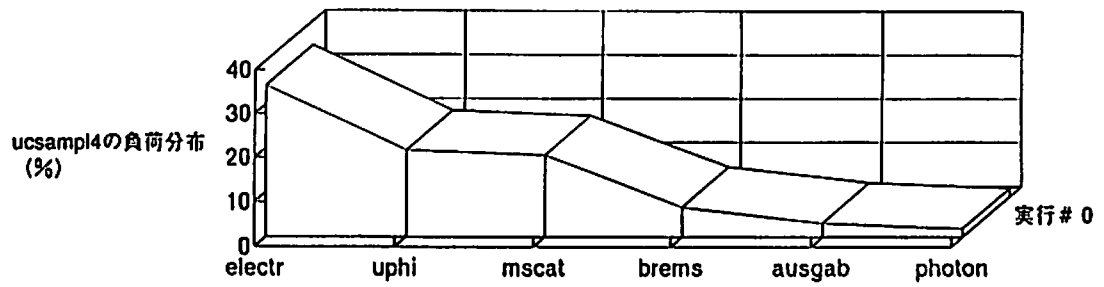


図14 Alpha AXP(OpenVMS)負荷分析1

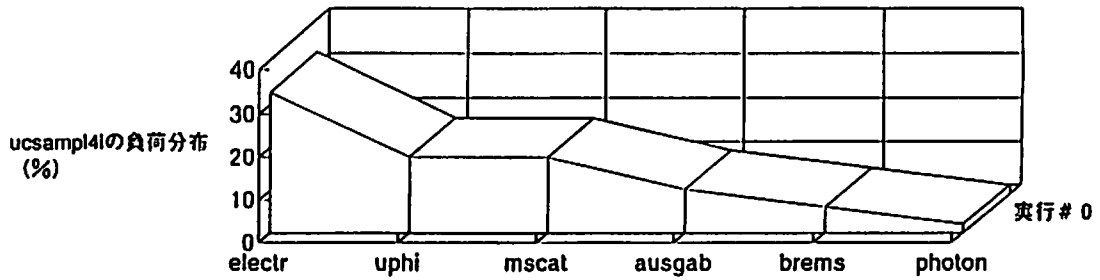


図15 Alpha AXP(OpenVMS)負荷分析2



図16 Alpha AXP(OpenVMS)負荷分析3

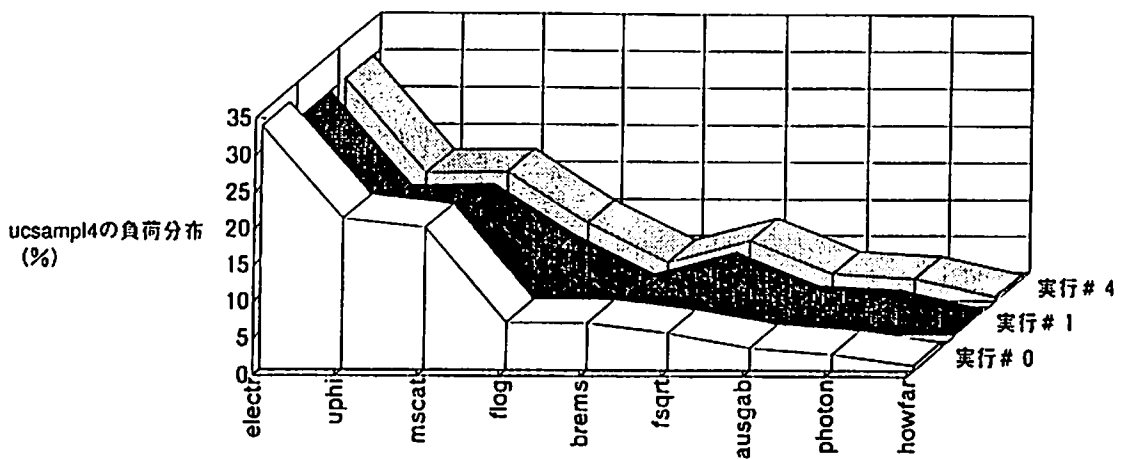


図17 MIPS(ULTRIX)負荷分析1

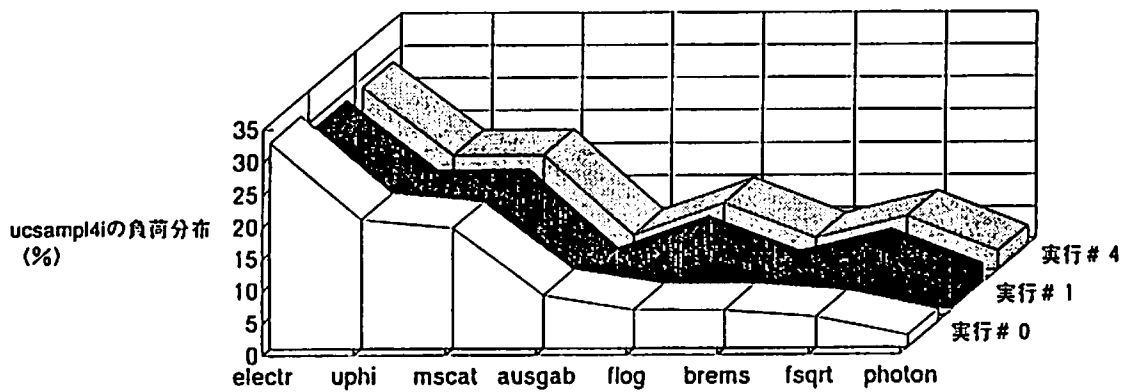


図18 MIPS(ULTRIX)負荷分析2

# ポジトロンファクトリー用電子リニアック及びターゲット系に関する考察 (Ⅱ)

日本原子力研究所高崎研究所 金子広久, 岡田漱平

## Consideration on Electron Linac and Target System for the Positron Factory (Ⅱ)

Hirohisa Kaneko and Sohei Okada

Takasaki Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute  
Watanuki-machi, Takasaki-shi, Gunma-ken 370-12, Japan

JAERI Takasaki has been promoting design studies for the Positron Factory, which aims at production of linac-based intense monoenergetic positron beams of  $10^{10} \text{ s}^{-1}$  in intensity. We have developed a new Monte Carlo simulation system (EGS4-SPG) for the design of the complicated target (electron/positron converter and positron moderator).

In this simulation system, the EGS4 code is applied when energies of positrons are more than a cut-off energy. The calculation on the behavior of positrons is switched to the SPG code (thermalization, diffusion, annihilation, reemission) below the cut-off. The combination of EGS4 and SPG made it clear that photons from the converter play a considerable role in the slow positron generation in the moderator.

### 1. はじめに

電子リニアックを用いて  $10^{10}$  個/秒以上の高強度単色陽電子ビームの発生を目指すポジトロンファクトリーのターゲット系の設計計算を行うため、新しいモンテカルロ計算システム (EGS4-SPG) を開発した。

### 2. 計算コード開発

計算システムの概念を図1に示す。高エネルギー電子線による電子・陽電子・ガンマ線シャワー発生に関しては既存の計算コード EGS4<sup>1)</sup> を利用した。陽電子の熱化・拡散・消滅・再放出に関しては、我々が開発したコード SPG<sup>2)</sup> (Slow Positron Generation) を用いた。これまでは (たとえば前回の本研究発表会) コン

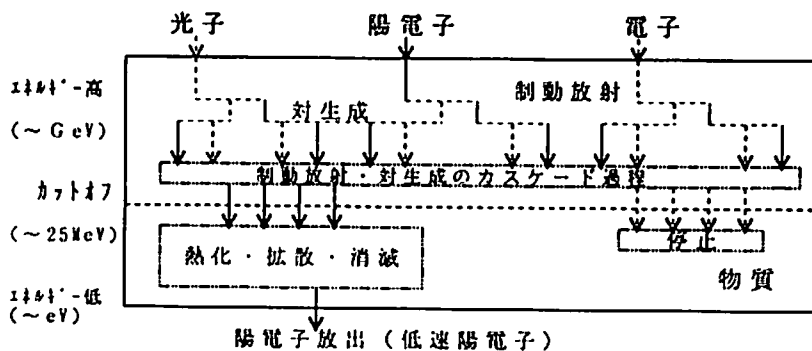


図1. 計算システム (EGS4-SPG) の概念図

パータから発生する高エネルギー陽電子のエネルギー・角度分布をEGS4で計算し、次に種々のエネルギーの陽電子それぞれに対してSPGを用いてモデレータにおける熱化・拡散・消滅・再放出を計算していた。このため、モデレータ内でも起こっているはずの電子・陽電子・ガンマ線によるカスケードシャワーを考慮に入れることができなかつた。

新しい計算システムでは、コンバータ及びモデレータで陽電子のエネルギーがカットオフエネルギー（可変：通常25keV程度）以上の場合にはEGS4を適用し、それ以下になるとSPGに引き渡すようにした。また、計算で使用された媒質の形状及び各粒子の飛跡をグラフィック化できる機能も付与した。

### 3. 結果および考察

100MeVの電子ビームが、図2のようなタンタルコンバータと、3連の1T集束磁場及びタングステンモデレータ（25 $\mu$ m $\times$ 10枚）から構成される系に入射した場合の計算結果を図3に示す。コンバータから放出された陽電子が磁場により集束されている様子が分かる。

勿論、モデレータから再放出する低速陽電子の計数も行われ、このようなトータルシステムの設計に役立つことがわかる。しかし、このような‘通し’の計算では、低速陽電子がどのような過程を経て再放出されるに至ったのかを追うことはできない。そこで、さら

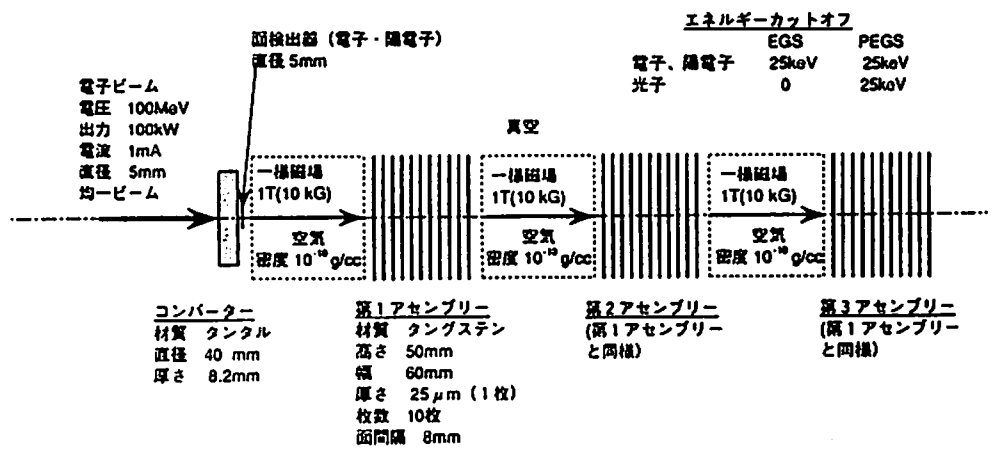


図2. コンバータ及びモデレータアセンブリーの配置図

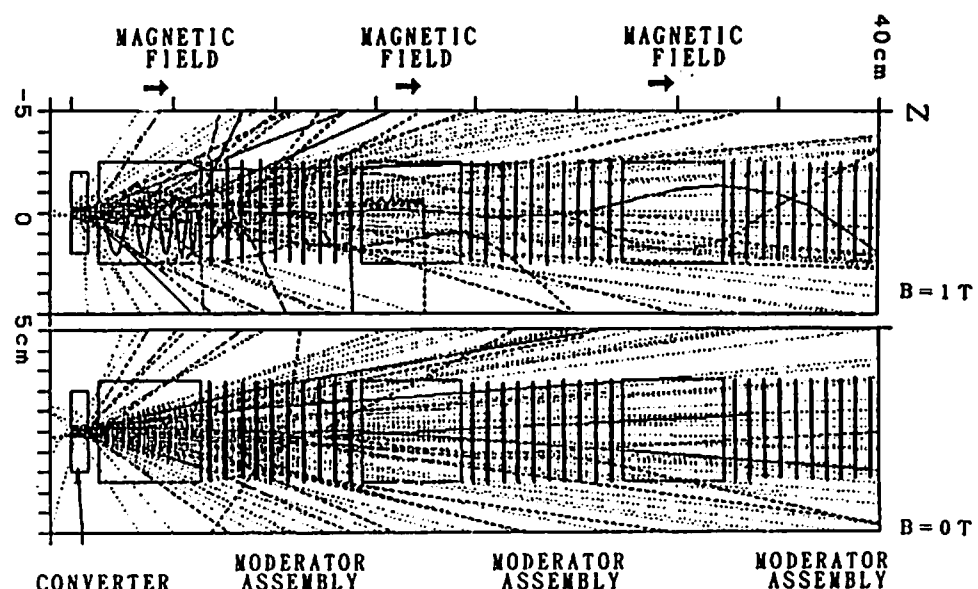


図3. 100MeV電子がコンバータ及びモデレータアセンブリーに入射した場合の粒子の飛跡  
(実線：陽電子、破線：電子、点線：光子)

に詳細な検討を加えるため、タングステンモデレータ箱10枚(10cm×10cm,厚さ25 $\mu$ m,間隔8mm)に1~5MeVまでのポジトロン、5MeV電子及び光子を入射した場合の計算を行った。1, 3, 5MeVポジトロンが上記構成のモデレータに入射した場合の粒子の飛跡(実線:陽電子、破線:電子、点線:光子)を図4に示す。高エネルギーになるに従って箱を透過する粒子の割合が高く、方向が前方に狭まっていることが視覚的にわかる。

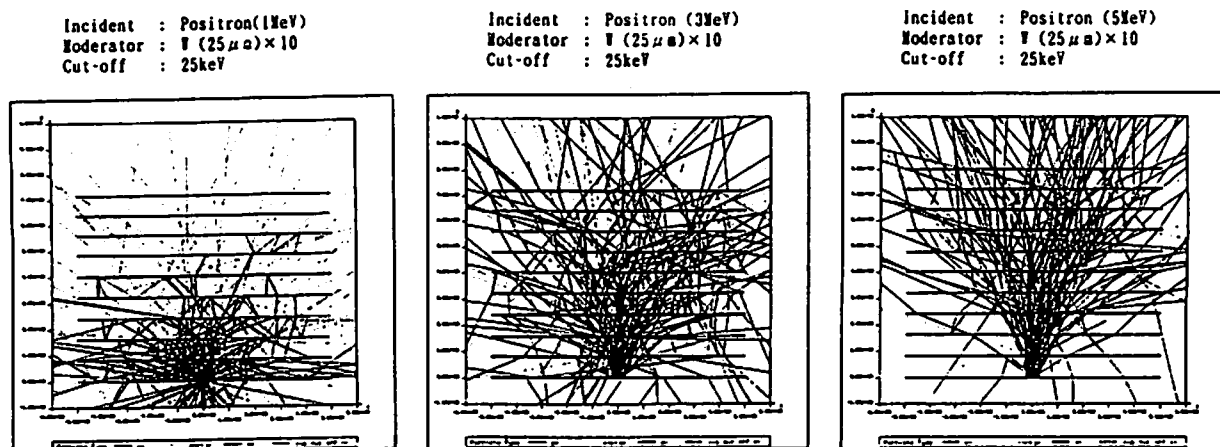


図4. 1, 3, 5 MeVの陽電子がモデレータに入射した場合の粒子の飛跡  
(実線:陽電子、破線:電子、点線:光子)

モデレータ中で陽電子が熱化する割合を表1に示す。SPGだけで計算した場合とオーダーエスティメーションを行う範囲では一致している。EGS4-SPGでは、陽電子がさらにカスケードシャワーを起こしている過程も算入しているはずであるが、陽電子を入射したケースでは、これを区別できない。陽電子のかわりに電子を入射してみるとそれがわかるが、表1から明らかのように、モデレータ中での電磁カスケードによる熱化陽電子の発生は少ない。しかし、同じ5MeVの光子を入射した場合の熱化陽電子の生成量は無視できない。

今後、コンバータから放出される光子の有効利用を図れるようターゲット系の設計を進める必要がある。

incident particle	incident energy (MeV)	positron thermalization probability	
		EGS4-SPG	SPG alone
e <sup>+</sup>	1	0.472	0.801
e <sup>+</sup>	2	0.213	0.206
e <sup>+</sup>	3	0.0575	0.0710
e <sup>+</sup>	4	0.0186	0.0319
e <sup>+</sup>	5	0.0161	0.0170
e	5	$7.80 \times 10^{-6}$	—
$\gamma$	5	$3.13 \times 10^{-3}$	—

表1. モデレータに各粒子を入射した場合の熱化陽電子生成量

参考文献

- 1) W.R.Nelson, H.Hirayama & D.W.O.Rogers : SLAC-265(1985)
- 2) S.Okada and H.Sunaga: Nucl. Instr. and Meth. B56/57(1991)604-609

# S P r i n g - 8 電子陽電子変換部の シミュレーション

原研 - 理研大型放射光施設計画推進共同チーム 水野明彦、鈴木伸介、吉川博  
堀利彦、柳田謙一、為実健二、古寺正彦、榊泰直、横溝英明

## Simulation of Electron/Positron Converter for SPring-8

Akihiko Mizuno, Shinsuke Suzuki, Hiroshi Yoshikawa,  
Toshihiko Hori, Kenichi Yanagida, Kenji Tamezane,  
Masahiko Kodera, Hironao Sakaki, and Hideaki Yokomizo  
JAERI-RIKEN SPring-8 Project Team  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

SPring-8 is the largest synchrotron radiation facility in the world, which is under construction in Harima Science Garden City. It consists of 1GeV-Linac, 8GeV-Synchrotron and 8GeV-Storage-ring. In order to avoid ion-trapping and make a beam-lifetime longer in the storage-ring, positrons will be used as accelerating particle, and are produced at the electron/positron converter in the linac.

In this paper, simulation of electron/positron converter is presented, using EGS4 code for positron producing at a target, and our original tracking code for positron focusing section. In the simulation, we obtained electron/positron conversion efficiency of 0.58%, and simulation data were qualitatively coincident with experimental data.

### 1. はじめに

S P r i n g - 8 は、兵庫県播磨科学学園都市に建設中の、世界最大級の放射光施設である。入射器としての1GeV線型加速器、8GeVシンクロトロンと、8GeV蓄積リングとで構成される。これらでは、蓄積リング中のイオントラッピングの影響をおさえ、ビーム寿命を延ばすため、電子による運転の他、陽電子による運転を計画している。電子/陽電子変換部は、線型加速器の、ビームエネルギーが250MeVのところに設置の計画である。入射系からの蓄積リングへのビーム入射時間を短くし、効率よい運転を行うためには陽電子への変換効率をできるだけ大きくする必要がある。

今回、電子/陽電子変換部の設計、特に高効率を実現するための構成を設計するためと、変換効率の設計上の目処をつけるため、EGS4<sup>1)</sup>によってターゲットでの陽電子の発生についてシミュレーションを行った。また、その後の陽電子収束部についてトラッキングコードを作成し、EGS4の結果を初期条件として変換部出口までのシミュレーションを行った。さらに、変換部のR&D装置を原研東海に設置し、実験とシミュレーションの比較検討を行った。

### 2. EGS4でのシミュレーション

シミュレーションでは、FIG.1に概略を示す装置の構造を対象とした。EGS4の計算では、タングステンターゲットに120MeV(原研に設置したR&D装置に対

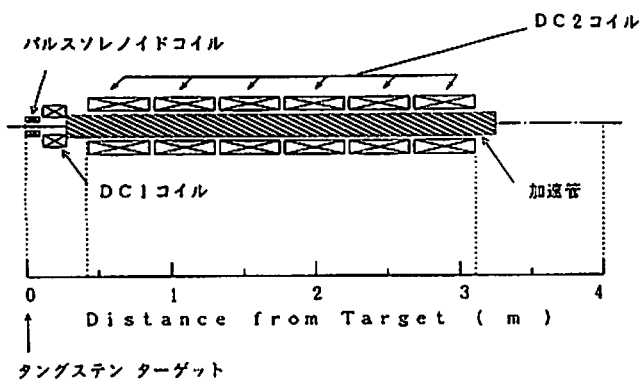


FIG.1 陽電子変換部概略図

ある。250MeVのときの方が生成効率が悪いように見えるが、これは、EGS4の計算時間を短縮するため、生成効率の良い250MeVのときの入射電子数を、120MeVの場合より少なくしたためである。なお、この計算では、ターゲットからの出射角度 $18^\circ$ 以上、およびエネルギー50MeV以上の陽電子は無視している。なお、計算は原研情報システムセンターのM780を用いた。

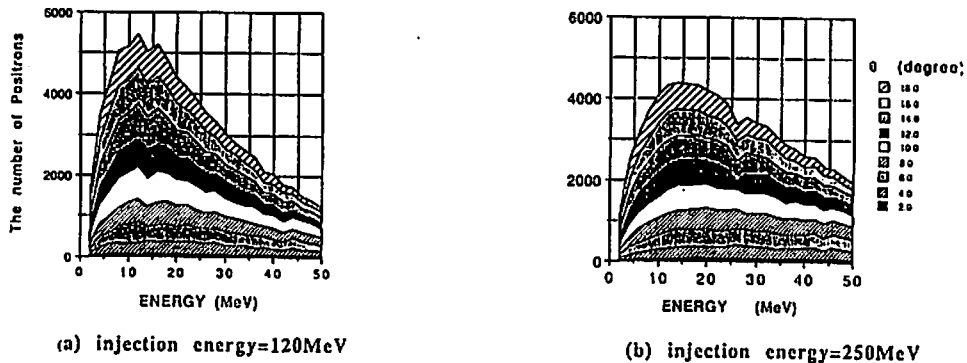
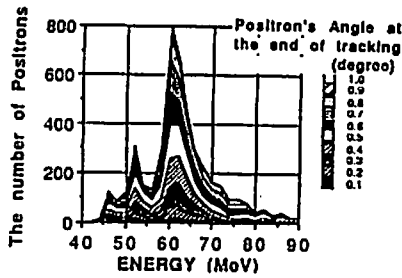


FIG. 2 EGS4の計算結果

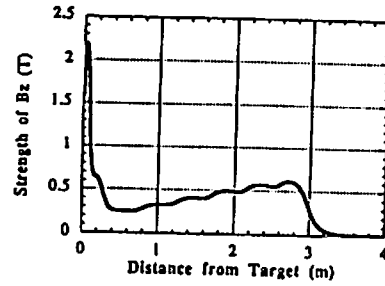
### 3. トラッキングコードでのシミュレーション

FIG.1に示すターゲット以降の収束部では、自作のトラッキングコードによりシミュレーションを行った。このトラッキングコードは、EGS4で計算した陽電子のターゲット上での位置、エネルギー、出射角度のデータを取りこみ、ルンゲクッタ法によって収束部をシミュレートするものである。Spring-8で実際に運用するときの収束部電流は数十mAと小さな値が予想され、スペースチャージの影響は無視されるので、各々のトレースは独立とし、ベクトル演算プロセッサVP2600を用いて計算の効率化を図っている。このコードでは、FIG.1に示す加速管の加速電場、およびソレノイドコイル磁場のパラメータ変化をシミュレーションに取り込めるようにした。加速電場は、収束される陽電子が主に10MeV以上なので定常電場と仮定した。ソレノイド磁場は、コイルの位置に円筒電流を仮定して計算した。

FIG.3(a)に、今回の計算の結果として、変換部出口での陽電子のエネルギースペクトルを、(b)にそのときのソレノイド磁場の構成を示す。このときの入射電子エネルギーは250MeVであり、初期データとしてFIG.2(b)を用いている。加速管では40MeV加速している。ソレノイドコイル磁場の構成は(b)のように尻上がりにな



(a) エネルギースペクトル



(b) 磁場構成

FIG. 3 変換部出口でのシミュレーション結果

っている。これは、収束部内で陽電子が1回転する間に進む距離が、陽電子のエネルギー増加に係わらずほぼ一定となる条件である。シミュレーションではこの場合に最良の結果が得られた。このときのEGS4を加えた変換効率は1.0%である。しかし、大きなエネルギー分散を持つビームを線型加速器終端まで輸送するのは困難である。エネルギーピーク $\pm 5\text{MeV}$ の範囲内の陽電子が終端まで輸送できると仮定すると、変換効率は0.58%となる。

ここで述べた最良結果と言うのは、磁場構成、および加速電場の強度については、最適値があるという意味である。ただし、磁場強度については最適値があるという意味ではなく、実現可能であろう磁場強度の中で最良という意味である。FIG.4に示すように、同一磁場構成のもと、磁場強度を大きくしていくと変換効率も大きくなるという結果が得られている。ただし、それにつれて、得られる陽電子のエネルギーも大きくなる。

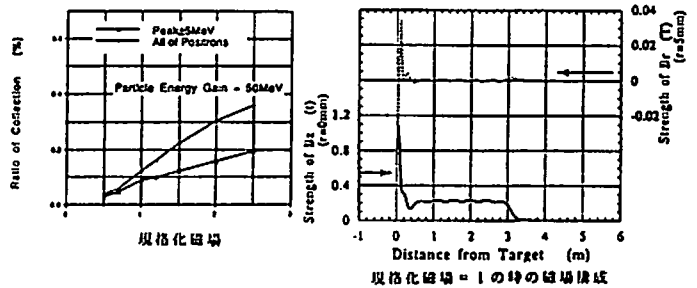


FIG. 4 磁場強度による変換効率の変化

#### 4. シミュレーションと実験との比較

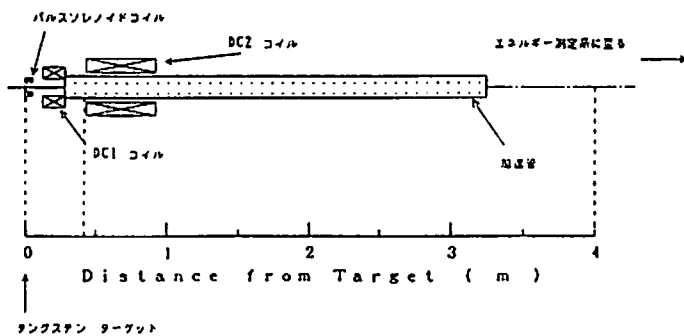


FIG. 5 R&D装置の概略図

電子/陽電子変換部のR&D装置は原研リニアックからのビームラインに設置したものであり、FIG.5に示すようにFIG.1の形状に比べ加速管を囲むソレノイドコイルの数が少ない。この装置について、3つのソレノイドコイル(左からパルスソレノイドコイル、DC1コイル、DC2コイル)の励磁量をパラメータとして変化させて実験を行い、また、同じようにシミュレーションを行うことによって比較検討をした。



ターゲット	:	シミュレーションと同一
入射電子電流	:	150nA (average)
入射電子エネルギー	:	90MeV
繰り返し	:	5pps
入射ビームパルス幅	:	1 $\mu$ sec
加速エネルギー	:	33MeV

表1 実験パラメータ

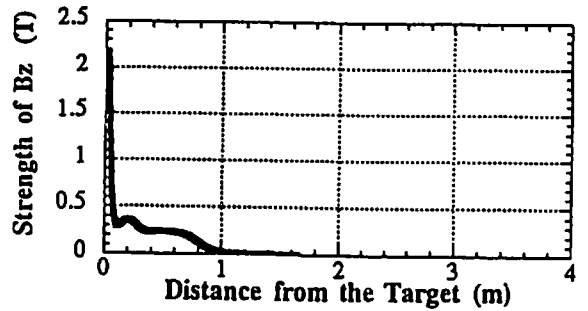


FIG. 6 実験での磁場構成 (最大値)

$\Lambda^{\circ}$  ストロノイドコイル : 5.8kA  
 DC1コイル : 350A  
 DC2コイル : 130A

実験でのパラメータを表1に示す。また、実験での磁場構成をFIG. 6に示す。比較はFIG. 7-1~FIG. 7-3に示すように、それぞれパルスソレノイドコイルだけを変化させた場合、DC1だけを変化させた場合、およびDC2だけを変化させた場合について行った。入射電子エネルギーがシミュレーションでは120MeVであるのに対し実験では約90MeVであるが、その他の条件については同一である。FIG. 6の磁場構成はFIG. 7-1~FIG. 7-3の最下段の実験、シミュレーションに対応するものである。

FIG. 7-1~FIG. 7-3により、実験結果とシミュレーションはエネルギースペクトルの形としては定性的に良く一致していることが分かる。特に、エネルギースペクトル中には複数のピークが存在するが、その数、および位置が良く一致している。相対的なピークの高さの変化はFIG. 7-1とFIG. 7-3では良く一致しているがFIG. 7-2では一致していない。

小さなピークが複数存在するのは、各々のピークが各コイルに対応しているためであると考えられる。これは、FIG. 7-1~FIG. 7-3の各図において、変化を受けるピークが違ふことから分かる。FIG. 7-1で変化しているピークはパルスソレノイドコイルに対応したもの、FIG. 7-3で変化しているピークはDC2コイルに対応したものである。ピークの変化は、DC1コイルとDC2コイルに対応したものは同じ位置で高さが増減するだけであるが、パルスソレノイドコイルに対応したピークでは、実験、シミュレーションともにピークのエネルギースペクトル中の位置が変化し、パルスソレノイドコイルにエネルギー選択機能があることが分かる。FIG. 7-2でシミュレーションと実験が一致しないのは、DC1コイルに対応するピーク的位置が、シミュレーションと実験とで一致していないのではないかと考えられる。

一方、変換効率、FIG. 7-1~FIG. 7-3の最下段の場合で、シミュレーションが0.11%に対し、実験の方は0.27%であり、大きな開きがある。この原因としては、加速管壁面での陽電子の再散乱を考慮していないこと、 $\gamma$ 線によるダクト壁面での陽電子生成を考慮していないこと、若しくはシミュレーションと実験が細部まで一致していないことなど様々に原因が考えられる。しかし、いづれにしても定性的な一致を見たことでシミュレーションそのものの妥当性は確認できたと考えられる。

以上より、FIG. 3(b)の磁場形状がSpring-8の線型加速器で達成できれば、0.58%以上の変換効率は達成できると考えられる。

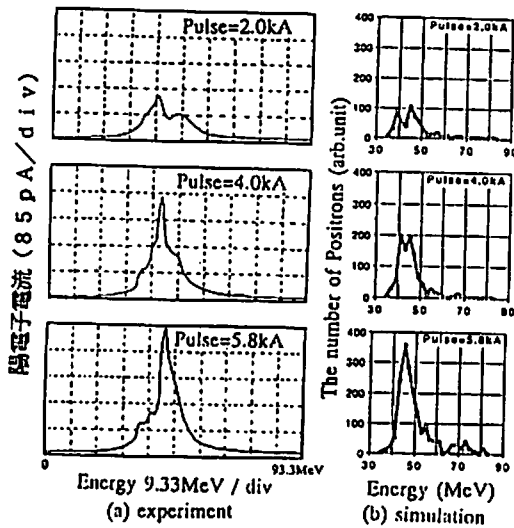


FIG. 7-1 実験とシミュレーションの比較  
(パルスソレノイドコイル励磁電流変化)  
DC1=350A DC2=130A

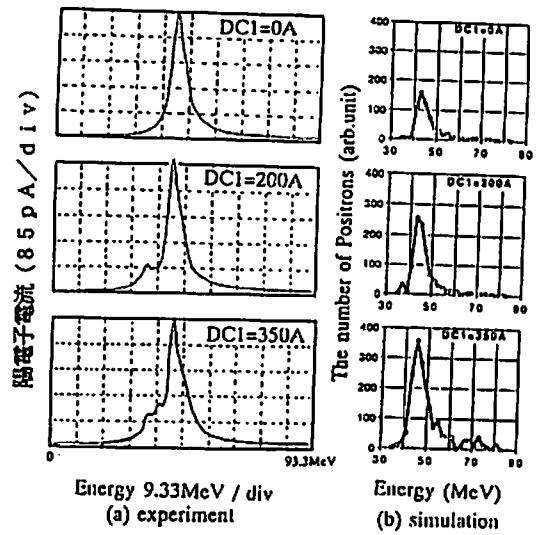


FIG. 7-2 実験とシミュレーションの比較  
(DC1コイル励磁電流変化)  
PULSE=5.8kA DC2=130A

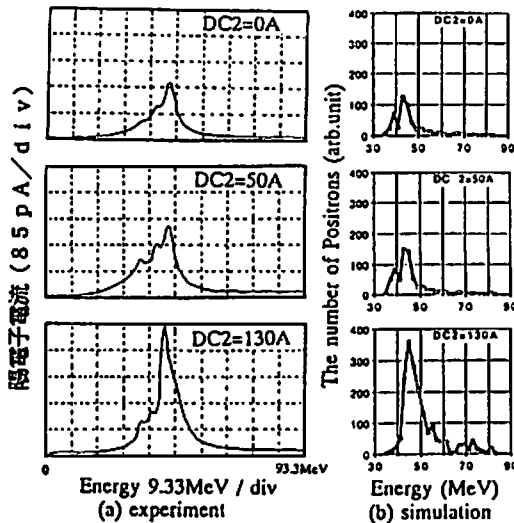


FIG. 7-3 実験とシミュレーションの比較  
(DC2コイル励磁電流変化)  
PULSE=5.8kA DC1=350A

## 5. まとめ

S P r i n g - 8 線型加速器について、E G S 4 によりターゲットでの陽電子発生について、また、自作のトラッキングコードにより収束部のシミュレーションを行った。この計算の内、実現し得る最良の結果として変換効率0.58%を得た。更に、実験とシミュレーションが定性的に一致することを確認した。

## 参考文献

- 1) Walter R. Nelson, Hideo Hirayama and David W.O. Rogers, "THE EGS4 CODE SYSTEM", SLAC-Report-265, 1985

## 第3回『EGS4研究会』講演プログラム

於：高エネルギー物理学研究所・3号館セミナーホール

1993年7月26日(月)

(1) 9:45~12:00

### 基礎コース

- 1) EGS4のシステムの概要
- 2) MORTRAN3の使い方(1)
- 3) EGS4システムのインストール
- 4) 基本的なUNIXコマンドと vi  
エディタの操作法

### 応用コース

各自のユーザコードのインストール  
実行。問題点の確認

(2) 13:00~15:00

### 基礎コース

EGS4システムのインストール  
Mortran, CHECK77  
pegs4, peps4run  
egs4run, examin

### 応用コース

- 1) Geometry Subroutine HOWFARの書き方
- 2) 進んだEGS4の使用法  
PRESTA, LATCH, Bremss. Splitting,  
特定の反応前後での AUSGAB CALL 等
- 3) EGS4に関する質疑、討論(1)

(3) 15:30~17:30

### 基礎コース

- 5) PEGS4の使い方(Material data)
- 6) EGS4 User Codeの作り方  
ucnail.morの説明

### 応用コース

各自のユーザコードの修正、改良、実行

(4) 18:30~20:30

### 基礎コース

pegs4による物質データの作成  
ucsampl4.mor, ucnail.mor等を  
基にコードの作成、実行

### 応用コース

- 4) EGS4の改良(低エネルギー光子)
- 5) EGS4に関する質疑、討論(2)

1993年7月27日(火)

(5) 9:30~12:00

基礎コース

応用コース

7) EGS4 の概要

8) MORTRAN3の使い方(2)

各自のユーザコードの修正、改良、実行

9) Geometry Subroutine HOWFAR の書き方

## EGS4を使用した研究報告

セッションI (13:30 ~ 15:00) 座長 平山 英夫 (KEK)

- 1) NE102Aプラスチックシンチレータを使った血液モニターの開発に関する  
予備計算 東北大サイクロトロン・RIセンター 成田雄一郎
- 2) 腔内挿入用 $\gamma$ プローブにおける同時計数に関するシュミレーションについて  
東北大サイクロトロン・RIセンター 林 喜治
- 3) ライナック電子線による水溶液中のエネルギー付与分布 北大 沢村 貞史
- 4) EGS4を用いた高エネルギー光子の線量当量換算係数の計算  
三菱原子力工業 岩井 敏

セッションII (15:15 ~ 17:10) 座長 中村 尚司 (東北大)

- 5) 核融合 $\gamma$ 線検出器 対生成磁気スペクトロメーターの概念設計  
東大 原野 英樹
- 6) ガス補集用電離箱の電離効率の計算 動燃・大洗 鳥居 建男
- 7) TLDを用いた光子吸収線量測定における境界面効果の影響 船研 成山 展照

8) 多重層 $\gamma$ 線ビルドアップ係数 京大 秦 和夫

9) 汎用ユーザーズ版EGS4のスカイシャイン線量評価への適用研究  
動燃・東海 野尻 一郎

1993年7月28日(水)

セッションIII (9:15 ~ 10:35) 座長 田中 俊一(原研)

10) EGS4コードによる光核反応評価手法 CRC総研 高橋 浩

11) PEGS4用光子断面積PHOTXデータ 原研 坂本 幸夫

12) 高エネルギー物理学(HEP)ベンチマークプログラム KEK 安 芳次

13) EGS4システムのプログラム解析 日本DEC 鈴木 栄進

セッションIV (10:50 ~ 12:00) 座長 伴 秀一(KEK)

14) ポジトロンファクトリー用電子ライナックおよびターゲット系に関する考察(II)  
原研高崎 金子 広久

15) Slow positron Production with A Linac 京大 道下 敏則

16) Spring-8電子陽電子変換部のシュミレーション 原研 水野 明彦

参 加 者 名 簿

氏 名	所 属	氏 名	所 属
秋本 泰造	富士フィルム	須藤	放医研
浅野 芳裕	原研大型放射光	高橋 浩	CRC総研
阿蘇 司	新潟大	武田 直人	電総研
石川 智之	CRC総研	田中 俊一	原研遮蔽研
伊藤 彬	癌研究会	田中 隆次	京大工学部
伊藤 寛	東大理学部	俵 裕子	KEK
石田 彰	シーメンス旭	遠見 宣子	奈良女子大
井上 佳久	VIC	外村 浩美	放医研
岩井 敏	三菱原子力	鳥居 建男	動燃大洗
氏家 宣彦	KEK	長尾 美春	原研大洗研
宇山 親雄	国立循環器	中川 正洋	宮崎大
大久保 敏広	甲南大	中島 宏	原研遮蔽研
大谷 宏樹	都立医療短大	中根 佳弘	原研遮蔽研
小川 喜治	近畿大学	中村 正吾	横浜国大
冲垣 成保	癌研究会	中村 尚司	東北大CYRIC
奥野 巧一	間組	波戸 芳仁	KEK
加藤 和明	KEK	成田 <sup>雄</sup> 一郎	東北大CYRIC
金子 広久	原研高崎研	成山 展照	船研
河邊 征次	KEK	沼尻 正晴	KEK
紙谷 琢哉	KEK	野尻 一郎	動燃東海
北市 雅敏	北大工学部	原野 英樹	東大工学部
吉見 弘道	KEK	林 喜治	東北大CYRIC
工藤 勝久	電総研	伴 秀一	KEK
国枝 悦夫	慶応大	平林 洋美	KEK
黒沢 直弘	VIC	平山 英夫	KEK
小口 宏	信州大医学部	深作 泰宏	原子力システム
児玉 英世	KEK	福士 政広	都立医療短大
近藤 <sup>健</sup> 次郎	KEK	福村 明史	放医研
斎藤 秀敏	都立医療短大	藤崎 達也	中央医療技専門
坂本 幸夫	原研遮蔽研	藤田 文行	北大工学部
佐々木 慎一	KEK	藤原 明春	北大工学部
笹本 宣雄	原研大型放射光	藤井 芳昭	KEK
佐藤 理	三菱総研	古川 和朗	KEK
佐藤 和男	日大工学部	前田 繁	法政大工学部
沢村 貞史	北大工学部	水野 昭彦	原研大型放射光
清水 良雄	動燃東海	道川 太一	JREC
肖 瑞亭	阪大基礎工学部	道下 敏則	京大教養部
白石 忠男	原研大洗研	南 聖治	東工大
白貝 彰宏	放医研	宮井 裕史	日立エネ研
秦 和夫	京大工学部	森山 茂栄	東大理学部
菅谷 頼仁	農工大	安 芳次	KEK
杉田 武志	VIC	山口 恭弘	原研東海研
鈴木 栄伸	日本DEC	山崎 正晴	三菱電機