

トリスタン計画用高精度・高安定度電源

High Stabilized Power Sources for Bending and Quadrupole Magnets of TRISTAN Project

文部省高エネルギー物理学研究所で進めているトリスタン計画の電子リング用電磁石の励磁電源は、ビームを安定に保つため直流出力電流の長時間安定度、脈動率共に 10^{-4} という厳しい性能を要求される。

このような仕様を満足させるため、高精度電流検出器、アクティブフィルタなどを使用した電源構成とした。本電源の性能を検証するため、独自に試作を行ない文部省高エネルギー物理学研究所で実機コイルとの組合せ試験を行なった。その結果、出力安定度、脈動率、電流追従性などについて十分な性能をもっていることを確認し、現在計80台の実用機の製作を進めている。

本稿では上記電源システムについて述べるとともに、試作機の性能試験結果について報告する。

熊谷 教孝* *Noritaka Kumagai*
 小川 真一** *Shin'ichi Ogawa*
 古関庄一郎*** *Shōichirō Koseki*
 長坂 三郎** *Saburō Nagasaka*

1 緒 言

文部省高エネルギー物理学研究所で推進中のトリスタン計画の電子・陽電子ビーム衝突リング用偏向電磁石、四極電磁石、実験直線部四極電磁石の励磁用電源は、計80台から構成される。本電源は電子・陽電子ビームを安定に保つため、出力安定度、脈動率共に 10^{-4} 、直線性 10^{-4} 、出力電流追従性 10^{-3} という高い性能を要求される。日立製作所では、現在上記80台の電源の設計、製作を進めている。

本稿では、電源の全体システムを説明し、前記要求性能を満足させるための電源構成を述べ、特に性能上重要な高精度電流検出器、及び直流フィルタについて説明する。更に本電源の先行試作機を製作し、文部省高エネルギー物理学研究所での実機コイルとの組合せ試験で出力安定度、電流脈動率などすべて要求仕様以内の優れた性能をもっていることが確認されたことを報告する。

2 電源システム

本電源はトリスタン計画の電子リング用電磁石を励磁するものであり計80台で構成される。これらの電源は偏向電磁石を励磁するB電源と、四極電磁石を励磁するQ電源に大きく分

類される。更に、出力容量により表1に示すように9種類に分類される。

B電源は出力容量が最も大きい電源であり、図1に示すように平均直径約960mの衝突リング上の4箇所電源棟内に配置された4ユニットから成り、同リング上に据え付けられた264台の偏向電磁石を一括励磁する。QF及びQD電源は同様に各々2箇所に配置された2ユニットから成り、各96台の四極電磁石を一括励磁する。

BW電源を除く他の電源は小形Q電源と呼ばれ、各1台ずつで構成され、衝突リング上の4箇所の電源棟に15台、他の4箇所に4台ずつ配置され、それぞれ2~8台の四極電磁石を励磁する。BW電源は1台でリング上の8台の副偏向電磁石を励磁する。

図2に第8棟の電源の概略構成を示す。B、QF、QD電源は6.6kV母線から給電される。小形Q電源とBW電源は420Vに

表1 電源仕様 トリスタン用電源は計80台から成り、用途(B, Q), 仕様により9種類に分類される。

No.	名 称	仕 様			員数
		出 力	直流電圧	直流電流	
1	B電源	6,408kW	4,272V	1,500A	1台
2	QF, QD電源	2,452kW	1,816V	1,350A	2台
3	QRF, QRD電源	309kW	206V	1,500A	8台
4	QC1, QC2電源	267kW	157V	1,700A	8台
5	QC3電源	117kW	78V	1,500A	4台
6	QC4-6電源	90kW	60V	1,500A	12台
7	QSI-7電源	105kW	70V	1,500A	28台
8	QWI-4電源	70.5kW	47V	1,500A	16台
9	BW電源	3.6kW	180V	20A	1台

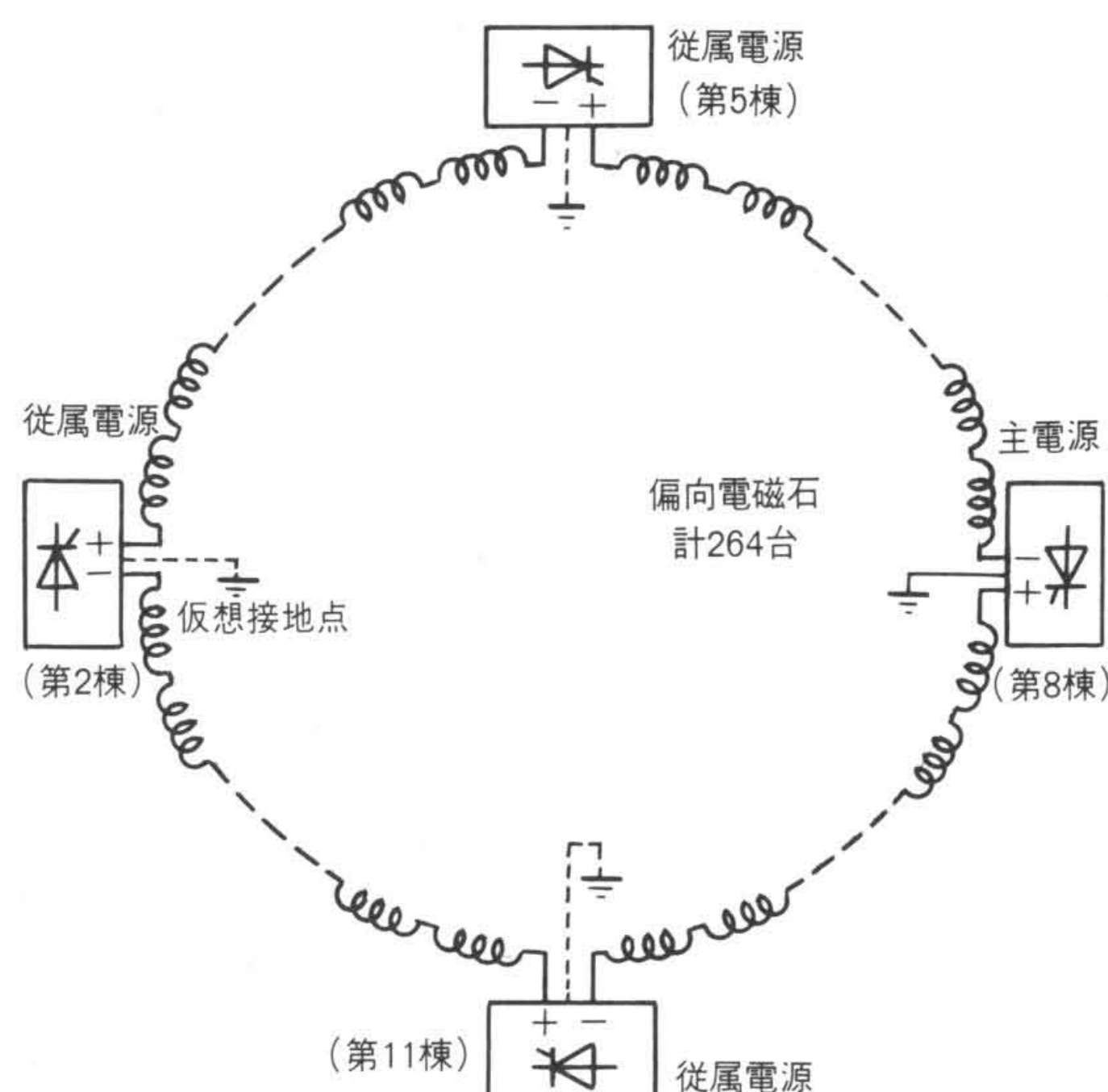


図1 B電源の全体構成 B電源は衝突リング上に配置された4ユニットで構成され、計264台の偏向電磁石を励磁する。

* 文部省高エネルギー物理学研究所 理学博士 ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所日立工場 工学博士

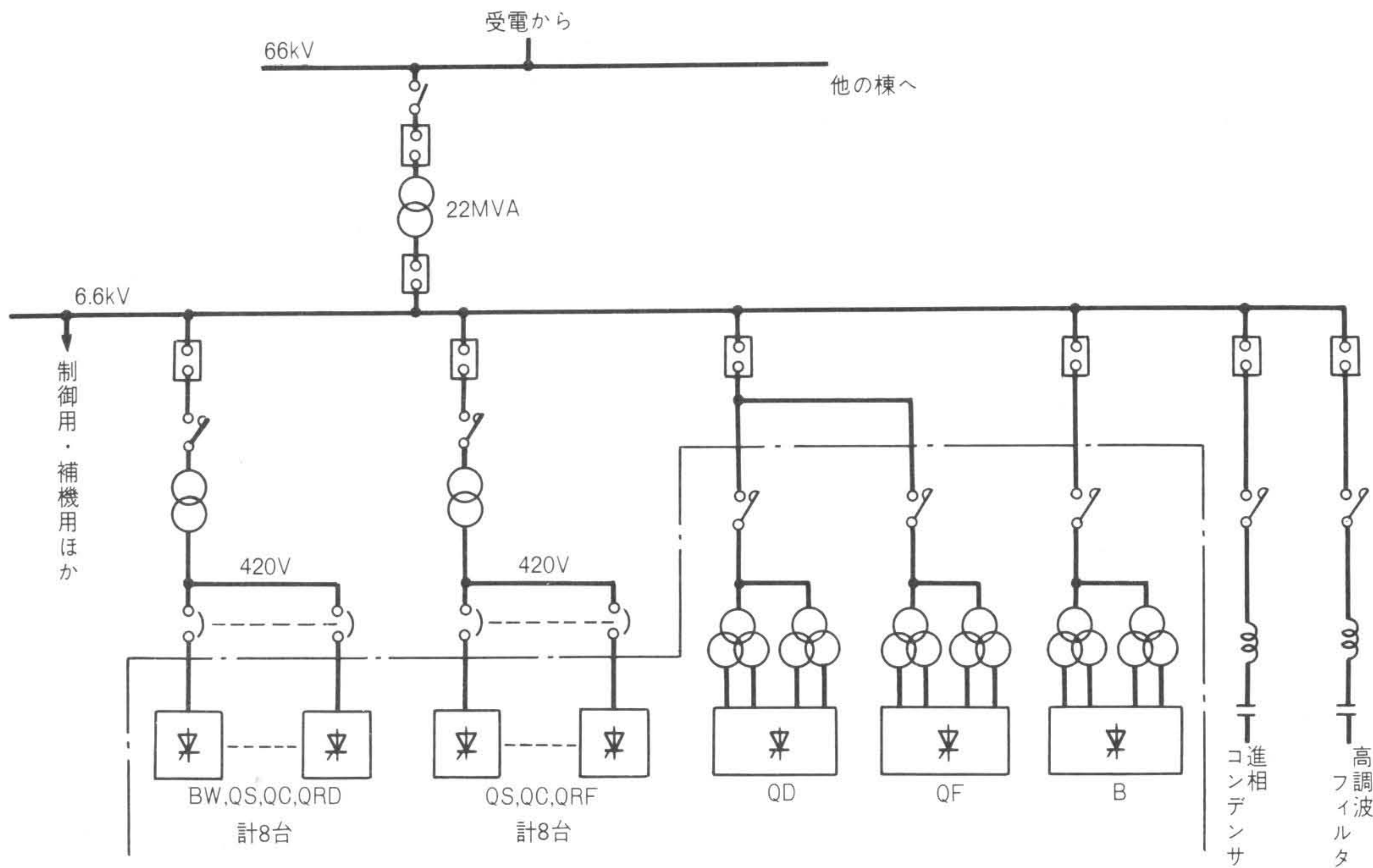


図2 概略構成(第8棟)
多数の電源が同一母線に接続されており、システム設計が必要である。

降圧されて給電される。このように多数の電源が同一の母線に接続されているためシステム設計に当たっては、次の点に考慮を払った。

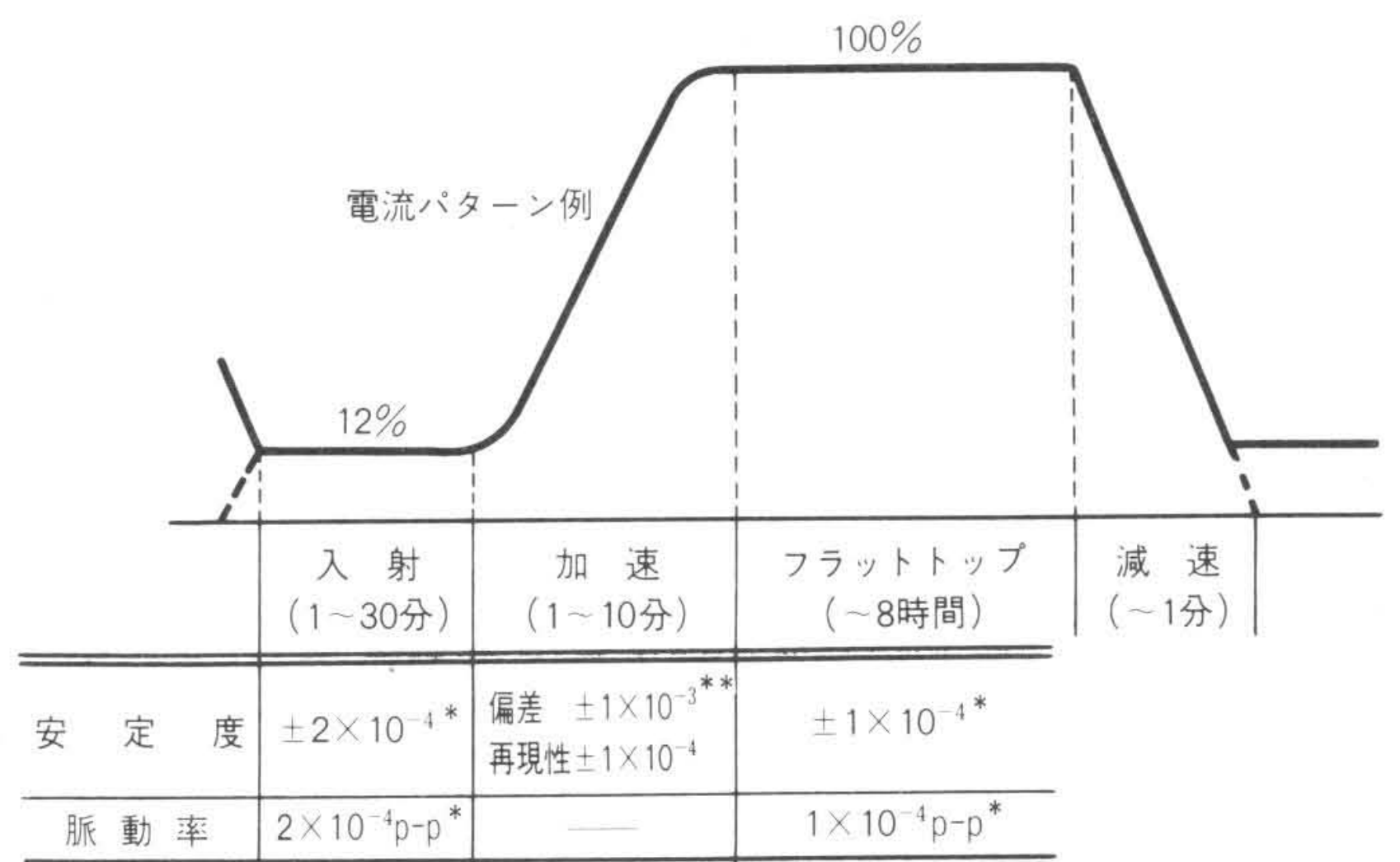
- (1) 進相コンデンサ投入容量，受電変圧器タップ切換について検討し，電源電圧変動を極少として受電容量を切り詰める。
- (2) 各電源の変圧器にタップを設け，小電流通電時の力率を向上させるとともに，出力側直流脈動電流も減少させる。
- (3) 6.6kV母線から給電されるB, QF, QD電源は24パルス整流とし，420Vで給電される12パルス整流方式の小形電源は位相を15度ずらした二組みに分け，等価整流パルス数を24パルスとし高調波を減少させる。

3 要求性能

電子リング電磁石励磁用直流安定化電源には，次のような基本的な性能が要求される。

- (1) 高安定度，高精度であること。
平均直径約960mの大きさをもつ電子リング内の4箇所の衝突点で，電子と陽電子のビームサイズを直径1mm以下に集束して効率的な衝突実験を行なうためには，極めて高いビームの安定性と正確なビーム光学的制御が要求される。これらの目的を達成するためには，電磁石の励磁用電源の出力電流の性能として，電流の安定度が設定値に対する相対値で規定して8時間にわたって $\pm 1 \times 10^{-4}$ 以内であること，また同一の電流設定値に対する出力電流の偏差(直線性を含む)が，各電源間で 10^{-4} 以内であることがそれぞれ要求される。
- (2) 出力直流脈動電流が極小であること。
出力電流の直流脈動電流は磁場の変動として現われ，特に偏向電磁石ではビーム軌道の振れとなり実験に多大な悪影響を与えることが予想される。このため，励磁電源の出力直流電流脈動率は入射時 $2 \times 10^{-4} p-p$ ，フラットトップ時 $1 \times 10^{-4} p-p$ でなければならない。
- (3) 電流指令に対する出力電流の追従性及び再現性が良いこと。

80台の電源を有機的に制御し運転を行なうためには，個々の電源は計算機システムからの指令に基づき， 10^{-4} の直線性を保ちながら忠実に電流制御を行なう必要がある。今回の電源では，入射時電流値からフラットトップ時電流値まで1分



注：* 設定値に対する相対値で規定する。
** 定格値に対する絶対値で規定する。

図3 電流パターンの例と各点での要求性能 電源は高安定度，低直流脈動電流が求められるとともに，パターンに対する追従性，再現性，直線性についても高性能が要求される。

間で加速したときに，指令値と出力電流値との偏差が，フラットトップ時電流に対し $\pm 1 \times 10^{-3}$ という追従性が要求されるとともに，同一通電パターンに対する再現性は $\pm 1 \times 10^{-4}$ が要求される。

図3に電源の基本的な電流パターンと，各点で要求される性能の一覧を示す。

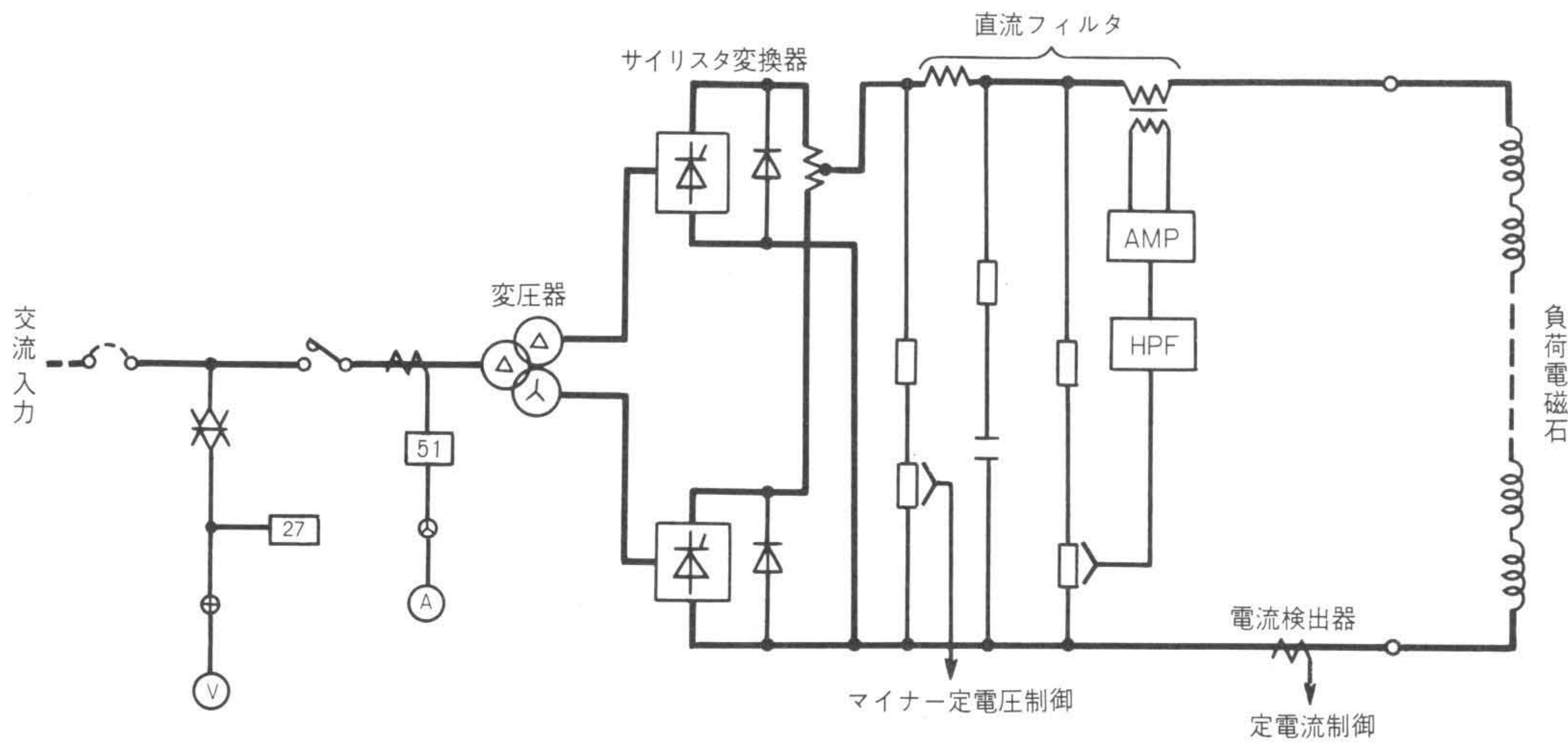
4 電源の構成

4.1 主回路構成

本電源は交流受電部及び整流器用変圧器，サイリスタ変換器，直流フィルタなどから構成される。図4に小形Q電源の主回路構成を示す。ただし，大容量のB電源及びQF, QD電源は交流入力6.6kVで，高压盤，変圧器は屋外に別置される。

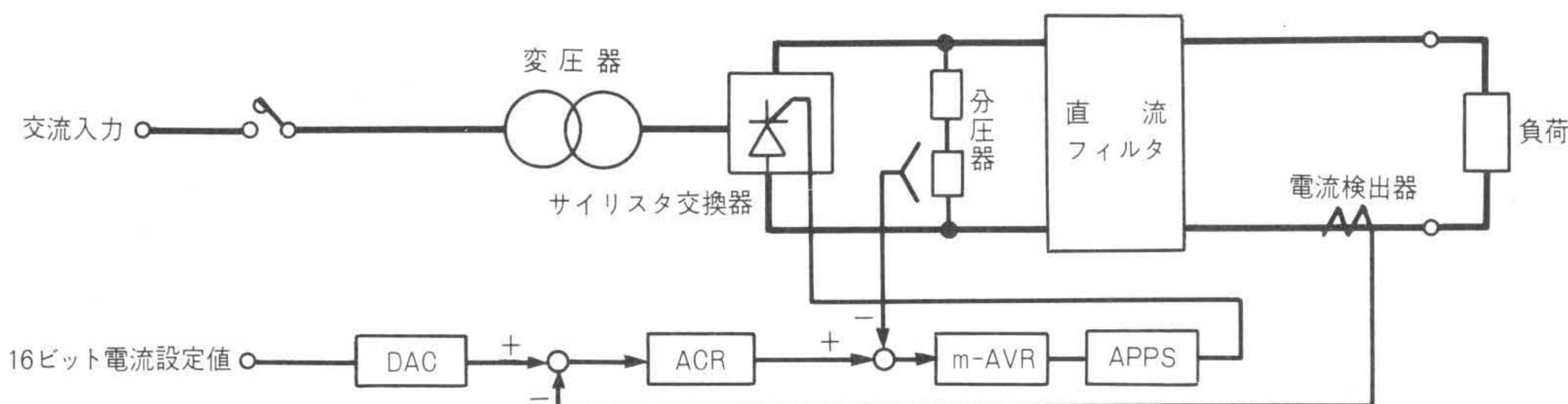
本電源の主回路の特長は次のとおりである。

- (1) 交流側への高調波発生量及び出力直流脈動電流を少なくするため，大容量電源は24パルス整流を，小容量電源は12パルス整流方式を採用した。



注：略語説明 AMP(出力増幅器), HPF(ハイパスフィルタ)

図4 小形Q電源回路構成
出力直流脈動電流を減らすため、12相整流とし、更に直流フィルタを備えている。



注：略語説明 DAC(デジタル-アナログ変換器), m-AVR(マイナー定電圧制御), ACR(定電流制御), APPS(自動パルス移相器)

図5 制御回路ブロック図
電流設定値は、16ビットデジタル信号をD-A変換して与えられる。マイナー定電圧制御付の定電流制御により高精度制御を行なう。

(2) 出力直流脈動電流を極小とするため、直流フィルタとして直列リアクトルと並列コンデンサから成るパッシブフィルタと、リアクトルトランス結合方式のアクティブフィルタの併用方式を採用した。

(3) 電源室への熱放出を極力抑えるために、盤内のサイリスタ、変圧器、リアクトルなど主要発熱部品を水冷方式とした。ただし冷却水を供給できない小規模電源棟に設置する電源は空冷とした。

4.2 制御回路構成

本電源の制御回路は、高精度・高安定度定電流制御を行なうACR(定電流制御)系と、受電変動に対して出力を安定させるm-AVR(マイナー定電圧制御)系から構成されている。制御ブロック図を図5に示す。

本電源の制御回路の特長は下記のとおりである。

- (1) 電流検出器として日立独自の方式である4コアタイプ差動帰還増幅瞬時応答式高精度電流検出器を採用した。
- (2) 高安定度を実現するため、ACR制御系の主要部品は恒温槽内に収納し、設定温度を25℃とした。
- (3) 広大な円周上8箇所分散配置されるため、計算機システムからのデジタル信号によるON、OFFなどの遠方操作機能を保有している。
- (4) 計算機との入出力リンケージの標準仕様であるCAMAC(Computer Aided Measurement and Control)メモリモジュールからの16ビットデジタル信号による電流パターン運転の機能を保有している。

5 高精度電流検出器

5.1 高精度電流検出器の回路構成

高精度・高安定度出力電流制御を行なうには、電源として

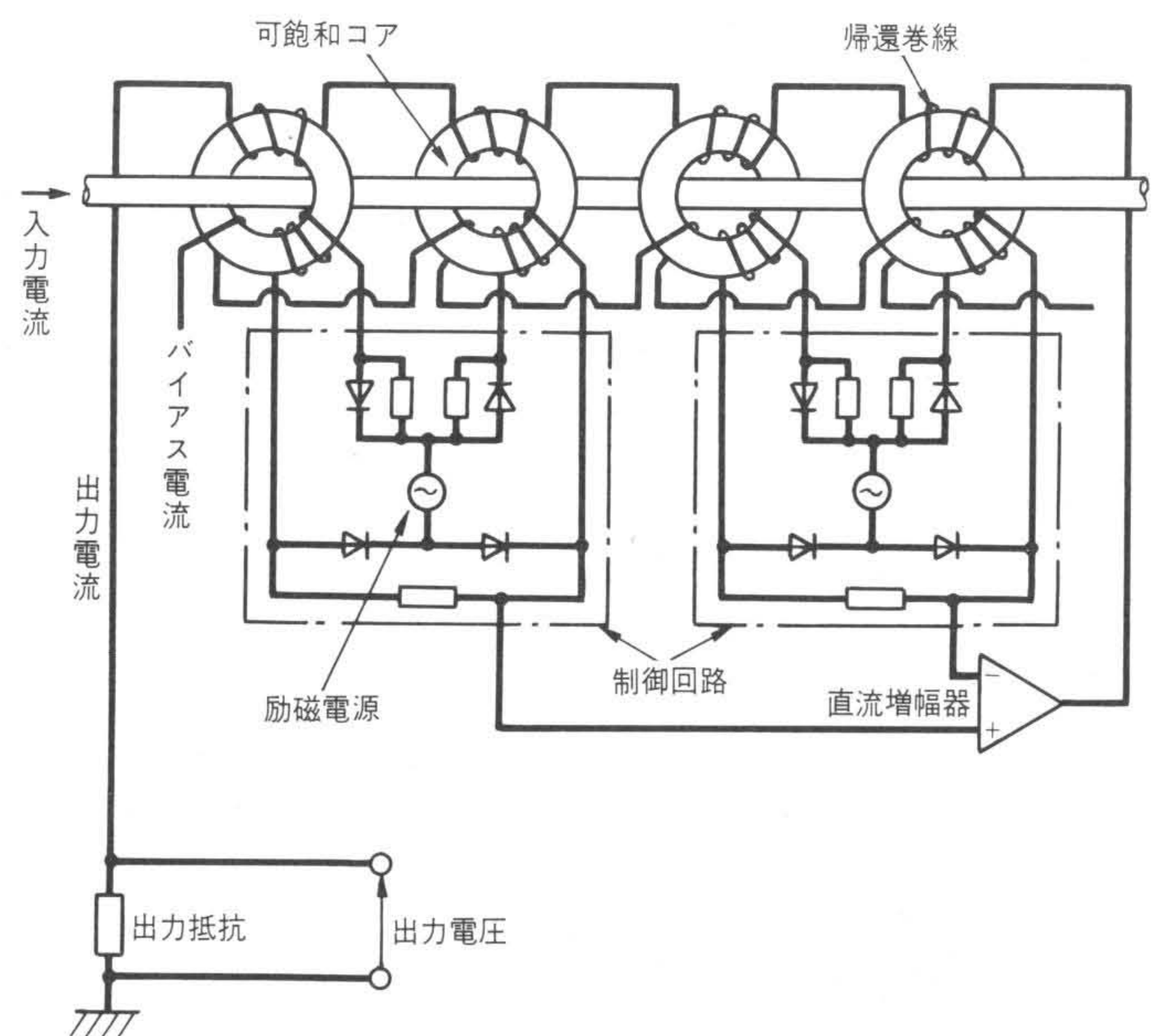


図6 高精度電流検出器構成 2台の瞬時応答式電流検出器の出力を、差動帰還増幅することによって高い精度で入力電流を検出することができる。

の要求精度よりも一桁以上優れた精度をもつ電流検出器を用いる必要がある。本電源に採用した電流検出器は、日立製作所が文部省高エネルギー物理学研究所の指導を得て独自に開発した4コアタイプ差動帰還増幅瞬時応答式電流検出器である¹⁾。

本電流検出器は、二組みの瞬時応答式電流検出器の出力を差動帰還増幅することによって格段の性能向上を図ったもの

であり、その構成を図6に示す。瞬時応答式電流検出器は二つのコアの可飽和特性を利用した直流変流器の一種であるが、出力にスリットがなく、主回路から絶縁して直流から交流まで幅広い周波数にわたって電流を検出できるという優れた特長をもっている。この検出器を二組み逆極性に組み合わせてその出力電圧の差分を増幅し、帰還巻線により入力電流による起磁力を打ち消すように動作させることによって、帰還巻線に入力電流に比例した電流を得るとともに、二組みの

表2 高精度・高安定度直流電流検出器仕様 本電源に採用した4コアタイプ差動帰還増幅瞬時応答式直流電流検出器は、直線性、出力脈動成分などの点で、極めて高い性能をもっている。

項目	仕様		
形式	4コアタイプ		
検出方式	差動帰還増幅瞬時応答式		
制御入力	AC200V ±10%		
入力電流	±1,500A		
出力電圧	±10V/入力電流		
性能	直線性	0.01%以下	
	オフセット	±1mV以下	
	出力脈動成分	固有脈動成分	5mVp-p以下
		50Hz成分	3mVp-p以下
	温度係数	±2ppm/°C	
	電源電圧係数	1ppm/%V	
出力インピーダンス	50Ω以下		

表3 サイリスタ直流電源から発生する脈動電圧計算例 サイリスタ直流電源の出力電圧には、理論高調波成分のほかに種々の要因による非理論高調波成分が含まれる。

n	V _n (%)	V _n /n (%)	n	V _n (%)	V _n /n (%)
1	1.2	1.20	21	1.2	0.06
2	3.4	1.70	22	3.0	0.14
3	1.2	0.40	23	1.2	0.05
4	2.4	0.60	24	16.2	0.68
5	1.2	0.24	25	1.0	0.04
6	1.2	0.20	26	3.6	0.14
7	1.2	0.17	27	1.0	0.04
8	2.0	0.25	28	1.6	0.06
9	1.2	0.13	29	1.0	0.03
10	3.6	0.36	30	1.0	0.03
11	1.2	0.11	31	1.0	0.03
12	32.8	2.73	32	2.0	0.06
13	1.2	0.09	33	1.0	0.03
14	3.6	0.26	34	2.6	0.08
15	1.2	0.08	35	1.0	0.03
16	1.8	0.11	36	10.4	0.29
17	1.2	0.07	37	1.0	0.03
18	1.2	0.07	38	3.6	0.09
19	1.2	0.06	39	1.0	0.03
20	2.0	0.10	40	1.0	0.03

注：略語説明など
 n(次数), V_n [脈動電圧振幅(無負荷直流電圧に対する割合)]
 条件 (1) 入力交流電圧不平衡3%
 (2) サイリスタ素子ゲートパルスの相間ばらつき±1度
 (3) サイリスタ素子ゲート点弧角70度
 (4) 整流相数 12相

特性のばらつきを相殺して、高精度電流検出を可能としている。更に、励磁電源電圧の安定化及び制御回路の恒温化を図ることにより安定度を高めている。

本検出器は次に示すような多くの特長を備えている。

- (1) 直線性、オフセット共に10⁻⁴以下である。
- (2) 出力脈動成分は10⁻³_{p-p}(実効値は10⁻⁴)以下である。
- (3) 安定度は±1×10⁻⁵に近い値である。
- (4) 外部磁界の影響を受けにくい。
- (5) 主回路と絶縁した出力を得られる。
- (6) 直流だけでなく数キロヘルツの交流も測定でき、周波数領域が広い。

5.2 高精度電流検出器の仕様

高精度電流検出器の仕様の一例を表2に示す。実機への適用に当たっては、電流検出器の性能を最大限に上げるため検出器電流の定格値を電源の出力電流の定格値に等しく選定した。

6 直流フィルタ

6.1 直流電源から発生する脈動電圧と電流

出力直流脈動電流は、電源の出力脈動電圧に起因して発生する。

サイリスタを用いた多相整流回路から構成される直流電源装置では、直流出力電圧に整流パルス数の整数倍の次数の理論高調波電圧ばかりでなく、交流入力電圧の相間不平衡に起因する偶数次調波電圧及びサイリスタ素子のゲート点弧パルスの各相ばらつきなどによる脈動電圧が含まれる。

表3に、12パルス整流直流電源装置の出力電圧に含まれる脈動電圧成分の計算例を示す。

直流電源の出力電流の脈動成分は、脈動電圧と負荷電磁石及び接続ケーブルのインピーダンスから決まるので、パッシブフィルタでの減衰効果が期待できない50~200Hz程度の比較的低周波分及び発生量の大きな600Hz, 1,200Hzの脈動電圧発生量が特に問題となる。

6.2 直流フィルタの構成

サイリスタ変換器から発生した出力電圧脈動成分を減衰させ出力側直流脈動電流を仕様値以下に抑えるため、今回の電源ではパッシブフィルタとアクティブフィルタの組合せ方式を採用した。図7にその構成を示す。

パッシブフィルタは直列リアクトルと並列コンデンサ(ダンピング抵抗付)から成る。これは比較的高い周波数の成分

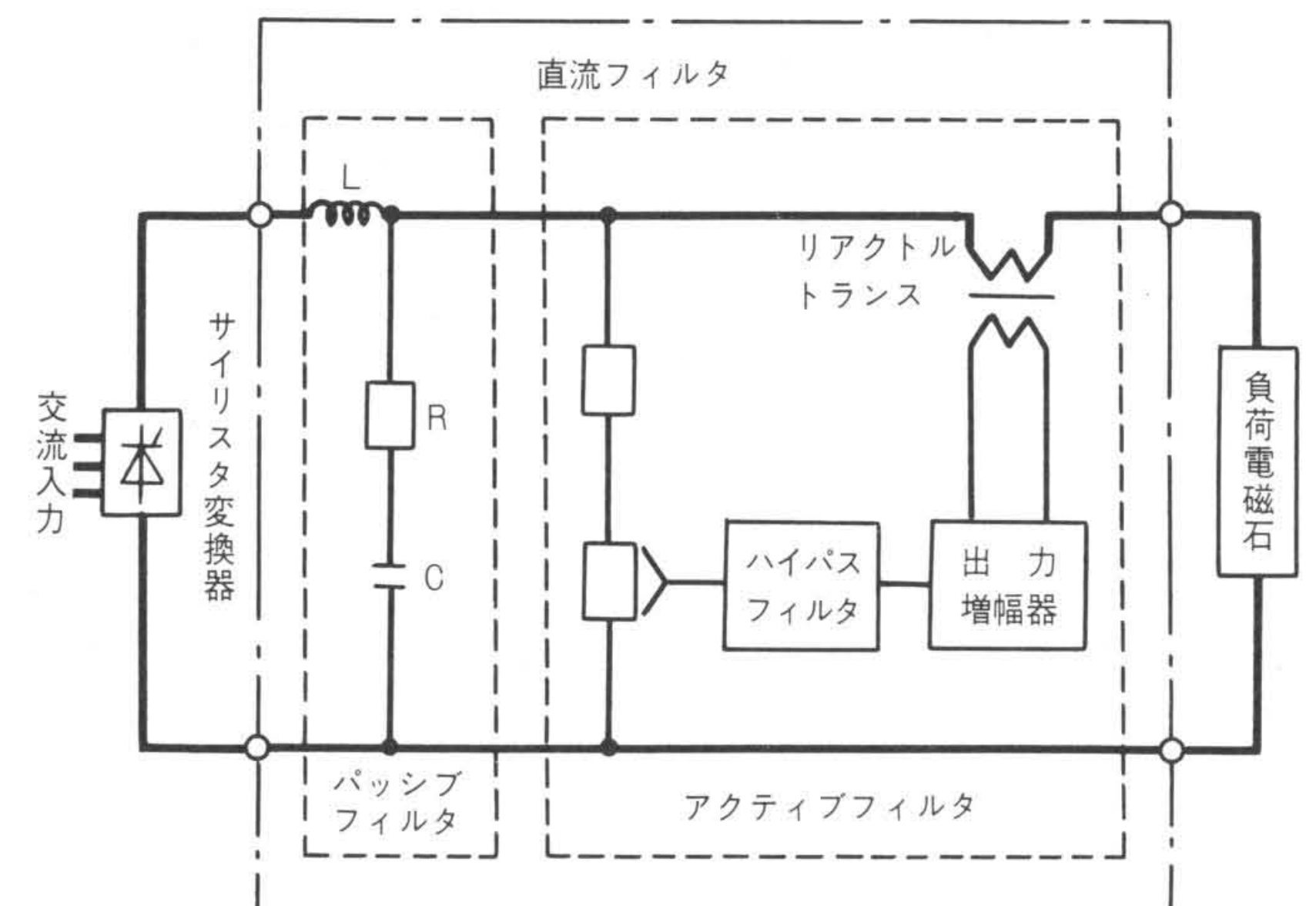


図7 直流フィルタ構成 パッシブフィルタとアクティブフィルタの組合せ方式により、大きなフィルタ効果が得られる。



図8 試作機試験状況 文部省高エネルギー物理学研究所で実負荷と組み合わせ、試作機の動特性の評価試験を実施した。

表4 試作機仕様 電磁石用電源としての図3に示す要求性能を確認するため、実用機(80台製作)に先立ち、本仕様に基づいて試作を行なった。

項目	仕様
用途	0電磁石用電源
形式	屋内用自立盤
交流入力	AC420V 3相 50Hz
定格直流出力	315kW
定格直流電圧	210V
定格直流電流	1,500A
冷却	水冷式
寸法	幅2,200×奥行1,300×高さ2,300(mm)
重量	2,200kg

(理論調波である600Hz成分以上)の減衰を目的としたものであり、脈動成分の大きな部分を低減し、次段のアクティブフィルタの容量を軽減している。

アクティブフィルタは50Hz成分など、パッシブフィルタでは減衰できない比較的低次の脈動電圧の減衰を主目的としたもので、リアクトルトランス結合方式²⁾を採用した。これは電圧検出部、ハイパスフィルタ、出力増幅器及びリアクトルトランスから構成される。その動作原理は、アクティブフィルタの入力電圧に含まれる脈動電圧をハイパスフィルタを通して検出及び増幅し、リアクトルトランスを介して主回路に逆位相で重畳させることにより、脈動電圧の打ち消しを行なうものである。本方式は直列トランジスタ方式のアクティブフィルタに比較して、次のような特長をもっている。

- (1) 信頼性が高い。
- (2) 出力増幅器の容量が小さく、発生損失も小さい。
- (3) 出力増幅器以外の制御回路構成がハイパスフィルタだけであり、簡単である。
- (4) 出力増幅器がリアクトルトランスにより主回路と切り離されているので、主回路故障時に事故の波及を受けにくい。

6.3 目標性能

出力側直流脈動電流値を規定値以内とするため、直流フィ

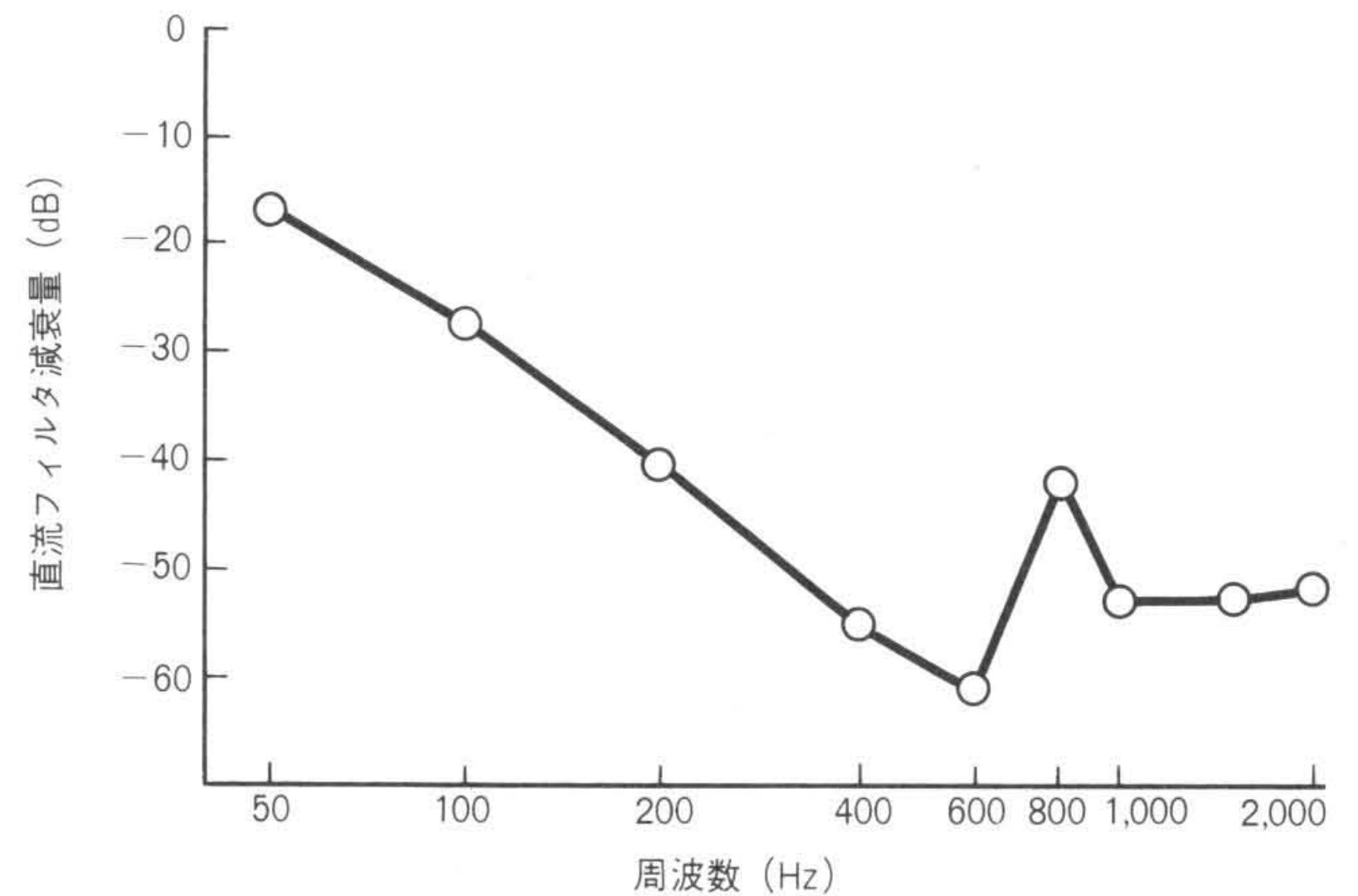


図9 直流フィルタ減衰量測定値 直流フィルタ入出力電圧波形分析から直流フィルタ減衰量を測定した。50Hz成分で-17dB、600Hz成分で-61dBという良好な減衰特性が得られた。

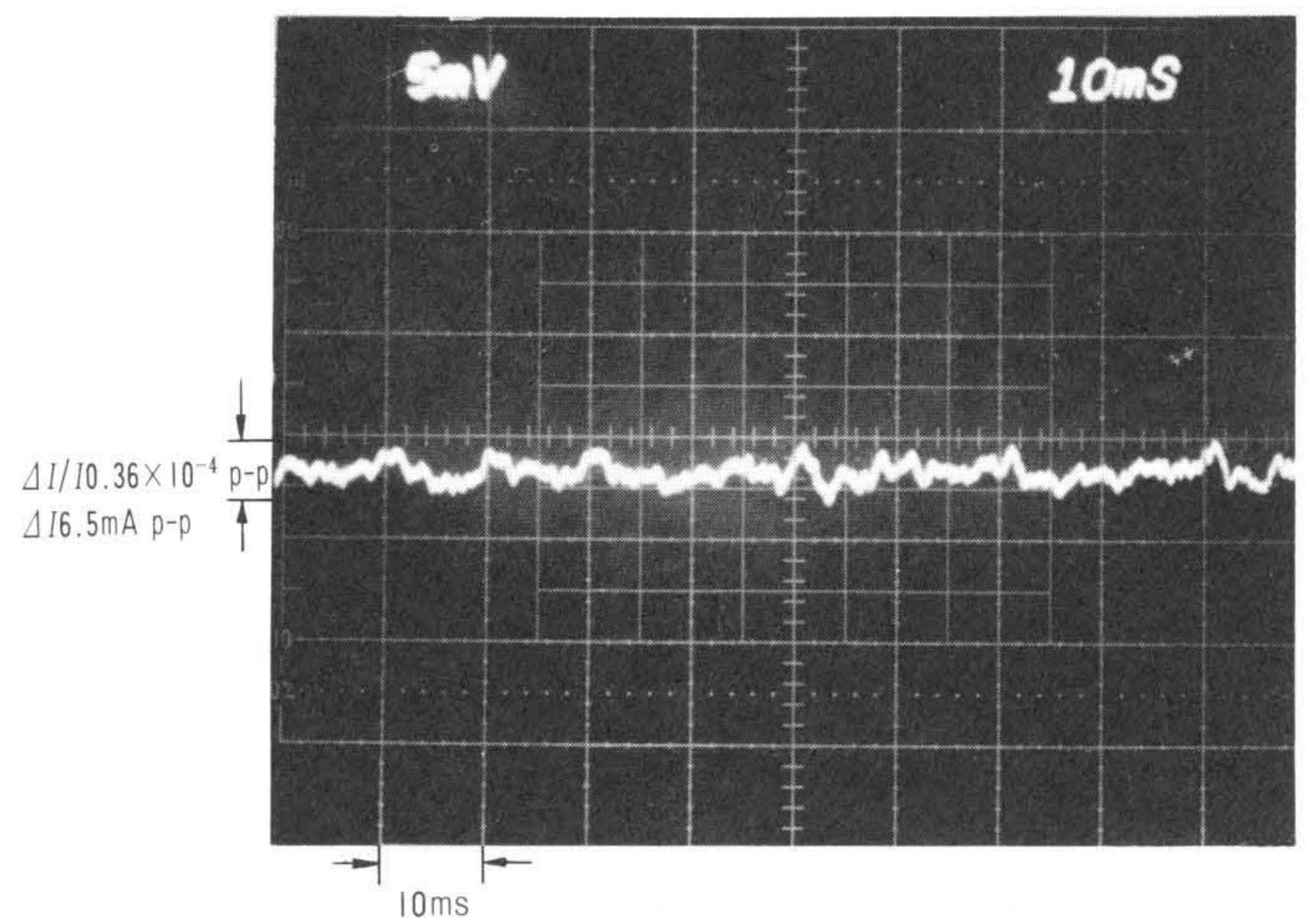


図10 180A通電時出力脈動電流波形 負荷電磁石の磁場変動から出力電流脈動率を測定した。直流フィルタの効果により、要求性能 2×10^{-4} p-pを十分満足している。

ルタの減衰量は50Hz成分を-17dB、600Hz成分を-48dBとすることを目標とした。

7 試験結果

7.1 試作機仕様

今回電磁石電源80台の製作に当たり、その要求性能が現有技術の極限に近いものであることから、独自に試作機を製作して性能特性の評価を行ない万全を期した。表4に試作機の仕様を示す。

7.2 試験結果

試作機の試験、評価に当たっては、工場内での静特性試験だけでは評価が不十分であるため、文部省高エネルギー物理学研究所の協力を得て同研究所内で実負荷と組み合わせ、総合的な特性評価試験を実施した。図8は実負荷との組合せ試験状況である。以下、試作機の試験結果について報告する。

(1) 直線性試験

デジタル設定値に対する出力電流モニタ出力の偏差を測定し、180Aから1,500Aまでの最大偏差の仕様値 $\pm 1 \times 10^{-4}$ に対し $\pm 0.4 \times 10^{-4}$ という良好な結果を得た。

(2) 出力直流脈動電流

直流フィルタの入力電圧と出力電圧の波形スペクトル分析

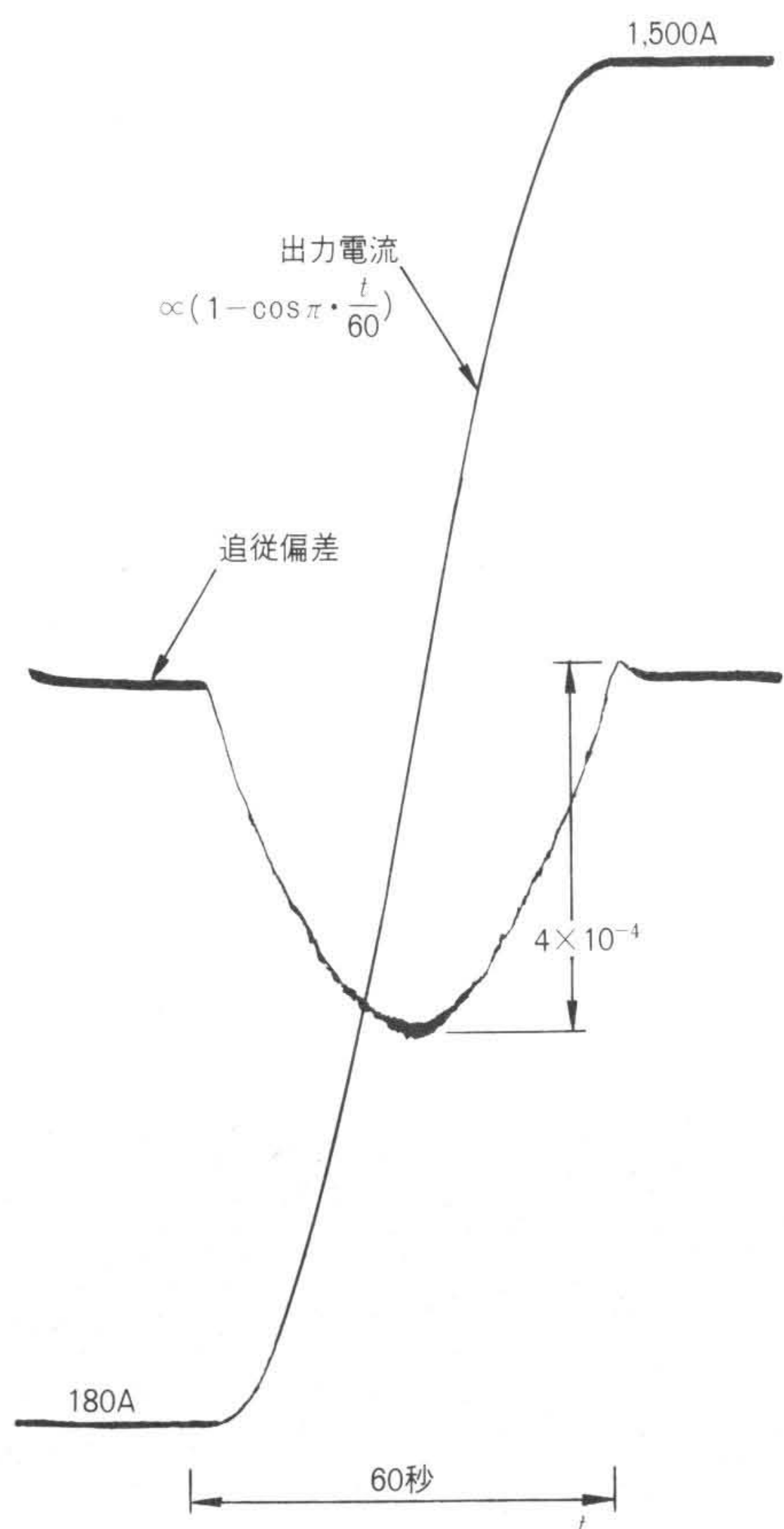


図11 電流追従性試験結果 出力電流を180A(12%)から1,500A(100%)までパターン運転したときの電流偏差は、仕様値 1×10^{-3} 以下を満足している。

結果から求めた直流フィルタによる減衰量を図9に示す。パッシブフィルタとアクティブフィルタの併用により、50Hz成分で-17dB、600Hz成分で-61dBという減衰効果が得られた。このとき、負荷電磁石に流れた直流脈動電流量は、負荷電磁石(積層型電磁石)の磁場の変動量をサーチコイルで検出する方法により測定した。図10に検出波形を示す。今回の電源仕様では、直流電流脈動率は設定値に対する相対値で規定されるため、入射電流180A(12%電流)通電時がより厳しい仕様となっているが、仕様値 2×10^{-4} p-pに対し 0.36×10^{-4} p-pという高性能が実現でき良好な結果を得た。

(3) 電流追従性試験

電子・陽電子ビームを確実に加速するためには、電流パターンに対する電源出力電流の追従特性は電源システムの運転上重要な特性である。実際の運転パターン入力に対する出力偏差の測定結果を図11に示す。定電流制御系の応答を十分速くするとともに、負荷時定数やアクティブフィルタなどによる制御系の遅れ要素を補償する制御を行なうことにより、仕様値 $\pm 1 \times 10^{-3}$ に対し $\pm 4 \times 10^{-4}$ という良好な結果を得た。

(4) 安定度試験

電源の出力安定度は温度などの環境変化及び使用電子部品の経時変化によるドリフトなどの影響を受ける長時間安定度だけでなく、受電電圧急変などの短時間の外乱に対しても十分安定でなければならない。図12に安定度試験測定結果の一部を示す。180A通電時、受電電圧の急変を含む変動にもかかわらず出力電流の変動率は180A(12%電流)に対して 5.4×10^{-5} p-p以下に抑えられている。この測定結果から安定度及び応答特性について所期の性能を十分に満足していることが確認された。

また、180A及び1,500Aの電流値で8時間通電試験を実施し、出力電流安定度が図3に示すそれぞれの仕様値を満足し

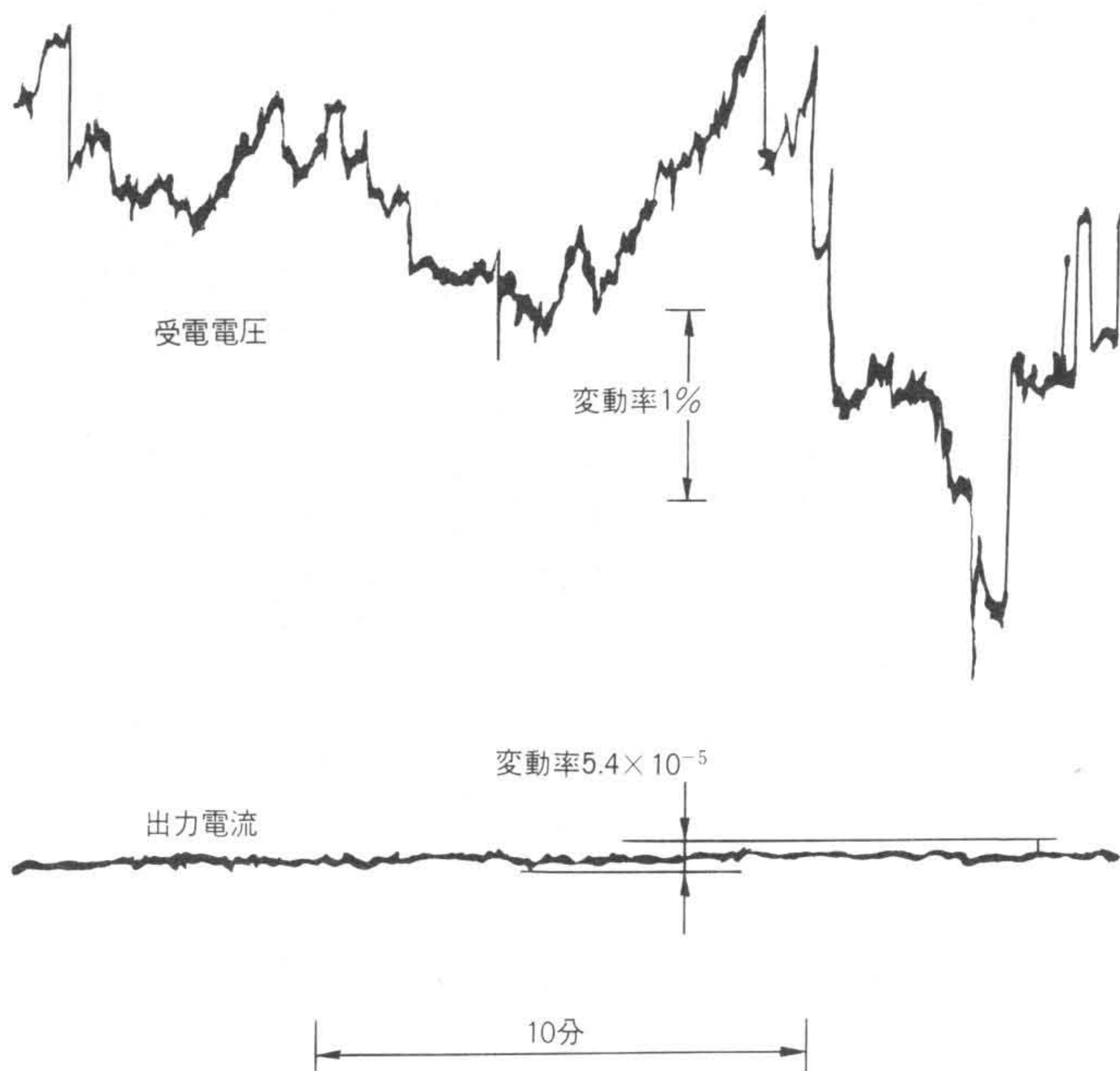


図12 180A通電時出力安定度試験結果 受電電圧の変動にもかかわらず、出力電流変動率は12%電流に対し仕様値 $\pm 2 \times 10^{-4}$ 以内に抑えられている。

ていることが確認された。

8 結 言

直流脈動電流を含む出力電流安定度は100%電流に対し 1×10^{-4} 、12%電流に対し 2×10^{-4} という高性能を要求される電磁石用励磁電源の仕様を満足させるために、高精度電流検出器、直流フィルタなどを使用した先行試作機を製作し、文部省高エネルギー物理学研究所で実機コイルとの組合せ試験を実施した。その結果、特に仕様の厳しい12%電流に対しても安定度 5.4×10^{-4} p-p、脈動率 0.36×10^{-4} p-pという仕様範囲内の優れた性能を得、直線性、電流追従特性についても良好な結果を得た。

今回の試験は、特定の負荷条件で実施したものであり、各種負荷コイル定数の組合せによっては若干異なった結果となる。しかし、80台の電源については各々の負荷条件に対してシミュレーションを行ない、制御定数の切換などにより仕様を満足できる見通しを得ており、これらの結果を踏まえて現在80台の実用機を製作中である。

本電源は、加速器用に限らず数百ないし数千アンペアの電流を用いて高安定度の磁場などを発生させる物理学実験装置などの用途に今後応用されると考えられる。また、本電源に用いている高精度電流検出器は、その高速応答性を生かして、交流成分を含む電流や過渡電流波形などの高精度測定にも利用できると考えられる。

最後に、本電源の開発、先行試験などに御指導、御協力をいただいた関係各位に対し、深く感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 中村, 外: 高精度, 高安定度直流電流検出器, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-80-43(昭55-5)
- 2) 新富, 外: 直流アクティブフィルタ, 日立評論, 63, 6, 397~400(昭56-6)