

実験用中型放送衛星(BS)のトランス
ポンドに生じた不具合の原因究明及び
今後の対策について(報告)

昭和 5 5 年 1 1 月 6 日

宇宙開発委員会第四部会

実験用中型放送衛星（ＢＳ）のトランスポンダに
生じた不具合の原因究明及び今後の対策について

昭和５５年１１月６日

宇宙開発委員会第四部会

宇宙開発委員会第四部会は、実験用中型放送衛星（ＢＳ）のトランスポンダに生じた不具合について、昭和５５年１０月３日以来、その原因究明及び今後の対策に係る技術的事項を慎重に調査審議してきたが、このたびその結果をとりまとめたので報告する。

目 次

1. 実験用中型放送衛星 (B S) のトランスポンダの概要	
(1) 衛星の概要	1
(2) トランスポンダの概要	2
2. 不具合発生状況	2
(1) B 系統 T W T 増幅器の不具合発生の経過	3
(2) R 系統 T W T 増幅器の不具合発生の経過	3
(3) A 系統 T W T 増幅器の不具合発生の経過	3
3. 不具合原因の究明	4
(1) 不具合発生状況の分析	4
(2) 原因究明	4
(3) 高圧電源に関する詳細検討	6
(4) まとめ	8
4. 今後の対策	8
5. 総合意見	9
参考 1 実験用中型放送衛星 (B S) のトランスポンダに生 じた不具合の原因究明及び今後の対策について	16
参考 2 宇宙開発委員会第四部会構成員	17

1. 実験用中型放送衛星 (BS) のトランスポンダの概要

(1) 衛星の概要

(i) 目的

実験用中型放送衛星 (BS) は、衛星システムを用いた画像及び音声の伝送試験を行うこと、衛星放送システムの運用技術の確立を図ること等を目的としている。

(ii) 衛星の外観及び主要機能・性能

BS は底面約 $1.3\text{ m} \times$ 約 1.2 m 、高さ約 3.1 m の箱形 (太陽電池パネル展開時の全長は約 9.0 m) の三軸姿勢制御衛星である。アポジモータを含む重量は約 675 kg であり、静止軌道上の初期重量は約 355 kg である。

BS は、上り回線に 14 GHz 帯、下り回線に 12 GHz 帯の周波数を使用し、1チャンネル当たり約 100 W の出力で広帯域2チャンネルの衛星放送実験が可能である。

BS の外観及び主要機能・性能をそれぞれ図1及び表1に示す。

(iii) 打上げ及びその後の経過

BS は、昭和53年4月8日、米国東部打上げ射場からデルタ2914型ロケットにより打ち上げられた。打上げ後、BS は順調な飛行を続け、4月26日に所定の静止軌道 (東経 110°) に投入された。

衛星の機能を確認するため、打上げ後7月19日までバス系機器のチェックが、また5月8日から6月30日にかけてはミッション機器のチェックが行われた。その間、Sバンド受信機の入力切替スイッチの動作不良及び三軸姿勢制御の一時的な乱れが発生したが、運用上の対策が講じられ (昭和53年9月の当部会の報告書「実験用中容量静止通信衛星 (CS) 等4衛星の打上げ結果の評価について (報告)」を参照)、昭和53年7月20日から、郵政省、日本放送協会 (NHK) 及び宇宙開発事業団が協力してBSを用いた各種実験を開始した。

打上げ後1年を経過した頃からいくつかの不具合が起つたものの、衛星の冗長系の活用や運用方法の変更により、BSを用いた実験は順調に進められた。

(2) トランスポンダの概要

BSのトランスポンダは受信部、送信部及び送受分合波器で構成され(図2及び図3参照)、14GHz帯の受信電波を12GHz帯に周波数変換し、電力増幅を行って送信出力とするものである。

受信部は2系統(うち1系統は予備)で構成され、送信部はA系統及びB系統並びに双方共通の予備としてのR系統の合計3系統で構成されている。各系統の電力増幅は進行波管を用いた増幅器で2段階に行われており、後段の高出力進行波管増幅器(以下「TWT増幅器」という。)は、出力約100Wの高出力進行波管(以下「TWT」という。)とTWT用高圧電源部で構成されている。(図4参照)12GHz帯で約100Wの出力が得られるTWT増幅器は、BSの最も重要な機器のひとつである。

2. 不具合発生状況

BSは昭和53年4月8日に打ち上げられ、設計寿命は3年であった。しかし、A、B及びRの3系統のTWT増幅器のうち、B系統が打上げ後約1年2か月で、次いでR系統が打上げ後約2年1か月で作動を停止した。さらに最後のA系統も昭和55年6月17日、打上げ後約2年2か月で作動を停止し、以後、BSを用いたテレビジョン放送の実験を実施することができなくなった。

それぞれの系統の不具合発生状況は次のとおりである。

なお、三軸姿勢制御、軌道制御、12GHz帯及び14GHz帯電波の伝搬特性等に関する実験並びに各種テレメ^(ト)データの取得が、現在も継続されている。

(1) B系統TWT増幅器の不具合発生の経過

昭和54年6月8日、B系統TWT増幅器の高圧電源の投入を指令してTV信号が正常に受信されてから約13分後、突然TV信号が途絶した。その後再起動を試みたが、TV信号は受信されなかった。

なお、この不具合のあとのBSを用いたテレビジョン放送の実験は、B系統の代わりに予備のR系統を用いることにより、支障なく継続された。

(2) R系統TWT増幅器の不具合発生の経過

昭和55年5月19日、R系統TWT増幅器の高圧電源の投入を指令してTV信号が正常に受信されてから約1時間後に、衛星からのTV信号が突然途絶した。このため、翌日に、約26分間R系統TWTのカソードの汚染除去(ボイル・オフ)を行ってから再び高圧電源の投入を指令したところ、約7秒間TWT増幅器が正常に作動し、再び突然作動が止まった。以後、R系統のTWT増幅器は再起動しなかった。

なお、R系統の不具合により、BSを用いたテレビジョン放送の実験は以後A系統のみを用いて継続された。

(3) A系統TWT増幅器の不具合発生の経過

昭和55年6月17日、A系統TWT増幅器の高圧電源の投入を指令してTV信号が正常に受信されてから約11分後、衛星からのTV信号が突然に受信できなくなった。その後7月14日に再起動を試みたところ、第1回目は約0.6秒間、第2回目は約0.2秒間、第3回目は約0.5ミリ秒間の作動が認められたが、その後も機能は回復に至らなかった。

これによって、以後BSを用いたテレビジョン放送の実験を実施することができなくなった。

3. 不具合原因の究明

(1) 不具合発生状況の分析

今回の不具合発生状況は次の点が特徴である。

- (i) 通信系以外のBSの各サブシステムには今回の不具合に関連する異常が発生していないこと、B系統及びR系統の不具合の際にA系統には異常がなかったことから、今回の不具合は通信系で起こり、しかも受信部、送受分合波器ではなく、送信部で起こったことは確実である。
- (ii) A、B及びRの各系統ともTV信号の途絶の仕方はほぼ同様であり、信号途絶の直前まで何ら異常の兆候も見られずに突然に信号が途絶していることから、TWT増幅器の高圧電源シャ断回路(図4参照)が作動して電波の発射が行われなくなったものと推定される。
- (iii) R系統とA系統で再起動が可能であったことから、原因は持続性のあるものではなく、またR系統とA系統の両方に見られるように、TV信号が途絶するまでの時間が徐々に短くなってついには再起動不可能となっていることから、これは放電にかかわるような不具合であると考えられる。
- (iv) A、B及びR系統のTWT増幅器の全作動時間は、地上での試験をも含め、それぞれ3262時間、3573時間及び5995時間であり、軌道上での作動時間はそれぞれ2471時間、2653時間及び4886時間であった。このことから、不具合の原因には経年変化的要素があると考えられる。

(2) 原因究明

不具合の原因究明に当たっては、高圧電源シャ断回路が作動したと推定されることから、この原因を抽出するためFault Tree Analysisの手法を用いた。なお、この検討に当たっては、筑波宇宙センターに保管されていたBSのプロトフライトモデルを用いたシミュレーション実

験の結果も使用した。

高圧電源シャ断回路が作動する原因としては、TWTの異常と高圧電源の異常とが考えられる。

(i) TWTの異常

TWTの異常の原因としては、カソード—アノード間又はコレクタ—ボディ間の、管内又は管外での放電が一応可能性のあるものとして挙げられるが、次の理由によりその可能性は小さいと考えられる。

① カソード—アノード間又はコレクタ—ボディ間のTWT管外での放電

端子部分のボッティング(部品を固定し、また電氣的に絶縁するために充填する高分子材料)に剥離が起こる可能性は構造上小さく、また、仮にクラックが生じてもセラミックで絶縁されているので放電につながる可能性は小さいため、この部分に放電が起こる可能性は小さい。

② カソード—アノード間又はコレクタ—ボディ間のTWT管内での放電

TWT管内にガスが発生するとカソード—アノード間又はコレクタ—ボディ間に放電が起こる可能性がある。この場合、通常イオンポンプ電流が増加するが、実際の不具合ではイオンポンプ電流の増加が認められていないので、これが原因である可能性は小さい。

(ii) 高圧電源の異常

高圧電源側で起こったと考えられる現象のうち可能性があるものは、電圧の異常上昇と高圧モジュール内の放電である。

① 高圧電源電圧の異常上昇

高圧電源電圧の異常上昇の原因としては、安定回路トランジスタの飽和、高圧出力負荷インピーダンスの増加及び負荷回路の開放が考えられる。

しかし、いずれの場合も電圧上昇の割合は設計上最大4%であり、この程度で高圧電源シャ断回路が作動する可能性は小さい。

② 高圧モジュール内の放電

高圧電源部は図4に示すように各TWTの電極毎に分割(モジュール化)されている。各モジュールには、トランス、チョークコイル、コンデンサ等からなる電源回路が組み込まれており(図5参照)、各部品間の隙間にはポッティング材が充填されている。このポッティングにクラックが生じると、クラック内部が放電し易い蒸気圧になった時にそのクラックに沿って放電が起こる可能性があり、この可能性を否定し、あるいは可能性が小さいとする理由は見出されない。

(3) 高圧電源に関する詳細検討

不具合の原因が高圧モジュール内の放電である可能性が大きいことから、BSのプロトフライトモデルを用いた各種の試験、米国の製造メーカーでの試験に関する調査等の結果をもとに、高圧電源に関する詳細な検討を行った。

(i) 高圧電源シャ断回路の作動について

筑波宇宙センターに保管してあったBSのプロトフライトモデルを用い、外部から強制的に放電を起こさせる回路をTWT増幅器の回路の各部に接触させてアーク放電を起こし、高圧電源シャ断回路の作動を観察し、また各部の電圧・電流を測定した。

この結果、高圧回路にある程度以上の電流の放電が起こると高圧電源シャ断回路が作動することが認められた。

(ii) 放電の原因について

BSのトランスポンダを製作した米国のメーカーで、BS用のものと同じ設計の高圧モジュールの真空環境寿命試験が昭和52年4月か

ら2年8か月にわたって行われており、それによると供試体2個のうち1個は、試験中に発生・成長したクラックに沿って起こった放電により、累積時間9955時間で突発的に故障している。また残りの1個は、故障の発生はなかったもののクラックの発生・成長が認められている。

この試験結果により、室温程度の温度条件でも時間の経過に伴いクラックが発生し、成長することが示され、またそのクラックが強電界部分にあつて、かつ、クラック内部が放電の発生し易い蒸気圧になるとクラックに沿って放電が起こり、最終的にはポッティング材の炭化現象により永久的な短絡に至ることが判明している。

これはBSの不具合の場合の現象と一致している。

(iii) ポッティングのクラックの発生及び成長について

ポッティングについて熱膨張(収縮)を考慮した応力解析を行ったところ、周囲が拘束されている部分及びモジュール内部の部品等の鋭角部分の付近に応力の集中が起こり、クラックが発生する可能性があることが判明した。なお、この部分に高い電圧がかかっていたら放電が発生し易い。

応力集中は、モジュール内部の部品の形状及び配置、並びにポッティング材の物質特性及び硬化過程に起因して起こっているものと推定される。

BSに用いられた高圧モジュールの場合、室温における内部の応力がポッティング材の引張強さよりも小さいものの、BSのトランスポンダに対する認定試験の際の最低温度-40℃では引張強さよりも大きな応力が生じる可能性がある。なお、認定試験の際の低温条件は短時間であることから、この時にクラックが発生したとしてもそれは微小なものであろうと推定される。

BSのプロトフライトモデルから高圧モジュールを取りはずしX線検査を行った結果、製造時にクラックが全く発見されていなかったに

もかわらず、9個のモジュールのうち5個にクラックが発見された。さらに熱サイクル試験(−40℃~+80℃、28サイクル)及び真空中における熱サイクル試験(1×10^{-5} Torr 以下、−40℃~+50℃、12サイクル: −40℃~+85℃、3サイクル)を行ったところ、3個のモジュールに新たなクラックが発見された。

これによって常温においてもクラックが発生し成長すること、及び熱ストレスが加わることによって新たなクラックが発生することが判明した。

(4) まとめ

以上の検討の結果をまとめると、BSのトランスポンダに生じた不具合の原因は次のとおりであったものと推定される。

- (i) A、B及びR系統のトランスポンダが作動しなくなったのは、TWT増幅器の高圧電源シャ断回路が働いたためであると考えられる。
- (ii) 高圧電源シャ断回路が働いたのは、TWT増幅器の高圧モジュールのボッティングにクラックが生じ、このクラックに沿って放電が起こったためであると考えられる。
- (iii) ボッティングのクラックは、材料物性の経年変化による応力の増加によって発生・成長し、熱ストレスによってそれが助長されたものと考えられる。

4. 今後の対策

今回の不具合は、TWT増幅器の高圧モジュールのボッティングに生じたクラックに沿って起こった放電によるものと推定される。

このことから、今後同様の高圧モジュールを用いる場合、放電を引き起こすようなクラックが発生又は成長しないよう、次の対策を講じる必要がある。

ある。

なお、ボッティング以外の放電防止対策についても、情報の収集に努めることが望ましい。

- (i) ボッティング材として、軌道上における温度範囲で放電を引き起こすようなクラックが発生又は成長しないような物性条件を満たすものを選定すること。

この際、ボッティング材の含浸性、部品との接着性及びぬれ性等の物性条件についても、またボッティングの手法についても配慮すること。

- (ii) ボッティング部分に発生する応力が少なくなり、また高圧モジュール内での放電がより起こりにくくなるように、部品の形状及び配置並びに回路を選定すること。
- (iii) 設計寿命を検証するため、高圧モジュールの寿命に関する試験を実施すること。

5. 総合意見

昭和53年4月8日に打ち上げられ、約2年にわたって衛星放送システムに関する種々の実験に用いられた実験用中型放送衛星(BS)は、昭和55年6月17日までに、搭載したトランスポンダの3系統の高出力進行波管増幅器すべてが作動しなくなり、衛星のその他の機能は健在であるにもかかわらず、以後、テレビジョン放送の実験を実施することができなくなった。

この不具合は、高出力進行波管増幅器の高圧モジュールのボッティングに生じたクラックに沿って放電が起こったことにより、高圧電源シャ断回路が作動して高出力進行波管増幅器が作動しなくなったものと推定される。

したがって、今後同様の高圧モジュールを用いる場合、放電を引き起こすようなクラックが発生又は成長しないよう前述の対策を確実に実施する必要がある。

表1 BSの主要機能・性能

項 目	諸 元	
形 状	底面約1,320mm×約1,200mm, 高さ約3,090mmの箱形 (太陽電池パネル展開時約8,950mm)	
重 量	打上げ時: 約675kg (アポジモータを含む。) 静止衛星軌道上初期: 約355kg	
姿勢安定方式	三軸安定方式 (トランスファ軌道上では, スピン安定方式)	
軌 道	静止衛星軌道 (赤道上東経約110°)	
スピン方向	時計回り (ロケット側から衛星を見て)	
スピン率	60±6 rpm	
基 本 機 器 と 搭載機器構成	通 信 系	電力分配型3ホーン成型ビームアンテナ, 直接周波数変換型Kバンドトランスポンダ (カラーテレビジョン信号 (音声信号を含む。)) 2チャンネルの 伝送)
	トラッキング・ テレメトリ 及びコマンド系	Sバンドオムニアンテナ, Sバンド送受信機 Kバンド: トラッキング・テレメトリ及びコマンドサブシ テム (通信系経由) S/Kアップコンバーター, K/Sダウンコンバーター
	姿勢制御系	[トランスファ軌道モード] デジタル太陽センサ, 地平線検出器, ニューテーションダンパ [静止衛星軌道モード] アナログ太陽センサ, 地球センサ, モノパルスRFセンサ, リアクションホイール, レートジャイロ
	熱 制 御 系	受動型熱制御系 (ヒーター, サーモスタット, ヒートパイプ等使用)
	推 進 系	アポジモータ 二次推進系
電 源 系	電 源 系	展開型太陽電池パネル バッテリー, 電力制御器
	構 体 系	主要な発熱構成機器を収容した北面パネル, 南面パネルを持つ箱形構造 太陽電池パネル展開及び駆動機構
寿 命	3年後の残存確率50%以上 (設計)	

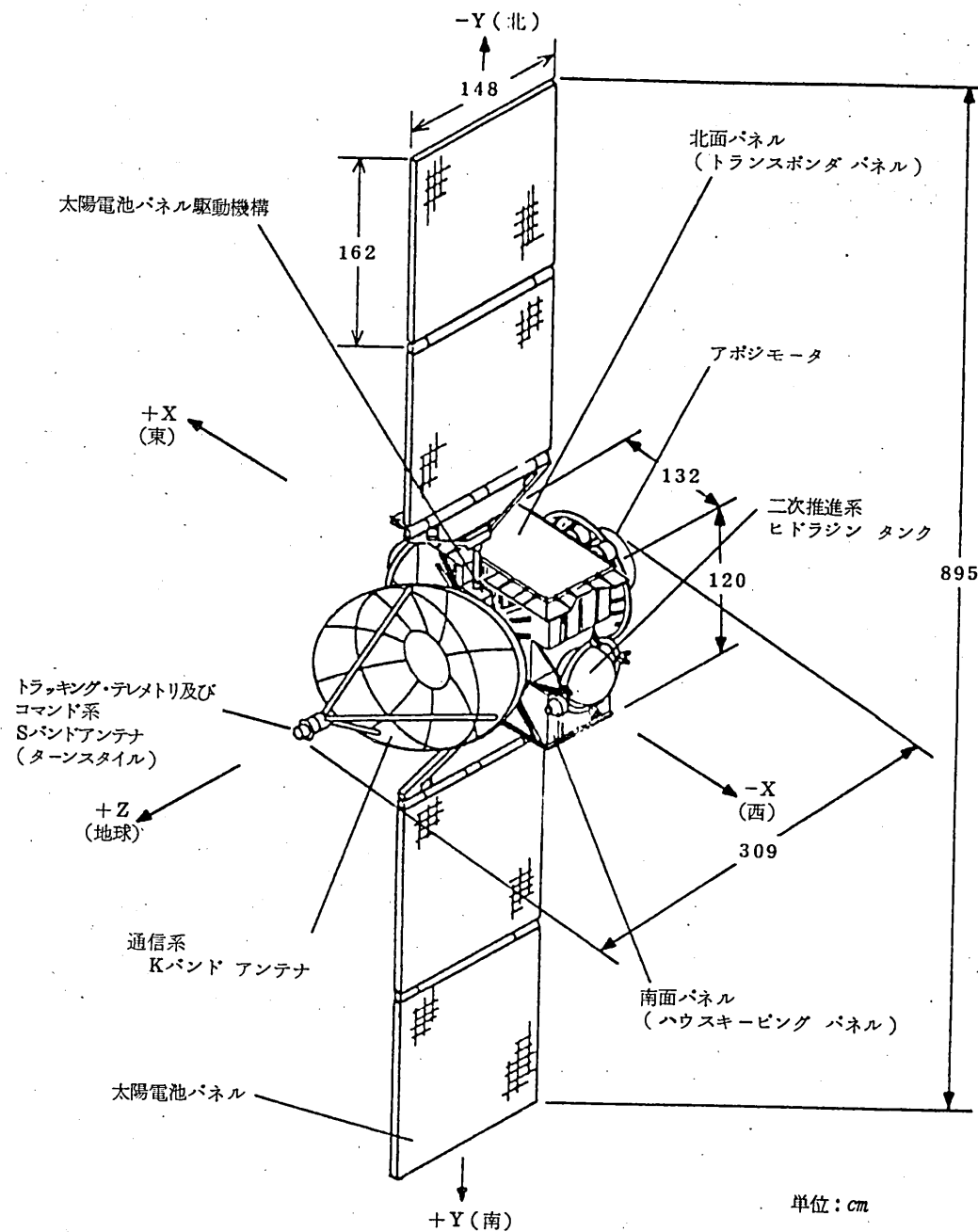


図1 BSの外観図 (静止軌道上)

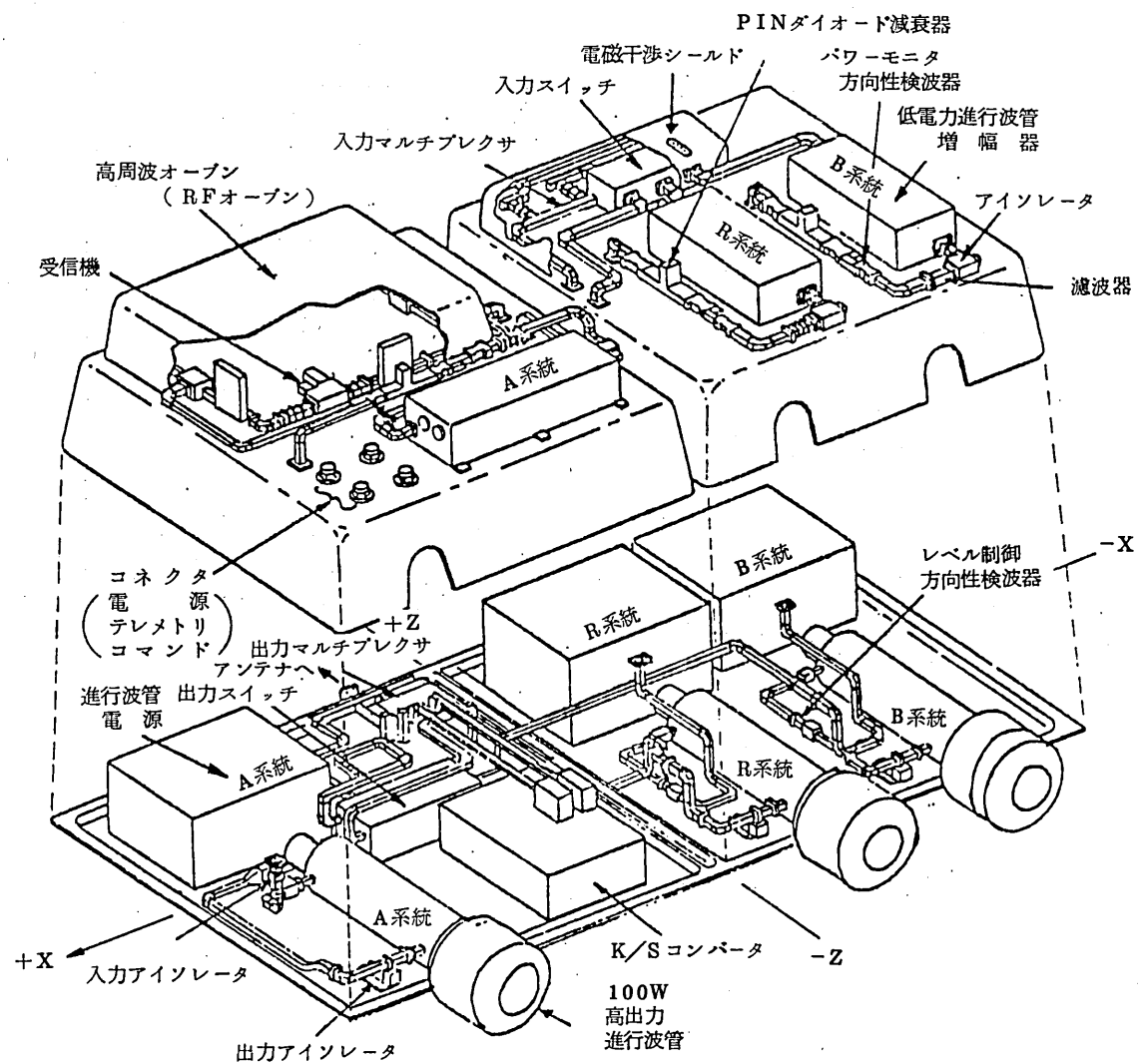


図2 BSのトランスポンダの構造

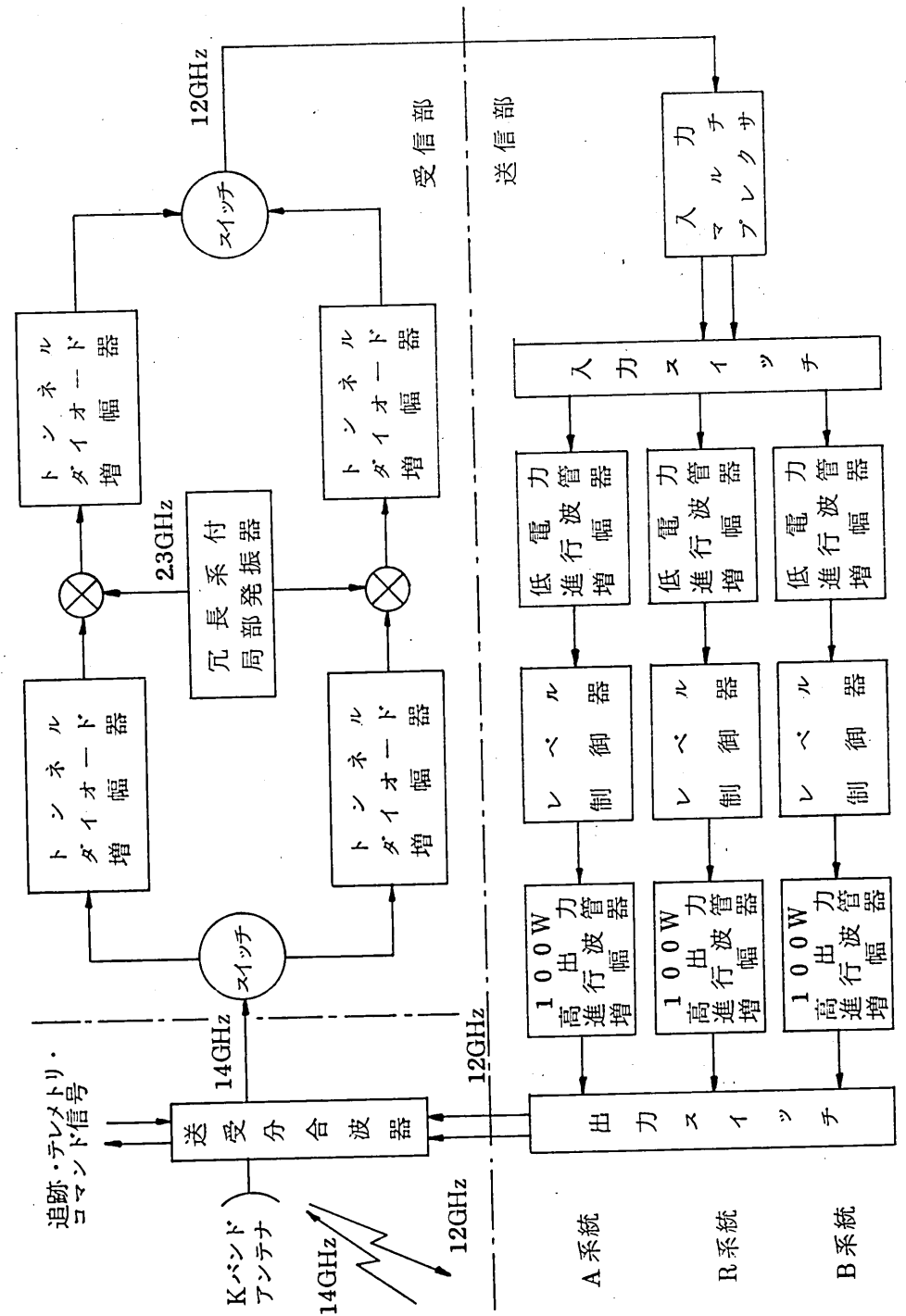


図3 トランスポンダの構成

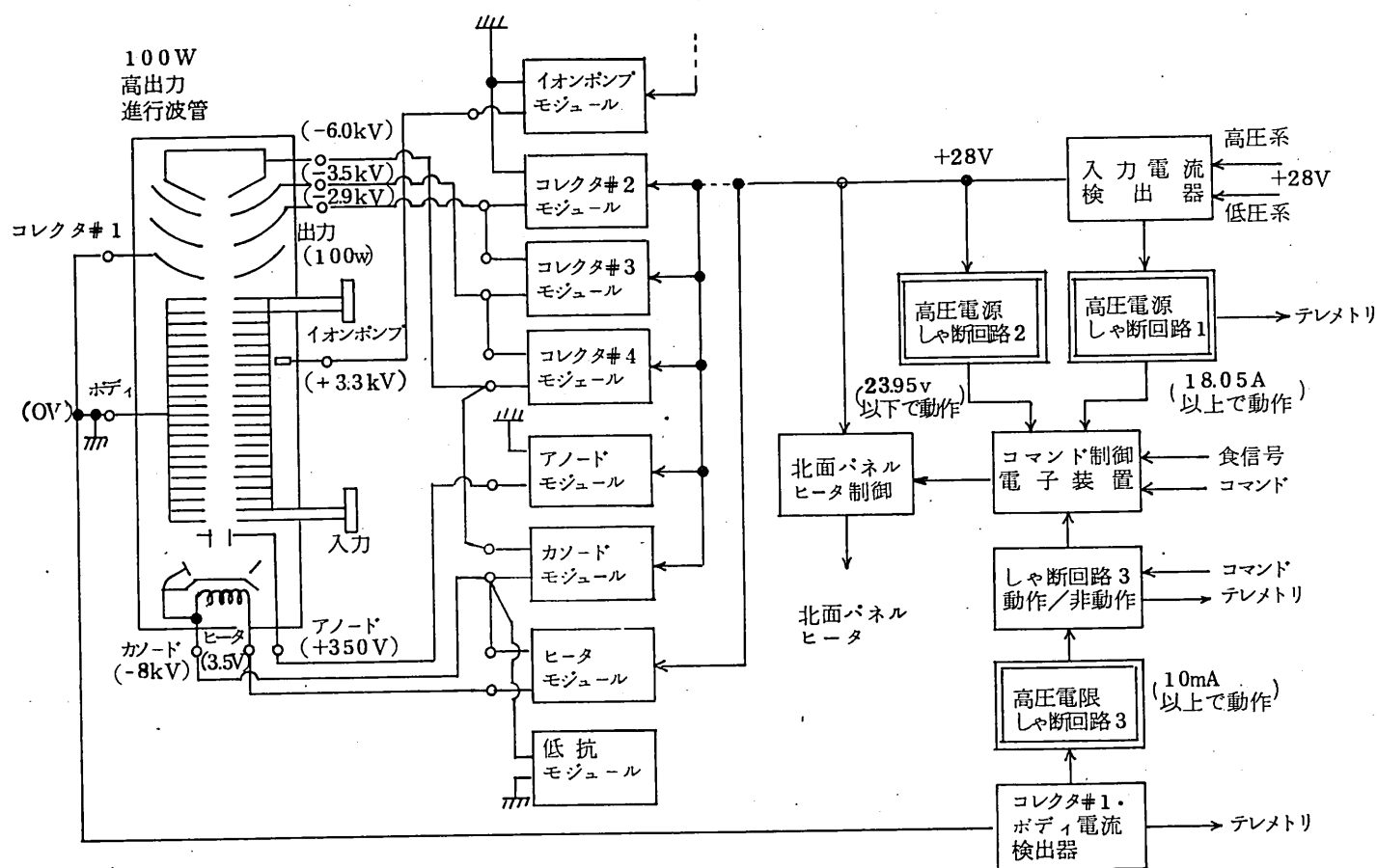


図4 進行波管・高圧電源系統図

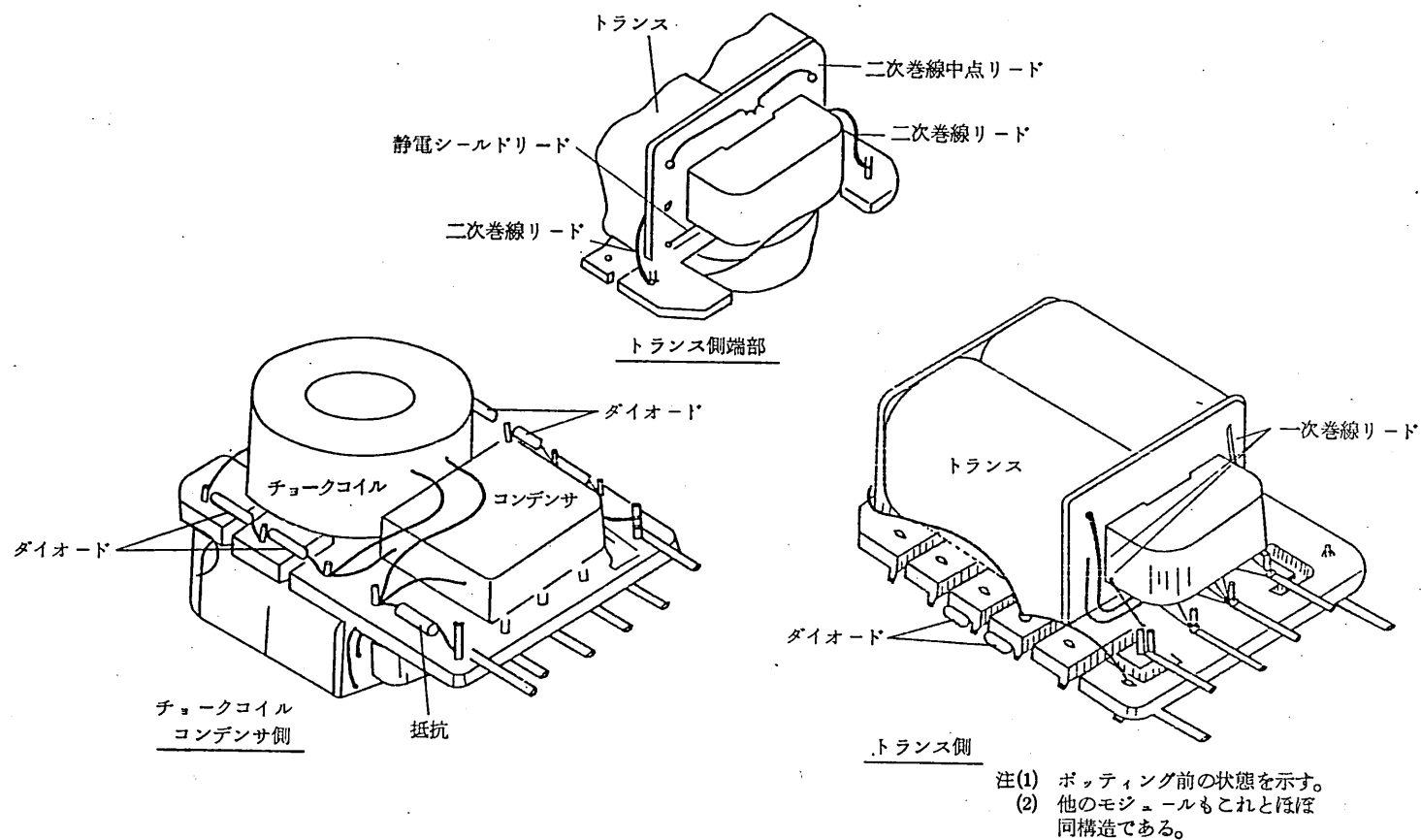


図5 高圧モジュール（コレクタ#2用）構造概念図

実験用中型放送衛星（BS）のトランスポン
ダに生じた不具合の原因究明及び今後の対策
について

昭和55年9月24日
宇宙開発委員会 決定

1. 昭和53年4月に打ち上げられた実験用中型放送衛星（BS）のトラン
スポンダに生じた不具合について、その原因を究明し、今後の対策につい
て審議検討を行うものとする。
2. このため、原因究明及び今後の対策に係る技術的事項について、第四部
会において調査審議を行うものとする。
この調査審議は、昭和55年10月末までに終えることを目途とする。

宇宙開発委員会第四部会構成員

昭和55年11月
（50音順）

部 会 長	佐 貫 亦 男	日本大学理工学研究所顧問
部会長代理	内 田 茂 男	名古屋大学工学部教授
専 門 委 員	秋 葉 鏖二郎	東京大学宇宙航空研究所教授
	大 島 耕 一	東京大学宇宙航空研究所教授
	栗 原 芳 高	郵政省電波研究所長
	五 代 富 文	科学技術庁航空宇宙技術研究所主任 研究官
	小 林 繁 夫	東京大学工学部教授
	中 込 雪 男	国際電信電話株式会社取締役
	長 洲 秀 夫	科学技術庁航空宇宙技術研究所 宇宙研究グループ総合研究官
	林 友 直	東京大学宇宙航空研究所教授
	*平 井 正 一	宇宙開発事業団理事
	*平 木 一	宇宙開発事業団理事
	前 田 弘	京都大学工学部教授
	虫 明 康 人	東北大学工学部教授

注) *印の専門委員は、今回の調査審議については、説明者として参加
した。