

JAERI-Tech  
2003-004



JP0350058



ITER NBI保守用セシウム除去装置の概念設計

2003年 3月

岡 潔・柴沼 清

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

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

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

## ITER NBI 保守用セシウム除去装置の概念設計

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

岡 潔・柴沼 清

(2003 年 1 月 16 日 受理)

国際熱核融合実験炉 (ITER) のためのプラズマ加熱装置の 1 つである中性粒子入射装置 (NBI 装置) では、安定した負イオンを発生させるため、セシウムの使用が要求されている。しかしながら、NBI 装置を長時間運転すると、セシウムが電極を支持する絶縁碍子に付着して絶縁抵抗を低下させるため、定期的な除去と清掃が要求される。一方、NBI 装置は、D-T 反応のプラズマからの中性子によって放射化され、ガンマ線線量率が 1Sv/hr であり、遠隔操作を考慮したセシウム除去シナリオと装置の検討が要求される。本レポートでは、セシウム除去手順とレーザアブレーション技術を用いたセシウム除去装置の概念設計を行い、その適用性を示した。

---

本報告は、ITER 工学 R&D の一環として実施した。設計タスク (番号 : D418-J-3) の結果を取りまとめたものである。

那珂研究所 (東海駐在) : 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

## Conceptual Design of Cesium Removal Device for ITER NBI Maintenance

Kiyoshi OKA and Kiyoshi SHIBANUMA

Department of Fusion Engineering Research  
(Tokai Site)

Naka Fusion Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 16, 2003)

Cesium is required in order to generate a stable negative ion of hydrogen in an ion source of the neutral beam injector (NBI), which is one of the plasma-heating devices for International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER). After long time operation of the NBI, the cesium deposits to the insulators supporting the electrode. Due to the deterioration of the insulation resistance, the continuous operation of the NBI will be difficult. In addition, the NBI device is activated by neutrons from D-T plasma, so that periodic removal and cleaning of the cesium on the insulators by remote handling is required. A study of the cesium removal scenario and the device is therefore required considering remote handling. In this report, a cesium removal procedure and conceptual design of the cesium removal device using laser ablation technique are studied, and the feasibility of the laser ablation method is shown.

Keywords : ITER, Neutral Beam Injection, NBI, Cesium Removal, Laser Ablation,  
Remote Maintenance

---

This work is conducted as ITER Technology R&D and this report corresponds to ITER Design Task Agreement (D418-J-3).

## 目 次

1.	はじめに	1
2.	設計条件	1
3.	セシウム除去手順の概念検討	1
3.1.	セシウム除去手順	2
3.2.	セシウム除染用装置による作業時間	4
4.	セシウム除染用装置の概念設計	4
4.1.	イオン源碍子部への除染用装置の適用検討	4
4.1.1.	イオン源高電圧(HV)線と冷却配管周り	4
4.1.2.	イオン源を被う静電シールド	5
4.1.3.	NBIセル内壁とイオン源間エリア	5
4.1.4.	碍子周りのスペース	5
4.2.	セシウム除染用装置の設計	5
4.2.1.	システム構成	5
4.2.2.	レーザー発振器の選定	6
4.2.3.	光伝送系の検討	6
4.2.4.	除去ツールの検討	7
4.2.5.	駆動機構によるレーザービーム光の制御方法の検討	8
4.3.	セシウム除染用機器の仕様	10
5.	NBI装置構造の改良の提案	11
5.1.	NBIセル内への除去ツール導入スペース	12
5.2.	高電圧(HV)線・冷却配管導入部碍子のセシウム除去作業	12
5.3.	セシウムの除去対象範囲	12
5.4.	コロナシールド内部へのセシウム流入	13
5.5.	除去ツール取付け状態とセシウム除去の確認	13
6.	まとめ	13
6.1.	成果	13
6.2.	今後の課題	14
6.2.1.	セシウム除去用装置の設計課題	14
6.2.2.	セシウム除去用装置の適用におけるR&D項目	14
	謝 辞	14

## Contents

1. Introduction	1
2. Design Conditions	1
3. Conceptual Study of a Cesium Removal Procedure	1
3.1. Cesium Cleaning Procedure	2
3.2. Work Time with a Device for Cesium Decontamination	4
4. Conceptual Study of a Device for Cesium Decontamination	4
4.1. Study of Application of a Device for Decontamination to an Ion Source Insulator	4
4.1.1. Ion Source High Voltage (HV) Line and a Cooling Pipe Arrangement	4
4.1.2. The Electric Shield around Covers Up an Ion Source	5
4.1.3. Space between NBI Cell Wall and Ion Source	5
4.1.4. Insulator Circumference Space	5
4.2. Design of a Cesium Decontamination Device	5
4.2.1. System Configuration	5
4.2.2. Selection of Laser Oscillator	6
4.2.3. Study of Optical Transmission (Optical) System	6
4.2.4. Study of Cleaning Tool	7
4.2.5. Study of a Control Method of a Laser Beam Light by Drive Mechanism	8
4.3. A Specification of a Device for Cesium Decontamination	10
5. Extraction of Problems and Improvement of Construction	11
5.1. Cleaning Tool Introduction Space in NBI Cell	12
5.2. Cesium Cleaning Method around HV Cables	12
5.3. Cesium Cleaning Area	12
5.4. Cesium Inflow into Corona Shield	13
5.5. Confirmation of Cleaning Tool Installation and End of Cleaning	13
6. Conclusion	13
6.1. Results	13
6.2. Future Issues	14
6.2.1. Design Subjects of a Cesium Removal Tool	14
6.2.2. R&D Subjects of a Cesium Removal Tool	14
Acknowledgments	14

## 1. はじめに

国際熱核融合実験炉 (ITER) プラズマ加熱装置の1つである中性粒子入射 (NBI) 装置において、負イオンを安定に発生させるためにセシウムが必要となる。しかし、NBI 装置を長時間運転した後、セシウムは電極の支持部分の絶縁に付着するため、碍子の絶縁抵抗値が低下し、運転の継続が困難となる。このため、一定期間毎に碍子部分上に付着したセシウムの除去・清掃を行わなければならない。一方 NBI 装置ではプラズマからの中性子照射によって機器が放射化されるため、遠隔操作によるセシウム除去及び清掃を実施するための手順とセシウム除去装置の検討が必要となる。

このような背景の下、セシウム除去の一方法として、レーザアブレーション法が選定されている。本件では、遠隔操作によるセシウム除染を目的とし、レーザアブレーションを適用した手順の検討とセシウム除去装置の設計・検討を行った。

## 2. 設計条件

以下の環境条件及び NBI 装置の諸元に従って、セシウム除去手順の検討を実施した。

### (1) 環境条件

- |            |                       |
|------------|-----------------------|
| 1) 雰囲気     | : 循環空気及び窒素            |
| 2) 圧力      | : 1 bar               |
| 3) 温度      | : 50°C以下              |
| 4) ガンマ線線量率 | : 1 Sv/hr (イオン源周辺部分)  |
| 5) 汚染物質    | : トリチウム、放射化ダスト、ベリリウム等 |
| 6) 磁場      | : コイル磁場は無し            |

### (2) NBI 装置の基本諸元及び構成

イオン源・加速器は直径約 4 m、長さ約 3 m、総重量は約 20 トンで真空容器内に設置され、絶縁ガス C2F6 が 0.7MPa の圧力で封入されている。セシウムは、Fig.2-1 に示すイオン源の、アルミナ製絶縁材部分に付着する。セシウム除去を行なう部分を Fig.2-2 に示す。この部分に堆積したセシウムを取り除くために、セシウム除去用装置 (ツール) を使用して、その場で除去作業を行う。セシウム除去には、YAG レーザを使用したレーザアブレーション技術を適用するものとする。なお、セシウム除去の対象となる碍子は、イオン源の円周上に合計 8 本ある。

## 3. セシウム除去手順の概念検討

中性子入射 (NBI) 装置のイオン源の電極支持・絶縁用碍子は、付着するセシウムによって絶縁抵抗が低下する。そこで、定期的に遠隔操作によるレーザアブレーション法を適用したセシウム除去を行なう。セシウム除去手順は、付帯設備と NBI 装置の構造を考慮し、主な作業項目とその具体化を検討する。

また、この結果をセシウム除去装置の設計へ反映する。さらにセシウム除染用機器を適用するにあたり、NBI 装置においても問題点の抽出と構造の改良を提案するものとする。

### 3.1. セシウム除去手順

セシウム除去手順は、スタンダードマニピュレータ(以下マニピュレータという)付帯のトランスファーキャスク(以下キャスクという)を使用することを前提にキャスクのNBIセルへの移送から撤退までの概念検討を行う。以下に主なステップ毎の作業内容を示す。Fig. 3. 1-1 にセシウム除去手順の概念フローを示す。

#### 《ステップ1》キャスクのNBIセルへの移送

- 1) 一時保管・引渡しエリアで保管しているキャスクにセシウム除去装置(レーザユニット, 除去ツール, 碍子観察用TVカメラ等)を準備する。
- 2) キャスクを主建屋のリフターを利用してNBIフロアへ降ろす。Fig. 3. 1-2 にトランスファーキャスクのNBIセルまでの移動経路を示す。
- 3) リフターから回廊のレールに沿って、所定のNBIセルの前までキャスクを移動する。
- 4) NBIセルの前に設置されているターンテーブルで、キャスクを旋回させNBIセルドームの方向を一致させる。Fig. 3. 1-3 にNBIフロアでキャスクをNBIセルドームへ移動する経路を示す。

#### 《ステップ2》キャスクの接続と二重シール扉開放

- 1) キャスクをNBIセル方向にスライドさせる。
- 2) ガイド機構によりNBIセルとの接続部分に位置合せし、NBIセルの接続フランジにキャスクフランジを接続する。Fig. 3. 1-4 にNBIセルドームとキャスクの接続を示す。
- 3) キャスク扉をNBIセルのドームフランジに接続する。
- 4) キャスク扉の外側に設置されたボルトの締緩機構を用いて、ドームフランジ上の固定ボルトを緩める。
- 5) すべてのボルトを外した後、この二重扉(キャスク扉とNBIセルドーム)を、キャスク内の扉旋回機構を用いてキャスク内の最奥部に移動し、固定する。Fig. 3. 1-5 にキャスク内の扉旋回機構による二重扉の移動を示す。

#### 《ステップ3》静電シールドの取外し

- 1) NBIセルとキャスクの接続が完了した後、除去ツールの碍子部への設置スペースを確保するために静電シールドをマニピュレータにより取外す。
- 2) 取外した静電シールドは、キャスク内に保管する。

#### 《ステップ4》除去ツールの碍子部への移動

- 1) 碍子観察用TVカメラをマニピュレータでNBIセル内の取付け用金具へ設置する。
- 2) マニピュレータに持たせた除去ツールをセシウム除去対象である所定の碍子部へ移動する。ここでのマニピュレータの動作は、基本的に自動とする。
- 3) 除去ツールと碍子の相対位置は、碍子観察用TVカメラで確認する。位置ズレが生じている場合は、マニピュレータの位置補正制御を行なう。Fig. 3. 1-6 に除去ツールの碍子部への移動を示す。

※ 本ステップの作業は、除去対象碍子の数から(水平方向に直列で5個×周方向8列(45°



間隔)の配列で合計 40 個) 40 箇所となる。

《ステップ 5》除去ツールの碍子部への取付け(ツール設置)

- 1) 除去ツールの碍子部への取付けは、マニピュレータが除去ツールをコロナシールドへあてがい、押付けることで可能とする。
- 2) 取付け状態を碍子観察用 TV カメラで確認する。Fig. 3. 1-7 に除去ツールの碍子部への取付けを示す。

《ステップ 6》除去作業の開始(レーザ発振開始)

- 1) 除去作業は、除去ツールの取付け状態が完了した後、レーザユニットの起動、レーザの発振、除去ツールの作動の順で開始される。除去ツールは、レーザビームの照射ヘッドが碍子の周りを回転移動して全周除去を可能とする。
- 2) 碍子表面から飛散したセシウムは、円筒碍子の垂線方向に取付けられたセシウム捕集板で回収される。Fig. 3. 1-8、Fig. 3. 1-9 に碍子周りの除去作業概念図を示す。

《ステップ 7》除去作業の終了(レーザ発振停止)

- 1) 除去作業は、レーザビームの照射ヘッドが碍子の周りを往復回転移動して元の位置に戻った時点で全面除去を終了する。
- 2) 除去状態を碍子観察用 TV カメラで確認する。

《ステップ 8》除去ツールの碍子部への取外しと移動

- 1) 碍子観察用 TV カメラで碍子表面の除去状態を確認した後、除去ツールと碍子観察用 TV カメラを取外す。
- 2) 各碍子においてステップ 4 から 8 の作業を繰り返し行なう。

《ステップ 9》静電シールドの復旧作業

- 1) 全ての碍子について除去作業が終了し、除去ツールを収納した後に静電シールドの復旧作業を行なう。
- 2) キャスク内に一時保管した静電シールドを、マニピュレータを使用して取付けを行なう。

《ステップ 10》ドームフランジへの二重シールド扉接続

- 1) キャスク内に一時保管した二重扉(キャスク扉と NBI セルドーム)をドームフランジへ押付ける。
- 2) ドームフランジ上の固定ボルトを締緩機構で締付ける。

《ステップ 11》NBI セルからのキャスク後退

- 1) 二重シールド扉のキャスク扉とセルドーム間で分割し、NBI セルとキャスクを切り離す。
- 2) キャスクは、ターンテーブルまで後退して方向を変え、回廊のレールに沿って次の NBI 装置へ移動する。
- 3) 残りの NBI 装置についても、ステップ 1 の「キャスクの NBI セルへの移送」から、ステップ 11 の「NBI セルからのキャスク撤退」までを同様に行なう。

### 《ステップ12》キャスクの撤退

全ての NBI 装置の除去作業が終了したキャスクは、移送経路でリフターを利用して上階の一時保管・引渡しエリアへ撤退する。

### 3.2. セシウム除染用装置による作業時間

レーザアブレーション法によるセシウム除染作業の作業時間を、作業手順とセシウム除染用装置の概念検討の結果を基に評価する。作業時間の評価範囲は、除去ツールを碍子部へ取付ける作業から除去作業を終え除去ツールを取外し、次の碍子へ移動するまでとする(碍子1個を洗浄する時間であり、3.1節のステップ5~8の範囲)。セシウム除染用装置による除染作業の時間は、Table3.2-1に示すように碍子1個当たり140分を必要とする。

## 4. セシウム除染用装置の概念設計

セシウム除去作業へのレーザアブレーション法の適用概念と手順の設計検討結果を考慮し、セシウム除染用装置(以下除染用装置という)の概念検討を行なう。装置の概念検討は、2章の設計条件を基にNBIセルの構造を把握し、セシウム除染作業が可能であること、装置の概念が設計として成立することを検証する。

概念設計は、はじめにNBI装置の構造から想定される、セシウム除去装置を適用するための空間的制約条件を把握し、次に基本システムをベースにレーザ発振系、光伝送系、除去ツールの具体化検討を行なう。また、設計を進める上で必要となるNBI装置構造の改良項目を提案する。

### 4.1. イオン源碍子部への除染用装置の適用検討

セシウム除染作業に除染用装置を適用するに際し、NBIセルの構造を検討する。NBI装置は、NBIセルの中心にイオン源があり、イオン源の周囲に碍子が配備されている。Fig.4.1-1にリアフランジ側から見たNBI装置構造を示す。イオン源の上部には高圧(HV)線と冷却配管の導入口があり、これらの全面が静電シールで覆われている。除染用装置(以下、碍子へ設置するツール部を除去ツールという)は、マニピュレータでNBIセルのリアフランジ側からNBIセル内壁とイオン源の周囲空隙を利用して導入する。そこで、除去ツールの導入空間と碍子への除去ツールを設置するための条件抽出を行なう。

#### 4.1.1. イオン源高電圧(HV)線と冷却配管周り

NBIセルの上部には高電圧(HV)線と冷却配管の導入口が存在する。この部分に配置された碍子は、これらに囲まれているために除去ツールの導入と設置が不可能である。

よって、現状の構造では、最上部に配置される5個の碍子は同一のツールで除染作業を行なうことは困難である。

#### 4.1.2. イオン源を被う静電シールド

イオン源は、リアフランジを通過した位置に全面を覆う3つの静電シールドが存在する。これにより、除去ツールの碍子までの導入ルートが静電シールドで塞がれる状態である。

よって、前項までの高電圧(HV)線、冷却配管周りと同様に除去ツールを導入することは困難である。

#### 4.1.3. NBI セル内壁とイオン源間エリア

除去ツールを碍子部まで導入するには、4.1.1~4.1.2項の高電圧(HV)線、冷却配管及び静電シールドの空間的干渉の問題を回避することが条件となる。これらを行なうことを前提に導入エリアを確認する。

NBI セル内壁とイオン源間の空間は、縦断面の上下で657.5mm、横断面の左右で748.5mmとなる。また、NBI セルの長手方向の距離については、リアフランジのシールド面から碍子の中心までの距離が遠い箇所では3219mm、近い箇所では1894mmとなる。

よって、NBI セル内壁とイオン源間エリアを碍子部まで除去ツールを導入するには、NBI セル内壁とイオン源間の狭隘部657.5mmをマニピュレータで通過可能な大きさとする必要がある。Fig. 4.1-2にNBI セル内壁とイオン源間スペースを示す。NBI セルの長手方向の距離については、マニピュレータの使用目的にイオン源の取付けボルトの締緩作業が可能であること(碍子より奥に位置する)からも全ての碍子へアクセスは可能となる。

#### 4.1.4. 碍子周りのスペース

Fig. 4.1-3に碍子周りの構造を示す。碍子は、左右をマウンティングフランジで支持され、イオン源の中央側にサポートフレームが存在する。マウンティングフランジ形状は、上下が曲線、左右が直線のトラック状リングである。除染の対象となる碍子の中で、800kVと600kVグリッド間が狭隘部となる。

よって、この狭隘部を碍子周りの作業空間条件とし、除去ツールの設計を行なう。

### 4.2. セシウム除染用装置の設計

セシウム除染用装置の設計では、2章の設計条件と4.1節の除染用機器の適用検討で摘出された条件を基に、システム構成、装置の部品構成、基本仕様、構造の概念検討を行なう。また、2章のセシウム除去手順の概念検討と除染用機器の適用検討で摘出されたNBI装置の改善点は反映されたものとして設計を進める。改善点の詳細は5章で述べる。

#### 4.2.1. システム構成

セシウム除染用装置のシステムは、レーザ発振器、レーザ伝送系、レーザ光を碍子へ照射する除去ツール、回収装置及び制御系から構成される。Fig. 4.2-1, Fig. 4.2-2, Fig. 4.2-3にセシウム除染用装置のレーザ発振系、圧縮空気系、排気系のシステム構成を示す。

レーザ発振器は、レーザアブレーションがレーザ光を碍子の表面に必要な出力(レーザ光の強度)を供給する。発振器の運転は、中央操作室のセシウム除染用装置制御盤からの制御信号でレーザの発振、停

止及び出力のコントロールを可能とする。レーザー発振器から発振されたレーザー光は伝送系で除去ツールまで伝送される。除染対象となる碍子は個々に位置が異なるため、多様なルートに適用が可能となる伝送システムを選択が必要である。除去ツールは、碍子の表面にレーザー光を適切に照射する装置であり、碍子の周方向と長さ方向の2方向へ照射ヘッドを制御することで行なう。また、除去により飛散したセシウムを回収するための回収装置を備え付ける。照射ヘッドの制御は、発振器と同様に運転開始、適切な位置での停止を可能とする。

#### 4.2.2. レーザー発振器の選定

レーザーアブレーション現象は  $10^8 \text{W/cm}^2$  台のエネルギー密度で発生すると言われている。これを実現可能なレーザー発振器としては、パルス YAG レーザ、銅蒸気レーザ、TEA  $\text{CO}_2$  レーザ、エキシマレーザが考えられる。Table 4.2-1 にパルスレーザの比較を示す。気体を発振源とする、銅蒸気レーザ、TEA  $\text{CO}_2$  レーザ、エキシマレーザはシステムサイズが大きく、系統が複雑であり、さらに保守点検が煩雑である。それに対し、固体を発振源とする YAG レーザは、コンパクトでありかつ保守が容易であるという利点がある。また NBI 装置へのレーザー光導入・誘導を考慮すると、光ファイバの使用は必須であると考えられる。YAG レーザは光ファイバでの伝送が可能であり、この点でも優れている。

以上の事から使用するレーザー発振器は、YAG レーザが最適である事を確認した。

ところで、光ファイバ単線のレーザー光耐力は約  $10^8 \text{W/cm}^2$  であり、市販の光ファイバ光伝送部(コアと称する)の直径は最大でも 0.8mm 程度であり、断面積は  $5 \times 10^{-3} \text{W/cm}^2$  である。したがって、伝送可能な最大のレーザー光強度は約  $5 \times 10^3 \text{W}$  となる。この強度のレーザー光をアブレーションに必要な  $10^8 \text{W/cm}^2$  とするためには、直径  $80 \mu\text{m}$  に集光する必要がある。この集光径に相当する照射面積は、本設計の前提である碍子の大きさから、除染作業上極めて不十分であり、多数本の光ファイバでレーザー光を伝送する必要がある。通常 YAG レーザのピーク強度は  $10^7 \text{W}$  程度であるため、1本のレーザー光を多数本の光ファイバに誘導する光学系(以下分配光学系と略す)が必要となる。ところで YAG レーザ光は赤外線(不可視)であり、出力が大きいため、調整には十分な配慮が必要とされる。移動時の振動等を考慮し、実用に耐える分配光学系の設計・製作は、調整方法も含めて開発要素が多い。そこで、本設計では、この光学系を有したレーザーアブレーション装置として、フランス/カンテル社の製品、レーザーブラスト 1000 を使用する事とした。

#### 4.2.3. 光伝送系の検討

光伝送系は中空の導光路管内にレンズやミラーでレーザー光を伝送させるもの(空中伝送)と光ファイバケーブル(線路)による伝送が考えられる。空中伝送は、途中における損失が大きい。また、本システムへの適用には発振器から除染ツールまでの光路が一定の場合は最適であるが、碍子の位置が多様なためにツールの設置姿勢と円筒の碍子周りを全周にわたり除染することから光の照射方向が常に変化する。よって、フレキシブルな光路の対応が要求されるため適用が難しい。これに比べて、線路による伝送は光ファイバを採用することにより所定の許容曲げの範囲で光路を自由に変えることが可能である。

よって、本システムの光伝送系は光ファイバによる線路伝送を適用する。光ファイバの仕様を次に示す。

## 〔光ファイバ仕様〕

- ・ ファイバケーブル径 :  $\phi 10\text{mm}$ (外被外径)
- ・ ファイバ本数 : 4本
- ・ 曲率半径 : R350mm
- ・ 長さ : 40m (実績最長さ)

また、光ファイバの寿命は光通信などの一般の使用条件下では半永久的といえる。本光伝送への適用は、フレキシブルな光路の変化に対応が可能である反面、引張荷重・繰り返し曲げ等の機械的特性の評価が必要である。

## 4.2.4. 除去ツールの検討

除去ツールは、セシウムが付着した罫子表面にレーザ光を適切に照射する装置である。レーザ光の照射は、罫子の形状が円筒形であることから、円筒周りの回転移動と長さ方向の直線移動から除染対象範囲を漏れることなく行なうことが必要となる。ここで除去ツールの構造を具体化するには、NBIセルと罫子間、及び罫子周りのスペースに制約があるため、曲率に限界のある光ファイバの引廻しと除去ツールへのレーザ光の導入から照射までの検討が特に必要となる。これに作動機能をマッチングさせツールの構造を決定する。また、伸縮式コロナシールド等の罫子周りの構造の改善を反映したものとし概念設計を行なう。

## (1) 光ファイバの引廻しの検討

光ファイバの引廻しに関して、キャスクから罫子までのルートと罫子装着時及び作動時のファイバの処理を検討する。

レーザ光は、キャスクの後方に付帯したレーザ発振器から光ファイバで伝送される。Fig. 4.2-4に光ファイバの引廻しルートを示す。光ファイバは、キャスク側面に沿ってリアフランジを通過し、NBIセル壁とイオン源間のスペースを利用し罫子側面まで導かれる。次に、ツールを罫子部のコロナシールドへ装着する。装着時の光ファイバは、所定の曲率 R350mm を保持した状態で取付けられる。これらの作業はマニピュレータで行なうものとする。

装着後の光ファイバは、ツールの照射ヘッドの回転運動に伴い曲率を保持した状態で NBIセル壁とイオン源のスペースを回転運動する。Fig. 4.2-5に罫子周りの光ファイバの処理、Fig. 4.2-6に罫子周りの光ファイバの回転運動を示す。

## (2) ツール光学系

ツール光学系とは、光ファイバの受光部を示している。Fig. 4.2-7にレーザ光学系光路図、Fig. 4.2-8にツール光学系の概念を示す。ここでは回転運動において、レーザ光の照射位置を常に一定とするための構造を前述(1)を含め検討する。

光ファイバは、照射ヘッドの罫子周りの回転運動に伴い、所定の曲率を保持する必要がある自由度を要求される。レーザ受光部には回転機構を持たせた構造とする。これにより、除去ツールがサポートフレーム側の狭隘部に回転移動しても、光ファイバは罫子に沿った状態で曲率の保持と干渉の回避が可能である。

また、レーザ光は光路の変換にプリズム(1)を使用するため、回転に伴う光路の変化が無く固定のプリズム(2)へ伝達される。プリズム(2)で光路は、再度変換される。最後に集光レンズ(凸レンズ)で所定のパワー密度へ絞られ、碍子の表面に照射される。

#### 4.2.5. 駆動機構によるレーザビーム光の制御方法の検討

##### (1) 駆動方法

駆動機構は、レーザ伝送系を構成する照射ヘッドが碍子の周りを回転する機構と、碍子の長さ方向へ直線移動する機構を必要とする。また、レーザビーム径が小さいことから、碍子へ漏れなくビームを照射するにはビームをオーバーラップさせることが必要であり、位置制御の精度が要求される。回転と直線運動の動作を制御する方法は、以下に示す3つのパターンが考えられる。

パターン1：(回転運動=位置制御) + (直線運動=一定速度(連続))

パターン2：(回転運動=一定速度(連続)) + (直線運動=位置制御)

パターン3：(回転運動=一定速度(連続)) + (直線運動=一定速度(連続))

##### (a) パターン1について

照射ヘッドが碍子の周方向の所定に位置で停止し、碍子の長さ方向(水平)に決められたストロークを移動、停止する。照射ヘッドは、次の位置へ回転移動して同じ動作を行い、これを全周行なう。

##### (b) パターン2について

照射ヘッドが碍子の長さ方向(水平)の所定の位置に停止し、碍子の周方向を全周回転移動して停止する。照射ヘッドは、次の位置へ直線移動して同じ動作を行い、全ストローク行なう。

##### (c) パターン3について

照射ヘッドが回転と直線の2方向移動を停止することなく連続運動で行なう。この場合、照射されたレーザ光の軌跡は曲線運動となる。

##### (d) 作動パターンの選定

作動パターンの選定には、光ファイバの保護を考慮すると作動に伴った追従性とその頻度が重要となる。光ファイバは、照射ヘッドの回転運動で大きく位置を変化させる。これに比べ、直線運動時は一定の曲率を維持したままで少しの角度を振る程度に収まる。光ファイバの回転運動に伴う位置の変化はパターン1で1回、パターン2で34回繰り返すことになる。ここで、34回は長さ方向の洗浄幅100mm、照射ビーム径 $\phi$ 3mmの場合である。また、位置制御は、回転運動の場合には照射ヘッドの荷重方向の変化による作動部(組合せ部)のギャップ変動の繰り返しが精度の維持に影響することも想定される。

以上のことから、作動パターンは、パターン1の(回転運動=位置制御) + (直線運動=一定速度(連続))とする。ここで、パターン3の連続運転は、直線運動の移動量100mmに対して回転運動の移動量は750mmであり、速度差が大きいため制御バランスが悪く、運動の切り替え位置で速度変化も生じるため、ビームの照射が一定とならないことから採用しないものとした。

##### (2) 回転機構の構造

回転機構は、照射ヘッドの回転とツールの装着機能を兼ね備えたものである。Fig. 4.2-9 に回転機構部構造を示す。機器の構成は、駆動用のモータ、リング状の案内軌道、本体と軌道の位置保持用のローラ等から構成される。

装着機構は、軌道に開閉する機能を持たせ装着性の向上を計るために、軌道内側へはガイドを設ける。ガイドをコロナシールドに宛がうことで軌道が閉じて装着が完了する。この作業はマニピュレータによる遠隔操作で行なう。

### (3) 直動機構の構造

直動機構は、照射ヘッドを碇子の長さ方向(水平)に移動させるものである。Fig. 4.2-10 に直動機構部構造を示す。主な部品は、モータを駆動源とし、動力を伝達する減速ギア、直線方向に動力を伝達するボールネジ、案内用のスライドと軸、照射ヘッド部となるテーブルから構成される。

### (4) 回転機構の位置決め精度

回転機構が位置制御となることから本体の移動量は、碇子表面へ照射されるレーザービーム径が最大の送り量となる。レーザー光は、碇子表面に照射される前で所定のパワー密度  $10^8 \text{ W/cm}^2$  へ集光され、ビーム径は約  $\phi 3\text{mm}$  となる。回転機構の場合は、ビーム径に相当する角度が要求される位置決め精度となる。Fig. 4.2-11 にビーム径と位置決め精度の関係を示す。ビーム径が約  $\phi 3\text{mm}$ 、碇子の外径が  $\phi 100\text{mm}$  であることから、回転機構の位置決め精度は、 $3^\circ$  以下とする。この精度を確保することで、碇子の表面を漏れることなくレーザーを照射することが可能となる。

### (5) 直動機構の送り速度

洗浄ヘッドの直動機構による送り速度は、母材の種類や付着物の付着状況によって、レーザー光から照射する単位時間あたりのエネルギー量を適切な照射時間にコントロールすることが必要となる。しかし、レーザーアブレーションによるセシウムの除染と碇子を基板とした除染の実績が無い。対象物は異なるが、汎用のレーザー除染装置による手動操作(ガンタイプ)によれば、 $10\sim 20\text{mm/sec}$  の範囲で除染が可能である。

よって、直動機構の送り速度は、実績が無いことも踏まえた上で速度の調整が可能なシステムとする必要がある。

### (6) 碇子へのレーザー照射方向と位置の検討

碇子の表面に付着しているセシウムは、レーザーの照射で除去される。除去されたセシウムは、円筒形の碇子では法線方向(平板の場合は面に垂直)に飛散するため、レーザーの碇子への入射角と照射位置の関係からセシウムの飛散方向が決まる。

レーザーの入射は、碇子の円筒表面の水平方向(仮定)に対して角度を替えて照射する方法(ケース1)と、垂直に照射する方法(ケース2)の2通りが考えられる。Fig. 4.2-12 にレーザー光の照射によるセシウムの飛散方向を示す。ケース1の場合は、飛散方向が常に碇子の法線方向になる。ケース2の場合は、碇子への照射位置によって飛散方向が変化する。次にケース1と2について、次に示すA~Fのパターンを比較検討する。Table 4.2-2 に碇子へのレーザー照射方向と位置の比較を示す。

#### ① ケース1-A

碇子の入射角が小さいためにレーザーの照射面積が拡大され均一な除染が期待できず、効率が悪

いと推測される。また、飛散方向がレーザー光の入射方向と離れるのに伴い、回収位置が遠くなることからツールが大きくなる。

② ケース 1-B

入射角が  $45^\circ$  でレーザーの照射面積が多少は拡大されるが汎用のレーザー除染装置で照射部がガンタイプ(照射方向が人手で自由に変わる)で不規則な形状の表面に対応出来ていることから性能に支障なく除染が可能と推測される。また、飛散方向はレーザー光の入射方向との距離から回収位置は適切になり、ツールのコンパクト化が可能である。

③ ケース 1-C

入射角が小さいのでレーザーの照射面積の拡大が及ぼす性能への影響はないものと推測される。また、飛散方向はレーザー光の入射方向と近くなることから、回収位置と照射位置(集光レンズ)が交錯する。

④ ケース 2-D

入射が碍子の中心を通る法線方向であるため飛散方向は入射方向にそのまま反射する。これにより集光レンズに飛散したセシウムが付着し、ビーム強度の損失やレンズの破損につながることも想定される。また、入射と飛散方向が同一では、ツール構造が成立しない。レーザーの入射が垂直なので受光部及び集光部の構造は容易となる。

⑤ ケース 2-E

基本的にはケース 2-C と同様である。レーザーの入射は垂直(水平となす角度は  $90^\circ$ )で、受光部及び集光部構造は容易となる。

⑥ ケース 2-F

洗浄部位(碍子側)から見た入射角と飛散方向の関係は、ケース 1-B に同じである。レーザーの入射は垂直で、受光部及び集光部構造は容易となる。

以上の比較検討の結果から、ケース 2-F を採用する。

#### (7) セシウム回収法の検討

飛散物の回収方法は、吸引と吸着が考えられる。しかし、飛散したセシウムは再付着することが想定される。そこで、エアブローによる流れの形成で再付着の防止と、さらに回収の援助を計るものとする。これらに手法の組合せから以下の2つとする。Fig. 4.2-13 にセシウム回収方法を示す。

① エアブロー+吸引

② エアブロー+吸着

これらの回収方法は碍子へ照射するレーザー光を挟むように左右にエアの供給口と吸引ダクトまたは吸着ロール機を配置する。

#### 4.3. セシウム除染用機器の仕様

これまでの検討結果から、決定したセシウム除染用機器の仕様を以下に示す。また、吸引式除去ツールを Fig. 4.3-1 に、吸着式除去ツールを Fig. 4.3-2 に、除去ツールを設置した様子を Fig. 4.3-3 に示す。Fig. 4.3-4 に吸着式除去ツールの外観を示す。

[セシウム除染機器の仕様]



- (1) 除染方式：レーザーアブレーション方式
- (2) 主要機器構成
- ① レーザ発振器
  - ② 光ファイバ
  - ③ 除去ツール
    - ・ 回転機構、直動機構、光学系(受光部)
    - ・ 回収装置(吸引または吸着)、エアブローノズル
  - ④ セシウム除染用機器中継盤(キャスク付帯)
  - ⑤ セシウム除染用機器制御盤(中央操作室)
  - ⑥ エア供給装置(キャスク付帯)
- (3) レーザ発振器
- ・ レーザの種類 : YAG レーザ
  - ・ 波長 : 1.064  $\mu$  m
  - ・ パルス幅 : 10~12ns
  - ・ 出力 : 40W
  - ・ 最大パルス繰り返し数 : 120Hz
  - ・ パルスエネルギー : 335mJ
  - ・ フラッシュランプ寿命 :  $6 \times 10^7$  ショット
- (4) 光ファイバ
- ・ ファイバケーブル径 :  $\phi$  10mm (外被外径)
  - ・ ファイバ本数 : 4本
  - ・ 曲率半径 : R 350mm
  - ・ 長さ : 約 20m
- (5) 除去ツール
- ・ 型式 : 2軸走査式レーザー照射
  - ・ 大きさ : 幅 272.5×旋回半径 200mm (最大位置)
  - ・ 除去範囲 : 約 100mm (碇子中心部)
  - ・ レーザ光照射部パワー密度 :  $10^8$  W/cm<sup>2</sup>
  - ・ 重量 : 約 10kg
  - ・ セシウム回収方式 : 吸引または吸着+エアブロー
  - ・ ツールの設置方法 : マニピュレータによる遠隔操作
  - ・ 操作方法 : 制御室からの遠隔操作

## 5. NBI 装置構造の改良の提案

NBI 装置の絶縁において、碇子に付着しているセシウムを除去する手段としてレーザーアブレーション法を適用した場合、セシウム除去手順及びセシウム除去用装置の概念検討を実施した結果から抽出され

た問題点と NBI 装置構造の改良を以下に示すように提案する。

### 5.1. NBI セル内への除去ツール導入スペース

除去ツールを碍子部まで導入するルートは、マニピュレータにより NBI セルのリアフランジを通過し、さらにイオン源と NBI セルの隙間へ進入する。しかし、現状では NBI の内壁とイオン源の隙間は、リアフランジ側の高圧 (HV) 線・冷却を含むイオン源が静電シールドで被われている。Fig. 5. 1-1 の A 部に示すように、NBI セルの内壁と静電シールド隙間は約 300mm であるので、除去ツールの挿入を阻むことになる。

以上の問題点を解決するためには、セシウム除染作業時は、静電シールドをマニピュレータで脱着が可能な構造とする必要がある。そのため、静電シールドを除染作業の開始前にキャスク内へ一時保管し、除染作業の終了後は復旧させる。

### 5.2. 高電圧 (HV) 線・冷却配管導入部碍子のセシウム除去作業

高電圧 (HV) 線周りには、バスバー、フィラメントケーブル、冷却配管が存在する。Fig. 5. 2-1 にキャスク設置側のリアフランジから見た高電圧 (HV) 線・冷却配管導入部の鳥瞰図を示す。特に冷却配管の集合部に位置する碍子はこれらに囲まれているために除去ツールの設置は不可能である。

そのため、現状の碍子の配列を変えることでツールの設置スペースを確保する必要がある。また、遠隔操作による碍子の除去作業エリアを考慮した高圧線と冷却配管の引廻し(貫通)ルートの見直しが必要である。以下に現状と改良の配列状態を示す。Fig. 5. 2-2 に碍子の配列改良案を示す。

#### (a) 現状の碍子配列

最上部  $0^\circ$  を含む中心振り分けとなっている。 $0^\circ$  の位置にはリアフランジ側から奥へ水平に 5 個が存在する。

#### (b) 改良の配列

現状の碍子位置を  $22.5^\circ$  (中心振り分け) 回転移動させた配列とする。

### 5.3. セシウムの除去対象範囲

現状の碍子部の構造は、円筒のコロナシールドが円筒碍子を左右から被う形であり、中央の直径 64mm の開口部から碍子が覗いている。Fig. 5. 3-1 に碍子周りの構造図を示す。中央開口部での除去作業は、この開口部から碍子の外周をレーザー光が走査する動作で可能となるが、コロナシールド内部全域に渉るレーザー光の導入には限界がある。

そのため、コロナシールドを伸縮タイプとし、現在の 64mm を除去作業時は左右に開かせることで碍子表面を露出させ、除去対象範囲を拡大させる構造とする。Fig. 5. 3-1 に碍子周り改良案、コロナシールドの伸縮構造案を Fig. 5. 3-2 にスパイラル後退式、Fig. 5. 3-3 にスプリング後退式の改良案を示す。

#### 5.4. コロナシールド内部へのセシウム流入

碇子の周囲を被うコロナシールドは、碇子表面へのセシウム付着防止の目的も有している。しかし、碇子間は隙間が存在するためセシウムの流入が予想される。よって、セシウムの付着範囲の拡大は除去作業に不利な条件となる。

そのため、碇子の表面に波状の突起を設けることで、コロナシールド内部へのセシウムの流入、付着を防止する (Fig. 5.3-2 示す)。これにより、除去範囲をコロナシールドの開口部のみとすることができる。

#### 5.5. 除去ツール取付け状態とセシウム除去の確認

除去ツールの取付け状態の確認、碇子表面の監視などが必要であるが、現状のマニピュレータに設置される TV カメラでは、NBI セルのフランジから遠い碇子ほど確認が困難である。

そのため、除去ツール取付け状態とセシウム除去の確認のための専用 TV カメラを設置する。TV カメラの設置は、除去作業時のみのとし、NBI セル内壁に設置用の取付け金具を設けておく等の配慮をする。

以上に述べたセシウム除去のために必要な NBI 装置構造の問題点と構造の改良案を、Table5-1 に示す。

### 6. まとめ

ITER を構成する機器の 1 つである中性粒子入射 (NBI) 装置のイオン源には、水素の負イオンを生成するためにセシウムが必要である。しかし、長時間の運転後には、電極支持・絶縁用の碇子にセシウムが付着してその絶縁抵抗が低下する。従って、一定期間毎に、碇子上のセシウムの除去・清掃を行わなければならない。一方 NBI 装置ではプラズマからの中性子照射によって機器が放射化されるため、遠隔操作により行うセシウムの除去・清掃技術開発が必須となる。このような背景を下に、レーザアブレーション法によるセシウム除去用装置の概念設計として、除去手順及び装置設計・検討を行なった。以下にその成果と今後の課題を示す。

#### 6.1. 成果

- (1) レーザアブレーションに必要なレーザ装置、伝送路、除去ツールなどの基本仕様を明確化した。
- (2) 多くの領域をカバーするための手段として碇子廻りの改良とレーザ光の操作方法を回転と直線の 2 軸運動により可能とした。
- (3) マニピュレータによる遠隔操作を前提に、碇子へレーザを照射する除去ツールの機器構想を明確化し、取扱いが可能であることを確認した。
- (4) 飛散したセシウムを回収する方法として吸引及び吸着装置を適用した。
- (5) 除去ツールを碇子部まで搬送する経路を NBI 装置の改良により明確化した。
- (6) セシウム除去手順と機器の適用検討から必要な改良点を摘出し、NBI 装置の改善とセシウム除染用機器の適用を図った。

これらの結果から、NBI 装置のセシウム除去方法として遠隔操作によるレーザアブレーション法の適用が基本的に可能であることが検証された。

## 6.2. 今後の課題

### 6.2.1. セシウム除去用装置の設計課題

セシウム除去用装置の設計課題を以下に示す。

- (1) 遠隔操作を踏まえた軌道の取付け構造の具体化
- (2) 光ファイバ受光部の光学系の具体化
- (3) 光ファイバを含むユティリティの除去ツールまでのルート間の引廻し(支持)構造の具体化
- (4) 除染ツールのコンパクト化

### 6.2.2. セシウム除去用装置の適用における R&D 項目

セシウム除去用装置としてレーザアブレーション法を適用する場合の R&D 項目として技術課題と解決方法を以下に示す。また、Table6.2-1 にまとめて示す。

#### (1) 光ファイバ以降の光学系設計と実用性実証

He-Ne レーザ等の模擬光を対象として設計を行い、その性能を実験的に実証する。その知見を基に YAG レーザ用光学系を設計し、実験的に確認を行う。

#### (2) 除染時の光学系汚れ対策

ITER における付着セシウムを模擬した碍子を除染して、汚れによる光透過率の減衰を調べる。その結果、実用上汚れ対策が必要であれば、エアカーテン等の対策を施す。

#### (3) レーザパルス照射数の決定

ITER における付着セシウムを模擬した試験片を製作し、レーザパルス照射数と残留セシウム量の関係を調べて決定する。残留セシウム量の定量化は誘導結合型プラズマ発光分析法 (ICP)により可能であると考えられる。

## 謝 辞

ITER の NBI 装置用セシウム除去装置の設計にあたり、那珂研究所松田所長、核融合工学部関部長、旧炉構造研究室員、ITER 共同中央チームメンバー及び(株)日立製作所の方々に対し、ここに深く感謝致します。

Table3.2-1 Clock time of decontamination with a cesium decontamination device

Step	Work item	Time
Step 5	Installation to an insulator part of a removal tool	50 minutes
	- Cesium adhesion situation confirmation	for 10 minutes
	- Tool movement	for 15 minutes
	- The establishment	for 20 minutes
	- Establishment state confirmation	for 5 minutes
Step 6	Removal work start	50 minutes
	- Head movement (a start position)	for 5 minutes
	- Laser oscillation	for 30 minutes It is kept in its mind warm-up time
	- The decontamination start (decontamination head activation)	for 10 minutes
	- ~ decontamination end (a decontamination head stop)	
Step 7	The removal work end	5 minutes
	- Removal state confirmation	for 5 minutes
Step 8	Disconnection from an insulator part of a removal tool and movement	35 minutes
	- Tool disconnection	for 20 minutes
	- Tool movement	for 15 minutes
	Decontamination time of one insulator	140 minute (2.3Hr)

Table 4.2-1 Comparison of Pulse Lasers

Laser (Wave length)  Item	Solid	Gas		
	YAG (1.064 $\mu$ m)	Excimer (0.2~0.3 $\mu$ m)	TEA-CO <sub>2</sub> (10.6 $\mu$ m)	Copper (0.5 $\mu$ m)
Excitation Method	Lamp (Optical excitation)	Electrical discharge		
System Configuration	Oscillator Power supply Chiller	Oscillator Power supply Chiller Gas supply • Circulatory system	Oscillator Power supply Chiller Gas supply • Circulatory system	Oscillator Power supply Gas supply Heater
Size of System (Floorage)	1 m <sup>2</sup> 1m×1m	4 m <sup>2</sup> 2m×2m	9 m <sup>2</sup> 3m×3m	3 m <sup>2</sup> 1m×3m
Fiber Transmission	Possible	Impossible	Impossible	Possible
Underwater Transmission	Impossible (If the second harmonics is used, it is possible.)	Impossible	Impossible	Possible
Articles of Consumption	Lamp (3×10 <sup>7</sup> Shot) 50Hz:170Hr	Laser gas (Corrosion) Electrode	Laser gas  Electrode	Copper • Gas (Addition) Electrode
Running cost	Electric power	Electric power + Gas	Electric power + Gas	Electric power

Table 4.2-2 Comparison between Direction of Laser Incidence and Position on Insulator

NO	Case	Pattern	Condition			Comparison items						Integrated Judgment
			The angle of Incidence	Direction of Explosion	Angle between Incidence and Explosion direction	Influence of Irradiation area expansion	Cleaning Efficiency	Directivity of Explosion	Incidence Position	Collection position		
1	1	A	Small (45°>)	Vertical	Large (45°<)	△	x	○	△	○	x	
		B	45°			○	△	○	△	⊙	○	
		C	Large			○	○	△	△	△	△	
2	2	D	Vertical	Normal to Insulator at Incidence position	0°	⊙	⊙	x	○	○	x	
		E	Large			○	○	△	○	△	○	
		F	45°			○	△	○	○	○	⊙	

Table 5-1 Problems and Required Improvements

NO	Items	Problems	Required Improvements	Note
1	Cleaning tool introduction space in NBI cell	an electrostatic shield makes introduction of cleaning tool by manipulator difficult	<ul style="list-style-type: none"> <li>Optimization of Disassembling method and structure of electrostatic shield</li> <li>Storage method of electrostatic shield in the cask</li> </ul>	
2	Cesium cleaning method around HV cables	The installation of the cleaning tool is impossible because of the cooling pipes.	Re-arrangement of insulator position	Fig5.2-2
3	Cesium cleaning area	Cleaning area is limited to gap between corona shields.	Design of HV cable routing in taking remote cleaning into account	
4	Cesium inflow into corona shield		Adoption of expansion and contraction type corona shield	Fig5.3-2,3,4
5	Confirmation of cleaning tool installation and end of cleaning	The confirmation is difficult in manipulator TV camera.	Adoption of corrugated insulator. Installation of fittings for TV camera on NBI cell inner wall	Fig5.3-2



Table 6.2-1 Technical Issues and Improvement Method

No.	Technical Issues	Improvement method
1	Optical system design and R&D	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Designs for mock light (He-Ne laser etc.), and R&amp;D</li> <li>• Design of optical system for the YAG laser according to R&amp;D and experimental proof</li> </ul>
2	Contamination of optical system in cleaning	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cleaning R&amp;D using contaminated post insulator with cesium in ITER condition</li> <li>• As a result, if cleaning of optical system is necessary, air curtain etc should be installed.</li> </ul>
3	Number of laser pulse required for sufficient cleaning	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Number of laser pulse is decided by R&amp;D using contaminated insulator with cesium in ITER condition. (Amount of the residual cesium can be measured by the ICP analysis.)</li> </ul>

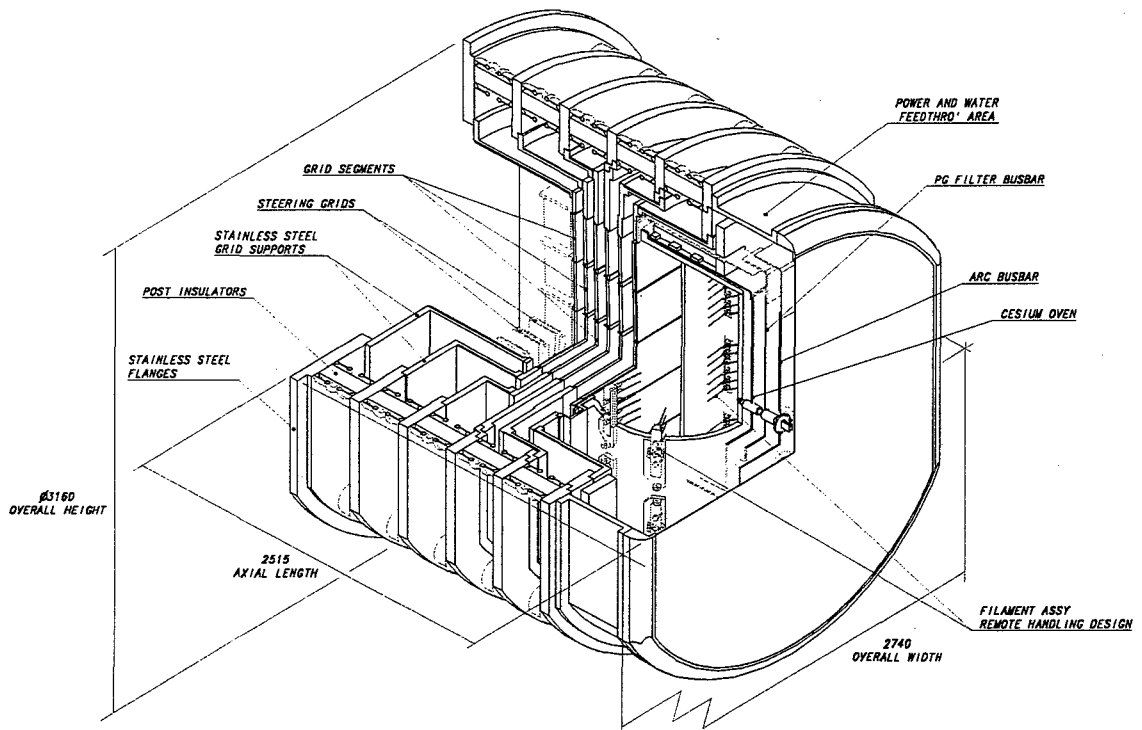


Fig. 2-1 Overviews of NBI Ion Source (Dimensions in mm)

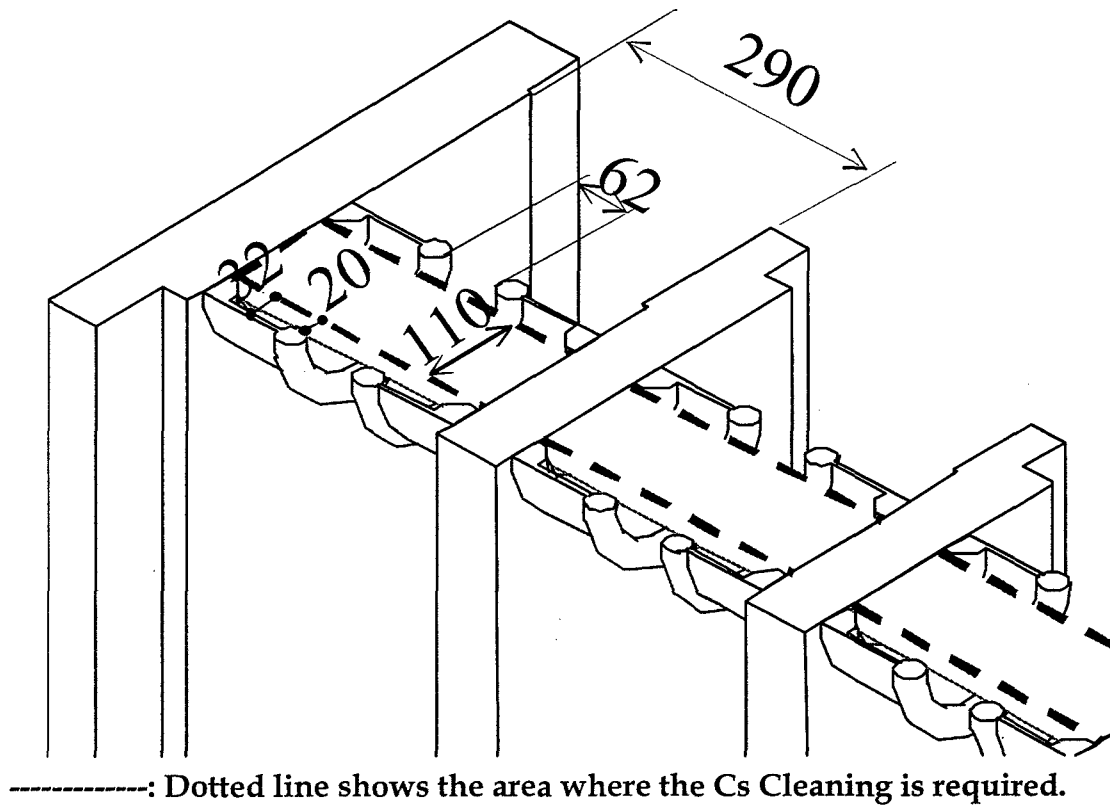


Fig. 2-2 Overview of Insulators (Cross section)

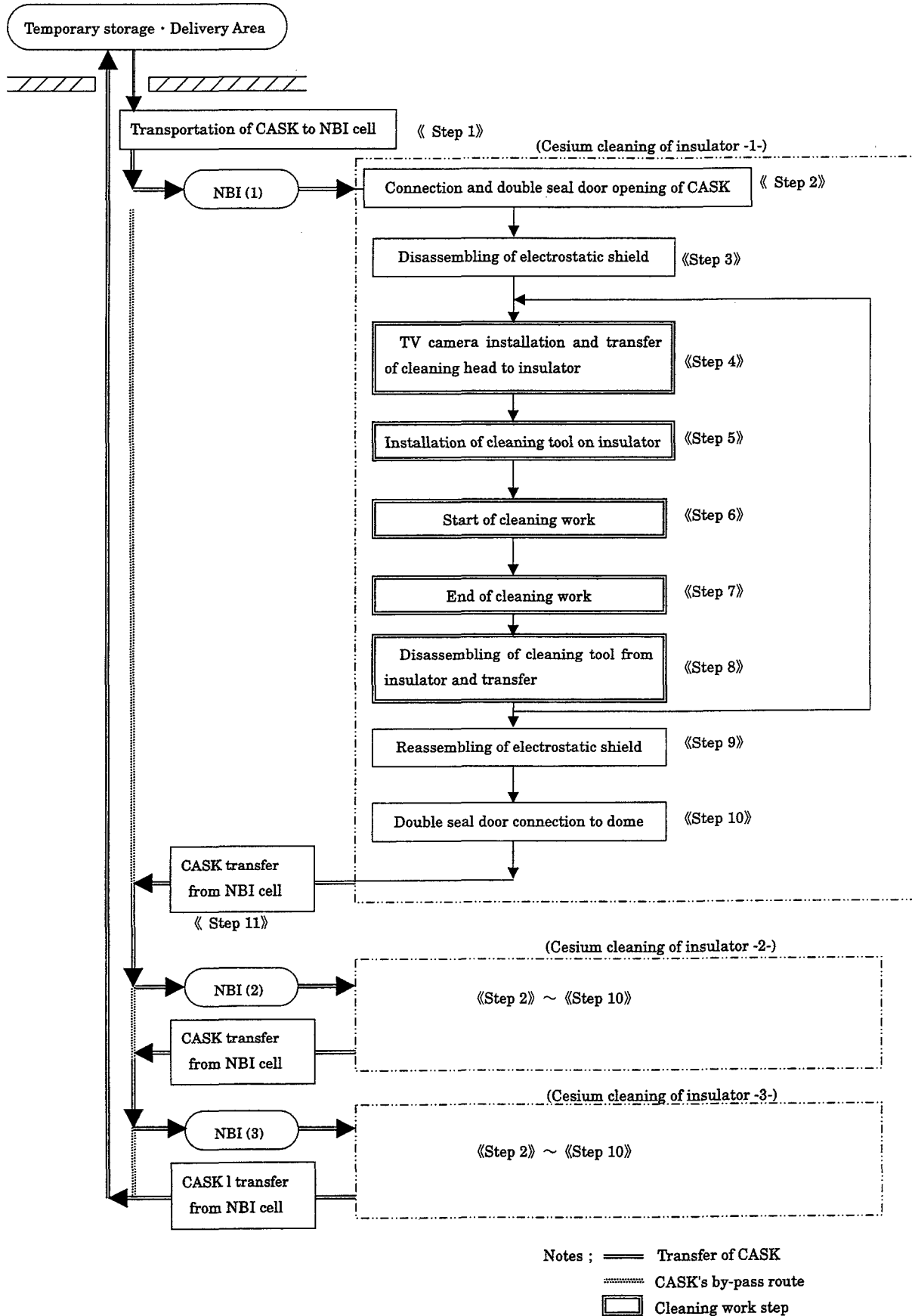


Fig. 3.1-1 Flow Diagram of Cesium Cleaning Procedure

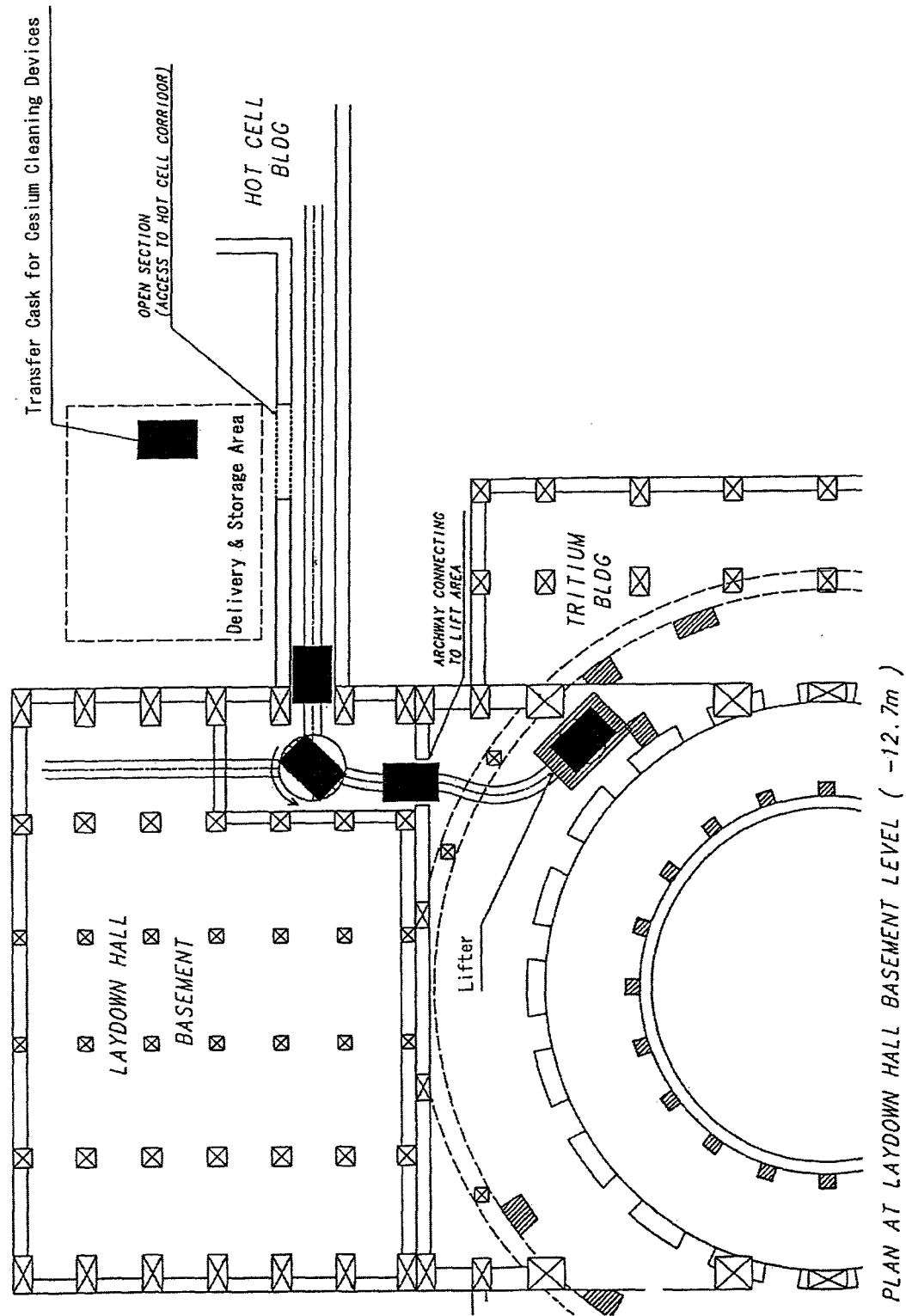


Fig. 3.1-2 Transfer Pass of Transfer Cask for Cesium Cleaning Devices to NBI Cell

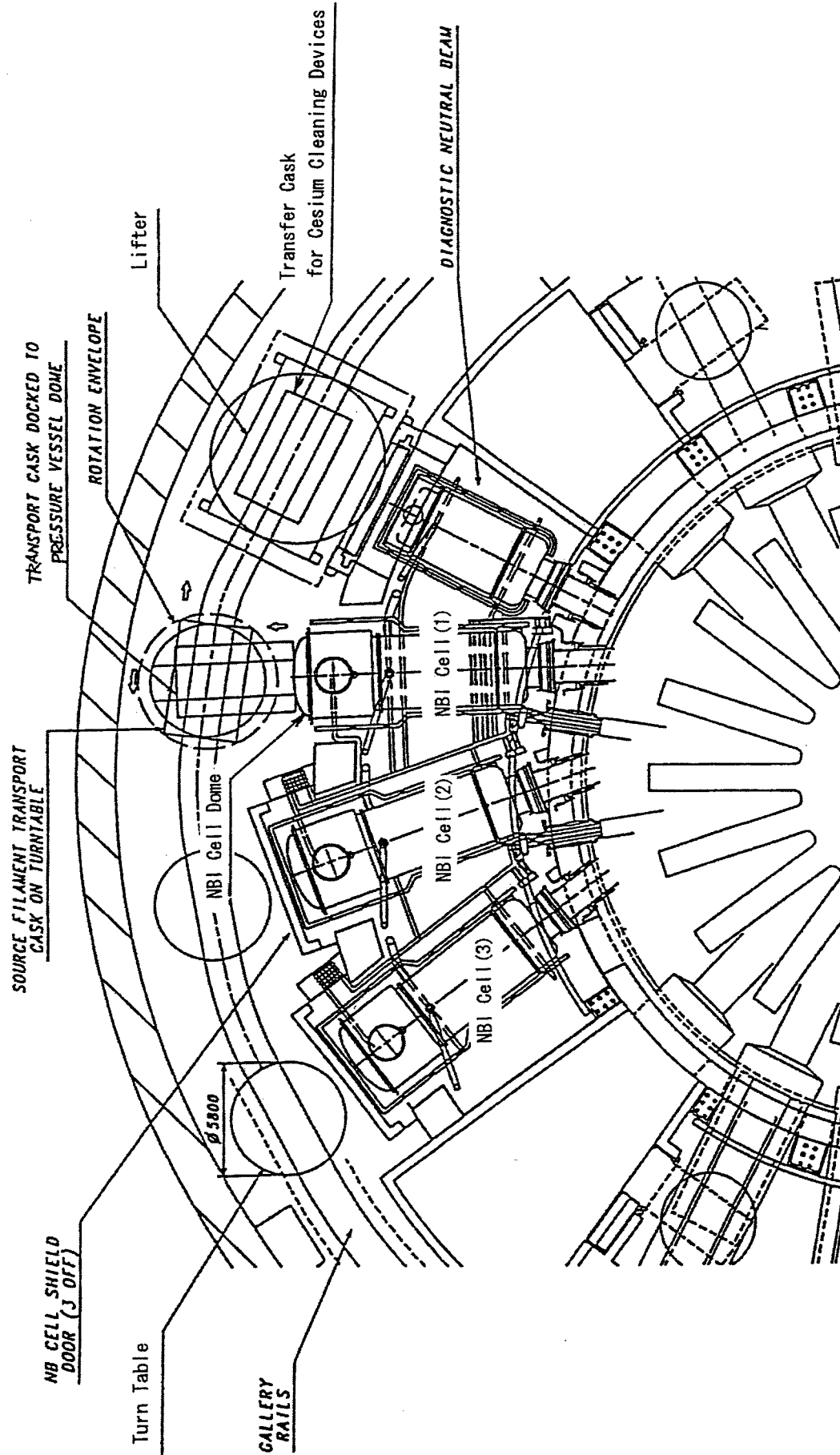


Fig. 3.1-3 Transfer Pass to NBI Cell Dome on NBI Floor of Transfer Cask for Cesium Cleaning Devices

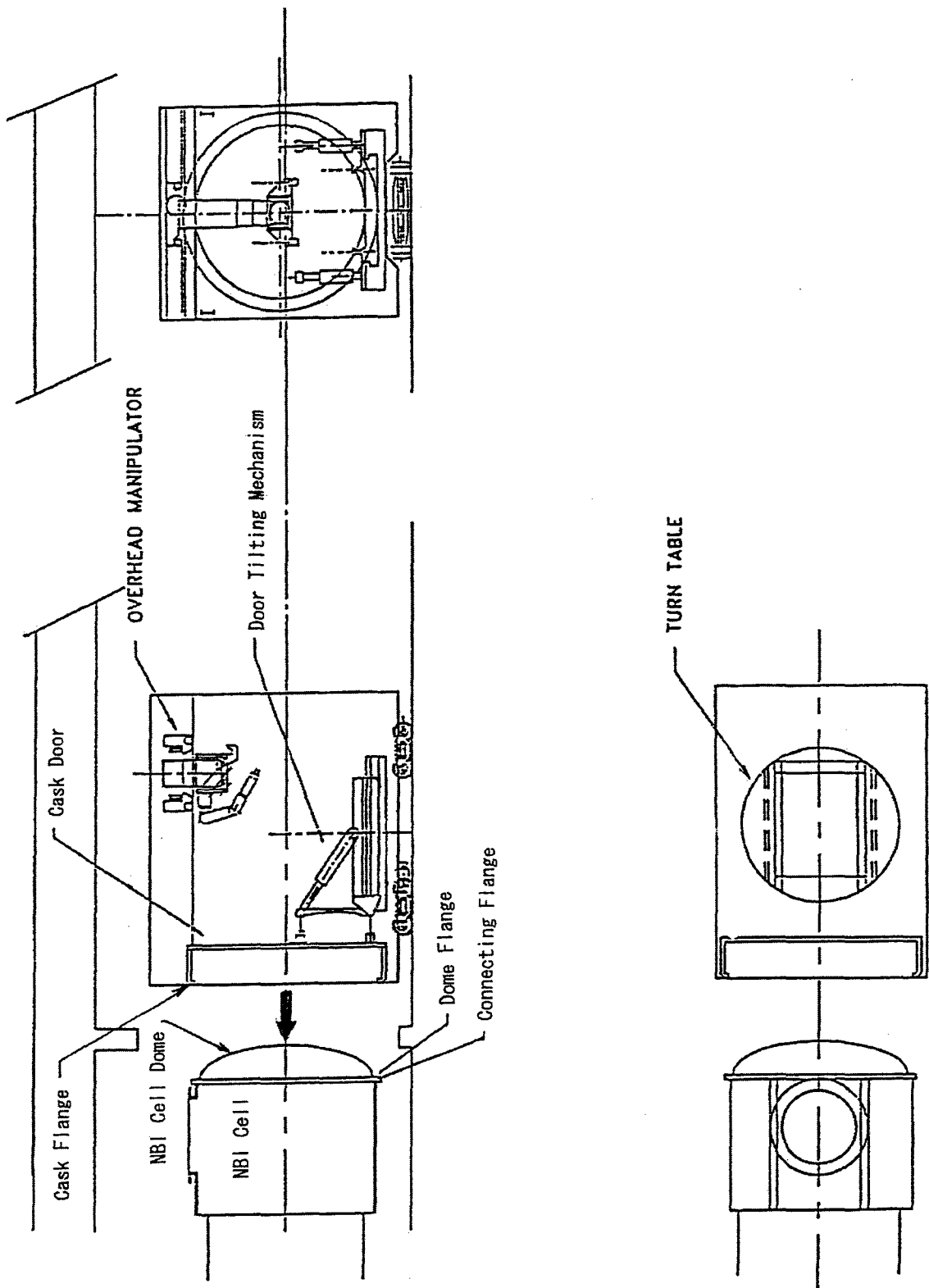


Fig. 3.1-4 Connecting between NBI Cell Dome and Transfer Cask

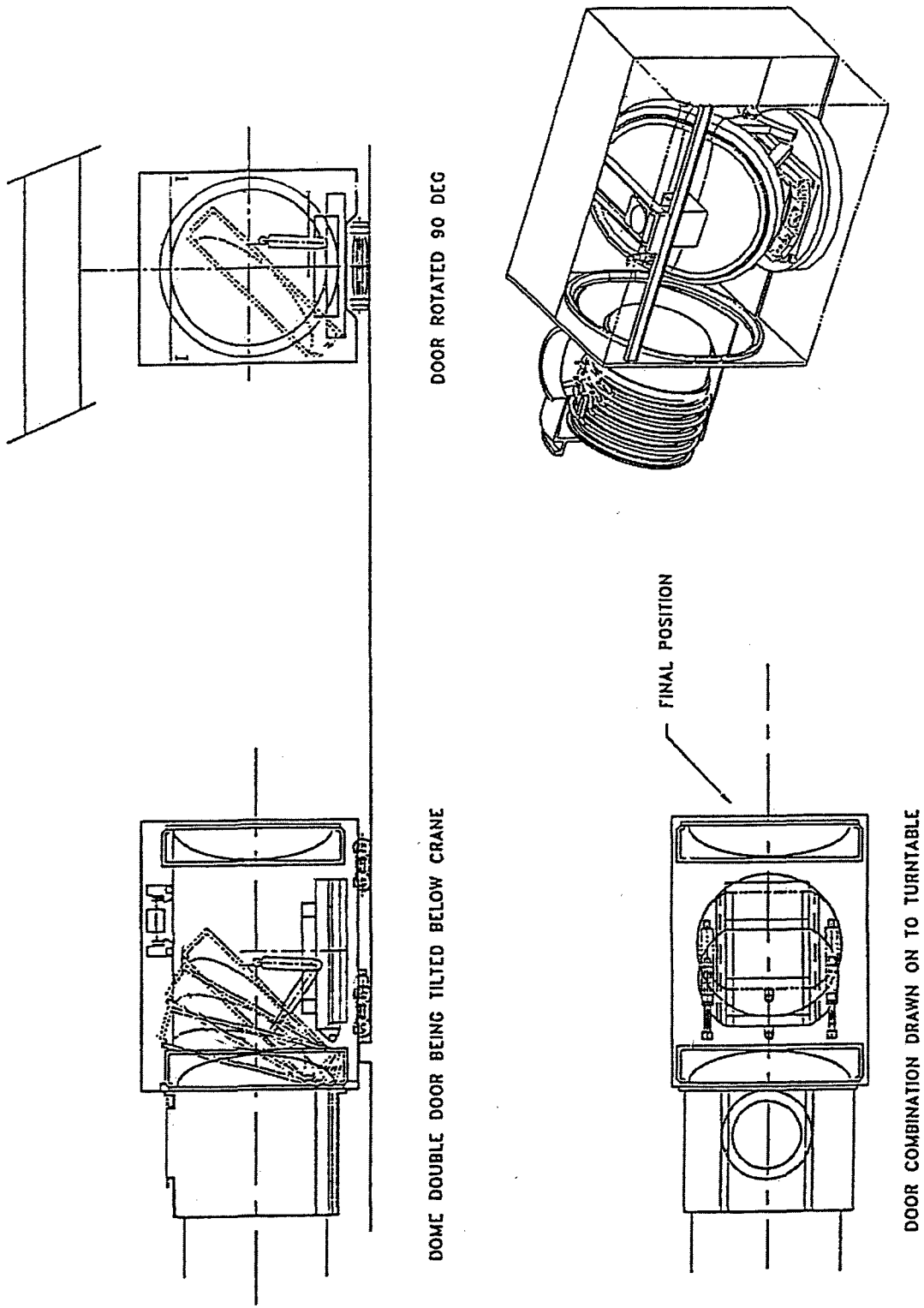


Fig. 3.1-5 Removal of Double Seal Door



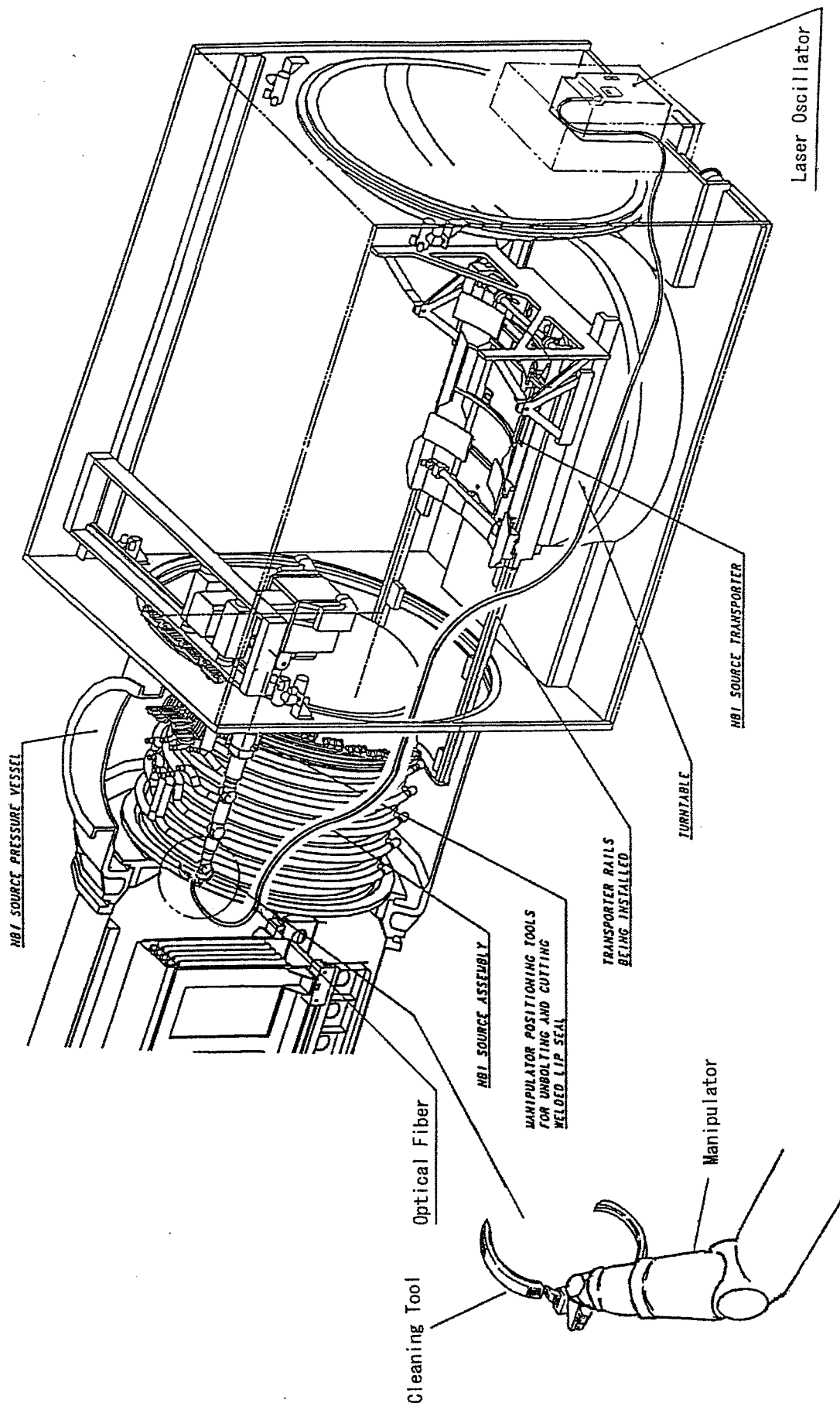
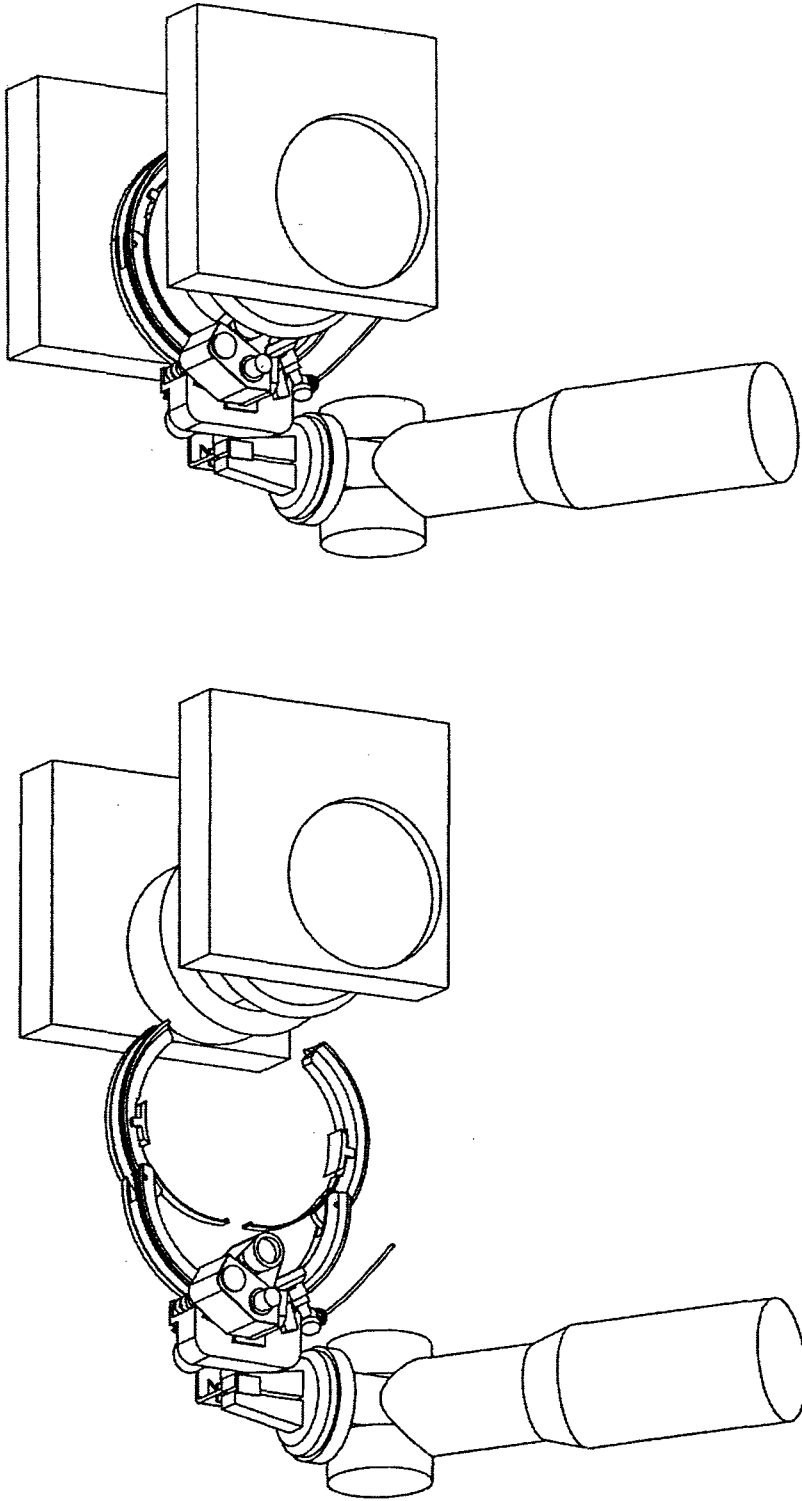


Fig. 3.1-6 Cesium Cleaning Tool Transfer by Manipulator to Insulators



(a) Before clamping an insulator

(b) Clamping an insulator

Fig. 3.1-7 Installation of Cleaning Tool on Insulators

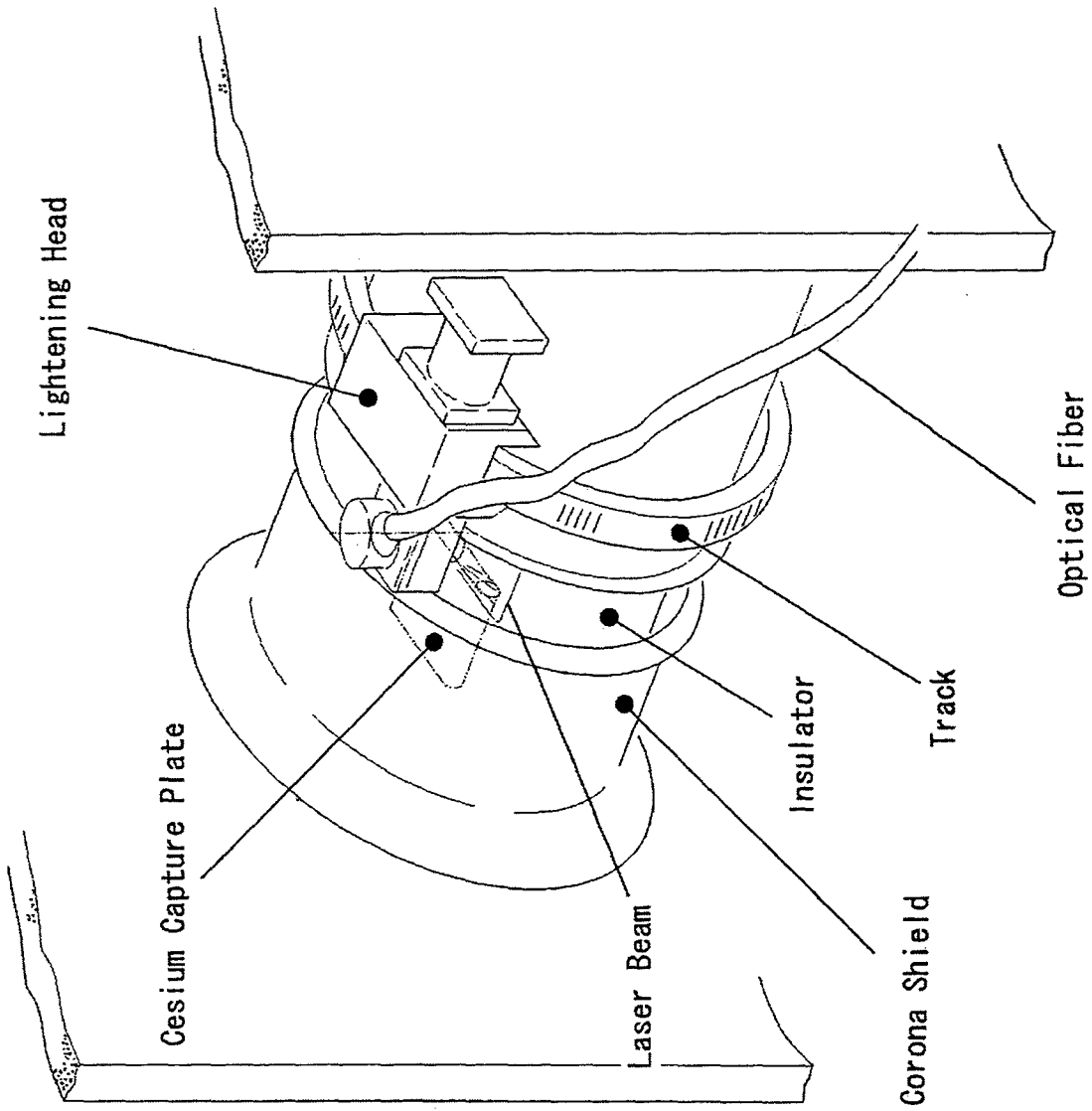


Fig. 3.1-8 Conceptual Drawing for Cesium Cleaning

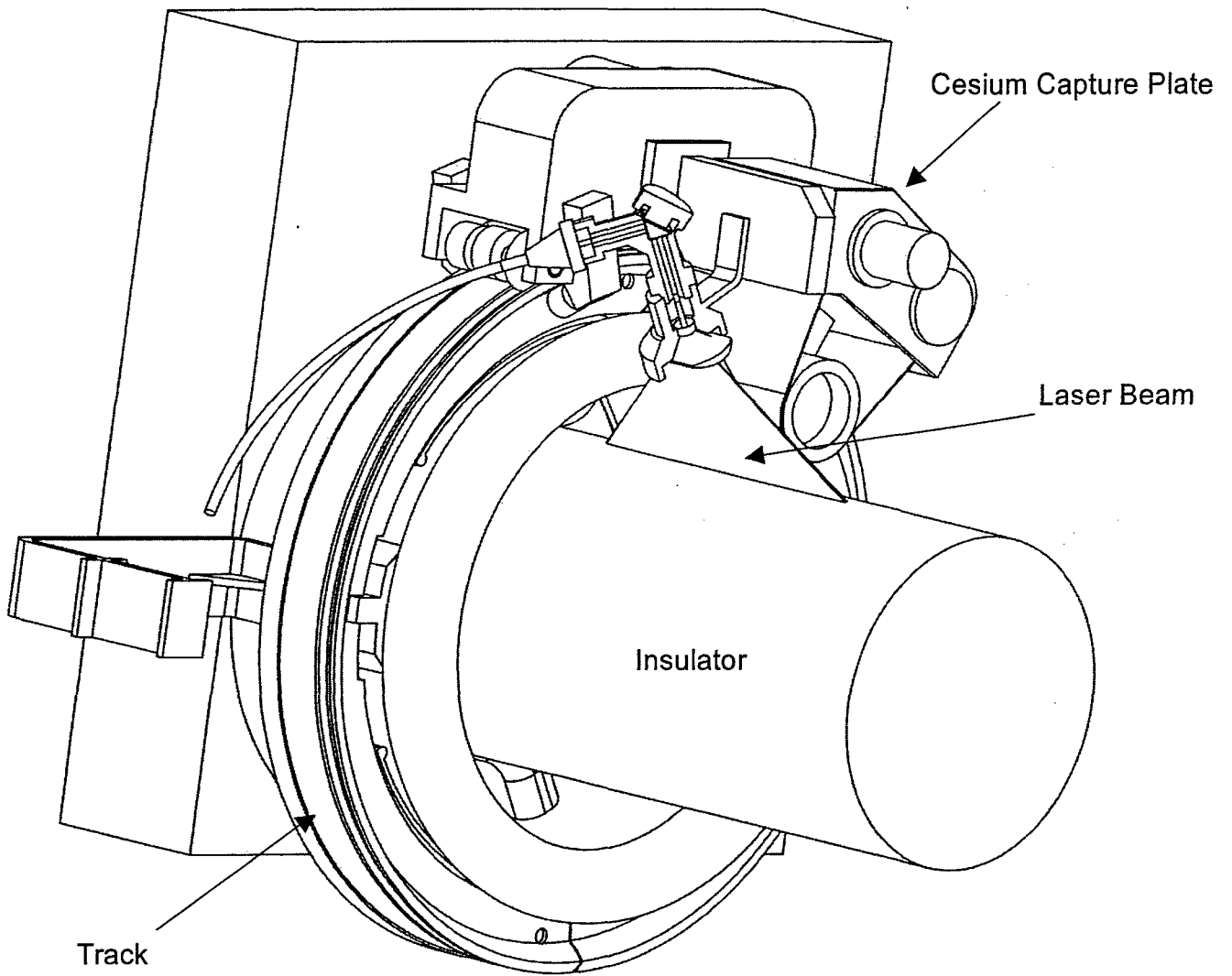


Fig. 3.1-9 Conceptual 3D-Drawing for Cesium Cleaning

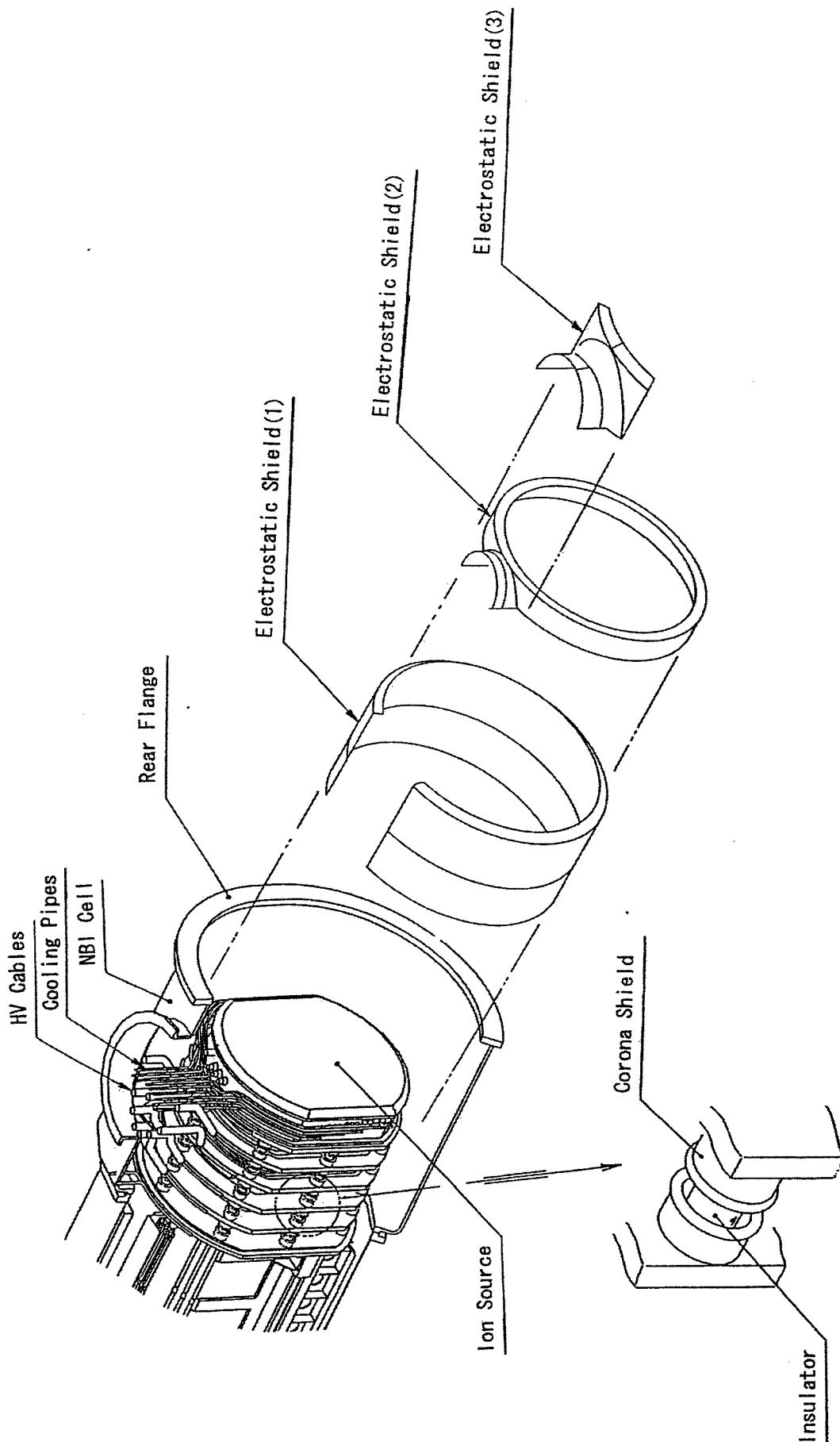


Fig. 4.1-1 NBI Injector Viewed from Rear Flange

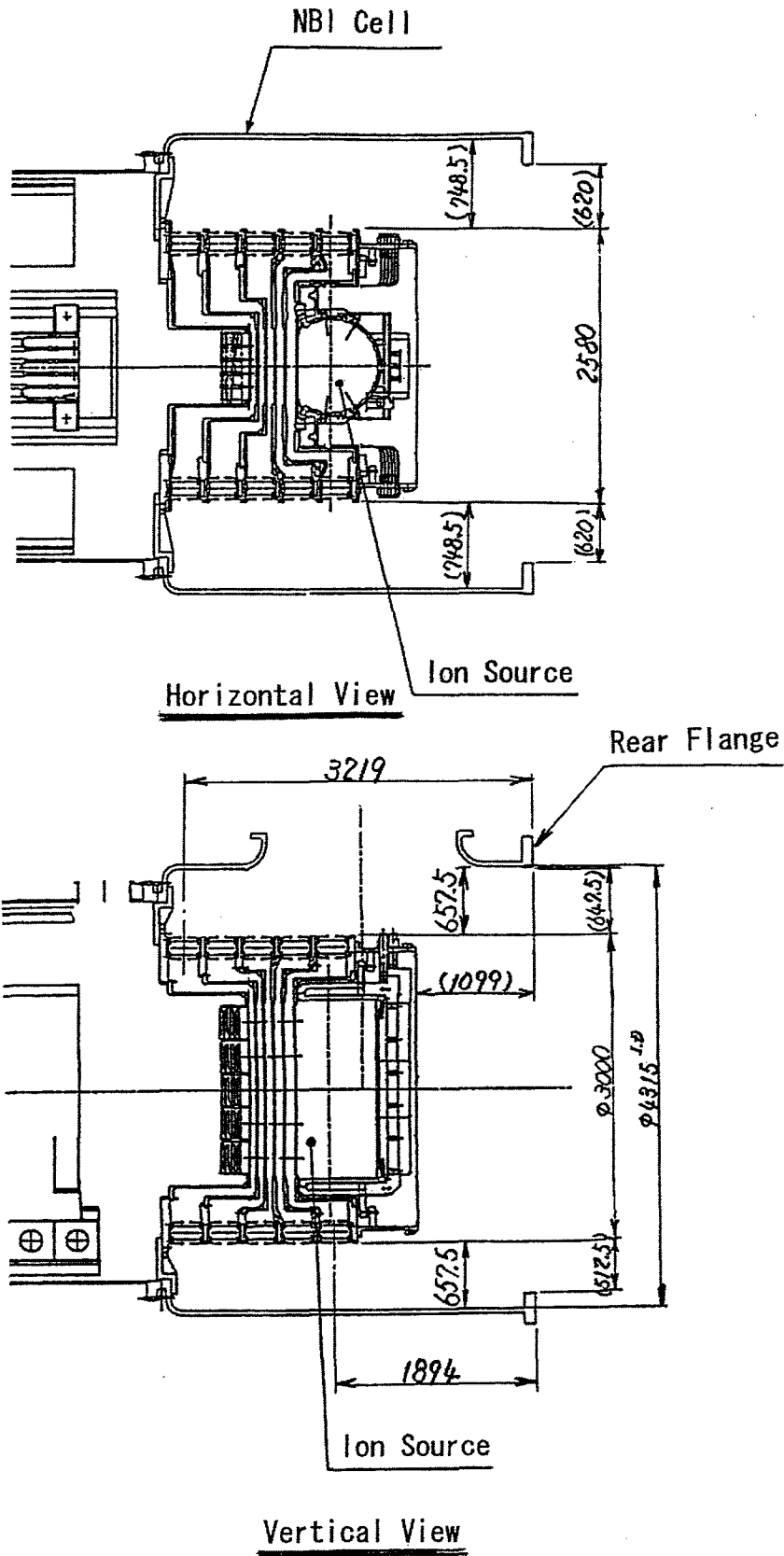


Fig. 4.1-2 Space between NBI Cell Inner Wall and Ion Source

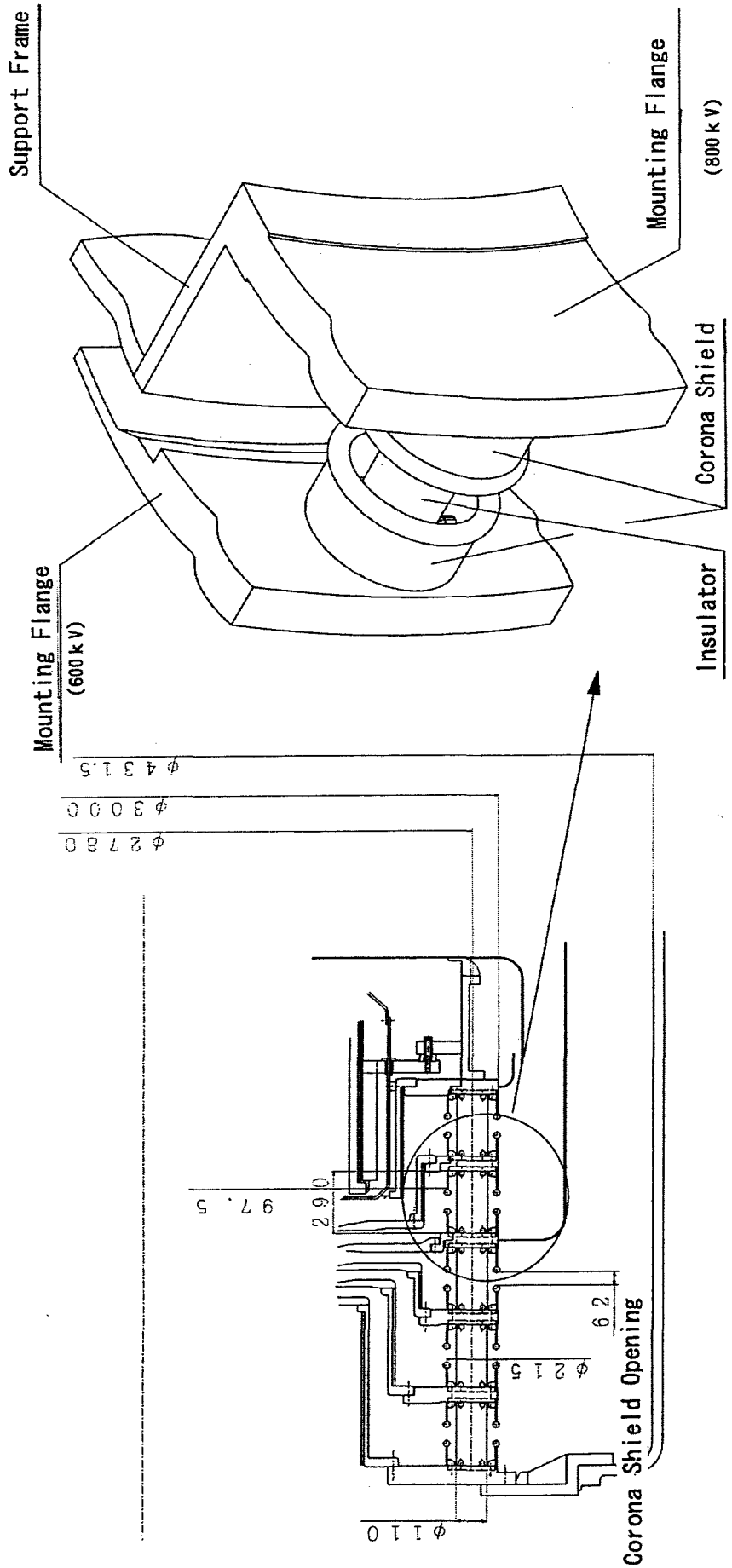


Fig. 4.1-3 Structure around Insulator

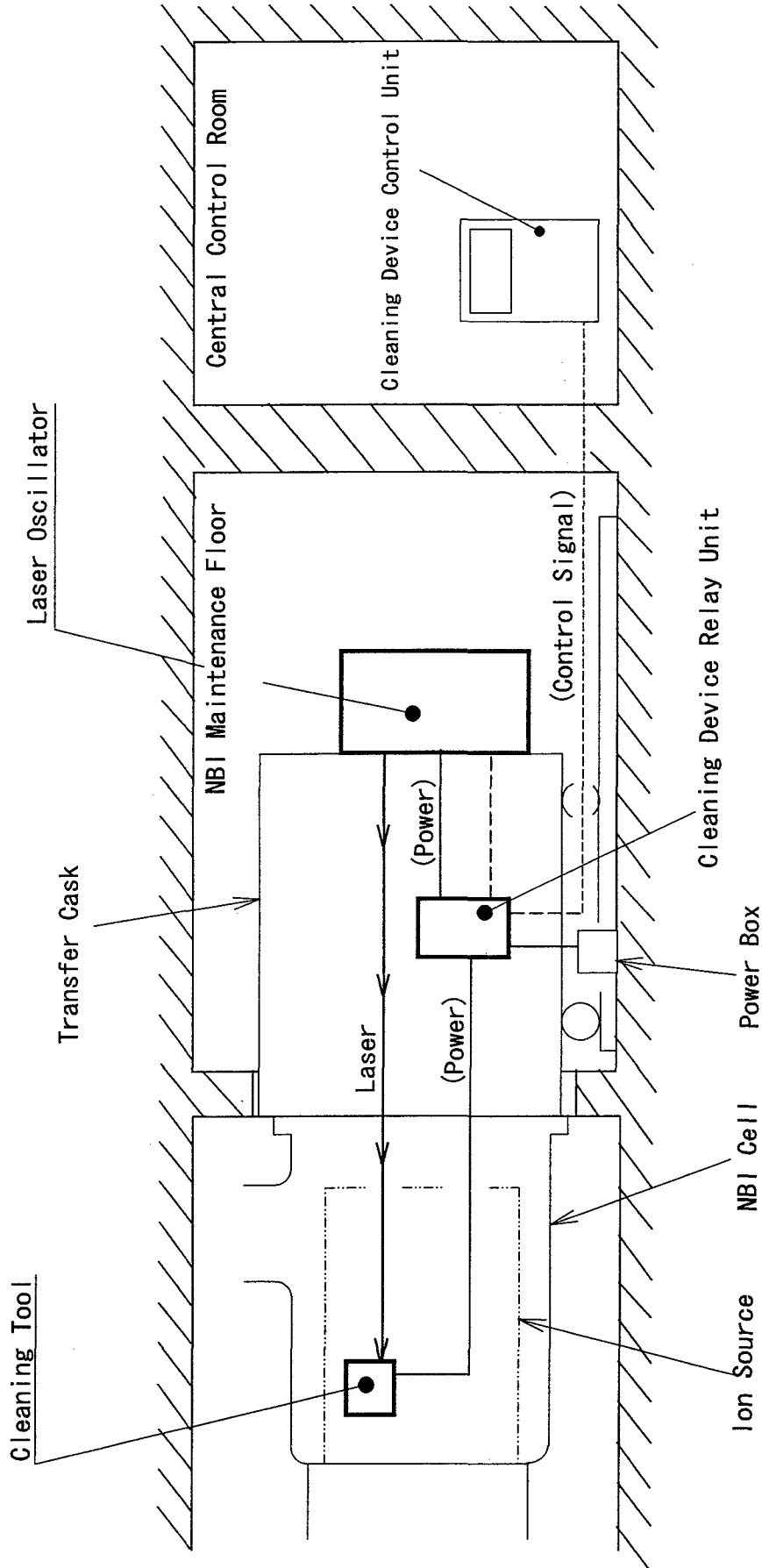


Fig. 4.2-1 System of Cesium Cleaning Device (Laser System)



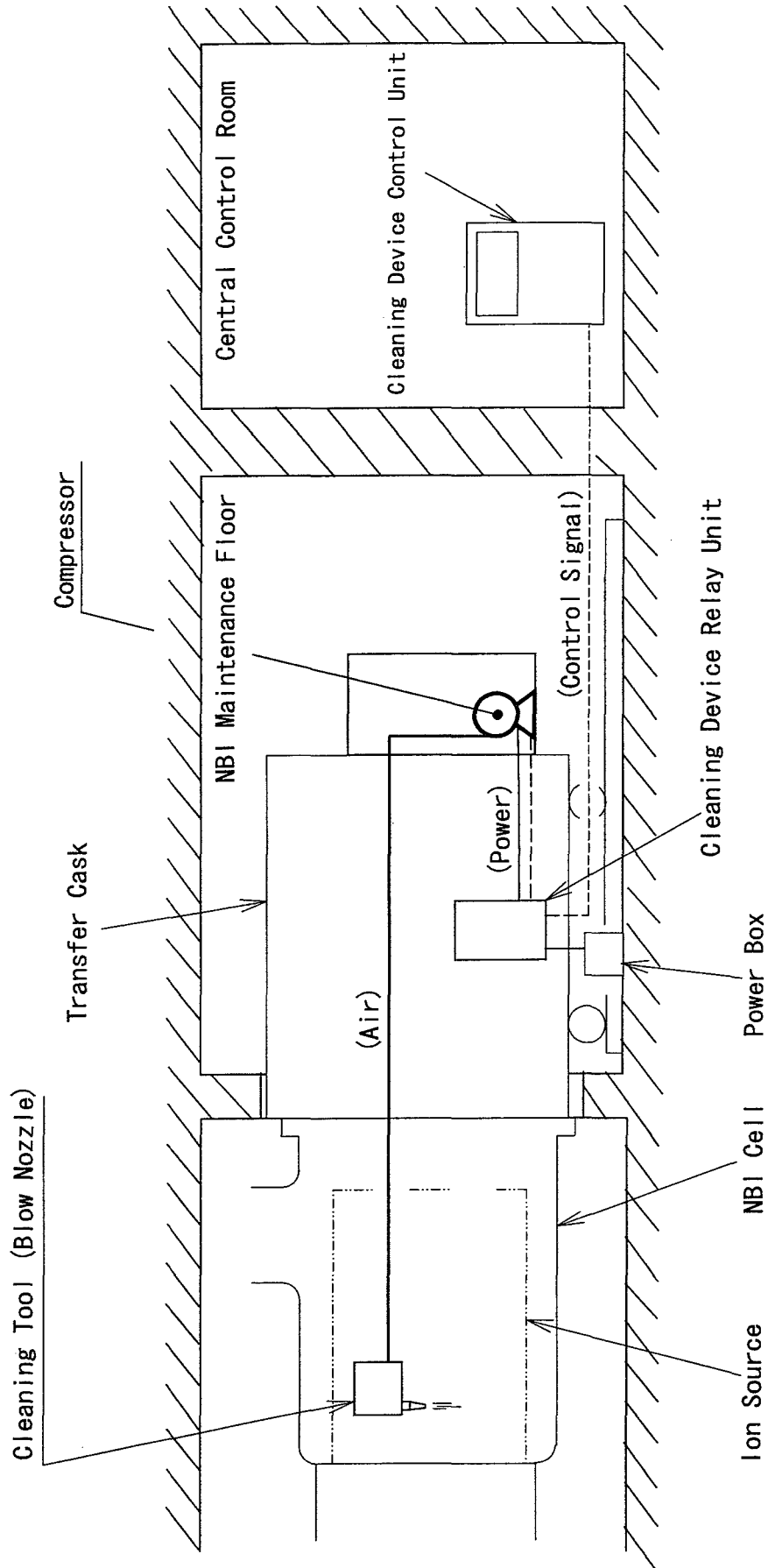


Fig. 4.2-2 System of Cesium Cleaning Device (Pneumatic Air System)

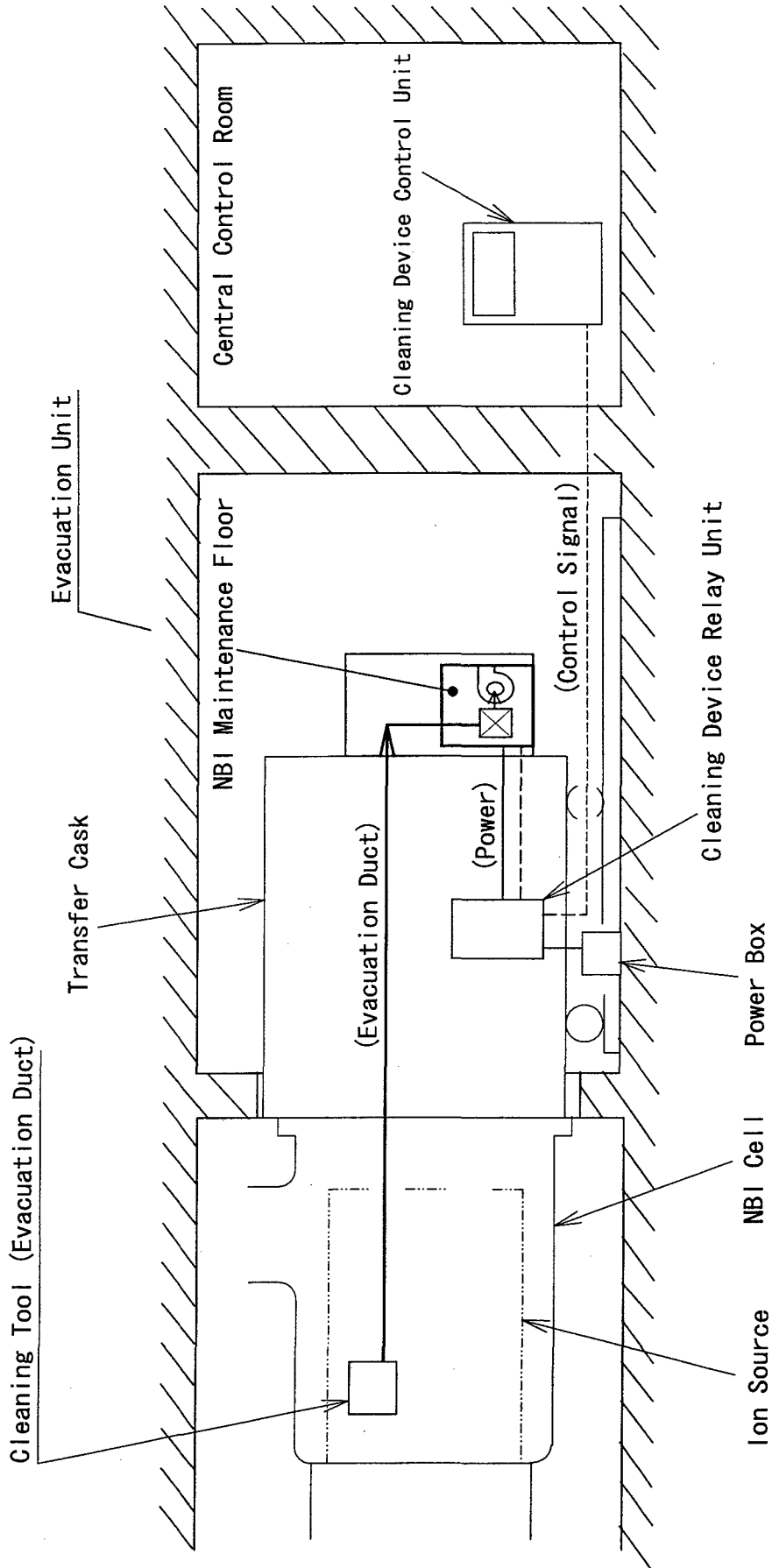


Fig. 4.2-3 System of Cesium Cleaning Device (Evacuation System)

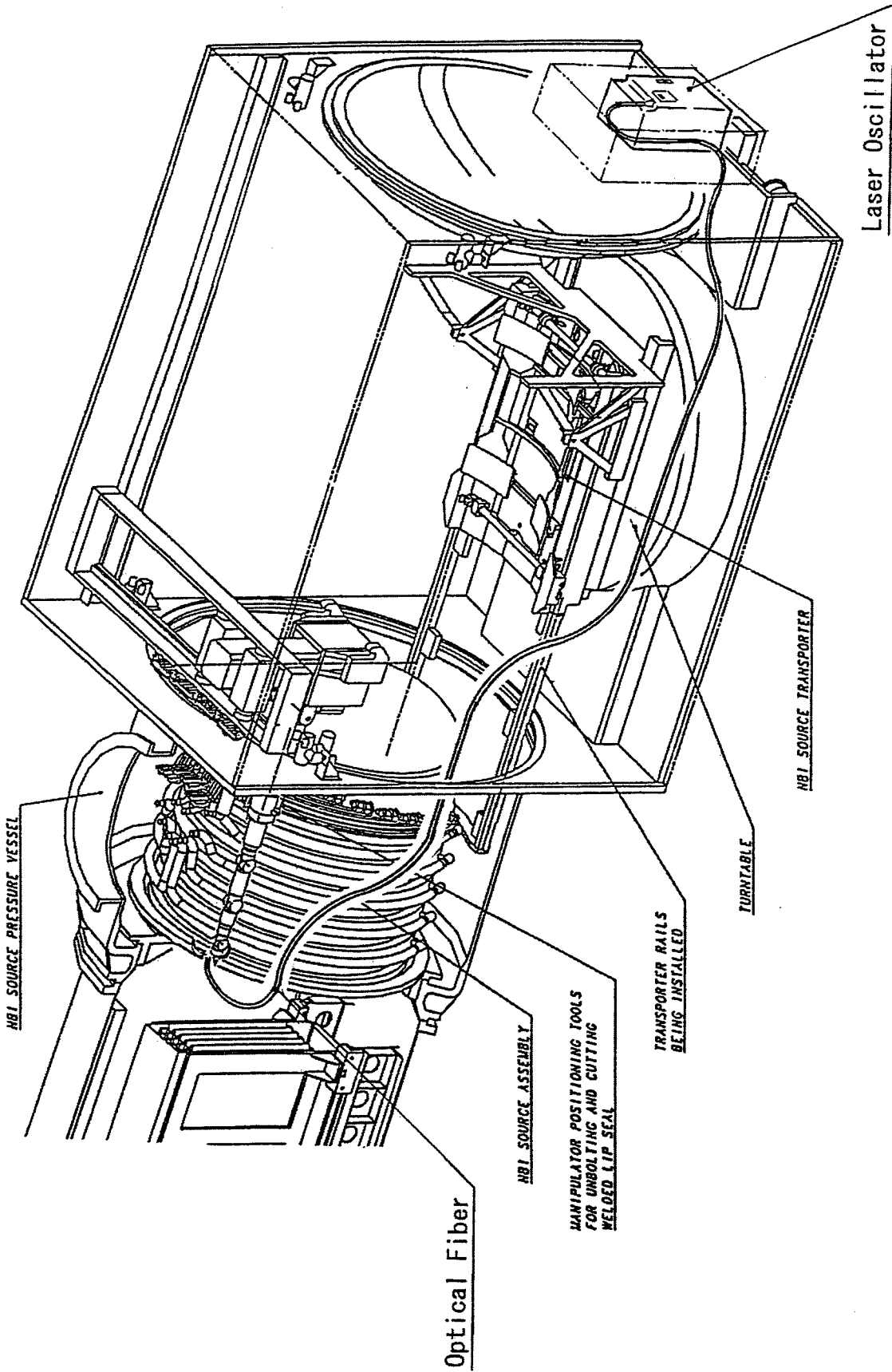


Fig. 4.2-4 Routing of Optical Fiber

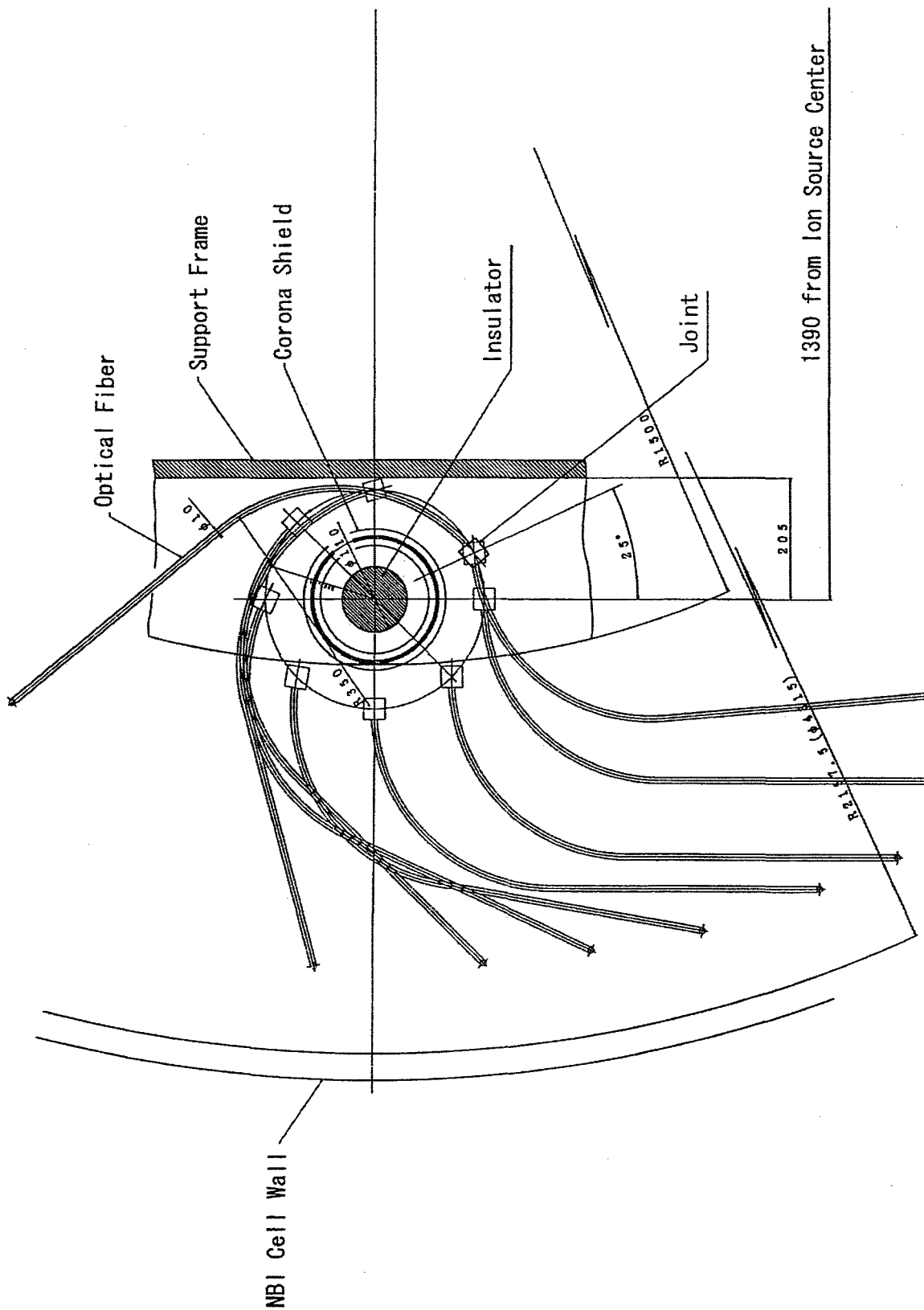


Fig. 4.2-5 Positions of Optical Fiber around Insulator

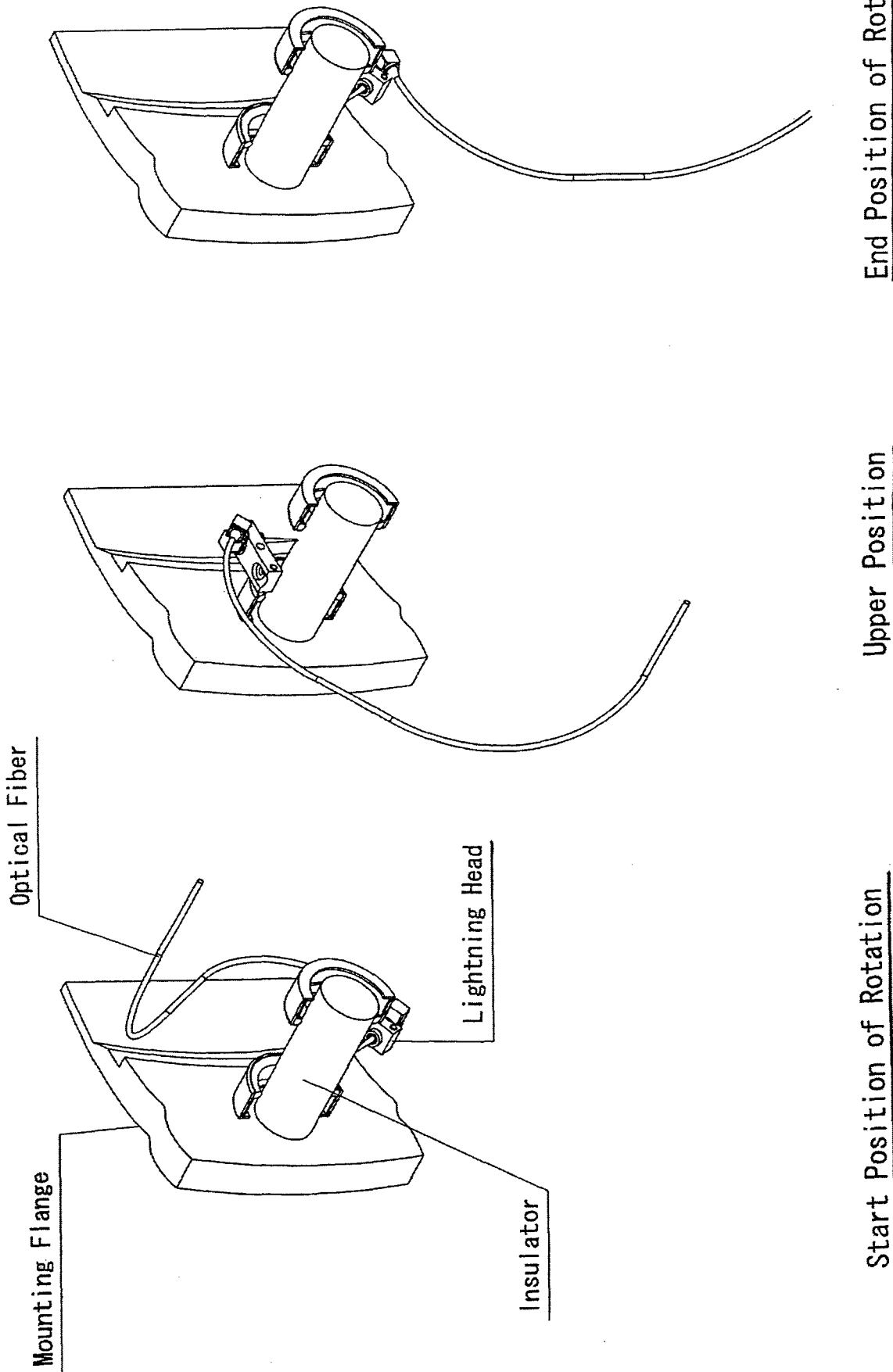


Fig. 4.2-6 Routing of Optical Fiber around insulator

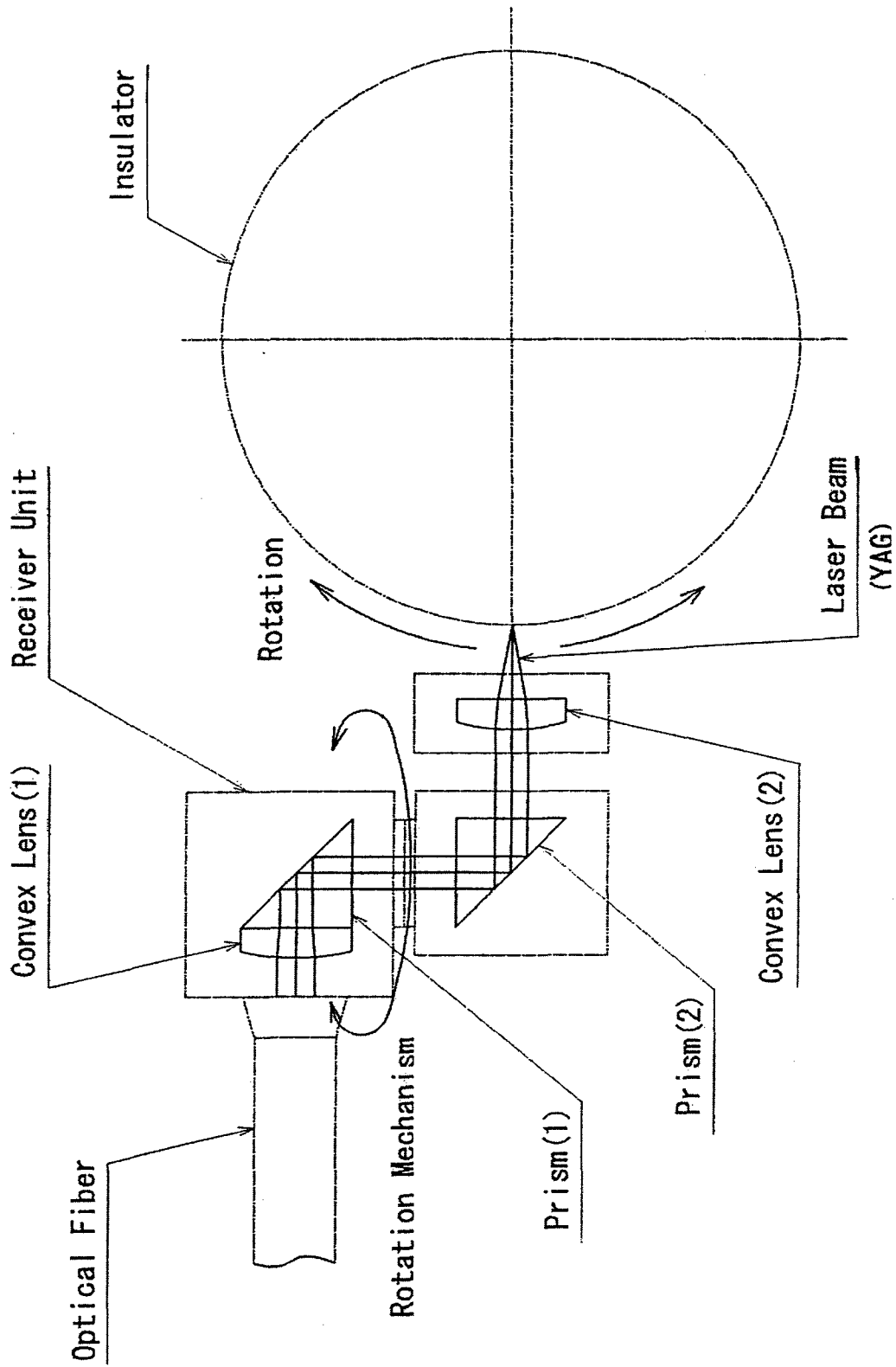


Fig. 4.2-7 Optical Path in Laser Optics

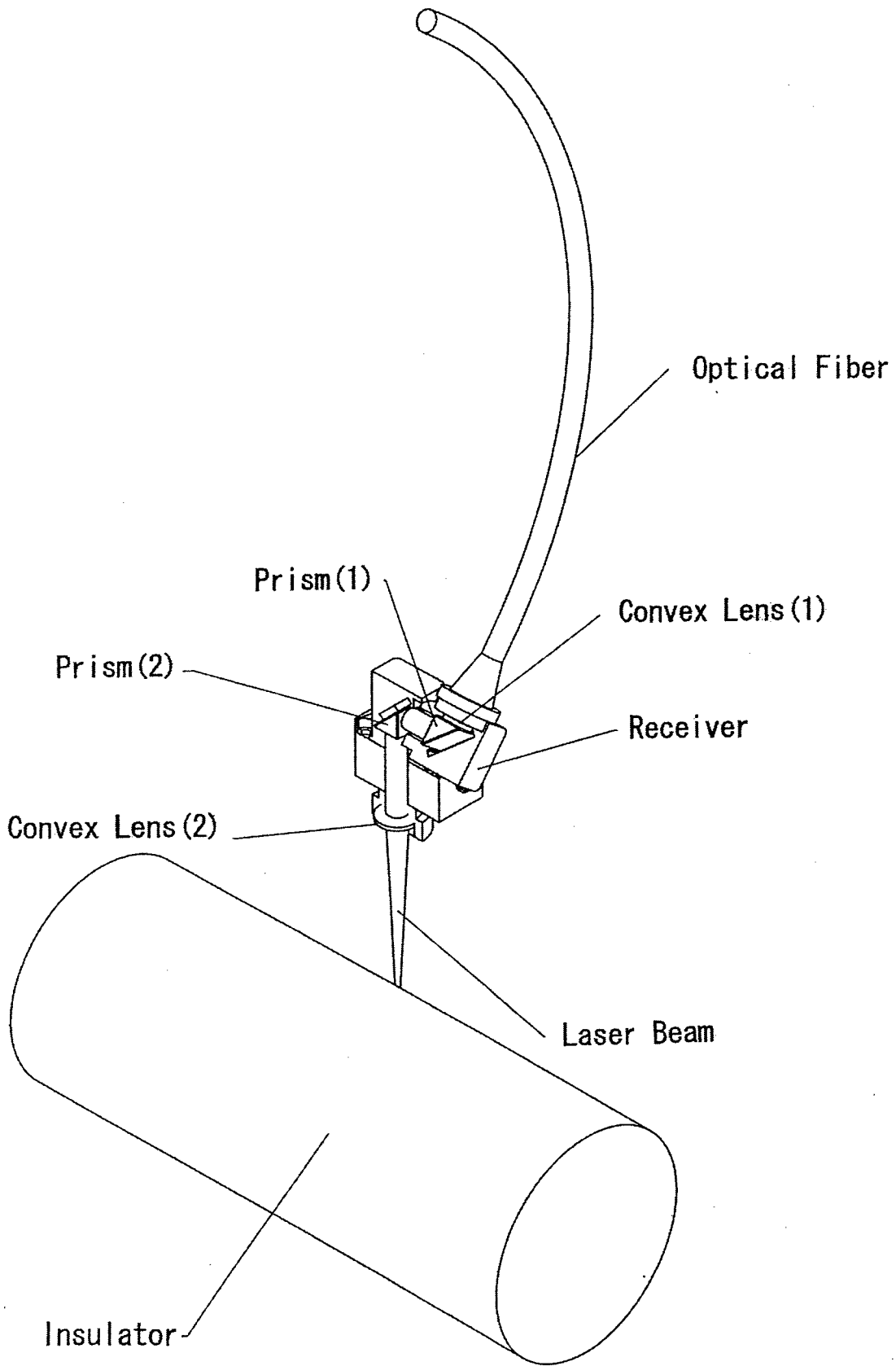


Fig. 4.2-8 Conceptual design of Laser Optics

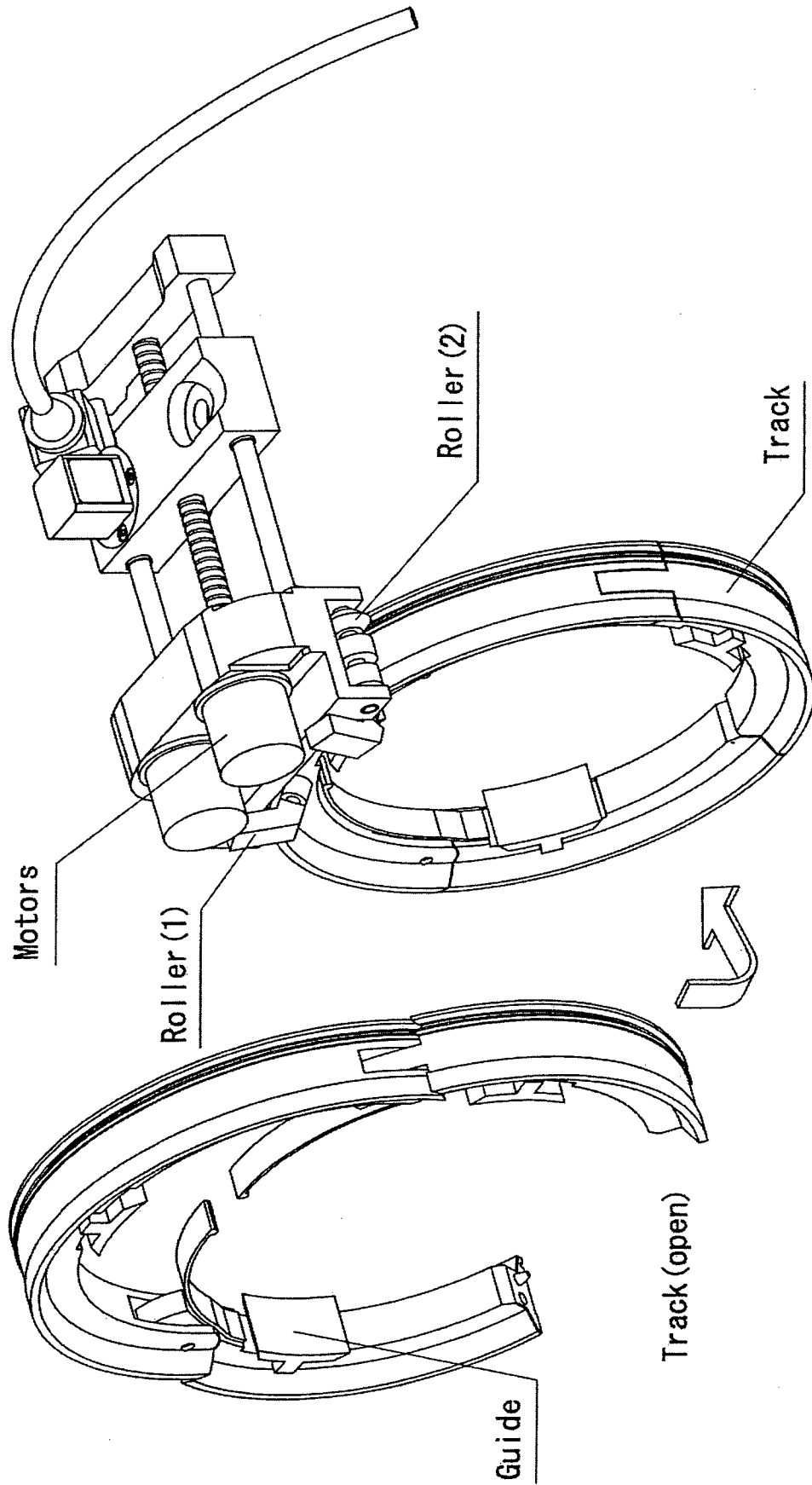


Fig. 4.2-9 Rotation Mechanism



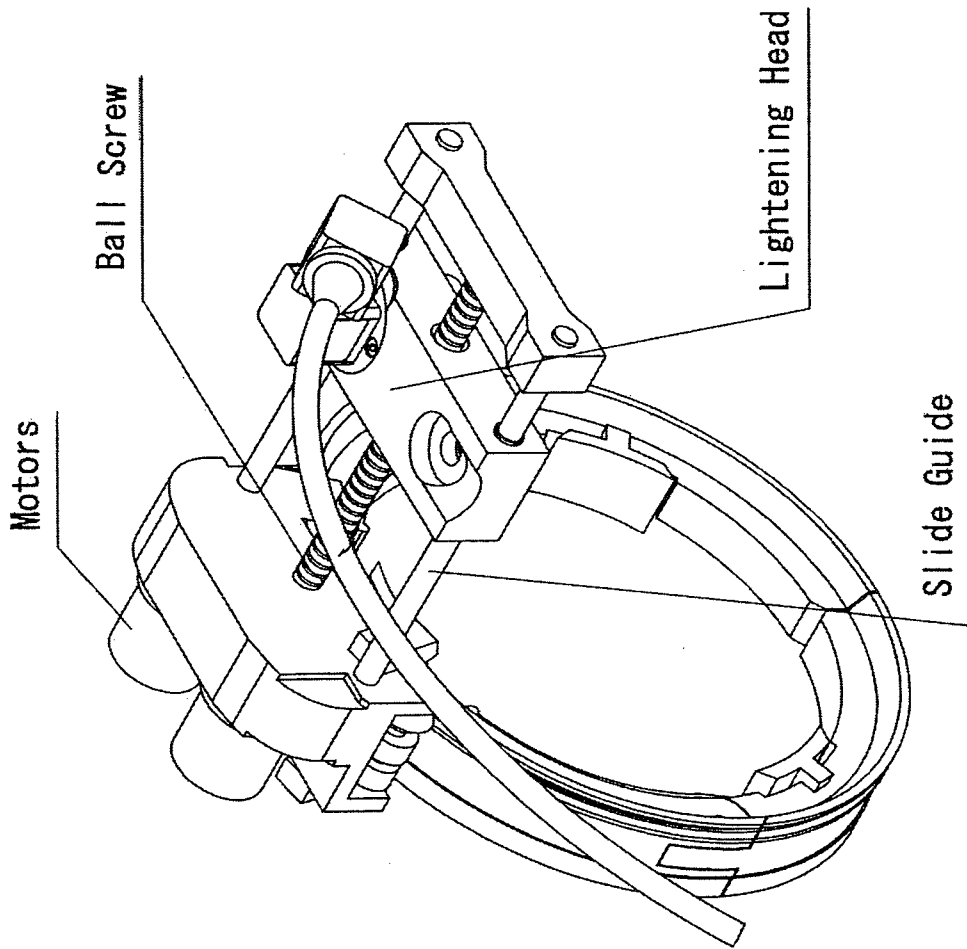


Fig. 4.2-10 Linear-motion Mechanism

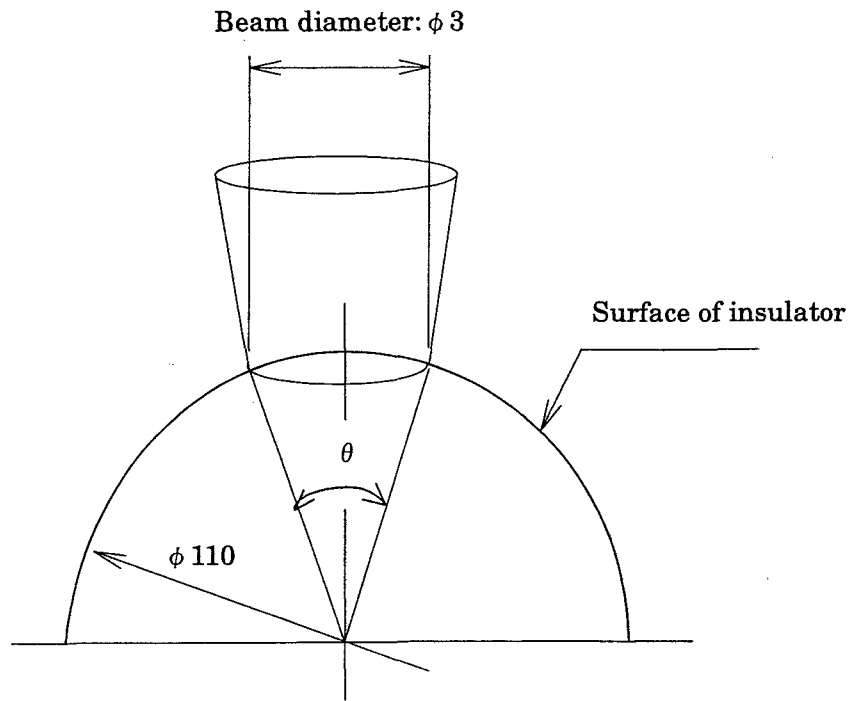
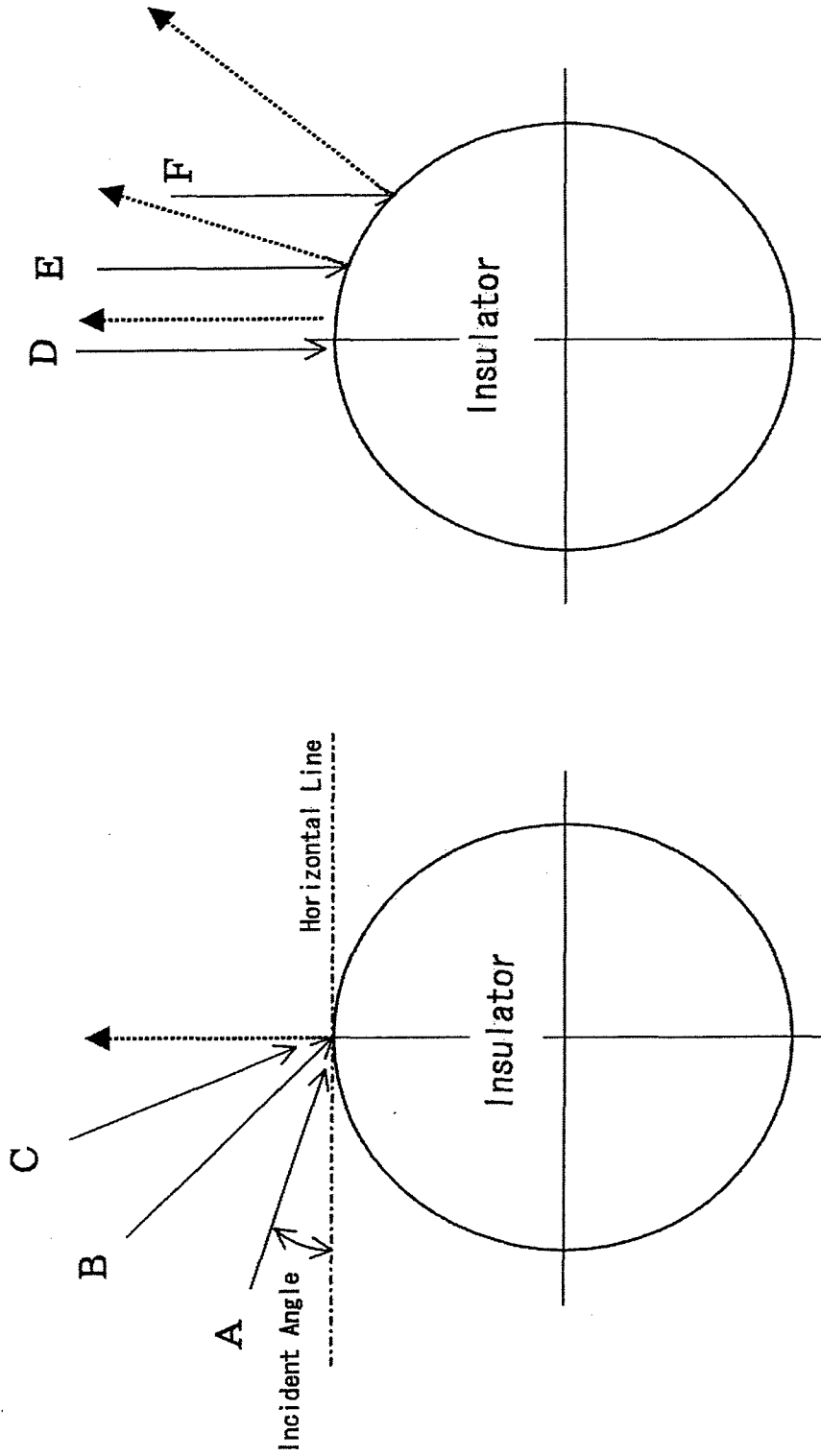


Fig. 4.2-11 Relationship of a beam diameter and positioning accuracy



(a) The Case in that Laser Incident Angle Varies (b) The Case in that Laser Incident Position Varies

Fig. 4.2-12 Laser Incident Direction and Scattering Direction

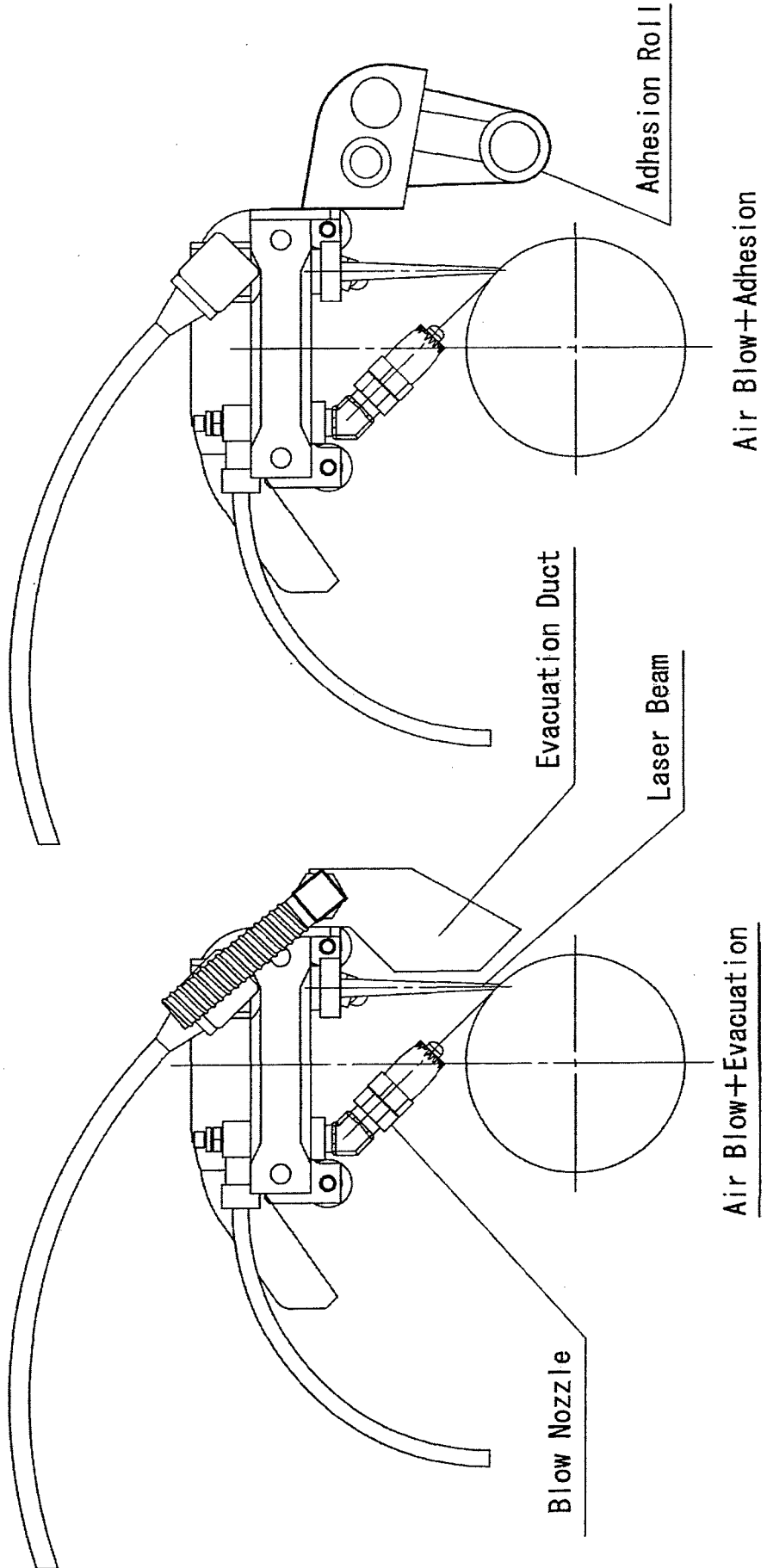


Fig. 4.2-13 Cesium Collection Mechanism

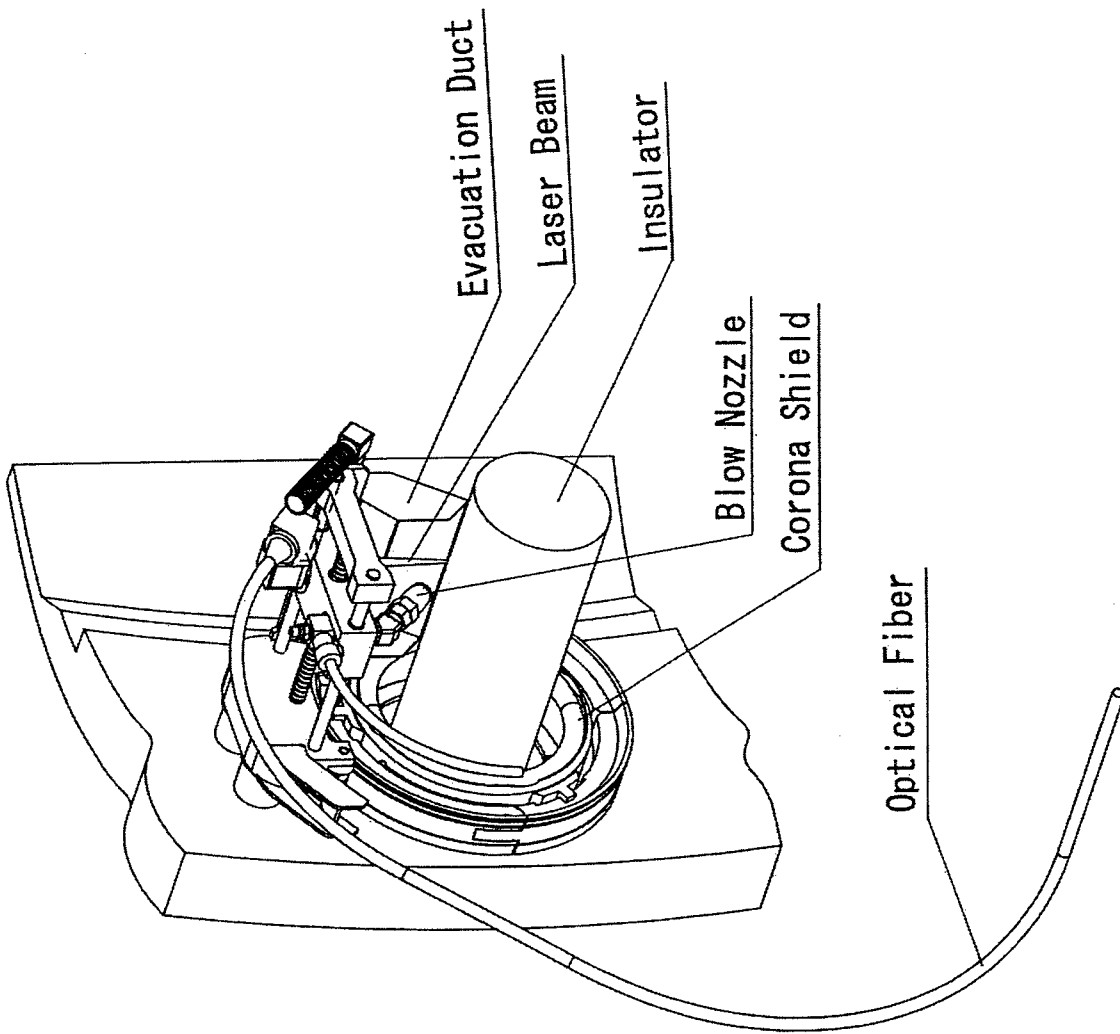


Fig. 4.3-1 Cesium Cleaning Tool (Evacuation Type)

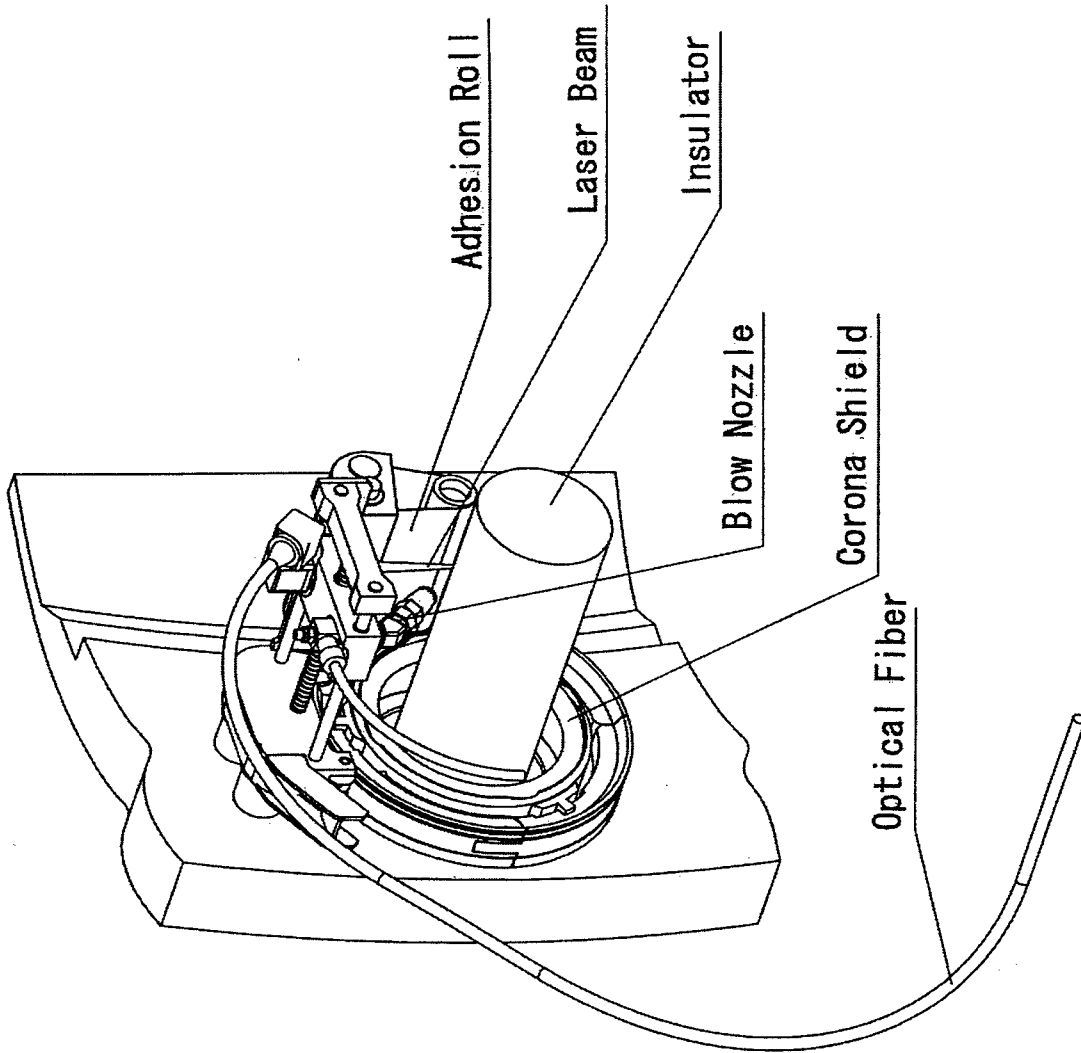


Fig. 4.3-2 Cesium Cleaning Tool (Adhesion Type)

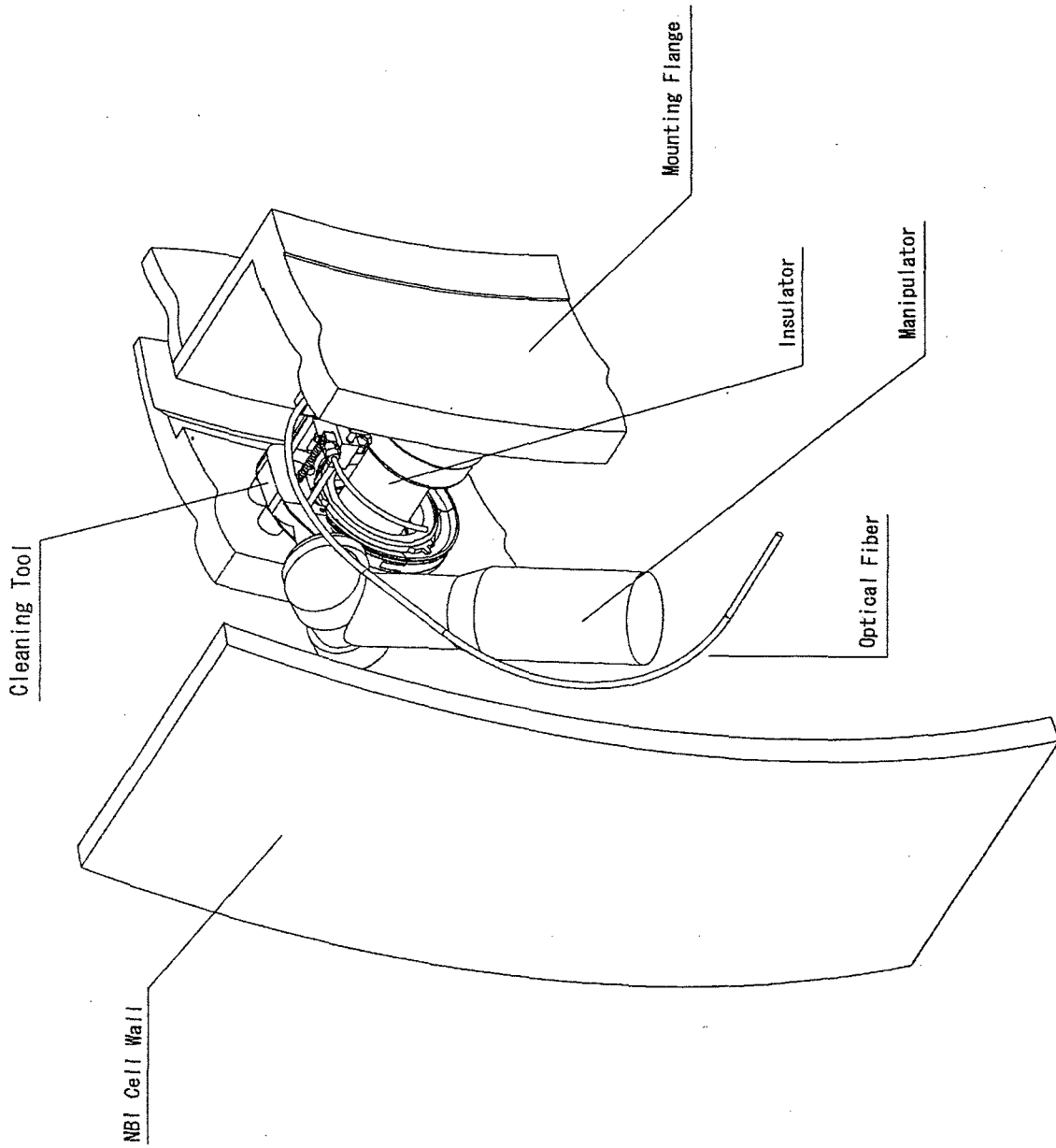


Fig. 4.3-3 Cesium Cleaning Tool Installed on Insulator

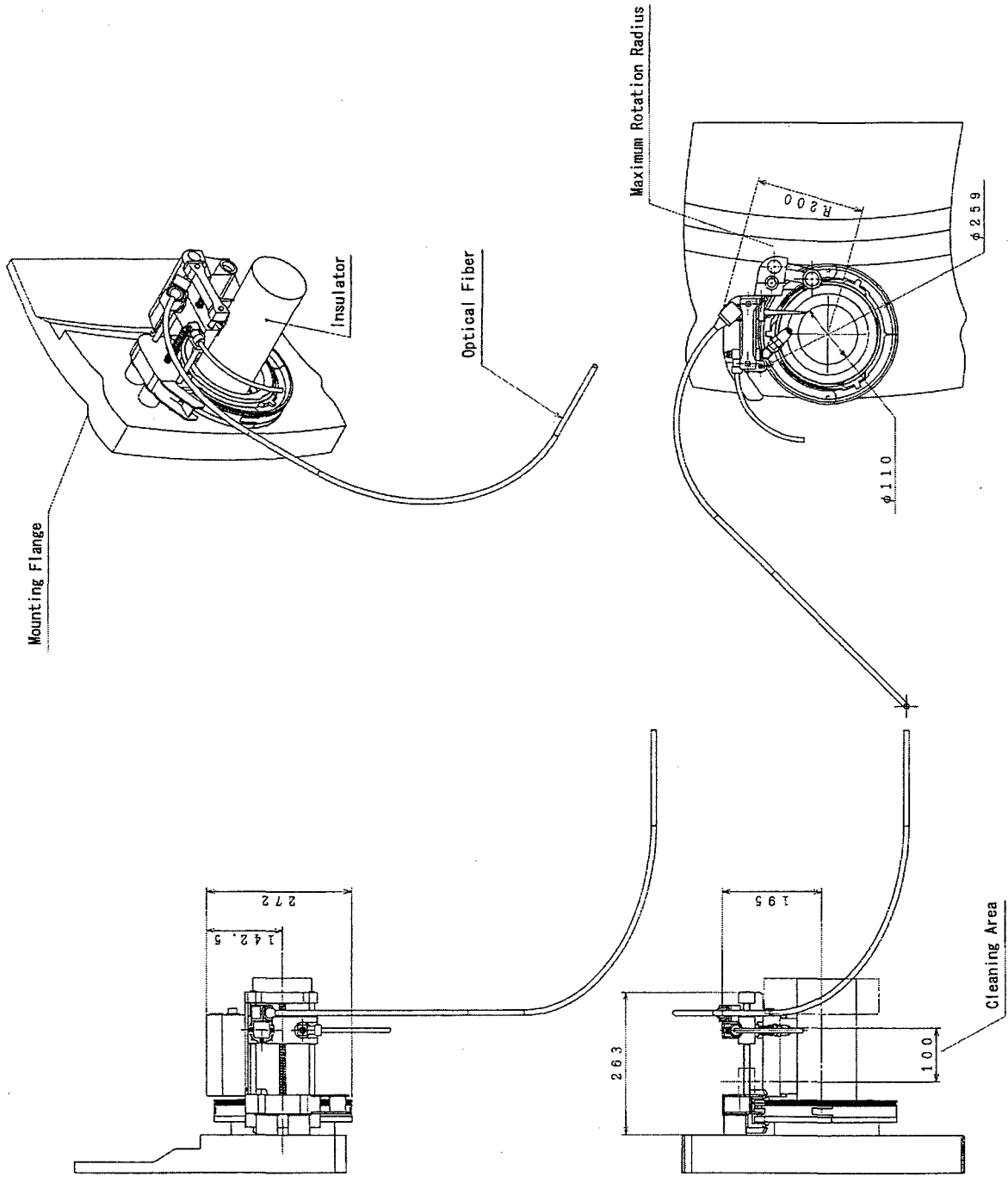
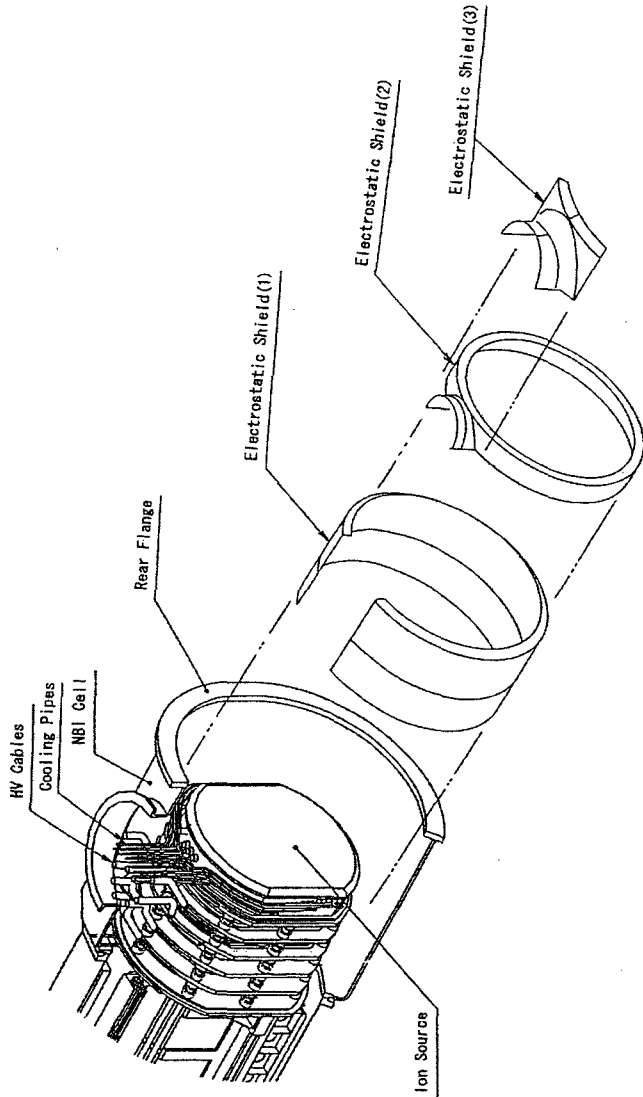
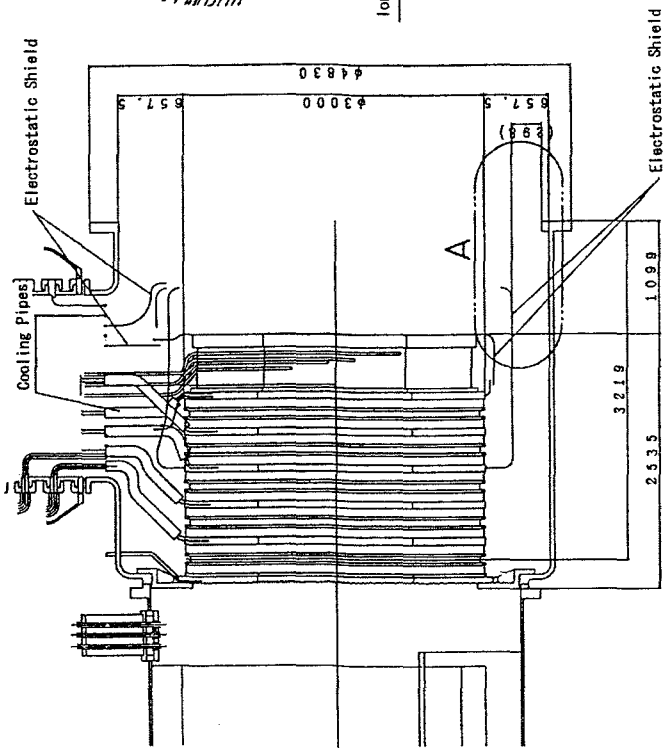


Fig. 4.3-4 Cesium Cleaning Tool (Adhesion Type)





(b) Assembly of electrostatic shield



(a) Sectional view of ion source

Fig. 5.1-1 Electrostatic Shield

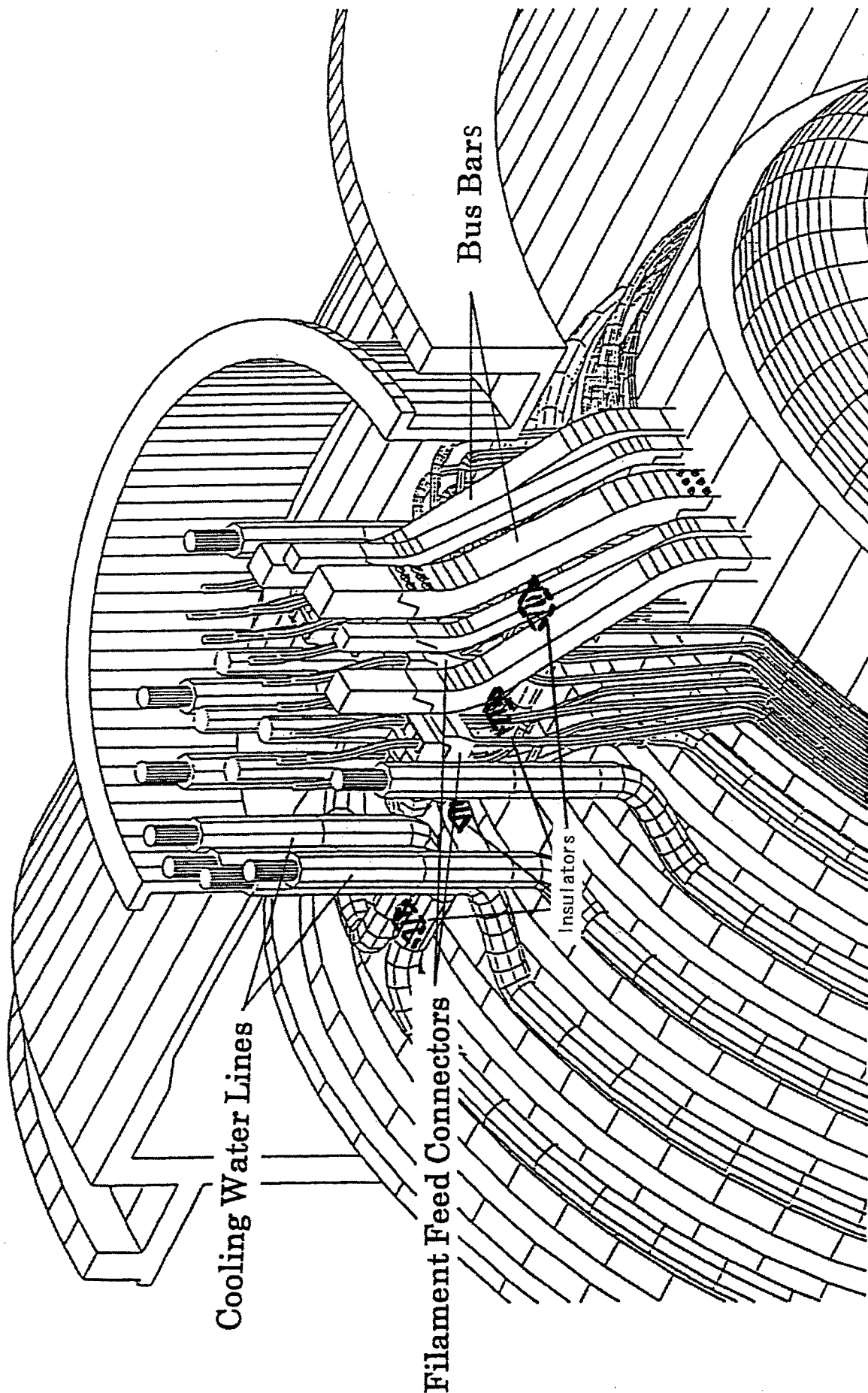


Fig. 5.2-1 Bird's-eye View of HV Cables and Cooling Pipes

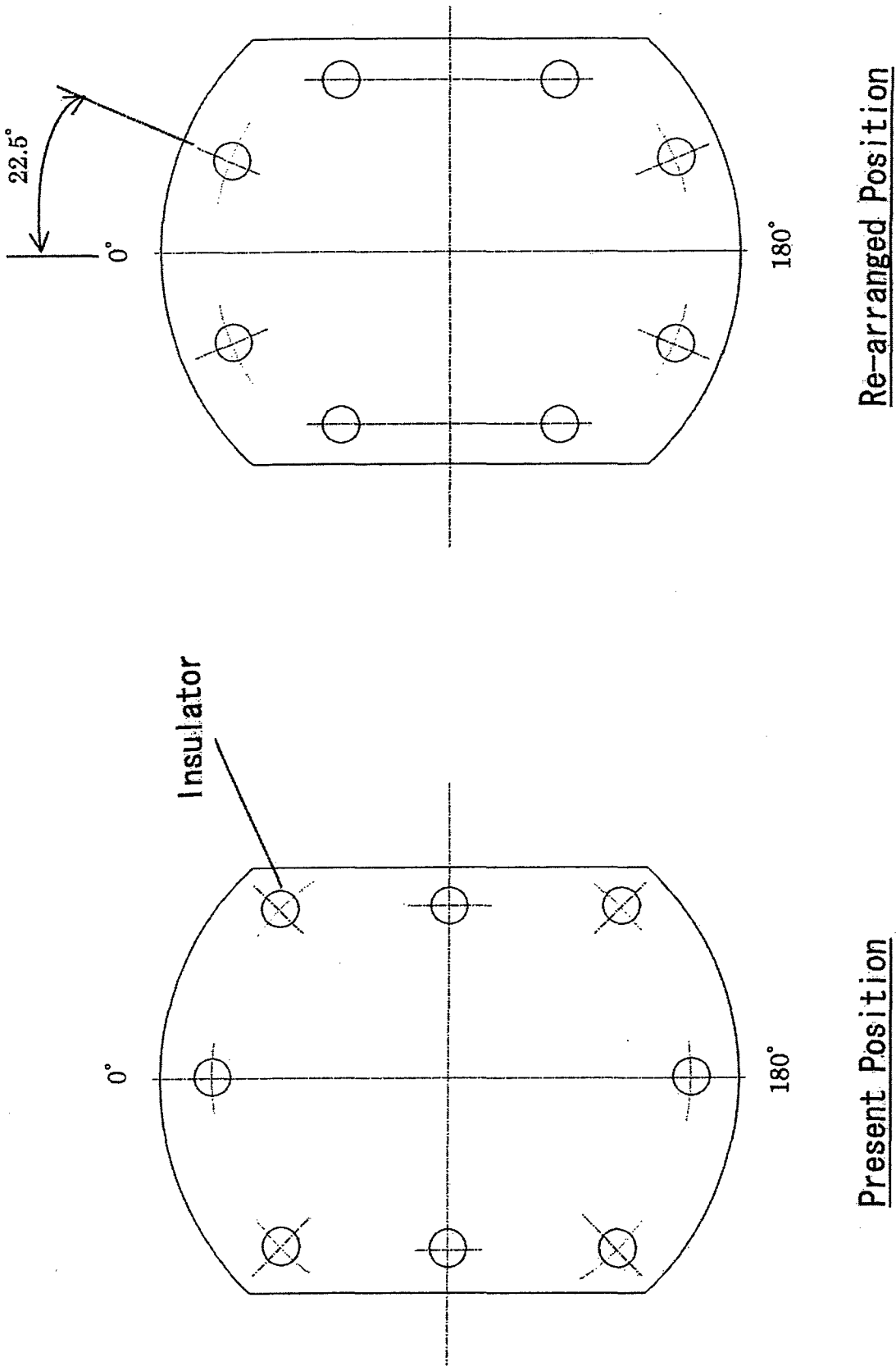


Fig. 5.2-2 Re-arranged Insulator Position

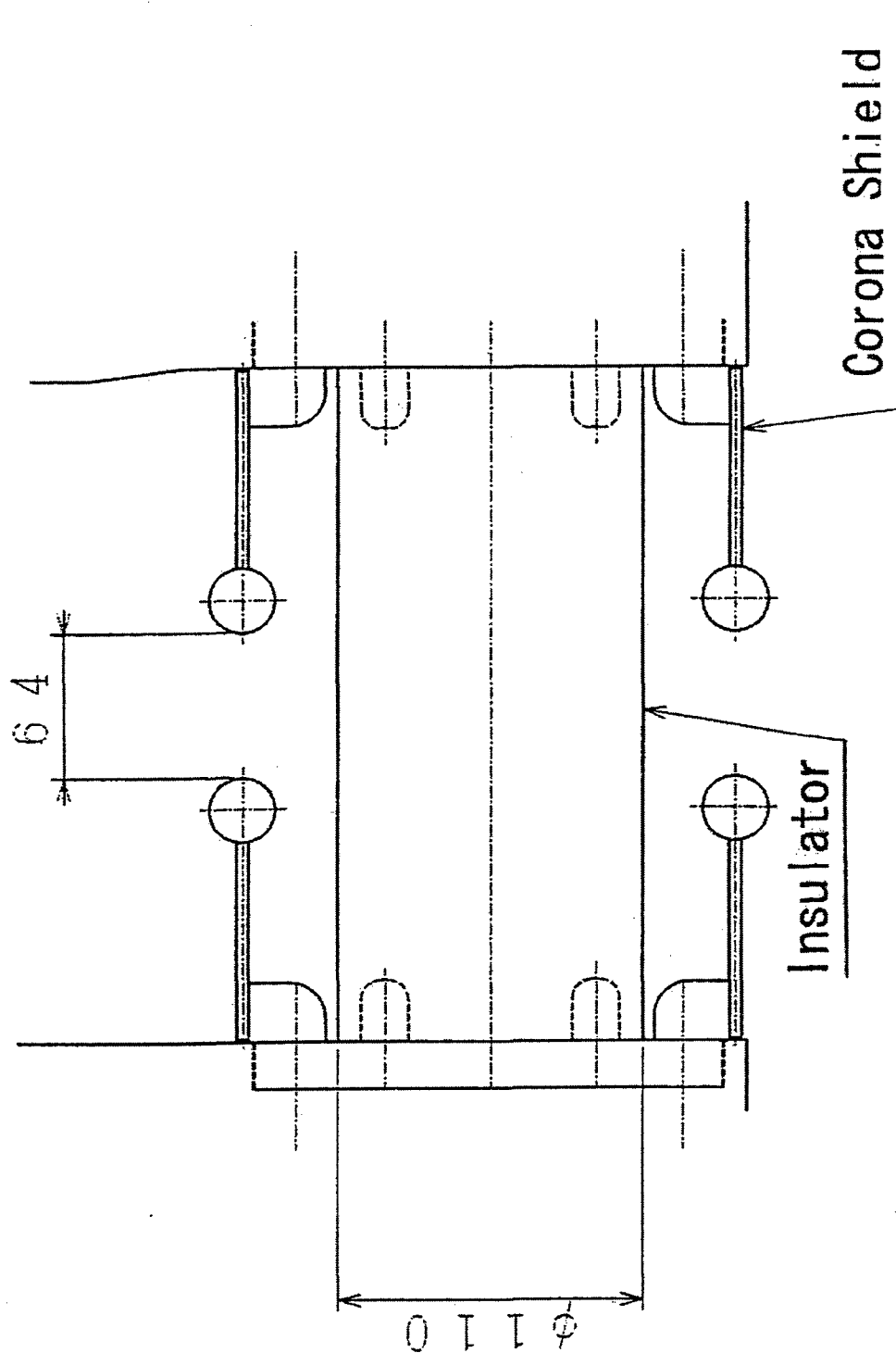
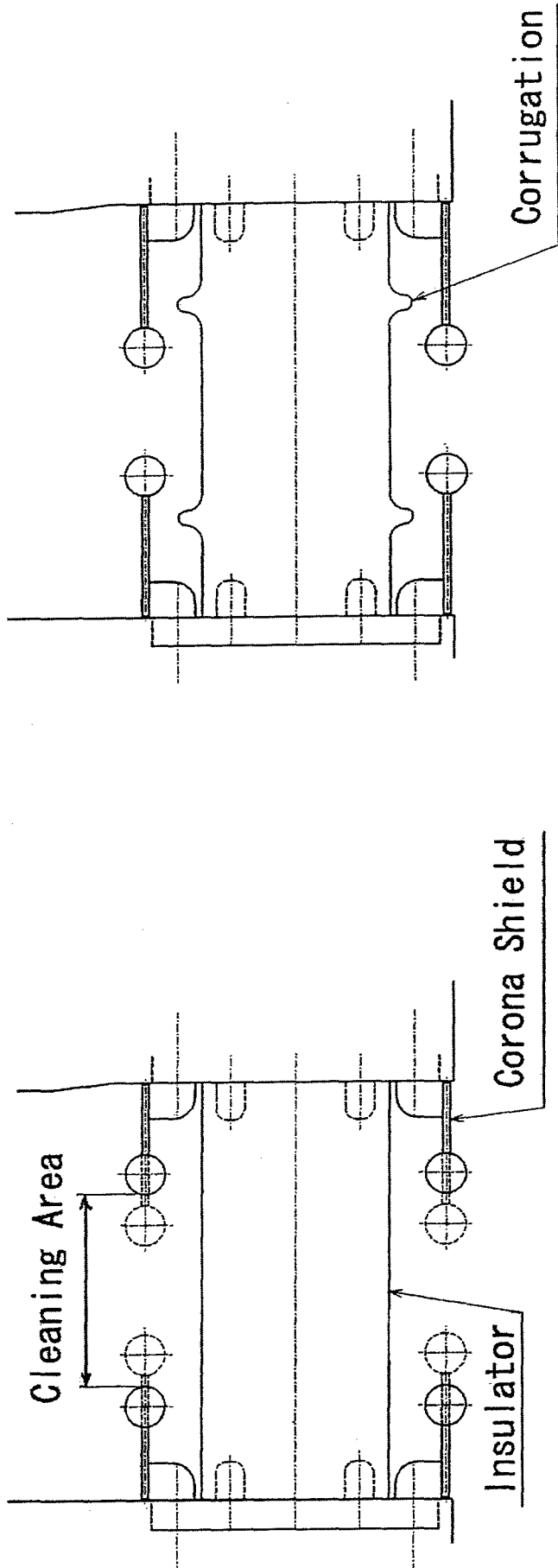


Fig. 5.3-1 Structure around Insulator



Corrugated Insulator

Telescopic Corona Shield

Fig. 5.3-2 Improved Structure around insulator

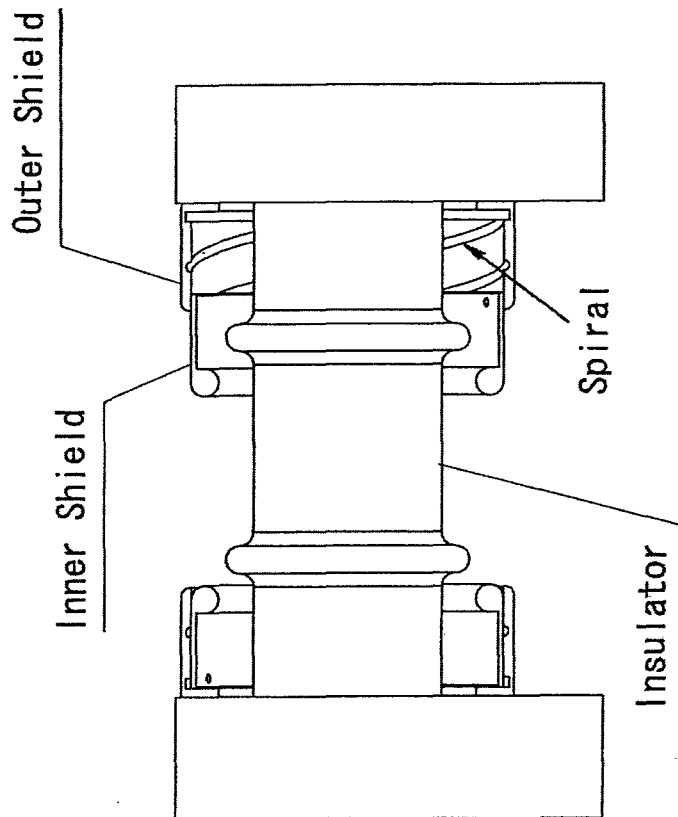
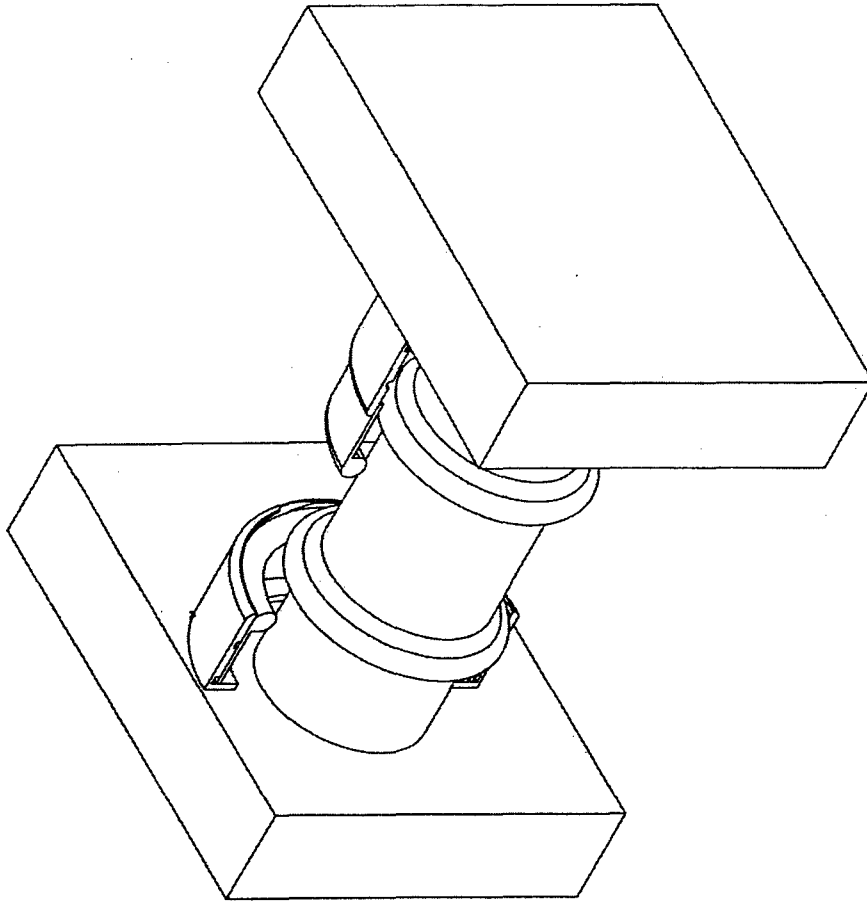


Fig. 5.3-3 Spiral Corona Shield

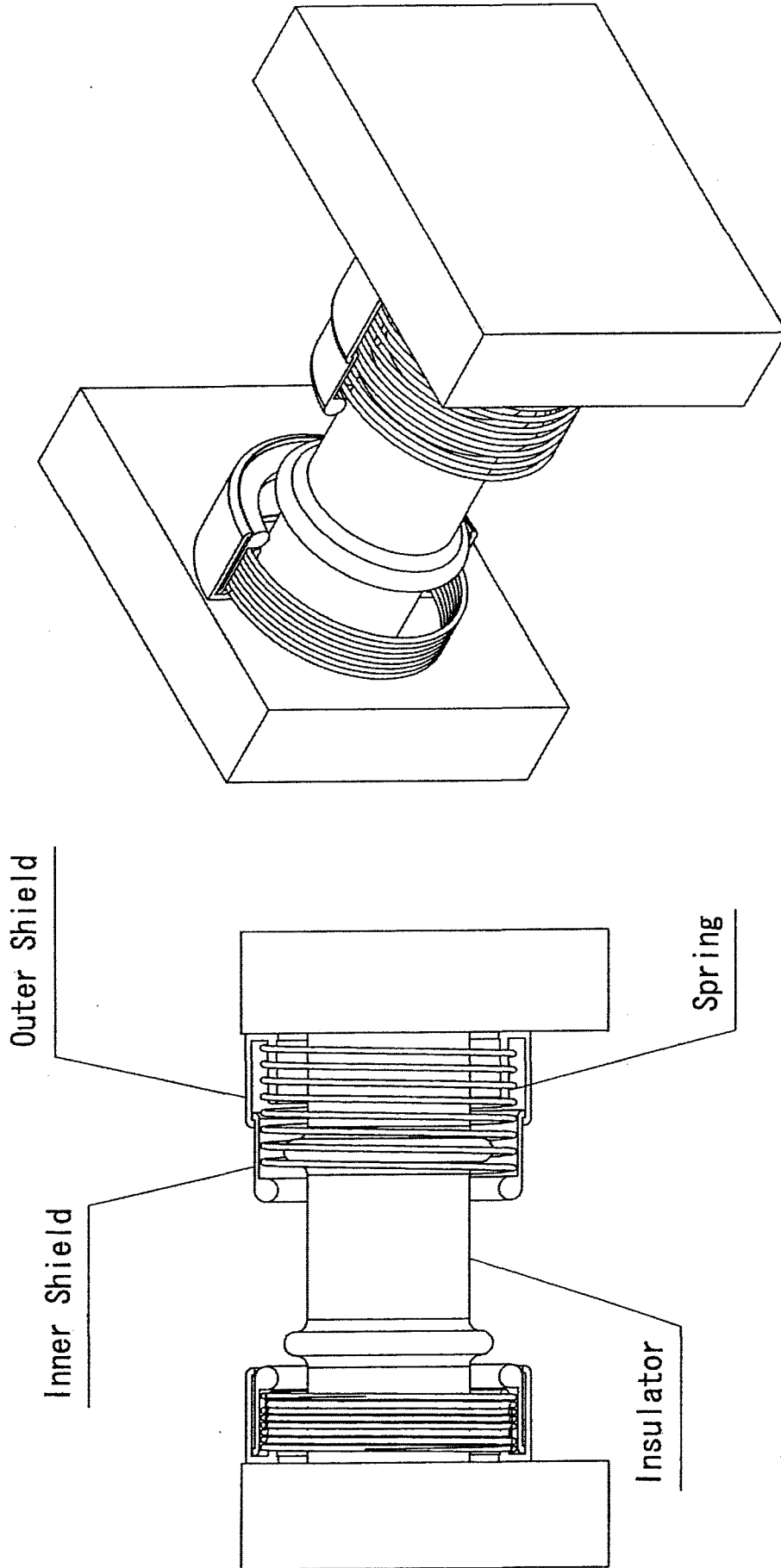


Fig. 5.3-4 Spring Type Corona Shield

This is a blank page.



# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

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

表3 固有の名称をもつSI組立単位

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

表2 SIと併用される単位

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

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J  
1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m  
1 b = 100 fm<sup>2</sup> = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>  
1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>  
1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq  
1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg  
1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy  
1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

表5 SI接頭語

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

(注)

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

## 換算表

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

粘度 1 Pa·s (= N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

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

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

1 cal = 4.18605 J (計量法)  
= 4.184 J (熱化学)  
= 4.1855 J (15 °C)  
= 4.1868 J (国際蒸気表)  
仕事率 1 PS (仏馬力)  
= 75 kgf·m/s  
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

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

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

INTERNOI 保守用セラム除去装置の概念設計



古紙配合率 100%  
白色度 70% 再生紙を使用しています