

# 放射光実験施設の概要と電磁石及び電源

## Outline of "Photon Factory" and Magnets and Power Supply System

放射光の利用研究は近年目覚ましい発展を遂げ、我が国でも各分野研究者の共同利用施設として、文部省高エネルギー物理学研究所が専用の2.5GeV放射光実験施設の建設を計画し、完成したものである。

本施設の放射光を発生するストレージリングに設置される偏向電磁石、四極電磁石及びその励磁電源と電子直線加速器からストレージリングまでのトランスポートライン用各電磁石の設計製作を日立製作所が担当した。

各電磁石とも磁場強度の空間的分布は、高い一様性と高精度を要求されるため、磁極面の加工精度は±0.02mm以内、組立精度、磁極間隙の絶対値は±0.05mm以内に製作し所期の性能を達成できた。また安定化電源については、偏向電磁石用及び四極電磁石ともトランジスタ制御方式を採用し、それぞれ安定度は $5 \times 10^{-4}$ 、 $1 \times 10^{-5}$ 以下を達成できた。

本論文では、これらの電磁石と偏向電磁石用電源の技術的内容及びその成果について述べる。

木原元央\* *Motohiro Kihara*  
 橋本 宏\*\* *Hiroshi Hashimoto*  
 吉田進伍\*\* *Shingo Yoshida*  
 田中利雄\*\*\* *Toshio Tanaka*

### 1 緒 言

光で物質を研究するには、物質の原子構造あるいは分子構造に合わせた波長の光を選ばなくてはならない。極めて小さな物を見るには光学顕微鏡がよく用いられるが、分子や原子を直接見ることはできない。原子や分子の大きさは $10^{-8} \sim 10^{-10}m$ であり、これらと同程度の波長をもつ極紫外線～X線を用いることにより原子、分子の世界が見えてくる。この波長領域の理想の光源と期待されるものとして、シンクロトロン放射光が脚光を浴びている。放射光利用の関心は国際的にも大いに高まり、世界各国で放射光専用の電子ストレージリングが建設されている(表1<sup>1)</sup>)。我が国でも文部省高エネルギー物理学研究所で専用の2.5GeV放射光実験施設を建設し、現在運転中である。

放射光を発生するためには、電子直線加速器(以下、ライナックと言う。)から送られてきた高エネルギー(高速)の電子を

長時間、安定に長円軌道にため込む。この装置が電子ストレージリングである。ストレージリングの軌道上には電子ビームを曲げるための偏向電磁石と、電子ビームが発散しないよう収束させるための四極電磁石、更にはライナックからストレージリングまでのトランスポートラインにも電子ビームの移送に必要な電磁石が多数設置されている。またこれらの電磁石に電流を供給するために、精密高安定化電源が準備されている。日立製作所はこれらの電磁石及び電源の製作を担当したのでそれについての技術的内容について述べる。

### 2 施設の概要

放射光を発生するストレージリングはほぼ長円に近く、一周の長さ約186mで電子をためる超高真空パイプ、電子の進行方向を曲げる28個の偏向電磁石、電子ビームを絞る58個の四

表1 世界各国の放射光実験施設 世界各国の代表的な放射光実験施設及びその建設計画を示す。

国 別	機 関	加速器名称	エネルギー (GeV)	電 流 (mA)	フォトンエネルギー (keV)	完 成 (予定) 年	備 考
日 本	東京大学物性研究所	SOR-RING	0.4	500	0.13	1975	専用
	文部省高エネルギー物理学研究所	PHOTON FACTORY	2.5	(500)	4.0	1982	"
	分子科学研究所	UVSOR	0.6	(500)	0.22	1984	"
	電子技術総合研究所	ETL-TERAS	0.66	100	0.32	1981	"
米 国	ウィスコンシン大学	TANTALUS-I	0.24	100	0.048	1968	専用
	ブルックヘブン国立研究所	NSLS-X	2.5	(500)	4.24	1982	"
	スタンフォード大学	SPEAR	4.0	100	11.2	1974	共用
	連邦基準局(NBS)	SURF-II	0.24	40	0.037	1976	専用
	コーネル大学	CESR	8.0	100	35.0	1979	共用
英 国	ダレスベリー研究所	SRS	2.0	200	3.20	1980	専用
ドイツ	DESY	DORIS	5.0	100	22.9	1974	共用
フランス	LURE	ACO	0.54	150	0.32	1966	専用
ソ 連	モスクワ大学	PAKHRA	1.3	300	1.22	1980	専用
	ノボシビルスク研究所	VEPP-III	2.25	100	4.11	1977	"
イタリア	イタリア原子核研究所	ADONE	1.5	60	1.50	1978	専用

\* 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 \*\*\* 日立製作所大みか工場

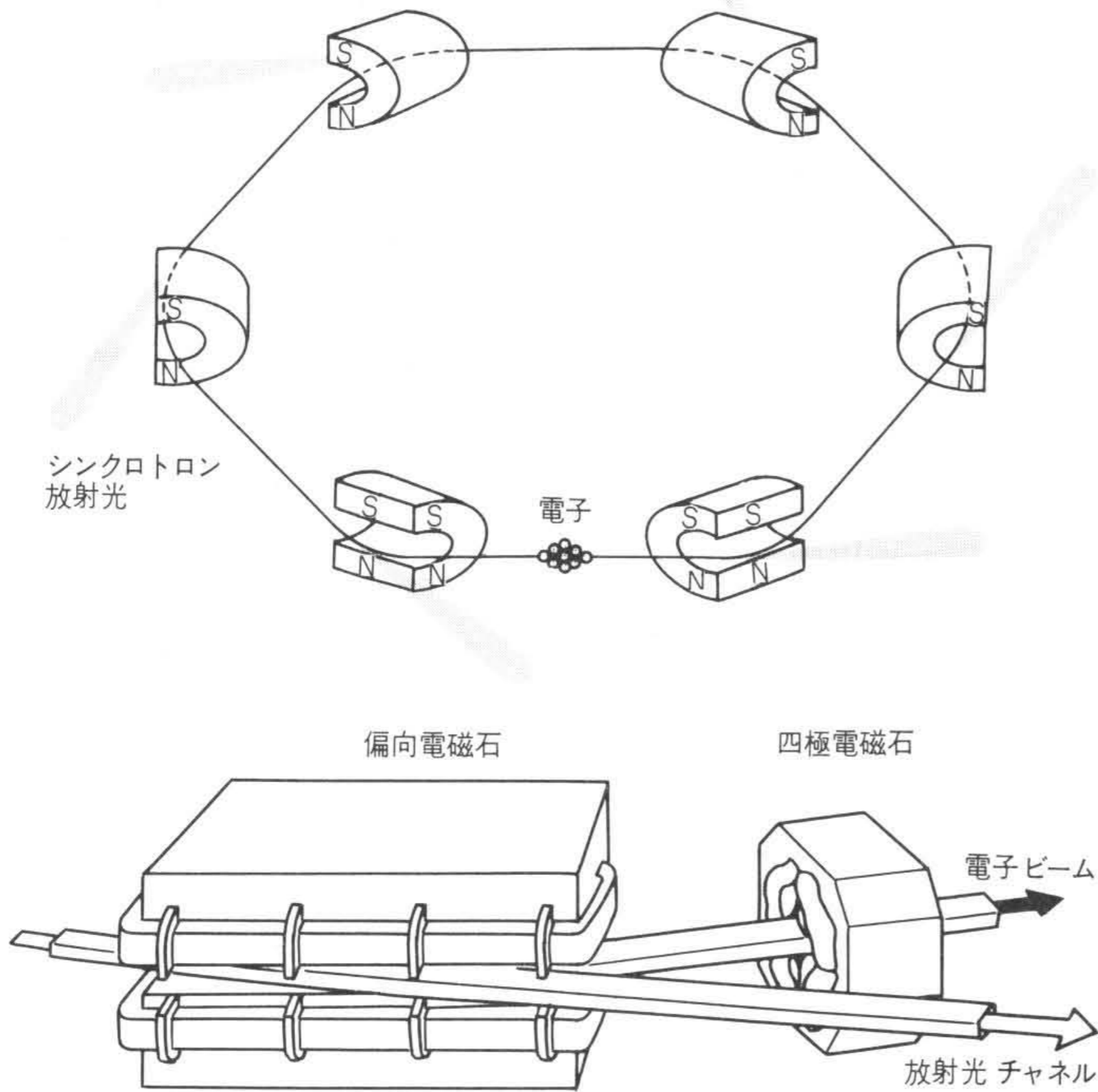


図1 放射光発生原理 偏向電磁石で電子が曲げられるたびに、電子から光が放射される。

極電磁石、電子にエネルギーを補給する加速空洞2個から成っている。ライナックで2.5GeVに加速されストレージリングに導かれた電子は、偏向電磁石の磁場の力を受けて急激に方向を変えられると、エネルギーの一部を失って放射光を発する。放射光は長円軌道上に置かれた偏向電磁石で方向を曲げられるたびに電子から光が放射される(図1<sup>2)</sup>)。電子の失ったエネルギーはすべて光に変換されるので、極めて強力な光源となる。これがシンクロトロン放射光と呼ばれる赤外線からX線に及ぶ完全な連続スペクトルの光である。

電源は各電磁石に高安定電流を供給するもので、偏向電磁石用電源は1台、四極電磁石用電源は5台から成っている。いずれもトランジスタを用いた精密直流安定化電源である。

### 3 各種電磁石

#### 3.1 ストレージリング用電磁石

偏向電磁石の外観を図2に、四極電磁石の外観を図3に、それぞれの主要諸元を表2に示す。

偏向電磁石は、鉄心、磁極、主コイル、補助コイル、コイル取付金具、架台、冷却水配管、配線から成っている。鉄心材質は本体がSS41相当、磁極は磁気特性良好なS10C相当品を適用した。磁界分布は高い一様性が要求されるので、磁極面の形状加工精度±0.02mm以内、組立精度は、磁極間隙の絶対値±0.05mm以内、上下磁極中心の位相差(ビームの半径方向)±0.1mm以内となっている。真空パイプを組み込む必要から鉄心を上下に2分割しているが、合せ目にロックピンを用いて位置精度の再現性を確保した。主コイルは、中空導体を12ターン巻いて1パンケーキとし、2パンケーキを1コイルとしている。耐放射線性は $10^6$ rad以上の要求があるため、コイルの絶縁はエポキシセミキュアマイカテープとエポキシセミキュアガラステープを用い、加熱加圧してレジンを硬化させるプリプレグ方式<sup>3)</sup>を採用した。コイルは支持金具により鉄心に固定し、マニホールドから絶縁ホースを介して1パン

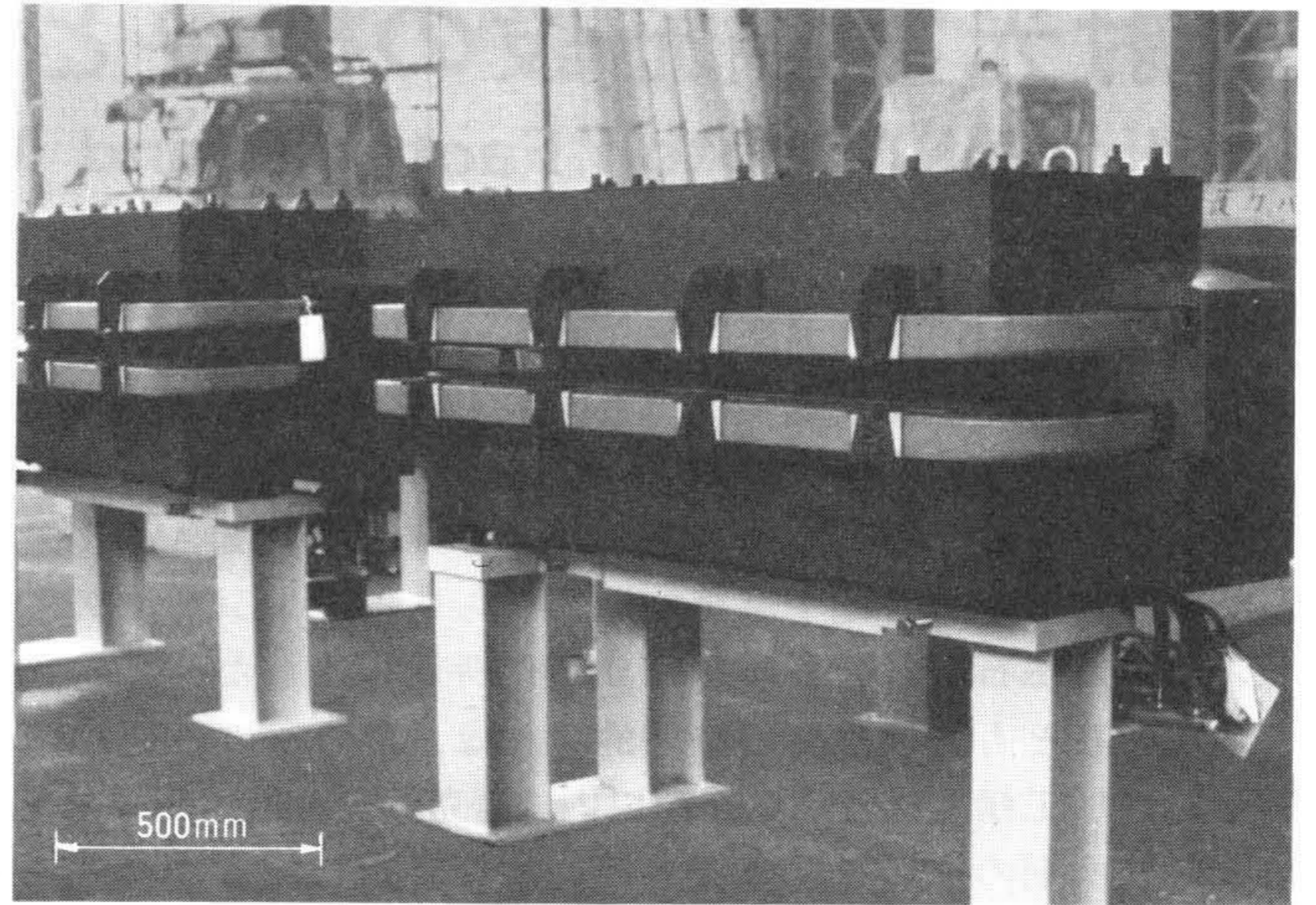


図2 ストレージリング用偏向電磁石の外観 C形鉄心に主コイルを上下に配置し架台上に設置した偏向電磁石を示す。

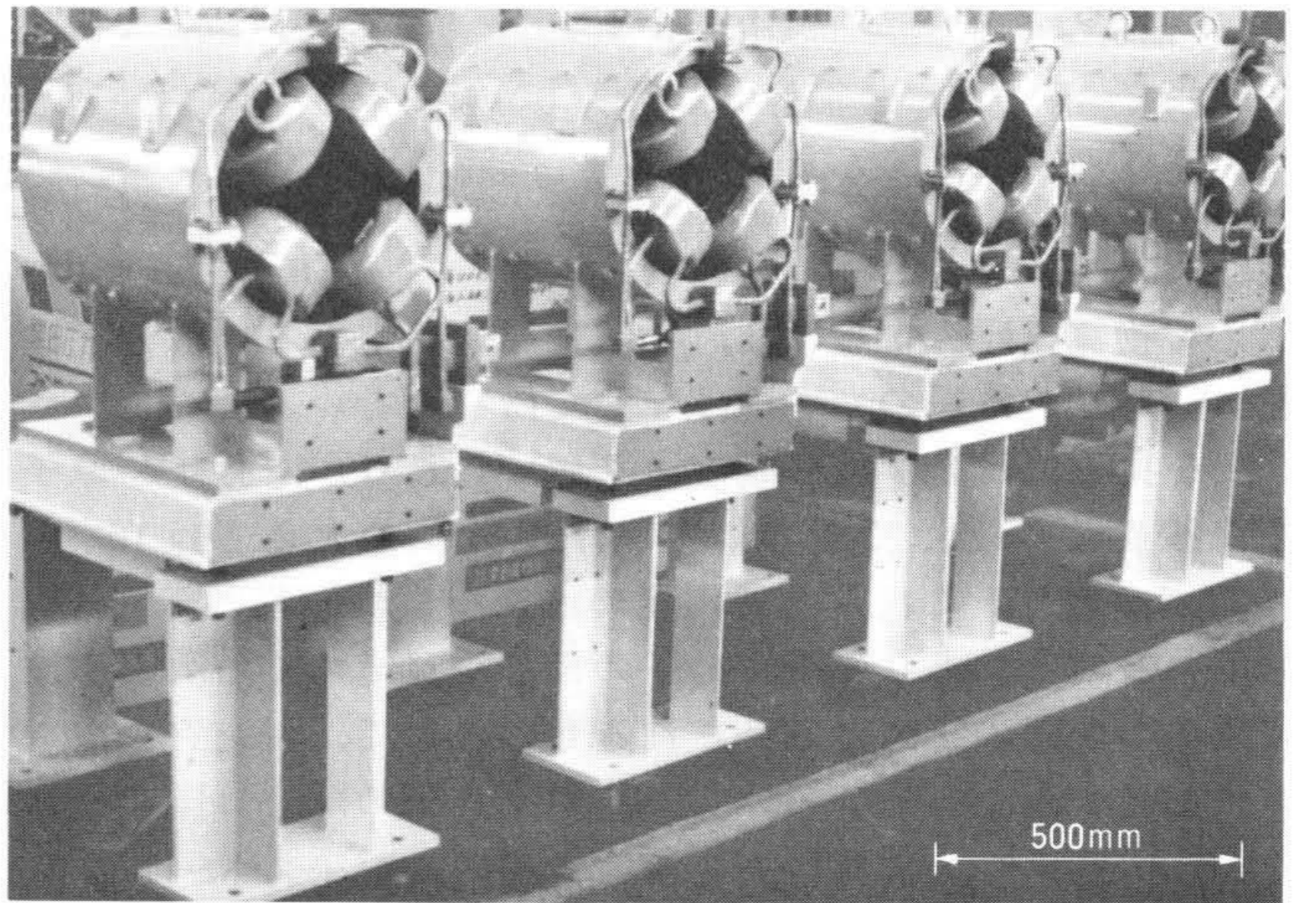


図3 ストレージリング用四極電磁石(タイプI)外観 円筒形鉄心に四個の磁極とコイルを組み合わせ架台上に設置した四極電磁石を示す。

表2 ストレージリング用電磁石主要諸元 ストレージリング用偏向電磁石及び四極電磁石の主要諸元を示す。

(a) 偏向電磁石

台数(台)	最大磁場(kG)	最大電流(A)	最大電圧(V)	磁極間隔(mm)	磁極幅(mm)	鉄心長(mm)
30	15	1,530	27.6	70	270	1,850

(b) 四極電磁石

タイプNo.	台数(台)	磁場こう配(kG/mm)	最大電流(A)	コイル抵抗(mΩ)	鉄心幅(mm)	鉄心長(mm)
I	30	0.988	529	31.9	50	500
II	8	1.530	913	31.9	70	500
III	4	1.153	610	53.2	70	1,000
IV	8	1.226	727	42.6	70	750
V	8	1.45	828	36.1	70	600

注：共通仕様(内接円直径 110mm)

ケーキを1回路として、冷却水により直接冷却される。補助コイルは鉄心の中間部に取り付けている。鉄心には電磁石の位置を測定するときに用いる標準面を、鉄心上部に1箇所、側部・長手方向に2箇所設け、側部標準面にはターゲット取付け用の基準穴を設けている。

四極電磁石は、鉄心、磁極とも材質はS10C相当品を使用している。磁極面の形状は、双曲線と直線、円弧の組合せから

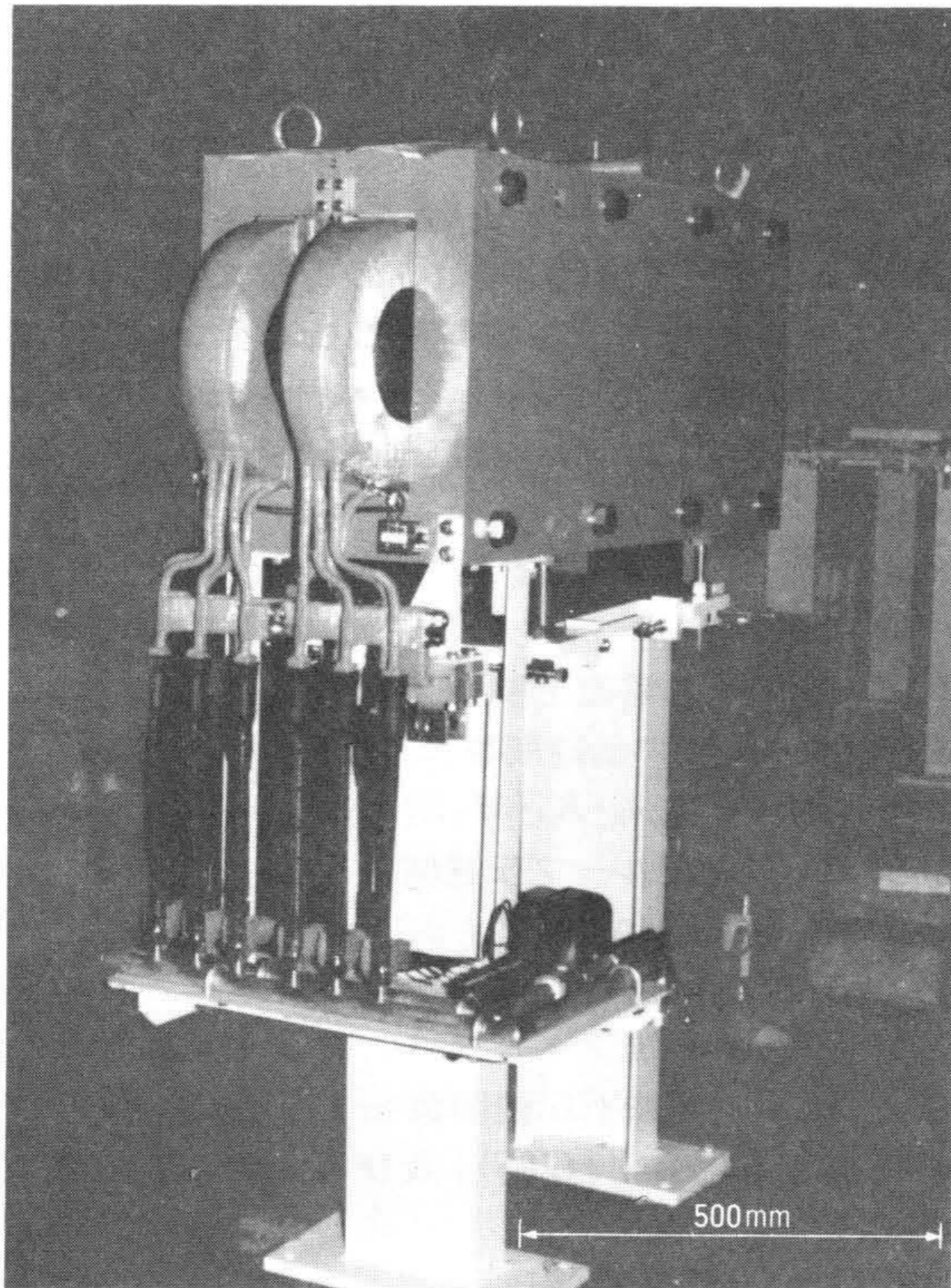


図4 トランスポートライン用偏向電磁石(立て位置設置)外観  
H形鉄心にコイル2個を組み合わせ、電気端子と冷却水配管を下方に配置している。

表3 トランスポートライン用電磁石主要諸元 トランスポートライン用偏向電磁石及び四極電磁石の主要諸元を示す。

(a) 偏向電磁石

台数 (台)	偏向角度 (度)	最大磁場 (kG)	電流 (A)	電圧 (V)	磁極間隔 (mm)	鉄心長 (mm)
6	7.5	約11	330	24	35	1,000
2	6	約11	330	21	35	790
1	5	約11	330	18	35	650

(b) 四極電磁石

台数 (台)	最大磁場こう配 (kG/cm)	電流 (A)	電圧 (V)	内接円直径 (mm)	鉄心長 (mm)	コイル巻数 (ターン/極)
10	約0.76	3	101	63	300	1,000
9	約1.3	3	50.8	36	300	570

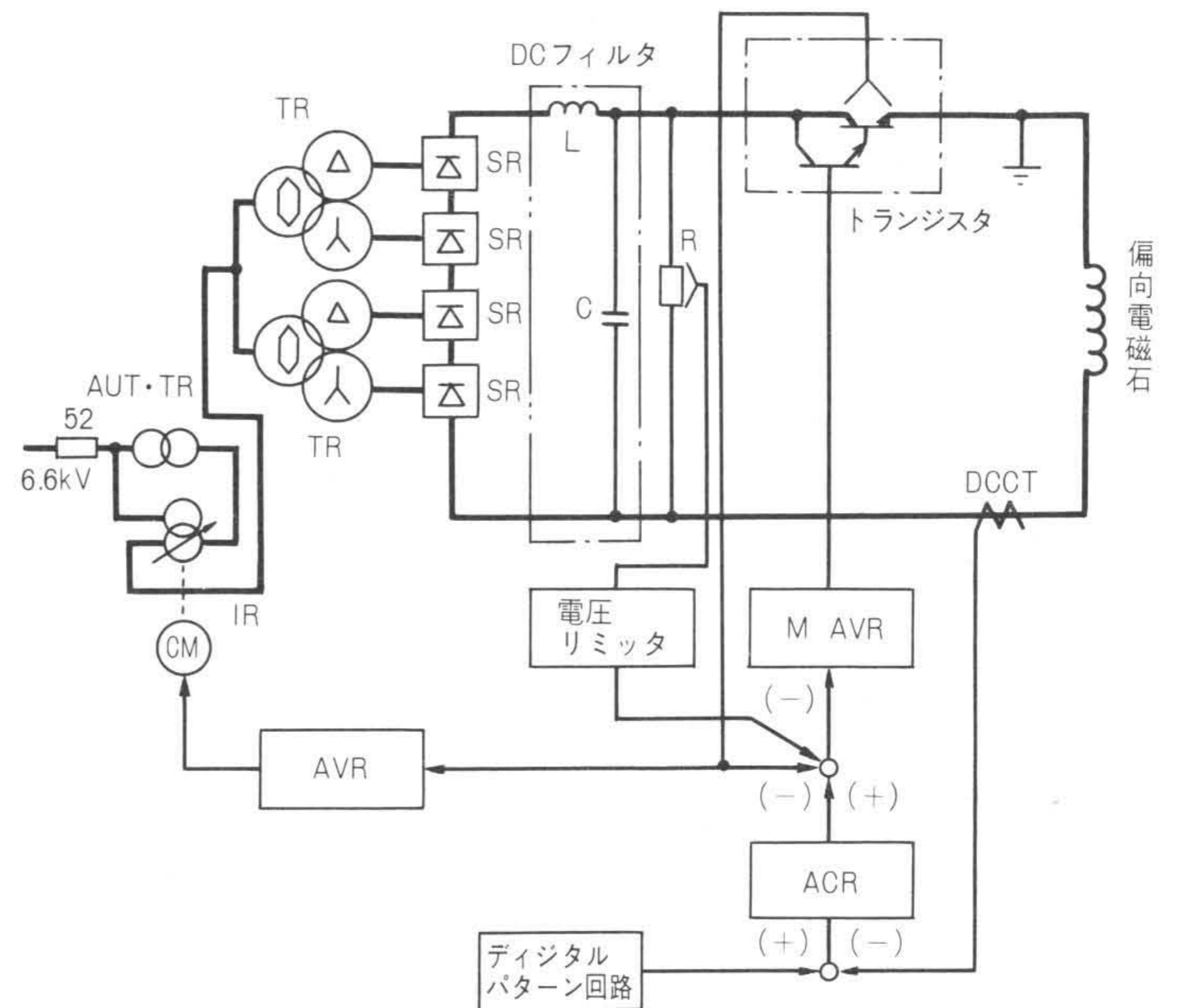
成っているが、磁界分布は高精度が要求されるため、磁極面の加工精度 $\pm 0.02\text{mm}$ 以内、組立精度は対面する磁極の間隔 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内、ただしS極間間隔とN極間間隔との差 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内、隣接する磁極相互の最大最小値の差 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内としている。また四極電磁石に重要な対称性を確保するため、鉄心は円筒形鉄心とした。鉄心は偏向電磁石と同様に、上下に2分割し合せ目にノックピンを設け、鉄心上部と側部に標準面を設けている。

コイルは、中空導体を23ターン巻いて1コイルとし、偏向電磁石と同じくプリプレグ方式絶縁を採用した。コイルの冷却は、タイプIは2コイルを、タイプII~Vは1コイルを1回路として冷却水を流して冷却し、電気的には4コイルをシリーズ接続としている。

### 3.2 トランスポート用電磁石

偏向電磁石の外観を図4に、偏向電磁石及び四極電磁石の主要諸元を表3に示す。

偏向電磁石は3種類あるが、基本構造は同じである。鉄心材質はSS41相当品を使用し、鉄心は磁極と一体構造とし、上



注：略語説明 AVR(Automatic Voltage Regulator)  
ACR(Automatic Current Regulator)  
SR(シリコン整流器)  
TR(変圧器)  
M-AVR(マイナ電圧制御)  
DCCT(直流変流器)  
IR(誘導電圧調整器)

図5 偏向電磁石電源単線接続図 電源への影響及び電流リップルを最小限にするため、サイリスタ変換装置を使用せず24相シリコン整流器とトランジスタの組合せとした。

下に分割して合せ目にノックピンを用いている。主要精度は、磁極面加工精度 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内、極極面の間隔 $\pm 0.1\text{mm}$ 以内、上限磁極のずれ(ビームと直角な方向) $\pm 0.1\text{mm}$ 以内となっている。鉄心上面には据付基準となる標準面を、立てて設置する電磁石には電磁石の設定角度を補正した標準面を設け、ターゲット取付穴を設けている。主コイルは、中空導体を16ターン巻いて1パンケーキとし、3パンケーキを1コイルとして、導線を200ターン巻き回した補助コイルと組合せ、低電圧用として耐放射線性に優れているノーメックス(Dupont社ポリアミド紙)とガラステープとを、レジ塗り込み方式により絶縁形成している。コイルの冷却は、上下コイルを6回路並列として冷却水により直接冷却している。

四極電磁石は2種類あるが、基本構造は同じであり、鉄心磁極とも材質はSS41相当品を使用し、ストレージリング用四極電磁石と同様な円筒形鉄心とした。磁極面は双曲線と直線から成る曲面となっており、主要精度は、曲面の加工精度 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内、組立総合精度 $\pm 0.1\text{mm}$ 以内としている。鉄心上面には据付基準用標準面とターゲット用基準穴2個を設けている。コイルはガラス絶縁線にレジンを塗り込みながら巻き直し、前記偏向電磁石と同様にレジ塗り込み方式を用い絶縁している。

## 4 偏向電磁石電源

偏向電磁石用電源は、放射光実験装置の性能を決定する重要な装置の一つであり、シリコン整流装置により直流に変換後トランジスタを経て、直流電源として供給される。図5に偏向電磁石電源の単線接続図を示す。

誘導電圧調整器とシリコン整流装置、トランジスタの組合せによる電源装置は、電磁石の所望電流及び後述の制御性能

を得るため、以下に述べるような特徴をもっている。

- (1) 従来使用していたサイリスタ変換装置は、他の設備のノイズ源となるため使用せず、誘導電圧調整器とトランジスタによる制御とし、誘導電圧調整によるパターン制御と、トランジスタで高速、電流制御を行なった。
- (2) シリコン整流装置は、三相ブリッジ4段カスケード接続とし、整流器用変圧器の出力電圧を24相整流しトランジスタに直流電圧を供給する方式とした。
- (3) 60kWのトランジスタ電源装置は、100Wのトランジスタを使用し、1ユニット49個実装の27ユニット構成とし水冷却方式とした。
- (4) 制御装置は、デジタルパターン回路とアナログ制御回路の組合せとし、主要制御部分は±0.3℃の恒温槽盤内蔵とした。

## 5 制御装置

### 5.1 制御装置に要求される性能

制御装置も放射光実験装置の性能を決定する重要な装置の一つである。したがって、制御装置に要求される性能は極めて厳格なものである。

表4に、偏向電磁石電源装置及び制御装置に要求される仕様と所要性能を示す。

### 5.2 制御装置の構成

制御装置の制御機能は、ICなどの半導体を中心とした高精度増幅素子、各種デジタル素子により構成される。図6に制御ブロック図を示す。また、主な機能であるAVR(Automatic Voltage Regulator), ACR(Automatic Current

表4 偏向電磁石電源及び制御装置の仕様と所要性能 偏向電磁石電源及び制御装置の主な仕様及び所要性能を示す。

項目	仕様及び所要性能
出力仕様	DC 800V 1,500A
電流制御範囲	5~100% (75~1,500A)
電流安定度	±1~10 <sup>-4</sup> /d at 70~100% (1,050~1,500A)
電流設定精度	1×10 <sup>-3</sup>
直流電流直線性	1×10 <sup>-3</sup>
直流電流リップル	1×10 <sup>-5</sup> (p-p)

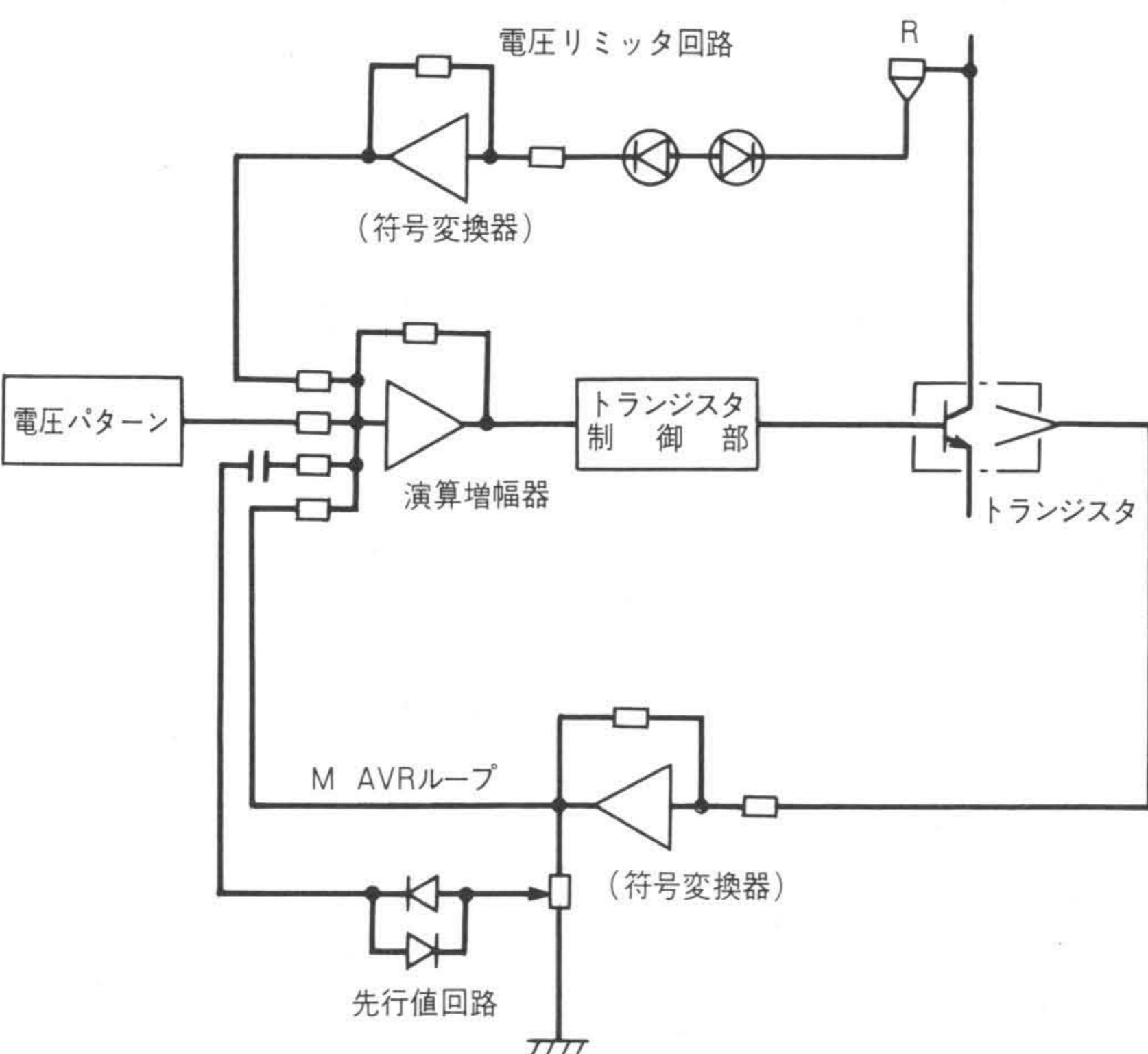


図6 M AVR回路構成 トランジスタ負担を最少限に抑えるため高速AVR制御回路を構成している。

Regulator)及びマイナ電圧制御(以下、M AVRと略す。)について述べる。

### (1) AVR

AVR回路は、電流パターン変更(5~100%)時に、シリコン整流装置の入力電圧を変化させてトランジスタの負担電圧を常に一定に保つよう±0.5%の電圧制御を行なっている。また、ACR系との相互干渉を避けるため周波数応答を大幅に遅らせており、 $\omega c \approx 0.2 \text{ rad/s}$ の積分制御を行なっている。

### (2) ACR

ACR回路は、電磁石の時定数が非常に大きいこと、及び電流変化時のオーバシュートを避けるため比例制御系とし、トランジスタのベース電流を制御することにより行なっている。ACRの開ループの伝達関数は、次式により表わされる。

$$G(S) = K_{M \text{ AVR}} \cdot K_A \cdot M(S) \cdot K_{FB} \dots\dots\dots(1)$$

ここに  $G(S)$ : 開ループ伝達関数

$K_{AVR}$ : M AVRゲイン

$K_A$ : 制御増幅器ゲイン

$K_{FB}$ : 電流フィードバック

$M(S)$ : 電磁石伝達関数  $\approx 1 / 0.55(1+S)$

となり、ループゲイン  $|G(S)|$  及び周波数応答時間  $\omega c$  は下記としている。

$$|G(S)| = 35 \sim 40 \text{ dB}$$

$$\omega c = 50 \sim 70 \text{ rad/s}$$

### (3) M AVR

M AVR回路は、入力電圧の急激な変動時や電流パターン設定値変更時でも、トランジスタの負担電圧の影響を少なくすることを目的とし、次に述べるような特徴をもつ。

(1) M AVRの応答を高速とし、電源急変時などのトランジスタ負担電圧の抑制制御を行なう。

(2) 電源急変時のトランジスタ負担電圧抑制のため、電圧リミッタ回路と先行値制御回路を設けてある。

図7にM AVRの回路構成を示す。M AVRの開ループ伝達関数  $G_{M(S)}$  は次式となる。

$$G_{M(S)} = K_{A(S)} \cdot K_T \cdot M_{MB} \dots\dots\dots(2)$$

ここに  $K_{A(S)}$ : 演算増幅器伝達関数

$K_T$ : トランジスタゲイン

$K_{MB}$ : 電圧フィードバックゲイン

開ループでのループゲイン及び周波数応答は、

$$|G_{M(S)}| \approx 36 \text{ dB}$$

$$\omega c \approx 1,000 \text{ rad/s}$$

## 6 結 言

各電磁石、電源とも工場試験で所期の性能を達成し、文部省高エネルギー物理学研究所に設置され、予定どおり昭和57年に完成した。

本施設の放射光の利用は物質構造の研究だけでなく、理学、工学、生物学、医学などの広範な分野でも世界最高水準の研究成果が期待される。

終わりに、本施設の設計製作に当たり、御指導と御協力をいただいた関係各位に対し、厚く謝意を表わす次第である。

### 参考文献

- 1) 文部省高エネルギー物理学研究所要覧(昭和58年度)
- 2) 文部省高エネルギー物理学研究所, 放射光実験施設要覧 (昭和53年度)
- 3) 安芸, 外: 核融合装置と加速器用コイルの電気絶縁の現状, 日立評論, 63, 7, 481~486(昭56-7)