

山口 32 m電波望遠鏡用 22GHz 帯冷却低雑音受信機の製作

山口大学 M2 宮村 太基

1 はじめに

山口 32 m電波望遠鏡では運用開始当初から 22GHz 帯による観測を計画していた。2006 年時には常温試験受信機を用いた試験観測が行われ、開口能率 30 %であることを示し、山口 32 m電波望遠鏡において 22GHz 帯観測が十分可能であることは証明されている。

故に次の段階として山口 32 mの 22GHz 観測システムを高感度なものにするために低雑音受信機の製作が必要となる。そこで 2008 年に冷却低雑音増幅器を組み込むための冷却デュワーが製作された。2009 年 4 月からその冷却デュワーを用いた 22GHz 受信機の開発が始まり 2011 年 8 月に完成した。ここでは完成した 22GHz 帯冷却低雑音受信機に関する報告を行う。

2 2008 年冷却デュワー製作

低雑音化には低雑音増幅器 (Low Noise Amplifier : LNA) の導入が必要となる。そこで図 1 のような冷却デュワーを製作した。

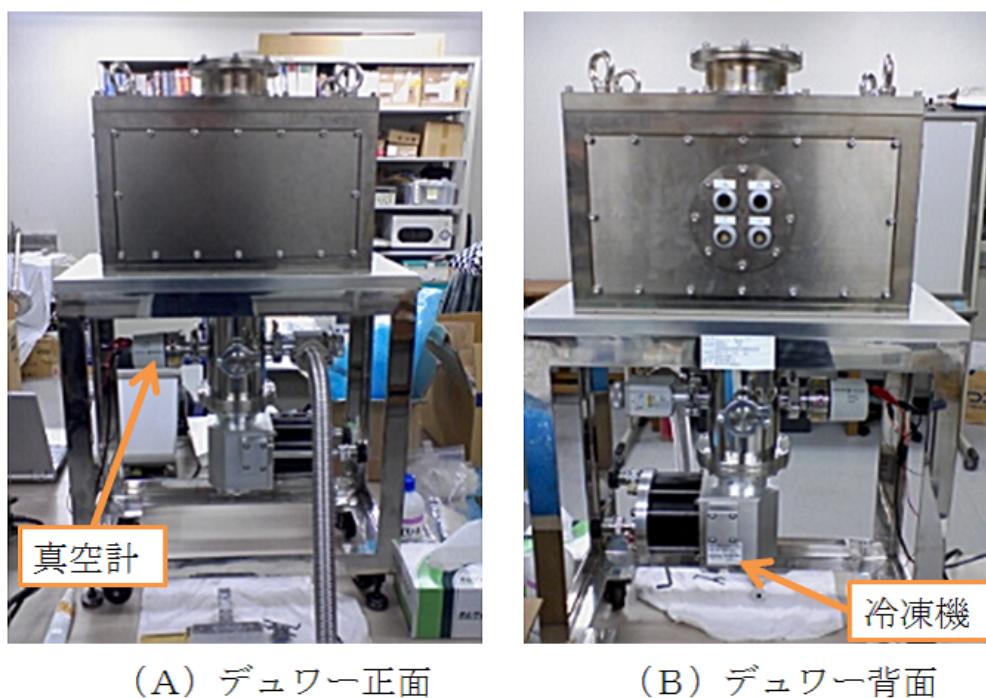


図 1 22GHz 帯用冷却デュワー

デュワー内部は図 2 のようになっており、10K ステージがデュワー下部の冷凍機によって冷却される。デュワー上部にはテーバ管と円筒管、そして円形導波管と円角変換導波管が接続されたものが搭載される。デュワー上部のこのテーバ管が山口 32m のフィードホーンに直接接続される。このデュワー単体の重量は約 70 kg あり、山口 32m のフィードホーンに接続した状態にするとテーバ管と円形導波管の接続部に大きな負荷が掛かってしまうので、その負荷を分散するために円筒管が間に接続されている。この段階の設計では、円角変換導波管の下にポーラライザーが接続されその両端に LNA が接続される。ポーラライザーと LNA は熱伝導メッシュによって 10K ステージと繋がっており、熱伝導によって冷却されるようになっている。

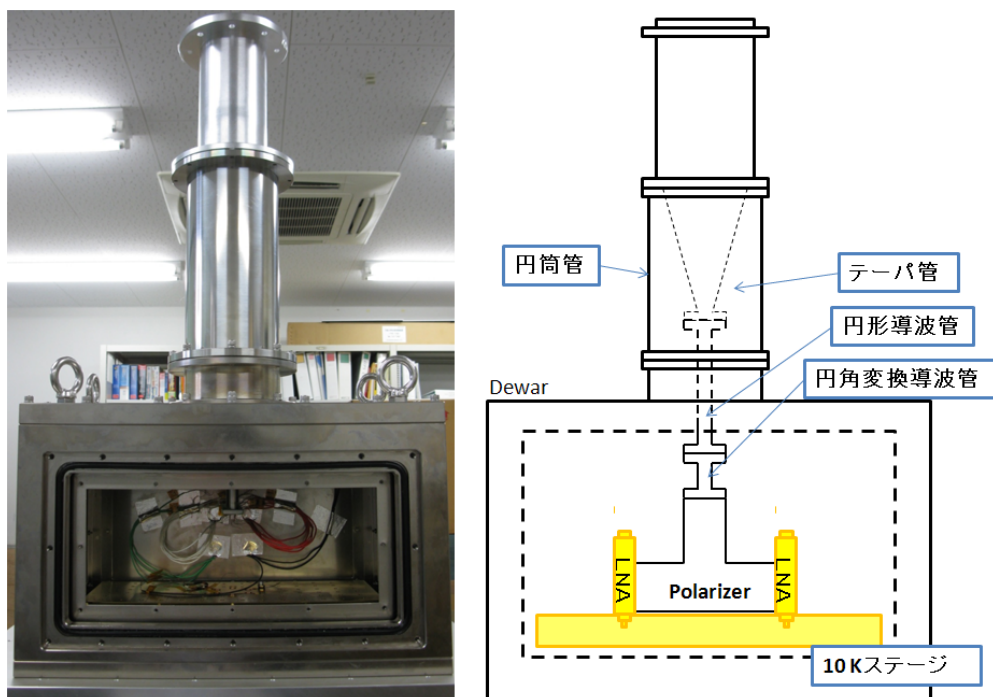


図 2 22GHz 帯用冷却デュワー構造

2.1 真空・冷却試験

冷却の際にはデュワー内部の水蒸気などが冷却の妨げとなるので、真空ポンプによってデュワー内部を真空に近い状態にする必要がある。そこで 2010 年に冷却デュワーの真空引きおよび冷却試験を行った。その結果、真空引き試験では真空引きを開始しておよそ 20 分でデュワー内部気圧を 1 Pa 以下の状態にすることができた。また冷却試験では、デュワー内部気圧が 1 Pa 以下の状態で冷却を開始しておよそ 3 時間 30 分で 10K ステージを 9 K まで冷却することができた。ただし、試験の際デュワー内にはポーラライザーおよび LNA は非搭載の状態だったので、実際にすべて組み込んだ状態で同様の試験を行った場合、もう少し時間を要することが予想される。しかし、この時点では搭載に向けて十分な性能が示されたといえる。

3 設計の方針、仕様（目標値）の決定

22 GHz 帯で主な観測対象として水メーザー（静止周波数：22.235 GHz）やアンモニア吸収線（遷移 (J,K) = (1,1)：23.7 GHz）が挙げられる。この両者を観測できるような広帯域かつ両円偏波同時受信可能なポーライザーの導入が求められる。また、ポーライザーは低雑音増幅器 (LNA) よりも前段のコンポーネントなので低損失であることが求められる。ポーライザーのロスによる雑音温度上昇は冷却することで低減できるため、低雑音増幅器とともに冷却デューワー内に搭載する。

目標とする受信機雑音温度は低雑音増幅器の雑音温度およびポーライザー、テーパ管の損失から予測される。表 1 に受信機性能の仕様および目標値を示す。

表 1 22GHz 帯低雑音受信機の仕様（目標値）

項目	内容	コメント
観測周波数帯域	20.5 GHz - 24.0 GHz	
偏波	左右両円偏波同時受信	
受信機単体雑音温度	50 K 以下	LNA 単体雑音温度 30 K
校正システム	ノイズソースによる校正	

観測システムの校正方法は常温の黒体（アブソーバー）を使用する方法とノイズソースを使用する方法の 2 つが挙げられるが、ここでノイズソースによる校正を選択した理由は、山口 32 m では構造上アブソーバーの使用が難しいのに比べ、ノイズソースの校正の場合、電源の ON/OFF の動作のみなので遠隔による操作が可能となるからである。

4 セプタム型広帯域ポーライザー

22GHz 帯受信機に搭載するポーライザーは大阪府立大学の研究グループが開発したセプタム型ポーライザーを採用した。このポーライザーの特徴は有効帯域が 20.5 GHz - 25 GHz の広帯域であることとセプタムによる左右両円偏波観測が可能であることが挙げられる。表 2 にこのポーライザーの性能を示す。また、このポーライザーは 8.1×8.1 mm の正方形の形状をした導波管入力から 10.67×4.32 mm の長方形の形状をした導波管出力になっている。図 2、3、4 には表 2 でまとめた諸性能の測定結果を示している。

表 2 帯域 20.5GHz-25GHz におけるポーラライザーの性能

リターンロス	アイソレーション	挿入損失	強度比	位相差
20 dB 以上	25 dB 以上	0.1 dB 以内	0.1 dB 以内	$\pm 5^\circ$ 以内

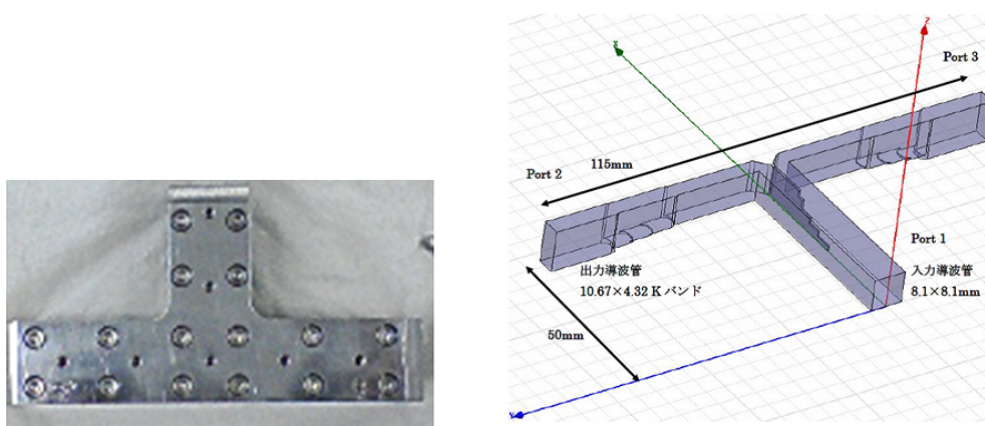


図 1 (左) ポーラライザーの写真 (右) ポーラライザー (内径) の CAD 図

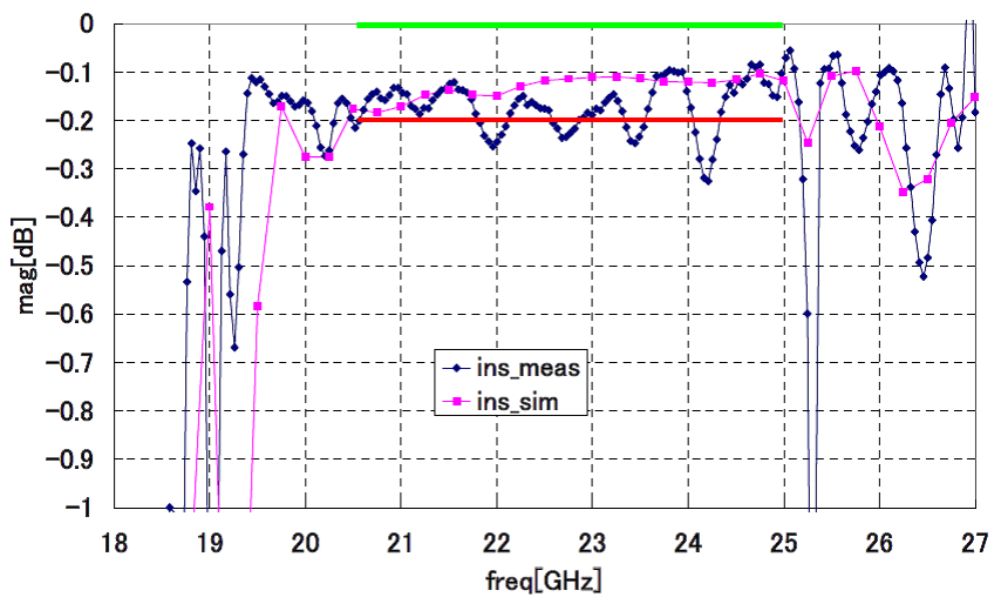


図 2 インサクションロス。図中の青線は実測値、紫線はシュミレーションの値である。また赤線は-20dBm 以上の範囲を示している。

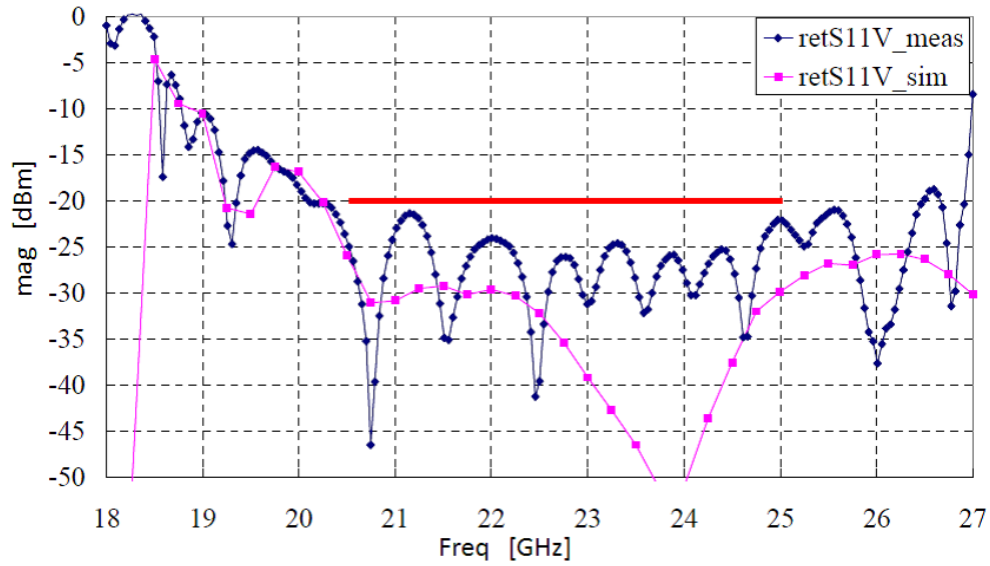


図 3 リターンロス。図中の青線は実測値、紫線はシュミレーションの値である。また赤線は-20dBm 以上の範囲を示している。

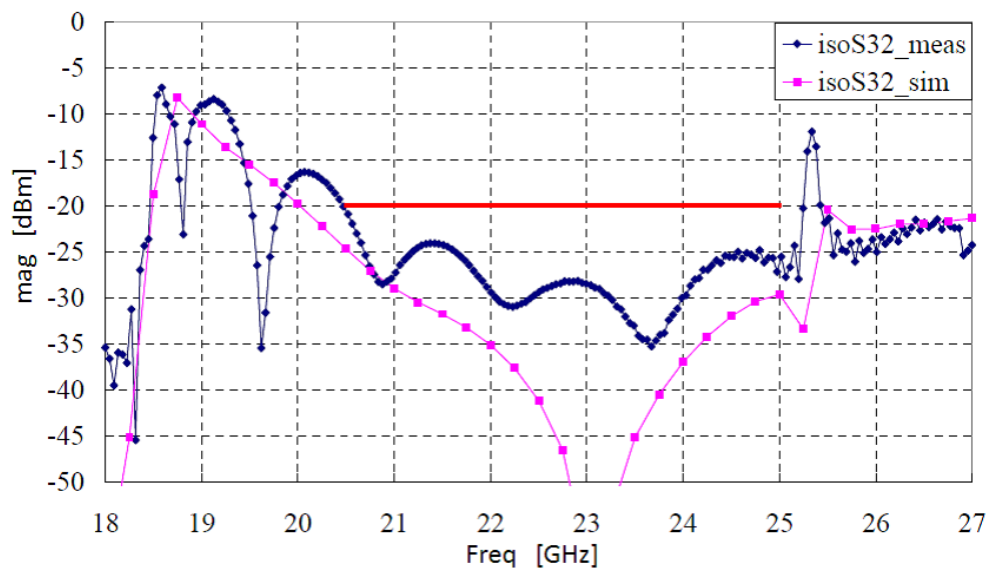


図 4 アイソレーション。図中の青線は実測値、紫線はシュミレーションの値である。また赤線は-20dBm 以上の範囲を示している。

5 22GHz 帯低雑音増幅器

22GHz 帯受信機に搭載する低雑音増幅器 (LNA) は日本通信機製で入力口が導波管なのに対し、出力口は同軸出力となっている。下部にはバイアス入力用のコネクタが備えられている。22GHz 帯受信機では両円偏波観測を行うため LNA は 2 台使用する。両者はともに同じ規格の製品であり左回り偏波用チャンネル (CH1) 側では型番号 69M001、右回り偏波用チャンネル (CH2) 側では型番号 70J003 のものを使用した。表 3 に LNA の性能を示す。また、図 6、7 には 2 台の LNA のうち 70J001 における利得および雑音温度の測定結果を示す。

表 3 22GHz 帯低雑音増幅器の性能

周波数帯域	利得	雑音温度	入出力リターンロス
20.5 - 24 GHz	37 ± 4 dB	30 K 以下	10 dB 以上

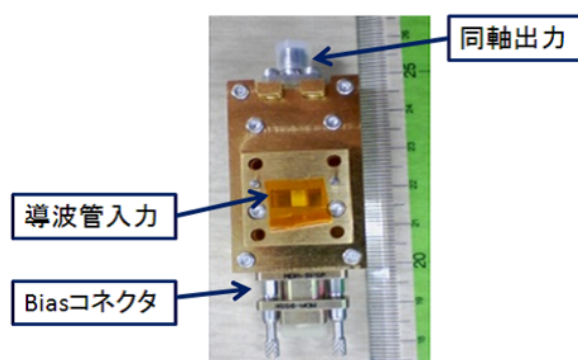


図 5 22GHz 帯低雑音増幅器 (日本通信機製)

6 RF 部の設計と製作

6.1 RF 部設計の問題点

2010 年の段階での冷却デュワーの設計 (図 3.3) には以下に挙げる問題点があった。

(a) LNA と 10 K ステージの干渉。

ポーラライザーの底面と 10 K ステージの間が近接するよう設計されていたため、ポーラライザーの両端に接続される LNA のコネクタ部がステージと干渉してしまい LNA を接続

できない。

(b) 山口 32m へ搭載の際、冷却デューワーの上部の角が円形台と干渉する。

図 2.2 (A) に示すように、円形台の中央部の空洞は直径 35cm であり、その空洞部を通してフィードホーンへと接続しなければならない。また、フィードホーンの底面は円形台の上面からさらに 30cm ほど高い位置にあるので冷却デューワー上部のテーパ管と接続させる場合、冷却デューワーの両肩が円形台を支える 3 つの板と干渉してしまう。

(c) ノイズソースによる校正システムの導入

受信機（システム）雑音温度の大部分は初段の増幅器によって決定される。また、ノイズソースによるシステム雑音温度校正は単純に言えば、ノイズソースの ON と OFF のパワー差を測定することによって行われる。故に、冷却デューワー内の LNA よりも前の段階でノイズソースを注入しなければならない。通常、ノイズソースの注入にはクロスガイドカップラー（結合器）を用いて行われるが、ポーラライザーや円形導波管はデューワー内部にあるためカップラーを接続するのは難しく、テーパ管の接続口は円形でサイズが決まっており、そのサイズにあうカップラーを用意することは難しい。以上より、カップラー以外の方法でノイズソースの注入方法を考えなければならない。

6.2 冷却デューワーの改良

前節で挙げた問題点を解決するため冷却デューワーの改良を行った。図 9 に改良後の冷却デューワーの絵を示す。改良の主な内容は (i) 10K ステージの加工、(ii) 新規フランジ製作、(iii) デューワー背面コネクタ用フランジの製作、(iv) ノイズソース固定ホルダー製作、である。その際に作成した各フランジの図面および改良後の冷却デューワー全体図面は付録にまとめている。

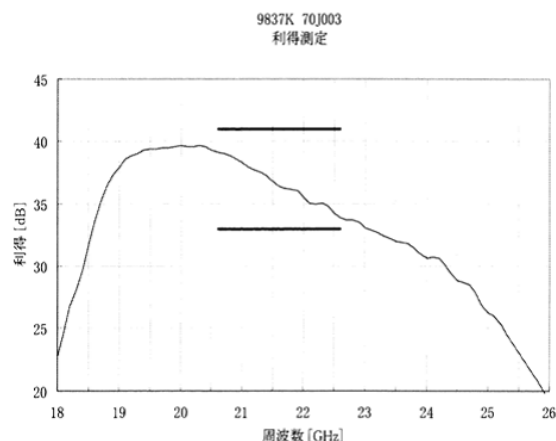


図 6 LNA(70J001) の利得グラフ

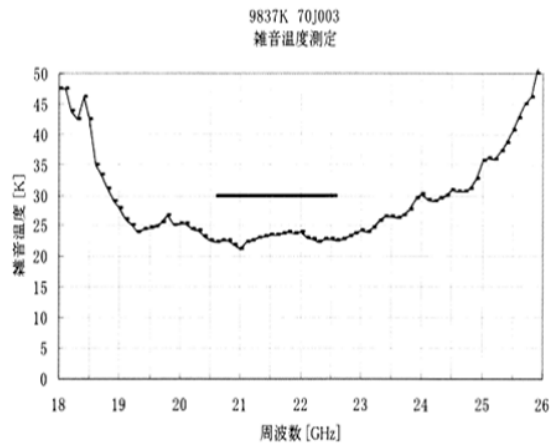


図 7 LNA(70J001) の雑音温度グラフ

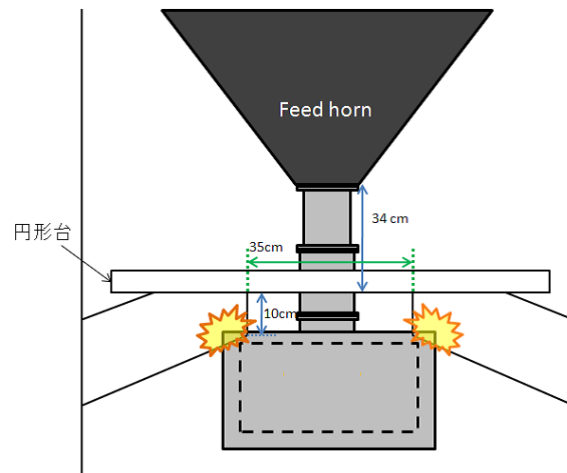


図 8 冷却デューワーと円形台の干渉

(i) 10 K ステージの加工

10K ステージにおける LNA のコネクタ部との接触部分を 20mm × 40mm の長方形にカットした (図 10)。これにより加工した空洞部に LNA のバイアスコネクタが位置し、ステージの下からケーブルが配線されることになる。

(ii) 新規フランジ製作

デューワー上部のテーパ管とデューワー内円形導波管の接続部に新しく導入するフランジを 2 つ設計・製作した。1 つは円形台との干渉を改善するためにデューワー上部のテーパ管部分を長くすることを目的としている。また、さらに LNA のコネクタ部の配線作業を楽にするためにポーラライザーと 10K ステージ間の距離を離すことも目的としている。このフランジ

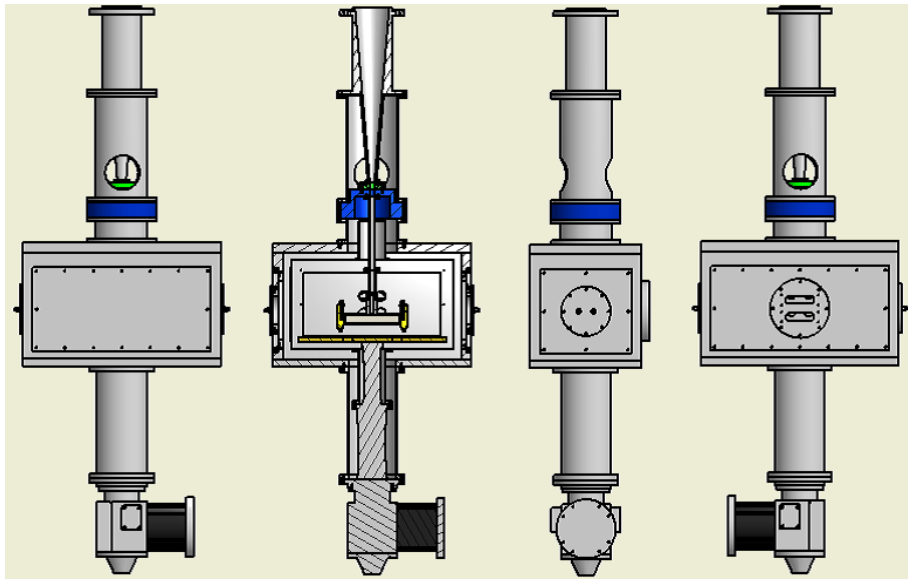


図 9 改良後の冷却デュワーの絵：左から正面、断面図、側面、背面となっている。

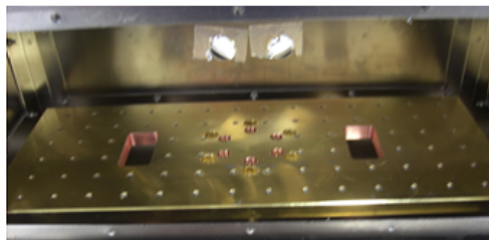


図 10 加工した 10K ステージ

をインターフェースフランジとする（図 9 中の青いフランジ）。

残る 1 つはインターフェースフランジの上部に接続するもので、ノイズソース注入用のフランジである。このフランジをアイフランジとする（図 9 中の緑のフランジ。アイフランジには側面に 2 カ所テーパ形の貫通孔が空いており、その片側の穴に真線を出した同軸ケーブルを挿入してノイズソースを注入する。また、このアイフランジとインターフェースフランジの間にカプトンフィルムを挟み、デュワーの気密を行っている。

(iii) デュワー背面コネクタ用フランジの製作

デュワー内には 2 台の LNA と温度センサーが 1 つ設置されており、それぞれバイアス電源が必要となる。その電源はデュワー外部からコネクタを介して供給しなければならない。そこで図 12 に示すような配線を行うことを想定し、図 17 のようなフランジ (D-sub-port) を作成した。デュワー背面のコネクタ部にはハーメチックコネクタを採用した。使用するハーメチックコネクタは 2 つでそれぞれに D-sub 25 pin が取り付けられる。1 つの D-sub 25 pin には 2 台分の LNA の配線を行い、もう 1 つは温度センサー用の配線を行う。

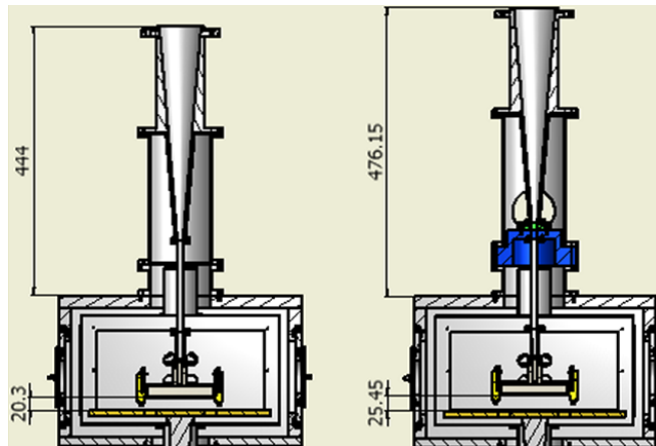


図 11 (左) 改良前のデュワー、(右) 改良後のデュワー

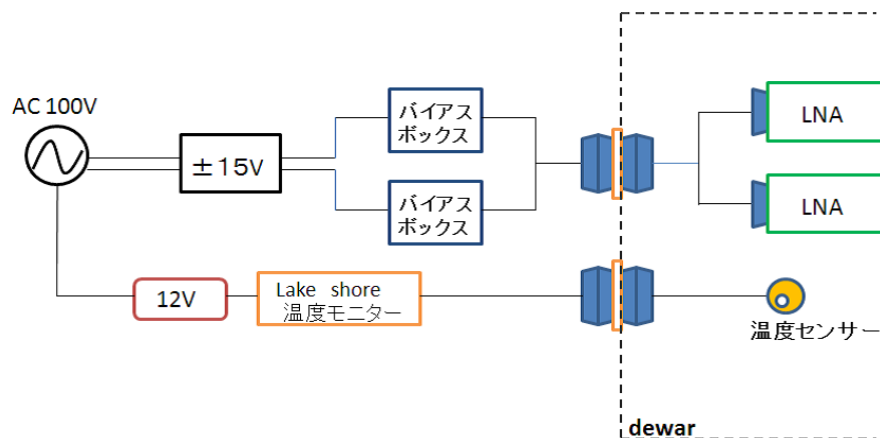


図 12 22GHz 帯受信機部配線模式図

(iv) ノイズソース固定ホルダー製作

ノイズソースが取り付けられた同軸ケーブルの先端部を真線がでるように加工したものをアイフランジの貫通孔から挿入してノイズソースの注入を行う。その際、同軸ケーブルの真線の挿入加減が変わってしまうと、注入されるノイズソースの雑音温度も変化してしまうので、同軸ケーブルを固定する必要がある。そこで図 13 のようなノイズソース固定ホルダーを設計・製作した。また、アイフランジ貫通孔に同軸ケーブルを挿入できるように円筒管の両側に直径 70mm の穴を加工した。図 13 に示すノイズソース固定ホルダーは 4 つのパーツからできており、そのうちの 2 つのパーツで円筒管を挟み、ホルダー自身を固定させる。残った 2 つのパーツは同軸ケーブルを挟んで固定させるものである。円筒管に接続されているパーツと同軸ケーブルを固定しているパーツの間に六角ネジが計 4 本取り付けられており、それらのネジで同軸ケーブルの挿入加減を微調整できるようになっている。

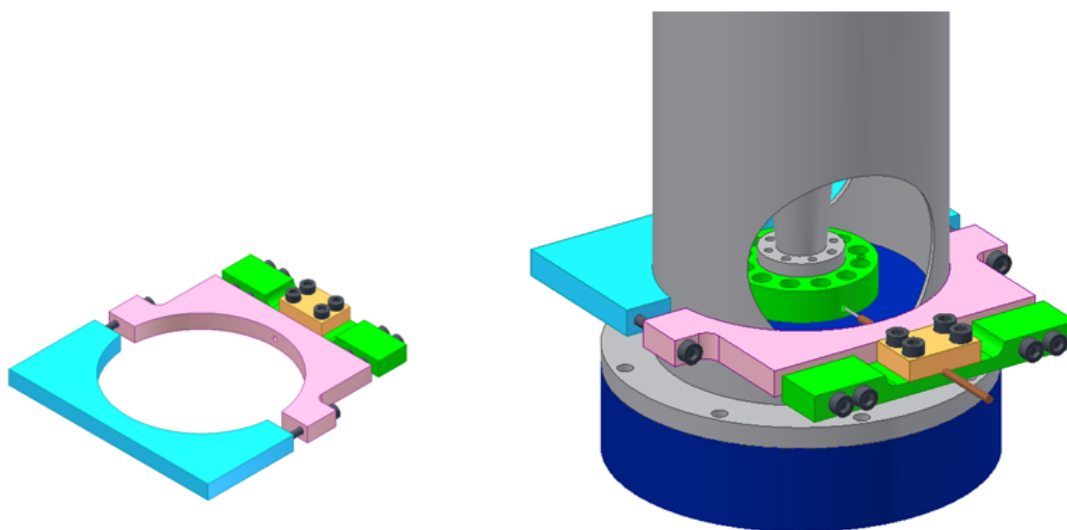
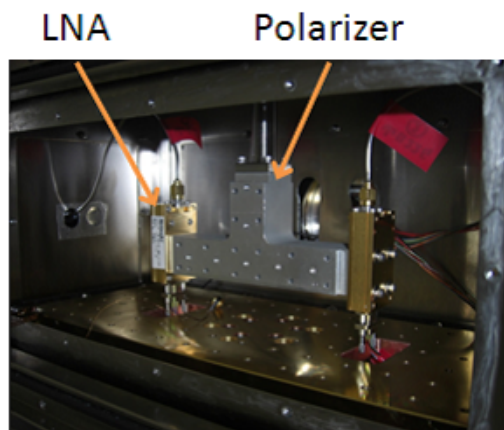


図 13 （左）ノイズソース固定ホルダー、（右）ホルダー搭載時の絵

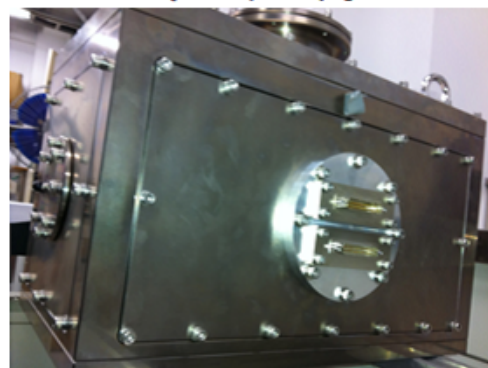
以上 (i) ～ (iv) で設計・製作したフランジを組み込んだ冷却デュワーの全体図を図 14、図 19 に示す。また、図 15～17 には、新規作成および追加加工を行った各コンポーネントを、図 18 にはそれらのコンポーネントを組み込んだデュワー上部構造の図を載せている。



デュワー正面



デュワー内



デュワー背面

図 14 改良後の冷却デュワー



表面

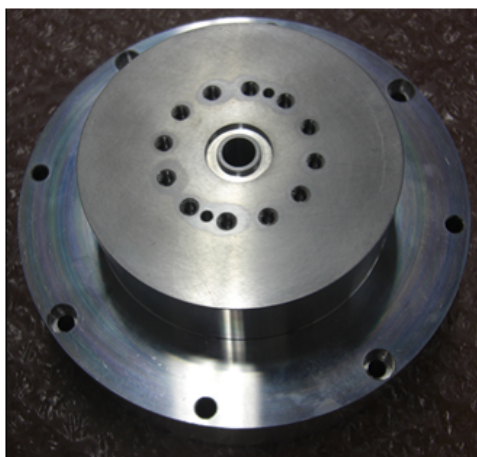


側面

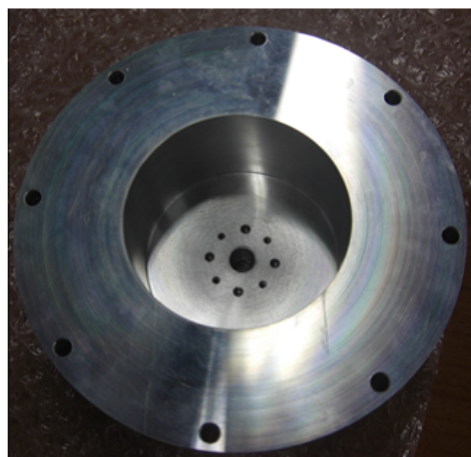


アイフランジ側面の図面

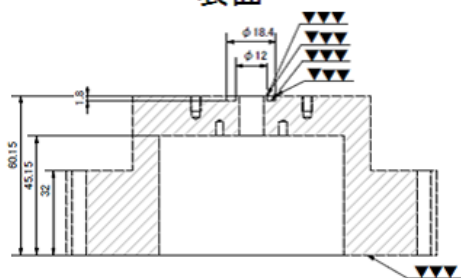
図 15 新規作成したアイフランジ



表面



裏面



断面図

図 16 新規作成したインターフェースフランジ



円筒管



D-sub-port

図 17 (左) 加工した円筒管 (右) 新規作成した D-sub-port



図 18 デュワー上部の全体構造

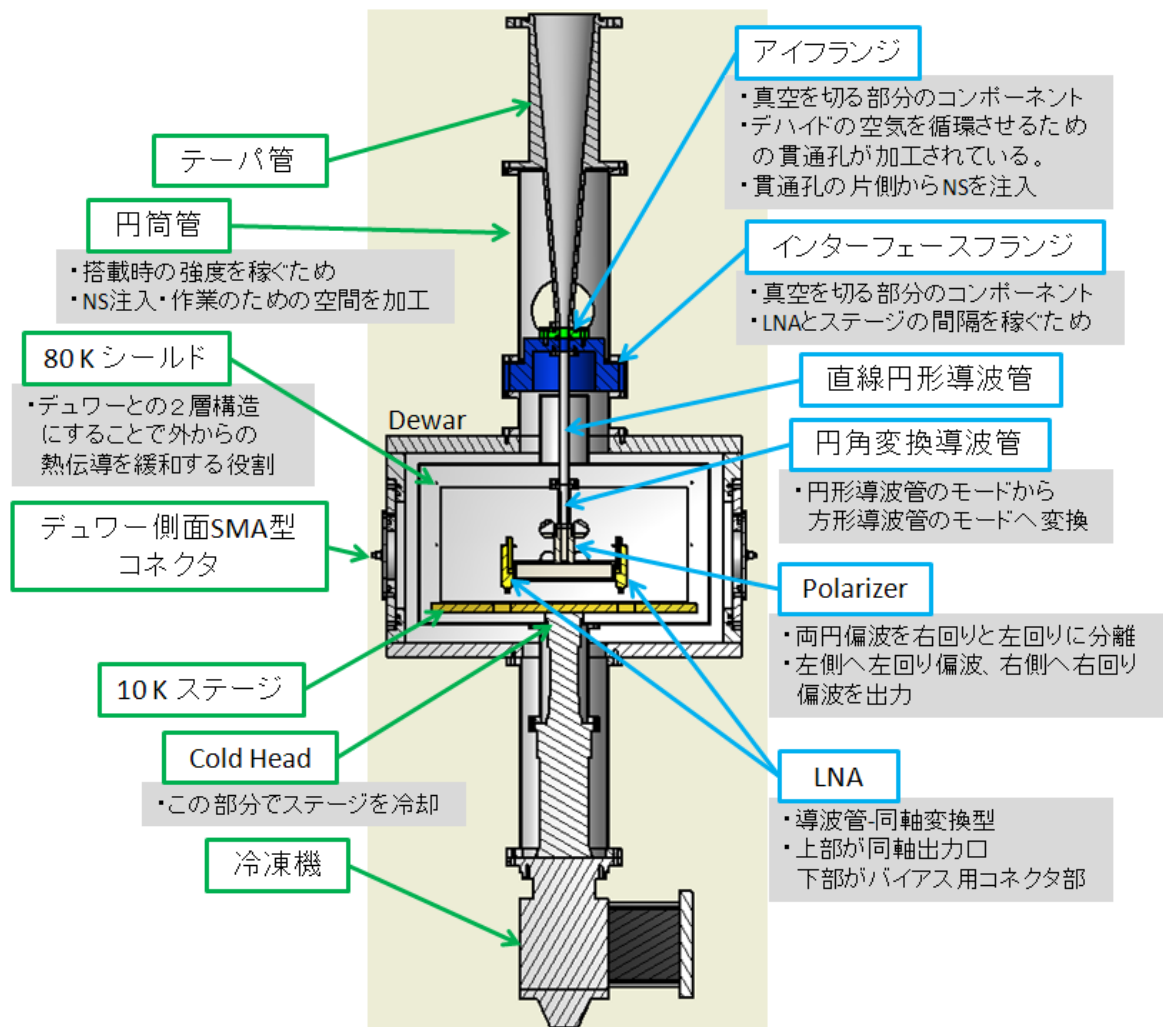


図 19 改良後の冷却デュワー全体構造模式図

6.3 真空・冷却試験

● 真空引き試験

前節で述べた新規作成した各フランジを組み込んだ冷却デュワーにおいて気密が保たれているかを確認するために真空引き試験を行った。試験時のデュワー内の状態は LNA およびポラライザーは非搭載である。

試験の結果、真空引きを開始しておよそ 20 分でデュワー内気圧が 1Pa を下回り、継続して真空引きを行ったところ 0.051 Pa まで達した。この結果から新規フランジを組み込んだ冷却デュワーは十分に気密性が保たれていることがわかる。

● 冷却試験

次にデュワー内冷却試験を行った。真空引き試験時と同様デュワー内は LNA およびポー

ライザー非搭載である。温度センサーは 10K ステージ上に設置しており、冷却試験で測定される温度は 10K ステージの温度となる。

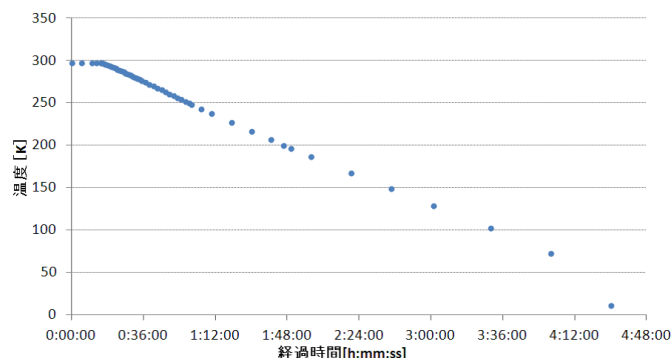


図 20 冷却試験時のデュワー内 10K ステージの温度の時間変化

表 20 は冷却試験の結果を表したグラフである。真空引きを開始したときをスタートとし、その 20 分後のデュワー内気圧が 1Pa を下回ったときに冷却を開始した。試験の結果、実際に冷却を開始してからおよそ 4 時間 30 分で 10K ステージが 10K に到達した。その後も継続して冷却を行ったところ 9~10K の間で安定していた。

6.4 RF 部配線

図 12 の配線図を詳細に模式図にあらわしたものが図 21 である。デュワー背面のコネクタ部には新規フランジ (D-sub-port) を作成しており、ハーメチックコネクタが取り付けられる。

この RF 部の配線を行うために (1) LNA 用バイアスボックスと D-sub-port (デュワー外側) を繋ぐケーブル、(2) D-sub-port (デュワー内側) と LNA を繋ぐケーブル、(3) 温度モニター (Lake shore) と D-sub-port (デュワー外側) を繋ぐケーブル、(4) D-sub-port (デュワー内側) と温度センサーを繋ぐケーブル、の計 4 種類のケーブルを作成した。それぞれのケーブルのうち (1) - (2) のペアと (3) - (4) のペアは D-sub-port 越しに繋がることになる。図にあるとおり (2) のケーブルは 10K ステージの下から追加工した穴を通して LNA 下部コネクタに接続する。また、2 台の LNA の出力部とデュワー両側面のコネクタ (デュワー内側) を繋ぐケーブル (5) も作成した。

(1) LNA 用バイアスボックスと D-sub-port (デュワー外側) を繋ぐケーブル

図 22 に LNA 用バイアスボックスコネクタ部のピンアサイメントを、図 23 に作成したバイアス用ケーブル (デュワー外側) を、図 24 にバイアスケーブルの D-sub-port に接続する側のピンアサイメントを示す。

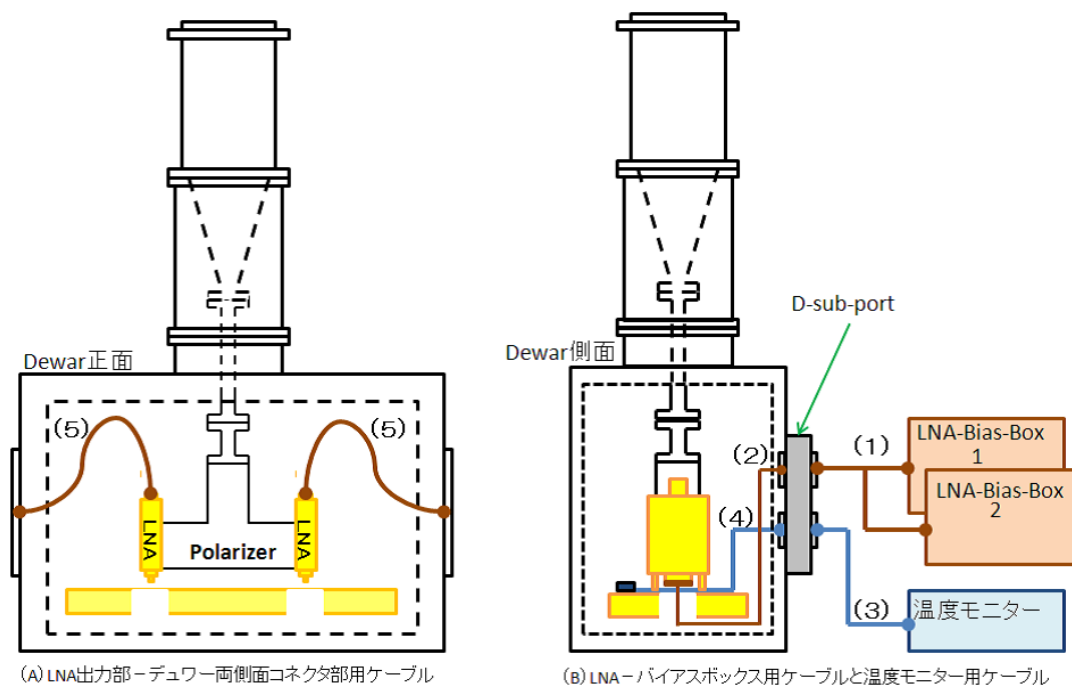


図 21 RF 部配線の模式図。図中の (1) ～ (5) で記したケーブルは本文中のものと対応している。

ケーブル自体はあらかじめ製品に付属されていたケーブルを用いたため、バイアスボックス側のコネクタはそのまま使用できる。ケーブル 2 本を 1 つの D-sub 25pin に繋いでいるので、D-sub 25pin の配線と 2 本のケーブルの対応関係をその都度確認することが必要である (ただし、D-sub 25pin 側とケーブルには対応関係を確認するためにタグを付けている。)

(2) D-sub-port (デュワー内側) と LNA を繋ぐケーブル)

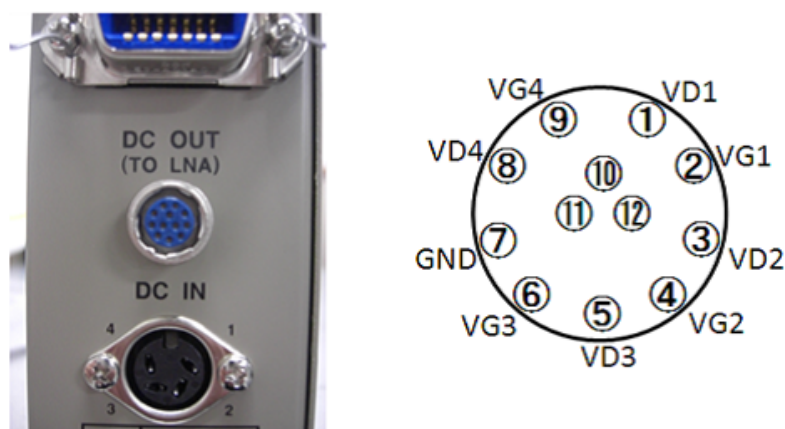


図 22 LNA 用バイアスボックスのコネクタ部ピンアサインメント



図 23 作成したバイアス用ケーブル（デュワー外側）

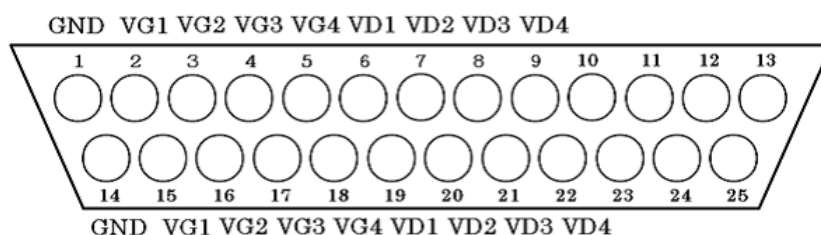


図 24 バイアス用ケーブルのピンアサイメント。LNA2 台分の配線を上下段に分けて作成した。図は図 23 の線がはんだ付けされている面の反対側から見た場合で描かれている。

図 25 に作成した LNA ケーブル（デュワー内側）を、図 26 に LNA ケーブルの D-sub-port と接続する側のピンアサイメントを示す。図 27 は LNA 下部のバイアスコネクタ部に接続する側のピンアサイメントである。また図中の左下のピンアサイメントの図と右側の表は対応している。

（１）のバイアスケーブルと同様、LNA2 台分のケーブルが 1 つの D-sub 25pin にまとめられているので対応関係を確認する必要がある（こちらにもタグを付けている）。

（３） 温度モニター（Lake shore）と D-sub-port（デュワー外側）を繋ぐケーブル

図 28～図 30 温度モニター用ケーブルのピンアサイメントおよび作成した温度モニター用ケーブルを示す。温度モニターの仕様書に配線図が載っていなかったため、図では色を用いて表している。また実際にデュワーとの配線を行う際に、デュワー側と温度モニター側で対応関係が分かるよう、ケーブルにタグを取り付けている。

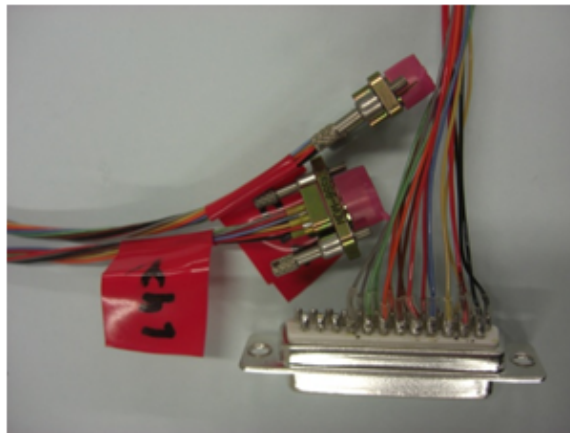


図 25 作成した LNA 用ケーブル（デュワー内側）

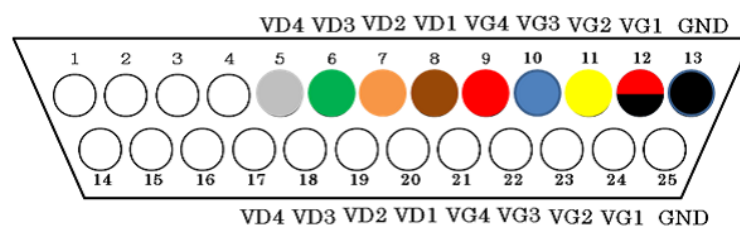
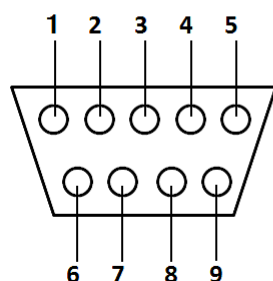


図 26 LNA 用ケーブルのピンアサイメント。LNA2 台分の配線を上下段に分けて作成した。図は図 25 の線がはんだ付けされている面の反対側から見た場合で描かれている。



LNA-バイアスコネクタのピン接続

線色	ピン番号	信号名
黒	1	GND
茶	2	VD1
橙	3	VD2
緑	4	VD3
灰	5	VD4
赤/黒	6	VG1
黄	7	VG2
水	8	VG3
赤	9	VG4



LNA外側（ピン側）から見た ピンアサイメント

図 27 バイアス用ケーブルのピンアサイメント。LNA2 台分の配線を上下段に分けて作成した。図は図 26 の線がはんだ付けされている面の反対側から見た場合で描かれている。

(4) D-sub-port (デュワー内側) と温度センサーを繋ぐケーブル

(3) の温度モニター用ケーブルのペアとなるデュワー内温度測定用ケーブルのピンアサイメントを図 31 に、出来上がったケーブルを図 32 に示す。また、デュワー内、外の D-sub 25 pin の配線もケーブルの色を合わせるようにして作成した。デュワー内温度測定用ケーブルには図 32 のような温度センサーがあり、中心の穴に M3 のネジを通してステージ上やポラライザーに取り付けることができる。

(5) LNA 出力部とデュワー両側面のコネクタ (デュワー内側) を繋ぐケーブル

デュワー内 LNA の同軸出力からデュワー内両側面のコネクタ部までの同軸ケーブルを 2 本製作した。その 2 本の同軸ケーブルを同軸ケーブル、とする。2 本とも長さは 20cm 程度であり、性能は図～に示している。性能測定にはネットワークアナライザーを用いた。これ以降に出てくる S11、S22 はそれぞれリターンロスで S21、S12 はそれぞれ挿入損失である。結果、ケーブル、ともにリターンロス 20 dB 以上、挿入損失 3 dB 以下を示した。

配線完了後の冷却デュワー

図 38 に作成したケーブル (1) ～ (5) を配線した後のデュワー内の様子を示す。図のようにステージの追加工部から LNA バイアス用ケーブル (2) が接続されている。また LNA 出力用同軸

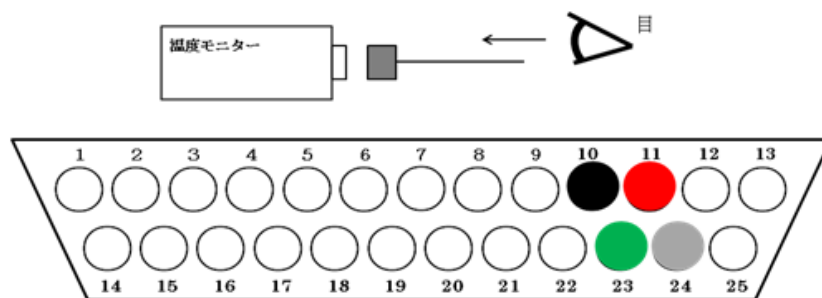


図 28 上図の向きから見た時の温度モニターへ繋ぐ D-sub 25 Pin のピンアサイメント

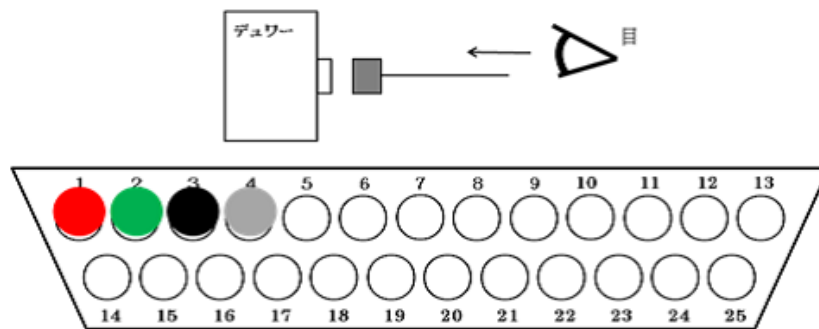


図 29 上図の向きから見た時のデュワー外側へ繋ぐ D-sub 25 Pin のピンアサインメント

ケーブル（5）はデュワー両側面のコネクタ部へ接続するために多少変形させて取り付けられている。デュワー両側面のコネクタ部は常温部であるため、LNA 出力用同軸ケーブル（5）には 10K ステージとデュワー内の 80K シールドの 2 カ所に熱アンカーをとっており、LNA 冷却の妨げとなるのを防いでいる。ポーラライザーおよび LNA とともに 10K ステージと熱伝導メッシュで熱アンカーをとって冷却を行っている。ポーラライザーの中心部には温度センサーを取り付けた。これにより、温度モニターに表示される温度はポーラライザーの温度とみなすことができる。ポーラライザーにはラベルを貼っており、左回り偏波、右回り偏波がどちら側から出力されるかを区別できるようにした。図 38 の場合、正面から見て左側に左回り偏波（CH1）、右側に右回り偏波（CH2）が出力される。

図 39 は LNA、温度測定に用いる各装置をまとめたものである。LNA バイアスボックスを動作させるために図のような 15V 電源を使用した。また、真空モニターは図の右端のデュワー下部真空計と繋がっており、内部の気圧をモニターに表示する。



図 30 温度モニター用ケーブル（デュワー外側）

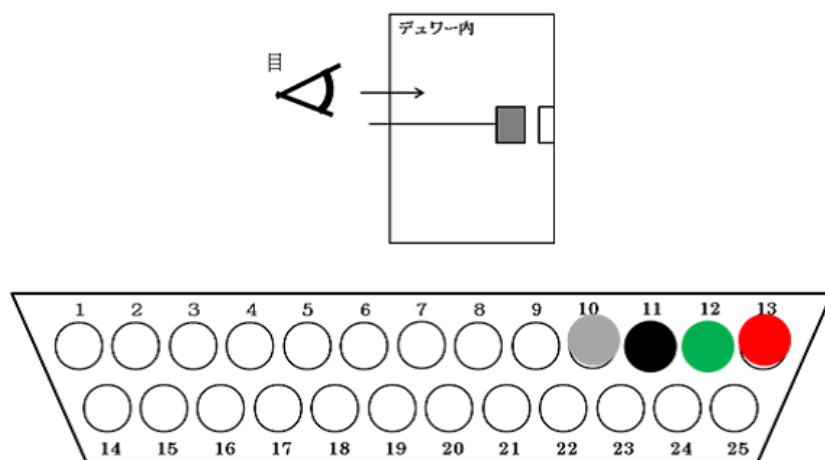


図 31 上図の向きから見た時のデューワー内側の D-sub 25 Pin のピンアサイメント



図 32 デューワー内温度測定用ケーブル

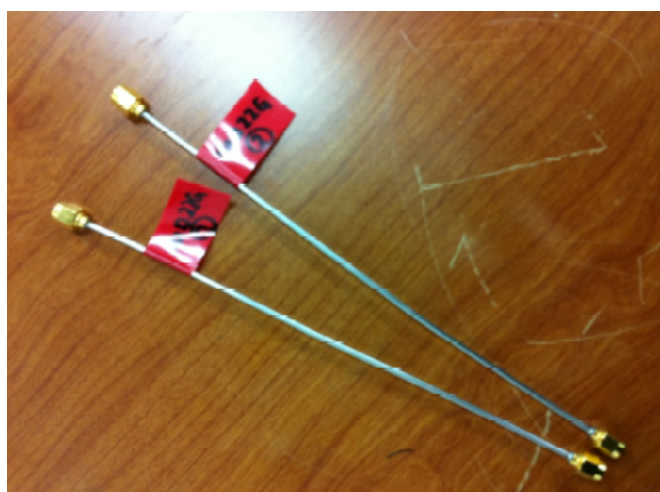


図 33 LNA 出力用同軸ケーブル

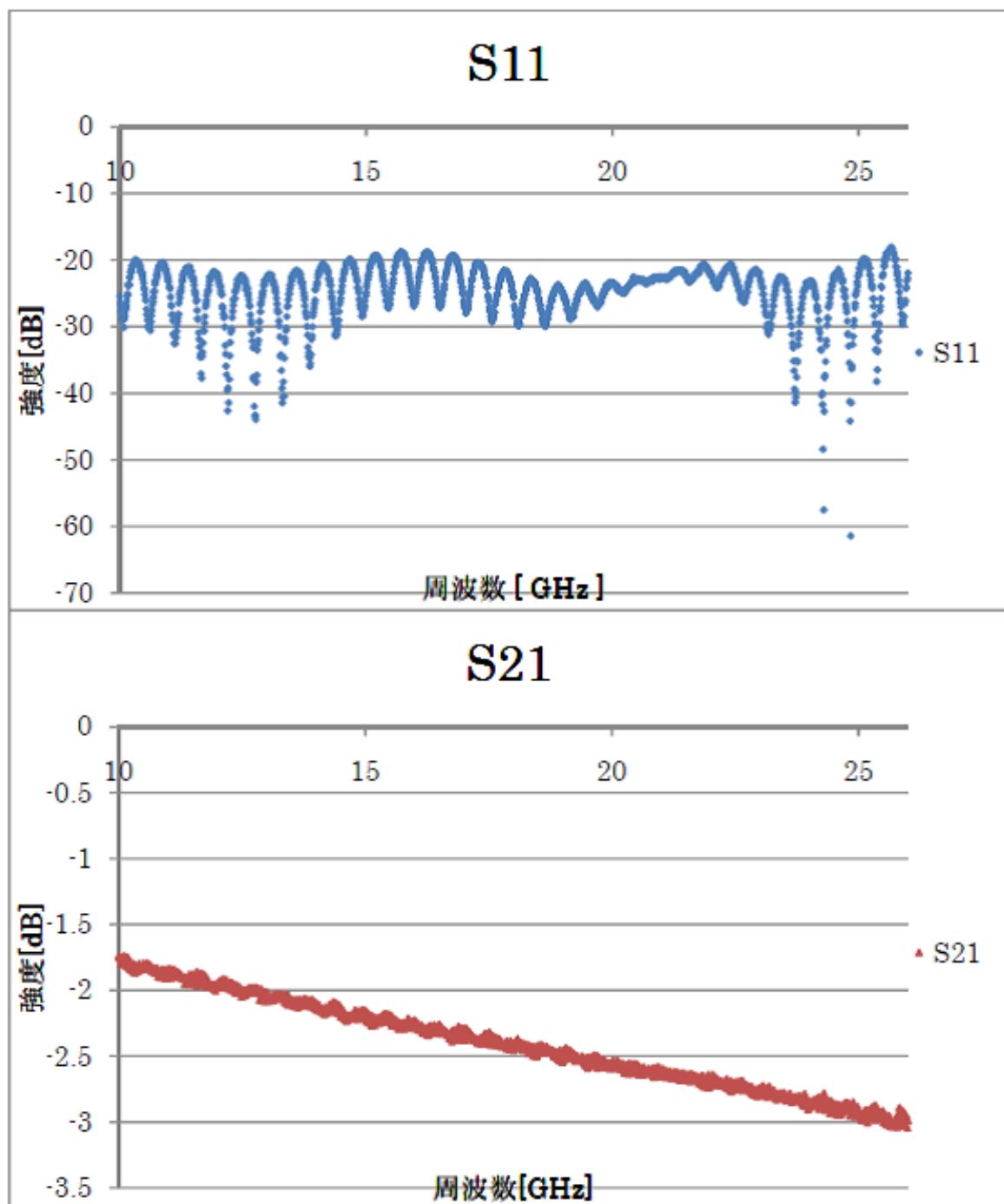


図 34 同軸ケーブル のリターンロスおよび挿入損失

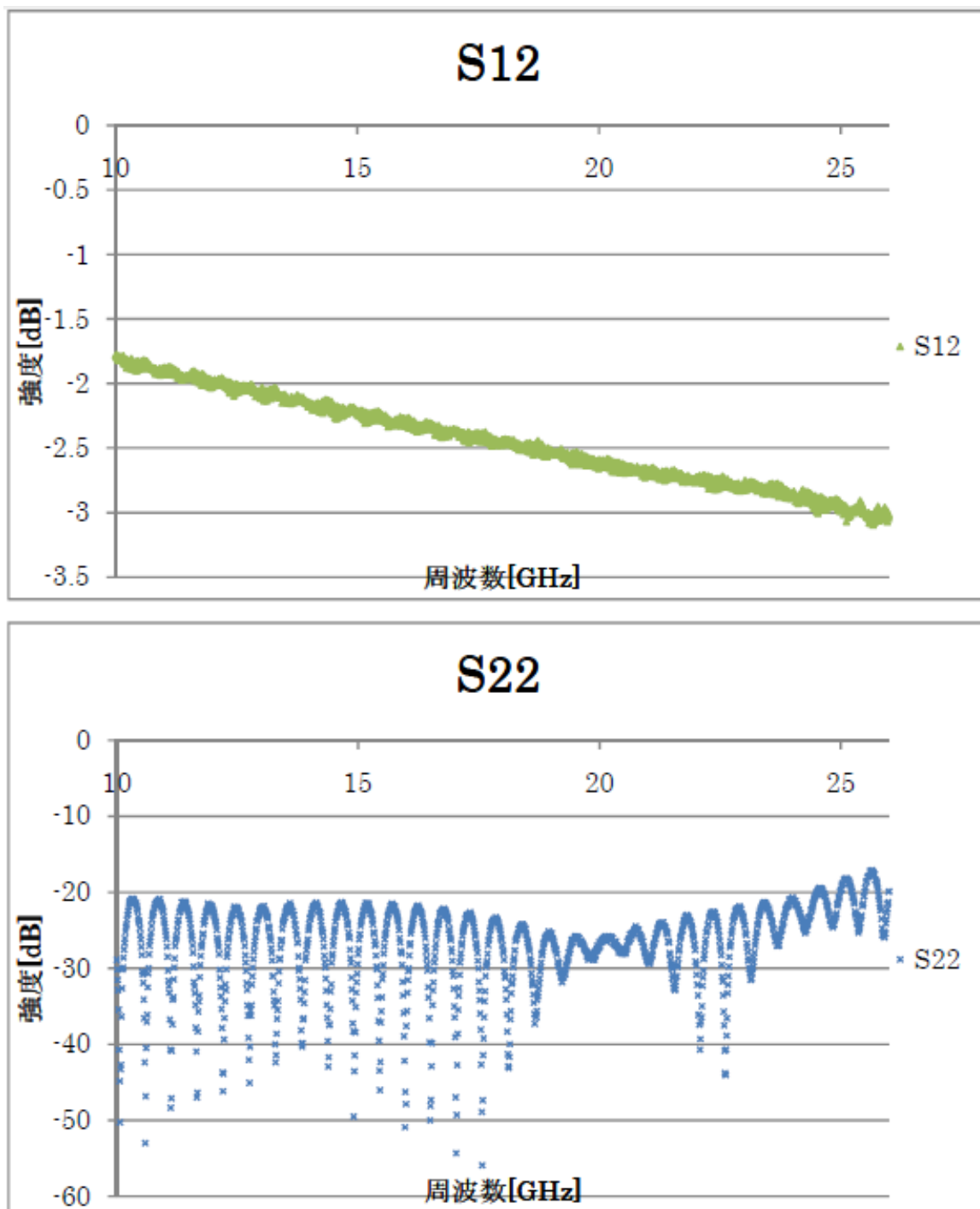


図 35 同軸ケーブル のリターンロスおよび挿入損失

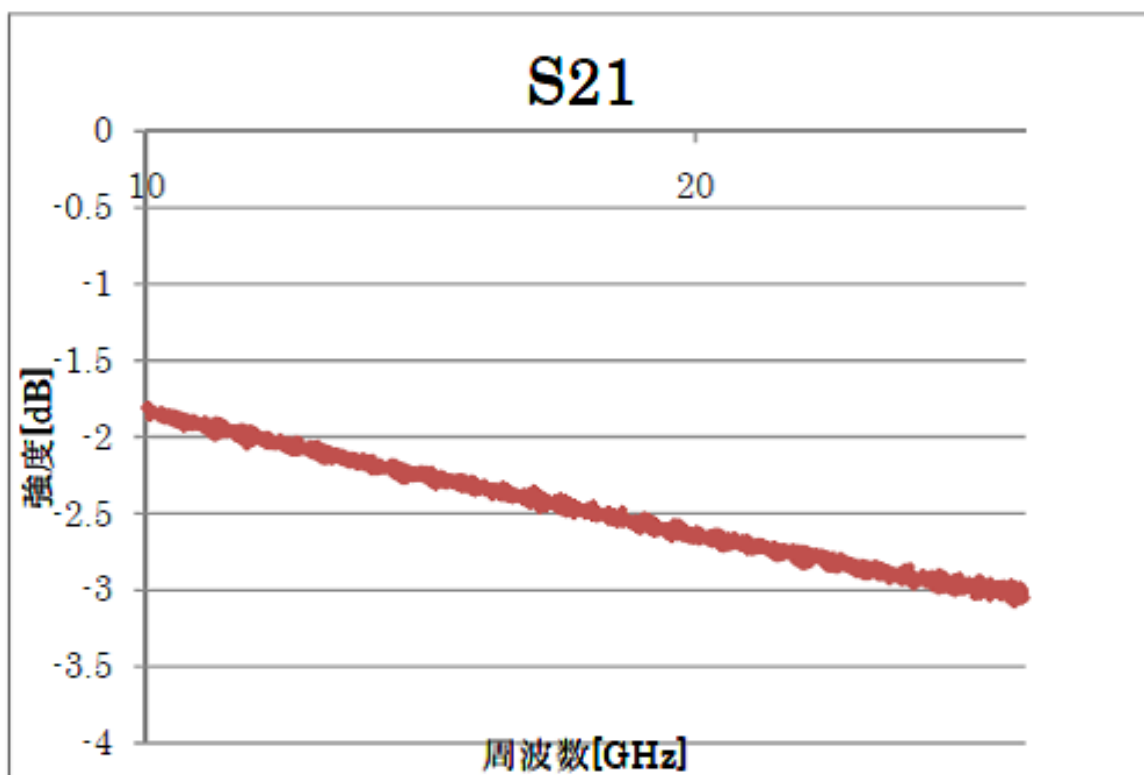
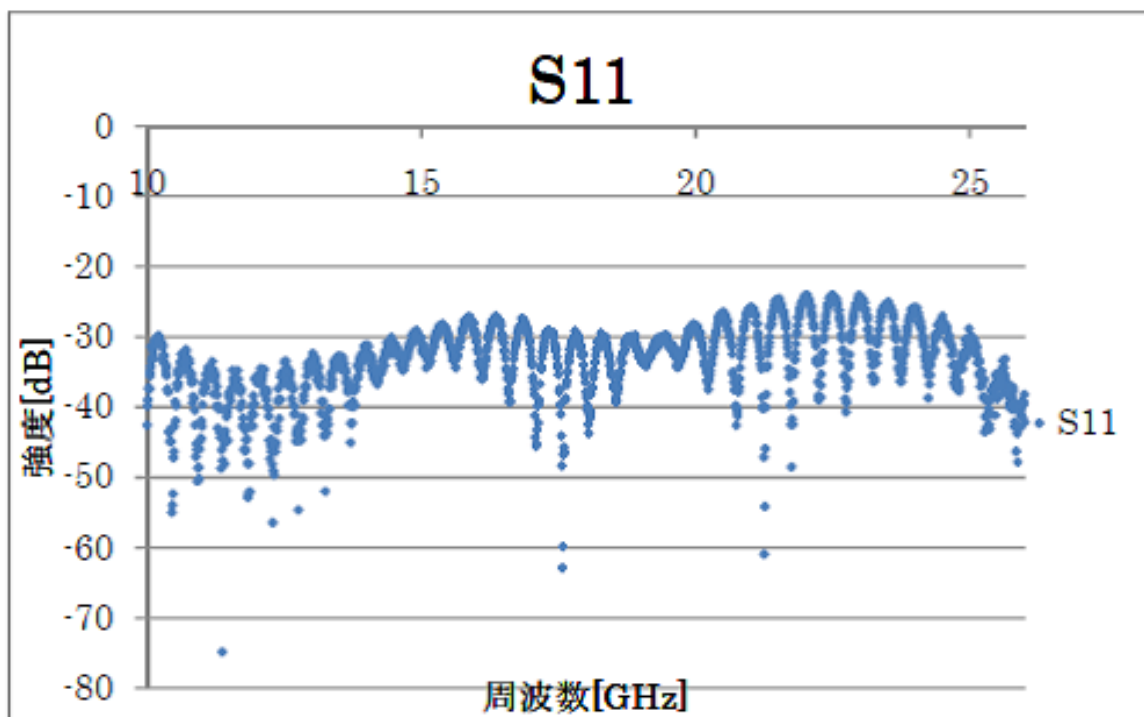


図 36 同軸ケーブル のリターンロスおよび挿入損失

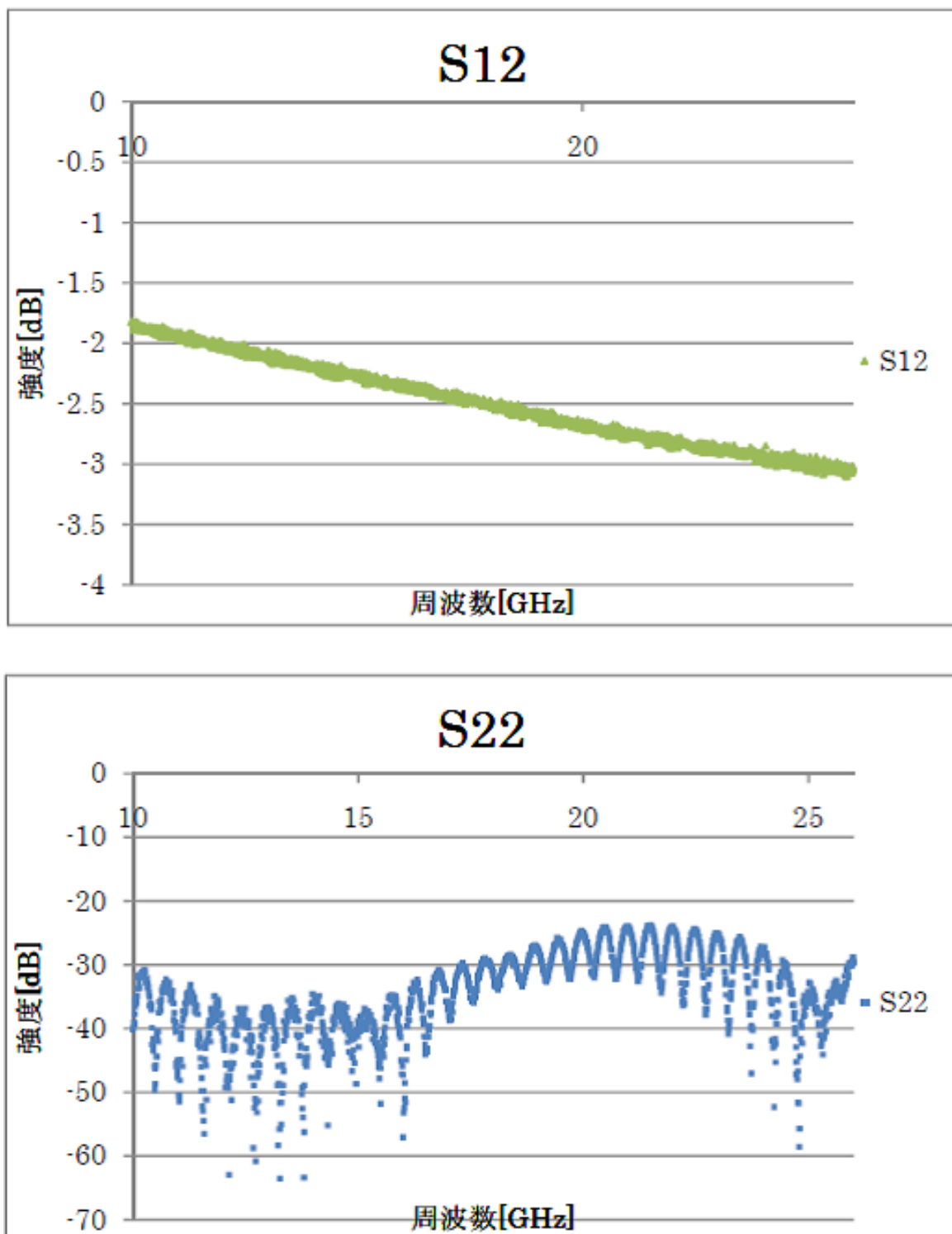


図 37 同軸ケーブル のリターンロスおよび挿入損失

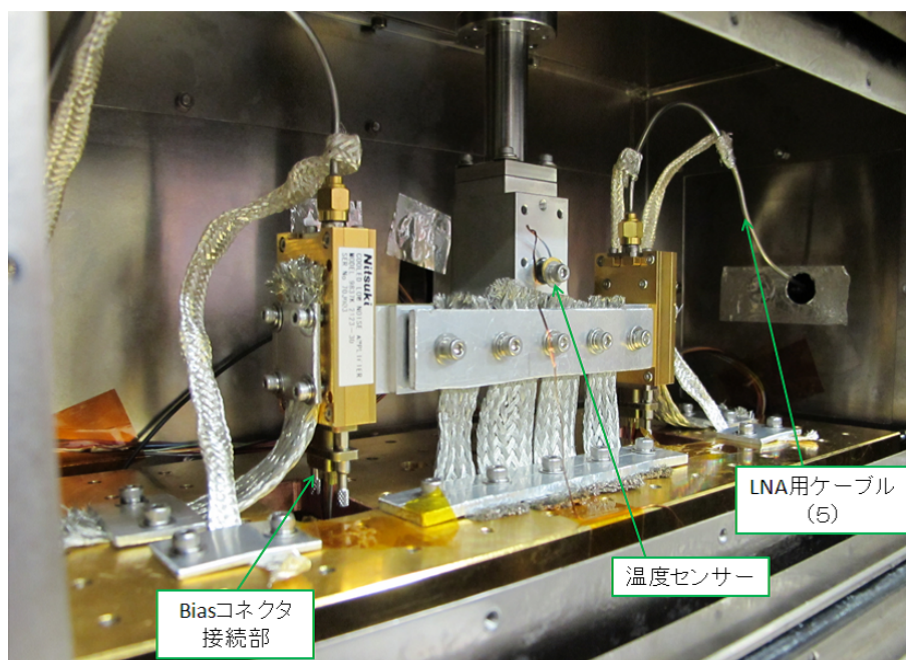


図 38 RF 部配線完了後のデュワー内の様子（デュワー正面から）

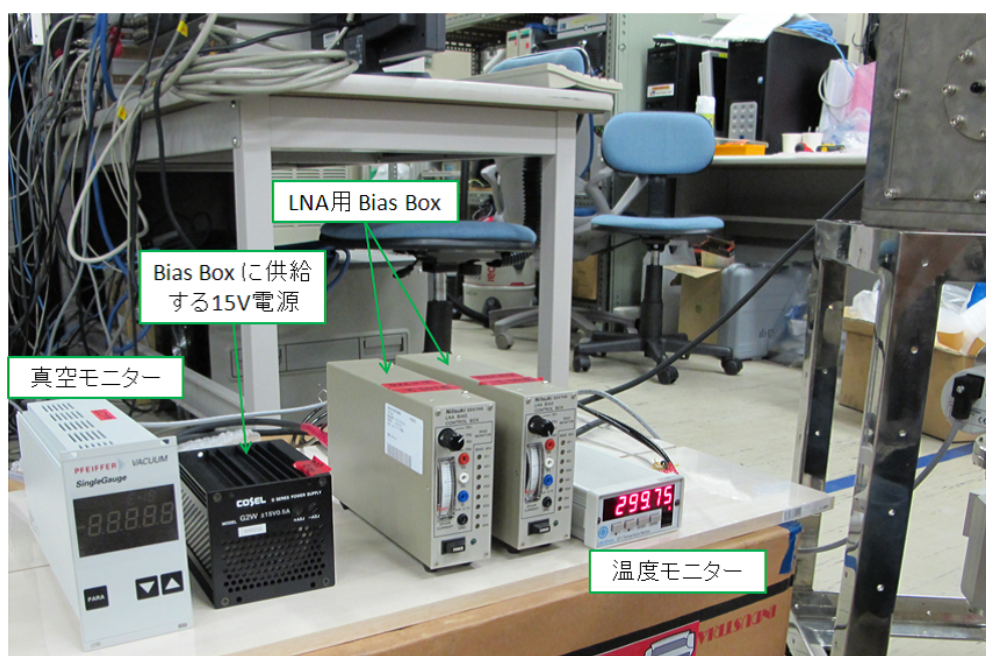


図 39 RF 部に使用する各装置