

大電力電子線用ビームダンプの開発(2)

—設計・製作・初期性能評価—
(研究報告書)

2000年12月



核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

大電力電子線用ビームダンプの開発 (2)

— 設計・製作・初期性能評価 —

(研究報告書)

武井 早憲^{*1}, 武田 靖^{*2}

要 旨

量子工学試験施設に設置された電子線加速器では、核分裂生成物を γ 線により核変換させるために必要な大電流電子線を効率良く安定に加速するための要素技術を開発してきた。

本報告書では、低エネルギー・大電流電子線 (加速エネルギー 10 MeV, 平均ビーム電流 20 mA) 用ビームダンプの設計, 製作, 及び初期性能評価についてまとめる。このような電子線を安全に吸収し, さらに電子線の状態をリアルタイムで把握するために, ビームダンプとしてリング・ディスク (RD) 構造を採用した。また, 設計における熱応力解析の結果, RD 構造のビームダンプでは出力 200 kW の電子線を吸収した時, 温度上昇の最大値は約 343 °C であった。また, 電子線から生成した γ 線の空気吸収線量率は, 全方向で平均して 28.9 Gy/h と予想された。

製作したビームダンプにビームエネルギー 7.0 MeV, 平均ビーム電流 0.84 mA の電子線を入射させ, その初期性能を評価した。この実験で得られたデータを解析した結果, 加速器からの電子線は完全に吸収されており, リングの温度上昇は設計値にほぼ一致していた。また, ビームダンプの中心から 1 m 離れた地点での 1 cm 線量当量率は計算コードからの予想値にほぼ近い値であった。特に, RD 構造のビームダンプでは, リングの温度分布から大電流電子線のプロファイルを直接測定できる可能性があることがわかった。

^{*1}大洗工学センター システム技術開発部 ビーム利用技術開発グループ

^{*2}スイス国立パウル・シェラー研究所 (元 動力炉・核燃料開発事業団 客員研究員)

The development of beam dump for high power electron beam (2)

— Design, Fabrication, Evaluation of Performance —

H. Takei^{*1}, Y. Takeda^{*2}

ABSTRACT

High current electron beams were required when transforming fission products with gamma-rays. Elemental technology to build a linac that can accelerate a high current beam in an efficient and stable manner, is being developed at the quantum technology development facility (QTF).

This paper presents the design and performance of a beam dump for a high current, low energy beam (20 mA of a 10 MeV electron beam). A ring and disk (RD) structure was adopted to analyze the condition of the beam in real-time, as well as to absorb the beam safely. The thermal and stress analysis showed that a 200 kW electron beam could be securely stopped. The highest temperature rise reached was approximately 343 degrees and the absorbed dose rate of gamma-rays generated in all directions from electrons was found to be 28.9 Gy/h, on average.

The performance of the beam dump was evaluated using a beam of 7.0 MeV and a mean current of 0.84 mA. The experimental results showed that the electrons transported from the accelerator were completely absorbed, and that the temperature rise of the ring corresponded to the pre-determined value. The 1 cm dose equivalent rate at a distance of 1 m from the center of the beam dump was also close to the predicted rate. In addition, the beam dump has the capability of measuring the profile of a high current electron beam directly from the temperature distributions of the rings.

^{*1}Beam Technology Development Group, System Engineering Division, Oarai Engineering Center

^{*2}Paul Scherrer Institut (Past guest researcher of PNC)

目次

要旨	i
英文要旨	ii
目次	iii
表リスト	v
図リスト	vii
第1章 はじめに	1
1.1 大電力電子線形加速器用ビームダンプの開発	1
1.2 概念設計におけるビームダンプの構造	2
第2章 設計のための数値計算	13
2.1 中空状金属円板の構造	13
2.2 熱伝導解析	15
2.3 熱応力解析	22
2.4 真空	29
2.5 放射線	35
第3章 設計・製作	99
3.1 設計	99
3.2 製作	99

第4章 初期性能評価	135
4.1 概要	135
4.2 加速器の運転状態	135
4.3 電流測定	136
4.4 ビームエネルギーの算出	137
4.5 金属円板の温度	138
4.6 1 cm 線量当量率の測定	140
4.7 真空度測定	143
4.8 四重極電磁石についての課題	144
第5章 まとめ	153
参考文献	155
付録A 概念設計書との対応	159
付録B 熱伝導方程式の解析解	161
B.1 はじめに	161
B.2 解析条件	162
B.3 昇温時の解析解	162
B.4 降温時の解析解	170
B.5 まとめ	171
付録C UNIX コマンド “runegs4”	181
付録D 冷却水流量の評価	185
付録E 絶縁パイプの補修	187
E.1 経緯	187
E.2 原因	187
E.3 対策	188

表リスト

表 1-1	JNC 加速器の基本パラメータ	2
表 2-1	計算コード ALGOR における定常熱伝導計算の条件	14
表 2-2	各中空状金属円板における温度	14
表 2-3	電子線入射条件	16
表 2-4	各モジュールの形状	16
表 2-5	各モジュールにおける電流値, 発熱量, 及び温度	18
表 2-6	金属円板 No.14 における発熱密度	19
表 2-7	一様加熱・一様冷却における計算条件 (計算コード ANSYS)	21
表 2-8	パルス加熱における計算条件 (計算コード ANSYS)	21
表 2-9	特定の時刻におけるパルス加熱と一様加熱の温度比較	22
表 2-10	無酸素銅の物性値	24
表 2-11	金属円板における冷却水の条件	27
表 2-12	無酸素銅における熱伝導率の温度依存性	27
表 2-13	計算コードの相違による温度分布の変化	27
表 2-14	各節点間を接続する配管の形状とコンダクタンス	33
表 2-15	部材からのガス放出速度	33
表 2-16	真空容器内にある部材の表面積	34
表 2-17	計算コード EGS4 の計算条件	36
表 2-18	計算コード EGS4 における標的の厚さと評価面半径の設定 (1)	37
表 2-19	制動輻射スペクトルの計算結果	37
表 2-20	計算コード EGS4 における標的の厚さと評価面半径の設定 (2)	38
表 2-21	銅標的でのエネルギー損失の計算結果	38
表 2-22	線量率評価における計算条件	40
表 2-23	鉛における軌道電子のエネルギー準位	40
表 2-24	各エネルギー区分における単位フルエンス率当たりの空気吸収線量率	42
表 2-25	ビームダンプ中心から 1 m 離れた地点での空気吸収線量率	42

表 2-26	特定の散乱角で平均した空気吸収線量率	43
表 2-27	計算コード EGS4 における冷却水経路の定義	47
表 2-28	水中における光子エネルギー損失	47
表 3-1	ビームダンプ設計条件	100
表 3-2	ビームダンプ決定事項	105
表 3-3	K 型及び SK 型熱電対の時間応答特性	117
表 3-4	温度測定系の仕様	119
表 3-5	非接触型電流モニターの仕様	120
表 3-6	圧力伝送器及びマスフローメーターの仕様	122
表 3-7	熱交換器ユニットの仕様	123
表 4-1	各モジュールにおける最大ビーム電流と発熱量	137
表 4-2	金属円板 No.14 に設置された熱電対の温度上昇	139
表 4-3	フィルムバッジ, TLD の仕様	141
表 4-4	線量計の場所と測定された 1 cm 線量当量	141
表 4-5	測定された 1 cm 線量当量率と計算コード EGS4 との比較	142
表 4-6	運転状態 (iv) におけるビームラインの真空度	143
表 4-7	配管ネットワークにより得られたガス量と節点 1 の真空度	143
表 A-1	概念設計書 [1] との対応	159
表 B-1	非定常熱伝導方程式 (B.4) の解析条件	162
表 B-2	$n = 36$ までの $y = f(x)$ の解	167
表 C-1	コマンド “runegs4” における各プロセスの内容	181
表 C-2	コマンド “runegs4” における各オプションの内容	182
表 C-3	コマンド “runegs4” で作成されるファイル一覧	182
表 D-1	温度 310 K における冷却水の物性値	185

図リスト

図 1-1	量子工学試験施設 鳥瞰図	7
図 1-2	計算コード EGS4 で得られた銅板での発熱密度	9
図 1-3	ビーム輸送系及び差動排気系に関する機器の配置	10
図 1-4	ビームダンプの断面図	11
図 2-1	計算コード ALGOR で設定した各中空状金属円板のメッシュ	49
図 2-2	計算コード ALGOR で得られた各中空状金属円板の温度分布	49
図 2-3	各金属円板の代表的な格子点における温度上昇	51
図 2-4	計算コード EGS4 で定義したビームダンプのモデル	52
図 2-5	計算コード EGS4 で定義したビームダンプのスケールモデル	53
図 2-6	中空状リングの断面と発熱領域の定義	54
図 2-7	各金属円板における温度上昇とエネルギー損失の関係	55
図 2-8	各金属円板における 1 kW 当たりの温度差	55
図 2-9	計算コード ALGOR で設定した金属円板 No.14 のメッシュ	57
図 2-10	計算コード ALGOR で得られた金属円板 No.14 の温度分布	57
図 2-11	金属円板 No.14 における半径方向の温度	59
図 2-12	金属円板 No.14 における平均温度	59
図 2-13	1 mm メッシュと 5 mm メッシュにおける発熱密度の相違	60
図 2-14	計算コード ALGOR で設定した評価用金属円板のメッシュ	60
図 2-15	計算コード ALGOR で求めた評価用金属円板の温度	61
図 2-16	1 mm メッシュと 5 mm メッシュにおける温度分布の相違	63
図 2-17	金属円板 No.14 における加熱時の温度変化 (1)	63
図 2-18	金属円板 No.14 における除熱時の温度変化	64
図 2-19	金属円板 No.14 における, 加熱時と除熱時の温度の和	64
図 2-20	金属円板 No.14 における加熱時の温度変化 (2)	65
図 2-21	特定の時刻における金属円板 No.14 の最高温度の比較	66
図 2-22	金属円板 No.14 における温度履歴の模式図	67

図 2-23 中空状金属円板における温度及び熱応力の解析解	67
図 2-24 弾性歪み範囲, 塑性歪み範囲, 及び全歪み範囲と疲労寿命関係の模式図	68
図 2-25 無酸素銅における塑性歪み範囲と疲労寿命の関係	68
図 2-26 無酸素銅における応力と歪みの関係	69
図 2-27 計算コード ANSYS で得られた金属円板 No.14 の温度分布	69
図 2-28 荷重ステップ 1 における金属円板 No.14 の変形	71
図 2-29 荷重ステップ 1 における金属円板 No.14 のミーゼス等価応力	71
図 2-30 荷重ステップ 2 における金属円板 No.14 の変形	73
図 2-31 荷重ステップ 2 における金属円板 No.14 のミーゼス等価応力	73
図 2-32 荷重サイクルによる M_1 点での半径方向の変位量	75
図 2-33 荷重ステップ 1 及び 2 における金属円板 No.14 のミーゼス等価歪み	77
図 2-34 図 2-33 のミーゼス等価歪み中の塑性歪み	79
図 2-35 $R=2.4$ cm における荷重負荷時 (荷重ステップ 1) のミーゼス等価歪み	81
図 2-36 $R=2.4$ cm における荷重除荷時 (荷重ステップ 2) のミーゼス等価歪み	81
図 2-37 節点 i と j を接続する配管の模式図	82
図 2-38 節点 i におけるガスの流れの模式図	82
図 2-39 ビームダンプ真空系をモデル化した配管のネットワーク図	83
図 2-40 室温におけるビームパイプ内の真空度	83
図 2-41 電子線照射によるビームパイプ内の真空度	84
図 2-42 散乱角 θ と方位角 ϕ の定義	85
図 2-43 典型的な散乱角 θ	86
図 2-44 標的からの制動輻射量	87
図 2-45 タングステン標的からの制動輻射量	89
図 2-46 銅標的でのエネルギー損失分布	90
図 2-47 ビームダンプから発生する光子のエネルギー, 散乱角, 及び方位角の関係 (1)	91
図 2-48 ビームダンプから発生する光子のエネルギー, 散乱角, 及び方位角の関係 (2)	92
図 2-49 ビームダンプから発生する光子のエネルギー, 散乱角, 及び方位角の関係 (3)	93

図 2-50	ビームダンプから発生する光子のエネルギー分布 (1)	94
図 2-51	ビームダンプから発生する光子のエネルギー分布 (2)	95
図 2-52	ビームダンプから発生する光子のエネルギー分布 (3)	96
図 2-53	単位フルエンス率当たりの空気吸収線量率と 1 cm 線量当量率	97
図 2-54	重金属標的に生成する X 線による空気吸収線量率	97
図 3-1	ビームダンプの構造	125
図 3-2	各円板に設置された熱電対の半径方向の位置	133
図 3-3	各円板に設置された熱電対の方位角方向の位置	134
図 4-1	ビーム位置モニター BPM で測定された電子線の中心位置 (r, ϕ)	145
図 4-2	試験開始後 163 分後における電子線 1 パルスの波形	146
図 4-3	各運転状態を代表する時刻における各モジュールの最大ビーム電流	147
図 4-4	運転状態 (iv) で測定された各モジュールの平均ビーム電流と発熱量の関係	148
図 4-5	加速器停止直後における円板 No.14 の温度変化	148
図 4-6	ビームダンプ試験における円板の温度変化	148
図 4-7	図 4-3 の各時刻に対応する円板の温度分布	149
図 4-8	各測定点における線量計及び計算コード EGS4 から得られる 1 cm 線量当量率の比較	151
図 4-9	特定の散乱角で平均した空気吸収線量率 (金属円板, 真空容器, 遮蔽体)	151
図 B-1	解析解を求める中空状金属円板の形状	173
図 B-2	式 (B.32) で定義された関数 $y = f(x)$	173
図 B-3	式 (B.37) 及び式 (B.41) で定義された関数 $C_i \varphi_i(r)$	174
図 B-4	昇温時の温度 $\theta(r, t)$	174
図 B-5	特定の時刻における昇温時の温度分布	175
図 B-6	特定の位置における昇温時の温度変化 (1)	175
図 B-7	特定の位置における昇温時の温度変化 (2)	176
図 B-8	$r = r_1$ における昇温時の温度変化	176
図 B-9	$t = 0.004$ における温度分布	177
図 B-10	降温時の温度 $\theta(r, t)$	177

図 B-11 特定の時刻における降温時の温度分布	178
図 B-12 特定の位置における降温時の温度変化 (1)	178
図 B-13 特定の位置における降温時の温度変化 (2)	179
図 E-1 真空リーク試験により漏洩が検出された絶縁パイプの断面図	189
図 E-2 接合部の模式図	190
図 E-3 電子顕微鏡による接合部の断面図	191
図 E-4 拡大した接合部の断面図	193
図 E-5 電子顕微鏡による Mo-Mn 層の写真	195
図 E-6 補修した絶縁パイプ	197

第1章 はじめに

1.1 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荷電粒子間の電磁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。

核燃料サイクル開発機構では、オメガ計画の一環として、高レベル放射性廃棄物の消滅処理を考えた、大電流線形加速器開発（以下、JNC 加速器と記す）を目的に、大電流化の要素技術開発を推進してきた。JNC 加速器を含む施設の鳥瞰図を図1-1に示す。また、JNC 加速器の基本パラメータを表1-1に示す。なお、1996年3月から9月まで実施した、入射部及び第一加速管のみを用いた入射部試験における電子線の最大エネルギー（表中*印）は、3.5 MeV である。

JNC 加速器は、既存の加速器よりも平均ビーム電流で2桁程度高い電子線を加速するため、加速器を構成する各要素に対して既存の加速器にはない大電流化に対応できる技術を開発してきた。JNC 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、他の要素と同様に大電流化に対応した設備にする必要があった。特に、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しなければならなかった。

本報告書は、すでに概念設計についてまとめた文献 [1] に引き続き、ビームダンプの設計・製作について述べ、1999年1月から開始した性能確認試験で得られたビームダンプの初期性能についてまとめる。なお、文献 [1] で詳細に述べられなかった事項は、主に第2章に示すが、詳しい対応は付録 A に示す。

表 1-1 JNC 加速器の基本パラメータ

項目	設計値
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)
最大ビームエネルギー	10 MeV*
最大ビーム電流	100 mA
平均ビーム電流	0.001 ~ 20 mA
パルス幅	0.1 ~ 4 msec
繰り返し	0.1 ~ 50 Hz
Duty Factor	0.001 ~ 20 %
平均ビーム出力	最大 200 kW
全長	約 20 m

1.2 概念設計におけるビームダンプの構造

JNC 加速器から得られる電子線は、平均ビーム電流が非常に高く、ビームエネルギー[†]が低い
ため、電子線が照射された物質中でのエネルギー損失は大きくなり、その結果生じる平均発熱密
度も非常に高くなる。図 1-2 は、ビームエネルギー 10.51 MeV、平均ビーム電流 20 mA (電力
200 kW) の電子線が銅板に入射したときの発熱密度を表わす。発熱密度は、電子・光子輸送コー
ド EGS4 [2] による計算結果であるが、詳しい計算条件は文献 [1] 及び表 2-17 に示している通り
である。入射する電子線の直径が 2 cm、電流密度がビーム半径を 3σ とする正規分布であるた
め、このまま銅板で受けたとすると発熱密度は中心部で約 500 kW/cm^2 となる。

このため、JNC 加速器用ビームダンプでは、発生する熱をいかに分散させ、効率良く除去する
かが安全上重要となる。また、ビームダンプから発生する放射線を遮蔽し、放射化の可能性を減
らすことも重要な事項の一つとなる。さらに、最終加速管からビームライン上約 10 m 下流に設
置するビームダンプは、電子線の加速状態を直接監視できるため、ビームモニターとして機能す
るように最大限活用する。

[†]以下、本報告書におけるビームエネルギーは、電子の静止質量を含む全エネルギーとする。

従って、ビームダンプの設計方針は、発熱の局所化を防ぐことにより効率良く除熱し、放射化を防ぐとともに、ビームモニターとしての機能を持つこととする。このような設計方針に基づき、ビームダンプの設計条件は次の 4 項目とする。

- (1) ビームダンプの入口にある電磁石によって電子線を拡大させる。
- (2) 電子線を空間的に分散させた標的で吸収させる。
- (3) 放射化の可能性を減らす。
- (4) 大電流電子線用ビームモニターとしての機能を付加する。

第 1 番目の条件は、電子線の電流密度を小さくするために、電子線を四重極電磁石によって発散させることを表わす。この発散によって、電子線は拡大された状態で標的に照射され、点照射の場合に予想される標的の破損を防ぐ。第 2 番目の条件は、この発散に対応するもので、標的における単位体積当たりのエネルギー損失を低くするため、電子線を空間的に広く分布させた標的に吸収させる。第 3 番目の条件は、放射化する可能性を少なくするため、電子線が直接通過する場所、或いはその近くにおける物質量を減らすことである。特に、標的を冷却する冷却水は熱交換器まで循環させるため、その容量は多くなりやすい。このため、冷却水に直接電子線を照射しないようにして、さらに容量を少なくする。第 4 番目の条件は、従来のビームモニターでは困難であった、平均ビーム電流 20 mA の電子線を直接監視することである。特に、電子線の方向などの状態が変化した場合、その様子を直ちに把握し、対処することが重要である。この第 4 番目の条件に対する今回の新しい試みと結果は、第 4 章で述べる。

さて、(1) から (3) までの条件については、これらを満たすために、JNC 加速器用ビームダンプとして、スイス国立ポール・シェラー研究所 (PSI) で実績のある Ring & Disk (RD) 構造を採用した。この RD 構造は、大量の水や鉄などに荷電粒子を点照射していた、従来のビームダンプと大きく異なっている。但し、PSI での実績は陽子線についてのものであるため、電子線については今回新たに設計を試み、構造と機能を最適化させた。

この設計に基づき説明すると、その特徴は、電子線を吸収する場所を 22 枚の金属円板に分散させている点である。円板の材質は無酸素銅 (OFHC : Oxygen Free High-purity Copper) であり、その構造は内径が少しづつ異なる 18 枚の中空状リングを上流側に、4 枚の無孔の円板を下

流側に並べたものである。また、円板の厚さは全て 5 cm である。前述のように、全てのリングの内径は異なっており、上流から下流方向にかけて、徐々に小さくなっている。(拡大した電子線はリングの内側を進行する。) 最も上流のリングの内径は 19.6 cm であり、他のリングの内径は約 1 cm ずつ減少している。

加速管を出た電子線は、最初の中空状円板から 2 m 上流にある四重極電磁石を通過した後、円板構造体を収納した真空容器まで輸送される。この輸送系は、図 1-3(1) に示す機器で構成されている。機器の配列は、第 7 加速管 (Acc.7) から下流方向に、パルスビームモニター (CT)、四重極電磁石 (Q1:トリプレット)、ステアリング・マグネット (STM)、ビーム位置モニター (BPM)、四重極電磁石 (Q2:ダプレット)、及びプロファイル・モニター (PRM) の順である。ここで、四重極電磁石 Q1 は、発散用電磁石 Q2 まで電子線を輸送する収束用電磁石である。また、四重極電磁石 Q2 の磁場中心に電子線が入射するように、電磁石 STM とモニター BPM を用いてビーム軌道を調整する。なお、電子線のパルス幅が約 50 μ s 以下の場合、ボタン電極を用いた BPM の電気的特性から、電子線の位置が正確に検出できないため、材質が蛍光板である PRM を用いる。

円板に入射する電子線は、直径が 20 cm、半径方向に正規分布であるため、電子線が上流から下流に進行するに従って、その外側から少しずつ、リング内側の上流側の角で吸収される。そして、最終的に無孔円板で全て吸収される。吸収により生じた熱は、金属円板の外側に伝導され、そこで冷却水に伝導される。

22 枚の金属円板は、条件 (4) を満たすため 4 個のモジュールに分ける。すなわち、5, 5, 7, 5 枚の円板からなるモジュールは、吸収された電流を測定するためお互いに電氣的に絶縁され、一つのユニットとして交換できる構造とする。特に、金属円板は熱による塑性変形が起これり、破断する可能性があるため、モジュール単位で交換することは重要である。図 1-4 に中空状金属円板を含むビームダンプの断面を表わす。

従来の加速器では、ビームダンプと加速管の間には真空を隔てるビーム窓がある。しかし、電子線がビーム窓を直接照射するため、その発熱やビーム窓を冷却する水の放射化が問題となる。このため、JNC 加速器ではビーム窓ではなく、図 1-3(2) に示した差動排気系を用いて、ビームダンプと加速管を接続する。この差動排気系は、排気速度が早い、2 台のターボ分子ポンプ (TMP1, TMP2) とコンダクタンスが低いビームパイプから構成されている。また、ピラニー法による熱伝導真空

計 (TM1, TM2) 及びベニング法による冷陰極真空計 (PM1, PM2) を用いて、ビームパイプ中の真空度を測定する。さらに、金属円板が点照射された場合やビームパイプが破損した場合などによる、ビームパイプ内の真空度の悪化が加速管へ及ばないように、緊急遮断シャッター (FCS) 及びゲートバルブ (GV) を設置する。なお、加速器を長期間停止する際、ターボ分子ポンプではなく、イオンポンプ (IP) によりビームダンプ内の真空度を保つ。

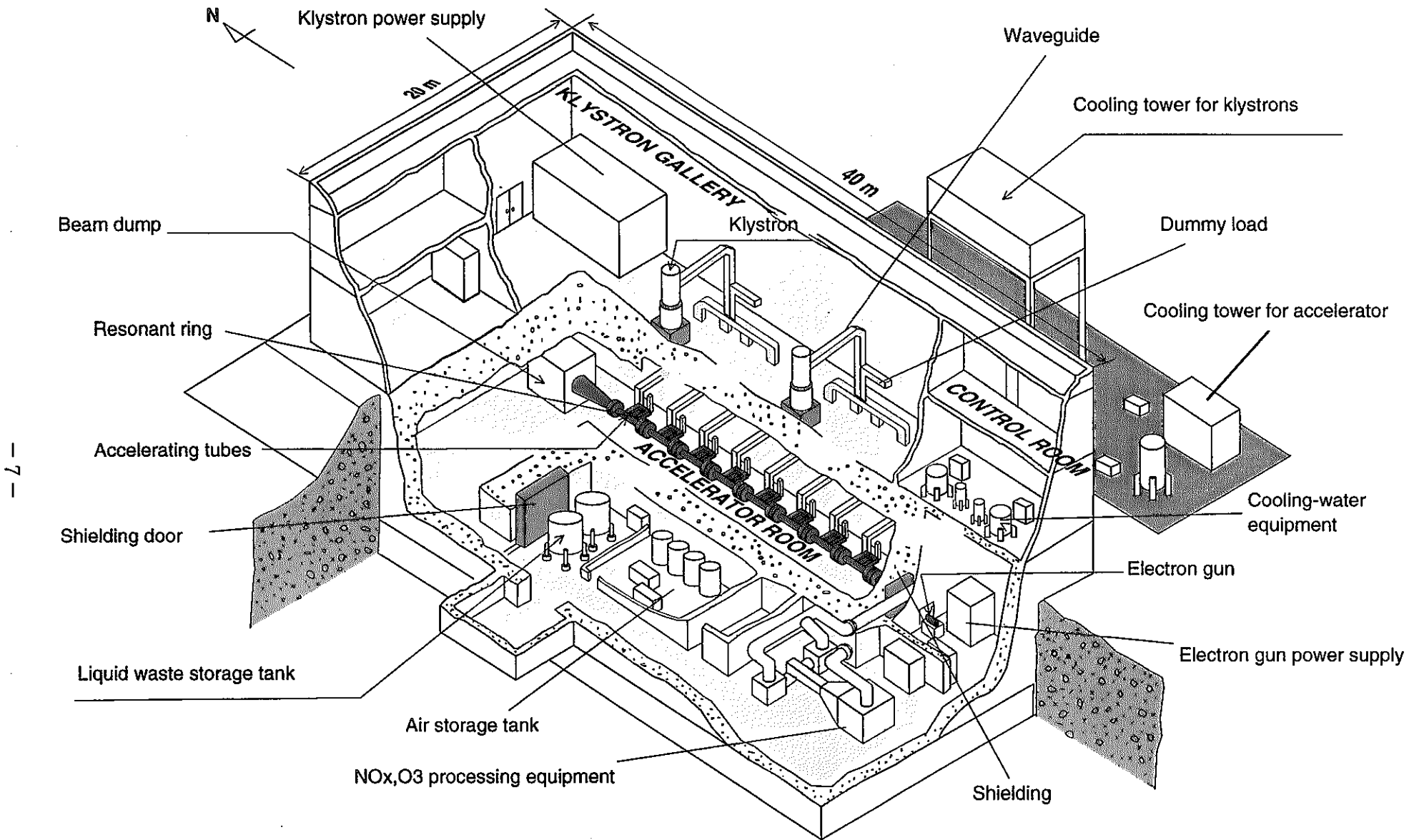


图1-1 量子工学試験施設 鳥瞰図

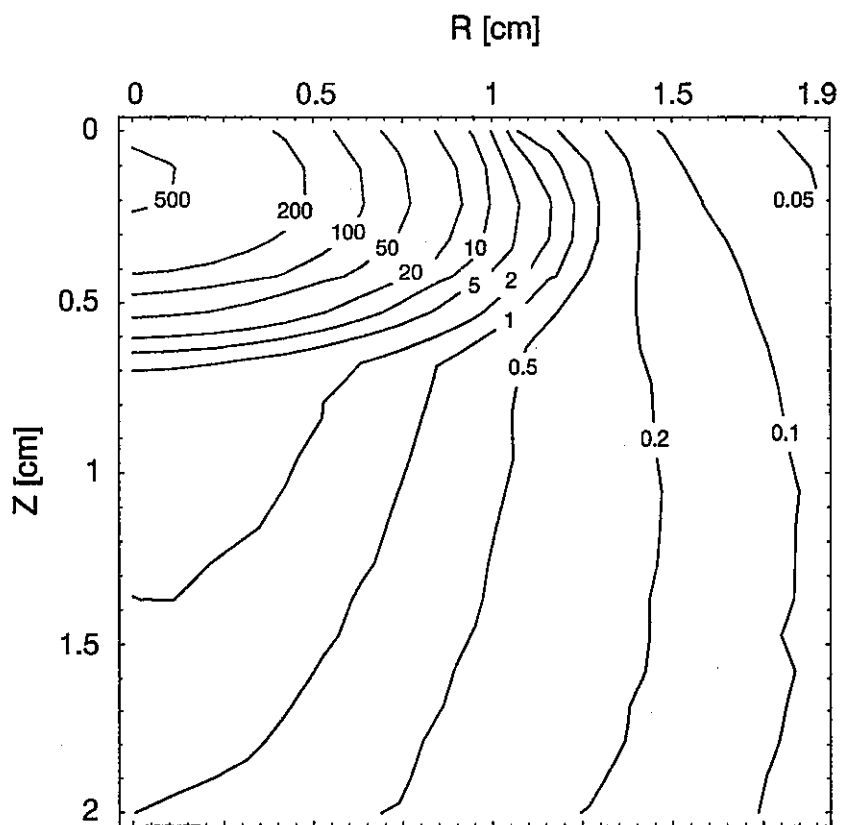
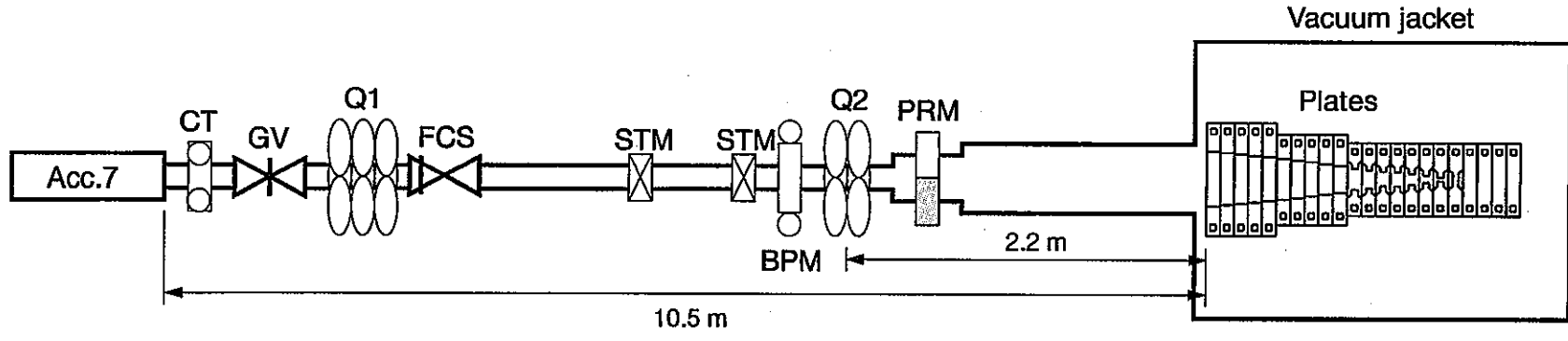


図1-2 計算コード EGS4 で得られた銅板での発熱密度。半径 1 cm の電子線 (10.51 MeV, 200 kW) が +Z 方向へ進行する時の発熱密度 (kW/cm^3) を表す。

(1) ビーム輸送系



(2) 差動排気系

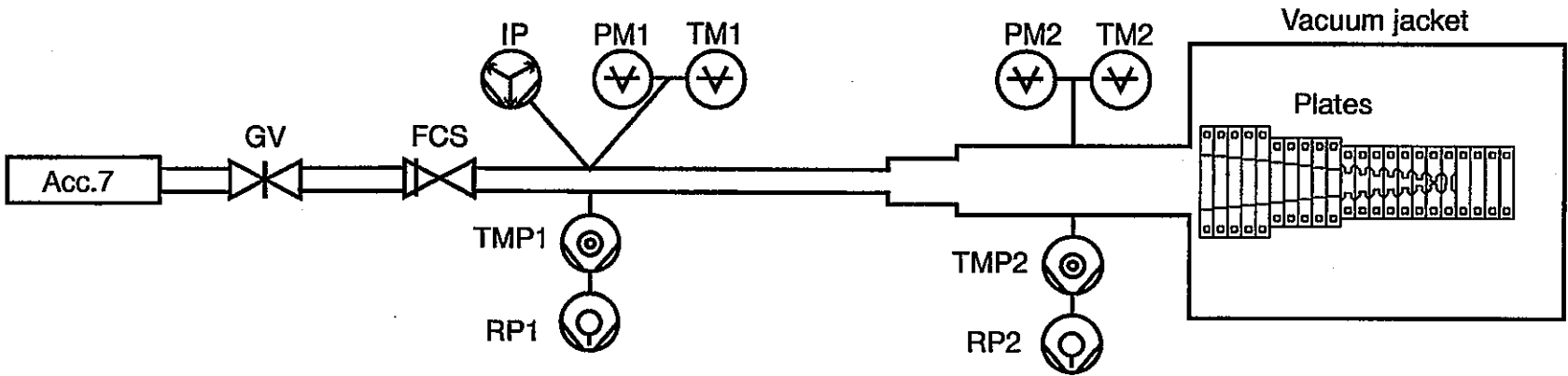


図1-3 ビーム輸送系及び差動排気系に関する機器の配置

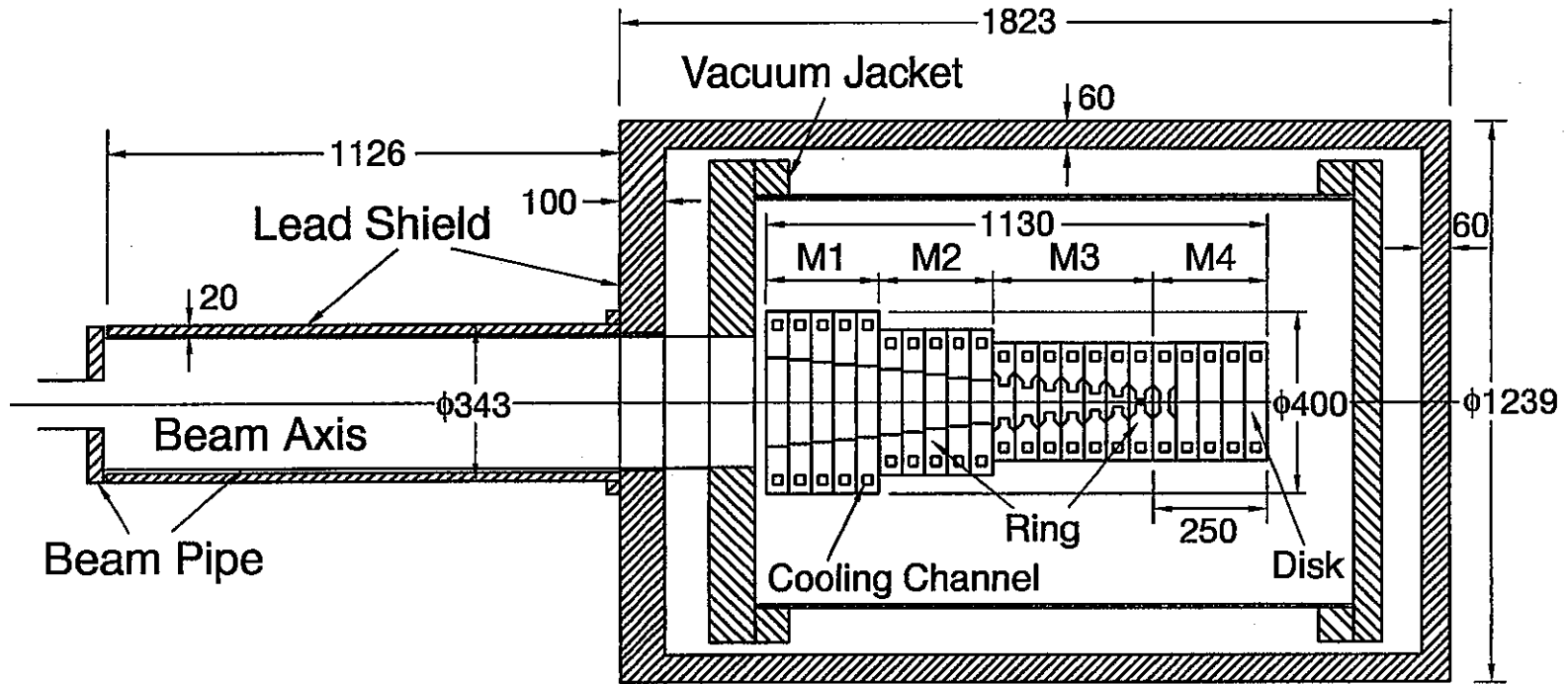


図1-4 ビームダンプの断面図

第2章 設計のための数値計算

2.1 中空状金属円板の構造

文献 [1] 及び第 1 章に述べたように、各モジュールの金属円板の枚数は、上流側から 5, 5, 7, 5 枚、合計 22 枚である。22 枚の形状として、電子線が直接照射する、上流側から数えて 1 枚目から 18 枚目までの金属円板は中空状リング、電子線が直接照射しない 19 枚目から 22 枚目までは無孔円板とする。さらに、中空状リング 18 枚は内径側の形状によって二種類に分ける。すなわち、中空状リング 1 枚目から 10 枚目までのビーム軸方向の断面形状は、内径側の厚さと外径側の厚さが等しい長方形とする。また、残りの形状は、内径付近の厚さが他の部分より段状に薄くなるくさび形とする。

このように、モジュール 1 及び 2 で長方形タイプ、モジュール 3 でくさび形タイプの金属円板を用いた理由は、熱伝導を異なるタイプの円板で確かめるためである。第 1.2 項で述べたビームダンプ設計条件 (2) によると、大電力電子線を安全に吸収し、金属円板の温度を抑えるためには、複数の円板で少しずつ電子線を吸収させるとともに、さらに一枚の円板では熱を伝導させる部分を広くする必要がある。このような形 (長方形タイプ、くさび形タイプ) にすることで、熱が様々な方向に伝導され、温度上昇が抑えられる。

文献 [1] 図 3-4 によると、厚さ 0.5 cm の銅に入射した、ビームエネルギー 10.51 MeV の電子線は、約 80 % のエネルギーが損失する。電子線が照射する内径の厚さは長方形タイプで 5 cm、くさび形タイプで 2 cm であるため、両タイプのエネルギー損失量はほとんど等しい。このため、円板内の熱伝導部の違いにより温度上昇が異なる。従って、二種類のリングの採用により、両方で熱伝導の相違を比較でき、さらに両者の実験データから熱伝導解析手法を評価できる。

なお、設計条件 (2) を満足する形状の中でも、さらに最適に近いものとして、例えば一枚の金属円板において、その内径を少しずつ小さくし、電子線が内壁に一様に照射するようなリング形状も考えられる。しかし、電子線による温度上昇などの実験データを解析する際、有限要素法計

算コードに用いる発熱領域の設定に仮定が入る可能性がある。すなわち、実験データと熱伝導解析結果を比較するとき、電子線の照射条件などを単純なものとし、計算手法にいろいろな仮定を導入する必要がないようにしなければならない。従って、今回はこの形状を採用せず、対称性のある単純な形状とした。

ところで、二種類のリングを熱伝導の視点から評価する例として、単位熱量当たりの温度がある。図2-1に示すような、厚さ5 mmの一様な中空状金属円板 [形状(1)] と発熱部の厚さが5 mmであるが、内径 ($R=2.4$ cm) 部の厚さが異なる二種類の中空状金属円板 [形状(3),(4)] の温度を比較する。なお、温度を比較する参考として、形状(1)と形状(3)(4)の中間的な形状(2)を考える。温度は有限要素法計算コード ALGOR [3] で計算する。

図2-1は、計算コード ALGOR で設定した、比較する各円板の断面を表わし、基本とするメッシュの大きさは5 mm × 5 mmの正方形とする。また、各円板における熱伝導条件は、灰色の領域のみ発熱を与え、太線部分で外部に熱が伝達されるものとする。表2-1は計算コード ALGOR

表2-1 計算コード ALGOR における定常熱伝導計算の条件

項目	設計値
材質	銅
密度	8.94×10^3 [kg/m ³]
比熱	3.85×10^2 [J/(kg·K)]
熱伝導率	3.86×10^2 [W/(m·K)]
熱伝達率	5.8×10^3 [W/(m ² ·K)]
冷却水温度	35 [°C]
初期温度	一様に冷却水温度とする

表2-2 各中空状金属円板における温度

項目	形状 (図2-1 参照)			
	(1)	(2)	(3)	(4)
発熱密度 [kW/cm ³]	0.21	1.05	2.1	2.1
発熱量 [kW]	1.07	5.34	10.7	10.7
最高温度 [°C]	206	288	333	330
最低温度 [°C]	100	116	63	63

で用いる物性値 [4] であるが、無酸素銅円板における、冷却水への熱伝達率は経験値とする。また、リング形状 (2), (3) 及び (4) に与える発熱密度は、各円板の最高温度が 300 度前後となるように、(1) の 5 倍、10 倍、及び 10 倍とする (表 2-2 参照)。

計算の結果を図 2-2 の温度分布に示し、表 2-2 にまとめる。次に、円板表面を代表する 6 点 (図 2-1 における黒点) における温度を図 2-2 より求め、図 2-3 に示す。図 2-3 は各点の番号を横軸に、発熱量を 1 kW に規格したときの温度を縦軸に表す。形状 (3) と (4) を比較すると、点 2 を除いてほぼ同じ温度であるが、点 2 では 1.7 倍の差がある。従って、熱伝導部の設定により金属円板下流側の温度に差があることが予想される。

2.2 熱伝導解析

内部発熱などの条件が簡単な場合、中空状金属円板の温度は解析的に求められるが、一般に有限要素法により数値解が得られる。なお、解析的に温度が得られる中空状金属円板の例を付録 B に示す。

本節では、付録 B で明らかになった解析解の一般的性質を参考にして、有限要素法による金属円板の温度を解析する。

2.2.1 解析条件

ビームダンプにおける温度、放射線量などを評価する際に必要となる電子線の入射条件と各モジュールにおける形状を表 2-3 及び表 2-4 に示す。なお、表 2-3 は、一部表 1-1 と重複する。

これらの条件を考慮して、金属円板での発熱量を求めるため、まず初めに図 1-4 に示した形状をモデル化する。計算コード EGS4 で用いる形状を記述するサブルーチン HOWFAR において、同軸の円筒と平行な平板で構成される円筒平板形状を定義する。図 2-4 は定義された形状を表わしており、R 方向に 1 ~ 26 まで番号付けられた円筒と、Z 方向に 1 ~ 52 までの平板がある。円筒と平板で区切られた 1326 個の領域は、計算コード EGS4 の定義に従って 2 から 1327 まで順に番号が付けられている。各領域の番号は図 2-4 の丸内の数字に表わす。但し、平板 1 より手前の領域及び平板 52 より外側の領域の番号は各々 1, 1328 とし、円筒 26 より外側の領域の番号は 1329 とする。

表2-3 電子線入射条件

項目	設計値
ビームエネルギー	10.51 MeV
平均ビーム電流	20 mA
最大ビーム電流	100 mA
パルス幅	0.1 ~ 4 msec
Duty Factor	0.001 ~ 20 %
ビーム半径	0.5 cm (加速管出口) 10 cm (金属円板上)
電流密度分布	ビーム半径を 3σ とする 正規分布
エミッタンス	50π mm mrad (目標値)
ビーム輸送距離	3.24 m (GV ~ Q2) 2.22 m (Q2 ~ 金属円板)
ビーム軸の高さ	床面から 1200 mm

表2-4 各モジュールの形状

モジュール番号	1	2	3	4
外径 [cm]	40	32	26	26
最大内径 [cm]	19.6	14.4	8.4	0.0
最少内径 [cm]	15.6	9.6	1.2	0.0
円板形状	長方形	長方形	くさび形	無孔円板
円板枚数	5	5	7	5
相対する円板 の内径差 [cm]	0.5	0.6	0.6	—

次に、各領域に図1-4の材質を割り当て、図2-4に示す。割り当てる材質は、主に放射線が発生、吸収する材質、すなわち金属円板の銅と遮蔽体の鉛とし、その他の領域は真空とする。なお、真空容器及びビームパイプは機器内の真空を保つものであるため、モデル化から外す。このため、電子線が入射する方向 (Z 方向) と反対の方向は、モデル上何も存在しない。

発熱分布を正確に表わすため、図1-4における1枚の中空状リングを平板数枚で囲まれた領域でモデル化する。但し、無孔円板 No.19 ~ 22 は、電子線が直接照射しないため、平板2枚でモデル化する。参考までに、図2-4の銅領域の右に金属円板の番号を示し、平板との関係を表す。

長方形タイプの金属円板1枚は、平板3枚で囲まれた2列の領域 (a,b) を用い、領域 a 及び b の厚さを各々 0.5 cm, 4.5 cm とする。くさび形タイプは、平板4枚で囲まれた3列の領域 (a,b,c) とし、各領域の厚さを各々 3.0 cm, 0.5 cm, 1.5 cm とする。なお、金属円板 No.11 の領域 a の厚さは 1.5 cm とする。また、各円板の内径の間隔は表2-4に記載された内径差とする。但し、くさび形を特徴付ける領域 a の内壁は、全て9番の円筒とする。電子線が直接照射する領域の厚さを、すなわち、金属円板 No.1 ~ 10 では領域 a, 及び No.11 ~ 18 では領域 b の厚さを全て 0.5 cm とする。なお、実際のスケールにおけるモデル化した形状を図2-5に示すとともに、電子線照射領域の厚さを 0.5 cm と設定した妥当性を第2.2.2項で評価する。

このようにモデル化した形状をサブルーチン HOWFAR で定義し、各領域における発熱密度、発生する光子の空気吸収線量を求めるユーザープログラム beam_dump.mortran (容量 88 kB) を作成した。なお、ユーザープログラム beam_dump.mortran を実行する UNIX コマンド “runegs4” を作成し、付録 C に示す。

2.2.2 金属円板の温度分布

(a) 定常状態での温度分布

まず、金属円板をモデル化した図2-4に電子線を入射させ、各円板における発熱密度を求める。図において、電子線は四重極電磁石 Q2 の出口である平板1からZ方向に1 cm 下流の地点から出発し、円板に入射する。電子線の電流密度分布は正規分布とし、その標準偏差は最大ビーム半径の1/3とする。各々の電子は、金属円板まで輸送される間、電子線の半径が0.5 cm から10 cm に拡大する軌道を通る(電子線の軌道は文献 [1] 式(4-11)である。)。このため、各電子はビー

μ軸と完全に平行に輸送されず、平均 1.16 ± 0.59 度の角度で入射する。

このような電子線が各円板で損失するエネルギー密度、すなわち各円板で生じる発熱密度は、文献 [1] 表 4-5 に示した通りである。この表では、図 2-6 の領域 A, B 及び C における発熱密度を表しているが、これらの和を図 2-7 に改めて示す。なお、図の横軸は金属円板の番号を表わし、番号 1 は最上流の円板に対応する。

表 2-1 の条件を用いて、計算コード ALGOR で各円板の温度上昇を求め、文献 [1] 表 4-8 及び図 2-7 に示す。また、計算で得られた各モジュールの電流値、発熱量、及び温度を表 2-5 に示す。この表の平均ビーム電流は各電流パルスを時間で平均化した値を、最大ビーム電流は 1 パルス当たりの値である。平均発熱量は、各円板における全エネルギー損失量を表しており、発熱領域 A ~ C におけるエネルギー損失の和でない。金属円板における平均発熱量は合計 199.6 kW であり、残り 0.4 kW は遮蔽体で吸収されたり、放射線として放出する量である。

表 2-5 各モジュールにおける電流値、発熱量、及び温度

モジュール番号	1	2	3	4	合計
平均ビーム電流 [mA]	2.1	8.0	9.7	0.2	20
最大ビーム電流 [mA]	10.4	40.2	48.6	0.8	100
平均発熱量 [kW]	18.1	77.3	101.1	3.1	199.6
最高温度 [°C]	110	320	380	170	—
最低温度 [°C]	36	54	47	39	—

次に、軸対称中空状金属円板では、定常状態における最高温度と最低温度の差が内部発熱量 q と半径の関数となることが知られている [式 (B.47)]。ビームダンプを構成する金属円板においても同様なことが成り立つことを確かめる。図 2-7 より各円板における単位熱量当たりの温度差を求め、図 2-8 に示す。図の横軸は金属円板の番号、縦軸は単位熱量当たりの温度差である。文献 [1] 表 4-8 によると、この温度差が各モジュールで一定となるようにモジュール毎の冷却水経路内径を設定している。このため、モジュール 1 及び 2 における温度差はほぼ一定である。しかし、モジュール 3 の後半で温度差が上昇しており、熱除去の効率が低下していることがわかる。

ところで、一般に熱応力は温度に依存するため、以後の熱伝導及び熱応力の解析においては、最高温度が最も高く、かつ最高温度と最低温度との温度差が最も大きい No.14 の金属円板を代表

表2-6 金属円板 No.14 における発熱密度

領域	発熱密度 [kW/cm ³]
A	2.1
B	0.068
C	0.27

として用いる。図2-9は、以下の解析で用いる、金属円板 No.14 の RZ 座標とメッシュを表わす。また、各領域における発熱密度は表2-6の値とする。

この発熱密度で計算した、円板の温度を図2-10に、また、図2-9の $Z = 0, 1, 2$ cm における温度を半径の半数として図2-11に示す。図2-10に示した各格子点の温度から、同一半径における Z 方向の平均温度を求め、半径の関数として図2-12の黒丸で表す。図の温度及び半径は式(B.6)により無次元化した量である。この分布から金属円板 No.14 の平均温度は、数値積分により 104 度となる。

なお、参考までに軸対称中空状金属円板の無次元化した温度 [式(B.43)] を図の白丸で表す。両者を比較すると、黒丸の温度は $r = 0.267$ で 1.57 倍となるが、 $r \geq 0.51$ では両者の差が 10 % 以内となる。すなわち、金属円板の温度は冷却水経路に近い場所では解析解にほぼ一致しているが、発熱領域における温度は解析解と異なっている。これは、金属円板の Z 方向に熱伝導部を設定したため、冷却水経路近くの温度が同じでも 12 倍の発熱量が除熱され、さらに最高温度が最大 1.57 倍で抑えられることを示している。

(b) 温度評価におけるメッシュ間隔の妥当性

発熱密度を求める際、円板での発熱領域と計算コード EGS4 で設定する領域は一致させる必要がある。しかし、計算コード EGS4 で細かい領域を設定するほど、計算速度やメモリーなどの条件により、計算が困難になる。このため、発熱領域の間隔として、電子線の 80 % のエネルギーが損失する 0.5 cm を採用した(第 2.2.1 項)。本項では、この妥当性を評価するため、発熱領域を細かくしたときの温度を求め、0.5 cm の場合と比較する。

まず、図2-9及び表2-6に示した半径 2.4 ~ 3.0 cm (領域 A, B) の発熱密度を図2-13の点線で

示す。(以下、このメッシュを5 mm メッシュと記す。)メッシュ間隔を $Z \leq 1$ cm で 0.1 cm, $Z \geq 1$ cm で 0.2 cm とした場合(以下、1 mm メッシュと記す。)の発熱密度を計算コード EGS4 で計算し、図2-13の白丸に示す。両者のメッシュにおける全発熱量は、共に等しく、11.6 kW である。

次に、金属円板 No.14 における内径面から冷却水経路の内壁までを取り出した、内径 4.8 cm, 外径 18.0 cm, 厚さ 2.0 cm の中空状金属円板における温度を求める。計算コード ALGOR で設定した形状は図2-14に示した通りであるが、特に Z 方向のメッシュ間隔は両者とも 1 mm に設定した。このメッシュ間隔は、計算コード EGS4 で設定する発熱領域の間隔が計算コード ALGOR の結果に影響を与えないようにするためである。なお、計算で用いた物性値は表2-1とする。

計算の結果、両者の温度を図2-15、半径 2.4 cm における Z 方向の温度を図2-16に示す。図2-16の黒丸は 1 mm メッシュ、白丸は 5 mm メッシュの温度に対応する。また、□印は、1 mm メッシュの温度から 5 mm メッシュの温度を引いた温度差を表わす。この差は、 $Z = 0$ cm の時最大値 8.6 度、 $Z = 2$ cm の時最小値 -1.6 度となる。このように、 $Z \leq 1$ cm で差が正、 $Z \geq 1$ cm で差が負となるのは、両者の発熱密度分布の差と関係しているからである。

従って、メッシュ間隔を 1 mm メッシュ及び 5 mm メッシュとした場合の温度を比較すると、最大 8.6 度 (1.5 %) の差であるため、以後の熱伝導・熱応力解析では特に問題が無く、5 mm メッシュを用いることとする。

(c) 非定常状態での温度分布

本項では、電子線を金属円板に照射したときの、非定常状態における温度を評価する。評価する項目として、一様に加熱した場合と電子線を模擬した場合の二項目とする。

初めに、電子線の時間的な変化がなく、一様な電流で加熱するとき(以下、一様加熱と記す)の温度変化を計算コード ANSYS [5] を用いて計算する。計算で使用した金属円板の形状は図2-9とし、物性値などの条件は表2-1及び表2-7とする。

計算の結果、温度の立上り時間は 35 秒で、加熱開始後約 480 秒で金属円板は定常状態となった。特に、変化が大きい加熱開始後 100 秒までの温度を図2-17に示す。定常状態のとき最高温度及び最低温度となる点(図2-6参照)の温度は図中の実線及び点線の通り変化する。

表 2-7 一様加熱・一様冷却における計算条件 (計算コード ANSYS)

経過時間	計算間隔	表示間隔
0 ~ 20 sec	2 msec	0.5 sec
20 ~ 200 sec	0.1 sec	5 sec
200 ~ 480 sec	0.5 sec	5 sec

加熱後十分時間が経過した後、電子線の照射を停止させ、その後の温度変化を計算し、図 2-18 に示す。なお、計算条件は表 2-1 及び表 2-7 とする。図 2-17 と同じ点の温度変化を図 2-18 の実線 (最高温度) 及び点線 (最低温度) に表す。

ところで、式 (B.48) に示した通り、軸対称中空状金属円板において、昇温時の温度と降温時の温度の和は時間に依存しない。図 2-17 と図 2-18 の温度から、加熱時の最高温度と除熱時の最高温度の和を図 2-19 の実線で表わし、同様に最低温度の和を点線で表わす。但し、表示は加熱開始後 100 秒までとする。各々の時刻における温度の和は、 ± 0.005 度の範囲で一定となり、この中空状金属円板でも、昇温時の温度と降温時の温度の和は時間に依存しない。

第二に、一様加熱と実際の電子線 (4 msec 間に 4 kJ の入熱、繰返し 50 Hz) を模擬した加熱 (以下、パルス加熱と記す) における金属円板の温度上昇を比較する。この比較においても、図 2-9 の形状、表 2-1 及び表 2-8 の条件を用いて、計算コード ANSYS で計算する。なお、パルス加熱における各領域の発熱密度は表 2-6 の 5 倍とする。

表 2-8 パルス加熱における計算条件 (計算コード ANSYS)

経過時間	計算間隔	表示時刻
0 ~ 20 sec	0.5 msec	0, 4, 20, 24, ... msec

加熱開始後 20 秒間における最高温度の時間変化を、表示間隔 20 msec (計算間隔 2 msec) とした一様加熱での最高温度とともに図 2-20 に表わす。両者を比較すると次のような傾向がある。

- (1) 立上り時間などマクロ的な温度変化は同じである。
- (2) パルス加熱では、熱源より遠く離れるほど、すなわち冷却水経路に近いほど温度変化はパルス状でなく、一様加熱と同じ変化を示す。

次に、ミクロ的な温度変化を調べるため、0.1 秒、1 秒、及び 10 秒を中心とした前後 0.1 秒間における、最高温度を図 2-21 に示す。図の白丸は一樣加熱、黒丸はパルス加熱での最高温度である。パルス加熱の特徴は、時間の経過とともにパルス内での温度上昇が減少することである。例えば、加熱開始直後におけるパルス内の温度上昇は 11.3 度であり、一方時刻 20 秒での上昇は 6.8 度と約 2 分の 1 である。また、加熱開始直後では、パルスとパルス間の温度降下がないことも特徴である。これらの特徴は、加熱開始直後、熱源の領域が十分に除熱されず、あたかも断熱状態にある金属円板での温度上昇と考えられる。実際、領域 A (図 2-9) が断熱状態と仮定した場合の温度上昇は 12.2 度となり、加熱開始直後のパルス内の温度上昇 11.3 度と近くなる。

特定の時刻における、パルス加熱と一樣加熱による最高温度を比較し、表 2-9 にまとめる。ここで、パルス加熱の温度は、前後 1 パルス間 (20 msec 間) の温度を梯形公式 [6] により平均する。表より、時刻 0.1 秒における温度は、断熱状態に近いパルス加熱の方が一樣加熱と比較して 3 % 程度高くなるが、1 秒以降はほとんど差がなくなる。

表 2-9 特定の時刻におけるパルス加熱と一樣加熱の温度比較

時刻	パルス加熱 [°C] (a)	一樣加熱 [°C] (b)	比 (a/b)
0.1 s	83.89	81.12	1.034
1.0 s	189.64	189.39	1.001
10 s	293.50	293.63	1.000

2.3 熱応力解析

電子線照射による金属円板 No.14 の温度履歴は、図 2-22 に示したように二種類に別けられる。まず初めの履歴は電子線 1 パルス毎の温度変化であり、二番目の履歴は荷重サイクルの繰り返しによる変化である。各々の変化を特徴付ける時間スケールは、前者が数ミリ秒であるのに対して、後者が数分から数時間である。特に、加速器運転の状態によって電子線が出射している時間が変わるため、後者の時間スケールは不定となる。従って、加速器による照射は、加熱と除熱を決められた時間を繰り返す定熱源、例えば原子炉などと大きく様子が異なる。

このような温度履歴によって、金属円板が熱的に損傷を受け、破壊されるメカニズムは、前者

が熱衝撃破壊，後者が低サイクル疲労破壊と呼ばれており，本節では，これらの破壊について検討する。

2.3.1 熱応力の解析解

本項では，金属円板で発生する熱応力について，その一般的性質を検討する。一般に，熱応力は有限要素法によって解析されるが，本項ではその解析解が求められる軸対称中空状金属円板(図B-1)の熱応力とする。

定常状態における中空状金属円板の熱応力は次式で与えられる [7]。

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{\alpha_* E_*}{1-\nu} \cdot \frac{1}{r_*^2} \left[\frac{r_*^2 - r_{1*}^2}{R_*^2 - r_{1*}^2} \int_{r_{1*}}^{R_*} T_*(r_*) r_* dr_* - \int_{r_{1*}}^{r_*} T_*(r_*) r_* dr_* \right] \\ \sigma_\theta = \frac{\alpha_* E_*}{1-\nu} \cdot \frac{1}{r_*^2} \left[\frac{r_*^2 + r_{1*}^2}{R_*^2 - r_{1*}^2} \int_{r_{1*}}^{R_*} T_*(r_*) r_* dr_* + \int_{r_{1*}}^{r_*} T_*(r_*) r_* dr_* - T_*(r_*) r_*^2 \right] \end{cases} \quad (2.1)$$

但し， σ_r kg/mm² は半径方向の熱応力， σ_θ kg/mm² は周方向の熱応力， E_* kg/mm² は縦弾性係数， α_* °C⁻¹ は線膨張係数， ν はポアソン比，及び $T_*(r_*)$ は金属円板の温度を表わす。式(B.6)により温度，距離を無次元化した後，式を整理すると，

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{\alpha_* E_* T_c}{1-\nu} \cdot \frac{1}{r^2} \left[\frac{r^2 - r_1^2}{1 - r_1^2} \int_{r_1}^1 \theta(r) r dr - \int_{r_1}^r \theta(r) r dr \right] \\ \sigma_\theta = \frac{\alpha_* E_* T_c}{1-\nu} \cdot \frac{1}{r^2} \left[\frac{r^2 + r_1^2}{1 - r_1^2} \int_{r_1}^1 \theta(r) r dr + \int_{r_1}^r \theta(r) r dr - \theta(r) r^2 \right] \end{cases} \quad (2.2)$$

となる。式(2.2)に表2-10に示した物性値を，また温度 $\theta(r)$ として式(B.43)を用いて，金属円板の熱応力を計算する。

求められた熱応力を温度 $\theta(r)$ とともに図2-23に示す。図における周方向の熱応力は， σ_θ の0.1倍の値である。外径側表面及び内径側表面で外力が作用しないため， $r = r_1$ 及び $r = 1$ において σ_r は0となり，また内径側表面の温度が高いため σ_θ は引張り応力となる。さらに，熱応力は銅の降伏点 σ_s である 0.63 kg/mm² を越えるため，金属円板内部のほとんどの領域で塑性域に入る。

従って，厚さ 0.5 cm，外径 18 cm (内径 4.8 cm) の金属円板に 1.07 kW の発熱がある場合，金属円板は塑性変形を起こすため，低サイクル疲労による寿命評価を行わなければならない。

表 2-10 無酸素銅の物性値

項目	記号	内容	
熱伝達率	h_*	$5.815 \times 10^3 [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	
縦弾性係数	E_*	$1.161 \times 10^4 [\text{kg}/\text{mm}^2]$	
塑性係数	E'	$2.31 \times 10^2 [\text{kg}/\text{mm}^2]$	
線膨張係数	α_*	$1.77 \times 10^{-5} [1/^\circ\text{C}]$	
ポアソン比	ν	0.37	
降伏点	σ_s	0.63	$[\text{kg}/\text{mm}^2]$
引張り強さ	σ_B	22.7	$[\text{kg}/\text{mm}^2]$
破断時の絞り	φ	0.9	

2.3.2 熱衝撃破壊

一般に、物体の表面が急激に加熱又は冷却されると、物体内部と表面の間の温度差により熱歪みを生じ、衝撃的な熱応力を生ずる。この応力は一定時間で最大値に達し、材料によってはこの値が限界値を越えて破壊する場合がある。このように急激な非定常の熱応力が作用する現象を熱衝撃という [8]。発生した熱応力の値が金属円板の破壊強度 S に等しいとして算定される限界の温度差 ΔT_{max} のことを熱衝撃破壊抵抗係数 R と呼び、熱衝撃破壊の目安となる [式 (2.3) 参照]。

$$R = \Delta T_{max} = \frac{S(1-\nu)}{E_*\alpha_*} \quad (2.3)$$

この式の破壊強度 S に無酸素銅の引張り強さ σ_B を代入すると、熱衝撃破壊抵抗係数 R は 70 度となる。図 2-21 によると、電子線照射中の最高温度上昇は、断熱変化と考えられる、加熱開始直後から 4 msec までの 11.3 度である。従って、この温度上昇は熱衝撃破壊抵抗係数以下であるため、熱衝撃破壊は問題にならない。

但し、電子線の直径が 20 cm の場合、熱衝撃破壊は問題とならないが、点照射などの異常に対しては、この値を越えるため、破壊される可能性がある。

2.3.3 低サイクル疲労の概略

一般に、機械、構造物が繰返荷重を受け、その部材に降伏点を越える大きな応力や歪みが繰り返され、 10^4 回程度 (又は、以下) の少ない繰り返し数で破壊する疲労を低サイクル疲労という

[9]. なお、特に断らない限り、本項で文献 [9] を参考とする。

クリープを無視できる温度における、多くの金属の低サイクル疲労試験において、塑性歪み範囲 $\Delta\varepsilon_p$ と疲労寿命 N_f との間に、次の Coffin-Manson 則が良く成立することが知られている。

$$\Delta\varepsilon_p N_f^{k_p} = C_p. \quad (2.4)$$

ここで、 k_p は疲労延性指数、 C_p は疲労延性係数と呼ばれる材料定数である。また、弾性歪み範囲 $\Delta\varepsilon_e$ と N_f との間にも式 (2.4) と同様な次式が成立することが Basquin 則として知られている。

$$\Delta\varepsilon_e N_f^{k_e} = C_e. \quad (2.5)$$

ここで、 k_e は疲労強度指数、 C_e は疲労強度係数と呼ばれる材料定数である。

全歪み範囲 $\Delta\varepsilon_t$ は、弾性歪み範囲 $\Delta\varepsilon_e$ と塑性歪み範囲 $\Delta\varepsilon_p$ の和で与えられるため、

$$\Delta\varepsilon_t = C_e N_f^{-k_e} + C_p N_f^{-k_p}. \quad (2.6)$$

式 (2.6) を両対数グラフ上に表すと図 2-24 となる。全歪み範囲と疲労寿命の関係は、高歪み域で式 (2.5) を表わす直線に、また低歪み域で式 (2.4) を表わす直線に漸近する曲線となる。式 (2.5) 及び式 (2.4) の直線は $\Delta\varepsilon_e = \Delta\varepsilon_p$ で交叉する。この交点に対応する疲労寿命 N_{tr} を遷移疲労寿命と呼ぶ。遷移疲労寿命に対応する歪み範囲は、多くの金属材料において $\Delta\varepsilon_e = \Delta\varepsilon_p \simeq 0.01$ となることが経験的に知られている。遷移疲労寿命以下の繰返し数を低サイクル疲労領域と呼ぶ場合がある。

次に、式 (2.4) について考察する。 k_p は多くの材料についてあまり変化せず、ほぼ $1/2$ となる。また、 C_p の値は材料の静的破断延性 ε_f と強く関係し、 $C_p = \varepsilon_f$ に近いが、 ε_f と $\varepsilon_f/2$ の間の値となる。Coffin によれば、 $k_p = 0.5$ となり、式は、

$$\Delta\varepsilon_p = C_p N_f^{-0.5} \quad (2.7)$$

となる。また、引張試験では $N_f = 1/4$ であるから、塑性歪み ε_p は静的破断延性 ε_f に等しくなり、

$$C_p = \frac{1}{2} \varepsilon_f = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1-\varphi} \quad (2.8)$$

となる。ここで、 φ は破断時の絞りである。式(2.7)及び式(2.8)から、塑性変形を伴う低サイクル疲労の最適疲労曲線として式(2.9)が得られる。

$$\Delta\varepsilon_p = \varepsilon(N_f) = \frac{-\ln(1-\varphi)}{2\sqrt{N_f}}. \quad (2.9)$$

ASME Boiler and Pressure Vessels Code, §III では、寿命に対する安全率 f_N を 20 とし、強さに対する安全率 f_s を 2 としている。この安全率を考慮した設計疲労曲線は、曲線 $\varepsilon(N_f)/f_s$ と関数 $\varepsilon(f_N N_f)$ の最小値で与えられる。すなわち、

$$\Delta\varepsilon_p = \text{Min} \left[\frac{\varepsilon(N_f)}{2}, \frac{\varepsilon(N_f)}{2\sqrt{5}} \right]. \quad (2.10)$$

例えば、無酸素銅の引張り試験によって得られた破断時の絞り $\varphi = 0.9$ を式(2.9)及び式(2.10)に代入すると、図2-25のような塑性歪み範囲と疲労寿命の関係が得られる。なお、全歪み範囲として塑性歪み範囲のみを考えた場合、設計疲労曲線は寿命に対する安全率を 20 とした曲線と完全に一致する。

2.3.4 塑弾性解析の条件

金属円板 No.14 での発熱量は 13 kW となるため、第 2.3.1 項で評価した通り、応力は塑性域に入る可能性がある。また、この熱荷重の繰返しにより、変形(ラチェット変形)が進行する可能性もある。そこで、計算コード ANSYS を用いて、金属円板の変形、熱応力、及び歪みを軸対称三次元モデルでの有限要素法による弾塑性解析を行った。

ここで、金属円板に加える荷重サイクル回数の定義として、金属円板の温度が冷却水入口温度と均一な状態から発熱による荷重負荷状態(荷重ステップ 1)、その後熱負荷を除荷し、冷却水温度と均一な状態(荷重ステップ 2)までを 1 サイクルとする。本解析では、この荷重サイクルを 4 回繰り返す。計算で用いた金属円板の弾塑性特性を図2-26に表わす。さらに、金属円板の物性値として、表2-10及び表2-11を用い、熱伝導率として温度依存性を考慮した表2-12を用いる [4]。ここで、表2-10における降伏点 σ_s は、高温で焼きなましされた無酸素銅の応力である。また、表2-11に示した冷却水流量は、金属円板と冷却水との熱伝達率 $5,815 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ を満たすように、付録 D で評価した $29 \text{ l}/\text{min}$ の 1.7 倍とした。なお、式(2.2)より、歪みが半径方向と周方

表 2-11 金属円板における冷却水の条件

項目	設計値
冷却水入口温度	35 [°C]
冷却水流量	50 [ℓ/min]

表 2-12 無酸素銅における熱伝導率の温度依存性

温度 [°C]	20	100	200	300	400	500
熱伝導率 [W/(m·K)]	391	390	388	386	384	381

向の二軸方向に発生するため、歪みはミーゼス等価歪みを用い、応力も二軸を考慮したミーゼス等価応力とする。

2.3.5 解析結果

(a) 温度

計算コード ANSYS で金属円板 No.14 の弾塑性解析を行う前に、まず金属円板の温度を計算し、図 2-27 に示す。計算した形状は、図 2-9 を参考とし、冷却水経路上の円板に幅 2.5 cm、深さ 0.5 cm の溝を設ける。この溝は、大きさ 2 cm × 2 cm の冷却水経路を製作するために生じるものである。すなわち、実際の製作工程においては、厚さ 5 cm の金属円板に深さ 3.5 cm の溝を設け、厚さ 1 cm の蓋で溝を覆う。この溝の設置により、円板の温度分布及び変形などが変わるため、実際の形状を考慮した、金属円板を解析する必要がある。

図 2-9 と図 2-27 を比較すると、多少温度分布が異なっているが、最高温度及び最低温度は 2 度以内で一致する (表 2-13 参照)。

表 2-13 計算コードの相違による温度分布の変化

計算コード	最高温度	最低温度
ANSYS	378 °C	69 °C
ALGOR	380 °C	70 °C

(b) 変形・ミーゼス等価応力

最初の荷重負荷状態である荷重ステップ 1 における金属円板の変形及びミーゼス等価応力を計算し、図 2-28 及び図 2-29 に示す。図 2-28 は荷重負荷時の変形を示しており、黒の点線は荷重負荷をかける前の形状を、また青の点線は荷重負荷をかけた後の形状を表わしている。両者の形状を比較すると、金属円板が半径方向とビーム軸方向に膨張していることがわかる。この 2 方向の変位のうち、半径方向の変位が主となるので、以下で述べる変位量は半径方向のみとする。最大変位は図における M_1 点 ($R=13$ cm) であり、その変位量は 0.157 mm である。また、ミーゼス等価応力の最大値は 2.32 kg/mm² である。このため、金属円板の中央部分 (発熱部と冷却水経路の中間部) を除き大部分の領域で応力が塑性域に入る。

さらに、最初の荷重除荷状態である荷重ステップ 2 における金属円板の変形及びミーゼス等価応力を計算し、図 2-30 及び図 2-31 に示す。図 2-30 は荷重除荷時の変形を図 2-28 と同様な点線で表す。なお、黒の点線は荷重ステップ 1 前の形状、また青の点線は荷重除荷後の形状である。この時、半径方向の最大変位は図における M_2 点 ($R=2.4$ cm) であり、その変位量は 0.011 mm である。従って、荷重除荷後においても多少変形が残留している。また、金属円板の内側を除き、大部分の領域でミーゼス等価応力が弾性域に戻っている (図 2-31 参照)。なお、荷重ステップ 1 において最大変位を与える M_1 点における変位量は 0.0026 mm である。

(c) 変形の進行

荷重サイクルに伴う変形を調べるため、 M_1 点 (図 2-28 参照) での半径方向の変位量を計算し、図 2-32 に示す。荷重サイクルの増加に伴い、荷重除荷時の変位量が多少増加しているが、荷重負荷時の変位量がほとんど変わらないことがわかる。このため、荷重サイクルによる変形 (ラチェット変形) はほとんど見られず、変形の進行は特に問題にならない。

(d) 歪み

図 2-33 に荷重ステップ 1 及び荷重ステップ 2 におけるミーゼス等価歪みを示す。さらに、寿命評価で必要になる塑性歪みを図 2-34 に示す。図 2-34 より最大塑性歪みを与える点は、最高温度を与える M_2 点である。 M_2 点におけるミーゼス等価歪み (全歪み) は、負荷時 1.043×10^{-2} 、除

荷時 6.180×10^{-4} であり、塑性歪みは、負荷時 1.017×10^{-2} 、除荷時 5.339×10^{-4} である。従って、負荷時の全歪みのうち 97 % は塑性歪みである。

なお、 $R=2.4$ cm におけるミーゼス等価歪みを図 2-35 及び図 2-36 に示す。これらの図は、 $R=2.4$ cm における位置 Z cm でのミーゼス等価歪みを表わしており、図 2-35 は負荷時、図 2-36 は除荷時である。

(e) 寿命評価

第 (d) 項で得られた塑性歪み範囲 $\Delta\epsilon_p [=1.017 \times 10^{-2} - (-5.339 \times 10^{-4})]$ を式 (2.9) に代入すると、最適疲労回数は 1.1×10^4 回であり、式 (2.10) に代入すると、設計疲労回数は 580 回である。但し、破断時の絞り ϕ は無酸素鋼の引張り試験によって得られた値 0.9 とし、除荷時の塑性歪みは半径方向の応力の符号が変わるため負の符号とする。

この設計疲労回数は、1日1回荷重サイクルを加えた場合 1.6 年で破断することを表わしている。しかし、加速器運転中の突然停止などによって、荷重サイクルが増加すると考えられるため、破断に至るまでの日数は予想できない。このため、各金属円板は交換できるように設計しなければならない。

2.4 真空

2.4.1 解析条件

ビームダンプ系における、電子線入射時の真空度を求めるための条件は、以下の 4 項目である。

- (1) 電子線が入射するとき、真空ポンプは図 1-3(2) に示した通り、排気速度 270 l/min のターボ分子ポンプ 2 台 (TMP1, TMP2) を用いる。なお、排気速度は窒素ガスに対する値である。
- (2) 真空容器と緊急遮断シャッターの距離は、緊急遮断バルブの全閉時間 13 msec に空気中の音速 340 m/s を掛けた 4.4 m 以上とする。
- (3) ビームパイプの内径は、加速系との取り合い部で 5.95 cm、真空容器との接続部で 25.94 cm とする。

- (4) 加速系からのガスの流れ込みはなく、取り合い点での真空度は、 $(1.3 \sim 13) \times 10^{-5}$ Pa とする。

2.4.2 配管ネットワークにおける真空度の定式化

ビームダンプ系を構成する真空容器、配管は、全てガスを放出する真空配管とみなせるため、その圧力(真空度)分布は複雑な配管ネットワークを持つ真空系 [10] として解析する必要がある。

まず、節点数が n である真空系において、節点 i と節点 j を接続する管に注目し、管内の真空度を求める(図2-37参照)。長さ方向の座標を x とすると、真空度 $p_{ij}(x)$ Pa と単位長さ当たりのガス放出量 $q_{ij}(x)$ Pa m³/s/m との間には、

$$\frac{d^2 p_{ij}(x)}{dx^2} = -\frac{q_{ij}(x)}{c_{ij}(x)} \quad (2.11)$$

が成立する。ここで、関数 $c_{ij}(x)$ m³/s·m は単位長さ当たりのコンダクタンスを表す。式(2.11)から真空度 $p_{ij}(x)$ を求めるとき、次のような仮定を設ける。

- (1) 各管は、一定の断面積を持つパイプとする。すなわち $c_{ij}(x)$ は一定とする。
- (2) 各管の内表面から放出されるガスは、場所によらず一様な放出率で発生する。すなわち $q_{ij}(x)$ は一定とする。

従って、定常状態における管内の真空度 $p_{ij}(x)$ は、次式で与えられる。

$$\frac{d^2 p_{ij}(x)}{dx^2} = -\frac{Q_{ij}}{C_{ij} L_{ij}^2} \quad (2.12)$$

ここで、 L_{ij} m は管の長さ、 $Q_{ij}(= q_{ij}(x)L_{ij})$ Pa m³/s は管内で放出される全ガス量、及び $C_{ij}(= c_{ij}(x)/L_{ij})$ m³/s は管のコンダクタンスを表す。なお、 L_{ij} 、 Q_{ij} 、及び C_{ij} は添字 i 及び j に関して対称である。この式を解くことにより、節点 i と j を接続する管内の真空度 $P_{ij}(x)$ は、

$$p_{ij}(x) = p_i + \left(p_j - p_i + \frac{Q_{ij}}{2C_{ij}} \right) \frac{x}{L_{ij}} - \frac{Q_{ij}}{2C_{ij}} \left(\frac{x}{L_{ij}} \right)^2 \quad (2.13)$$

となる。ここで、管の端部における真空度 $p_{ij}(0)$ 及び $p_{ij}(L_{ij})$ を各々 p_i 及び p_j とする。

次に、節点 i でガスの流れが保存することより、この節点における真空度 p_i を求める(図2-38参照)。節点に流れ込むガス量は、節点 j との真空度の差より $C_{ij}(p_j - p_i)$ 、管内から放出される

量として $\frac{Q_{ij}}{2}$ ，及び外部より Q_i^{ex} である。また，節点に接続された排気速度 S_i m³/s の真空ポンプへ流れ出すガス量は $p_i S_i$ である。以上より，真空度 p_i に関する式が得られる。

$$\sum_{(\ell \neq i)} \left[C_{\ell i} (p_{\ell} - p_i) + \frac{Q_{\ell i}}{2} \right] + Q_i^{ex} = p_i S_i. \quad (2.14)$$

ここで，和 $\sum_{(\ell \neq i)}$ は節点 i に接続された全ての節点の和を表わす。この式を変形すると，

$$\sum_{(\ell \neq i)} C_{\ell i} p_{\ell} - \left(\sum_{(\ell \neq i)} C_{\ell i} + S_i \right) p_i = - \left(\sum_{(\ell \neq i)} \frac{Q_{\ell i}}{2} + Q_i^{ex} \right) \quad (2.15)$$

となる。

さらに，全節点における真空度 $(p_1, \dots, p_i, \dots, p_n)$ は，式(2.15)の左辺，すなわち配管ネットワークにおける，各配管の接続，配管のコンダクタンス，真空ポンプの排気速度に関する $n \times n$ 行列 G を用いて，

$$G \begin{pmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_i \\ \vdots \\ p_n \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \sum_{(\ell \neq 1)} \frac{Q_{\ell 1}}{2} + Q_1^{ex} \\ \vdots \\ \sum_{(\ell \neq i)} \frac{Q_{\ell i}}{2} + Q_i^{ex} \\ \vdots \\ \sum_{(\ell \neq n)} \frac{Q_{\ell n}}{2} + Q_n^{ex} \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

と表わされる。この式より，真空度は，

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_i \\ \vdots \\ p_n \end{pmatrix} = -G^{-1} \begin{pmatrix} \sum_{(\ell \neq 1)} \frac{Q_{\ell 1}}{2} + Q_1^{ex} \\ \vdots \\ \sum_{(\ell \neq i)} \frac{Q_{\ell i}}{2} + Q_i^{ex} \\ \vdots \\ \sum_{(\ell \neq n)} \frac{Q_{\ell n}}{2} + Q_n^{ex} \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

となる。但し，行列 G^{-1} は行列 G の逆行列を表わす。

以上をまとめると，複雑な配管ネットワークにおける真空度は次のようにして求められる。

- (1) 式(2.17)により各節点における真空度を求める。
- (2) 式(2.13)により配管内の真空度を求める。

2.4.3 定常状態における真空度

配管ネットワークを用いて図1-3(2)に示したビームダンプでの真空度を求めるため、まず第一に、真空系をモデル化する。図2-39に示した、モデル化された真空系は、17個の節点で構成され、各節点は原則として、断面が一定の、ステンレス製の円筒配管で接続されている。但し、節点2と4、及び12と13はアングルバルブをモデル化した円筒の直角の曲がりとし、8と9、及び10と11は流れの急激な拡大とする。また、節点17は真空容器を、節点3、4、及び13は各真空ポンプIP、TMP1、TMP2を表す。節点6、7、15、及び16は各真空計PM1、TM1、PM2、及びTM2を表す。

次に、各節点間を接続する配管のコンダクタンスを求め、表2-14にまとめる。ここで、配管のコンダクタンスは文献[11]より導出する。長さ ℓ cm、直径 d cmの短い円筒におけるコンダクタンス C l/secは、薄い板にあけられた円孔(オリフィス)のコンダクタンス $9.1d^2$ に補正係数 k を掛けたものである。すなわち、

$$\begin{aligned} C &= 9.1d^2 \cdot k \\ &= 9.1d^2 \frac{1.33d}{\ell + 1.33d} \end{aligned} \quad (2.18)$$

である。円筒の直角の曲がりにおけるコンダクタンス C は、円筒に相当する長さ $\ell' (= \ell + 4d/3)$ を式(2.18)の ℓ に代入して求められる。また、流れの急激な拡大におけるコンダクタンス C は、拡大前後の直径を d_1 cm、 d_2 cmとすると、

$$C = 9.1 \frac{d_1^2 d_2^2}{d_2^2 - d_1^2} \quad (2.19)$$

で与えられる。但し、 $d_2 > d_1$ とする。

第三として、ビームダンプ内で発生するガス量を求めるため、常時真空中にある部材の表面から単位面積当たり放出されるガス量 λ を表2-15に示す[11]。なお、表に示した材質は、OFHC、SUS304、及びポリエチレンとし、ガス量 λ は真空中に放置後20時間経過した時の値とする。

表2-14 各節点間を接続する配管の形状とコンダクタンス C

形状	節点		長さ		C [ℓ/sec]
	i	j	d [cm]	ℓ [cm]	
円筒	1	2	5.95	179	14
	2	3	5.95	23.1	82
	2	5	3.51	27	17
	2	8	5.95	176	14
	5	6	3.51	10	36
	5	7	3.51	10	36
	9	10	9.56	33	230
	11	12	25.9	80	1800
	12	14	3.51	16.1	25
	14	15	3.51	10	36
	14	16	3.51	10	36
12	17	25.9	62	2200	
円筒の直角 の曲がり	2	4	10.2	42.2	190
	12	13	10.2	40.3	190
形状	節点		長さ		C [ℓ/sec]
	i	j	d ₁ [cm]	d ₂ [cm]	
急激な流れ の拡大	8	9	5.95	9.56	530
	10	11	9.56	25.9	960

表2-15 部材の表面から放出される単位面積当たりのガス量 λ [11]

材質	放出ガス量 λ [Pa m ³ /s/m ²]	条件
OFHC	1.1×10 ⁻⁷	室温, 機械研磨, 20 時間後
SUS304	3.3×10 ⁻⁷	室温, 機械研磨, 20 時間後
ポリエチレン	1.5×10 ⁻⁵	室温, 20 時間後
OFHC	2.1×10 ⁻⁷	350°C

OFHC は金属円板の材質，SUS304 はビームパイプ，架台，及び冷却水配管の材質，ポリエチレンは熱電対配線の被覆の材質である。

また，真空容器内にある部材の表面積を表2-16に示す。この表より，真空容器内にある OFHC，

表2-16 真空容器内にある部材の表面積

部材	材質	表面積	形状
金属円板	OFHC	4.4 m ²	厚さ 5 cm の円板 22 枚
真空容器内面	SUS304	4.9 m ²	内径 90 cm，長さ 130 cm の円筒形
架台	SUS304	2.5 m ²	48 cm × 130 cm の板 4 面
冷却水配管	SUS304	2.7 m ²	外径 3 cm の配管 26 本
熱電対配線	ポリエチレン	2.4 m ²	外径 0.5 cm の配線 100 本

SUS304 及びポリエチレンの各表面積 S_c ， S_s ，及び S_t は，

$$\begin{cases} S_c = 4.4 \text{ m}^2 \\ S_s = 4.9 + (2.5 + 2.7) \times 1.5 = 13 \text{ m}^2 \\ S_t = 2.4 \text{ m}^2 \end{cases} \quad (2.20)$$

となる。但し，架台及び冷却水配管の表面積は 50 % の余裕を持たせる。従って，室温における，節点 17 からビームパイプへ流入するガス量 Q_{17}^{eq} は式(2.21)で与えられる。

$$\begin{aligned} Q_{17}^{eq} &= \lambda_c S_c + \lambda_s S_s + \lambda_t S_t \\ &= 4.0 \times 10^{-5} \text{ Pa m}^3/\text{s} \end{aligned} \quad (2.21)$$

以上の値を式(2.17)に代入し，室温におけるビームパイプ内の真空度を求め，図2-40に示す。図の横軸は，ビームパイプにおける，節点 1 から節点 17 までの距離とし，縦軸は各節点における真空度である。なお，節点間の真空度は式(2.13)より計算する。この図から加速系との取り合い点での真空度は，室温において 4.0×10^{-5} Pa となり，解析条件を満足する。また，真空容器入口(節点 17)における真空度が 3.5×10^{-4} Pa であるから，式(2.21)のガス量より，同点での実効排気速度は 110 ℓ/sec となる。

ビームパイプ内の真空度のうち，真空容器からのガスによる寄与分とビームパイプ表面からガスの寄与分を計算し，同じ図の点線として示す。この両者を比較すると，節点 2 より下流では

ビームパイプ内の真空度のうち、約 93 ~ 99 % が真空容器からの寄与であるが、節点 1 では 16 % がビームパイプ表面からである。図 2-40 の黒丸は、真空計における真空度であるが、その値はビームパイプ内と 3 % 以内で一致している。

次に、電子線を照射しているときの真空度を求め、図 2-41 の黒丸に示す。この計算では、金属円板のみ高温となり、他の部材は室温であると仮定する。金属円板の最高温度は、第 2.2.2 項の結果より金属円板 No.14 で 378 °C であるが、ここでは全ての円板において一様に温度が分布しており、その温度を 350 °C と仮定する。この仮定と表 2-15 のガス量 λ から、金属円板から放出されるガス量の増分が $4 \times 10^{-7} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ であるから、ビームパイプ内の真空度は室温より最大 1.3 % しか増加しない。従って、電子線照射時においても、加速系との取り合い点の真空度は解析条件を満足している。

2.5 放射線

2.5.1 計算体系

第 2.1 節で述べたユーザープログラム `beam_dump.mortran` を用いて空気吸収線量率を計算するには、評価面の半径と中心点を決めなければならない。量子工学試験施設における遮蔽を評価した文献 [12] によると、ビームダンプから常時人が立ち入る評価点までの距離が約十メートルであるため、ビームダンプで発生した放射線は点線源から放出されたものと仮定している。このため、評価面の中心は、中空状金属円板の中心、すなわち金属円板 No.1 から下流側に 54.25 cm (図 2-4 の平板 28 と 29 の間) 離れた中心軸上の点とする。また、評価面の半径は、この点を中心とした半径のうち、ビームダンプの遮蔽体を全て囲むように 3.0 m に設定する。参考までに、中心点と評価面の定義を文献 [1] より引用して、図 2-42 に示す。なお、空気吸収線量率の角度依存性を評価するとき必要となる、散乱角 θ と方位角 ϕ の定義も図 2-42 に示し、典型的な散乱角 θ の値を図 2-43 に示す。

2.5.2 ベンチマーク実験による計算コード EGS4 の評価

本節では、プログラム `beam_dump.mortran` から得られる光子数などの値を評価するため、電子線が標的に入射し、光子などのエネルギー分布が得られた実験のうち、測定条件が明確な実験

(以下、ベンチマーク実験と記す)の結果と比較する。評価する項目として、標的に生成される制動輻射量と標的における電子線のエネルギー損失量である。

(a) 制動輻射生成量

本項では、運動エネルギーが数 MeV 以下の電子線がいろいろな材質の標的に入射し、発生した制動輻射量を計算コード EGS4 と比較した結果について述べる。ベンチマーク実験として、入射電子のエネルギーが JNC 加速器のエネルギーに近い、標的の厚さ等の測定条件が明確な下記の実験を選択した。

(1) 運動エネルギー 2 MeV の電子線を用いた実験 [13].

(2) 運動エネルギー 10 MeV の電子線を用いた実験 [14].

これらの実験は、電子線を標的に垂直に入射し、いくつかの角度において制動輻射スペクトルを測定したものである。計算コード EGS4 における計算条件を表 2-17 にまとめる。なお、表のエネルギー E_k は、入射する電子の運動エネルギーを表わす。

表 2-17 計算コード EGS4 の計算条件

項目		設定
EGS4	PRESTA	使用
	乱数	Ranmar 乱数
	K/L 殻での吸収端 カットオフエネルギー	使用
	・ e^-/e^+	$E_k/10^2$ (最低 10 keV)
	・ γ	$E_k/10^3$ (最低 10 keV)
計算形状	円筒平板	
PEGS4	レイリー散乱	使用
	制動輻射断面積の規格化	使用
	カットオフエネルギー	10 keV
電子線	直径	0 cm
	入射角	標的に垂直

また、計算コード EGS4 で設定した標的は円筒形であり、その直径を 40.0 cm、厚さを表 2-18 に示す。文献 [1] の 13 頁で述べた評価面の半径は、標的の形状がエネルギー分布に与える影響を無視できるような値とし、その値を表 2-18 に合わせて示す。特に、ユーザープログラム beam_dump.mortran では、ある金属円板の間隔を設定すると、全ての金属円板の間隔が同じ値となるため、厚さ数ミリメートルの標的に対して評価面の半径が数メートルとなる。

表 2-18 計算コード EGS4 における標的の厚さと評価面半径の設定 (1)

材質	運動エネルギー (MeV)	厚さ		評価面半径 (m)	文献
		(mm)	(g/cm ²)		
Fe	2.0	1.65	1.30	2.5	[13]
Al	2.0	6.44	1.74	4.0	[13]
Au	2.0	0.84	1.62	2.5	[13]
W	10.0	0.385	0.735	2.5	[14]

このような条件のもと、制動輻射スペクトルを計算し、表 2-19 に結果にまとめる。制動輻射スペクトルは、標的から 4π 方向に放出される光子数が 20,000 個になるように入射電子数を決め、表 2-19 の散乱角度内 (表における括弧内の角度) に入った光子のエネルギー分布と、その角度に対応する立体角から計算する。なお、光子の散乱角は電子線の進行方向を 0 度とし、その範囲は文献 [13, 14] に従い、中心角から 6 度及び 10 度に設定する。

表 2-19 制動輻射スペクトルの計算結果

材質	入射電子数 (個)	散乱光子数 (個)	散乱角度 (度)	図	図中の光子数 (個)
Fe	112,852	20,000	0 (0 ~ 6)	図 2-44(1)	270
			60 (54 ~ 66)	図 2-44(2)	1,868
			120 (114 ~ 126)	図 2-44(3)	1,340
Al	162,650	20,000	60 (54 ~ 66)	図 2-44(4)	1,870
Au	73,973	20,000	60 (54 ~ 66)	図 2-44(5)	1,227
W	29,422	20,000	0 (0 ~ 10)	図 2-45	3,867

図2-44及び図2-45は制動輻射スペクトルを示す。図における黒丸は、計算コード EGS4 によって得られた光子数を統計精度 $\pm 1\sigma$ の統計棒と伴に表し、×印はベンチマーク実験によって得られた光子数を示す。図2-44(1)は、運動エネルギー 2 MeV の電子 112,852 個が鉄標的に入射し、評価面を通過した光子のうち、0度方向の光子 270 個のエネルギー分布である。図の縦軸は、単位立体角、単位エネルギー、入射電子 1 個当たりの光子数である。図2-44(2)~(5)、図2-45における光子のエネルギー分布は、図2-44(1)と同様に求めるが、詳細は表2-19に示す。

(b) エネルギー損失

本項では、運動エネルギーが 16 MeV 以下の電子線が銅標的に入射し、標的で損失する電子線のエネルギー分布を、計算コード EGS4 と比較した結果について述べる。このエネルギー損失量は、ビームダンプの金属円板で発生する熱量となるため、温度評価の妥当性を表わすことになる。ベンチマーク実験として、前項と同様に、測定条件が明確な文献 [15, 16, 17] の実験を選択した。

計算における計算コード EGS4 の条件は表2-17のとおりである。また、計算コード EGS4 で設定した標的は前項と同様に円筒形であり、その直径を 40.0 cm、厚さを表2-20に示す。

このような条件のもと、標的における電子のエネルギー損失を計算し、表2-21にまとめる。工

表2-20 計算コード EGS4 における標的の厚さと評価面半径の設定 (2)

材質	運動エネルギー (MeV)	厚さ		評価面半径 (m)	文献
		(mm)	(g/cm ²)		
Cu	1.75	0.413	0.368	2.5	[15]
Cu	3.66	0.800	0.715	2.5	[16]
Cu	15.7	0.944	0.844	2.5	[17]

表2-21 銅標的でのエネルギー損失の計算結果

運動エネルギー (MeV)	入射電子数 (個)	散乱電子数 (個)	散乱角度 (度)	図	図中の電子数 (個)
1.75	52,000	38,075	150 (145 ~ 155)	図2-46(1)	1,631
3.66	92,724	80,000	0 (0 ~ 5)	図2-46(2)	570
15.7	38,390	40,000	0 (0 ~ 5)	図2-46(3)	2,462

エネルギー損失分布は、評価面を通過し、表 2-21 の散乱角度内に入った電子と入射電子のエネルギーの差と、その角度に対応する立体角から計算する。なお、角度範囲は、文献 [13] に従い、中心角から 5 度の範囲に設定する。

図 2-46 は、銅標的におけるエネルギー損失が 1.6 MeV 以下の分布を表している。図における黒丸と × 印は、前項と同様に計算コード EGS4 とベンチマーク実験の電子数である。図 2-46(1) は、運動エネルギー 1.75 MeV の電子 52,000 個が銅標的に入射し、150 度方向に放出された電子 1,631 個のエネルギー損失である。図の縦軸は、単位立体角、単位エネルギー、入射電子 1 個当たりの電子数である。図 2-46(2) 及び (3) におけるエネルギー損失分布は、(1) と同様に求めるが、詳細は表 2-21 に示す。

(c) 考察

前項までに示した計算コード EGS4 の結果には、粒子数から算出した統計誤差 (各図の統計棒) のほか、散乱などの断面積の不確かさ、モンテカルロ計算コードにおける近似計算の適応に起因する系統誤差が含まれている。さらに、ベンチスケール実験における複雑な形状を計算コード EGS4 でモデル化する際に生ずる系統誤差などがあり、これらを合わせた誤差は統計誤差の数倍である [13]。従って、これらの誤差を考えると、計算コード EGS4 の値と実験結果は誤差内で一致しており、ユーザープログラム beam_dump.mortran から正しい結果が得られている。

2.5.3 ビームダンプにおける空気吸収線量率の評価

本節では、ユーザープログラム beam_dump.mortran を用いて、ビームダンプに入射する電子線によって生じる光子のエネルギー分布を求め、その分布より放射線の遮蔽で重要となる空気吸収線量率を評価する。計算コード EGS4 における計算条件は、前項と同様に第 2.2.1 項、第 2.5.1 項及び表 2-17 とする。

まず初めに、表 2-22 に示した数の電子を入射させ、光子のエネルギーと角度 (θ, ϕ) の関係を図 2-47、図 2-48、及び図 2-49 に示す。図 2-47 及び図 2-48 はビームエネルギー 10.51 MeV の電子線が入射した時、光子のエネルギー、散乱角 θ 、及び方位角 ϕ の関係を表し、図 2-49 はビームエネルギー 4.01 MeV の電子線が入射した時の関係である。各図の (1) は光子のエネルギーと散

表 2-22 線量率評価における計算条件

ビームエネルギー	材質	入射電子数	散乱光子数	割合	図
10.51 MeV	銅	488,702	20,000	4.1×10^{-2}	図 2-47
10.51 MeV	銅・鉛	46,960,000	58,217	1.2×10^{-3}	図 2-48
4.01 MeV	銅・鉛	168,070,000	50,385	3.0×10^{-4}	図 2-49

表 2-23 鉛における軌道電子のエネルギー準位 [18]

電子軌道	エネルギー準位 (eV)	電子軌道	エネルギー準位 (eV)
<i>K</i> (1 <i>s</i>)	88005	<i>L</i> ₁ (2 <i>s</i>)	15861
<i>L</i> _{2,3} (2 <i>p</i>)	15200, 13055	<i>M</i> ₁ (3 <i>s</i>)	3851
<i>M</i> _{2,3} (3 <i>p</i>)	3554, —	<i>M</i> _{4,5} (3 <i>d</i>)	3066, 2586
<i>N</i> ₁ (4 <i>s</i>)	891.8	<i>N</i> _{2,3} (4 <i>p</i>)	761.9, 643.5
<i>N</i> _{4,5} (4 <i>d</i>)	434.3, 414.2	<i>N</i> _{6,7} (4 <i>f</i>)	141.7, 136.9
<i>O</i> ₁ (5 <i>s</i>)	147	<i>O</i> _{2,3} (5 <i>p</i>)	106.4, 83.3
<i>O</i> _{4,5} (5 <i>d</i>)	20.7, 18.1		

乱角 θ の相関, また, (2) はエネルギーと方位角 ϕ の相関である. なお, 計算コード EGS4 で設定した領域の材質は, 図 2-47 が銅のみとし, 他は銅及び鉛とする.

各図のエネルギーと散乱角の相関より, 光子は図の左上と右下の二つの領域に局在しているが, 方位角については一様である. 特に, 散乱角に対する光子の局在場所の違いから, 光子の発生過程が異なっていることがわかる. すなわち, 左上の領域は金属円板に入射した電子がその原子核によって後方に散乱される過程で生じた光子であり, 右下の領域は金属円板内で進行する電子から生じた光子のうち, 遮蔽体を通過したものである. このため, 前者のエネルギーは低く, 0.2 ~ 0.3 MeV 程度であるが, 後者のエネルギーは高く, 1 MeV 程度である. また, この過程の相違は遮蔽体の有無によって顕著となる. 図 2-47 と図 2-48 を比較すると, 二つの領域に集まる光子の分布が異なっている.

さらに, 鉛の遮蔽体を設けた場合, 後方に散乱される, エネルギー約 80 keV の光子が多く存在している. この光子は, そのエネルギーが一定の値であり, 光子の角度 (θ , ϕ) に依存しないため, 鉛の特性 X 線と考えられる. このエネルギーは, 鉛のエネルギー準位が表 2-23 となるから,

87.3 keV, 84.5 keV, 72.8 keV, 75.0 keV などである。なお、計算コード EGS4 では 4 種類の特性 X 線 ($L_3 - K$, $L_2 - K$, $M_3 - K$, $N_{2,3} - K$) を設定している。

次に、特定の散乱角で光子のエネルギー分布を求め、図 2-50, 図 2-51, 及び図 2-52 に示す。図 2-50 に示した光子のエネルギー分布は図 2-47 より、図 2-51 の分布は図 2-48 より、及び図 2-52 の分布は図 2-49 より求め、各図の (1) は単位エネルギー、入射電子 1 個当たりの光子数、(2) は単位立体角、単位エネルギー、入射電子 1 個当たりの光子数を表している。また、各図で設定した散乱角は、 $0^\circ \sim 180^\circ$, $0^\circ \sim 120^\circ$, $175^\circ \sim 179.1^\circ$ である。

このうち、角度 $0^\circ \sim 120^\circ$ に散乱される光子は図 2-48 の右下に局在するものであり、角度 $175^\circ \sim 179.1^\circ$ の光子は左上に局在するものである。これらの図の (1)、特に図 2-51 及び図 2-52 より、低エネルギー領域では角度 $175^\circ \sim 179.1^\circ$ の光子が、高エネルギー領域では角度 $0^\circ \sim 120^\circ$ の光子が大部分を占めていることがわかる。

さらに、各図の (2) より、単位立体角当たりの光子数は散乱角に対して非対称となり、後方に散乱される光子の強度は強くなる。例えば、角度 $175^\circ \sim 179.1^\circ$ に散乱する光子の強度は、全立体角で平均したものより約 10^2 倍も多くなる。このように後方に散乱する光子が多くなる理由は、RD 構造のビームダンプでは散乱角が 180° 方向に遮蔽体を設置できないため、光子が金属円板から直接外部に放出されるからである。なお、後方に散乱する光子のエネルギー分布は入射電子エネルギーにあまり影響されず、約 $0.1 \sim 0.2$ MeV が最大値となる。

以上の結果を用いて、ビームダンプにおける空気吸収線量率を次のような手順で評価する。

- (1) 光子エネルギーに基づき、空気吸収線量率を評価するエネルギー区分を設定する。
- (2) 設定したエネルギー区分に入る光子数を求め、空気吸収線量率を求める。

まず第一に、文献 [19] より、光子エネルギーに対する単位フルエンス率当たりの空気吸収線量率と 1 cm 線量当量率を図 2-53 に示す。光子エネルギーが 0.06 MeV のとき、空気吸収線量率は最少となるから、エネルギー区分は、図 2-51(1) を参考に 0.06 MeV 以上、10 MeV 以下の範囲で設定する。特に、放射線の遮蔽に関して、発生する空気吸収線量率を合理的に安全側に評価しなければならないことから、上記範囲を 4 個の区分に分割し、各区分で最大となる空気吸収線量率を用いることとする。このため、光子のエネルギーは各区分で 1 種類しか存在せず、空気吸収線量率の統計誤差は光子数から算出する。

すなわち、光子のエネルギー分布において後方に散乱する光子の割合が大部分を占める 0 ~ 0.4 MeV を一つの区分とする。また、他の区分は 0.4 MeV から最大ビームエネルギーまでを対数で均等になるように設定する。なお、ビームエネルギーが 4.01 MeV の場合、光子エネルギーが全体的に低いため、分割は均等でなく、1:1:2 とする。表 2-24 に各エネルギー区分における、単位フルエンス率当たりの空気吸収線量率をビームエネルギー毎に示す。

表 2-24 各エネルギー区分における単位フルエンス率当たりの空気吸収線量率

ビームエネルギー 4.01 MeV		ビームエネルギー 10.51 MeV	
エネルギー区分 (MeV)	空気吸収線量率 (Gyh ⁻¹ ·cm ² s)	エネルギー区分 (MeV)	空気吸収線量率 (Gyh ⁻¹ ·cm ² s)
0 ~ 0.4	6.81×10 ⁻⁹	0 ~ 0.4	6.81×10 ⁻⁹
0.4 ~ 0.6	1.02×10 ⁻⁸	0.4 ~ 1.5	2.20×10 ⁻⁸
0.6 ~ 1.0	1.60×10 ⁻⁸	1.5 ~ 4.0	4.29×10 ⁻⁸
1.0 ~ 4.0	4.29×10 ⁻⁸	4.0 ~ 10	8.36×10 ⁻⁸

表 2-25 ビームダンプ中心から 1 m 離れた地点での空気吸収線量率

ビームエネルギー (MeV)	材質	散乱光子	
		線量率 (Gy/h)	エネルギー (MeV)
10.51	銅	756 ± 7	0.80
10.51	銅・鉛	28.9 ± 0.1	1.1
4.01	銅・鉛	3.39 ± 0.02	0.37

但し、空気吸収線量率は全立体角で平均した値である。

次に、表 2-22 の光子数から各エネルギー区分に入る光子数を求め、空気吸収線量率を表 2-25 及び表 2-26 にまとめる。表 2-25 は全立体角で平均した空気吸収線量率、表 2-26 は特定の散乱角の範囲で平均した空気吸収線量率である*。この空気吸収線量率はビームダンプの中心から 1 m 離れた地点における値である。すでに、図 2-51 及び図 2-52 の (2) に示した通り、ビームダンプで発生する光子は散乱角に対して非対称であり、後方散乱ほど多くなる特長がある。表 2-26 より、

*真空容器も考慮し、ビームエネルギー 10.51 MeV、平均ビーム電流 20 mA における空気吸収線量率を求めると、全立体角で平均した場合 12.2 ± 0.07 Gy/h、また、特定の散乱角の範囲で平均した場合を図 4-9 に示す。

表 2-26 特定の散乱角で平均した空気吸収線量率

(1) ビームエネルギー 4.01 MeV の場合

散乱角 (度)	空気吸収線量率			平均エネルギー (MeV)
	区分 (MeV)	値 (Gy/h)	合計 (Gy/h)	
0 ~ 120	0.0 ~ 0.4	$(7.9 \pm 0.7) \times 10^{-3}$	1.34 ± 0.02	1.2
	0.4 ~ 0.6	$(3.8 \pm 0.2) \times 10^{-2}$		
	0.6 ~ 1.0	0.190 ± 0.005		
	1.0 ~ 3.5	1.10 ± 0.02		
120 ~ 150	0.0 ~ 0.4	$(5.5 \pm 0.4) \times 10^{-2}$	1.15 ± 0.03	0.81
	0.4 ~ 0.6	$(9.7 \pm 0.6) \times 10^{-2}$		
	0.6 ~ 1.0	0.33 ± 0.01		
	1.0 ~ 3.5	0.67 ± 0.03		
150 ~ 170	0.0 ~ 0.4	1.08 ± 0.03	2.84 ± 0.08	0.38
	0.4 ~ 0.6	0.20 ± 0.01		
	0.6 ~ 1.0	0.47 ± 0.03		
	1.0 ~ 3.5	1.09 ± 0.07		
170 ~ 175	0.0 ~ 0.4	9.1 ± 0.3	16.6 ± 0.5	0.28
	0.4 ~ 0.6	1.7 ± 0.1		
	0.6 ~ 1.0	2.7 ± 0.2		
	1.0 ~ 3.5	3.1 ± 0.4		
175 ~ 179.1	0.0 ~ 0.4	691 ± 4	970 ± 6	0.23
	0.4 ~ 0.6	80 ± 2		
	0.6 ~ 1.0	93 ± 2		
	1.0 ~ 3.5	107 ± 4		
179.1 ~ 180	0.0 ~ 0.4	1970 ± 40	2740 ± 60	0.23
	0.4 ~ 0.6	220 ± 10		
	0.6 ~ 1.0	250 ± 20		
	1.0 ~ 3.5	310 ± 40		

但し、空気吸収線量率は中心から 1 m 離れた地点の値である。

(2) ビームエネルギー 10.51 MeV の場合

散乱角 (度)	空気吸収線量率			平均エネルギー (MeV)
	区分 (MeV)	値 (Gy/h)	合計 (Gy/h)	
0 ~ 120	0.0 ~ 0.4	0.115 ± 0.005	28.6 ± 0.2	1.8
	0.4 ~ 1.5	8.36 ± 0.07		
	1.5 ~ 4.0	16.3 ± 0.1		
	4.0 ~ 10	3.9 ± 0.1		
120 ~ 150	0.0 ~ 0.4	0.14 ± 0.01	6.2 ± 0.2	1.1
	0.4 ~ 1.5	3.5 ± 0.1		
	1.5 ~ 4.0	2.3 ± 0.1		
	4.0 ~ 10	0.20 ± 0.04		
150 ~ 170	0.0 ~ 0.4	1.13 ± 0.05	8.3 ± 0.3	0.88
	0.4 ~ 1.5	3.6 ± 0.2		
	1.5 ~ 4.0	3.2 ± 0.2		
	4.0 ~ 10	0.5 ± 0.1		
170 ~ 175	0.0 ~ 0.4	8.7 ± 0.5	27 ± 1	0.45
	0.4 ~ 1.5	13 ± 1		
	1.5 ~ 4.0	5.1 ± 0.9		
	4.0 ~ 10	0		
175 ~ 179.1	0.0 ~ 0.4	1450 ± 10	2800 ± 20	0.33
	0.4 ~ 1.5	1040 ± 20		
	1.5 ~ 4.0	280 ± 10		
	4.0 ~ 10	23 ± 5		
179.1 ~ 180	0.0 ~ 0.4	3900 ± 100	7700 ± 200	0.33
	0.4 ~ 1.5	3100 ± 200		
	1.5 ~ 4.0	700 ± 100		
	4.0 ~ 10	60 ± 40		

但し、空気吸収線量率は中心から 1 m 離れた地点の値である。

ビームエネルギーが 10.51 MeV の場合、180° 方向の線量率は 0° 方向の 270 倍の強度となる。さらに、ビームエネルギーが減少するとその差はさらに大きくなり、4.01 MeV の場合 2,000 倍である。

表 2-26 に示した空気吸収線量率の妥当性を評価するため、文献 [20] の値と比較する。文献 [20] の空気吸収線量率は、原子番号が 73 より大きく、かつ単色エネルギーの電子線が非常に厚い標的に垂直入射したとき発生する光子 (X 線) から得られた値である。また、図 2-54 は、横軸にビームエネルギーを、縦軸に入射電流 1 mA 当たりの、標的中心から 1 m 離れた地点での空気吸収線量率を表したものであり、0° 方向と 90° 方向に分けている。特に、JNC 加速器に対応するビームエネルギー 10.51 MeV、平均ビーム電流 20 mA での空気吸収線量率は、0° 方向で 5×10^5 Gy/h、90° 方向で 1.5×10^4 Gy/h である。従って、計算コード EGS4 から得られた表 2-26 の値は、文献 [20] の約 500 分の 1 から約 20,000 分の 1 となる。

ところで、加速器の平均ビーム電流が低い場合、ビームダンプの 180° 方向の空気吸収線量率は、散乱角が 90° における値を代用し、評価する場合がある。しかし、JNC 加速器のように平均ビーム電流が高い場合、放射線防護の観点から、任意の散乱角に対する線量率を評価することが重要となる。今回計算コード EGS4 による 180° 方向の空気吸収線量率を評価した結果、文献 [20] に示された 90° 方向の値の約半分であることがわかった。

2.5.4 冷却水における水素発生量の評価

金属円板内を流れる冷却水から、放射線による加水分解により水素分子が生成される。このため、本項ではその生成量を評価する。例えば、運動エネルギー 10 MeV、平均ビーム電流 20 mA の電子線が全て冷却水中でエネルギーを損失した場合、毎秒生成される水素分子数 N_{H_2} は、

$$\begin{aligned} N_{H_2} &= G_{H_2} N_e \frac{\Delta E_e}{100} \\ &= 0.71 \cdot 1.25 \times 10^{17} \cdot 10^5 \\ &= 8.9 \times 10^{21} \text{ s}^{-1} \end{aligned} \quad (2.22)$$

と評価される。ここで、 G_{H_2} は水素に対する G 値 0.71 [21]、すなわち、水中で 100 eV のエネルギー損失があるとき生成する水素の分子数、 $N_e \text{ s}^{-1}$ は電流 20 mA に相当する 1 秒当たりの

電子数、及び ΔE_e eV は電子 1 個当たり損失するエネルギー量 10^7 eV を表わす。毎秒生成する 8.9×10^{21} 個の水素分子は、標準状態における 1 時間当たり 1.2 m^3 の水素ガス量に相当する。

第 1.2 項で述べたビームダンプ設計方針 (3) によると、RD 構造のビームダンプは放射化の可能性を減らしているため、放射線による加水分解も同様に少ないと考えられる。従って、RD 構造のビームダンプにおける水素分子発生量を計算コード EGS4 により評価する。

評価する方法として、まず冷却水経路の内壁 ($R=16, 12$, 及び 9 cm) を通過する、入射電子 1 個当たりの光子数を求め、光子 1 個当たりのエネルギー損失より、水素分子発生量を得る。なお、内壁を通過する電子は、銅中の飛程が短いことを考慮し、本計算では無視する。

まず初めに、冷却水経路の内壁を通過する光子のエネルギー分布を求める。冷却水経路の内壁は図 2-4 における円筒 15, 20, 及び 21 と定義し、この内壁を内側から外側へ移動する光子を、内壁を通過したとする。すなわち、内壁を通過する光子の領域番号として、Z 方向が N_{pa} 以上、 N_{pb} 以下で、かつ R 方向が出発時 N_{ca} 以下で到着時 N_{cb} とする (表 2-27 参照)。このような光子のエネルギー分布を表 2-28 の光子数の欄に表す。ここで、光子数の単位として、入射電子 1 個当たり、単位面積当たり通過する光子数とする。なお、内壁の面積は $7.63 \times 10^3 \text{ cm}^2$ である。

次に、厚さ 2 cm の水中における光子 1 個当たりのエネルギー損失を計算する。光子のエネルギー損失量は、円筒形状 (直径 4 cm , 高さ 2 cm) の水を計算コード EGS4 で定義し、その軸に平行に直径 2 cm の光子線を入射させ、直径 2 cm , 高さ 2 cm の領域で損失するエネルギーとする。入射する光子線の数密度は、半径方向によらず、一定とする。また、光子線のエネルギーは、表 2-28 のエネルギー区分を代表する一つの値とし、区分内でエネルギー損失が最大となる値である。但し、 $0 \sim 0.4 \text{ MeV}$ の区分では 5 種類のエネルギーによる平均損失量である。なお、表の括弧内の数値は計算で用いた光子のエネルギーである。

図 1-4 のビームダンプにおける冷却水経路の内壁の面積が $1124\pi \text{ cm}^2$ であるから、1 電子当たり、水中で損失するエネルギー ΔE_γ は 670 eV/e^- となる。従って、冷却水経路における冷却水

表2-27 計算コード EGS4 における冷却水経路の定義

モジュール 番号	円筒の定義	領域番号			
		N_{p_a}	N_{p_b}	N_{c_a}	N_{c_b}
1	半径 15.2 cm, 長さ 25 cm	5	14	21	22
2	半径 12.8 cm, 長さ 25 cm	15	24	20	21
3, 4	半径 8.8 cm, 長さ 60 cm	25	49	15	16

表2-28 水中における光子エネルギー損失

エネルギー 区分 (MeV)	光子数 ($1/e^-/cm^2$)	1 光子当たりの エネルギー損失 (MeV)	1 電子当たりのエネ ルギー損失 ΔE_γ (MeV/ e^-/cm^2)
0.0 ~ 0.4	4.8×10^{-6}	2.7×10^{-2} (0.2 MeV)	1.3×10^{-7}
0.4 ~ 0.8	3.8×10^{-6}	4.7×10^{-3} (0.8 MeV)	1.8×10^{-8}
0.8 ~ 1.2	1.6×10^{-6}	6.3×10^{-3} (1.2 MeV)	1.0×10^{-8}
1.2 ~ 1.6	9.8×10^{-7}	7.4×10^{-3} (1.6 MeV)	7.3×10^{-9}
1.6 ~ 2.0	6.5×10^{-7}	8.2×10^{-3} (2.0 MeV)	5.3×10^{-9}
2.0 ~ 4.0	1.4×10^{-6}	9.7×10^{-3} (4.0 MeV)	1.4×10^{-8}
4.0 ~ 8.0	4.2×10^{-7}	9.7×10^{-3} (4.0 MeV)	4.1×10^{-9}
8.0 ~ 10	6.1×10^{-9}	9.1×10^{-3} (8.0 MeV)	5.6×10^{-11}
合計	1.4×10^{-5}	—	1.9×10^{-7}

から毎秒発生する水素分子数は、式(2.22)と同様に得られ、

$$\begin{aligned}
 N_{H_2} &= G_{H_2} N_e \frac{\Delta E_\gamma}{100} \\
 &= 0.71 \cdot 1.25 \times 10^{17} \cdot 6.7 \\
 &= 5.9 \times 10^{17} \text{ s}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{2.23}$$

となる。この値は式(2.22)と比較すると、15,000 分の 1 であり、水素ガス量は、標準状態で、1 時間当たり 79 cm^3 に相当する。文献 [21] によると、発生した水素ガスは冷却水 1 ℓ 当たり、標準状態で約 18 cm^3 だけ溶解するため、直ちにガス化しない。実際、ビームダンプで使用する冷却水量は約 1 m^3 であるため、10 MeV, 200 kW の電子線を約 230 時間照射するまで気化しないと予想される。しかし、水素ガスが発生した場合に備え、冷却水配管は閉鎖系に設定すると

もに、冷却水配管に接続するバッファータンクの容積を少なくし、バッファータンク内の圧力を監視する。また、安全のため、送水ポンプは防爆タイプとする。

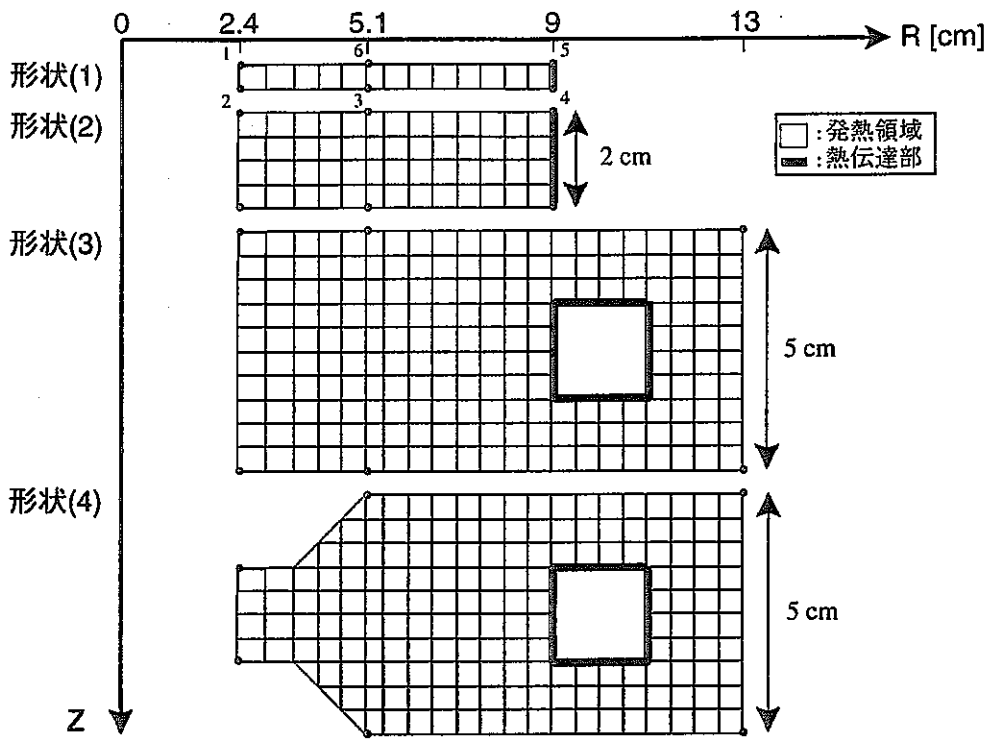


図2-1 計算コード ALGOR で設定した各中空状金属円板のメッシュ。各円板はZ軸に対して軸対称である。黒丸は代表的な格子点である。

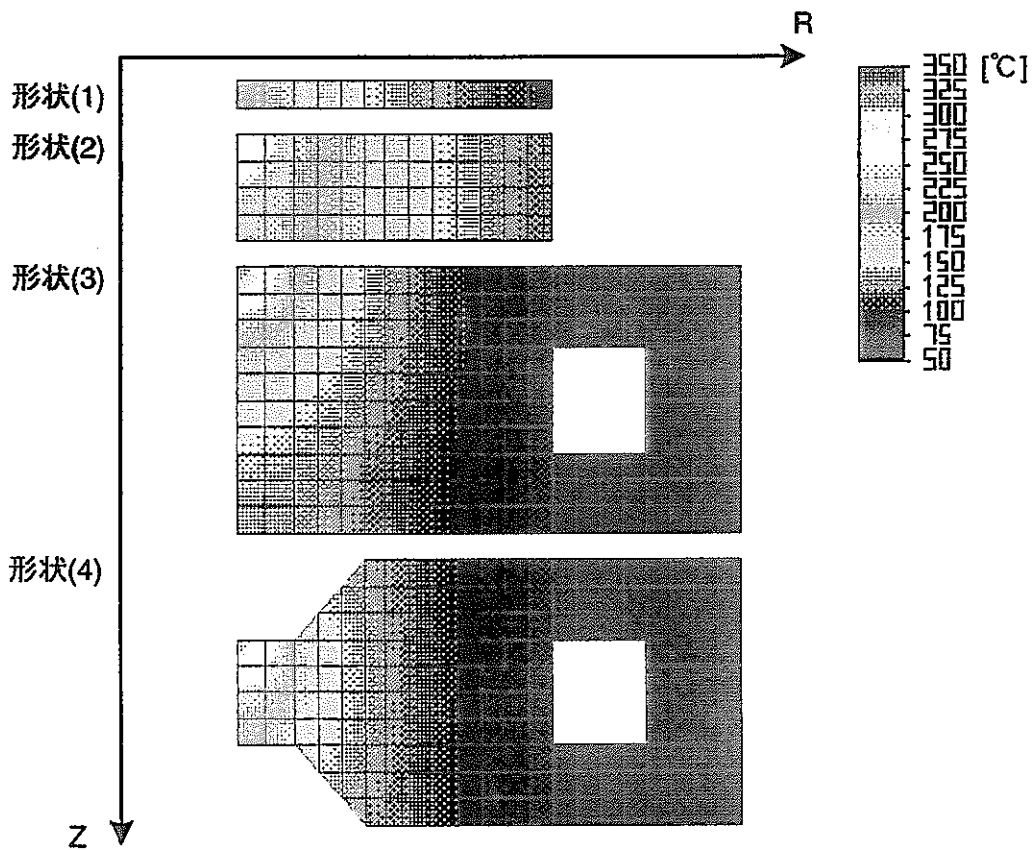


図2-2 計算コード ALGOR で得られた各中空状金属円板の温度分布。

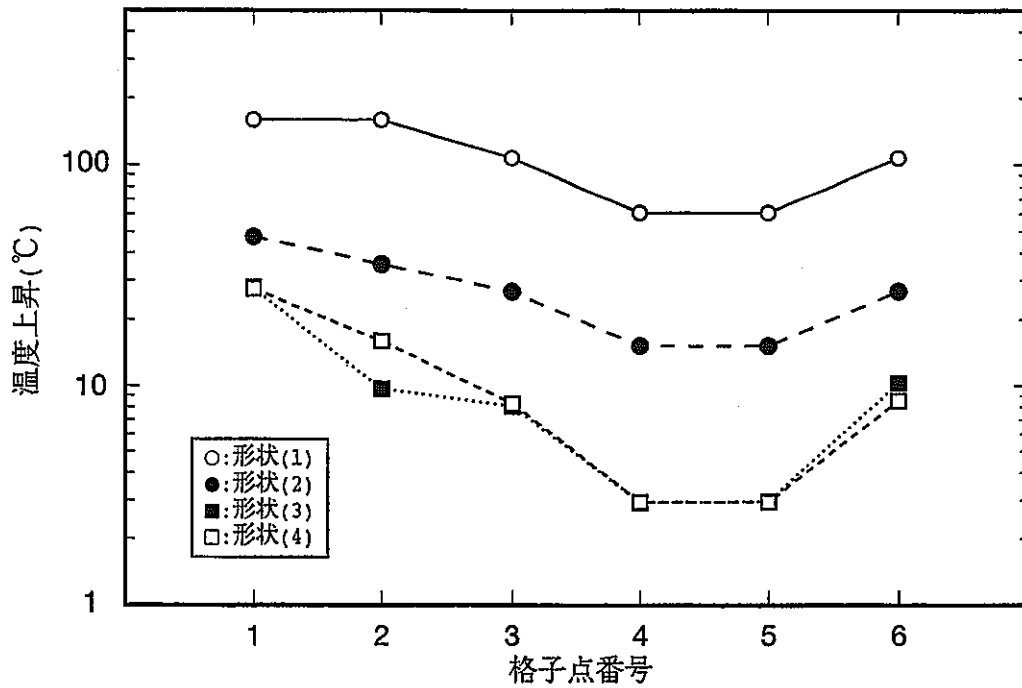


図2-3 各金属円板の代表的な格子点における温度上昇。
温度上昇は発熱量 1 kWで規格化する。

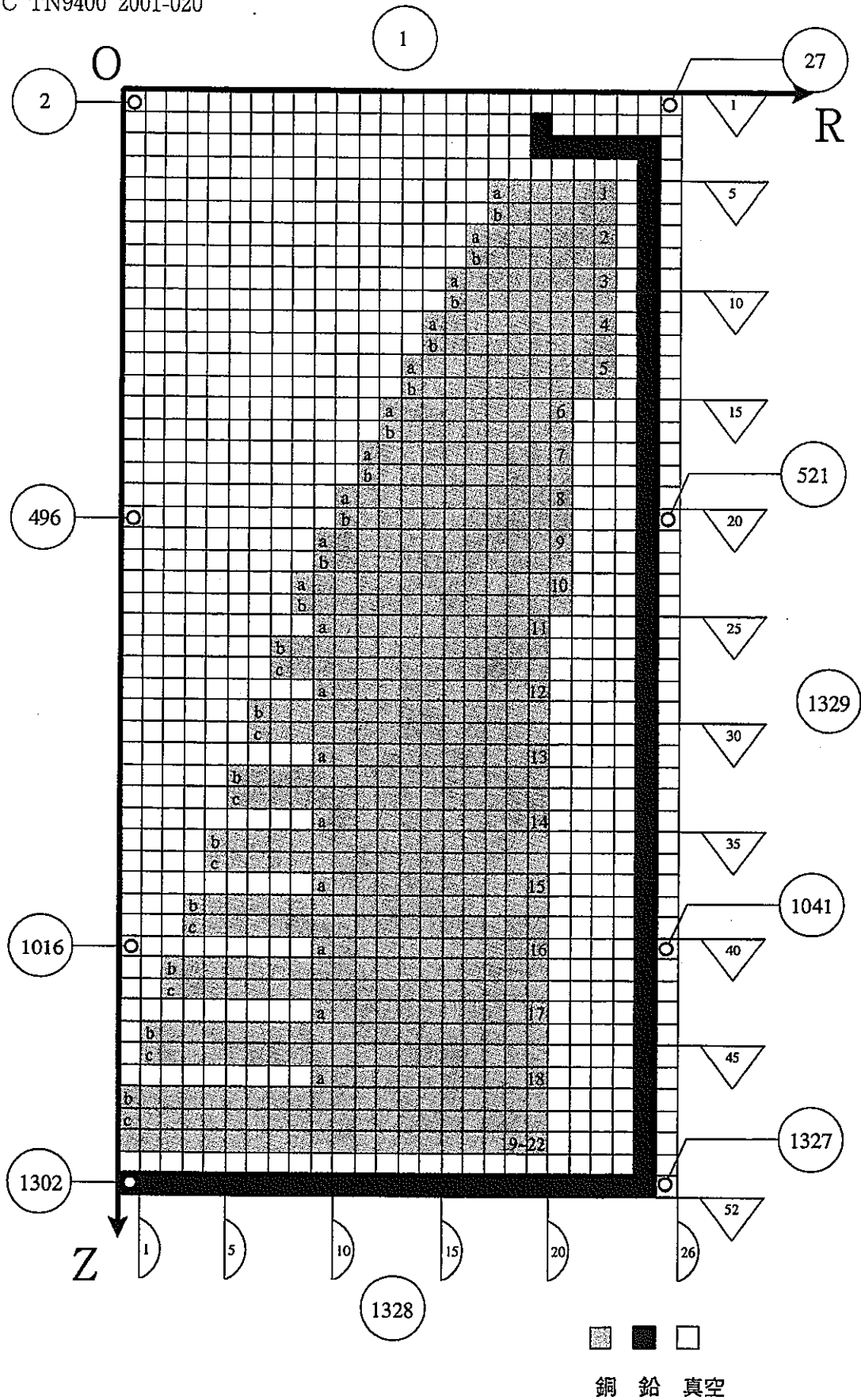


図2-4 計算コード EGS4 で定義したビームダンプのモデル。
 下向き三角印は平板の番号、半円印は円筒の番号、丸
 印は領域番号を表す。また銅領域の左にある数字(1, ...,
 22)は円板の番号を表し、右の英字(a, b, c)は分割した
 円板の領域を表す。

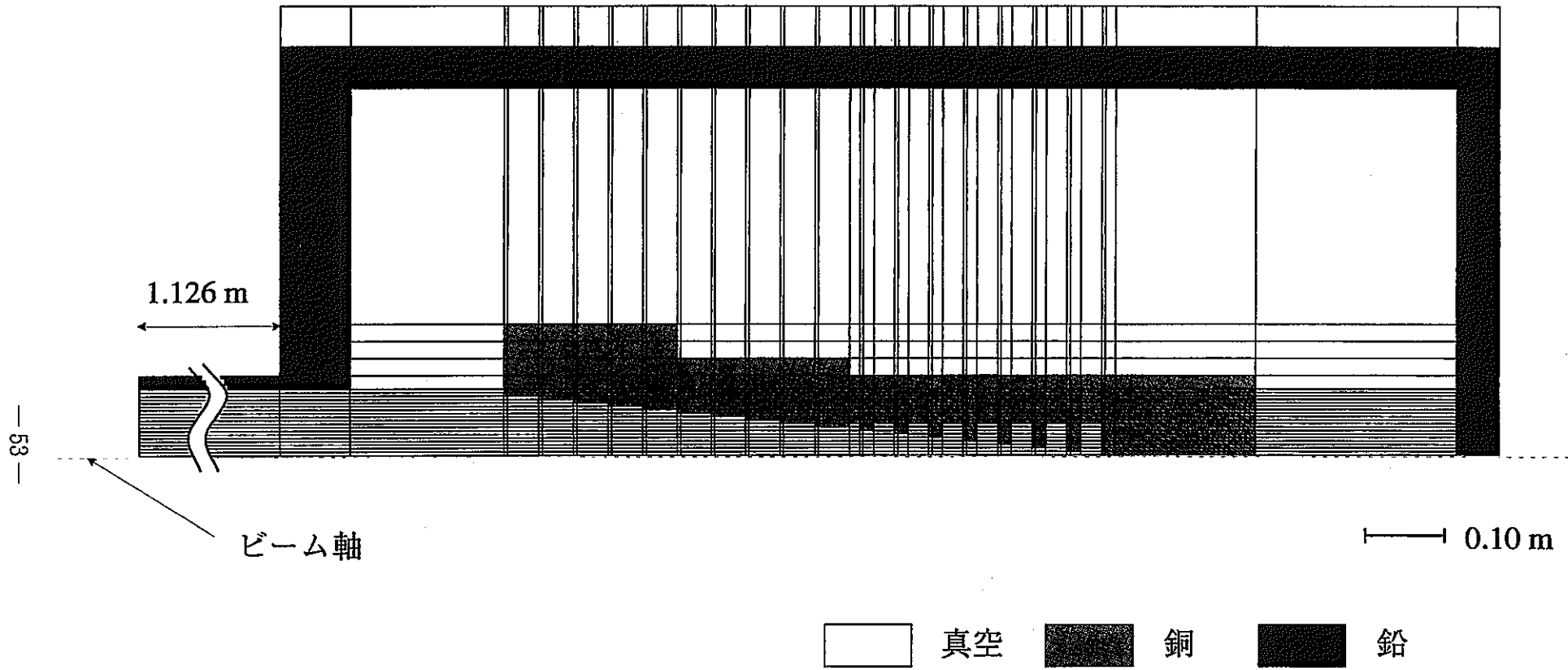


図2-5 計算コード EGS4 で定義したビームダンプのスケールモデル。
モデルはビーム軸に対して対称である。

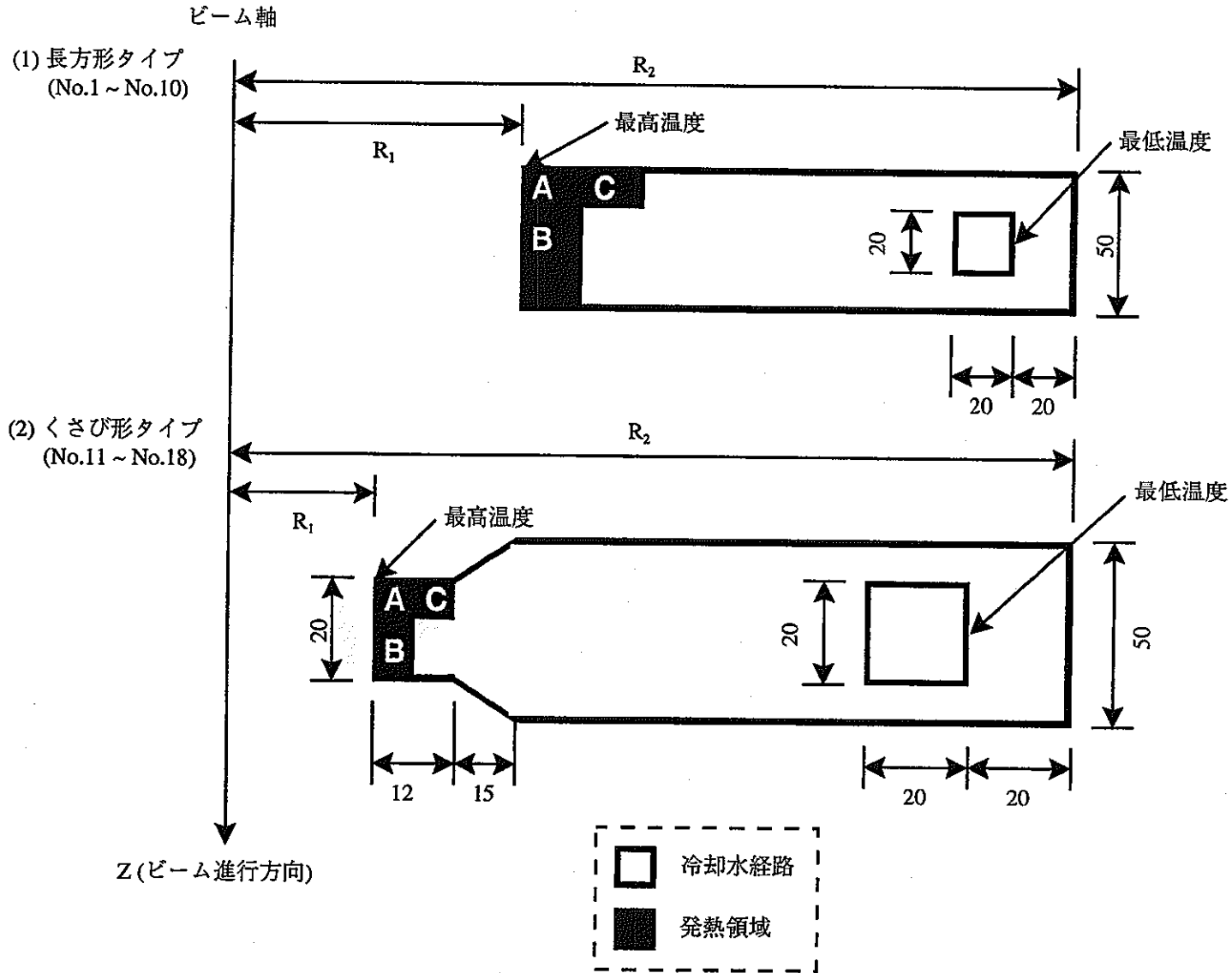


図2-6 中空状リングの断面と発熱領域の定義。
各断面は軸対称であり、電子線は+Z方向に進行している。

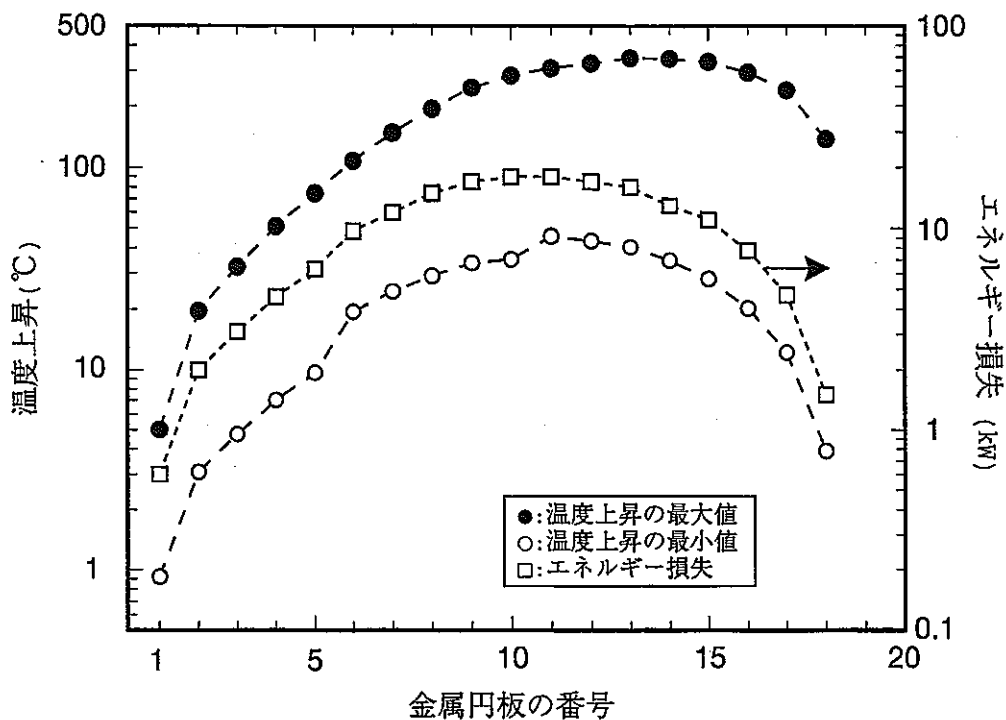


図2-7 各金属円板における温度上昇とエネルギー損失の関係

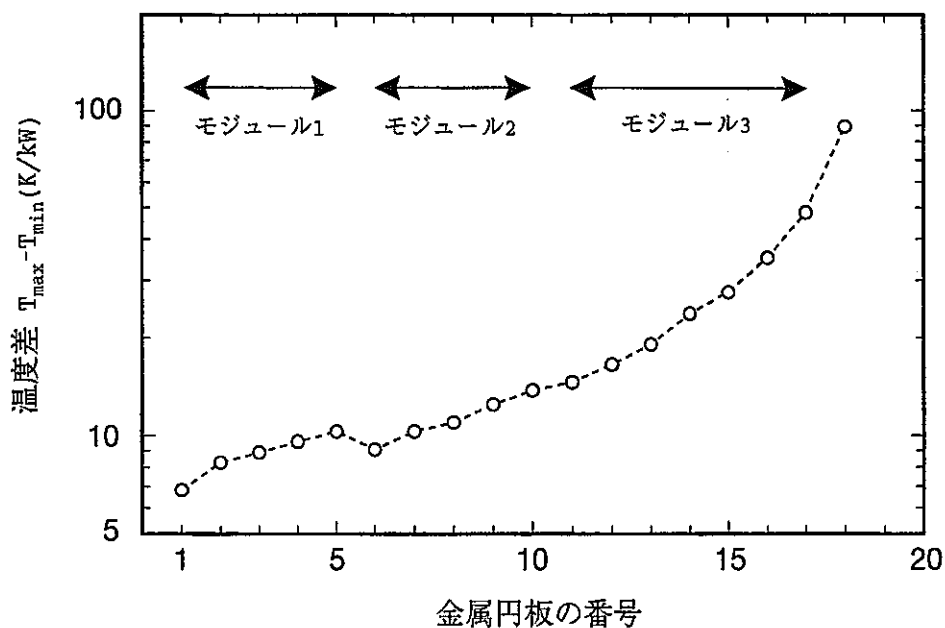


図2-8 各金属円板における1kW当たりの温度差

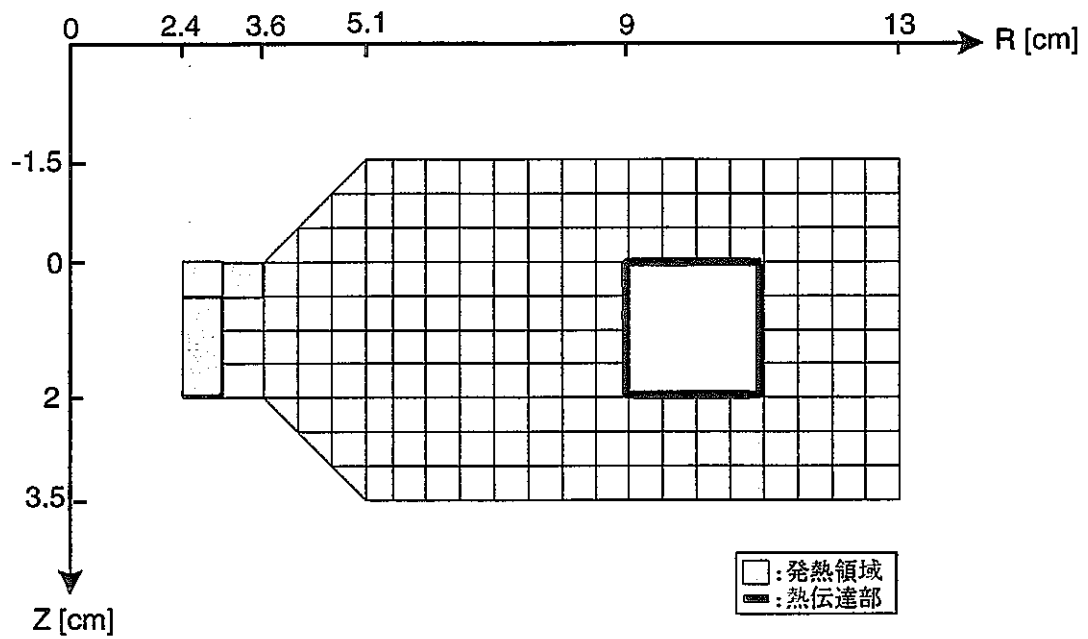


図2-9 計算コード ALGOR で設定した金属円板 No.14 のメッシュ。円板はZ軸に対して軸対称である。

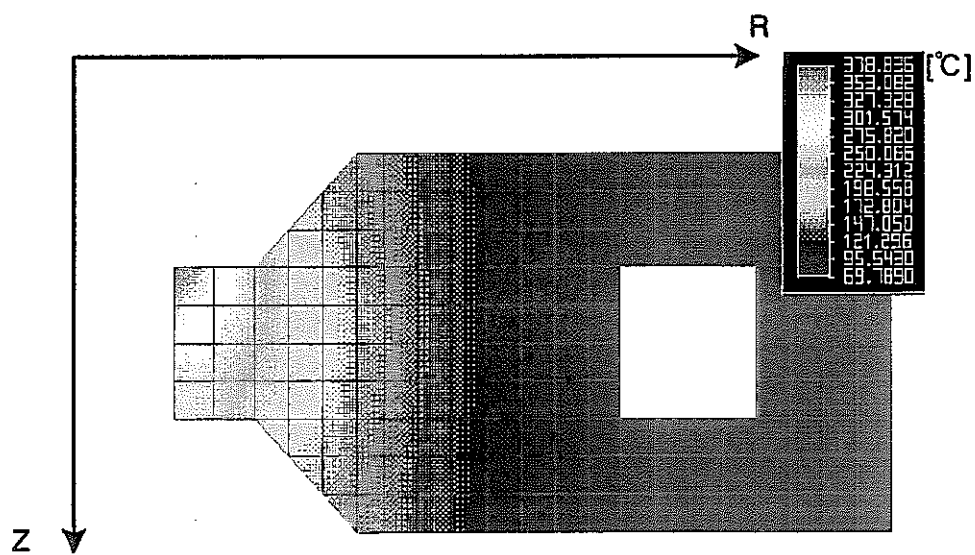


図2-10 計算コード ALGOR で得られた金属円板 No.14 の温度分布。

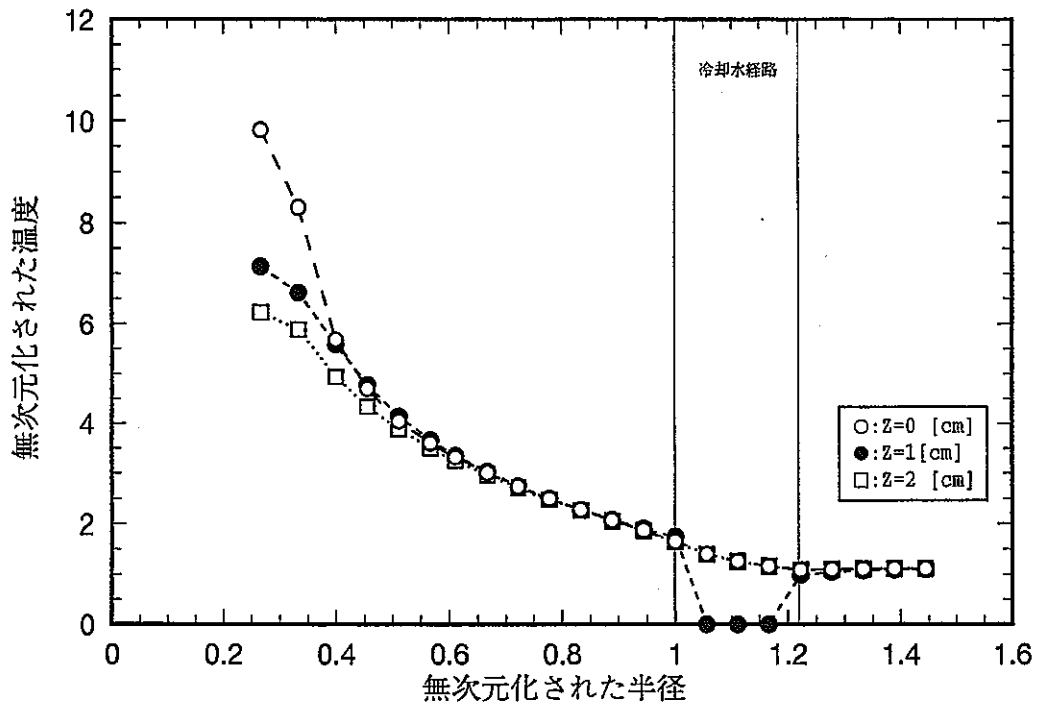


図2-11 金属円板 No.14 における半径方向の温度。
 横軸、縦軸は無次元化した半径及び温度を表す。
 なお、半径1は冷却水経路の内径である。

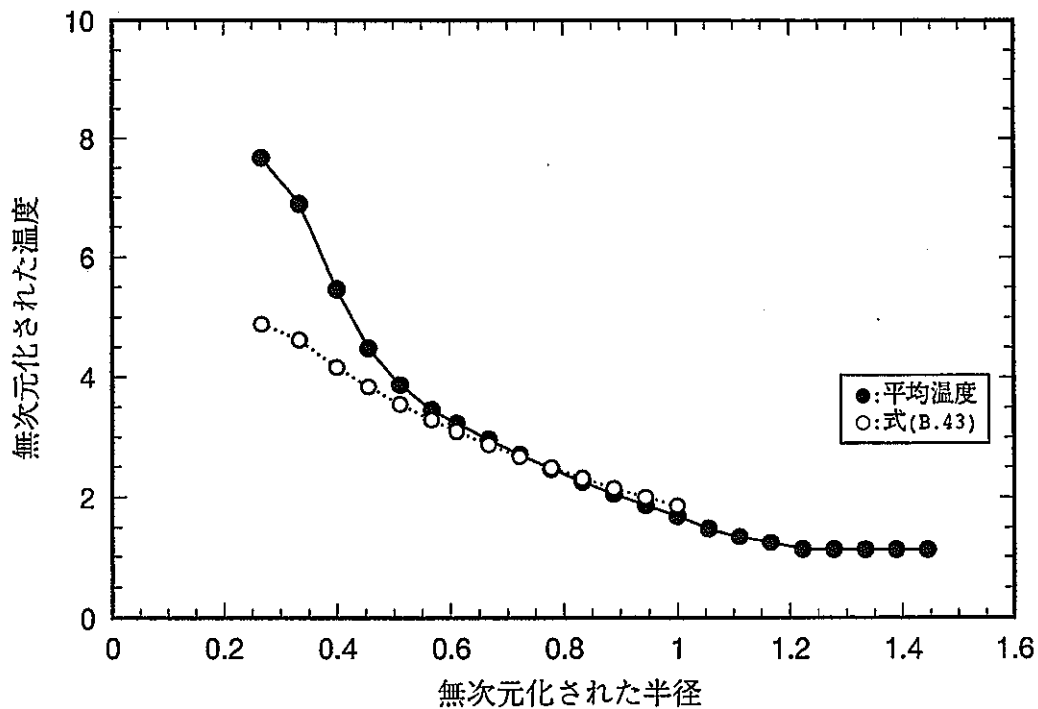


図2-12 金属円板 No.14 における平均温度。

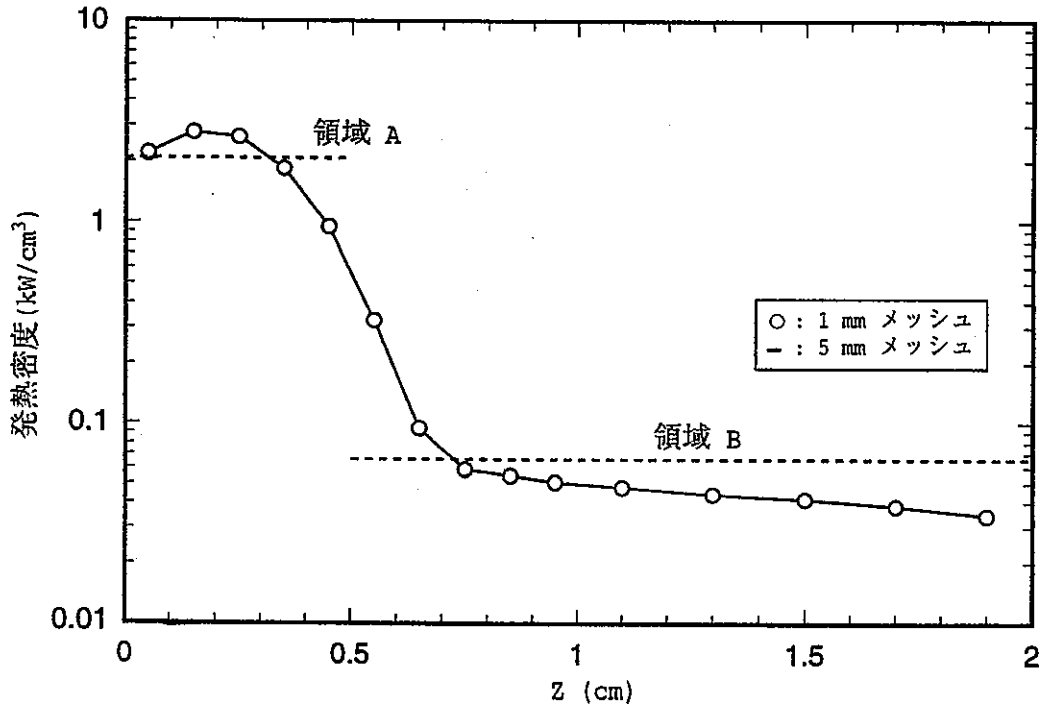


図2-13 1 mm メッシュと 5 mm メッシュにおける発熱密度の相違。点線は 5 mm メッシュである領域 A 及び B における値を表し、丸印は 1 mm メッシュにおける値である。

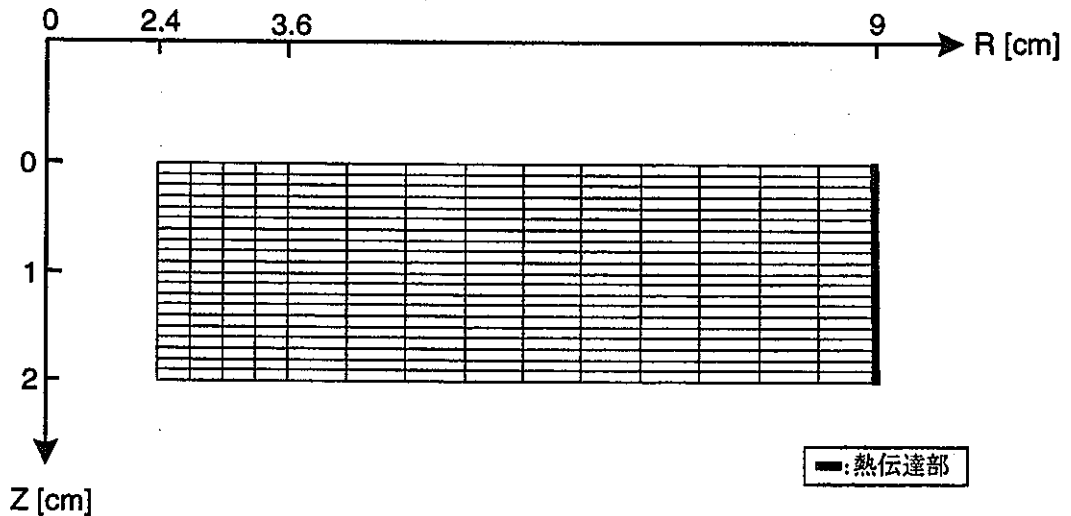


図2-14 計算コード ALGOR で設定した評価用金属円板のメッシュ。発熱領域は $2.4 \text{ [cm]} \leq R \leq 3.0 \text{ [cm]}$ である。

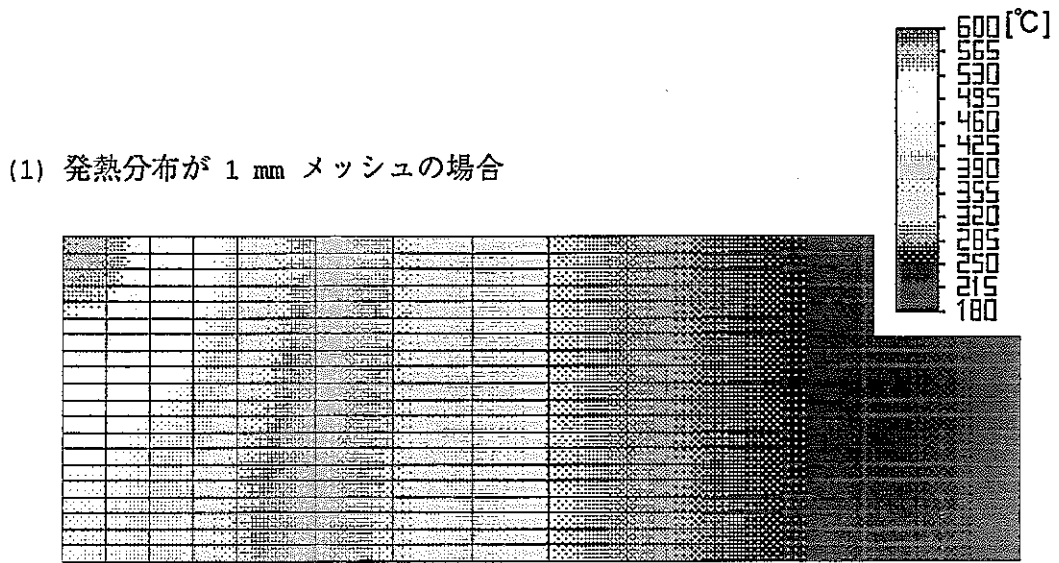


図2-15 計算コード ALGOR で求めた評価用金属円板の温度。
発熱密度は(1)が 1 mm メッシュ、(2)が 5 mm メッシュで
ある。

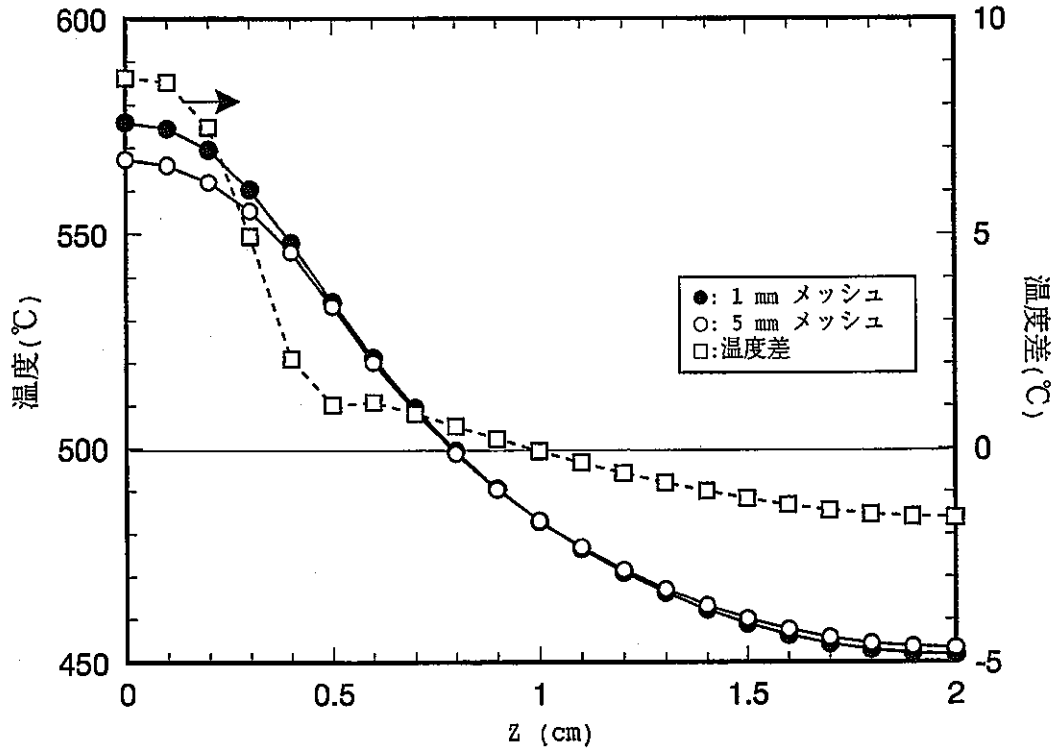


図2-16 1 mm メッシュと 5 mm メッシュにおける温度分布の相違。黒丸は 5 mm メッシュ、白丸は 1 mm メッシュの温度を表す。□印は両者の差である。

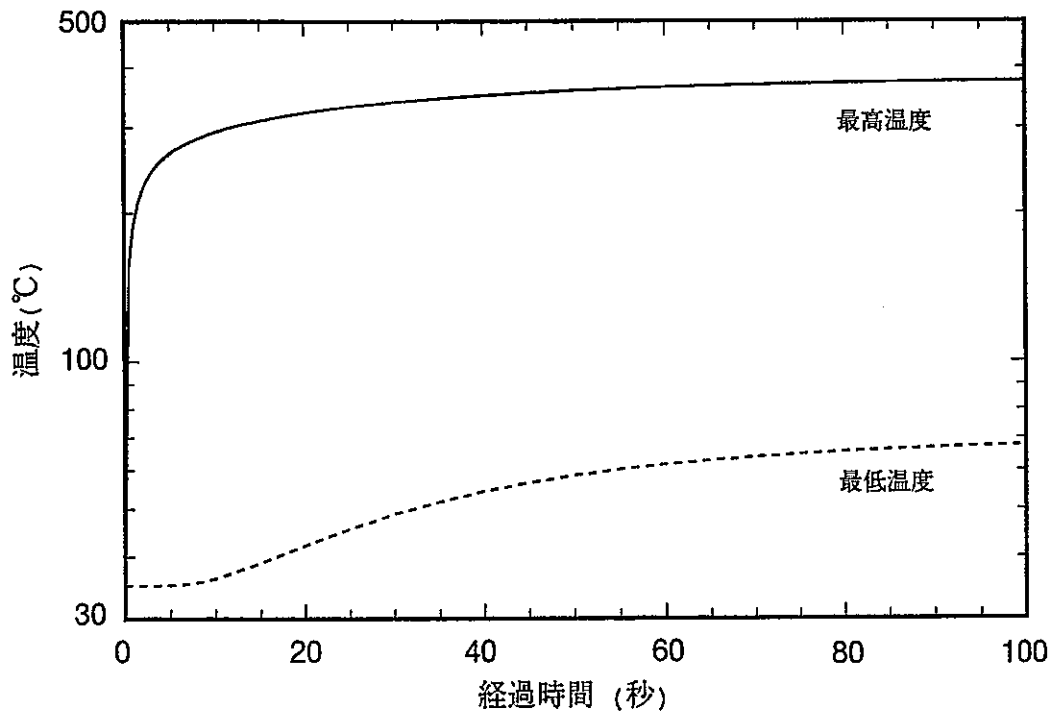


図2-17 金属円板 No.14 における加熱時の温度変化(1)。加熱は時間的に一様とする。

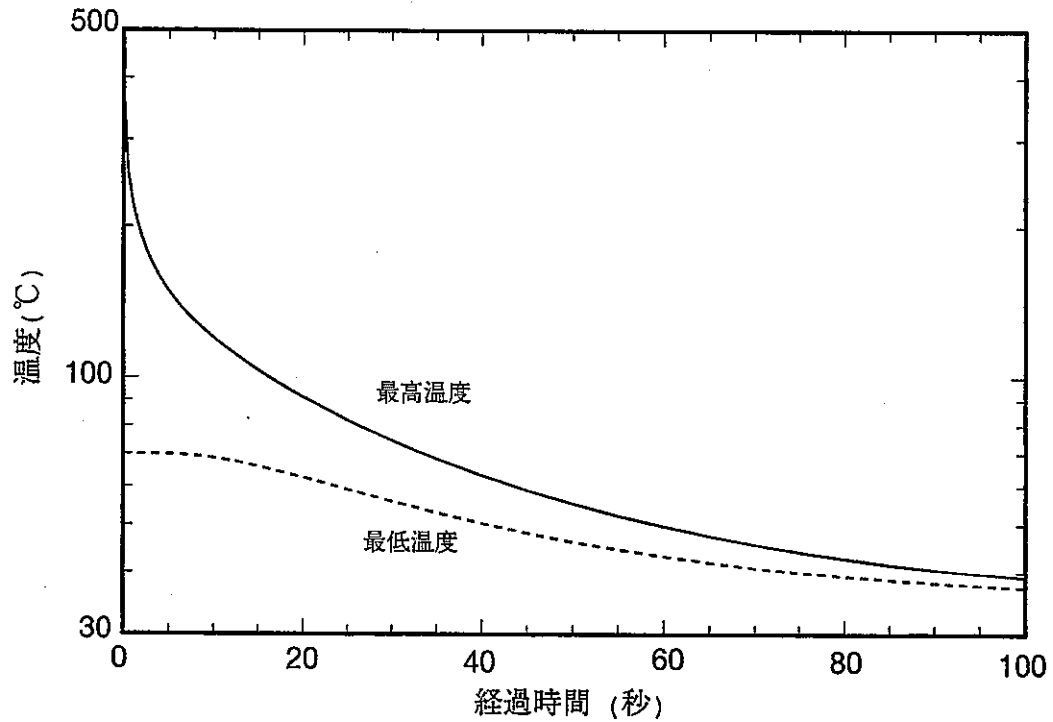


図2-18 金属円板 No.14 における除熱時の温度変化。
除熱は時間的に一様とする。

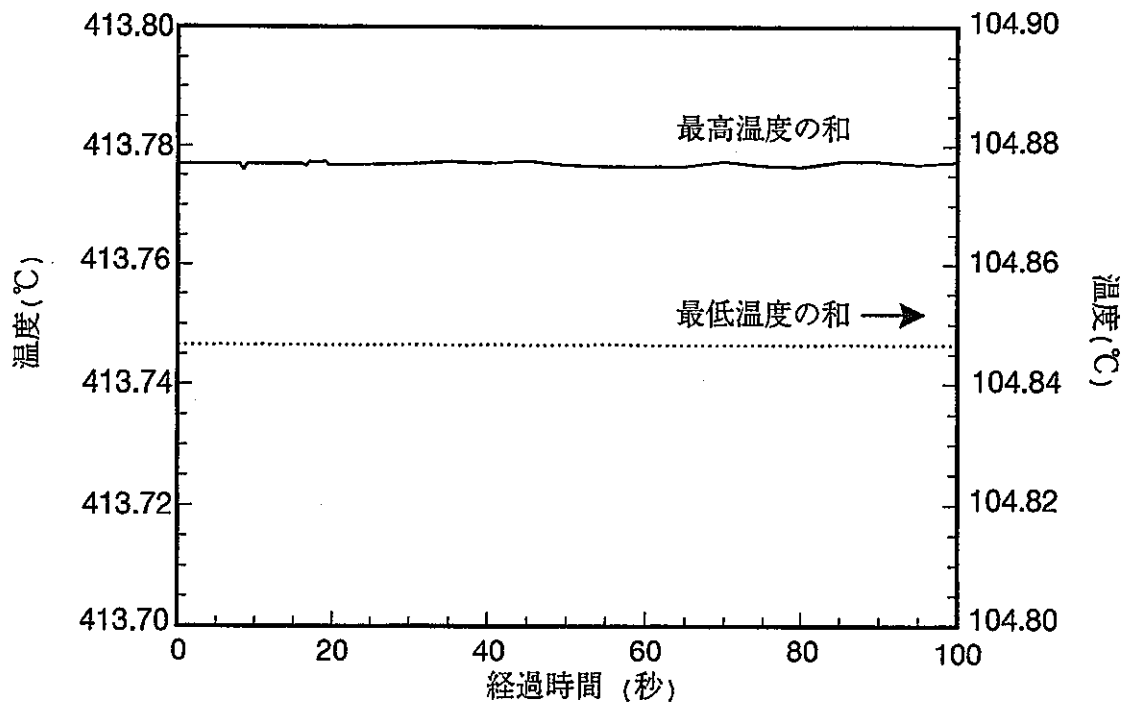


図2-19 金属円板 No.14 における、加熱時と除熱時の温度の和。実線は最高温度の和、点線は最低温度の和である。

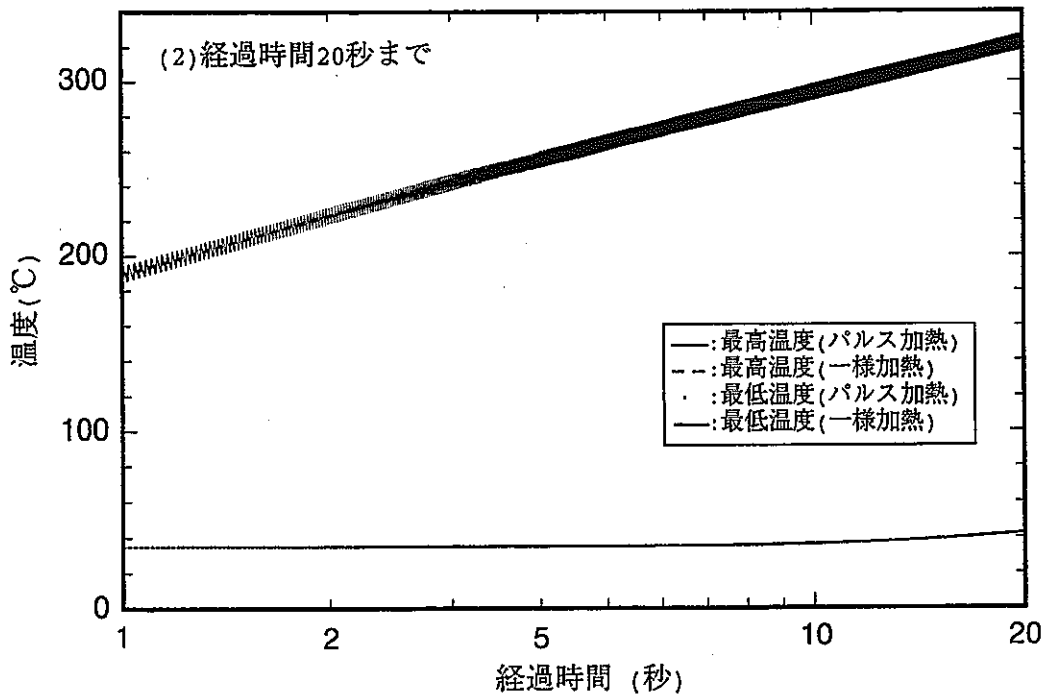
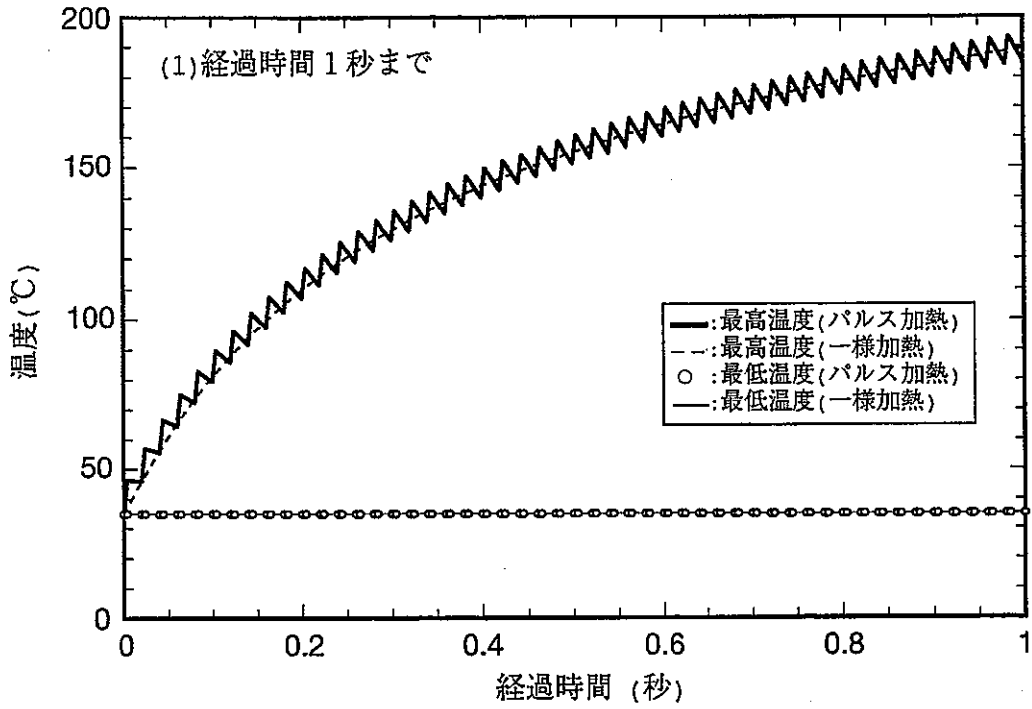


図2-20 金属円板 No.14 における加熱時の温度変化(2)。加熱は実際の電子線を模擬したパルス状とする。

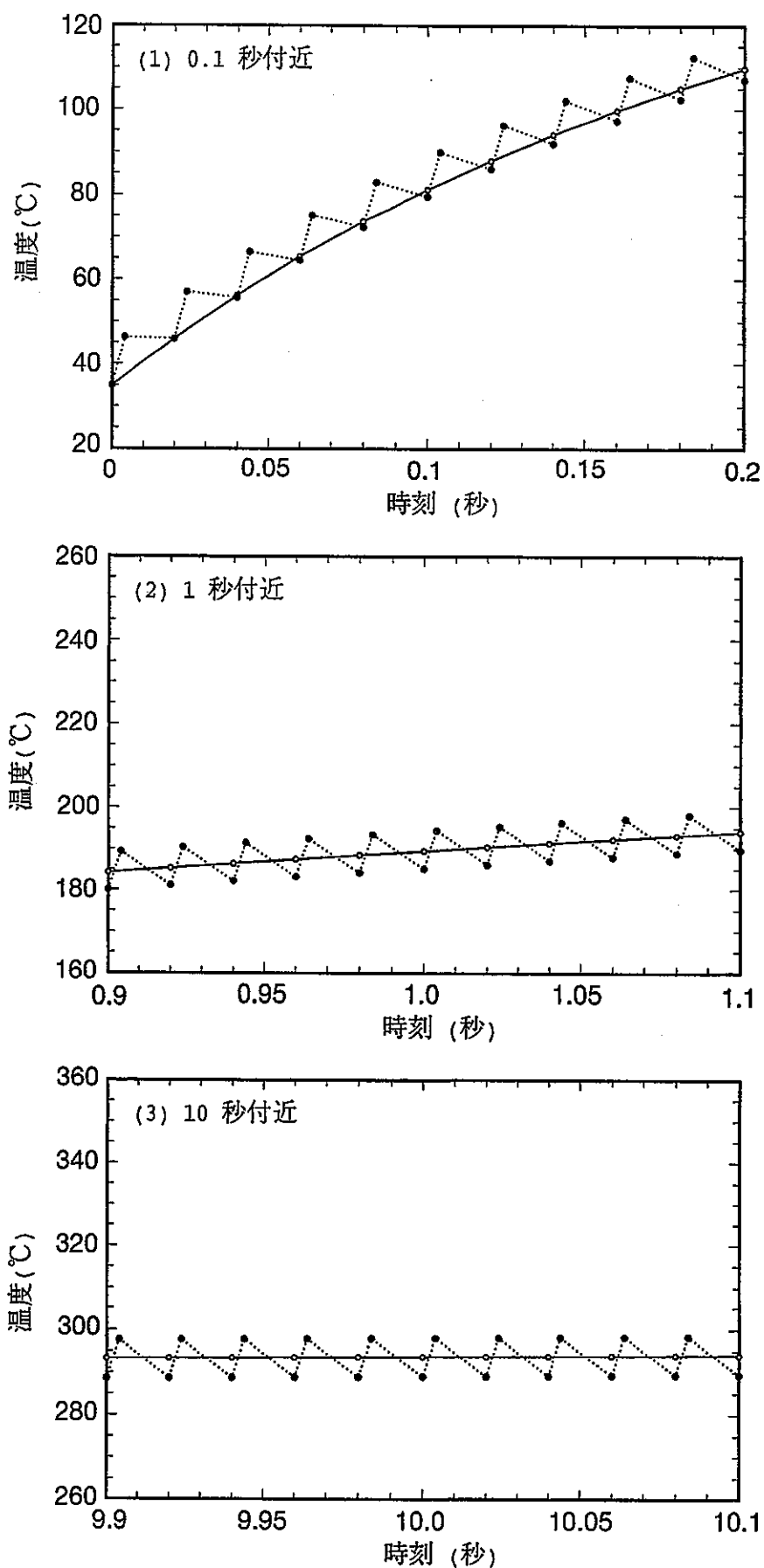


図2-21 特定の時刻における金属円板 No.14 の最高温度の比較。白丸は一様加熱、黒丸はパルス加熱を表す。

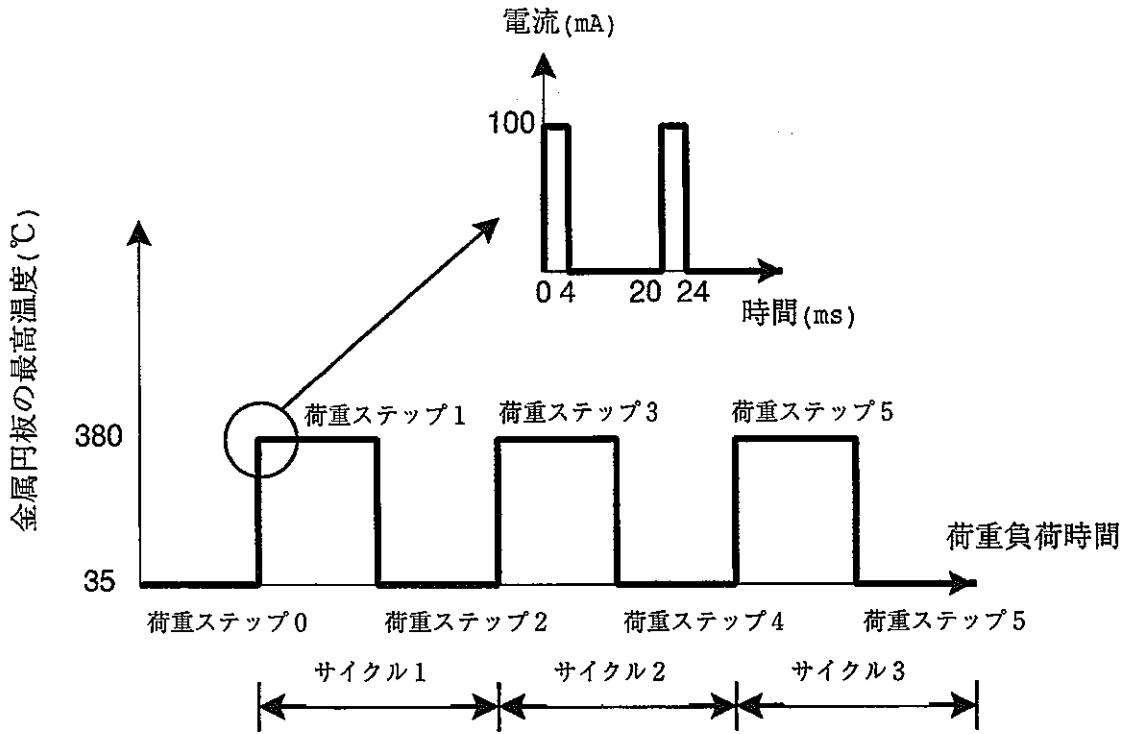


図2-22 金属円板 No.14 における温度履歴の模式図。

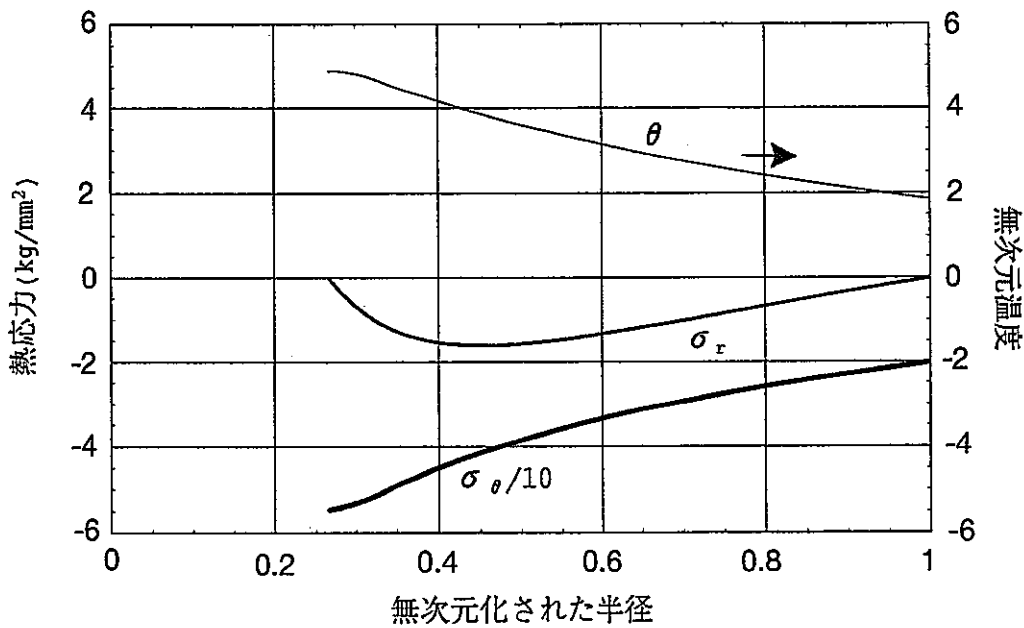


図2-23 中空状金属円板における温度及び熱応力の解析解。円板に与えた発熱は、1.07 kW である。

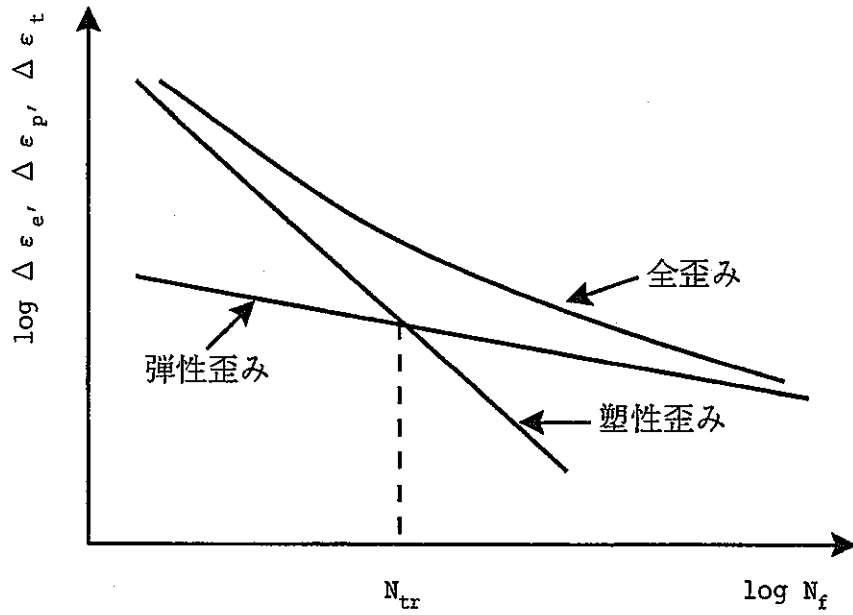


図2-24 弾性歪み範囲, 塑性歪み範囲, 及び全歪み範囲と疲労寿命関係の模式図。

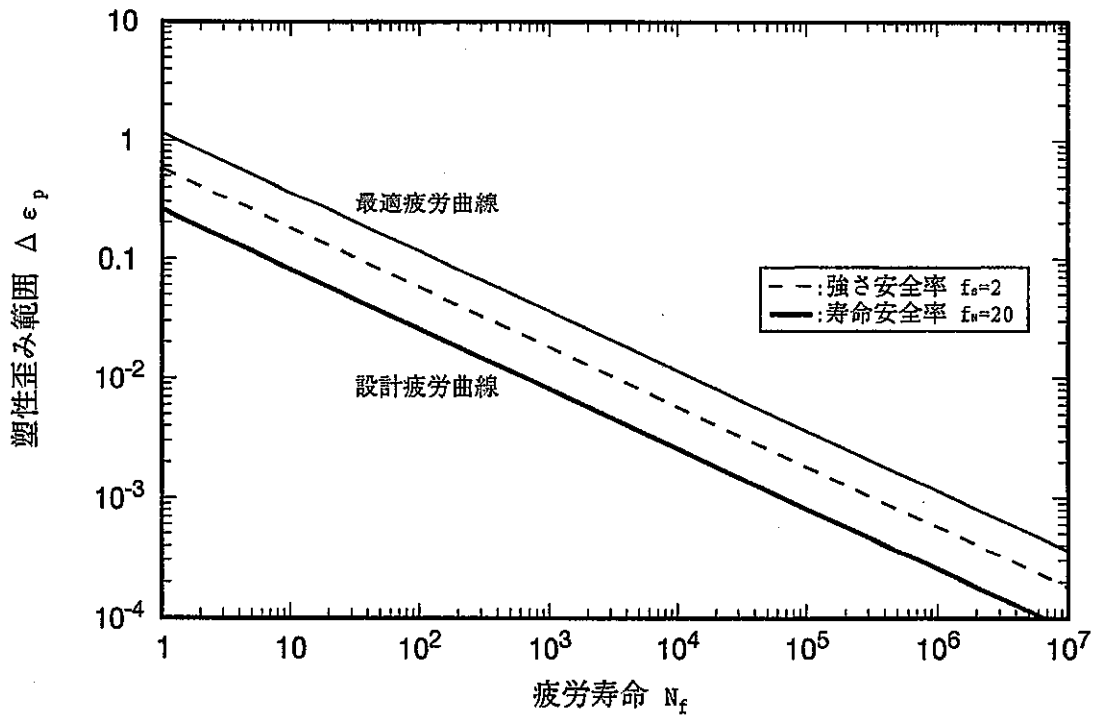


図2-25 無酸素銅における塑性歪み範囲と疲労寿命の関係。破断時の絞りを0.9とした最適疲労曲線と設計疲労曲線を示す。なお、設計疲労曲線を算出する際使用した各安全率の曲線も示す。

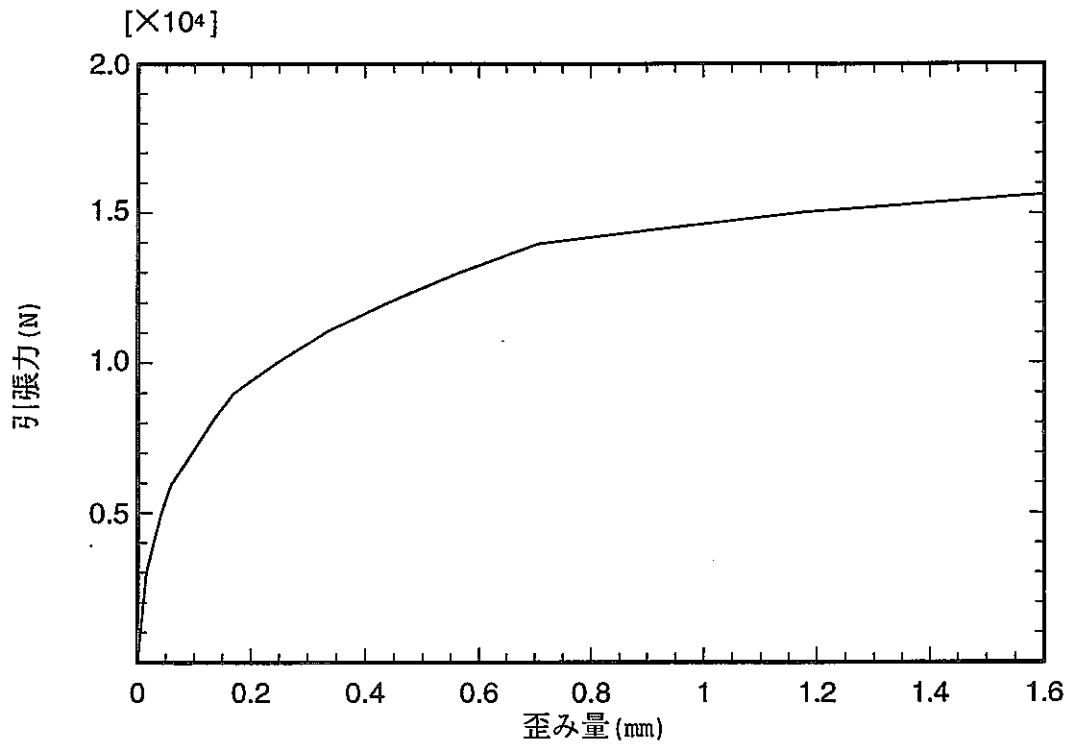


図2-26 無酸素銅における応力と歪みの関係。
引張試験によって得られたデータを用いる。

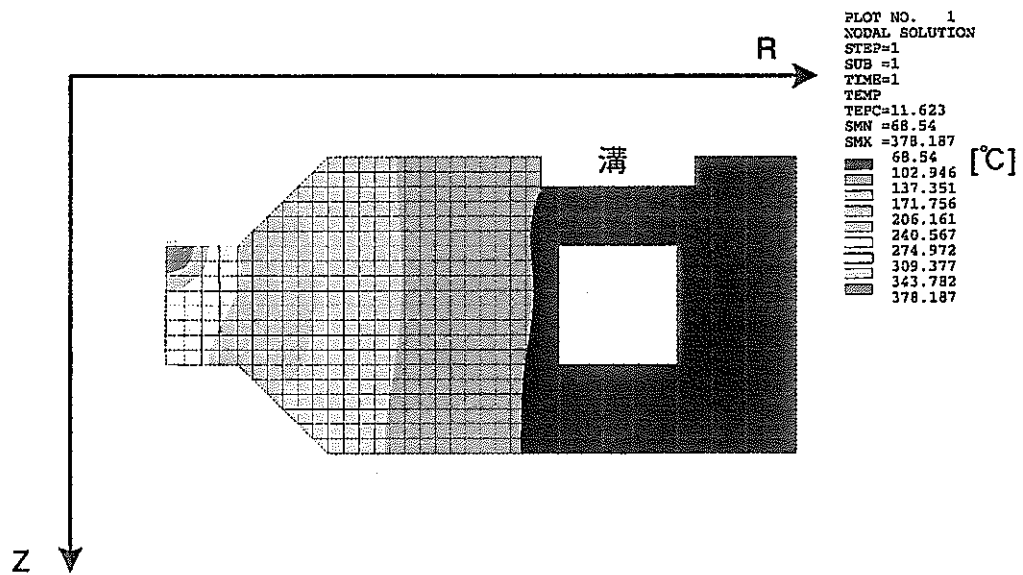


図2-27 計算コード ANSYS で得られた金属円板
No.14 の温度分布。

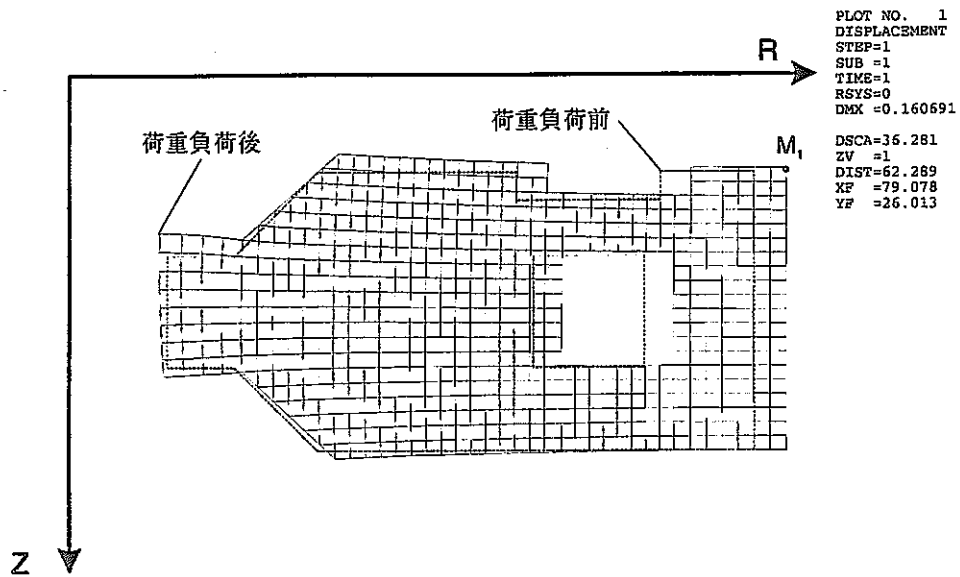


図2-28 荷重ステップ1における金属円板 No.14の変形。最大変位は M_1 点である。

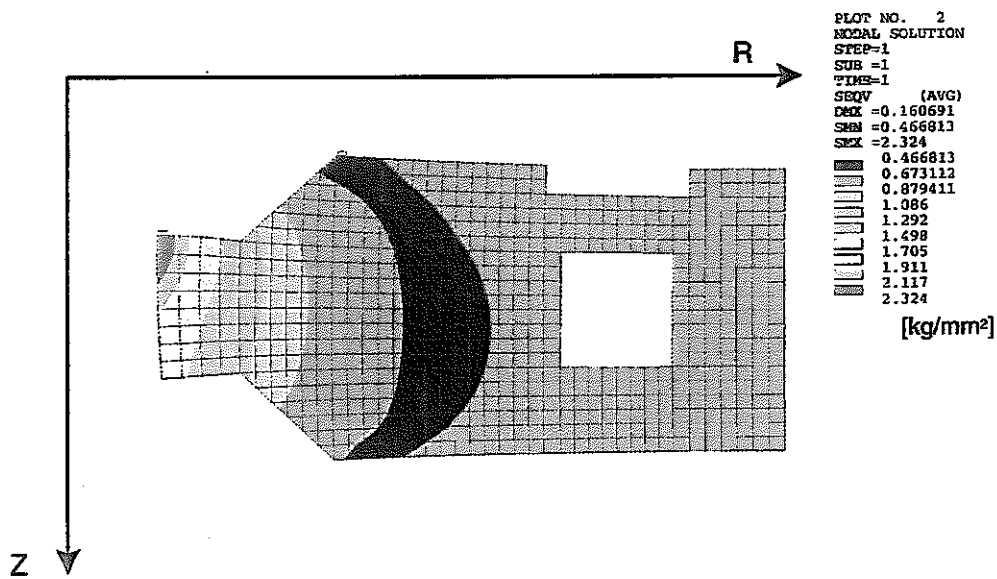


図2-29 荷重ステップ1における金属円板 No.14のミーゼス等価応力。円板の形は図2-28の変形を考慮する。

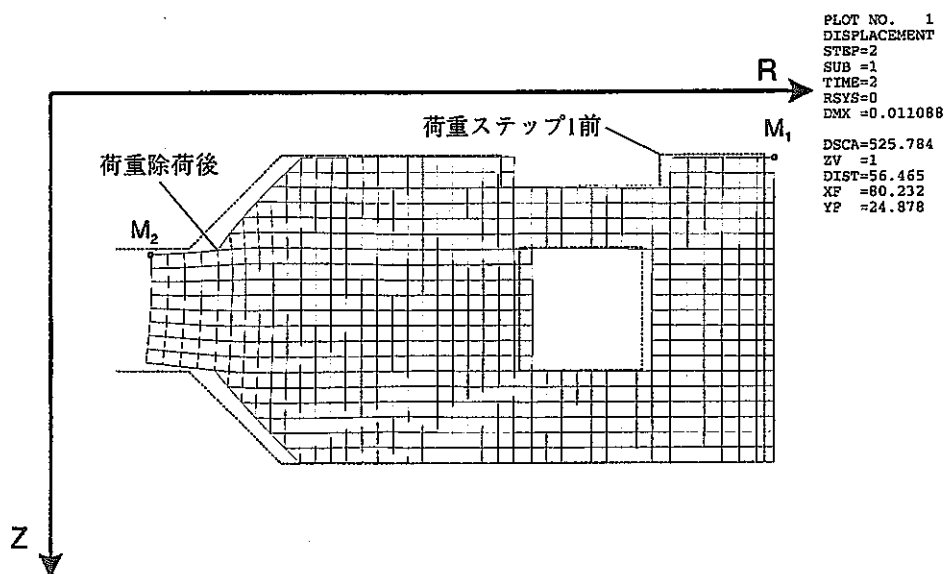


図2-30 荷重ステップ2における金属円板 No.14 の変形。最大変位は M_2 点である。

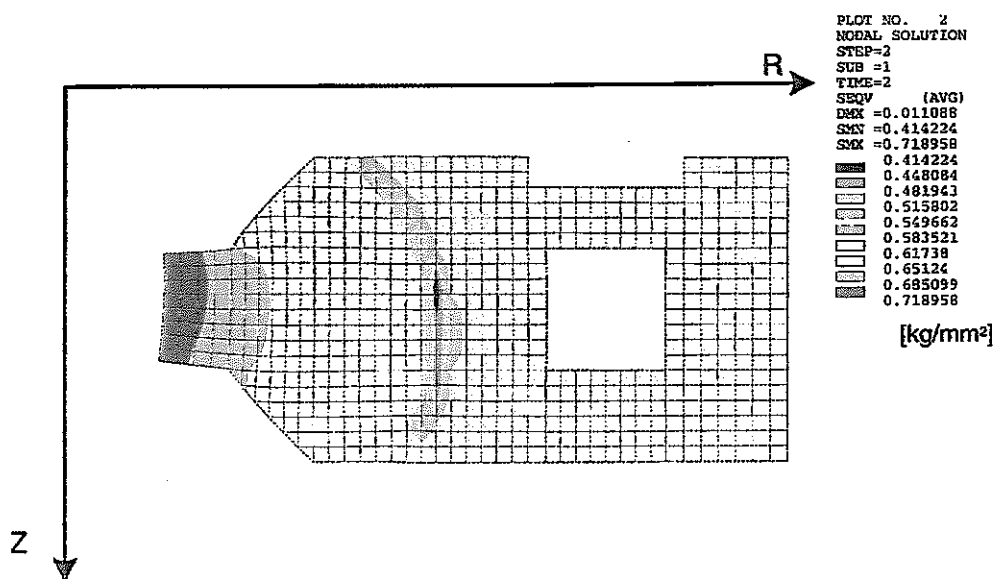


図2-31 荷重ステップ2における金属円板 No.14 のミーゼス等価応力。円板の形は図2-30の変形を考慮する。

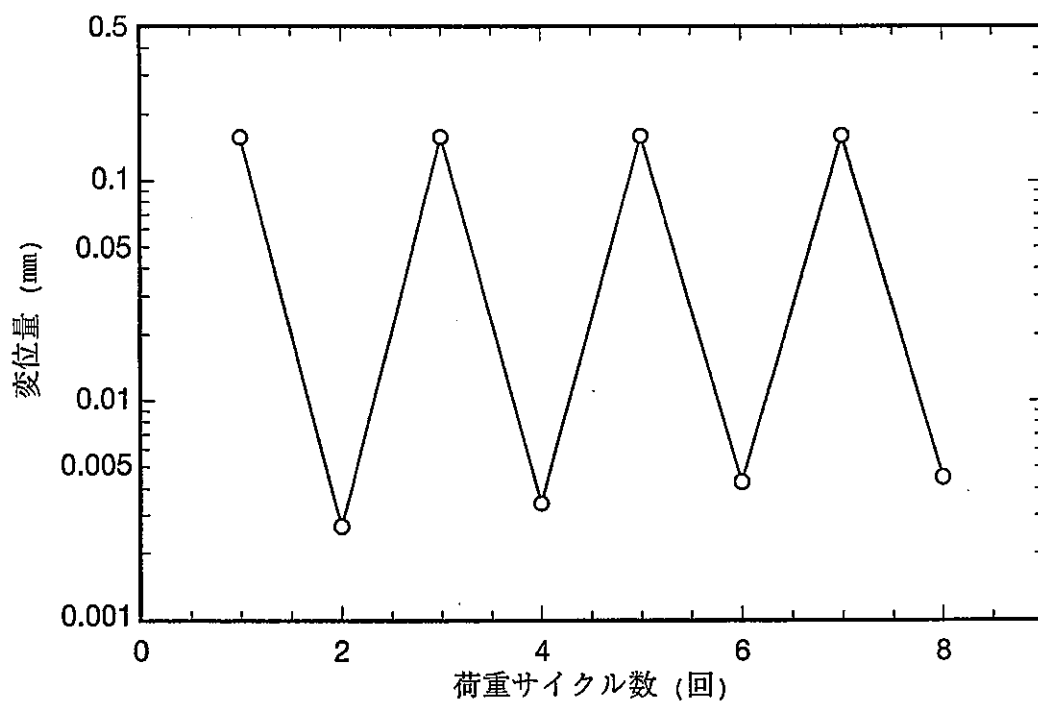
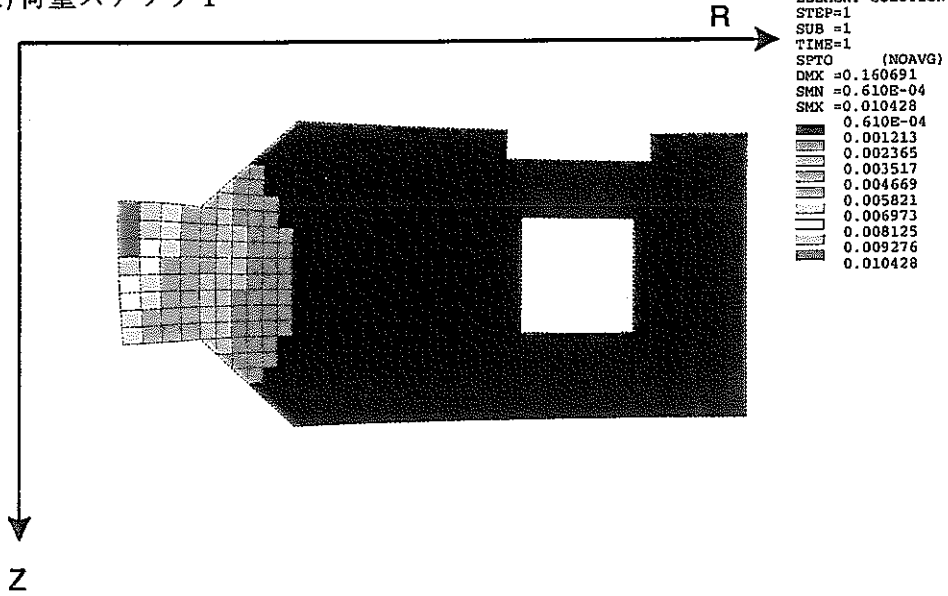


図2-32 荷重サイクルによる M_1 点での半径方向の変位量。

(1) 荷重ステップ 1



(2) 荷重ステップ 2

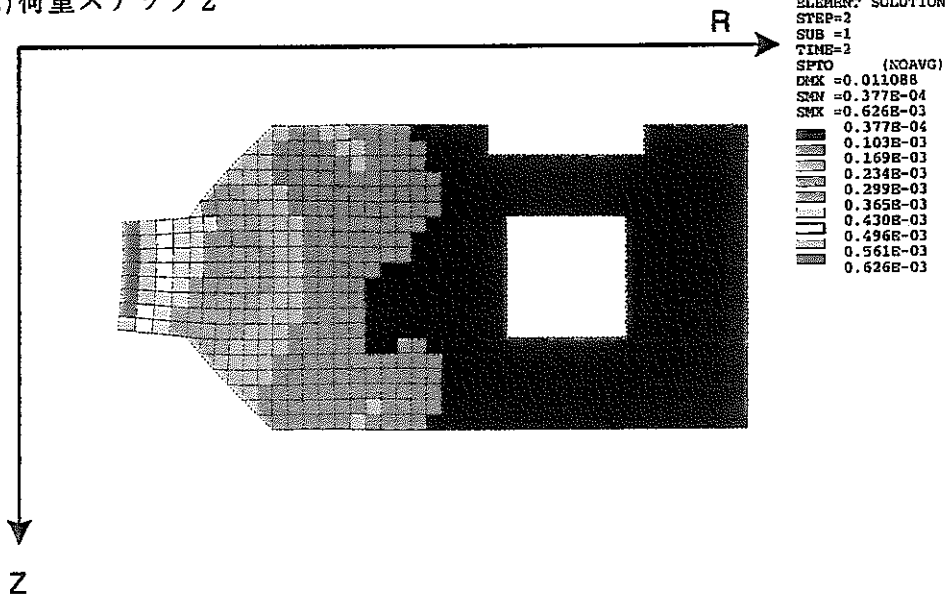
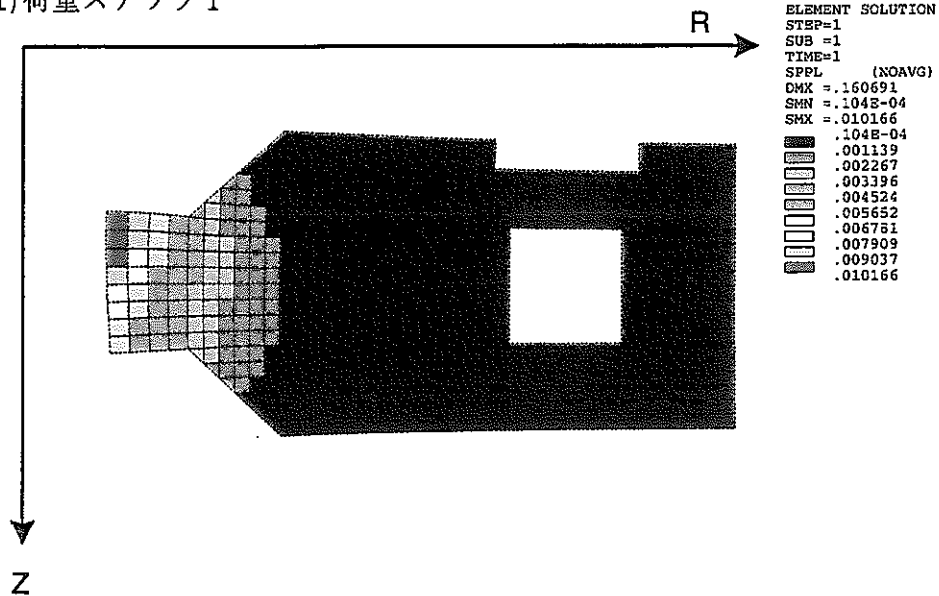


図2-33 荷重ステップ 1 及び 2 における金属円板 No.14 のミーゼス等価歪み。円板の形は図 2-28 及び図 2-30 の変形を考慮する。

(1) 荷重ステップ 1



(2) 荷重ステップ 2

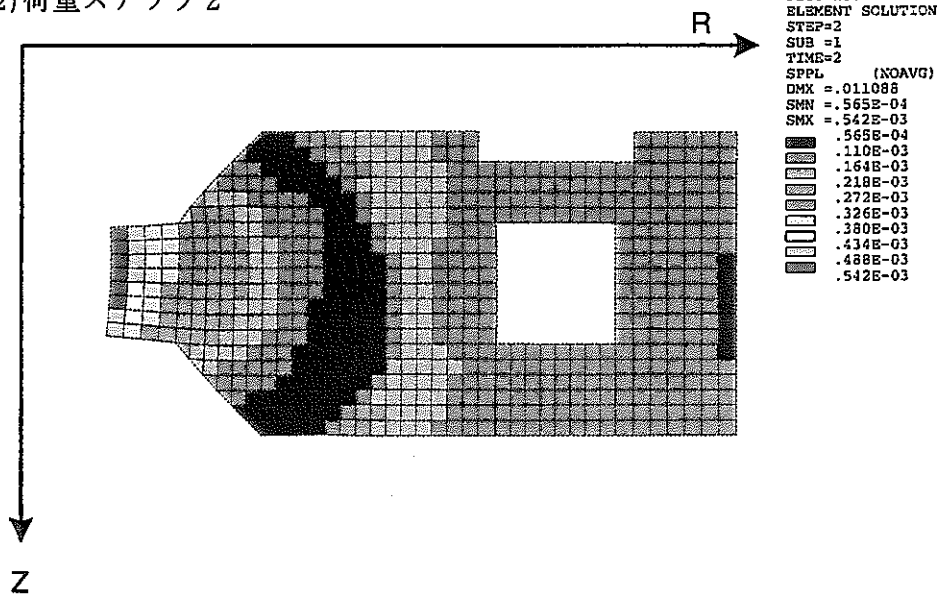


図2-34 図2-33のミーゼス等価歪み中の塑性歪み。
円板の形は図2-28及び図2-30の変形を考慮する。

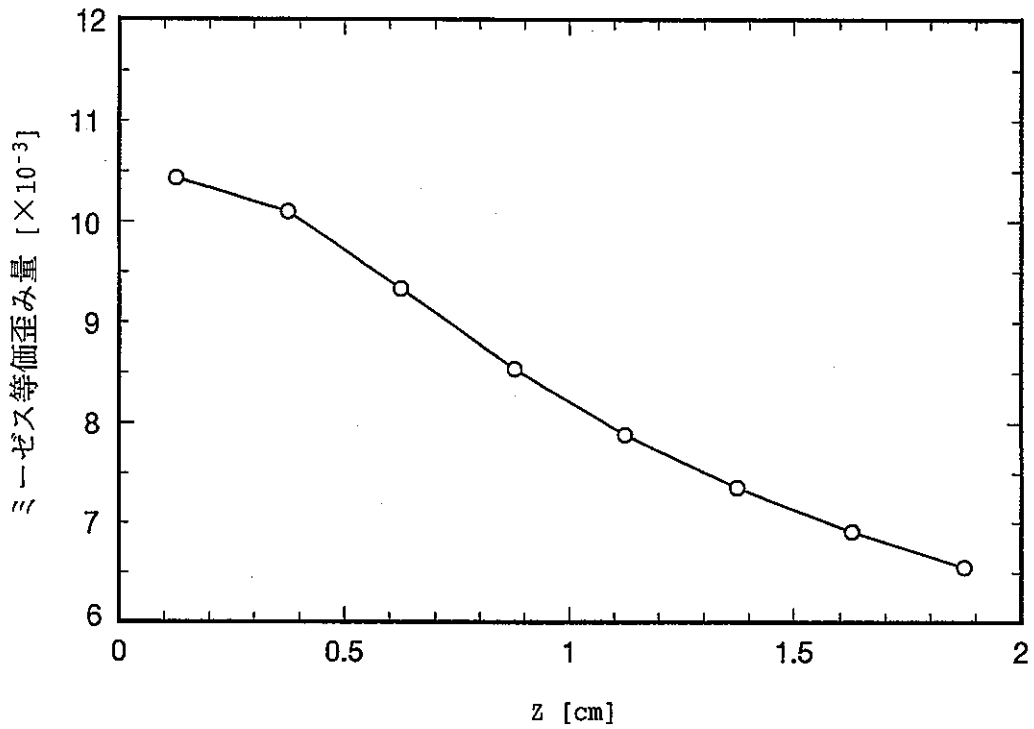


図2-35 R=2.4 cm における荷重負荷時 (荷重ステップ1) のミーゼス等価歪み。

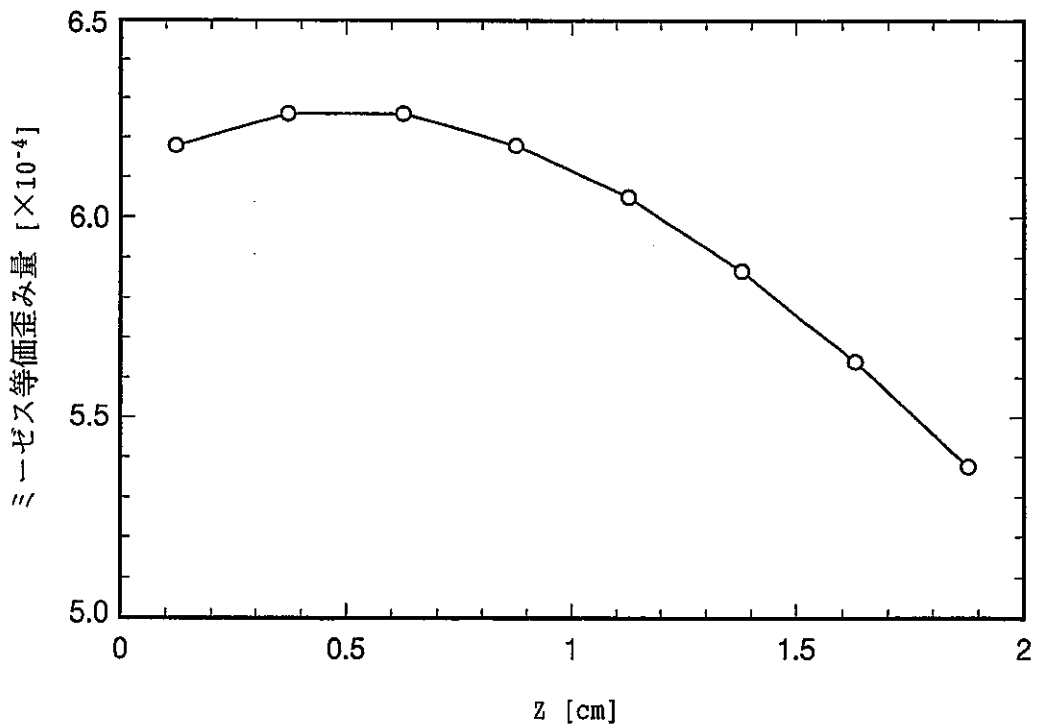


図2-36 R=2.4 cm における荷重除荷時 (荷重ステップ2) のミーゼス等価歪み。

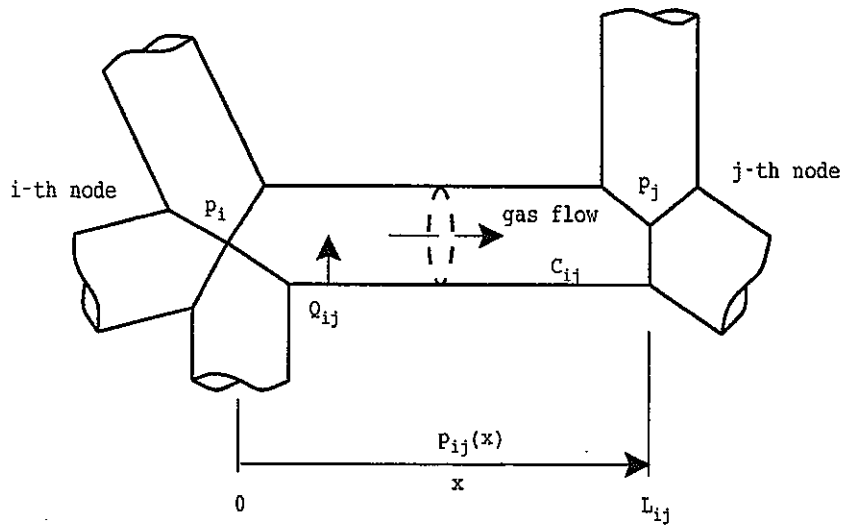


図2-37 節点 i と j を接続する配管の模式図。
 管のコンダクタンスを C_{ij} 、管内で放出される全ガス量を Q_{ij} とする。

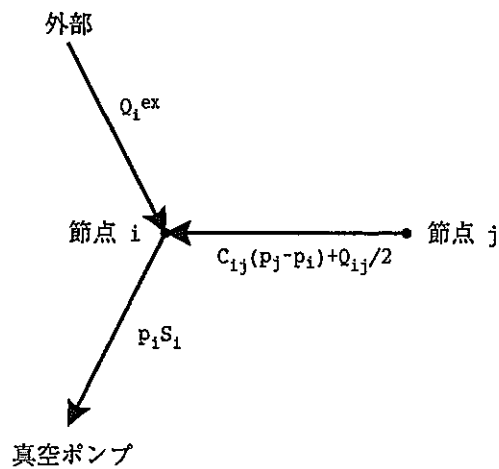


図2-38 節点 i におけるガスの流れの模式図。
 節点 i には節点 j 及び外部からガスが流れ込み、真空ポンプへ流れ出す。

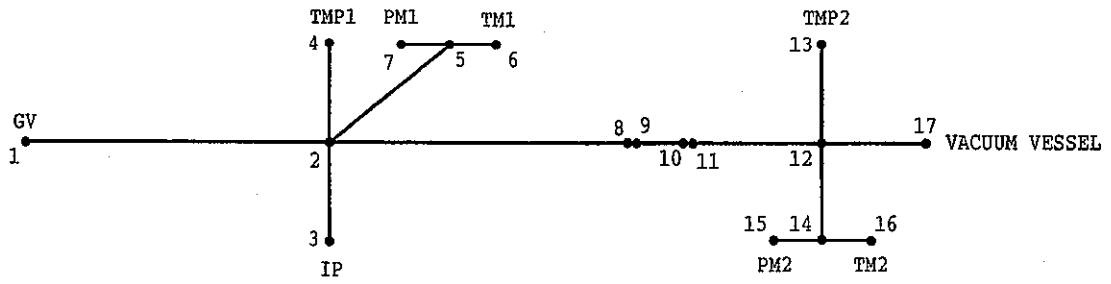


図2-39 ビームダンプ真空系をモデル化した配管のネットワーク図。全節点数は17個とし、電子線は節点1から17へ進行する。

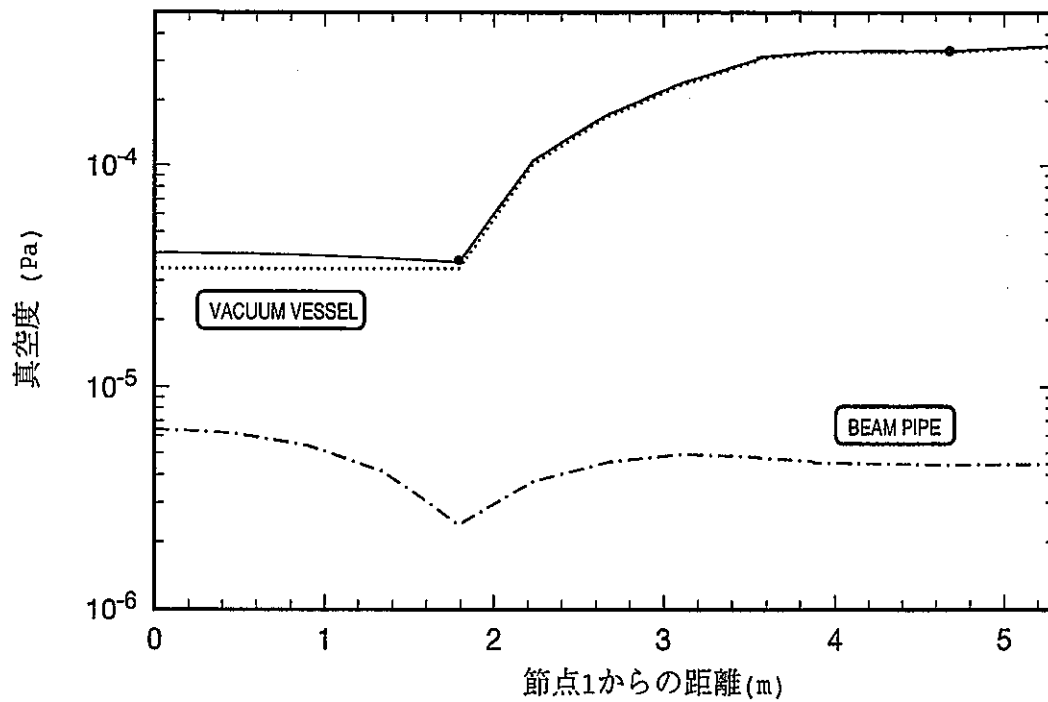


図2-40 室温におけるビームパイプ内の真空度。
●印は真空計での真空度である。

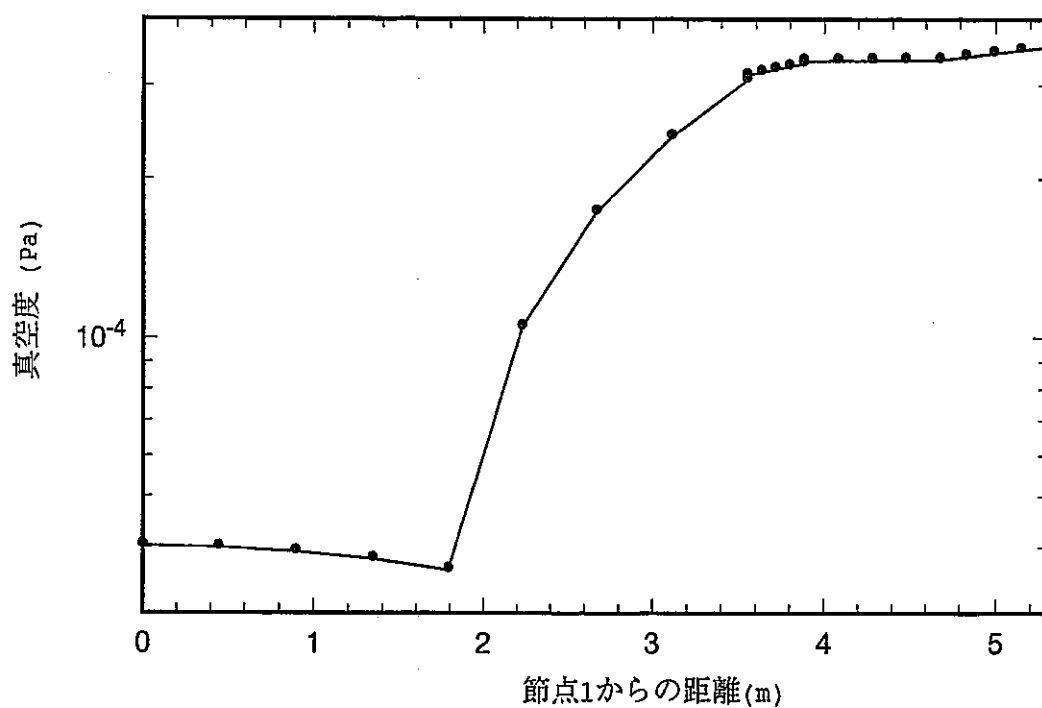
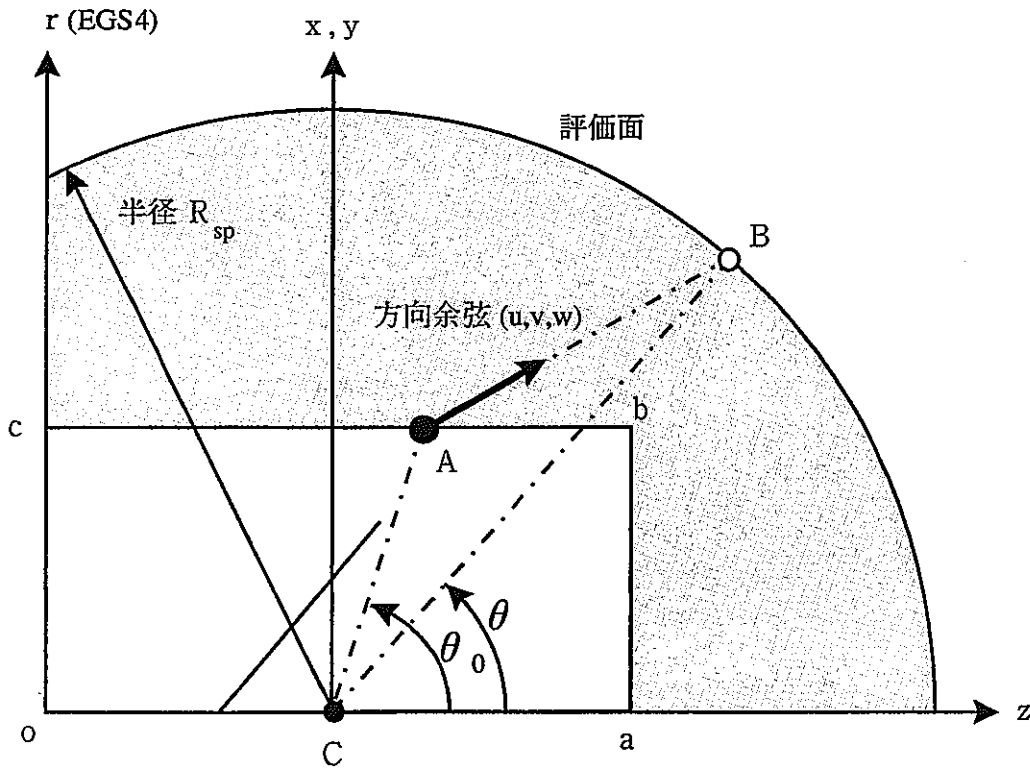


図2-41 電子線照射によるビームパイプ内の真空度。
●印は電子線照射時、実線が常温の場合である。

(1) x z (y z) 平面



(2) x y 平面

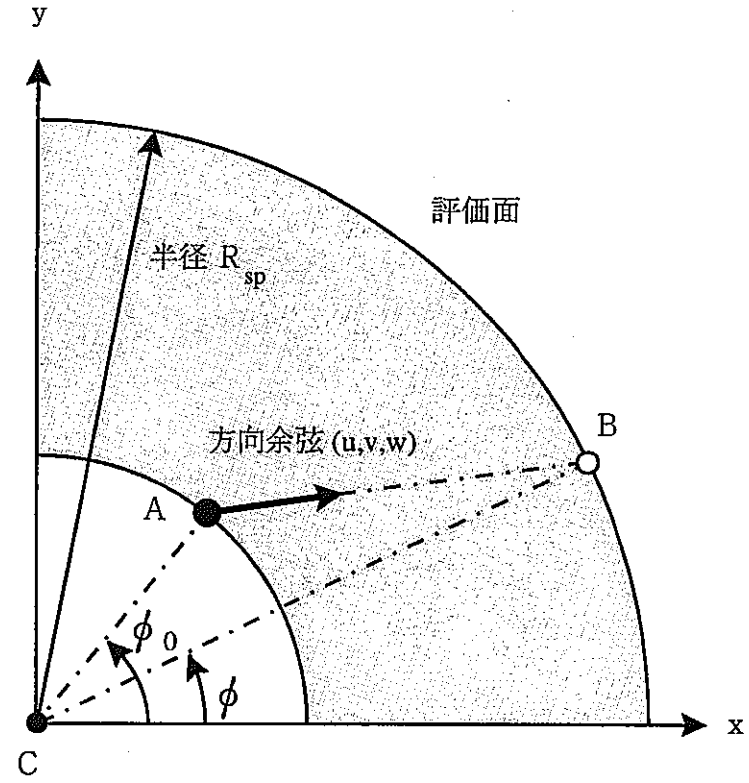


図2-42 散乱角 θ と方位角 ϕ の定義

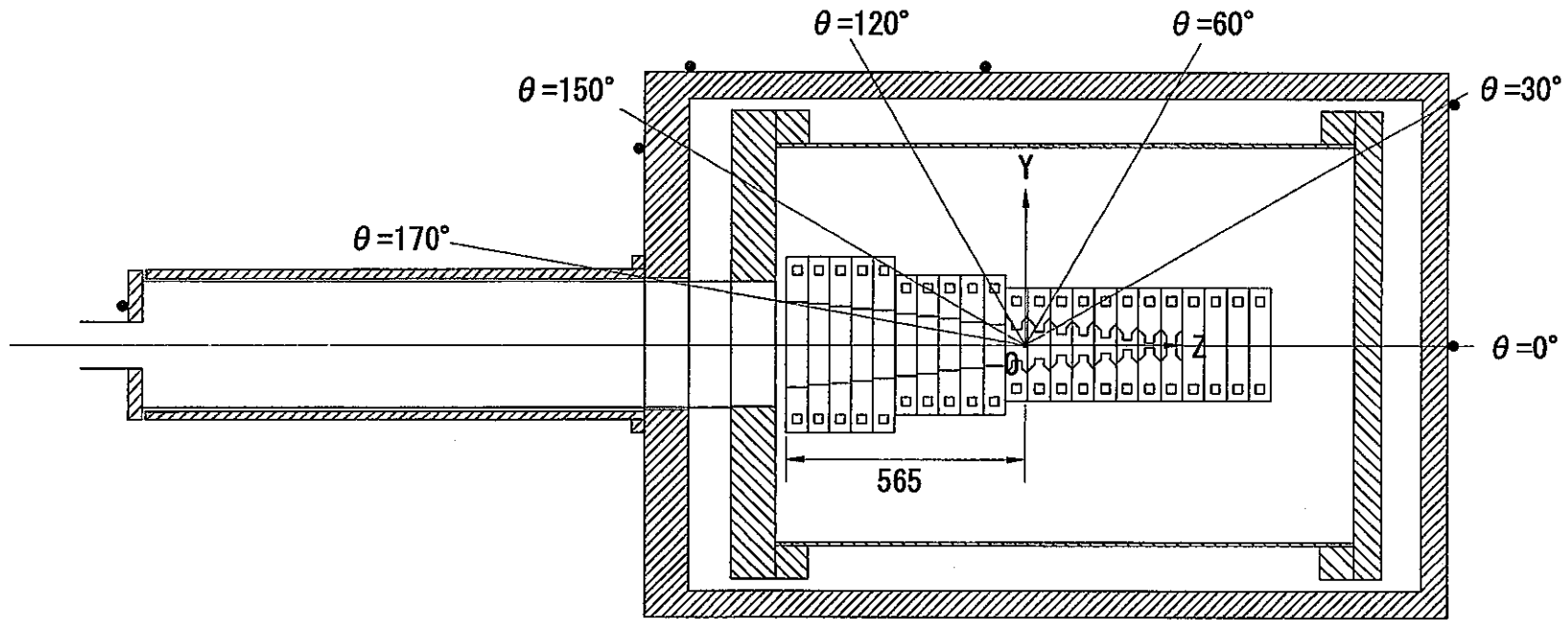


図2-43 典型的な散乱角 θ 。図の●印は線量当量率の測定点である(第4章)。

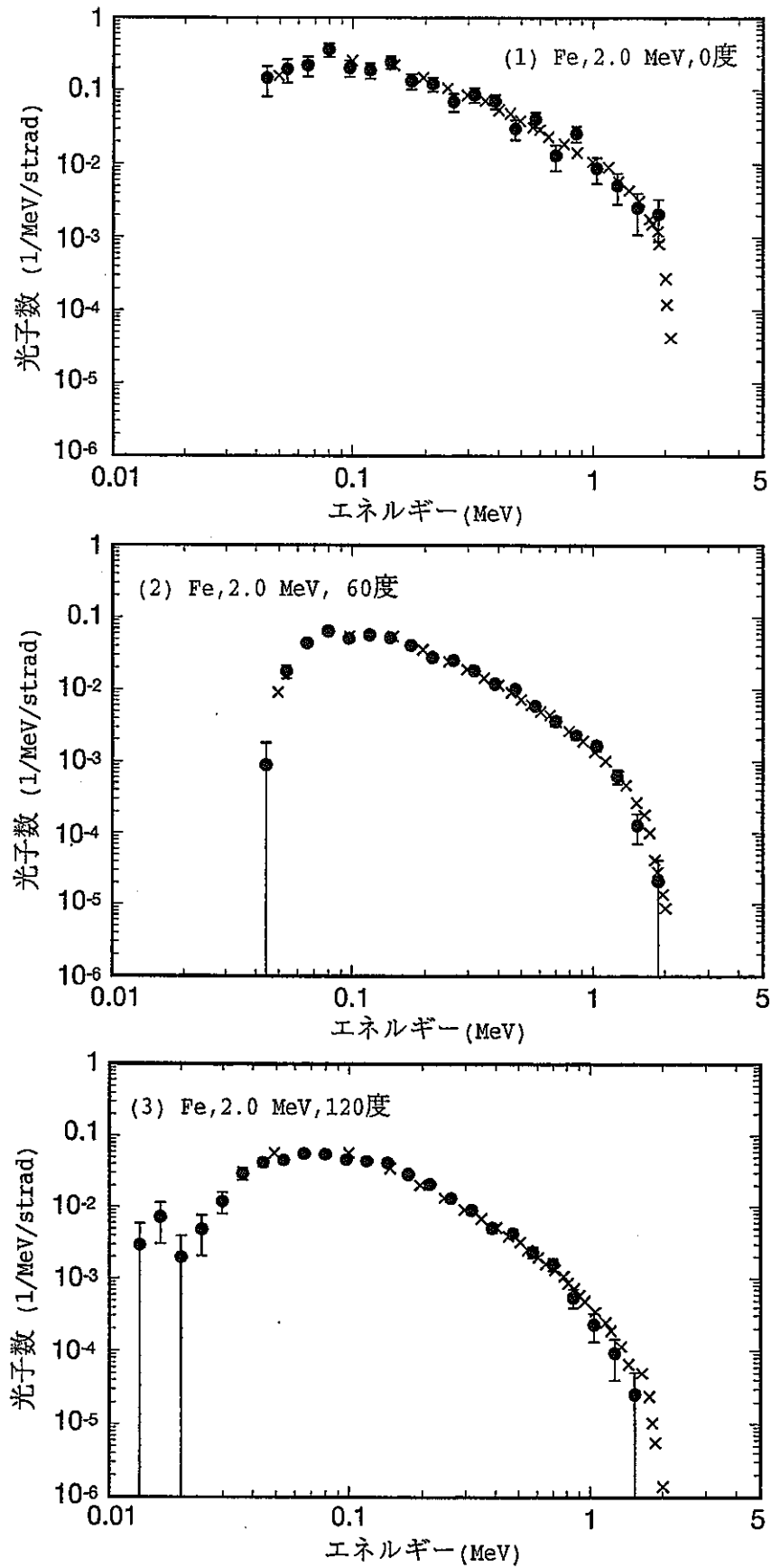


図2-44 標的からの制動輻射量 (1/2)。
 ●印は計算コードEGS4, ×印はベンチ
 マーク実験の結果を表す。

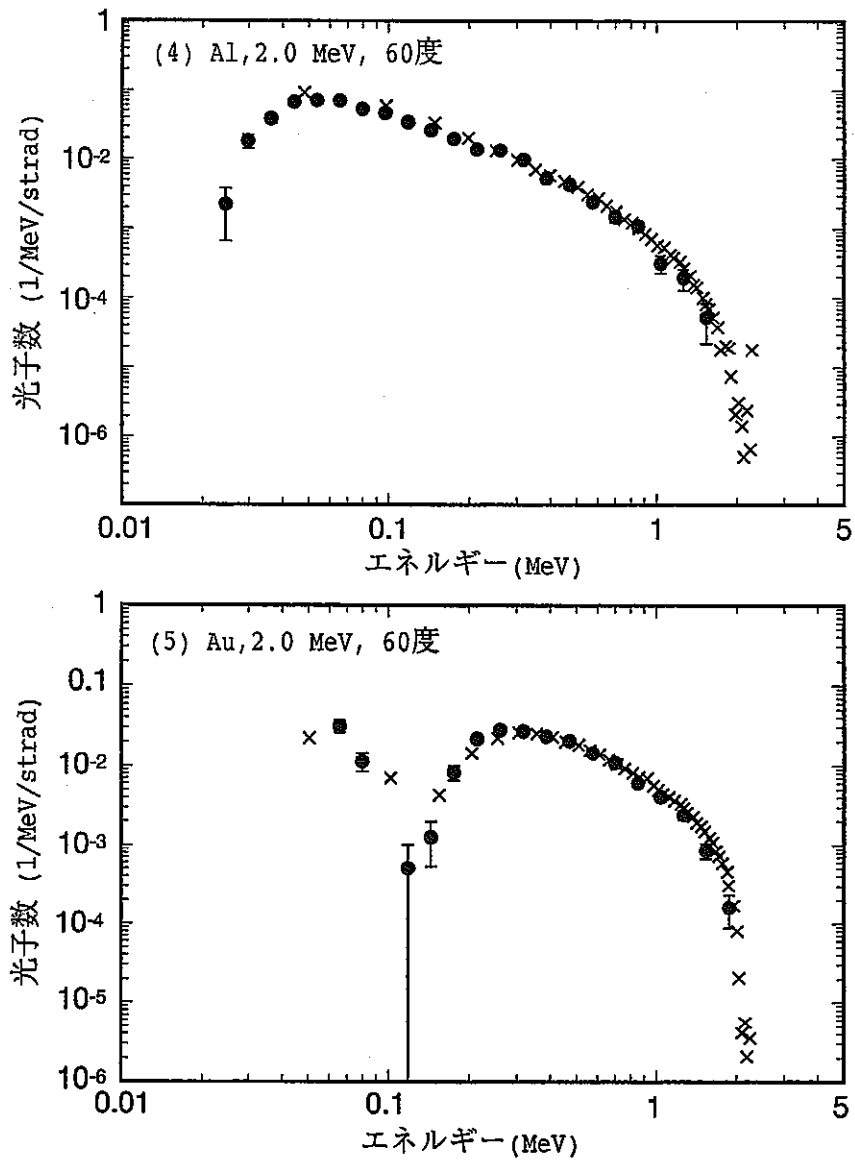


図2-44 標的からの制動輻射量 (2/2)。
 ●印は計算コードEGS4, ×印はベンチ
 マーク実験の結果を表す。

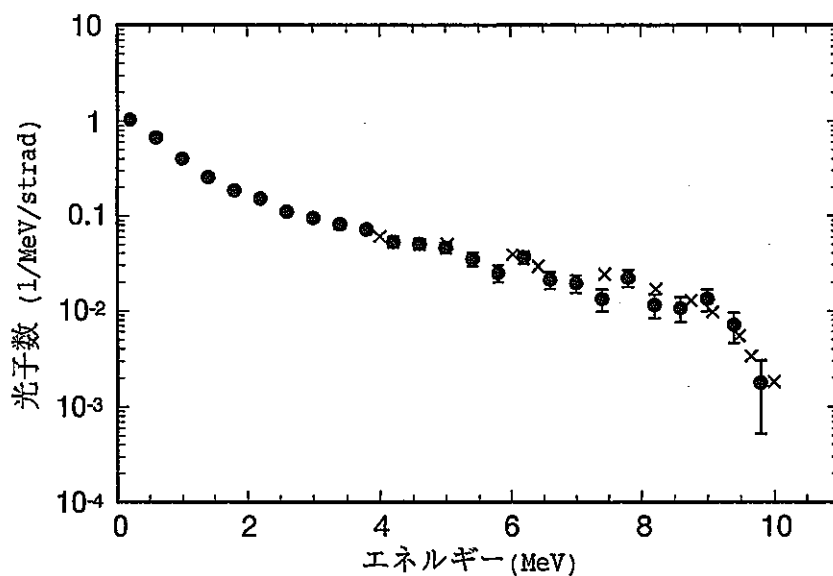


図2-45 タングステン標的からの制動輻射量。
 ●印は計算コードEGS4, ×印はベンチマーク実験の結果を表す。電子線のエネルギーは10 MeV, 散乱角度は0度である。

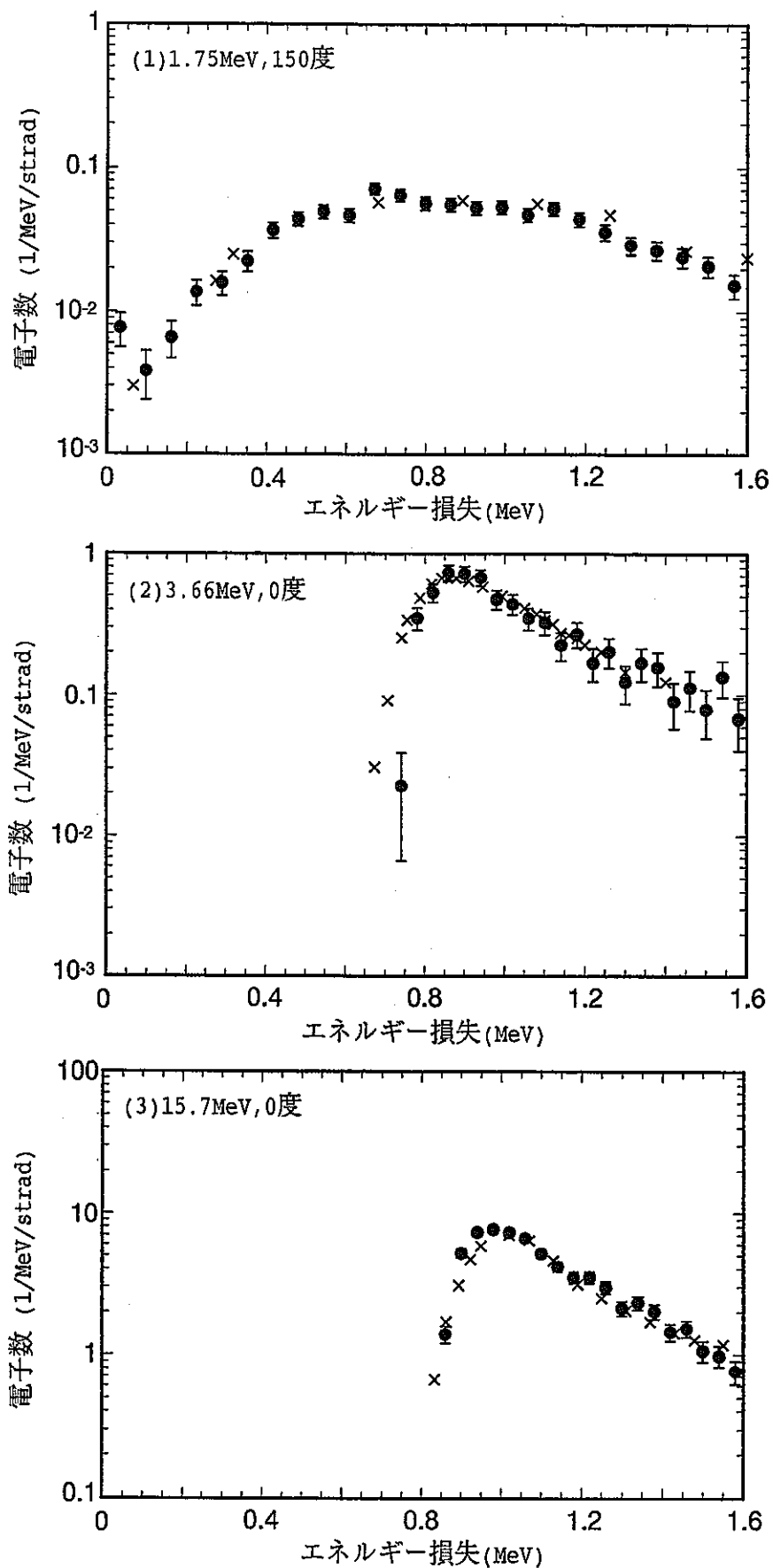


図2-46 銅標的でのエネルギー損失分布。
 ●印は計算コードEGS4, ×印はベンチマーク実験の結果を表す。

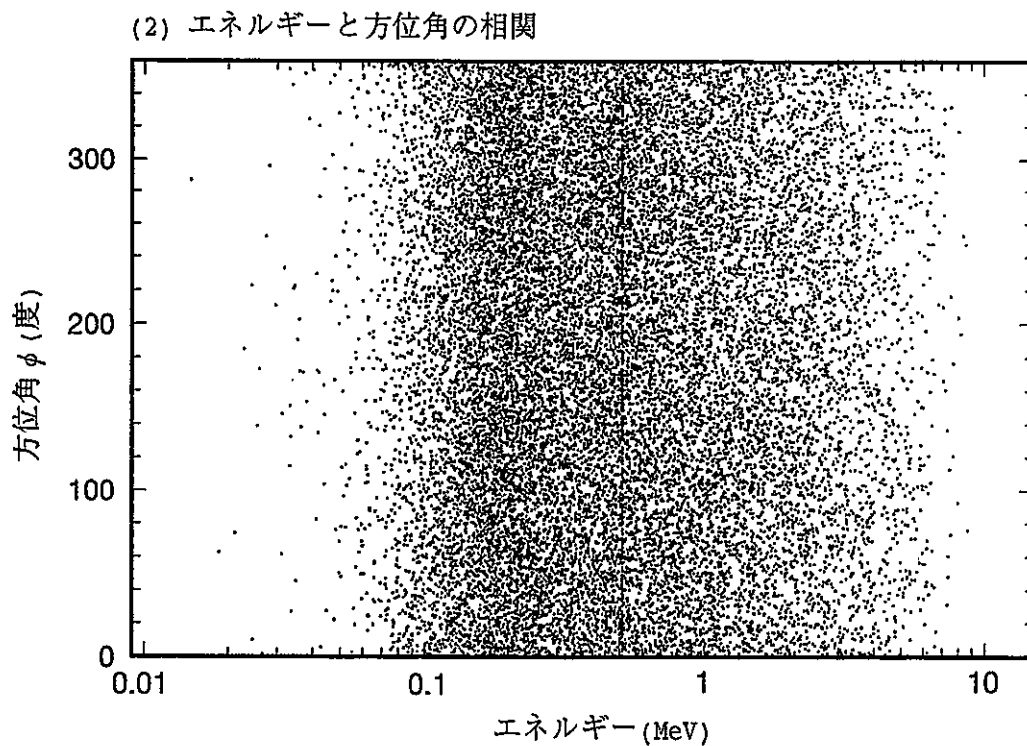
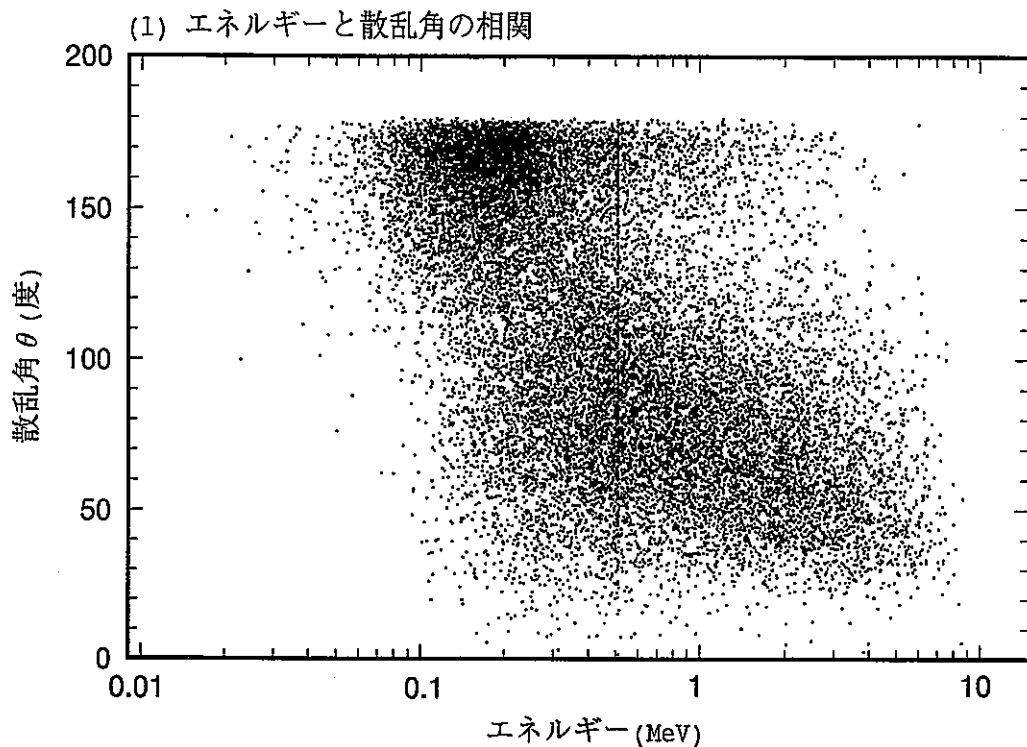


図2-47 ビームダンプから発生する光子のエネルギー、散乱角、及び方位角の関係(1)。計算コードEGS4で設定した材質は銅のみとし、ビームエネルギーは10.51 MeVである。

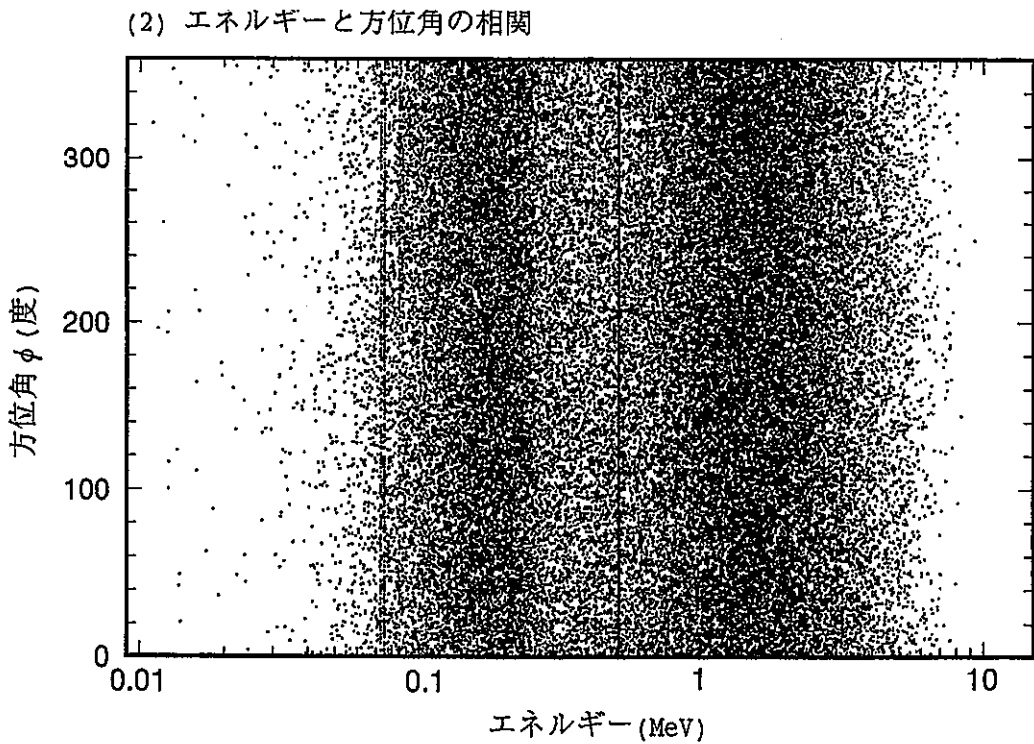
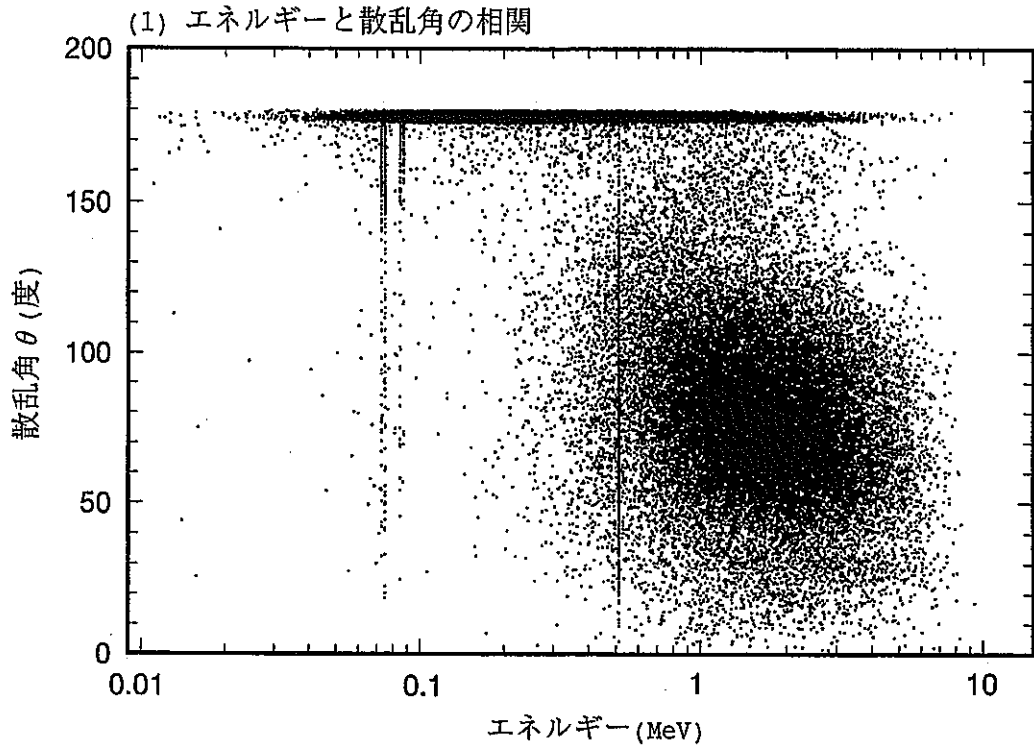


図2-48 ビームダンプから発生する光子のエネルギー、散乱角、及び方位角の関係(2)。計算コードEGS4で設定した材質は銅、鉛とし、ビームエネルギーは10.51 MeVである。

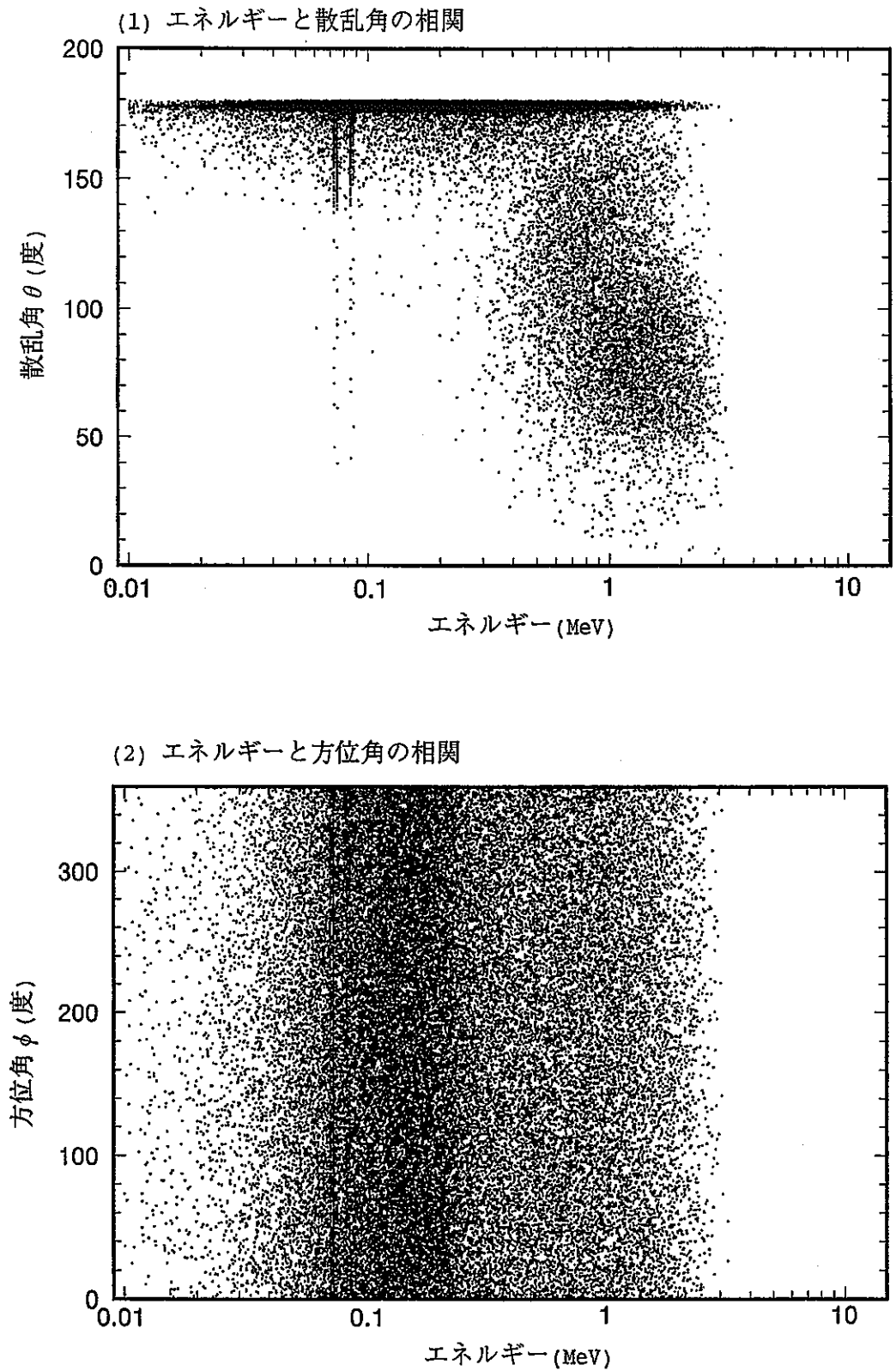


図2-49 ビームダンプから発生する光子のエネルギー、散乱角、及び方位角の関係(3)。計算コードEGS4で設定した材質は銅、鉛とし、ビームエネルギーは4.01 MeVである。

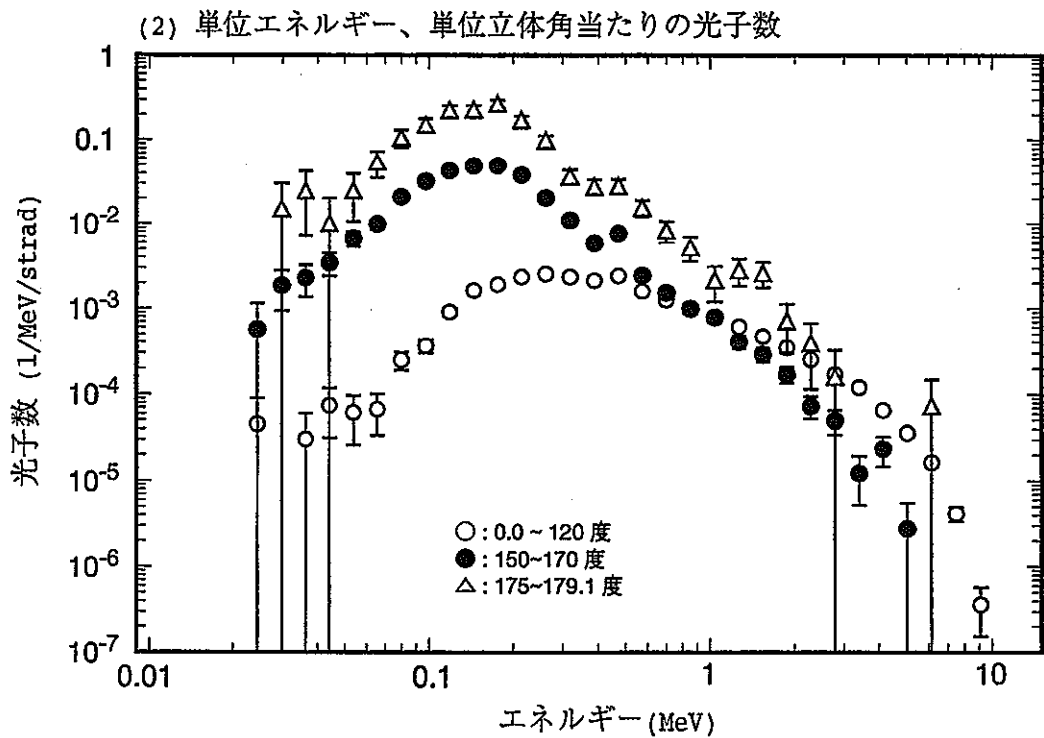
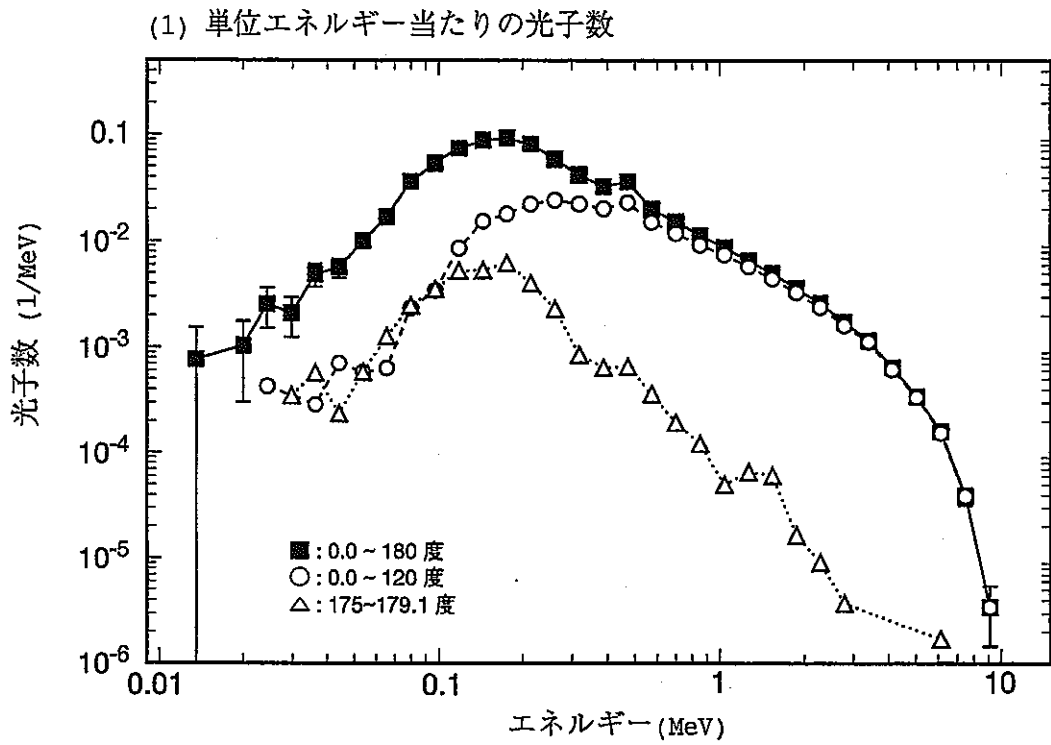


図2-50 ビームダンプから発生する光子のエネルギー分布(1)。計算コードEGS4で設定した材質は銅のみとし、ビームエネルギーは10.51 MeVである。

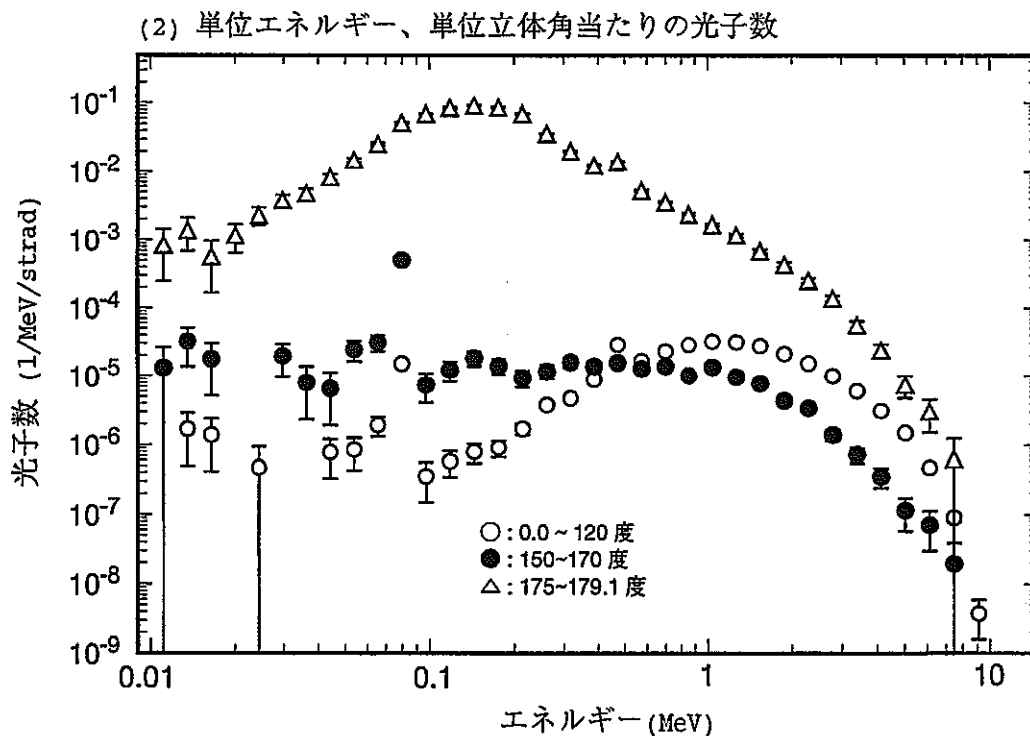
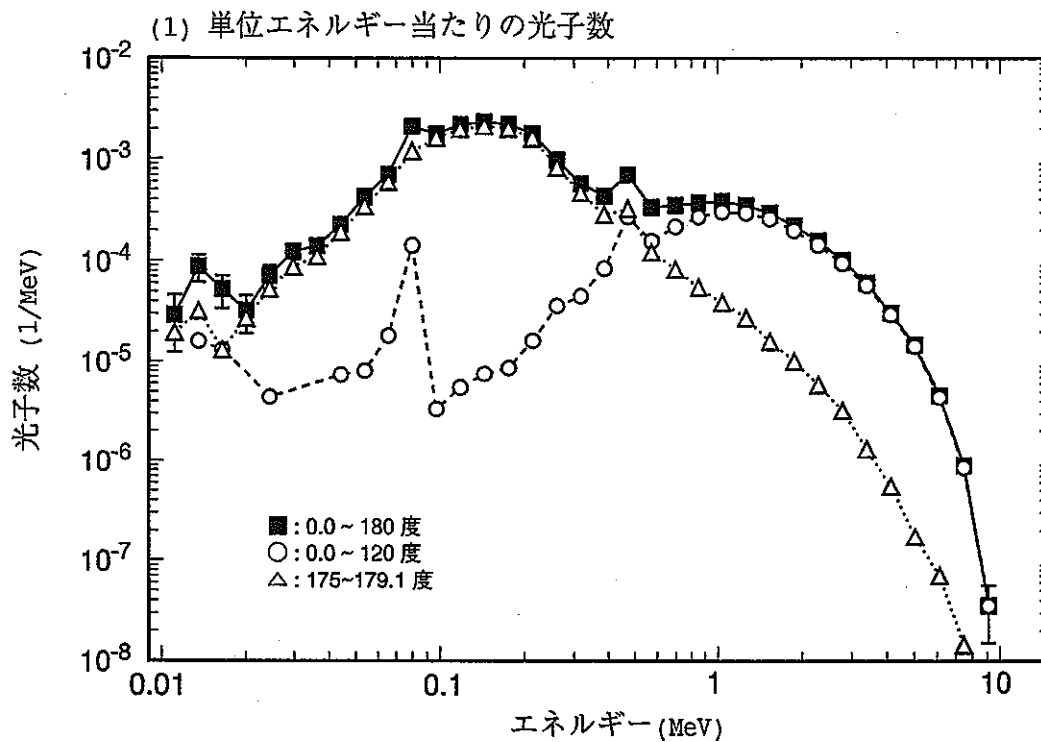


図2-51 ビームダンプから発生する光子のエネルギー分布(2)。計算コードEGS4で設定した材質は銅、鉛とし、ビームエネルギーは10.51 MeVである。

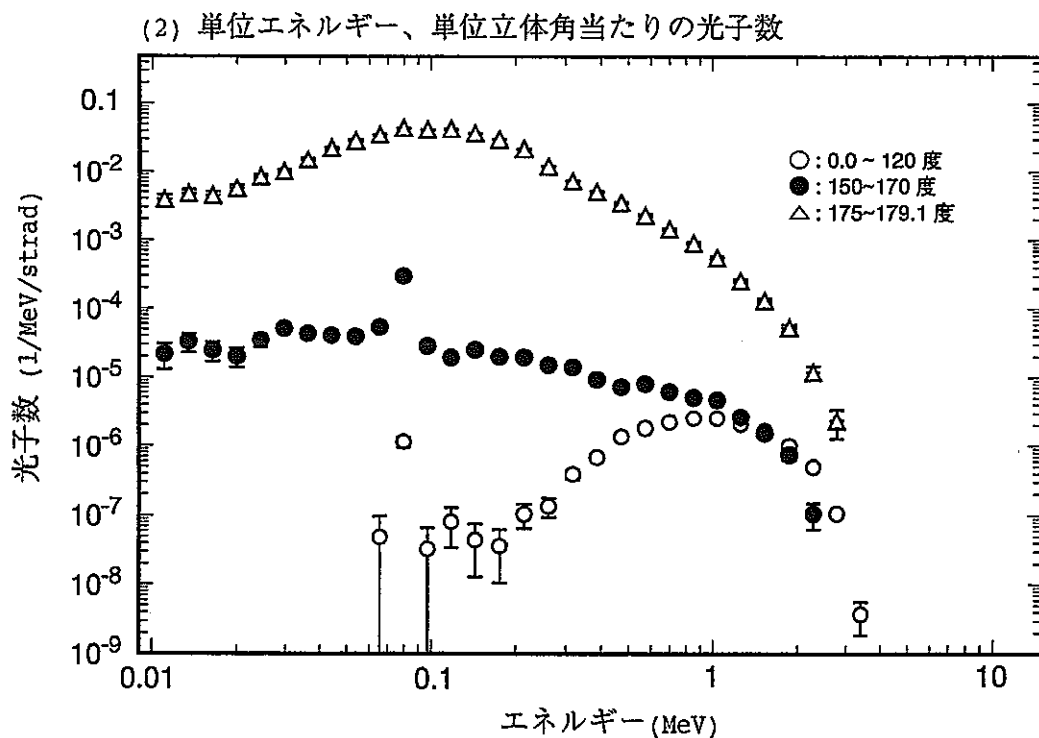
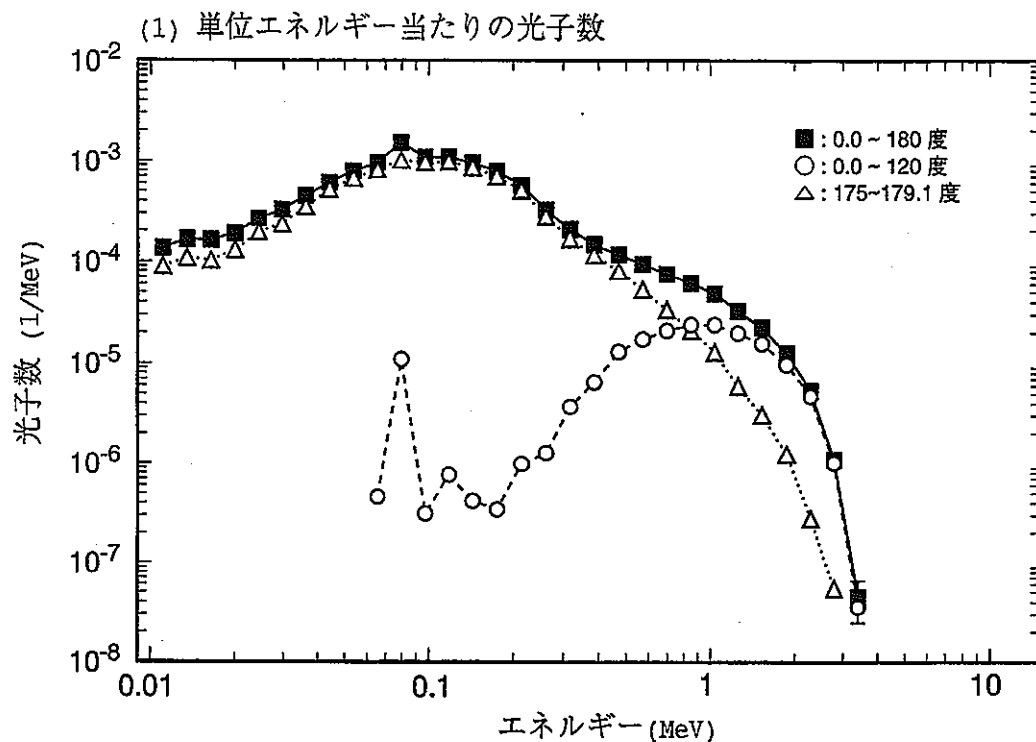


図2-52 ビームダンプから発生する光子のエネルギー分布(3)。計算コードEGS4で設定した材質は銅、鉛とし、ビームエネルギーは4.01 MeVである。

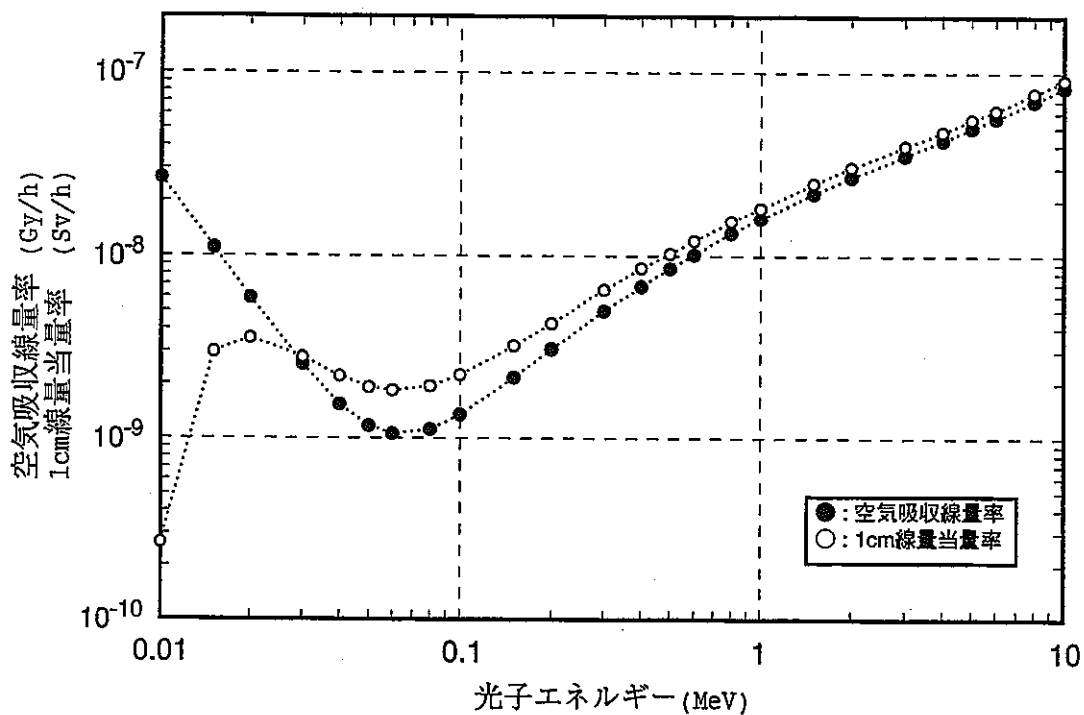


図2-53 単位フルエンス率当たりの空気吸収線量率と1cm線量当量率。

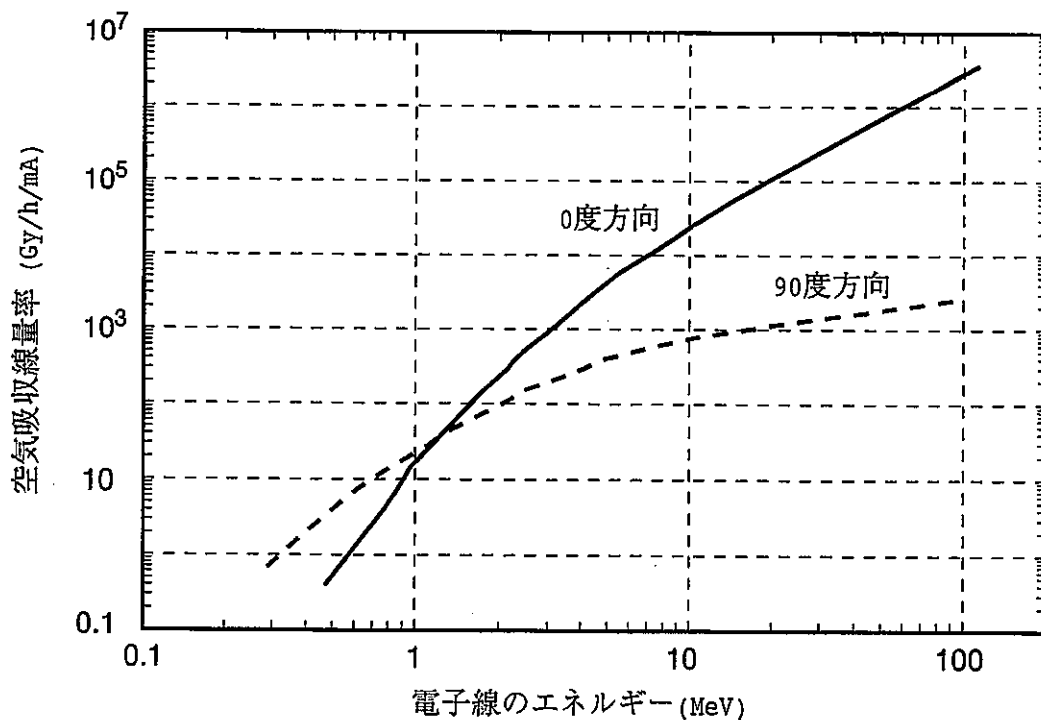


図2-54 重金属標的に入射した1 mAの電子線から発生する光子の空気吸収線量率。標的から1 m離れた地点における線量を表す。

第3章 設計・製作

3.1 設計

ビームダンプの機器は、加速器室内に設置されたビームダンプ本体、熱交換器室に設置された熱交換器ユニット、及び加速器空調室に設置された計測器から構成されている。本節では、これらの機器を設計する上で前提となった条件を表形式で表3-1にまとめる。また、設計の進捗に伴って決定された詳細な条件を表3-2にまとめる。なお、表3-1及び表3-2は文献[22]から引用した。

3.2 製作

3.2.1 概要

本項ではビームダンプを構成する各機器を設計・製作するうえで重要となった仕様を箇条書きでまとめる。なお、この箇条書きには、平成9年1月の機器完成後、加速器運転の経験に基づく変更や改良点も仕様として含め、第3.1節の表と重複する事項もある。

- (1) 重量が約1トンの金属円板を真空容器内で支えるため、まずモジュール化した金属円板をフランジ付きの架台に固定する。次に、その架台を真空容器内に設置したレールに沿って車輪で移動させ、真空容器内にある金具に固定する。金属円板をこのような構造にすることにより、架台が片持ちとならず、メンテナンス時に容易に金属円板を取り出すことができる。
- (2) 真空容器内にある冷却水配管の接合部に使用している面シール継手は、そのシール面に微細な傷があると冷却水漏れの原因となるため、その取り扱いに注意する。
- (3) 真空容器内における漏水の可能性を減らすため、冷却水配管と金属円板とのろう付け箇所は極力少なくし、冷却水配管の長さも極力短くする。

表 3-1 ビームダンプ 設計条件(1/5)

No	項目	設計条件	設計の背景	備考
1	入射ビーム形状	① ビームエミッタンス ・ X, Y方向とも 50π mm mrad ② エネルギー分解能 ・ 0.4~5% ③ ビーム径 ・ $\phi 10$ ④ ビーム形状 ・ ビーム半径を 3σ とする正規分布とする。	① 目標値として設定する。加速系で実施したビーム輸送コード PARMERA による計算結果である。 ②~④ ①と同様の計算結果に基づく。	文献[22]表 1.1【ビーム性能】参照
2	構造物	① 耐震構造：Cクラス ② 床耐荷重 ・ 1平方メートル当たり 500 kg 以下とする。但し、地中梁上の床耐荷重は、1平方メートル当たり 100 ton 以下とする。 ③ 加速器室内搬入物品の最大形状 ・ 寸法 3 m (D)×2.3 m (W)×2.3 m (H) ・ 重量 3000 kg	① 鉛遮蔽体など重量物を取り扱うため、耐震クラスを設定する。耐震クラスは建家と同クラスとする。 ② 建家床面の強度を実測から求める。地中梁上はコンクリート自身の強度である。地中梁以外はコンクリートプレートを用いているため、地中梁より強度は落ちる。 ③ 寸法は遮蔽扉の大きさ、荷物の回転半径などを考慮する。また、重量はチェンブロックの荷重とする。	

表 3-1 ビームダンプ 設計条件(2/5)

No	項目	設計条件	設計の背景	備考
2	構造物	④ 加速器室内の機器設置スペース ・ 7 m (W)×6 m (D)×4.7 m (H)	④ 加速系との取り合い場所からのスペースを考慮する。	
3	熱交換器	① 設置場所：熱交換器室内 ② 冷却設備との取り合い点 ・ 熱交換器二次側フランジ ③ 熱交換量：250 kW ④ バッファータンク カバーガス ・ 窒素ガス ⑤ カバーガスの供給源 ・ 屋外機械室にある窒素ポンベとする。	① 熱交換器室は冷却設備の熱交換器が設置されているため、取り合い条件が容易になる。 ② 発注時、ビームダンプの冷却構造を決定できなかったため、ビームダンプ内での圧力損失を予想出来なかった。このため、熱交換器二次側を取り合い点とした。 ③ 電子線による発熱は 200 kW (=10 MeV×20 mA) であるが、ポンプの発熱、平均ビーム電流の増加に対応するため、熱交換量を 25 % 増加させる。尚、熱交換量の上限は熱交換器の大きさから定格出力の 125 % とする。 ④ 冷却水の電気伝導度を一定に保つため、溶解度の小さいガスを選定する。 ⑤ 供給源の統一を図る。	③ SLAC では 100% の余裕を持つ施設もある。
4	廃棄物の処理	① 気体 ・ 加速器室内に放出する。対象物は、真空ポンプ排気ガス、熱交換器内バッファータンクカバーガスとする。	①② 電子線が標的に吸収されるビームダンプでは、放射化の可能性のある気体および液体は一時貯留し、自主的にサンプリングしてから放出する。 このため、気体(ガス)は空気処理設備 タンク、液体(冷	

表 3-1 ビームダンプ 設計条件(3/5)

No	項目	設計条件	設計の背景	備考
4	廃棄物の処理 (続き)	② 液体 <ul style="list-style-type: none"> ・ 建家廃液設備 廃液タンク(T-2)に排水する。対象は配管内の冷却水(加速器室内配管、熱交換器内配管)である。 	却水)は廃液タンク(T-2)に貯留する。	
5	基本構造	標的の基本構造は、以下の4点の考え方で決定する。 <ul style="list-style-type: none"> ① ビームダンプの入口にある電磁石によって電子線を拡大させる。 ② 電子線を空間的に分散させた標的で吸収させる。 ③ 放射化の可能性を減らす。 ④ 大電流電子線用ビームモニターとしての機能を付加する。 	<ul style="list-style-type: none"> ①② ビーム径$\phi 10$の大電流電子線を吸収するためには、空間的な発熱量を抑えなければならない。このため、電子線のビーム径を電磁石により広げ、電流密度を下げる。また、電子線を吸収する標的での発熱密度を抑えるため、電子線の照射領域を空間的に分散させた標的とする。 ③ 万一放射化した場合、処理量を減らすため、電子線に直接照射される部分の体積を減らす。 ④ 従来のビームモニターでは困難であった平均ビーム電流20 mAの電子線を直接監視する。特に、電子線の方向などの状態が変化した場合、直ちに把握し、対処することが重要となる。 	

表 3-1 ビームダンプ 設計条件(4/5)

No	項目	設計条件	設計の背景	備考
6	安全対策	<p>ビームダンプの安全対策として以下の6点を考慮する。</p> <p>① 冷却水が循環していない時、または冷却水の水量がある基準以下の場合、加速器の運転を不可とする。</p> <p>② 電子線の照射異常を検知し、加速器の運転を停止する。</p> <p>③ 緊急遮断シャッターを設ける。</p> <p>④ 加速器運転中に商用電源が停電した場合でも冷却水の循環を保つ。</p> <p>⑤ 放射線に強い材質を用いる。</p> <p>⑥ 放射線遮蔽能力を有する。</p>	<p>① 冷却水による除熱を確保する。</p> <p>② 電子線の照射異常、すなわち電子線が拡大されず、標的に照射された場合、局所発熱による機器破損をさける。</p> <p>③ ビームダンプ内で起こった真空度悪化を加速系に拡大しない。尚、真空度悪化の原因として局所発熱による溶解、照射異常によるビームダクトの破損、冷却水の漏洩を考える。</p> <p>④ 標的に蓄積した熱により、冷却水の局所沸騰を避ける。</p> <p>⑤ ビームダンプは放射線発生源であり、使用する材質は半導体機器の耐放射線レベル 10^6 Gyを満足するように選定する。</p> <p>⑥ 加速器室の貫通口から漏れる放射線を遮蔽する。</p>	

表 3-1 ビームダンプ 設計条件(5/5)

No	項目	設計条件	設計の背景	備考
7	データ収集	① ビームダンプ内の情報(電子線の状態、真空度、温度、流量、水圧、インターロック情報)は一ヶ所で管理する。	① ビームダンプは多様な機器の集まりであるため、収集したデータを一カ所で管理し、設備としての健全性を確保する。また、データを解析する上でも有効である。	
8	将来性	① 単にビーム吸収体としてのビームダンプではなく、大電流加速器用ターゲットとしてのデータを収集できる構造とする。 ② 収集するデータは、表 3-1【データ収集】に記載した事項であるが、さらに熱応力による歪みも収集できる構造とする。	① 現在加速器は大電流(大電力)化が進んでおり、大電流加速器用ターゲットを設計するためのデータを収集する。 ② 有限要素法などの解析で得られる結果と実測値を比較し、評価する。(今までターゲットとして評価した例がない。)	② 測定方法を検討したが良い案が無く、長期的な検討事項とする。
9	保守・点検	① 量子工学試験施設内で標的を点検・保守できるような構造とする。	① 電子線の照射による荷重繰り返しに応じて、標的の健全性を確認する。	

表 3-2 ビームダンプ 決定事項(1/11)

No	項目	設計内容	決定の背景	備考
1	配置	<p>① 上流よりパルスビームモニター、四重極電磁石Q1、緊急遮断シャッター、ステアリング・マグネット、ビーム位置モニター、四重極電磁石 Q2、プロファイルモニター、標的の順に配置する。(図 1-3 参照)</p> <p>② 緊急遮断シャッターと真空容器入口までの距離を 4.4 m とする。</p> <p>③ 標的の大きさ(長さ)を 2 m とする。</p>	<p>① 電子線を拡大する四重極電磁石 Q2 の中心に正しく電子線が入射するように、ステアリング・マグネット、ビーム位置モニター、四重極電磁石 Q2、プロファイルモニターの順に配置する。また、緊急遮断シャッターの開閉時間を考慮し、標的より遠方に緊急遮断シャッターを配置する。</p> <p>② 緊急遮断シャッターの遮断時間は 13 msec である。標的で真空悪化が起こったとき、加速系に影響が及ぶ前にシャッターを閉じるためには 4.4 m が必要となる。尚、真空度の悪化は、空気中での音速で伝わるとする。</p> <p>③ 表 3-1【構造物 ④】の条件を満たすため。すなわち、全長 7 m に対して、②から 4.4 m、メンテナンス用スペースに 1 m を考慮する。</p>	<p>② 真空度の悪化時間を測定したところ、約 50 msec であった。</p>

表 3-2 ビームダンプ 決定事項(2/11)

No	項目	設計内容	決定の背景	備考
2	金属円板の構造	<p>① 中空状金属円板を複数枚用いて電子線を吸収する構造とする。(図 1-4 参照)</p> <p>② 中空状金属円板に入射する電子線の直径を 20 cm とする。</p> <p>③ 中空状金属円板の材質 ・無酸素銅</p> <p>④ 中空状金属円板の概略形状 ・直径 40 cm 厚さ 5 cm を基準とし、図 1-4 に示した 22 枚の円板で構成する。</p> <p>⑤ 中空状金属円板をモジュール単位に分割する。</p>	<p>① 表 3-1 【基本構造 ②】を満たすため。</p> <p>② 電流密度を 2~3 kW/cm² とするため。尚、この値は金属に電子線が入射したとき、除熱できる値である。</p> <p>③ 熱伝導度が良いこと、加工しやすい。</p> <p>④ ビームラインの高さ 1.2 m 及び円板の取り扱い易さから最大直径を 40 cm とする。また、円板に冷却水配管及び冷却溝を取り付ける関係から厚さを 5 cm とする。さらに、設置スペースが 1 m であるから、枚数を 22 枚とする。</p> <p>⑤ 表 3-1 【将来性】に記載した通り、設計データを入手するためには、標的内での熱の移動を把握する必要がある。このため、金属円板 1 枚ごとに入射電流、金属円板の温度分布、冷却水の温度上昇を求めなければならない。しかし、円板 1 枚ごとに入射電流、冷却水の温度上昇を求めるのは製作的に困難であるから、モジュール単位で上記の情報を求めることとする。</p>	<p>① スイス、ポウル・シェラー研究所で陽子線用ビームダンプとして実績がある。(ビーム電力 750 kW)</p> <p>② 文献[1] p26 参照</p> <p>④ 文献[1] 4.2章参照</p>

表 3-2 ビームダンプ 決定事項(3/11)

No	項目	設計内容	決定の背景	備考
2	金属円板の構造 (続き)	<p>⑥ モジュール単位で金属円板の交換ができるように、配線、配管を行う。</p> <p>⑦ 各モジュールの役割(上流側から)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ No.1モジュール:異常照射に対応する。 ・ No.2モジュール:電子線吸収用 ・ No.3モジュール:電子線吸収用 ・ No.4モジュール:放射線吸収及び異常照射に対応する。 <p>⑧ 各モジュールにおける金属円板の枚数</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ No.1, 2, 4モジュール 各5枚 ・ No.3モジュール 7枚 <p>⑨ 各モジュールの入射電流比</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 2:9:9 (No.1:No.2:No.3) <p>⑩ 金属円板1枚当たりの発熱密度の最大値、温度上昇の最大値、発熱量の最大値</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 2.2 kW/cm³、343℃、18 kW 	<p>⑥ 冷却水の漏洩などの故障に備え、交換できるような構造とする。また、いろいろな形状の円板を照射し、種々のデータを入手するためにも交換できるようにする。</p> <p>⑦ No.1及びNo.4モジュールは、局所加熱による機器破損に備える。</p> <p>⑧ 各5枚を基準にするが、No.3モジュールは電子線の形状から、発熱密度が高くなることが予想される。このため、枚数を多くし、円板1枚当たりに入射するビーム電流を減らす。</p> <p>⑨ ⑦に記載した通り、No.1モジュールに余裕を持たせ、ビーム電流を2 mA (10%)とし、残りをNo.2, 3モジュールで均等に入射させる。No.4モジュールは異常照射に対応するため、設計では1%程度とする。この比から金属円板の内径が決定される。</p> <p>⑩ ②⑧⑨で得られた形状において計算コード EGS4 及び ANSYS による計算結果である。</p>	<p>⑧ 文献[1] 4.2 章参照</p> <p>⑨ 文献[1] 4.2 章参照</p> <p>⑩ 文献[1] 4.2 章参照</p>

表 3-2 ビームダンプ 決定事項(4/11)

No	項目	設計内容	決定の背景	備考
2	金属円板の構造 (続き)	<p>⑪ 金属円板における加熱・除熱サイクルに対する疲労回数</p> <ul style="list-style-type: none"> ・最適疲労回数: 1.1×10^4 回 ・設計疲労回数: 580 回 <p>⑫ 金属円板における冷却水経路は、二重構造としない。</p>	<p>⑪ 22 枚の金属円板のうち熱歪みの一番大きい No.14 円板(上流から数える)での弾塑性変形を熱解析コード ANSYS で計算した結果である。計算条件は最大負荷運転を仮定する。この結果、1日1回最大負荷の電子線を照射した場合、設計疲労回数の場合1.6年で破断する。</p> <p>⑫ 金属円板にろう付けで冷却水経路を形成する場合、経年変化等により水漏れの可能性がある。このため、銅配管を円板外周部にろう付けし、二重構造とすることが考えられる。しかし、熱伝達率が低下するため、この方法は採用しない。</p>	<p>⑪ スイス、ポウル・シェラー研究所陽子線用ビームダンプでは疲労回数を 1.0×10^4 回と評価している。</p>
3	標的の構造	<p>① 電子線を遮るビーム窓を設けず、差動排気系により加速系と接続する。</p> <p>② 標的の構造として、ビーム軸から外側に向かって、中空状金属円板、真空容器、遮蔽体とする。</p>	<p>① 計算コード EGS4 による計算では、運動エネルギー 10 MeV の電子は、厚さ 0.5 mm の銅で約 80% エネルギーを失う。このため、ビーム窓を設けると金属の中でエネルギーを失い、局所発熱を引き起こす可能性がある。このため、ビーム窓を設けず、中空状金属円板で発生したガスを外部に排気する差動排気系を用いる。</p> <p>② 金属円板を分割化したモジュールに構成したため、円板内部を真空に保つことが困難である。</p>	

表 3-2 ビームダンプ 決定事項(5/11)

No	項目	設計内容	決定の背景	備考
3	標的の構造	<p>③ 真空容器内で冷却水配管、熱電対配線を設置する。</p> <p>④ モジュール化した金属円板を架台に設置し、架台とともに真空容器から取り出せるようにレールを用いる。</p> <p>⑤ 標的の設置手順は、以下の通りとする。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 金属円板と真空容器架台(フランジ)との位置を合わせる。 ・ 真空容器に円板を載せた架台を上流から挿入し、固定する。 ・ 下流側から円板の位置を測定し、真空容器の中心にあることを確認する。 ・ 真空容器架台(フランジ)がビームライン上にあることを確認する。 ・ 標的内を真空に引き、漏れがないことを確認する。 ・ 遮蔽体を設置する。 	<p>③ ②と同様である。</p> <p>④ 重量約 1 ton の金属円板を真空容器フランジに片持ちで固定するのは振動面で危険である。また、メンテナンスの際、取り出し易いようにレールで移動できるようにする。この構造により、金属円板の据付精度が向上する。</p> <p>⑤ ビームダンプの構造と設置場所の関係から設置手順を検討した結果である。</p>	④ 表 3-1【保守・点検】参照

表 3-2 ビームダンプ 決定事項(6/11)

No	項目	設計内容	決定の背景	備考
4	差動排気系	<p>① 加速系との取り合い条件 ・ $(1.3 \sim 13) \times 10^{-5} \text{ Pa}$</p> <p>② 真空容器内 ガス放出量 ・ $4.0 \times 10^{-5} \text{ Pa m}^3/\text{sec}$ 程度</p> <p>③ ビームパイプの上流側及び下流側にターボ分子ポンプを設置し、さらに上流側にイオンポンプを設置する。(図 1-3 参照)</p> <p>④ ターボ分子ポンプは磁気浮上タイプとする。</p> <p>⑤ ターボ分子ポンプに接続する粗排気系真空ポンプで使用する潤滑油・ゴム等は消耗品とする。</p> <p>⑥ ターボ分子ポンプ用コントロールユニットを加速器室内に置く。</p>	<p>① 電子線の輸送に支障のない範囲とし、加速系と同程度とする。</p> <p>② 金属円板、真空容器、架台、熱電対配線及び冷却水配管から発生するガス量を、計算した結果である。尚、金属円板のみ温度を $350 \text{ }^\circ\text{C}$ と仮定する。</p> <p>③ 電子線が照射している間は標的から常時ガスが放出されるため、真空度が低い領域でも動作可能なターボ分子ポンプを設置する。また、電子線が入射しない時は、真空を維持するため、イオンポンプを使用する。</p> <p>④ 潤滑油が放射線により劣化するため、禁油タイプである磁気浮上タイプとする。</p> <p>⑤ 放射線による劣化が考えられ、適宜交換する。</p> <p>⑥ 放射線による劣化を抑えるため、加速器室内には極力電子機器を置かない。しかし、コントローラまでのケーブル長に制限があるため、ユニットを加速器室内に置く。</p>	① 文献[22] 表 3.2 【真空系】① 参照

表 3-2 ビームダンプ 決定事項(7/11)

No	項目	設計内容	決定の背景	備考
4	差動排気系 (続き)	<p>⑧ 真空度測定場所はビームパイルのみとする。</p> <p>⑨ 真空ポンプの排気量は①②を満たすように設定する。</p>	<p>⑧ 真空容器内は電子線の輸送に無関係であるため。</p> <p>⑨ 条件①②及び配管のコンダクタンスより必要な排気量を解析的に求める。</p>	
5	熱電対系	<p>① 熱電対の種類を以下の通りとする。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ Kタイプ(クロメル・アルメル) ・ 非接触型 ・ 0.75 級 (± 2.5 °C または測定温度の $\pm 0.75\%$) ・ シース径: $\phi 1.0$ <p>・ 測定範囲: 0 ~ 600 °C</p> <p>・ 補償導線の被覆: ポリエチレン</p>	<p>① 下記の理由で選定する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 高温領域が測定できること。 ・ 電気ノイズを拾わないこと。 ・ 入手可能な熱電対で精度の良いもの。 ・ 表 3-1【将来性】より、時間特性が良くなるように、さらに径が細いものを考えたが、製作時の取り扱いを考慮して、$\phi 1.0$ とする。 ・ 設計上、温度上昇の最大値は 343 °C であるが、電子線の照射異常を検出するため、測定範囲として 2 倍程度の余裕を設定した。 ・ 真空容器内に設置するため、ガス放出量の少ないガラス繊維を選定する予定であった。しかし、製作における取り扱いを考慮して、ポリエチレンを選定した。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 63.2% 立ち上がり時間は 76 msec である。 ・ 測定範囲は、熱電対のタイプ、シース径で一意的に決まる。

表 3-2 ビームダンプ 決定事項(8/11)

No	項目	設計内容	決定の背景	備考
5	熱電対系 (続き)	<p>② 熱電対は恒久的なものではなく、交換できるようにする。</p> <p>③ 真空容器内の熱電対の本数は 94 本とする。</p> <p>④ 熱電対を金属円板に接触する方法として、直径 1.2 mm 深さ 5 mm の穴を開け、シースを挿入し、ビスで固定する。</p> <p>⑤ 熱電対測定系の精度を 0.75 % 以下に設定する。</p>	<p>② 非接触型熱電対では、素線から補償導線への変換部においてエポキシ樹脂を使っているため、放射線による劣化が考えられる。</p> <p>③ 真空容器のケーブル取り合い点にクロメル・アルメルのピンで構成されたハーメチックコネクタ (48 対=24 本) が使われている。このコネクタの設置スペースから熱電対の本数を決定する。</p> <p>④ ろう付けが考えられたが、銀などエネルギー閾値の低い材料を使っているため、放射化ため不可とする。また、ペーストの使用も考えられるが、円板の温度上昇が設計値より大きくなる可能性があることやペーストの経年変化が不明であるため、使用しない。</p> <p>⑤ 熱電対測定系まで約 60 m の補償導線を使用しており、さらに端子台で異種金属に接しているため、ビームダンプから模擬電圧を印加させて測定系を校正する。このため、精度を熱電対と同程度とする。</p>	④ 図 3-1 参照

表 3-2 ビームダンプ 決定事項(9/11)

No	項目	設計内容	決定の背景	備考
6	冷却系	<p>① 金属円板の配管出入口は図 3-1 に示すように円周方向に交互にずらす。</p> <p>② セラミック配管を真空容器の外に設置し、電氣的に絶縁する。また、真空容器と配管の絶縁にもセラミックを用いる。</p> <p>③ ステンレス配管の途中に異種金属を用いない。</p> <p>④ 面シール継手の取り扱いに注意する。</p> <p>⑤ 熱交換器内のバッファータンクの容量を少なくする。</p> <p>⑥ バッファータンク内を 0.02 MPa 程度に加圧する。</p> <p>⑦ 停電時、熱交換器の電源を非常用発電機から供給する。</p>	<p>① 同一方向に出入口を設定すると、その部分が除熱されず、円周方向に温度差が生じる可能性がある。</p> <p>② セラミック配管を真空容器内で使用した実績がないため、左記のように決定する。</p> <p>③ 電解腐食が起きる可能性があるため。特にアルミニウムなどを使うガスケットに注意する。</p> <p>④ 継手を真空容器内で使用するため、微細な傷があると冷却水がわずかに漏れるため、真空度が悪化する。</p> <p>⑤ 表 3-1 【基本構造 ③】を満たすため。</p> <p>⑥ バッファータンクより 2 m 程高い配管があるため。</p> <p>⑦ 表 3-1 【安全対策 ④】を満たすため。</p>	<p>② 入射部試験では真空中で使用していたが、セラミック配管のろう付け部分が剥離した。</p>

表 3-2 ビームダンプ 決定事項(10/11)

No	項目	設計内容	決定の背景	備考
6	冷却系 (続き)	<p>⑧ 熱交換器内にある送水ポンプの空気抜きは常時開とする。ポンプから出た空気は冷却水配管に戻す。</p> <p>⑨ 各モジュールの冷却水は、最下流の円板から流入し、最上流の円板から流出する。</p> <p>⑩ 標的を流れる冷却水の仕様は以下の通りとする。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・流量：200 l/min (全体) ・流量：50 l/min (各モジュール) ・圧力(入口)：0.7 MPa ・電気伝導率：1 ~ 100 $\mu\text{S}/\text{m}$ 	<p>⑧ 送水ポンプに空気がある状態では、長時間安定した流量が確保できないため。</p> <p>⑨ 各モジュールにおいて最高温度を与える円板は、最下流にあるため。</p> <p>⑩ 熱伝達率 5815 W/(m^2K)を満たすため。</p>	⑩ 表 3-7 参照

表 3-2 ビームダンプ 決定事項(11/11)

No	項目	設計内容	決定の背景	備考
7	遮蔽体	<p>① ビームダンプから発生する光子の空気吸収線量率は表 2-26 の通りである。</p> <p>② 図 1-4 に示した厚さとする。</p> <p>③ 冷却水配管、熱電対配線、架台など遮蔽体貫通部に補助遮蔽体を設置する。</p> <p>④ 遮蔽体における鉛の充填率は 97 % 以上とし、架台との隙間は 1 mm 以下とする。</p> <p>⑤ 遮蔽体の温度を測定する。</p>	<p>① 計算コード EGS4 による計算結果である。尚、計算条件として、ビームエネルギーが 4.01 MeV 及び 10.51 MeV、平均ビーム電流が 20 mA、円板に入射する時のビーム半径を 10 cm とする (表 2-3 参照)。</p> <p>② 表 3-1 【安全対策 ⑥】、計算コード EGS4 による空気吸収線量率の計算及び遮蔽計算 [12] により構造を決定する。特に後方に散乱する光子が多いため、上流側遮蔽体の厚さを厚くする。</p> <p>③④ ビームダンプ中心から見て、②の遮蔽厚を担保するため。</p> <p>⑤ 万一、放射線により遮蔽体の温度が上昇した場合、温度を測定する。</p>	

- (4) 遮へい体の上流側及び中央部に冷却水配管，熱電対配線，及び架台用の貫通口を設ける。なお，貫通口の外側に，金属円板の中心から見て厚さ 10 cm を担保するように，補助遮へい体を設置する。
- (5) ビームダンプをビームラインに据え付ける手順として，まず真空容器用架台をアンカーボルトで床に固定し，ボルトと取り付けナットでその高さを調整する。次に，この架台に金属円板を固定した真空容器を設置する。なお，真空容器の位置が決まった後，真空容器用架台の脚部に無収縮モルタルを充填する。
- (6) 金属円板の据え付け精度は，金属円板の中心線がビームラインと鉛直・水平方向で各々 ± 0.2 mm，ビームライン方向で ± 5 mm とする。このような位置精度を得るために，電子銃室からトランシットを用いて調整する。

以上の事項及び表 3-2 の決定事項を用いて製作したビームダンプを図 3-1 にまとめる。また，ビームダンプで特に重要となる温度測定法，電流測定法，及び冷却水について次項から第 3.2.4 項で詳細に述べる。

3.2.2 温度測定法

金属円板の温度測定は，第 2 章で述べた金属円板の設計データと比較して，ビームダンプの安全性を確認する上で重要である。さらに，電子線の加速状態をリアルタイムで監視するビームモニターとして活用する上で，この温度はモジュールの電流とともに重要な測定項目である。

このため，温度を測定する熱電対の種類は，円板の温度上昇及び電氣的な絶縁を考慮し，シース径が細く，高温 (650 °C) まで測定できるシース熱電対 SK 型 (素線材質：クロメル，アルメル) とする。シース径は表 3-3 に示した K 型及び SK 型熱電対の時間応答特性 [23] を参考に決定する。表に示した応答時間は，100 °C の温水に熱電対を挿入した時から，63.2 % 及び 90.0 % の温度を指示するまでの時間である。図 2-21 に示した金属円板の温度は，パルス加熱の場合 20 msec で約 10 °C の変化が予想される。もし，この変化を SK 型熱電対で測定する場合，シース径が 0.5 mm より小さいものを選定し，温度測定系も同様な時間スケールで精度良く測定しなければならない。しかし，シース径が 0.5 mm 以下の熱電対を金属円板に設置するには細心の注意

表 3-3 K 型及び SK 型熱電対の時間応答特性 [23]
(100 °C 温水)

熱接点	シース 外径	応答時間 (ms)	
		63.2 %	90.0 %
接地型 (K)	0.5 mm	24	56
	0.85	32	76
	1.0	64	140
	1.6	110	240
	3.2	530	1300
	4.8	1200	2600
非接地型 (SK)	1.0	76	160
	1.6	150	350
	3.2	870	1900
	4.8	2100	4100

が必要となり、作業で誤って断線する場合がある。このため、シース径を 1.0 mm とし、その測定精度を 0.75 級とする。なお、導線被覆の材質として真空雰囲気で使用できるガラス繊維を当初考えていたが、導線の径が細くなり、製作時の断線があるため、ポリエチレンとする。

シース熱電対を金属円板に固定する方法として、円板に垂直に直径 1.2 mm、深さ 5 mm の穴を開け、その穴にシースを奥まで挿入する。挿入したシースは、金属円板の表面に平行になるように曲げ、ビスと金属板で円板に固定する。この方法を採用した理由は、シースを固定するろう材及び伝熱ペーストに 10 MeV 以下のエネルギーで放射化する銀などが含まれるからである。また、金属円板の温度上昇が設計値より大きくなることも予想され、耐熱温度を基準にした伝熱ペーストの選定に疑問が生ずる。さらに、シース熱電対は素線から補償導線へ接続するコネクタがあり、主な材質はエポキシ樹脂、酸化マグネシウムである。このため、エポキシ樹脂の放射線劣化を考慮し、熱電対自身を容易に交換できる構造とする。

熱電対を設置する場所は、半径方向と方位角方向の自由度があるが、真空容器にある補償導線用コネクタのピン数から制限され、94 箇所とする。すなわち、金属円板 1 枚当たり、熱電対を 2 ~ 3 本設置し、特定の金属円板 (4 枚) のみ円板内の熱伝導を調べるため、熱電対を 12 本設置する。この特定の円板では、4 箇所の方位角に対して、各々半径 R_a, R_b, R_c の場所に熱電対を設

け、その他の円板では、2～3箇所の方角に対して、半径 R_a の場所とする。

各円板における半径方向の位置 R_a, R_b, R_c cm は、電子線が直接照射しない場所とし、特に実験データと熱伝導解析の結果が容易に比較できる場所とする。すなわち、図2-6で定義された半径 R_1, R_2 cm を用いて、モジュール1及び2の熱電対では、

$$\begin{cases} R_a = R_1 + 0.15 (R_2 - R_1), \\ R_b = R_1 + 0.205 (R_2 - R_1), \\ R_c = R_1 + 0.35 (R_2 - R_1). \end{cases} \quad (3.1)$$

とし、モジュール3及び金属円板 No.18 では、

$$\begin{cases} R_a = R_1 + 0.81, \\ R_b = R_1 + 1.95, \\ R_c = 0.9R_1 + 0.1R_2 + 2.43. \end{cases} \quad (3.2)$$

とする。ここで、金属円板 No.19, No.20, 及び No.22 では $R_a = 0$ とする。

特に、ビームダンプにビームモニターとしての機能を付加するために、電子線の中心部分が照射するモジュール3及び金属円板 No.18 では、照射野から半径方向に 2.1 mm 離れた場所に熱電対を設置し、温度に対する時間応答性を向上させる。図3-2に各円板における半径 R_a, R_b, R_c を円板の内径 R_1 と伴に表す。

各円板における方角方向の位置は、次のような条件で設定する。

- (1) 電子線の中心部分が照射するモジュール2, 3, 及び金属円板 No.18 では、各円板の上流側の面に 120° 毎に3方向とする。
- (2) 電子線の周辺部が照射するモジュール1では、各円板の上流側の面に 180° 毎に2方向とする。
- (3) モジュール単位で全方角を測定できるように、一つのモジュール内での各円板の方角は少しずつ変化させる。
- (4) さらに、金属円板 No.10, 13, 17, 及び18では、円板内の熱伝導を調べるため、各円板の下流側の面 180° も含めて4方向とする。

図 3-3 に各円板における方位角を示す。なお、図における白丸は金属円板の上流側，黒丸は下流側である。

熱電対から得られた信号は，真空容器に取り付けられたセラミックコネクタ及び長さ約 60 m の補償導線を経由して，熱電対温度入力モジュール（エムティティ製 MS2801）に入力する。このモジュールは，SK 型熱電対からの入力信号を，JIS 規格（JIS-C-1602-1981）熱電対起電力表に基づきリニアライズ補正を行った後，直流電圧信号に変換する。このとき，出力信号は測定温度 0 ～ 600 °C に対して 0 ～ 10 V とする。なお，入力信号を直流電圧信号に変換する際，モジュール内で冷接点を補償している。

熱電対温度入力モジュールから出力された信号は，計測・制御系 VME モニターラックにある AD 変換器に入力し，分解能 12 ビットの情報としてデジタル化する。デジタル化した温度データは，200 msec 毎に 5 回の平均を取り，ユーザーが指定した時間間隔でコンピュータに記録する。表 3-4 に熱電対温度入力モジュール及び AD 変換器の仕様をまとめる。

表 3-4 温度測定系の仕様

熱電対温度入力モジュール	
項目	設計値
形式	エムティティ製 MS2801
入力信号	K 型熱電対
入力範囲	0 ～ 600 °C
入力抵抗	1 M Ω 以上
リニアライズ	最大 6 折線
出力信号	0 ～ 10 V DC
変換精度	最大入力信号の $\pm 0.25\%$ 以内
標準応答速度	約 2 Hz -3dB (63% 0.1 秒)
A D 変換器	
項目	設計値
形式	アクロマグ AVME-9325-5
入力仕様	0 ～ 10 V DC/12 bit
AD 変換速度	3 μ sec
変換精度	$\pm 0.04\%$ F.S.
増幅率	1, 2, 4, 8 倍

シース熱電対の温度に対する許容差は、熱電対が 0.75 級、すなわち、 $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ 又は測定温度の $\pm 0.75\%$ のどちらか大きな値、測定系から 0.5 % である。

3.2.3 電流測定方法

第 7 加速管からの電子線はパルスビームモニター CT を通過した後、モジュール化した金属円板まで輸送される。CT は非接触型電流モニターであり、その仕様を表 3-5 にまとめる。CT からの電流波形 (パルス波形) とファラデーカップであるビームダンプからの波形を比較すると、電子線の損失に関する情報が得られる。

表 3-5 非接触型電流モニターの仕様

項目	設計値
最大ビーム電流	0.2 ~ 100 mA
パルス幅	0.01 ~ 4 msec
繰り返し	50 Hz 以下
出力信号	1 V/100 mA
出力インピーダンス	50 Ω
パルス高リニアリティ	$\pm 1\%$ 以下
パルス立ち上がり特性	1 μsec 以下
ドロープ特性	1 % 以下
周波数特性	~ 300 kHz
冷却方式	自冷
形状	$\phi 140 \times 43$

ここで、パルス立ち上がり特性はステップ応答で 10 ~ 90 % の立ち上がり時間であり、周波数特性の時定数 τ として 400 msec 以上とし、周波数特性は定格入力 of - 3 dB 周波数帯域である。

モジュールに入射した電子は、モジュールに接続した電線で真空容器の外まで導出され、51 Ω の抵抗を経て、SUS 製のビームパイプに流れる。このとき、4 本の抵抗における電位差をデジタル・オシロスコープ (テクトロニクス製 TDS460 型) で同時に測定し、各モジュールに入射した電子線の波形を求める。デジタル・オシロスコープの測定モードは、入力インピーダンス 1 M Ω , DC カップリングとし、信号の立ち上がり時間は 1 ns である。また、測定された波形は、時間軸のレコード長が 500 ポイント、垂直軸方向のデジタイザ・ビット数が 8 ビットの情報にデジタル化

トの情報にデジタル化され、コンピューターに記録する。なお、ビームパイプは電氣的に加速管、電子銃、及び第一種アースと同電位になるように接続され、その電位は 0 V である。

ところで、RD 構造のビームダンプでは、四重極電磁石等の故障により電子線が拡大されず、金属円板に入射することが考えられる。すなわち、金属円板で短時間に局所的な発熱が生じ、金属円板が溶解する場合がある。このような溶解を防ぐため、一つのモジュールのみで電流が検出された場合、インターロック系によって直ちに加速器を停止させる [24]。

3.2.4 冷却水

加速器室に設置された冷却水配管 (母管, 口径 50 A) から分岐した 4 本のステンレス配管 (口径 25 A) は真空容器に入り、各モジュールの最下流にある金属円板に接続される。各モジュールにおける冷却水は、各円板を直列に流れた後、最上流の円板からステンレス配管で真空容器の外に出て母管に戻される。特に、モジュール単位で円板を電氣的に絶縁するために、真空容器を通過する 8 本のステンレス配管にセラミック配管 (通称: 絶縁パイプ) を挿入するとともに、ステンレス配管は真空容器及び架台にセラミックを介して固定する。なお、絶縁パイプは当初真空容器内に設置していたが、最終的に真空容器の外とする (付録 E 参照)。

真空容器から出たステンレス配管は、流量計及びマスフローメーターを経て母管に接続する。流量計は、冷却水が流れていない時加速器の運転を阻止すること、及び加速器室内で流量を調整するために設ける。各モジュールの流量は通常 50 l/min であるが、配管の破断などにより流量が 20 l/min 以下になった場合、流量計からインターロック信号を発信し、加速器の運転を停止する。また、マスフローメーターはモジュールを流れる流量を精度良く測定するものであり、モジュールの出入口における冷却水の温度差と合わせて、金属円板での発熱量を算出するとき使用する。さらに、母管には圧力伝送器を設置し、管内の圧力を測定する。圧力伝送器及びマスフローメーターの仕様を表 3-6 にまとめる。

ビームダンプを流れた冷却水の経路を閉鎖循環系とするため、熱交換器室内にあるビームダンプ専用の熱交換器ユニットに入り、冷却水設備 (粗温度系) の冷却水に熱を交換する。表 3-7 に熱交換器ユニットの仕様をまとめる。表中における一次冷却水はビームダンプから熱交換器ユニットまでの冷却水を表し、二次冷却水は冷却水設備を表す。

表 3-6 圧力伝送器及びマスフローメーターの仕様

項目	設計値	
	電子式圧力伝送器	マスフローメーター
形式	(株)共立計器製作所 PT3013A0810Z	東京計装(株) W-521
測定範囲	0 ~ 10 kgf/cm ²	0 ~ 70 l/min
出力信号	4 ~ 20 mA	4 ~ 20 mA
許容誤差	最大 ± 0.06 %	最大 ± 1.9 %

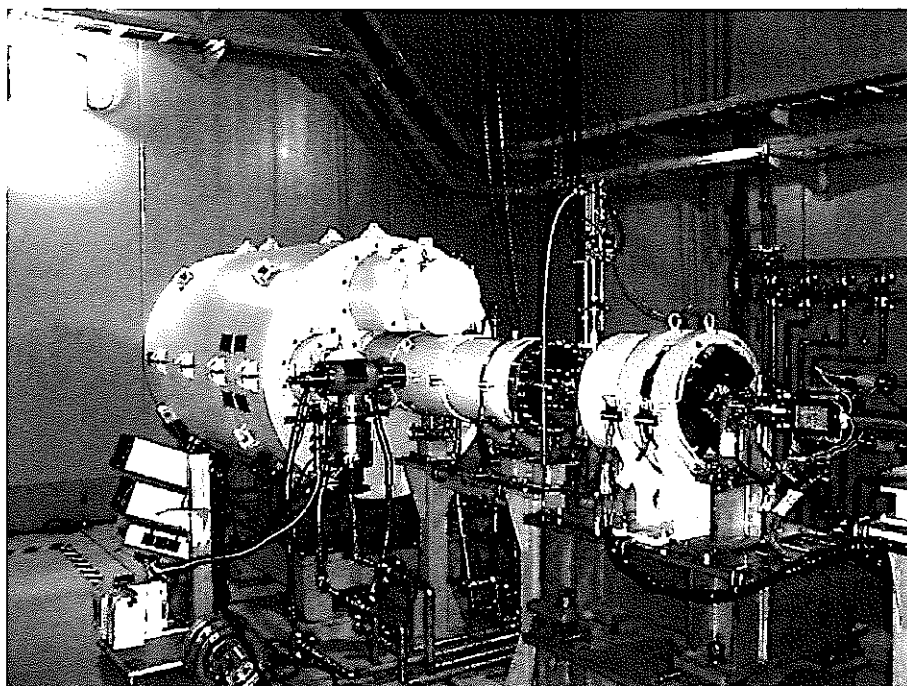
このユニットにおける熱交換器の冷却能力は、平均ビーム出力の最大値に 50 kW の余裕を加え、250 kW とする。また、冷却水に接する部材及び配管は全て禁油処理を施す。さらに、RD 構造のビームダンプでは、一次冷却水は間接的に電子線からの放射線に晒されているため、冷却水に含まれる不純物が放射化することが考えられる。このため、一次冷却水系統にはイオン交換樹脂による精製装置を設置せず、冷却水の電気伝導度の低下に対しては純水を入れ替えるものとする。なお、一次冷却水の電気伝導度は、純水を入れた当初 100 $\mu\text{S}/\text{m}$ であったが、少しずつ低下し、1 ヶ月程度で 6 $\mu\text{S}/\text{m}$ になり、平衡に達した。

さらに、一次冷却水の流量を一定に保つため、熱交換器ユニット内にある膨張水槽の内圧を窒素ガスを用いて大気圧より約 0.2 kgf/cm² だけ高い状態に設定した。この加圧により各モジュールの流量は、長時間に渡り精度良く一定となり、その安定度は 183.1 分間で $\pm 0.6\%$ 以下であった (表 4-1 参照)。

表 3-7 熱交換器ユニットの仕様

項目	設計値
形式	三栄技研(株) TWW-220KP
温度安定度	± 1 °C (一次側出口にて)
電気伝導率	1 ~ 100 μ S/m (一次側)
ポンプ出力	7.5 kW
膨張水槽	20 ℓ
熱交換器	プレート式 (表面積 5.4 m ²)
最大冷却能力	250 kW
保護装置	漏電ブレーカー, 安全弁など
大きさ	1300(W)×2050(H)×2300(D)
一次冷却水	流量 200 ℓ /min
	入口温度 45 ~ 65 °C
	出口温度 25 ~ 45 °C
	管内圧力 7 kgf/cm ²
	圧力損失 0.3 kgf/cm ²
二次冷却水	流量 360 ℓ /min
	入口温度 25 ~ 33 °C
	出口温度 30 ~ 50 °C
	管内圧力 7 kgf/cm ²
	圧力損失 0.9 kgf/cm ²

(1) ビーム輸送系を含むビームダンプの外形



(2) 金属円板の外形

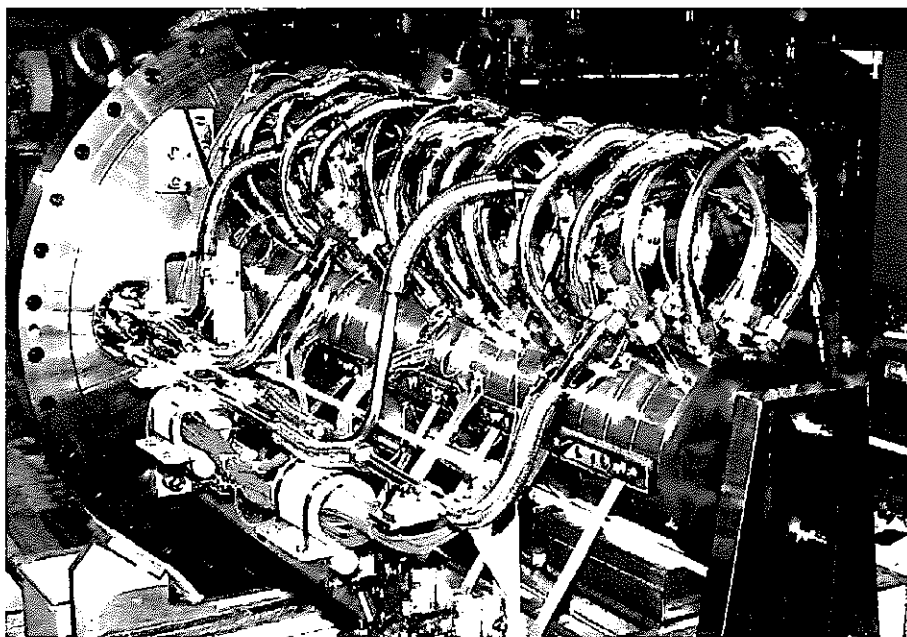
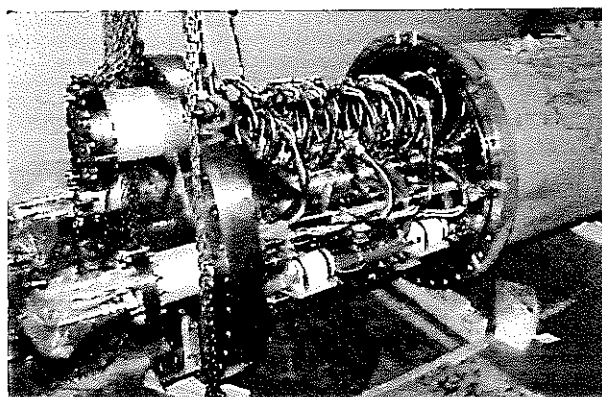


図3-1 ビームダンプの構造 (1/4)

(3) 上流側から見た金属円板



(4) 真空容器に挿入される金属円板



(5) 冷却水配管と金属円板の接続部

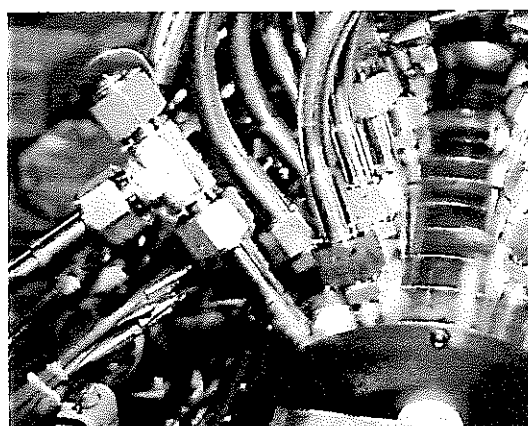
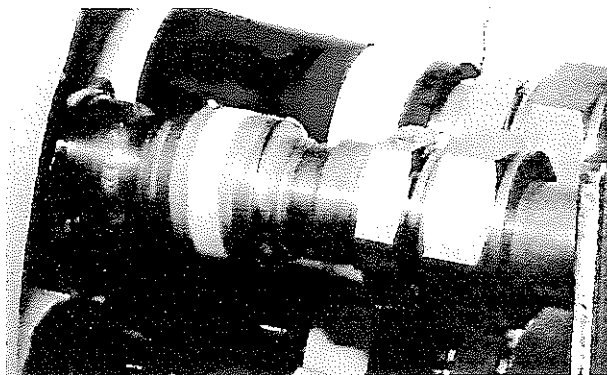
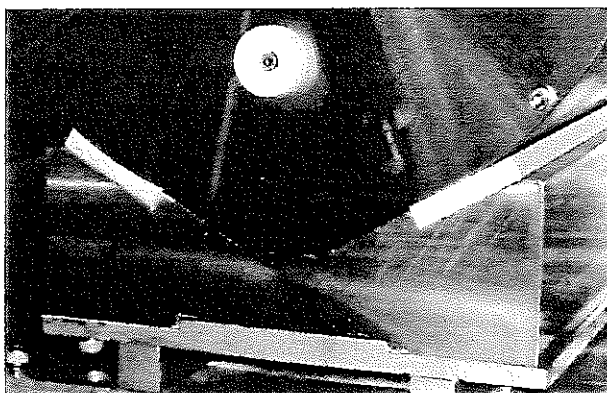


図3-1 ビームダンプの構造 (2/4)。

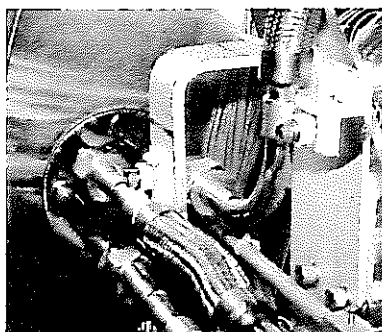
(6) 真空容器外に設置された絶縁パイプ



(7) セラミックを用いた金属円板と架台との絶縁部分



(8) 真空容器と冷却水配管の接続部



(9) 金属円板の上流部(外形)

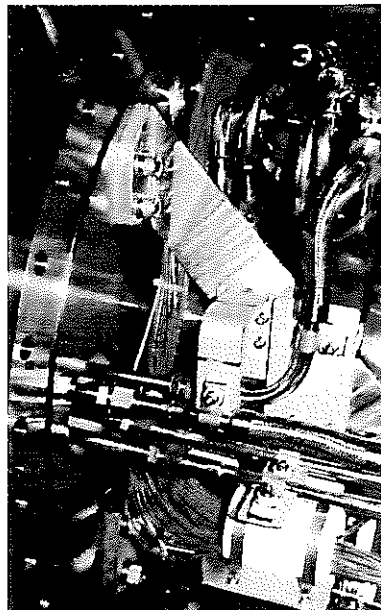
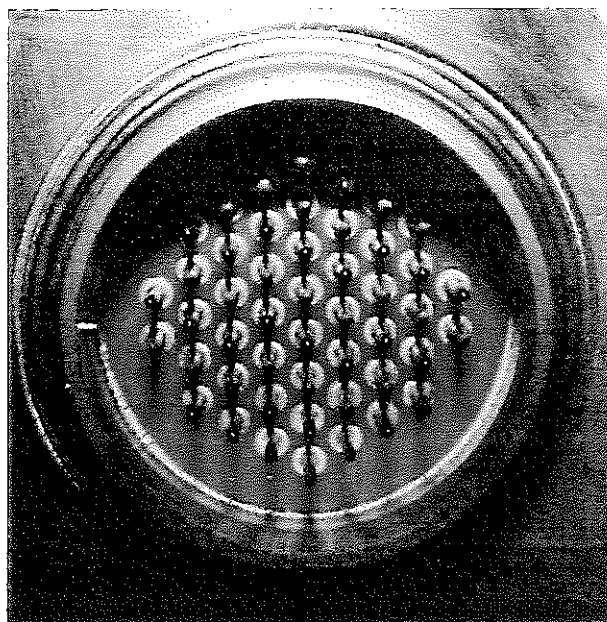
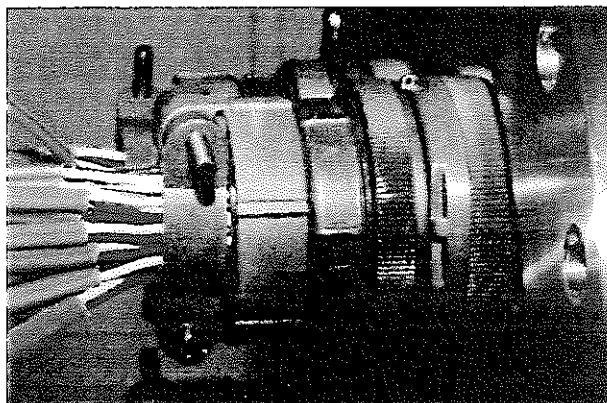


図3-1 ビームダンプの構造 (3/4)。

(10) ハーメチックコネクタ(ピン)



(11) ハーメチックコネクタ(真空容器側)



(12) 熱電対の固定方法(円板No.17の下流側)

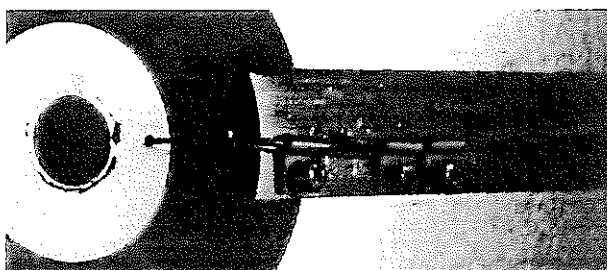


図3-1 ビームダンプの構造 (4/4)。

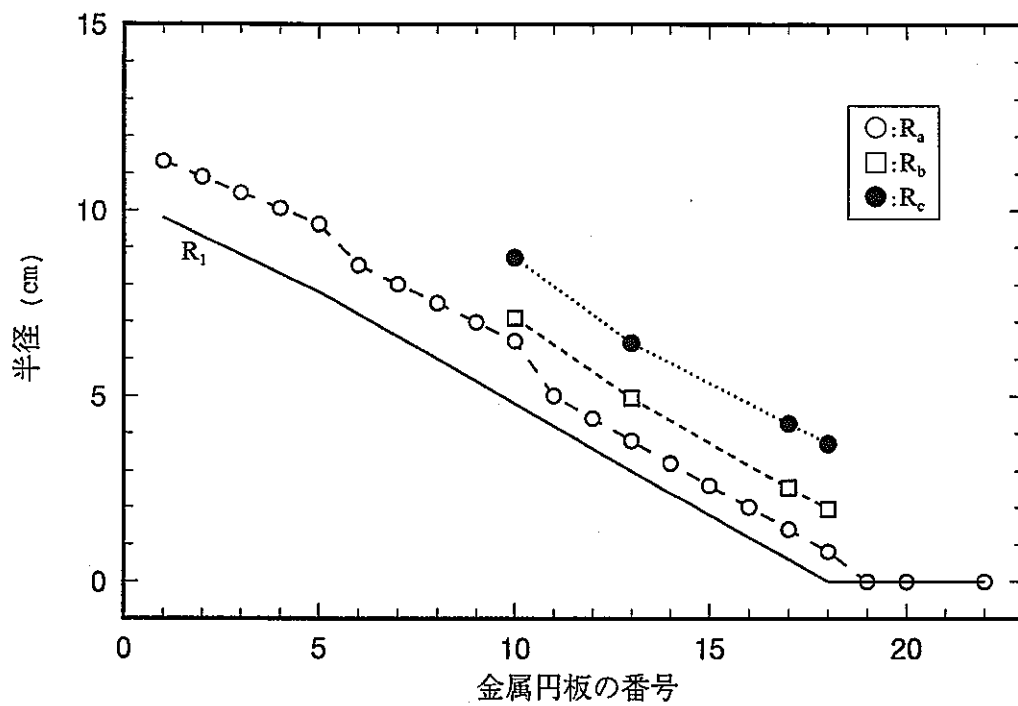


図3-2 各円板に設置された熱電対の半径方向の位置。

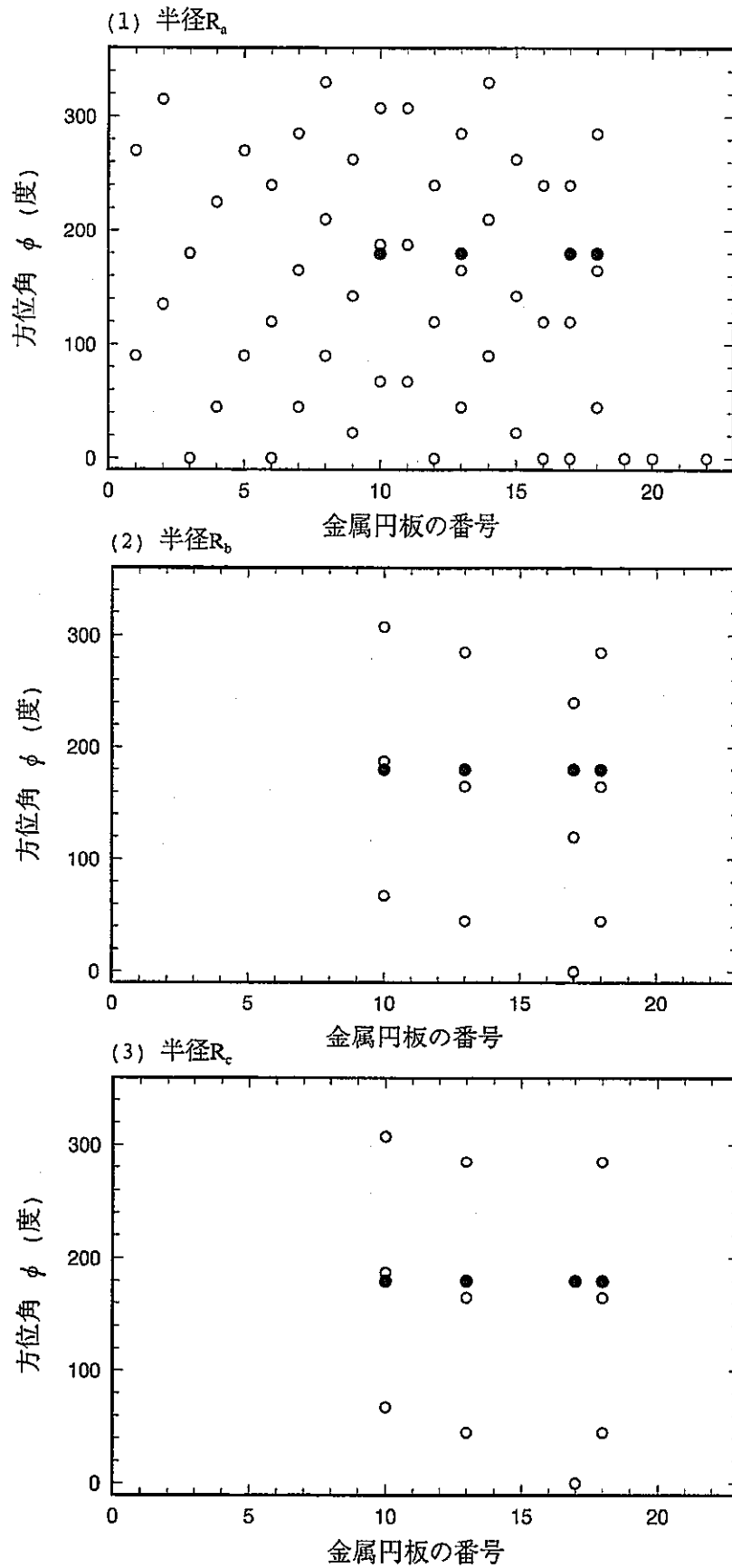


図3-3 各円板に設置された熱電対の方位角方向の位置。(1)から(3)は各々半径 R_a , R_b , R_c に対応する。また、○印は金属円板の上流側、●印は下流側を表す。

第4章 初期性能評価

4.1 概要

1999年1月より開始した加速器の性能確認試験では、許可された平均ビーム電流 10.5 mA を目指して電流を増加させた。同年12月には、平均ビーム電流 3.5 mA (最大ビーム電流 100 mA, パルス幅 1 msec, 及び繰り返し 35 Hz) で約 60 分間加速器を運転した。なお、ビームエネルギーの公称値は高周波の減少から算出した 7.0 MeV である。

この試験の中で、低電流の電子線に対するビームダンプの特性を調べる試験 (ビームダンプ試験) を行った。ビームダンプ試験における平均ビーム電流は、金属円板の温度等を長時間にわたって調べるため、電子線が安定に加速できる 0.84 mA (最大ビーム電流 100 mA, ビーム幅 0.24 msec, 繰り返し 35 Hz) に設定した。

本章では、ビームダンプ試験で得られた金属円板の温度、ビーム電流などのデータを示し、設計値との比較からビームダンプの性能を評価する。また、今後平均ビーム電流を上昇させる際に必要となる改良点についても簡単に述べる。

なお、特に断らない限り、本章で示す温度、電流などのデータは 30 秒間隔で測定している。

4.2 加速器の運転状態

ビームダンプ試験の結果を示す前に、本試験における加速器の運転状況をまとめると以下の通りである。

- (i) 試験開始直後から 25 分後までの間、電子線の軌道を調整する。
- (ii) 試験開始 25 分後から 122 分後までの間、電子線の軌道を積極的に制御せず加速器を運転する。

- (iii) 試験開始 122 分後から 172 分後までの間、電子線の中心位置が電磁石 Q2 の中心となるようにステアリング・マグネット STM などを用いて手動で制御する。
- (iv) 特に、運転状態 (iii) のうち、試験開始 138 分後から 165 分後までの間、各モジュールの電流値、ビームラインの真空度などの測定値が一定となる。
- (v) 試験開始 172 分後、加速器を停止する。

また、ビーム位置モニター BPM で測定された電子線の中心位置を図 4-1 に表す。図は、電磁石 Q2 の中心を原点とする電子線の位置を $r\phi$ 座標で表したものである。特に、灰色の長方形は運転状態 (iv) に該当しており、電子線の中心位置が $(r, \phi) = (0.8 \text{ mm}, -100^\circ)$ 付近で一定となっている。

4.3 電流測定

図 4-2 は、第 3.2.3 項の方法で得られた、ビームダンプ試験における電子線 1 パルスでの典型的な電流波形である。図 4-2(1) は、電子銃から出射される電子線の電流波形と、第 7 加速管出口における波形である。電子銃からの電子線 (約 300 mA) は加速器のチョッパー系で約 3 分の 1 の部分が切り出されるため、第 7 加速管出口では 100 mA となる。図 4-2(2) は、試験開始後 163 分後における各モジュールで測定された電流波形である。図の横軸は電子線 1 パルス内における経過時間、縦軸は電流値である。図における M_1 から M_4 までの記号は各モジュールの番号である。加速管から輸送された電子線は、第 3 モジュールに約 75 mA、第 2 モジュールに約 20 mA、残りは第 1, 4 モジュールに入射している。

また、図の “Sum” の波形は各モジュールの波形を計算機で加算したものであり、金属円板に入射した全電流に相当する。この全電流と図 4-2(1) の第 7 加速管出口における電流が一致しているため、加速管からの電子線はビームダンプの金属円板までほとんど輸送されている。

さらに、加速器の運転状態 (i) ~ (iv) を代表する時刻における各モジュールの電流値を図 4-3 の各々 (a) ~ (d) に示す。電子線の中心が電磁石 Q2 の中心からずれている状態 (ii)、すなわち図 4-3(b) では、モジュール 4 の電流が減少するとともに、モジュール 1 及び 2 の電流が増加している。

4.4 ビームエネルギーの算出

本ビームダンプは、金属円板がモジュール単位で電気的かつ熱的に絶縁されているため、各モジュール (モジュール番号 i) に入射する平均ビーム電流 \bar{I}_i と各モジュールを流れる冷却水の温度上昇から算出した発熱量 Q_i を同時に測定できる。すなわち、独立した 8 個の測定量からビームエネルギー及びモジュール内における熱の収支を評価できる。

表 4-1 は、電子線が安定に入射する運転状態 (iv) における、各モジュールの最大ビーム電流と発熱量 Q_i の関係である。

表 4-1 各モジュールにおける最大ビーム電流と発熱量

モジュール	最大ビーム電流 (mA)	流量 (ℓ/min)	発熱量 (kW)		
			照射時 (Q_{a_i})	未照射時 (Q_{b_i})	Q_i
1	4.75 ± 0.99	48.74 ± 0.08	0.64 ± 0.50	0.09 ± 0.39	0.55 ± 0.63
2	18.2 ± 1.2	47.65 ± 0.10	1.12 ± 0.50	0.07 ± 0.43	1.05 ± 0.66
3	73.8 ± 1.2	43.81 ± 0.13	4.41 ± 0.36	0.41 ± 0.36	4.00 ± 0.51
4	2.70 ± 0.80	45.79 ± 0.10	0.13 ± 0.42	0.13 ± 0.38	0.00 ± 0.57

ここで、発熱量 Q_i は照射時の発熱量 Q_{a_i} から電子線が照射していない時の発熱量 Q_{b_i} を引いた値である。これは、モジュールに流入、流出する冷却水の温度を各々 1 本の熱電対で測定しているため、両者の個体差が発熱量 Q_i の算出に影響を与える可能性があるからである。また、冷却水温度及び流量の測定は 1 分間隔とし、各データの測定時間は、電子線が照射していない時の発熱量が 109 分間、及び流量が 183.1 分間である。なお、ビームダンプに流入、流出する一次冷却水の圧力は各々 6.0 kg/cm²、1.5 kg/cm² であり、ビームダンプ内での圧力損失は 4.5 kg/cm² となった。

図 4-4 は、表 4-1 から得られた各モジュールにおける平均ビーム電流と発熱量の関係である。図の直線 $Q = a\bar{I}$ の傾き a は、電子線の運動エネルギーを表しており、最少自乗法により決定される。その結果、 a の値は 6.53 (MeV) となり、ビームエネルギー 7.0 MeV に該当する。なお、このときのパラメター χ_r^2 は 0.15 である。

従って、このビームエネルギーと公称エネルギーが一致しているため、各モジュールに入射した電流がモジュール内でそのエネルギーを損失し、冷却水へ伝熱していることがわかる。すなわ

ち、熱の収支から各モジュールが断熱状態であることも確認できた。

4.5 金属円板の温度

4.5.1 熱伝達率の確認

第 2.2.2 項で述べた円板の温度上昇は、表 2-1 の条件を用いて計算コード EGS4 と ALGOR から求めた。しかし、金属円板から冷却水への熱伝達率は経験から得られた値であるため、ビームダンプ試験においてその値を確認する必要がある。このため、金属円板に設置された熱電対のデータ、特に非定常状態における値から熱伝達率を求める。ここで、本試験における非定常状態は運転状態 (iv) 以外が対応している。しかし、本項では、電子線の照射状態の変化が円板の温度変化に与える影響を避けるため、加速器が停止した直後の温度変化から熱伝達率を考察した。

図 4-5 は、円板 No.14 にある熱電対の温度を停止直後から 5 秒間隔で測定した結果である。図の温度は 3 本の熱電対の平均値であり、統計棒は熱電対の測定誤差及び 3 個の測定値のばらつきを考慮している。次に、計算コード ANSYS から得られる熱電対の設置場所での温度変化を同図の曲線で示す。ここで、金属円板の初期温度及び冷却水温度は各々測定値である 37.7°C 及び 28.5°C になるように設定した。

両者を比較すると、計算コード ANSYS から求めた温度変化は測定値と統計棒の範囲内で良く一致している。従って、金属円板から冷却水への熱伝達率は $5800\text{ W/m}^2\text{K}$ と矛盾していないことが確認された。

4.5.2 定常状態における温度

ビームダンプ試験における金属円板の温度変化を図 4-6 に示す。図は金属円板 No.13 及び No.14 の半径 R_0 [式 (3.2)] における熱電対 (6 本) の温度であるが、第 3 モジュールに流入及び流出する冷却水の平均温度を引いた温度上昇分である。また、図 4-3 (a) ~ (d) に対応する時刻を図中の一点鎖線で示す。試験開始 25 分後から 122 分後までの間、すなわち運転状態 (ii) において両円板の温度変化を比較すると、方位角 180° 方向の温度が共に上昇し、 0° 方向の温度が共に減少している。また、この状態における温度上昇は、電子線が安定に入射する運転状態 (iv) と比較して約 0.5 ~ 4 倍の差があった。

次に、ビームダンプ試験における円板 No.14 の温度上昇と設計データを比較する。まず初めに、第 2.2.2 項で得られた温度上昇をビームダンプ試験の条件に合わせて再度計算する。すなわち、ビームエネルギー 7.0 MeV、平均ビーム電流 0.84 mA、及び熱伝達率 5800 W/m²K の条件を用いて、円板 No.14 に設置された熱電対の温度上昇を計算すると、表 4-2 となる。ここで、各

表 4-2 金属円板 No.14 に設置された熱電対の温度上昇

条 件		最大ビーム電流 (mA)				温度上昇 (°C)
		M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	
設 計	3 σ	9.9	39.8	49.4	0.9	7.3 \pm 0.2
	5 σ	0.2	14.6	82.9	2.3	13.8 \pm 0.4
実 験		4.8	18.2	73.8	2.7	12.3 \pm 2.4

モジュールで測定された電流値を計算コード EGS4 の入力条件に反映させるため、電子線の電流密度分布として最大ビーム半径を正規分布の 3 σ 及び 5 σ とする。(但し、 σ は正規分布の標準偏差である。) また、設計における温度上昇の誤差は、計算コード ANSYS から得られた深さ 5 mm (熱電対を挿入する穴の深さに該当) までの温度から算出した値とする。次に、運転状態 (iv) における 165 (=55 \times 3) 個のデータから温度上昇の平均と標準偏差を求め、同表に示す。

両者を比較すると、測定値は設計データと矛盾せず、特に、設計条件 [5 σ] と測定値はよく一致している。さらに詳しく両者を比較するためには、電子線の電流密度分布を得ることが重要となる。

4.5.3 ビームプロファイルの測定例

金属円板に入射する電子線のプロファイルを視覚的に求めるため、円板 No.1 ~ 18 の半径 R_a にある熱電対の温度を 18 個の同心円で囲まれたリング内の色として表示する。さらに、熱電対の方位角 (図 3-3 参照) を考慮して、各リングを円周方向に分割する。

図 4-7(a) は図 4-6 の (a) に対応し、試験開始 25 分後における金属円板の温度である。円板 No.1 にある 2 本の熱電対 ($\phi = 90^\circ, 270^\circ$) の温度は、円周方向に 180° 毎に分割された最外部のリングの色である。上部の半リングは $\phi = 90^\circ$ の温度、下部は $\phi = 270^\circ$ に対応している。このリングの内側にあるリングは、順に円板 No.2, No.3, ... にある熱電対の温度である。最内部の円は、

円板 No.18 にある 3 本の熱電対 ($\phi = 45^\circ, 165^\circ, 285^\circ$) の温度を表すため、熱電対の方位角を中心として 120° 毎に 3 個に分割している。なお、図の温度は、図 4-6 と同様に各モジュールの冷却水温度からの上昇分である。

図 4-7 の (a) ~ (d) の温度分布は、各々図 4-6 の (a) ~ (d) に対応する。これらの図を比較すると、電子線が中心に電磁石 Q2 の中心にある (a) 及び (d) と中心にない (b) では温度分布が明らかに異なっており、電子線が中心に金属円板上でおよそ方位角 180° 方向にあることが視覚的にわかる。

従って、電磁石 Q2 に入射する電子線の軌道が変化した場合、図 4-3 に示した各モジュールの電流及び図 4-7 の温度分布が共に変化している。すなわち、RD 構造のビームダンプは、電流と温度のデータから平均ビーム電流 20 mA の電子線を直接監視するビームモニターの機能があることがわかる。特に、加速器の運転において電子線が方向などの加速状態が変化した場合、その様子を直ちに把握し、加速器を含めて電子線を制御できる可能性がある。

なお、試験開始後 122 分後の電子線が中心位置は、電磁石 Q2 の前方にあるビーム位置モニター BPM によると $(r, \phi) = (5 \text{ mm}, 0^\circ)$ 付近であるが、図 4-7(b), すなわち金属円板上ではおよそ方位角 180° 方向である。このように両者の中心位置が異なっていることは、電磁石 Q2 により電子線の軌道が進行方向左側に曲げられていることを示している。

4.6 1 cm 線量当量率の測定

ビームダンプ試験中の 1 cm 線量当量を測定し、計算コード EGS4 の結果と比較するため、ビームダンプシャヘイ体の表面 (図 2-43 の黒丸 7 箇所) にフィルムバッジ (FB) 及び熱ルミネッセンス線量計 (TLD) を設置した。表 4-3 に測定で使った FB 及び TLD の仕様をまとめる。

ここで、測定誤差は、統計誤差のほか系統誤差も含めた値である。

ビームダンプ試験では、各測定点に FB 1 個及び TLD 2 素子を対に設置し、電子線を 172 分間照射している間の γ 線を測定した。その結果、次の二点を得られた。第一に、各測定点での γ 線のエネルギーは約 80 keV 以上が大部分を占めている。第二に、各測定点で得られた 3 個の 1 cm 線量当量を平均し、測定点の位置 (r, θ, ϕ) と共に表 4-4 にまとめる。1 cm 線量当量の誤差は、FB 及び TLD の測定誤差、並びに 3 個の測定値のばらつきを考慮した。なお、測定値が TLD

表 4-3 FB, TLD の仕様

項目	設計値	
形式	(株) 千代田テクノル 製 フィルムバッジ HM	松下電器産業 (株) CaSO ₄ 系 TLD UD-200S
エネルギー範囲	10 keV ~ 10 MeV	30 keV ~ 10 MeV
測定線量範囲	0.1 ~ 2000 mSv	1 μSv ~ 200 mSv
測定誤差	± 5 %	± 5 %

表 4-4 線量計の場所と測定された 1 cm 線量当量

No.	設置場所			1 cm 線量 当量 (mSv)
	r (cm)	θ (°)	φ (°)	
1	90.5	0.0	—	59 ± 42
2	104.4	29.9	180.0	130 ± 60
3	62.7	98.6	189.2	(1500.7)
4	98.7	141.1	189.2	78 ± 55
5	103.1	152.9	270.0	94 ± 43
6	214.1	177.5	180.0	(>2000)
7	62.7	98.6	350.8	(1417.6)

の測定範囲を超えている場合、FB の値を参考値として括弧内に表す。特に、番号 7 の測定値は FB の測定範囲を超えているため、FB の上限値 (2 Sv) を使用した。

次に、表 4-4 から得られる 1 cm 線量当量率を表 4-5 及び図 4-8 に示す。なお、表 4-5 の番号 3 の測定値は、表 4-4 の番号 3 及び 7 の測定値を平均した値である。

さらに、計算コード EGS4 を用いて平均ビーム電流 0.84 mA に対する各測定点の 1 cm 線量当量率を求め、同表の [EGS4] の欄及び図 4-8 に示す。ここで、計算コード EGS4 で設定した条件は次の通りである。

- (1) ビームエネルギーを 7.0 MeV 及び 10.51 MeV、電流密度分布を 3σ 及び 5σ (詳細は表 4-2 参照) の 3 通りとする。
- (2) ビームダンプの材質は図 2-4 に示した銅及び鉛のほか、真空容器の材質として鉄を考慮

する*。

- (3) 各測定点における γ 線は、対にした線量計の大きさを考慮して、線量計を中心とする遮蔽体上の ± 5 cm の範囲内に入るものとし、 0° のみ ± 15 cm とする。
- (4) 1 cm 線量当量率の計算では、単位フルフェンス率当たりの 1 cm 線量当量率として図 2-53 を用いる。
- (5) 1 cm 線量当量率の算出では、各線量計における γ 線の検出効率、例えばエネルギーや入射角などに対する効率を考慮しなければならない。しかし、線量計から算出される 1 cm 線量当量率には 50 % 以上の誤差が含まれていること、今回の測定はビームダンプの初期性能を評価することが目的であるため、検出効率を 1 とする。

線量計及び計算コード EGS4 からの 1 cm 線量当量率を比較すると、ビームエネルギー 7 MeV での計算コード EGS4 の値は実験データの傾向を良く再現していることがわかる。特に、複雑なビームダンプの形状を計算コード EGS4 でモデル化する際の精度を考慮すると、条件 [7.0 MeV, 5σ] における両者はファクター 2 程度で一致していると思われる。さらに詳しく両者を比較するためには、 γ 線のエネルギー分布を求める必要がある。

表 4-5 測定された 1 cm 線量当量率と計算コード EGS4 との比較

No.	θ ($^\circ$)	1 cm 線量当量率 (mSv/h)			
		測定値	E G S 4		
			7.0 MeV, 5σ	7.0 MeV, 3σ	10.51 MeV, 3σ
1	0.0	21 \pm 15	40 \pm 6	21 \pm 3	140 \pm 20
2	29.9	44 \pm 21	38 \pm 3	36 \pm 2	140 \pm 8
3	98.6	(510)	550 \pm 10	650 \pm 8	1700 \pm 30
4	141.1	27 \pm 19	51 \pm 3	85 \pm 3	130 \pm 7
5	152.9	33 \pm 15	110 \pm 5	170 \pm 5	240 \pm 10
6	177.5	(>700)	3000 \pm 60	3700 \pm 50	5900 \pm 100

*真空容器も考慮した、平均ビーム電流 20 mA に対する空気吸収線量率は図 4-9 に表す。

4.7 真空度測定

運転状態 (iv) におけるビームラインの真空度を表4-6にまとめる。表に示した真空度は、図2-39の節点7及び15で測定された値である。これらの値を用いて平均ビーム電流 20 mA における節点1の真空度を予想する。すなわち、第2.4.3項で述べた配管ネットワークを用いて、測定された節点7及び15の真空度を満たすように、真空容器からビームラインへ流入するガス量 Q_{17}^{ex} 及びビームパイプ表面から放出されるガス量 λ_{pipe} を決定し、これらの値から節点1の真空度を求める。計算の結果を表4-7にまとめる。配管ネットワークにより得られた節点7及び15の真

表4-6 運転状態 (iv) におけるビームラインの真空度

節点	真空度 [Pa]	
	試験前	状態 (iv)
7 (PM1)	4.8×10^{-6}	2.1×10^{-5}
15 (PM2)	2.7×10^{-5}	1.5×10^{-4}

表4-7 配管ネットワークにより得られたガス量と節点1の真空度

項目			条件		
			試験前	状態 (iv)	20 mA
ガス量	Q_{17}^{ex} [Pa m ³ /s]		2.8×10^{-6}	1.7×10^{-5}	3.5×10^{-4}
	λ_{pipe} [Pa m ³ /s/m ²]		2.6×10^{-7}	6.7×10^{-7}	9.9×10^{-6}
真空度	節点1 [Pa]		7.4×10^{-6}	2.7×10^{-5}	4.8×10^{-4}
	節点7 [Pa]		4.8×10^{-6}	2.1×10^{-5}	3.9×10^{-4}
	節点15 [Pa]		2.7×10^{-5}	1.5×10^{-4}	3.0×10^{-3}

真空度が表4-6の測定値と完全に一致しているため、差動排気系のコンダクタンスが正しく得られていることがわかる。しかし、節点1における真空度が、平均ビーム電流 20 mA における設計値 (4.1×10^{-5} Pa) の66%、すなわち 2.7×10^{-5} Pa となった。また、状態 (iv) におけるガス量 Q_{17}^{ex} 、 λ_{pipe} が試験前に比べて各々6.1倍、2.6倍増加していることも特徴である。特に、ガス量 Q_{17}^{ex} の増分が単に円板の温度に起因すると仮定した量よりも多くなることは、平均ビーム電流と共に増加する放射線の影響を考えなければならない。さらに、各ガス量の増分が平均ビーム電流

に比例すると仮定し、平均ビーム電流 20 mA におけるガス量と真空度を表 4-7 の「20 mA」の欄に示す。この結果、節点 1 における真空度が 4.8×10^{-4} Pa となり、設計値の 12 倍と予想される。

このように節点 1 における真空度が高くなった理由として、表 2-15 に示したガス量 λ として放射線の影響を考慮していなかったこと、ビームライン表面から放出されるガス量がビーム電流と共に増加したことが考えられる。今後、平均ビーム電流を上昇させる場合、ビームダンプ試験で得られた真空度を参考にして、真空系を改良する必要がある。

なお、ビームラインで残留しているガスの成分を分析することにより、電子線が照射している時にガスを放出する部材を推定できる。ところが、今回の試験では真空度が高くなったため、四重極型質量分析計を使用できなかった。

4.8 四重極電磁石についての課題

RD 構造のビームダンプでは、ダブレットの四重極電磁石で電子線の直径を拡大させている。ところが、加速器の性能確認試験で電子線の平均ビーム電流を増加させたとき、四重極電磁石付近のビームパイプが発熱した。すなわち、ダブレットの四重極電磁石では、上流の電磁石で電子線を X 方向に収束させているが、それに伴って電子線の Y 方向は発散状態となる。このため、発散した Y 方向の電子が下流の電磁石で収束されるまでの間に、電子線 (主として Y 方向) がビームパイプに当たり、ビームパイプが発熱した。この発熱の理由として、四重極電磁石に入射する電子線の条件が設計値である表 2-3 と異なった点が考えられる。実際に電磁石に入射した電子線の直径が 40 mm、またエミッタンスが数百 π mm mrad であったと予想されている。すなわち、電子線の周辺部の電子数が設計値より多くなり、ビームダクトに当たったためである。ビームダクトの発熱を抑さえるには、四重極電磁石をダブレットからトリプレットに変更し、電子線 (主として Y 方向) の発散を抑えること、また加速器で生じるハロービームを積極的に除く対策が考えられる。

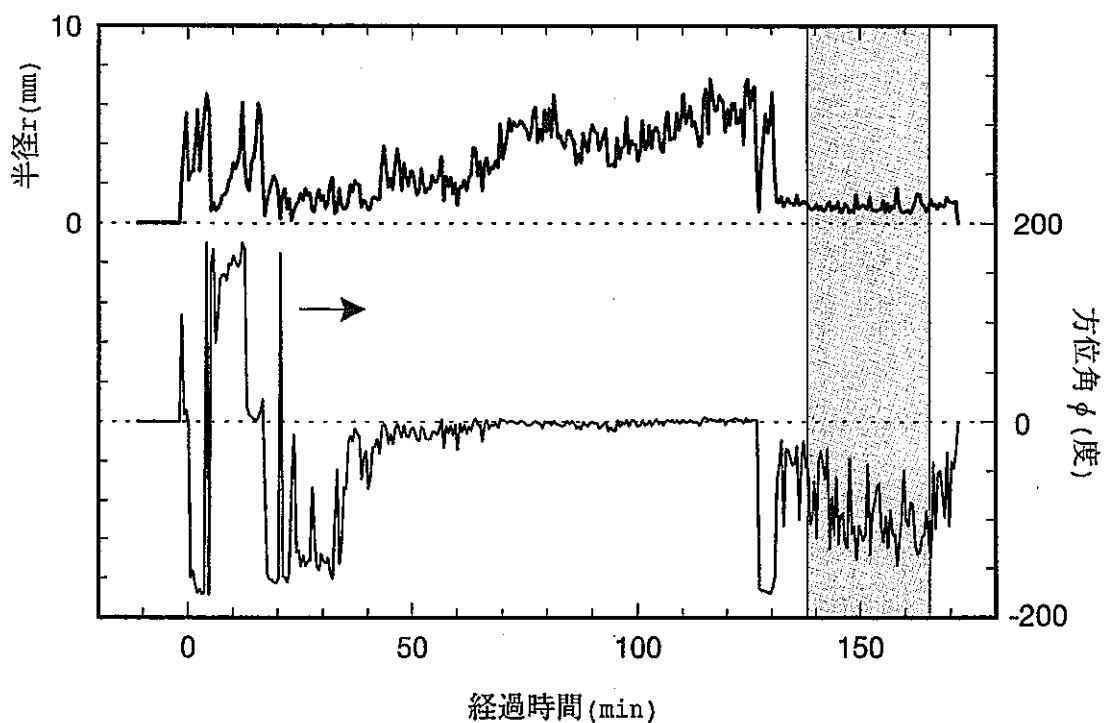
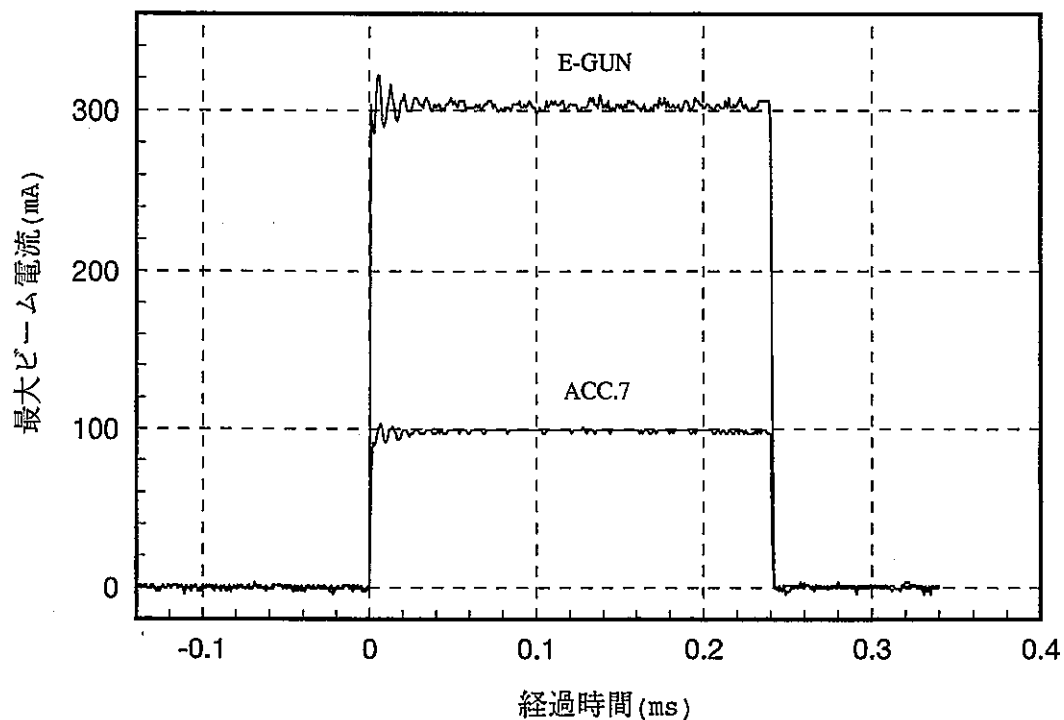


図4-1 ビーム位置モニターBPMで測定された電子線の中心位置(r, ϕ)。灰色の長方形は運転状態(iv)に該当する。

(1) 電子銃及び加速管の出口における電流波形



(2) ビームダンプにおける電流波形

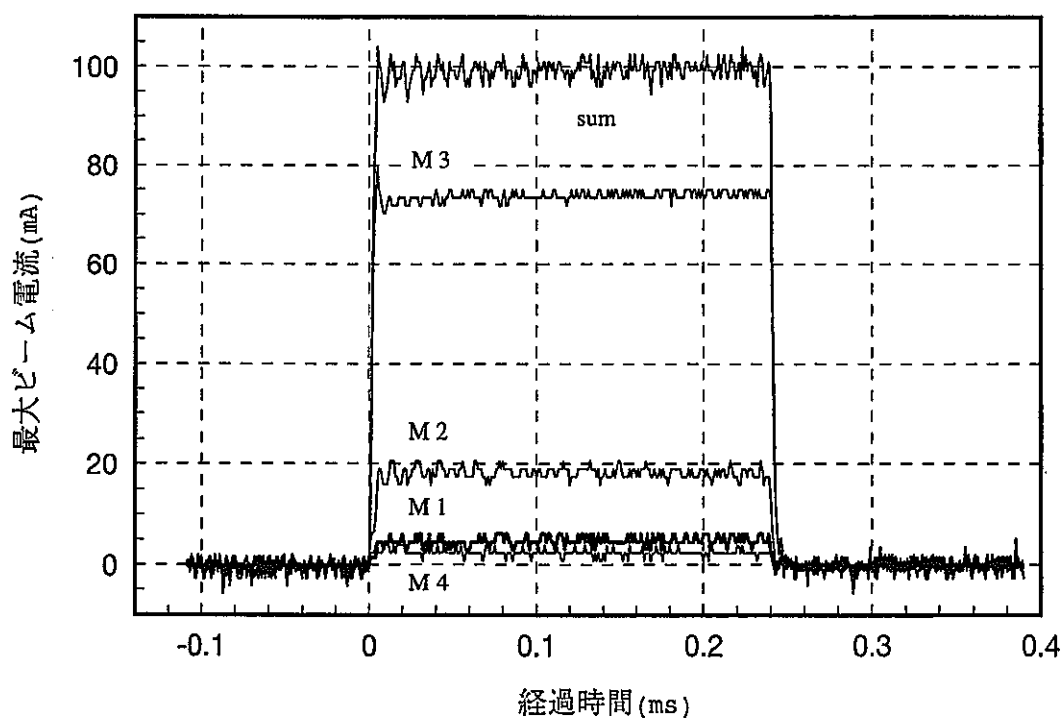


図4-2 試験開始163分後における電子線1パルスの波形。
 (1)は電子銃及び加速管の出口における波形、(2)は
 ビームダンプの各モジュールで測定された波形であ
 る。"sum"は計算機で加算した全電流である。

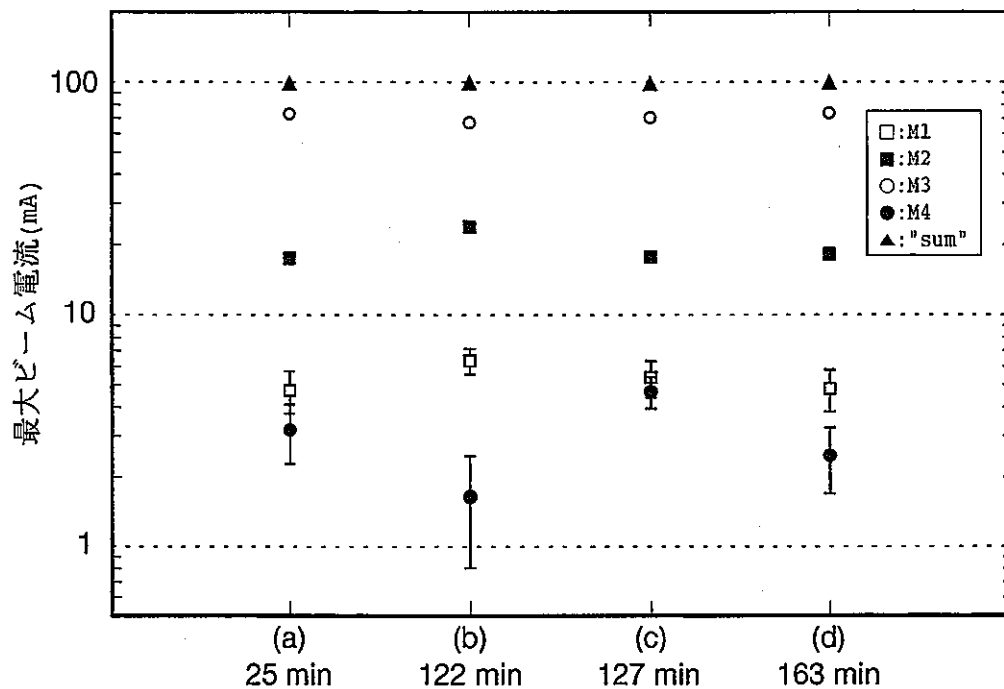


図4-3 各運転状態を代表する時刻における各モジュールの最大ビーム電流。M1からM4はモジュールの番号であり、「sum」は計算機で加算した全電流である。

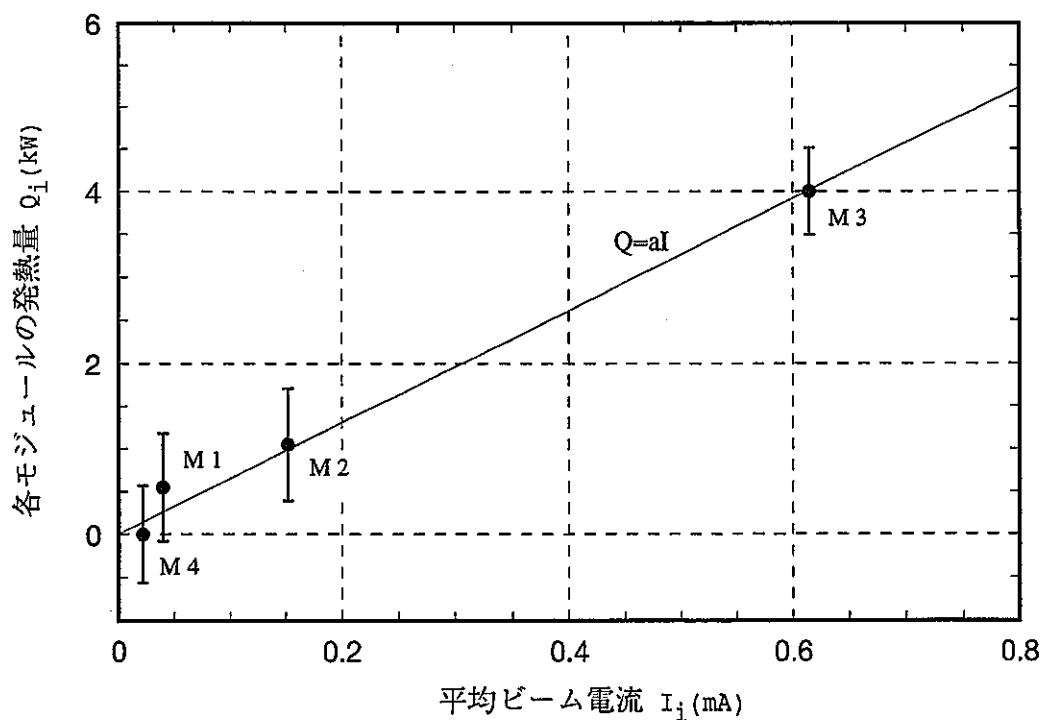


図4-4 運転状態(iv)で測定された各モジュールの平均ビーム電流と発熱量の関係。直線 $Q=aI$ の傾き a は電子線の運動エネルギーを表す。

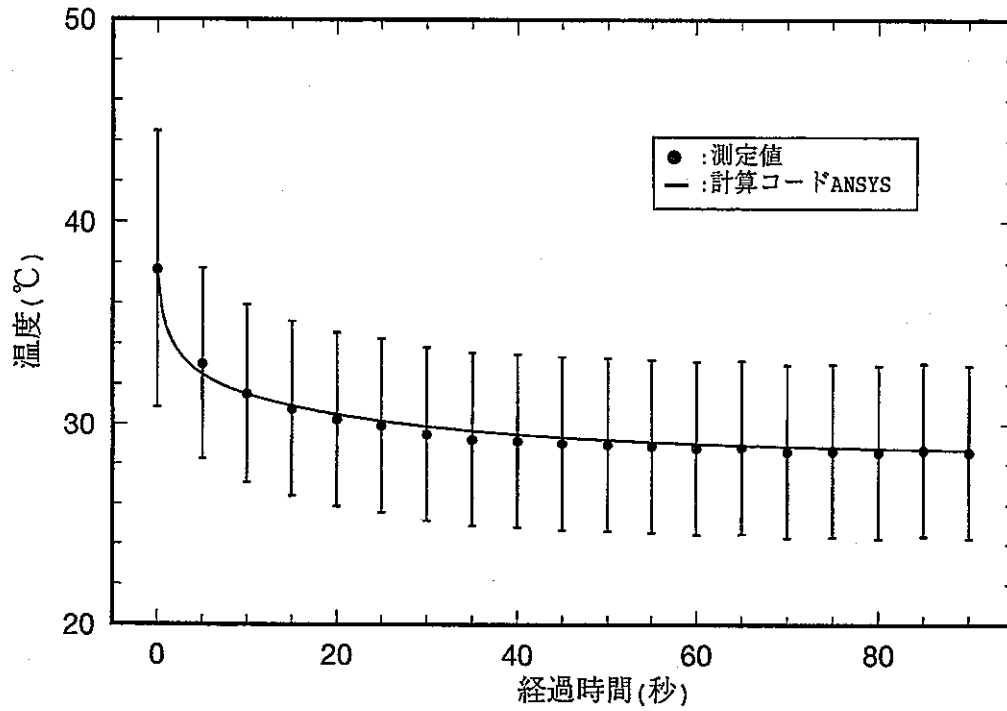


図4-5 加速器停止直後における円板No.14の温度変化。

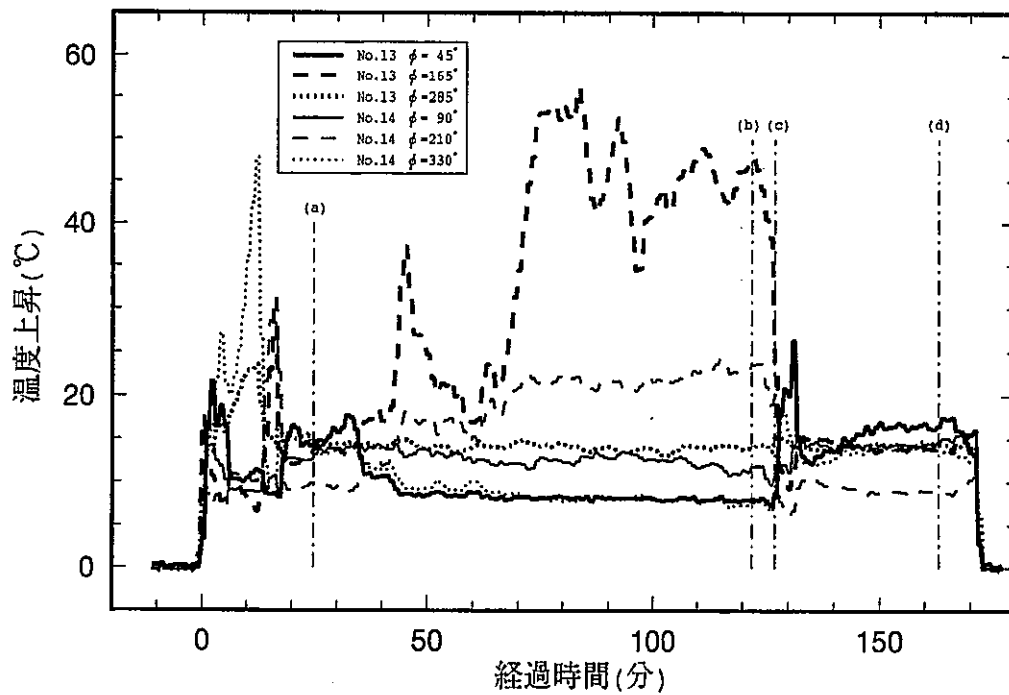
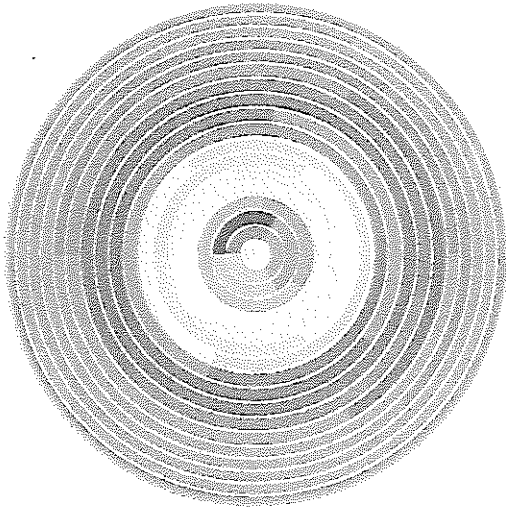
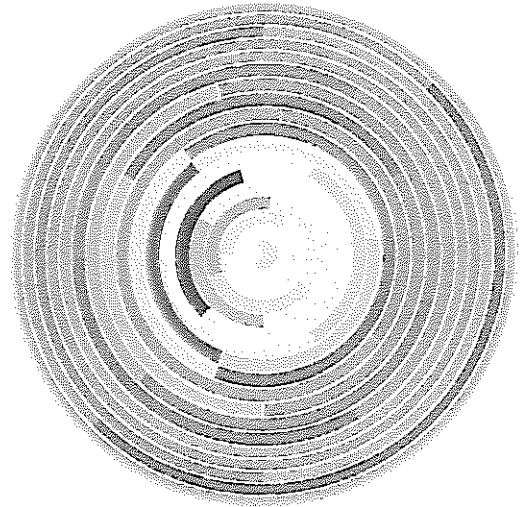


図4-6 ビームダンプ試験における円板の温度変化。
円板 No.13 及び No.14 に設置された6本の熱電対の温度上昇である。一点鎖線(a)~(d)は図4-3の時刻(a)~(d)に各々対応する。

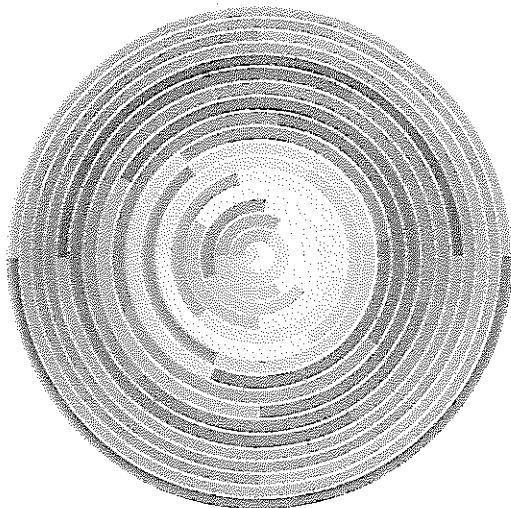
(a) 25 min



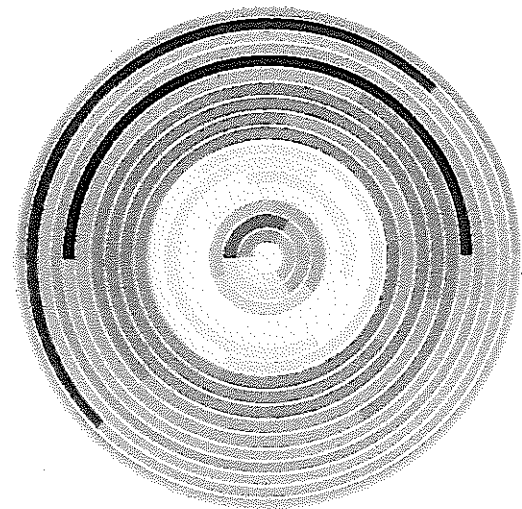
(b) 122 min



(c) 127 min



(d) 163 min



Temperature rize (°C)

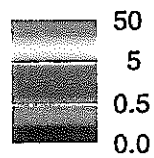


図4-7 図4-3の各時刻に対応する円板の温度分布。

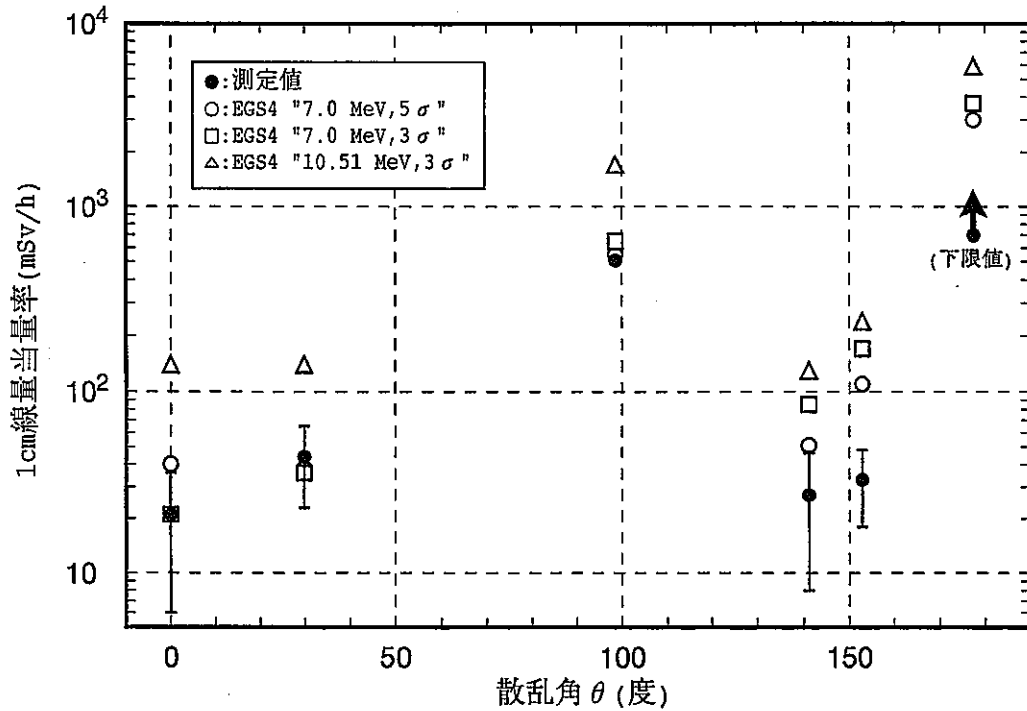


図4-8 各測定点における線量計及び計算コード EGS4から得られる1cm線量当量率の比較。線量計からの値のみ誤差棒を付ける。

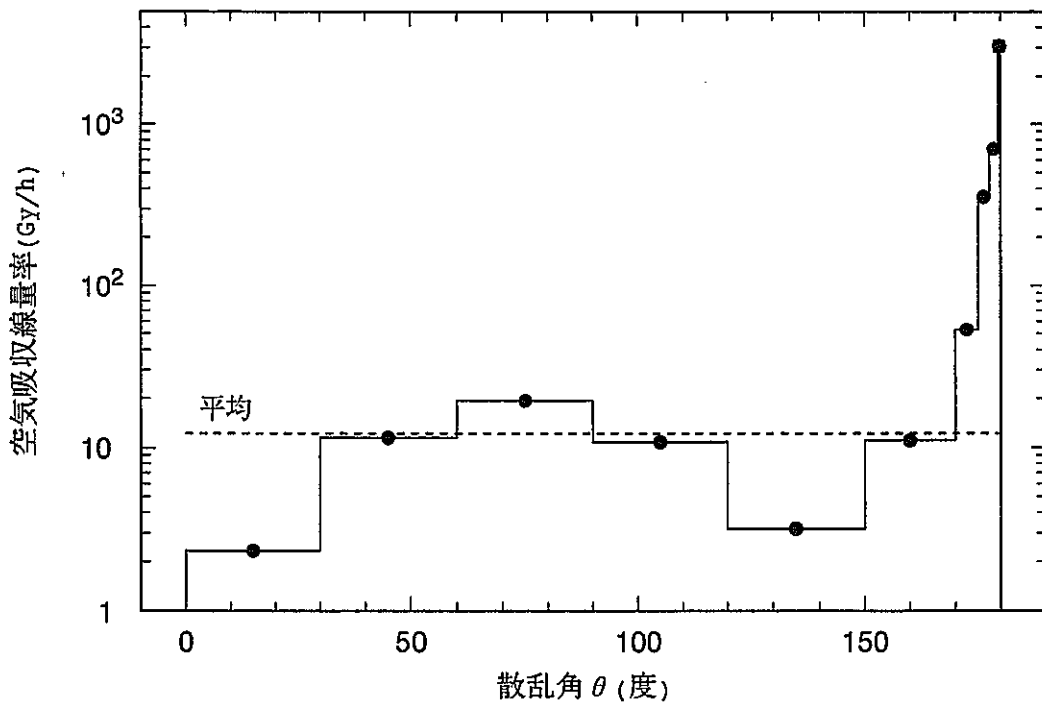


図4-9 特定の散乱角で平均した空気吸収線量率 (金属円板、真空容器、遮蔽体)

第5章 まとめ

核燃料サイクル開発機構では、オメガ計画の一環として、高レベル放射性廃棄物の消滅処理を考えた、大電流電子線形加速器の開発を目的に、大電流化の要素技術開発を推進してきた。JNC 加速器は既存の加速器よりも平均ビーム電流で 2 桁程度高い電子線を加速するため、ビームダンプでも大電流化に対応した設備にする必要があった。特に、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しなければならなかった。本報告書は、すでに概念設計についてまとめた文献 [1] に引き続き、ビームダンプの設計・製作について述べ、1999 年 1 月から開始した性能確認試験で得られたビームダンプの初期性能についてまとめた。

大電流化に対応するため、JNC 加速器用ビームダンプは、次の四項目を設計条件とした。

- (1) ビームダンプに入射する前に、電子線を四重極電磁石により拡大する。
- (2) 電子線を空間的に分割した標的に照射する。
- (3) 放射化の可能性を減らす。
- (4) 大電力電子線用ビームモニターとしての機能を付加する。

このような条件を満たすため、大量の水などを用いた従来のビームダンプと全く異なる Ring & Disk (RD) 構造を採用した。RD 構造は、真空容器中に中空状金属円板を 22 枚並べ、電子線が進行する方向に対して徐々に内径を小さくした。従って、直径 20 cm に拡大された電子線は、中空状金属円板の内側に照射され、電子線の外側より少しずつ吸収される。吸収により生じた熱は、金属円板の外部に伝導され、冷却水によって冷却される。22 枚の金属円板は 4 個のモジュールに分けており、各モジュールは電氣的に絶縁されている。このようなビームダンプの設計を評価した結果、金属円板における温度上昇の最大値は 343 °C、設計疲労回数が 580 回となった。

さらに、低電流 (ビームエネルギー 7.0 MeV, 平均ビーム電流 0.84 mA) の電子線に対するビームダンプの特性を評価するために試験を実施した。その結果をまとめると次の通りである。

- (1) 加速器から輸送された電子はビームダンプで完全に吸収された。
- (2) 円板で同時に測定された平均ビーム電流とエネルギー損失から平均ビームエネルギーが求められ、公称エネルギーと一致した。
- (3) 円板の温度上昇及び光子の空気吸収線量率は設計データと矛盾していなかった。
- (4) 円板の温度分布から平均ビーム電流 20 mA の電子線を直接監視するビームモニターの機能があることがわかった。

従って、この試験から JNC 加速器用ビームダンプは設計方針を満たしていることがわかった。しかし、ビームパイプ内の真空度が設計値の 12 倍悪化し、また四重極電磁石 Q2 付近のビームパイプが発熱することもわかった。これらの点を改良すれば、平均ビーム電流 20 mA の電子線を吸収できると考える。

参考文献

- [1] 武井 早憲, 武田 靖 : 大電力電子線用ビームダンプの開発-概念設計-, PNC TN9410 96-072, 1996 年 3 月.
- [2] W. R. Nelson, H. Hirayama and D. W. Rogers, THE EGS4 CODE SYSTEM, SLAC-Report-265, December 1985.
- [3] ALGOR, Steady-State Heat Transfer Analysis, Algor, Inc., 150 Beta Drive, Pittsburgh, Pennsylvania 15238-2932.
- [4] 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
- [5] ANSYS, ANSYS finite element analysis, ANSYS, Inc., Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317.
- [6] 森口 繁一 他, 数学公式 I §14, 岩波書店, 1983 年
- [7] 矢川 元基, 宮崎 則幸, 有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析, サイエンス社, 1985 年
- [8] (社) 日本機械学会 編, 機械工学便覧, A4 編 材料力学, 丸善株式会社, 1990 年 5 月
- [9] (社) 日本材料学会, 疲労設計便覧 第 6 章, 株式会社 養賢堂, 1995 年 1 月 ;
(社) 日本機械学会, 金属材料 疲労強度の設計資料 IV 低サイクル疲労強度
- [10] K. Kakiyama et al., Pressure-distribution Analysis of the vacuum system for the KEKB linac, Proceedings of the 1994 International Linac Conference, Vol.2 (1994) 567.

- [11] 中島 敏 編, 真空工学ハンドブック, 朝倉書店, 1965 年 10 月.
- [12] 大村 明子 他 : 量子工学試験施設の入射部試験に関するしゃへい評価, JNC TN9410 99-011, 1999 年 3 月.
- [13] M. J. Berger, ETRAN-Experimental Benchmarks, p183, Monte Carlo Transport of Electrons and Photons Edited by T.M.Jenkins, W.R.Nelson, and A.Rindi, Plenum Press (1988).
- [14] A. A. O'dell et al., Measurement of absolute thick-target bremsstrahlung spectra, Nucl. Inst. Meth., 61 (1968) 340.
- [15] H. Frank, Zur Vielfachstreuung und Rückdiffusion schneller Elektronen nach Durchgang durch dicke Schichten, Z. Naturforsch., 14a (1959) 247.
- [16] K. J. Van Camp and V. J. Vanhyse, Thick-Target Energy Loss Distributions of Electrons, Z. Phys. 211 (1968) 152.
- [17] H. E. Hall et al., Most Probable Energy Loss of Fast Electron, Phys. Rev. 115 (1959) 633.
- [18] Giorgio Margaritondo, Introduction to Synchrotron Radiation, Oxford University Press (1988).
- [19] (財) 原子力安全技術センター 編集, 放射線施設の γ 線しゃへい計算実務マニュアル, (財) 原子力安全技術センター, 1989 年 11 月.
- [20] National Council on Radiation Protection and Measurements, Radiation Protection Design Guidelines for 0.1 ~ 100 MeV Particle Accelerator Facilities, NCRP REPORT No.51 (1993).
- [21] D. R. Walz et al., Beam dumps, energy slits and collimators at SLAC, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-14, No.3 (1967) 923.
- [22] 武井 早憲 他 : 量子工学試験施設 加速器設備 設計根拠書, JNC TN9410 99-012, 1999 年 7 月.

- [23] 百目鬼 用吉 編, シース熱電対, 助川電気工業株式会社, 1984 年 8 月.
- [24] 平野 耕一郎 他: 高周波制御系の開発-インターロックシステム-, JNC TN9400 99-040, 1999 年 5 月.
- [25] Stephen Wolfram, The Mathematica Book, 3rd ed., Wolfram Media/Cambridge University Press, 1996
- [26] 寺沢 寛一 編, 自然科学者のための数学概論 応用編 A 編 第 2 章, 岩波書店, 1963 年
- [27] 森口 繁一 他, 数学公式 III §38, 岩波書店, 1985 年
- [28] 森口 繁一 他, 数学公式 II §50, 岩波書店, 1983 年
- [29] 内田 秀雄 編, 大学演習 伝熱工学, 裳華房, 1969 年

付 録 A 概念設計書との対応

第 1 章に示した通り，ビームダンプの概念を検討した文献 [1] では，十分に記載できなかった項目について，本報告書では詳細に述べる．表 A-1 に，概念設計書と本報告書の対応関係をまとめる．

表 A-1 概念設計書 [1] との対応

番号	項 目	文献 [1] の 頁数	該当する 頁数
1	評価面の設定 (点 C, 距離 R_{sp})	13	35
2	差動排気系の設計	19	29
3	局所発熱の回避	19	121
4	塑性変形で許容される繰り返し数	29	29
5	発熱領域の設定の妥当性	31	19
6	γ 線の評価	33	39

付 録 B 熱伝導方程式の解析解

B.1 はじめに

本章では、非定常熱伝導方程式を解き、その解析解の一般的性質について検討する。検討する解析解は、第 2.2 節に示したビームダンプ用金属円板に対する解ではなく、解析解が容易に得られる軸対称中空状金属円板 (図 B-1 参照) に対する解とする。

文献 [4] によると、三次元直交座標系 $O - x_*y_*z_*$ における、内部発熱がある非定常熱伝導方程式は、一般に

$$\rho_* c_* \frac{\partial T_*}{\partial t_*} = \frac{\partial}{\partial x_*} \left(k_{*x} \frac{\partial T_*}{\partial x_*} \right) + \frac{\partial}{\partial y_*} \left(k_{*y} \frac{\partial T_*}{\partial y_*} \right) + \frac{\partial}{\partial z_*} \left(k_{*z} \frac{\partial T_*}{\partial z_*} \right) + W_* \quad (\text{B.1})$$

で与えられる。ここで、 ρ_* kg/m^3 は物体の密度、 c_* $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ は物体の比熱、 T_* $^{\circ}\text{C}$ は物体の温度、 k_{*i} $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ は i 方向の熱伝導率、 W_* $\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$ は単位時間に単位体積あたりに供給される熱量を表わす。但し、 $*$ は次元付きの物理量を表わす。(以下、本付録では同様とする。)

熱伝導率 k_{*i} が、等方的で物体のいたるところで一定とすると、

$$k_{*x} = k_{*y} = k_{*z} = k_* \text{ (定数)} \quad (\text{B.2})$$

となり、式(B.1)は、

$$\rho_* c_* \frac{\partial T_*}{\partial t_*} = k_* \left(\frac{\partial^2 T_*}{\partial x_*^2} + \frac{\partial^2 T_*}{\partial y_*^2} + \frac{\partial^2 T_*}{\partial z_*^2} \right) + W_* \quad (\text{B.3})$$

あるいは、内部発熱がある非定常熱伝導方程式として、

$$\frac{1}{a_*} \frac{\partial T_*}{\partial t_*} = \nabla^2 T_* + \frac{W_*}{k_*} \quad (\text{B.4})$$

が得られる。ここで、 $a_* = k_*/(\rho_* c_*)$ m^2/s は温度伝導率を表す。

B.2 解析条件

本節では、非定常熱伝導方程式 (B.4) の解析解 T_* を求めるための条件を設定する。解析条件は表 B-1 に示した物性値を用いることとし、簡単のため、物性値は温度に依存しないものとする。また、温度 T_* は半径及び時間のみの関数とする。なお、特に断らない限り MATHEMATICA version 3 [25] を用いて計算する。

表 B-1 非定常熱伝導方程式 (B.4) の解析条件

項目	記号	内容
形状	-	中空状金属円板
材質	-	銅
外径	R_*	9.0×10^{-2} [m]
内径	r_{*1}	2.4×10^{-2} [m]
領域 1 の外径	r_{*2}	3.0×10^{-2} [m]
厚さ	l_*	5.0×10^{-3} [m]
密度	ρ_*	8.94×10^3 [kg/m ³]
比熱	c_*	3.85×10^2 [J/(kg·K)]
熱伝導率	k_*	3.86×10^2 [W/(m·K)]
熱伝達率	h_*	5.815×10^3 [W/(m ² ·K)]
内部発熱	W_*	2.1×10^8 [J/(m ³ ·s)]
冷却水温度	T_{*c}	35 [°C]
初期温度	-	一様に冷却水温度とする

B.3 昇温時の解析解

本節では、式 (B.4) を第 B.2 節で示した解析条件で解き、昇温時の温度 T_* を解析的に求める。まず、式 (B.4) を円筒座標に変換すると、

$$\frac{1}{a_*} \frac{\partial T_*(r_*, t_*)}{\partial t_*} = \frac{1}{r_*} \frac{\partial}{\partial r_*} \left(r_* \frac{\partial T_*(r_*, t_*)}{\partial r_*} \right) + \frac{W_*}{k_*} \quad (\text{B.5})$$

が得られる。次に、式(B.6)を用いて、式(B.5)の変数 T_* , t_* , r_* を無次元化する。

$$\begin{cases} r = \frac{r_*}{R_*}, \\ \theta = \frac{T_* - T_{*c}}{T_{*c}}, \\ t = \frac{t_*}{\tau}. \end{cases} \quad (\text{B.6})$$

ここで、 T_{*c} °C は冷却水温度、すなわち、金属円板の初期温度、 τ s は冷却時間を表わす。この無次元化により、式(B.5)は、

$$\frac{R_*^2}{\tau a_*} \frac{1}{r} \frac{\partial \theta(r, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta(r, t)}{\partial r} + \frac{R_*^2 W_*}{T_c k_*} \quad (\text{B.7})$$

と変形される。さらに、式(B.8)を用いて、式(B.7)の定数 a_* , W_* を無次元化する。

$$\begin{cases} a = \frac{\tau}{R_*^2} a_* \\ q = \frac{R_*^2 W_*}{T_c k_*} \end{cases} \quad (\text{B.8})$$

従って、無次元化された熱伝導方程式として、次式が得られる。

$$\frac{1}{a} \frac{\partial \theta(r, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta(r, t)}{\partial r} + q. \quad (\text{B.9})$$

なお、内部発熱がない領域における無次元化された熱伝導方程式は、式(B.9)において $q=0$ とし求められる。

次に、式(B.9)の解を解析的に求める。式(B.9)における関数 $\theta(r, t)$ に A を定数とする関数 $u(r)$ と $v(t)$ の積：

$$\theta(r, t) = u(r)v(t) + A \ln r - \frac{q}{4} r^2 \quad (\text{B.10})$$

を代入すると、変数が分離され、常微分方程式：

$$\frac{1}{av} \frac{dv}{dt} = \frac{1}{u} \left(\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} \right) = (\text{定数}) \quad (\text{B.11})$$

が得られる。式(B.11)における定数を $-p^2$ とおけば、関数 $v(t)$ は、

$$v(t) = e^{-p^2 at} \quad (\text{B.12})$$

の形となり，関数 $u_p(r)$ は p をパラメータとする微分方程式：

$$\frac{d^2 u_p(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_p(r)}{dr} + p^2 u_p(r) = 0 \quad (\text{B.13})$$

を満足する。

従って， A_1, A_2, B_1 ，及び B_2 を定数とすると，式 (B.9) の解は，

$$\begin{cases} \theta_1(r, t) = \sum_p e^{-p^2 at} u_p(r) + A_1 \ln r - \frac{q}{4} r^2 + B_1 & (r_1 \leq r \leq r_2) \\ \theta_2(r, t) = \sum_p e^{-p^2 at} u_p(r) + A_2 \ln r + B_2 & (r_2 \leq r \leq 1) \end{cases} \quad (\text{B.14})$$

で与えられる。但し，図 B-1 において，内部発熱がある発熱領域（領域 1： $r_1 \leq r \leq r_2$ ）の解を $\theta_1(r, t)$ とし，内部発熱がない伝熱領域（領域 2： $r_2 \leq r \leq 1$ ）の解を $\theta_2(r, t)$ とする。

式 (B.14) において， $r = r_2$ で関数 $\theta_1(r, t)$ と $\theta_2(r, t)$ が滑らかに接続する条件，及び境界における伝熱条件から定数 A_1, A_2, B_1 ，及び B_2 を決定する。まず，任意の時刻 t において， $\theta_1(r_2, t) = \theta_2(r_2, t)$ が成立することから，

$$A_1 \ln r_2 - \frac{q}{4} r_2^2 + B_1 = A_2 \ln r_2 + B_2, \quad (\text{B.15})$$

また，任意の時刻 t において，

$$\left. \frac{\partial \theta_1(r, t)}{\partial r} \right|_{r=r_2} = \left. \frac{\partial \theta_2(r, t)}{\partial r} \right|_{r=r_2}$$

が成立することから，

$$\frac{A_1}{r_2} - \frac{q}{2} r_2 = \frac{A_2}{r_2}. \quad (\text{B.16})$$

さらに，内部発熱した熱が $r_* = r_{*1}$ より内側に伝達されないことより，

$$-k_* \left. \frac{\partial T_*(r_*, t_*)}{\partial r_*} \right|_{r_*=r_{*1}} = 0, \quad (\text{B.17})$$

同様に，熱が $r_* = R_*$ で冷却水に伝達されることより，

$$-k_* \left. \frac{\partial T_*(r_*, t_*)}{\partial r_*} \right|_{r_*=R_*} = -h_* [T_*(R_*, t_*) - T_{*c}]. \quad (\text{B.18})$$

ここで， h_* W/(m²·K) は $r_* = R_*$ における熱伝達率を表す。式 (B.17) 及び式 (B.18) を式 (B.6) により無次元化すると，

$$\left. \frac{\partial \theta(r, t)}{\partial r} \right|_{r=r_1} = 0, \quad (\text{B.19})$$

$$\left. \frac{\partial \theta(r, t)}{\partial r} \right|_{r=1} = -h\theta(1, t). \quad (\text{B.20})$$

ここで, h は無次元化した熱伝達率 [ヌセルト数] を表し, $h = R_* h_* / k_*$ で定義される.

従って, 式(B.15), 式(B.16), 式(B.19), 及び式(B.20)を用いて, 温度 $\theta(r, t)$ が与えられる.

$$\begin{cases} \theta_1(r, t) = \sum_p e^{-p^2 at} u_p(r) + \frac{q}{2}(r_2^2 - r_1^2) \left(\frac{1}{h} - \ln r \right) \\ \quad + \frac{q}{4} r_2^2 \left(1 - \frac{r^2}{r_2^2} + 2 \ln \left(\frac{r}{r_2} \right) \right) & (r_1 \leq r \leq r_2) \\ \theta_2(r, t) = \sum_p e^{-p^2 at} u_p(r) + \frac{q}{2}(r_2^2 - r_1^2) \left(\frac{1}{h} - \ln r \right) & (r_2 \leq r \leq 1) \end{cases} \quad (\text{B.21})$$

なお, 関数 $u_p(r)$ は, $r = r_1$ 及び $r = 1$ での境界条件:

$$\left. \frac{du_p(r)}{dr} \right|_{r=r_1} = 0, \quad (\text{B.22})$$

$$\left. \frac{du_p(r)}{dr} \right|_{r=1} = -h u_p(1) \quad (\text{B.23})$$

を満たす.

式(B.11)のような変数分離により偏微分方程式を解くとき, 現われる常微分方程式は, 式(B.24)のような Sturm-Liouville 型方程式と呼ばれている.

$$\frac{d}{dx} \left(p(x) \frac{du}{dx} \right) - q(x)u + \lambda r(x)u = 0. \quad (\text{B.24})$$

この式における λ は, 分離定数として現われるパラメーターであり, 一般に任意の値を取るのではなく, 境界条件などから特定の値となる. この特定の値を λ の固有値と呼び, λ がある固有値 λ_n になったときの解 u を固有値 λ_n に属する固有関数という. また, この固有値 λ_n を決めることを Sturm-Liouville 型固有値問題 [26] という.

Sturm-Liouville 型固有値問題の解法 [26] として, まず, 一方の端における境界条件だけを満たす式(B.24)の解 $\varphi(x, \lambda), \chi(x, \lambda)$ を求める. 次に, 両方の境界条件を満たすために, φ と χ が線型的に従属である条件から λ_n を決定する. ここで, 二解 φ, χ が線型的に従属であることは, φ, χ の Wronski の行列式が 0 であることと同値であるから, Wronski の行列式:

$$\omega(\lambda) = p(x) \left[\varphi(x, \lambda) \frac{\partial \chi(x, \lambda)}{\partial x} - \chi(x, \lambda) \frac{\partial \varphi(x, \lambda)}{\partial x} \right] \quad (\text{B.25})$$

が 0 になるように λ を決定する。なお、関数 $\omega(\lambda)$ は x と無関係であり、 λ だけの関数である。

この Sturm-Liouville 型固有値問題の解法に従って固有値 λ を求める。まず、関数 $u_p(r)$ を定義した式 (B.13) を書き直すと、次式となる。

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{du(r)}{dr} \right) + p^2 r u(r) = 0. \quad (\text{B.26})$$

この式の一般解は、第一種円柱関数 (Bessel 関数) $J_0(pr)$ と第二種円柱関数 (Neumann 関数) $N_0(pr)$ の線形結合で与えられる。従って、 $r = r_1$ における境界条件 [式 (B.22)] を満たす式 (B.26) の解を $\varphi(r, p)$ とすると、

$$\varphi(r, p) = N_1(pr_1)J_0(pr) - J_1(pr_1)N_0(pr) \quad (\text{B.27})$$

である。また、 $r = 1$ における境界条件 [式 (B.23)] を満たす式 (B.26) の解を $\chi(r, p)$ とすると、

$$\begin{aligned} \chi(r, p) = & \frac{1}{p} [N_0(p)J_0(pr) - J_0(p)N_0(pr)] \cos \beta \\ & + [N_1(p)J_0(pr) - J_1(p)N_0(pr)] \sin \beta \end{aligned} \quad (\text{B.28})$$

である。但し、 $h = -\cos \beta / \sin \beta$ とする。なお、境界条件 [式 (B.22) 及び式 (B.23)] を満たす二解から式 (B.25) の関数 $\omega(\lambda)$ を求めるとき、式 (B.27) を χ 、式 (B.28) を φ と定義することもできる。しかし、ここでは式 (B.34) で定義される D_n が正になるように解を設定する。

次に、式 (B.24) と式 (B.26) を比較すると、

$$\begin{cases} p(x) = x, & q(x) = 0, \\ \lambda = p^2, & r(x) = x, \end{cases} \quad (\text{B.29})$$

であるから、式 (B.27) 及び式 (B.28) を用いて関数 $\omega(p^2)$ を求めると、

$$\omega(p^2) = \frac{2}{\pi} \frac{J_1(pr_1)[pN_1(p) - hN_0(p)] - N_1(pr_1)[pJ_1(p) - hJ_0(p)]}{p \sin \beta} \quad (\text{B.30})$$

が得られる。なお、この式を求める際、Lommel の公式 [27] :

$$J_\nu(z)N_{\nu+1}(z) - J_{\nu+1}(z)N_\nu(z) = -\frac{2}{\pi z} \quad (\text{B.31})$$

を用いた。式 (B.30) において、

$$f(p) = J_1(pr_1)[pN_1(p) - hN_0(p)] - N_1(pr_1)[pJ_1(p) - hJ_0(p)] \quad (\text{B.32})$$

表B-2 $n = 36$ までの $y = f(x)$ の解

n	p_n	n	p_n	n	p_n
1	1.487	13	51.47	25	102.8
2	4.889	14	55.75	26	107.1
3	8.920	15	60.03	27	111.4
4	13.10	16	64.31	28	115.7
5	17.32	17	68.59	29	120.0
6	21.57	18	72.87	30	124.3
7	25.83	19	77.15	31	128.5
8	30.10	20	81.44	32	132.8
9	34.37	21	85.72	33	137.1
10	38.64	22	90.00	34	141.4
11	42.92	23	94.28	35	145.7
12	47.19	24	98.56	36	150.0

と定義すると, $f(p) = 0$ の解 $p_n (n = 1, 2, \dots)$ は, $\omega(p^2) = 0$ を満たす. 図B-2に関数 $y = f(x)$ を示す. また, $n = 36$ までの解 p_n を表B-2に示す.

文献 [28] によると, 線型微分方程式, 或は積分方程式の相異なる固有値に属する固有関数は互いに直交することが知られている. 例えば, 二階線型常微分方程式 $y'' + \lambda r(x)y = 0$ ($r(x)$ は正で, 連続) の境界条件 $y(a) = y(b) = 0$ を満たし, 固有値 λ_n に属する 0 でない解は, 固有関数 $y_n(x)$ で与えられ, $y_n(x)$ は $r(x)$ に関する極性直交系となる. すなわち, $\{\sqrt{r(x)}y_n(x)\}$ は (a, b) において直交系となる. 従って, Sturm-Liouville 型方程式における境界条件を満たし, 固有値 λ_n に属する固有関数を $\varphi_n(x)$ とすると, $\varphi_n(x)$ は $r(x)$ に関する極性直交系となるため, 関数 $f(x)$ は一般に,

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_n}{\omega'(\lambda_n)} \varphi_n(x) \int_a^b r(\xi) f(\xi) \varphi_n(\xi) d\xi \tag{B.33}$$

と展開できる [26]. ここで, $k_n = \chi(x, \lambda_n) / \varphi(x, \lambda_n)$ であり, $\omega'(\lambda_n)$ は式(B.25)より得られる. また, D_n を

$$D_n = \frac{k_n}{\omega'(\lambda_n)} \tag{B.34}$$

と定義すると,

$$D_n \int_b^a r(\xi) \varphi_n(\xi) \varphi_{n'}(\xi) d\xi = \delta_{nn'} \tag{B.35}$$

となる [26]. 但し, $\delta_{nn'}$ は Kronecker のデルタを表す.

式 (B.34) の定義に従って, 式 (B.25), 式 (B.27), 及び式 (B.28) より D_n を求めると,

$$D_n = \frac{\pi^2}{2} \frac{p_n^2 (p_n J_1(p_n) - h J_0(p_n))^2}{(p_n^2 + h^2) J_1^2(p_n r_1) - (p_n J_1(p_n) - h J_0(p_n))^2} \quad (\text{B.36})$$

が得られ, さらに, 固有関数 $\varphi_n(x)$ を

$$\varphi_n(x) = N_1(p_n r_1) J_0(p_n x) - J_1(p_n r_1) N_0(p_n x) \quad (\text{B.37})$$

と定義すると, 関数 $u_p(r)$ は $\sum_{n=1}^{\infty} C_n \varphi_n(r)$ (C_n は定数) と展開され, 直交条件 [式 (B.38)] を満足する.

$$D_n \int_{r_1}^1 \xi \varphi_n(\xi) \varphi_{n'}(\xi) d\xi = \delta_{nn'}. \quad (\text{B.38})$$

従って, 式 (B.21) の関数 $u_p(r)$ に固有関数 $\varphi_n(r)$ を代入し, 温度 $\theta(r, t)$ が得られる.

$$\begin{aligned} \theta(r, t) = & \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-p_n^2 a t} \varphi_n(r) + \frac{q}{2} (r_2^2 - r_1^2) \left(\frac{1}{h} - \ln r \right) \\ & + \begin{cases} \frac{q}{4} r_2^2 \left(1 - \frac{r^2}{r_2^2} + 2 \ln \left(\frac{r}{r_2} \right) \right) & (r_1 \leq r \leq r_2) \\ 0 & (r_2 \leq r \leq 1) \end{cases} \end{aligned} \quad (\text{B.39})$$

この式において, 初期温度, $t = 0$ のとき $\theta = 0$ を代入し, 定数 C_n を求める. すなわち,

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} C_n \varphi_n(r) = & -\frac{q}{2} (r_2^2 - r_1^2) \left(\frac{1}{h} - \ln r \right) \\ & + \begin{cases} -\frac{q}{4} r_2^2 \left(1 - \frac{r^2}{r_2^2} + 2 \ln \left(\frac{r}{r_2} \right) \right) & (r_1 \leq r \leq r_2) \\ 0 & (r_2 \leq r \leq 1) \end{cases} \end{aligned} \quad (\text{B.40})$$

この式の両辺に $r \varphi_{n'}(r)$ を掛け, r_1 から 1 まで積分すると, 式 (B.38) の条件から係数 C_n が得られ,

$$C_n = -\frac{q r_2}{p_n^3} [N_1(p_n r_1) J_1(p_n r_2) - N_1(p_n r_2) J_1(p_n r_1)] D_n. \quad (\text{B.41})$$

なお、 C_n を求める際、次式の不定積分の公式を使用した。

$$\begin{cases} \int z Z_0(az) dz = \frac{z}{a} Z_1(az), \\ \int z \ln z Z_0(az) dz = \frac{z}{a} \ln z Z_1(az) + \frac{1}{a^2} Z_0(az), \\ \int z^3 Z_0(az) dz = \left(\frac{z^3}{a} - \frac{4z}{a^3}\right) Z_1(az) + \frac{2z^2}{a^2} Z_0(az). \end{cases} \quad (\text{B.42})$$

但し、 $Z_\nu(z)$ は、円柱関数 $J_\nu(z)$ 及び $N_\nu(z)$ を表わす。式(B.37)及び式(B.41)で定義される関数 $C_i \varphi_i(r)$ の値を図B-3に示す。図において $i = 1, \dots, 5$ とし、 $C_1 \varphi_1(r)$ は 0.1 倍とする。

図B-4に r 及び t を軸とする、昇温時の温度 $\theta(r, t)$ を表す。なお、この図における式(B.39)の和は、計算時間の制限から 1 ~ 6 とする。この図の断面である、半径方向及び特定の時刻における温度分布を各々図B-5、図B-6に表す。また、図B-7は特定の位置における、定常状態の温度 θ を 1 とした相対温度を表わす。なお、これらの図における式(B.39)の和は、計算時間の制限から 1 ~ 12 とする。

さらに、計算コード ANSYS を用いて $r = r_1$ における温度変化を表B-3の条件のもと計算し、図B-5の黒丸として表す。図における曲線と黒丸を比較すると、両者が一致しており、式(B.39)及び式(B.41)が正しいことがわかる。

表B-3 計算コード ANSYS における非定常熱伝導計算の条件

経過時間	計算間隔	表示間隔
0 ~ 10 sec	20 msec	0.5 sec
10 ~ 60 sec	0.5 sec	1.0 sec
60 ~ 130 sec	1.0 sec	10 sec

また、式(B.39)及び式(B.41)から得られる温度 $\theta(r, t)$ の時間減衰項 $C_n e^{-p_n^2 at}$ の寄与を調べるため、初期における温度変化を考察する。例えば、加熱開始後 4 msec における時間減衰項 $C_n e^{-p_n^2 at}$ の値が、 $n=1$ の時 2.19、 $n=30$ の時 4.03×10^{-3} であるため、初期における温度変化は n が大きい項までの寄与を調べることができる。図B-8及び図B-9に時刻 4 msec における温度分布を示す。図B-8は $r = r_1$ における時刻 4 msec までの温度変化を表し、図B-9は時刻 4 msec

における半径方向の温度分布を表す。これらの図における式(B.39)の和は、1～60である。また、計算コード ANSYS を用いて時刻 4 msec における温度分布を計算し、図B-8及び図B-9の黒丸として表わす。なお、計算コード ANSYS での計算ステップは 0.05 msec とする。これらの図における曲線と黒丸とを比較すると両者が一致しており、式(B.39)における時間減衰項 $C_n e^{-p_n^2 at}$ の値は正しいことがわかる。

B.4 降温時の解析解

本節では、前節で得られた昇温時の解析解に引き続き、軸対称中空状金属円板の降温時の解析解を求める。ここで、非定常熱伝導方程式は式(B.9)で $q = 0$ とした式であり、その他の解析条件は、表B-1に示した通りとする。但し、表B-1における内部発熱 W_* は $0 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ とし、金属円板の初期温度は式(B.39)において $t = \infty$ とした値、すなわち、

$$\theta(r, 0) = \frac{q}{2}(r_2^2 - r_1^2) \left(\frac{1}{h} - \ln r \right) + \begin{cases} \frac{q}{4} r_2^2 \left(1 - \frac{r^2}{r_2^2} + 2 \ln \left(\frac{r}{r_2} \right) \right) & (r_1 \leq r \leq r_2) \\ 0 & (r_2 \leq r \leq 1) \end{cases} \quad (\text{B.43})$$

とする。

非定常熱伝導方程式の境界条件が式(B.19)及び式(B.20)で与えられ、降温開始から十分時間が経過した後 $\theta(r, \infty) = 0$ となることより、

$$\theta(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} E_n e^{-p_n^2 at} \varphi_n(r). \quad (\text{B.44})$$

但し、 E_n は定数とする。この式において、初期温度、 $t = 0$ のとき $\theta(r, t)$ が式(B.43)となることより、定数 E_n を求める。すなわち、

$$\sum_{n=1}^{\infty} E_n \varphi_n(r) = \frac{q}{2}(r_2^2 - r_1^2) \left(\frac{1}{h} - \ln r \right) + \begin{cases} \frac{q}{4} r_2^2 \left(1 - \frac{r^2}{r_2^2} + 2 \ln \left(\frac{r}{r_2} \right) \right) & (r_1 \leq r \leq r_2) \\ 0 & (r_2 \leq r \leq 1) \end{cases} \quad (\text{B.45})$$

式(B.40)と式(B.45)を比較すると $E_n = -C_n$ であり, 温度 $\theta(r, t)$ は,

$$\theta(r, t) = - \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-p_n^2 at} \varphi_n(r) \quad (\text{B.46})$$

となる.

図B-10に r 及び t を軸とする, 降温時の温度 $\theta(r, t)$ を表す. なお, この図における式(B.46)の和は, 計算時間の制限から $1 \sim 6$ とする. この図の断面である, 半径方向及び特定の時刻における温度分布を各々図B-11, 図B-12に表す. また, 図B-13は特定の位置における, 初期の温度 θ を 1 とした相対温度を表わす.

なお, これらの図における式(B.46)の和は, 計算時間の制限から $1 \sim 12$ とする.

B.5 まとめ

軸対称中空状金属円板に対する解析解の特徴をまとめると, 以下の四項目である.

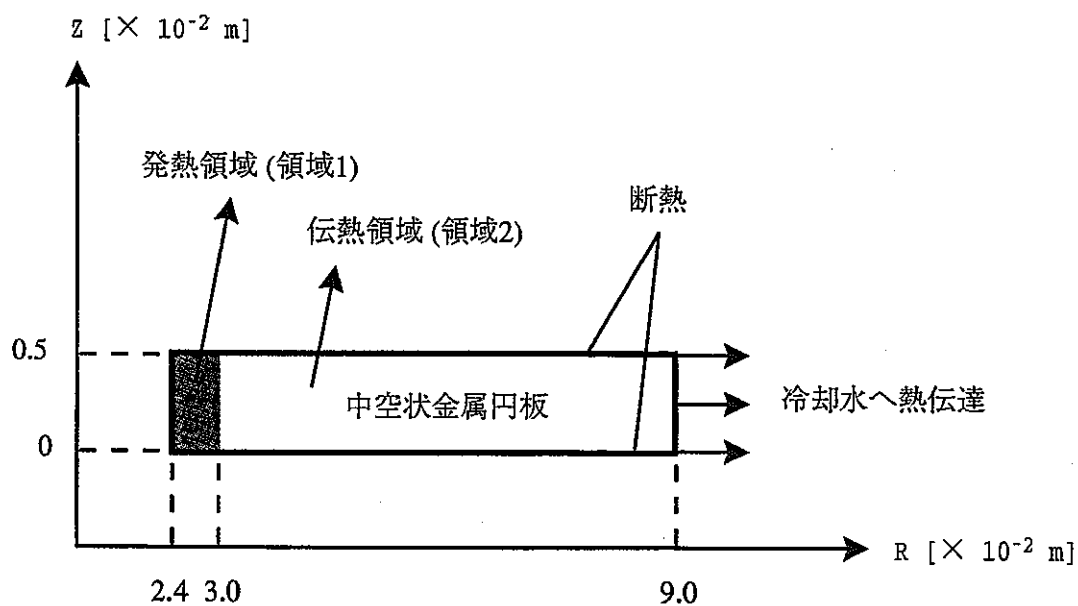
- (1) 式(B.39)及び式(B.41)より, 温度は内部発熱量 $q (\propto W_*/k_*)$ に比例する. すなわち, 温度は内部発熱に比例し, 熱伝導率に反比例する.
- (2) 定常状態における最高温度と最低温度の差 $\Delta\theta$ は, 熱伝達率 h に依存せず, 内部発熱量 q と半径の関数となる. すなわち,

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \theta(r_1, \infty) - \theta(1, \infty) \\ &= \frac{q}{4} \left[r_2^2 (1 - 2 \ln r_2) - r_1^2 (1 - 2 \ln r_1) \right] \end{aligned} \quad (\text{B.47})$$

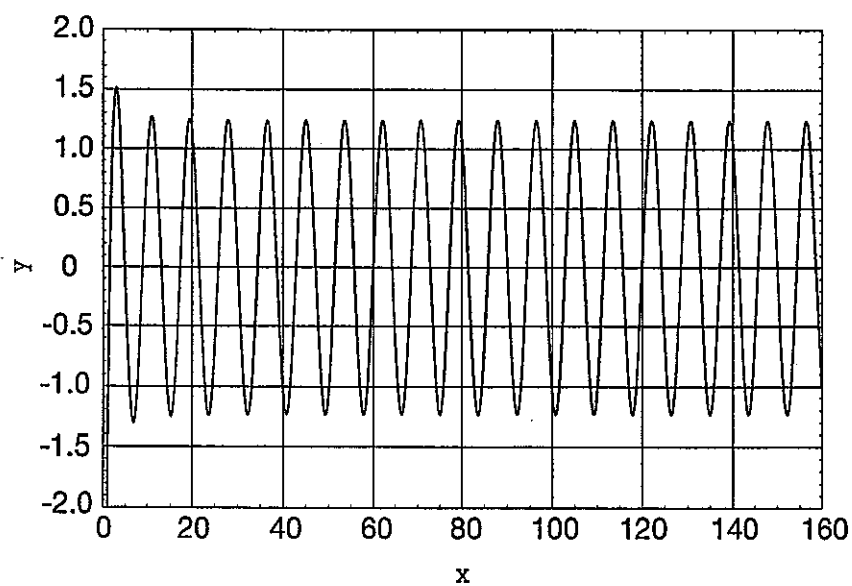
- (3) 中空状金属円板を昇温する時間と降温する時間は同じであり, 昇温時の温度 $\theta_u(r, t)$ [式(B.39)] と降温時の温度 $\theta_d(r, t)$ [式(B.46)] の和は時間に依存しない.

$$\begin{aligned} \theta_u(r, t) + \theta_d(r, t) &= \frac{q}{2} (r_2^2 - r_1^2) \left(\frac{1}{h} - \ln r \right) \\ &+ \begin{cases} \frac{q}{4} r_2^2 \left(1 - \frac{r^2}{r_2^2} + 2 \ln \left(\frac{r}{r_2} \right) \right) & (r_1 \leq r \leq r_2) \\ 0 & (r_2 \leq r \leq 1) \end{cases} \end{aligned} \quad (\text{B.48})$$

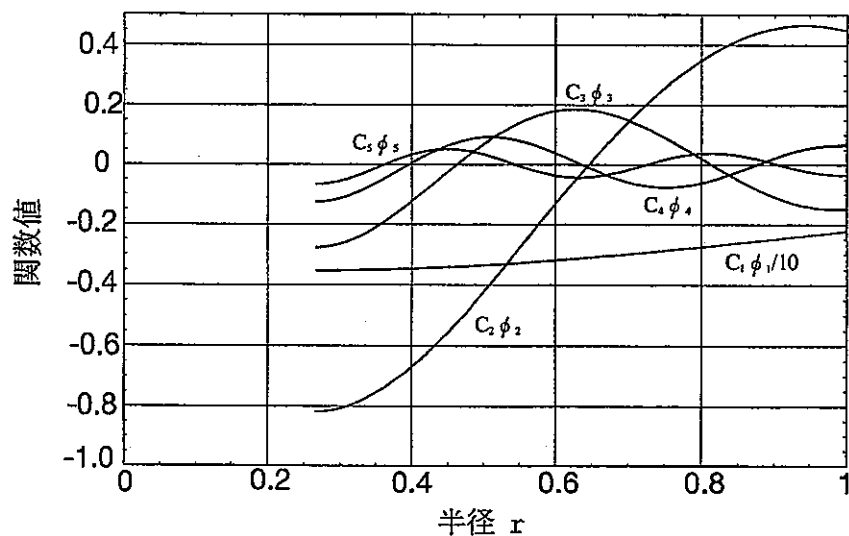
- (4) 加熱開始直後の温度上昇は、断熱状態と仮定した金属円板での温度上昇に等しい。例えば、加熱開始後 4 msec における最高温度は図 B-9 より $35.2425\text{ }^{\circ}\text{C}$ である。一方、断熱状態での最高温度は $35.2441\text{ }^{\circ}\text{C}$ であり、両者はほぼ等しい。



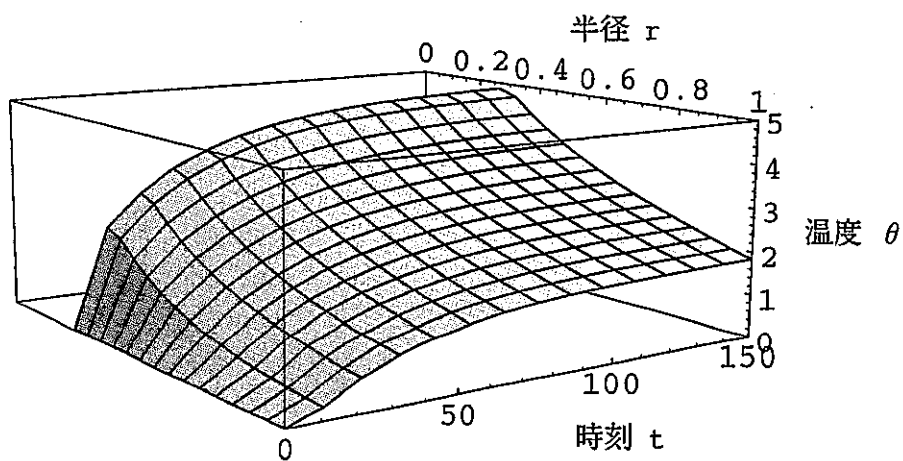
図B-1 解析解を求める中空状金属円板の形状。
金属円板は Z 軸に対して軸対称である。



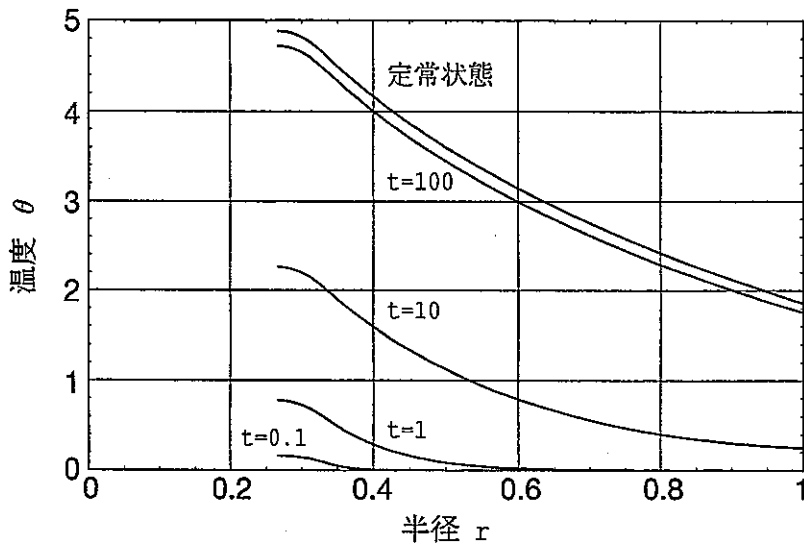
図B-2 式(B.32)で定義された関数 $y=f(x)$ 。



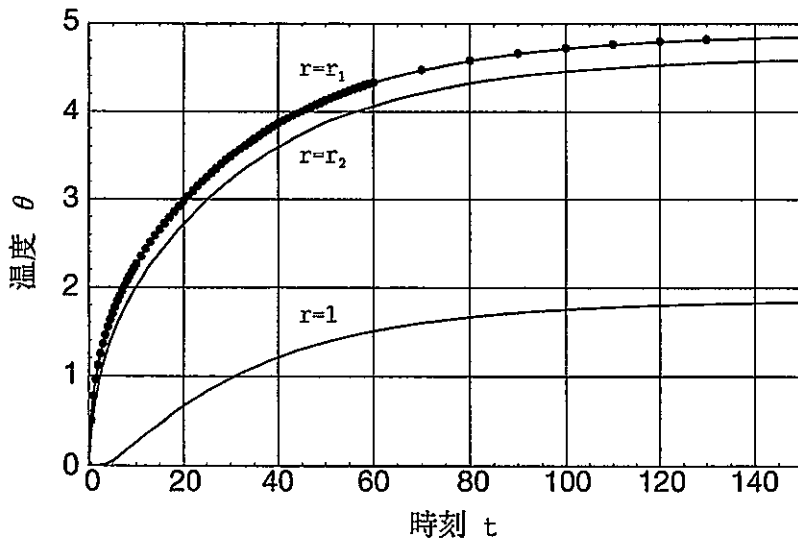
図B-3 式 (B.37) 及び式 (B.41) で定義された関数 $C_i \phi_i(r)$ 。 $i=1, \dots, 5$ とする。



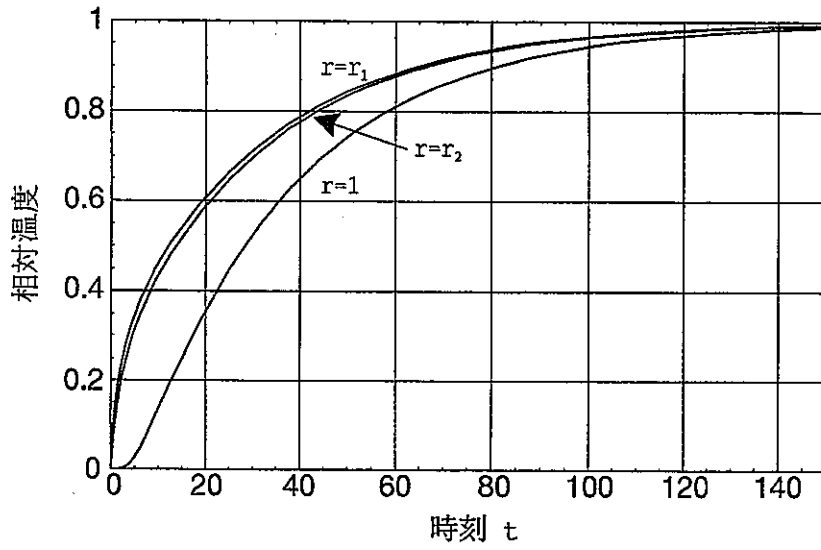
図B-4 昇温時の温度 $\theta(r,t)$ 。式 (B.39) の和は、1~6 とする。



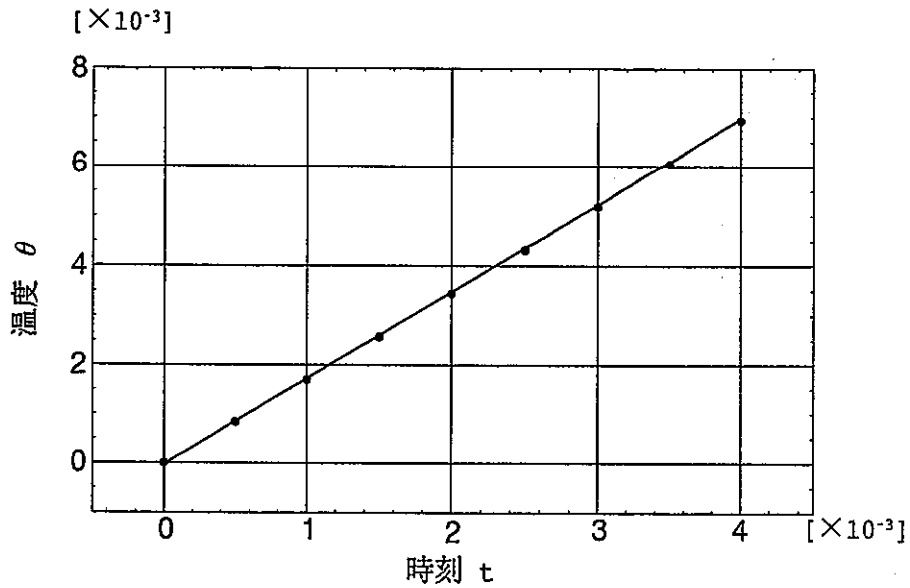
図B-5 特定の時刻における昇温時の温度分布。
式(B.39)の和は、1~12とする。



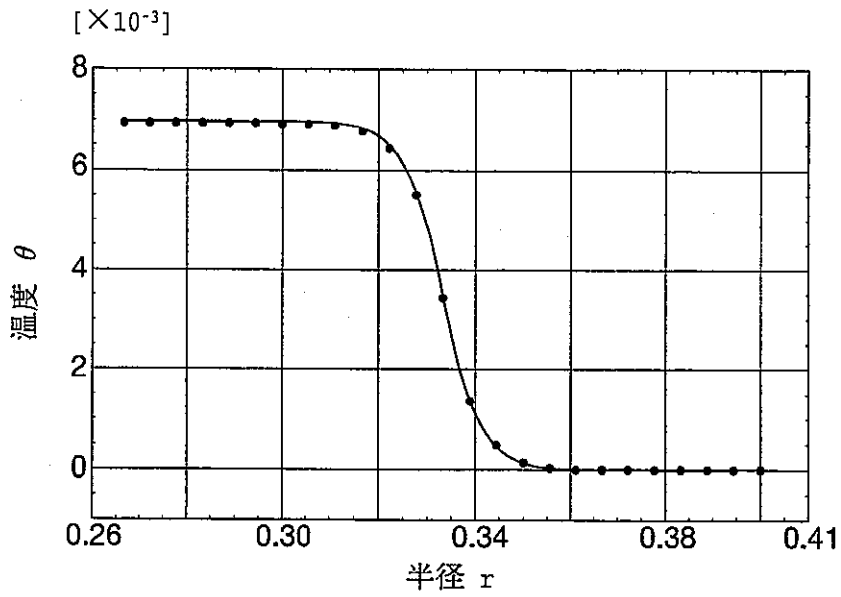
図B-6 特定の位置における昇温時の温度変化(1)。
式(B.39)の和は、1~12とする。黒丸は計算
コード ANSYS の結果である。



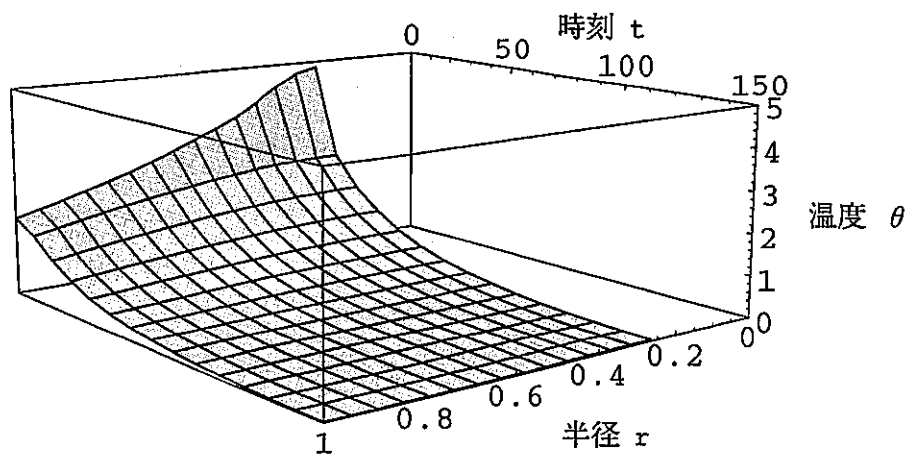
図B-7 特定の位置における昇温時の温度変化 (2)。定常状態の温度 θ を1とする。尚、式 (B.39) の和は、1~12 とする。



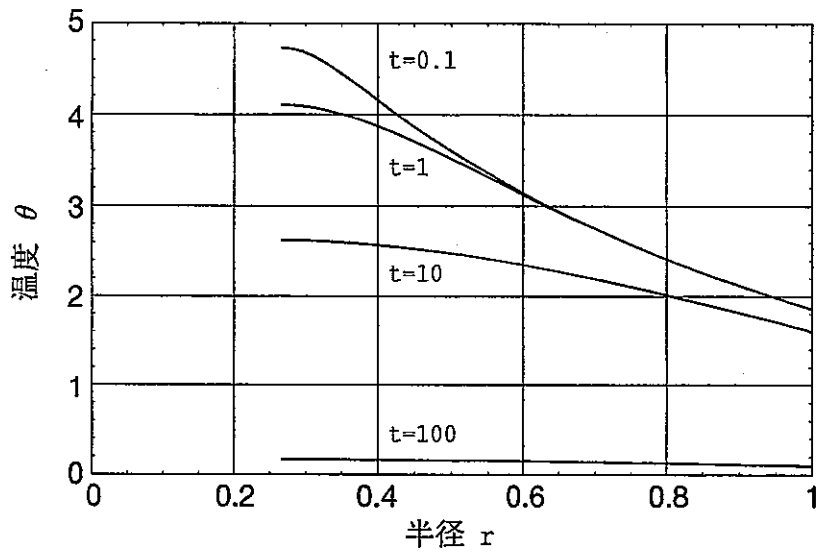
図B-8 $r=r_1$ における昇温時の温度変化。式 (B.39) の和は、1~60 とする。黒丸は計算コード ANSYS の結果である。



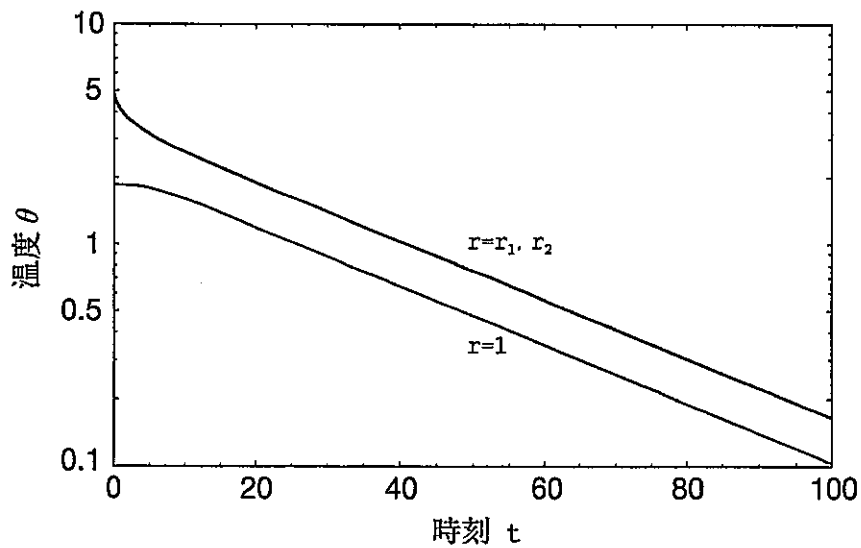
図B-9 $t=0.004$ における温度分布。式 (B.39) の和は、1~60 とする。黒丸は計算コード ANSYS の結果である。



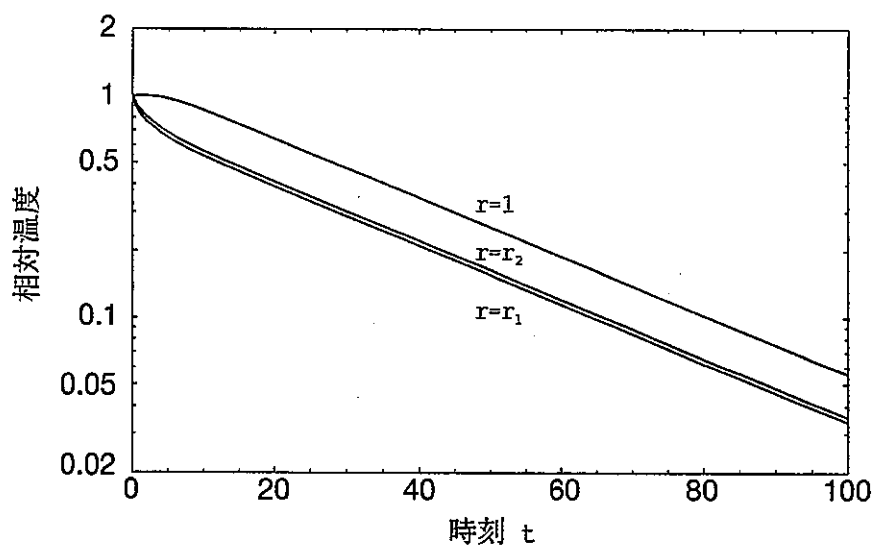
図B-10 降温時の温度 $\theta(r,t)$ 。式 (B.46) の和は、1~6 とする。



図B-11 特定の時刻における降温時の温度分布。
式(B.46)の和は、1~12とする。



図B-12 特定の位置における降温時の温度変化(1)。
式(B.46)の和は、1~12とする。



図B-13 特定の位置における降温時の温度変化(2)。
 $t=0$ の温度 θ を1とする。尚、式(B.46)の和は、
 1~12とする。

付録C UNIX コマンド “runegs4”

計算コード EGS4 のユーザーコードはモートラン (mortran) 言語で記述されているため、フォートラン (fortran) コンパイラによって実行ファイルを作成できない。このため、ユーザーコードを簡単に実行するコマンド “runegs4” を作成したので、本付録で説明する。

コマンド “runegs4” は 4 個のプロセスから構成されており、各プロセスの概要は表 C-1 の通りである。

表 C-1 コマンド “runegs4” における各プロセスの内容

プロセス	内容
1	ユーザーコードに EGS4 マクロ等のコードを加える。
2	プロセス 1 で作成したモートランファイルをフォートランファイルに変換する。
3	プロセス 2 で作成したフォートランファイルから実行ファイルを作成する。
4	プロセス 3 で作成した実行ファイルを実行する。

このコマンドの入力形式は、次の通りとする。

“runegs4 option-1 option-2 directory file-1 file-2”

ここで、各オプション (option-1, option-2, directory, file-1, file-2) の働きについては、表 C-2 にまとめ、さらに、このコマンドを実行した結果は、ディレクトリー directory 内に格納され、表 C-3 に示したファイルが作成される。

例えば、コマンドとして runegs4 -mcg -PR work beam_dump beam_dump50MeV を入力した場合、ディレクトリー work にあるユーザーコード beam_dump.mortran から実行ファイル beam_dump.exe を作成し、PEGS データファイル beam_dump50MeV.pegs4data を用いてファイル beam_dump.exe を実行することを表す。このとき、ユーザーコード beam_dump.mortran では、PRESTA 及び

表 C-2 コマンド “runegs4” における各オプションの内容

オプション		内容
option-1	-mcg	プロセス 1 から 4 までを実行する。
	-cg	プロセス 3 から 4 までを実行する。
	-g	プロセス 4 のみを実行する。
option-2	-PR	PRESTA 及び Ranmar 乱数を共に使用する。
	-R	Ranmar 乱数のみを使用する。
	-P	PRESTA のみを使用する。
directory		ユーザーコードを格納したディレクトリー名
file-1		ユーザーコード名
file-2		PEGS データファイル名

表 C-3 コマンド “runegs4” で作成されるファイル一覧

ファイル名	内容
compile.err	プロセス 3 を実行したときのエラーメッセージ
file-1.f	プロセス 2 で作成したフォートランファイル
file-1.exe	プロセス 3 で作成した実行ファイル
file-1.output	プロセス 4 を実行したときの出力ファイル

Ranmar 乱数を共に使用する。なお、このコマンド及びユーザーコード beam_dump.mortran を用いて、電子 10^4 個を入射させたときの出力例を以下に示す。

```
work5 [20] runegs4 -mcg -PR work beam_dump beam_dump50MeV
user/egs4 configuration and heirarchy
```

```
-----
Ver. 3.1 18-Aug-1995
Fri Jan 7 15:38:53 JST 2000
*** PRESTA & RANMAR Mode is selected ***
cd /Net/boss/Users/takei/egs4/work

**** Phase 1 ****
egs4mac.mortran      -egs4 standard macros
+ nrcc4mac.mortran   -NRCC standard macros
+ nrc4macp.mortran (p) -NRCC standard macros plus PRESTA macros
+ presta.mortran (p) -PRESTA standard macros
+ pair.mortran       -NRCC standard macros plus PAIR macros
+ NeXTmac.mortran    -code conversion macros for NeXT and RNG
+ kek4mac.mortran    -KEK standard macros
```

```
+ ranmar.minimal (r)   -RANMAR macros for RNG
+ beam_dump.mortran   -user code - macros and source
+ ranmar.init (r)     -RANMAR Initialization
+ kek4.mortran        -KEK subroutines including PHOTO & EDGSET
+ nrccaux.mortran     -NRCC standard subroutines
+ nrccauxp.mortran (p) -NRCC standard subroutines including PRESTA
+ egs4blok.mortran    -egs4 standard block data
+ egs4.mortran        -egs4 standard subroutines
      -----> /Net/boss/Users/takei/egs4/exec/mortjob.mortran
cd /Net/boss/Users/takei/egs4/exec
Fri Jan 7 15:38:57 JST 2000
```

```
**** Phase 2 ****
*** Now transforming !                               ***
      Mortran file ----> Fortran file
cd /Net/boss/Users/takei/egs4/work
Fri Jan 7 15:40:15 JST 2000
```

```
**** Phase 3 ****
*** Now compiling the FORTRAN file.                 ***
      Please see compile.err in case of some errors.
f77 -N9 beam_dump.f *.f -lV77 -lU77 -o beam_dump.exe -s > & compile.err
cd /Net/boss/Users/takei/egs4/work5
Fri Jan 7 15:40:56 JST 2000
```

```
**** Phase 4 ****
*** Now Calculating beam_dump.exe !                 ***
--- Now No.      1 : Current time 2000/ 1/ 7 15:41: 3
      DO-LOOP start !
--- Now No.     200 : Current time 2000/ 1/ 7 15:41: 7
      DO-LOOP will be finished at 2000/ 1/ 7 15:44:23
--- Now No.    2000 : Current time 2000/ 1/ 7 15:41:37
      DO-LOOP will be finished at 2000/ 1/ 7 15:43:53
--- Now No.    4000 : Current time 2000/ 1/ 7 15:42:10
      DO-LOOP will be finished at 2000/ 1/ 7 15:43:50
--- Now No.    6000 : Current time 2000/ 1/ 7 15:42:44
      DO-LOOP will be finished at 2000/ 1/ 7 15:43:51
--- Now No.    8000 : Current time 2000/ 1/ 7 15:43:17
      DO-LOOP will be finished at 2000/ 1/ 7 15:43:51
--- Now No.   10000 : Current time 2000/ 1/ 7 15:43:50
      DO-LOOP will be finished at 2000/ 1/ 7 15:43:50
runegs4 procedure finished normally
```

```
-----
Fri Jan 7 15:43:55 JST 2000
work5 [21]
```

付 録 D 冷却水流量の評価

本付録では、金属円板における、冷却水への熱伝達率を満たす流量について、簡単に評価する。

金属円板 No.14 で必要となる冷却水の流速 u m/s の最大値 u_m m/s を、配管の振動を考え、2 m/s とする。このとき、金属円板 No.14 における冷却水の温度上昇が 5.4 K となるため、冷却水の算術平均温度 t_m は 310.8 K である。この温度における冷却水の物性値 [表 D-1] を用いて、レイノルズ数 R_e の最大値 R_{em} は、

$$R_{em} \equiv \frac{u_m d}{\nu} = 5.7 \times 10^4 \quad (\text{D.1})$$

となる。ここで、 d m は伝熱面の代表長さを表わし、金属円板の場合 0.02 m である。

表 D-1 温度 310 K における冷却水の物性値 [4]

項 目	記号	内 容
動粘性率	ν	6.983×10^{-7} [m ² /s]
プラントル数	P_r	4.642
熱伝導率	k	0.6245 [W/(m·K)]
粘性係数	μ	693.7 [μPa·s]

レイノルズ数が 10^4 程度であるため、冷却水経路における熱伝達は管内乱流熱伝達に該当し、そのヌセルト数 N_u は Sieder と Tate が壁温一定における実験公式 [式 (D.2)] を与えている [29]。

$$\begin{aligned}
 N_u &\equiv \frac{hd}{k} \\
 &= 0.023 R_e^{0.8} \sqrt[3]{P_r} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}
 \end{aligned} \quad (\text{D.2})$$

但し、粘性係数 μ_w は冷却水路壁面の温度 370 K における値 291.8 μPa·s を用い [4]、その他は

\bar{t}_m における値を用いる。式(D.2)より、ヌセルト数 N_u が $160u^{0.8}$ となるから、熱伝達率 h は、

$$\begin{aligned} h &= \frac{N_u k}{d} \\ &= 5000 u^{0.8} \text{ [W/(m}^2\cdot\text{K)]} \end{aligned} \tag{D.3}$$

となる。この式に、表2-10に示した熱伝達率 $5.815 \times 10^3 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ を代入すると、流速 u は 1.2 m/s となる。

従って、金属円板における、冷却水への熱伝達率を満たすために必要な流量は 29 l/min である。

付録E 絶縁パイプの補修

E.1 経緯

入射部試験が終了した後、ヘリウムガスによる冷却水配管の真空リーク試験を実施したところ、配管に接続された絶縁パイプ 8 個のうち 3 個からヘリウムガスが漏洩していることが確認された。漏洩箇所を調査したところ、図 E-1 に示した絶縁パイプにおける、セラミックとフランジの間にあるろう付け部分であった。この絶縁パイプは、金属円板を電氣的に絶縁しており、さらに冷却水と真空を隔てているため、早急に補修しなければならなかった。なお、入射部試験における冷却水の使用条件は、圧力が 6 kg/cm^2 程度、通水期間が約 1 年間である。

E.2 原因

図 E-2 に、漏洩した絶縁パイプにおける、セラミックとフランジの間のろう付け部分 (以下、接合部と記す。) の模式図を示す。セラミックとフランジをろう材 (主成分:銀, 銅) でろう付けをする際、前処理として、セラミック側及びフランジ側にニッケルメッキを施す。特に、セラミック側は高融点金属法によるモリブデン、マンガンのメタライズ処理を行った。

図 E-3(1) は、接合部の断面写真、また、(2) は、電子顕微鏡による写真である。図 E-3(2) の A 側は内側であり、冷却水に接している。また、C 側は外側であり、真空雰囲気である。図 E-4 は、図 E-3 における A ~ C 部の拡大写真を表わす。A ~ C 部を比較すると、モリブデン、マンガンによるメタライズ層 (以下、Mo-Mn 層と記す。) とニッケルメッキ層 (以下、Ni 層と記す。) が選択的に腐食しており、内側 (A 側) から腐食が進行している。また、A 及び B 部における、パイプ中心軸と垂直な平面での Mo-Mn 層の電子顕微鏡写真を図 E-5 に示す。A 部は B 部に比べて、Mo-Mn 層に無数の隙間が広がっている。

従って、ヘリウムガスが漏洩した原因は、セラミック側の Ni 層 及び Mo-Mn 層が冷却水側よ

り選択的に電解腐食を受け、消失したためである。また、Ni 層 及び Mo-Mn 層が電解腐食した理由として、冷却水中に溶解した金属イオンによって冷却水が電解液となり、銀より酸化電位が約 1 V 高いニッケル、モリブデン、マンガンが消失したと考えられる。なお、フランジ側の Ni 層は、配管及びろう材と同電位であるため、電解腐食が発生していなかった。

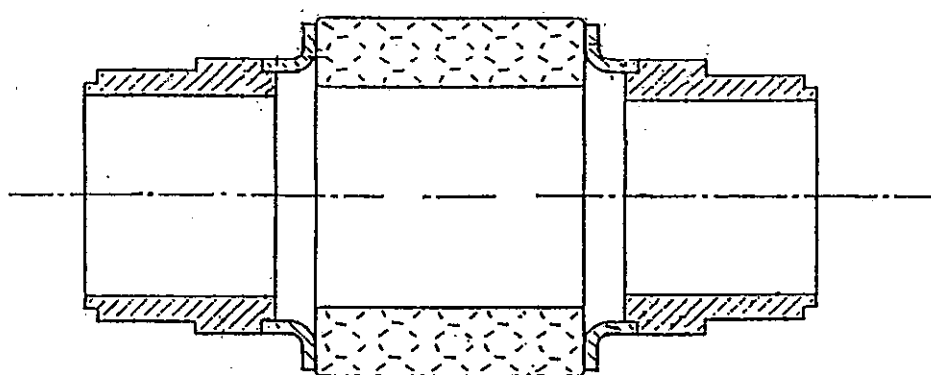
E.3 対策

今回の原因が Ni 層 及び Mo-Mn 層の電解腐食による消失と特定されたため、以下の対策を施した。

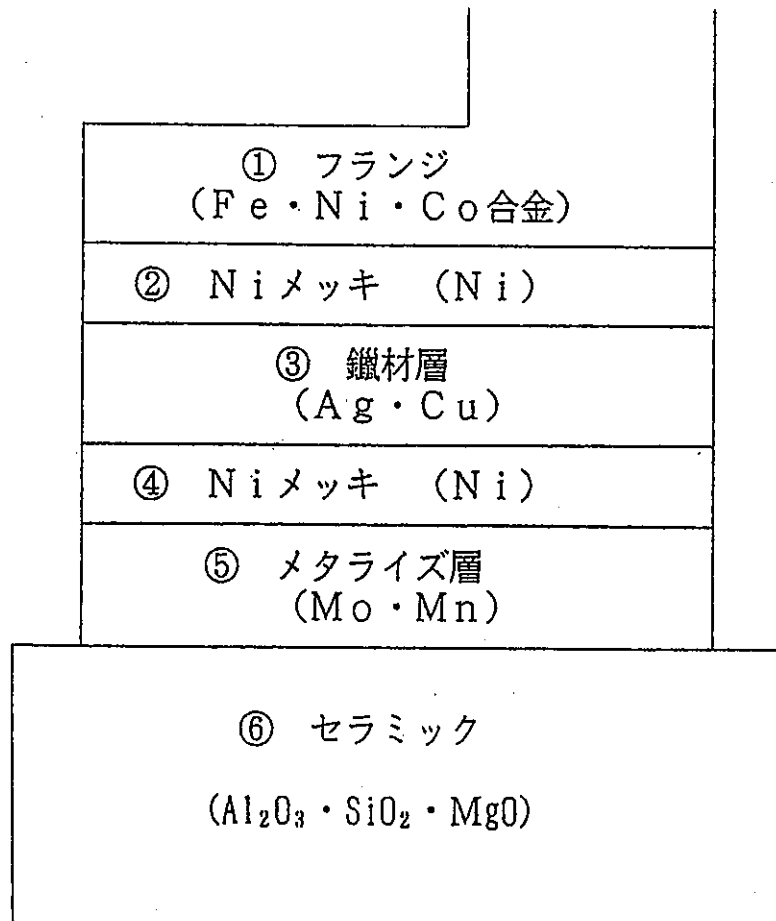
- (1) セラミックのメタライズ処理をタングステン、マンガンによる同時焼成法とする。このメタライズ処理はモリブデン、マンガンより電解腐食に強いという実績がある。
- (2) セラミックをメタライズ処理する場所をセラミック外周部分とし、フランジとの接合はコンプレッションタイプとする。
- (3) 絶縁パイプの設置場所を真空容器の中から外に変更する。このため、冷却水配管と真空容器を電氣的に絶縁する。

特に、絶縁パイプを真空容器の外に設置することにより、絶縁パイプで真空と冷却水を隔てる必要がなくなり、真空容器内での漏水を防ぐことができる。さらに、タングステン、マンガンによるメタライズ処理の電解腐食に対する強度が定量的に不明なため、万一漏水が生じた場合でも直ちに絶縁パイプを交換できる利点がある。図 E-6 に、補修した絶縁パイプを表わす。

なお、補修した絶縁パイプは、通水後約 2.5 年を経過した現在でも、入射部試験と同じ条件下で漏水は認められない。

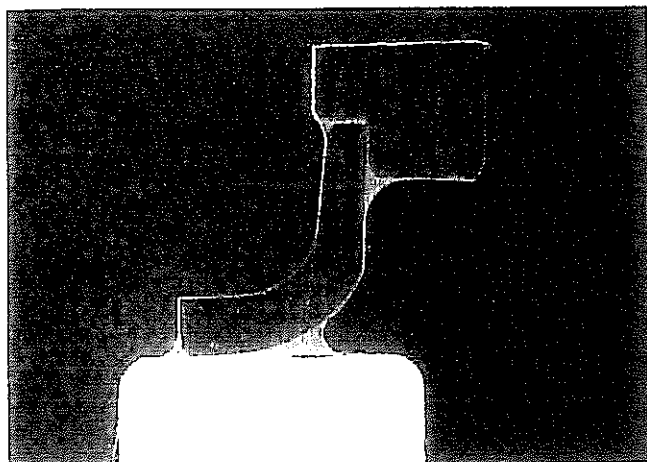


図E-1 真空リーク試験により漏洩が検出された絶縁パイプの断面図



図E-2 接合部の模式図

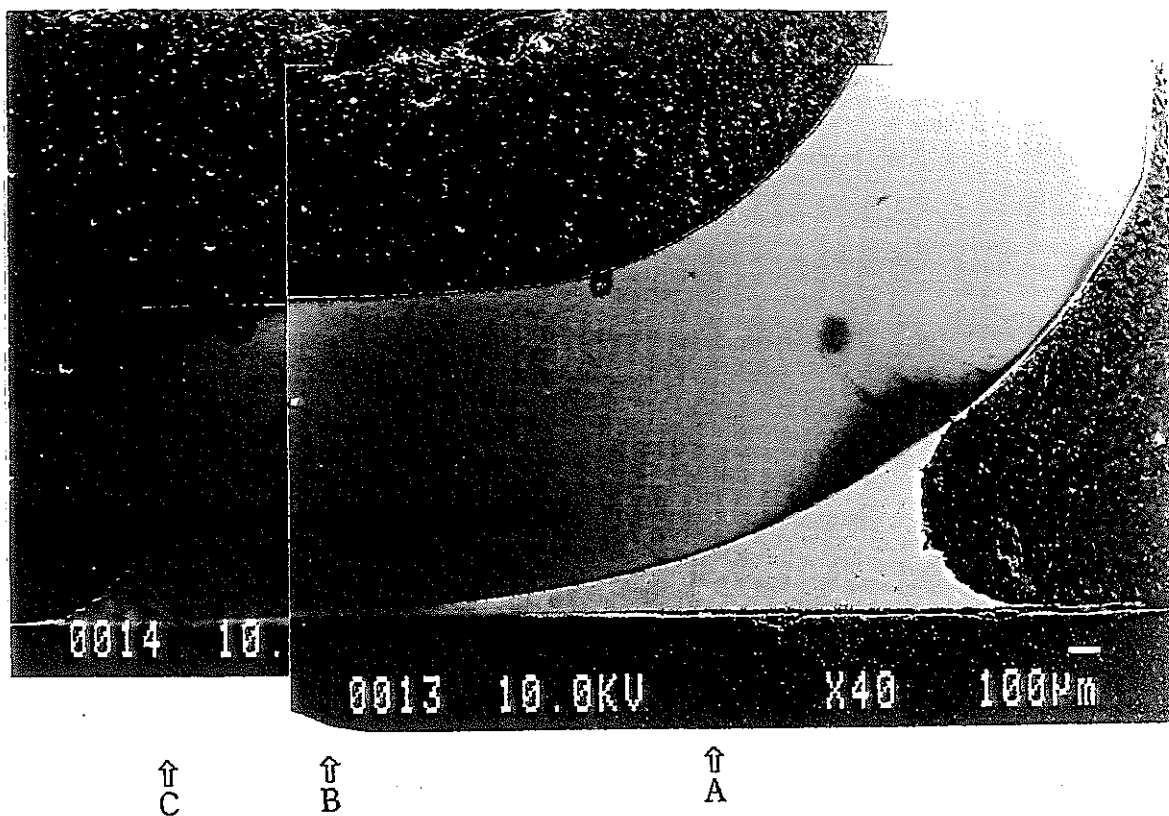
(1)



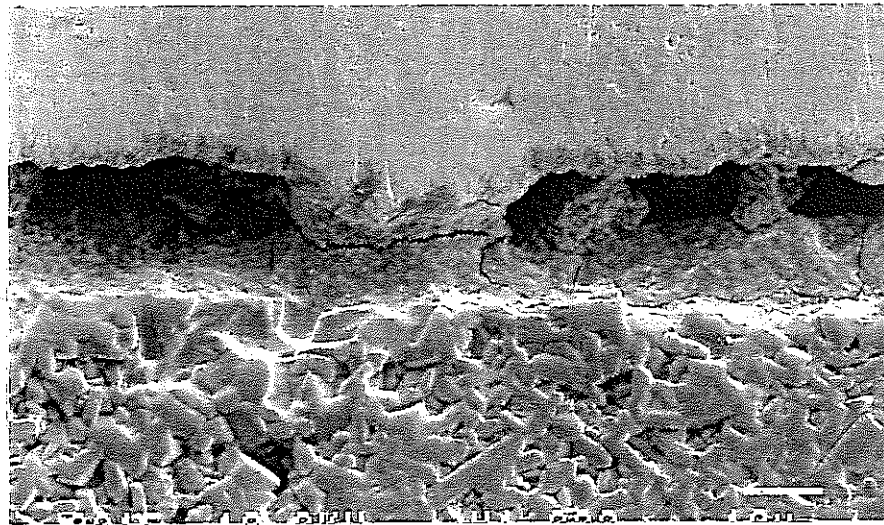
絶縁パイプ
内面側
(水側)

接合部断面写真

(2)

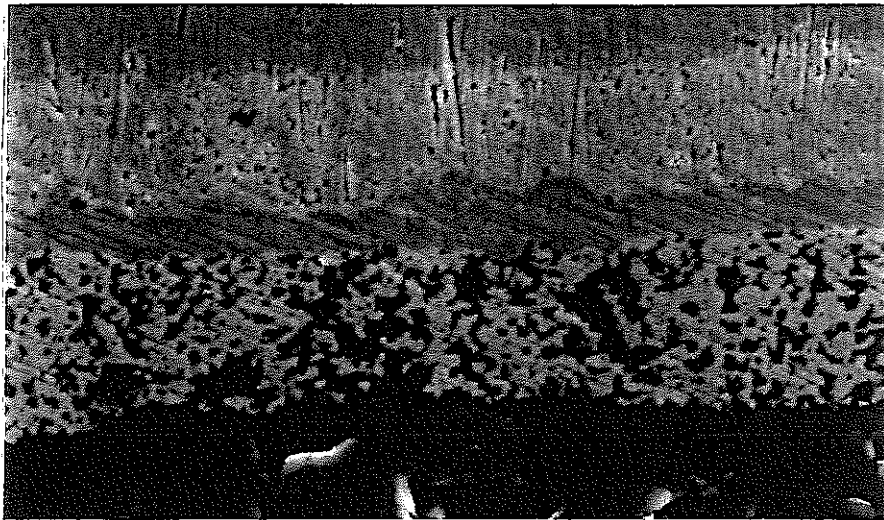


図E-3 電子顕微鏡による接合部の断面図



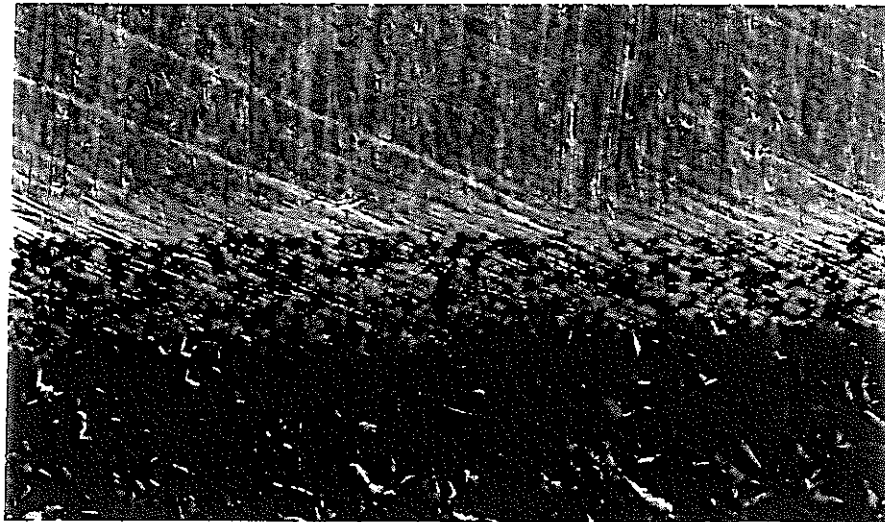
銀ロウ
Niめっき層
Mo-Mn層
セラミック

A部の拡大SEM写真 ×1000



コパール
銀ロウ
Niめっき層
Mo-Mn層
セラミック

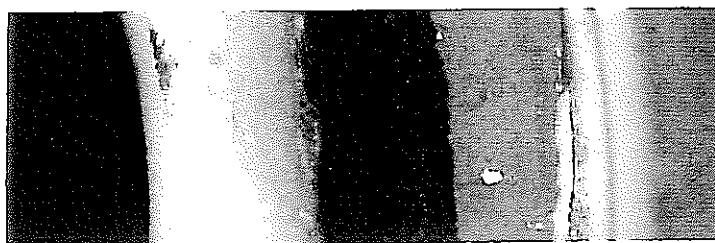
B部の拡大SEM写真 ×1500



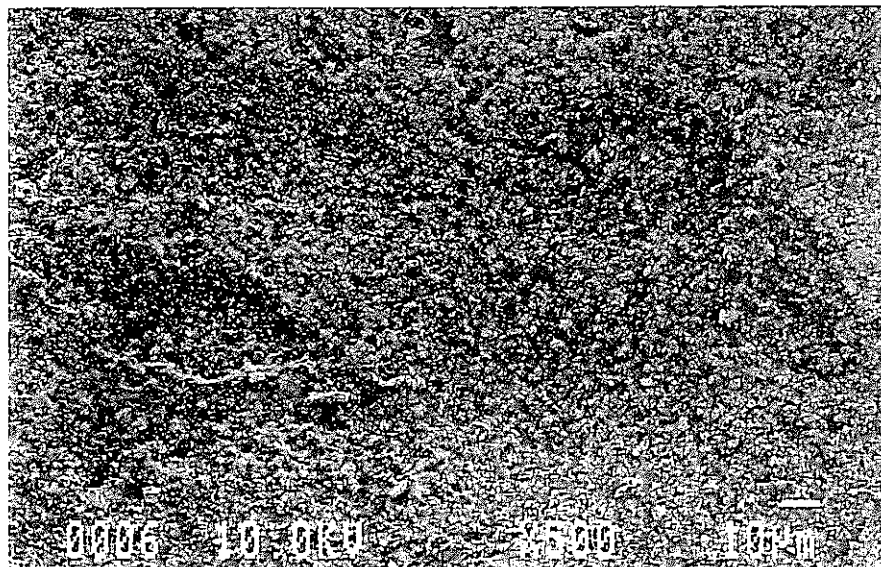
銀ロウ
Niめっき層
Mo-Mn層
セラミック

C部の拡大SEM写真 ×1000

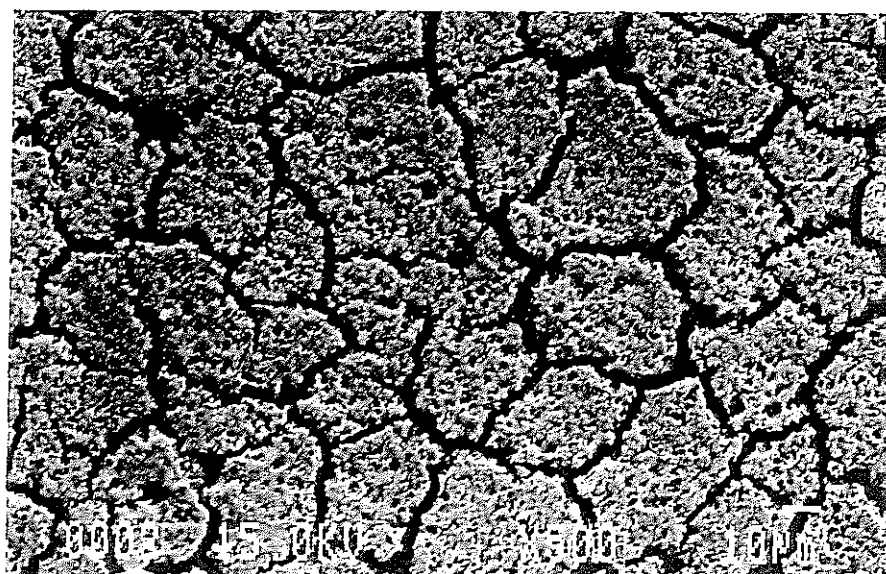
図E-4 拡大した接合部の断面図



セラミックス側破断面（#2モジュール下流側）

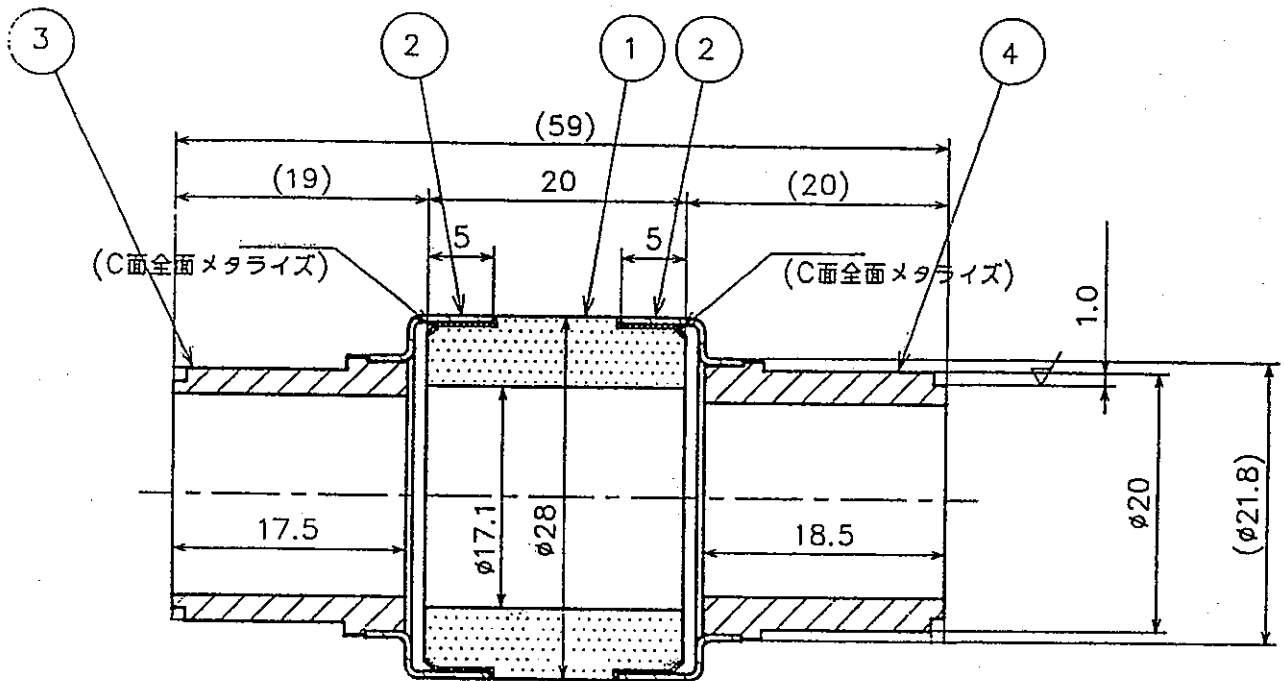


外周側ネズミ色部（未腐食部）×500



中央黒色部（腐食部）×500

図E-5 電子顕微鏡によるMo-Mn層の写真



品番	部品名称	数量	材質
1	セラミック	1	Al ₂ O ₃
2	スリーブ	2	Fe-Ni-Co Alloy
3	ブロック 1	1	SUS304
4	ブロック 2	1	SUS304

図E-6 補修した絶縁パイプ