

出力100W化学励起ヨウ素レーザー試作機的设计製作

1994年8月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。ついでに複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 - 33

動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所

技術開発推進部・技術管理室

出力100W化学励起ヨウ素レーザー 試作機的设计製作

報告者 核燃料技術開発部先端技術開発室 北谷 文人
責任者 核燃料技術開発部先端技術開発室 高橋 武士

要 旨

化学励起ヨウ素レーザー(COIL)は、ファイバー伝送可能な高効率出力レーザーとして遠隔での光エネルギー利用のために研究開発が進められている。動燃においても管理区域での装置部品の解体および補修のために光エネルギーの利用を考えている。このためのレーザー光源としてCOILの研究開発を行っている。本報告書では、原子力にCOILを応用するために、その基礎的特性を把握し、より高度な応用を目指したパルス化などの特殊動作をおこなわせるための基礎的データの収集を目指した出力100W試作機的设计製作を行ったので報告する。

目 次

1. はじめに	1
2. 試作機の設計概要	1
2-1 予定出力	1
2-2 ポンプシステムの選定	2
2-2-1 ポンプ排気量の見積もり	2
2-2-2 使用可能なポンプ	2
2-3 励起酸素発生機的设计	4
2-3-1 概 要	4
2-3-2 サイズの決定	4
2-3-3 その他の構造	4
2-4 水蒸気トラップの設計	5
2-4-1 概 要	5
2-4-2 シール方法	5
2-4-3 サイズの決定	5
2-5 レーザダクトの設計	6
2-5-1 概 要	6
2-5-2 サイズの決定	6
3. 製作の詳細	7
3-1 配 管	7
3-2 ポンプシステム	7
3-3 励起酸素発生装置	7
3-4 水蒸気トラップ	7
3-5 レーザダクト	7
4. ま と め	8

1.はじめに

化学励起ヨウ素レーザー(COIL)は、ファイバー伝送可能な高効率高出力レーザーとして遠隔での光エネルギー利用のために研究開発が進められている。動燃においても管理区域での装置部品の解体および補修のために光エネルギーの利用を考えている。このためのレーザー光源としてCOILの研究開発を行っている。COILは、発明されてから比較的歴史が浅く他の化学レーザー同様に軍用の応用を目指した研究が行われてきたので、一般産業用レーザーとしての研究開発を行っているところは少ない。そこで、原子力にCOILを応用するためにその基礎的特性を把握しより高度な応用を目指したパルス化などの特殊動作をおこなわせるための基礎的データの収集を目的とした小型試作機の設計製作を行ったので報告する。

2.試作機の設計概要

主な形状は、DcMommattらが2度目に製作を行った横流れ型のCOILを参考にする。

2-1 予定出力

COILの出力は、レーザーダクトに到達する励起酸素濃度に比例する。よって、出力上昇のためには、大きな酸素流量を必要とする。しかし、このレーザーは、衝突によるエネルギー移乗で動作するために、動作圧の上昇は、圧力による励起酸素の濃度低下を引き起こすので動作圧には上限がある。一般に動作圧力の上限は、レーザーダクト内で1Torr程度である。よって高出力化のために大酸素流量で動作させるためには、大排気量の排気ポンプを用いてレーザーダクト内の圧力を1Torr以下に保って動作させる必要がある。このため、COILの出力の限界は、ポンプの排気量でほぼ決定される。

今回製作する試作機で行う予定の試験は、COILの基本的動作特性の測定およびパルス化を主な目標とした特殊動作型のCOILの基礎データの収集である。この際光計測を考えると発振波長が1315nmであるから熱源からのノイズが考えられ、種々の光パラメータの測定を行うために十分な出力として数十mWの出力があればよいと考えられる。さらに、パルス動作や波長変換などの特殊動作によるレーザー光の変換効率を数%以下に見積もれば、基本的なCW動作での出力は、数十W以上あれば良いと考えられる。これより、予定最大出力を100Wとする。

2-2 ポンプシステムの選定

2-2-1 ポンプ排気量の見積もり

最大出力100Wを得るためのポンプの排気量を見積もる。

出力100Wとすると単位時間に放出する光子数 n は、 $n=100/h\nu$ h :プランク定数 ν :発振周波数

$$h=6.63 \times 10^{-34} \quad \nu=3.00 \times 10^8 / 1.315 \times 10^{-6} \quad \text{よって } n=6.61 \times 10^{20}$$

まず、励起酸素からヨウ素へのエネルギー移乗の効率および励起酸素の割合を100%と考える。COILの反応式から励起酸素3molから励起ヨウ素1molが生成するのだから、 n 個の光子を生成するために必要な励起酸素分子の最低のmol数は、 $3n/NA$ (NA :アボガドロ数 6.02×10^{23})であり前記の光子数を得るために必要な酸素の量は、 3.29×10^{-3} molである。この物質量の酸素の1Torrでの流量は、気体温度を0℃として56(1/s)である。

ここで励起酸素のエネルギー移乗効率を40%とし全酸素流に対する励起酸素の割合を50%と見積もる。さらに、酸素流に対して最大で100%のバッファガスが流れるとすると必要な量の励起酸素を得るためにポンプに要求される1Torrで必要な排気量は、 $560(1/s)=2016(m^3/h)$ である。これをもとに、駆動ポンプシステムの選定を行う。

COILに用いるポンプシステムは、励起酸素発生器で液相反応を用いているために多量の凝縮性のガスを排気可能なシステムが必要である。また、動作圧力が1Torr以下であるために乾燥気体を排気したときの到達真空度は、 1×10^{-3} Torr以下になる必要がある。これらの性能を満たし前記のように1Torrで2000(m^3/h)程度の排気量を持つポンプを選定しなければならない。

2-2-2 使用可能なポンプ

COILの動作ポンプに課せられているような反応性の凝縮のガスの多量排気は、真空排気ポンプにとってもっとも厳しい動作条件のひとつになる。動作条件が数Torrの多量排気であるのでポンプシステムの前段は、メカニカルブースタポンプを用いることがもっともよいと考えられる。この際、これと組み合わせるエンドポンプになにを用いるかが問題となる。特に排気するガスが水蒸気を含んだ酸素ガス流であるために、もっとも一般的である排気ポンプである鉱物油を動作流体に用いたオイルロータリポンプは、エンドポンプに用いることができない。このために、用いる排気ポンプとしては、次のようなものが考えられる。

a. ドライポンプ

近年発展が著しい半導体工業に用いられるガスは、シラン系のガスを始めとする反応性気体が多い。このために、近年、反応性ガスを排気するためのドライポンプの技術は、急速に発展してきている。COILに用いるような反応性凝縮気体の排気には、エンドポンプとしてドライポンプは、有効なポンプである。しかし、このポンプは、構造上、ポンプ内での固形物の析出には弱い。このために、COIL動作用の排気ポンプとするためには、レーザ媒質であるヨウ素のポンプ内での析出を防ぐためのフォアライントラップを取り付けるなどの防護策が必要である。また、ポンプとしては、精密なつくりの部類に入るので排気量あたりの単価は、非常に高価なポンプとなる。

b. 水封ポンプ+スチームイジェクタポンプ

水封ポンプは、動作流体として水（種々のアルカリなどの水溶液を含む）を用いる排気ポンプである。このポンプの特徴は、動作流体に水を用いているためにケーシングとロータとクリアランスが広く、気体の凝縮および固形物の析出に非常に強いということである。また動作流体に種々の水溶液を用いることができるために反応性気体をポンプ内で中和しながら動作をすることが可能である。しかし、動作流体が水溶液であるために動作流体の蒸気圧が高く、このポンプ単体では、到達真空度は、数十Torr程度である。到達真空度をあげるための補助ポンプとしてスチームイジェクタポンプを用いて数十mTorr程度であるために、到達真空度の点でCOILの動作ポンプとして用いるためには、多少問題がある。しかし、排気量あたりの単価としては、安価な部類にはいるポンプである。

c. 不燃性合成油を用いたオイルロータリポンプ

オイルロータリポンプは中真空域でもっとも一般的に用いられるポンプであり、また、種々の排気システムのエンドポンプとしてもっとも一般的に用いられ、種々の排気量を持つ種々のタイプのポンプが市販されている。しかし、前記のように通常はこのポンプの動作流体は、合成もしくは天然の鉱物油が用いられる。この場合オイルは、可燃性でかつハロゲンなどの活性気体で極めて速やかに劣化しポンプの能率を落としてしまう。これを避けるためには、ハロゲン系の側鎖をもつハロカーボン系の合成油を用いればよい。しかし、フロンリンやバイエタールの商品名で知られているフッ素系のハロカーボン合成油は、非常に高価（通常一般の小売り価格で1kg(500cc)2万円）であるためにランニングコストが高くなるおそれがある。また、凝縮性の気体を排気した際には、ポンプ中に蓄積する液体や固形物のスラッジの除去を考えなければならない。以上のような問題がオイルロータリポンプにはあるが、ポンプ装置そのものの安定性や排気量あたりの価格を考えれば非常によいポンプシステムとなる。

以上のようなポンプシステムを考えてポンプ破損の際の修理の容易さ、到達真空度の信頼性を考えて、駆動ポンプシステムをオイルロータリ+メカニカルブースターポンプとする。動作流体としてフッ素系合成油を用いてポンプ内に蓄積する液体およびスラッジを動作中に排出するオイルフィルタを付加したシステムを考える。ランニングコストについては、フッ素系合成油は、フィルトレーションをしながら用いることによって再生可能で劣化が著しくなれば蒸留によって新品同様に再生できるためにかなり軽減できると考えられる。

ポンプは、不燃性のフッ素系ハロカーボン合成油を用いたオイルロータリポンプをエンドポンプとして、排気加速用にメカニカルブースターポンプを組み合わせたものとし、排気量は、1Torrの真空で2000(m³/h)程度の能力を持ち、ポンプヘッドでの到達真空度は、 6×10^{-4} Torr以下のシステムとする。また、外部にパーティクル除去用のフィルタと水分除去用のフィルタの2系統のフィルタを取り付け動作中に水およびパーティクルのクリーニングが可能にする。

2-3 励起酸素発生器の設計

励起酸素発生器(SOG)には、バブラータイプ、アトマイザタイプ、ウェティッドディスクタイプなど種々のタイプがあるが、この試作機では、操作の簡便性と開発の歴史が長く動作が安定していることを考えてバブラータイプのSOGを採用する。その他のタイプのSOGは、試験を進めていくうちに検討をしていく。

2-3-1 概要

SOGは、強アルカリの液を扱うために接液部には、金属ではなく高分子を主な材料に用いる。また、励起酸素の材料による失活性の反応速度は、金属(特に炭素鋼)は、テフロンなどの高分子にくらべ2桁、バイレックスなどのガラスに比べて1桁以上大きい。これからも、できるかぎり構造材は、高分子材料をもちいる。また、動作中は、反応液の温度は、 -10°C ～ -20°C になるために低温での脆化による破壊を考えた構造にする。

2-3-2 サイズの決定

反応槽サイズは、連続動作時間に依存する。まず、試作機の連続動作時間を1hとする。この時間中に流す塩素の流量は、平均6SLMとする。この時間に流れる物質量は、約16molである。過酸化水素16molの重量は544gである。動作には、35%wtの過酸化水素水を用いるから全重量は、約1600gとなる。さらに、これに物質量として同量のアルカリを加える。アルカリとして50%wtのNaOHを用いるとして16molのNaOHは、784gとなるから、50%wtNaOH水溶液では、1568gとなる。過酸化水素水とアルカリ水溶液の合計は、約3kgとなる。混合溶液の容積は、35%wt過酸化水素水の密度は $1.13\text{g}/\text{cm}^3$ で50%wtのNaOHの密度は $1.53\text{g}/\text{cm}^3$ であるから、約2.5lである。よって動作時間から考えればSOGの内容積は3l程度あればよい。しかし、前記のように動作中は、SOGの液温は、 -10°C 以下になるために混合したアルカリが析出しないだけの量の過酸化水素水がなければならない。 -10°C でのNaOHの溶解量は、飽和溶液100g中に約10gであるから、前記のようにNaOHが約2kg混合されて析出しないためには、約20kgの過酸化水素水が必要となる。これより、SOGの内容積は、接液部で20l以上なければならない。

2-3-3 その他構造

前記のようにSOGの内容積は、20l以上必要である。これをもとにSOGのサイズを決めてゆく。SOGの接液部は、高分子材料で造る必要がある。この際、どのような材料を用いるかが問題となる。SOGは、液の様子や酸素の発光状態が、肉眼で観測できる方がよいので、透明な材料が望ましい。また、動作条件が -10°C ～ -20°C の低温で、さらに内部は数Torrの真空であるので低温である程度の強度を持つ材料が望ましい。耐薬品性や温度条件からは、テフロンの使用が望ましいが、テフロンの場合、構造を造る際の接着の難しさや材料が不透明であることなどから、使用に向かない。次に、透明高分子材の代表であるアクリルは、透明度、接着の容易さには問題ないが、脆性が強い材料であるために、低温で外圧が、かかった場合の破壊強度に問題があるために、使用に向かない。次に、透明塩化ビニールがある。これは、アクリルほどの透明度はない。しかし、液面の確認等には、十分な透明度を持っている。また、延性が強

い材料であるので強度的に低温でも安心して用いることができる。これより、今回作成する SOG の接液部には、透明塩化ビニールを用いることとする。

塩素注入のバブラは、バルク材の多孔質バブラ(多孔質グラファイトやガラス)を用いる方法とチューブに小孔を開けたものを用いる方法の2通りがある。今回は、制作の容易さからチューブに小孔を開けたものを用いることとする。バブラとして、1/4 inch のテフロン管に 0.3mm の小孔をあけたものを用いる。SOG の外観の形状は、耐圧と配管のつなぎの容易さを考えて、円筒形にする。

2-4 水蒸気トラップの設計

2-4-1 概要

水蒸気トラップは、励起酸素のトラップ壁での失活性をできるだけ抑えるために、直管型のシェル&チューブ型のコールドトラップとする。冷却は、通常 -60℃ 以下の冷却が必要なので冷凍機の使用が難しい。このために、寒剤を利用しなければならない。この寒剤として、操作性と断熱の容易さを考えて、ドライアイス+エタノールで行う。このトラップの制作上困難な点は、チューブの真空シールである。トラップの接ガス部は、励起酸素の失活性をおさえるために金属は、用いない方がよい。さらに、熱伝導度が良い材料が好ましいので、トラッピングチューブは、ガラス管を用いることになる。さらに寒剤のドライアイス+エタノールが入る液槽は、断熱を考慮して高分子材を用いることになる。このために、ガラスと高分子材との接合部での真空シールを考えなければならない。この際、まわりの雰囲気は -60℃ 程度であるために、ゴムを用いたシールは、十分にきかない恐れがある。これらを考慮しながら水蒸気トラップの設計を進める。

2-4-2 シール方法

ゴムを用いたシールは、-20℃ 程度までが限界である。このために、ガラス管と液槽の真空シールは、多少の工夫が必要である。考えられるシールは、テフロンシールを用いることである。しかし、テフロンシールは、硬度が堅いために締め付け側が、ガラスであるとガラス管の真円度の不足と強度不足から完全に締め付けられず、シールが不完全になる恐れがある。そこで、今回は、シールをバイトンゴムシールを用いて、ゲージポートタイプのシールを考える。この際、ゴムが凍ってシールがきかなくならないように、ゲージポートの締め付けリングを、厚い高分子材で造り、ゴムを寒剤から断熱する事によってシールの健全性を保つこととする。

2-4-3 サイズの決定

トラップサイズは、水蒸気のトラッピング能と動作時間および励起酸素の失活性に与える影響とのかねあいで決まる。励起酸素の壁との衝突による失活性の反応速度は、バイレックスガラスで $k=2.4 \times 10^{-3} \text{ mol/s}$ である。これによる失活性のレート方程式は、 $d[O^*] / dt = k[O^*]$ である。よって励起酸素の 5% が壁との衝突で失活性する時間は、 $2 \times 10^3 \text{ s}$ であるからトラップ透過時間での壁での失活は、問題ない。

次は、動作時間について考える。動作時間については、前記の SOG で検討したように連続 1

時間程度動作するようにする。動作時間は、トラップの閉塞時間で決まる。動作中のSOG温度を -15°C としトラップ温度を -50°C とする。各々の温度における飽和水蒸気圧は、 $1.47(\text{Torr})$ 、 $0.047(\text{Torr})$ である。これからトラップ内部には、1時間あたり約5gの水が付着する。よって動作時間中に付着する氷による閉塞は大きな問題でないと考えられる。これから、トラップサイズは、製作の容易さと組立のために必要な大きさから決定する。とりあえず、管径20mm、管長1mのバイレックス管を7本用いた構造とする。

2-5 レーザダクトの設計

2-5-1 概要

レーザダクトは、通常圧力と衝撃波による失活性を防ぐために、流量とダクトの開口径を考慮して音速をこえないようにする。特にレーザダクト内の圧力が1Torrをこえると失活が大きくなるために、流量に応じて圧力が変化できるようにダクトハイトを可変となるようにする。

2-5-2 サイズの決定

レーザダクトのサイズについては、励起酸素の失活を少なくするためにトラップ部からの急激な拡大縮小をさけ流速が音速を越えないようにする。トラップの管径が20mmでこれが7本あるのでトラップの幅は、管の取り外しなどの組み立ての余裕を考慮して400mm程度とする。これから、ダクト開口部を400x20mmとしてダクト部での流速を考える。ポンプの最大排気速度を、 $2000\text{m}^3/\text{h}$ として、これを用いて流速 $v=Q/A$ (Q :流量 A :流路断面積)であるから、この場合流速は、 69.4m/s で亜音速条件を満たしている。よって、レーザダクト本体の寸法は、材料厚み、組み立てしろを考慮して幅450mmとする。次に、共振器のサイズを考える。共振器は、ヨウ素蒸気による共振器鏡の汚れを防ぐためにアーム状に張り出して不活性ガスによってパージを行う構造とする。このとき、ミラーアームの寸法は、レーザ媒質のドップラー幅を考慮して決定する。室温でのヨウ素のドップラー幅は、約250MHzあるので、共振器の縦モードが、これによる変化を受けにくくするためには、共振器長は、ドップラー幅からくる波長の変化(約1.2m)以上あることが望ましい。これから、ミラーアーム長は、500mmとする。(共振器本体の幅450mmであるので共振器長は、 $500 \times 2 + 450 = 1450\text{mm}$)

以上をふまえて詳細を決定していく。

3. 製作の詳細

3-1 配管

Fig3-1にCOILシステムの装置配管の概略図を示す。前記の概略寸法をもとに各部の寸法を決定する。ポンプと装置の位置は、ある程度離して設置しなければならないために、排気管は、天井吊りを考える。このためにあまり大口径で大重量の配管は、用いないこととする。また、排気量は、最大2000m³/h程度必要であるから流速が音速を超えないために、最低16cm²以上の配管断面積が必要となる。最低2.5cmの配管径があればよい。しかし、装置の真空度を確保するためには、配管径は、大きい方が望ましい。また、真空配管であるから、1atmの外圧に耐えるだけの強度が必要である。以上を考慮し配管は、水道用塩化ビニル管口径JIS150Aのものをを用いる。

3-2 ポンプシステム

前記のようにポンプシステムとしては、排気速度2000m³/h程度のメカニカルブースタポンプ+オイルロータリポンプを採用する。このとき、オイルロータリポンプのオイルは、フッ素系合成油を用いる。実際のポンプの選定では、排気速度2000m³/h程度の大排気量のポンプの製作を行っているところは、限られている。このため、大阪真空および島津製作所の排気ポンプセットを選定の候補として考えた。排気ポンプセット能力例としての**Fig3-2**に大阪真空のメカニカルブースタポンプ+オイルロータリポンプの圧力-流量特性図を示す。これより、PRM25-60相当の排気ポンプセットがあればよい。最終的に設置したポンプは、島津製作所製ポンプセットMB3000+KP6500の排気セットで動作オイルとしてフォンブリンY-20を用いた。

3-3 励起酸素発生装置

励起酸素発生装置 (SOG) の詳細図面を**Fig3-3**に示す。

3-4 蒸気トラップ

蒸気トラップ (WVT) の詳細図面を**Fig3-4**に示す。

3-5 レーザダクト

レーザダクト (LD) の詳細図面を**Fig3-5**に示す。

4.まとめ

以上に示したような図面に従って装置の製作を行った。この装置を用いて化学励起ヨウ素レーザーの動作の基本特性およびパルス化などの特殊動作についての基礎的試験を行う予定である。

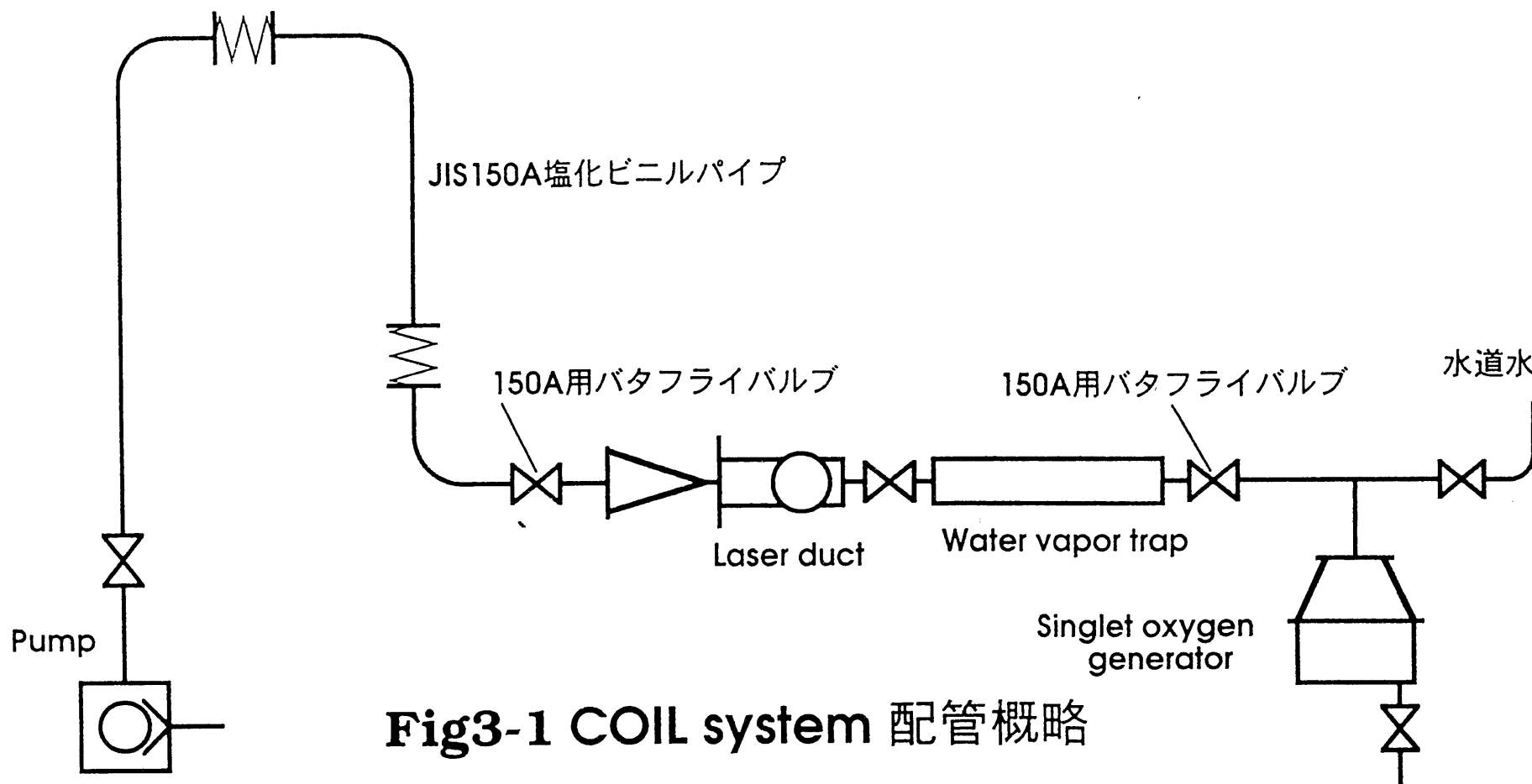


Fig3-1 COIL system 配管概略

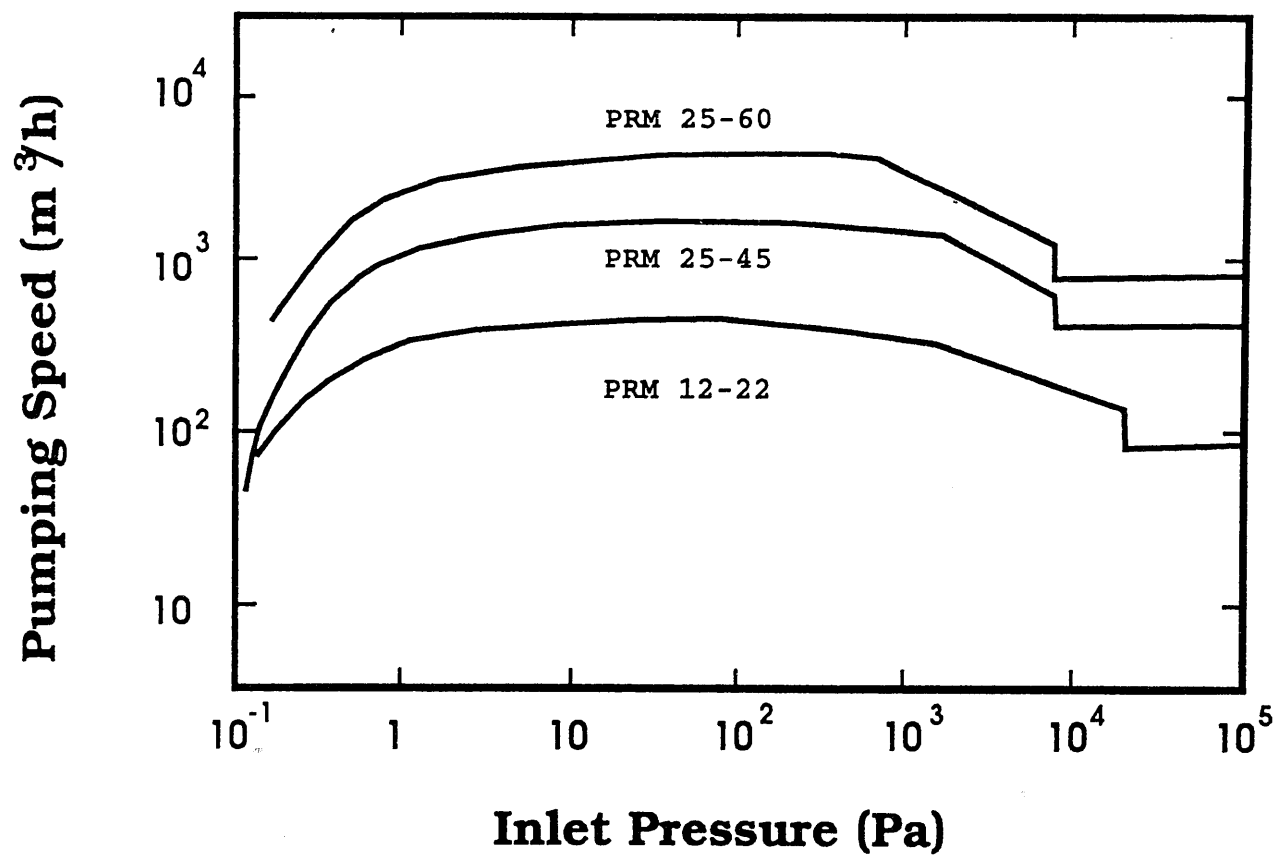
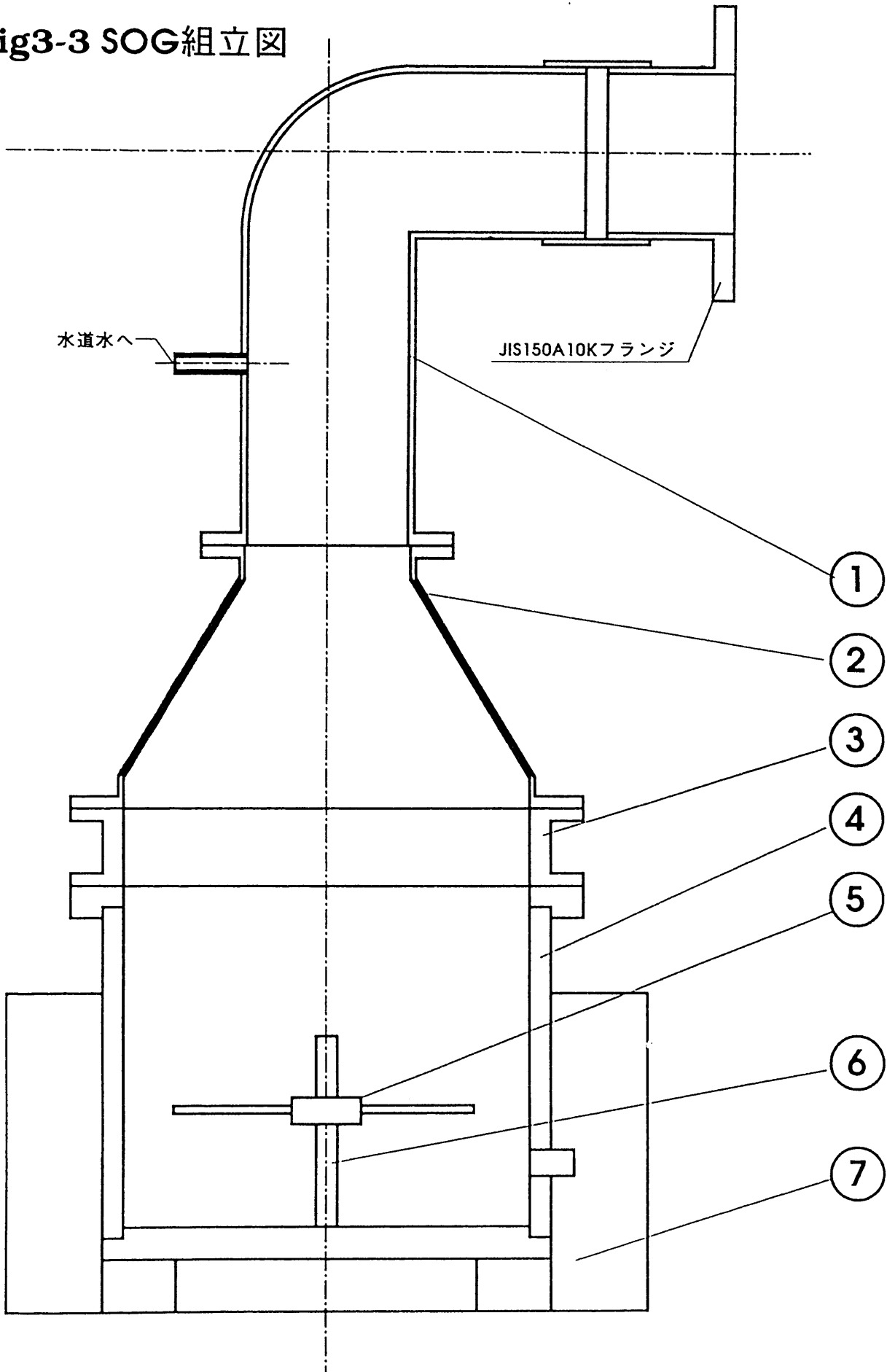
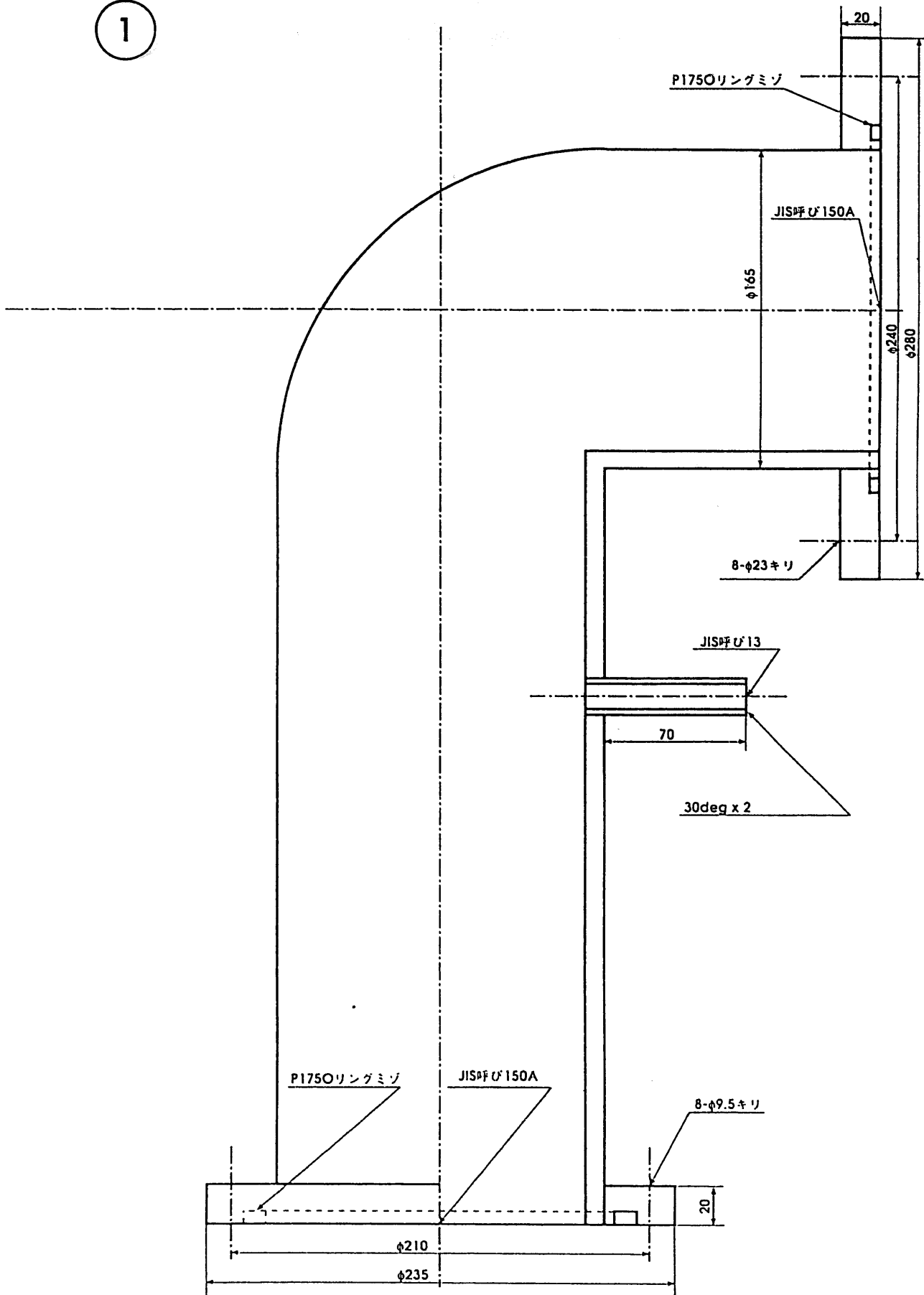


Fig.3-2 排気ポンプの圧力-流量特性

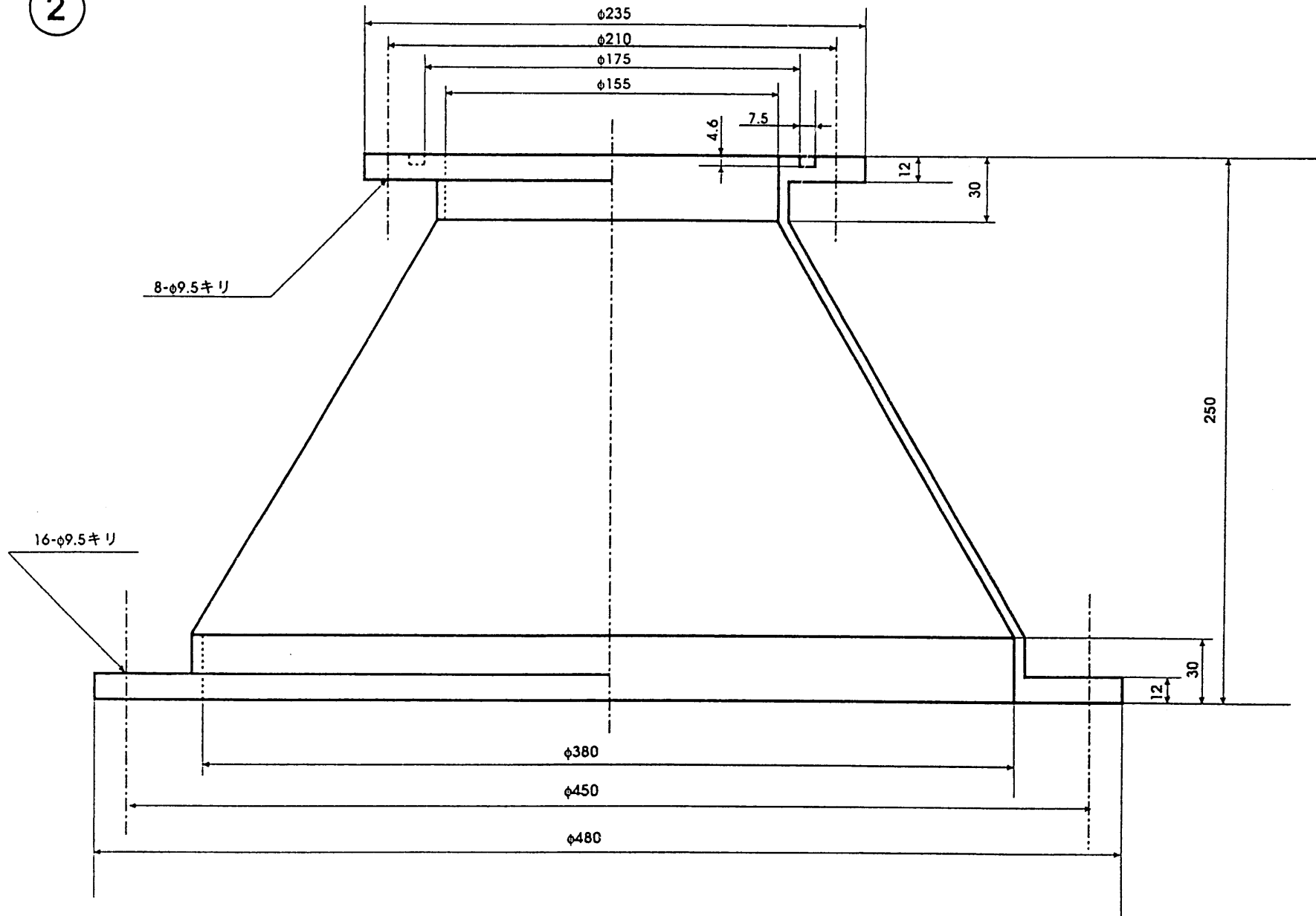
Fig3-3 SOG組立図



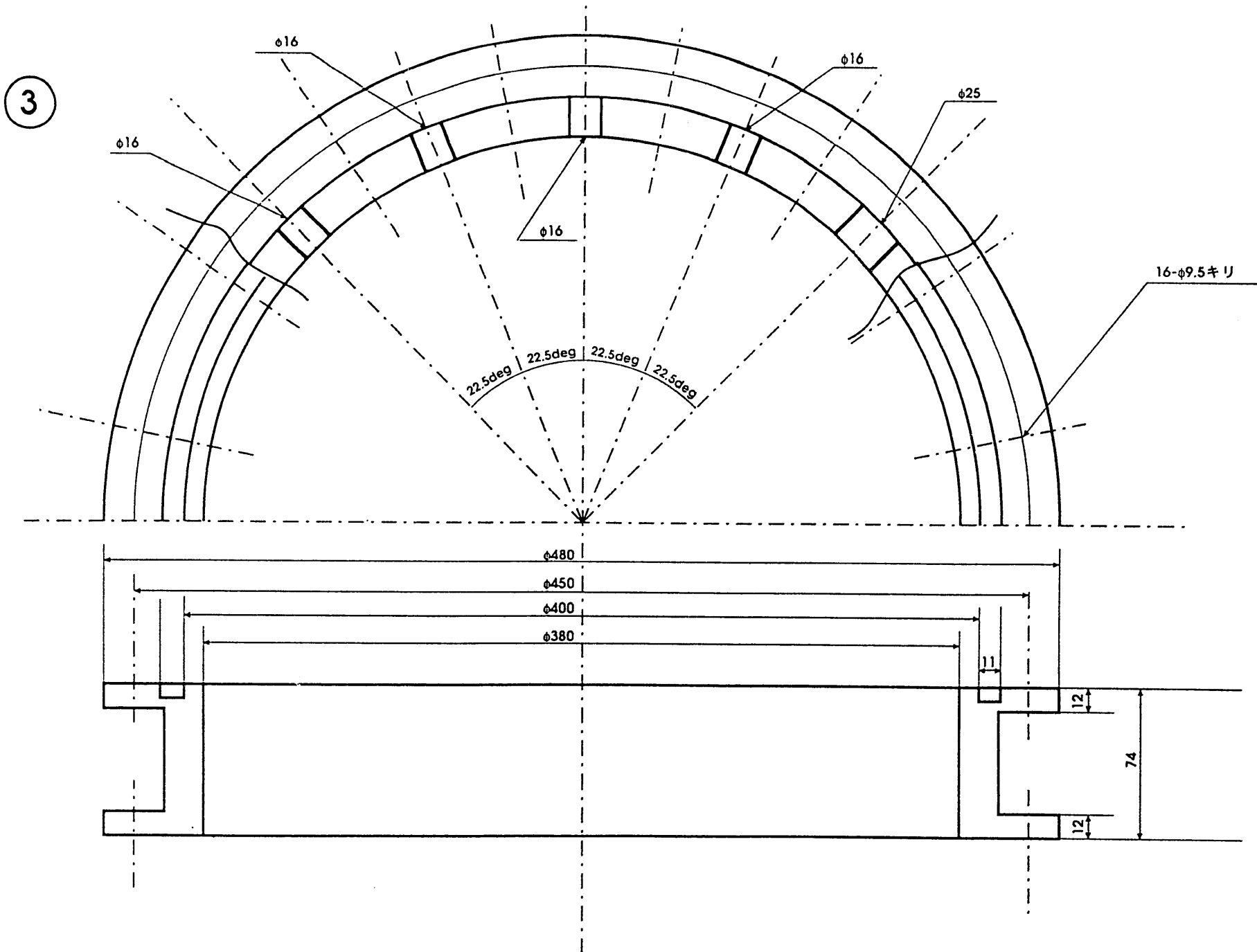
1



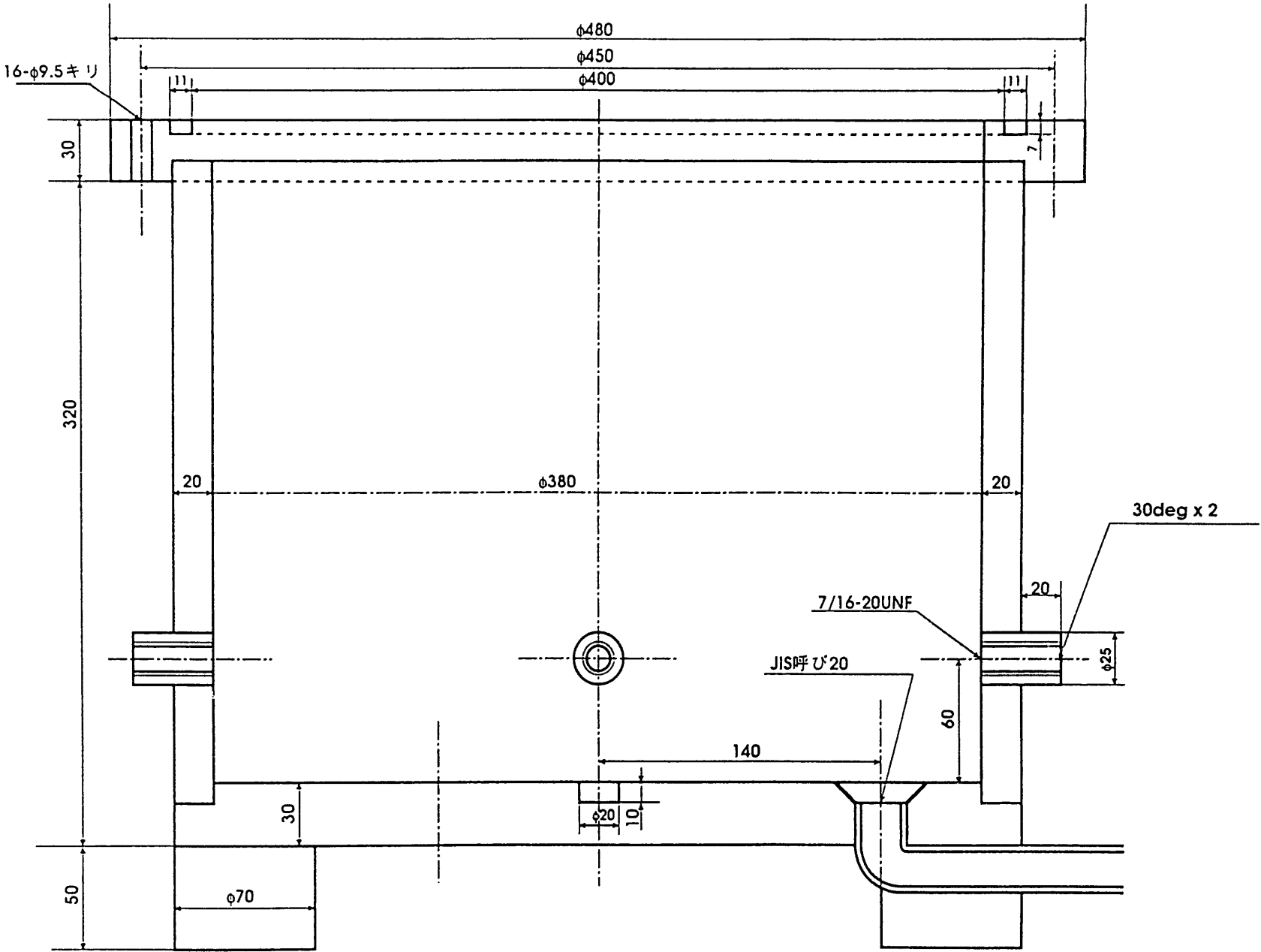
2

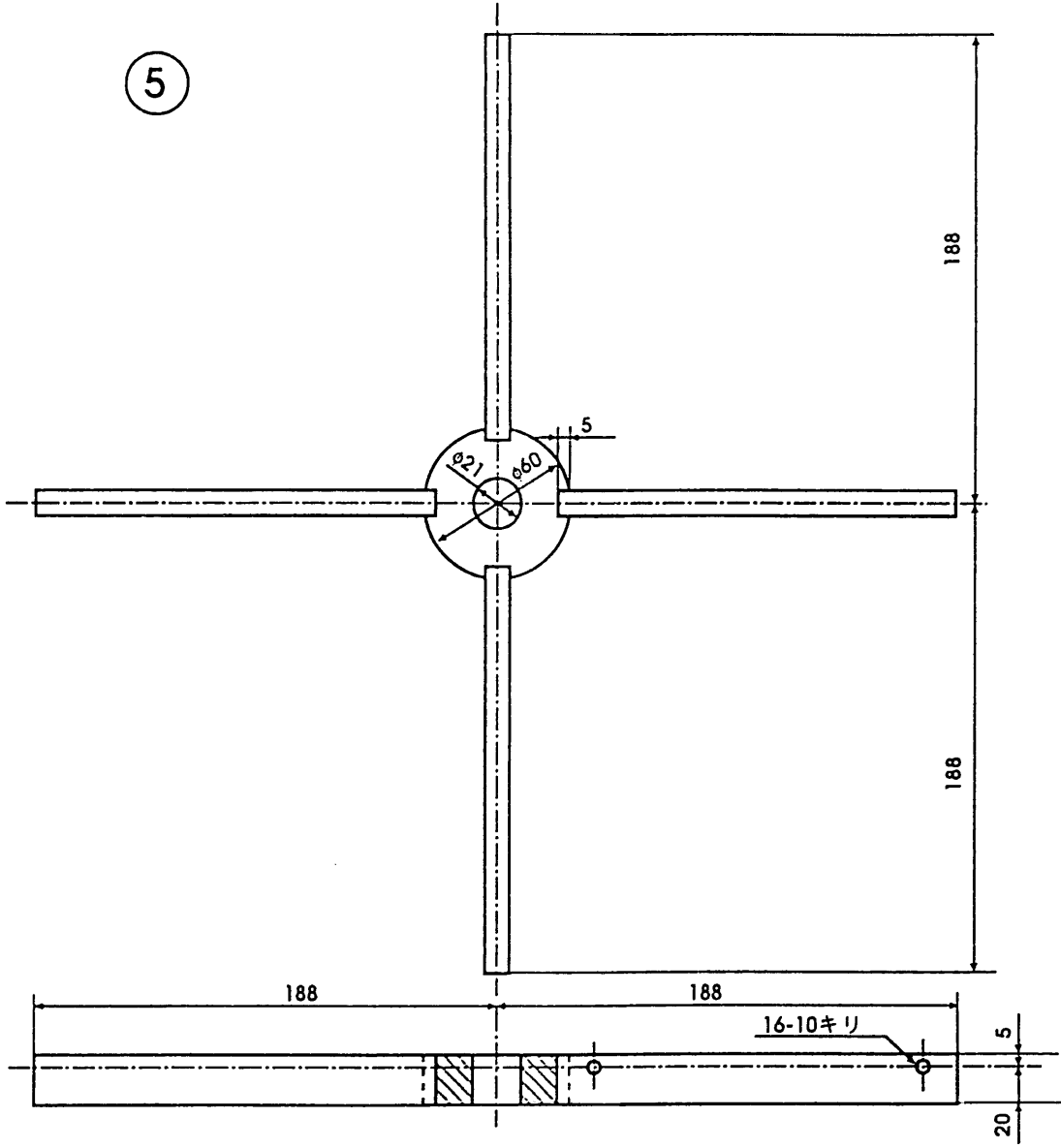
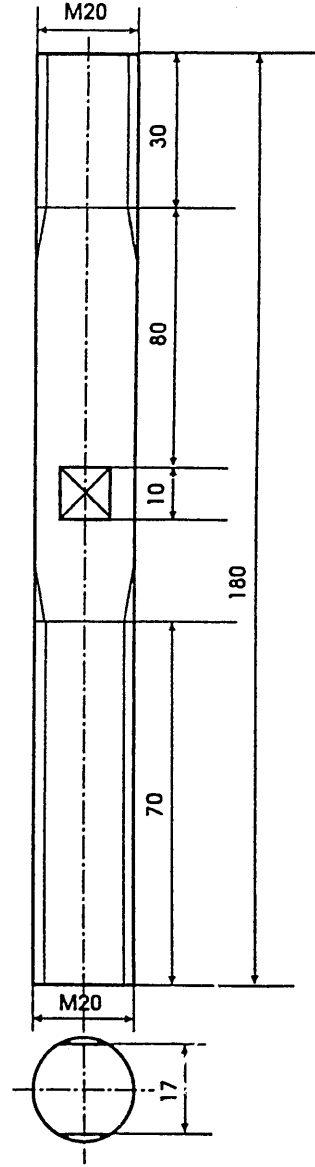


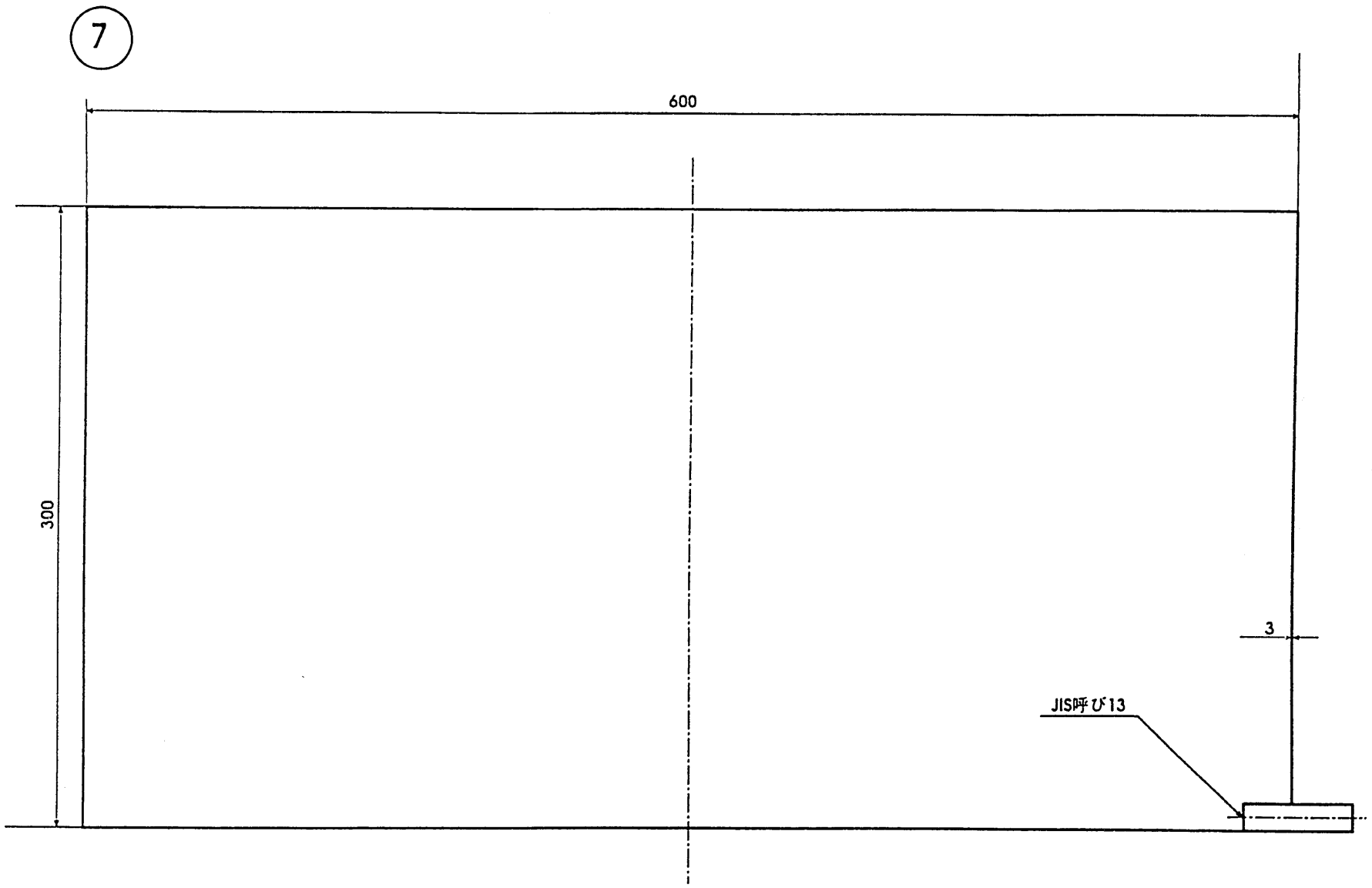
PNC PN8410 94-268



4

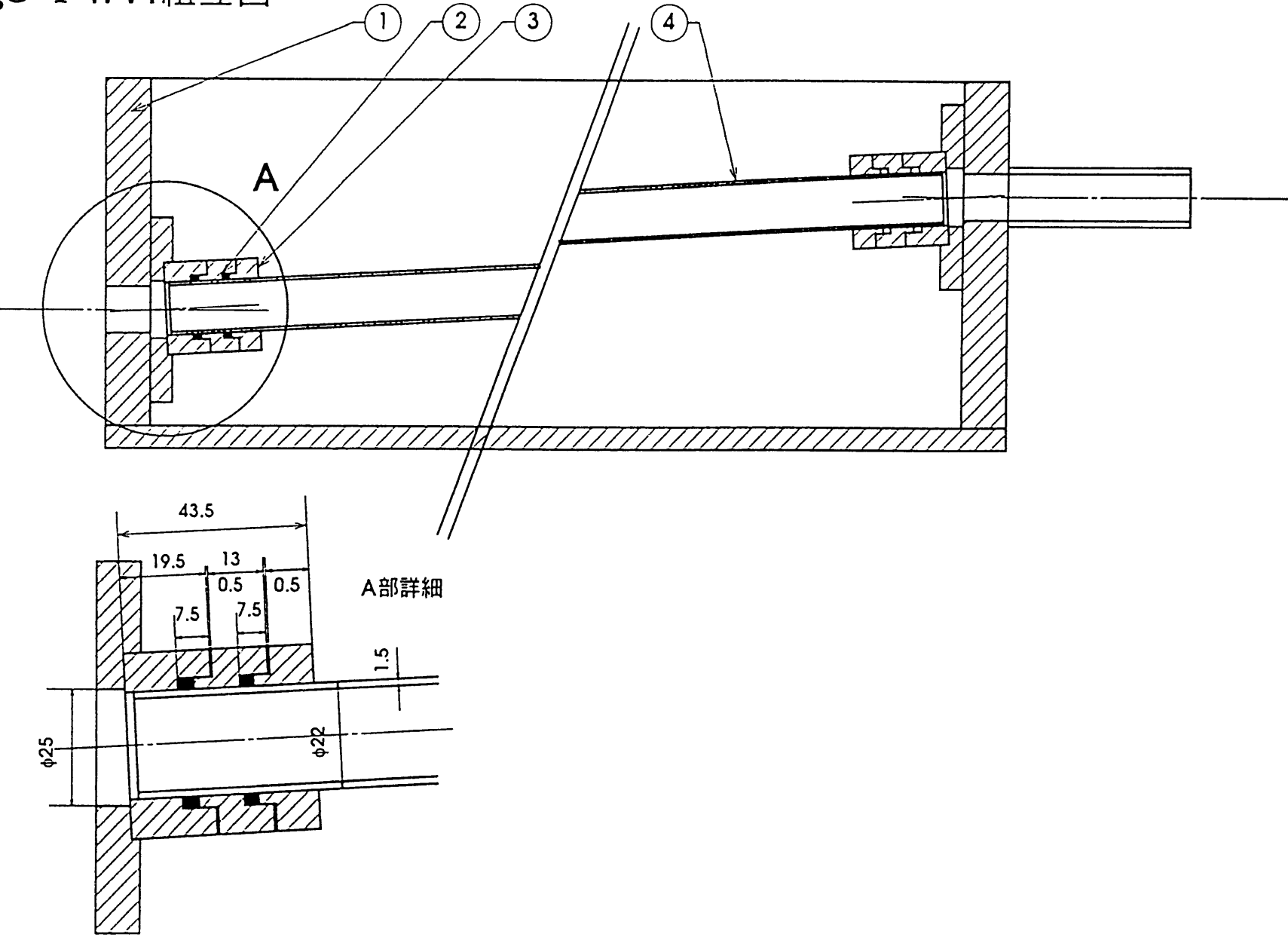




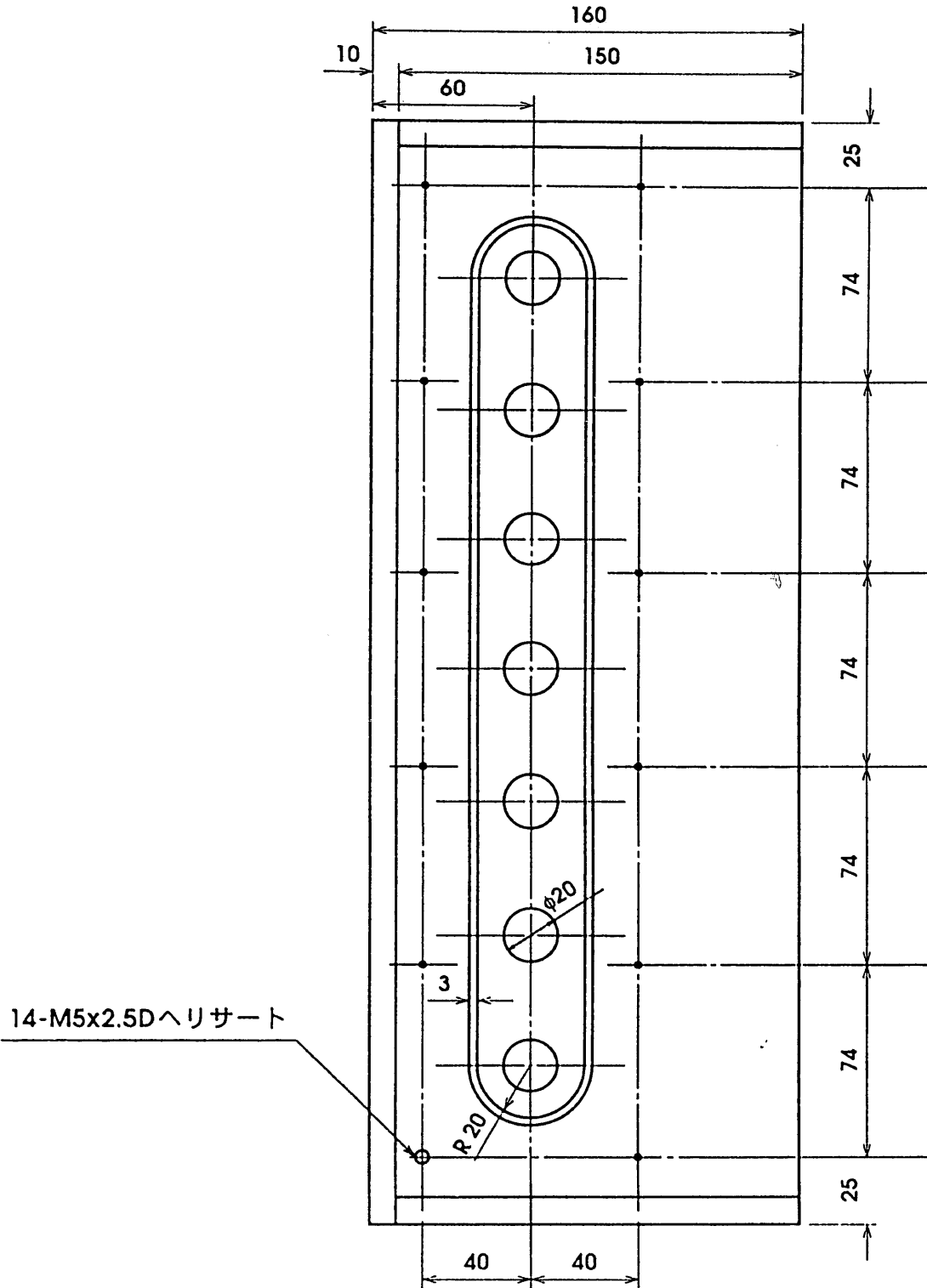


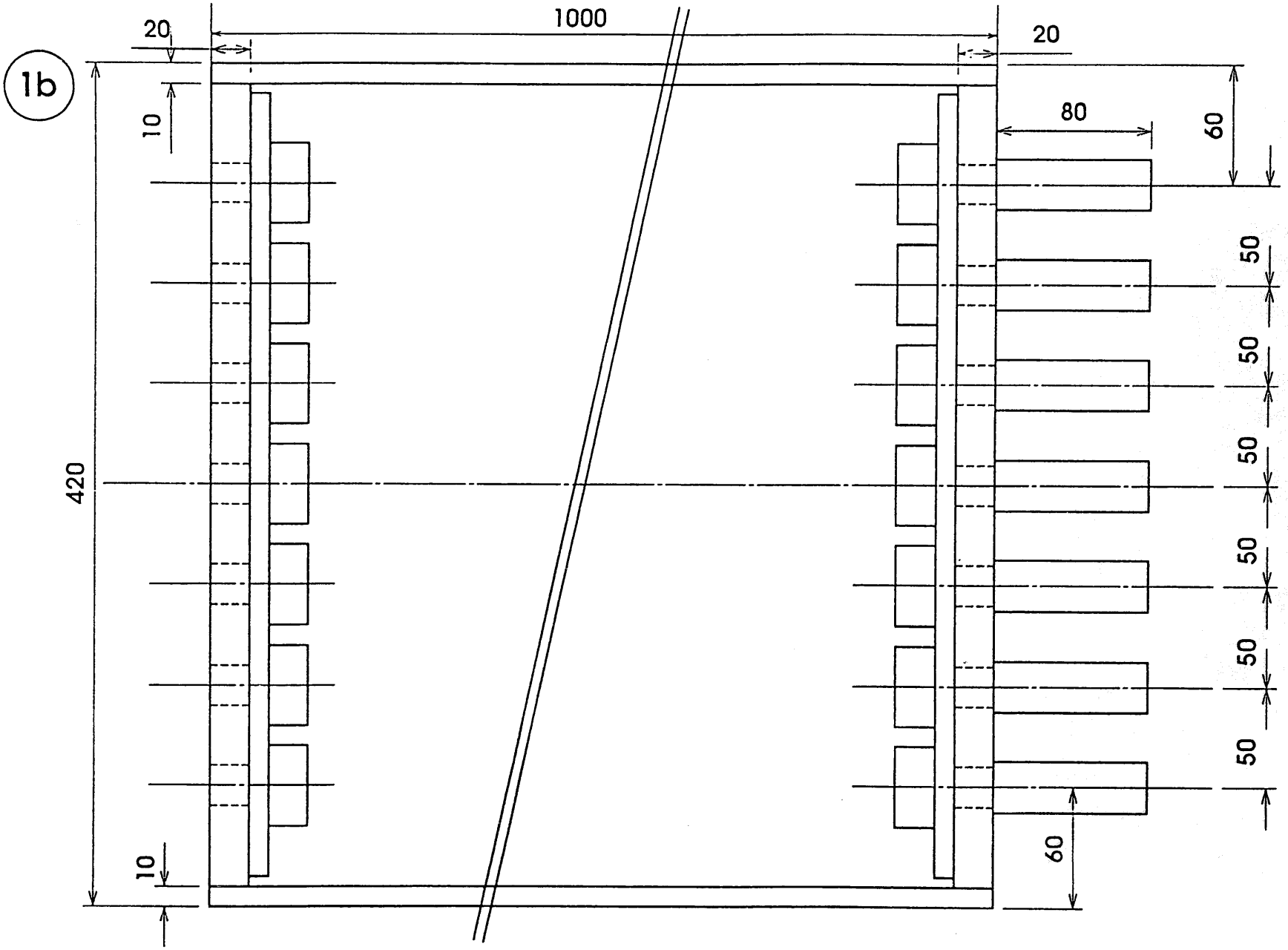
7	廃液槽	1	透明塩ビ	キ,接	1/2
6	支持棒	1	透明塩ビ	キ,接	1/1
5	バブラーささえ	1	透明塩ビ	キ,接	1/2
4	本体	1	透明塩ビ	キ,接	1/2
3	下部フランジ	1	A5052	キ,溶	1/2
2	上部フランジ	1	A5052	キ,溶	1/2
1	WWT-SOG接続管	1	グレー塩ビ	キ,接	1/2
図番	図名	個数	材料	加工	縮尺
品名	励起酸素発生装置	製作者名	北谷		

Fig3-4 WVT組立図

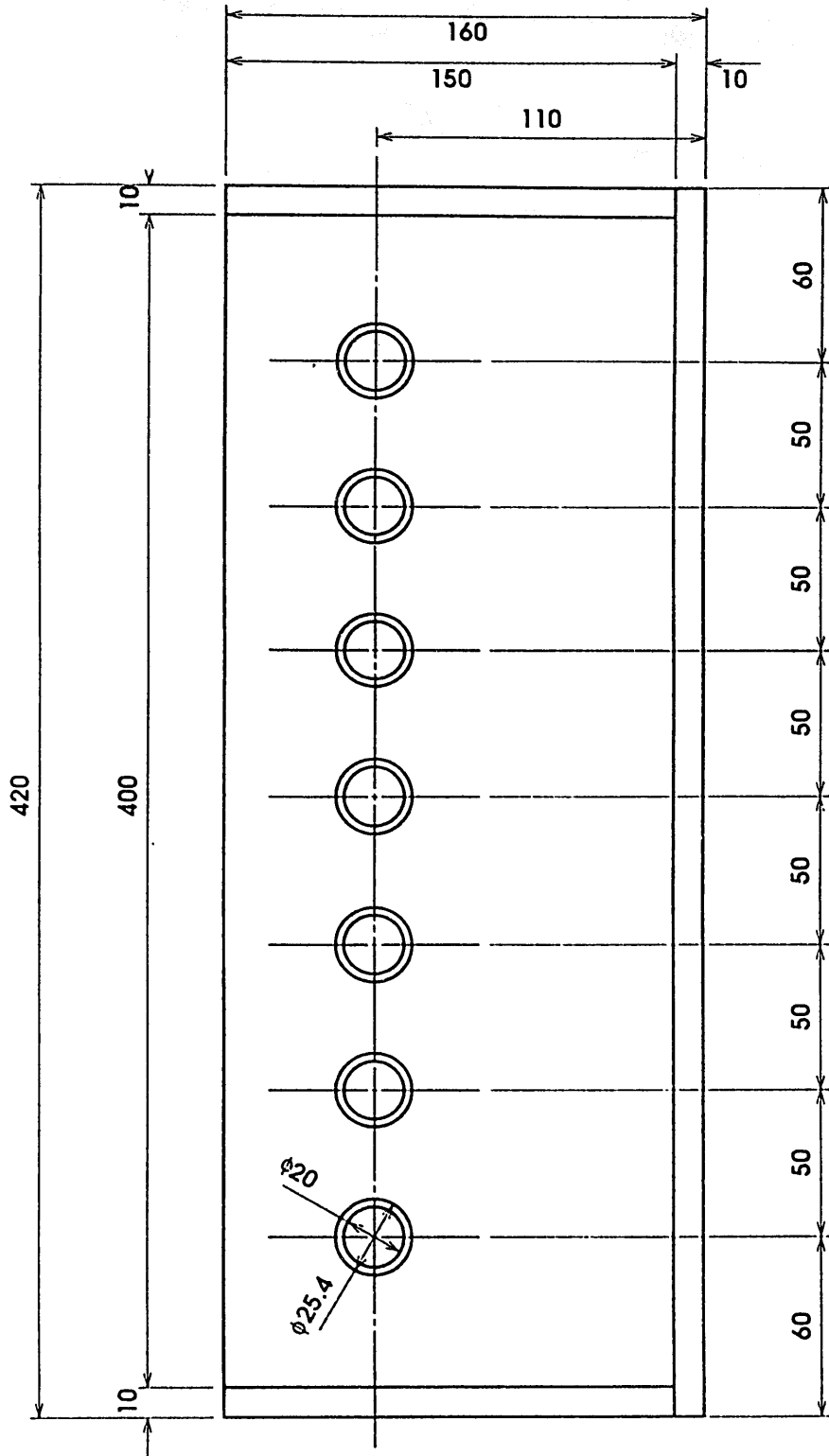


1a

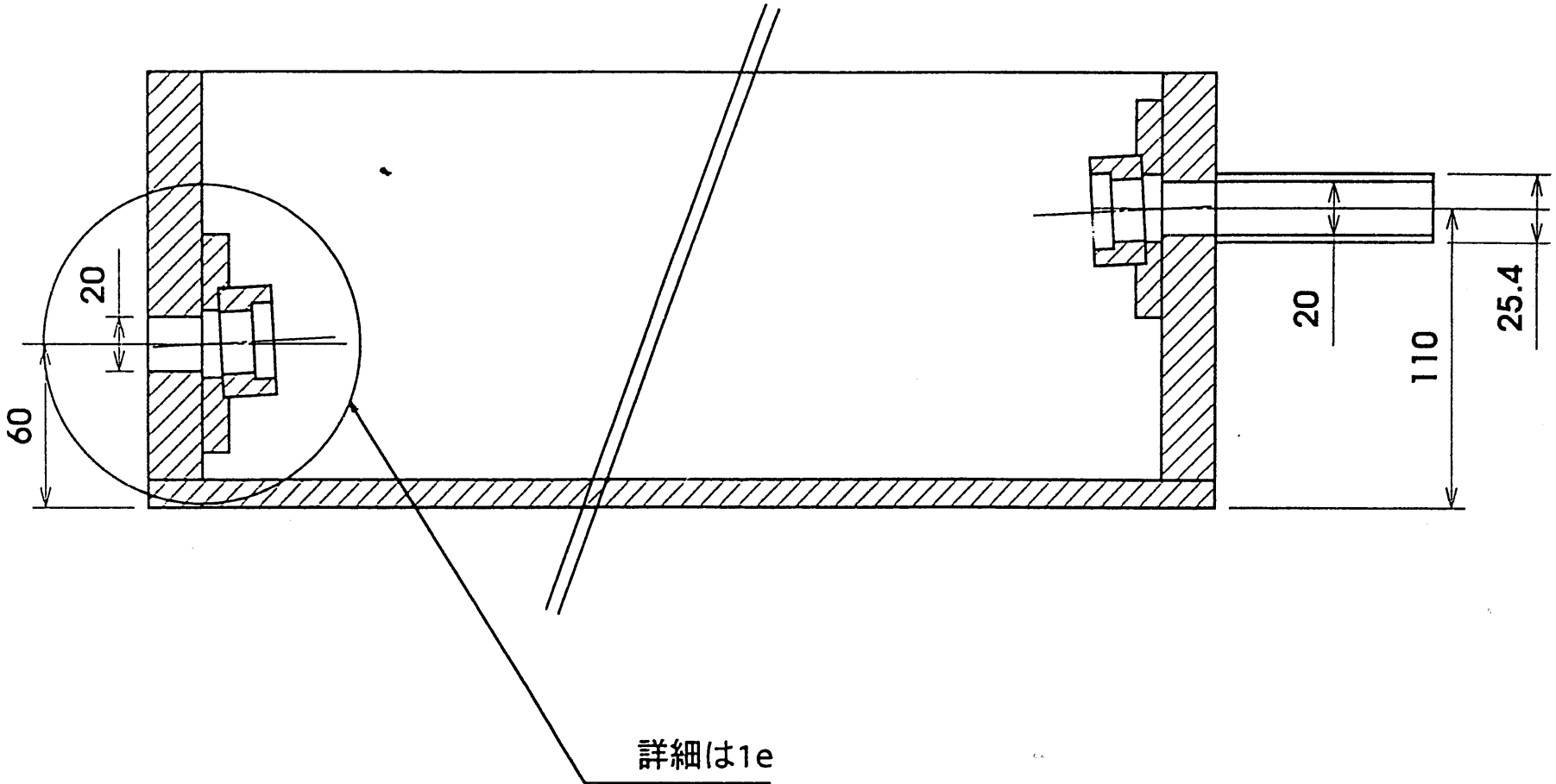




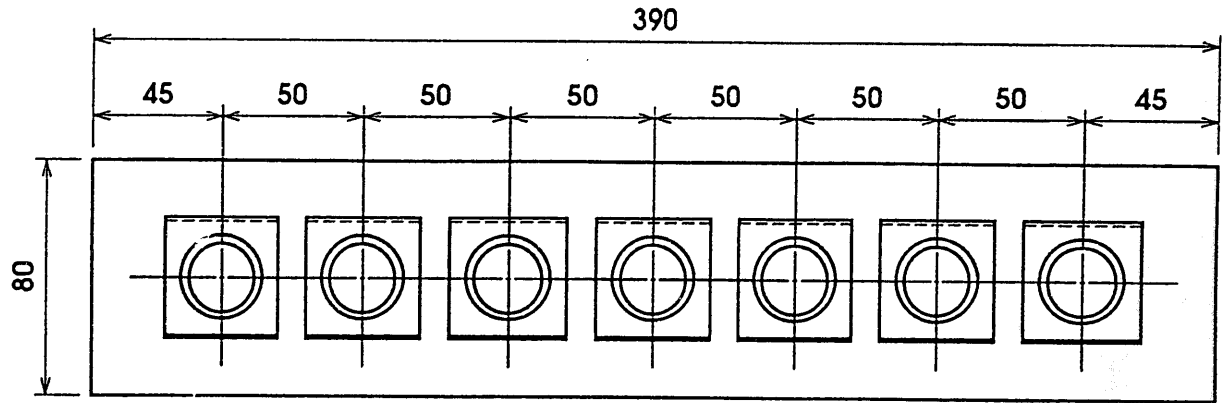
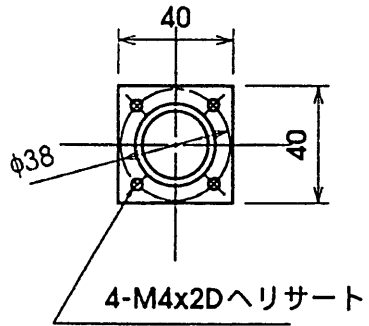
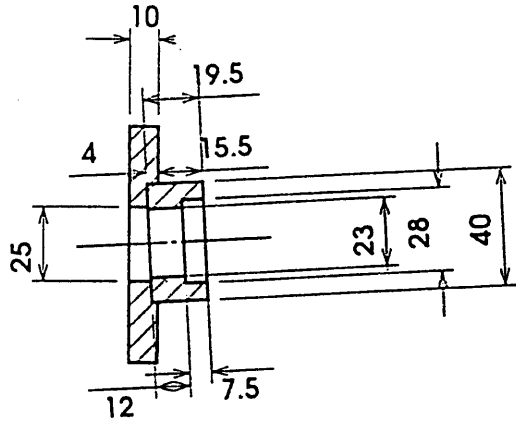
1c



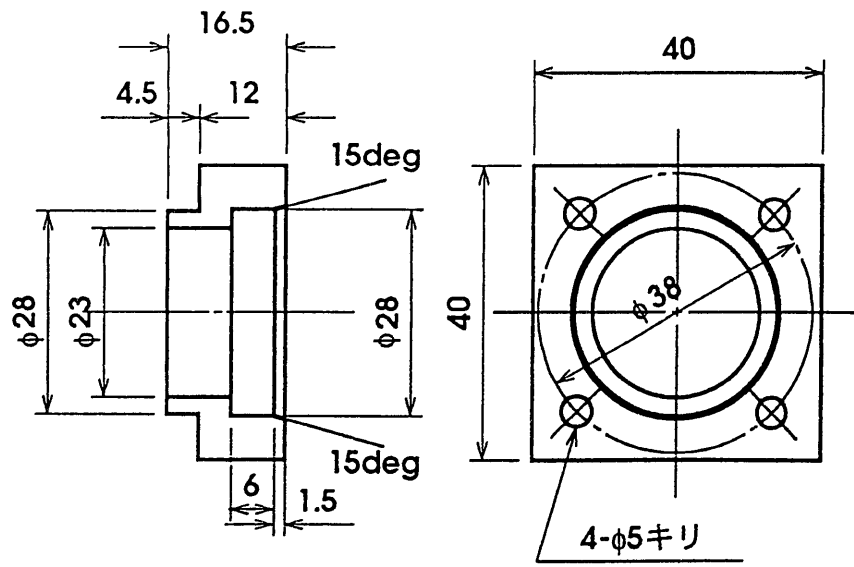
1d



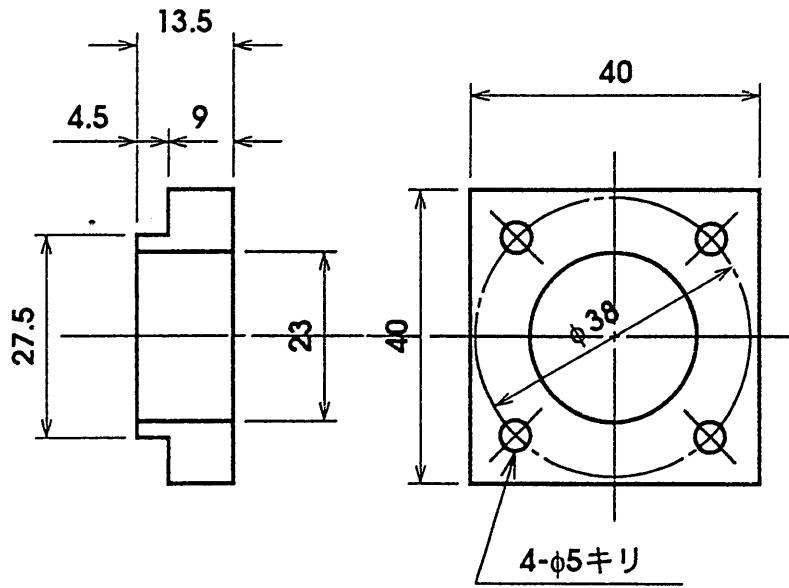
1e



2

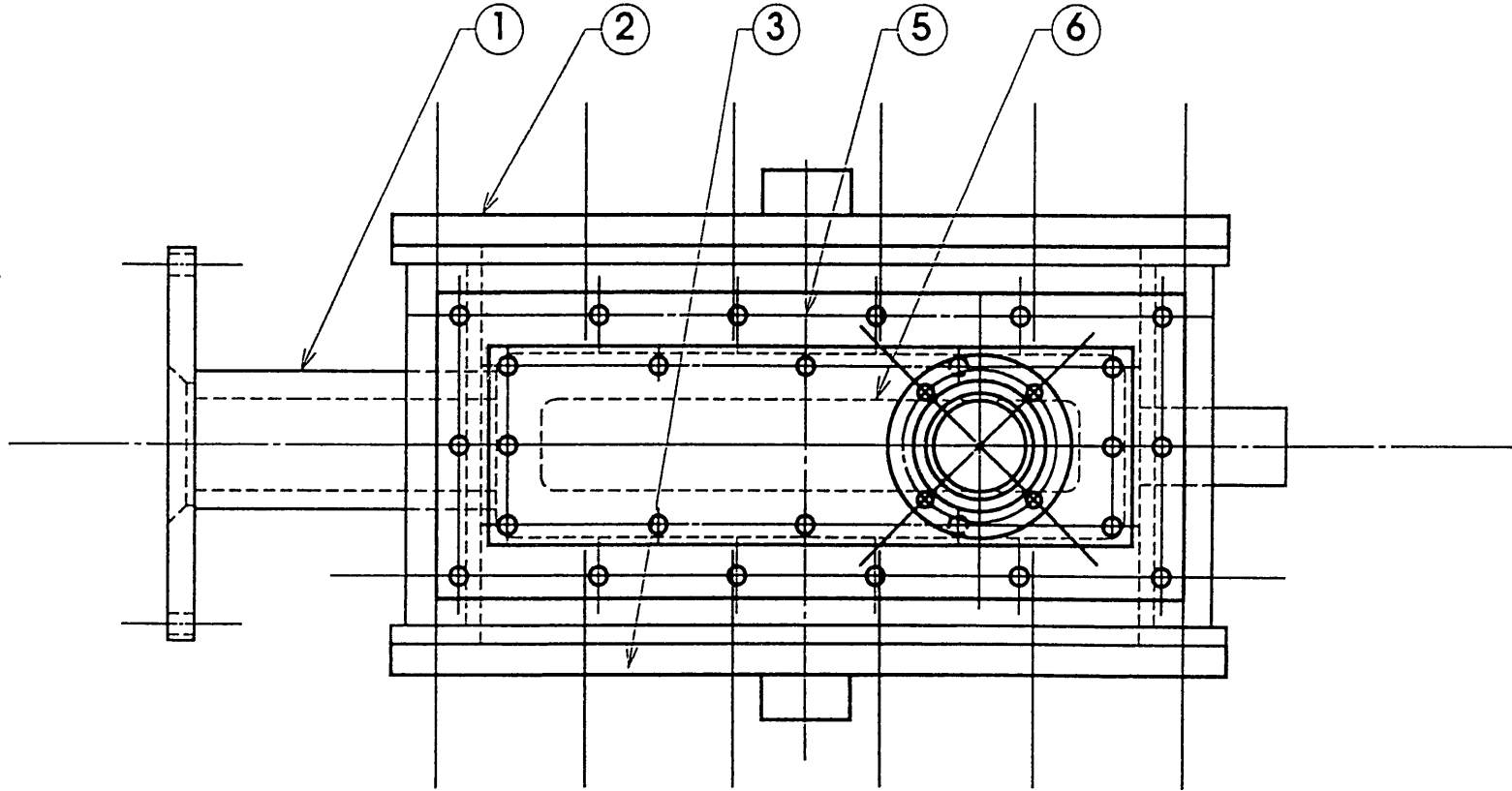


3

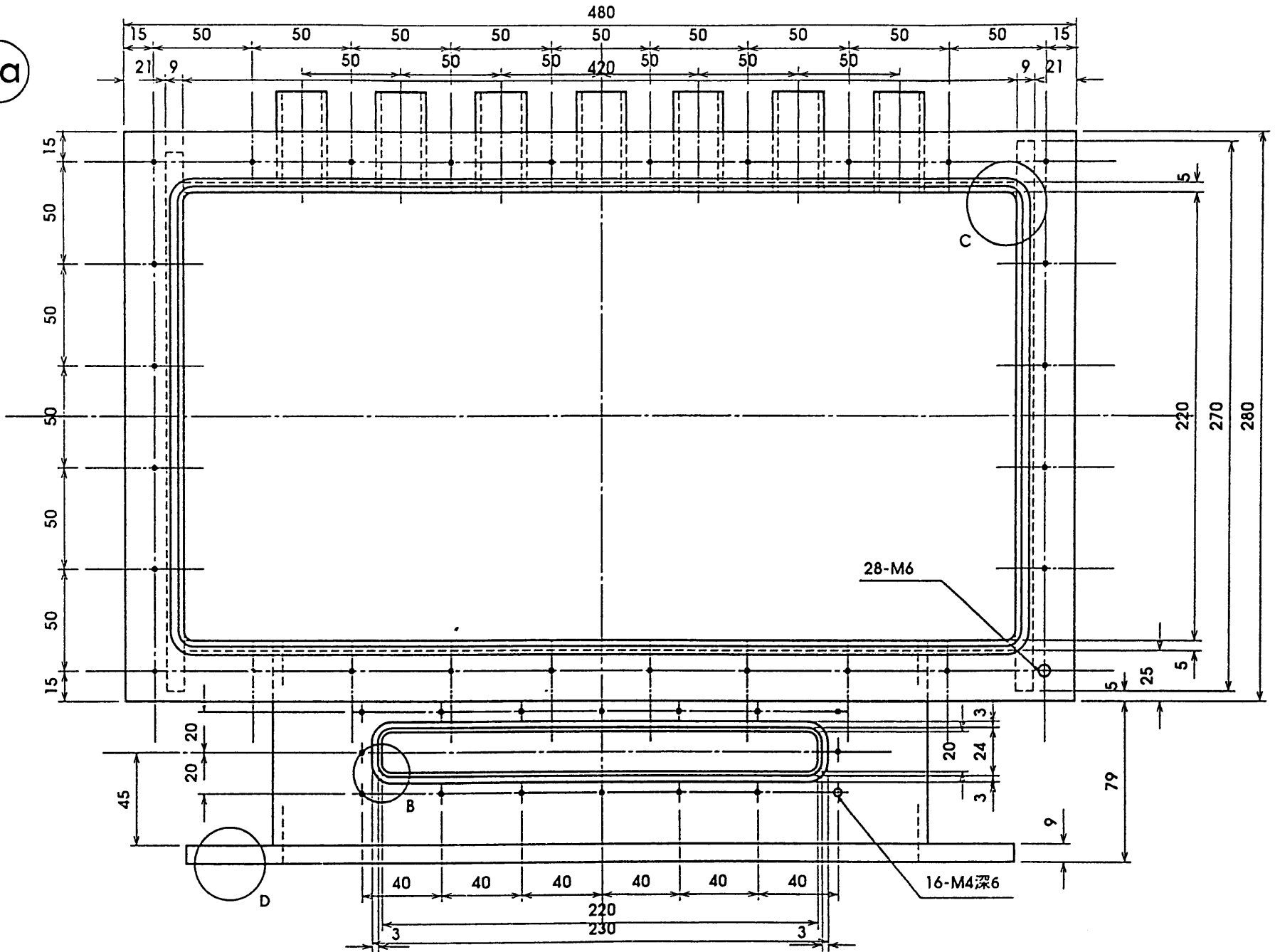


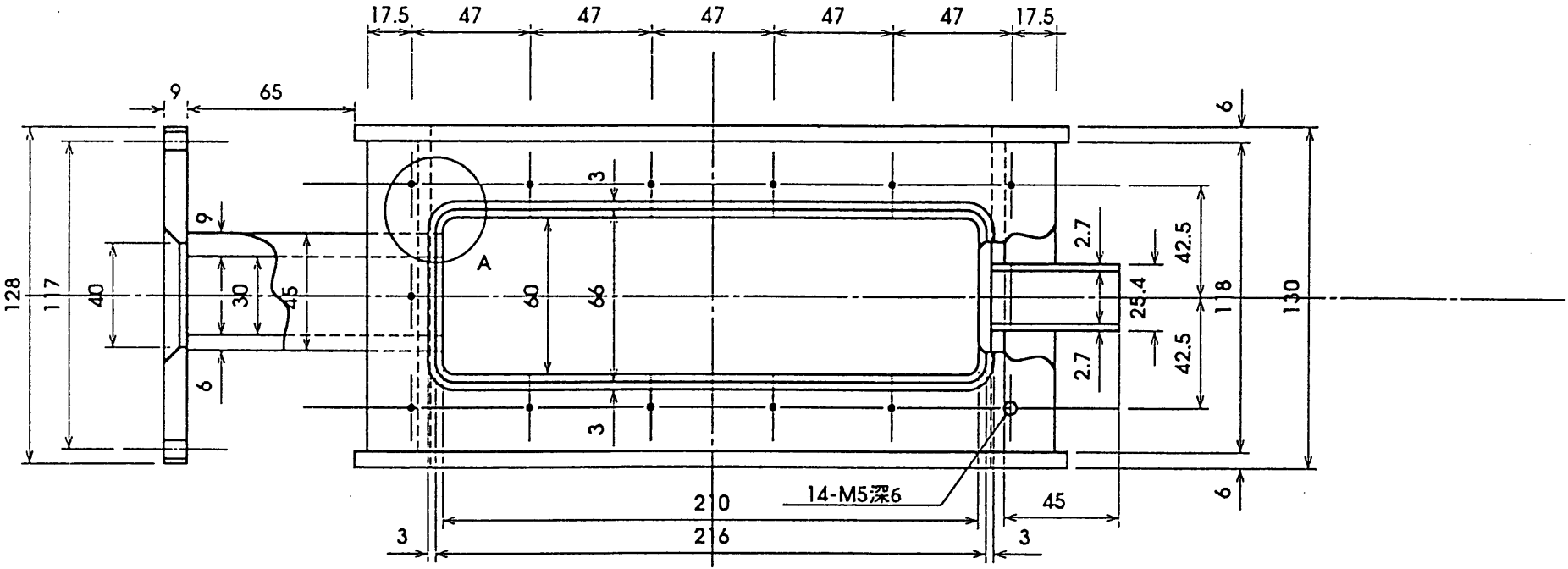
4	トラップ管	1	パレックス		1/2
3	リング押さえ上部	1	透明塩ビ	キ,接	1/1
2	リング押さえ下部	1	透明塩ビ	キ,接	1/1
1a-e	本体	1	透明塩ビ	キ,接	1/2
図番	図名	個数	材料	加工	縮尺
品名	水蒸気トラップ	製作者名	北谷		

Fig3-5 LD組立図



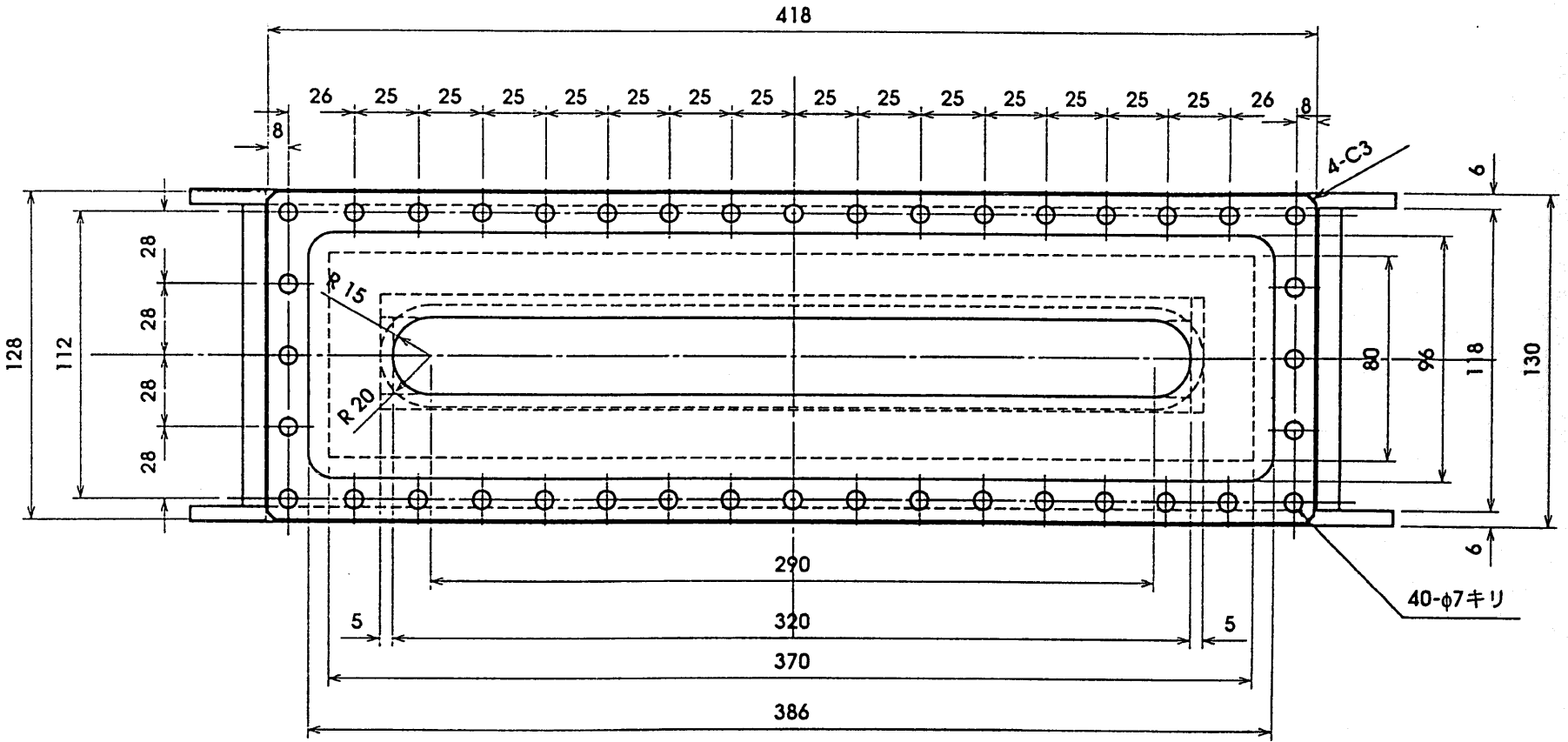
1a



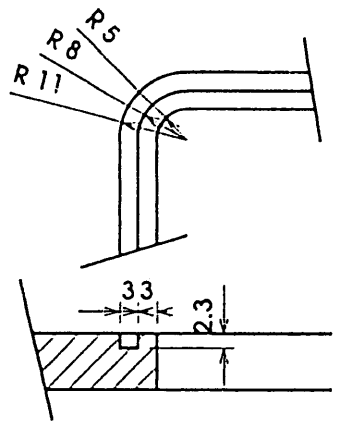


1b

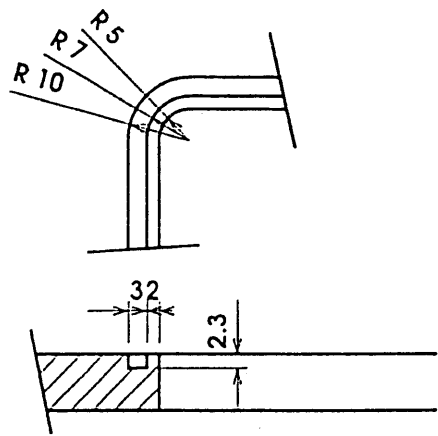
1c



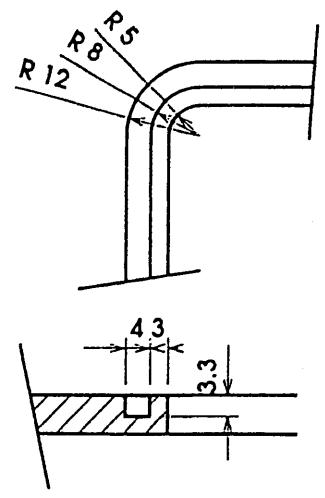
A部詳細



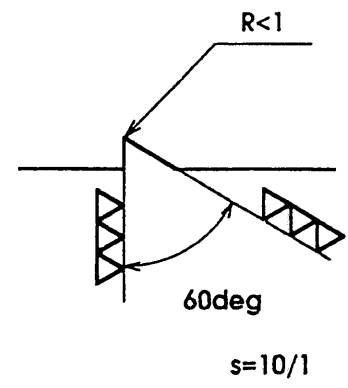
B部詳細



C部詳細



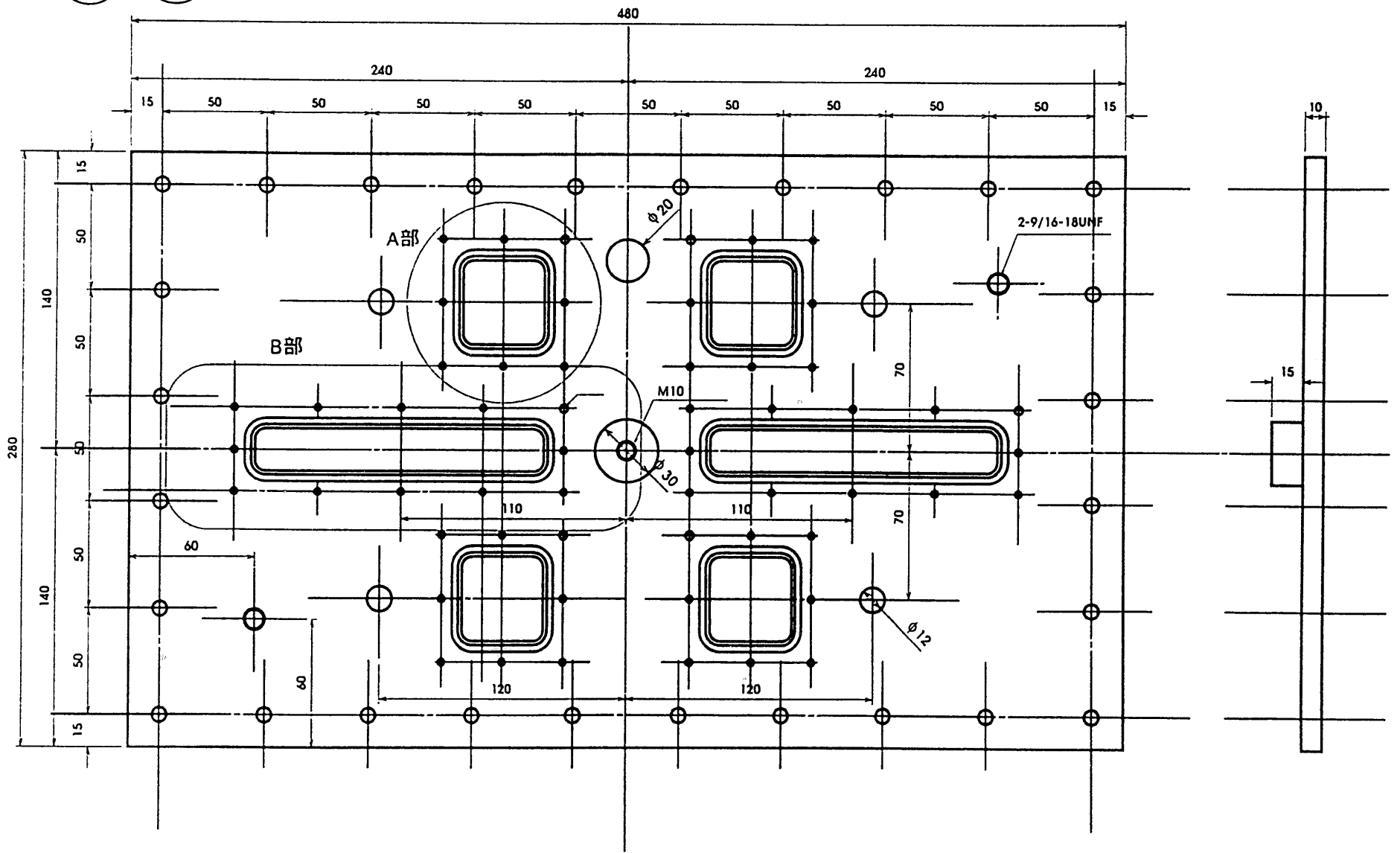
D部詳細



2

3

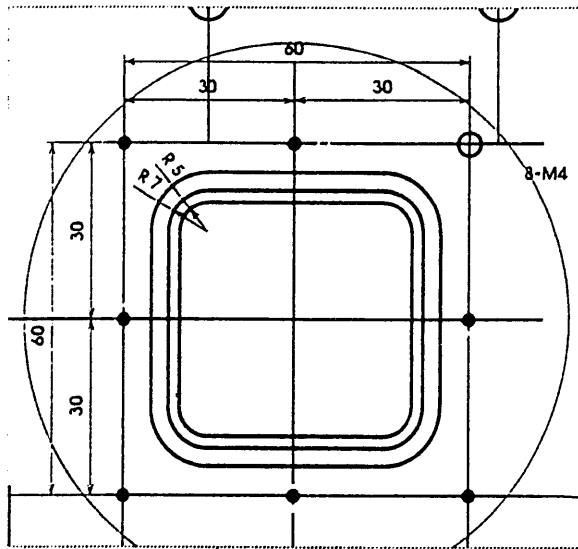
3 AおよびB穴なし



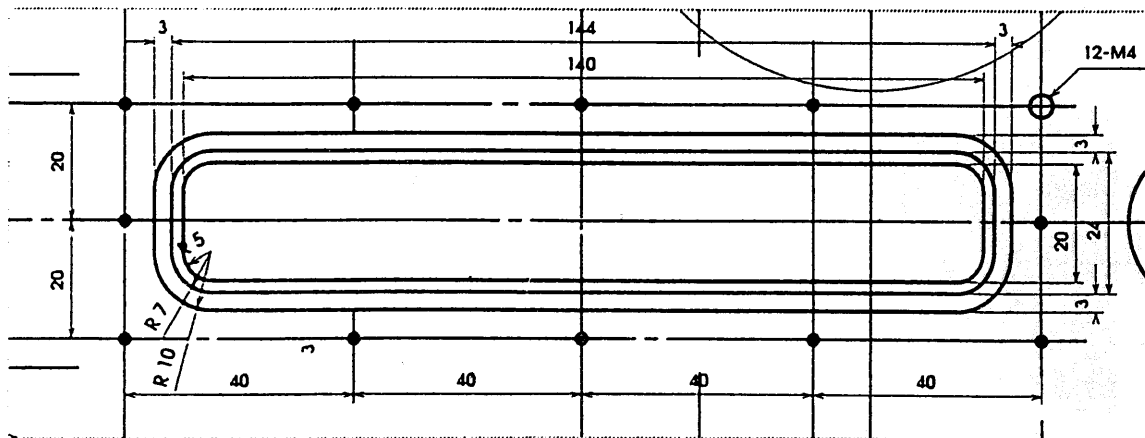
PNC PN8410 94-268

2a

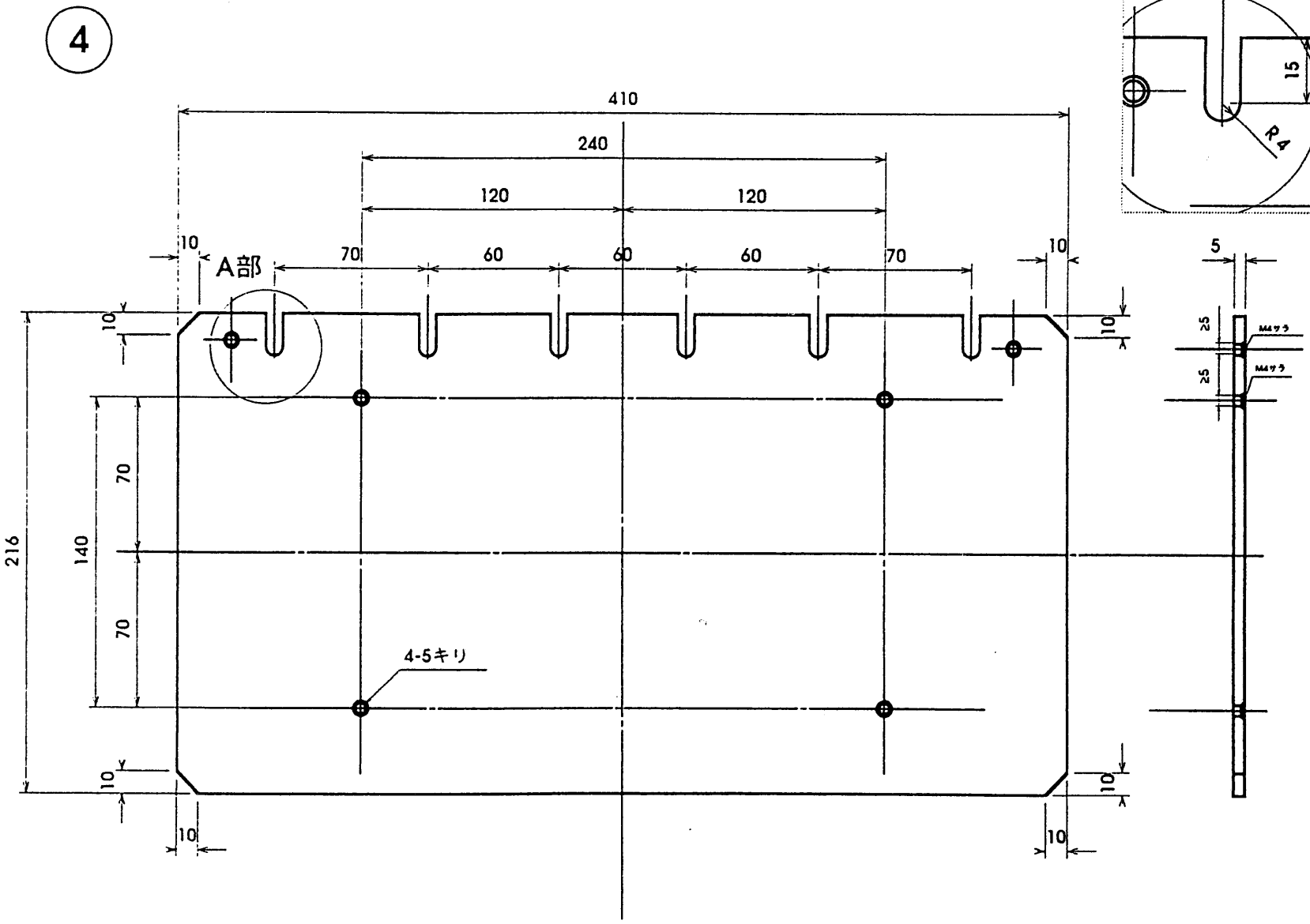
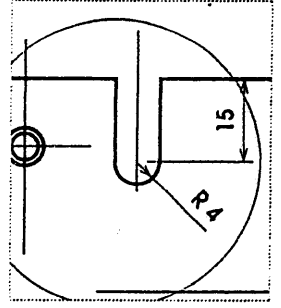
A部詳細



B部詳細

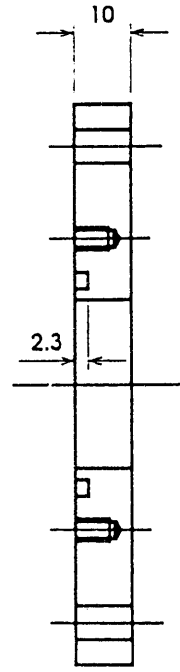
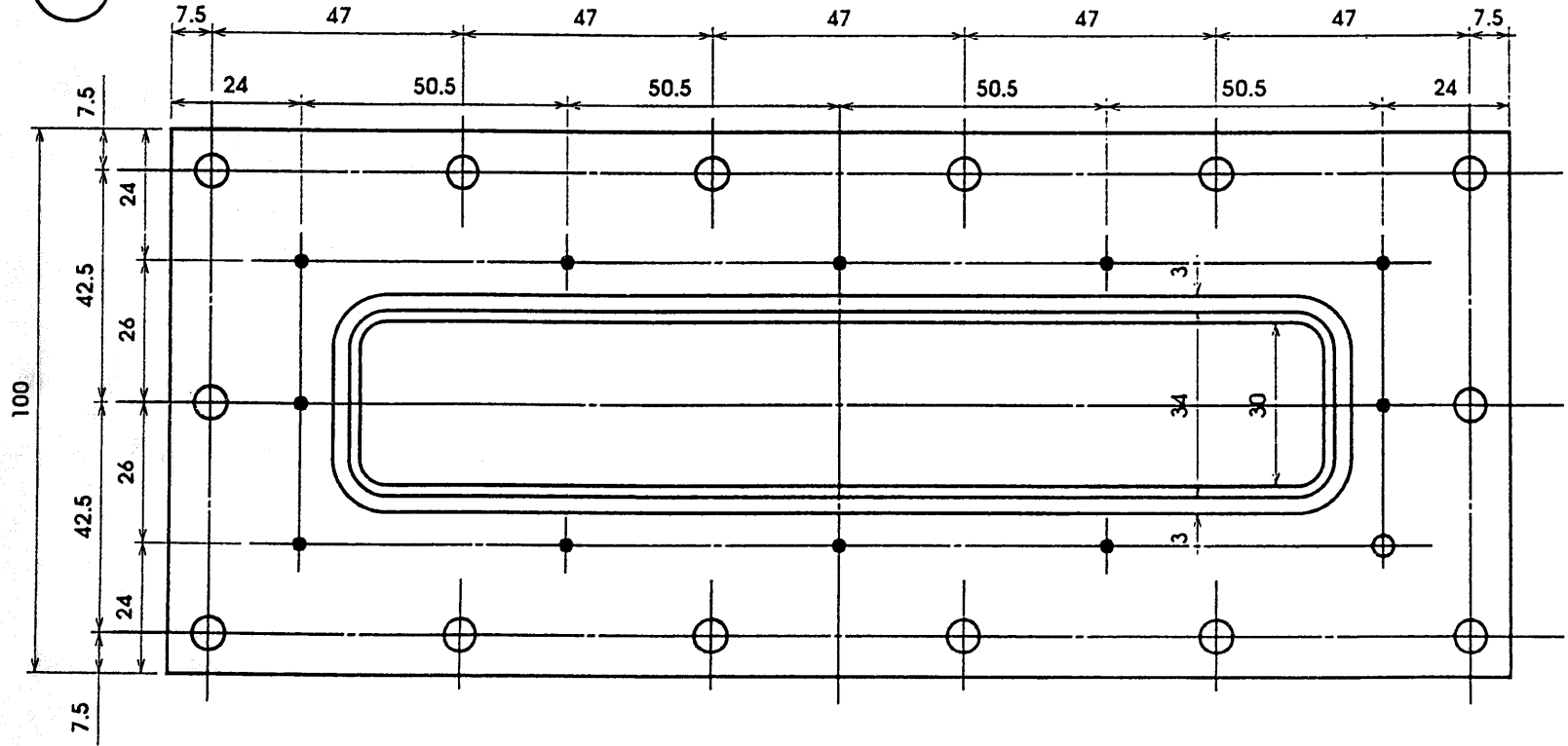


A部詳細

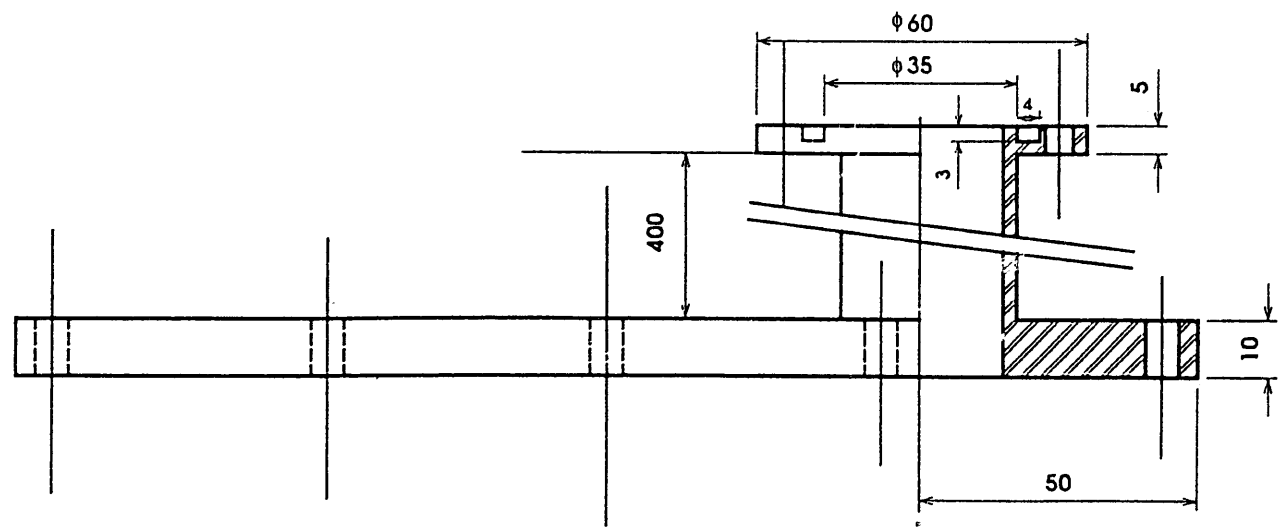
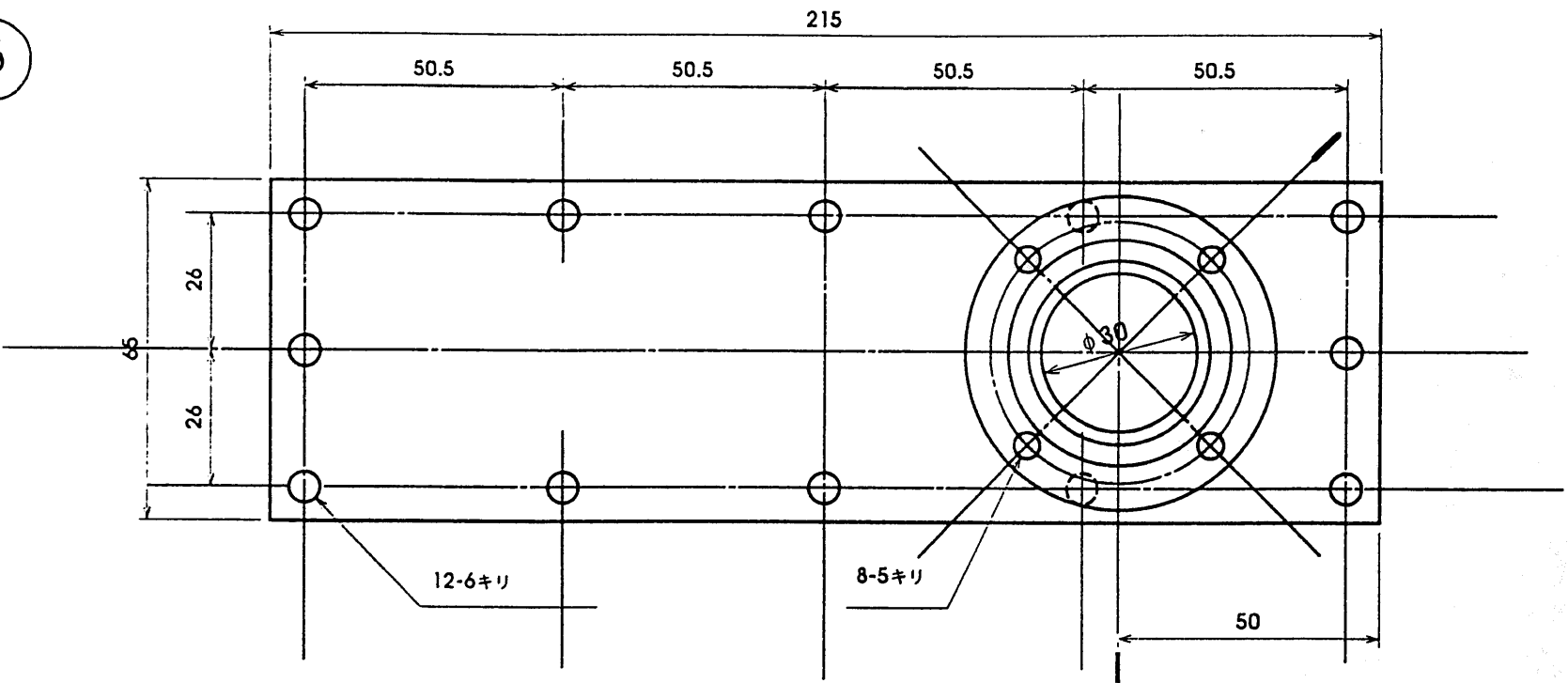


4

5



6



7	ヨウ素インジェクタ	2	Cu	キ,接	1/2
6	共振器取り付け板	2	SUS316	キ,接	1/1
5	側板	2	SUS316	キ	1/1
4	しきり板	2	透明塩ビ	キ	1/2
3	下部板	1	透明塩ビ	キ	1/2
2	上部板	1	透明塩ビ	キ	1/2
1a-d	本体	1	SUS316	キ,接	1/2
図番	図名	個数	材料	加工	縮尺
品名	レーザダクト	製作者名	北谷		