

JAERI - M  
**90-155**

極低温照射試験装置の運転特性

1990年9月

笠井 昇・瀬口 忠男

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division  
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-  
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 いばらき印刷(株)

極低温照射試験装置の運転特性

日本原子力研究所高崎研究所開発部

笠井 昇・瀬口 忠男

(1990年8月14日受理)

極低温照射試験装置は、繊維強化樹脂 (FRP) および高分子材料の放射線劣化におよぼす照射温度効果について検討するため、1989年3月に高崎研究所  $\gamma$  線照射室に設置された。円筒状の照射容器の外周に18本の  $\text{Co-60}$  線源を配置する方式で、照射容器は液体窒素 ( $\text{LN}_2$ ) 用と液体ヘリウム (LHe) 用の2種類が設けられている。本試験に先立ち、装置の運転特性、主に照射の線量率と照射容器内の液化ガスの蒸発量について調べた。線量率は液体窒素用照射容器で  $3.5 \times 10^6 \text{ R/h}$  ( $9.0 \times 10^2 \text{ C/kg} \cdot \text{h}$ )、液体ヘリウム照射容器で  $3.0 \times 10^6 \text{ R/h}$  ( $7.7 \times 10^2 \text{ C/kg} \cdot \text{h}$ ) であった。線量率分布は試料を入れて照射するサンプルケースの径が小さくなるほど少なくなることが認められた。照射容器内の液化ガスは照射により蒸発量が多くなり、液体ヘリウムは照射時において未照射時の30倍の蒸発量であった。本装置では照射時において液体窒素や液体ヘリウムの供給および液面制御が正常に行われることが確かめられた。

Operation and Characteristics of  
Very Low Temperature Irradiation Test Equipment

Noboru KASAI and Tadao SEGUCHI

Department of Development  
Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Watanuki-cho, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received August 14, 1990)

The very low temperature irradiation test equipment, which is used for the study of irradiation temperature effects on the radiation degradation of fiber reinforced plastics (FRP) and polymers, was constructed and installed in Takasaki Co- $\gamma$  irradiation facility at March 1989. The equipment has two types of irradiation vessel, liquid nitrogen and liquid helium. The Co-60  $\gamma$ -ray sources (18 pieces of pencil) were arranged cylindrically around the irradiation vessels. Initially, the test operation of the equipment was carried out, and the characteristics were investigated in the points of dose rate distribution and the regulation of liquid nitrogen and liquid helium supply during irradiation. The dose rate was  $3.5 \times 10^6$  R/h ( $9.0 \times 10^2$  C/kg·h) in the vessel of liquid nitrogen, and  $3.0 \times 10^6$  R/h ( $7.7 \times 10^2$  C/kg·h) in the vessel of liquid helium. The dose distribution was rather uniform in the vessel of liquid helium because of the small diameter. The evaporation of liquid helium increased during irradiation by about 30 times comparing with the nonirradiation. The transfer of liquid nitrogen and liquid helium from the storage tank to the irradiation vessel was well regulated during irradiation.

Keywords: Irradiation Equipment, Very Low Temperature, Cobalt 60- $\gamma$  Ray, Liquid Nitrogen, Liquid Helium, Organic Materials, Dose Rate, Evaporation, Transfer

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 装置の概要 .....	2
2.1 装置の使用目的 .....	2
2.2 運転方法の概略 .....	2
2.3 装置の構成 .....	2
2.3.1 照射容器 .....	3
2.3.2 トランスファーチューブ .....	3
2.3.3 パイピングユニット .....	3
2.3.4 制御盤 .....	3
2.3.5 液化ガス貯蔵タンク .....	3
2.3.6 線源用具 .....	3
3. 装置の特性 .....	4
3.1 照射 .....	4
3.1.1 線量率の計算 .....	4
3.1.2 線量率の測定方法 .....	5
3.1.3 線量率の測定結果 .....	5
3.2 液化ガスの蒸発量 .....	6
3.2.1 蒸発量の計算方法 .....	6
3.2.2 蒸発量の計算 .....	7
3.2.3 蒸発量の測定結果 .....	9
4. 極低温照射における問題点 .....	12
5. まとめ .....	13
謝 辞 .....	13
参考文献 .....	14
付 録 .....	32

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Outline of equipment .....	2
2.1 Purpose of equipment .....	2
2.2 Outline of operation .....	2
2.3 Components of equipment .....	2
2.3.1 Irradiation vessel .....	3
2.3.2 Transfer-tube .....	3
2.3.3 Piping unit .....	3
2.3.4 Control panel .....	3
2.3.5 Storage tank of liquid gas .....	3
2.3.6 Instruments of source .....	3
3. Operation and characteristics .....	4
3.1 Irradiation .....	4
3.1.1 Calculation of dose rate .....	4
3.1.2 Method of measurement of dose rate .....	5
3.1.3 Results of dose rate measurement .....	5
3.2 Quantity of liquid gas evaporation .....	6
3.2.1 Method of calculation of liquid gas evaporation .....	6
3.2.2 Calculation of liquid gas evaporation .....	7
3.2.3 Results of liquid gas evaporation measurement .....	9
4. The matters to be seen in equipment at very low temperature irradiation .....	12
5. Conclusion .....	13
Acknowledgements .....	13
Reference .....	14
Appendix .....	32

## 1. はじめに

高分子材料をマトリックスとして、繊維で強化した有機複合材料は、軽量で高強度のほかに寸法安定性、電気絶縁性、断熱性など優れた特性を有する。その中で、ガラス繊維で強化した樹脂（GFRP）は核融合炉の超電導磁石用絶縁材料の一つとして期待されている。超電導磁石用絶縁材料において、極低温で大量の中性子および $\gamma$ 線に曝される<sup>1)</sup>ことから、その照射による材料劣化の影響を考慮する必要がある。有機絶縁材料において耐放射線性の研究報告は多いが、極低温下での照射効果についての知見はきわめて少ない<sup>2)</sup>。

原研高崎研究所では「複合材料の耐放射線性に関する研究」のテーマの下で有機複合材料の放射線照射による劣化評価の研究<sup>3)</sup> および新規材料開発<sup>4)</sup>を行っている。本報告は極低温（液体ヘリウムおよび液体窒素温度）で照射による機械的特性、熱的特性に対する照射温度効果の研究を行うために設置した「極低温照射試験装置」について、線量率および液化ガスの蒸発量などの装置特性について調べたものである。

## 2. 装置の概要

### 2.1 装置の使用目的

極低温照射試験装置は、ガラス繊維強化プラスチック (GFRP) を液体ヘリウム (温度 4.2 k) または液体窒素 (温度 77 k) に浸漬した状態で<sup>60</sup>Co- $\gamma$ 線を照射して、機械特性等の劣化におよぼす低温照射効果を検討するものである。

本報では以後、液体ヘリウムを LHe、液体窒素を LN<sub>2</sub> と記載する。

### 2.2 運転方法の概略

本装置では LHe 温度 (4.2 k) での試料の照射においては LHe 照射容器を用い、LN<sub>2</sub> 温度 (77K) での試料の照射においては LN<sub>2</sub> 照射容器を用いる。LHe 温度での装置のフローシートを Fig. 1 に、LN<sub>2</sub> 温度でのフローシートを Fig. 2 に示した。以下に LHe 温度で試料を照射する場合の運転方法の概略を示した。なお、LN<sub>2</sub> 温度で照射の場合 LHe、He ガスおよび He 系計装機器等を使用しないが方法は同じである。

照射容器内のサンプルケースに試料を入れた後、照射容器内と配管内を真空排気して He ガスおよび N<sub>2</sub> ガスによりそれぞれの系内をガス置換する。(真空排気とガス置換の時にのみ GHe および GN<sub>2</sub> 排気口と真空排気口を接続する) ボンベの N<sub>2</sub> ガスを LN<sub>2</sub> 貯蔵タンクに注入・加圧して照射容器の LN<sub>2</sub> 槽に LN<sub>2</sub> を供給する。LHe についても同様に、ボンベの He ガスを LHe 貯蔵タンクに注入・加圧して照射容器の LHe 槽に LHe を供給し、試料を冷却する。照射容器内の LHe と LN<sub>2</sub> の量は液面計により検知して制御する。液面がセンサーの下限に達すると He ガスまたは N<sub>2</sub> ガスがそれぞれの貯蔵タンクに注入・加圧され LHe または LN<sub>2</sub> が照射容器に供給される。センサーの上限に達すると He ガスまたは N<sub>2</sub> ガスが系外にブローされて LHe または LN<sub>2</sub> の供給が停止する。このように、LHe と LN<sub>2</sub> は自動的にセンサーの上限と下限の間で断続的に供給される。また、気化したガス (GHe, GN<sub>2</sub>) は照射室外の排気口から排気される。照射容器内の LHe および LN<sub>2</sub> の液面制御が正常に行われることを確認した後、<sup>60</sup>Co- $\gamma$ 線による照射を行う。

### 2.3 装置の構成

本装置は主に照射容器、トランスファーチューブ (LHe や LN<sub>2</sub> の供給配管)、パイピングユニット、制御盤、液化ガス貯蔵タンクおよび線源用具から構成されている。照射室内には照射容器、線源用具およびトランスファーチューブの一部が設置されている。照射室外にはパイピングユニット、制御盤、液化ガス貯蔵タンクおよびトランスファーチューブの一部が設置されている。



### 2.3.1 照射容器

試料を低温に冷却したまま照射する容器であり、4.2kの温度で照射を行うLHe照射容器と77kの温度で照射を行うLN<sub>2</sub>照射容器の2種類がある。LHe照射容器はFig.3に示したように、真空断熱式二重管で試料を入れる内管にLHeが充填され、真空槽を通して外管にLN<sub>2</sub>が充填され冷却（熱シールド）される構造である。液面計によりLHeとLN<sub>2</sub>の液面（量）が一定範囲内でコントロールされる。LHeの充填量は約2.1ℓ（液面計上限レベル70%まで）、LN<sub>2</sub>の充填量は約3.5ℓ（液面計上限レベルまで）である。LN<sub>2</sub>照射容器はFig.4に示したように真空断熱式であり、液面計によりLN<sub>2</sub>の液面（量）が一定範囲内でコントロールされる。LN<sub>2</sub>の充填量は約5.8ℓ（液面計上限レベルまで）である。

### 2.3.2 トランスファーチューブ

LHeまたはLN<sub>2</sub>を液化ガス貯蔵タンクから照射容器へ供給する配管である。構造は内径5mmφの真空断熱二重管で、一部フレキシブルになっている。また、照射室内では2カ所着脱可能となっている。

### 2.3.3 パイピングユニット

照射室外の配管、バルブ、圧力計およびガス置換用の真空ポンプを1つのユニットにまとめたものである。

### 2.3.4 制御盤

LHeとLN<sub>2</sub>の液面計、液面制御器、圧力指示計等の計装およびスイッチ、ランプ類を1つのユニットにまとめたものである。

### 2.3.5 液化ガス貯蔵タンク

液化ガス貯蔵タンクは容量250ℓのLHe貯蔵タンク1台と容量270ℓのLN<sub>2</sub>貯蔵タンク2台からなる。LHe貯蔵タンクには超電導式液面計センサー、LN<sub>2</sub>貯蔵タンクには白金測温低抗体式液面計センサーが取り付けられている。

### 2.3.6 線源用具

ペンシル状の<sup>60</sup>Co線源（約11φ×450mm）を照射容器の外側に円周上に配列して照射を行うためのもので照射台、線源ケース、線源収納バスケットおよび線源カバーで構成されている。線源は線源ケースに挿入された状態で線源収納バスケットに納められ、プール内に保管されている。試料の照射は、照射台に固定された線源カバー内に線源収納バスケットをプールから上昇させて、Fig.5に示した配置のもとで外側から行われる。

### 3. 装置の特性

#### 3.1 照射

##### 3.1.1 線量率の計算

本装置の設計に当たり、照射容器の外側に円周上に配列したペンシル状（ $11\phi \times 450\text{ mm}$ ）の $^{60}\text{Co}$ 線源から照射容器内の試料がどの程度の照射を受けるか、下記の条件を設定して計算により線量率を求めた。また、この計算結果から、実際に照射に使用する $^{60}\text{Co}$ 線源の本数を決定する。なお、計算方法については付録に記した。

〔線量率計算の条件〕

① 照射容器

$\text{LN}_2$ 照射容器と $\text{LHe}$ 照射容器の2種類とし、いずれも無限円筒とする。

② 照射容器と線源の関係

$\text{LN}_2$ 照射容器と線源の関係をFig. 6,  $\text{LHe}$ 照射容器と線源の関係をFig. 7とする。

③ 材質

照射容器と線源カバーはSUS製とする。（ $\rho = 7.87\text{ g/cm}^3$ ）

試料はGFRPとする。（ $\rho = 2.17\text{ g/cm}^3$ ）

④ 試料寸法

$\text{LN}_2$ 照射容器で $90\phi \times 120\text{ mm}$ とする。 $\text{LHe}$ 照射容器で $40\phi \times 120\text{ mm}$ とする。

⑤ 液化ガス

液化ガスは照射容器に満たされているものとする。

$\text{LN}_2$ 密度：（ $\rho = 0.808\text{ g/cm}^3$ ）  $\text{LHe}$ 密度：（ $\rho = 0.125\text{ g/cm}^3$ ）

⑥  $^{60}\text{Co}$ 線源

線源は $11\phi \times 450\text{ mm}$ （6,000 Ci/本）のペンシル状とし、試料中心と線源中心を合わせ $260\phi$ の円周上に30本（180,000 Ci）等間隔に配置する。

Fig. 8に $\text{LN}_2$ 照射容器での線量率分布の計算結果を示した。線量率は最も高い点で $5.1 \times 10^6\text{ R/h}$ 、最も低い点で $4.1 \times 10^6\text{ R/h}$ となり $90\phi \times 120\text{ mm}$ の試料内において約20%程度の分布が生じる結果になった。線量率は試料の中心に対して高さ方向での分布はほとんど無いが、円周方向では分布が大きく試料の中心が最も低い結果となった。高さ方向の分布については、 $120\text{ mm}$ の長さの試料中心と $450\text{ mm}$ の長さの線源（試料に比べ十分長い）中心を合わせたことや照射容器について底部のない無限円筒として計算した結果、中心部と端部で線量率に差が現れていない。これに対し、円周方向については中心部は端部と比べて密度 $2.17\text{ g/cm}^3$ で、 $45\text{ mm}$ 厚の試料により覆われた状態になっていることや線源からの距離が違ふことにより線量率の分布が大きくなったものと考えられる。

Fig. 9に $\text{LHe}$ 照射容器での線量率分布の計算結果を示した。線量率は最も高い点で $5.3 \times 10^6\text{ R/h}$ 、最も低い点で $4.8 \times 10^6\text{ R/h}$ となり $40\phi \times 120\text{ mm}$ の試料内において約10%程度の分布が

生じた。LHe照射容器での試料内の線量率はLN<sub>2</sub>照射容器での試料内の線量率に比べ分布が均一で、絶対値が大きくなっている。このことは、LHe照射容器では試料と線源の間に薄板が増えたものの試料の直径が小さくなったことや試料の浸漬している液化ガスの密度が小さくなったためと考えられる。

以上の線量率の計算結果から照射を受ける試料の線量率は約 $5 \times 10^6$  R/h程度と推定される。しかし、後述するように線量率が高すぎると照射による試料や照射容器等の発熱のため、液化ガスの蒸発（気化）量が多くなる。最悪の場合には液化ガスの供給速度が蒸発速度に追いつかなくなり、照射容器内の液化ガスがなくなることが考えられる。このため、本装置での線量率を $3 \times 10^6$  R/h程度にすることとした。線量率を $3 \times 10^6$  R/hとするためには

$$30 \text{本} \times (3 \times 10^6 / 5 \times 10^6 \text{ R/h}) = 18 \text{本}$$

ペンシル状線源（6,000 Ci/本）を260φの円周上に18本（108,000 Ci）等間隔に配置すれば良いことが分かった。

18本の線源によりLN<sub>2</sub>照射容器での線量率を計算すると試料の中心で $2.5 \times 10^6$  R/h、端で $3.1 \times 10^6$  R/hとなり、LHe照射容器では中心で $2.9 \times 10^6$  R/h、端で $3.2 \times 10^6$  R/hとなる。

### 3.1.2 線量率の測定方法

線量率の計算結果より線量率を $3 \times 10^6$  R/hに設定して装置を設計した。製作した装置で実際にどの程度の線量率になっているか線量測定により調べた。なお、本装置において試料の照射は、Fig. 5に示した配置のもとで外側から行われる。

LN<sub>2</sub>やLHe温度などの低温で簡便に測定できる線量計がないため、照射容器内が空（何も入れない）の状態と他の液体を入れた状態で線量率を測定した後、照射容器内にLN<sub>2</sub>やLHeが入った場合での線量率に換算した。すなわち、LN<sub>2</sub>照射容器では容器内が空の場合と水を入れた場合でサンプルケース内の線量率を測定し、密度が $0.81 \text{ g/cm}^3$ のLN<sub>2</sub>が入った時の線量率に換算した。LHe照射容器では外側のLN<sub>2</sub>槽にLN<sub>2</sub>を入れた状態で容器内（LHe槽）が空の場合とメタノールを入れた場合の線量率を測定し、密度が $0.125 \text{ g/cm}^3$ のLHeが入った時の線量率に換算した。換算は密度を横軸に、線量率を縦軸に取り空気と水またはメタノール中で測定した線量率の値をプロットし直線で結び、LN<sub>2</sub>またはLHeの密度の所で線量率を読み取る方法で行った。線量計はアラニン線量計であるアミノグレイ（日立電線製）<sup>5)</sup>を用いた。アミノグレイはFig. 10に示したようにLHeおよびLN<sub>2</sub>照射容器の線源ケース内に取付けて一定時間照射し、照射された線量を測定して線量率（1時間当たりの線量）を求めた。

### 3.1.3 線量率の測定結果

Table 1にLN<sub>2</sub>照射容器のサンプルケース内にFig. 10(A)のように線量計を取り付けて行った線量率測定結果を示した。照射容器内が空の状態の線量率は $4.15 \sim 4.45 \times 10^6$  R/hで試料ケース内で最大7%の分布となった。これに対して、照射容器内に水を6ℓ（液面計の上限レベルまでの容量）入れた場合の線量率は $3.23 \sim 3.88 \times 10^6$  R/hでサンプルケース内で最大17%の分布となった。このように、容器内に水が入っている場合は空の場合に比べてサンプルケース内の線

量率分布が大きく、線量率も20%程度小さくなることが分かった。また、No.3だけ線量率が大きくなった原因として、線源を挿入した線源ケースを線源収納バスケット内にマジックハンド等により入れるために、線源ケースとバスケットの間に隙間を設けたため、線源ケースが中心から少しずれた位置に設置されたためと考えられる。得られた線量率から照射容器内がLN<sub>2</sub>の場合の線量率に換算すると(C)  $3.4 \sim 4.0 \times 10^6$  R/hとなり、試料ケース内で最大15%の分布となった。以上の結果から判断すると、LN<sub>2</sub>照射容器における線量率は  $3.5 \times 10^6$  R/hであると推定される。

LHe照射容器のサンプルケース内の線量率は、Fig. 10(B)のように線量計を取り付けて測定した。線量率の測定結果はTable 2に示したように、照射容器内が空の状態の場合  $3.1 \times 10^6$  R/hで照射容器内にメタノールを2ℓ（液面計で70%レベルの容量）入れた場合  $2.9 \times 10^6$  R/hであった。この結果から、照射容器内がLHeの場合の線量率に換算すると  $3.0 \times 10^6$  R/hであると推定される。

今回の線量率測定からLN<sub>2</sub>照射容器で照射する場合の線量率は  $3.5 \times 10^6$  R/h、LHe照射容器で照射する場合の線量率は  $3.0 \times 10^6$  R/hで、LN<sub>2</sub>照射容器の線量率が大きくなった。この結果は、3.1.1項の線量率の計算で得られた傾向と逆になった。このことは、線量率計算では、サンプルケース内に比重2.17の試料が隙間なく詰まっているとしたことや照射容器を無限円筒と仮定したが、線量率の測定においてサンプルケース内に試料が無い状態で測定したことや照射容器には底、液面計、液化ガス供給用パイプ等が取り付けられており、LN<sub>2</sub>照射容器に比べてLHe照射容器の方が影響が大きいことなどが原因と考えられる。

LN<sub>2</sub>照射容器で試料を照射する場合、サンプルケース径が大きいため中心部と端部で線量率に15%程度の差が生じており、長時間照射等において積算線量が試料位置により変わる恐れがあるため、注意する必要がある。しかし、Fig. 9の線量率の計算結果で試料の中心と中心から円周方向に20mmの位置では線量率がほとんど変わらないことから、サンプルケースの径を小さくすることにより解決される。

## 3.2 液化ガスの蒸発量

### 3.2.1 蒸発量の計算方法

照射容器内の液化ガス(LHe, LN<sub>2</sub>)の単位時間当たりの蒸発量を計算する。本報では照射容器や配管の初期冷却に必要な液化ガスの量、照射容器内の液化ガスの自然蒸発量および照射による液化ガスの蒸発量について計算する。

#### 3.2.1.1 初期冷却に必要な液化ガスの量

液化ガスの供給を始めてから、照射容器内に所定量溜まるまでに必要な液化ガスの量は

$$V = \sigma(V_1 + V_2) + V_3 \quad (\ell) \quad (1)$$

で表される。ここで $\sigma$ は材料1kgを冷却するのに要する液化ガスの量( $\ell/\text{kg}$ )<sup>6)</sup>、 $V_1$ は冷却する照射容器(パイプ等を含む)の重量(kg)、 $V_2$ は配管(トランスファーチューブ内管および継手等)の重量(kg)、 $V_3$ は照射容器の液化ガス容量( $\ell$ )である。

## 3.2.1.2 自然蒸発量

低温容器において容器の壁や支持棒などの固体伝熱、真空容器内の残留気体分子による伝導、気体の対流による伝導および温度差のある壁の間の輻射による伝導などにより熱が流入して、液化ガスの自然蒸発が起こる。普通の低温容器では壁や支持棒などの伝熱と輻射が主なものである。しかし、伝熱に比べて輻射は非常に小さいため今回の計算からは除外した。

低温容器への単位時間当たりの熱流は

$$Q = (A/\ell) \kappa (T_1 - T_2) (W) \quad (2)$$

で表される<sup>7)</sup>。Aは照射容器の断面積 (cm<sup>2</sup>)、ℓは冷却を受ける容器の長さ (cm)、κは熱伝導率 (W・cm<sup>-1</sup>・K<sup>-1</sup>)、T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>はそれぞれの面の温度 (K) である。

## 3.2.1.3 照射による蒸発量

コバルト 60-γ線の照射により照射容器、窒素 (N<sub>2</sub>) およびヘリウム (He) が受ける熱量を計算してみる。なお、照射線量は 1 MR とし、照射試料については考慮しない。

## ① 照射による吸収線量

吸収線量 (rad) は照射線量 (R) から次式で求められる。

$$D = 0.873 [(\mu_{en}/\rho)M/(\mu_{en}/\rho)_{air}] X \text{ (rad)}$$

ここで  $(\mu_{en}/\rho)M$  は材料の Mass Energy Absorption Coefficient (cm<sup>2</sup>/g)、 $(\mu_{en}/\rho)_{air}$  は空気の Mass Energy Absorption Coefficient (cm<sup>2</sup>/g)、X は照射線量 (R) である。

$(\mu_{en}/\rho)M$  の値<sup>8)</sup> はコバルト 60-γ線でステンレス: 0.02473 (鉄の値を用いた)、窒素: 0.02665、ヘリウム: 0.02665 (窒素の値を用いた) となる。また、 $(\mu_{en}/\rho)_{air}$  は 0.02661 となることから 1 MR の照射線量でステンレスは 0.81 Mrad (8.1 kGy)、窒素とヘリウムは 0.87 Mrad (8.7 kGy) の吸収線量となる。

## ② 吸収線量から受ける熱量

1 (Mrad) = 2.77 (W・h/kg) より、コバルト 60-γ線を 1 MR 照射した時に受ける熱量は下記の値となる。

・ステンレス

$$0.81 \text{ (Mrad)} \times 2.77 \text{ (W} \cdot \text{h/kg)} = 2.24 \text{ (W} \cdot \text{h/kg)}$$

・窒素およびヘリウム

$$0.87 \text{ (Mrad)} \times 2.77 \text{ (W} \cdot \text{h/kg)} = 2.41 \text{ (W} \cdot \text{h/kg)}$$

## 3.2.2 蒸発量の計算

(1) LN<sub>2</sub>照射容器内のLN<sub>2</sub>について

① 初期冷却に必要なLN<sub>2</sub>の量を(1)式から求める。

300 K から 77 K にステンレスを冷却する時の σ は 0.33 ℓ/kg、V<sub>1</sub> を 3 kg、V<sub>2</sub> を 2 kg とすると、V<sub>3</sub> が 5.7 ℓ (液面計上限までの量) から初期冷却に 7.4 ℓ の LN<sub>2</sub> が必要である。

② 自然蒸発量を(2)式から求める。

300 K から 77 K でのステンレスの κ は 0.123 (W・cm<sup>-1</sup>・K<sup>-1</sup>)、A は外径 14 cm、内径

13.8 cmより4.37 cm<sup>2</sup>,  $\ell$ は液面計下限の27.5 cmを取ると照射容器冷却部への熱伝導は4.4 (W)となる。

LN<sub>2</sub>の沸点での蒸発潜熱が198 J/g = 5.50 × 10<sup>-2</sup> W・h/g, 密度が0.808 g/cm<sup>3</sup>から蒸発潜熱は4.44 × 10<sup>-2</sup> W・h/mlとなる。すなわち, 1 W・hで22.5 mlのLN<sub>2</sub>が蒸発する。上記計算から, 300 Kにおいて冷却部に4.4 (W)の熱が流入することから, LN<sub>2</sub>照射容器のLN<sub>2</sub>は1時間に99.0 ml自然蒸発する。

### ③ 照射による蒸発量

LN<sub>2</sub>照射容器内の線量率は3.1.3項より3.5 MRである。1 MRの照射においてステンレスでは2.24 (W・h/kg), 窒素では2.41 (W・h/kg)の熱量を受けることから, 冷却する照射容器の重量を3 kg, 液面計上限までのLN<sub>2</sub>の量を5.7 ℓ (4.6 kg)とすると照射容器の受ける熱量は23.5 (W・h), LN<sub>2</sub>は38.8 (W・h)となる。1 W・hで22.5 mlのLN<sub>2</sub>が蒸発することから, 照射により1時間に1401.8 mlのLN<sub>2</sub>が蒸発する。

### ④ LN<sub>2</sub>照射容器におけるLN<sub>2</sub>の蒸発量

②と③から1時間に約1.5 ℓのLN<sub>2</sub>が蒸発する。

## (2) LHe照射容器内のLN<sub>2</sub>について

### ① 初期冷却に必要なLN<sub>2</sub>の量を(1)式から求める。

300 Kから77 Kにステンレスを冷却する時の $\sigma$ は0.33 ℓ/kg, V<sub>1</sub>を5 kg, V<sub>2</sub>を2 kgとすると, V<sub>3</sub>が3.5 ℓ (液面計上限までの量)から初期冷却に5.8 ℓのLN<sub>2</sub>が必要である。

### ② 自然蒸発量を(2)式から求める。

300 Kから77 Kでのステンレスの $\kappa$ は0.123 (W・cm<sup>-1</sup>・K<sup>-1</sup>), LN<sub>2</sub>の入る槽で内筒の外径10 cm, 内径9.8 cm, 外筒の外径14 cm, 内径13.8 cmからAは7.5 cm<sup>2</sup>,  $\ell$ は液面計下限の32.2 cmを取ると照射容器冷却部への熱伝導は6.4 (W)となる。1 W・hで22.5 mlのLN<sub>2</sub>が蒸発することからLHe照射容器のLN<sub>2</sub>は1時間に144.0 ml自然蒸発する。

### ③ 照射による蒸発量

LHe照射容器内の線量率は3.1.3項より3 MRである。1 MRの照射においてステンレスでは2.24 (W・h/kg), 窒素では2.41 (W・h/kg)の熱量を受けることから, 冷却するLN<sub>2</sub>槽の重量を5 kg, 液面計上限までのLN<sub>2</sub>の量を3.5 ℓ (2.8 kg)とすると照射容器の受ける熱量は33.6 (W・h), LN<sub>2</sub>は20.2 (W・h)となる。1 W・hで22.5 mlのLN<sub>2</sub>が蒸発することから, 照射により1時間に1210.5 mlのLN<sub>2</sub>が蒸発する。

### ④ LHe照射容器におけるLN<sub>2</sub>の蒸発量

②と③から1時間に約1.4 ℓのLN<sub>2</sub>が蒸発する。

## (3) LHe照射容器内のLHeについて

### ① 初期冷却に必要なLHeの量を(1)式から求める。

300 Kから4.2 Kにステンレスを冷却する時の $\sigma$ は0.79 ℓ/kg, V<sub>1</sub>を1.5 kg, V<sub>2</sub>を2 kgとすると, V<sub>3</sub>が2 ℓ (液面計上限までの量)から初期冷却に4.8 ℓのLHeが必要である。

### ② 自然蒸発量を(2)式から求める。

77 Kから4.2 K (液体窒素で熱シールドされるため)でのステンレスの $\kappa$ は0.045 (W・cm<sup>-1</sup>・K<sup>-1</sup>), Aは外径8.6 cm, 内径8.5 cmから1.3 cm<sup>2</sup>,  $\ell$ は液面センサーの30%の値である

17.5 cmを取るとLHe槽への熱伝導は0.22 (W) となる。

LHeの沸点での蒸発潜熱が  $20.9 \text{ J/g} = 5.81 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{h/g}$ 、密度が  $0.125 \text{ g/cm}^3$  から蒸発潜熱は  $7.26 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{h/ml}$  となる。すなわち、 $1 \text{ W} \cdot \text{h}$  で  $1377.4 \text{ ml}$  のLHeが蒸発する。上記計算から、冷却部に0.22 (W) の熱が流入することから、LHe照射容器のLHeは1時間に  $303 \text{ ml}$  自然蒸発する。

### ③ 照射による蒸発量

LHe照射容器内の線量率は3.1.3項より3 MRである。1 MRの照射においてステンレスでは  $2.24 \text{ (W} \cdot \text{h/kg)}$ 、ヘリウムでは  $2.41 \text{ (W} \cdot \text{h/kg)}$  の熱量を受けることから、LHe槽の重量を  $1.5 \text{ kg}$ 、液面センサーの70%でのLHeの量を  $2 \text{ l}$  ( $250 \text{ g}$ ) とすると照射容器の受ける熱量は  $10.1 \text{ (W} \cdot \text{h)}$ 、LHeは  $1.8 \text{ (W} \cdot \text{h)}$  となる。 $1 \text{ W} \cdot \text{h}$  で  $1377.4 \text{ ml}$  のLHeが蒸発することから、照射により1時間に  $16391.1 \text{ ml}$  のLHeが蒸発する。

### ④ LHe照射容器におけるLHeの蒸発量

②と③から1時間に約  $16.4 \text{ l}$  のLHeが蒸発する。

## 3.2.3 蒸発量の測定結果

LN<sub>2</sub>照射容器内のLN<sub>2</sub>およびLHe照射容器内のLHeとLN<sub>2</sub>の蒸発量について測定した。LN<sub>2</sub>については、液面計の上限レベルから下限レベルまでに液面が到達する時間から1時間当たりの蒸発量を求めた。また、LHeについては、設定液面から設定液面まで低下する時間から1時間当たりの蒸発量を求めた。

### (1) LN<sub>2</sub>照射容器におけるLN<sub>2</sub>の蒸発量

LN<sub>2</sub>照射容器とLN<sub>2</sub>液面計の設定液面の関係をFig. 11に示した。照射容器内のLN<sub>2</sub>が蒸発して液面がLOWレベル以下になると電磁弁が開き、N<sub>2</sub>ガスがLN<sub>2</sub>貯蔵タンクに注入・加圧され照射容器にLN<sub>2</sub>が供給される。また、液面がHIGHレベル以上になるとN<sub>2</sub>ガスが系外にブローされてLN<sub>2</sub>の供給が停止される。LN<sub>2</sub>の蒸発量は照射容器内LN<sub>2</sub>の液面が液面計のHIGHレベルからLOWレベルまでに達する時間を測定して求めた。なお、HIGHレベルからLOWレベルまでの容積は  $1.5 \text{ l}$  である。

照射容器内LN<sub>2</sub>の時間に対する液面の変化を照射しない場合と照射中の場合に分けてFig. 12に示した。なお、N<sub>2</sub>ガスの圧力 (LN<sub>2</sub>貯蔵タンクに加圧する圧力) は  $0.4 \text{ kg/cm}^2$  に設定した。LN<sub>2</sub>はLOWレベルからHIGHレベル (①~②) まで供給され、HIGHレベル (②) で電磁弁が作動してN<sub>2</sub>ガスが系外にブローされてLN<sub>2</sub>の供給が停止される。しかし、LN<sub>2</sub>貯蔵タンク内の圧力は急激に下がらないため、実際にはHIGHレベル以上までLN<sub>2</sub>が供給される。HIGHレベル以上まで供給されたLN<sub>2</sub>が蒸発して液面がHIGHレベルに達する (②~③)。LN<sub>2</sub>は更に蒸発して、HIGHレベルからLOWレベル (③~④) まで液面が低下 (容積  $1.5 \text{ l}$ ) し、LOWレベル (④) で電磁弁が作動してN<sub>2</sub>ガスがLN<sub>2</sub>貯蔵タンクに注入・加圧されて、照射容器にLN<sub>2</sub>が供給される。しかし、注入・加圧までに一定時間要することや初期に照射容器までの配管 (トランスファーチューブ) を冷却するため、実際にはLOWレベル以下まで液面が低下する。LOWレベル以下まで低下した液面はLN<sub>2</sub>の供給により、再びLOWレベルに達する (④~⑤)。その後、LN<sub>2</sub>の液面は①の状態から繰り返し移動し、上限レベルと下限レベルの範囲内

で制御される。

Fig. 12(A)に示したように、未照射時において $\text{LN}_2$ がLOWレベルからHIGHレベルまで(容積 1.5  $\ell$ ) 達する時間は6分であることから、 $\text{LN}_2$ の供給速度は250  $\text{ml}/\text{min}$ である(実際には、照射容器および配管内の冷却に要する $\text{LN}_2$ が必要と考えられるが、ここでは無視した)。 $\text{LN}_2$ 照射容器において、初期冷却に必要な $\text{LN}_2$ は $\text{LN}_2$ の供給開始からLOWランプ点灯まで30分を要し、LOWレベルからHIGHレベルまで6分を要することから9  $\ell$ 必要であることが分かった。この量は3.2.2項で計算で求めた7.4  $\ell$ に比べ、若干多くなっている。

未照射時における照射容器内の $\text{LN}_2$ はFig. 12(A)で示したように、HIGHレベルからLOWレベルまで約4時間で低下した。すなわち、1.5  $\ell$ の $\text{LN}_2$ が4時間で無くなる(③~④)ことから蒸発量(自然蒸発量)は1時間で375  $\text{ml}$ である。これに対し、照射時の $\text{LN}_2$ の蒸発量はFig. 12(B)に示したように、1.5  $\ell$ (HIGHレベルからLOWレベルまで)の $\text{LN}_2$ が約1時間30分で無くなる(③~④)ことから1時間で1000  $\text{ml}$ である。この結果から、照射時には未照射時比べて約2.7倍蒸発量が多いことが分かった。

未照射時(自然蒸発量)における $\text{LN}_2$ の蒸発量について3.2.2項の計算結果と比較すると99.0  $\text{ml}/\text{H}$ の計算値に対して実際には3.8倍大きい蒸発量であった。また、照射時における $\text{LN}_2$ の蒸発量については、計算値の1.5  $\ell/\text{H}$ に対して実際には1  $\ell/\text{H}$ で3割程度蒸発量が少なかった。また、 $\text{LN}_2$ の供給時において、未照射時比べて照射時では多く蒸発しているためLOWレベルからHIGHレベルまでの供給時間が長くなっている。また、これらの結果から照射により多くの熱量を受けるが $\text{LN}_2$ の供給および液面制御が正常に行われることが分かった。

## (2) LHe照射容器内の $\text{LN}_2$ について

LHe照射容器と $\text{LN}_2$ 液面計の設定液面の関係をFig. 13に示した。LHe照射容器の $\text{LN}_2$ においても液面が液面計のHIGHレベルからLOWレベルまでに達する時間を測定して求めた。なお、HIGHレベルからLOWレベルまでの容積は約1.1  $\ell$ である。

照射容器内 $\text{LN}_2$ の時間に対する液面の変化をFig. 14に示した。図の(A)は照射容器内のLHe槽にLHeが無い場合における $\text{LN}_2$ の液面変化を表し、(B)はLHe槽にLHeが有る場合における $\text{LN}_2$ の液面変化を表したものである。しかし、いずれの場合も未照射時の液面変化である。 $\text{LN}_2$ がLOWレベルからHIGHレベルまで(容積 1.1  $\ell$ ) 達する時間(①~②)は(A)で8分、(B)で7分であった。この時間から単純に $\text{LN}_2$ の供給速度を計算すると(A)で138  $\text{ml}/\text{min}$ 、(B)で157  $\text{ml}/\text{min}$ となる。 $\text{LN}_2$ 照射容器に $\text{LN}_2$ を供給する際には供給速度が250  $\text{ml}/\text{min}$ であった。本来、 $\text{LN}_2$ 貯蔵タンクに加圧して $\text{LN}_2$ を供給させる $\text{N}_2$ ガスの圧力が同じことから、 $\text{LN}_2$ の供給速度も同じになるはずであるが、実際には約2倍程度 $\text{LN}_2$ 照射容器の供給速度が大きい結果となった。このことは、LHe照射容器は $\text{LN}_2$ 照射容器に比べて冷却に多くの $\text{LN}_2$ を要することを意味する。

照射容器内の $\text{LN}_2$ はHIGHレベルからLOWレベルまでの1.1  $\ell$ 無くなるのに照射容器内にLHeが無い場合約2時間、LHeが有る場合4時間で無くなった。この結果から、 $\text{LN}_2$ の蒸発量(自然蒸発量)はLHeが無い場合において1時間で550  $\text{ml}$ 、LHeが有る場合において1時間で275  $\text{ml}$ である。 $\text{LN}_2$ はLHeに対して熱シールドのために使用するが、LHeからも冷却を受けているため、LHeが無い場合に比べて蒸発量が少なくなっているものと思われる。



## (3) LHe照射容器内のLHeについて

照射容器内のLHeの量はLHe液面計により知ることができる。LHe液面計は液面センサーの長さ（20インチ）に対して何%のところに液面があるかを表示する。LHe照射容器とLHe液面計による液面の関係をFig. 13に示した。試料はLHe液面計で30%あれば完全に浸漬する状態となる。

Fig. 15に液面計によるLHeのコントロールの状態を示した。なお、上図に設定液面に対する電磁弁の作動点および実際に液面が移動する位置を示し、下図に設定液面（制御液面）に対する電磁弁の作動時間を示した。上図において、液面設定ダイヤル値を35～40%（図中A）に設定した場合には、液面が液面計の値で38%になると電磁弁が開いてLHeの供給が開始され、液面が44%になると電磁弁が閉じてLHeの供給が止まる。液面設定ダイヤル値を45～50%に（図中B）に設定した場合には、液面が52%になると電磁弁が開いてLHeの供給が開始され、液面が54%になると電磁弁が閉じてLHeの供給が止まるがLHeの液面は実際には46～56%まで移動する。このように、液面設定ダイヤル値と電磁弁が作動する液面と違っている。また、図中Aのように低い液面領域（液面計の値の小さい範囲）における液面制御（液面が実際に移動する位置）は電磁弁の作動液面と同じ位置であるが、図中DやEのように高い液面領域になるほど電磁弁の作動液面と大きな違いが生じることが分かった。下図において、液面設定ダイヤル値が35～40%（図中A）だけ他の設定値に比べて極端に電磁弁が作動する時間が長くなっている。特に、電磁弁が閉から開になる時間（LHeが液面センサーの44%から38%まで気化して無くなる時間）が非常に長くなっており、LHeが気化されにくいことが分かった。このことは、LHeの液面がある程度低い領域で制御される場合、 $LN_2$ による熱シールドが非常に効果を発揮して、熱の流入を防ぐものと思われる。

以上の結果から、①液面設定ダイヤル値と電磁弁の作動する液面の値は一致しないので注意を要する。②液面制御において照射容器内の高い液面領域では電磁弁の作動液面を大きく逸脱し、広範囲に渡り液面が移動するために液面の制御が難しい。③低い液面領域で制御する場合においては電磁弁の作動液面と実際の液面が同じ位置となることから、液面制御が良好に行われるとともにLHeが気化され難い、ということが分かった。

Table 3に制御液面を低い領域で設定した場合における、未照射時と照射時のLHe蒸発量を示した。未照射時における蒸発量は制御液面を45～50%（実際に液面は52～54%で制御される）にすると約6 l/h程度であるが、30～40%にすると $LN_2$ による熱シールドの効果が現れ、0.3 l/h程度で非常に少なくなった。これに対し、照射時の蒸発量は制御液面が低い領域で少なくなっているが、未照射時と比べると極端に多くなっている。即ち、未照射時に蒸発量の少ない30～40%の制御液面においても、照射時では8.4～9.2 l/hと大きくなり、未照射時の30倍もの蒸発量となった。このことは、照射によりLHeに非常に多くの熱が流入していることを示している。しかし、今回の測定結果から、照射により照射容器内のLHe蒸発量は非常に多くなるが、LHeの供給および液面制御が正常に行われることが分かった。

Table 4に液化ガスの蒸発量の計算結果と測定結果をまとめて示した。自然蒸発量（未照射時の蒸発量）においては測定値が $LN_2$ で計算値の約3.8倍と大きな違いとなったが、LHeではほとんど同じ値となった。また、照射時の蒸発量において測定値が計算値を下回ったが、比較的近い値であった。

#### 4. 極低温照射における問題点

本装置の設計および特性試験時において問題となった事項、対策および低温照射装置における注意事項について以下に記す。

- ①  $\text{LN}_2$  はコバルト 60- $\gamma$ 線や電子加速器で照射するとき爆発を起こす<sup>9)</sup>。この現象は  $\text{LN}_2$  中に溶解した酸素がオゾンに変化（または空気中で生成したオゾンが  $\text{LN}_2$  中に溶解）し、 $\text{LN}_2$  の蒸発に伴って  $\text{LN}_2$  中に濃縮された後、 $\text{LN}_2$  が無くなった際にオゾンが爆発的に分解する<sup>10)</sup>。本装置では  $\text{LN}_2$  の照射容器への供給および照射中に外部からの空気を完全に遮断した構造とした。また、オゾンの爆発分解を考慮して照射容器に破裂板を取り付けた。
- ② 液化ガスの蒸発に伴う照射容器内圧力の上昇については、本装置運転時において照射容器および配管が開放系であり加圧される構造ではない。試料に含まれる水分や何らかの原因により侵入した水分が冷却固化し、配管内で目詰まりを起こして圧力が上昇することが考えられるが、試料を照射容器内に設置した後照射容器内および配管を真空排気するため、防止できると考えられる。もし、何らかの原因で加圧された場合においても照射容器に取り付けた安全弁および破裂板により対処できる。
- ③ 低温用パッキン等においてテフロンがよく使用されている。しかし、テフロンは照射により劣化が起こりやすい。このため、照射を受ける部分には他の材質のものをを用いるか、こまめに交換する必要がある。
- ④ LHe 照射容器による照射において、LHe の蒸発量は多く 8.4  $\ell/\text{h}$  である。LHe 貯蔵容器の容積は 250  $\ell$  であるが LHe 搬入までのロス、照射容器や配管等の初期冷却等を考慮すると、1 台の LHe 貯蔵容器で供給できる時間は 24 時間程度と推定される。線量率は  $3 \times 10^6$  R/h であることから、1 台の LHe 貯蔵容器で約 72 MR の照射を行うことができる。本装置においては He の液化機が無いため、LHe を購入して空中放出する。しかし、長時間・高線量照射においては LHe から気化した He ガスを回収精製し、液化機で液化して繰り返し使用する方法が必要であろう。
- ⑤ LHe や  $\text{LN}_2$  の供給用配管であるトランスファーチューブの真空度が低下すると断熱効果が悪くなり、LHe や  $\text{LN}_2$  が気化しやすくなる。最悪の場合には LHe や  $\text{LN}_2$  が照射容器に入る前に気化し、照射容器に供給できなくなる。本装置において、照射室内に 2 カ所の着脱部があることや、照射されることなどが原因と思われる真空度の低下が見られるため、 $10^{-4}$  torr 台程度まで真空排気する必要がある。
- ⑥ 液化ガスは蒸発、気化すると体積が急増する。容積比（沸点の液体 1  $\ell$  が蒸発して 1 気圧、 $0^\circ\text{C}$  で何  $\ell$  になるかを表したものは  $\text{N}_2$  が 798、He が 700 である<sup>7)</sup>。このため、照射容器に液化ガスを供給する配管径に対して、気化したガスを排気する配管径を十分に大きくしないと照射容器内で気化したガスにより圧力が高くなり、液化ガスの供給圧力との差がなくなるため供給できなくなる。本装置では供給配管径 5 mm $\phi$  に対して、排気配管径 27.2 mm $\phi$  とした。

- ⑦ 照射容器内への LHe の供給において、一定量（一定の液面）の LHe が溜まった後に照射容器内の圧力が上昇して、溜まった LHe が無くなるという現象を繰り返すだけで必要量の LHe が溜まらないことがある。これは、供給パイプから LHe が勢いよく出たりした時に、LHe の飛沫が照射容器内の冷却が不十分の壁に接触して急激に気化するため、照射容器内の圧力が高くなり液化ガスの供給圧力を上回るために供給できなくなる。これに対しては、供給パイプの LHe 出口部にディフューザー（気液分離器）を付けることにより解決できる。また、供給パイプの LHe 出口部を照射容器内の上部の位置にすることが望ましい。

## 5. ま と め

極低温照射試験装置の線量率や液化ガスの蒸発量などの特性について調べた結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 線量率の計算では LN<sub>2</sub> 照射容器の中心部において  $2.5 \times 10^6$  R/h ( $6.5 \times 10^2$  C/kg·h) LHe 照射容器の中心部において  $2.9 \times 10^6$  R/h ( $7.5 \times 10^2$  C/kg·h) となった。これに対し、線量率を測定した結果では LN<sub>2</sub> 照射容器の中心部で  $3.5 \times 10^6$  R/h ( $9.0 \times 10^2$  C/kg·h), LHe 照射容器の中心部で  $3.0 \times 10^6$  R/h ( $7.7 \times 10^2$  C/kg·h) となった。
- (2) LN<sub>2</sub> 照射容器においてサンプルケースの直径が大きいために、最大 15% の線量率の分布が生じた。
- (3) LN<sub>2</sub> 照射容器内の LN<sub>2</sub> の蒸発量は、照射時において未照射時の 2.7 倍と多くなった。
- (4) LHe 照射容器の LHe 液面制御は、容器内の高い液面領域では難しいが低い液面領域では良好に行われた。また、LHe の蒸発量は、照射時において未照射時の 30 倍と多くなった。
- (5) 照射時の蒸発量は計算結果と比較的近い値であった。
- (6) 照射時においても、LN<sub>2</sub> や LHe の供給および液面制御が正常に行われた。

## 謝 辞

本装置の設計に当たり、設定条件から照射容器内の試料の線量率分布について計算していただいた、イオンビーム技術室中村義輝氏に感謝いたします。また、照射による液化ガスの蒸発量の計算において、照射線量から吸収線量への変換方法について助言をいただいた、照射施設課小島拓治氏に感謝致します。

- ⑦ 照射容器内への LHe の供給において、一定量（一定の液面）の LHe が溜まった後に照射容器内の圧力が上昇して、溜まった LHe が無くなるという現象を繰り返すだけで必要量の LHe が溜まらないことがある。これは、供給パイプから LHe が勢いよく出たりした時に、LHe の飛沫が照射容器内の冷却が不十分の壁に接触して急激に気化するため、照射容器内の圧力が高くなり液化ガスの供給圧力を上回るために供給できなくなる。これに対しては、供給パイプの LHe 出口部にディフューザー（気液分離器）を付けることにより解決できる。また、供給パイプの LHe 出口部を照射容器内の上部の位置にすることが望ましい。

## 5. ま と め

極低温照射試験装置の線量率や液化ガスの蒸発量などの特性について調べた結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 線量率の計算では LN<sub>2</sub> 照射容器の中心部において  $2.5 \times 10^6$  R/h ( $6.5 \times 10^2$  C/kg·h) LHe 照射容器の中心部において  $2.9 \times 10^6$  R/h ( $7.5 \times 10^2$  C/kg·h) となった。これに対し、線量率を測定した結果では LN<sub>2</sub> 照射容器の中心部で  $3.5 \times 10^6$  R/h ( $9.0 \times 10^2$  C/kg·h), LHe 照射容器の中心部で  $3.0 \times 10^6$  R/h ( $7.7 \times 10^2$  C/kg·h) となった。
- (2) LN<sub>2</sub> 照射容器においてサンプルケースの直径が大きいため、最大 15% の線量率の分布が生じた。
- (3) LN<sub>2</sub> 照射容器内の LN<sub>2</sub> の蒸発量は、照射時において未照射時の 2.7 倍と多くなった。
- (4) LHe 照射容器の LHe 液面制御は、容器内の高い液面領域では難しいが低い液面領域では良好に行われた。また、LHe の蒸発量は、照射時において未照射時の 30 倍と多くなった。
- (5) 照射時の蒸発量は計算結果と比較的近い値であった。
- (6) 照射時においても、LN<sub>2</sub> や LHe の供給および液面制御が正常に行われた。

## 謝 辞

本装置の設計に当たり、設定条件から照射容器内の試料の線量率分布について計算していただいた、イオンビーム技術室中村義輝氏に感謝いたします。また、照射による液化ガスの蒸発量の計算において、照射線量から吸収線量への変換方法について助言をいただいた、照射施設課小島拓治氏に感謝致します。

- ⑦ 照射容器内への LHe の供給において、一定量（一定の液面）の LHe が溜まった後に照射容器内の圧力が上昇して、溜まった LHe が無くなるという現象を繰り返すだけで必要量の LHe が溜まらないことがある。これは、供給パイプから LHe が勢いよく出たりした時に、LHe の飛沫が照射容器内の冷却が不十分の壁に接触して急激に気化するため、照射容器内の圧力が高くなり液化ガスの供給圧力を上回るために供給できなくなる。これに対しては、供給パイプの LHe 出口部にディフューザー（気液分離器）を付けることにより解決できる。また、供給パイプの LHe 出口部を照射容器内の上部の位置にすることが望ましい。

## 5. ま と め

極低温照射試験装置の線量率や液化ガスの蒸発量などの特性について調べた結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 線量率の計算では LN<sub>2</sub> 照射容器の中心部において  $2.5 \times 10^6$  R/h ( $6.5 \times 10^2$  C/kg·h) LHe 照射容器の中心部において  $2.9 \times 10^6$  R/h ( $7.5 \times 10^2$  C/kg·h) となった。これに対し、線量率を測定した結果では LN<sub>2</sub> 照射容器の中心部で  $3.5 \times 10^6$  R/h ( $9.0 \times 10^2$  C/kg·h), LHe 照射容器の中心部で  $3.0 \times 10^6$  R/h ( $7.7 \times 10^2$  C/kg·h) となった。
- (2) LN<sub>2</sub> 照射容器においてサンプルケースの直径が大きいために、最大 15% の線量率の分布が生じた。
- (3) LN<sub>2</sub> 照射容器内の LN<sub>2</sub> の蒸発量は、照射時において未照射時の 2.7 倍と多くなった。
- (4) LHe 照射容器の LHe 液面制御は、容器内の高い液面領域では難しいが低い液面領域では良好に行われた。また、LHe の蒸発量は、照射時において未照射時の 30 倍と多くなった。
- (5) 照射時の蒸発量は計算結果と比較的近い値であった。
- (6) 照射時においても、LN<sub>2</sub> や LHe の供給および液面制御が正常に行われた。

## 謝 辞

本装置の設計に当たり、設定条件から照射容器内の試料の線量率分布について計算していただいた、イオンビーム技術室中村義輝氏に感謝いたします。また、照射による液化ガスの蒸発量の計算において、照射線量から吸収線量への変換方法について助言をいただいた、照射施設課小島拓治氏に感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) 関泰, 飯田浩正, 井手隆裕: JAERI-M 6783 (1976)「超電導マグネットの遮蔽設計の検討(Ⅲ)」
- 2) 山岡仁史: 放射線化学, 40, 26 (1985)
- 3) 宇田川昂, 江草茂則, 貴家恒男, 瀬口忠男, 小野利夫, 川上和夫, 大塚正人, 山本泰, 橋本修, 園田克己, 富田春彦, 田村直幸: JAERI-M 88-047 (1988)「易加工性・耐放射線性繊維強化プラスチックの研究-II」
- 4) 宇田川昂, 貴家恒男, 瀬口忠男, 野島敏幸, 川上和夫, 大塚正人, 津久井啓太郎, 山本泰, 園田克己, 富田春彦: JAERI-M 89-203 (1989)「易加工性・耐放射線性繊維強化プラスチックの研究-III」
- 5) 柏崎茂, 松山茂樹, 八田敏正, 柳生秀樹, 小島拓治, 田中隆一, 森田洋右: 電気学会絶縁材料研究会資料, EIM-88-124, 61 (1988)
- 6) 小林俊一:「物理工学実験 7 低温技術」東京大学出版会 (1986)
- 7)「物理測定技術 7 極端条件技術」朝倉書店 (1967)
- 8) J. H. Hubbell: J. Appl. Radiat. Isot: 33, 1269 (1982)
- 9) T. G. OWe Berg: National Aero nautics and Sape Administration Special Report No. 0716-19 (01) sp
- 10) 武久正昭, 吉田健三, 川上和市郎, 瀬口忠男, 田中隆一, 渡辺博正, 綿貫孝司, 菊池栄助: JAERI-M, 6363 (1976)「液体窒素使用低温照射実験に伴うオゾン分解爆発とその防止対策」

Table 1 Effect of dosimetry in irradiation vessel for liquid nitrogen.

	A. dosimetry by empty in vessel	B. dosimetry by water into vessel	B/A	C. converted dose rate
No. 1	$4.15 \times 10^6 \text{R/h}$	$3.23 \times 10^6 \text{R/h}$	0.78	$3.4 \times 10^6 \text{R/h}$
No. 2	$4.18 \times 10^6 \text{R/h}$	$3.33 \times 10^6 \text{R/h}$	0.80	$3.5 \times 10^6 \text{R/h}$
No. 3	$4.45 \times 10^6 \text{R/h}$	$3.88 \times 10^6 \text{R/h}$	0.87	$4.0 \times 10^6 \text{R/h}$
No. 4	$4.19 \times 10^6 \text{R/h}$	$3.44 \times 10^6 \text{R/h}$	0.82	$3.6 \times 10^6 \text{R/h}$
Max/Min	0.93	0.83		0.85

Table 2 Effect of dosimetry in irradiation vessel for liquid helium.

	A. dosimetry by empty in vessel	B. dosimetry by methanol into vessel	B/A	C. converted dose rate
No. 1	$3.08 \times 10^6 \text{R/h}$	$2.87 \times 10^6 \text{R/h}$	0.93	$3.0 \times 10^6 \text{R/h}$
No. 2	$3.07 \times 10^6 \text{R/h}$	$2.88 \times 10^6 \text{R/h}$	0.94	$3.0 \times 10^6 \text{R/h}$

Table 3 Effect of measurement in evaporation rate (ℓ/h) to liquid helium.

setting point (%) * <sup>1</sup>	30~35	35~40	45~50
actual traversing range (%) * <sup>1</sup>	32~35	38~41	52~54
unirradiation	0.28	0.29	5.9
irradiation * <sup>2</sup>	8.4	9.2	12.6

\*1: percentage with liquid levelmeter length (20inches) of liquid helium.

Table 4 Effect of calculation and measurement on evaporation rate of liquid nitrogen and liquid helium in irradiation vessel.

		irradiatio vessel for liquid nitrogen	irradiatio vessel for liquid helium	
		liquid nitrogen	liquid nitrogen	liquid helium
initial necessary quantity of liquid gas	calculation	7.4 ℓ/h	5.8 ℓ/h	4.8 ℓ/h
	measurment	9.0 ℓ/h	—	—
evaporation rate of liquid gas in natural	calculation	99 ml/h	144ml/h	303ml/h
	measurment	375 ml/h	550ml/h	0.3 ℓ/h
evaporation rate of liquid gas in irradiation	calculation	1.4 ℓ/h	1.2 ℓ/h	16.4 ℓ/h
	measurment	1.0 ℓ/h	—	8.4~9.2 ℓ/h



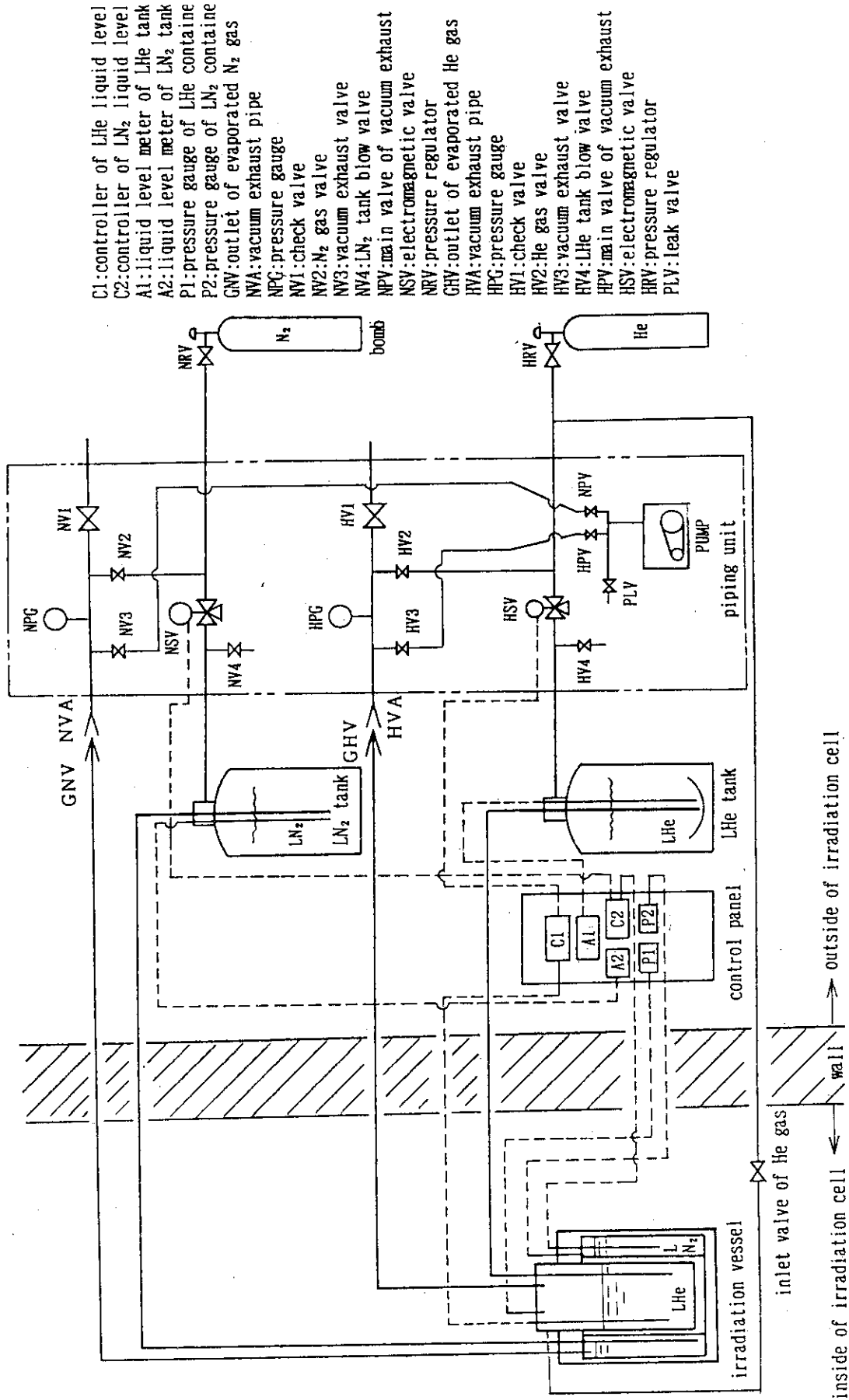


Fig. 1 Flow sheet of equipment for irradiation at liquid helium temperature.

A2: liquid level meter of LN<sub>2</sub> tank  
 C2: controller of LN<sub>2</sub> liquid level  
 P2: pressure gauge of irradiation vessel for LN<sub>2</sub>  
 GNV: outlet of evaporated N<sub>2</sub> gas  
 NVA: vacuum exhaust pipe  
 NPG: pressure gauge  
 NV1: check valve  
 NV2: N<sub>2</sub> gas valve  
 NV3: vacuum exhaust valve  
 NV4: LN<sub>2</sub> tank blow valve  
 NPV: main valve of vacuum exhaust  
 NSV: electromagnetic valve  
 PLV: leak valve  
 NRV: pressure regulator

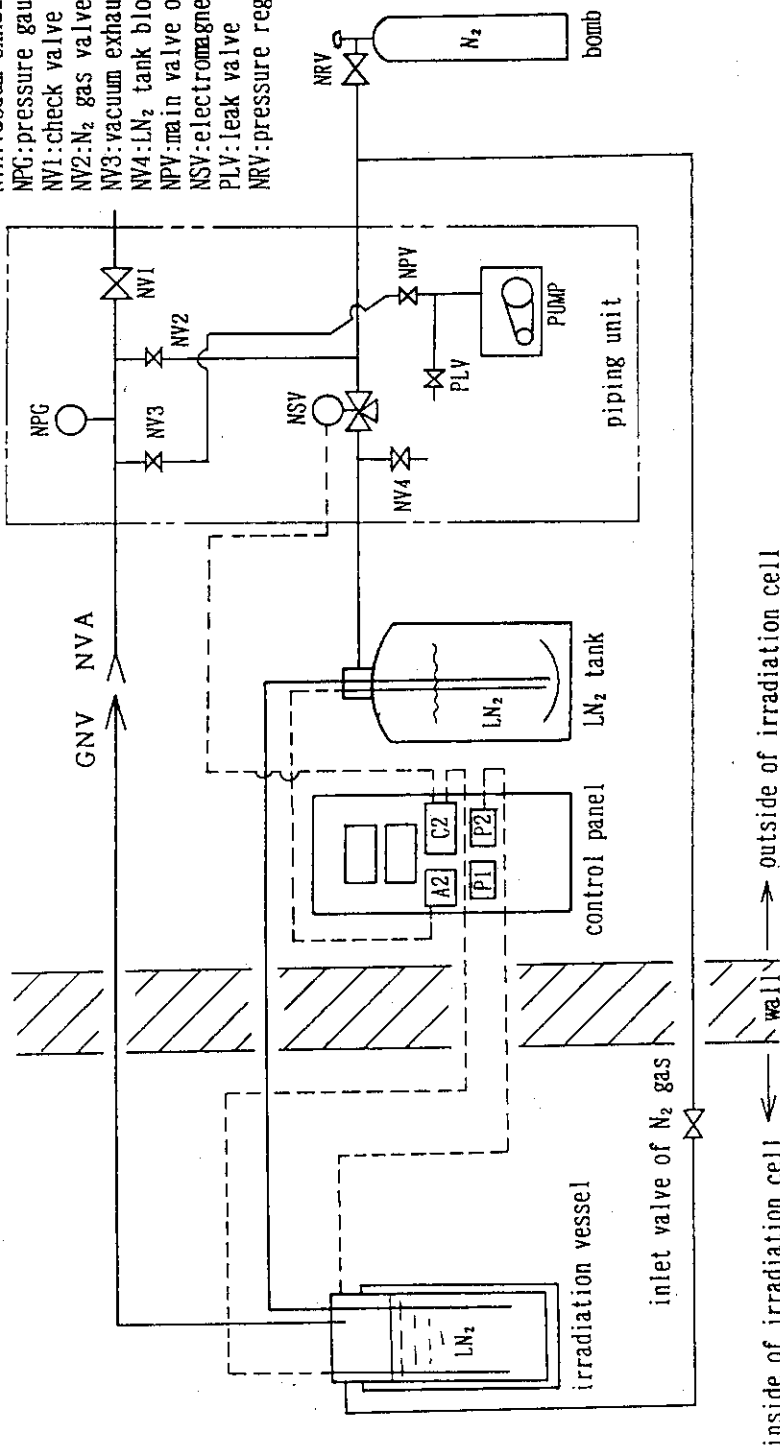


Fig. 2 Flow sheet of equipment for irradiation at liquid nitrogen temperature.

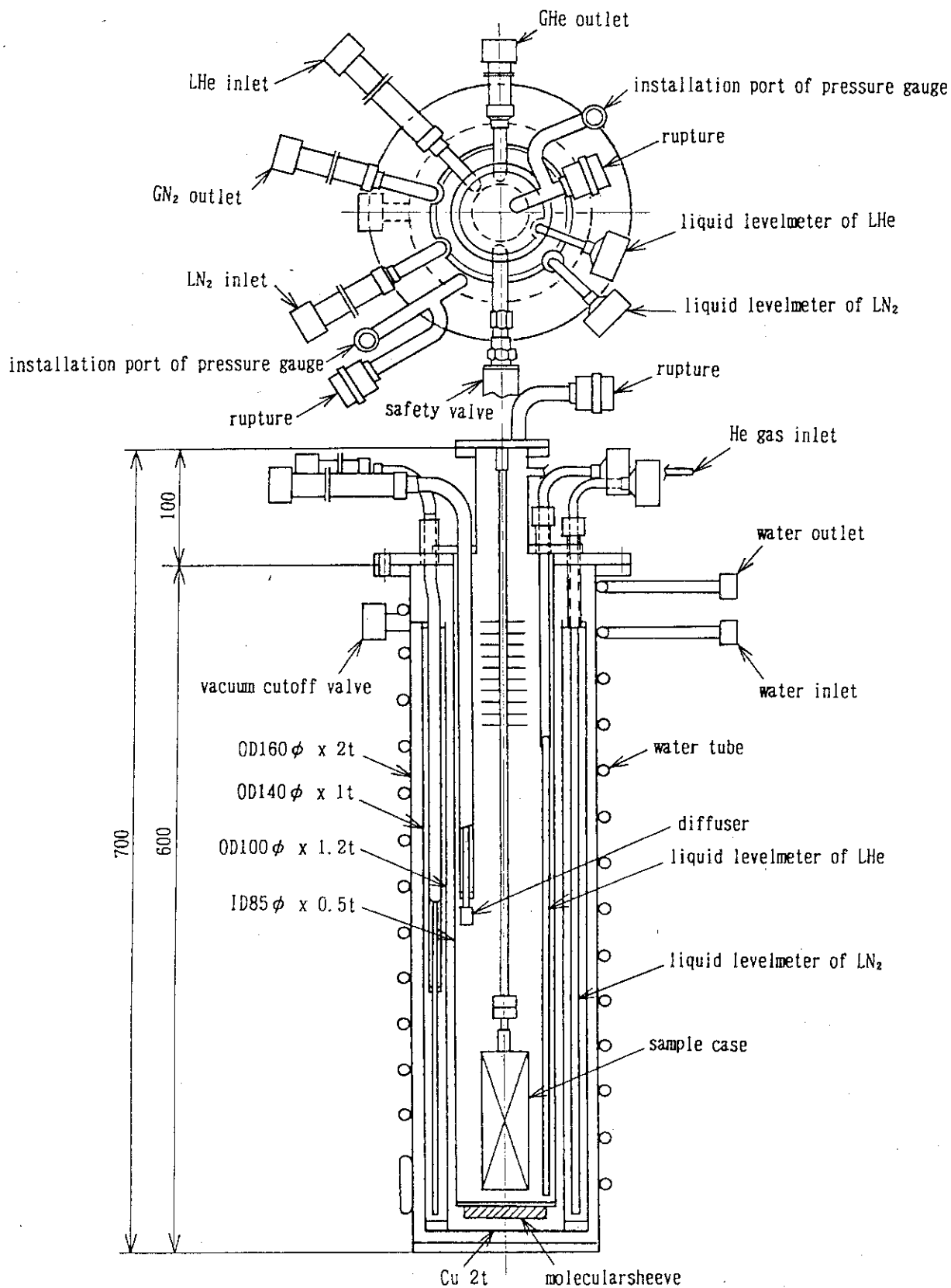


Fig. 3 Sketch of irradiation vessel for liquid helium.

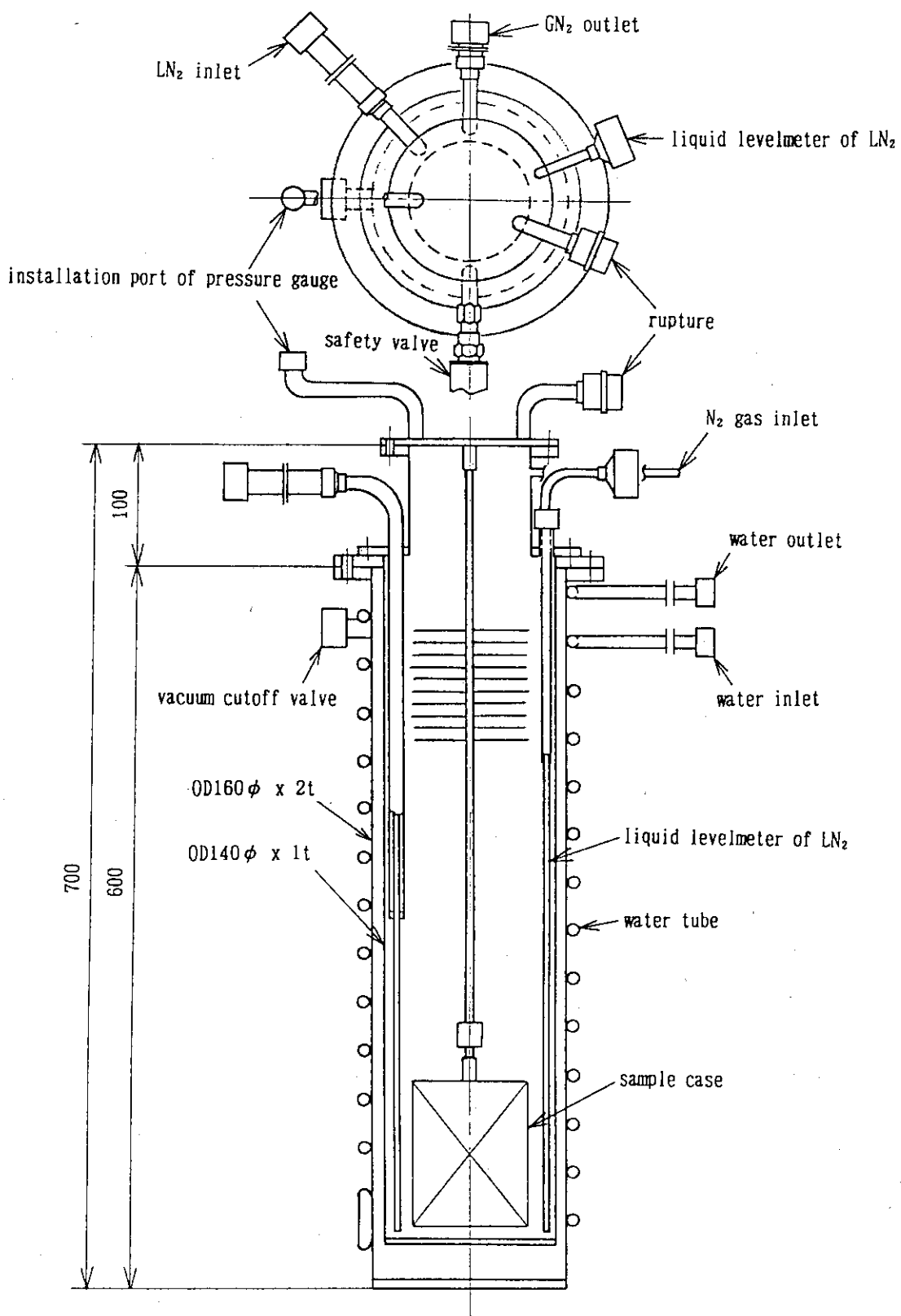


Fig. 4 Sketch of irradiation vessel for liquid nitrogen.

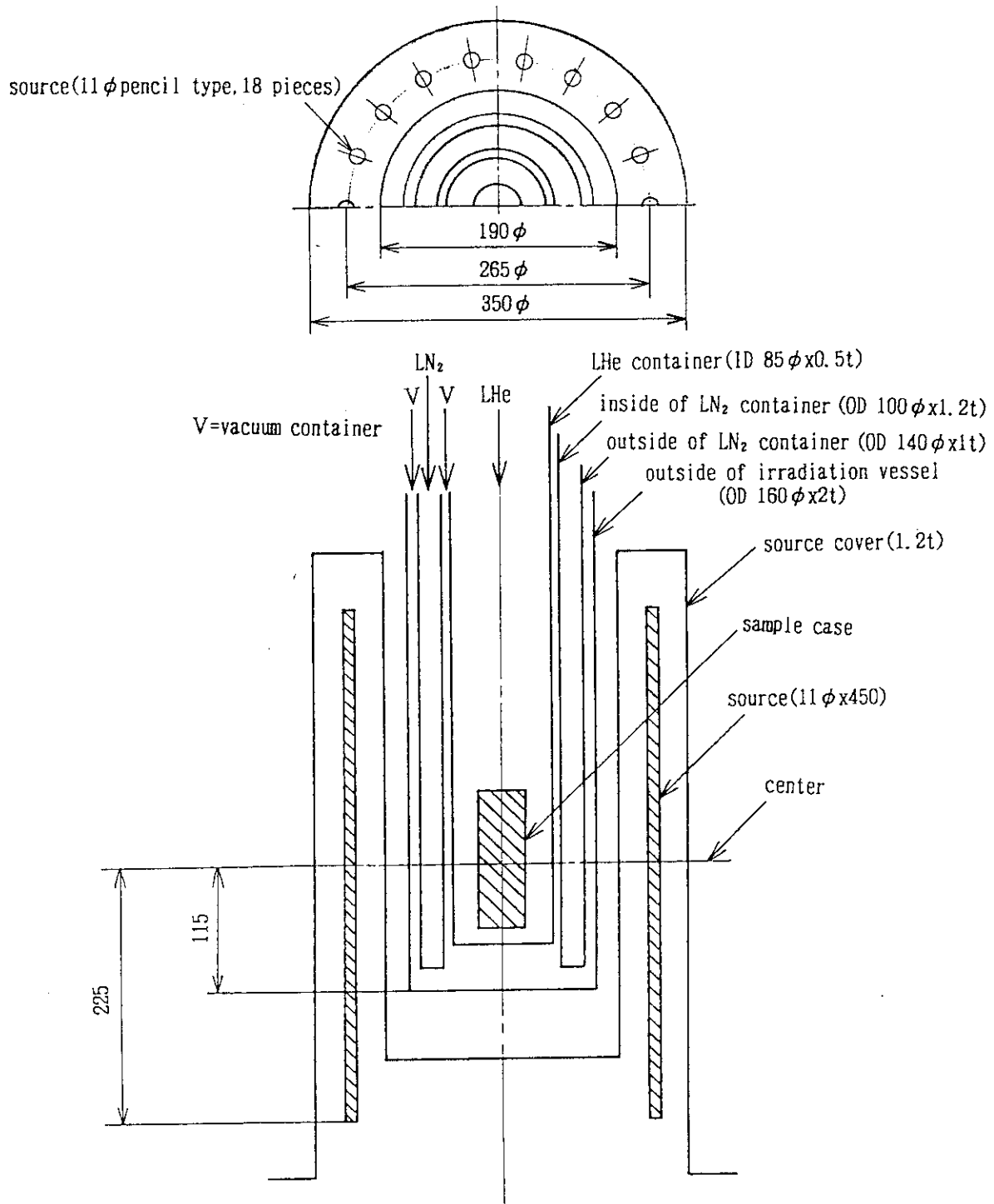


Fig. 5 Connection between irradiation vessel and source.

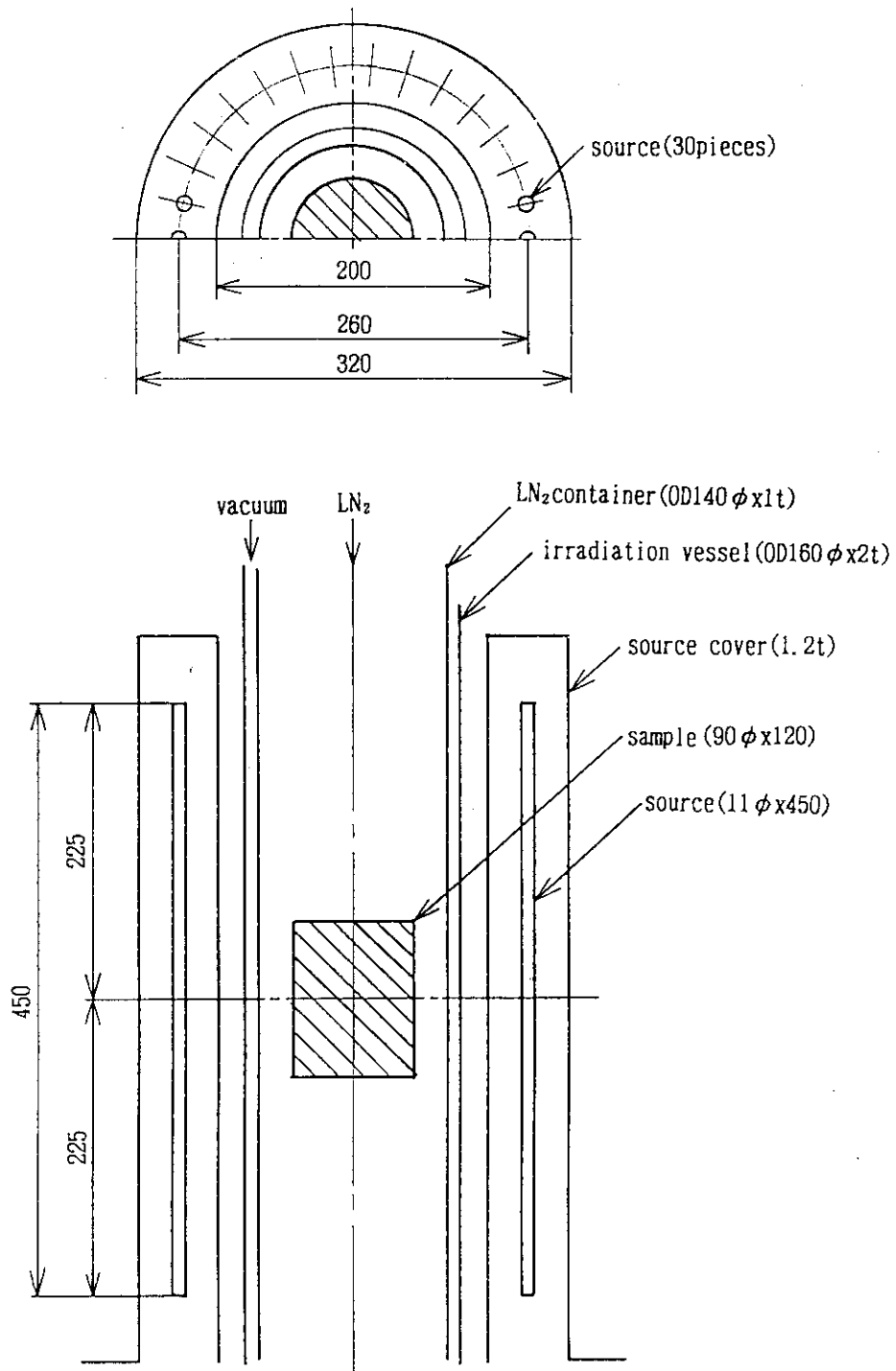


Fig. 6 Connection between irradiation vessel for liquid nitrogen and source on calculation in distribution of dose rate.

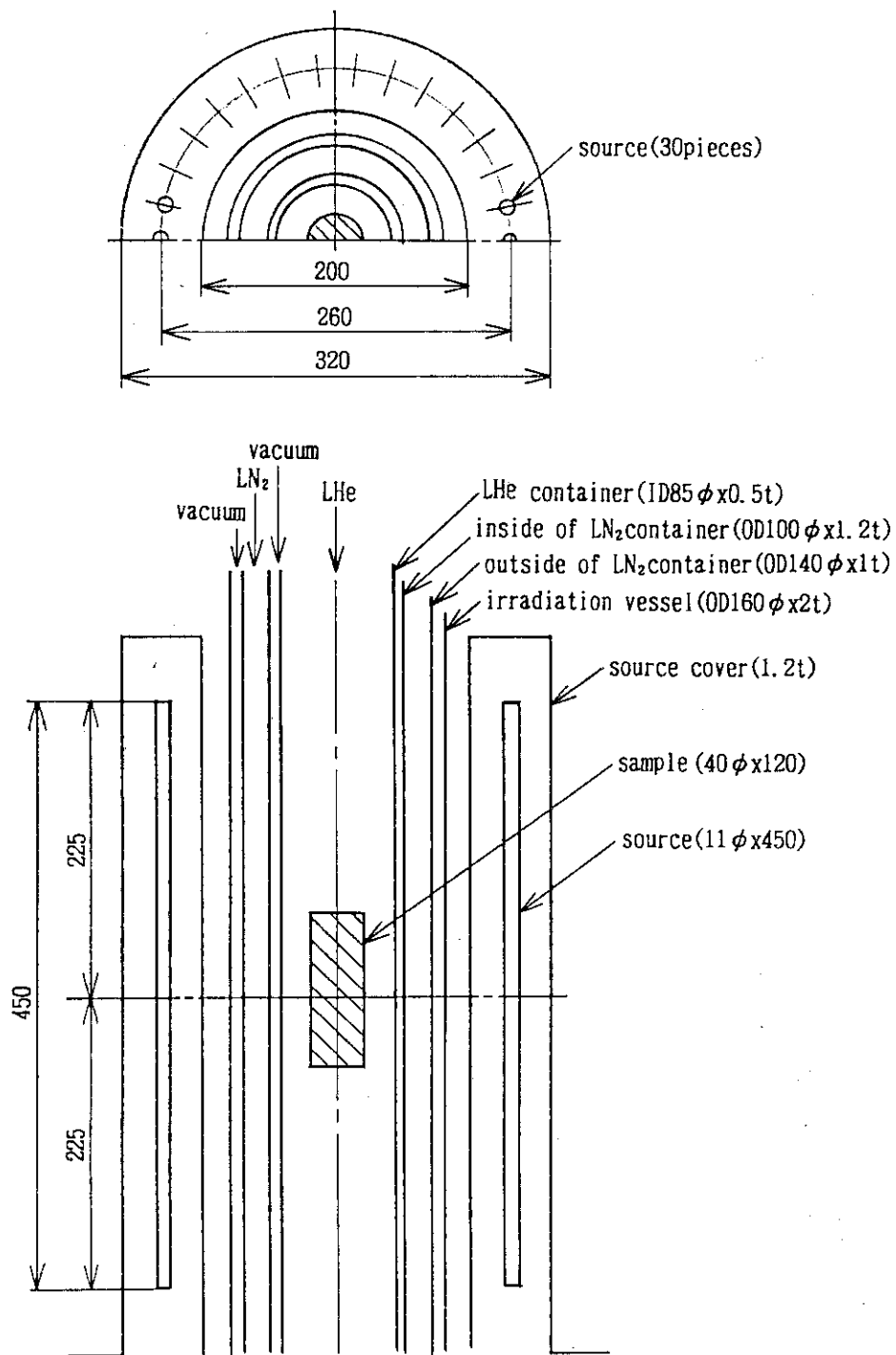


Fig. 7 Connection between irradiation vessel for liquid helium and source on calculation in distribution of dose rate.

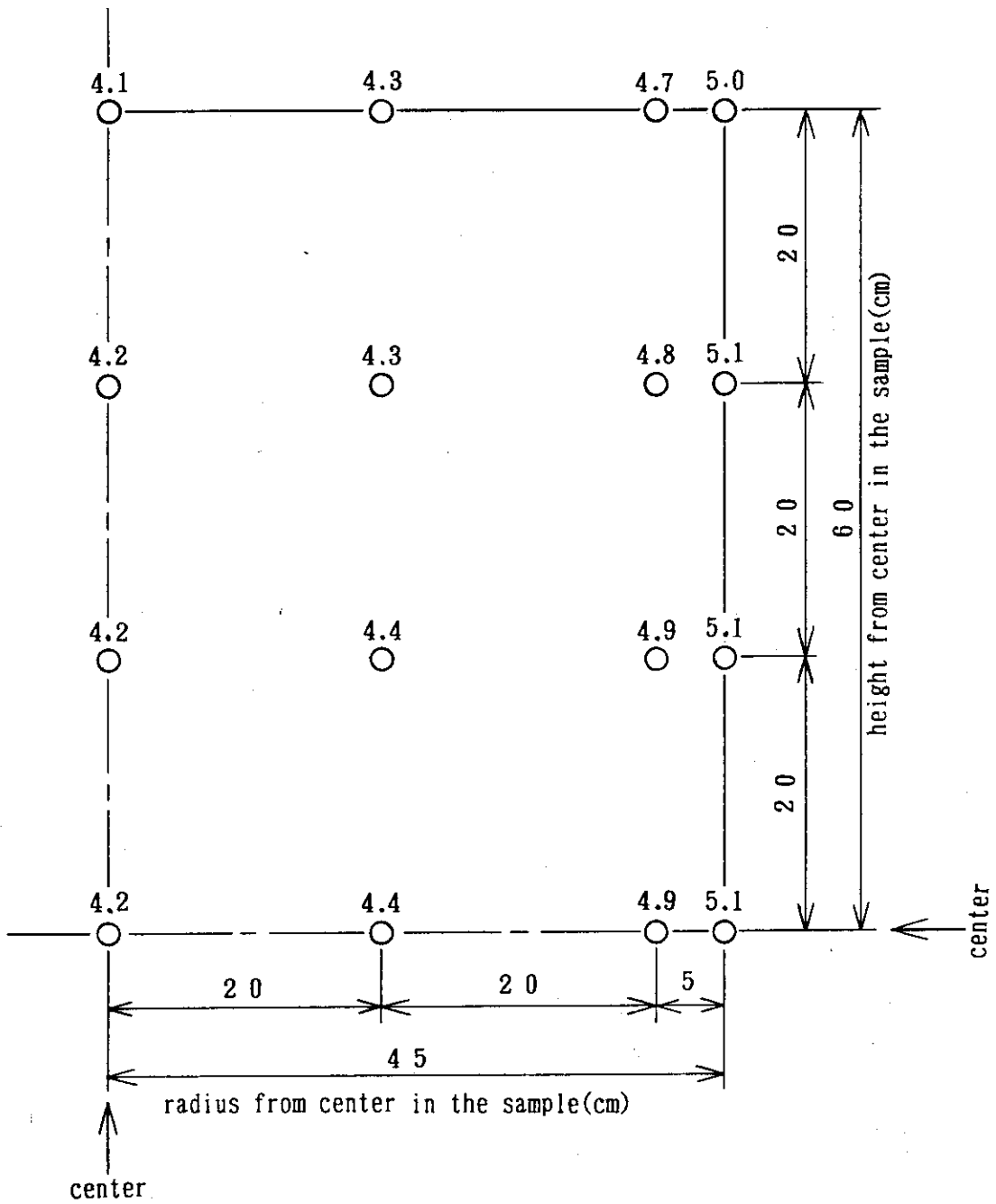


Fig. 8 Effect of calculation in dose rate (MR/h) on irradiation vessel for liquid nitrogen.



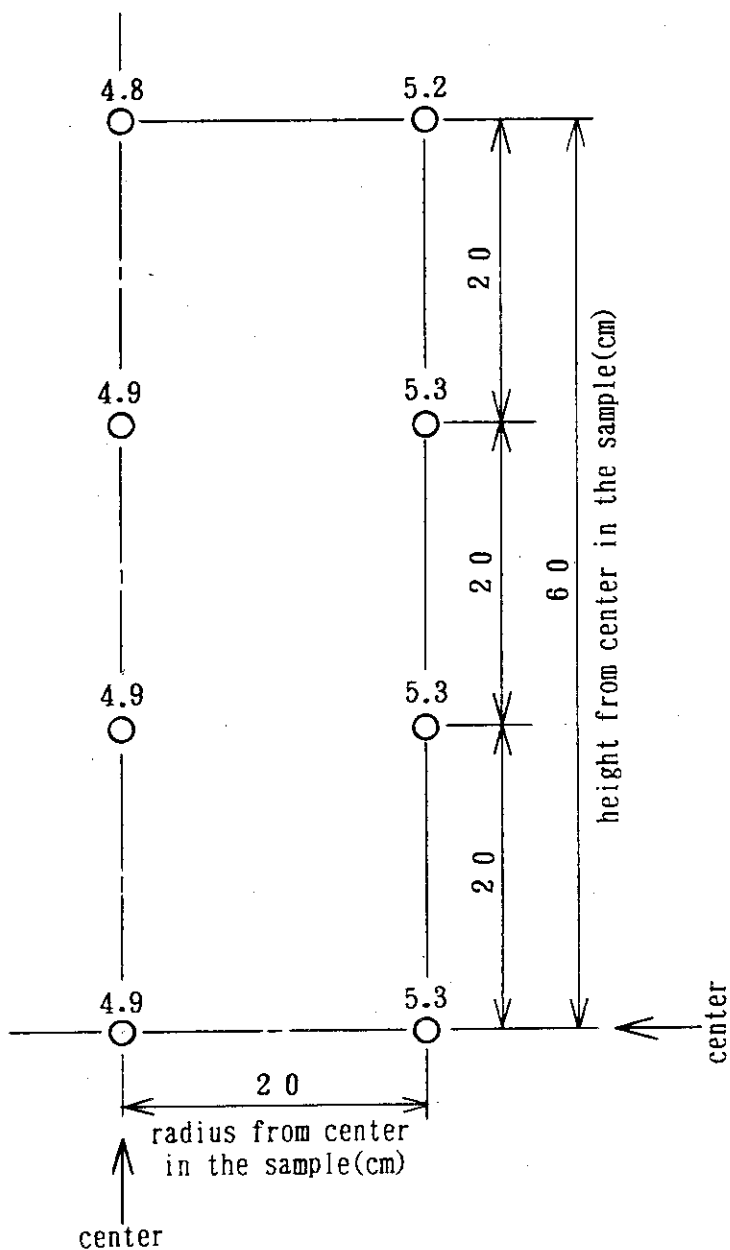
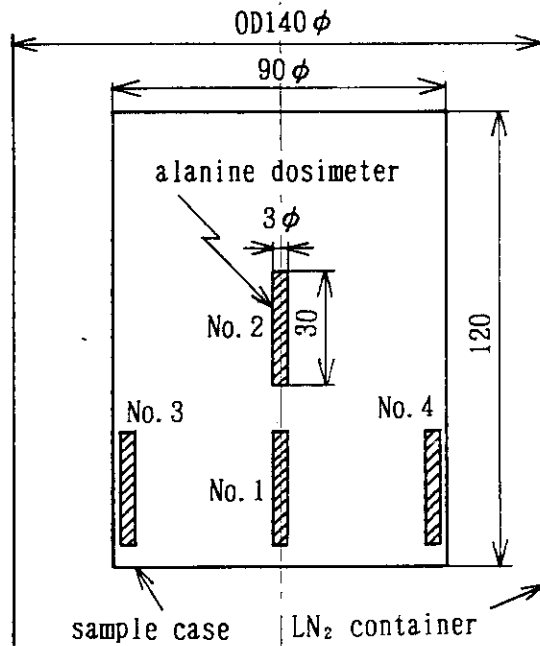
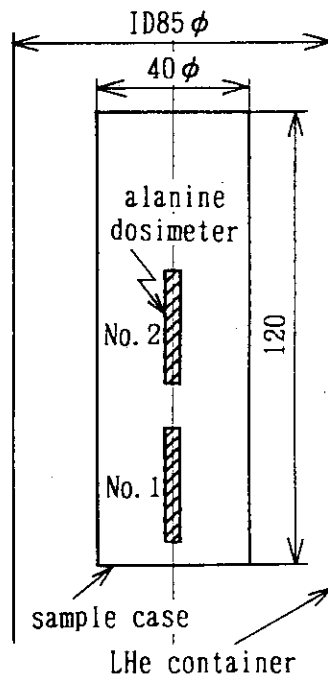


Fig. 9 Effect of calculation in dose rate (MR/h) on irradiation vessel for liquid helium.



(A) irradiation vessel for liquid nitrogen



(B) irradiation vessel for liquid helium

Fig. 10 Fixed position of alanine dosimeter in irradiation vessel for liquid nitrogen and liquid helium.

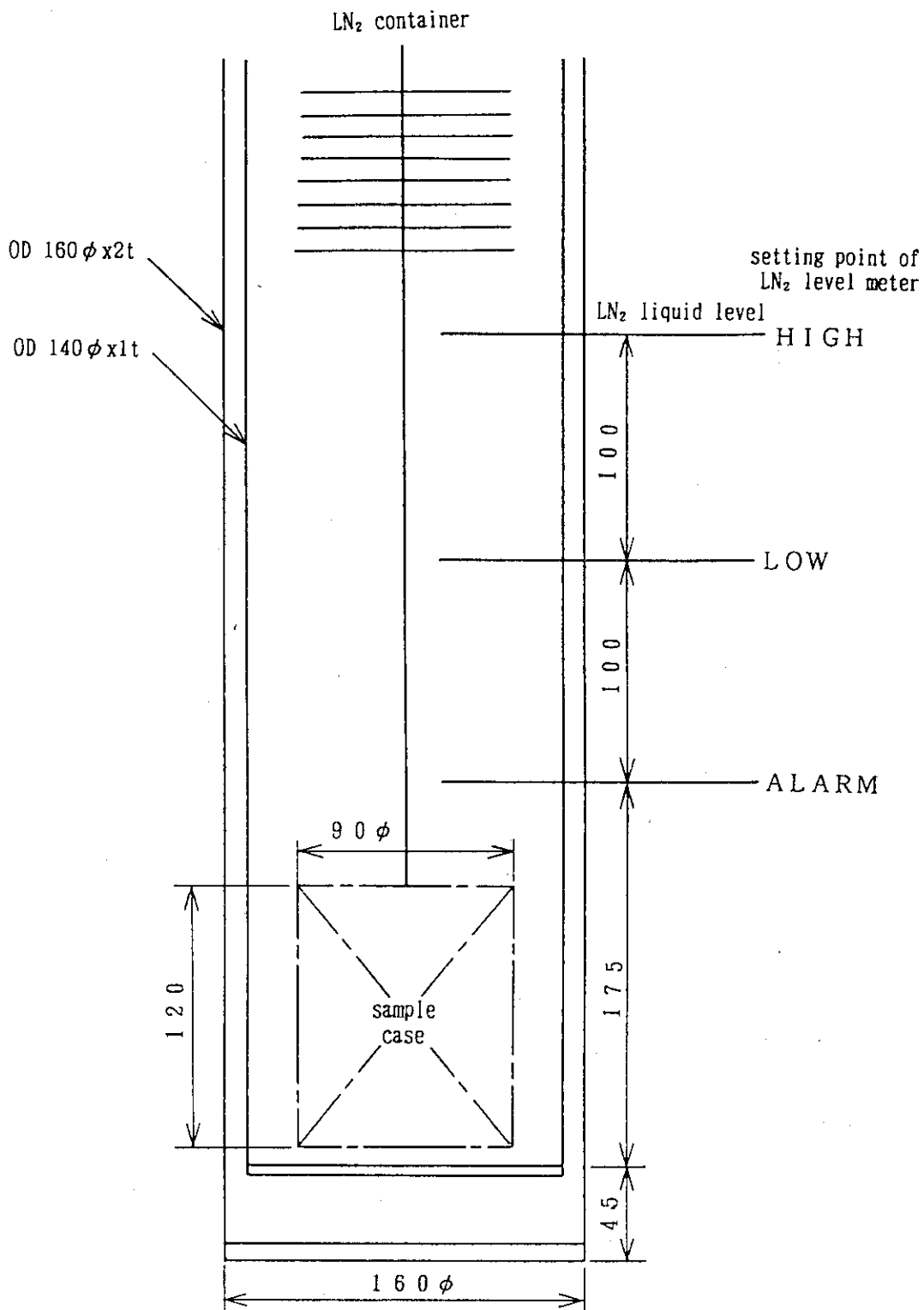
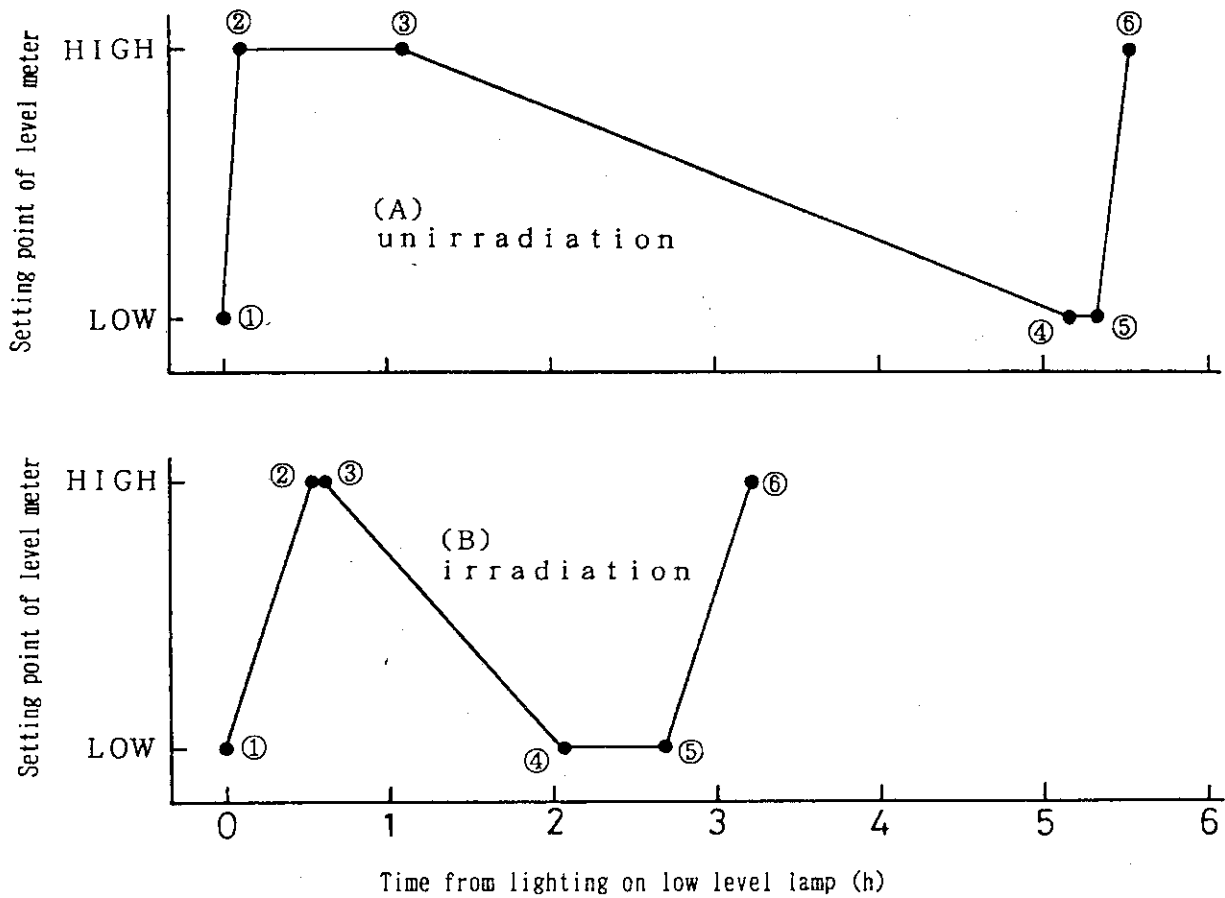


Fig. 11 Relationship between liquid level and irradiation vessel for liquid nitrogen.



- ① lighting on low level lamp
- ② lighting on high level lamp
- ③ high level lamp for putting out lights
- ④ low level lamp for putting out lights
- ⑤ lighting on low level lamp
- ⑥ lighting on high level lamp

Fig. 12 Effect of controll in liquid level of liquid nitrogen.

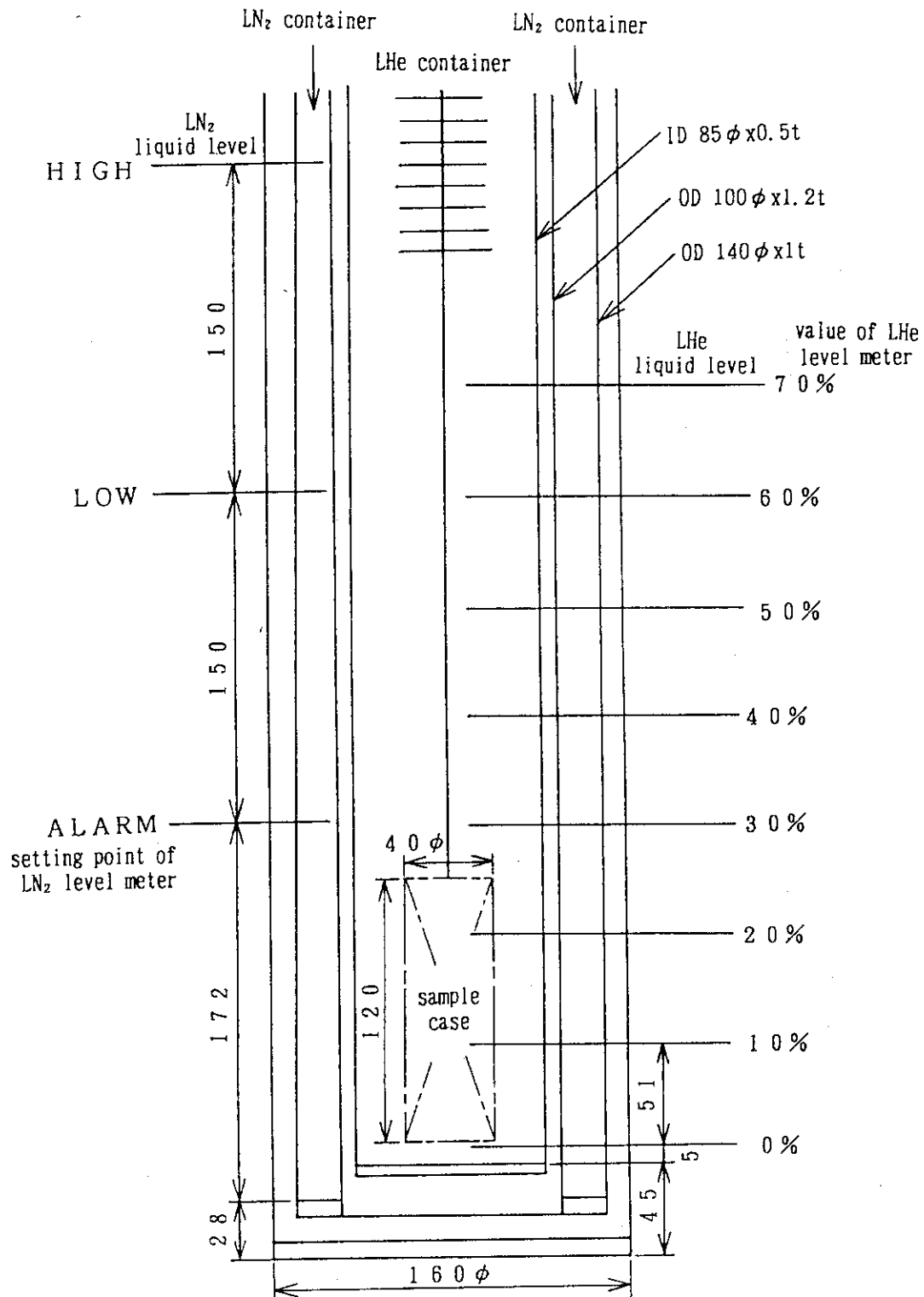
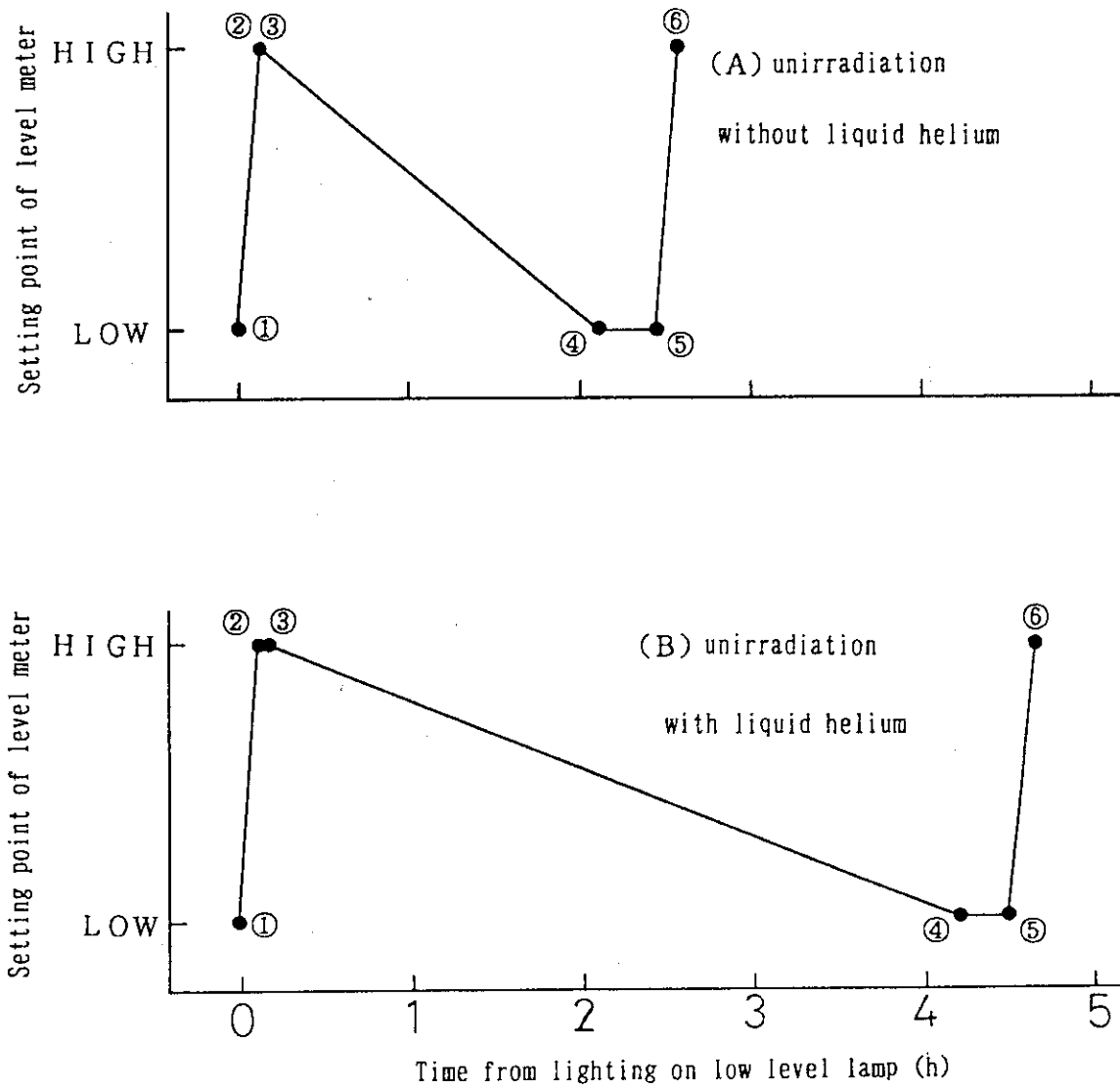


Fig. 13 Relationship between liquid level and irradiation vessel for liquid helium.



- ① lighting on low level lamp
- ② lighting on high level lamp
- ③ high level lamp for putting out lights
- ④ low level lamp for putting out lights
- ⑤ lighting on low level lamp
- ⑥ lighting on high level lamp

Fig. 14 Effect of controll in liquid level of liquid nitrogen.

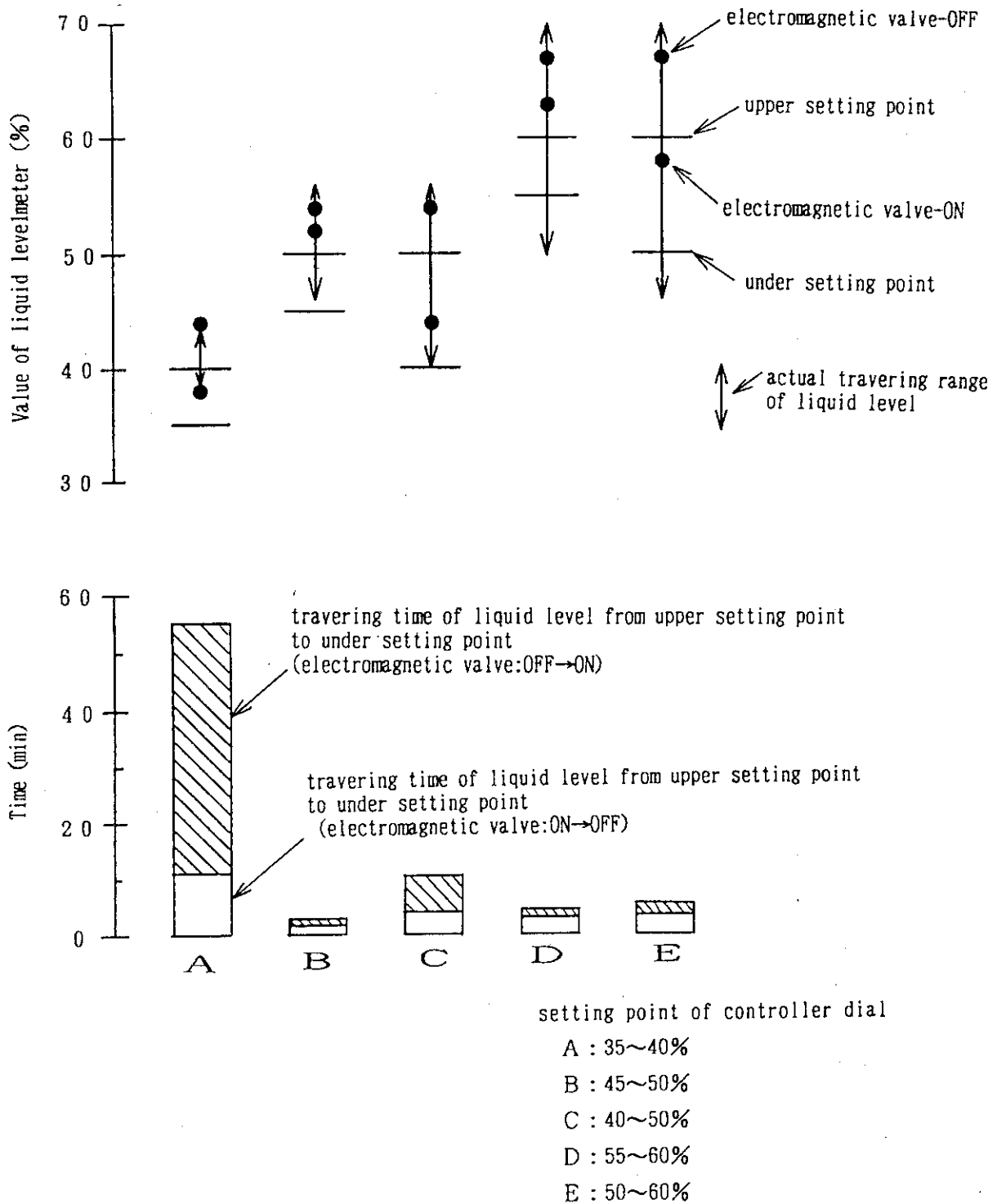


Fig. 15 Effect of controll in liquid level of liquid helium to unirradiation without the samples.

## 付 録

## 線量率の計算方法

容器内試料中の線量率分布を計算するために、本文中の Fig. 7 にもとづいて作成した計算モデルの平面図を Fig. A. 1 に、断面図を Fig. A. 2 に示す。図からも明かなように、線量率の計算は結局多重円筒吸収体の透過・減衰の問題に帰着する。照射試料内高さ方向の線量率分布は、照射容器底面の構造材による若干の影響が考えられるが、試料中心位置においては棒状線源からこの部分を透過するガンマ線の効果は、簡単な幾何学的検討から約 3% 以下の寄与と見積もられること、試料自身も直径が 4 cm と小さいので、同様に円筒体上面および下面の境界効果はほとんど無視できると考えられること、から計算モデルは無限長円筒吸収体の配置とした。また線源ハウジングを含む棒状線源部分は、円筒吸収体と線状線源の組み合わせに置換した。さらにこのモデルでは、棒状線源の本数に比較して試料の大きさが小さいので、試料内線量率分布の半径方向の角度依存性は非常に小さいと考えられるため、線量率計算点 P は横軸上のみを対象とした。点 P における線量率  $X_p$  (R/h) は、単位線状線源  $S_i$  からの線量率の寄与を線源本数全体にわたって積算すれば求められ、以下の式で表せる。

$$X_p = \Gamma \cdot \frac{C_a}{2L_s} \cdot 2 \sum_{i=1}^{15} \sum_{j=1}^2 \int_0^{\theta_j} \frac{\{\exp(-b_i \cdot \sec \theta)\} \cdot B(b_i \cdot \sec \theta)}{d_i} d\theta \quad (1)$$

ここで  $\Gamma$  は照射線量率定数、 $C_a$  は棒状線源 1 本当たりの放射能 (Ci)、 $L_s$  は線状線源の有効長 (cm)、 $\theta$  は計算点 P から  $i$  番目の線状線源を見込む角度 (rad)、 $d_i$  は  $i$  番目の線源と計算点 P との水平距離であり、さらに  $d_i$  は

$$d_i = (r_s^2 + R^2 - 2R \cdot r_s \cos \phi_i)^{1/2} \quad (2)$$

となる。 $R$  は試料中心 O と計算点 P との水平距離 (cm)、 $r_s$  は線源が配置されている円の半径 (cm)、 $\phi_i$  は  $i$  番目の線源と線分 OP とのなす角度 (rad) である。また  $\theta$  の上限角度  $\theta_1$  と下限角度  $\theta_2$  は、次式で簡単に表せる。

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{L_s - h}{d_i} \right) \quad (3)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left( \frac{L_s + h}{d_i} \right) \quad (4)$$

ここで  $h$  は線源 (試料) 中心からの高さ (cm) である。

線量ビルドアップ係数  $B(b_i \cdot \sec \theta)$  に関しては、今回の計算モデルでは吸収体はステンレスと冷媒を含む試料部分の 2 つに大別されると考えられるが、それぞれ吸収体の平面透過厚さとその材料の線減弱係数との積 (Relaxation length:  $R_x$ ) の総和  $b_i$  はおよそ 1~2 程度の値であるため、多重層の取扱いは行わず単一層での対応とした。また試料はガラスエポキシ等の複合材料が想定されたため、この部分についてのビルドアップ係数は、密度が類似しているガラスの



値、ステンレスについては鉄の値を用いることとした。

ビルドアップ係数は、文献<sup>1)</sup>でガラスと鉄について与えられている図を基に、平均自由行路が約2程度までのデータから、最小2乗法を用いて2次の近似式を求めた。またビルドアップ係数は、対象とする計算点に対してステンレスおよび試料部分での減衰の割合を比較し、支配的な材料の式を選択するようにした。i番目の線源からの吸収体全体の計算に対して、ステンレス部分の $R_x$ の総和を $b_{SUSi}$ 、試料部分（液体窒素および液体ヘリウム含む）のそれを $b_{sai}$ に分離し、前掲 Fig. A.1 を基にして整理すると、

$$b_{SUSi} = \mu_{SUS} \cdot (t_a + \sum_{n=1}^5 t_{ni}) \quad (5)$$

$$b_{sai} = \mu_{LHe} \cdot t_{LHei} + \mu_{LN2} \cdot t_{LN2i} + \mu_{sa} \cdot t_{sai} \quad (6)$$

$$b_i = b_{SUSi} + b_{sai} \quad (7)$$

で表現される。 $\mu_{SUS}$ 、 $\mu_{LHe}$ 、 $\mu_{LN2}$ および $\mu_{sa}$ は、それぞれステンレス、液体ヘリウム、液体窒素および試料の線減弱係数 ( $\text{cm}^{-1}$ ) であり、同様に添字付きの  $t$  はおのおのの円筒吸収体の平面透過厚さ (cm) を示す。

したがって鉄およびガラスに対する線量ビルドアップ係数をそれぞれ $B_{IRi}$ および $B_{GLi}$ とすると、これらはさらに次式で与えられる。

$$B_{IRi} = 0.9937 + 0.6311 \cdot x - (8.571 \times 10^{-3}) \cdot x^2 (b_{SUSi} > b_{sai}) \quad (8)$$

$$B_{GLi} = 0.9974 + 0.6843 \cdot x + (2.586 \times 10^{-3}) \cdot x^2 (b_{sai} > b_{SUSi}) \quad (9)$$

$$x = b_i \cdot \sec \theta$$

なお、線量率分布の計算で使用した定数や係数等の値は、Table A.1 に示した。線減弱係数の値は、文献<sup>2)</sup>で与えられている表を用いて、コバルト-60ガンマ線エネルギー1.25 MeVに、ラグランジェ補間して求めた。計算で使用したFORTRANプログラムは、直線と円の交差の判定および交点の位置座標算出、吸収体における平面透過距離の算出、線量ビルドアップ係数の計算、積分上下限角度の算出および数値積分などの部分については、全てサブルーチン化して同種類の線量計算に適応できるよう配慮した。数値積分部分のプログラムは、ガウス積分(10点法)<sup>3)</sup>を採用することとし、数値計算はmicroVAX-IIを用いて実行した。

#### 参考文献

- 1) Furuta Y., Tsuruo A. et al.: Nucl. Sci. Eng., vol 25, p85-92 (1966)
- 2) Storm E. and Israel H. I.: LA-3753 (1967)
- 3) 磯田和男, 大野豊: FORTRANによる数値計算ハンドブック: オーム社 (1974)

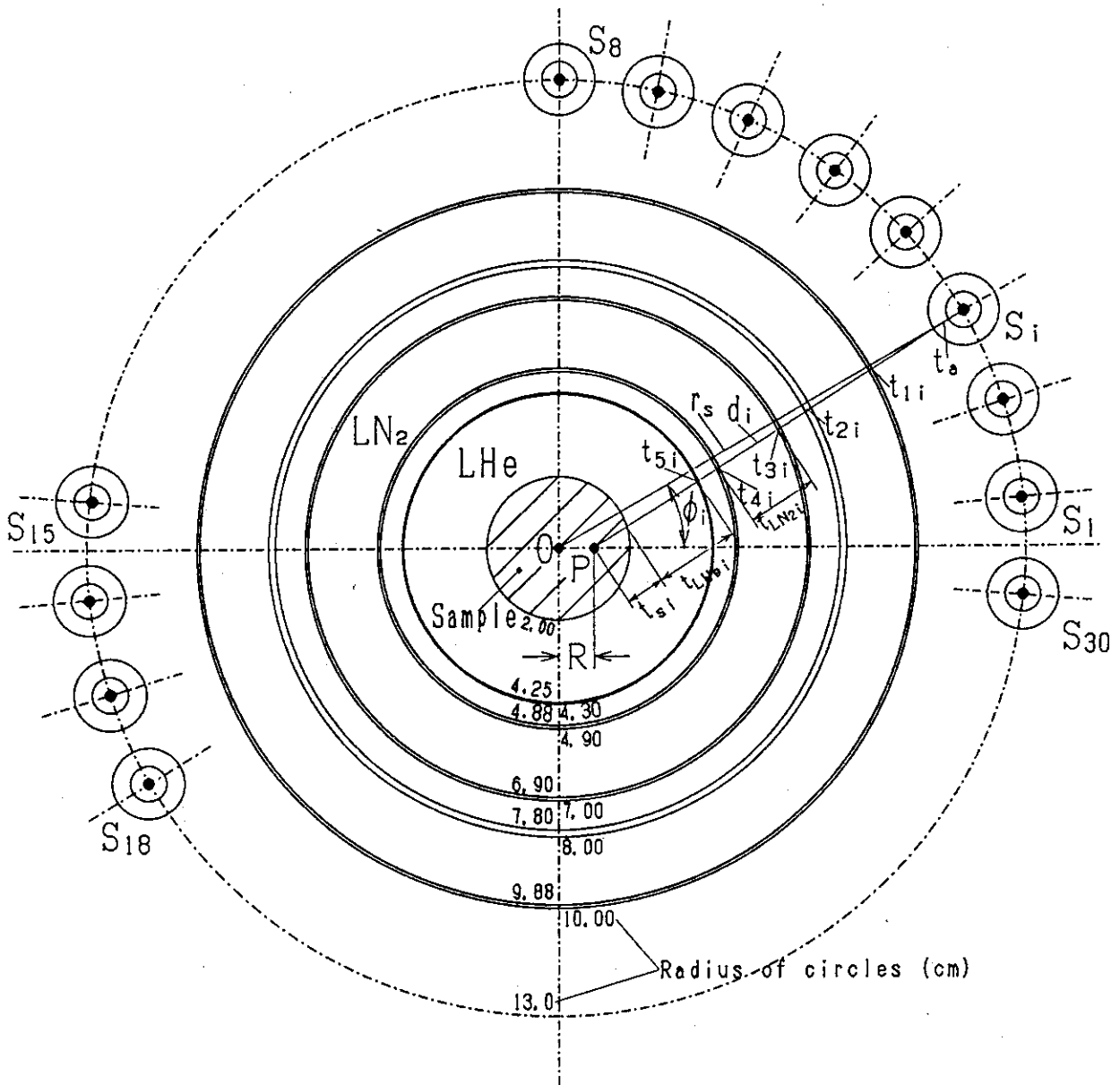


Fig. A.1 Calculation model (plane figure).

Table A.1 Constants and coefficients for exposure rate calculation.

Material	Linear attenuation coefficient (cm <sup>-1</sup> )
Stainless steel	0.424
Sample	0.124
Liquid nitrogen	0.0461
Liquid helium	0.00716

Exposure rate constant ( $\Gamma$ )	$1.3 \times 10^4$ (R/H)
Effective half length of rod source ( $L_s$ )	20.75 (cm)
Activity of single rod source ( $C_s$ )	6,000 (Ci)
Number of rod sources	30 (pieces)
Radius of circle on positioned source ( $r_s$ )	13.0 (cm)
Self absorption thickness of source assembly ( $t_s$ )	0.5 (cm)

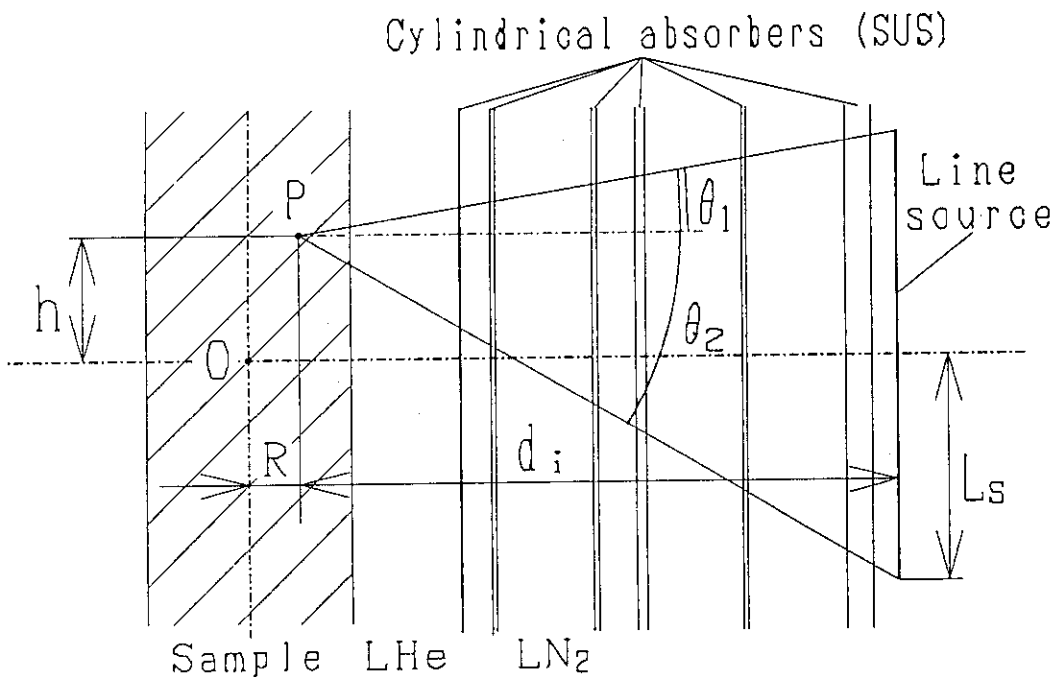


Fig. A.2 Calculation model (sectional plan).