放送局における送信用電子デバイスの保安全管理

正会員 小 野

功†

放送局における電子デバイス、特にここでは送信用デバイスの動向を展望し、最近の半導体素子および固体化機器の開発状況ならびに電子管と半導体素子の役割分担について記述する。さらに最近の電子管の問題点と対策状況、および電子デバイスの信頼性管理について NHK における実例をもとに述べる。

1. ま え が き

我が国の放送は半世紀におよぶ歴史の中で国民生活の中に着実にとけこみ、報道、文化、教育、娯楽等の面で重要な役割をはたしてきた。

最近になって特に災害時の情報確保等、放送に寄せる期待はますます強くなってきている。このため、良質の放送を提供するために放送網の拡充とメディアの多用化がはかられてきた。

ちなみに 1979 年末現在では、NHK、民放を含め我が国の放送局数はテレビ、ラジオ、FM 放送を含め、11,000 局の多くに達している。これらの放送設備は今や短時間の故障も許されず、設備を維持・管理するために絶大な努力が払われている。

諸設備の中で放送機は、電波サービスを左右する重要な装置であり、従来から高信頼化と特性の改善が着実に進められてきた。特に放送機に使用される電力用デバイスは、放送機の信頼性や性能に直接大きな影響を与えるものである。

放送用電力デバイスは、かつて大部分が電子管（送信管）であったが、近年、半導体素子の著しい進歩に伴う高周波大電力素子の開発により、電子管の分野にも進出し、比較的高電力の段にも使用されるようになってきている。

最近の放送機では、電力段までは半導体素子が使用され、高周波大電力段部分のみが技術的、経済的な優位性から送信管が使用されるようになってきた。このように、半導体素子と送信管との役割分担が明確になってき

たことが、近年の放送機の技術における大きな特徴である。

一方、装置から見ると、同一放送機の中で半導体素子と送信管が混在使用されることになり、そのため全真空管式の放送機に使用する送信管に比較して一段と高い信頼性と性能（高利得、高能率等）が要求されてきている。

以下に、送信用デバイスを展望する中で半導体素子と電子管との信頼性の違いを考察し、最近の放送用半導体デバイス、および固体化機器の開発動向などを紹介する。さらに、半導体素子の使用上の留意点や最近の送信管の問題点と対策、および管理手法の一例について NHK の実例をもとに述べる。

2. 送信用デバイスの展望

2.1 放送機用送信デバイスに要求される特性

放送機に使用される電力用デバイスは、連続運転が要求されて比較的高電力であり、山頂など使用環境が悪いなどの苛酷な条件の中でも高い信頼性が要求される。このことから、送信デバイスとしては次のような特性が必要である。

- (1) 故障率が小さく信頼性が高いこと (MTTF が大きい)。
- (2) 必要で充分な特性が安定に得られること (温度特性、振動に強い)。
- (3) 建設、運用コストが安いこと。
- (4) 補給が長期にわたって確保されること。

以上の要求を満たすデバイスとして、以前は送信管が使用されてきたが、最近は半導体素子が大幅に使用されて、これに代りつつある。

2.2 送信用デバイスの変遷

- (1) 半導体素子と送信管の信頼性考察

半導体と電子管は、それぞれ相反した特性をもち、そ

† NHK 技術本部放送網施設部
 "Preventive Maintenance for High-Power Broadcasting-use Transmitting Devices" by Isao Ono (NHK Engineering Headquarters, Tokyo)

れが現在の放送機の中での役割分担を決定づけている。

(A) 送信管の主な性質

- (a) カソード物質の蒸発によるエミッション低下を生じ、摩耗形部品で、寿命が短い。
- (b) ヒーターやプレートなど高温動作部があり、熱ストレスを受けやすい。
- (c) 構造上機械的に弱い。
- (d) 保守、管理に手間がかかる。
- (e) 高電力のもの（プレート損失 10～500 kW）が得られる。
- (f) 高電圧小電流動作である。

(B) 半導体素子の主な性質

- (a) 摩耗部分がなく、比較的長寿命である。
- (b) 小形軽量である。
- (c) 過負荷、過電圧、過電流に弱い。
- (d) 高周波大電力デバイスの製造が困難である。
- (e) 低電圧大電流動作である。
- (f) 比較的高価（Cost/W が大きい）である。

(2) 送信管と半導体素子の役割分担

放送機の高い信頼性を確保するため、送信管および半導体の特徴を生かし、弱点をおぎなう放送機の設計が実施されてきている。

送信管は、比較的高電力を扱う大電力ラジオや、テレビ、FM 放送機などの終段部に使用され、半導体は中電力段以前に使用されている。

図 1 に、NHK のテレビ基幹放送所で使用されている放送機の送信管、半導体の使用数、および MTBF の年度推移を示す。

図からわかるように、全真空管装置（1965 年までに製造されたもの）に比較して、送信管と半導体の役割分担が明確となった 1975 年以降、信頼度評価の著しい改善が見られる。

今後のデバイスの方向は、この役割分担の中で送信管、半導体の信頼性をいかに高めてゆくかにかかり、この点を考慮して半導体の高周波、高電力指向がさらに進められ、半導体の役割分担領域が送信管の分野に拡大して行くことになるであろう。

図 1 テレビ放送機用送信デバイスの推移と信頼性評価 (MTBF)

3. 半導体デバイス技術の放送機に対するインパクト

3.1 半導体デバイスの開発状況

(1) 電力用半導体素子の条件

- (A) 高耐圧……降伏電圧が高く、2 次降伏に強いこと。
- (B) 飽和電圧、および ON 抵抗が小さいこと。
- (C) 遮断周波数特性が良いこと。
- (D) スwitching 特性が良いこと。
- (E) 電流増幅度、または g_m が高いこと。

これらの条件は、それぞれ相反する事項が多く、これらをいかにクリアーするかが電力用半導体開発のポイントとなっている。そのため種々の製造技術が開発されてきた。

(2) 製造上の開発の要点¹⁾

- (A) 内部電力損失の低減、高耐圧化……三重拡散、プレーナ形
- (B) エミッターでの電流集中の防止……オーバレイ形、メッシュ形、フローティングエミッター形、リングエミッター形
- (C) Switching 特性の高速化（多数キャリアの利用）……静電誘導形トランジスタ (SIT)²⁾、MOS 電界効果トランジスタ (MOSFET)³⁾ (GaAs FET)

(3) 開発状況

電力用半導体デバイスの主な年度別、出力、周波数別の開発状況を図 2 に示す。

- (a) 1～10 MHz 帯……コレクター損失 1 kW ものデバイスも開発され、電源部スイッチングレギュレータモーター制御に利用されている。
- (b) 50～100 MHz 帯……中波・短波放送機、FM・UHF-TV 放送機用、PC=200W 級の MOST や SIT が開発されてきている。
- (c) 500～1 GHz 帯……UHF-TV や SHF-STL 用

図 2 電力用半導体デバイス開発状況

の、許容電力数十Wを有するオーバレイメッシュバイポーラトランジスタや高速性を有する GaAs FET が実用化された。

(d) 5~10 GHz 帯……STL 用, FPU 用, 衛星用などの GaAs FET の開発が進んできた。

この図からも高速化, 大電力化, 高集積化が進められていることがわかる。

3.2 高周波電力用 MOS FET の開発, 実用化⁴⁾

MOS FET は, スイッチング速度が速く電圧制御素子であること, 温度特性が負であるなど, 放送用デバイスとして有望であったが, 耐圧が低く小信号素子であるため高耐圧化の研究開発が進められた。今日ではドレイン・ソース間耐圧 400V, ドレイン電流 8A の素子も実用化されている。高周波電力用 MOS FET の構造の例を図 3 に示す。耐圧を高めるためドレイン付近の電界分布の均一化をしている。

バイポーラトランジスタと FET の特徴を比較すると表 1 のようになり, 安全動作領域 (ASO) が広く有利である。周波数特性の例を図 4 に示す。これから中短波はもとより VHF 帯の FM や TV にも実用できることがわかる。

3.3 放送機の固体化のメリット

(1) 信頼性の向上

- (a) 素子単体の信頼性が高い。
- (b) 素子の多数並列動作で冗長構成である。
- (c) 規格化, 標準化, 量産化が図られる。

(2) 保守性の改善

- (a) 故障修復時間が改善される。

(1) シールドベース MOS FET

(2) オフセットゲート MOS FET

図 3 MOS FET 素子構造

図 4 電力用 MOS FET の周波数特性

表 1 npn トランジスタと比較した MOS FET の特長

項 目	nnp トランジスタ	MOS FET	備 考
並 列 接 続 性 (電流 hogging)	ベース電流 hogging があるため, バラスト抵抗を入れる必要がある。 並列接続本数に大きな制限がある。	電流 hogging がないため, 多数のトランジスタを並列接続できる。	下図のような回路で, V_{BE} の小さいトランジスタに I_B が流れ, V_{BE} の大きいトランジスタに I_B が流れない現象をいう。
温 度 特 性	正の温度係数 温度上昇とともに, コレクタ電流が増加するため, 温度安定性が劣る。	負の温度係数 温度上昇とともにドレイン電流が減少する。 温度上昇に対して強い。	npn トランジスタは正の温度係数を有するため, さらに温度が上昇する。
2 次 降 伏	コレクタ電圧, コレクタ電流が増加するとともに, 電流が一部分に集中して熱暴走を起こし, ASO が制限される。	温度特性が良好であるため, 接合温度 150℃ まで使用できる。	
キ ャ リ ア 蓄 積	キャリアがベース内に蓄積されるため, いわゆる Tstg が存在し出力パルス幅が変化する。	キャリア蓄積がなく, 出力パルス幅が変化しない。	出力パルス幅変化があると, 負荷変動によってトランジスタが破壊する。

図5 固体化放送機実用開発年度推移

- (b) 特性変動が少ない。
- (c) 冗長系構成がとりやすい。
- (3) 中電力級以下の放送機では小形，軽量となる。
- 3.4 NHK における全固体化放送機の実用化開発
- (1) 開発，実用化の年度推移⁵⁾

図5に，NHK で実用化開発した全固体化放送機の年度推移を示す。VHF テレビ放送機では，すでに全固体1kW 放送機が実用化され，ラジオ放送機では，MOS-FET を使用した10kW の実用化試作機の製作を完了してテスト中である。FM 放送機では，バイポーラトランジスタを使用した1kW 機が実用化され，MOS FET を使用した1kW ユニットの実用化試作機も動作テスト中である。

一方，SHF 帯では，GaAs FET を使用した全固体化した5W形 STL も実用化され，さらに7GHz 帯10W形 TWT の固体化置替えなどが，検討されている。

- (2) 信頼性改善のための放送機設計，運用時の留意点⁶⁾

放送機の信頼性向上のために設計時に組み込まれる固有信頼性と，運用方式により信頼性を上げるようにする，使用信頼性の両者を考慮する必要がある。これまで固体化放送機を設計運用するときの留意点は，次のとおりである。

- (a) 電力効率の良い動作点を選択する（高周波部D級直線増幅 AB 級）。
- (b) デレーティングして使用する（電源電圧最大定格の80%，最大許容ジャンクション温度110℃以下）。
- (c) 過負荷，過電圧，過電流に対し保護機能を持つ。
- (d) 高温多湿地区での結露防止のため，冷却風の室内循環方式を採用する。
- (e) 中波放送機の雷害対策のため空中線基部整合回

路の耐雷化，およびサージプロテクター機能を具備する。

- (f) 広帯域無調整化（特性変動の低減）する

4. 送信管の現状と信頼性改善対策⁷⁾

4.1 送信管の現状

製造方法の改善（メッシュカソード・セラミック化，フォトリソグラフィや放電加工の採用）や材料，各種処理の安定化などにより，送信管の信頼性は改善されてきている。しかし，最近の送信管は半導体素子とそれぞれ役割分担をして同一放送機内で混在使用されることから，送信管に対するニーズが次のように変わってきている。

- (1) 高利得化

中・大電力放送機では，終段のみ送信管を使用し，前段までは，固体化される場合が多く，固体化部分の負担を軽くすることや，総合効率の向上を図るため，送信管の高利得化が図られ，その結果，最近の送信管には高 g_m 4極管が採用されている。

- (2) 運用期間故障率の低減

固体化機器と混在使用される場合，送信管の故障率が放送機の信頼性を決定づけることになる。運用期間内の故障率を可能な限り小さくするためには，初期不良の改善がきわめて重要となる。

- (3) 特性のばらつき

固体機器の無調整，広帯域化に伴い，送信管の特性のばらつきを放送機の調整により補正することが困難になってきている。

4.2 最近の送信管の問題点と対策

- (1) 高 g_m 送信管

- (A) 電極変形

高 g_m を得るために，カソード・グリッド間の電極間隔が狭く設計されている。図6に高 g_m 管の電極構造の一例を示す。そのため，わずかな電極の変形でも機器の動作に影響する。

- (a) バイアス電圧変化とリモートカットオフ化…

図6 高 g_m 管電極寸法例

写真 1

…動作点変動，直線性劣化

- (b) G-K 間の電極タッチ……起動時や輸送時に生じやすい。

電極変形の実例を写真 1 に示す。

〔改善対策〕

送信管製造時のフィラメント処理の最適化，残留機械的ストレスの処理，フィラメント温度の適正化を図る。

(B) グリッドからの電子放射

高 g_m 化するためグリッド電極がカソード電極へきわめて近い場合，カソード材がグリッドに蒸着され，カソードの輻射熱でグリッドからエミッションを生じる機会も多い。

- (a) グリッドに逆電流が流れ，バイアスが浅い方向に動く。
(b) グリッドリーク抵抗が高い場合に生じる（固体化大振幅電圧増幅器では，負荷抵抗を高くする例が多い）。

〔改善対策〕

- (a) グリッドエミッション抑制剤の改善，処理の改善。
(b) グリッド側直流インピーダンスの低減。

(2) 特性のばらつき

例として，FM 用送信管の E_g-I_g 特性を図 7 に示す。この送信管をセットに実装した場合，B 社より A 社の方が同一励振電圧でグリッド電流が多く流れ，グリッドリーク抵抗によりバイアスが深くなって出力が低下し，製造メーカーが異なるたびにバイアスを調整しなければならない。

〔改善対策〕

特性の均一化を図るとともに，例えば出力容量は標準キャビティによる同調試験を採用し，電極間容量の均一化を図るなど規格改善を図った。

図 7 E_g-I_g 特性のばらつき

(3) 環境対策

強制空冷管の場合，冷却空気の汚染により電極，ソケットおよびキャビティの接触不良や，発錆を生じ，送信管の寿命や特性に影響を与えていた。

〔改善対策〕

強制空冷送信管のプレート部にフランジを装着した送信管を開発した。改良管を写真 2 に示す。この送信管を，図 8 に示す改良形キャビティに実装し，大風量が必要とするプレート部とグリッド・ヒーター部を分離し，グリッド・ヒーター部に従来以上に浄化度の高いフ

写真 2

図 8 改良形キャビティ

図9 放送機出力と使用送信管(陽極損失)

フィルタを装備して、少風量であるが汚れの少ない冷却風を確保した。

4.3 管種統一

装置の固体化にともない、中電力級の送信管の使用数は減少の一途をたどっている。一方、大電力送信管では、単管当りの高利得化および高 g_m 化で設備毎の使用数は減少している。このような状況の中で、信頼性の高い送信管を確保するためには、出力別、周波数別に管種統一をし、生産性を確保しながら信頼性の良いものを求めることが必要である。

従来は技術の進歩に伴って種々の送信管が開発使用されてきた。しかし、今日では放送局数に限りがあり、市場が限られているため、品種の統一は、メーカーにおける生産性の向上やコストの低減の他に、ユーザーにおいても信頼性、寿命、保守性等の面で有利である。このような問題に対処するため、図9に示すような方向で検討中である。

5. 送信用デバイスの管理手法

信頼性の管理のためには、設備の運用データの収集と分析・評価結果の運用面、設計面へのフィードバックの一連の活動が必要となる。図10にNHKにおける送信管の管理フローを示す。

主な実施項目および具体例は次のとおりである。

5.1 フィールドデータ収集⁸⁾

- (1) 送信管のフィールドデータは、管に添付されたホールソートカード(送信管整理カード)に、現場での運用状況や、障害データを記載し、故障発生のとど管理担当あて送付する。
- (2) 半導体、送信管も含め部品レベルのデータは、現場で保守や修理を実施した場合に必ず記録する業務記録票(OCRカード付)により収集する。図11に、業務記録票によるデータ収集のフローを示す。

図10 送信管の管理情報の収集

図11 使用情報収集の流れ図(NHK 無人局情報収集の例)

- (3) その他、半導体使用ユニットのメーカーでの修理報告書も、有効なデータ源となっている。

5.2 データ処理、分析

- (1) 原因別、機器別データの分析

業務記録票、ユニット修理票から機器別、原因別に電算機により故障分析するとともに、データを蓄積し、そのデータを基に、経年劣化部分や異常部品の資料を得る。図12に、テレビサテライト装置に使用しているトランジスタの経年劣化のデータを示す。正常なトランジスタと比較し、5～6倍の故障率となっている。

図 12 トランジスタの不良状況

(2) 系統的なデータ分析¹⁰⁾

FTA (Fault Tree Analysis) 手法を応用したデータ分析を利用している。これにより故障の要因を原因、条件など幅広く検討し、信頼性向上のため効果的で経済的な対策ができる。なお、デバイスのデータ分析に使用する場合、現場のフィールドデータが基礎となるため、現象別の故障率の絶対値を算出することは困難であり、相対値を使用している。

この方法により、障害の要因の全体を系統的に見られることや、第三者でも理解し易く、検討に参画することができる利点を持っている。

ラジオ大電力放送所では変調用送信管の特性に変化が

あると、これに起因して動作点が変動する。図 13 にこの変動を FTA を応用して分析した例を示す。

(3) ワイブル確率紙による寿命の分析

種々の故障発生モードが混在し、偶発故障と摩耗故障とが発生する。送信管の障害モードの判定にはワイブル確率紙が有効であることが知られている。

ホールソートカード(送信管整理カード)のデータを基に、毎月管種別の累積故障率を電算機処理により出力し、送信管の寿命の確認をスピードアップしている。図 14 に、同一の送信管種で、生産年度と生産数が異なる送信管のワイブル確率紙による分析結果を示す。生産数が多い場合は、寿命が安定しているが、生産数が少なくなると信頼性が低下していることがわかる。

5.3 製品のユーザーによる品質評価

(1) 電子管の場合

納入試験時、各種性能試験に加えてスクリーニングを

図 14 ワイブル確率紙による分析

(注) 数値は相対故障率

図 13 FTA による障害分析

図 15 スクリーニング試験

実践することとした。特に信頼性改善効果の評価および重要かつ多量製造管のロットチェックに実際の使用条件に合った方法でスクリーニングを行っている。ラジオ送信管での実例を図 15 に示す。

(2) 半導体素子の場合

放送用として、多量に使用する可能性のあるデバイスについて、使用前に十分な信頼性があるか、信頼性評価試験を実施している。主な試験項目は、温度サイクルテストや、高温逆バイアス試験などである。

6. む す び

最近の送信デバイスの動向と保全管理の実例を示した。今後、半導体素子の高電力、高速化はますます進展し、送信管の分野へ進出することになると思われる。一

方、送信管は大電力送信機の終段部分に限って使用され、送信管と半導体素子の役割分担がより明確になるであろう。このため、送信管に対する信頼性要求は、さらに厳しくなるとともに、より有効な信頼性管理手法を確立しなければならないことは論を待たない。

また、送信デバイスの信頼性は、デバイス単体の信頼性も重要であるが、使用する回路技術により左右される。このため、回路とデバイスの調和のある使い方も必要である。

最後に、日頃御指導をいただいている技術本部放送網施設部の近藤担当部長、ならびに池田技師に厚く御礼申し上げます。

(昭和 56 年 5 月 29 日受付)

【参 考 文 献】

- 1) 三浦俊二：パワー・トランジスタ，エレクトロニクス，24，14 (1979) 1267
- 2) 小谷ほか：高耐圧高出力静電誘導トランジスタの試作及びその動作特性，信学大全 (1979) 48
- 3) 上川，井上：パワー MOS FET の特徴とその応用，電子技術，22，2 (1980) 95
- 4) 井上勝彦：電力増幅用 MOS FET を使った HF/VHF 電力増幅器，信学大全予，437 (1980) 2-208
- 5) 上中田勝明：送信技術の動向，テレビ誌，35，4 (1981) 260
- 6) 高木ほか：送信設備，テレビ誌，35，4 (1981) 281
- 7) 小野，井上：放送機用送信管の信頼性管理と対策，信学会信頼性研究会，R 80-10 (1980) 1
- 8) 宇佐，井上：放送用送信管の保全管理，日科技連第 8 回信頼性報文集 (1978) 409
- 9) 吉本英明：FTA (Fault Tree Analysis) とその応用，電学誌，96，6 (1976) 523
- 10) FMEA, FTA の解説，日科技連機械系信頼性部会 (1978) 60