SIT を使用した大電力中波放送機の開発

正会員 宮崎 徹郎[†], 正会員 山口 竹彦[†], 正会員 中 尚[†]
 正会員 那須 嘉彦[†], 正会員 生 岩 量 久[†]

Development of SITs Equipped High Power Medium-wave Radio Transmitter

Teturo Miyazaki[†], Takehiko Yamaguchi[†], Hisashi Naka[†]
 Yoshihiko Nasu[†] and Kazuhisa Hayeiwa[†]

Abstract : Design considerations for highpower transmitters with SITs are described. A high-frequency power SIT (Static Induction Transistor) is developed for transistorization of 20-kW medium-wave radio transmitters composed of 5-kW power amplifiers and 10-kW modulators.

Optimum numbers of parallel-connected SITs and optimum operating voltage are determined from drain-efficiency-maximizing theory.

A transmitter with a total efficiency of 65% and excellent characteristics is constructed.

1. ま え が き

中波固体化放送機には、電力増幅素子として MOS-FET が使用されているが^{1)~3)}、大電力放送機を信頼性と経済性を満足させて固体化するためには、MOS-FET よりもさらに高耐圧、大電流で動作するデバイスが必要である。

このため、高周波大電力 SIT⁴⁾⁵⁾ (Static Induction Transistor) を開発し、これを用いて出力 20 kW の中波ラジオ放送機を固体化した。

20 kW 放送機は、出力 5 kW の電力増幅器 6 台と出力 10 kW の変調増幅器 3 台で構成し、ユニットの設計にあたっては、ドレーン効率が最大となるように電源電圧、SIT 並列接続個数を設定するなど、最適化設計を行った。

この結果、電力増幅器のドレーン効率は 86% 以上、放送機としての総合効率は 65% 以上を得るなど、高効率、高性能な放送機を実現できた。

本文では、これら SIT 式大電力放送機の基本設計法、および得られたデータについて記述する。

図 1 SIT の構造断面
Structure of SIT.

キーワード：大電力中波放送機、最適化設計、高効率、SIT

1990 年 10 月 24 日受付、1990 年 12 月 14 日再受付

[†] NHK 技術局送信技術センター (〒150-01 東京都渋谷区神南 2-2-1, TEL 03-5478-5391)

[†] Transmitting Engineering Center, NHK (2-2-1, Jinnan, Shibuya-ku, Tokyo 150-01, Japan)

表 1 SIT の性能 (THF-51 N)
Performance of the SIT.

ゲート・ドレイン電圧	600 V
ゲート・ソース電圧	70 V
ゲート・ソースオフ電圧	-30 V
ドレイン電流	30 A
電圧増幅率	20
最大損失電力	400 W
熱抵抗	0.45°C/W
オン抵抗	0.6 Ω (at 25°C)
入力容量	5000 pF
出力容量	320 pF (at 170 V)
帰還容量	800 pF

2. 高周波 SIT

SIT は、図 1 に示すようにソース、ドレインが縦型に配置され、その間に多数のゲート電極を埋め込んだ構造となっている^{4)~5)}。

このように電流の流れるチャンネル部分を多数もつマルチチャンネル型のため、大電流化、内部抵抗（オン抵抗）の低減が容易である。また、縦型構造のため高耐圧化も容易である。

従来型大電力 SIT の動作周波数は、数 100 kHz 程度であったが⁵⁾⁶⁾、今回、(株)トーキンと共同で中波帯まで使用可能な高周波 SIT を開発し、放送機に使用した。従来型 SIT に比べて改善した点は以下のとおりである。

- (1) 高周波化：ゲート長を短くし、ゲート抵抗を小さくするとともに、ソース層不純物濃度を低くして入力容量を低減させ高周波化を図った。これにより 50 ns のスイッチング速度を得た（従来は 200 ns 程度）。
- (2) オン抵抗の低域：従来は 1.5 Ω 程度であったが、ゲートの不純物濃度を高め、0.6 Ω に低

減させた。

表 1 に開発した SIT の仕様を示す。

3. ユニットの設計

3.1 基本設計方針

図 2 に放送機の系統、図 3 に 10 kW 電力増幅部の回路構成を示す。

各ユニット（電力増幅器、変調増幅器）の設計において特に留意した点は以下のとおりである。

- (1) 高圧・低電流動作（高インピーダンス設計）

高耐圧の SIT を採用し、電源電圧を高めるとともに、最も負荷インピーダンスが高いブリッジ型 SEPP

図 3 10 kW 電力増幅部の回路構成
Circuit configuration of the 10 kW transmitter section.

図 2 放送機の系統
Schematic diagram of the transmitter.

表 2 電力増幅器の設計仕様
Design specifications of the power amplifier.

出力電力	5 kW
周波数範囲	531~1602 kHz
負荷インピーダンス	4 Ω
ドレーン効率	85% (at 1 MHz)
電力利得	12 dB以上
電源電圧	170 V
SIT 並列接続個数	10
冷却方式	強制冷却
大きさ, 重量	150×580×820 mm ³ , 38 kg

回路を採用し, 損失と過渡電圧を低減させた.

(2) ドレーン効率最大法による最適設計

最大ドレーン効率が得られる最適な電源電圧, SIT 使用個数を決定し, 効率の向上を図った.

(3) 放熱設計

大型の放熱器を用いて放熱器自体の熱抵抗を小さくするとともに, 冷却用送風機の風速を大きくして温度上昇を抑え, デバイスの ASO を充分確保した.

3.2 電力増幅器の設計

(1) 仕様

電力増幅器の設計仕様を表 2 に示す. 周波数 1 MHz で出力電力が 5 kW のとき, ドレーン効率が 85% 以上, 電力利得 12 dB 以上が得られるものとする.

表 2 の仕様を満足させるためには, 高耐圧で高速の SIT を採用する必要がある, 表 1 の仕様を有する SIT を採用した.

(2) 電気設計

(a) 出力電力と効率

ブリッジ型 SEPP 回路の出力電力 (P_0), ドレーン効率 (ηD) は次式で表される⁷⁾.

$$P_0 = (8E^2\eta D)/(\pi^2 RL) \quad (1)$$

$$\eta D = \frac{\sin \theta_0 + \sqrt{(\sin \theta_0 / \theta_0)^2 - (\pi^2 P_0 R_{on}) / \{[(4fNC_0 E^2)/P_0] + 1\} / (NE^2)}}{[2 \times \{[(4fNC_0 E^2)/P_0] + 1\}]} \quad (2a)$$

(2a) 式は SIT の出力容量 (C_0) が電源電圧に対して一定と仮定している.

負荷インピーダンスを一定とし, 電源電圧を変化させた場合のドレーン効率は, C_0 を電源電圧の関数とすれば次式で表される⁷⁾.

$$\eta D = \sin \theta / \theta - \{(2R_{on}) / (NRL) + (PfRL\pi^2) / (8E^2)\} \quad (2b)$$

(2b) 式において, $Pf = (24/10)C_{j\phi} \sqrt{E_0 + E_\phi} (2E - 3E_\phi)(E + E_\phi)^{2/3} fN + 4fNC_s E^2$ である.

図 4 電源電圧に対するドレーン効率
Drain efficiency in terms of the supply voltage.

図 5 SIT 並列接続個数に対するドレーン効率
Drain efficiency in terms of number N of SITs.

ここで, E : 電源電圧, RL : 負荷インピーダンス, f : 周波数, N : 1 ブランチの SIT 並列接続個数, R_{on} : SIT のオン抵抗, C_0 : SIT の出力容量, θ_0 : スイッチング過渡期におけるドレーン電圧とドレーン電流の重なり位相角 ($= 2\pi f\tau_0$), C_j : ある基準電圧 E_0 のときの SIT 単体のドレーン接合容量, C_s : 浮遊容量, E_ϕ : 拡散電位.

(2a) 式において

$$\partial \eta D / \partial N = 0 \quad (3a)$$

$$\partial \eta D / \partial E = 0 \quad (3b)$$

とすれば, ドレーン効率が最大となる N , E の値が求められる.

図 4 にドレーン効率対電源電圧の一例を示し, 図 5 にドレーン効率対 SIT 並列接続個数の一例を示す. 上記例では, 最適定数は $N = 10$, $E = 145$ V となり, このときのドレーン効率は 87.5% である.

ここで, 周波数は 1 MHz, $R_{on} = 0.75 \Omega$, $C_0 = 320$ pF, $\tau_0 = 50$ ns と仮定している.

一方, 最適負荷抵抗 $R_L(\text{opt})$ は (1) 式を変形して次式によって求められる.

$$R_L(\text{opt}) = (8E^2\eta D) / (\pi^2 P_0) \quad (4)$$

(4) 式において $E = 145$ V, $\eta D = 87.5\%$, $P_0 = 5$

図 6 SIT の等価回路
Equivalent circuit of SIT.

kW を代入すれば $R_L(\text{opt})$ は約 3Ω となる。

実際の設計では、負荷インピーダンスをできるだけ高くすることを考慮し、効率を若干犠牲（約 0.4%）にして $E=170 \text{ V}$ 、 $N=10$ とした。このときの $R_L(\text{opt})$ は約 4Ω となる。

(b) 電力利得と励振電力

電力利得 G_p は励振電力を P_i 、出力電力を P_o とすれば次式で表される。

$$G_p = P_o / P_i \quad (5)$$

(5) 式の励振電力は SIT の入力容量を C_{gs} とすれば図 6 の等価回路から次式で表される。

$$P_i = 4fNC_{gs}V_i^2 \quad (6)$$

ここで、 N : SIT の並列接続個数（各ブランチ）、 f : 周波数、 V_i : ゲート励振電圧（方形波ピーク値）

$N=10$ 、 $f=1 \text{ MHz}$ 、および $V_i=40 \text{ V}$ を (6) 式に代入すれば P_i が求められ、 $P_i=320 \text{ W}$ となる。

このときの出力電力 (P_o) は 5 kW であるから、(5) 式より電力利得 (G_p) は約 12 dB である。実測値も約 12 dB であった。

(3) 放熱設計

出力電力が 5 kW でドレーン効率を 87.1% としたとき、ユニット内で発生する損失 P_L は次式で求められ⁷⁾、 741 W にもなる。

$$P_L = P_o(1/\eta_D - 1) \quad (7)$$

このため、大型の放熱板を強制空冷してデバイスから空気環境への熱抵抗 R_{TH} を充分小さくした。

使用した放熱板の大きさは、縦が 580 mm 、横が 750 mm 、幅が 48.5 mm である。写真 1 に電力増幅器の外観を示す。

SIT 1 個当たりの損失を P_i 、 N をブランチの SIT 並列接続個数、 R_{TH} を SIT 1 個当たりの熱抵抗とすれば、 P_i およびケース表面温度上昇 ΔT は次式で求められる。

$$P_i = P_L / (4N) \quad (8)$$

$$\Delta T = R_{TH} P_i \quad (9)$$

$R_{TH}=0.5^\circ\text{C/W}$ 、 $P_L=741 \text{ W}$ 、 $N=10$ であるから、

表 3 変調増幅器の設計仕様
Design specifications of the modulator.

出力電力	11.8kW 以上
副搬送波周波数	120kHz
負荷抵抗	5Ω
出力電力効率	95% 以上
電源電圧 (E_b)	400V
SIT 並列接続個数	28
冷却方式	強制空冷
大きさ、重量	$250 \times 580 \times 550 \text{ mm}^3$, 35kg

写真 1 電力増幅器の外観
Outside view of the power amplifier.

$P_i=18.5 \text{ W}$ 、 $\Delta T \approx 10^\circ\text{C}$ を得る。実測値は 12°C/W であり、ほぼ一致している。

ケース・接合部間熱抵抗は 0.45°C/W であるため、SIT の接合部温度上昇は約 20°C ($=18.5 \text{ W} \times 0.45^\circ\text{C/W} + 12^\circ\text{C}$) と推測され、全く問題はない。

3.3 変調増幅器の設計

(1) 仕様

変調増幅器の設計仕様を表 3 に示す。出力電力が 10 kW のとき、効率が 95% 以上得られるものとする。デバイスは電力増幅器と同じ SIT を使用した。

(2) 電気設計

(a) 出力電力と効率

変調増幅器の出力電力 (P_m)、出力電力効率 (η_m)、および負荷抵抗 (R_m) は次式で表される⁸⁾。

$$P_m = P_o / \eta_D \quad (10)$$

$$\eta_m = \frac{1 - \{(\tau_m f_s) / 3\} \{ (1 - \alpha) MV_F \} / (\alpha E_b) + \sqrt{\{(\tau_m f_s) / 3 + (1 - \alpha) MV_F \} / (\alpha E_b) - 1}^2}{4 \{ 1 + (f_s N_m C_o E_b^2) / P_m \} P_m R_{on} / [(\alpha E_b^2 N_m)] / [2 \{ 1 + (f_s N_m C_o E_b^2) \} / P_m]} \quad (11)$$

$$R_m = (\pi^2 / 8) R_L(\text{opt}) \quad (12)$$

ここで、 P_o : 電力増幅器の出力電力、 η_D : 電力増幅器のドレーン効率、 f_s : 副搬送波周波数、 E_b : 入

力直流電圧 (変調増幅器), α : PWM 波のデューティ比, M : フライホイールダイオードの直列接続個数, V_F : ダイオードの順電圧降下, N_m : 変調増幅器の SIT 並列接続個数, R_{on} : SIT のオン抵抗, C_o : SIT の出力容量 (一定と仮定), τ_m : スwitchング過渡期におけるドレーン電圧とドレーン電流の重なり時間.

変調増幅器の出力電力 (P_m) は, 電力増幅器の出力電力を 5 kW, 効率を 85% とすれば (10) 式から求められ, 11.8 kW となる. 負荷抵抗 (R_m) は, (12) 式から 5 Ω となる.

また, 電力増幅器の動作電圧は 170 V であるから, デューティファクタ (α) を 0.42 とすれば, 次式から入力電源電圧 (E_b) は約 400 V となる.

$$E = \alpha E_b \quad (13)$$

変調増幅器の効率 (η_m) は, (11) 式から約 97.5% となり低域フィルタ (LPF) 等その他の損失を考慮しても仕様を充分満足する.

ここで, 計算においては $P_m = 11.8$ kW, $N_m = 28$, $f_s = 120$ kHz, $E_b = 400$ V, $M = 1$ とし, $V_F = 1.0$ V, $R_{on} = 0.75$ Ω , $C_o = 320$ pF, $\alpha = 0.42$, $\tau_m = 50$ ns と仮定した.

(b) SIT の並列接続個数

個数を決定する主な要因として, 変調増幅器の負荷が短絡したときに SIT が破壊されないようにすることが挙げられる. SIT の破壊エネルギーは約 20~30 J (実測), 電源の平滑コンデンサに蓄えられるエネルギー (P_b) は, 約 264 J ($P_b = (1/2)C_o E_b^2$, ここで, $C_o = 3300$ μ F, $E_b = 400$ V) であるため, SIT は 14 個以上必要である.

もうひとつの要因は, 素子の温度上昇である.

変調増幅器で発生する損失 (P_{lm}) は次式で求められる⁸⁾.

$$P_{lm} = ((2P_o/\eta D)/(1/\eta_m - 1)) \quad (14)$$

P_o を 5 kW, $\eta_m = 0.95$ (低域フィルタの損失による効率低下等を考慮し, 表 3 の仕様値を採用), $\eta D = 0.85$ とすれば, (14) 式から P_{lm} は 620 W となる.

SIT 1 個当たりの損失 P_{lm} は N_m を SIT の並列接続個数とすれば, $P_{lm} = P_{lm}/N_m$ から求められ, $N_m = 14$ では $P_{lm} = 44$ W を得る.

変調増幅器に使用した放熱板の熱抵抗 (SIT 1 個当たり) は 0.74°C/W であるため, 温度上昇は (9) 式から約 32°C となる. 電力増幅器に比較して温度上昇値が大きすぎるため 28 個並列とし, 温度上昇を 16°C に抑える設計とした. 実測値は 14°C であり, ほぼ一致している.

写真 2 に変調増幅器の外観を示す.

写真 2 変調増幅器の外観
Outside view of the modulator.

このときの入力直流電流のピーク値 (I_m) は, $I_m = P_m/(\alpha \eta_m E_b)$ ⁸⁾ であるから, $P_m = 11.8$ kW, $E_b = 400$ V, $\alpha = 0.42$, $\eta_m = 0.95$ を代入すれば求められ, $I_m = 72.6$ A となる.

このとき, SIT 1 個当たりの電流は, 約 2.6 A となり, 充分なディレーティング値が得られている.

(c) フライホイールダイオード フライホイールダイオードは SIT と同等のスitchング速度をもち, 高耐圧, 大電流のものが要求される. このため, 耐圧 500 V, 許容電流 30 A のものを 4 個並列にして使用している.

使用したダイオードのスitchング速度は約 50 ns であり, 充分な性能が得られている.

4. 性 能

図 7 に電源電圧を変化させたときの出力電力およびドレーン効率の計算値を (1) 式, (2b) 式により求め,

図 7 電源電圧に対する出力電力およびドレーン効率の変化

Output power and drain efficiency in terms of the supply voltage.

図 8 電力増幅器の出力電圧とゲート励振電圧（周波数：1071 kHz）

（上：電力増幅器出力電圧 V：50 V/div
H：0.2 μ s/div
下：ゲート励振電圧 V：10 V/div
H：0.2 μ s/div）

Output signal waveform and gate signal waveform of the power amplifier.

図 9 変調増幅器の出力電圧とゲート励振電圧（周波数：1071 kHz）

（上：変調増幅器出力電圧 V：5 V/div
H：2 μ s/div
下：ゲート励振電圧 V：10 V/div
H：2 μ s/div）

実測値と比較して示す．120～200 V にわたって 85% 以上の効率が得られており，計算値ともほぼ一致している．

写真 3 10 kW 電力増幅部の外観
Outside view of the 10 kW transmitter section.

図 10 放送機の変調波形
Modulation waveform of the transmitter.

図 8 に電力増幅器の出力電圧，ならびにゲート励振電圧の波形を示す．周波数は 1071 kHz，立上がり時間および立下がり時間はそれぞれ約 60 ns である．

図 9 は変調増幅器の出力電圧とゲート励振波形である．ドレーン側からの帰還も少なく良好である．ここで，副搬送波周波数は 120 kHz，ゲート励振電圧のピーク値は 40 V である．

5. 20 kW 放送機としての性能

20 kW 放送機を構成する 10 kW 電力増幅部の外観を写真 3 に示す．ユニット効率が高いため，20 kW 放送機としての総効率は 65% 以上が得られた．

図 10 に変調周波数 1 kHz，変調波 100% における放送機出力波形を示す．変調度 95% でのひずみ率は 0.75% 以下，信号対雑音比 (S/N) は 62 dB 以上であり，良好な特性が得られている．

6. む す び

SIT を用いて出力 5 kW の電力増幅器，出力 10 kW の変調増幅器を開発し，高効率，高性能の 20 kW 中波放送機を実現できた。

本 20 kW 放送機は仙台，広島（第一放送機）において順調に運用されている。

中波放送機への SIT の導入は，信頼性が高く，低コストの 100～500 kW 級ラジオ放送機の固体化を実現するうえで大いに有効であり，出力 100～500 kW 級の放送機を固体化することも経費的にも充分可能であると考えている。

終わりに，SIT および放送機の開発に関係された NHK および(株)トーキン，日本電気(株)の関係各位に深謝する。

〔参 考 文 献〕

- 1) 杉田，生岩：“中波ラジオ 1 kW 固体化放送機システムの開発”，テレビ全大，pp. 197-198 (1980)
- 2) 生岩，河村：“中波 10 kW 固体化放送機”，テレビ全大，pp. 213-214 (1983)
- 3) 池田，生岩：“MOS-FET を使用した高電力高周波電力増幅器の設計”，電学論，106-C，2，pp. 1-8 (Feb. 1986)
- 4) 龍田，山中，鈴木：“高周波用静電誘導トランジスタ”，電気学会全大，No. 475 (1987)
- 5) TOKIN：“静電誘導形トランジスタハンドブック”，cat No. VD-010 (1989)
- 6) 西沢，龍田：“大電力 SIT”，信学研資，ED 81-8 (Apr. 1981)
- 7) 池田，生岩：“ドレーン効率最大法による MOS-FET 式高周波広帯域電力増幅器の一般的設計理論”，電学論，106-C，11，pp. 1-8 (Nov. 1986)
- 8) 村山，石井，中ほか：“MOS-FET を使用した 1 ユニット 10 kW 中波放送機の開発”，テレビ誌，43，9，pp. 975-981 (Sep. 1989)

みやざき てつろう
宮崎 徹郎 昭和 56 年，九州大学大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了。同年，NHK に入局。59 年より，同技術局送信技術センターにて送信設備の開発に従事。正会員。

やまぐち たけひこ
山口 竹彦 昭和 45 年，山形工業高等学校電気科卒業。同年，NHK に入局。52 年，山形大学工業短大電気工学科卒業。主に中波大電力放送機の管理，開発に従事。現在，技術局送信技術センターに勤務。正会員。

なか ひし
中 尚 昭和 57 年，東北大学工学部電子工学科卒業。同年，NHK に入局。徳島放送局，菟浦久喜ラジオ放送所に勤務。平成元年より，同技術局送信技術センターに勤務し，現在に至る。放送機の設計に従事。正会員。

なす よしひこ
那須 嘉彦 昭和 45 年，室蘭工業大学電気工学科卒業。同年，NHK に入局。主として固体化放送機の設計，開発業務に従事。現在，同技術局送信技術センター副部長。正会員。

はらいわ かずひさ
生岩 量久 昭和 45 年，徳島大学工学部電気工学科卒業。同年，NHK に入局。主として固体化送信機の設計，開発業務に従事。現在，同技術局送信技術センターチーフエンジニア。工学博士。正会員。