

大電力電子線用ビームダンプの開発(1)

— 概念設計 —

1996年3月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken 311-13, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1996

大電力電子線用ビームダンプの開発(1)

— 概念設計 —

武井 早憲* 武田 靖†

要 旨

エネルギー10MeV ビーム電力200kW の大電力・低エネルギー電子線用ビームダンプの開発にはいくつかの開発すべき課題がある。すなわち、これはエネルギーが数GeVの電子の飛程は水中で数メートルであるのに対して、エネルギー10MeVの電子では数センチメートルであることに関係するからである。この結果、短い飛程長の中に大量のエネルギーが損失され、ビームダンプの標的内部での発熱密度が大きくなる。

このためビームダンプは、従来と異なり、差動排気システム・拡大用電磁石・中空状円板及び真空容器から構成されている。電子線は中空状円板の上流側に設置された拡大用電磁石を通過して真空容器に輸送される。拡大された電子線は冷却水により冷却された中空状円板の内側に照射され、吸収される。このような構造を採用することにより冷却水に直接入射電子線が照射されず、冷却水の放射線による分解が少なくなり、ビームダンプと加速管の間のビーム窓を無くすることができる。ビームダンプの標的は外径40cmの22枚の中空状円板で構成され、内径は電子線の進行方向に段々と小さくなるように設計されている。円板の材質は無酸素銅である。

このようなビームダンプにビーム形状が正規分布である最大ビーム電力の電子線が入射した時、最大発熱密度は $2.2\text{kW}/\text{cm}^3$ となる。また、中空状円板の内側の最高温度上昇は約350度と予想される。

*大洗工学センター 基盤技術開発部 先進技術開発室

†動力炉・核燃料開発事業団 客員研究員(スイス国立パール・シェラー研究所)

The development of beam dump for high power electron beam (1)

— Conceptual Design —

H. Takei* Y. Takeda†

ABSTRACT

The high power low energy beam (200kW of 10 MeV electron beam) dump poses some challenging problems. For electrons with 10 MeV, the range of electron in water is only a few centimeters in comparison with a few meters for a few GeV electrons. This short range with high power energy deposit causes high power densities in a beam dump target.

Major components are a differential pumping system, a dispersion magnet, hollow disks, and a cylindrical support carriage. The beam enters into the cylindrical vessel through a dispersion magnet which is located in front of hollow disks. The dispersed beam is stopped at the inner edge of hollow disks which are cooled by water. In order to reduce radiolysis of cooling water and to eliminate the window between the beam dump and the accelerating tube, cooling water is not exposed to the direct incident beam. The target consists of 22 hollow disk blocks (40cm outside diameter), which inside diameter is smaller step by step. Each disk is made from OFHC (Oxygen Free High-purity Copper).

The maximum power density in the copper disk is about $2.2\text{kW}/\text{cm}^2$ with full beam power assuming Gaussian distribution of the transverse beam intensity. The maximum temperature rise in the disk (around inner edge of hollow disk) is estimated about 350 degree from this power density.

*Frontier Technology Section, Oarai Engineering Center

†Guest Reseacher of PNC (Paul Scherrer Institut)

目次

要旨	I
目次	III
表リスト	V
図リスト	VI
1 はじめに	1
1.1 オメガ計画	1
1.2 消滅処理に必要な加速器条件	2
1.3 大電力電子線形加速器用ビームダンプの開発	3
2 電子・光子輸送計算コードEGS4	4
2.1 計算コードEGS4の概略	4
2.2 計算コードEGS4の整備(1)	6
3 ビームダンプの基本概念	14
3.1 ビームダンプの現状	14
3.2 SLAC方式の問題点	15
3.3 PNC加速器用ビームダンプの基本概念	17
4 ビームダンプの基本構造	21
4.1 計算コードEGS4の整備(2)	21
4.2 ターゲットの形状	26

5	まとめ	34
6	謝辞	36
	参考文献	37
	表	39
	図	64

表リスト

- 表 1-1 PNC 加速器の基本パラメーター
- 表 2-1 ファイル ranmar.README の内容
- 表 2-2 ファイル ranmar.init の内容
- 表 2-3 ファイル ranmar.minimal の内容
- 表 2-4 $IXX = 1802$, $JXX = 9373$ に初期値を設定したときの Ranmar 乱数
- 表 2-5 サブルーティン PROFIL の内容
- 表 2-6 サブルーティン INIDRZ の内容
- 表 3-1 水中でのエネルギー損失 (ビーム電力 100kW 入射時)
- 表 4-1 サブルーティン SETPOS の内容
- 表 4-2 電子線の直径を変化させた場合の発熱密度
- 表 4-3 電子線の入射角を変化させた場合の発熱密度
- 表 4-4 電子線入射条件
- 表 4-5 内部発熱領域の定義と発熱量
- 表 4-6 データファイル beam_dump.dat の内容
- 表 4-7 データファイル beam_dump_media.dat の内容
- 表 4-8 金属円板の温度

図リスト

- 図 1-1 ガラス固化体 1 本当たりの放射能の時間変化の計算例 (文献 [3] より引用)
- 図 2-1 任意分布の乱数発生のための棄却法
- 図 2-2 矩形領域と分布曲線 $f(y)$
- 図 2-3 入射点の xy 座標 (Pencil Beam Spot)
- 図 2-4 ビーム形状による電流密度分布
- 図 2-5 円筒平板形状の定義 (文献 [7] より引用)
- 図 2-6 散乱角 θ と方位角 ϕ の定義
- 図 3-1 SLAC のビームダンプ (文献 [11] より引用)
- 図 3-2 水中でのエネルギー損失 (ビーム電力 100kW 入射時)
- 図 3-3 水中での最大発熱密度 (ビーム電力 100kW 入射時)
- 図 3-4 銅中でのエネルギー損失 (ビーム電力 100kW 入射時)
- 図 3-5 銅中での最大発熱密度 (ビーム電力 100kW 入射時)
- 図 3-6 PSI ビームダンプの概要
- 図 4-1 電子軌道の直線近似方法
- 図 4-2 出発点の xy 座標 (Pencil Beam Spot)
- 図 4-3 出発点の xy 座標 (Gauss Beam Spot)
- 図 4-4 内部発熱による温度分布 (1)
- 図 4-5 内部発熱による温度分布 (2)
- 図 4-6 中空状金属円板の温度分布 (内部発熱 10kW)
- 図 4-7 ターゲット基本構造 (断面図)
- 図 4-8 内部発熱領域の定義 (軸対称)
- 図 4-9 金属円板 (No.10) の温度分布
- 図 4-10 金属円板 (No.13) の温度分布
- 図 4-11 γ 線の散乱角とエネルギーの関係 (ターゲット)
- 図 4-12 γ 線の方位角とエネルギーの関係 (ターゲット)
- 図 4-13 γ 線のエネルギー分布 (ターゲット)

第1章

はじめに

1.1 オメガ計画

わが国では高レベル放射性廃棄物中に含まれるマイナーアクチニド (^{237}Np , ^{241}Am , ^{243}Am , ^{243}Cm , ^{244}Cm , ^{245}Cm などの超ウラン元素) および長寿命核分裂生成物 (^{90}Sr , ^{93}Zr , ^{99}Tc , ^{129}I , ^{137}Cs など) を分離し、これらを原子炉、加速器などにより消滅する可能性を探る研究をオメガ計画として推進している。

オメガ計画は、昭和62年6月に改定された「原子力開発利用長期計画」を受けて、昭和63年10月に原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会で策定されたものである[1]。本計画の具体的な方針は、高レベル放射性廃棄物の深地層処分を基本方針としたうえで、処分の効率化、有用元素の資源化及び安全性の向上などの可能性を目指している。

事業団では、マイナーアクチニドの消滅には、高速炉を利用することが適切であると考えており、そのための研究開発を実施している。一方、長寿命核分裂生成物については中性子吸収断面積が小さいことから通常の原子炉で消滅するのが困難であり、加速器などによる消滅処理の可能性を検討している[2]。

加速器による消滅処理の対象になる核種は、U及びPuの核分裂によって生成される割合が大きく、半減期が長く、かつ (n, γ) 反応の断面積が小さいために原子炉では消滅せずに生き残ったものである。文献[1]によると出力1GWeの原子炉から生成される消滅対象核種の生成量は年間152kgとなり、主な核種は ^{137}Cs 39.5kg, ^{90}Sr 17.8kg などである。

1.2 消滅処理に必要な加速器条件

高レベル放射性廃棄物の処理・深地層処分の効率化に必要な消滅処理という視点に立てば、 ^{137}Cs 39.5kg を次のような考え方で消滅処理をすることも有効であると考えられる。

例えば、ガラス固化体を深地層処分する場合を考えると、ガラス固化体は冷却のため約50年間中間貯蔵を行い、発熱量を1本当たり2000Wから400Wに減少させることとしている[3]。これはガラス固化体を保護する緩衝材の許容温度が100℃であるからである。この中間貯蔵期間中 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr が主な発熱源であるため、これらの量を減少させることが中間貯蔵期間の短縮に有効である(図1-1参照)。

ところで、事業団では ^{137}Cs を消滅させるために、電子線の制動輻射による方法を用いてγ線照射野から制限される固体ターゲットの体積、消滅処理による実効半減期、及び1核変換当たりが必要となるエネルギー(消滅エネルギー)を考慮した解析を行っており、その結果については加瀬らの検討がある[4]。

これはターゲット体積を変化させたときの実効半減期及び消滅エネルギーを解析したものである。尚、入射電子エネルギーが約100MeV以上では ^{137}Cs の光核反応の割合がほとんど同じであるので、解析における加速器のビームエネルギーを100MeVに設定する。

また、文献[4]で示されたターゲット体積と実効半減期の関係を用いて、1年間に生成される ^{137}Cs 39.5kg (1.7×10^{26} 原子・ 5.1×10^7 GBq・ 21000cm^3)を一台の加速器を用いて消滅処理する場合、実効半減期が8.5年、消滅エネルギーが3800MeV(=100MeV/0.026)と推定される。

深地層処分の効率化に必要な消滅処理という観点から消滅処理期間を次のように設定する。すなわち、中間貯蔵期間約50年間に発熱量は1/5(=400/2000)となるので、 ^{137}Cs の量を実効半減期8.5年の消滅処理により1/5にするために必要な期間と設定する。この期間は $19.7(=8.5 \log 5 / \log 2)$ 年間であり、必要な電子加速器の平均電流 I は、式(1.1)で計算される。

$$I = \frac{1.7 \times 10^{26} \times 1.60 \times 10^{-19}}{19.7 \times 365 \times 24 \times 3600} \frac{1}{0.026} = 1.7(\text{A}) \quad (1.1)$$

従って、ビームエネルギー100MeV・ビーム平均電流1.7Aの加速器一台を用いて消滅

処理を行った場合、19.7年間で ^{137}Cs の量を1/5にすることができる。この期間は消滅処理を行わない場合と比較して中間貯蔵期間50年が半分以下に短縮されたことになる。すなわち、ビームエネルギー100MeV・ビーム平均電流1A (100MW) 級の大電力加速器が深地層処分の効率化という視点から必要になる。

1.3 大電力電子線形加速器用ビームダンプの開発

現在の加速器システムは、主に高エネルギー化・大電流化を目指して開発が進められている。特に研究用加速器は、エネルギーフロンティアを目標として高エネルギー物理学実験用に開発が進められている。しかしながら、大電流化を目指しての開発は電子ビーム間の相互作用によるビーム不安定性等の問題に直面し、その進展は高エネルギー化の開発と比較して顕著ではなかった。

現在先進技術開発室では、上記に示した消滅処理等に適用することが可能な大電力の電子線形加速器の開発を目的として、要素技術開発用の大電力CW (Continuous Wave, 連続波) 電子線形加速器(以下、PNC加速器と記す)の研究・開発を行っている。PNC加速器の基本パラメータを表1-1に示す。PNC加速器は、既存の加速器よりも平均電流で2桁程度高い電子線を加速するため、加速器システムを構成する全ての要素に対して既存の加速器にはない大電流化技術を開発する必要がある [5]。

PNC加速器から得られる電子線を吸収するビームダンプに関しても、他の加速器要素と同様に大電流化に対応できる技術を確立する必要がある。すなわち、低エネルギー・大電力電子線の吸収に伴う発熱を効率良くしかも安全に除去し、発生する大量の放射線を遮蔽するビームダンプの開発が急務となる。

本報告書では、PNC加速器から得られる大電力電子線を安全に吸収するビームダンプの基本構造について検討した結果をまとめ、将来の消滅処理システムを設計する場合の指針とする。

第2章

電子・光子輸送計算コードEGS4

大電力電子線形加速器用ビームダンプの基本概念を決めるためには、荷電粒子が媒質中でエネルギーを損失する過程を把握し、エネルギー損失に依存した冷却方法を決める必要がある。これは、エネルギー損失の大きい場所を集中して冷却するためである。

しかし、エネルギー損失が大きい場所はビーム形状やビームエネルギーなどに大きく依存するため、PNC加速器のビーム形状などに合わせた解析が必要になる。この解析のため、任意の材質・体系内における光子・電子・陽電子の輸送を取り扱うモンテ・カルロシミュレーションコードEGS4 (Electron Gamma Shower version 4)[6]を整備し、PNC加速器用ビームダンプの基本概念を決定するために必要な資料を作成する。

本章では、計算コードEGS4の概略と今回整備を行った内容について記述する。尚、詳細な計算コードの内容については1996年10月に発行予定の報告書(以下、基本設計報告書と記す)及び文献[7]を参照すること。

2.1 計算コードEGS4の概略

計算コードEGS4は、任意の材質・体系内における光子・電子・陽電子の輸送を取り扱う三次元モンテ・カルロシミュレーションコードである。EGS4で輸送する粒子の運動エネルギーは、約2～3keV (10^3eV) から約4～5TeV (10^{12}eV) までである。現在の最新バージョンは W. R. Nelson, H. Hirayama, D. W. O. Rogers が1985年12月に作成したバージョン4である。

EGS4で取り扱う主な物理現象は、以下の通りである。

- (1) Bremsstrahlung production
- (2) Positron annihilation in flight and at rest
- (3) Molière multiple scattering
- (4) Møller & Bhabha scattering
- (5) Continuous energy loss
- (6) Pair production
- (7) Compton scattering
- (8) Coherent (Rayleigh) scattering
- (9) Photoelectric effect

尚、計算コード EGS4 では光子・電子・陽電子の輸送のみを取り扱うため、入射粒子のエネルギーが高くなるほど計算コード内で中性子の輸送を取り扱えるようにしなければならない。しかし、PNC 加速器のビームエネルギーは 10MeV であるため、特に中性子の発生を考慮する必要がなく、EGS4 で十分である。

今回 EGS4 で低エネルギー領域の粒子の輸送を取り扱うため、従来の EGS4 に下記のような改良を加えた。尚、項目 (1), (4) 及び (5) に関する詳細は、本報告書の範囲を越えるため文献 [7] 及び基本設計報告書を参照のこと。

(1) EGS4/PRESTA

EGS4 では多重散乱理論として Molière の理論を用いている。しかし、電子・陽電子の実際のふるまいを多重散乱理論でどの程度精度良く評価できるかということは移動する直線距離 (step size) の設定に大きく依存する。特に低エネルギー領域 (数 MeV 以下) では重要になる。PRESTA は、Parameter Reduced Electron-Step Transport Algorithm の略で、step size を計算形状に合わせて最適化を行い、境界での取り扱いを厳密に行う機能が含まれている。

(2) Ranmar 乱数

従来、電子・光子輸送計算用モンテカルロコードでは、一般に初期乱数に一定の数を掛け、オーバーフローさせていく調和型乱数発生ルーチンが用いられている。このルーチンでは、その周期が計算機のビット数に依存し、一般に使われる32ビット計算機では、その周期は 2^{29} 程度である。Ranmar 乱数は、G. Marsaglia, A. Zaman 及び W. W. Tsang によって考案された遅延 Fibonacci 数列に基づく擬似乱数発生プログラムである [8]。Ranmar 乱数は、周期が 2^{144} と極めて長く、シード(種)を変えるだけで約10億通りの異なった数列を発生出来るなどの特徴がある。尚、詳細は第 2.2.2 節を参照のこと。

(3) IAPRIM オプション

EGS4 で使用する電子の放射阻止能がICRU Report 37[9]に等しくなるように制動輻射断面積を規格化するオプションである。すなわち、低エネルギー電子散乱の断面積を実験値に合わせるオプションである。

(4) K殻及びL殻での吸収端の設定

原子の中にある特定の軌道(K殻、L殻など)にある電子による光電効果を設定する。

(5) EGS4-PICTの組み込み

計算コードEGS4で輸送された粒子の軌道を三次元空間に表すプログラムを組み込みを行った。

2.2 計算コードEGS4の整備(1)

本節では今回整備した内容について説明を行う。ところで、作成したプログラムを表の中に示すが、プログラム言語はフォートランに良く似ているモートラン(Mortran)と呼ばれる言語を使用している。モートランに関する詳細は、本報告書の範囲を越えるため文献 [7] 及び基本設計報告書を参照のこと。

2.2.1 カットオフエネルギーの決定

電子・陽電子などの荷電粒子の輸送を取り扱う場合、そのエネルギーがゼロに近づくほどほとんどの反応断面積は無限大になるという問題がある。このため、荷電粒子の輸送の場合には全ての反応を取り扱うことは現実的でなく、荷電粒子の飛跡を多くの散乱が一つにまとまったステップに分割し、ステップ内でのエネルギーの減衰と角度変化を多重散乱モデルに基づいて変化させる。

EGS4 では多重散乱モデルをエネルギー減衰や角度変化の少ない反応のみに適用し、主な反応は離散的な反応として個別に取り扱う。すなわち、荷電粒子と光子のカットオフエネルギーをそれぞれAE, AP とし、AE 以上のエネルギーの δ 線を生じる散乱と AP 以上のエネルギーを発生する制動輻射を離散的な反応として扱い、その他の反応は連続的であると仮定する。

尚、特に断らない限り、電子・陽電子のカットオフエネルギーを入射粒子エネルギーの1.0% (最低10keV)、光子のカットオフエネルギーを入射粒子の0.1% (最低10keV) とする。

2.2.2 Ranmar 乱数の設定

Ranmar 乱数は、G. Marsaglia, A. Zaman 及び W. W. Tsang によって考案された遅延 Fibonacci 数列に基づく擬似乱数発生プログラムである。Ranmar 乱数は、先に述べたように周期が 2^{144} と極めて長く、シード(種)を変えるだけで約10億通りの異なった数列を発生出来るなどの特徴がある。

従来、電子・光子輸送計算用モンテカルロコードでは、調和型乱数発生ルーチンが用いられるが、その周期は計算機のビット数に依存し、一般に使われる32ビット計算機では 2^{29} 程度である。一方、Pentium Processor を搭載したAT互換機(90MHz)で第4章で述べる形状にエネルギー3.5MeVの電子を入射させた場合、約2.5日間の計算でこの程度のヒストリー数が実行される。(1事象当たり約50個のヒストリー数が実行され、1分間当たり約3000事象が実行される。)

従って、約2.5日間(約1000万事象)以上の長い計算を行う場合には、Ranmar 乱数を用いたほうが乱数の繰り返しに留意する必要はない。

Ranmar 乱数を EGS4 で直ちに使用できるように A. Bielajew がマクロ化を行っている。

(表2-1参照) Ranmar乱数を使用する場合、表2-2で示したサブルーティンRMARINで初期値 IXX (31328未満の整数)、 JXX (30081未満の整数) から97個の変数 $URNM(1)$, ..., $URNM(97)$ と3個の変数 $CRNDM$, $CDRNDM$, $CMRNDM$ を作成する。但し、初期値 IXX , JXX は4桁の整数とする。次にこれら100個の変数を用いて表2-3に示したマクロ \$RANDOMSET# から擬似乱数を発生させる。

文献[8]に従って初期値を $IXX = 1802$, $JXX = 9373$ (文献[8]の $RSTART(12, 34, 56, 78)$ に対応する) とした場合、20001番目の擬似乱数は0.38945となり、これを16進法で表わすと0.63B3040となる。この値を式(2.1)のように記述する。

$$6\ 3\ 11\ 3\ 0\ 4\ 0 \quad (2.1)$$

以下同様にして20001番目から20005番目までを表2-4に表わす。この結果は、文献[8]の結果と完全に一致しているため、Ranmar乱数は正しく設定されていることがわかる。

2.2.3 ビームプロファイルの決定

従来のEGS4における入射粒子の軌道は、ある特定な点(点 a)から粒子が出発し、別な点(点 b)に全粒子が入射するような軌道である。しかし、点 b 近傍での発熱密度を求める場合、評価する形状の違いにより発熱密度の値は異なり、有限の径を持つ実際の電子線入射の場合と比較出来なくなる可能性がある。

例えば、半径4.8cm厚さ0.5cmの銅板の中心にエネルギー3.5MeV電力70kW直径0mmの電子線が入射する場合、中心部分である $0 < R < 3\text{mm}$ 及び $0 < R < 6\text{mm}$ の発熱密度、発熱量はEGS4の結果から各々 $447\text{kW}/\text{cm}^3$ (63.2kW), $112\text{kW}/\text{cm}^3$ (63.3kW)である。

この結果から、厚さ0.5cmの銅板では約90%の電子線が発熱に変わるが、電子線のカスケードシャワーが発達していない領域を含む場合(例えば $3 < R < 6\text{mm}$)、評価を行う領域(半径)の設定により発熱密度は異なる値になることを表わしている。(評価半径を0mmとする極限では発熱密度は無限大に発散する。)

このため、ビーム形状を考慮した点 b (入射点)の座標を決定するサブルーティンPROFIL (PROFILE)を作成した。入射点の座標は、入射点を含むビーム軸に垂直な平面上の極座標($r\theta$ 座標)を用いて表す。尚、角度 θ の基準は任意とする。

表 2-5 に示したサブルーティン PROFIL では、下記の 4 種類のビーム形状を表わす入射点を発生させる。

- (1) ビーム半径が 0 である場合 (以下 Point Beam Spot と記す。)
- (2) 電流密度分布が半径 (r) に依存しない場合 (以下 Pencil Beam Spot と記す。)
- (3) 電流密度分布が半径 (r) に対する正規分布の場合 (以下 Gauss Beam Spot と記す。)
尚、ビーム半径を正規分布の標準偏差 (以下、 σ と記す) の 3 倍と仮定する。
- (4) 電流密度分布が上記 (2) (3) を合わせた場合 (以下 Pencil+Gauss Beam Spot と記す。) すなわち、ビーム半径を R_b とするとき、 $0 < r < R_{PG}$ が Pencil Beam Spot、 $R_{PG} < r < R_b$ が Gauss Beam Spot とする。

発生する入射点の $r\theta$ 座標は、von Neumann method[10] を用いて一様乱数から求める。von Neumann method は、任意の分布 $f(y)$ を持つ乱数を発生させる方法のうち、棄却法 (rejection method) と呼ばれる方法の一種類である。

乱数を発生する分布 $f(y)$ は $a < x < b$, $0 < y < 1$ の範囲で定義され、この区間外では $f(y) = 0$ で、また $f(y) < c$ であるとする。但し、 a, b 及び $c (> 0)$ は有限の大きさの定数である。棄却法による乱数発生アルゴリズムを図 2-1 に示す。2 個の独立な区間 $[0, 1]$ 上の一様乱数を線形変換し、図 2-2 に示すように矩形領域 ABCD の内部の 1 点に対応させ、斜線で表わした分布曲線 $f(y)$ の下方の領域内に落ちれば η_i を分布 $f(y)$ をもつ乱数として採用する。

入射点の $r\theta$ 座標を決定するためには、まず第一に上記に示した定数 a, b, c 及び分布 $f(y)$ を決定し、 r 座標を求める必要がある。上記 (1) から (4) までの分布を持つ入射点の r 座標は、下記に示した設定条件で求める。

(1) Point Beam Spot の場合

乱数に依存せず $r = 0$ とする。

(2) Pencil Beam Spot の場合

$$\begin{aligned}
a &= 0 \\
b &= R_b \\
c &= 2\pi R_b \\
f(y) &= 2\pi y
\end{aligned} \tag{2.2}$$

(3) Gauss Beam Spot の場合

$$\begin{aligned}
a &= 0 \\
b &= 3\sigma \\
c &= \sqrt{\frac{2\pi}{e}} \\
f(y) &= 3\sqrt{2\pi}y \exp\left(\frac{-9y^2}{2}\right)
\end{aligned} \tag{2.3}$$

(4) Pencil+Gauss Beam Spot の場合

$$\begin{aligned}
a &= 0 \\
b &= 3\sigma + R_{PG} \\
c &= \sqrt{2\pi} \left(k + \sqrt{k^2 + 1}\right) \exp\left(-\frac{(\sqrt{k^2 + 1} - k)^2}{2}\right) \\
f(y) &= \sqrt{2\pi}y(3 + 2k) \quad \text{for } 0 \leq y \leq \frac{2k}{3 + 2k} \\
&= \sqrt{2\pi}y(3 + 2k) \exp\left(-\frac{(2k - (3 + 2k)y)^2}{2}\right) \quad \text{for } \frac{2k}{3 + 2k} \leq y \leq 1
\end{aligned} \tag{2.4}$$

但し、 $k = R_{PG}/(2\sigma)$ である。

次に入射点の θ 座標を決定するために、下記に示した設定条件で r 座標と同様に求める。

(1) Point Beam Spot の場合

乱数に依存せず $\theta = 0$ とする。

(2) Pencil Beam Spot の場合

$\theta = 2\pi\eta_i$ として一様乱数とする。

(3) Gauss Beam Spot の場合

$\theta = 2\pi\eta_i$ として一様乱数とする。

(4) Pencil+Gauss Beam Spot の場合

$\theta = 2\pi\eta_i$ として一様乱数とする。

以上の設定条件から入射点での座標を求め、図2-3に示す。図2-3には半径2cm, Pencil Beam Spot の電子線が入射した場合、入射点での座標(X, Y)を表わしている。尚、入射電子数は3000個とした。この図から×印は一様に分布しているため、単位面積当たりの入射電子数は等しくなり、Pencil Beam Spot であることがわかる。

また、図2-4には半径10cm 電流20mA の電子線が入射したときの電流密度分布を示す。尚、入射電子数は10万個とした。この図は、Pencil Beam Spot, Gauss Beam Spot 及び $R_{PG} = 3\text{cm}$ の Pencil+Gauss Beam Spot を表わしている。計算により中心部分及び周辺部分での電流密度を求めると下記の通りになる。

$$\begin{aligned}
 (\text{電流密度}) &= 0.064 \text{ mA/cm}^2 \\
 & \quad (\text{Pencil Beam Spot の場合}) \\
 &= 0.064 \times 4.45 = 0.28 \text{ mA/cm}^2 \\
 & \quad (\text{Gauss Beam Spot, 中心部の場合}) \\
 &= 0.064 \times 0.0494 = 3.2 \times 10^{-3} \text{ mA/cm}^2 \\
 & \quad (\text{Gauss Beam Spot, 周辺部の場合}) \\
 &= 0.064 \times 2.67 = 0.17 \text{ mA/cm}^2 \\
 & \quad (\text{Pencil+Gauss Beam Spot, 中心部の場合}) \\
 &= 0.064 \times 0.0297 = 1.9 \times 10^{-3} \text{ mA/cm}^2 \\
 & \quad (\text{Pencil+Gauss Beam Spot, 周辺部の場合})
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

従って、この計算結果と図2-4を比較すると、ビーム形状に依存した電流密度分布が定量的に得られていることがわかり、入射点のr座標は正しく求められている。

ところで、出発点(点a)と入射点(点b)の関係はビームダンプの方式に依存するため、基本概念決定後改めて説明する。(第4.1.1項参照)

2.2.4 出発地点での領域番号の決定

前項で述べた通り、従来のEGS4における入射粒子は点aから出発し、点bに入射するように設定されている。このため、点aを含む円筒平板形状のある一つの領域から入射粒

子が出発するように、サブルーティン SHOWER 内の変数、すなわち、領域番号 (Region Number, IR) を決定する必要がある。尚、円筒平板形状は文献 [7] で定義されている平板数 52 円筒数 26 の形状である。(図 2-5 参照)

しかし、有限の径を持つ場合、異なった領域から粒子が出発する可能性があり、出発点に対応する領域番号を事象毎にサブルーティン SHOWER に引き渡さなければならない。表 2-6 に示したサブルーティン INIDRZ は出発点に対応した領域番号 IR の設定を行う。

表 2-6 に示したサブルーティン INIDRZ では、コモン文 /PLADTA/ 及び /CYLDTA/ で定義された平板や円筒の座標 ($PCOORD, CYRAD2$) を用いて、以下に示すアルゴリズムで領域番号 (IR) を決定する。尚、変数 $NPLAN, NCYLN$ は平板及び円筒の数とし、出発点の座標を以下 (X_s, Y_s, Z_s) とする。

- (1) 出発点の Z 座標から式 (2.6) を満たす整数 IDZ ($1, \dots, NPLAN - 1$) を見つける。

$$PCOORD(3, IDZ) \leq Z_s < PCOORD(3, IDZ + 1) \quad (2.6)$$

尚、 $Z_s < PCOORD(3, 1)$ の場合、 R 座標に無関係に領域番号を 1 とする。

- (2) 出発点の R 座標 $R_s^2 (= X_s^2 + Y_s^2)$ から式 (2.7) を満たす整数 IDR ($1, \dots, NCYLN$) を見つける。

$$CYRAD2(IDR - 1) < R_s^2 \leq CYRAD2(IDR) \quad (2.7)$$

但し、 $CYRAD2(0) = 0$ とする。

- (3) 式 (2.8) から領域番号 IR を求める。

$$IR = (IDZ - 1) \times NCYLN + IDR + 1 \quad (2.8)$$

2.2.5 散乱角 θ 方位角 ϕ 及び評価面の定義

ビームダンプなどの体系から発生する放射線の線量当量を測定し、EGS4 から得られた結果と比較する場合、体系外の任意の場所に設置した測定器から得られた値とその場所に

おける EGS4 で得られたデータとを比較する必要がある。このため、EGS4 から得られるデータは、任意の場所における値に変換が容易であるものにしなければならない。

一般に、体系中心(点C)を中心とした半径 R_{sp} の球面(以下、評価面と記す)を通過する粒子の座標とエネルギーから、距離 R_{sp} のエネルギー分布、線量当量を求め、変換を行う方法を用いる。

しかし、ビーム進行方向をZ軸と定義する円筒平板形状では新たに球面を追加し、評価面を通過する粒子の情報を得ることはできない。このため、円筒平板形状の計算体系から出た粒子、すなわち、追跡の終了した粒子の位置(点A)と進行方向から評価面での位置(点B)を解析的に求め、点Bでのエネルギーから線量当量を求める方法を採用した。(図2-6参照)

まず第一に、Z軸をビーム進行方向、原点を点Cとした $C-xyz$ 座標系において点Bの座標を求める。この $C-xyz$ 座標系において球座標($R\theta\phi$ 座標)を定義し、点Bの座標として用いる。以下、角度 θ を散乱角、角度 ϕ を方位角(azimuth angle)と記す。

次に点Bの座標(R_{sp}, θ, ϕ)を点Aより求める。図2-6に示した通り、体系を全て含むように半径 R_{sp} を設定する。次に円筒形の体系(oabc)上にある点Aの位置ベクトルを $\mathbf{a} = (x_a, y_a, z_a)$ 、点Aでの進行方向を表わす単位ベクトルを $\mathbf{d} = (u, v, w)$ 、点Cの位置ベクトルを $\mathbf{c} = (0, 0, z_c)$ とすると、角度 θ 及び ϕ は、

$$\cos \theta = \frac{z_a - z_c + tw}{|\mathbf{a} - \mathbf{c} + t\mathbf{d}|} \quad (2.9)$$

$$\cos \phi = \frac{x_a + tu}{\sqrt{(u^2 + v^2)t^2 + 2(ux_a + vy_a)t + x_a^2 + y_a^2}} \quad (2.10)$$

で求められる。但し、

$$t = -\mathbf{d} \cdot (\mathbf{a} - \mathbf{c}) + \sqrt{|\mathbf{d} \cdot (\mathbf{a} - \mathbf{c})|^2 + |\mathbf{d}|^2 (R_{sp}^2 - |\mathbf{a} - \mathbf{c}|^2)} \quad (2.11)$$

尚、式(2.9)及び式(2.10)において $t = 0$ とすると点Aの $\theta\phi$ 座標が求められる。

最後に点Bでのエネルギーは点Aのエネルギーと等しい、すなわち、輸送される途中でのエネルギー損失は無いと仮定する。

従って、この方法により評価面上のエネルギー分布は散乱角 θ と方位角 ϕ の関数として求められる。エネルギー分布の具体例は、第4.2.3項に表わす。尚、点C及び距離 R_{sp} の詳細な定義は基本設計報告書を参照のこと。

第3章

ビームダンプの基本概念

本章では、第2章で整備した計算コードEGS4を用いてビームダンプの基本概念について検討する。

3.1 ビームダンプの現状

加速器から得られた荷電粒子を吸収するビームダンプは、既存の加速器用として一般的に大量の水やコンクリートを用いている。この方法の特徴として、次のような点が挙げられる。

- (1) 冷却を兼ねるビーム吸収材に点状のビームを直接照射する。
- (2) 加速器からビームを取り出すビーム窓に金属を用いている。

すなわち、真空雰囲気である加速管よりビームを取り出し、大量の水やコンクリートなどのビーム吸収材に直接照射するためには、真空を隔てるビーム窓がなければならない。

例えば、米国スタンフォード線形加速器センター(SLAC)で実績のあるビームダンプは、ビーム半径0.1～0.3cm、ビームエネルギー11～25GeVの電子線を吸収するように設計されている[11]。吸収するビーム電力は2.2MWである。その構造は図3-1に示した通り、直径約150cm長さ約450cmのステンレス容器の中に前後二種類のビーム吸収材を用いている。長さ約380cm(10放射長)の前方部分は水で満たされ、中心軸の回りに秒速150cm程度で渦を巻くように流れている。次に後方部分は20放射長に相当する19層からなるクロム鋼、冷却水及び銅板で構成されている。このビームダンプに流れ込む冷却水量

は最大毎分2000ℓであるから冷却水の最大温度は40℃以下になる。ビーム窓は直径15cm厚さ0.127cmの高純度の銅を用いており、中心軸から30cm離れた場所に設置されている。ビーム窓でのエネルギー損失は、ビームエネルギー11GeVビーム電力2.2MWに対して0.325kWとなる。ビームダンプ付近でのビーム面積は約0.1cm²であるから入射電力密度は約2kW/cm²となる。(単純に計算すると入射電力密度は約3kW/cm²となるが、ビーム窓での横方向熱伝導を考慮することにより低減される。)以上、簡単にSLACで用いられているビームダンプについて説明を行ったが、このような大量の水を用いたビームダンプ(以下、SLAC方式という)をPNC加速器用ビームダンプとして採用した場合の問題点について次節で考察する。

3.2 SLAC方式の問題点

前節で説明したSLAC方式をPNC加速器用ビームダンプとして採用した場合の問題点について考察を行う。

まず第一に電子線によるエネルギー損失の相違が考えられる。すなわち、ビームエネルギーが10GeVと10MeVではエネルギー損失が全く異なることである。計算コードEGS4を用いて直径5mmの電子線が直径100cm厚さ4cmの水の中心に入射した時のエネルギー損失を計算した。電子線の入射電力を一定の値(100kW)に保ちながらエネルギーを変化させた時のエネルギー損失を計算し、結果を表3-1、図3-2及び図3-3に示した。第2.2.2項に示した計算機を用いた計算時間は、ビームエネルギーに依存するが、毎分約2500～6500事象である。尚、詳細な計算条件は表3-1に表わした通りであるが、ビーム形状及び入射電子数は、各々 Gauss Beam Spot, 1万個とし、乱数のシードを $IXX = 6866$, $JXX = 8315$ と設定した。

図3-2は電子線が入射してからの全エネルギー損失を表面からの距離Xの関数として表わしている。すなわち、ビームエネルギー100MeVの場合、表面から1cmまでに2kWのエネルギーが損失されることを表わしている。図より明らかにビームエネルギーが低いほど全エネルギーを損失する距離が小さくなっていることがわかる。これはビームエネルギーが低くなるほど水中での電子の飛程が短くなるためである。(EGS4の結果ではビームエネルギーが3.5MeVでは約2cm、10GeVでは約5mの飛程となる。)また、電子線は

水中を進行するごとに半径方向にもカスケードシャワーが拡大していくため半径方向の広がりも考慮に入れた評価を行う必要がある。この点を考慮して図3-2と同様な形状に電子線を入射させた時のエネルギー損失をエネルギー損失密度、すなわち、発熱密度に置き換えて評価した。表3-1及び図3-3はビーム軸を中心とした半径1mm 高さ2mmの円筒領域内における発熱密度の最大値をビームエネルギーの関数として表わしたものである。尚、半径を1mmに設定した理由は、ビーム半径より小さい領域では少なくともカスケードシャワーが発達していると考えられるからである。

この図よりビームエネルギーが低くなるほど最大発熱密度は大きくなり、10GeVと3.5MeVでは約1500倍の差が生じる。すなわち、PNC加速器用ビームダンプとしてSLAC方式を採用した場合、表面から高々10cm程度までに大部分のビーム電力が吸収され、最大約600kW/cm³の発熱が予想される。この発熱量はSLACビームダンプの約50(= 300/0.55*200kW/2.2MW)倍に相当し、冷却水による除熱はかなり困難になる。

第二点としてビーム窓の問題が生じる。すなわち、先に説明した水中の場合と同様にビームエネルギーが低いほどエネルギー損失が大きくなり、金属製ビーム窓のみで全ビーム電力が損失する可能性がある。この可能性を確認するために、計算コードEGS4を用いて直径5mmの電子線が直径100cm厚さ2cmの銅の中心に入射した時のエネルギー損失を計算した。電子線の入射電力を一定の値(100kW)に保ちながらエネルギーを変化させた時のエネルギー損失を計算し、結果を図3-4及び図3-5に示した。詳細な計算条件は水中の場合と同様である。図3-4は図3-2と同様に電子線が入射してからの全エネルギー損失を表面からの距離Xの関数で表わしている。図より明らかにビームエネルギーが低いほどエネルギー損失が大きくなる傾向が水中の場合より顕著になっている。(EGS4の結果ではビームエネルギーが3.5MeVでは約2mmで全ビーム電力の約90%が損失している。)また、図3-5は図3-3と同様にビーム軸を中心とした半径1mm高さ1mmの円筒領域内における発熱密度の最大値をビームエネルギーの関数として表わしたものである。この図から水中の場合と同様にビームエネルギーが低くなるほど最大発熱密度は大きくなり、しかも最大発熱密度は水中の場合より大きくなっている。すなわち、PNC加速器用ビームダンプのビーム窓として高純度の銅(厚さ0.2cm程度)を採用した場合、全ビーム電力の約40%がビーム窓で損失する。SLACでの損失割合は約0.02%であることと比較するとビー

ム窓での局所発熱が予想され、ビーム窓の破損などが考えられる。特に、PNC加速器では加速管までの距離が高々8m程度であるから、万一ビーム窓が破損し冷却水が漏れた場合でも加速器を保護する機構を考えるなければならない。

第三点として水素発生の問題がある。すなわち、 γ 線などの放射線を水に照射した場合、放射線により水分子が分解され水素が発生する。発生する水素量は $1.6\ell/(\text{MWsec})$ になると予想される。この予想値は水に対するG値、水中で100eVのエネルギー損失があるとき発生する水素の分子数を $G(\text{H}_2)=0.71[11]$ とし、水中で全エネルギーが損失すると仮定した場合である。このG値を用いてPNC加速器から発生する水素量を予想すると、毎秒0.33ℓの水素が発生する。この水素に対する対処方法としてSLACでは発生した水素を触媒器まで導き、再結合させ水に戻している。従って、SLAC方式をPNC加速器用ビームダンプとして採用した場合、ビーム吸収に伴い発生する水素の処理について解決しなければならない。

以上の問題点をまとめると、低エネルギー(10MeV)・大電力(200kW)の電子線を吸収するビームダンプとして水を用いたSLAC方式を採用した場合、表面から高々10cm程度までに大部分のビーム電力が吸収され、最大約 $600\text{kW}/\text{cm}^3$ の発熱が予想される。また、ビーム窓での局所発熱が予想され、ビーム窓の破損などが考えられる。このため万一ビーム窓が破損し冷却水が漏れた場合でも加速器を保護する機構を考えるなければならない。次にビーム吸収に伴い毎秒0.33ℓ発生する水素を安全に処理する方法について解決しなければならない。

3.3 PNC加速器用ビームダンプの基本概念

前節で考察した通り、低エネルギー・大電力電子線をSLAC方式で吸収するために解決しなければならない点として下記の三点がある。

- (1) 局所発熱の緩和
- (2) ビーム窓の破損
- (3) 冷却水から発生する水素処理

これらの問題を解決するために次のような方針を採用した。

- (1) ビームダンプに入射する電子線の単位時間、単位面積当たりの入射電力密度を空間的或は時間的に低減する。空間的に低減する方法として電子線を四重極電磁石などで拡大させ入射させる方法がある。また時間的に低減する方法として磁場により電子線を回転させる方法がある。今回の場合、比較的磁場の設計が容易である四重極電磁石による拡大方式を採用した。しかし、電子線を回転させる方法も大変重要であるため、PNC加速器を用いた実験結果から基礎データを収集する予定である。
- (2) ビーム窓を無くし、真空雰囲気である加速管とビームダンプを真空度の差により隔てる。(差動排気システムの採用) この方法により水平に電子線が入射するPNC加速器の場合、水などの液体はビーム吸収材として使用できない。尚、傾斜材料などを用いて耐熱性のある薄膜状のビーム窓を用いることも可能であるが、開発する時間などの制限より不採用とする。
- (3) ビーム吸収材の機能を分ける。すなわち、ビーム吸収材と冷却材を分けて使用する。特に電子線の進行方向に冷却材を設置しない。この方法によりビーム吸収材で γ 線が吸収され、冷却材中での水素発生が低減される。

以上の概念に基づくビームダンプの開発にあたり、スイス国立ポール・シェラー研究所(PSI)で陽子線用ビームダンプとして実績のある Ring & Disk 方式(以下、RD方式と記す)を参考とした。PSIのRD方式では、ビームエネルギー590MeV ビーム電力750kWの陽子線を中空状金属円板の内側に幅広く段階的に陽子線を吸収する。金属円板の周辺部は冷却水により冷却されている。円板の材質は無酸素銅であり、エネルギー590MeVの陽子線の飛程は約30cmである。また、円板に入射する陽子線のビーム直径はコリメーターにより制限され直径10cmである。従って空間的に入射電力密度を低減させ、かつ金属円板1枚当たりの発熱量を低減させる構造である。

また、金属円板は複数枚の組み合わせによりモジュールを構成し、ビームダンプ全体として4個のモジュールで構成されている。これらのモジュールは真空容器の中に入れられ、ビームダクトに接続している。尚、中性子の遮蔽及び機器の放射化を考慮してモジュールは長さ3m程度の鉄の支柱の下に設置されている。

PSIのビームダンプの概要を図3-6に表わす。図3-6(a)はビームダンプの概要をイラストで表わしている。図3-6(b)はビームダンプが設置されているビームラインを表わす。陽子線は左方より入射し、コリメーターなどを経てビームダンプに入射している。また、図の下に陽子線の電流などの実験データも表わしている。図3-6(c)及び図3-6(d)はモジュールI及びIIの前方からの様子を表わしている。図の茶色は銅の円板の内側を表わし、段々に内径が小さくなる様子がわかる。円板の前にある扇型の薄板は電流測定用の板である。最後に図3-6(e)はモジュールを支える支柱の上部を表わしている。冷却水配管や温度測定用熱電対の配線などがある。

このようなRD方式をPNC加速器用ビームダンプとして採用する最大の理由は、交換可能な複数枚の中空状金属円板を用いる点である。この金属円板に熱電対を多数設置することにより電子線の吸収過程に応じた発熱量を求めることができる。さらに、電子線による加熱・除熱サイクルが金属円板に与える影響も調べられる。これらの情報は、将来の消滅処理システムの設計に役立ち、SLAC方式ではあまり得ることのできない情報をRD方式により得ることができる。特にPNC加速器用ビームダンプの特徴として、PSIと異なり、ビームダンプと加速器との距離が約8m程度しか離れていないため電子線の周辺部分(ハロー部分)が直接入射する可能性もあり、電子線の状態に応じた詳しい熱特性を調べることが可能になる。

しかし、RD方式の短所として、四重極電磁石の故障などにより電子線が拡大されない場合局所発熱の可能性があり、金属円板の溶解など機器の安全性に問題が生じる。このため熱電対による温度測定や真空度の測定を常時行い、異常のある場合直ちに電子線を停止する必要がある。

以上、PNC加速器用ビームダンプの基本概念であるRD方式について示したが、表3-2にSLAC方式とRD方式の比較をまとめた。

第4章ではRD方式のビームダンプが大電力電子線を安全に吸収することを調べるため、中空状金属円板の基本構造を決定し、温度分布について検討する。第4章で示す温度分布はビームダンプの安全性を示す一つの結果であるが、さらに四重極電磁石による電子線拡大、差動排気システムの設計及び局所発熱の回避などの検討を行い、ビームダンプとして成立することを確かめる必要がある。これらは本報告書の範囲を越えるため基本設

計報告書に示す予定である。

第4章

ビームダンプの基本構造

本章ではRD方式のビームダンプの基本構造である中空状金属円板の温度分布について検討する。このために必要な計算コードEGS4を整備し、温度分布を求める。

4.1 計算コードEGS4の整備(2)

本節ではRD方式に対応させるため、第2.2節で整備した計算コードEGS4に電子線を拡大する機能を付け加える。

4.1.1 入射粒子の軌道決定

第2.2.3項においてビーム形状を考慮した粒子の入射点(点 b)を決定するサブルーティン PROFIL について述べたが、本項において四重極電磁石による電子線拡大を表わすように電子の出発点(点 a)及び入射方向を決める。これにより入射粒子の軌道は一意的に求めることができる。

表4-1に示したサブルーティン SETPOS (SET POSition) では下記に示す2種類の関係を考慮して入射粒子の軌道を求める。尚、以下の記述において点 a 、即ち四重極電磁石下流側での電子線の中心座標を点 (X_q, Y_q, Z_q) とし、点 b 、即ちターゲット表面での電子線の中心座標を点 (X_t, Y_t, Z_t) とする。また、各々の場所におけるビーム半径を R_q 及び R_t とする。

(a) 電子線の進行方向とZ軸との関係

電子線の進行方向を表す単位ベクトル e を (l, m, n) と表わすと、ベクトル e と文献[7]で定義された円筒平板形状の中心軸(Z軸)とのなす角を考慮して出発点の座標を決める。但し、ターゲットに入射するため $n \neq 0$ である。

今、ビーム半径 R 、単位ベクトル e で表される電子線を電子線の進行方向を基準とした直角座標系 $O - \xi\eta\zeta$ と円筒平板形状を定義した基準座標系 $O - xyz$ で記述することを考える。これらの座標系の関係は、剛体の回転などを記述するために用いられるオイラー角 (θ, ϕ, ψ) [12]により結び付けられる。一般にこの座標系を用いるとビーム半径 R の電子線は平面 $\zeta = 0$ の断面では半径 R の円を表すが、平面 $z = 0$ の断面では楕円を表す。この円と楕円の関係を求めることにより、単位ベクトル e とZ軸が平行でない場合の出発点が得られる。尚、本項において説明する座標系は、第2.2.5項及び図2-6で定義した座標系と全く異なる。

(a.1) $lm \neq 0$ の場合 $O - \xi\eta\zeta$ 座標系において点 $(R \cos \alpha, R \sin \alpha)$ を通り、 ζ 軸に平行な直線は、

$$\begin{aligned}\xi &= R \cos \alpha \\ \eta &= R \sin \alpha\end{aligned}\tag{4.1}$$

で表わされる。この直線と平面 $z = 0$ の交点の座標 (x, y) は、式(4.2)で与えられる。

$$\begin{aligned}R \cos \alpha &= x \cos \theta \cos \phi + y \cos \theta \sin \phi \\ R \sin \alpha &= -x \sin \phi + y \cos \phi\end{aligned}\tag{4.2}$$

但し、角度 ψ は角度 α の任意性があるため $\psi = 0$ とした。

これより式(4.3)が得られる。

$$\begin{aligned}x &= \frac{R}{\cos \theta} (\cos \alpha \cos \phi - \sin \alpha \cos \theta \sin \phi) \\ y &= \frac{R}{\cos \theta} (\cos \alpha \sin \phi + \sin \alpha \cos \theta \sin \phi)\end{aligned}\tag{4.3}$$

ここで、 $l = \sin \theta \cos \phi$, $m = \sin \theta \sin \phi$, $n = \cos \theta$ の関係を用いると、出発点の $O - xyz$ 座標系での座標 (x, y) は式(4.4)で求められる。

$$\begin{aligned} x &= \frac{R}{\sqrt{\ell^2 + m^2}} \left(\frac{\ell}{n} \cos \alpha - m \sin \alpha \right) \\ y &= \frac{R}{\sqrt{\ell^2 + m^2}} \left(\frac{m}{n} \cos \alpha + \ell \sin \alpha \right) \end{aligned} \quad (4.4)$$

この点は、 x 軸となす角の正弦が m/ℓ 、長軸の長さが R/n 、短軸の長さが R である楕円上の点を表わす。

(a.2) $\ell = 0 (m \neq 0)$ の場合 $\phi = \pi/2$ を式(4.2)に代入することにより、式(4.5)が得られる。

$$\begin{aligned} R \cos \alpha &= y \cos \theta \\ R \sin \alpha &= -x \end{aligned} \quad (4.5)$$

従って、出発点の $O - xyz$ 座標系での座標 (x, y) は式(4.6)で求められる。

$$\begin{aligned} x &= -R \sin \alpha \\ y &= \frac{R \cos \alpha}{n} \end{aligned} \quad (4.6)$$

(a.3) $m = 0 (\ell \neq 0)$ の場合 $\phi = 0$ を式(4.2)に代入することにより、式(4.7)が得られる。

$$\begin{aligned} R \cos \alpha &= x \cos \theta \\ R \sin \alpha &= y \end{aligned} \quad (4.7)$$

従って、出発点の $O - xyz$ 座標系での座標 (x, y) は式(4.8)で求められる。

$$\begin{aligned} x &= \frac{R \cos \alpha}{n} \\ y &= R \sin \alpha \end{aligned} \quad (4.8)$$

(a.4) $\ell = m = 0$ の場合 電子線の進行方向と Z 軸が平行であるので、出発点の $O - xy$ 座標系での座標 (x, y) は式(4.9)で求められる。

$$\begin{aligned} x &= R \cos \alpha \\ y &= R \sin \alpha \end{aligned} \quad (4.9)$$

(b) ビーム半径 R_q, R_t の関係

第 (a) 項で求めた出発点の座標、すなわち、式(4.4), (4.6), (4.8) 及び(4.9) はビーム進行方向の関数以外にビーム半径 R の関数と考えることもできる。このため R の値を変えることにより任意の場所における座標を表すことも可能である。従ってビーム半径 R_q と R_t の関係から任意の場所でのビーム半径 R を求めることができれば電子の軌道は一意的に求められる。ところで、座標 z におけるビーム半径 R_z は、四重極電磁石に入射する電子線のエミッタンスなどや四重極電磁石の磁場特性により大きく変化する。これらの影響を考慮して入射粒子の軌道を決定するためには電子軌道解析コード PARMELA 等のプログラムが必要になる。しかし、簡単のためにビーム半径 R_z は輸送距離に比例して変化すると仮定する。式(4.10) にビーム半径 R_z と輸送距離の関係を表す。(図 4-1 参照)

$$R_z = \frac{Z - Z_q}{Z_t - Z_q} (R_t - R_q) + R_q \quad (4.10)$$

但し、Point Beam Spot の場合は $R = 0$ とする。

ここで、座標 z における電子の位置として、電子線の中心軸からの相対位置 $(\delta X, \delta Y)$ を用いて表すことにすると、この相対位置は区間 $[0, 1]$ の実数 ϵ とビーム半径 R_z の積 ϵR_z を式(4.4), (4.6), (4.8) 及び(4.9) の R に代入して得られる座標 (x, y) に等しくなる。

この相対位置を用いて座標 Z における電子の位置は式(4.11) で求められる。

$$\begin{aligned} X_z &= \frac{Z - Z_q}{Z_t - Z_q} (X_t - X_q) + X_q + \delta X \\ Y_z &= \frac{Z - Z_q}{Z_t - Z_q} (Y_t - Y_q) + Y_q + \delta Y \end{aligned} \quad (4.11)$$

ところで、式(4.10) の仮定の妥当性については、比較的運動エネルギーの高い領域(数 MeV 程度) では相互作用によるビーム半径方向の広がりが無視出来ること、電子線を収束でなく拡大していること、及び計算コード EGS4 では 1 事象当たり 1 個の入射電子しか取り扱うことができないなどの理由により妥当であると考えられる。

以上の設定条件から電子線の出発点での座標を求め、図 4-2 に示す。図 4-2 は半径 2cm Pencil Beam Spot の電子ビームが入射した時、種々の方向余弦に対する電子線の出発点での座標 (X, Y) を表わしている。尚、入射電子数は 3000 個とした。この図から \times 印は一樣に楕円上に分布していることがわかる。また、同様に Gauss Beam Spot の場合を図 4-3 に示す。

4.1.2 ビーム径及び入射角度による発熱量の変化

第 2.2.3 項及び第 4.1.1 項で説明したように、計算コード EGS4 の整備においてビーム形状を考慮した出発点及び入射方向を決めるサブルーティンを作成した。作成したプログラムの正当性を調べるため、半径 4.8cm 厚さ 0.5cm の銅板の中心にビームエネルギー 3.5MeV ビーム電流 20mA (70kW) の Pencil Beam Spot の電子線を入射させて考察した。尚、入射電子数は 2 万個とする。

電子線の直径を 12mm, 40mm 及び 60mm と変化させた時、銅板中心部分 (半径 $0 < R < 6\text{mm}$, 長さ $0 < Z < 5\text{mm}$) での発熱密度を計算し、表 4-2 に示す。また、電子線により銅板内で発生する発熱量を EGS4 から求め、電子線の半径内の銅板で一様にこの熱量が発熱したと仮定した場合の発熱密度を表 4-2 の予想値として示す。尚、発熱量として EGS4 の結果を用いた理由は、銅板を通過する粒子や銅板表面で散乱する粒子があるため、正確な発熱量を解析的に求められないからである。

この結果、EGS4 で計算された発熱密度と予想値は 6% 程度の精度で一致し、発熱密度はビーム径の二乗に反比例している。

次に電子線の入射角度を 0 度, 45 度及び 66 度と変化させた時、銅板中心部分 (半径 $0 < R < 6\text{mm}$, 長さ $0 < Z < 5\text{mm}$) での発熱密度を計算し、表 4-3 に示す。尚、電子線の直径を 40mm とする。

また、電子線の直径を変化させた場合と同様に、銅板内で発生する発熱量を EGS4 から求め表 4-3 に示す。電子線が入射する銅板面は式 (4.4) に示した通り楕円で表わせるから、この楕円内で一様に発熱すると仮定した場合の発熱密度を表 4-3 の予想値として示す。

この結果、EGS4 で計算された発熱密度と予想値は 5% 程度の精度で一致し、発熱密度は入射角度に依存して変化している。また、銅板表面で散乱する電子線の割合が入射角度と共に大きくなるため、発熱密度は単純に入射面積に反比例せず、発熱量に依存して変化している。

以上の考察により、サブルーティン SETPOS 及び PROFIL の正当性は示された。

4.2 ターゲットの形状

本節において、電子線を吸収するターゲットの形状について検討し、温度分布からビームダンプとして成立する可能性を探る。

4.2.1 基本構造

(a) 電子線拡大条件

加速管7本によって加速された電子線は表4-4に示す条件でビームダンプに入射する。この電子線を四重極電磁石により拡大し、入射電流(電力)密度を低減させる。ターゲット入射時の入射電力密度は、文献[11]と同程度の値(2～3kW/cm²)とする。この値からターゲット上でのビーム半径 R_{el} は式(4.12)で与えられる。

$$\begin{aligned} R_{el} &= \sqrt{\frac{4.45 \times 200}{(2 \sim 3)\pi}} \\ &= 9.7 \sim 12\text{cm} \end{aligned} \quad (4.12)$$

但し、4.45倍は Pencil Beam Spot と Gauss Beam Spot における中心部分の電流密度比を表わす。(第 2.2.3 項参照)

また、四重極電磁石からターゲットまでの輸送距離は、ビームダンプを設置する領域の4分の1程度、2mとする。すなわち、ビームダンプを設置するビーム軸方向の距離は約8mであり、そのうちメンテナンス用に約2m 差動排気システム設置用に約2m ビームダンプ設置用に約2mを必要とするためである。

従って、拡大条件として電磁石からターゲットまで2m輸送される間に電子線を直径20cmに拡大するように設定する。

(b) 中空状金属円板の基本構造

RD方式の長所である中空状金属円板の材質として、熱伝導率の良い銅(無酸素銅)を選択する。無酸素銅は加速管の材料として用いられ、精密加工やロー付けなどの技術が確立しているためビーム吸収材として適当である。また、銅の光核反応におけるエネルギー閾値が最も低い反応は $^{65}\text{Cu}(\gamma, n)^{64}\text{Cu}$ であり、その閾値は9.9MeVであるため中性子の発生は無視できる。

次に円板の大きさとして、ビーム軸が床面から高さ120cmの位置にあること及び製作やメンテナンス時の取り扱いを考慮して最大外径を40cmに設定する。また、円板で発生する二次電子線などが他の円板を加熱させることを防ぐため、図3-4の結果から厚さを2cm以上に設定する。これは、エネルギー10MeVの電子線が厚さ約2cmで90%程度吸収されるためである。しかし、冷却水経路をロー付けで製作する関係上5cm程度とする。

さらに中空状金属円板の内径を決定するためにALGORと呼ばれる有限要素法の計算コード[13]を用いていくつかの形状における温度分布を求めた。尚、無酸素銅の物性値として、密度 8940kg/m^3 、比熱 $385\text{J}/(\text{kgK})$ 、熱伝導率 $386\text{W}/(\text{mK})$ を用いた[14]。図4-4は計算コードALGORを用いて計算された定常状態での温度分布を示す。図4-4(a)は温度分布を計算するとき用いた格子(メッシュ)を表わしている。図は円板(半径20cm厚さ5cm)の断面を表わしており、基本的なメッシュの大きさは $5\text{mm}\times 5\text{mm}$ である。このメッシュにより円板の断面は、 R 方向に40分割、 Z 方向に10分割される。内部発熱を表わす領域は、一つの辺が赤色で示した1個のメッシュ(領域a)とする。また、冷却水に熱を伝達することを表わす境界は図中の青色の線で表わされ、断面の大きさを $2\text{cm}\times 2.5\text{cm}$ 、初期温度を 35°C 、及び熱伝達係数を $5800\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ と設定する。尚、ここで示した内部発熱領域及び熱伝達係数などは単に形状の違いにおける温度の相違を確かめるために設定したものであり、物理的に可能である任意の領域及び数値を選定することもできる。

図4-4(b)は領域aに内部発熱として10kWの熱源を設定した時の温度分布を表わす。尚、計算コードALGORでは内部発熱として単位体積当たりの発熱量(発熱密度)を用いるため、計算では $25.5\text{kW}/\text{cm}^3$ を代入した。図に示された温度分布から最高温度は 1280°C 、最低温度は 48.0°C となる。この温度上昇は銅の融点(1083°C)を越えるため物理的には無意味である。このため許容される最大温度上昇を決定する必要がある、次項で考察する。

図4-4で用いた方法により外径を固定し内径を変化させた中空状金属円板の温度分布を求め、図4-5に示す。内部発熱領域は図中断面図の左上の領域aとし、発熱密度は図中に示した値とする。円板の温度は 390°C を最高温度として色分けされているが、図4-5(i)における最高温度は図4-4(b)に示した 1280°C である。

図4-5に示した温度分布より各円板の最高温度及び最低温度を内径の関数として図4-6に示す。図4-6は内径の基準として冷却水経路の内側の半径($R_{in} = 15.5\text{cm}$)を1として表

わしている。図より同一の熱源(10kW)を中空状金属円板で除熱した場合、内径が冷却水経路に近いほど最高温度は低くなるが、最低温度は変化しないことがわかる。このため冷却水経路と内径を近づけるように構造を決定した方が最高温度を抑える点では有利である。従って、内径に対する最高温度の変化が一定な範囲を選び、内径は約0.3以上の範囲と設定する。

しかし、冷却水経路と内部発熱領域との距離は銅内部で γ 線を吸収する必要があるため、ある程度の長さが必要になる。エネルギー10MeVの γ 線に対する銅の質量減衰係数は $0.03\text{cm}^2/\text{g}$ であるから、長さ3.7～8.4cmで強度は $1/e \sim 1/10$ になる。すなわち、冷却水経路と内部発熱領域との距離を5cm程度にすると γ 線強度は4分の1程度に減衰する。

従って、中空状金属円板の基本構造として

- (1) 熱伝導率の良い無酸素銅を用いる。
- (2) ビーム軸の高さから最大外径を40cm程度とする。
- (3) 内径は冷却水経路に近づくように設定し、約0.3以上の範囲とする。但し、 γ 線を吸収するため少なくとも5cm程度は保つ。

(c) 最高温度上昇の設定

金属円板の中心部で内部発熱により温度が上昇し、周辺部で冷却水により冷やされている形状では、中心部が熱膨張を起こし周方向に熱応力が発生する。この熱応力が弾性変形の領域で変化する場合は、熱歪みによる破断は無視できる。しかし降伏応力を越えた場合、塑性歪みが蓄積され破断に至る可能性がある。従って、降伏応力を与える温度上昇が最高温度上昇として考えられる。

金属円板で発生する周方向の熱応力 σ_t は、式(4.13)で与えられる。

$$\sigma_t = E\alpha \delta T \quad (4.13)$$

ここで、 E は縦弾性係数($5100\text{kgf}/\text{mm}^2$)、 α は線膨張率($1.8 \times 10^{-5}/\text{K}$)、 δT は中心部における温度上昇を表わす。尚、括弧内の数値は無酸素銅に対する物性値[14]を表わす。

この式に熱応力として降伏応力 $2.6\text{kgf}/\text{mm}^2$ [14]を代入すると、温度上昇は 28°C となる。この温度上昇 28°C は、図4-6に示された最高温度から類推すると内部発熱1kW程度に相

当する。このことはビーム電力200kWを吸収するために約200枚の金属円板を必要とすることを表わしている。しかし、ビームダンプを設置する場所の制限から困難であり、最高温度上昇として降伏応力から得られる温度上昇を用いることはできない。

従って、ビームダンプの設置場所の関係から降伏応力を越える温度上昇は許容せざるを得ないが、極力温度上昇を抑えるように構造を検討する必要がある。電子線の加熱・除熱サイクルの繰り返しによる温度差により、塑性変形の歪みが蓄積され、破断に至る可能性がある。塑性歪みによる破断の可能性については個々の形状について有限寿命評価を行う必要があるが簡単に試算する。

図4-5で考察した体系のうち、内径を0.3と設定した場合を考える。発熱を18kWとすると図4-6から最高温度上昇は約360(= $200 \times 18/10$)°Cとなる。この約360°Cの最大温度上昇による許容繰り返し数は 10^4 回程度である。(詳細な解説は本報告書の範囲を越えるため基本設計報告書を参照のこと。)電子線による加熱・除熱サイクルを600回程度と仮定すると安全率は15程度となる。このような破断の可能性があるため容易に金属円板を交換出来る構造にする必要がある。従って、最高温度上昇として降伏応力を越える温度上昇はある程度許容せざるを得ないが、極力温度上昇を抑えるように構造を検討する必要がある。この塑性変形による加熱・除熱サイクルの許容繰り返し数は、個々の形状について評価しなければならないが、金属円板の内部発熱を20kW程度、最高温度上昇を360°C程度に設定した場合、 10^4 回程度のサイクルを許容できる。

(d) ターゲットの基本構造

第(b)項及び第(c)項で設定した中空状金属円板を複数組み合わせることで電力200kW電子線を吸収するターゲットの形状を決定する。

まず第一にターゲットの長さとして、真空容器及び遮蔽体の大きさを考え1m程度とする。金属円板の厚さは5cm程度であるからターゲットを構成する円板は20枚前後になる。これらの円板の外径を全て同一の値に設定するよりも、冷却効率を考え異なる値に設定する。すなわち、冷却水経路に対する内径の割合を一定に保ちながら、冷却水経路と内部発熱領域との距離を5cm程度に保つためである。そこで第3.3節で説明した通り、円板の外径を同一とする中空状金属円板の組み合わせ(モジュール)を3個製作する。また発

生じた γ 線を吸収するモジュールを1個製作する。モジュールの番号はビーム上流側から $No.1, \dots, No.4$ とし、外径は $No.1$ モジュールが最も大きく、 $No.3$ モジュールが最も小さい。但し、 $No.4$ モジュールの外径は $No.3$ と同様とする。これは、 $No.4$ モジュールの働きが他と異なるからである。

次に、各モジュールで除熱するビーム電力からターゲットの形状を決定する。各モジュールに入射するビーム電力は入射する電流に比例すると考えられる。電子線の半径を1としたとき、半径 y_a と y_b の領域の電流は式(4.14)で定義される関数 $I(y_a, y_b)$ に比例する。尚、この式は第2.2.3項で定義された関数 $f(y)$ を積分することにより求められる。

$$I(y_a, y_b) = \exp\left(-\frac{9y_a^2}{2}\right) - \exp\left(-\frac{9y_b^2}{2}\right) \quad (4.14)$$

従って、各モジュール(i)に入射する電流の割合(I_i)は、式(4.14)を用いて式(4.15)で表わされる。

$$I_1 : I_2 : I_3 = I(a, 1) : I(b, a) : I(0, b) \quad (4.15)$$

但し、 a, b は電子線の半径を1とした時の半径を表わし、 $No.1$ モジュールでは区間 $[a, 1]$ 、 $No.2$ モジュールでは区間 $[b, a]$ 、 $No.3$ モジュールでは区間 $[0, b]$ の範囲の電流が照射すると仮定する。

ここで各モジュールの電流比を2:9:9程度に設定する。これはビーム形状が Gauss Beam Spot と異なり Pencil Beam Spot に近い形状の場合、電子線の入射軸がターゲットの中心軸に一致せず、不均一に入射する場合、及びハロービームなど予期しない電子線が入射する場合にも対応できるように、 $No.1$ モジュールのビーム電力を全体の10%と低く設定した。これより $a = 0.70$, $b = 0.36$ が得られる。拡大された電子線の直径が20cmであるから、各モジュールの最初の内径は各々20cm, 14cm, 7cmとなる。

この内径より γ 線の遮蔽距離を5cm程度に保ちながら、冷却水経路に対する内径の割合を一定にするため、各モジュールの外径は各々40cm, 32cm, 26cmと設定した。この設定により冷却水経路に対する内径の割合は0.4~0.6程度になる。

第三点としてモジュールごとの中空状金属円板の枚数と形状について設定する。上記で設定した内径より各モジュールにおける最初と最後の内径差は、各々3cm($No.1$), 3.5cm

(No.2), 3.5cm (No.3) となる。各金属円板の内径差は内部発熱を低減させるため極力小さい値に設定する。図4-5の結果を踏まえ、内径差を5～7mmに設定する。内部発熱の関係上2mm程度にも設定可能であるが、ビーム軸に対する据付精度やターゲットの長さの制限から5～7mmとした。これより各モジュール内の枚数は5枚になるが、No.3モジュールのみ安全側に考えて7枚とした。すなわち、ビーム形状が Gauss Beam Spot より鋭いピークを持った場合にも対応するためである。No.4モジュールの長さは、第3.1節のSLACの場合と同様に15放射長(21.6cm)程度の長さに設定する。

中空状金属円板の内径側の形状は、実験データを解析することを考慮し、単純な形状2種類を選定する。すなわち、内径側の厚さが外径と同じエッジ型と外径より薄いくさび型である。詳細な形状は第4.2.2項に示す。以上の考察から得られたターゲットの基本構造を図4-7に示す。

4.2.2 温度分布

前項で設定されたターゲットの基本構造(図4-7)からターゲットの温度分布について本項で検討する。

温度分布を求めるためには計算コードEGS4により発熱密度を計算し、内部発熱源として計算コードALGORに代入する。このため中空状金属円板における内部発熱領域を図4-8のように定義する。図4-7では金属円板の断面を表わし、電子線は上方から下方に入射している。灰色の領域A,B,Cは代表的な発熱領域を表わし、領域A,Bは電子線により直接照射される領域であり、領域Cは前に設置された金属円板の影になる部分である。図に示した(a)の形状はエッジ型、(b)はくさび型を表わしている。

電子線が直接照射する部分の厚さは、図3-4の結果から5cm(エッジ型)及び2cm(くさび型)とした。これは第4.2.1項で示した通りエネルギー10MeVの電子線は厚さ約2cmで90%程度吸収されるためである。また、内部発熱領域の厚さ T は発熱密度が一定な領域として図3-4より5mm(領域A,C)と設定した。ここで設定した内部発熱領域の詳細形状(図4-7の R_A, R_B, T)を表4-5に示す。前項で設定された基本形状と表4-5に示された形状は多少寸法が異なるが、これは実験データの解析を考慮して設定したためである。尚、内部発熱領域の形状の妥当性は基本設計報告書に示す予定である。

また、冷却水経路は外径より2cm内側に2cm×2cmの形状で設置する。これは、内径側の形状と同様に単純な形状としたためである。尚、熱解析条件は図4-4と同様に初期温度が35℃、及び熱伝達係数が5800W/(m²K)である。この内部発熱領域の発熱密度を計算コードEGS4で求めた。EGS4で発熱密度を計算するときに定義したパラメーターなどの値をデータファイルとして表4-6及び表4-7に示す。表4-6は電子線の形状及びターゲットの大きさを表わし、表4-7はターゲットの形状(図4-7)を表わしている。データファイルの詳細は基本設計報告書に詳しく示す予定である。

EGS4に入射電子数を700万個、四重極電磁石からターゲットまでの輸送距離を192cmとして計算を行った場合の発熱密度を表4-5に示す。表4-5は電子線が直接入射するNo.1からNo.18までの金属円板の発熱密度を表わしている。表より金属円板の最高発熱量は18kW、各モジュールの発熱量の比は2:8.5:10となる。尚、各モジュールに入射する電流比はEGS4の結果から2:7.7:9.3になる。

次に表4-5に示された発熱密度を用いて計算コードALGORにより温度分布を求め、表4-8に示す。表に発熱量が10kW以上、又は内径の割合が0.3以下金属円板の温度を示す。また、エッジ型で最高温度が最も高いNo.10の温度分布を図4-9に示す。同様にくさび型で温度の高いNo.13を図4-10に示す。表4-8から最高温度上昇は345(=380-35)℃となる。従って、前項で述べたようにこの温度上昇による加熱・除熱サイクルの許容繰返し数は10⁴回程度である。

尚、今回の計算により得られた温度分布は、金属円板間を断熱として考えている。このため熱的な接触がある場合にはこの温度分布と異なると予想される。詳細は基本設計報告書に示す。

4.2.3 γ 線の分布

前項で用いた計算コードEGS4からターゲットから発生する γ 線の角度分布及びエネルギー分布を求めた。図4-11及び図4-12は第2.2.5項で定義された散乱角 θ 及び方位角 ϕ に対するエネルギーの関係を表わした図である。図は $R_{sp} = 3\text{m}$ の評価面を通過する γ 線5000個を表わしたものである。入射電子に対する γ 線の発生効率は4.1%である。また、図4-13は γ 線のエネルギー分布を表わしている。図の縦軸は単位エネルギー、単位立体角、入射

電子1個当たりの光子数を表わしている。図中に統計精度 $\pm 1\sigma$ を表わす統計棒を各ビンの中央に示す。

これらの図に関する評価は基本設計報告書に示す。

第5章

まとめ

現在先進技術開発室では、消滅処理等に適用することが可能な大電力の電子線形加速器の開発を目的として、要素技術開発用の大電力CW電子線形加速器の研究・開発を行っている。PNC加速器は、既存の加速器よりも平均電流で2桁程度高い電子線を加速するため、加速器システムを構成する全ての要素に対して既存の加速器にはない大電流化技術を開発する必要がある。PNC加速器から得られる電子線を吸収するビームダンプに関しても、他の加速器要素と同様に大電流化に対応できる技術を確立する必要がある。すなわち、低エネルギー・大電力電子線の吸収に伴う発熱を効率良くしかも安全に除去し、発生する大量の放射線を遮蔽するビームダンプの開発が急務となる。

しかし、ビームエネルギー10MeV・ビーム電力200kWの電子線を吸収するビームダンプとして大量の水などを用いる従来の方式では、

- (1) 局所発熱の可能性(最大発熱密度600kW/cm³)
- (2) ビーム窓の破損
- (3) 冷却水から発生する水素処理

などの問題が生じる。

これらの問題を解決するために、スイス国立ポール・シェラー研究所(PSI)で実績のあるRing & Disk方式(RD方式)を採用した。RD方式では、拡大した電子線を複数枚の中空状金属円板の内側に幅広く段階的に吸収させ、金属円板1枚当たりの発熱量を低減させる構造である。この方式を採用することにより、ビーム窓を用いず電子線を輸送すること

が可能になり、入射電子線が直接冷却水に照射しないようにすることができる。また、発生した γ 線を金属円板で吸収させ、冷却水から発生する水素量を低減させることができる。

このようなRD方式をPNC加速器用ビームダンプとして採用する最大の理由は、交換可能な複数枚の中空状金属円板を用いる点である。この金属円板に熱電対を多数設置することにより電子線の吸収過程に応じた発熱量を求められる。さらに、電子線による加熱・除熱サイクルが金属円板に与える影響も調べられる。これらの情報は、将来の消滅処理システムの設計に有効である。特に、PNC加速器用ビームダンプの場合、PSIと異なり、ビームダンプと加速器との距離が約8m程度しか離れていないため電子線の周辺部分(ハロー部分)が直接入射する可能性もあり、電子線の状態に応じた詳しい熱特性を調べることが可能になる。

電子・光子輸送コードEGS4及び有限要素計算コードALGORを用いて中空状金属円板の形状を最適化したところ、金属円板の1枚当たりの最大内部発熱は18kW(最大発熱密度 $2.2\text{kW}/\text{cm}^3$)、最高温度上昇は 345°C となった。すなわち、発熱密度を約270分の1に抑え、ビームダンプとして成立することがわかった。

しかし、この最高温度上昇は降伏応力の範囲を越え、ある程度の塑性変形があることを意味している。塑性歪みによる破断に至るまでの許容繰返し数は 10^4 回程度と予想され、電子線による加熱・除熱サイクルを600回程度と仮定すると安全率は15程度となる。このような破断の可能性があるため容易に金属円板を交換出来る構造にする必要がある。

本報告書で得られた結果をもとに、四重極電磁石による電子線拡大、差動排気システムの設計及び局所発熱の回避などの検討を行い、ビームダンプの基本設計を行う予定である。

第6章

謝辞

本研究を行うにあたり計算コードEGS4について有益な助言・議論をして下さった文部省高エネルギー物理学研究所 平山 英夫 教授及び動力炉・核燃料開発事業団 鳥居 建男 課長代理に感謝致します。

参考文献

- [1] 原子力委員会 放射性廃棄物対策専門部会、群分離・消滅処理技術研究開発長期計画、昭和63年10月11日
- [2] 若林、山岡他、高速炉および加速器による核変換研究の現状、動燃技報 82 (1992) 96.
- [3] 動力炉・核燃料開発事業団、高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書—平成3年度—、PNC TN1420 92-081、1992年9月
- [4] 小無 健司 他、「核変換研究会」報告書、PNC TN8100 92-011、1992年5月
- [5] 遠山 伸一、谷 賢、大電流電子線形加速器の開発、動燃技報 88 (1993) 19.
- [6] W. R. Nelson, H. Hirayama and D. W. Rogers, THE EGS4 CODE SYSTEM, SLAC-Report-265, December 1985.
- [7] 平山 英夫、EGS4 システムの概要 (第4回 EGS4 研究会)、高エネルギー物理学研究所、1994年7月
- [8] G. M. Arif, A. Zaman and W. W. Tsang, Toward A Universal Random Number Generator, FSU-SCRI-87-50, 1987.
- [9] International Commission on Radiation Units and measurements, Stopping Powers for Electrons and Positrons, ICRU Report 37, 1984.
- [10] 津田 孝夫、モンテカルロ法とシミュレーション(改訂版)、培風館、1977年

- [11] D. R. Walz *et al.*, Water cooled beam dumps and collimators for the Stanford Linear Accelerator, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-12, No.3 (1965) 867 ;
D. R. Walz *et al.*, Beam dumps, energy slits and collimators at SLAC, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-14, No.3 (1967) 923.
- [12] ランダウ・リフシッツ理論物理学教程、力学、東京図書、1977年
- [13] ALGOR, Steady-State Heat Transfer Analysis, Algor, Inc. 150 Beta Drive, Pittsburgh, Pennsylvania 15238-2932.
- [14] 日本機械学会、伝熱ハンドブック、丸善、1993年 ;
飯田 修一 他 編集、新版 物理定数表、朝倉書店、1992年

表 1-1PNC 加速器の基本パラメータ

加速周波数	1249.135 MHz
高周波波長	24.0 cm
加速モード	$2\pi/3$ モード
加速管構造	進行波還流型
クライストロン数	2本
高周波出力	最大1.2 MW (CW)
ビームエネルギー	10 MeV*
最大ビーム電流	100 mA
平均ビーム電流	20 mA
パルス幅	0.1 ~ 4 msec
繰返し	0 ~ 50 Hz
Duty Factor	0 ~ 20 %
平均ビーム出力	200 kW
全長	約20 m

* 入射部及び第一加速管のみの場合は3.5MeVである。

表2-1ファイル ranmar.README の内容

RANMAR is a "Lagged-Fibonacci Method" pseudo random number generator devised by George Marsaglia and Arif Zaman.

This is the Mortran3 distribution intended for the EGS4 code:

- ranmar.init --- initialization routine, call once before selecting a random number, you can set your own values for initialization and ranmar.init traps for illegal values setting defaults if necessary.
- ranmar.minimal - minimum macro set needed to get going. Note that the state of the random number is defined by ALL the variables.
If you want to reset, you have to reset ALL the variables in the common block.
- ranmar.README -- this file created 90/06/14 in Ottawa, Canada by Alex Bielajew
 - tel: (613)993-2197
 - fax: (613)952-9865
 - e-mail (my preference) BLIF at NRCVM01.BITNET

表2-2ファイル ranmar.init の内容

```

;
SUBROUTINE RMARIN;
;
COMIN/RANDOM/;
;
" Check Routine is added on 22-Aug-1994 by H. Takei          "

IF((IXX.LE.0).OR.(IXX.GT.31328)) IXX=1802; "SETS MARSAGLIA DEFAULT"
" BUG. In the following line the assignment previous to 90/09/18  "
" was to IXX. This DID NOT upset the randomness of the sequence,  "
" just the initial starting point. BLIF 90/09/18.                "

IF((JXX.LE.0).OR.(JXX.GT.30081)) JXX=9373; "SETS MARSAGLIA DEFAULT"

I = MOD(IXX/177,177) + 2;
J = MOD(IXX, 177) + 2;
K = MOD(JXX/169,178) + 1;
L = MOD(JXX, 169) ;

IF(I.lt.1.or.I.gt.178) GOTO :INPUT_ERROR;; "Check Routine is Added"
IF(J.lt.1.or.J.gt.178) GOTO :INPUT_ERROR;; "Check Routine is Added"
IF(K.lt.1.or.K.gt.178) GOTO :INPUT_ERROR;; "Check Routine is Added"
IF(I*J*K.eq.1) GOTO :INPUT_ERROR;; "Check Routine is Added"
IF(L.lt.0.or.L.gt.168) GOTO :INPUT_ERROR;; "Check Routine is Added"

DO II=1,97[
  S=0.0;T=0.5;
  DO JJ=1,24[
    M=MOD(MOD(I*J,179)*K,179);
    I=J;J=K;K=M;L=MOD(53*L+1,169);
    IF(MOD(L*M,64).GE.32) S=S+T;
    T=0.5*T;
  ]
  URNDM(II)=S;
]

CRNDM = 362436./16777216.;
CDRNDM = 7654321./16777216.;

```

CMRNDM = 16777213./16777216.;

IXX = 97;

JXX = 33;

RETURN;"END;"

"Check Routine"

"Check Routine is Added"

:INPUT_ERROR:

OUTPUT;('**** Seed Values Error (RMARIN) ****');

OUTPUT IXX,JXX,I,J,K,L;

(' IXX=',I5,' JXX=',I5,/,', I,J,K=',3I5);

RETURN;

END;

;

表2-3ファイル ranmar.minimal の内容

```

;
"*****"
"
"          RANMAR.MACROS          "
"          *****              "
"
" THIS MACRO SET IS DESIGNED TO BE USED WITH THE EGS4 CODE SYSTEM."
" RANMAR IS A LONG SEQUENCE RNG INVENTED BY MARSAGLIA AND ZAMAN.  "
" IT IS A PSEUDO RANDOM NUMBER GENERATOR RETURNING A SINGLE      "
" PRECISION                                                         "
" REAL NUMBER BETWEEN 0 (INCLUSIVE) AND 1 (EXCLUSIVE).           "
" THE CYCLE LENGTH OF THIS GENERATOR IS 2**144                    "
"
" INITIALIZATION SUBROUTINE RMARIN IS REQUIRED (STORED IN "
" RANMAR.INIT)                                                    "
"
" THIS RNG IS DESCRIBED IN                                         "
" A REVIEW OF PSEUDORANDOM NUMBER GENERATORS BY F JAMES          "
" IN PUBLICATION DD/88/22 FROM THE CERN DATA HANDLING DIVISION  "
"
" CODING FOR THE EGS4 SYSTEM BY:                                    "
"
" ALEX F. BIELAJEW  89/12/21  VERSION 1.0                          "
" DIV. OF PHYSICS                                                "
" NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA                             "
" OTTAWA, CANADA                                                 "
" KIA OR6                                                         "
"
" Modified By H. Takei on 17-Aug-1994                              "
"   [ Adding Output Routine ]                                     "
"
"*****"
;
"RANDOM VARIABLE COMMON"
REPLACE {;COMIN/RANDOM/;} WITH {;
COMMON/RANDOM/URNDRM(97) ,CRNDM ,CDRNDM ,CMRNDM ,IXX ,JXX;
}

```

```

;
"This should be called somewhere near the beginning of the main      "
"routine before any random numbers are asked for";

```

```

REPLACE {$RNG-INITIALIZATION;} WITH {;
  OUTPUT;(/, ' *** Ranmar Random Number Check *** '); "Add H.Takei"
  OUTPUT IXX,JXX; ('      IXX = ',I5,' : JXX = ',I5); "Add H.Takei"
  CALL RMARIN;
  DO II=1,20005 [ "Add H.Takei"
    $RANDOMSET XRANM; "Add H.Takei"
    IF(II.GT.20000) [ "Add H.Takei"
      OUTPUT (MOD(INT(XRANM*16.**JJ),16),JJ=1,7); "Add H.Takei"
      (8X,7I3);]] "Add H.Takei"
  }
;

```

```

REPLACE {$COMMON-RANDOM-DECLARATION-IN-BLOCK-DATA;} WITH {;
  ;COMIN/RANDOM/;
}
;

```

```

REPLACE {$RANDOMSET#;} WITH {
  {P1}=URNDM(IXX)-URNDM(JXX); IF({P1}.LT.0.) {P1}={P1}+1.;
  URNDM(IXX) = {P1};
  IXX=IXX-1; IF(IXX.EQ.0) IXX=97;
  JXX=JXX-1; IF(JXX.EQ.0) JXX=97;
  CRNDM=CRNDM-CDRNDM; IF(CRNDM.LT.0.) CRNDM=CRNDM+CMRNDM;
  {P1}={P1}-CRNDM; IF({P1}.LT.0.) {P1}={P1}+1.;
}
;

```

表 2-4 $IXX = 1802$, $JXX = 9373$ に初期値を設定したときの Ranmar 乱数

20001 番目	6	3	11	3	0	4	0
20002 番目	13	8	15	11	11	14	0
20003 番目	6	15	0	2	3	11	0
20004 番目	5	14	2	14	4	8	0
20005 番目	7	15	7	10	12	2	0

表 2-5 サブルーティン PROFIL の内容

```

%E
"*****"
"
SUBROUTINE PROFIL(ICON,DATAPF,RNORMD,TNORMD);
"
"   Generating the random number using $RANDOMSET
"   --- Following 4 types are available ---
"
"   Input   : ICON   -- Condition Number
"              ICON=1 : Point Beam Spot
"              ICON=2 : Pencil Beam Spot
"              ICON=3 : Gaussian Beam Spot
"              ICON=4 : Pencil+Gaussian Beam Spot
"   : DATAPF(1) -- Beam Radius (cm) (RADIUS)
"                  Only using ICON=2 and 4
"   : DATAPF(2) -- Standard Deviation (cm) (SIGMA)
"                  Only using ICON=3 and 4
"   Output  : RNORMD  -- Particle_Start_Point (R)       : Real*8
"              : TNORMD  -- Particle_Start_Point (Theta) : Real*8
"   Caution : If RAN > 1 or RAN < 0 then warning message
"
"   Author   : H. Takei
"   Date     : 19-May-1993      Ver.1.0
"
"   Modified by H. Takei on 8-Jun-1993      Ver.1.1
"                  [ Added ICON=1,2,4 ]
"   Modified by H. Takei on 1-Sep-1993      Ver.2.0
"                  [ We use the generator of random number
"                    weighted current density. ]
"   Modified by H. Takei on 9-May-1994      Ver.2.1
"                  [ Cutoff Parameter was changed. ]
"   Modified by H. Takei on 3-Aug-1995      Ver.2.2
"                  [ Input & Output Parameter was changed. ]
"
"*****"
COMIN/RANDOM/;
REAL*8      RNORMD,TNORMD;
REAL*4      DATAPF(2);

```

```
RADIUS=DATAPF(1);SIGMA=DATAPF(2);
/RNORMD,TNORMD/=0.0D+0;
```

```
##### In case of ICON=1 #####
IF(ICON.eq.1) [RETURN;]
```

```
CUTOFF=$CUTOFF;
PI = 4.0*ATAN(1.0);
TWOPI = 2.0*PI;
SQTWPI = SQRT(TWOPI);
SQE = SQRT(exp(1.0));
```

```
" ----- RANRD is random number -----
:RANRD-RETRY:
```

```
$RANDOMSET RANRD;
IF(RANRD.LT.0.0.OR.RANRD.GT.1.0) [
  OUTPUT RANRD; ( ' --RANDOM NUMBER (R) ERROR IN PROFIL ',F10.6);
  GOTO :RANRD-RETRY;]
```

```
##### In case of ICON=2 #####
IF(ICON.eq.2) [
```

```
  RNORM = RADIUS*RANRD;
  ZNORM = TWOPI*RNORM;
  $RANDOMSET ZTESTA;
  ZTESTA=TWOPI*(RADIUS*ZTESTA);
  IF(ZTESTA.gt.ZNORM) [GO TO :RANRD-RETRY;]
```

```
  RNORMD = DBLE(RNORM);]
```

```
##### In case of ICON=3 #####
```

```
ELSE IF(ICON.eq.3) [
  RNORM=CUTOFF*SIGMA*RANRD;
  ZNORM=SQTWPI/SIGMA*RNORM*exp(-0.5*(RNORM/SIGMA)**2);
  $RANDOMSET ZTESTA;
  ZTESTA=ZTESTA*(SQTWPI/SQE);
  IF(ZTESTA.gt.ZNORM) [GO TO :RANRD-RETRY;]
```

```
  RNORMD = DBLE(RNORM);]
```

```

##### In case of ICON=4 #####
ELSE IF(ICON.eq.4) [
  RNORM=(CUTOFF*SIGMA+RADIUS)*RANRD;

  IF(RNORM.le.RADIUS) [
    ZNORM=SQWPI/SIGMA*RNORM;]
  ELSE [
    ZNORM=SQWPI/SIGMA*RNORM*exp(-0.5*((RNORM-RADIUS)/SIGMA)**2);]

  RMAXG=(RADIUS+SQRT(RADIUS**2+4.0*SIGMA**2))/2.0;
  ZMAXG=(SQWPI/SIGMA)*RMAXG*exp(-0.5*((RMAXG-RADIUS)/SIGMA)**2);
  ZMAXL=(SQWPI/SIGMA)*RADIUS;
  ZMAX =AMAX1(ZMAXG,ZMAXL);
  $RANDOMSET ZTESTB;
  ZTESTB=ZTESTB*ZMAX;
  IF(ZTESTB.gt.ZNORM) [GO TO :RANRD-RETRY:;]

  RNORMD = DBLE(RNORM);]

" ----- RANTH is random number ----- "
:RANTH-RETRY:

$RANDOMSET RANTH;
IF(RANTH.LT.0.0.OR.RANTH.GE.1.0) [
  OUTPUT RANTH; ( ' --RANDOM NUMBER (Theta) ERROR IN PROFIL ',F10.6);
  GOTO :RANTH-RETRY:;]

TNORM=TWOPI*RANTH;TNORMD=DBLE(TNORM);

RETURN;END;"END OF PROFIL"

```


表 2-6 サブルーティン INIDRZ の内容

```

%E
"*****"
"
SUBROUTINE INIDRZ(X0,Y0,Z0,ID,ICODE);
"
"   Getting Region Number (ID) corresponding with (X0,Y0,Z0).
"   ----- Only consider RZ-Distribution -----
"
"   Input   : X0,Y0,Z0 -- Position
"   Output  : ID      -- Region Number
"             : ICODE  -- Condition Number
"
"             ICODE = 0 : We find ID number.
"             ICODE = 1 : We find NO-ID number
"                       at (X0,Y0,Z0).
"
"   Author  : H. Takei
"   Date    : 29-July-1993      Ver.1.0
"
"   Modified by H. Takei 11-Apr-1994 Ver.1.2
"
"*****"
COMIN/GEOM/;
COMMON/GEOMDTA/NPLAN,NCYLN,NREG,IRZ;

/ID,ICODE/=0;

IF(Z0.lt.PCOORD(3,1)) [
  ID=1;
  RETURN;]

DO I=1, NPLAN-1 [
  IF(Z0.ge.PCOORD(3,I).and.Z0.lt.PCOORD(3,I+1)) [
    IDZ=I;GOTO :PASSZ:;]]
ICODE=1;RETURN;

:PASSZ:

```

RPOS2=X0**2+Y0**2;

IF(RPOS2.LE.CYRAD2(1)) [IDR=1;GOTO :PASSR:;]

DO I=2, NCYLN [

IF(RPOS2.GT.CYRAD2(I-1).and.RPOS2.LE.CYRAD2(I)) [

IDR=I;

GOTO :PASSR:;]]

ICODE=2;RETURN;

:PASSR:

ID=(IDZ-1)*NCYLN+IDR+1;

RETURN;END;"END OF INIDRZ"

表3-1水中でのエネルギー損失(ビーム電力100kW入射時)

ビーム エネルギー MeV	ビーム電流 mA	全エネルギー 損失 kW	最大発熱密度 kW/cm ³
3.5	28.6	98	850
10	10	88	300
10 ²	1	8.2	31
10 ³	0.1	0.87	3.6
10 ⁴	0.01	0.11	0.55

表3-2SLAC方式とRD方式の比較

項目	SLAC方式	RD方式
発熱密度の低減	×	○
ビーム窓の安全性	×	◎
水素発生の低減	×	○
突発的な局所発熱の回避	×	×
熱特性データの収集	△	◎

但し、記号は下記の通りである。

- × 期待出来ない
- △ 可能性ある
- 十分可能性がある
- ◎ 非常に有効である

表4-1 サブルーティン SETPOS の内容

```

%E
"*****"
"
SUBROUTINE SETPOS(ICON,IFLAT,PRODAT,XSTATC,XSTOPC,XSTART,DIREC);
"
"   Generating the particle_start_point and moving direction   "
"
"   Input   : ICON   -- Condition Number                       "
"              ICON=1 : Point Beam Spot                       "
"              ICON=2 : Pencil Beam Spot                      "
"              ICON=3 : Gaussian Beam Spot                    "
"              ICON=4 : Pencil+Gaussian Beam Spot             "
"   : IFLAT  -- Condition Number                               "
"              IFLAT=1 : Beam Radius at Q_Magnet is same     "
"                      as at Target Plan                       "
"              IFLAT=0 : Other                                 "
"   : PRODAT(1) -- Beam Radius ( Pencil_Part ) at Q Magnet   "
"   : PRODAT(2) -- Beam S.D. ( Gaussian_Part ) at Q Magnet   "
"   : PRODAT(3) -- The ratio of beam diameter                 "
"                      between Q Magnet and Target Plan      "
"
"   : XSTATC(1) -- Beam_Center at Q_Magnet (X) cm            "
"   : XSTATC(2) -- Beam_Center at Q_Magnet (Y) cm            "
"   : XSTATC(3) -- Beam_Center at Q_Magnet (Z) cm            "
"
"   : XSTOPC(1) -- Beam_Center at Target Plan (X) cm         "
"   : XSTOPC(2) -- Beam_Center at Target Plan (Y) cm         "
"   : XSTOPC(3) -- Beam_Center at Target Plan (Z) cm         "
"
"   Output  : XSTART(1) -- Start point at Q_Magnet (X) cm    "
"   : XSTART(2) -- Start point at Q_Magnet (Y) cm            "
"   : XSTART(3) -- Start point at Q_Magnet (Z) cm            "
"
"   : DIREC(1)  -- Moving direction (X) Real*8               "
"   : DIREC(2)  -- Moving direction (Y) Real*8               "
"   : DIREC(3)  -- Moving direction (Z) Real*8               "
"   --- DIREC(1)**2+DIREC(2)**2+DIREC(3)**2=1 ---           "
"

```

```

" Author : H. Takei "
" Date : 28-July-1995 Ver.1.0 "
" " "
" Modified by H. Takei on 3-Aug-1995 Ver.1.1 "
" [ Bug fixed. ] "
" Modified by H. Takei on 31-Oct-1995 Ver.1.2 "
" [ Bug fixed. ] "
" " "
"*****"
REAL*4 PRODAT(3),XSTATC(3),XSTOPC(3),XSTART(3);
REAL*4 DATAPF(2);
REAL*8 RNORMD,TNORMD;
REAL*8 DIREC(3);
REAL*8 UTMP,VTMP,WTMP,UC,VC,WC;
REAL*8 SIGX,SIGY;

DO I=1,3 [ XSTART(I)=0.0; DIREC(I)=0.0D+0; ]

" Moving Direction for Beam_Center "
UTMP=DBLE(XSTOPC(1)-XSTATC(1));
VTMP=DBLE(XSTOPC(2)-XSTATC(2));
WTMP=DBLE(XSTOPC(3)-XSTATC(3));
UC=UTMP/DSQRT(UTMP**2+VTMP**2+WTMP**2);
VC=VTMP/DSQRT(UTMP**2+VTMP**2+WTMP**2);
WC=WTMP/DSQRT(UTMP**2+VTMP**2+WTMP**2);

IF(WC.eq.0.0D+0) [
OUTPUT; ( ' *** ERROR! WC=0 in SETPOS *** ');
RETURN;]

IF(ICON.eq.1) [
IF(IFLAT.ne.1) [
OUTPUT IFLAT; ( ' --IFLAT ERROR in SETPOS ',I6);]
DO I=1,3 [XSTART(I)=XSTATC(I);]
DIREC(1)=UC;DIREC(2)=VC;DIREC(3)=WC;RETURN;]

" Set Start Point "

ISPOT=ICON;
DATAPF(1)=PRODAT(1);" for RADIUS "

```

```

DATAPF(2)=PRODAT(2);" for SIGMA "
CALL PROFIL(ISPOT,DATAPF,RNORMD,TNORMD);

IF(UC.eq.0.0D+0.and.VC.eq.0.0D+0) [
  SIGX=RNORMD*DCOS(TNORMD);
  SIGY=RNORMD*DSIN(TNORMD);]
ELSE [
  SIGX=RNORMD*DCOS(TNORMD)*UC-RNORMD*DSIN(TNORMD)*VC*WC;
  SIGY=RNORMD*DCOS(TNORMD)*VC+RNORMD*DSIN(TNORMD)*UC*WC;
  SIGX=SIGX/DSQRT(UC**2+VC**2)/WC;
  SIGY=SIGY/DSQRT(UC**2+VC**2)/WC;]

XSTART(1)=XSTATC(1)+SNGL(SIGX);
XSTART(2)=XSTATC(2)+SNGL(SIGY);
XSTART(3)=XSTATC(3);

" Set Moving Direction
RATEQT=PRODAT(3);
  UTMP=SIGX*DBLE(RATEQT-1.0)-DBLE(XSTATC(1)-XSTOPC(1));
IF(IFLAT.eq.1) [UTMP=-DBLE(XSTATC(1)-XSTOPC(1));]
  VTMP=SIGY*DBLE(RATEQT-1.0)-DBLE(XSTATC(2)-XSTOPC(2));
  IF(IFLAT.eq.1) [VTMP=-DBLE(XSTATC(2)-XSTOPC(2));]
  WTMP=-DBLE(XSTATC(3)-XSTOPC(3));
DIREC(1)=UTMP/DSQRT(UTMP**2+VTMP**2+WTMP**2);
DIREC(2)=VTMP/DSQRT(UTMP**2+VTMP**2+WTMP**2);
DIREC(3)=WTMP/DSQRT(UTMP**2+VTMP**2+WTMP**2);

RETURN;END;"END OF SETPOS"

```

表4-2電子線の直径を変化させた場合の発熱密度

直径 (mm)	発熱量 (kW)	発熱密度			
		EGS4		予想値	
		絶対値 (kW/cm ³)	相対値	絶対値 (kW/cm ³)	相対値
12	63.6	105	1	112	1
40	63.6	9.91	1/10.6	10.1	1/11.1
60	63.6	4.54	1/23.1	4.50	1/24.9

表 4-3 電子線の入射角を変化させた場合の発熱密度

No.	角度 (deg.)	発熱量 (kW)	発熱密度			
			EGS4		予想値	
			絶対値 (kW/cm ³)	相対値	絶対値 (kW/cm ³)	相対値
1	0	63.6	9.91	1	10.1	1
2	45	58.0	6.84	1/1.45	6.53	1/1.55
3	45	58.1	6.71	1/1.47	6.54	1/1.54
4	45	58.2	6.60	1/1.50	6.55	1/1.54
5	66	47.9	3.14	1/3.16	3.11	1/3.25
6	66	48.1	3.04	1/3.26	3.13	1/3.23
7	66	47.7	3.03	1/3.27	3.10	1/3.26

尚、方向余弦などの値は下表を参照のこと。

No.	発熱密度			入射面積	
	l	m	n	(cm ²)	相対値
1	0	0	0	12.57	1
2	-0.707	0	0.707	17.77	1.41
3	0	-0.707	0.707	17.77	1.41
4	-0.5	-0.5	0.707	17.77	1.41
5	-0.913	0	0.408	30.78	2.45
6	0	-0.913	0.408	30.78	2.45
7	-0.646	-0.646	0.408	30.78	2.45

表 4-4 電子線入射条件

ビームエネルギー	10MeV
平均ビーム電流	20mA
最大ビーム電流	100mA
パルス幅	0.1 ~ 4 msec
Duty Factor	0 ~ 20%
ビーム半径	5mm
ビーム形状	ビーム半径を 3σ とする正規分布
エミッタンス	50 π mm mrad(目標値)
ビーム軸の高さ	床面から 1200mm

表4-5 内部発熱領域の定義と発熱量

モジュール	円板	発熱領域	R _A (cm)	R _B (cm)	T (cm)	体積 cm ³	発熱密度 kW/cm ³	発熱量 kW
No.1 16.7kW	1	A	9.8	10.3	0.5	16	2.0×10 ⁻²	0.60
		B	9.8	10.3	4.5	1.4×10 ²	2.0×10 ⁻³	
		C	10.3	10.8	0.5	17	2.2×10 ⁻⁴	
	2	A	9.3	9.8	0.5	15	9.1×10 ⁻²	2.0
		B	9.3	9.8	4.5	1.4×10 ²	3.7×10 ⁻³	
		C	9.8	10.3	0.5	16	1.0×10 ⁻²	
	3	A	8.8	9.3	0.5	14	0.15	3.1
		B	8.8	9.3	4.5	1.3×10 ²	5.7×10 ⁻³	
		C	9.3	9.8	0.5	15	1.7×10 ⁻²	
	4	A	8.3	8.8	0.5	13	0.24	4.6
		B	8.3	8.8	4.5	1.2×10 ²	8.3×10 ⁻³	
		C	8.8	9.3	0.5	14	2.7×10 ⁻²	
	5	A	7.8	8.3	0.5	13	0.35	6.3
		B	7.8	8.3	4.5	1.1×10 ²	1.2×10 ⁻²	
		C	8.3	8.8	0.5	13	4.0×10 ⁻²	
No.2 71.1kW	6	A	7.2	7.8	0.5	14	0.51	9.7
		B	7.2	7.8	4.5	1.3×10 ²	1.4×10 ⁻²	
		C	7.8	8.3	0.5	13	5.7×10 ⁻²	
	7	A	6.6	7.2	0.5	13	0.71	12
		B	6.6	7.2	4.5	1.2×10 ²	1.8×10 ⁻²	
		C	7.2	7.8	0.5	14	6.5×10 ⁻²	
	8	A	6.0	6.6	0.5	12	0.93	15
		B	6.0	6.6	4.5	1.1×10 ²	2.3×10 ⁻²	
		C	6.6	7.2	0.5	13	8.7×10 ⁻²	
	9	A	5.4	6.0	0.5	11	1.2	17
		B	5.4	6.0	4.5	97	2.8×10 ⁻²	
		C	6.0	6.6	0.5	12	0.11	

表4-5 内部発熱領域の定義と発熱量 (続き)

モジュール	円板	発熱領域	R _A (cm)	R _B (cm)	T (cm)	体積 cm ³	発熱密度 kW/cm ³	発熱量 kW
No.2	10	A	4.8	5.4	0.5	9.6	1.4	18
		B	4.8	5.4	4.5	87	3.2×10^{-2}	
		C	5.4	6.0	0.5	11	0.13	
No.3 86.9kW	11	A	4.2	4.8	0.5	8.5	1.7	18
		B	4.2	4.8	1.5	25	5.4×10^{-2}	
		C	4.8	5.4	0.5	9.6	0.20	
	12	A	3.6	4.2	0.5	7.4	1.8	17
		B	3.6	4.2	1.5	22	6.0×10^{-2}	
		C	4.2	4.8	0.5	8.5	0.26	
	13	A	3.0	3.6	0.5	6.2	2.0	16
		B	3.0	3.6	1.5	19	6.5×10^{-2}	
		C	3.6	4.2	0.5	7.4	0.27	
	14	A	2.4	3.0	0.5	5.1	2.1	13
		B	2.4	3.0	1.5	15	6.8×10^{-2}	
		C	3.0	3.6	0.5	6.2	0.27	
	15	A	1.8	2.4	0.5	4.0	2.2	11
		B	1.8	2.4	1.5	12	7.1×10^{-2}	
		C	2.4	3.0	0.5	5.1	0.26	
	16	A	1.2	1.8	0.5	2.8	2.2	7.8
		B	1.2	1.8	1.5	8.5	7.3×10^{-2}	
		C	1.8	2.4	0.5	4.0	0.24	
17	A	0.6	1.2	0.5	1.7	2.2	4.7	
	B	0.6	1.2	1.5	5.1	7.3×10^{-2}		
	C	1.2	1.8	0.5	2.8	0.21		
No.4 1.5kW	18	A	0.0	0.6	0.5	0.57	2.1	1.5
		B	0.0	0.6	1.5	1.7	4.1×10^{-2}	
		C	0.6	1.2	0.5	1.7	0.15	

表4-6データファイルbeam_dump.datの内容

```

Particle=ELECTRON:Current= 20(mA):KineticEnergy= 1.0000D+01(MeV)
NCASE=8700000:Beam_Diameter(Q_Mag)= 10(mm):Pencil_Part= 0/1000
Beam_Diameter(TG)= 200(mm):Beam_Center:No. 1Plan [Line 0.00(mm)]
Beam_Center_at_Q_Magnet:X_Direction= 0(mm):Y_Direction= 0(mm)
Array_Containing_Names_Of_Media(PEGS4):"CU"
Media_Unit_Length: DR(1)= 25(mm), DR(2)= 30(mm), DR(3)= 48(mm)
Media_Unit_Length: Diameter(Target)= 400(mm): Target_Type ="DUMP"
Shield_Length:(Forward__Sideward) 60(mm)(Backward:ID= 20) 100(mm)
Shield_Length:(Using_Pipe=YES) Thickness= 20(mm), Length=1265(mm)
Length:Z(Q_Mag-Chamber)=1800(mm), DZ(all)= 50(mm)(SURFACE:1/10)
Length: DZ(#3EDGE)= 20(mm)(SURFACE:1/ 4)
Print_Out_Format(Short_Style=YES:Histogram=YES):Calling_Shower=YES
K-Edge_SET=YES:Writing_Data=YES:Writing_Gamma_Data=YES"
Use_New_Seed_Number(YES):IXX= 474373863;IXX=3869,JXX=2456(RANMAR)
Making_Shower_Display_File = NO:Maximum_history_Number= 10"

```

表4-7データファイル beam.dump_media.dat の内容

#1A45678901234567	
#1B45678901234567	
#2A4567890123456	
#2B4567890123456	
#3A456789012345	
#3B456789012345	
#4A45678901234	
#4B45678901234	
#5A4567890123	
#5B4567890123	
#6A456789012	01
#6B456789012	01
#7A45678901	01
#7B45678901	01
#8A4567890	01
#8B4567890	01
#9A456789	01
#9B456789	01
#10A5678	01
#10B5678	01
A23456789	#11
B234567	#11
C234567	#11
A23456789	#12
B23456	#12
C23456	#12
A23456789	#13
B2345	#13
C2345	#13
A23456789	#14
B234	#14
C234	#14
A23456789	#15
B23	#15
C23	#15
A23456789	#16
B2	#16
C2	#16

A23456789	#17
B	#17
C	#17
A23456789	#18
	#18
	#18
	#19

表4-8 金属円板の温度

No	外径 (cm)	内径		発熱量 (kW)	最高温度 (℃)	最低温度 (℃)
		(cm)	割合			
1	40	19.6	0.61	0.60	—	—
2	40	18.6	0.58	2.0	—	—
3	40	17.6	0.55	3.1	—	—
4	40	16.6	0.52	4.6	—	—
5	40	15.6	0.49	6.3	—	—
6	32	14.4	0.60	9.7	—	—
7	32	13.2	0.55	12	180	60
8	32	12.0	0.50	15	230	64
9	32	10.8	0.45	17	280	69
10	32	9.6	0.40	18	320	70
11	26	8.4	0.47	18	340	81
12	26	7.2	0.40	17	360	78
13	26	6.0	0.33	16	380	76
14	26	4.8	0.26	13	380	70
15	26	3.6	0.20	11	370	63
16	26	2.4	0.13	7.8	330	55
17	26	1.2	0.07	4.7	280	47
18	26	0.0	0.00	1.5	170	39

但し、割合は冷却水経路の内側の半径を1とした内径を表す。

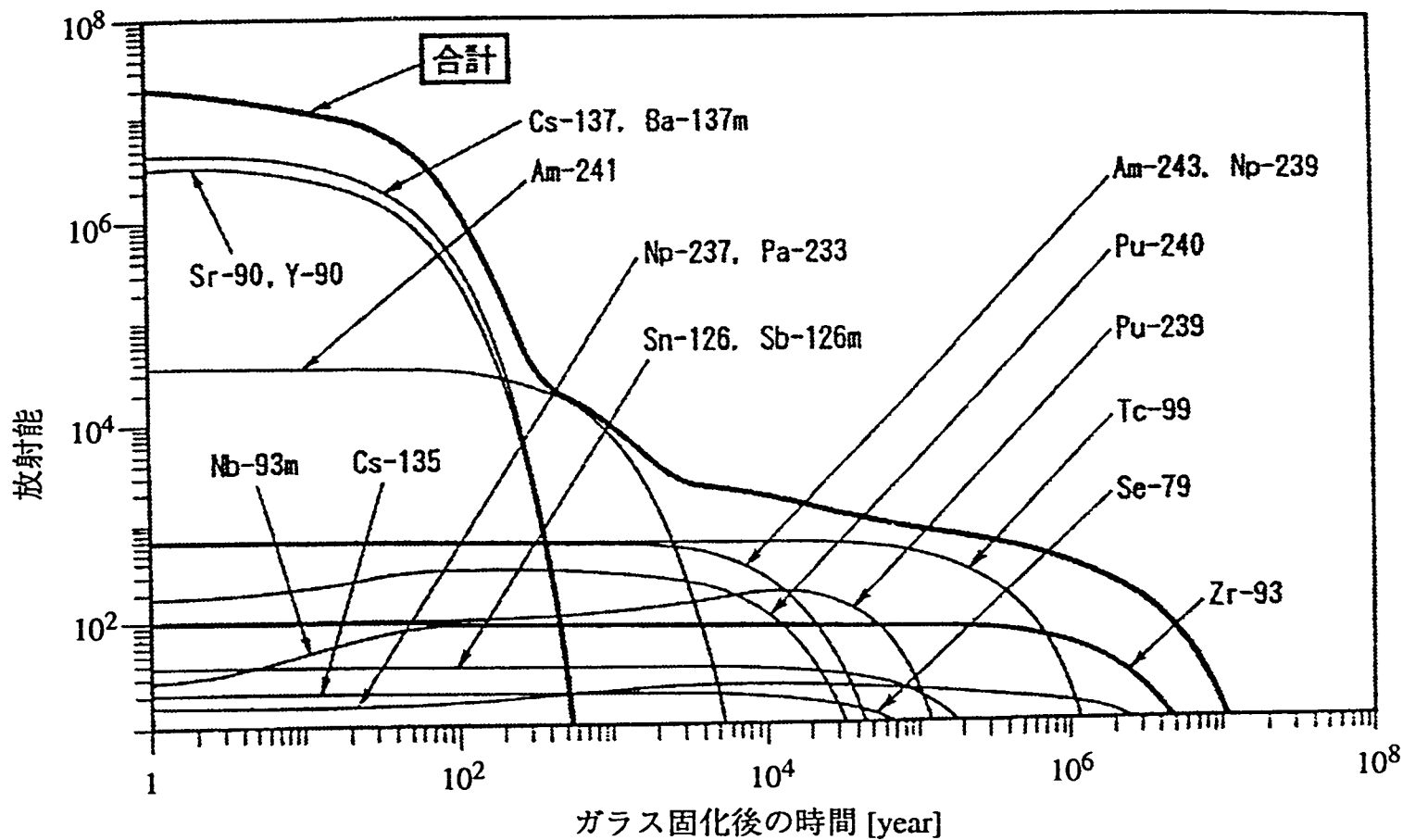


図1-1 ガラス固化体1本あたりの放射能の時間変化の計算例 (文献[3]より引用)

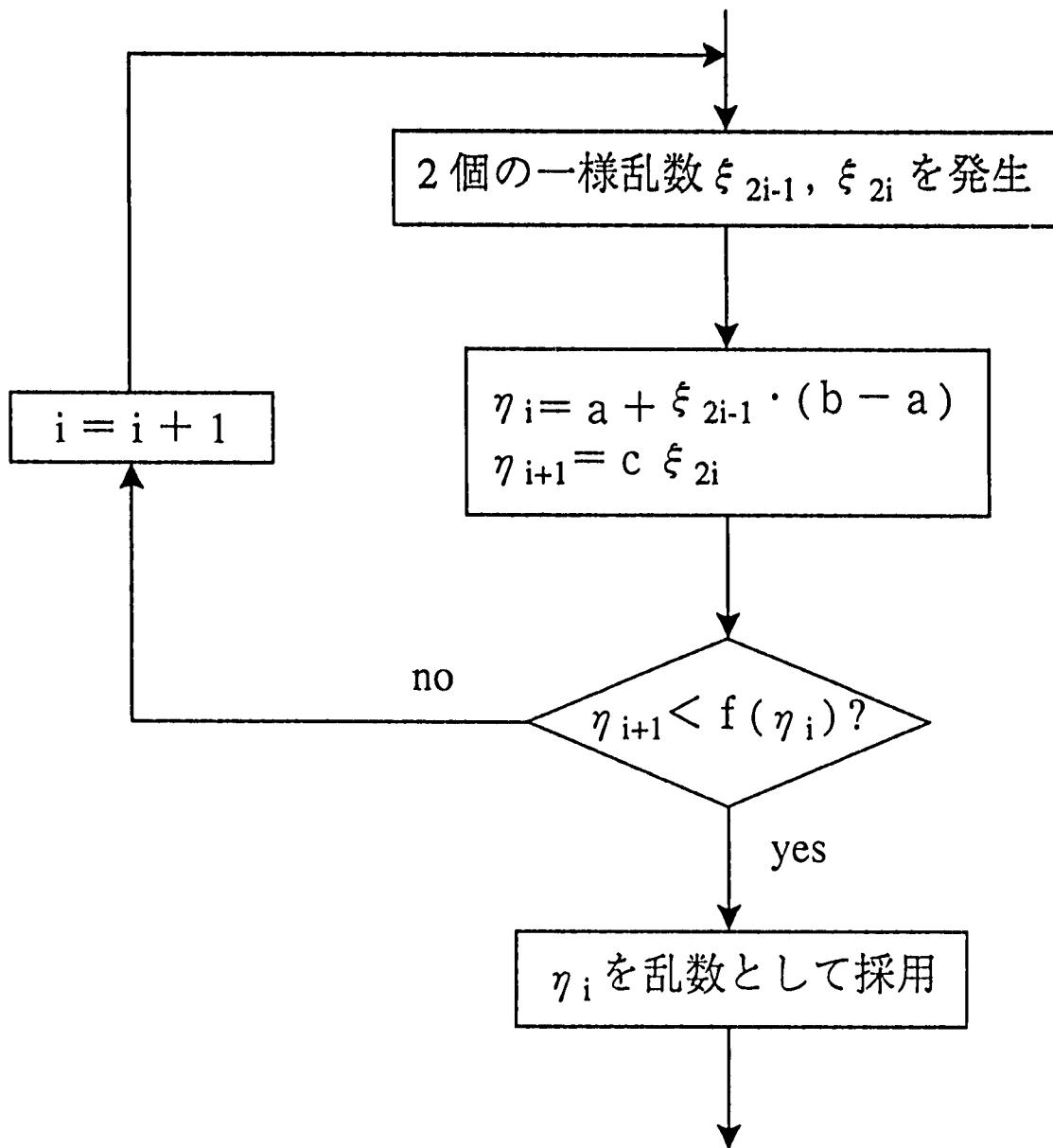


図2-1 任意分布の乱数発生のための棄却法

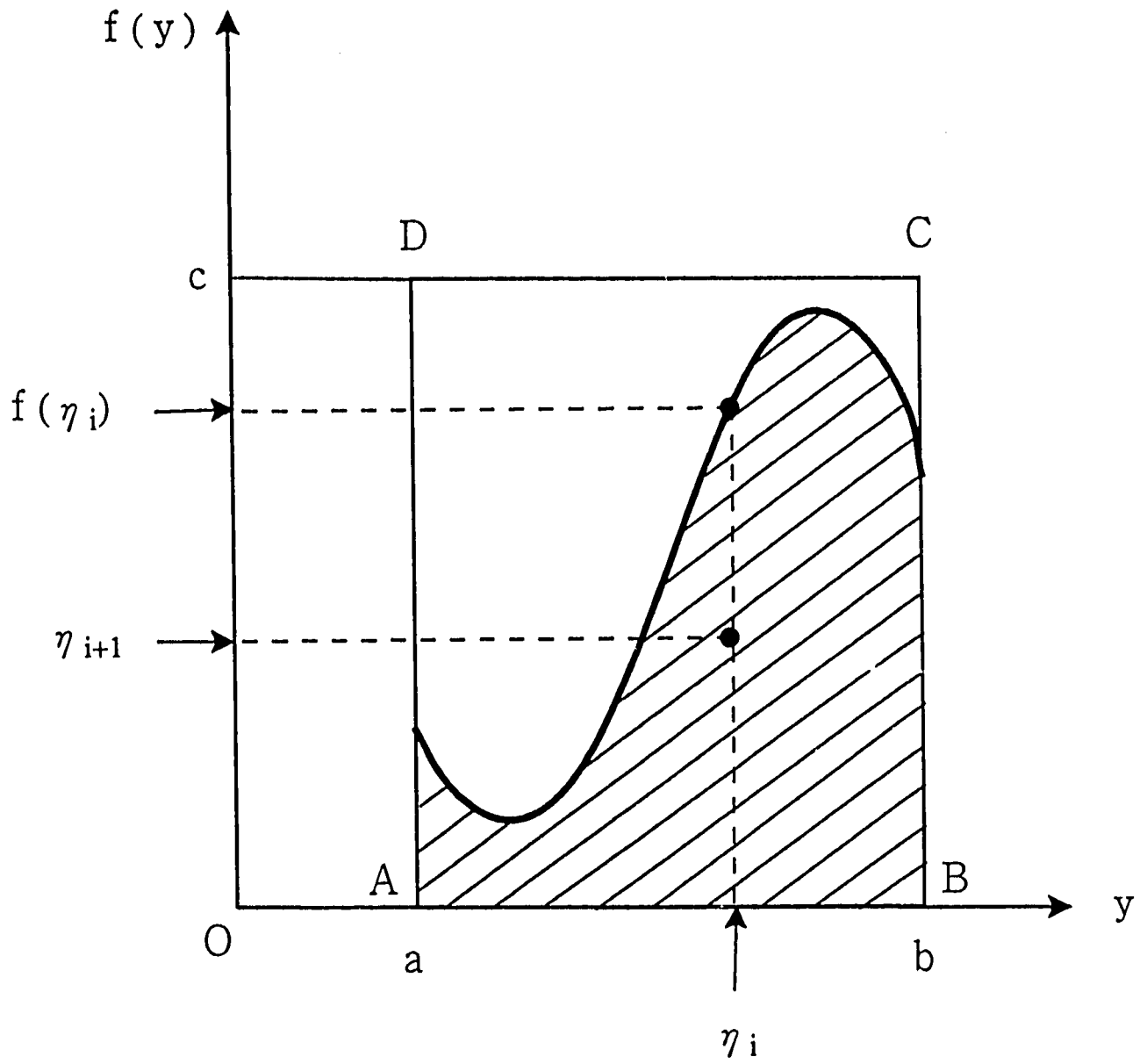


図2-2 矩形領域と分布曲線 $f(y)$

図2-3 入射点のxy座標
(Pencil Beam Spot)

EGS4/PRESTA

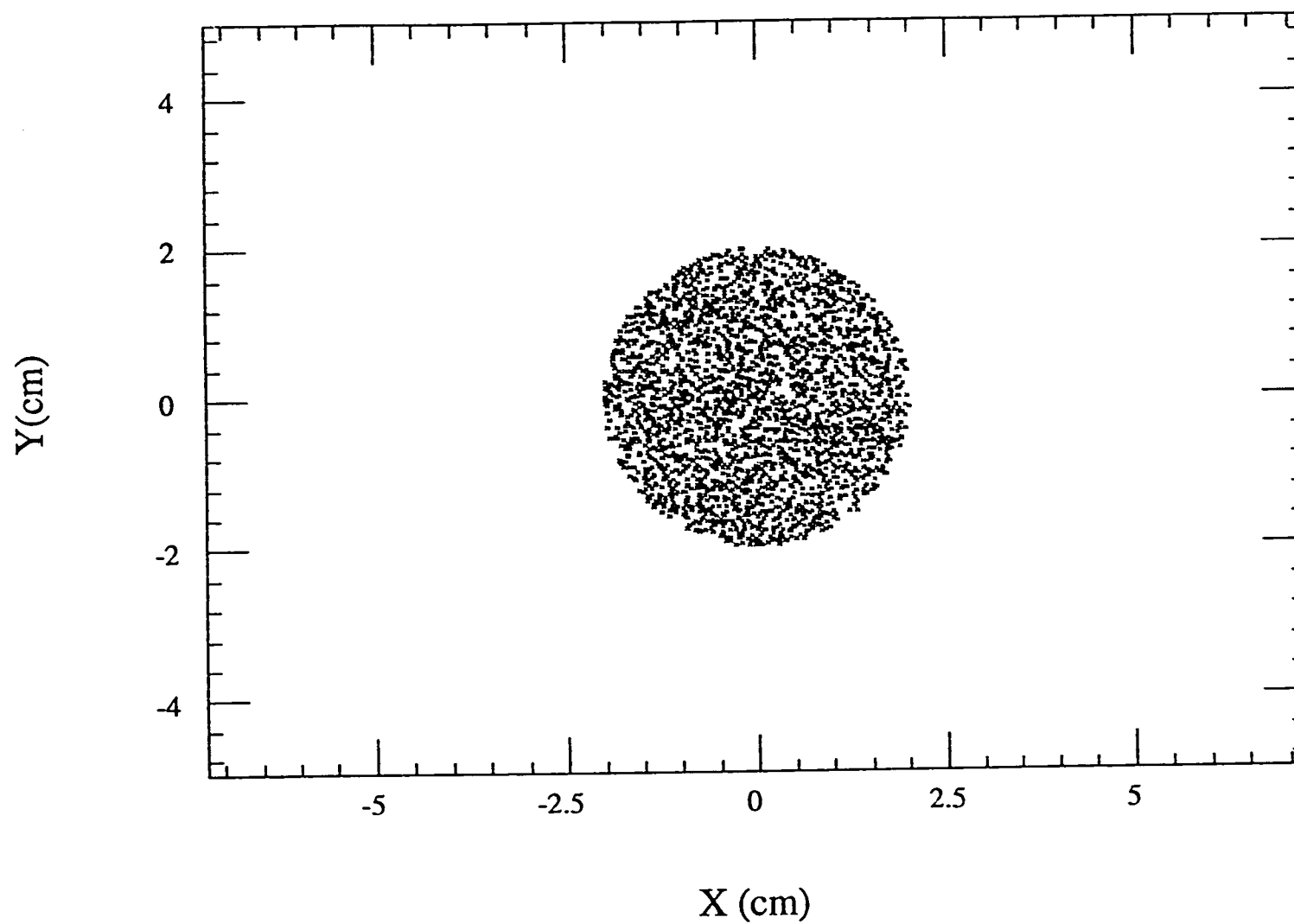
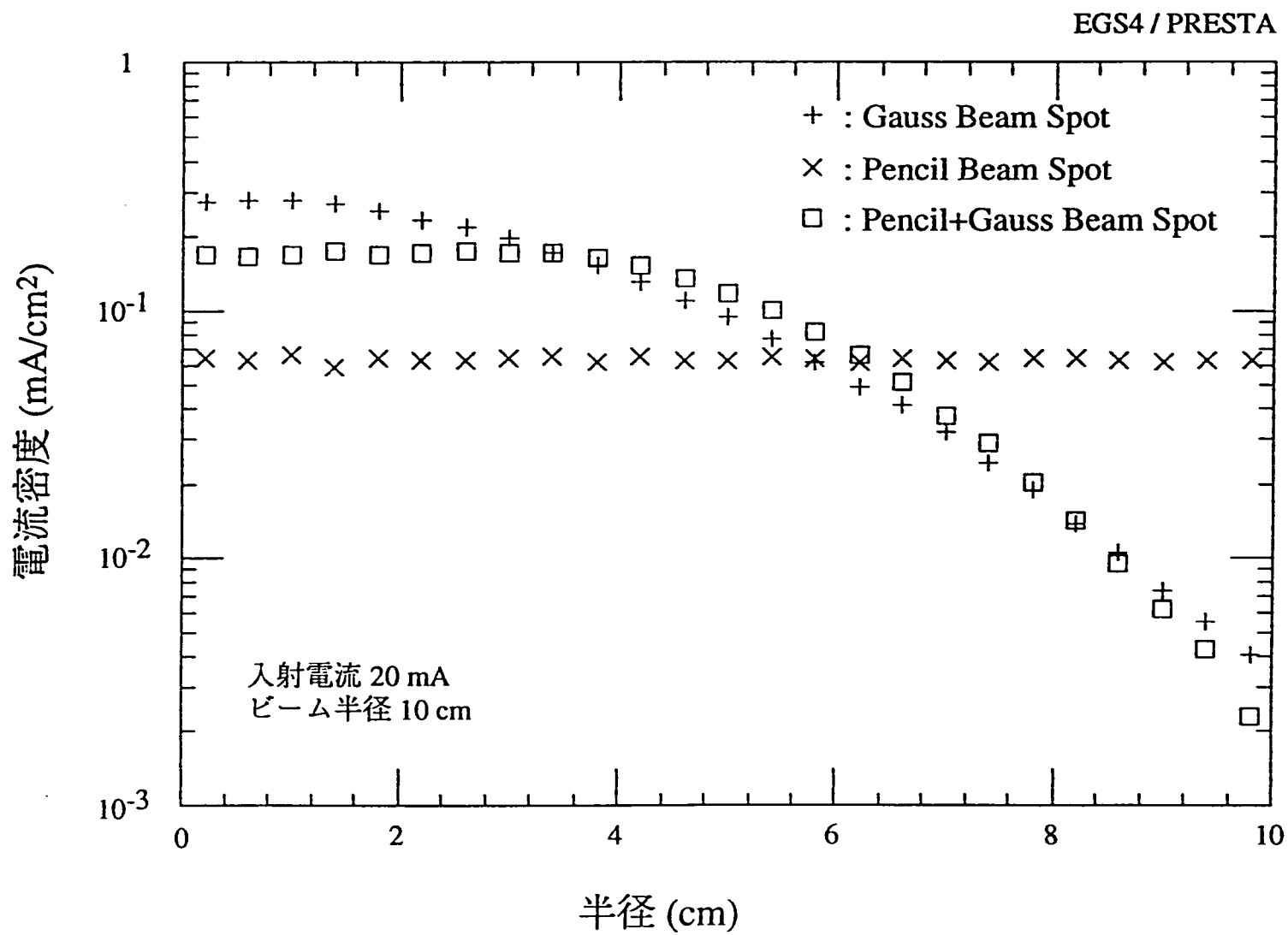


図2-4 ビーム形状による電流密度分布



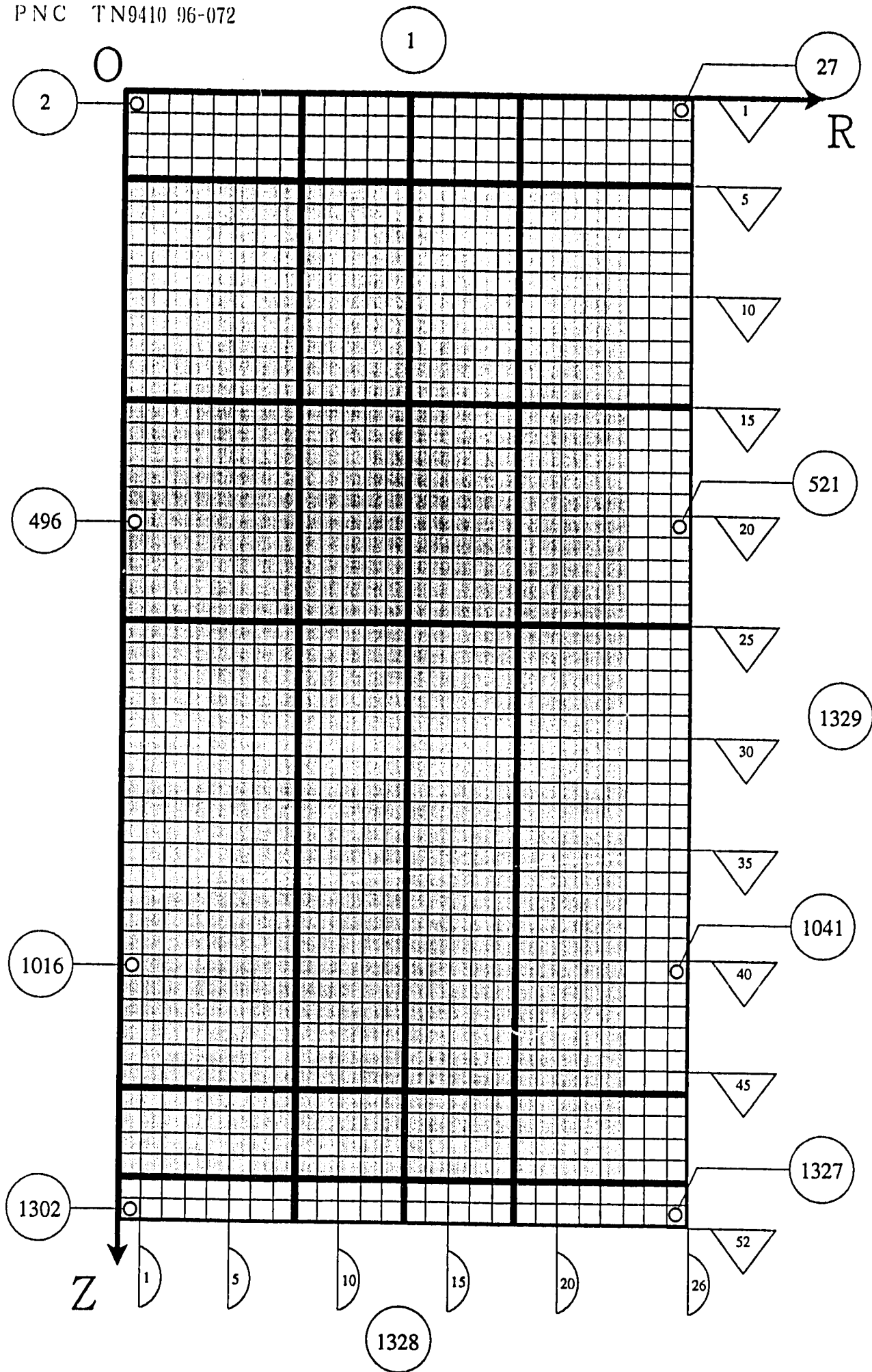
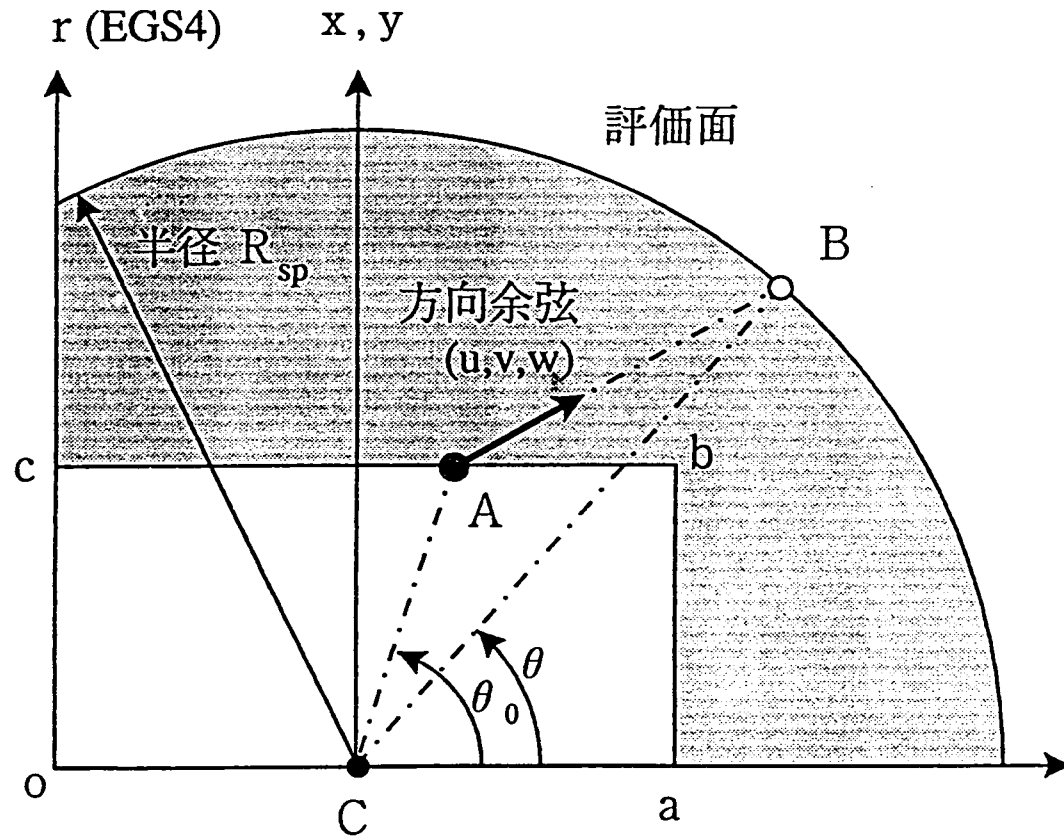


図2-5 円筒平板形状の定義 (文献[7]より引用)

(i) x z (y z) 平面



(ii) x y 平面

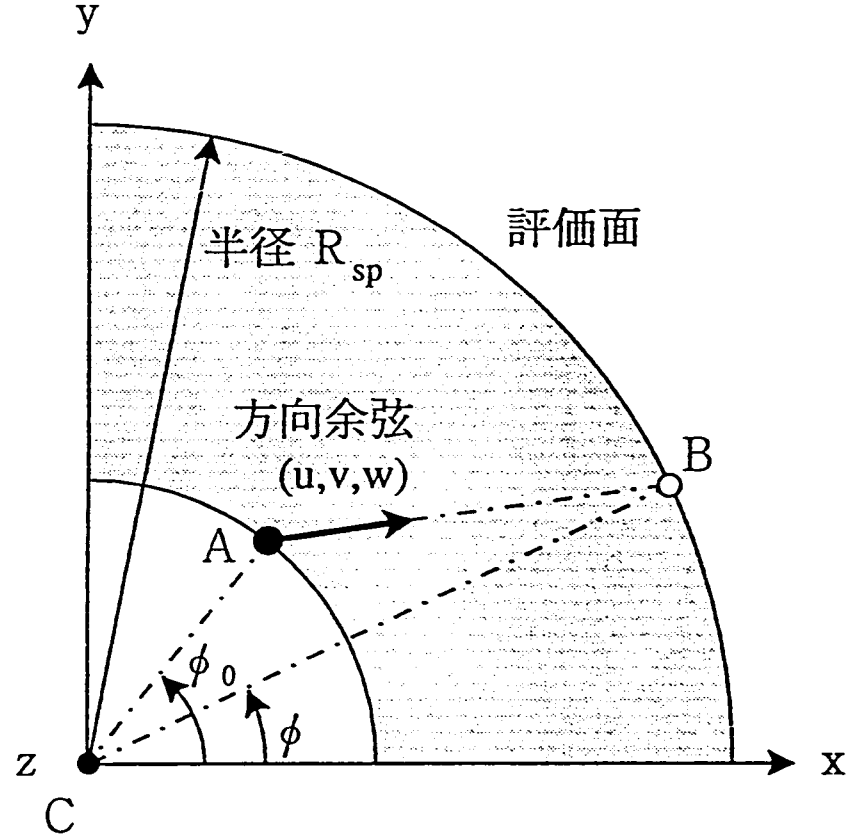
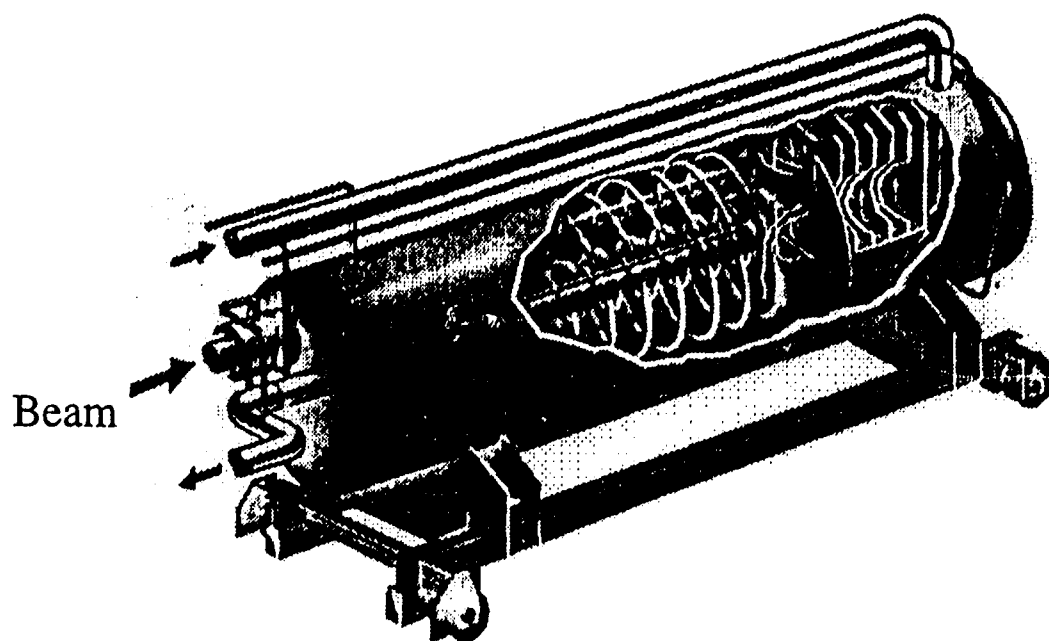


図2-6 散乱角 θ と方位角 ϕ の定義

(a) Artist's Conception of 2.2 MW Beam Dump



(b) Front view of Beam Dump

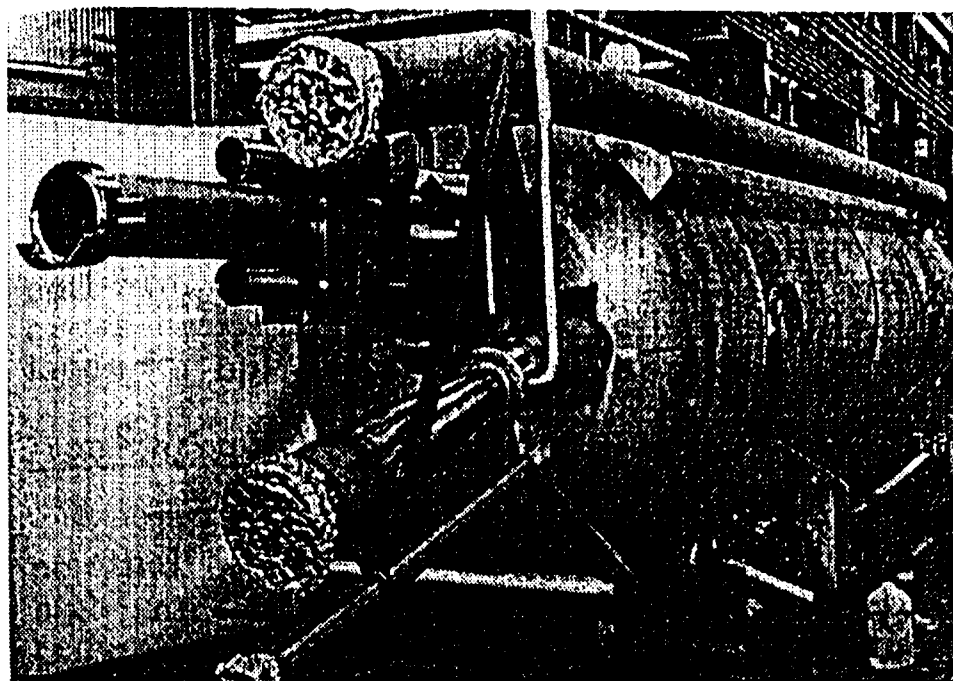


図3-1 SLACのビームダンプ (文献[11]より引用)

図3-2 水中でのエネルギー損失
(ビーム電力100kW入射時)

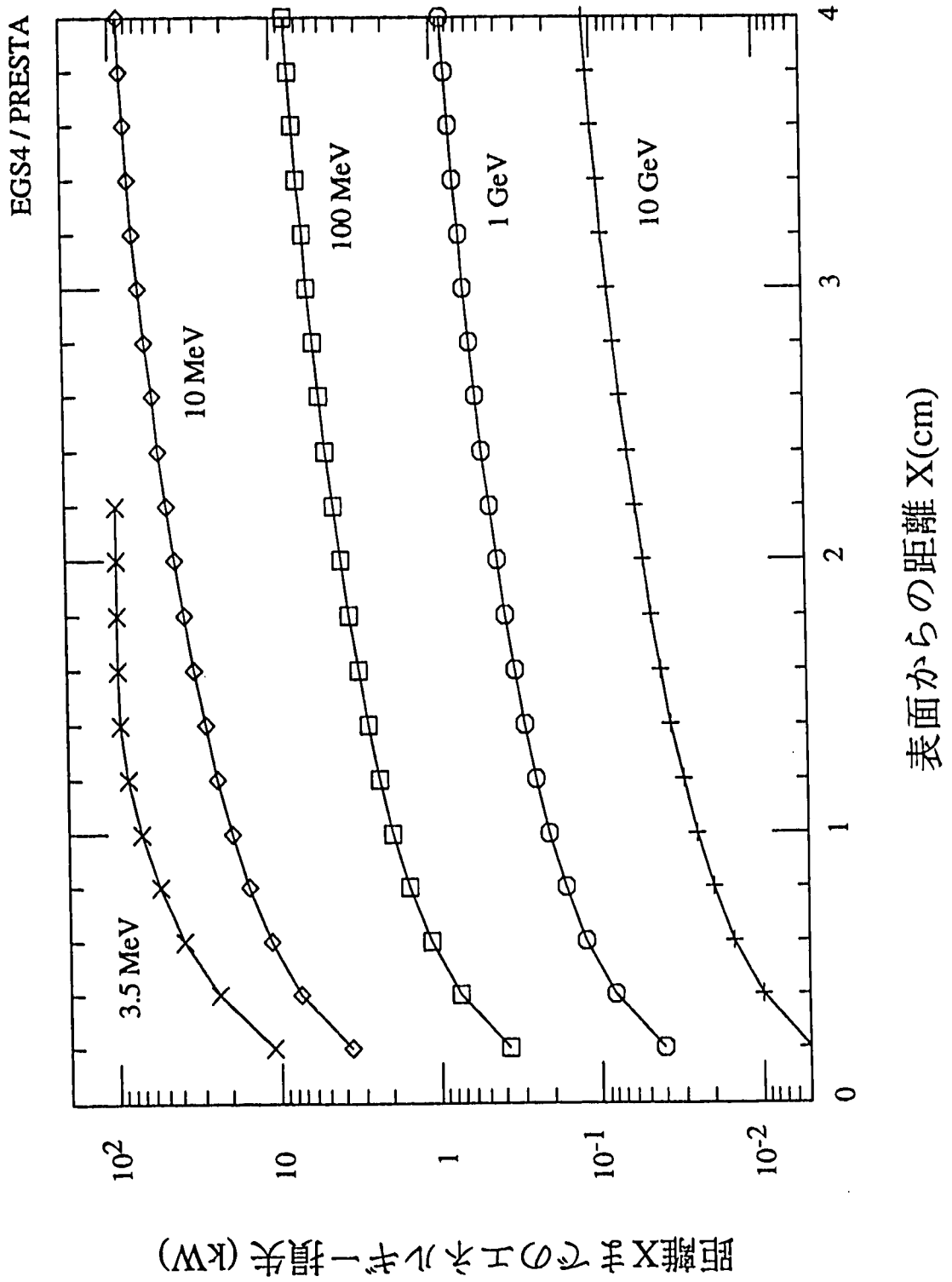


図3-3 水中での最大発熱密度
(ビーム電力100kW入射時)

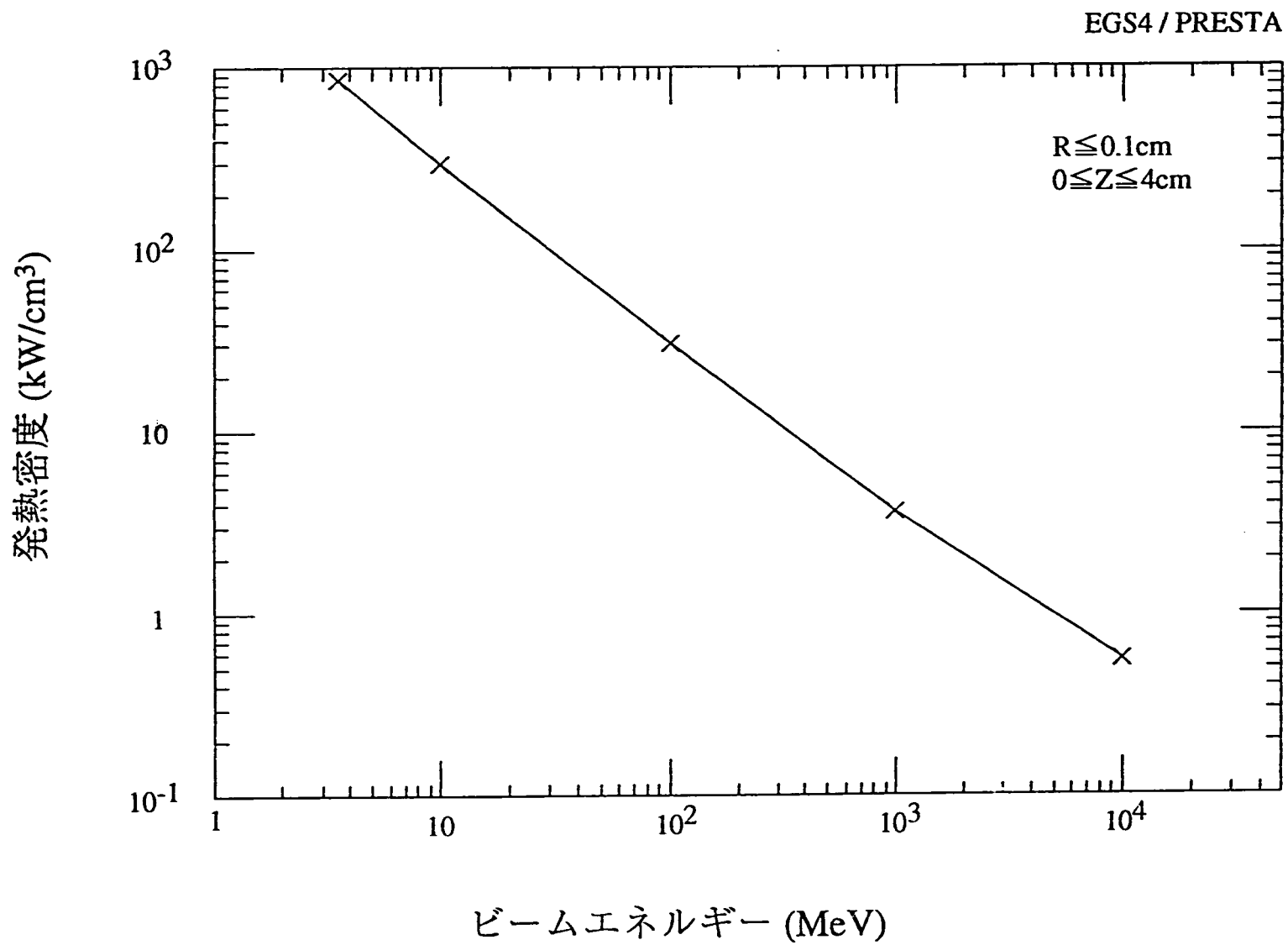


図3-4 銅中でのエネルギー損失
(ビーム電力100kW入射時)

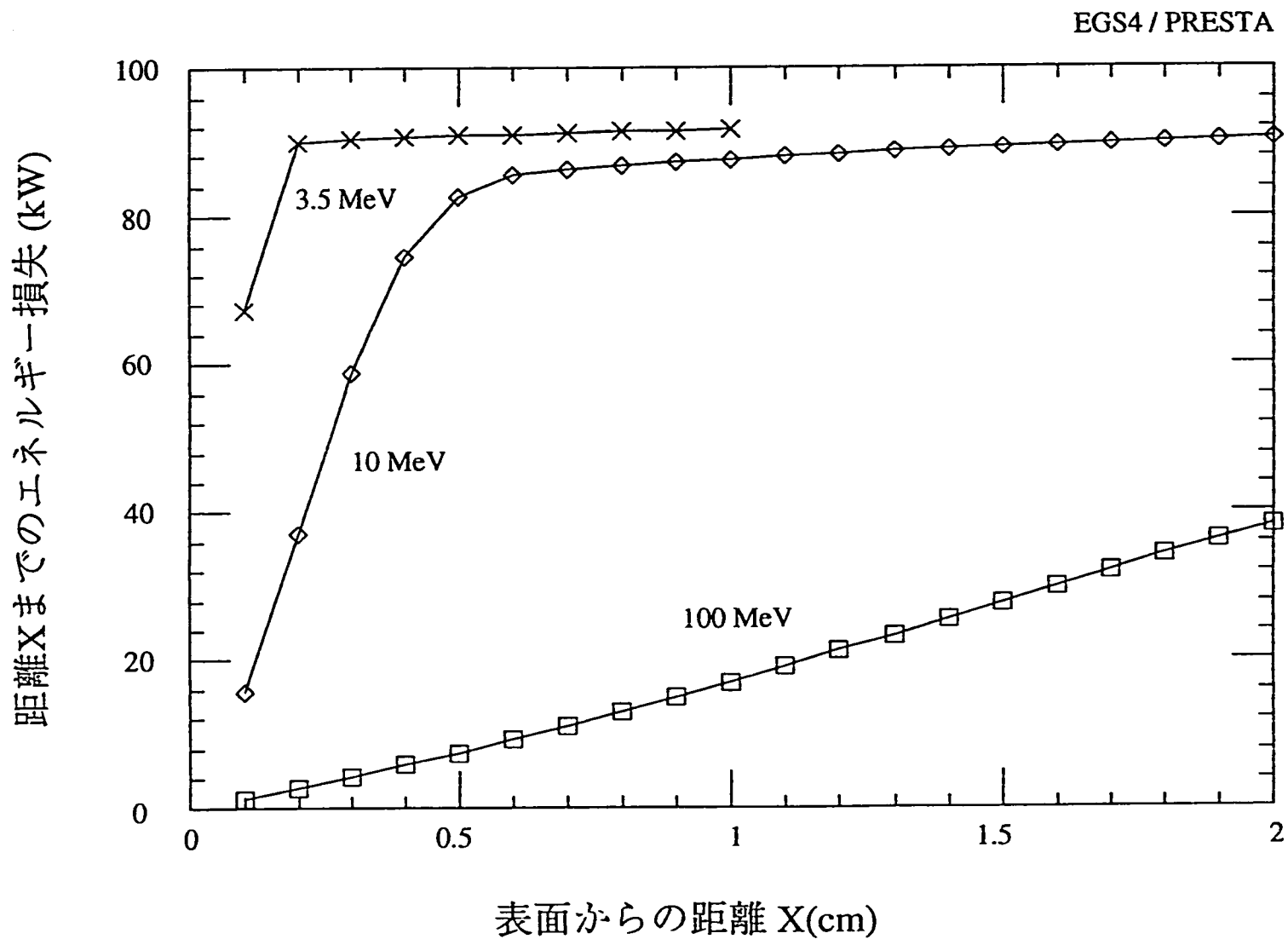
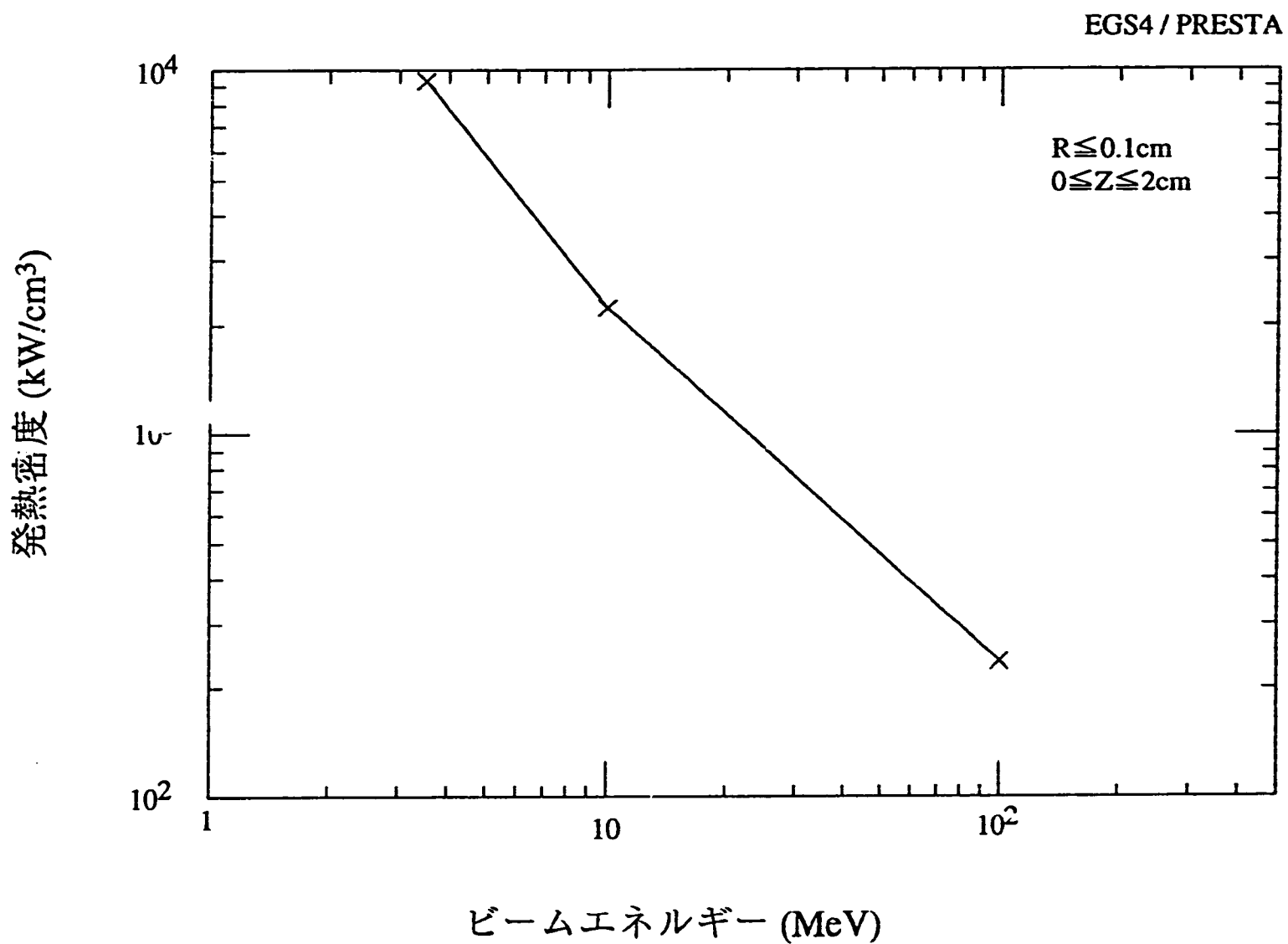


図3-5 銅中での最大発熱密度
(ビーム電力100kW入射時)



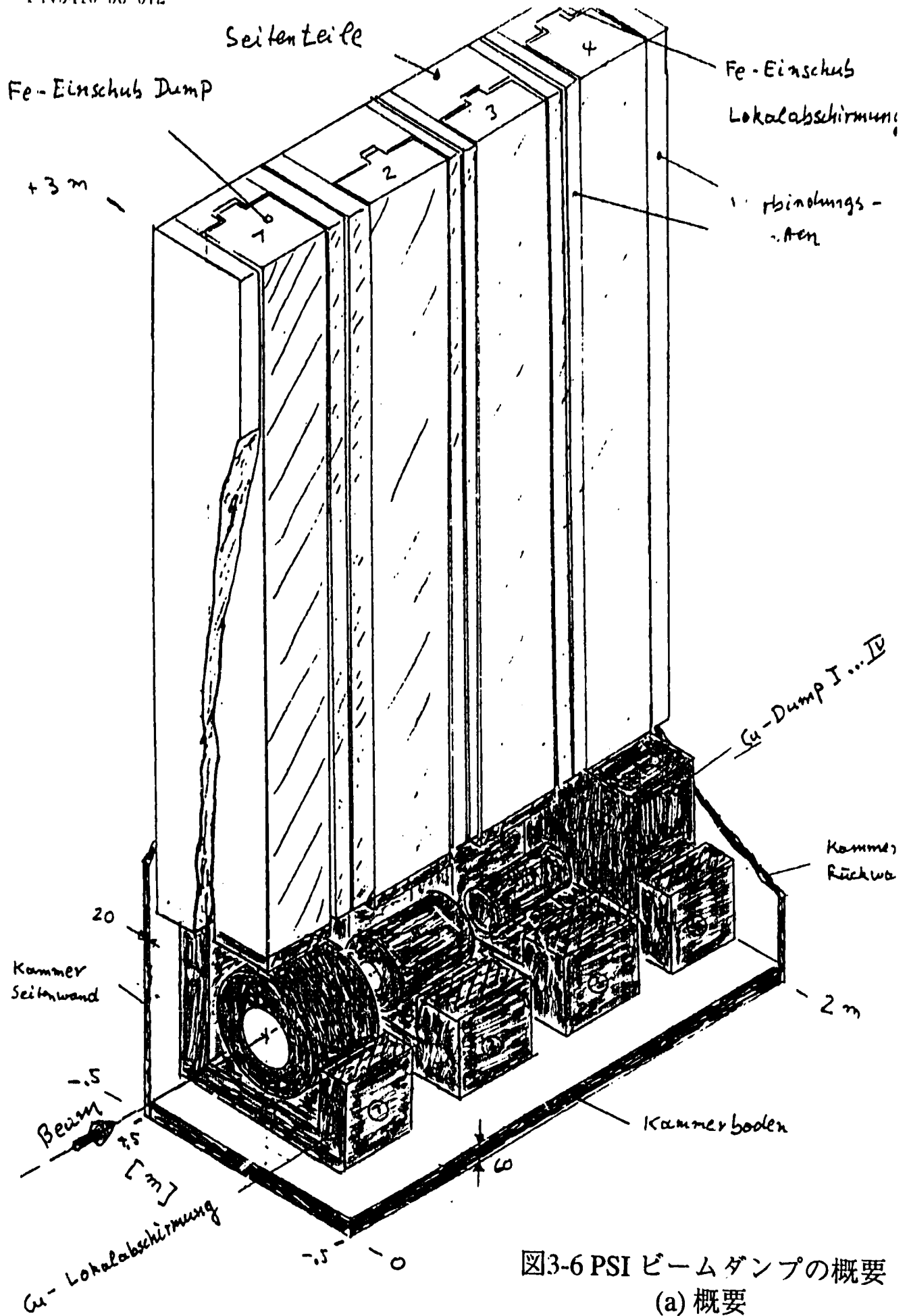
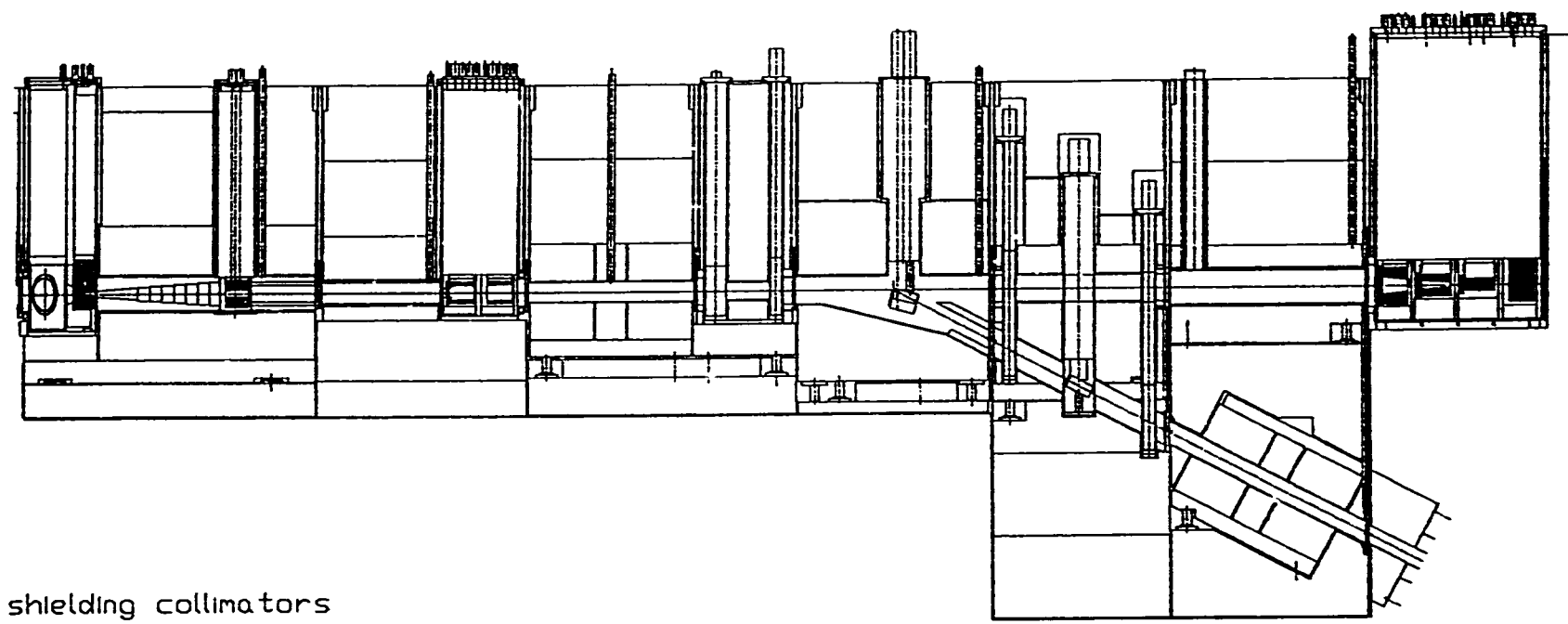


図3-6 PSI ビームダンプの概要
(a) 概要



shielding collimators

72 KW (p,n)
45 KW (therm.rad) 38 KW

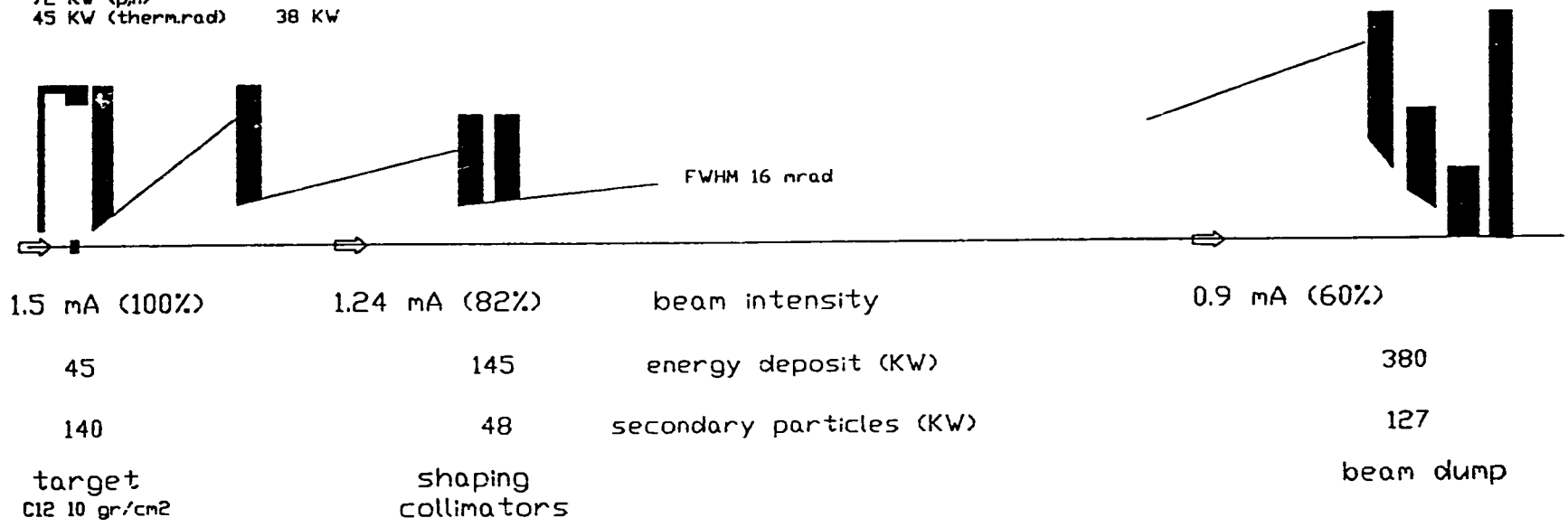


図3-6 PSI ビームダンプの概要
(b) ビームライン

図3-6 PSI ビームダンプの概要
(c) モジュール正面(その1)

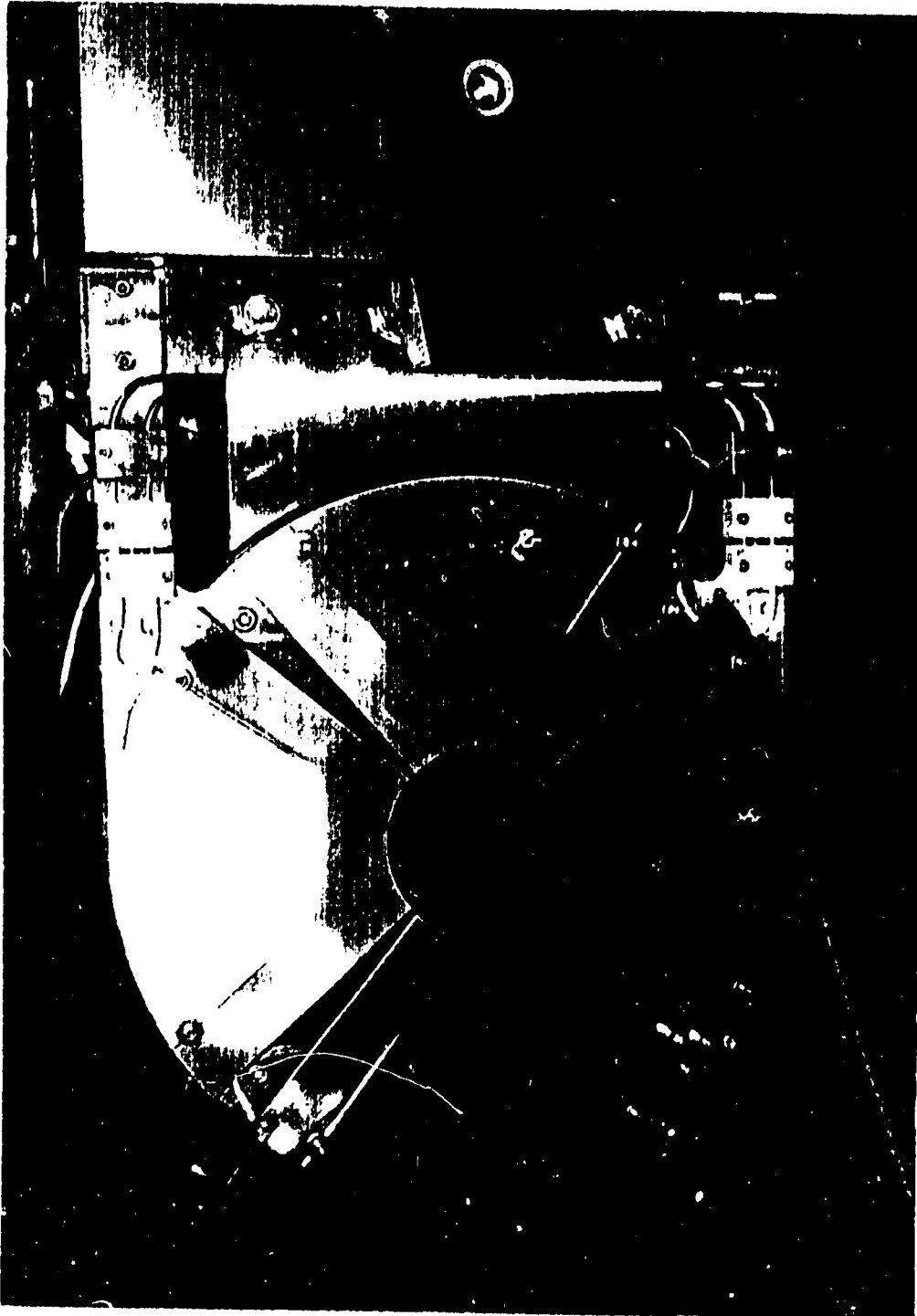


図3-6 PSI ビームダンプの概要
(d) モジュール正面(その2)

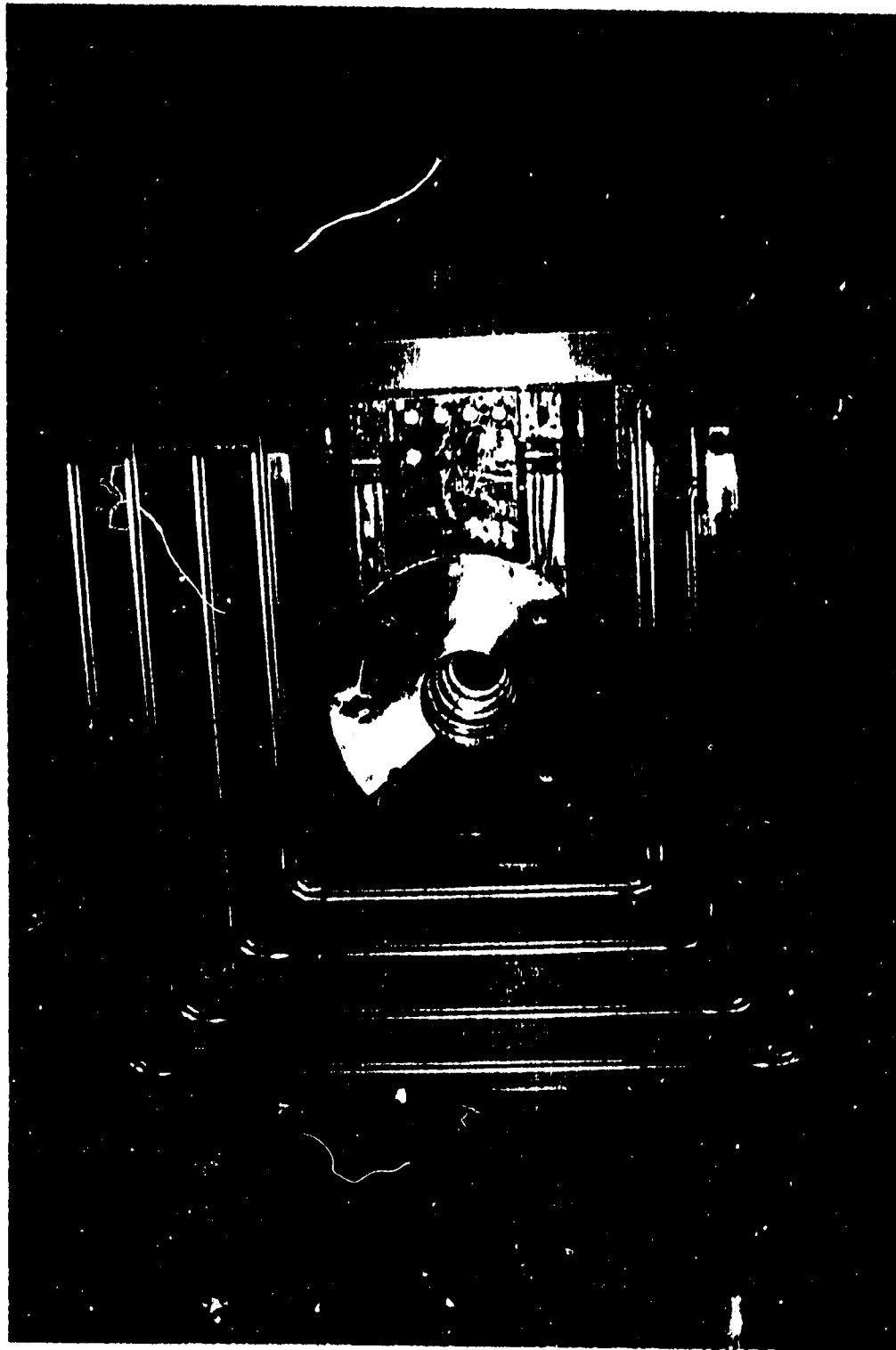
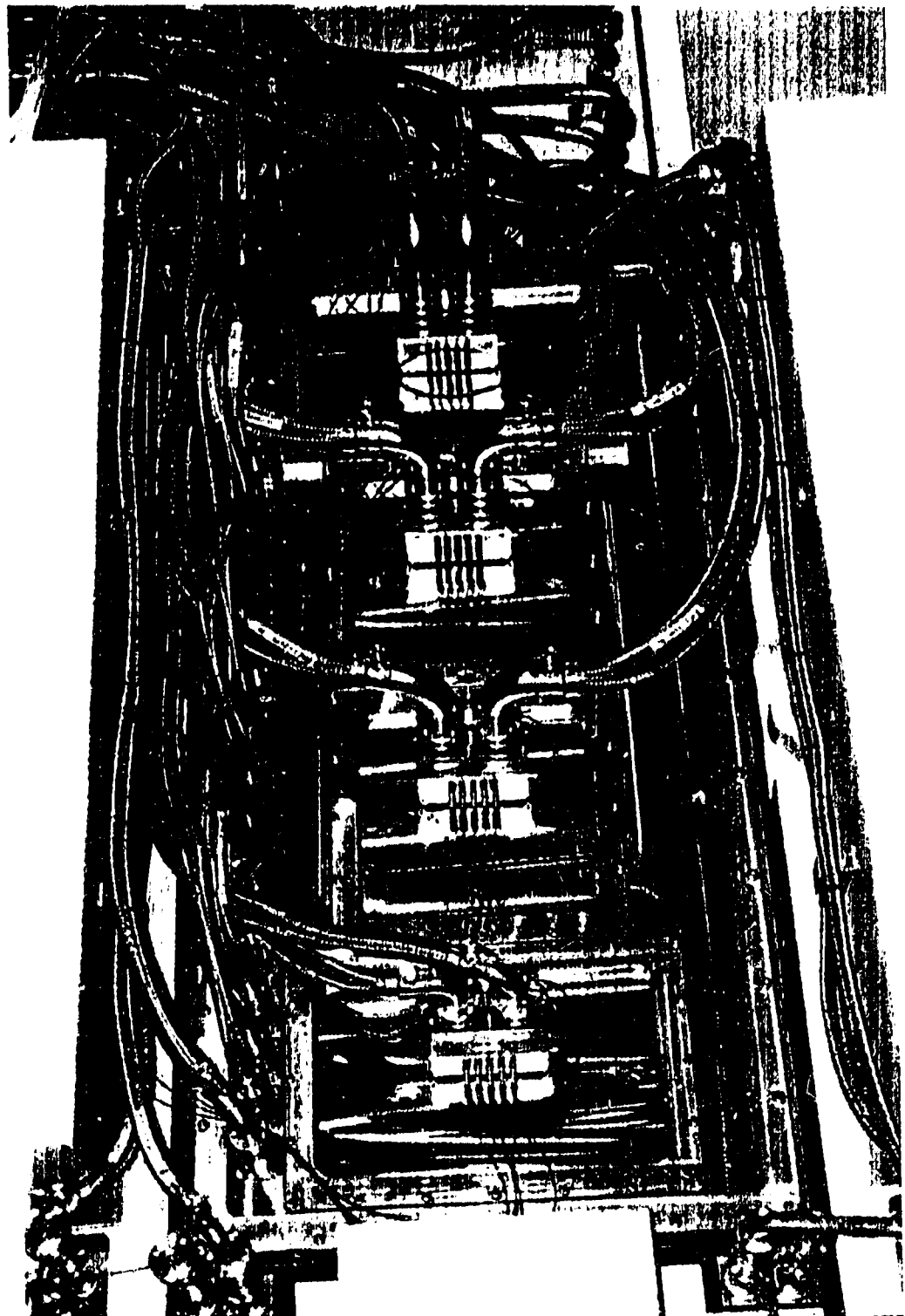
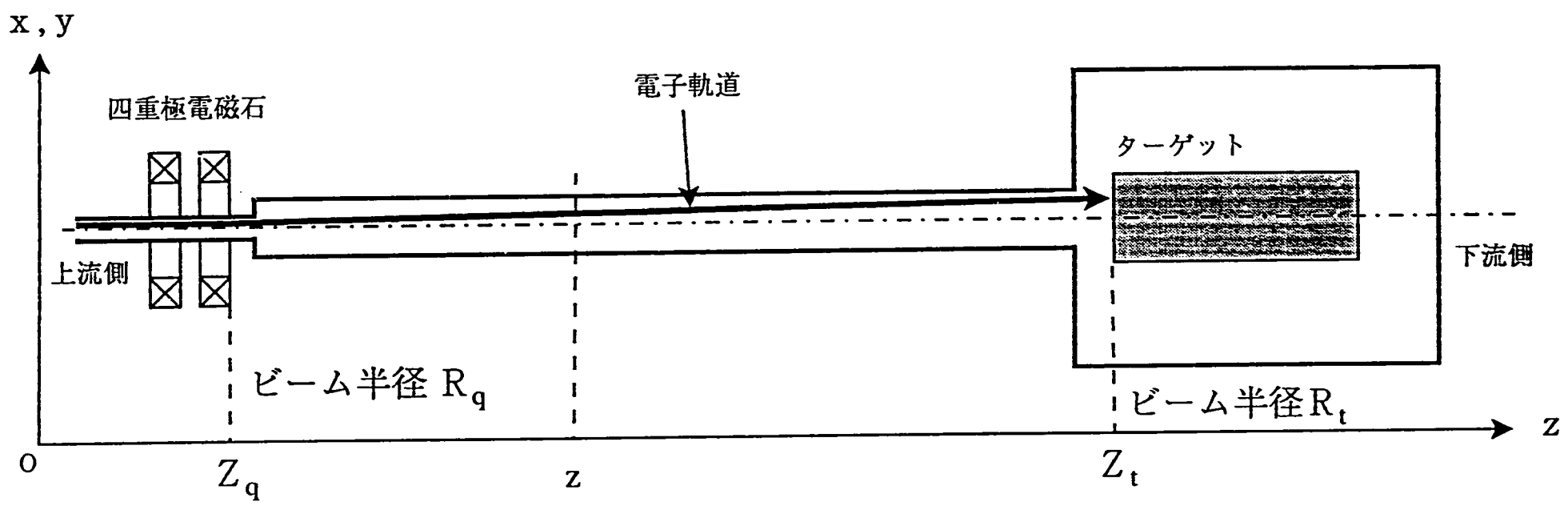


図3-6 PSI ビームダンプの概要
(e) 支柱上部





平面 z の断面図

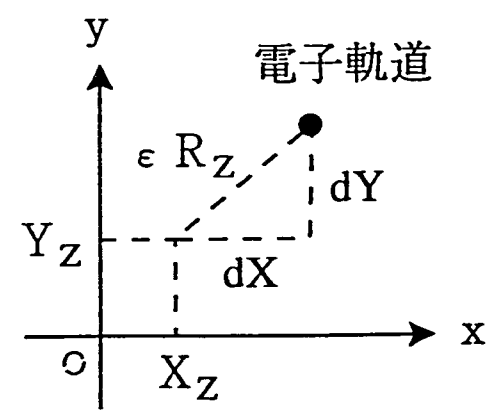


図4-1 電子軌道の直線近似方法

図4-2 出発点のxy座標
(Pencil Beam Spot)

(i) $(l,m,n)=(-0.817,-0.408,0.408)$

EGS4/PRESTA

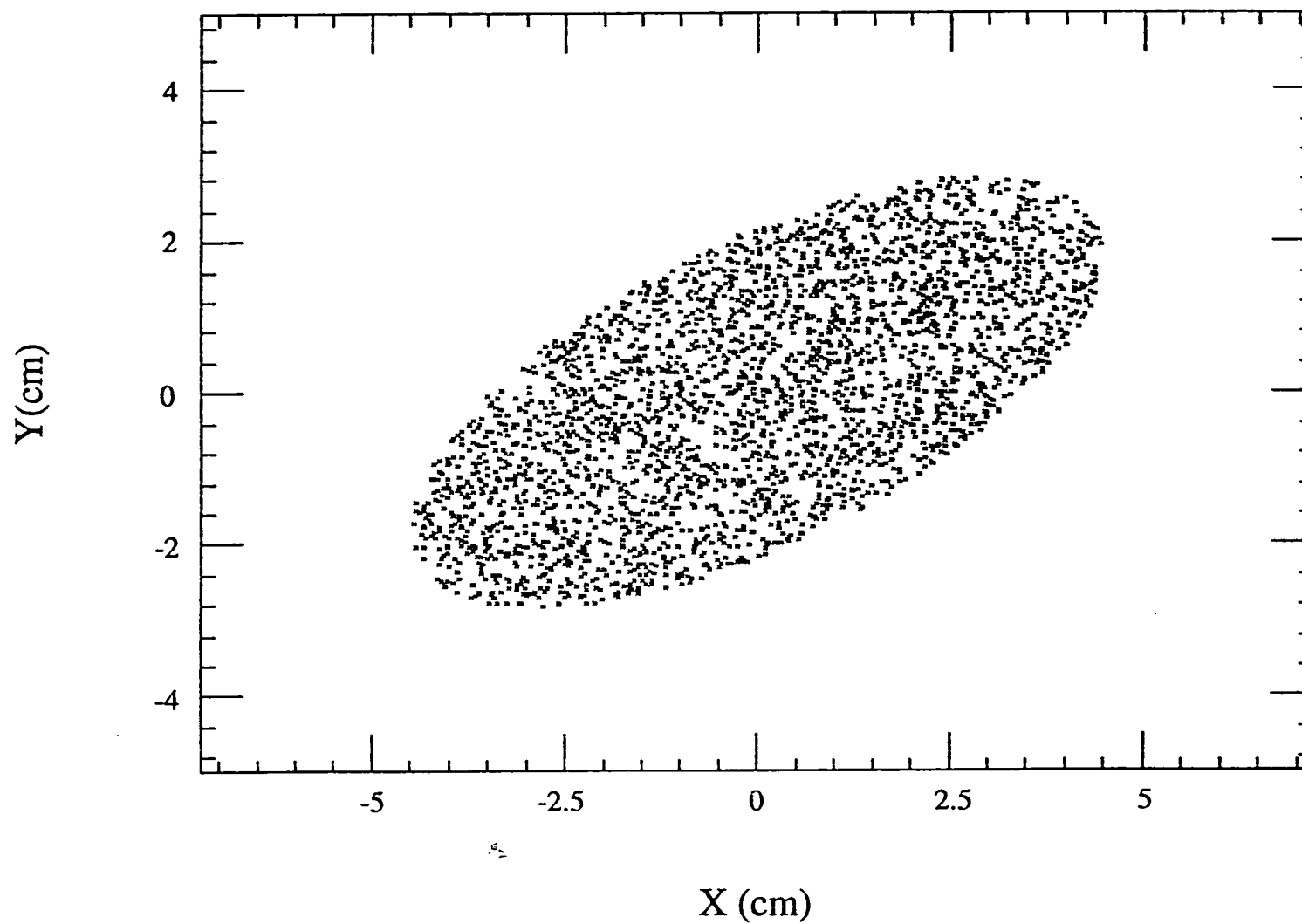


図4-2 出発点のxy座標
(Pencil Beam Spot)

(ii) $(l,m,n)=(0,-0.707,0.707)$

EGS4 / PRESTA

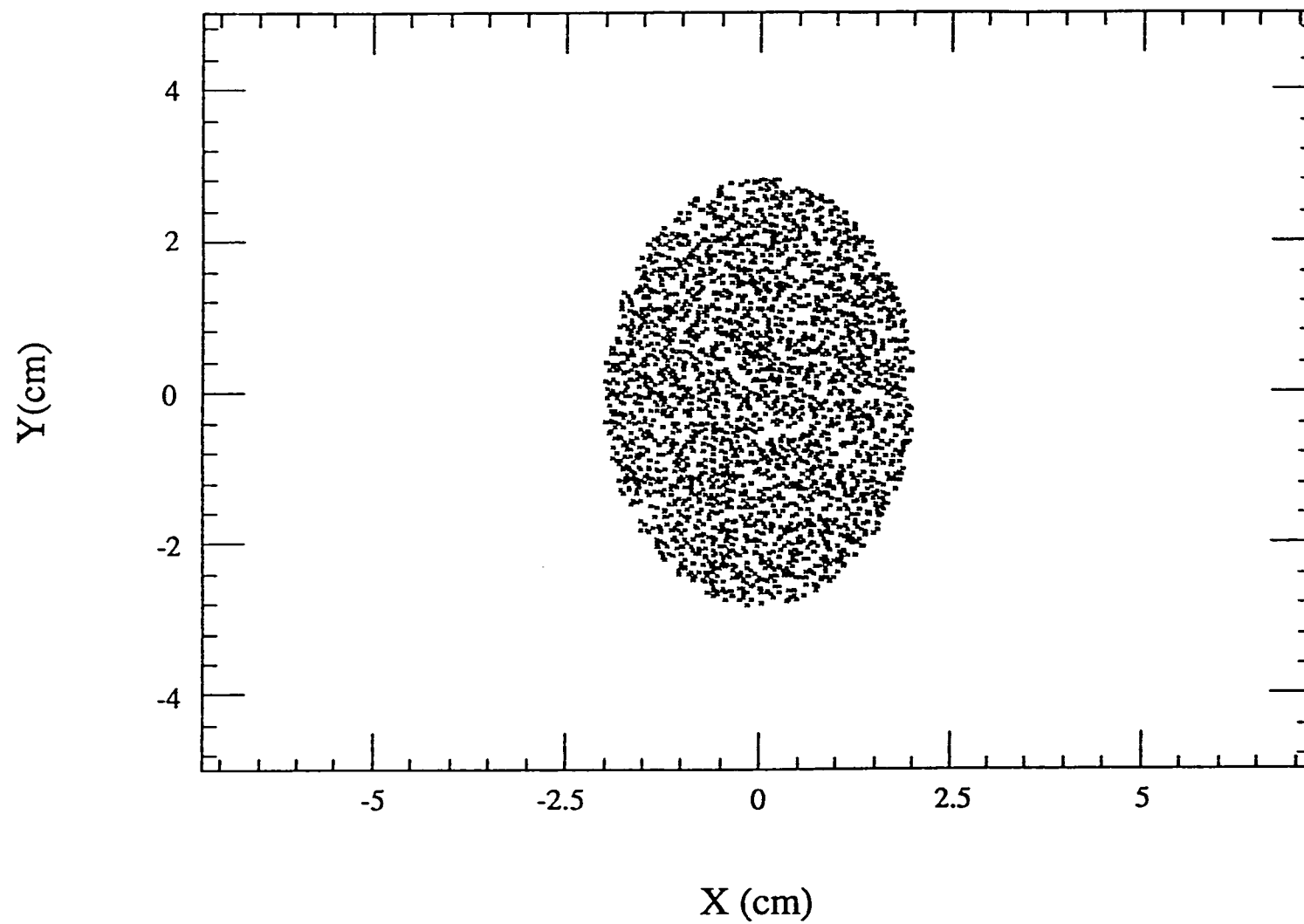


図4-2 出発点のxy座標
(Pencil Beam Spot)

(iii) $(l,m,n)=(-0.707,0,0.707)$

EGS4 / PRESTA

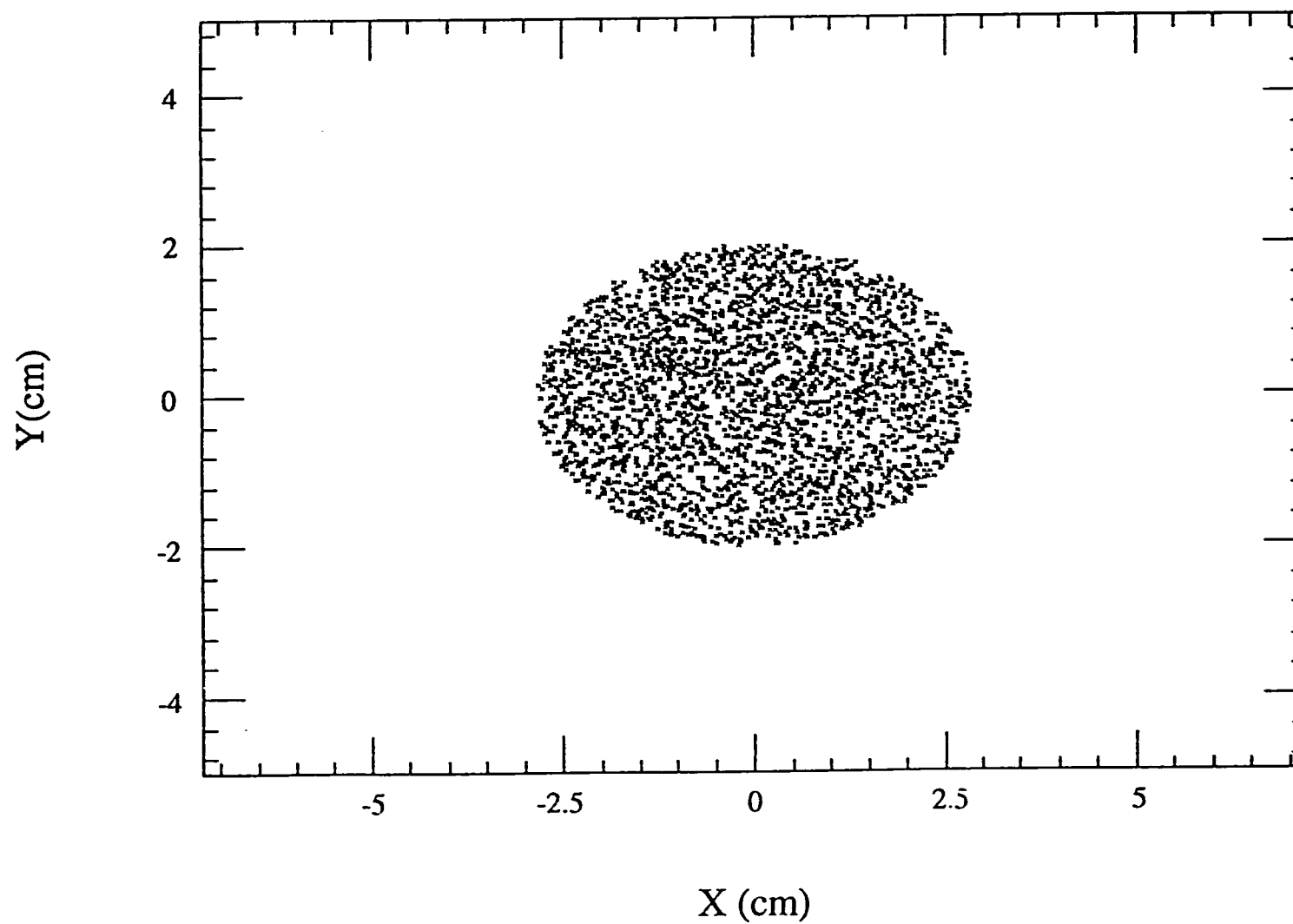


図4-3 出発点のxy座標
(Gauss Beam Spot)

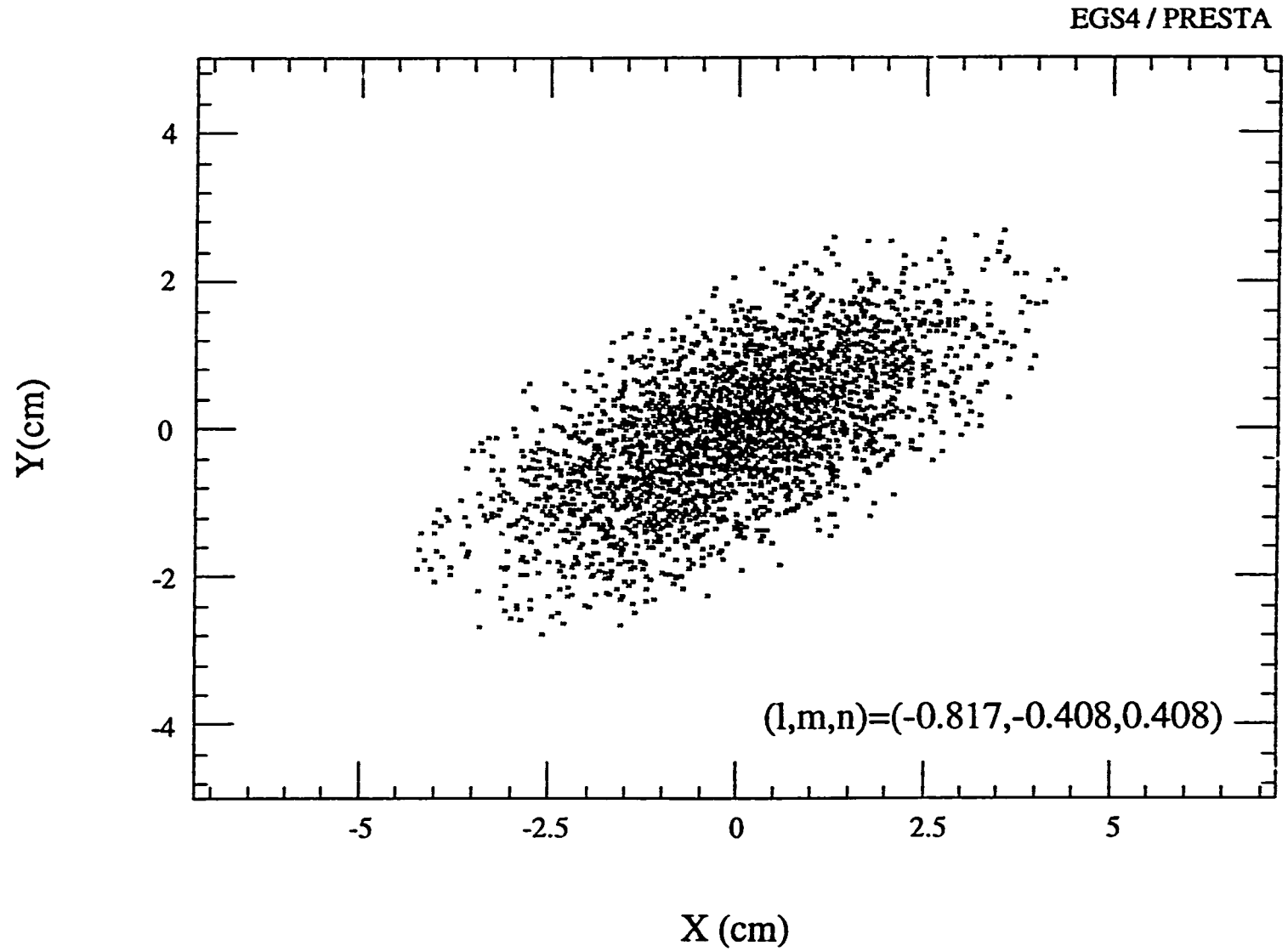


図 4-4 内部発熱による温度分布(1)

(a) メッシュ

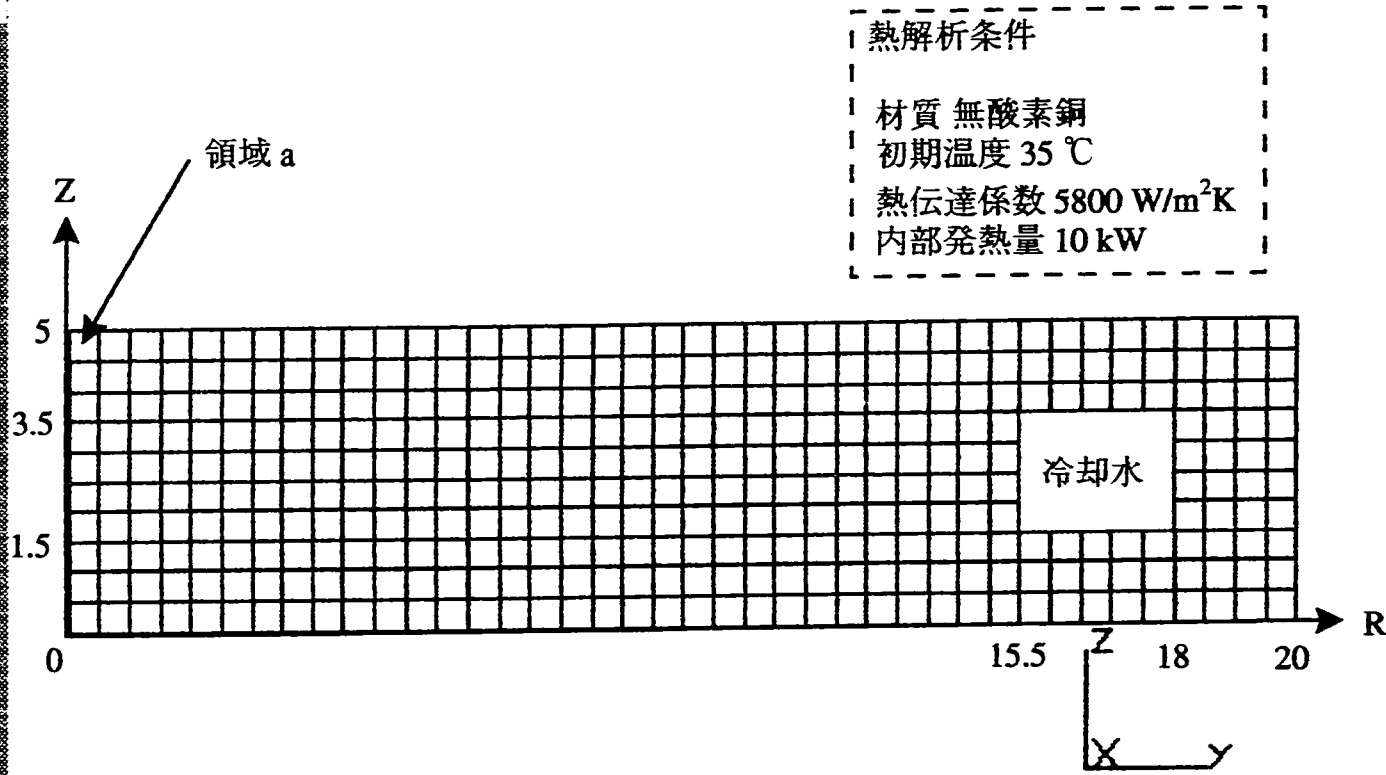
◆ALGOR+D
 MAIN MENU
 Add
 Modify
 Control
 File
 Inquiry
 Settings

 Exit Mesh
 Transfer
 Render

 Quit

 [Esc]

 Help Undo
 Stop ASnap
 Save BSWrite
 Print BMenu
 Quit DBrow



Superdraw II 3.18 -3H 21-MAY-93 Copyright (c) 1987-1993 Algor Inc.
 F2= / S-H 500 V0= 5 L=0 00000 C X=0.00000 Y=0.0100 Z=0.0225

図 4-4 内部発熱による温度分布(1)

(b) 温度分布

ALGOR

熱解析条件

材質 無酸素銅

初期温度 35 °C

熱伝達係数 5800 W/m²K

内部発熱量 10 kW

発熱密度

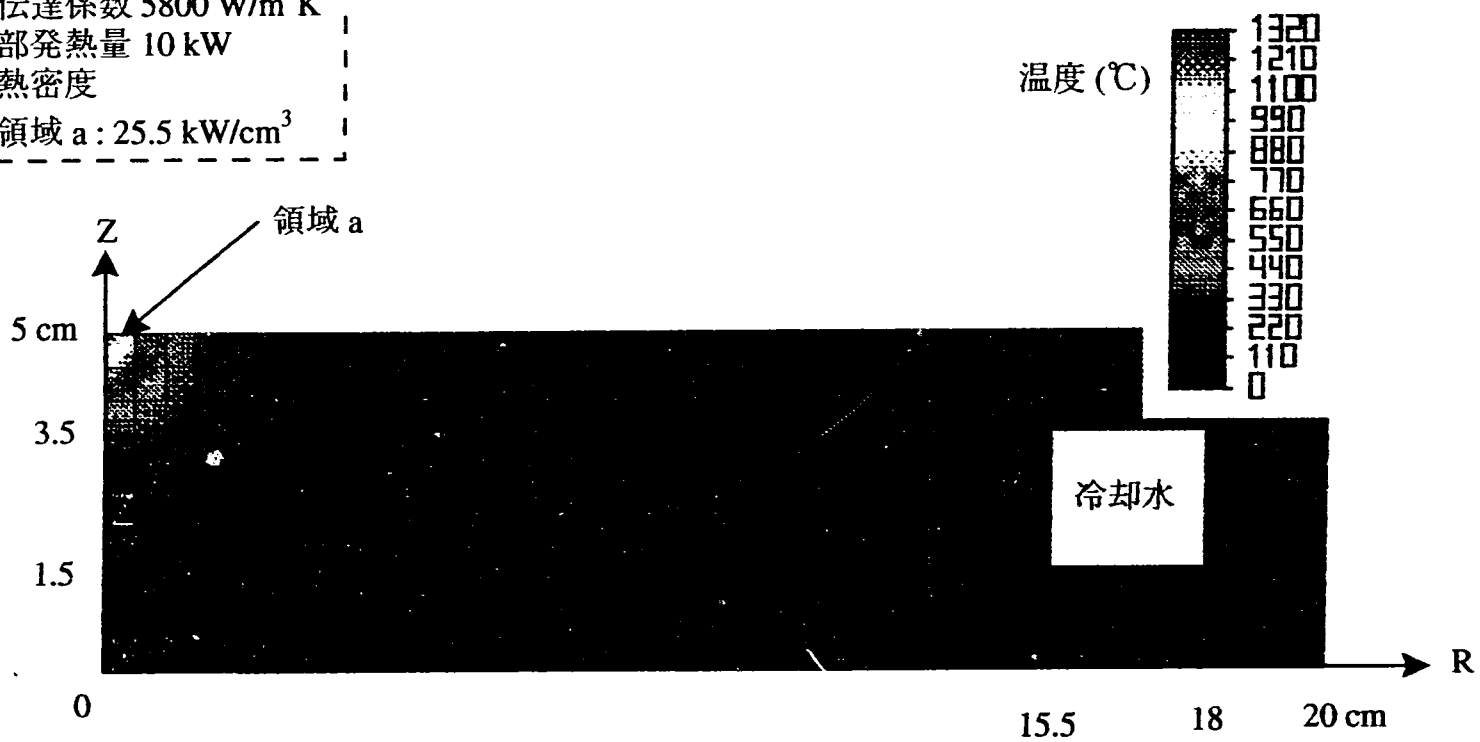
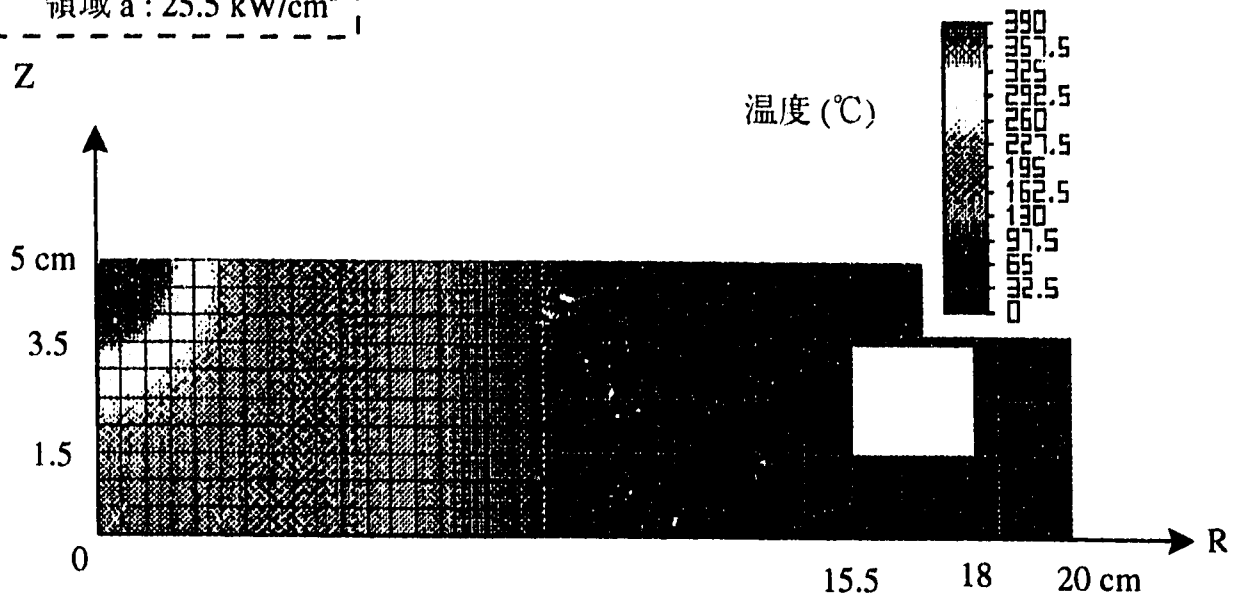
領域 a : 25.5 kW/cm³

図 4-5 内部発熱による温度分布(2)

(i) $0 \leq R \leq 20\text{cm}$

熱解析条件
 内部発熱量 10 kW
 発熱密度
 領域 a : 25.5 kW/cm^3



(ii) $2 \leq R \leq 20\text{cm}$

熱解析条件
 内部発熱量 10 kW
 発熱密度
 領域 a : 2.83 kW/cm^3

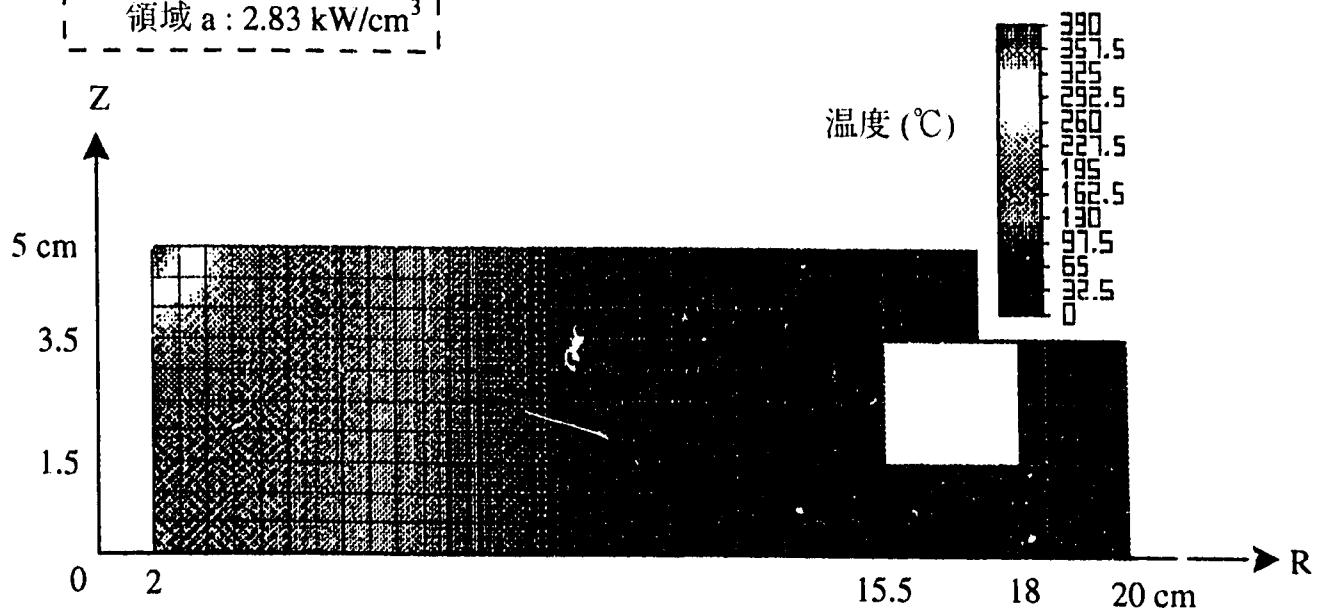
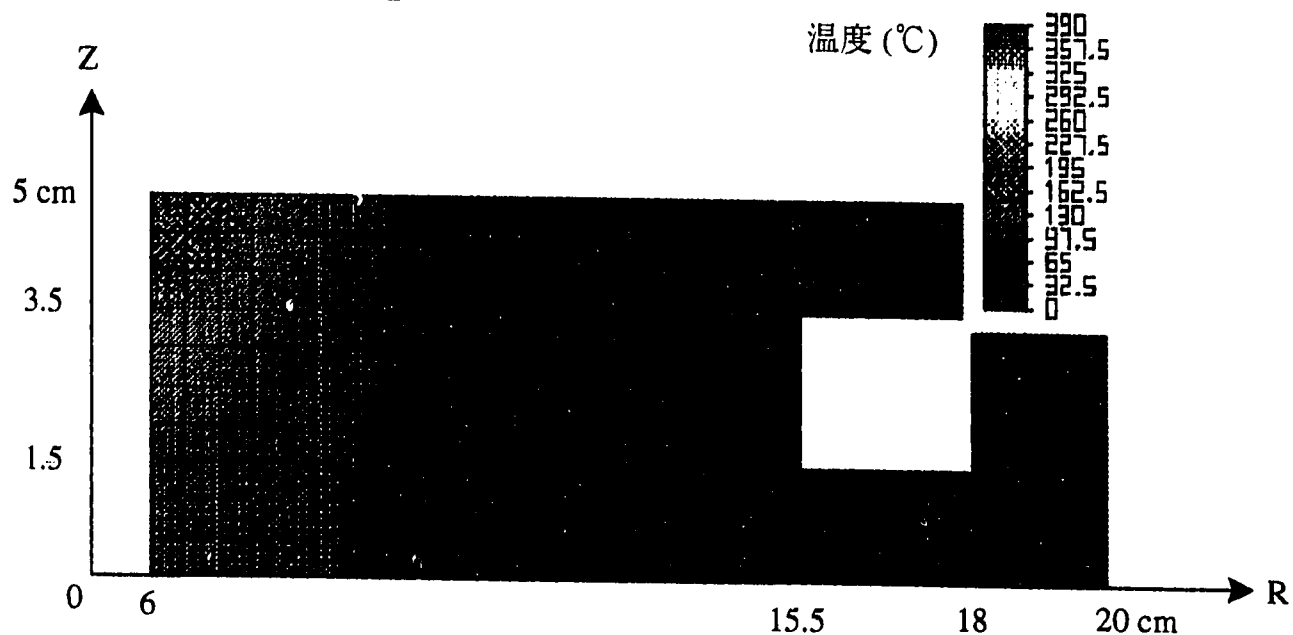


図 4-5 内部発熱による温度分布(2)

(iii) $6 \leq R \leq 20\text{cm}$

熱解析条件
 内部発熱量 10 kW
 発熱密度
 領域 a : 1.02 kW/cm^3



(iv) $10 \leq R \leq 20\text{cm}$

熱解析条件
 内部発熱量 10 kW
 発熱密度
 領域 a : 0.62 kW/cm^3

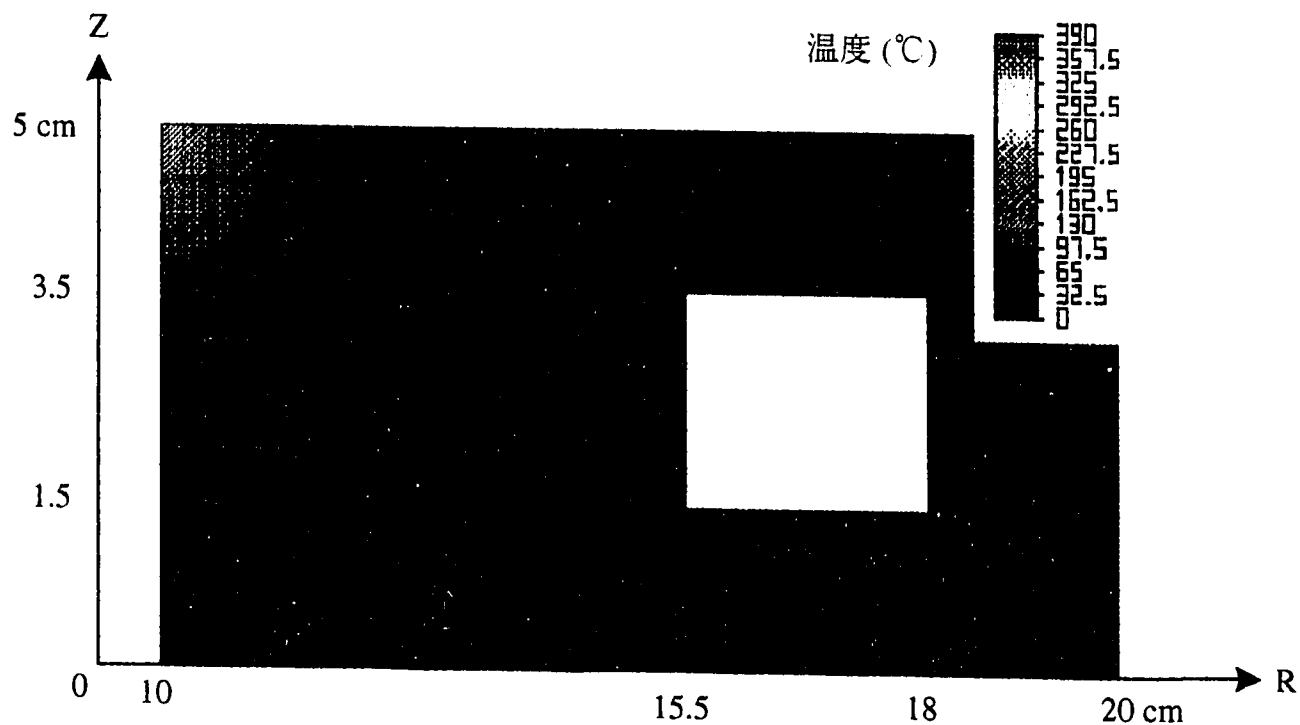


図 4-5 内部発熱による温度分布(2)

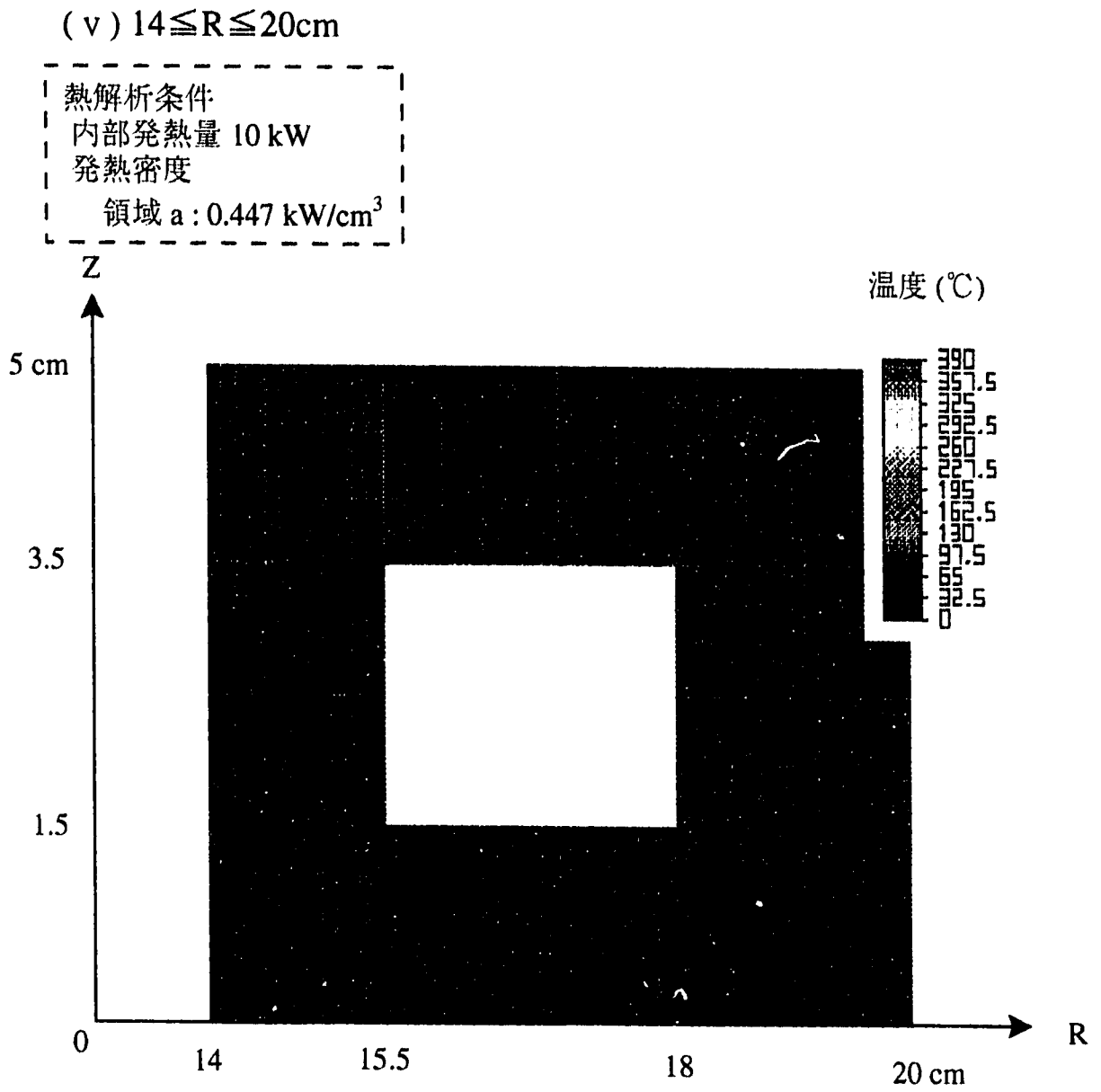


図4-6 中空状金属円板の温度分布
(内部発熱10kW)

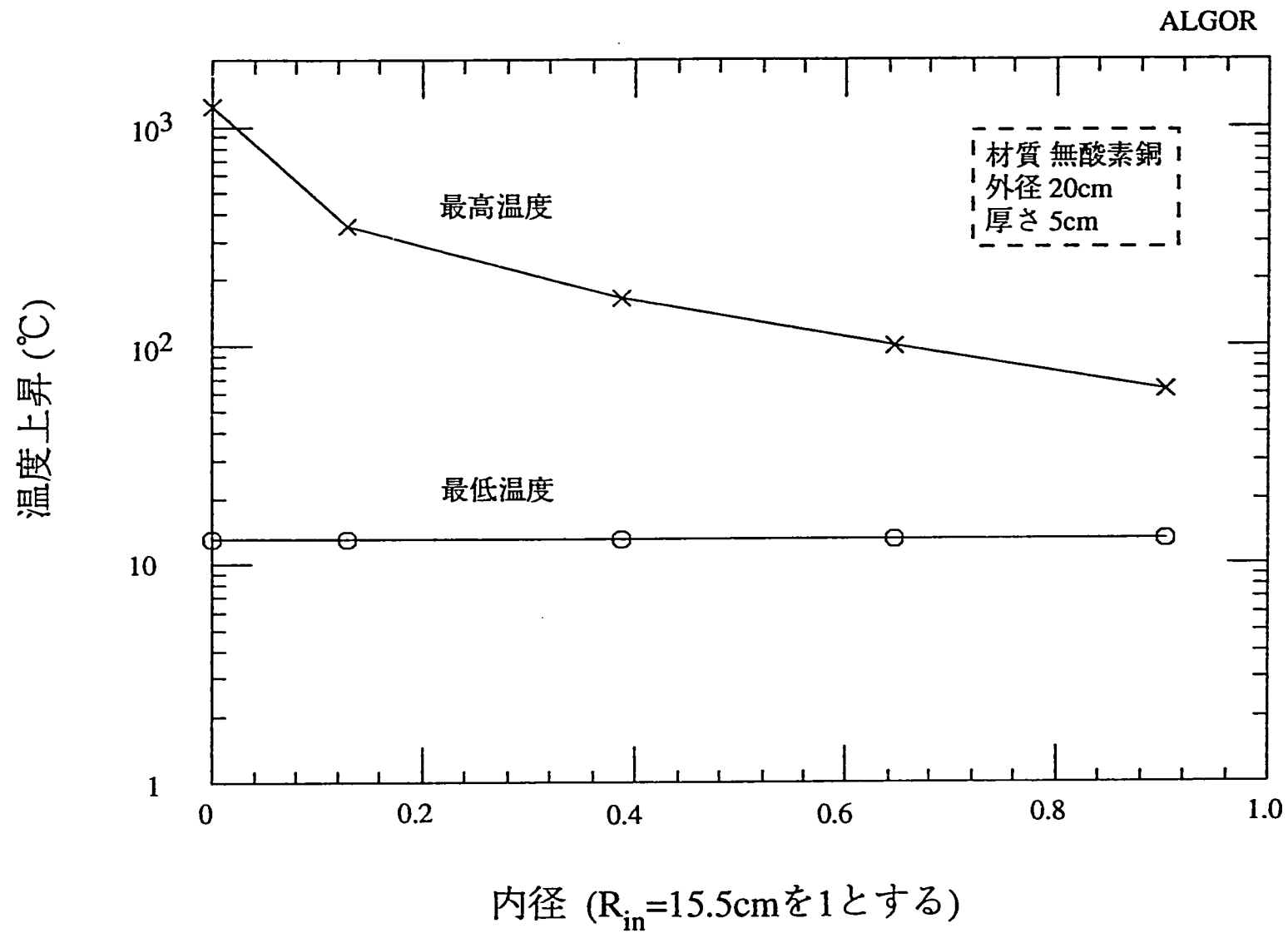


図4-7 ターゲット基本構造(断面図)

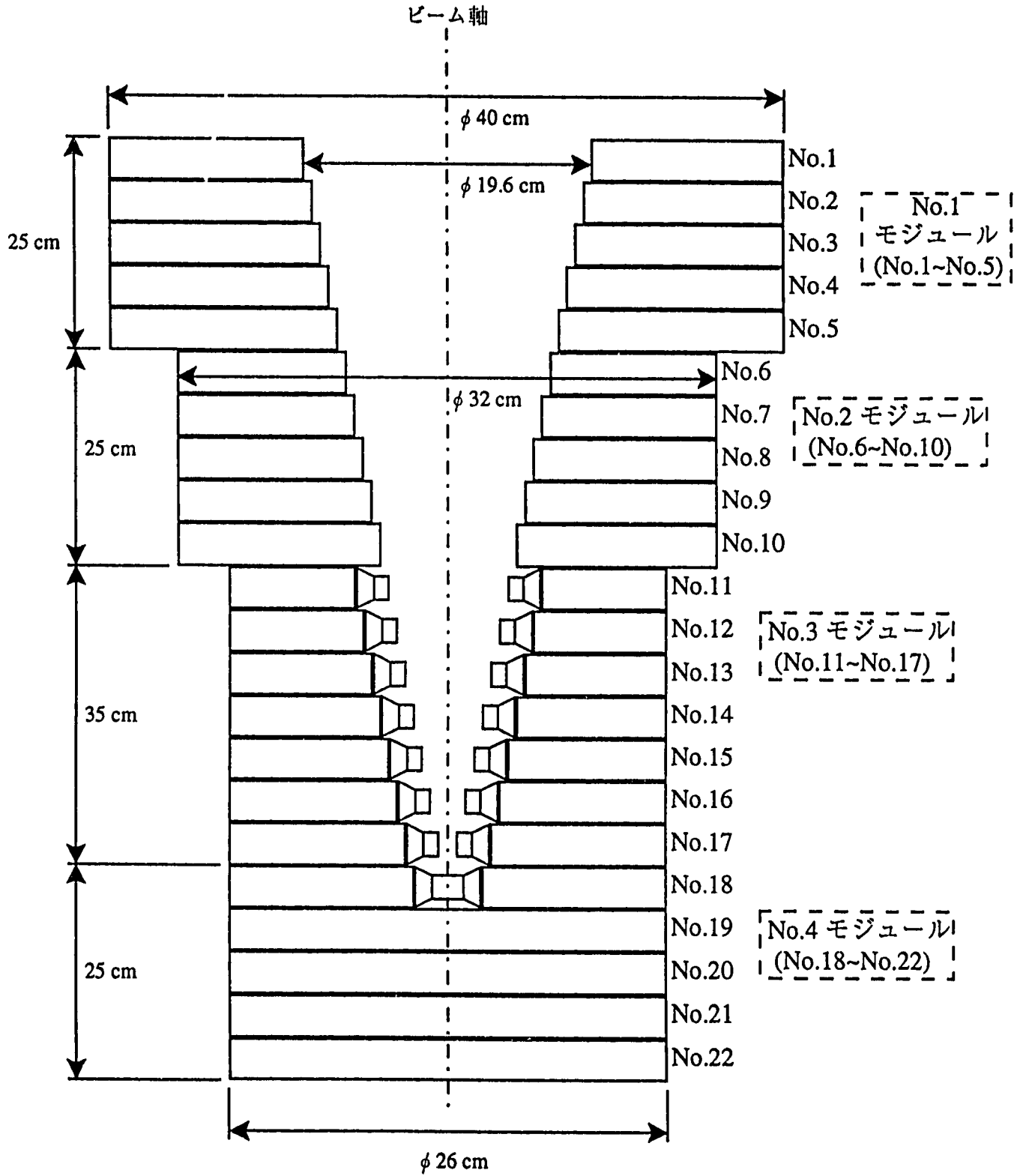


図4-8 内部発熱領域の定義 (軸対称)

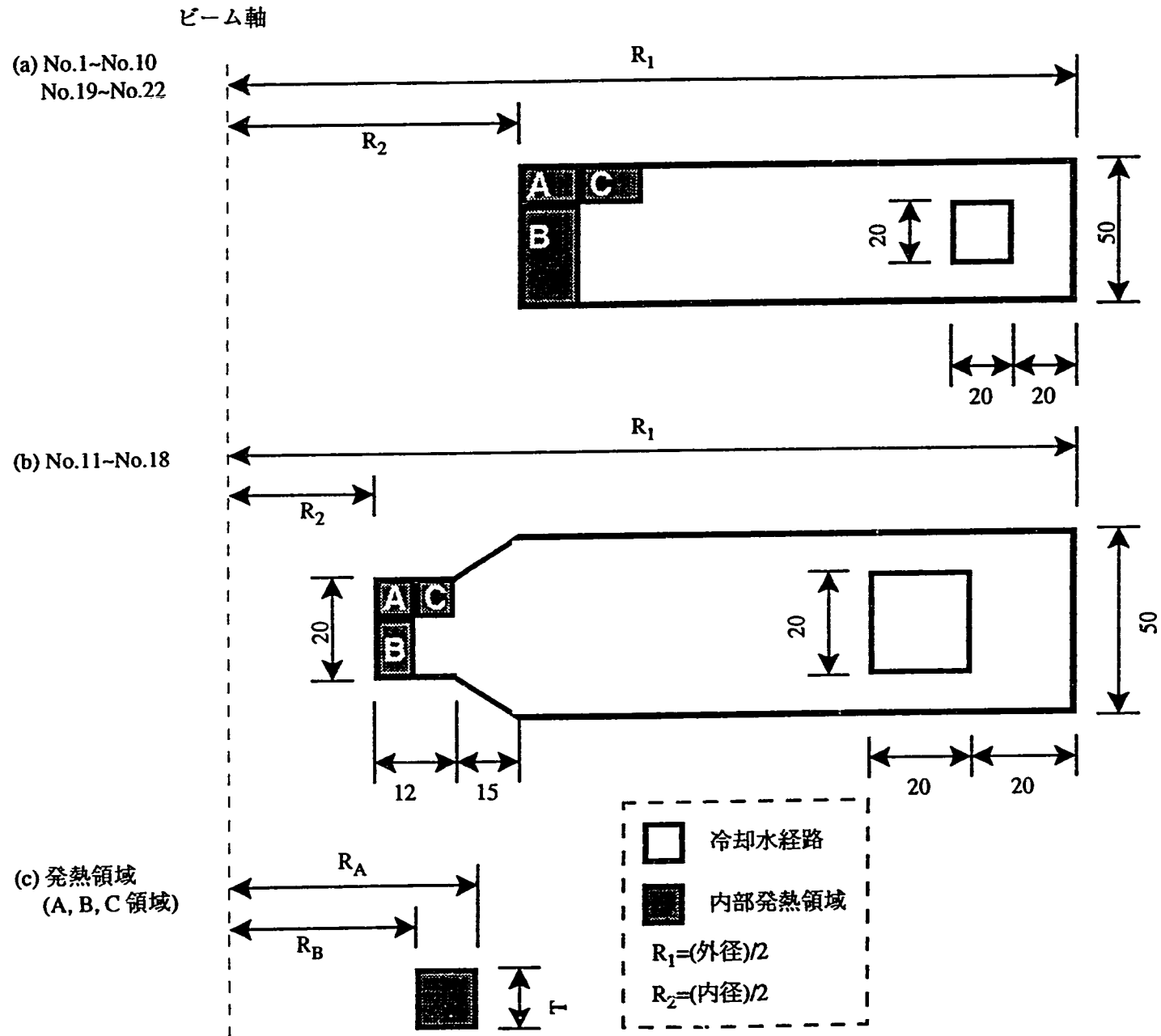


図 4-9 金属円板(No.10)の温度分布

EGS4/PRESTA & ALGOR

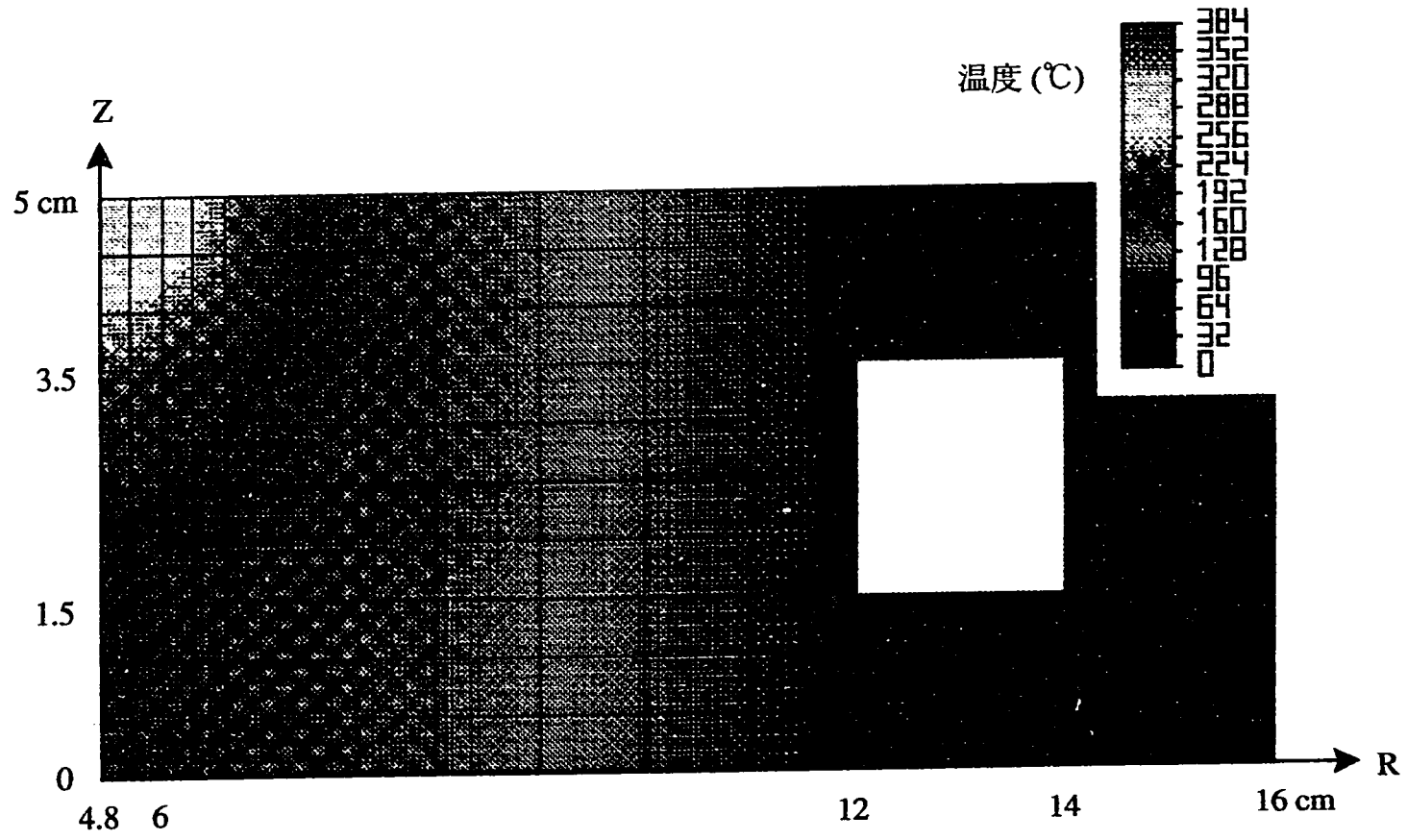


図 4-10 金属円板(No.13)の温度分布

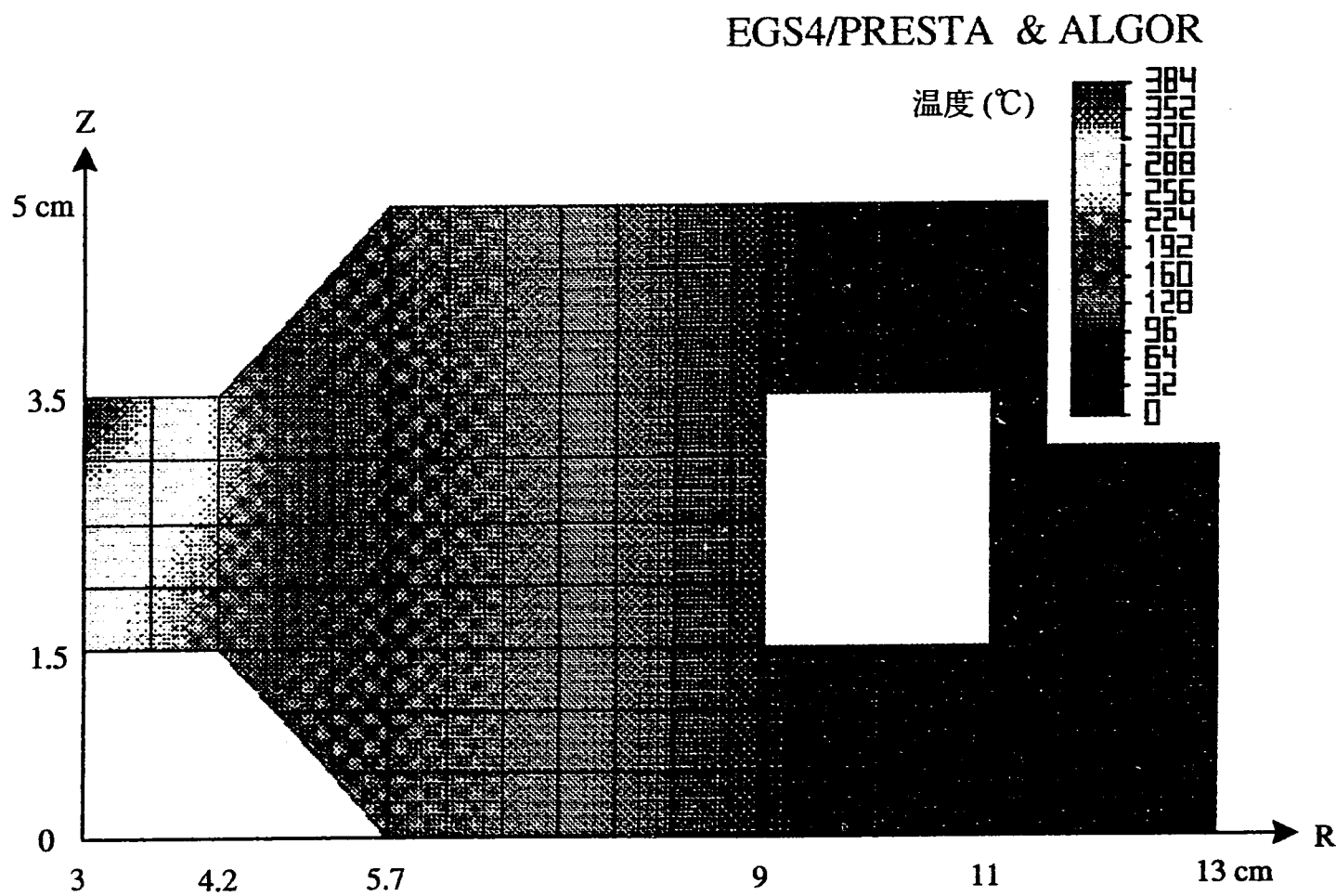


図4-11 γ 線の散乱角とエネルギーの関係
(ターゲット)

EGS4/PRESTA

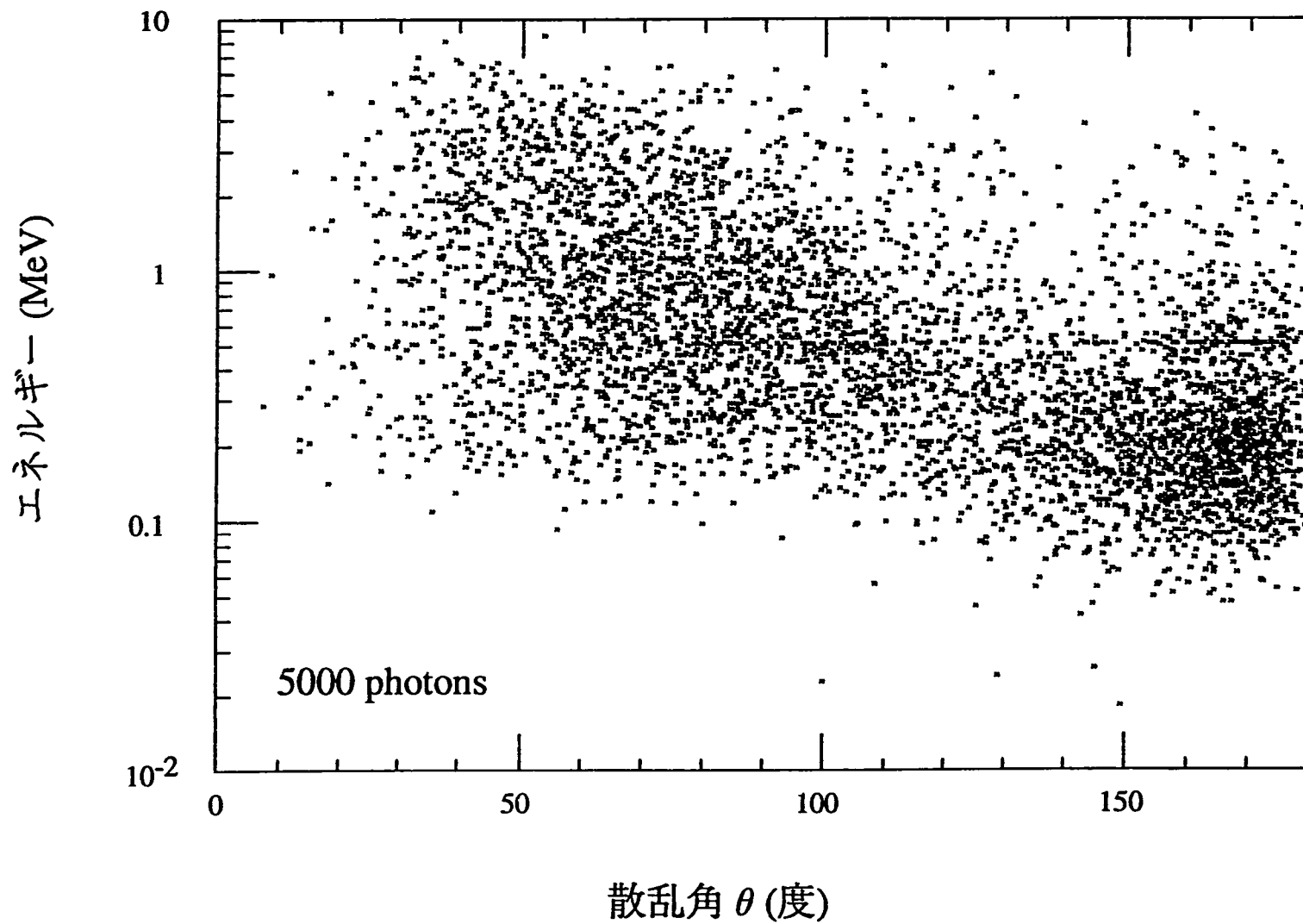


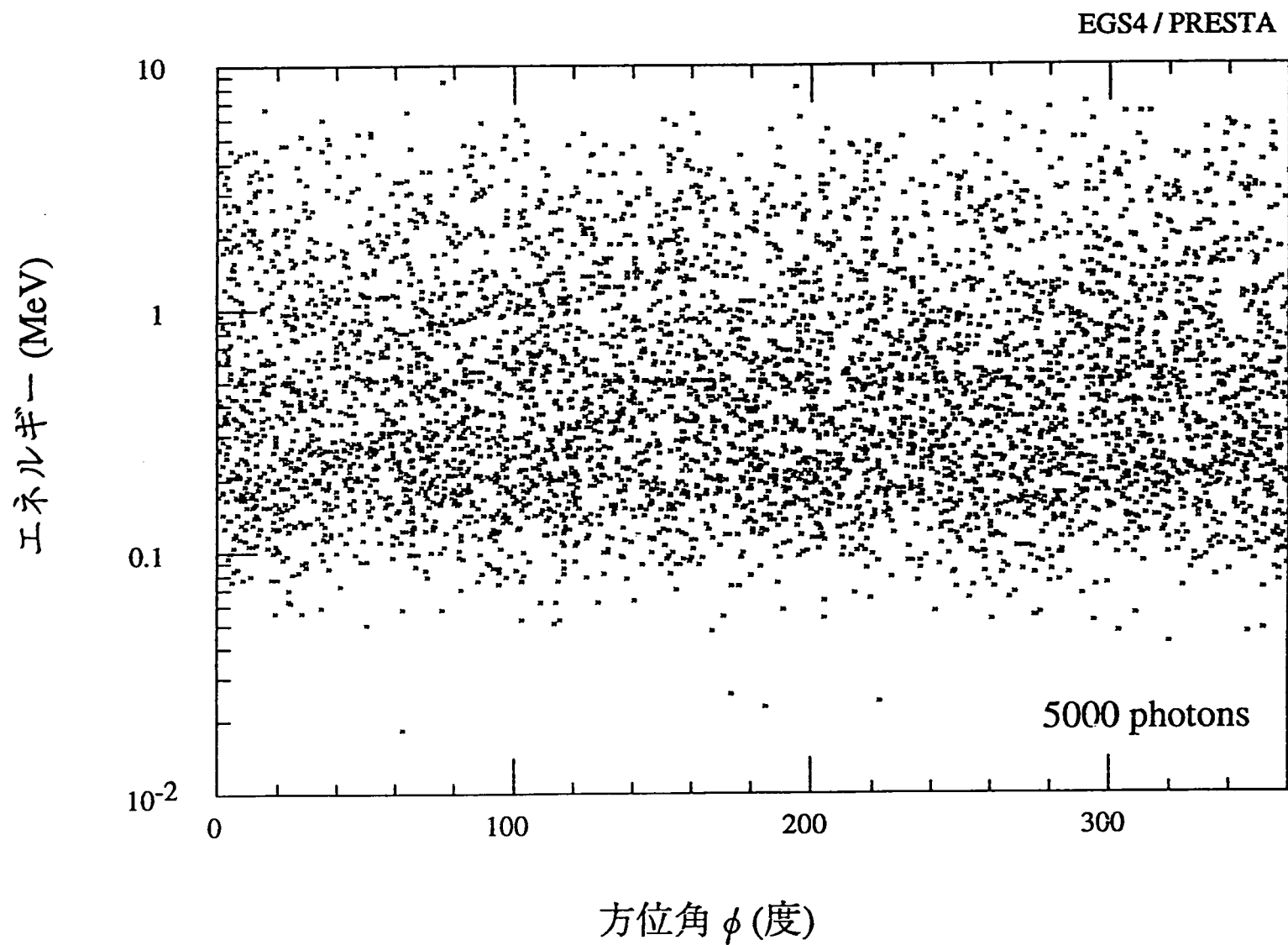
図4-12 γ 線の方位角とエネルギーの関係
(ターゲット)

図4-13 γ 線のエネルギー分布
(ターゲット)