

# X帯固体電力増幅装置の試作研究

内村孝志、戸田知朗、沼田健二、富木淳史、湯地恒次（宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 深宇宙探査用地上局プロジェクトチーム）  
山本善一（宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 宇宙機応用工学研究系）、米倉克英（宇宙航空研究開発機構 追跡ネットワーク技術センター）

## Development of 20kW class X-band SSPA for the Satellite tracking station

Takashi Uchimura, Tomoaki Toda, Kenji Numata, Atsushi Tomiki, Kouji Yuchi (Ground Station for Deep Space Exploration and Telecommunication Project Team, Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency )

Zenichi Yamamoto (Department of Spacecraft Engineering, Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency)

Katsuhide Yonekura (Space Tracking and Communication Center, Japan Aerospace Exploration Agency)

# 1. 試作研究の目的及び経緯

## 1.1 試作研究の目的

本試作研究は、X帯GaN固体電力増幅装置（X-SSPA：X-band Solid State Power Amplifier）の研究開発要素である「増幅器」「合成器」について仕様検討、設計、試作、評価を行い、その結果を現在開発整備中の深宇宙探査用地上局（GREAT）にフィードバックすることを目的としている。

## 1.2 経緯

- (1) 現行の臼田宇宙空間観測所では、X帯送信設備としてクライストロン（KLY）を使用しているが、KLYは電子管であり、安定性が悪く、不具合が生じると探査機との通信断に直結することから、冗長構成で運用している。
- (2) また、KLYは海外製(米国CPI社のみ)であり、将来的な供給も保証されておらず、かつ、寿命も短いことから毎年予備品を購入する必要があるなど、ライフサイクルコストの観点で問題がある。
- (3) この状況下で、KLYに代わる増幅器として注目を浴びているのが、GaN(Gallium Nitride：窒化ガリウム) SSPAであり、GaN SSPAはKLYに比べて動作安定性に優れ、かつ、寿命が長い利点を持ち合せており、KLYと同等レベルの電力変換効率を実現することが期待されている。
- (4) 現在、S帯については、ほとんどの局においてSSPAに換装されており、動作が安定していることから、X帯についても導入すべく、試作評価を行うこととした。

### SSPAのメリット：

- エージングレス：電源投入から運用開始までの時間が短い
- 複数の増幅器出力を合成。増幅部単一故障による電力低下は機微。冗長装置数を削減可能
- 増幅部交換保守頻度が低い。ライフサイクルコストが安価。（クライストロンは1年交換）
- 増幅部に職人的技術が不要（部品枯渇時の置換設計・技術継承が容易）

## 2. 試作概要 (1/3)

### 2.1 試作方針

X帯SSPA試作に当たっての方針は以下のとおり。

- GaN-FETによる高効率PAを用いたSSPAの試作
  - ⇒7145MHz～7235MHzの周波数帯で、高出力電力のGaN-FETが存在しないため、既存品をカスタマイズして試作する。
  - ⇒20kW(CW)にてクライストロン方式と同等の電力変換効率実現  
(GaN-FETの性能目標：125W以上、効率：45%以上50%目標)
- 衛星運用の継続性の向上による信頼性の確保
  - ⇒増幅器 (PA) 単位でホットスワップが可能なラジアル合成方式を採用する。
- 送信電力40 kWを実現可能な拡張性⇒出力電力の拡張性
  - ⇒電力アップ可能なSSPA方式を採用する。
- 将来にわたる維持整備性の向上、維持コスト低減
  - ⇒各増幅器 (PA) の出力中も着脱が可能な方式を採用する。

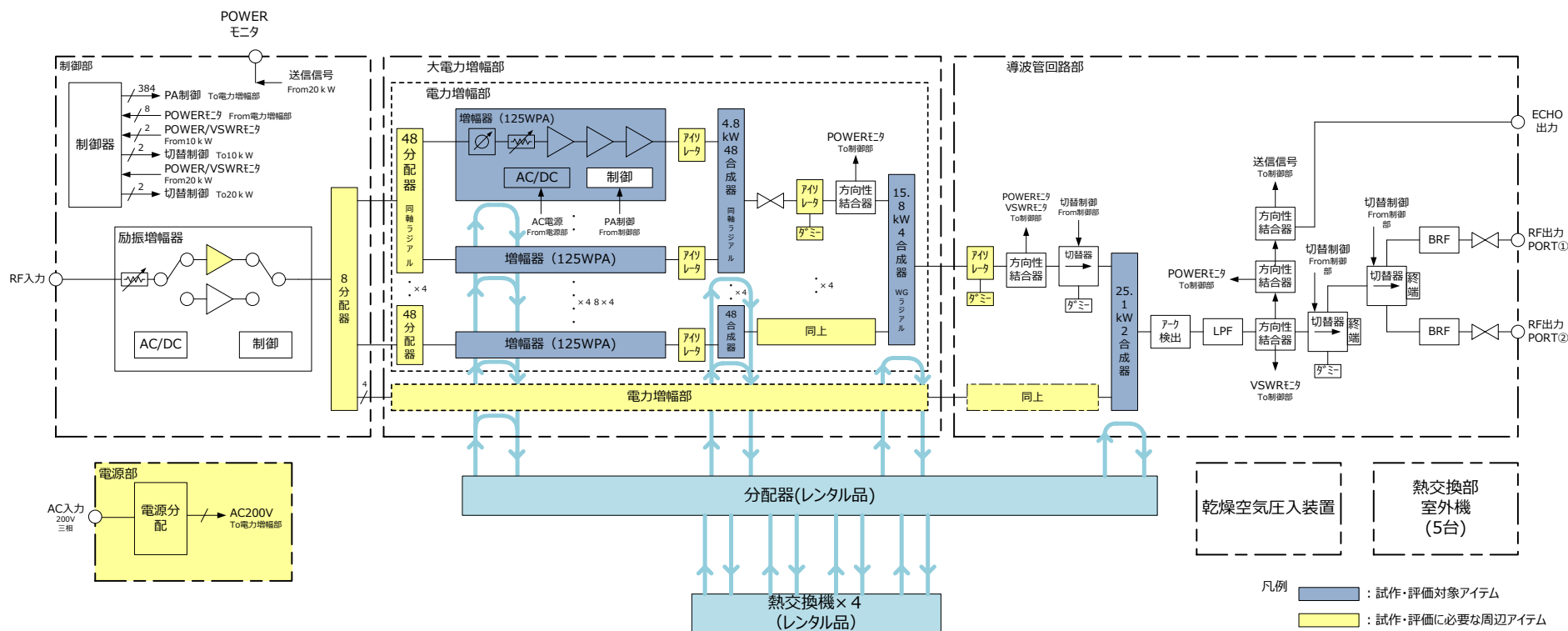
なお、本試作研究はSSPAで数多くの開発実績を有する日本電気(株)との契約に基づき実施している。

# 2. 試作概要 (2/3)

## 2.2 X帯SSPA試作範囲

試作範囲は、以下4つの主要開発アイテムを対象とし、各方式の確立およびRF系・冷却性能の評価を行うこととしている。

- 増幅器 (GaN-FET、125W PA)
- 4.8kW48合成器
- 15.8kW4合成器
- 25.1kW2合成器



X帯大電力増幅装置における試作・評価対象アイテム

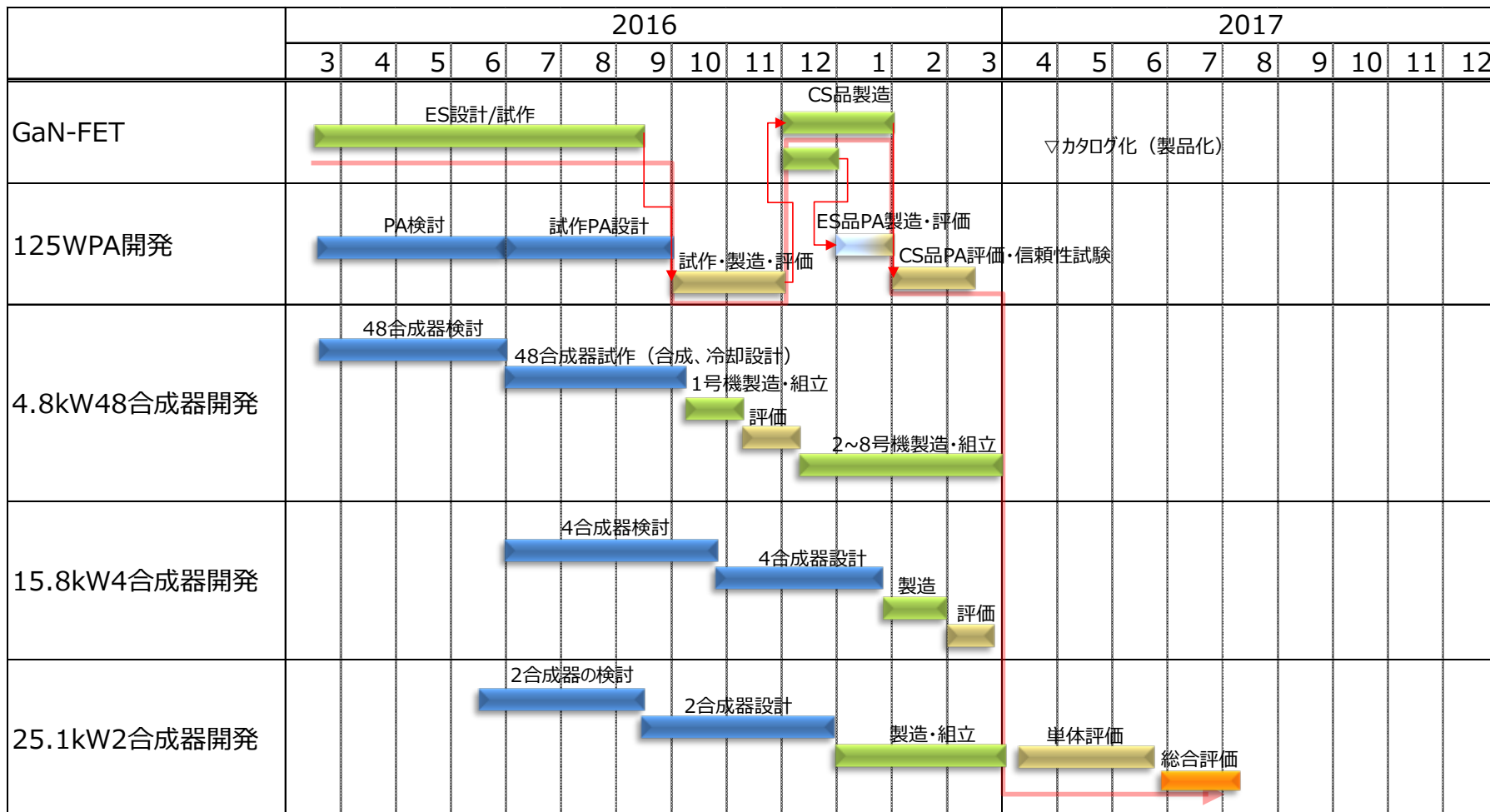
## 2. 試作概要 (3/3)

### 2.3 開発リスクとその対応

開発アイテム	開発要素	試作内容
GaN-FET 125W PA	<ul style="list-style-type: none"> <li>・7GHz帯GaN-FET開発</li> <li>・125WPAの確立</li> <li>・125WPAの信頼確認</li> <li>・冷却方式の確立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●既存GaN-FET(7.7-8.5GHz)の周波数を所望の周波数(7.145-7.235GHz)に変更し、かつ、パルスタイプをCWに変更してES品試作を行う。検証結果をCS品にフィードバックする。</li> <li>●CS品を350台試作し、設計検証により製品設計を確立する。(出力特性、温度、信頼性)</li> </ul>
4.8kW 48合成器	<ul style="list-style-type: none"> <li>・合成方式の確立</li> <li>・冷却方式の確立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●4.8kW 48合成器を試作する。</li> <li>●4.8kW出力SSPAを試作し、ES品により試作したPAを用いて設計検証する。(特性、合成損失、帯域、冷却他)</li> </ul>
15.8kW 4合成器	<ul style="list-style-type: none"> <li>・合成方式の確立</li> <li>・冷却方式の確立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●15.8kW 4合成器を試作する。</li> <li>●制御系を除いた電力増幅部を試作し、CS品により試作したPAを用いて設計検証する。(特性、合成損失、冷却他)</li> </ul>
25.1kW 2合成器	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大電力合成器の確立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●ハイブリッド型合成器の試作および試作した電力増幅部(15.8kW)×2による評価による検証 (合成効率、信頼性、冷却他)</li> </ul>
冷却構造	<ul style="list-style-type: none"> <li>・125WPAの冷却確立</li> <li>・合成器の冷却確立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●水冷方式の試作による検証 概算発熱量から保有冷却技術の応用にて実現する。</li> </ul>

# 3. 試作研究スケジュール

本試作研究においては、GaNデバイスの開発が鍵となるため、ES品試作評価、PA試作評価、CS品製造といった段階的なスケジュールとなっている。赤太線がクリティカルパスであり、来年度の総合評価結果を踏まえ、GREATへの採用可否を判断する予定である。

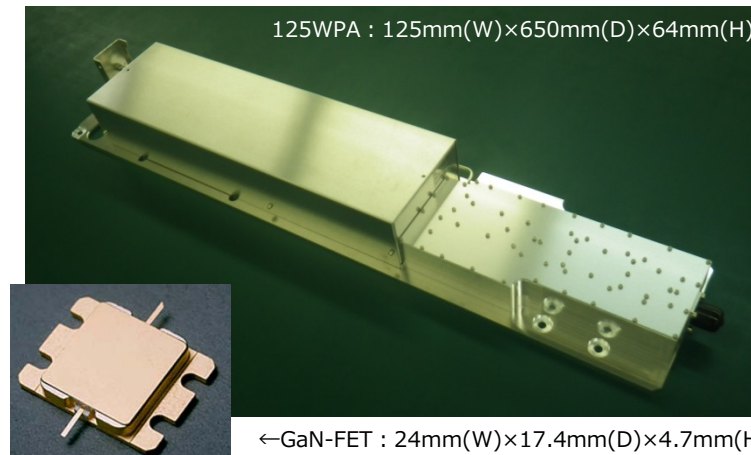


# 4. 試作状況(GaN-FET、125WPA)

GaN-FETの試作は、ES品の評価を完了しており、CS品の試作を進めている。

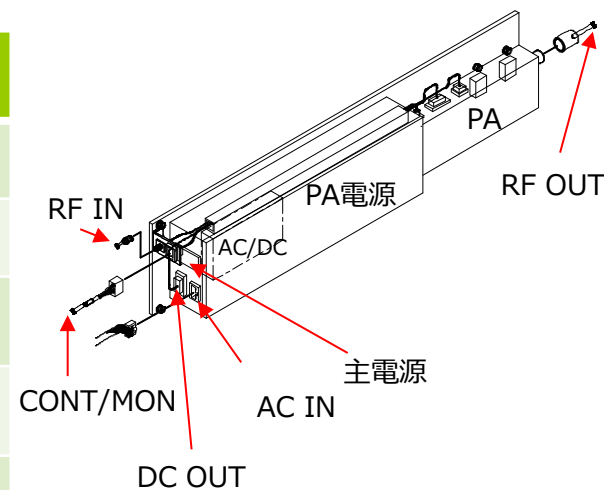
以下はES品 3 個について出力電力及びPAE（電力付加効率）を評価した結果である。SSPAの動作温度は $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ として冷却系の設計を行っていることから、評価は中央値（ $25^{\circ}\text{C}$ ）及び最大値（ $27^{\circ}\text{C}$ ）で行っている。

結果として周波数において若干のバラつきはあるものの51dBm(125W)以上の出力が得られ、PAEも45%以上を達成している。



GaN-FET,125W-PAの外観写真

周波数 GHz	25℃ (冷却設計温度の中央値)		27℃ (冷却設計温度の最大値)	
	出力(dBm)	PAE(%)	出力(dBm)	PAE(%)
目標値	51.0	45	51.0	45
7.14	51.2/51.2/51.6	47.2/46.6/47.3	51.1/51.2/51.6	46.9/46.4/47.1
7.20	51.1/51.2/51.5	46.5/45.5/46.7	51.1/51.1/51.5	46.2/45.3/46.5
7.24	51.1/51.1/51.4	45.6/45.3/46.4	51.1/51.0/51.4	45.4/45.1/46.2

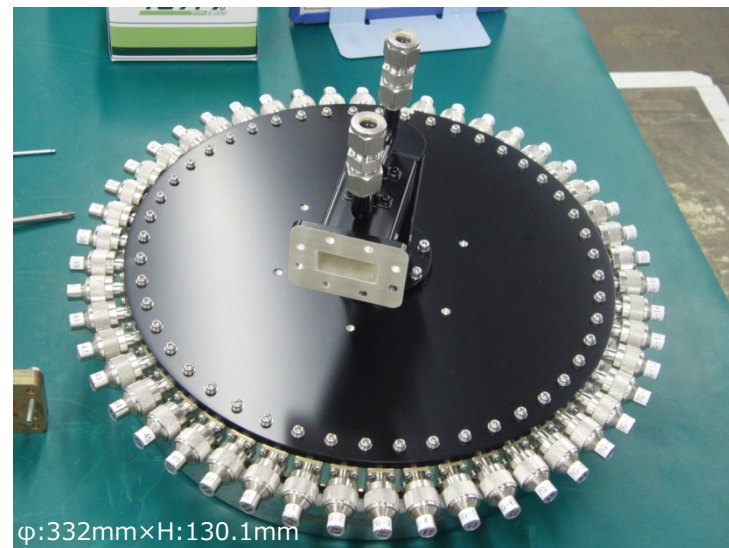


# 4. 試作状況(48合成器、48分配器)

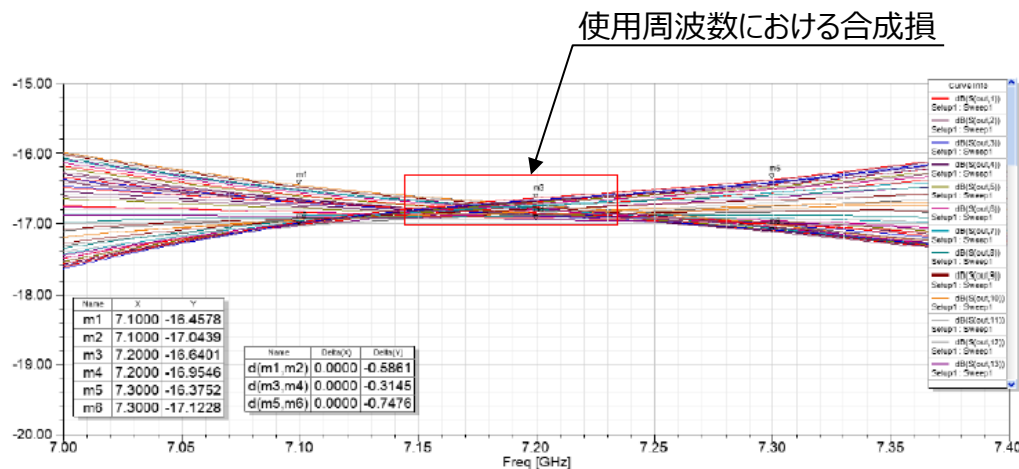
125W PAの出力をロスなく合成するため、48合成器に対する合成損失の要求を0.6dB以下として、構造検討を行い、シミュレーションを実施した。

下図はシミュレーション結果であるが、使用周波数帯において、0.3dB以下の結果が得られている。

現在、これに基づく48合成の試作を行い評価中である。



48合成器外観写真



周波数に対する合成損失(48合成器)



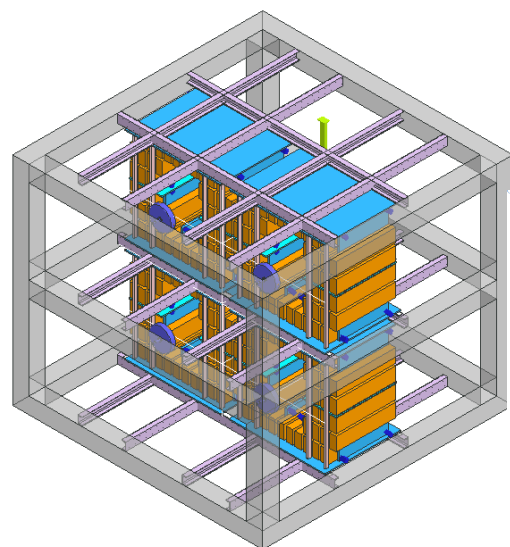
48分配器外観写真



# 4. 試作状況(4合成器、2合成器)

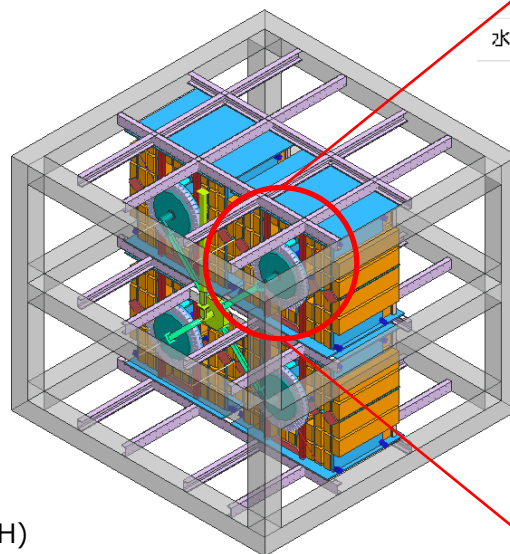
4合成器、2合成器に対する合成損失の要求は、それぞれ0.5dB以下、0.6dB以下としている。現在、両合成器については構造検討を行い、シミュレーションを実施中である。

また、下図はSSPAのラック収納状態のイメージ図であるが、PAの保守性等を考慮した機器レイアウトや実装方法について検討中である。

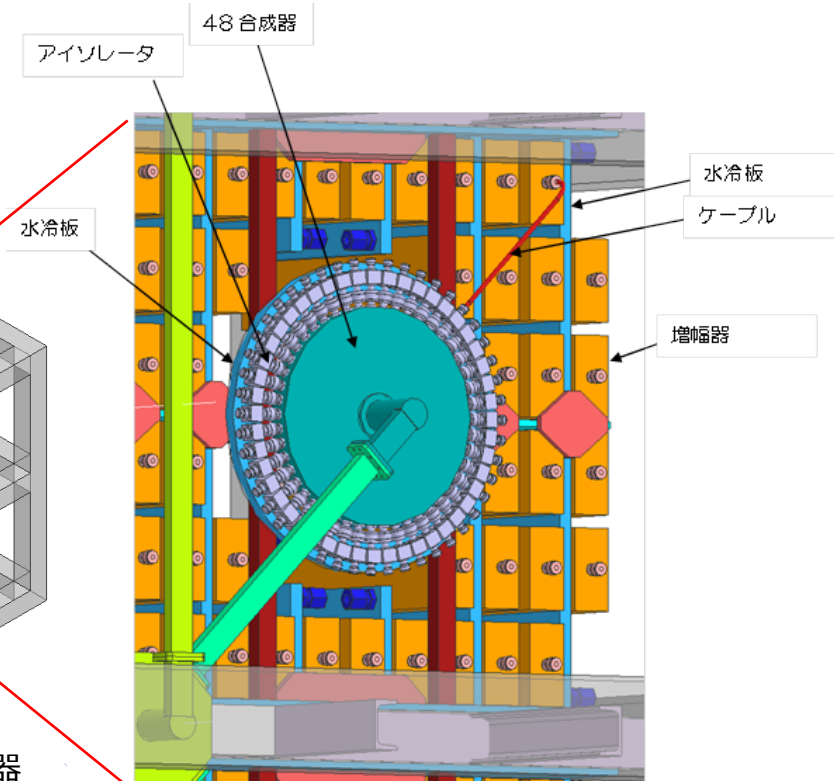


電力増幅部 (正面)  
※配管ケーブルは省略

※電力増幅部一架あたりの寸法：  
2300mm(W)×2300mm(D)×2300mm(H)



電力増幅部 (背面) 4合成器  
※配管ケーブルは省略



## 5.まとめ

- X帯固体電力増幅装置は、これを担う研究チームが平成28年1月27日付で正式発足し、SSPA全体システムの設計を始めとして、GaN-FETの開発、125WPA、48分配器及び48合成器の試作を行ってきた。GaN-FETについては、所定の目標を達成することができており、今後、製品化に向けた評価を行っていく予定である。
- また、125WPA、48分配器及び48合成器についても試作器が順次出来上がってきていることからその性能を個々に評価し、今年度内に最終段の2合成器までを含めた組立作業を完了し、平成29年度上期までにシステムとしての評価検証を完了させる計画である。
- SSPAはGREATシステムの送信装置として投入することを目的として、研究開発を進めているが、将来的な国内外等での拡販を想定して以下の課題を払拭していく必要がある。これらについては本研究でも意識して取り組んでいる。
  - GaNデバイスのPAE向上
    - ⇒高効率化により発熱量の減少 →冷却系装置の縮減、消費電力の低減
    - ⇒384本のPAデバイスの削減 →筐体の縮小 →装置設置面積の縮小
  - 低コスト化
    - ⇒中長期的なニーズの拡大（JAXA局をベースにX-SSPAへの乗り換え、実績作り） →安定した生産体制とシェア拡大による生産コストの低減