

JAERI-Tech

JP0150376

2001-017



# 腫瘍細胞を用いた JRR-4 中性子ビームの評価

(協力研究)

2001年3月

山本 和喜・山本 哲哉\*・熊田 博明・鳥居 義也  
岸 敏明・松村 明\*・能勢 忠男\*・堀口 洋二

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

腫瘍細胞を用いた JRR-4 中性子ビームの評価  
(協力研究)

日本原子力研究所東海研究所研究炉部

山本 和喜・山本 哲哉<sup>\*1</sup>・熊田 博明・鳥居 義也・岸 敏明・松村 明<sup>\*1</sup>・能勢 忠男<sup>\*1</sup>・堀口 洋二

(2001年2月2日受理)

ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)の照射計画においては、物理線量が重要であるだけでなく、生体に及ぼす効果の評価について重み付け又は RBE も必要である。線量評価システム(JCDS:JAERI Computational Dosimetry System)で計算される物理線量は JRR-4 の持つ各照射モードに対応して腫瘍組織、中枢神経、神経膠、脈管のような種々の細胞による重み付けが適切に行わなければならぬ。

このような影響を評価するため、頭部水ファントムで 9L gliosarcoma、C6 glioma を用いた *in-vitro* 生物学的実験を行った。JRR-4 の中性子ビームはこれら細胞の生存率関数から評価した。

評価の結果、ホウ素+窒素の物理線量から計算されるような日本の熱中性子を用いた伝統的な BNCT に実施してきた線量評価が熱・熱外混合中性子ビームに対して応用可能であるということが本結果から明らかとなった。

---

本研究は筑波大学との協力研究のもと実施された。

東海研究所 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

\*1 筑波大学

## Evaluation of JRR-4 Neutron Beam using Tumor Cells

Kazuyoshi YAMAMOTO, Tetsuya YAMAMOTO<sup>\*1</sup>, Hiroaki KUMADA, Yoshiya TORII,  
Toshiaki KISHI, Akira MATSUMURA<sup>\*1</sup>, Tadao NOSE<sup>\*1</sup> and Yoji HORIGUCHI

Department of Research Reactor  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 2, 2001)

For preparation of irradiation plan of boron-neutron capture therapy (BNCT), not only the physical dose is important, but also weighted factors or RBE are also necessary on the evaluation of the effect on the organism. Physical dose calculated by dose evaluation system (JCDS : JAERI Computational Dosimetry System) must appropriately carry out the weighting by various cells like tumor, central nerve, glia, and the vascular in proportion to JRR-4 each irradiation mode.

In-vitro biological experiment which used 9L gliosarcoma and C6 glioma in the head water phantom was carried out in order to evaluate these effect. Neutron beam characteristics of JRR-4 were also evaluated from the functions of survival fraction of these cells.

As a result of the evaluation, it became clear that the dose evaluation calculated from physical dose of the boron and nitrogen carried out in traditional BNCT of Japan using thermal neutron is applicable for thermal and epi-thermal mixed neutron beam.

**Keywords:** Boron Neutron Capture Therapy, Biological Experiment, JRR-4, In vitro, 9L Gliosarcoma, C6 Glioma, Water Phantom, Survival Fraction, Colony Formation Assay, Neutron Beam

---

This experiment was performed by cooperative research with the University of Tsukuba.

\*1 University of Tsukuba

## 目次

1	はじめに . . . . .	1
2	JRR-4 中性子ビーム設備の概要 . . . . .	2
3	実験の方法 . . . . .	2
4	実験実施日 . . . . .	4
5	物理線量の評価方法 . . . . .	4
5.1	ホウ素線量の算出 . . . . .	4
5.2	窒素線量の算出 . . . . .	5
5.3	ガンマ線線量の推定 . . . . .	6
5.4	高速中性子線量の推定 . . . . .	7
5.5	ウェルプレートの熱中性子フルエンス及び $\gamma$ 線量 . . . . .	7
6	細胞生存率曲線の定性的評価 . . . . .	7
7	評価方法の検討 . . . . .	8
7.1	中川らの物理線量での整理 . . . . .	8
7.2	Weighted Dose での整理 . . . . .	9
7.3	$\gamma$ 線等価線量 . . . . .	10
8	まとめ . . . . .	11
8.1	腫瘍細胞の生存率から観た各ビームの評価 . . . . .	12
8.2	線量評価方法の検証 . . . . .	12
8.3	今後の課題 . . . . .	12
	謝辞 . . . . .	13
	参考文献 . . . . .	14

## Contents

1	Introduction . . . . .	1
2	Out line of JRR-4 Neutron Beam Facility . . . . .	2
3	Method and Materials for Experiment . . . . .	2
4	Experiment Date . . . . .	4
5	Evaluation of Dose in the Phantom . . . . .	4
5.1	Boron Dose . . . . .	4
5.2	Nitrogen Dose . . . . .	5
5.3	Gamma-ray Dose . . . . .	6
5.4	Fast Neutron Dose . . . . .	7
5.5	Thermal Neutron Fluence and Gamma-ray Dose on the Well Plate . . . . .	7
6	Depth Response Curve of Survival Fraction for the Three Modes . . . . .	7
7	Evaluation of Dose Units . . . . .	8
7.1	Japanese Traditional Physical Dose Unit . . . . .	8
7.2	Weighted Dose Unit at EU . . . . .	9
7.3	Gamma-ray Equivalent Dose . . . . .	10
8	Conclusions . . . . .	11
8.1	Evaluation of the JRR-4 Beams from Survival Fraction of the Glioma Cells Survival Fraction . . . . .	12
8.2	Calibration of Dose Indicator . . . . .	12
8.3	Future Studies . . . . .	12
	Acknowledgment . . . . .	13
	References . . . . .	14

## 1 はじめに

ホウ素中性子捕捉療法では、他の放射線治療（X線、 $\gamma$ 線治療そして重粒子線治療）と比較すると格段にその線量評価を行うことが難しい。なぜならば、原子炉からの1次中性子と1次 $\gamma$ 線のみではなく、中性子は脳内で減速され、より低いエネルギーの中性子となり、生体内の水素は中性子を吸収することで即発 $\gamma$ 線を発生するためである。これら物理現象が脳内で同時に起こるため、実験的にそれらを分離して線量評価することは非常に困難である。一方、近年のCT及びMRIの技術の進展には目覚しいものがあり、これらからデータを取得することにより、3次元組成分布データを作成し、ダイナミック・シミュレーションが可能となり、各物理線量を決定できるようになってきた。脳という小さい体系で中性子及びガンマ線の輸送シミュレーションするにはMCNPなどのモンテカルロ計算を行うことが好ましいと考え、我々は線量評価システム(JCDS)<sup>1)</sup>を現在開発中である。

MCNPコードは各設定群の物理線量データを出力するが、この物理線量のままでは生物学的な効果を示すものではなく、生体組織が受けるダメージおよび腫瘍の消滅などの治療効果の指標になるよう変換しなければならない。つまり、治療を計画する医療グループにとって治療を行いたい部位の線量が医療グループの望むような形の線量単位で出力されなければ適切な治療計画を立てることができないことになる。その評価指標はX線、 $\gamma$ 線治療について放射線医学の分野で蓄積された腫瘍制御及び正常組織での耐用線量についての知見が、放射線治療の経験として医師にはあるので、それらと等価に扱える形にするか、あるいは治療を行うための何らかの1次相関のある線量単位となるようにすれば良い指標であるといえる。その線量単位に基づき治療計画を立て、どのくらいの線量でどの程度効果があるのかを定量的に評価を行うことは、安全かつ有効性の高い治療方法を見出すことにつながる。まとめると、JCDSをより有効にするためには医療グループが望むような、例えば正常の放射線障害、腫瘍の縮小などのように、生物学的効果の定量的評価を可能とし、安全かつ有効な治療方法を見出すための線量評価単位(式)を入力できるような線量評価システムにしなくてはならない。上述のごとく、中性子線で治療を行う場合、物理線量の算定が難しいこともあるが、生物学的効果を評価するために、最も基本的な実験手法として殺細胞効果の測定がある。本研究はJRR-4の各中性子ビームの殺傷効果を観察するために2種類の実験細胞を用いて*in-vitro*実験を実施し、適切な線量単位(式)についての考察も行った。

日本のBNCTに関する臨床研究において、中川らの提唱する窒素+ホウ素の物理線量(以降中川らの物理線量と呼ぶ)を指標とした治療がなされている<sup>2)</sup>。本研究の第1の目的は従来の中川らの物理線量評価のJRR-4各中性子ビームに対する適応性を検討することにあり、第2に現在、欧米で用いられるWeighted Dose単位で整理することにより、中川らの物理線量との比較を行った。

JRR-4中性子ビーム設備は重水タンクの重水層厚さ変更及びCdシャッタ開閉により中性子スペクトルに変化を与えることができる。特に熱外中性子モード(熱外中性子)、熱中性子モードI(熱中性子+熱外中性子)、熱中性子モードII(熱中性子)の3モードを医療照射用の基本モードとして設定しているので、これら3モードを対象として実験を行った。各モードの中性子スペクトルをFig.1に示す。人間の頭を模擬した円筒水ファントム中に培養した腫瘍細胞を插入し、最大熱中性子フルエンスが同程度になるよう照射を行った。これら細胞の生存率曲線からビームの特性を観察し、線量指標について整理検討した。

## 2 JRR-4 中性子ビーム設備の概要

中性子ビーム設備は、重水タンク、ビーム実験要素、簡易遮蔽体及び照射室で構成される。中性子ビーム設備の構造を Fig.2 に示す。重水タンクは、炉心タンク内とビーム実験要素との間の No1 プール内に据え付けられており、重水層の厚さを変えることで中性子のスペクトルを段階的に調整することができる。重水タンクには厚さの異なる重水層 16cm (A層)、4cm (B層)、8cm (C層)、5cm (D層) の4層あり、それぞれ独立に重水を注入排水することができる。この4層の組み合わせにより、0cm から 33cm まで種々の重水厚さを選択することができる。D 層はカドミ比が J R R - 2 と同等なビームを得るために設けたもので、将来軽水シャッタとして機能させるよう設計されたものである。この重水タンクの注排水は、ヘリウムを加圧することによって行う。また、カドミウムシャッタを重水タンクとプールライニング間に設置し、熱中性子のカットができるように設計されている。これらを組み合わせることにより、熱中性子束と熱外中性子側が混在する熱中性子モード I、重水を厚くし中性子スペクトルを最も軟化させた熱中性子束モード II、そしてカドミウムシャッタをフィルタとして使用し、熱中性子束をカットした熱外中性子モードの3つのモードを医療照射用モードとして挙げている。各ビームの設定条件を Table1 に示す。更にビーム実験要素は、取り出す中性子ビームの質を改善するために、ビーム孔内にビスマス遮蔽体、黒鉛ライニング、照射コリメータが配置されている。ビスマス遮へい体は、炉心からのガンマ線を遮へいするために厚さは、180mm のブロックを用いている。また、照射コリメータは、 $\phi 10\text{cm}$ 、 $\phi 12\text{cm}$ 、 $\phi 15\text{cm}$ 、 $\phi 20\text{cm}$  の4種類を選択することができる。

各モードに対してビーム孔出口のフリービーム状態での熱中性子束及びガンマ線線量率の測定結果を Table2 に示す<sup>3)</sup>。この熱中性子束の測定は、ビーム中心での熱中性子束を示すものである。 $\gamma$  線線量の測定は LiF 粉末をエポキシ系樹脂で固化させた容器に TLD (Panasonic 社製 170L) を挿入したものを用いて行なった。なお、<sup>6</sup>Li には熱中性子をカットし、TLD の有する熱中性子の感受性の影響をなくする役割がある。

## 3 実験の方法

実験に使用した頭部水ファントムは Fig.3 及び Photo1 に示すように直径 18.6cm、長さ 24cm の円筒（ヘッド部分）と試料を出し入れできる水槽からなり、約 13 リットルの純水で満たして実験を行う。このファントム容器の材質はアクリル製 (PMMA : polymethylmethacrylate) で、円筒部分は肉厚 3mm のものを使用した。PMMA はより実用的でかつ、ICRU report 45において引用されており、等価性の高い材料として知られている。主要な組成も炭素、水素、酸素だけなので放射化の恐れもない。また、水ファントムにおいて実験を行うのは ICRU report 48 によって推薦されているためである。

使用した細胞系としては、脳腫瘍の臨床を踏まえて、リオーマ系細胞とし、9L gliosarcoma<sup>4)</sup>と C6 glioma<sup>5)</sup>の2系統を用意した。9L 及び C6 は実験グリオーマ細胞として *in-vitro* 実験では一般に用いられるもので、共に化学物質によるラットの発ガン細胞である。これら細胞はラットの脳に移植できることから、臨床的応用を見込み、*in-vitro* から *in-vivo* (生体内実験) へのステップアップを考慮して選択したものである。使用した培養液は MEM (minimum essential medium) + FBS (fetal bovine serum ; 仔牛の血清) 10% であり、実験前に細胞を指数成長条件 (exponential growth condition) 中で取りだし、照射前に細胞数のカウントを行った。細胞を指数成長条件で取る理由は、人為的な操作

から十分な時間をおくことによりそれらの影響が現れるのを防ぐことができ、かつ細胞同士の結合が殆どないと考えられるためである。今回の実験では 24 時間以上の好条件にて培養してから取りだし、実験を行った。細胞懸濁液中の添加するホウ素化合物として、実際の医療照射で使用される Sodium Borocaptate ( $B_{12}SH_{12}Na_2$ : BSH) を用いることとし、BSH を投与しないコントロール群 ( $0\mu g^{10}B/g$ ) と  $5$ 、 $15\mu g^{10}B/g$  に調整された BSH 添加培養液とに区別し、それぞれ 18 時間培養した後、実験に使用した。

これら細胞懸濁液中のラットグリオーマ細胞は Photo2 に示すようなウエルプレート (384Well Plate; Nunc 社製) と呼ばれる生物実験用の培養容器に充填し、ファントム内に挿入した。ウエルプレートは 1 つのセルが口部 4mm□、底部 2mm□の容器で、そのセルが  $16 \times 24$  個等距離 (4.5mm ピッチ) に 2 次元的に配置されている容器である。ウエルプレートを利用すると照射する細胞を含んだ懸濁液を精度良く配置できること、同時に種々の条件での照射できることなどの利点がある。しかし、市販されているこのウエルプレートにはその周りに空間があり、そのまま水に浸して使用すると空間に空気が残り、実験上好ましくないため、改善策としてウエルプレート周りの空間にゲル (Seakem LE agarose : FMC Bioproducts 社製) を満たし、できるだけボイドが無くなるよう工夫した。ファントム内での線量分布が左右対称であることを物理測定のデータで確認できていることから、細胞の配置として Fig.4 に示すようにビーム孔から見て右側に 9L gliosarcoma、左側に C6 glioma 細胞を配置することにした。ホウ素濃度については中心から 3 レーンを  $15ppm$ 、次ぎの 3 レーンを  $5ppm$ 、その後の 3 レーンを  $0ppm$  とした。細胞懸濁液を入れていないセルには純水を注入し、ボイドにならないよう配慮した。懸濁液の量は各セルには  $100\mu l$  とし、細胞数は table3 に示すような数程度になるよう調整した。各モードに対して熱中性子フルエンスの最大値が  $5.5 \times 10^{12} n/cm^2$  になるよう照射条件を設定し照射を行った。熱中性子束が最も高い熱中性子モード I では  $3.5MW$  で 15 分、熱外中性子モードでは 23 分、熱中性子モードでは 60 分の照射時間をそれぞれ設定した。なお、コリメータのサイズは  $\phi 15cm$  を用いた。

照射後、マイクロピペットを用いてウエルプレートの各セルから細胞懸濁液を取りだし、半量をシャーレにとり、培養液を約  $3ml$  加え、 $CO_2$  インキュベータで 1 週間培養した。コントロール群においても同様にウエルプレートに挿入したうえで、マイクロピペットで取りだし 1 週間同条件で培養した。照射 1 週間後、培養した細胞の固定・染色を行い、Colony 数を数えた。Photo3 にシャーレ上の染色後のコロニーを示す。コントロール群と比較することで細胞の生存率が計算できる。この検定方法は一般的に Colony formation assay 法と呼ばれており、臨床における実際の殺細胞効果を観察するには最も直接的で有効な方法である。ただし、シャーレに培養するため、Colony 数が多い場合その判別が難しく、極端に少ないと誤差の増大につながるため、各セルに注入する細胞数を制御することが重要である。腫瘍の治療を考えるうえでコロニーを作れるかどうかを判定する Colony formation Assay 法を用いることは、まさしく癌の増殖の度合いを直接的に判断することのできる方法であり、ビームの評価として最適な検定方法であると言える。また、コロニー アッセイで求まる細胞生存率は增殖死 (reproductive cell death) と呼ばれるものであり、通常の細胞死とは異なり細胞そのものの死滅は問わず、増殖できるかを判定できるものである。今回扱うような 9L、C6 という実験細胞は急性反応細胞であり、腫瘍のような細胞周期の速い細胞の代表となりうるが、脳神経細胞のような晚期反応細胞では異なるレスポンスを示す。したがって、本実験で得られる結果は主に癌細胞に対する評価を与えるものであって、正常脳細胞への影響を正確に示すものでない。恐らくひとつの細胞系で各ビームの比較は可能であるが、ガンマ線などの

バックグラウンド線量の計算又は正常細胞の耐用線量を判断するときには細胞周期等が違うため注意が必要である。

#### 4 実験実施日

実験はJRR-4の中性子ビーム設備を用いて行われた。医療照射を行うにあたり細胞によるビームの評価が必要であったため、改造後共同利用が開始された平成11年2月から3月にかけて本実験は行われた。最初のBNCTはこの細胞実験の結果を考慮し、平成11年10月に行われている。中性子ビーム設備にはシャッタ等の線量を抑制するための設備が無いため、ファントムを照射室内ビーム孔出口へ配置してから、原子炉が起動、20W臨界確認、200KW臨界、3.5MW最高出力で運転し、原子炉の制御棒を挿入することで照射が終了することにした。照射が行われたときの原子炉の運転パターンをFig.5に示す。

- 1)熱中性子モード I R4-10-18 サイクル 3.5MW 15分照射
- 2)熱中性子モード II R4-10-18 サイクル 3.5MW 60分照射
- 3)熱外中性子モード R4-10-16 サイクル 3.5MW 23分照射

#### 5 物理線量の評価方法

ウェルプレートに分注された細胞の線量評価をするための各物理線量の計算方法を以下に示す。現在の日本におけるBNCTでは中川らの物理線量に基づいて照射時間を決定している。この場合特にホウ素線量( $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ )及び窒素線量( $^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p})^{14}\text{C}$ )が重要で、これらによって正常脳の耐容線量、腫瘍細胞の治療線量が決定される。BNCTの臨床経験から中川らはホウ素線量と窒素線量の物理線量を線量評価の指標として使用し照射線量を判断している<sup>2)</sup>。中川らの各カーマの計算しようするカーマ係数の正確な情報がないためICRU46の大人的脳と同じ組成比であると仮定して計算を行うこととした。ホウ素線量及び窒素線量は熱中性子束に比例しているので、別の物理実験で測定されたファントム内の熱中性子束2次元分布より計算することができる。また、ガンマ線においても原子炉側から到達するガンマ線をフリービーム実験と同等と考え、残りをファントム材料から発生するものとして、ファントムの物理実験の値を用いて推定することとした。

##### 5.1 ホウ素線量の算出

ホウ素線量は評価済みENDF/B-VI核データ<sup>6)</sup>から、36°Cに相当する0.0266eVの吸収断面積 $\sigma_a$ を内挿して計算し、その値よりホウ素濃度1ppm当たりのカーマ係数を計算した。

$$K_{B10h} = \frac{J_{B10} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sigma_{B10} \cdot \frac{w\rho}{A} \cdot N_a \cdot e / 10^{24}}{\rho \times 10^{-3}} \quad (1)$$

$K_{B10h}$ : 热中性子に対する $\text{B}(\text{n}, \alpha)$ 反応のカーマ係数 ( $= \text{Gy} \cdot \text{cm}^2/\text{ppm}$ )

$J_{B10}$ :  $\alpha$ 及び $\text{Li}$ 核に与えられる運動エネルギー ( $= 2.342525 \times 10^6 \text{eV}$ )

e : 電気素量 ( $=1.6021892 \times 10^{-19}$ )N<sub>a</sub> : アボガドロ数 ( $=6.02 \times 10^{23}$ ) $\sigma_{B10}$  : 0.0266eV の断面積 (3321.85barn)

A : 原子質量 (=10)

W : 媒質重量に対する B10 の重量比 (ホウ素濃度=1ppm=1/1000000)

 $\rho$  : 密度 ( $=1.04\text{g/cm}^3$ )

この(1)式から熱中性子に対する B(n,  $\alpha$ )反応のカーマ係数<sup>6)</sup>は  $7.5054 \times 10^{-14}(\text{Gycm}^2/\text{ppm})$ となる。線量へ変換は次の関係式から求められる。

$$D_{B10} = \phi th \times T \times K_{B10th} \times C_{B10} \quad (2)$$

D<sub>B10</sub> : B10 線量 (Gy) $\phi th$  : 热中性子束( $\text{n/cm}^2/\text{sec}$ )

T : 照射時間(sec)

C<sub>B10</sub> : B10 濃度 (ppm)

## 5.2 窒素線量の算出

窒素線量はホウ素と同様に評価済み ENDF/B-VI 核データから、36°Cに相当する 0.0266eV の吸収断面積  $\sigma_a$  を内挿して計算し、その値よりカーマ係数を計算した。

$$K_{Nth} = \frac{J_N \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sigma_N \cdot \frac{w\rho}{A} \cdot N_a \cdot e / 10^{24}}{\rho \times 10^{-3}} \quad (3)$$

K<sub>Nth</sub> : 热中性子に対する N(n, p)反応のカーマ係数 ( $=\text{Gycm}^2$ )J<sub>N</sub> : 陽子に与えられる運動エネルギー ( $=6.259178 \times 10^3\text{eV}$ )e : 電気素量 ( $=1.6021892 \times 10^{-19}$ )N<sub>a</sub> : アボガドロ数 ( $=6.02 \times 10^{23}$ ) $\sigma_N$  : 0.0266eV の断面積 ( $=0.064796\text{barn}$ )

A : 原子質量 (=14.0067)

W : 媒質重量に対する N の重量比 (2.2% = 0.022)

 $\rho$  : 密度 ( $=1.04\text{g/cm}^3$ )

この(3)式から熱中性子に対する N(n, p)反応のカーマ係数は  $1.49708 \times 10^{-13}(\text{Gycm}^2)$  となる。線量へ変換は次の関係式から求められる。

$$D_N = \phi th \times T \times K_{Nth} \quad (4)$$

$D_N$  : 窒素線量 (Gy)

$\phi_{th}$  : 热中性子束( $n/cm^2/sec$ )

T : 照射時間(sec)

### 5.3 ガンマ線線量の推定

炉心方向から直接到達する $\gamma$ 線は direct-gamma (or core-gamma) と呼ばれており、ファントム材料が中性子を吸収して放出する $\gamma$ 線は capture-gamma と呼ばれている<sup>7)</sup>。このように発生源についてガンマ線を 2 種類に分類して考えると、ガンマ線の線量を推定するのに都合が良い。core-gamma はフリービーム実験により求められたものと同等であり、ファントムのある状態においても同量のガンマ線が存在していると考えられる。ガンマ線の 2 次元分布を定量的に、かつ、高分解能で測定することは難しく、実験&解析の両方によって推定することとした。

この core-gamma はフリービーム実験 (ビーム孔中心) にて測定されている数値を用いたこととした。

Table2 に示すように熱中性子ビームモード I では 10cm コリメータにおいて 2.64Sv/h、15cm コリメータにおいて 2.79Sv/h であった。これら core-gamma 線についてファントム内の減衰を考えて、数 MeV の $\gamma$ 線に対するエネルギー減弱係数  $0.03cm^2/g$  を用い、core-gamma による線量率分布を次式より推定した。

<熱中性子モード I >

$$D_{core} = 2.71 \exp(-0.003 \times z) \quad (5)$$

ここで、

$D_{core}$  : core-gamma の $\gamma$ 線線量率 (Gy/h)

$z$  : ファントム軸中心の深さ (mm)

同様に、熱中性子モード II、熱外中性子モードも計算でき、以下の式となる。

<熱中性子モード II >

$$D_{core} = 0.54 \exp(-0.003 \times z) \quad (6)$$

<熱外中性子モード >

$$D_{core} = 1.86 \exp(-0.003 \times z) \quad (7)$$

熱中性子束 2 次元分布 (半径方向-深さ方向) が求まっていることから、capture-gamma 線量率は積分計算することにより求めることができる。Fig6 及び Fig7 に示すように core-gamma + capture-gamma を計算した結果を、15cm コリメータにおける TLD の実測値と比較した。この比較から表面及び深いところで比較的一致していることが分かる。20mm の辺りで測定値が小さくなるのは TLD 自身によって中性子場を乱してしまい、うまく測定できていないためと考えられる。この推定方法によりファントム内の $\gamma$ 線線量率分布を 2 次元でほぼ計算できることが分かった。

#### 5.4 高速中性子線量の推定

ファントム内の中性子線量をペアチェンバで測定を行ない、組織等価材料のカーマを算出し、熱中性子線量の分を差し引いて高速中性子線量の減衰曲線を得た。熱中性子モードI及び熱外中性子モードでは、その減衰率は-0.0158 ( $\text{mm}^{-1}$ )、熱中性子モードIIは-0.0166 ( $\text{mm}^{-1}$ ) であった。Table4に示すフリービームの高速中性子線量値を利用して、各モードにおける高速中性子線量の分布は暫定的に以下のとおりであるとした。

熱中性子モードIの場合、

$$D_{\text{fast}} = 0.773 \exp(-0.0158 \times z) \frac{P}{3.5} \quad (8)$$

熱中性子モードIIの場合、

$$D_{\text{fast}} = 0.031 \exp(-0.0166 \times z) \frac{P}{3.5} \quad (9)$$

熱外中性子モードの場合、

$$D_{\text{fast}} = 2.44 \exp(-0.0158 \times z) \frac{P}{3.5} \quad (10)$$

ここで、

$D_{\text{fast}}$  : 高速中性子線量率 (Gy/h)

P : 原子炉出力 (MW)

Z : ファントム軸中心の深さ (mm)

#### 5.5 ウエルプレートの熱中性子フルエンス及び $\gamma$ 線量

上記の物理線量の計算方法に必要な各セル毎の熱中性子フルエンスを Table5～Table7 に、 $\gamma$ 線線量を Table8～Table10 に整理した。この熱中性子フルエンス、 $\gamma$ 線線量を用いることにより、上記のカーマ係数等を使用し、各物理線量を計算することができる。

### 6 細胞生存率曲線の定性的評価

半径方向の 3cell を平均して、コントロール群のコロニー数で割ることで深さ方向の生存率曲線 (SF : Survival Fraction) を求めた。なお、細胞固定の段階で明かに汚染したものについてはデータより削除した。深さ方向の生存率曲線をまとめた結果を Fig.8～Fig.13 に示す。

各ビームにおいて、BSH を添加しない細胞群では最低生存率が約 0.1 となるが、BSH を 15ppm 添加した場合、細胞生存率が大きく低下することが分かった。熱外中性子モード及び熱中性子モードIにおいてその傾向は顕著であり、最低生存率が 0.001 程度まで下がることが分かった。熱中性子成分を含む熱中性子モードI及びIIでは表面近傍に最低生存率があるのに対して、熱外中性子ビームでは約 2cm のところに最低生存率を示す。これは熱外中性子が減速されて生じる熱中性子のピークによるもので、熱中性子束分布に対応して細胞が死滅していることを示している。

ホウ素濃度が 0ppm の生存率曲線は $\gamma$ 線、窒素線量、高速中性子線量による死滅を示すものと考えられ、いわばバックグラウンド線量に対するレスポンス曲線といえる。このバックグラウンド線量に対するレスポンス曲線と比較すれば分かるように、これら腫瘍細胞にホウ素を添加した場合のレスポンス

特性は濃度に比例した明確な死滅を示す。つまり、細胞はホウ素が熱中性子を捕獲することによるホウ素線量に対して感度があることを示しているといえる。熱外中性子ビームに対するファントム表層部の生存率曲線が回復していることから、熱外中性子に対して感度が鈍く、熱化された中性子に強く依存していることが確認できた。表面近傍で細胞の死滅が少ないことは、熱外中性子に対して細胞が反応を示さず、深部において熱化された熱中性子に対して反応し、細胞が死滅している。JRR-4の熱外中性子ビームにおける細胞実験においても熱外中性子の低レスポンス性を確認されたことになる。また、この結果は臨床応用を考えると、熱外中性子を深部の患部まで浸透させ、生体内で熱化した中性子を利用して治療可能であるということを示すものである。

細胞種による生存率の違いは、 $\gamma$ 線に対するレスポンスから推定することができるこであるが、中性子照射を行った場合においても C6 glioma の放射線感受性は高く、9L gliosarcoma のほうが若干小さいことが分かった。また、同じ操作を行っているにも関わらず 9L では比較的分散しやすい傾向を示すことが分かった。この分散は細胞種の heterogeneity の違いによるもので、9L は Glioblastoma Multiforme と似ており、heterogeneity が高く、クローニングしてもすぐに突然変異を誘発し、細胞形状、染色体数等からもたらされる細胞分裂速度、感受性にはらつきが出てくるためではないかと考えられる。実際の組織内のグリオーマ細胞は、細胞の大きさ、ホウ素を取り込む能力及び細胞周期などにバラツキがあり、in vivo 状態でも本実験と同様の分散性を示すものと推察できる。

## 7 評価方法の検討

この章では殺傷効果を定式化するため、線量単位の評価方法を考察することとした。線量単位に要求される条件として、

- 1) 線量計画が組めるような単調な直線関係
- 2) 線量評価システムに記述できるような定式化が可能
- 3) 線形相関性（適切なパラメータにより分散が小さい曲線となる）

が考えられる。

### 7.1 中川らの物理線量での整理

BNCTをリードしてきた中川らを中心とするグループでは照射量の目安として、物理線量のみを用いて、臨床時の照射計画及び線量の評価を行っている。この中川らの物理線量は $\gamma$ 線線量、高速中性子線量などを無視し、ホウ素及び窒素のみを考慮したものである<sup>2)</sup>。つまり、熱中性子に対する窒素及びホウ素のカーマ係数を考慮した物理線量 ( $D_{\text{phys}}$ ) で、以下の(9)式を用いて治療を行ってきた。

$$D_{\text{phys}} = D_{\text{nitrogen}} + D_{\text{boron}} \quad (11)$$

ここで、

$D_{\text{nitrogen}}$ ：窒素の物理線量 (Gy) ( $= 1.356 \times 10^{-13} \text{ Gy cm}^2/\text{ppm}$ ) ; 窒素 2.0%と仮定している。

$D_{\text{boron}}$  : ホウ素の物理線量(Gy) ( $=7.43 \times 10^{-14} \text{Gycm}^2$ )

我々が5章で算出した窒素カーマ係数  $1.49708 \times 10^{-13} (\text{Gycm}^2/\text{ppm})$  及びホウ素カーマ係数  $7.5054 \times 10^{-14} (\text{Gycm}^2)$  と若干違うものの(11)式とほぼ同じ数値となっている。これまでに多くの患者を治療してきた中川らの経験から見出された窒素線量+ホウ素線量のみでの評価方法であるが、少なくとも熱中性子ビームに対して効果的であったことはその治療成績より明かである<sup>2)</sup>。この中川らの行ってきたホウ素+窒素線量(5章のカーマ係数)を用いて、今回測定したC6及び9Lのin vitroデータを整理した。

中川らの物理線量に対して生存率の整理した結果をFig.14~Fig.19に示す。半径方向に線量の分布があるので、各セルづつ線量評価をおこなった。使用した線量は5章に述べた評価方法によって得られたものである。Fig.16及びFig.17からJRR-2と同等の熱中性子ビームを目指した熱中性子モードIIでは中川らの物理線量に対して直線関係にあることが分かる。つまり、物理線量を大きくすればその殺傷効果は比例して強くなり、治療効果を示す線量評価の指標としては十分である。現在JRR-4の治療で用いられているのは熱中性子モードI(混合中性子)であるが、この混合ビームに対しても、Fig.14及びFig.15が示すとおり、この直線関係は維持されている。熱中性子ビームモードIIの曲線と同様の傾きであることから、熱中性子を利用したBNCTと同じ治療計画を熱中性子-熱外中性子混合ビームに適応しても、その効果は十分期待できる。しかし、熱外中性子モードに中川らの物理線量を指標にまとめるとFig.18及びFig.19が示すように、データはバラツキを持つようになり、熱中性子ビームにおいてみられた直線性はもはやなくなってしまう。この非直線性の原因は何かは今後検討すべき問題であるが、少なくとも熱外中性子ビームを用いた臨床治療研究にこれまでの中川らの物理線量を導入するためには基礎研究を積み上げ、慎重に対処すべきである。

## 7.2 Weighted-Doseでの整理

米国、ヨーロッパにおいて熱外中性子ビームBNCTが臨床治療として実施されていることを考えると、同分野では海外のほうが進んでいることから、欧米で行っている線量評価方法を取り入れ、本実験の整理を試みた。整理に当たっては基本的にはPettenのプロトコールを参考とした。Pettenのプロトコールには以下に示す(12)式を用いて評価を行っている<sup>3)</sup>。

$$D_{\text{WU}} = W_{n+N} \cdot U_{n+N} + W_g \cdot D_g + CF_{\text{organ}} \cdot D_B \quad (12)$$

ここで  $W_{n+N}$  は反跳陽子、高速中性子、窒素吸収反応の combined weighting factor である。 $W_g$  は光子に対する weighting factor であり、 $CF_{\text{organ}}$  はホウ素反応( $^{10}\text{B}(n, \text{alpha})^{7}\text{Li}$ )に対する weighting factor となっている。

この線量を Weighted Dose と呼び、単に RBE を用いた線量ではなく、その細胞構成等の混成効果を含めたもので、線量の指標として取り決めたものである。細胞実験ではホウ素濃度が均質にコントロールされているので、この CF(compound factor) は概念的にほぼ RBE に等しいものと考えて良い。RBE を用いた整理方法の利点は他の放射線治療の成果と比較し易い点にある。中性子捕捉療法の難しい点はガンマ線、アルファ線、中性子線等と様々な線質が混在しており、

普段の放射線治療で用いられる X 線又は  $\gamma$  線単一ではなく、更に各線量にはそれぞれ RBE を用いた評価が必要であり、より複雑なものとなっている。中川らの物理線量も 1 つの指標であるが、 $\gamma$  線治療や他の放射線治療の知見との比較が困難である。各施設における治療結果を比較するには  $\gamma$  線と等価になるように重みを付けされた欧米のような Weighted Dose のような指標を用いるべきである。Weighted Dose を用いる線量の考え方の欠点は、実際照射時の脳内の各線量分布を測定できないことがある。金線を用いて測定された中性子フルエンスにカーマを乗じることで中川らは物理線量を計算できるのに対し、欧米の線量評価は  $\gamma$  線線量及び高速中性子線量が更に必要となり、実際の測定によってその確認を得ることは困難である。そのため線量評価システムにより照射線量を予測して、照射計画どおりの照射を行っていると考えられる。

5.5 節で説明した各物理線量を Weighted Dose の(12)式に挿入して線量を計算した。計算に使用した  $W_{n+N}$  は Petten のプロトコール等の文献を参考に 3.9<sup>9</sup>を使用し、 $CF_{organ}$  として 2.3<sup>10</sup>を使用した。なお、使用する CF についてはその評価が難しく、使用した数値が適正化かどうか確認されていないことを断つておく。今後、JRR-4 の細胞実験が進むことによって徐々に明らかにされるものである。ウェルプレートの個々のセルに対して計算した Weighted Dose に対して生存率をそれぞれプロットしたのが、Fig.20 から Fig.25 である。なお、欧米の臨床上使用されている weighted dose は *in vivo* 実験データから得られたものであり、本来の 9L, C6 細胞についての RBE でないが、ビームの比較するうえでこれらを用いていることとした。

熱中性子モード I 及び II では中川らの物理線量整理法と同様に直線関係にあり、良好な線量指標である。熱外中性子モードにおいては中川らの方法より直線性が高い分、それだけ正確な線量計画を組むことができると考えられる。しかし熱中性子ビームのみを見れば、Petten の線量評価方法も線量を大きくすればその殺傷効果はそれに比例して強くなり、かつ、直線性に優れている分、それだけ正確な線量評価の指標として十分であることが分かる。しかし、熱外中性子モードについては中川らの整理方法と同様に、データはバラツキ、熱中性子モードで示すような明かな直線性がなくなることが分かった。しかし、比較的、物理線量のみで整理するよりはまとまった分布を示す。

### 7.3 $\gamma$ 線等価線量

癌の臨床治療では放射線治療として  $\gamma$  線、X 線を利用したものが多く、それだけに医療的に知見も多いことになる。多数研究が成されているフォトンの効果について、研究あるいは治療経験などが豊富であり、これらのデータを利用すべく  $\gamma$  線に対する生物学的効果を基準とする考えは当然妥当なものとなる。しかし、BNCT では実際の線量は  $\gamma$  線、中性子線、 $\alpha$  線、proton などの高 LET、低 LET の放射線が混合した複雑な照射場であることを認識しておかなければならぬ。暫定的に 7.2 節に示す値を用いて、Petten や BNL などが行うとおりの評価を行ったわけであるが、(12)式にはすべての放射線が加算的であるという単純化された仮定を用いている。これは第 1 次的に正しいが、2 ヒット理論が示すように、確率論的に現象を本来考察しなくてはならない。つまり、ある線量以上ではオーバーキルにより、与える線量に対して、効果が薄れるようになることが考えられる。線量が低い間は、現象の独立性が高く、総合的な効果は加算的に振る舞うが、線量が高くなるに連れて、互いの影響はもはや独立性が乏しくなり、やがて相互作用（相乗効果）を起こすようになる。そこで実際に  $\gamma$  線の効果に対し、Weighted Dose の加算的評価が

妥当であるかを検証することとした。

まず、9L 及び C6 を  $\gamma$  線場 ( $^{137}\text{Cs}$  線源；照射線量率 152cGy/min) において、 $\gamma$  線照射を行う。これにより  $\gamma$  線に対する生存率曲線を求めることができ、データからフィッティング曲線 ( $\exp(-(\alpha \cdot D + \beta \cdot D^2))$ ) を求める。これは LQ モデル(Linear-quadratic model)と呼ばれており<sup>12)</sup>、 $\alpha/\beta$  比はほぼ一定となることが知られている。今回、 $\alpha/\beta$  として 6.5 を採用し、実際の  $\gamma$  線照射を行い SF カーブを検証したところ、このモデルによる fitting に問題がないためことが確認した。細胞生存率が対数軸上での 1 次項と 2 次項を持つ式が最もフィットし、DNA 2 重鎖の障害という仮説で考えると理屈が合うことが知られている。この LQ モデルは 2 ヒット説によって理論的に裏づけされたものである。2 ヒット理論では高線量域では 1 ヒットで同位置の 2 本鎖障害により、低線量域ではたまたま相対する同位置の 1 本鎖障害により DNA 再生が出来なくなることによる増殖死（本来の細胞死ではなく増殖能の停止）を起こすというものである。

Fig.26 に  $\gamma$  線照射した場合の生存率曲線とフィッティングラインを示す。また、以下にフィッティングされた曲線の式を示す。比較のため文献による X 線(250keV)に対する 9L の  $\alpha$  値が 0.13  $\pm$  0.02、 $\beta$  が 0.01  $\pm$  0.001 であることから<sup>13)</sup>、ほぼ妥当な曲線を得られていることが分かる。

$$SF_{C6} = \exp(-0.1361 \cdot Dg + 0.02093 \cdot Dg^2) \quad (13)$$

$$SF_{9L} = \exp(-0.1215 \cdot Dg + 0.01869 \cdot Dg^2) \quad (14)$$

ここで、

$SF_{C6}$  : C6 の  $\gamma$  線に対する生存率 (-)

$SF_{9L}$  : 9L の  $\gamma$  線に対する生存率 (-)

$Dg$  :  $\gamma$  線吸収線量 (Gy)

このフィッティング曲線の式から簡単に逆関数をもとめることができるので、任意の SF 値に対する  $\gamma$  線線量を算出することができる。これを  $\gamma$  線等価線量と定義し、これを使用することにより加算的な Weighted Dose と比較することを行った。LQ モデルから effective dose を導く方法は Bond ら<sup>11)</sup>も行っており、RBE を含まないで議論できるものである。Fig.27 及び Fig.28 は Weighted Dose に対する  $\gamma$  線等価線量を整理したグラフである。これら Fig.27 及び Fig.28 が共に示すように、Weighted Dose が 13Gy を超えると、Weighted Dose のほうが大きくなり過剰評価するようになることが分かる。高線量になるに連れて、与える線量に対しての効果が薄れるようになっており、前述したようなオーバキルが起こっている可能が考えられる。線量が低い間は、加算的に振舞うが、高線量になるに連れて、互いの影響はもはや独立性を失い、相互作用を起こすようになると考えられる。したがって、個々の物理線量に RBE を乗じて Petten が採用しているような加算的評価方法を用いて線量評価できるのは、Weighted Dose が約 13Gy までであり、それ以上になると何らかの補正を行うか、あるいは相互作用を含めた評価式を作成しなくてはならない。

## 8 まとめ

本実験では JRR-4 の有する医療照射用の 3 つの基本モード（熱外中性子モード（熱外中性子）、熱中

性子モード I(熱中性子+熱外中性子)、熱中性子モード II(熱中性子)において 2 種類のグリオーマ細胞を照射し、細胞の生存率 (*in vitro*) を調べた。

### 8.1 腫瘍細胞の生存率から観た各ビームの評価

各ビームにおいて、BSH を添加しない細胞群では最低生存率が約 0.1 となり、BSH を 15ppm 添加した場合、細胞生存率が大きく低下することが分かった。熱外中性子モード及び熱中性子モード I においてその傾向は顕著で、最低生存率が 0.001 程度まで下がることが分かった。また、熱外中性子ビームでは約 2cm のところに最低生存率を示し、熱中性子束分布に対応して細胞が死滅していると考えられる。細胞の種類により、その生存率の実験データが分散するため、更に異なる細胞を照射し、細胞径などを考察のもと詳細な評価が必要である。

### 8.2 線量評価方法の検証

物理実験を基に円筒水ファントム中に置かれたウェルプレート内を個々に線量評価し、中川らの物理線量単位と欧米で用いられている Weighted Dose 単位の線量対生存率の直線性を評価した。従来の方法を熱・熱外中性子混合のビームに応用しても、直線性は保たれており、臨床応用してもこれまでどおりの評価方法で十分対応できることが分かった。しかし、熱外中性子にあつては、双方ともにデータにバラツキが目立つ。この原因を追跡するための再実験が必要と思われる。熱外中性子への移行は慎重な対応が必要である。 $\gamma$ 線等価線量という考え方を導入することで、Weighted Dose 単位を検証したところ、各線量要素が相互作用を起こしていて過剰評価する可能性を指摘した。Petten が採用している加算的評価方法を用いて線量評価できるのは、Weighted Dose が約 13Gy までであり、それ以上になると何らかの補正を行うか、あるいは相互作用を含めた評価式を作成しなくてはならないことが明かとなった。

### 8.3 今後の課題

今後の課題として、これまで臨床応用面を見つめ 9L、C6 グリオーマ細胞を使用してきたが、基礎的なデータを取るために、D.Gabel らが行っているような<sup>10)</sup>、放射線生物学で標準的な細胞系列として用いられている V79 または SCCVII などの細胞を用いた実験を実施する必要がある。また、物理線量評価方法について今回は $\gamma$ 線線量及び高速中性子線量がフリービーム実験に基づく推定値であり、バラツキの原因がこうした評価の方法による影響もないとは言えない。よって、ファントム内の線量評価実験を 2 次元的に行ことや、線量評価システムによって各線量を計算するなど確定した物理線量を求める努力が今後必要となる。

### 謝辞

京都大学原子炉実験所の小野公二教授には放射線治療の立場から weighted dose の適切な選択方法、世界の動向などの貴重な意見を頂き大変参考となりました。更に JRR-4 管理課の運転員の方々には特殊な運転パターンでの運転を行って頂きました。また、研究炉利用課の高田準太郎氏、大竹真一氏には物理測定を始め、実験補助をして頂きました。以上の先生並びに運転員、研究炉利用課の方々に感謝申し上げます。なお、本報告書をまとめるにあたって、御指導下さった研究炉部の高柳政二部長、小林晋昇次長、桜井文雄 JRR-4 管理課長及び海江田圭右前研究炉部長には深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) H.Kumada, Y.Torii, K.Saito, Y.Yamagushi, A.Matsumura, Y.Nakagawa, F.Sakurai : A Development of Computation Dosimetry System for BNCT at JRR-4, abst. of Eight International Symposium on Neutron Capture Therapy for Cancer. La Jolla, California, USA, September 13-18 abstract, 1998, p58
- 2) Y.Nakagawa, H.Hatanaka : Boron Neutron Capture Therapy; Clinical Brain Tumor Studies, J. Neuro Oncology 33, 1997, p105-115
- 3) Y.Torii, T.Kishi, H.Kumada, K.Yamamoto, K.Yokoo, N.Ohashi, F.Sakurai : BNCT Irradiation Facility at JRR-4, JAERI-Conf 99-006, 1999, p228-231
- 4) M.Weizsaecker, D.F.Deen, M.L.Rosenblum, T.Hoshino, P.H.Gutin and M.Barker : The 9L Rat Brain Tumor Description and Application of an Animal Model, J. Neurol. 224, 1981, p183-192
- 5) P.Benda, K.Someda, J.Messer, et al. : Morphological and Immunological Studies of Rat Glial Tumors and Clonal Strainspropagated in Culture, J. Neurosurg 34, 1971, p310-323
- 6) O.F.Rose(ed.), ENDF-201;ENDF/B-VI summary documentation, BNL-NCS-17541,4<sup>th</sup>,1991
- 7) T.Matsumoto, O.Aizawa, T.Nozaki and T.Sato: Musashi Institute of Technology Reactor as a Medical Facility – with Reference to Dosimetry and in situ Boron Concentration Measurement, Boron-Neutron Capture Therapy for Tumors, ed. H. Hatanaka, 1986, p235-241
- 8) W.Sauerwein et al.: European Organization for Research and Treatment of Cancer; BNCT Study Group Protocol 11961 Postoperative Treatment of Glioma with BNCT at the Petten Irradiation Facility;Phase I clinical Trial, 1996.
- 9) D.Gabel K.H.I.Philipp, R.Huiskamp : The Compound Factor of  $\text{Na}_2\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{SH}$  and the Relative Biological Effectiveness of Recoil Protons for Neurological Damage in Boron Neutron Capture Therapy., ed. Y.Mishima, Neutron Capture Therapy for Human Cancers. New York , Plenum Press, 1995.
- 10)D.Gabel, D.G. Fairchild, B. Larsson and H.G.Borner : The Relative Biological Effectiveness in V79 Chinese Hamster Cells of the Neutron Capture Reactions in Boron and Nitrogen.,Radiat. Res. 98, 1984, p307-316
- 11)V.P.Bond, B.H.Laster and L.Wielopolski, The Equal Effectiveness Ratio : A Quantitative Approach to the Evaluation of Compounds for Boron Neutron Capture Therapy, Radiat. Res. 141, 1995, p287-293
- 12)RBE for Deterministic Effects : A Report of a Task Group of Committee1 of the International Commission Radiological Protection, ICRP pub 58, 1989, p16
- 13)J.A.Corerre, M.S.Makar, P.L.Micca, M.M.Nawrocky, H.B.Liu, D.D.Joel, D.N.Slatkin and H.I.Arnold: Derivation of Relative Biological Effective for the High-LET Radiations Produced during Boron Capture Irradiation of the 9L Rat Gliosarcoma *in vitro* and *in vivo*, I. J. Radiation Oncology, Biol. ,Phys., Vol 27, 1993, p1121-1139

Table 1 中性子ビーム設備の照射モードの条件

	熱中性子モード I	熱中性子モード II	熱外中性子モード	
重水厚さ	12cm	33cm	8cm	8cm
カドミシャッタ	上限	上限	下限	下限
ビスマス厚さ	18cm	18cm	18cm	18cm
黒鉛ライニング	有(7cm厚)	有(7cm厚)	有(7cm厚)	無(7cm厚)
照射コリメータ	リチウム入りポリエチレン	φ15cm、12cm、10cm		

Table 2 各モードに対するビームの性能

	熱中性子束 (n/cm <sup>2</sup> /sec)		ガンマ線線量率 (Gy/h)		カドミ比	
	10cm	15cm	10cm	15cm	10cm	15cm
熱中性子モード I	$1.7 \times 10^9$	$2.0 \times 10^9$	2.64	2.79	2.3	2.5
熱中性子モード II	$5.3 \times 10^8$	$6.5 \times 10^8$	—	0.54	10.6	13.5
熱外中性子モード (黒鉛ライニング有)	—	$3.6 \times 10^8$	—	1.86	—	1.15
熱外中性子モード (黒鉛ライニング無)	$1.1 \times 10^8$	$2.1 \times 10^8$	1.47	2.64	1.08	1.1

Table 3 ウエルプレートに播く細胞数

	A-G レーン	H-K レーン	L-P レーン
$15\mu\text{g}^{10}\text{B/g}$	10000	1000	100
$5\mu\text{g}^{10}\text{B/g}$	1000	100	100
$0\mu\text{g}^{10}\text{B/g}$	500	100	100
Control	100	100	100

Table 4 フリービーム条件での速中性子線量および混入率

	線量率	混入率
	Gy/h-	Gy/(n·cm <sup>2</sup> )
熱中性子モード I	0.773	$1.08 \times 10^{-13}$
熱中性子モード II	0.031	$1.31 \times 10^{-14}$
熱外中性子モード (黒鉛ライニング有)	2.59	$4.03 \times 10^{-13}$
熱外中性子モード (黒鉛ライニング無)	2.44	$3.15 \times 10^{-13}$

Table 5 热中性子モード I におけるウエルプレート内の各セル毎の热中性子束分布

中性子フルエンス	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	9.975	4.686E+12	4.747E+12	4.761E+12	4.726E+12	4.657E+12	4.553E+12	4.417E+12	4.269E+12
B	14.475	4.242E+12	4.307E+12	4.336E+12	4.311E+12	4.243E+12	4.137E+12	4.005E+12	3.859E+12
C	18.975	3.771E+12	3.825E+12	3.847E+12	3.827E+12	3.772E+12	3.686E+12	3.572E+12	3.441E+12
D	23.475	3.326E+12	3.347E+12	3.349E+12	3.334E+12	3.300E+12	3.236E+12	3.142E+12	3.027E+12
E	27.975	2.896E+12	2.899E+12	2.894E+12	2.885E+12	2.861E+12	2.809E+12	2.729E+12	2.629E+12
F	32.475	2.484E+12	2.487E+12	2.487E+12	2.481E+12	2.459E+12	2.414E+12	2.345E+12	2.257E+12
G	36.975	2.117E+12	2.122E+12	2.124E+12	2.119E+12	2.098E+12	2.056E+12	1.994E+12	1.916E+12
H	41.475	1.805E+12	1.806E+12	1.805E+12	1.797E+12	1.776E+12	1.738E+12	1.682E+12	1.613E+12
I	45.975	1.534E+12	1.530E+12	1.524E+12	1.512E+12	1.492E+12	1.459E+12	1.411E+12	1.353E+12
J	50.475	1.295E+12	1.288E+12	1.279E+12	1.265E+12	1.248E+12	1.223E+12	1.187E+12	1.137E+12
K	54.975	1.088E+12	1.081E+12	1.072E+12	1.061E+12	1.047E+12	1.031E+12	1.002E+12	9.582E+11
L	59.475	9.156E+11	9.099E+11	9.028E+11	8.942E+11	8.835E+11	8.689E+11	8.452E+11	8.061E+11
M	63.975	7.735E+11	7.694E+11	7.638E+11	7.562E+11	7.451E+11	7.294E+11	7.071E+11	6.739E+11
N	68.475	6.613E+11	6.568E+11	6.503E+11	6.411E+11	6.283E+11	6.111E+11	5.894E+11	5.626E+11
O	72.975	5.687E+11	5.631E+11	5.548E+11	5.433E+11	5.283E+11	5.107E+11	4.911E+11	4.700E+11
P	77.475	4.774E+11	4.716E+11	4.628E+11	4.515E+11	4.381E+11	4.233E+11	4.078E+11	3.916E+11
									3.726E+11

Table 6 热中性子モード II におけるウエルプレート内の各セル毎の热中性子束分布

中性子フルエンス	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	9.975	3.819E+12	3.851E+12	3.781E+12	3.710E+12	3.659E+12	3.620E+12	3.555E+12	3.472E+12
B	14.475	3.265E+12	3.294E+12	3.286E+12	3.243E+12	3.195E+12	3.157E+12	3.103E+12	3.033E+12
C	18.975	2.770E+12	2.788E+12	2.794E+12	2.779E+12	2.749E+12	2.701E+12	2.637E+12	2.569E+12
D	23.475	2.334E+12	2.357E+12	2.381E+12	2.378E+12	2.336E+12	2.279E+12	2.220E+12	2.159E+12
E	27.975	1.955E+12	1.976E+12	1.993E+12	1.987E+12	1.951E+12	1.904E+12	1.856E+12	1.803E+12
F	32.475	1.616E+12	1.626E+12	1.634E+12	1.635E+12	1.620E+12	1.587E+12	1.547E+12	1.501E+12
G	36.975	1.336E+12	1.341E+12	1.347E+12	1.351E+12	1.347E+12	1.325E+12	1.288E+12	1.247E+12
H	41.475	1.120E+12	1.121E+12	1.123E+12	1.125E+12	1.121E+12	1.105E+12	1.073E+12	1.034E+12
I	45.975	9.408E+11	9.369E+11	9.338E+11	9.306E+11	9.262E+11	9.183E+11	8.955E+11	8.573E+11
J	50.475	7.771E+11	7.723E+11	7.683E+11	7.650E+11	7.622E+11	7.588E+11	7.451E+11	7.132E+11
K	54.975	6.364E+11	6.330E+11	6.310E+11	6.300E+11	6.292E+11	6.271E+11	6.203E+11	5.967E+11
L	59.475	5.258E+11	5.238E+11	5.229E+11	5.226E+11	5.220E+11	5.192E+11	5.122E+11	4.955E+11
M	63.975	4.382E+11	4.370E+11	4.360E+11	4.345E+11	4.318E+11	4.270E+11	4.192E+11	4.073E+11
N	68.475	3.656E+11	3.638E+11	3.618E+11	3.590E+11	3.551E+11	3.497E+11	3.425E+11	3.340E+11
O	72.975	3.049E+11	3.023E+11	2.994E+11	2.960E+11	2.921E+11	2.877E+11	2.825E+11	2.764E+11
P	77.475	2.516E+11	2.494E+11	2.469E+11	2.443E+11	2.416E+11	2.385E+11	2.350E+11	2.232E+11

Table 7 热外中性子モードにおけるウエルプレート内の各セル毎の热中性子束分布

中性子フルエンス	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	9.975	5.351E+12	5.361E+12	5.373E+12	5.333E+12	5.246E+12	5.140E+12	5.000E+12	4.825E+12
B	14.475	5.498E+12	5.435E+12	5.379E+12	5.328E+12	5.273E+12	5.195E+12	5.063E+12	4.883E+12
C	18.975	5.373E+12	5.274E+12	5.164E+12	5.125E+12	5.111E+12	5.048E+12	4.927E+12	4.757E+12
D	23.475	5.065E+12	4.972E+12	4.865E+12	4.820E+12	4.804E+12	4.747E+12	4.641E+12	4.489E+12
E	27.975	4.625E+12	4.578E+12	4.504E+12	4.435E+12	4.391E+12	4.341E+12	4.252E+12	4.123E+12
F	32.475	4.211E+12	4.175E+12	4.105E+12	4.006E+12	3.927E+12	3.874E+12	3.803E+12	3.703E+12
G	36.975	3.798E+12	3.753E+12	3.674E+12	3.567E+12	3.457E+12	3.388E+12	3.339E+12	3.264E+12
H	41.475	3.364E+12	3.313E+12	3.233E+12	3.131E+12	3.020E+12	2.937E+12	2.889E+12	2.832E+12
I	45.975	2.943E+12	2.894E+12	2.821E+12	2.732E+12	2.632E+12	2.533E+12	2.471E+12	2.426E+12
J	50.475	2.562E+12	2.516E+12	2.450E+12	2.370E+12	2.281E+12	2.188E+12	2.113E+12	2.061E+12
K	54.975	2.212E+12	2.170E+12	2.112E+12	2.042E+12	1.965E+12	1.884E+12	1.805E+12	1.742E+12
L	59.475	1.886E+12	1.852E+12	1.803E+12	1.745E+12	1.681E+12	1.613E+12	1.540E+12	1.471E+12
M	63.975	1.592E+12	1.566E+12	1.529E+12	1.483E+12	1.430E+12	1.372E+12	1.308E+12	1.240E+12
N	68.475	1.346E+12	1.325E+12	1.295E+12	1.258E+12	1.213E+12	1.163E+12	1.107E+12	1.047E+12
O	72.975	1.139E+12	1.122E+12	1.097E+12	1.065E+12	1.027E+12	9.833E+11	9.356E+11	8.843E+11
P	77.475	9.612E+11	9.472E+11	9.261E+11	8.990E+11	8.667E+11	8.302E+11	7.901E+11	7.471E+11

Table 8 热中性子モード I におけるウエルプレート内の各セル毎の  $\gamma$  線線量分布

$\gamma$ 線線量	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	9.975	4.552E+00	3.989E+00	3.417E+00	3.062E+00	2.804E+00	2.598E+00	2.425E+00	2.276E+00
B	14.475	4.368E+00	3.846E+00	3.311E+00	2.972E+00	2.720E+00	2.516E+00	2.345E+00	2.196E+00
C	18.975	4.099E+00	3.626E+00	3.138E+00	2.824E+00	2.589E+00	2.399E+00	2.237E+00	2.095E+00
D	23.475	3.794E+00	3.369E+00	2.930E+00	2.647E+00	2.435E+00	2.261E+00	2.112E+00	1.981E+00
E	27.975	3.474E+00	3.100E+00	2.712E+00	2.461E+00	2.271E+00	2.115E+00	1.980E+00	1.859E+00
F	32.475	3.157E+00	2.832E+00	2.495E+00	2.275E+00	2.107E+00	1.967E+00	1.846E+00	1.737E+00
G	36.975	2.855E+00	2.576E+00	2.286E+00	2.094E+00	1.947E+00	1.823E+00	1.714E+00	1.617E+00
H	41.475	2.577E+00	2.339E+00	2.090E+00	1.923E+00	1.794E+00	1.685E+00	1.589E+00	1.502E+00
I	45.975	2.325E+00	2.122E+00	1.908E+00	1.764E+00	1.652E+00	1.557E+00	1.473E+00	1.396E+00
J	50.475	2.097E+00	1.924E+00	1.741E+00	1.618E+00	1.521E+00	1.440E+00	1.367E+00	1.301E+00
K	54.975	1.894E+00	1.747E+00	1.592E+00	1.487E+00	1.404E+00	1.335E+00	1.272E+00	1.214E+00
L	59.475	1.715E+00	1.591E+00	1.460E+00	1.370E+00	1.300E+00	1.240E+00	1.186E+00	1.135E+00
M	63.975	1.559E+00	1.454E+00	1.343E+00	1.267E+00	1.206E+00	1.154E+00	1.108E+00	1.064E+00
N	68.475	1.424E+00	1.335E+00	1.240E+00	1.175E+00	1.122E+00	1.077E+00	1.036E+00	9.987E-01
O	72.975	1.305E+00	1.229E+00	1.148E+00	1.092E+00	1.046E+00	1.007E+00	9.725E-01	9.404E-01
P	77.475	1.195E+00	1.131E+00	1.063E+00	1.015E+00	9.772E-01	9.442E-01	9.147E-01	8.876E-01

Table 9 熱中性子モード II におけるウエルプレート内の各セル毎の $\gamma$ 線線量分布

$\gamma$ 線線量	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A 9.975	3.701E+00	3.230E+00	2.751E+00	2.456E+00	2.242E+00	2.082E+00	1.954E+00	1.844E+00	1.746E+00
B 14.475	3.421E+00	3.008E+00	2.583E+00	2.312E+00	2.115E+00	1.964E+00	1.839E+00	1.731E+00	1.636E+00
C 18.975	3.111E+00	2.754E+00	2.387E+00	2.150E+00	1.975E+00	1.834E+00	1.715E+00	1.614E+00	1.524E+00
D 23.475	2.801E+00	2.500E+00	2.188E+00	1.984E+00	1.826E+00	1.697E+00	1.590E+00	1.497E+00	1.415E+00
E 27.975	2.507E+00	2.253E+00	1.989E+00	1.813E+00	1.676E+00	1.563E+00	1.468E+00	1.384E+00	1.311E+00
F 32.475	2.234E+00	2.021E+00	1.798E+00	1.649E+00	1.534E+00	1.437E+00	1.353E+00	1.280E+00	1.214E+00
G 36.975	1.991E+00	1.812E+00	1.626E+00	1.501E+00	1.404E+00	1.321E+00	1.248E+00	1.183E+00	1.124E+00
H 41.475	1.781E+00	1.631E+00	1.474E+00	1.369E+00	1.286E+00	1.216E+00	1.153E+00	1.096E+00	1.043E+00
I 45.975	1.597E+00	1.472E+00	1.339E+00	1.250E+00	1.180E+00	1.121E+00	1.067E+00	1.016E+00	9.693E-01
J 50.475	1.433E+00	1.329E+00	1.218E+00	1.143E+00	1.084E+00	1.035E+00	9.895E-01	9.460E-01	9.043E-01
K 54.975	1.289E+00	1.203E+00	1.111E+00	1.049E+00	9.995E-01	9.578E-01	9.202E-01	8.834E-01	8.471E-01
L 59.475	1.166E+00	1.094E+00	1.018E+00	9.665E-01	9.252E-01	8.897E-01	8.576E-01	8.267E-01	7.959E-01
M 63.975	1.060E+00	1.001E+00	9.378E-01	8.942E-01	8.592E-01	8.288E-01	8.012E-01	7.752E-01	7.497E-01
N 68.475	9.691E-01	9.197E-01	8.668E-01	8.301E-01	8.004E-01	7.745E-01	7.511E-01	7.292E-01	7.084E-01
O 72.975	8.896E-01	8.484E-01	8.042E-01	7.734E-01	7.485E-01	7.267E-01	7.071E-01	6.888E-01	6.714E-01
P 77.475	8.195E-01	7.855E-01	7.489E-01	7.234E-01	7.027E-01	6.846E-01	6.682E-01	6.528E-01	6.379E-01

Table 10 热外中性子モードにおけるウエルプレート内の各セル毎の $\gamma$ 線線量分布

	$\gamma$ 線線量	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	9.975	5.114E+00	4.472E+00	3.825E+00	3.425E+00	3.132E+00	2.900E+00	2.703E+00	2.529E+00	2.370E+00
B	14.475	5.306E+00	4.623E+00	3.933E+00	3.509E+00	3.205E+00	2.965E+00	2.760E+00	2.577E+00	2.409E+00
C	18.975	5.301E+00	4.615E+00	3.919E+00	3.495E+00	3.195E+00	2.956E+00	2.750E+00	2.566E+00	2.397E+00
D	23.475	5.147E+00	4.493E+00	3.824E+00	3.412E+00	3.120E+00	2.886E+00	2.686E+00	2.507E+00	2.342E+00
E	27.975	4.894E+00	4.291E+00	3.671E+00	3.277E+00	2.994E+00	2.770E+00	2.580E+00	2.411E+00	2.256E+00
F	32.475	4.597E+00	4.047E+00	3.477E+00	3.106E+00	2.834E+00	2.623E+00	2.447E+00	2.290E+00	2.147E+00
G	36.975	4.274E+00	3.775E+00	3.255E+00	2.913E+00	2.657E+00	2.459E+00	2.297E+00	2.155E+00	2.025E+00
H	41.475	3.933E+00	3.486E+00	3.019E+00	2.710E+00	2.475E+00	2.291E+00	2.143E+00	2.014E+00	1.896E+00
I	45.975	3.591E+00	3.196E+00	2.783E+00	2.507E+00	2.297E+00	2.127E+00	1.989E+00	1.874E+00	1.768E+00
J	50.475	3.262E+00	2.917E+00	2.554E+00	2.311E+00	2.124E+00	1.971E+00	1.845E+00	1.739E+00	1.643E+00
K	54.975	2.950E+00	2.651E+00	2.336E+00	2.124E+00	1.960E+00	1.825E+00	1.710E+00	1.612E+00	1.526E+00
L	59.475	2.658E+00	2.401E+00	2.131E+00	1.947E+00	1.805E+00	1.687E+00	1.585E+00	1.495E+00	1.417E+00
M	63.975	2.388E+00	2.170E+00	1.940E+00	1.784E+00	1.661E+00	1.558E+00	1.468E+00	1.389E+00	1.318E+00
N	68.475	2.147E+00	1.963E+00	1.768E+00	1.634E+00	1.529E+00	1.440E+00	1.362E+00	1.292E+00	1.228E+00
O	72.975	1.933E+00	1.777E+00	1.612E+00	1.498E+00	1.408E+00	1.332E+00	1.264E+00	1.203E+00	1.148E+00
P	77.475	1.742E+00	1.611E+00	1.471E+00	1.375E+00	1.298E+00	1.233E+00	1.176E+00	1.123E+00	1.076E+00

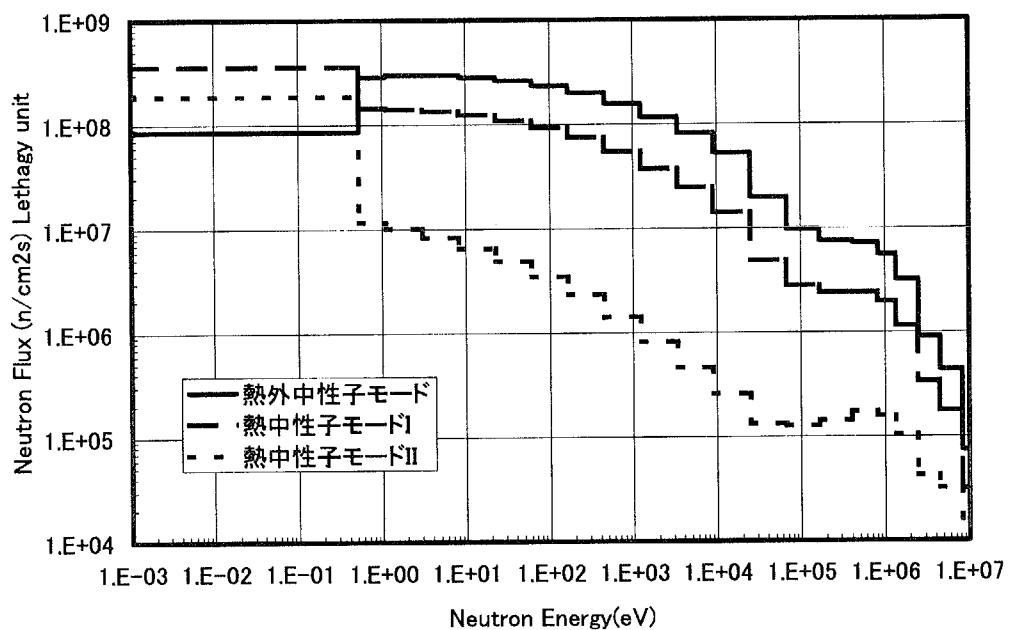


Fig.1 JRR-4 Neutron Beam Equipment

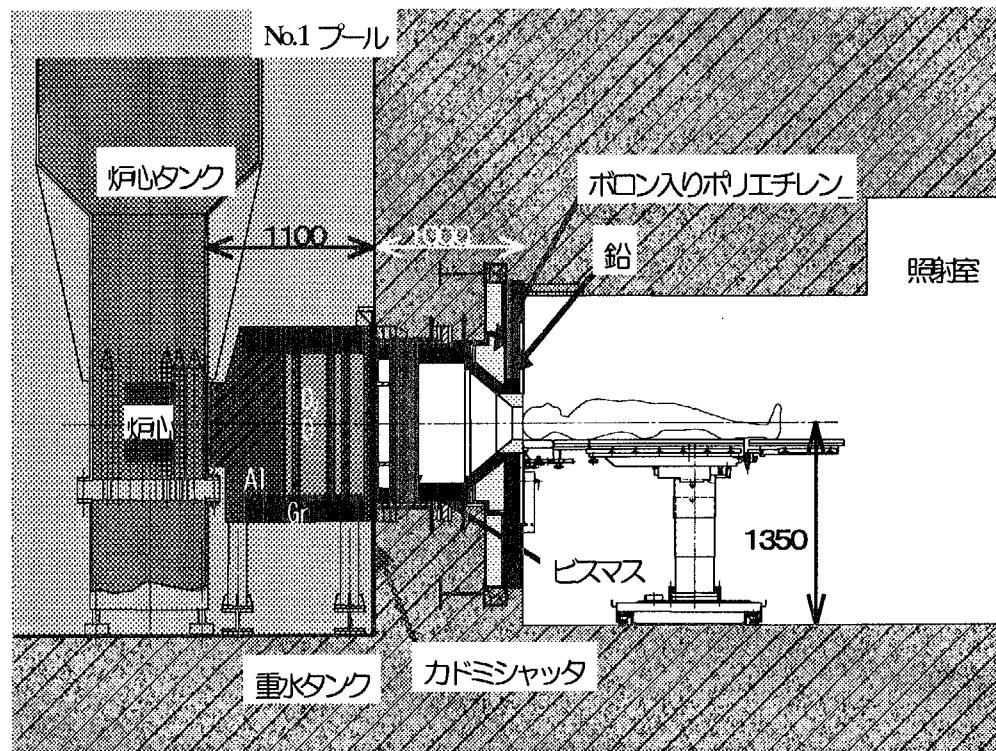


Fig.2 JRR-4 Neutron Beam Equipment

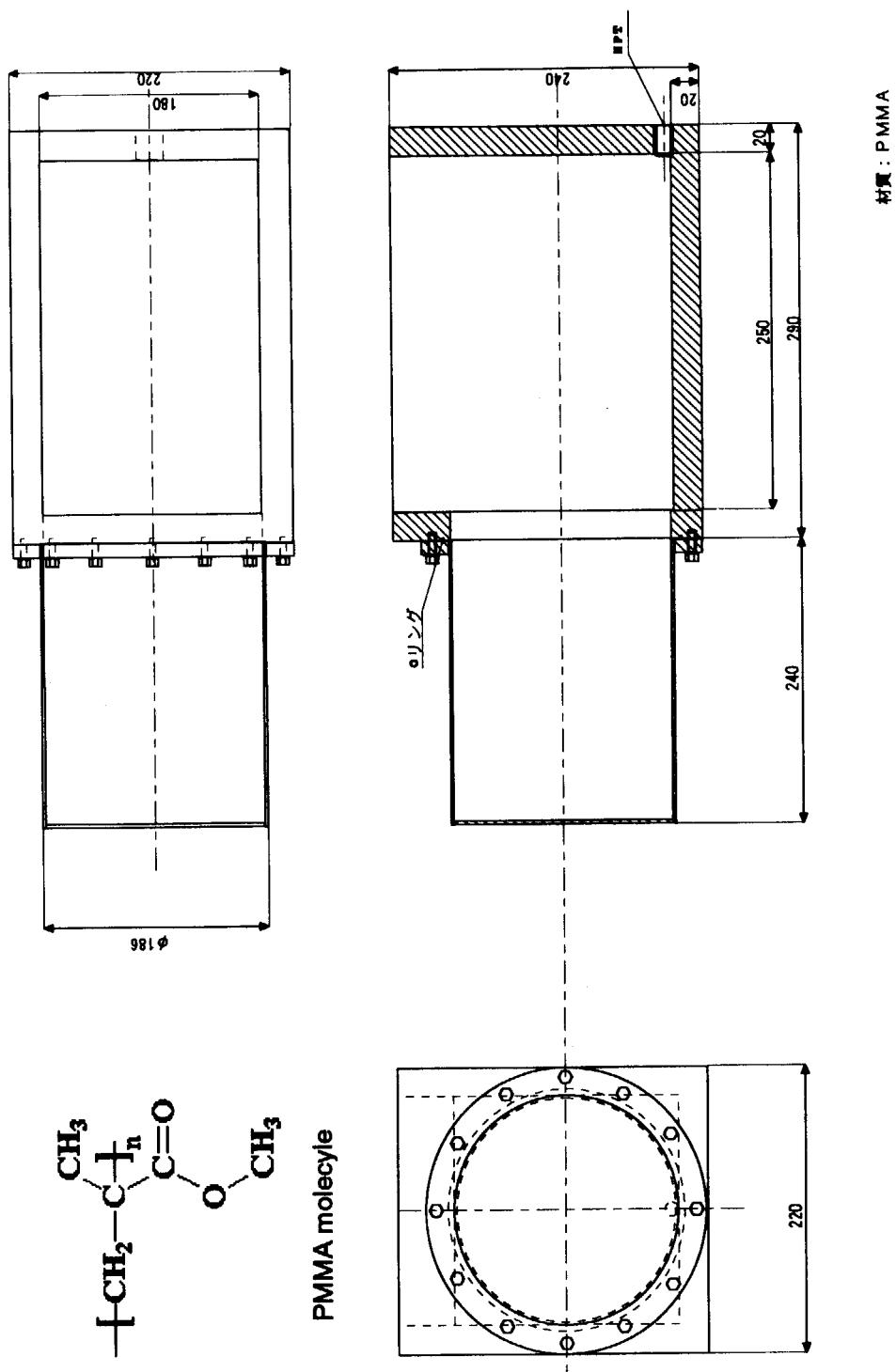


Fig.3 実験に使用した頭部水ファントム

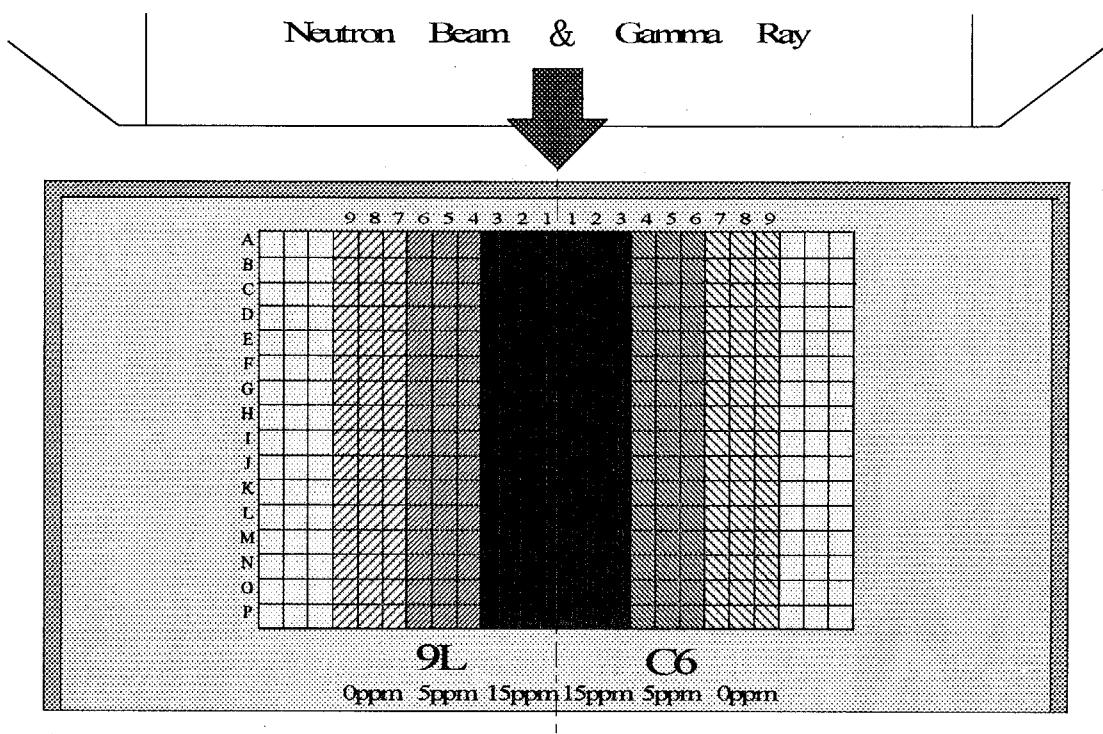


Fig.4 ウエルプレート上の腫瘍細胞の配置

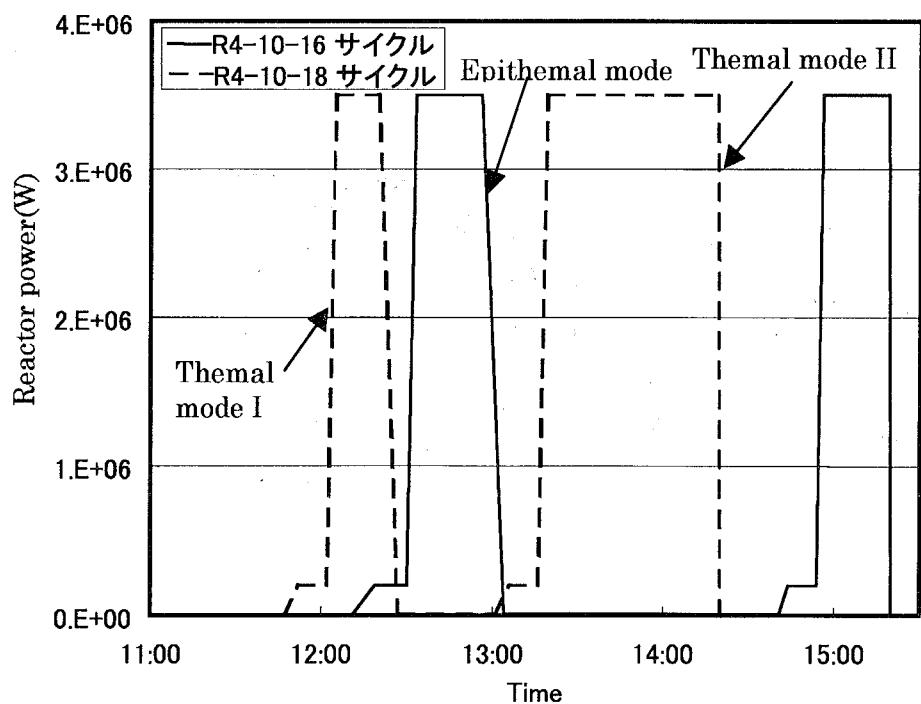


Fig.5 照射実験時の原子炉出力の変化

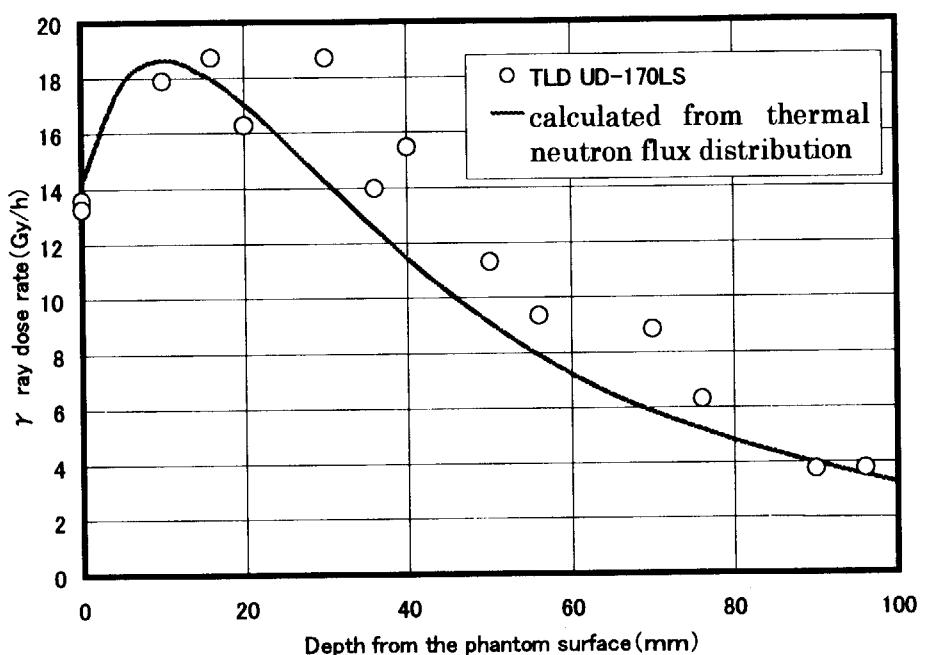


Fig.6 热中性子モードIの $\gamma$ 線量率分布

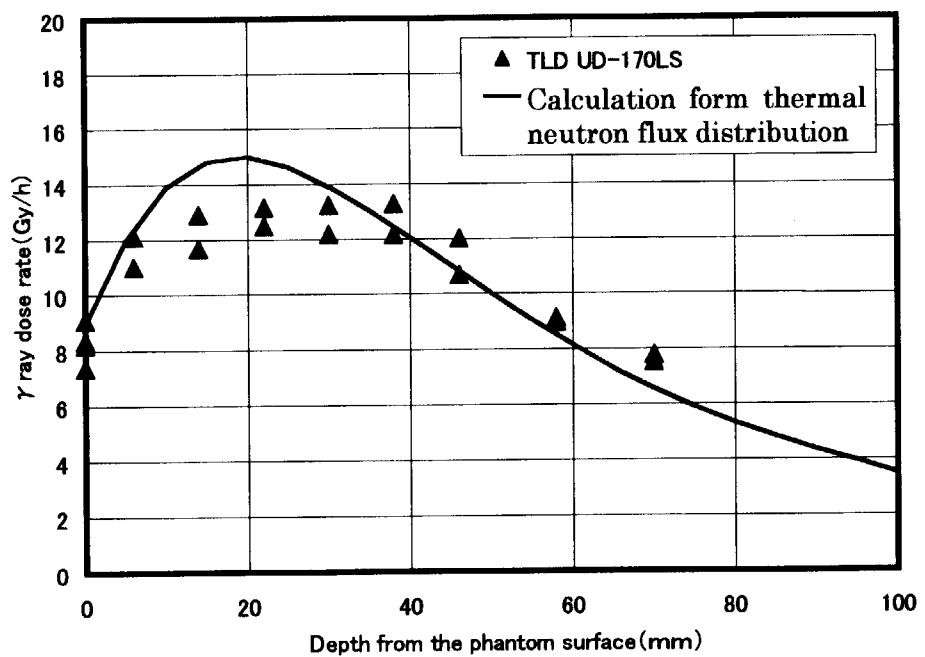


Fig.7 热外中性子モードの $\gamma$ 線量分布

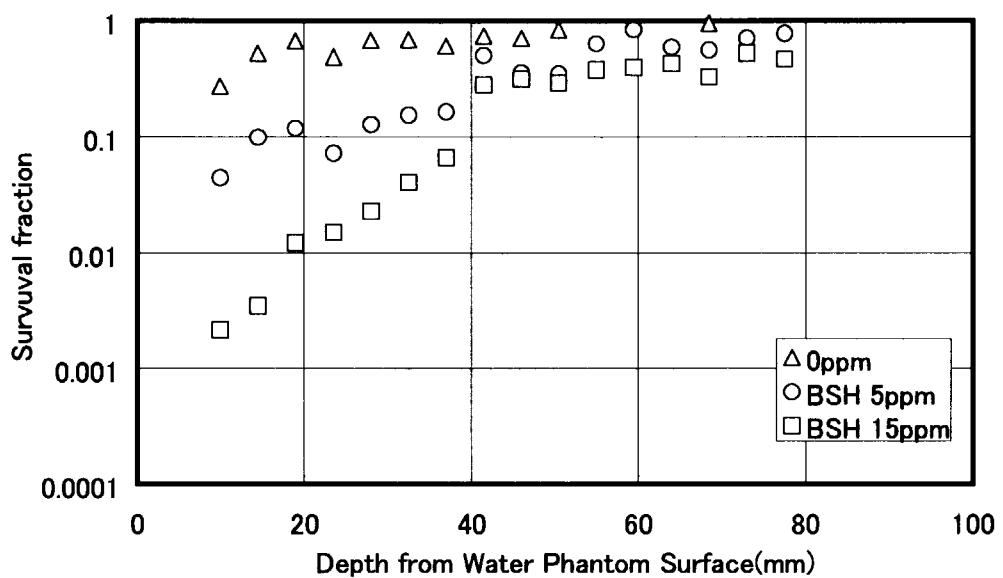


Fig.8 热中性子モード I に対する 9L gliosarcoma cells の生存率感度

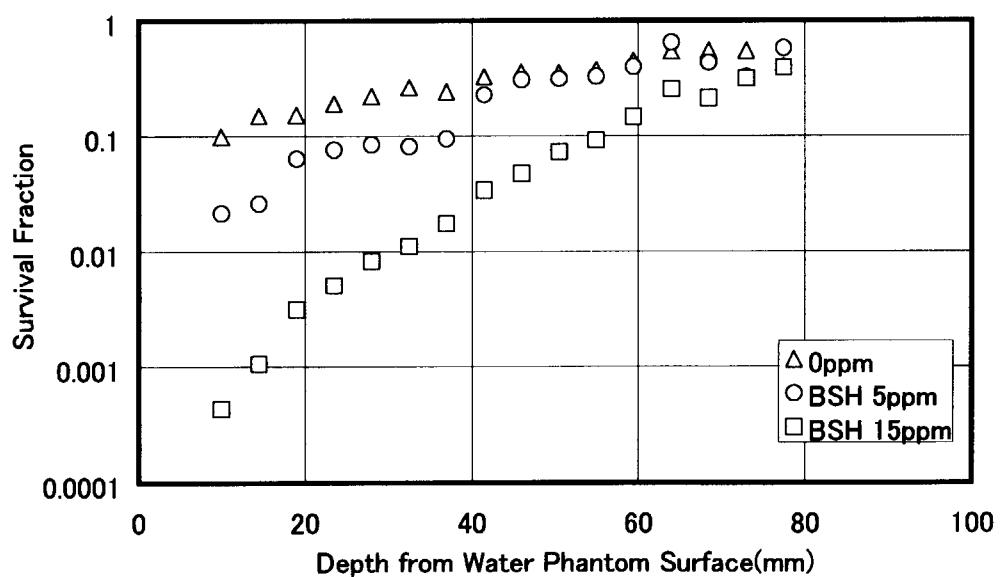


Fig.9 热中性子モード I に対する C6 glioma cells の生存率感度

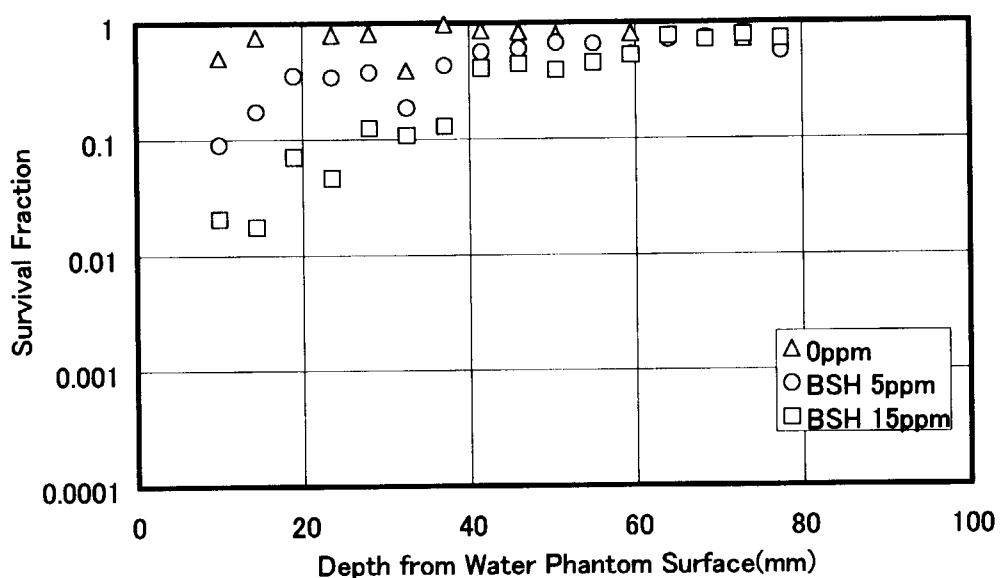


Fig.10 热中性子モード II に対する 9L gliosarcoma cells の生存率感度

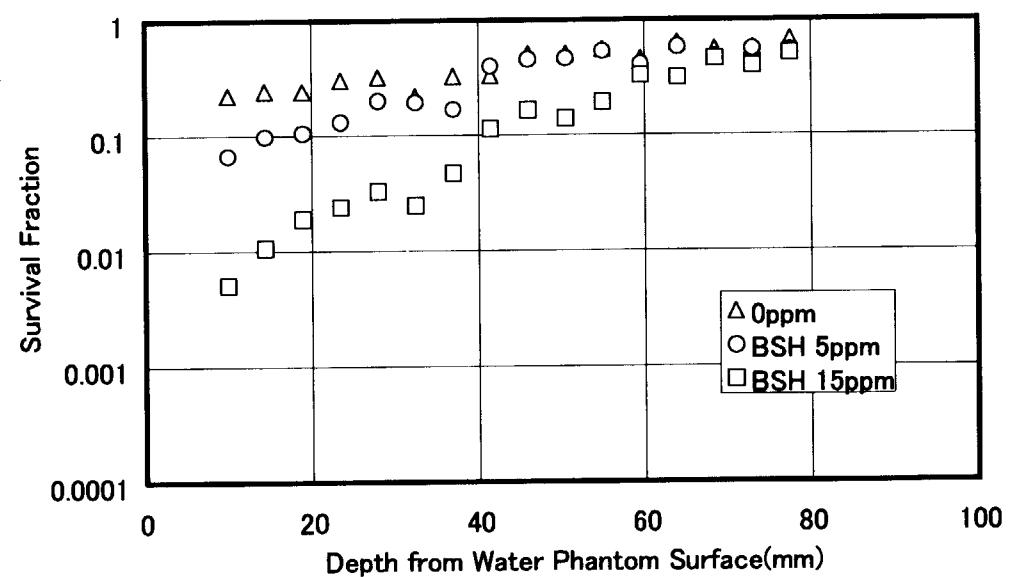


Fig.11 热中性子モード II に対する C6 glioma cells の生存率感度

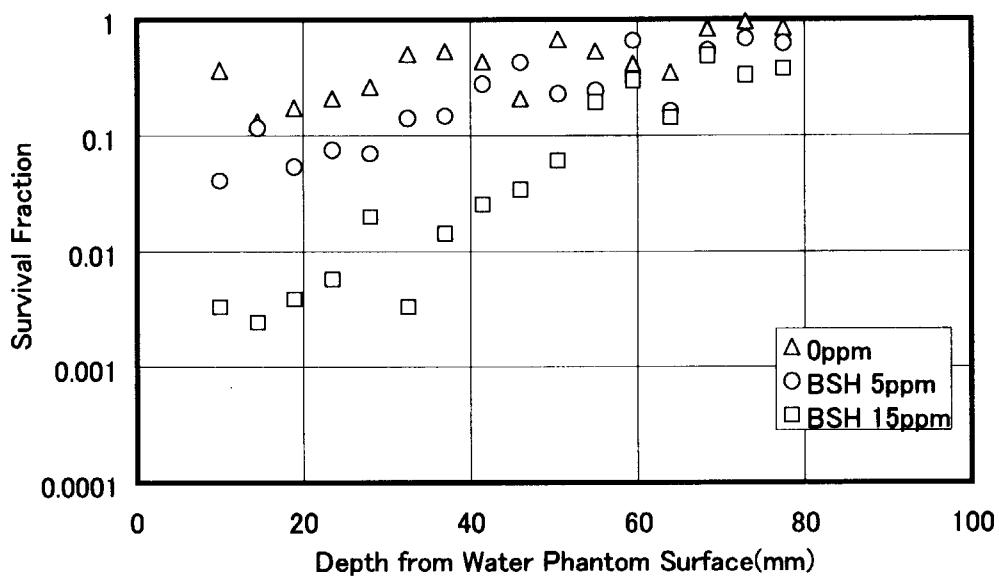


Fig.12 热外中性子モードに対する 9L gliosarcoma cells の生存率感度

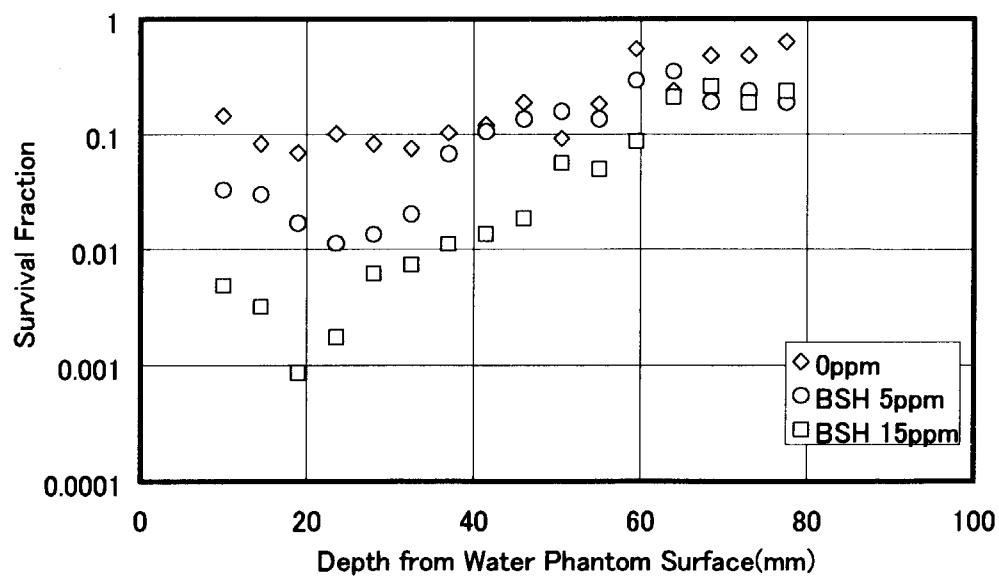


Fig.13 热中性子モード I に対する C6 glioma cells の生存率感度

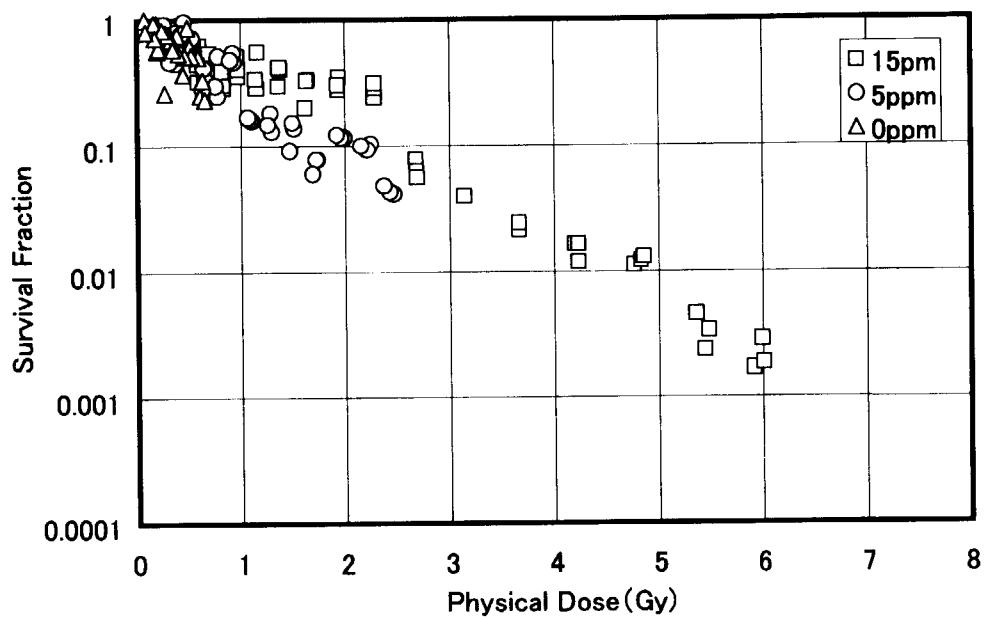


Fig.14 热中性子モード I に対する中川らの物理線量に対する 9L gliosarcoma cells の生存率曲線

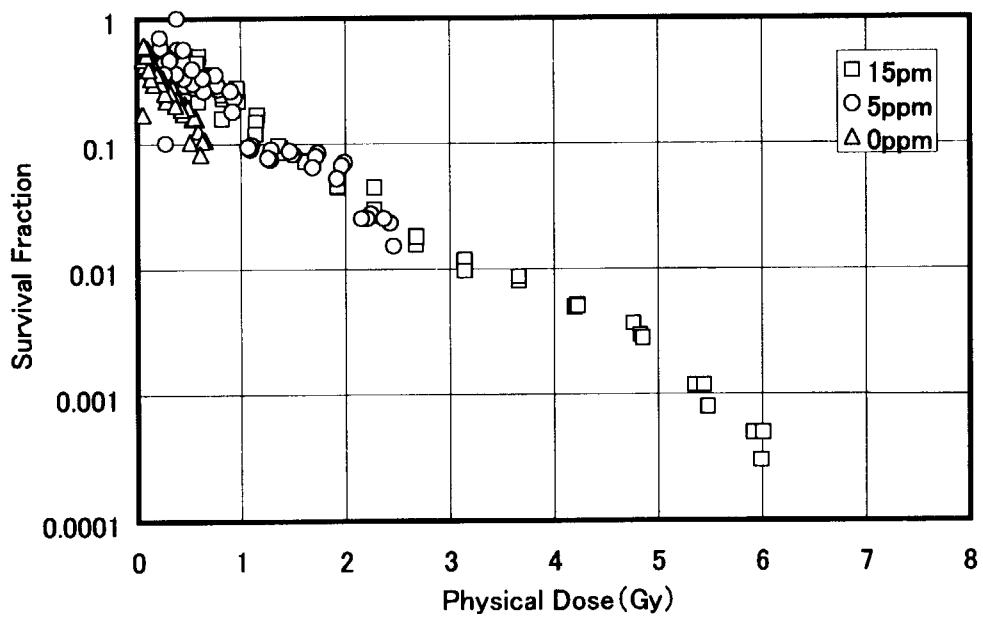


Fig.15 热中性子モード I に対する中川らの物理線量に対する C6 glioma cells の生存率曲線

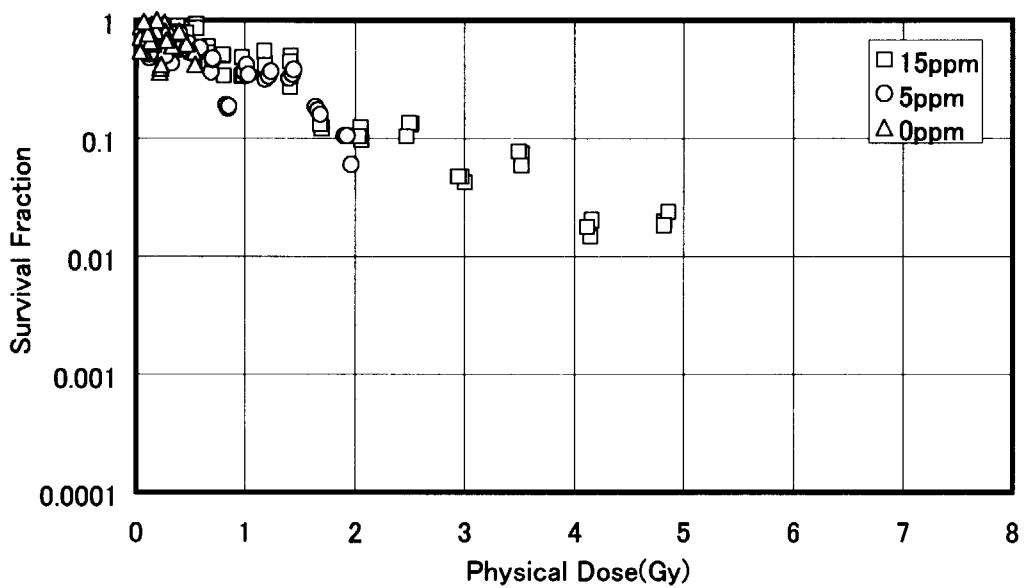


Fig.16 热中性子モード II に対する中川らの物理線量に対する 9L gliosarcoma cells の生存率曲線

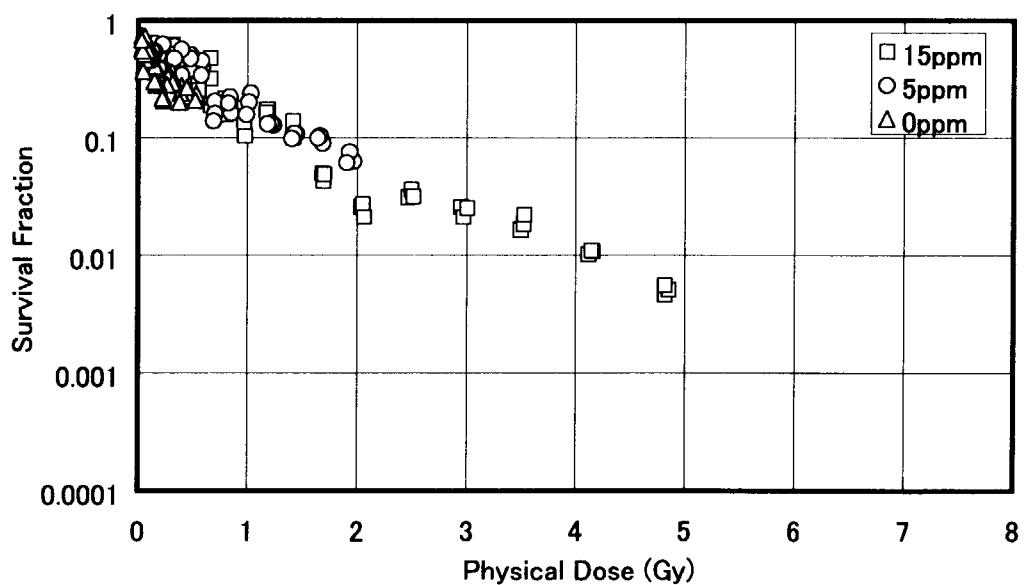


Fig.17 热中性子モード II に対する中川らの物理線量に対する C6 glioma cells の生存率曲線

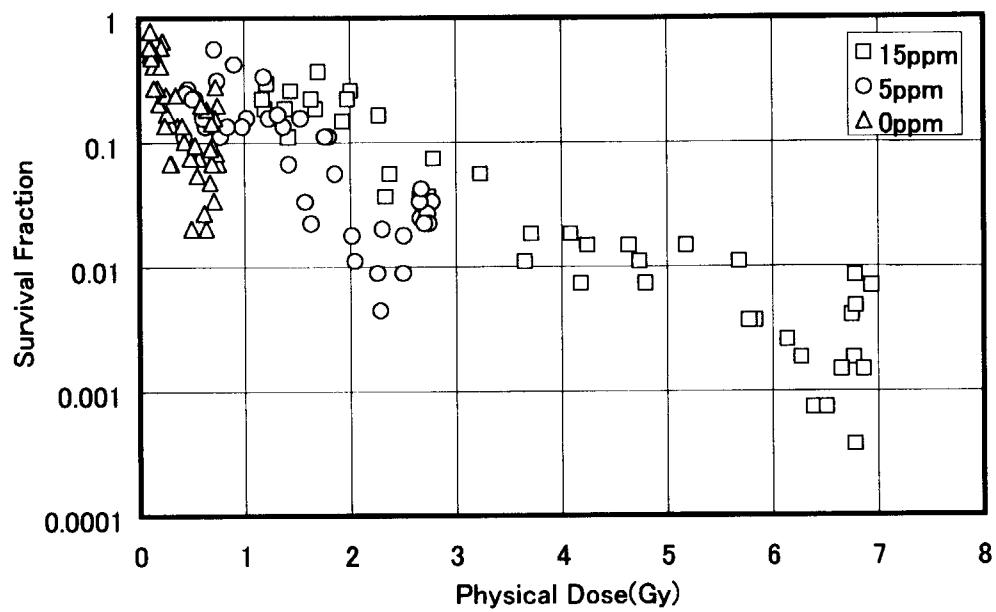


Fig.18 热外中性子モードに対する中川らの物理線量に対する 9L gliosarcoma cells の生存率曲線

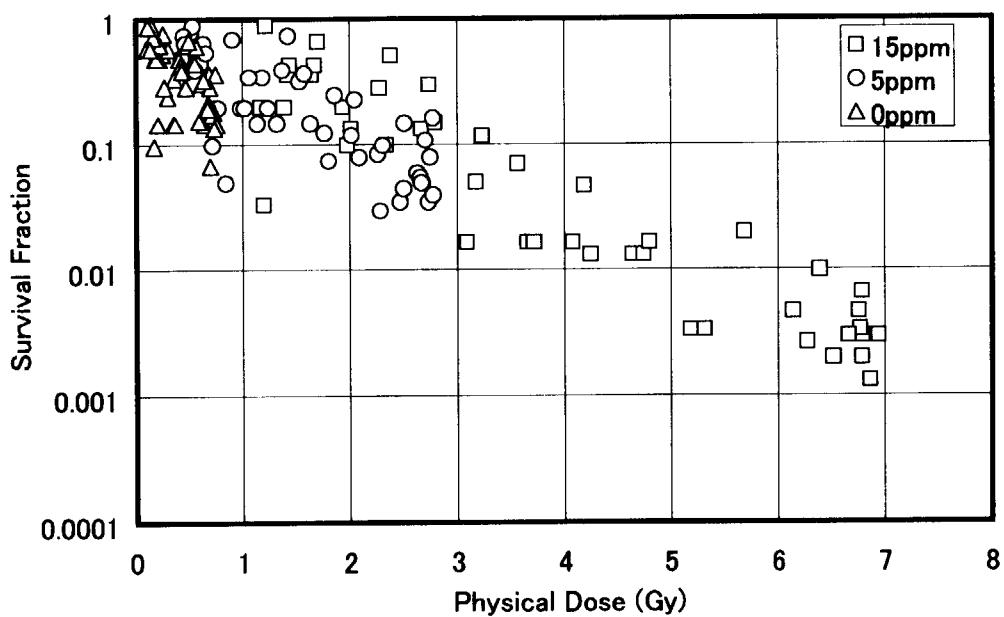


Fig.19 热中性子モード I に対する中川らの物理線量に対する C6 glioma cells の生存率曲線

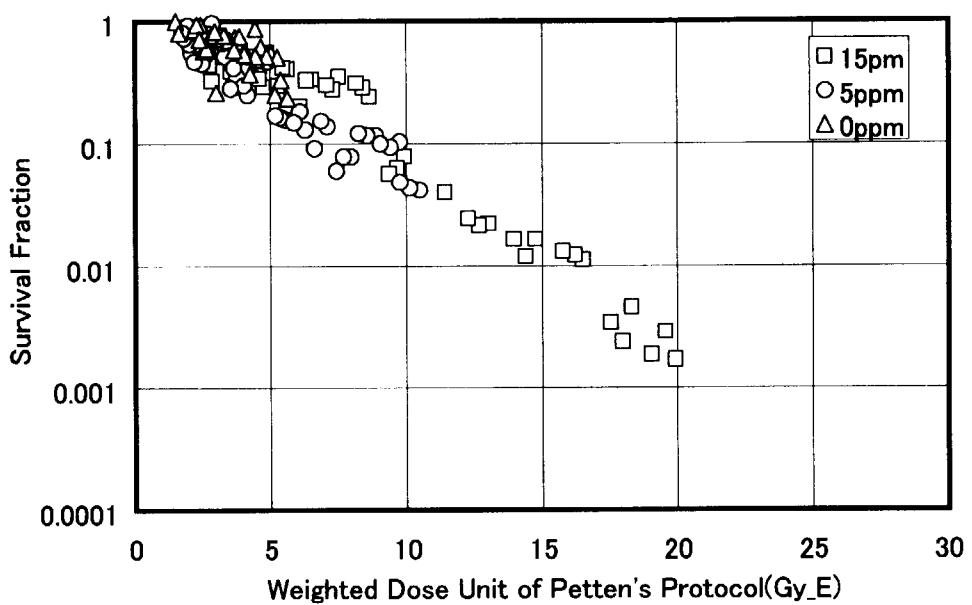


Fig.20 热中性子モード I に対する Petten のweighted dose unit に対する 9L gliosarcoma cells の生存率曲線

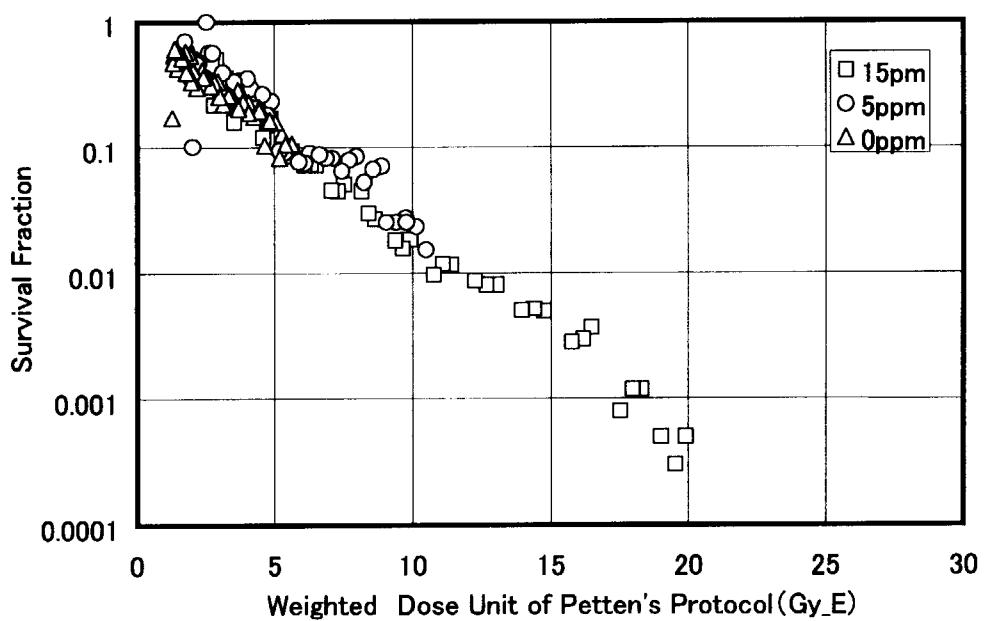


Fig.21 热中性子モード I に対する Petten のweighted dose unit に対する C6 glioma cells の生存率曲線

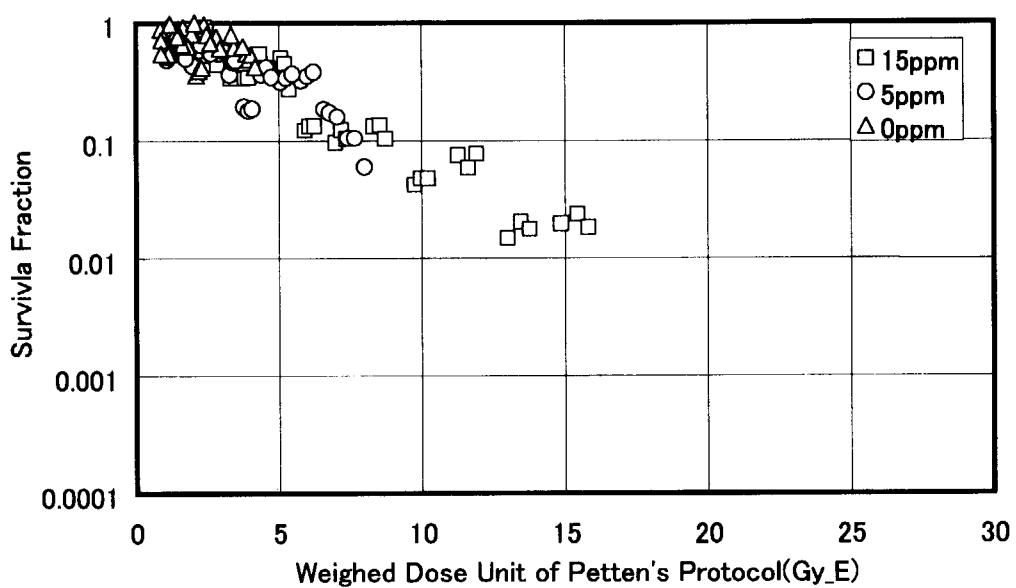


Fig.22 热中性子モード II に対する Petten のweighted dose unit に対する 9L gliosarcoma cells の生存率曲線

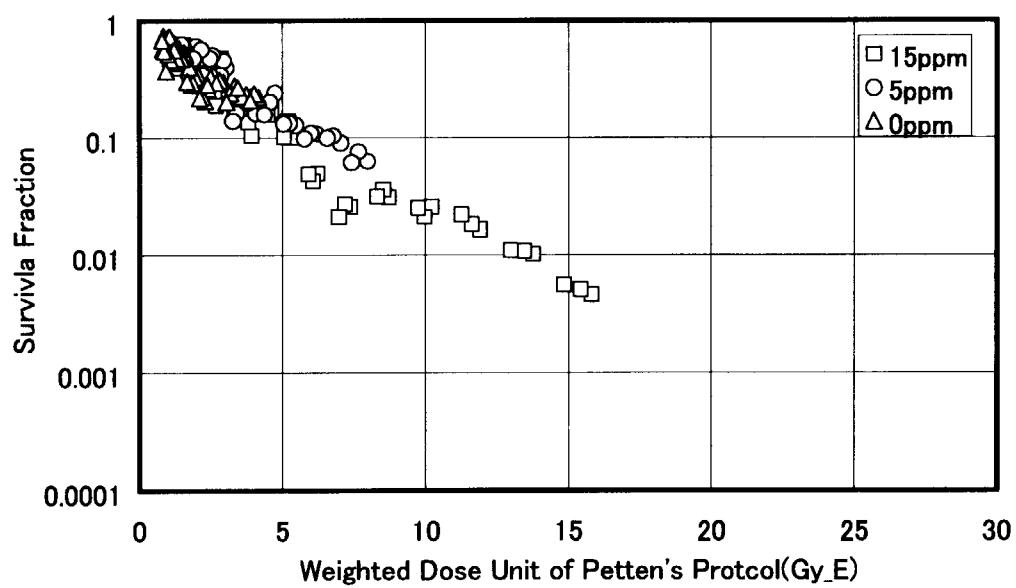


Fig.23 热中性子モード I に対する Petten のweighted dose unit に対する C6 glioma cells の生存率曲線

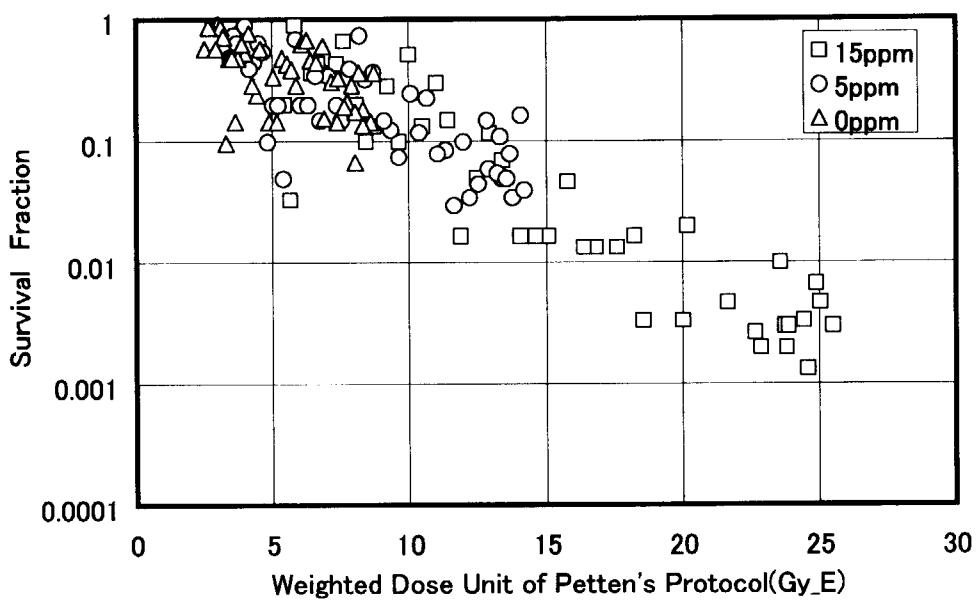


Fig.24 热外中性子モードに対する Petten のweighted dose unit に対する 9L gliosarcoma cells の生存率曲線

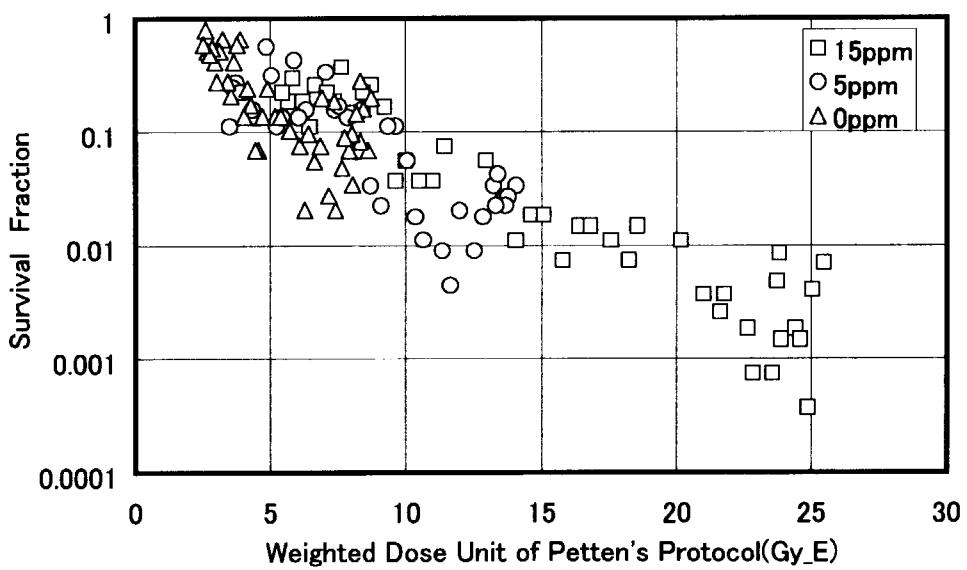
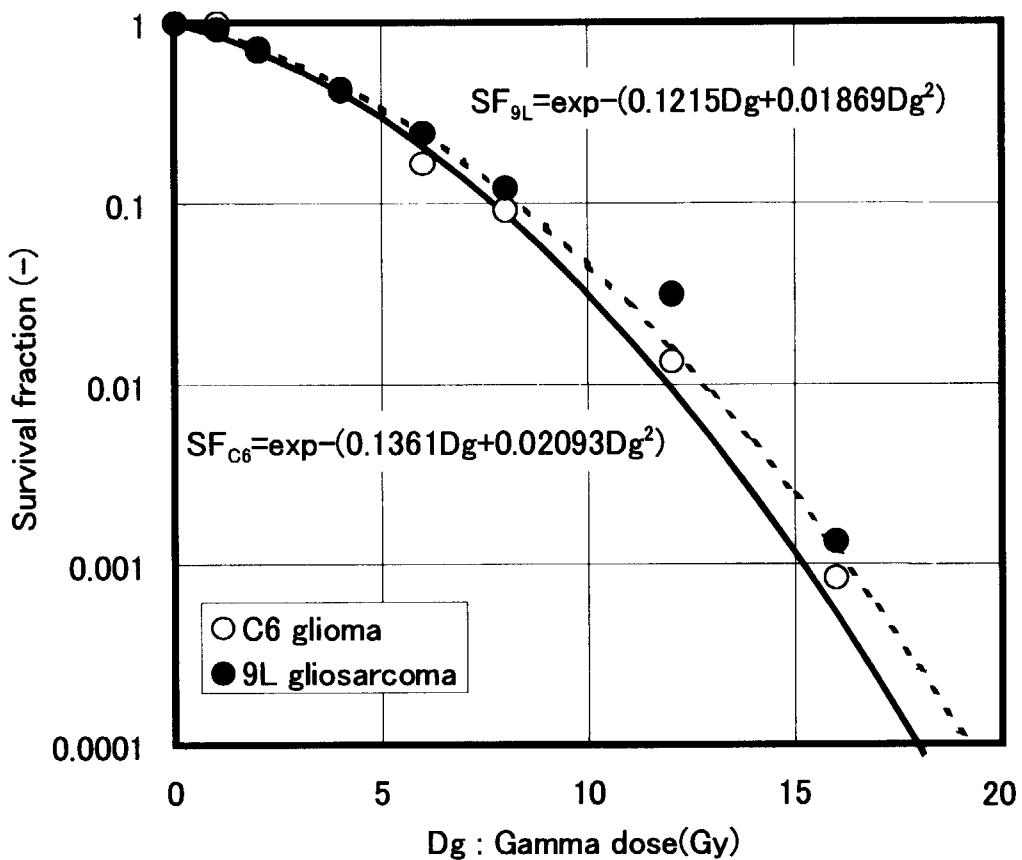


Fig.25 热外中性子モードに対する Petten のweighted dose unit に対する C6 glioma cells の生存率曲線

Fig.26  $\gamma$ 線に対する感度曲線 (Cs-137)

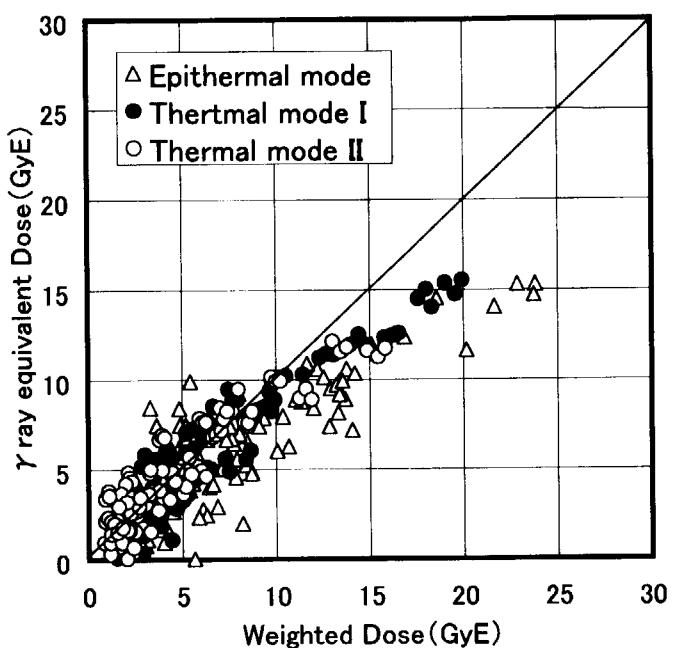


Fig.27 9L gliosarcoma の weighted dose に対する  $\gamma$  線等価線量の比較

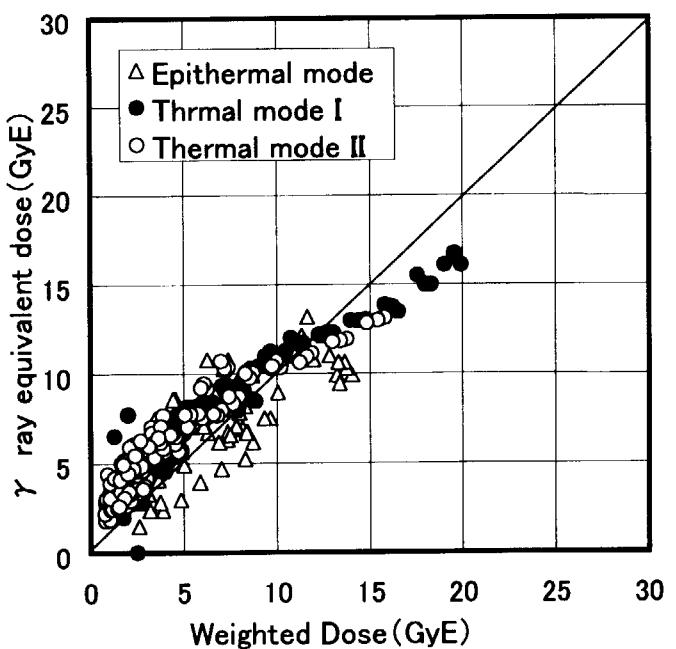


Fig.28 C6 glioma の weighted dose に対する  $\gamma$  線等価線量の比較

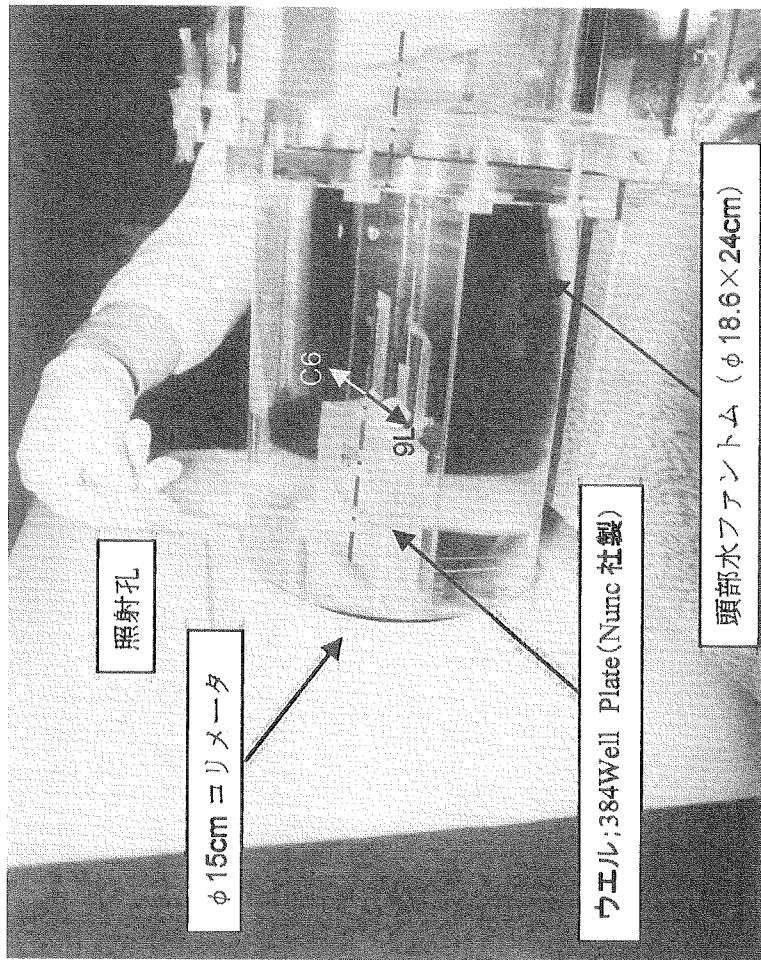


Photo1 実験時の頭部水円筒ファントム (384 Well Plate を内蔵) と JRR-4 のコリメータ  
(直径 15cm)

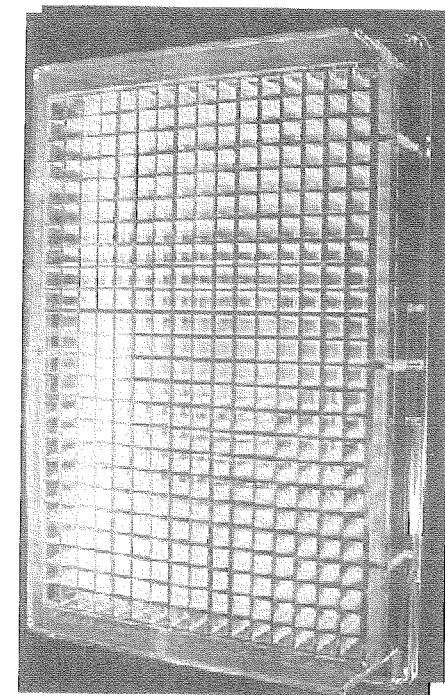


Photo2 384Well Plate(Nunc社)



Photo3 メチレンブルーで染色後のシャーレ

- 1.細胞系列:9L Gliosarcoma, C6 Glioma
- 2.容器 :ウエル:384Well Plate(Nunc社製)
- 3.BSH :0ppm, 5ppm, 15ppm
- 4.検定方法: Colony Formation Assay Method  
(7日間培養)
- 5.細胞懸濁液の量:100  $\mu$  l
- 6.照射量:最大で約 $5.5 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名 称	記 号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レンントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

## 換 算 表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

IE	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>	= 4.184 J (熱化学)	
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	= 4.1855 J (15 °C)	
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>	= 4.1868 J(国際蒸気表)	
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	仕事率 1 PS(仮馬力)	
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	= 75 kgf·m/s	
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	= 735.499 W	
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>		1	100
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1	0.01	1	

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

