

電子シンクロトロン加速用高周波振幅変調器

福島 敏孝

1977.9.12.

東京大学原子核研究所

目 次

Amplitude Modulator of Radio Frequency System
for 1.3 GeV Electron Synchrotron

T. Fukushima

Institute for Nuclear Study, University of Tokyo

§ 1. 序	1
§ 2. 変調器の回路構成	1
§ 3. 変調器各部の動作	11
§ 4. 保護回路	13
§ 5. 運転結果	15
§ 6. 参考文献	16
§ 7. 回路詳細図	16

Abstract

The amplitude modulator for the 8F68 VHF high power tetrode tube has been designed and constructed. The modulator was constructed with solid components such as transistors and integrated circuits. In case of changing circuit elements of the modulator to solid components from tubes, many attentions are paid for preventing the noise and the over load, due to connection between the low power circuits (modulator) and high power circuits (VHF amplifier). The new modulator is constructed with taking careful consideration into selection of the method of the power control and the protection system.

§ 1. 序

原子核研究所 1.3 GeV 電子シンクロトロン (ES) の高周波発振機は、基準発振周波数 15 MHz (crystal oscillator) をトランジスタ回路で過倍増幅する 138 MHz マスターオシレーターとその出力を増幅する共振、弱型励振器 (四極管 5F20RA, 7F31RA) をして共振空洞型電力増幅器 (四極管 8F68) から構成されている。電力増幅器では、グリッド変調 C 級増幅が行われ、周波数 138 MHz, peak 20 kw の振幅変調出力が得られる。(文献 1) グリッド変調 C 級増幅回路を構成するためには、増幅回路の特性に合った変調器 (グリッドバイアス電源) が必要である。これまで ES において使用してきた変調器は、製作以来 10 年を経過したもので、現在製造中止となっている受信管を多数使用した回路構成となっている。そして変調器本体も長期にわたる連続運転の結果、回路部品等の劣化が進行し性能の維持ができる期間が限定された装置となった。

また変調器の動的特性 (変調信号振幅及び電流尖頭値等) を示す検出回路及び指示回路がほとんど付加されてなかったため、装置の動的特性測定が容易でなかった。

新変調器は、これらの点を踏まえて回路素子としてトランジスタ、IC 等の固体素子を採用し、動的特性が測定できる検出回路を完備した。そして検出回路は、特性の指示だけでなく装置の保護動作も同時に行なう機能を持たせた。

固体回路素子の採用により、その多くは低電力で動作する回路構成となる。このため大電力で動作する高周波増幅回路への適合を考慮する必要がある。この点については、回路構成上十分留意した設計とした。

§ 2. 変調器の回路構成

変調器のブロックダイアグラムを図 1 に示した。

ここで並列制御回路の入力側は、-520 V 定電圧電源が接続される。

フィードバックアンプの入力端子には Wave Form Generator で作られた変調信号が加えられる。

フィードバックアンプの出力は、並列制御安定化回路に送られその信号と同一の波形で変調器出力電圧を制御する。

サンプルホールド回路は、電子シンクロトロンの加速エネルギーによって変化させる必要がある変調器出力電圧 (EG_1)、及びその時の出力電流 (IG_1)、各々の peak, idle

値をメータで指示するため (くり返し 50 msec 時間幅 10~25 msec の三角波または台形波) 及びビインターロック信号を作るために付加されている。

サンプルパルス発生回路は、電子シンクロトロンの Timing pulse を受け EG_1 peak, EG_1 idle, IG_1 peak, IG_1 idle, 検出用のサンプリングパルスを発生する。

差動アンプは、 EG_1 peak, EG_1 idle の差を検出して変調信号振幅 (E_{MOD}) をメータで指示する。

2-1. 動作原理

EG_1 制御回路の基本構成を図 2 に示した。

この回路の動作は、一般に直流安定化電源に用いられる帰還型並列制御定電圧回路と等価である。

入力電源は、安定化された -520 V 定電圧電源から供給される。

帰還回路は、分圧器 ($R_{S1} \sim R_{S2}$)、差動増幅器 (U_{3a}) から構成されトランジスタ ($Q_{17} \sim Q_{22}$) を駆動して出力電圧を制御する。

R_{S1} は EG_1 idle 設定可変抵抗で E_{F1} 制御回路の基準電圧を設定する。

U_{2a} 、 U_{2b} は、それぞれボルテージフォロワー、インバーターで変調信号変換回路を構成し、その出力電圧を分圧器 B 点に送り EG_1 (D 点) を制御する。

すなわち変調信号変換回路は、定電圧電源回路で一般に広く用いられる基準電源と等価で、この変換回路を図に示したように接続することにより EG_1 回路は、並列制御式浮動型定電圧回路を構成する。

分圧器 B 点に加えられた変調信号により EG_1 は、次のように制御される。

SIG-IN 端子における変調信号が 0 V の場合、 U_{2a} 入力端子には R_{81} で設定された電圧が入力され次の U_{2b} で加算一極性変換 (SUM. INV.) される。従って R_{81} で -4 V に設定した場合 (アイドル設定値 4 V) + 4 V の電圧信号が B 点に送られる。一方 C 点は、常に A 点と同電位になるよう U_{3a} 、 $Q_{17} \sim Q_{22}$ 、 R_{S1} 、 R_{S2} にフィードバックがかかっている。このため R_{S1} と R_{S2} の分圧比で D 点に安定化された EG_1 idle が出力される。この関係を次式に示した。

$$V_{DA} = -\frac{R_{S1}}{R_{S2}} \times V_{BA} = -100 V_{BA} \quad (1)$$

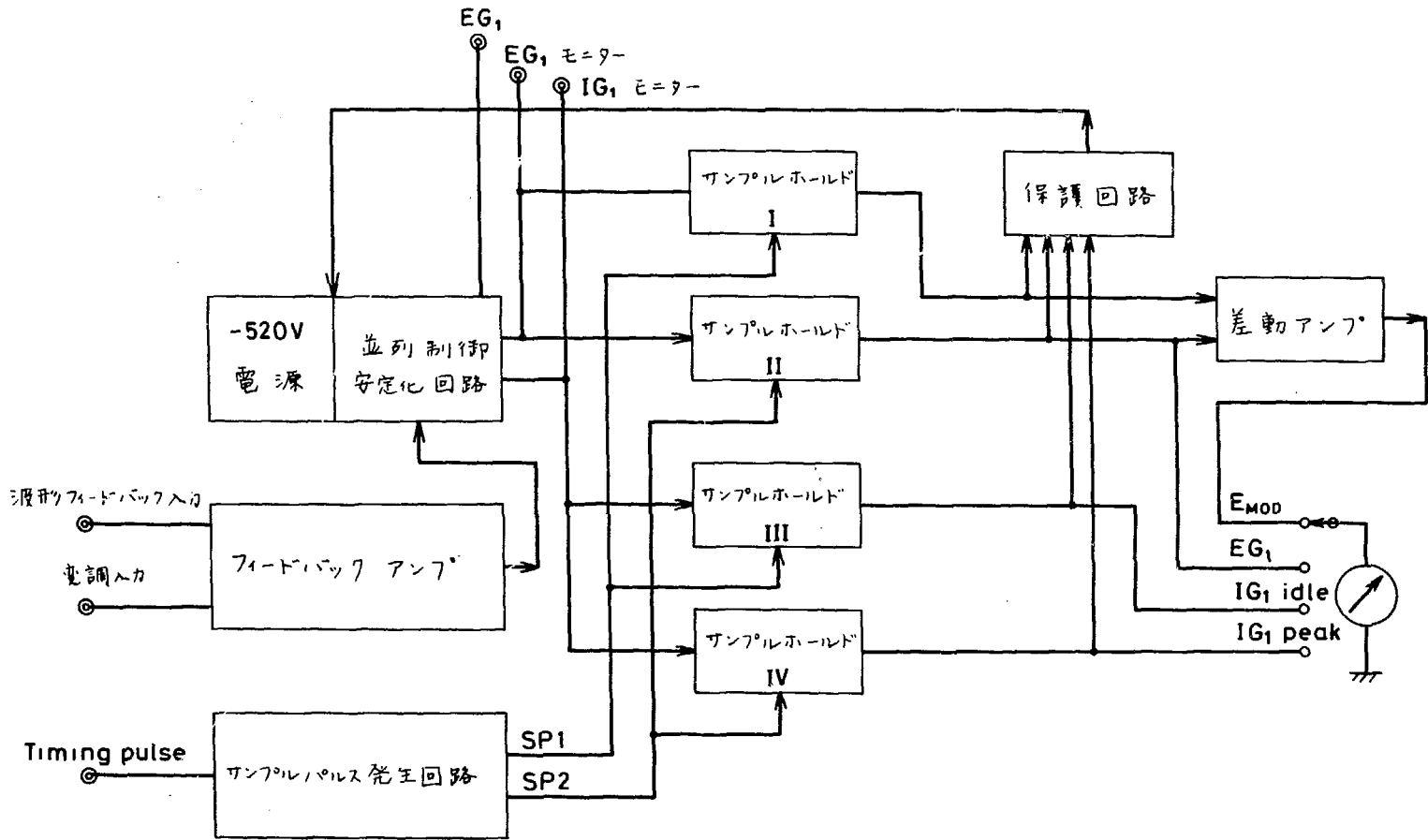


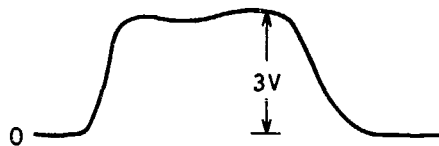
図1. 変調器ブロックダイヤグラム

次に SIG-IN に図 3 に示したような peak 3V の変調信号が入力された場合、 U_{2b} で先に述べたアイドル設定値 -4V と SUM-INV. され分圧器 B 点に送られる。この場合、(1)式より与えられる peak 値となる。

$$V_{DA} = -100 V_{BA} = -100 V$$

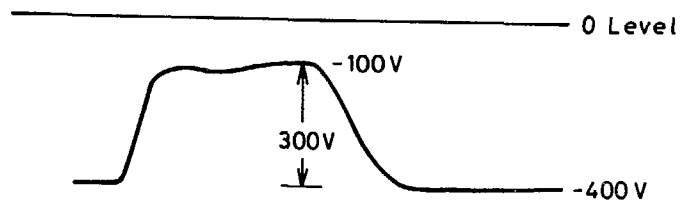
以上の動作による変調器出力を図 4 に示した。この場合変調信号振幅は 300V となる。

出力端子 D 点における負荷変動に対する定電圧安定化は、よく知られている並列制御定電圧電源と同様な動作が行なわれ、常に安定化される。



Wave Form Generator Signal

図 3.



EG₁ Output Wave Form

図 4.

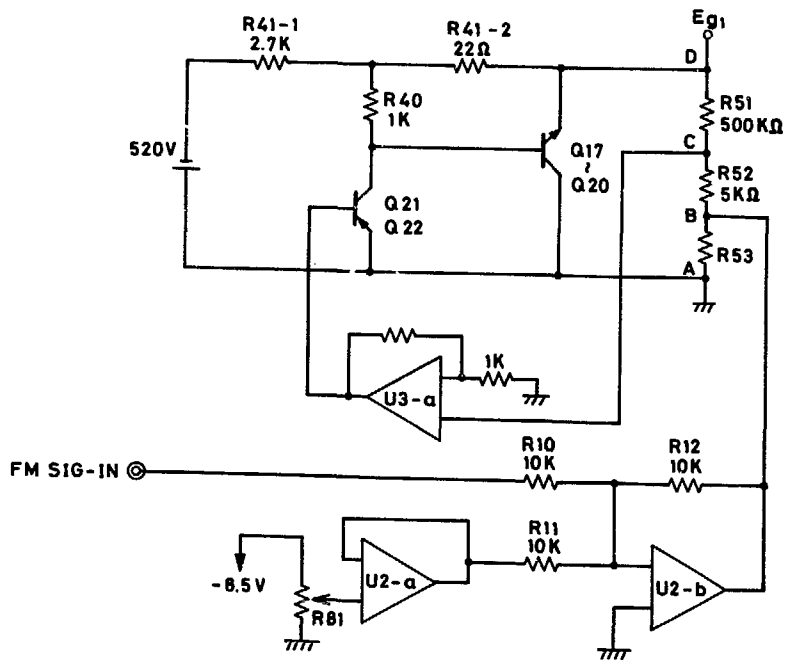


図 2. EG₁ 制御回路の基本構成

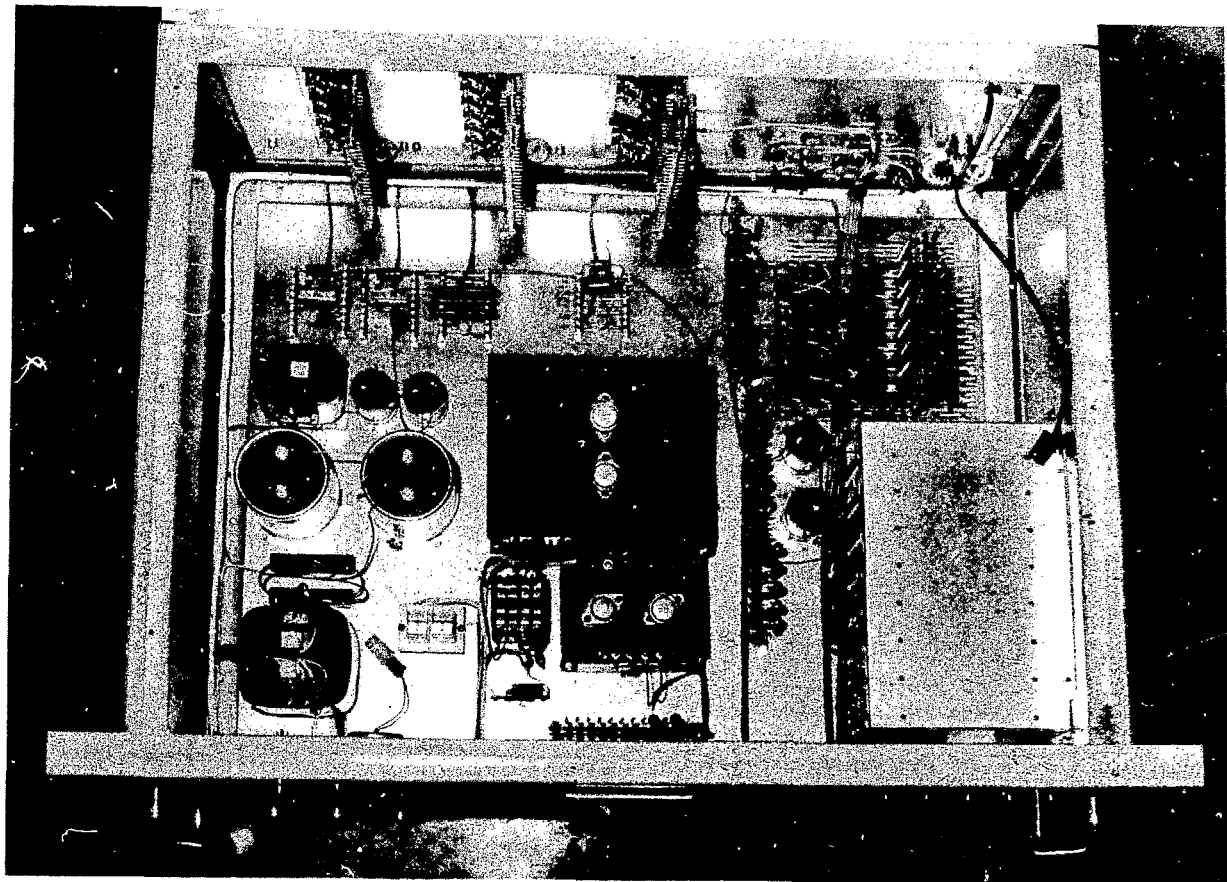


写真 1. 新変調器内部

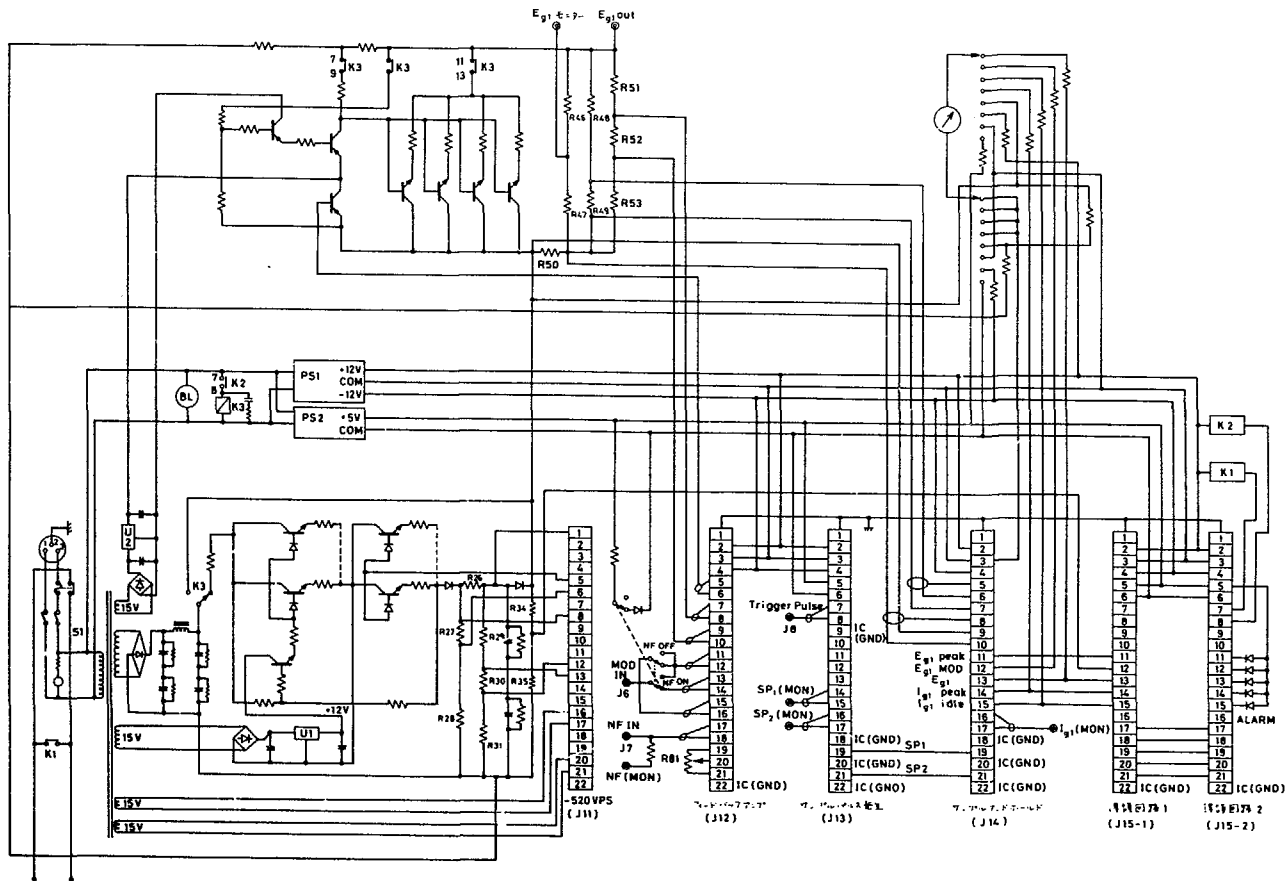


图 5. 変調器盤内図

§ 3. 変調器各部の動作

図5は、機能別にユニット化した変調器各部との盤間図である。写真1はこの模様を示す変調器の内部である。

ここでは、各部の動作及び回路の詳細図を示す。

3-1. 520V定電圧安定化電源

定電圧安定化の方式は、制御用トランジスタを負荷に対して直列に入れた直列制御式で、基準電圧源をそのトランジスタに浮動させた直列制御式浮動型定電圧電源である。

動作の詳細については、別の報告書でくわしく述べてある。(文献2)

回路の詳細を図7に示した。

3-2. フィードバックアンプ

回路の詳細を図8に示した。ここで U_{2a} 、 U_{2b} 、 U_{3a} の動作については、§2で述べた通りである。

U_{1a} 、 U_{1b} は、変調信号を波形フィードバックする時に使用する回路で差動増幅器を構成している。

波形フィードバック用信号は、加速空胴のGap電圧モニター信号が使用される。(文献3)

動作としては、 U_{1a} 、 U_{1b} を通過した変調信号と加速空胴モニター信号との差が U_{2b} を通り並列制御回路への信号となる。

並列制御回路の詳細を図9に示した。

3-3. サンプルアンドホールド回路

変調器より与えられた高周波増幅管8F68G₁電極の電圧波形は、写真2に示した通りである。先に述べたように変調器出力電圧電流をメータ指示させるため及び保護回路を動作させる信号を検出するためサンプルホールドを行なう。

(a) サンプルパルス発生回路

サンプルパルス(SP)は次に述べる方法で発生させる。測定したい変調器出力の波形はESのTiming pulseでトリガーされた変調信号(図3)で制御されている。従って写真2に示した SP_1 、 SP_2 は、このTiming pulseで単安定マルチバイブレーターをトリガーして発生させる。図10にサンプルパルス発生回路の詳細図を示した。ここで U_{1a} はコンパレータでTiming pulseが入力される。またこのコンパ

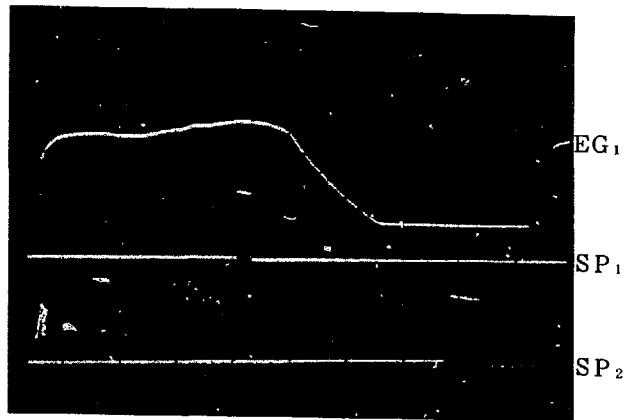


写真2. EG_1 波形とサンプリングパルス($SP_{1,2}$)

レータは CR_1 (RD5A)をつけることによってTTLレベルの出力が得られる。バッファとして U_{2a} 、 U_{2b} を通ったあと、ワンショット($U_5 \sim U_6$)により各タイミングに必要な時間、幅のパルス(SP_1 、 SP_2)を発生させる。 $Q_1 \sim Q_4$ はTTLレベルのSPをサンプルホールドに必要な $\pm 11V$ に振るためのものである。

(b) サンプルアンドホールド回路の動作

図6にこの回路の基本構成を示した。図においてSが閉じた時、Cは入力電圧に等しい値までチャージアップされSが開いたあともその電圧を保持する。サンプルアンドホールドのスイッチ素子(S)としては、FET(2SK12)を用い、その受けはFET入力のアンプ($\mu A740HC$)をボルテージホロワーとして用いる。ボルテージホロワーの出力はメータ及び保護回路に接続される。

サンプルアンドホールド回路の詳細図を図11に示した。ここで電流信号(IG_1)は、検出抵抗が 10Ω と小さいので、反転形の差動増幅器(U_{1a} 、 U_{1b})で、そしてアイドル電流は電流値が小さいので差動アンプの出力を再びアンプ(U_{3a})してサンプルアンドホールド回路(Q_1U_1 、 Q_2U_5)に接続する。

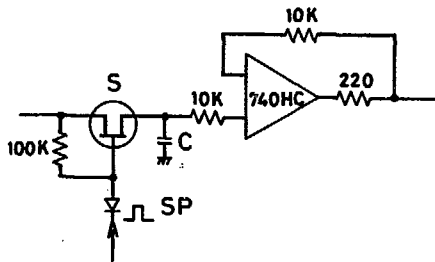


図6. サンプルアンドホールド回路の基本構成

電圧信号 (EG_1) に対しては、検出抵抗が $5\text{ k}\Omega$ と大きいので非反転形の差動増幅器 (U_{2a} , U_{2b}) を通り Q_3 , U_6 , Q_4 , U_7 に接続する。 U_{3b} は差動増幅器で U_6 (EG_1 peak), U_7 (EG_1 idle) の出力信号を入力して、その差 E_{MOD} を検出する。

5. 保護回路

この回路の動作としては、次に述べる保護機能を持たせ、高周波増幅回路及び変調器の保護を目的とする。

4-1. EG_1 Upper limit

変調時の EG_1 電圧 (EG_{1MOD}) が零ボルトを超えた時動作する。動作としては、安定化回路を切りはなして、非安定化電源 -650 V を出力する。その理由は、増幅器の他の回路より正の高電圧が連続的に変調器の出力端に加わるような場合及び変調信号を必要以上に過大入力した場合、電子管 8F68 の G_1 電極電圧を -650 V にして電子管の動作をカットオフにし、電子管及び変調器を過大負荷より保護する。保護回路の詳細を図 12 に示した。

EG_1 Upper limit の保護動作は次のように行なわれる。

サンプルホールドされた EG_1 は、 $10\text{ V}/-500\text{ V}$ の感度で出力され、ピン 11 より保護回路 U_{1b} へ送られる。ここで零より大きい小さいか即ち正か負かを判別し TTL レベルで出力する。この信号は AC 電源投入時 1 秒間の INHIBIT 信号とゲート (U_{8b})

がかけられ電源投入時に保護回路の動作を表示する発光ダイオード (アラーム) が点灯しない様になっている。ゲート (U_{8b}) を通過した信号は、ノイズによる誤動作防止のための U_{3c} , R_{29} , C_{12} , R_{30} , U_{7b} , 及び C_{15} のローパスフィルタを通りフリップフロップ U_{9b} に入力される。

このフリップフロップは AC 電源投入時にピン 6 に入力される信号でクイヤされる。この動作によりピン 9 に (L), ピン 8 に (H) の信号が出力されている。ピン 5 に入力されるアラーム信号の負のエッジで反転する。ピン 8 の信号は変調器表面パネルの発光ダイオードによりアラーム内容を表示する。ピン 9 より出力信号は、他の検出回路との OR ゲート (U_{12}) を通りトランジスタ Q_2 , Q_4 によりリレー K_2 を駆動する。この K_2 を駆動することにより先に述べた保護機能 (高周波増幅管 8F68 カットオフ) が動作する。

4-2. EG_1 idle upper limit

変調がかかっていない時の EG_1 の電圧 (EG_1 idle) が -220 V を超えた時動作する。その理由は、 EG_1 電源の安定化回路に異常が生じ 8F68 バイアスが小さくなってしまった時、電子管 8F68 及び増幅回路の他電源が過負荷にならないように 8F68 安定化回路を切りはなして、非安定化電源 -650 V を出力する。この動作により 4-1 に述べたと同様 8F68 の動作はカットオフとなる。

4-3. IG_1 Upper limit

IG_1 peak が設定値 ($0.44 \sim 0.55\text{ A}$) を超えた時動作する。8F68 のグリッド電流が何らかの原因で設定値を超えるほど増加すると EG_1 電源の並列制御回路のトランジスタ $Q_{17} \sim Q_{20}$ の損失が増大し安全動作領域を超えトランジスタの破損の危険があるので、その安定化回路を切りはなして 4-1, 4-2 で述べたと同様に -650 V を出力して、 EG_1 電源を保護する。

4-4. IG_1 idle upper limit

IG_1 idle が設定値 ($45 \sim 55\text{ mA}$) を超えた時動作する。保護機能としては、4-3 と同様の内容である。

4-5. -520 V 電源 Lower limit

変調器内の -520 V 電源の電圧が、 -400 V 以下になった時動作して安定化回路を切りはなし非安定化電源 -650 V を出力する。以後は 4-1 と同様の内容である。

§ 5. 運転結果

新変調器を8F68高周波増幅器に組み込んだ。(写真3)

その結果高周波増幅回路への接続に当たってのトラブルもなく順調に動作し、次に示す加速エネルギーで必要な加速用高周波を振幅変調した。その時の変調器と8F68の測定値を示す。

加速エネルギー 1.1 GeV
高周波出力 21.5 kW

変調器	E_{MOD}	201 V	8F68	I_k	820 mA
	EG_1	320 V		E_b	6.45 kV
	$IG, idle$	48 mA		EG_2	830 V
	$IG, peak$	120 mA		IG_2	35 mA

以上四極管8F68の振幅変調器についてのあらましを述べた。この報告書では、今後の運転及び保守に際して必要と思われる回路の機能をできるだけわしく述べたつもりである。尚回路設計の詳細については、参考文献、その他の専門書を参照して頂きたい。

本装置の製作には、日本高周波KKの協力を得た。そしてこの報告書作成に当って技術部第三技術課河野俊哉氏には、多くの有益な技術資料を提出して頂いた。

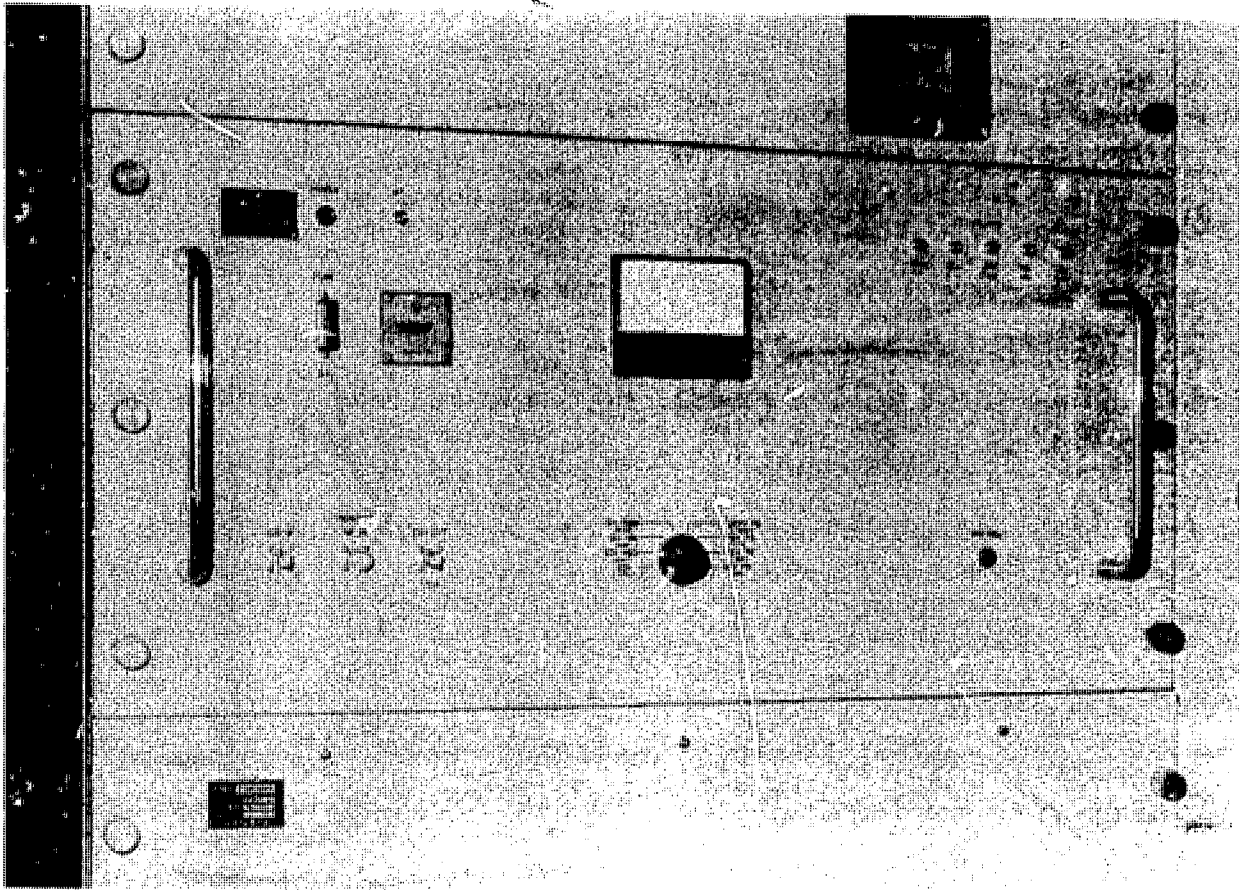
装置の仕様決定及び接続に当って核物質研究計画準備室片山武司助教授には、多くの有益な御指摘をいただいた。そして電子シンクロトン高周波加速系コントロールシステムへのインターロック信号接続に当って高エネルギー部武藤正文氏、吉岡正和氏、浅岡聖二氏の協力を得た。また報告書中の図面作成に当っては、高エネルギー部佐藤旬子氏に協力して頂いた。ここで深く感謝致します。

§ 6. 参考文献

- (文献1) 片山武司, 福島敏孝「大電力高周波増幅装置」 INS-TH-87 1974
(文献2) 福島敏孝「高周波増幅管用スクリーングリッドバイアス電源」
INS-TH-113 1977
(文献3) 福島敏孝, 片山武司「高周波加速空胴の特性」 INS-TH-96 1975
(文献4) 岡村勉夫「OPアンプ回路の設計」 昭和51年CQ出版

§ 7. 回路詳細図

- 図7. -520 V定電圧安定化電源
図8. フィードバックアンプ
図9. 並列制御安定化回路
図10. サンプルパルス発生回路
図11. サンプルアンドホールド回路
図12. 保護回路



2

写真3. 高周波増幅装置に組み込まれた新変調器

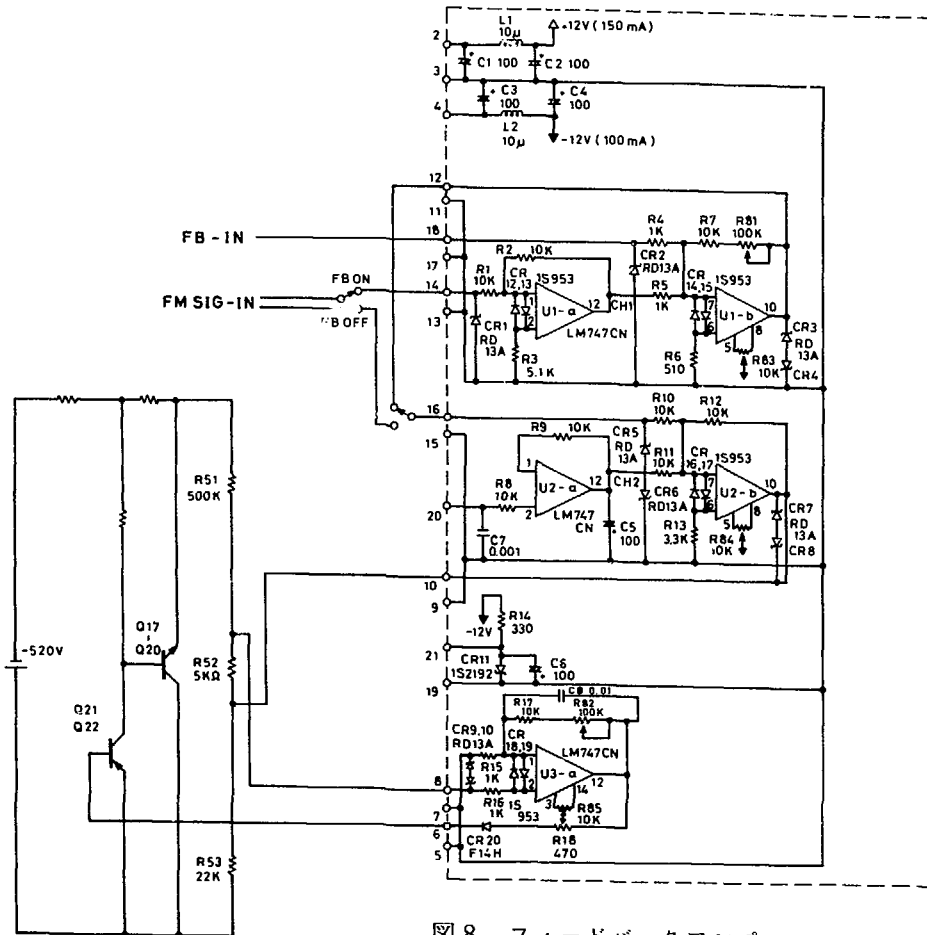


図 8. フィードバックアンプ

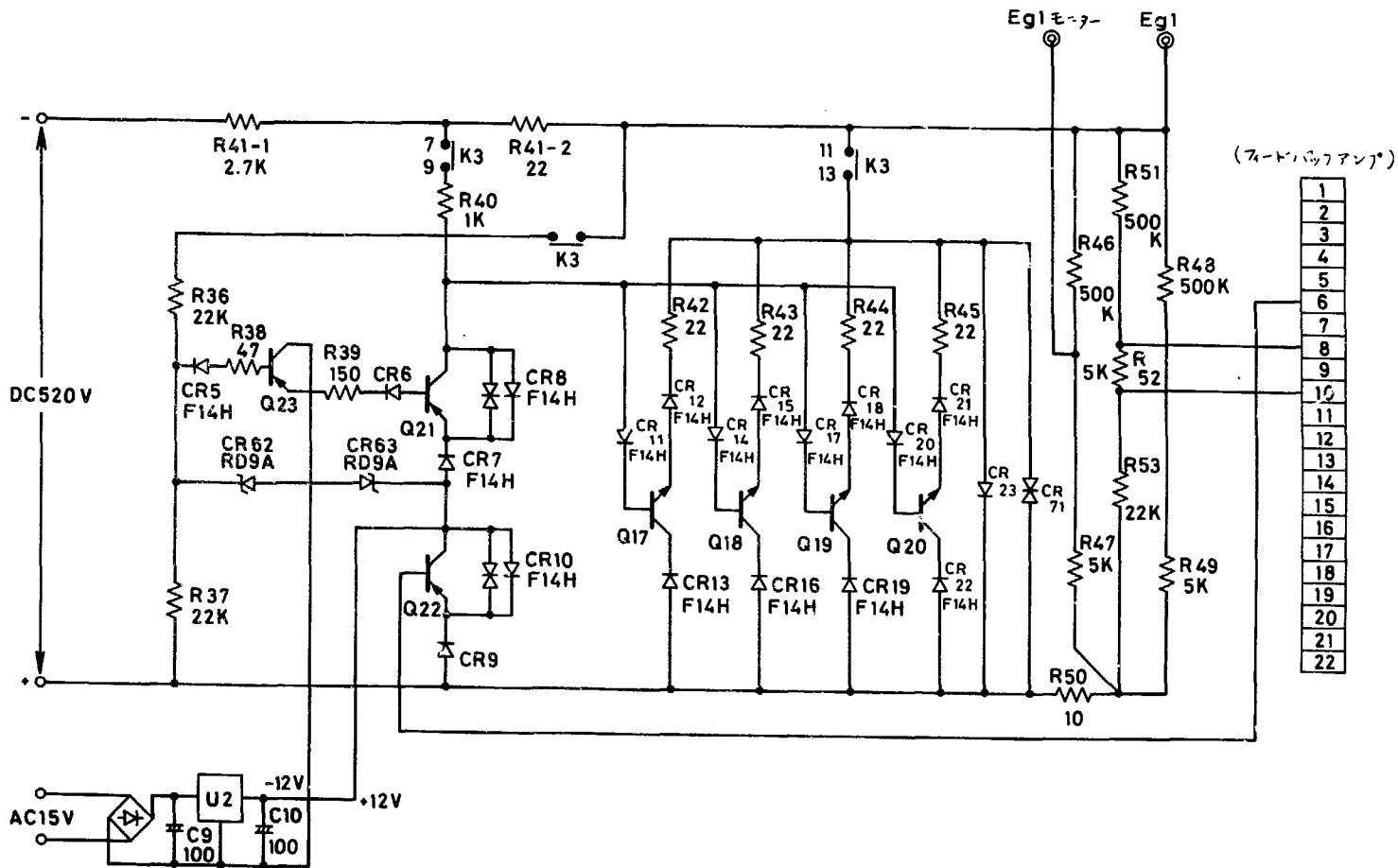


图 9. 並列制御安定化回路

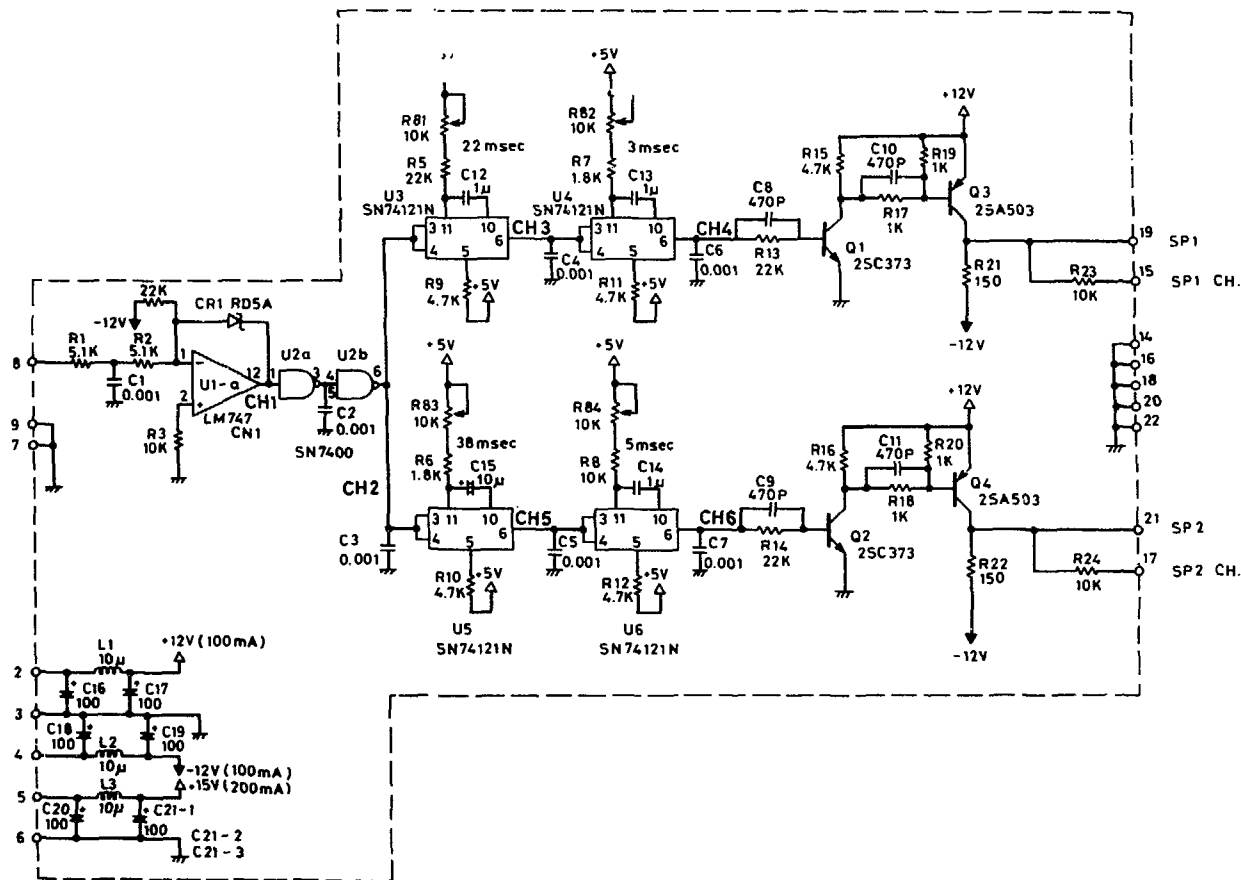


図10. サンプルパルス発生回路

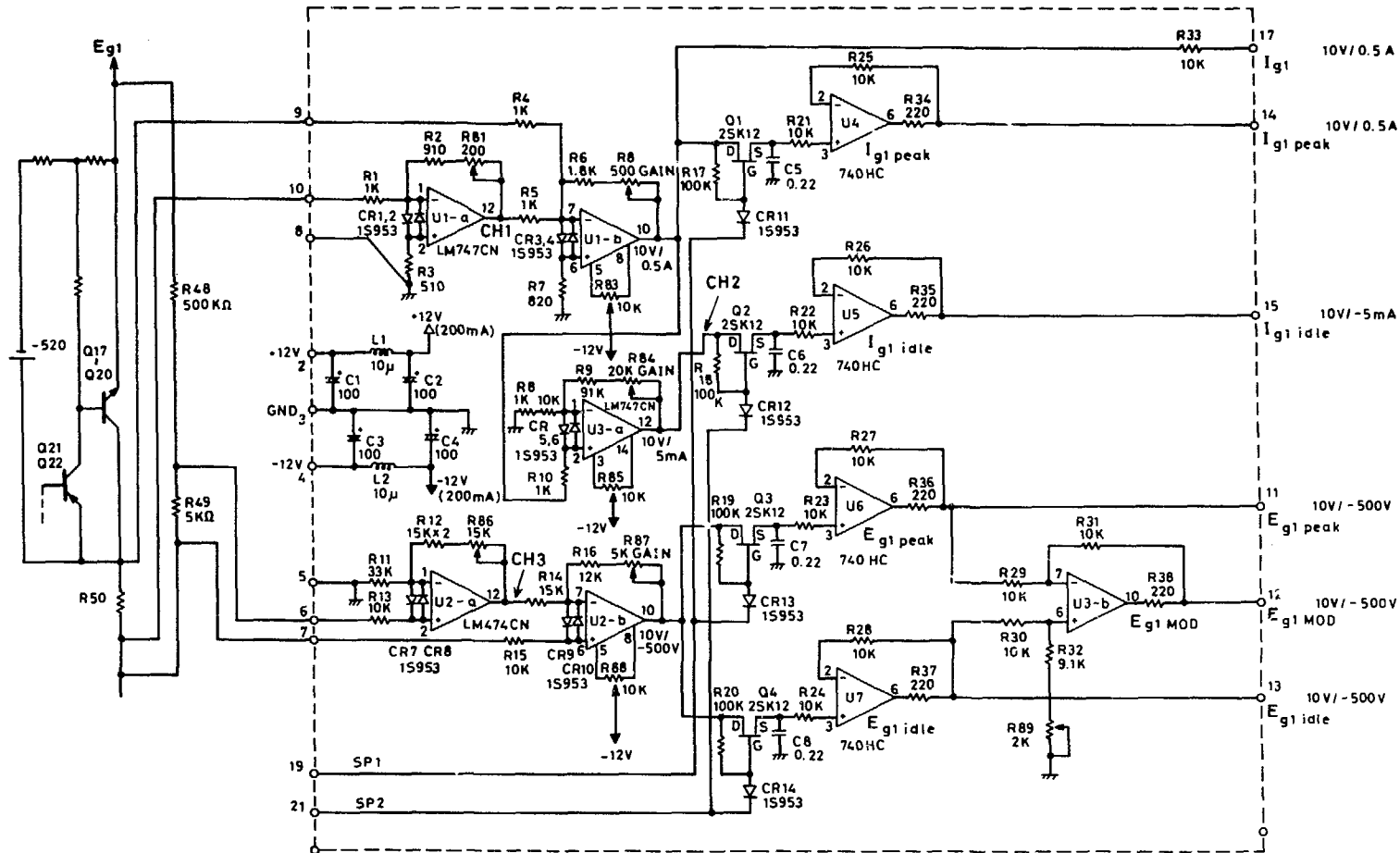
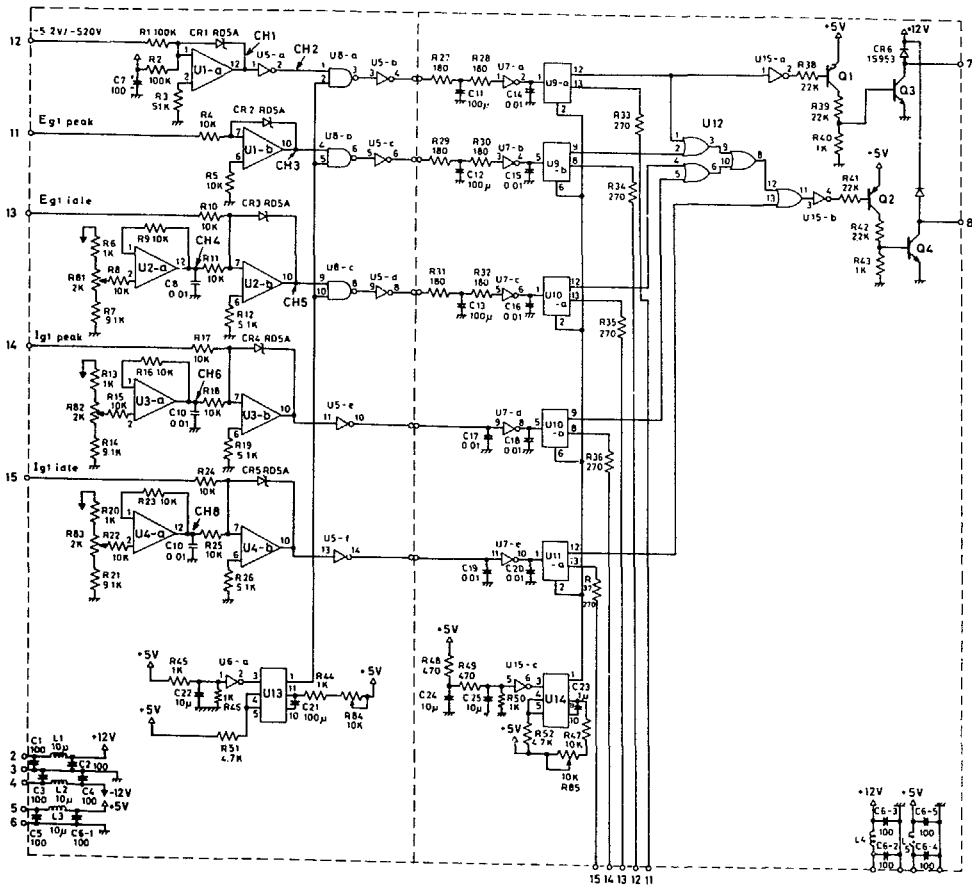


図 11. サンプルアンドホールド回路



保護回路 1

保護回路 2

图 12.