

双方向型共同研究

『GAMMA10ダイバータ模擬実験のための マイクロ波イメージング干渉計用 1次元アンテナアレイの開発』 進捗報告

東京農工大学 桑原大介

研究代表者：	桑原 大介	(東京農工大学)
センター世話人：	吉川 正志	(筑波大学)
NIFS世話人：	長山 好夫	(NIFS)
研究協力者：	土屋 隼人	(NIFS)
	小波蔵 純子	(筑波大学)
	森川 裕亮	(筑波大学)
	長谷川 裕平	(筑波大学)
	間瀬 淳	(九州大学)
	伊藤 直樹	(宇部高専)
	近木 祐一郎	(福岡工大)

1. 目的

GAMMA10/PDXにおいてダイバータプラズマ電子密度イメージング計測を目指したマイクロ波イメージング干渉計が開発されているが、E-ダイバータ部のような真空容器内の狭い領域で使いやすい1次元アンテナアレイは開発されていない

真空容器で使用可能なコンパクトかつ高性能な1次元アンテナアレイを開発する。

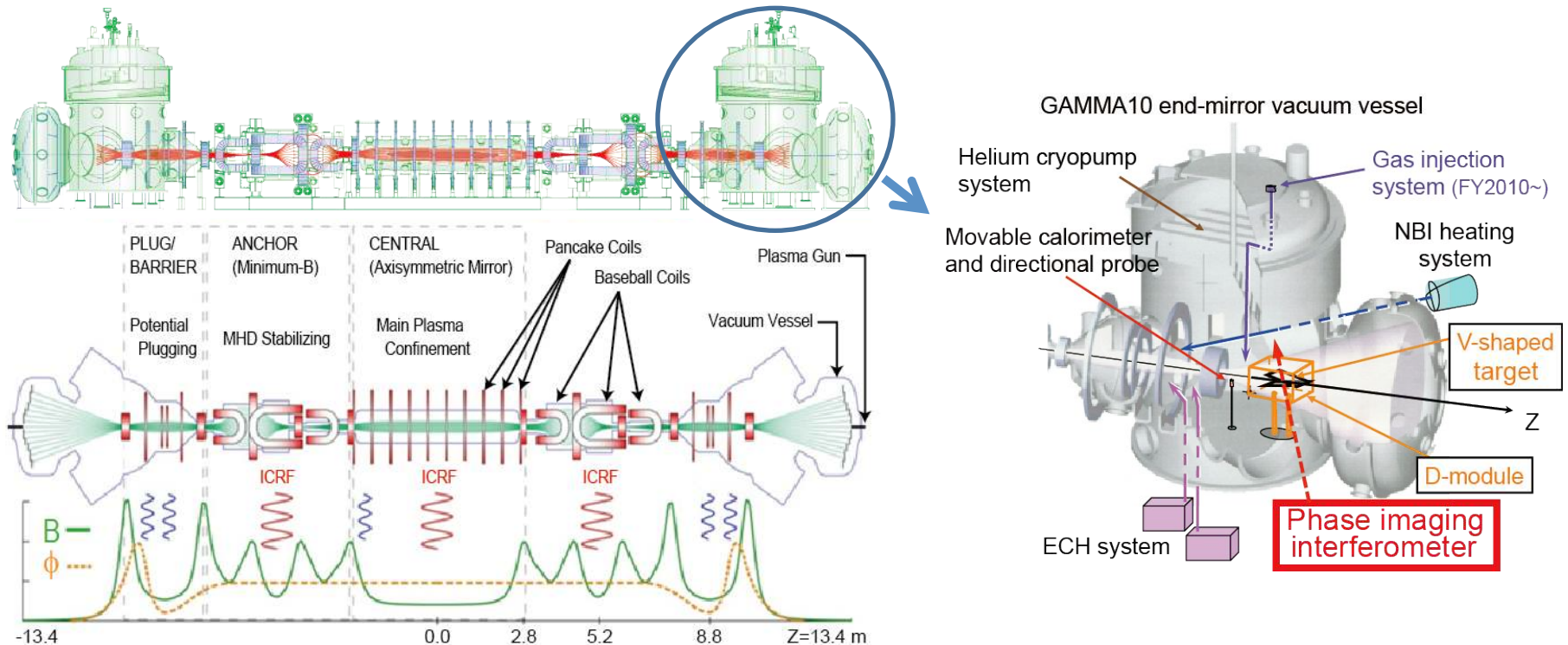


Fig.1 GAMMA10-PDX

2-1. 背景 ミリ波干渉計

➤ ミリ波干渉計

プラズマによるマイクロ波位相の変化(ϕ)を
観測することにより電子密度(n_e)を計測

$$\phi = \frac{\pi}{\lambda_i n_c} \int_0^L n_e(z) dz$$

⇒高い周波数であり直接観測が困難

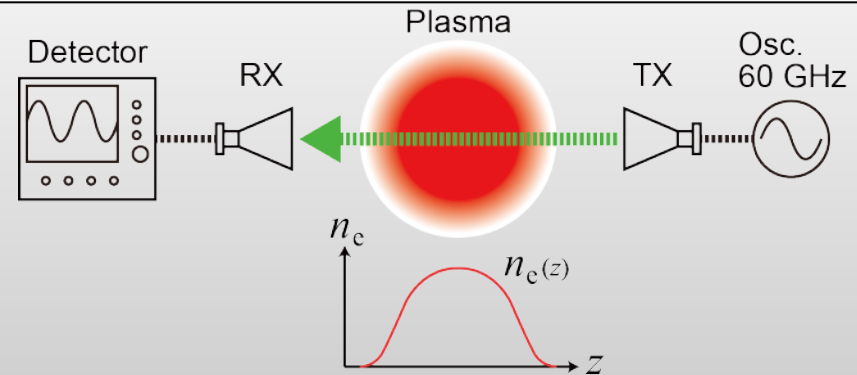


Fig.2 直接計測型干渉計

➤ ヘテロダイン位相干渉計

LO信号とミキサを用いてより低い周波数の
IF信号を生成し、この位相を観測することで
高感度な電子密度計測が可能

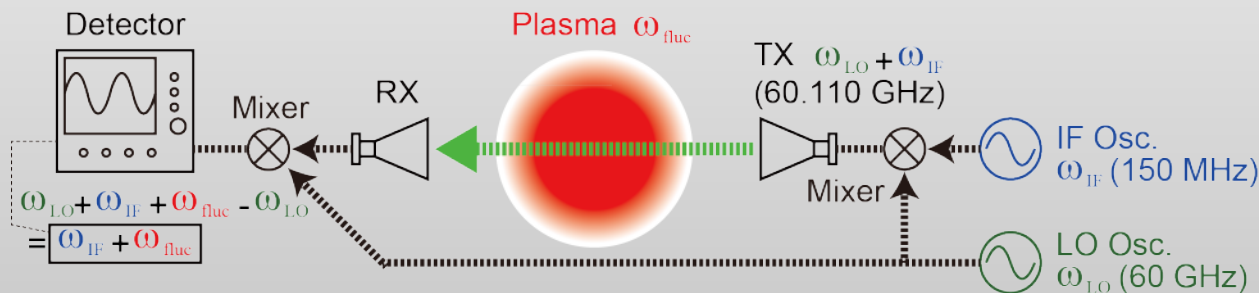


Fig.3 ヘテロダイン干渉計

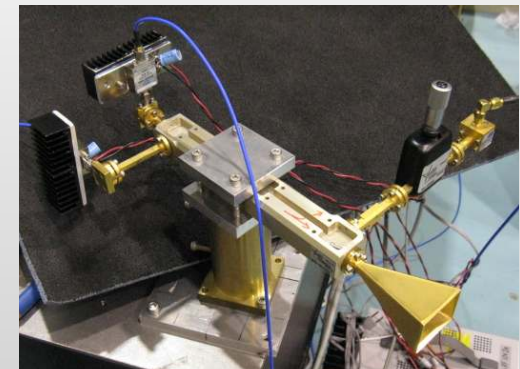


Fig.4 導波管素子(例)

2-2. 背景 –イメージング反射計–

➤ イメージング干渉計

多チャンネル受信アンテナによる画像的計測

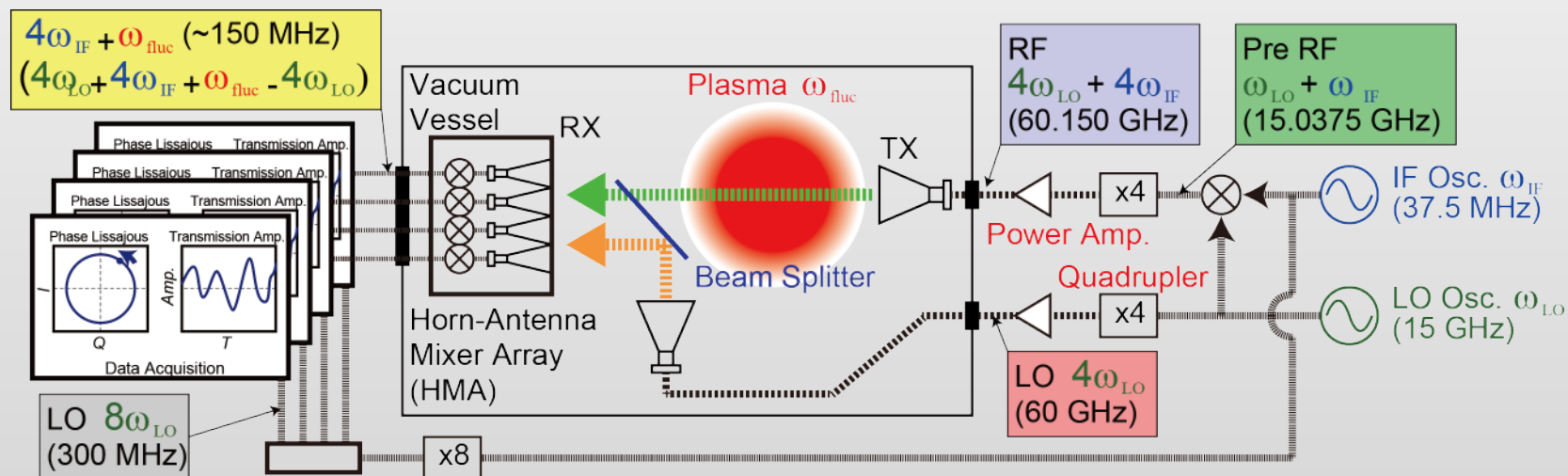


Fig.5 GAMMA10ダイバータ部イメージング干渉計 回路系簡略図

➤ GAMMA10 E-ダイバータ用イメージング反射計

- NIFS開発の1次元アンテナアレイを使用した1次元7ch計測
- 照射波: 60.150 GHz LO: 60 GHz IF: 150 MHz
- 4通倍ヘテロダイン方式
- 直交検出器による高感度位相計測
- ビームスプリッターによるLO供給

2-3. 背景 ミリ波干渉計 –LO供給法-

➤ ビームスプリッター(B.S.)によるLO供給の問題点

①強力なミリ波アンプが必要 (極めて高価)

- ・ 低LO反射率による効率低減
LO反射率 $\sim 5\%$ (RF透過率 $\sim 95\%$)
 - ・ LO電力の不均一による周辺部chの感度低下
 - 各ch要求LO電力: $+10\text{ dBm}$ (10 mW)
 - 減衰(B.S., アンテナ, 拡散等)
: -30 dB (NIFS MIRアンテナ端部)
- ⇒LO供給電力: **$+40\text{ dBm}$ (10 W以上)?**

②LO光学系による装置容積増加 (邪魔)

- ・ ミラー
- ・ 導波管・アンテナ
- ・ ビームスプリッター

➤ 解決策

HMA内アンテナ素子毎にLO供給

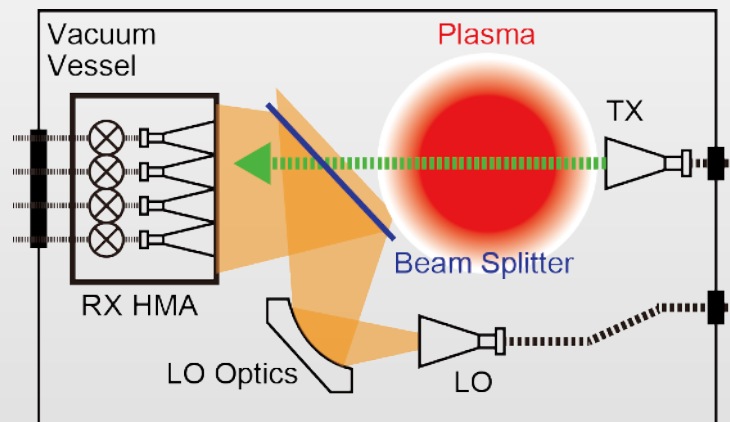


Fig.6 真空容器内装置

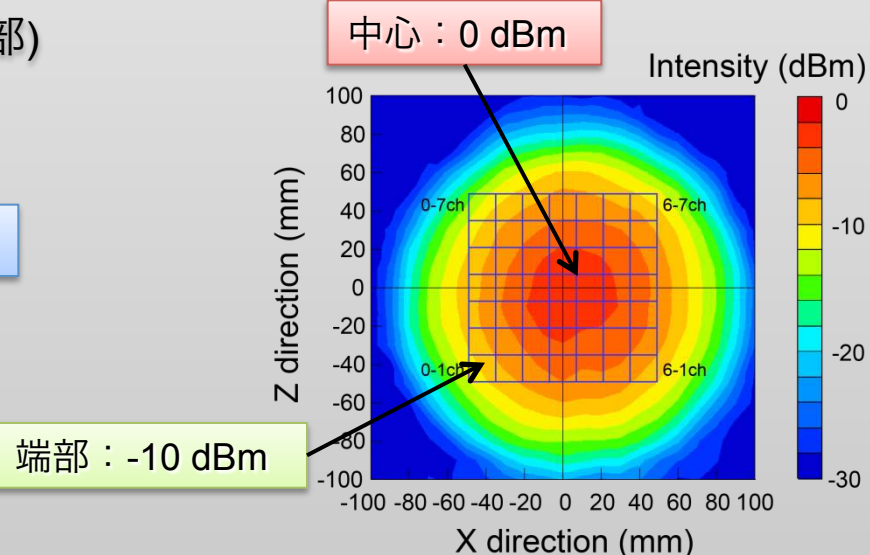


Fig.7 LHD MIR装置におけるアンテナアレイ上LO電力分布(供給: 24 dBm)

3-0. Horn-Antenna Mixer Array (HMA) (1/2)

- 3次元マイクロ波イメージング反射計用に開発された2次元アンテナアレイを構成可能な1次元アンテナアレイ

LO供給：外部照射供給

ミキサ：シングルダイオードミキサ

周波数帯域：50 – 120 GHz

IF帯域：DC – 12 GHz

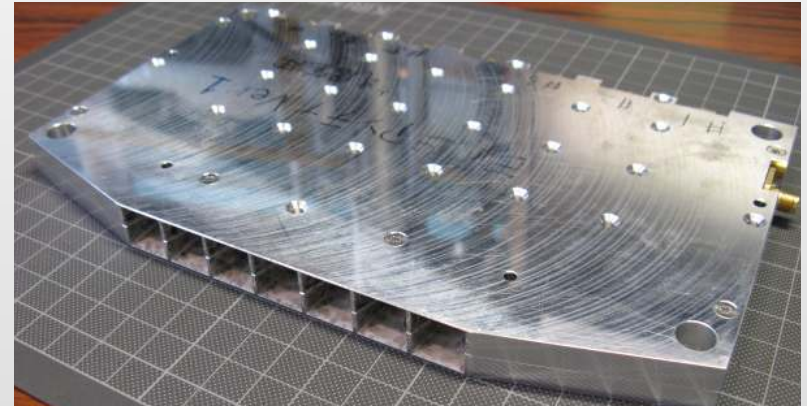


Fig.8 HMA外観



Fig.10 6x7ch 2次元アンテナアレイ
(HMA 6層スタック)



Fig.9 HMA (上側フレーム除去)

3-0. Horn-Antenna Mixer Array (HMA) (2/2)

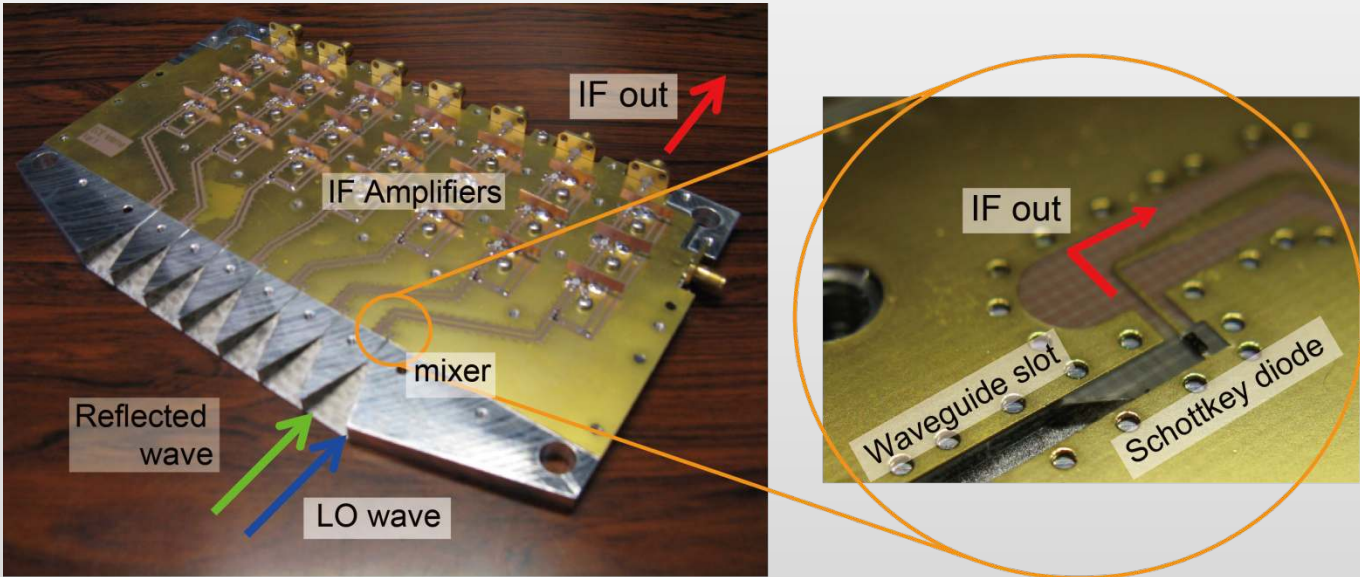


Fig.11 HMA（上側フレーム除去）詳細

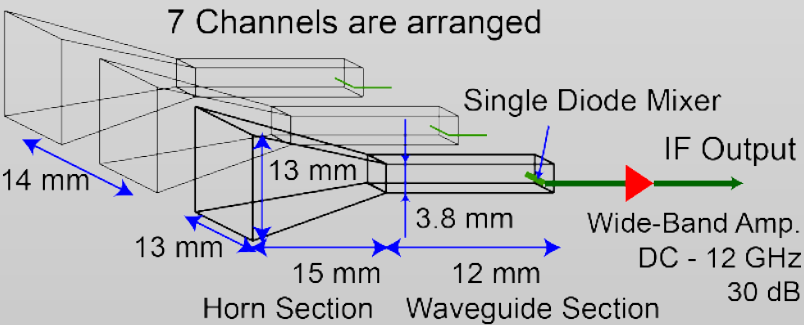


Fig.12 HMA寸法詳細

遮断周波数(導波管)	40 GHz
導波管長辺(H)×短辺(E)	3.8 × 1.9 mm
ホーン開口長辺(H)×短辺(E)	13 × 13 mm
ホーン角(H), (E)	51°, 51°
アンテナ間隔	14 mm

3-1. 新型 1 次元アンテナアレイ –開発要素–

➤ 新型HMA

⇒ 従来型HMAのLO供給を内部供給に

- ①アンテナアレイ 1 台につき 1 個のLO入力
 - ②LOは1/4周波数(15 GHz)をSMA入力
 - ③アンテナアレイ内にLO分配器 (8way) 設置
 - ④各Ch.LO用4通倍器(15GHz⇒60GHz)設置
 - ⑤真空容器内設置対応
 - ⑥チャンネル数：8ch
- (RF: 60.150 GHz, LO: 60 GHz, IF: 150 MHz)

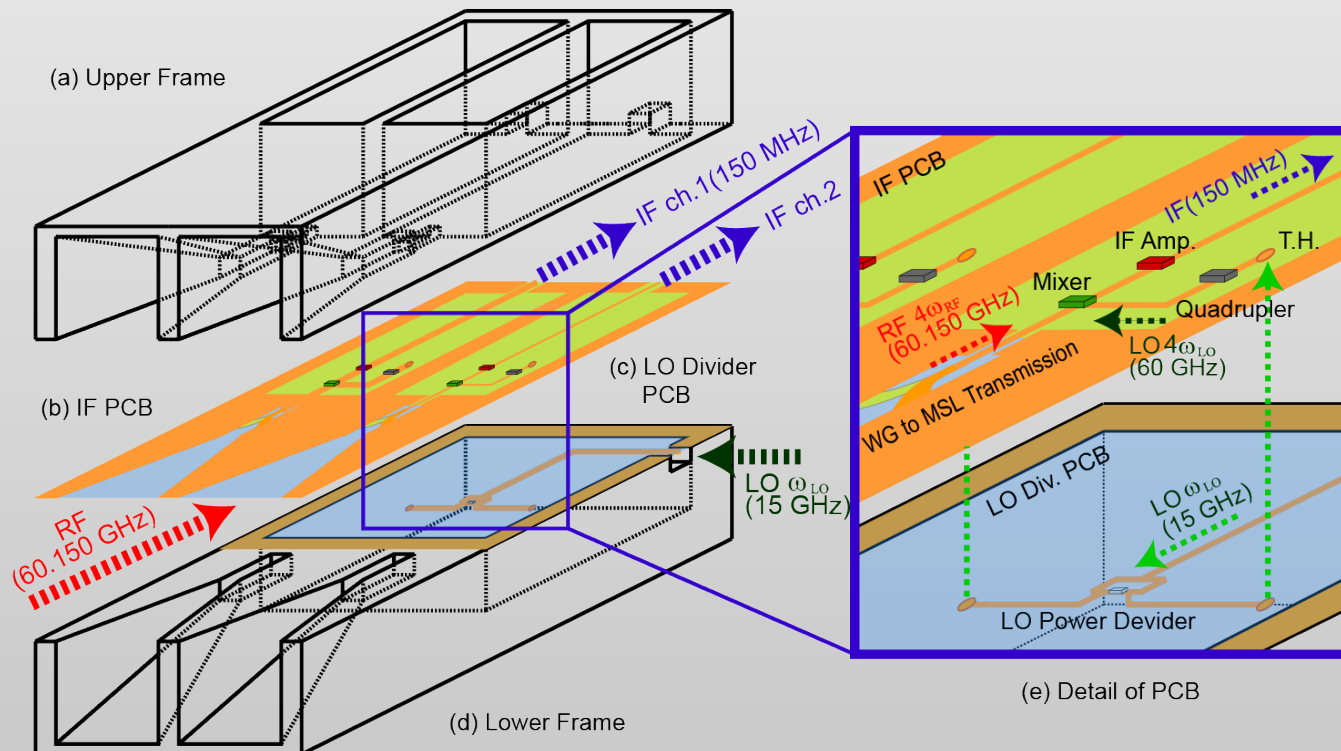


Fig.13 新型HMA模式図 (2ch版)

3-2. 新規開発要素 –WG-MSL変換器–

- ホーンアンテナに入射したRFを高周波基板上のミキサへ伝達するための導波管-マイクロストリップライン変換器
- 高効率なフィンライン変換器を採用

- 試験器を製作し変換効率を評価
⇒ 低損失 (-1.65 dB) かつ 使用帯域で平坦な特性

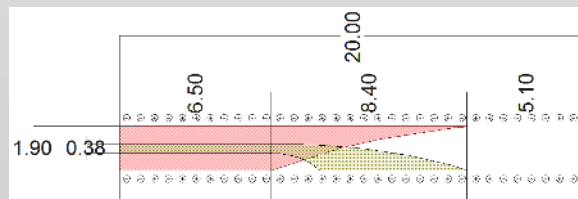
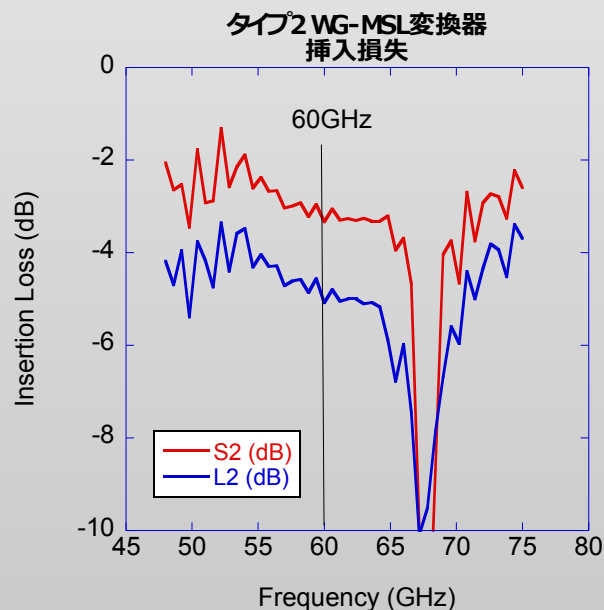


Fig.15 フィンライン変換器周波数特性

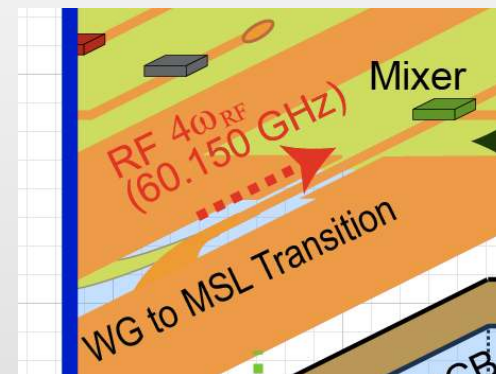
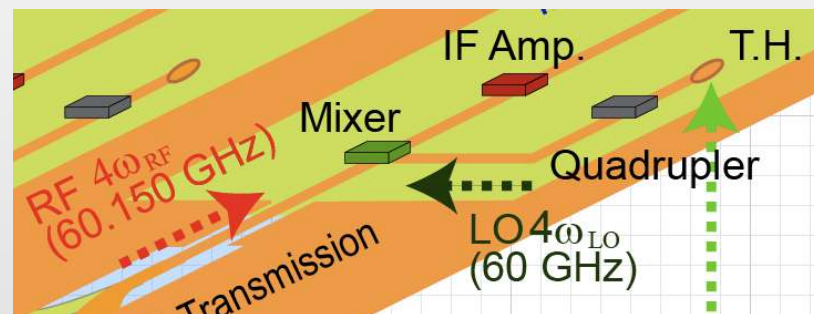


Fig.14 フィンライン変換器試験器

3-3. 新規開発要素 –LO逡倍器–

- チャンネル毎でミキサにLO(60 GHz)を供給
⇒4逡倍MMICを採用

- チップ入手済み
- ワイヤボンディング手法&評価基板を
現在開発中



住友電工デバイス・イノベーション(Eudyna)社
57-64GHz出力 4 逡倍MMIC FMM5125X (10,000
円程度)

入力(15 GHz) : +10 dBm

出力(60 GHz) : +5 dBm (変換損失: 5 dB)

電源電圧 : +5V

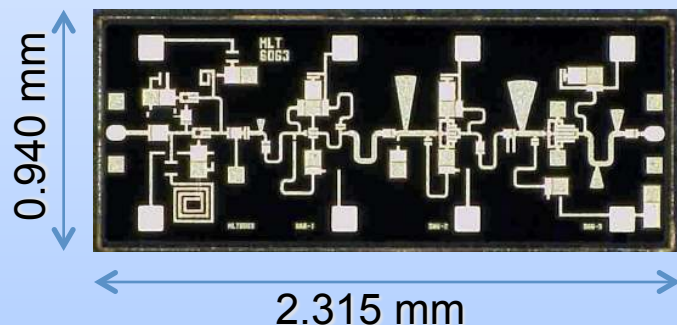


Fig.16 FMM5125X 外觀

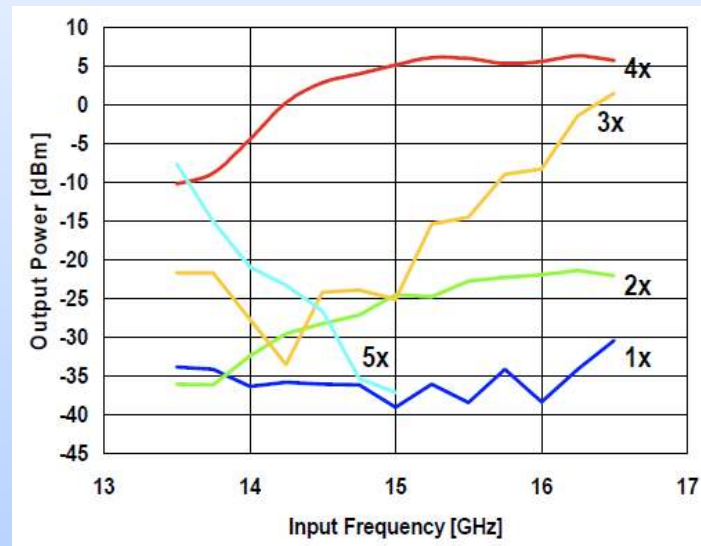


Fig.17 入力-出力特性

3-4. 新規開発要素 –LO分配器–

- チャンネル毎のLO通倍器に1/4周波数LOを8wayに分配し供給する

- 評価基板製作済み
- 現在評価用フレームを製作中

- 2wayウィルキンソン分配器3段で8way分配器を構成
(周波数のズレを考慮し14, 15, 16 GHz三種設計・製作)
- 1段辺り-4 dB、合計-12 dBの減衰を想定

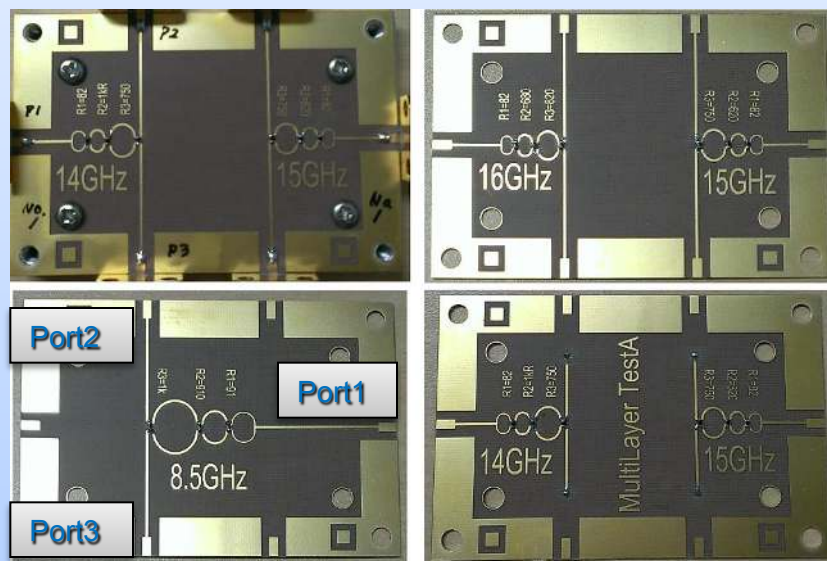


Fig.18 LO分配器試験基板

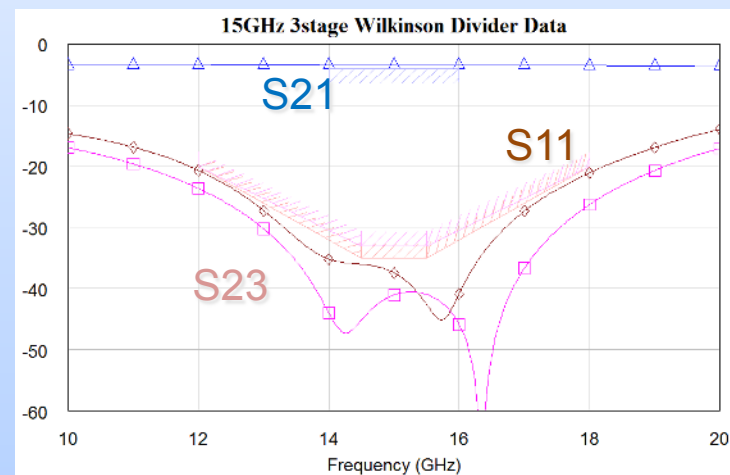
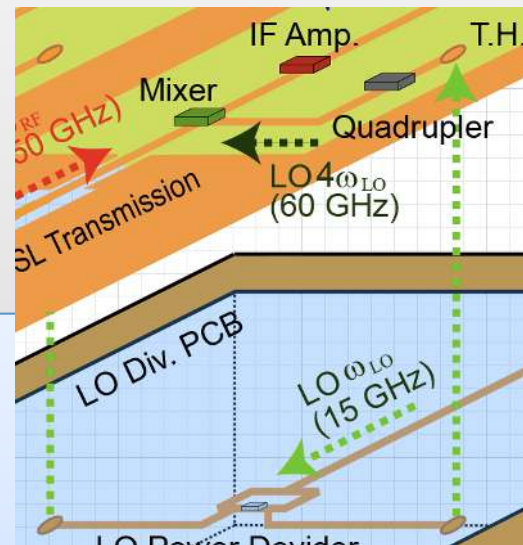
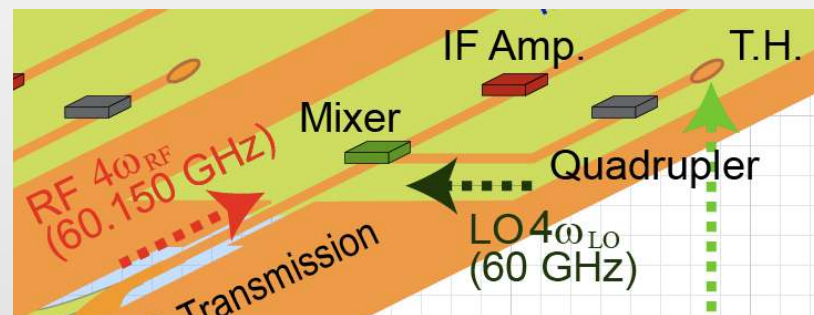


Fig.19 15GHz PWD 設計値

3-5. 新規開発要素 -ミキサ-

- チャンネル毎にミキサを設置
⇒V-bandダブルバランスドミキサMMICを採用

- チップ手配中
- ワイヤボンディング手法&評価基板を現在開発中



Hittite社 ダブルバランスドミキサ

HMC-MDB169 (3,000円程度)

RF周波数：54-64GHz, IF周波数：DC-5 GHz

変換損失：-8 dB, LO入力レベル：+13 dBm

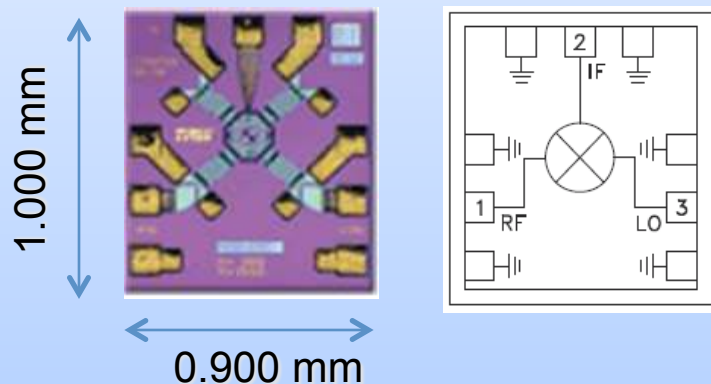


Fig.20 MDB169 外観&模式図

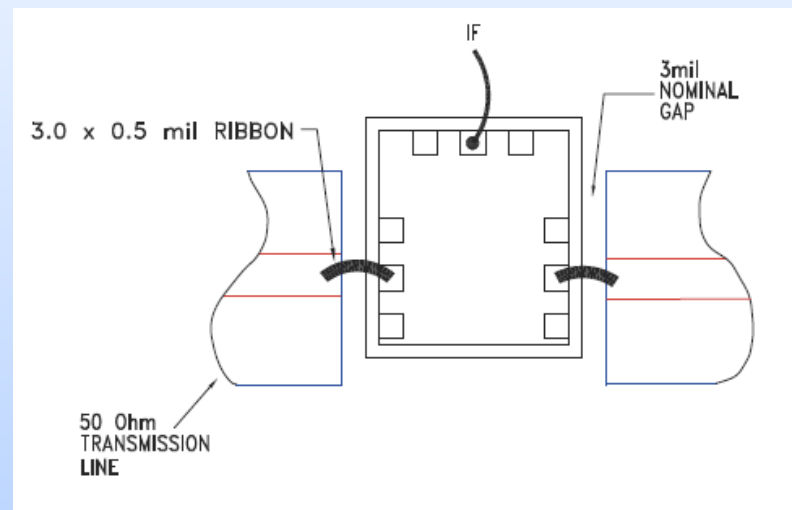


Fig.21 MDB169 ボンディング模式図

3-6. 新規開発要素 –真空対応–

- E-ダイバータ部光学系に結合させるためアンテナアレイは真空容器内に設置する

- テストチャンバー内試験（今期中）
 - ・回路動作
 - ・真空度
 - ・熱

- 各チャンネルは連結した小部屋構造
⇒ホーン開口部から排気可能
- アンテナアレイ全体の電力は5W程度
 - ・アンテナ固定具経由でどの程度除熱されるか
⇒ショット時のみの間欠動作も

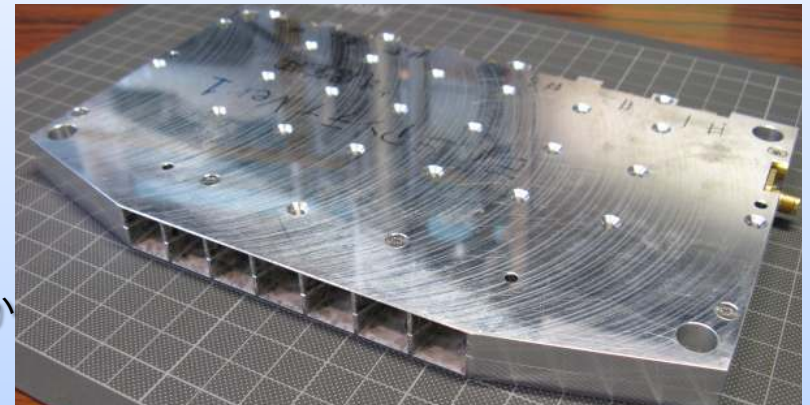


Fig.22 旧アンテナアレイ外観

4. 開発スケジュール

➤ 今年度の予定

開発要素	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
WG-MSL変換器	完了							
LO逡倍器	基板設計	ボンディング	評価					
LO分配器	フレーム製作	評価						
ミキサ	基板設計	ボンディング	評価					
真空対応	テストチャンバ試験							
2ch試験アンテナ製作	基板・フレーム設計					実装	評価	

➤ 今年度目標

- ・ 2ch程度の試験アンテナアレイを製作・評価
※スケジュールが合えば空ポートから反射計的な試験計測を実施し、
実際のプラズマ計測で支障ないか試験



8ch完成版製作の準備を完了する。

5. まとめ

➤ GAMMA10/PDX Eダイバータマイクロ波イメージング干渉計用1次元アンテナアレイ開発

➤ アンテナ毎にLO用ミリ波4通倍器を内蔵

- ①強力なミリ波パワーアンプが不要（コスト大幅カット）
- ②LO光学系による供給損失・LO供給の不均一が発生しない（高感度化・均一な視野）
- ③MMICミキサ（高感度化）
- ④LO光学系が不要なコンパクトなシステム
- ⑤旧アンテナと同様に2次元アンテナアレイを構成可能

➤ 開発要素

- | | | |
|------------|-------------|-------|
| ①WG-MSL変換器 | ②MMIC LO通倍器 | |
| ③LO分配器 | ④MMIC ミキサ | ⑤真空対応 |

➤ 今年度目標

- ・2ch試験アンテナアレイを製作・評価
- ※スケジュールが合えば空ポートから反射計的な試験計測を実施し、プラズマ計測が可能か否かも試験



8ch完成版製作の準備を完了する。

添付資料

LHDマイクロ波イメージング計測

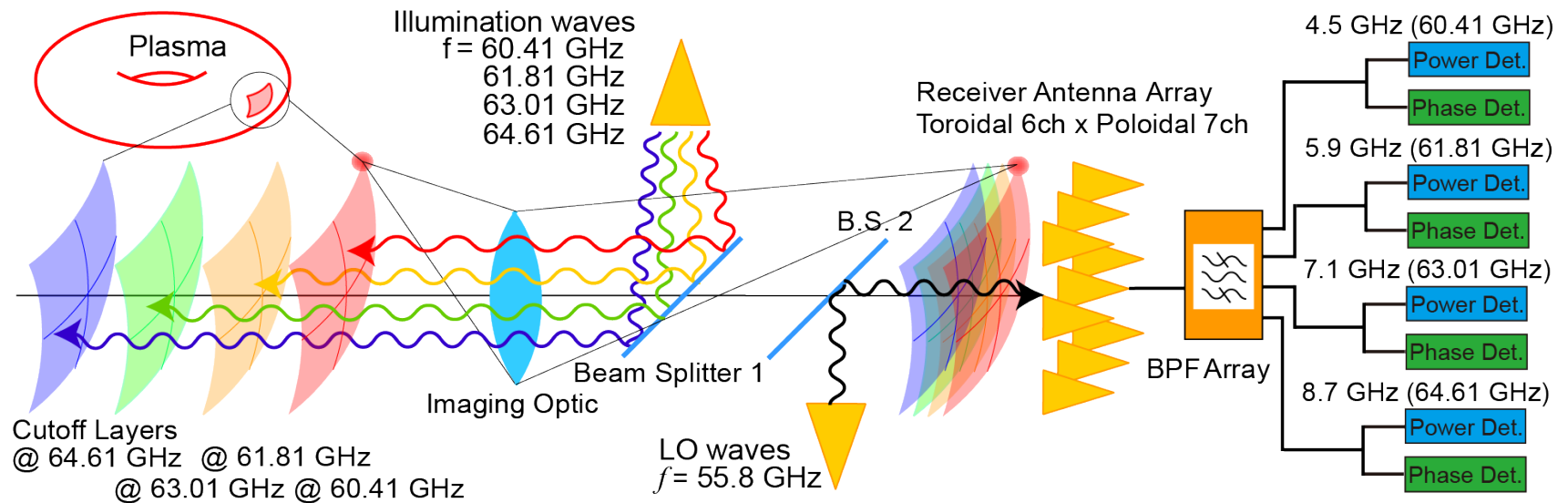
MIR

照射マイクロ波	4周波数 (60.41, 61.81, 63.01, 64.61 GHz)
受信アンテナアレイ	6 × 7 チャンネル
検出方法	位相検出・強度検出
サンプリング	1 μ s
計測領域	120 × 120 mm

ECEイメージング

計測周波数	97 – 104 GHz (第二高調波)
周波数チャンネル数	8 チャンネル
受信アンテナアレイ	1 × 7 チャンネル
検出方法	BPF, 半導体検出器
サンプリング	1 μ s
計測領域	20 × 120 mm (ポロイダル断面)

LHD マイクロ波イメージング反射計



➤ マイクロ波反射計

単一照射周波数, 単一受信アンテナ

→ プラズマのカットオフ面の一点の変動を検出

➤ マイクロ波イメージング反射計

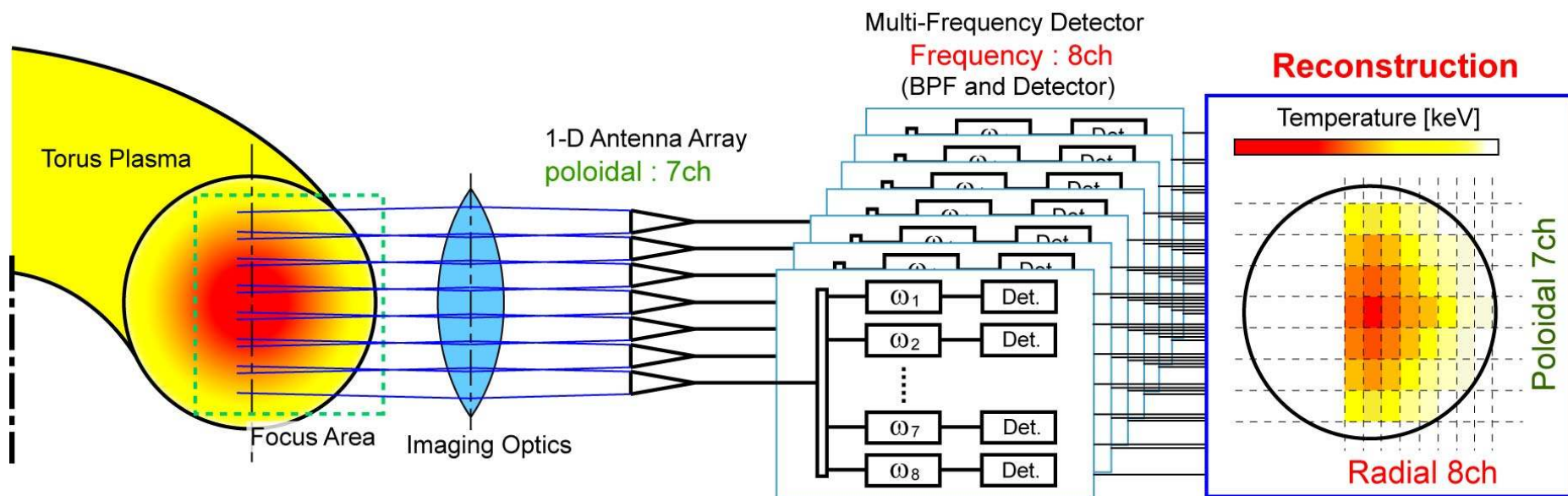
①複数照射周波数 ②2次元受信アンテナアレイ ③イメージング光学系

④周波数分離器

→ 複数のカットオフ面上の複数点の変動を検出

計測空間内の電子密度揺動分布・揺動波動の進行方向（波数）を観測

LHD ECEイメージング計測



➤ ECEラジオメータ

単一受信アンテナ

→ 1 視線上の1次元電子温度分布

➤ ECEイメージング計測

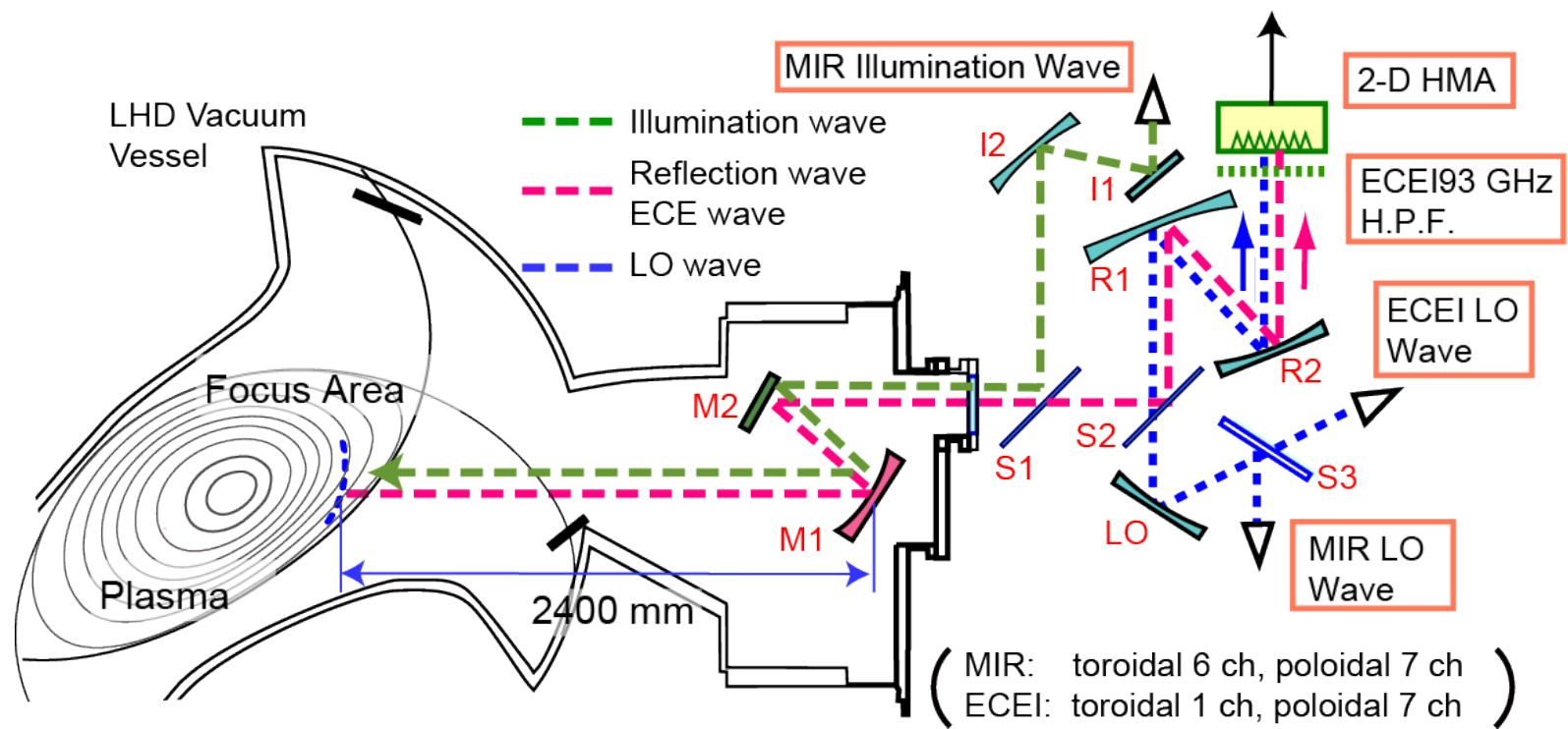
① 1 or 2次元受信アンテナアレイ ② マイクロ波イメージング光学系

→ 複数視線上の2 or 3次元電子温度分布

計測空間内の電子温度分布・温度揺動の進行方向（波数）が計測できる

LHDにおけるマイクロ波イメージング計測器開発

MIR・ECEIマイクロ波光学系① 全体図



光学系
・計測位置を可変する可動ミラー

MIR

- ・照射波をプラズマに照射する
- ・反射波を受信アンテナアレイに結像
- ・LO波を受信アンテナに均一に照射

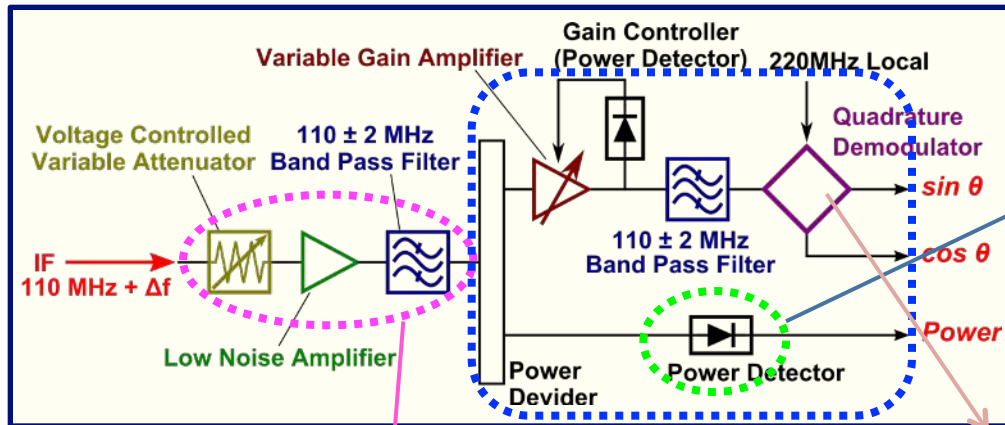
ECEイメージング

- ・ECEを受信アンテナアレイに結像
- ・LO波を受信アンテナに均一に照射
- ・アンテナ前でECEI低周波側をH.P.Fで遮断

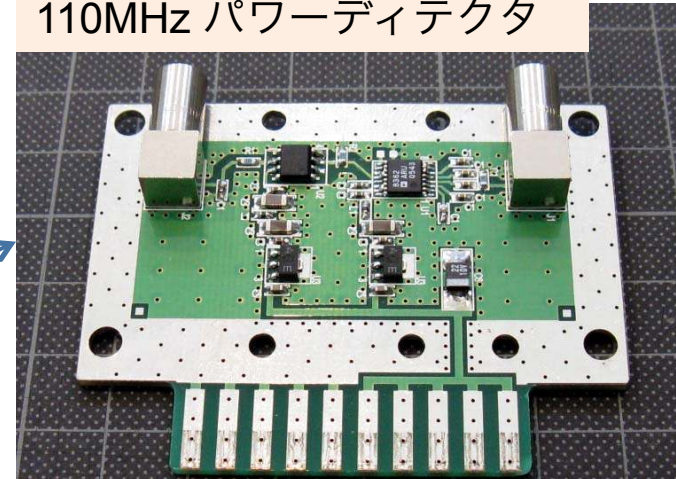
IFアンプ&位相検出器

MIR高周波回路④ 検出回路

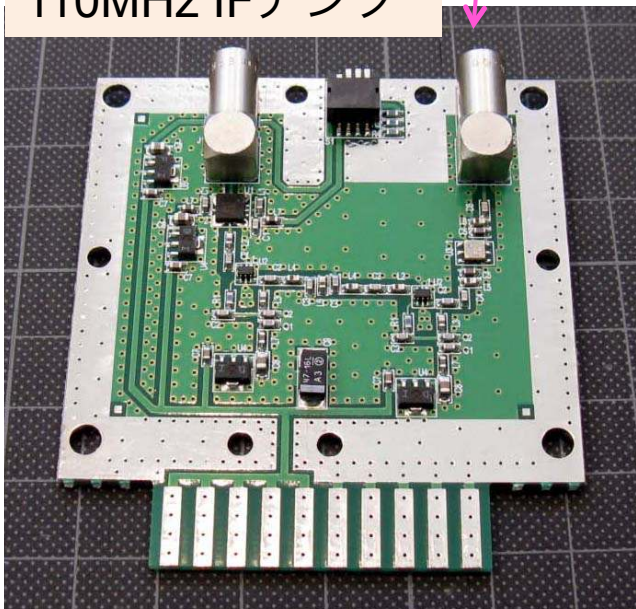
チャンネル数が140chと多い為、回路を内製



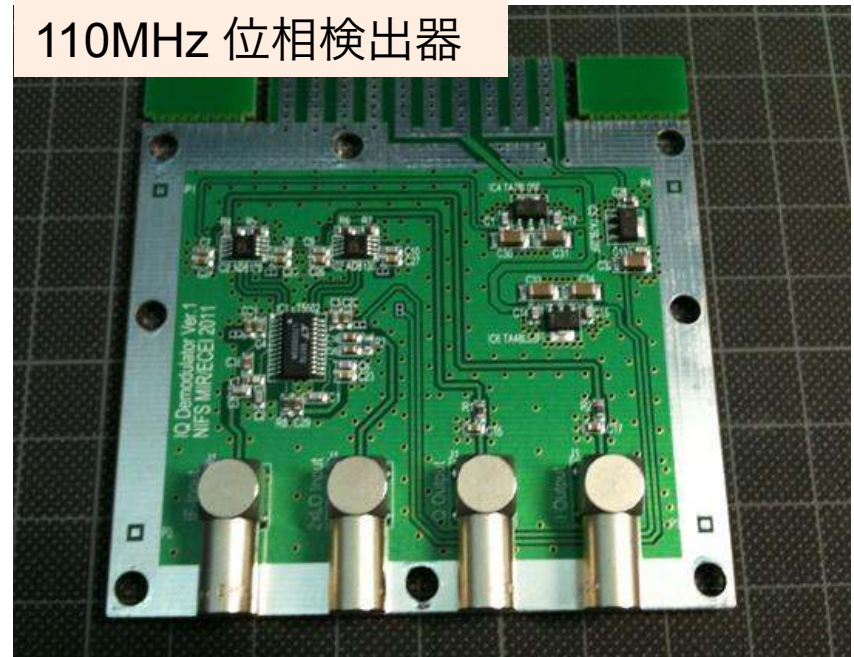
110MHz パワーディテクタ



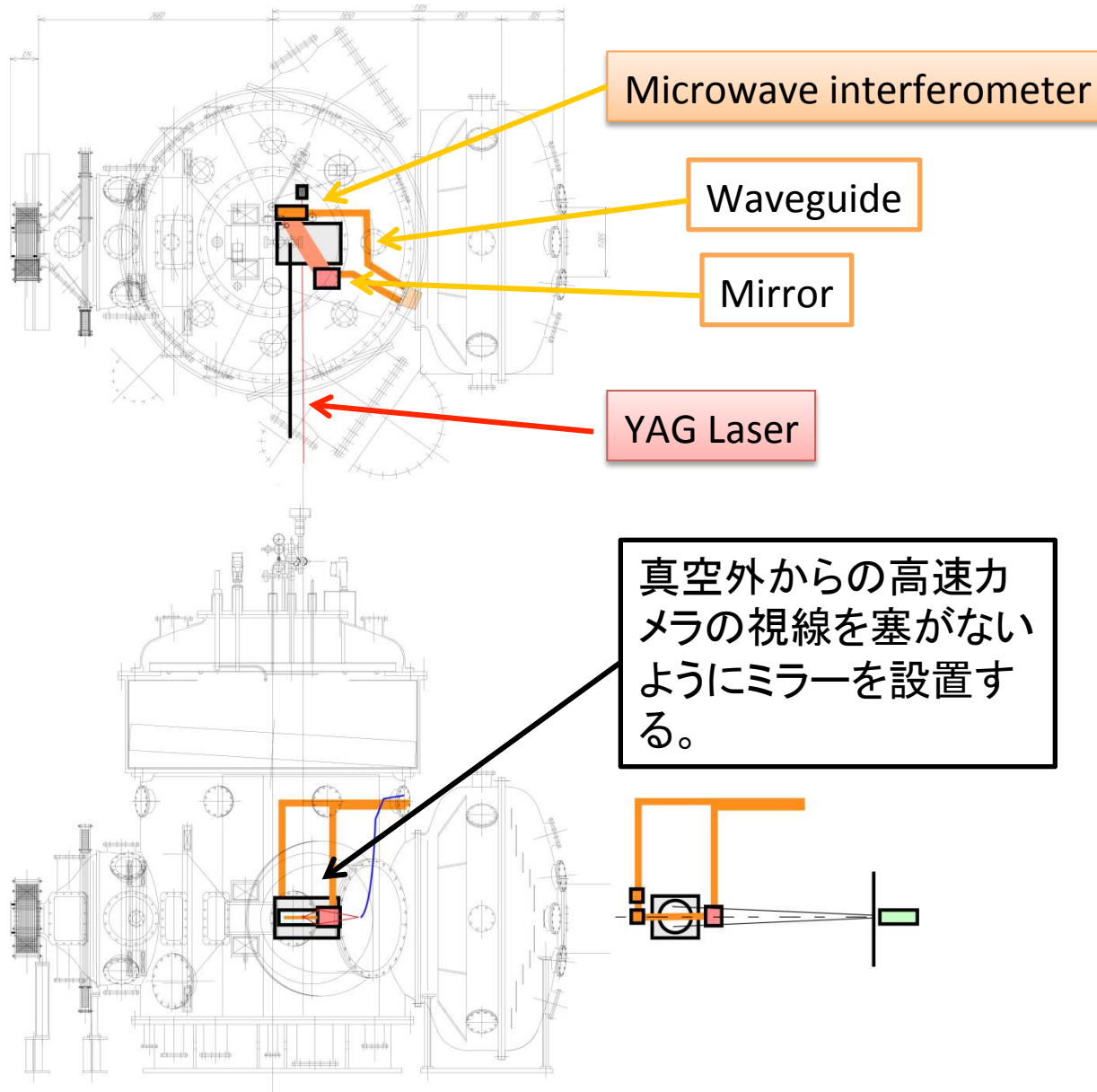
110MHz IFアンプ



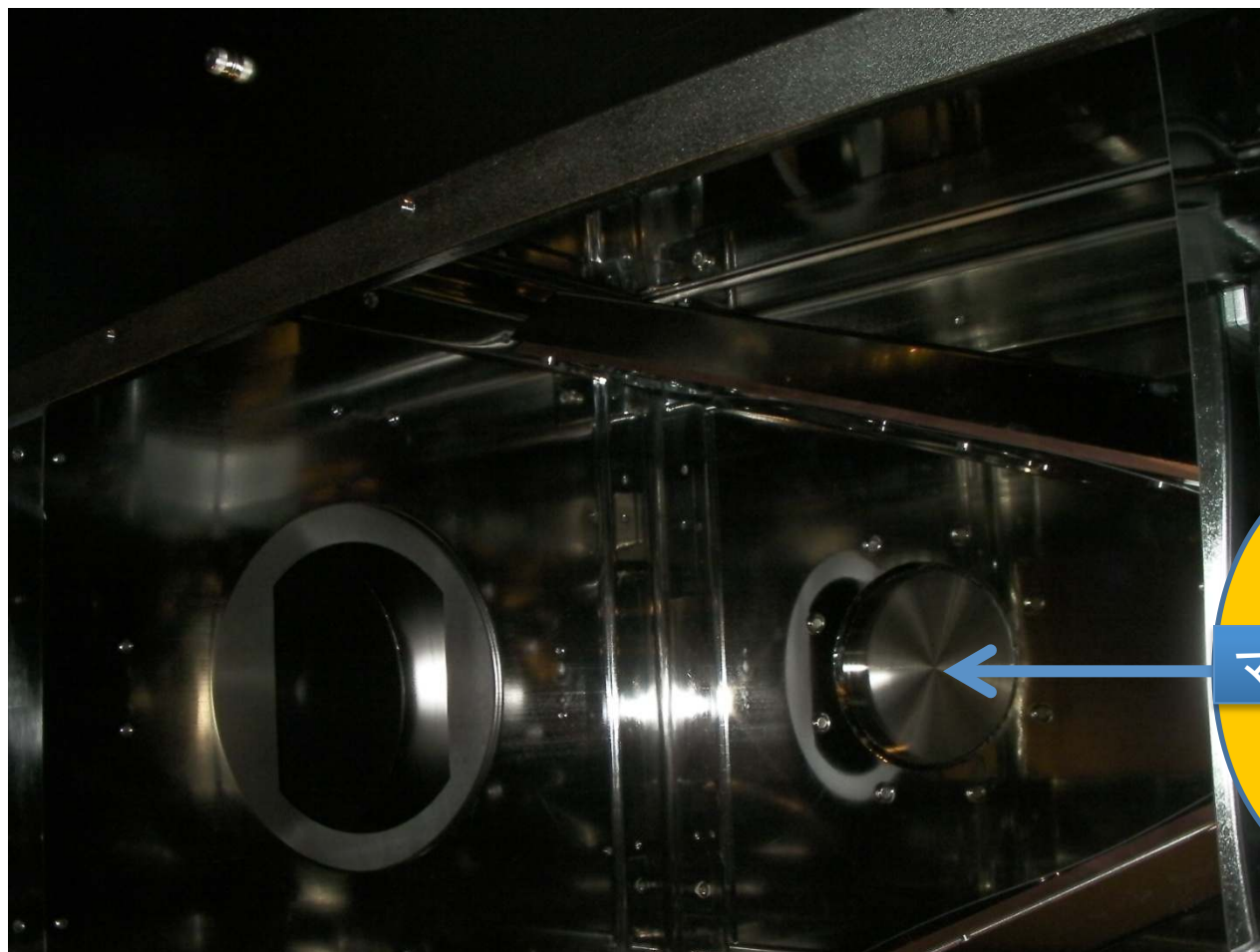
110MHz 位相検出器



E-Div マイクロ波干渉計概略図



E-Div-Imaging interferometer

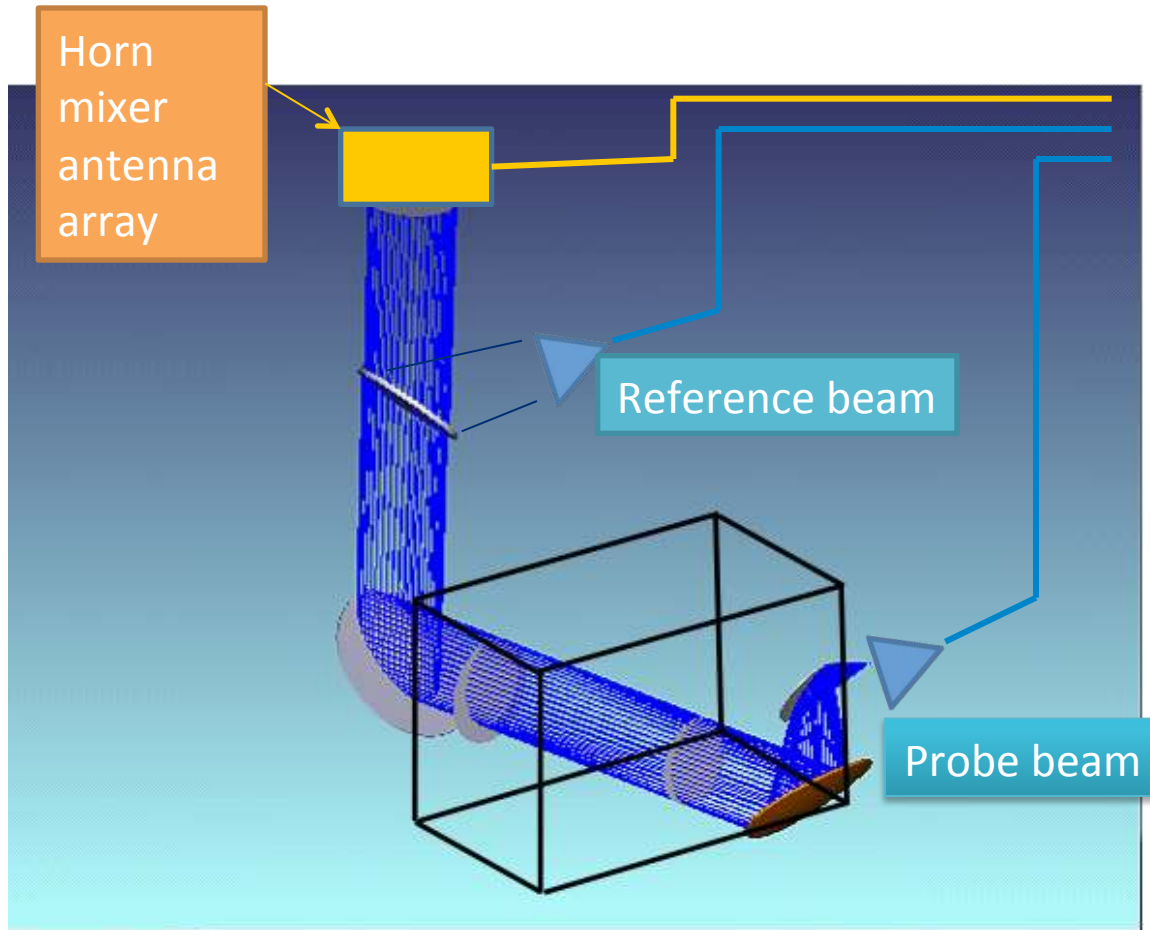


カメラの視線には入らないようにミラーを設置する。

ミラー

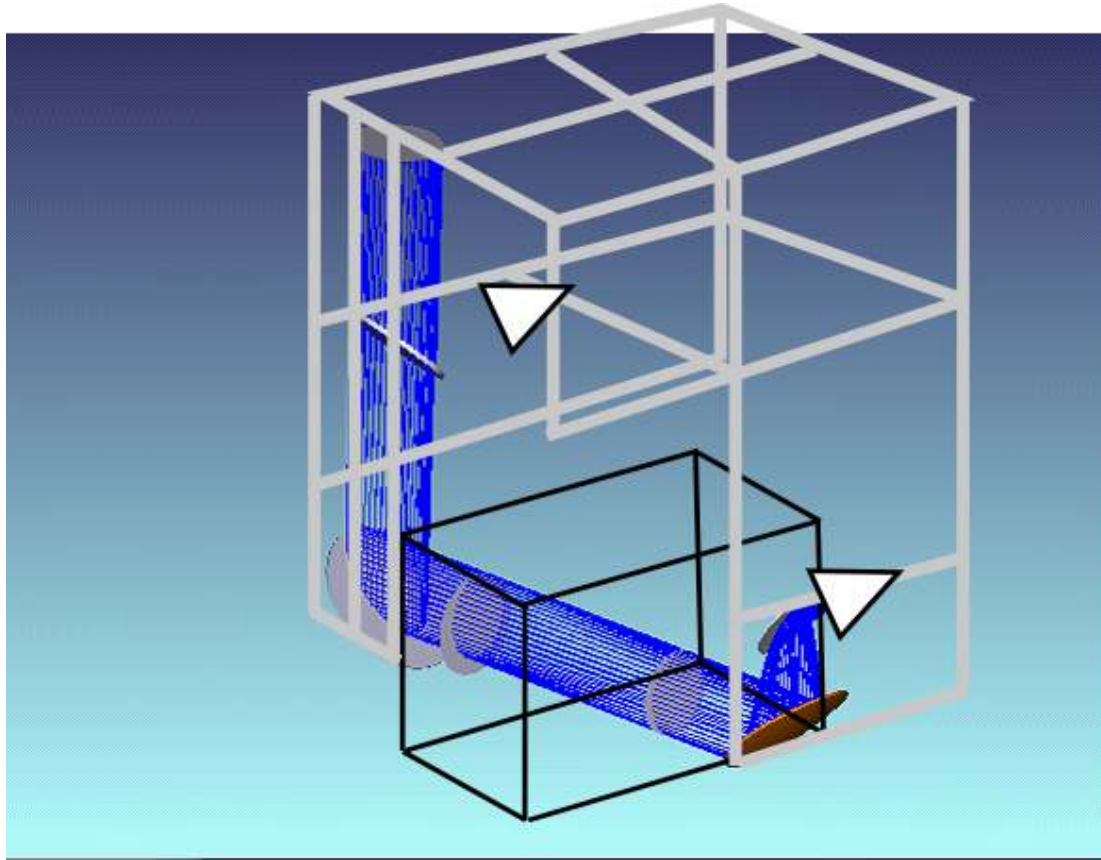
マイクロ波ビームの視線

E-Div-Imaging interferometer



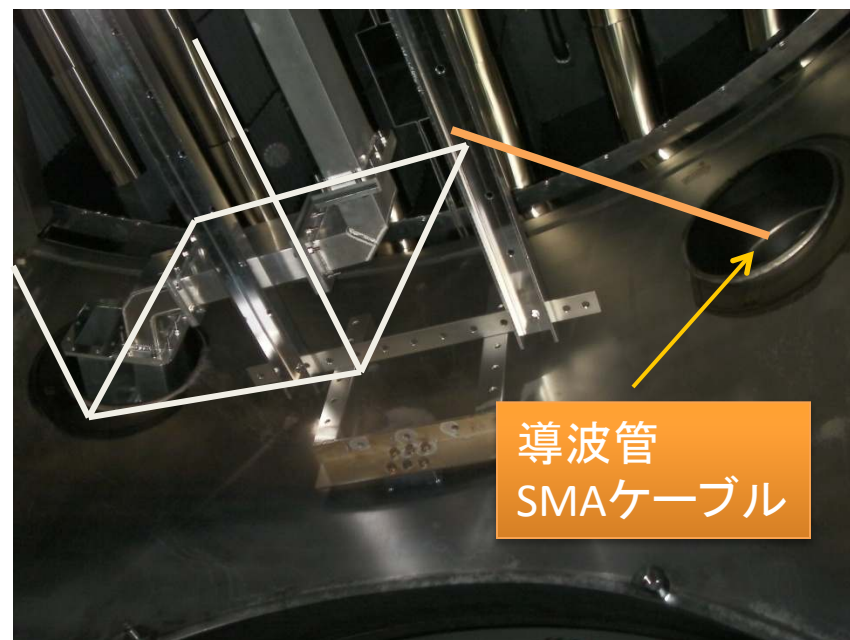
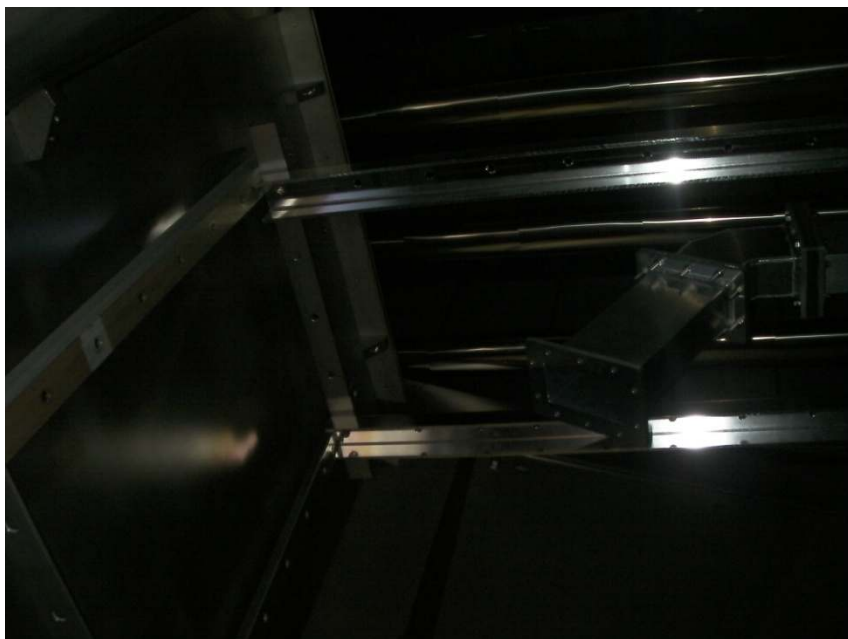
- $\Phi 15\text{cm}$ 程度のビームとして入射する。
- 受光面は、8チャンネル受光モジュールを使用。
- 本年度は1チャンネルのみ取り込む予定。

E-Div-Imaging interferometer



- ミラー、ホーン関係支え
- アルミアングルでエンド部上部のアンクルからつりさげる。

E-Div-Imaging interferometer



エンドタンク上部のアンクルを利用してImaging用のホーン、ミラー、検出器を設置する。