

JAERI-M
9345

3MeV 75kW 電子加速器設置報告

1981年3月

四本 圭一・須永 博美・水橋 清
田中 隆一・田村 直幸

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、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（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

3 MeV 75 kW 電子加速器設置報告

日本原子力研究所高崎研究所開発試験場

四本圭一・須永博美・水橋 清

田中隆一・田村直幸

(1981年1月28日受理)

日本原子力研究所高崎研究所では昭和51～52年度に2号加速器(電子加速器)の更新を行った。新加速器は定格出力3 MeV, 25mAのダイナミトロンで、旧加速器の出力3 MeV, 5mAに比べ5倍の出力を有している。本加速器を収納する建家として、旧2号加速器用建家を遮蔽増強などの改造を行って利用した。建家改造工事は52年5月～11月に、加速器の据えつけ調整が12月～53年3月に行われ、所定の性能を有することを確認した。本加速器は昭和53年4月より各種の電子線照射実験に幅広く利用され、順調な稼動を続けている。

JAERI-M 9345

Installation of 3MeV-75kW Electron Accelerator

Keiichi YOTSUMOTO, Hiromi SUNAGA, Kiyoshi MIZUHASHI,
Ryuichi TANAKA and Naoyuki TAMURA

Pilot Scale Research Station,
Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment,
JAERI

(Received January 28, 1981)

New electron accelerator has been installed from 1977 through 1978 as the replacement of 2nd accelerator of TRCRE, JAERI. The rated output of the new machine, Dynamitron IEA 3000-25 is 3MeV, 25mA, which is fivefold increase in beam power as compared with the old machine. The modification of the existing building and reinforcement were required to install the new machine. The renovation of the building started in May and was completed in November, 1977. The installation of the accelerator commenced in December, 1977, and the performance test was completed in March, 1978. The new 2nd accelerator has worked well for the use in the research and development of the radiation processing in these three years.

Keywords; Electron Accelerator, Dynamitron, Radiation Shielding, Ozon Treatment, Dose Distribution, Depth Dose Profile, Beam Current Density, Performance

目 次

1. はじめに	1
2. 加速器更新計画の経緯	1
2.1 更新理由	1
2.2 更新の方針	2
2.3 更新加速器の仕様	2
2.4 機種を選定, 契約	3
3. 建家	6
3.1 旧2号加速器用建家の利用	6
3.2 遮蔽設計	6
3.2.1 遮蔽計算の条件	6
3.2.2 既設遮蔽に対する漏洩線量率の計算	7
3.2.3 建家改造のための遮蔽設計	9
3.3 建家改造	10
3.4 電気, 水設備	11
3.4.1 電気設備	11
3.4.2 水設備	11
4. 安全対策	18
4.1 放射線被曝対策	18
4.1.1 加速器の運転条件と付帯設備の状態とのインターロック	18
4.1.2 警報装置	19
4.1.3 放射線モニター	19
4.2 オゾン処理対策	19
5. 加速器の製作, 据えつけ	22
5.1 工場内組立ておよび試験検査	22
5.2 高崎研での設置工事	23
5.3 検収	24
5.3.1 技術検査項目および方法	24
5.3.2 検査結果	25
6. 設置後の運転経過	32
7. あとがき	32
謝辞	33
参考文献	34

Contents

1. Introduction	1
2. Replacement of electron accelerator	1
2.1 Requirement of the replacement	1
2.2 Replacement plan	2
2.3 Specification of the new accelerator	2
2.4 Selection and contract of the new accelerator	3
3. Building	6
3.1 Use of the existing building for the new accelerator	6
3.2 Design of radiation shielding	6
3.2.1 Basic concepts for calculation of radiation shielding	6
3.2.2 Calculation of leakage exposure rate for the existing shielding	7
3.2.3 Reinforcement of radiation shielding	9
3.3 Modification of the building	10
3.4 Incidental electrical equipments and cooling water supply system	11
3.4.1 Incidental electrical equipments	11
3.4.2 Cooling water supply system	11
4. Safety system	18
4.1 Safety system for radiation protection	18
4.1.1 Interlock system	18
4.1.2 Alarm system	19
4.1.3 Radiation monitoring system	19
4.2 Ozone treatment system	19
5. Manufacture and installation	22
5.1 Tests of fabrication and operation	22
5.2 Installation in JAERI Takasaki	23
5.3 Performance tests	24
5.3.1 The methods of performance tests	24
5.3.2 Results of the performance tests	25
6. Operations after the installation	32
7. Summary	32
Acknowledgement	33
Reference	34

1. はじめに

日本原子力研究所高崎研究所では昭和51～52年度に、それまで使用していた3 MV, 5 mA コッククロフト・ウォルトン形電子加速器を設置した。

これは旧加速器の出力性能が低下し、かつ故障頻度が増大してきたことにもよるが、一方において、照射用電子加速器の製作技術の進歩があり、出力性能のさらに優れた加速器設置に対する開発研究からの強い要請があったためである。

新加速器を設置する建家は、既存建家の有効利用を図る見地より、旧2号加速器用建家を加速器の出力増大に伴う遮蔽補強などの改造を加えて利用した。

本報告は加速器を更新するにいたった経緯、新加速器の機種選定、建家改造のための遮蔽設計、改造工事、加速器の据えつけ調整、および加速器運転に関わる安全系統などについて述べる。

2. 加速器更新計画の経緯

2.1 更新理由

2号加速器を更新するための作業が進められたのは昭和49年秋からである。当時高崎研には1号、2号の電子加速器とX線発生装置である3号加速器の3台の加速器が稼動していた。

これらの加速器は高崎研設立時に計画されたもので、1号加速器はセルロースのグラフト重合中間規模試験を主目的として昭和39年に、2号加速器はトリオキサンの固相重合中間規模試験を主目的として昭和41年に、3号加速器はX線照射実験用として昭和42年に設置されたものである。各中間規模試験の終了後はこれらの加速器は種々の高分子材料の開発や排煙、廃水処理等の環境保全への放射線利用の研究に広く利用されてきた。

Table 1は昭和49年の時点で高崎研で稼動中の加速器の種類と性能を、Table 2は1号および2号加速器の稼動状況を示す。

しかし各加速器は設置後はほぼ10年を経過し、故障発生の増加と老朽化による性能低下が目立つようになり、またメーカーの加速器製造停止に伴って部品の調達が困難になってきた。さらに研究開発の進展、展開に伴って新たに要請される出力条件、照射条件にこれらの加速器では対応できなくなってきた。Table 3には各加速器の主な故障、部品の更新などの状況を示す。国内における放射線利用の中心的な役割をもつ研究機関である高崎研で、加速器照射施設の弱体は重大な問題であり、できるだけ早急に加速器の更新を行うべく、昭和49年11月以後6ヶ月にわたり加速器更新計画に関する所内検討会が開かれ、加速器更新の方針、更新加速器の仕様等が検討された。

1. はじめに

日本原子力研究所高崎研究所では昭和51～52年度に、それまで使用していた3 MV, 5 mA コッククロフト-ウォルトン形電子加速器を設置した。

これは旧加速器の出力性能が低下し、かつ故障頻度が増大してきたことにもよるが、一方において、照射用電子加速器の製作技術の進歩があり、出力性能のさらに優れた加速器設置に対する開発研究からの強い要請があったためである。

新加速器を設置する建家は、既存建家の有効利用を図る見地より、旧2号加速器用建家を加速器の出力増大に伴う遮蔽補強などの改造を加えて利用した。

本報告は加速器を更新するにいたった経緯、新加速器の機種選定、建家改造のための遮蔽設計、改造工事、加速器の据えつけ調整、および加速器運転に関わる安全系統などについて述べる。

2. 加速器更新計画の経緯

2.1 更新理由

2号加速器を更新するための作業が進められたのは昭和49年秋からである。当時高崎研には1号、2号の電子加速器とX線発生装置である3号加速器の3台の加速器が稼動していた。

これらの加速器は高崎研設立時に計画されたもので、1号加速器はセルロースのグラフト重合中間規模試験を主目的として昭和39年に、2号加速器はトリオキサンの固相重合中間規模試験を主目的として昭和41年に、3号加速器はX線照射実験用として昭和42年に設置されたものである。各中間規模試験の終了後はこれらの加速器は種々の高分子材料の開発や排煙、廃水処理等の環境保全への放射線利用の研究に広く利用されてきた。

Table 1は昭和49年の時点で高崎研で稼動中の加速器の種類と性能を、Table 2は1号および2号加速器の稼動状況を示す。

しかし各加速器は設置後ほぼ10年を経過し、故障発生の増加と老朽化による性能低下が目立つようになり、またメーカーの加速器製造停止に伴って部品の調達が困難になってきた。さらに研究開発の進展、展開に伴って新たに要請される出力条件、照射条件にこれらの加速器では対応できなくなってきた。Table 3には各加速器の主な故障、部品の更新などの状況を示す。国内における放射線利用の中心的な役割をもつ研究機関である高崎研で、加速器照射施設の弱体は重大な問題であり、できるだけ早急に加速器の更新を行うべく、昭和49年11月以後6ヶ月にわたり加速器更新計画に関する所内検討会が開かれ、加速器更新の方針、更新加速器の仕様等が検討された。

2.2 更新の方針

前述のように1号、2号、3号の各加速器はいずれも更新の時期にきているが、どの加速器から更新し、その加速器はどのような性能のものにするかについて次の条件を考慮して検討を進めた。

- イ 高崎研の今後の研究開発に最も有用な加速器であること
- ロ 老朽化の状態、保守上の問題点等、問題の多い加速器から更新すること
- ハ 所内の研究の進展をできるだけ妨げないように、2台の電子加速器の稼働ができるだけ中断しないようにすること
- ニ 現有の建家をできるだけ利用して建家の有効利用を図ること

上記の条件をすべて満たす方法はないが、検討の結果まず新加速器の性能については、材料開発、放射線処理、照射損傷、食品照射を高崎研の今後の研究計画として挙げ検討した結果、エネルギーが最大3～4 MeV、ビーム電流20～25 mA程度で、連続した安定なビームが取りだせることなどという結論に達した。3 MeV加速器と4 MeV加速器のどちらを選択するかについては次の理由で3 MeV形にするのが得策ということになった。

- イ 今後の研究計画は3 MeVのエネルギーでできるものがほとんどである。
- ロ 3 MeV加速器の方が安定運転という点で信頼性が高い。
- ハ 3 MeV加速器と4 MeV加速器では価格の点で大きな開きがある。
- ニ 現有建家を利用するとき、3 MeVの方が遮蔽の増強が僅かですむ。

そしてどの加速度を更新するかについては、更新加速器の性能として3 MeV、25 mAの定格をもつものを最優先として選定された結果、まず2号加速器を更新することとした。それは照射室の遮蔽増強、電気設備等の改造が必要であるが、市販の更新の対象となる加速器の高圧タンクの高さ、径など加速器本体の大きさについて設置可能であることによる。

2.3 更新加速器の仕様

所内検討会での検討結果に基づき最終的に決定した更新加速器の性能は次のようになった。

一般性能

本加速器の形式は絶縁ガス封入式多段縦続整流形とし、次の性能を有するものとする。

- イ 最大定格出力：75 kW
 - 加速電圧 3.0 MV
 - ビーム電流 25 mA
- ロ 出力可変範囲
 - 加速電圧
 - 1.0 MVから3.0 MVまで連続可変とする。
 - ビーム電流
 - 加速電圧一定の条件において次の範囲内で可変であることとする。
 - 加速電圧1.5 MV～3.0 MVについては100 μ A～25 mA連続可変であることとする。

加速電圧 1.0 MV から 1.5 MV については加速電圧の低下に伴い最大ビーム電流は漸時低下するものとするが、加速電圧が 1.0 MV においても 100 μ A から 10 mA の範囲で連続可変であることとする。

ハ 安定度

加速電圧安定度

ビーム電流一定の条件において一次側の電源入力の変動が $\pm 10\%$ 以内の場合に最大 ± 60 kV 以内で制御できることとし、1.0 MV から 3.0 MV の全範囲にわたって設定値に対する $\pm 2\%$ の安定度を目標値とする。

ビーム電流安定度

加速電圧一定の条件下で、100 μ A から 2.5 mA の範囲では ± 15 μ A 以内、2.5 mA から 25 mA の範囲では ± 250 μ A 以内で制御できることとし、100 μ A から 25 mA の全範囲にわたって各設定値の $\pm 2\%$ を安定度の目標値とする。

ニ 走査

走査幅

ビーム窓面上における電子線照射幅は出力可変範囲の全域にわたって最大 60 cm とし、ビーム窓面上での電子束密度の許容限界内で 0 から 60 cm の範囲で可変であることとする。

走査角度

37.5 度以内であることとする。

平坦度

照射窓面から 15 cm の平面内における電子流密度分布は走査軸方向について $\pm 5\%$ 以内の平坦度

ホ 連続運転

本加速器は加速器を停止することなく連続自動運転が可能であることとする。

ヘ その他

上記イ～ホの定格仕様に対して次の点を補足する。

ニで述べたビーム窓面における電子流密度の許容限界については本加速器の製作者が限界条件 (mA/cm) を明示し、さらにスポットビーム運転時における出力電流の最大値を明示することとする。

2.4 機種を選定，契約

当時 3 MeV、25 mA 電子加速器を製作していた米国 1 社と製作可能な国内 2 社の加速器メーカーの各仕様、性能、実績等の調査結果をもとに高崎研としての受入れ条件等を勘案して検討した結果、米国 Radiation Dynamics Inc (以下 RDI と略) 製 Dynamitron、最大定格出力 75 kW、電子線エネルギー 3.0 MeV、ビーム電流 25 mA、ビーム電流 0.1～25 mA を選定することが決まった。

選定理由は次に依る。

イ 性能

各社の仕様を検討した結果、多小の差異はあってもほぼ当所の仕様に合致する。

ロ 設置条件

本加速器を既設の2号加速器棟に設置するためには次の制約がある。

- i) 加速器室床の許容荷重は15 tonであるので、加速器室に設置する諸装置は15 ton以下であることが必要である。
- ii) 加速器の出力が大きくなるため、照射室は遮蔽増強を行わなければならないが、床地耐力に余裕がないので床を利用した補強等は一切できない。
- iii) 加速器室及び照射室の遮蔽壁には遮蔽能力並びに壁強度上スリーブ以外の貫通孔を設けることは不可能である。
- iv) 照射室及び隣設作業エリアは開発試験用装置の設置並びに実験作業エリア確保のため、遮蔽増強以外は行えない。

これに基づき各社のデータを比較したところ、RDIのDynamitron(本体及発振器盤重量: 12 ton)については当所の条件に適合するが国内2社の機種は適合しない。

ハ 製作経験

RDIは既に3 MeV 25 mA 2台、3 MeV 12 mA 2台を製作販売しいずれも順調に稼動しており、さらに社内試験用として3 MeV 50 mAを製作している。

昭和51年12月、本加速器購入に関しRDIの日本における取扱い商社である三井物産との間に契約がなされた。

Table 1 Specifications of three accelerators in JAERI Takasaki

加 速 器	1 号	2 号	3 号
線 質	電 子 線	電 子 線	X 線
出 力	2 MeV p 0 ~ 6 mA	1 ~ 3 MeV 0 ~ 5 mA	200 keVmax 1 A max
現 状 出 力 (50年5月)	2 MeV p 0 ~ 3 mA	1 ~ 2 MeV 0 ~ 3 mA	160 keVmax 0.5 A max
走 査 幅	40 cm (2重走査方式)	60 cm	ターゲット面積 (30cm×15cm)×2
線 量 率	6×10^5 rad/sec	5×10^5 rad/sec	10^4 R/min
主圧力容器寸法	直径 1.7 m 高さ 2.7 m	直径 2.6 m 高さ 7.2 m	
設 置 年	39年	41年	42年
メ - カ -	GE	日立	東芝

Table 2 Operation of electron accelerators in JAERI Takasaki
(1971~1974)

年 度		46	47	48	49
1 号 加 速 器	ビーム発生時間 h	499	480	564	463
	照 射 件 数 (全)	481	435	759	685
	” (所外)	28	28	41	44
1~3月運転不能					
2 号 加 速 器	ビーム発生時間 h	160	212	199	595
	照 射 件 数 (全)	154	198	215	367
	” (所外)	14	6	18	13
1~3月運転不能 5~7月運転不能					

- 1) 49年度は老朽化が著しくなり、予備運転に時間がかかるようになったためビーム発生時間が増えた。
- 2) 1号が1~3月運転不能のため、照射申込みが大幅に増加した。時間延長などを行って処理したが一部は照射申込の削減を行った。

Table 3 Troubles on electron accelerators in JAERI Takasaki
(1971~1974)

加速器 年度	1 号	2 号	3 号
46		ロータリーポンプ更新 照射室真空計更新	フィラメント交換
47	ガラスロッド破損	M-G系統故障 ビーム窓破損	イオンポンプ修理 真空系改良
48		高圧ケーブルヘッド絶縁破壊 高圧ケーブル放電溶融	ターゲット破損 フィラメント交換
49	コンプレッサー冷却塔更新 加速管更新 M-G系統オーバーホール 加 速 管 } 損傷 コイルスタック }	加速管更新 加速管排気系オーバーホール 油拡散ポンプ更新	真空系統故障 冷却系熱交換器老朽化

3. 建 家

3.1 旧2号加速器用建家の利用

2で述べたように旧2号加速器用建家(2号加速器棟)に遮蔽補強等必要な改造を加え、それを更新加速器用建家として利用することが決定された。

2号加速器棟はFig.1に示すように一部2階建、建物面積延べ1306 m²で、1階の管理室、制御室、照射室、作業エリア、装置室、2階の加速器室等から成っている。¹⁾このうち照射室は面積61.2 m²で比重2.68、厚さ160 cmの重コンクリート遮蔽壁で囲まれている。照射室出入口扉にはコンクリート製ステップバック式遮蔽扉が用いられている。照射室の上部に位置する加速器室は厚さ80 cmの普通コンクリートで照射室と仕切られている。旧2号加速器のうち高電圧発生回路、加速管等が収納されている主圧力容器は加速器室に、スキャンホーン、加速管内真空排気装置等は照射室に設置されていた。

新加速器は寸法においては旧加速器と多少異なるが、形状は類似しているので、同様の配置で設置することになった。

3.2 遮蔽計算

2号加速器棟に更新加速器を設置するに際し、加速器の出力が3 MV, 5 mAから3 MV, 25 mAに増大するのに伴う放射線遮蔽の増強に関する検討を行った。

3.2.1 遮蔽設計の条件

放射線遮蔽の検討において、次の項目を基本的な条件とした。

1) 線 源

更新加速器は旧2号加速器と同様縦形とし、加速器室に高電圧発生部、加速管などを収納する主圧力容器を置き、照射室にスキャンホーンを設置する。電子線はこのスキャンホーンより床面に垂直に放出される。

遮蔽の対象は電子線自体より透過力のある制動放射X線である。X線発生量はターゲット物質の種類に依存するが、ここではターゲットを銅として計算を行った。これはターゲット物質として銅より原子番号の高い物質は考えていないことによる。Fig.2は照射室内のX線発生源の位置を示す。X線発生源は床面上約1.3 mのビーム窓の位置とする。電子線は最大60 cm幅にわたって走査されるため、X線発生源はそれに応じて一定の幅をもつが、簡単のため点状線源を仮定し、遮蔽壁に近接する走査幅の端部にX線源が位置するものとして計算した。

2) X線の放出強度

制動放射X線の放出強度は電子線の進行方向(0°)が最大となる角度分布を有する。²⁾照射室壁の遮蔽計算では、この角度分布のうち90°方向の放出X線のみを考慮した。

入射電子エネルギーが3 MeVで銅ターゲットの場合の90°方向に放出されたX線の照射線量はBuechnerら²⁾の報告をもとにして、ターゲットから1 m離れた場所で60 R/min・mAとした。すなわち更新加速器の定格出力の25 mAでは 9×10^4 R/h at 1 mとなる。

3) X線のエネルギースペクトル

3 MeV電子に対する制動放射X線のエネルギースペクトルの形をFig. 3のように仮定した。これはMillerら³⁾の1.4 MeV電子に対する実測結果をもとに推定したものである。スペクトルの形はX線の放出方向により異なるが、ここでは90°方向についても安全をみて0°方向のスペクトルを用いた。

4) 許容線量率

遮蔽設計においては人が立入る場所の許容線量率は加速器を最大定格出力で運転した場合でも0.2 mR/h以下となるようにした。

3.2.2 既設遮蔽に対する漏洩線量率の計算

(1) 制御室および作業エリア内の漏洩線量率

制御室および作業エリア内の漏洩線量率に寄与する放射線としては、①ターゲットから放出したX線が照射室遮蔽壁を透過することによるもの ②加速電子線の一部が加速管内の電極に衝突することにより制動放射X線が発生し、これが加速器室の壁や床を通して作業エリアや制御室内に漏洩するもの ③照射室から作業エリアに通ずる迷路を通しての散乱X線によるものが考えられる。

これらのうちまず①は制御室、作業エリアの全域で問題となる。②は発生源が加速器室であり、作業エリア、制御室とも照射室遮蔽壁の近傍ではこの遮蔽壁が有効な遮蔽体となり、したがってこの照射室遮蔽壁より離れた位置で問題となる。また③については迷路の出口付近で問題となる。これらを考慮して、漏洩線量率の計算はFig. 2に示すA~Gの位置について行った。このうちA, B, Cは照射室遮蔽壁の外壁面であり、上記①のみが問題となる位置である。D, E, Fでは②についても考慮する必要がありGでは①と③について考慮する必要がある。

まず①による漏洩線量率 \dot{D}_1 (mR/h)は(1)式により行った。

$$\dot{D}_1 = \sum_{i=1}^n B_i \frac{\dot{D}_0}{r^2} \exp(-\mu_i t) \times 10^3 \quad (1)$$

ここで \dot{D}_0 は3.2.1で述べた線源より1 mの位置における定格出力での照射線量率(9×10^4 R/h), B_i , μ_i はそれぞれFig. 3.3に示したエネルギースペクトルを150 KeV毎に20分割したときの、その i 番目のエネルギー範囲の平均エネルギーに対する線量ビルドアップ係数⁴⁾および質量減衰係数(Table 4), t は遮蔽体の厚さ(g/cm^2), r は線源から対象とする位置までの距離(m)である。

②の放射線についてはメーカー側からのデータとして加速管より約1 mの距離の主圧力容器表面において最大約300 mR/hの値が報告されているのみである。ここではこの放射線のエネルギースペクトルを①の場合と同一と仮定して(1)式により各位置における漏洩線量率を算出した。

③による迷路出口における漏洩線量率については、旧2号加速器の2.5 MV, 4 mAの条件

でバックグラウンドレベルの値が測定されており、これから新加速器を定格出力で運転した場合も0.2 mR/h以下になると予想されたが、電子エネルギー3 MeVの場合を考慮して次のような計算を行った。

本迷路の構造はFig. 2に示すように線源から迷路出口まで最低3回散乱するように設計されている。1回散乱した後の P_2 点の線量率 \dot{D}_2 (mR/h)は(2)式より求めた。

$$\dot{D}_2 = \frac{\dot{D}_0 \cdot A \alpha \cos \theta}{r_1^2 \cdot r_2^2} \times 10^3 \quad (2)$$

ここで A は P_1 で散乱し P_2 に達する放射線に対する有効散乱面積(m^2)、 α は線量微分アルベド、 θ は入射角、 r_1 、 r_2 はそれぞれ線源から P_1 点まで、 P_1 点から P_2 点までの距離(m)を示す。さらに P_2 点に等方線源があると仮定して P_3 、 P_4 点の線量率を同様に求めてきた。

制御室および作業エリア内各位置の漏洩線量率の計算結果をTable 5の“改造前”の欄に示す。これらの計算結果から遮蔽に関して次の結論が得られた。

- 1) A, B, C各位置のいずれも0.2 mR/hを越える線量率が予測されるため、照射室遮蔽壁の遮蔽増強を行う必要がある。
- 2) 加速管内から発生するX線によるD, E, Fの位置における線量率も0.2 mR/hを越えることが予測されるため、加速器室壁および制御室天井の遮蔽補強を行う必要がある。
- 3) 迷路を通しての散乱X線によるG点の線量率は0.2 mR/hより十分低いので迷路の改造は必要としない。

(2) スカイシャインによる建家外の線量率

加速器メーカーからのデータによると、ビーム窓の位置にステンレス製ターゲットを置いた場合、ここで発生するX線のうち電子線の進行方向に対して 180° 方向に放出するものは加速管内を逆に進み、主圧力容器頭部における線量率は200 R/hに達すると予測している。

ここではFig. 4に示すように、このX線が更に建家の天井を透過して大気中に達した場合のスカイシャインによる地表上の線量率について検討した結果を示す。

スカイシャインについてはTrubey⁶⁾が提案している(3)式を用いて計算を行った。

$$\dot{D}_3 = \frac{N \cdot C(E) \cdot \dot{D}(E, \phi)}{l \cdot \sin \phi} \quad (\text{R/h source photon} \cdot \text{sec}^{-1}) \quad (3)$$

ここで \dot{D}_3 は放出光子数が1秒あたり1個の場合の測定点における線量率、 N は空気 1 cm^3 中の電子の数、 E は光子エネルギー、 l は線源より測定点までの距離(Fig. 4参照)、 $C(E)$ 、 $D(E, \phi)$ は E および ϕ により決まる定数である。

(3)式は1次線の空気中の減衰とビルドアップを無視し、1回散乱のみを考慮した計算方法であり、モンテカルロ法による計算結果とよく一致するとされている。

(3)式によればスカイシャインによる地表上の線量率は、光子エネルギーおよびX線放射角が一定であれば、線源から測定点までの距離が短い程高い値となる。しかし(3)式は建家自体による遮蔽効果を考慮していない。2号加速器の場合には l が20 m以下ではこの効果が大きいと考えられるので、 $l = 20 \text{ m}$ の位置における線量率について検討した。光子のエネルギーは実

効的に2 MeVと仮定して計算を行った。その結果放出光子数が1秒あたり1個の場合の線量率は 7.0×10^{-16} R/hという値となった。主圧力容器頂部での線量率200 R/hは加速器の断面積が約314 cm²であるので、光子数は 2.04×10^{10} sec⁻¹となり、したがって $l = 20$ mの位置における線量率は0.014 mR/hとなる。この値は十分安全側の値と考えられるので、この結果からスカイシャインに対する遮蔽補強は不要であることがわかった。

3.2.3 建家改造のための遮蔽設計

上記のように2号加速器棟に更新加速器を設置すると、作業エリアおよび制御室における漏洩線量率が所定の値以上となることが明らかとなり、遮蔽補強を行うことが必要となった。このための遮蔽設計は次の方針に基づき行った。

- ① 加速器の設置位置は変更することなく旧2号加速器の場合と同一とする。
- ② 計算結果にもとづき、補強部分は照射室遮蔽壁、加速器室壁および制御室天井の一部とする。
- ③ 照射室遮蔽壁の遮蔽補強の方法は既設建家の構造上の理由により既設の壁の内側に行うこととする。
- ④ 遮蔽材として比重2.2の普通コンクリートを使用する。

まず照射室遮蔽壁の補強については、既設と同一条件で新加速器を設置した場合に漏洩線量率が最も高くなるA点に着目した。この位置における線量率の算出値は最高1.08 mR/hであり、これを0.2 mR/h、すなわち約 $1/5$ 以下に低減させる必要がある。そのためには普通コンクリートで約20 cmの厚さを要することが報告されている⁷⁾。これをもとにして比重2.2の普通コンクリートで既設壁を20 cm増厚した場合の各点の線量率を計算した。その結果A点の線量率は0.20 mR/hとなり、B点、C点ではこれより十分に低い値が得られた。したがってA点側の遮蔽壁以外の増厚は20 cmも必要としないが、既設の遮蔽壁の厚さが各面とも同一であること、および線源の位置変更にも対処できるように各遮蔽壁とも20 cmの増厚を決定した。なお照射室出入口遮蔽壁、制御室からの視窓についてもこの遮蔽壁の増厚と等価になるような遮蔽補強を行うことにした。

照射室の天井、すなわち照射室、加速器室間の遮蔽体に関しては計算によってその厚さと作業エリアにおける漏洩線量率との関係を求めることは困難である。しかし加速器の更新によるX線出力の増大に対応した遮蔽補強は必要と考えられる。すなわち加速電圧は3 MVで同一であるのでビーム電流増加率(5倍)に対応した遮蔽補強が必要となり、その厚さは上記と同様に普通コンクリート20 cmが相当する。したがって照射室の天井についても20 cmの増厚を行うことにした。

次に主圧力容器内の加速管から発生するX線に対する遮蔽補強について検討した。この放射線に対する遮蔽補強は前述のように加速器室の壁と制御室天井の一部について行う必要がある。まず作業エリア側の遮蔽体である加速器室の壁については、既設の状態で最大の線量率となる位置は作業エリアのE点である。照射室遮蔽壁を通しての漏洩放射線を考慮して、E点の線量率を0.15 mR/hにすることを一応の目安として計算を行った。その結果15 cmの増厚により0.14 mR/hの値が得られたので、15 cmを増厚することにした。この増厚はE点に面する壁だけでなく、F点、G点に面する壁についても同様に行うことにした。

制御室天井の一部、すなわち加速器室床面と共通となる部分の遮蔽補強については、この遮蔽体に入射する放射線の入射角が約 60° であり、薄い遮蔽体でも効果は大きくなる。いま 20 cm 増厚すると仮定すると D 点の線量率算出値は 0.01 mR/h に低減する。したがって計算上はこの部分の遮蔽補強に 20 cm もの増厚は不要である。しかしこの放射線に対しては発生量そのものが予測し難いという不確定要素があるので、施工上の問題点がなければ安全を確保するため、十分な補強を行うことが望ましい。このため 20 cm の増厚を行うことにした。

迷路出口については、照射室遮蔽壁の増厚により、この壁を通しての漏洩放射線量が十分減衰するので、仮に迷路内の散乱線による寄与が 0.05 mR/h あったとしても合わせて 0.11 mR/h 程度である。したがって迷路については改造は行わない。

以上、各部について遮蔽補強を行った後の漏洩線量率の計算値を Table 5 の "改造後" の欄に示す。

3.3 建家改造

上記遮蔽設計に基づく改造および新加速器据えつけのための改造工事を昭和 52 年 5 月より同年 11 月の間に行った。改造を行った主な項目は次の通りである。

- 1) 照射室遮蔽壁および照射室、加速器室間の遮蔽体の増厚
- 2) 照射室出入口遮蔽扉増厚
- 3) 照射室視窓ガラス増厚
- 4) 加速器室壁増厚
- 5) 制御室天井一部増厚
- 6) 加速器室内加速器本体設置部改造

Fig. 5 に改造部分を斜線で示す。

照射室遮蔽壁の増厚については、当初既設壁の外側で行うことで検討をすすめた。しかしこの方法においては建物基礎の杭にかかる荷重がその耐力を越えてしまうことが判明した。そこで Fig. 6 に概略を示すように照射室内の床面をとり除き、地面まで掘り出し、この地面にすべての荷重がかかるような箱状の遮蔽補強部を設ける方法を採用した。この方法により既設建物の杭に新たに荷重をかけることなく遮蔽補強を行うことができるが、その反面照射室内のスペースが狭くなる結果となった。

遮蔽設計では遮蔽補強部の壁の厚さは普通コンクリートで 20 cm としたが、制御室側およびその反対側の壁は施工上の理由により 25 cm 厚となり、更に安全側となった。

照射室および加速器室間の遮蔽体については、現場でのコンクリート打ちが困難なためこの遮蔽補強部の壁の上部に鋼製の I ビームを渡し、その上に 20 cm 厚のプレキャストコンクリートをはめこむ方法により遮蔽補強を行った。

照射室遮蔽壁の増厚とほぼ等価になるよう 7 cm 厚の鉄板を室内側に取付けた。また制御室より照射室内の照射部分を観察するための視窓についても制御室側に比重 6.2、厚さ 8 cm の遮蔽ガラスを取付けることにより遮蔽補強を行った。

加速器室の壁も遮蔽設計の通り 15 cm 厚の普通コンクリートで作業エリアに面する各壁につ

いて補強を行った。この場合、補強部の荷重は建物の杭にかかることになるので、改造前以上に荷重が増加してはならないが、旧加速器に比べ新加速器が軽いので、その差に相当する重量分だけの補強が許容されることになり、その結果遮蔽補強は床面から70 cmの高さまで行った。作業エリアに対する遮蔽はこの高さでも有効であると考えられる。

また制御室天井一部の遮蔽補強は制御室天井のうち、加速器室床面と共通になる部分12.6 m²を対象としたものである。この場合も制御室の該当部合の床面をとり除き、地面を掘り出し、ここに20 cm×20 cmの鋼製角柱4本を立て、これに渡したIビーム上に20 cm厚のプレキャストコンクリートを並べるという工法を用いた。

その他新加速器据えつけのため、加速器室内の旧加速器設置部分の直径2.5 mの穴をふさぎ、ここに新加速器のドリフトチューブ貫通用の30 cm φステンレス管の布設などを行った。

3.4 電気、水設備

3.4.1 電気設備

建家の改造および新加速器の設置に伴い、次の電気設備工事を行った。

1) 加速器用電源更新工事

旧加速器用の電源として用いられていた6.6 kV/3.3 kV 100 kVAの3相変圧器を撤去し、新たに新加速器用として6.6 kV/440 V 250 kVA 3相、6.6 kV/380 V 75 kVA 3相の変圧器を屋外に設置し、440 V/220 V 5 kVA 単相の変圧器を加速器室に設置した。6.6 kV/440 V変圧器は新加速器の主電源、6.6 kV/380 V変圧器はガスハンドリングシステムおよびビーム窓冷却ブロー用電源に、そして440 V/220 V変圧器は加速管内真空排気系統および加速器制御盤用電源として用いられる。これらの変圧器の2次側は加速器室内に設置された分電盤に接続され、これより加速器各部へ電力が供給される。

2) 照射室およびコントロール室電気設備更新工事

建家改造工事に伴い、照射室については既設照明器具、コンセント等を撤去し、新たに400 W水銀灯4灯、400 Wナトリウム灯4灯、蛍光灯2灯、20 W非常灯(蛍光灯)1灯と、コンセント2ヶ所、火災報知器用空気管をとりつけた。また制御室の天井改造部分については40 W×2蛍光灯3灯および火災報知器用空気管をとりつけた。

3.4.2 水設備

更新加速器 Dynamitron IEA 3000-25-2形電子加速器ではTable 6に示すように冷却のため、加速器各部へ所定の流量、温度、圧力の水を供給する必要がある。このため、Fig. 7に系統図を示す冷却水供給設備を設置した。クーリングタワーや加圧ポンプなどは屋外に設置、加速器室内には加速器各部への接続部があり、ここに各系統の流量、温度、圧力を示すメーターが備えられている。

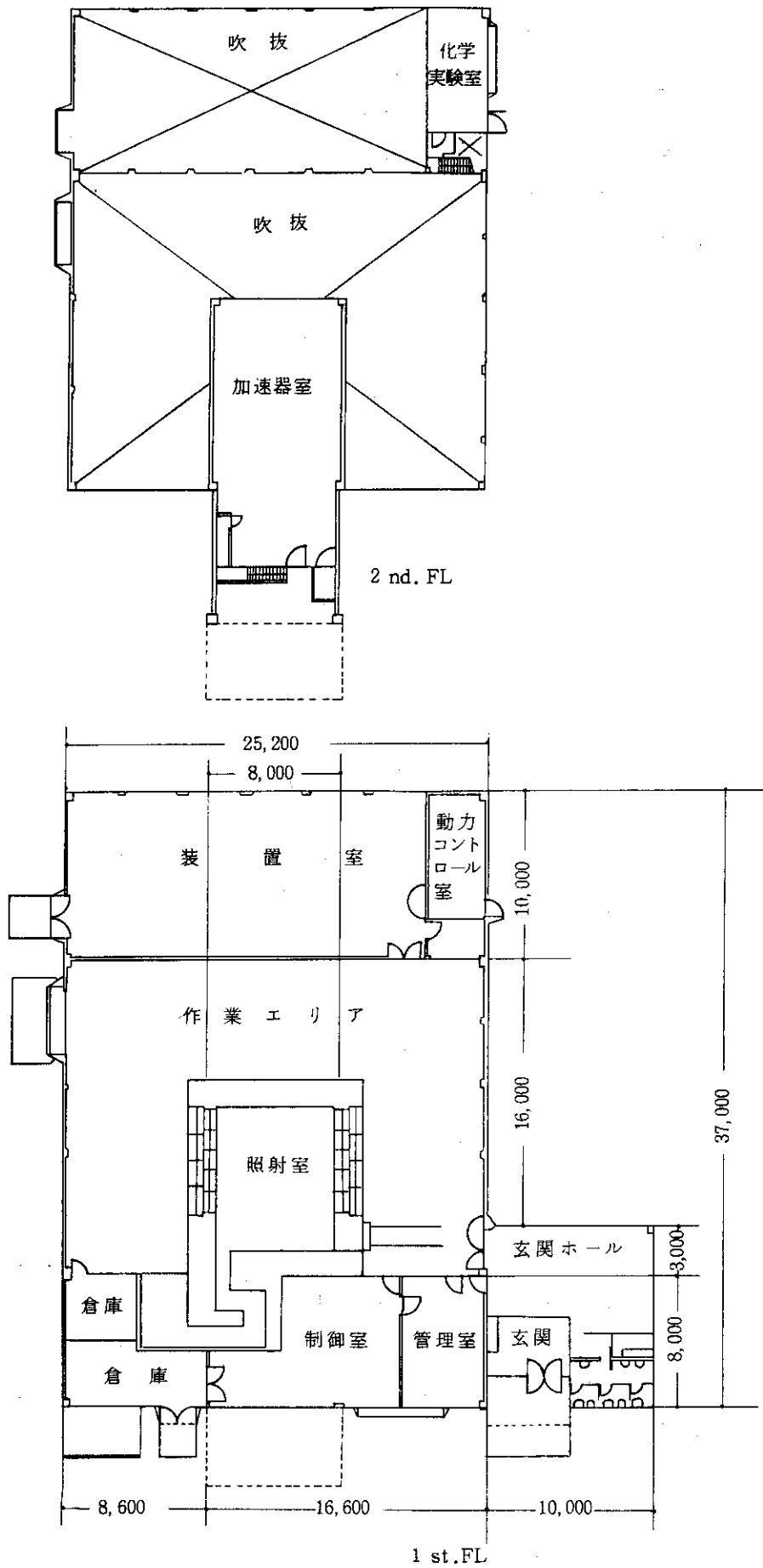


Fig. 1 Layout of building for the accelerator (before modification)

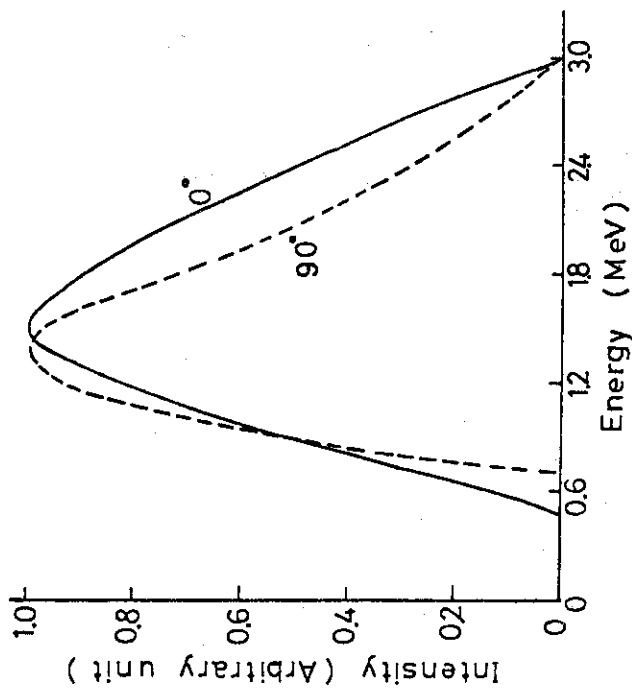


Fig.3 Energy spectra of X-ray produced with 3 MeV electron beam

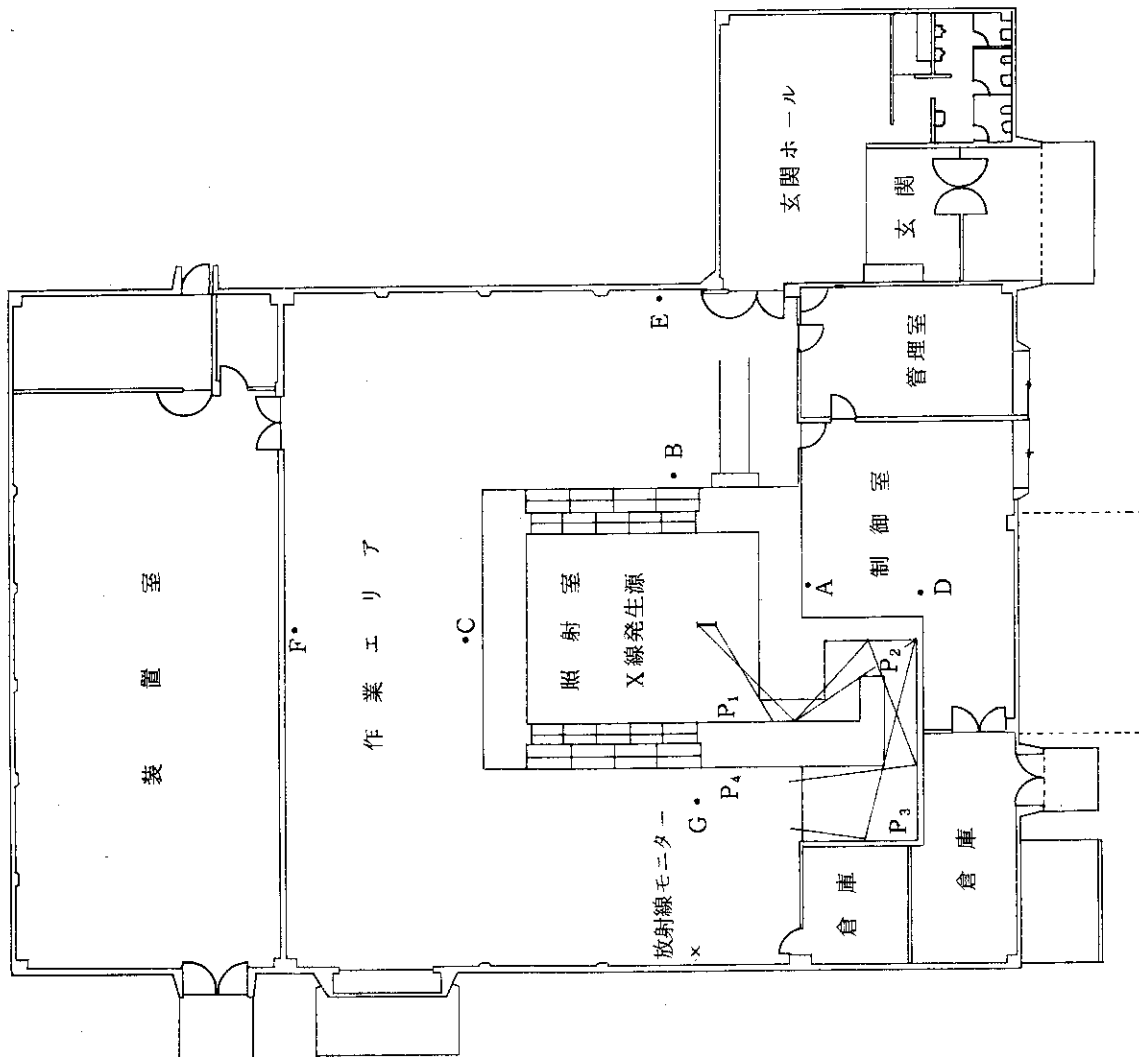


Fig. 2 The position of X-ray source

Table 4 Energy dependence of mass attenuation coefficient

Energy Range	Mass Attenuation Coefficient	Energy Range	Mass Attenuation Coefficient
(MeV)	(cm ² /g)	(MeV)	(cm ² /g)
3.00 - 2.85	0.0365	1.80 - 1.65	0.0470
2.85 - 2.70	0.0378	1.65 - 1.50	0.0490
2.70 - 2.55	0.0388	1.50 - 1.35	0.0519
2.55 - 2.40	0.0400	1.35 - 1.20	0.0545
2.40 - 2.25	0.0410	1.20 - 1.05	0.0580
2.25 - 2.10	0.0422	1.05 - 0.90	0.0620
2.10 - 1.95	0.0435	0.90 - 0.75	0.0670
1.95 - 1.80	0.0452	0.75 - 0.60	0.0730

Table 5 Calculated values of leakage exposure rate at several positions

放射線源	位置	A		B		C		D		E		F		G	
		改造前	改造後	改造前	改造後	改造前	改造後	改造前	改造後	改造前	改造後	改造前	改造後	改造前	改造後
①	改造前	1.08		0.55		0.26		0.24		0.01		0.01		0.33	
	改造後		※ 0.20		0.10		0.04		0.04		0.002		0.002		0.06
②	改造前	-		-		-		0.51		0.50		0.38		-	
	改造後		-		-		-	0.01		0.14		0.11		-	
③	改造前	-		-		-		-		-		-		0.05	
	改造後		-		-		-	-		-		-		-	0.05
計	改造前	1.08		0.55		0.26		0.75		0.51		0.39		0.38	
	改造後		0.20		0.10		0.04		0.05		0.14		0.11		0.11

単位 mR/h

※改造により25 cmの増厚となり0.13 mR/hとなる。

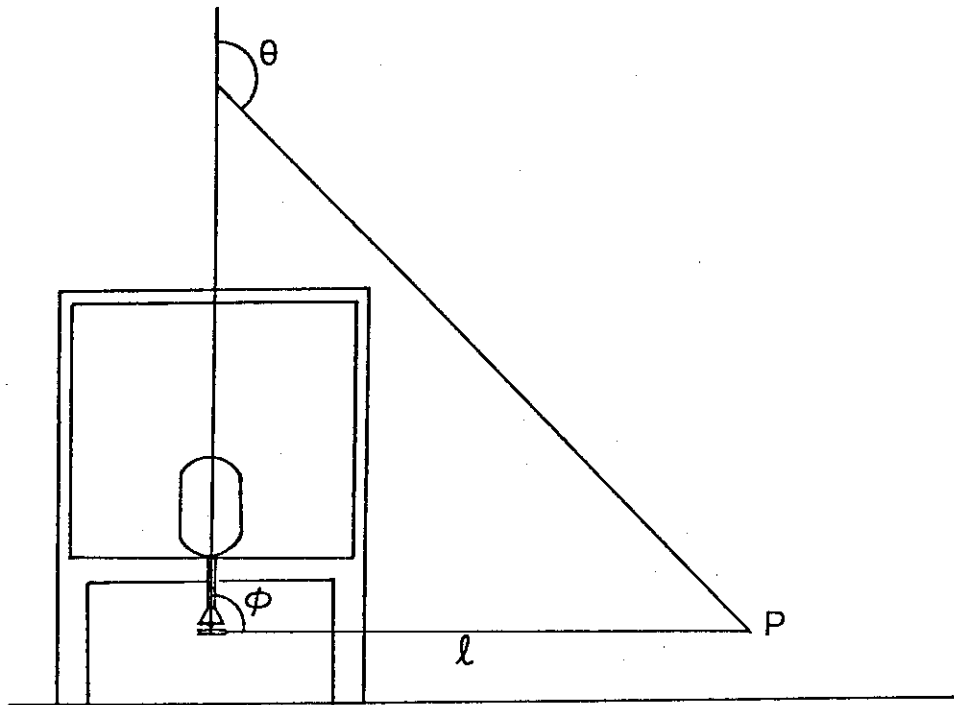


Fig.4 Geometrical configuration of skyshine

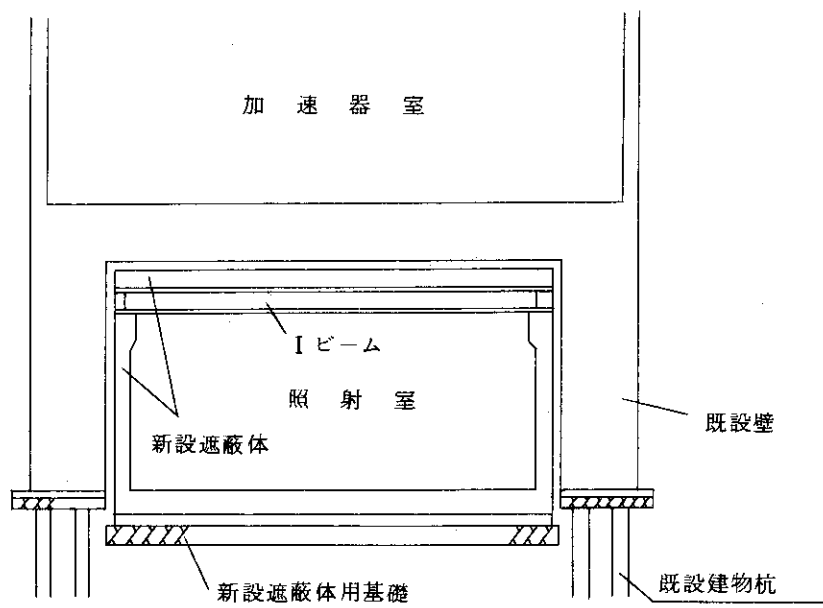


Fig. 6 Shielding modification for the irradiation room

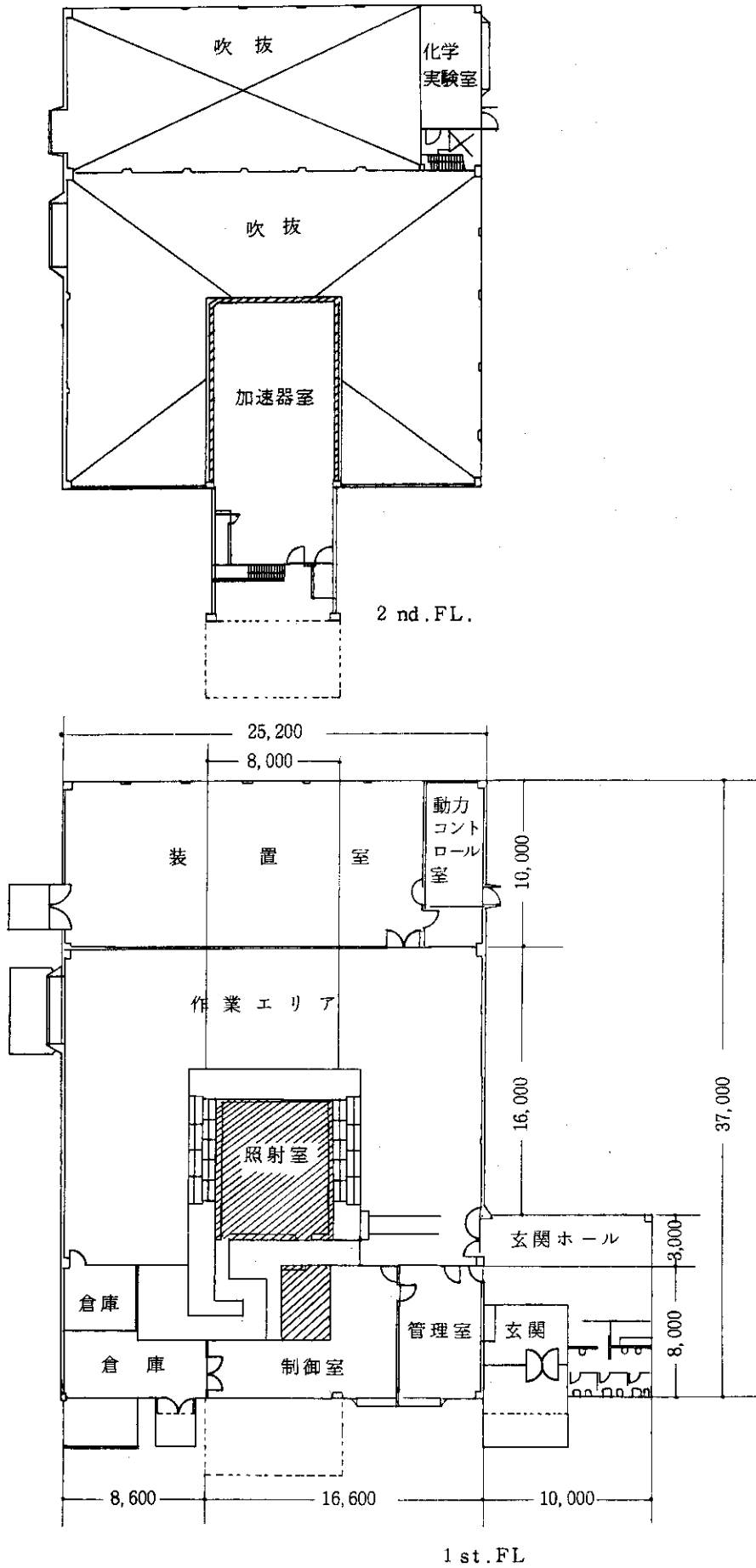


Fig. 5 Building modification for the accelerator (shaded parts)

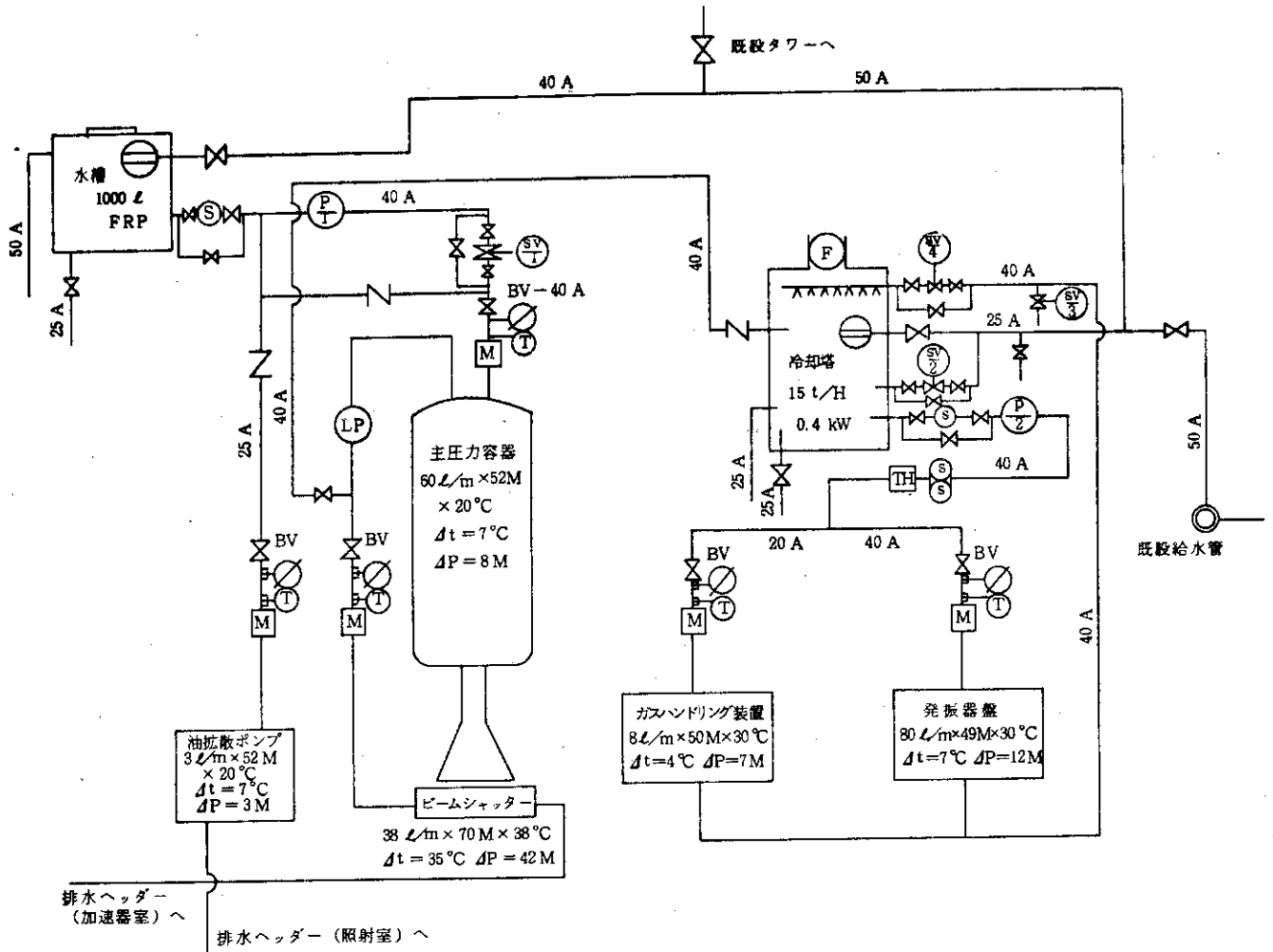


Fig. 7 Flow diagram of the cooling water supply system

Table 6 Requirements of cooling water for the accelerator

名 称	所要流量	水圧 (最高)	水温 (最高)
主 圧 力 容 器	60 l/min	75 PSI	20 °C
発 振 器 盤	80	70	30
ガスハンドリングシステム	8	75	30
真 空 排 気 系	3	75	20
ビームシャッター	38	100	38

4. 安全対策

更新加速器の運転に関わる安全対策として、(1)人の放射線被曝を防ぐための対策および(2)照射室内で発生するオゾンの処理について検討を行った。

4.1 放射線被曝対策

加速器を運転中、施設内立入者の放射線被曝を防ぐための対策として、(1)加速器の運転条件と遮蔽扉等付帯設備の状態とをインターロックすること、(2)ブザーや表示器などの警報装置の設置、(3)放射線モニターの設置等の措置を構じた。これらについての概要を以下に述べる。

4.1.1 加速器の運転条件と付帯設備の状態とのインターロック

加速器運転中に立入りを禁止すべき場所は、高線量率の放射線の間となる照射室および加速器室である。したがって (イ)加速器運転中はこれらの部屋に入れない。(ロ)室内に入っている場合には加速器の運転はできないという条件を満たすことを基本とするインターロックシステムを設置した。

加速器の運転とインターロックする設備として、照射室および加速器室の出入口扉、室内作業スイッチ、照射室内非常スイッチがある。これらの状態と加速器の運転条件との関係を Table 7 に示す。すなわち出入口扉、“開”作業スイッチ“作業中”非常スイッチ“ON”の状態に一つでもなると加速器を運転することはできない。また加速器運転中は照射室出入口扉は開くことができない。ただし、いかなる場合でも照射室内に設置された非常ボタンを押して“ON”の状態にすると、照射室出入口扉は開き、運転中の加速器は停止する。

照射室への立入りに際しての立入者の必要な操作は、扉が開いた後、室内の作業スイッチを“作業中”にすることである。これにより加速器は運転不能な状態になるとともに扉も動作不能な状態になり、照射室内に閉じ込められることもなくなる。この作業スイッチの操作の励行を促すために室内にブザーが設置されており、立入りの際扉が開き始めてから“作業中”のスイッチが入れられるまで鳴動するようにした。また作業終了後は“作業完了”にすることにより扉を動作させることが可能になるとともに、このブザーが鳴動し、照射室内に残った人が居れば速かに退出することを促す役割を果す。Fig. 8 はこれら加速器の状態、立入者の動作、室内ブザーの動作の関係を示す。

加速器室については出入口扉が電動式でないため、加速器運転中は扉を開くことを自動的に不能な状態にすることはできないが、扉の鍵を加速器操作用の鍵と一体として管理することにより、加速器運転中は扉を開くことができないようにした。扉が“開”、作業スイッチが“作業中”の状態では加速器が運転不能の状態になることは照射室の場合と同じである。

照射室、加速器室の出入口扉、作業スイッチの状態は制御室内の監視盤内のインターロック表示盤に表示される。

4.1.2 警報装置

加速器運転中には、制御室内、照射室入口、および作業エリアに設置した“照射中”を示すフリッカー式表示器が点灯し、各室への立入者に対し、加速器の状態を表示する。また、この表示器はブザーを内蔵しており、表示器点灯中は鳴動し、表示に対する注意を喚起する。

4.1.3 放射線モニター

加速器運転中の作業エリアおよび加速器室の漏洩線量率を測定するための放射線モニターを設置した。このモニターは応用技研(株)製AE-790形で、円筒形電離箱式で、実効電離容積は1.1ℓである。測定範囲はバックグランドレベルから100mR/hまでで、1、10、100mR/hフルスケールの3レンジ切換方式となっている。検出部の設置位置は、作業エリアについては最も線量率が高くなる可能性がある迷路側壁面(Fig. 2に図示)とし、加速器室については入口部の壁面とした。加速器室には運転中に立入らないが、加速器の主圧力容器内の加速管部から発生するX線が、作業エリアや制御室の漏洩線量率を高める原因になるので、この値を適格に求めるために設置したものである。漏洩線量率の指示は制御室内で読みとる。

4.2 オゾン処理対策

加速器の運転により照射室内で発生したオゾンを含む排気ガスによる大気汚染を防止する目的で、オゾン処理装置を設置した。

旧2号加速器の場合には、オゾン処理は行わず、照射室内を11,000m³/hの速度で換気し、地上高13mの位置より建家外へ排出する空気希釈方式をとっていた。新加速器では出力が大きくなり、排気中のオゾン濃度が高くなることが予想されたため、排出口でのオゾン濃度を計算および実験から評価し、さらに着地濃度の規制値を0.05ppm以下として、検討した結果、オゾン処理を行った後、排気することに決定した。オゾン処理装置の基本設計は原研で行った⁸⁾

換気方式は旧2号加速器の場合と同様に照射室全体を換気する方式とし、室内における作業がし易い方式とした。Fig. 9に装置の系統図を示す。オゾンを含んだ空気は照射室内の一角に位置する吸気口より吸引され、50cmφのダクトを通して作業エリアに設置された処理槽に導かれる。処理剤としては活性炭配合固形剤である品川白煉瓦(株)製「セカードMR-4」が用いられ、この処理槽中に1.9m×1.9m×厚さ1mの内容積で充填した。処理剤のみかけの比重は約0.5であり、処理剤重量は約1.8トンとなる。オゾンを含んだ空気はこの槽を接触時間が1.2秒となる線速で流れ、その後ダクトで加速器室に導かれ、ブローを経て地上高13mの位置より屋外へ排出される。ブローは排気量11,000m³/h、静圧740mmAqのターボファンで、処理槽の2次側より吸引する方式で使われている。

本加速器の出力範囲内では1.5MV、25mAで運転した場合のオゾン濃度が最大となり、約100ppmと算定されるが、この状態で100時間にわたり処理剤が破過することなく使用できるよう設計した。実測の結果、最大濃度は約40ppmで、処理後の濃度は常に1ppb以下となり、この値は加速器の運転時間(高電圧印加時間)が1600時間を越えた56年1月現在でも変わっていない。

「セカード」によるオゾン処理は「セカード」中に配合された活性炭とオゾンが反応し、その結果CO₂が生成することを利用したものである。

Table 7 Interlock function in the accelerator running condition

インターロック設備	加 速 器 運 転		備 考
	不 能	可 能	
照射室出入口扉	開	閉	加速器運転中扉動作不能
作業スイッチ	"作業中"	"作業完了"	"作業中" は扉動作不能
非常スイッチ	"ON"	"OFF"	"ON" で扉が開動作をし、 運転中の加速器は停止する。
加速器室出入口扉	開	閉	
作業スイッチ	"作業中"	"作業完了"	

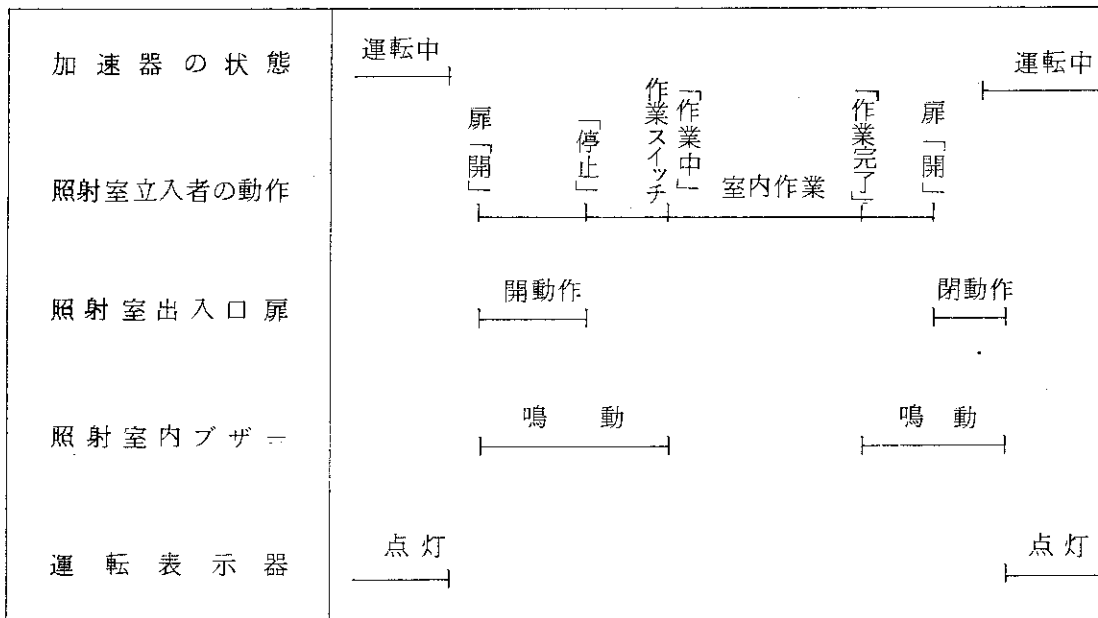


Fig. 8 Safety plan for the workers entering the irradiation room

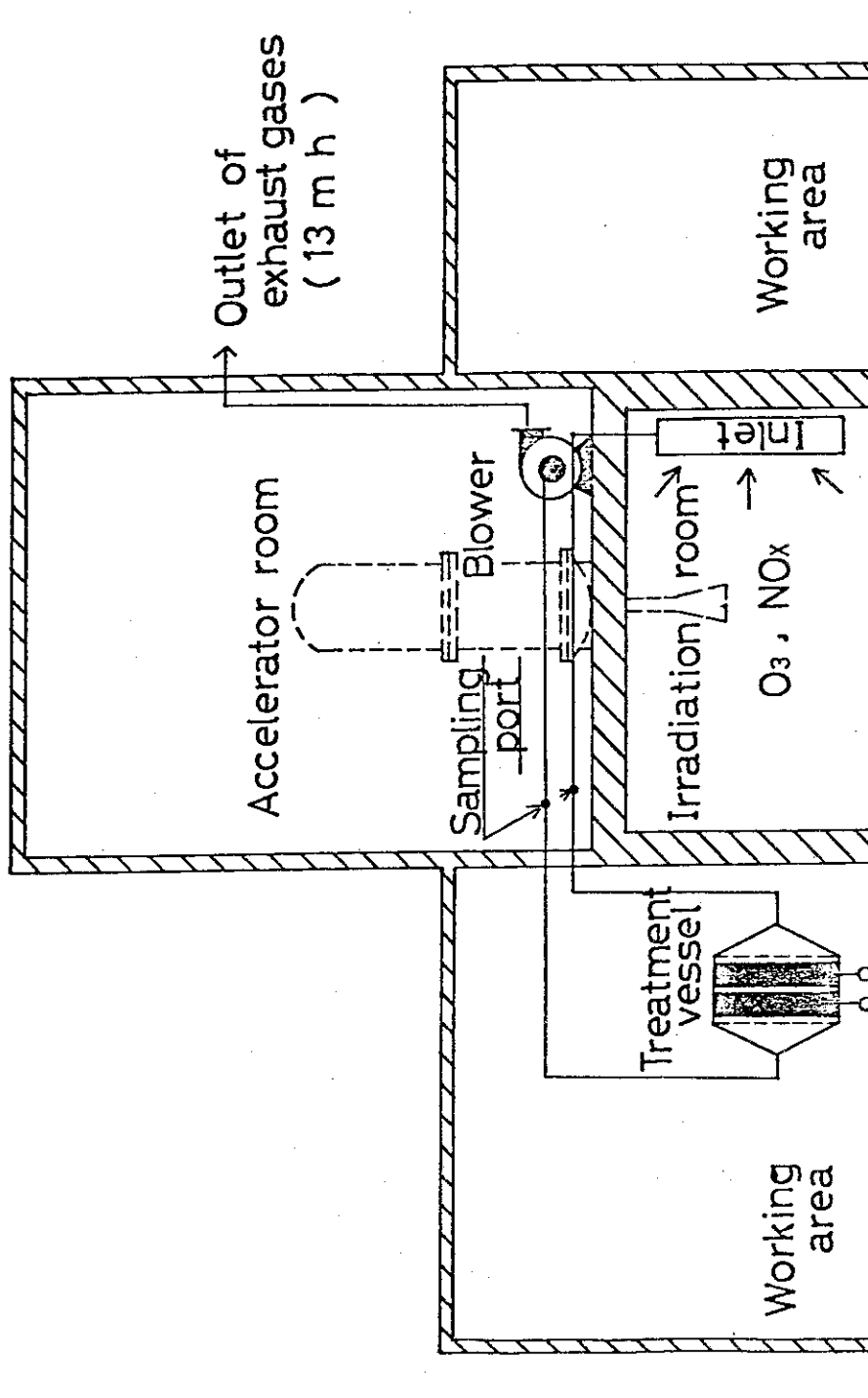


Fig.9 Ozone treatment system

5. 加速器の製作, 据えつけ

5.1 工場内組立ておよび試験検査

契約後, アメリカ, ニューヨーク州のRDIの工場において装置の製作がすすめられ, 昭和52年10月初めに工場内における組立てが完了した。この段階で, 工場内試験検査立会いのため, 原研から担当者を1名派遣した。

10月12日にはじめて装置に電源を投入し電圧上昇試験を開始し, 翌日には順調に定格値3MVまで昇圧することができた。つづいてビームをとりだすための試験運転にはいった。この運転ではまず, ビーム窓面におけるビームスポットの位置, 走査ビームの位置, 幅などの観察, 調整が行われ, その後徐々にビーム量を増やした。そして10月24日には定格出力の3MV, 25mAでの運転までに達した。しかしこの場合には15分で装置が停止してしまった。原因はスキャンホーンの一部にビームがあたり発熱し, 一部が溶解したことによる。

この故障をはじめとして, 出力上昇試験運転においては, スキャンチェンバーの一部にビームがあたったことによる溶解, 放電によるrfコイルの損傷, 加速電圧を制御するSCRコントローラの故障などが生じた。

しかし10月26日には最大定格において2時間をこえる運転に成功した。

このように多小のトラブルはあったものの, はじめて電源を投入してからわずか15日間で所定の出力の運転に成功した。

また, 試験検査要領に基づき, 次の項目についての試験検査が行われた。

1) 外観および寸法検査

イ. 主圧力容器 ロ. ドリフトチューブ ハ. 真空システム ニ. スキャニングシステム

2) 出力試験

イ. 回路試験および動作確認

a. 高電圧分割抵抗部 b. ビーム電流測定回路 c. インターロック回路

d. 真空度測定部 e. 加速器運転制御部 f. ビームシャッター

g. ビーム窓冷却用ブローア h. ガスハンドリングシステム

i. スキャニングシステム

ロ. 所要電力および冷却水量

a. 発振器 b. 主圧力容器 c. ビームシャッター

ハ. 主圧力容器周囲の放射線線量率

3) ビームテスト

イ. 1.0MV, 3.0MVのビームスポットおよび次に示すビーム電流での試験運転(各20分間)

加速電圧	ビーム電流			
	0.1 mA	1.0	10	25
3.0 MV	0.1 mA	1.0	10	25
1.0 MV	0.1	1.0	10	

ロ、深部線量分布を求め、加速電圧の推定を行う。

これらの試験検査の結果、いずれも仕様を満たす動作性能を示すことが確認された。なお、2) -ハについては主圧力容器より1 mの位置で、加速電圧上昇時に最高1.5 R/hを越える値となることがわかった。

5.2 高崎研での設置工事

昭和52年12月17日にRDIより高崎研へ装置が搬入された。それまでに国内で製作したタンク回転治具、SF₆ガス貯蔵タンクがRDIの代理業者である四国変圧器(株)より搬入され、据えつけを行うとともに加速器のスキャンホーン支持台のとりつけ作業など、加速器設置準備作業が行われた。

装置の搬入は11 tonトラック2台で行われ、またタンクの建家内搬入のため10 tonクレーン車も1台準備された。

主圧力容器の建家内への搬入は建家備えつけの5 tonクレーンで頭部を吊り、底部を10 tonのクレーン車で保持することにより行った。そして年内のうちに加速器各部の定置、組立て作業を完了した。

昭和53年1月に入り、電気配線工事、冷却水用配管工事、SF₆ガス用配管工事を行い、冷却水、SF₆ガス漏れテストなどを完了した。以上の作業はすべて四国変圧器(株)により行われた。

1月31日にはRDIのスーパーバイザー(1名)が来所し、早速スケジュールの打合わせ、それまでに行った作業についての点検、真空系内リークテスト、タンク内へのSF₆ガス詰めなどを行い、2月10日、はじめて電源を投入した。

2月12日には電圧上昇を開始し、その日のうちに3.1 MVまで上昇させることができた。続いてビーム窓面におけるビームスポットおよびスキャンビームの形および位置を窓面に塩化ビニルフィルムをセットすることにより観察し、必要な調整を加え、電子ビームを徐々にとり出す運転に入った。

2月18日には定格出力である3 MV、25 mAでの運転(15分間)まで到達した。この段階で、検収試験項目のうちの1) ビーム電流のメーター指示値と実際に放出されるビーム電流との関係を実測して求める。2) 1 MV 10 mA、2 mA、3 MV 0.1 mAの各条件において2時間連続運転および安定度の測定などを行った。これらの試験結果については5.3.2に示す。

その後定格出力で8時間連続運転を行う試験に入った。この場合照射熱の除去のため照射室内のピット(床面下、深さ1.4 m)のふたをとり、この中に水を流し、ここに電子線を入射させて運転を行った。ピット内の水のレベルはITVで観察を行い、また水の排出用のポンプの運転制御はコントロール室より行った。

しかし定格出力での8時間連続運転はなかなか達成することができなかった。短い場合で数分、長い場合で6時間余りの運転で主圧力容器内でアークが発生し、装置が停止してしまうためであった。この原因を調査するため、10回程主圧力容器を開いて内部の点検を行った。この点検で指摘、調整が施された主な点は

- i) 高周波トランスのコイル素子の位置調整
 - ii) 高周波電極と主圧力容器壁との間隔調整
 - iii) 整流スタック集合体の位置調整
 - iv) 加速管排気系の油拡散ポンプのヒーター出力不足
 - v) ビーム制御信号伝達用ロッドの軸受部（デルリン製）に放電破壊痕を発見，この部分は全部で3個あるが，放電痕のない中心の一つを残して他の2個は取り除く。
- などであった。結果的にはv)で示した部分も最もアーク発生による運転停止に関連していたように思われた。

定格出力における8時間連続運転が達成されたのは3月24日となった。2月23日にこのための運転を開始して以来約1ヶ月を費した。

翌3月25日，ビーム窓下15 cmの位置におけるビーム走査方向の電子流密度平坦度が適正であるかの測定，および必要な調整を行い，仕様を満たしていることを確認した。なおこの日より他に1名の技術者が来所し，調整にあたった。更に3月26日には原研の運転員に対する運転指導その他の説明があり，この加速器の据えつけ調整すべてが完了した。

5.3 検 収

5.3.1 技術検査項目および方法

次に示す方法により技術検査を行ない，仕様を満たすかどうかを検査した。

(1) 加速電圧

- a) 加速電圧については制御盤上に指示される高電圧発生装置の発生電圧によって規定するものとし，RDI社が提出する測定回路及び測定用抵抗の試験成績表について検査を行なう。
- b) 制御盤上での加速電圧の設定値が1.0 MV，2.0 MV，3.0 MVの各場合について加速電圧の評価を行なうこととし，その方法は照射窓下大気中においてフィルム線量計等を用いて行なう深部線量分布の測定から得られる電子線エネルギーによるものとする。

(2) 出力ビーム電流

- a) 出力ビーム電流については制御盤上に指示される加速管内電流により規定するものとし，RDI社が提出する測定回路について検査を行なう。
- b) 照射窓下大気中におかれた水等のターゲットに入射する電子流を次の各運転条件について測定し管内電流の評価を行なう。

加 速 電 圧：	1.0 MV	2.0 MV	3.0 MV
出力ビーム電流：	0.1 mA，	1 mA，	5 mA，
	15 mA	20 mA	25 mA

(3) 連続運転

- a) 3.0 MV 25 mA で8時間の連続運転を行なう。
- b) 1.0 MV 10 mA で2時間の連続運転を行なう。
- c) 3.0 MV 100 μ A で2時間の連続運転を行なう。

d) 2.0 MV 2 mA で2時間の連続運転を行なう。

(4) 安定度

3) 項に示した連続運転時における加速電圧, 出力電流を記録計により測定し, 一定の時間内での安定度について検査する。

(5) 走査幅および平坦度

照射窓下 15 cm における電子流密度分布, 又は線量分布を出力ビーム電流一定の条件で, 加速電圧 1.0 MV, 2.0 MV, 3.0 MV の各場合について測定し, 走査幅および平坦度について検査する。

5.3.2 検査結果

(1) 加速電圧

a) 測定回路の検査

加速電圧の測定は Fig. 10 に等価回路で示すように高電圧端子から高抵抗を通してアースへ流れる電流を測定し, この電流値 (High Voltage Divider Current) から加速電圧を求める方法をとった。高抵抗は $22\text{ M}\Omega$ の抵抗を6個接続したものを一単体とし, これを計 206 単体直列に接続したものとして構成されている。

この高抵抗に流れる電流と両端の電圧との関係は実測により校正されている。実測方法は各単体ごとに一定電流を流したときの両端電圧を測定し, それを合計する方法を用いており, これらのデータは RDI より提出されている。Fig. 11 には High Voltage Divider Current と加速電圧との関係を示す。

b) 深部線量分布

三酢酸セルローズ (CTA) 線量計を用いて, メーター指示加速電圧 1.0, 2.0, 3.0 MV における CTA 中の深部線量分布を測定した。試料の照射位置はビーム窓下 20 cm として, 静止状態で照射を行った。測定結果を Fig. 12 に示す。同図には参考のため, CTA に対するポリスチレンの阻止能比を用いて換算したポリスチレン内の深部線量分布も示す。ポリスチレンは深部線量分布データの標準的物質としてよく用いられているので, 信頼できるポリスチレンに対する計算結果⁹⁾と Fig. 5.3 の結果とを比較した。比較は深部線量分布のピークに対応する深さ, 曲線の尾部を外挿して求めた飛程 (外挿飛程) を比べることにより行った。

その結果, 測定値はこれらの結果と良い一致を示すことが確認された。したがって本装置の加速電圧メーター指示値は CTA 中の深部線量分布から推定する限りにおいては正しい値を示しているといえる。しかし深部線量分布からは厳密にエネルギーを決定するのは困難であり, より精密な方法を今後検討する必要がある。

(2) 出力ビーム電流

a) 測定回路

出力ビーム電流検出のため, Fig. 10 に等価回路で示すように電流計がアースと高電圧発生回路との間に接続されている。この電流計指示値は, 真のビーム電流と High Voltage Divider を流れる電流との和を与える。

しかし本装置においては、この全出力電流から High Voltage Divider Current を差し引いた値を指示するための別電源 (Negating Power Supply) が付属しており、真のビーム電流の測定が可能な回路となっている。

b) 入射ビーム電流測定

スキャンホーンの下に $1\text{ m} \times 0.84\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ (深さ) のステンレス製容器を置き、これに水を満たして電子線吸収用のターゲットとした。このターゲットとアース間に接続された電流計により入射ビーム電流を測定し、制御盤上のメーター指示値をチェックした。測定結果を Fig. 13 に示す。この結果をまとめると Table 8 のようになる。

加速管を通過したビーム電流のうち、水ターゲットに吸収されないビーム電流分としては次の3つが考えられる。

- i) ビーム窓での損失¹⁰⁾ (後方散乱を含む)
- ii) ターゲットからの後方散乱¹¹⁾
- iii) ビーム窓での前方散乱および空気層での散乱により幾何学的にターゲットに入射しない電流

これらの寄与のビーム電流に対する割合を計算で求めると Table 9 で示す値となる。

以上の結果を考慮すれば、2 MV, 3 MV について、制御盤上のメーターは妥当な値を示し、これにより本装置のビーム電流測定回路は正しく機能していることが確認された。

1 MV について測定値が小さい理由は上記 iii) の寄与が相当あるためと考えられる。

(3) 連続運転性能

5.3.1, (3) 項で示した各条件についての連続運転をすべて行った。Fig. 14 に 3.0 MV, 25 mA の場合の加速電圧、ビーム電流、真空度を記録した結果の一部を示す。

(4) 電圧、電流の安定度

加速電圧およびビーム電流の安定度の検査は、前記連続運転の記録結果全体に対して行い、加速電圧、ビーム電流の変動が許容値の範囲内にあることを確認した。

(5) ビーム走査幅および電子流密度の平坦度

ビーム窓下 15 cm の距離において、電子流密度測定器をビーム走査方向に一定速度で移動させながら電子流密度分布を測定し、ビーム走査幅および電子流密度の平坦度が仕様を満たすかどうか検査を行った。その結果、加速電圧 1.0, 2.0, 3.0 MV についてビーム走査方向 60 cm にわたり $\pm 5\%$ 以内の平坦度が得られ、仕様が満たされていることが確認された。Fig. 15 に測定結果を示す。

(6) 検査結果

以上、加速電圧、出力ビーム電流、連続運転性能、加速電圧およびビーム電流の安定度、ビーム走査幅、および電子流密度の平坦度についての技術検査を行った結果、所定の性能を満たしていることを確認した。

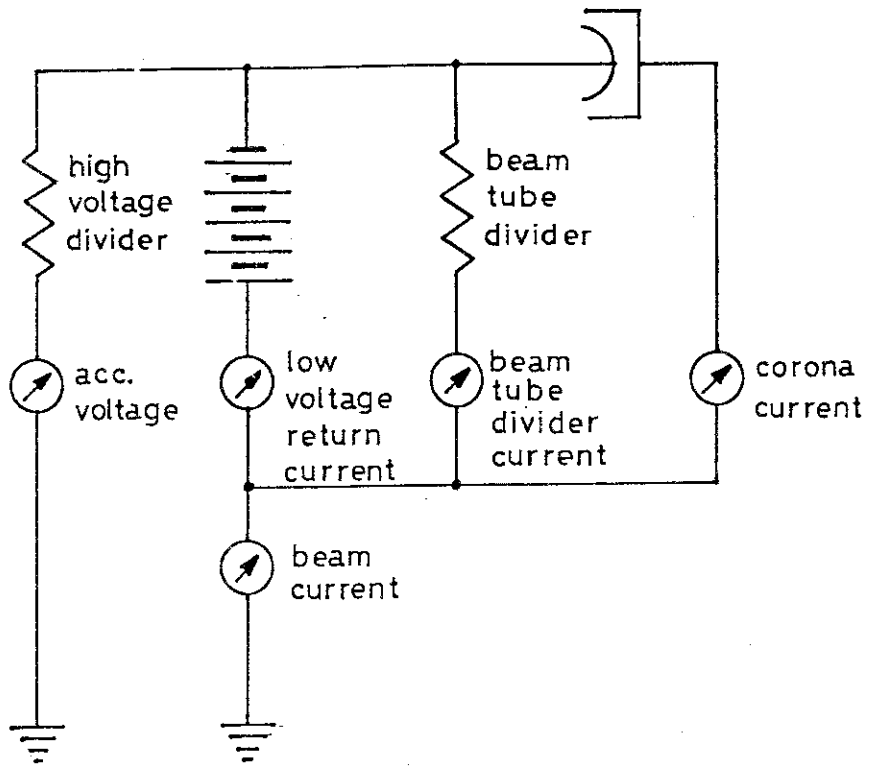


Fig.10 Equivalent circuit of metering circuit of the accelerator

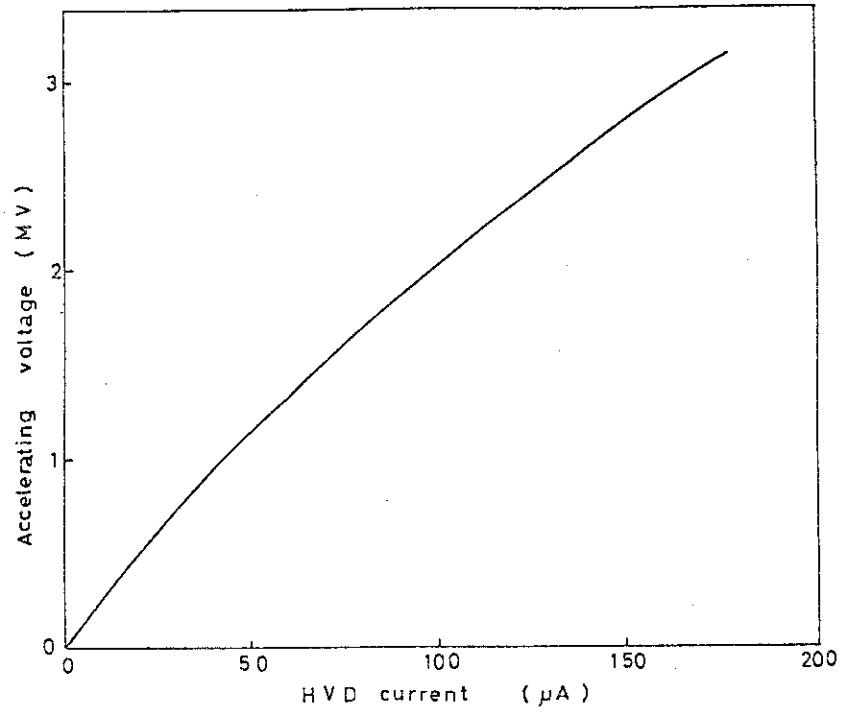


Fig.11 Relationship between High Voltage Divider current and accelerating voltage

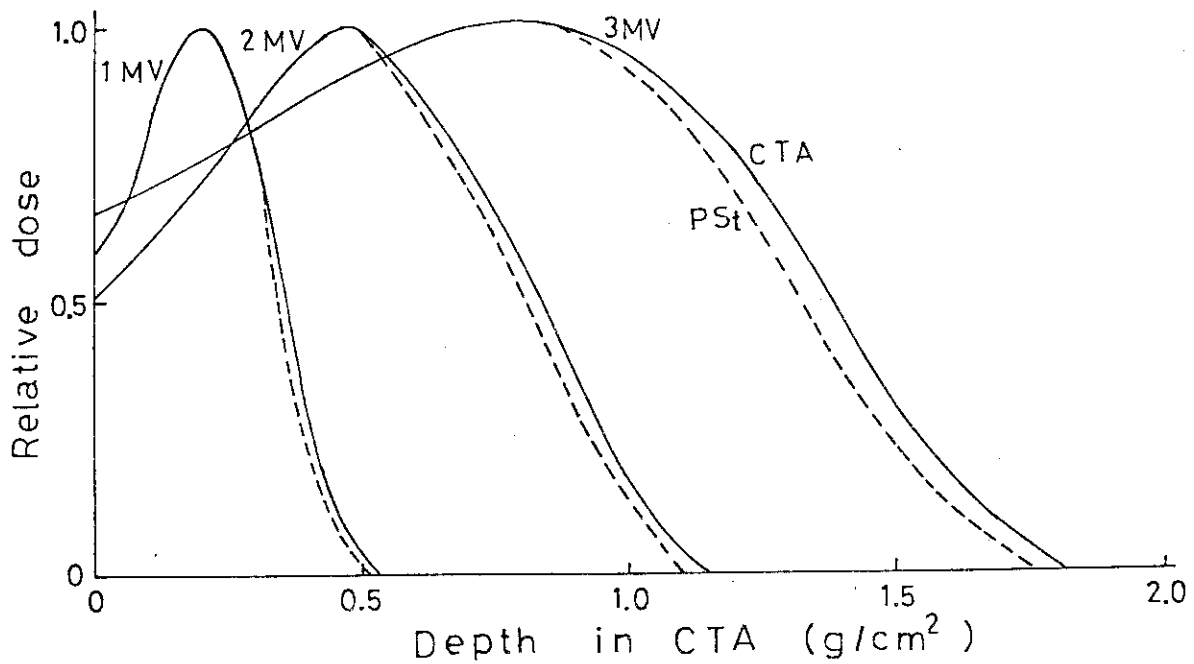


Fig.12 Depth dose profiles in Cellulose triacetate irradiated with 1, 2, 3 MV accelerating voltages

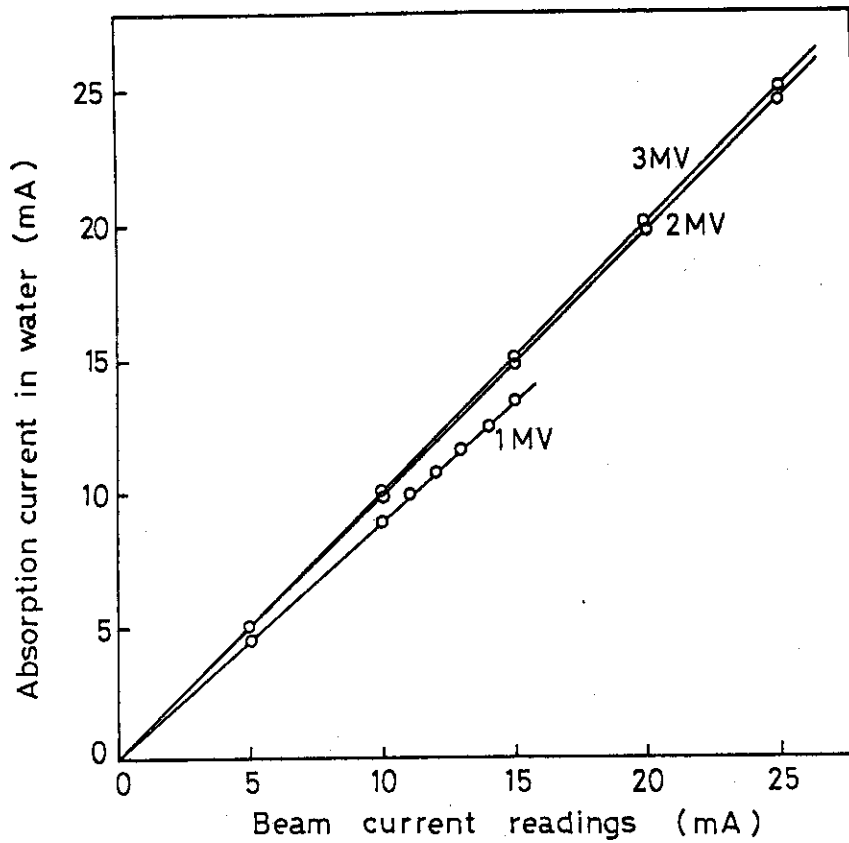


Fig.13 The relationship between beam current reading and absorption current in water

Table 8 The rate of measured beam current to meter reading at different accelerating voltage

加速電圧	測定値/メーター指示値
1.0 MV	0.89
2.0	0.98
3.0	0.98

Table 9 The rate of beam current losses due to scattering and absorption to total beam current in acceleration tube

加速電圧	i)	ii)	iii)	計
1.0 MV	2.9 %	2.6 %	α *	5.5 % + α
2.0	0.8	1.7	δ *	2.5 + δ
3.0	0.4	1.3	δ	1.7 + δ

※ α , δ : 定量的に求めることは困難であるが, α はある程度は考慮すべき量を,
 δ は非常に少ない量を示す。

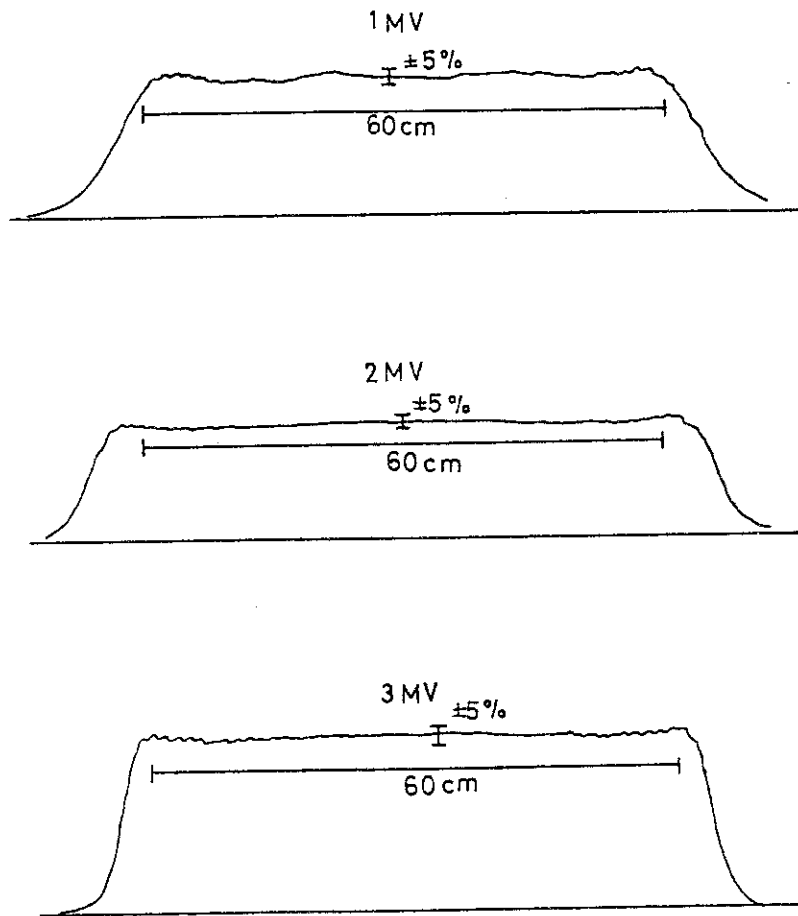


Fig.15 Beam current distributions along scan axis
 (under 15 cm from beam window)

6. 設置後の運転経過

本加速器の照射運転は昭和53年4月より開始され、以後ほぼ順調な稼働を続けている。昭和54年4月から所内利用のほか所外の共同利用照射実験にも広く利用されている。

昭和56年1月現在の運転時間は1600時間を越え、照射件数は約730件となっている。

設置以来現在までに電源回路内のチョークコイルやビーム制御回路などに故障を生じたが、これらの故障では、予備部品の使用や応急措置などにより速かに運転可能な状態が得られ、長期間にわたって運転休止を要するような故障は今までのところ発生していない。

本加速器を用いた主な照射実験は次の通りである。

排煙処理実験、電子線高速重合、セルロースの糖化醗酵、機能性高分子膜製造、樹脂合成、放射線による照射損傷の研究、各種線量計実験。

7. あとがき

本加速器の設置は、今まで使用していた2号加速器の更新ということで、建家は再利用し、しかも加速器の出力は増大させるという点に特徴があった。これは旧加速器用の建家が基本的に加速器の更新がし易い構造を有していたことによるものであった。

加速器の出力増大に伴う照射室の遮蔽増強工事においては、既設建家基礎の杭耐力の関係より、独立した基礎を有する構造物とする必要が生じるなど、建家改造については種々検討を要することが多かった。その結果、照射室についてはその面積が多少狭くなる結果になったとはいえ、全体として、改造したことをほとんど感じさせないような出来映えの建家が完成した。

また新しく設置した加速器については、小形、軽量ながら高出力、高性能であり、今回の更新に適した機種であったといえよう。

本加速器は据えつけ調整も順調に進められ、その後3年近く経過した現在まで、故障もすくなく、順調な稼働を続けている。

今後も本加速器が放射利用の研究のための線源として活発に利用されることが期待される。

6. 設置後の運転経過

本加速器の照射運転は昭和53年4月より開始され、以後ほぼ順調な稼働を続けている。昭和54年4月から所内利用のほか所外の共同利用照射実験にも広く利用されている。

昭和56年1月現在の運転時間は1600時間を越え、照射件数は約730件となっている。

設置以来現在までに電源回路内のチョークコイルやビーム制御回路などに故障を生じたが、これらの故障では、予備部品の使用や応急措置などにより速かに運転可能な状態が得られ、長期間にわたって運転休止を要するような故障は今までのところ発生していない。

本加速器を用いた主な照射実験は次の通りである。

排煙処理実験、電子線高速重合、セルロースの糖化醗酵、機能性高分子膜製造、樹脂合成、放射線による照射損傷の研究、各種線量計実験。

7. あとがき

本加速器の設置は、今まで使用していた2号加速器の更新ということで、建家は再利用し、しかも加速器の出力は増大させるという点に特徴があった。これは旧加速器用の建家が基本的に加速器の更新がし易い構造を有していたことによるものであった。

加速器の出力増大に伴う照射室の遮蔽増強工事においては、既設建家基礎の杭耐力の関係より、独立した基礎を有する構造物とする必要が生じるなど、建家改造については種々検討を要することが多かった。その結果、照射室についてはその面積が多少狭くなる結果になったとはいえ、全体として、改造したことをほとんど感じさせないような出来映えの建家が完成した。

また新しく設置した加速器については、小形、軽量ながら高出力、高性能であり、今回の更新に適した機種であったといえよう。

本加速器は据えつけ調整も順調に進められ、その後3年近く経過した現在まで、故障もすくなく、順調な稼働を続けている。

今後も本加速器が放射利用の研究のための線源として活発に利用されることが期待される。

謝 辞

2号加速器の更新にあたり、建家改造については、基本設計から完成にいたるまで建設課安福晋太郎元課長、味岡勝重氏、根岸義夫氏諸氏の御尽力をいただいた。また電気設備、水設備については設備課高橋寛課長、笠原壮介氏の担当により施工され、所定の要求を十分に満たす諸設備を完成することができた。ここに各担当された皆様に厚く感謝の意を表す。

また加速器の据えつけ調整、その後のきめ細かいアフターサービスに御尽力いただいているRDIの代理業者四国変圧器(株)の古池昭、真鍋義幸の諸氏に感謝の意を表します。

おわりに加速器の更新が計画された時点より現在にいたるまで種々御協力いただいている照射施設課金沢孝夫、平尾敏雄、春山保幸の諸氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Oshima Y. Yotsumoto K. Tanaka R. Tazima S. and Sunaga H.
: JAERI 1190 (1970)
- 2) W. W. Buechner et al : Phys. Rev. 74 1348 (1948)
- 3) W. Miller et al : Phys. Rev. 96 1344 (1954)
- 4) "Isotope Benran", Japan Radioisotope Association, Maruzen,
Tokyo, 538 (1970) (in Japanese)
- 5) D. J. Raso : Nucl. Sci. Eng. 17 411 (1963)
- 6) D. K. Trubey : Nucl. Sci. Eng. 10 (1961)
- 7) "NCRP Report No. 51", National Council on Radiation Protection
and Measurement (1977)
- 8) Mizuhashi K. Watanabe H. Kawakami W. and Tamura N. : The
15 th. Annual Meeting on Radioisotopes in the Physical
Science and Industry 11 (1978) (in Japanese)
- 9) L. V. Spencer NBS Monograph 1 (1959) National Bureau of
Standards, U. S. Department of Commerce
- 10) Tabata T. and Ito R. : Ann. Rep. Radiation Center of Osaka
Prefecture 14 27 (1973)
- 11) Tabata T. Ito R. and Okabe S. : Nucl. Instrm. Meth. 94
509 (1971)