

Linac の設計, 製作と運転

1975 年 3 月

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI レポート

この報告書は、日本原子力研究所で行なわれた研究および技術の成果を研究成果編集委員会の審査を経て、不定期に刊行しているものです。

研究成果編集委員会

委員長 山 本 賢 三 (理事)

委 員

赤石 準 (保健物理安全管理部)	岡下 宏 (原子炉化学部)
朝岡 卓見 (原子炉工学部)	小幡 行雄 (物 理 部)
浅見 哲夫 (研究炉管理部)	栗山 将 (開発試験場)
阿部 俊彦 (企 画 室)	佐藤 一男 (動力炉開発管理室)
天野 恕 (製 造 部)	田中 正俊 (核融合研究室)
石塚 信 (動力試験炉部)	長崎 隆吉 (燃料工学部)
石原 豊秀 (東海研究所長付)	能沢 正雄 (安全工学部)
大内 信平 (材料試験炉部)	原田吉之助 (物 理 部)
大西 寛 (原子炉化学部)	平田 実穂 (動力炉開発管理室)
大森 栄一 (技術情報部)	堀田 寛 (高崎研・研究部)

入手 (資料交換による)、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部 (〒319-11 茨城県那珂郡東海村) であて、お申しこみください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会情報サービス事業部 (茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内) で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI Report

Published by the Japan Atomic Energy Research Institute

Board of Editors

Kenzo Yamamoto (Chief Editor)

Toshihiko Abe	Jun Akaishi	Hiroshi Amano	Tetsuo Asami
Takumi Asaoka	Kichinosuke Harada	Mitsuho Hirata	Hiroshi Hotta
Toyohide Ishihara	Makoto Ishizuka	Isamu Kuriyama	Ryukichi Nagasaki
Masao Nozawa	Yukio Obata	Hiroshi Okashita	Eiichi Ohmori
Hiroshi Onishi	Shinpei Ouchi	Kazuo Sato	Masatoshi Tanaka

Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to the Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Nakagun, Ibaraki-ken, Japan.

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 三美印刷株式会社

JAERI 1238 正誤表

ページ	行 など	誤	正
2	右, 上から 9	加速管新を linac	加速管を新 linac
24	右, 上から 2 3	定在測定器	定在波測定器
31	Fig. 5.4	V_1 3E29, V_2 3E29	V_1 2B29p, V_2 2B29p
47	左, 下から 2 2	6.9 5 Ω	6.9 Ω
50	Table 6.3	Si diode 2M100	Si diode 10M100
58	右, 下から 5	$r' \sim 10 \text{ MeV/m}$	$r' \sim 10 \text{ MV/m}$
132	Fig. 15.5	200m N. detector st.	190m N. detector st.
168	左, 上から 1	運転停止後は	運転停止から
170	右, 上から 2	天井は 50m	天井は 50 cm
171	Fig. 19.1	200m detector station	190m detector station
179	左, 下から 1 0	工程調達	工程調整

Linac の設計, 製作と運転

日本原子力研究所 東海研究所

編集 竹 腰 秀 邦

秋 山 信 義 ・ 浅 見 明 ・ 更 田 豊治郎 ・ 河原崎 雄 紀
北 島 正 博 ・ 入 江 浩 一* ・ 益 子 勝 夫 ・ 松 本 純一郎
水 本 元 治 ・ 中 島 豊 ・ 信 坂 幸 男 ・ 大久保 牧 夫
大 杉 茂 治 ・ 桜 井 淳 ・ 鹿 園 直 基 ・ 荘 司 時 雄
竹 腰 秀 邦 ・ 田 村 務

(1974 年 11 月 25 日 受理)

原研の新しい linac の設計, 建設経過およびその性能についてまとめたものである.

この linac は長さ 2 m の加速管 2 本と長さ 3 m の加速管 3 本を使用している. 20 MW の 2857 MHz の RF 電力をそれぞれの加速管に供給した場合に, 最高 190 MeV のエネルギー (電流 1 mA の時) が得られ, また最大 1 A の尖頭電流 (エネルギー 100 MeV でパルス幅 0.5 μ sec の時) を得ることができる. パルス幅は 10nsec から 2 μ sec まで変えることができ, パルスの繰返しは最大 600 pps である.

この linac は原子炉の設計に必要な核データの研究に主として用いられるが, また電子, X線または中性子源として, 中性子物理, 核物理, 固体物理, 放射線化学や遮蔽工学等の研究にも使用される.

* 三菱電機株式会社中央研究所

Design, Construction and Operation of JAERI-Linac

Edited by Hidekuni Takekoshi

Nobuyoshi Akiyama, Akira Asami, Toyojiro Fuketa, Yuki Kawarasaki,
Masahiro Kitajima, Kouichi Irie*, Katsuo Mashiko, Junichiro Matsumoto,
Motoharu Mizumoto, Yutaka Nakajima, Yukio Nobusaka, Makio Ohkubo,
Shigeharu Ohsugi, Kiyoshi Sakurai, Naomoto Shikazono,
Tokio Shoji, Hidekuni Takekoshi and Tsutomu Tamura

Tokai Research Establishment,
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 25, 1974)

The design and construction of a new linear accelerator at the Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) are described together with its performance.

The machine is constructed from five accelerating waveguide sections, two of which have a length of 2m each, the remainder have 3m each. The maximum electron beam energy 190MeV (with 1mA current) and the maximum beam current 1 ampere (with a pulse width of 0.5 μ sec at 100-MeV beam energy) are obtained when the RF power of 20MW with a frequency of 2,857MHz is fed into each accelerator section. The pulse width of the beam is variable from 10nsec to 2 μ sec, and the maximum repetition rate is 600pps.

The main research program in the use of this linac is to obtain nuclear data needed for the development of nuclear reactors. In addition, the linac is used as strong sources of electron, X-ray and neutron for the studies of neutron physics, nuclear physics, solid state physics, radiation chemistry, shielding technology, etc.

* Central Research Institute, Mitsubishi Electric Company

目 次

1. 建設経過	1	7.4.3 偏向磁石	59
1.1 旧 linac	1	7.4.4 Steering コイル	60
1.2 Linac 増力計画	1	7.4.5 Degauss コイル	60
1.2.1 ビームのエネルギーと電流値の検討	1	7.4.6 磁気シールド	60
1.2.2 クライストロンと加速管	1	7.4.7 スリット	61
1.2.3 予算の承認と製作方針	2	7.4.8 コリメータ	61
1.3 建設, 組立と運転	2	7.5 Floating wire 法による磁石の性能測定	61
2. 構成	5	7.5.1 磁石の性能測定	61
3. 加速管部	7	7.5.2 Floating wire 法の原理	62
3.1 第1加速管と第2加速管	7	7.6 伝送特性	62
3.2 第3, 第4, 第5加速管	8	7.7 ビーム伝送系の据付け	62
4. 電子入射系	12	7.8 電磁石用直流電源	63
4.1 電子銃	12	8. ビーム・モニター	83
4.2 プレバンチャ	12	8.1 電流モニター	83
4.3 ビーム集束及び steering	13	8.2 エネルギー・モニター	83
4.4 電子銃電源	13	8.3 位置モニター	83
4.4.1 カソード・パルサー	13	9. 真空系	87
4.4.2 パルストランス	14	9.1 電子銃部及び加速管部真空系	87
4.4.3 グリッド・パルサー	14	9.2 ビーム伝送部真空系	87
4.4.4 電子銃ヒータ及びバイアス電源	14	9.3 導波管部真空系	87
5. マイクロ波系	21	9.4 真空系の組立及び排気	88
5.1 マイクロ波発振器	21	10. 冷却系	95
5.2 3極管増幅器	21	10.1 加速管冷却系	95
5.3 ブースター・クライストロン増幅器	21	10.1.1 加速管の温度とエネルギー利得の関係	95
5.4 低電力マイクロ波伝送系	21	10.1.2 構成	95
5.5 主クライストロン増幅器	22	10.2 ターゲット冷却系	96
5.6 大電力マイクロ波伝送系	22	10.3 クライストロン冷却系	97
5.7 加速管	23	11. 受電及び配電設備	104
5.8 無反射終端部	23	11.1 750kVA 受電設備	104
5.9 加速管系のマイクロ波特性	24	11.2 Linac 建屋内の配電	104
6. モジュレータ	46	12. 制御系	108
6.1 電源部	46	12.1 配置及び配線	108
6.2 PFN 部	47	12.2 コントロール・パネル	108
6.3 サイクロtron駆動部	49	12.3 コントロール・デスク	108
7. 電子ビームの伝送系	54	12.4 トリガー系	109
7.1 ターゲットへの伝送系	54	12.4.1 AC 同期パルス発生器	109
7.2 加速管部伝送系	55	12.4.2 タイミング調整回路	109
7.3 軌道計算	55	13. インターロック系	115
7.3.1 運動方程式	55	13.1 機械に対するインターロック	115
7.3.2 直進ターゲットCへの伝送	57	13.2 人に対するインターロック	116
7.3.3 ターゲットRへの伝送(右折)	57	14. 加速特性	119
7.3.4 ターゲットLR, LCへの伝送(左折)	58	14.1 測定方法	119
7.3.5 加速管部における伝送	58	14.2 電子銃のカソードのヒータ電流調節	119
7.4 ビーム伝送系の構成部品	58	14.3 電子銃グリッドのパルスの電圧と幅の調節	119
7.4.1 Q磁石	59		
7.4.2 分岐磁石	59		

14.4	電子銃カソードのパルス電圧調節	119	17.	実験データ同時処理装置 (on-line computer)	154
14.5	プレバンチャのマイクロ波の強度と 位相調節	119	17.1	方針と経緯	154
14.6	加速管へのマイクロ波の入力調節	120	17.2	システムの概要	154
14.7	加速ビームのパルス内のエネルギー分布	120	17.2.1	ハードウェア	154
15.	放射線防護	125	17.2.2	ソフトウェア	156
15.1	加速管, ビーム伝送系, およびターゲ ットから発生する放射線に対する遮蔽	125	(1)	ICD-507 FORTRAN システム	156
15.1.1	放射線遮蔽設計の基準	125	(2)	計測用 on-line プログラム	156
15.1.2	放射線源	125	(3)	AID utility プログラム	157
15.1.3	遮蔽設計上問題となる地点	125	17.3	使用状況	157
15.1.4	遮蔽計算	126	17.3.1	ハードウェア	157
15.2	ターゲット室の空気汚染	127	17.3.2	ソフトウェア	157
15.3	ターゲット及び分岐電磁石の残留放射能	127	(1)	On-line プログラム	157
15.3.1	残留放射能の高い場所に近づかな いための対策	127	(2)	Off-line プログラム	158
15.3.2	残留放射能による被曝をおさえる 対策	128	17.4	データ通信および今後の問題	158
15.4	区域管理	128	18.	Linac の運転と管理	165
15.4.1	管理区域	128	18.1	放射線に対する安全確認	165
15.4.2	高放射線区域への立入に関する安全 管理	128	18.2	高電圧に対する安全確認	165
16.	実験装置	134	18.3	運転操作手順	165
16.1	中性子実験	134	18.4	運転停止	167
16.1.1	中性子発生	134	18.5	タイム・チャート	167
(1)	中性子発生率	134	18.6	立入制限	167
(2)	ターゲット物質中の放射線の飛程	134	18.7	Maintenance manual	168
(3)	中性子ターゲット	135	19.	建屋	169
16.1.2	中性子飛行管	136	19.1	敷地	169
16.1.3	TOF ユニット	137	19.2	加速室管とモジュレータ室	169
16.1.4	検出器	138	19.3	ターゲット室	169
(1)	中性子全断面積測定装置	138	19.4	中性子飛行管及び中性子測定室	169
(2)	中性子捕獲断面積測定装置	138	文 献		178
(3)	散乱断面積測定装置	138	あとがき, Linac の主な購入物品の契約先		179
(4)	分裂断面積測定装置	139	付録 Linac 加速管部の設計と製作		182
16.1.5	測定方法と測定例	139	A.1	加速管の設計	182
16.2	Linac による RI 生成及び核分光学の 研究	139	A.1.1	基本設計	182
16.2.1	気送管照射装置	140	A.1.2	加速管性能の設計値	182
16.2.2	短寿命核種の研究	140	A.1.3	バンチャ部の設計	182
16.2.3	β 線スペクトル測定と解析	140	A.2	加速管の構成	183
16.2.4	同時計数測定及びその解析	140	A.2.1	マイクロ波モード変換器	183
			A.2.2	大電力無反射終端器	184
			A.3	加速管の性能	184
			A.4	加速管の製作方法	184
			A.5	電子銃	185
			A.6	結果	185

Contents

1. History of construction.....	1
1.1 Old linac	1
1.2 Design study of a new linac	1
1.2.1 Energy and current of electron beam	1
1.2.2 Klystron and accelerator structure	1
1.2.3 Budget permission and plan for construction	2
1.3 Construction, assembling and operation	2
2. Composition	5
3. Accelerating waveguide sections	7
3.1 The first and the second accelerator sections	7
3.2 The third, the fourth and the fifth accelerator sections	8
4. Electron injector	12
4.1 Electron gun	12
4.2 Prebuncher	12
4.3 Beam focussing and steering system	13
4.4 Power supply for the electron gun	13
4.4.1 Cathode pulser	13
4.4.2 Pulse transformer	14
4.4.3 Grid pulser	14
4.4.4 Electron gun heater and the bias power supply	14
5. Microwave system	21
5.1 Microwave oscillator	21
5.2 Planar triode amplifier	21
5.3 Booster klystron amplifier	21
5.4 Low power microwave transmitting system	21
5.5 Main klystron amplifier	22
5.6 High power microwave transmitting system	22
5.7 Accelerating waveguide section	23
5.8 Non-reflecting terminator	23
5.9 RF characteristics of accelerator section	24
6. Modulator	46
6.1 Power supply	46
6.2 Pulse forming network	47
6.3 Thyatron drive system	49
7. Beam transport system	54
7.1 Beam transport to targets	54
7.2 Beam transport in the accelerator section	55
7.3 Beam dynamics	55
7.3.1 Equation of motion	55
7.3.2 Beam transport to the target C	57
7.3.3 Beam transport to the target R (to the right)	57
7.3.4 Beam transport to the target LR and LC (to the left)	58
7.3.5 Beam transport in the accelerator section	58
7.4 Components of the beam transport system	58
7.4.1 Q-magnets	59
7.4.2 Switching magnet	59

7.4.3	Deflection magnets	59
7.4.4	Steering coils	60
7.4.5	Degauss coils	60
7.4.6	Magnetic shield	60
7.4.7	Slit	61
7.4.8	Collimators	61
7.5	Measurements of the magnet characteristics by the floating wire method	61
7.5.1	Measurements of the magnet characteristics	61
7.5.2	Principle of the floating wire method	62
7.6	Performance of the beam transport system	62
7.7	Alignment of the beam transport system	62
7.8	Magnet DC power supplies	63
8.	Beam monitor	83
8.1	Beam current monitor	83
8.2	Beam energy monitor	83
8.3	Beam position monitor	83
9.	Vacuum system	87
9.1	Electron gun and accelerator sections vacuum system	87
9.2	Beam transport vacuum system	87
9.3	Waveguide vacuum system	87
9.4	Assembling and evacuation of vacuum systems	88
10.	Cooling water systems	95
10.1	Accelerator section cooling water system	95
10.1.1	Relationship between beam energy gain and the temperature of accelerator structure	95
10.1.2	Composition of the system	95
10.2	Target cooling water system	96
10.3	Klystron cooling water system	97
11.	Electric power substation and power distribution	104
11.1	750 kVA substation	104
11.2	Power distribution in the linac building	104
12.	Control system	108
12.1	Arrangement and wiring	108
12.2	Control panel	108
12.3	Control desk	108
12.4	Linac trigger system	109
12.4.1	Master trigger generator	109
12.4.2	Trigger pulse timing control circuits	109
13.	Interlock system	115
13.1	Interlock system for accelerator	115
13.2	Personal protection system	116
14.	Acceleration performance	119
14.1	Methods of measurements	119
14.2	Adjustment of electron gun cathode-heater current	119
14.3	Adjustment of voltage and width of electron gun grid pulse	119
14.4	Adjustment of electron gun cathode pulse voltage	119
14.5	Adjustment of RF power and phase supplied to the prebuncher	119
14.6	Adjustment of RF power fed to accelerating waveguide sections	120
14.7	Electron energy spectrum versus time during the beam pulse	120
15.	Radiation protection	125

15.1	Shielding for radiations produced at accelerator section	
	beam transport system and targets	125
15.1.1	Standards for radiation shielding	125
15.1.2	Radiation source	125
15.1.3	Important positions and distances in shielding design	125
15.1.4	Shielding calculations	126
15.2	Air contamination in the target area	127
15.3	Residual radioactivities of targets and magnets	127
15.3.1	Counterplans to keep away from high residual radioactivities	127
15.3.2	Counterplans for minimum exposure to radiation from residual radioactivities	128
15.4	Control for radiation area	128
15.4.1	Controlled area	128
15.4.2	Safety control for the high radiation area	128
16.	Facilities of experiments	134
16.1	Neutron physics experiment	134
16.1.1	Neutron production	134
	(1) Neutron production rate	134
	(2) Radiation range in the target material	134
	(3) Neutron producing target	135
16.1.2	Neutron flight tubes	136
16.1.3	TOF-unit	137
16.1.4	Detectors	138
	(1) Detector for total cross section measurement	138
	(2) Detector for capture cross section measurement	138
	(3) Detector for scattering cross section measurement	138
	(4) Detector for fission cross section measurement	139
16.1.5	Measurement procedure and examples	139
16.2	Radioisotope production and nuclear spectroscopy with the linac	139
16.2.1	Irradiation device with pneumatic tube	140
16.2.2	Short-lived nuclide study	140
16.2.3	β -ray spectrum measurement and analysis	140
16.2.4	Coincidence counting measurement and analysis	140
17.	Experimental data acquisition and reduction system (on-line computer)	154
17.1	Policy and history	154
17.2	General system description	154
17.2.1	Hardware	154
17.2.2	Software	156
	(1) ICD-507 FORTRAN system	156
	(2) On-line programs for measurements	156
	(3) AID utility programs	157
17.3	Performance	157
17.3.1	Hardware	157
17.3.2	Software	157
	(1) On-line program	157
	(2) Off-line program	158
17.4	Data communication and future problems	158
18.	Operation and maintenance of linac	165
18.1	Confirmation of safety for radiation	165
18.2	Confirmation of safety for high voltage	165

18.3	Operation procedure	165
18.4	Stop	167
18.5	Time chart	167
18.6	Off limits	167
18.7	Maintenance manual	168
19.	Building	169
19.1	Site	169
19.2	Accelerator and modulator room	169
19.3	Target area	169
19.4	Neutron flight tubes and detector stations	169
References		178
Postscript		179
Appendix	Design and construction of the accelerator section	182
A.1	Design of the accelerator structure	182
A.1.1	Fundamental design	182
A.1.2	Design values of the accelerator structure characteristics	182
A.1.3	Design of the buncher section	182
A.2	Composition of the accelerator structure	183
A.2.1	Microwave mode converter (coupler)	183
A.2.2	High power non-reflecting terminator	184
A.3	Accelerator structure characteristics	184
A.4	Fabrication of the accelerator structure	184
A.5	Electron gun	185
A.6	Results	185

1. 建設経過

1.1 旧 linac

原子炉の開発に伴う中性子物理の研究は、原研においては、熱中性子領域では主として研究炉 (JRR-1, JRR-2, JRR-3) 低速中性子領域では電子 linac (20 MeV)、高速中性子領域では Van de Graaff 加速器 (2MV, 5.5 MV) を用いて進められてきた。

電子 linac は、電子線源、X線源または中性子源として原研開発足期に設置が決り、昭和32年9月アメリカの High Voltage Engineering Corporation に発注された。当時電子 linac は市販されるようになったばかりで技術的に未解決の問題があり、発注後1~2の設計変更を経て昭和36年1月に完成された。この linac は、最大エネルギー 25 MeV、最大電流 150 mA (20 MeV) のビーム出力を持ち、昭和44年2月まで、中性子物理の研究、RI の生成、各種の照射実験に使用され、運転時間の合計は、11,700 時間に及んだ。

1.2 Linac の増力計画

原研の linac の完成後 linac の製作技術はめざましく進歩した。昭和41年には、Stanford 大学で世界最大の 20 GeV の linac (SLAC)¹⁾ が完成したのをはじめ、世界の各所に数多くの新鋭 linac 設置が進められた。とくに各国の原子力関係の研究所では、高出力 linac による中性子物理研究が盛んに行なわれるようになった。TABLE 1.1 に国内外の中性子物理研究用の主な linac を示す。

こうして7~8年前にすでに外国の新鋭 linac は原研の旧 linac に比べ、10~100 倍の中性子発生能力をもつようになってきた。これに対して旧 linac による中性子物理の研究テーマは限られ、例えば中性子断面積の測定においては、数 10 eV の中性子全断面積測定を行なうのが限界で、散乱・捕獲・分裂等の部分断面積の測定は、ほとんど不可能であった。一方、原子力工学からの要求は、測定対象については、全断面積から部分断面積に移り、要求精度も年と共に高まってきたので、linac の中性子発生能力を高めることがまず第1の課題となってきたのである。以上の事情から昭和40年頃から、核物理第2研究室を中心として、linac を増力する計画が検討されはじめた。

1.2.1 ビームエネルギーと電流値の検討

電子 linac による中性子の発生は、加速された電子を重金属のターゲットに入射させて、X線を発生させ、X

線がそのターゲット内でおこす (γ, n) または (γ, Xn) 反応によって行なう。

この場合、中性子の発生率は、電子エネルギーが 30 MeV 位までは指数函数的に増加し、それ以上の電子エネルギーでは増加がゆるやかになり、さらに電子エネルギーが 50 MeV 以上では大体ビーム電力に比例して増加すると考えてよい。一般に低エネルギーで高電流のビーム出力の装置は同じビーム出力をもつ高エネルギーで小電流のビーム出力の装置に較べて、建設費が安い。それで、中性子物理研究には前者がもっぱら使用され、高いエネルギーを必要とする原子核物理研究には主に後者が使用される。原研の新 linac としては、経済性と、中性子物理と原子核物理の研究を同時に行なうことを考えて、エネルギー 100 MeV、電流 500 mA のビーム出力をもつ中間の形のものについて検討が行なわれた。

1.2.2 クライストロンと加速管

原研の旧 linac²⁾ は Fig. 1.1 に示されるように 1 m の長さの加速管 6 本より構成されていた。3 MW 出力のクライストロンが 2 本あり、それぞれの出力マイクロ波は立体回路により 3 分割され、1 MW ずつのマイクロ波が 6 本の加速管に供給される。新 linac の構成を決める際に最初に行なったことは、クライストロンの選択であった。これは検討の末に SLAC で使用されている 20 MW 出力のクライストロンを採用することとした。その一つの理由はこのクライストロンの使用周波数が旧 linac で使用されたクライストロンの周波数と一致し、旧 linac の多くの部品が流用できることである。他の理由は SLAC で多数使用されているため、技術的に安定し寿命が長く経済性に秀れていることと、将来もメーカからの安定供給が見込めることなどである (第3の点については、予想に反し、そのメーカーである RCA は 1973 年にクライストロンの生産を停止した。以後は ITT が生産を受けつぐとされている)。

つぎに、新 linac の加速管へのマイクロ波の供給方式の検討を行なった。旧 linac のように 1 本のクライストロンより複数 (3 本) の加速管にマイクロ波を供給する場合は、1 本の加速管の耐電力は低くて済むが、高電力レベルでマイクロ波の分割や位相調整や、振幅調整を行わなければならない。それで高電力に耐える分割器、位相調整器、減衰器を必要とするが、これらの装置は製作が技術的に難しく、保守も容易でない。これに反して 1 本の加速器に、1 本のクライストロンから直接にマイクロ波を供給する方法をとれば、位相調整や振幅調整をクライストロンの入力側で行なうことが可能になり、低電

力レベル用の位相器や減衰器が使用できるので構成が簡単になり linac の運転保守も楽になる。しかし、この場合は 1 本の加速管にクライストロンの全出力が供給される。従って、SLAC 型のクライストロンの最大出力である 20 MW のマイクロ波の入力にも耐え、15 MV/m 位のマイクロ波電界を発生できる加速管を作る必要があった。それで加速管の耐電力についてのベンチテストを行ない、マイクロ波供給方式を決めることにした。

この目的のために昭和 43 年、44 年にわたって 2 m の長さの constant impedance 型の加速管 2 本と（そのうち 1 本はバンチャ部を含む）、電子銃および高電力用立体回路等が三菱電機に発注された。これらの加速管はメーカーの手持のパルス電源の関係上 5 MW のマイクロ波入力試験を経た後、45 年度の始めに納入された。

1.2.3 予算の承認と製作方針

Linac の増力計画は、45 年度にいたり予算化された。認められた予算は、45 年より 46 年にまたがり、本体関係 3 億円（データ同時処理装置を含む）と、建屋関係 7,500 万円（中性子飛行管を含む）であった。完成後において中性子の核データ測定や、中性子物理の研究を世界的水準で行なうためには、 $10^{18}/\text{sec}$ （全立体角）以上の中性子発生率が必要になると思われたので、ビーム・エネルギー 100 MeV 以上、電流 500 mA、20~40 kW のビーム出力が得られる linac を目標にすることとした。

しかし、一般に行なわれているように、業者に一括発注する方法では、旧 linac を上記性能をもつ linac に改造することは、予算の範囲内では困難と考えられた。そこで核物理第 2 研究室では、これまでの長年にわたる linac についての運転、保守経験、各種試作試験の経験を生かし、自ら詳細設計を行ない、各部品を購入し、組立も研究室が中心になって行なうというやり方を採用することとした。Linac はいくつかのほぼ同じユニットから構成されているので、他の加速器の建設に比べれば比較的容易に、このような方法が採用できると思われた。

とは云え、このようなやり方は、原研においてはきわめて異例なことであった。それで研究室では全員がこの仕事に参加するという特別の体制をしいて仕事に着手した。また、目的を無事達成するため、とくに重要な加速管の構成やマイクロ波給電方法についての基本設計をベンチテストによって最終的に確認することとした。このために、45 年半ばに原研において前述の三菱製のバンチャのついた加速管と、SLAC で使用されているクライストロン等により構成された試験機が組立てられた。これにより加速管のマイクロ波周波数特性測定、耐圧測定、電子の加速特性測定を行なった。その結果、加速管に 15 MW のマイクロ波を供給した際に 20 MeV、300 mA の電子ビームが得られた。これらの測定の際に、マイクロ波窓、無反射終端器および導波管等の高電力マイクロ波用部品の耐圧状態や、パルス・モジュレータに

使用されているコンデンサーやコイル等のコロナ放電の調査が行なわれた。この試験機は 45 年 12 月までに 1,000 時間の運転が行なわれ、その信頼性と耐久性が確かめられた。

これらのデータを基礎として、また当時出版された SLAC のレポート¹⁾、東大原子核研究所や東北大学の linac 建設の経験等²⁾を参考にして、linac の設計が進められた。加速管の構成として、先に三菱電機から購入した 2 本の加速管新を linac の第 1 および第 2 加速管として使用することをきめた。これらの加速管は、設計値では 20 MW のマイクロ波を供給した際に、無負荷の時には 27 MeV のエネルギー利得も持ち、500 mA の負荷時には 18 MeV のエネルギー利得を持つ。それで 500 mA の負荷時に 100 MeV のビームを得るには、20 MW の耐電力をもつ 2.5 m~3 m の長さの加速管がもう 3 本必要になる。この加速管の構造として constant gradient 型（この型は constant impedance 型に較べて製作コストは高くはつくが、高いエネルギー利得が得られる³⁾）が選ばれ、長さ 3 m の 3 本の加速管を新 linac の第 3、4、5 加速管として使用することに決めた。

国内外の 5 つのメーカーに引合いが出されて入札が行なわれた。国内のメーカーは 3 m の長さの加速管を製作する設備がなく入札を辞退した。国外の 3 社が応札しアメリカの ARCO が落札した。この加速管は 20 MW のマイクロ波供給の際に無負荷時で 45 MeV のエネルギー利得を持ち、500 mA の負荷時に 27 MeV のエネルギー利得を持っている。

各部の詳細設計を進めるに当たっては、核物理第 2 研究室全員が分担してあたることとし、モジュレータ回路、マイクロ波増幅器および立体回路、加速管および伝送系の真空排気装置、電子ビーム入射装置、ビーム伝送用の各種磁石および電源、加速管やクライストロンや各種ターゲットの冷却系、コントロール系、インターロック系、安全系および電算機を含む実験装置等に仕事を区分し、設計担当者が決められた。

建物については、建設部が担当し、真空装置等の機械工作品については、工作課において設計発注が行なわれた。こうして新 linac の詳細設計はほぼ 45 年度末に完成した。

1.3 建設・組立と運転

詳細設計に基づき、建屋の改造、旧 linac の解体、新 linac のための新部品の発注などが、昭和 45 年 12 月頃からいっせいに開始された。経過の概略を Fig. 1.2 に示す。46 年 1 月中に旧 linac の解体が終り、同年 7 月には建屋の主要部分は完工し、この頃から次々に到着する新部品の試験と組立に着手した。組立は、46 年中にはほぼ終了し、47 年に入って系統別の試験に着手し、47 年 4 月から総合試運転に入った。加速管は排気コンダクタンスが

悪いので真空度の上昇に1ヵ月の排気が必要であった。真空度の上昇にあわせて加速管へのマイクロ波の供給を徐々に増加させ、6月には250 mA (150 MeV) の加速電子ビームを得ることに成功した。この時点で一応、新 linac が所期の性能を満たすという見通しをほぼ確実に得ることができたので、同年6月27日に、新 linac の所内公開を行なった。

その後種々の特性測定や、小さな規模の改造を行ないながら、徐々にマイクロ波の供給を増加させ7月には、全加速管に20 MW のマイクロ波を供給し、最高エネルギー190 MeV (1 mA の負荷)、100 MeV (パルス幅 0.5 μ sec) のエネルギーで600 mA のビームの取出しを行な

い、所期の性能を得るのに成功した。その後加速管のビーム集束系に改良を加えた結果、現在は100 MeV のエネルギーで1 A のビーム電流が得られている。

Linac の完成に前後して、中性子発生用ターゲットや5本の中性子飛行管、中性子実験のデータの同時処理を行なうための16 K のメモリーを有する小型電算機、RI 生成用のターゲットおよび気送装置等の実験設備も完成した。

47年8月より定常的な運転が始められ、中性子実験やRIの生成が試験的に行なわれたが、48年度からは本格的な実験が行なわれている。

TABLE 1.1 Electron linacs in the world used for neutron physics research

Linac installation	Type	Max. energy	Current	Flight tube	Remarks
JAERI (I)	S	25 MeV	80 mA (20 MeV, 2 μ sec)	1	
JAERI (II)	S	190	1 A (100 MeV, 0.5 μ sec)	8	
Tohoku Univ.	S	300	1 A (60 MeV), 100 mA (250 MeV)	1	
Electrotechnical Lab.	S	33	200 mA (25 MeV)		
Radiation Centre of Osaka Prefecture	S	15	400 mA (10 MeV)		
KUR (Kyoto Univ.)	L	40	1 A (30 MeV)	2	
Hokkaido Univ.	S	45	200 mA (30 MeV)		
Institute for Nuclear Study (Tokyo)	S		300 mA (15 MeV)		Injector of synchrotron
Saclay (France)	S	54	300 mA (46 MeV, 0.2 μ sec)	2	
Harwell (UK)	S	60	1 A (45 MeV, 0.1 μ sec)	7	^{235}U booster
Geel (EURATOM) (Bergie)	S	85	85 mA (45 MeV, 2 μ sec) 5 A (75 MeV, 0.01 μ sec)	8	^{235}U target
Gulf (USA)	L	50	1.5 A (40 MeV, 0.01 μ sec)	2	
RPI (USA)	L	100	6 A (60 MeV)	4	
Oak Ridge (USA)	L	200	500 mA (150 MeV, 2 μ sec) 15 A (150 MeV, 3 nsec)	11	
Livermore (USA)	S	150	3 A (100 MeV, 5 nsec) 500 mA (100 MeV, 2 μ sec)	6	

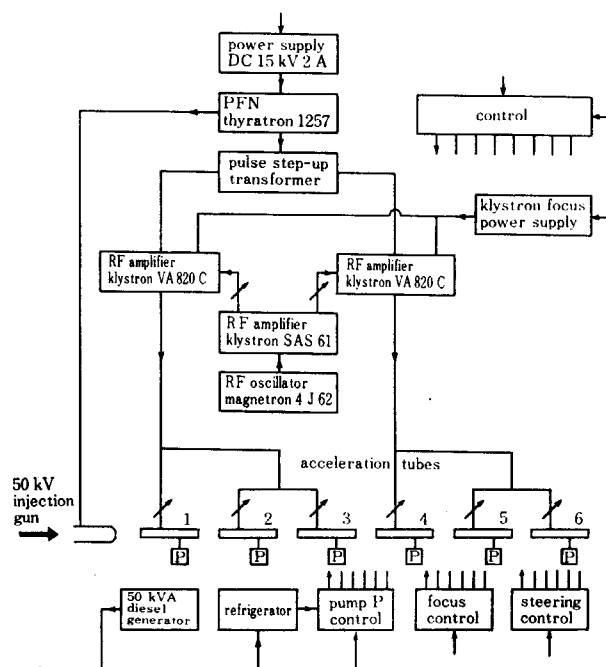


Fig. 1.1 Block diagram of JAERI 20-MeV linac.

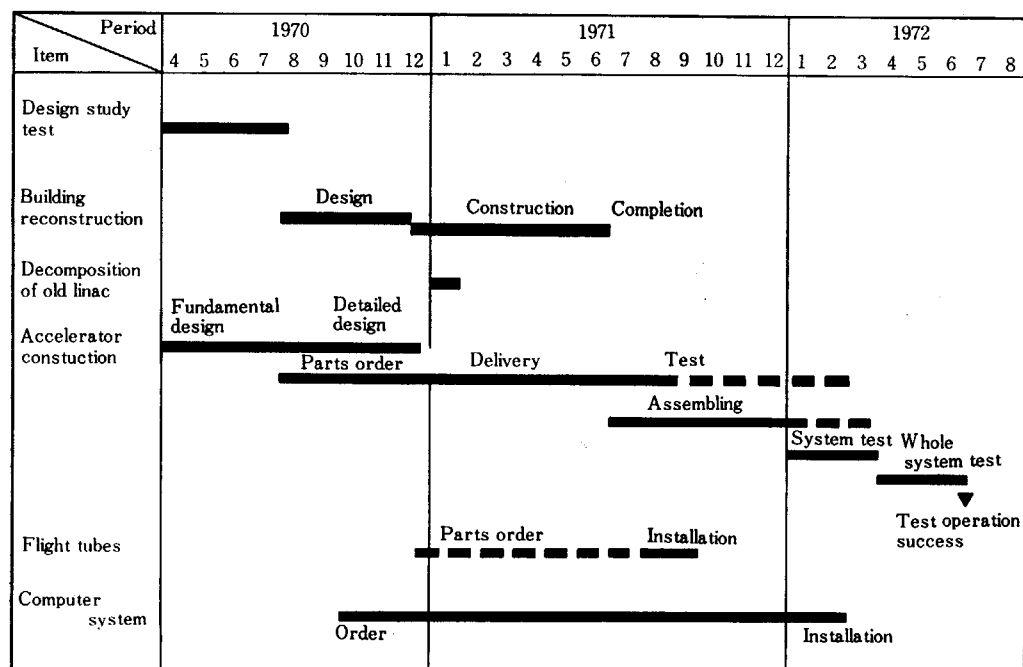


Fig. 1.2 Time schedule of construction.

2. 構 成

昭和 47 年に完成した新 linac は次の各部より構成されている。

1. 加速管部
2. 電子入射部
3. マイクロ波系
4. クライストロンモジュレータ部
5. ビーム伝送系
6. ビーム・モニター
7. 真空系
8. 冷却系
9. 受電および配電設備
10. 制御系
11. インターロック系

実験装置として、中性子スペクトロメーター、RI 製造装置、各種放射線測定装置、電算機等が整備されている。

これらの主要部品の配置を Fig. 2.1 に示す。

中性子スペクトロメーターの 5 本の飛行管は、リニアック建屋から屋外に放射状に設置され、その末端に中性子測定室が建てられている。これらの建屋および中性子飛行管の配置を Fig. 2.2 に示す。また、linac の主要特性を TABLE 2.1 に示す。

以下 linac の各構成を部分ごとに、第 3 章から第 13 章に説明する。第 14, 15 章は加速特性および放射線防護をとりあつかい、第 16 章では各種実験装置、17 章で実験データ同時処理装置について述べる。第 18 章では linac の運転に関する事項をとりまとめた。

なお、第 1 加速管、第 2 加速管およびこれらに付属するマイクロ波関係部品については、とくに設計製作を担当した三菱電機入江技師に詳しくとりまとめをお願いしたので、巻末の Appendix に一括して記載した。

TABLE 2.1 Specifications of JAERI-linac II

Length of accelerator section	Two of 2 m, three of 3 m
Type of accelerator structure	Constant impedance (2 m accelerator section) Constant gradient (3 m accelerator section)
Mode	$2\pi/3$ (for both types)
RF frequency	2856.75 MHz
RF power rating	Average 20 kW, peak 20 MW (for both types of accelerator sections)
Q-value of the accelerator structure	>13,000
Klystron output	20 MW (peak) × 5
Beam energy (max)	190 MeV
Peak beam current at 100 MeV energy with 0.5 μ sec width	1 A
Beam pulse width	10 nsec ~ 2 μ sec
Beam pulse repetition (max)	600 pps
Number of beam transports	3
Number of neutron flight tubes	8 (longest: 190 m)
Neutron production rate in a pulse to all solid angle (max)	$\sim 10^{17}/\text{sec}$

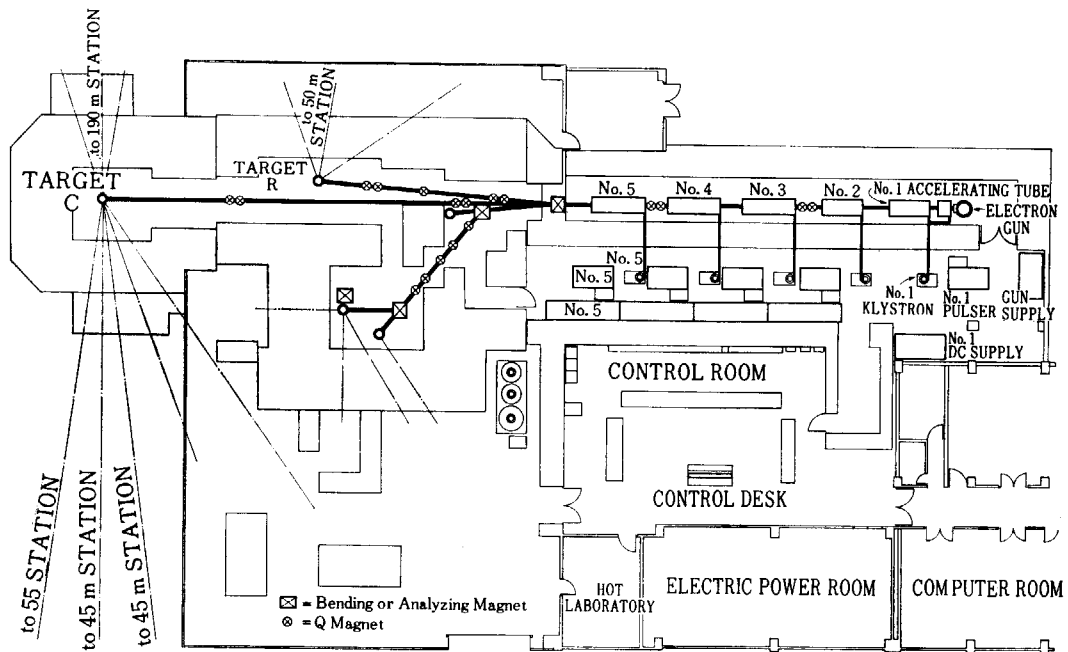


Fig. 2.1 Layout of main components of JAERI-linac.

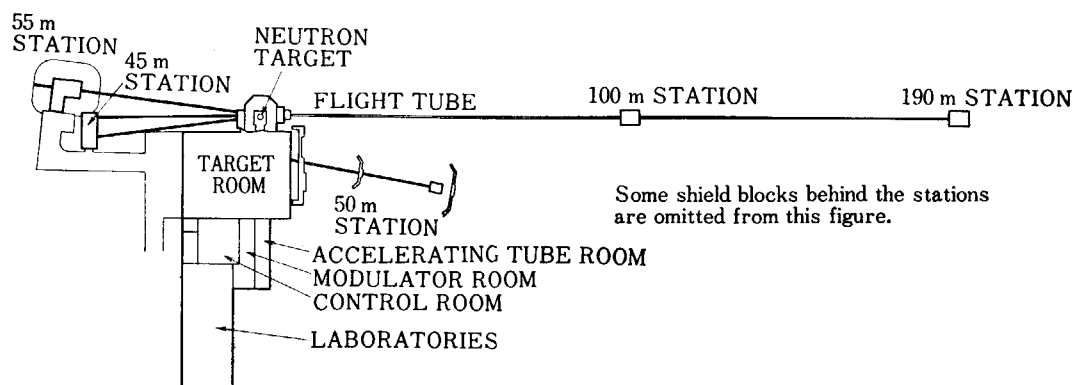


Fig. 2.2 Buildings and neutron T-O-F system.

3. 加 速 管 部

Linac の加速管部は Fig. 3.1 に示す 1 単位と同じ構成の 5 単位よりなっている。それぞれには加速管と、それにマイクロ波を供給する導波管系と、加速管を通過したマイクロ波を吸収する無反射水負荷終端部がある。また加速管の間にはビーム集束用 Q 磁石、ビーム・モニター、イオンポンプ等が設けられている。

加速管は 2 m のものが 2 本と、3 m のものが 3 本使用されている。これらの加速管はいわゆる遅波型の導波管で、TM₀₁ モードの進行波を管内に発生させて電子の加速を行なう。一般に円形導波管内を進行する電波の位相速度は光速より早いので、電波の位相速度を電子速度に一致させる必要があり、円形導波管内に負荷を入れて位相速度を遅くすることが行なわれる。新 linac の加速管は孔あきディスクを 1 波長あたり 3 枚はめこむ 2 π /3 モードの構造が採用されている。電波の位相速度はディスクの孔の大きさと、円形導波管の直径を変えることによって調整される。

3.1 第 1 加速管と第 2 加速管

第 1 加速管の前の部分はバンチャ部と呼ばれ、電子のバンチャングと加速を同時に行なうところで、同一構造の 7 コの空洞によって構成されている。バンチャ部におけるマイクロ波の位相速度は 0.95 C (C: 光速) でバンチャとしては高電界型に属する。電子の入射は、80 kV ~ 100 kV の電圧で行なわれる (Appendix 参照)。

バンチャを通過した電子の速度はほとんど光速に達するので、それ以後においては電子の加速は、光速度のマイクロ波電界によって行なうことができる。第 1 加速管のバンチャ部を除いた部分はレギュラー部と呼ばれ、この部分におけるマイクロ波の位相速度は光速度に等しい。第 1 加速管のレギュラー部は 52 コの空洞よりなり、空洞構造は同一であるので constant impedance 型と呼ばれる。この型の加速管に電力 P_0 (MW) のマイクロ波を供給した時、内部に発生する最大電界強度 V_0 (MV/m) は次式によって与えられる¹⁾。

$$V_0 = \sqrt{2P_0 I r} \quad (3.1)$$

ここに I (Np/m) は、加速管内におけるマイクロ波の減衰係数である。 r (M Ω /m) は shunt impedance と呼ばれ、加速管の加速能率を示す係数である。第 1 加速管の設計値の I : 0.11 Np/m, r : 49 M Ω /m の値を上式に代入するとマイクロ波の入力が 20 MW の時 V_0 は 15 MV/m となる。この値は S バンドの加速管の放電限界といわれる 20 MV/m に較べてかなり低いので、耐電力については設計値は余裕がある。加速管における電子のエネ

ルギー利得 E_0 は、constant impedance 型の加速管については次式で与えられる。

$$E_0 = LV_0(1 - e^{-\tau})/\tau + Lri \{(1 - e^{-\tau})/\tau - 1\} \quad (3.2)$$

ここに L (m) は加速管の長さを表し、 τ は減衰 (Np) で $I \times L$ で与えられる。 i (A) はビーム電流である。この式により、第 1 加速管のバンチャ部の 7 コの空洞をレギュラー部の 7 コの空洞で置換えた加速管 (これは第 2 加速管と同じもの) のビーム負荷特性を計算した結果を Fig. 3.2 に示す。

これらの加速管は無酸素銅の円筒と孔あきディスクのろうづけによって組立てられたものである。最初に円筒とディスクは 5 ミクロンの精度で旋盤加工されて、ろうづけが行なわれる。ろうづけの際に寸法が狂ってくるので、旋盤加工時の寸法は設計値よりいくらか大きめに選り、ろうづけの後、各々の空洞を squeeze によって変形し、寸法の補正を行なう。Squeeze は加速管に規定された周波数のマイクロ波を供給した時個々の空洞内に発生する定在波を目安として行なわれる。第 1 加速管の各々の空洞の位相のばらつきは $\pm 2\%$ 以下に押えられている。

クライストロンから加速管にマイクロ波を供給するために矩形導波管が接続されている。矩形導波管は SF₆ ガスで加圧され、一方、加速管は真空なので接続する際に真空を隔絶するマイクロ波窓が必要になる。窓はセラミックスの円板によって作られている。

矩形導波管内を TE₁₀ 波で伝播してきたマイクロ波は入力結合器により、加速管に結合され、加速管内では、TM₀₁ 波に変換される。入力結合器は円筒空洞形の変換器で、加速管にろうづけされて一体構造になっている。

加速管内においてマイクロ波のエネルギーの一部は電子の加速と加速管内面を流れるマイクロ波電流のオーム損失に使われ、残りは入力結合器と同一構造の出力結合器によって加速管外に取出される。このマイクロ波は、入力側につけられたマイクロ波窓と同じ構造の窓を通り、無反射終端器に導かれ吸収される。この終端器は、テーパ状ガラス管を水負荷とする型のものである。

加速管の冷却のため、6 本の 15 mm 直径の銅パイプが楕円形に変形されて加速管にはんだづけされている。この 6 本の銅管には合計 60 l/min (最大) の冷却水が流されて加速管は 40 °C 前後の温度に保たれる。この際水温を制御して、加速管の温度変化を ± 0.5 °C 以下に保つ。この水温制御については第 10 章に述べられる。加速管は、温度が室温より 40 °C まで上昇した際全長で

1 mm に近い熱膨張をおこし、しかもろうづけにより焼なましを受けていて変形しやすいので、ステンレス製の厚いベンチの上に3点において支持されている。加速管は入口側の一点で支持金具により完全に固定され中央部及び出口側は上下、左右だけを固定する支持金具により支持され、熱膨張により応力を受けるのを避けている。

第1加速管の入口には、鉄芯入りの電磁レンズがとりつけられている。また加速管には電子ビームの発散を防ぐためソレノイドコイルが合計15コ巻かれている。各々のコイルの巻数は500で最大電流は15 Aである。この磁石により、第1加速管の軸上に最大500ガウスの磁界を与えることができる。Photo 3.1は第1加速管をビームの出口の方向から撮影したものである。

第2加速管は、59コの空洞によって構成され、各々の空洞は第1加速管のレギュラー部と同一構造である。第2加速管の表面には、4本の30 mm直径の銅パイプを変形した水冷管がはんだづけされている。冷却水の流量は第1加速管と同じく60 l/minである。加速管に接続される無反射終端器は遅波式の抵抗負荷型のものである。この負荷は加速管と同じ構造で、内面に抵抗被膜をつけたものである。この負荷は真空中で使用できるので、マイクロ波窓を使う必要がない。

しかし、この型の欠点は他に較べて高価なことと、表面からガス放出があり、排気に時間がかかることである。第1加速管に使用されたテーパ状ガラス管水負荷は、加圧ガス中で使用されるためマイクロ波窓が必要であり、欠点としては水を流すテーパ状ガラス管がこわれやすいことである。

現在は第1加速管と第2加速管の無反射終端器は、第3、第4、第5加速管に用いられているものと同型のセラミック窓を使用する水負荷型の無反射終端器(Varian, 1284 BC 4)に置換えられた。第1加速管、第2加速管及びこれらに付属する立体回路系の設計、製作及び特性についてはAppendixで詳しく述べる。第1加速管の集束コイルはとくに原研側で巻かれたものである。

Photo 3.2は第2加速管であり、空洞の組立構造を見ることができる。加速管の各々の空洞表面に見られる白い点はsqueezeの跡である。加速管の上部と下部に水冷管が、また中央には加速管支持金具が見られる。

3.2 第3, 第4, 第5加速管

第3、第4、第5加速管は、加速管内でマイクロ波電界強度が一定になるように、マイクロ波の加速管内の伝播による減衰分を空洞寸法を変えることによって補う

constant gradient 構造で、85コの空洞よりなっている。しかし電子を加速する場合は、加速に使われるマイクロ波の減衰分は補われないので電界は一定にならない。

Constant gradient の加速管における電子の利得エネルギー E_0 は

$$E_0 = (1 - e^{-2\tau})^{1/2} (PLr)^{1/2} - \frac{irL}{2} \left(1 - \frac{2\tau e^{-2\tau}}{1 - e^{-2\tau}} \right) \quad (3.3)$$

で表わされる⁹⁾。ここに

r : shunt impedance (MΩ/m)

τ : 減衰 (Np)

L : 加速管の長さ (m)

i : ビーム電流 (A)

上式によって計算された第3、第4、第5加速管の負荷特性をFig. 3.3に示す。

これらの加速管の製作法は第1、第2加速管と同じくろうづけによるものである。各空洞の位相のばらつきは2%以下に調整されている。空洞のディスクの孔の直径は入口では約25 mmで、だんだん小さくなり出口では約18 mmである。

入力と出力の結合器は、SLACで開発された非対称効果補正された円筒空洞型のもので、加速管にろうづけされて一体構造になっている。

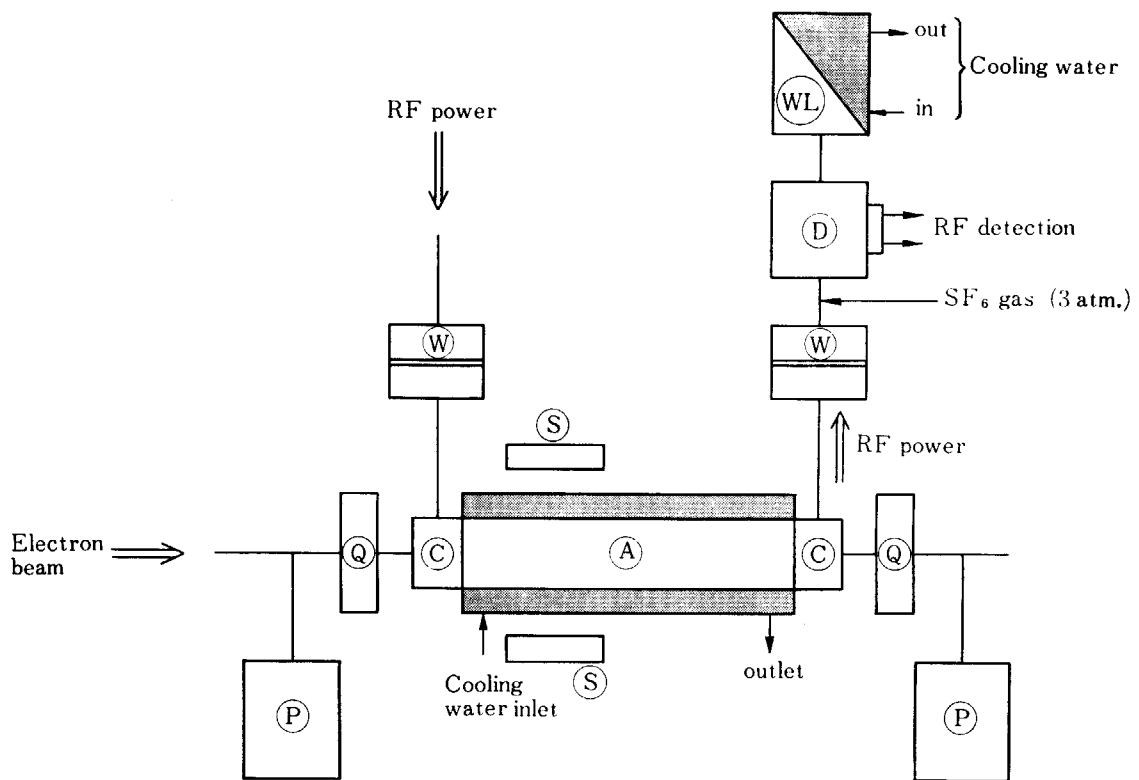
加速管は冷却水を流すためのステンレス円筒内に納められている。この外筒と加速管の間には、4つの縦のしきりがあり、冷却水の往路と復路を形成し、かつ加速管の支持も行なっている。この構造により、冷却水の温度は平均化され、加速管の場所による温度勾配が小さくなる。加速管は40℃で運転されるので、室温より温度が上昇した際に、1 mm程度の伸びがおこる。これに較べてステンレス外筒の膨張ははるかに小さいので、伸びに差がおこってくる。このため外筒と加速管は、後部において直接ろうづけされ、前部ではステンレスの薄い円板(厚さ0.2 mm)を介して接合され、伸びの差による応力は円板に吸収され小さくなっている。

加速管の外壁には2つのステンレス製中空リングがとりつけられ、細いステンレス管によって外部に連絡されている。加速管の温度変化がおこるとステンレス・リングの気圧が変化し、この圧力変化はステンレス管によって外部に取出され検出される。この信号は加速管の温度制御に使われる。

Photo 3.3は第4加速管の入口側の写真である。TABLE 3.1に加速管の特性を示す。これらの加速管には3.1で述べたセラミック窓をもつ水負荷型の無反射終端器が接続されている。

TABLE 3.1 Characteristics of the third, the fourth and the fifth accelerator sections

Mode	$2\pi/3$, Constant gradient
Power rating	20 kW, (average), 20 MW
VSWR	Less than 1.1: 1 at 2856 MHz through the windows into a matched load. Less than 1.5: 1 over a bandwidth of 5.5 MHz centered at 2856 MHz.
Solenoid field	None
Length	Approximately 3 meters (85 cavities)
Nominal operating frequency	2856.75 MHz (in vacuum)
Figure of merit (Q)	13000
Operating temperature	40 °C (water cooled)
No load energy	45 MeV (20 MW input)
Maximum field intensity	15 MeV/m (20 MW input)
Beam loading factor	36.2 MeV/amp
Maximum efficiency current	0.643 amp (20 MW input)



- (A) Accelerator structure (P) Ion pump (W) RF window
 (C) Input & output couplers (Q) Q-magnet (WL) waterload terminator
 (D) Bi-directional coupler (S) steering coil

Fig. 3.1 Components of accelerator section.

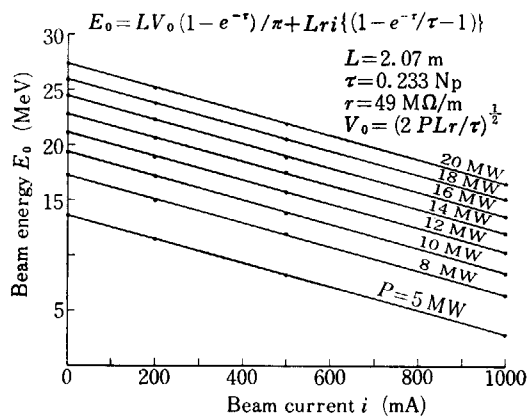


Fig. 3.2 Beam loading characteristics of the #1 and #2 accelerator structures (Mitsubishi).

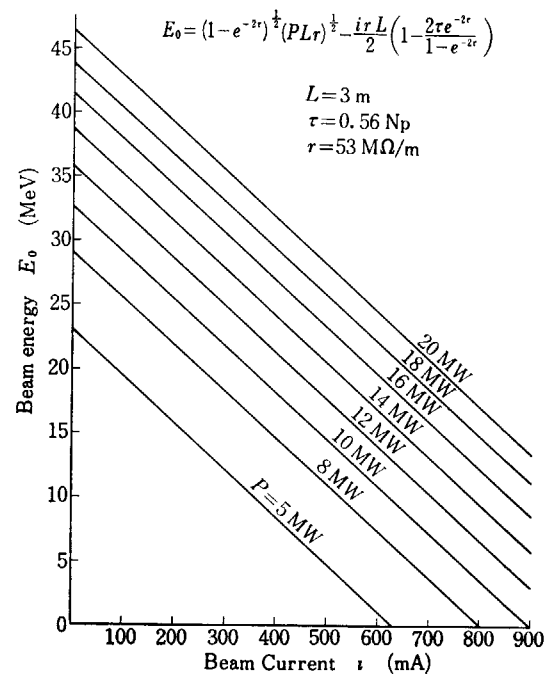


Fig. 3.3 Beam loading characteristics of the #3, #4 and #5 accelerator structures (ARCO)

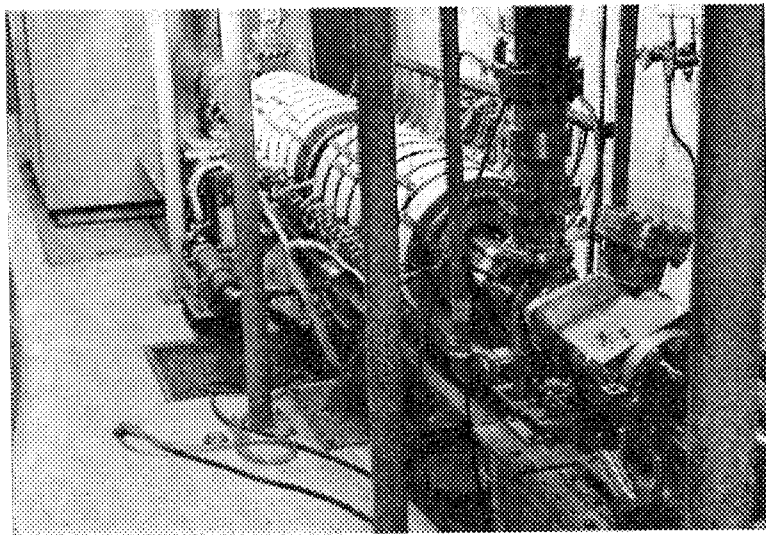


Photo 3.1 #1 accelerator section (Mitsubishi) viewed from the output end.

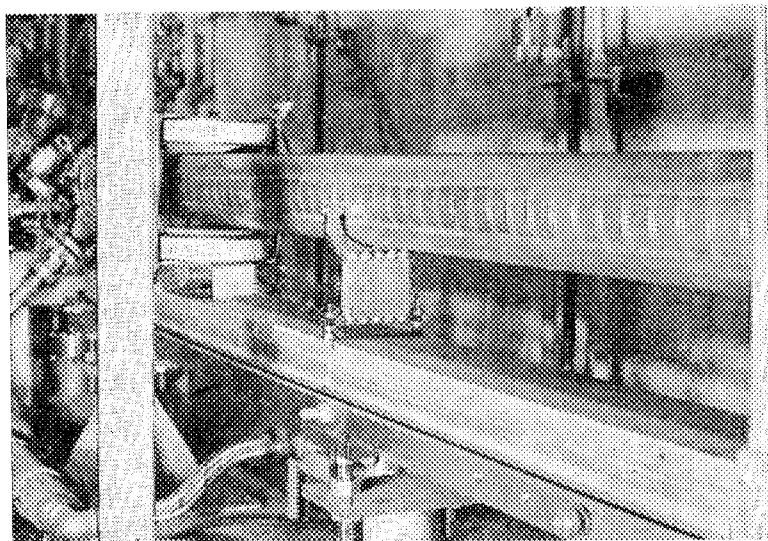


Photo 3.2 #2 accelerator section (Mitsubishi).
Traces of squeeze for tuning are seen on the wall of cavities.

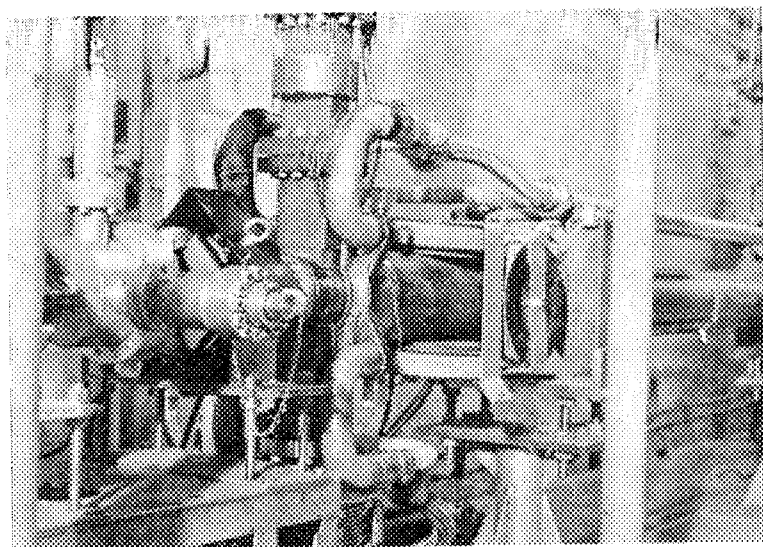


Photo 3.3 #4 accelerator section (ARCO) viewed from the input end. An electron beam monitor (left), a Q-magnet and steering coils are also seen in the photograph.

4. 電子入射系

電子入射系のブロック図を Fig. 4.1 に示す。電子銃はグリッド付きの Pierce gun である。電子はアノードの孔より細いビーム状になり放出される。このビームは鉄芯入り第1の電磁レンズにより集束された後プレバンチャを通過する。ついで第2の電磁レンズで集束され、ゲート・バルブを通過し、再び第3の電磁レンズで集束され第1加速管にいたる。電子はプレバンチャを通過する際にマイクロ波電界により速度変調をうけ、加速管に到着する間にバンチャが形成される。電子ビームの軸合わせのために、上下と左右に steering コイルが設けられている。ゲートバルブにはビーム集束のためのソレノイド・コイルが巻かれている。Photo 4.1 は入射系の写真で、左のアルミニウム製電磁シールドの箱の中には電子銃が入れられている。

4.1 電子銃

電子銃のカソードは酸化物を含浸した材料で作られた直径 17 mm, 厚さ 2~3 mm の円板で、電子放出面は中央部が凹んだ球面形状で、裏側からヒータにより間接的に熱せられる。カソードに接近してグリッドがあり、カソード、グリッドおよびアノードはいわゆる Pierce 型の電界分布を形成し、カソードから放出される電子はこの電界の集束作用をうけて、細いビーム状になりアノードにあけられた 9 mm 直径の孔からでてくる。アノードの電位はアースと同電位で、従ってカソードには負の高電圧が供給される。この電子銃の規格はカソード電圧は最大 100 kV (パルス), グリッド・バイアス電圧は -100 V から -500 V, グリッド電圧は最大 2 kV (パルス) で、5 A 以上のビーム電流が得られる。グリッド電圧の制御により最も短い場合で 5 nsec の時間幅のビームパルスが得られる。この電子銃の詳細については Appendix に示した。Photo 4.2 は電子銃である。

4.2 プレバンチャ

プレバンチャは共振型の単一空洞である。第1加速管に供給されるマイクロ波の一部は分割され、位相と強度が適当に調整されてプレバンチャに供給される。プレバンチャの空洞の相対する電極間にはマイクロ波の電界が発生し、これを通過する電子に速度変調を与える。速度変調を与えられた電子は、定められた距離を通過するとバンチャを形づくる。バンチャの模様は次式によって表わされる⁵⁾。

$$\theta_2 - \theta_0 = \theta_1 + \frac{2\pi D}{\beta_0 \lambda_0} \left(\frac{\beta_0}{\beta} - 1 \right) \quad (4.1)$$

ここに、

D : 電子の飛行距離

θ_1 : 電子がプレバンチャの電極のギャップを通過する時のマイクロ波の位相

θ_2 : 上記の電子が、飛行距離 D を通過した時のマイクロ波の位相

θ_0 : ギャップのマイクロ波の位相が 0 の時に通過した電子が D を飛行した時の位相

v_0 : プレバンチャに入射する電子の速度

v : プレバンチャを通過した電子の速度

C : 光速

λ_0 : マイクロ波の自由空間での波長

β_0 : v_0/C プレバンチャに入射する電子の速度の光速に対する割合

β : v/C プレバンチャを通過した電子の速度の光速に対する割合

相対論の影響を考えると、 $V(\text{kV})$ で加速された電子の速度 β は次式で表わされる。

$$\beta = \frac{\left\{ \left(\frac{V}{511} + 1 \right)^2 - 1 \right\}^{1/2}}{\frac{V}{511} + 1} \quad (4.2)$$

プレバンチャを通過する電子の受ける加速電圧 V は次式で与えられる。

$$V = V_0 + V_m \sin \theta_1 \left(\frac{\sin \tau/2}{\tau/2} \right) \quad (4.3)$$

ここに

V_0 : 電子がプレバンチャに入射する以前に受けた加速電圧

V_m : プレバンチャの電極間のマイクロ波の電圧の最大振幅

τ : プレバンチャの電極間を電子が通過する時間をラジアン単位で表わしたもの (C の速度の電子が 1 波長の距離を通過する時間を 2π ラジアンと定義する)。

実際の linac においてプレバンチャの電極間を電子が通過する場合の (4.3) 式の $\frac{\sin \tau/2}{\tau/2}$ についてはつぎのようになる。

例えば、0.5 C の速度の電子 (80 keV) がプレバンチャの 8 mm のギャップを通過する場合を考えると、通過時間 τ は 0.951 ラジアンで $\frac{\sin \tau/2}{\tau/2}$ は 0.963 になる。従って、

$$V \approx V_0 + V_m \sin \theta_1 \quad (4.3)'$$

と近似する。(4.1)式に(4.2), (4.3)'を代入し計算したのがFig. 4.2で, θ_1 と $\theta_2 - \theta_0$ の関係が示されている。

プレバンチャを dt_1 の時間内に i_0 の電流のビームが通過し, この電荷が D を飛行した後に dt_2 の時間内に i_2 のビームとなって到着したとすると i_0 と i_2 との間には次の関係が成立する。

$$i_2 = i_0 \frac{dt_1}{dt_2} = i_0 \left| \frac{d\theta_1}{d(\theta_2 - \theta_0)} \right| \quad (4.4)$$

(4.4)式の後の項は(4.1), (4.2), (4.3)'式より

$$\frac{d\theta_1}{d(\theta_2 - \theta_0)} = \frac{1}{1 - \frac{2\pi D}{\lambda_0} \times \left(\frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \right)^{-3/2} \times \frac{V_m \cos \theta_1}{511}} \quad (4.5)$$

上式による i_2 の計算例をFig. 4.3に示す。定められた位相範囲で D を飛行する電流の総量 I は(4.4)式を積分することにより次式で与えられる。

$$I = \int_{\theta_1 - \theta_0}^{\theta_1 + \theta_0} i_2 d(\theta_2 - \theta_0) = i_0 \int_{\theta_1 - \theta_0}^{\theta_1 + \theta_0} \left| \frac{d\theta_1}{d(\theta_2 - \theta_0)} \right| d(\theta_2 - \theta_0) \\ = i_0 \sum_{\theta_1 - \theta_0} |\theta_1| \quad (4.6)$$

Fig. 4.3の図中の数字は, バンチ内の電流の積分値の電流の総量に対する比である。

プレバンチャの材料には低熱膨張係数をもつステンレス鋼が使用されて, 温度変化による周波数のドリフトが押えられた。

空洞の寸法は実験的にきめられ, 最終的な周波数の調節は空洞の横壁をsqueezeすることによって行なわれた。Fig. 4.4にプレバンチャの寸法を示した。第1クライストロンから分岐されたマイクロ波は同軸ケーブルによりプレバンチャへ送られ, 結合器により空洞が励振される。最大の入力電力は20kWで, 空洞の電極の間には20kV程度のマイクロ波電圧が誘起される。

Fig. 4.5にはプレバンチャの周波数特性を示した。これよりQ値が得られこの値は340であった。Photo 4.3はプレバンチャである。

4.3 ビーム集束及び steering

電子は電子銃のカソード(直径17mm)の表面から放出され, カソードとアノードによって形成されるPierce型の電界によりビーム状に集束される。このビームは, プレバンチャ, ゲート・バルブの順に通過して第1加速管に入射される。ビームがこれらを通る間に器壁と衝突して損失がおこらないように, 集束装置やsteering装置が設けられている。ビームが発散する原因は最初のビーム形成の際のビームの進行角の拡りと, ビーム自身の電荷によるクーロン反跳による発散, プレバンチャにおけるマイクロ波電界によるビームの偏向等によっておこる。

これらの影響を考慮して軌道計算を行なうのは, 必ずしも容易でない。それで電子銃, プレバンチャ, ゲート・バ

ルブ, 第1加速管の間にそれぞれ電磁レンズを設け, またとくにゲート・バルブは構造的に長くなるので, これの外側にソレノイド・コイルを巻いて, これらの励磁電流を変化させることにより電子の軌道の調整を行なうようにした。Fig. 4.6には電子銃直後に設けられた第1番目の電磁レンズの寸法が示されている。またビームの進行方向を正しく加速管の軸に一致させるために上下, 左右1組ずつのsteeringコイルが設けられ, それぞれの励磁電流の変化によりビームのsteeringが行なわれる。

Photo 4.4は入射系の写真で2組の鉄芯入りの電磁レンズと, ゲート・バルブに巻かれたソレノイドコイルと, 左右偏向用と上下偏向用のsteeringコイルが見られる。

4.4 電子銃電源

電子銃にはカソード・パルサー(カソード・モジュレータ), グリッド・パルサー, カソードバイアス電源等が必要である。電子銃からでてくる電子ビームの加速はカソードに加えらるパルスによって行なわれる。このパルスはカソード・パルサーによって発生され, これがパルストランスで昇圧されたものである。また, 電子銃のビーム電流は, グリッドの電圧か, またはカソードのヒータ電流を変化することによって調節される。グリッド電圧制御のためのグリッド・パルサーとカソードのヒータのトランスはカソード・パルストランスの2次巻線の出力側に置かれていて, カソードのパルス電圧が重畳される。これらの給電はカソード・パルストランスの2次巻線(6本)を通して行なわれる。電子銃のカソード・バイアス電源はアース側にあり, パルストランスの2次巻線の1本を通して電子銃のカソードに正の電圧を与えている。グリッド・パルサーのトリガーもこの2次巻線の1本を通して行なう。

電子銃の諸電源の配線図をFig. 4.7に示す。

4.4.1 カソード・パルサー

カソード・パルサーのパルス形成回路(PFN)には, lump型のディレー・ラインが使用されている。ディレー・ラインは8組のコンデンサとインダクターより構成されている。コンデンサの容量は0.008 μF である。インダクターは銅パイプのコイルで, アルミニウム製のslugをコイルから出し入れすることにより, インダクタンスを1.1 μH から1.5 μH までかえることができる。これらのコイルは互にはcoupleされていない。PFNのパルス幅は4 μsec で, 特性インピーダンスは40 Ω である。PFNのスイッチ管には水素入りのサイラトロン(7890)が用いられている。カソード・パルサーの出力は10kVで, 50 Ω の同軸ケーブル(RG 19/U)により, パルストランスに伝送される。カソード・パルサーの回路図をFig. 4.8に示す。Photo 4.5はカソード・パルサーのPFNである。中央後方にサイラトロンが見える。

4.4.2 パルストランス

パルストランスの巻線比は 1:10 でインピーダンスは 1 次側が 40Ω , 2 次側が $4k\Omega$ である。1 次巻線の入力電圧は 10 kV で 2 次巻線の出力は 100 kV である。2 次巻線は 6 本併行巻でグリッド・パルサーの電力と電子銃のヒーターの電力の供給と、電子銃のグリッドのバイアス電圧とトリガー信号の伝送に用いられる。全体は絶縁油の中に入れてられていて、2 次巻線出力は絶縁碍子を通して外部に取出されている。またインピーダンス・マッチのために $4k\Omega$ (容量 2.7 kW) の無誘導抵抗がパルストランスの出力に接続されている。パルストランスの 2 次側の電圧波形を Photo 4.6 に示す。

4.4.3 グリッド・パルサー

電子銃のグリッドにはグリッド・パルサーにより最大 2 kV の制御パルスが加えられる。このグリッド・パルサーの PFN は 50Ω の同軸ケーブル (5D2W) をディレー・ラインとして使用しスイッチ管として水素入りサイラトロン (4C35) を使用している。

グリッド・パルサーの出力のパルス幅は同軸ケーブルの長さを変えることにより 15nsec, 30nsec, 60 nsec, 0.125 μ sec, 0.25 μ sec, 0.5 μ sec, 1 μ sec, 2 μ sec の 8 段階に切換えることができる。グリッド・パルサーの高圧直流は、

真空管使用の電圧安定電源により供給される。電源の出力は最高 2 kV, 60 mA で、電圧はアース側から絶縁物の棒を介して安定化回路の比較電圧調節用のバリオームを回転することにより、変化させることができる。

この電圧を変化させて、パルス出力電圧を調整する。グリッド・パルサーのサイラトロンの制御グリッドにはパルストランスの 2 次巻線の 2 本を通してトリガー信号が送られる。グリッド・パルサーの電力供給もこの 2 次巻線の他の 2 本を使って行なわれる。グリッド・パルサーの回路図を Fig. 4.7 に示す。Photo 4.7 は出力波形である。

4.4.4 電子銃ヒータおよびバイアス電源

電子銃のカソードのヒータトランスの電力供給はパルストランスの 2 次巻線を通して行なわれるので、ヒータ電流はアース側で変えることができる。ヒータ電流は最大 15 A で電圧は約 6 V である。トランスの結線を Fig. 4.7 に示す。Photo 4.8 はグリッド・パルサーで、下方に見える箱はカソード・パルストランスである。カソードに与えられるバイアス電圧はパルストランスの 2 次巻線の 1 本により送られる。このためにバイアス電源はアース側に置くことができる。バイアス電源の出力電圧は真空管式安定回路により安定化されている。

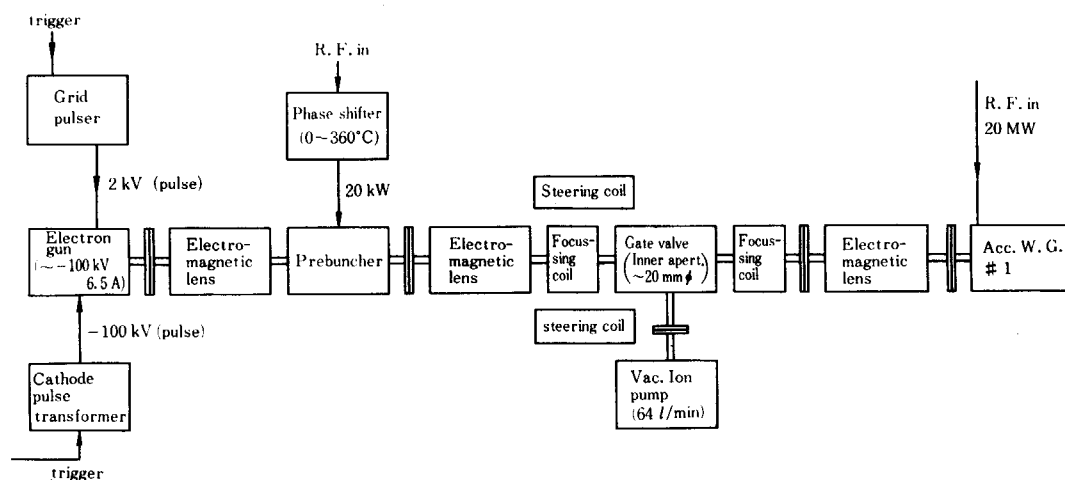


Fig. 4.1 Block diagram of electron injector.

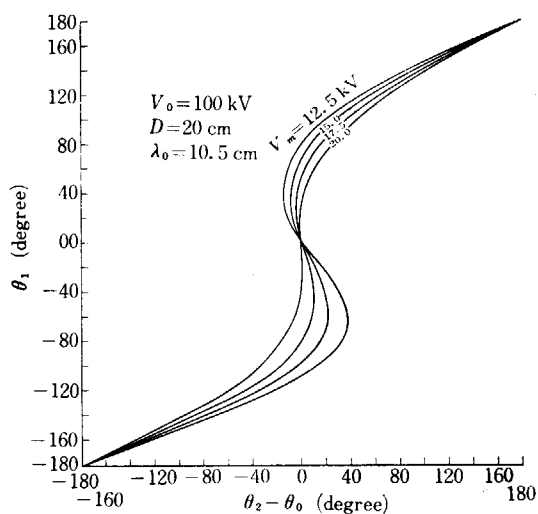


Fig. 4.2 Departure-arrival phase relationship for prebunched electron beam.

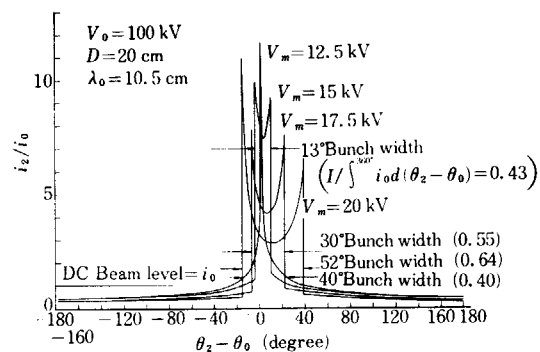


Fig. 4.3 Current arrival-phase relationship for prebunched electron beam.

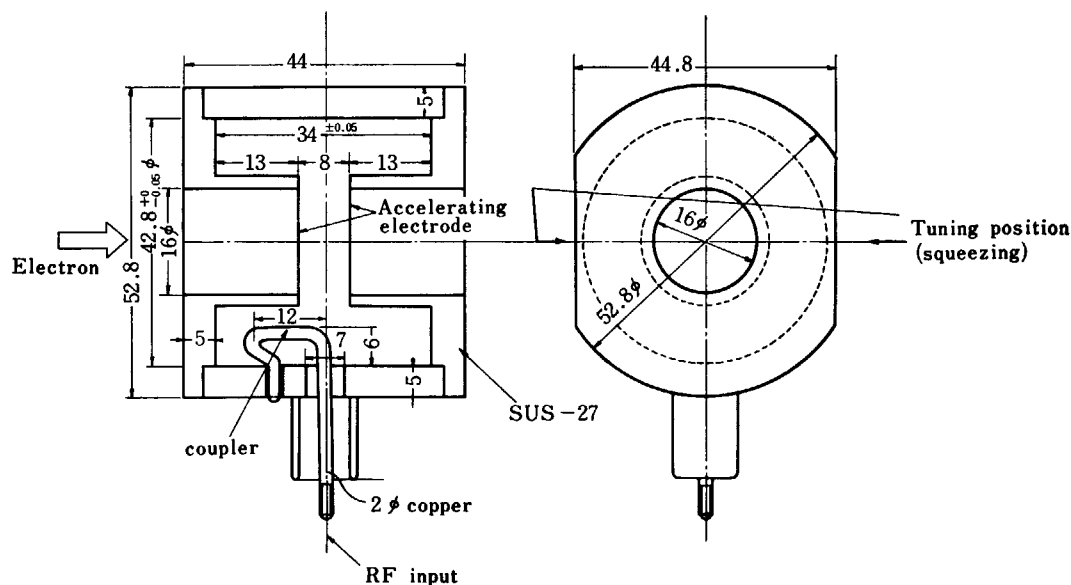


Fig. 4.4 Dimensions of prebuncher.

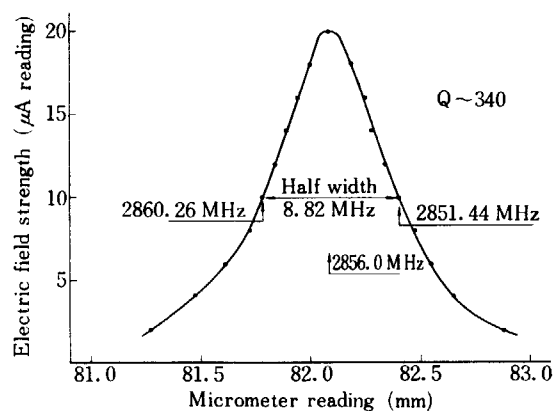


Fig. 4.5 Frequency characteristics of prebuncher.

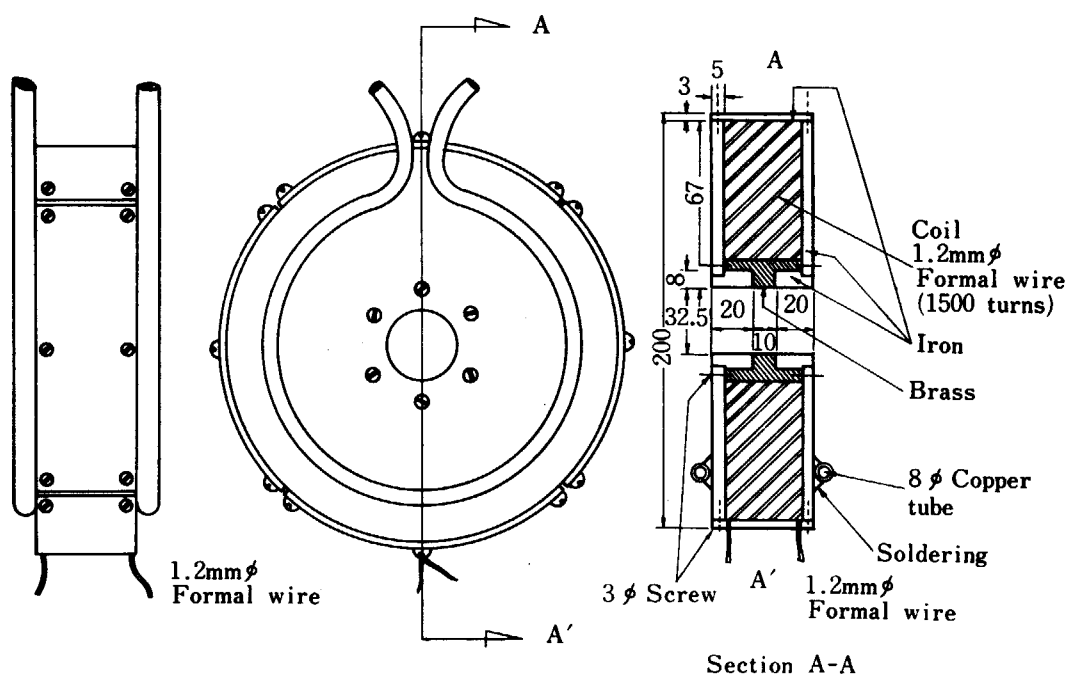


Fig. 4.6 Electromagnetic lens.

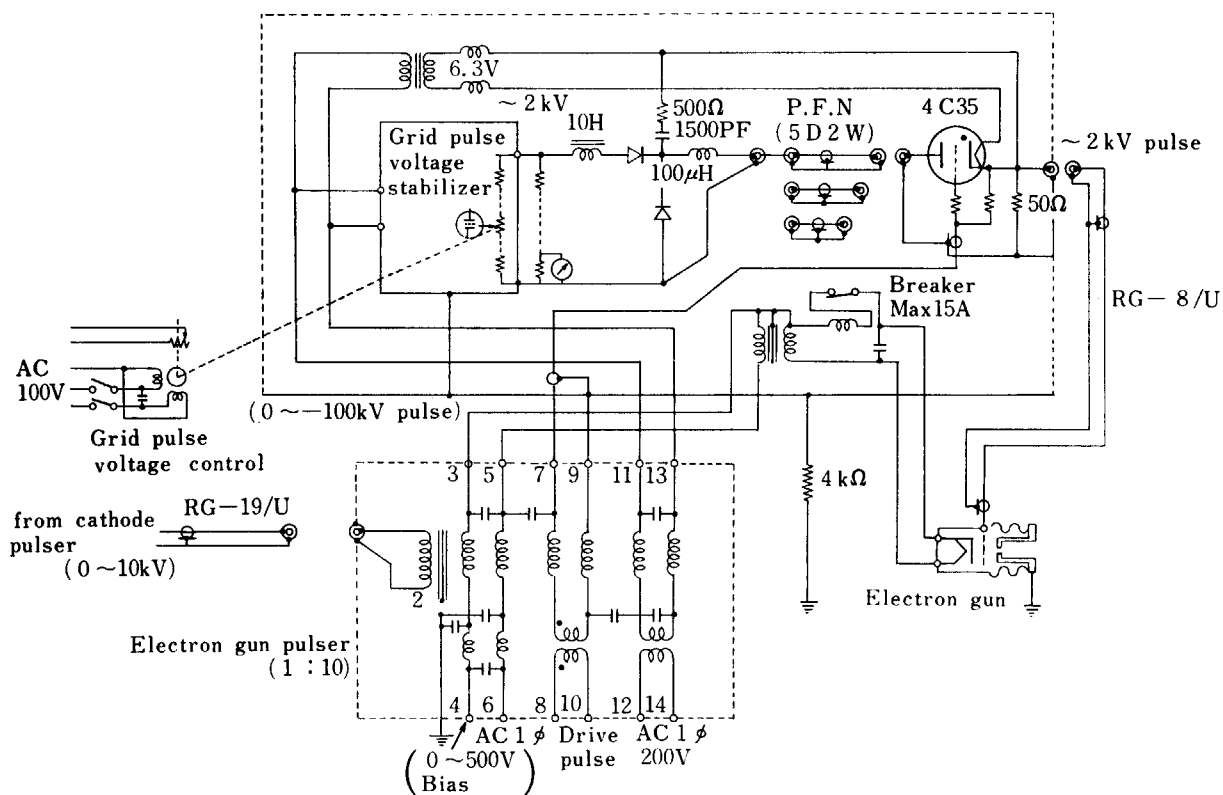


Fig. 4.7 Block diagram of electron gun pulser.

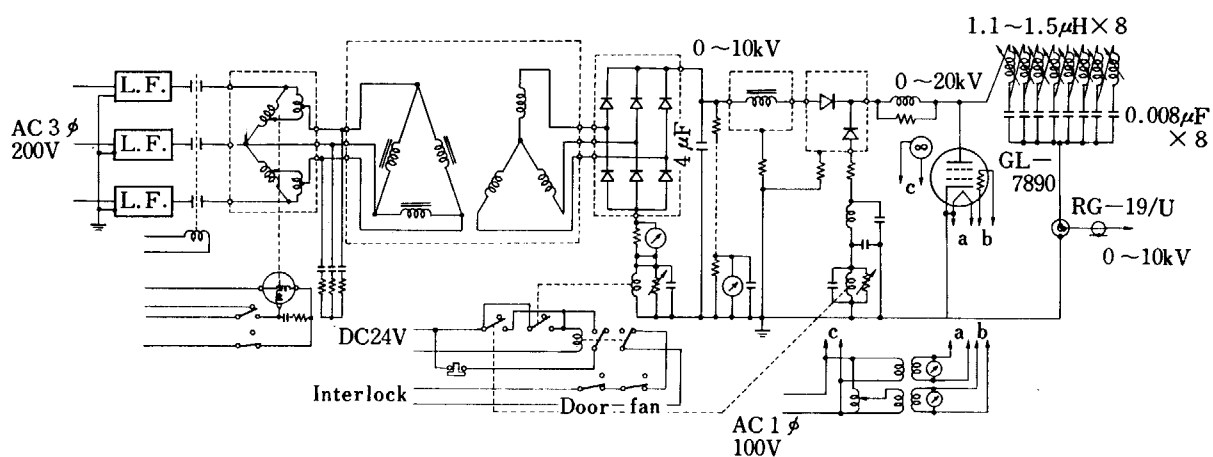


Fig. 4.8 Circuit diagram of electron gun cathode pulser.

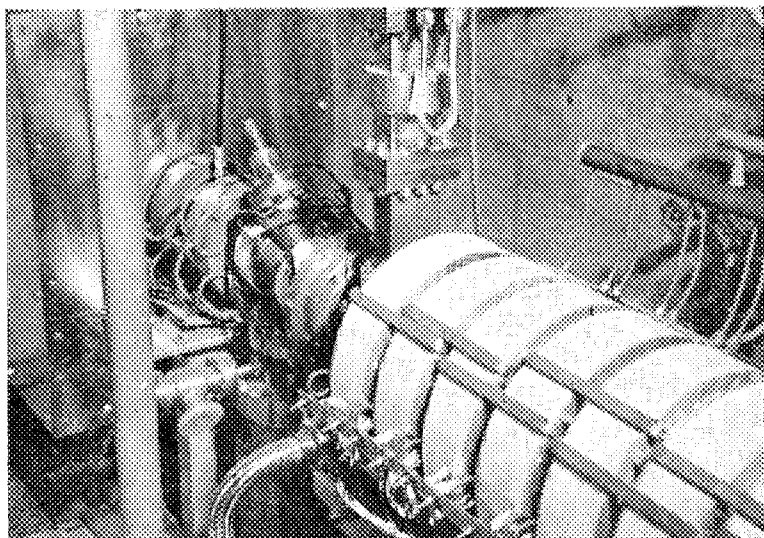


Photo 4.1 Electron injector system viewed from #1 accelerator. An electron gun is put in an aluminium case.

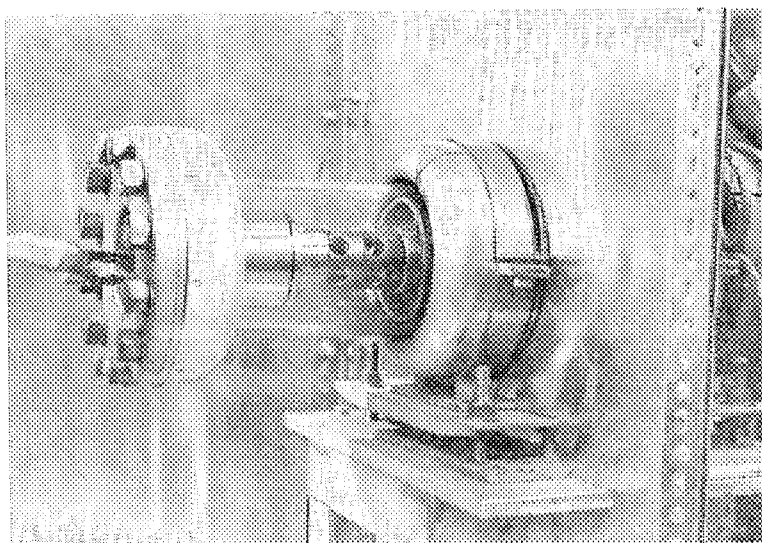


Photo 4.2 Electron gun.

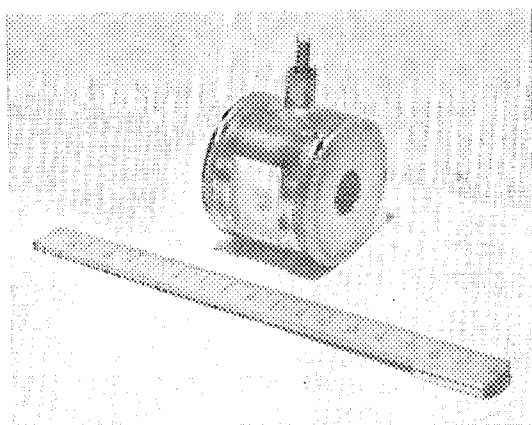
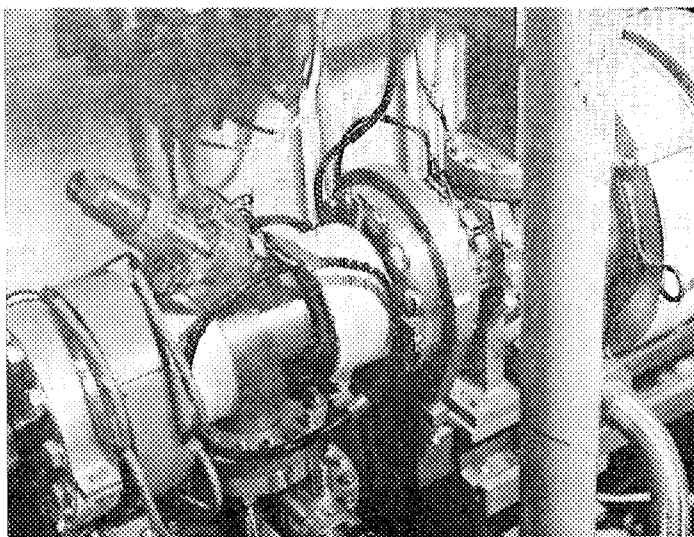


Photo 4.3 Prebuncher.

Photo 4.4 Focussing and steering coils of the electron injector.



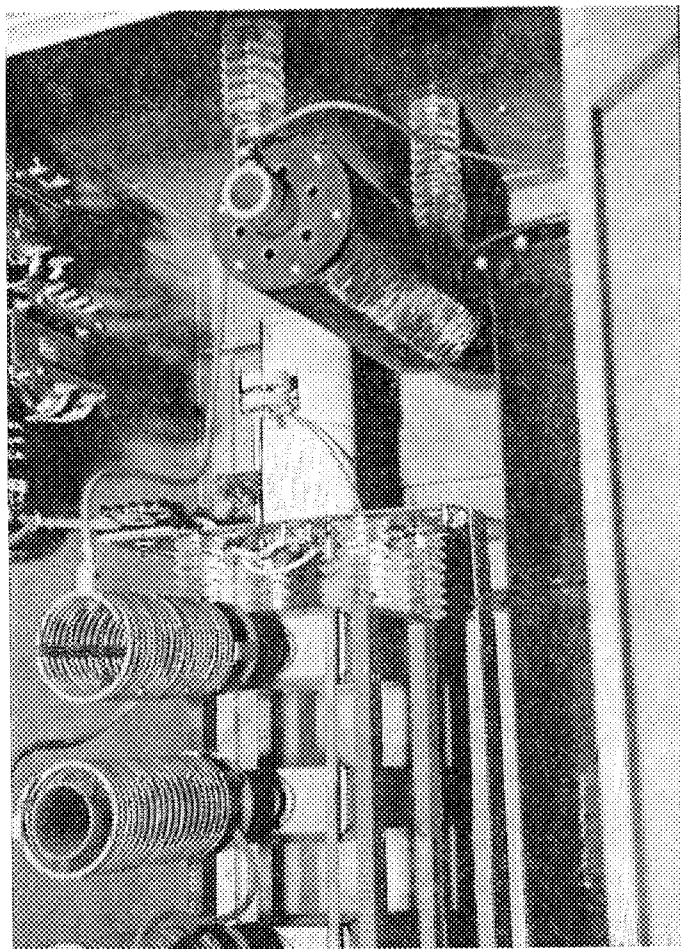


Photo 4.5 PFN of gun cathode pulser.

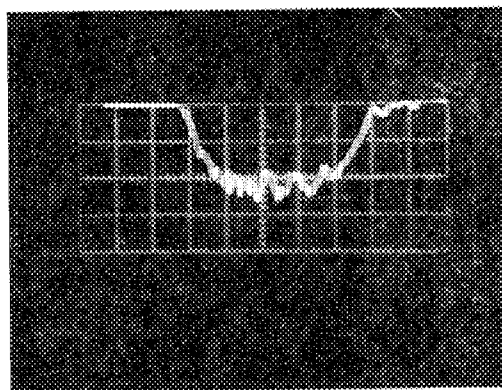


Photo 4.6 Voltage waveform at electron gun cathode (abscissa 1 μ sec/division, ordinate 50 kV/division).

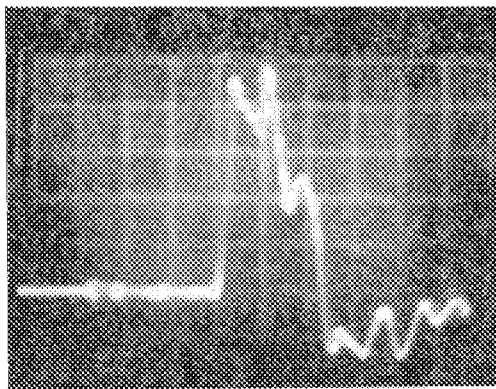
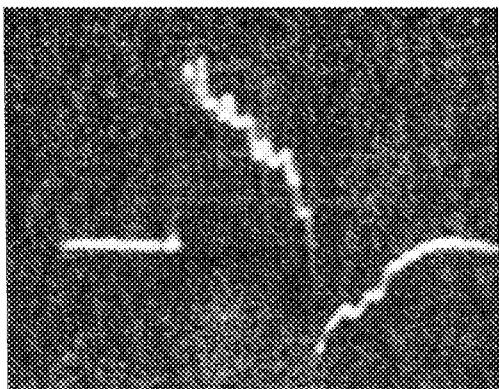
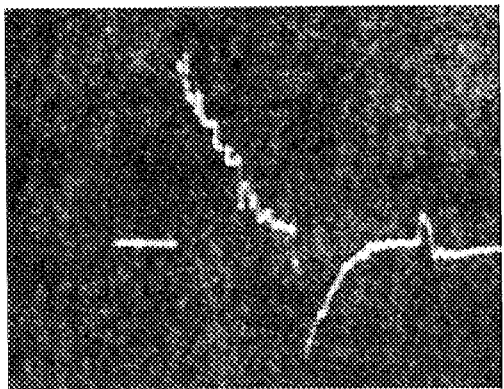


Photo 4.7 Voltage waveform of grid pulser (abscissa $0.5\mu\text{sec}$ (a), $0.1\mu\text{sec}$ (b), $0.05\mu\text{sec}$ /division (c), ordinate 400 V/division)

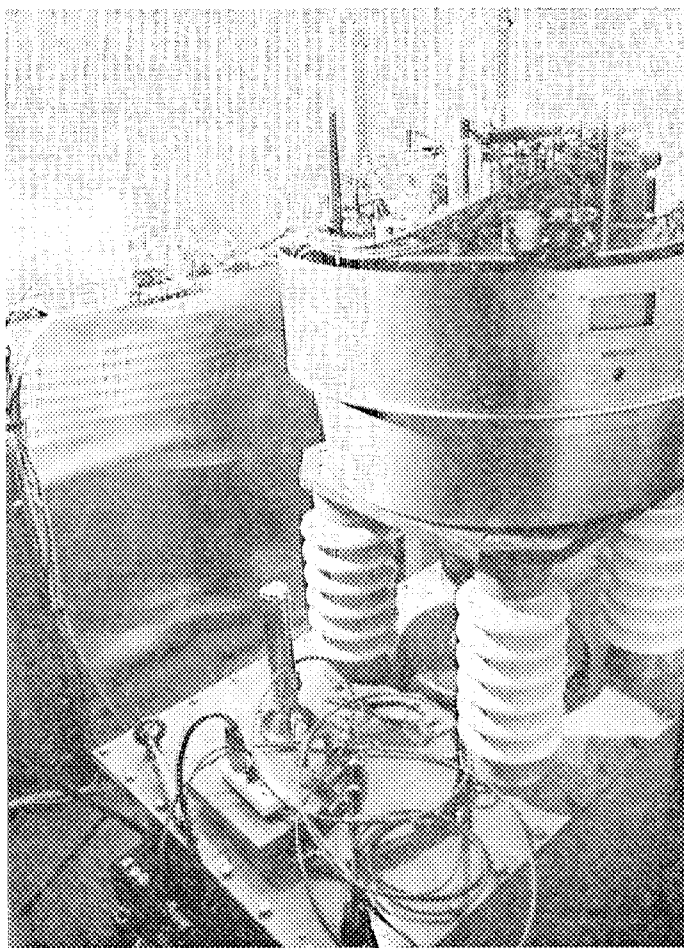


Photo 4.8 Grid pulser (upper circuit) and gun cathode pulse transformer. The grid pulser is covered with an aluminium case in operation.

5. マイクロ波系

Linac のマイクロ波装置の系統図を Fig. 5.1 に示す。進行波管 (TWT) を標準空洞に組合わせることによってマイクロ波の発振を行なっている。周波数範囲はいわゆる S-バンドに属し 2 W の連続波 (CW) の出力が得られる。この CW のマイクロ波は、3 極真空管 (板極管) によってパルスに変調され、増幅される。尖頭出力は 50 W である。この出力はブースター・クライストロンによって 5 kW に増幅される。ブースター・クライストロンの出力は導波管を伝わり、5 組の方向性結合器によって 5 分割されて 5 本の大型クライストロンに導かれる。このクライストロンによって最終増幅が行なわれ 20 MW のパルス出力を得る。この出力は矩形導波管により個々の加速管に導かれる。

5.1 マイクロ波発振器

進行波管 (TWT, 東芝製 3W20) を使用する自励発振器によってマイクロ波の発振が行なわれる。TWT を標準空洞に結合させ、空洞に発生したマイクロ波電力の一部を結合器で取りだし、強度と位相を調節して TWT にフィード・バックを行なう。このフィード・バック・ループには単向管、移相器および減衰器が含まれ、これらの素子は矩形導波管によって結合されている。基準となる空洞は低熱膨張係数をもつインバールで作られた円筒形空洞である。円筒底面はピストン構造で、モータ駆動のマイクロ・スクリュにより空洞の容積を変えることができる。この容積変化により発振周波数を 2,856.75 MHz を中心にして 1 MHz の範囲にわたり変化することができる。得られる周波数の安定度は 1×10^{-6} であり、linac の安定運転に必要な条件をほぼ満している。

Fig. 5.2 に発振器の回路図を示す。この発振器は旧 linac に長年使用されていたものを (烏田理化製)、改造したもので、コントロール・デスクで操作できるインバール製の基準空洞が新たにとりつけられた。Photo 5.1 には上から発振ループ、TWT、同電源、3 極管増幅器、同電源のパネルが順に見られる。

5.2 3 極管増幅器

マイクロ波増幅用 3 極管 (板極管 Machlett: ML-8535) を使用した増幅器である。板極管は共振空洞型 mount 内に装填されている。グリッドに 2 W のマイクロ波入力を行ない、カソードに 30 V, 7 μ sec パルス幅をもった変調電圧を加えると、50 W のパルス出力が得られる。Photo 5.1 の写真において下から 2 段目のシャーシに

は、2 組の板極管 (1 組は予備) とその mount と冷却ファンが見られる。TABLE 5.1 に板極管の特性を示す。

Fig. 5.3 は ML-8535 のカソード・モジュレータの回路図である。Photo 5.2 は ML-8535 のカソードの電圧波形、Photo 5.3 はマイクロ波出力波形である。

5.3 ブースター・クライストロン増幅器

ML-8535 の出力 (50 W) は同軸ケーブルによりブースター・クライストロン (Sperry: SAS-61) に導かれて 5 kW の増幅が行なわれる。ブースター・クライストロンのカソードに加えられるパルス電圧波形の平坦部にリップル成分があると、出力マイクロ波に位相変調がおこる。これが主クライストロンで増幅され加速管に供給されると、加速電子のエネルギーと強度が変調される。ビームのエネルギーの変調を 1% 以内に抑えるには、ビームの位相のずれを 1% 以内、従ってリップルを 0.1% 以内に抑えることが必要である⁹⁾。

SAS-61 のカソードには 11 kV の負のパルス電圧が供給される。この発生にはパルス用の真空管 (4PR1000A) を変調管とするパルサーが用いられる。この回路図を Fig. 5.4 に示す。Photo 5.4 は 4PR 1000 A のグリッドの電圧波形である。Photo 5.5 は SAS 61 のカソードの電圧波形、Photo 5.6 はカソードの電流波形である。また、Photo 5.7 は出力マイクロ波波形である。Fig. 5.5 は SAS 61 のカソード・パルサーの高圧を供給する高圧電源の回路図である。

マイクロ波発振器、3 極管増幅器、ブースター・クライストロン増幅器はコントロール室のコントロール・ラック内に収められている。

5.4 低電力マイクロ波伝送系

コントロール室のコントロール・ラック内の SAS 61 からモジュレータ室内の 5 本のクライストロンにマイクロ波を供給する低電力マイクロ波伝送系を Fig. 5.6 に示す。この構成はつぎの通りである。SAS 61 に接合された矩形導波管は、保護用減衰器を経て床ダクトを通りモジュレータ室に導かれ、3db の方向性結合器により 2 分割される。分割された一方の導波管は床ダクトを通り、第 3、第 2、第 1 クライストロンのパルストランスケースの下部に順に導かれる。ケースの下部においては方向性結合器がとりつけられ、それぞれにマイクロ波減衰器、移相器が接合されている。マイクロ波は移相器からは同軸ケーブルによりクライストロンに導かれる。他

方の導波管は同じように第4, 第5クライストロンの順にマイクロ波の供給を行なっている。

伝送系に使用された黄銅製の矩形導波管(規格名 WRJ-3)の内寸法は $34.0\text{mm} \times 72.1\text{mm}$ で, 内面は銅鍍金されている。保護用減衰器は伝送系のマイクロ波が急激に増加するためにおこるクライストロンの窓の破壊を防止するもので, 系内に何らかの理由でマイクロ波がなくなった時に 20 db の抵抗を1秒以内に挿入する。マイクロ波の伝送を開始する時は10秒位でゆっくり抵抗を抜く。マイクロ波を分割する方向性結合器の結合度は第1, 第5クライストロン用のものは3dbで, 第2, 第3, 第4クライストロン用のものは6dbである。従って分割されるマイクロ波強度は必ずしも一定でないが, 減衰器によって調節され, 各々のクライストロンには100W程度が供給される。結合器の規格性能の1例を TABLE 5.2 に示す。

マイクロ波の位相を調節する移相器の規格性能を TABLE 5.3 に示す。また強度を調節する減衰器の規格性能を TABLE 5.4 に示す。

5.5 主クライストロン増幅器

新 linac に使用されたクライストロンは SLAC で使用されているもので, RCA 社で製作された(8568)。このクライストロンは周波数固定式の5空洞構造で, 増幅度は 53 db, 最大出力は 21 MW である。使用時にはセラミック・シールのカソード部が絶縁油に浸される。クライストロンの管内の電子ビームを集束するために軸方向に最大1,100 Gauss の磁界が必要であり, 電磁石が用いられている。電磁石の外筒, 上蓋および下蓋は軟鋼製で磁界のしみ出しの遮蔽を行なっている。これはカソードに磁界の漏洩があると, カソードから放出される電子に cathode oscillation と呼ばれる不安定現象がおこるのでこれを防止するためのものである。8568 の磁界分布を Fig. 5.7 に示す。

クライストロンの管内において電子ビームが途中の空洞に衝突しないように, 電磁石の励磁電流は注意深く調節される。調節はクライストロンのカソードの電圧波形と, マイクロ波の波形を観測しながら行なわれ, この両方の波形がなるべく一致する励磁電流が求められる。Photo 5.8はクライストロンのカソードの電圧波形, Photo 5.9はビーム電流の波形, Photo 5.10は出力マイクロ波波形である。この最適の励磁電流はクライストロンの出力と共に変るが, 実際には 20 MW 出力に最適な励磁電流に固定されている。RCA 8568 の規格を TABLE 5.5 に, 出力特性は Fig. 5.8 に示す。

クライストロンの平均寿命は, SLAC の実績では 8000 時間以上を記録したといわれている。新 linac の場合5本とも使用時間は 5000 時間に達したが, まだ目立った出力低下はおこっていない。

クライストロンのカソードには最大で電圧 260 kV, 電流 270 A のパルスが供給される。このパルスの発生は第6章で述べられるカソード・モジュレータによって行なう。モジュレータの出力はパルストランスで昇圧されてカソードに供給される。

このパルストランスの昇圧比は 1:12 で, Pearson 社で製作されたものである。パルス繰返しは $2.8\mu\text{sec}$ 幅のパルスの場合 360 pps まで使用可能であり, 出力のパルスの立上り時間は約 $0.5\mu\text{sec}$ である。このトランスの規格を TABLE 5.6 に示す。

コアはバイアス方式がとられ, 絶縁油が入れられたケースの内部に収められている。ケースの中央にしきりがあり, 一方はパルストランスが収められ, 他方にはクライストロンがカソードを下にして, セラミックシール部が絶縁油に漬かるように立てられている。Photo 5.11 は第1加速管部のクライストロンとパルストランスである。

パルストランスの2次巻線は2本の線が平行に巻かれた bifilar 形式になっている。この2本の銅線はタンクの中央部のしきりを貫通してクライストロンのカソードのヒータに接続されている。またタンク内にはクライストロンのビーム電流をモニターするためのフェライトリングが置かれ, 前述の2本の銅線はこの中心部を貫通している。

クライストロンのカソード電圧をモニターするためには電極板がカソードに向きあって立てられ, 誘起電圧が外部に取出される。パルストランスの配線図を Fig. 5.9 に示す。Photo 5.12 にモジュレータとパルストランスを接続する4本の同軸ケーブルがみられる。4本の50Ωのケーブルを並列に用いることにより, ケーブルのインピーダンスを 12.5Ω に下げている。

5.6 大電力マイクロ波伝送系

モジュレータ室に設置された5本のクライストロンと, 加速管室の5本の加速管はそれぞれ導波管回路で接続され, 大電力のマイクロ波の伝送が行なわれる。伝送回路はクライストロンの上に向いたマイクロ波窓に始まり, これに矩形導波管が接合される。つぎに H-Bend 管が接合されて導波管は 90° 曲げられて水平になり, 1.2m の厚さのコンクリート壁を通り抜けて加速管室にはいり, 再び H-Bend 導波管により 90° 度下方に曲げられ, マイクロ波窓を通過して, 加速管にいたる。導波管はかなりの重量なので, 加速管やクライストロンに無理な力がかからないように注意深く組立が行なわれた。

組立の順序は両端を除いて全部の直線導波管と bend 導波管の各々をフランジで接続して組立てる。組立てたものは加速管室のコンクリート壁の穴の部分で軽く支えられる。ついで, 一方の端のフランジを加速管側のマイクロ波窓のフランジに接続する。最後に他の端のフラン

ジをクライストロンのマイクロ波窓のフランジに接続する。この際両方のフランジの位置を合わせるため、クライストロンが装填されているパルス・トランスのタンクを移動させる。移動にはあらかじめパルストランスが置かれている上下、左右および前後可動の調節台が用いられる。大電力導波管系各部の寸法を Fig. 5.10 に示す。

導波管は地震等による振動を避けるため、コンクリートの壁の穴の出入口で、ゴムクッションを介して固定されている。導波管の断面は 34.0 mm × 72.1 mm (内寸法) で厚さ 4 mm のひきぬき無酸素銅管である。外温の変化によって導波管の寸法が変化し、伝送マイクロ波の位相のずれがおこるのを防止するために、導波管の外側の一面に外径 16 mm の 2 本の銅管がはんだづけされ、これに加速管を冷却する恒温水が流され導波管の温度は一定に保たれている。

大電力のマイクロ波を導波管で伝送する場合、管内での放電を防止するために第 1 加速管の系では管内は 3 kg/cm² の SF₆ ガスで加圧され、残りの系では管内は真空中に排気している。導波管系は管内を気密または真空中に保ち、かつ導波管壁を流れるマイクロ波大電流を円滑に流す必要があるので、導波管のフランジは SLAC で開発された角型のものが使われた。このフランジは銅の金属製ガスケットを使用する。Fig. 5.11 は、この矩形導波管とフランジを示す。

クライストロンのマイクロ波窓に続く直線導波管には、両方向性結合器がとりつけられている。この結合器の結合度は 50 dB であり、クライストロンから加速管側に伝送されるマイクロ波電力のモニターに使用される。同時に、加速管側より反射してくるマイクロ波電力のモニターにも使用することができるようになっている。

Fig. 5.12 にこの結合器用の検出器を示す。

とくに第 1 加速管の導波管には方向性結合器が取り付けられている。これによって加速管に供給されるマイクロ波電力の一部は分岐されて、プレバンチャに供給される。この伝送経路は方向性結合器、マイクロ波窓、同軸変換器、同軸ケーブル、減衰器、移相器、同軸ケーブル、プレバンチャの順である。方向性結合器は 3 気圧で使用され、減衰器や移相器は大気圧で使用されるので、気圧を分離するためにセラミックスマイクロ波窓が用いられている。この伝送系によりプレバンチャには約 20 kW のマイクロ波が供給される。方向性結合器の規格と性能を TABLE 5.7 に示す。Photo 5.13 にはプレバンチャのマイクロ波伝送回路の減衰器と移相器がみられる。

5.7 加速管

加速管の機械的構造は第 3 章に述べられたのでここではマイクロ波伝送に関係あることだけを述べる。

加速管は遅波型の円形導波管で、管内に進行する TM₀₁ 型の高いマイクロ波電界を発生させて電子の加速を行な

う。進行波の位相速度はバンチャ部においては 0.95C (C: 光速) でレギュラー部においては C である。加速管の構造は 1 波長あたり 3 枚の孔あきディスクがはめこまれた 2 π /3 モード型のものである。

矩形導波管内を TE₁₀ 波で伝播したマイクロ波は入力結合器により加速管に結合され、加速管内では TM₀₁ 波に変換される。加速管内を伝播するマイクロ波のエネルギーの一部は加速管内面を流れるマイクロ波電流のオーム損失と電子の加速に使われ、残りは出力結合器によって加速管外に取出される。このマイクロ波はマイクロ波窓を通り、5.6 で述べられたものと同じ構造の両方向性結合器モニターつき導波管を通過して、最終的に無反射終端器に吸収される。

Photo 5.14 は第 1 加速管出口側の両方向性モニターの波形で、加速管に電子ビームを流さない場合である。Photo 5.15 は電子ビームを流した場合の波形である。Photo 5.16 は第 1 加速管直後のビームモニターにおけるビーム電流波形である。Photo 5.14 のパルス波形から Photo 5.16 の波形をさしひいたものが、Photo 5.15 の波形と考えてよい。加速管のマイクロ波特性測定については 5.9 に述べる。

5.8 無反射終端部

加速管を出たマイクロ波を完全に吸収して反射をおこさないようにするのが無反射終端部である。最初第 1 加速管にはテーパ管水負荷型のものが用いられ、第 2 加速管には加速管型のものが用いられた。しかし、これらは完成後の改造の際に、第 3、第 4、第 5 加速管に使用されているものと同型のセラミックス窓をもった水負荷型無反射終端器に取換えられた。

無反射終端部の構成は 5 組ともつぎの通りである。加速管出力結合器、マイクロ波窓、両方向性結合器つき直線導波管、水負荷型無反射終端器の順である。これらは全て SLAC 型の角フランジによって接続された。マイクロ波窓と無反射終端器の間は SF₆ ガスにより約 3 kg/cm² に加圧されている。

前記の両方向性結合器は、加速管からでてくるマイクロ波と、無反射終端器から反射するマイクロ波のモニターに使用されるもので、加速管の入口側の導波管にとりつけられたものと同型のものである。

無反射終端器は角型のセラミックス窓を持ち、窓の裏側には水が流されていて、マイクロ波の吸収が行なわれる。終端器の特性を TABLE 5.8 に示す。Photo 5.17 は終端器を入口側から撮影したもので、インピーダンス・マッチ用の銅棒が見られ、底面にはセラミックスが見られる。

加速管の入口と出口に使用されたセラミックスマイクロ波窓は、最初は第 1、第 2 加速管については三菱電機製のものが接続されていたが、フランジの関係で現在は

RCA 製のものに統一されている。両者とも円形のセラミックスの板を使用し、矩形導波管からのインピーダンス変換が行なわれている。また、両者とも高真空または高圧 ($\sim 5 \text{ kg/cm}^2$) 条件で使用することができる。三菱電機製のものはセラミックス板と導波管はろうづけによって組立てられ、RCA 製のものはセラミックス板を円形導波管に嵌合し、鋼製のリングで締めつけることにより組立てられている。これらの窓のセラミックス表面は半導体の薄い被膜で coat されている。これは表面が帯電し、それに電子またはイオンが衝突し、セラミックス板を破壊するのを防止するためである。TABLE 5.9 に RCA 製のマイクロ波窓の特性を示す。Photo 5.18 はこの窓の写真である。

これらのマイクロ波窓は機械的な強度が弱く、力がかかると真空リークがおこり易いので組立ての際は注意が必要である。三菱電機製のマイクロ波窓は水冷を必要とするが、RCA 製のものは自然冷却でよい。三菱電機製のマイクロ波窓については Appendix で詳しく述べる。

5.9 加速管系のマイクロ波特性

クライストロンの出力マイクロ波は矩形導波管によって加速管に導かれ、エネルギーの一部は加速管内で使われ、残りは無反射終端にいたる。これらを通過する際にインピーダンスのミスマッチがあると逆の方向にマイクロ波の反射がおこる。この反射波は、加速管内で電子を減速したり、ビームを横に振るような電界を発生することがある。またクライストロンや加速管のマイクロ波窓の表面に強い電界を誘起し、それに電子やイオンが衝突しセラミックスを破壊することがある。これらを防ぐために、インピーダンスマッチをよくして反射波を小さくすることが必要である。

反射波の大きさを表わす量として VSWR (電圧定在波率) が定義されている。5本の加速管の安全運転を行なうためには、使用周波数を中心にして約 2 MHz の範囲で、5本の加速管の VSWR は約 1.2 以下であることが必要である。クライストロンから無反射終端器にいたる伝送系における各マイクロ波素子の VSWR 値はメーカーの測定によれば、全て 1.1 以下であった。原研において、これらを組立てた複合系の VSWR 値の実測を行なった。

以下この複合系についての実測について述べる。反射型クライストロン (726 C) から得られる 100 mW の出力を、組立てられた加速管系に入れて反射波を測定する。測定は以下に述べる 3通りの方法がある。

- (1) 発振周波数を固定し定在波測定器の検出器を $\lambda_g/2$ の範囲内で移動させ VSWR を測定する。周波数を順次変化させ各々の周波数における VSWR を求める。 λ_g は導波管内におけるマイクロ波の波長である。

- (2) 周波数が鋸歯状に変調されたマイクロ波を負荷に与え、反射波を定在波測定器で検出する。この検出シグナルを鋸歯状波に同期したオシロスコープで撮影し、定在波測定器の検出器の位置を順次移動させ撮影を同一フィルムの上に重ねていく。
- (3) 反射波をマジック T で分離してオシロスコープで撮影する。

周波数標準として、JJY 標準電波で校正された 28 50.000 MHz が選ばれた。これと反射波とのビート信号を無線受信器で検出して、周波数のマーカーを得る。

(1)の方法は、測定に長時間を要し、この間に 726 C の発振周波数がドリフトするので周波数の広い範囲で VSWR を測るのは不正確になる。(2)の方法は周波数の 1 点では(1)の方法よりは良い精度は得られないが、短い測定時間内に広い周波数帯における VSWR 値が求められ便利である。以下には(2)の方法による測定例について述べる。(3)の方法による測定はとくに行なわなかった。

Fig. 5.13 に示されるように、726C のマイクロ波出力は、同軸型アイソレーターを通して導波管に導かれ、減衰器、定在波測定器を通過して加速管系に送られる。オシロスコープのスweep電圧を取出して 726 C の反射電極に加えると、出力マイクロ波の周波数は、スweep電圧に同期して変調される。定在測定器の検出力をオシロスコープの縦軸に入れる。オシロスコープの横軸は周波数と直線関係になっている。得られる波形は定在波測定器のプロープの位置を変えると変化する。反射がおこらない周波数においては、プロープの位置を変えても検出器の出力は変らない。反射がある場合は検出器に定在波ができるので、プロープ出力の最大値と最小値、およびプロープの特性から VSWR が求められる。

上記の方法により、プロープの位置を d の step で $\lambda_g/2$ の範囲について移動させて、各々の位置におけるオシロスコープ波形を同一のフィルムの上に重ね撮りを行なう。 d を $\lambda_g/8$ にとった場合のパターンを Fig. 5.14 に示す。2本の包絡線は、プロープ出力の最大値 $V_{\max}$ と最小値 $V_{\min}$ を与えている。このパターンとプロープ特性から VSWR をきめることができる。

第2加速管系についてプロープを 5mm ずつ移動させ、周波数のマーカーも同時に撮影して得られた写真を Photo 5.19 に示す。とくに中心周波数 (2856.75 MHz) 付近のパターンは、第1加速管については Photo 5.20 に、第2加速管については Photo 5.21 に示す。この特性は、E-bend 丸角変換アダプター、マイクロ波窓、真空引口、加速管、E-bend、マイクロ波窓、方向性結合器、無反射水負荷終端器を組合せた総合特性である。第1加速管の場合水負荷に泡が入ると、VSWR の測定値は大きく変わるので注意する必要がある。第2加速管については、終端器は加速管型のものであるのと、とくに問題はない。Fig. 5.15 に定在波測定器のプロープの出力電圧 V とマイクロ波の電界強度 E との関係を示す。

この関係は、2乗検波特性からわずかにはずれ、 $V_{\infty}(E)^{1.84}$ が得られた。従って、VSWR はつぎの関係式によって与えられる。

$$\text{VSWR} = \frac{E_1 + E_2}{E_1 - E_2} = \left(\frac{V_{\max}}{V_{\min}} \right)^{\frac{1}{1.84}} \quad (5.1)$$

Photo 5.20 のパターンから得られる第1加速管系の VSWR を Fig. 5.16(a) に、また Photo 5.21 のパターンから得られる第2加速管の VSWR を Fig. 5.16(b) に示す。

第1及び第2加速管は $2\pi/3$ モードで加速する設計であり、加速周波数付近で最も良いインピーダンスマッチが行なわれている。20°Cにおける第1加速管の測定例では 2855~2859 MHz の範囲であれば、VSWR は 1.15 より小さい値を示し、2854.6, 56.1, 57.6, 59.0 MHz の各点で極小になる。加速管は温度が 1° 変化すると周波数特性は 0.05 MHz 変化するので、40°C においては上記の周波数範囲は、2853.5 MHz~2858 MHz になり、極小点は 2853.6, 2855.1, 2856.6, 2858.0 MHz になる。

第2加速管についても、インピーダンスマッチはよくとくに中心付近の 2856.5 MHz~2858 MHz の範囲 (22.9°C) での VSWR 値は 1.05:1 より小さい。極大と極小を示す位置は第1加速管の位置とほとんど一致する。VSWR の極大及び極小は中心周波数の両側に多数観測される。Photo 5.22 に第2加速管における周波数の低い方のバンドの端におけるパターンを示す。また Photo 5.23 には周波数の高い方のバンドの端におけるパターンを示す。低い方のパターンに較べて不規則なのは、マイクロ波が加速管の入力結合器に共鳴するからと思われる。

パターンの極小に対応する周波数において、共鳴がおこっていると考えることができる。それで第2加速管についてこの共鳴点の周波数を求めて、分布を示したものが Fig. 5.17 である。この図は Brillouin ダイアグラムと呼ばれ、横軸はモード番号、縦軸は周波数である。最高

周波数モードは 2872 MHz で π モードに対応している。加速管の空洞総数は 59 コ (2 コの結合器を含む) であるが、観測された極小の総数は 55 コであった。これはバンドの両端においては極小点の確認が難しく、見逃したモードがあるものと思われる。

群速度 V_g は次式で与えられる。

$$V_g = \frac{\delta\omega}{\delta k} = 2L \frac{\delta f}{\delta m} \quad (5.2)$$

ここに ω : 角速度, K : 波数, L : 加速管の長さ, f : 周波数, m : モードの数である。

Fig. 5.16 の Brillouin ダイアグラムの曲線上の $2\pi/3$ モード点における曲線の勾配から V_g を計算することができる。この測定によって得られた値は 0.020 ± 0.0005 C で三菱電機的设计値 0.02 C とよく一致している。

第3, 第4, 第5加速管は constant gradient 構造であり、空洞寸法が順次変化しマイクロ波の群速度も変わってくるので、それに従って、加速管の長さ方向の各点において Brillouin ダイアグラムは違ってくる。Photo 5.24 の a), b), c) は第1, 第2加速管と同じ測定方法で第3, 第4, 第5加速管のバンドの中心部において得られたパターンで、極大と極小がはっきり現われている。Photo 5.25 はもっと広い周波数範囲で第3, 第4, 第5加速管で得られたパターンで、第1, 第2加速管のパターンに較べて極大と極小の構造が複雑になっている。これは加速管からの反射が複雑に重畳しているためと考えられる。この方法では広い範囲における Brillouin ダイアグラムの測定を行なうことはできない。しかし、Photo 5.24 で得られた中心周波数付近におけるパターンから、中心周波数付近での VSWR を推定することができる。かくして得られた VSWR を Fig. 5.18 に示す。この図から中心周波数の両側 1 MHz の範囲において VSWR 値は 1.15 以下であることが判る。この値は linac の安定運転から要求される値より充分小さい。

TABLE 5.1 Planar triode (ML-8535) specifications

General Characteristics	
Electrical	
Heater voltage (AC or DC)	6.0 V
Heater current at 6.0 volts	1.25 A
Cathode heating time, minimum	60 sec
Amplification factor	80
Transconductance	30000 μ mhos
Interelectrode capacitance, without heater voltage	
Grid-plate	2.2 pf
Grid-cathode	8.5 pf
Plate-cathode, maximum	0.065 pf
Mechanical	
Mounting position	Optional
Type of cooling	
With radiator (ML-8535)	Forced-air
Without radiator (ML-8534)	Conduction & convection
Maximum anode temperature	250 °C
Net weight	
With radiator (ML-8535)	1.6 oz
Without radiator (ML-8534)	0.7 oz
Grid-pulse RF oscillator and amplifier	
Maximum ratings, absolute values	
DC plate voltage	2500 V
DC grid voltage	-150 V
Instantaneous peak grid-cathode voltage	
Grid negative to cathode	-750 V
Grid positive to cathode	250 V
Peak plate current from DC supply	5 A
Average plate current	16 mA
Average grid current	6 mA
Average plate dissipation	
Forced-air cooling (ML-8535)	33 W
Conduction and convection cooling (ML-8534)	10 W
Average grid dissipation	1.5 W
Pulse duration	6 μ sec
Duty factor	0.0033
Frequency	3 Gc

TABLE 5.2 Example of the specifications and performance of a low-power dividing directional coupler

Type of waveguide	WRJ-3			
Type of flange	BRJ-3X			
Frequency range	2856 $\pm$ 10 MHz			
Max: VSWR	1.1			
Coupling	6 $\pm$ 0.2 db			
Isolation	>20 db			
Frequency (MHz)	Coupling	Insertion loss	Isolation	Max. VSWR
	(db)	(db)	(db)	
2846	6.05	1.20	30.8	1.03
2856	6.10	1.20	30.5	1.04
2866	6.10	1.30	31.2	1.05

TABLE 5.3 Specifications and performance of a low-power phase shifter

Type of waveguide	WRJ-3			
Type of flange	BRJ-3X			
Frequency range	2856 $\pm$ 10 MHz			
Max. VSWR	1.1			
Phase	0 $\sim$ 2 π variable			
Insertion loss	0.5 db			

Frequency (MHz)	VSWR			Insertion loss
	0	π	2 π	(db)
2846	1.03	1.05	1.09	0.5
2856	1.03	1.05	1.09	0.5
2866	1.03	1.05	1.09	0.5
Time required for changing full range of phase			40.2 sec	

TABLE 5.4 Specifications and performance of a low-power attenuator

Type of waveguide	WRJ-3			
Type of flange	BRJ-3X			
Frequency range	2856 $\pm$ 10 MHz			
Max. VSWR	$\leq$ 1.05 for 0 db			
	$\leq$ 1.10 for $>$ 0 db			
Attenuation	0 $\sim$ 20 db Variable			

Frequency (MHz)	VSWR			Insertion loss
	0 db	10 db	20 db	(db)
2846	1.01	1.05	1.05	0.1
2856	1.01	1.05	1.05	0.1
2866	1.01	1.05	1.05	0.1
Time required for changing full range of attenuation			43.2 sec	

TABLE 5.5 Klystron RCA-8568 specifications

General data		
Electrical :		
Heater		
Type	Matrix type, oxide coated, unipotential cathode	
Voltage (AC or DC)	15 V	
Current (at 15 V)	14 A	
Warm up time (at 14 A)	20 min	
Direct interelectrode capacitance		
Anode to cathode	42 pF	
Anode to cathode with corona shield and in permanent magnet	50 pF	
Ion pump	VC 2119	
Operating frequency	2856 MHz	
Pulsed RF amplifier ratings		
Maximum ratings, absolute-maximum values :		
For a maximum DC pulse "ON" time of 3.2 microseconds in any 2700-microsecond interval, and RF load vacuum pressure of 10^{-7} torr.		
Peak beam voltage	260 max.	kV
Peak inverse beam voltage	50 max.	kV
Peak beam current	270 max.	A
Peak input beam power	68 max.	MW
Average input beam power	78 max.	kW
Typical operation :		
With rectangular waveshape pulses, RF-pulse duty factor of 0.0009, RF pulse duration of 2.5 microseconds centered within a DC pulse duration of 3.2 microseconds, and at a frequency of 2856 MHz.		
Peak beam voltage	250	200 kV
Peak beam current	250	170 A
Driving power input at peak of pulse (Input VSWR<1.5 : 1)	105	150 W
Useful power output at peak of pulse (Load VSWR<1.5 : 1)	21	12 MW
Power gain	53	49 dB
Phase modulation, by heater magnetic field	0.14	0.10 deg
Phase modulation, by change in beam voltage	6.0	5.5 deg/percent
Amplitude modulation, by noise and heater magnetic field	0.12	0.05 percent

TABLE 5.6 Pulse transformer specifications

Operating pulse output voltage	250 kV
Load resistance at operating voltage	1000 ohm
Load capacitance (actual measured value in surroundings and dielectric in which load is to be used)	40 pF
Flat-top length (at 100% voltage amplitude)	2.8 μ sec
Droop of flat-top	< 2.0 %
Primary low end insulation to core and baseplate	pulse 1000 V
Rise time (from 0 to 100% voltage amplitude)	0.52 μ sec
Leakage inductance	236 μ H
Distributed capacity (assuming 220 pF as total capacitance of transformer and load when tanked with transformer oil and a voltage step-function resistive source.)	180 pF
Overshoot	4.3 %
Operating repetition rate (at 2.8 μ sec and 250 kV.)	360 pps
Primary to secondary voltage ratio	1 : 12.0
Type of secondary winding	Bifilar
Voltage between windings	100V rms, 50 Hz
Current through windings	2.9 A rms
Type of construction	Dielectric : Transformer oil
Other specifications	
a) Open circuit primary inductance	0.67 mH
b) Bias required	15 A dc at approximately 6 V

TABLE 5.7 Specifications and performance of a directional coupler

Type of waveguide	WRJ-3
Type of flange	Special
Frequency range	2856 ± 10 MHz
Max. VSWR	1.05
Coupling	30 ± 1 db
Isolation	20 db

Frequency (MHz)	Coupling	Isolation	Max. VSWR
	(db)	(db)	
2846	29.2	44	1.03
2856	29.2	45	1.03
2866	29.2	45	1.03

TABLE 5.8 Characteristics of a non-reflecting terminator

Type	L284BC4 (Varian)
VSWR	< 1.10 (2.851~2.861 GHz)
Power rating	20 kW (average) 20 MW (peak)
Water flow	22 l/min
SF ₆ pressure	3.7 kg/cm ²

TABLE 5.9 Characteristics of an RF window

Type	J15097 (RCA)
Center frequency	2.856 or 3.000 GHz
Bandwidth	40 MHz
Maximum VSWR	1.08
Maximum RF power	25 MW (peak) 25 kW (average)

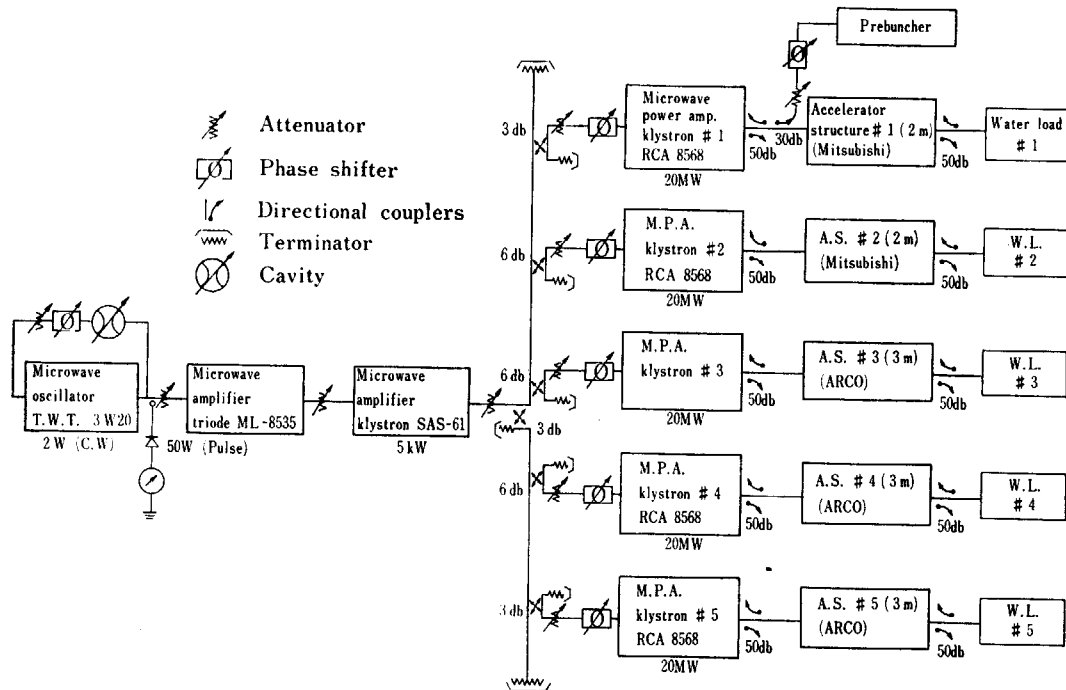


Fig. 5.1 Block diagram of microwave system.

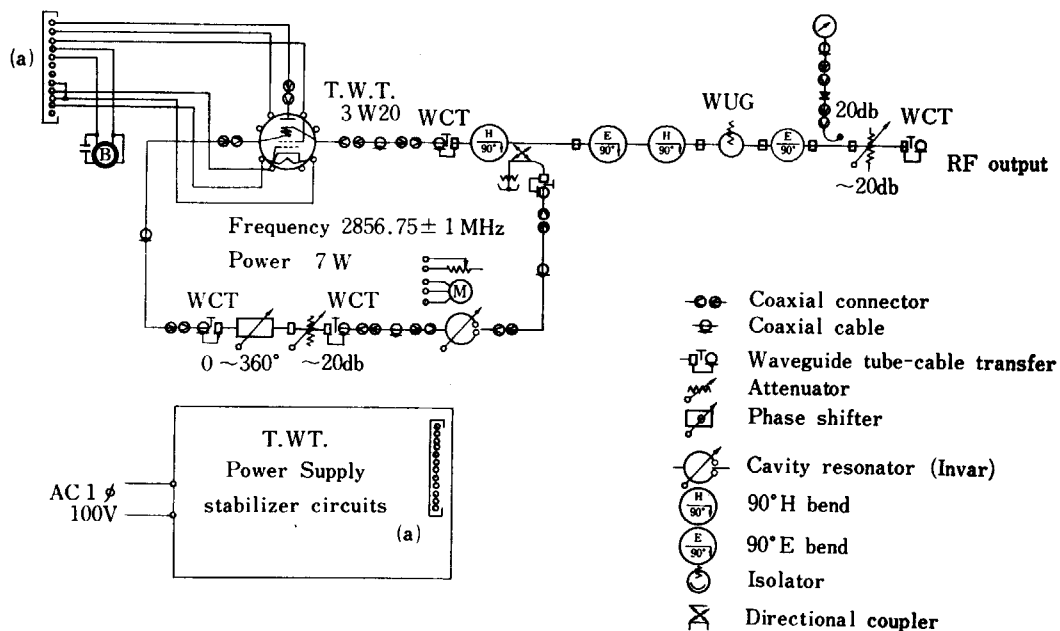


Fig. 5.2 Microwave oscillator.

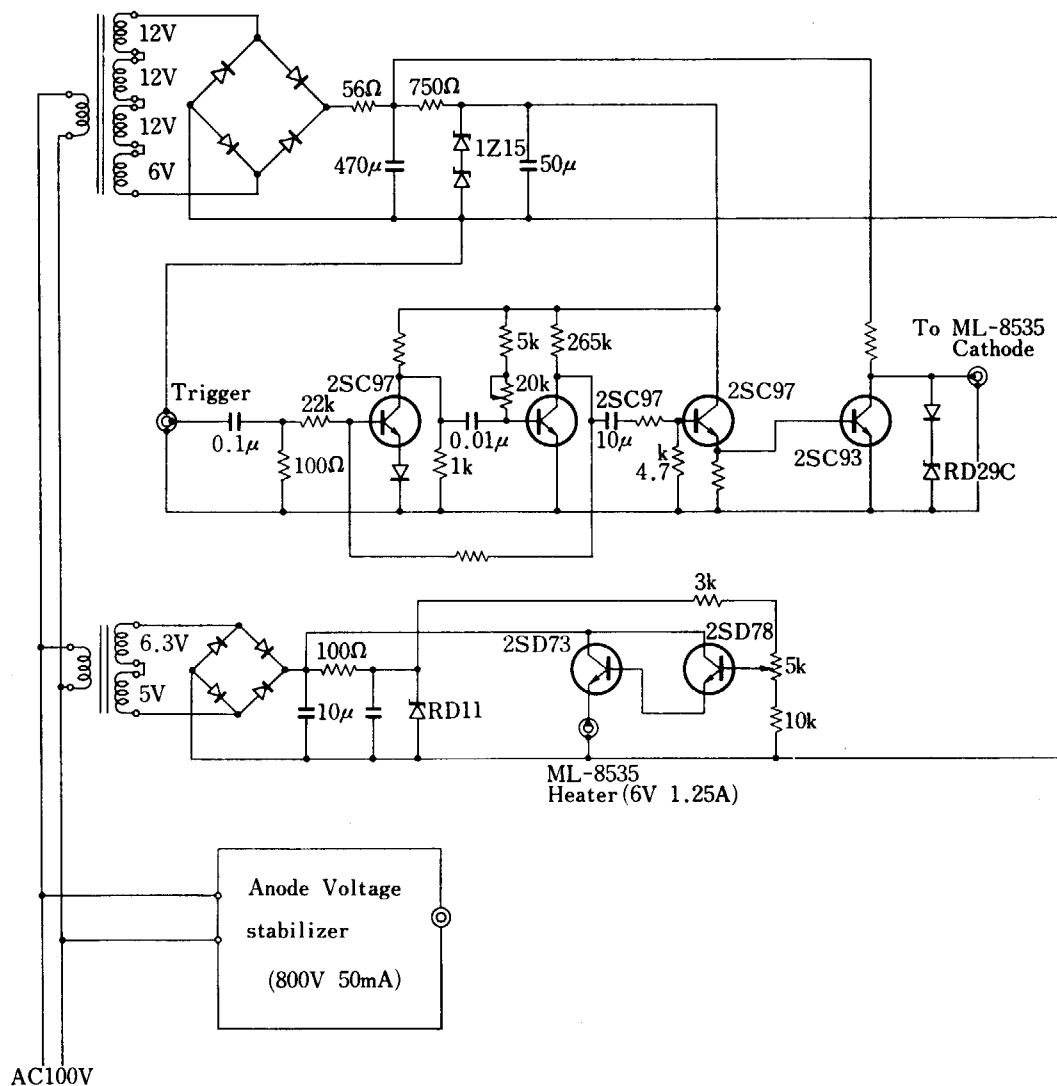


Fig. 5.3 Circuit diagram of triode (ML-8535) modulator.

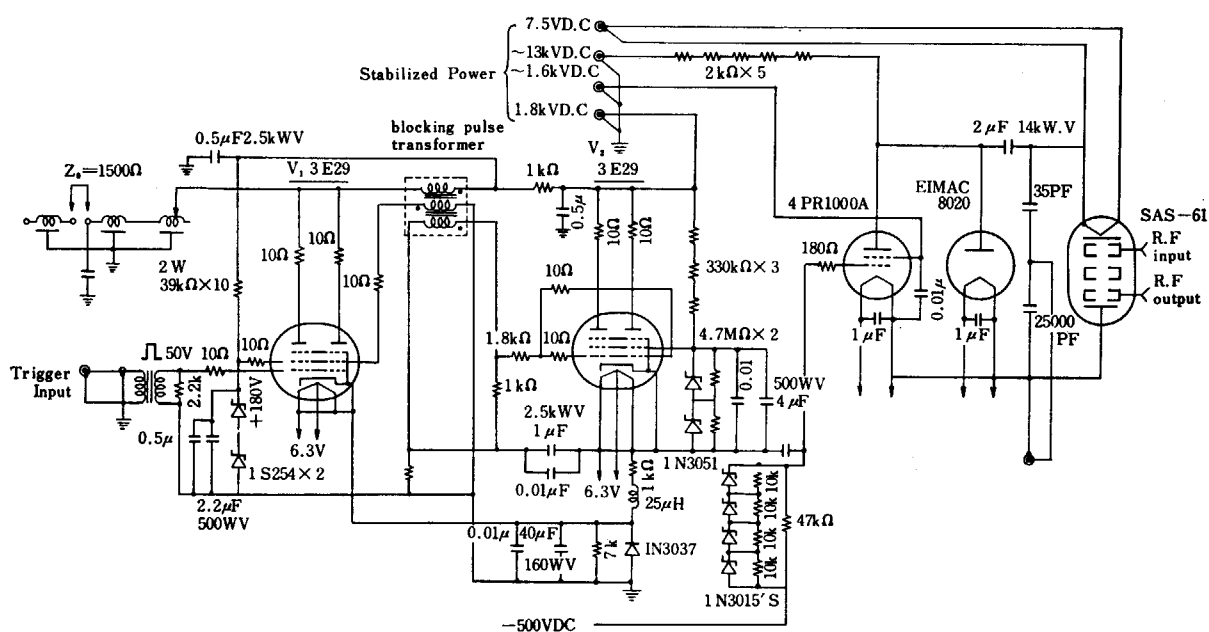


Fig. 5.4 Circuit diagram of klystron (SAS-61) pulser.

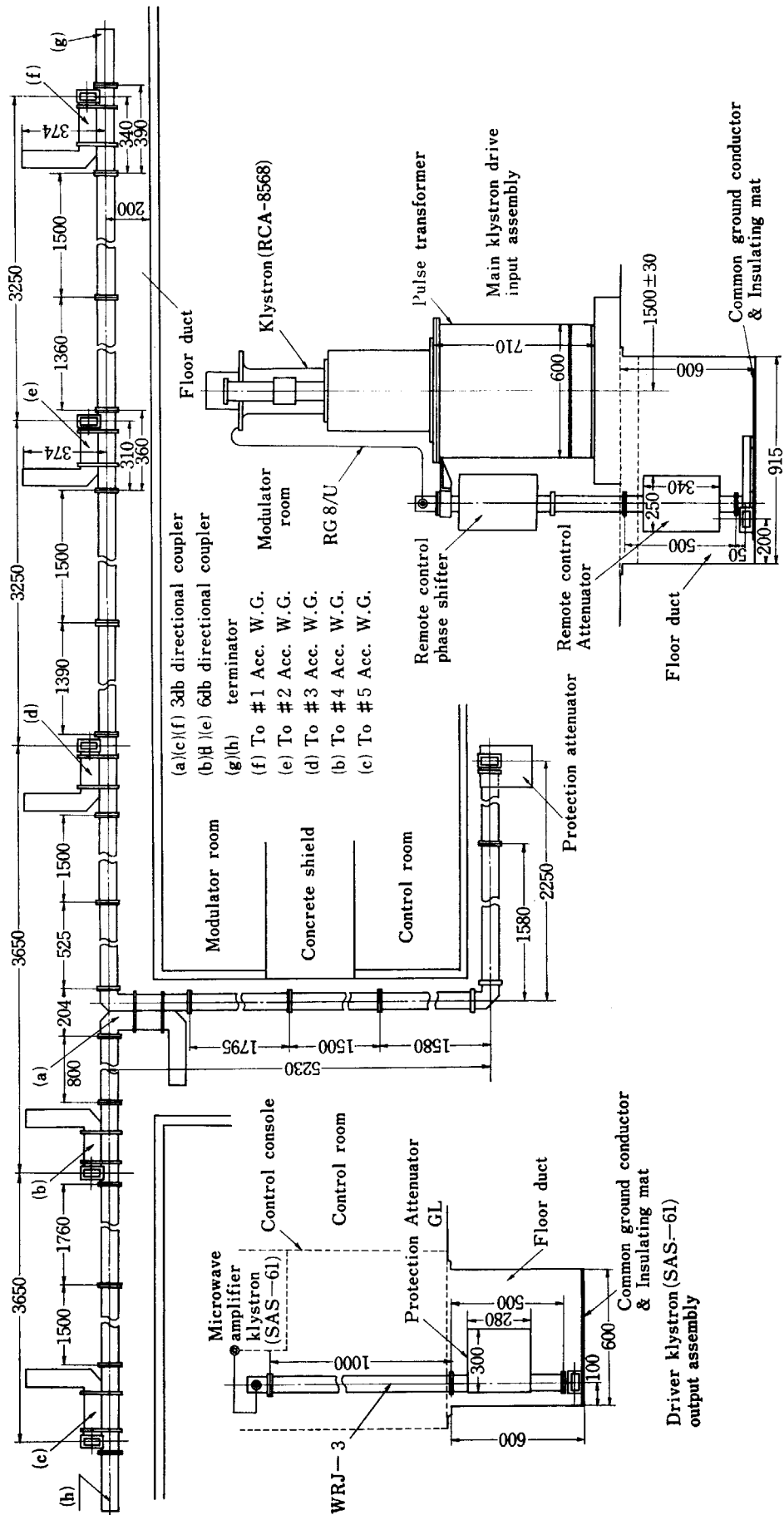


Fig. 5.6 Low power microwave transmitting system layout.

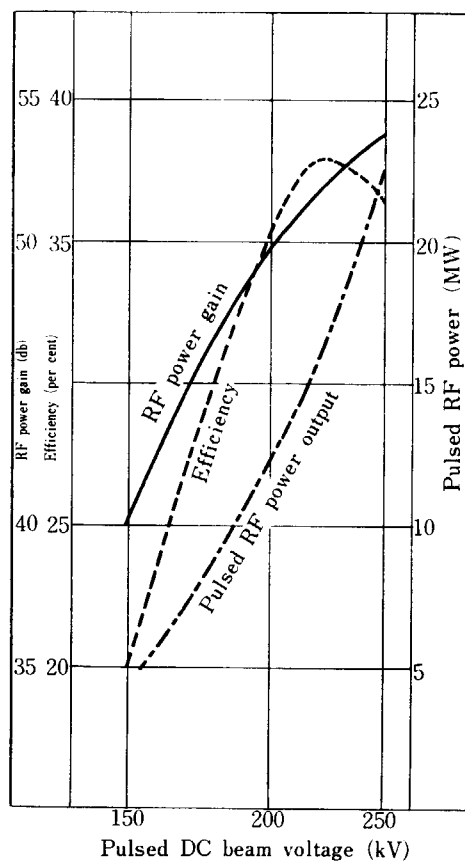


Fig. 5.8 Characteristics of RCA-8568 klystron.

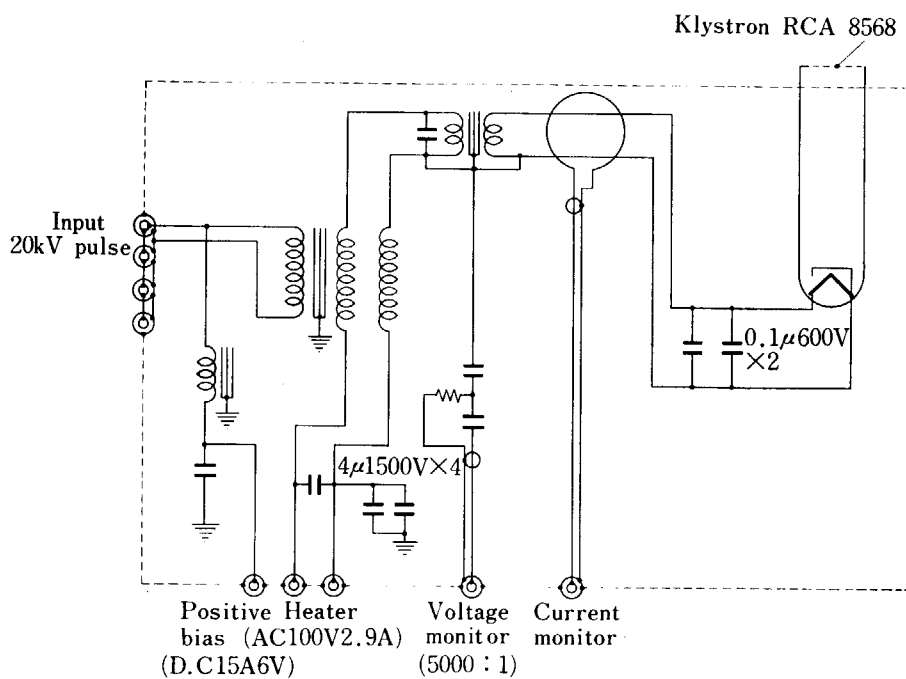


Fig. 5.9 Circuit diagram of pulse transformer for an RCA-8568 klystron.

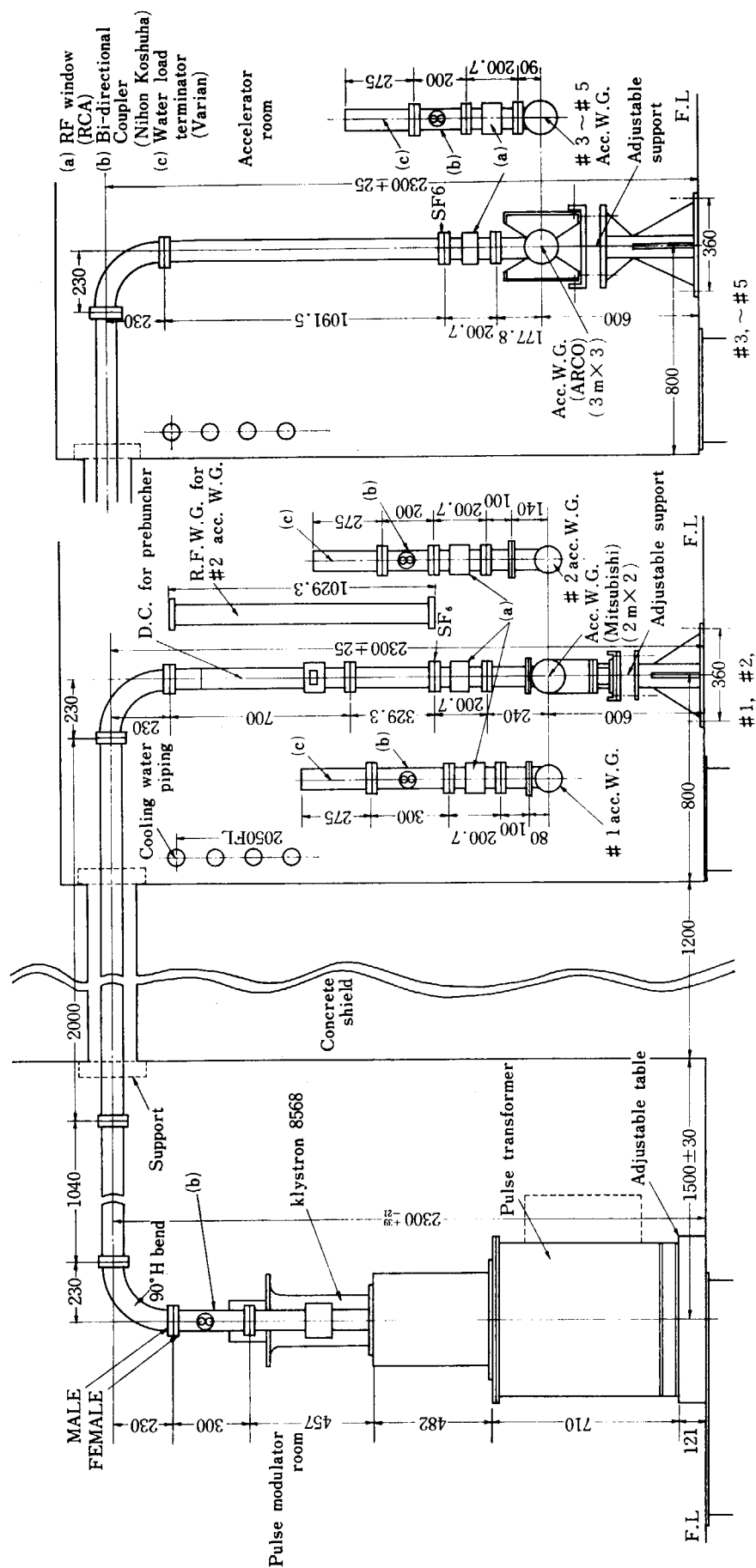


Fig. 5.10 High power waveguide network.

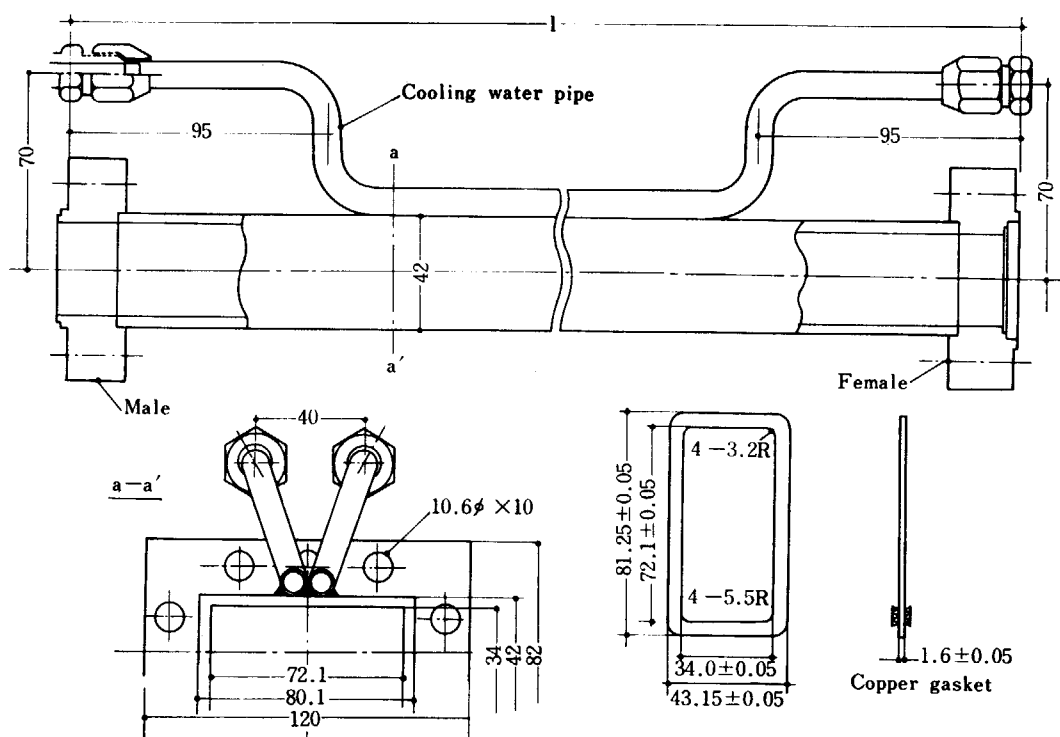


Fig. 5.11 High power waveguide.

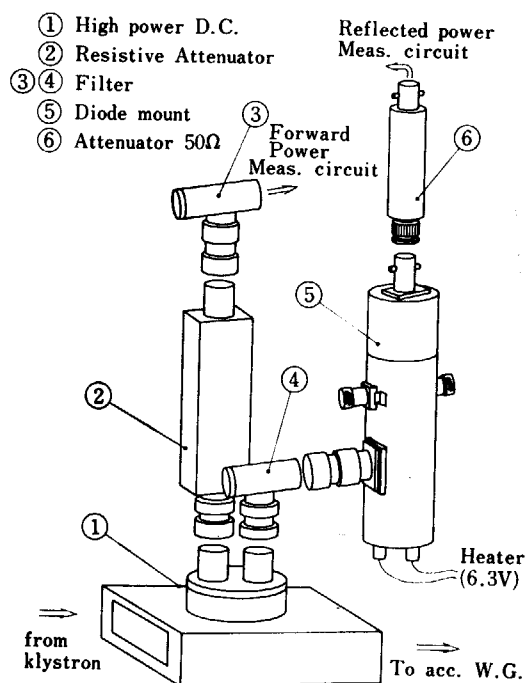


Fig. 5.12 High power microwave detection system.

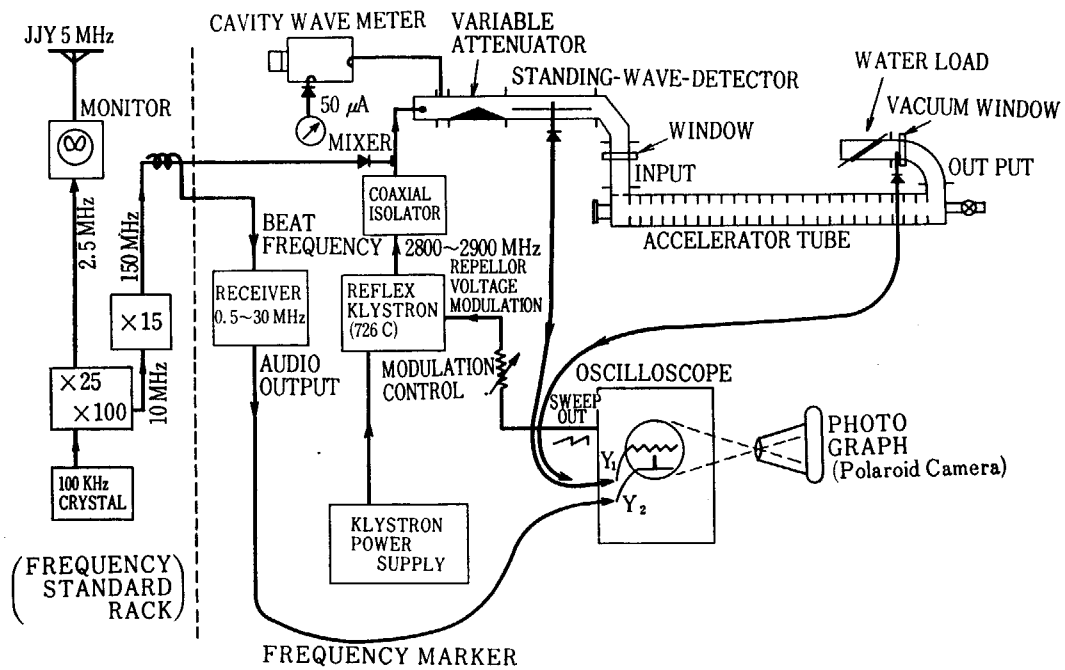


Fig. 5.13 Block diagram of the system for VSWR measurement.

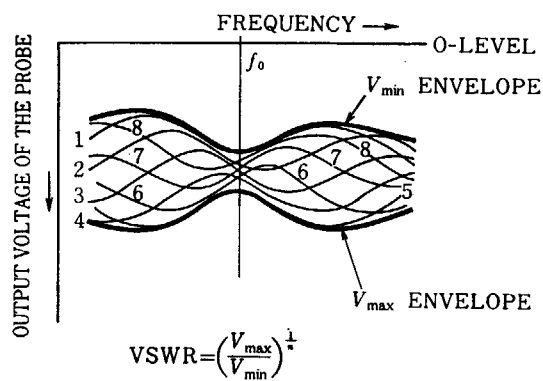


Fig. 5.14 Output voltage of the probe of the standing wave detector vs. frequency with probe step d of $\lambda_g/16$. The envelopes of these curves correspond to $V_{\max}$ and $V_{\min}$, and the VSWR are obtained by $\text{VSWR} = (V_{\max}/V_{\min})^{1/2}$. At the frequency f_0 in the figure, VSWR shows a minimum.

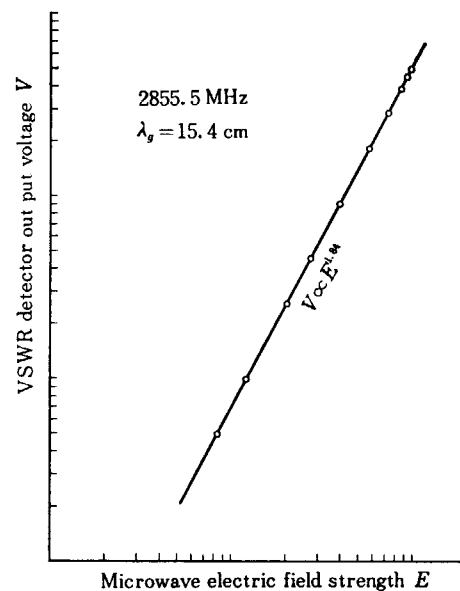


Fig. 5.15 Calibration curve for VSWR detector.

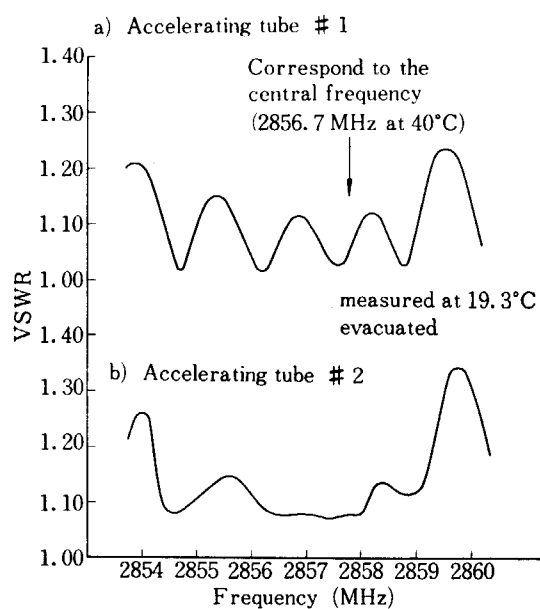


Fig. 5.16 VSWR of #1 and #2 accelerating waveguide obtained from Photo 5.19 and 5.20.

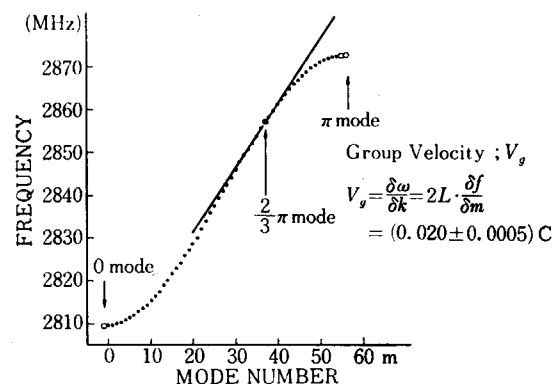


Fig. 5.17 The Brillouin diagram for the #2 accelerating waveguide.

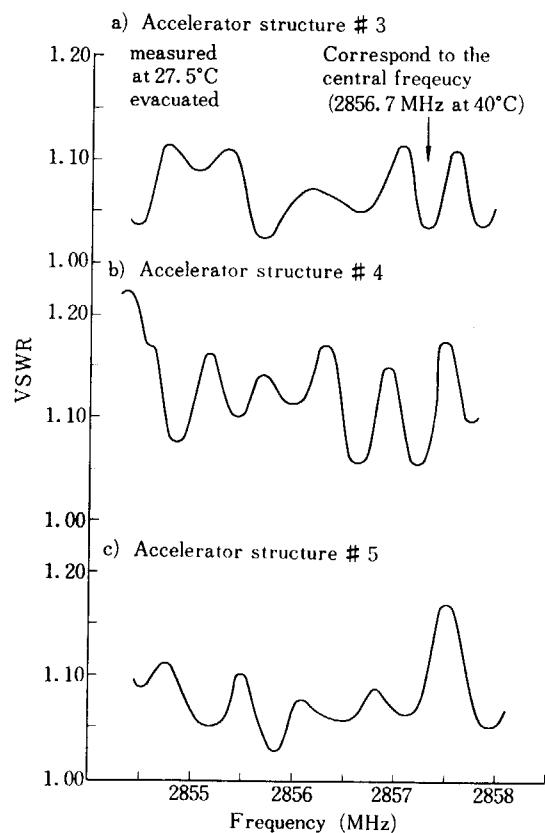


Fig. 5.18 VSWR of #3, #4 and #5 accelerating waveguide obtained from Photo 5.24.

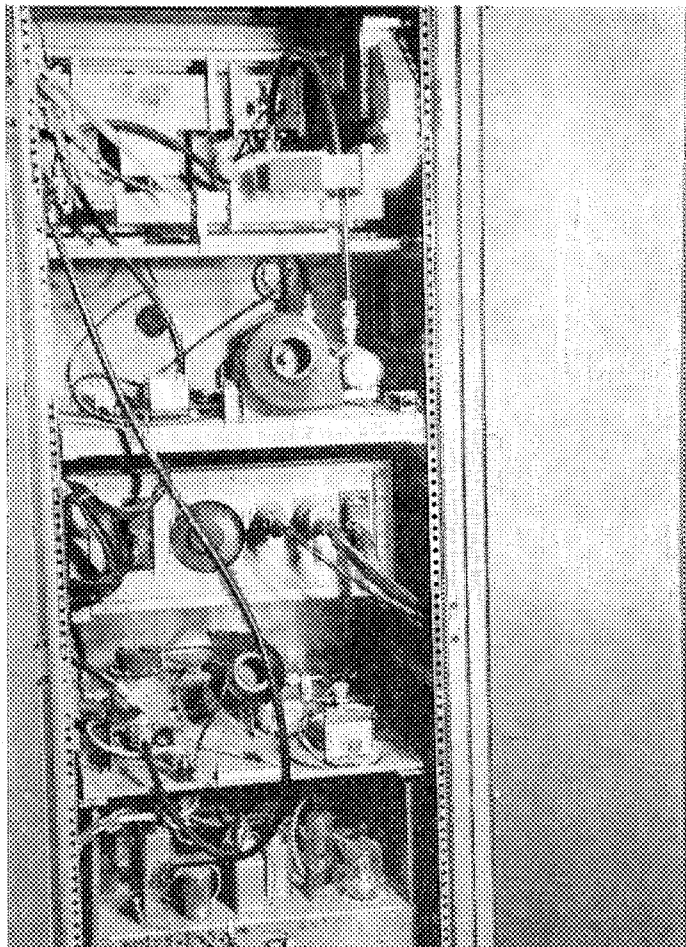


Photo 5.1 Microwave oscillator assembly. Feedback loop, TWT, TWT power supply, triode pulse microwave amplifier and triode amplifier power supply (from the top).

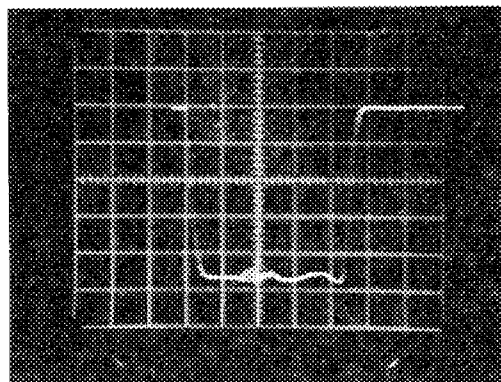


Photo 5.2 Cathode voltage waveform of triode of microwave amplifier. (abscissa $2\mu\text{sec}/\text{division}$, ordinate $5\text{V}/\text{division}$).

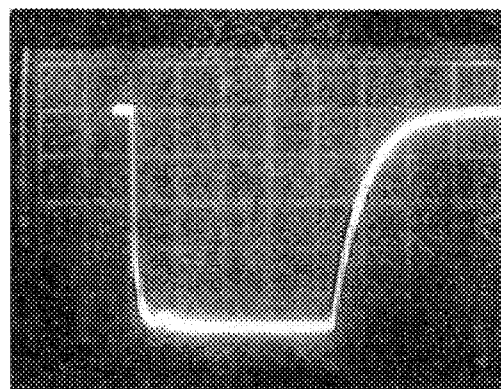


Photo 5.3 RF output waveform of triode microwave amplifier (abscissa $2\mu\text{sec}/\text{division}$).

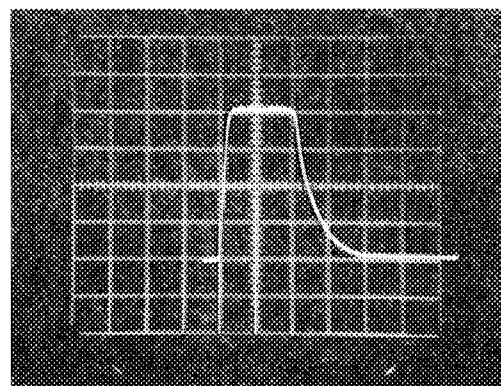


Photo 5.4 Grid voltage waveform of 4 PR 1000 A (abscissa $5\mu\text{sec}/\text{division}$, ordinate $200\text{V}/\text{division}$).

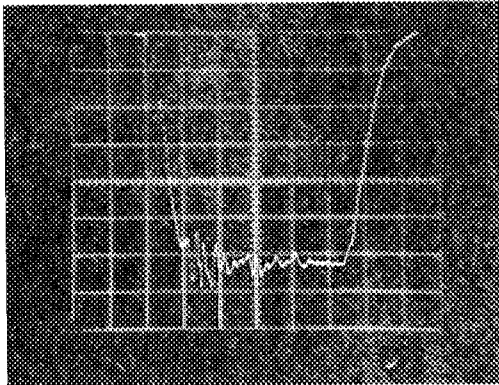


Photo 5.5 Cathode voltage waveform of SAS-61 (abscissa $2\mu\text{sec}/\text{division}$, ordinate $150\text{V}/\text{division}$).

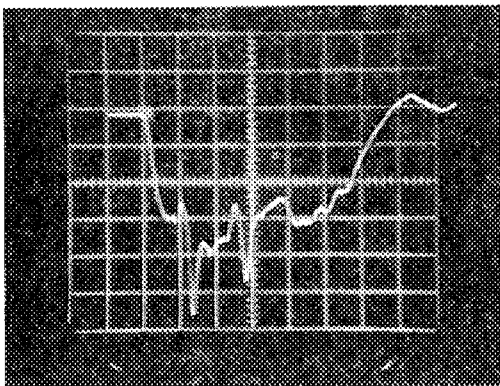


Photo 5.6 Cathode current waveform of SAS-61 (abscissa $2\mu\text{sec}/\text{division}$).

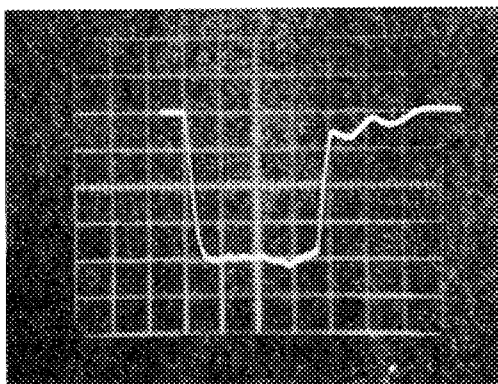


Photo 5.7 RF output waveform of SAS-61. (abscissa $2\mu\text{sec}/\text{division}$).

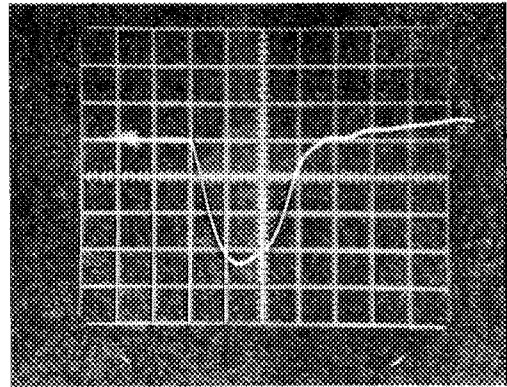


Photo 5.8 Cathode voltage waveform of main klystron (RCA 8568) (abscissa $1\mu\text{sec}/\text{division}$, PFN time constant $2\mu\text{sec}$).

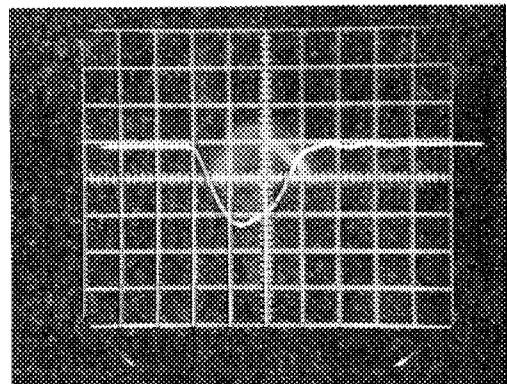


Photo 5.9 Cathode current waveform of the main klystron (RCA 8568) (abscissa $1\mu\text{sec}/\text{division}$, PFN time constant $2\mu\text{sec}$).

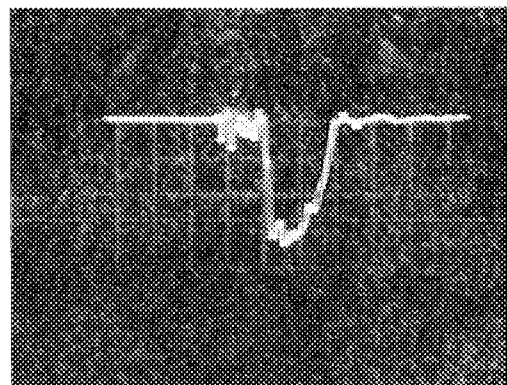


Photo 5.10 RF output waveform of main klystron (RCA 8568) (abscissa $1\mu\text{sec}/\text{division}$, PFN time constant $2\mu\text{sec}$).

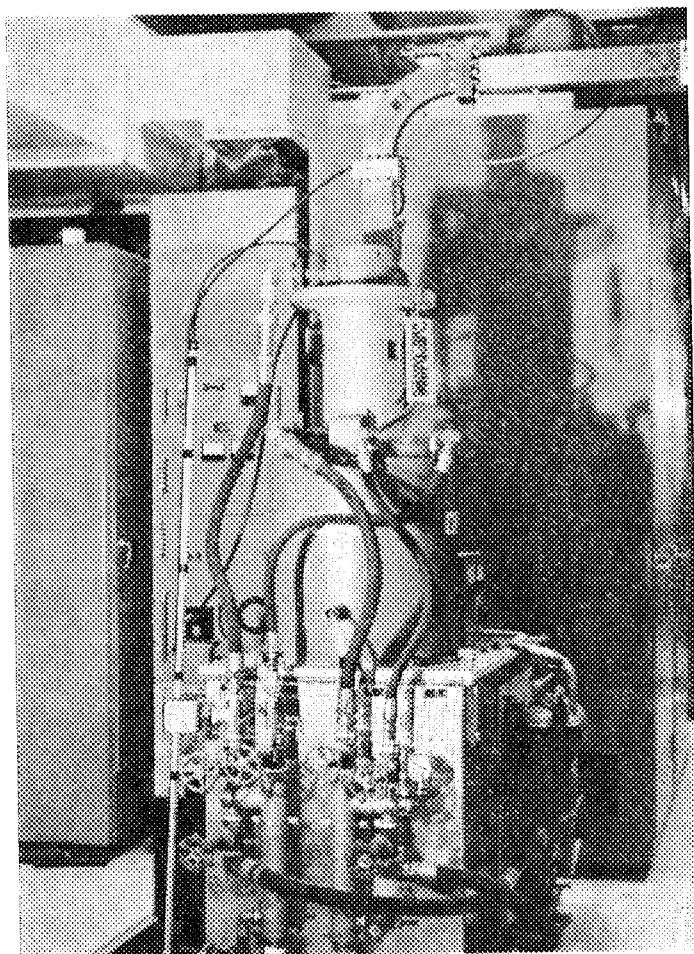


Photo 5.11 Main klystron (RCA 8568) and pulse transformer.

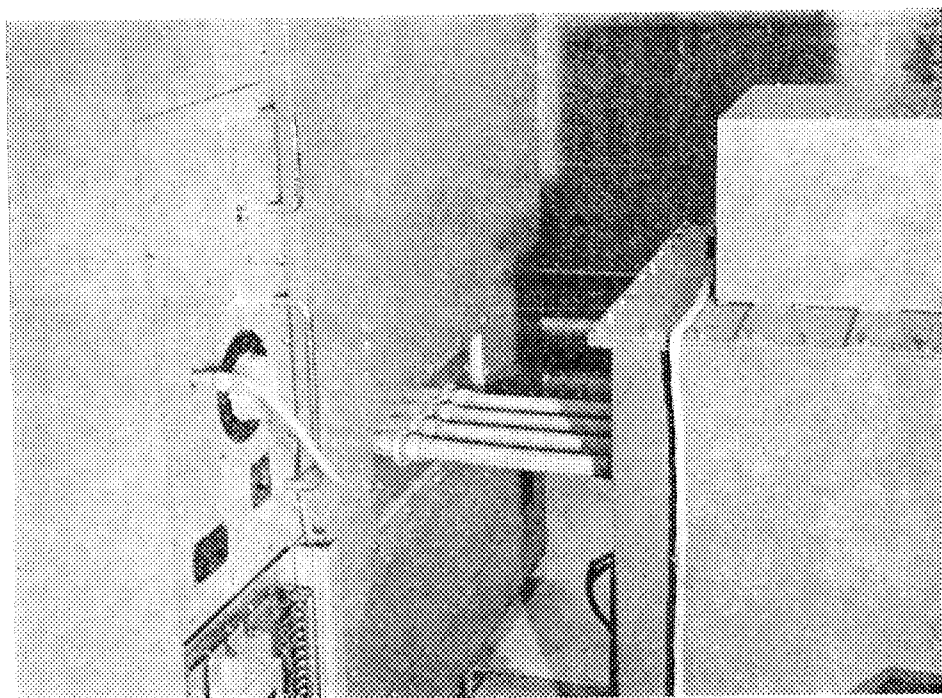


Photo 5.12 Pulse-feeding cables connecting a pulser and a pulse transformer.
Four parallel 50Ω cables form 12.5Ω characteristic impedance.

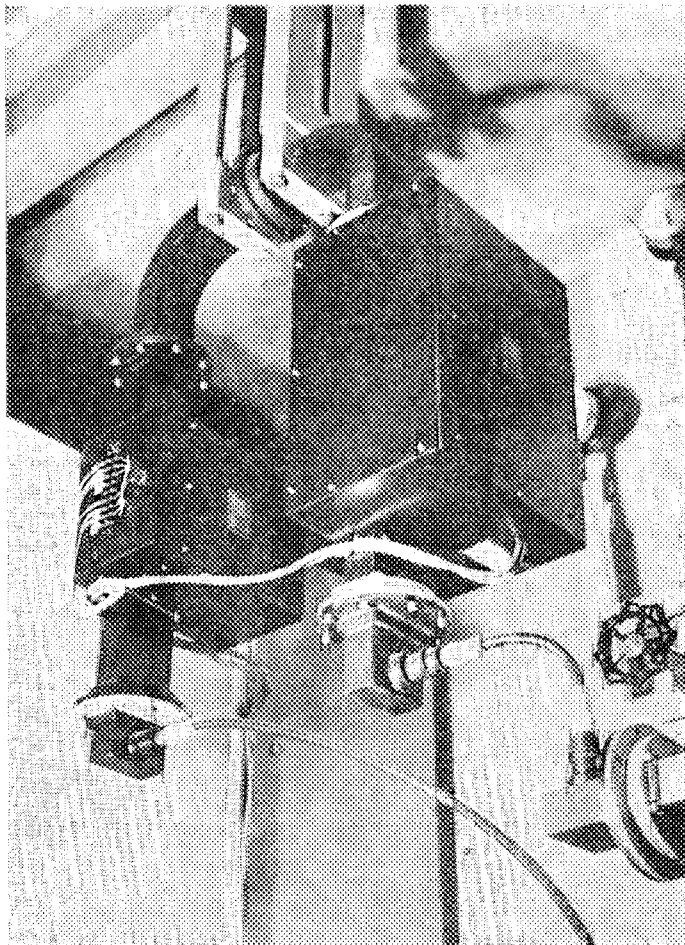


Photo 5.13 Remote controlled attenuator (right) and phase shifter (left) for prebuncher.

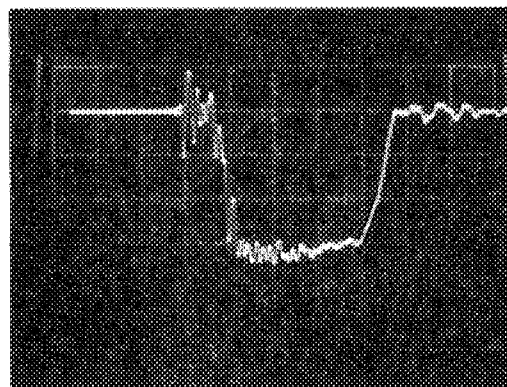


Photo 5.14 Waveform of microwave input to accelerator waveguide (abscissa $1/\mu\text{sec/division}$).

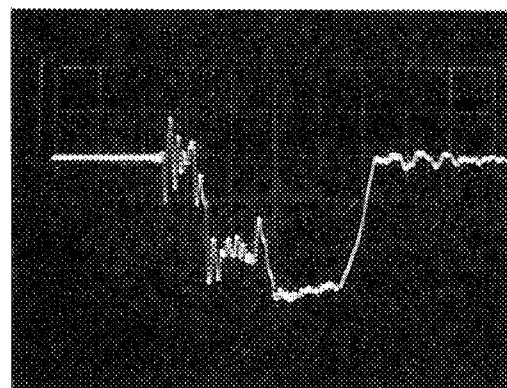


Photo 5.15 Waveform of microwave output from accelerating waveguide (abscissa $1/\mu\text{sec/division}$).

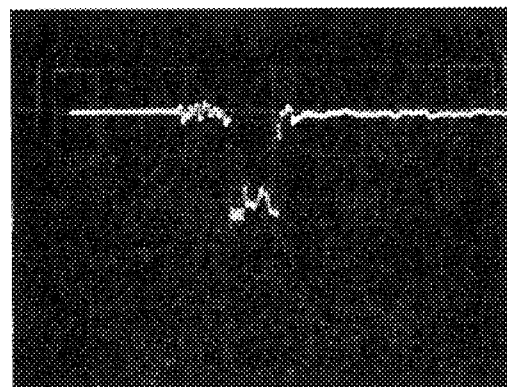


Photo 5.16 Waveform of beam current (ordinate 120 mA/division , abscissa $1/\mu\text{sec/division}$).

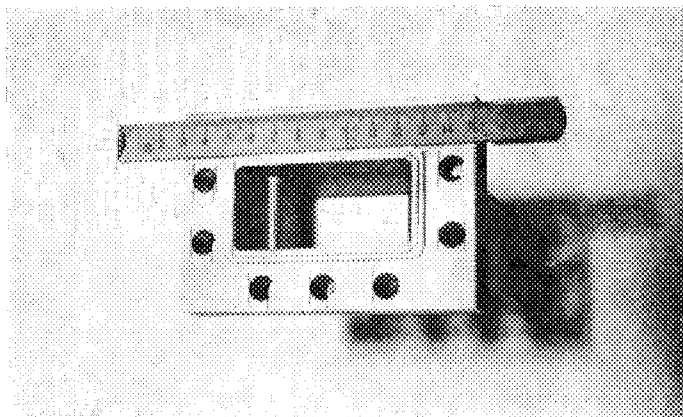


Photo 5.17 Non reflecting terminator.

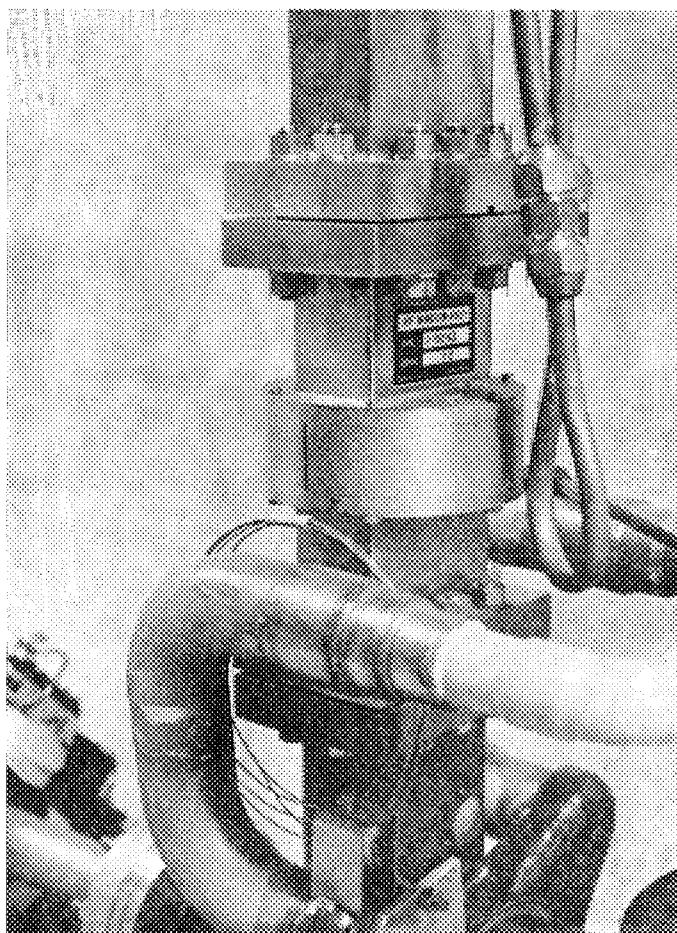


Photo 5.18 RF window (RCA).

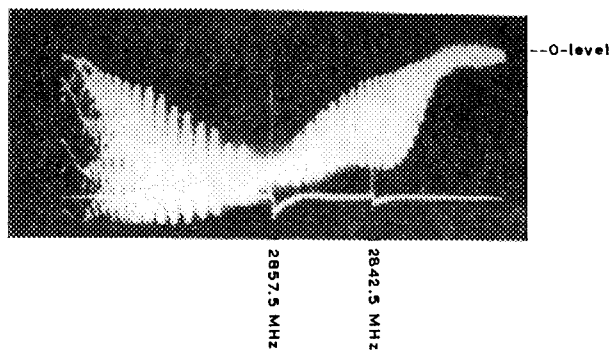


Photo 5.19 Necks and knots pattern ± 2 accelerating waveguide in a rather wide frequency range. The markers are 2857.5 MHz (center) and 2842.5 MHz (right).

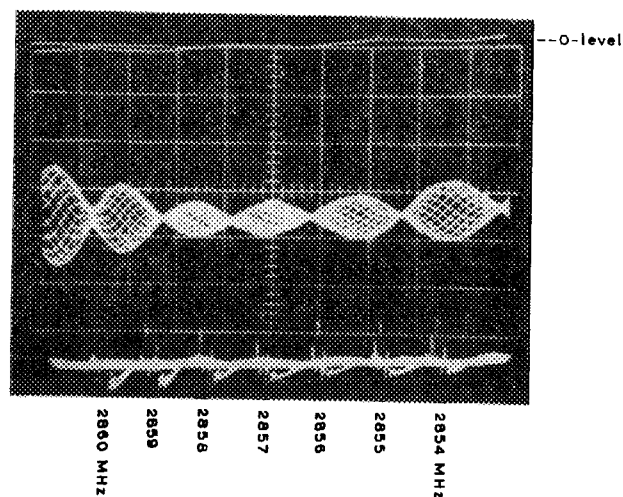


Photo 5.20 Detailed structure around the central frequency for #1 accelerating waveguide.

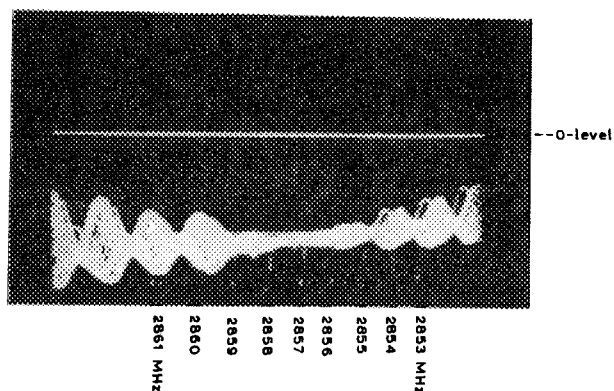


Photo 5.21 Detailed structure around the central frequency for #2 accelerating waveguide.

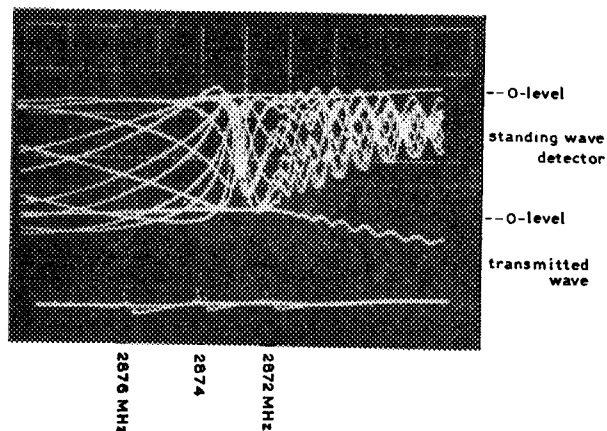


Photo 5.23 Patterns near upper band edge of 2872 MHz. Just out of the band, and an irregularity at 2873 MHz is considered to be due to a resonance of the input iris-coupler structure.

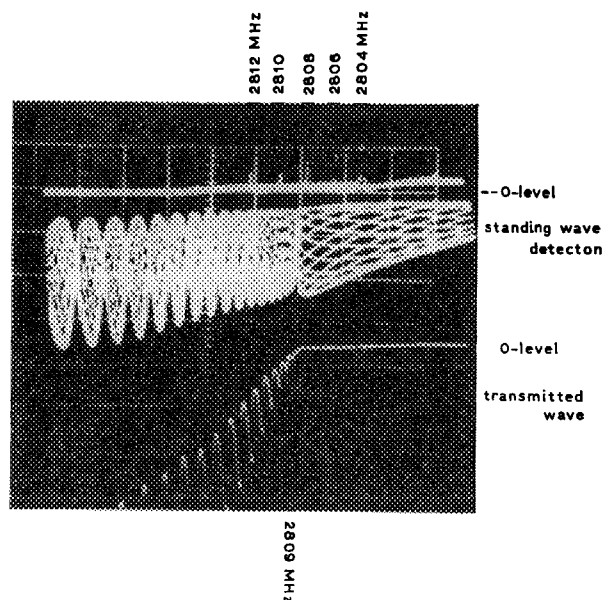


Photo 5.22 Patterns near lower band edge of 2809 MHz for #2 accelerating waveguide.

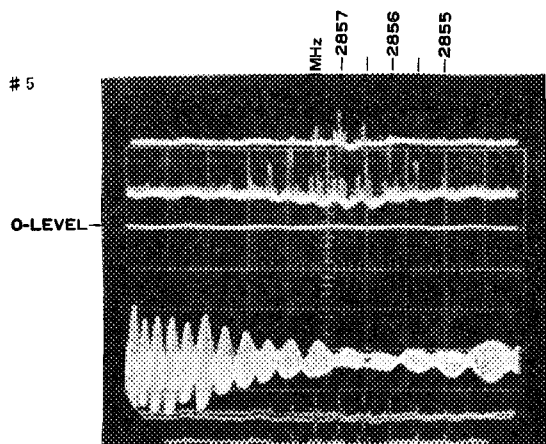
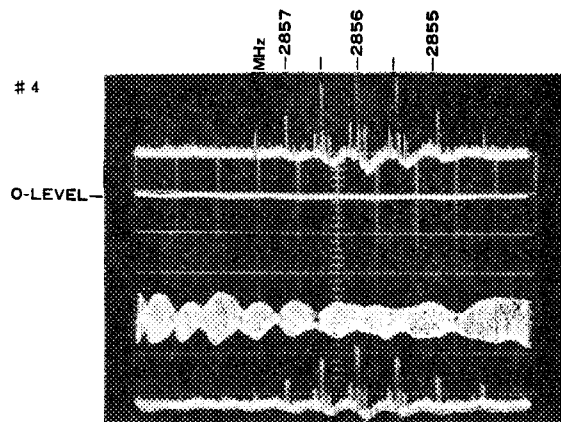
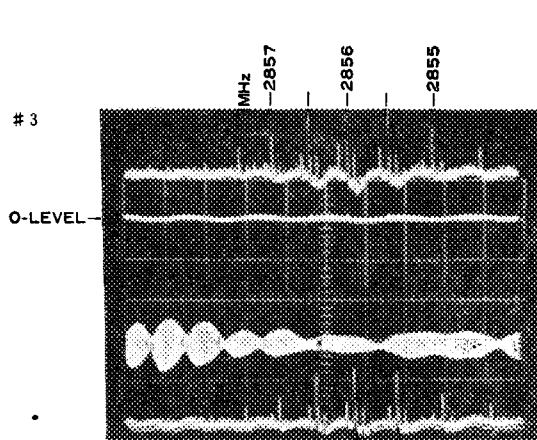


Photo 5.24 Detailed structure around central frequency for #3, #4 and #5 accelerating waveguide.

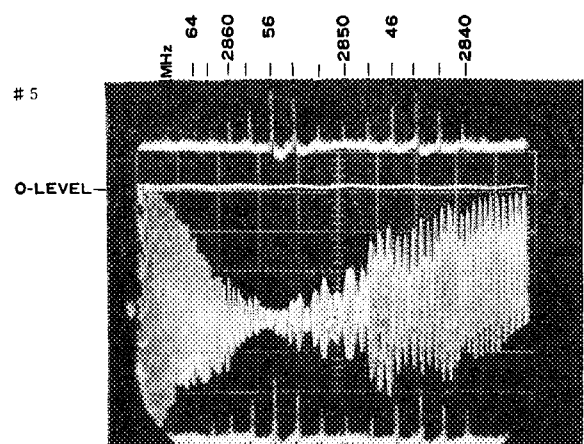
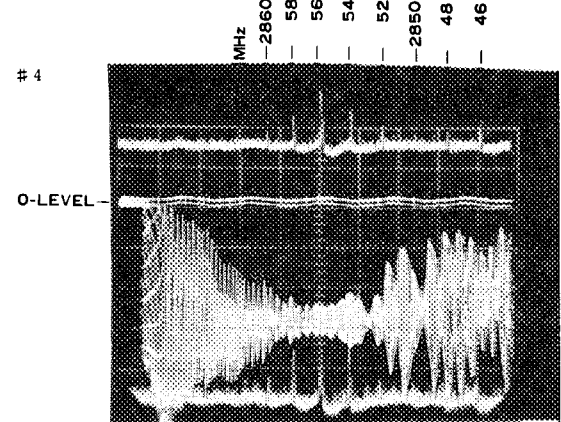
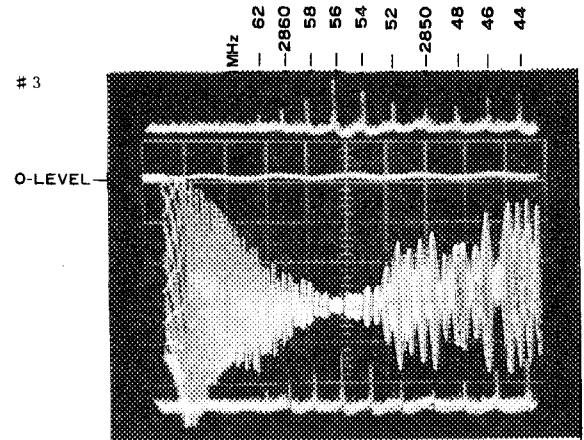


Photo 5.25 Patterns for #3, #4 and #5 accelerating waveguides in rather wide frequency range.

6. モジュレータ

主クライストロンのカソードに供給されるパルスの発生回路 (モジュレータ) は SLAC で用いられたものを参考にして設計された⁸⁾. その性能の概要を TABLE 6.1 に示す. モジュレータは電源部, PFN 部 (pulse forming network), サイラトロントリガー部の三つに分けられ, それぞれの筐体内に設置されている.

モジュレータから発生するパルス性の雑音電波は, 実験に種々の障害をひきおこすので筐体には嚴重な電磁遮蔽が行なわれ, また筐体内から外部への配線にはラインフィルターが用いられた. PFN 部の筐体の扉の接触部は, 完全接触が行なわれるようにベリリウム銅の fn が使用された. また, 各々の筐体はベークライト板の上に置かれ, 建屋の床とは電氣的に絶縁された. 筐体の間は 60 cm の幅の銅板により連絡され, 銅板の一点において建屋のアースと結ばれた. 各々のモジュレータ回路はパルストランスの一次側において筐体と結ばれている. 各筐体にはファンが取り付けられ, 筐体下部から取入れられた空気は筐体内の部品を冷却した後に, エア・ダクトにより建屋外に排気される.

6.1 電源部

PFN 回路に電圧 22.5 kV で電流 4 A の直流を供給する直流電源の回路図を Fig. 6.1 に示す. この電源の入力は 3 相 420 V で各相に 125 A 用のライン・フィルターが設けられている. このフィルターは, PFN 回路で発生する雑音が AC ラインにもどるのを防ぐためのものである. 電源トランスは 5 台あり, 入力電圧は 420 V で, 出力電圧は 19 kV で 3.8 A (rms) の電流が得られる. 入力側には中間タップがあり, タップの切換により, 出力電圧を 19 kV, 18 kV, 17 kV に変えることができる. トランスの結線は, 1 次側は 5 台とも Δ 結線であるが, 2 次側の 3 台は Δ 結線で, 2 台は Y 結線である. これは整流の際に生ずる高調波電流が Δ 結線と Y 結線で互に打消すことを利用して AC ラインにもどるのを軽減するためである.

トランスの一次側及び二次側の各々には, 異常なサージ電圧を吸収するための抵抗容量回路が設けられている. これは整流器のシリコン半導体素子を保護するためのものである⁹⁾.

トランスの 1 次側の AC ラインがブレーカにより急に開かれた場合, 1 次から見たトランスの等価インダクタンスと一次巻線の等価容量によって形成される共振回路に振動が発生する. この周波数がラインの周波数より高いと異常なサージ電圧が発生することがある. このため

に, コンデンサーをトランスの 1 次側の AC ラインの間に入れて共振振動数を 50 Hz 以下にする. 実際に用いられた容量は 10 μ F で耐圧は 440 VAC である. また, この振動を適当に減衰させるため 33 Ω の抵抗がコンデンサーと直列に用いられた.

整流器で整流が行なわれる時, 相間電流が切換わることにより, トランスの漏洩インダクタンスとトランスの 2 次巻線の等価容量によって形成される共振回路に振動が発生する. この周波数がラインの周波数より高いと前と同様に異常なサージ電圧が発生する. この周波数を 50 Hz より低くするためにトランスの 2 次側線間にコンデンサが入れられた. 容量は 0.1 μ F で耐圧 12.7 kV AC である. 振動を減衰させるために 1 k Ω の抵抗がコンデンサーと直列に用いられた.

トランスの 2 次側は整流器に接続される. 整流は 3 相全波整流方式で行なわれる. 整流器は耐圧 1000 V で順電流 3 A 以上のシリコンダイオードが 60 コ並べられたものが 6 組用いられた. ダイオード保護のために, 電圧分割の抵抗とコンデンサーが並列に接続された. この抵抗値は次式によって決められる.

$$R = 1/2 \frac{(\text{逆耐圧})}{(\text{順電流})} \quad (6.1)$$

整流器に用いられた素子を TABLE 6.2 に示す. これらのダイオード, 抵抗, コンデンサーはデルリン板の上に組立てられオイルタンクに入れられた. オイルタンクの大きさは, シリコンダイオードの接合部の温度が最大出力時にも 90 $^{\circ}$ C を超えないように設計された.

整流器の出力は, チョークインプット型のフィルター回路により整流リップルの平滑化が行なわれる. この回路のチョークコイルのインダクタンスは 2 H で耐圧 25 kV, コンデンサーの容量は 4 μ F で耐圧 25 kV である.

フィルター回路に充電トランスが接続される. 充電トランスは, PFN の繰返し周波数が 300 pps 以下の場合にはインダクタンス 2.6 H で使用し, 300 pps 以上の場合には巻線の切換により 1.3 H に変更して使用する. 充電トランスを通して PFN に充電が行なわれる場合には PFN のコンデンサーと充電トランスが共振して, 充電トランスの出力側には入力側の直流電圧の 2 倍の電圧が発生する.

また, 充電変圧器のコアには 25 : 1 の 2 次巻線が巻かれている. この巻線は PFN の充電電圧の安定化を行なう deQ 回路に使用されるのであるが, 現在 deQ 回路はまだ製作されていない. 充電トランスの出力は高圧の同軸ケーブル (RG-20 AU) により PFN 部に送られる.

Photo 6.1 は電源部内部の写真で, 右に整流器, 左に電

源トランスが見られる。

6.2 PFN 部

PFN の回路図を Fig. 6.2 に示す。PFN 部において 22.5 kV で 3000 A のパルスが発生されてクライストロンのパルストランスに供給される。PFN は 12 組のコンデンサーとインダクターで構成された lump 型のディレー・ラインで、スイッチ管には大型水素入りサイラトロンが用いられている。PFN のコンデンサーの容量 C とインダクターのインダクタンス L の値の関係は次式で定められる。PFN のコンデンサーに貯えられるエネルギーがサイラトロンの放電によってすべて消費されると

$$\begin{aligned} 1/2 CV_c^2 &= V_p I_p T \\ \text{すなわち } C &= \frac{2V_p I_p T}{V_c^2} \end{aligned} \quad (6.2)$$

ここに、 C : PFN の全容量

V_c : PFN のコンデンサーにかかる電圧
(45 kV)

V_p : パルストランスの一次側電圧 (22.5 kV)

I_p : パルストランスの一次側電流 (3000 A)

T : パルス幅 (4 μ sec)

この関係より C が求められる。クライストロンの最大出力時のインピーダンスは約 1 k Ω であり、これをパルストランスの一次側からみると $1 \text{ k}\Omega / (12)^2 = 6.9 \Omega$ となる。PFN の特性インピーダンス Z_0 は $Z_0 = \sqrt{L/C}$ で与えられ、この値を負荷であるクライストロンのインピーダンス 6.95 Ω と一致させるように L が決められる。

PFN の 12 コのコイルは 8 mm 直径の銅棒で作られ、コイルの巻数は 6 回、コイルの直径は 80 mm、高さは 110 mm である。このコイルには、直径 50 mm、長さ 80 mm のアルミニウム管がテフロン爪でコイル中に挿入され、回転により出し入れを行ない、インダクタンスの微調整を行なうことができる。インダクタンスを大きく変える時には銅板により巻線間の短絡を行なう。このコイルのインダクタンスは約 1.6 μ H である。各々のコイルはコンデンサの電極の高圧碍子の上にとりつけられているが互には couple していない。PFN の各々のコンデンサーは、容量が 0.02 μ F で、耐圧は 50 kV であり、低誘電損失のポリエチレンフィルムが誘電体として使用され、片方の電極はコンデンサーのケースに接続される単極碍子構造である。Photo 6.2 は PFN 筐体の内部で PFN のコンデンサーとコイルが見られる。

PFN の特性インピーダンスは、実際には後述されるような理由で 5% 程低くとる必要がある。コイルは、アルミニウム管を引抜いた時特性インピーダンスが 9 Ω になるように設計されている。コイルを 1 巻分短絡するか、またはアルミニウム管を一番深く押込んだ際に特性インピーダンスは 7 Ω になる。PFN の波形及び特

性インピーダンスの調整は Fig. 6.3 に示すように水銀リレーを 50 Hz で on-off してパルスをつくり、オシロスコープで観測しながら調整した。しかし、実際にパルストランスをつないだ時には浮遊容量の変化や、パルストランスの漏洩インダクタンスのために波形が多少くずれたが、調整にさしつかえる程ではない。波形を完全にするためには、高出力運転中に調整するのが理想的であるが、実際には危険であり、行なわれなかった。

PFN のコンデンサーの充電はつぎのように行なわれる。サイラトロンにより PFN のコンデンサーの電荷が放電されると、充電トランスと充電整流器を通して充電が行なわれる。その際に、充電トランスと PFN のコンデンサーにより共振がおこり、充電トランスには、最高で入力電流電圧の 2 倍の電圧が現われる。充電整流器は PFN のコンデンサーの電圧をこの電圧に保持する。充電整流器は、耐圧 1000 V、順電流 20 A のシリコン・ダイオードを、90 コ直列につなぎ、各々のダイオードに電圧分割用の抵抗とコンデンサーを並列に接続したものである。充電整流器に用いられた素子の性能と規格を TABLE 6.3 に示す。

サイラトロンが放電した際生じるサージ電流に耐えるように順電流の容量の大きなシリコン・ダイオードを選んだために逆電流もふえ、分圧用抵抗も小さくとらなければならない。分圧抵抗を流れる電流及びダイオードの逆電流による発熱が最大出力時に約 500 W に及んだ。各素子はベークライト及びデルリンの絶縁板の上に取りつけられ、絶縁油の入れられた大きさ 30 $\times$ 90 $\times$ 80 (cm) のタンク中に収められた。このタンクの外側にひだがあり筐体内における空気の流れにより冷却される。ダイオードの接合部の温度は最大出力時にも 90 $^{\circ}$ C を超えないように考慮されている。

充電整流器と PFN 回路との間には despiking 回路¹⁰⁾ が入れられた。Despiking 回路は、サイラトロンが放電した時に、充電整流器及び充電トランスにかかる電圧の spike を吸収するためのものである。充電トランスや、充電整流器はタンク中に入れられているのでかなりの浮遊容量があり、サイラトロンが放電した時、この浮遊容量と PFN の一段目のコイルのインダクタンスとで共振をおこし、電圧 spike を発生し、充電整流器を破壊するおそれがある。また、浮遊容量の両端には 20 kV 近くの逆電圧がかかり、これが充電トランスの絶縁破壊をひきおこすことも考えられる。Despiking 回路は、この共振周波数を低くするように定数を選ばなければならない。

実際の共振回路は配線の関係でかなり複雑で算定することは困難なので、15 mH の空心コイルと 2 k Ω を並列につないだものが用いられた。Photo 6.3 は despiking 回路のコイル (中央) で、上部にサイラトロン、下部に充電変圧器と EOL クリッパーが見られる。

PFN のサイラトロンにいちばん近いコンデンサーと並列に EOL (end of line) クリッパーがつながれてい

る¹¹⁾.

EOL クリッパーはシリコンダイオードと抵抗と SiC バリスタを直列につないだもので, PFN のコンデンサーの電圧の正方向に対して open に近い高いインピーダンスを示し, 負方向に対して低いインピーダンスを示す.

EOL クリッパーがないと, サイラトロンが放電した時に PFN のインダクタンス内に貯えられた余分のエネルギーがコンデンサーを逆充電し, サイラトロンに高い負の電圧がかかりサイラトロンを破壊するおそれがある. また, つぎの充電サイクルで PFN が過充電されるおそれもある.

サイラトロンが放電した場合のイオンの deionization を行なうには, サイラトロンのアノードをわずかに負電圧にする必要がある. そのために抵抗及び無極性の SiC バリスタをシリコン・ダイオードに直列に入れて逆電流が流れた際に一定の負の電圧が維持されるように設計されている. 使用されたシリコン・ダイオードは耐圧 1000 V のものを 90 コ直列につないだもので, 分圧の抵抗とコンデンサーが各々のダイオードに並列につながれている. EOL クリッパーは, PFN コンデンサーに貯えられたエネルギーのうちパルストランスを通過せずに反射されたエネルギーの一部を吸収するので発熱がある. それはクライストロンのインピーダンスは出力によって変わるのでミスマッチをおこすのと, また PFN は後に述べる理由で意図的にミスマッチされているのでこの反射は常におこっている. そのためシリコン・ダイオードは逆電流の少ないものを選び分圧抵抗も大きくして全体の発熱量を抑えた. 抵抗部分はシリコニット無誘導抵抗 10 Ω (定格 200 W) を 8 本直並列につなぎ全体で 5 Ω (定格 1.6 kW) とした. この抵抗は SiC バリスタと共に逆充電の負荷として働く.

SiC バリスタは非線形型抵抗体で電流が少い時には高抵抗を示すが, 電流が増加するに従って急激に抵抗値が減少する. 従って, ある一定電圧以上には逆電圧はかからない. この SiC バリスタの組合せは deionization 電圧が 3.6 kV の時に 2 k Ω の抵抗値を示すように設計された. EOL クリッパーに使用された構成素子を TABLE 6.4 に示す. また, EOL クリッパー回路に逆電流測定用のフェライト・コアのピックアップがとりつけられている. シリコン・ダイオードと SiC バリスタと抵抗はベークライト及びデルリンの絶縁体の上にとりつけられ, ひだつきの鉄製のタンク (30 $\times$ 90 $\times$ 80 cm) 内に収められ絶縁油が入れられている. シリコン・ダイオードの接合部の温度は 90 $^{\circ}\text{C}$ を超えないようにタンクの大きさは設計されている.

PFN のスイッチングに用いられる水素入りの大型サイラトロンは ITT 社で製作されたもので, 最大出力は 125 MW でアノードの耐電圧は正逆ともに 50 kV である. このサイラトロンの規格を TABLE 6.5 に示す. サイラトロンは 5 本用いられているので, 各々の放電開始時

間がふらつくと, 加速管における電子の加速時間が変動し, ビーム強度に大きな影響を与える. この放電開始時間のふらつきを抑えるために補助電極が用いられる. この電極に 200 $\sim$ 300 V の電圧を与え, サイラトロンを放電させ, 常時 200 mA 位の放電電流を流しておく, コントロール・グリッドにトリガーパルスが入る 0.1 μsec 前にトリガーパルスの 1/10 の電圧をこの電極に与える. これによりアノードの放電時間の遅れのふらつきを著しく減少させることができる. サイラトロンのトリガーには 1000 $\sim$ 4000 V の 2 μsec 幅のパルスが必要である. 入力インピーダンスは 10 $\sim$ 100 Ω である.

このサイラトロンには水素のリザーバーがあり, リザーバーのヒーターの電流を変えることによって, 管内の水素の分圧を調節することができる. ヒーターの電流値はサイラトロンが放電を開始する点と, 連続放電をおこす点との中間の値に調節される. この値はサイラトロンの使用時間が増加すると変化するので, 時々調節を行なうことが必要である. 一般には時間が経つに従ってヒーター電流を増加させる必要がある. 水素圧を調整すると補助電極の電流も変化するが, この電流をはば一定に保つような条件で調整を行なわなければならない. Linac の運転には 5 本のサイラトロンが使用されているが, 5000 時間の運転において取換えられたものは, 1 本であった. この球の寿命は約 3000 時間であった. Photo 6.3 には PFN 筐体中のサイラトロンが見られる.

PFN とパルストランスの負荷とのインピーダンスマッチはとくに重要である. マッチングがはずれると, パルストランスから反射されたパルスがサイラトロンを破壊することがある. もしも PFN のインピーダンスがクライストロンのインピーダンスより大きいと, 反射波は反転してサイラトロンに負の電圧を与える. サイラトロンに適当な負の電圧をかけることは deionization のために必要ではあるが, このインピーダンスのミスマッチによるものだと main pulse の直後にかかるので, イオンが大量にアノードにぶつかるためにアノードをいためやすい. また, さらにその後パルストランスの漏洩インダクタンスに貯えられていたエネルギーがアノードに負の電圧を与えるため, 負の電圧 spike が大きくなって, サイラトロンを破壊するおそれがある. 逆に PFN のインピーダンスが負荷のインピーダンスより小さいと, 反射波は同位相で反射されるためにサイラトロンには負の電圧がかからない. しかし, パルストランスに漏洩インダクタンスがあるため, このインダクタンス L と PFN のコンデンサーの容量 C との共振により, $t \sim 2\pi\sqrt{LC}(\text{sec})$ の時間後に負の電圧がかかる. この電圧は EOL クリッパーでクリップされ, 2 $\sim$ 3 kV の負の電圧がアノードにかかって deionization が行なわれる. 我々のモジュレータでは SLAC と同様に, 後者の方法で deionization を行なっている. 従って, PFN のインピーダンスは最大出力時の負荷のインピーダンスより 5% 小さくなるよう

に調整を行なった。この方法では、負荷にインダクタンスがないとサイラトロンに負電圧がかからず deionization をおこさないで、負荷に無誘導抵抗を使って試験を行なうとサイラトロンに連続放電がおこるので注意が必要である。

6.3 サイラトロン駆動部

サイラトロンの駆動部の筐体にはサイラトン・トリガーパルサー I (低レベル)、サイラトン・トリガー II (高レベル) と、 0.1μ 秒のディレー・ラインと、サイラトン補助電極用の直流電源 (350 mA) 及びクライストロンのパルストランスのバイアス電源が入れられている。また、この筐体は deQ 回路も入れられるように大きさに余裕がとられている。この筐体は PFN 筐体に密接しておかれている。モジュールタ部とコントロール室のコントロール回路やコントロールデスクをつなぐ信号は、全てこの筐体からライン・フィルターを通して取出されている。

サイラトン駆動部の諸回路の接続図を Fig. 6.4 に示す。トリガーパルサー II はクライストロン・モジュールタの大型サイラトロンをトリガーするものである。この回路の PFN には、5 組の $0.004 \mu\text{F}$ のコンデンサーと $8 \mu\text{H}$ のインダクターより構成されたディレー・ラインが用いられ、スイッチ管として水素入りサイラトン 2G-22P が用いられている。PFN の出力は巻線比が 2:1 のパルストランスを通して取出される。パルストランスの

出力側のインピーダンスは 25Ω で、最大パルス電圧は 2000 V である。このパルストランスの出力側にはパルスの跳返りを防止するためにダイオードが接続され、またサージ電圧吸収用の SiC バリスターと抵抗容量回路が、パルサーの素子の保護のために接続されている。

Photo 6.4 はパルサー II の出力電圧の波形である。クライストロン・モジュールタのサイラトロンが放電するとクイストロンのインピーダンスは急激に低下するので波形はくずれている。

トリガー・パルサー I はトリガー・パルサー II のサイラトン 2G22P のトリガー用である。この回路は真空管式であり、パルスの発生は、ブロッキング発振によって行なわれている。真空管を使用するのは、真空管がサージに対して強いからである。このパルサーはコントロール室の AC 同期パルサーによってトリガーされるが、この入力パルスの電圧は 50 V でパルス幅は約 $2 \mu\text{sec}$ である。トリガー I の出力パルスの電圧は 200 V でパルス幅 $3 \mu\text{sec}$ である。コントロール室の AC 同期パルサーとモジュールタ室のクライストロン・モジュールタの PFN との間に、トリガー・パルサー I と II が介在していることは、PFN で発生するサージ電圧がコントロール室にもどり、種々のコントロール回路に障害を与えるのを防止するのに役立っている。Photo 6.5 はトリガー・パルサー I の出力波形である。

Photo 6.6 はサイラトン駆動部で、最下部にはコントロール室につなぐ信号線のためのライン・フィルターがみられる。

TABLE 6.1 Characteristics of modulator

Maximum output power	65 MW
Average output power	80 kW
Maximum output pulse voltage	22.5 kV
Maximum output pulse current	3000 A
Maximum output pulse width	4 μ sec
Maximum output pulse repetition	600 pps

TABLE 6.2 Components of rectifier

	Specifications	Number of element
Si diode	6M100 (International Rectifier Corp., Japan)	360
Dividing resistor	200 k Ω (1 W)	360
Dividing condenser	0.01 μ F (maximum voltage 1000 V, mica)	360

TABLE 6.3 List of the charging diode components

	Specifications	Number of element
Si diode	2M100 (International Rectifier Corp., Japan)	90
Dividing resistor	56 k Ω (2 W)	90
Dividing condenser	0.01 μ F (maximum voltage 1000 V, mica)	90

TABLE 6.4 List of the EOL clipper components

	Specifications	Number of element
Si diode	S-20-10 (Origin Electric Co.)	90
Dividing resistor	200 k Ω (2 W)	90
Dividing condenser	0.01 μ F (maximum voltage 1000 V, mica)	90
Noninductance resistor	ER200SP (10 Ω 200 W, Tokai Konetsu Co.)	8
SiC varistor	TVA-16 (14S stack, Sanken Electric Co.)	4

TABLE 6.5 Specifications of thyatron (KU-275)

Type	KU-275 (ITT)
Heater voltage	6.3 (6.0~6.6) VAC
Heater current (at 6.3 V)	35~55 A
Reservoir voltage	2.5~6.0 V
Reservoir current (at 5.5 V)	10~25 A
Minimum heating time	5 min
Peak anode voltage, forward	50.0 kV (max.)
Peak anode voltage, inverse	50.0 kV (max.)
DC anode supply voltage	2.0 kV (min.)
Peak anode current	5000 A (max.)
Average anode current	8.0 A (max.)
RMS anode current	200 A (max.)
Anode current rate of rise	10,000 A/ μ sec (max.)
Ambient temperature	-55 $^{\circ}$ C to 90 $^{\circ}$ C
Anode delay time	0.3 μ sec (max.)
Time jitter	2.0 nsec

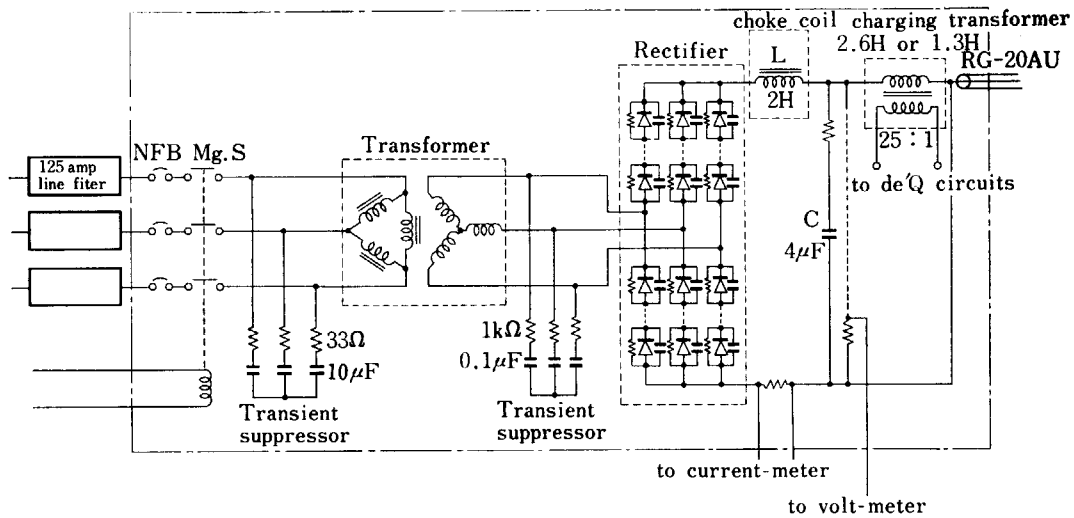


Fig. 6.1 Power supply for main modulator.

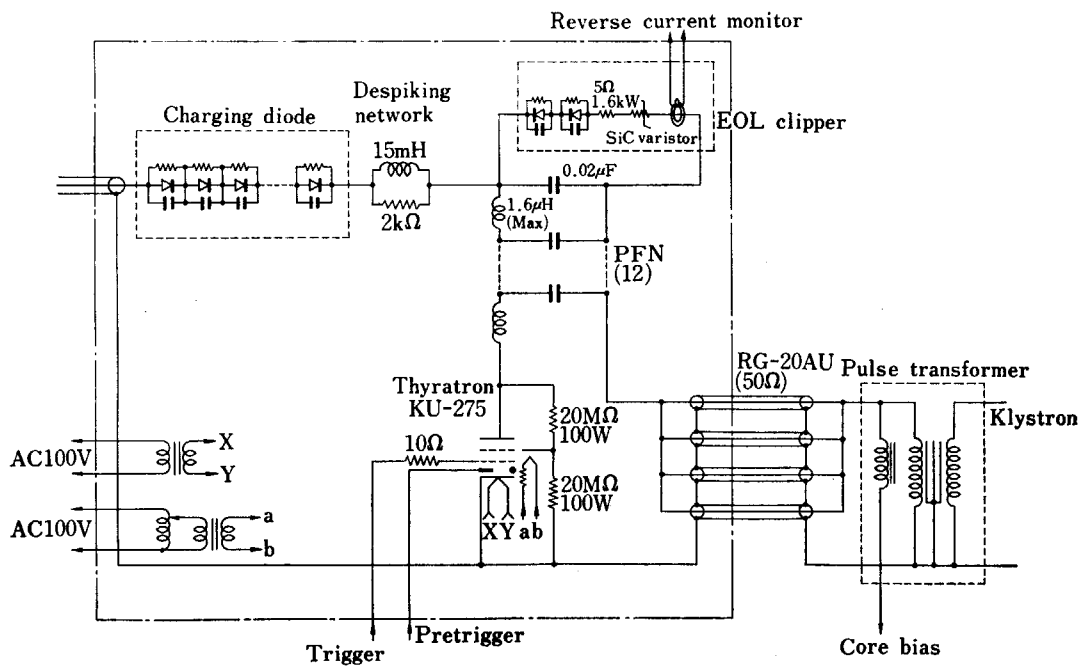


Fig. 6.2 PFN.

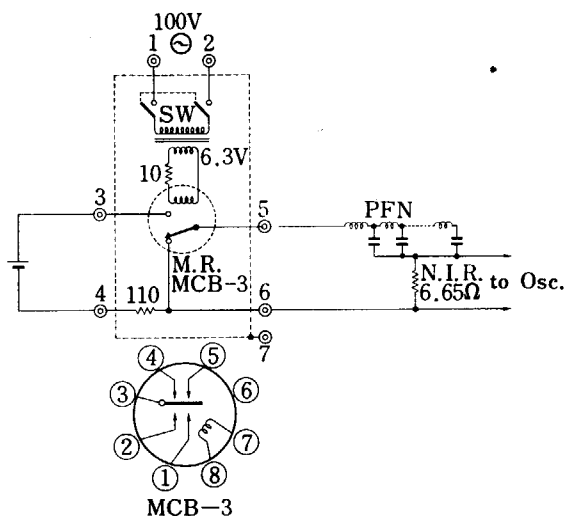


Fig. 6.3 Mercury pulser for PFN adjustment.

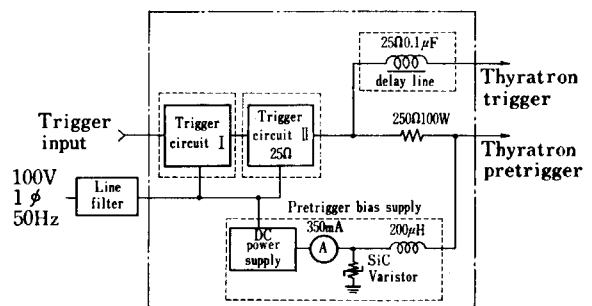


Fig. 6.4 Trigger circuits for main thyatron.

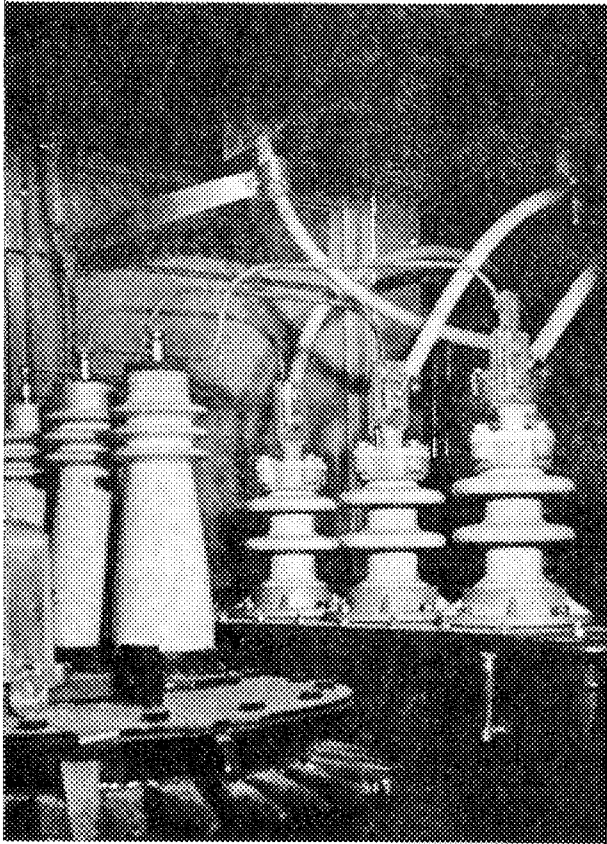


Photo 6.1 High voltage DC power supply.

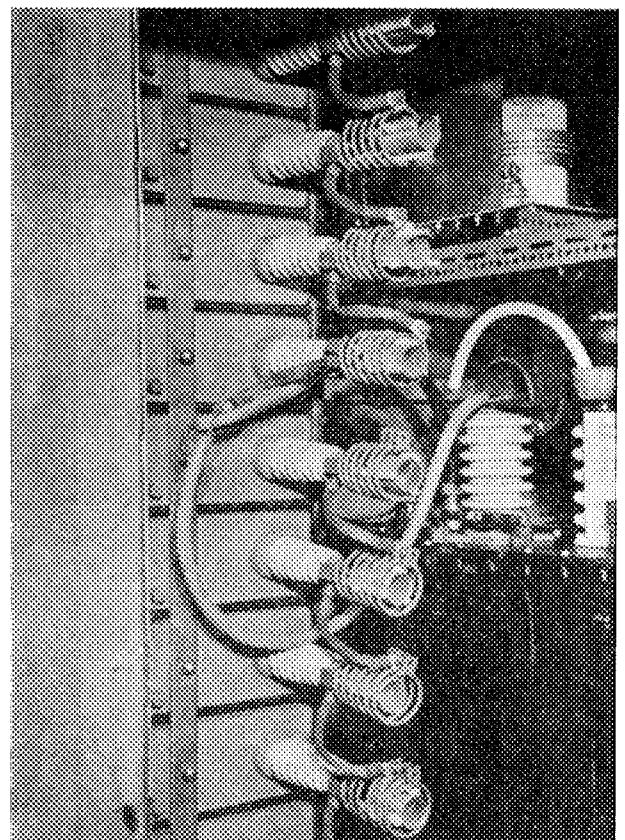


Photo 6.2 Pulse forming network of main modulator.

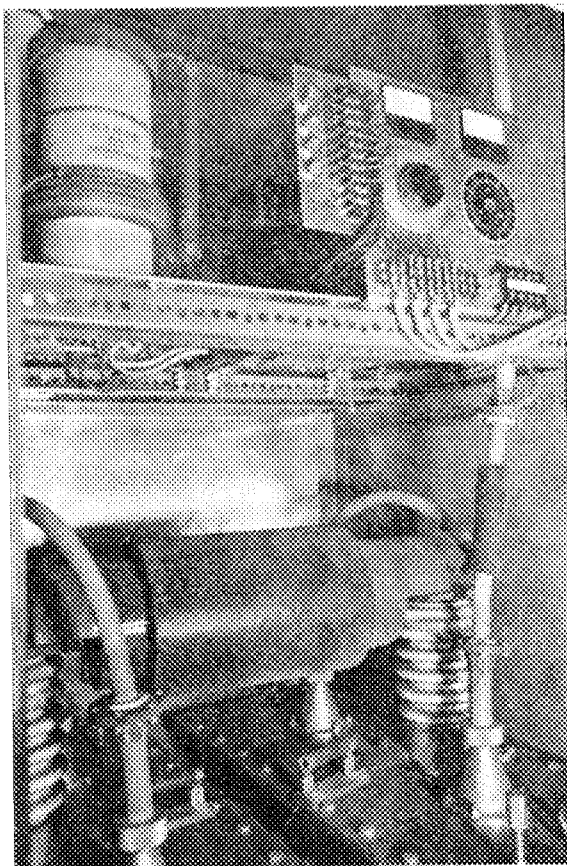


Photo 6.3 Thyatron (upper left), despike coil (center), EOL clipper (lower left) and charging diode (lower right).

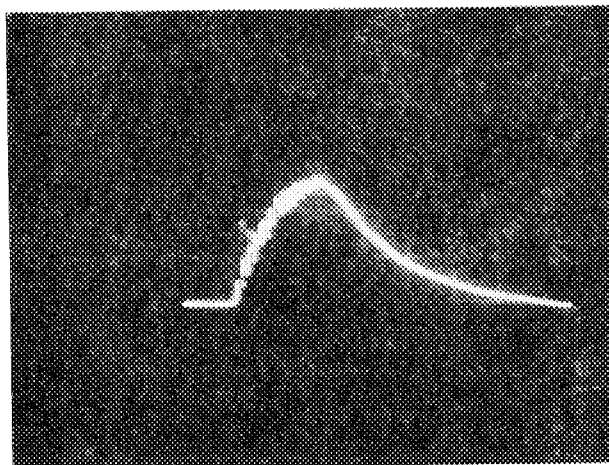


Photo 6.5 Output voltage waveform of trigger pulser I (abscissa $1\mu\text{sec}/\text{division}$, ordinate $20\text{V}/\text{division}$).

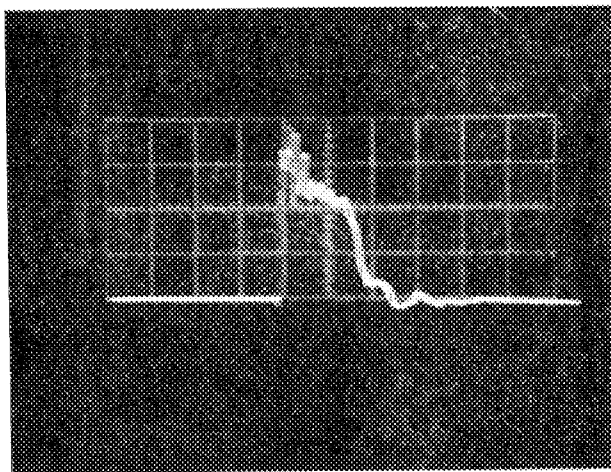


Photo 6.4 Output voltage waveform of trigger pulser II (abscissa $1\mu\text{sec}/\text{division}$, ordinate $400\text{V}/\text{division}$). A large oscillation near the beginning is due to the thyatron firing.

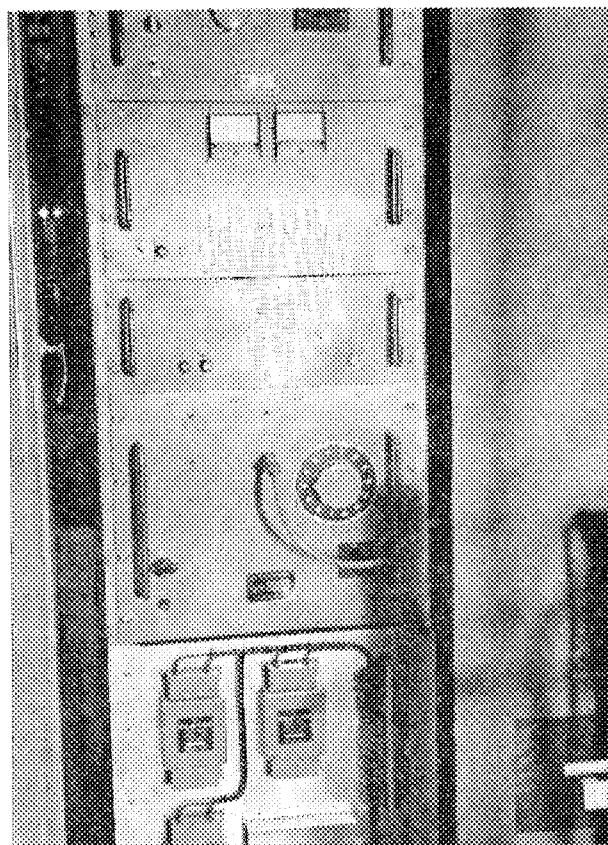


Photo 6.6 Thyatron trigger pannel. Power supply for DC bias of the pulse transformer, power supply for pretrigger, trigger pulser I, trigger pulser II and line filter (from the top).

7. 電子ビームの伝送系

Linac で加速される電子ビームを, もっとも効率良く所定のターゲットの位置まで導くための装置がビーム伝送系である. これは次の2つの部分に分けることができる. 第1は, 電子銃により電子が加速管に入射されてから最終段の加速管を出るまでの, いわば linac 本体における伝送系である. その第2は, 加速管を出た後いろいろなターゲットに至るまでの伝送系である. 伝送系はビームダクト, イオンポンプ, 各種磁石, コイルおよびスリット等より構成されている. Photo 7.1 は分岐磁石側から加速管部を撮影したものであり, Photo 7.2 は同じ分岐磁石側から撮影された3本のビーム伝送系が示されている.

ターゲットの位置は Fig. 7.1 に示されるように, 実験上の都合から, linac 本体から相当に離れた位置にある. Fig. 7.1 でターゲット C (C は center の略) は電子ビームの直進する方向に位置し, 中性子を発生するターゲットである. このターゲットに入射する電子ビームは, エネルギーのばりはあまり問題にならないが, 大電流であることが必要である. したがってこの直進部の伝送系に対しては, 最大のビーム伝送率を持つことが要求される. また, ビームの幾何学的大きさは小さくできた方が好都合である. ターゲット R (right の略) には, 電子ビームをX線に変えるX線コンバータがある. これは水冷の白金板のターゲットであって, この後部に試料が置かれ放射性同位元素が作られる.

ここでもやはり最大電流をとることが必要であるが, 同時にビームの幾何学的大きさの小さいことも比放射能を上げるのに重要である. ターゲット LR (left right の略) での計画の1つは, 電子ビームを使った原子核実験を行なうことで, これまでのターゲットの場合と違って, 電流値はあまり問題にしないが, エネルギーの揃った電子ビームを必要とする. またエネルギーのばりを大きくした場合には, 電流値をかなり大きくできることは, やはり望ましい. ターゲット LC (left center の略) には, 固体物理関係の実験のための熱中性子発生用のターゲットが置かれ, ターゲット C の場合と同様に, 電子ビームの電流値は最大であることが要求され, また, ビーム・スポットの大きさはある程度小さい方が望ましい.

一方, linac 本体でのビーム伝送系に対して要求されることは, 当然最大限の伝送率を持つことであるが, このためには加速管のビーム孔が小さいことを考慮し, ビームのばりを抑えることがもっとも重要になる. しかしこの部分では, ビームは直進するだけなので, 装置としては linac を出た後の前述した部分に較べるとずっと簡単になる.

7.1 ターゲットへの伝送系

伝送系を設計するにあたり, まず問題になることは, ビームの初期条件である. これはエネルギー値とそのばり, 空間的な大きさ, および進行方向の角度のばりである. この初期条件については信頼できるデータがなく, また予想を立てるのも困難な問題であった. それで他所の linac での例を参考にして, 一応次の初期条件を設定した. エネルギーのばり $\pm 5\%$, 空間的なばり $10\text{ mm}\phi$, 進行方向の角度のばり 10^{-3} ラジアン. これは1つの目安であるので, これよりも大きなばりを持つ場合もある程度考慮する必要があった.

さて, ターゲットの配置からみて, linac を出たビームを3方向に分岐させるための磁石が必要であるが, この磁石を直流方式にするか交流方式にするかは次の点を考慮してきめられた. 交流方式では電子ビームを3方向にパルスごとに分配することができ, 3つのターゲットを使用することにより実験を同時に行なうことができるので, もちろん有利であるが, 技術的には相当厄介な問題があった. そこで電磁石は交流磁石を作り, 当面は直流磁石として動作させることにした. そしてこの磁石なるべく小型のものですませるよう偏向角度を小さくする. その後, 直流偏向磁石1により大きく偏向させる方式をとった.

伝送には, 直進部については一般によく行なわれるように Q 磁石 (quadrupole magnet, または4極磁石) を用いる. 偏向部についてはいくつかの伝送方式があるが, 大別すると, 偏向磁石をいくつか組合せて, これと Q 磁石を必要な個数だけ使用するのと, 偏向磁石の数を最小限にして, これと Q 磁石を組合せて使用するものに分けられる. ここでは経済性を考え後者を採ることとした. 分岐磁石, および偏向磁石の配置が定まると, 残るのは Q 磁石の数および配置の問題である. この決定は電子ビームの軌道計算によらなくてはならない. この計算は 7.3 で改めて述べるが, 結果を簡単に以下にまとめる.

Fig. 7.2 にターゲットへのビーム伝送系の配置図を示す. ターゲット C への電子ビームを直進させる伝送系としては, Q 磁石3個でも一応充分であるが, 4個を2個ずつの組み (doublet) 2組にする方が中心軸に対する対称性が良くなるので, doublet 2組を使用する.

分岐磁石によりビームを右側へ曲げてターゲット R に導く伝送系では, Q 磁石4個ではなお不充分で電子ビームのばりがかなり大きい. それで Fig. 7.2 のように中央にもう1個加えた. 前述の4個は2組の doublet であ

り、中央の1個は doublet の中点よりやや後方に置かれた。

ターゲット LR または LC へ行く伝送系は2つの異った機能を持つ。ターゲット LR でエネルギーの振り幅のせまいビームが要求される時には、Q磁石は使用せずに同一エネルギーで平行に入射する電子について偏向磁石1の後で焦点を結ばせ、この位置にスリットを置き、その幅を変えることによって任意のエネルギー幅のビームを得ることができる。第2の機能はエネルギー幅を問題とせずなるべく多くの電流を伝送するもので、この場合にはQ磁石を使用する。偏向磁石1と2の間では5個のQ磁石を用い、さらに偏向磁石2の後ではそれぞれの実験の必要性に応じて、将来Q磁石を製作設置することとした。電子ビームは分岐磁石と偏向磁石1で大きな角度の偏向を受けるために、空間的に大きく振り、磁石も大型のものが要求される。

以上が伝送系の主体となる電磁石類であるが、このほかの補助的な装置がいくつか必要で、これらについて次に述べる。Steering コイルは空心のコイルで、各分岐路にそなえられている。これによって各ターゲットでの電子ビームの中心位置の微調整を行なう。とくにターゲット LR, LC へ行く経路では、2つの偏向磁石の比較的狭い磁極間隙を通過するために、このコイルが重要になると思われる。偏向磁石1はターゲットCへ行くビーム直進軌道に非常に近いため、その漏洩磁場が直進するビームに影響する。これを防ぐために、必要部に磁気遮蔽を施している。

Linac を使用する実験では通常、実験に先立って linac のいろいろな部分を調整して、要求される電子ビームを得る調整運転を行なうが、このさいビームが真空導管や真空槽等の壁に当ることは避けられない。これを極力少なくするため、偏向部にはコリメータを入れる。これはまた、極端にエネルギーのずれたビームを取除くのにも役立っている。

7.2 加速管部伝送系

ターゲットの伝送系の場合と同じく、まずビームの初期条件を設定しなくてはならない。前にも述べたようにこれが難しい問題であった。とくに電子銃から出るビームの特性が十分に知られていない。電子銃から出たビームは、いくつかの集束装置を通して第1加速管に入る。そこで、第1加速管までを電子入射装置と見なし、第1加速管出口でのビームの状態を初期条件として、つぎのように設定した。エネルギーの振り $\pm 5\%$ 、大きさ $10\text{mm}\phi$ 、角度の振り 10^{-3} ラジアンと仮定する。

Linac のビーム伝送系で考慮しなければならないのは“beam shortening”と呼ばれる現象である。これは電流が増加すると、電子ビームにより余計なモードのマイクロ波が加速管内に誘起されて、このマイクロ波により

電子ビームが偏向を受け、加速管の disk に当たってビームが途中で失われる現象である。これを抑えるのに、Q磁石をあらかじめ加速管上に設置するか、あるいは2つの加速管の間に置くかが問題になる。前者のように加速管の上に置くためには相当大型の磁石にしなければならないが、後者の配置ならば小型のものである。また、加速管の間に置く配置でも、かなり beam shortening に対し有効であろうと考えられるので、こちらを採用することにした。

後に7.3の軌道計算で示されるが、想定した初期条件の下ではビーム伝送は容易である。当初 Fig. 7.3 に見られるように、2カ所にそれぞれ doublet (Q_1Q_2 および Q_3Q_4) を設置した。この他の加速管の間には、設置できるように空間をとっておいた。その後実際に linac をテストして入射ビームが予想以上に広がっていることがわかった。そこで残りの加速管の間にも Q 磁石の doublet が設置された。

Q磁石の他に、また、第3, 4, 5加速管には、地磁気消磁用 degauss コイルが備えられている。この部分では加速管の長さがそれぞれ3mと長い割に disk の口径が $25\sim 18\text{mm}$ と、小さいためである(第1, 第2加速管はそれぞれ2mの長さで disk 口径は 26mm)。第3加速管入口では広がったビームが加速管に当るのを防ぐためのコリメータが取り付けられている。

7.3 軌道計算

7.3.1 運動方程式

最初に、Q磁石中での電子の運動を考える¹²⁾。このため座標系を Fig. 7.4 のようにとる。磁石の軸方向(電子の進行方向)が Z 軸で、X, Y 軸はこれに垂直な平面内にある。L は磁石の Z 方向の実効長である(漏洩磁場の効果により実際の長さ L' よりやや長い)。磁場の成分を B_x, B_y (計算を行なう空間では $B_z=0$ を仮定している)、magnetic rigidity を $B\rho$ ($eB\rho$ は運動量である)とする。さらにパラメーター k_x, k_y を導入する。

$$k_x = \left(\frac{1}{B\rho} \frac{\partial B_y}{\partial x} \right)^{1/2} \quad (7.1)$$

とすると $k_y = -ik_x$ で、以下では $k_y > 0$ と仮定する。

$z=0$ における電子の初期条件として

$$x=x_0, y=y_0, \theta_0 = \left(\frac{\partial x}{\partial z} \right)_0, \phi_0 = \left(\frac{\partial y}{\partial z} \right)_0 \quad (7.2)$$

とすると、磁石の出口 $z=L$ における運動方程式の解は、

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 \cosh kL + \frac{\theta_0}{k} \sinh kL \\ \theta &= x_0 k \sinh kL + \theta_0 \cosh kL \\ y &= y_0 \cos kL + \frac{\phi_0}{k} \sin kL \\ \phi &= -y_0 k \sin kL + \phi_0 \cos kL \end{aligned} \right\} \quad (7.3)$$

これらの方程式は線型であるので, 行列表示を用いるのが便利である. x, y 方向のそれぞれについて, ほぼ同じ様に計算ができるので, 以下では y 方向の運動のみを取扱う. これは集束性の運動であって,

$$\begin{pmatrix} y \\ \phi \end{pmatrix} = M_c \begin{pmatrix} y_0 \\ \phi_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos kL & \frac{1}{k} \sin kL \\ k \sin kL & \cos kL \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ \phi_0 \end{pmatrix} \quad (7.4)$$

ところで, Q 磁石の電子に及ぼす作用は, 光学におけるレンズの作用と同等であることが知られている. 薄いレンズの場合, 物空間および像空間主平面の位置をそれぞれ t_i, t_e とし, 焦点距離を f_c とすると, (7.4) 式の M_c はこれらの量によって次のように表わされる.

$$M_c = \begin{pmatrix} 1 - t_e/f_c & t_i + t_e - t_i t_e/f_c \\ -1/f_c & 1 - t_i/f_c \end{pmatrix} \quad (7.5)$$

M_c に対する (7.4) の表示と比較すると

$$\begin{aligned} 1/f_c &= k \sin kL \\ t_i &= t_e = (1 - \cos kL)/k \sin kL \end{aligned} \quad (7.6)$$

が得られる. 薄いレンズすなわち $k^2 L^2 \ll 1$ が成立する場合, これらの関係はずっと簡単になる.

$$M_c = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_c & 1 \end{pmatrix}, \quad 1/f_c = k^2 L \quad (7.7)$$

以上 y 方向のみを考えたが, x 方向の運動は (7.3) 式から知られるように発散性である. x, y 方向ともに集束性の軌道にするためには, 2 枚のレンズを重ねなくてはならない. 2 枚とも薄いレンズとし, それぞれの焦点距離は f_1, f_2 , 2 つのレンズ間の距離を t とすると, 次の式が成立する.

$$\begin{pmatrix} x \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - t/f_1 & t \\ -1/f_1 - 1/f_2 + t/f_1 f_2 & 1 - t/f_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{pmatrix} \quad (7.8)$$

$$\begin{pmatrix} y \\ \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + t/f_1 & t \\ 1/f_1 + 1/f_2 + t/f_1 f_2 & 1 + t/f_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ \phi_0 \end{pmatrix} \quad (7.9)$$

設計段階では, 手計算で試行錯誤をくり返ししながら, 適当なパラメータ・セットを探さなくてはならない. このためにはマトリックス形式よりも, 光学レンズだけで考える方が直観的に理解し易く, 見通しがたてやすいことが多い. $f_1 = f_2$ の 2 枚の薄いレンズによる結像法則は

$$\frac{1}{x_1 + f_1} - \frac{1}{x_2 + f_1} = \frac{t}{f_1^2} \quad (7.10)$$

x_1 は物点の, x_2 は像点の位置で, それぞれの第 1, 第 2 レンズから測られ, 光の進行方向にある時に正, 逆のとき負となる. 横倍率は $(x_1 + f_1)/(x_2 + f_1)$ である.

実際の計算では, (7.8), (7.9), (7.10) 式を用いて近似的なパラメータを決定し, (7.5), (7.6) 式を用いてもう 1 度計算機で厳密に計算して, パラメータの最終値を確定するという方法をとった¹³⁾.

つぎに, 一様な磁場を持った磁石を通過する電子軌道のもっとも一般的な場合を考える¹²⁾. 一様磁場の中で

は, 電子軌道はいうまでもなく円弧を描く. 運動量 p と磁場の強さ B との関係は, $p = eB\rho$, ここに ρ はその円の半径である. Fig. 7.5 のような一様な磁石で角度 α だけ偏向させるとする. 点鎖線は半径 ρ の中心軌道を表す. 図に示すように電子の入射する側の磁曲面は中心軌道に垂直でなく, β_1 だけずれており, 同様に出てゆく側では β_2 だけずれているとする. 符号は図のようになっている時, $\beta_1 > 0, \beta_2 < 0$ であるようにとる.

さて, p から Δp だけずれた運動量を持った電子が, 中心軌道から, Δx_1 はなれた位置に入射したとする. 入射方向はやはり $\Delta\theta_1$ だけずれているものとする. これらの符号のとり方を Fig. 7.5 に示す. 磁石を通過した後の電子軌道を決定する量は, Fig. 7.5 の $\Delta x_2, \Delta\theta_2$ である.

$\Delta x_2, \Delta\theta_2$ と $\Delta x_1, \Delta\theta_1$ の関係は次式で与えられる.

$$\begin{pmatrix} \Delta x_2 \\ \Delta\theta_2 \\ \Delta p/p \end{pmatrix} = M(\alpha, \beta_1, \beta_2) \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta\theta_1 \\ \Delta p/p \end{pmatrix}, \quad M = \begin{pmatrix} \frac{\cos(\alpha - \beta_1)}{\cos \beta_1} \\ -\frac{(1 - \tan \beta_1 \tan \beta_2) \sin(\alpha - \beta_1 - \beta_2)}{\rho \tan(\beta_1 + \beta_2)} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \rho \sin \alpha & \rho(1 - \cos \alpha) \\ \frac{\cos(\alpha - \beta_2)}{\cos \beta_2} \sin \alpha + (1 - \cos \alpha) \tan \beta_2 & 1 \end{pmatrix} \quad (7.11)$$

あるいは, 同じ式であるが

$$\begin{aligned} \Delta x_2 &= \Delta\rho(1 - \cos \alpha) + \Delta x_1(\tan \beta_1 \sin \alpha_1 + \cos \alpha_1) \\ &\quad + \rho\theta_1 \sin \alpha \\ \Delta\theta_2 &= \frac{1}{\rho} [\Delta\rho \sin \alpha - \Delta x_1(\sin \alpha_1 - \tan \beta_1 \cos \alpha_1) \\ &\quad + \rho\theta \cos \alpha_1 + \Delta x_2 \tan \beta_2] \end{aligned} \quad (7.12)$$

この式の方が簡単で数値計算には都合が良い. ただし, 第 2 式の右辺に Δx_2 が含まれている点に注意を要する. これらの関係はかなり複雑ではあるが, 単に幾何学的考察から得られるものである.

β_1, β_2 が零でないのはつぎの理由による. もっとも一般的には β_1, β_2 共に零でないが, ここではどちらか一方が零でない場合について考察する¹⁴⁾¹⁵⁾. Fig. 7.6 (a) のように, 磁石を 2 つ用いて電子線を伝送する場合を考える. 入射電子は中心軌道に沿って第 1 の磁石に入射する. エネルギーが異なっていると, 第 1 の磁石の後で拡ってくる. しかし, 第 2 の磁石を通過した後, F_E の距離で再び集束してくる. この距離 F_E はエネルギー・焦点

距離と呼ばれ、次式で与えられる。

$$\frac{1}{F_E} = \frac{\tan \alpha}{\rho} (1 - \tan \beta_2 / \tan \alpha) \quad (7.13)$$

つぎに Fig. 7.6 (b) のように、入射電子のエネルギーは等しく入射方向も平行であるが、入射位置がずれている場合（入射ビームに大きさがある場合）を考える。この場合電子は第1の磁石を通過した後、一点に集束する。その距離 q は

$$q = \rho \cot(\alpha - \beta_1) \quad (7.14)$$

で与えられる。スリットを置いて単色の電子線を取り出すには、この位置が良い。この後電子線は拡って第1の磁石に入るが、その後 F_H の距離（水平焦点距離という）で再び集束する。

$$\frac{1}{F_H} = \frac{\tan \alpha}{\rho} (A - \tan \beta_2 / \tan \alpha) \quad (7.15)$$

ここに

$$A = \frac{[(d/\rho) - 2](1 - R) - R \sec \alpha}{[(d/\rho) - 2](1 - R) + (1 - 2R) \sec \alpha}$$

$$R = \tan \beta_1 / \tan \alpha$$

ところで垂直方向の運動については、これまで何も述べなかった。これは一様磁場の磁石では垂直方向の運動に対して何の影響もなかったからであるが、 β_1, β_2 が零と異なる場合には、事情が変わってくる。これは漏洩磁場に水平方向の成分が現われるためであって¹⁶⁾¹⁷⁾、この効果は $f_1 = \rho / \tan \beta_1$, $f_2 = \rho / \tan \beta_2$ の焦点距離を持つ薄いレンズと同じである。 β_1, β_2 が Fig. 7.6 のようにとられている時 f_1, f_2 とともに正、すなわち集束するように作用する。

最後に、加速管中での電子の運動について考察する¹⁸⁾。加速管軸方向の座標を、前と同じく z とする円筒座標系をとる。 z に垂直な座標を r で表す。 z に関する全微分をプライム（'）で表す。さらに、電子の速度を β （磁石で出てきた β_1, β_2 と異なる）、光速=1 とする。そして電子の静止質量 m_0 で測った電子の全エネルギーを γ とすると $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ である。さきに述べた z に関する全微分と時間微分との関係は

$$(\cdot)' = \frac{d}{dz} = \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{\beta} \frac{\partial}{\partial t} \quad (7.16)$$

である。 r 方向の運動方程式は

$$(\beta \gamma r)' = \frac{e(\vec{E} + \vec{\beta} \times \vec{B})_r}{m_0 \beta} \quad (7.17)$$

である。右辺の分子は、電子に働く Lorentz 力の r 成分であるが、進行波型の加速器で、 $\beta \sim 1$ の相対論的な電子に対しては、右辺は極めて小さい。したがってこれを無視すると、(7.17) 式の積分が得られる。

$$r = r_0 + \theta_0 (\beta \gamma)_0 \int_{z_0}^z \frac{dz}{\beta \gamma} \quad (7.18)$$

ここに θ_0 は、 $z = z_0$ で軌道が Z 軸となす角であり、添字の 0 は $z = z_0$ で、測られる量であることを示す。 z に沿って一様に加速される場合には、さらに簡単になる。

$$r = r_0 + z_0 \theta_0 \ln \frac{z}{z_0} \quad (7.19)$$

電子の軌道は、対数的に z 軸に平行な直線に漸近する。

7.3.2 直進ターゲット C への伝送

Linac の加速管の出口から得られるほぼ平行な電子ビームを、中性子発生用ターゲット C まで透過率 ≈ 1 の条件で直進させる光学系を考える。

7.3.1 の (7.8), (7.9) 式のマトリックスの両側に自由空間マトリックスを乗じて、 X 軸、 Y 軸方向のビームの運動を調べる。光学系に対する要求としては、電子ビームの太さを、ターゲットにおいて、linac 出口と同じ太さに保つこと、ビームダクトの途中で振幅が大きすぎないことである。まず Q 磁石の doublet を用いる系を考えたい。Linac 出口からターゲットまで 22 m として、ターゲットから 8 m の位置に 0.5 m はなして Q 磁石の doublet を置いた場合、入力ビームを太さ 1 cm ϕ 、発散角 10^{-3} rad とすると、ビームの最大振幅は、Q 磁石の位置でおこり、約 2.5 cm である。これに対してビームダクトの内径は 6 cm であるが、他の原因によるビームの発散も考えられるので、安全を見て 4 枚レンズ系を採用した。このレンズ系は中央に焦点を結ぶ対称形である。

Fig. 7.7 はこの 4 個の Q 磁石を用いて得られるビームの XZ, YZ 断面である。ビームの最大直径は、2 cm となり、また中性子ターゲット直前において、 X 方向、 Y 方向ともに完全集束する（合成マトリックスが、ターゲット直前で単位マトリックスになる）ようにした。したがって加速管出口におけるビームの条件が、そのままターゲットに伝送される。エネルギー幅 $\pm 10\%$ のビームに対しても、良好な伝送特性が得られる。実際に用いた値は、Fig. 7.2 の配置図のとおり、分岐磁石から約 5 m の位置に最初の doublet の Q_5, Q_6 、そこから約 10 m の位置に次の doublet (Q_7, Q_8) が置かれている。

7.3.3 ターゲット R への伝送（右折）

ターゲット R では、電子ビームはとくに幾何学的大きさを小さくする必要があるが、分岐磁石で偏向されているため、直進部に較べると問題がずっと難しくなる。Q 磁石が 2~3 個では不可能であることは簡単な計算で判る。4 個用いても困難であるので、5 個用いることにした。

設計にあたっては、次の場合が考慮された。

(1) 水平方向の運動については、

(a) 中心エネルギーにあるビームが ($\Delta p = 0$)、中心軌道位置において ($\Delta x = 0$)、角度の拡がりがある ($\Delta \theta \neq 0$)、場合。

(b) エネルギーが中心エネルギーからずれていて ($\Delta p \neq 0$)、偏向磁石を通るため $\Delta x = 0$ であるが大きな $\Delta \theta$ を持っている場合。
($\Delta \theta = -\alpha \Delta p / p_0$, ただし α は偏向角)。

(c) $\Delta p=0$, $\Delta\theta=0$ であるが, $\Delta x \neq 0$ のもの, すなわち平行ではあるが, 入射時にすでに幾何学的大きさがある場合.

(2) 垂直方向の運動については, 水平方向と同様であるが, ただ(1)の(b)の $\Delta x=0$ の場合でも $\Delta\theta$ がとくに大きくなることは, この場合には, 関係がなく考慮に入れる必要がない. $\Delta p \neq 0$ の場合には, 偏向磁石を通して角度の拡がりが生ずるほか, この電子線に対しては Q 磁石の焦点距離が変わってくることに注意しなければならない.

こうして決定された Q 磁石の配置を Fig. 7.8 に示す. 大まかに見ると, 伝送系の中心点 0 に関して対称に置かれている. Q_9, Q_{10} と Q_{12}, Q_{13} はとくに, 光源で本来角度の拡がりを持っているものをターゲット近辺に結像させる働きをしている. エネルギー分散のため生ずる角度の拡がりも, エネルギー分散が 5% 程度までならば, ターゲット近辺での大きさは十分に小さくなる. いずれにしても中心点近傍では, 中心軌道からのずれは小さい. $Q_9, Q_{10}, Q_{12}, Q_{13}$ だけの場合に具合の悪いのは, 第 1 に水平方向軌道で入射ビームが中心軌道に平行ではあるが, 位置がずれている場合である. 図のような Q_9, Q_{10} の組合わせレンズでは, 図に示されるように焦点 F' が相当前方に來ているので, 焦点を通った後, 中心軸から大きくずれてしまう.

第 2 には, エネルギー分散が -10% に達する電子線に対して実効焦点距離が短くなるため, 第 1 の場合と同様にいったん中心軸と交った後, 急速に中心軸からずれてしまう. これらの具合の悪い点に対して, Q_{11} が有効になる. Q_{11} がなくても良かった軌道は, いずれも中心点 0 の近傍で中心軸から余りずれていないため, Q_{11} の導入によってそれ程影響を受けない. Q_{11} を置く位置としては中心点よりもやや後方にずらせてあるが, これはこの方が前記の欠点を解決する上で良いばかりでなく, 例えば垂直方向の軌道の改良にも有効であるなど, 全体的にはすぐれていることが判明したからである.

Fig. 7.9 に, 計算機によるより厳密な計算結果を示す¹³⁾.

7.3.4 ターゲット LR, LC への伝送 (左折)

さきに 7.3.2 の (a) で述べたのと同じように, この部の伝送系は 2 つの要求を満たさなければならない. 第 1 にはエネルギーの揃った単色電子線の伝送であり, 第 2 には最大強度の電流の伝送である. 第 1 の要求のためにはスリットが必要になる. 第 2 の要求は前に述べたターゲット R への伝送系の場合と共通するが, 偏向磁石 1 により水平方向軌道は大きく曲げられているので, $\Delta p \neq 0$ の電子に対しては非常に大きな $\Delta\theta$ を持つことになる. さらにもう 1 つの偏向磁石 2 をうまく通さなくてはならないことが, 問題を一層難しくする. とくに偏向磁石 2 において垂直方向の拡がり小さくないと, 磁極間隙を適当

な値に抑えることができなくなり, 磁石が大きなものになってしまう.

この伝送系への入射ビームについて考慮した条件は, 前のターゲット R への場合と同様である. ただし, $\Delta p/p = \pm 0.1$ にも達するエネルギーの拡がりを持ったビームは, その横幅が非常に大きくなるので, その伝送は断念せざるを得ず, 拡がり $\Delta p/p = \pm 0.05$ までとした. また, ターゲット位置での幾何学的大きさを相当小さくすることも困難であり, このためには偏向磁石 2 の後で Q 磁石を入れなくてはならないが, これは後日実際の使用にあたって設計することとした.

決定された配置図を Fig. 7.10 に示す. Q_{14} から Q_{18} まで 5 個の Q 磁石からなっているのは, ターゲット C へ行くものと同じである. Q_{14}, Q_{15} と Q_{17}, Q_{18} が対称でないのは, Q_{14} と Q_{15} の間にスリットが置かれるためである. 中央の Q_{16} の作用は, 前の Q_{11} の場合と同様で, とくに平行に入射するビームを集束させるためである.

Fig. 7.11 に計算機による計算結果を示す.

7.3.5 加速管部における伝送

第 1 加速管から出た電子ビームを, Q 磁石の doublet だけ用いて, 7.2 の (b) で述べた初期条件の下に, 分岐磁石まで導くことは可能である. しかし初期条件の不確定さを考え, 安全を期して 4 個の磁石を用いることにした.

まず, 加速管による加速の効果を無視して考える. これは第 2 加速管以後にマイクロ波が供給されていない場合に相当する. 計算は容易であって, この結果決定された配置を Fig. 7.12 に示す. Q_1, Q_2 および Q_3, Q_4 は, それぞれ doublet を形成し, それぞれの焦点距離が等しく, 対称的に配置されている. 最初の doublet の像空間焦点が後の doublet の物空間焦点になるように, 各磁石が定められ, とくに垂直面における第 2 doublet の像空間焦点は, はば分岐磁石の位置と一致する. 水平面では, 分岐磁石の位置は像点の位置になるようにとられている.

つぎに, 加速管にマイクロ波が供給され, 電子が加速を受ける場合の軌道を考える. 結果を Fig. 7.13 に示す. 加速により電子は加速管軸に対数的に平行になろうとする結果, 電子軌道の拡がり前の場合に較べて, ずっとおさえられるのがわかる. この計算の初期条件等として用いたのは次の値である. $\gamma_0 = 20$ MeV, $z_0 = 2$ m で $r_0 \leq 5$ mm, $\theta_0 \leq 10^{-3}$ ラジアンであり, 加速電場の強さは $\gamma' \sim 10$ MeV/m である.

7.4 ビーム伝送系の構成部品

ビーム伝送系には, 電子ビームを集束させるための Q 磁石, ビームを曲げるための偏向磁石, 分岐磁石, steering コイル, 地磁気を消去するための degauss コイル, ビー

ム通路における漏洩磁場の遮蔽のための磁気シールド、ビームのエネルギーを制限するためのスリット、ビームをしぼるためのコリメータ等が使用されている。これらの構成部品の設計と製作について述べる。

7.4.1 Q磁石

前述のビーム軌道解析から求められたQ磁石については数種類も多いので、旧 linac に使用したものの中で利用可能なものはなるべく流用することを考えた。あらたに製作したものは5種類計13個であったが、後に加速管の途中でのビーム集束のために6個が追加された。

Q磁石の焦点距離を軌道解析から求め、この焦点距離が得られるように鉄芯、コイルの ampere-turn、電源容量等の計算が行なわれた。レンズの焦点距離を $f(\text{cm})$ 、ビームの運動量を $H\rho(\text{Gauss} \cdot \text{cm})$ 、Q磁石の口径を $2r(\text{cm})$ 、Q磁石の軸方向の有効長を $l(\text{cm})$ とすると、薄レンズ近似により

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{H\rho} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\partial B_y}{\partial x} \right) dz \approx \frac{1}{H\rho} \left(\frac{\partial B_y}{\partial x} \right) \cdot l \quad (7.20)$$

の関係式が得られる。磁場勾配と ampere-turn と口径 $2r$ の間には、

$$2 \cdot \frac{4\pi}{10} NI = r^2 \left(\frac{\partial B_y}{\partial x} \right) \quad (7.21)$$

の関係がある。ここに NI は ampere-turn/pole である。この式は鉄芯が非飽和で ($\mu \gg 1$)、磁石の端における磁界のはみ出しのない場合に適用される。

180 MeV の電子ビームに対し、焦点距離 1.6 m、口径 7.0 cm、有効磁極長 25 cm として、ampere-turn NI を (7.21) 式より求める。

$$\left. \begin{aligned} H\rho &= \frac{me\beta}{e\sqrt{1-\beta^2}} = 6.02 \times 10^5 \text{ Gauss} \cdot \text{cm} \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} &= \frac{H\rho}{fl} = \frac{6.02 \times 10^5}{160 \times 25} = 150 \text{ Gauss/cm} \\ NI &= \frac{10 \times (3.5)^2 \times 150}{12 \times 2} = 760 \text{ ampere-turn/pole} \end{aligned} \right\} \quad (7.22)$$

コイルの巻線の電流密度を 1A/mm^2 、space 率を 1.5 として、鉄芯の大きさを決定した。磁石のポール・ピースの形状は、中心磁場において4極場以上の高次成分が増えないように、直角双曲面に内接する円で近似された。このようにして全部のQ磁石の鉄芯の大きさ、コイルの ampere-turn などを求めた。とくに Q_9, Q_{10} は、設置場所が狭く、磁石のヨークを 45° 傾けた。これにより Q_9, Q_{10} のヨークと、直進部ビームダクトの距離をかなり近づくことができた。

新しくつくられたQ磁石は、180 MeV の電子ビームまで偏向集束可能である。Fig. 7.14 の上部に、大きさの異なる4種類のQ磁石(A, C, D, E型)の寸法を示し、下部に型の異なるB型の図を示す。Q磁石 $Q_{7,8,11,12,13}$ は日立製作所でつくられ旧 linac に用いられていた

ものであるが、120 MeV 位までは、集束できるように、電源容量を強化した。このためコイルの温度上昇は多少大きくなるが、使用上差しつかえないと判断した。加速管途中の小型のQ磁石については、ampere-turn の値がやや大き過ぎたが、励磁電流を下げて所要の集束性能を得ることができた。

18個のQ磁石の性能概要を TABLE 7.1 に示す。Photo 7.3 の右前方には直進伝送系におけるQ磁石(Q_6, Q_7)が、手前左には右折伝送系のQ磁石(Q_{11})がみられる。

最初のビームテストの結果、出力ビームの幾何学的拡りがあまり小さくできないことが判明したので、各加速管の間にQ磁石が追加設置された。これらのQ磁石は、Fig. 7.3 に示されているが、E型と同型で長さが短くて ampere-turn も小さい。この磁石の鉄芯は当研究所の工作場で製作し、コイルは研究室で巻かれた。このQ磁石の性能の測定は、磁場測定と、floating wire 法の両方で行なわれた。Fig. 7.15 (a) および (b) に軸方向磁場分布と励磁曲線を示す。追加したQ磁石については、また磁場の中心軸がQ磁石の幾何学的中心軸と一致しているかどうかを調べた。方法は電磁石のポールピースの間に floating wire を通しておく。Q磁石を強く励磁しておき、wire に数アンペアの電流を流し、wire の動く向きが反転する位置をさがす。この方法で磁場中心は、0.2 mm 程度の精度で求められ、幾何学的中心との差はほとんど認められなかった。

7.4.2 分岐磁石

第5加速管を出た電子ビームは実験に応じて3方向に分岐される。これに使われるのが分岐磁石であり、その特性を TABLE 7.2 に示す。この磁石は電子ビームをパルスごとに3方向に分岐することができる交流磁石である。交流磁石のビーム偏向角を大きくすると高価になり、また、交流電源の設計が難しくなるので、偏向角は左右それぞれ $4^\circ 56'$ に決められた。

この磁石は現在直流磁石として使用され、とくに左にビームの偏向を行なう場合は、linac のビームの調整にも使用されている。現在この磁石にはさまれている真空槽はステンレス製であるが、磁石の交流運転を行なう際にはセラミックスの真空槽が使用される。Photo 7.4 は分岐磁石と3つの伝送系の分岐点にある真空チェンバーである。

7.4.3 偏向磁石

Fig. 7.2 からわかるように、偏向磁石1の傍をターゲットCへ直進する径路が通るために偏向磁石としてH型ヨークは設置が不可能なので、C型ヨークが採用された。偏向磁石2はH型ヨークである。H型では、真空槽を挿入するために、ポール・ピースとヨークの一部を取外し、再現性を持って組み立てられるようにする必要がある。

偏向磁石 1 の β_1 と偏向磁石 2 の β_2 は, 前に述べたように零でなく連続可変にしておく (磁石端の部分だけを回転できるような構造にする) ことが望ましいが工作や機構が複雑になるので, 前に述べた値の外, $\beta_1 = \beta_2 = 0$ の値がとれるように別々に鉄片をとりつける方式をとった。

設計上の問題点は, 漏洩磁場の形, 漏洩磁束の中心磁束に対する割合, および磁芯の飽和の影響等である。これらの点については文献 19), 20) のデータを参考にし評価した。偏向磁石 1 の漏洩磁場はターゲット C へ行く電子線に影響を与えるので, できるだけ小さくする必要があった。

こうして決定された電磁石の特性のうち, 主要なものを TABLE 7.3 に示す。これに基づいて設計, 製作された偏向磁石の図面を Fig. 7.16 および Fig. 7.17 に示す。Photo 7.5 は偏向磁石 1 である。偏向磁石の手前に直進伝送系のダクトが見え, その前のダクトは右折伝送系のものである。

中性子飛行管の中心軸の高さは, 直進ビーム軸の高さより 15 cm 低く設置されている。これは中性子ターゲットを直進ビーム軸におき中性子を発生させ, 中性子ターゲットの下方に中性子のモデレータを置き, モデレータから放出する中性子のみが中性子飛行管を通過するようにするためであった。この配置で中性子実験を行なったところ, 中性子強度が予想以上に弱いことが判った。そこで中性子ターゲットを中性子飛行管の高さに下げて, 中性子の発生を行なうことにした。このためにビームを下方に偏向する必要がある。偏向磁石 3 が製作された。ビームを中性子ターゲットの定った位置に厳密に入射する必要は必ずしもないので, この磁石のポール・ピースの形は矩形である。磁極間隔は 62 mm と広くし, ポール・ピース断面は 120 mm (高) 200 mm (長) とした。この磁石は中性子ターゲットの前方約 125 cm の位置に水平面に対し約 6° 傾けて設置された。

7.4.4 Steering コイル

ビームは伝送系の途中で地磁気, 各種磁石の漏洩磁場のために偏向を受ける。これらの影響を補正するために, steering コイルが随所に設けられた。この設置位置は各々の加速管の入口の 5 カ所 (Fig. 7.3 における S_1 から S_5) と, 分岐磁石を出た後と, 直進部においては Q_6 の直後, ターゲット R 側においては Q_{10} の直後に設けられている (Fig. 7.2)。

加速管系の steering コイルの定数と磁場分布を Fig. 7.18 に示す。磁場の積分値は $\int_{-\infty}^{\infty} H_z dz = 420$ (Gauss · cm/amp) である。この steering コイルによる偏向角度を 2×10^{-3} ラジアン以下とすると, 2 アンペア以下の励磁でも, どの加速管に対しても充分 steering を行なうことができる。加速管を出た後の直進部およびターゲット R 側の steering コイルは, 130 MeV の電子ビームを 3×10^{-3}

ラジアンだけ偏向する条件で設計された。このためには $\int_{-\infty}^{\infty} H_z dz = 1300$ Gauss · cm/amp が必要である。実際のコイルは, 550 (長) $\times$ 65 mm (高) の矩形コイル 1.2 ϕ ホルマル線の 160 巻でエポキシ樹脂真空含浸のものである。これを 2 個ずつ組合わせて水平と垂直の偏向を行なう。

7.4.5 Degauss コイル

ほぼ東西に水平に走る電子ビームに働く地磁気成分 H_z は, ~ 0.3 Gauss で伏角 $\sim 60^\circ$ である。これによる 100 MeV のビームの偏向は, 進行距離を 10 m とすると, 約 1 cm である。この偏向はエネルギーに反比例するので, エネルギーが低い場合はかなり問題になり, 地磁気を打消す必要がある。このために加速管に沿って電流を流してその磁界により打消す。Fig. 7.19 に示すようにビームの位置を中心とする正六角形の 4 つの頂点に導線を配置する場合が, もっとも磁界の均一性がよい。第 3, 4, 5 加速管について, あらかじめ伏角を測定して, それに合わせて導線を配置した。第 1 加速管については, 集束コイルが巻いてあるために, また第 2 加速管については取付が困難であるために degauss コイルは用いられていない。Fig. 7.19 は degauss コイルのモデル実験であり, ある電流値でほぼ完全に消磁される様子を示す。磁場測定は回転型磁束計とオシロスコープを用いて, 発生する交流電圧を測定することによって行なわれた。

7.4.6 磁気シールド

分岐磁石の直後の伝送系には, 種々の磁石が配置されているので, 一つの伝送系の磁石磁界が他の伝送系に洩れて, その伝送系におけるビームの軌道に影響を与えることが考えられる。とくに偏向磁石 1 の励磁中, 磁極のすぐ近くを通過する直進部ビームにかなり強い影響を及ぼす。このために steering コイルによる補正が偏向磁石 1 の励磁電流の変化に応じて必要になる。これを避けるために, 磁気シールドパイプによる磁気遮蔽を行なった。

高い透過率を持つ磁気シールドパイプ (東北金属製, TMC-V 及び TMB 材使用) をビーム・ダクトの外壁にぴったり合う寸法に作って, ビーム・ダクトのフランジを溶接する前にはめ込んだ。外部磁場はこのパイプにより 1/100 程度に減衰する。偏向磁石 1 の近辺ではこのパイプの上に安全のために, 直径 120 mm の磁気シールドパイプをさらにかぶせて二重磁気遮蔽を行なった。 $Q_9, 10$ および Q_{11} のヨークに近い部分のシールドは一重である。他の磁石付近ではあまり問題にならないと考えて磁気遮蔽は行なわなかった。Photo 7.5 において偏向磁石 1 の前に直進ビーム・ダクトと磁気シールドが見られる。

この磁気シールドは, 材料を成形加工した後, 水素炉中で焼鈍し, 磁氣的歪を取ってから防錆塗装したもので, ショックや変形は禁物なので取扱いは注意が払われ

た。

7.4.7 スリット

ターゲット LC と LR において、エネルギーの揃ったビームが要求されるときには、偏向磁石 1 による水平面集束点 (horizontal focus) にスリットを入れて必要なエネルギー幅のビームだけが通過するように開口する。このスリットを Q_{14} と Q_{15} の間に置くという条件で軌道解析を行なうと、スリットの位置が偏向磁石の中心から 1.66m で、偏向磁石の入射側のポール・ピースの角度 β が 16° のとき、最高の分解能 ($1.3 \text{ cm}/(\Delta E/E \times 100)$) が得られる。スリットの材料はなるべく Z の小さいものを使い、X 線の発生をへらし、ionization loss により電子を吸収するようにする。このためアルミブロック、銅ブロックに水を通す方式も検討されたが、結局工作上的の問題から、ステンレス水箱の方式が採用された。工作上的の諸数値を TABLE 7.4 に示す。

水箱の移動は可逆モータで行ない、位置はモータに連動したヘリポットの電圧で読み取る。スリットの概要図を Fig. 7.20 に示す。高真空中で 30 l/min の冷却水の流れている箱をストローク 40 mm も動かすのは、工作上困難な問題を含んでいたが、原研工作工場のスタッフにより解決された。Photo 7.6 はスリットの写真である。

7.4.8 コリメータ

分岐磁石を通過した後、ビームのうち中心エネルギーからのずれが大きい部分は、ビーム・ダクトの壁面に当る。これにより電子線による発熱、吸着ガス放出、X 線の発生、ビーム・ダクトの残留放射能などの好ましくない現象が起り、ターゲット LC および LR における実験のバックグラウンドを増加させる結果になる。これらを避けるためにビーム・ダクトの数カ所に電子ビームをしぼるコリメータを入れる。ビームコリメータは、分岐磁石を出た後の約 2.5m の位置と、各偏向部に 1 個ずつ使用している。構造は入口側が広く出口側は小さくなっている矩形断面のテーパ管で、外側は冷却水が通されている。コリメータの寸法を TABLE 7.5 に示す。

7.5 Floating wire 法による磁石の性能測定

電子ビームの磁石による偏向、集束を求めるには、直接磁場分布を測定し、それを基礎に軌道計算を行なう方法④と、ここで述べる floating wire 法⑤がありそれぞれ特長がある。④の場合、磁場を空間的に精度よく多数の点で測定する必要がある。また、得られた磁場分布から、軌道計算を実際に行なうことは一般には大変やっかいなことである。⑤の floating wire 法は wire の形が粒子軌道の形を simulate するという意味で、大変面白い方法ではあるが、高い精度を上げるのは困難である。Floating wire 法の原理は 7.5.2 にのべる。

7.5.1 磁石の性能測定

Floating wire 法で測定された磁石は、加速管途中の $Q_1, Q_{2,3,4}$ のうちの 2 個と、テスト用小型偏向磁石である。ビームの軸に沿って細い銅線を張り一端を固定し、他端は摩擦のごく小さい滑車を通して、錘をつるして、wire に一定の張力をかける。この wire の両端に電流を流すためのリード線を出し、それに数アンペアの直流を流す。Wire としては細い銅線 (2.3 mg/cm) を用いた。Wire の位置を精度よく読み取るために、4 カ所にステンレス製の物指を wire と直角に置く。Wire との距離は 3~5 mm であり、wire の位置読取の精度は、 $\sim 0.3 \text{ mm}$ 以下である。Q 磁石の中心軸と wire を一致させるのに充分注意した。Q 磁石の電流 I_Q を一定 ($I_Q = 2.0 \text{ A}$) にして、wire の電流 I_w を -2.5 アンペアから 2.5 アンペアまで 0.5 アンペアおきに变化させた。滑車の位置を移動させて、wire の曲りを読取る。このようにして得られた wire 軌道の一例を Fig. 7.21, Fig. 7.22 に示す。摩擦の影響を調べるため、錘の重さと電流を同時に 1.5 倍したが、wire の形は全く変化しなかった。

光軸に平行に入射する実際のビームの集束性を調べるために floating wire 法で測定したデータを Fig. 7.23 に示す。Floating wire が光軸を横切る点が b である。 $1/b$ と wire 電流 I_w をプロットしたものが Fig. 7.24 である。この関係は Q 磁石のレンズ公式

$$\begin{aligned} \frac{1}{f} &= K \sin KL = K^2 L - \frac{K}{6} (KL)^3 + \dots \text{focus の場合} \\ &= K \sinh KL = K^2 L + \frac{K}{6} (KL)^3 + \dots \text{defocus の場合} \end{aligned} \quad (7.23)$$

で計算することができる。Fig. 7.25 の実線は (23) 式の右辺の第一項のみを入れた場合の計算で、点線は第 2 項まで入れた場合である。ここに f は薄レンズの公式

$$1/b = 1/f - 1/a$$

から求められるが、 $a \rightarrow \infty$ であるので

$$1/b = 1/f$$

である。

Floating wire の軌道と実際の粒子の $H\rho$ (Gauss·cm) との関係式 $1/H\rho = I_w/10T$ (amp/dyne) より、

$$\frac{1}{f} = \frac{I_w}{10 \cdot T} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial B_y}{\partial x} dz \quad (7.24)$$

が得られる。

Floating wire のデータから磁場勾配の軸方向の積分が得られた。

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial B_y}{\partial x} dz = 6.00 \times 10^3 \text{ Gauss (励磁 } 2.00 \text{ A の時)} \quad (7.25)$$

Q 磁石を No.2 に取りかえて、同様な wire 測定を行なったが、No.1 のデータとの一致は非常に良い。No.2 については

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\alpha B_y}{\partial x} dz = 5.90 \times 10^3 \text{ Gauss (励磁 2.00A の時)} \quad (7.26)$$

メーカ (住友特殊金属) の磁場測定の実験によると, 570 Gauss/cm, at 2.2A, $L_{\text{eff}} = 11.4 \text{ cm}$ であり,

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial B_y}{\partial x} dz = 570 \times 11.4 \times \frac{2.0}{2.2} = 5.90 \times 10^3 \text{ Gauss} \quad (7.27)$$

(励磁 2.0A に換算)

となり, floating wire の測定とよく一致している。

Linac の第 1 加速管から得られるビーム特性をモニターするために, 最初のテストの際に, 第 1 と第 2 加速管の間に小型偏向磁石が組込まれた。ポール・ピースの直径 12 cm, ギャップ 3.65 cm, 偏向角 20° で最大励磁 5000 Gauss のとき 70 MeV ビームを曲げることができる。この磁石のビームの軌道偏向特性は, floating wire 法で測定された。最初のビームテストが終るとこのモニター磁石は取払われた。

7.5.2 Floating wire 法の原理

磁場のある領域を横切って A, B の二点間に細い導線を一定の張力で張り (滑車に錘を下げるなどにより), これに電流を流す。Wire は磁場から力を受けてたわみ, 張力と電磁力のつり合う平衡位置に落ち着く。この位置でのつり合い条件は, Fig. 7.25 に示されるように wire の各微小部分で,

$$F_{\text{EM}} = F_T \quad (7.28)$$

が成立する。ここに F_{EM} と F_T は次式で表わされる。

$$|F_{\text{EM}}| = \frac{1}{10} I_w \cdot H \cdot \rho d \theta \quad (7.29)$$

$$|F_T| = 2T \sin \frac{d\theta}{2} \approx T d\theta \quad (7.30)$$

これより,

$$H\rho \text{ (Gauss} \cdot \text{cm)} = \frac{10 \cdot T}{I_w} \text{ (dyne/amp)} \quad (7.31)$$

が得られる。

張力 T , wire の電流は wire に沿って一定であるから, wire の形は $H\rho$ 一定の粒子軌道を simulate している。荷電粒子では, $H\rho = \frac{p}{e} = \frac{mc\beta}{e\sqrt{1-\beta^2}}$ であり, 電子の場合は, $\sim 10 \text{ MeV}$ 以上では, 電子エネルギー $E(\text{MeV})$ とすると, 近似的に $H \cdot \rho \text{ (Gauss} \cdot \text{cm)} = 3.35 \times 10^3 E(\text{MeV})$ となる。250 MeV までの正確な $H\rho$ と β の値を TABLE 7.6 に示す。

7.6 伝送特性

現在までに実験的に得られたこの伝送系の特性について, 簡単に述べる。これは linac の加速性能に関する結果と密接な関係があるが, それについては, 後述される。

ビーム伝送特性では, 伝送系の途中におけるビームの

大きさが重要であるが, このための特別の測定は行なわなかった。ただ linac の試運転時に, 第 1 および第 3 加速管の後に一時的に小さい電磁石を据付けてビームを偏向させ, エネルギー, 電流値, およびビームの大きさ等について観測した。途中での電流強度は, ビームモニターで測定することができる。ターゲット位置でのビームの大きさは, ルサイト, ガラス等のビームによる照射の観測結果から推定された。ビームの大きさ等の特性は, linac の調整の仕方により複雑に変化する。それでこれから述べる数値は概略のものである。

まず, 第 5 加速管を出た後, 直進してターゲット C へ行くビームについて述べる。この系では実験に使われるいろいろな条件のビームに対し, いずれも伝送率はほぼ 100% である。ターゲットの位置でのビームの大きさは直径 7~8mm と考えられる。

ターゲット R へ行くビームについてはとくにビームの大きさが重要で, このためつぎの測定が行なわれた。細い銅線をターゲット位置に並べて照射し, $^{63}\text{Cu}(\gamma, n)^{62}\text{Cu}$ 反応で生成する半減期 10 分の ^{62}Cu の崩壊を観測し, これから電子ビームの大きさを推定する。測定の結果は, 垂直方向の半値幅 16 mm, 水平方向 13 mm であった。大きさとしては 10 mm ϕ 程度が望ましく, これよりはやや大きくなっている。この原因としては, ビームが初期においてすでに相当に広がっているためと考えられる。ターゲット LC, LR へ行く系は, 現在テスト実験中であるが, 大部分のビームを伝送できることが確かめられた。

最後に加速管部の伝送系について述べる。この部分では一つの問題がある。第 1, 2 加速管の disk 孔の口径が 26mm に対し, 第 3 加速管以後はもっとも小さい口径は電子の出口部で 18 mm と小さい。このため現在約 20% の電流が第 3 加速管入口で失われる。これは入射ビームが当初予想したよりずっと広がっているためと考えられる。そこで第 3 加速管入口には小さなコリメータを設置してある。このビームの広がりを抑えるのには, 入射装置の伝送系の改良が必要で, これは今後に残された問題である。

第 3 加速管以後では, 低エネルギー電子ビームの伝送の際には特別な注意が必要である。実験上 $\sim 35 \text{ MeV}$ のビームもしばしば必要である。この場合に第 4, 第 5 加速管にはマイクロ波が供給されないと, ビームが広がり易くなる。そこで各加速管へのマイクロ波電力等を調整して, 第 4 加速管までマイクロ波を供給する方が伝送特性が良くなる。現在, 30 MeV 位までのビームの全電流を大体伝送することができる。

7.7 ビーム伝送系の据付け

加速管, Q 磁石, 分岐磁石および偏向磁石は精度良く配置する必要がある。据付けはレーザー光線によって粗く整列させて, その後トランシットで覗きながら微細に調整した。Q 磁石は幾何学的な中心軸をビーム軸と合わ

せた。加速管と諸磁石の整列の精度は加速管部では 0.5 mm 以下、その他のビーム伝送系では 1 mm 以下である。

7.8 電磁石用直流電源

Linac には電子ビームを集束させたり曲折させるために各箇所電磁レンズや、Q 磁石や、偏向磁石が使用されている。これら磁石のコイルの規格を TABLE 7.7 に示す。磁石の励磁電源は安定回路により、用途に応じて 0.1% より 1% の範囲で電流の安定化を行なっている。これらの電源回路は標準のシャーシに組込まれ、コントロール室のパネル・ラックに入れられている。電流値の設定は、電源回路に設けられたヘリポットを手動することによって行なわれる。

小型磁石の励磁電源の整流回路は単相全波整流方式で、出力電圧は固定されている。偏向磁石等の大型励磁電源の整流回路は 3 相全波整流方式が採用されている。また、これらの安定回路に使用されているシリーズ・トランジスタにかかる電圧を規格以内に押えるために、交流入力電圧を直流出力電流に応じて変化させる。交流入

力電圧の変化は、安定回路の直流出力電流値を設定するヘリポットと連動された電動式摺動変圧器により、自動的に行なわれる。これらの整流回路の出力は安定回路に供給される。

安定回路の例を Fig. 7.26, Fig. 7.27 に示す。出力電流に直列に接続された基準抵抗 R_s にかかる電圧と、別に用意された基準電圧との差が差動増幅器によって増幅され、シリーズ・トランジスタにフィード・バックされて出力電流の安定化が行なわれる。差動増幅器は operation amplifier μ PC 55 が使用され、プリント基板に組込まれている。すべての安定回路には同じ差動増幅器が使われている。シリーズ・トランジスタは安定回路の出力の電圧と電流に応じて、種類と個数がきめられている。

TABLE 7.8 に用いられたトランジスタの規格を示す。

Fig. 7.28 に偏向磁石用の定電流回路を示す。出力は 130 V, 20 A である。シリーズ・トランジスタとして 18 コの 2SD208 が並列に使用されている。これらのトランジスタは水で冷された銅板にとりつけられている。また、シリーズ・トランジスタ保護のために過電圧検出回路と、温度検出回路が設けられている。

TABLE 7.1 Specifications of Q-magnets. A, B, C and D types are manufactured by Sumitomo Special Metals Co., those with * mark (used for old JAERI linac) are by Hitachi Ltd, and F type by JAERI.

Type	A	*	B	*	*	C	D	E	F
Number	Q _{5,6}	Q _{7,8}	Q _{9,10}	Q ₁₁	Q _{12,13}	Q _{14,18}	Q _{15,16,17}	Q _{1,2,3,4}	
Focal length (m)	1.6 min	1.0	0.7	3.0	1.0	0.6	0.7	2.0	2.0
Aperture (mm)	70	120	88	120	120	125	88	42	70
Pole length (mm)	200	100	200	100	100	200	200	100	80
Maximum magnetic field gradient (G/cm)	150	500	350	220	400	390	350	70	70
Dimension of the pole piece (mm)	240×240	650×650	320×320	480×480	650×650	420×420	320×320	170×170	170×170
Magnetomotive force (ampere turn)	740×4	7000×4	2500×4		7000×4	6100×4	2500×4	1000×4	150×4
Number of turns (per pole)	250	2800 3000	600	2800	2800 3000	1250	640	450	150
Conductor dia. (mm)	2.0		2.0			2.0	2.0	1.4	1.6
Maximum current (A)	3.0	2.5	4.2	1.2	2.5	4.9	3.9	2.2	
Maximum voltage (V)	10.5	250	32	200	250	103	37	20	
Temperature rise (°C)	~10		~30			~30	~20	~30	

TABLE 7.2 Switching magnet (A. C. magnet) main specifications

Parameters	
Type	C
Gap length (mm)	35
Maximum magnetic field (gauss)	D. C. 2730 A. C. 2120
Deflection angle to left or right	4°56' each
Central orbit radius (mm)	2200
Magnetic field uniformity	less than ± 1 %
Pole piece area (mm ²)	95×120
Silicon steel thickness (mm)	0.1
Magnetomotive force (ampere turn)	D. C. 9100 A. C. 7100
Number of coil turns	366

TABLE 7.3 Deflection magnet main specifications

Parameters	Magnet	Deflection magnet 1	Deflection magnet 2
Type		C	H
Gap length (mm)		40	40
Maximum magnetic field (gauss)		8,000	8,000
Deflection angle (mm)		45	50
Central orbit radius		750	750
Pole piece area (mm×mm)		160×254	160×589
Maximum allowable difference in gap length (μ)		± 50 (within 30 mm on either side of central orbit) ± 100 (along central orbit)	± 50 (within 30 mm on either side of central orbit) ± 200 (along central orbit)
Angle between the incident pole edge and the normal of central orbit (degree)		0 or 16	0
Angle between the emerging pole edge and the normal of central orbit (degree)		0	0 or 34
Magneto-motive force (ampere turn)		3.2×10^4	3.2×10^4
Maximum voltage (V)		130	150
Maximum current (A)		20	20
Number of coil turns		1600	1600
Insulation resistance of the coil (M Ω)		> 2	> 2
Temperature rise (°C)		≤ 30	≤ 30

TABLE 7.4 Characteristics of slit

Dimensions of water box (mm ³)	400×70×60
Velocity of the box (mm/sec)	1.1
Stroke of the box on each side (mm)	0~40
Slit width (mm)	0~80
Water flow (l/min)	30
Maximum allowable difference in slit width (mm)	1
Material	SUS 27
Vacuum (torr)	$< 1 \times 10^{-8}$

TABLE 7.5 Dimensions of collimators

Position	Inlet (mm)	Outlet (mm)	Length (mm)
Right hand side (to target R)	80×40	60×20	300
Left hand side (to target LR)	80×40	50×20	300

TABLE 7.6 $H\rho$ and β values versus electron energy

$H \cdot \rho = P/e = (mc\beta)/e(1-\beta^2)^{1/2}$		$(1-\beta^2)^{1/2} = 1/(1+E/mc^2)$		E = KINETIC ENERGY		H = MAGNETIC FIELD (GAUSS)		ρ = RADIUS (CM)	
ENERGY (MeV) E	MOMENTUM (GAUSS·CM) $H \cdot \rho$	BETA β	ENERGY (MeV) E	MOMENTUM (GAUSS·CM) $H \cdot \rho$	ENERGY (MeV) E	MOMENTUM (GAUSS·CM) $H \cdot \rho$	ENERGY (MeV) E	MOMENTUM (GAUSS·CM) $H \cdot \rho$	ENERGY (MeV) E
1	4743.	0.94108	51	171815.	101	338602.	151	505386.	201
2	8201.	0.97908	52	175150.	102	341937.	152	508721.	202
3	11587.	0.98935	53	178486.	103	345273.	153	512057.	203
4	14950.	0.99356	54	181822.	104	348609.	154	515393.	204
5	18304.	0.99569	55	185158.	105	351944.	155	518728.	205
6	21651.	0.99692	56	188494.	106	355280.	156	522064.	206
7	24996.	0.99768	57	191829.	107	358616.	157	525400.	207
8	28338.	0.99820	58	195165.	108	361951.	158	528735.	208
9	31680.	0.99856	59	198501.	109	365287.	159	532071.	209
10	35020.	0.99882	60	201837.	110	368623.	160	535407.	210
11	38359.	0.99901	61	205172.	111	371958.	161	538743.	211
12	41698.	0.99917	62	208508.	112	375294.	162	542078.	212
13	45036.	0.99928	63	211844.	113	378630.	163	545414.	213
14	48374.	0.99938	64	215180.	114	381966.	164	548750.	214
15	51711.	0.99946	65	218516.	115	385301.	165	552085.	215
16	55049.	0.99952	66	221851.	116	388637.	166	555421.	216
17	58386.	0.99957	67	225187.	117	391973.	167	558757.	217
18	61723.	0.99962	68	228523.	118	395308.	168	562092.	218
19	65060.	0.99966	69	231859.	119	398644.	169	565428.	219
20	68396.	0.99969	70	235194.	120	401980.	170	568764.	220
21	71733.	0.99972	71	238530.	121	405315.	171	572099.	221
22	75070.	0.99974	72	241866.	122	408651.	172	575435.	222
23	78406.	0.99976	73	245201.	123	411987.	173	578771.	223
24	81742.	0.99978	74	248537.	124	415322.	174	582106.	224
25	85079.	0.99980	75	251873.	125	418658.	175	585442.	225
26	88415.	0.99981	76	255209.	126	421994.	176	588778.	226
27	91751.	0.99983	77	258544.	127	425329.	177	592113.	227
28	95088.	0.99984	78	261880.	128	428665.	178	595449.	228
29	98424.	0.99985	79	265216.	129	432001.	179	598785.	229
30	101760.	0.99986	80	268552.	130	435337.	180	602120.	230
31	105096.	0.99987	81	271887.	131	438672.	181	605456.	231
32	108432.	0.99988	82	275223.	132	442008.	182	608792.	232
33	111768.	0.99988	83	278559.	133	445344.	183	612127.	233
34	115104.	0.99989	84	281894.	134	448679.	184	615463.	234
35	118440.	0.99990	85	285230.	135	452015.	185	618799.	235
36	121776.	0.99990	86	288566.	136	455351.	186	622134.	236
37	125112.	0.99991	87	291902.	137	458686.	187	625470.	237
38	128448.	0.99991	88	295237.	138	462022.	188	628806.	238
39	131784.	0.99992	89	298573.	139	465358.	189	632141.	239
40	135120.	0.99992	90	301909.	140	468693.	190	635477.	240
41	138456.	0.99992	91	305244.	141	472029.	191	638813.	241
42	141792.	0.99993	92	308580.	142	475365.	192	642148.	242
43	145128.	0.99993	93	311916.	143	478700.	193	645484.	243
44	148464.	0.99993	94	315252.	144	482036.	194	648820.	244
45	151799.	0.99994	95	318587.	145	485372.	195	652155.	245
46	155135.	0.99994	96	321923.	146	488707.	196	655491.	246
47	158471.	0.99994	97	325259.	147	492043.	197	658827.	247
48	161807.	0.99994	98	328594.	148	495379.	198	662162.	248
49	165143.	0.99995	99	331930.	149	498714.	199	665498.	249
50	168479.	0.99995	100	335266.	150	502050.	200	668834.	250

TABLE 7.7 Maximum current and voltage values of various electric magnets

Type of Q-magnets, Number	Max. current (A)	Max. voltage (V)	Magnet type	Max. current (A)	Max. voltage (V)
A Q _{5,6}	3.0	10.5	Switching magnet	25	13
Q _{7,8}	2.5	250	Deflection magnet 1	20	130
B Q _{9,10}	4.2	32	Deflection magnet 2	20	150
Q ₁₁	1.2	200	Deflection magnet 3	12	70
Q _{12,13}	2.5	250			
C Q _{14,18}	4.9	103			
D Q _{15,16,17}	2.2	37			
E Q _{1,2,3,4}	2.2	20			
F	2.2	20			

TABLE 7.8 Transistors specifications

NEC	2SD73	2SD206	2SD207	2SD208
PC	60W	150	150	150
VcB	100V	50V	100V	150V
IC	5A	10A	10A	10A
HpE	25	10~20		

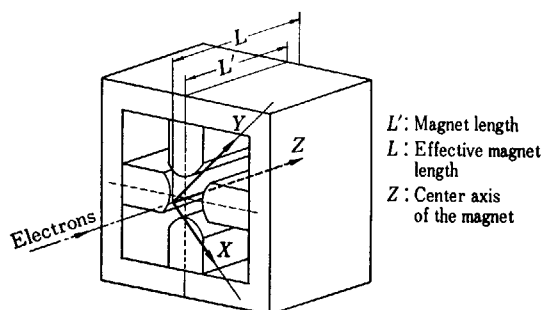


Fig. 7.4 Coordinate system for Q-magnet. L is a little larger than L' due to the fringe fields.

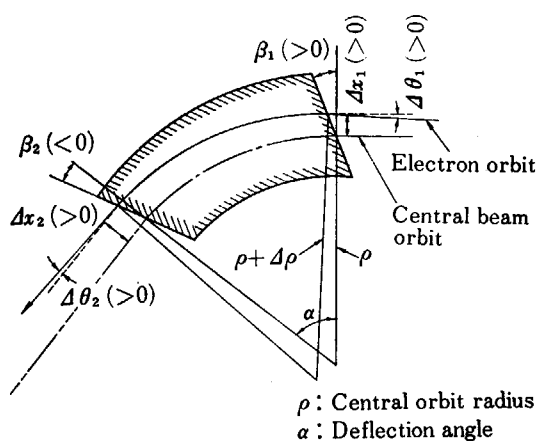


Fig. 7.5 Electron orbit diagram in a uniform bending magnet. Shaded area with oblique lines indicates the effective pole piece position.

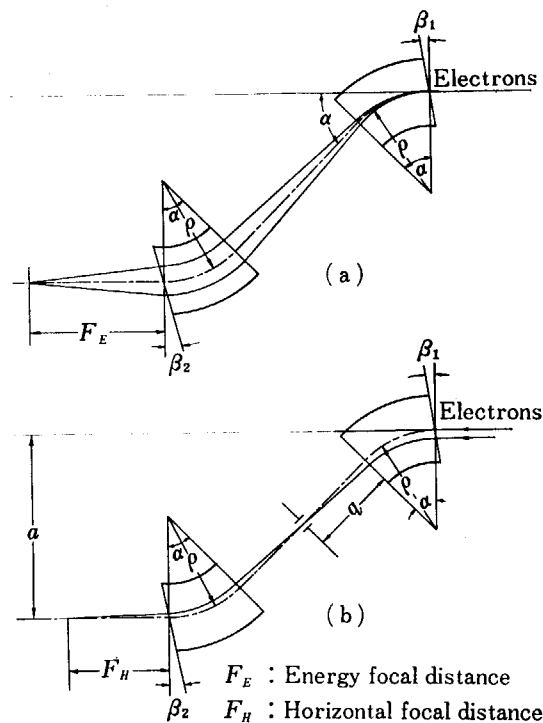


Fig. 7.6 Orbit diagrams of two beam components in two deflection magnets. (a) Two components differ in energy but not initial geometry. (b) Two components have same energy but differ in their horizontal entrance position.

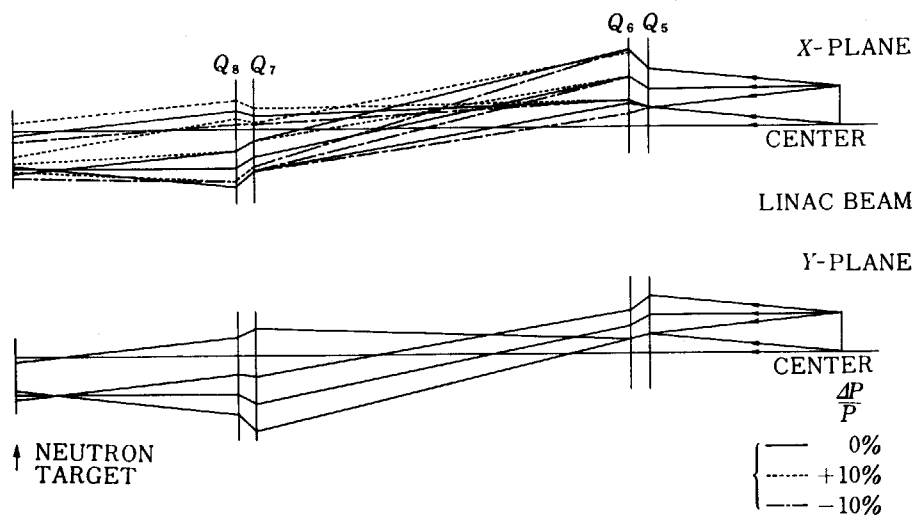


Fig. 7.7 Orbit diagrams of various beam components in the beam transport system to target C.

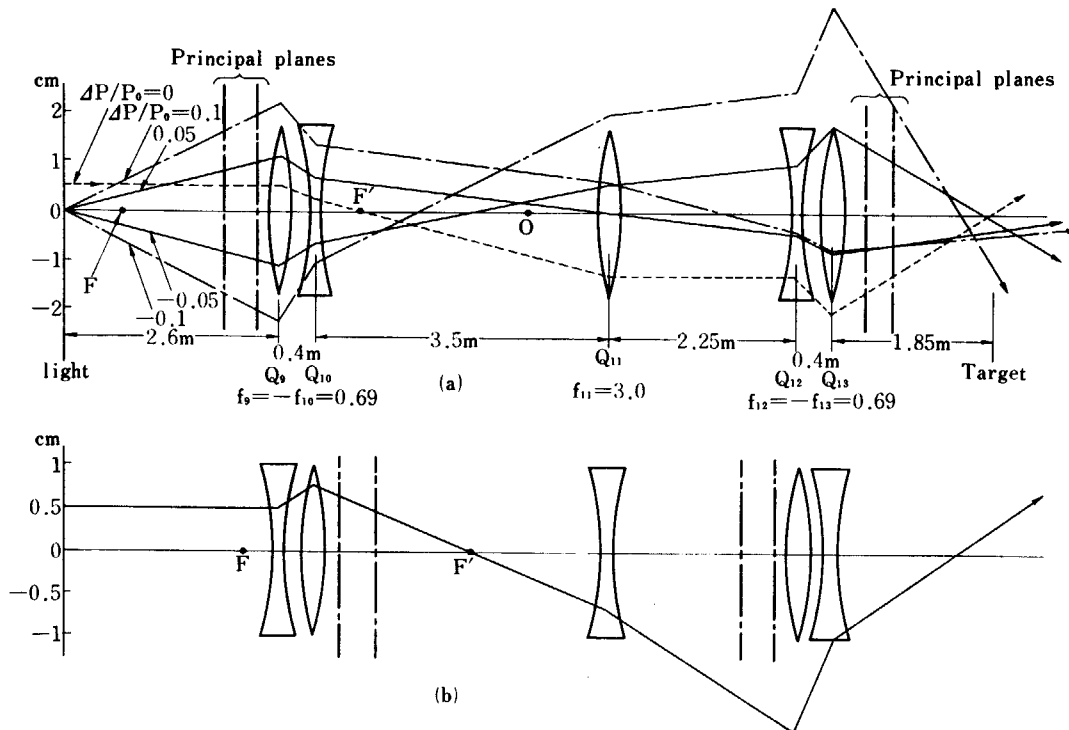


Fig. 7.8 Approximate orbit diagrams of various beam components in the beam transport system to target R, F and F' are focal points of a pair of thin lenses (Q_9, Q_{10}) in the source and image spaces, respectively. f-values are focal lengths of the individual lenses. a) Horizontal orbit. b) Vertical orbit.

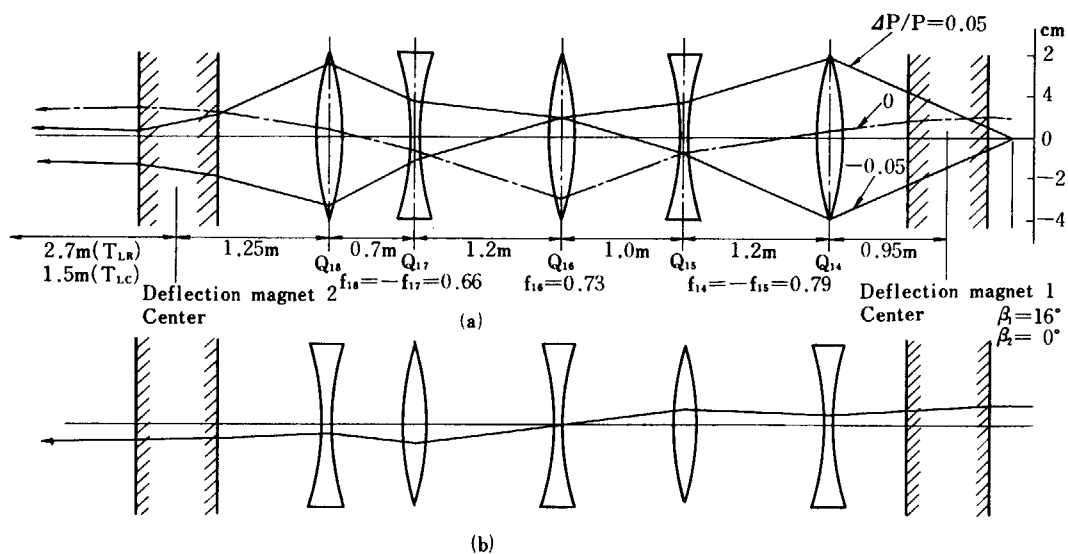


Fig. 7.10 Approximate orbit diagrams of various beam components in the beam transport system to targets LR and LC. Shaded areas indicate deflection magnets, f-values are focal lengths of the individual lenses. (a) Horizontal orbit. (b) Vertical orbit.

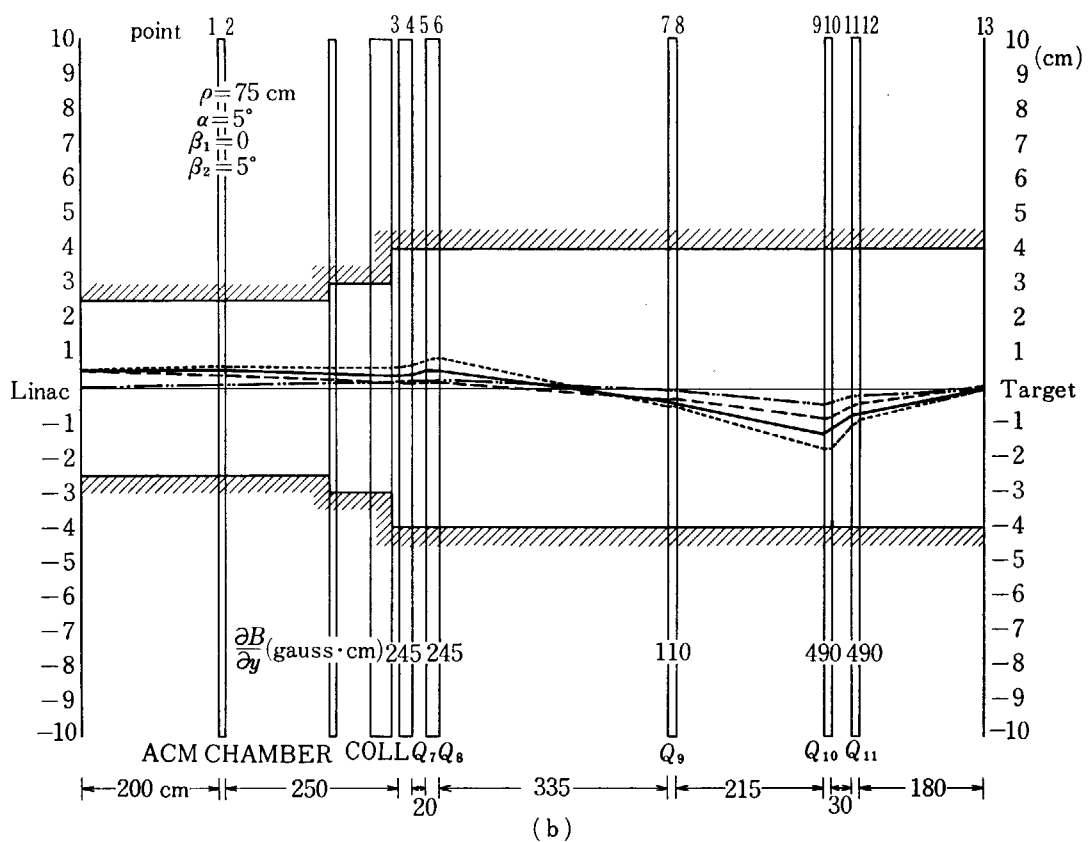
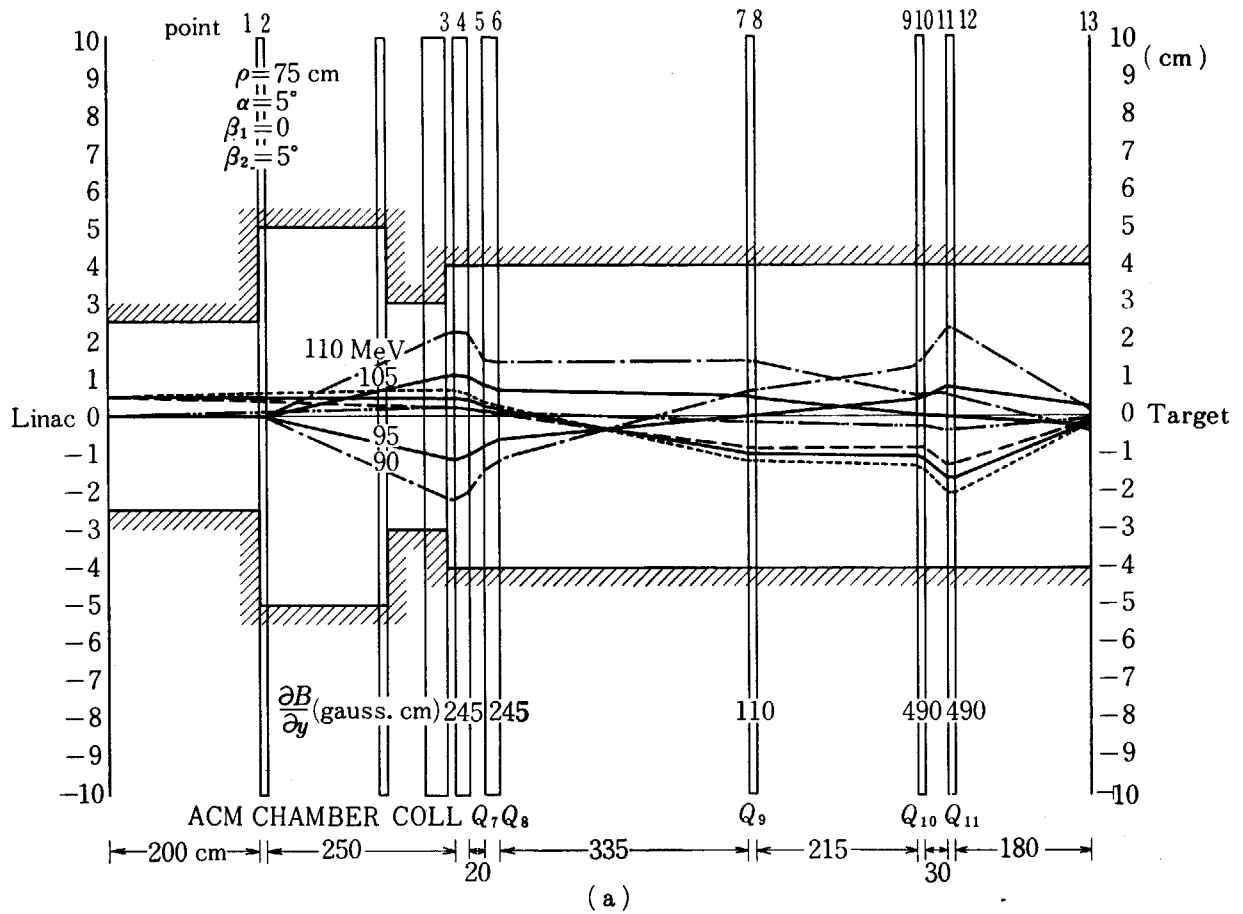


Fig. 7.9 Orbit diagrams in the beam transport system to target R. These are calculated with a computer. Shaded areas are vacuum walls.
 (a) Horizontal orbit. (b) Vertical orbit.

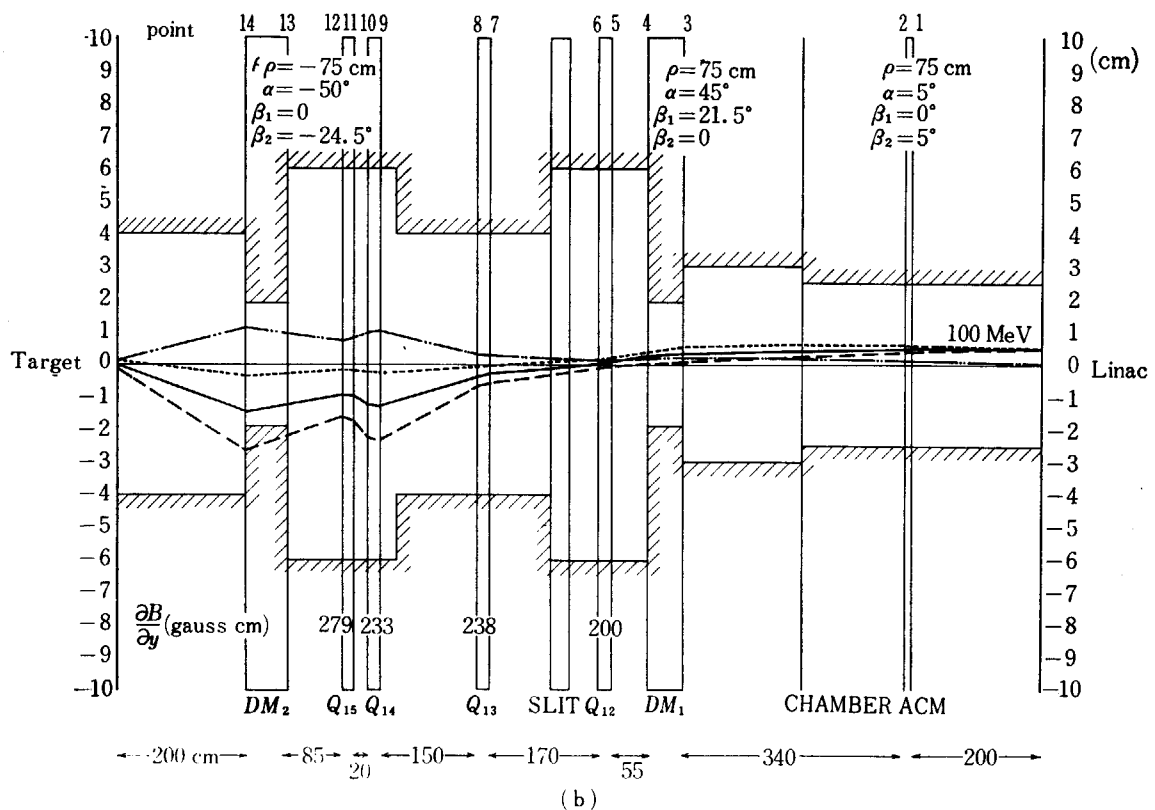
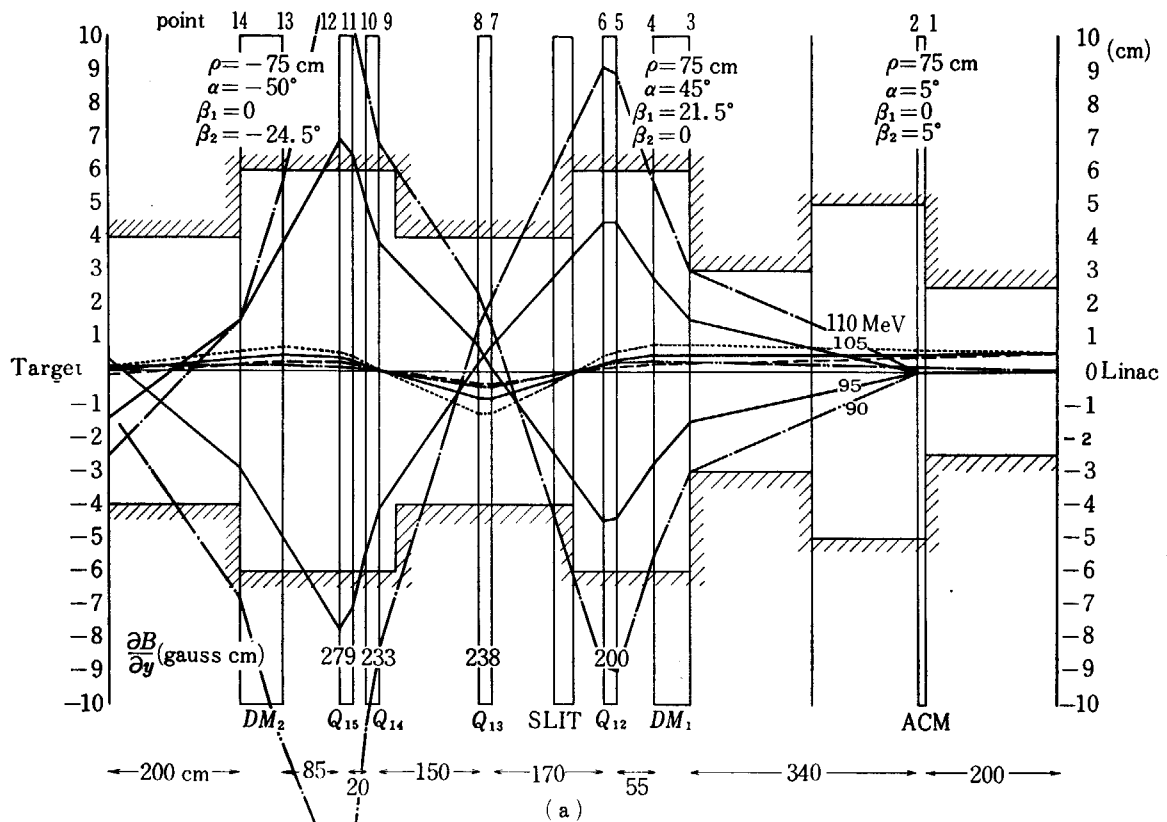


Fig. 7.11 Orbit diagrams in the beam transport system to targets LC, LR. These are calculated with a computer. Shaded areas are vacuum walls.

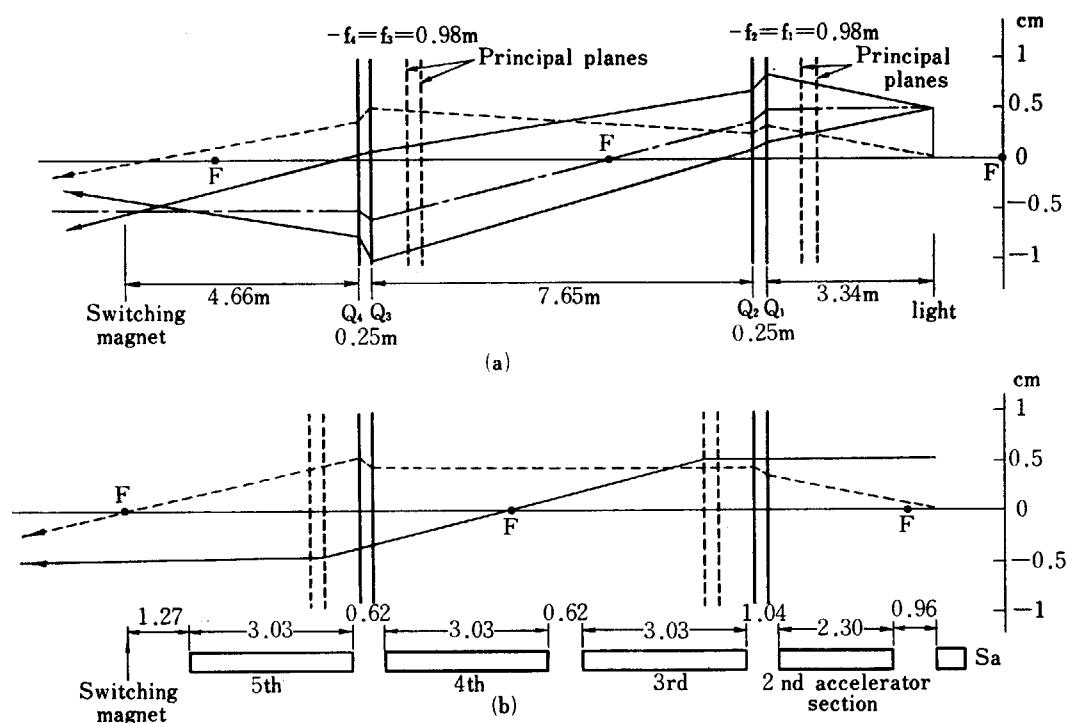


Fig. 7.12 Orbit diagrams in the accelerator section without RF field.

(a) Horizontal orbit. (b) Vertical orbit.

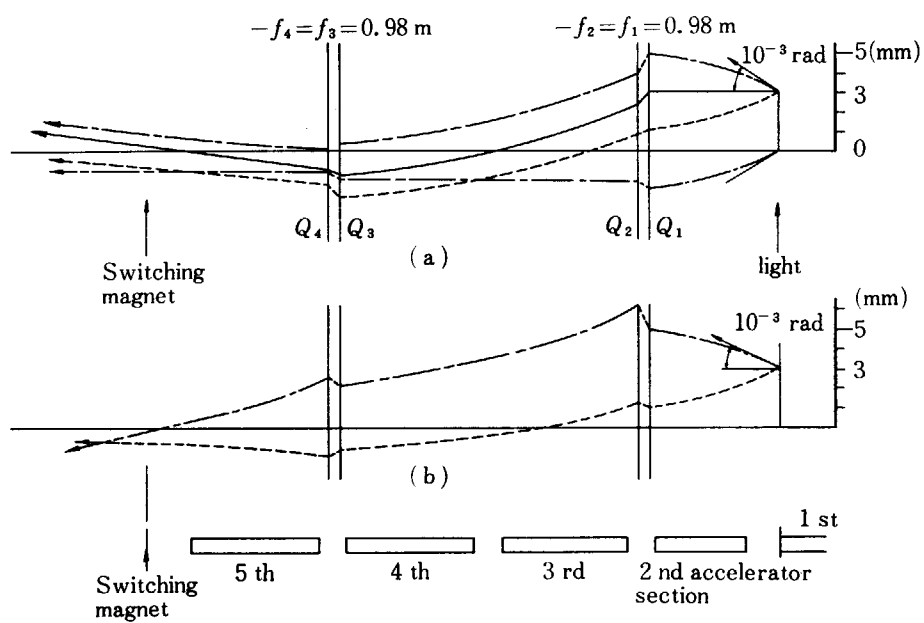
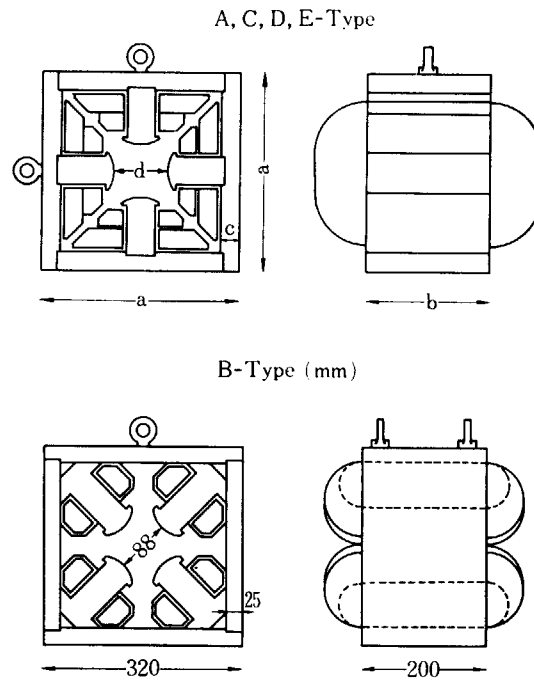


Fig. 7.13 Orbit diagrams in the accelerator section with RF field.

(a) Horizontal orbit. (b) Vertical orbit.



TYPE	a	b	c	d (mm)
A	240	200	20	70
C	420	200	40	125
D	320	200	30	88
E	170	100	15	42

Fig. 7.14 Dimensions of Q-magnets.

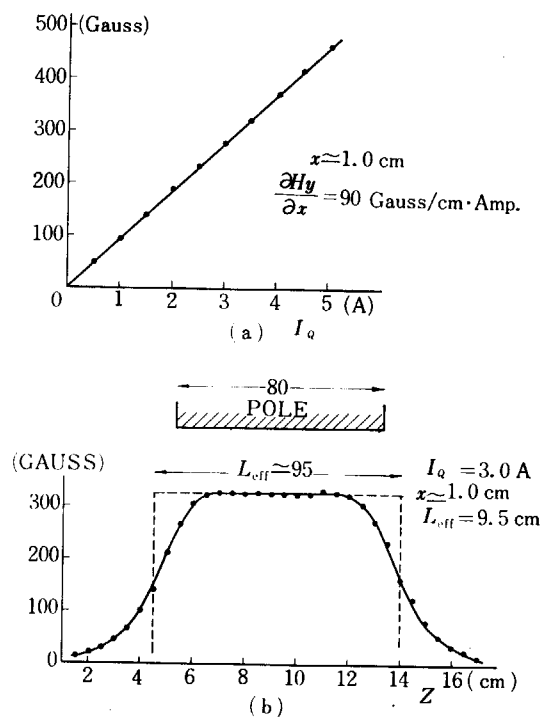


Fig. 7.15 Magnetic field excitation curve (a) and field distribution (b) of the F type Q-magnet.

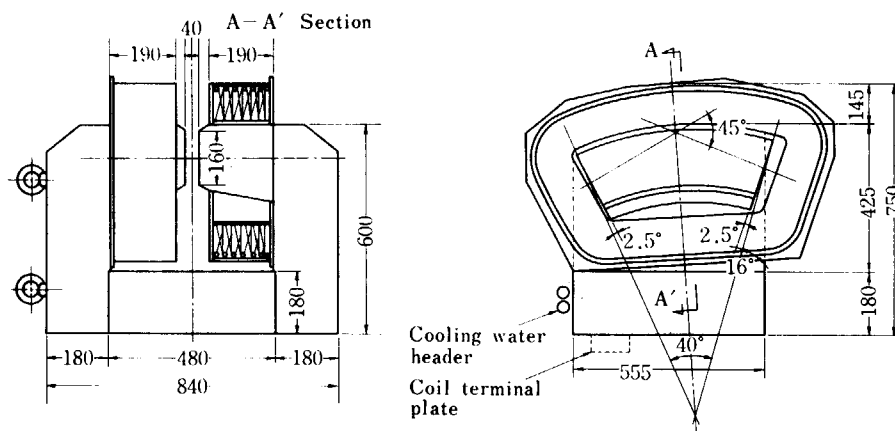


Fig. 7.16 Deflection magnet 1.

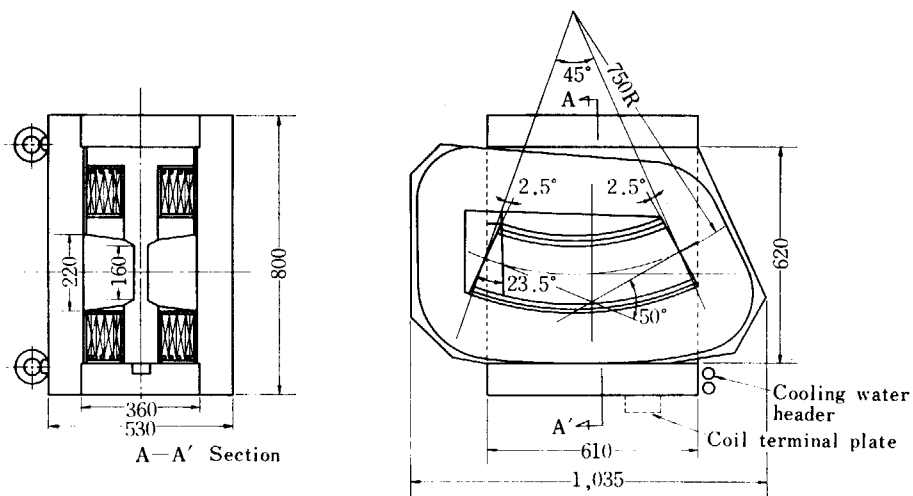


Fig. 7.17 Deflection magnet 2.

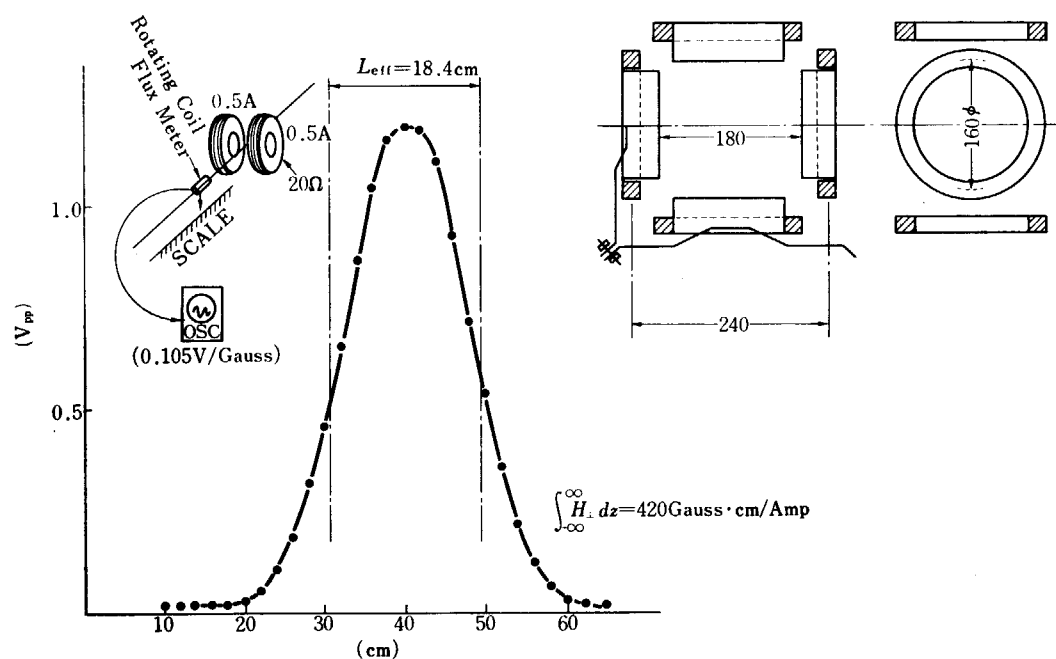


Fig. 7.18 Steering coils in the accelerator section and magnetic field distribution.

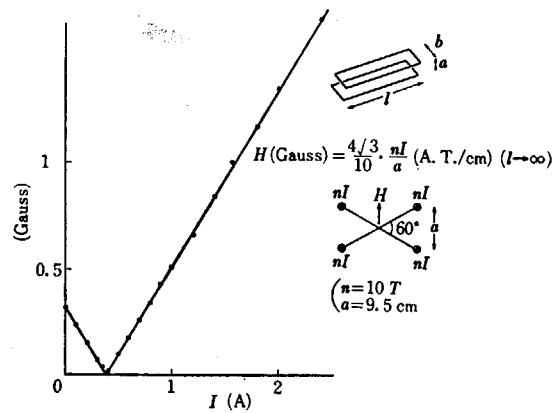


Fig. 7.19 Example of degaussing of the earth's magnetic field.

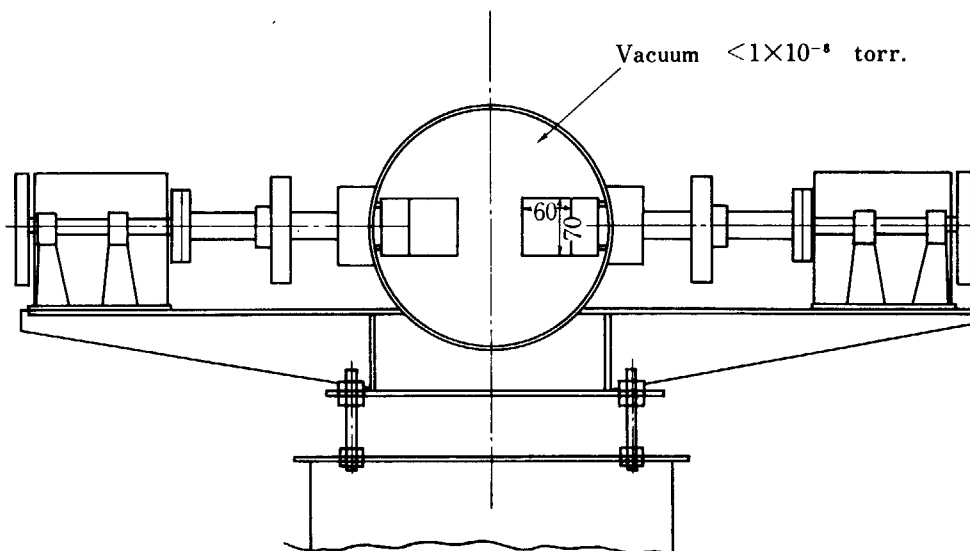
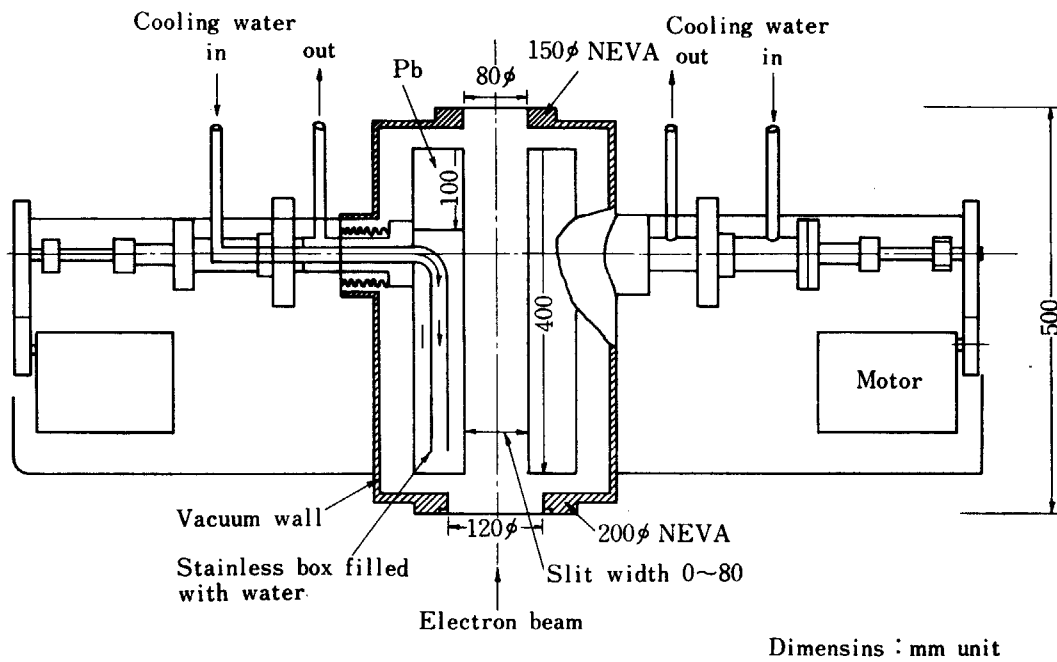


Fig. 7.20 Cross section of beam slit.

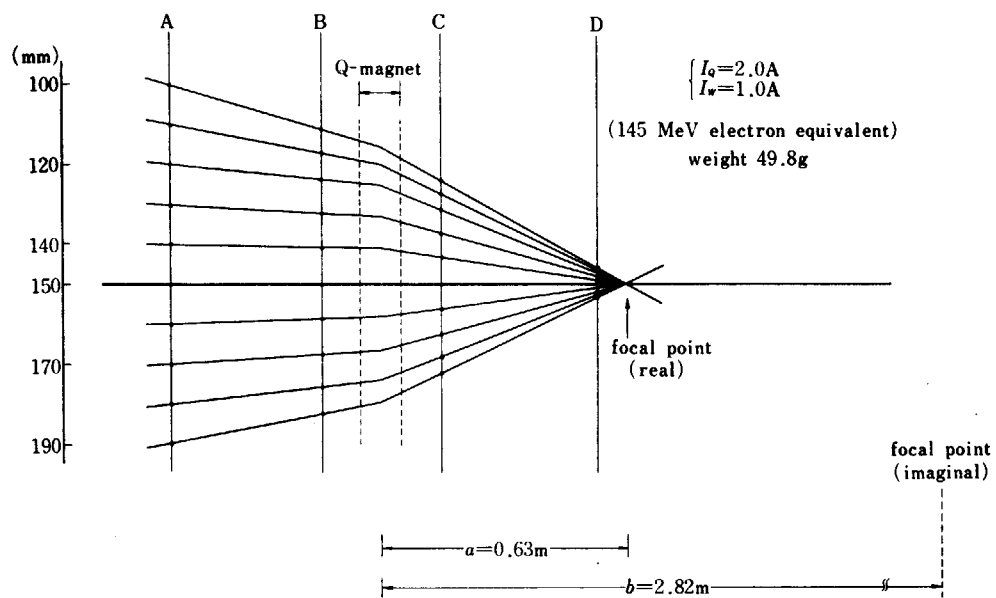


Fig. 7.21 Beam focusing pattern of Q-magnet simulated by floating wire.

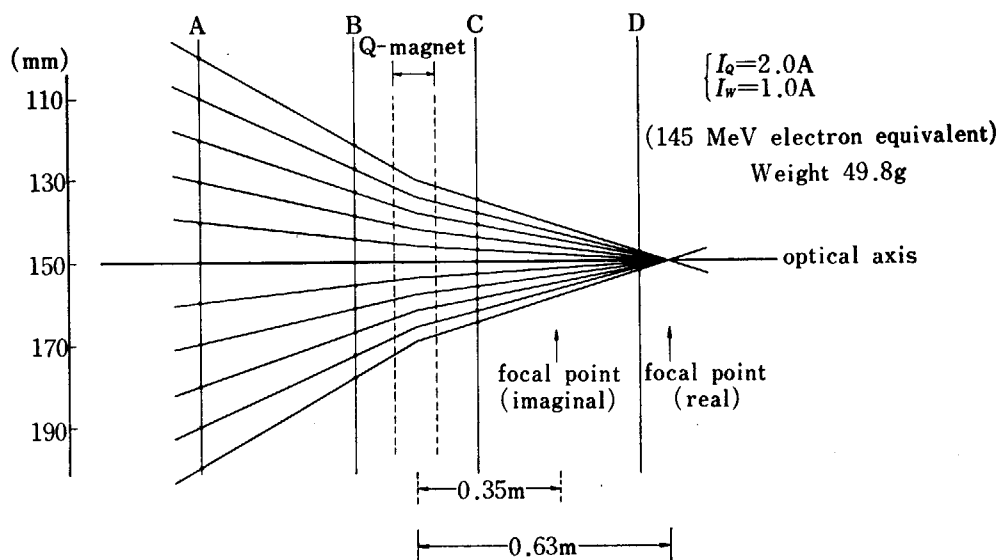


Fig. 7.22 Beam defocusing pattern of Q-magnet simulated by floating wire.

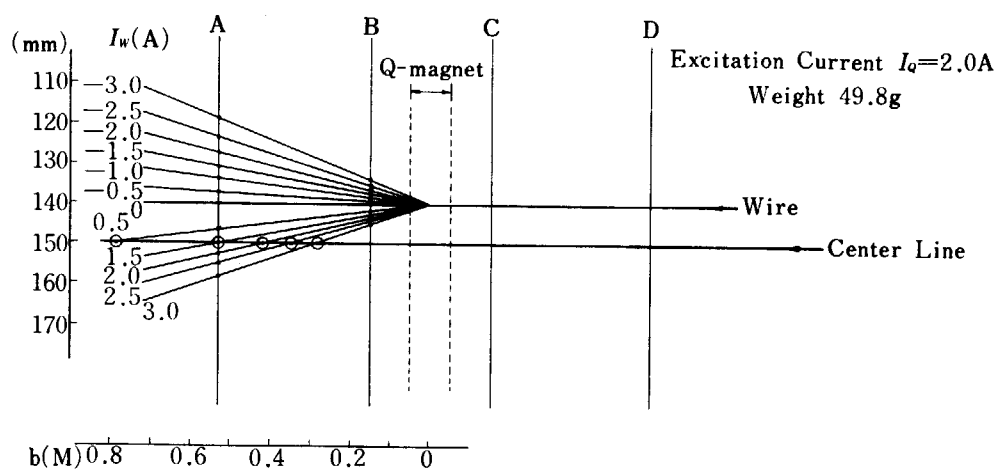


Fig. 7.23 Focusing and defocusing properties for parallel beam.

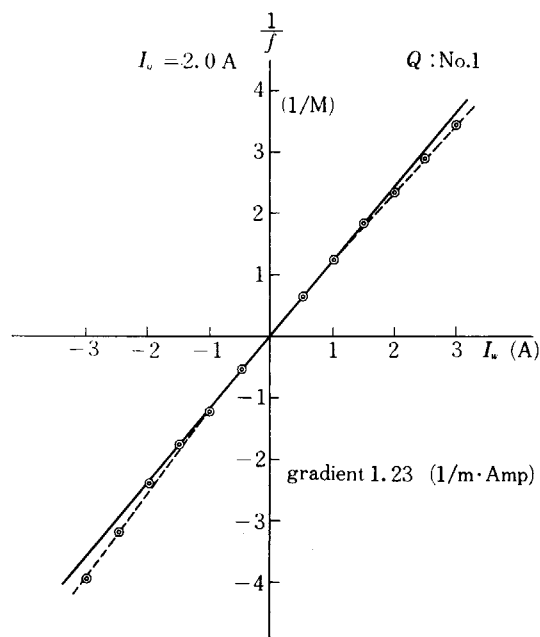
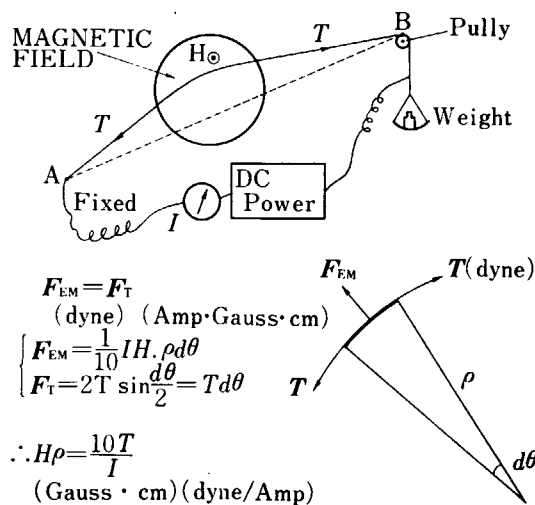
Fig. 7.24 $1/f$ versus wire current for parallel beam.

Fig. 7.25 Principle of floating wire method.

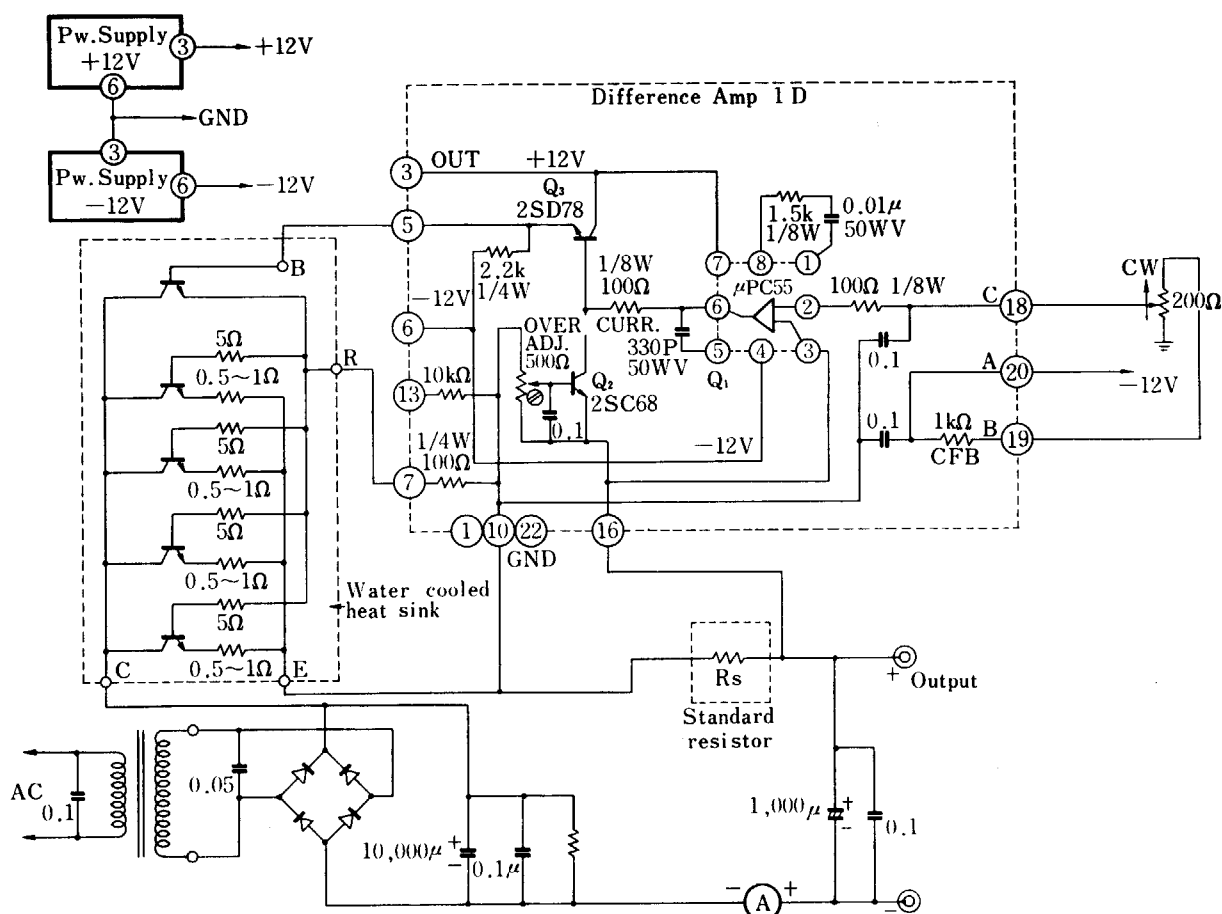


Fig. 7.26 Constant current control circuit (1~20A) for a Q-magnet.

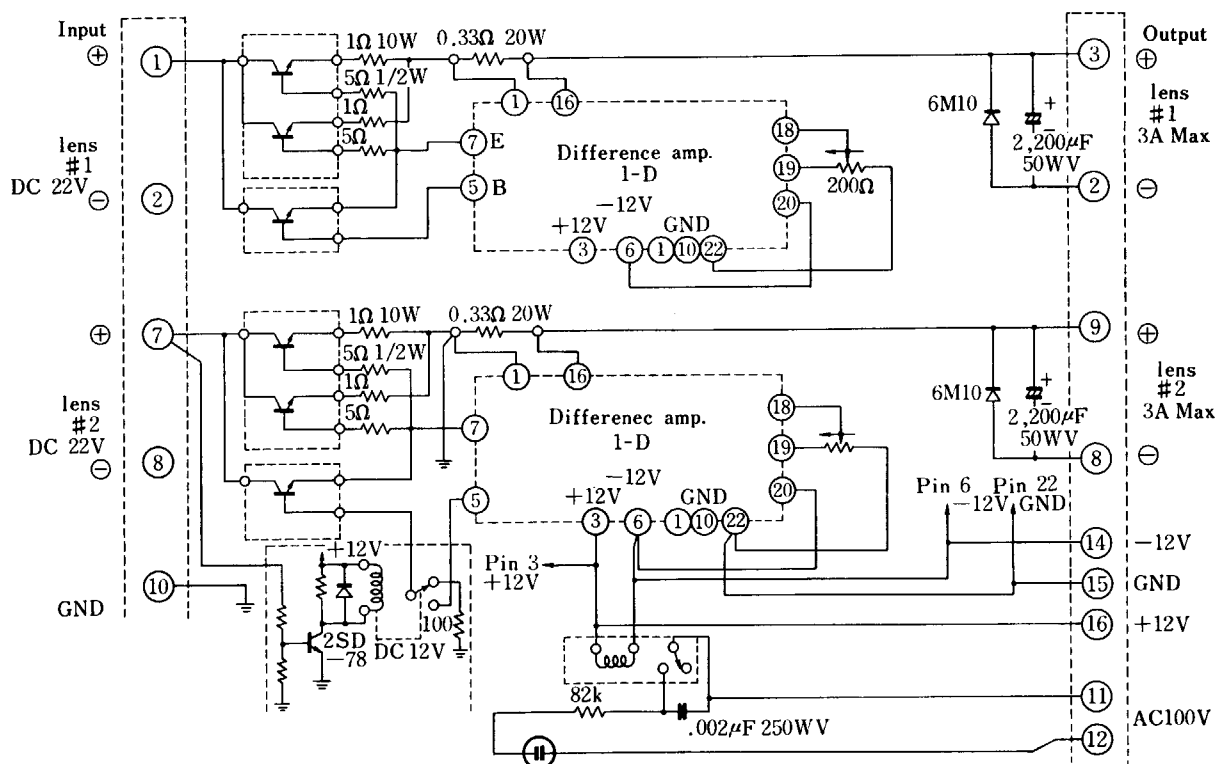


Fig. 7.27 Constant current control circuits for focussing lenses.

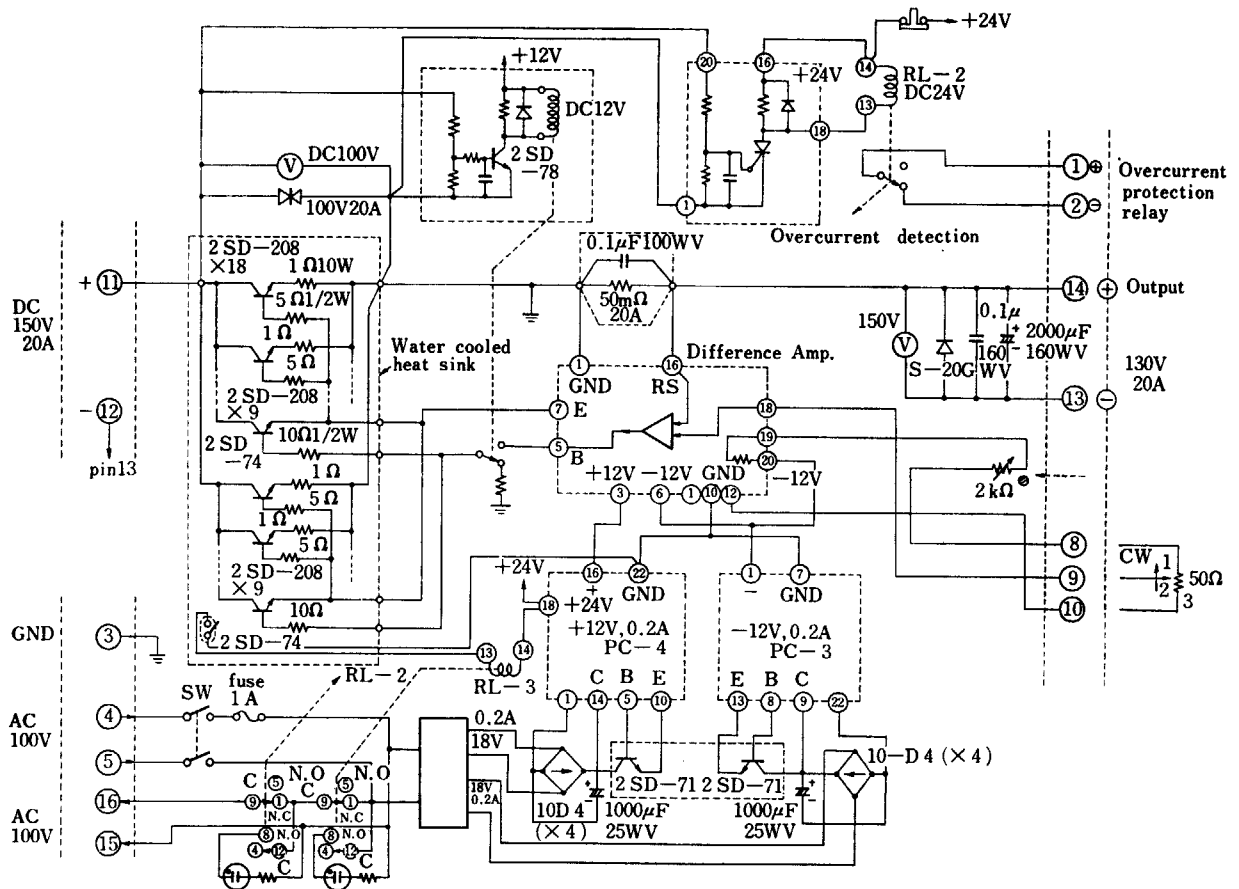


Fig. 7. 28 Constant current control circuit for a deflection magnet 1.

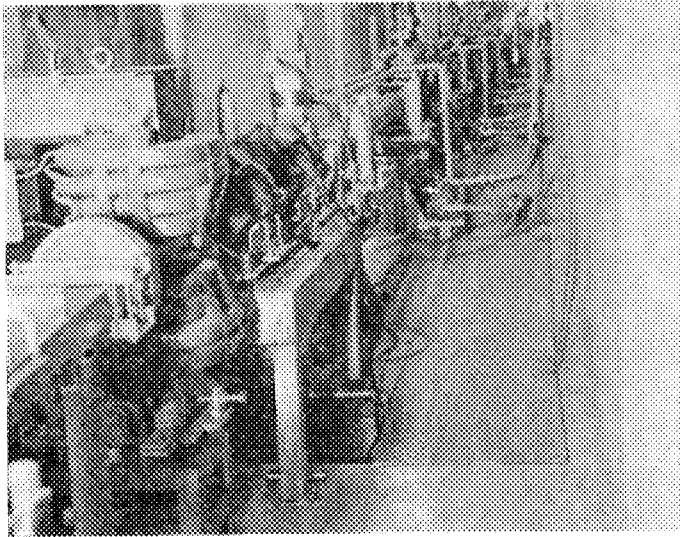


Photo 7.1 Beam transport system in accelerator section. This photograph was taken from the switching magnet.

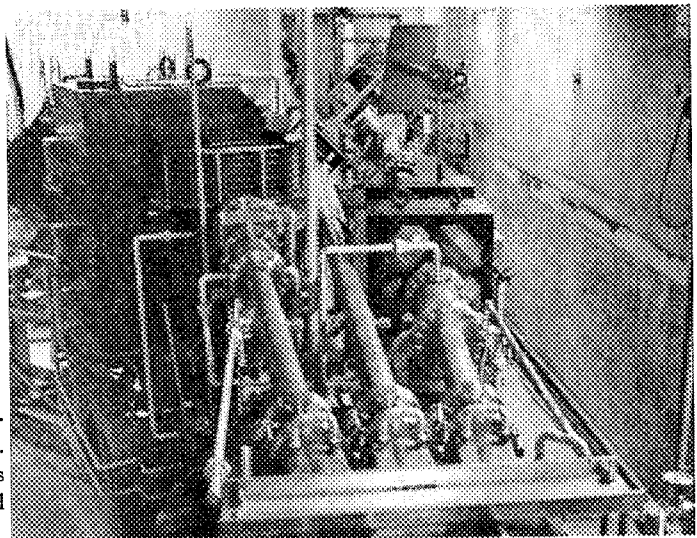


Photo 7.2 Three beam transport tubes. This photograph was taken from the switching magnet. The deflection magnet and Q-magnets are seen on the left and the right hand sides, respectively.

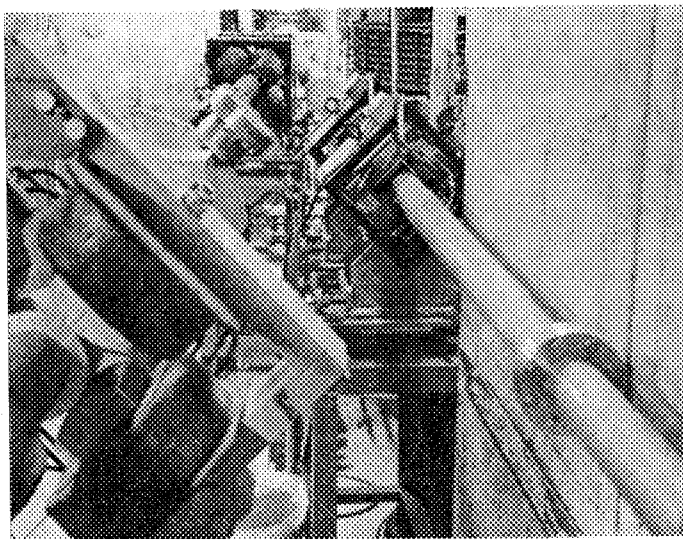


Photo 7.3 Q-magnets. Q_6 , Q_7 are on forward right side, Q_{11} of the transport system to target R is on the left side.

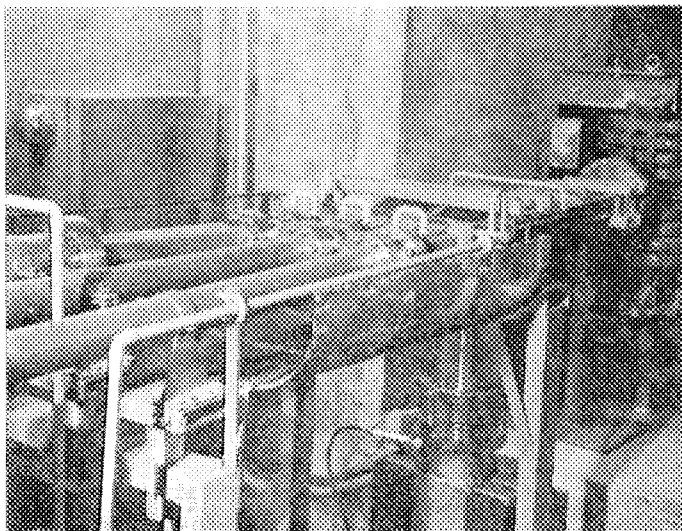


Photo 7.4 Switching magnet and three beam transport tubes.

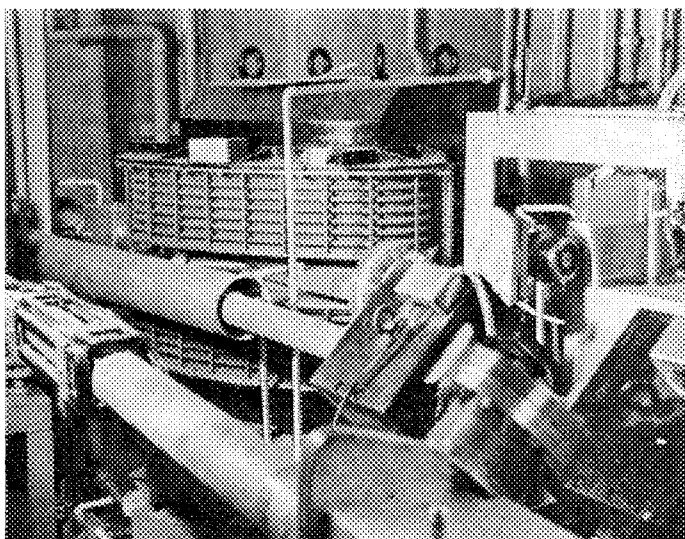


Photo 7.5 Deflection magnet 1. A magnetic shield is on the beam tube going to the target C. On the left of the shield a pair of steering coils are set on the tube going to the target R.

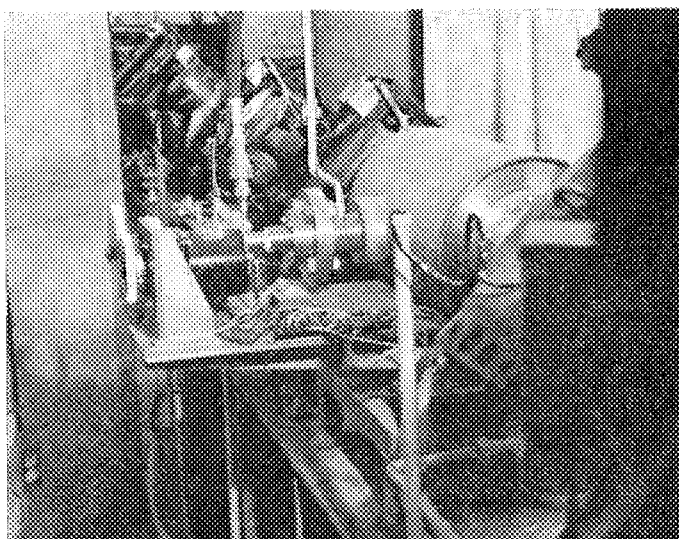


Photo 7.6 Beam slit.

8. ビーム・モニター

Linac の 5 本の加速管のそれぞれの後と 3 本のビーム伝送管には電流モニターが置かれていて、通過するビームの波形の監視がコントロール・デスクのオシロスコープによって行なわれる。また linac の運転に先だって、エネルギーを調整するために分岐磁石によりビームを曲げ、ビーム窓から外部に取出し、蛍光板を光らせてビームのプロフィールを ITV (工業用テレビ) で観測する。各々のターゲットの前にはベリリアの薄板が置かれていてビームがあたると発熱により光がでる。これを ITV で観測してビームのターゲット入射位置やビーム・スポットの大きさの調整を行なう。

運転中は電流モニターによりビームの監視が行なわれる。また、中性子ターゲットや X 線ターゲットは電気的に絶縁されているので、直接にターゲット電流をコントロール・デスクのオシロスコープで観測することもできる。各モニターの配置を Fig. 8.1 に示す。

8.1 電流モニター

電流モニターは Fig. 8.1 に示されるように、各加速管の後と分岐磁石と偏向磁石の直後におかれて、これらを通過するビームを観測することができる。

この電流モニターはフェライトのリングに裸銅線をまいたもので、これをマイカ箔で絶縁し、一部が開いた黄銅製のシールドケースに入れ真空導管中に収められたもので、信号の取出しは、セラミックス製の真空導入端子を通して行なわれる。また、この端子はアルミニウム・ケースで電氣的にシールドされている。信号は 5 D 2 W (50 Ω 2 重シールド同軸ケーブル) を通してコントロール・デスクの同軸アクセプターに送られる。

このフェライト・リングは電流トランスとして働き、近似的に I/N の電流源となる (I はビーム電流, N は巻数である)。ケーブルのインピーダンスを R とすれば出力の電圧 V は、 $V = (I/N) R$ で与えられる。この式はこの系の時定数がパルス幅より充分大きい時に成立つ。

すなわち、 $L_r/R \gg t_p$,

$$L_r/R = \frac{\mu\mu_0 N^2 A}{2\pi r R} \text{ sec} \quad (8.1)$$

で与えられる。ここで

L_r : インダクタンス

t_p : ビーム幅

A : フェライトコアの断面積

r : フェライトコアの平均半径

μ : フェライトコアの initial permeability

μ_0 : 真空の permeability

である。一方、出力の波形のさがり D (droop) は;

$$D = \left| \delta V/V \right| = \frac{R t_p}{L_r} = \frac{2\pi r R}{\mu\mu_0 N^2 A} t_p \quad (8.2)$$

で与えられる。巻数 N を少なくするほど出力は大きくなるが、 L_r が小さくなって波形が微分されてくる (D が大きくなる)。それを防ぐには μ の大きな材料を選び、geometry の許すかぎり A/r を大きくする必要がある。巻数を少なくすることは、出力が大きくなることの他に、線間の浮遊容量等を小さくすることができて高周波の発振も押えられるので望ましいことである。実際に用いられた定数を TABLE 8.1 に示す。Fig. 8.2 に電流モニターの断面を示す。

8.2 エネルギー・モニター

分岐磁石は、linac の電子ビームの調整時にビームエネルギー分析電磁石として使われる。ビームを 5° 曲げビーム窓から大気中に取り出してエネルギー・モニターの前面 (Photo 8.1 の写真の中央の白い部分) に入射させる。この白い部分は蛍光板であり、これにビームが当たって発光する部分がビームのプロフィールを示すから、これを ITV で観測しながらビームのエネルギーとプロフィールの調整を行なう。エネルギー・モニターの構造は電氣的に絶縁されたステンレス製の循環水タンクのビーム・キャッチャーが上下に動く構造になっている。水タンクの大きさは、電子ビームの大部分が吸収されてビーム電流が直接的に測定できるように、幅 20 cm, ビーム方向の奥行 60 cm に選ばれた。それがほぼ妥当なことは、Photo 8.2 に示される 120 MeV 電子の水中の通過の際のチェレンコフ光像の全長が約 60 cm であることから推定される。

タンクが上下に動くようになっているのは、電子ビームの平均強度が極めて大きい場合に蛍光面が焼損するのを防ぐためである。しかし、ビームのパルス幅が狭い場合や、パルス幅が広くてもパルスの繰返しを落して調整できる場合が多く、これまでのところタンクの上下動を必要としないので、タンクを静止させて使用している。蛍光板が縦に長くなっていないのはこのためである。

8.3 位置モニター

電子ビームが伝送管を出た直後、すなわちターゲットの直前におけるビームの位置を検出する目的には、当初は空気中の電離を利用する検出器が用いられたが²¹⁾、現在は各ターゲットを ITV で観測できるようになってお

り, 蛍光板が用いられている. これらの ITV カメラのレンズの放射線による着色を防ぐために, 遠隔操作によりレンズの直前で turret 式に鉛の遮蔽体が挿入できるようになっており, 観測を行なわない時にはレンズを遮蔽するようになっている.

蛍光板は当初 アルミニウム箔に ZnS 蛍光体の粉を塗付したものが使用されていたが, 焼損し易い事と, 残留

放射能が強いために, 東北大学の linac で用いられている方法を採用しベリリヤの薄い板に変えられた. この板は発熱によって発光することができ, 寿命も長くほとんど残留放射能が残らない. この板の厚さは 0.5 mm で大きさは 50 mm 角のものまで入手することができる (日本碍子).

TABLE 8.1 Performance of the current monitors

	Accelerator section (No. 1, 2)	Transport section (No. 3, 4, 5)
Core inner dia. (mm)	72 ϕ	86 ϕ
outer dia. (mm)	52 ϕ	70 ϕ
thickness (mm)	10	15
Material	H ₅₈ 9 $\times$ 27 (TDK)	2000 L (Tohoku Metal Industries)
Number of turns of coil	30	30
Cable	5D2W (50 Ω)	5D2W (50 Ω)
Sensitivity	1.7 mV/mA	1.7 mV/mA

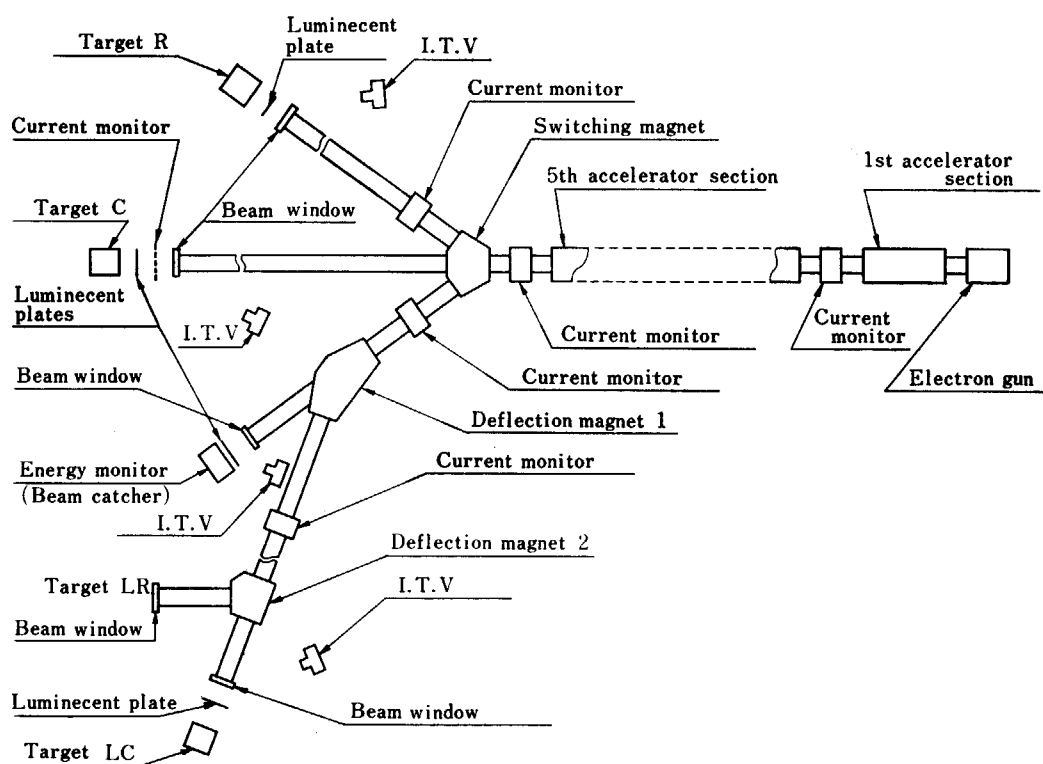


Fig. 8.1 Location of beam monitors.

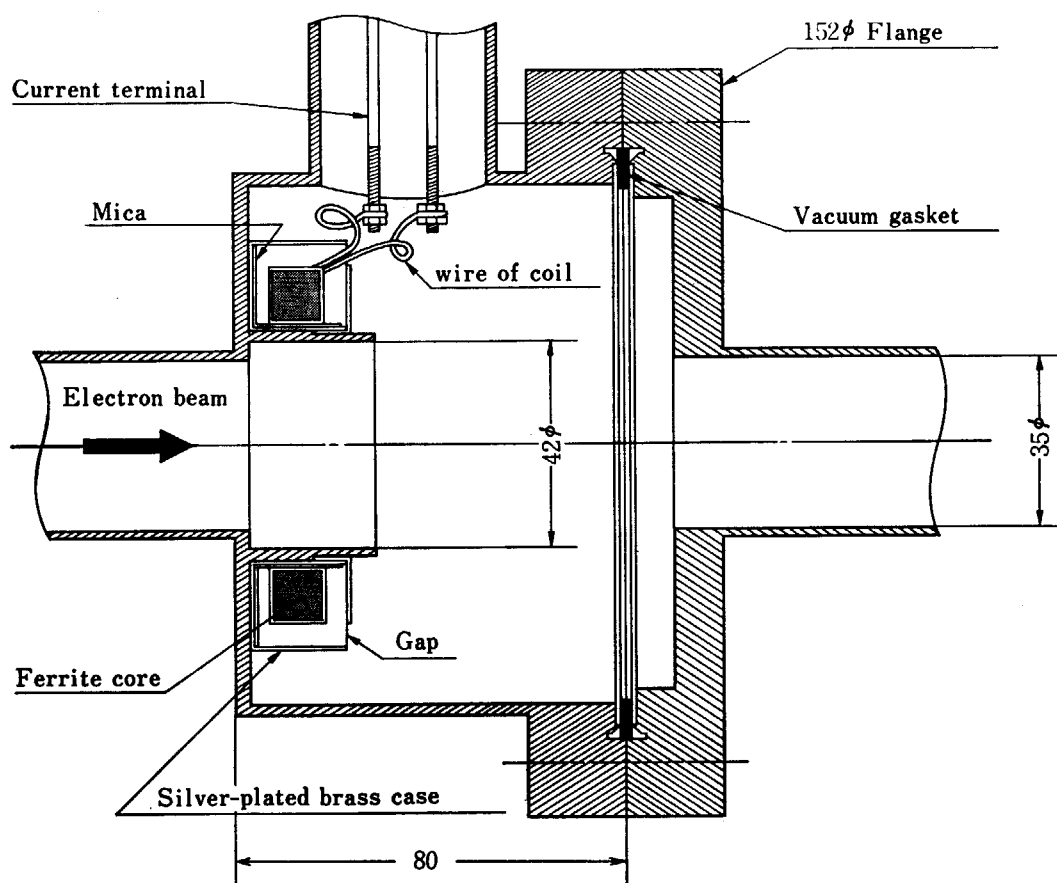


Fig. 8.2 Cross section beam current monitor.

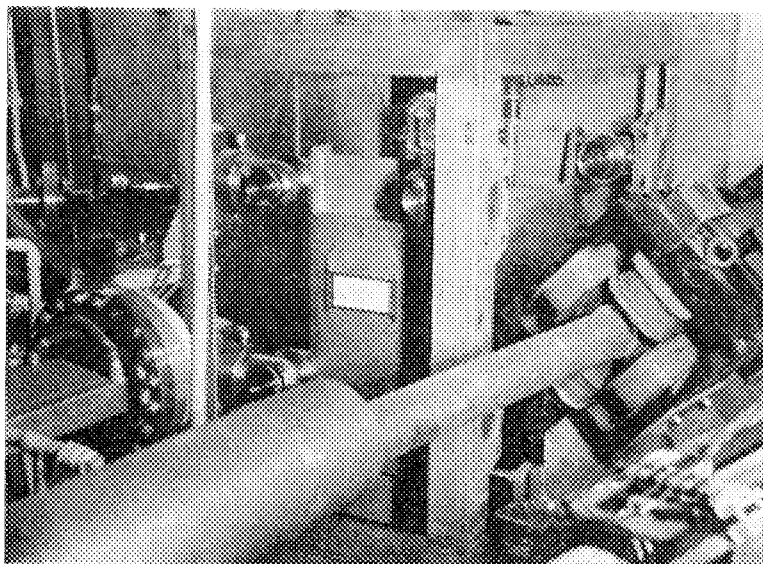


Photo 8.1 Beam energy monitor. The luminescent plate on the front can be moved up and down.

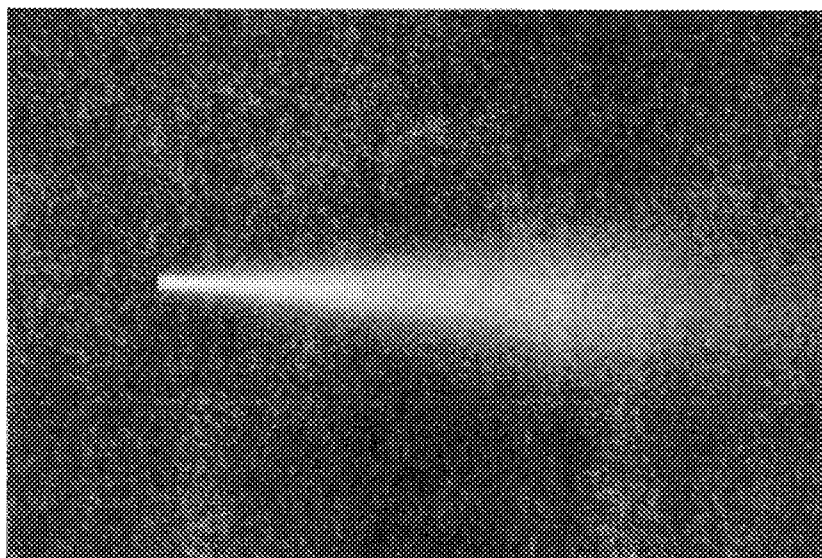


Photo 8.2 Cerenkov radiation emitted from 120 MeV electrons with 30 mA peak current passing through water. Total length of the radiation is about 60 cm (Exposure 1 sec, ASA 100).

9. 真 空 系

真空系の概略は Fig. 9.1 に示されている。電子銃部と加速管部との間にはゲート・バルブ1があり、加速管部とビーム伝送系との間にはゲート・バルブ2があつて3つの部分に分けられている。5本の加速管と5本のクライストロンの間はそれぞれ導波管で結ばれているが、第1の加速管の導波管を除いて、残り4本の導波管は真空中に排気されている。加速管と導波管の間はセラミックのマイクロ波窓があり、真空系としては別系統になるように隔絶されている。

電子銃から、電子ビーム窓1までの直進路の長さは約41 mである。ゲート・バルブ2からビーム窓BW₂までの右折路の長さは約12 mで、同じゲート・バルブからビーム窓5までの左折路の長さも約12 mである。真空系の総延長は約70 mである。4本の導波管の長さは、それぞれ約5 mである。

主排気系は排気速度80 l/sec, 100 l/sec 及び160 l/secのイオン・ポンプ(sputter ion pump) 11台により、4本の導波管はそれぞれ1台の40 l/secのイオン・ポンプにより排気される。

9.1 電子銃部及び加速管部真空系

電子銃及び加速管部の真空系の構成を Fig. 9.2 に示す。加速管は小さな孔(直径18~26 mm)のあいた多数の(第1, 第2加速管では60枚, 第3, 第4, 第5加速管では86枚)ディスクを重ねた構造なので排気コンダクタンスが極端に悪い。そのために加速管の間には、それぞれ80 l/secの排気速度のイオン・ポンプをとりつけて排気を行なった。

ゲート・バルブ1は加速管部に真空リークが発生し、修理するために真空を破っても、電子銃の真空を保持するためのもので(電子銃のカソードを大気にさらすと寿命が短くなる)、有効径は20 mmである。金属シール(銅ガスケット)構造で手動により開閉を行なう。必要以上に締めつけてガスケットを変形させないように、トルクレンチを使うかまたは真空計をみながら操作する(約100回開閉可能)。電子銃と第1加速管の間隔は、ビーム集束を行なうためにはなるべく短いのが好ましいので、ゲート・バルブ1は Fig. 9.3 に示すようにポンプの引口及び電磁レンズと一体構造とした。荒引バルブもゲート・バルブと同じくメタル・シール構造である。

Fig. 9.4 には第3, 第4, 第5加速管とイオン・ポンプの接続図を示す。イオン・ポンプのフランジ面より電子ビームの中心までの距離は350 mmで、これだけの距

離があればイオン・ポンプの漏洩磁界が電子ビーム軌道に影響を与えることはない。

9.2 ビーム伝送部真空系

ビーム伝送部の真空系の構成を Fig. 9.5 に示す。この系はほとんどすべて cone-flat 型のフランジが使用されている。ガスケットは銅製である。伝送部においては加速管系におけるほど高真空は必要としないが、伝送系はかなりの長さになるので、約5 mごとに1台の割合で排気速度80 l/secのイオン・ポンプが配置されている。

電子ビームは伝送系の末端で一旦空気中に取り出され、ターゲットへの入射が行なわれる。電子を真空系より空気中に出すには薄い金属箔のビーム窓を用いて電子を通過させる。この材料として電子のエネルギー吸収率が低いこと(原子番号の低い元素)と耐熱性の高いことが必要であり、チタンかステンレス箔が用いられる。

Fig. 9.6 にビーム窓BW₂~BW₅の分解図を示す。ビームダクト側には cone-flat 型のフランジが用いられ、チタン箔と銅のガスケットをはさみ、シール部が平坦な押えフランジで締め付ける。チタン箔の厚さは0.05 mmで銅のガスケットの厚さは2 mmである。締め付けトルクは、外径114 mmのフランジを使用する場合で約150 kg cmである。約200 kgcm以上のトルクで締め付けるとチタン箔が cone-flat の edge により切断されることがある。外径114 mmのフランジの場合、シール部の直径は84 mmである。チタン箔は押えフランジに仕込まれた風冷孔より出てくる圧縮空気によって冷却される。

直進路のビームはビーム窓BW₁の直前に置かれた偏向磁石により偏向される。これは、実験によってはビームの高さを変えてターゲット入射を行なうので、これに伴って縦に長いビーム窓を作る必要があった(円形の窓を作るとフランジの直径が非常に大きくなり、中性子ターゲットをITVで観測する時の邪魔になる)。Fig. 9.7 にはビーム窓BW₁が示されている。BW₁の両方のフランジのシール面は平坦で鏡面加工がほどこされている。この場合は、直径1 mmの純金のガスケットがビームダクト側のフランジとチタン箔の間に入れられて、押えフランジで締め付けられる。この場合もチタン箔の厚さは0.05 mmである。Photo 9.1 はビーム窓BW₁である。この写真の右側にはビーム偏向磁石が見られる。

9.3 導波管部真空系

クライストロンの出力マイクロ波は導波管により加速

管に供給される。この導波管は最初は SF_6 で加圧して使用されたが、つぎの理由により第1加速管を除いて真空中で使用されることになった。第1に加速管の窓の製造元である RCA が生産を中止し窓の補給が難しくなったこと、第2にはクライストロンの窓がこわれても導波管が真空中であればクライストロンはそのまま使用できるからである。現実には第2番目のクライストロンの窓は真空リークがあるがそのまま使用している。第1加速管の導波管については、プレバンチャにマイクロ波を供給する方向性結合器が付いており、その構造が真空中に排気することが困難なので SF_6 で加圧したまま使用している。導波管を真空中に排気する場合は加速管側のマイクロ波窓は必ずしも必要ではないが、クライストロンを取換える際に加速管の真空を保持できるのでそのまま残された。Fig. 9.8 に導波管真空系の構成を示す。40 l/sec のイオンポンプが排気に用いられ、その取換の際、導波管を真空保持するためのセパレート・バルブと荒引のためのバルブが用いられている。これらのバルブはバイトンのガスケット・シール構造である。

Photo 9.2 には導波管とイオン・ポンプがみられる。この写真はクライストロンのあるモジュレータ室側から撮影されたものである。Fig. 9.9 に導波管とフランジの断面を示す。導波管の内寸法は 72 mm × 34 mm である。

9.4 真空系の組立及び排気

真空系の全部品は組立に先立って、個々にヘリウム・リーク・デテクターによりリーク試験が行なわれた。真空部品の内面は研磨仕上げで酸洗いとトリクロルエチレンによる洗浄を行なった。これらの各部品を真空中に排気し、100~200 °C の温度で約6時間のベーキングを行なった。ベーキングの際にはガスの放出が盛んなので油拡散ポンプで排気した。高温時及び室温に冷した後にヘリウム・リーク・デテクターの最高感度で、リークが検出されないものを合格とした。加速管とマイクロ波窓につ

いては温度をあげることができないので入荷後リーク試験のみを行なって組立てた。

真空部品を組立てた後、荒引口から排気を開始する。Fig. 9.10 に荒引装置の構成を示す。ソーブション・ポンプは molecular sieve を液体空気により冷却する型のもので小型のものを2台用いている。オイル・ロータリー・ポンプとソーブション・ポンプの間には fore-line trap (液体窒素使用) が用いられ、オイルの逆流の防止を行なっている。

荒引を開始して真空度が 10^{-4} Torr のオーダーに達すれば、イオン・ポンプに電圧をかける。最初、イオン・ポンプは自分のガス放出により真空度がなかなか上昇せず温度があがることがある。この場合には、しばらく電源を切ってポンプが冷めるのを待つか、ファンによりポンプの強制冷却を行なう。真空度が上昇してくれば荒引口のバルブを閉じる。Linac の全真空系の組立て終了後最初の排気を行なった際に加速管のガス放出が続き、 10^{-7} Torr の真空度に到達するのに約1ヵ月を要した。その後、真空を破る場合には、窒素ボンベから乾燥した窒素を取出し真空系内に充填して、なるべく短時間で真空にもどすようにしている。水蒸気は金属面に吸着されやすくガス放出の大きな原因になるといわれているので、これが真空系内に入らないようにとくに注意が払われている。排気の実例を以下に示す。加速管部の真空を破り窒素ガスを充填し、約1時間後に荒引を開始した。約30分後にイオン・ポンプに電圧をかけると約1時間後に真空度は 1×10^{-7} Torr に到達した。

TABLE 9.1 に linac の運転中と運転休止時のイオン・ポンプの電流と真空度を示す。

Fig. 9.11 と Fig. 9.12 はイオン・ポンプの制御回路の略図を示す。真空系の真空度はイオン・ポンプの電流から測定される。真空系の真空度が悪くなった時には linac の運転が自動的に停止するように、イオン・ポンプ電流で動作するリレーが回路内に設けられている。

個々の真空系のリレーの設定値を TABLE 9.2 に示す。

TABLE 9.1 Indications of vacuum monitors before and during linac operation

Ion pump		Before operation		Operation (95 MeV, 300 mA, 1 μ sec, 50 pps)	
No	Speed (l/sec)	Ion cur- rent(μ A)	Torr	Ion cur- rent(μ A)	Torr
P ₁	80	2	$<2.8 \times 10^{-9}$	4	5.5×10^{-9}
P ₂	80	80	1.2×10^{-7}	31	4.5×10^{-8}
P ₃	80	5	7.0×10^{-9}	6	8.0×10^{-9}
P ₄	80	6	8.0×10^{-9}	7	1.0×10^{-8}
P ₅	80	27	4.0×10^{-8}	28	4.0×10^{-8}
P ₆	100	40	4.0×10^{-8}	30	3.0×10^{-8}
P ₇	160	120	7.0×10^{-8}	100	6.2×10^{-8}
P ₈	80	stop	—	—	—
P ₉	80	18	2.8×10^{-8}	17	2.8×10^{-8}
P ₁₀	80	65	9.0×10^{-8}	50	7.0×10^{-8}
P ₁₁	80	360	5.0×10^{-7}	270	4.0×10^{-7}
P ₁₂	40	4	3.0×10^{-8}	16	4.5×10^{-8}
P ₁₃	40	24	7.0×10^{-8}	57	1.4×10^{-7}
P ₁₄	40	27	7.5×10^{-8}	78	2.2×10^{-7}
P ₁₅	40	27	7.5×10^{-8}	50	3.0×10^{-7}

TABLE 9.2 List of operating values of vacuum interlock

Electron gun	1.2×10^{-6} Torr
Accelerating waveguide	3.0×10^{-5} Torr
Beam transport system	1.8×10^{-5} Torr
High power waveguide system	3.0×10^{-6} Torr
Klystron	2.3×10^{-8} Torr

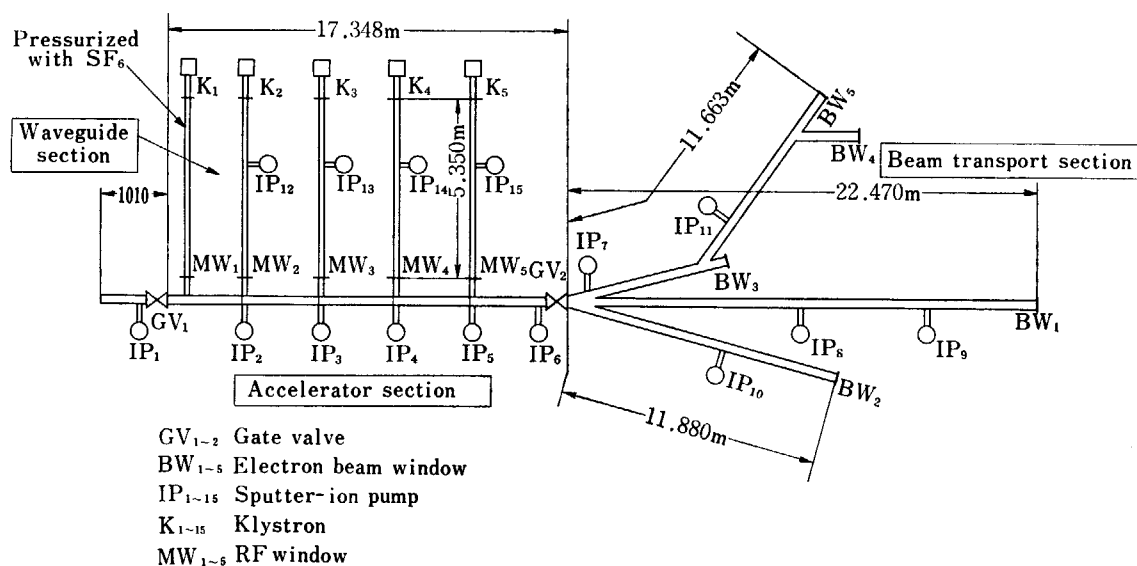


Fig. 9.1 Schematic diagram of vacuum system.

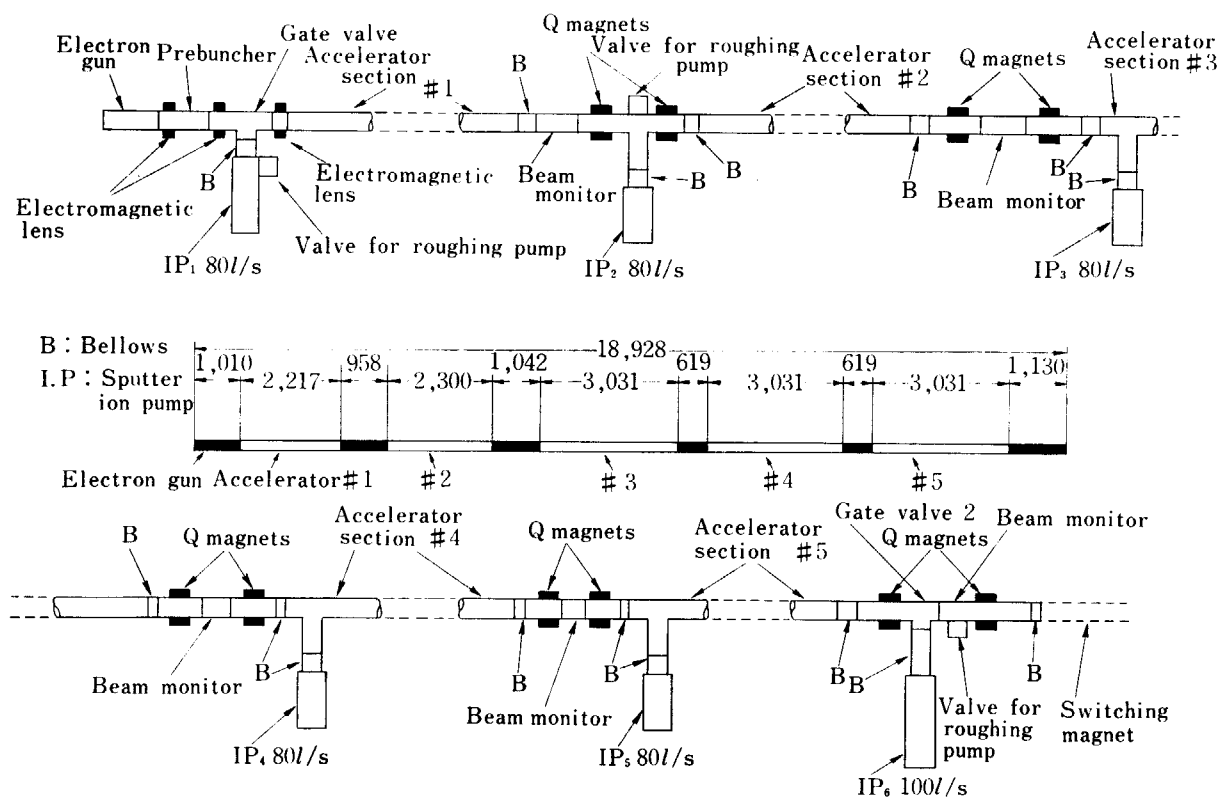


Fig. 9.2 Vacuum system arrangement for the electron gun and the accelerator section.

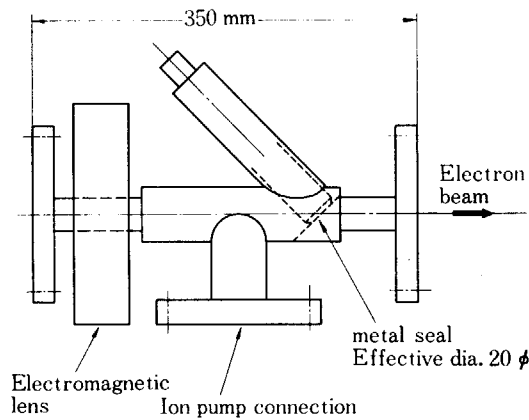


Fig. 9.3 Gate valve 1, ion pump connection and electromagnetic lens.

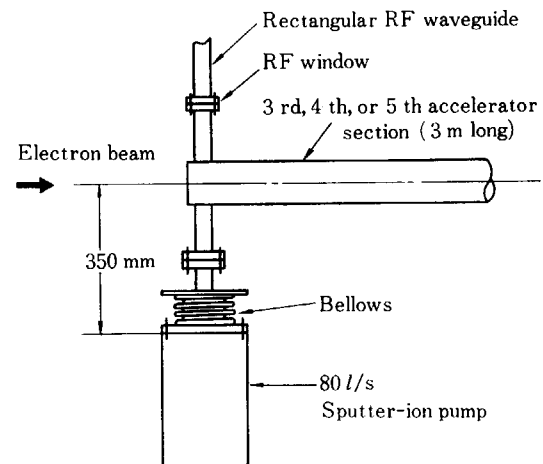


Fig. 9.4 Connection of ion pump with the accelerator.

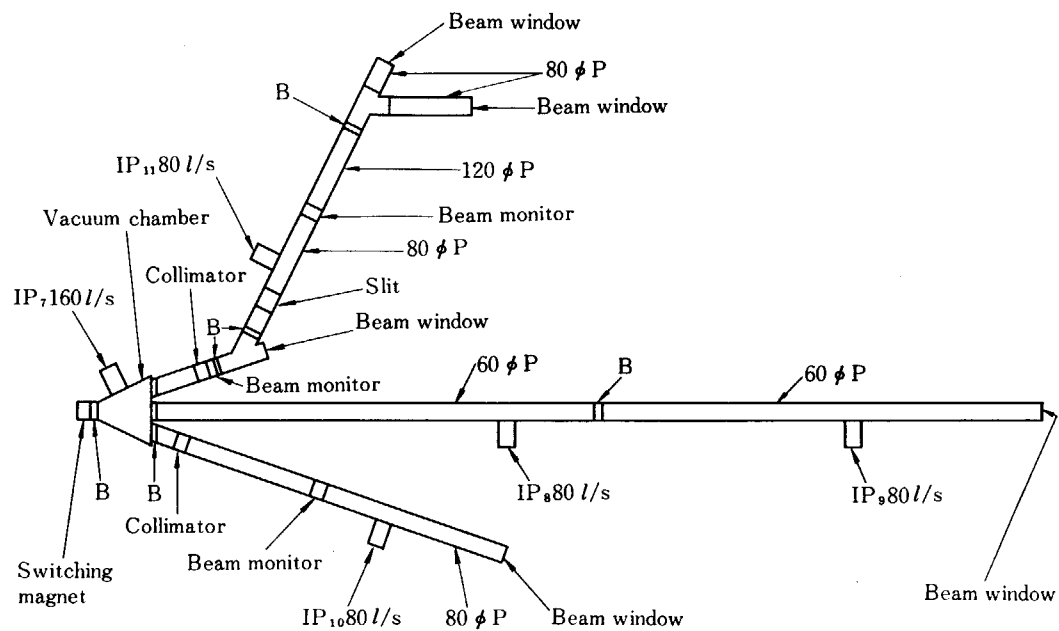


Fig. 9.5 Vacuum system arrangement for the electron beam transport section.

B: Bellows
IP: Sputter-ion pump
P: Pipe

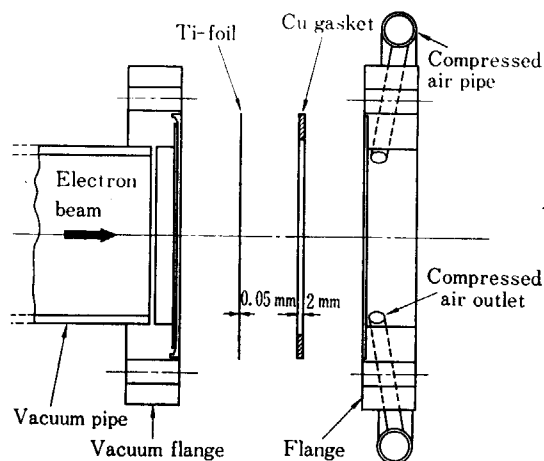


Fig. 9.6 Assembly of beam window.

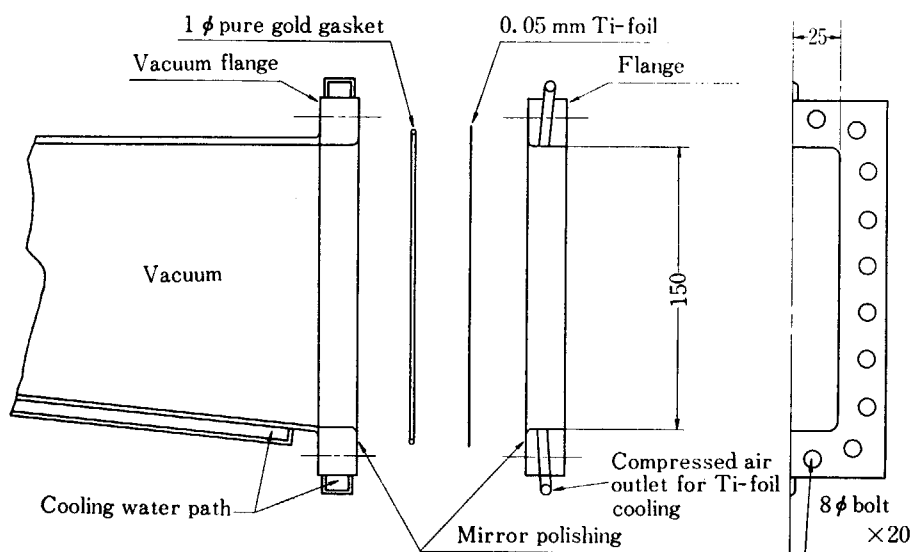
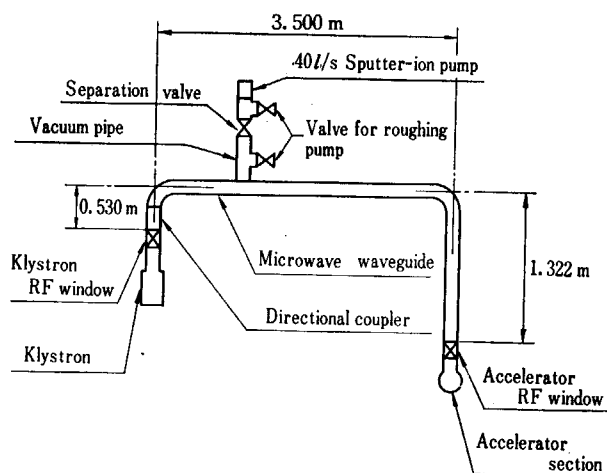
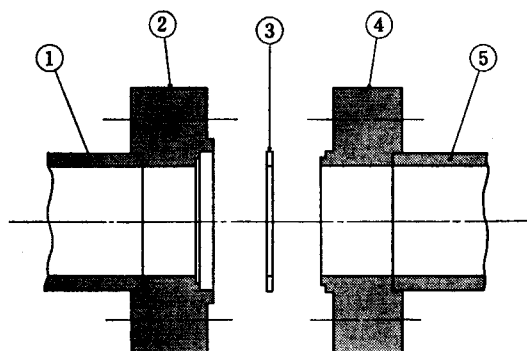
Fig. 9.7 Assembly of beam window BW₁.

Fig. 9.8 Vacuum system arrangement for the waveguide section.



- ① S-band waveguide (4 mm)
- ② Rectangular flange (female)
- ③ Copper gasket (1.6 mm)
- ④ Rectangular flange (male)
- ⑤ S-band waveguide

Fig. 9.9 Waveguide flange.

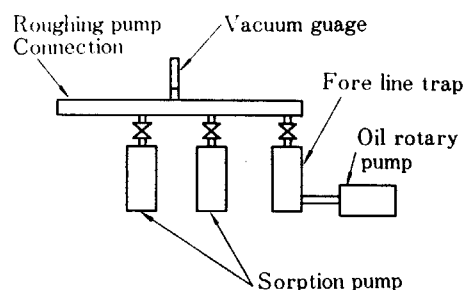


Fig. 9.10 Composition of roughing pump set.

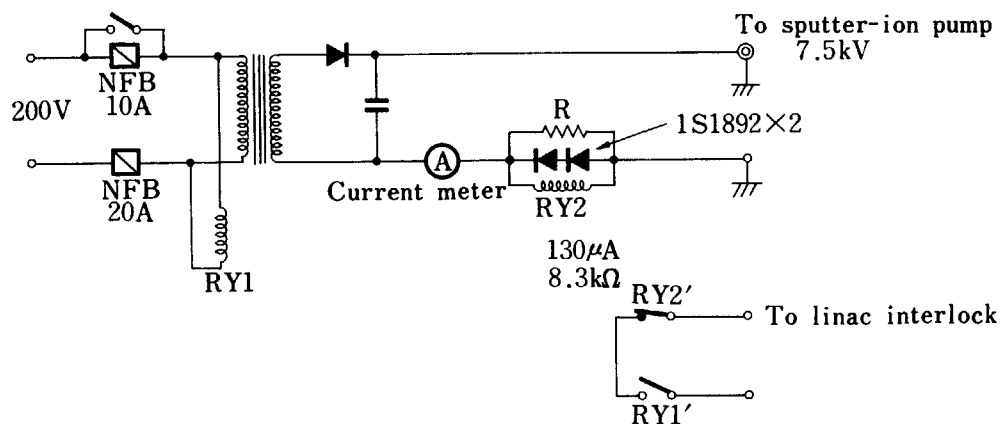


Fig. 9.11 Schematic control circuit diagram of the 80 l/sec ion pump.

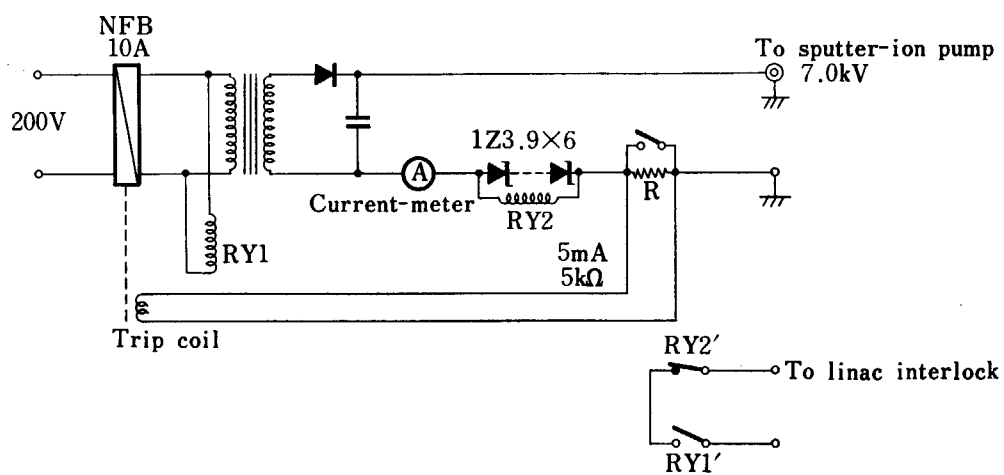


Fig. 9.12 Schematic control circuit diagram of the 100 l/sec ion pump.

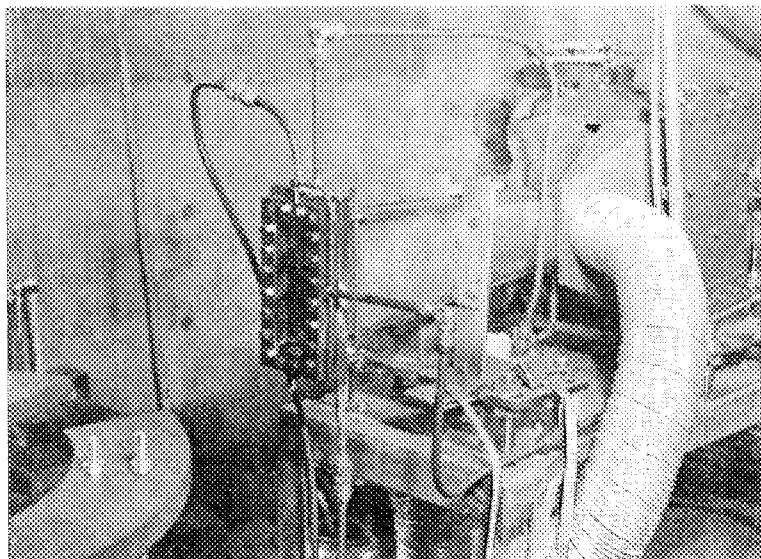


Photo 9.1 Beam extracting window. Deflection magnet 3 is seen on the right side

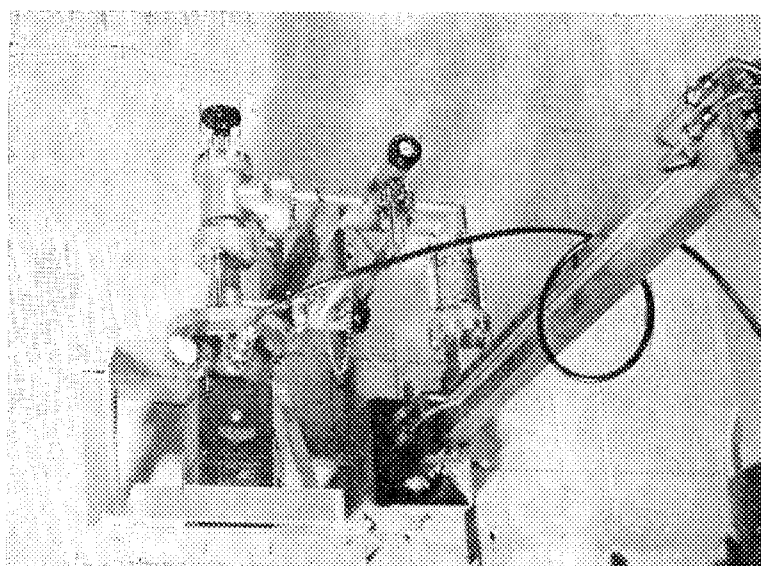


Photo 9.2 Vacuum system of waveguide.

10. 冷 却 系

Linac の各部を冷却する水冷装置は、3つの系統に分けられている。その第1は加速管冷却系である。これはマイクロ波電力の加速管中での損失による発熱と、加速管終端で水負荷に吸収されて生ずる熱を除去し、しかも加速管温度をできるだけ一定に保つためのものである。クライストロンと加速管を結ぶ導波管の温度もこの冷却系により一定の温度に保たれる。この冷却系には純水を用いるが、これは水の中の不純物が高エネルギーX線等により放射化されるのを防ぐためである。

第2の冷却系はターゲット冷却系である。これは中性子発生ターゲットの2次冷却、X線コンバータ、エネルギー・モニター（ビーム・キャッチャー）等の冷却のほか、電子ビーム・コリメータ、スリット、あるいは電子ビームが分岐または偏向を受ける部分の真空槽、および偏向用磁石コイル等の冷却に使用される。この冷却系も純水を用いるが、加速管冷却系と異なって、温度制御は必要でない。

第3はクライストロン冷却系である。これはクライストロンとその集束コイルの熱除去のほか、クライストロンに高電圧を供給するパルストランスを冷やすのにも使用される。この冷却水の一部は、また種々の電源回路の冷却に使用されている。この系統では水の放射化の心配はなく、水道水に不凍液を混入して用いている。Photo 10.1 は linac 建屋屋上に設置された冷却系の冷却塔である。

10.1 加速管冷却系

10.1.1 加速管の温度とエネルギー利得の関係

加速管の中をマイクロ波が伝播する場合、位相速度が光速になる周波数を f とし、電子の加速エネルギーを E とする。加速管の温度が変化し周波数が δf だけ変化した場合のエネルギーの変化分を δE とすると δf と δE の関係は constant gradient 型の加速管については²²⁾

$$\frac{\delta E}{E} = \left(Q \frac{\delta f}{f} \right)^2 \left[\frac{2\tau e^{-2\tau}(\tau+1)}{1-e^{-2\tau}} - 1 \right] \quad (10.1)$$

で表わされる。Constant impedance 型の加速管では、 $\delta E/E$ の値は上式よりいくらか大きくなる。加速管の周波数と温度の関係は線型で、その温度係数は加速管の構造にはほとんど無関係である。

銅の加速管については

$$\frac{\Delta f}{\Delta T} \approx -50 \text{ kHz/}^\circ\text{C} \quad (10.2)$$

であることが実験的に確かめられている。これらの関係により第3、第4、第5加速管について $\delta E/E$ を計算す

ると、 1°C の温度変化によって、0.8% のエネルギー変化がおこり、 2°C の上昇では 3.2% のエネルギーの変化がおこる。第1、第2加速管については、 1°C の温度変化について 0.15%、 2°C の上昇に対して、0.6% のエネルギー変化がおこる。

実際の加速管の冷却においては構造上、軸上に沿って $1^\circ\text{C} \sim 2^\circ\text{C}$ の温度勾配がおこり、空洞間でマイクロ波の位相のずれがおこるので、エネルギーの変化は上記の計算より大きく見積る必要があり、エネルギーの変化を 1% に押えるには、加速管の温度変化を 1°C 以内に押える必要がある。実際の加速管の使用温度は 40°C である。

10.1.2 構 成

加速管冷却水系統図を Fig. 10.1 に示す。この系統は 1 次冷却系と 2 次冷却系に分けられる。Linac の建設時には、2 次回路のない冷却方式を採っていたが、その後実際に運転してみたところ、linac の最大出力時に（とくに夏季及び冬季）温度制御に難点があることが判った。これらの季節では冷却塔をとりまく外温が 1 日の内に 10 度以上も変化するので、水温が温度制御系の制御範囲からずれてしまうためであった。

また、linac の起動時の温度制御に hunting が起りやすいことも判った。それで最近、Fig. 10.1 に示すように 2 次回路を設けた。2 次回路は、夏季と冬期には異った冷却塔に切変えて使用する。この 2 次回路の冷却水にも温度制御を行ない、外温が変化しても 1 次回路の冷却水温度をなるべく一定に保つようにした。なお、1 次回路では純水を用いるが、2 次回路では水道水（夏季）または不凍液（冬季）を使用する。

夏期用の冷却塔は開放型でビルの空調によく使用される市販のものを購入したが、これは価格が安く寿命（約 3~5 年）を考えると経済的に有利であるからである。冬期用冷却塔は夏期用冷却塔に比べて冷却能力は小さくてすむが、冬期の氷結に備えて不凍液を使用するためにステンレス鋼または銅を材料に使用する必要があり、開放型は使用できないので、原研の工作課によって設計製作された。夏期用と冬期用を兼ねたものを製作することは、分けた場合に比べてはるかに価格が高くなり、寿命の点でも問題がおこる。

最初に 1 次回路について、ポンプからの流路に沿って述べる。ポンプはステンレス製、流量 380 l/min である。氷結防止の 3 kW ヒーターを経て 2 つに分岐し、一方は熱交換器へ、もう一方は 3 方弁（合流弁）に入る。この熱交換器は原研工作課で設計されたもので、加速管に供給されるマイクロ波最大電力約 100 kW 、 $9 \times 10^4 \text{ kcal/hr}$

を除去できる。熱交換器を出た水はストレーナを通して、3 方弁のもう一方の入力口に入る。3 方弁は、加速管を冷却した後の還路側にある測温抵抗体からの温度信号により動作して、2 方向からの冷却水の混合比を変え、その出口側温度を一定に保つ。この後分岐して、5 本の加速管をそれぞれ冷却するほか、各加速管につながられる大電力伝送導波管も冷却する。冷却水は加速管を出た後合流して主還路を成し、ポンプに戻る。この主還路には 500 l のサージ・タンクがある。冷却水の不純物イオンを取除くために、ポンプからの水の一部は、分岐されてイオン交換塔を通して戻ってくる。以上、加速管冷却部のための分岐路、および熱交換器を除いた部分は、すべて当研究所建設部で設計・製作されたものである。

つぎに、2 次回路を説明する。ポンプは 420 l/min の流量を持つ通常の鉄製のものである。2 次冷却水は、1 次冷却系の場合と同じく、2 方向に分岐され、1 つは冷却塔へもう 1 つは 3 方弁に入る。冷却塔は、前に述べたように $V_1 \sim V_4$ のバルブの切換えにより、夏と冬では別のものを使用する。夏型のものの冷却能力は 50 冷却トンと大きい、開放型のため相当量 ($\sim 10\%$ /day) の冷却水が失われるので、常時水道水を補給しなくてはならない。冬型のものは密閉型で、工作課の設計である。冬季用サージ・タンク T_2 は容積 500 l で大気に開放されているが、夏型のサージ・タンクは、冷却塔が開放型であるため密閉されていて、容積は 1,000 l である。3 方弁の制御に用いる測温抵抗体は熱交換器の後にある。3 方弁で混合された冷却水は熱交換器を経て、ポンプに戻る。2 次冷却回路はすべて工作課によって設計された。加速管等の被冷却体を除いたほとんどすべての部分は、linac 建屋屋上に設置されている。加速管室天井のコンクリート貫通部を含め、屋上での配管はすべて断熱材で覆われている。

各々の加速管冷却流路の入口には、Fig. 10.2 に示すように、流量計、ストレーナおよび 5 kW のヒーターが入れている。ヒーターは前に述べた 3 方弁と共に温度制御に用いられるもので、とくに 5 本の加速管の間の温度のばらつきを小さくするためのものである。温度制御回路を Fig. 10.3 に示す。制御回路においては加速管の管壁に取付けられたサーミスタ測温抵抗体からの信号と設定電圧との差を差動アンプで増幅しフィードバックを行ない、トライアック (交流用サイリスタ) でヒーター電流の on, off を行ない水温の制御を行なう。トライアックにおいて電流を流す場合、交流電圧が 0 になる位相で on, off を行なうように回路は設計されているので雑音の発生は比較的少ない。

ヒーターを通過した冷却水は加速管を冷却し無反射終端器の水負荷を通る。そして、フロー・スイッチとバルブを経て主還路へ戻る。これらの配管は、ヒーターから加速管につながる部分、および水負荷からフロー・スイッチへ行く一部分には、フレキシブル・チューブ (SUS

27 製)を用いている他は、すべて銅管 (25 A) である。主要な構成部品の特性を TABLE 10.1 に示す。

10.2 ターゲット冷却系

ターゲット冷却系の系統図を Fig. 10.4 に示す。純水を用いるので、各部品は原則としてステンレスまたは砲金製であり、配管はすべて銅管である。ポンプはステンレス製、流量 350 l/min である。ヒーターは 3 kW で、冬期の水結防止に使用される。冷却塔は蒸発式で、冷却熱量最大 130,000 kcal/hr の性能を有する。ここで冷却された水はストレーナを通過してから、いろいろな被冷却体に分岐されていく。分岐路については後に述べるがその基本型は、流量計を通過して被冷却体に入り、その後フロー・スイッチを通るもので、往還路共バルブで仕切れるようになっている。それぞれの分岐路を通過してきた水は、合流して主還路となりサージ・タンクに戻る。サージ・タンクは普通主還路と独立になっていて、ただ 1 本の管で主還路に結合され水圧の伝達を行なうが、この冷却系では、Fig. 10.4 に示すようにタンク自体が主還路の一部に組込まれている。

被冷却体が多種多様であり、また linac を使った実験の種類により、被冷却体が変更されることも少なくないと予想される。それで、冷却水循環路に閉じこめられる空気を抜きとることを容易にするために、サージ・タンクを前記の配置にした。このタンクにはレベル・ゲージが取付けられ、linac のインターロック系に接続されている。前に触れた各分岐路のフロー・スイッチもインターロック系につながれている。ポンプから送り出される水の極く一部は、分岐されフィルターを通過してイオン交換器に送られ、再びポンプに戻る。

サージ・タンクから冷却塔の次のストレーナまでの部分は、加速管室の屋上にあり、冷却塔以外は小屋の中に据付けられている。屋上部分の配管はすべて断熱材でおおわれている。加速管およびターゲット室におけるターゲット冷却系統の流路図の詳細を Fig. 10.5 に示す。分岐路の系統について④から⑩の記号がつけてある。⑩は中性子発生ターゲット冷却水回路の熱交換器の 2 次回路をなすものである。これはターゲットが発熱その他で損傷し、冷却水が放射能汚染をおこし冷却回路全体に拡がるのを防止するため熱交換器を設けた。

中性子発生ターゲット 1 の冷却回路の詳細は別に述べられる。これと同様なターゲットは、③ターゲット 3 C (中性子回折研究室)、⑨のターゲット 2 (炉物理実験研究室) で、それぞれの研究室で製作されている。⑨の X 線コンバータは、中性子ターゲットと同程度の発熱が予想されるが、白金を使用しているため損傷および損傷した場合の汚染の程度が小さいと考えられるので、直接冷却方式とした。また、エネルギー・モニター用の⑧のビーム・キャッチャーも比較的短時間しか使用しないため

直接冷却方式とした。これらのターゲットやビーム・キャッチャーはビーム電流を測定するので、アースと絶縁することが必要である。また、位置を換えるために冷却管も可動でなくてはならない。このため配管の一部に絶縁管とステンレスのフレキシブル管を用いている。これ以外は分岐路はすべて銅管を用いている。分岐路の流量はバルブによって調整する。⑧部では全体の流量が大きいため、流量の小さい分岐路では流量がわからない。それで大小2つの流量計を並列にして、小流量の分岐路でも一応推定できるようにしてある。ターゲット冷却系の主要特性を、まとめて TABLE 10.2 に示す。

10.3 クライストロン冷却系

クライストロン冷却系は、クライストロン等による発熱量約 300,000 kcal/hr を除去するためのもので、この系統図を Fig. 10.6 に示す。前にも述べたように、この冷却系が他の2つと異なるのは純水を用いない点で、不凍液を用いて冬期の氷結を防いでいる。ポンプから送り出された水は流量計を通る。これで全流量を測定できるが、流量計はここだけで分岐路には設置していない。それで試運転の際、分岐路に流量計を挿入して流量を確めた。この後で、冷却水は主ヘッダーに入り5つの分岐路

に分かれ、それぞれ第1から第5クライストロンの冷却を行なう。各分岐路はそれぞれさらに3つに分かれ、クライストロン、クライストロンの集束コイル、パルストランスをそれぞれ冷却する。

主ヘッダーには、この外もう1つの小さい分岐路がある。これは制御室に導かれ、ここにあるいろいろな電源回路（各種磁石電源）の冷却に使われている。主ヘッダーから3つの分岐路に分かれる小さなヘッダーまでの間は、往、還路ともワイヤー入りゴム製の高圧ホース（38 A）を用いている。ここからクライストロン等への配管にも同様なホースを用いるが、とくにクライストロンに対しては途中に self sealing coupling と呼ばれるカップリングを用いて、脱着を容易にしている。

冷却水はフロー・スイッチ、バルブを経て、サージ・タンクに戻る。サージ・タンクはターゲット冷却系の場合と同じく、タンク自体が循環路の一部を成すものである。冷却水は冷却塔、ストレーナーを経てポンプに戻る。冷却塔の冷却能力は 303,000 kcal/hr、ポンプ流量は 420 l/min である。サージ・タンクから流量計までの部分は、すべてモジュレーター室屋上に設置されている。

クライストロン冷却系の主要特性を TABLE 10.3 に示す。

TABLE 10.1 Accelerator section cooling water system main specifications

Component	Specifications	
Heat exchanger	Cooling heat capacity	39,600 kcal/hr
	Water flow	Primary 380 l/min Secondary 420 l/min
	Design temperature difference	1.4 °C
	Outer pipes	SUS 5t×150φ×4,000
Primary circulating pump	Inner pipes	Cu 0.7t×15φ×4,000
	Type	Multistage turbine pump
	Pipe dia., flow	65A×380 l/min
	Total lift	60 m
	Electric motor power, power supply	7.5kW×3φ×200V
	Material	SUS
Primary flow meter	Type	Glass tapered pipe with float
	Max. flow	400 l/min, 50 l/min
Flow switch	Flow detection	Piston with permanent magnet
	Flow setting	0.8~60 l/min
Primary three way valve	Manufacturer	Gems Company Inc. (USA)
	Type	V5013A (Yamatake-Honeywell)
	Pipe dia.	2 1/2"
	Operation	Automatic control by motor
Secondary circulating pump	Type	Multistage turbine pump
	Pipe dia. flow	65 A×420 l/min
	Total lift	60 m
	Electric motor power, power supply	7.5kW×3φ×200V
Secondary three way valve	Type	V5013A (Yamatake-Honeywell)
	Pipe dia.	3"
	Operation	Automatic control by motor
Cooling tower (summer)	Type	SBC-5 (Kowa Sangyo Co.)
	Cooling capacity	50 freezing ton
	Water flow	650 l/min
	Temperature	42 °C→32 °C (380 l/min)
	Fan	900 φ×330 m ³ /min
Cooling tower (winter)	Type	Forced air cooling
	Cooling capacity	39,600 kcal
	Water flow	420 l/min
	Coil	19 Cu pipes
		0.7 t×15 φ×2,000 each
	Cooling liquid	Water with antifreeze
Ion exchange	Fan	650 φ×242 m ³ /min
	Positive ion exchange, quantity	Amberlite IR-120B 4 l
	Negative ion exchange, quantity	Amberlite IRA-410 8 l

TABLE 10.2 Target section cooling water system main specifications

Component	Specifications	
Cooling tower	Cooling capacity	130,000 kcal/hr
	Water flow	350 l/min
	Temperature	46.3 °C→40 °C (Wet globe 25.6 °C)
	Coil, fin	Cu.
Pump	Fan	680 ϕ × 295 m ³ /min
	Type	Horizontal turbine pump
	Pipe dia., flow	65 A × 350 l/min
	Total lift	75 m
	Electric motor power, power supply	11 kW × 3 ϕ × 200 V
Flow meter	Material	SUS
	Type	Glass tapered pipe with float
	Max. flow scale	50, 100, 200 l/min
Flow switch	Flow detection	Piston with permanent magnet
	Flow setting	0.8~60 l/min
	Manufacturer	Gems Company Inc. (USA)
Ion exchange	Positive ion exchange, quantity	Amberlite IR-120B 4 l
	Negative ion exchange, quantity	Amberlite IRA-410 8 l

TABLE 10.3 Klystron cooling water system main specifications

Component	Specifications	
Cooling tower	Cooling heat capacity	303,000 kcal/hr
	Water flow	420 l/min
	Temperature	52 °C~40 °C (wet globe 25.6 °C)
Pump	Pipe dia., flow	65 A × 420 l/min
	Total lift	60 m
	Electric motor power	7.5 kW
Flow switch	Flow detection	(I) paddle, bellows (II) Orifice, diaphragm (III) Shuttle with permanent magnet
	Pipe dia.	(I) 1" (II) 3/4" (III) 1"
	Manufacturer	(I) (II) Yamatake-Honeywell Co. (III) Gems Company Inc. (USA)

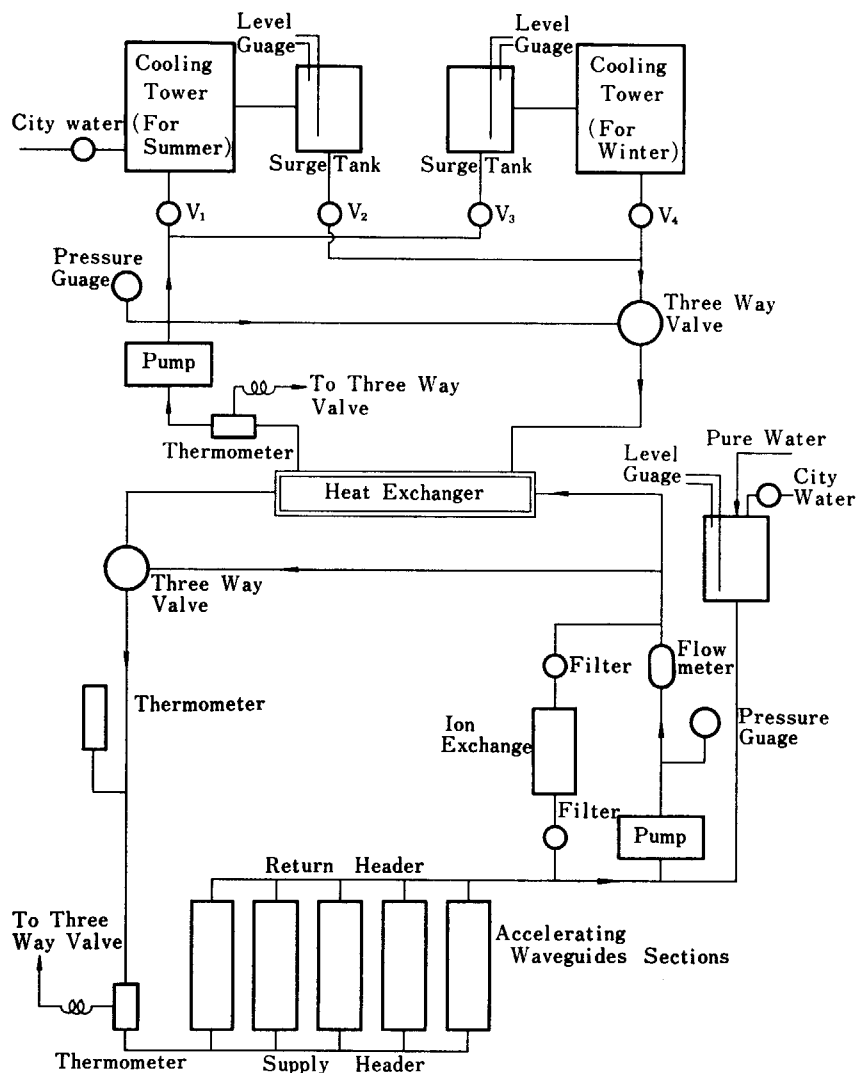


Fig. 10.1 Flow diagram of accelerating waveguide section cooling water system.

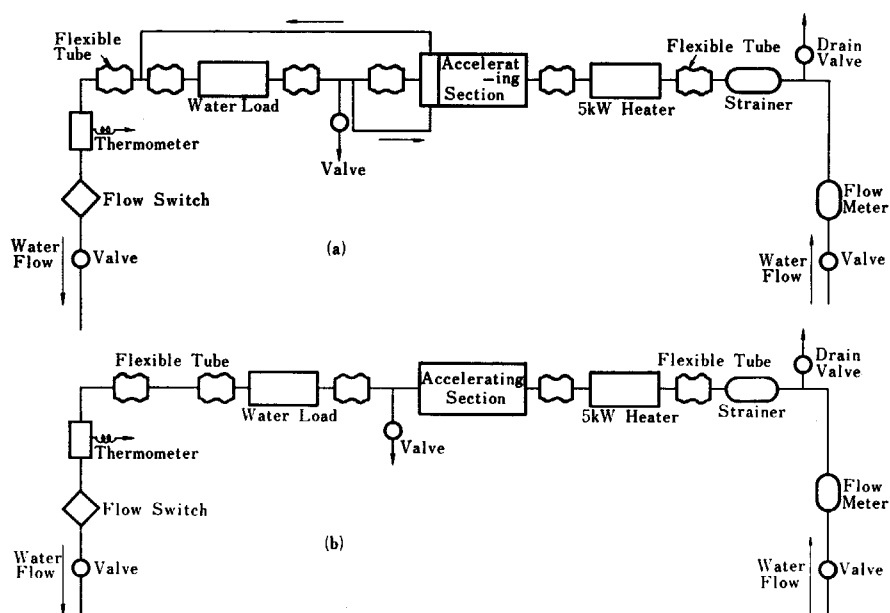


Fig. 10.2 Flow diagram of cooling water for accelerating waveguide sections.

(a) First and second accelerator sections.

(b) Third, fourth and fifth accelerator sections.

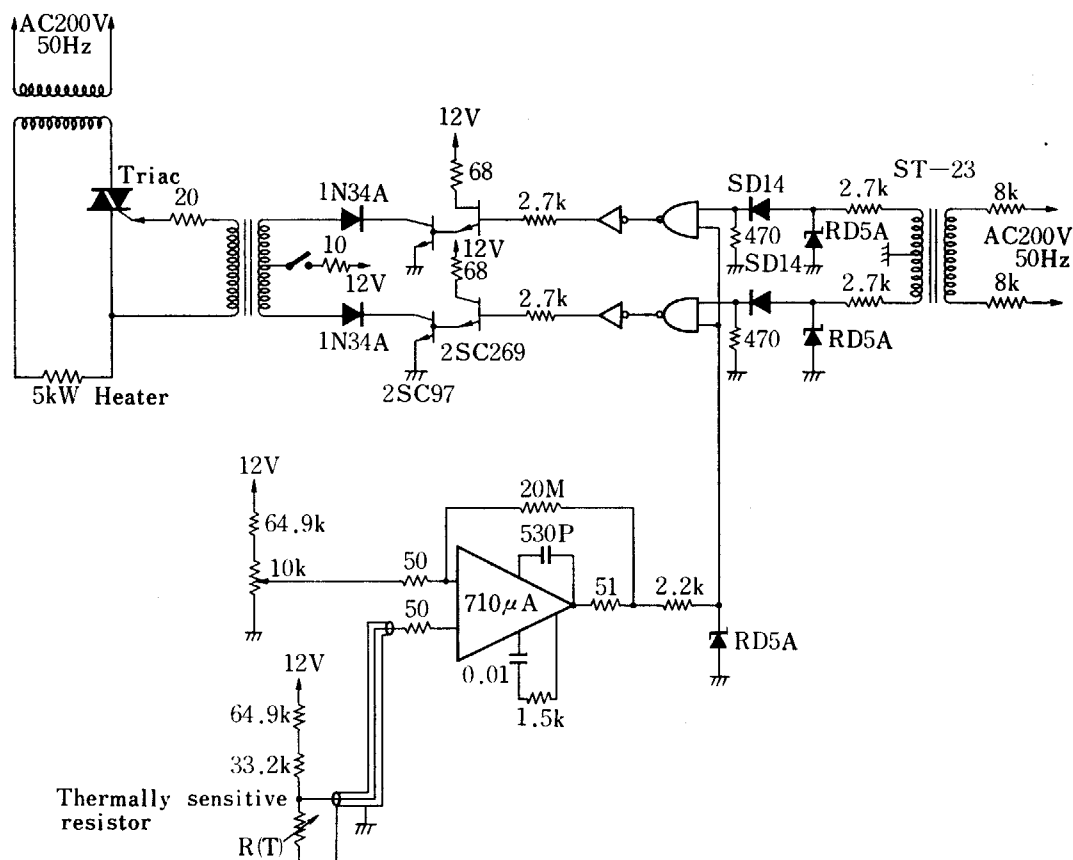


Fig. 10.3 Switching circuit diagram of a 5kW electric heater, for water temperature control.

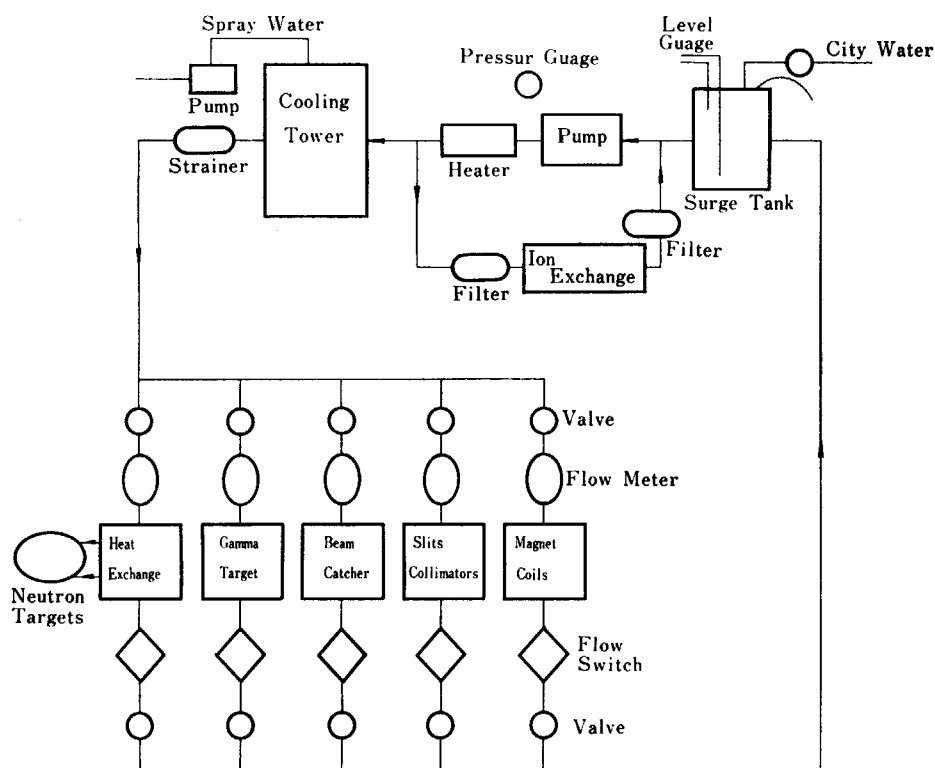


Fig. 10.4 Flow diagram of targets and other cooling water system.

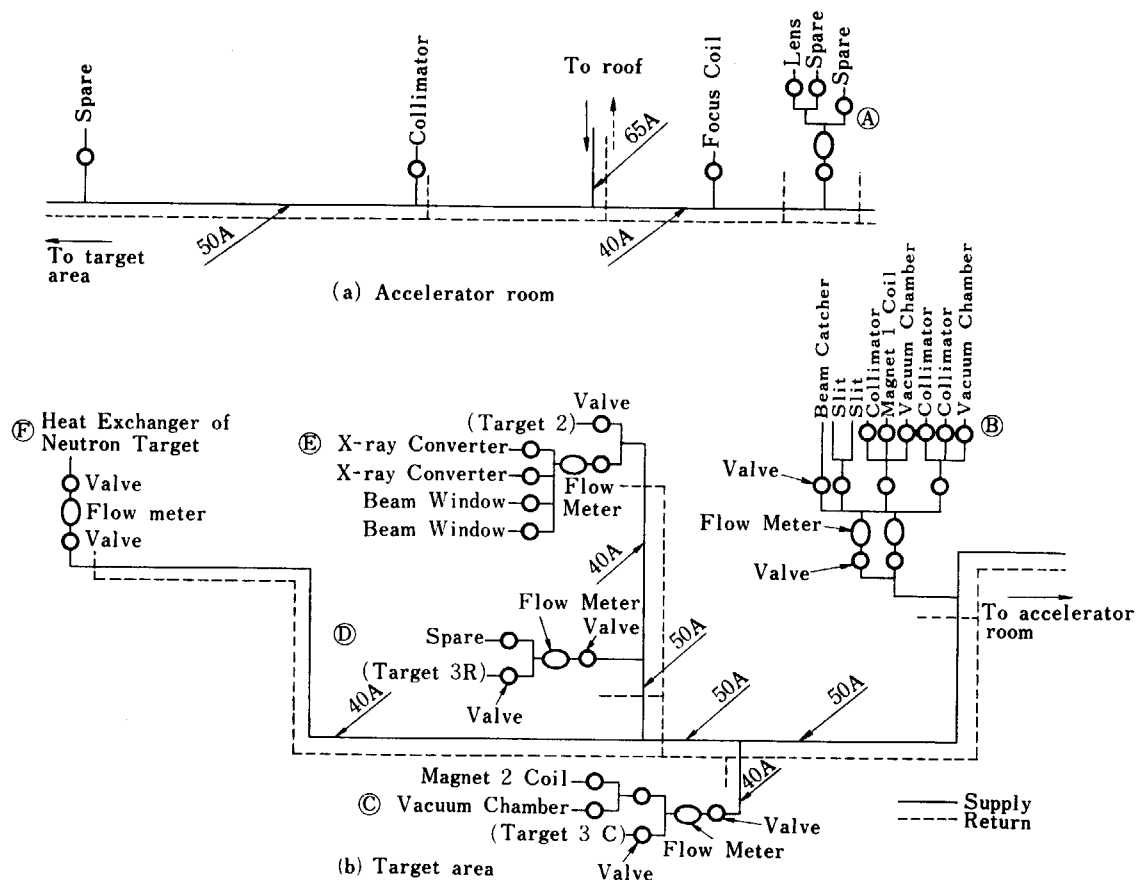


Fig. 10.5 Flow diagram of cooling water for targets and other various instruments. A flow switch and a valve, omitted in the figure though, are installed in the return line of each cooling water branch. Numbers, e.g., 40 A, are the diameters of the pipes indicated with an arrow in mm unit.

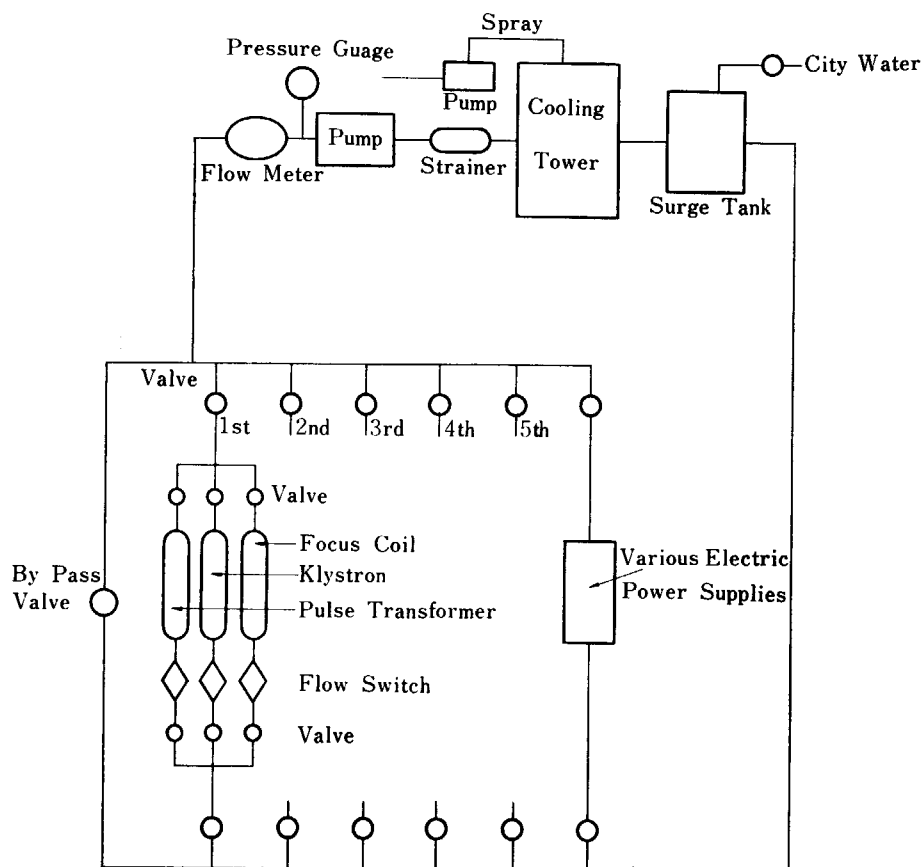


Fig. 10.6 Flow diagram of klystron cooling water system.

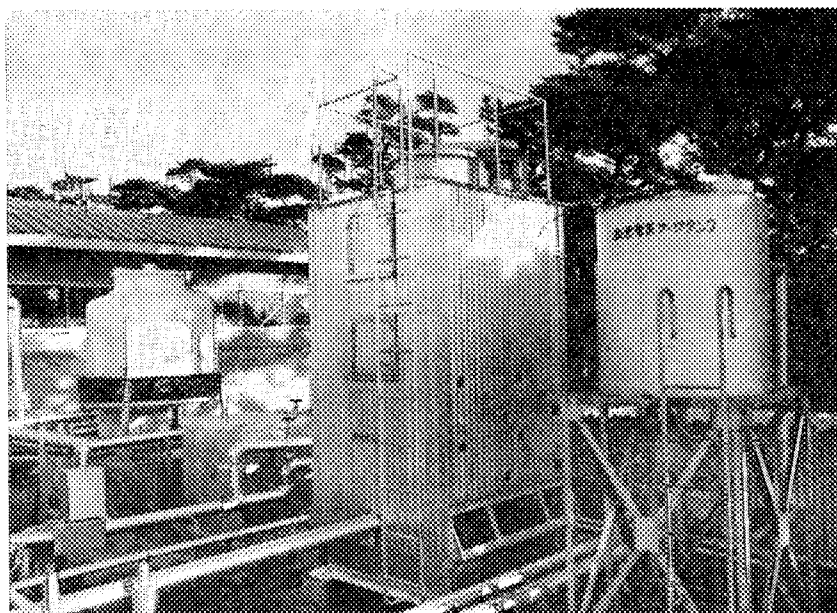


Photo 10.1 Water cooling system.

11. 受電及び配電設備

Linac の増力に伴って使用電力が増大し、750 kVA の受電設備が増設された。また、そのために一部の配電経路の変更が行なわれた。受電設備において低圧に降圧され linac 建家内の諸設備に配電が行なわれる。

11.1 750 kVA 受電設備

従来 linac 建屋の給電は、建屋内の電気室とその隣接の屋外に設置された受電設備から行なわれていた。しかし、電気室内に 750 kVA 受電設備を収容する余裕がないので、Fig. 11.1 に示すように道路を隔てた屋外の放射線警戒区域内に新しい受電設備が設置された。電流容量が増加するために、従来の Co-60 照射室からの送電は変更されて、JRR-1 建屋の高圧幹線から地下送電されることになった。

750 kVA 受電設備は、Fig. 11.2 に示すように、3 単位の屋外型 cubicle と 1 台の屋外型の変圧器よりなっている。JRR-1 建屋から高圧受電 cubicle までは地下の高圧ケーブルによって送電される。この cubicle 内には、DS (disconnecting switch) と OCB (oil circuit breaker) がある。これに続く高圧配電 cubicle においては、送電は 2 系統に分けられる。1 系統は cubicle 内の DS を経て高圧ケーブルにより既設 linac の受電設備へ送電される。他の 1 系統は cubicle 内の DS と OCB を経て 3 相変圧器に接続されている。変圧器の容量は 750 kVA、2 次電圧は 210 V である。変圧器の 2 次出力は低圧配電 cubicle に接続されている。この内部において 4 系統に分けられ、それぞれ cubicle 内の NFB (no fuse breaker) を経て低圧大電流ケーブルによって linac 建屋のコントロール室に設置された屋内自立型 NFB 分電盤に接続されている。

11.2 Linac 建屋内の配電

コントロール室内の自立型 NFB 分電盤には 4 系統の配線があり、それぞれに NFB が含まれている。分電盤の出力端子は Fig. 11.3 に示すように、1 系統は直接、

他の 3 系統は IVR (induction voltage regulator) を経て、屋内自立形 MgS (magnet switch) 盤に接続される。IVR と MgS 盤はコントロール室の隣のターゲット建屋に設置されている。

IVR の容量は、IVR 1 と 2 が 110 kVA で、IVR 3 は 330 kVA であり、それぞれの出力電圧は、0 から 420 V まで変えることができる。これらの IVR の各々に自動電圧調整器が付随していて、これを動作させることにより IVR の設定出力電圧の変動を $\pm 1\%$ 以下にすることができる。これらの自動電圧調整器はコントロール室に設置されている。Fig. 11.4 はコントロール室付近の平面図で、自立 NFB 盤、IVR、自立 MgS 盤、IVR 盤の配置を示す。

前記のターゲット建屋内の自立型 MgS 盤の入力は 4 系統であるが、IVR 3 を通る系統は MgS 盤内においてさらに 3 系統に分けられる (Fig. 11.3)。これらの 6 系統は MgS を通り、1 系統は電子銃のカソード・モジュレータに、5 系統はそれぞれ 5 組のクライストロンのモジュレータの電源回路に接続されている。

前にも述べたように、750 kVA の高圧配電 cubicle から既設の linac 建屋の電気室の高圧受電盤へ高圧ケーブルによって送電が行なわれている。この高圧受電盤から一旦屋外の変圧器群へ送電され、電圧を 210 V および 100 V に下げて再び電気室の既設の低圧配電盤に送電される。Linac の建屋の空調機、照明器、各種実験機器は、この配電盤から送電されている。コントロール室内のモジュレータ室側に NFB-MgS 分電盤と linac の 3 系統の冷却系制御回路と定電圧装置が設置されている。これらは電気室の低圧配電盤から送電されている。この NFB-MgS 分電盤より linac の制御回路、各種電源へ配電される。定電圧装置は電子銃のカソード、パルサーの電源用で、電圧安定度 $\pm 2\%$ の磁気増幅型交流電圧安定回路である。また、電気室内には各中性子実験室への送電のために低圧分電盤が増設された。

以上の受配電設備の設計は原研の技術部によって行なわれた。

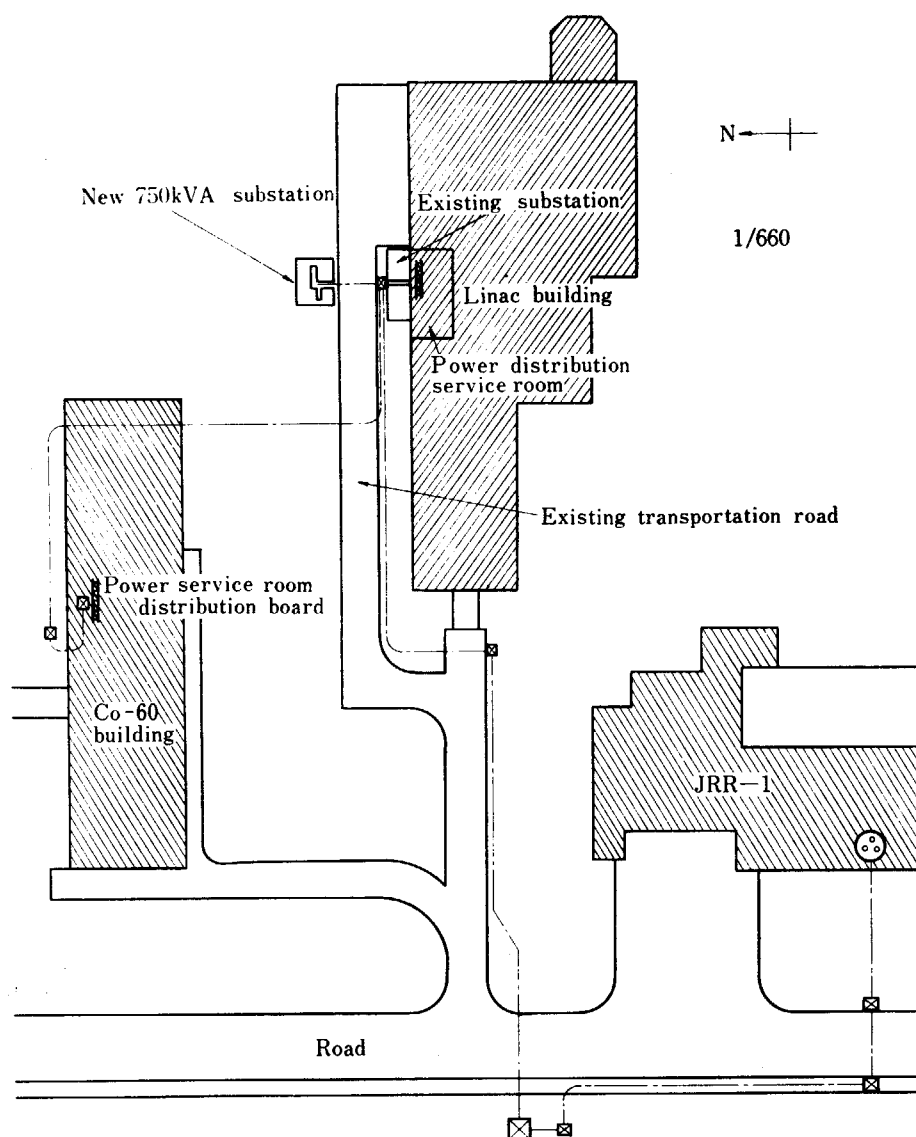


Fig. 11.1 Location of power line under the ground around the linac building.

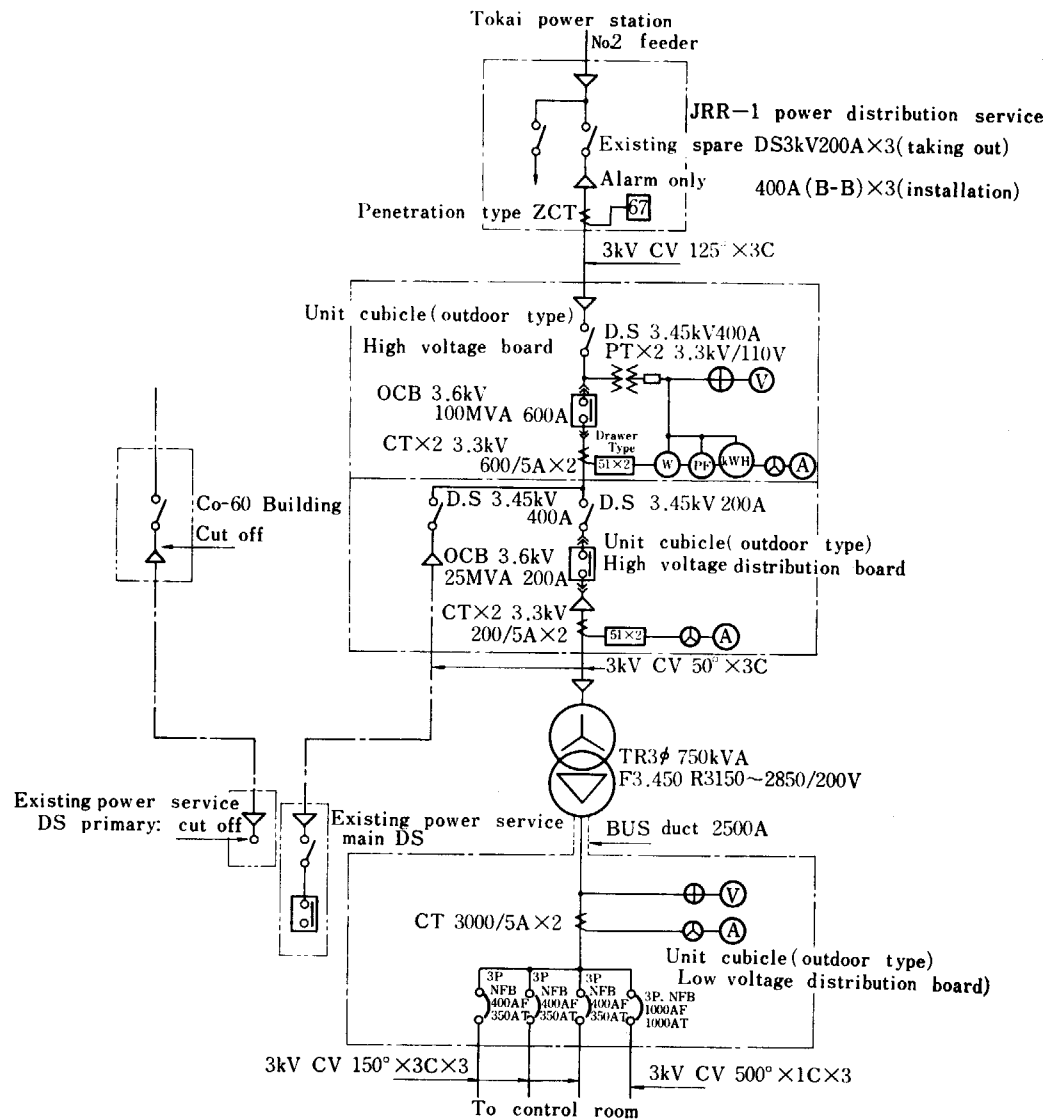


Fig. 11.2 750 kVA master substation.

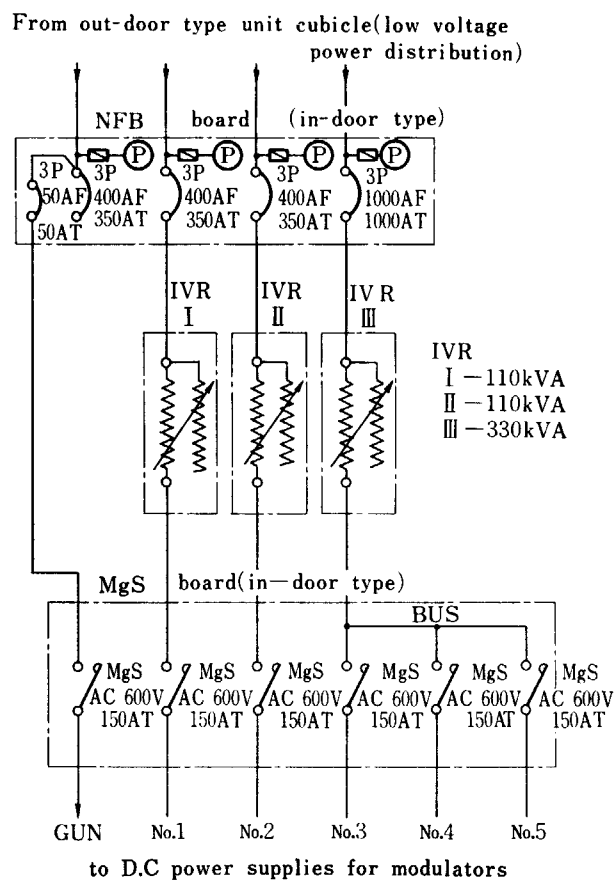


Fig. 11.3 Diagram of gun modulator and klystron modulators services.

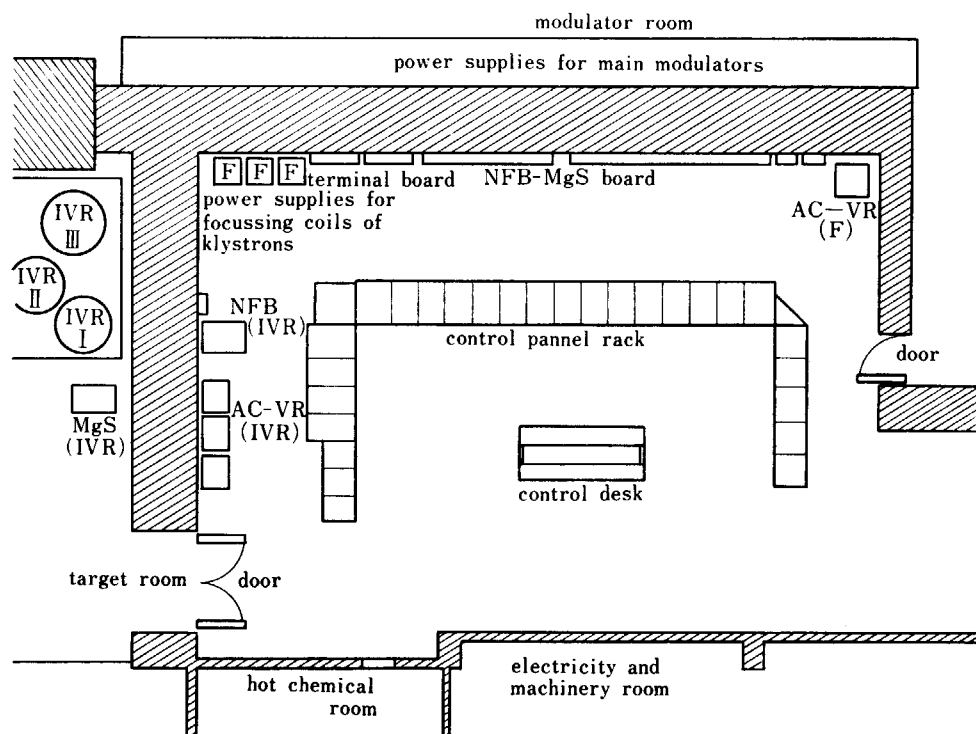


Fig. 11.4 Location of control system components in the control room.

12. 制 御 系

Linac には数多くの電気回路や電気機器とそれらの制御回路が含まれているので, linac の運転を 1 人の運転員によって行なうために集中管理方式が採用されている。起動, 調整, 停止等の諸操作は全てコントロール室で行なうことができる。

また, linac の安全運転, 放射線被曝防止および高圧感電事故防止のためにインターロック系が設けられている。異常がおこるとインターロック系は自動的に働いて, linac の運転は停止される。Fig. 12.1 に制御系の系統図を示す。

12.1 配置及び配線

コントロール室の中央にはコントロール・デスクがあり, それを取り囲む形でコの字形にコントロール・ラックが置かれ, それに各種の回路のパネルが収められている。コントロール・デスクとコントロール・ラックは床の配線用ダクトの上に設置され, このダクトは linac 建屋の各室のダクトとも結ばれている。したがって, すべての配線はこれらのダクトを通して行なわれる。

Linac 建屋コントロール室内には, 第 11 章でも述べた NFB-MgS 分電盤が壁に取付けられていて, これらから linac の制御系および各種電源への給電が行なわれている。コントロール室, モジュール室, 加速管室の壁にはターミナル盤が設けられ, これらの部屋にまたがる配線は(高電圧線と速い信号の伝送線を除く), 全てターミナル盤を経由して行なわれる。

コントロール室内には第 11 章で述べたように IVR 用の自立型 NFB 盤や, IVR 制御装置の他にクライストロン集束コイル電源, 定電圧電源, および 3 系統の冷却系の制御盤が設置されている。

12.2 コントロール・パネル

コントロール・ラックにおけるパネルの配置図を Fig. 12.2 に示す。ラックの正面中央部に ITV 受像器が置かれ, linac の調整時に電子ビームのスポットの観察に用いられる。この受像器は, 必要に応じて手前に引き出して $\pm 90^\circ$ 回転させることができる。その左隣には, 照光式グラフィック・パネルが置かれている。これにはコントロール室, モジュール室, ターゲット室, 加速管室が 1/50 の縮尺で示され, 動作している装置と使用しているターゲットおよび飛行管がランプの点灯によって示される。

パネルの配置は右より順に, 煙感知器のマスター回

路, トリガー・パルス発振器, マイクロ波発振器および増幅器, 加速管部 steering コイル電源, 主モジュレータ計器, クライストロン計器, 電子銃バイアス電源, イオン・ポンプ電源, 各種磁石およびコイルの励磁電源, 加速管温度制御回路, 放射線モニター, linac 各部の温度記録計およびインターロック表示板である。パネル・ラックの最上段には同じラックに属する各々のパネルのインターロック信号が集められ, ランプの点灯によって表示されている。また, 左端のラックのパネルには, このインターロック信号とコントロールパネル以外のインターロック信号が集められて, ランプの点滅によって全インターロック系の動作が一目で確認できる。

これらのラックの上部にはファンがとりつけられて, パネルの部品の空冷を行なっている。とくに大型電磁石の励磁電流安定回路のトランジスタは水冷されている。また, ラック上部の 7 カ所に煙感知器が取付けられていてパネルの火災防止に備えている。Photo 12.1 はコントロール・パネル, Photo 12.2 はラックの中央部の写真で, グラフィック・パネルと ITV の受像管が見える。

12.3 コントロール・デスク

コントロール室の中央に設置されたコントロール・デスクには, linac の運転に際して必要な制御がすべてできるように, 計器や操作スイッチや, 信号ターミナルが集められていて, 1 人の運転員がほとんど移動することなく運転操作を行なうことができる。Photo 12.3 はコントロール・デスクである。コントロール・デスクのパネルで行なうことができる主な操作を左のパネルから順に述べる。

- 1) マイクロ波発振器の周波数調整
- 2) 5 本の主クライストロンとプレバンチャへの入力マイクロ波用の減衰器と移相器の調整
- 3) 電子銃カソード加速パルス電圧調整
- 4) 電子銃のグリッド・バイアス電圧調整
- 5) 電子銃グリッド制御パルス電圧調整
- 6) 電子銃ヒーター電流調整
- 7) 主クライストロンのモジュレータの直流電圧の昇降。これは手動操作によるか, またはヘリポットで電圧の値を予め設定し, 自動操作で行なう。ただし, 手動の場合はモジュレータ 1 と 2 は独立に, モジュレータ 3, 4, 5 は同時に操作される。自動操作の場合は全部同時に設定値まで操作されるが, モジュレータ 3, 4, 5 の設定値は互いに独立には選ぶ

ことはできない。

- 8) 事故発生時の linac の緊急運転停止。大きな事故発生時にはインターロック系により自動的に運転停止が行なわれるが、インターロック系に組込まれていない箇所の事故や、インターロック系の事故も考えられるので、手動による運転停止も考える。この操作を素早く行なうために、コントロール・デスクの中央部のパネルの下方に赤色の大きな押しボタンスイッチが設けられている。
- 9) Linac のコントロール電源の起動および停止
- 10) インターロック系が開かれた場合の復帰
- 11) Linac の運転開始。これは準備完了と開始の2段階の回転スイッチ（メイン・キー）で行なう。準備完了と開始はそれぞれの点灯によって表示される。
- 12) Linac のトリガー信号の繰返し周波数の設定
- 13) ビームの伝送路の変更（電磁石の切換、ターゲットの切換）
- 14) 一部の加速管のマイクロ波の入力停止
- 15) ビーム伝送系の主な磁石とレンズの電流調整。ただし、伝送系については現在も改良中であり、最終的な配線は完了していない。

コントロール・デスクのパネル上には上記の操作の際に必要な電流計、電圧計などの指示計と、各種のパルス波形観測のための同軸ケーブル用ターミナルがある。コントロール・デスクの上部の回転台上にはオシロスコープが置かれ、前記のターミナルと同軸ケーブルで接続し、波形観測を行なう。そのほか linac の制御電源運転時間とビーム時間の積算計と、時計がある。

コントロール・デスクの左袖にはコントロール・デスクの電源の起動と停止を行なうキー・スイッチがある。また、コントロール・デスクの上部にはドア・インターロック解除の点滅信号を発生する指示器が置かれている。コントロール・デスクの内部には linac のトリガーパルス発生回路が置かれているが、これについては次に述べる。

12.4 トリガー系

Linac は、通常 AC 電源同期の繰返しパルスで運転される。非同期でも運転可能であるが、マイクロ波増幅系の直流電源の整流リップルのために、クライストロンの

出力がパルスごとに変化し、したがって加速される電子のエネルギーが変化する。そのため特別な目的以外には電源非同期運転は行なわれない。

AC 同期パルス発生器の出力信号を分割し、それぞれに適当な時間のずれを与えマイクロ波増幅系、電子入射系、実験装置等のトリガーを行なう。

12.4.1 AC 同期パルス発生器

AC 同期パルス信号の発生は AC 3 相ラインの全波整流（6 相整流）によって得られる。パルスの繰返し設定は各相にスイッチが設けられ、その on-off によって行なわれる。これにより 50, 100, 150, 300 pps の等間隔信号と、200, 250 pps の非等間隔信号が得られる。上記の整流電圧信号は適当な増幅と微分によりパルスに変換される。また、2 組の flip-flop 回路により上記の 1/2 および 1/4 の繰返しの信号を発生することができる。組合わせて得られる等間隔繰返しは 12.5, 25, 37.5, 50, 75, 100, 150, 300 pps である。この繰返しパルス発生器の回路を Fig. 12.3 に示す。Linac の各モジュレータからもれてくるパルス雑音による誤動作を避けるために、とくに真空管回路が採用されている。

12.4.2 タイミング調整回路

AC 同期パルス発生器の信号は増幅され、3つの信号に分割される。第1の信号は時間遅れがない信号で、これはまた2つの信号に分割され、カソード・フォロアーによって取出される。第2の信号はディレー・ケーブルによって 2.1 μ sec の遅れが与えられた後、5つに分割され、カソード・フォロアーによって取出される。

第3の信号は 0.5 μ sec または 0.7 μ sec の遅れが与えられた後、2つに分割され、同じくカソード・フォロアーによって取出される。これらのパルスは linac の諸パルサーのトリガー信号として用いられる。この回路も前に述べた理由により真空管方式である。

タイミング調整回路はコントロール室のコントロール・デスク内のラックに設置されている。Fig. 12.4 にタイミング調整回路の配線図を示す。また、Fig. 12.5 に、AC 同期パルス発生回路とタイミング調整回路のブロック図と出力の時間関係を示す。

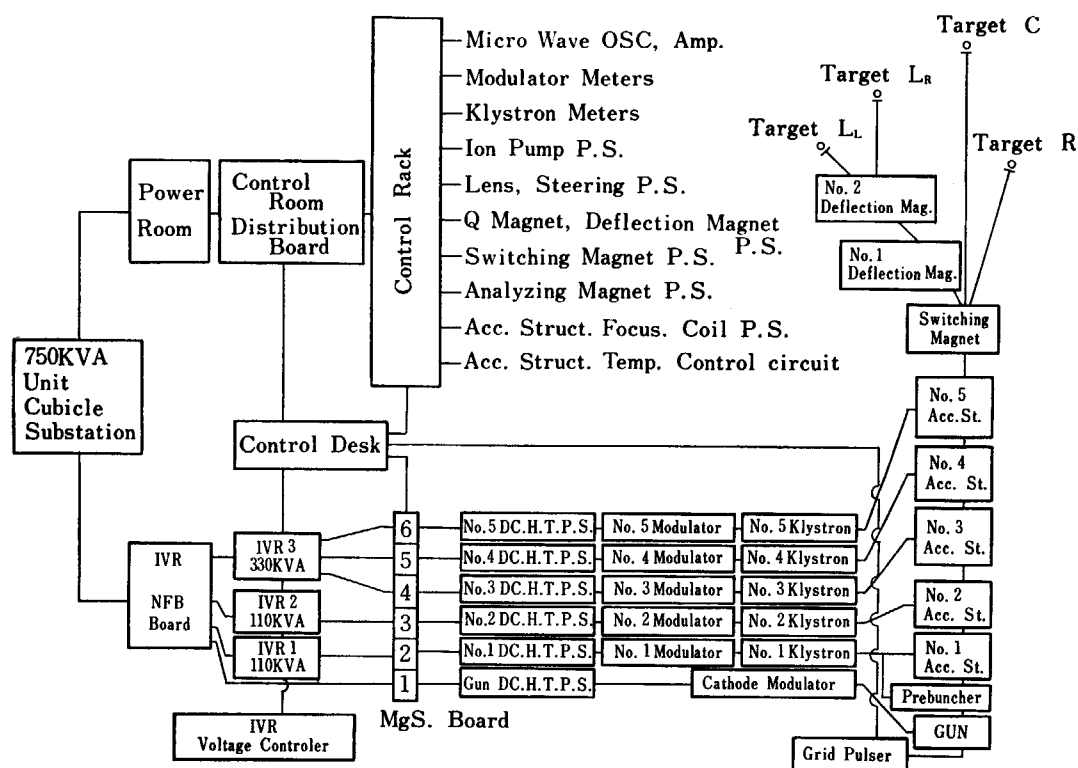


Fig. 12.1 Block diagram of control system.

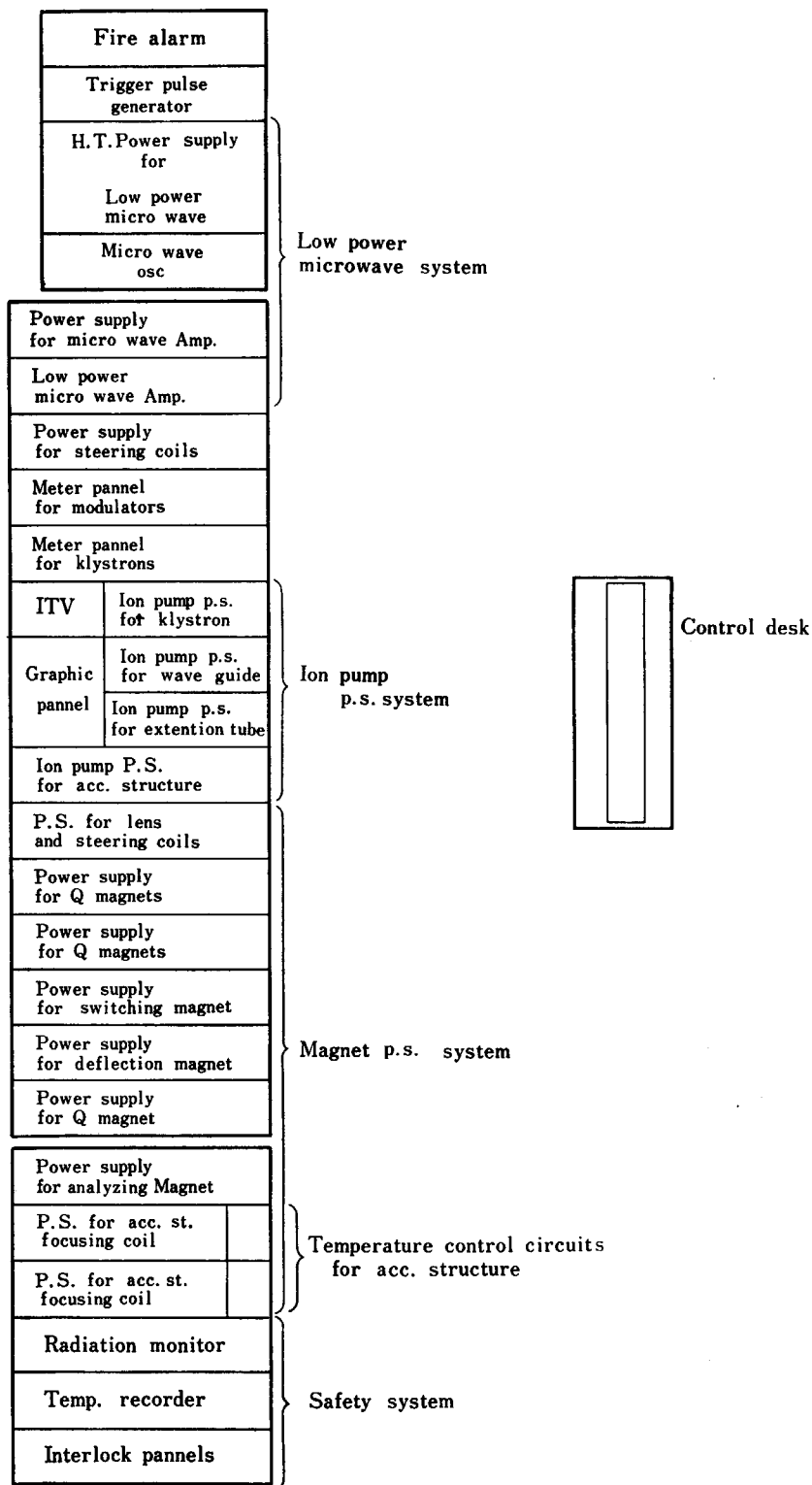


Fig. 12.2 Location of various system components on the racks of the control room.

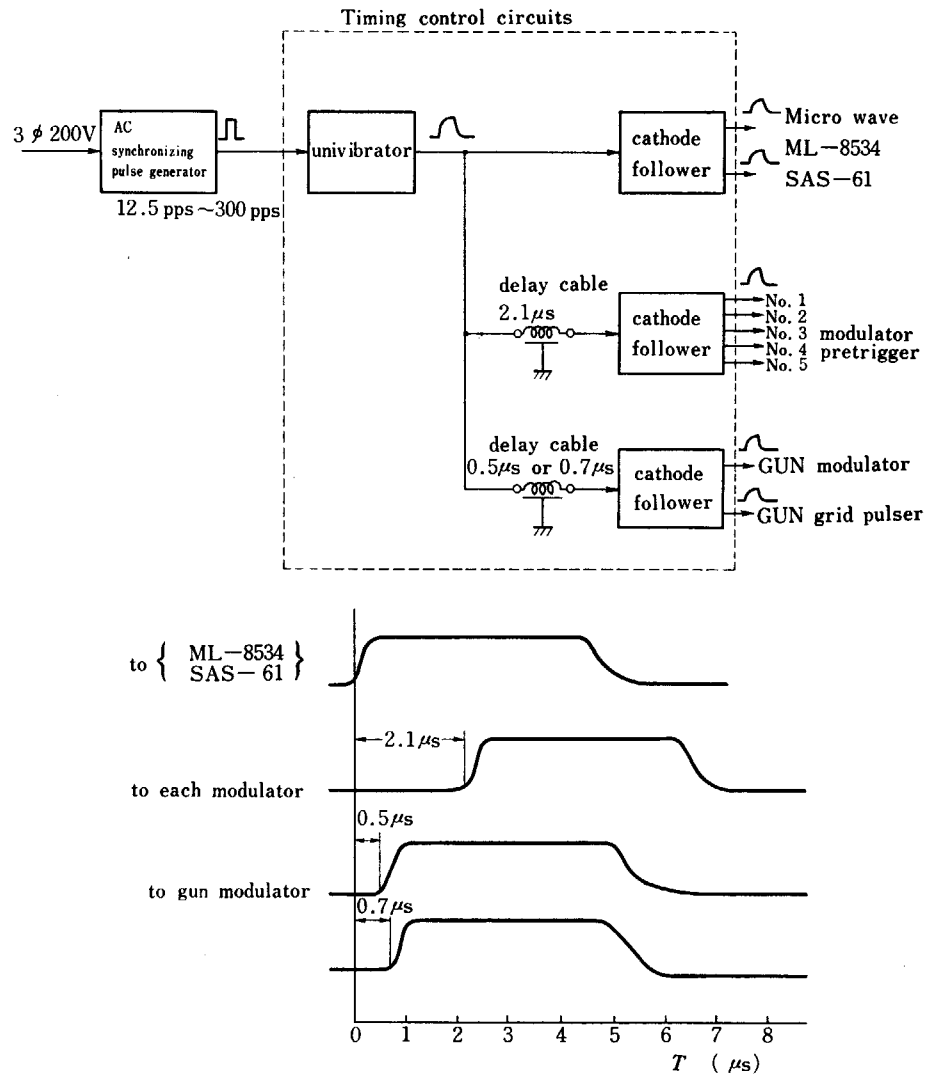


Fig. 12.5 Block diagram of trigger pulser and timing relation between various trigger pulses.

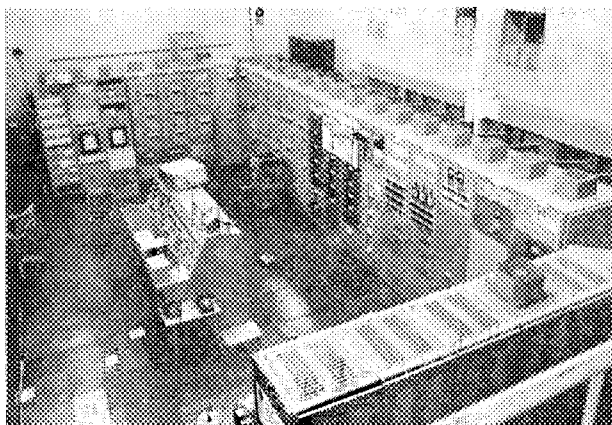


Photo 12.1 Control panel.

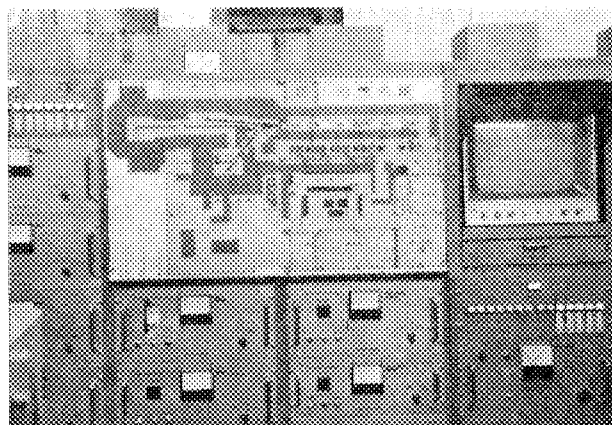


Photo 12.2 Graphic panel and ITV receiver.

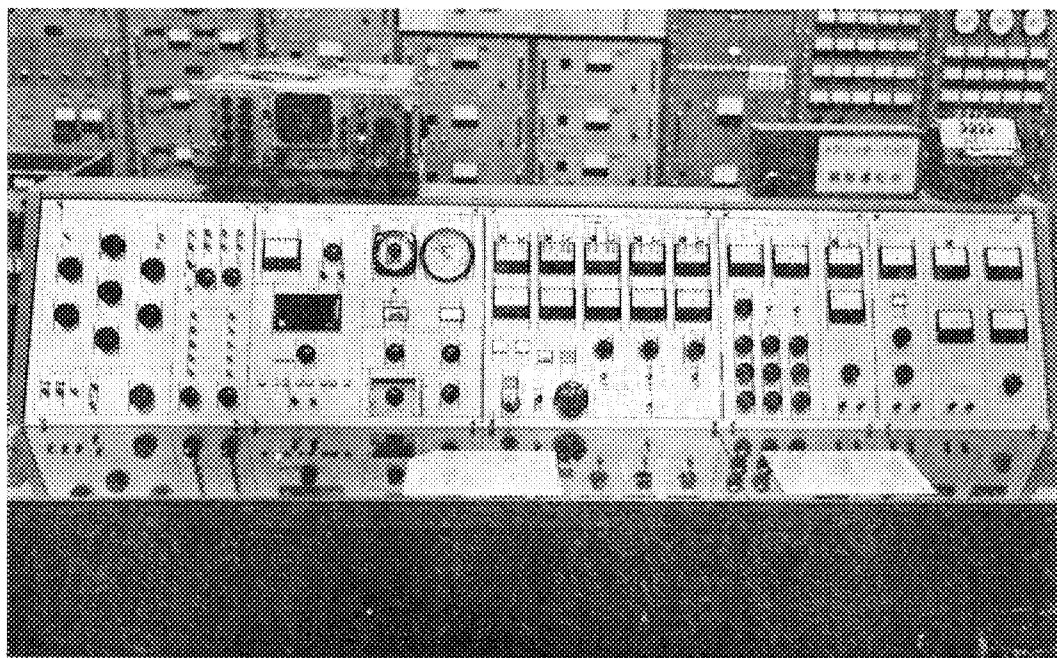


Photo 12.3 Control desk.

13. インターロック系

インターロック回路は機械の保護と人の安全のために組まれていて、これにより Linac の起動、運転、停止の動作が確保される。運転中に機械に異常が発生したり、人に対し危険が発生すればインターロックは破れて運転が停止する。Linac のインターロック系のブロック図を Fig. 13.1 に示す。図の左側は機械に対するもので、右側は人に対するものである。

13.1 機械に対するインターロック

1) コントロール室分電盤系: Linac の各種電源や制御電源の電力は、分電盤の NFB と MgS を通して送っているが、この NFB と MgS の補助接点がインターロック回路に組込まれている。全ての NFB と MgS が閉じなければインターロックは完成しない。もしどれかの NFB に過電流が流れれば、NFB は trip してインターロックは破れ、linac の運転は停止される。

2) クライストロン冷却系、加速管冷却系、ターゲット冷却系: これらの冷却系の循環ポンプや冷却塔のファンはコントロール室内の配電室内の NFB と MgS を通して給電される。この NFB と MgS の補助接点と、サージ・タンクの水位検出器の接点はインターロック回路に組込まれている。NFB, MgS が閉じサージ・タンクの水位が正常であれば、インターロックは完成される。

3) 冷却水系: 全ての冷却水回路のドレイン側にはフロー・スイッチが取つけられ、それらの接点がインターロック回路に組込まれている。流量が規定値以上にならないとインターロックは完成しない。

4) マイクロ波系: コントロール・ラックにあるマイクロ波発振器とマイクロ波増幅器の電源の MgS の補助接点と、これらの回路中の電流の動作範囲の上限と下限を制限するためのメーター・リレーの接点がインターロック回路に組込まれている。MgS が閉じて、電流値が規定範囲にあるとインターロックは完成される。また、クライストロンからの大電力マイクロ波を伝送する導波管にとりつけられているマイクロ波モニターのリレーの接点が、インターロック回路に組込まれている。モニターで異常な反射波を検出するとインターロックは破られる。

5) モジュール系: 各モジュールの高圧直流電源の過電流リレーの接点がインターロック系に組込まれていて、過電流が流れるとインターロックは破られる。

サイラトロン空冷用のブローワの風量リレーの接点とサイラトロンの補助電極の直流電源の出力電流の電流リレーの接点がインターロック回路に組込まれている。ブ

ローワが働き、補助電極に規定電流が流れるとインターロックは完成する。

6) クライストロン系: クライストロンの集束コイル電源の NFB と MgS の補助接点、パルストランスのバイアス電源のメーター・リレーの接点とクライストロン関係の冷却水のフロー・スイッチの接点がインターロック回路に組込まれていて、これらが正常に動作しないとインターロックは完成しない。また、クライストロンのヒーター回路の過電流リレーの接点もインターロック回路に組込まれ、過電流が流れるとインターロックは破られる。

7) ビーム伝送系: 各種電磁石や集束コイル等の励磁電源回路の MgS の補助接点と、これらの直流電流の上限下限を制限するメーター・リレーの接点と定電流安定化回路の電源の動作を示すリレーの接点が各伝送路別に組合わされてインターロック回路に組込まれている。これらが正常に動作しないとインターロックは完成しない。

8) 真空系: イオン・ポンプの真空度の限界をきめる過電流リレーやメーター・リレーの接点がインターロック回路に組込まれ、真空度が悪くなるとインターロックは破られる。

これらのインターロック回路はインターロックが完成するとランプを点灯して表示される。コントロール・ラックの最上部のパネルには、そのラックに属するパネルのインターロック信号で動作するリレーが並べられ、その接点の1つは表示ランプの点灯を行なう。他の1つの接点は直列に接続されて、最左端のラックのパネルに集められ、インターロック総表示インターロック・リレーを動作させる。このリレーの接点により総表示ランプの点灯が行なわれ、他の接点は直列に接続されてインターロック回路が組まれる。Photo 13.1 は総表示パネルである(左端)。Fig. 13.2 にはインターロック回路の配線図が示されている。これらに使用されるリレーは AC 24 V で動作する小型リレーである。

インターロック回路の役割の1つは運転の際の機械の動作順序を確保することである。この順序の詳細は運転の項で述べられるが、最初に冷却塔系が動かされ、冷却水系のインターロックが完成した後にメイン・スイッチにより諸電源や制御回路の起動が行なわれる〔CONTROL POWER ON〕。この時クライストロン、サイラトロンや各種大型真空管のカソードのヒーターは点火されるが、クライストロンのカソード・モジュール電源とこれらの球のアノード電源は起動されない。アノード電源を起動させるインターロック回路にはタイム・ディレ

ー・リレーが組込まれていて、30 分後にはインターロックが完成しアノード電源が起動される。また、この際クライストロン・モジュレータ用の 3 台の IVR と電子銃カソード・モジュレータの 3 相摺動変圧器の出力電圧が 0 にならないと前記のインターロック系は完成しないように、IVR と摺動変圧器の可動部のリミット・スイッチがインターロック回路に組込まれている。これはサイラトロンやクライストロンに急激に高電圧を与えるのを防止するためである。

インターロック回路のつぎの役割は、各部で異常や故障が生じた時にインターロック系が破れて、linac の運転を速かに停止することである。とくによくおこるインターロック系の破れは、クライストロン・モジュレータの直流高圧電源の過電流リレーの動作と、イオン・ポンプの電源の過電流リレーの動作によるものである。真空系のインターロックが破れた場合は、クライストロン・モジュレータと電子銃カソード・モジュレータ回路の AC 入力回路の MgS が開かれる。MgS が開かれると 3 台の IVR と摺動変圧器は出力電圧がゼロになるように動作する。また、電子銃のヒーター電源、グリッド・パルサー電源も自動的に停止する。真空系以外のインターロック系が破れる場合はクライストロン・モジュレータと電子銃のカソード・モジュレータの電源回路の MgS だけが開かれる。

13.2 人に対するインターロック

人に対するインターロックについては放射線被曝に関するものと高電圧の感電に関するものがある。

パーソナル・スイッチ：放射線被曝防止のため加速管室とターゲット室の入口付近の壁にはプラグ・ジャック型スイッチが 10 コずつ並べられている。このプラグが 1 つでも引抜かれるとインターロックは破られ、linac の運転は停止する。

ドア・スイッチ：放射線被曝防止のために、加速管室、ターゲット室、モジュレータ室、各中性子測定室、ターゲット建屋内のコンクリートシールド、ホット排風機室、リニアック建屋屋上等の入口のドアにはドア・スイッチが設けられ、ドアが開かれるとインターロック系は破れる。モジュレータ室のドア・スイッチだけは必要に応じてインターロックを解除することができる。この場合はコントロール・デスク上にインターロック解除の信号を出す。

感電防止のために、主モジュレータ、電子銃カソード・モジュレータ、電子銃グリッド・パルサー回路の筐体のドアにはドア・スイッチが設けられ、扉が開かれるとインターロックが破れて、これらの高電圧は落とされる。

非常スイッチ：放射線被曝防止のため、高放射線区域の各所に運転表示ランプとスピーカーと非常スイッチがある。非常スイッチを off にするとインターロックは破れて、linac の運転は停止する。

放射線モニター：コントロール室内には放射線モニターが設けられていて、放射線のレベルが異常に上昇した場合はインターロックが破れて linac の運転は停止される。このモニターは保健物理安全管理部放射線管理課で管轄されている。

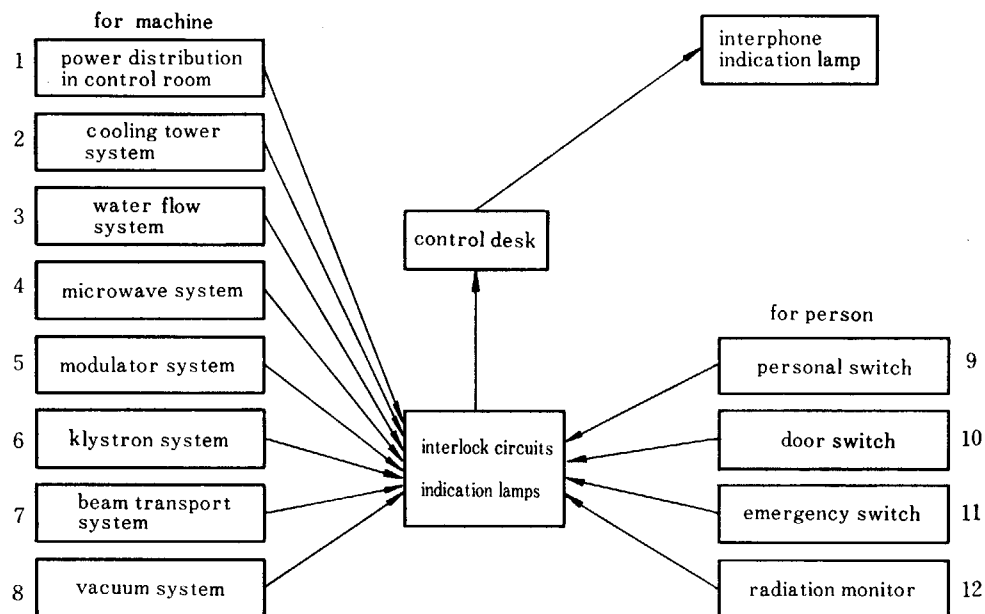


Fig. 13.1 Block diagram of interlock system.

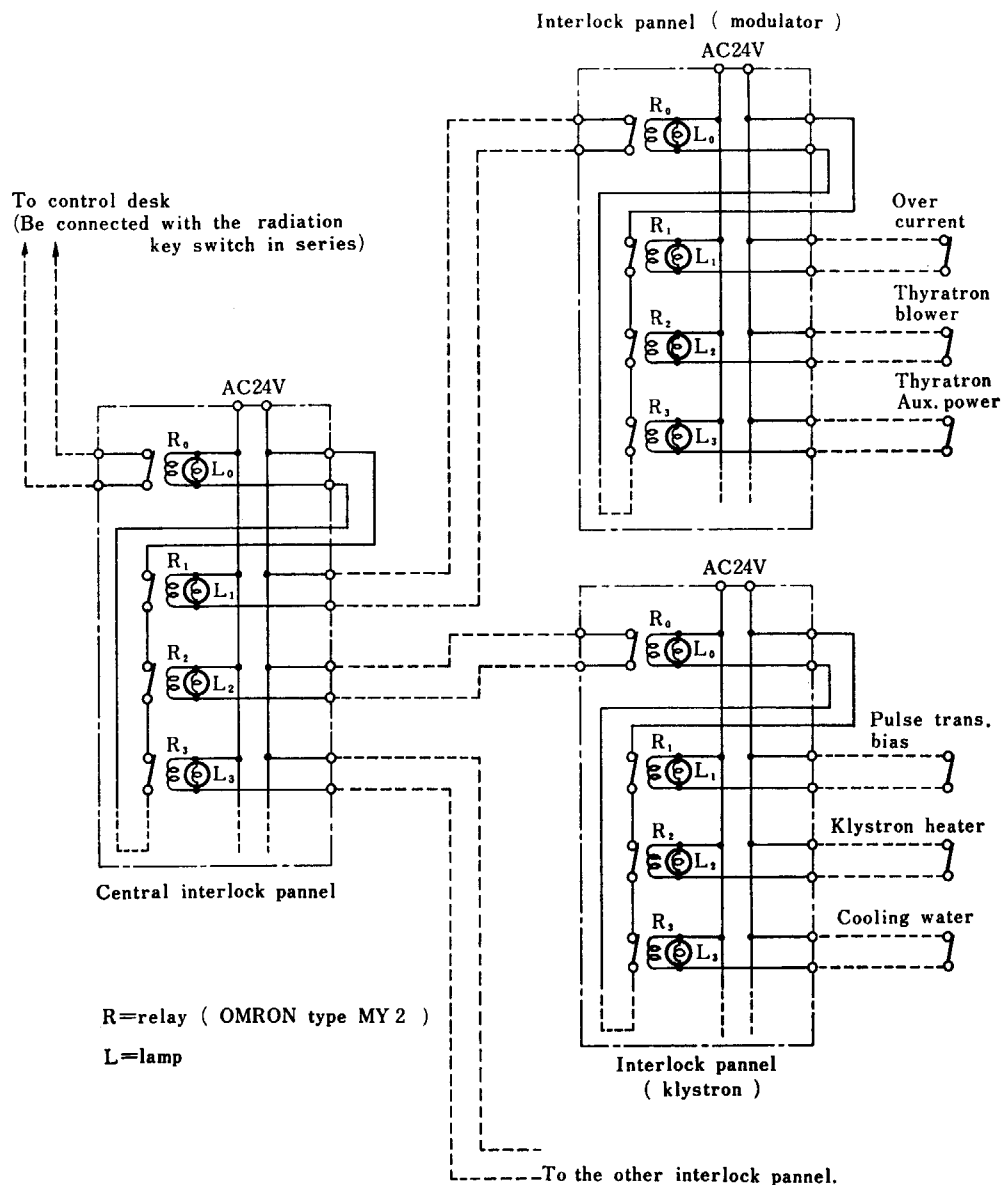


Fig. 13.2 Interlock pannel connection.

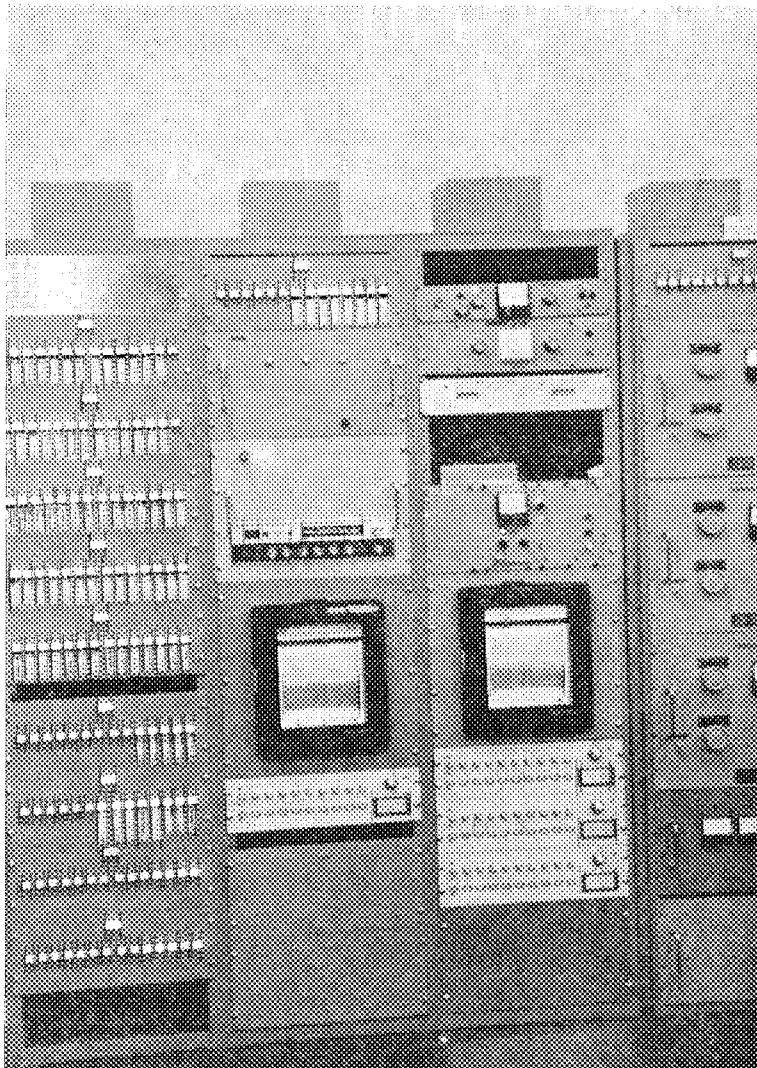


Photo 13. 1 Interlock pannel, temperature monitor and radiation monitor (from left).

14. 加速特性

Linac で得られる電子ビームの強度とエネルギーは多くの運転のパラメータによって支配される。以下主なものを列挙する。

- 1) 電子銃のカソードのヒーター電流
- 2) 電子銃のグリッドの制御パルス電圧とパルス幅
- 3) 電子銃のグリッドとカソード間のバイアス電圧
- 4) 電子銃のカソードの加速パルスの電圧及びパルス幅
- 5) プレバンチャのマイクロ波の電界強度及び位相
- 6) 入射系における集束用の電磁レンズ、ソレノイドコイル及び steering コイルの励磁電流
- 7) マイクロ波の周波数
- 8) 各加速管におけるマイクロ波の電界強度及び位相
- 9) 各加速管の温度
- 10) 第1加速管の集束コイル励磁電流
- 11) 加速管と次の加速管の間の Q 磁石と各加速管の steering コイルの励磁電流
- 12) 各ビーム伝送系における Q 磁石、偏向磁石、steering コイル等の励磁電流

しかし、これらの個々のパラメータのビーム加速に対する影響は必ずしも独立ではない。

14.1 測定方法

これらの測定において、1つのパラメータの加速特性の影響をみる場合は、他のパラメータも適当に変えて最大のビーム強度が得られるような調整が行なわれた。

ビーム電流は各加速管の後に設けられている5コの電流モニターで測定された。このモニターについては第8章に述べてあるので説明は省略する。加速管系に後続する分岐磁石を用いてビームを約5°左側に偏向することによって、そのエネルギーが測定された。磁石から430 cmの所に8 mm幅のビーム・スリットを設け、その後にはビーム・キャッチャを置いて電流を測定した。このエネルギー・モニターの分解能 $\Delta E/E$ は

$$\Delta E/E \approx \frac{8}{4300 \times 2\pi \times 5/360} = 0.021 \quad (14.1)$$

である。

14.2 電子銃のカソードのヒーター電流調節

ヒーター電流 I_t を変えた時のエネルギー・モニターによる加速ビームの電流とエネルギー・スペクトルの測定結果を Fig. 14.1 に示す。図中の I_{BM5} は第5加速管の直後にある電流モニターにおける電流の波高値である。

ヒーター電流が減少するとカソードからのエミッション電流が減り、ビーム電流値は減るが、エネルギーは上り、エネルギー・スペクトルの幅は狭くなる。 $I_t=0.6$ A の場合、スペクトルの半値幅はエネルギー・モニターの分解能による拡りを補正すると5%になる。この半値幅内の電流の積分値は電流総量の56%である。ヒーター電流を増すと、ビーム電流は増えるが、エネルギーは低くなり、スペクトルの半値幅も増える。さらにヒーター電流を増やすとエネルギーの高い所と低い所に電流のピークが現れてくるが、この原因はよくは判らない。Fig. 14.2 は Fig. 14.1 のスペクトルにおける電流の最大値に対するエネルギー値と I_{BM5} の関係を示したもので、大体直線関係になっている。

14.3 電子銃グリッドのパルスの電圧と幅の調節

電子銃のグリッドに加えられるパルス電圧を変化させた場合の加速ビームの電流とエネルギーの測定値を Fig. 14.3 に示す。また、このパルス幅の影響を調べたものが Fig. 14.4 である (パルス波形については、Photo 4.7 を参照)。

14.4 電子銃カソードのパルス電圧調節

電子銃のカソードのパルス加速電圧を変えた時の加速ビームのエネルギー・スペクトルを示したものが Fig. 14.5 である。電子のパルス加速電圧はプレバンチャ及びバンチャにおける電子のバンチングに関係があり、加速管への入射効率に大きな影響を与える。この測定から判るようにパルス加速電圧が低くなると、電子はプレバンチャ及びバンチャのマイクロ波電界が強くて狭い位相範囲でのみ、入射が可能であることを示している。これらの測定においてはプレバンチャとバンチャのマイクロ波電界強度と位相は一定に保たれている。

14.5 プレバンチャのマイクロ波の強度と位相調節

プレバンチャに供給されるマイクロ波の強度を変えた時の加速ビームのエネルギー・スペクトルを Fig. 14.6 に示す。この測定から判るように、プレバンチャのマイクロ波の電界強度が大きくなると、加速エネルギーが高くなり電流も増える。さらに電界強度が大きくなるとエネルギー幅も大きくなり、また、電流も増えてくる。こ

の関係は第4章の Fig. 4.3 に示された計算からも理解される。この測定が行なわれた時にはマイクロ波の位相は一定に保たれた。

プレバンチャのマイクロ波の位相を 60° ずつ変化させた場合に第1加速管の直後の電流モニターで観測されたビーム波形を Photo 14.1 に示す。写真からマイクロ波の位相が変わるとパルスの高さとパルスの形が変わるのが見られる。パルスの前の部分の電子のエネルギーは高く、後の部分のエネルギーが低いことは 14.7 に述べるが、パルスの前の部分の高さと後の部分の高さの比が変わるのに注意されたい。

14.6 加速管へのマイクロ波の入力調節

Linac の定常の運転を行なう場合は、第1加速管のマイクロ波の入力は最大にしてしかも固定される。入力を最大にするのは大きい方が電子の入射効率が高いため、固定するのは入力の大きさを変えると多くの運転のパラメータの調節をやり直す必要がでてくるためである。Fig. 14.7 はいくつかの加速管へのマイクロ波の供給を中止した場合の加速ビームのエネルギー・スペクトルの測定例である。Fig. 14.7 の(2)の曲線は第1加速管と第2加速管にのみマイクロ波の入力を行なった場合である。マイクロ波が供給された加速管の数が減るのにしたがってエネルギーは 30 MeV 位ずつ減ってくるがエネルギー幅はあまり変らない。この際加速ビームの電流は減少してくる。電流が減少するのはマイクロ波電界のない加速管内を電子ビームが通過すると、電子ビームのために加速管にマイクロ波電界が誘起され、これにより電子ビームが偏向を受け、加速管の管壁にあたってしまうからと考えられる。

Fig. 14.7 の(2)(3)のスペクトルにおいて低いエネルギー部分が減少していることは、低いエネルギーの電

子の方が偏向を受けやすいことを示している。

14.7 加速ビームのパルス内のエネルギー分布

電子が加速管を通過するとマイクロ波電界により加速を受けるが、同時に加速管に蓄えられたマイクロ波のエネルギーの一部が消費される。そのために加速管内のマイクロ波電界が時間とともに減衰し、電子の加速も弱められてくる。これらの関係はエネルギーモニターのビーム・キャッチャにおける加速ビームの電流波形 (Photo 14.2, Photo 14.3) に示される。Photo 14.2 はパルス幅が $0.25 \mu\text{sec}$ の場合で、Photo 14.3 はパルス幅が $0.0625 \mu\text{sec}$ の場合である。

分岐磁石の励磁電流を減らすと(測定するビームのエネルギーを下げる)、パルス幅内においてビーム・キャッチャに到着する電流が時間的に遅れてくるのがよく見られる。これらの測定の際には linac は AC 電源同期の 150 pps で運転されたが、linac のモジュレータの直流電源の整流出力が、AC の3相間で完全に一致せず、加速ビームのパルスは3つの異った特性のパルス群として観測された。Photo 14.1 の波形写真の(c)では2本、(d)では3本のパルスが見られる。

Photo 14.2 においても同様な現象がみられる。加速ビームのエネルギーと、ビーム電流のパルス幅内における時間分布を示したものが Fig. 14.8 である。

最後に各加速管の後に置かれた電流モニターのパルス波形を Photo 14.4 に示す。この波形から判るように第2、第3加速管の出口では時間の遅れた部分(エネルギーの低い)のビーム強度の減少がはげしい。第1加速管に入射するビームの波形は測定できないので、第1加速管におけるビーム強度の減少については知ることができないが、ビーム強度の減少は第1、第2、第3加速管附近で主におこると考えられる。

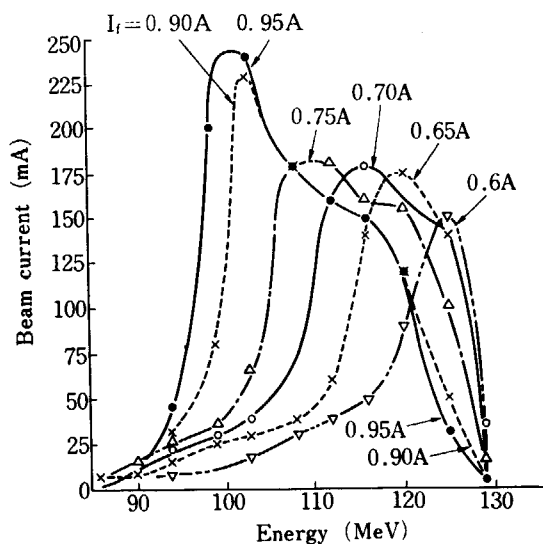


Fig. 14.1 Electron energy spectra for various filament current values of the electron gun.

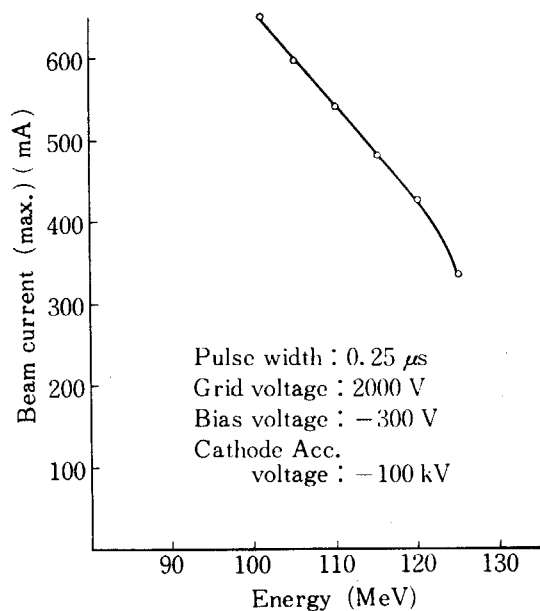


Fig. 14.2 Electron beam peak current versus beam energies.

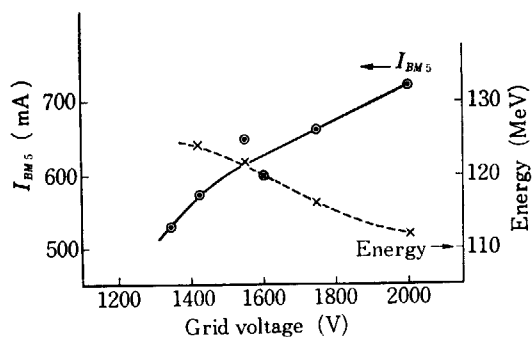


Fig. 14.3 Electron beam energy and peak current versus grid voltages of the gun.

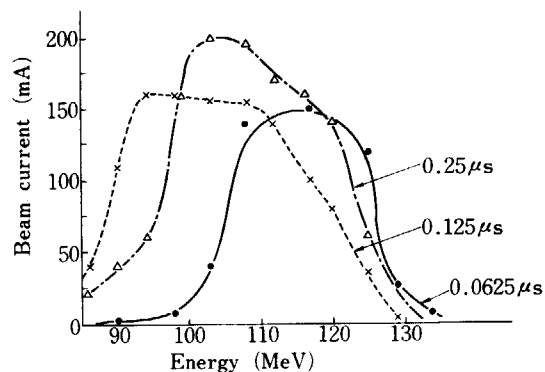


Fig. 14.4 Electron energy spectra for various electron pulse widths.

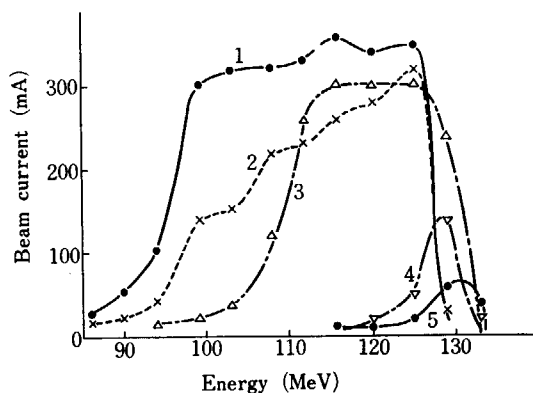


Fig. 14.5 Electron energy spectra for various cathode voltages of the electron gun.

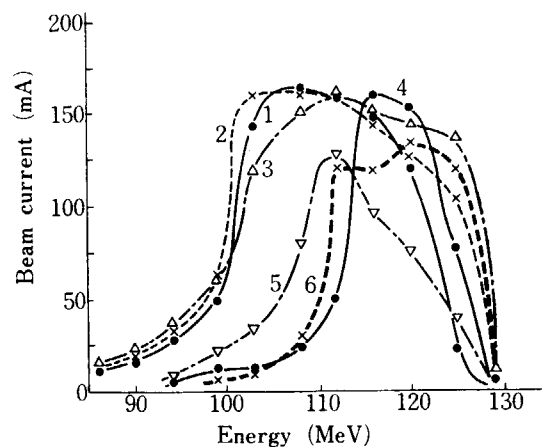


Fig. 14.6 Electron energy spectra for various RF powers of the prebuncher.

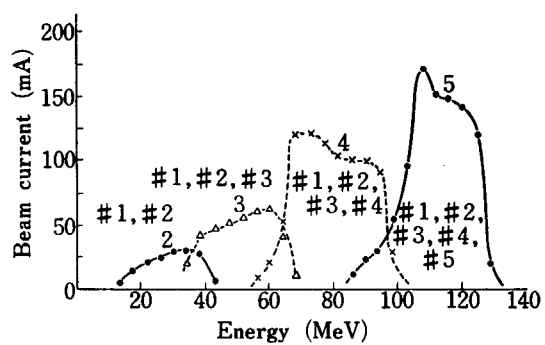


Fig. 14.7 Variation of electron energy spectrum as the number of accelerator sections varied.

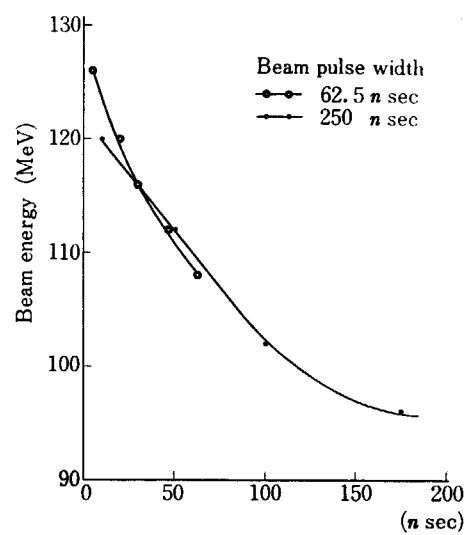


Fig. 14.8 Variation of electron energy as a function of time during the beam pulse.

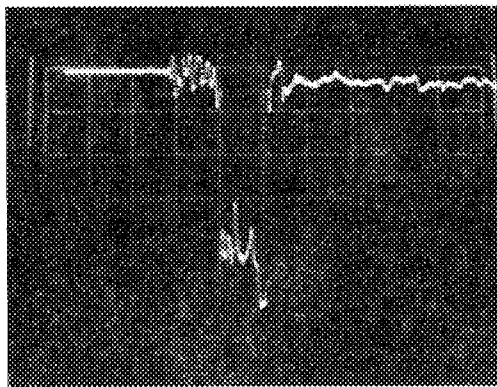
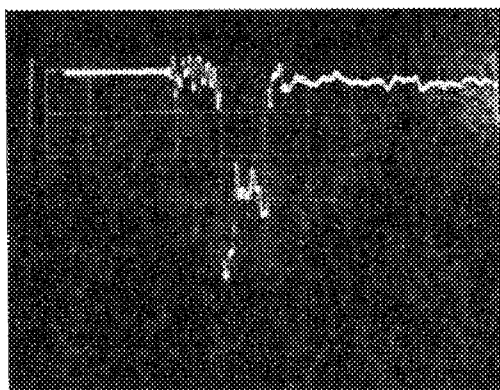
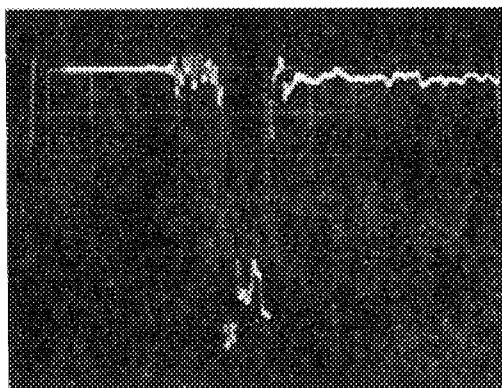


Photo 14.1 Waveform of beam current (I_{BM1}) as a function of prebuncher RF phase angle, difference of phase angles is 60° each (abscissa $1\mu\text{sec}/\text{division}$, ordinate 120 mamp/division).

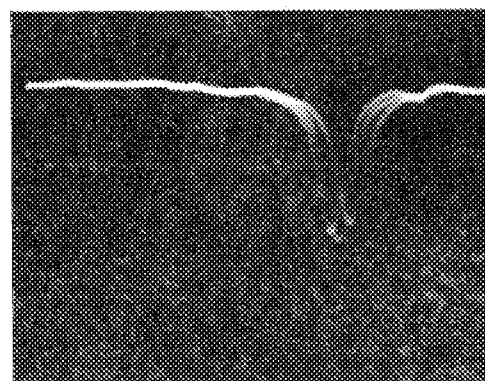
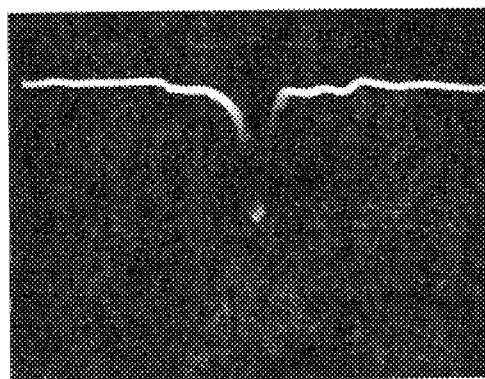
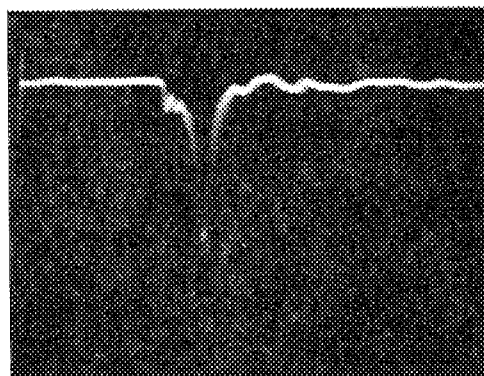
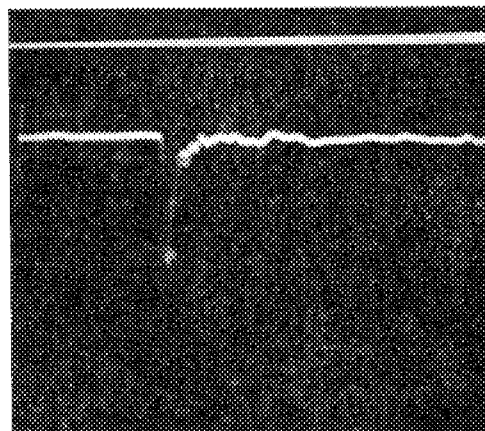


Photo 14.2 Waveform of energy monitor current as a function of beam energy. The beam pulse width is $0.25\mu\text{sec}$ (abscissa $0.05\mu\text{sec/division}$).



Photo 14.3 Waveform of energy monitor current as a function of beam energy. The beam pulse width is $0.0625\mu\text{sec}$ (abscissa $0.02\mu\text{sec/division}$).

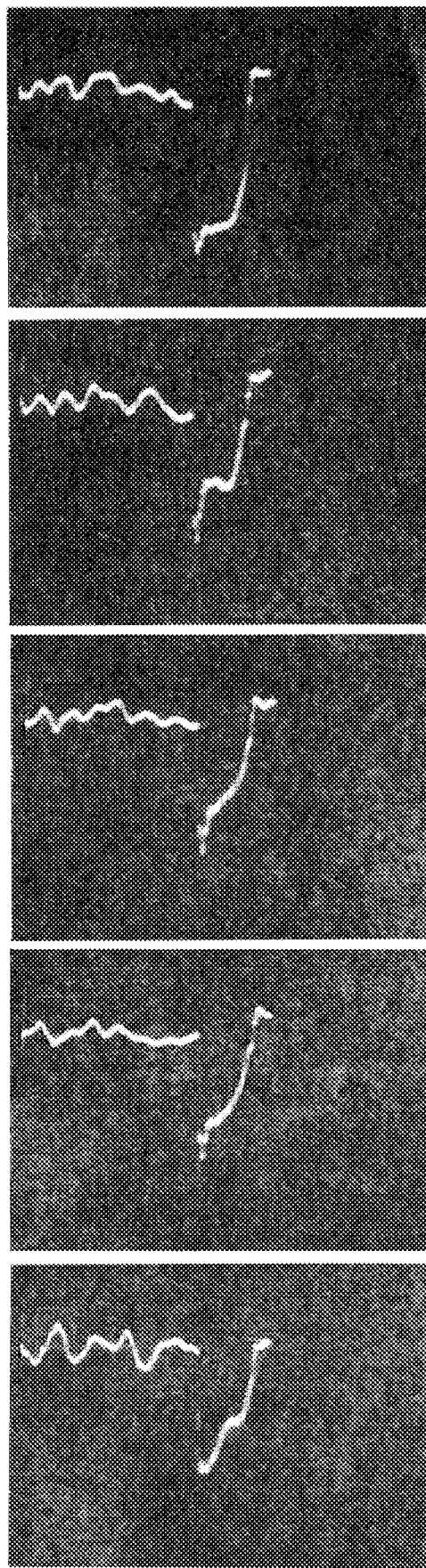


Photo 14.4 Waveform of beam current on each beam monitor behind accelerating waveguide. (abscissa $0.2\mu\text{sec/division}$).

15. 放射線防護

新 linac から発生する放射線強度は増力前に較べて、bremsstrahlung (X 線) が約 10 倍、中性子線が約 100 倍になると推定された。また、ターゲットでの残留放射能も 10 倍程度大きくなると推定された。このような強力な放射線に対して、適切な遮蔽体、防護柵、安全装置を設けて、linac および近接建家の職員の放射線被曝を最小限におさえることが重要である。放射線防護対策を立案するに当たっては、旧 linac でのターゲットおよび施設周辺の空間線量分布²³⁾を参考にした。防護についてはつぎの 4 つの事項について検討した。

- (1) 加速管、ビーム伝送系、ターゲットから発生する X 線および中性子線に対する遮蔽。
- (2) ターゲット室内で発生する空気の放射能汚染。
- (3) 加速管、分岐電磁石、ターゲットの残留放射能
- (4) 高放射線区域への出入の安全管理

新 linac からの放射線の空間線量分布、空気汚染については放射線管理課で測定管理が継続して行なわれており、別に報告される予定である。

15.1 加速管、ビーム伝送系およびターゲットから発生する放射線に対する遮蔽

15.1.1 放射線遮蔽設計の基準

「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」によれば、放射線被曝の基準としてつぎのように定められている。

- (1) 使用施設内の常時人が立ち入る場所において人が被曝するおそれのある放射線の線量は、100 mrem/week 以下、週 48 時間運転するとして、 2×10^{-3} rem/hr 以下。
- (2) 事業所内の人が居住する区域における放射線の線量は、10 mrem/week 以下、週 48 時間運転として、 2×10^{-4} rem/hr 以下。

15.1.2 放射線源

Linac から発生する放射線の種類は、加速管、ビーム伝送系、ターゲット等から発生する X 線と、主としてターゲットから発生する中性子と考えられる。問題となる放射線発生源の位置を Fig. 15.1 に示す。X 線の強度は、増力前のデータを参考にして推定された。

- 1) 旧 linac のデータ²³⁾によれば
電子ビーム：20 MeV, 18 μ A
ターゲット：中性子発生用の厚い鉛ターゲット
X 線の強度：前方 1.5 m で 470 R/min
側方 (90°) 1 m で 100 R/min

Fig. 15.2 の (A) にこの模様が示されている。

2) 増力後の X 線および中性子強度の推定。

増力後には最大電力条件でのビーム・エネルギーは 80 MeV、平均電流は 300 μ A に増強される。ビーム電流と X 線強度とは比例関係にあるとみなしうる。他方、電子から X 線への変換比率は 20 MeV の場合の 0.4 程度であり²⁴⁾、80 MeV の場合は 0.8 程度に上昇すると推定される。したがって、増力後の X 線強度は、 $300/18 \times 0.8/0.4 = 34$ 倍と見積ることができる。すなわち、ターゲット前方 1.5 m で 16,000 R/min、側方 1 m で 3,400 R/min と推定される。

Fig. 15.2 (B) にこの模様が示されている。

Fig. 15.1 の T_c には厚いタンタル製のターゲットが置かれ、T_R には X 線発生用の白金板コンバーター、またはビーム・エネルギー較正用の分岐磁石およびビーム・キャッチャーが置かれ、T_L には白金板コンバーターまたは熱中性子発生用の厚いタンタル製のターゲットが置かれている。各々のターゲットでの X 線の発生の状況はかなり異なると思われるが、近似的に前記の推定が適用できるものとする。

電子ビームが加速管、分岐電磁石、スリット等のビーム伝送系を通過する際に、一部は管壁に衝突して X 線を発生する。これらの場所でのビーム損失は運転条件に大きく依存するが、分岐磁石や伝送管中では 1% 程度が X 線や中性子発生に寄与するものと推定される。Linac 各部での放射線源強度を TABLE 15.1 のように推定した。また、中性子線源としては最大 2×10^{14} n/sec と推定した²⁵⁾。

15.1.3 遮蔽設計上問題となる地点

遮蔽設計上問題になる地点を Fig. 15.1 に示す (Fig. 15.1 は略図であるため遮蔽体の形状が正しく表わされていないので、実際の形状は Fig. 15.4 および Fig. 15.5 を参照のこと)。

- 1) T_c 前方 100 m……………東側柵
- 2) T_c 側方 85 m……………北側柵
- 3) (T_c+加速管) 側方 170 m……………南側柵
- 4) T_L 側方 80 m……………北側柵
- 5) T_R 後方 80 m, 加速管後方 50 m
……………西側柵, JRR-1 建屋
- 6) T_L 側方 60 m, 加速管側方 50 m
……………Co⁶⁰ 照射室
- 7) T_L 側方 10 m, 電磁石側方 8 m, 加速管側方
6 m……………コントロール室
- 8) ターゲット室天井からの sky shine

9) 中性子測定室周辺

このうち (7) だけは, 15.1.1 にあげた (1) の基準を満足しなくてはならず, 残りは基準 (2) を満足すればよい。

15.1.4 遮蔽計算

(a) X 線に対する遮蔽

ターゲットから R_{2x} の距離における X 線の空間線量率 ϕ_{1x} (R/hr) は, つぎの計算式によって計算することができる。

$$\phi_{1x}(\text{R/hr}) = S_{1x}(\text{R/hr}) \times \frac{4\pi R_{1x}^2}{4\pi R_{2x}^2} \times T_x \quad (15.1)$$

ターゲットの前方方向 (電子ビームに対し 0° 方向) での線量率を計算する場合には S_{1x} は前方 R_{1x} の距離における X 線の強度を表し, 15.1.2 で $R_{1x}=1.5$ m の位置において推定した値を用いることとする。

ターゲットの側方方向 (電子ビームに対し 90° 方向) での線量率を計算する場合には, S_{1x} は側方 R_{1x} の距離における X 線の強度を表し, 15.1.2 で $R_{1x}=1$ m の位置において推定した値を用いることとする。

T_x はコンクリートによる X 線の減衰率を表す。なお通常 ϕ_{1x} には (15.1) 式にビルドアップ係数を掛けた値が用いられるが, 高エネルギー電子から発生する X 線についてはビルドアップ係数はたかだか 2 であることが確認されているので, 以下すべての場合についてビルドアップ係数を無視した。

X 線の普通コンクリート (比重 2.3g/cm^3) による減衰率は 3 m の厚さのコンクリートに対して 5×10^{-7} となることがわかっている²⁴⁾。15.1.4 であげた問題となる地点 (1), (2), (3), (4), (6), (7) において (15.1) 式を用いた計算結果を TABLE 15.2 に示す。

地点 (5) (T_R 後方 80 m, 加速管後方 50 m) については, ターゲットおよび加速管の後方に対する X 線の強度に関する測定データがないから, 増力前におけるリニアック建屋周辺における放射線管理データを参考にして検討する。

20 MeV で $65\mu\text{A}$ の運転中で, T_R 相当の位置にターゲットがある場合の西側柵地点 (地点 (5)) における空間線量率は 0.06 mR/hr となっている。18 μA に換算すればこの値は約 0.02 mR/hr となる。増力前のコンクリートの壁厚は 1.2 m (X 線の減衰率 2.5×10^{-3}) であり, 増力後の壁厚は, 1.6 m (減衰率 2.5×10^{-4}) である。X 線の強度は増力前の 34 倍であるから, 地点 (5) の空間線量率は, 0.07 mR/hr で, この値は 15.1.1 の基準 (2) より一桁小さい。

ターゲット室天井は, 運転中立入禁止 (インターロックつき扉がある) になっているので遮蔽上は, 周辺への sky shine の影響だけを考察する。増力前の天井のコンクリート厚は 0.8 m で (減衰率 2.5×10^{-2}), 20 MeV-65 μA で運転しても, 柵の位置その他居住区域に対す

る基準値からの超過は認められなかった。増力後はターゲット室天井のコンクリート厚は 1.6 m (減衰率 2.5×10^{-4}) である。X 線の強度は増力により, およそ 10 倍になり, 遮蔽効果は 100 倍になるので天井からの sky shine は, 増力後も問題にならない。

(b) 中性子線に対する遮蔽

増力後は厚いターゲットによる中性子発生量は, 15.1.2 で述べたように最大 $2 \times 10^{14}\text{ n/sec}$ とする。したがってターゲットより 10 m 離れた場所 (コントロール室) では, シールドがなければ $1.5 \times 10^7\text{ n/cm}^2, \text{ sec.}$ となる。

100 MeV の電子ビームで厚いターゲットを照射した際に発生する中性子のエネルギー・スペクトル分布については, まだ十分にわかっておらず, また, このような中性子に対するコンクリートの遮蔽効果に関するデータも十分にはないが, 遮蔽設計の面では, 中性子スペクトルの主要部は, 核分裂による中性子のスペクトルとかなり類似していると考えてよい。原子炉中性子スペクトルではコンクリート 1 m あたり 10^{-3} の減衰があるのでこれを準用するとターゲット室の 3 m のコンクリートでは $10^{-8} \sim 10^{-9}$ の減衰を見込むことができる。

したがって, コントロール室における中性子密度は, $1.5 \times 10^{-1}\text{ n/cm}^2, \text{ sec.}$ となる。この場合の中性子の平均エネルギーを 1 MeV と仮定し, 週 48 時間運転することとして中性子線量に換算すると $1.5 \times 10^{-1} (\text{n/cm}^2, \text{ sec}) \times 60 (\text{sec}) \times 60 (\text{min}) \times 48 (\text{hr}) / 28,800 = 1\text{ mrem/week}$ になる (なお, かりに中性子エネルギーが 3 MeV 以上であるとすれば, 上記の値の倍となる)。

この値は, 15.1.1 の基準値 (1) より 2 桁小さく, (2) よりも 1 桁小さい。3 m の壁をもつターゲット室からの中性子漏洩は少なくとも 10 m 以上の地点においては問題とならない。

(c) 中性子測定室周辺の遮蔽

新 linac は主に, 中性子飛行時間法によって, 中性子断面積の測定に用いられる。そのため 5 本の中性子飛行管がターゲット室からそれぞれ中性子測定室に向かって設置されている。したがって, 中性子飛行管を通して X 線や中性子が大量に漏洩し, 中性子測定室周辺の線量率はかなり高くなり, 特別な遮蔽が必要になる。

ターゲット, 中性子反射体および中性子飛行管の位置関係を Fig. 15.3, Fig. 15.4 および Fig. 15.5 に示す。ターゲットで発生した中性子線や X 線は, 中性子反射体で散乱されたものが中性子飛行管を通して, 中性子測定室後方のビーム・キャッチャーに到達する。したがって, 15.1.4 (a), (b) で用いた線源強度をそのまま利用することはできない。ここでは計算を簡単にするため, ターゲットで発生した放射線は点線源として発生し, ターゲットのまわりに置かれている減速材により等方的に散乱されたものとする。減速材ですべての X 線が散乱されるものとする減速材から 1 m のところでの X 線の強度 S_{2x} (R/hr) は 15.1.2 の推定により $7.0 \times 10^3\text{ R/hr}$

となる。

中性子線については減速材から 4π 方向に等方に散乱されると考えると、中性子強度 $S_{2n}(\text{n/sec})$ は 15.1.2 の推定により、 $7.2 \times 10^{12} \text{ n/sec}$ である。この強度の X 線や中性子線がターゲット室のコンクリート壁の直径 12 cm のコリメーターを通過しビーム・キャッチャーにあたり減衰するものとする。ビーム・キャッチャーの横と縦幅は厚さに較べて大きいので、放射線の強度はビーム・キャッチャーの後方においては、ビーム進行方向が一番強いと考えてよい。そこでこの方向の柵での放射線強度を計算する。この場所の X 線強度 $\phi_{2x}(\text{R/hr})$ は次式で与えられる。

$$\phi_{2x}(\text{R/hr}) = S_{2x}(\text{R/hr}) \frac{4\pi L_1^2}{4\pi L_2^2} \cdot T_x \quad (15.2)$$

ここに L_1 は 1 m, L_2 は減速材から柵までの距離, T_x はビーム・キャッチャーによる X 線の減衰率を表わす。

また、中性子強度 $\phi_{2n}(\text{n/sec} \cdot \text{cm}^2)$ は次式で与えられる。

$$\phi_{2n}(\text{n/sec} \cdot \text{cm}^2) = S_{2n}(\text{n/sec}) \times \frac{1}{4\pi L_2^2} \cdot T_n \quad (15.3)$$

L_2 は減速材から柵までの距離 (cm), T_n はビーム・キャッチャーによる中性子減衰率を表わす。(15.2)式および(15.3)式は大きめに見積った場合の計算式であるが、ビーム・キャッチャーの厚さはこれらの式により計算した。この計算結果を TABLE 15.3 に示す。

ビーム・キャッチャー後方に対しては、いずれも基準値(2)を越える場合が予想される。したがって、つぎのような遮蔽を中性子測定室に設ける。

40 m 測定室：鉛 30 cm, パラフィン 10 cm (X 線減衰率 1.0×10^{-3} , 中性子減衰率 1.6×10^{-2}), 合計線量 $1.2 \times 10^{-4} \text{ rem/hr}$

50 m 測定室：鉛 20 cm, パラフィン 20 cm (X 線減衰率 1.1×10^{-2} , 中性子減衰率 1.1×10^{-2}), 合計線量 $1.3 \times 10^{-4} \text{ rem/hr}$

55 m 測定室：鉛 30 cm, パラフィン 30 cm (X 線減衰率 1×10^{-3} , 中性子減衰率 1.2×10^{-3}), 合計線量 $1.6 \times 10^{-4} \text{ rem/hr}$

190 m 測定室：鉛 20 cm (X 線減衰率 1.1×10^{-2} , 中性子減衰率 1.3×10^{-1}), 合計線量 $4.8 \times 10^{-5} \text{ rem/hr}$

以上の通り合計線量(中性子と X 線の線量の和)は基準値(2)以下となる。

15.2 ターゲット室の空気汚染

ターゲット室の空気および塵が linac の X 線によって照射され放射化する。その主な核種は増力前の測定²³⁾から、 $^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$ と $^{40}\text{Ar}(\gamma, p)^{39}\text{Cl}$ 反応による ^{13}N と ^{39}Cl であることがわかっている。また $^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$ 反応による ^{15}O も存在すると考えられるが、測定されていない。

その理由はおそらく、 (γ, n) 反応の高い Q 値 ($Q = -15.65 \text{ MeV}$) と短い半減期 ($T_{1/2} = 122 \text{ sec}$) によるものと推定されている。

X 線の強度が増力により増加したことから、ターゲット室の体積が増えたことを考慮して増力前の測定から推定した空気汚染の濃度を TABLE 15.4 に示す。ターゲット室および加速管室の排気系を Fig. 15.6 に示す。このほかにモジュレータ室に 2 系統の排気系があるが、機器の冷却を目的としたものであるため、Fig. 15.6 では省略されている。加速管室およびターゲット室の排気系は linac の放射線により汚染された空気を室外に排気し、コントロール室や、実験室へ汚染した空気がもれないようにするために設けられており、TABLE 15.5 からわかるように約 2 分間で換気できる。排気中の塵を取除くために absolute filter がとりつけてあり、排気口は地上から約 5 m の位置にある。

加速管室およびターゲット室へは、linac の運転停止後 10 分以上待つて入ることになっており、2 分間で換気されることから空気汚染による被曝はほとんどないと考えられる。また、排気された空気の汚染は増力前の測定からターゲット室の空気汚染の濃度の 10^{-4} 倍になること²³⁾、排気口が地上から 5 m の位置にあり、排気はただちに空気中に拡散することなどから考えて、公衆への被曝はほとんどないと考えてよい。 ^{15}O の濃度は、 ^{13}N のそれより大きいと考えられるが、半減期が 2 分であるので、 ^{15}O による被曝は問題にならない。

15.3 ターゲットおよび分岐電磁石の残留放射能

Linac の増力により、ターゲット、ビーム伝送系、エネルギーモニターおよび加速管の残留放射能は飛躍的に増加する。したがって、これらに近づくことは、放射線被曝量を増大させる原因となる。増力前の linac においても、個人の被曝記録から、残留放射能による被曝が大部分を占めていることが指摘されており²³⁾、残留放射能による被曝をおさえることが重要である。被曝量をおさえる対策としては、(1) 残留放射能の高い場所には近づかなくてもよいようにすること、(2) 近づいたとしても被曝量を必要最小限にとどめるようにすることが考えられる。

15.3.1 残留放射能の高い場所に近づかないための対策

中性子ターゲット (Fig. 15.4 の T_c) と X 線照射用ターゲット (Fig. 15.4 の T_r) の設置場所を別にして、ターゲットの置換えをしなくてもすむようにした。また、照射用ターゲットには、気送管を設けて、ターゲット室に入らなくても、照射用試料の照射等の取扱いができるようにした。この結果ルーチン化した実験の場合にはタ

ターゲット室に入らなくてもよいようになった。

15.3.2 残留放射能による被曝をおさえる対策

ターゲット室内での修理作業, 実験のための準備作業はできるだけ linac が長時間停止した後 (例えば月曜日の朝, 最悪の場合でも翌日の朝の運転開始前) に行なう。ターゲット室へ入る場合は, ポケット・チェンバーを携行し, サーベイ・メーターで安全を確かめながら入ることにし, 用が終ったら速かに高放射線区域から出るようにした。

X線照射用ターゲットは, 使用しない時にはターゲット室外において遠隔操作によって鉛のシールドに納めるようにした。しかし, 中性子ターゲットの鉛容器への格納は, まだ手動によって行なわれている。

15.4 区域管理

15.4.1 管理区域

Linac の運転中には, 1秒以内で致死量に達する場所がある。このような場所の立入は厳しく禁止しなければならない。また, 比較的放射線強度が弱い場所においても, 必要以上の被曝を避けるために立入の制限を行なう必要がある。そのために linac 建屋およびその周辺を高放射線区域, 第1種管理区域, 第2種管理区域および立入禁止区域に指定している。

(1) 高放射線区域

Linac からの放射線を直接被曝するおそれのある場所は, 高放射線区域として, 特別な安全管理を行なっている (15.4.2 参照)。高放射線区域は, Fig. 15.4 に示すように, モジュレータ室, 加速管室, ターゲット建屋コンクリートブロック内 (ターゲット室), コンクリート天井, cat-walk, 10 トン・クレーンおよび中性子測定室 (40 m, 50 m, 55 m, 100 m, 190 m) である。

(2) 第1種管理区域

照射した試料の取扱いや, 化学分離などを行なうため, 密封線源でない RI を取扱う化学実験室である。

(3) 第2種管理区域

100 mrem/week の被曝のおそれのある場所で, (1)

の高放射線区域を含んでいる。一般人の立入りを禁止し, 実験者の立入りも制限し, 無用な被曝をさけるように管理している。第2種管理区域は Fig. 15.4 と Fig. 15.5 に示すように, ターゲット室, コントロール室, モジュレータ室, 加速管室, 中性子測定室 (40 m, 50 m, 55 m, 100 m, 190 m) およびこれらの周辺の柵内である。

(4) 立入禁止区域

Linac 建屋周辺の立入禁止柵内で Fig. 15.5 に示した区域である。柵内では 10 mrem/week 以上の被曝のおそれがあり, 一般人の立入りを禁止している。

15.4.2 高放射線区域への立入に関する安全管理

高放射線区域内では, linac の運転中 1秒以内で致死量の放射線被曝を受けるおそれのある場所があるので, 立入りはとくに厳重に管理しなければならない。入室中に誤って linac の運転が行なわれたり, linac の運転中に誤って入室しないように, 下記のような安全装置が設けられている。これらは第13章で述べられたので, 簡単に述べる。

- (1) 高放射線区域に入室するときには, パーソナル・キーを必ず携帯するよう定めている。このキーが1個でもキー・ボードに戻っていない時は運転を開始することができない。
- (2) 高放射線区域の扉には, ドア・インターロック装置がついており, 扉が開いていると linac の運転はできない。
- (3) Fig. 15.4 に示す場所と, 各中性子測定室には, 非常スイッチ盤が設けてあり, 非常スイッチを切ることによって運転の開始を中止できる。運転開始の合図からビームが出るまでには, 約1分間かかるので, 非常スイッチを切る余裕は充分ある。また, 高放射線区域で作業するときには, 非常スイッチを切って行なう。
- (4) 運転標示灯は Fig. 15.4 と Fig. 15.5 に示された位置にあり, 実験者および linac の周辺にいる人に Linac の運転状況がわかるようになっている。運転標示灯, 放送および非常スイッチ盤ランプの点灯等の時間関係を TABLE 15.6 に示す。

TABLE 15.1 Estimated intensity of bremsstrahlung (R/hr)

Radiation source	0° (From beam direction)	90°	Remark
Target T _C , T _R , T _L	1×10^6	2×10^5	1) Estimated from the measured values for the 20MeV, 18μA beam 2) T _C , T _R , T _L are not used simultaneously
Deflection magnet slit, beam transport tube	—	2×10^4	1) Estimated for the 10% beam loss at these parts 2) Radiation from deflection magnet is generated for the use of T _L target
Accelerating waveguide sections	—	2×10^3	1) Estimated for the 1% beam loss

TABLE 15.2 Estimated radiation intensity around the linac

Place	Concrete thickness (m)	Attenuation	Estimated intensity of radiation (R/hr)	Estimated radiation dose (R/hr)
(1) 0° (beam direction), 100m from T _C	3	5×10^{-7}	1×10^6 (0°, 1.5m from T _C)	2×10^{-5}
(2) 90° (side), 85m from T _C	3	5×10^{-7}	2×10^6 (90°, 1m from T _C)	1.5×10^{-5}
(3) 90°, 170m from T _C	3	5×10^{-7}	2×10^5 (90°, 1m from T _C)	3.5×10^{-6}
(3) 90°, 170m from acc.	1.5	1×10^{-3}	2×10^3 (90°, 1m from acc.)	6.9×10^{-5} } 7.3×10^{-5}
(4) 90°, 80m from T _L	3	5×10^{-7}	2×10^5 (90°, 1m from T _L)	2×10^{-5}
(6) 90°, 60m from T _L	3.5	5×10^{-8}	2×10^5 (90°, 1m from T _L)	3×10^{-6}
(6) 90°, 50m from acc.	2.0	5×10^{-5}	2×10^3 (90°, 1m from acc.)	4×10^{-5} } 4.3×10^{-5}
(6) 90°, 10m from T _L	4.6	5×10^{-10}	2×10^5 (90°, 1m from T _L)	1×10^{-6}
(7) 90°, 8m from magnet	2.8	1.6×10^{-6}	2×10^4 (90°, 1m from mag.)	5×10^{-4} } 1×10^{-3}
(7) 90°, 6m from acc.	2.4	5×10^{-6}	2×10^3 (90°, 1m from acc.)	3×10^{-4}

TABLE 15.3 Details of shielding design, estimated radiation dose around the neutron detector stations

Neutron detector station	40m station	50m station	55m station	190m station
Concrete shield thickness (cm)	70	70	50	100
Dist. bet. reflector and fence (m)	85	130	85	200
Attenuation of X-ray by beam catcher (m)	2.1×10^{-2}	2.1×10^{-2}	1.2×10^{-1}	1.1×10^{-2}
X-ray intensity at 1m from reflector (Target room) (R/hr)	7.0×10^3	7.0×10^3	7.0×10^3	7.0×10^3
X-ray intensity at the fence 0° to the flight tube (eq. (2)) (rem/hr)	2.1×10^{-2}	8.8×10^{-3}	1.2×10^{-1}	2.0×10^{-3}
Total neutron flux (n/s)	7.2×10^{12}			
Attenuation of neutrons by beam catcher.	6.0×10^{-3}	6.0×10^{-3}	3.3×10^{-2}	1.0×10^{-3}
Neutron flux at fence 0° to the flight tube (eq. (3)) (n/cm ² ·s)	4.8×10	2.1×10	2.6×10^2	1.5
Neutron dose behind the beam catcher (rem/hr)	6.0×10^{-3}	2.6×10^{-3}	3.3×10^{-2}	1.8×10^{-4}
Total radiation dose at the fence behind the beam catcher (rem/hr)	2.7×10^{-2}	1.2×10^{-2}	1.5×10^{-1}	2.2×10^{-3}

TABLE 15.4 Estimated concentration of radioactivity for 80 MeV, 300 μ A beam

Beam condition	Before increase of beam power 20MeV, 8 μ A	After increase of beam power 80MeV, 300 μ A
Relative intensity of bremsstrahlung	1	75
Air volume (m ³)	144	254
Dust ¹³ N (μ Ci/cc)	5.9×10^{-7}	2.6×10^{-5}
³⁹ Cl (μ Ci/cc)	7.1×10^{-9}	3.1×10^{-4}
Gas ¹³ N (μ Ci/cc)	1.1×10^{-5}	4.9×10^{-4}
³⁹ Cl (μ Ci/cc)		

TABLE 15.5 Air exhausting capacity

	Volume (m ³)	Exhausting capacity (m ³ /hr)
Modulator room	496	9000
Accelerator room	125	15300
Target room	254	

TABLE 15.6 Automatic indicator system for linac operation. Their positions are indicated in Fig. 15.4 and Fig. 15.5.

Type of indicator		Control power off	Control power on	Radiation key on	Beam on	Beam off
Outdoor red flasher	5	off	off	Red light flashing	1 min delay	off
Outdoor green-red	2	off	Green light on	Red light on		Green light on
Indoor green-red	3	off	Green light on	Red light on		Green light on
Interphone	19	off	off	Radiation warning		off
Emergency switch panel	19	off	off	Red light on		off

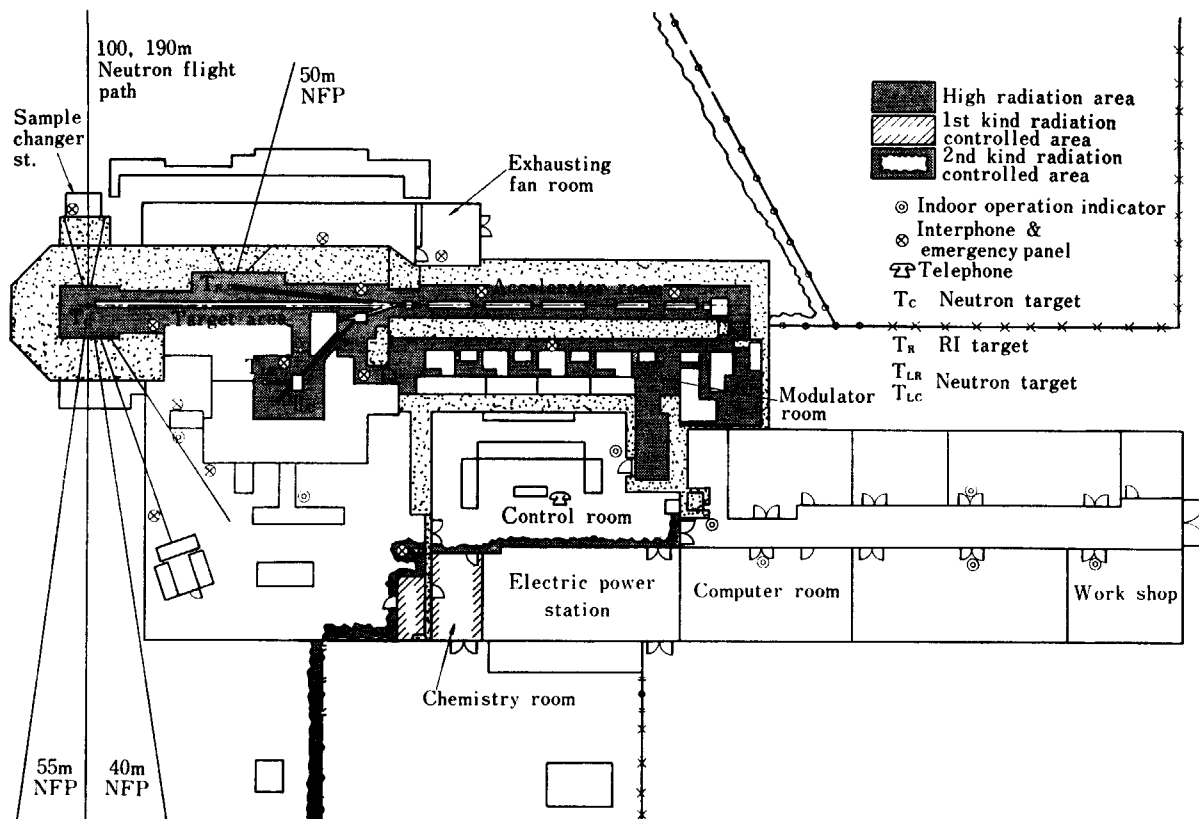


Fig. 15.4 Floor plan of the accelerator building.

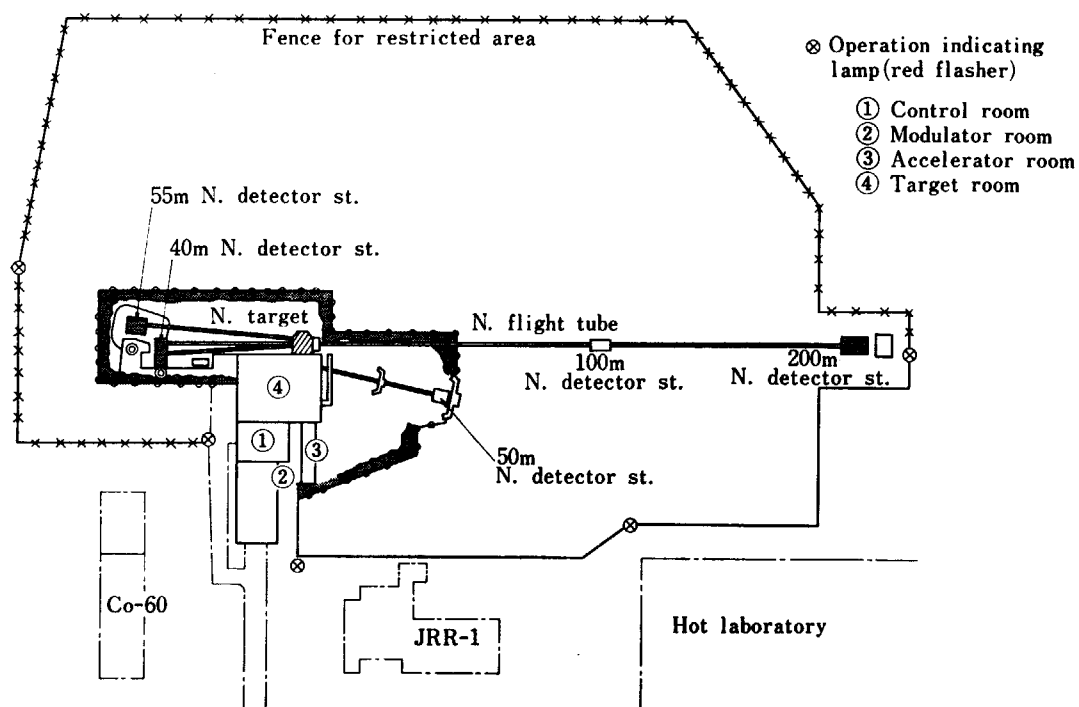


Fig. 15.5 Laboratory site and surroundings.

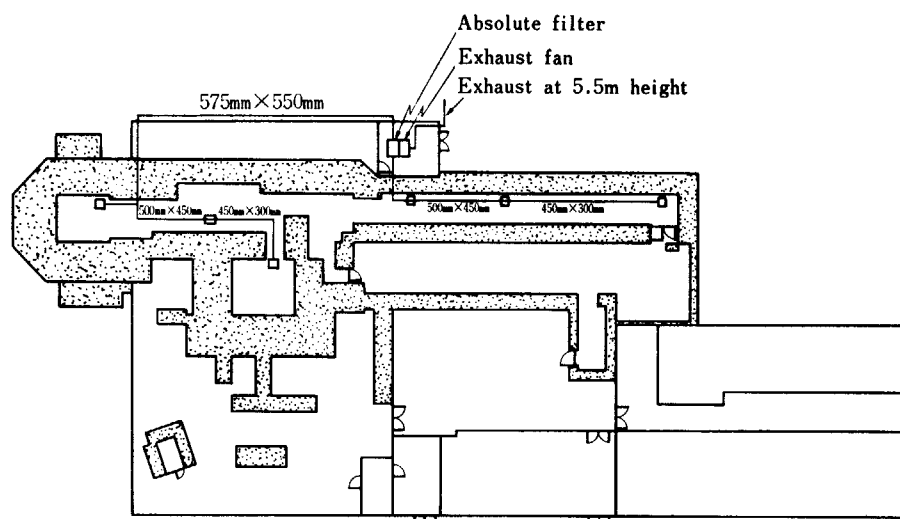


Fig. 15.6 Air exhausting system.

16. 実験装置

16.1 中性子実験

新 linac をパルス中性子源として用いる中性子スペクトロメータの建設が行なわれた。この装置の目的は、原子炉の設計や製作に必要な各種の中性子断面積の基礎的データを求め、これらのデータを系統的に理解するための核物理の研究を行なうことである。

中性子スペクトロメータは、つぎのような部分で構成されている。第1は linac から電子ビームを使って中性子を発生させるターゲットであり、なるべく多くの中性子を発生させることを目的としている。第2には中性子を一定の距離だけ飛行させる飛行管で、中性子のエネルギー分解能をあげるために長い飛行距離を必要とする。5本の飛行管のうち最も長いものは190mの長さである。第3は中性子あるいは γ 線などの検出器類であり、飛行管の先端に置かれている。検出器からの信号は回路系を通して実験データ処理用の計算機へ送られる。

16.1.1 中性子発生

タンタル、タングステン、白金、鉛、ウランなどの重金属ターゲットに高エネルギーの電子線が入射した場合、電子・光子カスケードが発生し、光核反応により高速中性子の放出が行なわれる。この際の高速中性子の収量は、ターゲットの材質の原子番号、形状、入射電子のエネルギー、電流値などに支配される。低速中性子はターゲットで発生した高速中性子を減速させることによって得られる。減速材としては通常水素原子を多く含む水、プラスチック、パラフィンなどが使用される。入射電子のエネルギーは、光中性子の収量の点から30 MeV以上が好ましく、150 MeV 位のものも使用されている。

(1) 中性子発生率

厚いターゲットに電子を入射させた時の中性子の発生現象は複雑である。入射電子のエネルギーが低い場合(～30 MeV)の中性子発生についてかなり系統的に測定²⁶⁾がなされているが、高いエネルギーではほとんど行なわれていない。しかし、電子・光子カスケードの計算はいろいろ²⁷⁾²⁸⁾²⁹⁾³⁰⁾試みられている。

これらの計算は、1次電子の物質中の通過過程と、それによる2次電子、X線および中性子の発生と物質中の通過過程等を考えてモンテ・カルロ法により行なっている。

Fig. 16.1 は R. G. Alsmiller²⁷⁾による100 MeVの電子がタンタルのターゲットに入射された際の計算例で、ターゲットの形状を変えた時の中性子収量についての

のである。Fig. 16.2 は同じ R. G. Alsmiller²⁷⁾による入射電子エネルギーと中性子収量の関係を示す計算例であり、ターゲットの半径は1 cm である。電子エネルギーがタンタルの中性子結合エネルギー(7.6 MeV)を越すと光中性子が発生しはじめ、30 MeV まではエネルギーの上昇とともに中性子収量が急激に増加し、それ以上になると増加はゆるやかになる。

(2) ターゲット物質中の放射線の飛程

高エネルギー電子が物質中に入射された時の放射線の発生の様子を見るために2, 3の実験を行なった。

物質中を通過する電子の速度が、物質中の光速より速いとチェレンコフ発光がおこる。第8章のPhoto 8.2 は水槽に120 MeV, 30 mA (ピーク値)の電子を入射させた時のチェレンコフ発光の様子を示すもので、全長は約60 cm である。この発光は1次電子と2次電子の両者によっておこされている。

ガラスに電子を入射させると電子がvacancyにトラップされてカラー・センターを生じ着色するので、これにより電子の飛程を眼で見ることができる。Photo 16.1 は120 MeVの20 mAの電子ビームを20秒間入射させた時のソーダガラスの着色模様を示したものである。

1次電子の飛跡は杓子状と考えられるので、写真の20 cmより長い尾の部分はX線によって発生する2次電子によっておこされた着色模様である。

Photo 16.2 は2 mmの厚さの鉄板と1.7 mmの厚さのソーダガラスを交互に重ねたものに120 MeVの電子による照射を行ない、照射後ガラスだけを重ね合わせた写真である。この写真は鉄の中の電子の飛程を示すもので、横の長さのスケールを2/1.7倍にしたものが真の飛程を表わす。

Photo 16.3 は2 mmの厚さの鉛板と1.7 mmの厚さのソーダガラスを交互に重ねたものについて、鉄板の場合と同一の照射を行なった場合の写真である。

Photo 16.4 はPhoto 16.3のソーダガラスを1枚ずつ並べたもので、番号は電子入射側からかぞえた通し番号である。最初8 mm直径で入射した電子ビームは5枚目(距離に換算すると $2 \times 5 = 10$ mm)位まではそのままひろがり、その後は電子密度の高い部分はだんだんぼけてきて12枚目(24 cm)でほとんど消えてしまう。

これらガラスの着色において黒化度と通過した電子密度の関係は正確には判らない。しかし黒化している場所の境界面を明らかに認めることができるので、この境界面内部で大半の中性子が発生しているものと考えられる。Photo 16.4 は鉛中における電子ビームの飛程を示すものであるが、実際のターゲットに使用されるタンタ

ル中においては Photo 16.3 の飛程よりはいくらか長くなる。これからタンタル中性子ターゲットの大きさとして直径 20 mm 長さ 30 mm で充分であると推定した。また TABLE 16.1 に黒化した部分の面積を示す。この面積の逆数は電子ビームが鉛を通過する時の単位体積あたりの発熱におよそ比例する量である。この値から 12 mm の鉛板通過後には単位体積あたりの発熱が入射時のほぼ半分になることが判る。このデータは中性子ターゲットの設計において熱除去の計算を行なう際参考にされた。

(3) 中性子ターゲット

中性子ターゲットの設計は、発生中性子のスペクトル及び収量、ターゲットの冷却、中性子飛行管への中性子の伝送を考慮に入れて行なわなければならない。数 100 keV 以下の中性子発生には、ターゲット物質として通常重金属が用いられる。これは重金属は X 線の発生率が高く、したがって、中性子発生率も高い。また、ターゲットの形も小さくでき中性子の伝送効率の点からも有利である。重金属として、タンタル、タングステン、白金、鉛、ウランウム等が考えられる。これらのうち、鉛は融点が低い、白金は高価である、ウランウムは残留放射能が高い、などの欠点がある。それに対してタンタルとタングステンは融点も高く、比較的安価に入手できる。両者を比べると、高放射線のもとでの冷却水による corrosion や erosion に対してタンタルの方が秀れているので、タンタルをターゲットの材料として採用した。

ターゲットの形状については、電子ビームが良くコリメートされていて、しかも入射位置のふらつかない場合は、前述のガラスの着色の測定で知れるように、電子ビームのエネルギーが 100 MeV 位でも、ターゲットの大きさは直径 20 mm 長さ 30 mm 位の円柱で充分である。しかし、実際には電子ビームの広がりやターゲットへの入射位置のふらつきがおこるので、余裕をみて 32×32 mm のタンタル板の積層を使用した。その構造を Fig. 16.3 に示す。タンタルの板の間は冷却水の通路になるように同じタンタルのスペーサーが上下にはさまれている。タンタル板の厚さと水の通路の大きさはタンタル板の冷却が一様に行なわれるように配慮されている。冷却水は Fig. 16.3 の B-B' 断面の左側の配水口からタンタル板の積層の間の 14 の水路に分流され、タンタル板の冷却を行なった後に右側の集水口に集められる。14 の水路の合計の流水抵抗は、配水口と集水口の流水抵抗に較べてかなり大きいので、一部の水路に水の流れが集中することはない。これは透明なプラスチックの実物大のターゲットの模型を用いて、インキをまぜた水の流れの観測によって確かめられた。

ターゲットの冷却水は独立した中性子ターゲット冷却系によって循環が行なわれる。これはタンタルの corrosion や erosion により冷却水が放射化され全体の冷却系を汚染する恐れがあるからである。Fig. 16.4 には中性子ターゲット冷却系のブロック図が示されている。循環

のためのポンプの容量は 150 l/min で、ターゲットの配水口と集水口の圧力差は 1.5 kg である。熱交換器の 2 次冷却水はターゲット冷却系より供給されている。

現在までにターゲットに入射させた最大ビーム電力は 7.5 kW である。この場合ターゲットの最初の 2 mm のタンタル板の発熱は 500 W 位になると思われるが、冷却水の残留放射能から推定する限りでは目立った erosion や corrosion は発生していないようである。

中性子ターゲットで発生する中性子は高速中性子であるので、低速中性子の実験を行なうには減速材により中性子のエネルギーを減らす必要がある。減速材は直径 200 mm、厚さ 10 mm のアルミニウムの容器に水を入れたものである。この容器は Fig. 16.5 に見られるように前方に切りこみがあり、ターゲットがはさみこまれている。低速中性子の中でも比較的エネルギーが低い領域についての測定を行なう場合は、アルミニウム容器の両面にポリエチレン製の同じ形の板をはりつける。ポリエチレン板の厚さは測定エネルギー領域により 5 mm から 20 mm 位のものが使用される。また、このポリエチレンには 6.5 % (重量比) の硼酸が混入されている。これは熱中性子の発生の割合を少なくし、熱中性子がモデレータ中の水素に捕獲されて発生する 2.2 MeV の γ 線バックグラウンドを減らすためである。

また、重金属のターゲット物質からは、中性子発生数の数 100 倍の X 線光子が発生する。もしも、飛行管の端末に置かれる中性子検出器がターゲットを直接見るような配置にあると、ターゲットで発生した X 線は直接に検出器にはいり、 γ -flash と呼ばれる過大な信号を発生する。検出系はこの信号によりこれに続くかなりの時間オーバーロードをおこし、この間、中性子のシグナルに対して不感になったり、検出感度が著しく変化したりする。これを避けるために、中性子検出器がターゲット物質を直接見ないように γ 線シールドを置く必要がある。Linac の加速管を通る電子ビームの中心軸とターゲット室から出ている各飛行管の中心軸で作られる平面との間には、15 cm の高さの差がある。最初の計画では電子ビームは直進させて中性子発生ターゲットにあて、飛行管の他端からはターゲットの真下に置かれた減速材のみを見る予定であった。しかし、この配置で実験したところ中性子強度が以外に弱いことが判り、各飛行管の中心軸の交点と中性子ターゲットのほぼ中心 (電子ビーム入射面から 30 mm 後方の点) とが一致するような配置に変更した。そのため電子ビームは偏向磁石によって下方に曲げられ水平面に対して 6° の角度で中性子ターゲットに入射する。

また、全部の飛行管に対して γ 線の遮蔽を行なうため、Fig. 16.5 に見られるような円弧状の鉛のシールドを用いてどの飛行管の端末からも中性子ターゲットが直接見られないようにした。なお、ターゲットとシールドは電子ビームに合わせて 6° 傾けて設置された。ターゲ

ットの中心部分の遮蔽を行なうという考えは, Macklin によるもので³¹⁾, 実際の構造は CBNM (Geel) の linac で使用されているものを参考にした。

中性子ターゲットは残留放射能が非常に強いので, この附近に近づく時には, 手動の遠隔操作により, 下部の鉛の容器内にターゲットを格納することができる。また, ターゲットと鉛の容器は台車にのせられて移動することもできる。Photo 16.5 はターゲット附近の写真で, 右後方に電子ビームを取り出すためビーム窓が見える。右前に見える蛇管はビーム偏向磁石 3 の冷却のための空ダクトである。

16.1.2 中性子飛行管

飛行時間法により, 中性子エネルギーを測定して中性子断面積を測定する場合は, 中性子強度とエネルギーの分解能との兼合いから適当な飛行距離が選ばれる。Linac をパルス中性子源として使用する場合には 10 m 前後から数 100 m の飛行距離が用いられる。中性子が大気中を 1 m 飛行すると, そのエネルギーが 1 keV 以下であれば, 約 6 % の強度減少がおこる。これは主に中性子が空気中の窒素ガスによって散乱を受けることによる。この減衰は真空またはヘリウムガスを充填した中性子飛行管を用いることにより防ぐことができる。

7 本の中性子飛行管は Fig. 2.1 および Fig. 2.2 に示したように, linac 建屋内と建屋外に設置されている。飛行管のうちターゲット室まわりのコンクリートシールドに埋め込まれた部分はステンレス製のパイプで, その他の部分はアルミニウム製のパイプである。4 本の飛行管の構成を Fig. 16.6 に示す。これらの飛行管のアルミニウムの部分は TABLE 16.2 に示すような直径と長さを持った飛行管の単位より構成されている。これらの接続はネオプレンのガスケットを用いる真空フランジによって行なわれる。

飛行管を真空で使用する場合はロータリーポンプによって 10^{-1} torr 以下の真空度に排気される。ヘリウムガスを充填する場合はガスの圧力を大気圧よりわずかに高く保ち, 空気が飛行管にはいり込まないようにしてある。しかし屋外では気温の変化が激しく, ガス圧の大幅な変化を避けるために, 190 m の飛行管には 1 m 立方のリザーバーが設けられ, 2 本の 45 m 飛行管 (実際の長さ 47 m) と 55 m の飛行管 (実際の長さ 52 m) には共通に 0.5 m^3 のリザーバーが取付けられている。このリザーバーはナイロン布に合成ゴムを塗布したものである。現在は 55 m と 2 本の 45 m の飛行管は真空中に排気され, 190 m 飛行管にはヘリウムガスが充填されている。これは 190 m 飛行管の真空排気を行なう場合, 飛行管の端の中性子ビーム取出しの窓が直径 60 cm あるため, アルミニウムの窓では 1 mm 以上の厚さがないと破れる恐れがある。破れた場合, 窓の近傍に人がいると危険である。また, 厚い窓を用いると中性子の減衰を招き, 測定の種

類によってはアルミニウムの中性子共鳴が邪魔になるので, これを避けるためヘリウムを充填し薄いマイラー膜を窓に使用する。飛行管にヘリウムを充填する場合は, 窓の外側に真空槽をとりつけ, 飛行管と真空槽を同時に排気した後ヘリウムを充填し, 外側の真空槽を取りはずす。このマイラー膜の厚さは 190 m と真空中に排気された 55 m の飛行管共に 0.075 mm である。45 m の飛行管も真空中に排気され窓には 0.5 mm の厚さのアルミニウムの板が用いられている。

中性子飛行管は中性子ターゲットから離れる程直径が大きくなっている。Fig. 16.6 で見られるように, 飛行管の直径が大きくなる場所に長さ 20 cm の中性子コリメーターが挿入されている。これは硼酸とパラフィンを重量比で 1:1 位に混入して作られたものである。コリメーターの内径は, 飛行管の壁で散乱される中性子が検出器に到着しないような大きさにきめられた。これは中性子ターゲット側からと, 逆に検出器側から中性子飛行管を見た場合, 飛行管の壁が双方から同時に見えないような条件が満されるもっとも大きな内径が選ばれた。ただし, 飛行管の途中に測定サンプルが置かれる場合は, このサンプルから見て前記の条件を満足する必要がある。飛行管の終端には長さ 50 cm のコリメーターが置かれている。

コンクリートのシールドに埋め込まれた部分の飛行管は, 中性子ターゲットに近い部分では内径は 150 mm, 直径で遠い部分の内径は 120 mm である。これは, ターゲットに近い部分からの散乱中性子や減速中性子を検出器またはサンプルに直接到達しないようにするためである。これらの長さについては, やはり Fig. 16.6 に示されている。

190 m 飛行管はターゲット室を出る部分に試料室があり, 飛行管の間に約 1.5 m の間隙があり, 全断面積測定用のサンプルが置かれる。また, この飛行管の 100 m の地点には 100 m 中性子測定室があり, 約 3 m の間隙があり, 中性子検出器が置かれる。

55 m の飛行管には同じくターゲット室を出た部分に, 約 1 m の間隙があり, サンプルを置くことができる。

パイプ, フランジ, 真空引口の溶接は現場で行なわれ組立てられた。メーカーより納入された時の 1 本のパイプについての曲りは 5 mm 以内であった。組立においては中性子ターゲットの位置にトランシットを置いて飛行管を見通して, 各々のパイプのフランジ面の中心が一直線になるように支持台の高さの調整を行なった。

旧 linac には 50 m の飛行管があり, 内径 30 cm と 60 cm のパイプにより構成されていたが, これを linac 建家側からの長さがそれぞれ 10 m で内径 31 cm, 40 cm, 50 cm のもので置換え, 以前からの内径 60 cm のものは 10 m だけ残した。この結果, 余った内径 60 cm のパイプ 30 m は 190 m の飛行管に流用した。Photo 16.6 はターゲット室から 190 m の飛行管を撮影した写真で, 100

m の中性子測定室が見られる。

Photo 16.7 は 55 m (左) と 2 本の 45 m の飛行管を撮影した写真で後方にターゲット室及びターゲット建屋が見られる。Photo 16.8 はターゲット室における飛行管の端末の写真で、右から 55 m, 45 m, 45 m, 18 m の飛行管の中性子ビーム窓である。55 m の飛行管にはサンプルチェンジャーが取り付けられている。この飛行管の窓はマイラー箔で他の窓はアルミニウム板である。

ターゲット建屋内には、中性子ターゲットから出発する 2 本の飛行管が設置されている。1 本は現在 18 m の長さで、他の 1 本は 12 m の長さである。12 m のものは床面からの高さが他の飛行管より 15 cm 高く linac の加速管の高さと同じである。この 2 本の飛行管の長さは実験に応じて容易に変更することができる。

飛行時間法で中性子エネルギーを正確に測定するには、飛行距離と飛行時間を正確に測る必要がある。時間の測定にはクリスタル発振器を用いれば 10^{-6} 程度の絶対精度が得られる。この際発振器を標準電波により校正すれば、より高い精度も得ることができる。

長さの測定については、実験室内では光の波長のように 6~8 桁も有効数字を出すこともできるが、一旦屋外に出れば高精度を得るのは容易ではない。そこで今回はステンレス鋼のテープ尺による方法によって測定を行った*。この 200 m に及ぶ飛行距離の測定においては、市販のテープ尺の精度 (JIS 1 級品の規格 10^{-4} 程度) をはるかに越える 10^{-5} 以下の精度を得ることができた。初期の目標は、相対誤差 $<10^{-4}$ であったが、特別に校正されたテープ尺を用い、これに一定の張力をかけ、たわみの出ないように多数の支持具を用い、多くの人員を動員してこの精度を得ることができた。

目的精度 $1\sim 2\times 10^{-4}$ を得るためには、1 ランク上の精度 $1\sim 2\times 10^{-5}$ を得るに必要な作業手順をとることとし、作業中における精度低下を防いだ。この測定に JIS 1 級品のテープ尺を用いるのでは、規格精度が 10^{-4} 前後 (30 m で ± 3.2 mm, 50 m で ± 5.2 mm) であるので目的を達することはできない。それで三角測量で使用するステンレス鋼の基線尺で工業技術院計量研究所において検定したものを 2 本使用した。テープ尺をたるませないように、トランシットで見通した直線に沿って、5 m 間隔で杭を打込み、それにテープ保持具の針を打った。地表温度、作業の便など考慮して、テープは地表から約 30 cm 上に張られた。温度計 (1° 目盛付) 1 コ、テープ 2 本、スプリング秤 2 丁、ポール 4 本、アイピース 2 コを用意した。使用したステンレス鋼のテープ尺は、ヤマヨ測定機 K.K 製 (タフステンレス・テープ) で全長 50 m, 1 mm 目盛のものである。工業技術院計量研究所による校正では、50 m の目盛に対する校正された長さは 50.0004 m 及び 50.0002 m であり、誤差 1 mm 以下で

ある。この長さは使用条件において、ヤング率や、膨張係数から補正が行なわれた。190 m 飛行距離を求めるため全体を A, B, C, D の 4 ブロックに分けて、各ブロックの長さを測定し、それぞれのたし算を行なった。実際の測定は、仮のベンチ・マークを設定して、二つのベンチ・マーク間にテープ尺を張り、10 kg の張力を (スプリング秤で測定する) かけて、両方のベンチ・マークの目盛をアイピースを使って読取る。テープ尺の目盛の局部的な歪を除くために、テープ尺をずらしながら、計 16 回の測定を各ブロックについて行なった。これらの測定から、仮のベンチ・マーク間の距離が TABLE 16.3 のように求められた。目的とする 100.000 m 及び 190.000 m 点のベンチ・マークはこれらの測定値から正確に決定され、測定室床面にうめ込まれた真鍮円板に十文字の交点としてきざまれた。

190 m 点の絶対精度は ± 0.29 mm であり、精度は 1.5×10^{-6} , 100 m 点は ± 0.24 mm, 2.4×10^{-6} の精度である。このテープ尺を用いて、55 m の中性子測定室には 50.000 m, 45 m 測定室には 46.000 m (東側), 47.000 m (西側) のベンチ・マークが取り付けられた。これらの測定は、ターゲット室の建設における基礎工事の段階で行なわれた。なお、校正したテープ尺と、校正しない JIS 1 級品のテープ尺の長さの比較が、同じ条件 (10 kg 張力, 50 m) で行なわれたが、約 5 mm の差があった。したがって JIS 1 級品のテープ尺による測定では、 10^{-4} の精度は得られないことが判った。

16.1.3 TOF ユニット

この装置は中性子が発生したことを表わすパルスと、中性子が一定距離を飛んで検出器に到達したことを示す検出器からのパルスとの時間間隔 (アナログ量) をデジタル量に変換する回路である。第 17 章で述べられる計算機 ICD-507 にはインターフェイスを介して 4 台の TOF ユニットが接続可能であるが、現在は東芝製の TOF ユニットと原研エレクトロニクス課製のものの 2 台がある。エレクトロニクス課製の TOF ユニットの性能の概要は次のとおりである³²⁾。

- (1) channel 幅: 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400 (nsec)
- (2) channel 数: 最大 65535
- (3) delay time (start pulse の delay): $0\sim 65535\times$ channel 幅
- (4) variable channel 幅: 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192, 16384, 32768 channel ごとに channel 幅が倍ずつになる mode と channel 数と channel 幅とも倍ずつになる mode がある。
- (5) counter channel: 最大 8 コの独立したカウンターからの信号を分析できる。
- (6) buffer register: 4 コの buffer register があり、

* (註)測定は測量士・関口幸五氏により鹿島建設(株)の協力のもとで行なわれた。

数え落しを少なくしている。

16.1.4 検出器

(1) 中性子全断面積測定装置

中性子全断面積は、一様な厚さの試料の中性子透過率の測定から求められる。中性子エネルギーによって全断面積が変るため、中性子エネルギーを飛行時間法で測定し、透過率をエネルギーの関数として求める。隣り合った共鳴単位をできるだけ分離するためには、中性子エネルギーを高分解能で測定する必要がある。190 m 飛行管を使って全断面積の測定を行なっている。中性子検出器は $4\frac{3}{8}"\phi \times \frac{1}{2}"$ の ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータ 7 台である。光電子増倍管にける高電圧を調整して、7 台の検出器の中性子によるパルスの高さを合わせることができるようになっている。

中性子検出器は、厚さ 30 cm の硼素、パラフィンを混合したシールド内に置かれる。このシールドは 2 cm 厚の B_4C で内張りしてある。測定器および回路系のブロック図を Fig. 16.7 に示す。190 m 測定室には検出器と高圧電源、プレアンプとミキサーが置かれ、信号はパロンケーブルにより計算機室に送られ、増幅、整形が行なわれる。

ターゲット室の飛行管を出たところに小さな小屋があり、中性子強度を監視する中性子検出器 ($1\frac{1}{2}"\phi \times \frac{1}{4}"$, ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレータ) と試料交換器が置かれている。試料を液体窒素で冷却して、全断面積を測定する試料交換器も設置してある。これは中性子共鳴単位が密なとき、共鳴単位の分離をよくするためのものである。Photo 16.9 はこの小屋の写真であり、写真右から中性子が通る。この方向に沿って最初にモニターのシールド、つぎがコリメーター、最後が試料交換器の順である。左上が試料冷却装置だが、この写真の場合この装置は使用していない。

(2) 中性子捕獲断面積測定装置

中性子捕獲断面積測定装置の概略を Fig. 16.8 に示す。中性子捕獲 γ 線を検出する大型液体シンチレーション検出器は、中性子発生ターゲットから 52 m の距離にある土盛りをした測定小屋の中に置かれている。液体シンチレータはキシレンを溶媒として p-terphenyl を 4 g/l と、 α -NPO を 0.086 g/l 溶解したものである。このシンチレータはほぼ球型をした 3,500 l のステンレスのタンクの中に入れられた。液体内の水素の中性子捕獲による 2.2 MeV の γ 線を少なくするために、シンチレータの中には 35.7 cc/l のメチルボレートが加えられた。タンクの内壁には光の集光率を良くするために酸化チタニウムが塗ってあり、また、酸素を追出して発光効率を上げるためにアルゴンガスの bubbling が常時行なわれている。

中性子ビームの通る中央の管はアルミニウム製で、内径は 14 cm、その外側には散乱中性子の影響をなくすた

めにボロンカーバイドを入れた帯がまかれている。サンプルはタンクの中心に置かれ、サンプル交換器によって自動的に中性子ビーム中に出し入れされる。中性子ビームが直接シンチレータにあたらないようビームの直径は 4 cm にしぼられている。また、中性子ターゲット方向からの γ -flash やバックグラウンドの中性子がタンクに入らないように、タンクの中性子ターゲット側には鉛とパラフィンのシールドが置かれている。

タンクには 10 個の光電子増倍管用の窓が開けられ、現在 4 本の EMI 9545 B (直径 10 インチ) が取り付けられている。それからの信号が集められて γ -flash limiter を通った後増幅され、timing single channel analyzer により設定した pulse height より高いパルスがストップ信号を与える。これらの回路は linac による雑音の影響を小さくするため中性子測定室に置かれている。信号はパロンケーブルによって計算機室へと送られる。Photo 16.10 にタンクと光電子増倍管が見られる。

タンクの後方で中性子ターゲットから 56 m の位置に中性子束測定用の $4\frac{3}{8}"\phi \times \frac{1}{4}"$ の ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレーション・カウンターが置かれ、さらに中性子ターゲットから 5 m のところには、中性子モニター小屋が作られてバックグラウンド測定用のサンプル交換器と中性子強度をモニターするために、 $2"\phi \times \frac{1}{2}"$ の ${}^6\text{Li}$ -ガラス・シンチレーション・カウンターが置かれている。

(3) 散乱断面積測定装置

中性子散乱断面積測定装置³³⁾は、47 m 測定室におかれている。この装置の構造を Fig. 16.9 に示す。入射中性子ビームは、鉛および硼酸入りパラフィンのコリメーターにより、直径 6 cm にしぼられる。ビームの通過するアルミニウム管の中に、散乱試料が置かれる。この管は真空中に排気できる構造になっていて、中性子が空気によって散乱され、バックグラウンドが増加するのを防いでいる。ビームと直角に、水平に 2 コのシンチレーション・カウンターが試料の両側に対向して置かれている。ビーム孔およびシンチレータの周囲は、硼酸入りパラフィンおよび鉛リングのシールドで囲まれている。さらに、直接中性子が当る可能性のあるビーム孔の内面やシンチレータの周囲は、アルミニウム板が 2 重の構造になっていて、 B_4C の粉末が 1 cm の厚さでつめられている。

シンチレータは直径 11.1 cm で 0.63 cm の厚さの ${}^6\text{Li}$ (NE 908) と、同じ大きさの ${}^7\text{Li}$ (NE 906) ガラス・シンチレータである。使用された光電子増倍管は、EMI-9579 A (5" 直径) である。 ${}^6\text{Li}$ ガラス・シンチレータ内の ${}^6\text{Li}$ (n, α) T 反応 ($Q=4.8$ MeV) のパルス・ハイトの半値幅は、光電子増倍管の個々の特性に強く依存していて、この場合 65 % であった。シングルチャネル・パルスハイト・アナライザーで中性子の波高選別を行なう際に、捕獲 γ 線のコンプトン散乱のパルスが混入してくる。この γ 線成分を除く目的で、 γ 線に対する感度の等しい ${}^7\text{Li}$ ガラス・シンチレータを幾何学条件とパルス・

ハイトの選別条件を等しく調整して、両者の差を求める。また、散乱を受けずに試料を通過した中性子ビームを小型の ^6Li ガラス・シンチレータで測定して、中性子束のモニター及び試料の透過率測定を行なっている。

これらのシンチレータからのパルスは、シングルチャネル・パルスハイト・アナライザーを通したあと成形し、同軸バローン・ケーブルにより、計算機室にある TMC-4096 チャネル・タイム・アナライザーに送られる。タイム・アナライザーに蓄えたデータは、磁気テープに読出し、計算センターの大型コンピュータを用いて処理が行なわれる。Photo 16.11 はこの測定装置を示している。右端が飛行管終端で、中性子はコリメータを通過してシールド中の試料に入射する。シールドの左側は透過率測定用の中性子検出器である。

(4) 分裂断面積測定装置

分裂断面積の測定には核分裂片を直接測る方法と分裂の際出てくる高速中性子や、 γ 線を測定する方法がある。後の方法では出てくる中性子や γ 線と、中性子源からくる散乱高速中性子や、中性子捕獲 γ 線との区別がつけにくい。そのため断面積の絶対値を正確に測定する場合は前者が用いられる場合が多い。

^{235}U の中性子核分裂断面積の測定を行なうために、 ^{235}U のフィッション・チェンバーが製作された。Photo 16.12 は、フィッション・チェンバーである。このチェンバーの内部には厚さ 0.1 mm、直径 220 mm のアルミニウムの箔が 20 枚 1 cm おきに平行に並べられている。この箔は 1 枚おきに導線で接続されていて、これらの 2 組の間には、500 V 程度の電圧がかけられる。アルミニウム箔の両方の面には 2 mg/cm^2 位の厚さで直径 180 mm にわたって ^{235}U が塗られている。チェンバーには 1 気圧から 2 気圧程度の PR ガスが入れられる。分裂片の信号は、リニア・アンプで増幅され計数される。

16.1.5 測定方法と測定例

各種の中性子断面積を求めるための測定の方法を簡単に説明し、それぞれの断面積についての生の測定データの実例を示す。

全断面積は中性子透過率から求められる。サンプルを中性子ビーム中に入れた場合と、入れない場合の中性子束を測定し、それぞれバックグラウンドを差し引いて比をとると、中性子の透過率が得られる。Linac の電子ビームの時間変動により、中性子束が時間的に変動するため、別に中性子モニターで平均の中性子束を測定する。これにより、前述のサンプルの出し入れに伴う 2 つの中性子束をそれぞれ規格化することができる。モニターには、小さな ^6Li ガラス・シンチレータを使用している。このほか、測定系のいろいろなドリフトの影響を排除するため、サンプル交換器でサンプルや、バックグラウンド測定のためのサンプルの出し入れをひんばんに繰返す。これらはすべて計算機の“オンラインプログラム”により自

動的に行なわれ、一時的に計算機に記憶された中性子束のデータはつぎつぎに磁気テープに移される。

Fig. 16.10 は 5 mm 厚の天然ウランをサンプルとした測定データの 1 例である。飛行時間の原点をきめる信号には、第 5 加速管の後のビームモニター (8.1 参照) の信号を使用している。これを TOF ユニットのスタート信号とし、検出器からの信号がストップ信号となる。この図の場合、linac のパルス幅 125 nsec、時間分析器チャンネル幅 100 nsec である。多くの共鳴準位が見られる。

部分断面積を求めるための測定方法も、多くの点で全断面積の場合と共通している。いずれも中性子モニターを使用するが、これらは各飛行管ごとに設けられている。精密な測定では、サンプル交換器を使用することが望ましいが、部分断面積測定では検出器がサンプルの周囲に置かれるため、サンプル交換器の構造は複雑になる。全断面積測定と異なる主な点は、検出効率の値が必要であること、また、中性子束の絶対値が必要になることで、このため測定が難しくなってくる。

Fig. 16.11 に、タンタルの捕獲 γ 線の収量の測定例を示す。サンプルの厚みは 0.8 mm、linac のパルス幅 500 nsec、時間分析器のチャンネル幅は 400 nsec である。Fig. 16.12 はタングステンの散乱中性子の収量の測定例である。下図が ^6Li -ガラス・シンチレータによる中性子と γ 線の検出信号のデータであり、上図が ^7Li -ガラス・シンチレータの γ 線だけによる信号のデータである。サンプルは 0.026, 0.39, および 1.9 mm の 3 種で、linac のパルス幅は 500 nsec、時間分析器チャンネル幅は同じく 500 nsec である。Fig. 16.13 は ^{235}U の核分裂収量の測定例である。

16.2 Linac による RI 生成及び核分光学的研究

Linac の電子ビームを重金属のターゲットに入射させると高いエネルギーの X 線を多量に発生する。この X 線の光核反応により RI の生成を行なうことができる。これらの RI には原子炉の (n, γ) 反応では作ることができない多くの核種がある。とくに (γ, p), (γ, pn) 反応で作られる核種にはこの例が多い。また、linac 電子ビームのエネルギーは最高 190 MeV であるので、(γ, n) 反応以外に (γ, pn), ($\gamma, 2n$), ($\gamma, 3n$) 反応を起すこともできる。これらの RI の中の短寿命の核種は、核分光学的の対象になるものが多い。

実用 RI には (γ, n) 反応によって作られる ^{132}Cs のように、原爆実験の fallout の ^{137}Cs が人体に吸収される場合の代謝の研究に用いられるものや、同じく (γ, n) 反応でつくられる ^{237}U のようにウランのトレーサ実験によく用いられるものがある。

RI 生成のためのサンプルの照射は、遠隔操作の照射装置により、高放射線のターゲット室に立入ることなく

安全に行なうことができる。

16.2.1 気送管照射装置

核分光学, 放射化分析の研究のための X 線による RI の生成は, 気送式照射装置によって行なうことができる。この装置は増力前に使用していたものと原理的に同じであるが, 照射部の冷却能力が向上された。この構成は照射部, 気送部, 制御部の 3 部から成り, 照射部は加速管の出口から南側へ 5° 偏向されたビームダクトの端に置かれている。気送部と制御部は化学室に置かれていて, 気送部と照射部は外径 24 mm, 内径 18 mm のポリエチレン製のパイプで接続されている。

照射部の概略を Fig. 16.14 に示す。照射プローブの先端には直径 20 mm, 厚さ 1 mm の白金板 3 枚が冷却水に浸されている。電子ビームはコリメートされて 1.0 mm の厚さのステンレス窓に入射し, 白金のコンバーターによって小さい角度で前方方向にコリメートされた X 線を放出する。X 線の広がりの実測例を Fig. 16.15 に示す。照射プローブや集束監視用のコリメータはそれぞれ電気的に絶縁されて, これらの部分に集められた電子ビームは制御室内のオシロスコープやデジタル, ボルトメータによって測定される。電子ビームの位置と集束状況の監視および調整には, 0.5 mm の酸化ベリリウムの板と ITV カメラが使用されている。照射試料はアルミニウムまたはプラスチック製のカプセルに入れられて, 約 30 m はなれた化学室から送り込まれる。送り込みと取出しに要する時間は約 5 秒であり, したがって 10 秒程度の半減期をもつ核種の測定も可能である。

照射プローブの上面, 側面, 前方には 5 cm の厚さの鉛の遮蔽体があって, 照射中に発生する強い X 線が周辺のバックグラウンドレベルを高くしないようにしている。照射をしていない時に, この附近へ近づく際, プローブの残留放射能による被曝を最小とするためプローブは遮蔽体の被いとともに鉛製収納部へ収められる。照射位置から収納位置への移動は化学室から, 遠隔操作で行なうことができる。

また, 照射部全体が台車の上に組立てられているので, プローブを格納状態にすると, ビーム・ダクトに妨害されずに前方に移動することが可能であり, 他の実験系を容易に照射位置に据付けることができる。

操作部パネルには上述の各制御スイッチの他, プローブ位置, カプセルの位置等を示す表示灯がある。

16.2.2 短寿命核種の研究

短寿命核種の研究は主として linac で (γ, n) , (γ, p) ,

(γ, pn) , (γ, f) 反応を用いて放射性核種を生成し, 半減期や, β 線と γ 線と内部変換電子線のエネルギースペクトルや, 各放射線の間のカスケード関係等の測定を行なって, 崩壊様式を確立し, 核構造や核反応の機構を解明することを目的としている。また, これらの崩壊核データは核物理の研究のみならず, 最近とくに核燃料の計量, 原子炉の停止時の崩壊熱の推定, 放射化分析などで精度の極めて高いものが要求されるようになってきた。

このような高精度の実験を行なうために放射線検出器, 測定回路, データの収集処理のシステムについての整備を行なった。 γ 線のエネルギースペクトルの測定のため, Hoboken 社から購入した Ge 単結晶から 20 cc, 60 cc 同軸型の Ge (Li) γ 線検出器を製作した。20 cc 検出器のエネルギー分解能は 120 keV では 1.3 keV, 1.3 MeV では 2.5 keV である。60 cc の検出器ではそれぞれ 2.0, 3.0 keV であり, これらは稀土類付近の複雑な崩壊に伴う γ 線スペクトルの測定において極めて有用である。Fig. 16.16 は, low energy photon spectrometer による ^{189}Re の γ 線スペクトルである。 γ 線スペクトルのピークの位置, 面積, γ 線のエネルギー, 強度の解析は BOB-73³⁴⁾コードにより行なわれた。

16.2.3 β 線スペクトル測定と解析

β 線の測定に関しては Si (Li) 検出器とアントラセン検出器が用いられている。 β 線スペクトルの Kurie プロット処理のプロセスにおいては計算機を大幅に用いることによって, 最大エネルギーの決定精度が向上した。

16.2.4 同時計数測定及びその解析

各種放射線の間の正確なカスケード関係, 精度の良い β , γ 分岐比の決定においては, $\beta\gamma$, $\gamma\gamma$, $\beta\gamma\gamma$ 等の同時計数実験が重要である。USC-3 データ処理装置の導入によって, event by event 方式で非常に能率よく同時計数測定が行なえる。この方式では 2 個あるいは 3 個の検出器信号はそれぞれの ADC で波高分析されて, これを磁気テープ上に順次書き込み, 実験終了後にこのテープを掃引し, 任意の放射線をゲートとした coincidence spectrum を得るもので, 一回の実験から測定系が cover する範囲のすべての放射線について同時計数関係が求められる。

実験終了後の磁気テープの掃引については, USC-3, FACOM-230/60 の両システムで行える。FACOM-230/60 ではテープの書き込み方式の相違から非標準方式プログラムを用いる。

TABLE 16.1 Cross section versus range for electron beam in lead.

Range (mm)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Cross section (mm ²)	91	95	100	120	140	170	140	120	100	50	35
Reciprocal of cross section (mm ⁻²)	0.0110	0.0105	0.0100	0.0083	0.0071	0.0059					

TABLE 16.2 Dimension of aluminum tube.

Inner dia. (mm)	Thickness (mm)	Length (mm)
200	5	8,000
300	4.5	6,000
400	5.5	6,000
500	7	6,000

TABLE 16.3 Lengths of four blocks.

	A-block	B-block	C-block	D-block
Average length (mm)	50,000.727	47,509.050	50,010.001	40,506.518
Error (mm)	± 0.201	± 0.136	± 0.131	± 0.100
Relative error	4×10^{-6}	3×10^{-6}	3×10^{-6}	2.5×10^{-6}

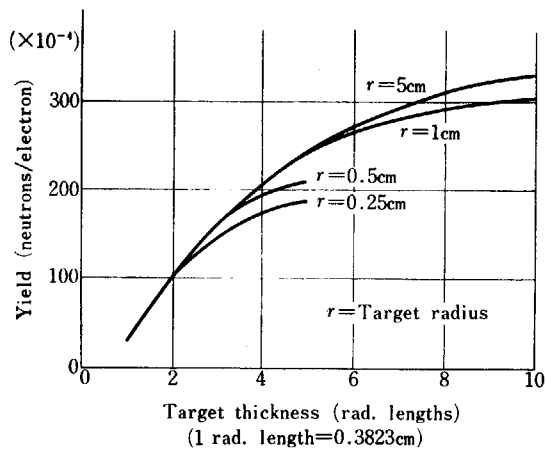


Fig. 16.1 Neutron yield versus target thickness for 100 MeV electrons incident on a Ta-target.

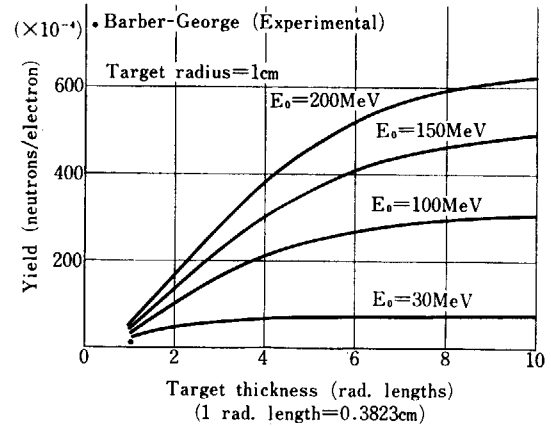


Fig. 16.2 Neutron yield versus target thickness for 30 to 200 MeV electrons incident.

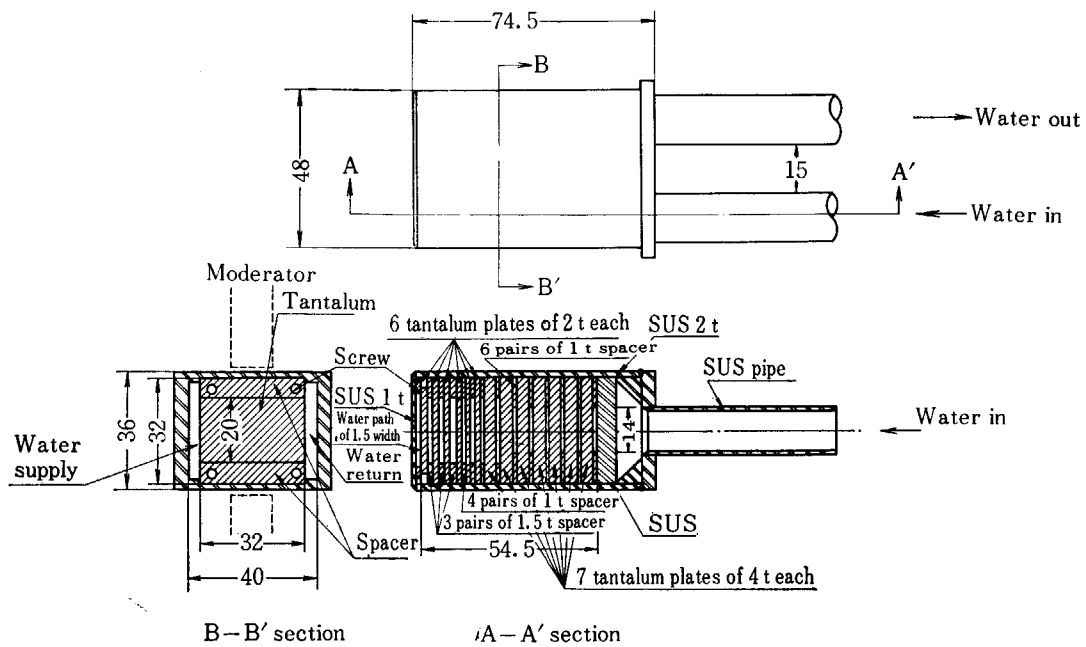


Fig. 16.3 Neutron target.

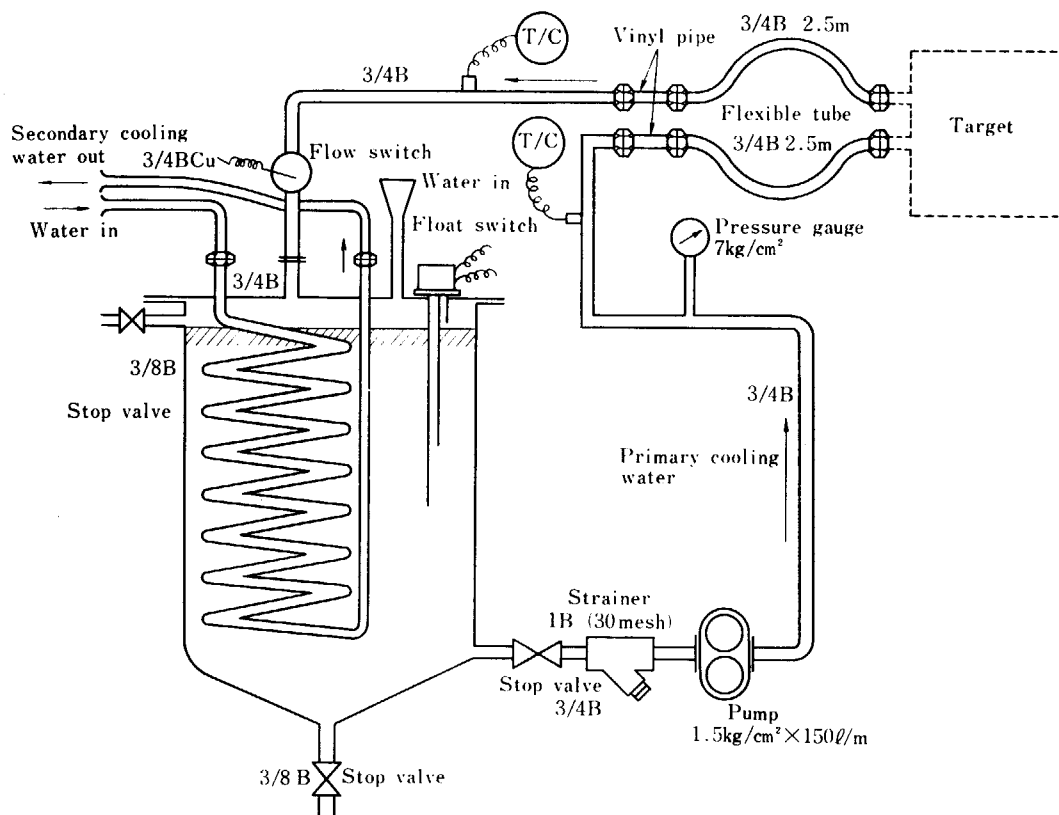


Fig. 16.4 Primary cooling water system of the neutron producing target.

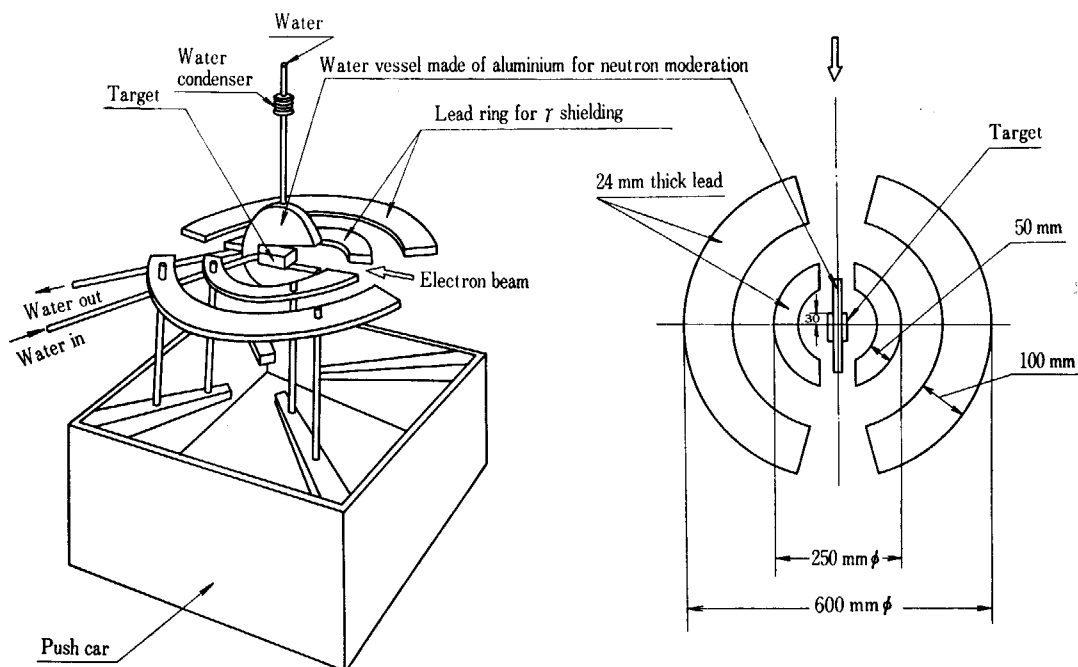


Fig. 16.5 Neutron target assembly.

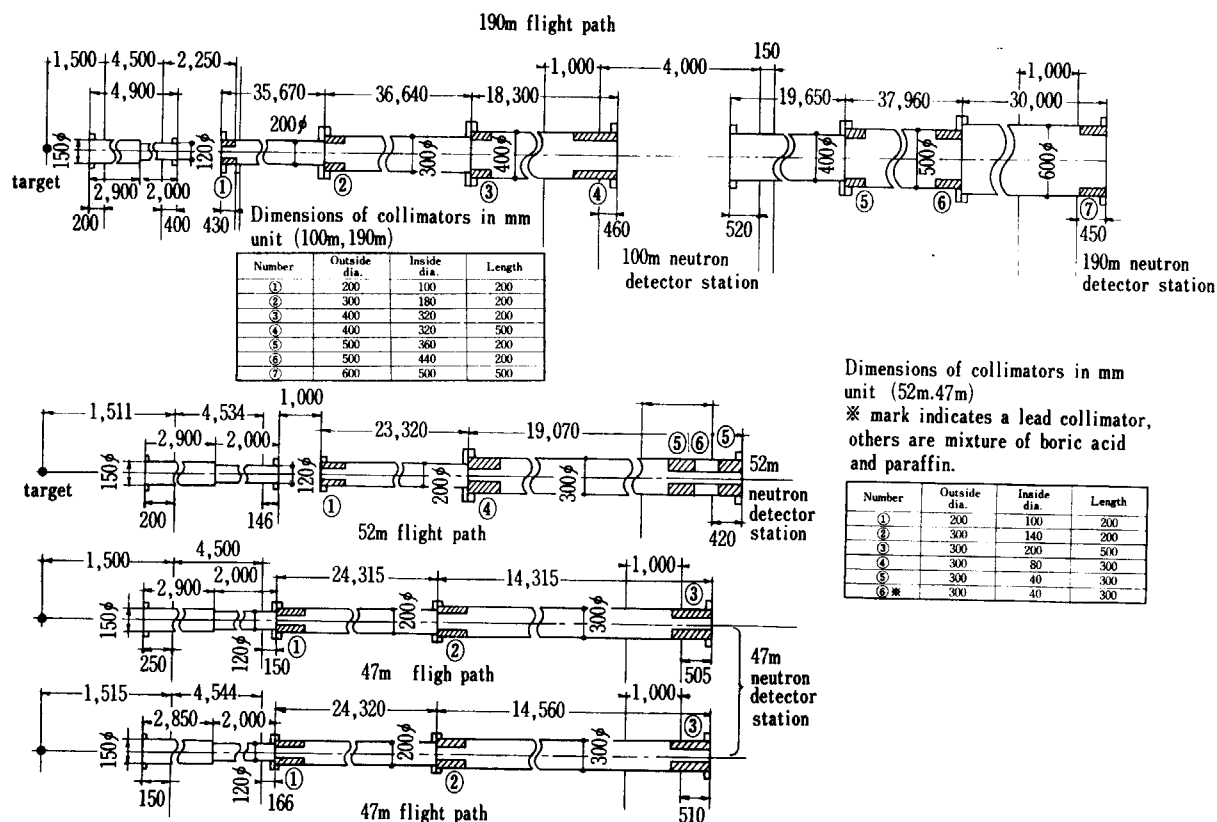


Fig. 16.6 Various neutron flight tubes and collimators.

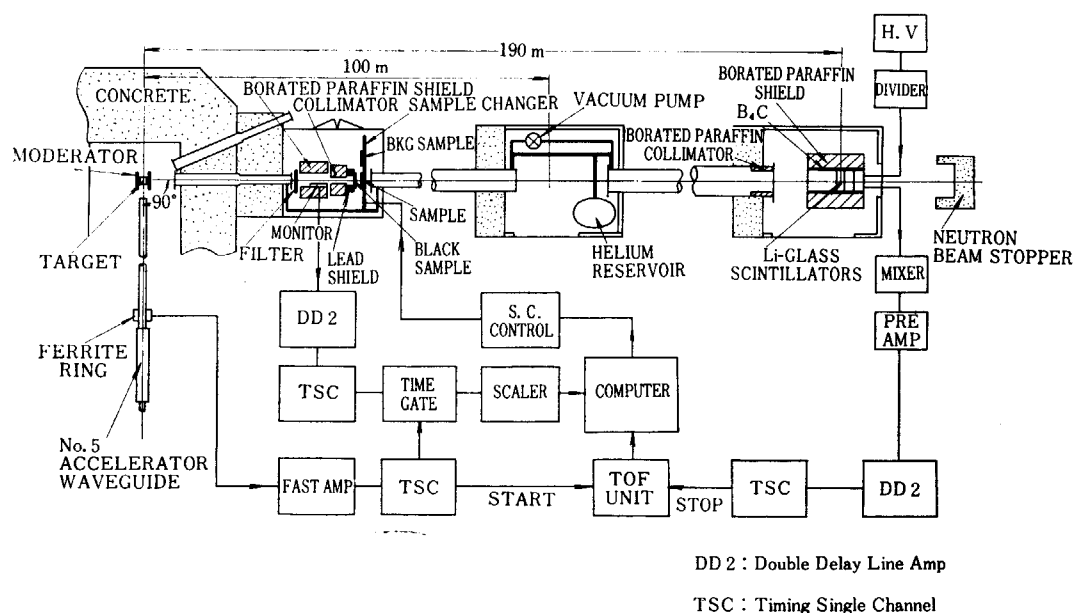


Fig. 16.7 Block circuit diagram for the total cross section measurement.

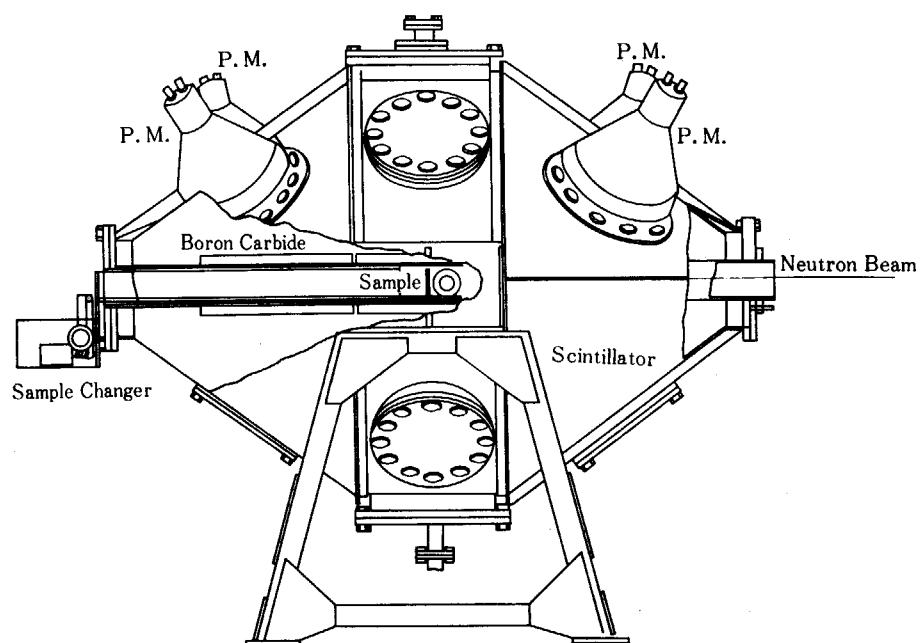


Fig. 16.8 Liquid scintillator tank for the capture cross section measurement.

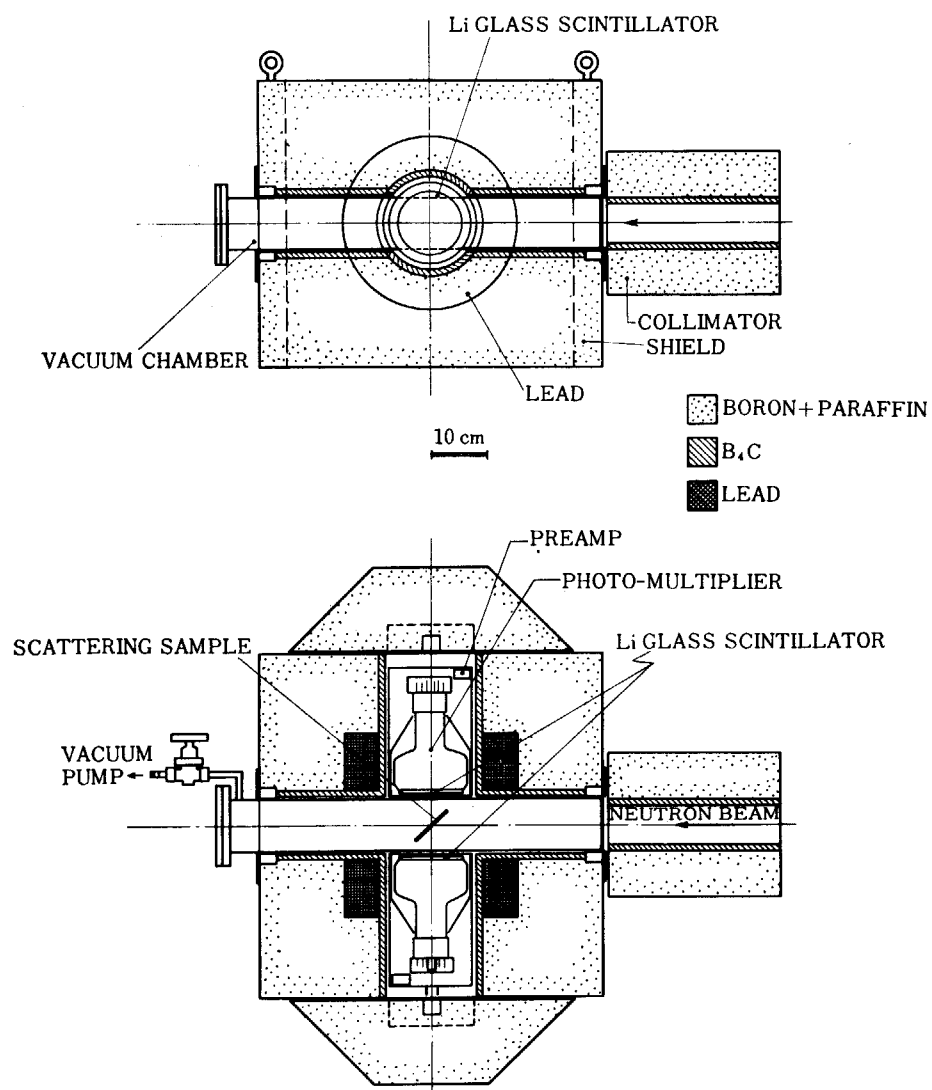


Fig. 16.9 Neutron scattering detector.

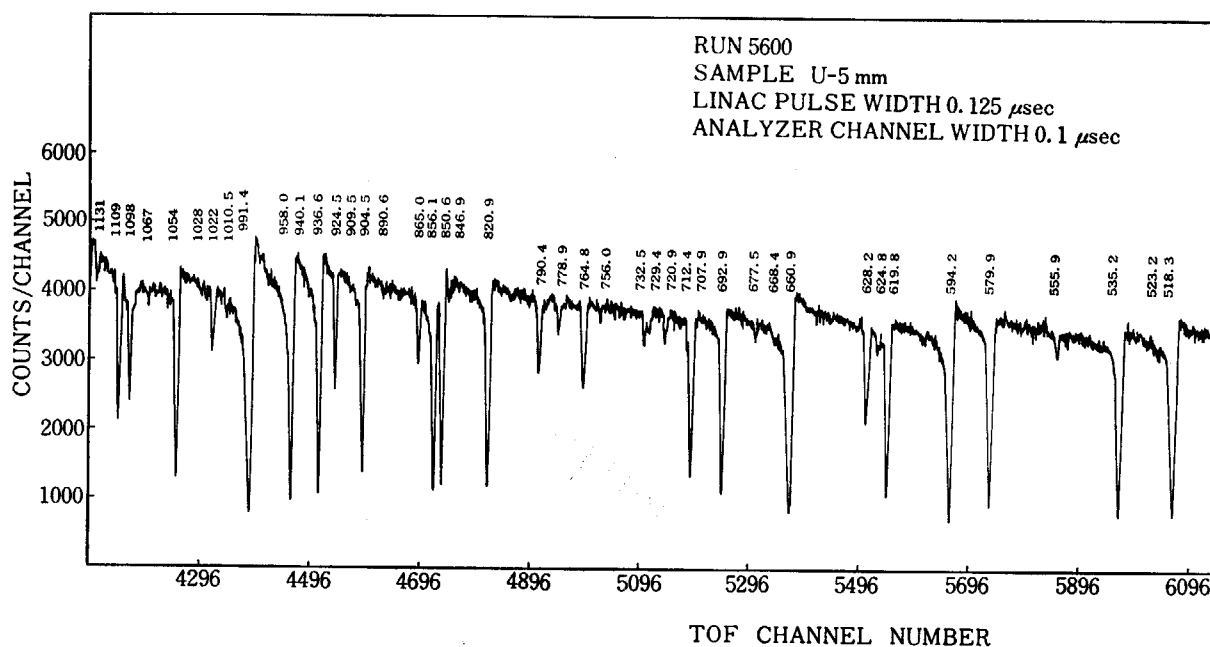


Fig. 16.10 Neutron transmission spectrum for a natural uranium sample. Numbers associated with the absorption dips in the spectrum are resonance energies in electron volt.

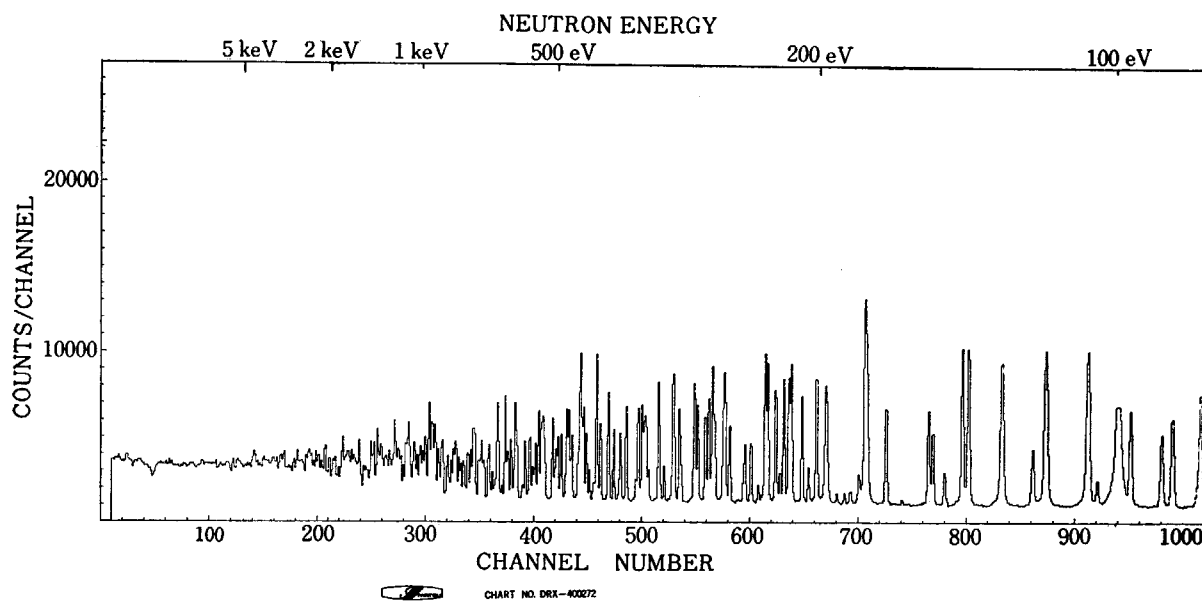


Fig. 16.11 The number of capture counts per channel for a 0.8 mm thick tantalum sample plotted against neutron time-of-flight. (Electron pulse width 0.5 μ sec, Channel width 0.5 μ sec, Flight path length 52 m).

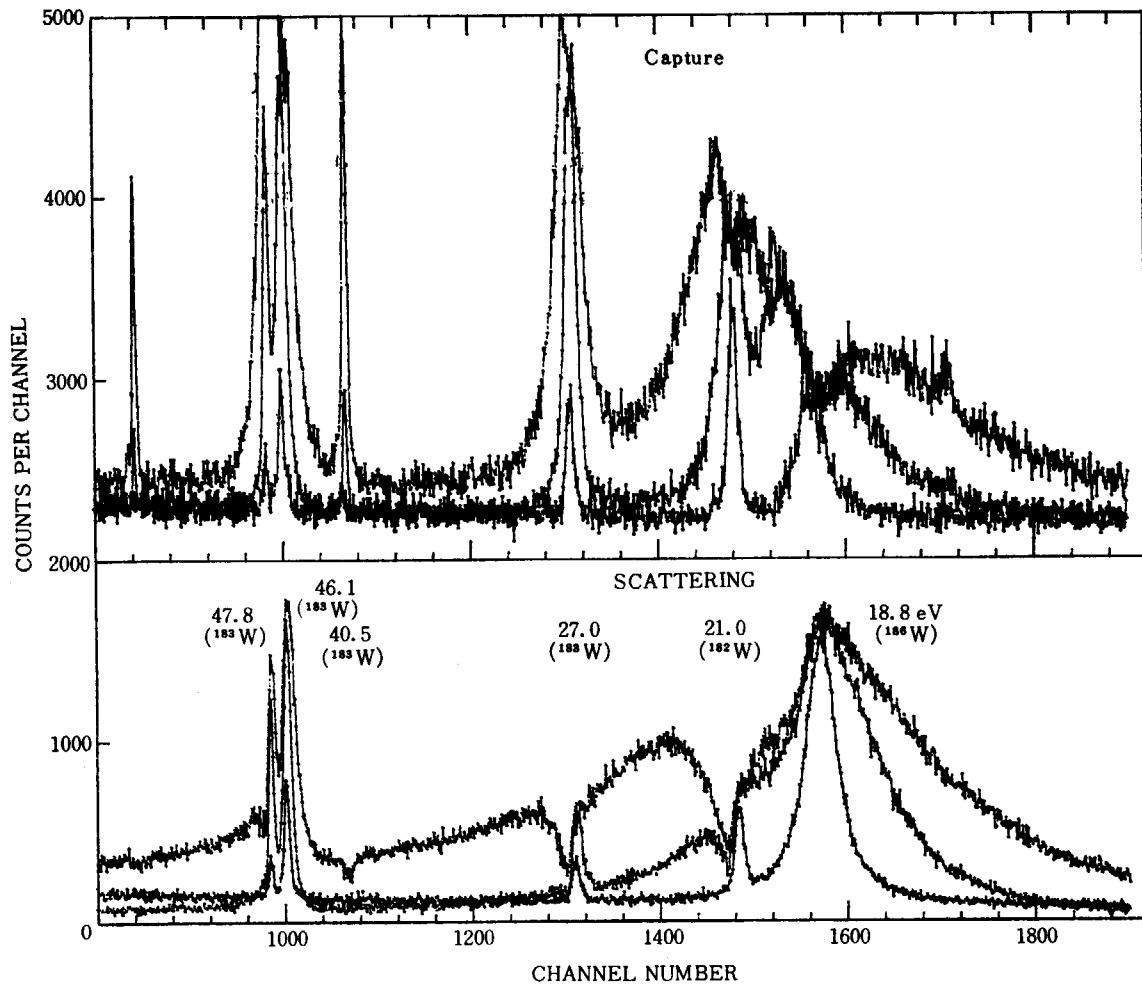


Fig. 16.12 The number of scattering (below) and capture (above) counts per channel versus neutron time-of-flight for 0.026, 0.39 and 1.9 mm thick samples of tungsten. Resonance energies and the isotopes responsible for the resonances are shown.

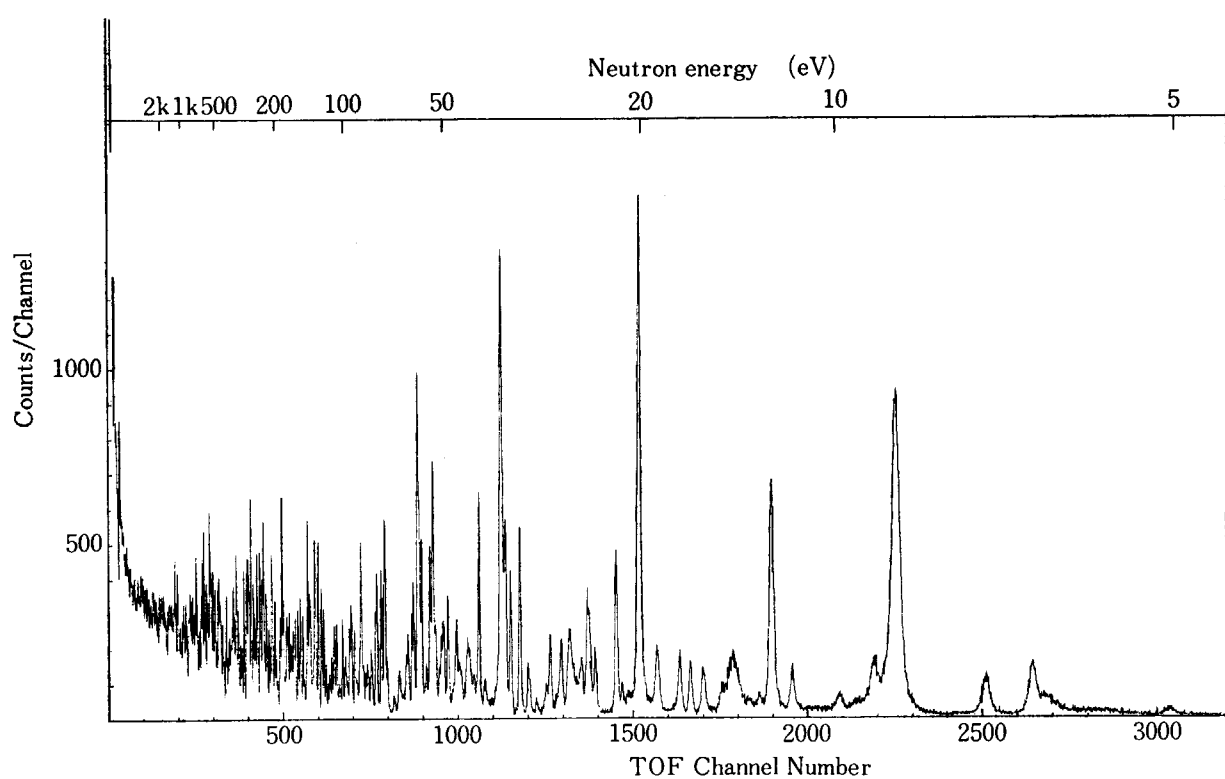


Fig. 16.13 The number of fission counts per channel plotted against neutron time-of-flight for a ^{235}U sample.

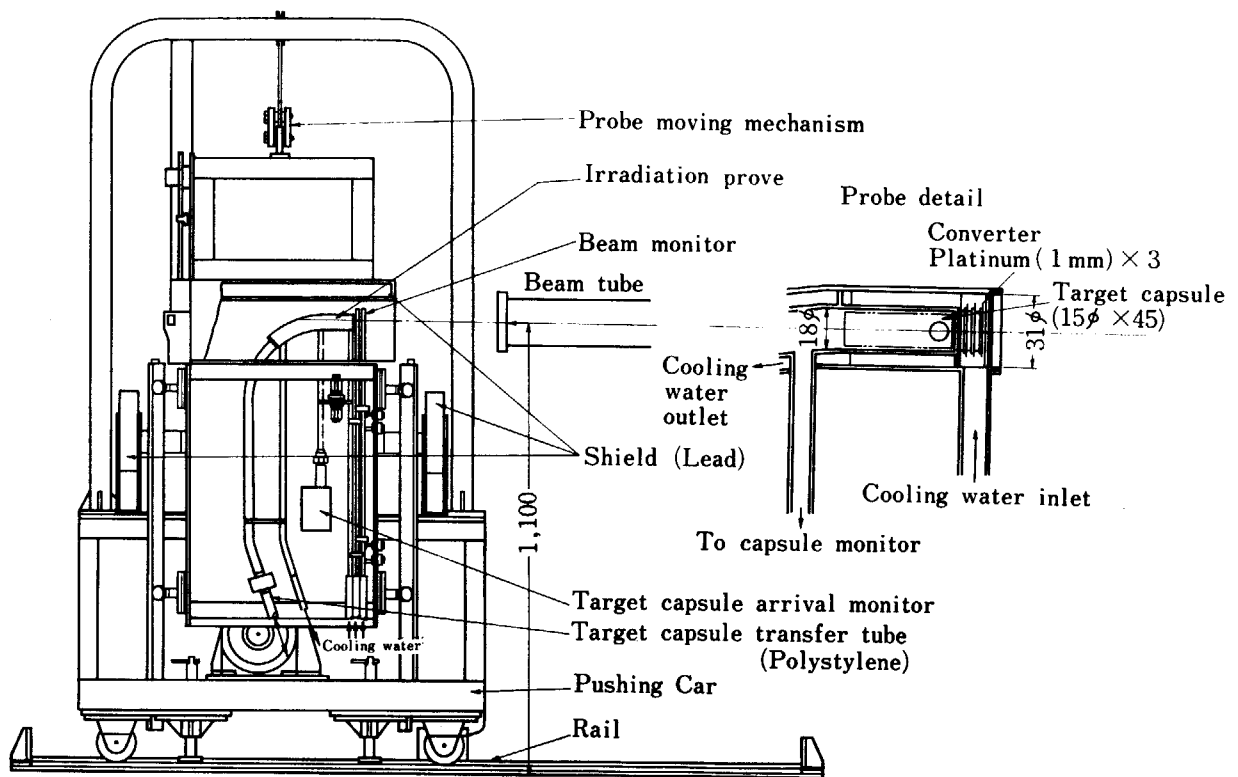
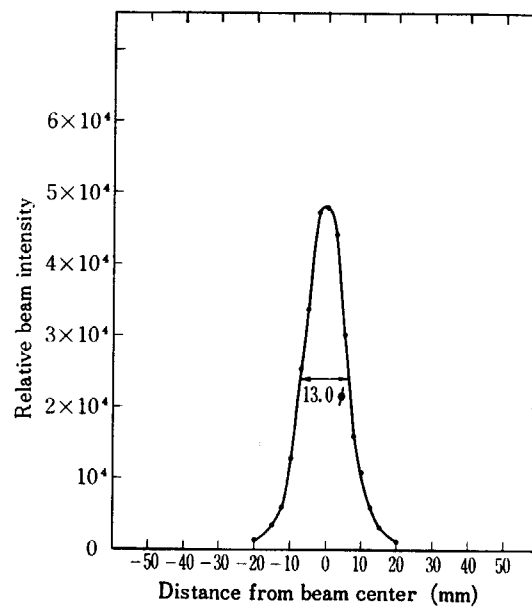


Fig. 16.14 X-ray converter and target transfer system.

Fig. 16.15 Electron beam profile observed by $^{63}\text{Cu}(\gamma, n)^{62}\text{Cu}$ reaction.

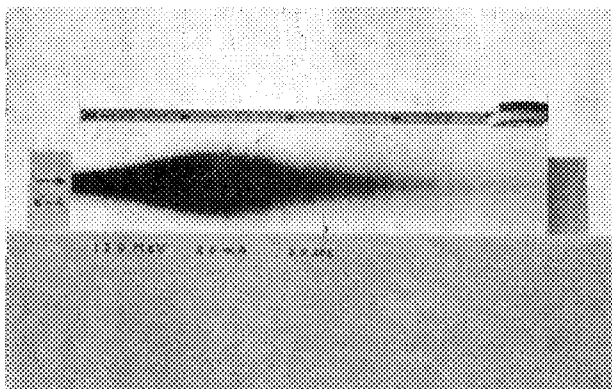


Photo 16.1 Soda glass coloured by electron irradiation (120 MeV, 20 mA, 20 sec).

Photo 16.2 Coloration of soda glass. A stack of 2 mm thick iron and 1.7 mm thick soda glass plates was irradiated by electrons (120 MeV, 20 mA, 20 sec), after the irradiation iron plates were taken out.

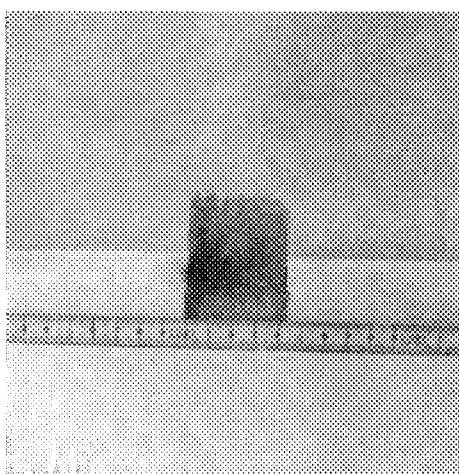
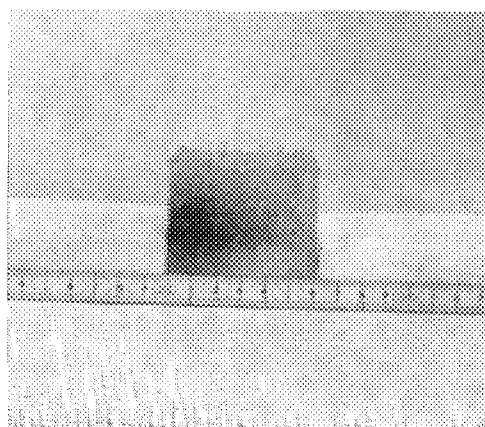


Photo 16.3 Coloration of soda glass. A stack of 2 mm thick lead and 1.7 mm thick soda glass plates was irradiated by electrons (120 MeV, 20 mA, 20 sec), after the irradiation lead plates were taken out.

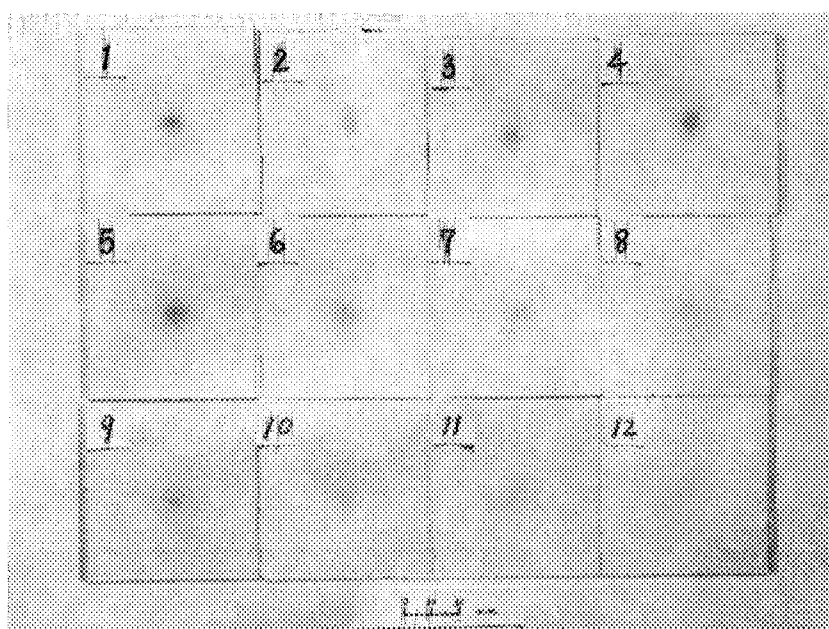


Photo 16.4 Coloration of soda glass. Condition of irradiation was the same as that of F. M 16.3. Numbers show the order of the glasses in the stack.

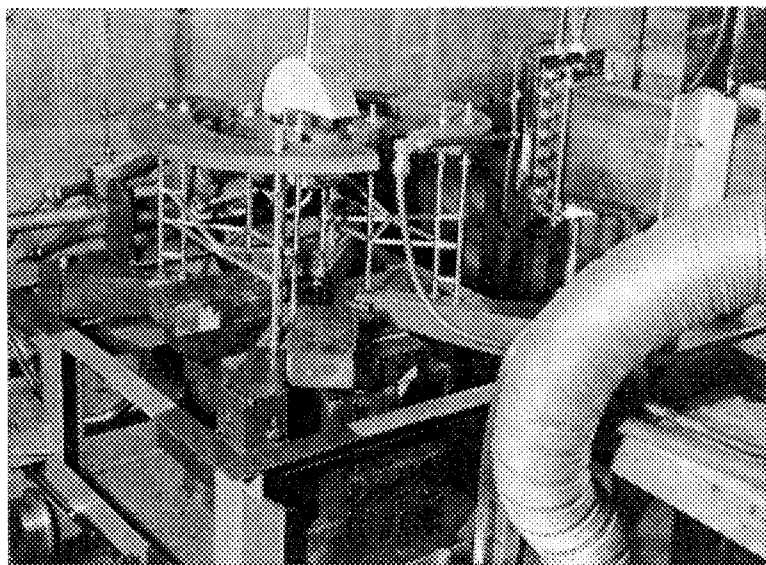


Photo 16.5 Neutron target. The target itself can be removed into a lead shelter placed underneath by manual remote control. An electron beam window and the cooling air pipe for the coil of deflection magnet 3 are seen in the upper and lower parts of the righthand side, respectively.



Photo 16.6 First one hundred meter part of 190 m neutron flight tube. The neutron detector station seen at the end of the tube is the 100 m one.

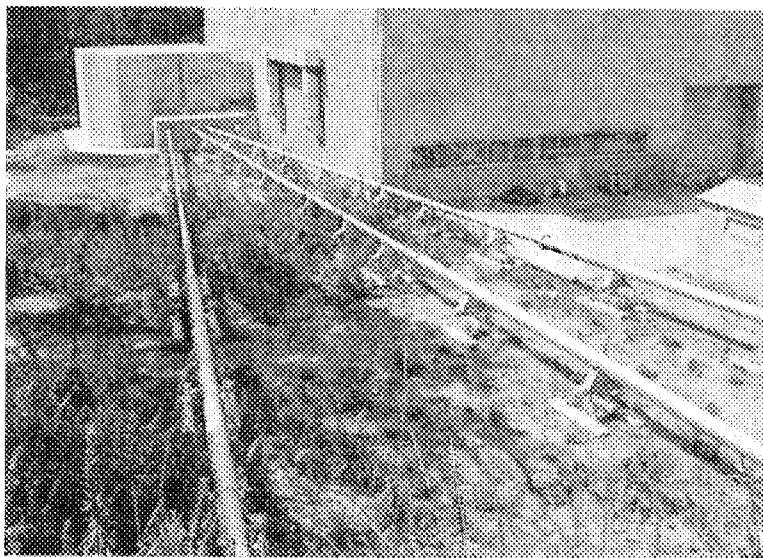


Photo16.7 Neutron flight tubes extending from neutron target shielding room. The left hand side tube is 52 m long, the others both 47 m.

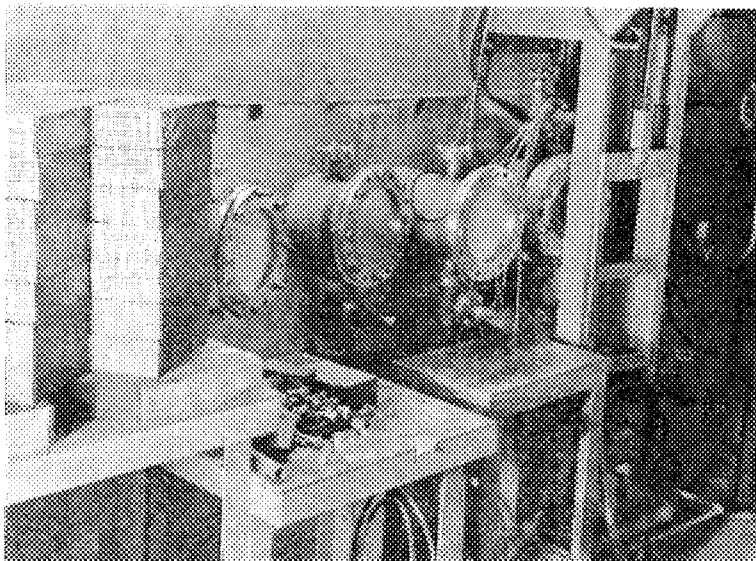


Photo 16.8 Ends of neutron flight tubes in target shielding room.

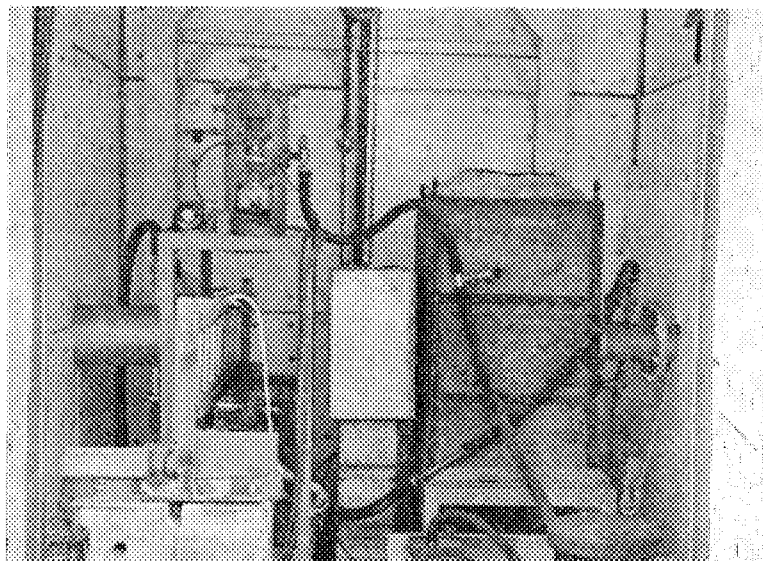


Photo 16.9 Sample changer station of the 190 m flight tube. A neutron monitor shielding, a collimator and an automatic sample changer are seen.

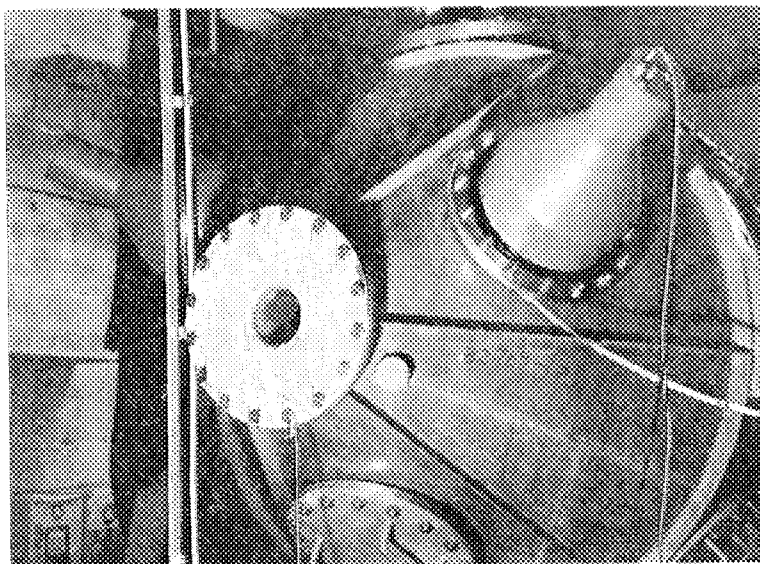


Photo 16.10 Liquid scintillator tank. The neutron exit hole is seen on the left.

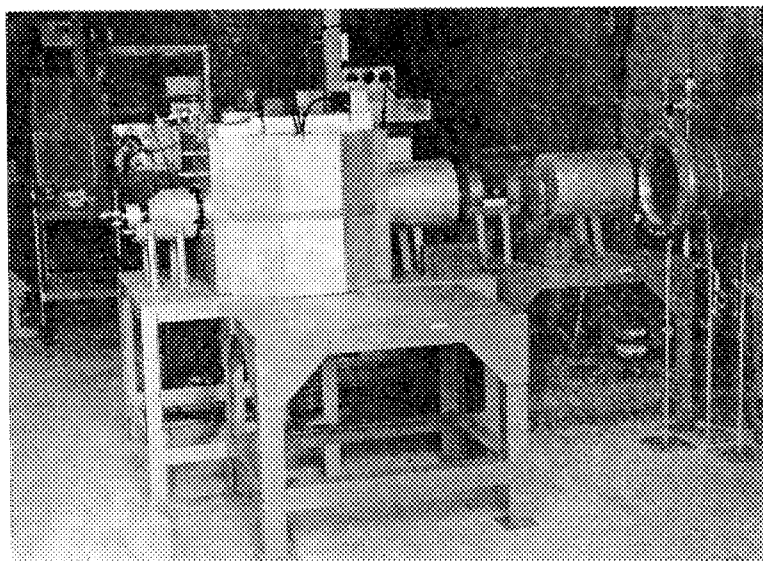


Photo 16.11 Collimators and shielding of neutron scattering detector.

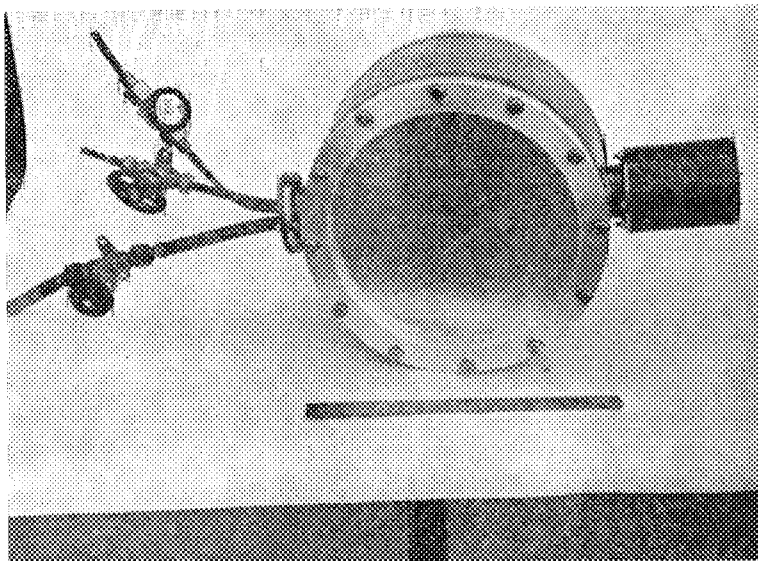


Photo 16.12 Multiplates fission chamber for ^{235}U sample.

17. 実験データ同時処理装置 (On-line computer)

17.1 方針と経緯

新しい linac では、各種の中性子断面積の測定および短寿命の β 線, γ 線の測定を含む核物理の研究を主として、多様な実験が行なわれる。これらの測定は、一般に測定すべきパラメータとパラメータ当りの channel 数が多く、また計数率も高いことが特徴である。また 2 種類以上の測定が同時に並行して行なわれることも少なくない。このような multiparameter, multichannel がかつ高計数率のデータを同時に取得処理するために、実験装置と on-line につながった小型計算機を中心とする、データ同時処理装置の設置が当初より計画された。

このような装置に要求される機能としては、データの取得 (あるいは収集)、処理、および制御に大別されるが、われわれの場合にデータの取得機能に重点を置くべきであることは明らかであった。このための計算機システムを選定するに際しては、目的の多様性から購入後も各種の実験装置との interface の増設を含む、システムの改良や拡張が必要となることを予想せねばならなかった。その際の技術的なサービスとか保守のためのさまざまな問題を考慮して、国産の計算機を本体とすることが望ましいと考えられた。これは、当時の輸入計算機による類似のシステムの実績と、国産計算機の性能とのバランスも考慮した上でのことである。つぎに、どうしても欠くことのできない機能とソフトウェアは当然揃えるとして、後は予算枠の範囲内で、補助記憶装置を含めてできる限りハードウェアを優先するという方針を立てた。

当時、モデルとして仕様の検討に役立つような同規模のシステムが国内に無かったので、仕様書作成の段階で補助記憶装置・周辺装置を含むシステムの規模を規定することは困難であった。そこで、ある程度大きな要求を含めた仕様書を作り、その各項目に、(A)欠かすことのできないもの、(B)ほとんど欠かすことのできないもの、(C)欠くこともある程度やむを得ないもの、および(D)必要順位の低いもの、の 4 順位をつけて業者よりシステムを提案させることにした。最終的には 3 社が具体的システムについての仕様と見積を提出した。

購入を決定したシステムは東芝製で、USC-3 system と呼ばれるものである。USC-3 system は ICD-507 (industrial control and data processing system: 工業用情報処理システム) を中心に、USC-interface (universal statistical computer-interface) を付加した複合システムである³⁵⁾。これは、他社提案のシステムに比べて、(1) 磁気コア記憶装置にハードウェアの add-one 機能を内蔵

しており、実時間処理的なデータ取得時間が $1.8 \mu\text{sec}$ でもっとも速い (最重点機能)、(2) 補助記憶装置、入出力装置を含めて周辺装置がもっとも充実している、(3) word length が (20 bits + parity bit + protect bit) で他社の (16 bits + parity bit) より長い、(4) このシステムより小規模ではあるが、核物理実験用の類似のシステムがすでに九州大学および東京工業大学で稼働中であり、核物理実験用の interface の経験に一日の長があると思われる、などの点で優れていると判断された。以下に、その構成、個々の機器の仕様、ソフトウェア、今日までの使用状況などについて簡単に説明する。

17.2 システムの概要

17.2.1 ハードウェア

採用されたデータ同時処理装置のシステム構成図を Fig. 17.1 に示した。この図において、No. 10 の原研製 TOF-ADC (time-of-flight analog-to-digital converter)、および No. 22 の通信回線部分は購入後に追加されたものである。また No. 6 の USC-interface も本節の終りに述べるように、48 年と 49 年の 2 度の改造により仕様を増強されている。本装置の概観は Photo 17.1 に、その各部分の構成は Fig. 17.2 に示す通りである。以下に Fig. 17.1 のブロック図に示した番号順に、各機器の機能についての簡単な紹介をする。

1) 演算制御部 (CPU) (Toshiba 製)

この演算制御部は中央記憶部 (CMU) の優先度のもっとも低い割込レベルに結合され、direct access によりコア記憶部を使うようになっている。主な仕様を TABLE 17.1 に示す。

2) 磁気コア記憶部 (CMU) (Toshiba 製)

この記憶部は、コアメモリに direct access control 機能を付属させ、USC system の中核としての働きをしている。主な仕様を TABLE 17.2 に示す。

3) ラインプリンタ (ハードは Oki 電気工業 KK 製)

型名	MG-624
印字速度	300 lines/min
印字桁数	132 words

4) 磁気ドラム記憶装置 (Fuji 通信機製)

補助記憶部として、コアメモリとの間で、データを語単位で転送する。主な仕様を TABLE 17.3 に示す。

5) 磁気テープ装置 (TEAC 製)

同型式のものが 2 台あり、仕様を TABLE 17.4 に示す。

6) USC-interface (Toshiba 製)

これは ADC と磁気コア記憶部と演算制御部の間をと

りもち、各測定モードに応じて、AD 変換されたデータの処理、転送、制御を行なう部分である。本システムの機能をもっとも具体的に示す重要な部分であるので、一通りの機器の紹介を終えた後で、再びやや詳しい説明を行なうことにする。

- 7) Twin PHA-ADC (Toshiba 製)
- 8) PHA-ADC (Nuclear Data 社製)
- 9) TOF-ADC (I) (Toshiba 製)
- 10) TOF-ADC (II) (JAERI 製)³⁶⁾
- 7), 8), 9), 10) の仕様を TABLE 17.5 に示す。
- 11) ブラウン管表示ユニット、アナログ出力コントロール部 (CRT: Hewlett Packard 製)
表示様式を TABLE 17.6 に示す。
- 12) 入出力タイプライター (IBM 製)
型式 IBM MODEL B
印字速度 600 characters/min (maximum)
- 13) 紙テープ・パンチャー (Tally 製)
- 14) 光電式紙テープ読取装置 (Toshiba 製)
- 13), 14) の仕様を TABLE 17.7 に示す。
- 15) カード・リーダー (NCR 製)
型名 EMD-4
読取速度 300 cards/min
- 16) Off-line カード・パンチャー (IBM 製)
型名 IBM-29 MODEL A22
- 17) Incremental plotter (Iwasaki 通信機製)
仕様を TABLE 17.8 に示す。
- 18) Digital I/O unit (Toshiba 製)

周辺機器からの digital data の読取り、もしくは、周辺機器へ digital data を出す場合の interface である。

19) の code I/O unit あるいは 20) の relay unit で作られた入出力信号で周辺機器と結びつけられている。

これらは使用法で3通りに分類されるが、以下にそれぞれの用途を簡単に述べる。

(i) Digital 入力 80個

これはたとえば測定プログラムのために manual 操作でハード的に設定された諸条件、すなわち使用する ADC の区別、使用モード、コア記憶部のふり分け、十進レジスターで設定されたプログラムの option を表わす数値の読み取りなどに用いられる。

(ii) 高速 digital 出力 32個

測定条件、あるいは特定の ADC のスタート、ストップの指令などを計算機側より高速に出力信号として送る。

(iii) 低速 digital 出力 12個

表示の点灯、ランプの点灯、monitor、ブザーの on-off を計算機側からの指示により行なう。これらの入出力信号を TABLE 17.9 に示す。

19), 20) 上述。

21) Interruption panel (Toshiba 製)

On-line 測定にとっては重要な部分であって、緊急性

を持つ入力を連続的に監視し、必要に応じて実行中のプログラムを中断し、優先度の高いプログラムを働かせたりするのに用いられる。優先度の高い順につぎの4レベルに分類される。

割込入力 channel 数

第1レベル	1	Real time interruption
第2レベル	1	Input typewriter interruption
第3レベル	1	Communication lines interruption, etc.

第4レベル 32

第4レベルの割込入力は、たとえば event recording 測定で buffer が満たされたときに入力され磁気テープ書き込みプログラムを働かすためのもの、各稼働 ADC からの1秒ごとの live time 割込などがつながっている。入力は接点形のときは閉で、電圧形のときには 0→5V に変ったときに瞬間割込 (10~200 μ sec) する。

22) 通信回線 (communication lines) 後述 (17.4)。

データの取得に関しては、現状では Fig. 17.1 に示したように、3台の PHA-ADC と2台の TOF-ADC が USC-interface につながっている。USC-interface の機能としては、最大4台の PHA-ADC と4台の TOF-ADC ままで接続可能で、single parameter の波高分析測定に対しては、この範囲内で任意個数の ADC で同時に測定することが可能である。そのさいに、データを入れる磁気コア記憶部の先頭番地とサイズのふりわけを、この interface のスイッチで選択し得ようになっている。これらの選択はプログラムによっても行なえる。

Event recording 測定 (磁気テープを用いた事象記録測定) は、2つ以上の ADC 間の同時計数測定に用いられるもので、測定データを一時記憶する 1024 語の buffer area と若干の program area を必要とするだけで、4K channel $\times$ 4K channel $\times$... の 2-parameter, 3-parameter 同時計数データをとり得ようになっている。購入当初においては、東芝 twin-ADC を用いた PHA-ADC 間の 2-parameter 測定および東芝 TOF-ADC と twin-ADC の1つを用いた TOF-PHA の 2-parameter 測定モードのみが使用可能であった。ただし TOF-ADC に関しては、16K channel のデータをとり得る。

その後の改造で、PHA-ADC については現存の3コを用いた 3-parameter 測定、TOF-PHA については twin ADC の2つを使った 3-parameter 測定が可能になった。さらにそれまで event recording 測定と single parameter 測定が共存できない構造であったのを改めて、event recording 測定1つと他の複数個の single parameter 波高分析測定が、独立にスタート、ストップできるようにした。

いま1つの測定様式として TOF-ADC 1台の 64K channel の時間分析測定を行うモードがある。もちろん 64K channel のデータをためるコア容量はないので、この bit までの時間分析結果を1語ずつ buffer area に書

込んで行き, 512 語ごとに磁気テープに記録して行くという event recording mode である。

17.2.2 ソフトウェア

USC-3 システムの導入にさいして, ソフトウェアとしては FORTRAN システム, 計測用 on-line プログラムおよび AID プログラムの提供を受けた。以下それらを簡単に紹介する。

(1) ICD-507 FORTRAN システム

すでに述べたように, USC-3 システムは東工大および九大で使用されており, また ICD-507 を中心としたシステムは工場などの制御関係では豊富な経験を持っている。したがって, assembler, loader などのソフトウェアについては十分な経験と自信を持っているはずである。しかし FORTRAN システムとしては, 当研究室の強い希望もあって本システムで初めて使用されたものであったので, 初期にはいろいろな故障も経験した。FORTRAN の言語水準も高くなく, 大体 JIS-3000 程度のものである。

この FORTRAN システムは, compiler, assembler, loader, I/O routine など合計 ~15 K 語のプログラムであるが, この計算機の最初の 8 K 語のコア領域しか使えないので, 全部をコアに置くことはできない。1 K 語の FORTRAN monitor プログラムのみがコア記憶部に常駐し, 他はドラムに格納されていて, つぎに述べる処理の各 phase に応じて FORTRAN monitor プログラムが必要なプログラムをドラムから呼び出す。まず, カードベースのオリジナル・プログラムは compiler モードのプログラムによって assembler 語に翻訳され, 紙テープに出力される。つぎに, これは assembler モードに通すことによって機械語 (relocatable binary) に翻訳された紙テープになる。さらにこれを loader モードで所定のコア領域に入れたところで始めてプログラムが実行可能になり, 結果がラインプリンタに出力されるという 3 段階の手続きを必要とする。その機能, 操作の一般的な流れを Fig. 17.3 に示す。

また, 言語水準の低いことから予想されるように, 使用可能な FORTRAN 文および statement も Fig. 17.4 に示すようなものに限られる。この図で囲み付きで示したものが使用可能なものである。その他にも組込関数, 外部関数がこのシステムの中には組込まれておらず, 紙テープに subroutine として納められていて, これらをつなぐ操作をしなければいけないといった煩雑さもある。文番号その他には TABLE 17.10 に与えられるような制約がある。実数は 2 語を用いているが, 実数演算はハード機構がなく, マクロ命令という subroutine システムを使うので演算速度が遅く, 加算 ~1 msec, 減算 ~1.5 msec, 乗算 ~1.2 msec, 除算 ~1.8 msec の時間がかかる。

以上のような制約はあるが, FORTRAN 文中に as-

sembler 語を混在させることができ, I/O 機器を働かせるのに FORTRAN による計算や FORTRAN 形式の出力を利用できるという大変に便利な点もある。プログラムの組合せで 16 K 語のコア領域のすべてを活すこともできるし, また, 実数演算の速度が遅いとはいえ, 40 bits (2 語) を用いているので適当な精度もあり (10 進 9 桁), 相当な計算も可能である。プログラムを作るまでに手数がかかるとはいっても完成してしまえば同じであり, FORTRAN システムの導入によって大変に計算機の利用価値が増したといえる。

以上, FORTRAN を中心として述べたきたが, 測定データの収集とか装置の制御にはもっぱら assembler 語に頼るようなプログラムが多い。Assembler 語で書かれたプログラムも, この FORTRAN システムでカードベースで入力でき, 既述のプログラム作製操作でまず assembler モードから出発すればよい。Assembler 語は TIAP と呼ばれるもので 15 種の基本命令と約 40 種の補助命令からなる。基本命令の種類と実行時間を TABLE 17.11 に示すが, 命令の区別に 4 bits, さらに間接アドレスに 1 bit, index 修飾に 2 bits を用いて, 残りの 13 bits を番地指定に使っている (最大 8 K 番地)。

補助命令は番地に直接関与しない命令で, 周辺機器の入出力を操作するものと CPU の register 内容を操作するものとがある。実行時間は周辺機器と関連したものについてはその各々によって異なるが, register 内容を操作する命令はほとんどが 7.2 μ sec である。

(2) 計測用 on-line プログラム

On-line プログラムとしては, 実験の要求とも関連して, single parameter 測定および event recording 測定に若干のデータ処理プログラムを含んだものが, システム購入時に東芝より提供された。プログラムのサイズは約 5 K である。購入時にこのプログラムに対しては何等の注文もつけていなかったもので, 予想されたことではあるが, この標準仕様のままでは用途がかなり限定されてしまうことが判った。そこで, それぞれの実験にもっとも適したプログラムは, 各グループが長時間かけて開発することが必要であった。それらについては後述することにして, まず, 東芝の on-line program の概要を説明する。

1) 波高分析自動測定

最大 4 台までの PHA-ADC と 4 台までの TOF-ADC を用いて, single parameter 測定を決った時間置きに任意回測定する。各 run の結果は, 各測定の終了後にただちにドラムに格納し, つぎの測定を開始した後に, 測定中にドラムからコアに順次移してラインプリンタで出力する。各 ADC の live time も割込 signal を用いて数えられており, 同時に出力される。

2) 多次元パラメータ・データ収集プログラム

Event recording 測定に用いられるもので, USC-interface 上に設定された ADC の選択と 1 K 語の buffer

area の先頭番地をもとに働く。512 語データが書込まれると発生する割込入力を読んで、残りの 512 語の area でデータをとり始めると共に前の 512 語 (1 ブロック) のデータを磁気テープに記録するように作られている。

3) データ処理プログラム

これにはコア記憶部のデータの加減算を行なうもの、1 次元、2 次元の平滑化、データの積分、圧縮、ラインプリンタへの打出し、リニアプロットなどが含まれている。

(3) AID utility プログラム

これはプログラムのコアへの読み込み、紙テープの作製、ドラムとのプログラムのやりとりなど、もっとも頻繁に用いられるユーティリティ・プログラムである。内容は紙テープの読み込み (モード 1: load), 紙テープ出力 (p: punch), 紙テープのミスパンチ・チェック (c: compare), コア・ドラム間のプログラム転送 (x: drum transfer), タイプライタによるコアへの書き込み (w: write), コア内容の打出し (d: dump) プログラムの別のコア領域への転送 (z: relocate) がある。これらの操作はタイプライターを通じてなされる。

17.3 使用状況

17.3.1 ハードウェア

USC-3 システムが導入されて 2 年余りになるが、稼働状況は順調であり、実験データの収集およびそれらの処理に大いに利用されている。このシステムは、常時電源 on の稼働状態にあるので、利用者はただちに JOB に入ることができる。この状態を保持するためには、それ相応の点検・整備が必要であるが、とくに機械的可動部を持つ周辺 I/O 機器の保守点検作業は重要であり、導入直後の初期故障の大半は、これらの機器に集中していた。そのため、メーカーによる年 2 回の定期保守点検と、また、突発的故障にはオン・コール・サービスの契約を行なっている。

現在では、故障頻度はあまり多くなく、主として I/O 機器によるものが平均して、2~3 ヶ月に 1 件くらいの割合であり、安定稼働状態に入っている。

17.3.2 ソフトウェア

実際の実験上われわれが必要とするプログラムは、各グループによっても違うし、また、実験の種類によっても異なる。以下、この 2 年余りに開発された on-line, off-line プログラムの主なものを紹介する。

(1) On-line プログラム

1) 中性子断面積測定用プログラム³⁷⁾

中性子断面積の測定にさいしては、中性子ビーム中にサンプルを入れたときの透過中性子スペクトルと、サンプル off のときの background スペクトルを交互に測る。このとき、時間的な drift の影響をできる限り抑え

るために、sample changer をかなり頻繁に (15 分間隔くらい) 動かす必要がある。Sample changer はビーム中にある intensity monitor の count が設定値に達したところで動くように作られており、計算機との間の指令の交換は、割込入力、低速 digital 出力を用いてなされている。

各サンプル別に集録されたデータは、その都度データ番号をつけて磁気テープに書込まれ、それと同時にサンプル別に前のものに加えてドラムに保存しておき、一連の測定が終了した後で磁気テープに書込まれる。

計算機への指令、各回のデータについて必要な記録などは入出力タイプライターで行なわれ、このプログラムは数日間の連続測定にも有効に働いている。

2) Event recording 測定および sorting プログラム

現在までの段階では γ - γ , γ - β 同時計数実験が行なわれており、2~3 台の PHA-ADC を用いた event recording 測定と sorting のプログラムが実行に移されている。

測定プログラムは東芝 on-line プログラムを基にしたが、そこでは磁気テープへの書き込みが進行するだけで、測定系が正常に作働しているか否かを見るためには、その磁気テープを sorting して取得スペクトルを調べるより仕方がなかった。そこで、磁気テープに書込むと同時に、各 ADC の同時計数スペクトルをそれぞれ 2 K ずつのコア領域に編集し集積することによって、測定しながら CRT-display で monitor し得るように改良した。

Sorting プログラムは、まずタイプライターで選択した各 gate の ADC 種類、lower channel および upper channel を、最大 100 gates までコア領域へ書込んでおく。磁気テープの 1 台で original data を sorting し、結果は他の磁気テープにデータ番号をつけて書込む。このプログラムでは、8 K のコア領域を使って結果をふり分け集積して行くように作ってあるので、4 K channel のスペクトルとして編集するときには 1 回の磁気テープ掃引で 2 gates ずつ、2 K に圧縮してスペクトルを編集するときは、4 gates ずつ、その他に 1 K $\times$ 8 gates, 512 channel $\times$ 16 gates (β スペクトルに相当) の 4 通りを option で選択できる。1 回の掃引が終れば自動的にテープを巻戻して次の gate の sorting に移る。実行時間は option によって異なるが、1 晩で 30~60 gates くらい、1 実験当たり 100 gates くらいとして磁気テープ 1 巻の sorting に 2~4 晩かかることになる。

3) 短寿命核種の半減期測定用プログラム

数秒から 1 分程度の短寿命核種の崩壊では、取得スペクトルを磁気テープに書込むのに要する時間さえも問題になる。このプログラムでは、8 K のコア領域をいくつかに等分割して、指定された時間ごと (秒単位) にその崩壊スペクトルを順次コア領域を移して取得できるようにしてある。

4) Digital stabilizer 用プログラム

スペクトル測定時の時間的な drift を抑えるためのプログラムで、外部 signal の指示で働くものと全くソフト的に処理するものがある。前者については必要な外部ハード機構が未だないので説明を省くとして、後者の紹介をする。まず reference peak を低い channel と高い channel 部分で1コずつ選んで、一定時間置きでデータでその位置を 1/8 channel の精度で計算する。これが一定位置になるように全スペクトルを計算し直して、ドラムに格納されたそれ以前のデータに加算して行く。この計算は、つぎの run の測定続行中にドラムを媒介にして測定領域以外のコア領域を用いてなされるので、時間的なロスはないと考えてよい。以上のことから各データの測定間隔は、計算時間より長いことが必要である。

(2) Off-line プログラム

1) 測定データ処理プログラム

スペクトルデータを集録したり、プロット処理を中心とする用途の広いプログラムで、とくにプログラム自身を磁気テープに記録させる方式をとって取扱いの便利さと高速化をはかったこと、およびプロットを、通常の FORTRAN システムにおける subroutine に対応するものを作って扱い易い形にしたところに大きな特徴がある³⁸⁾³⁹⁾。プロットはリニア、対数プロットを option で選択でき、また1つの図にいくつかのスペクトルをずらして書かせることもできる。また USC-3 基本 subroutine として、CALL PLOT (X, Y, IPEN), CALL SYMBOL (X, Y, S, JJ, A, N), CALL NUMBER (X, Y, S, FN, A, N) に相当するものがある。これらと組合わせて、磁気テープデータの読み出し、書込み、smoothing、その他にラインプリンタへの出力、ドラムと磁気テープ間のデータ転送、コア内容のラインプリンタへの打出しなどのプログラムが整備されている。

2) 対数プロットプログラム

前記のプロットでは対数プロットを実数計算を用いてやっているが、ここでは2つの表の内挿で計算する方式をとっているため、時間的には大分早いプロットができる。磁気テープから必要なデータを次々に読出して来てはプロットできるようになっており、スペクトルの複雑さにもよるが、4K channel のスペクトル 40 枚程度を数時間くらいでプロットする。

3) その他

以上の外にも、たとえば統計精度を上げるために、磁気テープの指定されたデータの加算を次々に行なうと、結果は他の磁気テープに書込んで行くもの、他所でとった紙テープ出力データの読みこみなどさまざまなプログラムが必要に応じて作られている。

その他に TMC 4K channel 波高分析器でとったデー

タを USC-3 に移して⁴⁰⁾、その overflow を修正するプログラム、また、ゲルマニウム検出器でとったγ線スペクトルの automatic な background 差引き、peak 位置、計数の算出のプログラムもある。

17.4 データ通信および今後の問題

USC-3 システムで収集されたデータの解析処理は、一部はこの計算機によってなされるが、数値解析などを含むデータ処理には大型計算機の高速演算能力、大容量かつ高水準の FORTRAN を利用したい場合が多い。

大型計算機側の terminal computer との接続システムの整備が進んでいたこともあって、USC-3 計算機の導入当初から計算センター側の協力があり、48年度から on-line 端末プログラムの開発が始まり、同年末には完成した⁴¹⁾。USC-3 と MODEM (FACOM 製) の間の interface はエレクトロニクス課によって製作された⁴²⁾。詳しい報告は文献にあるが、通信回線の方式および性能を TABLE 17.12 に示す。

この通信回線では remote batch 処理ができるから、USC-3 システムでプログラムおよびデータカードを読ませて、大型計算機で演算処理した結果を USC-3 のラインプリンタで出力することができる。しかし、それ以上の利点は、磁気テープに収納されている実験データとか USC-3 システムでコア内に収集を終ったデータを処理できるような FORTRAN subroutine が作られていて、簡単にこれらを利用できるところにある。ただし現状では通信速度の遅さと、USC-3 のカードリーダーの低性能がネックになっている。というのは、現在の USC-3 の利用率が高く、利用者のマシンタイムの確保が相当に窮屈である。Linac が稼働状態にあるときには、実験データ収集のために大半の時間がとられてしまう。また、データの1次処理にとられる時間も馬鹿にならない。したがって、両者を同一時間帯で遂行するためには、もう少し規模の大きいシステムか、あるいは同程度の独立した端末システムの設置が必要である。

これ以外にも、USC-3 システムの稼働効率をさらに改善し、機能を拡張するためのものとして、a) off-line FORTRAN システムの改良、b) 大容量補助記憶装置(磁気ディスク)の追加、c) プロット処理の off-line 化、d) I/O コンソール・タイプライタとカードリーダーの高速化、e) CAMAC interface の接続、f) on-line プログラムの開発などの諸点が検討された。このうち e) については、クレートコントローラをエレクトロニクス課で製作中であり、f) についても2つ以上の実験を併行して処理できる on-line プログラムを開発中である。

TABLE 17.1 Specifications of the central processing unit (CPU)

1. Clock frequency;	5 MHz
2. Type and elements of the CPU circuits;	static logic, TTL-IC
3. Cycle time;	1.2 μ sec (without cycle stealing of add-one) 3.0 μ sec (with add-one function included)
4. Memory words	
Word length;	20 bits+parity bit+protect bit
Memory page;	8192 words/page
Data word format;	sign bit+19-bit binary, two's complement arithmetic
5. Instruction words	
Form of instruction;	one word-to-one instruction, 1-1/2 address
No. of instructions;	15 basic instructions (memory reference) and 40 subsidiary instructions (register reference and I/O control)
Basic instruction words;	Operation code (4 bits)+indirect addressing (1 bit)+indexing (2 bits) +address field (13 bits) (Details of the basic instructions appear in TABLE 17.11)
6. Programmed interruption;	4-priority levels

TABLE 17.2 Specifications of the central memory unit (CMU)

1. Model;	DL 507-630
2. Memory capacity;	Two units of 8192-word memory
3. Word length;	(20 bits+parity bit+protect bit)/word
4. Memory cycle time;	1.2 μ sec (without cycle stealing of add-one) 3.0 μ sec (with add-one function included)
5. Access priority;	5-priority levels in direct accessing

TABLE 17.3 Specifications of the magnetic drum memory unit

1. Model;	DL 507-330
2. Memory capacity;	One unit of 65k words/drum
3. No. of data tracks;	256 tracks/drum
4. No. of words per track;	256 words/track
5. Clock frequency;	154 kHz

TABLE 17.4 Specifications of the magnetic tape unit

1. Model;	TEAC MT-200
2. No. of units installed;	two units
3. Tape to be handled;	12.7 mm(1/2 inch) width (standard)
4. Tape reel size;	267 mm ϕ (10-1/2 in ϕ) maximum
5. Tape driving speed;	0.95 m/sec (37.5 IPS)
6. Recording tracks;	9 tracks
7. Recording density;	800 BPI (32 bits/mm) in NRZI form, IBM, FACOM compatible
8. Data-transferring speed;	30 kHz
9. Form of data transfer;	in block unit of 512 words/block, 1536 bytes/block

TABLE 17.5 Specifications of the various ADC's

	Twin PHA-ADC	PHA-ADC	TOF-ADC (I)	TOF-ADC (II)
Model	RS 301-360	ND2200		
Channel size	4 K $\times$ 2	8 K	16 K	64 K
Clock freq.	50 MHz	100 MHz		
Resolution			0.1 μ s/channel variable chan. width 0.1~12.8 μ s/chan.	25ns/channel variable chan. width 25 ns~6.4 μ s/chan.
No. of inputs			4	8

TABLE 17.6 Specifications of the CRT display unit

1. Display area ;	80 mm (in height) × 100 mm (in width)
2. Display mode ;	4 modes, LIVE DISPLAY, STATIC DISPLAY, PROGRAM DISPLAY (512 × 512 matrix, GRAPHIC) and 2-PARAMETER DISPLAY.

TABLE 17.7 Specifications of the paper-tape perforator and reader

	Perforator	Reader
Model	TALLY 420 PR	TRM 0013 A
Code	8-bit ICD-507 system code	8-bit standard code
Speed	600 lines/min (maximum)	500 lines/sec (maximum)

TABLE 17.8 Specifications of the incremental plotter

1. Model	DPL-602
2. Plotting speed	
X- and Y-axis ;	400 steps/sec maximum
Z-axis (pen-up and-down) ;	10 times/sec maximum
3. Plotting width ;	0.1 mm/step along X-and Y-axis
4. Sheet size ;	Y-axis 270 mm X-axis corresponds to the total length of sheet, 35 m
5. Absolute plotting accuracy ;	less than $\pm 0.3\%$ for translation of 25 cm in both directions
6. Mechanical return error ;	less than 0.1 mm

TABLE 17.9 Specifications of the digital input/output unit

	Digital inputs		Digital outputs	
			Low speed	High speed
I/O form	contact point	voltage-coded	contact point	voltage-coded
code	BCD	binary	BCD	binary
No. of bits	<8 positions/chan.	8 bits/chan.	<8 positions/chan.	8 bits/chan.
Logic {	contact open	0~0.4 V	contact open	0~0.4 V
	" close	3~5 V	" close	3~5 V

TABLE 17.10 Allowable size of the various tables in the USC-3 FORTRAN system

Name of table	Table size
Number of DO nest	10
Number of argument in SUBROUTINE or FUNCTION	10
Number of branch in computed GO TO subprogram	10
Table size of statement label	55
Table size of transfer control	65
Table size of arithmetic expression	30
Symbol table	50
Literal table	20
Dimension table (1-dimensional)	30
" (2-dimensional)	15

TABLE 17.11 Instructions in ICD-507

Basic (Memory Reference) Instructions

Mnemonic	Code				Function	Time in μsec
	20	19	18	17		
NOP					No operation	1.6
UJP		1		1	Unconditional jump	5.8
CMP	1			1	Compare and skip, { Not skip	7.2
					skip	11.4
JPL		1			Jump and link	11.4
ICR	1				Increment (Add-one)	3.0
ADD	1	1	1		Addition	7.2
SUB	1	1	1	1	Subtraction	7.2
MUL	1	1			Multiplication	83.0
DIV	1	1		1	Division	87.0
AND			1	1	Logical AND	7.2
EOR			1	1	Exclusive OR logic	7.2
LAC	1			1	Load Accumulator	7.2
STA				1	Store Accumulator	7.2
LUA	1			1	Load Upper-Accumulator	7.2
TUC				1	Store and Clear UA	7.2

Address modification in every basic instruction requires an additional time of 5.4 μsec .

TABLE 17.12 Specifications of the communication lines

1. Communi. speed ;	1200 baud (bits/s)
2. " form ;	Half duplex
3. Synchronization ;	Synchronous start-stop system
4. Connection control ;	Polling/selecting
5. Transmission code ;	7-bit+parity check bit
6. Code system ;	ISO 7-bit code
7. Error control ;	Vertical/horizontal parity check

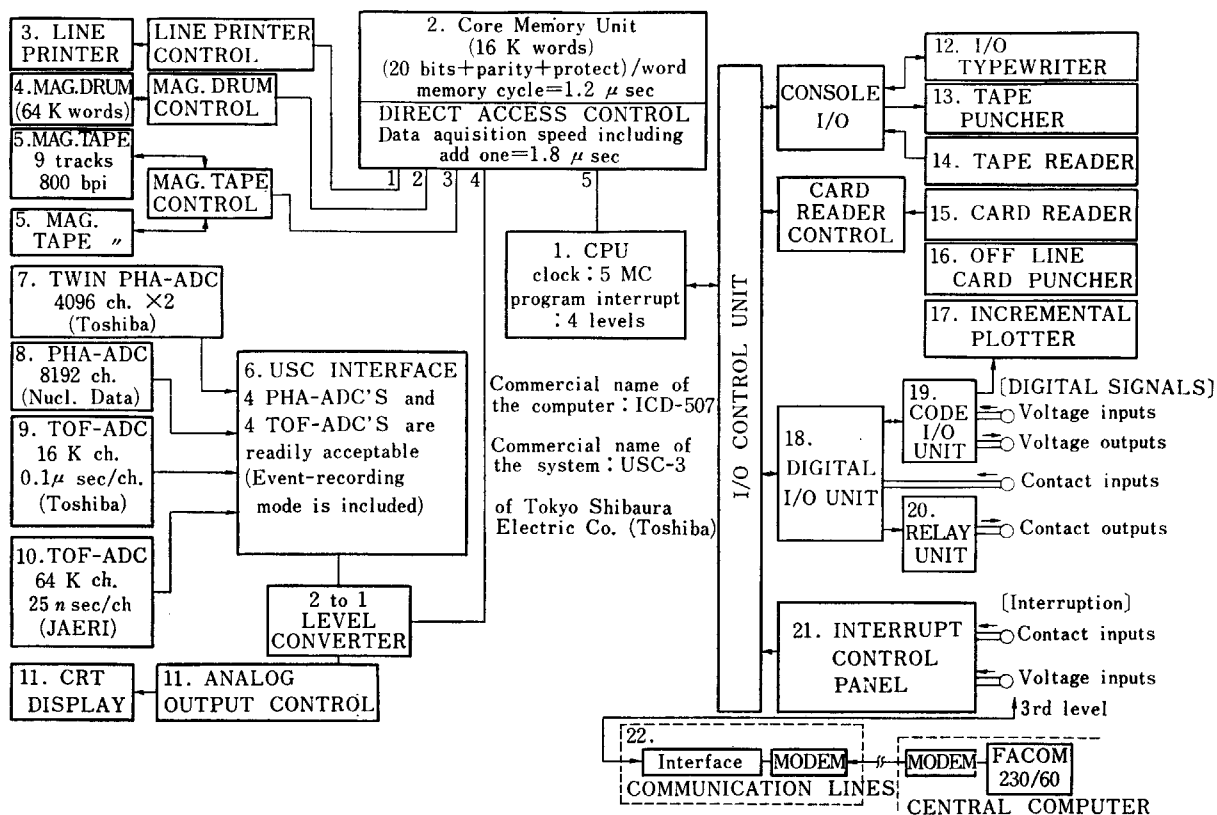


Fig. 17.1 USC-3 experimental data acquisition and reduction system.

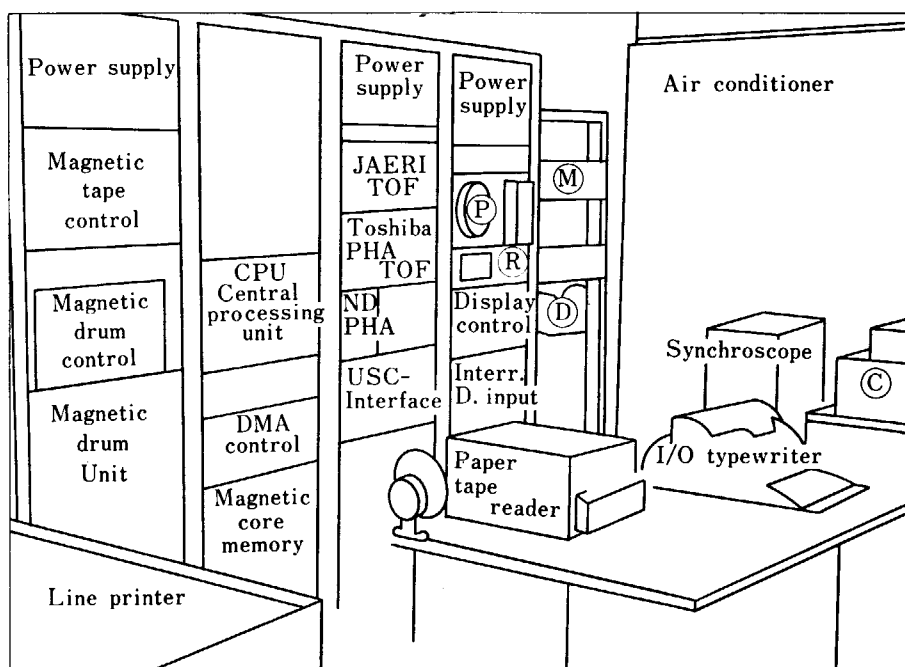


Fig. 17.2 Explanatory figure of the USC-3 experimental data acquisition and reduction system. In this figure, two magnetic tape devices are not seen. The alphabetic characters in circles refer to respectively as: (P) Paper tape puncher, (R) CRT display, (M) USC-3 MODEM interface, (D) Digital plotter and (C) Card reader.

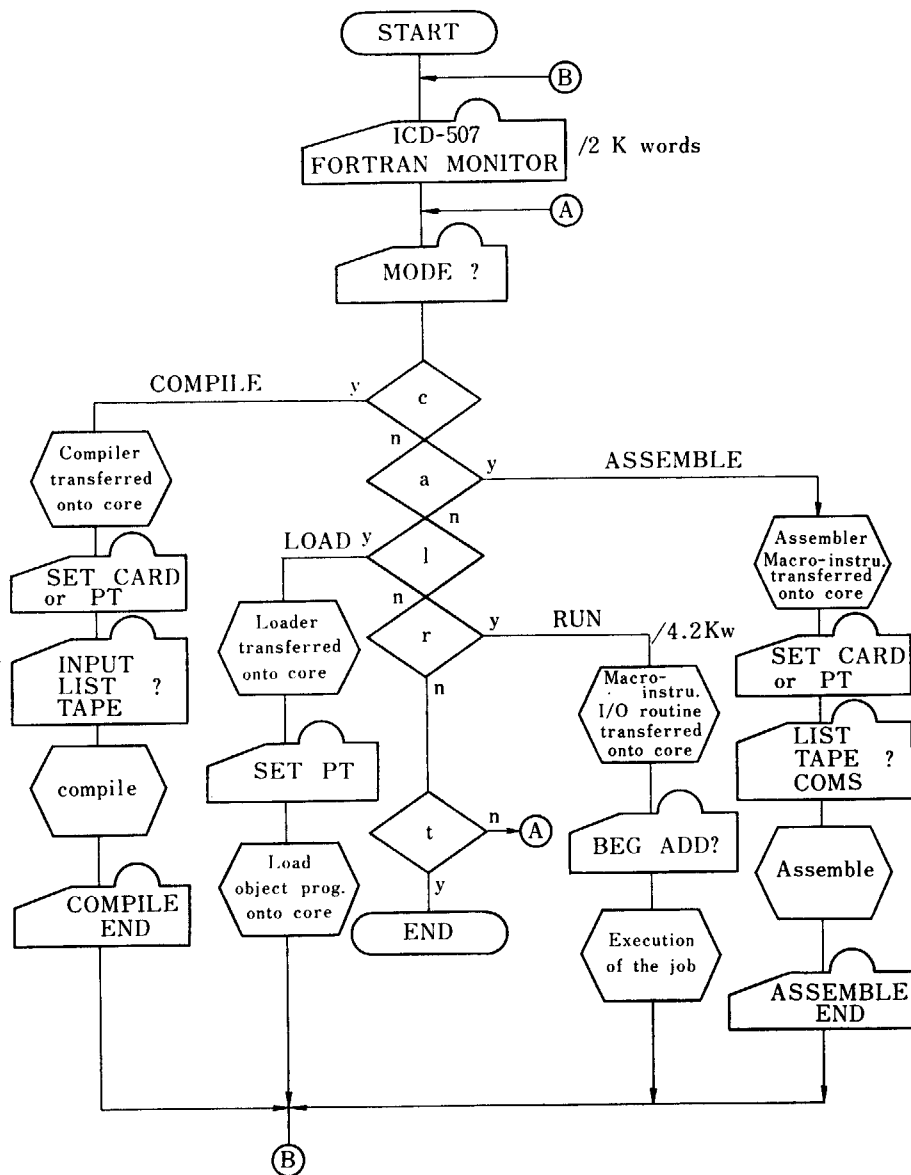


Fig. 17.3 Operational flow of the USC-3 FORTRAN system. Four modes separated from each other: compile, assemble, load and execute.

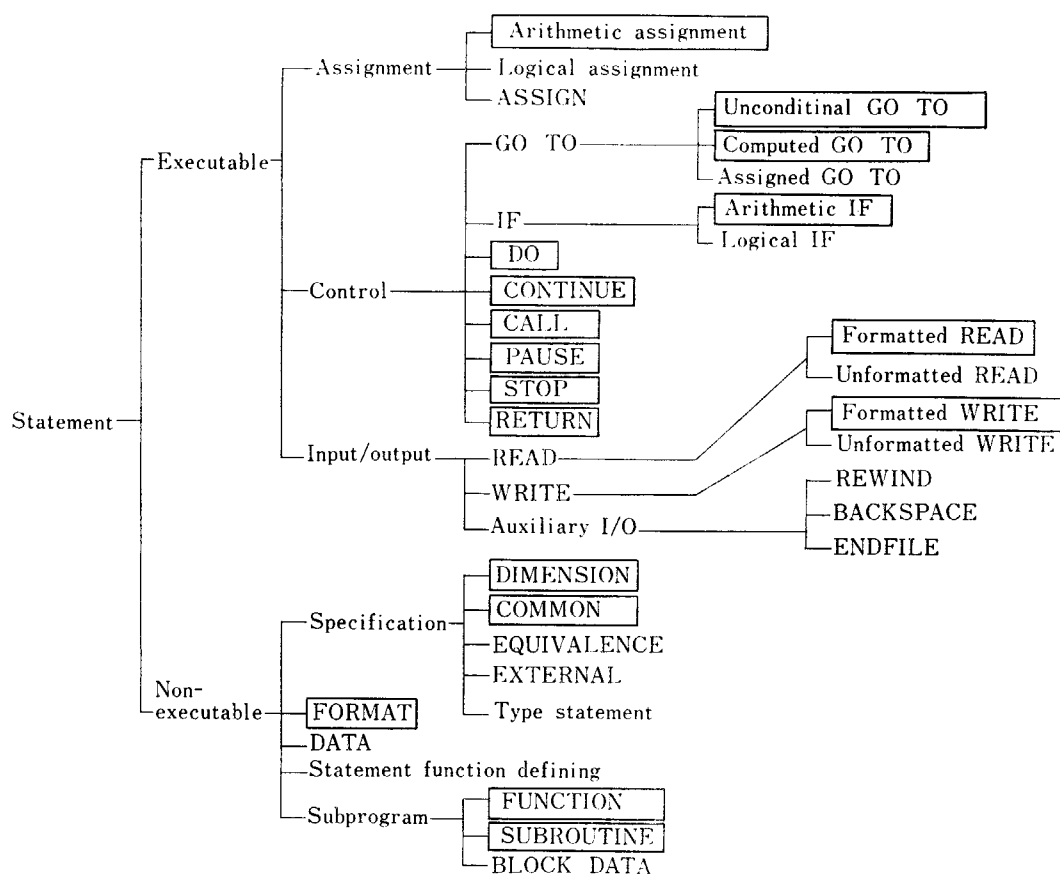


Fig. 17.4 Allowable FORTRAN statements labeled with rectangular enclosures in the USC-3 FORTRAN system. All cases are the same as the FORTRAN statements themselves.

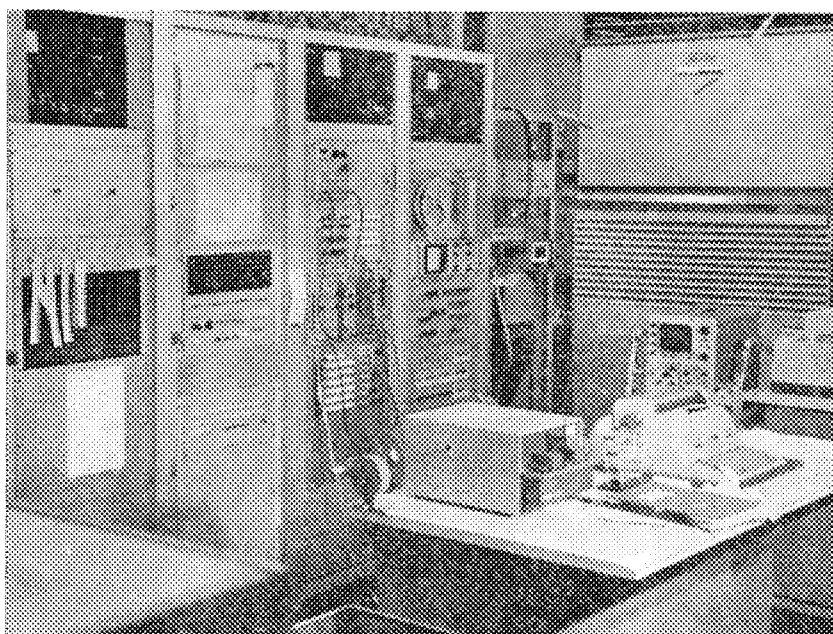


Photo 17.1 USC-3 experimental data acquisition and reduction system.

18. Linac の運転と管理

Linac は放射線に対する安全と、高電圧に対する安全が確認されてから、運転が開始される。Linac の起動、運転、停止は以下にのべる操作手順に従って行なわれる。この章には運転のほか保守、点検の注意事項も述べる。

18.1 放射線に対する安全確認

A) 運転前の確認事項

- 1) ターゲット室、加速管室、モジュレータ室、およびコンクリートブロック上に人がいないこと。パーソナルキーが全部もどっていること。以上を巡視の上で確認する。
- 2) 加速管室、ターゲット室、モジュレータ室、catwalk 階段、linac 建屋屋上階段、および排風機室等のドアのインターロックが ON。
- 3) 放射線モニター電源 ON。
- 4) インターホンによる運転開始の放送。
- 5) 非常スイッチのインターロックが ON。

B) 運転中の確認事項

- 1) 放射性モニターの動作に異常がないこと。
- 2) 運転標示灯及び点滅式運転警告灯の動作に異常がないこと。

18.2 高電圧に対する安全確認

A) 運転前の確認事項

- 1) ターゲット室の IVR 及び自立型 MgS 盤付近に人がいないこと。
- 2) モジュレータ回路の筐体のドア・インターロック ON。
- 3) 電子銃の筐体のドアのインターロック ON。

B) 運転中の確認事項

IVR 及び MgS 盤付近及びコントロール室の分電盤やコントロール・パネル付近に運転員以外の者が立入らないこと。

C) 保守、点検時の確認事項

- 1) コントロール・デスクのスイッチを切り「点検中」または「修理中」の標識を置くこと。
- 2) IVR の 2 次電圧がゼロに下がり、モジュレータの直流電圧がゼロに下がっていること。
- 3) モジュレータ室に入り、直流電源のドア、または PFN のドアを開けたら、必ずアース棒で高圧充電部を短絡してから作業を開始し、終了時までアース棒をそのままにしておくこと。

18.3 運転操作手順

A) 運転準備操作

- 1) 放射線のモニター電源が ON であることを確認。
- 2) 750 kVA 受電設備の高圧スイッチ及び低圧側 NFB が ON。(通常は常時 ON である)
- 3) 電気室の linac 制御用ナイフ・スイッチ ON。(スイッチ番号 No. 1, 2, 32, 33, 36, 53)
- 4) 真空系が正常であること。 $(1 \times 10^{-6}$ torr 以下) 初期運転の場合ロータリ・ポンプ、ソーブション・ポンプで荒引の上、イオン・ポンプ電源 ON。
- 5) IVR の NFB 盤の NFB を ON。
- 6) コントロール室分電盤の NFB を ON。(イオン・ポンプ電源、non control power の NFB は通常 ON)
- 7) 冷却水系の各種バルブの調整操作(初期運転の場合のみで通常はバルブは OPEN)
- 8) 導波管の SF₆ のガス圧を確認。不足の場合はポンプのバルブを開けて適正圧とする(3 kg/cm²)
- 9) 電気室のコンプレッサー、モジュレータ室の排風機、およびターゲット室の排風機を ON。

B) 運転操作(コントロール・デスク上の操作)

- 10) デスクの左袖のキー・スイッチを ON。
- 11) 照光式押ボタン・スイッチ [DESK] を ON。IVR 運転方式切換用の押ボタン・スイッチが [MANUAL] であることを確認する。もし [AUTO] であれば押して [MANUAL] に切換える。これによってデスクの表示ランプ及びインターロック回路の電源が入る。
- 12) 切換スイッチ [ACC. TUBE MODE SELECTION] でマイクロ波を入れる加速管をきめる。第 1, 第 2 加速管の 2 本で運転する場合と、5 本の全ての加速管で運転する場合の 2 方式を選ぶことができる。なお、スイッチ [CONTROL POWER] が入ると、このスイッチの上の蓋が自動的にロックされ運転中は蓋があかないようになる。
- 13) ロータリー・スイッチ [TARGET MODE SELECTION] を切換える。運転開始時、または運転条件変更時等においてビーム・エネルギーをチェックする場合は [E] に切換える。実験開始時に、希望するターゲットに切換えることによって、電子ビームの経路に応じて磁石等の電源が自動的に選択される。
- 14) 照光式押ボタン・スイッチ [CONTROL POW-

- ER) を ON. これによって自動的に入る系統は、
- ①加速管冷却系及び温度制御系. ②ターゲット冷却系. ③クライストロン冷却系. ④低電力マイクロ波系. ⑤各種電磁石及びコイルの電源系統. ⑥電子銃, 主クライストロン, 主サイラトロン, サイラトロンのリザーバー, 主サイラトロントリガーパルサーのサイラトロン等のヒーター電源は, スイッチ [CONTROL POWER] の ON によって, 電圧がゼロより 100 V まで 3 分間で上昇するモータ駆動の摺動変圧器より供給される. なお, この変圧器の 1 次側は電気機械室の単相 10 kVA の磁気増幅型 AVR より供給される. ⑦スイッチ [CONTROL POWER] が ON と同時にデイレイ・タイマーが動作してトリガー・パルサー II の高圧電源は 6 分位して ON になる. なお, サイラトロンの補助電極, パルストランスのバイアス電源もこれより供給される. コントロール電源 ON 後, 30 分経過し, 全インターロック回路に異常がなければ [RADIATION KEY READY] のランプが点灯し運転準備が完了する.
 - 15) コンプレッサーと, モジュールタ室とターゲット室の排風機が ON であることを確認.
 - 16) ターゲット室, 同天井, catwalk, 加速管室, モジュールタ室に人がいないことを巡視により確認. 各測定室に人がいないことをインターホンで確認.
 - 17) 各インターロックが有効であることを表示ランプにより確認.
 - 18) クライストロンのヒーター電流, クライストロン集束コイル電流, パルストランス・バイアス電流等をコントロール・パネル上の電流計で確認.
 - 19) 低電力マイクロ波が発振し増幅していることを確認.
 - 20) 真空系が完全であることを再度確認.
 - 21) キー [RADIATION KEY] を ON. 1 分間運転合図を放送する. これは自動的にテープレコーダのエンドレステープによりインターホンに 1 分間の放送を流す. その 1 分間に非常スイッチが, OFF にならなければ MgS 盤が ON となる. ターゲット室, 加速管室, モジュールタ室に人がいる時は非常スイッチが切られ, インターロック系が動作し [RADIATION KEY] 回路が OFF となり linac は運転できない.
 - 22) 電子ビームのエネルギーをチェックするためにスイッチ [TARGET MODE SELECTION] を [E] に, スイッチ [TRIGGER REPETITION] を 50 pps に set する.
 - 23) [MODULATOR] 部のスナップ・スイッチ [UP-DOWN] を [UP] にすれば, IVR の上昇に伴い直流電源電圧が上昇する. スイッチ S_1 では第 1 直流電源を, S_2 では第 2 直流電源を, S_3 は第 3, 第 4, 第 5 直流電源を, S_0 は全ての直流電源の [UP] または [DOWN] の操作ができる.
- [注意] モジュールタの直流電源電圧を上昇させる場合は, 真空系の状態を監視しながらゆっくり上昇させること. なお, 真空系の状態が非常に良い場合 [MANUAL-AUTO] の切換により [AUTO], すなわち自動的に設定値まで上昇できる. また, [AUTO] の場合はその後常に設定値の電圧に保つように IVR は自動定電圧装置として動作する.
- 24) [CATHODE ACCELERATION] 部の押ボタンスイッチの [UP] を押して, 電子銃直流電源電圧を上昇させる.
 - 25) [Q & MAGNET] 部のロータリー・スイッチを [DC] に set し, ITV を見ながら, エネルギー・モニターの蛍光板上に電子ビームを捕えるよう押ボタン・スイッチ [DEC], [INC] のいずれかを押して分岐磁石の電流を調整する.
 - 26) [ATTENUATOR, PHASE SHIFTER] 部の照光式押ボタン・スイッチ [ATTENUATOR] または [PHASE SHIFTER] のいずれかを押して切換える. ロータリー・スイッチを順々に切換えながら, 押ボタン・スイッチ [DEC], または [INC] のいずれかを押して, 5 本のクライストロンのマイクロ波の強度と位相の調整を行ない, 最良の電子ビームを得る.
 - 27) 22)~26) の操作中や調整中, 及びその後の運転中の各種のパルス波形はコントロール・デスク左端の [WAVE FORM OBSERVATION] 部の同軸切換スイッチによって, デスク上部の 4 現象オシロスコープで観測される.
 - 28) 加速管やビーム伝送管の中を通る電子ビームの位置とビーム強度は [BEAM MONITOR] 部の切換スイッチにより, いずれか 2 ヶ所のビーム・モニターを使って同時に, デスク上部の 4 現象オシロスコープ上で観測される.
 - 29) 導波管内の SF_6 ガスの圧力, 加速管温度及び低電力マイクロ波出力はコントロール・デスク右端の計器によって観測できる. また, マイクロ波周波数の小範囲の調整は [FREQUENCY ADJUST] の押ボタン [LOW], [HIGH] のいずれかを押すことによって行なわれる.
 - 30) 以上の操作でエネルギー・チェックが終れば, 主モジュールタの直流電源をゼロに下げて, 切換スイッチ [TARGET MODE SELECTION] でターゲットを選んだ後に, 再び直流電源電圧を上げる. その後 [CATHODE ACCELERATION] の直流電源電圧を上げる.
- [注意] モジュールタの直流電源電圧を下げる時には, 同時に [CATHODE ACCELERATION] の直流電源電圧も下げること. [RADIATION KEY] を OFF にした場合は両方ともに同時に自動的に下

がる。

31) [TARGET MONITOR] 部ではターゲット電流をオシロスコープで観測する。

32) 31)のターゲット電流や ITV 受像機に写った蛍光板上の電子ビームのスポットを観測しながら必要ならばコントロール・パネルの steering コイル, Q 磁石を調整して電子ビームの形状, 位置を調節することができる。

以上によって定常運転状態となる。

C) 運転中の注意

33) コントロール・デスクには常時少なくとも 1 名の運転員がいなければならない。また、運転員以外の者にコントロール操作を行なわせてはならない。

34) 各インターロック表示灯, コントロール室運転表示灯, 自記温度記録計, 放射線モニターの作動状況に注意すること。オシロスコープの波形, 各種計器の指示, 異臭, 異常音の発生に注意すること。

35) モジュールタ室または各測定室内に作業員がいる場合には運転員は, インターホン等により, 常に作業員と密接に連絡をとりつつ, 運転すること。

36) 工務関係作業員, 除草作業員等の管理区域柵内への立入に注意すること。

18.4 運転停止

A) 緊急停止

感電事故, 火災事故または linac に異常を認め, 緊急停止を必要とする時は, コントロール・デスク上の大きな赤い押ボタン・スイッチ [EMERGENCY] を押す。その結果は, [CONTROL POWER] が切れて, イオン・ポンプ電源及び [DESK] を除くすべての電源が OFF となる。なお [DESK] ON の状態が保たれるため, 各種インターロック標示灯は異常個所を表示したまま保持される。

原因を解明し, 適切な処置をしてリセット・ボタン・スイッチを押せば [CONTROL POWER] が ON となり, 運転操作要領 13) と同じ状態となり, 約 30 分後に運転が再開できる。

B) 通常停止

運転停止に伴う通常の停止は運転操作, 運転準備操作の逆を行なう。

① [RADIATION KEY] OFF. ② [CONTROL POWER] OFF. ③ [DESK] OFF. ④ コントロール・デスクの左袖の [KEY] OFF. ⑤ コンプレッサー, モジュールタ室とターゲット室の排風機 OFF. ⑥導波管加圧の SF₆ ガスのポンプのバルブを閉める。⑦コントロール室分電盤の NFB を OFF. ただし, 真空系 NFB 及び non control power 用 NFB は ON のまま。⑧IVR の NFB を OFF.

C) 長期停止

真空系修理, その他の長期停止の場合は, 真空系用 NFB 及び non control power 用 NFB を切り, 電気室のナイフ・スイッチ及び 750 kVA 受電設備の NFB を OFF にする。

D) インターロックによる運転停止

インターロックの動作による自動運転停止は原則として, [RADIATION KEY] 回路を OFF とし, その状態を保持するものである。

インターロックの動作により運転が停止したときは, その原因を表示ランプによって確認し, 必要な措置を講じてのち, 運転を再開するものとする。運転再開にあたっては, リセット・ボタン・スイッチを押す。これによって 21) の状態にもどり, 再び 1 分間の自動放送の後 MgS 盤が ON になる。なお, 機器保護のため, インターロックには一部上記と異なった操作をするものがある。

18.5 タイム・チャート

前記の運転準備操作, 運転操作, 緊急停止, 通常停止の時間関係を Fig. 18.1 に示す。数字は 18.3 の操作項目番号である。

18.6 立入制限

A) 運転中の立入制限

Linac の運転中 (電子ビーム発生中) は次の場所への立入を禁止する。

①モジュールタ室。②加速管室。③ターゲット建屋のコンクリートブロック内のターゲット室。④コンクリートブロック天井。⑤cat-walk (10 t クレーン)。⑥45 m, 50 m, 55 m, 100 m, 190 m, 各中性子測定室及びサンプルチェンジャー室。⑦linac 周辺管理区域柵内。⑧linac 建屋屋上。

B) 運転中立入禁止の例外

機器調整のために linac の運転中にモジュールタ室に入室する必要があるときは, 管理者の許可を得て運転者に通報のうえ入室することができる。この場合運転者はモジュールタ室のドア・インターロックを解除する。

実験上の必要から linac の運転中に各中性子測定室に入室する必要があるときは, インター・ロックを解除せずに管理者の許可を得て運転者に通報のうえ入室することができる。この場合入室者は, ビームの通過場所に立入らぬように縄ばりを行なうこと。

C) 運転停止時の立入

Linac の運転停止中にモジュールタ室, 加速管室, ターゲット室に立入る者は各入口において各人ごとにパーソナルキーを抜き取り携行すること。

また, 加速管, ターゲットなどの残留放射能に十分

注意すること. これらに近づく時は運転停止後は少なくとも 10 分間以上経過してから立入ること.

18.7 Maintenance manual

Linac の点検保守は, 日常点検 (運転前点検), 6 ヶ月点検, 随時保守, および電気工作物保守規程に定める巡視, 点検および自主検査の 4 種類とする.

1) 日常点検 (運転前点検)

毎運転開始前に運転チェック・リストにより点検を行ない異常のないことを確認する.

2) 6 ヶ月点検

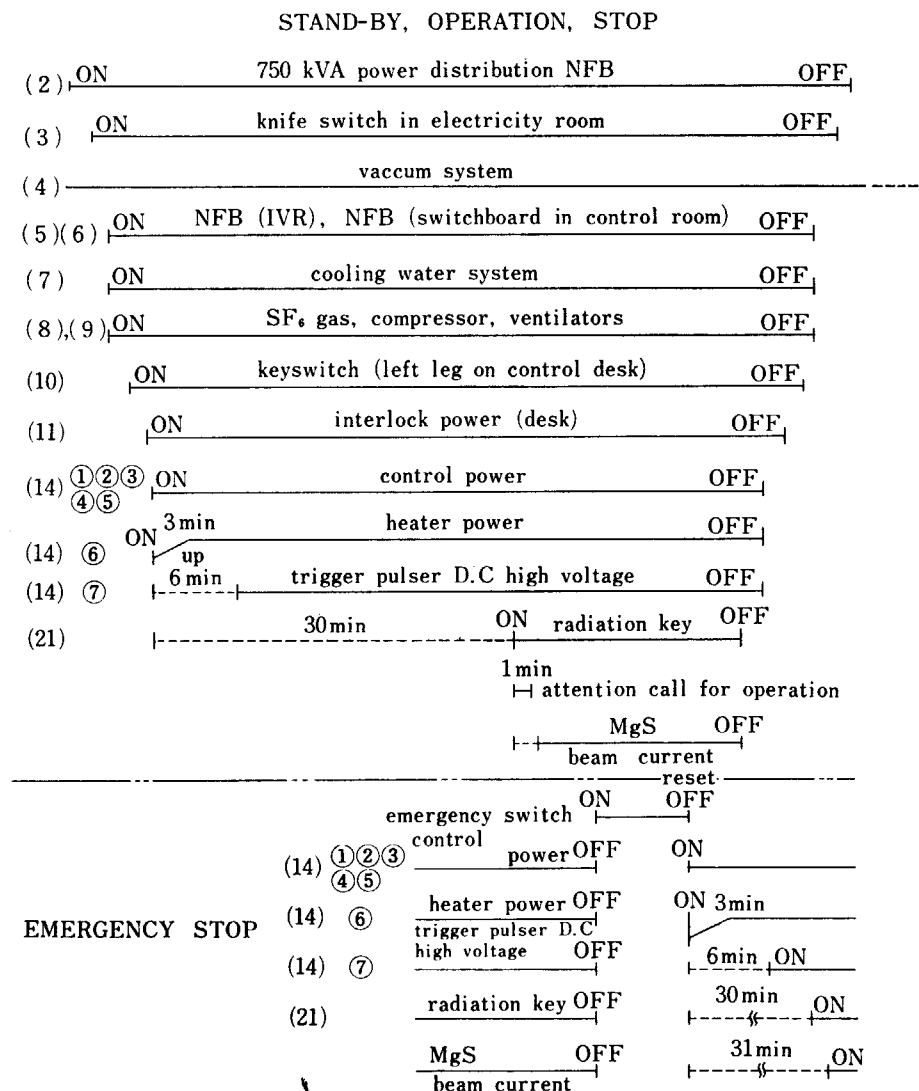
6 ヶ月ごとに, 6 ヶ月点検チェック・リストにより点検を行ない, 必要な保守を行なう.

3) 異常, 故障などが発見され補修した時は, 保守, 修理, 記録に記載する.

4) 電気工作物保安規程に定める巡視, 点検, 自主検査の様式は別に定める.

5) 保守, 点検時の高電圧に対する安全措置

- ①コントロール・デスクのスイッチが OFF であることを確認し「点検中」または「修理中」の標識をおく.
- ②IVR の 2 次電圧がゼロに下り, モジュールタの直流電源電圧がゼロに下がっているのを確認する.
- ③モジュールタ室に入り, 直流電源の扉またはモジュールタの扉を開いたら, 必ずアース棒で高圧充電部を短絡して作業を開始すること.
- ④アース棒は作業終了まで必ず高圧充電部に接触して置くこと.



* after reset, return to (14) in a case of emergency stop
after reset, return to (21) in a case of interlock stop

Fig. 18.1 Time chart of operation

19. 建 屋

新 linac は旧 linac が収容されていた linac 建屋²⁾内に設置することになったが、装置の規模が数倍になるため全体を収容できず加速管を設置するための建屋の増築が行なわれた。また、新 linac の放射線発生量は旧 linac に較べて数 10 倍以上も増加するので、放射線遮蔽を強化する必要がおり、ターゲットを収容する建屋の増築とターゲット建屋内に積まれているコンクリート・ブロックの積増しが行なわれた。

Linac 建屋の外には中性子の T-O-F の実験のための 4 本の飛行管の設置と、4 棟の中性子測定室の建設が行なわれた。

19.1 敷 地

敷地は東海研究所のほぼ中央部に位置し、南北 300 m 東西 200 m の広さで、大半は松の防風林によって覆われている。Linac 建屋は、この敷地内の北西の部分に位置している。Fig. 19.1 に敷地と建物の配置を示す。建屋より南の方向に 190 m の飛行管が設置され、その 100 m 地点と 190 m の終点にそれぞれ中性子測定室が設けられている。北の方向に 55 m と 45 m 2 本の飛行管が設けられ、55 m 飛行管の終点に 1 棟、2 本の 45 m の飛行管の終点に 1 棟の中性子測定室が設けられた。

建物の敷地の地盤構造は Fig. 19.2 に示すが、建物は遮蔽構造体のため重量が大きく、比較的に地盤の条件が悪いので特別な考慮が払われている。

19.2 加速管室とモジュレータ室

加速管は強い放射線発生源になるので加速管室は厳重な遮蔽構造になっている。外部に面する壁は 1.5 m、天井は 1 m の厚さの鉄筋コンクリートである。モジュレータ室は旧 linac の加速管を収容していた建屋であるが、新 linac の 5 組のモジュレータとその電源とパルス・トランスとクライストロンが収容され、また、電子入射系のモジュレータも収容されている。モジュレータ室から加速室への出入りは 1.9 m 幅の両開きの扉が設けられているが、加速管の搬入後、人の出入りのための曲りくねった通路を残してコンクリート・ブロックで閉鎖された。これは加速管室からの放射線の漏洩をなるべく少くするためである。これらの建屋を Fig. 19.3 に示す。

19.3 ターゲット室

加速管で加速された電子は伝送系により、 T_c 、 T_R 、 T_L

のターゲット区域へ導かれる。 T_c は中性子ターゲットが置かれる区域である。Fig. 19.4 に示すように、中性子を飛行させるために 8 本の飛行管がターゲットを中心に伸びている。これらの飛行管のターゲット側の先の部分はコンクリートに埋込まれている。 T_c 区域の周りのターゲット室の壁は 2.5 m、天井は 2 m の厚さの鉄筋入りのコンクリートであり、さらに埋込まれた飛行管に沿って、2 m 厚、高さ 1.7 m のコンクリート壁が、放射線遮蔽を強化するために築かれた。この部分は旧ターゲット建屋から突出して外部に増築された。

T_R の区域はターゲット建屋内にあり中性子発生ターゲットと RI 製造用の γ ターゲットが置かれている。 T_R の区域は放射線の遮蔽のためにコンクリート・ブロックで囲まれているが、3 本の中性子飛行管の部分だけは 2 m の厚さのコンクリートの打込みを行なった。コンクリート・ブロックは側面で 2 m、天井では 1.6 m の厚さに積上げられている。

T_L には熱中性子及び X 線のターゲットが置かれている。放射線遮蔽は T_R と同じくブロック積で、側面は 3 m、天井は 1.6 m の厚さである。中性子飛行管と X 線通過孔が貫通する部分はコンクリートが打込まれている。

19.4 中性子飛行管及び中性子測定室

Linac の建屋の外には T_c ターゲット室から出発する 4 本の中性子飛行管が設置されている。

190 m の中性子飛行管の設置は地形の関係上 15/1000 の勾配がつけられた。設置場所においてこの勾配より出た部分は削り取られ、下がった部分は表面の腐葉土層を取除いた上に盛土が行なわれた。Fig. 19.5 に飛行管の配置と地形を示す。適当な間隔に飛行管の支持台が設けられ、この支持台の上に飛行管がとりつけられている。飛行管の 100 m の地点には中性子測定室が建設された。

測定室はターゲットの方向からくるバックグラウンドの放射線を遮蔽するために、この側の壁は 1 m の厚さのコンクリートになっている。飛行管はこの壁を貫いて室内に入るが、測定室内において 3 m の長さだけ中断される。これはこの間に測定器を持込んで 100 m の飛行実験を行なうためである。190 m の飛行実験を行なう場合は、この測定器を取除いて中性子をマイラー箔の窓を通しつぎの飛行管に入射させる。この飛行管は反対側の壁を貫いて 190 m の地点までのびている。100 m 中性子測定室を Fig. 19.6 に示す。

飛行管の 190 m の終点には 100 m 測定室と大体同一構造の測定室が建設された。飛行管の 190 m の終点もマイ

ラー箔の窓になっていて、中性子はこの窓から測定室に取出される。サンプルを通過した中性子は 2 mm の厚さのアルミ板を貫通後測定室の後方約 5 m の地点に置かれているコンクリート製のビーム・ストッパーによって止められる。190 m の測定室を Fig. 19.7 に示す。

190 m の飛行管とは反対の方向に 45 m の飛行管 2 本と 55 m のもの 1 本が設置された。これらは水平に置かれている。2 本の 45 m の飛行管は同一棟の中性子測定室に入る。この建屋のターゲット側の壁の厚さは 1 m のコンクリートである。45 m 測定室を Fig. 19.8 に示す。

55 m の中性子測定小屋では、大型の液体シンチレーション・カウンターによる捕獲断面積測定が行なわれる。

この建屋はカウンターのバックグラウンドを減少させるために、嚴重な遮蔽が施されている。壁と天井は 50 cm の厚さのコンクリートよりなり、建屋の上には 2.5 m 以上の厚さの土盛が行なわれた。また、この部屋にはシンチレータの液体のドレーンのタンクを収容する地下室が設けられている。55 m 中性子測定室を Fig. 19.9 に示す。この測定室に設置される検出器には、キシレンを溶媒とする約 3,500 l の液体シンチレータが収容されるので、建屋は危険物一般取扱所として消防法の規制をうけ通気管や電灯・配線については防爆上の配慮がはらわれている。

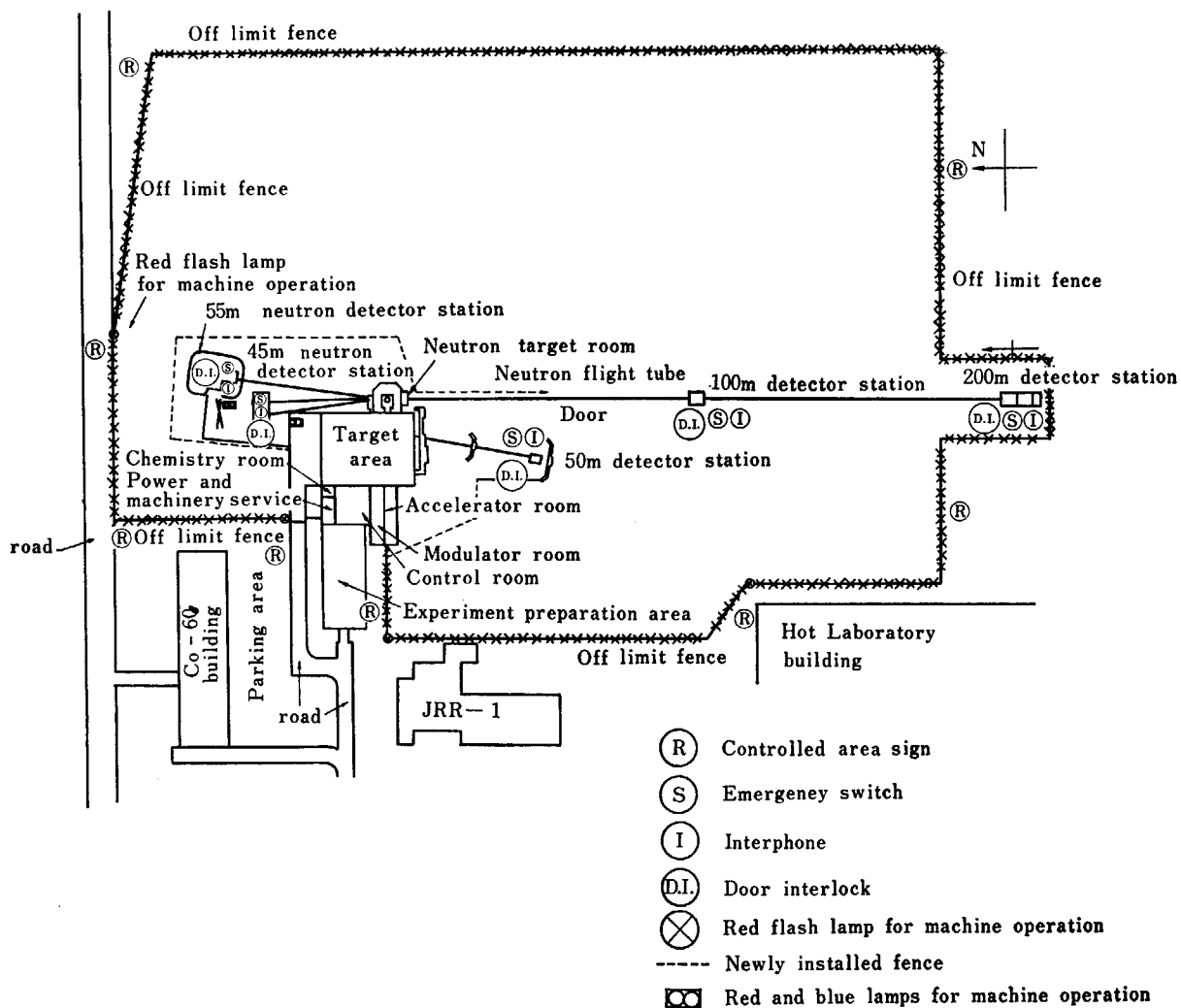


Fig. 19.1 Layout of the linac building and neutron detector station.

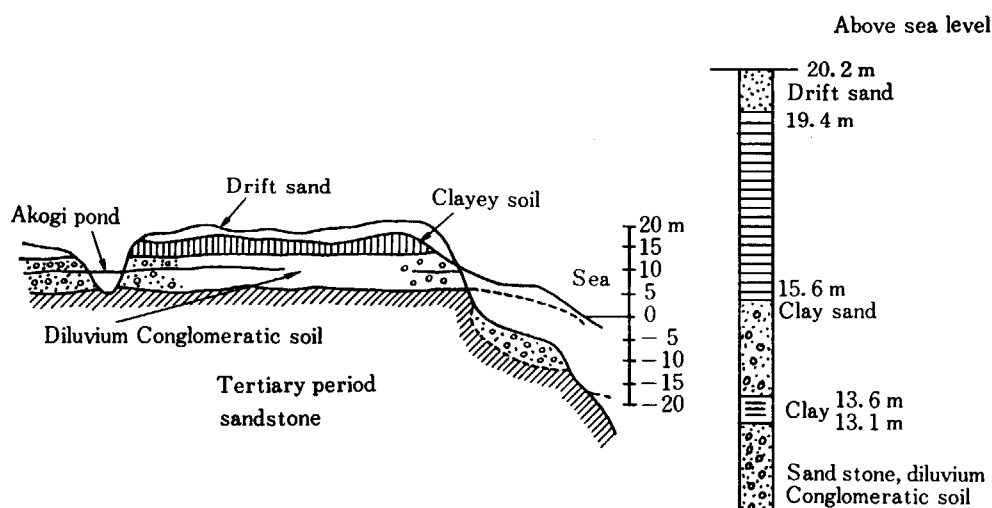


Fig. 19.2 Ground structure around the site.

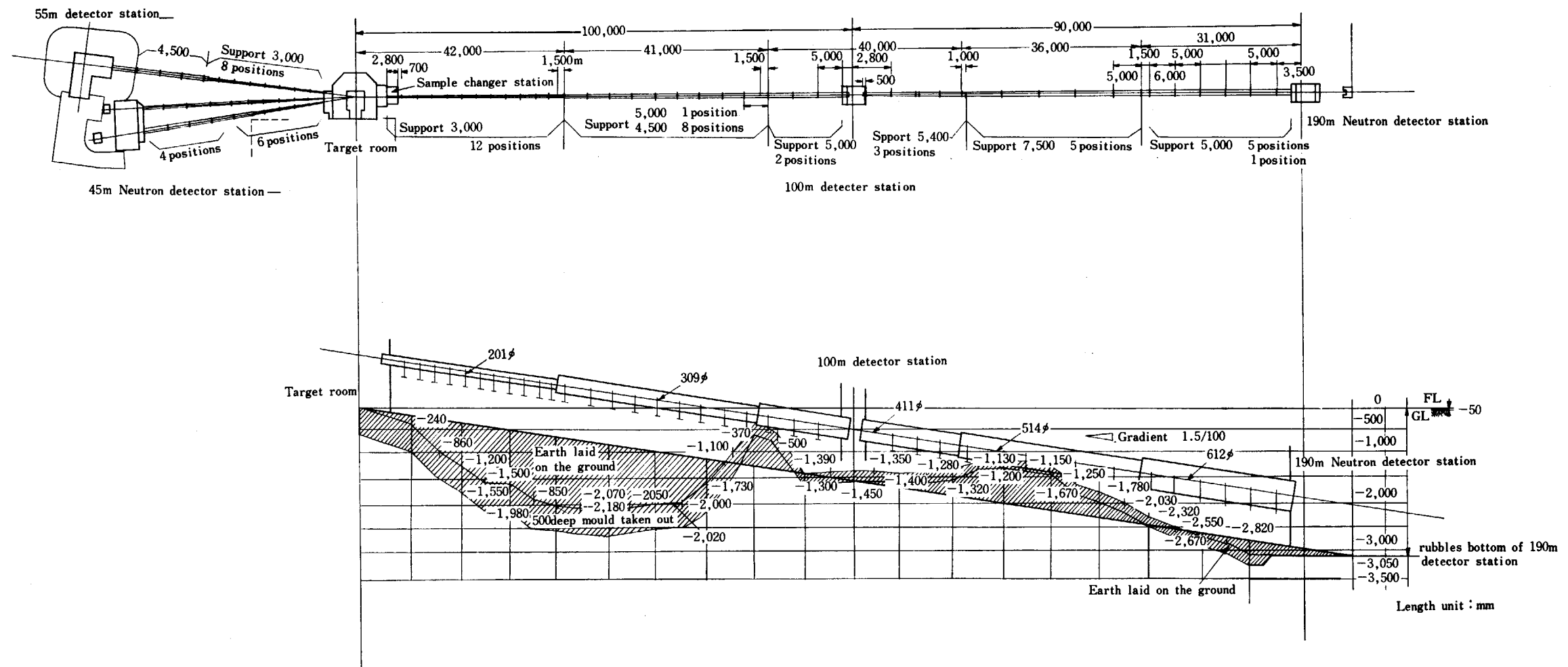


Fig. 19.5 100 m and 190 m neutron detector stations, supports of flight tubes, and level of the site.

This is a blank page.

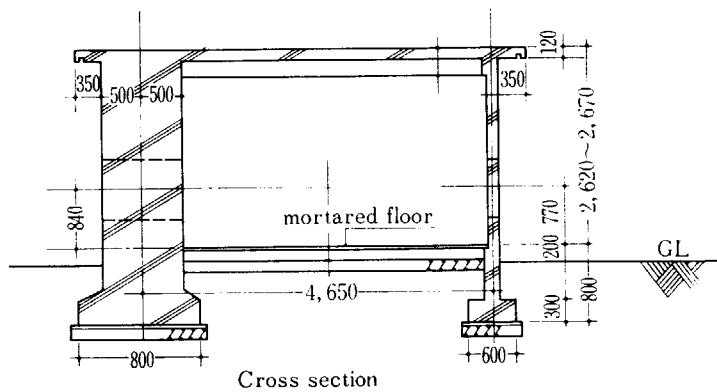
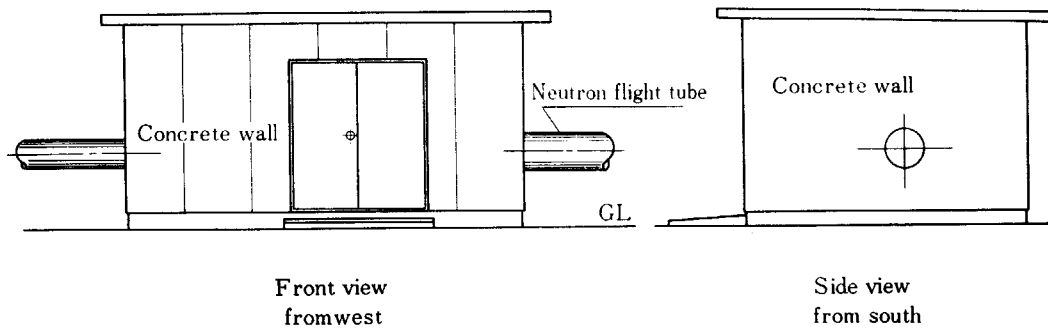


Fig. 19.6 100 m neutron detector station.

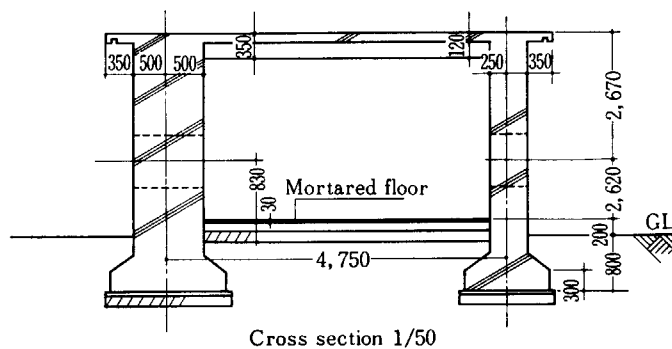
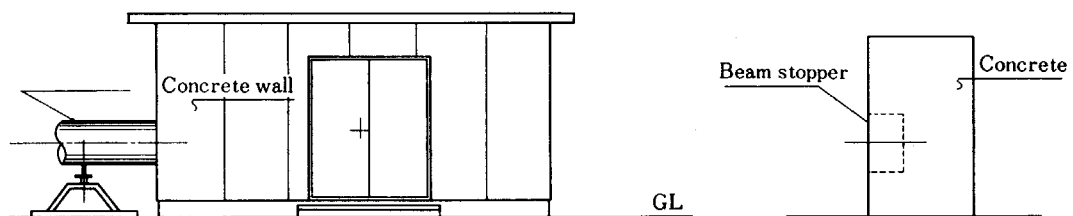


Fig. 19.7 190 m neutron detector station.

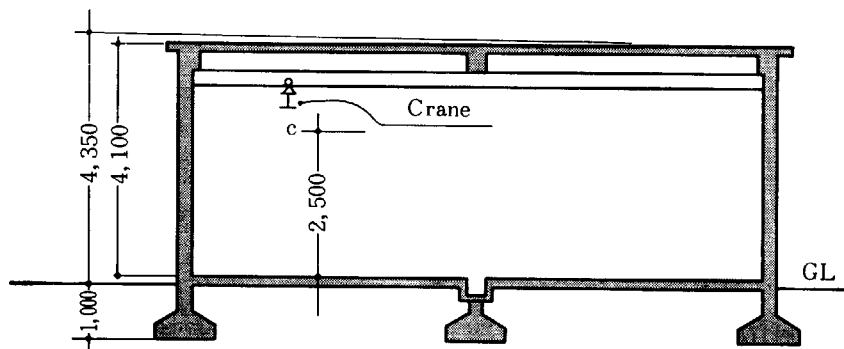
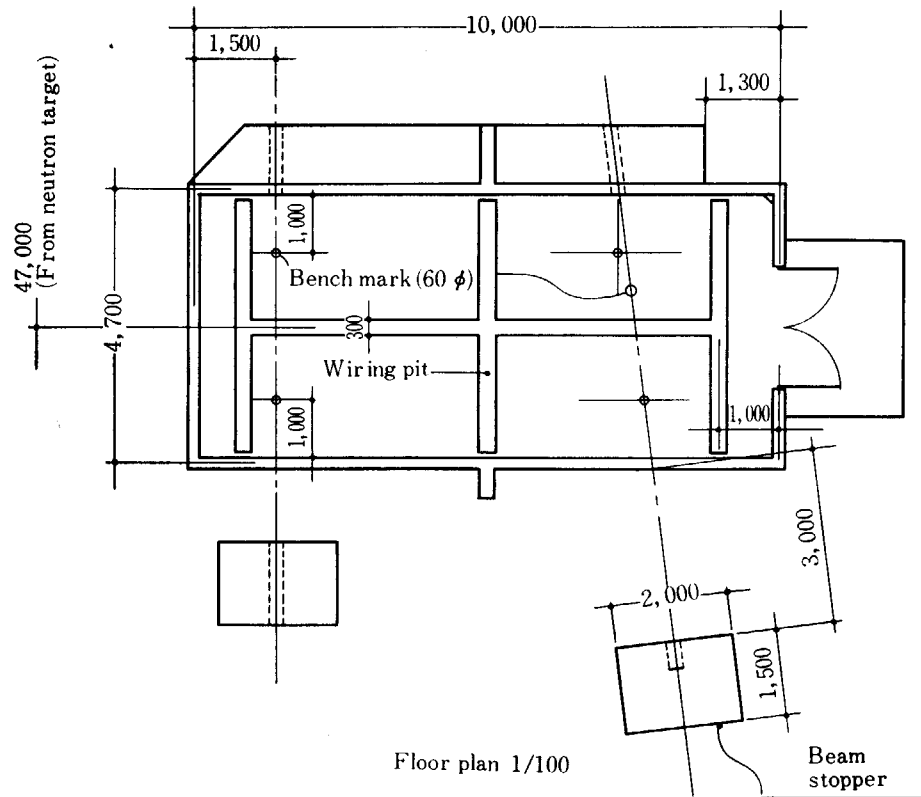


Fig. 19.8 45 m neutron detector station.

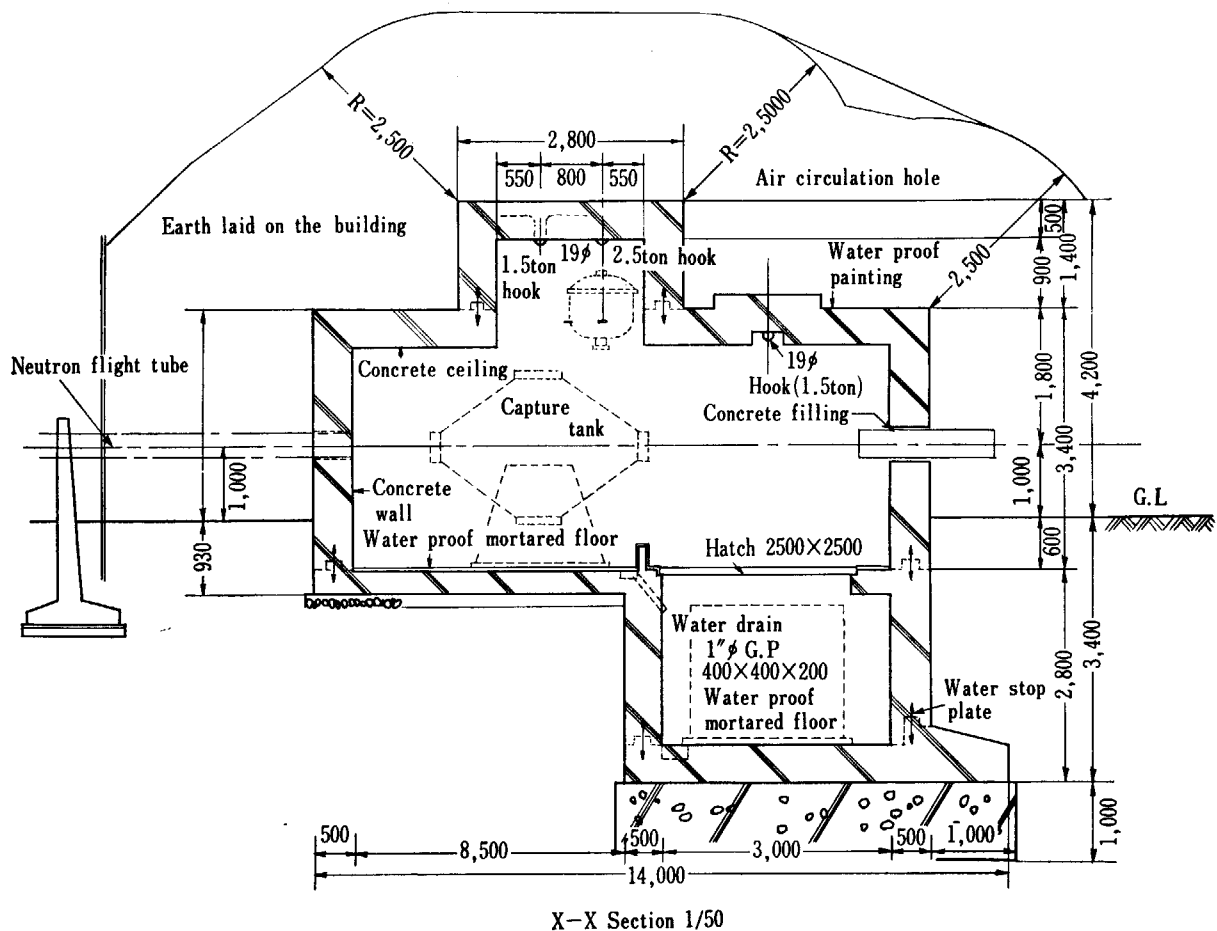
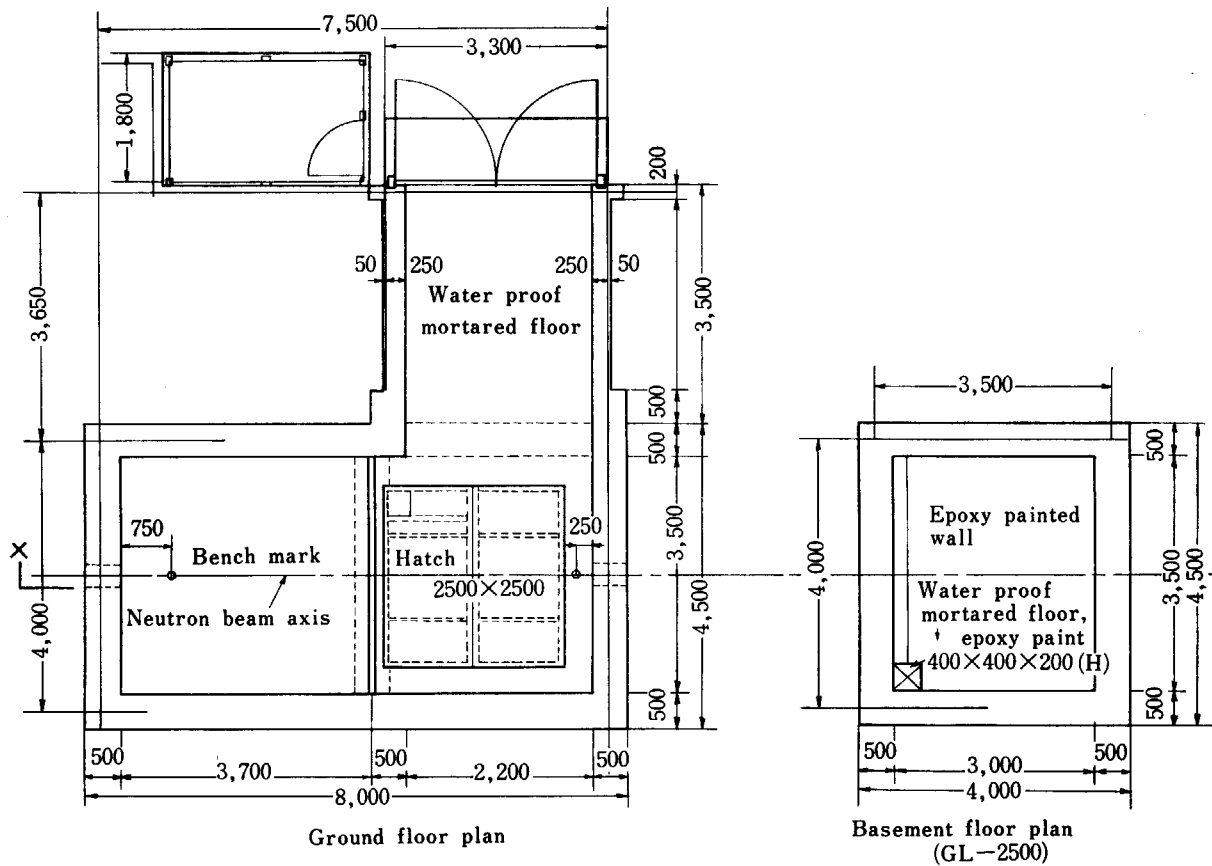


Fig. 19.9 55 m neutron detector station.

References

- 1) "The Stanford Two-Mile Accelerator, ed R.B. NEAL", W.A. BENJAMIN, (1968)
- 2) Linac Laboratory: JAERI 6014 (1964)
- 3) Special edition "ML-300 Electron Linac for Tohoku University", Mitsubishi Denki Giho, **42**, 271 (1968)
- 4) Reference 1), p. 116
- 5) HAIMSON J.: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-9, 32 (1962)
- 6) Reference 1), p. 454
- 7) OHKUBO M.: *Nuclear Instr. and Methods*, **103**, 53 (1972)
- 8) Reference 1), p. 411
- 9) *ibid.*, p. 418
- 10) *ibid.*, p. 437
- 11) *ibid.*, p. 425
- 12) PENNER S.: *Rev. Sci. Instr.*, **32**, 150 (1961)
- 13) MIZUMOTO M., OHKUBO M. and ASAMI A.: unpublished
- 14) PANOFSKY W.K.H. and MCINTYRE J.A.: *Rev. Sci. Instr.*, **25**, 287 (1954)
- 15) BROWN K.L.: *Rev. Sci. Instr.*, **27**, 959 (1956)
- 16) BAINBRIDGE K.: "Experimental Nuclear Physics, ed. E. Segre" John Wiley and Sons, Vol. 1. (1953)
- 17) ENGE H.A.: *Rev. Sci. Instr.*, **35**, 278 (1964)
- 18) Reference 1), p. 163
- 19) Special edition "Generation and measurement of magnetic field", Butsuri (Physical Society of Japan), **14** (1959)
- 20) KUMAGAI H.: Butsuri, **11**, 81 (1956); MATSUDA K.: "核実験装置 II" 核物理学講座, 共立出版, **8** (1961)
- 21) FUKETA T. and TAKEKOSHI H.: *Rev. Sci. Instr.*, **39**, 1573 (1968)
- 22) Reference 1), p. 118
- 23) YOSHIDA Y. *et al.*: JAERI 1063 (1964)
- 24) PRICE B.T. *et al.*: "Radiation Shielding", Pergamon, p. 88 (1957)
- 25) Linac Laboratory: JAERI-M 3567 (1969)
- 26) BARBER W.C. and GEORGE W.D.: *Phys. Rev.* **116**, 1551 (1959)
- 27) ALSMILLER R.G., Jr. and MORAN H.S.: *Nuclear Instr. and Methods*, **48**, 109 (1967)
- 28) ALSMILLER R.G., Jr. and MORAN H.S.: *Nuclear Instr. and Methods*, **51**, 339 (1967)
- 29) BERGER M.J. and SELTZER S.M.: *Phys. Rev. C*, **2**, 621 (1970)
- 30) SELTZER S.M. and BERGER M.J.: *Phys. Rev. C*, **7**, 858 (1973)
- 31) MACKLIN R.L.: *Nuclear Instr. and Methods*, **91**, 79 (1971)
- 32) KINBARA S. and TAWA F.: JAERI-M 5835 (1974)
- 33) OHKUBO M.: JAERI-M 5624 (1974)
- 34) BABA S., BABA H. and OKASHITA H.: JAERI 1216 (1971); BABA H., OKASHITA H., BABA S., SUZUKI T., UMEZAWA H. and NATSUME H.: *J. Nucl. Sci. and Tech.*, **8**, 703 (1971); BABA H., SEKINE T., BABA S. and OKASHITA H.: JAERI 1227 (1973)
- 35) Toshiba Electric Co. Ltd.: Instruction Manuals of USC-3 system; Toshiba RS, 1020400-002 (1972), Toshiba DS, 103600-010 (1970), Toshiba RS, 1020400-005 (1972)
- 36) KINBARA S. and TAWA F.: JAERI-M 5835, (1974)
- 37) SHOJI T., MIZUMOTO M. and KAWARASAKI Y.: JAERI-M 6010 (1975)
- 38) KAWARASAKI Y.: JAERI-M 5435 (1973)
- 39) KAWARASAKI Y.: JAERI-M 5299 (1973) and JAERI-M 5602 (1974)
- 40) KAWARASAKI Y., SHOJI T. and MIZUMOTO M.: JAERI-M 5572 (1974)
- 41) TSUGITA T.: JAERI-M 5768 (1974), and private communication
- 42) Electronics section of JAERI: private communication
- 43) HAIMSON J.: *Trans. on Nuclear Science* NS-12, **3**, 506 (1965)
- 44) LOEW G.A. *et al.*: Linear Accelerators, ed. P.M. Lapostoll and A.L. Septier, North-Holland, p. 96 (1970)
- 45) MALLORY K.B.: Stanford University HEPL Technical Report, 46 (1955)

あ と が き

Linac の増力にあたっては、3 億円という予算の範囲内で、最も性能の高いものを作り中性子実験に役立てたいという強い希望から、われわれは、一般に行なわれているような業者への一括発注によらず、自ら設計し、部品を購入し、組立・調整・試験を行なう、という異例の方法によることを決意した。このようなやり方で、はたして短い期間に所定の性能のものを作れるのかという危惧の声は、所内でも少なくなかったし、われわれ自身、十分な事前の準備を重ねて自信はもっていたものの、内心何の不安もなかったとはいいいきれない。

しかし、研究所において、この思いきった異例の計画がオーソライズされ、激励を受け、十分なサポート体制が組まれたおかげで、本計画は、予想以上に順調に進み、途中生じたさまざまな困難ものり切ることができ、所期の成果を得るまでにこぎつけた。

とくに、建家と付属施設関係は建設部、真空装置の部品関係は技術部工作課、工程調達および庶務は物理部事務室に、全面的に分担してもらい、これら部門の担当者は、研究室員と一体となってこの仕事に従事していただいた。さらに、放射線遮蔽および放射線管理、電気関係工事の設計・安全チェック、消防法関係手続き、旧 linac 改造にともなうぼう大な物品管理と運搬、多数の物品の調達、予算のやりくり、クレーン操作、など、所内の実に多くの部門の熱意ある協力をいただいた。

ここにあらためて記して、関係各位に深く感謝の意を表明したい。

技術的側面で言えば、基本部分について、旧 linac 時代から十分な試作試験を重ね、またこの種の加速器の長年の取扱経験があって、研究室として製作・運転・保守にわたる問題点を十分に把握していたことが、成功の重要な基盤であった。

また、部品製作を担当したメーカーが、事前の試作・試験を通じて十分な経験と能力を有していたこと、および東北大学における大型 linac の製作経験を活用し得たことも、きわめて大きな成功の要因であった。東北大学の関係者および、各メーカーにも感謝の意を表したい。

本レポートの執筆担当者は下記の通りである。

1 章：竹腰，大杉，2 章：竹腰，3 章：竹腰，益子，大久保，浅見，河原崎，秋山，4 章：竹腰，益子，秋山，荘司，5 章：田村，益子，大久保，荘司，水本，竹腰，6 章：鹿園，益子，信坂，竹腰，7 章：浅見，大久保，水本，秋山，荘司，8 章：更田，鹿園，北島，荘司，9 章：秋山，浅見，松本，10 章：浅見，信坂，益子，北島，桜井，11 章：北島，12 章：北島，益子，秋山，信坂，荘司，中島，桜井，13 章：北島，中島，14 章：竹腰，北島，信坂，益子，浅見，15 章：中島，田村，16 章：更田，浅見，田村，松本，河原崎，大久保，中島，水本，竹腰，17 章：更田，松本，河原崎，18 章：北島，中島，益子，浅見，竹腰，19 章：田村，更田，浅見，鹿園，大久保，中島，信坂，竹腰，Appendix：入江

Linac の主な購入物品の契約先

品 名	メーカ	取扱業者
Linac 建屋の増築	鹿 島 建 設	
加速管, 電子銃, 導波管, 各種マイクロ波素子	三 菱 電 機	
実験データ同時処理装置, 小型サイラトロン, 進行波管, 各種小型真空管	東 芝	東京電気特器
加 速 管	ARCO	丸 紅 飯 田
Q磁石, 偏向磁石, 分析磁石, 分岐磁石	住友特殊金属 K. K	住 友 商 事
誘導電圧調整器, モジュレータ構成素子, IVR 制御装置, 大型高圧電源トランス, 加速管集束コイル巻工事	国際変圧器 K. K	
超高真空バルブ, イオンポンプ及び制御電源	日本真空技術 K. K	小林理化器械
マイクロ波回路素子一式, トリガーパルサー II	日本高周波 K. K	
板極管用空洞, マイクロ波発振装置, 高周波電力検出器	島田理化工業 K. K	
コントロールデスク, グラフィックパネル, インターロックパネル一式, Linac 制御用配線とコネクター取付作業	池上通信機 K. K	
自動電圧調整器, 電磁石励磁用電源一式	山菱電機 K. K	
コンデンサー (PFN 用), 各種小型コンデンサー	指月電機製作所	
パルストランス	PEARSON	関 商 事
各 種 真 空 管	EIMAC	
クライストロン (RCA-8568)	RCA	大倉電気サービス
サイラトロン (KU-275 C)	ITT	安 宅 産 業
クライストロン (L-3989)	LITTON	ウェストレックス
クライストロン (SAS-61)	SPERRY	東 京 計 器
板極管 (ML-8534)	MACHLETT	新日本無線 K. K
板極管用空洞	MICROWAVE CONTROL	
中性子ターゲット, スリット・ボックス部品, 真空槽	宮 盛 製 作 所	
真空導管, 気送管装置	中島製作所 K. K	
中性子飛行管工事, 各種架台, SF ₆ 加圧装置取付作業	大昭加熱工業 K. K	
電磁レンズ, パネル・ラック, 各種筐体	荒 友 製 作 所	
EOL クリッパー, 充電変圧器及び整流器の組立	立山精機 K. K	
真空系部品 (ベロー), 真空導管	大野ベロー工業 K. K	
真 空 系 部 品	東理社理化研究所	
直流電源電力ケーブル配線工事, 電磁石等電源の配線工事, インターロックとインターホーン配線工事	日本電設工事 K. K	
Linac 冷却水系配管工事, 真空導管出口窓空冷系統工事	建 材 社	
炭酸ガス消火設備	能美防災工業 K. K	

ソープションポンプ, 各種真空部品	日電バリアン K. K	
碍子, ベリリヤ板	日本碍子 K. K	
セラミック真空槽	京都セラミック K. K	
シリコン整流素子	日本インターナショナル K. K	田 丸 電 気
シリコン整流素子	オ リ ジ ン	ム ツ ミ 産 業
パワー・トランジスタ	新電元工業 K. K	
マイクロ波導波管	古河電気工業 K. K	
二重シールド同軸ケーブル	古河電線 K. K	菱 三 電 気
ITV	日本電気 K. K	
電線, 各種ケーブル, テフロンケーブル	日立電線 K. K	
NFB, 電磁開閉器	富士電機 K. K	協 同 電 気
高圧ホース, 金具	横浜ゴム K. K	横浜ゴム工業品東販
配管用各種部品	日 立 管 材	
フロー・スイッチ	山武ハネウエル K. K	
フロー・スイッチ	GEMS	大 平 貿 易
工業用銅板, アース回路用銅板	佐藤金属 K. K	

Appendix : Linac 加速管部の設計と製作

従来の S バンド線形電子加速管では, 加速管へのマイクロ波入力, 数 MW のものがほとんどであった。それは主として, マイクロ波電力管の性能と加速管を含めマイクロ波伝線路の耐電力の問題からであった。しかし最近のクライストロンの進歩により, 20 MW 程度の電力を 1 個の出力導波管から得ることは容易になった。この出力をそのまま 1 本の加速管へ給電すれば, 線形加速管の構成は非常に単純となる。今回の計画は, まさにこのようなものであった。そのため, 設計値として 16 MW 入力で動作する S バンド (2850 MHz) 加速管を新たに設計・製作する必要が生じた。さいわい, この新しい加速管は, はば設計どおりの性能を発揮することがわかったので, ここに加速管の設計と性能を中心として, その他三菱電機株式会社の納入した加速管に関連する機器について報告する。

A. 1 加速管の設計

A. 1. 1 基本設計

加速管は, 従来からもっとも多く用いられている円板を周期的に装荷する円形導波管構造を用いている。マイクロ波入力が大きくなっても, これ以外の形式を考えねばならぬ理由はみあたらない。また, 後述のように, 加速管の工作上的制約から, その長さは約 2 m に制限されるので, 定電界強度形としなくても, 加速管の両端部における電界強度の差は極端に大きくならないので, 制作の容易性を考えて定インピーダンス形を採用した。

まず, 加速管の性能に大きな影響を与える円板の孔径 (2a) をきめるには, 与えられたマイクロ波入力 (P_0) に対して加速管軸上の電界強度を考える。これに参考となるデータには, つぎのものがある。

(i) Frascati 線形電子加速器⁴³⁾

マイクロ波周波数 f : 2856 MHz

2a: 28.36 mm

光速度で規格化された群速度, v_g/C : 0.0275

実効並列インピーダンス, r/Q : $36 \times 10^2 \Omega/m$

(ii) Stanford 2 マイル線形電子加速器⁴⁴⁾

f : 2856 MHz

2a: 26.20 mm

v_g/C : 0.0203

r : 53.1 M Ω/m

マイクロ波の自由空間波長を λ_0 , 加速管の Q 値を Q とすると, 加速管の減衰定数 I と加速管軸上の電界強度の最大値 E_0 とは, それぞれ次式であらわされる。

$$I = \frac{\pi}{\lambda_0 \cdot Q \cdot v_g / C} \quad (A. 1)$$

$$E_0 = (2P_0 \cdot I \cdot r)^{1/2} \quad (A. 2)$$

従って, P_0 を 16 MW とすると, 前者で E_0 は 112 kV/cm, 後者では, Q を 1.3×10^4 と仮定すると, E_0 は 139 kV/cm となる。このように従来の加速管の加速電界強度の最大値は, 150 kV/cm 以下のものが多かった。しかし, 筆者の経験からは 150 kV/cm くらいまでは実用上問題はないと考えられるので, 2a を 26.20 mm ときめた。これでも従来の加速管にくらべるとかなり大きい値となっている。その他の寸法については, 円板の厚さ t は, 孔部における局所的な高電界による放電の危険性を考慮して, 5.84 mm と厚くし, かつエッジのアールを 3 mm と大きくとった。円板の間隔 D は, 2857 MHz で $2\pi/3$ モードで動作するよう, レギュラ部では 35 mm となる。加速管の内径は, 上記諸寸法において, 所定の周波数で共振するように実験的に数値を定めた。

A. 1. 2 加速管性能の設計値

2a を 26.20 mm に選んだ場合, 文献 43) のデータから予想される加速管の性能は, $v_g/C = 0.021$, $r/Q = 38 \times 10^2 \Omega/m$ となり, 従って (A. 1) 式より, $IQ = 1.4 \times 10^3 m^{-1}$ となり, $P_0 = 16 MW$ に対し $E_0 = 13 MV/m$ となる。これは (A. 2) 式からわかるように, Q に無関係である。S バンドで通常の製作方法によってかなり容易に得られることがわかっている値として $Q = 1.3 \times 10^4$ を用いると, $r = 49 M\Omega/m$, $I = 0.11 neper/m$ となる。

これらの基本定数は, 測定により求めることはせず, 上記推定値を設計値として用いた。その理由は, とくに並列インピーダンスの測定は誤差が大きいこと, 従来の経験からこれらの数値は設計値として用いるに妥当な値であると思われることなどである。TABLE A. 1 に加速管の基本マイクロ波特性, 寸法および性能の設計値をまとめてある。

なお, 加速管の長さは, この程度の減衰定数の場合は, 2 m より長いほうがマイクロ波電力の有効利用の点からは有利である。しかし, 主として加速管製作上の問題から, 長さを約 2 m に制限せざるをえなかった。

A. 1. 3 バンチャ部の設計

バンチャ部の設計において考慮すべき基本的事項にはつぎのものがある。

- (1) エネルギー幅を狭めることと, 電子集群の位相幅を狭めることとの, どちらに重点があるか。
- (2) 電子捕捉効率に対する要求はどうか。

- (3) 電子入射電圧に対する制限はどうか。
- (4) 設計計算の結果が、忠実に具体的構造に実現できるか。
- (5) 加速電界として、極端な高電界や低電界を必要としないか。
- (6) ビーム負荷の大きい場合にその設計法は妥当であるか。
- (7) マイクロ波の周波数や電力および加速管温度の変動に対してバンチャ部の機能は安定であるか。
- (8) 周期構造として不規則性は小さいか。機械的構造は単純であるか。
- (9) 動作条件の設定は簡単であるか。

バンチャ部については、従来多くの方式が実用されてきたが、ここでは上記の観点から、いわゆる高位相速度・高電界強度形バンチャを採用した。これはレギュラ部と一体構造であって、レギュラ部と同程度の電界強度をもち（レギュラ部と $2a$ の値は同じ）、位相速度は一定値 $0.95c$ を数空洞にわたってもつ方式であり、つぎのような特徴をもつ。

- (1) 電子はすぐに高エネルギーに加速されるので、加速効率が良くしかも電子ビーム集束の問題も簡単になり、従来よく用いられてきたソレノイド・コイルなどはほとんど不要である。
- (2) 電子の位相変化が単純であるので、設計計算の結果が容易に実現でき、ビーム負荷の大きい場合にも比較的正確な設計ができる。
- (3) 単一給電方式が可能になり、大電力マイクロ波立体回路系の構成も簡単になる。
- (4) 機械的構造も簡単で、周期性の不規則さもすくない。
- (5) 電子捕捉効率が 50 % 程度以上にとりにくい。場合によってはプレバンチャを必要とする。

バンチャを含む加速管内を進む電子の位相変化とエネルギー変化の計算結果を、設計パラメータとともに Fig. A.1 と Fig. A.2 とに示してある。これらの図から、加速管出口での電子の位相とエネルギーとを電子の入射位相の関数としてあらわしたものが Fig. A.3 と Fig. A.4 である。これらからつぎのことがわかる。

- (1) 電子捕捉効率は 58 % である。
- (2) 出力電子の 76 % がエネルギー幅 8 % にある。
- (3) 出力電子の 47 % が位相幅 10° 内に、58 % が 20° 内にある。

さらに 2 段目の加速管について計算した結果はつぎの通りである。

- (1) 電子捕捉効率は 56 %
- (2) 出力電力の 78 % がエネルギー幅 7 % にある。
- (3) 出力電子の 60 % が位相幅 20° 内にある。

この計算より集群特性はほとんど 1 本目の加速管でできまり、あとはほとんど変わらないことがわかる。

A.2 加速管の構成

マイクロ波電力を加速管に供給する矩形導波管と加速管との結合器、すなわち矩形導波管の TE_{10} モードと加速管の TM_{01} モード間のモード変換器は、いわゆる空洞形結合器であり、加速管と一体構造となっている。加速管の冷却は、加速管の外壁に直接銅管をろうづけし、これに冷却水を流す方式をとっている。加速管は、たわみによる変形をふせぐため、3 点支持による専用支持台に固定されている。また、従来の加速管に多く用いられていたソレノイド・コイルは使用せず、電子銃とバンチャ部との間に磁場レンズを設ける構成となっている。これは、高位相速度・高電界強度形バンチャのため、電子ビームの発散がすくないからである。

この加速管にマイクロ波電力を供給する導波管系は、16 MW 以上の大電力の伝送を考えてユニークな構成となっている。すなわち単一給電方式を採用し、1 本のクライストロンから 1 本の加速管へ 1 本の導波管により給電し、耐電力性の点から、真空気密窓とマイクロ波電力モニタ用の方向性結合器のほかは立体回路素子を用いしないで、導波管バンドも耐電力性のよい H バンドのみを用いている。ただし、電子銃とバンチャ部加速管入口との距離をできるだけ短くするため、この部分のみ真空引口を導波管に設けている。

加速管を通過したマイクロ波電力を吸収する大電力無反射終端器は、遅波回路形と水負荷形と 2 種類製作した。水負荷形無反射終端器には、カロリメータがついており、電力の測定が可能である。真空気密窓、方向性結合器、真空引口などの立体回路素子は、設計の段階で、リング・サーキットにより約 20 MW までの耐電力性をテストしたものである。導波管はその内部を加圧して使用されるので（最大絶対圧力 4 kg/cm^2 ）、加圧による変形をふせぐため、肉厚 4 mm のものを使用している。なお、平均電力 16 kW の伝送では、WRJ-3 導波管では 1 m あたり約 100 W の発熱があり、周囲条件にもよるが、このための導波管の温度上昇は最大約 30°C と考えられるが、導波管に冷却機構は設けなかった。クライストロン出力から加速管までの大電力立体回路系の構成を Fig. A.5 に示す。以下に、重要な素子について、やや詳細に述べる。

A.2.1 マイクロ波モード変換器

モード変換器は大別して、ドアノブ形と空洞形と 2 種類あるが、ここではそのコンパクトさ、構造の単純さ、および加速管と一体構造が可能であることから、空洞形を採用した。結合空洞の径と結合アイリスの幅とを適当に選ぶと、VSWR の値 ρ が 1.1 以下のバンド幅を後述のように数 MHz にとることは比較的簡単である。

A. 2.2 大電力無反射終端器

1) 遅波回路形大電力無反射終端器

平均電力 10 kW 以上, 尖頭電力 10 MW 以上のマイクロ波無反射終端器で全金属製となしうるものには, テーパー導波管形と遅波回路形とがある。遅波回路形は, 構造が複雑であり, 製作がむづかしく, かつ使用温度を一定に保つ必要があるなどの難点はあるが, 全長を短かくしうる利点がある。

加速管の場合, 1 空洞共振器あたりの減衰定数は 0.35 dB/cavity であるが, これでは減衰が小さすぎるので, 共振器の内表面にカンタルを塗布することにより, 最大 2.45 dB/cavity にまで減衰を増すことができ, かつ塗布する表面積により減衰量を制御できる。

無反射終端器としては, 均一に発熱することがのぞましい。均一発熱の条件は, 簡単な考察から, 減衰定数を入力端からの距離 Z の関数として

$$I/I_0 = (1 - 2I_0 Z)^{-1} \quad (\text{A. 3})$$

とすればよいことがわかる。 I_0 は I の初期値である。長さ l で得られる減衰量 τ は, (A. 3) 式の積分より

$$\tau = -\frac{1}{2} \ln(1 - 2I_0 l) \quad (\text{A. 4})$$

となる。一方, 減衰量 τ の場合, 終端で完全反射させたときの入力端における VSWR を ρ とすると

$$\rho = \coth \tau \quad (\text{A. 5})$$

である。従って, 例えば $\rho = 1.1$ 以下とするためには, (A. 5) 式より τ は 1.5 neper (13 dB) 以上が必要となり, さらに (A. 4) 式より $I_0 l$ は 0.475 以上が必要となる。 I_0 をいくりにするかは, 単位長あたりの発熱量によってきまる。いま, I_0 を I の最大値の 1/6, すなわち $I_0 = 1.34$ neper/m とした場合の入力端からの順に空洞共振器あたりの必要な減衰量を (A. 3) 式から計算すると, TABLE A. 2 のようになる。実際には 2.45 dB/cavity が最大であるから, 第 11 空洞共振器以降はすべて減衰量を 2.45 dB/cavity としなければならない。第 10 空洞共振器までの減衰量は 8 dB であるから, あと 8 個の空洞共振器を追加して, 全減衰量を 27.6 dB とする。これにより入力 VSWR は, 1.005 以下が期待される。発熱量の軸方向分布の計算値を Fig. A. 6 に示してある。また, 温度に関する設計値と入力整合の周波数特性の測定結果を, それぞれ Fig. A. 7 と Fig. A. 8 に示してある。

2) 水負荷形大電力無反射終端器

水負荷形大電力無反射終端器は, 構造が簡単で広い帯域にわたってよい整合がとれることが特長である。入力整合の周波数特性の測定結果を Fig. A. 9 に示してある。

A. 3 加速管の性能

加速管の寸法 (2b) 決定のための test cavity での測定によって得られた分散特性を Fig. A. 10 に示す。これより, $2\pi/3$ モードにおける群速度は $v_g/C = 0.0203$, 加

速管を構成する空洞共振器間の結合係数 (電界結合) は $k = 0.0224$ であることがわかる。入力整合の周波数特性の測定結果を Fig. A. 11 に, nodal shift 法で測定した加速管の各空洞共振器の位相のばらつきを Fig. A. 12 に示した。加速管の諸性能の測定結果は TABLE A. 3 にまとめてある。

A. 4 加速管の製作方法

加速管は, 無酸素銅の孔あき円板と円筒とをろうづけ (brazing) によって, つなぎあわせた構造となっている。マイクロ波の伝はんする内部の表面は, すべて機械仕上げされた面で構成され, 金メッキなどはされてない。部品の機械加工の寸法公差は, $\pm 5 \mu$ であるが, 実際に製造された部品についての実測結果は TABLE A. 4 のようであった。なお, $2b$ の値をきめる test cavity の測定結果より, $2b$ の変化に対する共振周波数の変化は

$$\Delta f / f : -36.3 \text{ MHz/mm}$$

であることがわかった。

ろうづけによる加速管の寸法のくまりをふくめて, 最終的に各空洞共振器ごとの位相のばらつきを小さくするために, nodal shift 法⁴⁵⁾ によって, 加速管のスクイズをおこなっている。 $\pi/2$ モードの特性により, ある空洞共振器の前後の共振器に短絡棒を置いたときの加速管の入力インピーダンス位相角の差が, その空洞共振器の位相のずれを示す。従って, スクイズは $\pi/2$ モード励振でおこなうのが便利である。

ある空洞共振の共振周波数のずれを Δf とすると, その空洞共振器での位相のずれ $\Delta \phi$ は,

$$\Delta \phi = -\frac{\pi}{2} \cdot \frac{v_p}{v_g} \cdot \frac{\Delta f}{f} \quad (\text{A. 6})$$

であらわされる。一方, 加速管入力に接続された導波管定在波測定器では, この位相差は定在波最小点の位置のずれ Δl となる。すなわち, この周波数での導波管の管内波長を λ_0 とし, l を負荷側へ測ると,

$$\Delta \phi = 2\pi \frac{\Delta l}{\lambda_0} \quad (\text{A. 7})$$

となる。従って, (A. 6) 式と (A. 7) 式とより

$$\Delta l = -\frac{\lambda_g}{4} \cdot \frac{v_p}{v_g} \cdot \frac{\Delta f}{f} \quad (\text{A. 8})$$

が得られ, これはスクイズによる同調の限界をあらわす。すなわち, Fig. A. 10 より, $\pi/2$ モードでの値として

$$f : 2841 \text{ MHz}$$

$$v_g/C : 0.0233$$

$$v_p/C : 1.325$$

が得られ, また, 2841 MHz における WRJ-3 導波管の管内波長は 155.3 mm であるから, 以上の数値を用いると式 (A. 8) は, $\Delta l = 0.1 \text{ mm}$ に対し, $\Delta f = 130 \text{ kHz}$ を与える。

$\pi/2$ モードで励起して, 加速管を構成する各空洞共振

器の一様性をそろえた後、 $2\pi/3$ モードで励起し、短絡棒で順次空洞共振器の同調をずらせて、入力インピーダンスを測定し、スミス図表にプロットしたものが Fig. A. 12 である。

A. 5 電子銃

この電子銃は、つぎのような点を考慮して設計されたものである。

- (1) 使用最大電圧は 100 kV
- (2) カソード電流は 5 A 以上
- (3) ビーム電流とパルス幅は連続可変
- (4) 10^{-9} 秒程度の短パルス幅ビームの発生が可能
- (5) 電子ビームの直径は 5 mm 程度以下
- (6) 大気にならされてもカソード放射電流は容易に回復できる。

上記の点より、カソードは含浸形 (Impregnated) カソードを採用し、電子銃はグリット付きのピアス形とした。短パルス電圧をグリットに印加するために、グリット入力回路には同軸線路を使用している。電気的性能を

TABLE A. 5 にまとめ、電子銃の 3 極管特性の 1 例を Fig. A. 13 に示してある。

A. 6 結 果

以上、主として加速管の設計とマイクロ波性能について述べた。大電力での加速管の性能は、工場にその電力源がないため、測定はできなかった。この点と、加速管の製造装置の関係で 2 m 以上の長い加速管が製作できなかった点が残念であった。しかし、2 m 以下であることは BBU (beam blow-up) に対しては有利な点であり、本文ではふれなかったが、この加速管にはとくに BBU の対策はなにもほどこさなかった。

納入後の試運転の結果、加速管はほぼ設計どおりの性能を発揮することが確かめられ、このような大電力で動作する加速管の一つの設計法が確立されたといえる。

今回の加速管の設計は、未知の分野であった大電力での動作に主眼がおかれたが、この問題が解決されたので、つぎのステップは BBU を含め加速管の性能向上が考えられるべきと思われる。

TABLE A. 1 Design parameters of the accelerator structure

Microwave frequency, f	2857 MHz, at 20 °C
Input microwave power, P_0	16 MW (peak), 16 kW (average)
Accelerator waveguide type	Disk-loaded cylindrical waveguide delay line, constant impedance, travelling wave type
Electromagnetic field mode	TM_{01} , $2\pi/3$
Shunt impedance, r	49 M Ω /m
Attenuation, I	0.11 neper/m
Q value	1.3×10^4
Group velocity, v_g/C	0.021
Disk diameter, $2a$	26.20 mm
Waveguide inside diameter, $2b$	83.42 mm
Disk spacing, D	35.00 mm
Disk thickness, t	5.84 mm
Disk edge radius, ρ	3.0 mm
Length, L	2 m (59 cavities)
Unloaded energy gain, V_0	23.6 MeV
Beam loading derivative, R	10 MeV/A
Beam current at maximum conversion efficiency, i_{max}	1.18 A
Electric field strength	130~106 kV/cm (unloaded) 130~ 77 kV/cm ($i_p=0.3$ A)
Maximum heat production	5.7 kW
Accelerator temperature rise	2.2 °C
Accelerator temperature gradient	0.6 °C (cooling water 60 l/min), 1.8 °C (30 l/min)
Accelerator cooling water temperature rise	1.4 °C (water flow 60 l/min), 2.8 °C (30 l/min)

TABLE A.2 Design values of attenuation versus cavity number in the waveguide type nonreflecting terminator.

Cavity number	Attenuation (dB/cavity)
1 (coupler)	
2	0.42
3	0.47
4	0.53
5	0.61
6	0.70
7	0.84
8	1.05
9	1.37
10	2.01
11	3.74
12	22.1

TABLE A.3 Measured values of the accelerator structure parameters.

	Accelerator structure buncher section	Accelerator structure regular section
$2/3\pi$ mode frequency, f_0 (MHz) 20 °C, in vacuum	2857.10	2857.11
Input VSWR		
VSWR at central frequency	1.03	1.02
Bandwidth with VSWR 1.1 (MHz)	4.5	4.9
$2\pi/3$ mode phase fluctuation	less than $\pm 1.2^\circ$	less than $\pm 2.0^\circ$
Transmission loss (dB)	-1.8	-2.0
Attenuation coefficient (Np/meter)	0.10	0.11
Phase velocity, v_p/C	0.94, 1.00	1.00
Group velocity, v_g/C	0.020	0.020
TM ₀₁ mode bandwidth	63.5	63.5
$2\pi/3$ mode resonance Q-value	1.4×10^4	1.3×10^4

TABLE A.4 Manufacturing accuracy for main dimensions of accelerator structure.

Dimensions	Average of the fluctuation	Standard deviation of the fluctuation
2a	-2μ	3μ
2b	$+5 \mu$	5μ
D	-2μ	2μ
t	-1μ	2μ

TABLE A.5 Maximum ratings of the electron gun.

Cathode pulse voltage	Max. -100 kV
Grid pulse voltage	Max. 3 kV
Grid cutoff voltage	-150 V
Heater voltage	Max. 7 V
Heater current	Max. 15 A
Cathode current	Max. 5 A
Beam diameter	Approx. 5 mm
Perveance	0.664×10^{-6}
Cathode temperature	Max. 1200 °C

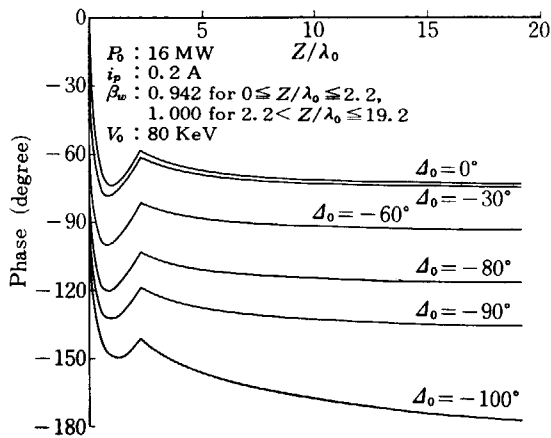


Fig. A.1 Phase angle versus distance along the buncher accelerator structure for various Δ_0 values.

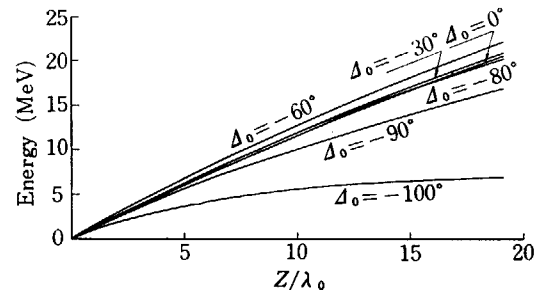


Fig. A.2 Electron energy gain versus distance along the buncher accelerator structure for various Δ_0 values.

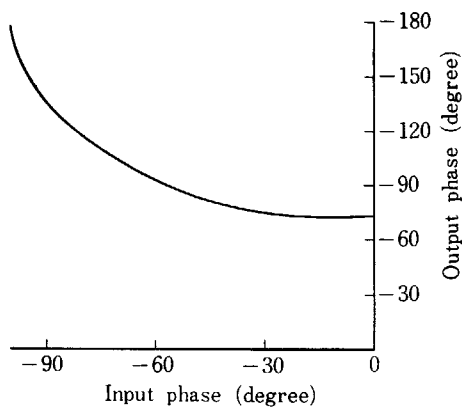


Fig. A.3 Relationship between incident and emerging electron phase angles in the buncher accelerator section.

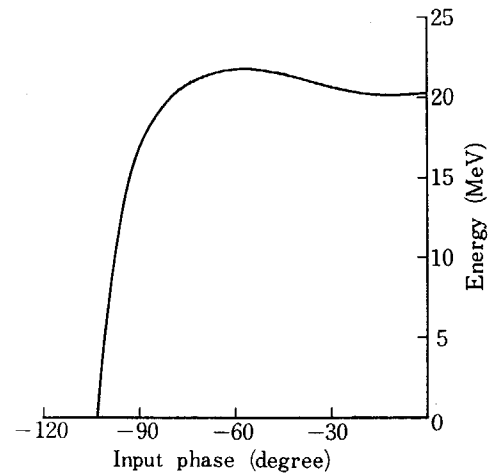


Fig. A.4 Relationship between electron energy and incident phase angle in the buncher accelerator section.

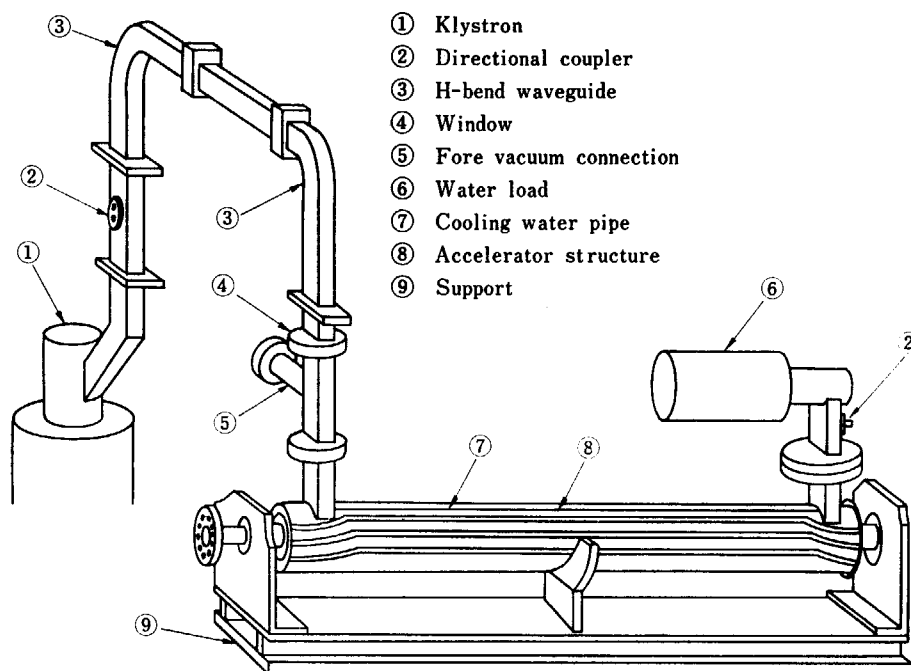


Fig. A.5 Composition of accelerator system.

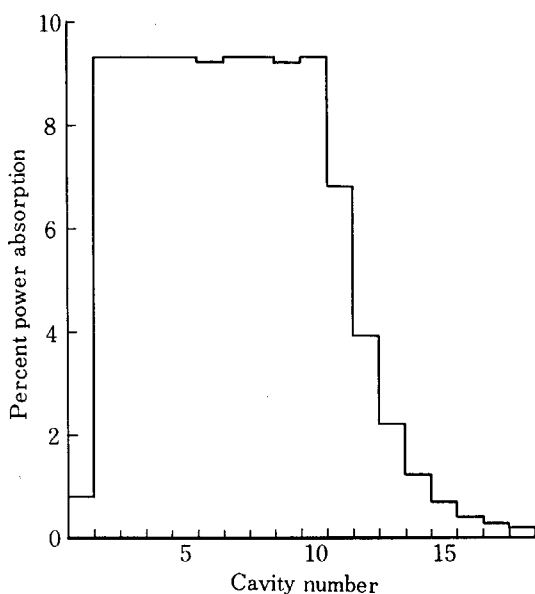


Fig. A.6 Value of heat production as a function of cavity number in the waveguide type nonreflecting terminator.

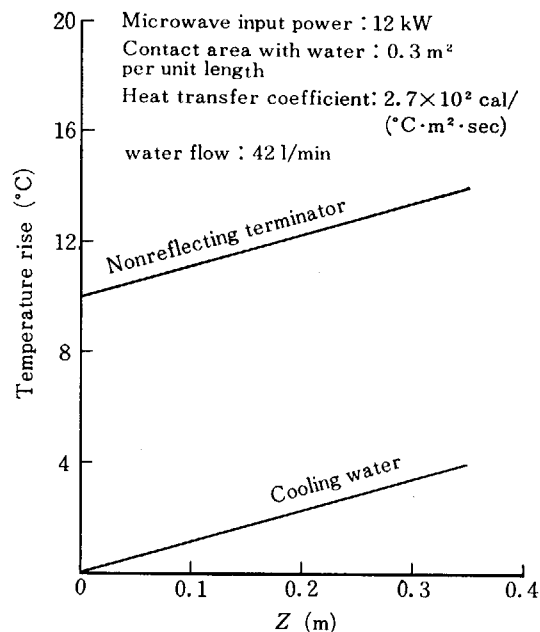


Fig. A.7 Value of temperature rise as a function of distance in the waveguide type nonreflecting terminator.

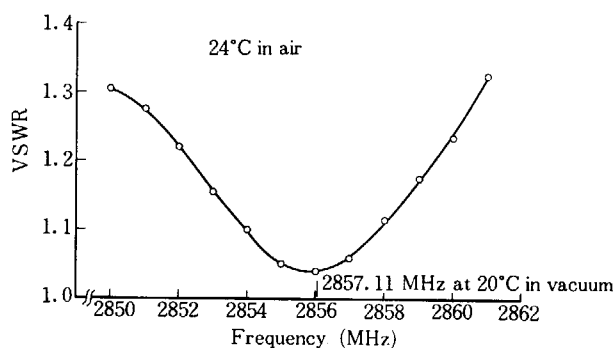


Fig. A.8 Input VSWR versus frequency for waveguide type nonreflecting terminator.

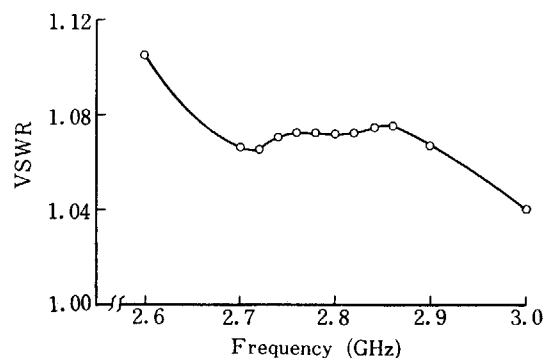


Fig. A.9 Input VSWR versus frequency for water load type nonreflecting terminator.

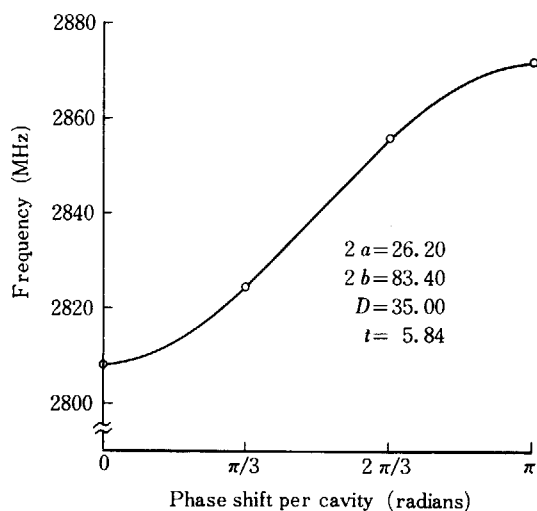


Fig. A.10 Dispersion characteristics of accelerator waveguide.

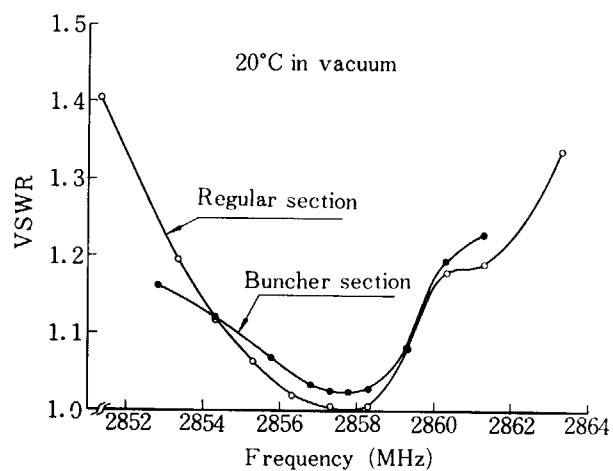
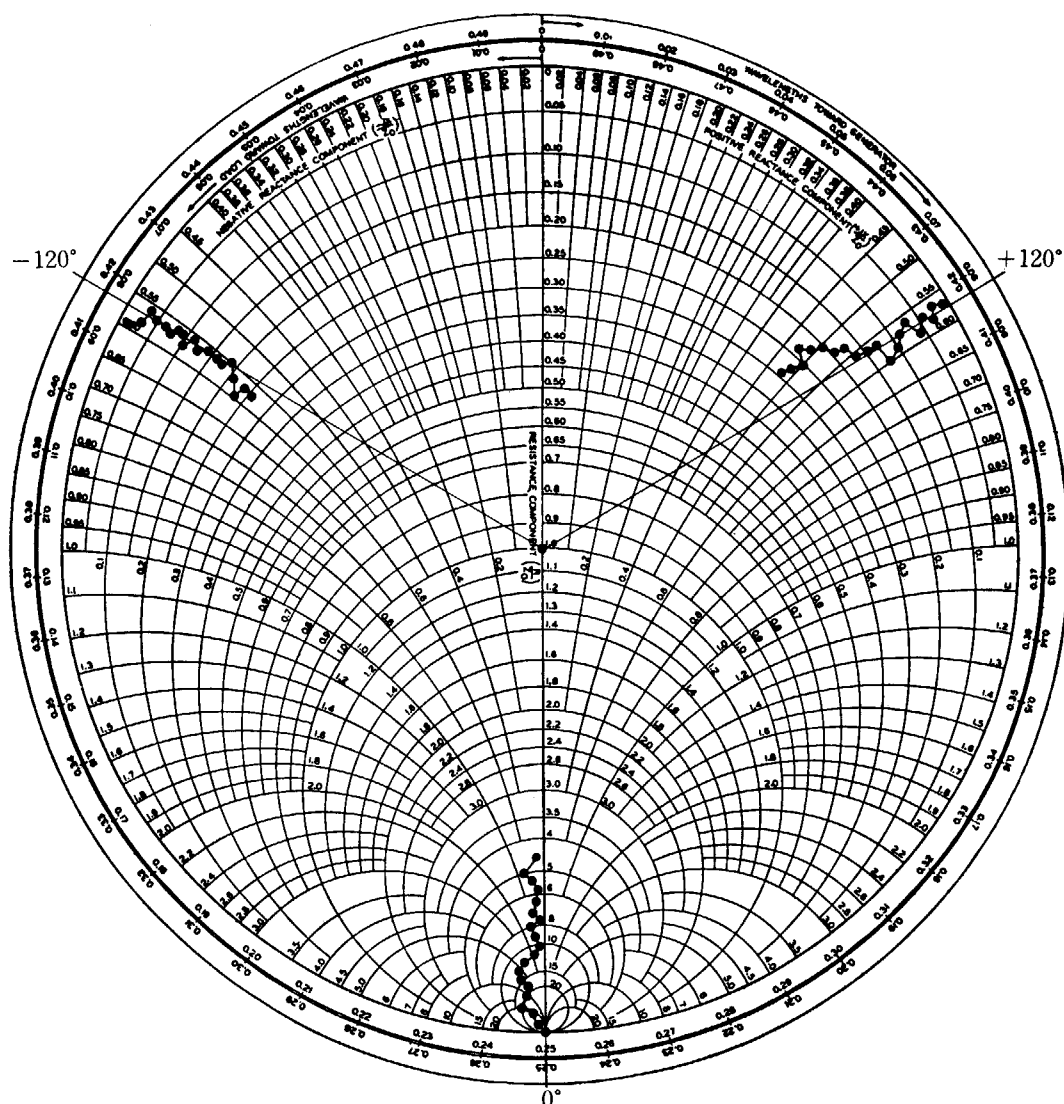


Fig. A.11 Input VSWR versus frequency for accelerator waveguide.



Measured frequency 2855.88 MHz at 27°C in air
(2857.11 MHz at 20°C in vacuum)

Fig. A.12 Uniformity of the accelerator structure.

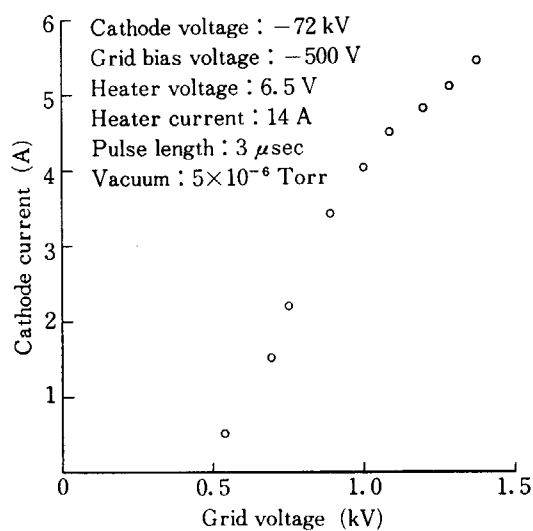


Fig. A.13 Triode characteristics of the electron gun.