

すばる望遠鏡用ドームフラットシステム (案)

概念設計レポート

1998年4月21日

土居・嶋作・高見

(1) はじめに

このレポートの目的は、すばる望遠鏡用ドームフラットシステムの概念設計を提案することです。この案ではトップリング裏にランプと簡単な光学系を置き、天頂方向に張られたスクリーンを照らします。以下、どの程度の光量および一様性のものが達成できそうかをおおよそ見積もっていきます。背景として、土居・嶋作は、スローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) の監視望遠鏡 (口径60cm 現在20インチのものへ交換中) 用に同様の方式でドームフラットシステムを設計してきています。(現在テスト中。光量についてはほぼ要求通りの実測値を得た段階。一様性についてはこれから。) SDSSは可視光だけですが、現在MAGNUM 2m望遠鏡についてもMAGNUMグループ、京都3Dのグループと協力して、ほぼ同様の設計でU-Kのドームフラットを製作しようとしています。このレポートは、MAGNUMにむけて行った設計を多少変更して作りました。すばるについて土居・高見でうちあわせを行ったのが17日金曜日の午後ですが、急いで概念設計を提案すべき段階かどうかがありましたので、取り急ぎレポートをつくりました。この段階では、すばるにあわせて本格的にファインチューニングを行った結果ではないこと、またデータや計算について十分確認ができていない段階であることをご承知の上で以下をお読みください。

(2) 概要

この提案では光源部分 (ランプ・レンズ・フィルター) は主焦点・副鏡のケージの裏に配置します。ランプをいくつ置くにしても、常に中心に近い場所とします。これは軸対称性を利用した設計になっている (現在のところソフトウェアの限界もあり、これしかできない) ためです。冷却についてはトップリングに水が来ていますので、それを利用できと思っています。スクリーンについては例えばSORICのスクリーンを天頂方向に張ることとします。

設計に際して考慮した装置はSuprimCam, FOCAS, CIAO, CISCO, OHS, IRCSです。ただしこの時点では装置の効率については一律30%を仮定させていただいています。各装置の方には、このレポートをもとにより具体的な値をいれて検討していただき、性能が不足である場合に報告していただければと思います。ただし光量には限界があり、あまり高い波長分解能には対応できません。ピンニング、あるいは低分解能のフラットを利用することなどを検討していただき、それでも不足する場合には報告していただき、ランプ数の増加などを検討することになります。設計でカバーするバンドはUからMまでです。ただしU-KまでとL、Mは別の光源を用います。もともと製作経験があるのは可視光ですので、波長の長い方へいくほど実際には新たな問題に出くわす可能性が高くなります。

以下まずU-Kについての設計を示し、特に困難なLM用のについては後で記します。

(3) 光学設計

以下に光学部品の配置を示します。

| | 曲率半径 | thickness | |
|----------------|----------|-----------|------------------------|
| 1 ランプ (フィラメント) | - | 8.5 | |
| 2 レンズ1 | 46.0 | 2.6 | fused silica, phi=15mm |
| 3 | Infinity | 6.0 | |
| 4 レンズ2 | -13.8 | 2.0 | fused silica, phi=25mm |
| 5 | Infinity | 5000.0 | |
| 6 スクリーン | -10000.0 | | parabolla |

1) レンズ

ここでレンズ1平凸レンズ、レンズ2は平凹レンズです。光を拡散させてスクリーンを照らします。レンズ1、2の距離および曲率を調整することで、スクリーンの照らし方を調整します。レンズのパラメータはすべてシグマ光機のカタログの標準品より選んでいます。ランプの光のうち、F/1.0にはば対応した光を集めてきています。この設計で半径4500mm程度をほぼ一様に照らせます。

2) スクリーン

レンズ2からスクリーンまでの距離は5,000mmとしてあります。すばるデータブックSDS-3-1-3より目分量で読み取り、多少の余裕を見ました。スクリーンの形状について、重要な点が一つあります。ここでは上のような形状の放物面を仮定しました。SDSSでは粗い面精度ではありますが、放物面にしました。これは使用しているソフトウェアがRay Traceのソフトウェア(ZEMAX)であり、スクリーンで散乱された後の違った方向の光を追跡できないため、散乱の後も中心光のみ追跡し、中心光の一様性を調べ、中心光に対する散乱の対称性を仮定して、一様性を評価することしかできないためです。すばるの場合スクリーンの大きさが非常に大きく、放物面にするのはかなり難しくなると考えられます。これについては4)でより詳しく述べ、方針をまとめます。

スクリーンの直径は3)に示すように直径8400mm以上必要です。スクリーンの材質はドームフラットのために作られたSORICスクリーンを仮定しています。これは広い波長範囲で高い反射率(70~80%程度)、かつ性質の良い散乱反射特性を持っているためです。ただし2.5ミクロンまでしかデータがなく、現在問い合わせています。ただし6)に書きますように高価ですので、代わる材があればそれにこしたことはないと思われれます。

3) 視野

視野はどれだけ広い範囲まで照らせるかで決まります。スクリーンと主鏡の距離を多少余裕を見て20mとすると、視野半径15分は約100mmになります。もともとの有効口径とあわせて半径4200mmを照らせれば良いことになります。現在の設計では、この範囲は問題なく照らせています。

4) 一様性

ここで調べている一様性は主鏡に入っていく段階での一様性です。検出器の上では一様性はより高くなりますが、できる限り無限遠からの一様光に近づけることを試みる必要があります。

例えば理想的な一様光に比べ、主鏡中心付近に大量の余分な光があたっているとすると、検出器の上ではどの要素も余分な光を見ますので、ほとんど一様に見えます。しかしながら焦点面近くのむらや埃のコントラストは、中心付近からの光をける、けらないが理想的な場合と大きく異なってくるので、正しい感度パターンをあたえません。

さて、実際にZEMAXを用いた一様性の測定には限界があります。方法としては上にあげた光学系のほぼ主鏡位置においた平面上でのencircled energyの分布を半径方向約100点で調べます。これは半径に対する積分値ですので、差分をとってリングごとの光量におおします。リングの面積は半径に比例しますので、結果が比例関係になれば一様性が確保されていることになります。図1が結果です。がたがたしているのは計算の粗さがでているためです。ほぼ比例関係にあり、概念設計としては、上記のような光学系でほぼ一様な照射が可能であることを示しています。ただしこれ以上の精度の計算はZEMAXでは限界があります。SDSSではスカイフラットや星をCCDの別の位置で読めて撮って調べた感度パターンと比較し、校正して使おうとしています。

すばるの場合の問題点の一つとして、前にあげたように、スクリーンを放物面にすることが難しい(高価である)ことがあります。スクリーンが平面の場合の非一様性の目安として、以下のような計算をしてみました。

必要な放物面の形状を

$$z=r^2/R(1+\sqrt{1+4R^2})$$

とすると

$$dz/dr=2/(1+\sqrt{1+4R^2}) \cdot (r/R)$$

使用するスクリーンの端付近の位置 $r=4200\text{mm}$ のところ

| R | dz/dr | theta (degree) | cos(theta) |
|-------|-------|----------------|------------|
| 10000 | 0.348 | 19.2 | 0.944 |

となり、 19° 傾いている必要があります。ここが平面になるのですから、散乱特性をcosineで近似すると、約5.6%だけ主鏡にまっすぐ向かう光が少ないことになります。したがって光軸中心で見ると端で約6%減っていくような光が理想的な一様光のかわりに入ってきます。なお光軸中心から離れた焦点面の位置では鏡のある側と反対側を反射してくる光が片側より強くなりますが、主焦点カメラでもその大きさは 0.25° ですのでその差は小さく、ほぼ光軸中心と同じような光を受けていることになります。この他に光源からの距離が平面と放物面で異なる部分の効果も補正項として入ってきます。

この問題の解決方法として、

- ①外側の光が必要なだけ強くなるようにレンズ群を詳細設計する。
- ②スクリーンの形状を放物面にする。
- ③この程度の非一様性を許容する。

が考えられます。③は一つの可能性です。SDSSやMAGNUMでは副鏡裏とスクリーンの位置関係がより厳しく、このオプションをとれませんでした。すばるでは目指す精度によっては無視で

きるかもしれません。しかしながら①がもっとも安心かつ比較的安価なオプションだと思われます。これには本格的な計算、特に照射を精度良く計算するようなソフトウェアがあると良いです。例えばOPTICADと呼ばれるソフトウェアであれば50万円以下で購入できます（開発実験センターに1ライセンスあっても良いと思われる）。このようなソフトを用いれば光路以外からの散乱光（迷光）の計算も本格的にやろうと思えばできるはずです。なお、レンズ1を別の標準品のレンズに交換した時の図1に対応したプロットを図2に示します。端で光量が増えている様子がわかると思います。

主鏡の端付近を強めに照らす設計の例

| | 曲率半径 | thickness | |
|----------------|----------|-----------|------------------------|
| 1 ランプ (フィラメント) | - | 8.5 | |
| 2 レンズ1 | 32.2 | 2.9 | fused silica, phi=15mm |
| 3 | Infinity | 8.0 | |
| 4 レンズ2 | -13.8 | 2.0 | fused silica, phi=25mm |
| 5 | Infinity | 5000.0 | |
| 6 スクリーン | -10000.0 | | parabolla |

(4) ランプおよび光量

ここではランプと光量についての計算を行います。ここでは計算を簡単にするためにすばるの装置のシステム効率をすべて30%としています。またスクリーンや鏡の反射率は波長によらず一定としています。

1) 絶対値の実測値

最初に実測値として、SDSS60cm望遠鏡において r' バンド、SITeの2 Kチップ

(0.8arcsec/pixel)における光量の実測値をあげます。使ったランプはOSRAM 12V-30Wのランプで、色温度として約3200Kのもので、光学系は上記と似ていますが、ランプの光のうちのF/2.0を使っています。システムの効率はおおよそ50%、バンド幅は150nmです。この時、受けた光量は約18000 electrons/sec/pixelです。

すばるの各装置に適用する場合、口径は関係ありませんが、以下のいくつかの補正が必要になります。まずFOCASのBバンドに変換します。

- 1 ランプの光の利用 F/2.0 → F/1.0 (レンズを明るいFの設計にした)
- 2 画素の見える立体角 0.8arcsec/pix → 0.10arcsec/pix
- 3 装置の効率 50% → 30%

(このレポートではすばるの装置は一律30%とするため)

- 4 バンド変換 0.431 → 1.0

(以下の計算のnormalizationになっているBバンドの値に直すため。

SDSSではランプの後にBG26 4mm, KG4 4mm, UG3 2mmを入れており、補正量を計算した。)

これにより 1570 electron/sec/(0.1×0.1sq.arcsec) : Bバンド

これをすばるの各装置への入射光量の推定の基準とします。

2) broad bandでの光量の比

最終的な絶対値の議論は最後に再度行うことにし、他の波長(まずbroad band)での光量の比を求めて行きます。broad bandの計算に際しては、以下のようなパラメータで計算します。

| band | U3 | B2 | V | Rc | Ic | J | H | K | L | L' | M' | M |
|-------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| lam_eff (Å) | 3652 | 4448 | 5505 | 6588 | 8060 | 12367 | 16466 | 22126 | 35000 | 37800 | 47800 | 48500 |
| FWHM (Å) | 526 | 1008 | 827 | 1568 | 1542 | 2062 | 2986 | 3956 | 6100 | 5900 | 2200 | 6200 |
| Resolution | 6.9 | 4.4 | 6.7 | 4.2 | 5.2 | 6.0 | 5.5 | 5.6 | 5.7 | 6.4 | 21.7 | 7.8 |

また各装置の空間・波長分解能は

| | SuprimCam | FOCAS | CIAO | IRCS | CISCO/OHS |
|-------------------|-----------|--------|--------|---------|-----------|
| 画素サイズ(arcsec/pix) | 0.18 | 0.10 | 0.012 | 0.023 | 0.12 |
| 波長分解能 | < 50 | < 2500 | < 1000 | < 20000 | < 450 |

(A) 3200Kの黒体に対しては光量の比は

| band | U3 | B2 | V | Rc | Ic | J | H | K | L | L' | M' | M |
|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ratio | 0.131 | 1.00 | 2.42 | 8.11 | 11.8 | 19.5 | 23.8 | 20.1 | 13.7 | 11.5 | 2.17 | 6.35 |

(Bバンドがnormalization)

さらにスケールの変換をすると、broad bandの光量の比は

| | SuprimCam | FOCAS | CIAO | IRCS | CISCO/OHS |
|---|-----------|-------|-------|------|-----------|
| U | 0.42 | 0.13 | | | |
| B | 3.24 | 1.00 | | | |
| V | 7.84 | 2.42 | | | |
| R | 26.3 | 8.11 | | | |
| I | 38.2 | 11.8 | | | |
| J | | | 0.281 | 1.03 | 28.1 |
| H | | | 0.343 | 1.26 | 34.3 |
| K | | | 0.289 | 1.06 | 28.9 |

となります。

broad bandのドームフラットに必要な光量を、可視光で10000electrons/pix, IRで10000electrons/pixとすると、

必要な積分時間(秒)は次のようになります。

30W-3200Kのランプで可視100000e/pix, IR 10000e/pixに達するまでの推定時間 (秒)

| | SuprimCam | FOCAS | CIAO | IRCS | CISCO/OHS |
|---|-----------|-------|------|------|-----------|
| U | (152) | 490 | | | |
| B | 19.7 | 63.7 | | | |
| V | 8.1 | 26.3 | | | |
| R | 2.4 | 7.6 | | | |
| I | 1.7 | 5.4 | | | |
| J | | | 22.7 | 6.2 | 0.23 |
| H | | | 18.6 | 5.1 | 0.19 |
| K | | | 22.0 | 6.0 | 0.22 |

FOCASのUバンドでの光量が不足していますが、他は許容範囲(目標1分以内)に入っています。

3) 分光での光量

分光では、これより大きく光量を増やすことが必要になります。broad bandの波長分解能を典型的に5とすると、本来必要な量はbroad bandの

| | FOCAS | CIAO | IRCS | CISCO/OHS |
|--------------------|-------|------|-------|-----------|
| 分光に必要な光量(倍) | 500 | 200 | 4000 | 90 |
| 30Wでの積分時間(sec,max) | 3000 | 4400 | 23600 | 20 |

となります。ただしFOCASについては、装置自体にフラット用光源が用意されており、ドームフラットは使えれば使うということですので、ここでは少なくともUバンドの分光は考えていません。

光量の増加は主にランプのパワーをあげることによって可能となります。150W以上のランプでは3400Kくらいの色温度になりますが、スペクトルの形としてUバンドで50%増える程度で、桁で増えることはありません。

具体的には600W分のランプ(例えば150Wのランプ4本)にすると上の表の約1/20で済み、FOCAS(R=2500, B), CIAO(R=1000, J)でも数分で済む計算になります。しかしIRCSのR=20000では20分かかる計算になります。計算の上ではランプを増やせば光量はいくらかでも増やせます。しかし冷却の問題があり、あまり大きな電力のランプを置くのは考えものです。精度をゆるずる(例えば1pixelの光子揺らぎ3.16%で良ければ1/10の時間で良いので、2分で到達します)、あるいはピンニングをすることを検討していただければと思います。

4) ランプ

150W-24V-3400K (Philips)

250W-24V-3400K (ORIEL)

等が温度の高いランプで候補としてあげられます(電力の高いものは温度の低いものが多い)。寿命はどちらも24Vでは50時間しかありませんが、例えば前者については20V(3200K)で使えば約500時間になります。

装置のスペック、冷却などとあわせて電力が決まったら比較的簡単に選定できます。

5) 光量の調整

光量の調整はランプの電圧を調整することである程度行えます。MAGNUM望遠鏡の場合、150W-24Vのランプを200Wの出力電圧をリモートで調整できる電源を用いる予定です（電源はJTEレクトロニクス、出力電圧調整は2.5Vまでのアナログ電圧によりコントロール）。特にSuprimCamではシャッターの効果がでないよう、積分時間を1秒以上にしたいという希望があります。これを電圧調整だけで行えるかどうか（低電圧でランプが安定して動作するか、再現性、ランプ寿命等）調べる必要があるかもしれません。

あるいはbroad band用には150Wのランプを使ったもう一つの光源を用意し、およその光量をあわせた後に電圧を調整する方が安全かもしれません。例えば

(B) BG26 3mm + KG2 2mm の色ガラスを追加すると3200Kの黒体に対してbroad bandの光量の比は

| band | U3 | B2 | V | Rc | Ic | J | H | K |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ratio | 0.12 | 0.94 | 1.76 | 2.57 | 1.23 | 0.84 | 3.06 | 3.01 |

となり、Uバンドを除くと約3倍以内におさまるようになります。

この時、必要な積分時間（秒）は

| SuprimCam (100000e/pix) | CISCO/OHS (10000e/pix) |
|----------------------------|---------------------------|
| U (33.2) | |
| B 4:2 | |
| V 5.3 | |
| R 5.1 | |
| I 3.3 | |
| J | 1.1 |
| H | 0.29 |
| K | 0.29 |

となります。

なおこの時の光学パラメータ等の例は付録Aに記しました。

(5) L・Mバンド

Mバンドでは石英のレンズやランプのガラスが光を通さず、光源およびレンズを共に変更する必要があります。Lバンドは通す石英材もあるようですが、材によっては通さないことがあります。レンズについてはフッ化カルシウム、ジंकセレンなどを用いることになります。Kバンドまでと光学設計については（屈折率の違いの分を曲率などを変えて設計すれば）同じです。光源については通常のQTHランプは2.7 μ mくらいまでしか使えないように書いていることが多いようです。それより長い波長での光源は、これまで調べた限りでは

セラミック・ヒーター光源 60W 1600K (日本分光)

IR Emitter 166W 1190K (ORIEL)

があります。後者はワット数は高いけれども温度が低いため、結局前者に比べLバンドで1.2倍、Mバンドで1.38倍の明るさで、大差はありませんので以下前者について計算します。

なおスクリーンの反射率はデータがありませんので波長によらず一定としています。また emissivity もまだデータがありませんので、QTHと同じと仮定しています。これらは実際には光量をより減らす方向に働くと予想されます。

3200Kの黒体に対する1600Kの黒体の光量の比は、これまで同様、3200KのBバンドを1.00として、

| band | L | L' | M' | M |
|-------|------|------|-------|------|
| ratio | 2.94 | 2.67 | 0.611 | 1.79 |

となります。

スケールの変換後のbroad bandの比は

| | CIAO | IRCS |
|----|---------|--------|
| L | 0.0423 | 0.156 |
| L' | 0.0384 | 0.141 |
| M' | 0.00880 | 0.0323 |
| M | 0.0258 | 0.0945 |

となります。

電力が2倍ですので、光量が2倍になるはずということも考慮して、10000electron/pixelになる時間(秒)を推定すると、

| | CIAO | IRCS |
|----|------|------|
| L | 75.3 | 20.4 |
| L' | 82.9 | 22.6 |
| M' | 362 | 98.6 |
| M | 123 | 33.7 |

これまで調べた限りでは、上記のもの以上ワット数の大きい赤外線光源は見つかっておりませんので、分光のため光量を増やし、積分時間を減らすには本数を増やしていくことになりませんが、Eバンドまづに比べ光量が減っているので、L~Mでは高い分解能の分光のドームフラットは難しそうです。

(6) 推定予算

スクリーン

最も高価だと思われるのはスクリーンです。SORICの場合、過去の見積り例では\$1329/(1.68mx1.68m)ですので、8.5m直径のものを面積で計算すると\$26,720. となります。スクリーンは予算的に大きいので、いろいろ注意して選ぶ必要があります。広い波長範囲で高い反射特性があることが重要です。散乱特性としては、あまり大きな角度では使いませんので、SORICのようなものでなくても大丈夫です。取り付けもある程度の費用が必要になると考えられます。

配線・冷却配管

配線として、電源を上に乗せるとしたら1kW程度のACを一本、電源on/off用配線3組程度、電圧調整用2.5V配線3組程度が必要です。下に置くとしたら上まで10A程度の直流線3組から5組(ランプの種類と数による)が必要です。この熱冷却のために水の配管を拡張する必要があります。

光源

ランプ自体はQTHも赤外線用のものも1個25000円位です。レンズはU-Vバンドまでのものは数万円、LM用は20万くらいになります。電源はランプ1つあたり10万円弱です。ホルダーは冷却を考えた構造にするので、現段階では推定しにくいですが、全部で数十万でしょうか。

(7) その他

上の計算をたたき台に各装置に必要なワット数を提案していただくことが次のステップになると思います。ここでは装置の効率30%を仮定しているので注意してください。反射率やemissivityなど赤外線ではこの計算よりも光量が例えば50%減る可能性も十分ありますのでご注意ください。

(付録A) 色補正フィルター付き光学系

色補正用フィルターを入れる場合の光学系の例です。

| | 曲率半径 | thickness | |
|----------------|----------|-----------|------------------------|
| 1 ランプ (フィラメント) | - | 8.5 | |
| 2 レンズ1 | 23.0 | 3.3 | fused silica, phi=15mm |
| 3 | Infinity | 0.01 | |
| 4 フィルター | Infinity | 5.0 | color glass |
| 5 | Infinity | 5.0 | |
| 6 レンズ2 | -23.0 | 2.0 | fused silica, phi=25mm |
| 7 | Infinity | 5.0 | |
| 8 レンズ2 | -32.0 | 2.0 | fused silica, phi=30mm |
| 9 | Infinity | 5000.0 | |
| 10スクリーン | -10000.0 | | parabolla |

1) レンズ

ここでレンズ1平凸レンズで、光を一度平行光に近くし、色補正用フィルターにあまり斜めの入射をしないようにするのが一つの目的です。レンズ2、3は平凹レンズで、光を拡散させてスクリーンを照らします。レンズ1、2、3の距離および曲率を調整することで、スクリーンの照らし方を調整します。ここでもレンズのパラメータはすべてシグマ光機のカタログの標準品より選んでいます。またランプの光のうち、F/1.0に対応した光を集めてきています。

2) フィルター

平板の色ガラスフィルターです。もともとのランプのスペクトルでは短波長の光子が不足するので、赤い光を多少制限しています。斜め入射の影響ですが、レンズ1でビームを絞った後の最も外側の光は約13°傾いています。この光は中心の光に比べ2.5%だけ長く色ガラスを通過しますが、この程度の量なら許容できるはずです。

以上

Fig.1 : homogeneous illumination (2 lenses)

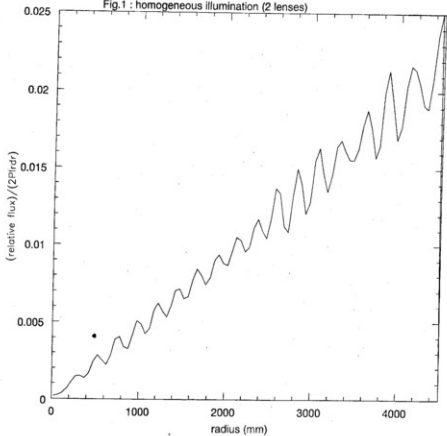
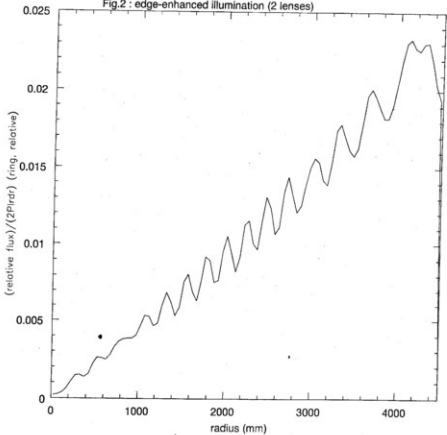


Fig.2 : edge-enhanced illumination (2 lenses)



1. はじめに

ドームフラット用光源装置の概略構造案を提示致します。

2. 概略構造案

<主な仕様>

—光源部分—

- ・外気圧：0.5 bar 対応
- ・密閉型内部強制空冷方式（封入窒素ガス強制循環）
- ・外部熱交換エチレングリコール ラジエーター方式
- ・窒素封入圧力計表示
- ・光学出力：f 70 mm 石英レンズ
- ・300 Wキセノンランプ使用

—イグナイター部分—

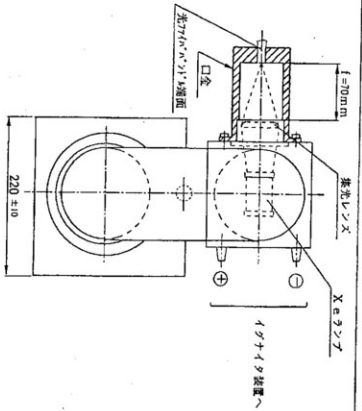
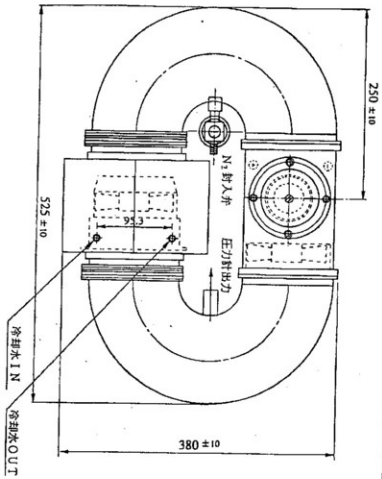
- ・イグナイター装置（点灯用）低電圧0.5 bar 放電防止モールド加工
- ・強制空冷用ファンモーター

<概観図面>

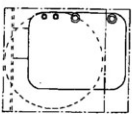
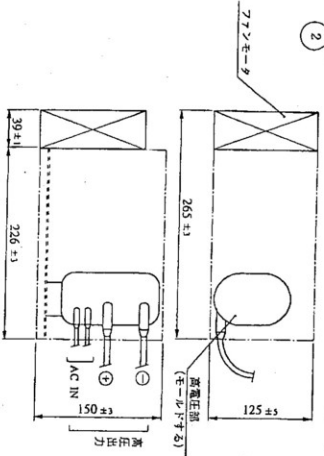
概観図面を1枚添付する。

- ・図番 98T99-0020-001

以上



②



①と②は別体

型 材料 記 号 (EPC No.) サイズ

| | | | | | |
|------|----------|----------------|---|----|-----|
| 品名 | レーザー形光源 | 1 | 1 | | |
| 仕様 | イタチイタ装置 | | | | |
| メーカー | T.Nagata | | | | |
| 尺規 | 尺 | 1998 | 年 | 4月 | 22日 |
| 製 | 所 | 東京 | | | |
| 電 | 話 | 03-427-1301 | | | |
| 電 | 傳 | 03-427-1302 | | | |
| 電 | 郵 | 150-0011 日本橋 | | | |
| 電 | 子 | 98179-0020-001 | | | |

株式会社 ナガタ