

修士学位論文

茨城局 32m 電波望遠鏡搭載用
22 GHz 帯冷却受信機の開発

2013 年度
(平成 25 年度)

茨城大学大学院理工学研究科

理学専攻

12NM165N

森 智彦

要旨

茨城大学では、茨城県高萩市・日立市にまたがる国立天文台茨城観測局内に設置されている 2 基の 32 m 電波望遠鏡の整備を進めている。6–9 GHz 帯での受信機システムは既に整備が終了しており試験運用が行われているが、水メーザー・アンモニア分子輝線が含まれる 22 GHz 帯の観測装置整備は行われていなかった。本研究では、茨城局 32 m 鏡に搭載する 22 GHz 帯冷却受信機システムの開発について報告する。

今回の開発では、受信機システムの初段回路を格納するデュワー部分を設計した。電波望遠鏡のような多段回路においては、初段回路の雑音を可能な限り低減させることが望まれる。装置由来の熱雑音は、デュワー内を極低温状態にすることで低下させられる。また、極低温を維持するためには装置内部を真空状態にして熱伝導を小さくする必要がある。そのため、内部を真空・極低温に保つことができるデュワー構造とした。デュワー内の回路に入力された天体電波信号は、ポーラライザーによって偏波分離され、HEMT アンプによって増幅される。受信機は、高萩市・日立市の各アンテナ用に 2 台開発した。デュワーの設計は細部で一部異なるが、内部構造は基本的に同じである。以下、前者の受信機を 1 号機、後者を 2 号機とする。

受信機が完成した後、Y-factor 法による受信機雑音温度 T_{RX} の測定を行った。 T_{RX} の測定結果は、1 号機が 35 ± 5 K、2 号機が 25 ± 1 K であった。 T_{RX} は、常温 300 K の電波吸収体と液体窒素に浸けた 77 K の電波吸収体を受信機に付属する給電部前におき、この両者の出力の比から求めた。この後、22 GHz 帯冷却受信機 1 号機は高萩アンテナに搭載し、2 号機は日立アンテナに搭載した。搭載後、システム雑音温度 T_{sys}^* を測定した。測定の結果、両アンテナともに $T_{sys}^* = 45$ K 程度（天頂大気込み、冬季、晴天時）となった。常温の 22 GHz 帯冷却受信機では $T_{sys}^* = 300$ K 程度であるのに比べると、開発した冷却受信機の雑音温度は 6 分の 1 に低減されたといえる。また、他局のアンテナ性能（VERA は $T_{sys}^* = 100$ K）と比べても低雑音となった。 T_{sys}^* は観測感度に直結しており、同等な感度を達成するのに必要な観測時間は T_{sys}^* が 2 分の 1 になると 4 分の 1 になる（下式参照： T_{rms} はデータの期待される標準偏差、 B は 1 Ch あたりのバンド幅、 t は積分時間を表す）。

$$T_{rms} = \frac{\sqrt{2} \times T_{sys}^*}{\sqrt{B \times t}} \quad (T_{sys} = T_{sys}^* e^{-\tau})$$

上記の測定結果に加えファーストライト受信にも成功した。高萩アンテナでは大質量星形成領域 W49N の水メーザー源で、日立アンテナではオリオン大星雲の星形成領域 Orion-BN/KL の水メーザー源で、それぞれスペクトルを取得した。

さらに、測定時間 t に対し雑音が $1/\sqrt{t}$ に比例して減少する時間スケールを求めるために、システムの安定度の測定を行った。システム安定度の測定では、いくつかの天候下において EL = 85°, 30°, 15° 方向の放射と、電波吸収体の放射を、8 時間データを取り続け、32 MHz の帯域幅を 2048 点分光してパワースペクトル 1 チャンネル (1 Ch) のアラン分散、離れた 2 Ch 間のアラン分散をそれぞれ求めた。その結果、22 GHz 帯の観測ではシステムの安定度は天候（大気の状態）に大きく影響されることが分かった。連続波観測の ON-OFF スイッチ時間の指標となる 1 Ch の安定時間は、晴天時で 20 秒程度であるが、雨天時には 2 秒程度となった。分光観測の ON-OFF スイッチ時間の指標となる 2 Ch 間の安定時間では、天候だけでなく 2 Ch 間の幅によっても安定度が大きく異なることが分かった。曇天時、帯域中心付近の狭い Ch 間の安定時間は 200 秒程度であったが、帯域全体に及ぶ広い Ch 幅では 40 秒程度となった。これらより、連続波観測と分光観測では、天候と観測対象の天体を持つスペクトルによっては、ON-OFF スイッチを非常に短い時間で済ませなければならないことが分かった。

今回開発した冷却受信機により、22 GHz 帯における高感度観測が可能となった。さらに、高萩アンテナ・日立アンテナは日本の VLBI 観測網の中心付近に位置するため、国内にある他のアンテナと組み合わせた VLBI 観測において短基線を形成することができる。これにより、広がりのある天体に対してより高い感度を得ることができる。将来的には、高萩アンテナと日立アンテナを結合した 22 GHz 帯 2 素子干渉計の構築を可能とする。

今後の課題は各アンテナにて 22GHz 帯における、ビームパターン、開口能率、指向精度を行う必要がある。

目次

第 1 章 序論	1
1.1 電波天文学	1
1.2 電波望遠鏡	2
1.3 観測方式	3
1.3.1 単一鏡観測	3
1.3.2 干渉計観測	4
1.3.3 単一鏡観測と干渉計観測の感度の比較	4
1.3.4 連続波観測	5
1.3.5 線スペクトル（輝線）観測	5
1.4 茨城 32 m 電波望遠鏡	6
1.5 本研究の目的・意義	8
第 2 章 22GHz 帯冷却受信機の開発	9
2.1 茨城局 32m 鏡搭載用受信機システムの構成	9
2.2 22GHz 帯冷却デュワーの設計	10
2.3 冷却デュワー内の信号の流れ	11
2.3.1 ノイズソース用フランジ	12
2.3.2 RF 真空フランジ	12
2.3.3 断熱導波管	14
2.3.4 円角変換	15
2.3.5 円偏波分離機（ポーライザー）	16
2.3.6 HEMT	22
2.4 冷却デュワーの真空・冷却構造	25
第 3 章 受信機システムの性能評価（22GHz 帯）	27
3.1 雑音温度	27
3.1.1 多段回路における初段回路の重要性	28
3.2 受信機システム単体での性能評価	29
3.2.1 受信機雑音温度 T_{RX}	29
3.2.2 Y- factor 法	29
3.2.3 Y- factor 測定の結果	30
3.2.4 Y- factor 測定結果の考察	32
3.2.5 各コンポーネントの雑音温度に基づく T_{RX} の導出	33

第4章 アンテナシステムの性能評価(22GHz帯)	35
4.1 システム雑音温度の測定	35
4.1.1 システム雑音温度 T_{sys}	35
4.1.2 R-Sky 法	37
4.1.3 システム雑音温度の測定結果	38
4.1.4 システム雑音温度の測定結果と受信機雑音温度の比較	39
4.2 22 GHz 帯ファーストライト受信	39
4.3 観測システムの安定性の測定	41
4.3.1 安定度の指標	42
4.3.2 分光観測における安定度	42
4.3.3 アラン分散の測定方法	43
4.3.4 高萩アンテナでの測定	44
4.3.5 日立アンテナでの測定	45
4.3.6 考察	48
第5章 まとめ	50
5.1 本研究の成果	50
5.2 今後の課題	50
茨城局 32m 電波望遠鏡搭載用 22GHz 帯冷却受信機 1 号機 図面目次	53
茨城局 32m 電波望遠鏡搭載用 22GHz 帯冷却受信機 2 号機 図面目次	54
22GHz 帯ポーラライザー 図面目次	55
参考文献	56

第 1 章 序論

1.1 電波天文学

大気圏外からは様々な波長の電磁波が到来する。しかし、全波長のうち地上で観測できるのは電波と可視光と赤外線の一部だけである。その他の波長域では地球大気に吸収されてしまい、地上まで到達することができない。ただし、電波領域でも 10~20 MHz 以下の周波数は電離層を通らないため、大気の外から観測する必要がある。

電波天文学では、宇宙起源の電波から天体の物理状態を推定する学問である。天体源の電波は微弱であり肉眼では観測できないため、電波を観測するために電波望遠鏡を用いる(次節参照)。電波による宇宙の観測は他波長にはない以下のような特徴を有し、天文学で重要な位置を占めている[1]。

- (1) 可視光などの他波長では見えない現象が見える。シンクロトン放射、中性水素原子、極低温の分子ガスなどは電波でしか観測できない。これらの現象は星の誕生を調べるために必要である。
- (2) 波長が長いため、宇宙空間に存在する星間微粒子の吸収を受けずに観測することができる。つまり、宇宙空間のガスや系外銀河などの奥まで見通すことができ、中心部の構造を明らかにすることができる。
- (3) 電氣的に干渉技術が容易である。電波天文学では天体源の電波を、アンテナを用いて観測する。大きく離れたアンテナ間で電波を干渉させることができ、きわめて高い空間分解能を実現できる。

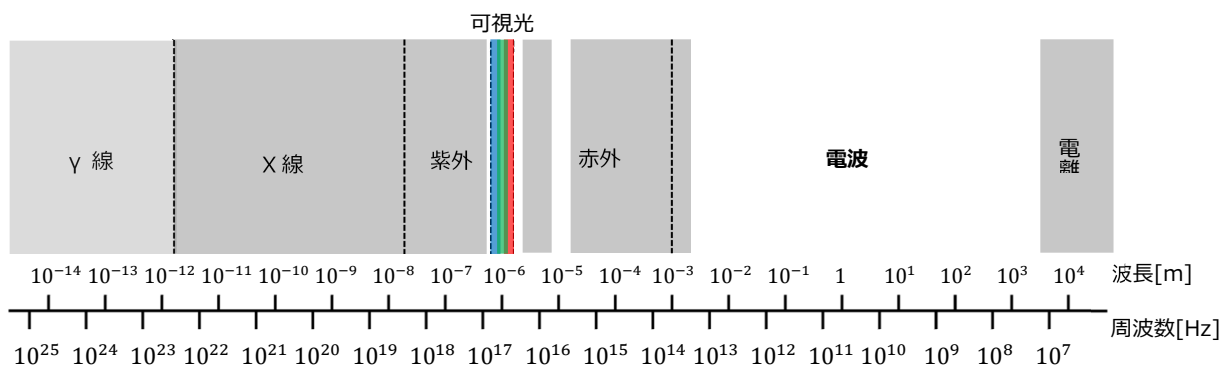


Fig. 1.1 : 電磁波の分類と「大気の窓」の模式図

(大気の影響により地表に到達する電磁波は、電波、可視光、一部の赤外線のみ)

1.2 電波望遠鏡

電波望遠鏡とは、天体からの電波を捉え、そこから天体に関する情報を抽出する装置である。電波望遠鏡は大きく分けて、アンテナ、受信機、検波器、または分光計、それらを制御しデータを取り込む計算機によって構成される。

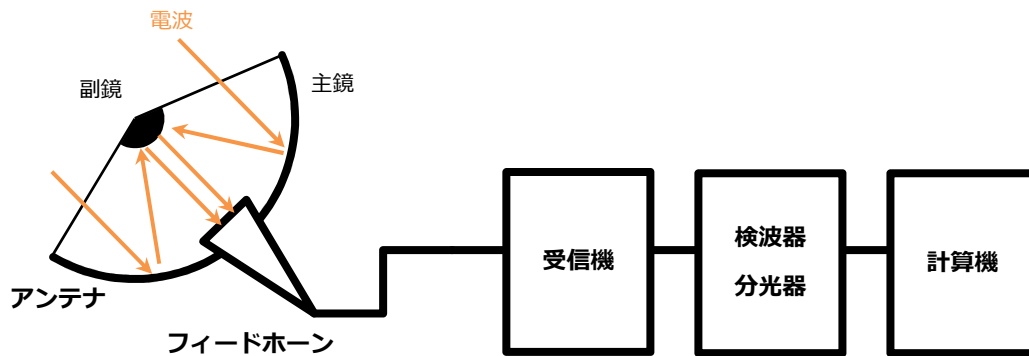


Fig. 1.2 : 電波望遠鏡の構成

・アンテナ

アンテナとは、天体からの電波を集める装置である。天体起源の電波から天体の構造、強度、速度などの情報を正しく引き出し、また微弱な宇宙からの電波を効率よく受信するために電波望遠鏡には指向性と集光力が求められる。指向性とは、アンテナの向きに関する性能であり、集光力とは天体信号を集める性能である。これらはアンテナの構造や重力変形、日射を含む熱変形、風変形に左右される。また、アンテナ口径は、電波望遠鏡の角度分解能（ビームサイズ）に直結する。

・受信機（フロントエンド）

受信機には、天体源の高い周波数で微弱な電波信号を、後段の装置で容易に扱える周波数と強度を持った電氣的な信号に変換する働きがある。受信機は一般的に増幅器と周波数変換器によって構成される。増幅器は基本的に入力電力 P_{in} を G 倍する装置である。しかし、増幅過程で増幅器自体の雑音電力 P_{noise} が付加される。

$$P_{out} = GP_{in} + P_{noise} \quad (1.1)$$

電波望遠鏡では、雑音電力をそれと等価な黒体の絶対温度に換算し、望遠鏡の性能を示すパラメータとして扱う。雑音にはいくつか種類があり、熱雑音などがある。しかし、どのような増幅器や周波数変換でも量子雑音温度 $T = \hbar\nu/k$ 以上の雑音が発生する（ $\hbar$ はプランク定数、 k はボルツマン定数、 ν は周波数）。

一般的に、受信機は電波望遠鏡の信号処理において初段に位置する。電波望遠鏡のように様々な装置を組み合わせた回路において、初段の雑音温度は全体の性能に大きく関係する。そのため、増幅器や周波数変換器は低雑音化が求められている。

・検波器と分光器（バックエンド）

検波器は電氣的な信号に変換された信号をパワーとして検出する．分光器は信号を周波数ごとのパワーとして出力する（分光計の概要については，[2] 田中智明 2011 年修士論文参照）．検波器は連続波観測に用いられ，分光計は分光観測に用いられる．それぞれ天体から取得したい情報に応じて使用する．

1.3 観測方式

電波望遠鏡を使った観測には，1 基のアンテナで観測する単一鏡観測と，複数のアンテナで連携して観測を行う干渉計観測がある．また，天体源の電波から取り出したい目的の情報によっても観測方式は異なる．ある周波数帯域内での天体電波の平均的な強度を知りたいければ連続波観測を行い，その天体領域に存在している分子ガス等の線スペクトルを捉えたければ高分散分光（線スペクトル）観測を行う．

1.3.1 単一鏡観測

アンテナの角度分解能は通常，アンテナ直径 D と観測波長 λ で決定される．電波の場合，大気からの影響が小さい場合は，下記の式で与えられる角度分解能が実現される．

$$\text{HPBW} = K \times \frac{\lambda}{D} \quad (1.2)$$

HPBW はアンテナのビームの半値幅， K はアンテナの 1 次放射器の照射パターンによる係数であり 1.2 程度となる．干渉計観測の場合 D はアンテナ間距離（基線長）となるため，単一鏡の方がビームサイズは大きくなる．ビームサイズはアンテナの視野に相当する．単一鏡観測では，観測目的に応じた受信機システムとバックエンドの選択によって連続波観測や分光計観測を行う (§1.3.3, §1.3.4)．また，その広い視野を活かして新天体のサーベイなどを行う．

世界の代表的な電波望遠鏡はプエルトリコにあるアレシボ 305 m 鏡やグリーンバンク 100 m 鏡（米国），JCMT 15 m 鏡（英・カナダ・オランダ）などがある．日本国内では，野辺山 45 m 鏡や臼田 64 m 鏡などがある．

1.3.2 干渉計観測

干渉計とは，複数の素子アンテナを相関器でつなげた装置である．各素子アンテナで得られた電波を相関器で干渉させることで，天体位置や強度分布を知ることができる．

干渉計観測の場合，角度分解能のアンテナ口径はアンテナ間隔 d に相当し，

$$\text{HPBW} = K \times \frac{\lambda}{d} \quad (1.3)$$

とかける．単一鏡において，アンテナ口径を大きくすると鏡面を高精度に保ちながら正確に天体に向けることが技術的に難しくなる．また，高い角度分解能を得るために大口径アンテナを建設することは予算的にも困難である．一方で，干渉計の場合はアンテナ間隔 d を長くすることで

鋭い角度分解能が達成でき、かつアンテナ間隔 d は干渉させる素子アンテナの組み合わせなどによって比較的容易に変更できる。このため高い分解能を得て天体の微小構造を明らかにする場合は、単一鏡よりも干渉計の方が適している。

干渉計観測には大別して、基準となる電気信号をケーブルで分配することで素子アンテナ同士をつないでいる素子結合型干渉計と、素子アンテナは独立であるがそれぞれ水素原子時計を用いて正確な時間で同期している超長基線干渉計(VLBI : Very Long Baseline Interferometer)の2つがある。VLBI では受信した電波信号を磁気テープ、もしくはハードディスクに記録し、後日それらを集めて相関処理されている。前者の代表的なものには ALMA (チリ) や VLA (アメリカ) が、後者の代表的なものには VLBA (アメリカ) や VERA (日本) などがある。

1.3.3 単一鏡観測と干渉計観測の感度の比較

電波望遠鏡が積分時間 t で検出できる電波の強度を最小検出フラックス密度 ΔS といい、アンテナが持つ感度の指標である。単一鏡型望遠鏡の場合は、

$$\Delta S(\text{single}) = \frac{2K_s}{\eta_A A_p} \frac{kT_{\text{sys}}}{\sqrt{Bt}} = \frac{2\sqrt{2}}{\eta_A A_p} \frac{kT_{\text{sys}}}{\sqrt{Bt}} \quad (1.4)$$

となる[1]。ただし η_A はアンテナの開口能率で、通常 0.7~0.8 程度である。 A_p はアンテナの開口面積、 k はボルツマン定数、 T_{sys} はシステム雑音温度 (§4.1 参照) である。 T_{sys} は観測システム全体が持つ雑音を示しており、アンテナの感度に直結する値である。例えば、 T_{sys} を 10 分の 1 に抑えることができれば、積分時間(観測時間)は 100 分の 1 で済む。 K_s は受信方式によって異なる係数である。実際の観測では大気の効果や装置起源の系統誤差を取り除くために、天体方向(ON 点)だけではなく、天体放射が無視できる近接した方向(OFF 点)も観測し、ON 点・OFF 点で同じ積分時間だけ観測する。この場合 OFF 点の雑音放射が加わるため 右辺では $K_s = \sqrt{2}$ となる。

n 素子の干渉計の場合の最小検出強度は、点源に対しては

$$\Delta S(\text{synth}) = \frac{\sqrt{2}}{\eta_A A_p^*} \frac{kT_{\text{sys}}}{\sqrt{\frac{n(n-1)}{2} Bt}} \quad (1.5)$$

とかける。 A_p^* は素子アンテナの物理開口面積で、 $A_p^* = \frac{1}{n} A_p$ とおくと、

$$\Delta S(\text{synth}) = \frac{\sqrt{2}}{\eta_A A_p} \frac{kT_{\text{sys}}}{\sqrt{\frac{1-1/n}{2} Bt}} \quad (1.6)$$

式(1.4), (1.6) より、感度の比は、

$$\frac{\Delta S(\text{single})}{\Delta S(\text{synth})} = K_s \sqrt{1 - \frac{1}{n}} \quad (1.7)$$

となる。式(1.7) を用いて、2 素子干渉計と単一鏡の感度を比較すると、干渉計の方が $\sqrt{2}$ だけ感度が良いことが分かる($K_s = 1$ とする)。

1.3.4 連続波観測

天体からの（連続波の）電波強度を測定したい場合は、バックエンドには 2 乗検波器が接続される。2 乗検波器は、広い周波数幅の電波から得られた電圧パターンを 2 乗しパワーとして検波する。連続波の放射機構には高温の物体から発する黒体放射や高いエネルギーを持った電子が宇宙空間の磁力線に巻き付いたときに発するシンクロトロン放射がある。緩やかな周波数依存性があるため、それらを多波長（電波と X 線など）で観測することにより、若い恒星の周囲の電離領域や活動銀河中心核などの天体の物理状態を知ることができる。

1.3.5 線スペクトル（輝線）観測

天体から得られた信号をフーリエ変換し、周波数ごとに分解すると各周波数のパワー（パワースペクトル）が得られる。このような観測を分光観測とよぶ。

分光観測では、天体が出す線スペクトル（分子輝線スペクトルなど）を得ることができる。線スペクトルは例えば分子の励起状態の変化で放射され、この線スペクトルの周波数を調べて分子種を特定することができる。また、線スペクトルの静止周波数が分かっている場合、観測された周波数とのズレがドップラー効果によるものであるとすると、視線速度が求められる。ここから、領域内の回転速度、回転以外の運動などを知ることができる。さらに、観測から領域内の質量を求めることもできる。

例えば、アンモニア分子が含まれる分子雲領域を観測する場合は、アンモニア分子が持つ反転遷移の超微細構造により、メインのスペクトルに加え、対になったサテライトが 2 つ表れ、5 つのピークを持った線スペクトルが観測される (Fig. 1.4)。このメインのスペクトルとサテライトの強度比から光学的厚み (§4.1.1) を求め、さらにそこから温度 [T]、柱密度 [g/cm²] を求めることができる。柱密度とは、視線に沿ってどの程度の物質が重なり合っているかを表す量である。さらに、この柱密度とアンモニア分子の放射領域の立体角、分子雲までの距離を用いてアンモニア分子の質量を求めることができる [3]。

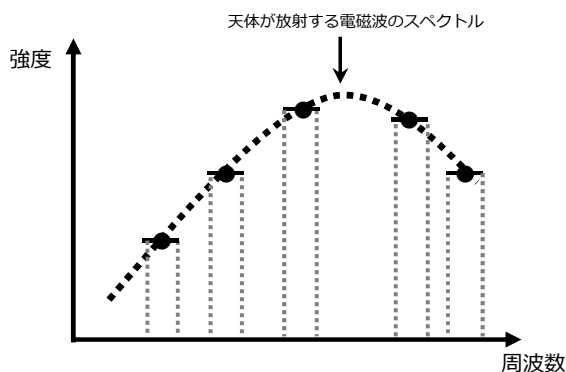


Fig. 1.3 : 連続波観測

各周波数帯の強度を観測することで、天体が発射する電磁波の全体的なスペクトルの形を求めることができる。ここから、天体の物理状態を推測する。

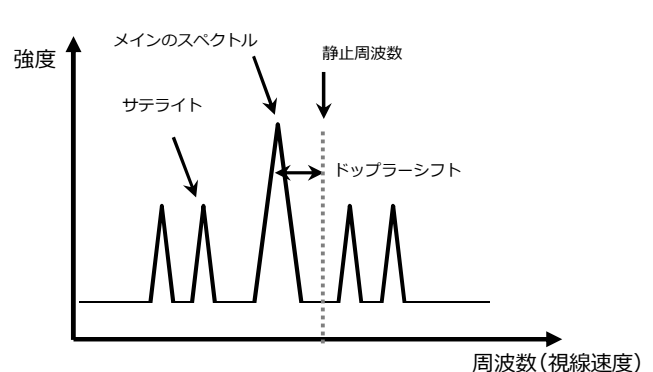


Fig. 1.4 : 線スペクトル（輝線）観測
この図はアンモニア分子輝線 (23.694 GHz) の反転遷移のスペクトルを表している。
線スペクトルから天体の運動や分子の質量、密度などを求めることができる。

1.4 茨城局32m電波望遠鏡

茨城局 32 m 電波望遠鏡は、KDDI から国立天文台に譲渡され、茨城大学で電波望遠鏡としての立ち上げと運用を行っている 2 基のパラボラアンテナである。茨城県高萩市と日立市にあり、それぞれ高萩アンテナ・日立アンテナ（両者合わせて茨城局）と呼ばれている。

観測周波数帯は 6.3 – 7 GHz (C band), 8 – 8.8 GHz (X band), 22 GHz (K band) である。主な観測対象は、6 GHz 帯ではメタノールメーザー、8 GHz 帯では連続波、22 GHz 帯では水メーザー (22.24 GHz) 及びアンモニア分子輝線 (23.69 GHz), 連続波が挙げられる。

茨城局では、単一鏡観測の他に、他局のアンテナと連携した干渉計観測 (VLBI 観測など) や高萩市・日立市の 2 基のアンテナを用いた多波長同時観測も行っている。さらに、2 素子干渉計観測の実現が期待されている。



Fig. 1.5 : 茨城局 32m 電波望遠鏡

写真左が高萩アンテナ、右奥が日立アンテナである。

アンテナで集光された電波は、ビーム伝送系を通してフィードホーンに導かれる。茨城局 32m 鏡のビーム伝送系はカセグレン・クーデ方式である。カセグレン・クーデ方式とは、主鏡でとらえた電磁波を副鏡でアンテナ中心部に導き、さらに数枚の鏡を用いて経緯台の方位角軸内へ導く伝送系である。茨城局では、ビームは主鏡、副鏡の他に 4 枚の鏡で反射されてフィードホーンに送られる (Fig. 1.16)。

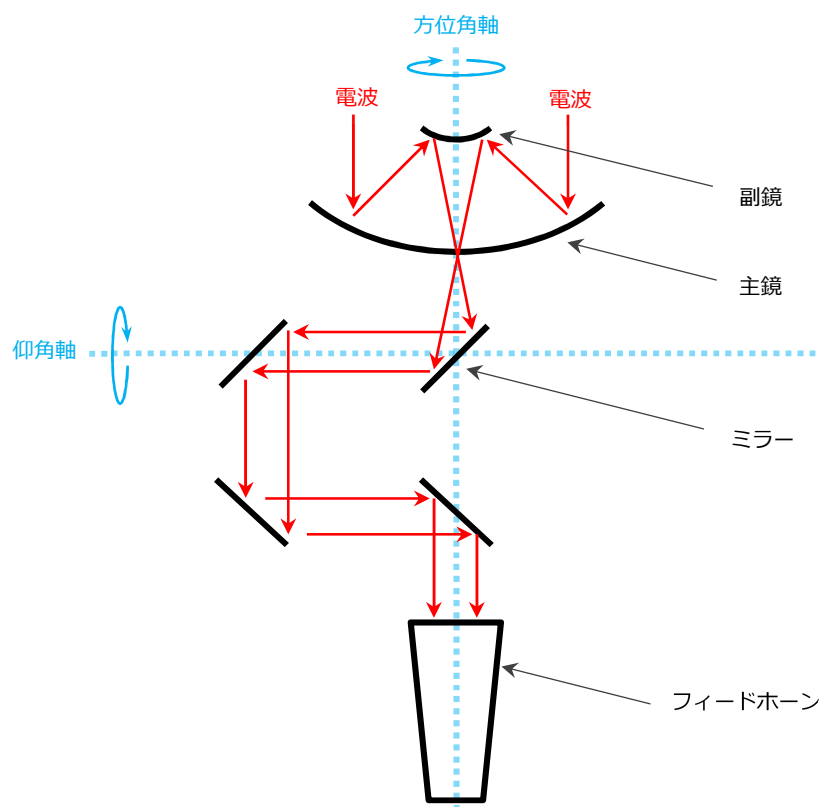


Fig. 1.6 : 茨城局のビーム伝送系

フィードホーンは巻取室の中央に設置されており、アンテナ方位角が変化しても回転せず固定されている。デュワーはロスを避けるためにフィードホーンの根元に設置し、IF 系と電源系もアンテナ動作に依らずフィードホーンを支える槽内に設置する。

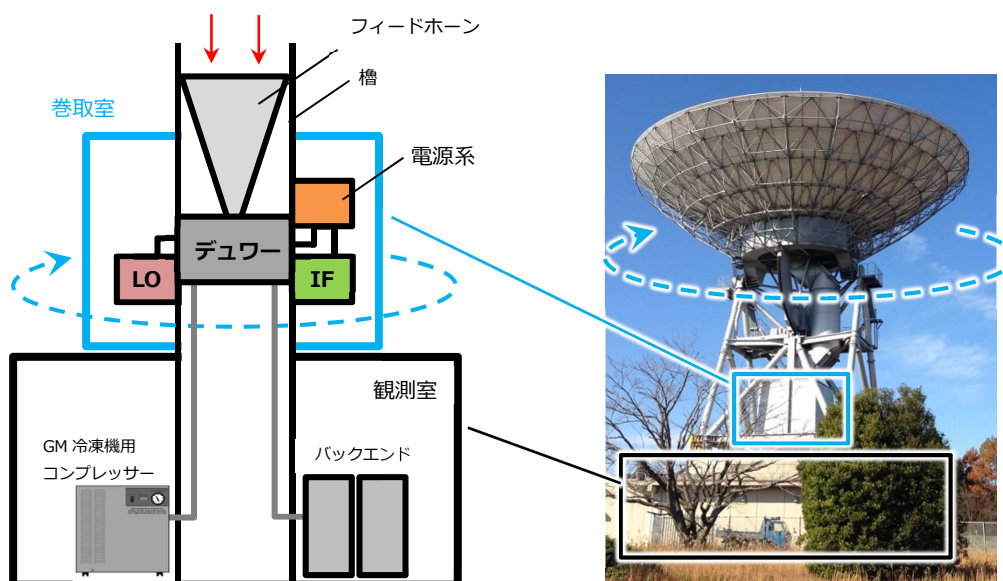


Fig. 1.7 : 茨城局 32m 鏡の構成

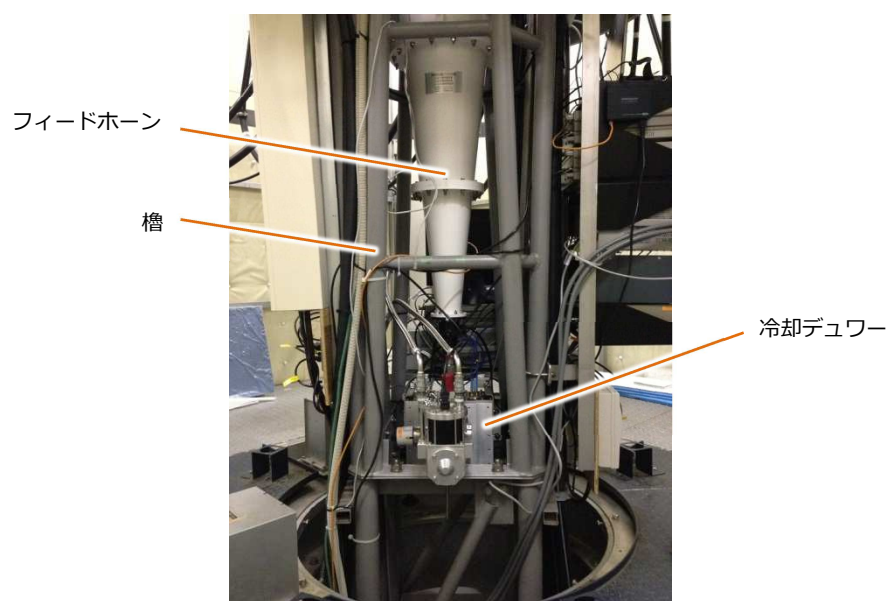


Fig. 1.8 : 巻取室内の様子

1.5 本研究の目的

茨城局では、6 GHz 帯、8 GHz 帯の受信機システムは既に整備が終了しており、試験観測運用が行われているが、22 GHz 帯の観測装置整備は行われていなかった。22 GHz 帯には水メーザーやアンモニア分子輝線などが含まれ、これらは大質量星形成領域や活動銀河核などに付随するため、星形成のメカニズムの解明等に極めて重要である。

本研究の目的は、茨城局 32 m 鏡搭載用の 22 GHz 帯冷却受信機を開発し、両偏波・高感度観測を可能にすることである。本論文では、22 GHz 帯冷却受信機の開発と受信機単体の性能測定、さらに、高萩アンテナ・日立アンテナに受信機を搭載し 22 GHz 帯における両アンテナの性能測定について報告する。

第 2 章 22 GHz 帯冷却受信機の開発

2.1 茨城局 32 m 鏡搭載用受信機システムの構成

アンテナからビーム伝送系を通してフィードホーンに導かれた信号は、冷却デュワー内に入力される。デュワー内には 20K 以下に冷却された円偏波分離機（ポーラライザー）と低雑音増幅器（HEMT）が格納されている。デュワーに入力された信号はポーラライザーによって左右両偏波に分離される。偏波分離された信号は、HEMT で、電気的な信号に変換され、さらに 22GHz 帯における信号強度が増幅される。HEMT から出力された信号は同軸ケーブルを通して IF 系へと導かれる。

常温の IF 系は主に、フィルター、ミクサー、増幅器、減衰器、アイソレータ、局部発振器（LO：Local Oscillator）で構成されている。各素子の動作は Table 2.1 にまとめた。デュワーから出力された信号は、まず 22 GHz 帯用の 2 チャンネル（2 CH）ダウンコンバータに入力される。2 CH ダウンコンバータには左右偏波用に、入出力ポートとモニター用の出力ポートがそれぞれ 2 つずつ備わっている。このダウンコンバータ内部では 22 GHz 帯の信号の増幅とそれ以外の信号の減衰が行われる。増幅された信号は、LO から出力される信号（LO 信号）と混ぜ合わされ、6-8 GHz 帯に周波数変換される。このように元の信号（RF 信号）と LO 信号の差周波数（IF 信号）を取り出す方式をヘテロダインと呼ぶ。

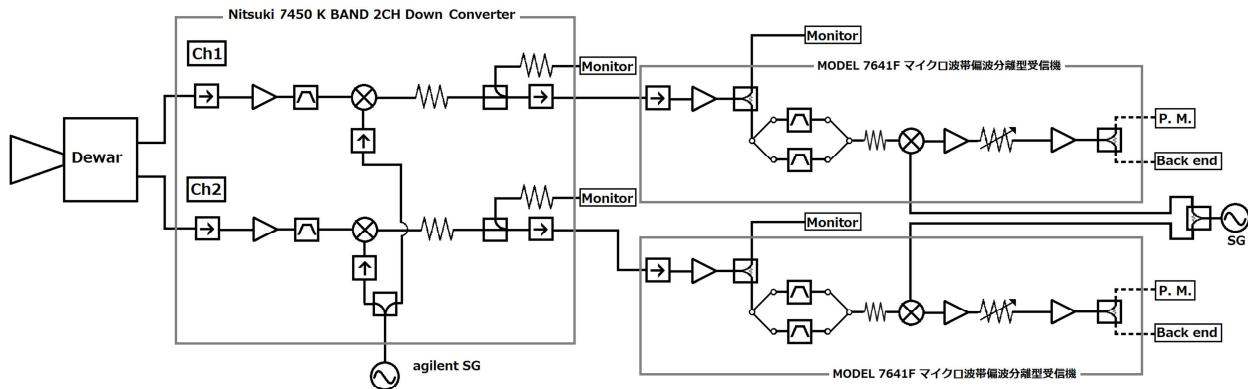


Fig. 2.1 : 22GHz 帯冷却受信機システムのブロックダイアグラム

Table 2.1 : ブロックダイアグラムの素子とその役割

名称	記号	役割
フィルター		特定の周波数成分を取り出す電気回路。
ミクサー		入力された 2 つの信号を混合する電気回路。
増幅器		電源電力を基に入力信号より大きなエネルギーの信号を出力する装置。
減衰器		信号を適切な信号レベルに減衰させる電気回路。記号右は可変の減衰器。
アイソレータ		一方向にのみ信号を伝える電気回路。
LO（局部発振器）		ある周波数の正弦波信号を発生する発振器。周波数変換に用いる。

2.2 22 GHz 帯冷却デューワーの設計

受信機システムの初段回路を格納するデューワーの設計は、Autodesk 社の 3D CAD ソフト Inventor を用いて行った[4]。設計は、高萩・日立で試験運用している 6.7–8 GHz 帯冷却受信機を参考した。第 1 章で記述したように、受信機は天体からの微弱な信号を増幅し、周波数を変換する装置である。電波望遠鏡のような多段回路においては、初段回路の雑音を可能な限り低減させることが望まれる。装置由来の熱雑音は、デューワー内を極低温状態にすることで低下させられる。また、極低温を維持するためには、デューワー内部を真空状態にして熱伝導を小さくする必要がある。そのため、内部を真空・極低温に保つことができるデューワー構造とした。

受信機は、高萩市・日立市の各アンテナ用に 2 台開発した。デューワーの設計は細部で一部異なるが、内部構造は基本的に同じである。以下、前者の受信機を 1 号機、後者を 2 号機と記述する。

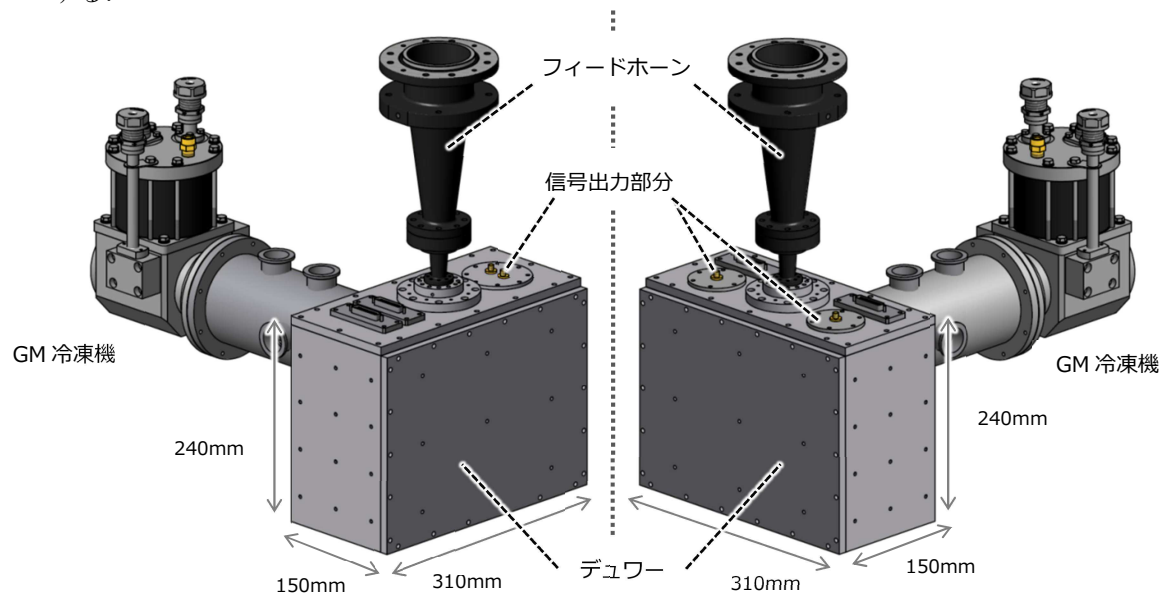


Fig. 2.2a : 22GHz 帯冷却受信機 1 号機の模式図
(デューワー上面の信号出力が片側にまとめられている)

Fig. 2.2b : 22GHz 帯冷却受信機 2 号機の模式図
(デューワー上面の信号出力が左右に分けられている)

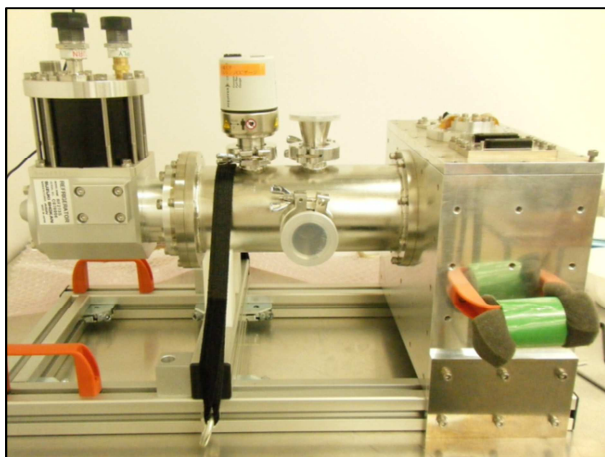


Fig. 2.3a : 22GHz 帯冷却受信機 1 号機

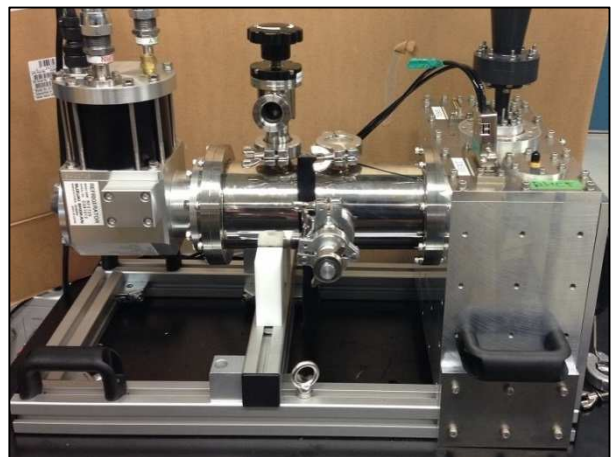


Fig. 2.3b : 22GHz 帯冷却受信機 2 号機

2.3 冷却デューワー内の信号の流れ

電波信号はフィードホーンを通った後、RF 真空フランジ、ノイズソース (NS) フランジを通りデューワー内に導かれる。2 つのフランジ間には、デューワーを密閉するための電波を透過する膜 (カプトンフィルム) が挟まれている。デューワー内では、断熱導波管、円角変換、ポーラライザー、HEMT、同軸ケーブルの順で信号が伝わり IF 系へと出力される。フィードホーンやデューワー内の信号の通り道である金属製の筒は導波管と呼ばれる。電波は導波管内で反射を繰り返して伝搬する。HEMT に入力された電波信号は電気的な信号に変換され、今度は導体内を伝搬する。

1 号機と 2 号機のデューワー構造には、Table 2.2 のような違いがある。しかし、1 号機と 2 号機で各コンポーネントの性能が同等である場合、出力される信号はほぼ同じである (実際には、コンポーネントの固有差や同軸ケーブルの長さが異なることに起因する出力差が発生する)。

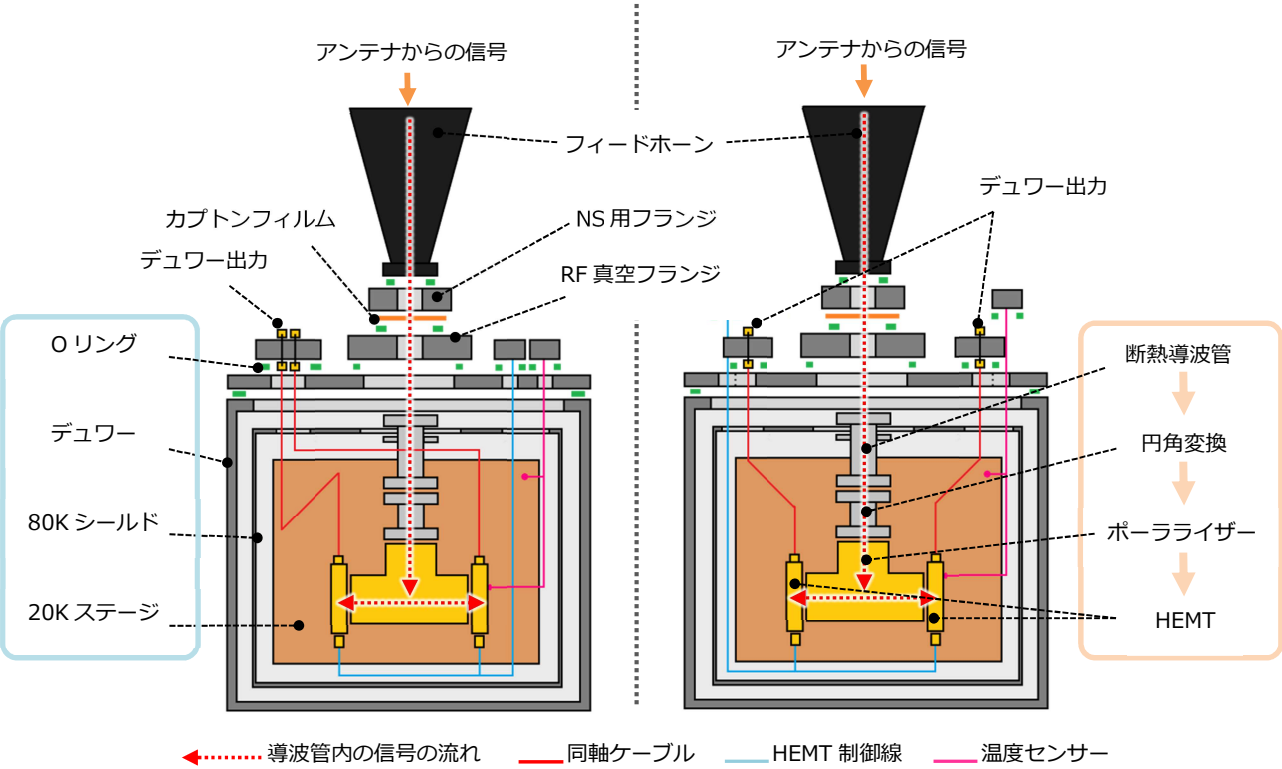


Fig. 2.4
22GHz 帯冷却受信機デューワー内の模式図
1 号機 (左) ではデューワーの構造を, 2 号機 (右) では信号の流れを示している

Table 2.2 : 22GHz 帯冷却受信機 1 号機と 2 号機における構造の違い

	1 号機	2 号機
天体信号の出力 (同軸ケーブル)	デューワー上面の左側に 2 つ	デューワー上面の左右に 1 つずつ
HEMT の電源供給 (HEMT 制御線)	デューワー上面の右側から入力	デューワー上面の左側から入力
温度の信号 (温度センサーケーブル)	デューワー上面の右側に出力	デューワー上面の右側に出力

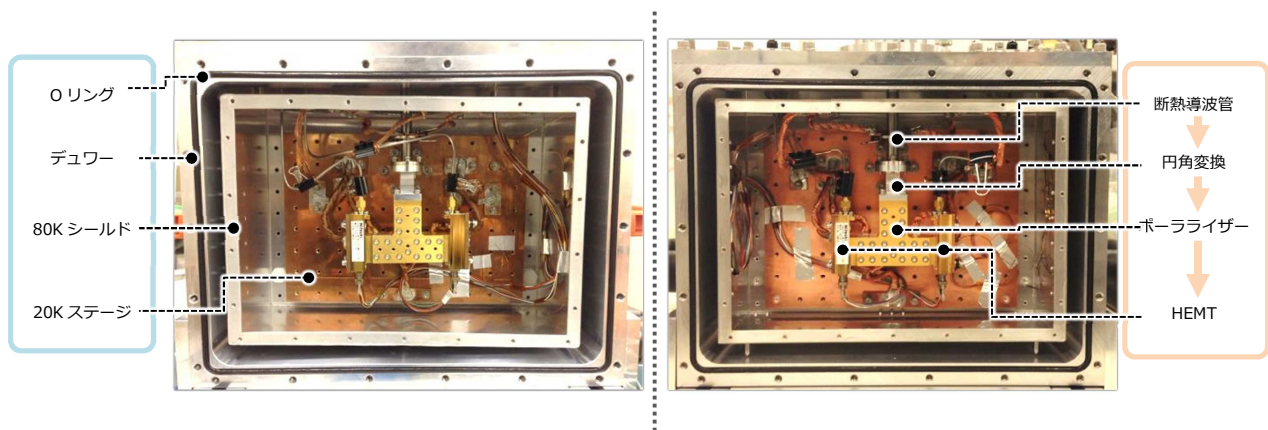


Fig. 2.5
22GHz 帯冷却受信機のデュワー内の様子
1号機（左）ではデュワーの構造を、2号機（右）では信号の流れを示している

以下、信号の流れに沿ってデュワー内のコンポーネントについて説明する。

2.3.1 ノイズソース用フランジ

アルミニウム(A5052)製のフランジで、ノイズソース注入用の孔を設けた導波管である(Fig. 2.6)。この孔は乾燥空気を流すための通気孔でもある。

ノイズソースとは、すべての周波数で同じ強度を持つ信号(ホワイトノイズ)を発生させる雑音源である。一般的にアンテナ性能を評価する測定では、基準信号として電波吸収体を使用しているが、ホワイトノイズを基準信号として用いることもできる。茨城局でも、ホワイトノイズをノイズソース用フランジから準光学的に入力信号に混ぜる事で、性能評価を行う計画が進められている。我々は普段茨城大学水戸キャンパスに所在を置いているが、電波吸収体を使用する場合は高萩市・日立市にあるアンテナへ赴き、現地で作業を行う必要がある。しかし、ノイズソースはリモート操作が可能であるため、アンテナへ移動する時間と労力を省くことができる。

茨城局において、常温のフィードホーンと冷却デュワー間の温度差によってカプトンフィルムに水滴が発生する。この水滴によって、受信機の出力に雑音が付加されてしまう。水滴の発生を防ぐために、茨城局のアンテナでは、デハイド装置を用いてフィードホーン下部から上部へ流れるように乾燥空気を循環させている(Fig. 2.7)。NS用フランジの送風孔は、乾燥空気がカプトンフィルムまで十分行き届くようにあけられている。ただし、ノイズソース用の孔であるため、孔の径が大きく必要以上にフィードホーン内の空気が抜けてしまう。そのため、デハイド稼働時はアルミテープで送風孔を塞ぎ、針で直径0.3mm程度の孔をあけている。

2.3.2 RF 真空フランジ

アルミニウム(A5052)製のフランジである(Fig. 2.6)。RF真空フランジとNS用フランジでカプトンフィルムを挟むことで導波管部分の真空を切っている。

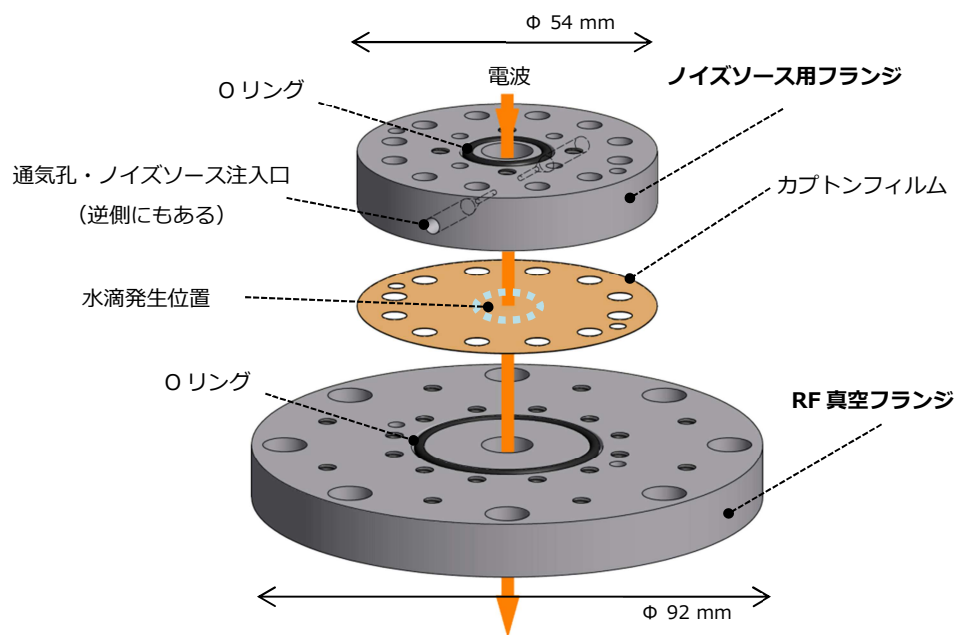


Fig. 2.6 : RF 真空フランジとノイズソース用フランジ, カプトンフィルムの模式

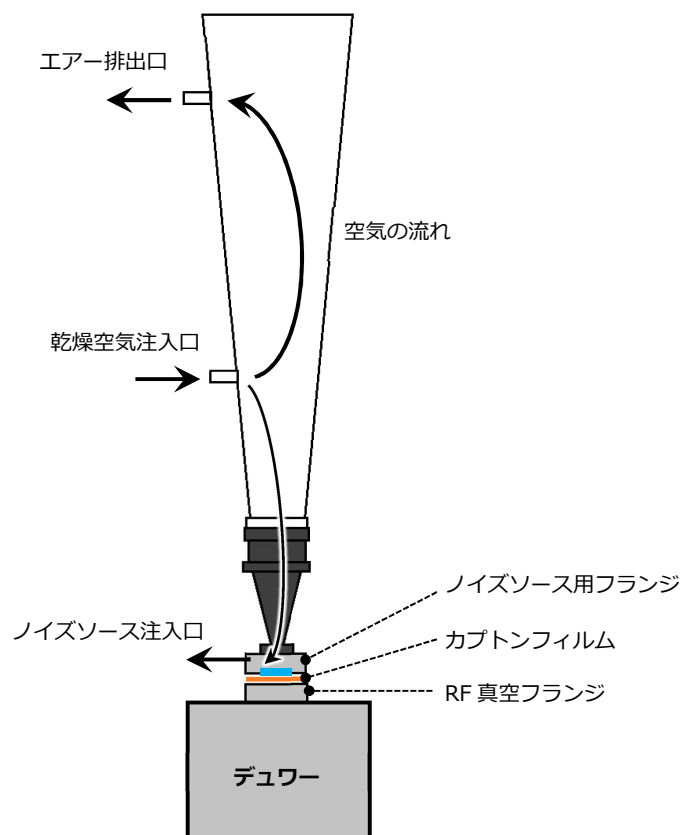


Fig. 2.7 : デハイドによる乾燥空気の循環

2.3.3 断熱導波管

ステンレス(SUS304)製の円形導波管である。SUS304は熱伝導率が低いため、断熱目的でデューワー内部の初段の導波管に使用した。熱流入を低減化するために導波管部分の厚さを0.2mmに設計した。さらに、導波管には熱アンカー用のフランジを取り付けた。このフランジ部分と冷凍機によって冷却される80Kシールドを、銅線を介して物理的に接続することでポーライザー、HEMTへの熱流入を抑えている。ステンレス製の導波管は断熱性が良い一方で電気伝導率が低いため、電波が導波管を通過する際の損失が大きい。そのため、管内に金メッキ処理を施している。

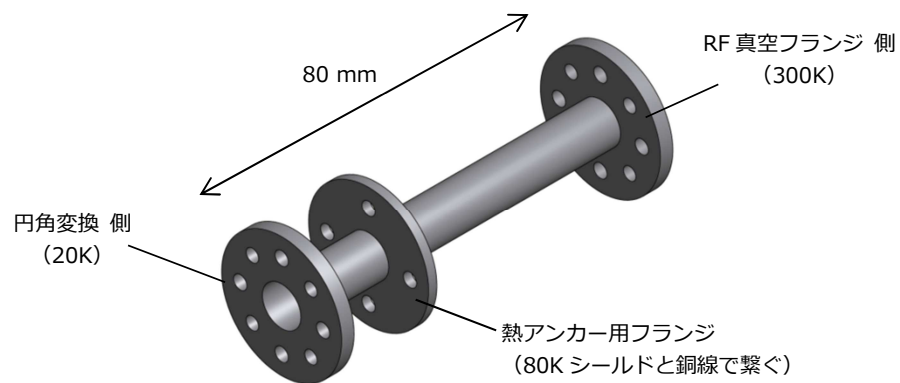


Fig.2.8 : 断熱導波管

Table. 2.3 : 金属・合金の熱伝導率

材料	熱伝導率[W・m ⁻¹ ・K ⁻¹]		
	-100℃	0℃	100℃
アルミニウム	241	236	240
金	324	319	313
銀	432	428	422
銅	420	403	395
鉄	99	83.5	72
18Cr-8Ni (ステンレス)*	12	15	16.5

*SUS304 は、別名 18Cr-8Ni, 18 クロムステンレス

([5] 平成 22 年 理科年表 国立天文台編 参照)

2.3.4 円角変換

アルミニウム(A6063)製の導波管で、テーパ構造をしている。フィードホーンは円形導波管であるが、ポーラライザーは方形導波管である。円角変換は両者の導波管を繋ぐように、直径9.3mmの円形から一辺7.87mmの方形へテーパ状に変形する構造をしている。

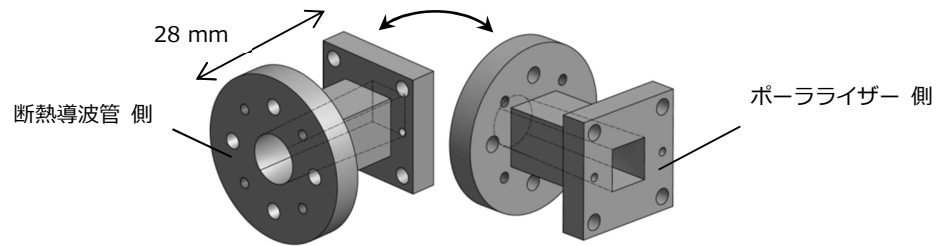


Fig. 2.9 : 円角変換

2.3.5 円偏波分離器（ポーラライザー）

テルル銅に金メッキ処理を施した T 字型の導波管である (Fig. 2.10). テルル銅とは、銅にテルルを 0.3 % ~ 2.0 % を添加した高銅合金である。テルル銅は電気伝導率が高く、被削性に優れているため、複雑な構造で低損失が求められるポーラライザーの材料として使用した。また、金メッキ処理によってさらに電気伝導性を高めている。ポーラライザーの設計には、3 次元電磁界解析ソフト HFSS を用いた。

ポーラライザーは円偏波でとらえた電波を左右円偏波に分離し、直線偏波として出力する役割を果たす。ヘテロダイン方式のようなコヒーレント受信の場合、受信機は原理的に、右円偏波か左円偏波のどちらか 1 成分しか受信できないので、天体信号を左右円偏波に分離し、それぞれの偏波に対して 1 台ずつ受信機を設ける必要がある。

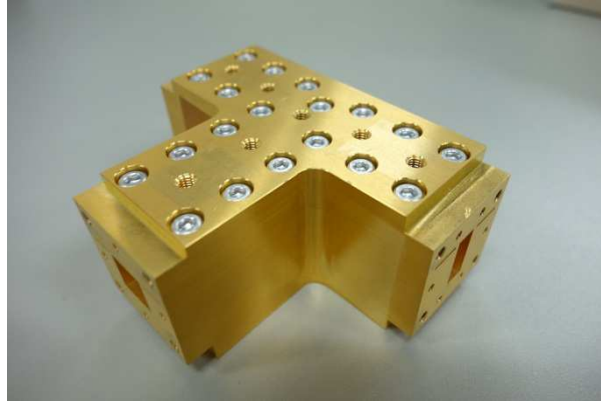


Fig. 2.10 : 茨城局 32m 鏡用 22GHz 帯ポーラライザー

ポーラライザーの構造を記述する前に、まず偏波について記述する。

偏波

電磁波を構成する電界と磁界は向きは直交しており、電界が分かれば磁界もわかる。ここでは電界についてのみ考える。z 方向に進む電波の電界 E は以下のような式で書ける。

$$E = \text{Re}[E_1 e^{i\delta_x \mathbf{x}} + E_2 e^{i\delta_y \mathbf{y}}] e^{i(\omega t - kz)}. \quad (2.1)$$

このとき電界 E の x 成分、 y 成分はそれぞれ

$$E_x = E_1 \cos(\omega t - kz + \delta_x), \quad (2.2)$$

$$E_y = E_2 \cos(\omega t - kz + \delta_y), \quad (2.3)$$

である。ここで ω は角周波数、 k は波数である。また、 δ_x は x 成分の位相因子、 δ_y は y 成分の位相因子であり、この 2 つの差は位相差になる。

$$\delta = \delta_x - \delta_y. \quad (2.4)$$

この位相差によって偏波面の回転する方向が異なる．詳細を Fig. 2.11 に示す．

Fig. 2.11 a のように進行方向 z に向かって E_x と E_y が時間変動していた場合 ($0^\circ \leq \delta_x - \delta_y \leq 180^\circ$)，電界ベクトルは Fig. 2.11 b のように進行方向に対して楕円の軌道を描く．このとき，楕円偏波は Fig. 2.11 c のように定義される．

式(2.2), (2.3) で $E_1 = E_2$ かつ $\delta = 90^\circ$ のとき，左回りの円偏波になる．また， $E_1 = E_2$ かつ $\delta = -90^\circ$ のとき，右回りの円偏波になる．このように進行方向に対して左回転を左円偏波 (LHCP)，右回転を右円偏波 (RHCP) という．

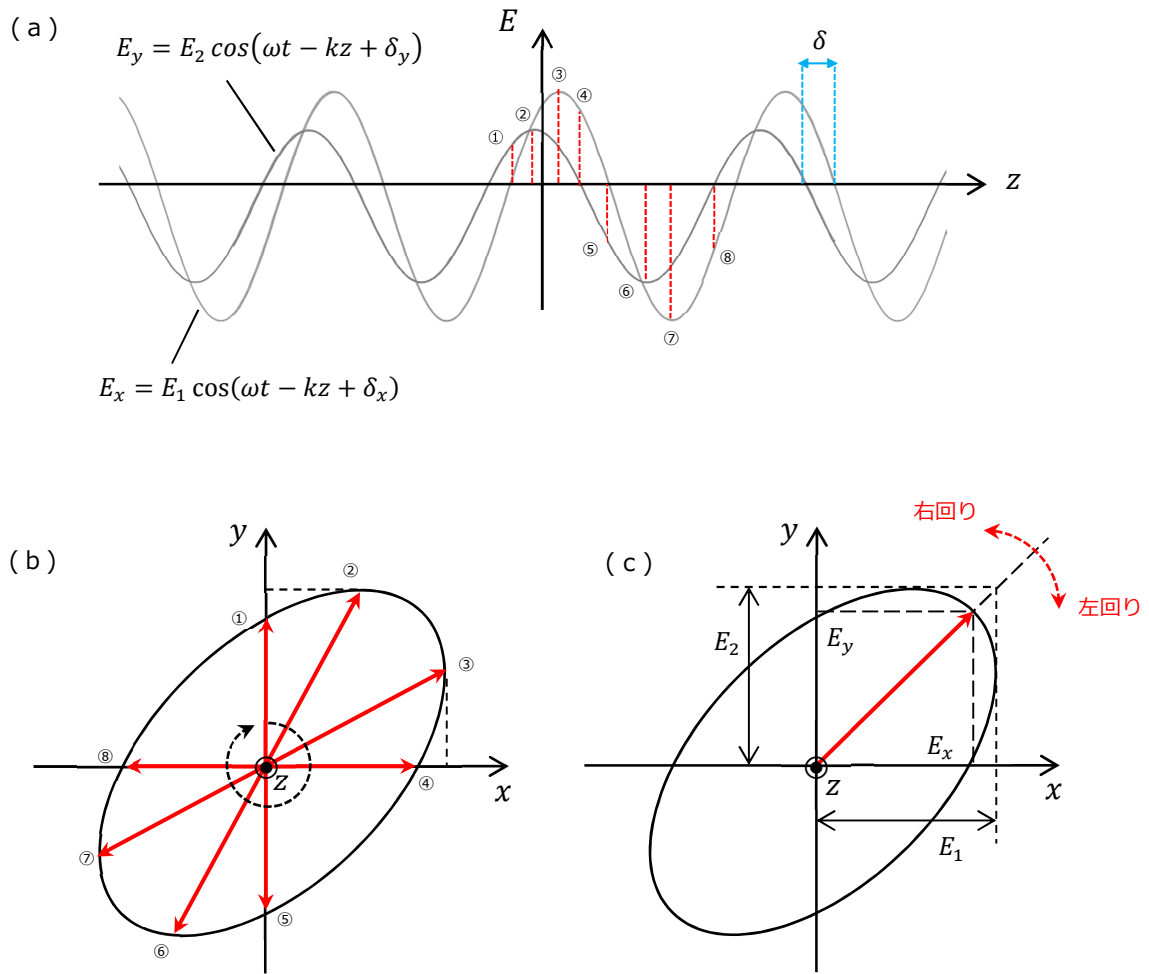


Fig. 2.11

(a)(b) : 電界ベクトルの回転の様子, (c) : 楕円偏波の定義

ポーライザーの構成

前述したように，円偏波は E_x と E_y の位相差が $\pm 90^\circ$ である．この円偏波を受信するには，この位相差をなくし，直線偏波にする必要がある．また， x 成分位対して， y 成分を 90° ずらすことで右円偏波と左円偏波を分けて取り出すことができる．茨城 32m 鏡ではセプタム型ポーライザーを用いてこれを行っている．

22 GHz 帯用ポーライザーの内部は，Fig.2.12 のような構造である．円偏波を左右円偏波に分離するセプタム部，導波管の向きを 90° 変えるベンド部，出力導波管のサイズを標準サイズに変更するステップ部からなる．

ポーライザー内で，左右円偏波を分離し直線偏波に変換しているのは導波管の中央に位置する階段状のセプタムである．このような導波管の中央に進行方向に延びる突起がある導波管をリッジ導波管という．セプタムはリッジ導波管の多段接続である（セプタムにおける円偏波分離の原理については，Soon Kang Lou 修士論文[6]参照）．

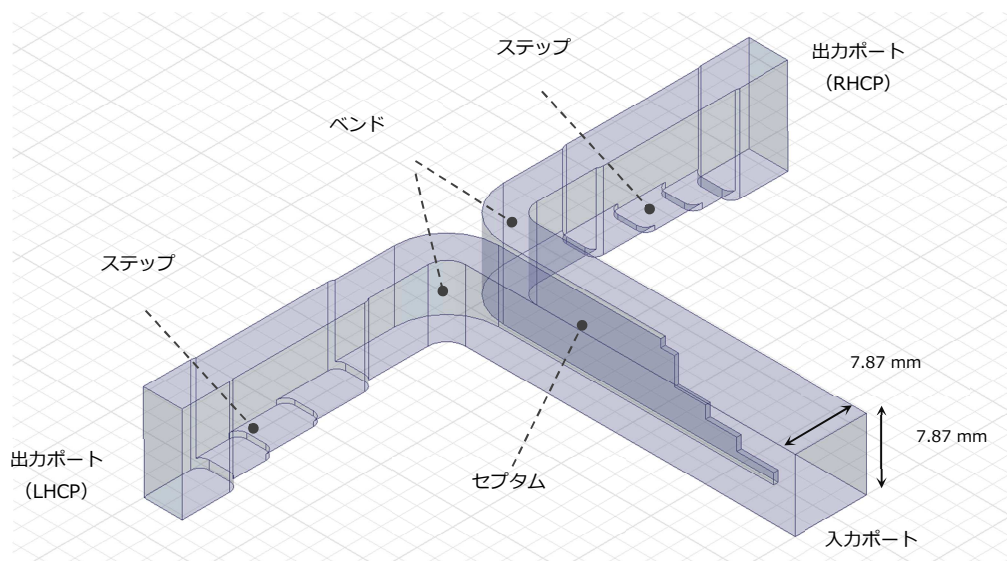


Fig. 2.12 : ポーライザーの内部構造

ポーラライザーの性能

Soon らがポーラライザーの電気特性をベクトルネットワークアナライザ(VNA)を用いて測定した結果を以下に示す(測定方法に関しては [2] 参照). 赤線はシミュレーション結果である. 挿入損失(Fig.2.14) と交差偏波(Fig.2.19) に関しては, ポーラライザーを 2 つ用いて測定した結果である. つまり, ポーラライザー 2 つ分の電気特性値であり, 測定結果を 2 で割るとポーラライザー 1 つ分の電気特性値となる.

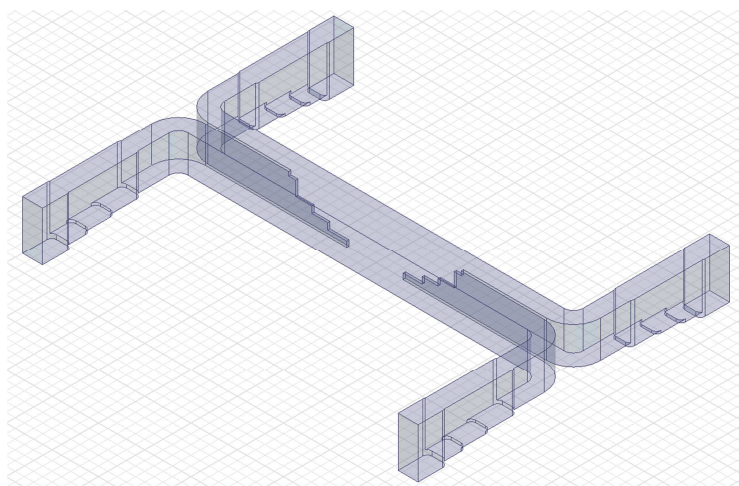


Fig. 2.13 : 2 つのポーラライザーを用いた測定法の模式図
挿入損失と交差偏波はポーラライザーを 2 つ使って測定する.

Fig. 2.14 はインサクションロス(挿入損失)と言い, 入力値に対する出力値の割合を表している. 入力損失の原因は導波管表面のジュール熱によるロスであり, その大きさは金属の電気伝導率に依存する. 損失が少ないほど性能が良いと言えるので, 値が 0 dB に近いほど良い.

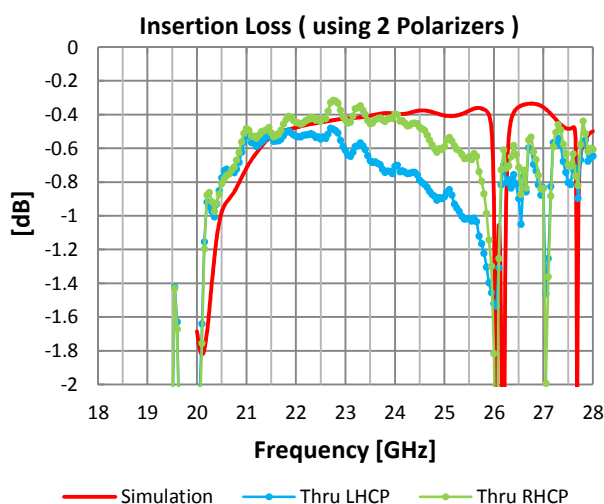


Fig. 2.14 : 挿入損失

赤線は HFSS を用いた挿入損失のシミュレーション結果,
青線と緑線は 2 つのポーラライザーの LHCP・RHCP における挿入損失の実測値である.

Fig. 2.15 は入力リターンロス（入力反射損失）で、ポーラライザー内で反射された電波が入力ポートから出力されてしまう量を表す。セプタム型ポーラライザーの場合は、セプタムでの反射率を直接表している。反射が大きいほど雑音が混ざってしまうため、リターンロスはより少ないほど良い。Horizontal, Vertical は電界ベクトルの直交する 2 成分に相当する。

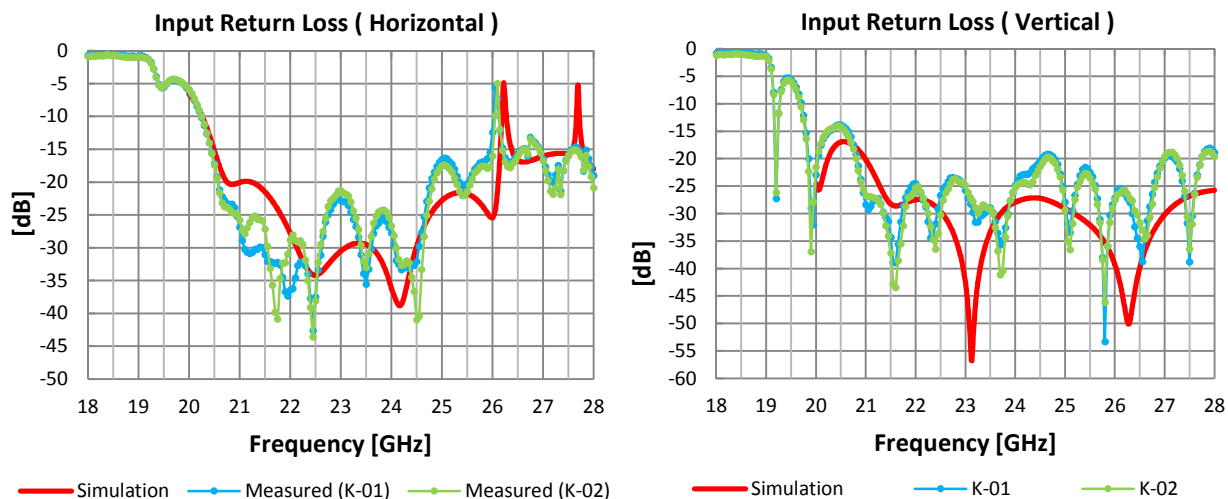


Fig. 2.15 : 入力ポートの反射損失

赤線は HFSS を用いた反射損失のシミュレーション結果、
青線(K-01)と緑線(K-02)は、2 つの 22GHz 帯ポーラライザーそれぞれの反射損失である。

Fig. 2.16 は出力リターンロスで、ポーラライザーの出力ポートから入力された信号がポーラライザー内で反射し出力ポートから出力されてしまう量を表す。このポーラライザーの場合は、ステップでの反射率に寄与する。入力リターンロスと同じように、この値が大きいと雑音が大きくなり受信機の性能は悪くなる。入力リターンロスと出力リターンロスは、ポーラライザー以前のコンポーネントや HEMT との定在波の発生低減のためにもできる限り小さくする必要がある。具体的には、 -20 dB 以下が望ましい。

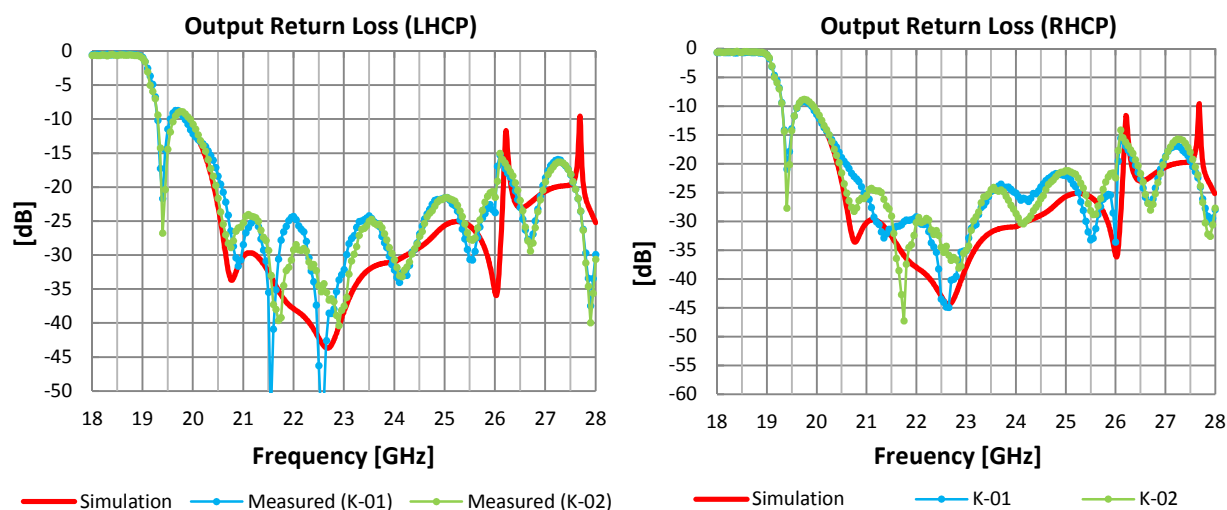


Fig. 2.16 : 出力ポートの反射損失

赤線は HFSS を用いた反射損失のシミュレーション結果、
青線(K-01)と緑線(K-02)は、2 つの 22GHz 帯ポーラライザーそれぞれの反射損失である。

Fig.2.17 はアイソレーションと言い、 LHCP と RHCP の出力ポートの干渉具合を表している。アイソレーションが悪いと、各出力ポートで発生した反射信号は干渉し合い、信号に対する雑音比率(S/N 比)が悪くなってしまう。これも -20 dB 以上が望ましい。

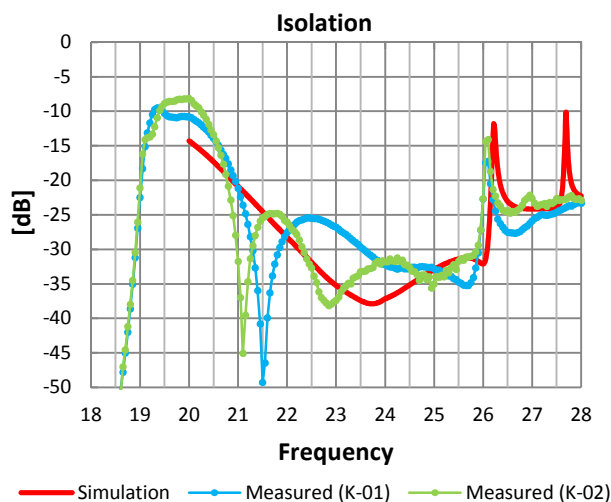


Fig. 2.17 : アイソレーション

赤線は HFSS を用いたアイソレーションのシュミレーション結果,
青線(K-01)と緑線(K-02)は、2 つの 22GHz 帯ポーラライザーそれぞれのアイソレーションである。

Fig.2.18 は入力信号と出力信号の位相差を表す。ポーラライザーでは円偏波を直線偏波に直すために位相を 90° ずらすので、 90° に近い値程良い。

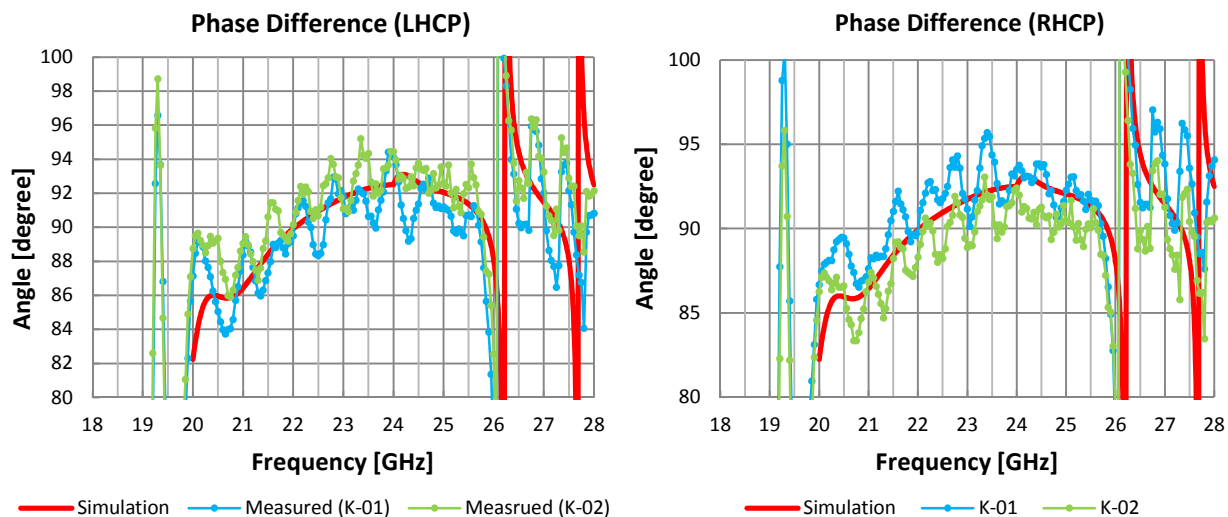


Fig. 2.18 : 位相差

赤線は HFSS を用いた位相差のシュミレーション結果,
青線(K-01)と緑線(K-02)は、2 つの 22GHz 帯ポーラライザーそれぞれの位相差である。

測定の結果、挿入損失は約 -0.3 dB で、入力・出力リターンロス、アイソレーション、交差偏波は目標値である -20 dB 以下、位相差は約 90° となった。22 GHz 帯の観測において 2 つのポーラライザーは必要な性能を満たしていると言える。

2.3.6 HEMT

HEMT とは High electron mobility transistor の略で高電子移動度トランジスタと呼ばれる。電界効果トランジスタ (FET : Field Effect Transistor) の一種であり、HEMT トランジスタを使用した増幅器である。

ここでまず FET の動作について説明する。FET は Fig. 2.19 のように、n 型半導体の両端にドレイン、ソースの電極を置き、その中央にゲート電極として p 型半導体をつけた構造、または金属電極のショットキー接合がある。FET では、ゲートにかかる電圧を変化させることによってソースドレイン間の電流を制御することができる。

ゲート電極部分は pn 接合なので、逆方向電圧をかけると空乏層ができ、ソースドレイン間の電流が制限される。トランジスタはソースドレイン間に順方向に一定の電圧が与えられたときのみ動作するので、あらかじめある程度の電圧を与える（バイアスかける）ことにより、入力信号が負になっても、ソースドレイン間には常に順方向の電圧がかかることになり、入力信号のわずかな変化として出力させることもできる（増幅作用）[1]。

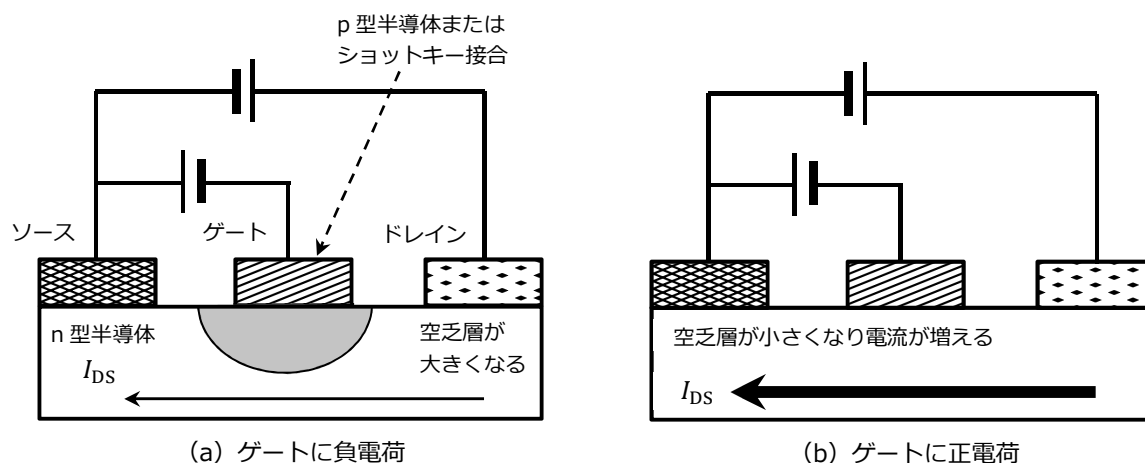


Fig. 2.19 : 電界トランジスタ (FET) の構造と動作

この HEMT は電子移動度を向上させているため低電圧低電流で動作するので、低雑音になっている。電波望遠鏡のような複数の装置で構成されている回路では、初段回路の低雑音化が重要である（第 3 章参照）。そのため、HEMT トランジスタを使用した増幅器は初段の低雑音増幅器に利用されている。茨城局では HEMT を約 11K に冷却することでさらに低雑音化を図っている。

Fig. 2.20 は、実際に 22GHz 帯冷却受信機に使用している HEMT である。この HEMT は日本通信機製で信号の入力口が導波管であるのに対し、出力口は同軸出力 (2.92 mm 同軸コネクタ) となっている。出力口の反対側の面には、バイアス入力用のコネクタ (MDM 9 PSP) が備えられている。Fig. 2.21 はデューワー内に搭載した状態の HEMT である。茨城局の 22 GHz 帯冷却受信機では両円偏波観測を行うため、HEMT は 1 号機・2 号機でそれぞれ 2 台ずつ、計 4 台使用する。これらはともに同じ規格の製品である。受信機ごとに使用している HEMT の型番とその性能を Table 2.4 にまとめた。また、Fig. 2.22 は、茨城局で使用している 4 つの HEMT のうち、型番 70M004 (1 号機 RHCP に使用) の性能を示すグラフである。他の HEMT についても同じような周波数特性である。

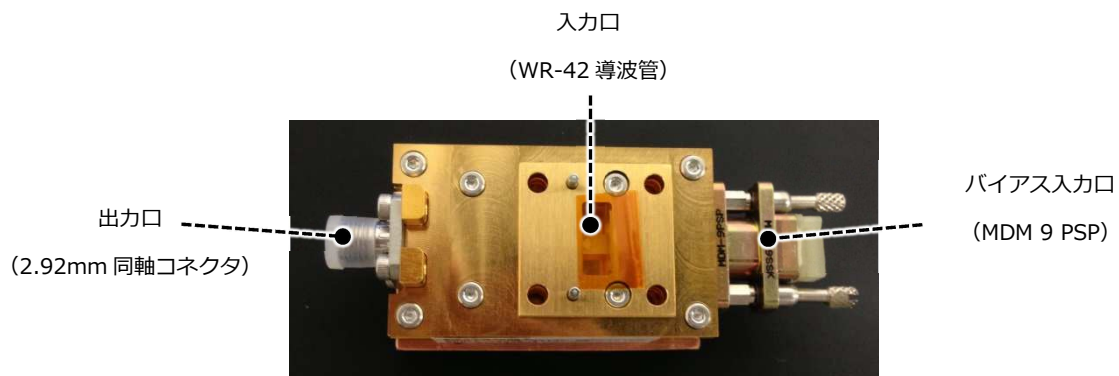


Fig. 2.20 : 茨城局で使用している 22GHz 帯用の HEMT
(日本通信機株式会社製 MODEL 9837K 2123-30)

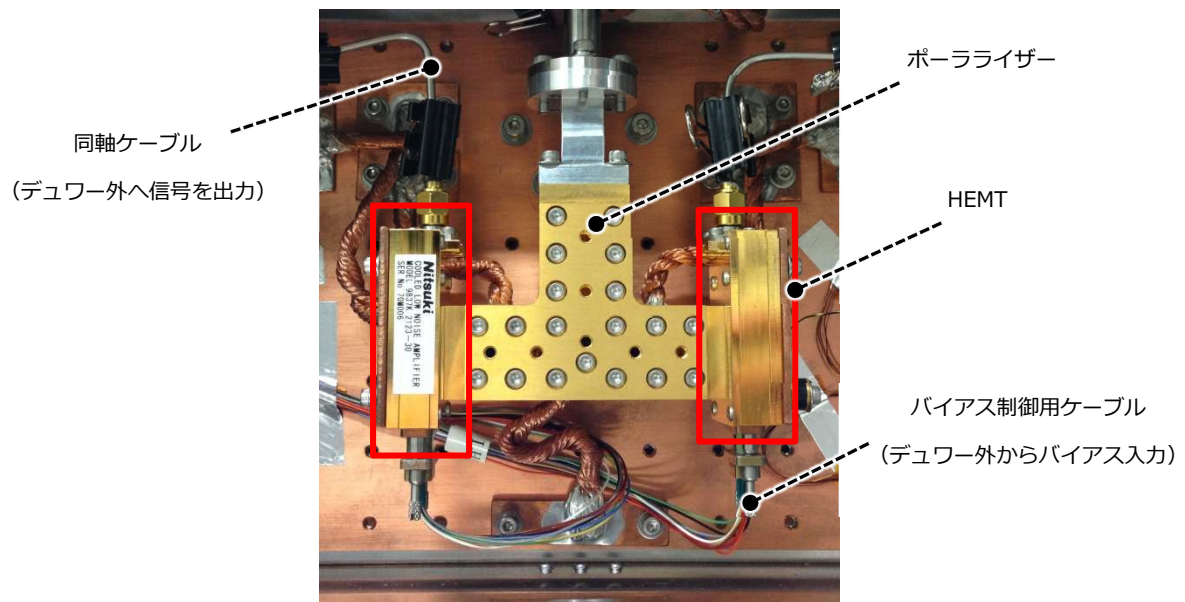


Fig. 2.21 : デュワー内に搭載した HEMT の様子 (赤線)
(バイアス制御用の MHM9pin ケーブルと信号が出力される同軸ケーブルが接続されている)

Table 2.5 : 22GHz 帯冷却受信機で使用している HEMT の性能表

周波数帯域 20.6~22.6 GHz		70M004 (1 号機:RHCP)	70M005 (1 号機:LHCP)	70M006 (2 号機:RHCP)	70M007 (2 号機:LHCP)
帯域内 利得	仕様値	37±4 dB	37±4 dB	37±4 dB	37±4 dB
	測定結果	Max : 40.1 dB Min : 34.8 dB	Max : 39.7 dB Min : 34.5 dB	Max : 39.6 dB Min : 34.2 dB	Max : 40.2 dB Min : 34.8 dB
帯域内 雑音温度	仕様値	30 K 以下	30 K 以下	30 K 以下	30 K 以下
	測定結果	Max : 21.4 K	Max : 22.3 K	Max : 22.4 K	Max : 21.4 K

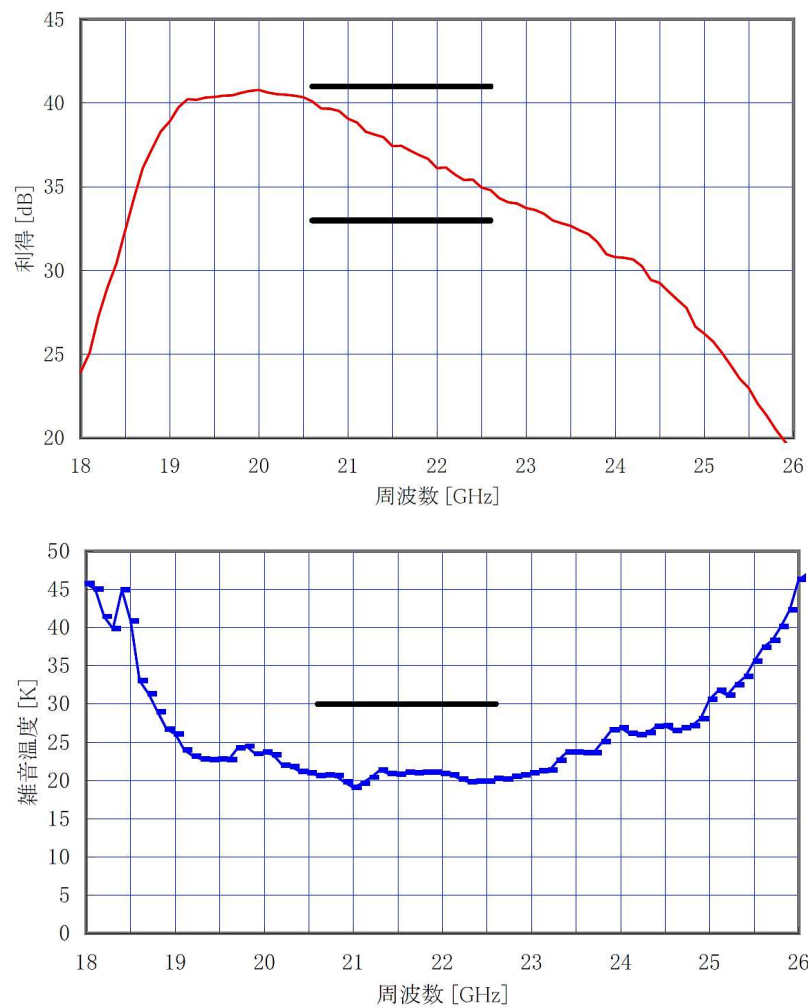


Fig. 2.22 : HEMT(70M004)の利得(ゲイン)と雑音温度の周波数特性
 図中の黒線は HEMT の性能表(Table 2.5)での周波数帯域(20.6 ~ 22.6 GHz)を表している.
 高周波になるとゲインは小さくなり, 雑音も高くなる. 水メーザー(22.23 GHz)に比べ,
 高周波数側であるアンモニア分子輝線(23.69 GHz)の周波数では, 性能が若干落ちる.

2.4 冷却デュワーの真空・冷却構造

前述したように 22 GHz 帯冷却受信機では、装置由来の熱雑音を低減化するためにデュワー内を極低温かつ高真空状態にしている。この節では、高真空・極低温を維持するためのデュワー構造について記述する。

冷却デュワーの構成は、大きく 3 つに分けることができる。真空状態を維持する密閉容器であるデュワー、冷凍機の冷却部（コールドヘッド）が接続される 80K シールドと 20K ステージである。Fig. 2.23 は冷却デュワー内の様子を示している。赤線はデュワー、青線は 80K シールド、水色線は 20K ステージである。

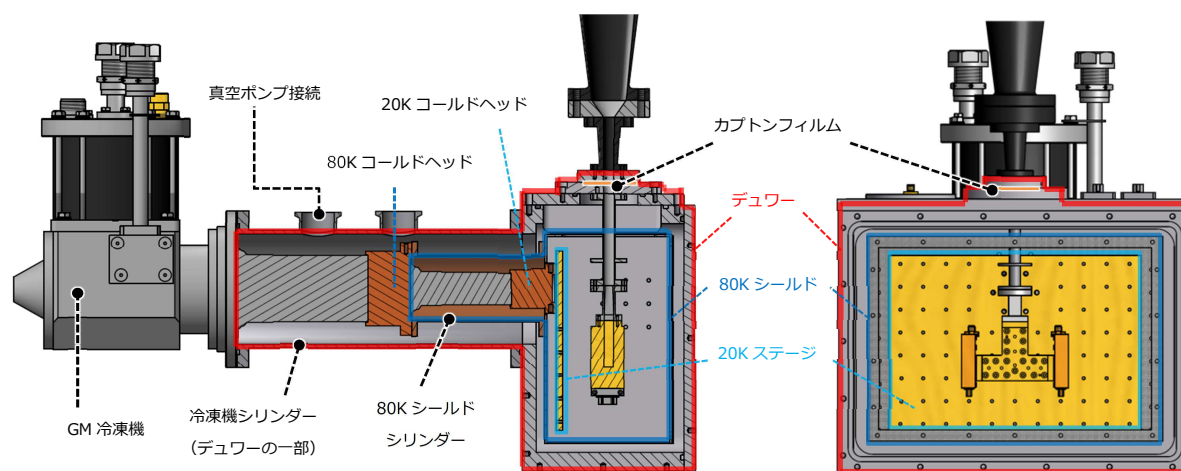


Fig. 2.23a

22GHz 帯冷却受信機のデュワー内を側面から見た模式図

Fig. 2.23b

22GHz 帯冷却受信機の
デュワー内を正面から見た模式図

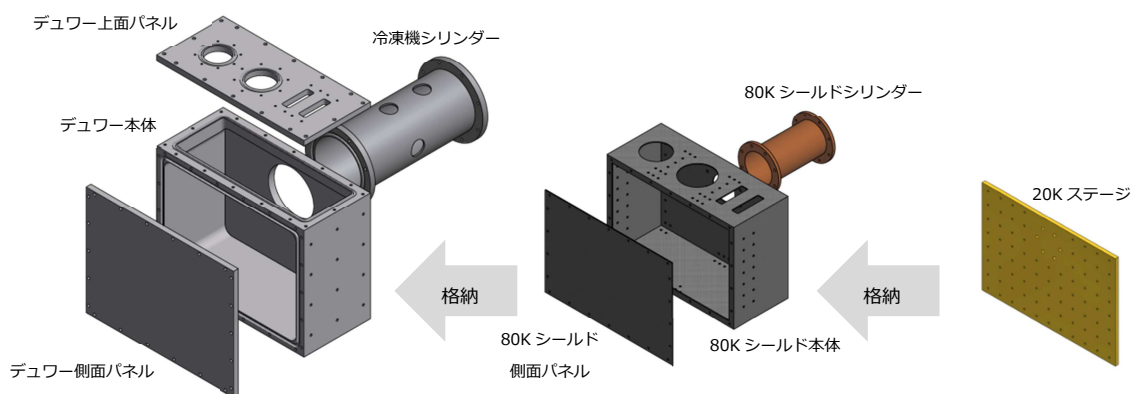


Fig. 2.24

冷却デュワーの格納構造

デュワーとデュワー上面パネル、デュワー側面パネル、冷凍機シリンダー、及び冷凍機は O リングという断面が O 形(円形)の環状パッキンで密着させ密閉構造を作っている(Fig. 2.25 左). また、導波管部分はカプトンフィルムをノイズソース用フランジ, RF 真空フランジ間にはさみ, O リングを用いて密閉させている(Fig. 2.6). このように外部からの空気の流入を防ぐことでデュワー内部の温度を保っており、さらには空気接触によるコンポーネントの劣化を防いでいる.

80 K シールドは, 80 K シールドシリンダーを通して冷凍機の 80 K コールドヘッドと熱交換され冷却される. 80K シールドは, 20 K 以下に冷却されたコンポーネントを覆うことで, デュワー(300 K) からの熱放射による熱伝達を防いでいる. また, 300 K のデュワーと 20 K のコンポーネントの間に, 80 K シールドに接続した熱アンカー(銅板に銅線をはんだ付けしたもの)を設置することで, デュワー内の熱勾配を緩やかにしている. これにより, 温度差によるデュワー表面の水滴の発生を防いでいる.

20K ステージには, 冷凍機の 20K コールドヘッドが接続され 20 K 以下に冷却される. 20 K ステージには複数の熱アンカーが設置してあり, デュワー内のコンポーネントに接続することでポラライザー, HEMT など 20 K 以下に冷却している. これにより, 導波管, HEMT における熱雑音を低減している(Fig. 2.25 右).

80 K シールドの底面と冷凍機側の奥の面, さらに 20 K ステージと 80 K シールドの間には樹脂ねじを設置してあり, デュワー, 80 K シールド, 20 K ステージが接触しないようにしている(Fig. 2.25 左).

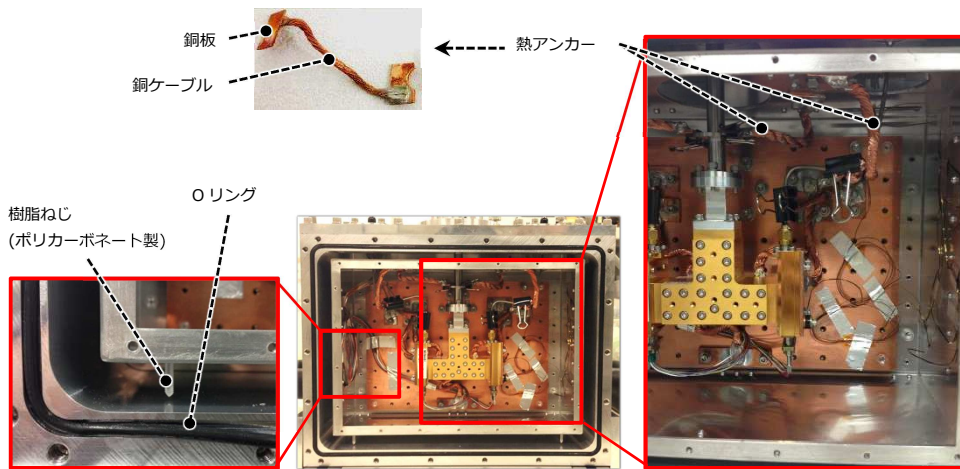


Fig. 2.25
樹脂製ねじ(写真左)と熱アンカー(写真右)
熱アンカーは銅板を冷却部分にねじで留める。
または, 銅ケーブルを巻きつけ, クリップで留めている。

Table 2.4 : 熱アンカーの接続

冷凍機による冷却部分	熱アンカーの接続先	接続数
20 ステージ	→ ポラライザー	3
	→ HEMT (LHCP, RHCP)	各 1
	→ 同軸ケーブル (LHCP, RHCP)	各 1
80K シールド	→ 断熱導波管	2
	→ 同軸ケーブル (LHCP, RHCP)	各 1

第 3 章 受信機システムの性能評価

受信機が完成した後、受信機単体で性能評価を行った。評価方法は異なる温度の電波吸収体を使用する Y-factor 法を用いた。性能評価の前に、まずは、受信機やアンテナの性能の指標となる雑音温度について記述する。

3.1 雑音温度

一般的に増幅器などの装置からの出力には、入力信号に対する出力信号だけでなく、その回路自体が持つ雑音信号も含まれる。電波天文学では天体信号以外の信号を雑音とし、観測装置だけでなく、大気や光学系（アンテナ）などからも雑音が混入する。この雑音の大きさを定量的に表すために、単位帯域幅あたりの雑音電力を絶対温度に換算した雑音温度を導入する。

雑音温度を説明するために、以下のような増幅器の回路を考える。

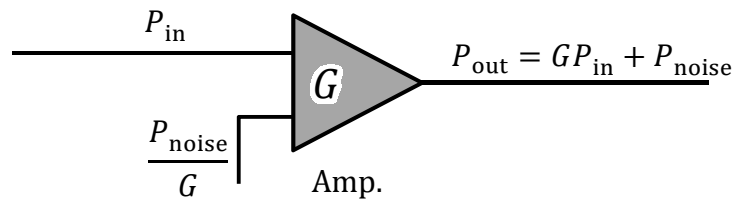


Fig. 3.1 : 増幅器単体の動作モデル

Fig.3.1 のように、実際の増幅器では入力信号を G 倍したものに雑音を加えてしまう。単位帯域幅あたりの入力信号と出力信号の電力を P_{in} , P_{out} とおくと、

$$P_{out} = GP_{in} + P_{noise} = G \left(P_{in} + \frac{P_{noise}}{G} \right). \quad (3.1)$$

P_{noise} は増幅器が発生する雑音の電力、 G は増幅器の増幅率（ゲイン）である。式 (3.1) から、増幅器に入力される正味の雑音は $P_{noise}/G \equiv N$ である。増幅器の性能は付加雑音 N が小さいほど性能が良いと言える。

雑音温度 T_N は、ナイキストの定理から付加雑音 N を用いて、下記のように表せる [1]。

$$T_N = \frac{N}{kB} = \frac{P_{noise}}{kBG}. \quad (3.2)$$

ただし、式 (3.2) における N はある帯域幅 B 全体からの雑音の出力電力である。 T_N が小さいほど増幅器の性能は良いと言える。 k はボルツマン定数である。

雑音には §1.2 に記述したように熱雑音や量子雑音などがあるが 6 GHz 帯や 8 GHz 帯、22 GHz 帯では熱雑音の効果が大きい。熱雑音は、物体の温度を下げることで低減化できる。そのため、ポーラライザーや HEMT などは GM 冷凍機により 20K 以下まで冷却される。

多段回路における初段回路の重要性

電波望遠鏡は，増幅器や周波数発振器などの多くの装置が連なっている．このような多段回路では初段回路の性能が重要である．ここで，以下のような増幅器を連結した回路を考える．

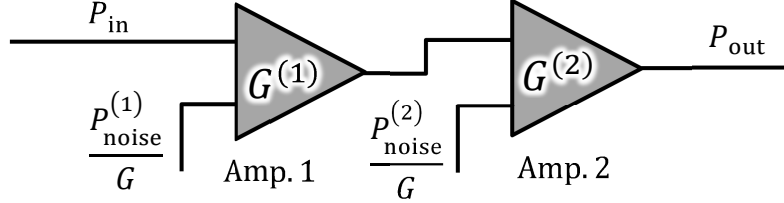


Fig. 3.2 : 増幅器を 2 つ連結した場合の動作モデル

各増幅器の入力段換算の付加雑音を $P_{\text{noise}}^{(1)}/G = N_1$, $P_{\text{noise}}^{(2)}/G = N_2$ とする．この時の P_{out} は，

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &= G^{(2)} \left\{ G^{(1)} \left(P_{\text{in}} + \frac{P_{\text{noise}}^{(1)}}{G^{(1)}} \right) + \frac{P_{\text{noise}}^{(2)}}{G^{(2)}} \right\} \\ &= G^{(1)} G^{(2)} \left\{ P_{\text{in}} + \frac{P_{\text{noise}}^{(1)}}{G^{(1)}} + \frac{P_{\text{noise}}^{(2)}}{G^{(1)} G^{(2)}} \right\}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

n 個の増幅器を連結した場合は，

$$P_{\text{out}} = (G^{(1)} \dots G^{(n)}) \left\{ P_{\text{in}} + \sum_{k=1}^n \frac{P_{\text{noise}}^{(k)}}{G^{(1)} \dots G^{(k)}} \right\}. \quad (3.4)$$

さらに，系全体の雑音温度 T_{Nt} は式 (3.2) より，

$$\begin{aligned} T_{\text{Nt}} &= \frac{N_{\text{t}}}{kB} = \frac{1}{kB} \left(P_{\text{in}} + \sum_{k=1}^n \frac{P_{\text{noise}}^{(k)}}{G^{(1)} \dots G^{(k)}} \right) \\ &= T_{\text{in}} + \frac{T_{\text{N}}^{(1)}}{G^{(1)}} + \frac{T_{\text{N}}^{(2)}}{G^{(1)} G^{(2)}} + \dots \frac{T_{\text{N}}^{(n)}}{G^{(1)} G^{(2)} \dots G^{(n)}} \end{aligned} \quad (3.5)$$

式 (3.3), (3.4) , から，入力信号に対して 1 段目の増幅器の雑音が最も効いてくることが分かる．茨城 32m 鏡の受信機システムで使用する増幅器のゲインは $G \gg 1$ であるから， $P_{\text{noise}}^{(2)}$ の項よりも $P_{\text{noise}}^{(1)}$ の項の方がシステムへの寄与が圧倒的に大きい．また，式 (3.5) から 1 段目の増幅器のゲインが大きいほど，後段の雑音温度の影響は小さくできることが分かる．22 GHz 帯冷却受信機ではデュワー内部の HEMT が 1 段目の増幅器にあたる．ゲインは約 35 dB で，電力の増幅率に換算すると約 3000 倍である．以上から，受信機の初段の増幅器は低雑音にする必要があり，より大きなゲインであることが望ましい．

3.2 受信機システム単体の性能評価

受信機を組み立てたのち、受信機単体の雑音温度である受信機雑音温度 T_{RX} を測定した。§3.1 で述べたように受信機（初段回路）の雑音温度は電波望遠鏡全体に大きく影響する。そのため、 T_{RX} を測定することは観測システムを評価するうえで重要である。

3.2.1 受信機雑音温度 T_{RX}

受信機雑音とは、増幅器などの回路の組み合わせで構成される受信機全体の雑音電力である。その雑音電力を温度換算したものが受信機雑音温度であり、受信機の性能を示す指標となっている。温度 T の黒体で覆った時の受信機からの出力には T_{RX} が含まれており以下のように表せる。

$$P(T) = GkB(T_{RX} + T). \quad (3.6)$$

G はゲイン、 k はボルツマン定数である。

3.2.2 Y-factor 法

Y-factor 法とは、異なる温度を持つ2つの電波吸収体を受信機に見せた時の出力の比から T_{RX} を求める方法である。今回開発した受信機の測定では、常温の電波吸収体と液体窒素で冷却した電波吸収体を見せた時の出力の比から T_{RX} を求めた。

式(3.6)を用いて、常温 $T_{amb}(\text{hot})$ の電波吸収体を見せた時の出力 $P(\text{hot})$ は、

$$P(\text{hot}) = GkB(T_{RX} + T_{amb}). \quad (3.7)$$

同様に、液体窒素(77 K)で冷却した電波吸収体 (cold) を見せた時の出力 $P(\text{cold})$ は、

$$P(\text{cold}) = GkB(T_{RX} + 77). \quad (3.8)$$

式(3.7),(3.8)より、これらの出力の比 Y と、受信機雑音温度 T_{RX} は、

$$Y = \frac{P(\text{hot})}{P(\text{cold})} = \frac{T_{RX} + T_{amb}}{T_{RX} + 77}, \quad (3.9)$$

$$T_{RX} = \frac{T_{amb} - 77Y}{Y - 1}. \quad (3.10)$$

ただし、式(3.7)から式(3.10)の $P(\text{hot}), P(\text{cold})$ の単位は [W] である。一方で、実際のパワーメータでの測定値の単位は [dBm] である。一般的に、2つの信号の電力 (P_{out}, P_{in}) または電圧 (V_{out}, V_{in}) と Y-factor (2つの信号の電力、または電圧の比) の間には、以下の関係がある。

$$Y[\text{dB}] = 10 \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right), \quad (3.11)$$

$$Y[\text{dB}] = 20 \log \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right), \quad (3.12)$$

$$P_{out}(\text{dBm}) = 10 \log \left(\frac{P_{out}[\text{W}]}{1[\text{mW}]} \right). \quad (3.13)$$

Y-factor が大きいほど受信機雑音温度は低くなり、受信機の性能が良いと言える。Fig. 3.3 は Y-factor と受信機雑音温度の関係を表している。横軸は受信機が見ている電波吸収体の温度、縦軸は出力電力である。 $P(\text{hot})$ と $P(\text{cold})$ の差が大きいほど受信機の性能が良いことを示している。つまり、性能が良い受信機は Fig. 3.3 の傾きが大きくなり、Y-factor も大きくなる。ここで受信機雑音は受信機自身が出力している成分であるから、グラフの y 切片が受信機雑音の電力 $GkBT_{\text{RX}}$ に相当する電力である。

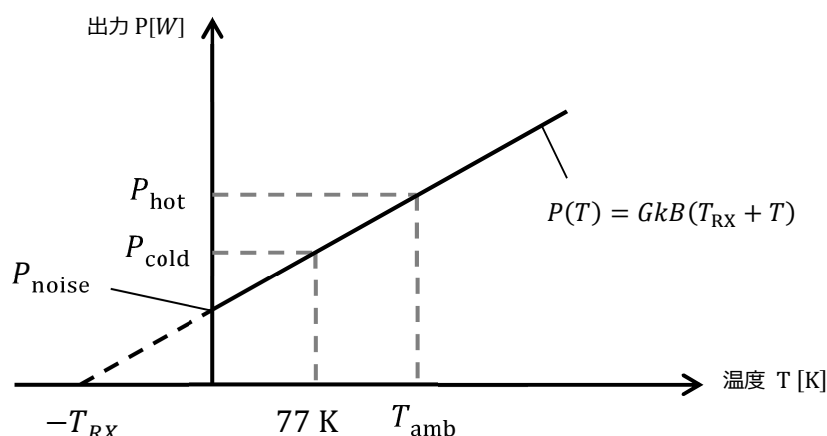


Fig. 3.3 : Y-factor と受信機雑音温度の関係

3.2.3 Y-factor 測定の結果

デュワー内を冷凍機で 10 K に冷却した状態で、フィードホーンの上に常温 (300K) の電波吸収体と液体窒素で冷却した電波吸収体 (77 K) を交互にかぶせ、Y-factor 法を用いて受信機システムのフロント部分の受信機雑音温度を測定した。測定系は Fig. 3.4 の通りである。使用した電波吸収体は、平板型電波吸収体 ECCOSORB-AN75 である。

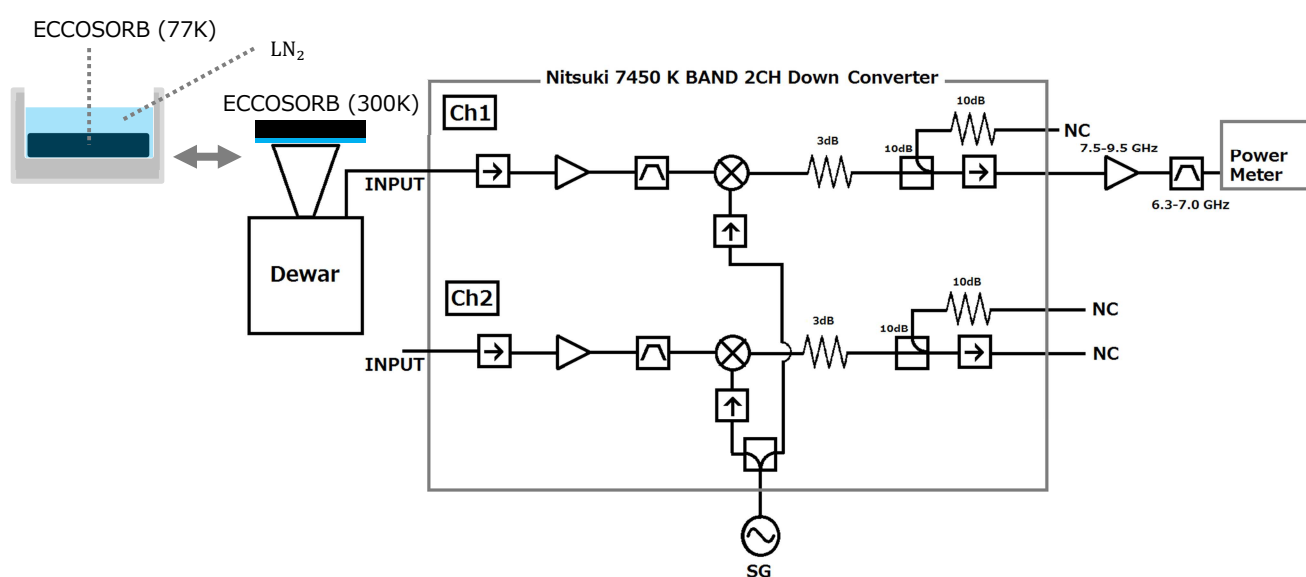


Fig. 3.4 : Y-factor 測定時の受信機ブロックダイアグラム

Fig. 3.5 は実際に行った測定の様子である。

ECCOSORB (左 : 300K, 右 : 77K)

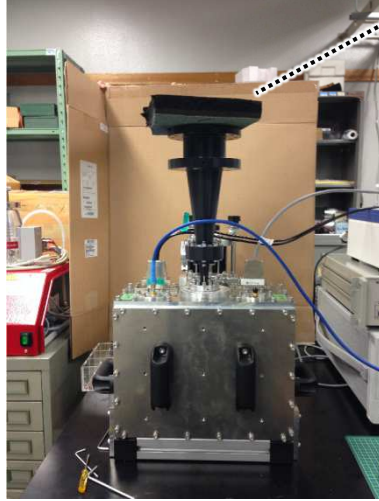


Fig. 3.5 a : Y-factor 測定時の様子(hot)

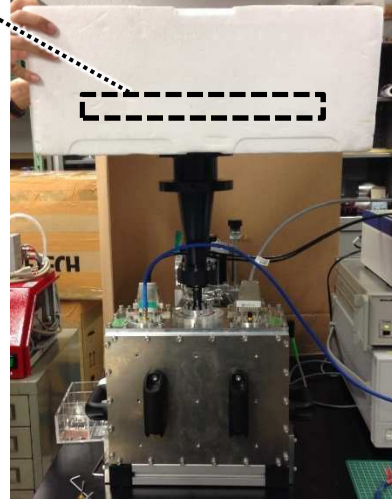


Fig. 3.5 b : Y-factor 測定時の様子(cold)
発泡スチロール内を液体窒素で満たし、
電波吸収体を浸している。

デュワーから出力された信号は 2 CH ダウンコンバータに入力され、6 GHz 帯に周波数変換される。このとき混ぜ合わせる局部発振器周波数(ν_{LO})は、水メーザー、アンモニア分子輝線の観測で使用される周波数(水メーザー観測時： $\nu_{LO} = 15.58508$ GHz, アンモニア分子輝線観測時： $\nu_{LO} = 17.0445$ GHz)にした。ダウンコンバータからの出力信号は、増幅器で増幅され、さらにフィルターで 6.7 GHz 帯以外の信号が落とされる。このとき使用した増幅器は 7.5–9.5 GHz 帯用であったが、6.7 GHz 帯に対しても 30 dB 以上のゲインがあったため今回の測定に使用した。

デュワー内のポーラライザーにより入力信号は左右円偏波(LHCP, RHCP)に分離される。Y-factor 測定は LHCP と RHCP を片側ずつ行い、それぞれで水メーザー、アンモニア分子輝線での周波数帯域における T_{RX} を測定した。

T_{RX} は以下の計算から求めた。パワーメータで測定した出力 $P(\text{hot})$ と $P(\text{cold})$ の比 Y-factor は

$$Y_{dB} = P(\text{hot})[\text{dBm}] - P(\text{cold})[\text{dBm}],$$

であるから、これを [W] の出力比に直すと、式 (3.11) より、

$$Y = 10^{\frac{Y_{dB}}{10}}$$

さらに、これを式(3.10)に代入すると

$$T_{RX} = \frac{T_{amb} - 77 \times 10^{\frac{Y_{dB}}{10}}}{10^{\frac{Y_{dB}}{10}} - 1}. \quad (3.10)$$

となる。測定結果は、Table 3.1 と Table 3.2 の通りである。

Table 3.1 : 22GHz 帯冷却受信機 1 号機の受信機雑音温度の測定結果

	水メーザー[K]	アンモニア分子輝線 [K]
LHCP	37 ±5	39 ±5
RHCP	38 ±5	22 ±5

* 2013 年 8 月に受信機をアンテナから降ろし, 2013 年 8 月 29 日測定

Table 3.2 : 22GHz 帯冷却受信機 2 号機の受信機雑音温度の測定結果

	水メーザー[K]	アンモニア分子輝線 [K]
LHCP	26 ±1	29 ±1
RHCP	25 ±1	30 ±1

2014 年 1 月 11 日測定

3.2.4 Y-factor 測定結果の考察

測定の結果, 1 号機と 2 号機で 10 K 程度の差が出た. 要因として, まず使用しているコンポーネントの個体差が考えられる. しかし, 1 号機, 2 号機で使用している HEMT の性能については大きな違いは見られない (Table 2.5). 1 号機の断熱導波管には, 導波管部分に直径 1mm 程度の凸があるため, それにより S/N 比が悪くなっている可能性もあるが, 第 4 章のシステム全体の雑音温度測定の結果では, 高萩アンテナ (1 号機) と日立アンテナ (2 号機) で大きな違いは見られなかった. 以上から, 1 号機と 2 号機の T_{RX} 測定結果の差は, 測定系によるものだと考えられる.

Y-factor 法の測定系に影響を及ぼすものとして, $P(cold)$ を測定する際の発泡スチロール外面に発生する水滴が考えられる. 22 GHz 帯の場合, 発泡スチロールは電波を通すが, 水は電波を通さない. そのため, 水滴が付いた状態で測定すると水からの放射が加わるため, $P(cold)$ の値は大きくなる. つまり, Y が小さくなり T_{RX} を悪く見積もってしまう. 実際の測定では発生する水滴をふき取るが, 湿度が高い場合は水滴の発生が著しく完全にふき取ることはできない. そのため, 湿度が低い冬期に測定した 2 号機に比べ, 湿度が高い夏期に測定した 1 号機の T_{RX} が高くなってしまったと思われる. 1 月 11 日の測定の際に, 発泡スチロールの底面に意図的に水滴を付けて測定を行い, 水滴がついていない場合と T_{RX} を比べると +5 K ほど悪化することを確認した. また, 水滴の有無によって出力値の変動具合にも影響することが分かった. 以上から 1 号機の測定時は, 水滴が発生しやすかったため, Y-factor 測定の結果が悪く見積もられ, ばらつきが大きくなったと思われる. 一方で, 2 号機の測定時は湿度が低いため, 水滴の発生は少なく出力値のばらつきも小さかった.

3.2.5 各コンポーネントの雑音温度に基づく T_{RX} の導出

T_{RX} は式 (3.5) を用いて求めることもできる. 式 (3.5) に Y-factor 法測定時の受信機システムをあてはめると,

$$T_{RX} = T_N^{(i\omega g)} + \frac{T_N^{(cswg)}}{G^{(i\omega g)}} + \frac{T_N^{(pol)}}{G^{(i\omega g)}G^{(cswg)}} + \frac{T_N^{(HEMT)}}{G^{(i\omega g)}G^{(cswg)}G^{(pol)}} + \frac{T_N^{(cc)}}{G^{(i\omega g)}G^{(cswg)}G^{(pol)}G^{(HEMT)}} + \dots \quad (3.11)$$

$T_N^{(i\omega g)}, T_N^{(cswg)}, T_N^{(pol)}, T_N^{(HEMT)}, T_N^{(cc)}$ はそれぞれ断熱導波管, 円角変換, ポーラライザー, HEMT, 同軸ケーブルの雑音温度である. $G^{(i\omega g)}, G^{(cswg)}, G^{(pol)}, G^{(HEMT)}$ は各コンポーネントの利得 (ゲイン, または, ロス) を示している. HEMT は大きなゲインであるため, 右辺第 5 項以降はほぼ 0 と見なせる. 各コンポーネントでの雑音温度はコンポーネントの物理的な温度を T として,

$$T_N = T(10^{NF/10} - 1), \quad (3.12)$$

と表すことができる[7]. さらに, NF は信号雑音比 (S/N) で表される量であるから,

$$NF \text{ [dB]} = 10 \log \left(\frac{(S/N)_{in}}{(S/N)_{out}} \right) = 10 \log \left(\frac{S_{in}}{S_{out}} \frac{N_{in}}{N_{out}} \right). \quad (3.13)$$

ここで損失を持つ受動コンポーネントの場合, S_{in}/S_{out} は挿入損失, 雑音 N は熱雑音のみであるので $N_{in}/N_{out} = 1$ となる. ゆえに, NF は挿入損失と等しくなる. 各コンポーネントのパラメータを式(3.12), (3.13), (3.11) に代入すると,

$$T_{RX} = 10.3 + 0 + \frac{0.6}{0.95 \times 1} + \frac{22}{0.95 \times 1 \times 0.94} + 0 \cong 27 \text{ [K]}, \quad (3.14)$$

となる. パラメータは Table 3.3 にまとめた. 物理温度はコンポーネントを実測した値である. 実際には, 各コンポーネントで温度勾配があるが, 代表的な値を使用した. 断熱導波管の利得は 3 次元電磁界解析ソフト HFSS を用いたシミュレーション結果である (Fig. 3.6). ポーラライザーと同軸ケーブルの利得は Agilent 社のベクトルネットワークアナライザを用いた実測結果である. HEMT の利得は, 日本通信機株式会社の仕様値である. 円角変換に関しては導波管の経路が短くロス is 充分低いため, 利得は 0 とした.

Table 3.3 : デュワー内コンポーネントの物性値

	物理温度 [K]	利得 [dB]	利得 (倍)	雑音温度 [K]
断熱導波管	40	-0.2	0.95	10.3
円角変換	14	0	1	0
ポーラライザー	11	-0.25	0.94	0.6
HEMT	11	35	3162	22
同軸ケーブル	40	-3	0.5	20

式 (3.14) の結果, 約 35.4[K]となった. 断熱導波管の利得はの管内に塗装された金メッキの厚さによって結果が異なる. 最も良いもので -0.08 [dB]でこの場合式 (3.14) の結果は 34.7[K] 程度となる.

式 (3.14) の結果から, 各コンポーネントのパラメータから導かれる値と Y-factor 法の測定結果は概ね一致した結果となった.

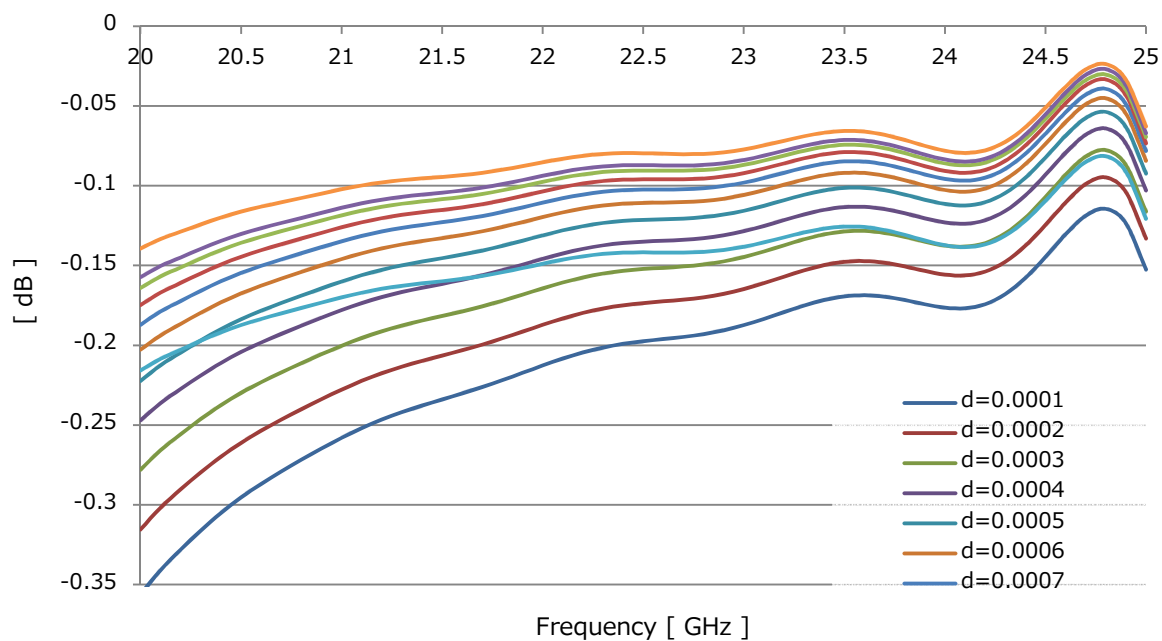


Fig.3.6 : 金メッキの厚さによる断熱導波管の挿入損失
(HFSS によるシミュレーション結果)

第 4 章 アンテナシステムの性能評価

受信機システム単体での性能評価を測定した後、受信機をアンテナに搭載し、アンテナを用いた性能評価を行った。まず、アンテナシステム（大気込み）の雑音温度 T_{sys} を測定した。さらに、システムの安定度の指標となるアラン分散を測定した。

4.1 システム雑音温度の測定

4.1.1 システム雑音温度 T_{sys}

システム雑音とは、電波望遠鏡で天体や空を観測した際に得られる出力の中で、天体源以外の信号成分のパワーである。このシステム雑音を温度換算したものをシステム雑音温度 T_{sys} と呼ぶ。 T_{sys} を説明するために、式(3.6)を用いて空と天体を見た場合の出力を考える。

まず、電波望遠鏡で天体のない空を見たときに得られる受信機出力は、

$$P_{\text{sky}} = GkB[T_{\text{RX}} + (1 - \eta)T_{\text{amb}} + \eta(1 - e^{-\tau})T_{\text{atm}}]. \quad (4.1)$$

T_{amb} は望遠鏡周辺の温度、 T_{atm} は上空大気の温度、 τ は大気の光学的厚みである。また、 η はアンテナが空からの信号をとらえている効率（フィード効率）であり、 $(1 - \eta)$ は空以外からの信号を受けている割合である。 G はゲイン、 k はボルツマン定数、 B は帯域幅である。

簡単のため $T_{\text{amb}} = T_{\text{atm}}$ にとすると、式 (4.1) は

$$P_{\text{sky}} = GkB[T_{\text{RX}} + (1 - \eta e^{-\tau})T_{\text{amb}}]. \quad (4.2)$$

ここで光学的厚み τ はアンテナが見る方向によって変わりうる値である。大気の性質が一様な平板であるとする τ は見る方向の大気の厚みに比例する。大気の厚みを H とすると、天頂方向から角度 Z の方向を見た時の大気の厚みは $H/\cos Z$ である。天頂での光学的厚みを τ_0 、天頂から角度 Z 方向の光学的厚みを τ とすると、

$$\tau = \frac{\tau_0}{\cos Z} = \tau_0 \sec Z. \quad (4.3)$$

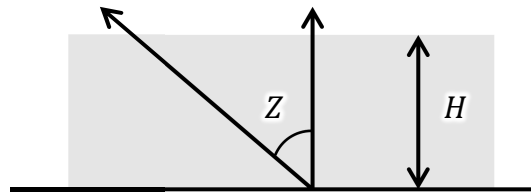


Fig.4.1 : 見る方向と大気の光学的厚みの関係

角度を変えて P_{sky} を測定すると τ が付く項のみが変化するため、 τ_0 を見積もることができる．これをsec Z 法と呼ぶ．ただし、 τ は空の状態によって短い時間スケールで時間変化するため短時間で測定する必要である．式(4.3)より、式(4.2)を書き直すと、

$$P_{\text{sky}} = GkB[T_{\text{RX}} + (1 - \eta e^{-\tau_0 \sec Z})T_{\text{amb}}], \quad (4.4)$$

となる．

次に、電波望遠鏡を天体に向けた場合の出力を考える．天体の信号を受信した際に得られる出力 P_{source} には、受信機雑音や大気による放射も含まれる．したがって、式(4.1)に天体信号の項を加えると、

$$P_{\text{source}} = GkB[T_{\text{RX}} + (1 - \eta)T_{\text{amb}} + \eta((1 - e^{-\tau})T_{\text{atm}}) + T_{\text{A}}] \quad (4.5)$$

$$= GkB[T_{\text{RX}} + (1 - \eta e^{-\tau})T_{\text{amb}} + T_{\text{A}}]. \quad (4.6)$$

T_{A} は地球上でのアンテナ温度であり、 P_{source} に含まれる天体起源のパワーを温度に換算したものである．式(4.6)において、天体源の出力成分である T_{A} 以外が雑音であり、これらをまとめて、システム雑音温度 T_{sys} という指標で表す．システム雑音温度は以下のようにかける．

$$T_{\text{sys}} = \frac{T_{\text{RX}} + (1 - \eta e^{-\tau})T_{\text{amb}}}{\eta}. \quad (4.7)$$

式(4.6)の T_{A} は、アンテナや大気によるロスが含まれているため純粋な天体信号（宇宙空間での減衰を含む）由来の温度成分とは言えない．そこで、大気圏外にアンテナを出した場合のアンテナ温度を T_{A}^* とすると、天体の電波が大気を通過する際の減衰 $L = e^{\tau}$ と、アンテナで受信する際の損失を表すフィード効率 η を補正して、 T_{A}^* を以下のように表すことができる．

$$T_{\text{A}}^* = T_{\text{A}} \frac{L}{\eta} = T_{\text{A}} \frac{e^{\tau}}{\eta}. \quad (4.8)$$

式(4.8)より、式(4.6)は、

$$P_{\text{source}} = GkB[T_{\text{RX}} + (1 - \eta e^{-\tau})T_{\text{amb}} + \eta T_{\text{A}}^* e^{-\tau}], \quad (4.9)$$

となる．式(4.9)のようなアンテナを大気圏外に出した場合の受信信号に対するシステム雑音温度を T_{sys}^* とすると、以下のようにかける．

$$T_{\text{sys}}^* = \frac{T_{\text{RX}} + (1 - \eta e^{-\tau})T_{\text{amb}}}{\eta e^{-\tau}}. \quad (4.10)$$

したがって、 T_{sys} と T_{sys}^* の関係は、

$$T_{\text{sys}}^* = \frac{T_{\text{sys}}}{e^{-\tau}}. \quad (4.11)$$

T_{sys}^* は「大気による吸収の影響を含んだ（大気込みの）システム雑音温度」という意味で表される．実際の観測では，アンテナ温度を求めるためにシステム雑音温度を測定する．

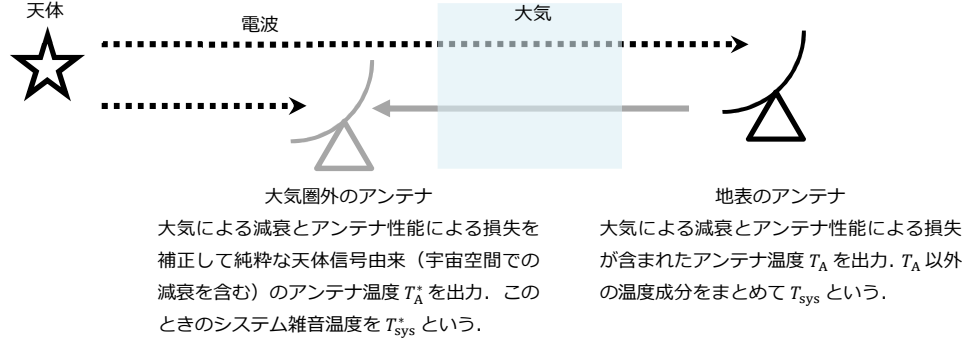


Fig.4.2 : T_{sys} と T_{sys}^* の違い

4.1.2 R-Sky 法

R-Sky 法とは，電波吸収体 (R) と天体がない空 (Blank sky) の放射のみからシステム雑音温度 T_{sys}^* を導く方法である．

電波望遠鏡が R を見た時の出力は，

$$P(T_{\text{amb}}) = GkB(T_{\text{RX}} + T_{\text{amb}}). \quad (4.12)$$

とかける．式(4.12) からBlank skyを見た時の出力の式(4.2) を引くと，

$$P(T_{\text{amb}}) - P_{\text{sky}} = GkB\eta e^{-\tau} T_{\text{amb}}. \quad (4.12)$$

これを $\eta e^{-\tau}$ について解くと，

$$\eta e^{-\tau} = \frac{P(T_{\text{amb}}) - P_{\text{sky}}}{GkB T_{\text{amb}}}. \quad (4.13)$$

となる．ここで，式(4.2) を変形して，

$$\frac{P_{\text{sky}}}{GkB} = T_{\text{RX}} + (1 - \eta e^{-\tau}) T_{\text{amb}}. \quad (4.14)$$

式(4.13), (4.14) を式(4.10) に代入すると，

$$T_{\text{sys}}^* = \frac{P_{\text{sky}} T_{\text{amb}}}{P(T_{\text{amb}}) - P_{\text{sky}}}, \quad (4.10)$$

となりシステム雑音温度が得られる．さらに，sec Z 法で τ 測定を行えば式(4.11) より，アンテナを地上に置いたときのシステム雑音温度 T_{sys} も導出することができる．

4.1.3 システム雑音温度の測定結果

1号機の受信機を高萩アンテナに搭載(2012年12月5日)し, 2号機を日立アンテナに搭載(2014年1月14日)した. 搭載後に, R-Sky法を用いてシステム雑音温度の測定を行った. 茨城局では, ホーン上部に電波吸収体をかぶせて $P(T_{\text{amb}})$ を測定する.

高萩アンテナと日立アンテナでは, それぞれ LHCP, RHCP 両偏波と各偏波で水メーザー, アンモニア分子輝線の周波数帯域について, アンテナを大気圏外に出した場合のシステム雑音温度 T_{sys}^* を測定した. さらに, sec Z 法を用いて τ 測定を行い, アンテナを地上に置いたときのシステム雑音温度 T_{sys} も算出した. 結果は, Table 4.1 と 4.2 の通りである.

Table 4.1 : 高萩アンテナのシステム雑音温度の測定結果

	水メーザー [K]			アンモニア分子輝線 [K]		
	T_{sys}^*	T_{sys}	τ	T_{sys}^*	T_{sys}	τ
LHCP	43	42	0.03	48	46	0.03
RHCP	44	43	0.03	—	—	—

水メーザー : 2013 年 2 月 8 日 (晴天), アンモニア分子輝線 : 2013 年 1 月 4 日 (晴天)

*RHCP でのアンモニア分子輝線の性能測定はまだ行っていない

Table 4.2 : 日立アンテナのシステム雑音温度の測定結果

	水メーザー [K]		
	T_{sys}^*	T_{sys}	τ
LHCP	45	44	0.03
RHCP	46	44	0.03

*水メーザー : 2014 年 1 月 19 日 (晴天)

*RHCP でのアンモニア分子輝線の性能測定はまだ行っていない

HEMT が常温時のシステム雑音温度が 300[K]であるのに比べると, 開発した冷却受信機の雑音温度は約 6 分の 1 に低減されたといえる. また, 他局のアンテナ性能と比べても 3 倍低雑音となった (Table 4.3 参照).

Table 4.3 : 各局のシステム雑音温度

局名	システム雑音温度	備考
茨城	300 K	常温
VERA*	100 K	冷却
野辺山	100 K	冷却
鹿島	100 K	冷却
苫小牧	100 K	冷却
岐阜	100 K	冷却

<http://www.astro.sci.yamaguchi-u.ac.jp/jvn/status/status.html> 参照

http://www.nro.nao.ac.jp/~nro45mrt/html/prop/status/Status_R12.html 参照

* 水沢, 入来, 小笠原, 石垣

4.1.4 システム雑音温度の測定結果と受信機雑音温度の比較

システム雑音温度の測定結果から受信機雑音温度を導出する. 高萩アンテナの水メーザーの場合, 光学的厚みが 0.03 であるから, 大気による雑音温度は以下ようになる.

$$T_N^{(\text{atm})} = T_{\text{atm}}(1 - e^{-\tau}) \quad (4.11)$$

$$= 290.5 \times (1 - e^{-0.03}) \cong 8.6 \quad (4.12)$$

システム雑音温度の測定結果から式(4.12)の結果を差し引くと 35[K] 程度となる. Y-factor 法による受信機雑音温度の測定結果で, 誤差の少ない Table 3.2 の結果(25 K)と比べると 10 K 程度高い値である. これは, 式(4.12)の結果が純粋な T_{RX} の値ではなく, デュワー入力以前のフィードホーン, 伝送系, アンテナの雑音が付加されるためである.

4.2 22GHz 帯ファーストライト受信

2012 年 12 月 6 日, 22GHz 帯冷却受信機 1 号機を搭載した高萩アンテナにおいて, 大質量星形成領域 W49N (R.A. (J2000) = 19^h 10^m 13^s.4, Desl. (J2000) = 09°06'14".4) の水メーザー源でファーストライト受信に成功した(Fig. 4.3). W49N は銀河系内で最も明るい水メーザー源であるため, ファーストライトのターゲットとして選んだ.

観測システムは, デュワーからの出力を 2 つのダウンコンバータを使用して 780 MHz 帯へと周波数変換を行い, 分光計としてスペクトルアナライザを用いてスペクトルを観測した.



Table 4.3a: 高萩アンテナ 22GHz 帯ファーストライト水メーザー (LHCP)

横軸: 周波数 (center 768.00 MHz, span 20.00 MHz)
縦軸: 強度 (最大 -28.8 dBm at 769 MHz, 2 dB/div)

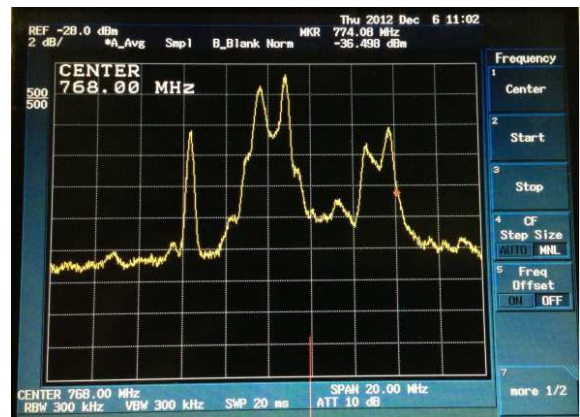


Table 4.3b: 高萩アンテナ 22GHz 帯ファーストライト水メーザー (RHCP)

横軸: 周波数 (center 768.00 MHz, span 20.00 MHz)
縦軸: 強度 (最大 -26.5 dBm at 769 MHz, 2 dB/div)

2014 年 1 月 14 日には, 22GHz 帯冷却受信機 2 号機を日立アンテナに搭載し, オリオン大星雲の星形成領域 Orion – BN/KL (R.A. (J2000) = 5^h 35^m 14^s.28, Desl. (J2000) = -05°22'33".54) に付随する水メーザーを観測し, ファーストライト受信に成功した(Fig. 4.4). 観測システムは, デュワーからの出力を 2 つのダウンコンバータを使用して 780 MHz 帯へと周波数変換を行い, さらに高萩局観測室にて 16 MHz 帯まで周波数を落とし, 分光計としてスペクトルアナライザを用いてスペクトルを観測した.

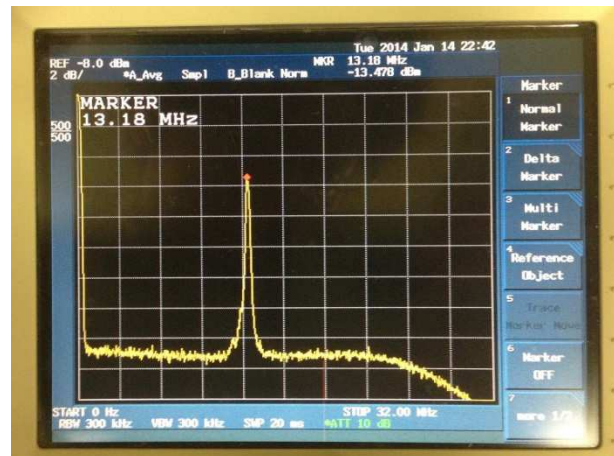


Table 4.4 : 日立アンテナ 22GHz 帯ファーストライト
水メーザー (LHCP)

横軸 : 周波数 (center 16.00MHz, span 32.00MHz)

縦軸 : 強度 (最大-28.8dBm at 13.18 MHz, 2dB/div)

高萩アンテナ、日立アンテナで取得した各スペクトルには大きな定在波やスプリース (天体起源の信号以外の成分) などではなく、問題なく天体からの信号を受信できることを確認できた。以上の結果から、両アンテナで天体観測が可能であると言える。

4.3 観測システムの安定性の測定

電波望遠鏡を天体に向けたときの出力には、天体信号の他に雑音信号が混じっている。ランダムな雑音の標準偏差は $1/\sqrt{t}$ に比例して小さくなるため、十分な信号雑音比(S/N)を達成するためには、長時間積分を行う必要がある。しかし、観測で得られるデータには、地球大気の変動、及び受信機、IF 系、分光計に起因するドリフト（電波出力の時間変動）が含まれており、このドリフトが支配的になるタイムスケールでは揺らぎの時間平均は必ずしも $1/\sqrt{t}$ に比例して低減していかない[8]。そのため、天体を観測する際には、ドリフトが卓越する時間より短い時間で積分を行わなければならない。

単一鏡で天体を観測する場合、天体がある ON 点方向を近傍の天体がない OFF 点方向を観測し、その差を取ることで天体が放射する真の電波強度を求める。また、十分な信号雑音(S/N)比を達成するために、ON 点と OFF 点それぞれで超時間積分を行う（真の電波強度を求めるために OFF 点を ON 点と同じ時間だけ積分時間をとる）。このような観測手法を ON-OFF 観測と呼ぶ(Fig. 4.5a)。ON-OFF 観測において、観測システムの安定時間内で ON-OFF スイッチを行う必要がある。アンテナのお向きを ON 点から OFF 点に移動させる時間（スルー）は、観測する天体の広がりによって異なるが、一般的に 10 秒~数十秒はかかる。スルーにある程度時間がかかる場合、システムの安定時間が長いほど、安定時間における ON 点・OFF 点の積分時間の割合を多くとることができる(Fig. 4.5b)。逆に安定時間が短いと、十分な S/N 比を達成するために複数回 ON-OFF スイッチを行う必要がある。この場合だと、観測におけるスルーの割合が多くなり観測効率が悪くなる。以上から、安定時間が長いシステムほど効率が良い観測を行うことができると言える。

観測システムの安定度は使用している装置や大気の特性に依存しているため、安定度を向上させるには、装置をより高性能な物にするか、大気の影響が小さい時に観測するしかない。しかし、システムの安定時間を知ることによって、最も長くとれる積分時間が分かり、より効率的に観測することができる。この ON-OFF スイッチ時の最適な積分時間を決定するために、22GHz 帯の観測システムが持つ安定時間の測定を行った。

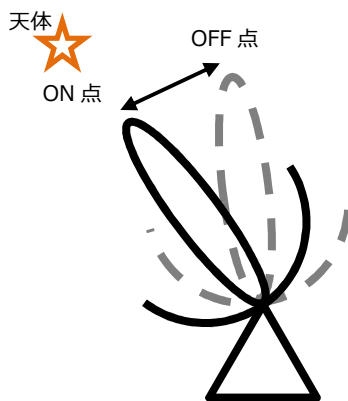


Fig. 4.5a : ON-OFF 観測

ON 点観測時の出力から OFF 点観測時の出力を差し引きすることで、大気及び装置起源の揺らぎを除去することができ、天体が放射する真の電波強度を求めることができる。

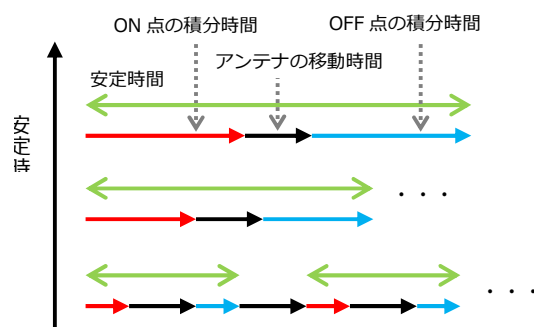


Fig. 4.5b : 安定時間における ON-OFF スイッチ

緑線が安定時間、赤線・青線が ON 点・OFF 点における積分時間、黒線が ON-OFF 間のアンテナ移動時間である。安定時間が長い方が 1 回の ON-OFF スイッチでより長く積分時間を取ることができる(a)。逆に、安定時間が短いと、十分な S/N 比を達成するために複数回 ON-OFF スイッチを行う必要がある(c)。この場合、全観測時間における、アンテナが移動する時間の割合が多くなり、観測効率は悪くなってしまふ。

4.3.1 安定度の指標

システムの安定度を評価する際の指標としてアラン分散を用いる。アラン分散で評価されるのはランダムな雑音信号に対して系統的な雑音信号がどの程度の時間で卓越してくるかである。

まず、茨城局で使用している分光計 K5/VSSP32 の各チャンネルの出力がどのくらい時間的に安定しているかを評価する。単位時間ごとに連続して N 回サンプリングした分光計 K5/VSSP32 出力のデータ列の i 番目データを x_i とおく。 $x_i (i = 1 \sim N)$ を K 個ずつ平均したデータ列 $R_n(K)$ を作る。

$$R_n(K) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x_{nK+i} \quad (4.14)$$

ただし、 $M = N/K - 1$ として、 $n = 0, 1, 2, \dots, M$ である。

次に、 $R_n(K)$ に対して分散 $\sigma_A^2(K)$ を式(4.15) で定義する。この分散をアラン分散と呼ぶ。

$$\sigma_A^2(K) = \frac{1}{2M} \sum_{n=1}^M [R_n(K) - R_{n-1}(K)]^2 \quad (4.15)$$

これを K に対してプロットしたものをアランプロットという。ただし、縦軸、横軸ともにログスケールである。アランプロットはデータが時間に対してどの程度安定しているかを評価する指標になる。電波望遠鏡で取得したデータの典型的なアランプロットは Fig. 4.5 のような形になる。ランダムな雑音が卓越する時間スケールでは積分時間 K に反比例して単調減少するが、ドリフトが卓越する時間スケールでは積分時間 K に対して増加に転じる。

式(4.15) で表されるアランプロットは、バンドキャラクタにおける選択したチャンネル(i 番目データ) の安定度を評価することができる。

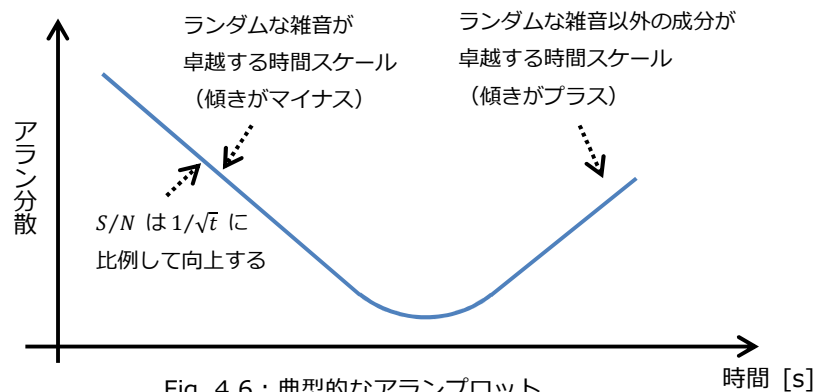


Fig. 4.6 : 典型的なアランプロット
(縦軸がアラン分散 $\sigma_A^2(K)$ ・横軸は積分時間 K 、ともにログスケール)

4.3.2 分光観測における安定度

電波分光観測では、線スペクトルの形や強度を正確に測定するために、線スペクトルのない周波数領域でゼロレベルを決定し、それを差し引く。そのため、あるチャンネルの出力強度に変動があっても、スペクトルの形が時間的に変動しなければ最終的に得られるスペクトルに影響はない。そこで、各チャンネルの出力差のアラン分散を測定することで、バンド内の周波数応答特性の安定度を評価する。単位時間ごとに連続で N 回サンプリングした K5/VSSP32 のあるチャンネル

ルのデータ列のデータと、それとは別のチャンネルのデータ列のデータを連続で同時に取得する。
 i 番目のデータをそれぞれ x_i, x'_i とおき、 $x_i - x'_i (i = 1 \sim N)$ を K 個ずつ平均したデータ列 $R'_n(K)$ を作る。

$$R'_n(K) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (x_{nK+i} - x'_{nK+i}) \quad (4.16)$$

ただし、 $M = N/K - 1$ として、 $n = 0, 1, 2, \dots, M$ である。

次に、 $R'_n(K)$ に対して分散 $\sigma_A^2(K)$ を式(4.17) で定義する。この分散を分光アラン分散と呼ぶ。

$$\sigma_A^2(K) = \frac{1}{2M} \sum_{n=1}^M [R'_n(K) - R'_{n-1}(K)]^2 \quad (4.17)$$

分光アラン分散のアランプロットが示すランダムな雑音が卓越する時間スケールは、周波数特性が安定である最大時間を示している。

4.3.3 アラン分散の測定方法

観測システムが安定している時間スケールを評価するために、幾通りかの天候下で、3つの仰角(EL) 方向について、K5/VSSP32 を用いて測定を行った(ただし、高萩アンテナに関しては、仰角方向にアンテナを動かすモーターの故障により、仰角 30 度と 15 度のデータ、および T_{sys}, τ は測定していない)。分光計の設定は、64 MHz サンプリング(帯域幅は 32 MHz)、量子化ビット数は 4 bit、分光点数は 2048 点、測定はすべて左円偏波(LHCP)で行った。

・ 天候	晴天 ($\tau = 0.03 \sim 0.05$)	: 光学的厚みが小さく、大気からの影響も小さい。
	曇天 ($\tau = 0.05 \sim 0.6$)	: 光学的厚みが若干大きく、大気の影響が多少ある。
	雨天 ($\tau = 0.6 \sim$)	: 光学的厚みが大きく大気の影響が大きい。
・ 測定対象	EL = 85° *	: 大気の影響が最小である仰角方向。
	EL = 30°	: 観測時のアンテナの典型的な仰角方向。
	EL = 15°	: 観測で使用するアンテナ方向のおおよその下限。 大気の影響を最も受ける。
	電波吸収体	: 大気の影響を取り除き、装置の安定度のみを測定。 吸収体はホーン上部に挿入(測定時はデハイドを停止)。

*高萩アンテナの場合は、EL = 90°

測定結果からは、チャンネル 1010 番目の出力(以下、ch1010 と表記)の絶対値と 7 組の 2 チャンネル間出力差(ch1010 - ch1110, ch910 - 1110, ch910 - 1210, ch810 - ch1210, ch710 - ch1210, ch510 - 1510, ch10 - ch2010) に対するアランプロットを作成した。

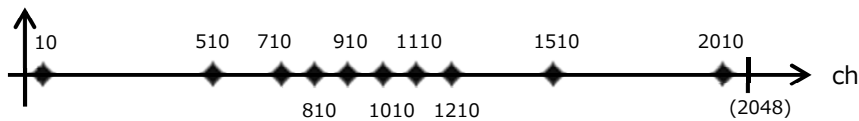


Fig. 4.7 : 分光アラン分散で使用するチャンネル
(チャンネルはバンドキャラクタに対応する)

4.3.4 高萩アンテナでの測定

Table 4.4 : 安定度の測定（高萩アンテナ）

入力	EL=90°の空			電波吸収体
測定日	2014.01/06	2014.01/04	2013.12/20	2013.12/29
天候	晴天	曇天	雨天	-
観測時間	8 時間			
RF 周波数	22.225 ~ 22.257 GHz (雨天時のみ 22.219 ~ 22.251 GHz)			
分光計設定	64 MHz サンプリング, 4 bit, 2048 点分光			

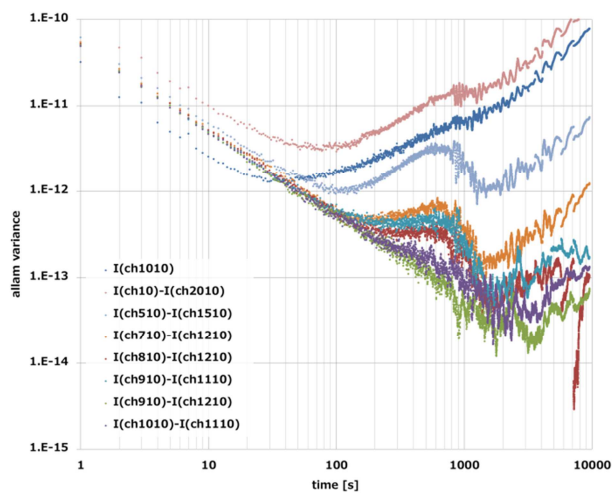


Fig. 4.8 : 仰角 90 度 (晴天)

青点 I(ch1010) は帯域中心にある ch1010 のアランプロット,
それ以外の点は 2ch 間の相対的なアランプロットである。

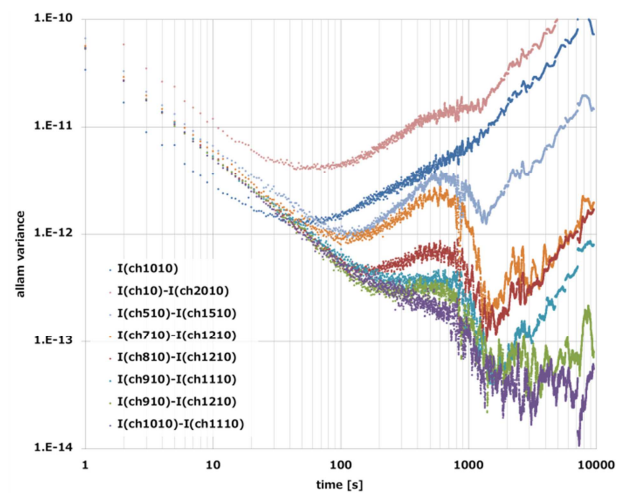


Fig. 4.9 : 仰角 90 度 (曇天)

青点 I(ch1010) は帯域中心にある ch1010 のアランプロット,
それ以外の点は 2ch 間の相対的なアランプロットである。

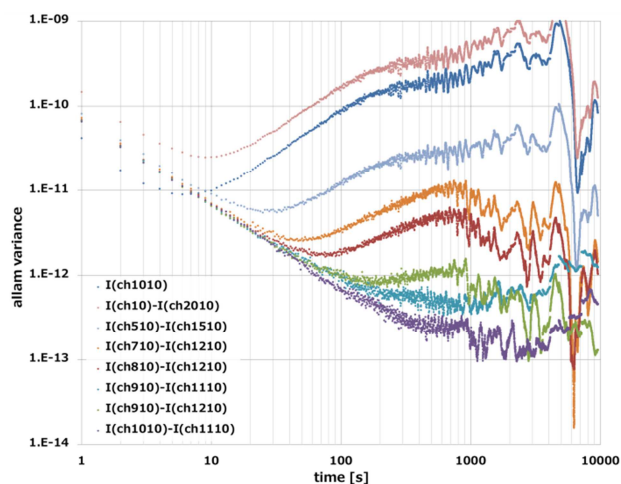


Fig.4.10 : 仰角 90 度 (雨天)

青点 I(ch1010) は帯域中心にある ch1010 のアランプロット,
それ以外の点は 2ch 間の相対的なアランプロットである。

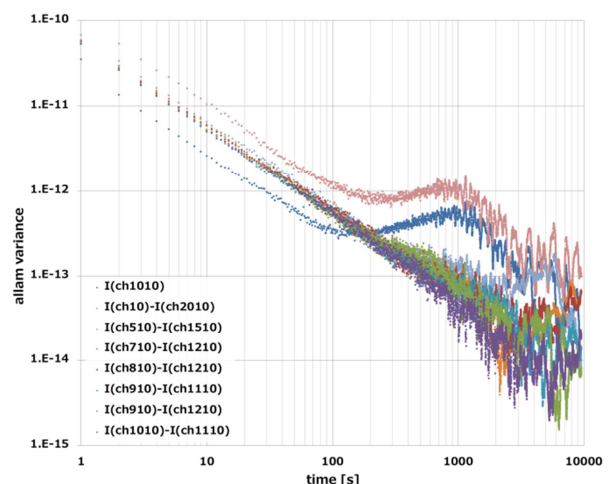


Fig. 4.11 : 電波吸収体

青点 I(ch1010) は帯域中心にある ch1010 のアランプロット,
それ以外の点は 2ch 間の相対的なアランプロットである。

Table 4.5 : 高萩アンテナにおける安定時間

入力	EL=90°の空			電波吸収体
図番	Fig. 4.7	Fig. 4.8	Fig. 4.9	Fig. 4.10
天候	晴天	曇天	雨天	-
絶対値の安定時間	30~40 秒	40~50 秒	5 秒	100 秒
2 ch 間の相対的な安定時間	50~1000 秒	40~800 秒	10~400 秒	200~1000 秒

高萩アンテナにおける 22 GHz 帯のアランプロットは Fig. 4.7~4.10 に、安定時間は Table 4.6 にまとめた。晴天・曇天の場合、安定時間にさほど差はなく 40 秒程度であった。一方で、雨天の場合は安定時間は短くなり 5 秒程度となった。分光アランプロットの結果からは、バンド中心付近の狭いチャンネル幅では安定時間は長く 200~秒程度となった。一方で、(ch10 – ch2010) のような帯域全体の応答特性の安定時間になると短くなり 50 秒以下になることが分かった。電波吸収体の測定は安定しており帯域中心付近の安定時間は 2000 秒程度となった。

4.3.5 日立アンテナでの測定

Table 4.6 : 安定度の測定@日立アンテナ

入力	EL=85°の空		EL=30°の空		EL=15°の空			電波吸収体
測定日	2014 1/28	2014 1/15	2014 1/19	2014 1/17	2014 1/23	2014 1/28	2014 1/19	2014 1/14
天候	晴天	曇天	晴天	曇天*	曇天	曇天*	雨天*	曇天
測定前 T_{sys}^*	49.2	54.6	45.4	55.7	53.3	60.8	58.8	52.7 K
測定後 T_{sys}^*	52.4	-	49.4	50.6	55.0	49.2	45.1	54.6 K
測定前 τ	0.037	0.083	0.028	0.059	0.054	0.070	0.059	0.047
測定後 τ	0.043	-	0.032	0.040	0.053	0.043	0.030	0.081
観測時間	8 時間							
RF 周波数	22.219 ~ 22.251 GHz							
分光計設定	64 MHz サンプリング, 4 bit, 2048 点分光							

*測定途中で晴天に変化

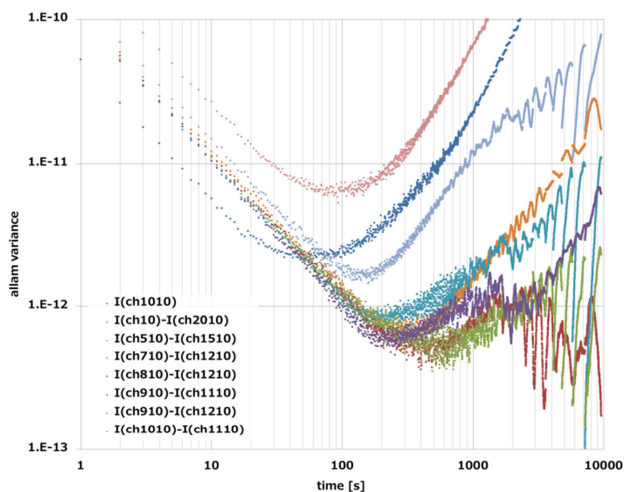


Fig. 4.12 : 仰角 85 度 (晴天)

青点 I(ch1010) は帯域中心にある ch1010 のアランプロット,
それ以外の点は 2ch 間の相対的なアランプロットである。

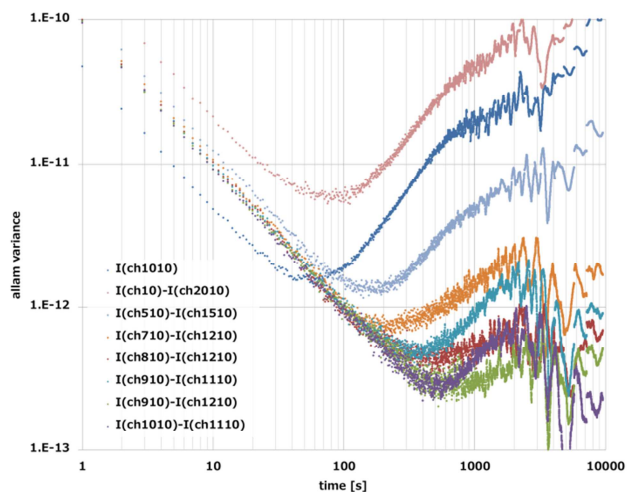


Fig. 4.13 : 仰角 85 度 (曇天)

青点 I(ch1010) は帯域中心にある ch1010 のアランプロット,
それ以外の点は 2ch 間の相対的なアランプロットである。

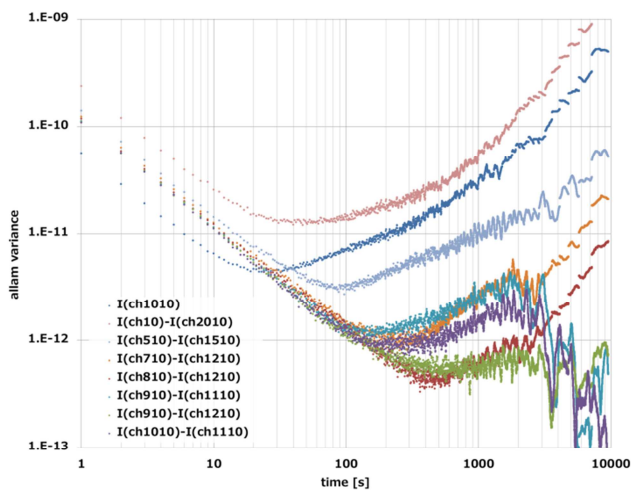


Fig. 4.14 : 仰角 30 度 (晴天)

青点 I(ch1010) は帯域中心にある ch1010 のアランプロット,
それ以外の点は 2ch 間の相対的なアランプロットである。

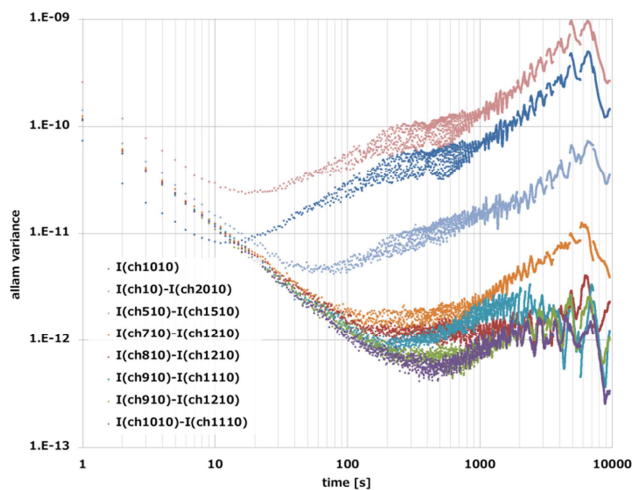


Fig. 4.15 : 仰角 30 度 (曇天)

青点 I(ch1010) は帯域中心にある ch1010 のアランプロット,
それ以外の点は 2ch 間の相対的なアランプロットである。

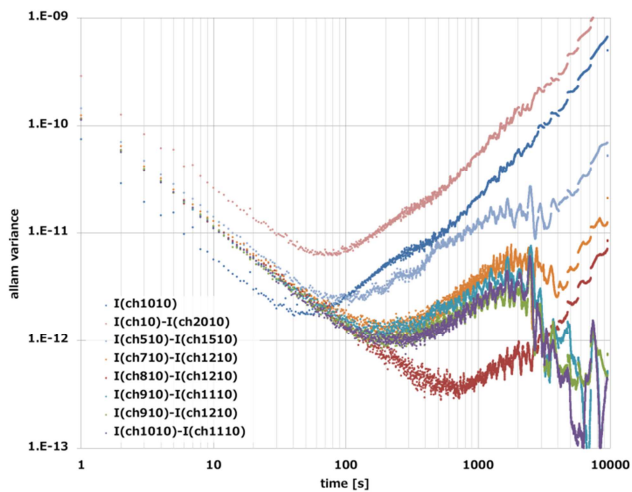


Fig. 4.16 : 仰角 15 度 (曇天)

青点 I(ch1010) は帯域中心にある ch1010 のアランプロット,
それ以外の点は 2ch 間の相対的なアランプロットである。

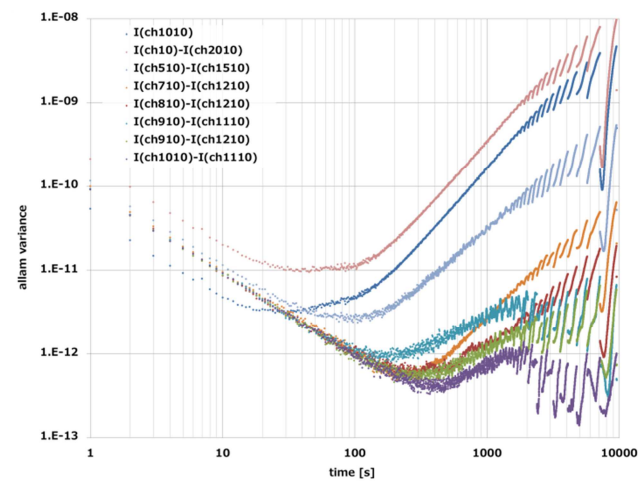


Fig. 4.17 : 仰角 15 度 (曇天→晴天)

青点 I(ch1010) は帯域中心にある ch1010 のアランプロット,
それ以外の点は 2ch 間の相対的なアランプロットである。

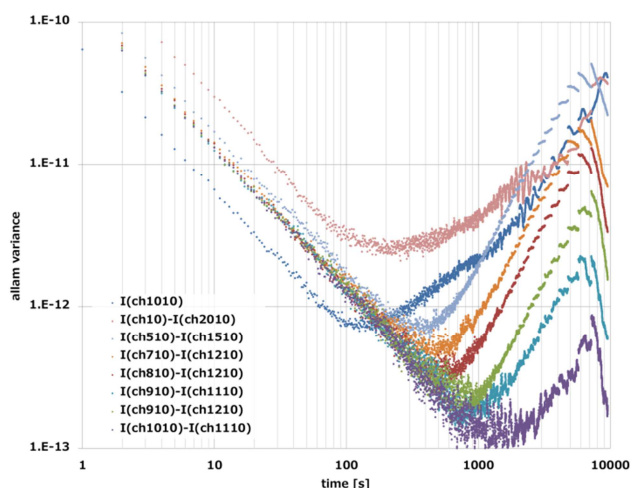


Fig. 4.18 : 電波吸収体

青点 I(ch1010) は帯域中心にある ch1010 のアランプロット,
それ以外の点は 2ch 間の相対的なアランプロットである.

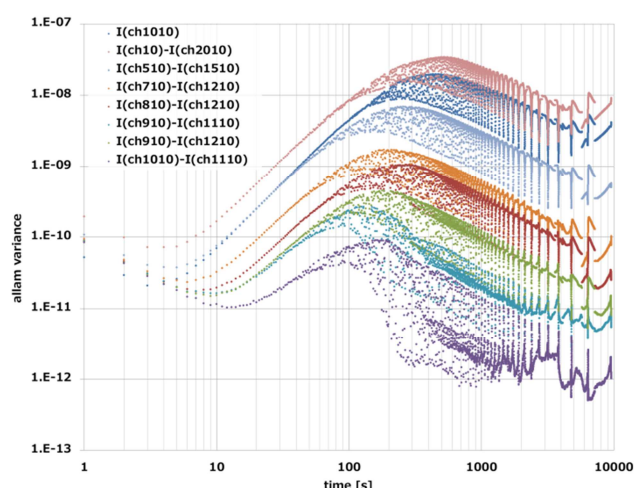


Fig. 4.19 : 仰角 15 度 (雨天(雪)→晴天)

青点 I(ch1010) は帯域中心にある ch1010 のアランプロット,
それ以外の点は 2ch 間の相対的なアランプロットである.

Table 4.7 : 日立アンテナにおける安定時間

入力	EL=85°の空		EL=30°の空	
図番	Fig. 4.11	Fig. 4.12	Fig. 4.13	Fig. 4.14
測定日の天候	晴天	曇天	晴天	曇天
絶対値の安定時間	50 秒	40 秒	20 秒	10 秒
2ch 間の相対的な安定時間	90~600 秒	80~500 秒	40~400 秒	20~400 秒

入力	EL=15°の空			電波吸収体
図番	Fig. 4.15	Fig. 4.16	Fig. 4.17	Fig. 4.18
測定日の天候	曇天	曇天→晴天	雨天→晴天	晴天→曇天
絶対値の安定時間	40 秒	20 秒	2 秒	100 秒
2ch 間の相対的な安定時間	40~200 秒*	40~400 秒	2~10 秒	200~1000 秒

* Ch810 – Ch1210 では 500 秒

日立アンテナにおける 22 GHz 帯のアランプロットは Fig. 4.11~4.18 に、安定時間は Table 4.7 にまとめた。一番大気の影響を受ける雨天時に仰角 15 度方向の安定度を観測した結果、絶対値の安定時間と相対的な安定時間は 2 秒以下となった。この値は観測において、安定時間のおよその下限値と言える。各仰角で同様な天気である曇天時の相対的な安定時間を比べると、仰角が高い方が広い周波数範囲で安定時間が長い結果となった。一方で、曇天時・仰角 15 度の結果(Fig. 4.15)では、帯域中心付近の相対的な安定度が 200 秒程度であるのに対し、Ch810 – Ch1210 が突出して安定時間が長く 500 秒程度となった。さらに、絶対値の安定時間が仰角 85 度の結果と同じ 40 秒程度となった。電波吸収体の測定結果は、絶対値の安定度が 100 秒、相対的な安定時間は帯域両端で 200 秒、中心付近では 300~1000 秒程度となった。

4.3.6 考察

高萩アンテナでは安定時間の仰角方向の依存性は測定できなかったが、安定時間の天候による依存性は確認できた。一般的に雨天・曇天などの悪天候の場合、光学的厚みは大きく大気による雑音（大気の揺らぎ）も大きくなる。そのため、絶対値の安定時間の下限値は、晴天時と曇天時では 40 秒程度であったが、雨天時では非常に短い 5 秒程度となったと考えられる。電波吸収体を測定する場合は、大気の影響はなく、吸収体に大きな温度変化がなければ吸収体からの放射は変わらない。そのため、観測装置のみの安定性を測ることができる。帯域の端では 200 秒程度であったが、帯域中心から広い範囲で 2000 秒以上の安定時間であった。観測装置は十分な安定性を持っていると言える。

日立アンテナの測定結果において、 $EL = 15^\circ, 30^\circ$ のプロットが大きく散らばっているのは、天候の変化によるものと思われる。これらの測定では、測定開始の際は天候が悪く T_{sys}^*, τ の値も大きかったが、測定中に天候が回復した。そのため、大気からの放射強度は小さくなり $R_n(K)$ の値も減少、結果分散 $\sigma_A^2(K)$ の値が変動したと考えられる。Fig. 4.15 で Ch810 – Ch1210 の安定時間が長い結果となったのは、Ch810 – Ch1210 が丁度周波数応答特性における歪みの節であった可能性が考えられる。一般的に相対的な安定時間は 2 Ch 間の幅が大きいほど短くなるが、ドリフトが支配的な時間スケールで応答特性が歪むときに丁度節同士にあたる 2 Ch 間では大きな差はないため、安定時間が長くなる場合がある。おそらく、Fig. 4.15 の Ch810 – Ch1210 もこれにあたると思われる。次に、電波吸収体の安定時間について考える。高萩アンテナの結果と比べると、絶対値の安定時間はさほど変わらないが、日立アンテナでは帯域中心付近の安定度にばらつきがみられた。これは観測装置でランダムではない系統的な雑音が混入していることを示している。日立アンテナの観測システムで高萩アンテナと大きく異なるのは、日立アンテナで受信した信号を高萩アンテナの観測室で解析するために、電気・光変換(E/O)している部分である。日立アンテナで電気信号から光信号に変換された信号は、光ファイバーを通して高萩アンテナの観測室に送られ、再び電気信号に変換され分光などの解析が行われる。E/O や光ファイバーによって雑音が混入しているかどうかを検証するために、高萩アンテナを用いて以下のような安定度の測定を行う必要がある。

- (1) 高萩アンテナの出力信号を E/O 変換し、光ファイバーで日立アンテナに送る。
- (2) 日立アンテナで信号を E/O 変換で電気信号に変換した後、再び E/O 変換し光ファイバーで高萩アンテナに戻す。
- (3) 高萩アンテナで電気信号に変換した信号を分光し解析を行う。

これによって、E/O 変換や光ファイバーの影響について検証することができる。この測定法の他に、日立アンテナに分光計を構築する方法があるが、高萩アンテナの分光計 VSSP32 とそれを制御する PC などの移設が困難であるため、まずは上記のような方法を用いて今後検証する必要がある。

上記で述べてきた絶対値の安定時間は、電波望遠鏡で観測される電力の絶対値に対する安定度に相当する。そのため、周波数帯域内のパワーを測定する必要のある連続波観測でこの値を用いる。つまり、連続波観測をする場合は、各天候の安定時間より十分短い時間内で ON-OFF スイッチを行わなければならない。2 Ch 間の相対的な安定時間はバンドキャラクタの安定度意味するため、線スペクトルに対応する分光観測でこの値を用いる。つまり、分光観測を行う場合は、観測対象のスペクトルが観測される Ch 幅（周波数幅）における各天候の安定時間より十分短い時間内で ON-OFF スイッチを行わなければならない。例えば、日立アンテナで $EL = 30^\circ$ 付近、曇

天時に観測する場合で Ch710~1210 内にスペクトルがあるときは、200 秒より短い時間内で ON-OFF スイッチを行う必要がある。

第 5 章 まとめ

5.1 本研究の成果

本研究では、茨城局 32m 電波望遠鏡に搭載する 22 GHz 帯冷却受信機を 2 台開発した。今回の開発で得られた成果をまとめる。

1. 2 台の 22 GHz 帯冷却受信機の開発に成功し、日立アンテナ・高萩アンテナに搭載した。これにより、茨城局で 22GHz 帯の観測が可能となった。
2. 高萩アンテナ・日立アンテナで性能測定を行った結果、両偏波共にシステム雑音温度は 45 K（天頂、大気込み、冬季）となった。また、各アンテナでファーストライト受信に成功した。これらより、茨城局 32m 鏡を用いた 22GHz 帯の観測で高感度観測が期待できる。
3. 22 GHz 帯におけるシステムの安定度の測定を行い、いくつかの天候時における ON-OFF 観測の ON-OFF 切り換え間隔の最適値を明らかにした。

5.2 今後の課題

1. 高萩アンテナで、日立アンテナと同じようにシステムの安定度の測定を行う。高萩アンテナでは、仰角方向にアンテナを動かすモーターの故障により、 $EL = 15^\circ, 30^\circ, 85^\circ$ でのシステム安定度を測定できなかった。高萩アンテナが復旧次第、各仰角での安定度の測定をする必要がある。
2. アラン分散の測定によって得られた安定時間よりも短い時間で ON-OFF 観測を行う。この観測によって、実際に雑音が $1/\sqrt{t}$ で減少するかを確かめる必要がある。
3. 22 GHz 帯における茨城局 32m 鏡の開口能率と指向精度を測定する。開口能率は、天体を観測した時の測定値から正確な天体強度を得るために必要である。また、精度よく天体を観測するために、指向精度を測定しアンテナ制御の際に指示した方向と実際の光軸とのズレを補正する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたって多くの方にご指導、ご協力いただきました。指導教員の百瀬宗武先生、米倉覚則先生には研究を進めるに当たり大変お世話になりました。百瀬宗武先生にはゼミ等で電波天文学の基礎を教わり、学会での発表や論文執筆、研究の相談、TAの仕事についてまで、研究室に配属されてから終始ご指導いただきました。米倉覚則先生には、私の研究テーマである受信機開発については勿論のこと、電波望遠鏡の仕組みや観測・解析方法など一から教えていただきました。心より感謝申し上げます。

本研究で様々なご指導を頂きました大阪府立大学の皆様、まことにありがとうございました。小川英夫先生には、お忙しい中時間を割いて受信機について丁寧且つ熱心なご指導を賜りました。修士2年の長谷川豊氏にはCADの使い方を一から教えていただき、デューワーの設計に関しても様々なご助言を頂きました。研究員の木村公洋氏には、性能測定や受信機組立に協力していただき、また多くのアドバイスを頂きました。客員研究員の阿部安宏さんにはVNAの使い方やコネクタの管理についてなど丁寧に教えていただきました。また、大西利和先生、前沢裕之先生、村岡和幸先生、秘書の長谷川陽子さん、博士3年の西村淳氏、修士2年の高津湊氏、田中智博氏、藤賀志央里氏、徳田一起氏、馬路博之氏、修士1年の岡田望氏、には、長い出張期間での研究室・実験室の利用にあたり大変お世話になりました。大阪府立大学の方には厚くお礼申し上げます。

茨城局32m鏡で研究を進めるに当たり茨城大学 宇宙科学教育研究センター 宇宙電波館の皆様にも感謝しなくてはなりません。センター長の吉田龍生先生には学部生の頃から流体力学などの講義で大変お世話になりました。事務員の藤原佳志子さんには、研究の合間にお菓子、お茶などを頂き、またその笑顔に癒されました。技術補佐員の笹山友和さんには、光学観測の際にお世話になり、光学望遠鏡を使わせていただきました。感謝の意を表します。

本研究室の皆様には、ただただ感謝の気持ちでいっぱいです。修士2年の5名とは2年間共に学び、支え合い、高め合ってきました。Soon Kang Lou氏は学部4年の頃から共に受信機開発を行い、大阪出張の際は同じ釜の飯を食べ、励まし合って研究を進めてきました。また、マレーシアからの留学生ということで、東南アジアの料理や風習、多様な言語表現など異文化について多くのことを教えていただきました。東京理科大学から茨城大学大学院に入学した岡本雄大氏には、研究面での知識だけでなく日本の先端カルチャーについてもご指導いただきました。就職活動の際は同じ志望先もあり、お互いに刺激し合い、充実した就職活動を行うことができました。根本貴之氏には、研究発表会等の準備で大変な時期に差し入れを頂き、私にとって大きな励みとなりました。同じ就職先ということもありこれからも良き友でありたいと心から思います。影近早香氏は、学部生時代から学際理学コースで共に学び、研究ではアンモニア分子輝線の観測実習についてのまとめを参考にさせていただきました。修士1年の石井翔太氏、佐藤雄貴氏、学部4年の千葉元貴氏、安井靖堯氏、永瀬桂氏、加古琳一氏、中村英斗氏、山田淑乃氏、沖本有氏には受信機搭載作業や性能測定に協力していただきました。特に、千葉元貴氏、安井靖堯氏は22GHz帯冷却受信機2号機の立ち上げの際に共同研究を行い、茨城局での作業では長時間の性能測定を手伝ってくださり大変感謝しております。研究員の宮本祐介氏、古川尚子氏にはゼミ・観測等で大変お世話になりました。そして、博士2年の齋藤悠氏には足を向けて寝られません。研究面ではゼミなどでご指導いただき、アンテナでの観測や解析方法などについてもお力添え頂きました。また、研究室での生活では院生・学部生をまとめ、より良い研究環境を目指してお骨折りいただきました。心より感謝申し上げます。

最後に、これまで私を育ててくれた家族に深く感謝申し上げます。

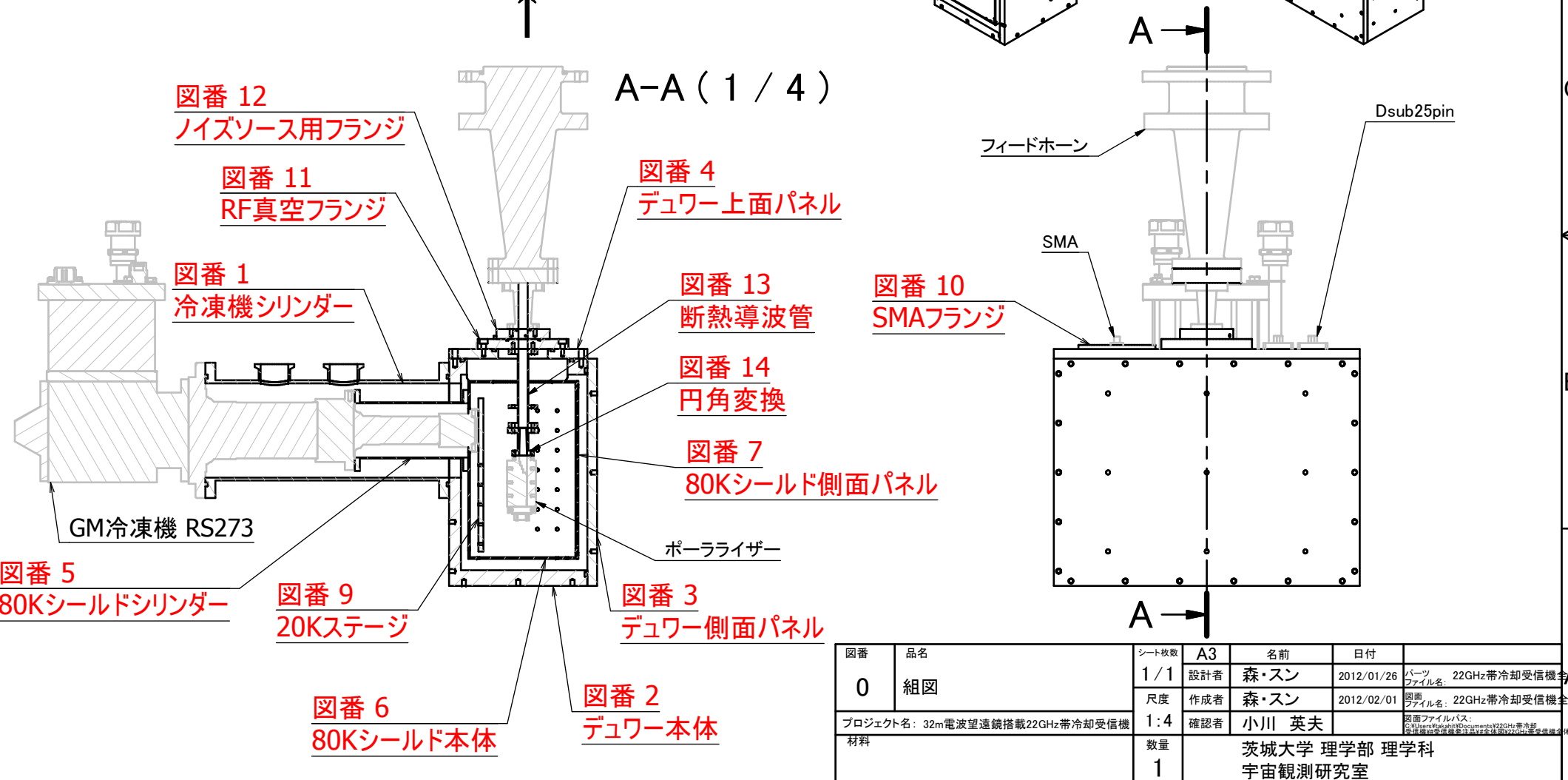
茨城局 32m 電波望遠鏡搭載用 22GHz 帯冷却受信機 1 号機 図面目次

図番	名称	材料	数量
0	組図		1
1	冷凍機シリンダー	SUS304	1
2	デュワー本体	A5052	1
3	デュワー側面パネル	A5052	1
4	デュワー上面パネル	A5052	1
5	80K シールドシリンダー	無酸素銅	1
6	80K シールド本体 (*図番 6 と 8 を一体化。1/26 設計変更)	A1050	1
7	80K シールド側面パネル	A1050	1
9	20K ステージ	無酸素銅	1
10	SMA フランジ	A5052	1
11	RF 真空フランジ (*1/26 設計変更)	A5052	1
12	ノイズソース用フランジ (*1/26 図面の間違いを修正)	A5052	1
13	断熱導波管 (*2/1 図面追加・設計変更)	SUS304	1
14	円角変換 (*2/1 図面追加)	A6063	1
-	22GHz 帯冷却受信機設置図面		

2012/2/1(水)

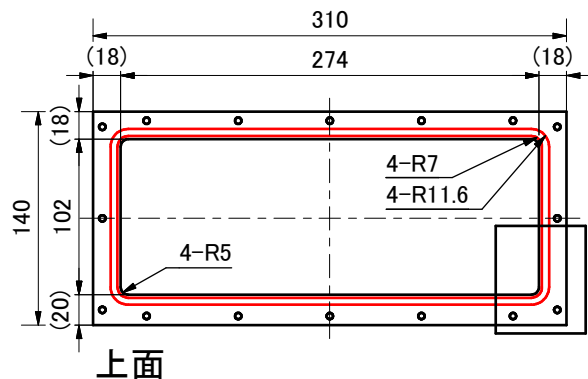
* 22GHz帯冷却受信機 組図

高萩32mパラボラ



図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	備考
0	組図	1 / 1		設計者 森・スン	2012/01/26	パーツファイル名: 22GHz帯冷却受信機全体組図
		尺度 1:4		作成者 森・スン	2012/02/01	図面ファイル名: 22GHz帯冷却受信機全体組図
		数量 1		確認者 小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\kajikawa\Documents\22GHz帯冷却受信機全体組図\22GHz帯冷却受信機全体組図.dwg (80K改) 22
プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機		茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室				
材料						

*デュワー本体(1/2) 外寸

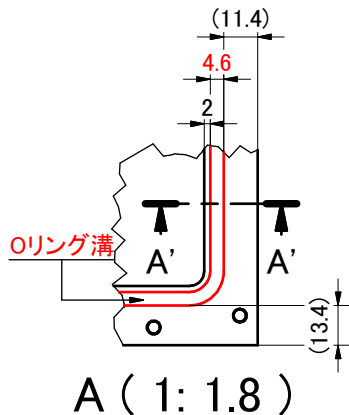


デュワー本体上面

リング溝長さ:
 $755.982 \div 240.64 \pi$

使用するリング:
AS568-272 (CO2050)

・W=3.53±0.10
・do=240.89±0.76

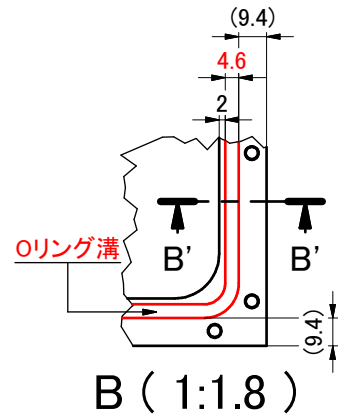


デュワー本体正面

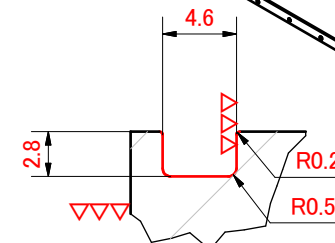
リング溝長さ:
 $955.982 \div 304.30 \pi$

使用するリング:
AS568-278 (CO4602)

・W=3.53±0.10
・do=304.39±0.76

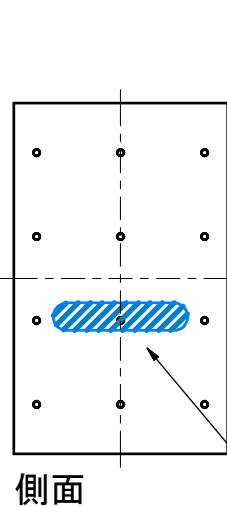


補助ビュー



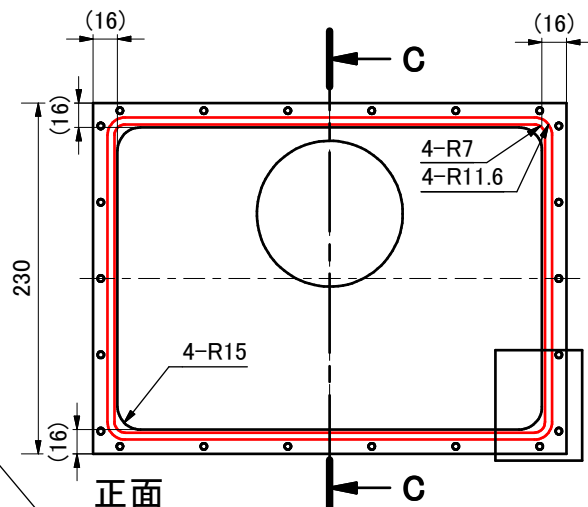
リング溝部拡大
A'-A'、B'-B' (3:1)

リング面

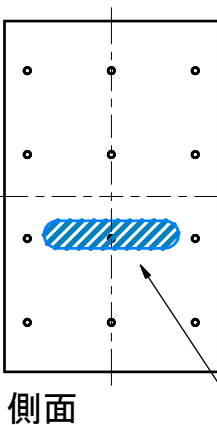


側面

取っ手
(ネジ未記入)
(フレームの高さに合やすよう)

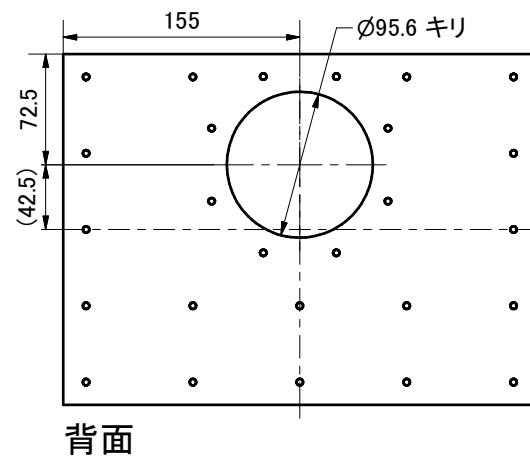


正面

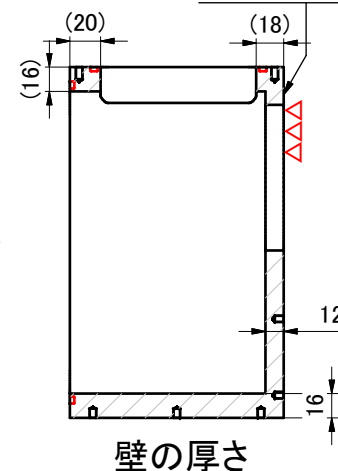


側面

取っ手
(ネジ未記入)
(フレームの高さに合やすよう)



背面



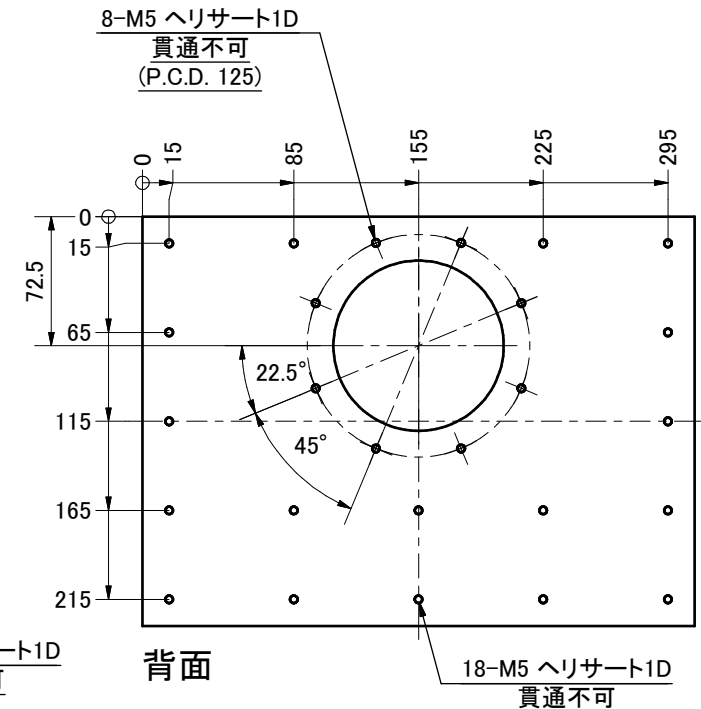
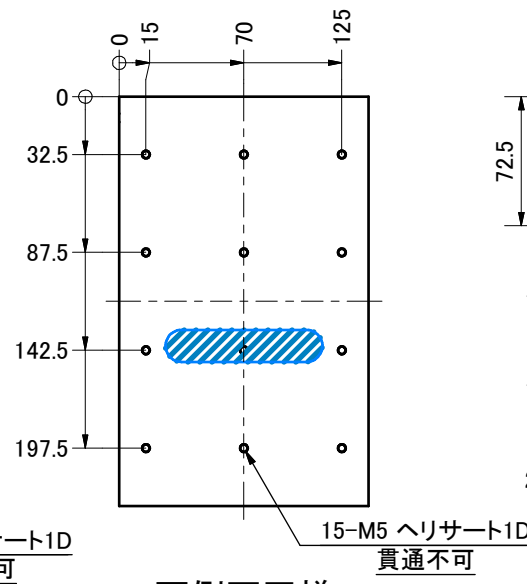
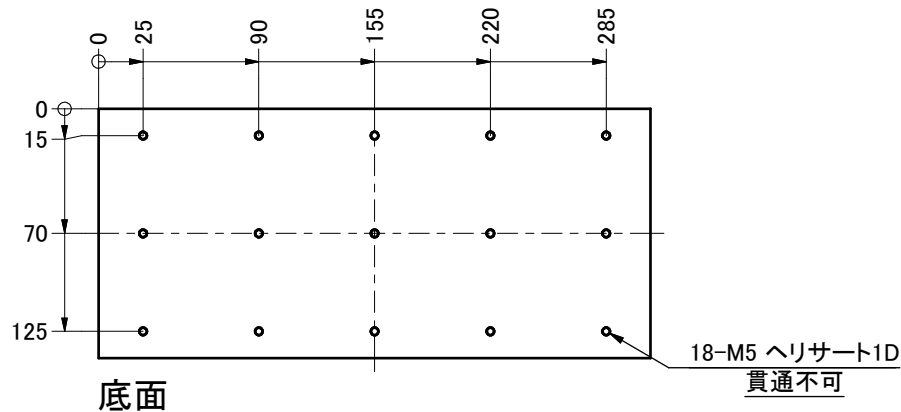
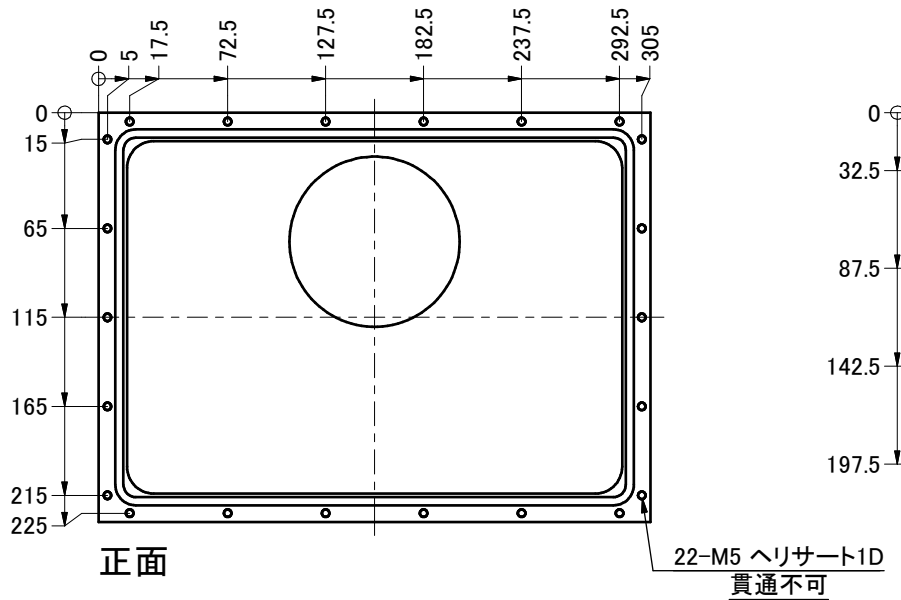
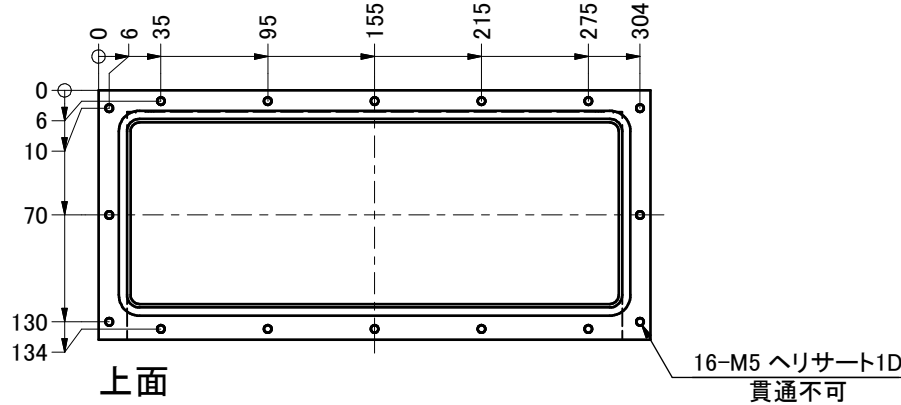
壁の厚さ

C-C断面図

底面

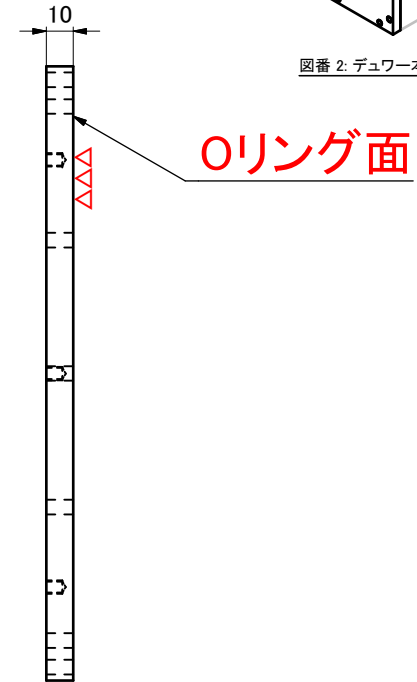
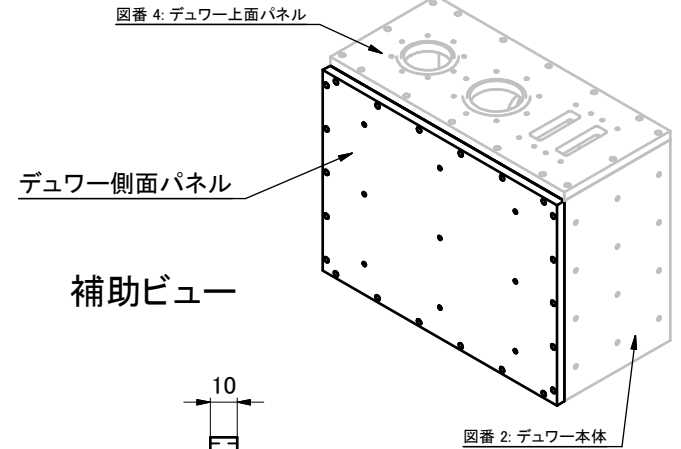
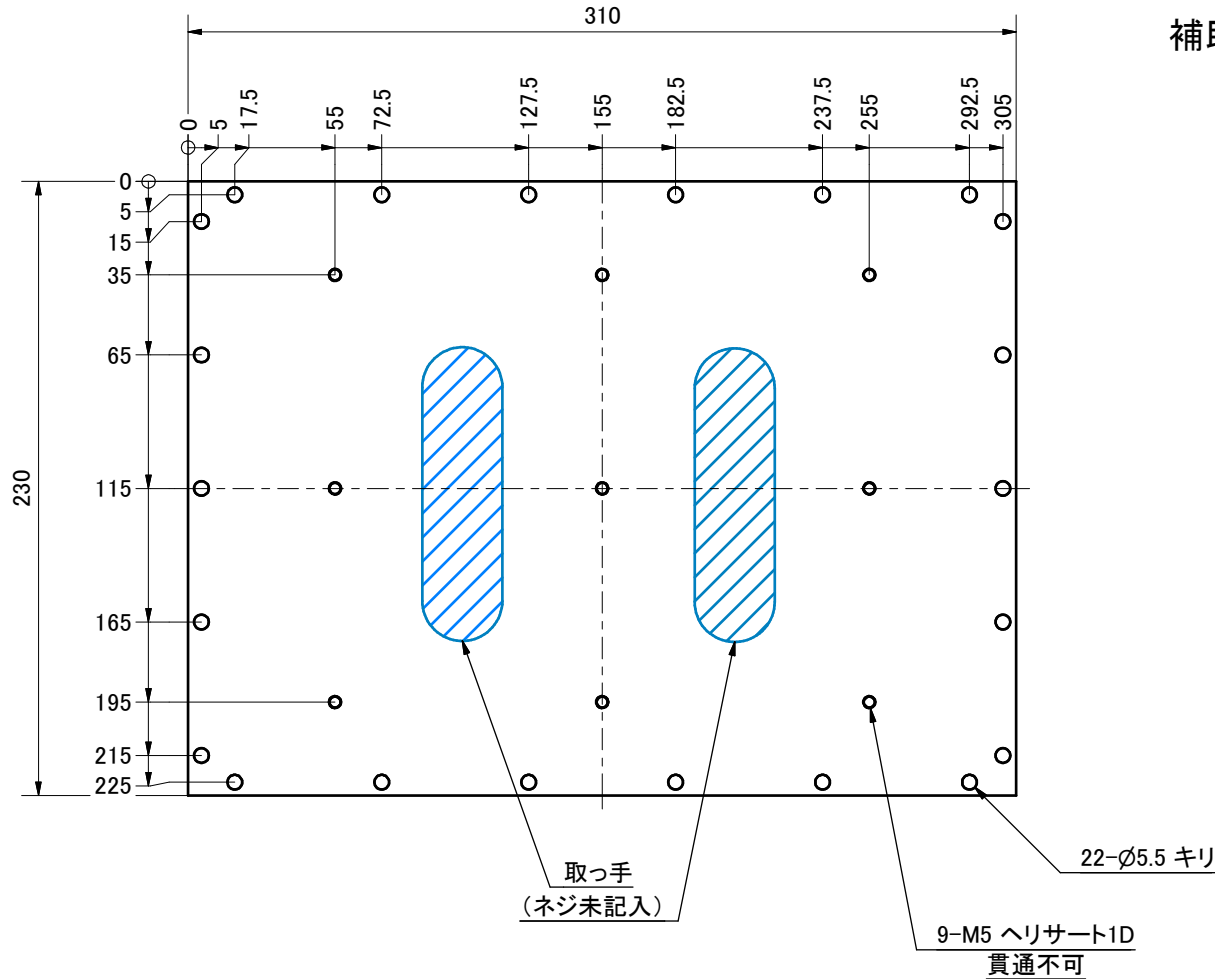
図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
2	デュワー本体	1 / 2	設計者	スン カンロウ	2012/01/19	パーツ ファイル名: デュワー本体.ipt
		尺度	作成者	スン カンロウ	2012/01/19	図面 ファイル名: デュワー本体(1/2)外寸.idw
プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機		1:3.5	確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\Wakaha\Documents\高橋22GHzデュワー
材料 A5052		数量 1	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室			

*デュワー本体(2/2) ネジ寸法



図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
2	デュワー本体	2 / 2	設計者	スシ カンロウ	2012/01/19	パーツ ファイル名: デュワー本体.ipt
		尺度	作成者	スシ カンロウ	2012/01/19	図面 ファイル名: デュワー本体(2/2)ネジ寸法.i
		確認者	小川 英夫			図面 ファイルパス: C:\Users\shakahi\Documents\32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機\最終図面Vデ
	プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機	数量	1	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室		
	材料 A5052					

*デュワー側面パネル

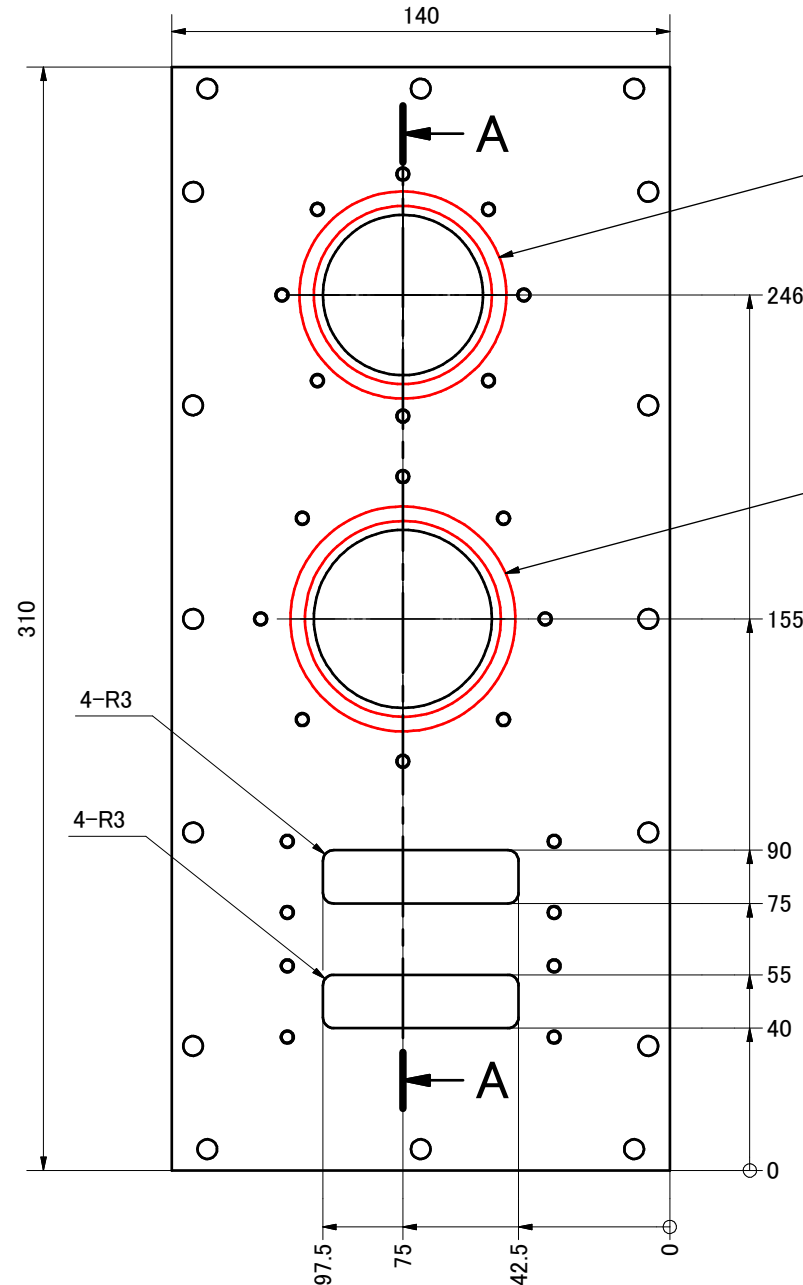


t=10mm

図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
3	デュワー側面パネル	1 / 1	設計者	シン カンロウ	2011/12/19	パーツ ファイル名: デュワー側面パネル.dwg
プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機		尺度	作成者	シン カンロウ	2011/12/19	図面 ファイル名: デュワー側面パネル.dwg
材料		数量	確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\shinaka\Documents\32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機\最終図面Vデ
A5052		1	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室			

* デュワー上面パネル(1/2): 外寸・Oリングを記載

A-A 部断面図(1 / 1.5)



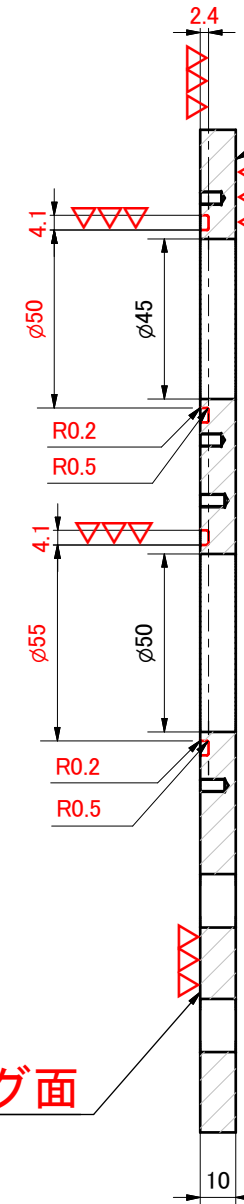
Oリング用の溝

* 使用するOリング: G50
(CO0205)
W=3.1 ± 0.1
do=49.4
H=2.4
G=4.1

Oリング用の溝

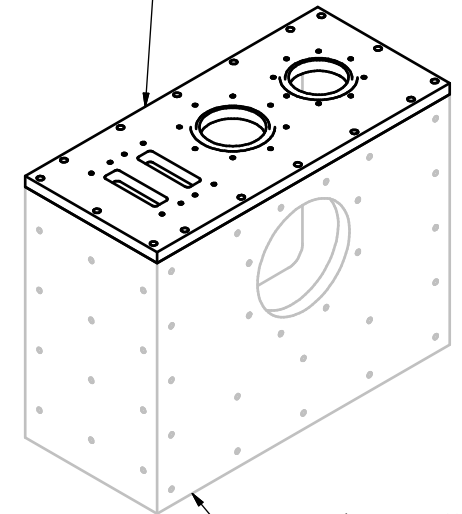
* 使用するOリング: G55
(CO0206)
W=3.1 ± 0.1
do=54.4
H=2.4
G=4.1

Oリング面



Oリング面

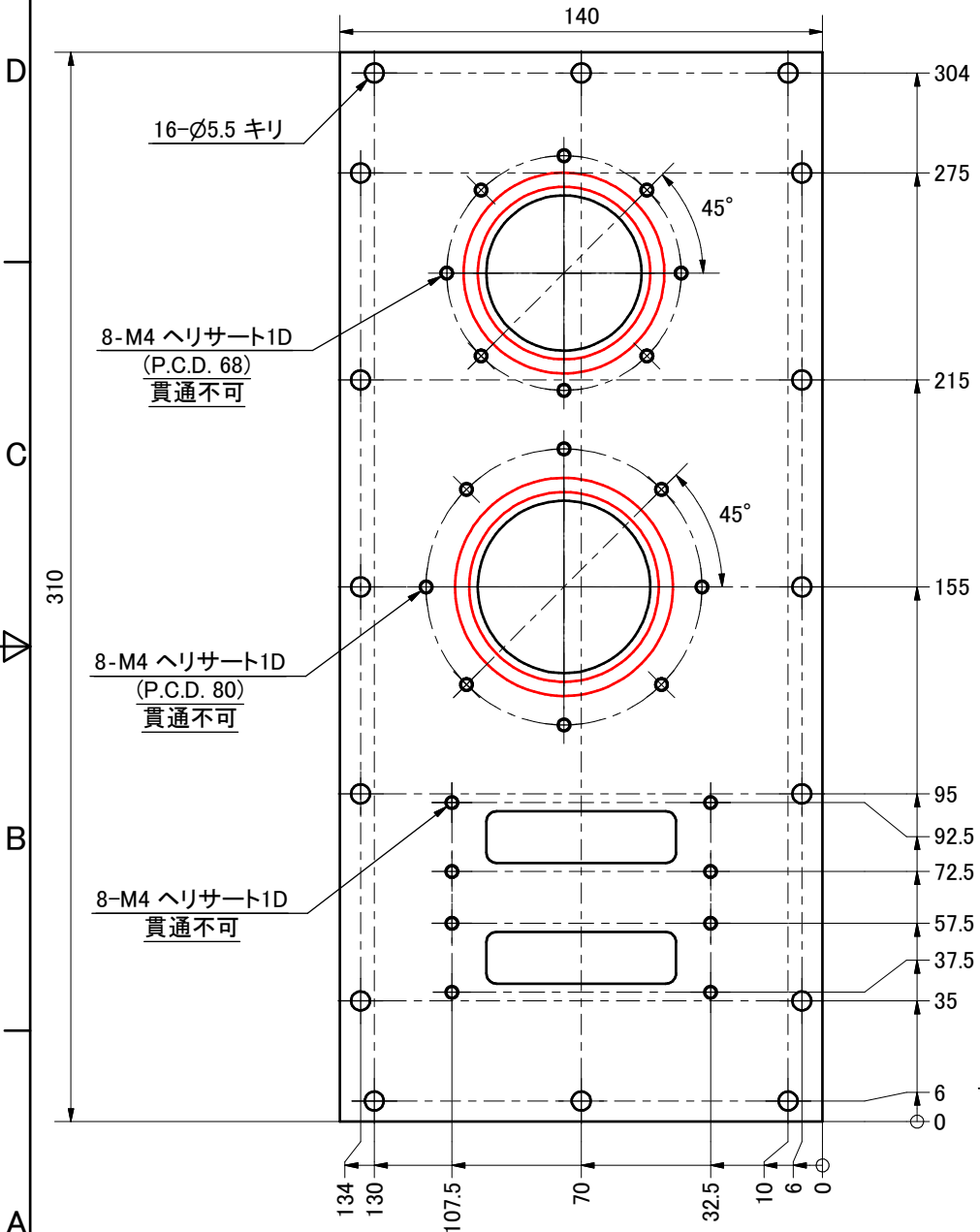
図番 4: デュワー上面パネル



補助ビュー

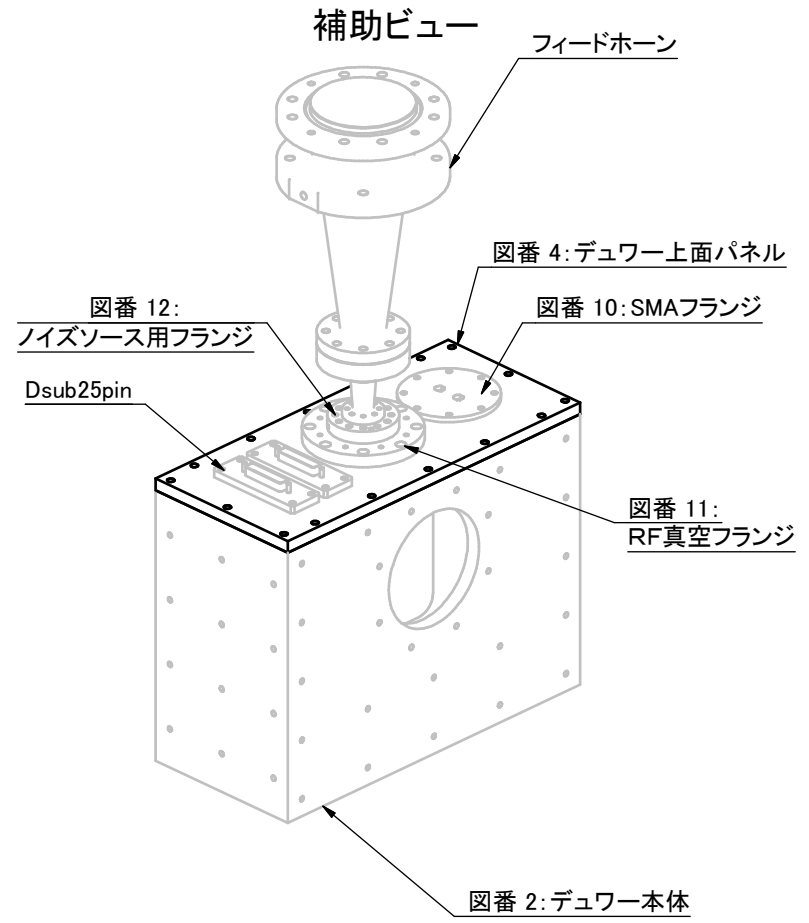
図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
4	デュワー上面パネル	1 / 2	設計者	森 智彦	2011/12/19	パーツ ファイル名: デュワー上面パネル.dwg
		尺度	作成者	森 智彦	2011/12/19	図面 ファイル名: デュワー上面パネル.dwg
		1:1.5	確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\Wakabayashi\Documents\Y220Hz帯冷却 受渡機組立受渡機部品図\デュワー上面パネル.dwg
プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機						
材料		数量	茨城大学 理学部 理学科			
A5052		1	宇宙観測研究室			

*デュワー上面パネル(2/2):ねじ位置を記載



リング面

リング面



図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
4	デュワー上面パネル	2/2	設計者	森 智彦	2011/12/19	パーツ ファイル名: デュワー上面パネル.igw
		尺度	作成者	森 智彦	2011/12/19	図面 ファイル名: デュワー上面パネル(idw)
		1:1.5	確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\kajikaw\Desktop\22GHz帯冷却 受機組立装置組立部品\デュワー上面パネル(ネジ).idw
プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機						
材料 A5052		数量 1	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室			

* 80Kシールドシリンダー

図番 6: 80Kシールド本体

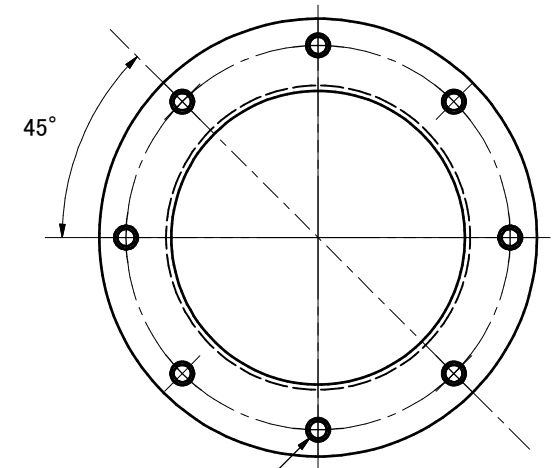
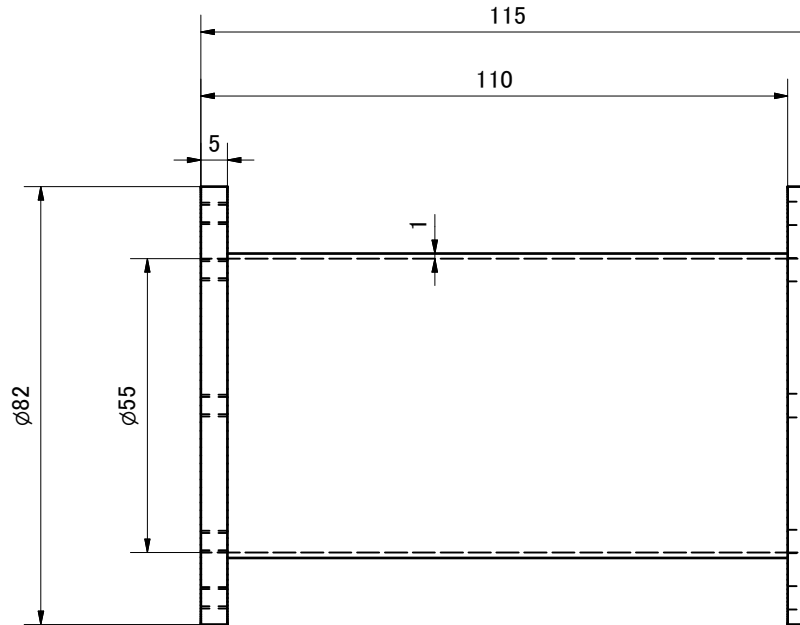
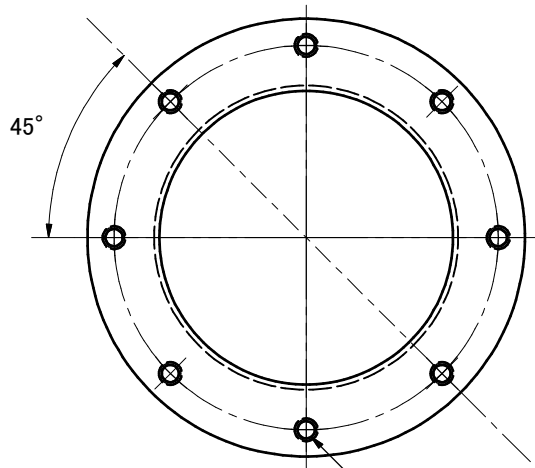
補助ビュー

図番 5: 80Kシールドシリンダー

GM冷凍機 RS273

80Kシールド本体 側

GM冷凍機 側

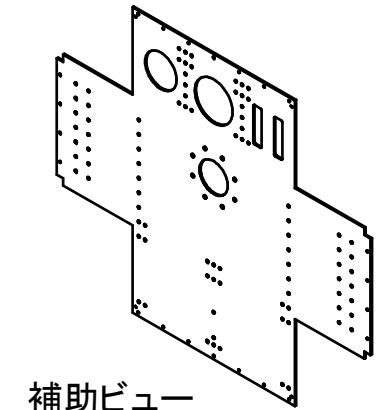
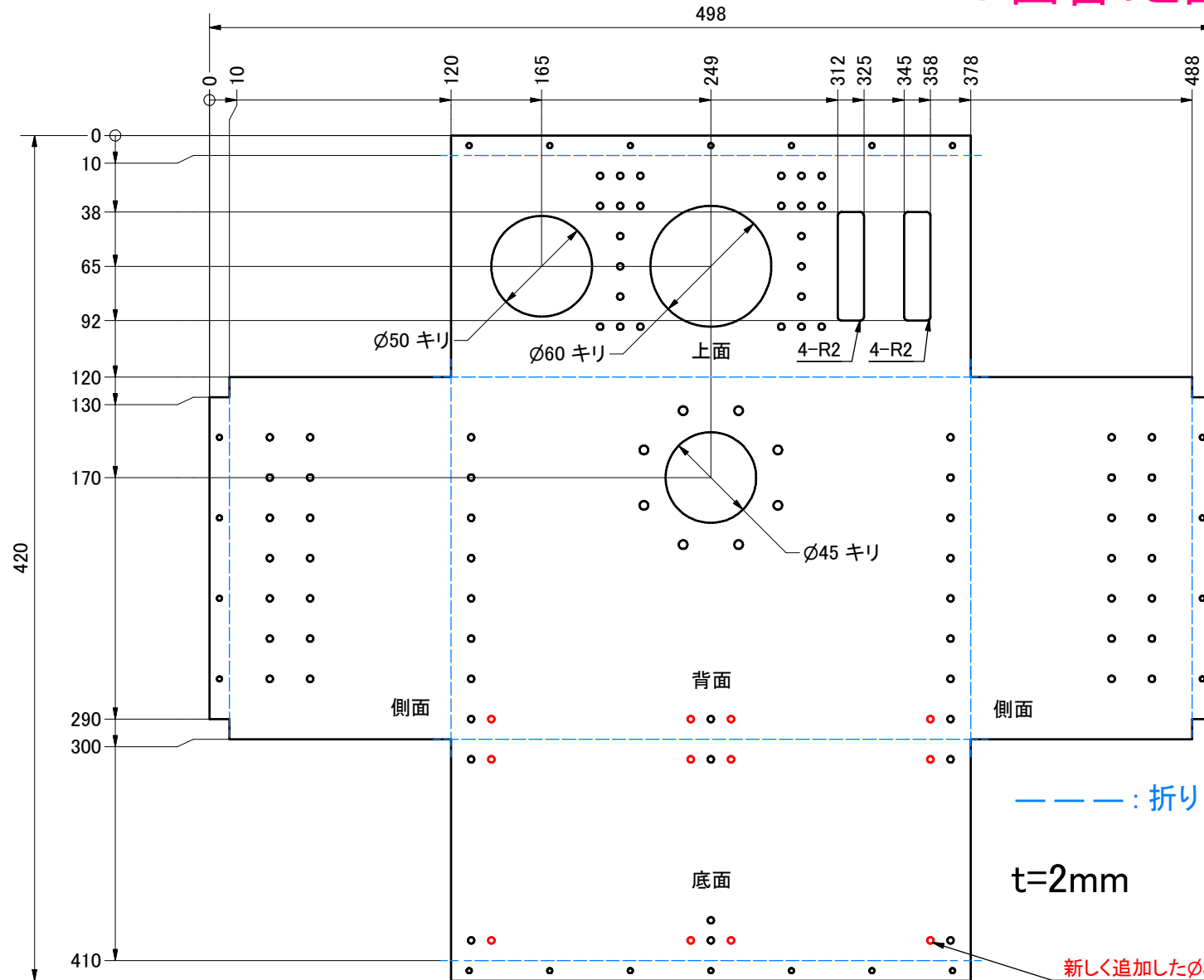


8-M4 ヘリサート1D 貫通
(P.C.D. 72)

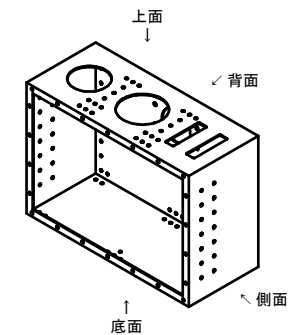
8-ø4.4 キリ
(P.C.D. 72)

図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
5	80Kシールドシリンダー	1 / 1	設計者	森 智彦	2011/12/19	パーツ ファイル名: 80Kシールドシリンダー
プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機		1:1	作成者	森 智彦	2011/12/19	図面 ファイル名: 80Kシールドシリンダー
材料 無酸素銅		数量 1	確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\kajikait\Documents\22GHz帯冷却 受信機搭載望遠鏡部品\80Kシールドシリンダー
		茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室				

！図番6と図番8を一体化したもの



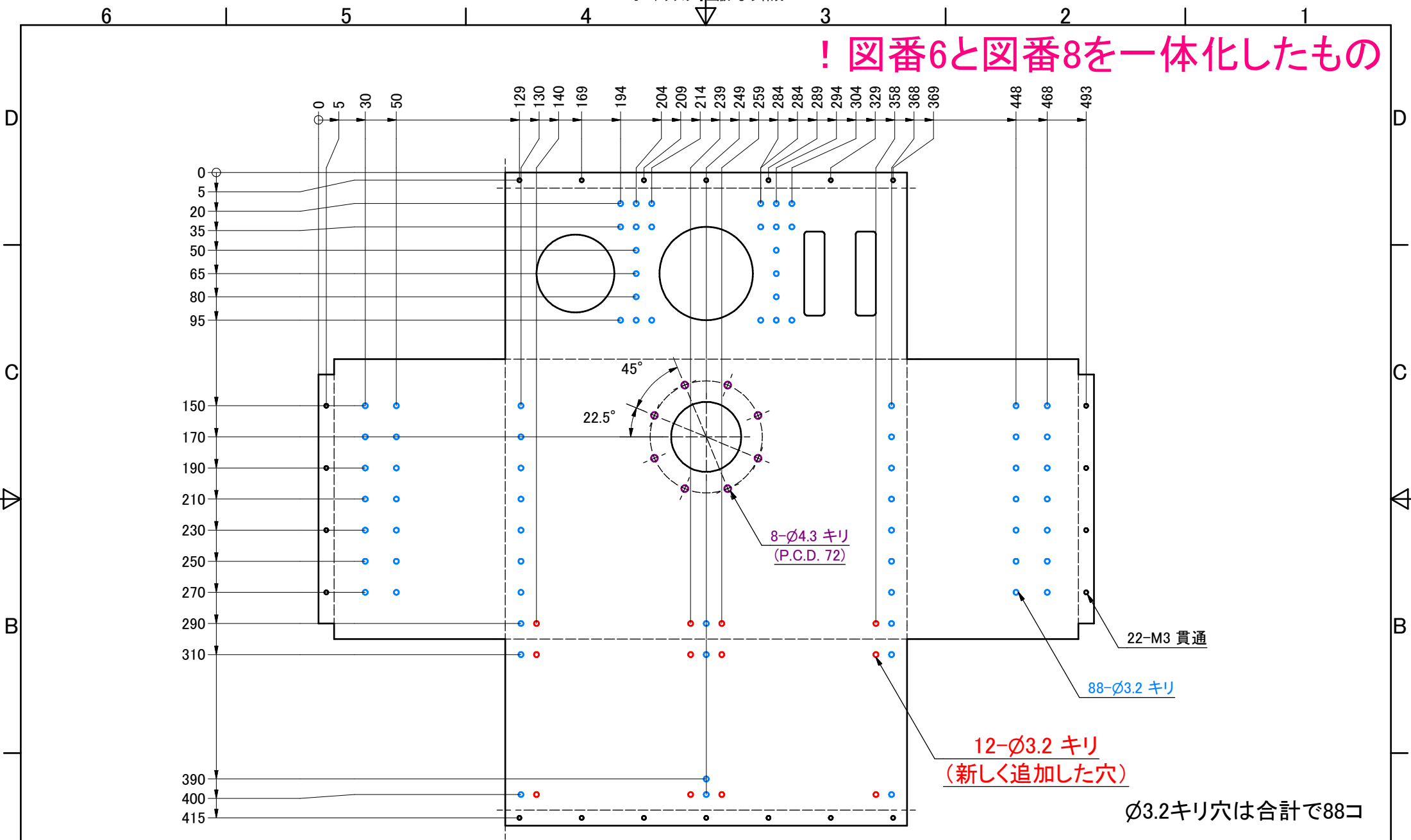
完成予想図



*80Kシールド(1/2)外寸

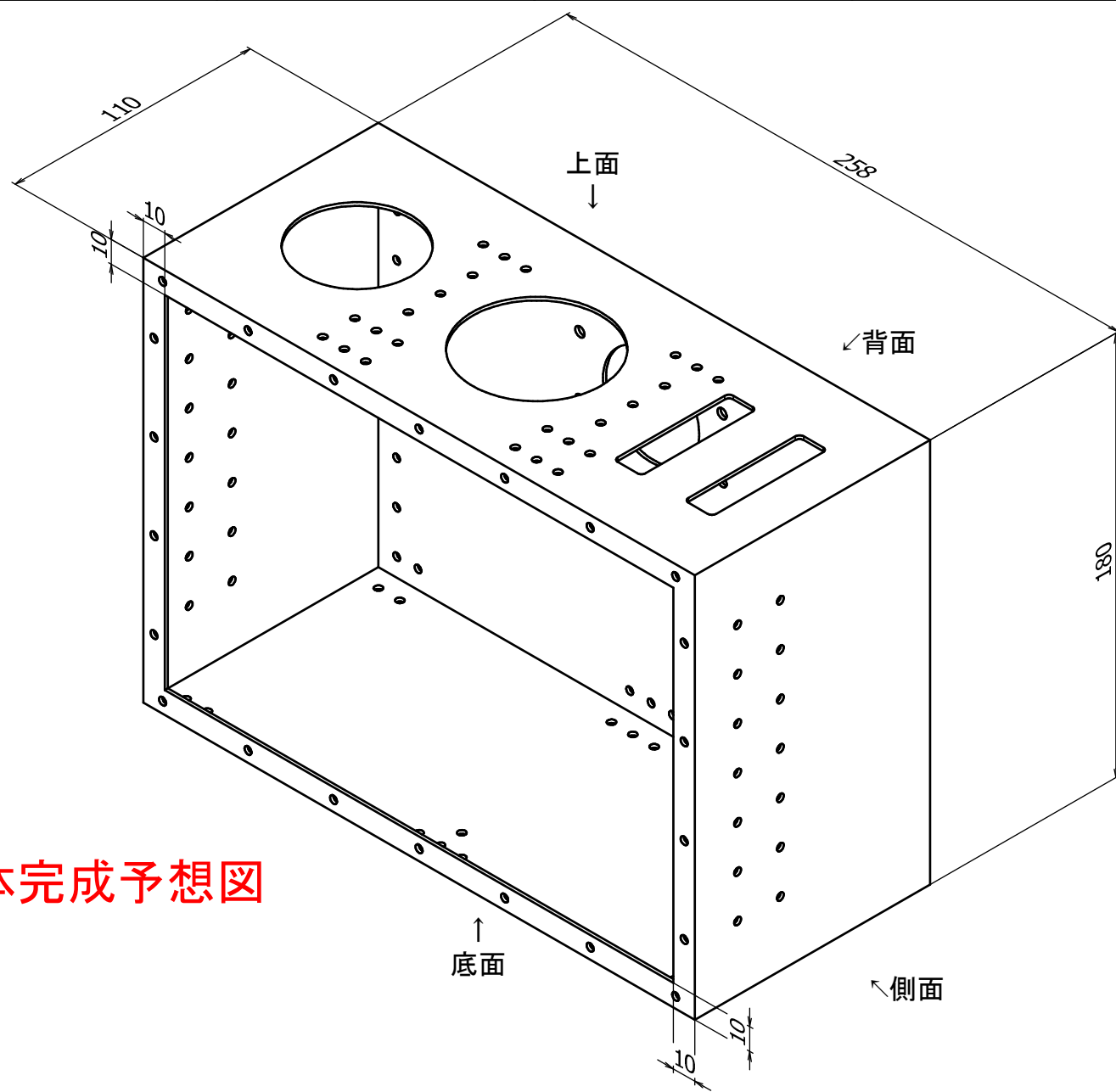
図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
6	80Kシールド本体	1/2	設計者	森・スン	2012/01/26	パーツ ファイル名: 80Kシールド本体.ipt
		尺度	作成者	森・スン	2012/01/26	図面 ファイル名: 80Kシールド本体ver2(1/2).dwg
		1:2.2	確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\User\Wakashi\VD\Desktop\X32m観受信機開発\80Kシールド\80Kシールド本体.ipt
	プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機	数量	1	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室		
	材料 A1050					

！図番6と図番8を一体化したもの



*80Kシールド(2／2)穴位置・寸法

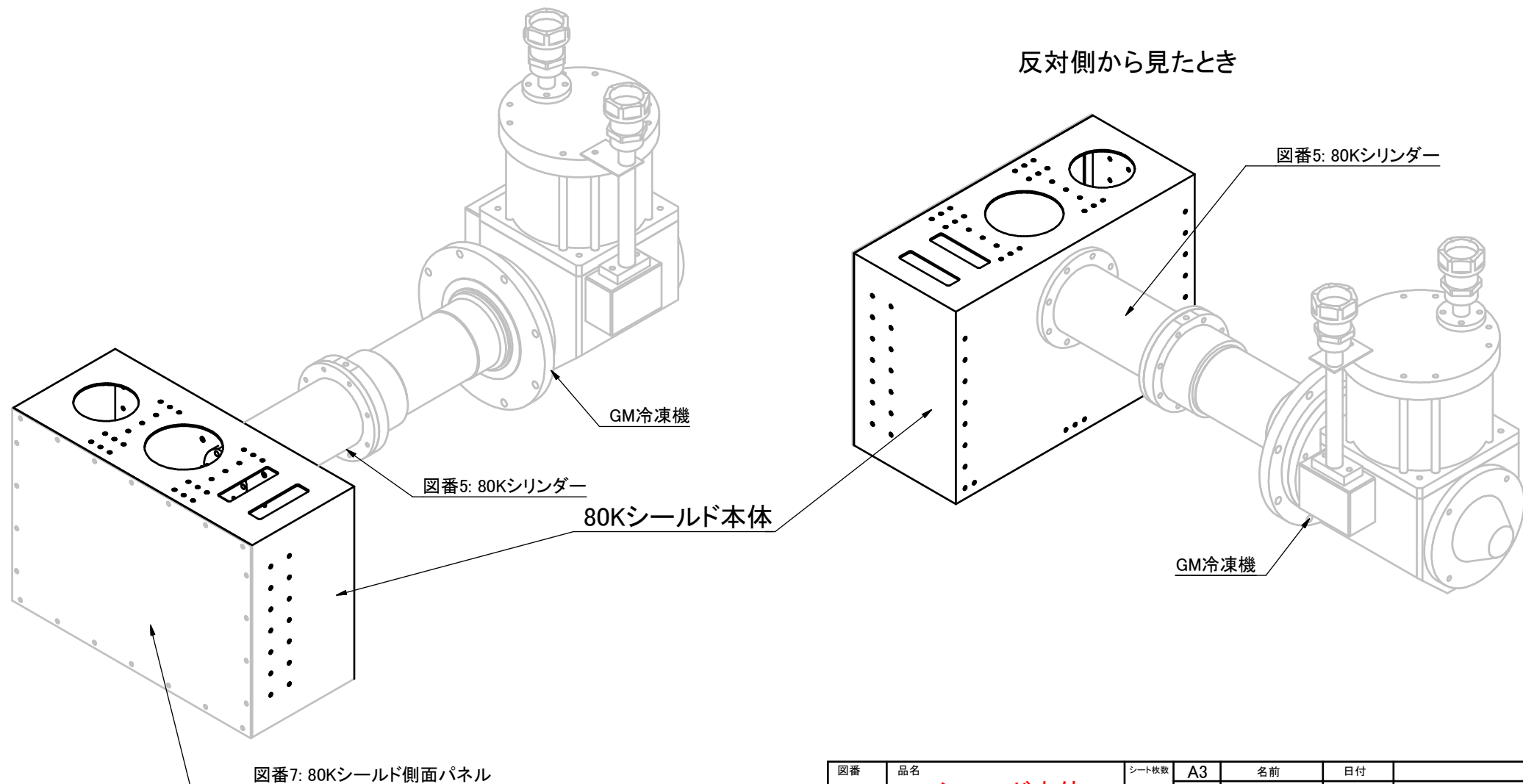
図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
6	80Kシールド本体	2/2	設計者	森・スン	2012/01/26	パーツ ファイル名: 80Kシールド本体(一
		尺度	作成者	森・スン	2012/01/26	図面 ファイル名: 80Kシールド本体ver2(2
		1:2.2	確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\User\Hakahi\K\Desktop\32m観受信機開発\80K
プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機		数量	茨城大学 理学部 理学科			
材料 A1050		1	宇宙観測研究室			



80Kシールド本体完成予想図

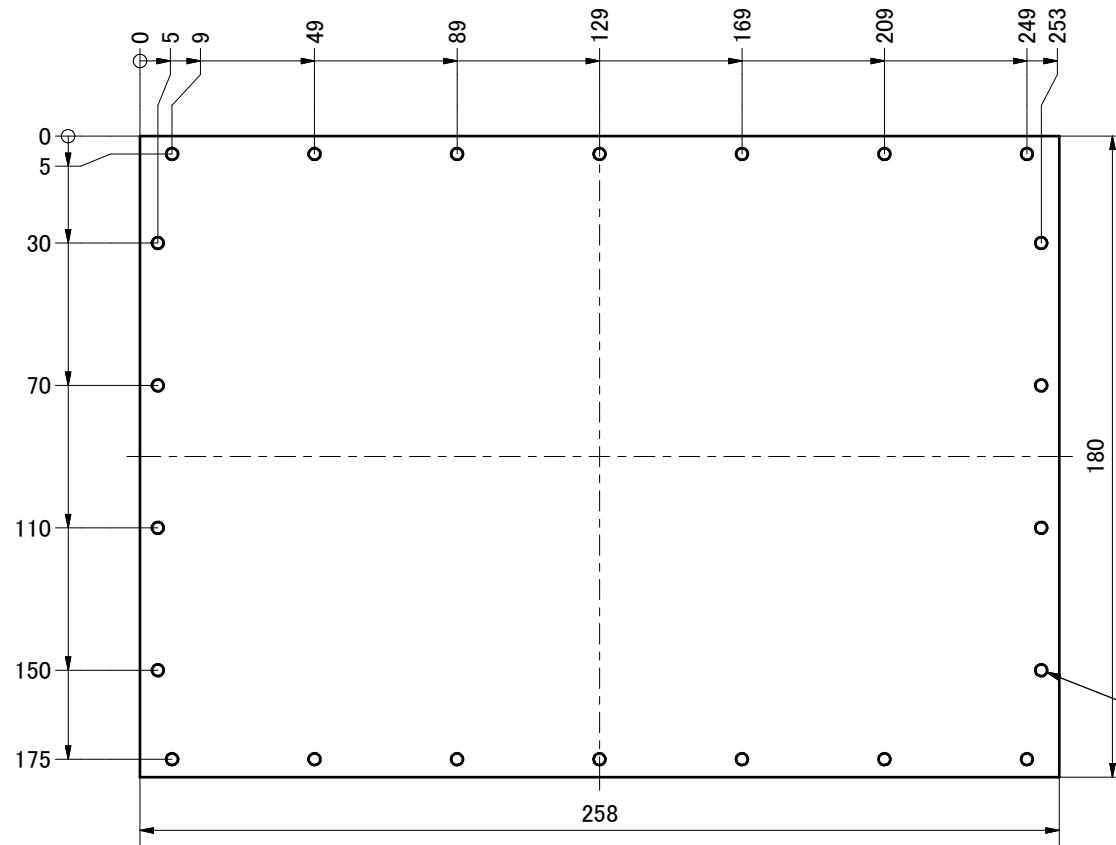
図番	品名 80Kシールド本体 完成予想図	シート枚数	A3	名前	日付	
		1/ 2	設計者	森・スン	2012/01/26	パーツ ファイル名: 80Kシールド本体.ipt
		尺度	作成者	森・スン	2012/01/26	図面 ファイル名: 80Kシールド本体完成
			確認者			図面ファイルパス: C:\Users\Fukahi\Desktop\K32m\観受機機開発\80K2
プロジェクト名:						
材料		数量	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室			

80Kシールド本体補助ビュー



図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付		
			1 / 1	設計者	森・スン	2012/01/26	パーツ ファイル名: 80Kシールドシリンダー
プロジェクト名:			尺度	作成者	森・スン	2012/01/26	図面 ファイル名: 80Kシールド本体補助
				確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\Wakahai\Desktop\K32-線受情報開示\80K
材料			数量	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室			
			1				

*80Kシールド側面パネル



80Kシールド側面パネル

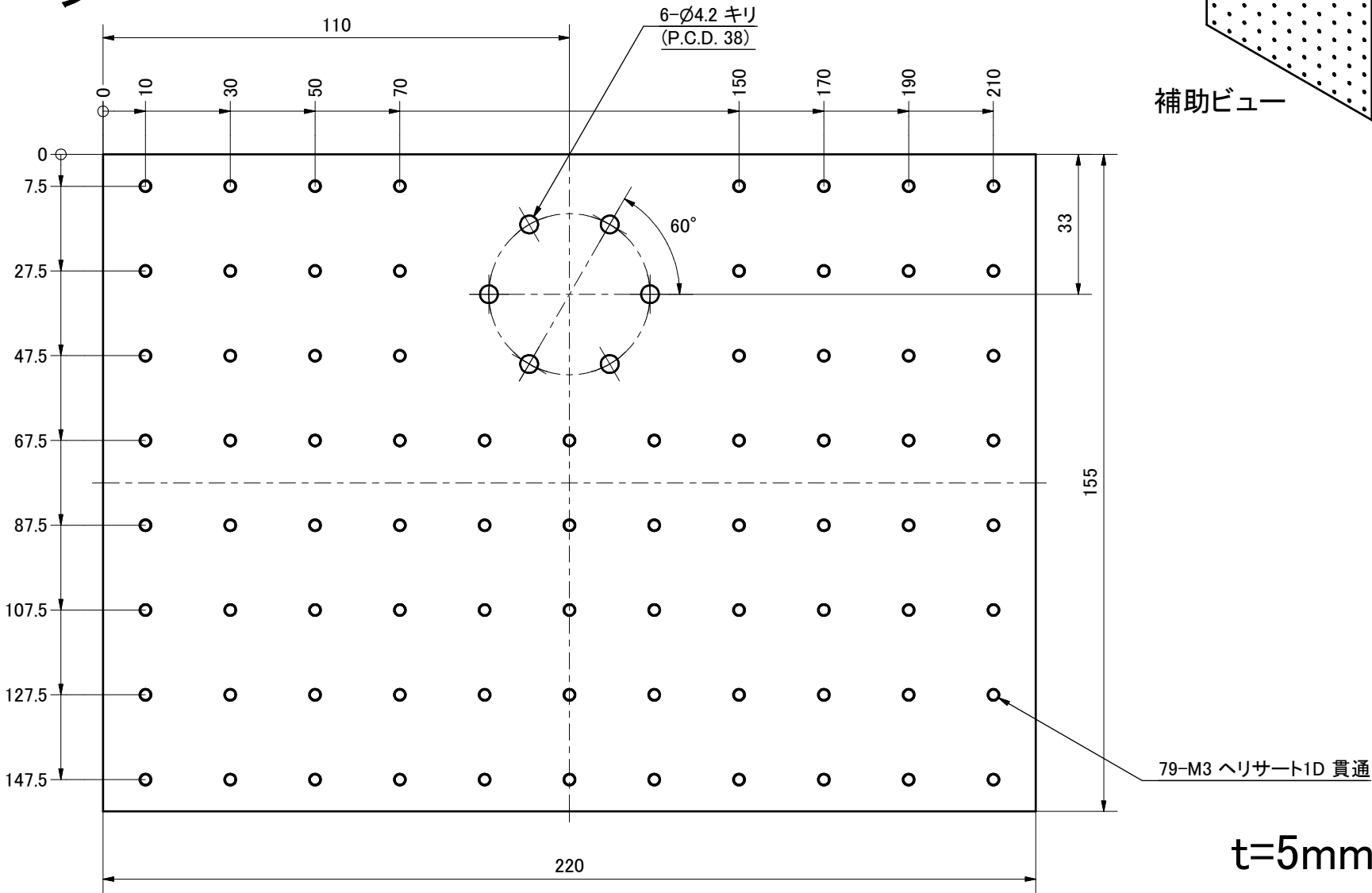
補助ビュー

図番6: 80Kシールド本体

$t=1.5\text{mm}$

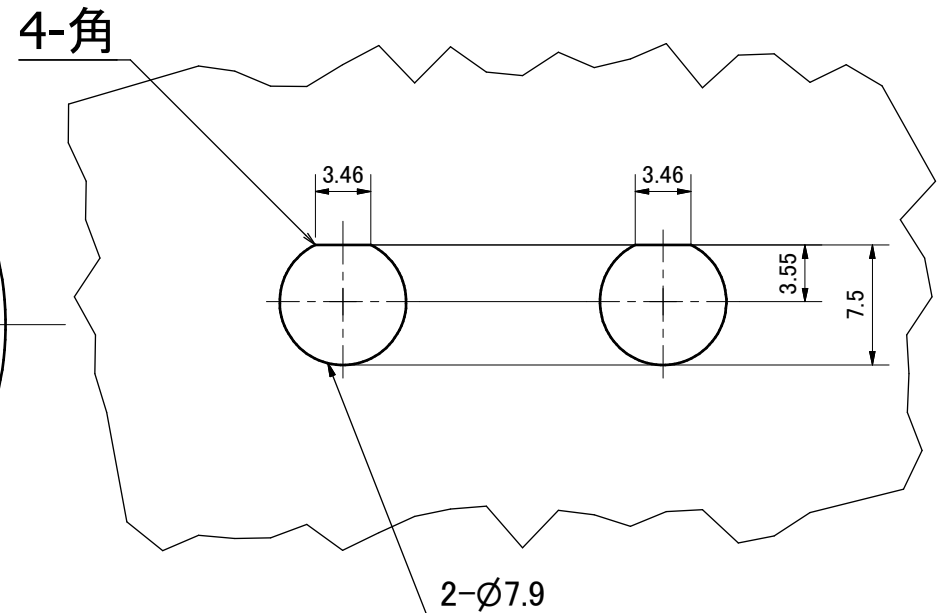
図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
7	80Kシールド側面パネル	1 / 1	設計者	森・スン	2012/01/16	パーツ ファイル名: 80Kシールド側面パネル.dwg
		1:1.8	作成者	森・スン	2012/01/16	図面 ファイル名: 80Kシールド側面パネル.dwg
			確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\shakahi\Documents\shakahi\22GHz\デューワー\最終図面\80K
プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機						
材料 A1050		数量 1	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室			

*20Kステージ



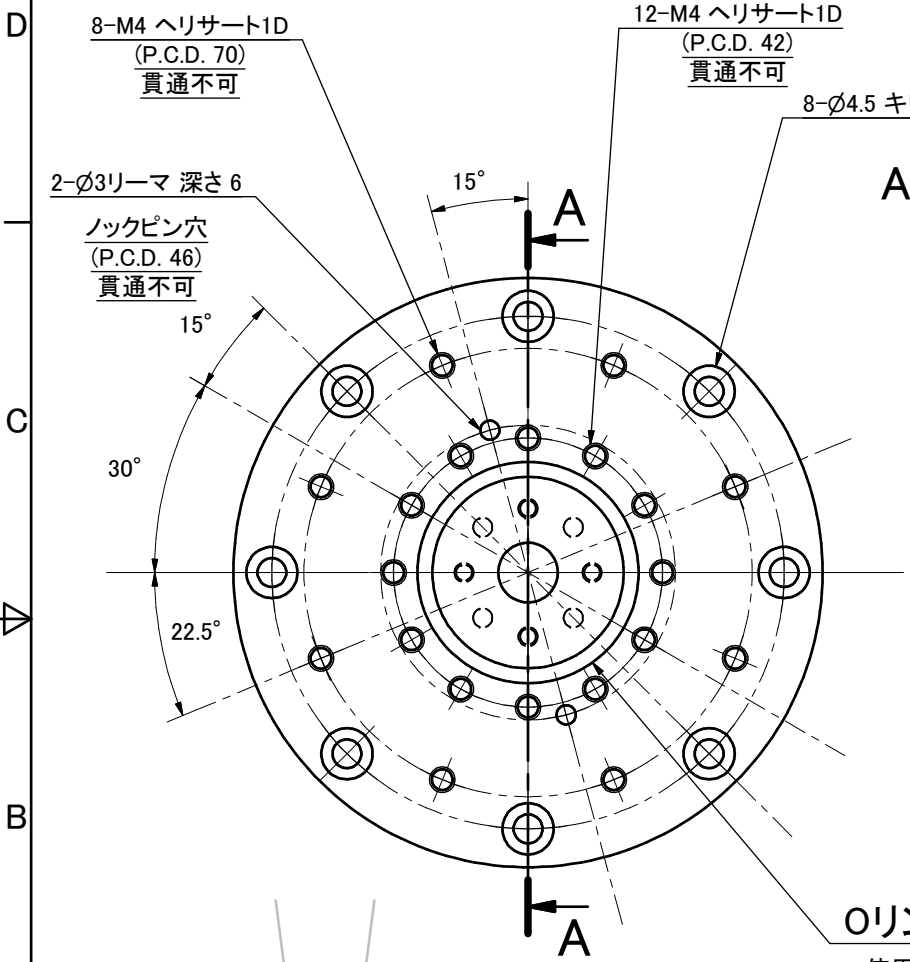
図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
9	20Kステージ	1 / 1	設計者	スン カンロウ	2011/12/19	パーツ ファイル名: 20Kステージ.ipt
		1:1	作成者	スン カンロウ	2011/12/19	図面 ファイル名: 20ステージ.idw
			確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\Hakahi\Documents\高精度22GHzデュー
		数量	1	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室		

A (3 : 1)
SMA挿入部分 拡大図

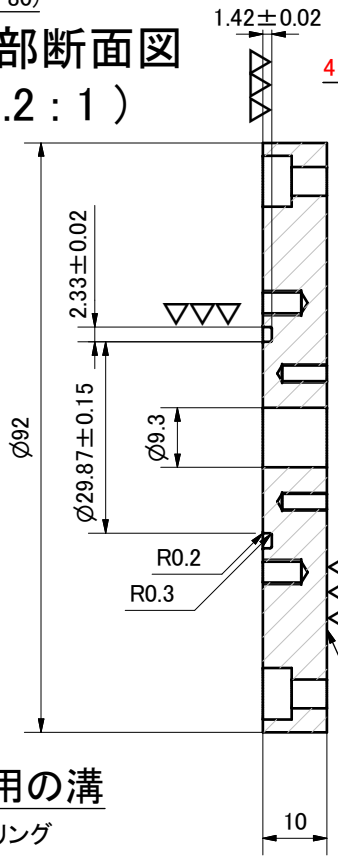


図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
10	SMAフランチ	1 / 1	設計者	森 智彦	2011/12/19	パーツ ファイル名: SMAフランチ.jpt
		尺度	作成者	森 智彦	2012/01/16	図面 ファイル名: SMAフランチ.idw
プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機		1:1.5	確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\Wakuhito\Documents\22GHz帯冷却 受信機設計書\図面\10.SMAフランチ.idw
材料 A5052		数量 1	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室			

* RF真空フランジ



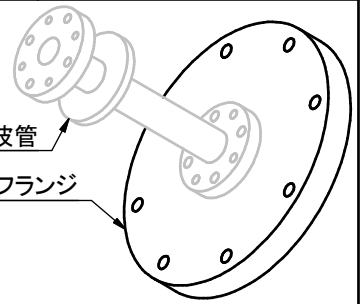
A-A 部断面図
(1.2 : 1)



Oリング用の溝

* 使用するOリング
AS568-025
(CO3636)
W=1.78±0.07
do=29.87±0.15
H=1.42
G=2.33

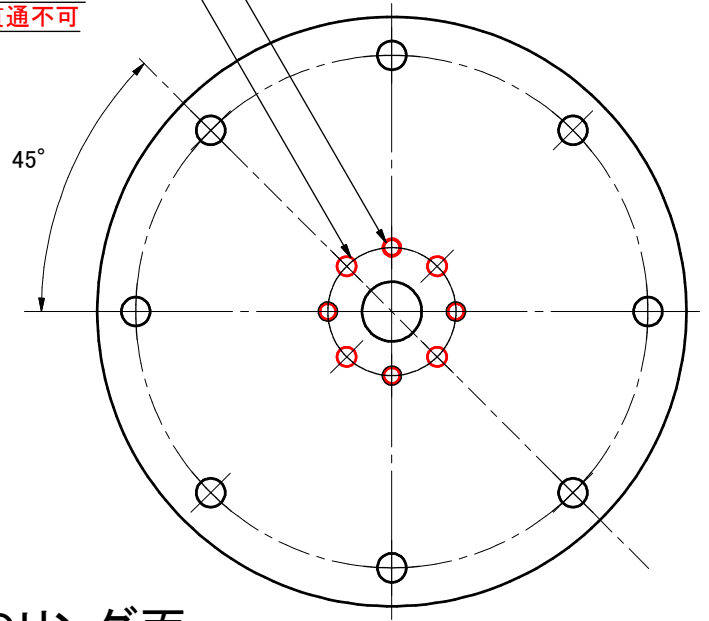
補助ビュー



図番 11: RF真空フランジ

4-M3 ヘリサート1D
(P.C.D. 20)
貫通不可

4-ø3 深さ 6、ノックピン穴
(P.C.D. 20)
貫通不可

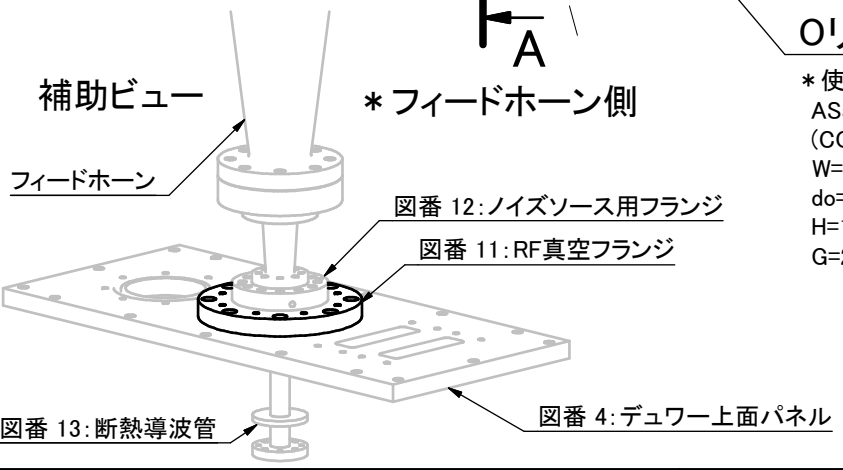


Oリング面

* デュワー側

補助ビュー

* フィードホーン側



図番 12: ノイズソース用フランジ

図番 11: RF真空フランジ

図番 4: デュワー上面パネル

図番 13: 断熱導波管

* ø9.3の穴は、両側面取りなし

図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
11	RF真空フランジ	1 / 1	設計者	森 智彦	2012/01/26	パート ファイル名: RF真空フランジ.ipt
		1.2 : 1	作成者	森 智彦	2012/02/01	図面 ファイル名: RF真空フランジ201202
			確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\kajikawa\Documents\22GHz帯冷却 受信機用部品設計\RF真空フランジ20120225断熱
プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機						
材料 A5052		数量 1	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室			

* ノイズソース用フランジ

2- $\phi 3$ リーマ ノックピン穴
(P.C.D. 46)
貫通

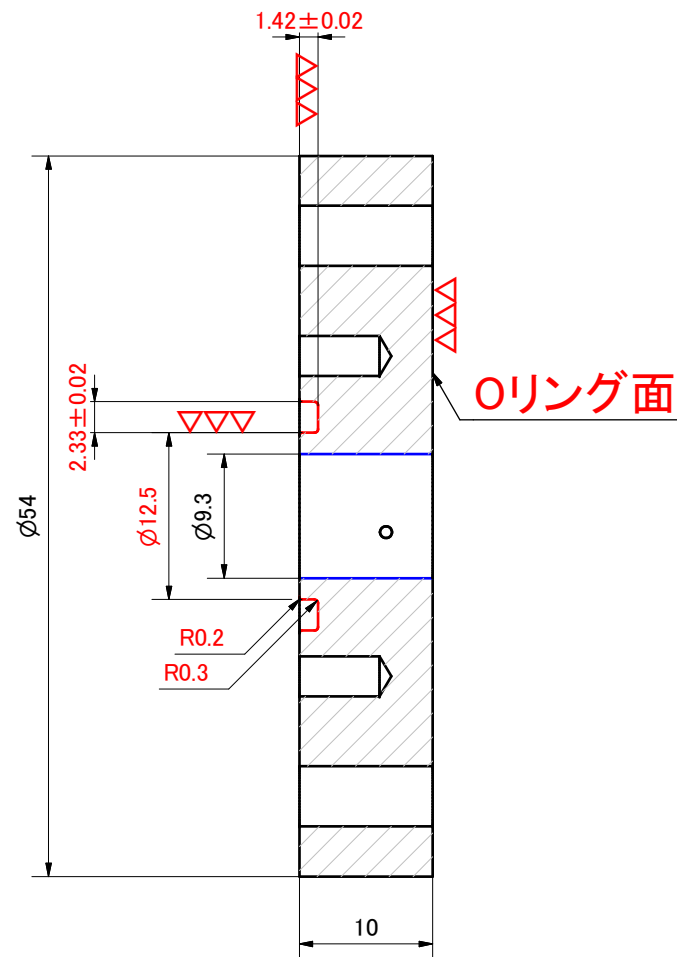
12-4.5 キリ (P.C.D. 42)

4- $\phi 3.2$ リーマ 深さ6 ノックピン穴

(P.C.D. 24)
貫通不可

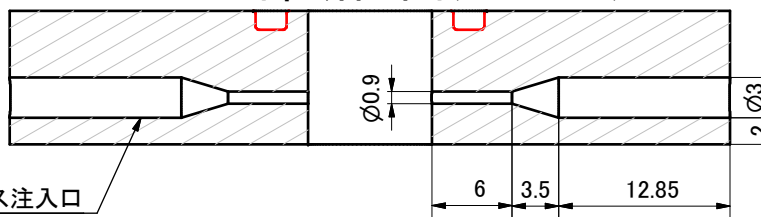
4-M3 ヘリサート1.5D
(P.C.D. 24)
貫通不可

A-A 部断面図(2.5 : 1)



* 使用するOリング
AS568-014
(CO1119)
do=12.42±0.12
W=1.78±0.07
H=1.42
G=2.33±0.02

B-B 部断面図(2.5 : 1)



* $\phi 9.3$ の穴は、両側面取りなし

補助ビュー

フィードホーン

図番 12: ノイズソース用フランジ

図番 11: RF真空フランジ

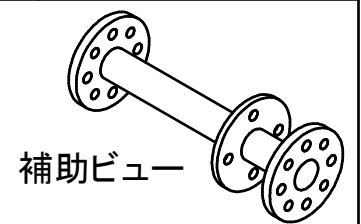
図番 13: 断熱導波管

図番 4: デュワー上面パネル

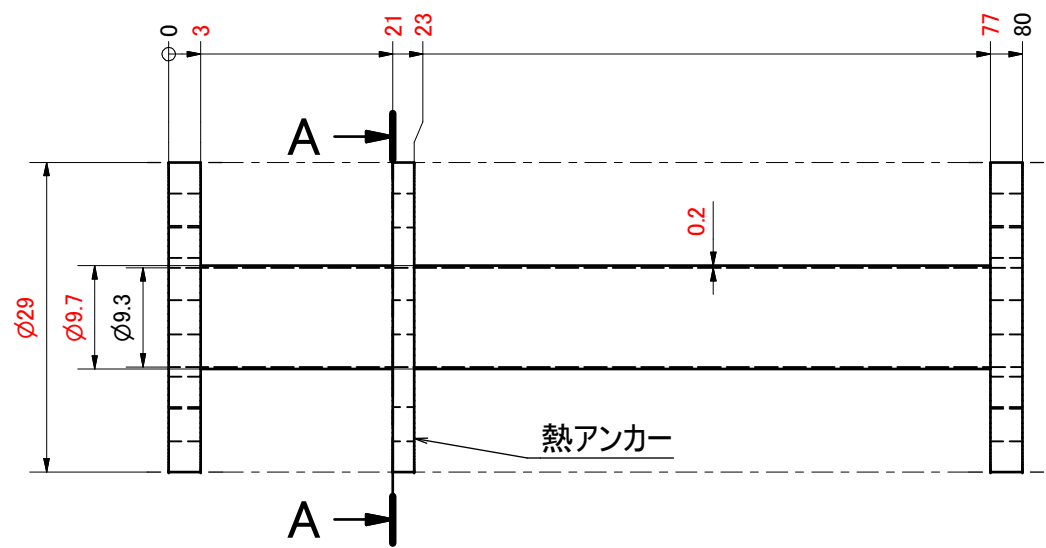
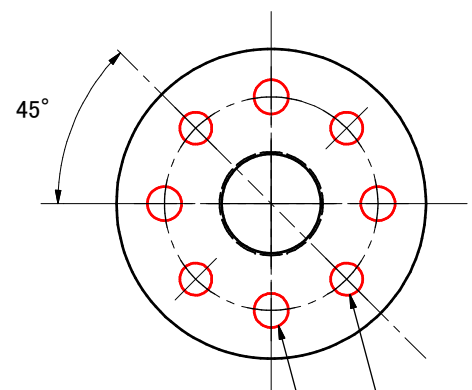
ノイズソース注入口

図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
11	ノイズソース用フランジ	1 / 1	設計者	森 智彦	2012/01/16	パート: ノイズソース用フランジ
		尺度	作成者	森 智彦	2012/01/16	図名: ノイズソース用フランジ
		2.5 : 1	確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\kajikawa\Documents\22GHz帯冷却受信機\図面\図番11_ノイズソース用フランジ.dwg
材料	A5052	数量	1	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室		

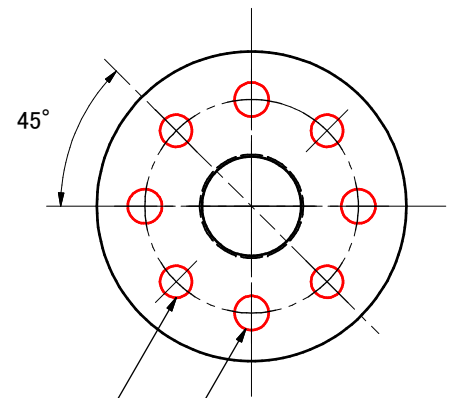
* 断熱導波管



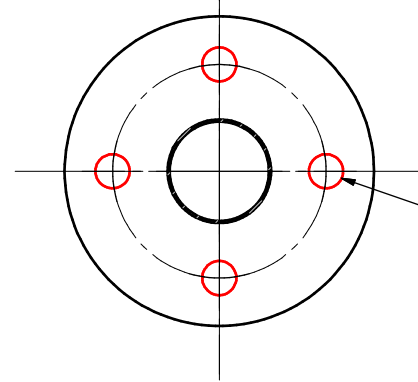
* 円角変換側



* RF真空フランジ側



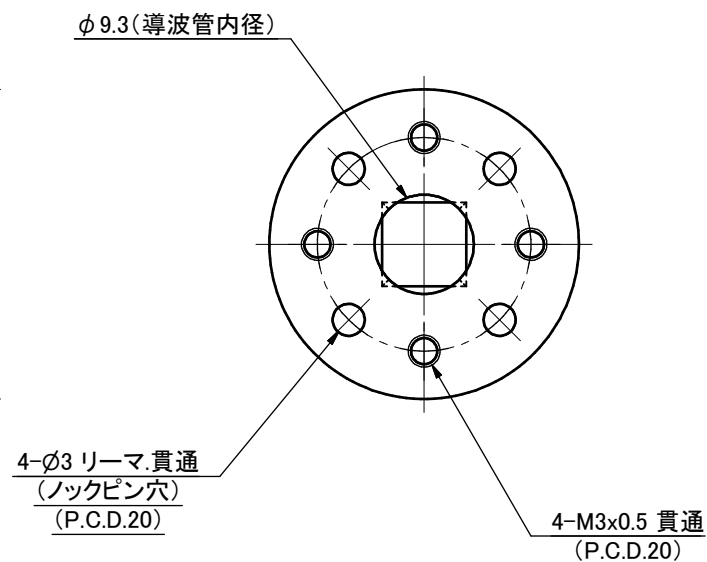
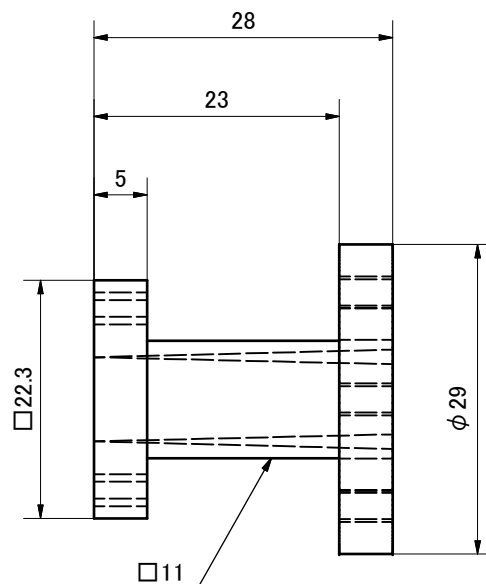
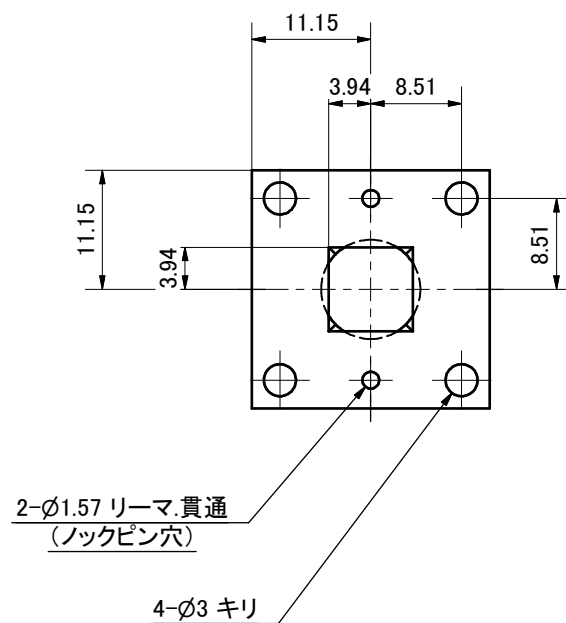
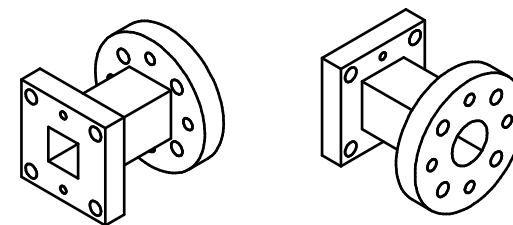
A-A (2:1) 熱アンカー部



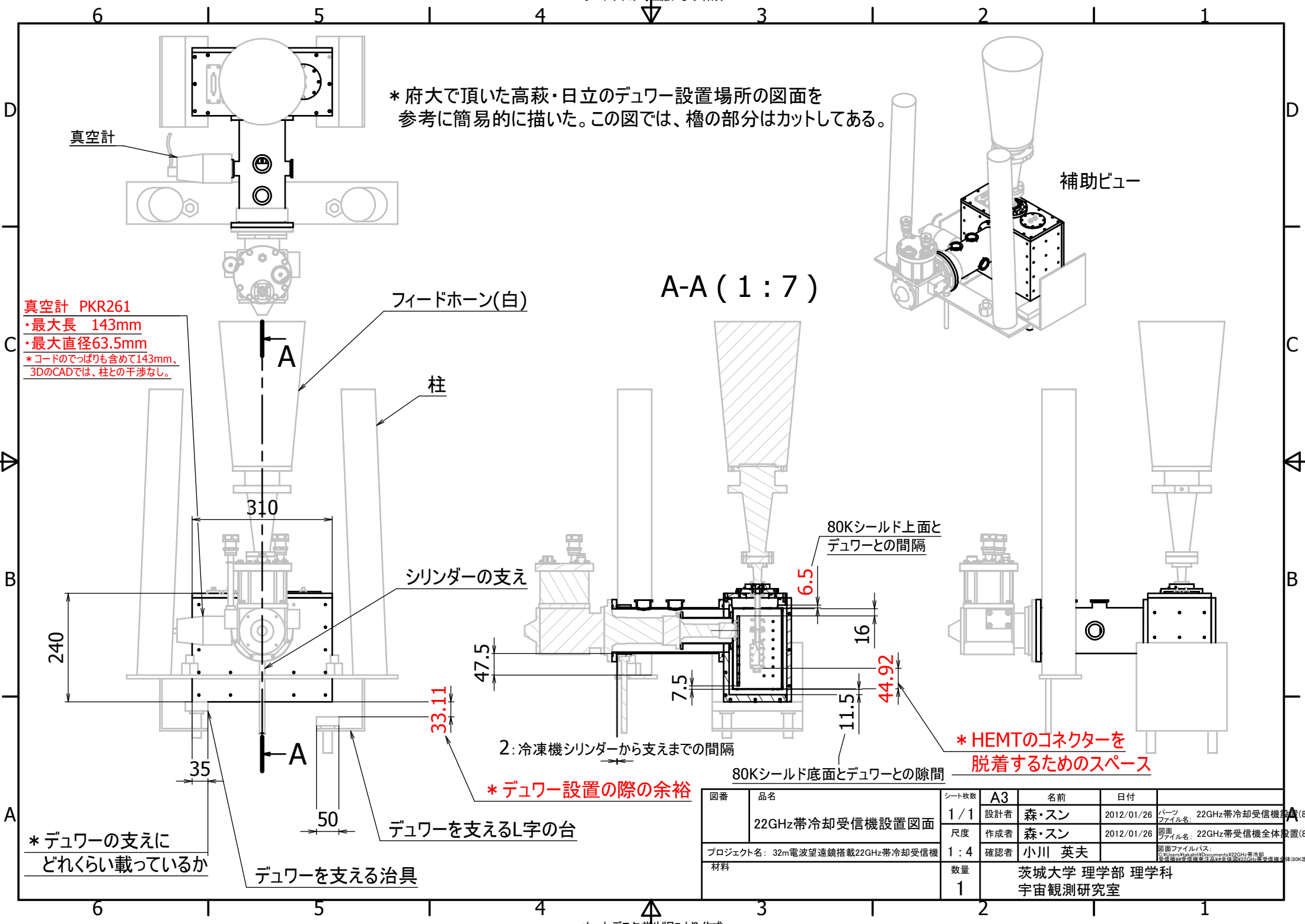
* φ9.3の穴は、両側面取りなし

図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
13	断熱導波管	1 / 1	設計者	森 智彦	2012/02/01	パーツ ファイル名: 断熱導波管.ipt
		尺度	作成者	森 智彦	2012/02/01	図面 ファイル名: 断熱導波管.idw
		2 : 1	確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\wakaki\Documents\22GHz帯冷却 受信機部実装部品Y断熱導波管.idw
プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz冷却受信機 材料		数量	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室			
SUS304 (内側 金メッキ)		1				

22GHz帯円角変換図



図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
14	茨城32m鏡22GHz帯 円角変換	1 / 1	設計者	尾上裕隆	2012/01/26	パート ファイル名: 22GHz_pol_CAD_mode
		2 / 1	作成者	尾上裕隆	2012/01/26	図面 ファイル名: 22GHz_pol_CAD_mode
プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機			確認者	小川英夫		画面 ファイルパス: C:\Users\Kosuke\Desktop\K21-26GHz帯-ラライザ-通
材料		数量	大阪府立大学 理学部 物理科学科 宇宙物理学研究室			
A6063		2				



* 府大で頂いた高萩・日立のデュワー設置場所の図面を参考に簡易的に描いた。この図では、櫓の部分はカットしてある。

真空計 PKR261
・最大長 143mm
・最大直径63.5mm
* コードのでっぱりも含めて143mm、3DのCADでは、柱との干渉なし。

* デュワーの支えに
どれくらい載っているか

* HEMTのコネクターを
脱着するためのスペース

* デュワー設置の際の余裕

図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	備考
	22GHz帯冷却受信機設置図面	1 / 1		設計者 森・スン	2012/01/26	パーツファイル名: 22GHz帯冷却受信機全体設置(80K)
			尺度	作成者 森・スン	2012/01/26	図面ファイル名: 22GHz帯冷却受信機全体設置(80K)
	プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機	1 : 4		確認者 小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\kajikawa\Documents\22GHz帯冷却受信機全体設置(80K)改訂22
材料		数量		茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室		
		1				

茨城局 32m 電波望遠鏡搭載用 22GHz 帯冷却受信機 2 号機 図面目次

図番	名称	材料	数量
0	組図		1
1	冷凍機シリンダー	SUS304	1
2	デュワー本体	A5052	1
3	デュワー側面パネル	A5052	1
4	デュワー上面パネル (11/1 設計変更)	A5052	1
5	80K シールドシリンダー (11/1 設計変更)	無酸素銅	1
6	80K シールド本体 (*図番 6 と 8 を一体化したもの。11/1 設計変更)	A1050	1
7	80K シールド側面パネル	A1050	1
9	20K ステージ	無酸素銅	1
10	SMA フランジ (11/1 設計変更)	A5052	2
11	RF 真空フランジ	A5052	1
12	ノイズソース用フランジ (11/1 設計変更)	A5052	1
13	断熱導波管	SUS304	1
14	円角変換	A6063	1

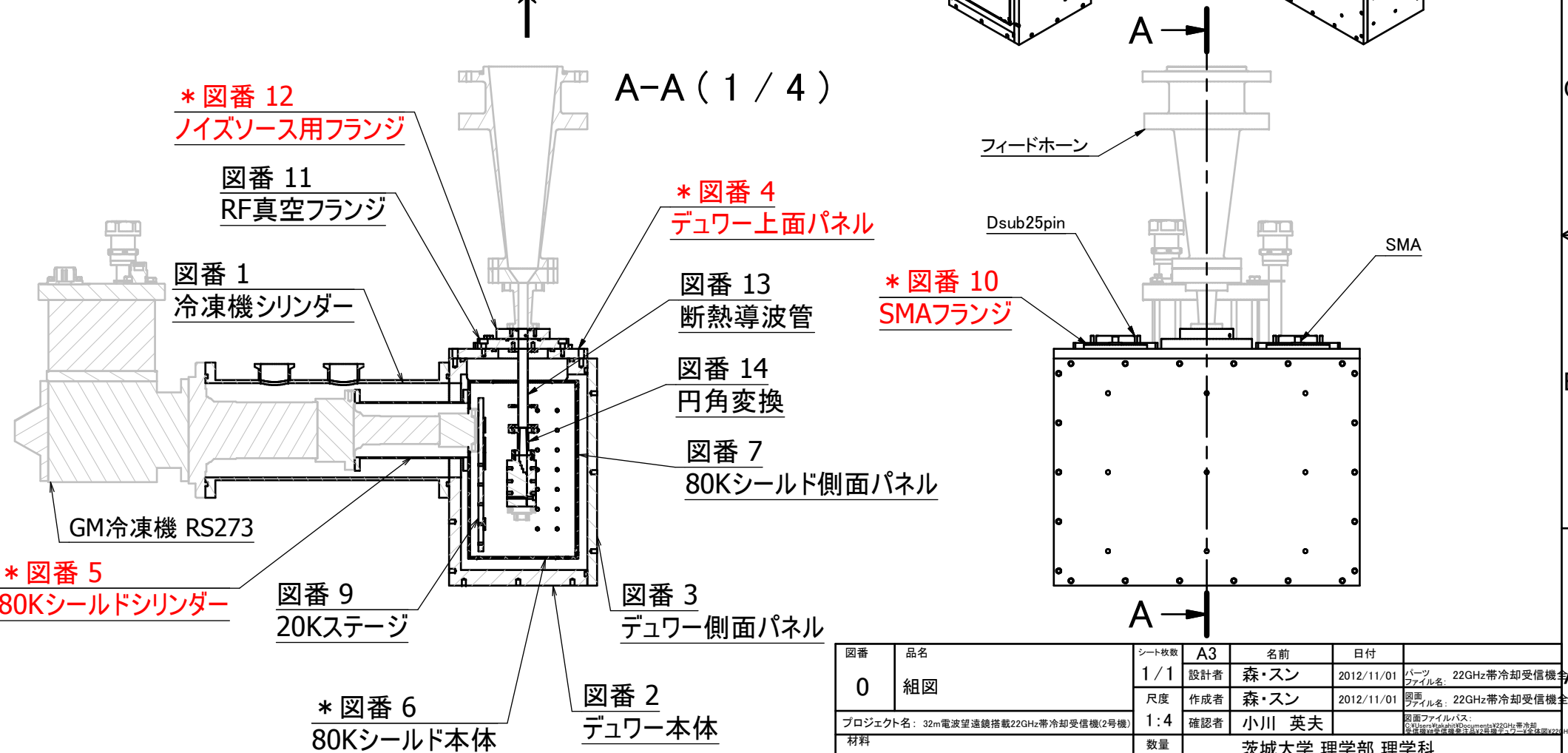
* 赤文字は、1 号機と設計が異なる。

2012/11/1(木)

* 22GHz帯冷却受信機(2号機) 組図

下図 * 印付きの図番は
1号機デュワーとは設計が異なる。

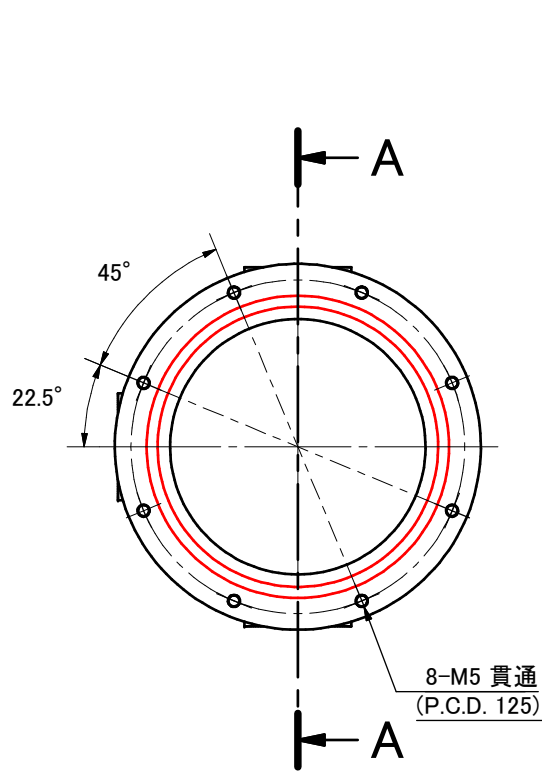
高萩32mパラボラ



図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
0	組図	1 / 1		設計者 森・スン	2012/11/01	パーツ 22GHz帯冷却受信機(80K)
		尺度 1:4		作成者 森・スン	2012/11/01	図番 22GHz帯冷却受信機全体組図
	プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機(2号機)			確認者 小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\kajikawa\Documents\22GHz帯冷却受信機組図\22GHz帯冷却受信機組図\22GHz帯冷却受信機組図.dwg
材料		数量 1		茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室		

*冷凍機シリンダー

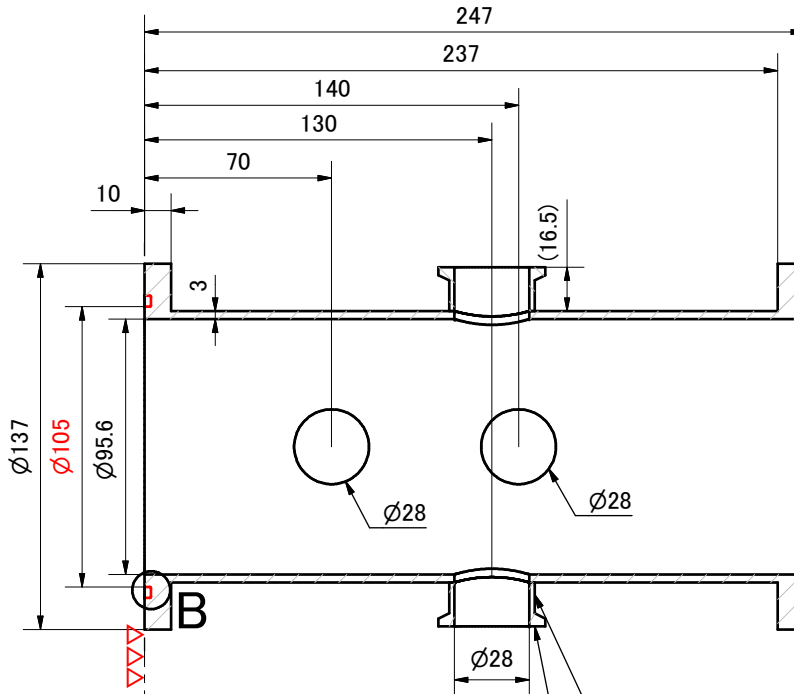
A-A 断面図(1 : 2)



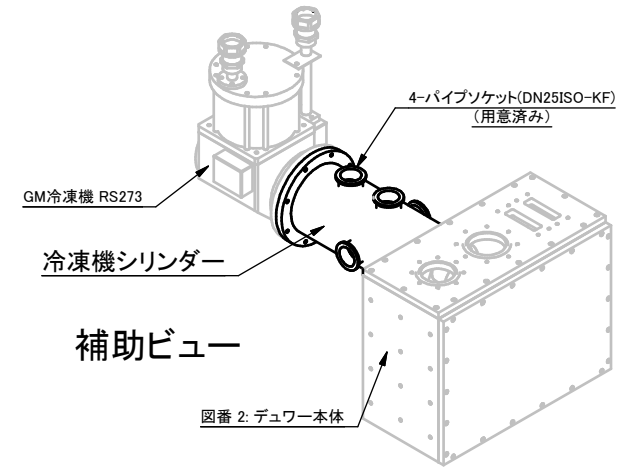
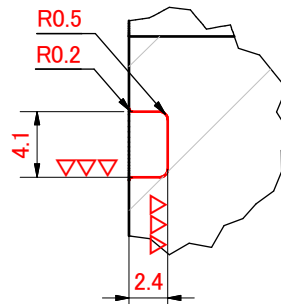
GM冷凍機 RS273側

シリンダー両面フランジ
Oリング溝内径: $\phi 105$

使用するOリング:
G105 (CO0216)
・W=3.1 $\pm$ 0.10
・do=104.4

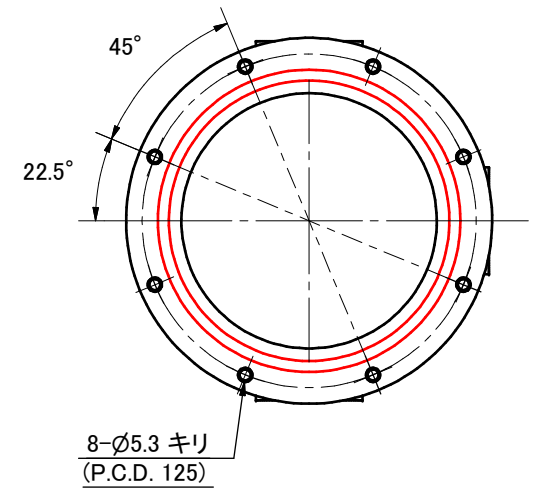


B (3 : 1)
Oリング溝部拡大図



補助ビュー

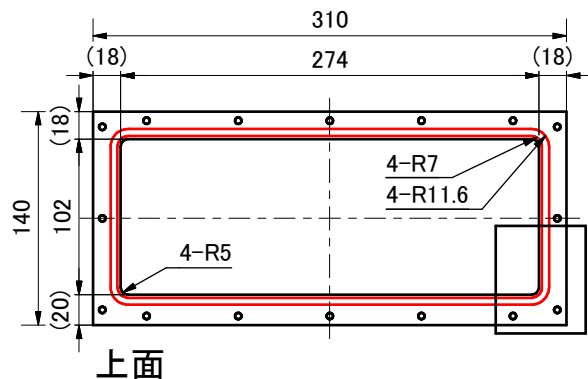
図番 2: デュワー本体



デュワー本体側

図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
1	冷凍機シリンダー	1 / 1	設計者	スン カンロウ	2012/01/19	パーツ ファイル名: シリンダーと25ISO-KF
		尺度	作成者	スン カンロウ	2012/01/19	図面 ファイル名: 冷凍機シリンダー.idw
		確認者	小川 英夫			図面 ファイルパス: C:\Users\Hakuhai\Desktop\32m観測機器開発\シリンダー\冷凍機
材料	SUS304	数量	1	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室		

*デュワー本体(1/2) 外寸

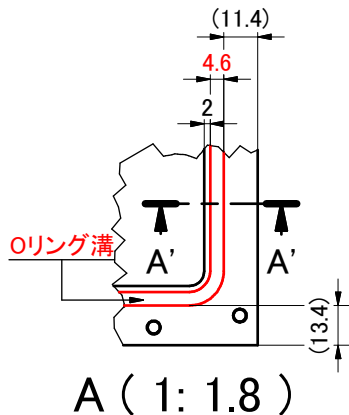


デュワー本体上面

リング溝長さ:
 $755.982 \div 240.64 \pi$

使用するリング:
AS568-272 (CO2050)

・W=3.53±0.10
・do=240.89±0.76

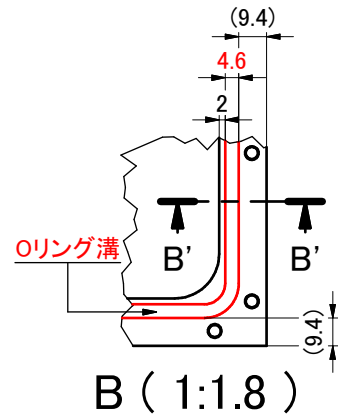


デュワー本体正面

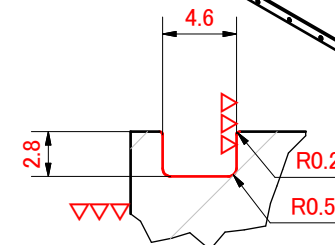
リング溝長さ:
 $955.982 \div 304.30 \pi$

使用するリング:
AS568-278 (CO4602)

・W=3.53±0.10
・do=304.39±0.76

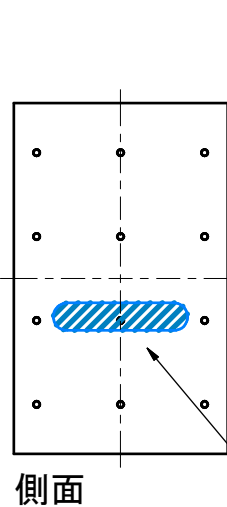


補助ビュー



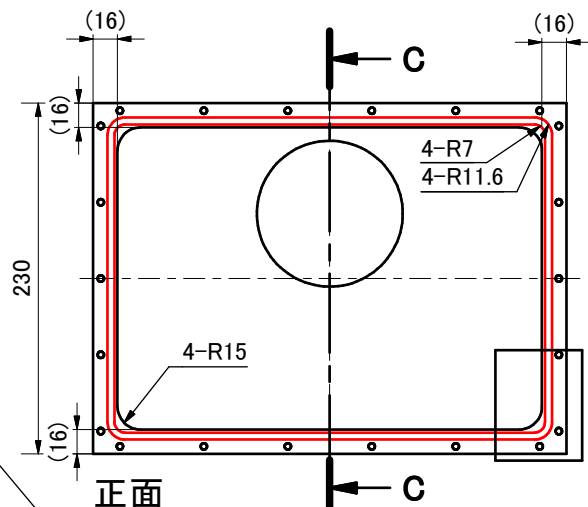
リング溝部拡大
A'-A'、B'-B' (3:1)

リング面

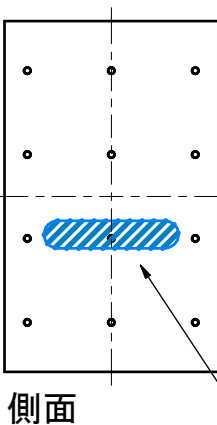


側面

取っ手
(ネジ未記入)
(フレームの高さに合やすよう)

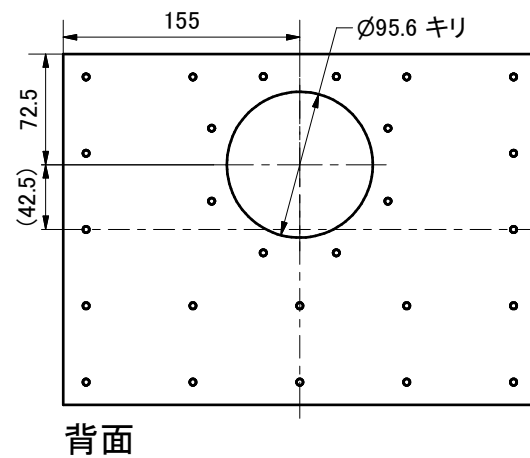


正面

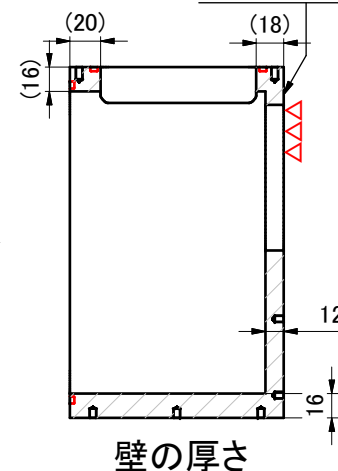


側面

取っ手
(ネジ未記入)
(フレームの高さに合やすよう)



背面



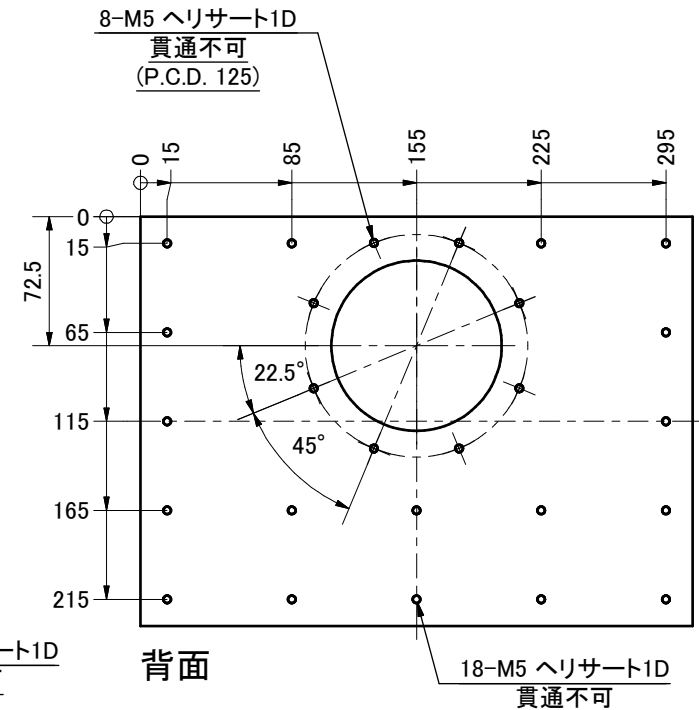
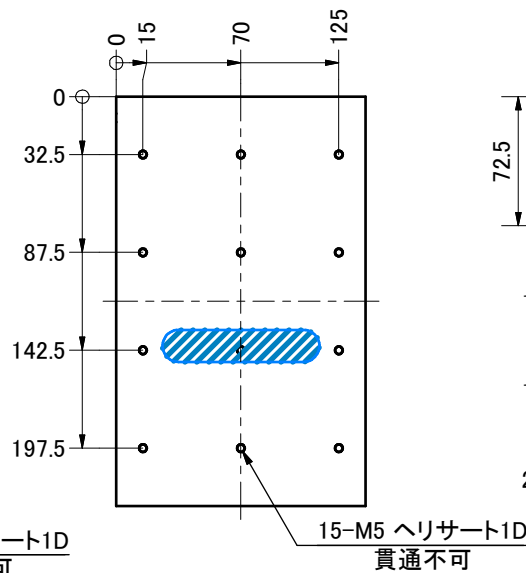
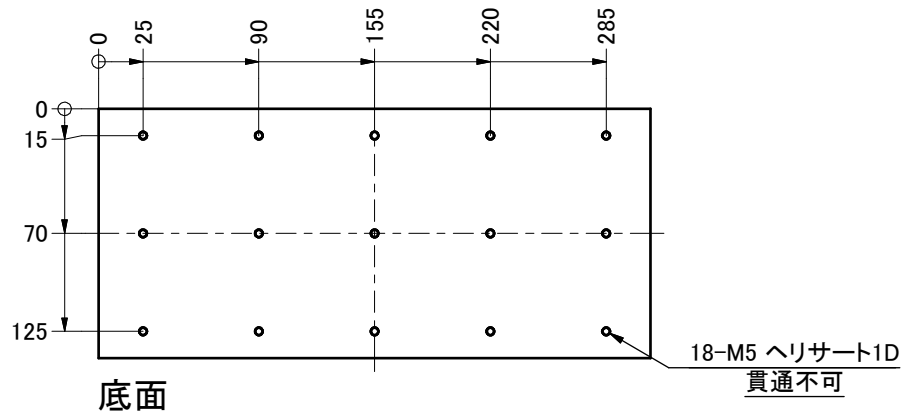
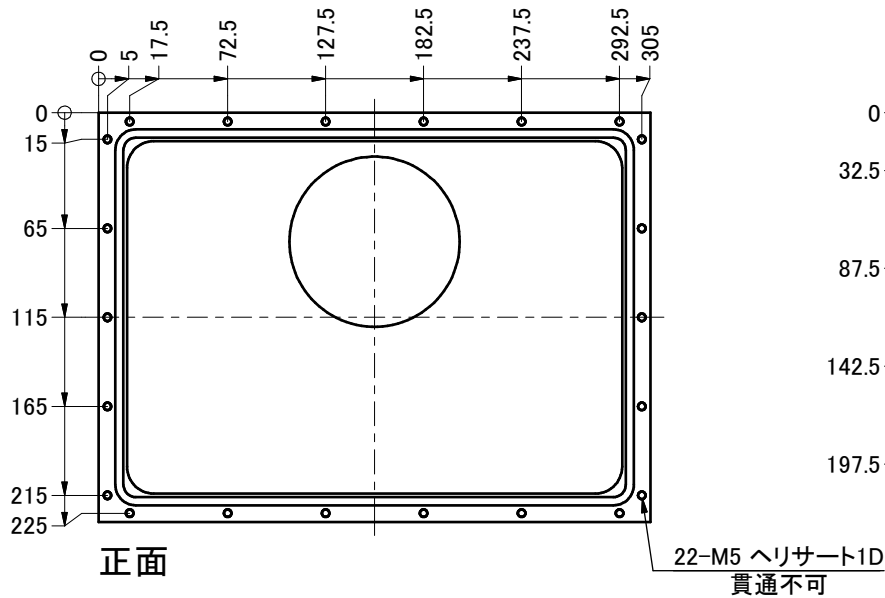
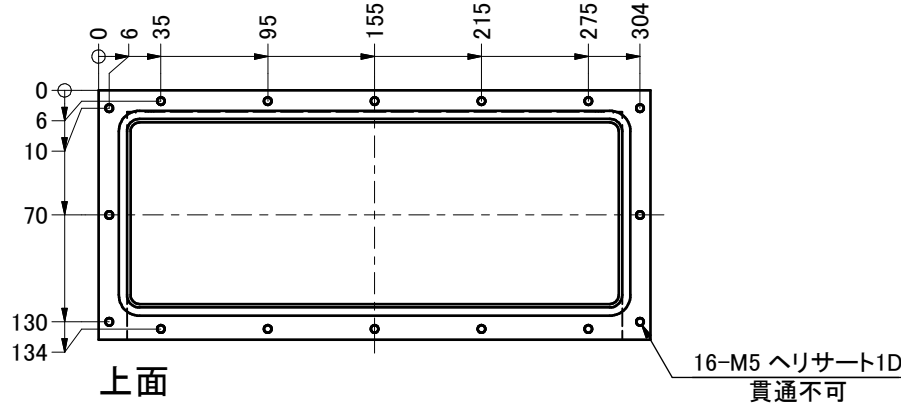
壁の厚さ

C-C断面図

底面

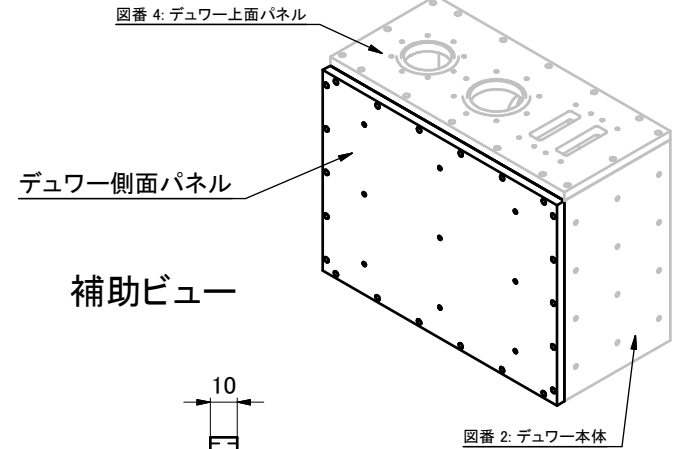
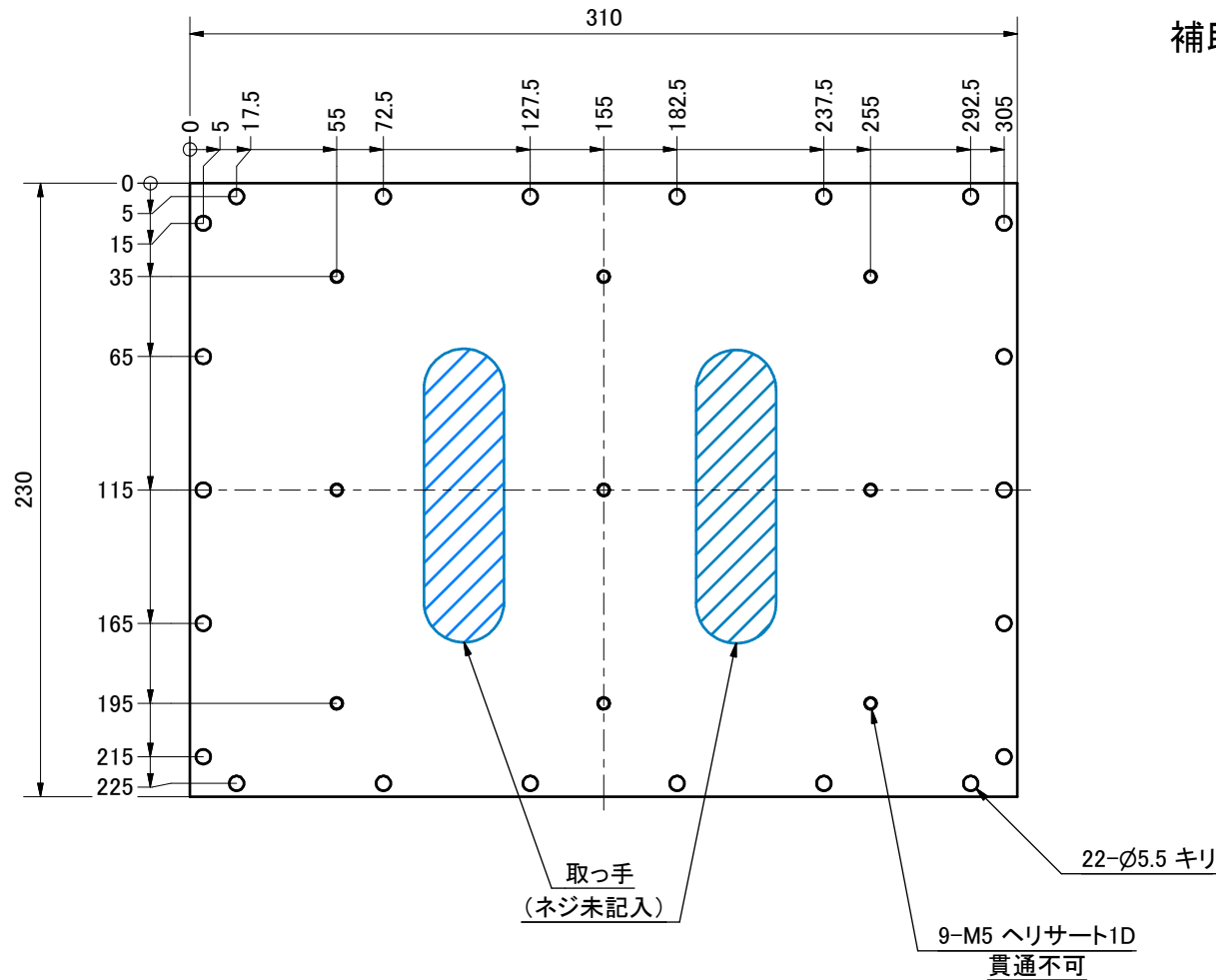
図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
2	デュワー本体	1 / 2	設計者	スン カンロウ	2012/01/19	パーツ ファイル名: デュワー本体.ipt
		尺度	作成者	スン カンロウ	2012/01/19	図面 ファイル名: デュワー本体(1/2)外寸.idw
		1:3.5	確認者	小川 英夫		図面 ファイルパス: C:\Users\shakahi\Documents\高級22GHzデュワー最終図面V01
	プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機	数量		茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室		
	材料 A5052	1				

*デュワー本体(2/2) ネジ寸法



図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
2	デュワー本体	2 / 2	設計者	スシ カンロウ	2012/01/19	パーツ ファイル名: デュワー本体.ipt
		尺度	作成者	スシ カンロウ	2012/01/19	図面 ファイル名: デュワー本体(2/2)ネジ寸法.i
		確認者	小川 英夫			図面 ファイルパス: C:\Users\shakahi\Documents\32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機\最終図面Vデ
	プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機	数量	1	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室		
	材料 A5052					

*デュワー側面パネル

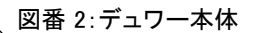


リング面

t=10mm

図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
3	デュワー側面パネル	1 / 1	設計者	シン カンロウ	2011/12/19	パーツ ファイル名: デュワー側面パネル.dwg
プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機		1:2	作成者	シン カンロウ	2011/12/19	図面 ファイル名: デュワー側面パネル.dwg
材料 A5052		数量 1	確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\shinaka\Documents\32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機\最終図面Vデ

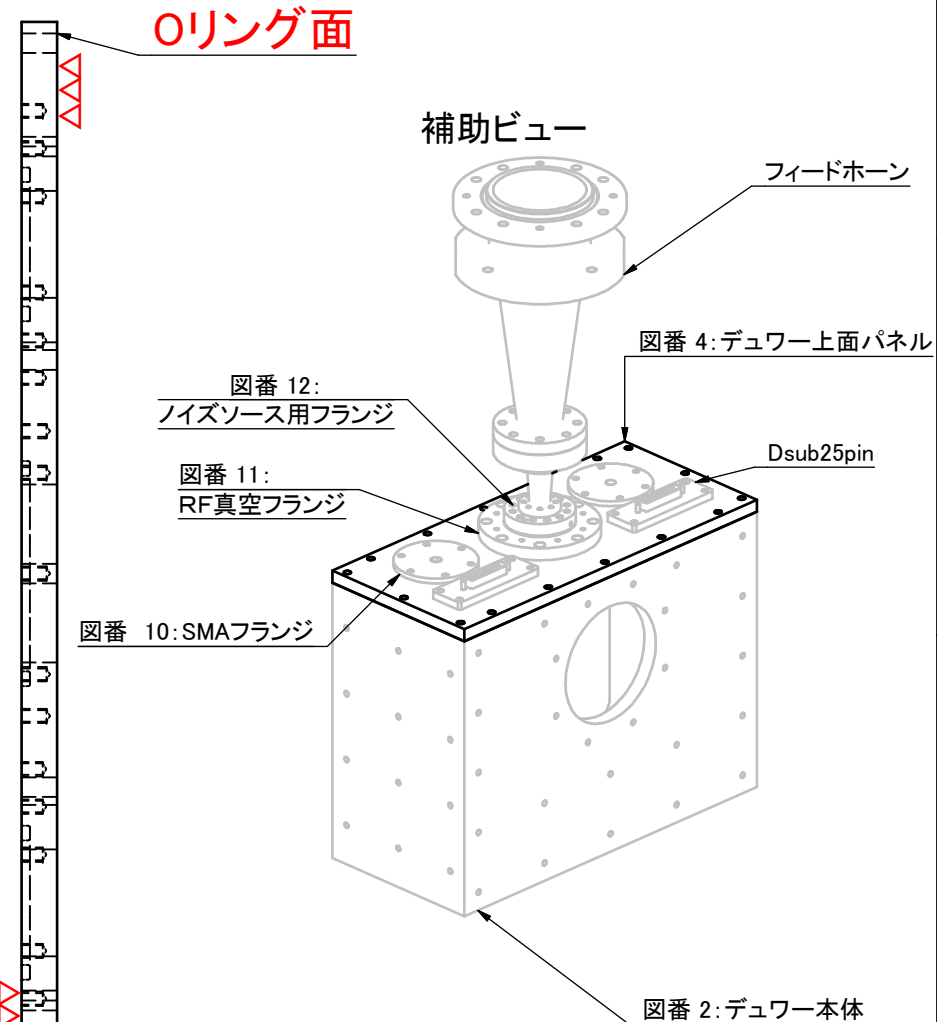
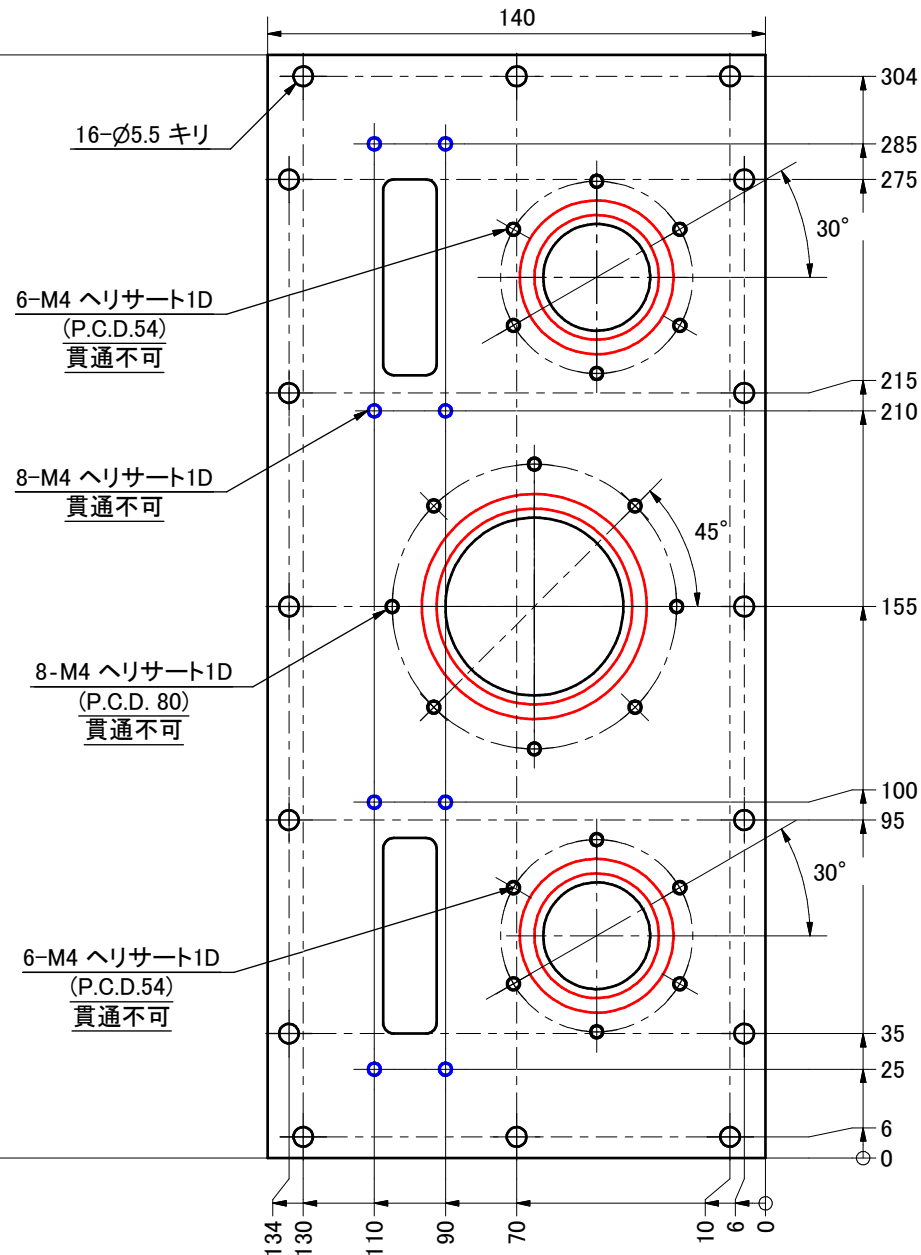
SMAフランジ、Dsub25pinの設置位置を変更



補助ビュー

図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
4	デュワー上面パネル	1/2	設計者	森 智彦	2012/11/01	ページ: デュワー上面パネル(2号機).ic
		尺度	作成者	森 智彦	2012/11/01	図面ファイル名: デュワー上面パネル(2号機).ic
プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機(2号機)		1:1.5	確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: G:\Users\Wakabi\Documents\K22GHz帯冷却 受信機22m電波望遠鏡搭載22GHz帯デュワー・ドーム上面パネル(2号機).ic
材料 A5052		数量 1	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室			

*2号機用:デュワー上面パネル(2/2):ねじ位置を記載

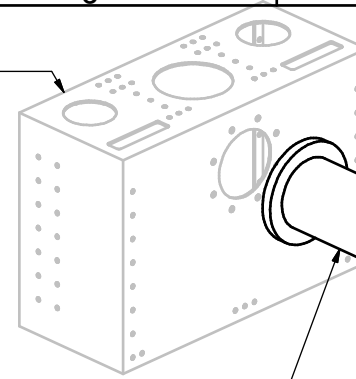


図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
4	デュワー上面パネル	2/2	設計者	森 智彦	2012/11/01	パート: ファイル名: デュワー上面パネル(2)
		尺度	作成者	森 智彦	2012/11/01	図面 タイトル名: デュワー上面パネル(1)
プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機(2号機)		1:1.5	確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\kakeishi\Documents\K22GHz帯冷却 受信機受信機製作\A3\2号機デュワー上面パネル
材料		数量				
A5052		1		茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室		

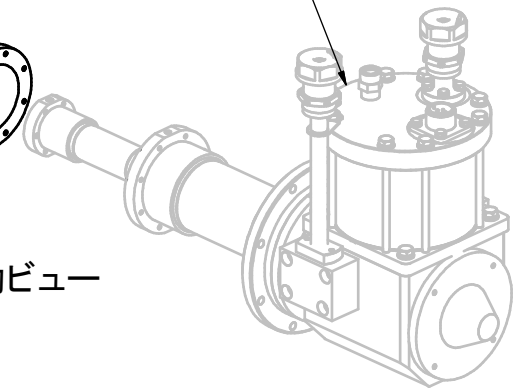
* 2号機用: 80Kシールドシリンダー

フランジ部分の厚さを5mm→8mmに変更

図番 6: 80Kシールド本体



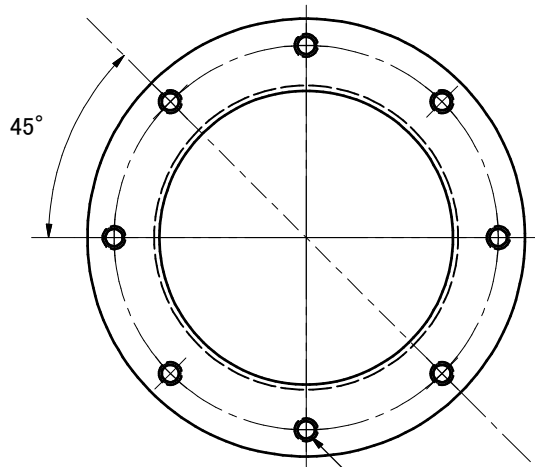
GM冷凍機 RS273



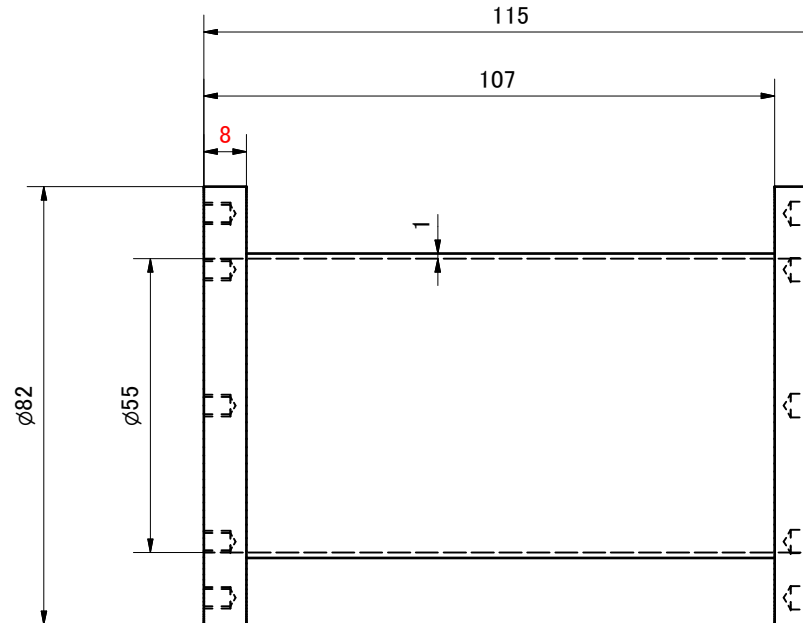
図番 5: 80Kシールドシリンダー

補助ビュー

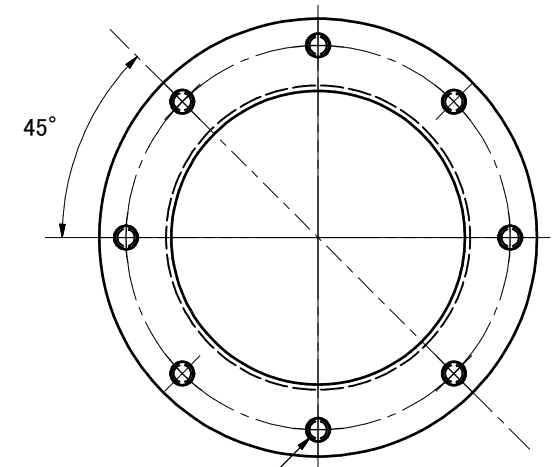
80Kシールド本体 側



8-M4 ヘリサート1D 貫通
(P.C.D. 72)

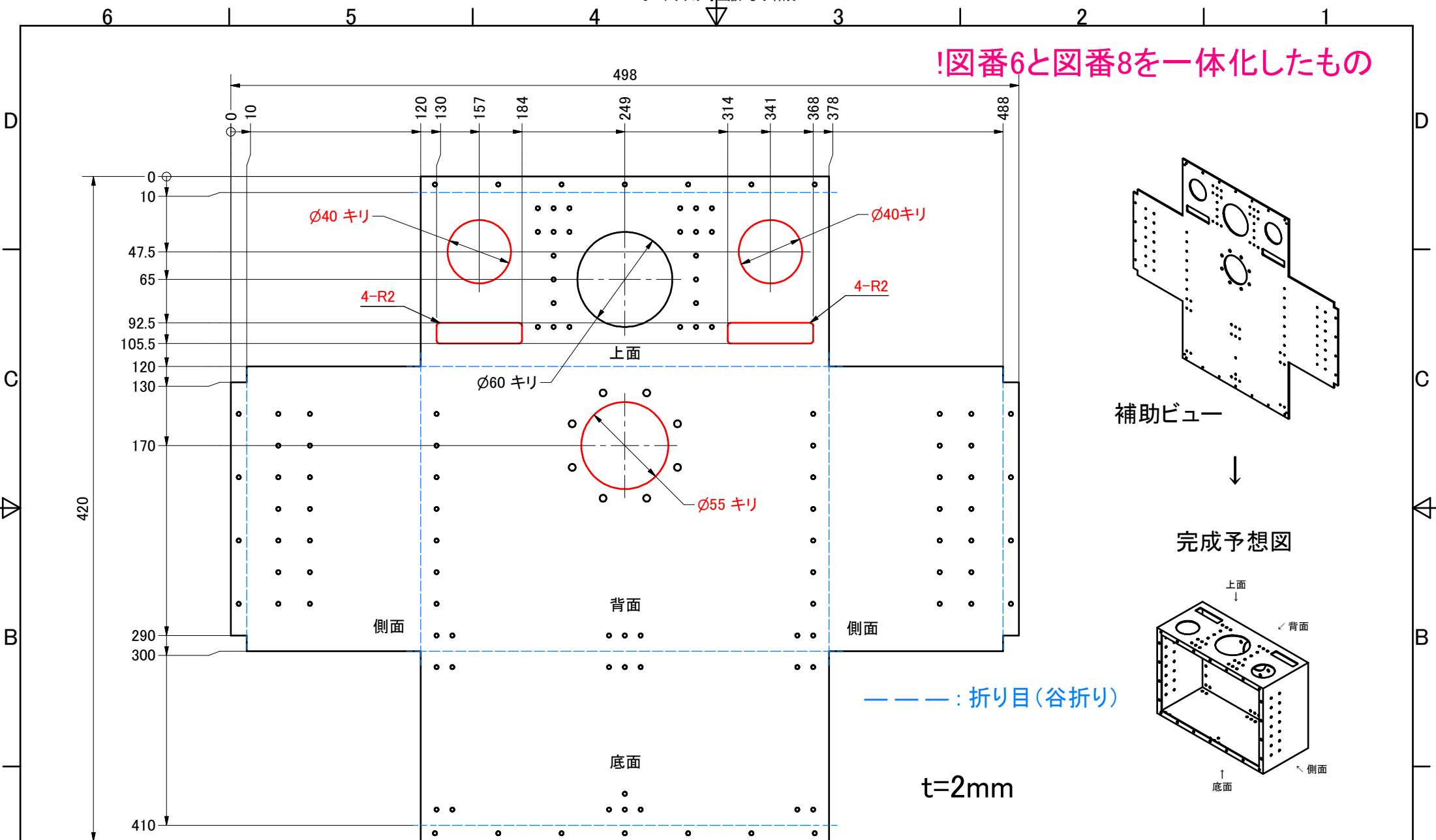


GM冷凍機 側



8- $\phi 4.4$ キリ
(P.C.D. 72)

図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
5	80Kシールドシリンダー	1 / 1	設計者	森 智彦	2012/11/01	パート 80Kシールドシリンダー (2号機)
		尺度	作成者	森 智彦	2012/11/01	図面 80Kシールドシリンダー (2号機)
		1:1	確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\kajikawa\Documents\22GHz帯冷却受信機\22GHz帯冷却受信機部品図面\部品図面\80Kシールドシリンダー (2号機).dwg
材料	無酸素銅	数量	1	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室		



!図番6と図番8を一体化したもの

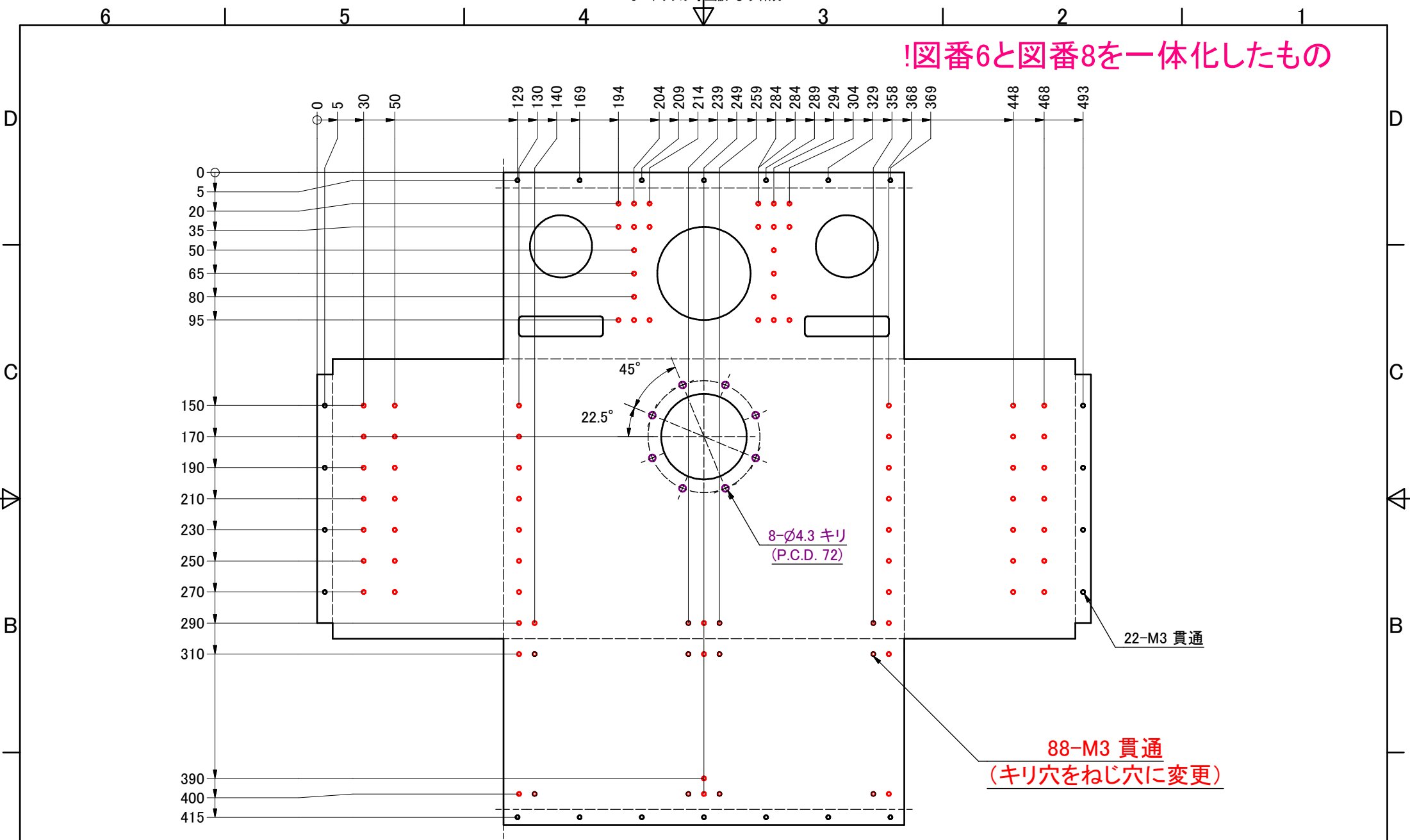
補助ビュー

完成予想図

*2号機用: 80Kシールド(1/3)外寸
上面の設計を変更
背面の開口をΦ45→Φ55に変更

図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
6	80Kシールド本体 補助ビュー(2号機)	1 / 3	設計者	森・スン	2012/11/01	パーツ ファイル名: 80Kシールド本体(2号機).ipt
		1:2.2	作成者	森・スン	2012/11/01	図面 ファイル名: 80Kシールド本体ver2.1(2)外
			確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\kajikawa\Documents\22GHz帯冷却 受信機設計書\部品図面\22GHz帯冷却受信機本体ver2.1
		数量	1	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室		
材料 A1050						

!図番6と図番8を一体化したもの

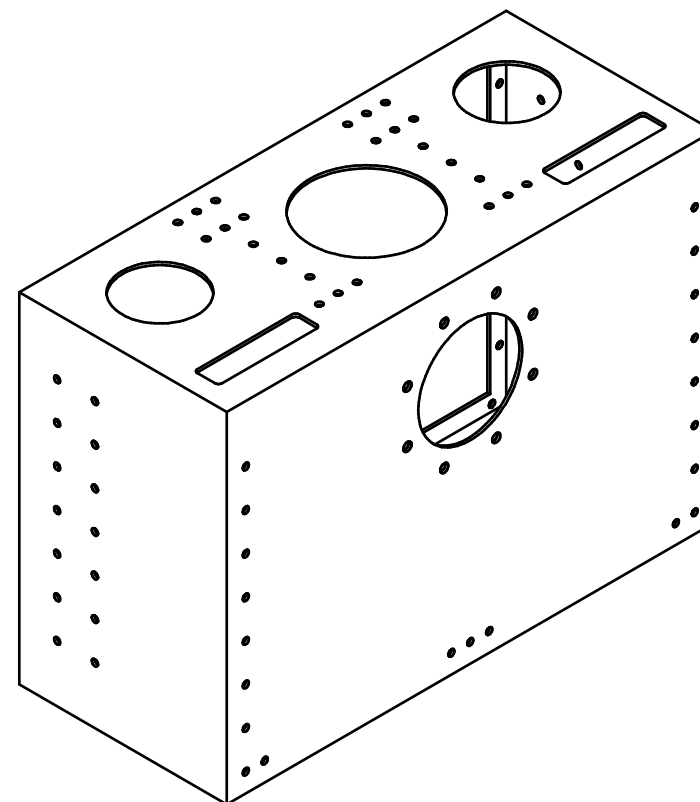
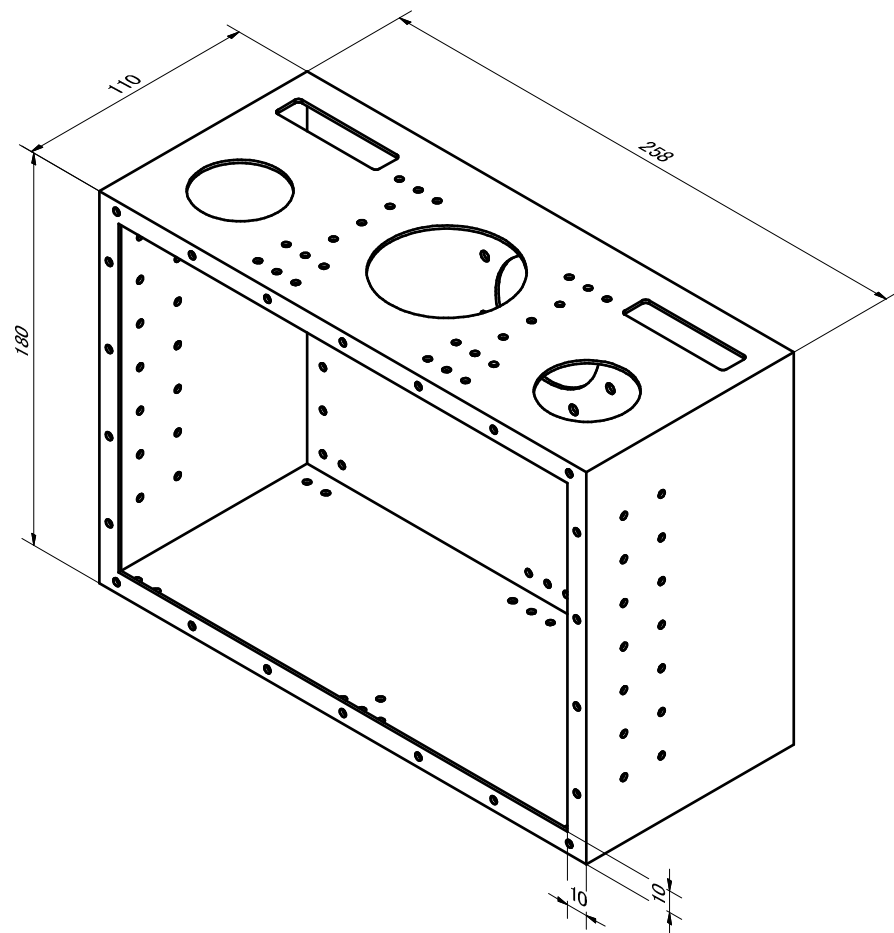


A*2号機用: 80Kシールド(2/3)穴位置・寸法

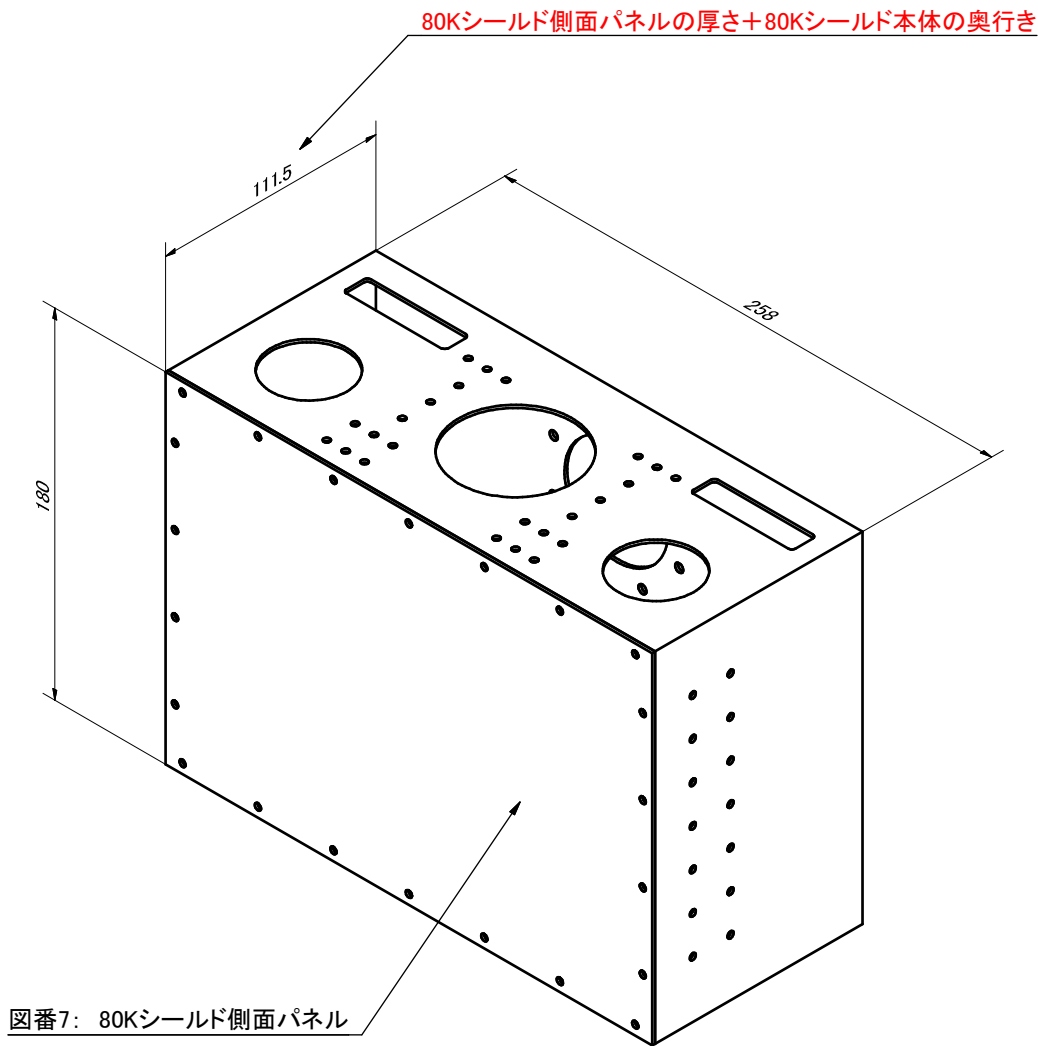
Φ3.2のキリ穴をすべてM3のねじ穴に変更

図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
6	80Kシールド本体	2/3	設計者	森・スン	2012/11/01	パーツ
		1:2.2	作成者	森・スン	2012/11/01	図面
			確認者	小川 英夫		図面ファイルパス:
材料	A1050	数量	1	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室		

2号機用:80Kシールド本体完成予想図



図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
6	80Kシールド本体	3 / 3	設計者	森・スン	2012/11/01	パーツ ファイル名: 80Kシールド本体(2号機)等Apt
		尺度	作成者	森・スン	2012/11/01	図面 ファイル名: 80Kシールド本体ver2.1(1/2)外
		1:2.2	確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\Wakana\Documents\22GHz帯冷却 受信機(2号機)等受信機用80Kシールド本体ver2.1(1/2)外
プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機(2号機)						
材料		数量				
A1050		1	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室			



2号機用: 80Kシールド本体完成予想図 80Kシールド側面パネル付き

図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
	80Kシールド本体 補助ビュー(2号機)	1 / 1	設計者	森 智彦	2012/11/14	パーツ ファイル名: 80Kシールド本体完成品+側面
		尺度	作成者	森 智彦	2012/11/14	図面 ファイル名: 80Kシールド本体完成品+側面
		3/1	確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\kajikawa\Documents\22GHz帯冷却 受信機2号機部品図面\22GHz帯冷却受信機2号機部品図面\80Kシールド本体完成品+
材料	A1050	数量	2	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室		

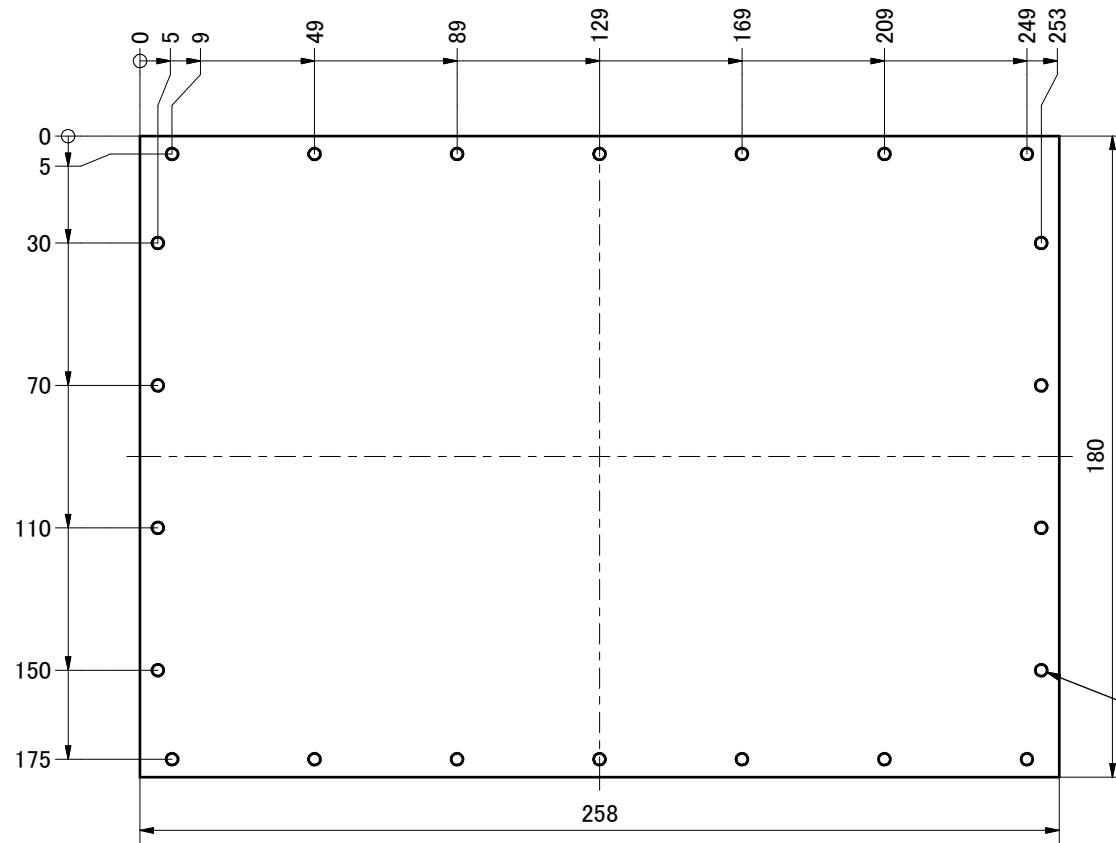
80Kシールド本体
補助ビュー(2号機)



ノートブックの書き方

冷凍機
(1/2)外
本体ver2(1/

*80Kシールド側面パネル



補助ビュー

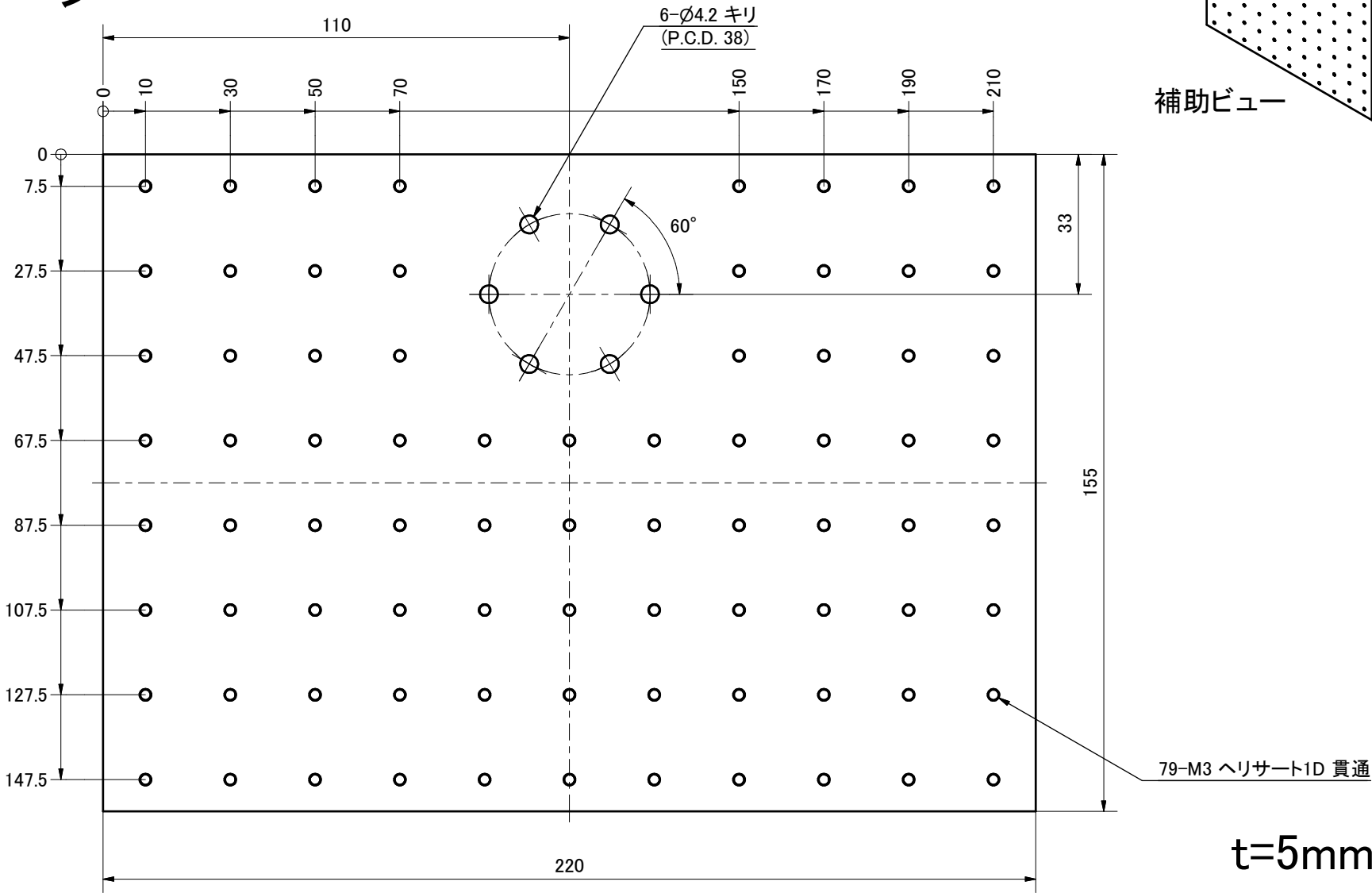
図番6: 80Kシールド本体

22- ϕ 3.3 キリ

$t=1.5\text{mm}$

図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
7	80Kシールド側面パネル	1 / 1	設計者	森・スン	2012/01/16	パーツ ファイル名: 80Kシールド側面パネル.dwg
		尺度	作成者	森・スン	2012/01/16	図面 ファイル名: 80Kシールド側面パネル.dwg
		1:1.8	確認者	小川 英夫		図面 ファイルパス: C:\Users\shakahi\Documents\32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機\最終図面\80Kシールド側面パネル.dwg
プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機						
材料 A1050		数量 1	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室			

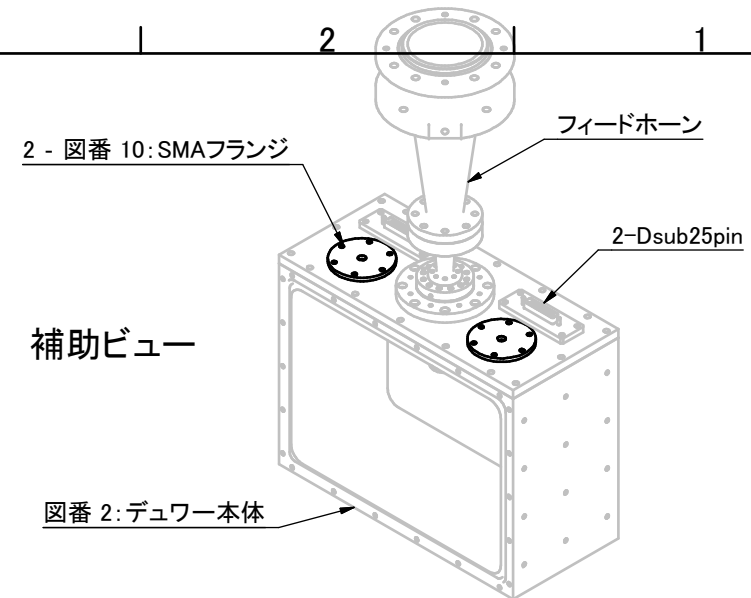
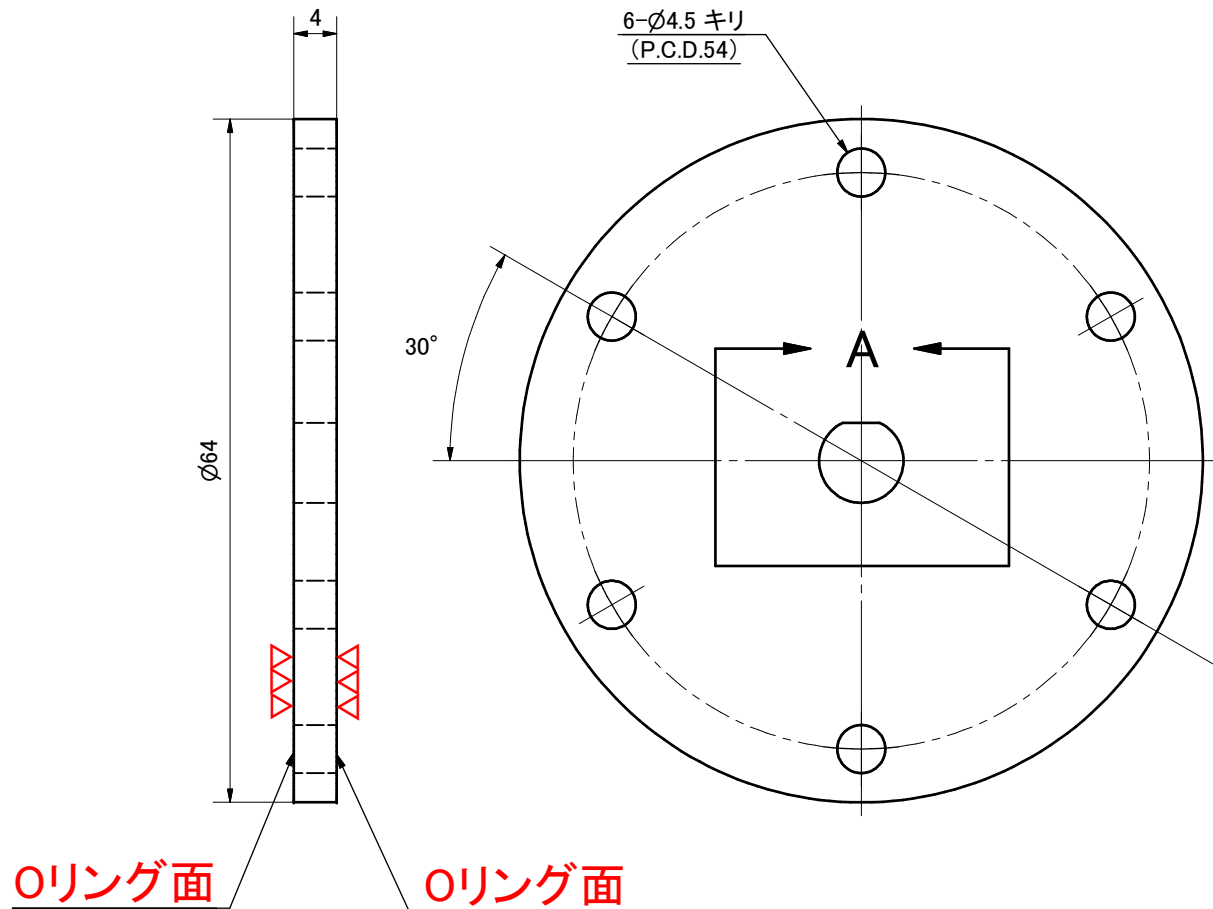
*20Kステージ



図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
9	20Kステージ	1 / 1	設計者	スン カンロウ	2011/12/19	パーツ ファイル名: 20Kステージ.ipt
		1:1	作成者	スン カンロウ	2011/12/19	図面 ファイル名: 20ステージ.idw
			確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\Wakashi\Documents\高精度22GHzデュー
		数量	1	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室		

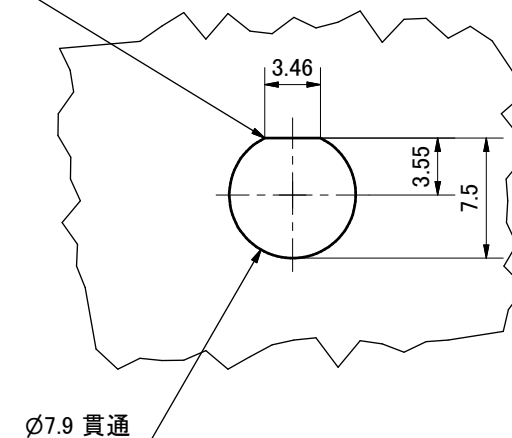
* 2号機用:SMAフランジ

寸法を変更(Φ78→Φ64)
SMA挿入口は1つで、SMAフランジは2枚使用する



SMA挿入部分 拡大図
A (3:1)

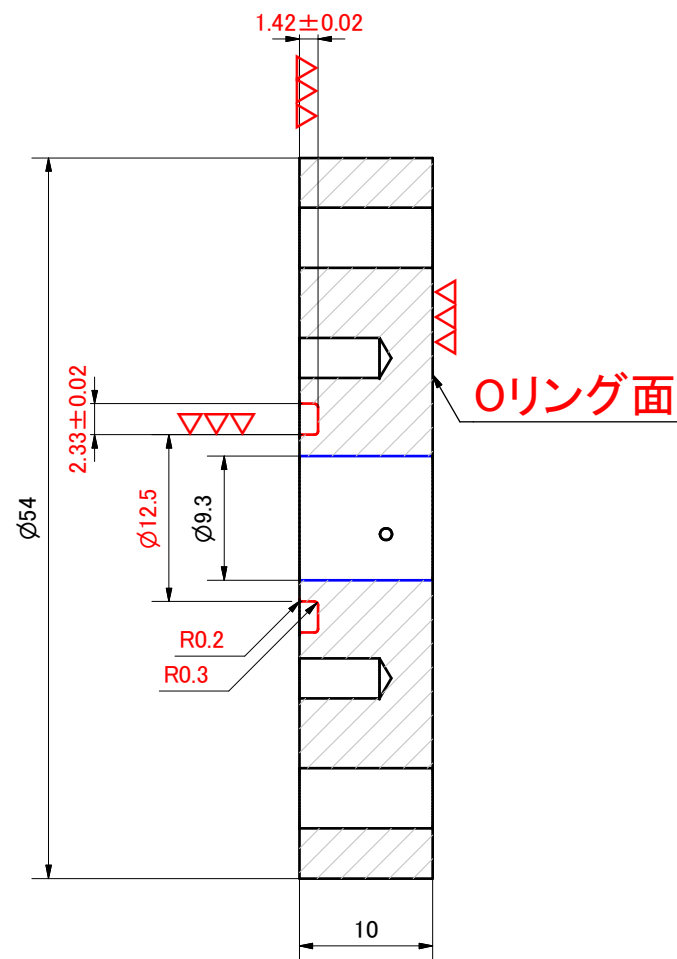
2-角



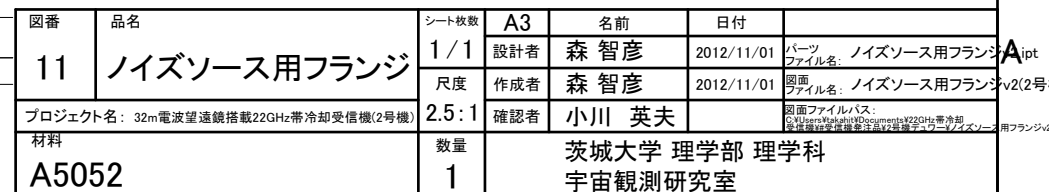
図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
10	SMAフランジ	1 / 1	設計者	森 智彦	2012/11/01	パート ファイル名: SMAフランジ(2号機).igw
		尺度	作成者	森 智彦	2012/11/01	図面 ファイル名: SMAフランジ(2号機).ldw
プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機(2号機)		1:1.5	確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\Wakana\Desktop\22GHz帯冷却 受信機部品\2号機用SMAフランジ(2号機).ldw
材料 A5052		数量 2	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室			

RF真空フランジ用ノックピン穴、テーパ用ねじ穴を修正

ノートブックの持ち出し禁止

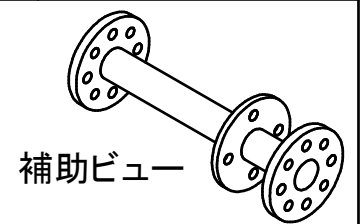


* $\phi 9.3$ の穴は、両側面取りなし

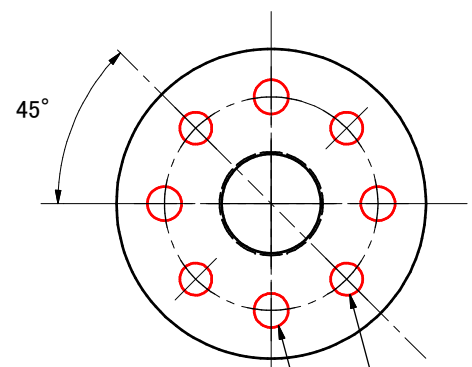


オートデスク学生版により作成

* 断熱導波管



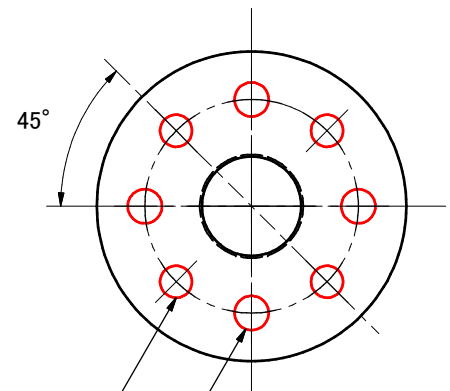
* 円角変換側



4-3リーマ、ノックピン穴
(P.C.D. 20)

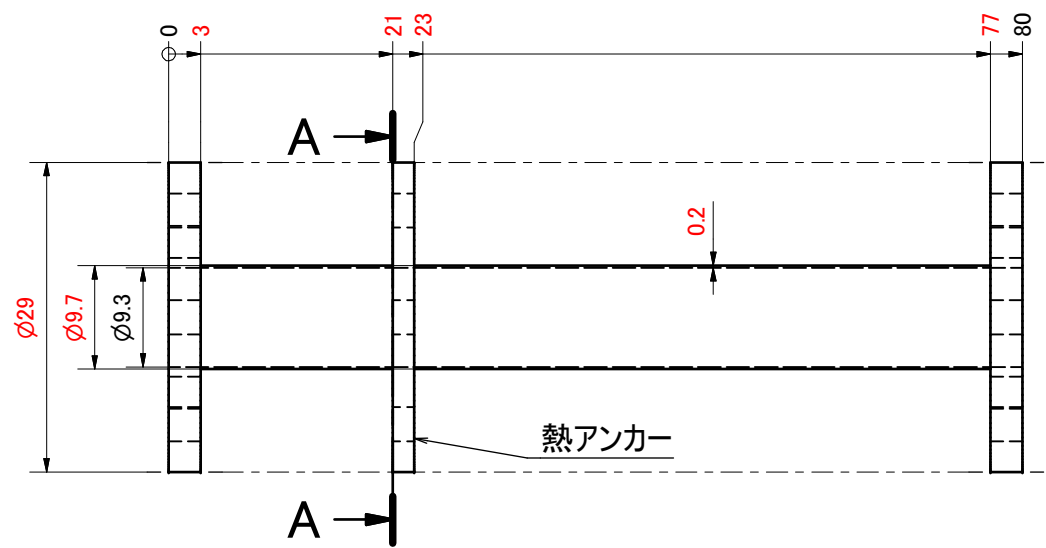
4- $\phi 3.2$ キリ
(P.C.D. 20)

* RF真空フランジ側



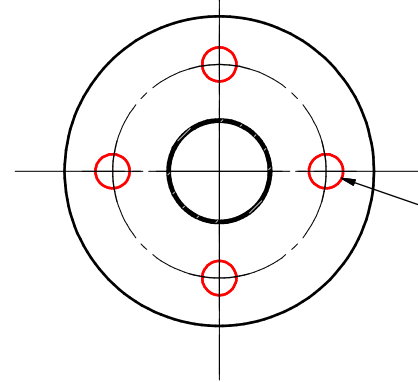
4-3リーマ
ノックピン穴
(P.C.D. 20)

4- $\phi 3.2$ キリ
(P.C.D. 20)



熱アンカー

A-A (2:1)
熱アンカー部

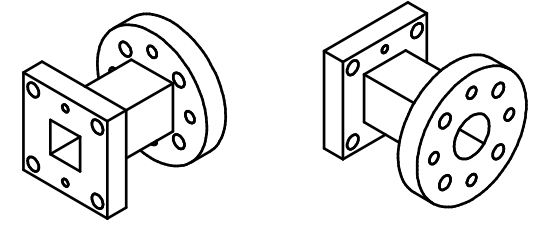
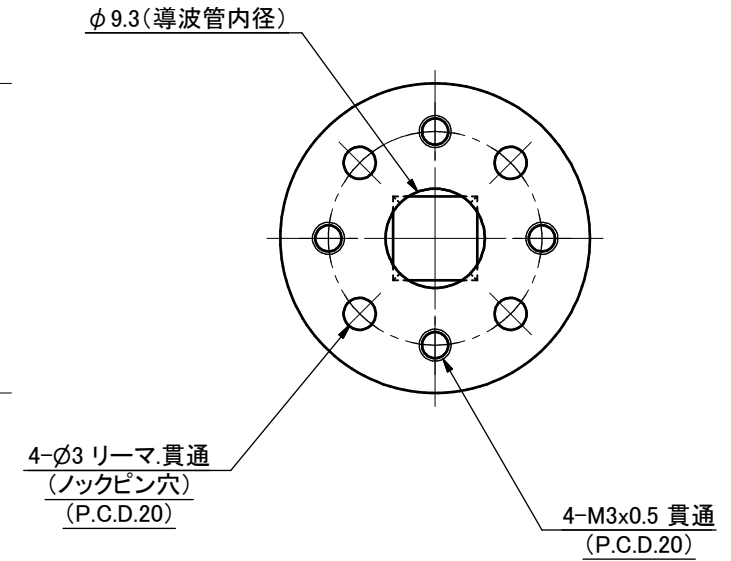
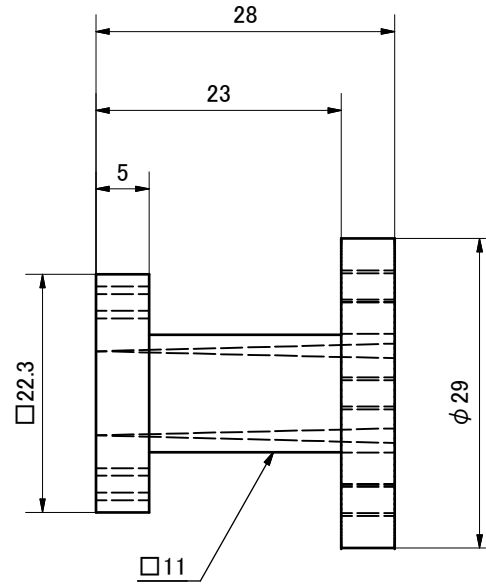
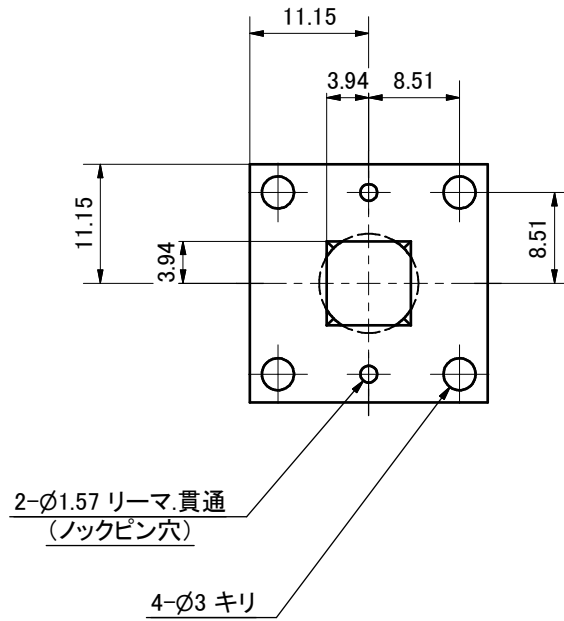


4- $\phi 3.2$ キリ
(P.C.D. 20)

* $\phi 9.3$ の穴は、両側面取りなし

図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
13	断熱導波管	1 / 1	設計者	森 智彦	2012/02/01	パーツ ファイル名: 断熱導波管.ipt
		2:1	作成者	森 智彦	2012/02/01	図面 ファイル名: 断熱導波管.idw
プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz冷却受信機			確認者	小川 英夫		図面ファイルパス: C:\Users\Wakashi\Documents\22GHz帯冷却 受信機部実装部品\断熱導波管.idw
材料		数量	茨城大学 理学部 理学科 宇宙観測研究室			
SUS304 (内側 金メッキ)		1				

22GHz帯円角変換図



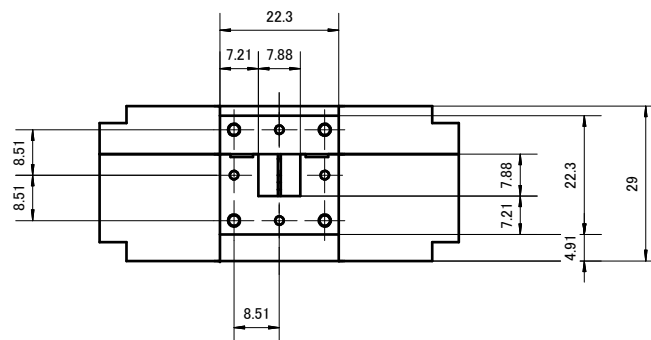
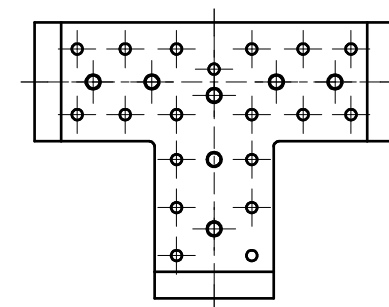
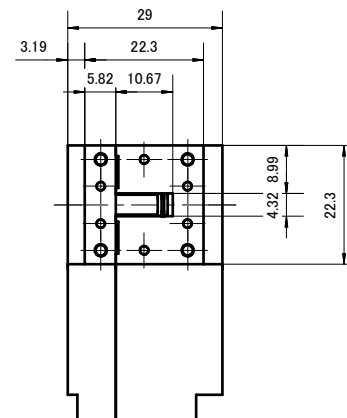
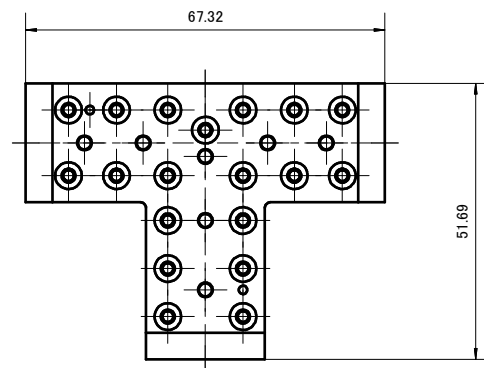
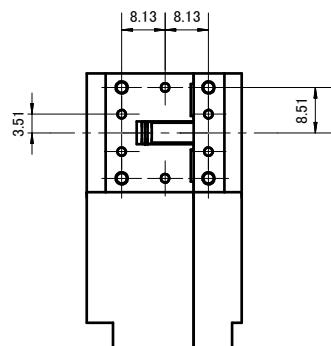
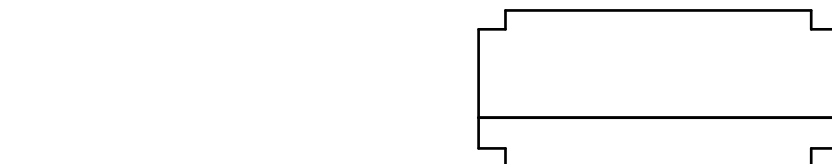
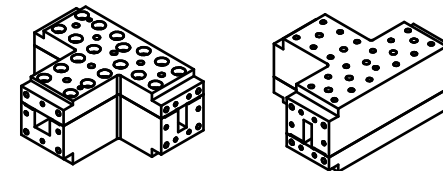
図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
14	茨城32m鏡22GHz帯円角変換	1 / 1	設計者	尾上裕隆	2012/01/26	パーツ ファイル名: 22GHz_pol_CAD_model.dwg
	プロジェクト名: 32m電波望遠鏡搭載22GHz帯冷却受信機	2 / 1	尺度	作成者	2012/01/26	図面 ファイル名: 22GHz_pol_CAD_model.dwg
	材料	数量	確認者	小川英夫		図面 ファイル名: 22GHz_pol_CAD_model.dwg
	A6063	2		大阪府立大学 理学部 物理科学科 宇宙物理学研究室		図面 ファイル名: 22GHz_pol_CAD_model.dwg

22GHz 帯ポーラライザー 図面目次

図番	名称	材料	数量
1	22GHz 帯ポーラライザー組立図	テルル銅（金メッキ）	2
2	22GHz 帯ポーラライザー下部図(1/2)	テルル銅（金メッキ）	2
3	22GHz 帯ポーラライザー下部図(2/2)	テルル銅（金メッキ）	2
4	22GHz 帯ポーラライザー上部図	テルル銅（金メッキ）	2

2012/1/22(日)

22GHz帯ポーライザー組立図

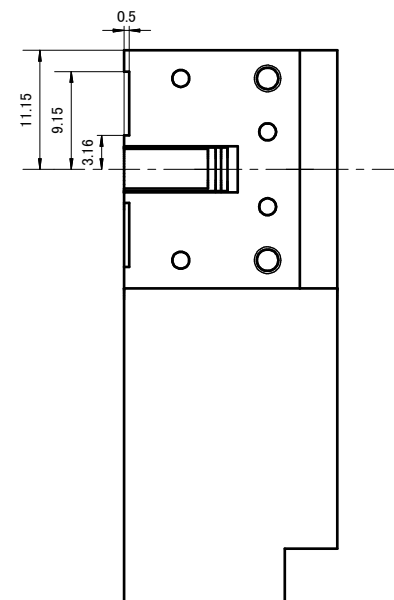
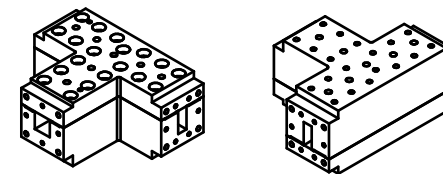
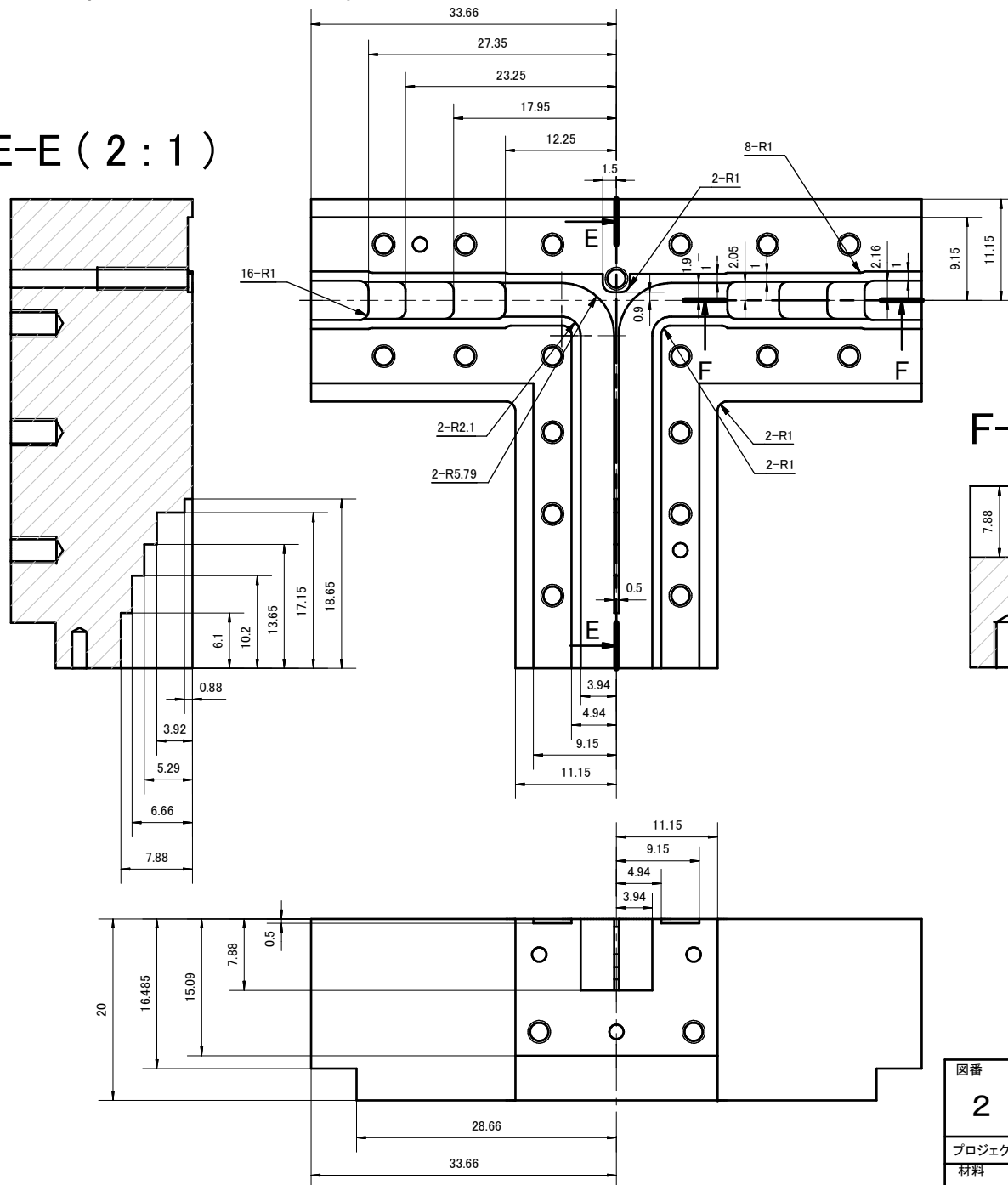


* 反対面共通

図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付		
1	茨城32m鏡22GHz帯 ポーライザー組立図	1 / 1	設計者	onoe	2012/01/22	パーツ ファイル名: 21-26pol_CAD_all_model_v2.1	
		1 / 1	尺度	作成者	尾上裕隆	2012/01/22	図面 ファイル名: 22GHz_pol_CAD_model_drawing
		1 / 1	確認者	小川英夫		図面 ファイルパス: C:\Users\Konoen\Desktop\21-26GHzポーライザー組立図_V22GHz.p	
プロジェクト名: 茨城32m22GHz冷却受信機							
材料		数量	大阪府立大学 理学部 物理科学科 宇宙物理学研究室				
テルル銅(金メッキ)		2					

22GHz帯ポーラライザー下部図(1/2)

E-E (2:1)

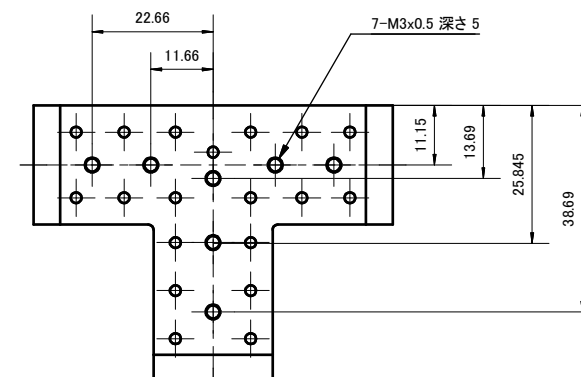
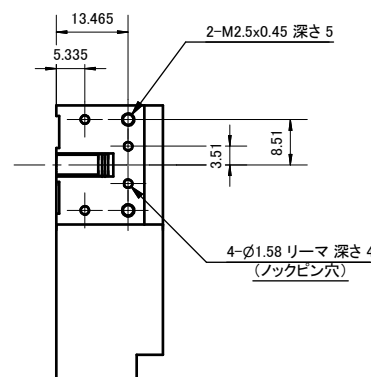
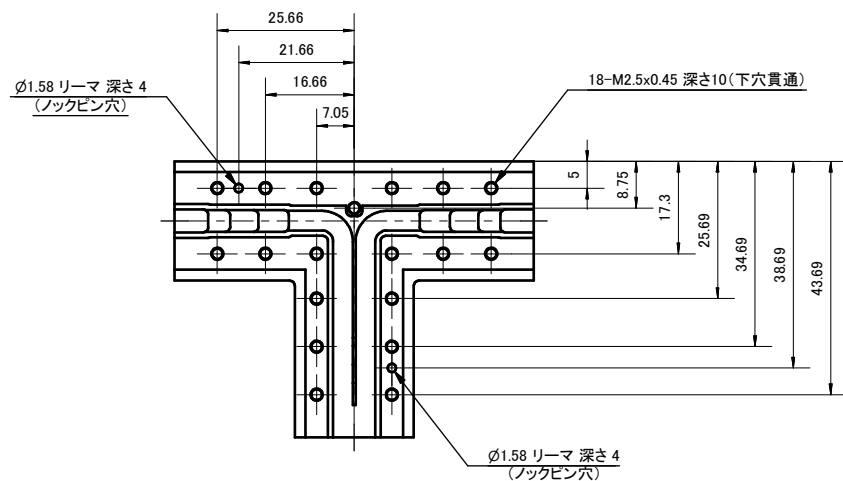
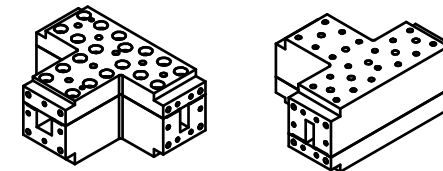


* 反対面共通

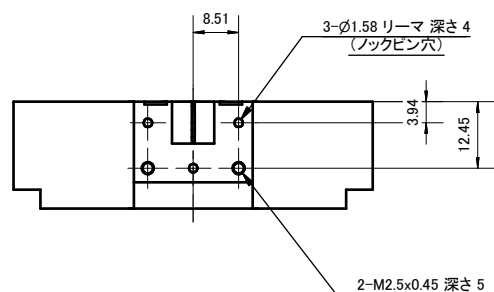
* 導波管は面取り無し
* フランジは合わせ加工の事

図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	パーツ
2	茨城32m鏡22GHz帯 ポーラライザー下部	1 / 2	設計者	onoe	2012/01/15	22GHz_pol_CAD_model_v
プロジェクト名: 茨城32m22GHz冷却受信機		2 / 1	作成者	尾上裕隆	2012/01/22	図面ファイル名: 22GHz_pol_CAD_model_drawing
材料		数量	確認者	小川英夫		図面ファイルパス: C:\Users\Konohe\Desktop\22GHz帯ポーラライザー部
テルル銅(金メッキ)		2	大阪府立大学 理学部 物理科学科 宇宙物理学研究室			

22GHz帯ポーラライザー下部図(2/2)



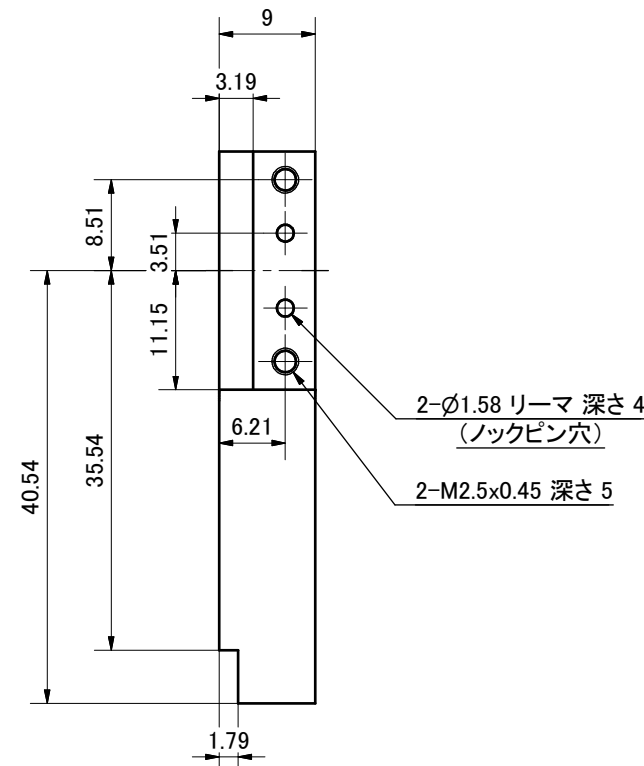
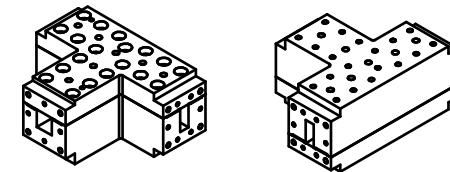
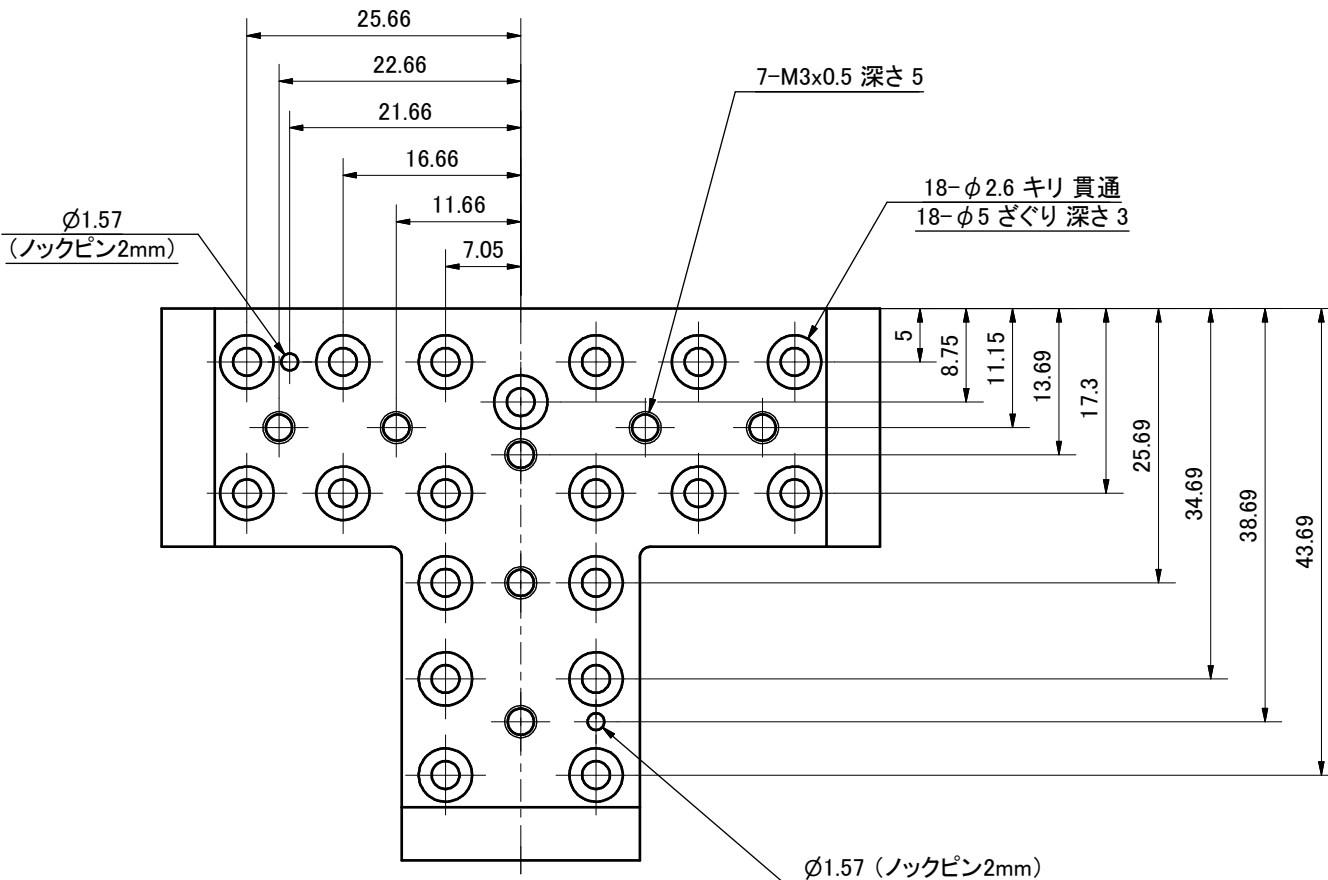
* 反対面共通



* 導波管は面取り無し
* フランジは合わせ加工の事

図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
3	茨城32m鏡22GHz帯 ポーラライザー下部	2 / 2	設計者	onoe	2012/01/15	パーツ ファイル名: 22GHz_pol_CAD_model.der_v
プロジェクト名: 茨城32m22GHz冷却受信機		1 / 1	尺度	作成者	2012/01/22	図面 ファイル名: 22GHz_pol_CAD_model_drawing
材料		数量	確認者	小川英夫		図面ファイルパス: C:\Users\konoe\Desktop\X21-28GHzポーラライザー部\22GHzポ
テルル銅(金メッキ)		2	大阪府立大学 理学部 物理科学科 宇宙物理学研究室			

22GHz帯ポーラライザー上部図



* 反対面共通

* 導波管は面取り無し
* フランジは合わせ加工の事

図番	品名	シート枚数	A3	名前	日付	
4	茨城32m鏡22GHz帯 ポーラライザー上部	1 / 1	設計者	onoe	2012/01/16	パーツ ファイル名: 22GHz_pol_CAD_model_upper_v
	プロジェクト名: 茨城32m22GHz冷却受信機	2 / 1	尺度	作成者	2012/01/22	図面 ファイル名: 22GHz_pol_CAD_model_drawing
	材料	数量	確認者	小川英夫		図面ファイルパス: C:\Users\Konohe\Desktop\22GHzポーラライザー部
	テルル銅(金メッキ)	2				図面V22GHz.pol

参考文献

- [1] 中井直正ほか、日本評論社 2009 年「宇宙の観測Ⅱ-電波天文学 シリーズ現代の天文学 16 巻」
- [2] 田中智明 茨城大学 大学院理工学研究科 「2011 年修士論文 茨城 32m 電波望遠鏡の単一鏡分光観測システム開発」
- [3] 岡本雄大 茨城大学 大学院理工学研究科 「2013 年修士論文 Bok-Globule FeSt 1-457 に対する多輝線マッピング観測Ⅰ： $\text{N}_2\text{H}^+(J=1-0)$ 輝線」
- [4] 米 Autodesk, inc. 「Autodesk Inventor 2011 公式トレーニングガイド」日経 BP 社
<http://www.autodesk.co.jp/products/autodesk-inventor-family/overview>
- [5] 観山正見 国立天文台 2009 年 「理科年表 平成 22 年」 丸善株式会社
- [6] Soon Kang Lou 茨城大学 大学院理工学研究科 「2013 年修士論文 VERA 搭載用 86 GHz 帯セプタム型円偏波ポーラライザーの開発」
- [7] 松本浩平 大阪府立大学 理学系研究科 「2010 年修士論文 超長基線干渉計に用いる 6.7 GHz 帯受信機の広帯域化に関する研究開発」
- [8] 海田正大ほか 東京学芸大学紀要自然科学系 2006 年 「60cm 電波望遠鏡の音響光学型電波分光計の開発」