



ISSN 1349-113X  
JAXA-SP-11-014

# 宇宙航空研究開発機構特別資料

## JAXA Special Publication

---

21GHz帯高度放送衛星給電アレ一部  
排熱方式に関する研究

宇宙航空研究開発機構・日本放送協会

2012年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# 宇宙航空研究開発機構特別資料

JAXA Special Publication

## 21GHz帯高度放送衛星給電アレ一部排熱方式に関する研究

金森 康郎\*<sup>1</sup>, 中村 安雄\*<sup>1</sup>, 杉田 寛之\*<sup>1</sup>, 川崎 春夫\*<sup>1</sup>, 矢部 高宏\*<sup>1</sup>,  
岡本 篤\*<sup>1</sup>, 前田 真克\*<sup>1</sup>, 正源 和義\*<sup>2</sup>, 田中 祥次\*<sup>2</sup>, 中澤 進\*<sup>2</sup>,  
小島 政明\*<sup>2</sup>, 長坂 正史\*<sup>2</sup>, 山形 和弘\*<sup>2</sup>

\*1 研究開発本部 熱グループ

\*2 NHK放送技術研究所



2012年3月

March 2012

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# 目次

第1章	はじめに .....	1
第2章	共同研究の背景と経緯.....	3
2.1	研究概要 .....	3
2.2	過去の共同研究の経緯.....	5
2.3	平成20-21年度「21GHz帯高度放送衛星給電アレー部排熱方式に関する研究」の目的 .....	7
第3章	給電アレー部分モデルによる評価試験 .....	9
3.1	TWT熱ダミー熱平衡試験.....	9
3.2	給電アレー部分検証モデル熱真空試験 .....	28
第4章	給電アレー部熱解析.....	37
4.1	解析モデル .....	37
4.2	熱真空試験結果を用いたコリレーション .....	41
4.3	給電アレー部熱解析.....	43
第5章	給電アレー部温度分布の放射パターンへの影響.....	48
5.1	給電アレー部の温度特性による振幅・位相遷移.....	48
5.2	素子故障が放射パターンに及ぼす影響 .....	54
5.3	課題 .....	62
第6章	まとめと今後の課題.....	63

## 第 1 章 はじめに

平成 16、17 年度(平成 16 年 10 月 1 日～平成 18 年 3 月 31 日)の共同研究「21GHz 帯高度放送衛星システムに関する研究」では 21 GHz 帯衛星放送の実験衛星性能の要求条件を明らかにし、放送衛星システムの概念検討を行った。この検討より、給電アレー部の排熱が放送衛星ミッション実現にとって鍵となる技術課題の一つであると分かった。

また、平成 18 年度(平成 18 年 7 月 10 日～平成 19 年 3 月 31 日)の共同研究「21GHz 帯高度放送衛星給電アレー部排熱方式に関する研究」では、大気圧下で動作する小型細径進行波管(以下、TWT)の温度、発熱分布を断熱条件下で測定し、TWT の簡単な熱数学モデルを作成した。また、このモデルをもとに給電アレー部の大まかな温度分布を計算した。

以上の経緯を踏まえて、平成 19 年度(平成 19 年 4 月 11 日～平成 20 年 3 月 31 日)共同研究「21GHz 帯高度放送衛星給電アレー部排熱方式に関する研究」では、真空中で動作する TWT の熱真空試験を行った。この試験において TWT の性能データを取得するとともに、TWT の温度、発熱分布の取得データから、平成 18 年度より詳細な TWT の熱数学モデルを作成し、高い精度で給電アレー部の温度分布を計算した。

本報告書では、第 2 章で、21GHz 帯高度放送衛星ミッションのシステム概要、および、平板型ヒートパイプとこれを用いた排熱システムの概要を述べる。また、平成 16～19 年度に実施した共同研究の成果と課題を示すとともに平成 20～21 年度共同研究の目的及び実施方針を示す。

第 3 章で、TWT 熱ダミーを用いた評価試験について述べる。大気中で動作する TWT と真空中で動作する TWT の温度分布の差異と、試験コンフィギュレーション、電気的および熱的な観点から設定した試験条件について述べる。また、TWT の熱数学モデルのコリレーション用データの取得を目的として実施した熱ダミーによるアレー部を用いた熱真空試験について述べる。

第 4 章で、給電アレー部の熱解析について述べる。まず第 3 章に示す熱真空試験で取得したデータを用いて実施した給電アレー部の熱数学モデルのコリレーション内容について示し、コリレーション実施後の熱数学モデルを用いて実施した熱解析の結果および解析により明らかになった熱的な課題について述べる。

第 5 章で、第 3 章の試験及び第 4 章の熱解析結果を基にした、給電アレー部の温度分布が及ぼす放射パターンへの影響について述べる。また、アレー給電部の素子故障した場合の放射パターンへの影響について述べる。

第6章で、本研究より得られた知見と課題をまとめて示す。

本報告書の執筆分担を以下の表に示す。

表 1-1 報告書執筆分担

構成章	担当
第1章 はじめに	JAXA、NHK
第2章 共同研究の内容	JAXA、NHK
第3章 TWT 熱ダミーを用いた熱平衡試験	JAXA、NHK
第4章 給電アレー部熱解析	JAXA
第5章 給電アレー部温度分布の放射パターンへの影響	NHK
第6章 まとめと今後の課題	JAXA、NHK

## 第 2 章 共同研究の背景と経緯

### 2.1 研究概要

#### 2.1.1 21GHz帯高度放送衛星システム

NHK 放送技術研究所では、究極の高臨場感放送システムを目指してスーパーハイビジョンの研究を行っている。スーパーハイビジョンは、3300 万画素の超高精細映像と 22.2 マルチチャンネルの音響システムからなるシステムで、その情報量は非圧縮時には 24Gbps 以上であり、圧縮により 100~200Mbps 程度と想定している。膨大な量の情報を家庭に届け、スーパーハイビジョン放送を実用化するために、21GHz 帯衛星放送システムの研究を進めている。21GHz 帯衛星放送は、衛星の特徴を生かして全国同時に放送サービスを実現できることに加え、600MHz (21.4 - 22GHz) という広い帯域を生かして 2~3 チャンネルのスーパーハイビジョン番組を同時に放送することができる。

しかし、21GHz 帯衛星放送の電波は降雨による減衰が大きく、従来の 12GHz 帯衛星放送の電波の減衰に比べて、デシベル値で比較して約 3 倍である。降雨によるサービス時間率の低下を抑えて、家庭用小型受信アンテナによる受信を可能にするためには、降雨減衰対策が不可欠である。

衛星送信側の対策として、フェーズドアレーアンテナを採用したシステムを研究している。大きな降雨減衰が生じている地域のみ放射電力を増強するシステムで、日本全国にほぼ均一に電力を放射（全国ビーム）した上で、さらに降雨減衰が激しい地域に向けて増力したビーム（増力ビーム）を放射するシステムである。増力ビームは降雨状況に応じて照射場所を移動し、また強さを変化させることが可能である。増力ビームを照射する地域が狭い場合には、増力ビームを放射しても全国ビームを含めた衛星送信電力の合計をほとんど変えることなく効率的に降雨減衰補償が可能である。

現在検討しているアンテナ給電部の構成は、アレー状に高密度に配置された放射素子それぞれに増幅器などの送信回路が接続されたアクティブアレー方式である。最終段の電力増幅器もアレー状に高密度に配置されているため、電力増幅器から発生する大量の熱の処理が大きな課題である。通常宇宙用ヒートパイプを用いた排熱は空間的に難しく、特に中心部の熱を排熱することが非常に困難である。このため、新しい排熱機構を開発する必要がある。

#### 2.1.2 平板型ヒートパイプ

衛星搭載機器が発する熱は、衛星構体パネルを介し、宇宙空間に捨てられる。一般的には、サーマル・ダブラや宇宙用ヒートパイプが用いられ、それらにより機器から機器搭載面である衛星構体パネルへの熱拡散や、衛星構体パネルから放熱面（ラジエータ）への熱輸送が行われる。しかし、今後想定される衛星内部搭載機器の高密度化、高実装化に伴い、従来の方法では、十分な熱拡散や輸送が困難になる

ことが考えられる。そこで、高い熱輸送性能を持ち、高密度実装の発熱機器に対する搭載性を向上させた、薄型のヒートパイプの開発が必要となる。

JAXA 研究開発本部熱グループでは、上記の要求を満たす熱輸送デバイスとして、2008 年度から平板型ヒートパイプの開発を行っている。開発目標としては、

- (a) 厚さを 3mm 以下であること。
- (b) 高発熱密度源の熱拡散が可能であること。(発熱密度 10W/cm<sup>2</sup>)
- (c) 十分な熱輸送性能を持つこと。(長さ 300mm 以上、熱輸送量 100W 以上)
- (d) 宇宙での使用を考慮し、寿命などの高い信頼性を有すること。

を挙げている。平板型ヒートパイプの開発課題としては、薄板形状であることや、機器の実装性が良いこと、起動特性が良いこと、安定した性能、宇宙での使用を考慮した信頼性を挙げている。それらの課題を達成するデバイスとして、薄板型に加工が容易で、且つ性能が高い振動流型ヒートパイプ (OHP) に注目し、その中でも安定した動作が期待できる逆止弁付 OHP を平板型ヒートパイプとして開発してきた。現在は BBM フェーズにあり、各種パラメータ・スタディを行いつつ、信頼性向上に向けた検討を行っている。

## 2.2 過去の共同研究の経緯

### 2.2.1 平成 16、17 年度実施の「21GHz帯高度放送衛星システムに関する研究」による排熱に関する成果と課題

平成 16、17 年度実施の「21GHz 帯高度放送衛星システムに関する研究」では、給電アレー部排熱方式の検討を行うとともに、簡易熱解析を行って給電アレー部と衛星主構体の表面温度を算出して概念検討を行った。給電アレー部の排熱に関する成果と課題を以下に記す。

#### 給電アレー部排熱方式の検討

給電アレー部での発生熱を放熱面へ排熱し、温度保持範囲と温度変動幅の要求を満足させるために、次の検討が必要である。

- (1) 給電アレー部内部から側面への熱輸送
- (2) 給電アレー部側面からバス放熱面への熱輸送
- (3) (1)から(2)へのインタフェイス

2 段階の熱輸送のステップと、ステップ間のインタフェイスを想定しているが、給電アレー部の排熱に該当する検討課題は(1)である。

給電アレー部の中心部から側面へ発生熱を輸送するデバイスとしては、平板型ヒートパイプ（厚さ 2～3 mm）が有望である。ただし、宇宙用途としての技術の確立と、設計、製造、評価を実施できるメーカーの選定、開発体制構築が課題である。また、本ミッションの検討課題として複数ヒートパイプの配置最適化（ヒートパイプの重ね合わせ）、吸排熱部以外の断熱設計、性能、信頼性評価などがあげられる。

また、給電アレー部ダミー供試体を使った熱真空試験による評価も必要である。

### 2.2.2 平成 18 年度実施の「21GHz帯高度放送衛星給電アレー部排熱方式に関する研究」の成果と課題

平成 18 年度の研究では、排熱に関する基礎技術の有効性を検討するとともに、給電アレー部の熱的成立性を検討した。検討に当たっては、TWT および TWT 熱磁気ダミーの温度分布および各部位の発熱量を大気圧断熱条件下で測定し、熱解析に用いるデータを取得した。高周波増幅器に NHK が開発した小型細径 TWT を想定し、排熱を担当する熱輸送デバイスに JAXA が検討している平板型ヒートパイプを想定した構成とした。

TWT 熱特性取得試験より、以下の知見が示唆された。

- ・ 発熱量に大きな温度依存性がある。
- ・ 低速波回路部を冷却した場合、発熱量の制御がしやすい。
- ・ コレクタ部を冷却した場合、TWT 全体の温度レベルを下げやすい。



- ・ 低速波回路部からコレクタ部にかけて、TWT 全体の温度レベルを下げ、温度分布が均一化する最適冷却ポイントが存在する。
- ・ 磁気シールドの有無については、温度分布に与える影響が小さい。

給電アレー部熱解析より、以下の知見が得られた。

- ・ 給電アレー部を構成する TWT 同士を熱的に結合させることにより、給電アレー部の温度低減を図ることができる。
- ・ 給電アレー部中心部温度の低減には、給電アレー部の TWT 列一層につきヒートパイプ 1 本では不十分である。
- ・ TWT188 素子密集時におけるヒートパイプ設置の最適化の検討が必要（トレードオフの実施）である。

### 排熱システムの実現への課題

アレーシステムを許容温度範囲内に収めるため、個々の TWT の出力変化や効率低下時だけではなく、アンテナ運用モードに応じた発熱条件を把握し、発熱条件のワーストケースにおいても、排熱能力に十分なマージンを確保できる排熱システムの設計検討が求められる。

また、TWT の熱特性及び出力特性等の詳細な把握とともに、排熱システムの要となる宇宙仕様の平板型ヒートパイプの開発が重要である。熱真空環境下における TWT 試験を実施し、TWT 熱特性・出力特性を明確化するとともに、平板型ヒートパイプの開発と平行し、TWT との熱伝達性能の高い締結方法を開発する必要がある。

#### 2.2.3 平成 19 年度「21GHz帯高度放送衛星給電アレー部排熱方式に関する研究」の成果と課題

平成 19 年度の研究では、真空環境下で動作する TWT の熱平衡試験を行い、取得したデータをもとに、TWT の熱数学モデルを作成した。また、給電アレー部の熱解析に新たに作成したモデルを適用し、給電アレー部全体の解析を行った。

TWT 熱真空試験（電気性能試験、熱平衡試験）より、以下の知見が示唆された。

- ・ 大気中で動作する TWT と同等の結果が得られ、十分な性能を有していることが分かった。
- ・ TWT の熱数学モデルとのコリレーションに有効な発熱量、各部平衡温度のデータを取得することができた。

給電アレー部全体の熱解析により、以下の知見が示唆された。

- ・ 給電アレー部を構成する TWT 同士を熱的に結合させることにより、給電アレー部の温度低減を図ることができる。
- ・ 給電アレー部中心部温度の低減には、TWT1 本につきヒートパイプ 1 本では不十分である。

### 給電アレー部排熱システム実現への課題

多数の小型細径 TWT により構成されるアレーシステムにおいては、個々の TWT の個体差や駆動用電源の制約があり、各 TWT を最適な動作温度や動作条件に制御することが困難である。出力変化がアレーのアンテナ放射パターンに与える影響の解析や、劣化した放射パターンの補正方法の検討が必要となる。

一方、発熱条件のワーストケースにおいても、排熱能力に十分なマージンを確保できる排熱システムの設計検討が求められる。今後は、平板型ヒートパイプの開発と平行し、TWT との熱伝達性能の高い締結方法を開発することが今後の課題となる。

## 2.3 平成 20-21 年度「21GHz帯高度放送衛星給電アレー部排熱方式に関する研究」の目的

平成 20-21 年度の研究では、開発した平板型ヒートパイプの実証を目的とし、TWT 熱ダミーによる給電アレー部分検証モデルに平板型ヒートパイプを実装し、熱真空環境下で熱平衡試験を行い、熱的成立性を検証する。また、アレー形成時の温度分布や素子故障が TWT の電気特性に与える影響を考慮し、放射パターンに及ぼす影響を評価する。

### 共同研究の実施方針

平成 20-21 年度（本報告書）の研究の遂行に当たっては、以下の手順で行う。

- (1) 過去に実施した TWT の熱平衡試験結果から、TWT 熱ダミーによる給電アレー部分検証モデルを試作する。
- (2) 給電アレー部分モデルに平板型ヒートパイプを実装し、熱真空環境下における熱的成立性を評価する。
- (3) 上記(2)で測定した結果をもとに、平板型ヒートパイプの熱数学モデルを検討し、給電アレー部の温度特性を評価する。
- (4) 給電アレー部の温度分布や素子故障が放射パターンなどの電気性能に与える影響を評価する。

## 共同研究の課題および作業分担

以下のようにまとめる。

表 1-1 共同研究の研究課題項目および作業分担

研究課題項目	NHK	JAXA
(1) TWT 熱ダミーによる給電アレー部分モデルの試作	◎	○
(2) 平板型ヒートパイプを実装した給電アレー部分モデルの熱真空試験	○	◎
(3) 平板型ヒートパイプの熱数学モデル作成	○	◎
(4) 給電アレー部の温度分布特性の評価	○	◎
(5) 給電アレー部の温度特性が電気性能に与える影響の評価	◎	○

◎は主担当、○は副担当を示す。

## 第3章 給電アレー部分モデルによる評価試験

### 3.1 TWT熱ダミー熱平衡試験

#### 3.1.1 TWT熱ダミーの概要

TWT (Traveling Wave Tube、進行波管) は、真空管中で電子ビームをつくり、マイクロ波と相互作用させて電子のエネルギーをマイクロ波に変換することで増幅器として動作する。TWT は、電子銃、アノード、低速波回路、コレクタから構成される。

NHK 放送技術研究所では、21 GHz 帯衛星搭載給電アレー部に適用することを目的として、断面寸法 15.3 mm×20.0 mm、出力約 10 W の TWT を開発した。

表 3.1-1 TWT の主要諸元

周波数	21.7 GHz
出力電力	10.8 W
利得	40 dB
総合効率	40%



図 3.1-1 小型細径 TWT の外観

本研究においては TWT の発熱特性を再現する TWT 熱ダミーを設計し実験を行うことが重要となる。そこで、TWT の発熱部の構造と各部分の特徴について解説する。図 3.1-2 に TWT の発熱部と構造を示した。

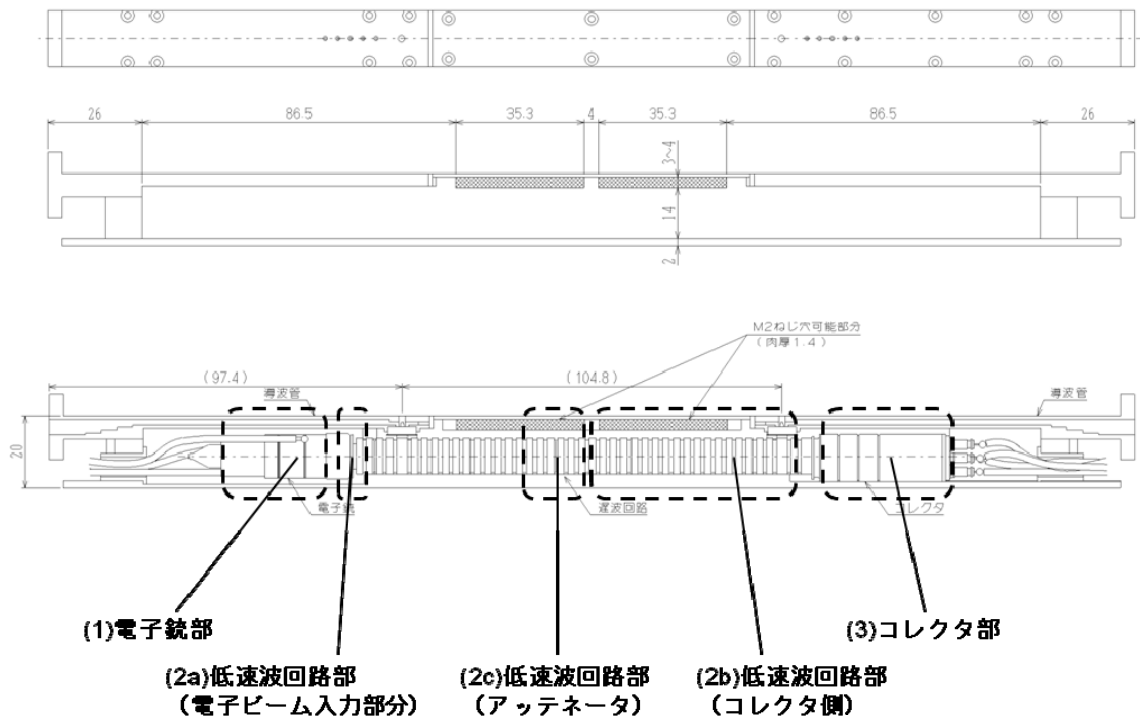


図 3.1-2 TWT の発熱部と構造

TWT 発熱部の特徴と発熱量を以下に述べる。

(1) 電子銃部…2.5W 程度

電子銃部からの熱はシリコンモールド剤を介して筐体に伝達される。側面との距離が短いので、側面に逃げる熱の量が、上下面に逃げる熱よりもやや多くなる想定される。

(2a) 低速波回路部 (電子ビーム入力部分) …1W 程度

電子ビーム入力部分のビームセイバーによる発熱がある。発熱部の位置を考えると、電子銃部の発熱として考えて問題ない。

(2b) 低速波回路部 (コレクタ側) …1.5～4.5W 程度

低速波回路部の発熱のうち、(2a)の分を除いた残りは、主にコレクタ部に近い部分で発生する。底面とは接触しており、側面とは熱伝導性接着剤を介して伝導する。

(2c) 低速波回路部 (アッテネータ) …ごく僅か

アッテネータによる発熱は、10W 程度の出力では無視できる程度と想定できる。

(3) コレクタ部…9～15W 程度

コレクタ部は円筒形の形状をしており、放熱のために筐体と接触している。

開発した 2 式の TWT(#9 と#10)を用いて平成 19 年度には真空条件下において、

発熱特性および温度分布測定を実施した結果を再掲載する。

## TWT実機の温度分布測定結果

### (1) I/F 温度による TWT 温度分布比較

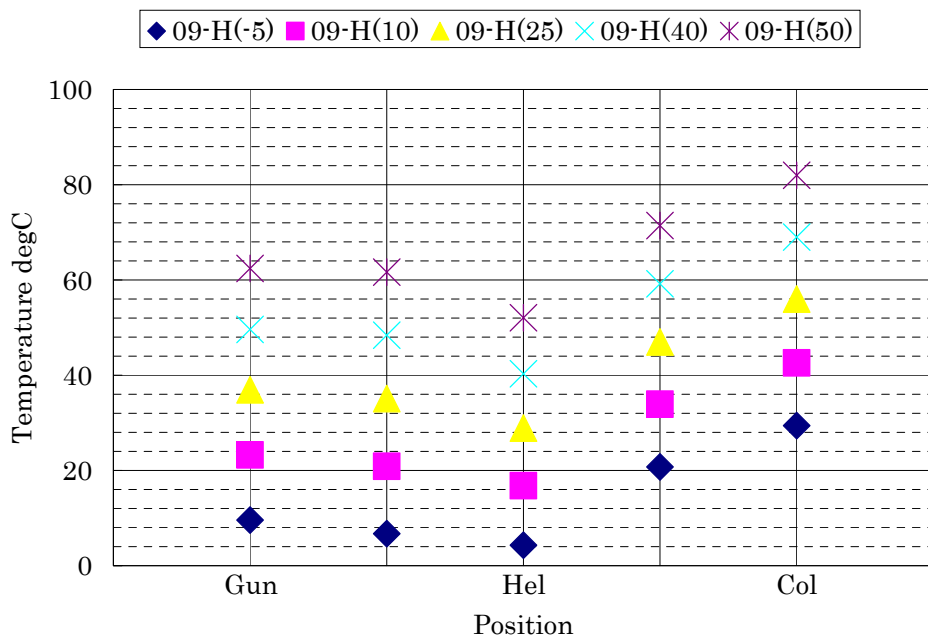
TWT 温度分布を I/F 温度について比較した結果を図 3.1-3 に示す。比較は、TWT#09 の Hel 部冷却の結果において行った。

### (2) TWT#09 と#10 の TWT 温度分布比較

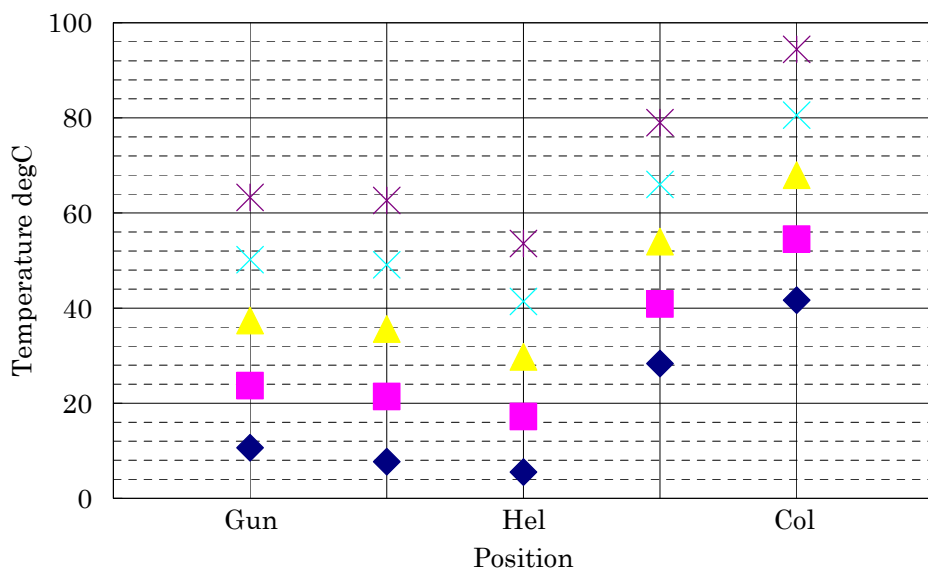
TWT 温度分布を TWT#09 と#10 で比較した結果を図 3.1-4.に示す。比較は、Hel 部冷却の I/F 温度 25℃、10℃の結果において行った。

### (3) 冷却位置による TWT 温度分布比較

TWT 温度分布を冷却位置について比較した結果を図 3.1-5 に示す。比較は、I/F 温度 10℃において行ったが、TWT の許容温度による制約により、Gun 部冷却の無信号モードについては I/F 温度 0℃の結果で代用している。

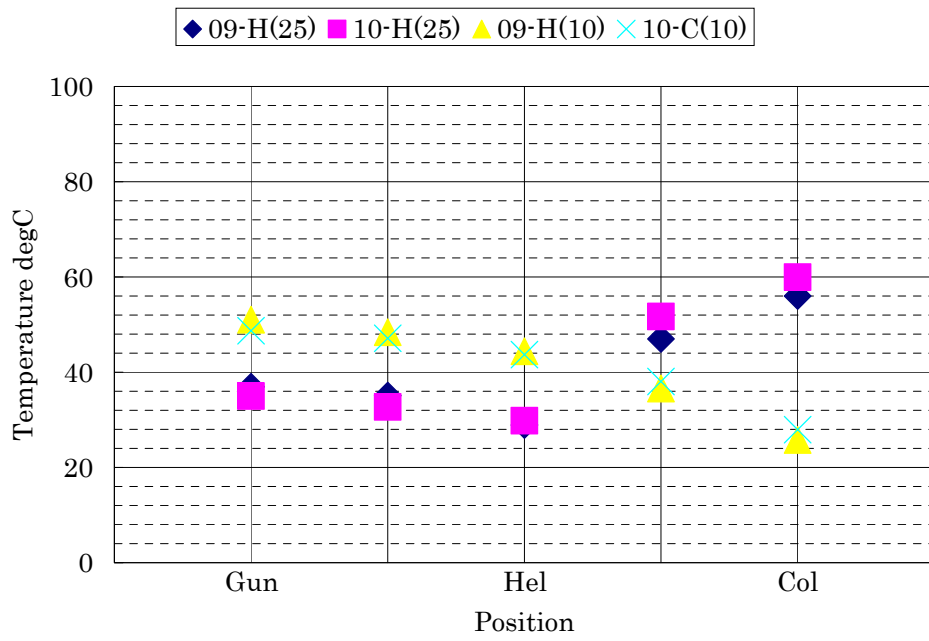


(a) 飽和動作モード温度比較

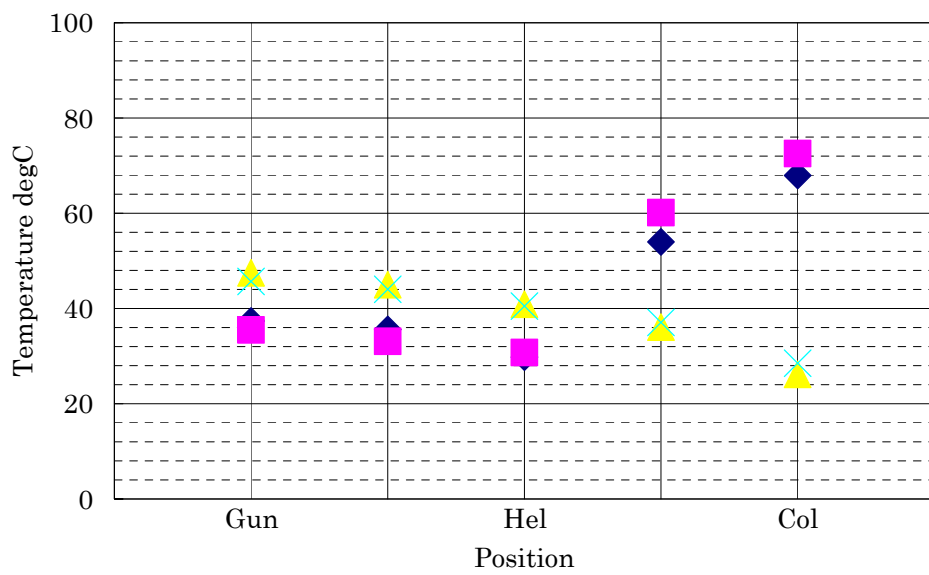


(b) 無信号動作モード温度比較

図 3.1-3 I/F 温度における TWT 温度分布比較



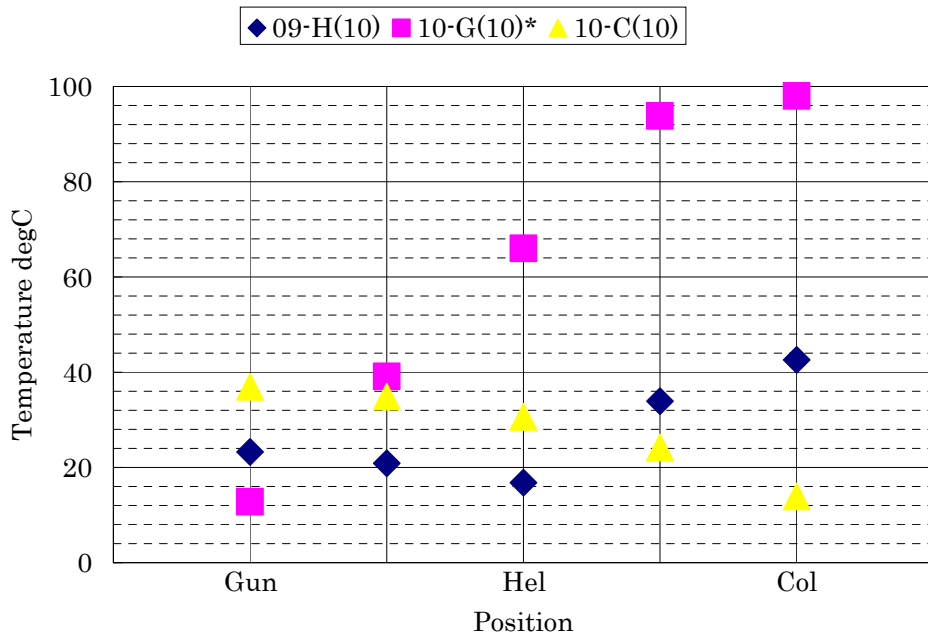
(a) 飽和動作モード温度比較



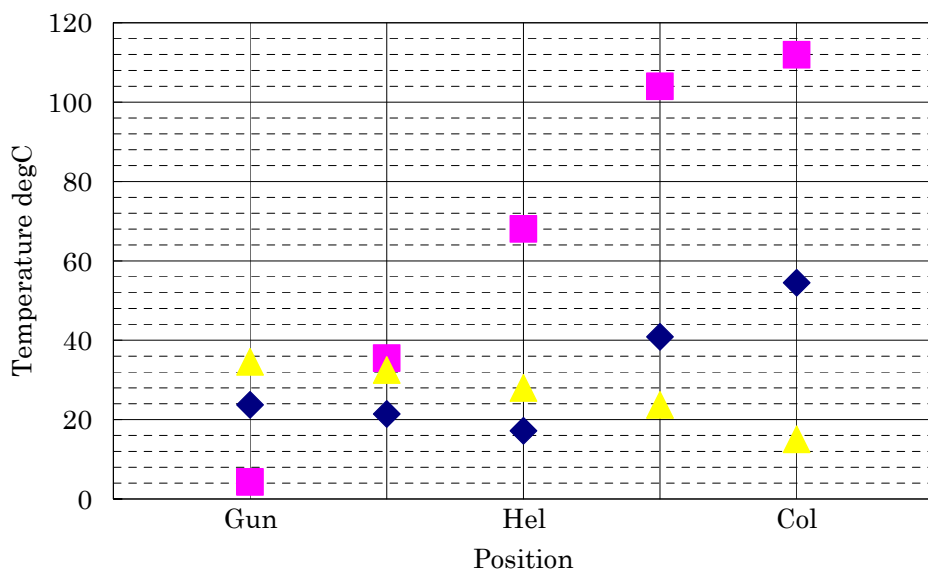
(b) 無信号動作モード温度比較

図 3.1-4 TWT#09 と#10 の TWT 温度分布比較





(a) 飽和動作モード温度比較



(b) 無信号動作モード温度比較

図 3.1-5 冷却位置による TWT 温度分布比較

\* #10-G の無信号モードの結果は I/F 温度 0°C で代用している

### TWT熱ダミーの基本仕様

開発した TWT 熱ダミーの外形寸法は、試作した TWT の外形と同じとし、材料は TWT 実機の筐体と同様にアルミ合金を用いた。発熱部はカートリッジヒーターにより発熱特性を再現する。熱ダミーの内部形状、カートリッジヒーターの種類、アルミ合金の種類、を最適化することにより、TWT 熱ダミーの発熱特性を TWT 実機に近づけた。外形図を図 3.1-6 に示す。また、発熱部のカートリッジヒーターの定格消費電力を下記に示す。

- 電子銃部            3W
- 低速波回路部      6W
- コレクタ部        15W

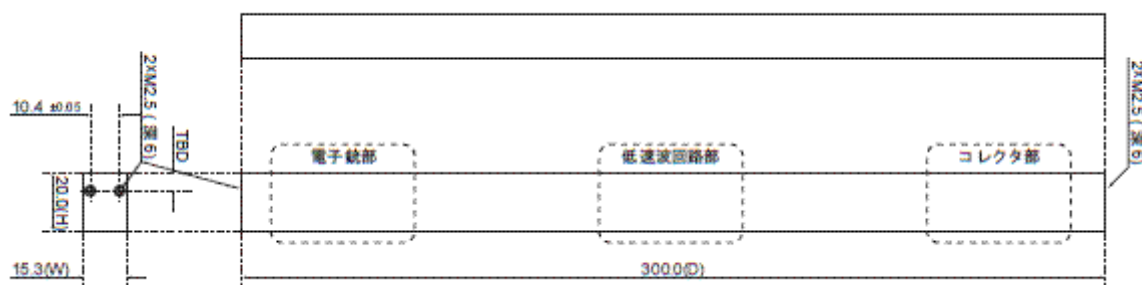


図 3.1-6 TWT 熱ダミー外形図

開発した TWT 熱ダミーと平板型ヒートパイプを用いた熱的成立性の確認試験においては、188 素子給電アレーの中央部 5 段を抽出した形状により実施する方針とし、TWT 熱ダミーは 69 式製作した。

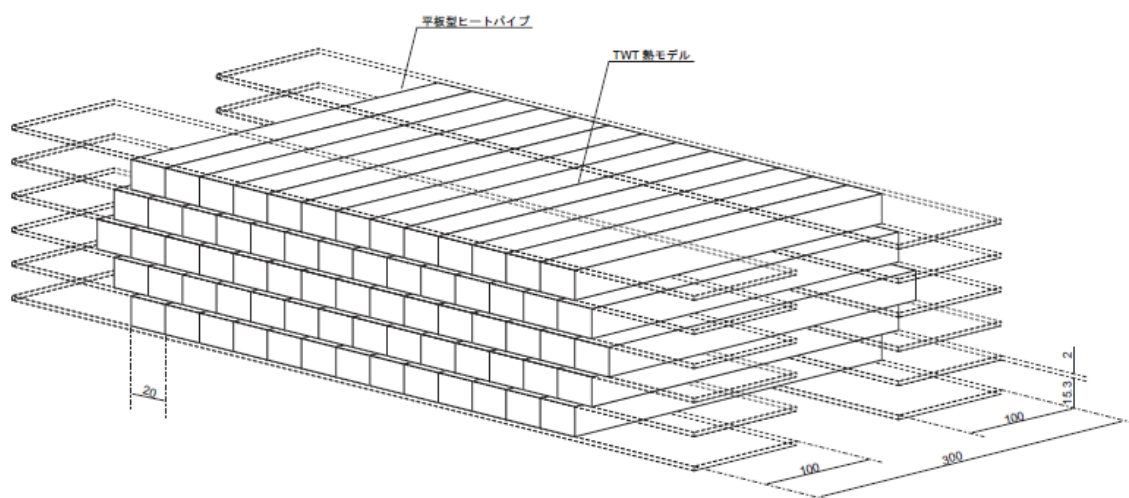


図 3.1-7 TWT 熱ダミーアレー構成イメージ図

### 3.1.2 TWT熱ダミーの設計検討と試作

前述の基本仕様を基に、TWT 熱ダミーの設計検討を行った。熱ダミーは、軸方向熱伝導率と各部での発熱を実機である TWT#09, 10 と合わせて製作した。

TWT 熱ダミーの形状は、実機と同じ形状にしたが、熱伝導率を合わせるため、材質や内部形状を調整し、表 3.1-1、図 3.1-8 の形状、材質に決定した。また、発熱を合わせるため、Gun 部, He1 部, Col 部に当たる個所にそれぞれカートリッジヒータを挿入した。加えて、評価試験での温度測定を想定し、Gun 部, He1 部, Col 部に当たる個所にそれぞれ熱電対を設けた。

表 3-1-1 TWT 熱ダミー設計結果

外寸法	mm	15.3 × 20 × 280	
材質		A7075	
ヒータ抵抗	Ω	Gun 部	256
		He1 部	192
		Col 部	57.6

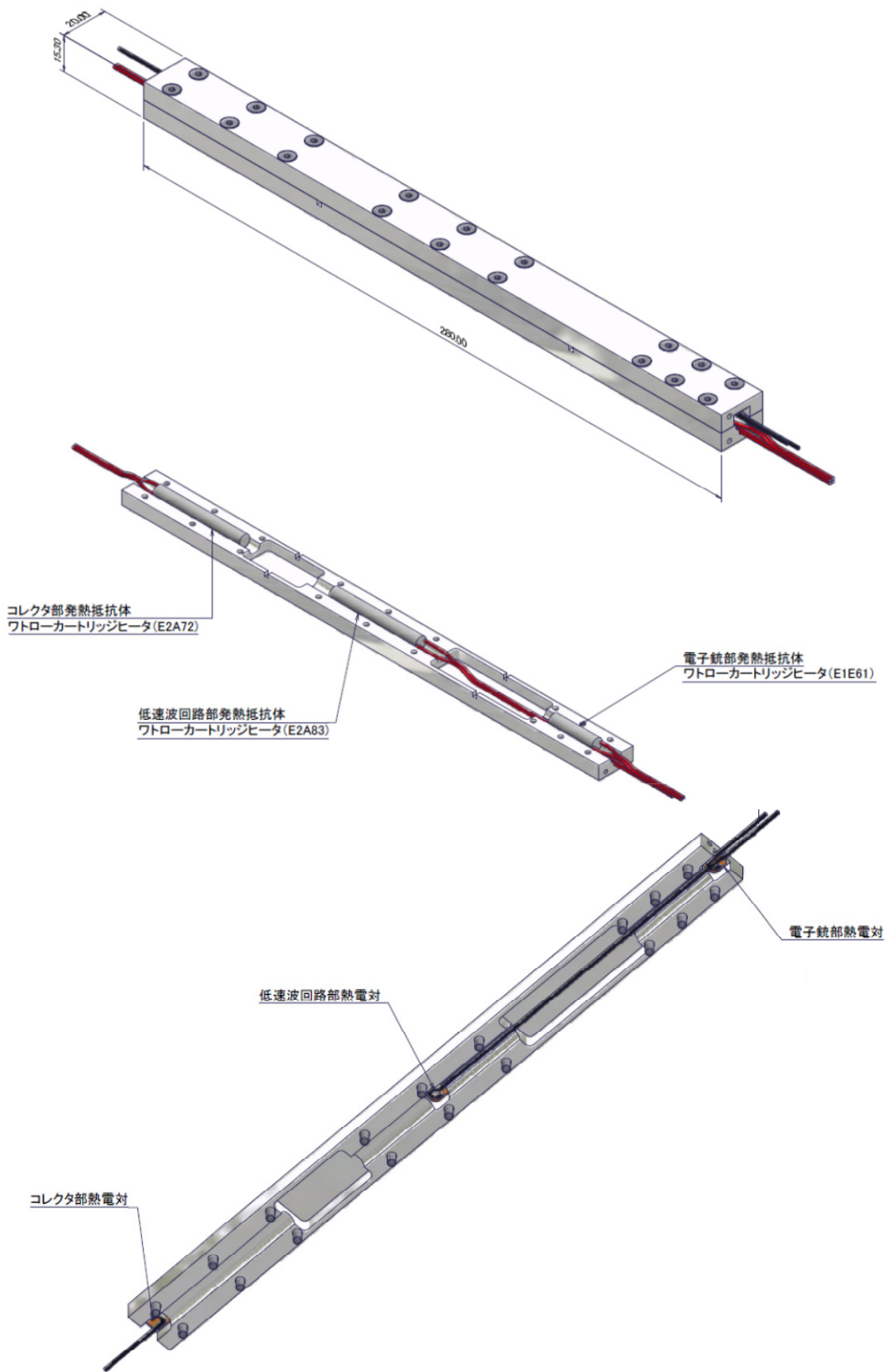


図 3.1-8 TWT 熱ダミーの形状

### 3.1.3 熱ダミー妥当性評価

試作した TWT 熱ダミーは、恒温槽を用いて大気圧断熱環境下で測定し、#10TWT 実機の同様の試験結果と比較することにより、発熱特性の妥当性を評価した。また、試作した 69 式の TWT 熱ダミーの内、無作為に 7 本選択し、同じコンフィギュレーションで測定を行うことで、バラつきの確認を行った。

#### 3.1.3.1 試験コンフィギュレーション

図 3.1-9 に熱ダミーの大気圧断熱環境試験の様子を示す。

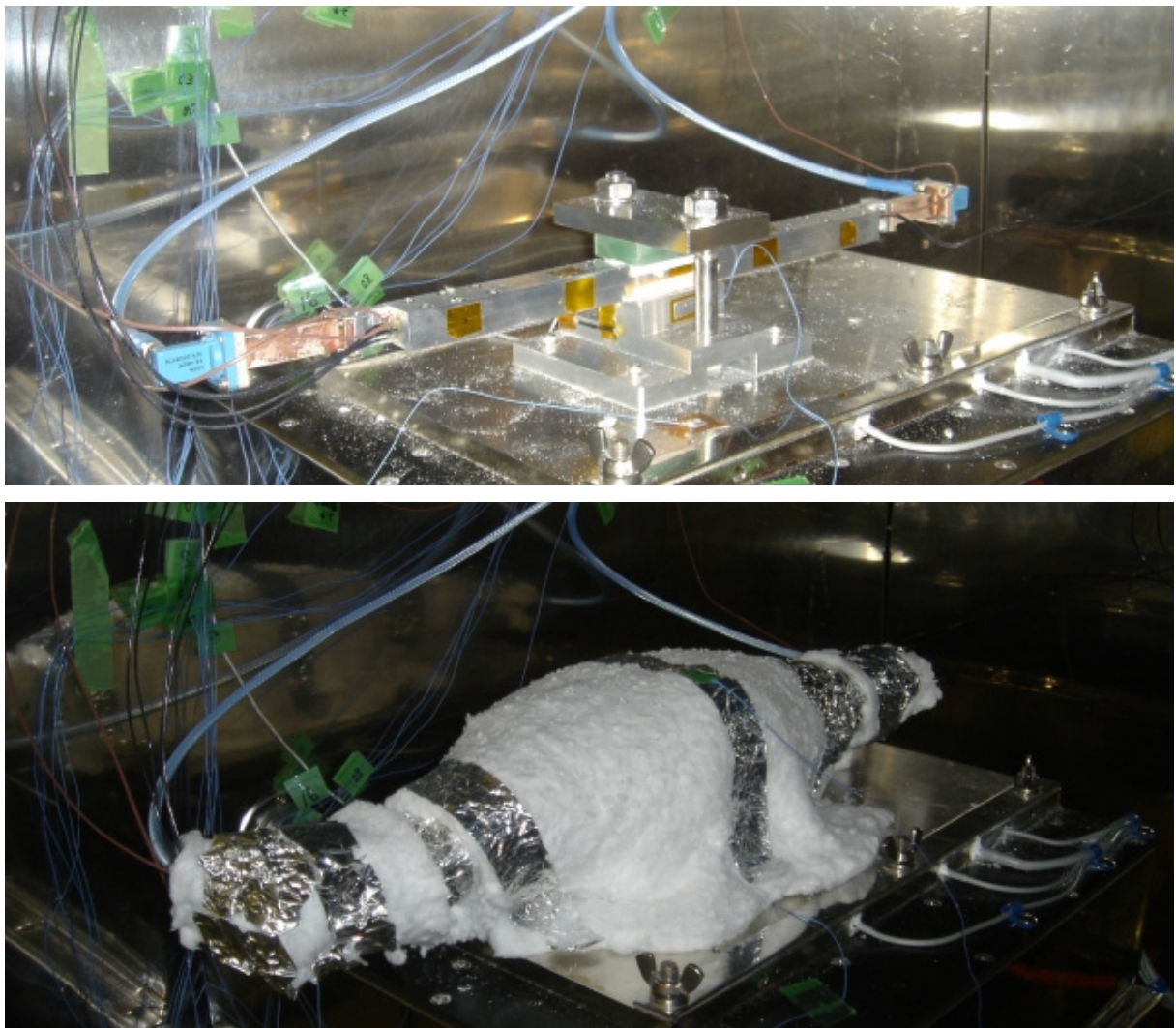


図 3.1-9 TWT 熱ダミーの大気圧断熱環境試験の様子

### 温度測定点

図 3.1-10 に示す熱電対による測定点 TC01~024 において、温度測定を行った。TWT 熱数学モデル構築のために、TWT 上には Gun 部、Hel 部、Col 部に加え、それぞれの間と Hel 部測定点裏の計 6 点熱電対を設けた。

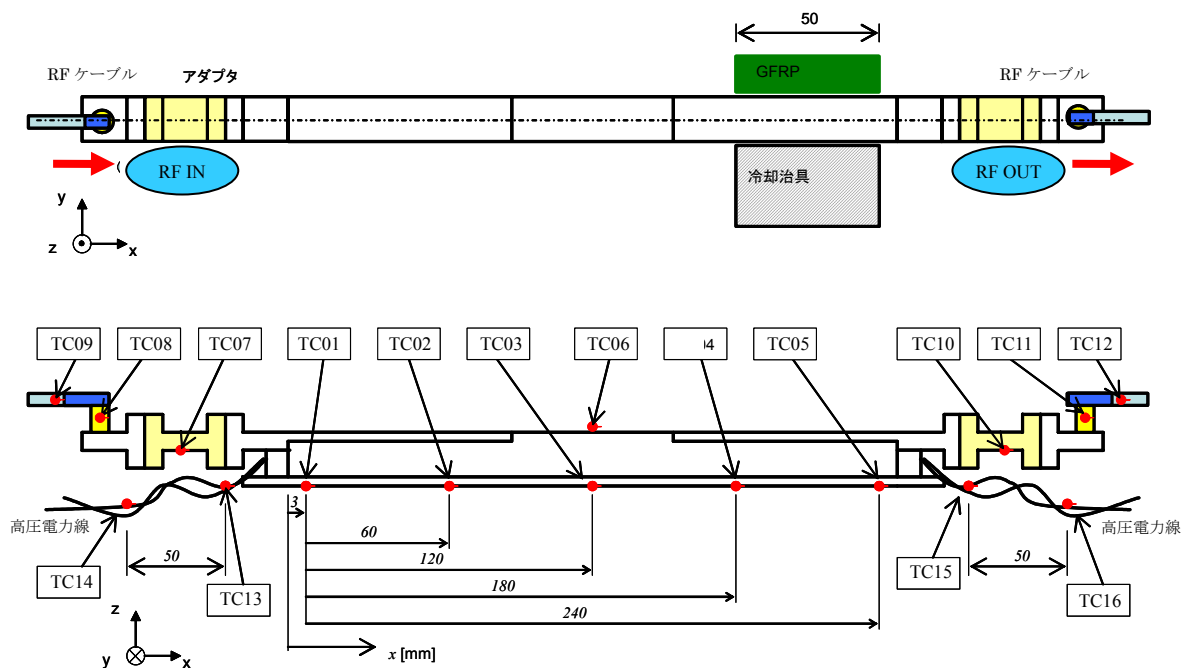


図 3.1-10 熱電対取付け位置

### TWT冷却位置

TWT の発熱を除去するための冷却部を、3 箇所から設定した。この 3 箇所は、発熱要素として想定される電子銃 (Gun) 部、低速波回路 (Hel) 部およびコレクタ (Col) 部とした。図 3.1-11 に上記 3 箇所を冷却した場合の概略図を示す。

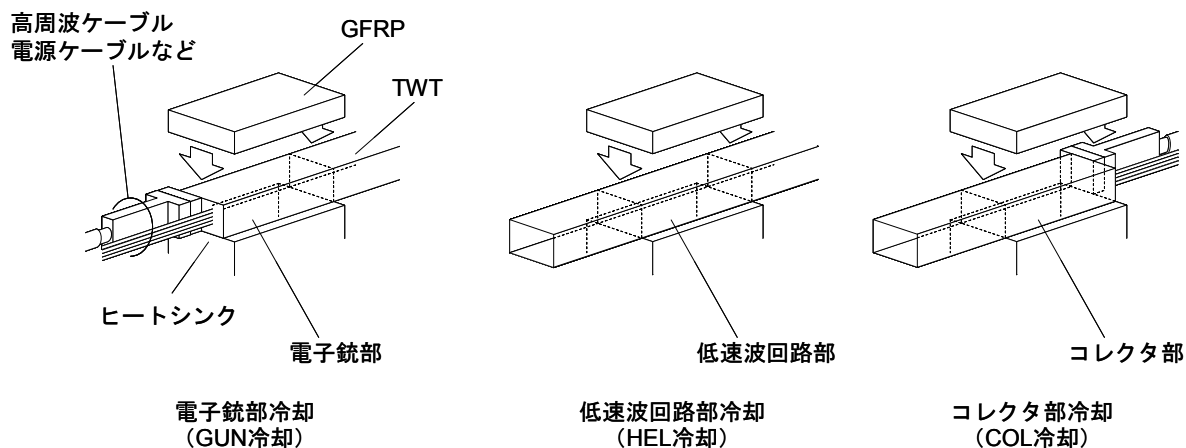


図 3.1-11 TWT 冷却位置

### 3.1.3.2 測定データ

試作した熱ダミーおよびTWT実機（#10）の熱平衡試験を実施し、その結果を比較した。TWT冷却位置、動作状態、冷却インタフェース温度（IF温度）の組み合わせは以下の通りである。

表 3.1-2 TWT 冷却位置、動作状態、IF 温度の組合せ

	飽和動作状態	無信号動作状態
低速波回路部冷却	IF 温度： -5, 10, 25, 40, 55 °C	
電子銃部冷却	IF 温度： -5, 10 °C	
コレクタ部冷却	IF 温度： -5, 10, 25, 40 °C	

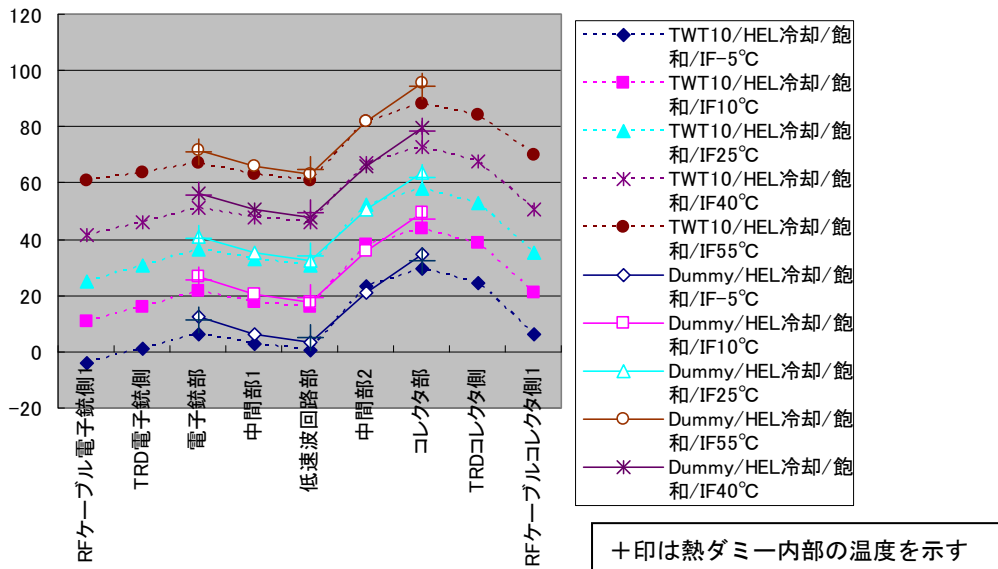


図 3.1-12 低速波回路部（HEL）冷却／飽和時

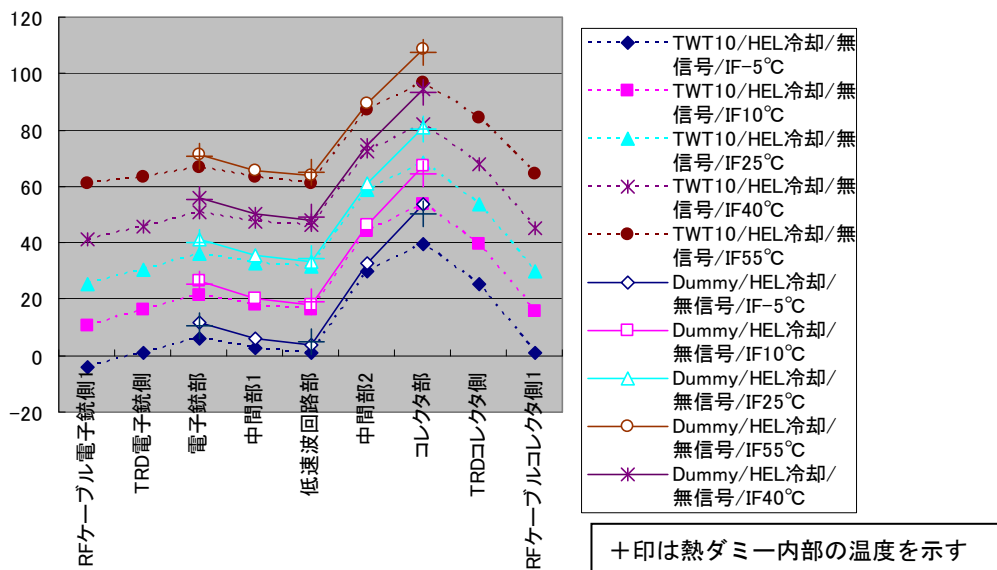


図 3.1-13 低速波回路部（HEL）冷却／無信号時

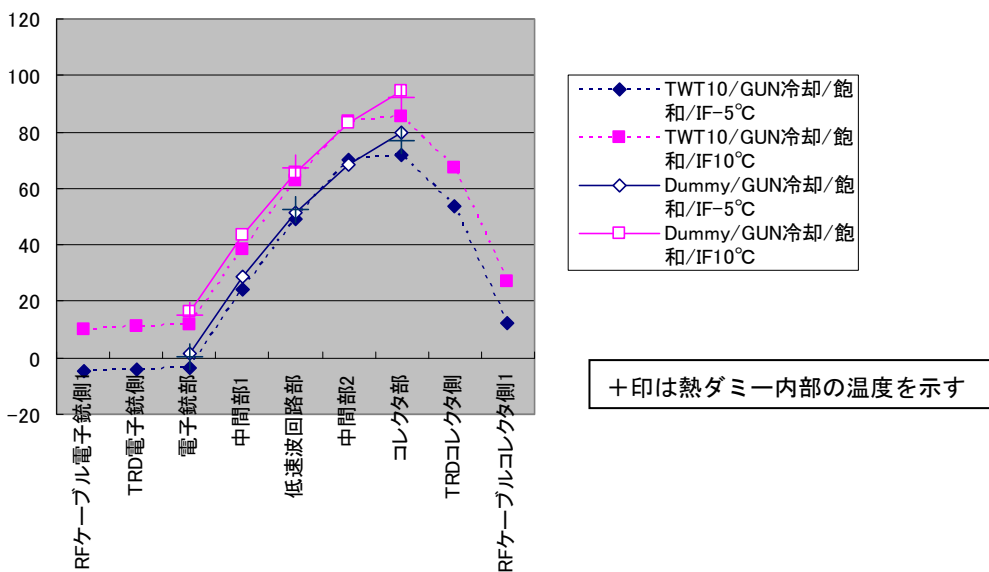


図 3.1-14 電子銃部 (GUN) 冷却/飽和時

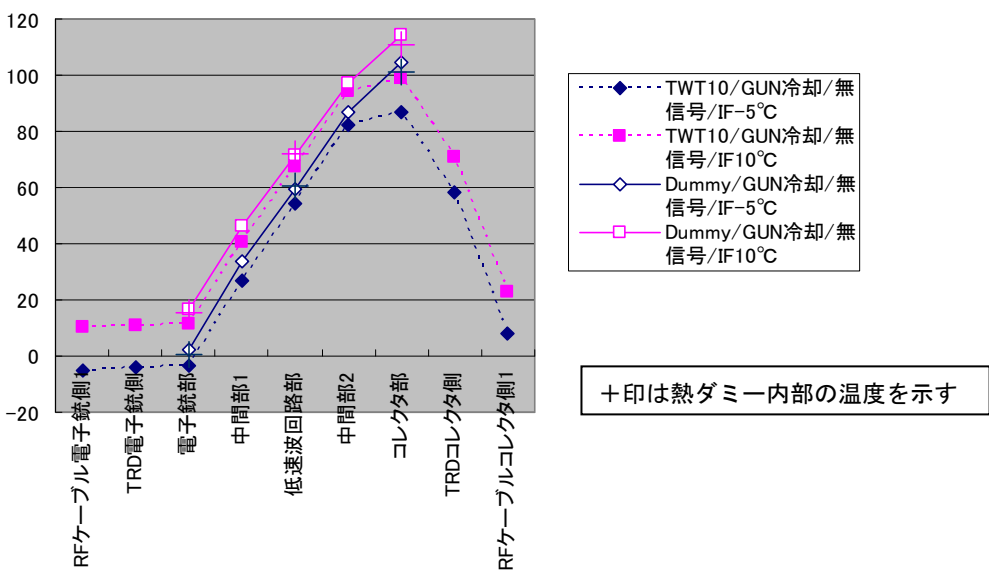


図 3.1-15 電子銃部 (GUN) 冷却/無信号時



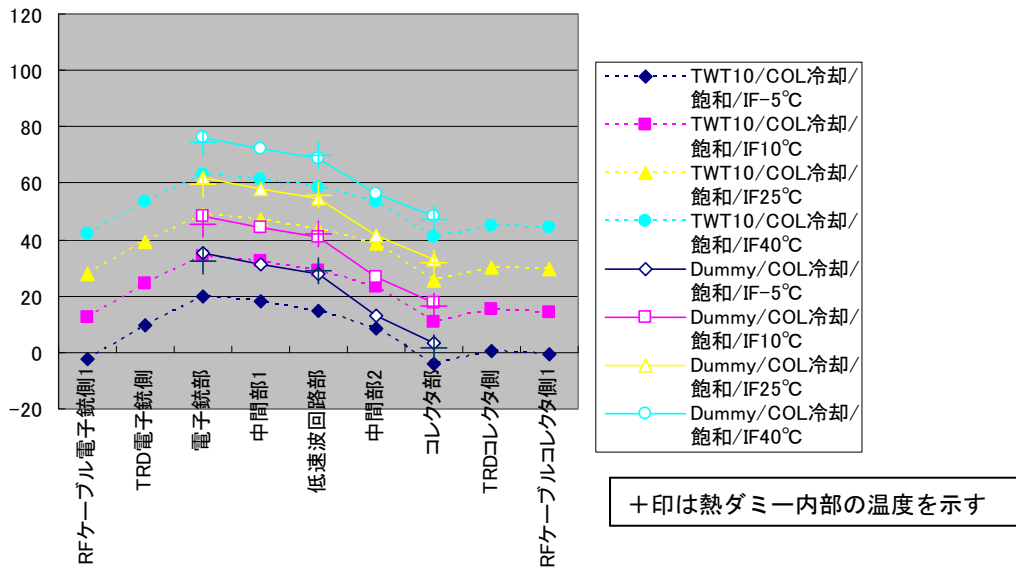


図 3.1-16 コレクタ部 (COL) 冷却/飽和時

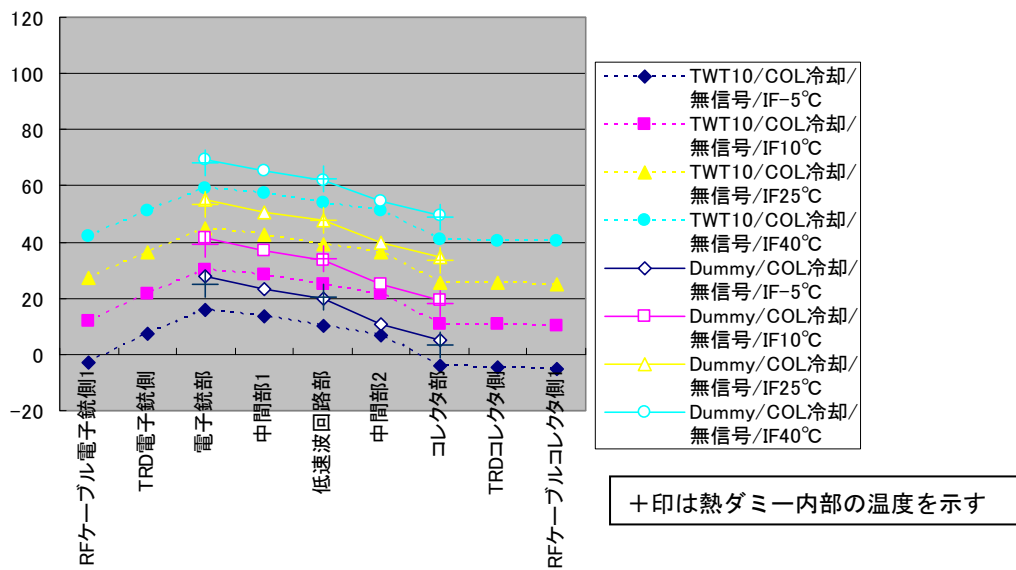


図 3.1-17 コレクタ部 (COL) 冷却/無信号時

全ての測定点において、熱ダミーの温度が実機の温度を少し上回ったが、TWT 熱ダミーと TWT 実機の温度分布の傾向は一致する結果を得た。また、熱ダミー筐体外部の熱電対の測定値と筐体内部に埋め込んだ熱電対の測定値の比較から表面温度と内部温度の間に大きな差がないことがわかった。

## TWT熱ダミーのバラつき確認試験

試作した TWT 熱ダミー69 本のうち 10%にあたる 7 本（銘版の下 1 桁が 5 番のもの）をサンプルとして抽出し、バラつきを確認した。

### 確認試験の方法

- ・ 低速波回路部（HEL）を冷却
- ・ TWT の動作状態は、飽和動作および無信号動作を模擬
- ・ IF 温度は、15, 55°C を測定
- ・ 測定点は TWT 熱ダミーの内部温度とし、電子銃部（GUN）、低速波回路部（HEL）、コレクタ部（COL）の 3 地点を測定
- ・ 測定の順番は、若番から順に測定

測定結果をまとめたものが図 3.1-18、図 3.1-19 である。試作した熱ダミーの温度はいずれも TWT 実機よりも高くなった。また、試作した TWT 熱ダミー初号機の温度とサンプルとして抽出した TWT 熱ダミーの温度を比較したところ、温度差は最も高いところで+5.1 度、最も低いところで-2.7 度であった。

No25、No35、No45 の 3 本は他の TWT 熱ダミーと比較して温度が高かった。これは、No15 の測定終了後、IF 部と熱ダミーとの間に貼ってある熱伝達シートを交換して No25 の測定を開始したことによる影響と考えられる。そこで、No65 までの測定が終了した後、熱伝達シートを交換せずに No25 を再測定し、その結果を“No25（再）”とした。熱伝達シート交換直後と比較して温度が約 5°C 低くなった。

今回の測定の結果、飽和時 15°C（図 3.1-18）の No25 のコレクタ部で初号機との温度差が最大となり、+5.1°C と大きかった。これは、TWT 熱ダミーと冷却治具との固定のトルク管理がきちんとされていないことが原因と考えられたので、後日、No. 25 の熱ダミーを用いて再現性確認を実施した結果を図 3.1-19 に示す。初号機と No. 25 の温度差は 1.7°C となり、トルク管理を行わない場合と比べて温度差は半分以下となった。

また、TWT 実機には、導波管とケーブルが接続されており、今回の評価試験においても、試作した TWT 熱ダミーにおいても、これらを取り付けた状態での発熱特性の妥当性が重要である。図 3.1-20 に導波管とケーブルからの熱リークの影響を考慮した実験結果を示す。導波管とケーブルを接続したことで、冷却部以外の測定ポイントの温度は約 3°C 低下し、TWT 実機と熱ダミーの発熱特性は近づいた。

最後に、個々のヒータの抵抗測定値はメーカーから提供されており、表 3.1-3 に示した。

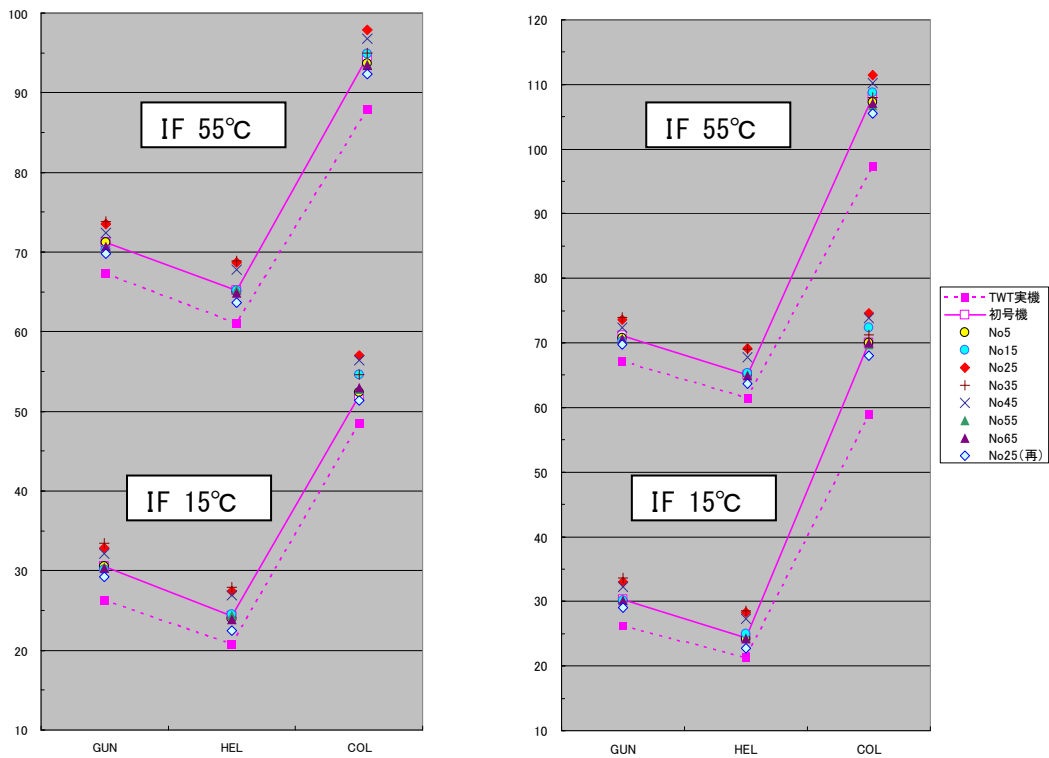


図 3.1-18 TWT 熱ダミーばらつき確認結果  
 低速波回路部 (HE1) 冷却/飽和時(左)、無信号時(右)

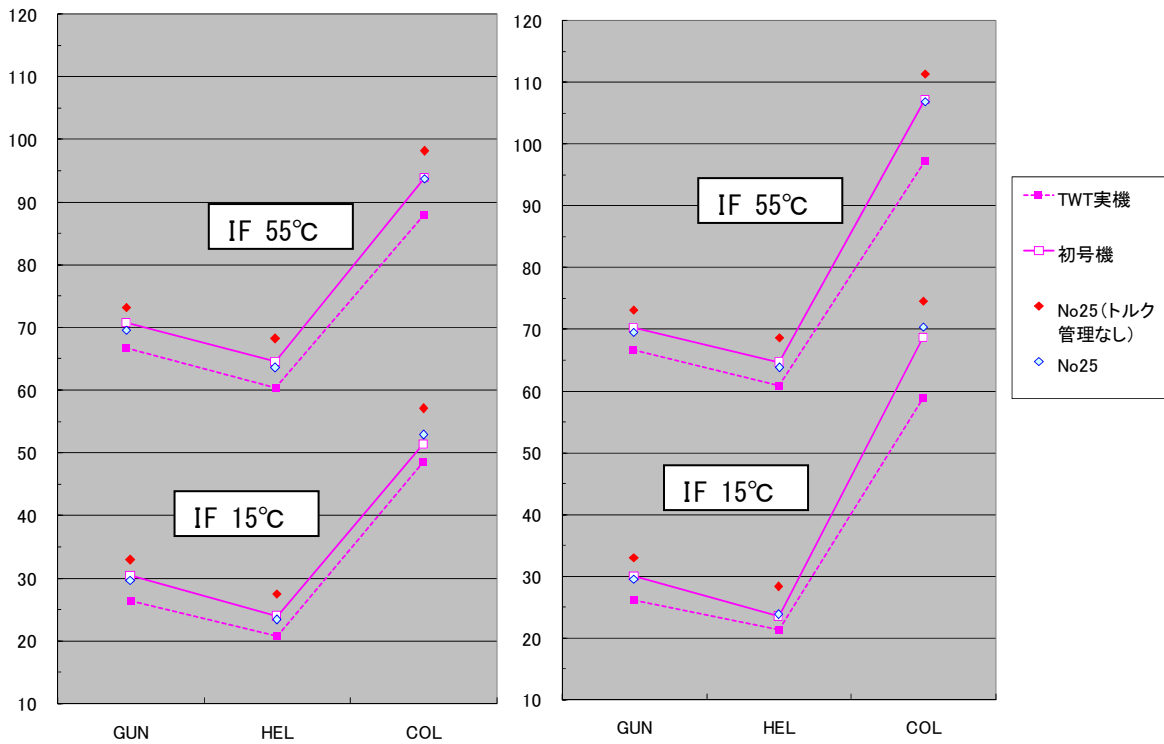


図 3.1-19 トルク管理した場合の再現性  
 低速波回路部 (HE1) 冷却/飽和時(左)、無信号時(右)

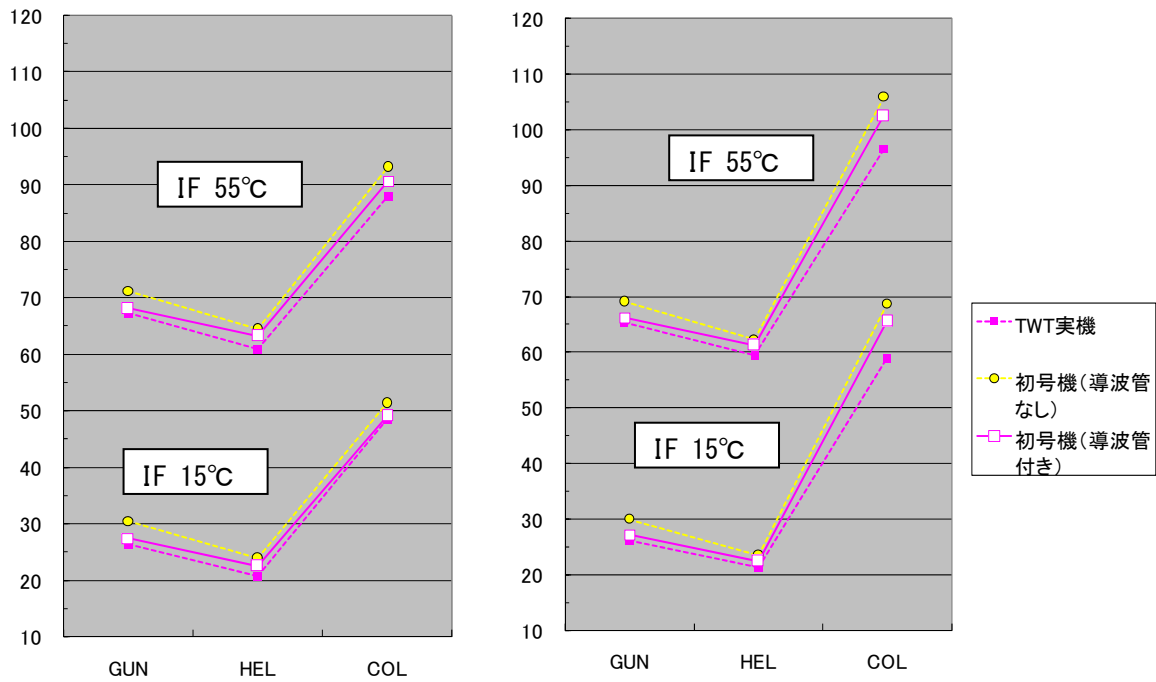


図 3.1-20 導波管とケーブルによる熱リークの影響  
 低速波回路部 (HE1) 冷却/飽和時(左)、無信号時(右)

表 3.1-3 TWT 熱ダミーのヒータ抵抗測定値

平成 21 年 1 月 29 日

TWT#	ヒータ						熱電対					
	コレクタ部ヒータ TWT**C		ヘリックス部ヒータ TWT**H		電子銃部ヒータ TWT**G		コレクタ部 TC**C		ヘリックス部 TC**H		電子銃部 TC**G	
	抵抗値 (55±5.5Ω)	合 否	抵抗値 (182±18Ω)	合 否	抵抗値 (243±24Ω)	合 否	導通	導通	導通	導通	導通	導通
1	53.0	(合) 否	172.1	(合) 否	238.0	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
2	52.0	(合) 否	179.6	(合) 否	245.4	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
3	51.7	(合) 否	183.5	(合) 否	237.9	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
4	55.1	(合) 否	180.7	(合) 否	238.0	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
5	54.4	(合) 否	172.7	(合) 否	240.9	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
6	52.3	(合) 否	174.1	(合) 否	239.1	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
7	55.7	(合) 否	177.9	(合) 否	247.0	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
8	55.3	(合) 否	177.5	(合) 否	239.6	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
9	55.0	(合) 否	181.7	(合) 否	236.9	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
10	55.3	(合) 否	180.7	(合) 否	249.4	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
11	52.9	(合) 否	178.0	(合) 否	245.3	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
12	55.0	(合) 否	176.4	(合) 否	242.7	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
13	52.9	(合) 否	172.0	(合) 否	243.4	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
14	54.7	(合) 否	172.7	(合) 否	231.9	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
15	54.6	(合) 否	176.2	(合) 否	242.3	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
16	52.0	(合) 否	177.1	(合) 否	235.9	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
17	55.1	(合) 否	185.2	(合) 否	240.6	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
18	55.3	(合) 否	173.9	(合) 否	240.2	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
19	53.2	(合) 否	173.4	(合) 否	237.4	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
20	53.8	(合) 否	174.4	(合) 否	248.5	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
21	52.2	(合) 否	175.0	(合) 否	241.9	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
22	55.3	(合) 否	172.9	(合) 否	247.9	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
23	55.6	(合) 否	173.2	(合) 否	236.6	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
24	53.9	(合) 否	184.4	(合) 否	243.3	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
25	53.3	(合) 否	171.8	(合) 否	244.2	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
26	52.9	(合) 否	177.2	(合) 否	240.1	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
27	53.8	(合) 否	175.2	(合) 否	237.4	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
28	52.6	(合) 否	176.9	(合) 否	240.1	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
29	55.2	(合) 否	183.0	(合) 否	243.9	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
30	55.2	(合) 否	173.1	(合) 否	239.1	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
31	55.7	(合) 否	175.0	(合) 否	241.2	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
32	52.9	(合) 否	183.7	(合) 否	242.6	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
33	53.5	(合) 否	183.8	(合) 否	241.8	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
34	52.4	(合) 否	178.1	(合) 否	236.1	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
35	52.1	(合) 否	172.7	(合) 否	231.5	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否

平成 21 年 1 月 29 日

TWT#	ヒータ						熱電対					
	コレクタ部ヒータ TWT**C		ヘリックス部ヒータ TWT**H		電子銃部ヒータ TWT**G		コレクタ部 TC**C		ヘリックス部 TC**H		電子銃部 TC**G	
	抵抗値 (55±5.5Ω)	合 否	抵抗値 (182±18Ω)	合 否	抵抗値 (243±24Ω)	合 否	導通	導通	導通	導通	導通	導通
36	55.3	(合) 否	184.3	(合) 否	240.3	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
37	53.1	(合) 否	174.4	(合) 否	243.0	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
38	55.3	(合) 否	180.2	(合) 否	237.7	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
39	55.1	(合) 否	175.4	(合) 否	239.0	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
40	52.9	(合) 否	174.4	(合) 否	245.0	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
41	55.5	(合) 否	173.1	(合) 否	236.1	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
42	55.3	(合) 否	174.7	(合) 否	234.2	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
43	55.9	(合) 否	180.0	(合) 否	241.1	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
44	55.8	(合) 否	176.7	(合) 否	238.3	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
45	55.5	(合) 否	176.7	(合) 否	239.0	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
46	55.3	(合) 否	175.4	(合) 否	244.4	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
47	54.9	(合) 否	180.3	(合) 否	240.4	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
48	52.0	(合) 否	183.6	(合) 否	238.8	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
49	53.0	(合) 否	176.3	(合) 否	236.2	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
50	55.4	(合) 否	176.8	(合) 否	237.0	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
51	53.7	(合) 否	182.8	(合) 否	238.9	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
52	53.8	(合) 否	172.5	(合) 否	243.2	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
53	58.9	(合) 否	175.0	(合) 否	243.0	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
54	55.6	(合) 否	174.7	(合) 否	238.7	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
55	55.1	(合) 否	179.9	(合) 否	243.1	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
56	53.1	(合) 否	183.5	(合) 否	242.5	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
57	52.7	(合) 否	176.1	(合) 否	237.5	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
58	52.3	(合) 否	176.7	(合) 否	238.1	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
59	55.1	(合) 否	174.3	(合) 否	243.7	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
60	55.2	(合) 否	185.4	(合) 否	247.3	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
61	54.8	(合) 否	176.4	(合) 否	243.4	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
62	54.9	(合) 否	183.7	(合) 否	235.4	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
63	55.2	(合) 否	173.2	(合) 否	248.9	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
64	52.3	(合) 否	184.1	(合) 否	244.7	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
65	54.6	(合) 否	185.8	(合) 否	236.2	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
66	55.4	(合) 否	180.1	(合) 否	241.0	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
67	55.3	(合) 否	176.0	(合) 否	246.1	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
68	54.1	(合) 否	185.1	(合) 否	238.2	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否
69	53.0	(合) 否	182.3	(合) 否	244.2	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否	(合) 否

### 3.1.3.3 評価

熱真空環境下においてアレー給電部に密着配列した TWT による発熱を平板型ヒートパイプにより排熱する実験を行うため、TWT 熱ダミーの設計および試作を実施した。TWT 熱ダミーは TWT 実機の発熱特性を模擬するよう設計し、大気圧断熱環境下において熱ダミーと実機の熱平衡試験を実施した結果、温度分布の傾向は一致しており、全ての測定点において、熱ダミーの温度が実機の温度を少し上回った。従って、試作した熱ダミーを用いて平板型ヒートパイプによる排熱を実証することができれば、TWT 実機における熱的成立性を示すことができる。

また、アレー給電部の一部を模擬した実験を行うため、TWT 熱ダミーは 69 式製造した。7 式をサンプル試験した結果、全ての熱ダミーと実機の温度分布の傾向は一致しており、且つ、熱ダミーの温度が実機の温度を少し上回った。試作した熱ダミーの温度バラつきは概ね $\pm 5^{\circ}\text{C}$ の範囲にあり、トルク管理をきちんと行うことで温度バラつきは、その半分程度になると考えられる。

以上の結果より、試作した TWT 熱ダミーを用いてアレー給電部に密着配列した TWT による発熱分布は実現可能である。また、試作した TWT 熱ダミーと平板型ヒートパイプを組み合わせることで排熱を実証することができれば、TWT 実機によるアレー給電部における熱的成立性を示すことができる。

## 3.2 給電アレー部分検証モデル熱真空試験

188 素子の TWT からなる給電アレー部を部分的に模擬するため、給電アレー部分検証モデルを組み、熱真空試験を行った。試験結果は、熱数学モデルのコリレーションに用いる。

### 3.2.1 供試体

給電アレー部分検証モデルは、前項で示した TWT 熱ダミーの他、FHP の BBM (ダブルタイプ)、熱的な境界条件を作り出す I/F プレート、全体を固定する固定治具などからなる。トレードオフ検討を経て、給電アレー部の中央部 5 段を模擬する形状とした。図 3.2-1 に全体形状を示す。このモデルを構成するためには、TWT 熱ダミーが 69 式、FHP が 8 式必要となる。

上記の予定に対し、FHP BBM の製作上の問題により、用意できた FHP が 2 式のみであったため、予定を変更し、TWT が 1 段 (15 式) と 2 段 (29 式) の場合のみ試験を行うこととした (図 3.2-2)。

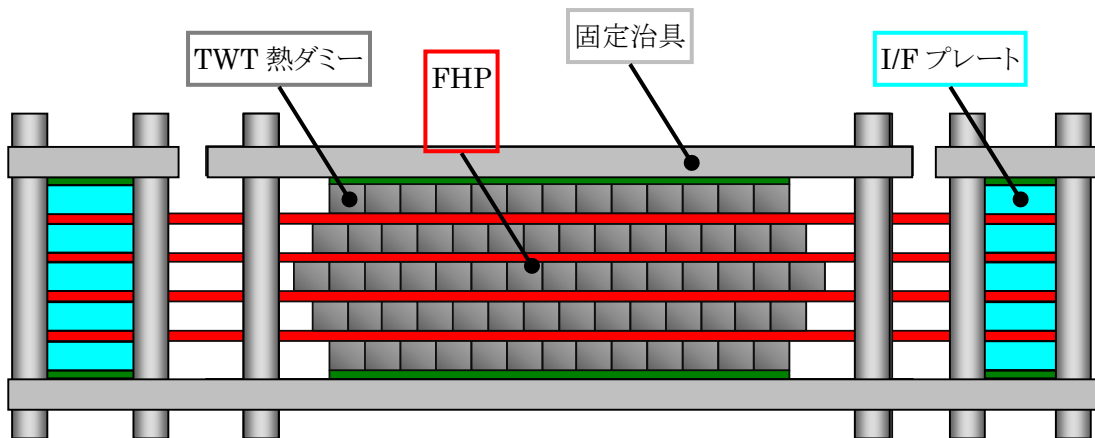


図 3.2-1 給電アレー部分検証モデルの全体形状



a) 試験コンフィギュレーション 01

b) 試験コンフィギュレーション 02

図 3.2-2 実際の試験コンフィギュレーション (固定治具除く)

## TWT熱ダミー

3.1 項で評価を行った TWT 熱ダミーを用いた。表 3.2-1 に TWT 実機の各モードを模擬した発熱量を示す。TWT 熱ダミーには FHP との結合のためのネジ穴が設けられている。

表 3.2-1 TWT 熱ダミーの発熱量

飽和動作モード時 発熱量	W	合計: 17.2	
		Gun 部 :	2.4
		Hel 部 :	5.3
無信号動作モード時 発熱量	W	合計: 18.9	
		Gun 部 :	2.3
		Hel 部 :	2.7
		Col 部 :	13.9

## FHP

JAXA 研究開発本部熱グループで開発しているダブルタイプの平板型ヒートパイプ (FHP) の BBM を用いる。この FHP は、中央部 (全長: 600mm) で受けた熱を両端に輸送するタイプであり、給電アレー部内の温度のばらつきを抑えつつ排熱できる点で有効であると考え、本システムの排熱デバイスとして検討している。

図 3.2-3 に概要を、図 3.2-4 にその性能の一部を示す。平成 19 年度の検討において用いた FHP 基本モデルの性能と比較すると実効熱伝導率が低下しているが、アルミニウム合金の 15-20 倍の熱伝導率を持ち、問題なく給電アレー部分検証モデルに用いることができる。



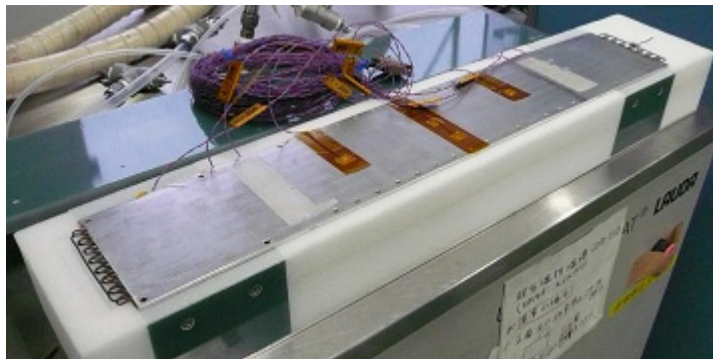
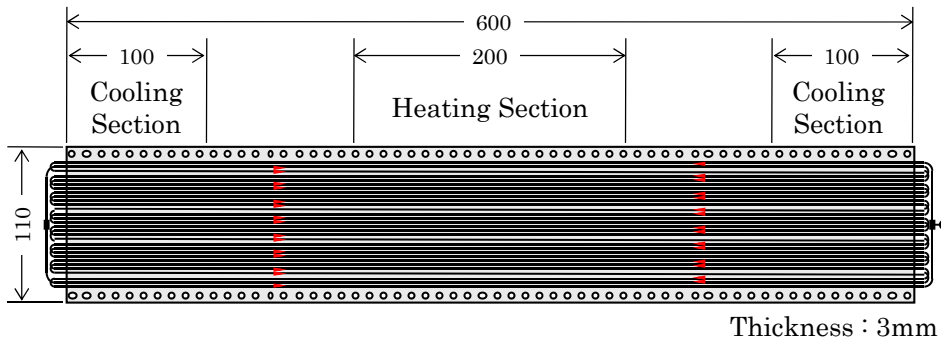


図 3.2-3 FHP 概要

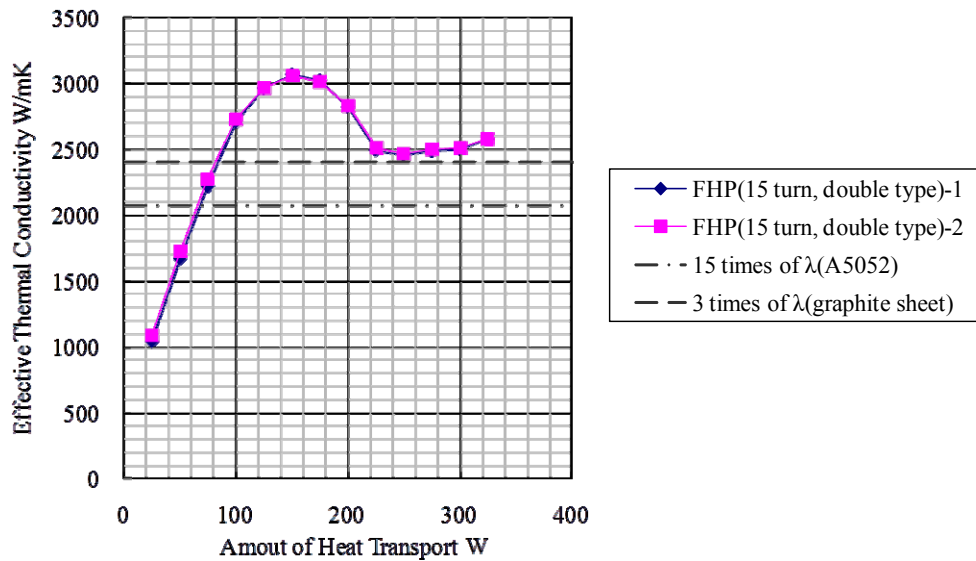


図 3.2-4 FHP 性能

### I/Fプレート及び固定治具

I/F プレートは、内部を恒温水循環装置で制御された冷媒が流れる銅ブロックであり、固定治具は、FHP とはネジで固定できない段の TWT を固定するため、上下から供試体を押さえる構造である。固定治具はボルトの締め付け方で TWT 熱ダミーと FHP 間の取り付け圧を調整することができる。

### 3.2.2 試験コンフィギュレーション

試験系の構成を図 3.2-5 に示す。試験系は、チャンバ、給電アレー部分検証モデル（測定系）、冷却治具に接続される冷却配管とチラー（冷却系）、熱ダミーのヒータ印加用電源ラインと電源（電源系）、温度センサラインとデータロガー（センサ系）からなる。冷却配管、電源ライン、温度センサラインは全てフランジを介しチャンバ内に引き込まれている。

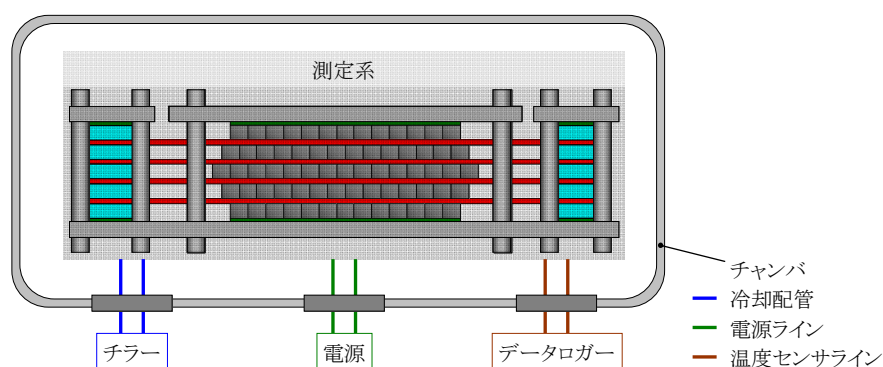


図 3.2-5 試験系概要

また、測定系は、以下に示す 2 つ形態とした。

- ① TWT 熱ダミー 1 列 (15 式) に対し、その上部 2 式の FHP がネジ止めしており、周りを固定治具の一部である断熱スペーサと MLI で断熱した形状。FHP の冷却部には冷却治具がネジ止めしている。(図 3.2-6 参照)
- ② ① の上部に熱ダミー 1 列 (14 式) を乗せ、上下から挟みこむことで固定した形状。熱リーク防止のために試験部と固定治具間には断熱スペーサを挟み込んでいる。FHP の冷却部も同様に①の冷却部に冷却治具を乗せ、上下から挟みこむことで固定している。(図 3.2-7 参照)

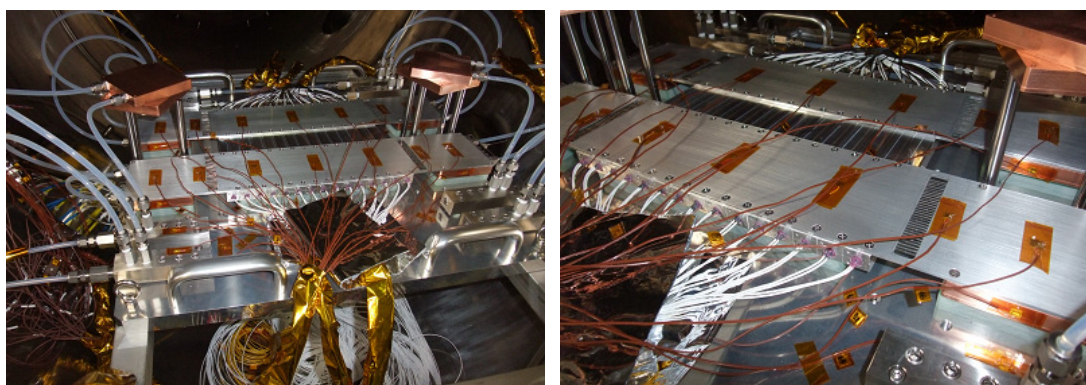


図 3.2-6 試験形態①

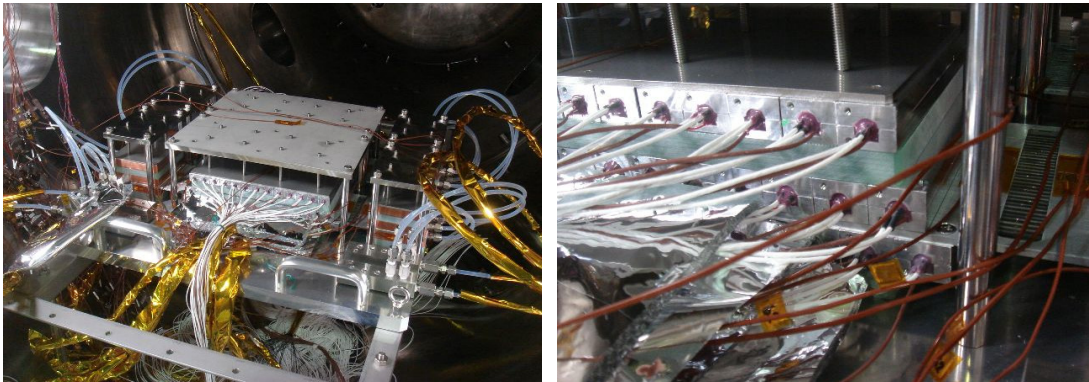


図 3.2-7 試験形態②

熱電対の配置を図 3.2-8 と表 3.2-2 に示す。TWT 熱ダミーは前述の通りそれぞれの Gun 部, Hel 部, Col 部に熱電対を持つが、チャンバインタフェースの制約から一部を選択して使用した。表の TWT の番号は、Gun 部から見て左から通し番号を付けており、15 本の段を TWTa、14 本の段を TWTb としている。

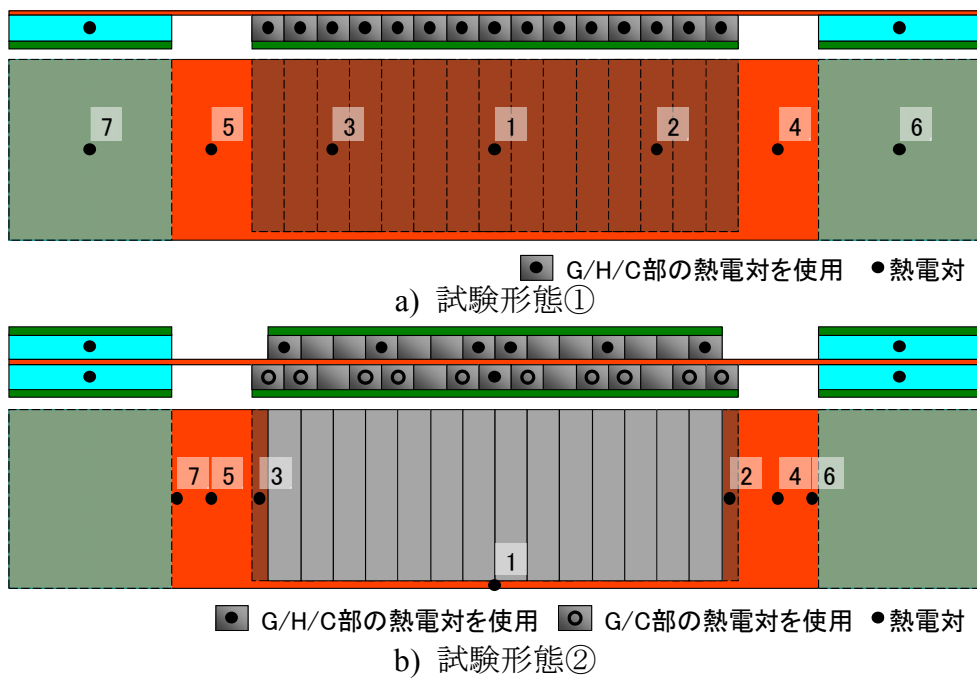


図 3.2-8 熱電対配置図

表 3.2-2  
熱電対位置（試験形態①）

フランジコネクタ	TC番号	名称	備考	フランジコネクタ	TC番号	名称	備考	フランジコネクタ	TC番号	名称	備考
01	01	TWTa01G	a:15列の段	03	25	TWTa09G	a:15列の段	05	49	冷却治具11	G部左
	02	TWTa01H	a:15列の段		26	TWTa09H	a:15列の段		50	冷却治具21	G部右
	03	TWTa01C	a:15列の段		27	TWTa09C	a:15列の段		51	冷却治具31	C部左
	04	TWTa02G	a:15列の段		28	TWTa10G	a:15列の段		52	冷却治具41	C部右
	05	TWTa02H	a:15列の段		29	TWTa10H	a:15列の段		53	FHPG1	中央
	06	TWTa02C	a:15列の段		30	TWTa10C	a:15列の段		54	FHPG2	加熱部左
	07	TWTa03G	a:15列の段		31	TWTa11G	a:15列の段		55	FHPG3	加熱部右
	08	TWTa03H	a:15列の段		32	TWTa11H	a:15列の段		56	FHPG4	左断熱部
	09	TWTa03C	a:15列の段		33	TWTa11C	a:15列の段		57	FHPG5	右断熱部
	10	TWTa04G	a:15列の段		34	TWTa12G	a:15列の段		58	FHPG6	左冷却部右
	11	TWTa04H	a:15列の段		35	TWTa12H	a:15列の段		59	FHPG7	右冷却部左
	12	TWTa04C	a:15列の段		36	TWTa12C	a:15列の段		60	FHPC1	中央
02	13	TWTa05G	a:15列の段	37	TWTa13G	a:15列の段	61	FHPC2	加熱部左		
	14	TWTa05H	a:15列の段	38	TWTa13H	a:15列の段	62	FHPC3	加熱部右		
	15	TWTa05C	a:15列の段	39	TWTa13C	a:15列の段	63	FHPC4	左断熱部		
	16	TWTa06G	a:15列の段	40	TWTa14G	a:15列の段	64	FHPC5	右断熱部		
	17	TWTa06H	a:15列の段	41	TWTa14H	a:15列の段	65	FHPC6	左冷却部右		
	18	TWTa06C	a:15列の段	42	TWTa14C	a:15列の段	66	FHPC7	右冷却部左		
	19	TWTa07G	a:15列の段	43	TWTa15G	a:15列の段	67	治具1	固定台中央右		
	20	TWTa07H	a:15列の段	44	TWTa15H	a:15列の段	68	治具2	固定台左		
	21	TWTa07C	a:15列の段	45	TWTa15C	a:15列の段	69	治具3	固定台右		
	22	TWTa08G	a:15列の段	46	治具4	TBD	70	チャンバ壁			
	23	TWTa08H	a:15列の段	47	治具5	TBD	71				
	24	TWTa08C	a:15列の段	48	治具6	TBD	72				

熱電対位置（試験形態②）

フランジコネクタ	TC番号	名称	備考	フランジコネクタ	TC番号	名称	備考	フランジコネクタ	TC番号	名称	備考
01	01	TWTa01G	a:15列の段	03	25	TWTb01H	b:14列の段	05	49	冷却治具11	G部左
	02	TWTa01C	a:15列の段		26	TWTb01C	b:14列の段		50	冷却治具21	G部右
	03	TWTa02G	a:15列の段		27	TWTb04G	b:15列の段		51	冷却治具31	C部左
	04	TWTa02C	a:15列の段		28	TWTb04H	b:15列の段		52	冷却治具41	C部右
	05	TWTa04G	a:15列の段		29	TWTb04C	b:15列の段		53	冷却治具12	G部左
	06	TWTa04C	a:15列の段		30	TWTb07G	b:15列の段		54	冷却治具22	G部右
	07	TWTa05G	a:15列の段		31	TWTb07H	b:15列の段		55	冷却治具32	C部左
	08	TWTa05C	a:15列の段		32	TWTb07C	b:15列の段		56	冷却治具42	C部右
	09	TWTa07G	a:15列の段		33	TWTb08G	b:15列の段		57	FHPG1	中央
	10	TWTa07C	a:15列の段		34	TWTb08H	b:15列の段		58	FHPG2	加熱部左
	11	TWTa08G	a:15列の段		35	TWTb08C	b:15列の段		59	FHPG3	加熱部右
	12	TWTa08H	a:15列の段		36	TWTb11G	b:15列の段		60	FHPG4	左断熱部
02	13	TWTa08C	a:15列の段	37	TWTb11H	b:15列の段	61	FHPG5	右断熱部		
	14	TWTa09G	a:15列の段	38	TWTb11C	b:15列の段	62	FHPG6	左冷却部右		
	15	TWTa09C	a:15列の段	39	TWTb14G	b:15列の段	63	FHPG7	右冷却部左		
	16	TWTa11G	a:15列の段	40	TWTb14H	b:15列の段	64	FHPC1	中央		
	17	TWTa11C	a:15列の段	41	TWTb14C	b:15列の段	65	FHPC2	加熱部左		
	18	TWTa12G	a:15列の段	42	治具1	固定台中央右	66	FHPC3	加熱部右		
	19	TWTa12C	a:15列の段	43	治具2	固定台左	67	FHPC4	左断熱部		
	20	TWTa14G	a:15列の段	44	治具3	固定台右	68	FHPC5	右断熱部		
	21	TWTa14C	a:15列の段	45	治具4	TWT用固定版	69	FHPC6	左冷却部右		
	22	TWTa15G	a:15列の段	46	治具5	左冷却治具固定版	70	FHPC7	右冷却部左		
	23	TWTa15C	a:15列の段	47	治具6	右冷却治具固定版	71				
	24	TWTb01G	b:14列の段	48	チャンバ壁		72				

### 3.2.3 試験条件

以下を試験パラメータとした。

#### (1) 熱ダミー発熱量

熱ダミーの発熱量は、飽和動作モード、無信号動作モード模擬では表 3.2-1 に示す値に設定するが、この値よりも低い熱負荷、高い熱負荷においても試験を行った。表に示す動作モード以外の熱負荷では、各部の発熱量が飽和動作モード時の発熱量の比になるように設定することとした。

$$(\text{Gun 部発熱量}):(\text{Hel 部発熱量}):(\text{Col 部発熱量})=2.4:5.3:9.5$$

## (2) 冷却治具温度

冷却治具温度はチラー設定温度で調整し、5度を基本として試験を行った。

## (3) 熱ダミーと FHP 間の面圧

試験コンフィギュレーション①では、熱ダミーと FHP を止めるネジにより面圧を変え、②では固定治具により面圧を変えた。加えた面圧は、それぞれのネジに加えたトルクで管理し、適正トルクとそのネジの状態から 1/4 回転各ネジを回した 2 つの条件において試験を行った。

また、真空チャンバ内の試験環境条件を表 3.2-3 に示す。試験設備の影響により、当初の予定の  $1.3 \times 10^{-3} \text{Pa}$  以下を達成できなかったが、特に問題なく試験を実施することができた。

表 3.2-3 試験環境条件

項目	条件
真空度	$5 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 程度
チャンバ壁温度	常温

上記試験条件を整理した試験プロファイル及びスケジュール（実績）を表 3.2-4、3.2-5 に示す。

表 3.2-4 試験プロファイル

試験 No.	面圧 (トルク)	試験形態	試験プロファイル
1-1	適正	①	I/F 温度：20 度 50W→100W→150W →100W→ (I/F 温度：10 度に変更) →100W
1-2	大		チラー温度：5 度 50W→100W→150W →100W→ (I/F 温度：20 度に変更) →100W
2-1	適正	②	チラー温度：5 度 50W→100W→150W →200W→飽和 (約 250W) →無信号 (約 280W) →300W→400W →100W→ (I/F 温度：20 度に変更) →100W
2-2	大		チラー温度：5 度 100W→200W→飽和 (約 250W) →無信号 (約 280W) →300W→400W→100W → (I/F 温度：20 度に変更) →100W



### 3.2.4 試験結果

全ての条件において熱数学モデルのコリレーションのためのデータが取得できた。

試験形態①では、熱電対の接触不良などによりデータが欠損している箇所があるが、熱ダミー内部の熱電対ほぼ全てでデータ取得ができた。しかし、FHP 上の温度が 80 度（FHP の動作許容温度）を迎えてしまうことから飽和/無信号動作模擬を含め、150W 以上の熱輸送は不可能であった。また、面圧を変えても熱の伝わり方はほぼ変わらないことがわかった。

試験形態②では、熱ダミー内部の熱電対から選択した熱電対でのみデータを取得したが、データの欠損等はなかった。さらに、試験形態①に比べ FHP の平均温度が下がったため、当初予定していた飽和/無信号動作モード以上の熱負荷でもデータ取得できることが分かった。また、面圧を大きくするとネジで直接止めていない部分での温度差が小さくなり、接触熱コンダクタンスが想定通り大きくなることが確認できた。

### 3.2.5 試験評価

まず、試験形態①で FHP の温度が高くなってしまい、試験ができなかったことについては、冷却部での接触熱コンダクタンスが低かったため、冷却部での温度差が大きくなってしまい、その分、FHP 全体の温度が高温側にオフセットしてしまったことが原因と考えられる。さらに、TWT 熱ダミー自体の温度はそれ以上に高くなってしまったが、それについては、TWT 熱ダミーと FHP 間の接触面積が関係すると考える。実機では TWT の上下に FHP が位置取るが、この試験形態では片面だけであったため接触面積に対して通過熱量が倍になってしまい、温度差が大きくなってしまう。また、面圧の変化が結果に影響を与えなかった点については、TWT 熱ダミー単体の接合面からはみ出た接着剤が TWT 熱ダミー同士で干渉し、FHP との接触熱コンダクタンス向上の妨げとなったことが原因であると考えられる。次に、試験形態②では①と違い熱負荷を高く設定することができた。これは、FHP の冷却部 1 か所につき 2 式の冷却治具で挟み込み、接触面積が 2 倍になったことによる。また、面圧の影響が想定通り試験に影響を与えたことに関しては、2 段目の TWT 熱ダミー（TWTb）が治具による挟み込みのみで固定されており、上記したはみ出た接着剤の干渉を最小限に抑えたためと考える。

## 第4章 給電アレー部熱解析

給電アレー部熱数学モデルを用いた熱解析結果について述べる。解析に用いた熱数学モデルは、開発を進めてきている TWT や FHP の最新の情報が組み込まれるほか、第3章で示されている給電アレー部分検証モデルの評価結果についても反映している。

### 4.1 解析モデル

#### 4.1.1 単体モデル構成

給電アレー部熱解析モデルは、TWT、FHP、I/F プレートからなり、それぞれ以下に示す構成になっている。

#### TWT

TWT の熱数学モデルは、3 項に示す TWT 熱ダミーを基に作成した (図 4.1-1)。モデルは、TWT を軸方向に 5 等分したモデルであり、各ノードの熱容量とノード間の熱コンダクタンスは、TWT 熱ダミーの材料 (アルミニウム合金 A7075-T651) の物性やその形状に基づき設定した。また、TWT の発熱については、電子銃部、低速波回路部、コレクタ部に当たるノードに TWT の発熱量を与えた。

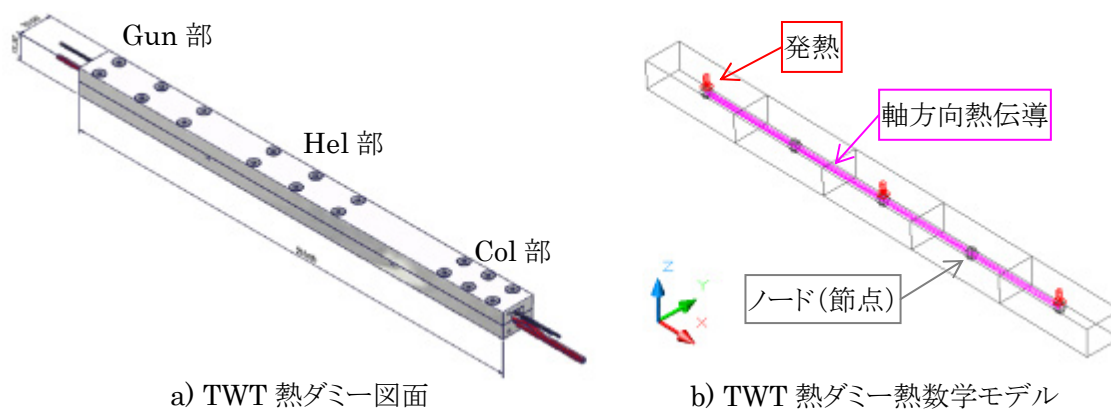


図 4.1-1 TWT 熱数学モデル

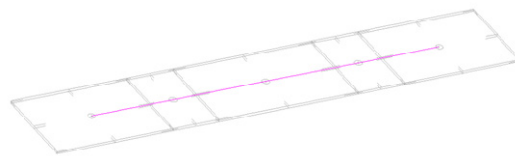


## FHP

FHP の熱数学モデルは、FHP BBM 試験の結果に基づき、作成した (図 4.1-2)。モデルは、FHP を軸方向に 5 分割したモデル (両端の冷却部を 1 ノード、それ以外を 3 等分) であり、各ノードは構成要素を考慮して熱容量を与え、ノード間の熱コンダクタンスは IF 温度 : 15°C の試験結果と合うように温度差の関数として設定した。また、FHP は最大熱輸送量を上回る熱負荷がかかるとドライアウトしてしまうが、このモデルにおいてもドライアウトが再現できるようになっている。



a) FHP 写真



b) FHP 熱数学モデル

図 4.1-2 FHP 熱数学モデル

## I/Fプレート

I/F プレートは給電アレー部の熱解析においてヒートシンクの役割を持つ。現状、具体的なシステム構成が決定していないため、ここでは温度として境界条件を与える単純なモデルとした。

## 4.1.2 単体モデル評価

### TWT

TWT 熱数学モデルの妥当性を確認するために、FY19 に実施した熱真空試験の結果との比較を行った。図 4.1-3 は、I/F 温度 15°C と 55°C において TWT の飽和動作と無信号動作について、熱数学モデルの比較結果を表している。結果から、実際の TWT の温度と熱数学モデルの解析結果との誤差は 5°C 程度と小さく、モデルが十分に妥当であることがわかる。

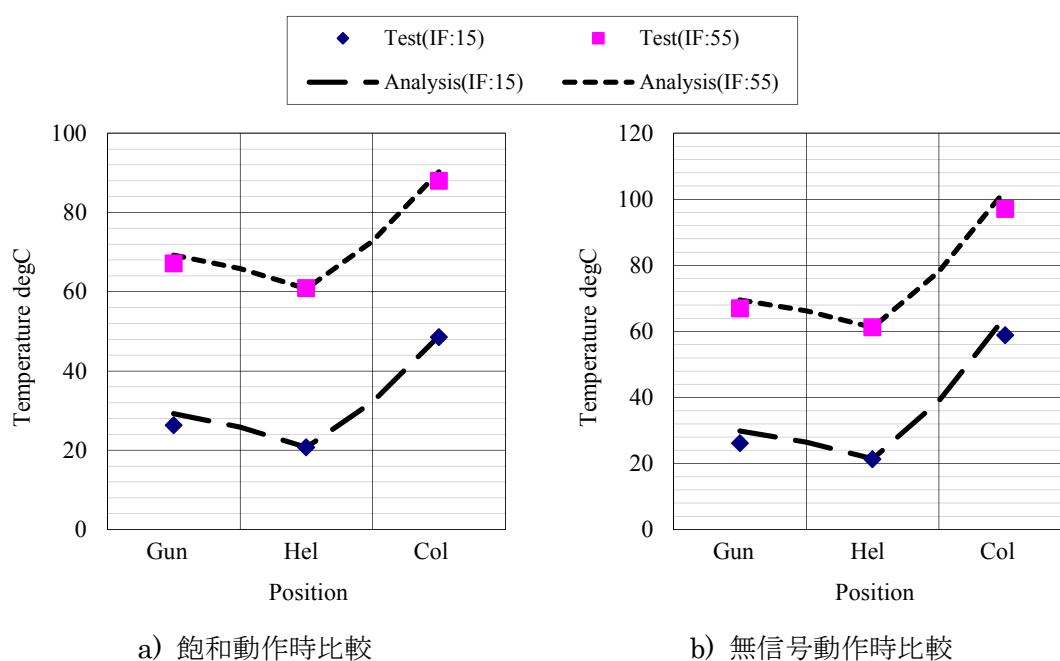


図 4.1-3 TWT 熱数学モデル妥当性確認

## FHP

FHP 熱数学モデルの妥当性を確認するために、FHP BBM 試験の結果と試験と同条件で解析を行った結果を比較した。図 4.1-4 は、I/F 温度が 5°C、15°C、25°C の時の比較結果である。FHP は性能が I/F 温度により変化するが、5°C、25°C とともに誤差は 5°C 程度と小さく、モデルとして妥当であることがわかる。

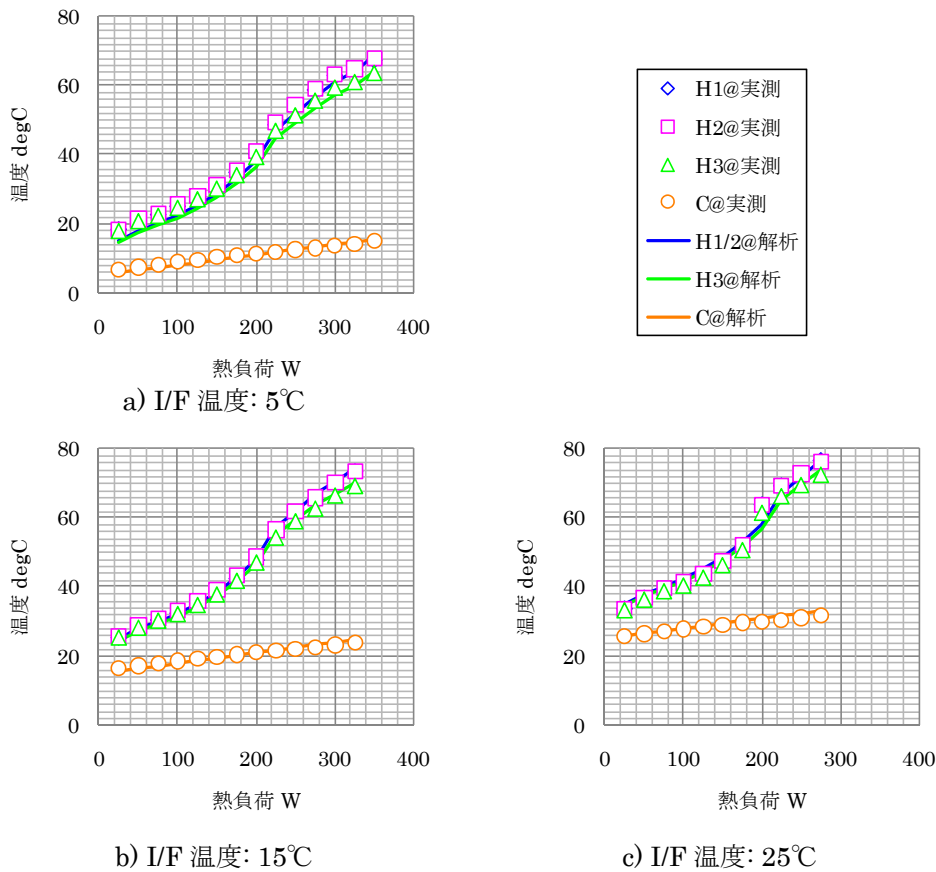


図 4.1-4 FHP 熱数学モデル妥当性確認

## 4.2 熱真空試験結果を用いたコリレーション

### 4.2.1 モデル構成

3 項にて記述した給電アレー部分検証モデル熱真空試験について、4.1 項で示した TWT 熱ダミーと FHP の熱数学モデル、I/F プレートを加え組み合わせることで熱数学モデルを作成した (図 4.2-1)。コリレーション前の各部の接触熱コンダクタンス (CC) は、フィラー材を用いた際の目安となる値 ( $500\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ) とした。

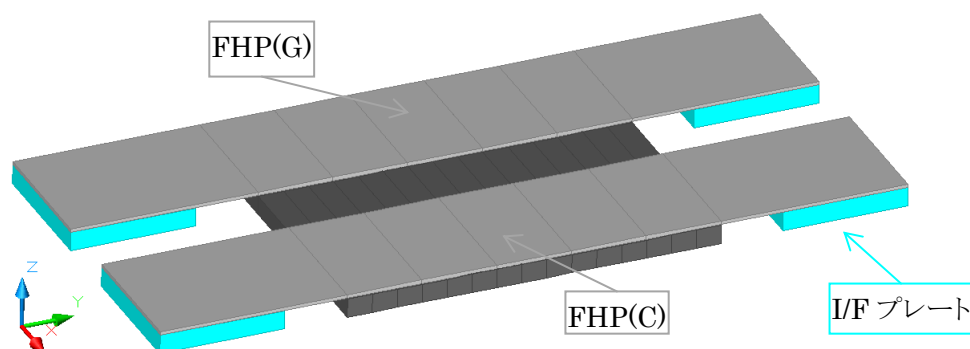


図 4.2-1 給電アレー部分検証モデルの熱数学モデル

### 4.2.2 評価

I/F 温度 :  $5^{\circ}\text{C}$ 、TWT 熱負荷量 : 50W、100W でのコリレーション結果を表 4.2-1 に示す。

解析値 1 は、FHP(C)、FHP(G)とも熱数学モデルの軸方向熱コンダクタンスを 4.1 項のまま用いた結果である。50W においては比較的よく一致しているが、100W においては TWT の Gun 部付近を中心に大きくずれていることがわかる。3 項で述べた通り、何らかの原因により FHP(G)が本来の性能を出せていないため、このような結果になったと推測される。

解析値 1 の結果を受け、FHP(G)の軸方向熱コンダクタンスを修正した結果が、解析値 2 である。全体的に解析値の方が高い温度を示しているものの、比較的よく一致していることがわかる。また、この結果の接触熱コンダクタンスに注目すると、フィラー材を用いていない TWT-TWT 間を除いても、あまり良い値が出ていないことがわかる。

上記通りコリレーションを行ったが、FHP の性能不全や低い接触熱コンダクタンスなど、設計等が決定していないことによる部分が多い。そのため、このコリレーション結果を以降の熱解析において用いることは、必ずしも実際のハードウェアを想定した熱解析にはならない。よって、以降の熱解析では、FHP の軸方向熱コンダクタンスは FHP 性能試験結果から作成したものを使用し、各部の接触熱コンダクタンスは想定できる範囲でパラメトリックに用いることにした。

表 4.2-1 給電アレー部分検証モデル熱数学モデルのコリレーション結果

試験条件	比較箇所	実測値	解析値 1		解析値 2	
			温度	誤差	温度	誤差
I/F:5°C Q:50W	Gun 部	29.2	28.0	1.2	33.4	-4.2
	Hel 部	32.0	30.6	1.4	34.3	-2.3
	Col 部	31.9	31.8	0.1	34.3	-2.4
	FHP(G)加熱部	27.0	25.3	1.7	32.5	-5.5
	FHP(G)冷却部	22.6	16.6	6.0	17.9	4.7
	FHP(C)加熱部	27.8	27.6	0.2	31.6	-3.8
	FHP(C)冷却部	19.8	18.2	1.6	21.3	-1.5
I/F:5°C Q:100W	Gun 部	51.4	42.1	9.3	53.7	-2.3
	Hel 部	56.2	47.0	9.2	55.1	1.1
	Col 部	55.3	49.4	5.9	54.8	0.5
	FHP(G)加熱部	48.1	37.0	11.1	52.1	-4.0
	FHP(G)冷却部	22.6	26.3	-3.7	27.0	-4.4
	FHP(C)加熱部	47.4	41.3	6.1	49.5	-2.1
	FHP(C)冷却部	33.1	29.9	3.2	36.7	-3.6
解析条件	I/F PLT-FHP(G)間 CC		113		60	
	I/F PLT-FHP(C)間 CC		113		120	
	FHP-TWT 間 CC		250		500	
	TWT-TWT 間 CC		50		50	
	FHP(G)内コンダクタンス		FHP(C)と同じ		FHP(C)の 1/8 倍	

## 4.3 給電アレー部熱解析

### 4.3.1 解析条件

表 4.3-1 に解析条件、表 4.3-2 に解析番号を示す。各部の接触熱コンダクタンスに関しては、以下に示す根拠から設定している。

- ・ FHP-I/F プレート間接触熱コンダクタンス：  
サーマルフィラーを用いた一般的な値に加え、FHP 性能試験での実績値を用いた。
- ・ FHP-TWT 間接触熱コンダクタンス：  
複数の TWT により平面度が悪くなる可能性を考慮し、サーマルフィラーを用いた一般的な値の半分の値から 2 倍の値を用いた。
- ・ TWT-TWT 間接触熱コンダクタンス：  
TWT 同士は構造的に積極的な結合が難しい可能性が高いため、フィラーを用いない場合の代表値 ( $100\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ) を基本の値とした。

また、許容温度については、TWT の許容温度上限である  $80^\circ\text{C}$  としたが、熱解析での合否判定には、JAXA の熱制御系設計標準の温度マージンの考え方を採用し、 $15^\circ\text{C}$  低い値で判定を行った。

表 4.3-1 給電アレー部熱解析条件

I/F プレート温度 $T_{I/F}$	degC	15, 25	
TWT 許容温度上限	degC	80	
TWT 発熱量 Gun - Hel - Col	W	飽和動作モード,	2.4 - 5.3 - 9.5
		無信号動作モード	2.3 - 2.7 - 13.9
接触熱コンダクタン ス	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	FHP-I/F プレート ( $C_{FH}$ )	500, 1500
		FHP-TWT ( $C_{FT}$ )	250, 500, 1000
		TWT-TWT ( $C_{TT}$ )	100, 500

\* 一般的なサーマルフィラー使用の場合： $500\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ～

表 4.3-2 解析番号

No.	Mode	T <sub>VF</sub>	C <sub>FH</sub>	C <sub>FT</sub>	C <sub>TT</sub>
01	飽和	15	1500	1000	500
02	飽和	15	1500	500	500
03	飽和	15	1500	250	500
04	飽和	15	1500	1000	100
05	飽和	15	1500	500	100
06	飽和	15	1500	250	100
07	飽和	15	500	1000	100
08	飽和	15	500	500	100
09	飽和	15	500	250	100
10	飽和	25	1500	1000	500
11	飽和	25	1500	500	500
12	飽和	25	1500	250	500
13	飽和	25	1500	1000	100
14	飽和	25	1500	500	100
15	飽和	25	1500	250	100
16	飽和	25	500	1000	100
17	飽和	25	500	500	100
18	飽和	25	500	250	100
No.	Mode	T <sub>VF</sub>	C <sub>FH</sub>	C <sub>FT</sub>	C <sub>TT</sub>
19	無信号	15	1500	1000	500
20	無信号	15	1500	500	500
21	無信号	15	1500	250	500
22	無信号	15	1500	1000	100
23	無信号	15	1500	500	100
24	無信号	15	1500	250	100
25	無信号	15	500	1000	100
26	無信号	15	500	500	100
27	無信号	15	500	250	100
28	無信号	25	1500	1000	500
29	無信号	25	1500	500	500
30	無信号	25	1500	250	500
31	無信号	25	1500	1000	100
32	無信号	25	1500	500	100
33	無信号	25	1500	250	100
34	無信号	25	500	1000	100
35	無信号	25	500	500	100
36	無信号	25	500	250	100

## 4.3.2 解析結果

### 給電アレー部最大温度

解析の結果、動作モードに関わらずコレクタ部が最も温度が高くなり、FHP-TWT 間接触熱コンダクタンスが小さい場合を除き、中央の素子（素子番号：1）が最大になることがわかった。FHP-TWT 間接触熱コンダクタンスが小さい場合は、中央の素子よりもコレクタ部最上段と最下段の6素子（素子番号：173～175, 182～184）の方が高温になる傾向であることがわかった。

給電アレー部の最大温度比較結果を図 4.3-1 に示す。TWT-TWT 間接触熱コンダクタンスに関しては、値を変えても結果に有意な差が生じなかったため、図 4.3-1 ではその値を  $100 \text{ W/m}^2\text{K}$  に固定している。結果から、FHP-I/F プレート間接触熱コンダクタンス ( $C_{FH}$ ) よりも FHP-TWT 間接触熱コンダクタンス ( $C_{FT}$ ) の方が給電アレー部最大温度に与える影響が大きく、 $C_{FH}$  が  $500 \text{ W/m}^2\text{K}$  でも  $C_{FT}$  が  $500 \text{ W/m}^2\text{K}$  以上で熱的に成立することがわかった。

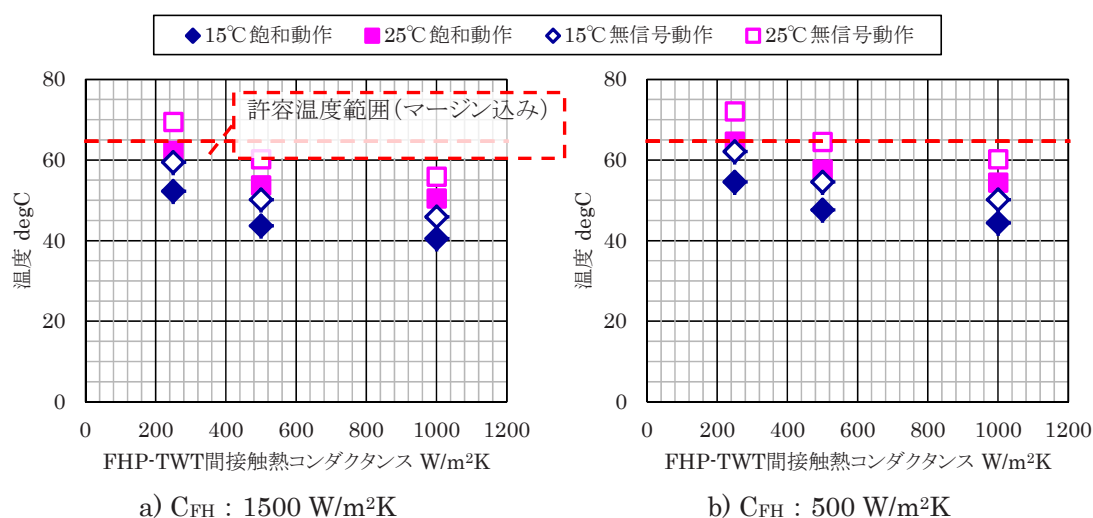


図 4.3-1 給電アレー部最大温度比較

### 面内温度差比較

給電アレー部はアレー内に温度分布が生じない方が良いことから、各箇所において面内温度分布を最高温度と最低温度の温度差で整理した。面内温度差比較結果を図 4.3-2 に示す。図は、 $C_{FH}$  を  $1500 \text{ W/m}^2\text{K}$ 、 $T_{IF}$  を  $15^\circ\text{C}$  とした際の比較結果である。解析の結果、面内の温度差は Col 部、Hel 部、Gun 部の順に大きく、 $C_{FT}$  が小さい時は  $C_{TT}$  の影響が出るが、 $500 \text{ W/m}^2\text{K}$  ではそれ程影響しないことがわかった。



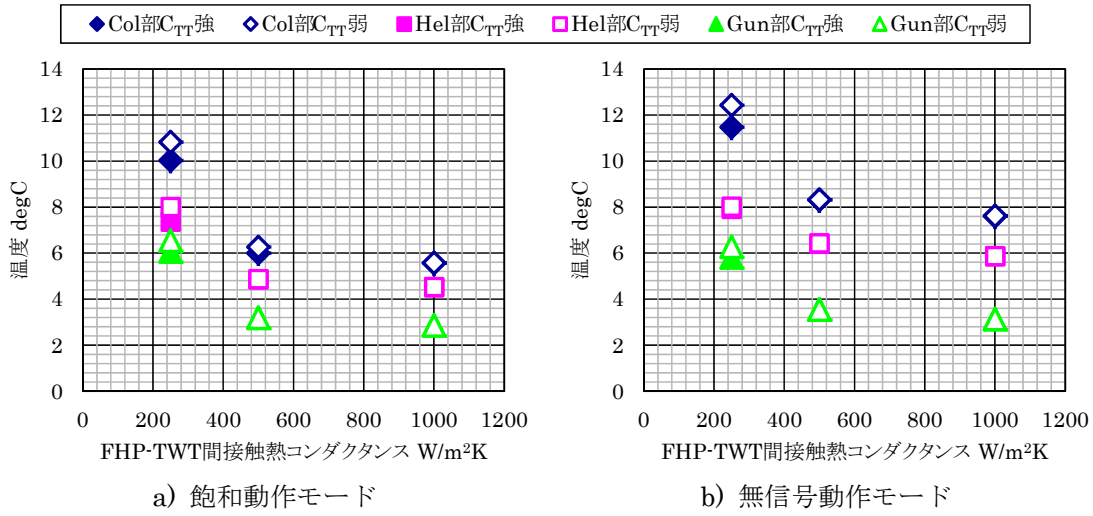


図 4.3-2 給電アレー部面内温度差比較

**TWT内温度差比較**

各 TWT 内の温度分布も TWT の電気性能に影響を与えるため、TWT 内温度分布を TWT 内の最高温度と最低温度の温度差で整理した。TWT 内温度差比較結果を図 4.3-3 に示す。図は、 $C_{FH}$  を  $1500\text{W/m}^2\text{K}$ 、 $T_{VF}$  を  $15^\circ\text{C}$  とした際の比較結果である。解析の結果、温度差は無信号動作モードの方が大きく、 $C_{FT}$  が  $1000\text{W/m}^2\text{K}$  の飽和動作モードにおいても  $10^\circ\text{C}$  程度温度差がつくことがわかった。

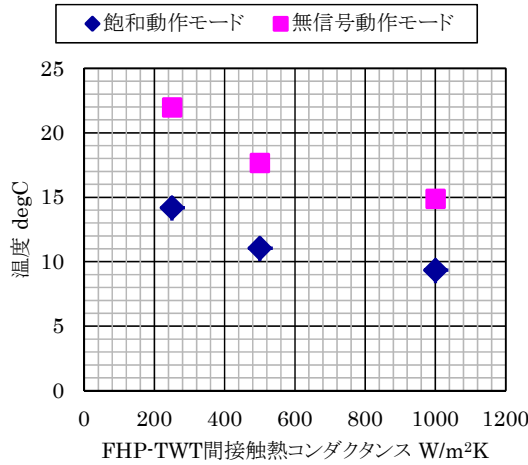


図 4.3-3 給電アレー部 TWT 内温度差比較

### 4.3.3 評価

各結果から、熱的に成立し、さらに面内や各 TWT 内の温度のばらつきを抑えるためには、FHP と TWT 間の接触熱コンダクタンスを高める必要があることがわかった。しかしながら、現在の設計においては、TWT 同士を機械的に締結していないことから、FHP とのインタフェースである複数の TWT からなる面が平らではなく、上記接触熱コンダクタンスを高めることは簡単ではない。よって今後の検討においては、この内容を踏まえ、上記接触熱コンダクタンスを高めるための機械的な設計を詳細化していく必要がある。

また、TWT 内の温度のばらつきに関しては、積極的に抑えるような熱設計としていない。本解析結果を基にした放射パターン等の解析結果によっては、この温度のばらつきを抑えるための方策についても考える必要が出てくる可能性がある。

## 第5章 給電アレー部温度分布の放射パターンへの影響

### 5.1 給電アレー部の温度特性による振幅・位相遷移

TWTの温度変化が給電アレーの位相分布に与える影響を調査した。TWT#10の位相遷移量の実測値を用い、25℃を基準（温度変化0、位相遷移0）としてグラフ化したものが図5.1-1である。図5.1-1の近似曲線を用い、給電アレーの熱解析結果を位相遷移分布に変換した。このとき用いた熱解析の条件を表5.1-1に示す。位相遷移量はコレクタ部の温度から評価した。各熱解析条件について、給電アレー全体の温度分布および位相分布の関係を図5.1-2～5.1-5に示す。温度分布と位相遷移量の最大値・最小値をまとめたものが表5.1-2であり、NO.11の条件が最も位相遷移量が大きく、その遷移量は給電アレーの周辺部で+0.7°、中心部で+2.0°であった。

表 5.1-1 熱解析条件

	No.01	No.02	No.10	No.11
Mode	飽和	飽和	飽和	飽和
T_I/F	15℃	15℃	25℃	25℃
C_FH	1500W/m <sup>2</sup> k	1500W/m <sup>2</sup> k	1500W/m <sup>2</sup> k	1500W/m <sup>2</sup> k
C_TF	1000W/m <sup>2</sup> k	500W/m <sup>2</sup> k	1000W/m <sup>2</sup> k	500W/m <sup>2</sup> k
C_TT	500W/m <sup>2</sup> k	500W/m <sup>2</sup> k	500W/m <sup>2</sup> k	500W/m <sup>2</sup> k

表 5.1-2 給電アレーの温度分布と位相遷移量

	No.01	No.02	No.10	No.11
最低温度	20.5℃	19.9℃	30.5℃	29.8℃
位相遷移量	-0.8°	-1.0°	+0.8°	+0.7°
最高温度	32.5℃	36.0℃	42.5℃	46.0℃
位相遷移量	+1.1°	+1.4°	+1.9°	+2.0°

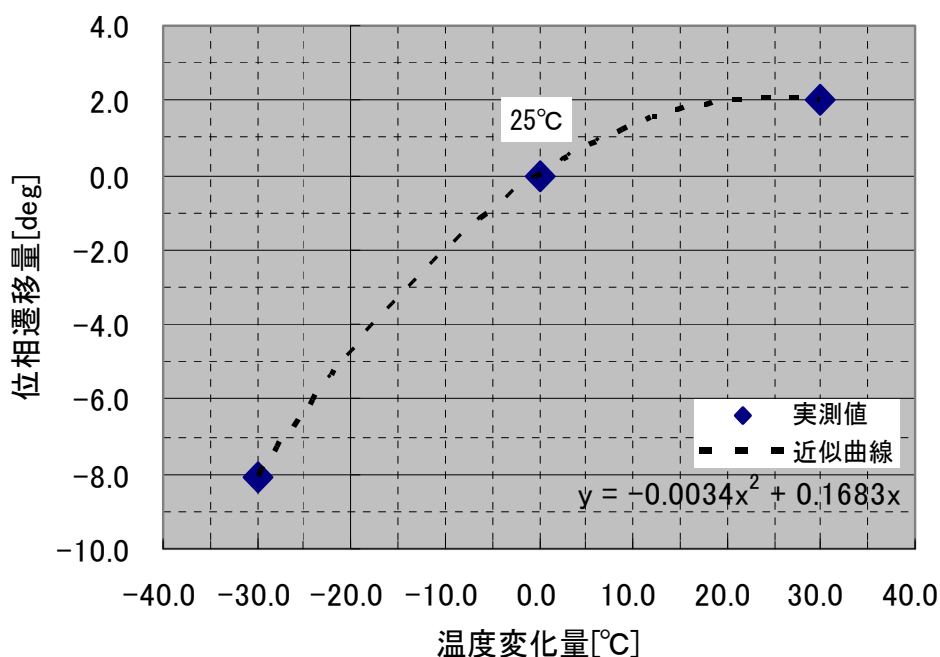


図 5.1-1 TWT#10 の温度変化と位相遷移量の関係  
(25°Cを基準としたとき)

### 温度変化が放射パターンに与える影響

熱解析結果から求めた位相遷移量を放射パターンに反映した。最も位相遷移が大きかった熱解析条件 No.11 の結果を用い、温度による位相遷移を考慮した場合としない場合の放射パターンを示したものが図 5.1-6 および図 5.1-7 である。それぞれについて比較すると、日本のエリア端で若干の違いがあるものの、ほとんど放射パターンには影響がないことが分かる。また、No.11 以外の熱解析条件についても比較を行ったところ、No.11 と同様に放射パターンには影響がみられなかった。

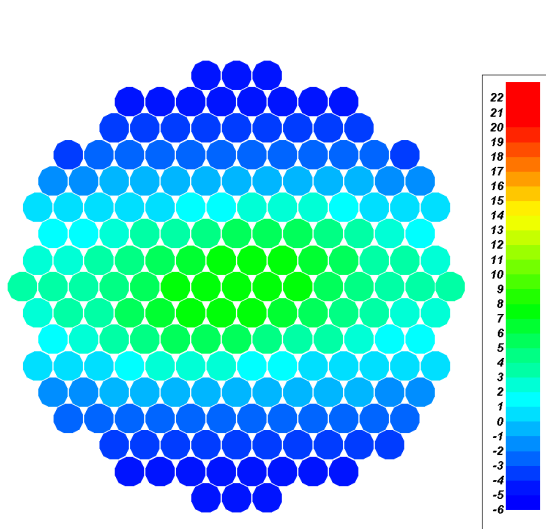


図 5.1-2a No.01 の温度変化量分布

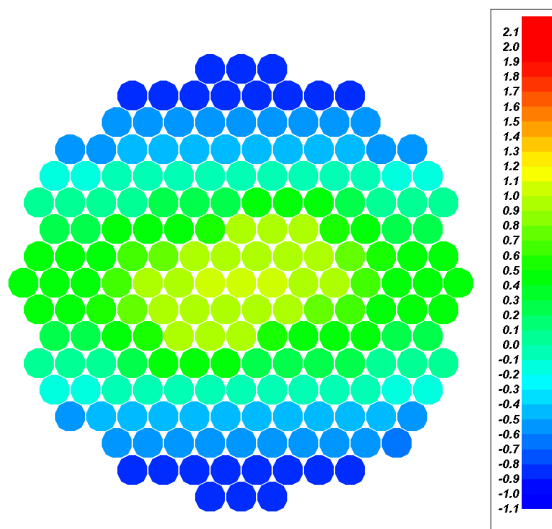


図 5.1-2b No.01 の位相遷移量分布

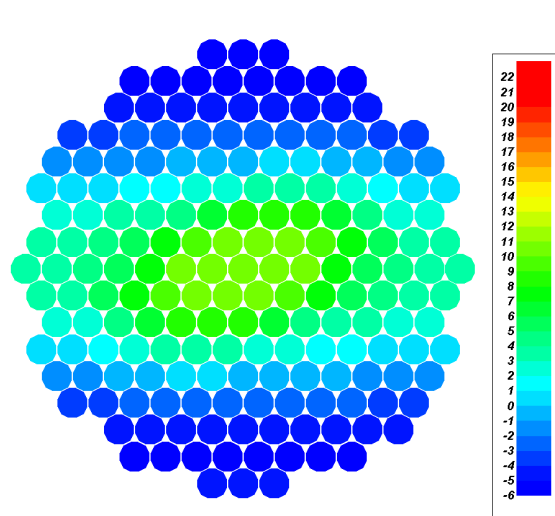


図 5.1-3a No.02 の温度変化量分布

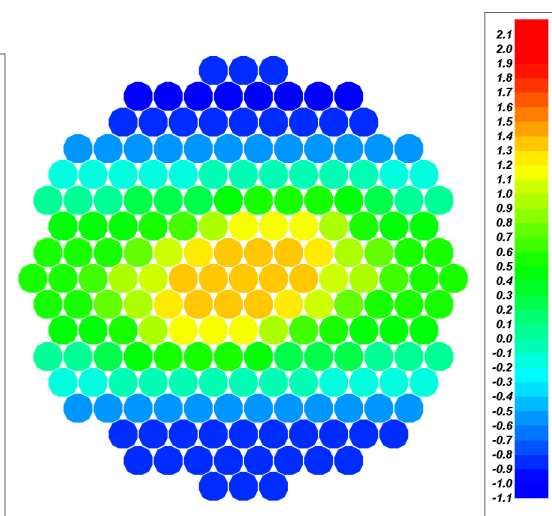


図 5.1-3b No.02 の位相遷移量分布

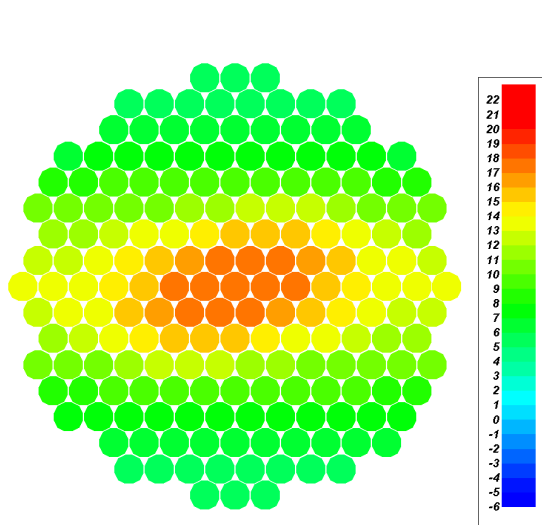


図 5.1-4a No.10 の温度変化量分布

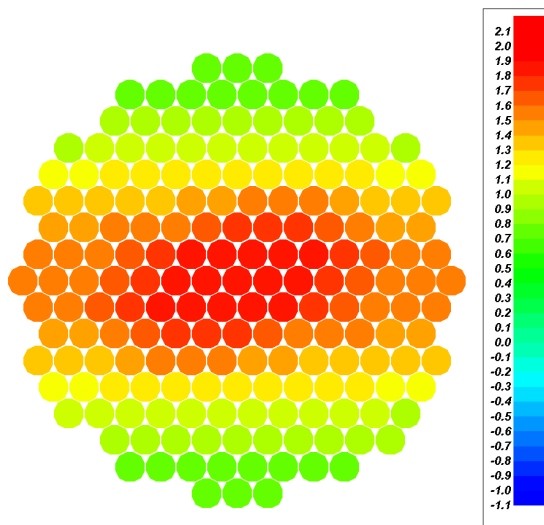


図 5.1-4b No.10 の位相遷移量分布

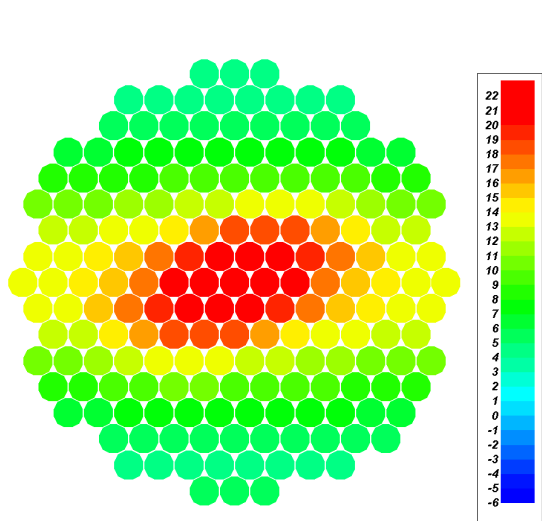


図 5.1-5a No.11 の温度変化量分布

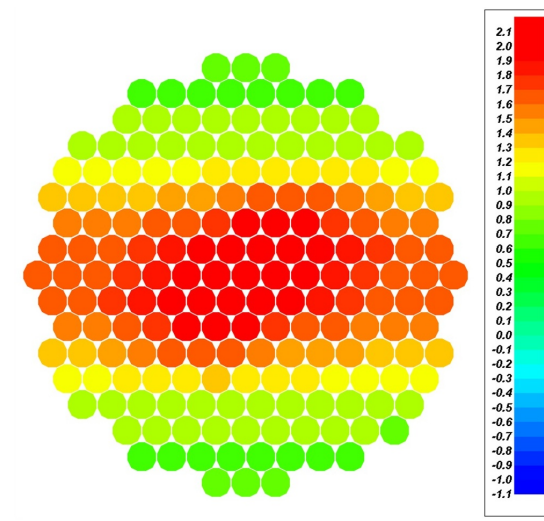


図 5.1-5b No.11 の位相遷移量分布

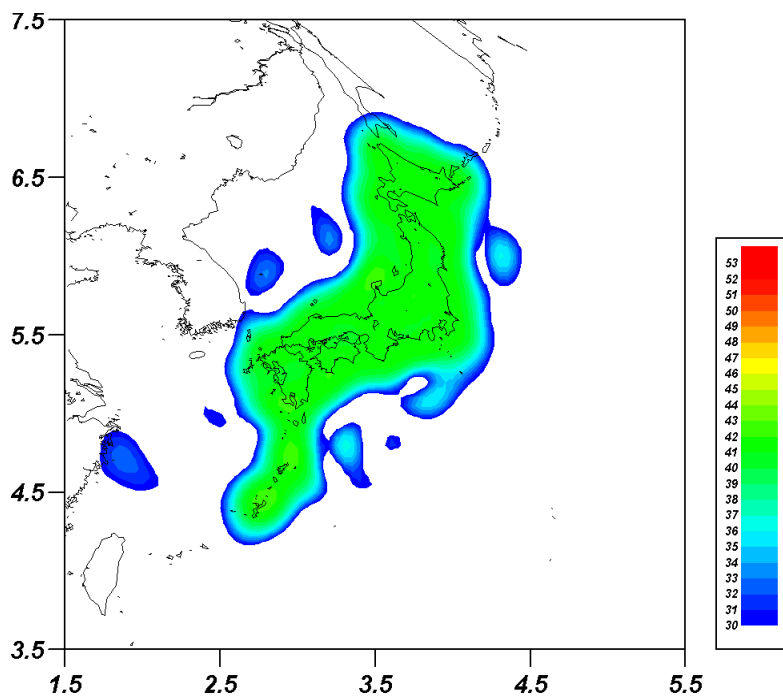


図 5.1-6a 位相遷移を考慮した場合の放射パターン例  
(全国均一利得、温度条件 No.11 による位相遷移を考慮)

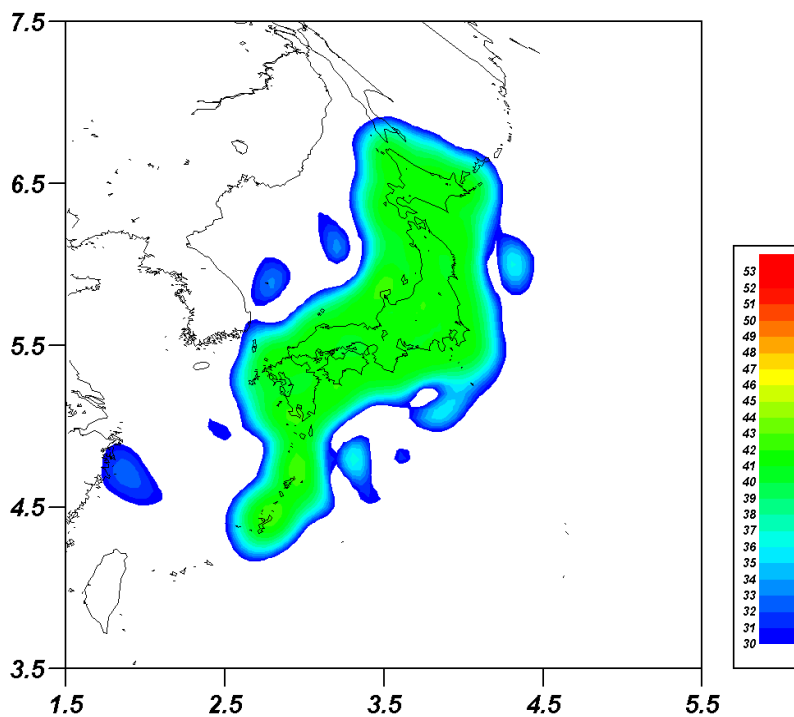


図 5.1-6b 位相遷移を考慮しない場合の放射パターン  
(全国均一利得、位相遷移 0)

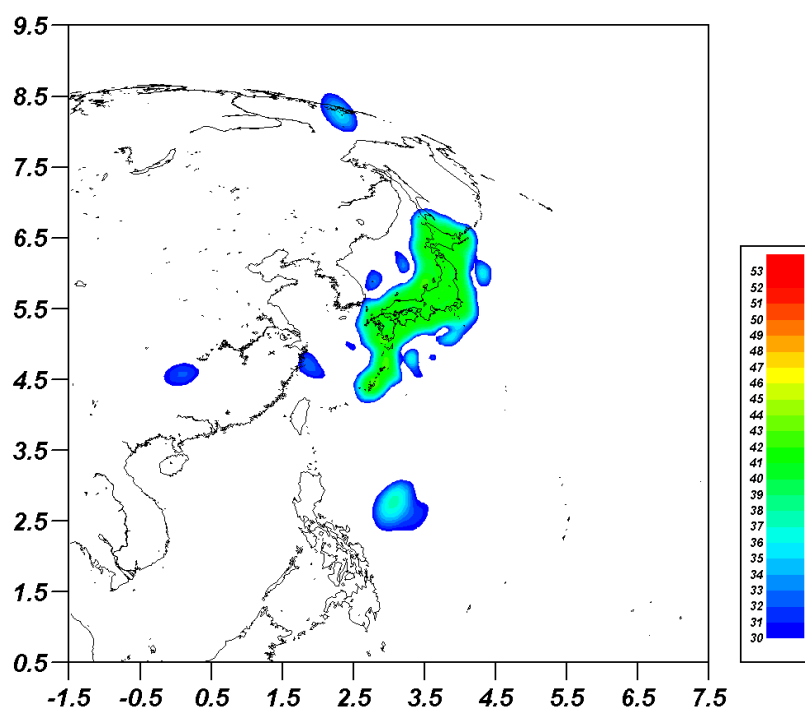


図 5.1-7a 位相遷移を考慮した場合の放射パターン例 [広域]  
(全国均一利得、温度条件 No.11 による位相遷移を考慮)

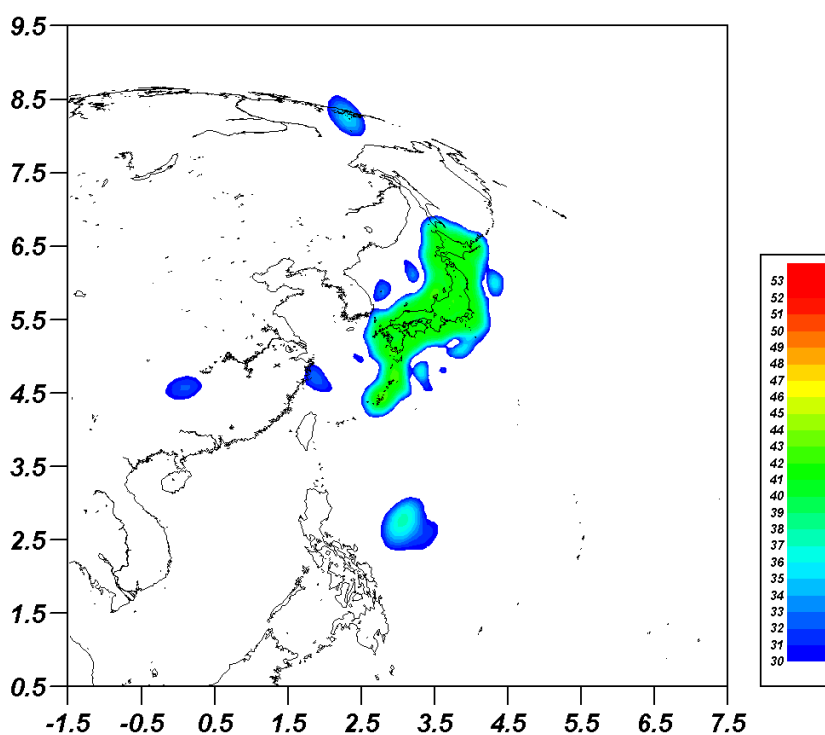


図 5.1-7b 位相遷移を考慮しない場合の放射パターン [広域]  
(全国均一利得、位相遷移 0)



## 5.2 素子故障が放射パターンに及ぼす影響

### 概要

フェーズドアレーアンテナは多数の給電系および放射素子から構成され、それ自体が冗長系を有するアンテナであることから、給電系を構成する増幅器、BFN (Beam Forming Network) 等が故障した場合、少数の故障であれば大きな劣化を生じにくいこと、また、残りの素子を用いて放射パターンの再設計が可能であるなどの利点がある。本検討では、給電系の主な故障の原因としてTWTを想定し、文献[5-1]によるTWTの故障率の調査結果をもとに設定した故障の条件としたときの、給電系が故障した場合の放射パターンへの影響を評価する。

### 本検討での前提条件

以下の通りとする。

- ・ アンテナ構成は、アレー給電イメージングリフレクタアンテナとした場合について検討する（下図参照。主反射鏡開口径 4m、給電部放射素子 188 素子、励振電力は固定）
- ・ 衛星搭載用 TWT の信頼水準 60%での故障率は 230FIT と仮定（検討例と同じ）し、10 年間に故障する可能性がある素子は約 2%とする。従って、故障する素子数は最大 4 素子程度であるが、実際には、故障する素子数はパラメトリックに設定する。
- ・ 故障する TWT の選択は、放射パターンへの影響の大きさを考慮して、励振電力が大きい給電アレー中心部に配置した TWT から選択することとする。

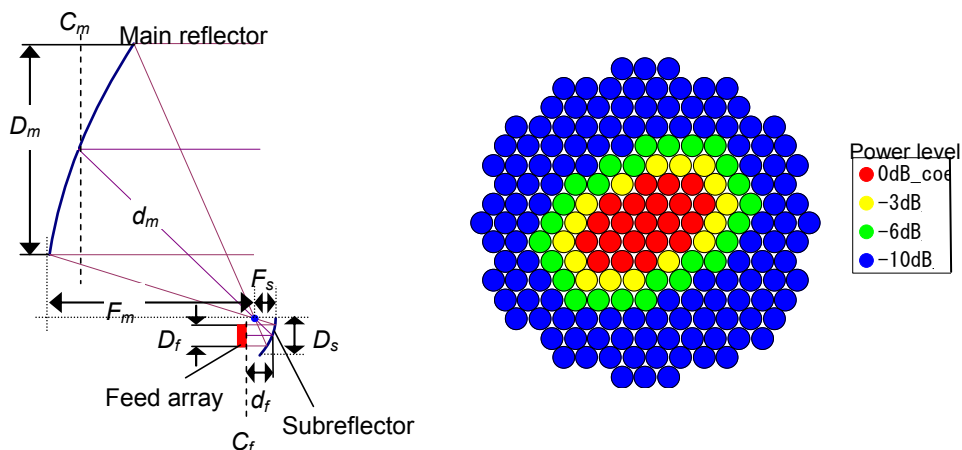


図 5.2-1 アンテナの構成と給電アレー素子配置

## 検討結果

### ○今回の報告での条件

- ・ 故障する素子として、電力値の大きい素子が配置される給電アレー中心部の素子を選択。
- ・ 故障数を1素子～3素子とした場合について検討
- ・ 複数の素子故障の場合は、近接して配置した素子を選択
- ・ 放射パターンは、大阪を10dB増力した場合に固定し、正常動作時、故障時および故障した素子を除いて再形成した場合について比較

### ○ 結果

図 5.2-2、図 5.2-3：故障した素子の例

図 5.2-4：利得の比較（1素子～3素子故障）

図 5.2-5：再合成した場合の利得の比較（1素子～3素子故障）

図 5.2-6：故障なしの場合の放射パターン

図 5.2-7：1素子故障した場合の放射パターン

図 5.2-8：3素子故障した場合の放射パターンと再形成した場合の放射パターンの例

図 5.2-9：3素子故障した場合の放射パターンと再形成した場合の放射パターンの例（広域図）

図 5.2-4 の結果より、今回検討した例では、3素子故障時（第6、第15、第16素子）の場合が最も放射パターンへの影響が大きく、故障なしの場合に比べて増力地域の利得が0.4dB低下、増力しない地域の利得で最大2.1dB低下した。しかし、残りの素子を用いて再合成することにより、故障なしの場合と同等の放射パターンを形成できることがわかった。

## 参考文献

[5-1] Shichiro MIURA et al, "Reliability Assurance of NEC's Space TWTs", NEC Res.&Develop., Vol.37, No2, April 1996

[5-2] "21GHz 帯を用いた高度衛星放送システムの概念検討", テレコム先端技術研究支援センター、平成15年3月

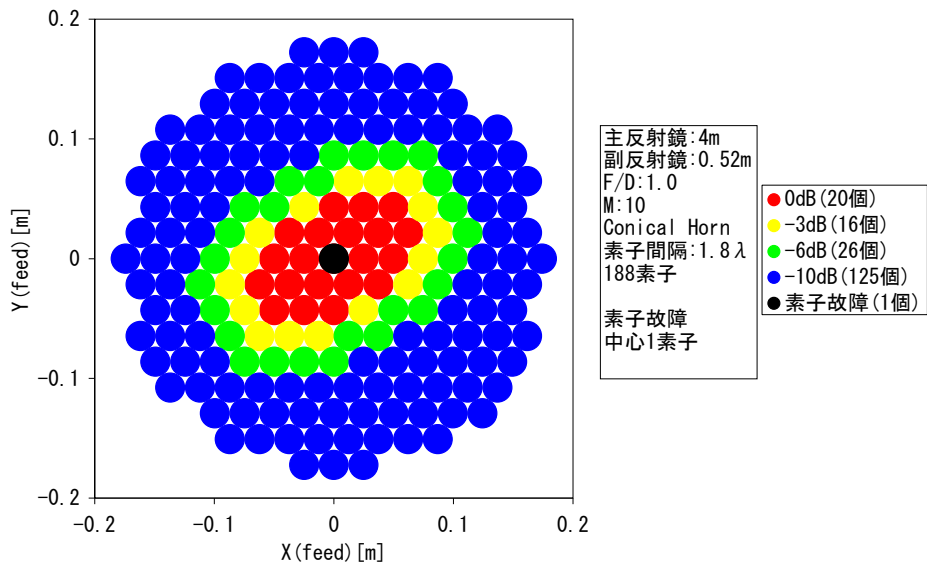


図 5.2-2 1 素子故障の例 (第1素子)

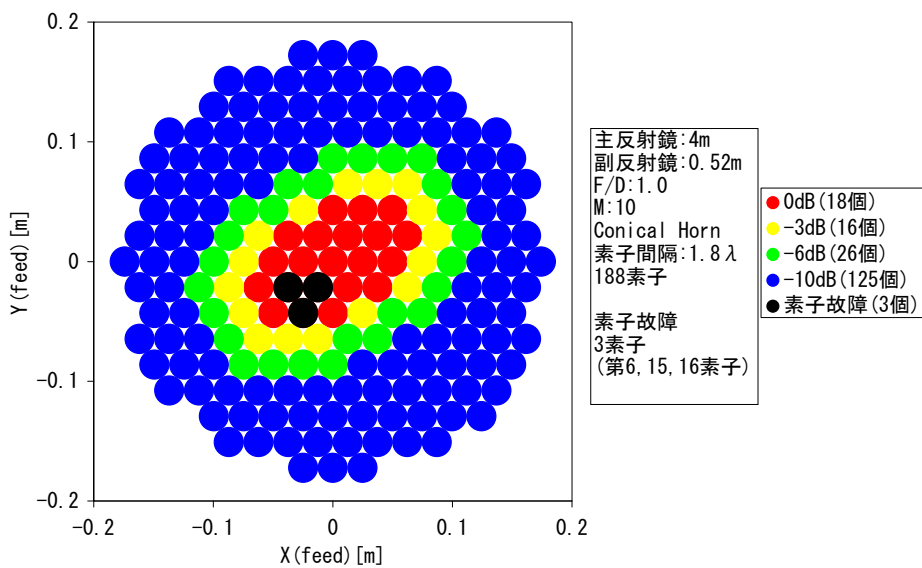


図 5.2-3 3 素子故障の例 (第 6、第 15、第 16 素子)

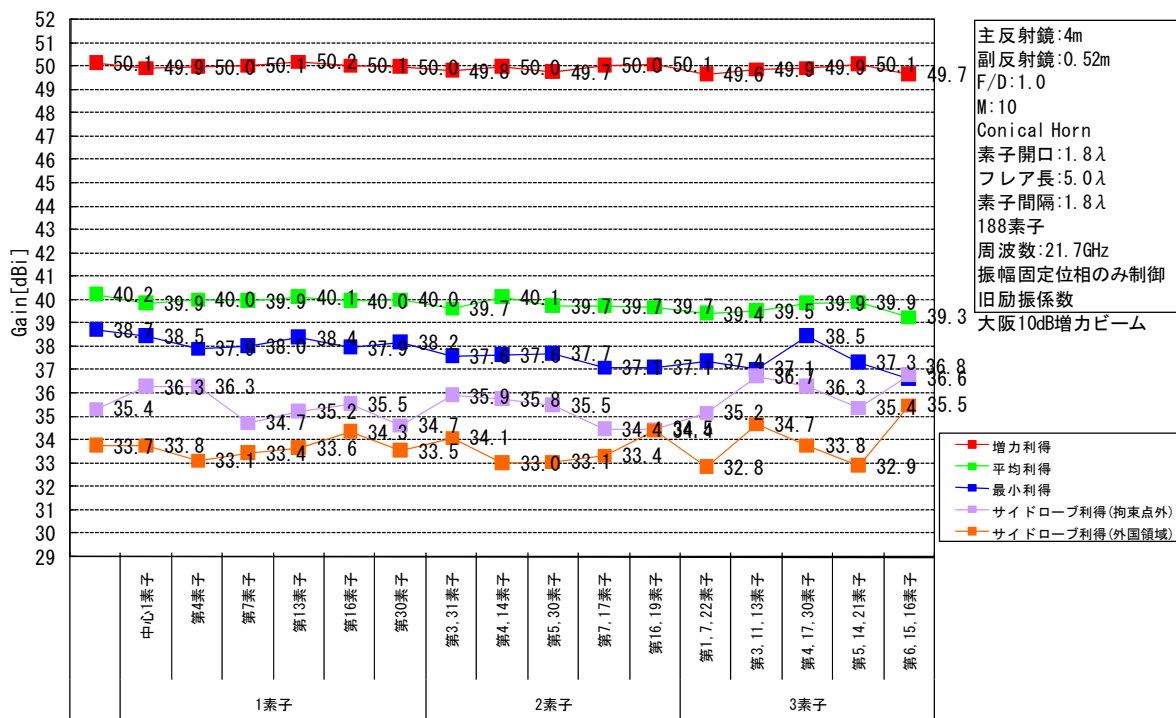


図 5.2-4 : 利得の比較 (1 素子~3 素子故障)

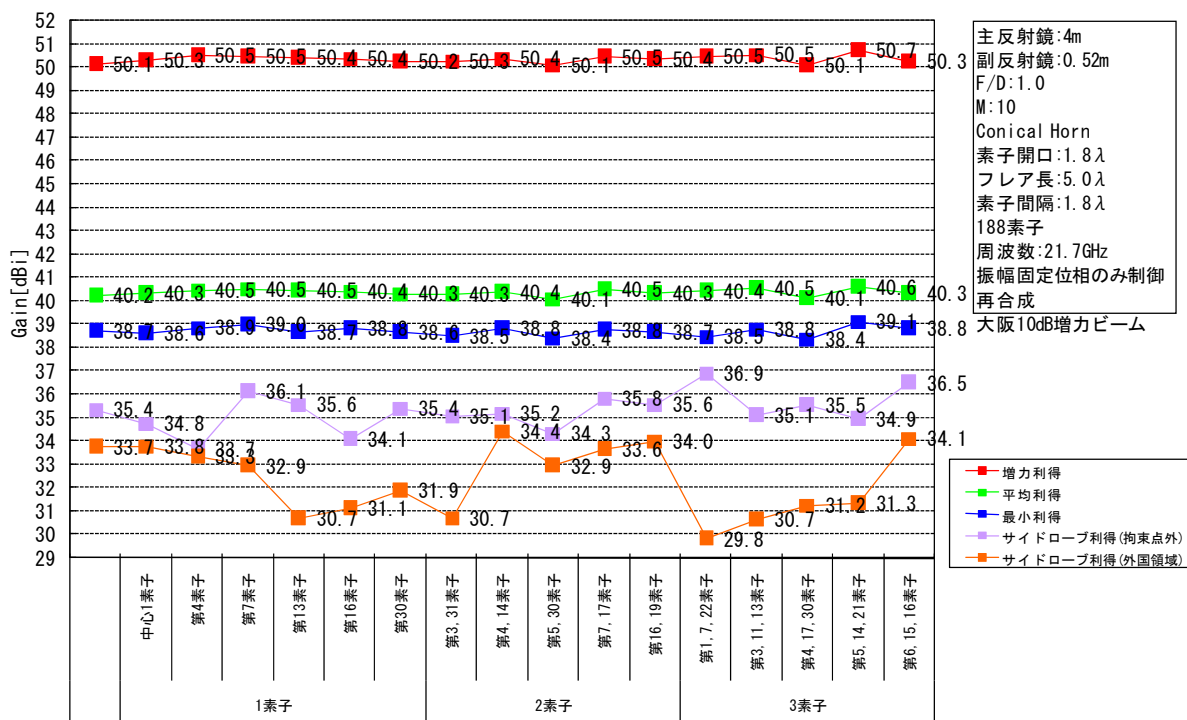


図 5.2-5 : 再合成した場合の利得の比較 (1 素子~3 素子故障)

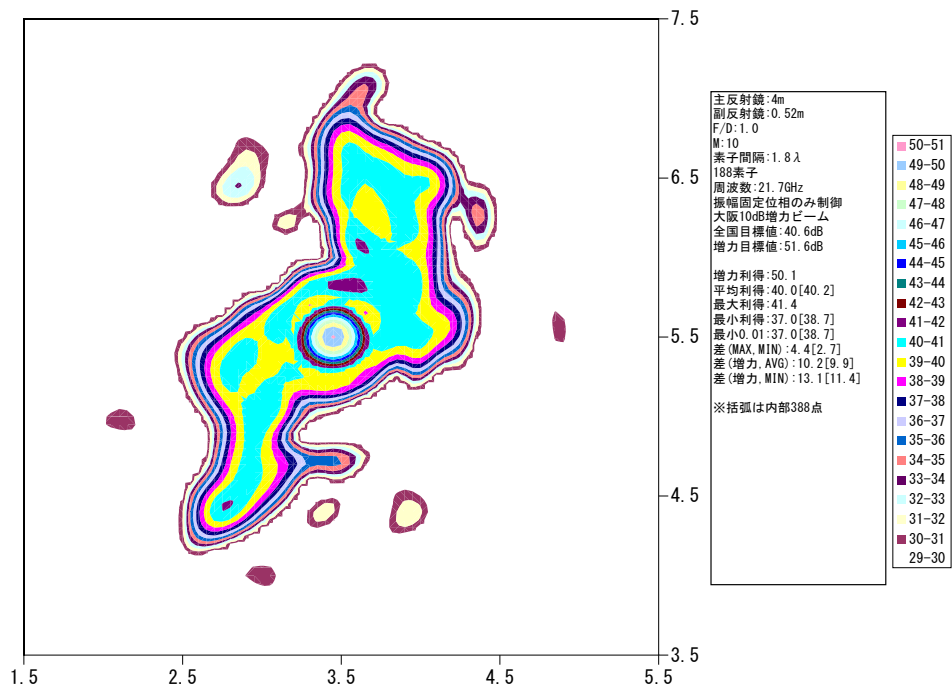


図 5.2-6 故障なしの放射パターン

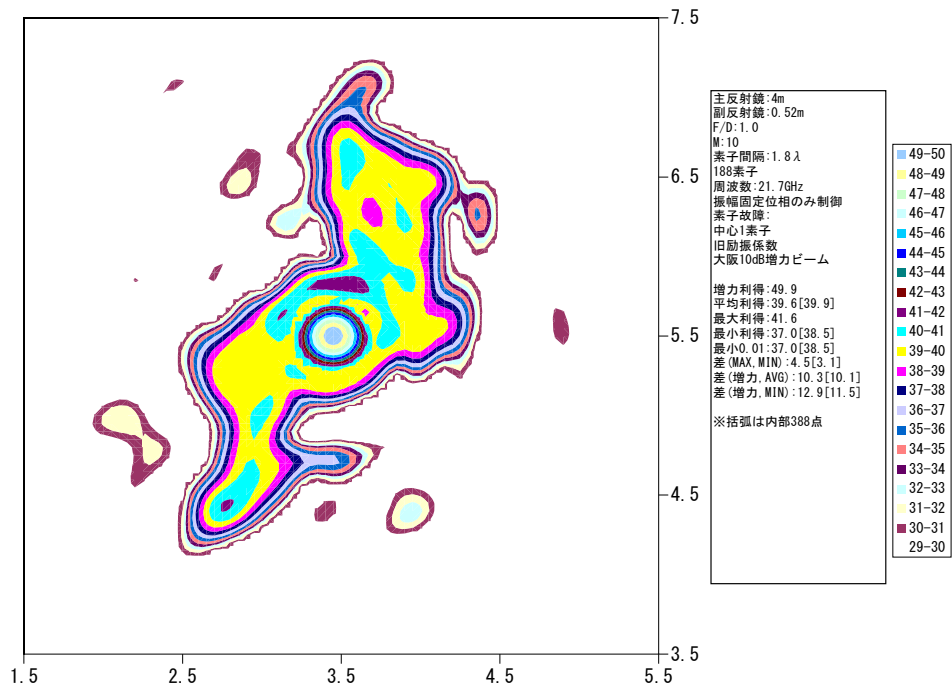


図 5.2-7 中心部の1素子故障(図 5.2-2 の例の場合)

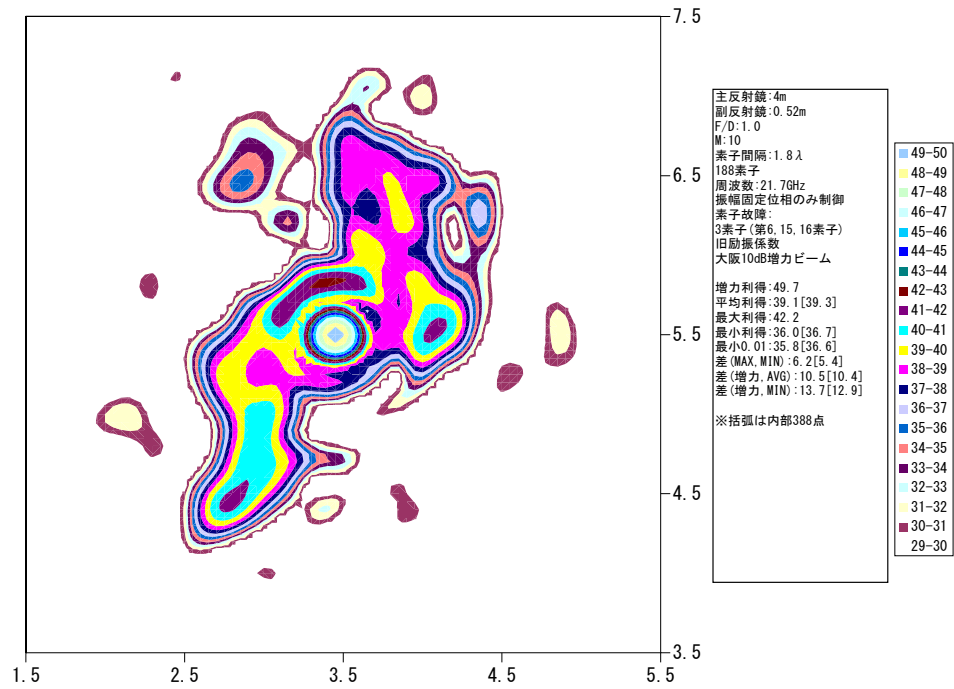


図 5.2-8 (a) 3 素子故障 (図 5.2-3 の故障例の場合)

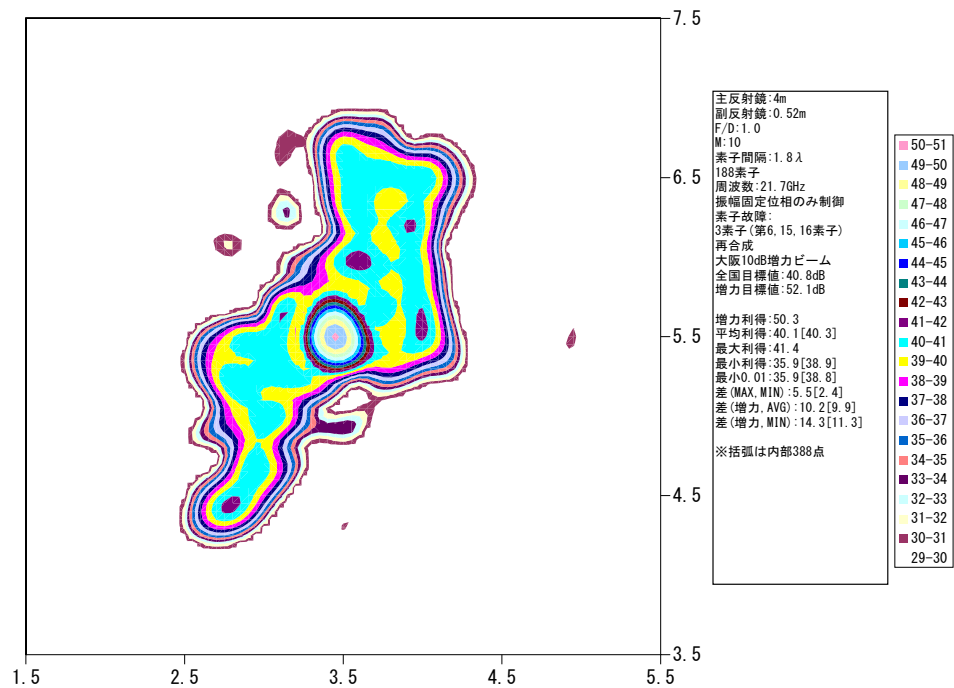


図 5.2-8 (b) 3 素子故障の再形成 (図 5.2-3 の故障例の場合)

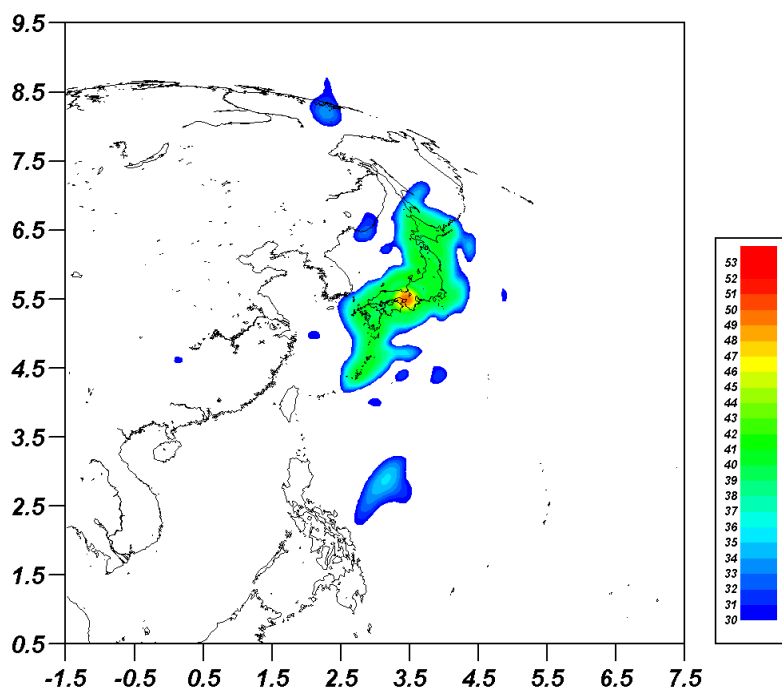


図 5.2-9 (a) 素子故障なしの場合の放射パターン(広域図)

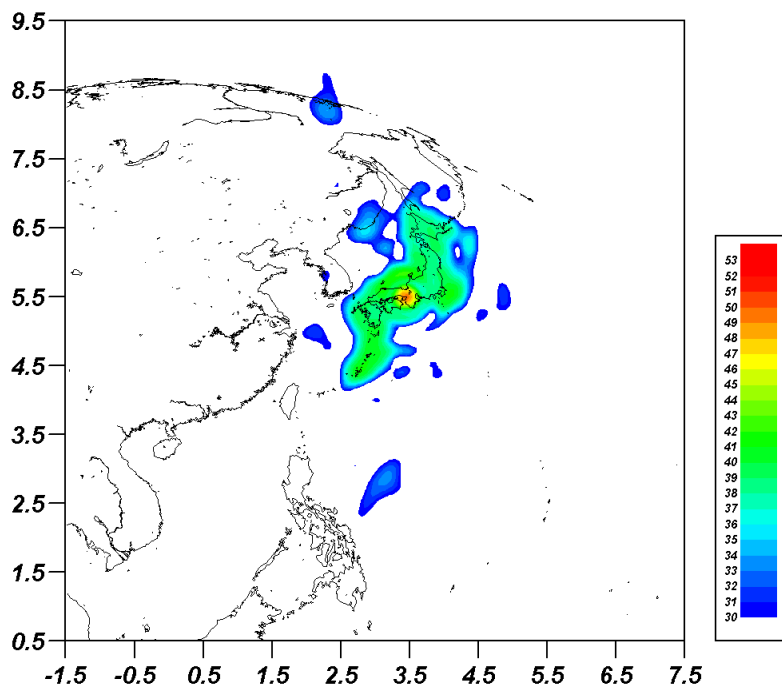


図 5.2-9 (b) 3 素子故障(図 3 の故障例の場合)(広域図)

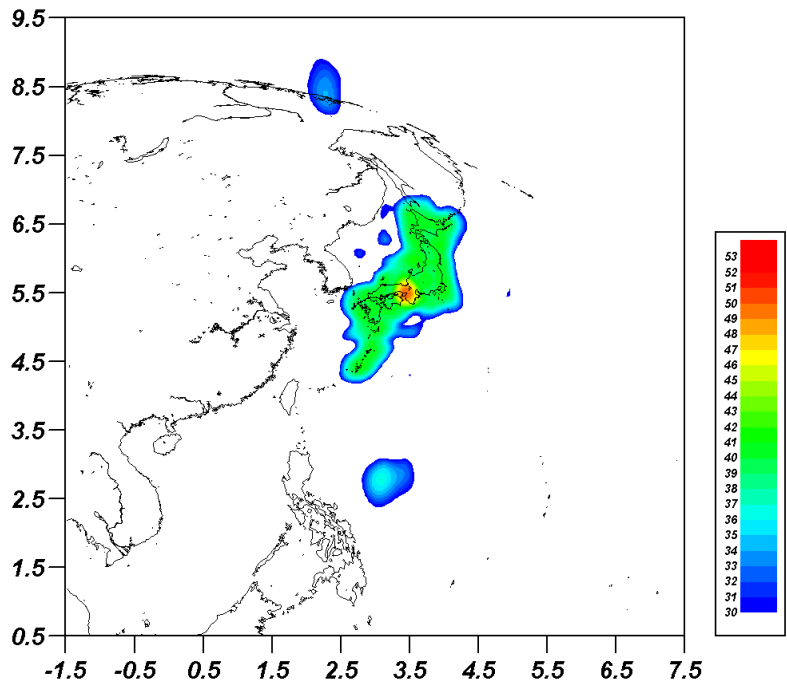


図 5.2-9 (c) 3 素子故障の再形成(図 3 の故障例の場合)(広域図)



### 5.3 課題

アンテナ構成として主反射鏡開口径 4m、給電部放射素子 188 素子、励振電力は固定のアレー給電イメージングリフレクタアンテナとした場合について。TWT の温度変化が給電アレーの位相分布に与える影響と給電系が故障した場合の放射パターンへの影響を評価した。

TWT アレー給電部の温度変化は、想定した最悪ケースの場合で中心と周辺部において 16°C の温度差が現れるが、位相遷移量にするとわずか 1.3° であり（表 5.1-2 No.11 参照）、位相遷移を考慮した場合と考慮しない場合で放射パターンに差は見られなかった。

188 素子のうち、出力の大きな 3 素子が故障した想定して、故障した素子を除いて放射パターンを再設計した結果を示した。故障なしの場合に比べて増力地域の利得が 0.4dB 低下、増力しない地域の利得で最大 2.1dB 低下した。しかし、残りの素子を用いて再合成することにより、故障なしの場合と同等の放射パターンを形成できることがわかった。

今後の課題としては、近い将来における衛星の実現性を考慮した衛星システムの検討が挙げられる。アレー給電部用増幅器として固体素子増幅器(SSPA)を用いる場合は、SSPA の出力効率を大幅に改善する必要がある。また TWT を用いる場合は、コスト削減のため、アレー素子数を減じたアンテナ構成を検討する必要がある。

## 第 6 章 まとめと今後の課題

本章では、各章のまとめと今後の課題について述べる。

### まとめ

#### 第 2 章

21 GHz 帯放送衛星給電アレー部排熱方式に関する JAXA と NHK の共同研究の内容について述べた。

- ・ 給電アレー部などの高密度実装機器は、機器を許容温度範囲に納める排熱システムの研究開発が必要不可欠である。平成 20-21 年度の研究では、開発した平板型ヒートパイプの実証を目的とし、TWT 熱ダミーによる給電アレー部分検証モデルに平板型ヒートパイプを実装し、熱真空環境下で熱平衡試験を実施した。

#### 第 3 章

TWT 熱ダミーを用いた熱平衡試験について述べた。

- ・ 21 GHz 帯放送衛星給電アレー用に設計した出力 10W 級の小型細径 TWT の発熱特性を再現する TWT 熱ダミーを設計し、妥当性を評価した。
- ・ TWT 熱数学モデルの精度向上を目指したコリレーション作業に用いるデータの取得を目的として熱ダミーによるアレー部を用いた熱平衡試験を行った。

#### 第 4 章

給電アレー部解析について述べた。

- ・ 第 3 章に示す熱真空試験で取得したデータを用いて実施した給電アレー部の熱数学モデルのコリレーション内容について示した。
- ・ 次にコリレーション実施後の熱数学モデルを用いて熱解析結果および解析により明らかになった熱的に成立させるための課題について整理した。

#### 第 5 章

給電アレー部の熱解析結果から得られた温度分布より、放射パターンへの影響を検討した。また、素子故障が生じた場合に故障した素子を除いた素子で放射パターンを再構成する検討を実施した。

- ・ 給電アレー部解析で得られた給電アレー部の温度分布に TWT 実機の温

度と振幅および位相遷移量の関係を活用して、温度分布が放射パターンに与える影響を計算し、ほとんど影響が無いことが確認できた。

- 1～3 素子故障した場合を想定し、残りの素子を用いて放射パターンを再形成する検討を実施した。3 素子故障した場合でも利得は低下するが故障なしの場合と同等の放射パターン形成できた。

## 今後の課題

21GHz 帯高度放送衛星ミッションでは多数の小型細径 TWT により構成されたフェーズドアレーアンテナを用いることを検討している。今後は、近い将来で商用としての実現性を考慮した中継器構成とし、TWT の入手可能性を考慮した上で TWT のアレー構成および排熱の実現可能性を評価することが課題である。排熱システムの実現にわたっては今回検討を行った発熱部から熱を除去する方策に加えて、その熱を最終的に宇宙空間に排熱する放熱面まで効率よく輸送する方策など、システムレベルでの排熱検討・熱的成立性検討が課題となる。