

JAERI-M  
94-007

原研 A V F サイクロトロン装置の真空排気系

1994年2月

中村 義輝・石堀 郁夫・奥村 進・奈良 孝幸  
横田 渉・福田 光宏・上松 敬・荒川 和夫  
水橋 清・佐野 正美\*・星加 敬三\*・佐藤 岳実\*  
鳥居 恒夫\*\*渡辺 洋之\*\*

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）  
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11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-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,  
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 日立高速印刷株式会社

## 原研 AVF サイクロトロン装置の真空排気系

日本原子力研究所高崎研究所放射線高度利用推進室

中村 義輝・石掘 郁夫・奥村 進・奈良 孝幸  
横田 渉・福田 光宏・上松 敬・荒川 和夫  
水橋 清・佐野 正美\*・星加 敬三\*・佐藤 岳実\*  
鳥居 恒夫\*\*・渡辺 洋之\*\*

(1994年1月10日受理)

放射線高度利用研究を推進するため原研 AVF サイクロトロン装置が設置された。このサイクロトロン装置は、2台のイオン源、イオン入射ライン、AVF サイクロトロン本体および8本の主ビーム輸送ラインから構成される。各系における到達圧力は、主として残留ガスとの荷電変換に起因するイオンビームの損失をもとにして決定した。また具体的に機器を配置した場合について、全真空セクションにおける圧力分布を評価し、目標の到達圧力が達成できることを確かめた。

各系の仕様は、清浄な真空、保守の容易さあるいは高信頼性の確保などの設計指針に基づいて検討するとともに、最終的な真空排気系の構成内容も記述した。さらにサイクロトロン本体の排気特性測定、残留ガスの分析および真空計の信頼性確認試験などの結果について示した。

---

高崎研究所：〒370-12 群馬県高崎市錦貫町1233

\* 住友重機械工業株式会社

\*\* 日立製作所

Vacuum System for JAERI AVF Cyclotron

Yoshiteru NAKAMURA, Ikuo ISHIBORI, Susumu OKUMURA  
Takayuki NARA, Watalu YOKOTA, Mitsuhiro FUKUDA  
Takashi AGEMATSU, Kazuo ARAKAWA, Kiyoshi MIZUHASHI  
Masami SANO\*, Keizou HOSHIKA\*, Takemi SATOH\*  
Tsuneo TORII\*\* and Hiroyuki WATANABE\*\*

Department of Advanced Radiation Technology  
Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Watanuki-cho, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received January 10, 1994)

JAERI AVF cyclotron system has been already constructed to promote the application of advanced radiation technology. This cyclotron system consists of two ion sources, an ion injection line, an AVF cyclotron and eight main beam transport lines.

The ultimate pressure in each vacuum section was mainly designed on the basis of the ion beam losses caused by the charge exchange with residual gas. The pressure distributions in whole vacuum sections, which were estimated on the practical arrangement of the vacuum components, showed clearly that the objective ultimate pressure could be attainable. The specification for the vacuum system was fixed up taking into account guiding principles such as clean vacuum, maintenance-free and high reliability, and the details of its final composition were described.

We also showed the several results of evacuation curve measurement and residual gas analysis in the cyclotron vacuum chamber, reliability test for the vacuum gauge controller and so on.

---

\* SUMITOMO Heavy Industries, Ltd.

\*\* HITACHI, Ltd

Keywords : Vacuum System, AVF Cyclotron, Vacuum Section, Beam Loss,  
Outgassing, Vacuum Pump, Vacuum Gauge

## 目 次

1.はじめに .....	1
2.真空排気系の基本設計 .....	2
2.1 到達圧力の検討 .....	2
2.2 サイクロトロン本体の排気特性および到達圧力の解析 .....	8
2.3 ビーム輸送系圧力分布の検討 .....	13
3.真空排気系の構成 .....	31
3.1 真空排気系の概要 .....	31
3.2 真空排気系の機能および構成機器等の内容 .....	32
3.3 イオン源系 .....	36
3.4 イオン入射系 .....	36
3.5 サイクロトロン本体系 .....	37
3.6 ビーム輸送系 .....	38
3.7 その他 .....	39
4.真空排気系および機器装置等の特性 .....	51
4.1 サイクロトロン本体の排気特性 .....	51
4.2 ビーム輸送系における排気特性測定の一例 .....	52
4.3 サイクロトロン本体の残留ガス分析 .....	52
4.4 ビームダクトのガス放出率測定 .....	53
4.5 ワイドレンジ真空計の信頼性確認試験 .....	53
4.6 速動バルブの性能試験 .....	54
5.あとがき .....	63
謝 辞 .....	64
参考文献 .....	65
付録 TIARA施設および原研AVFサイクロトロン装置の概要 .....	68

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Basic Design for Vacuum System .....	2
2.1 Design of Ultimate Pressure .....	2
2.2 Analysis of Evacuation Curve and Ultimate Pressure for AVF Cyclotron .....	8
2.3 Estimation of Pressure Distribution for Beam Transport System .....	13
3. Construction of Vacuum System .....	31
3.1 Outline of Vacuum System .....	31
3.2 Function of Vacuum System and Details of Components .....	32
3.3 Ion Source System .....	36
3.4 Ion Injection System .....	36
3.5 Cyclotron System .....	37
3.6 Beam Transport System .....	38
3.7 The Others .....	39
4. Characteristics of Vacuum System and Devices .....	51
4.1 Evacuation Curve of AVF Cyclotron .....	51
4.2 An Example of Evacuation Curve in Beam Transport System .....	52
4.3 Residual Gas Analysis in AVF Cyclotron .....	52
4.4 Outgassing Measurement of Aluminum Beam Duct .....	53
4.5 Reliability Test for Wide-range Vacuum Gauge Controller .....	53
4.6 Performance Test for Fast Closing Valve .....	54
5. Summary .....	63
Acknowledgement .....	64
References .....	65
Appendix Outline of TIARA Facility and JAERI AVF Cyclotron System .....	68

## 1. はじめに

日本原子力研究所高崎研究所では、放射線利用の新たな展開をめざして、イオンビーム利用による宇宙環境材料、核融合炉材料、バイオ技術および新機能材料の研究開発を中心とした「放射線高度利用研究」<sup>1) - 7)</sup> を推進している。これら広い分野の研究開発に対応するためには、多くのイオン種と幅広いエネルギーのイオンを発生できる施設が必要になる。このため高エネルギーイオン加速用の AVF サイクロトロン、中低エネルギーイオン加速用の 3MV タンデム型など 3 基の静電加速器を備えたイオン照射研究施設 (TIARA : Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application) が建設され、運転されている。なおこのうち、付録で仕様を示しているサイクロトロンは、年間 3000 時間程度の研究利用運転を順調に行っている。

サイクロトロン装置の設計・建設に当たっては多くの解決すべき検討課題があり、真空排気系もその一つである。ここで述べるサイクロトロン装置とはサイクロトロン本体のみならず、イオン源、発生したイオンをサイクロトロンまで輸送するイオン入射系、加速後ターゲットまでのビームを運ぶビーム輸送系の全てを含むものであり、これらの系に共通な真空排気系は、統一的な設計方針に基づいて全体的に統制のとれた構成とする必要がある。

荷電粒子が真空中を走行する場合には、イオンビームと残留ガスとの相互作用で荷電変換等による損失<sup>8) - 10)</sup> が起こる。真空系の圧力が低ければ低いほどビームの損失は少なくなるが、真空排気系が重装備となって経済的ではなくなったり、排気に長時間をするなど非現実的である。したがってイオンビームの減衰と真空系圧力やその他の要因との関係を総合的に評価するとともに、類似の加速器での実績<sup>11) - 14)</sup> を十分に勘案することにより、過不足のない合理的な到達圧力を決定することができる。

また設定された到達圧力を維持するため、真空系を構成する機器に使用される材料からのガス放出量<sup>15) - 19)</sup> についても系統的に評価し、排気系の設計に反映させることが必要である。そして具体的に機器を配置した場合における全真空セクションの圧力分布を評価し、到達圧力が満足されることを確かめて真空排気系の設計が完了する。

本報告では、これらの具体的な検討内容および評価結果を詳述した後、イオン源、イオン入射系、サイクロトロン本体およびビーム輸送系それぞれの特徴的な構成を述べる。さらに、完成したサイクロトロン装置の代表的な真空系の排気特性や真空計の信頼性試験などの技術的データに基づき、サイクロトロンの真空排気系全体の性能や特性について述べる。

## 2. 真空排気系の基本設計

イオン源から引き出されたイオンビームは、約24mのイオン入射系を輸送され、サイクロトロン本体に下方から垂直入射される。イオンビームは磁極空隙部分で加速された後サイクロトロンから引き出され（走行距離約800m）、各ビームラインのターゲット部分（最長で約55m）まで輸送されて、実験利用等に供される。したがってこれら全系にわたって、イオンビームの良好な透過率が必要となる。イオンビームの減衰については、サイクロトロン本体内でのビーム加速あるいは引き出しの過程、さらにビームラインの集束系調整などでのビームハンドリングに関連するものが支配的であるが、真空系内残留ガスとの相互作用での荷電変換に起因するビームロスも無視できない。

ここではサイクロトロン本体、イオン入射系およびビーム輸送系におけるビーム透過率の観点から、それぞれの系について設計目標となる到達圧力を検討した。

### 2.1 到達圧力の検討

真空系の到達圧力は、系内残留ガスとの相互作用によるイオンビームの減衰率を基本にして決定される。

室温（20°C）におけるイオンビーム透過率 $f_T$ は次式で与えられる。

$$f_T = \exp(-2.47 \times 10^{14} \cdot P \cdot \sigma_T \cdot x_p) \quad (1)$$

$$\approx 1 - \Delta \quad (\Delta \ll 1)$$

ここで $\Delta = 2.47 \times 10^{14} \cdot P \cdot \sigma_T \cdot x_p$ である。またPは真空系の圧力(Pa)、 $\sigma_T$ は全イオンビーム損失断面積(cm<sup>2</sup>)、 $x_p$ はイオンの走行距離(cm)である。この式から分かるように、ビーム透過率 $f_T$ は系の圧力Pに対して1からほぼ直線的に減少することになる。

損失断面積 $\sigma_T$ はイオンの種類、エネルギーおよび荷電数等多くの条件に依存する。 $\sigma_T$ のデータはこれまでいろいろと報告されているが、多種類のイオン、広い範囲のエネルギーおよび荷電数等について、包括的に与えられているものは少ない。イオン入射系およびビーム輸送系におけるイオンの走行距離は、ビームラインの長さから比較的簡単に求められる。しかしサイクロトロン本体内の走行距離は、加速空間内のイオンの回転回数を基にして推定することが必要となるが、イオンのエネルギーは走行中に時々刻々と変化するため、 $\sigma_T$ の値を正確に与えることは困難である。そのためここでは、実際の加速器運転においてサイクロトロンの中心領域に入射したイオンビーム電流と、引き出し半径位置でのそれとの実測値の比から、逆算して求めた平均的な $\sigma_T$ の値を用いた。

したがって到達圧力は、対象とする走行イオンのエネルギーが異なるサイクロトロン本体系、イオン入射系およびビーム輸送系の3系統に分類して検討した。

#### 2.1.1 サイクロトロン本体系

サイクロトロン本体系の真空圧力を規定する支配的な要因は、(1) イオンと残留気体との相

互作用による損失、(2) 真空中の火花放電またはマルチパクタリング放電による制約、の2つが考えられる。

### (1) 残留気体との相互作用によるイオンビームの損失

一般的にイオンビームと残留気体との相互作用による損失の過程は、(a) 残留気体原子によるイオンの核(クーロン)散乱によるもの、(b) 残留気体分子とイオン間の衝突による荷電変換に伴って中性化されるか、あるいは平衡軌道から逸脱するもの、および(c) 電離された残留ガス分子が壁面に衝突して、さらにガス分子が遊離される2次的な“圧力増加効果”によるものの3種類に分類される<sup>8)</sup>。これらのうち(c)項の寄与は、イオン加速器を対象とした真空圧力やエネルギー範囲において、ほとんど無視できると考えられている。したがってここでは、次の(a)項および(b)項について検討した。

#### (a) 残留気体原子によるイオンのクーロン散乱による損失

イオンは、残留気体原子の原子核と衝突してクーロン散乱を受けるが、ある散乱角以内であればサイクロトロンのベータトロン振動を励起するだけで、ビームが失われることはない。この限界散乱角 $\theta_c$ は、サイクロトロンのベータトロン振動波長 $\lambda_B$ と振幅A(サイクロトロンではディーギャップの半幅に相当する)により、次式で与えられる。

$$\theta_c = \frac{2\pi A}{\lambda_B} \quad (2)$$

これから損失断面積 $\sigma_A$ は、 $\theta_c$ を用いて次式で表される。

$$\sigma_A = \frac{(Z_g \cdot Z_i)^2}{4\pi \cdot \varepsilon_0^2 \cdot M_i^2 \cdot v^4 \cdot \theta_c^2} \quad (3)$$

ここで $Z_g$ は残留気体の電荷量(C)、 $Z_i$ はイオンの電荷量(C)、 $\varepsilon_0$ は真空の誘電率(F/m)、 $M_i$ はイオンの質量(kg)、 $v$ はイオンの速度(m/s)である。 $\sigma_A$ はこの式からイオンの速度の4乗に反比例しているので、その値が最大となるサイクロトロンの中心領域を考える。イオンの種類は、930サイクロトロンの入射系でその荷電変換断面積( $1.7 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ )<sup>9)</sup>が求められている<sup>84</sup>Kr<sup>15+</sup>を対象とした。入射エネルギーは180keV、ベータトロン振動数が0.1、平均磁場が1.6Tの条件では、 $\sigma_A = 9.7 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ となる。中心領域におけるこの数値は、<sup>84</sup>Kr<sup>15+</sup>の荷電変換断面積に比較して約1/1800と小さく、無視できる量であることが分かる。以上の結果からサイクロトロン内でのビーム損失は、以下に示すような荷電変換反応が支配的な因子であると考えられる。

#### (b) 残留気体分子とイオンとの荷電変換によるビーム損失

イオンビームの荷電変換断面積は、対象とするイオンの荷電数が減少するにつれて、またエネルギーが増加するにつれて、低下の傾向を示すとされている。しかしサイクロトロン内でのイオンビームの損失は、加速や引き出しなどの過程においても不可避的に発生するため、残留ガスとの荷電変換に起因する損失のみを、分離して評価することはできない。サイクロトロン内を走行するイオンは、加速の過程でイオンのエネルギーが徐々に増加して広範囲に変化するため、エネルギーに強く依存するビーム透過率を正確に推定することも困難である。ここでルー

パン大学（ベルギー）の930サイクロトロンで得られた各種イオンビーム（加速粒子）の電流値<sup>10)</sup> の減衰率を基にして、constant orbit法により平均的な全イオンビーム損失断面積 $\sigma_T$ を求めた。それらの結果をTable1に示す。加速粒子<sup>16</sup>O<sup>6+</sup>から<sup>86</sup>Kr<sup>17+</sup>までの $\sigma_T$ の値は、 $1.3 \sim 9.1 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ の範囲となっている。

サイクロトロン内の加速領域におけるクーロン散乱での損失断面積 $\sigma_A$ は、初期の加速領域での10ターン程度（全ターン数は後述のように210）を想定しても、イオンのエネルギーが約18MeVに達するので、前述(a)項での数値 $\sigma_A = 9.7 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ の $1/10^4$ と換算される。したがって初期の加速領域でも、 $\sigma_A$ の $\sigma_T$ に占める割合は平均で $2 \times 10^{-5}$ 程度の極小量であり、さらに加速が進行してイオンのエネルギーが増大する加速領域では、 $\sigma_A$ の寄与は全く問題にならない。これらの結果から、イオンの加速領域における $\sigma_T$ についても、荷電変換断面積の寄与が支配的であることが分かる。

ここで原研AVFサイクロトロンの場合について、簡単に走行距離 $x_p$ を推定してみる。まず最初に加速イオンのn回転目での1周の走行距離 $L_n$ は、その時の軌道半径との関係から下式で表される。

$$L_n = \frac{2\pi (2M_i \cdot \Delta E \cdot n)^{0.5}}{Z_i \cdot B} \quad (4)$$

ここで $\Delta E$ は1回転当たりのエネルギー増加分、Bは加速空間の平均磁場である。また $\Delta E$ は、引出し半径 $R_{ex}$ およびイオンの全ターン数Nと次式の関係がある。

$$\Delta E = \frac{(B \cdot Z_i \cdot R_{ex})^2}{2M_i \cdot N} \quad (5)$$

これから走行距離 $x_p$ は、

$$x_p = \sum_{n=1}^N L_n \\ = \frac{2\pi R_{ex} \cdot \left( \sum_{n=1}^N n^{0.5} \right)}{N^{0.5}} \quad (6)$$

で表せる。ここでN》kの場合 $\sum_{n=1}^N n^k$ の項は、

$$\sum_{n=1}^N n^k = N^{k+1} \left( \frac{1}{k+1} + \frac{1}{2 \cdot N} \right) \quad (7)$$

であるので $x_p$ は最終的に次式となる。

$$x_p = 2\pi R_{ex} \left( \frac{2}{3} \cdot N + \frac{1}{2} \right) \quad (8)$$

この式では通常Nが数100程度の値であることから、カッコ内の $1/2$ の項は無視できることになり、実効的な軌道平均半径 $R_{eff}$ は引出し半径 $R_{ex}$ の $2/3$ となることが分かる。また最小軌道半径を5cm、 $R_{ex}$ を92.3cmとすると単純平均の軌道半径は48.7cmとなり、 $R_{eff} = 61.5\text{cm}$ に比較すると約80%の大きさと推定される。

一方加速イオンの全ターン数Nは次式で表される。

$$N = \frac{K}{4eV_D \sin(h\theta/2) \sin(\phi_0 + h\theta/2)} \cdot \frac{Z}{M} \quad (9)$$

KはサイクロトロンのK値, Zはイオンの荷電数, eは素電荷, V<sub>D</sub>はディー電圧(MV), hは加速ハーモニック数, θはディーのスパン(開き)角, φ<sub>0</sub>はRFの加速位相, Mは質量数である。原研AVFサイクロトロンにおいて前述の<sup>86</sup>Kr<sup>17+</sup>イオンでエネルギー370MeVの場合では, K = 110, Z = 17, M = 86, θ = 86度, φ<sub>0</sub> = -45度, h = 3 および V<sub>D</sub> = 33.58 × 10<sup>-3</sup> であるので, これから N = 210 となる。したがって (8) 式から, 走行距離 x<sub>p</sub> = 8.15 × 10<sup>4</sup>cm (815m) と求まる。

ビーム透過率に関連するサイクロトロン本体内での平均的な全イオンビーム損失断面積 σ<sub>T</sub> は, 走行イオンのエネルギーに依存するため, 入射エネルギーと引出しエネルギーと同じでも, 加速領域における走行距離 x<sub>p</sub> が異なれば, 必ずしも同一になるとは限らない。しかしながら, σ<sub>T</sub> のエネルギー依存性が明確になっていないため, 原研AVFサイクロトロンについては, 前掲Table1 のうち σ<sub>T</sub> が最大である<sup>86</sup>Kr<sup>17+</sup> (σ<sub>T</sub> = 9.1 × 10<sup>-17</sup>cm<sup>2</sup>) を, イオンビーム透過率算出の対象とした。

これらの x<sub>p</sub> および σ<sub>T</sub> の数値から, ビーム透過率 f<sub>T</sub> = 0.95 を確保するためには P = 2.80 × 10<sup>-5</sup> Pa, f<sub>T</sub> = 0.90 を想定すると P = 5.75 × 10<sup>-5</sup>Pa の到達圧力とする必要がある。

すでに稼働している多くのAVFサイクロトロンにおいては, イオン源としてPIG等の内部イオン源を使用していること, 主に軽イオンの加速を目的としていること, などの理由で必ずしも高真空が得られる設計となつてはいなかった。原研AVFサイクロトロンでは, 外部イオン源方式としたため, 内部イオン源方式のように真空箱中にガスを供給する必要がなく, 高真空が得られ易い。しかし実際のサイクロトロンの構造では, 1) 加速箱内には多くの機器が設置されており, 特にアウトガスなど真空対策のみを優先して構成素材を選定できないこと, 2) ビーム加速空間は, 構造上の問題から真空コンダクタンスに限界があること, 3) サイクロトロンの中心領域直近に真空ポンプを取り付けることが困難であること, などの制約がある。以上の点を考慮し, 到達圧力の目標値は 6.7 × 10<sup>-5</sup>Pa とした。この圧力でのビーム透過率 f<sub>T</sub> は 0.88 となり, 約 12% のビームロスと見積られる。

なお垂直入射用として本体ヨーク内に設置しているグレーザーレンズ部分は, 構造上排気コンダクタンスが小さいので, 磁極間のビーム加速空間に比べて局所的に真空度が悪化することも予想されるが, イオンの走行距離としては約 1.2m であるため, ビームの減衰率はサイクロトロン本体内部に比べて小さいと予測される。

## (2) 放電現象による圧力の制約

サイクロトロン加速箱内では, ディー電極およびデフレクター電極に高電圧が印加される。圧力が十分低くないとグロー放電を起こすが, この状態を抜け出しても真空火花放電が発生する。絶縁破壊電圧 V<sub>b</sub> は, その系の圧力 p と電極間距離 d の積 pd と相関があり, 通常真空中の放電現象を説明しているパッシュンの法則は, この積 pd が約 0.1Pa · m 以上で成立している。V<sub>b</sub> はガスの種類に多少依存するものの, pd の値が 0.3 ~ 3Pa · m の範囲で極小値を持っている。実際

のサイクロトロン内の電極間距離（約5mm～40mm）と圧力（ $6.7 \times 10^{-5}$ Pa）を考慮すると、 $p_d$ は $3.4 \times 10^{-7} \sim 2.7 \times 10^{-6}$ Pa・mと非常に小さな値であり、パッシュンの法則が全く該当しない領域であることが分かる。

一般的に放電現象を規定する要因には、電極表面の形状、清浄度、材質および電界強度等があり、それらの関係は極めて複雑であるとされている。さらにサイクロトロン内では、磁場の存在がこの放電限界に影響を与える。ディー電極とアース板間では放電路と磁場が平行であるが、デフレクター高圧電極とセプタム電極間では両者の関係は垂直となっている。前者で発生する放電はPIG放電と呼ばれ、真空圧力の影響がより顕著となることが知られている。後者のデフレクター高圧電極とセプタム電極間で放電を生じない電圧 $V_x$ と距離dの関係は、 $d = kV_x^2$ （k：定数）で表される。この関係は、電極表面を飛び出す粒子の電荷数が電界 $V_x/d$ に比例し、粒子の得るエネルギーが電圧 $V_x$ に比例することから導かれる。

またディー電極に特有な現象としてマルチパクタリング放電がある。マルチパクタリング放電は、高周波電圧の印加されている両電極間で、生成された電子が対向する相手電極に進行するような電極間隙と周波数の関係が、常に成立している場合にのみ発生する。しかしながらこの放電は、真空圧力との直接的な関係はほとんどないとされており、特に真空中度の制約には結び付かない。

ここでルーベン大学の既設930AVFサイクロトロンについて、簡単に電界強度を算出してみる。加速ディー電極の電圧は50kV、アース板ギャップが39mmであるので、電界強度は12.8kV/cmとなる。またデフレクター電極は、印加電圧70kVで最小ギャップ5.4mmであり、最大電界強度は130kV/cmである。一方、原研AVFサイクロトロンにおいては、ディー電極の最大電圧が60kV、アース板ギャップが40.0mmであるので、電界強度は15.0kV/cmとなる。デフレクター電極では、印加電圧が常用で65kV（定格80kV）、ギャップの設定値を4.0mmとすると、電界強度は約160kV/cmとなる。これらの結果から両者のサイクロトロンでは、電界強度の数値にそれほど差はない。なお原研AVFサイクロトロンのデフレクターには、モリブデンメッキした放電防止板が設置されている。

これらの両電極および対向電極は、通常無酸素銅で表面を凹凸なく磨き上げられ、脱脂洗浄したもので製作されている。このような条件にある前述の930AVFサイクロトロンでは、 $6.7 \times 10^{-4}$ Paの圧力でも連続運転の実績が報告されている。原研AVFサイクロトロン本体の到達圧力目標値が、 $6.7 \times 10^{-5}$ Paであることを考え合わせると、放電現象に対する真空圧力の制約はほとんどないと結論される。

### 2.1.2 イオン入射系

イオン源から引き出されたイオンをサイクロトロン本体の加速領域まで輸送する系であり、走行イオンのエネルギーは数keV～数100keVと小さいため、真空中度への要請が最も厳しい系である。前述のように全イオンビーム損失断面積は、ほとんど残留気体分子との荷電変換断面積に支配され、したがってビーム透過率の検討は、断面積の大きい多価の重イオンを対象とすればよい。しかしこれらのイオンについてのデータがほとんど見当たらないため、ここでは前述の $^{84}\text{Kr}^{15+}$ の荷電変換断面積 $1.7 \times 10^{-14}$ cm<sup>2</sup>を用いる。ECRイオン源で発生したイオンの走行距

離  $x_p = 2.39 \times 10^3 \text{ cm}$  (23.9m) を考慮し, ビーム透過率  $f_T = 0.95$  を確保するためには, 圧力  $P$  を  $5.1 \times 10^{-6} \text{ Pa}$  とする必要がある。したがってイオン入射系は,  $^{84}\text{Kr}^{15+}$  イオンの減衰率 5 % 程度を想定し,  $6.7 \times 10^{-6} \text{ Pa}$  を到達圧力の目標値とする。

### 2.1.3 ビーム輸送系

ビーム輸送系は, サイクロトロンの加速箱から引き出されたイオンビームを, 各イオン室内のターゲットまで輸送する系であり, 軽イオン用の LA コースから重イオン用の HZ コースまで, 合計 13 本のビームラインから構成される。ビーム輸送系でのイオンビームは, サイクロトロン内で加速されてエネルギーが高くなるため, イオン入射系やサイクロトロン本体系に比較してその荷電変換断面積が小さくなり, したがってイオンビームの損失も相対的にかなり小さくなるものと考えられる。ここでは前掲文献 8)において, イオンの速度  $v$  と光速  $c$  との比  $\beta$  ( $\beta = v/c$ ) が, 0.01 以上の範囲で与えられている次式で検討した。

$$\sigma_L \doteq 9 \times 10^{-19} Z^{-0.4} \beta^{-2} \quad (10)$$

$$\sigma_c \doteq 3 \times 10^{-28} Z^{2.5} \beta^{-7} \quad (11)$$

$$\sigma_{CT} = \sigma_L + \sigma_c \quad (12)$$

ここで  $\sigma_L$  は電子損失断面積 ( $\text{cm}^2$ ),  $\sigma_c$  は電子捕獲断面積 ( $\text{cm}^2$ ),  $\sigma_{CT}$  は全荷電変換断面積 ( $\text{cm}^2$ ) である。これらの式から  $\sigma_{CT}$  は,  $Z$  および  $\beta$  に強く依存することになる。なおビーム輸送系においても, 走行イオンのエネルギーが高いため, 荷電変換断面積  $\sigma_{CT}$  は全イオンビーム損失断面積  $\sigma_T$  に等しいとした。原研 AVF サイクロトロンで加速される代表的なイオンの種類は, 軽イオンの陽子から重イオンのキセノンまでが計画されている。しかしながらイオンビームの残留ガスによる損失は, 加速エネルギーの低い領域で問題となるため, ここでは最低の加速エネルギーを対象として検討すればよい。

荷電変換断面積を検討する加速粒子は, 稀ガスのうち最も重い  $^{129}\text{Xe}^{27+}$  で, 最低加速エネルギー 320MeV とする。 $\beta = 0.0729$ ,  $Z = 27$  であるので,  $\sigma_{CT} = 1.49 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$  と求まる。ビームコースは, 第 5 重イオン室までの最長のターゲットポート HZ1 (後述 Fig.11 参照) とすると  $x_p = 5.39 \times 10^3 \text{ cm}$  (53.9m) になり, その結果 (1) 式は  $f_T = \exp(-198 \cdot P)$  と表される。したがってビームの透過率は, 重イオンの Xe を対象とし真空圧力  $1.3 \times 10^{-4} \text{ Pa}$  においても,  $f_T = 0.97$  とわずか 3 % の減衰に過ぎない。

しかしながらビーム輸送系については, 1) ビームダクト材質の選定やベーキングなど真空的な対策が実施しやすいこと, 2) 低真空度で長期間使用すると炭素などの蓄積が想定されること, さらに 3) 高真空度での照射実験も可能にする必要があること, などを考慮し到達圧力の目標値は本体系と同様  $6.7 \times 10^{-6} \text{ Pa}$  とした。この真空圧力は, 上述の  $^{129}\text{Xe}^{27+}$  イオンに対して 1.3 % の減衰をもたらす。

なおサイクロトロン本体系で対象とした  $^{86}\text{Kr}^{17+}$  についても, 参考のためにビームロスを算出してみると, 最低加速可能イオンエネルギー 215MeV, 圧力  $6.7 \times 10^{-5} \text{ Pa}$  では, その減衰率は約 0.3 % の小さな値となる。一方軽イオンの最低エネルギーに近いと考えられる 5MeV の陽子については, ビームロスは前述の  $^{86}\text{Kr}^{17+}$  よりかなり小さいものと予測したが, (12) 式の計算において  $\sigma_c$  は小さいものの,  $\sigma_L$  が  $8.4 \times 10^{-17}$  と比較的大きな値になるため,  $f_T$  は 0.993 と算出され

ほぼ同等の数値となった。これらの透過率の検討結果では、サイクロトロンで加速された低エネルギーイオンビームに対して、ビームの減衰率は加速粒子の種類にはほとんど依存しないことが明らかになった。

#### 2.1.4 検討結果のまとめ

以上の検討結果から、各系の到達圧力は対象とする真空セクション内の最も真空圧力が高いと予想される位置で、イオン入射系が  $6.7 \times 10^{-6}$  Pa、サイクロトロン本体系およびビーム輸送系が  $6.7 \times 10^{-5}$  Pa 以下を目標値とする。

到達圧力の目標値における重イオンビームの減衰率は、イオン入射系が約 5%，サイクロトロン本体系が約 12%，ビーム輸送系が 1.3% と推測された。これらの減衰率は、イオンビームの輸送、サイクロトロンでの加速および静電デフレクター等による引き出しなどの過程におけるビームロス約 20~30% とほぼ同等であり、サイクロトロン装置全体としてのビーム透過率の観点から、合理的な数値と考えられる。

なお真空排気系の設計においては、通常それほどの精度が期待できないため、到達圧力の設計値はその目標値に 1/2 の安全係数を見込み、それぞれイオン入射系が  $3.3 \times 10^{-6}$  Pa、サイクロトロン本体系およびビーム輸送系が  $3.3 \times 10^{-5}$  Pa とした。

また大気圧から所定の圧力までの到達時間は、イオン入射系およびビーム輸送系においては各真空セクション（後述 3.4 項および 3.6 項参照）について 6h 以内、サイクロトロン本体については 20h 以内とする。これらの到達時間は、実験者への配慮およびメンテナンス・修理時の即応性、さらに他の加速器施設等での実績<sup>20)</sup> などに基づいて決定した。

### 2.2 サイクロトロン本体の排気特性および到達圧力の解析

サイクロトロン本体は、サイクロトロン装置全体のうち最も複雑で大規模な真空排気を有する部分である。ここでは粗引時間の推定および到達圧力等の検討を行った。到達圧力の検討では、まず垂直入射部のガス放出量および圧力分布を評価し、次に本体加速箱内部のガス放出量およびコンダクタンスから圧力分布を計算し、そして主真空ポンプ取り付け部分の圧力を求めた。さらにターボ分子ポンプ（TMP）による中間排気系の到達圧力も推定した。

#### 2.2.1 粗引時間の推定

サイクロトロン本体粗引系排気系統の概略図を Fig.1 に示す。サイクロトロンの真空領域は、サイクロトロン本体上下主電磁石間のイオンビーム加速空間およびその両側の共振器を含む容積  $6.5\text{m}^3$  の高真空部と、磁場補正用サーチュラートリムコイルが収納されている約  $0.5\text{m}^3$  の低真空部とから構成されている。高真空部の圧力は、低エネルギー重イオンビームの荷電変換による減衰率を考慮して  $6.7 \times 10^{-5}$  Pa 以下に維持するが、低真空部の圧力は高真空部との隔壁であるアース板の変形・損傷を防止するため、両域の差圧管理を目的として 1Pa 程度に保持する設計となっている。

高真空部の粗引に使用するロータリーポンプ（RP<sub>1</sub>）は、 $300\text{m}^3/\text{h}$  の排気容量であり 65A の

配管を介して、直接加速箱に接続されている。また低真空部については、高真空部からさらに延長して接続されている40Aの配管を介して130Pa程度の圧力まで排気し、それ以降は14.4m<sup>3</sup>/hの低真空部専用のRP<sub>2</sub>からの排気に切り換える方式である。

なお粗引配管でのコンダクタンスは、サイクロトロン本体内部の粘性流領域コンダクタンスに比べて十分小さいと考えられるため、内部の圧力分布を無視し、実効排気速度は前掲Fig.1中の高真空部の接続箇所での値S<sub>e1</sub>を採用した。さらに10Pa程度までの粗引時の圧力領域では、実効排気速度がガス放出量に比較して非常に大きいと考えられるので、排気経路中のガス放出量も無視できるものとした。

粗引系における排気時間Δt(s)は、一般的に以下の式で表される。

$$\Delta t = 2.303 \cdot \frac{V}{S_{e1}} \cdot \log \left( \frac{P_B}{P_A} \right) \quad (13)$$

ここでVは排気容積(m<sup>3</sup>)、S<sub>e1</sub>は実効排気速度(m<sup>3</sup>/s)、P<sub>B</sub>およびP<sub>A</sub>はそれぞれ排気前圧力(Pa)と排気後圧力(Pa)である。

また粘性流領域における円管のコンダクタンスC<sub>D</sub>(m<sup>3</sup>/s)は、以下の式を使用して求めた。

$$C_D = 1349 \cdot \frac{D^4}{L} \cdot \frac{P_{E1} + P_{E2}}{2} \quad (14)$$

ここでDは管径(m)、Lは管長(m)であり、P<sub>E1</sub>およびP<sub>E2</sub>は管両端における圧力(Pa)である。

大気圧10<sup>5</sup>Paから10<sup>0</sup>Paまでの圧力範囲における実効排気速度および排気時間の計算結果をTable2にまとめて示す。高真空部の圧力が大気圧の10<sup>5</sup>Paから10<sup>0</sup>Paまで2桁低下するのに要する排気時間は480s、10<sup>3</sup>Paから10<sup>2</sup>Paまでは300s、同様に100Paから20Pa(サイクロトロン本体系のTMPがすでに定常回転に達していて、吸気側の主バルブが開放される時の圧力)までが330s、さらに20Paから1Paまでが320sと推定され、合計で1430s(23.8min)程度となる。

一方低真空部については、大気圧から13Pa(RP<sub>2</sub>の単独運転切り換え時の圧力)までの圧力降下が、高真空部と同様約25分となっている。しかし10Pa以下の圧力範囲では、RP<sub>2</sub>の排気速度が急速に減少するため、それに応じて排気時間も急激に増大することになる。計算による排気時間は、13Paから3Paまでが390s、3Paから1Paまでが1900sと大きくなり、10<sup>5</sup>から10<sup>0</sup>Paまでの全域では3450s(57.5min)にも達する。

## 2.2.1 到達圧力の検討

真空系内の到達圧力は、主としてそれら内部のガス放出量、排気コンダクタンスおよび真空ポンプの排気速度などに依存する。到達圧力の設計に使用した真空材料のガス放出率(後述3.2.3項参照)は、Table3に示すように主として文献15)に掲げられているものを用いた。この表から明かなように金属材料のなかで真鍮および軟鋼(素材)のガス放出率は、ステンレスやアルミニウムに比べて約200倍であり、バイトンおよびブナ(ニトリルブチルゴム)などのO

リング材は約500倍である。したがってこれらの材料については、それらの露出表面積をできるだけ少なくすることが必要である。

本体加速箱内の圧力分布は、隣接するイオン入射系およびビーム輸送系との真空セクション相互間で、ガスの流入出がないものとして評価した。

### (1) 垂直入射部の圧力

サイクロトロン下方からイオンビームを垂直入射する部分であり、圧力分布の計算モデル概略図をFig.2に示す。この垂直入射部は、内径の異なる3種類の円管が直列に接続されている形状であり、サイクロトロン本体に比べてコンダクタンスの評価は容易である。また垂直入射部分では、前段のイオン入射系からのガス負荷および排気の寄付はない [ $Q_a = 0$ : ゲートバルブ (GV) が閉鎖している] ものとし、サイクロトロン中心側にのみ放出ガスが流出するものとして評価した。

Fig.2で示した部分について計算したコンダクタンス、ガス放出量および境界圧力を、Table4にまとめて示す。この部分からのガス放出量の合計  $6.5 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  は、後述のサイクロトロンの全体量  $7.1 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  に比べて約9%であり、絶対量としてはそれほど多くはない。しかしこの部分の内容積  $3.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  が、サイクロトロンの高真圏領域  $6.5 \text{ m}^3$  のわずか約0.06%であることを考慮すると、相対的にはガス負荷の極めて大きな領域と見なせる。また垂直入射部の構造は、4連のグレーベーアレンズが配置されている数10mm径の細い円筒ダクト内に、さらにオリフィス構造の入射バッフルやそのRFのシールド板等も設置されているため、コンダクタンスも非常に小さくなっている。したがってこの垂直入射孔部分の小さな狭い領域では、サイクロトロン内部に比較してむしろ顕著な圧力増加が見込まれる。

### (2) サイクロトロン本体の圧力分布

サイクロトロン本体高真圏領域の主真圏ポンプには、クライオポンプ (CRYO : Cryogenic Pump) を使用している。サイクロトロン本体内部の圧力分布の評価については、Fig.3に示すように主真圏排気用のCRYOを基準とすると、ディーおよび共振器空洞の方向でサイクロトロン中心に対してほぼ左右対称と近似できる。このためサイクロトロン加速箱内部における圧力分布は、全ての内部放出ガスが両側の共振器に取り付けられているCRYOに均等に分配される状態となるので、ちょうどディー先端のサイクロトロン中心位置でその圧力が最大になるものと推定できる。またこの中心点への流入ガスは、前述(1)項の垂直入射部からの寄与のみを考慮すればよい。

サイクロトロン加速箱内部に挿入されている主要な機器・装置は、デフレクター、マグネットィックチャンネル、グラジエントコレクターなどのイオンビーム引き出し用機器、ビーム診断・計測のための位相プローブ、メインプローブ、デフレクター入口プローブおよびマグネットィックチャンネル入口プローブ、さらにRFの発生および微調整のためのディー電極とコンペナセーター、中心領域のイオンビームを制御するラー、インフレクター、位相スリット(I)および(II)などである。これらの挿入機器が、ステンレス製の加速箱および上下の銅製のアース板で区分された狭い空間領域に配置されている。

サイクロトロン内部挿入機器からのガス放出量は、安全サイドの設計が前提となるため、その大部分がFig.3の領域①に寄与するものとした。また比較的ガス放出量の大きな加速箱主オ-

リング、アース板オーリング、その他のオーリングなどからの放出ガスは、領域①～③の3つの領域に均等に分配されるものとし、また②および③領域については、ディー電極やアース板からのガス放出量の寄与も考慮した。

ディー電極など複雑な形状を持つ内部構造材のコンダクタンスは、角形管や角箱、スリットあるいは薄い平行2面など、いくつかの代表的な形状に関してすでに求められている数式が適用できるよう、近似あるいは置換して評価した。

ここでFig.3に示されたそれぞれの各領域について、簡単にそれらの内容を記述する。①領域は、磁極アース板および加速箱ギャップの一部で囲まれた部分であり、加速箱表面、磁極アース板表面の一部、主Oリングおよび加速箱内付帶機器等が含まれる。②領域は、磁極アース板ギャップとディー電極とに囲まれた部分であり、電極表面とアース板表面の一部から構成されるものとする。また③領域は、加速箱アース板とディー電極システムとの間の区域であり、④領域は共振器と加速箱の接続部で、スリット状の形状に近似する。さらに⑤領域は、共振器内部の円筒空洞部分であり、CRYO設置位置の取付口までの空間である。そして⑥領域は、CRYO背後の共振器円筒空洞部分であり、ショート板などのガス負荷が含まれる。これらサイクロトロン内部のガス負荷は、各共振器の両側に配置されている2台のCRYOに均等に流入して排気されるものとした。

サイクロトロン内部の圧力分布の計算は、Fig.3に示された①～⑤領域について、それぞれの領域のコンダクタンスおよびガス放出量を基礎に、それらの境界圧力を順次算出する方法で求める。ここで対象とする各領域のガス放出量を $Q_n$ 、コンダクタンスを $C_n$ およびこれらの境界圧力を $P_n$ とすると、それらの関係は以下の式で記述することができる。なおショート板後部の⑥領域の圧力については、単独で別に求める。

$$P_{n-1} - P_n = \sum_{n=1}^5 \left( \frac{Q_n}{C_{n-1}} \right) + \frac{Q_n}{2C_n} \quad (15)$$

構成素材の材料別に算出した各部の表面積およびガス放出量の値のうち、Table5に代表的な例として①領域の場合を示す。表から明かなように、ガスケット材料であるバイトンとブナおよび軟鋼の表面積は全体の2.2%と相対的に小さいものの、これらに起因する全ガス放出量が $1.85 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ に達し、全体量の $2.19 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ の85%と支配的な寄与を示している。

同様に②領域における構成材料の表面積およびガス放出量をTable6に示す。この領域では、全ガス放出量は $9.05 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ であるが、放出ガスに寄与するサイクロトロン内部挿入機器の数が少なくなるため、領域①に比べてその量は40%程度である。バイトンおよびブナのガスケット材料からのガス放出量は、この領域においても全体の94%とその大部分を占める。

サイクロトロン本体内部の①～⑥領域についてのコンダクタンス、ガス放出量および圧力の計算結果をTable7に一括して示す。各領域でのガス放出量は、 $1.3 \times 10^{-6} \sim 2.2 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ と比較的大きいが、サイクロトロン本体部分はイオン入射系やビーム輸送系等に比べてコンダクタンスも大きい( $7 \sim 420 \text{ m}^3/\text{s}$ )ため、圧力はCRYO取付部からディー先端部まで緩やかに上昇するが、それほど顕著な圧力変化は生じない。またCRYO1台当たりのガス放出量負荷の合計は、 $7.1 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ と見積もられる。

### (3) クライオポンプ取付部の圧力

サイクロトロン本体の主真空ポンプであるCRYOは、2台の対向している共振器空洞部分の加速箱近傍に、それぞれ2台づつ配置されている。CRYO取付位置は、最大30kWのRF電力供給部分に比較的近いため、CRYO吸気側部分にはシールド板を設置して冷凍パネルの加熱を防止している。

このRFシールド板の構造をFig.4に示す。シールド板は横方向に26mm幅の切り欠きを設け、その裏側には縦方向に水冷用の銅パルプ(6φ)を30mm間隔で配置した構造となっている。したがってシールド板は、等価的に約25mm角のメッシュに相当する形状となり、300mm径のポートに対する開口率は59%となる。

CRYO取付部の圧力および実効排気速度等を評価するための概略図をFig.5に示す。共振器取付位置でのオリフィス(300φ)部分のコンダクタンスを $C_{c1}$ 、RFシールドを含む短管部分のそれを $C_{c2}$ とし、さらにそれぞれの部分でのガス放出量を $Q_{c1}$ および $Q_{c2}$ とすると、取付部の圧力 $P_{co}$ は以下の式で表せる。

$$\begin{aligned} P_{co} = Q_g & \left( \frac{1}{C_{c1}} + \frac{1}{C_{c2}} + \frac{1}{S_{cp}} \right) + \frac{Q_{c1} + Q_{c2}}{S_{cp}} + \frac{Q_{c1}}{C_{c2}} \\ & + 0.5 \cdot \left( \frac{Q_{c1}}{C_{c1}} + \frac{Q_{c2}}{C_{c2}} \right) + P_{cp} \end{aligned} \quad (16)$$

ここで $Q_g$ はCRYOに流入するサイクロトロン本体加速箱内のガス放出量、 $S_{cp}$ はCRYOの排気速度( $4.0\text{m}^3/\text{s}$ 、対窒素ガス)、 $P_{cp}$ はCRYO単独での到達圧力である。実際の形状から求められた各部のコンダクタンス( $\text{m}^3/\text{s}$ )およびガス放出量( $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ )は、それぞれ $C_{c1} = 8.2$ 、 $C_{c2} = 9.3$ 、 $Q_{c1} = 0$ および $Q_{c2} = 2.8 \times 10^{-7}$ であり、さらに $P_{cp} = 1.3 \times 10^{-8}\text{Pa}$ であるので、(16)式は $P_{co} = Q_g / 2.08 + 8.6 \times 10^{-7}$ と書き直せる。したがってCRYO取付部分での実効排気速度は、ポンプ排気速度の50%程度に見積もられることになる。

また前述のRFシールド板からCRYO冷凍パネルへの熱流入について、概略の見積を行った。RFの誘導加熱によるシールド板での熱損失は、RFパワー30kWの最大条件で約70Wとなるが、この熱量は全て銅管の冷却水(30°C)で熱交換されるとすると、冷却管部分の温度上昇はわずか0.3°Cとなる。RF入力側のシールド板表面温度は、5mm厚さの開孔板の熱伝導と仮定して計算すると、15°C上昇して45°C程度に達する。この銅板表面温度からCRYO第1ステージへの熱輻射を見積もると0.23Wとなる。第1ステージの冷凍能力24Wおよび冷凍温度80Kを考慮し、この入熱量0.23Wが単純に温度上昇に寄与したとすると2.0Kとなるので、CRYOへの影響はほとんど無視できるものと推測される。

なお実際のサイクロトロンの運転においても、RF加熱によるクライオパネル温度への影響は、観測されていない。

### (4) TMPによる中間排気系の到達圧力

サイクロトロン本体の真空排気系のうち、RPによる粗引きからCRYOによる主排気に移行するまでの間は、TMPにより排気される。このTMPによる排気系を中間排気系と呼び、ここで到達圧力の評価を行った。なおCRYO作動のための圧力切り換えは、 $10^{-2} \sim 10^{-3}\text{Pa}$ 程度の圧力

で行うものとした。前述(2)項の加速箱内部のガスは、左右のCRYOに均等に分流されるものと仮定したので、ガス放出量はTable7で示されている数値の2倍の $1.42 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ となる。したがってTMPに流入するサイクロトロン本体内部の全ガス放出量は、垂直入射孔からのガス放出量 $6.5 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ を加えて、 $1.49 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ となる。

TMP取り付け部分の概略構造は、Fig.6に示すように上部の保護金網、GVおよび加速箱から延長されている角型ダクト等から構成されている。これら各部のコンダクタンス、ガス放出量および圧力の値を、Table8に示す。TMP単独での排気速度 $1.95 \text{m}^3/\text{s}$ は、加速箱取付部分では約40%の実効排気速度 $0.75 \text{m}^3/\text{s}$ 程度に減少している。これらの数値を基にして算出された到達圧力は、加速箱本体部分で真空計が取り付けられている位置と等価なこの場所で、 $1.97 \times 10^{-4} \text{Pa}$ に見積られる。

#### (5) 計算結果のまとめおよび検討

サイクロトロン本体加速箱内部と垂直入射部について求められた圧力分布のプロットおよび計算位置の概略断面図を、Fig.7に掲げる。各部の圧力は、CRYO部分 $P_s$ で $1.8 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 、ディー電極異径部 $P_1$ と $P_3$ でそれぞれ $1.8 \times 10^{-5}$ と $2.1 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 、ディー後部 $P_2$ で $2.7 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 、ディー中央部 $P_1$ で $3.1 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 、そしてディー先端部 $P_0$ で $3.2 \times 10^{-5} \text{Pa}$ となった。この計算結果から、ショート板を内蔵する共振器円筒部ではほとんど圧力分布は生じないものの、加速箱部分では空隙が小さくなっているディー異径部で圧力は18%上昇し、その後サイクロトロン中心部分まで約50%の増加となっている。

また垂直入射部分(Injection hole)では、オリフィス等の寄与が見込まれる入射孔出口位置 $P_d$ でディー電極先端中心平面 $P_0$ の22倍の $7.1 \times 10^{-4} \text{Pa}$ にまで急増し、さらにグレーザーレンズ円筒のダクト部分を経由した入口位置 $P_c$ で $7.6 \times 10^{-4}$ まで6%程度漸増している。ただし実際にサイクロトロンにビームを入射する場合には、境界のGV開放により放出ガスが入射系側にも分流されるため、圧力の増加はこれほど大きくはならない。

なお原研AVFサイクロトロンの全ガス放出量 $1.5 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ を、他施設のサイクロトロンの場合と比較すると、大阪大学リングサイクロトロン(SSC)の $2.7 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ <sup>11)</sup>(排気後20h)に比べて6%，理化学研究所SSCの約 $1 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ <sup>12)</sup>に比べて15%程度、さらにNAC(南アフリカ共和国国立加速器センター)のSSCでの全ガス放出量 $1 \times 10^{-2} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ <sup>13)</sup>(排気後15h)の2%程度、同所の入射器AVFサイクロトロン(SPC2)の全ガス放出量 $1.6 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ <sup>14)</sup>と比較してその9%となっている。

これらの比較検討結果から、原研AVFサイクロトロンでは有機材料のガスケット等の使用を必要最小限に制限するとともに、トリムコイル等のガス放出量の大きい機器はあらかじめ低真圧領域に隔離する構造となっているなど、本体内部での放出ガスの低減対策が効果的であるものと考えられる。

### 2.3 ビーム輸送系圧力分布の検討

ビーム輸送系は、サイクロトロン以降の水平ビームライン9本および垂直ビームライン4本から構成されている真空系統であり、両端をGVで区分した合計18の真空セクションに分割され

てそれぞれ独立に管理されている。この系では、ビームの輸送・偏向あるいは診断などのため、数多くの4極電磁石、偏向電磁石および診断ステーションなどが配置されるとともに、必要部分に真空ポンプやGV等も多数設置されている。これらのうち、4極電磁石はアーチュア内をアルミニウムダクトがそのまま貫通しているため、真空コンダクタンスを別に評価する必要はない。また偏向電磁石については、真空ダクトの断面はレーストラック型（外側寸法110mm×60mm）であり、4インチの円管断面積の約60%となっている。しかし90度偏向電磁石部分のダクトの長さは約1.6mであり、各ビームラインの平均的長さ約20mを考慮するとその影響はほとんど無視できる。したがって圧力分布の評価について別に考慮すべき機器は、診断ステーション、ロータリーシャッター（RS: Rotary Shutter）およびスイッチング電磁石等が主要なものとなる。

### 2.3.1 圧力分布の簡易計算モデル

真空系から見たビーム輸送系の大部分は、4インチ円管のビームダクトで占有されることになり、所々にビーム診断ステーションなどのガス負荷が接続される形態となる。このような形態を考慮した基本的な圧力分布の計算モデルをFig.8に示す。このモデルは、真空ポンプからビームダクトが接続され、その先端にガス負荷（ $Q_o$ ）となる診断ステーションが配置されているものである。この診断ステーション部分は、内径300mmのアルミニウム円筒に各種の診断機器が取り付けられており、その真空コンダクタンスはビームダクト（内径104mm  $\phi$ ）に比べて約24倍となるため、ステーション内部の圧力分布は無視できる。各真空セクションは、その両端のGVを閉鎖した状態で規定圧力を保持できることが必要であるため、圧力分布の計算は対象とする真空セクション単独で行った。

前述の計算モデルにおけるビームダクト内の圧力勾配 $dP/dx$ は、以下の簡単な式で記述される。

$$\frac{dP}{dx} = \rho \{ q(L - x) + Q_L + Q_o \} \quad (17)$$

ここで $\rho$ は単位長さ当たりのダクト排気抵抗（ $s/m^3 \cdot m$ ）、 $q$ は単位長さ当たりのガス放出量（ $Pa \cdot m^3/s \cdot m$ ）、 $L$ はダクトの全長（m）、 $x$ はポンプ位置からのダクトの長さ（m）、 $Q_L$ は診断ステーションのリーク量（ $Pa \cdot m^3/s$ ）、 $Q_o$ は診断ステーションのガス放出量（ $Pa \cdot m^3/s$ ）である。これらのうち各真空セクション当たりのリーク量は、 $1.3 \times 10^{-9} Pa \cdot m^3/s$ 以下の仕様に制限しているため、後述のように標準的な診断ステーションでのガス放出量 $3.80 \times 10^{-7} Pa \cdot m^3/s$ に比べて1/250以下の極小量となるので、この計算では $Q_L = 0$ とした。したがって(17)式は、 $x = 0$ で $P(x) = P_\infty$ の条件から次式に書き直せる。

$$P(x) = P_\infty - 0.5 \rho q (x - L)^2 + \rho Q_o x + 0.5 \rho q L^2 \quad (18)$$

ここで $P_\infty$ は真空ポンプのダクト接続部分における圧力（Pa）であり、さらに次式で表される。

$$P_\infty = \left( \frac{1}{C_{IP}} + \frac{1}{S_{IP}} \right) + (Q_o + qL) \quad (19)$$

$C_{ip}$ は真空ポンプからダクト接続部分までのコンダクタンス ( $m^3/s$ ),  $S_{ip}$ はポンプの排気速度 ( $m^3/s$ ) である。また診断ステーション取付部分の圧力  $P_{D1}$  は、(18) 式に  $x = L$  を代入して求められる。ここで使用する諸定数などについて簡単に触れる。使用したアルミニウム円筒ダクトは、内径 104mm であるので、単位長さ当たりの排気抵抗  $\rho$  は  $7.35 s/m^3 \cdot m$  となる。ガス放出率は、後述(3.2.3 項参照) のように  $6.7 \times 10^{-8} Pa \cdot m^3/s \cdot m^2$  を設計値としたので、この数値から単位長さ当たりのガス放出量  $q$  は、 $2.17 \times 10^{-8} Pa \cdot m^3/s \cdot m$  となる。

また診断ステーションのガス放出量  $Q_0$  については、各種のビーム診断機器一式が設置されている標準的なステーションの数値を、ビーム輸送系全体にわたって統一的に使用した。それぞれの診断機器のガス放出量は、前掲の Table 3 に示した各種素材材料のガス放出率と、表面積の積算を基にして算出した。その結果ガス放出量 ( $Pa \cdot m^3/s$ ) は、診断ステーションのチェンバー内筒  $8.5 \times 10^{-8}$ , スリット  $7.2 \times 10^{-9}$ , プロファイルモニター  $5.1 \times 10^{-9}$ , アルミナモニター  $5.4 \times 10^{-8}$ , ファラディーカップ  $1.4 \times 10^{-8}$ , 駆動部ベローズ  $2.0 \times 10^{-7}$  および駆動軸  $2.0 \times 10^{-8}$  と見積もられた。したがって全ガス放出量  $Q_0$  は、これらを合計して  $3.8 \times 10^{-7} Pa \cdot m^3/s$  と求められる。

なおビーム輸送系で採用した主真空ポンプはスパッタ型イオンポンプ (IP : sputter Ion Pump) であり、その排気速度は  $60 L/s$  であるので  $S_{ip} = 0.06 m^3/s$  となる。またイオンポンプを取り付けている 4 インチ L 型手動バルブのコンダクタンス  $C_{ip}$  は、 $0.35 m^3/s$  である。

### 2.3.2 圧力分布の計算

実際の真空セクションは、真空ポンプおよび診断ステーション相互の配置がそれ異なるため、Fig.9 に示すように 5 種類の構成モデルに分類して圧力分布を求めた。なお図中の  $X_n$  はビームライン接続点間の距離、 $P_n$  はその点での圧力を示す。これらのうちモデル①は真空ポンプが 1 台である前述の基本構成に近いもの、②は 1 台の真空ポンプの両側にガス負荷が存在する場合、③はポンプが 2 台の場合の一般的な配置、④は真空ポンプが 2 台で分岐したダクトの先端にガス負荷が配置されているモデル、さらに⑤は 2 台の真空ポンプの間に長尺物でガス負荷の大きな機器（ここでは RS）が存在する場合にそれぞれ対応する。

これらのうち代表的な真空セクションにおける計算結果のプロットを、それぞれ Fig.10A, Fig.10B および Fig.10C に示す。圧力分布計算のプログラムは、MS-FORTRAN を用いて作成し、いくつかの基本的なサブルーチンプログラムに分割して、モデル①から⑤の型を指定して実行できる構成とした。このうち Fig.10A は、モデル②に相当する真空セクション (VHC1) の圧力分布である。このセクションの圧力分布は、真空ポンプに対して左右ではほぼ類似の勾配を持つが、真空ポンプが中間点よりややビームライン上流（左）側に設置されているため、その絶対値は下流（右）側が高くなっている。圧力の最大値は右端における  $2.6 \times 10^{-5} Pa$  であり、設計値の  $3.3 \times 10^{-5} Pa$  に対して約 30 % の余裕が見込まれる。

Fig.10 B は同様にモデル③の例であり、真空セクション (VLA0) の両端近傍にそれぞれ診断ステーションが存在するため、圧力分布も同様に左右対称に近い形となる。圧力分布の最大値は、このセクションの中央部に表れ  $1.1 \times 10^{-5} Pa$  となるが、この圧力は設計値の約 30 % であり十分に余裕があることが分かる。

また計算モデル⑤の例としてRSを含む真空セクション（VLB0）の場合をFig.10Cに示す。RSは全長200cmおよび120cmの2種類があり、それぞれのガス放出量は $1.4 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ および $9.1 \times 10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ となる。したがって単位長さ当たりのガス放出量は平均で $7.3 \times 10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ となり、アルミニウムビームダクトのそれの34倍にも達する。そのためRSを含む真空セクションでは、ガス放出量が特に大きいRSの両側にそれぞれイオンポンプを配置する方式を基本としている。真空セクション内の圧力分布は、RS内のほぼ中央付近で最大 $3.4 \times 10^{-5} \text{Pa}$ まで増加するが、真空ポンプの位置がRSに対して非対称となっており、2台の真空ポンプ部分では約1.6倍の圧力差が出現している。このようにRSを含む真空セクションでは、他のビーム輸送系真空セクションに比べてガス放出量が大きいため、全体的に大きな圧力勾配が存在するとともに、圧力の絶対値も増大している。

以上のように真空ポンプやビーム診断ステーション等の関連機器・装置の具体的な配置に基づいて、ビーム輸送系の圧力分布を評価した結果、大部分の真空セクションの圧力が、設計仕様値の圧力 $3.3 \times 10^{-5} \text{Pa}$ に対して十分な余裕を持つことが確かめられた。しかしながらRSが含まれる真空セクションの一部では、設計仕様値と同等の圧力に達していることが明らかになった。

Table 1 ルーパン大学 930 サイクロトロンで得られた電流減衰率から算出した  
平均的な全イオンビーム損失断面積

加速粒子	引き出し時 エネルギー (MeV)	電流減衰率*	全イオンビーム 損失断面積: $\sigma_T$ ( $\times 10^{-17} \text{ cm}^2$ )
$^{16}\text{O}^{6+}$	270	0. 88	1. 3
$^{20}\text{Ne}^{7+}$	294	0. 85	1. 6
$^{32}\text{S}^{7+}$	184	0. 59	5. 3
$^{32}\text{S}^{8+}$	304	0. 70	3. 6
$^{40}\text{Ar}^{9+}$	243	0. 71	3. 4
$^{40}\text{Ar}^{11+}$	363	0. 67	4. 0
$^{40}\text{Ar}^{12+}$	432	0. 82	2. 0
$^{40}\text{Ar}^{13+}$	507	0. 73	2. 3
$^{40}\text{Ar}^{14+}$	588	0. 67	4. 0
$^{84}\text{Kr}^{17+}$	413	0. 50	6. 9
$^{86}\text{Kr}^{17+}$	403	0. 40	9. 1

\* サイクロトロン加速箱内半径 20 cm と 92 cm で得られたメインプローブ  
電流の比 ( $I_{R=92\text{cm}} / I_{R=20\text{cm}}$ )。  
サイクロトロン加速箱の圧力は、いずれも  $1.3 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 。

Table 2 サイクロトロン本体粗引時実効排気速度および排気時間

圧力範囲 (Pa)		実効排気速度 ( $m^3/s$ )		排 気 時 間 (s)			
$P_1$	$P_2$	$S_{e1}$	$S_{e2}$	$\Delta t_1$	$\Delta t_2$	高真空部	低真空部
1 0 0 0 0 0	1 0 0 0	0. 0 6 6 6	0. 0 6 6 5	4 5 0	3 0	4 8 0	4 8 0
1 0 0 0	1 0 0	0. 0 5 4 8	0. 0 4 9 5	2 7 0	3 0	3 0 0	3 0 0
1 0 0	2 0	0. 0 3 2 0				3 3 0	
	1 3		0. 0 0 2 7				3 8 0
2 0	3	0. 0 5 0				2 5 0	
1 3			0. 0 0 1 9				3 9 0
3	1	0. 1 0 0	0. 0 0 0 3			7 0	1 9 0 0
合 計						1 4 3 0	3 4 5 0

Table 3 サイクロトロン装置構成材料のガス放出率

材 料	処理・環境等	ガス放出率 (Pa・m <sup>3</sup> /s・m <sup>2</sup> )
ステンレス	素材+脱脂、常温20h	2. 8 × 10 <sup>-7</sup>
銅	機械研磨、常温50h	9. 3 × 10 <sup>-8</sup>
アルミニウム	素材、常温50h	2. 0 × 10 <sup>-7</sup>
軟鋼	素材、常温50h	5. 3 × 10 <sup>-5</sup>
	Niメッキ、常温50h	2. 8 × 10 <sup>-7</sup>
真鍮	素材、常温20h	2. 7 × 10 <sup>-5</sup>
モリブデン	(20hに外挿)	4. 2 × 10 <sup>-5</sup>
タンタル	(20hに外挿)	6. 0 × 10 <sup>-5</sup>
タングステン	(20hに外挿)	1. 3 × 10 <sup>-5</sup>
バイトン		7. 6 × 10 <sup>-5</sup>
ブナ(NBR)		1. 7 × 10 <sup>-4</sup>

Table 4 サイクロトロン本体垂直入射部のコンダクタンスおよびガス放出量の  
計算結果

排気部の領域	コンダクタンス		ガス放出量		圧力	
	記号	$m^3/s$	記号	$Pa \cdot m^3/s$	記号	$\times 10^{-4} Pa$
a			$Q_a$	0	$P_a$	7. 59
b	$C_b$	0. 0337	$Q_b$	$4. 93 \times 10^{-8}$	$P_b$	7. 58
c	$C_c$	0. 0208	$Q_c$	$7. 12 \times 10^{-8}$	$P_c$	7. 55
d	$C_d$	0. 0779	$Q_d$	$6. 41 \times 10^{-6}$	$P_d$	7. 13
e	$C_e$	0. 0095			$P_e$	0. 320
ガス放出量合計			$Q_t$	$6. 47 \times 10^{-6}$		

Table 5 サイクロotron本体加速箱内領域①での各種構成材料の表面積およびガス放出量

機器・装置	表面積・材料	表 面 積 (m <sup>2</sup> )	表 面 積 鋼	表 面 積 軟鋼	アルミニウム	バイトン	ブナ (NBR)
加速箱	ステンレス						
アース板	5. 785	2. 066					
マグネットイックチャンネル	0. 450					0. 002	
デフレクター	0. 650	0. 150				0. 003	
位相プローブ	0. 010	0. 255		0. 375			
アース板サポート	0. 061						
中心プラグ			0. 094				
位相スリット(II)	0. 085	0. 045					
インフレクター	0. 205	0. 020					
グラジエントコレクター	0. 125	0. 440	0. 100				
メインプローブ	0. 713	0. 015					
デフレクタープローブ	0. 045	0. 005					
マグチタン入口プローブ	0. 060	0. 005					
その他中心領域等	0. 750						
アース板Oリング						0. 021	
加速箱主Oリング					0. 042		
その他Oリング						0. 005	
表面積 合計	8. 189	3. 751	0. 194	0. 375	0. 042	0. 031	
ガス放出率	2. 8 × 10 <sup>-7</sup>	9. 3 × 10 <sup>-8</sup>	5. 3 × 10 <sup>-5</sup>	2. 0 × 10 <sup>-7</sup>	7. 6 × 10 <sup>-6</sup>	1. 7 × 10 <sup>-4</sup>	
ガス放出量	2. 3 × 10 <sup>-6</sup>	3. 5 × 10 <sup>-7</sup>	1. 0 × 10 <sup>-5</sup>	7. 5 × 10 <sup>-8</sup>	3. 2 × 10 <sup>-6</sup>	5. 3 × 10 <sup>-6</sup>	
ガス放出量合計	2.	1. 9 × 10 <sup>-6</sup>	(Pa · m <sup>3</sup> / s)				

表中の単位、ガス放出率: Pa · m<sup>3</sup> / s、m<sup>2</sup>、ガス放出量: Pa · m<sup>3</sup> / s

Table 6 サイクロトロン本体加速箱内領域②での各種構成材料の表面積および  
ガス放出量

機器・装置	表面積 (m <sup>2</sup> )				
	ステンレス	銅	アルミニウム	バイトン	ブナ (NBR)
ディー電極		2. 566			0. 010
ラー	0. 253	0. 018	0. 084		
位相スリット (I)	0. 085	0. 045			
アース板		2. 066			0. 021
加速箱主Oリング				0. 042	
表面積 合計	0. 338	4. 695	0. 084	0. 042	0. 031
ガス放出率	$2. 8 \times 10^{-7}$	$9. 3 \times 10^{-8}$	$2. 0 \times 10^{-7}$	$7. 6 \times 10^{-5}$	$1. 7 \times 10^{-4}$
ガス放出量	$9. 5 \times 10^{-8}$	$4. 4 \times 10^{-7}$	$1. 7 \times 10^{-8}$	$3. 2 \times 10^{-6}$	$5. 3 \times 10^{-6}$
ガス放出量の合計	$9. 05 \times 10^{-6}$ (Pa · m <sup>3</sup> / s)				

表中の単位 ガス放出率: Pa · m<sup>3</sup> / s · m<sup>2</sup>、ガス放出量: Pa · m<sup>3</sup> / s

Table 7 サイクロトロン本体各領域のコンダクタンスおよびガス放出量の計算結果

排気部の領域	コンダクタンス		ガス放出量		圧力	
	記号	$m^3/s$	記号	$Pa \cdot m^3/s$	記号	$\times 10^{-5} Pa$
垂直入射部			$Q_1$	$3.24 \times 10^{-6}$	$P_0$	3.20
①	$C_1$	17.4	$Q_1$	$2.19 \times 10^{-5}$	$P_1$	3.11
②	$C_2$	6.85	$Q_2$	$9.05 \times 10^{-6}$	$P_2$	2.68
③	$C_3$	6.89	$Q_3$	$8.91 \times 10^{-6}$	$P_3$	2.12
④	$C_4$	14.1	$Q_4$	$3.86 \times 10^{-6}$	$P_4$	1.80
⑤	$C_5$	418.5	$Q_5$	$1.29 \times 10^{-6}$	$P_5$	1.79
⑥	$C_R$	69.8	$Q_R$	$2.26 \times 10^{-5}$	$P_R$	1.80
ガス放出量合計			$Q_c$	$7.09 \times 10^{-5}$		

Table 8 サイクロトロン本体中間排気系の磁気浮上式ターボ分子ポンプ部分のコンダクタンスおよびガス放出量の計算結果

排気部の領域	コンダクタンス		ガス放出量		圧力	
	記号	$m^3/s$	記号	$Pa \cdot m^3/s$	記号	$\times 10^{-4} Pa$
10			$Q_{10}$	$1.42 \times 10^{-4}$	$P_{10}$	1.97
11	$C_{11}$	6.82	$Q_{11}$	$2.13 \times 10^{-6}$	$P_{11}$	1.76
12	$C_{12}$	6.35	$Q_{12}$	$4.79 \times 10^{-6}$	$P_{12}$	1.53
13	$C_{13}$	5.63	$Q_{13}$	$3.33 \times 10^{-8}$	$P_{13}$	1.26
14	$C_{14}$	2.98	$Q_{14}$	$5.32 \times 10^{-8}$	$P_{14}$	0.763
ガス放出量合計			$Q_T$	$1.49 \times 10^{-4}$		

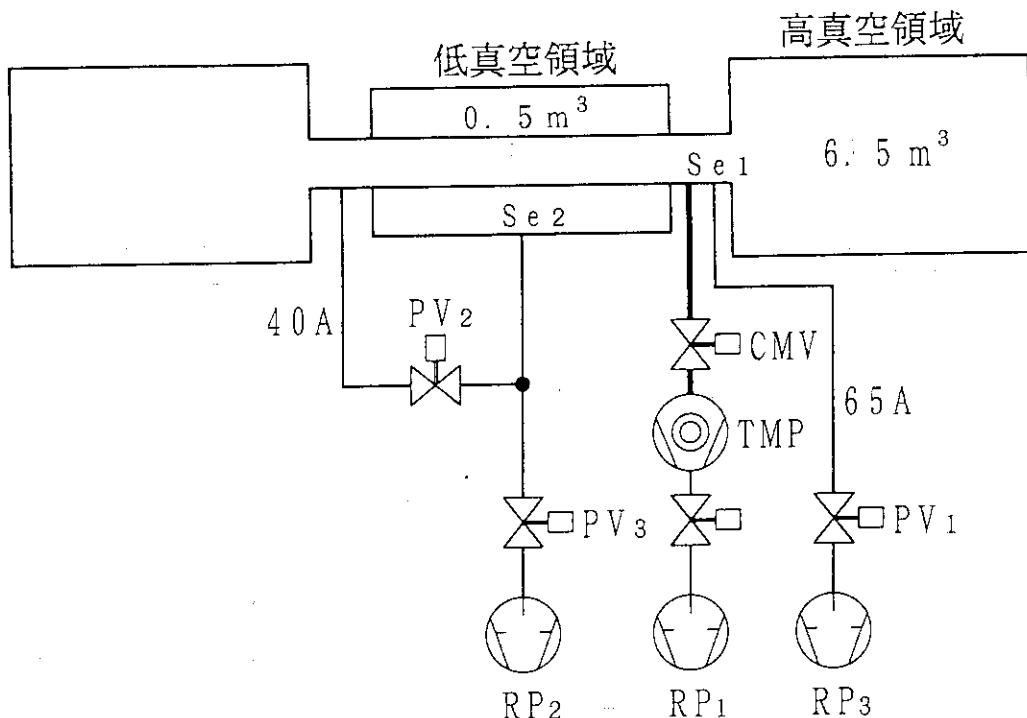


Fig. 1 サイクロトロン本体粗引系排気系統概略図

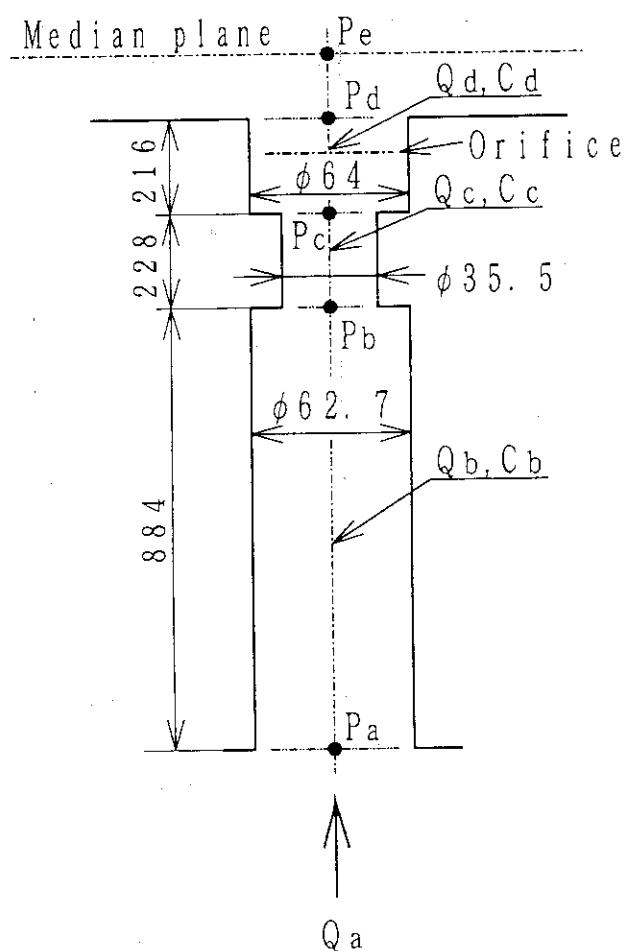


Fig. 2 サイクロトロン垂直入射部概略図

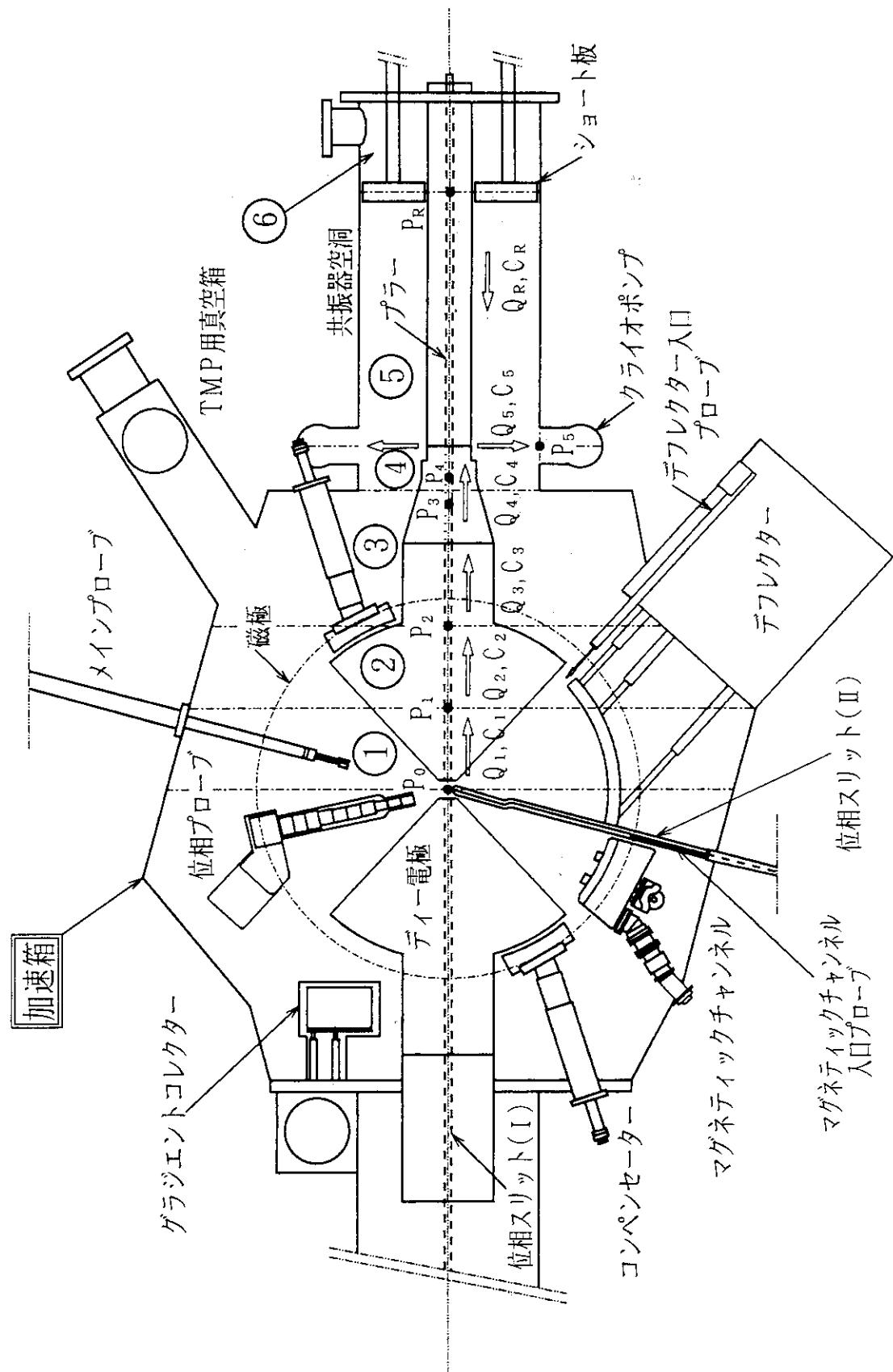


Fig. 3 サイクロトロン本体内挿入機器および圧力分布計算モデル概略図

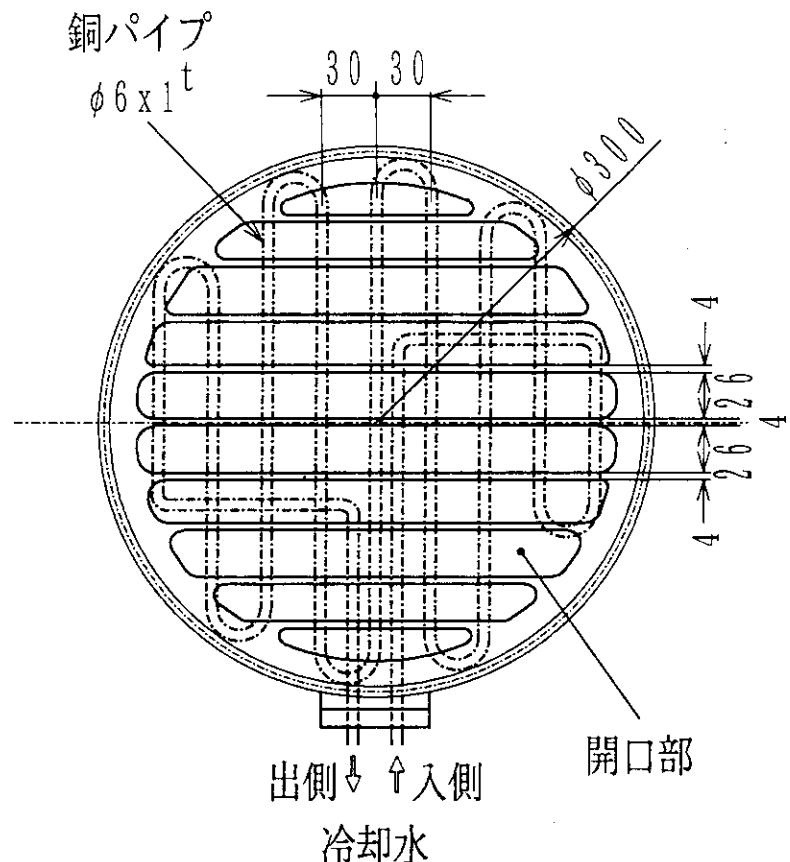


Fig. 4 クライオポンプ用 R F シールド板詳細図

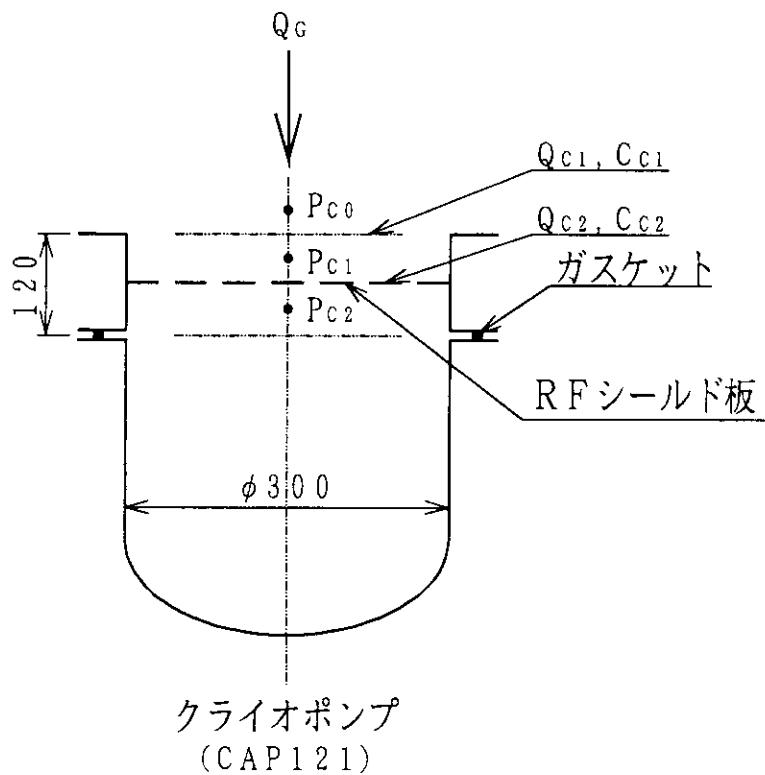


Fig. 5 クライオポンプ取り付け部分詳細図

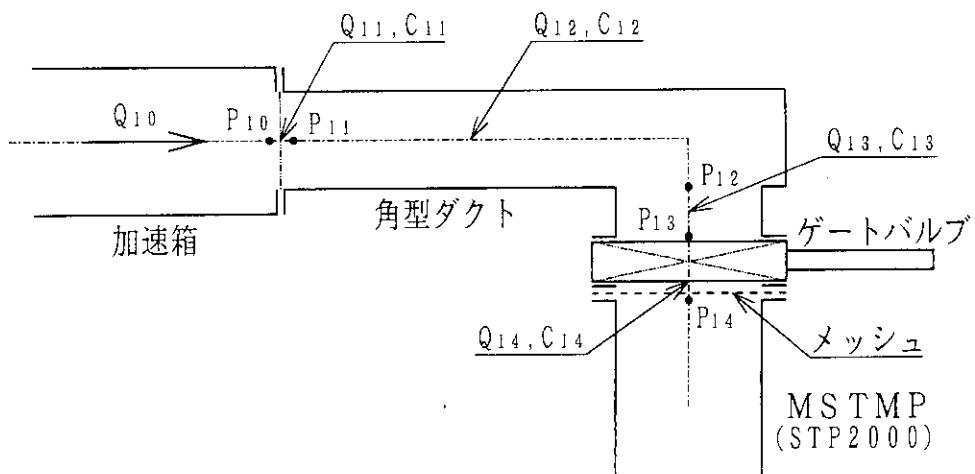


Fig. 6 サイクロトロン本体ターボ分子ポンプ取り付け部分の概略図

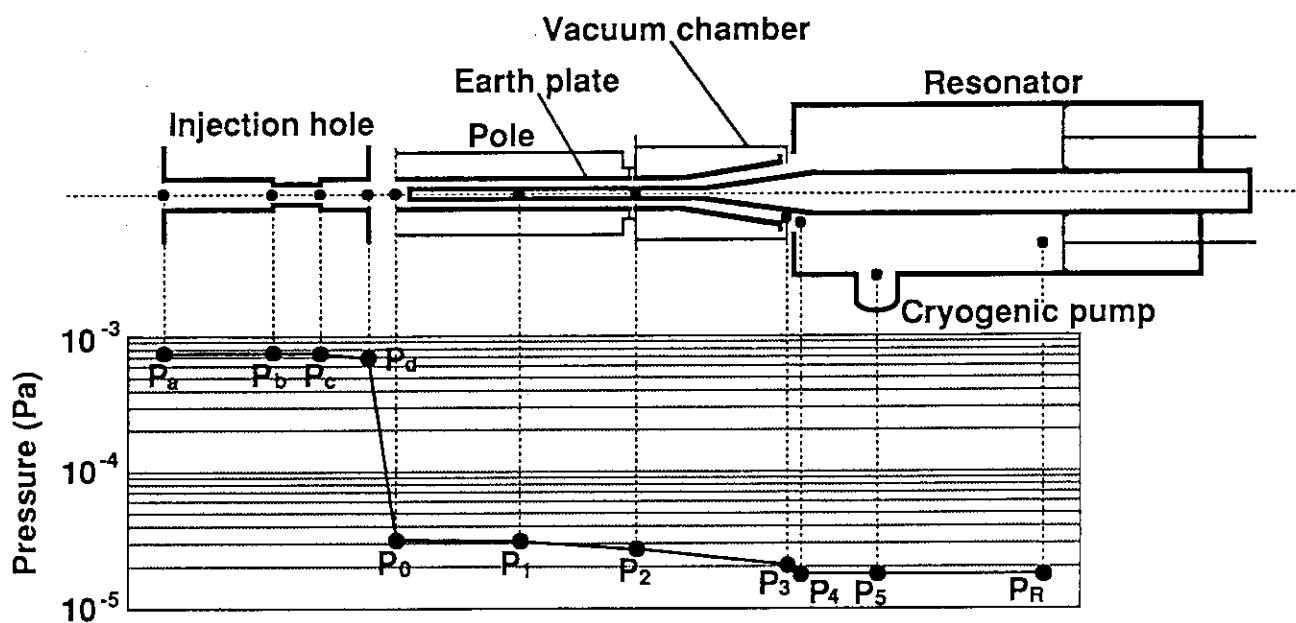


Fig. 7 原研 A V F サイクロトロン本体の圧力分布計算結果

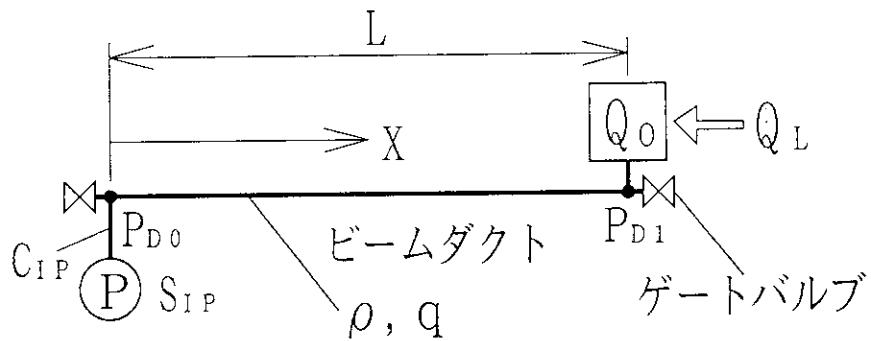


Fig. 8 圧力分布計算の基本モデル

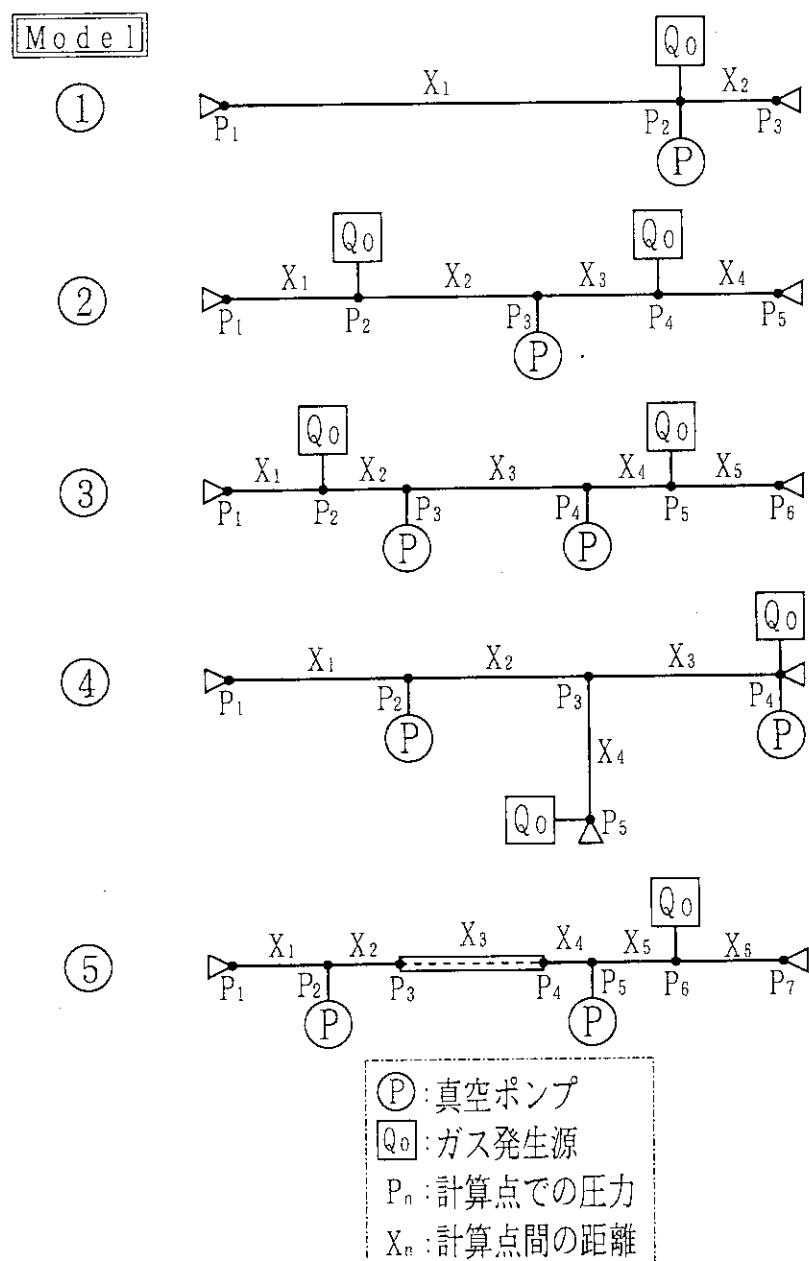


Fig. 9 ビーム輸送系真空セクション圧力分布計算の構成モデル

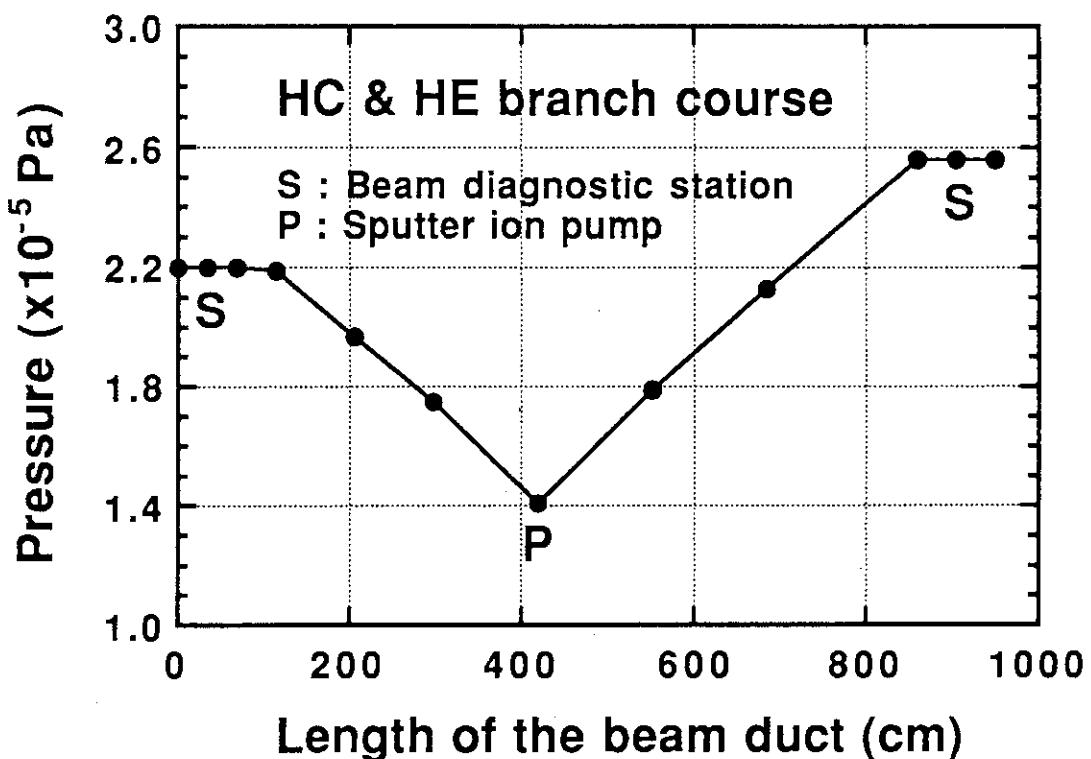


Fig.10 A ビーム輸送系真空セクション（VHC 1）圧力分布計算結果

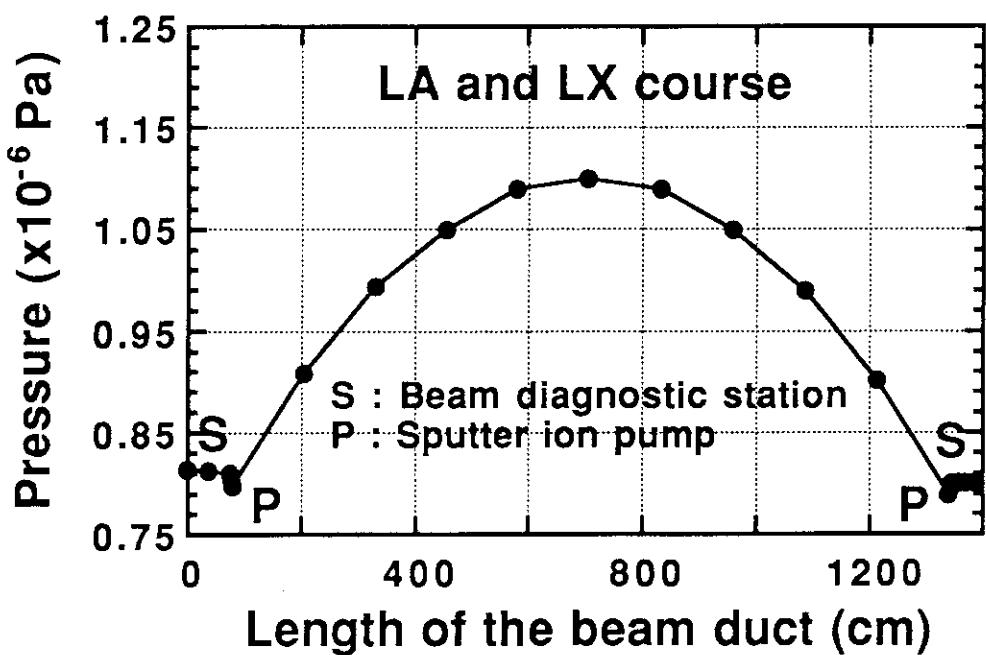


Fig.10 B ビーム輸送系真空セクション（VLA 0）圧力分布計算結果

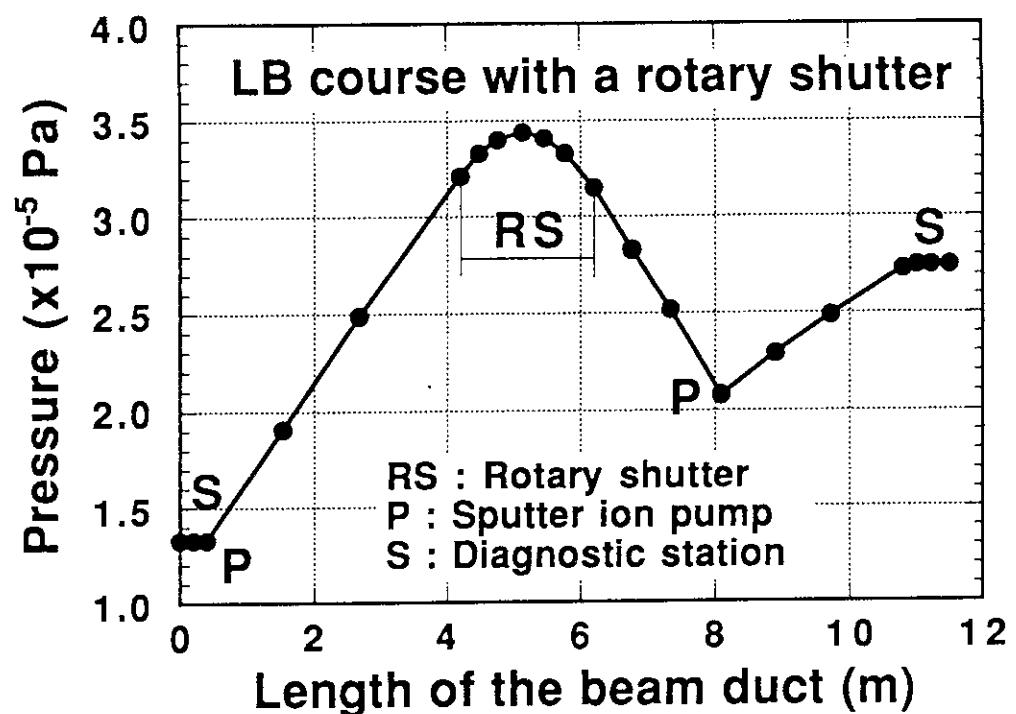


Fig.10 C ビーム輸送系真空セクション（VLB0）圧力分布計算結果

### 3. 真空排気系の構成

原研AVFサイクロトロン装置の真空排気系の設計・検討にあたっては、以下に示すようないくつかの項目を、基本的な設計指針として考慮した。

- ①連続運転が基本となるため特に安定性・耐久性などに優れ、信頼性の高いシステムであること。
- ②使用機器・装置の耐放射線性に配慮するとともに、保守・管理が容易な方式とすること。
- ③真空系構成材料あるいは機器自身からの内部ガス放出量は、できるだけ小さく抑制すること。
- ④オイルベーパーなどが真空系内に混入しにくい機構とし、清浄で良質の真空環境が得られること。
- ⑤消費電力が小さく、取扱いが容易であるなど、省エネルギー・省力化にも配慮すること。

#### 3.1 真空排気系の概要

真空排気系は、イオン源、イオン入射系、サイクロトロン本体系およびビーム輸送系と広範囲にわたっているため、両端をGVで区分された真空セクションに分割して、総合的な管理・監視等を行う。各真空セクションは、真空箱あるいは真空ダクト、真空ポンプ、真空計、GV、窒素および大気導入ポート等の基本的な構成要素から成り、それぞれ独立した真空管理が実現できる機能を持つ。

原研AVFサイクロトロン装置の全体構成および真空セクション分割図をFig.11に示す。真空セクションの数は、イオン源が2 (VECRおよびVMC)、イオン入射系が4 (VIA～VID)、サイクロトロン本体系が1 (VCYC) およびビーム輸送系が18 (VBCS, VTS1…VHE0) であり、合計25となっている。イオン源、イオン入射系およびサイクロトロン本体系では、主真空ポンプとしてクライオポンプあるいは磁気浮上式ターボ分子ポンプ (MSTMP: Magnetic Suspended Turbo Molecular Pump) が使用され、常設の補助排気系を備える方式となっている。一方ビーム輸送系については、主真空ポンプとしてスパッター型イオンポンプが採用されている。しかしMSTMPから構成されている補助排気系が常設されている真空セクションは、サイクロトロン以降の基幹ビームライン3ヶ所の真空セクションVBCS, VTS1およびVSMのみであり、その他の15セクションには補助排気系は存在しない。これらのセクションにおける真空の立ち上げは、可搬式の真空排気セット（後述3.7 (1) 項参照）を利用して行う。

真空セクションを分割しているGVは、放出ガスの低減等を考慮していずれもオールメタル仕様で製作されている。またターゲットポート部分等での真空トラブルに対応するため、各ビームラインの要所には速動型ゲートバルブを配置している。

各真空セクションには、ピラニゲージとコールドカソードゲージのペアで構成されるワイドレンジ真空計が、少なくとも1セット以上設置されており、大気圧から規定圧力までの圧力測定および真空排気系のシーケンスコントロール等が行える。全真空セクション25のうち4ヶ所に

は、コールドカソードゲージとの比較計測を目的として、BA ゲージを配置した。

真空セクションのリークは、イオン源、イオン入射系およびサイクロトロン本体系では、窒素ガスから大気に切り換える方式であるが、ビーム輸送系は窒素ガスだけの供給となっている。

真空排気系全体で使用されている構成要素の数量を、Table9に掲げる。ビーム輸送系のIP (60L/s および 500L/s) は合計 33 台、CRYO (1600L/s および 4000L/s) は 10 台、MSTMP (270L/s, 600L/s, 1000L/s および 2000L/s) は合計 15 台等となっている。また 4 インチ口径以上のゲートバルブは 45 台であり、L アングルバルブ（手動）が 45 台となっている。

### 3.2 真空排気系の機能および構成機器等の内容

#### 3.2.1 構成機器の略号表記

サイクロトロン装置全体を構成するそれぞれの機器は、多種類のものが広い範囲に配置され、しかも同一性能のものが数多く設置されているので、それらを効率的かつ容易に識別するため、以降における排気系統図での表示あるいは個別機器の特定などの目的で、英数字による略号を用いて表記している。以下に略号表記での具体例を示す。

TCGLB2\_PI : ビーム輸送系に設置されているワイドレンジ真空計で、LB コース上流側から 2 番目のもののうちのピラニゲージ。

ECP2 : ECR イオン源系の CRYO で上流側から 2 番目のもの。

CRP4 : サイクロトロン本体系のロータリーポンプで 4 番目のもの。

以上の具体例からも分かるように、最初の英字 1 文字が各系統すなわち E : ECR イオン源系、M : マルチカスプイオン源系、I : イオン入射系、C : サイクロトロン本体系および T : ビーム輸送系を示す。続く英文字 1 文字あるいは 2 文字が機器名の略号であり、例えば CG : Combination Gauge, CP : Cryogenic Pump, RP : Rotary Pumpなどを表す。次の英文字および数字は、機器の設置位置あるいは場所とその順番を特定する記号となっており、この例では LB2 : LB コースの上流側から 2 番目の意味となる。さらにアンダースコア以下の記号は、その機器の詳細情報を与えるものであり、前述の例では PI : Pirani gauge を示す。

#### 3.2.2 コントロール・表示

真空排気系の主要なコントロールは、1) 大気圧から高真空の規定圧力までの排気、2) 真空的および電気的トラブルからの機器の保護、3) 窒素ガスおよび大気による真空リークと真空系システムの停止、4) CRYO ポンプの再生などである。真空排気系の立ち上げおよび停止に関するシーケンスコントロール、GV の開閉動作に伴うインターロックなどの機能については、サイクロトロンの計算機制御とは独立した制御方式となっている。

真空排気系のコントロールあるいはインターロックのシーケンスは、UDC (Universal Device Controller) 内の ROM で実現されている<sup>21)</sup>。真空系のコントロールは、実際に機器が設置されている近傍のコントロールラックと、サイクロトロン制御室内のコントロールコンソール後方のコントロールラックの 2ヶ所で、現場 (LOCAL) および遠隔 (REMOTE) の二者択一での操作が可能となっている。真空排気系機器・装置の設定値の変更は、制御系の計算機からは不

可能であり、全て現場の機器側で行う設計となっている。

LOCALでの運転操作は、“Auto”, “Guide” および “Maintenance” の3つのモードで行える。このうちAutoモードは自動的な運転モードであり、大気圧から高真空領域までの真空立ち上げ時における真空ポンプの切り換えおよび真空バルブの開閉など、全てのシーケンスを自動で行える。Guideモードは、各ステップでのシーケンスの操作順序を表示灯の点滅により報知し、実際のON/OFF操作は人が状態を確認しながら段階的に行っていくものである。またMaintenanceモードは完全なマニュアル操作であり、操作の判断は人が行うものである。これらのうちREMOTEでの立ち上げ (Auto start) シーケンスの一例 (サイクロトロン本体系) をFig.12に掲げた。最初に粗引系をスタートしてから系統の圧力が13Paまで低下すると、粗引系はStopシーケンスに入って停止動作を開始するとともに、中間引系に移行して最初にCRP\_1を作動させた後にMSTMP (CTP) を起動する。CTPが定常回転に到達したところで吸気側の主バルブCMVを開き、中間引系のシーケンスは終了する。圧力が $1.3 \times 10^{-2}$ Paに低下すると、本引系のシーケンスが実行されてCRYO4台 (CCP\_1～CCP\_4) を順次起動し、いずれも低温 (250K以下) が達成されると本引系シーケンスおよびAuto startシーケンスが終了する。

各真空セクションの真空計圧力などの数値データは、250ms程度の間隔で定期的に計算機で収集され、サイクロトロン制御用メインコンソール上のCRTでのトレンド画面やパラメーター表示画面に利用される。さらに真空系で発生したアラーム信号についても、時系列のfault list作成など常時監視を行っている。

サイクロトロン制御室内のメインコンソール後方には、天井から懸架した大型のグラフィックパネル ( $2.2\text{mW} \times 1.7\text{mH}$ ) を設置して、各真空ポンプ、GV等の動作状況およびサイクロトロン本体圧力のデジタル値などを表示し、運転者が機器装置の動作状態を容易に把握できるようにした。各真空セクションの圧力数値は、サイクロトロン制御室内のコントロールラックに全て表示されるほか、このラックでは各セクションについてREMOTEでのON/OFF操作、GVの開閉およびリーク操作などが行える。

### 3.2.3 ガス放出量

ガス放出量の評価は、真空排気系設計での基本的重要事項であるため<sup>16), 20)</sup>、使用する代表的な構成材料等についてのガス放出率を従来データ<sup>15), 17), 18)</sup>、あるいはカタログデータなどを用いて評価した。

系統内のガス放出量をできるだけ低減するため、フランジ等の接続部およびGV等に使用するガスケットは、特に構造上の制約がない限りメタルシールを採用した。ビーム輸送系については、ガス放出量の低減とともに、放射化の抑制および軽量化による取り扱いの容易さなどを考慮し、ビームダクトはアルミニウム合金製とした。各真空セクション間の接続部などには、アルミニウム製ベローズを用いるのを基本としたが、強度的な問題などでやむを得ない場所にはSUS製のものを使用した。なおイオン入射系には、放射化の問題が無いことからSUSダクトを用いた。

アルミニウム構造材からの平均ガス放出率は、 $1.3 \times 10^{-8}\text{Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s} \cdot \text{m}^2$ <sup>19)</sup> であるが、約5

倍の余裕を見込んで  $6.7 \times 10^{-6}$  Pa・m<sup>3</sup>/s・m<sup>2</sup> 以下の仕様とし、また各真空セクション当りのリーク量は、 $1.3 \times 10^{-10}$  Pa・m<sup>3</sup>/s 以下に設定した。SUS 材料については、ベーキングなしで前述のガス放出率とするのは困難と考えられたため、ベーキングした場合の数値  $5.4 \times 10^{-9}$  Pa・m<sup>3</sup>/s・m<sup>2</sup><sup>18)</sup> を用いた。

ビームラインのベーキング温度は、アルミニウムダクトの最高使用温度が 145 °C 程度であること、真空計ゲージあるいは GV 等に使用されているプラスチック材料の耐熱性、真空系内吸着物の大部分は水分と予想されること、などの点を考慮し 120 °C 以下とした。ベーキング装置（後述 3.7 (1) 項参照）は可搬式で温度コントロールが可能な機能とした。

### 3.2.4 真空ポンプ

主要な真空ポンプについては、1) 運転時において大気側と連結されていない構造のもの、2) オイルベーパーなどの混入の可能性が低いもの、3) 回転あるいは摺動などの機械構造部分が少なく消耗部品も少ないもの、などを選定指針とした。

イオン入射系では、イオンビームのエネルギーが数 keV～数 100keV 程度あるため、ビーム衝撃による真空系内部金属材料のスパッタリングが問題となり、IP を導入した場合にはエレメントの消耗が激しくなることが予測されるので、CRYO を採用することとした。サイクロotron 本体系およびビーム輸送系については、それぞれ CRYO および IP を主真空ポンプに選定した。

メインポンプを起動するための圧力  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  Pa 程度までの補助排気系には、TMP を使用する。これらの TMP のうち排気容量 2000L/s 程度までの中小型ポンプに対しては、前述の清浄な真空環境の達成および軸受け部の潤滑オイル補充・交換、あるいはペアリング交換の保守<sup>22)</sup>などの点から、日本製の MSTMP を採用した。

真空排気系は連続運転となるため、MSTMP の停電時停止用バッテリーの交換および CRYO のオーバーホールなどの保守についても、少なくとも 12 ヶ月以上の点検間隔が確保できるようにした。

### 3.2.5 真空計

真空計は、真空排気時のポンプ起動・停止シーケンスの構成、GV あるいは真空リークのコントロール、さらには圧力の計測などの目的から、各真空セクションに少なくとも 1 セット設置する必要がある。したがって使用する真空計の性能は、大気圧からイオン入射系の到達圧力  $6.7 \times 10^{-6}$  Pa の  $1/10$  程度の高真空領域まで、広範囲な圧力計測を必要とする。また真空排気系は通年での運転となるため、真空計の長時間安定性および信頼性が要求される。

サイクロotron 装置には、大気圧から高真空領域まで 1 台で計測できるワイドレンジ真空計として、Balzers 社製の TPG-300 型を採用した。この真空計は、高真空領域における長時間の安定性および信頼性に優れ、主としてヨーロッパの加速器施設等での使用実績が豊富なものである<sup>23)</sup>。

TPG-300 真空計は、PI と Cold Cathode gauge (CC) 1 対から構成され、圧力範囲の自動切り換えにより大気圧から超高真空領域まで連続測定可能な機能を持つ。この CC は、従来のペニング型あるいはマグネットロン型ゲージを改良したものであり、高真空側での計測範囲が 3～

4桁程度拡張され、最高  $10^{-9}$ Pa の超高真空領域まで計測可能とされている。しかし従来のペニンギング真空計は、ゲージ内の電極部分等が油膜や炭化物などで汚れ易く、使用する圧力によっては数カ月毎の洗浄が必要になるなど、メンテナンスにおける問題点が指摘されている。

そこでわれわれは、実際の使用予定圧力より高い  $10^{-2} \sim 10^{-3}$ Pa で数 100h の“劣化促進試験”（連続運転）を実施し、BA ゲージとの比較から指示値の安定性および信頼性の確認試験を行った。その結果指示値の安定性および信頼性は、設計目標である到達圧力  $6.7 \times 10^{-5}$ Pa 程度の運転では、全く問題ないことが確かめられた（4.5.1 項参照）。

またこの真空計のコントローラーは、各種の半導体素子を搭載しているため、ガンマ線による耐放射線性試験も合わせて実施した。この試験結果から、サイクロトロン本体室や軽イオン室では、累積照射により放射線損傷が問題となる可能性が認められたため、コントローラーの設置場所などを検討した（4.5.2 項参照）。

### 3.2.6 ビーム診断ステーションおよび接続フランジ

イオンビーム診断のためのプロファイルモニター（PM）、X-Yスリット（SL）、アルミナモニター（AM）、ファラディーカップ（FC）などは、診断ステーションに設置されている（Photo. 1 参照）。これらの診断機器は、ビーム上流側から見て SL、PM、AM そして FC の順で配置されており、FC の位置がビーム光学上でのウエストに対応している。診断機器は、駆動系のベローズなど真空系内表面積の大きい部品も多数使用しているため、イオン入射系およびビーム輸送系でのガス放出量に大きな影響をおよぼす。診断機器を収納している診断ステーションは、イオン入射系ではステンレス（SUS）製でサイズが  $270\text{mm } \phi \times 400 \sim 800\text{mmL}$  であり、ビーム輸送系ではビームダクトと同様アルミニウム製で標準的なものが  $300\text{mm } \phi \times 500\text{mmL}$  となっている。また診断ステーションには、真空ポンプ、PI および CC の真空計ゲージ、Q マスフィルターディテクターなどのための予備ポートが設けられている。

ビームダクトの接続部や診断ステーションの診断機器取り付け部の接続フランジは、コンフラット（CF）型を採用した。ビームダクトの取り外し頻度が高いと考えられる部分、あるいは機械的に多少整合性が悪い場所などには、ベローズを使用した。

ビーム輸送系のコースエンドおよび中間ポートの直前には、絶縁耐圧  $20\text{kV}$  の絶縁フランジ ( $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{KOVAR}$ ) を挿入し、実験者側装置と電気的に絶縁した。

### 3.2.7 ゲートバルブ

ビームライン等に使用する真空セクション分割用の GV は、オールメタル仕様としてオイルフリーにするとともに、遠隔操作を可能とするため自動の圧空式とした。GV は、内部のガス放出量をできるだけ少なくするとともに、正圧・逆圧のいずれでもシール性能が維持できるようにした。主要な性能仕様は、バルブ本体 He リーク保証量  $1.3 \times 10^{-10}\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  以下、許容加熱温度  $125^\circ\text{C}$  以上、開閉寿命 1000 サイクル以上、シリンダー操作圧力  $4 \sim 6\text{kg/cm}^2\text{G}$  などである。全開時のコンダクタンスは、使用する 4 インチあるいは 6 インチのビームダクトと同程度が確保できるようにした。

また真空トラブルから機器を保護するため、速動型ゲートバルブ（FCV : Fast Closing Valve）

を合計8台配置した。このFCVの代表的な性能は、材質SUS304、閉鎖時間16ms、開放時間約3s、開閉寿命1000サイクル、本体および弁座のHeリーク保証量 $1 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下等である。なおFCVについての性能確認試験の結果は、4.6項で詳述する。

真空系統の停電時あるいは異常時には、イオン入射系、ビーム輸送系などの主要なGV等は自動的に閉鎖する。その後商用電源が復帰した場合は、必要に応じて再度真空ポンプおよびGVなどをシーケンスコントロールする。

### 3.3 イオン源系

イオン源は、陽子および重陽子の軽イオンを対象としたマルチカスプ(Multi-cusp)イオン源と、He以上の重イオン用としてECRイオン源(OCTOPUS)<sup>24) - 27)</sup>の2種類(ベルギー・IBA社製)が設置されている。これらのイオン源は、いずれも運転調整時にガスを導入してそれらの流量を制御するため、圧力が広範囲に変動する。

Fig.13はECRイオン源の排気系統図を示す。主真空ポンプには、第1ステージ、第2ステージおよび引き出しステージそれぞれにGVを介して日本製のMSTMPを設置し、共通の補助排気系ロータリーポンプ(ERPO)で排気する方式となっている。MSTMPの排気容量は、順にそれぞれ1000L/s、2000L/sおよび2000L/sとした。またイオン源では前述のようにガス負荷が大きいため、ERPOは各ステージの内容積に比較して大型のもの(排気速度180m<sup>3</sup>/h)を採用している。

真空ゲージは、3つのステージそれぞれにCCを設置して、圧力測定およびシーケンスコントロールを行っている。各ステージにおけるイオン源運転時の到達圧力は、第1ステージが $5.3 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 、第2ステージおよび引き出しステージが $3.8 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ を目標値とした。

マルチカスプイオン源の到達圧力の目標値は、ECRイオン源の第1ステージと同様 $5.3 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ である。イオン源本体の真空チャンバーには真空ポンプが取り付けられておらず、引き出し部直後の診断ステーションに1000L/sのMSTMPが設置されている。

### 3.4 イオン入射系

イオン入射系(入射系)は、マルチカスプイオン源およびECRイオン源からサイクロトロン垂直入射部までの範囲であり、真空セクションの数はイオンビームの進行方向順にVIAからVIDまで合計4である。これら4つの真空セクションは、主真空ポンプのCRYOが1台か2台かの相違を除いて、その他の部分はほぼ同様な構成となっている。各真空セクション内の圧力分布の評価から、真空ポンプの排気容量は500~600L/s程度で十分であることが分かったが、市販の小型CRYOの容量は1600L/sであるため、到達圧力にはかなりの余裕が見込まれる。

ビームダクトは、ビーム輸送系とは異なりイオンのエネルギーが低く、特に放射化などに対する配慮も必要ないため、ステンレス管を使用した。ビームダクトは、最大 $400 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 程度の大きなエミッタスの低エネルギーイオンビームの輸送を実現するため<sup>28)</sup>、6インチ管(外径152.4mm φ、内径146.4mm φ、肉厚3mm)を選択した。

真空セクションの代表的な例(VID)の系統図を、Fig.14に示す。主真空ポンプのCRYOは、2ヶ所の診断ステーション(IS2およびIS5)にそれぞれ1台づつ配置されているが、補助排気系のITP3(270L/s)はIS3のみに設置されている。またIS3には真空ゲージ1式(ICG4\_PIおよびICG4\_PE)が取り付けられているほか、3方弁ITV3によって切り換えられる窒素ガスおよび大気のリークラインも接続されている。

### 3.5 サイクロトロン本体系

サイクロトロン本体の真空排気系統図をFig.15に示す。本体の主真空ポンプは加速箱両側共振器(No.1およびNo.2)の外筒に各2台設置されているCRYO(排気速度4000L/s)である。旧型の930AVFサイクロトロンでは、11500L/sの油拡散ポンプが設置されているが、この油拡散ポンプをTMPに置換している例<sup>29)</sup>もある。最近建設されたサイクロトロンにおける主真空ポンプの構成は、TMPとCRYOの併用となっている例が多い<sup>13), 30) - 32)</sup>。原研AVFサイクロトロンでは、共振器が同軸型に改造されたため構造的に大型のTMPは取り付けにくいこと、本体内ガス放出量の大部分を占めると想定される水分に対して、大きな排気速度を持つ真空ポンプが効率的であること、などの理由からCRYOを選択した。

補助(中間)排気系には排気容量2000L/sのMSTMPが使われている。MSTMPは漏洩磁場の影響<sup>33) - 36)</sup>を受けるため、排気コンダクタンスがそれほど低下しない範囲で、サイクロトロン磁極空隙およびヨーク部分からできるだけ離して設置し、ポンプに作用する漏洩磁場の効果を抑制した。粗引系は、中間排気系とは独立した排気系とし、5000L/minの大型RPが単独で加速箱に接続されている。共振器No.1に取り付けられている片側のCRYO(CCP\_1)と、その近傍に設置されている中間排気系のMSTMP部分の状態をPhoto.2に示す。

また磁場補正用のトリムコイルが収納されている低真空部を排気するため、240L/minのRPが配置されている。この低真空部は、高真空部側との隔壁となっている銅製のアース板の変形・損傷を防止するため、両者の差圧が130Paを超過しないような圧力管理を行っている。この差圧管理は、前掲Fig.15中のCCG\_PI1とCCG\_PI2およびCCVで行われており、ショックアブソーバーも設置されている。インフレクター電極導入部分は、構造が複雑なため若干のリークが避けられず、このため小型のTMP(160L/s)を追加して局所的な真空悪化を改善している。

メインプローブ、デフレクタープローブ、ラーなど差動排気が必要な機器のために、47L/minの小型RPが設置されている。これらの各種プローブ類については、引き抜き操作時に差動排気部分の圧力を監視するため、汎用の真空ゲージ(V<sub>c</sub>)が取り付けられているほか、引き抜き/装着操作での自動化設備を備えているインフレクター・ラーには、自動運転シーケンスを構成するための真空スイッチ(V<sub>s</sub>)および圧力スイッチ(P<sub>s</sub>)も設置されている。

加速箱には圧力計測のため前述のPI(CCG\_PI1)およびCC(CCG\_PE)のほか、磁気シールド付きのBAゲージ(CIG)が配置され、さらにイオン入射系と同様窒素ガスおよび大気のリークラインも接続されている。使用している各種バルブのうち、遠隔操作が必要なものは主として圧空式を採用し、リークバルブは停電時に対応するため電磁式を用いた。

### 3.6 ビーム輸送系

ビーム輸送系は、サイクロトロン以降から全てのビームラインのコースエンドまでの広い範囲であり、合計18の真空セクションに分割して系統的に真空管理されている。これらビームライン全体の総延長は、約200mである。ビームダクトの材質は、イオンビームによる放射化の抑制、ガス放出量の低減および軽量化による操作性の向上などを考慮して、アルミニウム合金製(A6063)を選定した。ダクトは、ビーム輸送系のビーム光学的な検討<sup>37)</sup>およびダクト製造時の技術的な理由などにより、4インチ円管(外径110mm、内径104mm、肉厚3mm)とした。

主真空ポンプにはIPを採用した。ポンプの排気速度は、ビームダクトのコンダクタンスが1m当たり136L/sと比較的小さく、また遮蔽壁の厚さなどを考慮すると配置間隔は数m程度が現実的であることから、60L/sを選定した。しかし局的に特に大きなガス負荷が想定されるスイッキング電磁石およびS型チョッパー部分などには、500L/sのIPを設置した。

ビーム輸送系に特有な機器として、ビームダクト中に侵入する中性子を遮蔽するためのRS<sup>38)</sup>が、サイクロトロン本体室と各イオン室間およびイオン室相互間の各ビームライン毎に1基設置されている。RSは、真空中のチェンバー内で鉄およびポリエチレンの円柱状遮蔽体を遮蔽壁中で回転させる構造であり、全長が2mおよび1.2mの2種類である。このような構造を持つRSについては、1)閉鎖時に排気コンダクタンスが著しく減少する、2)真空系内構造物の表面積が大きくなるためガス放出量が多い、3)構造的にベーキングが困難である、などの問題がある。したがって、RSが収納されている遮蔽壁にできるだけ近いビームラインの両側に、IPを設置することとした。

真空セクションのうちの代表的な系統図の例をFig.16A～Fig.16Cに示す。Fig.16Aは、補助排気系が常設されているビーム振分室部分の真空セクション(VSM)の系統図であり、スイッキング電磁石(TSM)を中心としたビームライン分岐箇所が含まれる。円柱形状のTSMは8本のビームダクトを集合したチェンバーを内蔵し、しかも磁極面がチェンバー中に露出する構造となっているため、大きなガス放出量および排気容積となっている。このため補助排気系として、600L/sのMSTMP(TTPHD1)と500L/sのIP(TIP2)がTSMの近傍に配置され(Photo.3参照)，さらにビームダクト側にも270L/sのMSTMP1台(TTP3)と60L/sのIP2台(TIPLD1およびTIPHCl)が付加されている。

またFig.16Bに、軽イオンビームラインの例としてRSを含むコースエンドまでの連続した真空セクション(VLB0およびVLB1)を示す。これらのセクションには補助排気系が常設されておらず、真空立ち上げの場合には診断ステーションTSLB2のLアングルバルブTRVLB2、あるいはTRVLB3に、可搬式真空排気セットを接続して排気する。VLB0ではロータリーシャッターTRLBの両側にIP各1台(TIPLB1およびTIPLB2)が配置されているが、VLB1にはIP1台(TIPLB3)が設置されているだけである。またVLB0には実験装置を挿入するための中間ポート(LB1)が配置されており、その両端はGVで分離可能となっている。

RSには専用の小型RP(TRPRLB)が取り付けられており、駆動軸回転時におけるキャップシール部分の差動排気を行える機構となっている。このRPは、LB、LCおよびLDコースのRSに共通で使用されており、第3軽イオン室内側において配管で連結されている。真空ゲージ1対(TCGLB2

あるいはTCGLB3)と窒素ガスリークラインは、各真空セクションにそれぞれ1式設備されている。

Fig.16Cは、重イオンを対象としたビームコースの真空セクションVHE0の系統図を示す。このセクションは、第3重イオン室、第4重イオン室および第5重イオン室を含む広い範囲にわたっており、RS(TRHE)も存在するためIPは3台(TIPHE2, TIPHE3およびTIPHZ1)、真空ゲージが2対(TCGHE2およびTCGHZ1)、窒素ガスリークラインが2ヶ所に設置されている。このセクションには垂直ビームラインのポート(HZ1)を含む2つのターゲットポートも存在する。

### 3.7 その他

イオン入射系、サイクロトロン本体系およびビーム輸送系の真空セクションに組み込まれている機器の修理などで、系統を大気圧に戻す必要が生じた場合には、リモートコントロールによりリークバルブを開き、窒素ガスを導入できる。サイクロトロン本体のアース板およびビームラインのベローズ等差圧負荷が問題となる部分に対しては、2気圧の窒素ガスを減圧して流入させ、1気圧以上の差圧が生じないよう適切な圧力管理を行う。この置換用乾燥窒素ガスには、液体窒素貯蔵タンクからの蒸発ガスを利用している。

サイクロトロン本体系、イオン源およびイオン入射系のRPからの排気ガスは、有害ガス成分の混入も予想されることからそのまま室内には排気せず、室内に設置されている真空ポンプ排気用配管に接続して、サイクロトロン棟外に排出する。

常設の補助排気系が設置されていないビーム輸送系の真空セクションの排気には、合計8台の可搬式真空排気セットを使用する。また真空系のリークテストに使用するためのHeリークディテクター、ビームラインあるいは診断ステーションのためのベーキング装置を作製した。真空系内部の残留ガスあるいは放出ガス等の分析を行うためにQマスフィルター型ガス分析計(日本真空技術製のMSQ-150A型、分析質量数(M/e)範囲:1~150、最小検知分圧: $5 \times 10^{-11}$ Pa)を用意した。

以下のこれらの機器装置の内容について簡単に触れる。

#### (1) 可搬式真空排気セット

各イオン室内で中低真空領域の排気を行うため、300L/s程度のMSTMPを組み込んだ2種類の小型・軽量の可搬式真空排気セット(A型5台およびB型3台)を作製した。この真空排気セットA型およびB型の写真を、それぞれPhoto.4AおよびPhoto.4Bに示す。これらの排気セットは、イオン入射系およびビーム輸送系で共通に使用でき、各真空セクションに配置されている補助排気用ポート(L型バルブ)に接続して使用する。排気セットA型は、MSTMPとRP本体およびそれらのコントローラー等を含む機器全てを鉄フレーム内に収納しているが、一方B型はMSTMP本体のみを排気用ポートに直結し、その排気をフレキシブルホースでRP側に接続する方式となっている。

排気セットは、大気圧から $10^{-1} \sim 10^{-2}$ Paのイオンポンプ作動可能圧力まで、数h程度で排気できる能力を有する。粗引用のRPは、200L/min程度の直結型を使用した。これらの排気セ

ットの運転は、バルブの開閉およびポンプの起動・停止などを逐次手動で行うが、その動作条件には当該真空セクションのTPG-300からのインターロック出力を組み込み、簡単なインターロックシーケンスを構築している。

いずれの排気セットにも台車を付加するとともに、A型が530W×530D×930H、B型は550W×800D×900Hの大きさに制限して、イオン室内に設置されている荷物運搬用のダムウェイター(800W×1000D×1200H、最大積載重量500kg)に容易に搭載できる構造とした。

### (2) ヘリウムリークディテクター

ヘリウムリークディテクター本体には、日本真空技術製のDLMS-TP2型を採用した。今回製作したディテクターには、2台のソープショーンポンプと1台のRPおよび標準リークを付加し、放出ガスの多い部分などのリーク測定を行う場合に、2台のうちのいずれか1台のソープショーンポンプを、手動バルブにより切り換えて使用できる構成とした。このヘリウムリークディテクターの真空排気系統図をFig.17に、外観の写真をPhoto.5に示す。

主要な性能仕様は、最小検出リーク値が $1.3 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 、主排気系のTMP排気速度は50L/s、真空計はペニング真空計、供給電源はAC100Vなどである。

### (3) ベーキング装置

可搬式のコントローラー2台と3種類のベーキングヒーターを製作した。コントローラーは、熱電対による温度検出方式で、出力および温度調整器により最大200Vで10Aの出力が可能となっている。ベーキングヒーターは、1kW/mの最大発熱量を持つリボンヒーターで、全長1m、2mおよび3mのものをそれぞれ2本づつ製作した。

Table 9 サイクロトロン装置の真空排気系構成要素の数量

真 空 排 気 系 の 構 成 要 素	数 量
スパッターアイオンポンプ(60および500 L/s)	33
クライオポンプ(1600および4000 L/s)	10
磁気浮上式ターボ分子ポンプ(300、600、1000 および2000 L/s)	15
ロータリーポンプ	22
ゲートバルブ(オールメタル: 4インチ以上)	45
速動バルブ(オールメタル: 4インチ以上)	8
L型バルブ(4インチ)	45
ワイドレンジ真空計(型式: TPG-300)	30
電離真空計(型式: MIG-921)	4
可搬式真空排気セット(AおよびB型)	8

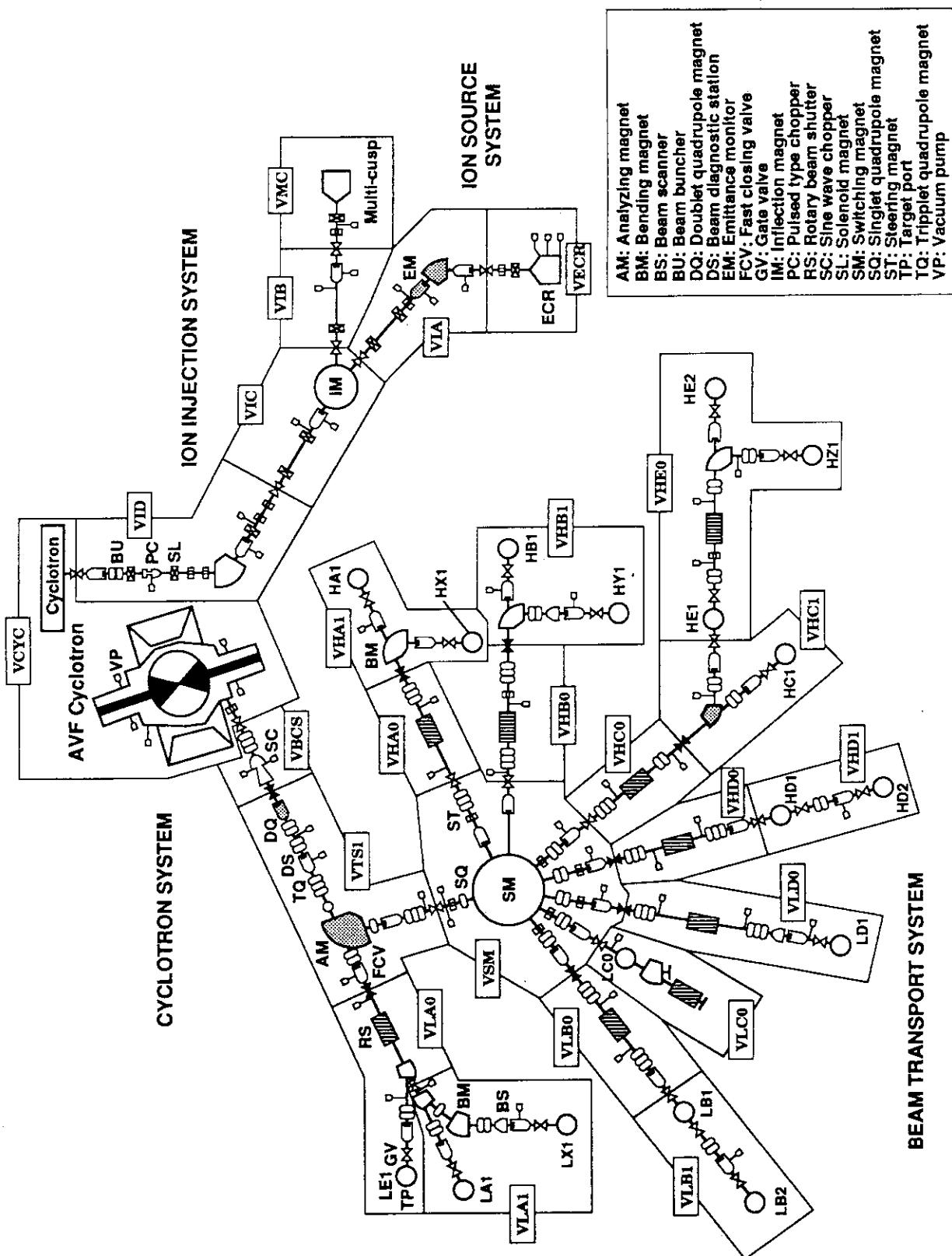


Fig.11 サイクロトロン装置の全体構成および真空セクション分割図

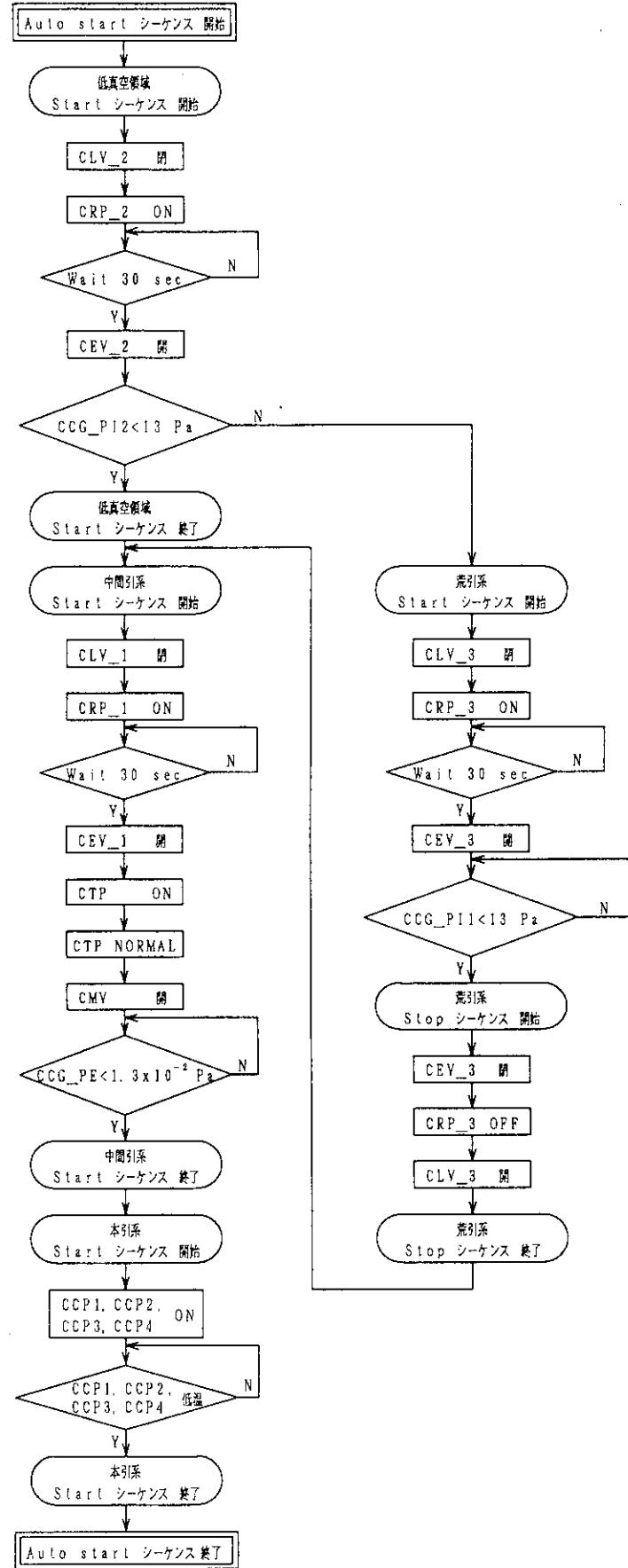


Fig.12 サイクロトロン本体真空排気運転シーケンスフローチャート

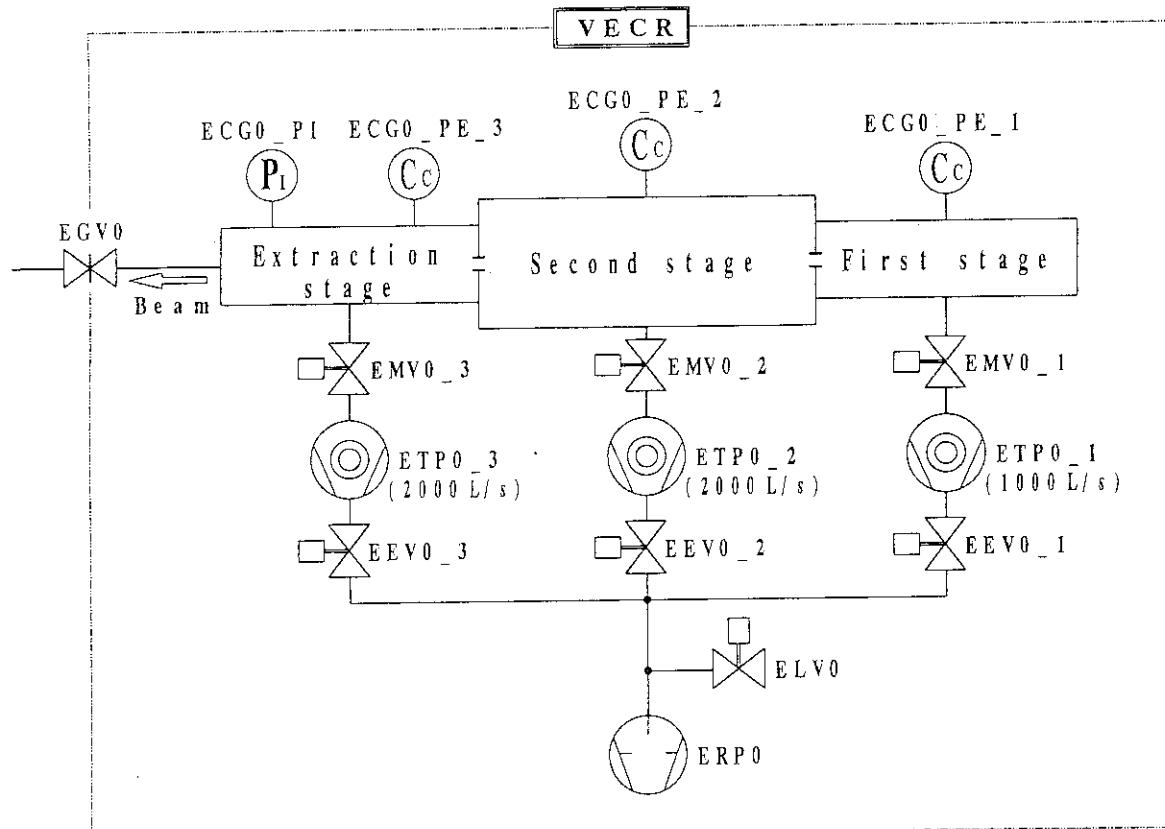


Fig.13 E C R イオノン源真空排気系統図

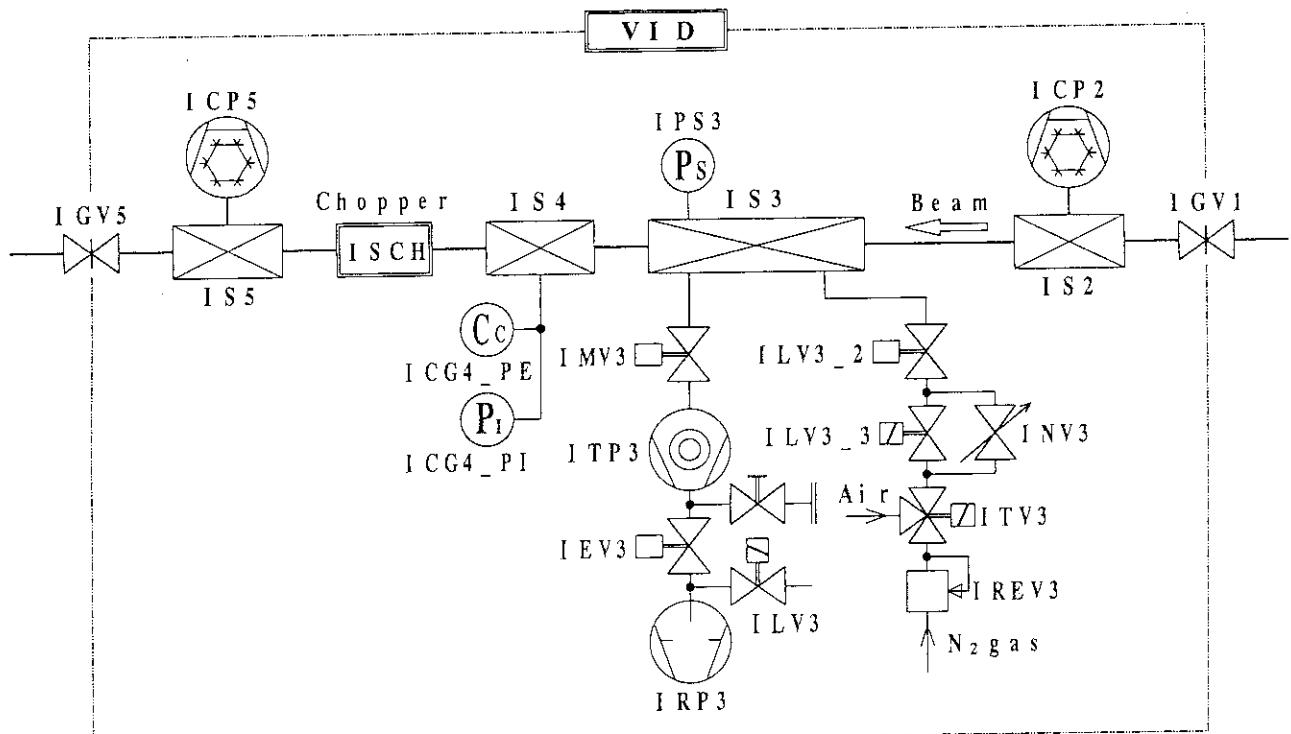


Fig.14 イオノン入射系真空セクション(VID) 系統図

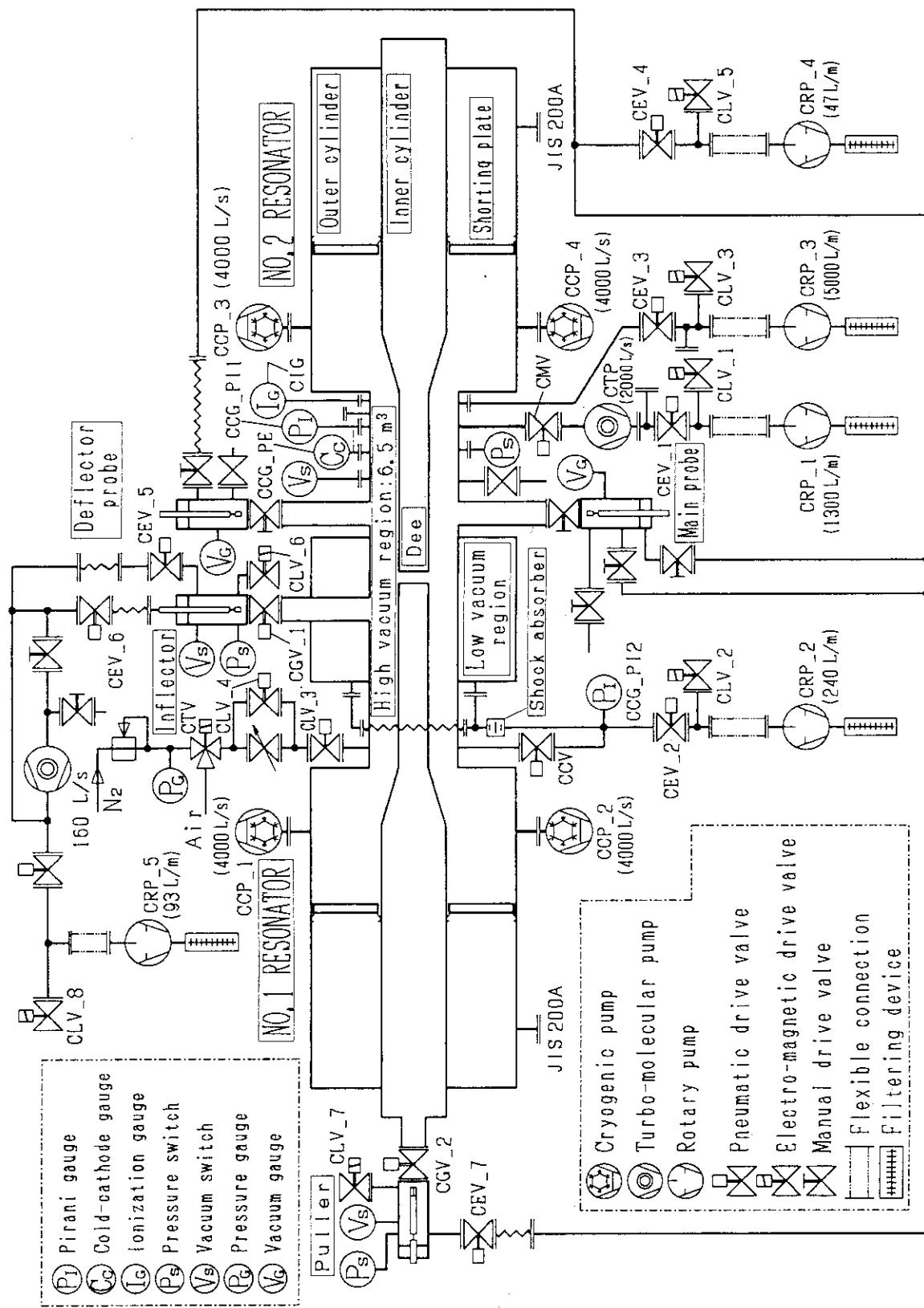


Fig.15 原研AVFサイクロトロン本体の真空排気系統図

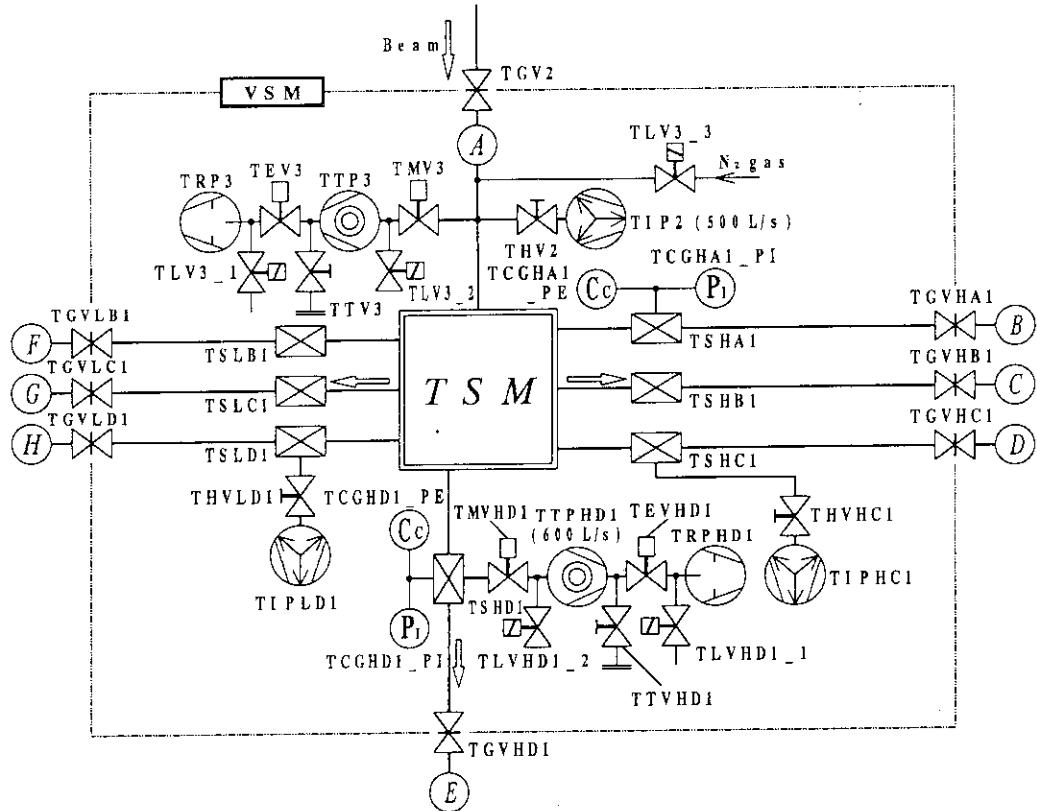


Fig.16 A ビーム輸送系真空セクション（VSM）系統図

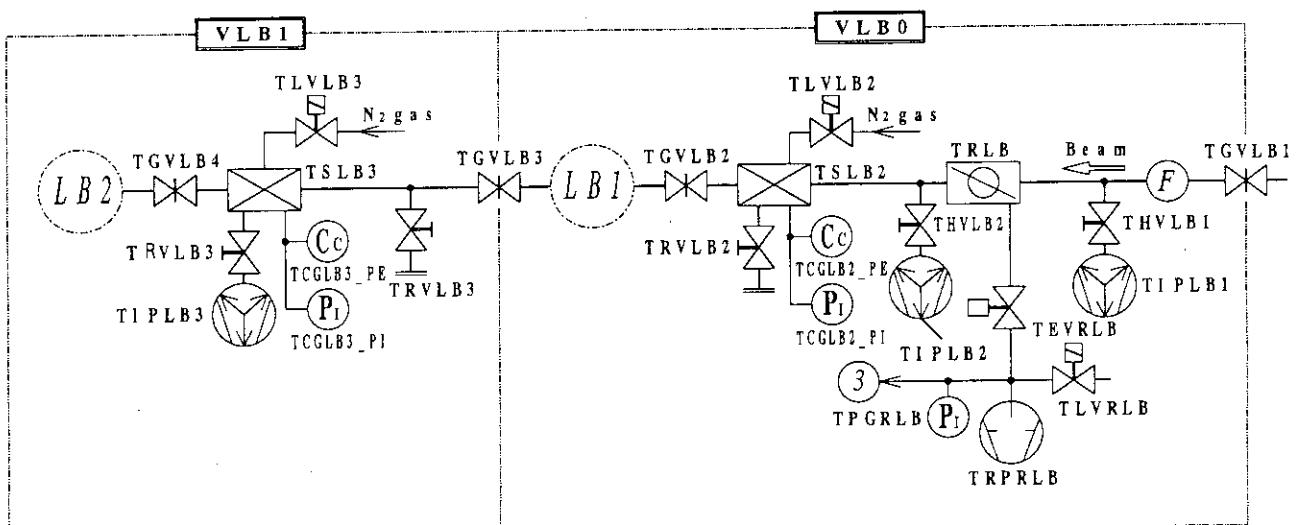


Fig.16 B ビーム輸送系真空セクション（VLB0）および（VLB1）系統図

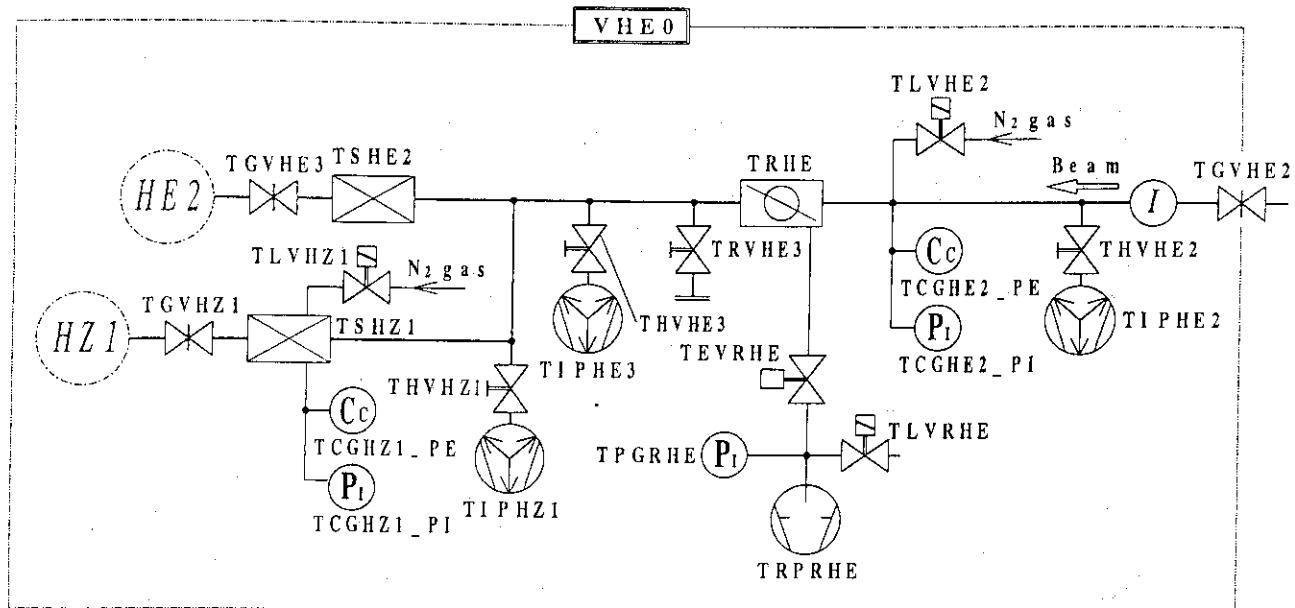


Fig.16 C ビーム輸送系真空セクション（VHE 0）系統図

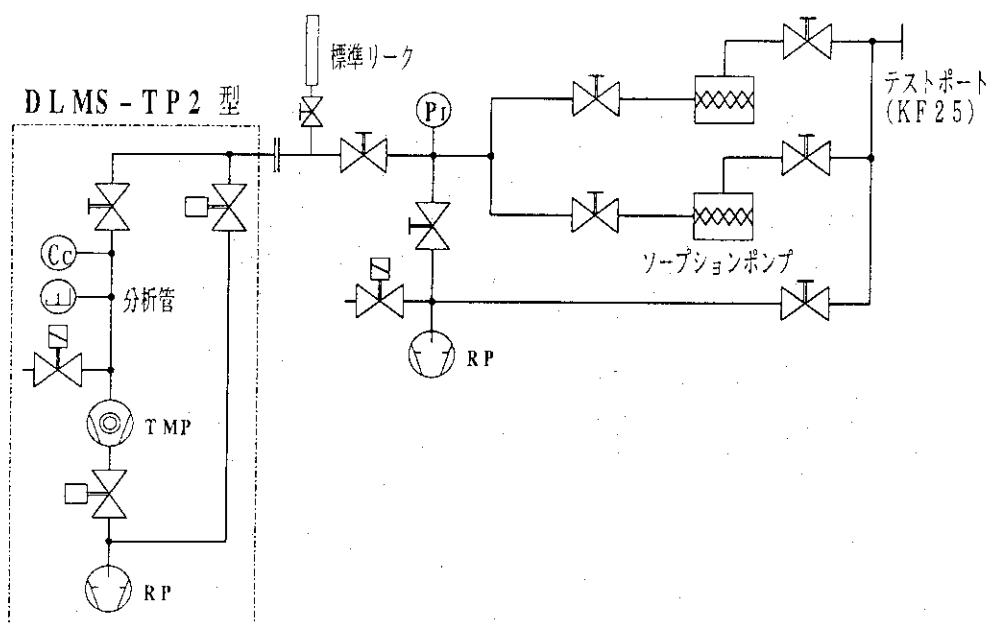


Fig.17 ヘリウムリークディテクター排気系統図

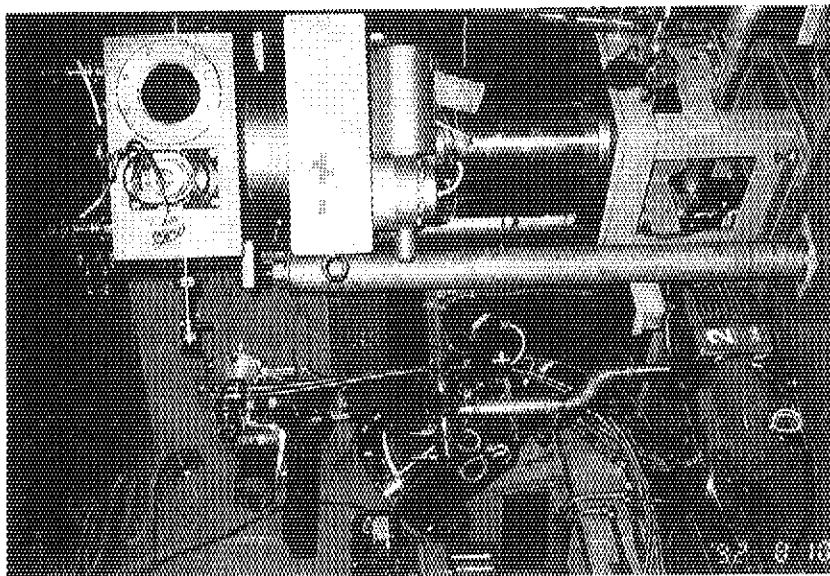


Photo. 1 ビーム診断ステーションの一例 (TSLA2)。

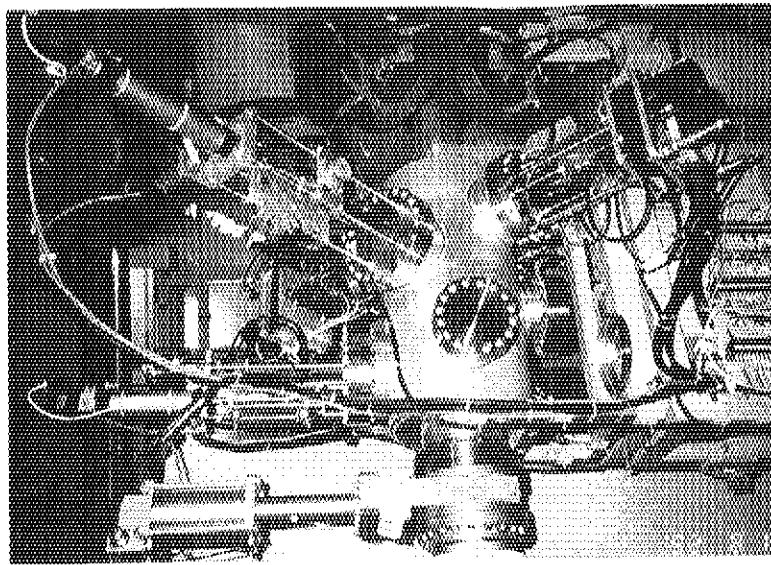


Photo. 2

サイクロotron本体の真空排気系の一部。中間排気系のMSTMP (CTR : 2000 L/s), 主真空ポンプのCRYO (CCP<sub>1</sub> : 4000 L/s), 空気用RP (CRP<sub>4</sub> : 47 L/min) および差動排気用RP (CRP<sub>4</sub> : 47 L/min) および真空ゲージ (CCG-PE およびCCG-P1) 等が配置されている。

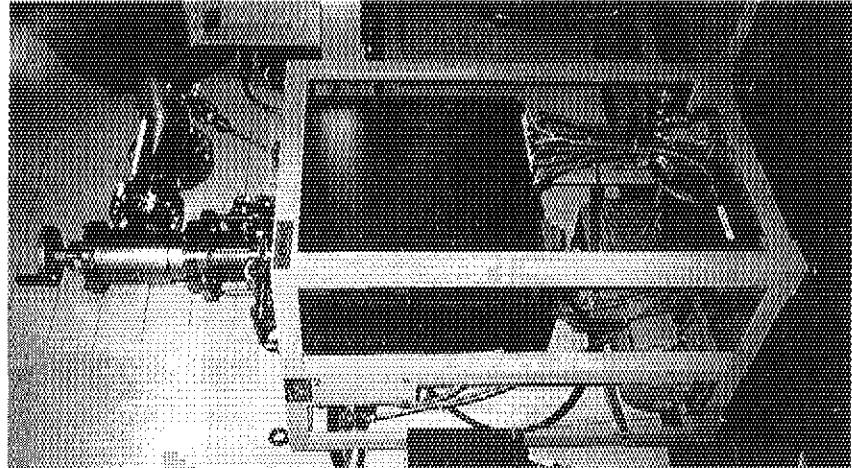


Photo. 3 ピーム輸送系の真空排気系の一例。真空セクション VTS 1 と VSM の境界部分。中央にゲートバルブ TGV 2, MSTMP および RP (TTP 2 と TTP 3 :  $270 \text{ L/s}$ , TRP 2 と TRP 3 :  $240 \text{ L/min}$ )、左側にイオンポンプ (TIP 2:  $500 \text{ L/s}$ ) が設置されている。

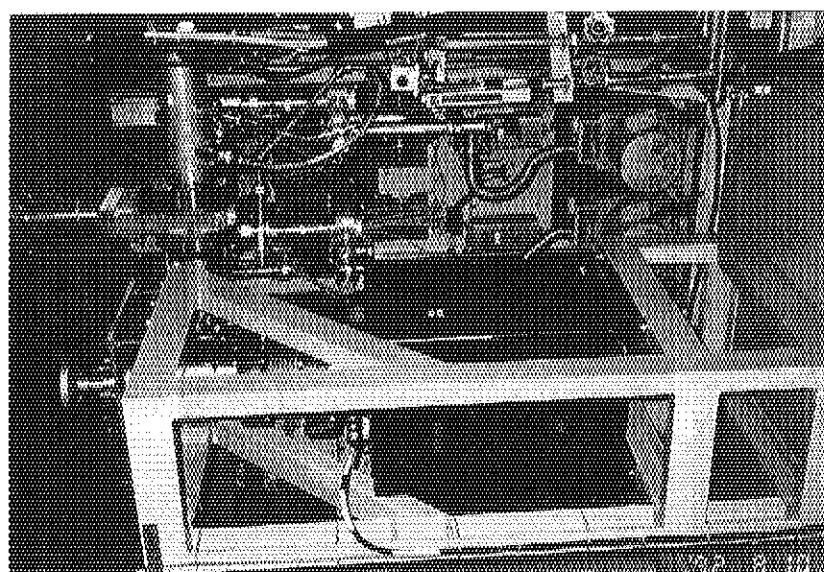


Photo. 4 A 可搬式真空排気セット A 型の取り付け例（第3重イオン室内の HA コースでロータリーチャッター - TRHA の直後）。

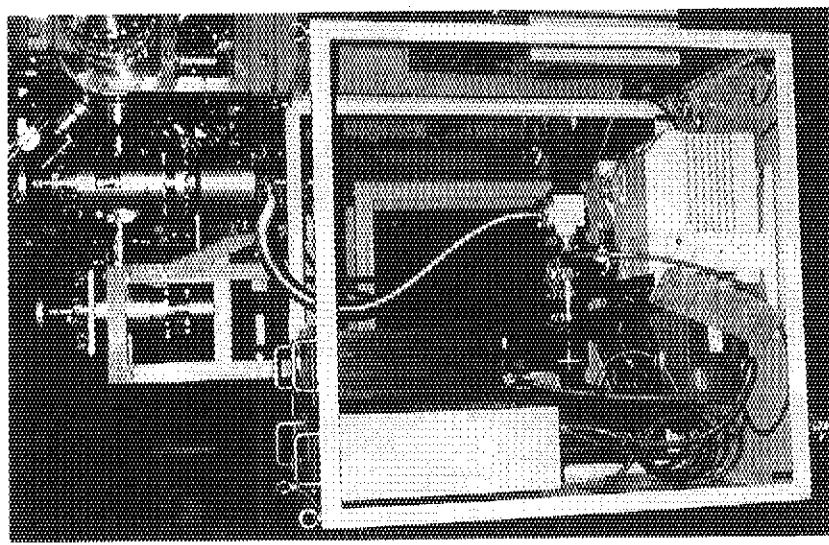


Photo.4 B 可搬式真空排気セッタB型の取り付け例  
(TSLB3)。

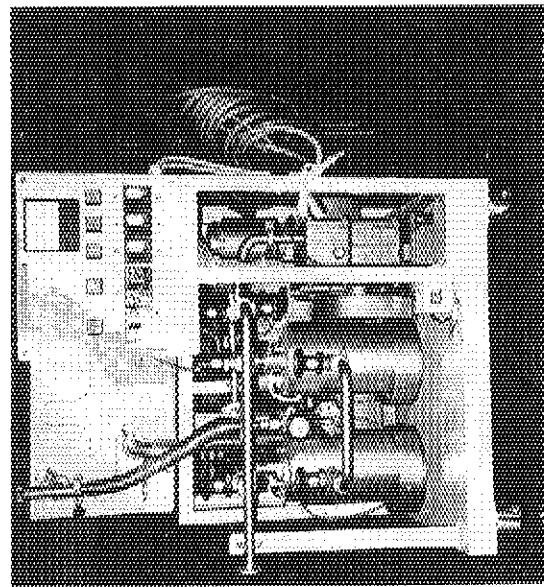


Photo.5 合車付きのヘリウムリードイテクター。手前  
上部に電源回路のブレーカー、下部に2台のソ  
ープンボンブおよびRPが見える。

## 4. 真空排気系および機器装置等の特性

真空排気系の特性として、サイクロトロン本体およびビーム輸送系の代表的な真空セクションの排気特性、本体の残留ガス分析、アルミニウムビームダクトのガス放出率の測定結果を示した。またワイドレンジ真空計の信頼性および耐放射線性試験、速動バルブの性能試験の結果についても掲げた。

### 4.1 サイクロトロン本体の排気特性

サイクロトロン本体加速箱の排気特性測定結果の一例（A）をFig.18に示す。この測定を開始した時点での加速箱は、静電デフレクターをNo.2号機からNo.1号機に交換するため、窒素置換の後大気リークに切り換えてから約1日程度放置していた状態であった。

加速箱内の圧力は、排気開始（CRP\_3運転）後約10分で3桁程度減少し $10^2\text{Pa}$ まで低下した。さらにその10分後には、すでに定速回転数に達しているCTP（MSTMP）の主バルブCMVが開放できる $1.3 \times 10^1\text{Pa}$ に到達した。圧力はMSTMP系統の排気効果により約8分間で2桁減少して $10^{-1}\text{Pa}$ になり、排気開始後33分でCRYOが起動された。CRYOポンプ第2ステージの温度は、初期の288Kから15K程度まで約80分でほぼ直線的に $3.4\text{K}/\text{min}$ の割合で下降した。CRYOの排気効果は、圧力降下の曲線からは明確に判定できないが、加速箱の圧力はCRYO起動後約2.5hで2桁程度下がり、 $1 \times 10^{-3}\text{Pa}$ となった。その後加速箱の圧力は、経過時間10hで $2.3 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 、19hで $1.3 \times 10^{-4}\text{Pa}$ まで徐々に減少した。到達圧力 $6.7 \times 10^{-5}\text{Pa}$ までの排気時間は、前述のように20h程度を設計目標値としているが、この測定の場合デフレクター交換などでの放出ガスの影響も予測されることから、満足な結果は得られなかった。

この測定でのサイクロトロン本体低真空中部および高真空中部における初期の排気特性の結果を、前述（2.2.1項）の計算結果と合わせてFig.19AおよびFig.19Bに示す。高真空中部ではFig.19Aに見られるように、排気開始後最初の約10分間で3桁程度の急速な圧力降下が観測されるが、次の10分間では初期の減衰勾配の約 $1/4$ に低下していく。しかしその直後に補助排気系のMSTMPの排気系統が作動するため、再び圧力は急激な減少を示す。大気圧から1Paまでの排気時間の測定値は、計算値と全体的にほぼ類似の傾向を示すとともに、経過時間も約25分であり計算値の約24分と良い一致を示した。

Fig.19Bに示した低真空中部の測定値は、排気開始後約22分まで高真空中部と同様に約4桁の減少を示すが、13Paで専用のCRP\_2に切り換えてから40分後での圧力は、初期値の $1/3$ 程度まで低下するに過ぎない。計算による排気特性との比較では、CRP\_2に切り換えた後の圧力降下部分で、両者の相違が拡大している。この理由は、10Pa以下で急激にCRP\_2の排気速度が低下すること、粘性流から中間流領域に移行するため系の実効的なコンダクタンスが減少すること等が考えられる。

またFig.20には排気時間約300hまでの別の測定例（B）を示すが、この時の加速箱は事前

の計画停電のため、約1週間程度の間（窒素リーク後）大気に戻していた状態であり、特に本体内挿入機器の交換などは行っていない場合である。CRP\_3による排気開始後約25分程度でMSTMPが起動可能となり、CRYOも前掲Fig.18の測定と同様約33分で起動した。しかしながらこの測定では、排気開始後約1.4hで真空計ゲージの誤動作からCRYOがいったん停止したため（温度は約86K）、その後ゲージを復旧して約5h後に再度CRYOを起動した。圧力は排気時間20hで $1.1 \times 10^{-4}$ Paまで低下し、その後サイクロトロンの運転により一時的に増加に転じたものの、80h後には $2.8 \times 10^{-5}$ Paまで減少した。さらに数回のサイクロトロン運転を経た約290h後で、圧力は $1.1 \times 10^{-5}$ Paまで到達した。

この排気特性測定におけるCRYOの一時停止およびサイクロトロンの運転期間は、圧力曲線の全体的な減衰傾向を考慮すると、本来の減衰状態にはそれほど影響を与えていないと思われる。この仮定を基にすると、前述の目標到達圧力 $6.7 \times 10^{-5}$ Paまで低下する時間は40h程度と推定され、目標値の20hに近い数値が得られた。

#### 4.2 ビーム輸送系における排気特性測定の一例

ビーム輸送系のうち、サイクロトロン本体に近い真空セクション（VTS1）での排気特性の測定例をFig.21に示す。このVTS1は、S型ビームチョッパー後のビーム輸送系基幹コースから、分析電磁石TAMを介してLAコースと、スイッチング電磁石TSW側への偏向コースとに分岐される部分である。真空セクションには、300L/sおよび600L/sのMSTMPからなる2系統の補助排気系、および60L/sと500L/sのIPから構成されている主排気系が常設されている。

排気特性の測定は、真空セクションが約1気圧のN<sub>2</sub>雰囲気に25h程度放置された後開始された。RPによる排気開始後約6min（MSTMPはすでに定速回転数に達して待機状態になっている）で、MSTMP本体直前の主バルブ（MV）が開放されると、圧力はその後約4minで約4桁の急激な減少を示した。排気開始後14min後に手動でIPを起動すると、圧力は1h後には $2.6 \times 10^{-5}$ Pa、6.3h(380min)後には $5.4 \times 10^{-6}$ Paまで低下した。

この測定結果によると、大気圧から設計到達圧力 $6.7 \times 10^{-5}$ Paまでの排気時間は約25minとなっているが、この時間は設計目標値の6hに比較して非常に短時間であり、極めて良好な排気特性が実現されている。

#### 4.3 サイクロトロン本体の残留ガス分析

サイクロトロン加速箱内の残留ガスの分析は、同部分における真空リークあるいは内部放出ガスの診断などの基礎データとして重要である。ここではサイクロトロン内部の真空圧力が比較的高かった場合と定常時に近い状態において、Qマスフィルター分析計（Qマス）を用いて測定した2つの例を、それぞれFig.22AとFig.22Bに示す。測定に使用したQマスは、前述のMSQ-150A型であり、質量（M/e）分析範囲は1~150である。

Fig.22Aは、全圧 $3.3 \times 10^{-4}$ Paでの測定結果である。この測定は、すでに共振器内部のコンタクトフィンガー用圧空細管接続部分で小さなリーク（測定時点では不明であった）が発生し

ていて、加速箱の真空圧力が  $10^{-4}$ Pa のオーダーで推移していた状態で行われた。測定されたスペクトルは、 $H_2O^+$  や  $N^+$  の小さなピークが観測されたものの、空気成分 ( $N_2^+$  と  $O_2^+$  による主ピークが約 4 : 1 で出現する) の典型的な形を示した。なお圧空接続部修理後における加速箱内の圧力は、 $1 \sim 2 \times 10^{-5}$ Pa で推移するように改善された。

Fig.22B は、全圧  $1.4 \times 10^{-5}$ Pa の定常状態時に測定したスペクトルであり、通常リークの存在しない正常な真空系において観測される  $H_2O^+$  および  $OH^+$  の大きなピークが見られた。このほか、オイルあるいはグリース類に起因するハンドロカーボン系生成ガスと考えられる  $M/e$  の大きい数多くの小さなピーク ( $C_2H_3^+$ ,  $C_2H_5^+$ ,  $C_3H_7^+$  など) が測定された。

#### 4.4 ビームダクトのガス放出率測定

特殊押し出し工法により製造されたアルミニウムダクト（アルミニウム合金：A6063-T6）について、オリフィス法により室温でガス放出率を測定した結果および測定方法の概略を Fig. 23 に示す。オリフィスは 10mm 径とし、前後に BA ゲージを設置して計測した。測定試料は、長さ 2.0m のチェンバー（内径 180mm、肉厚 5mm）形状で、脱脂処理したもの用いた。また試料の排気には、排気速度 220L/s の TMP を組み込んだ排気装置を使用した。

測定開始後 10 分以降では、アルミニウムダクトのガス放出率は、ほぼ排気時間に比例して（正確には排気時間の約 1.1 乗で）減少する。この測定結果によると、ビーム輸送系で圧力分布の計算に使用したガス放出率  $6.7 \times 10^{-8}$ Pa · m<sup>3</sup> / s · m<sup>2</sup> の数値は、排気開始後約 65h で得られている。

#### 4.5 ワイドレンジ真空計の信頼性確認試験

##### 4.5.1 真空計ゲージ指示値の信頼性試験

ペニング型ゲージの一種である CC の長時間安定性を確かめるため、実際の使用予定圧力より高い  $10^{-2} \sim 10^{-3}$ Pa での“劣化促進試験”を行い、指示値の安定性および信頼性を試験した。この試験では、TMP を備えた試験チェンバーに CC および BA ゲージを取り付け、数種類の圧力でそれれ数 100h 運転後、 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ Pa 程度の高真空領域内で圧力を変化させ、両者の比較測定を行った。

測定結果の一例を Fig.24 に示す。圧力  $5 \times 10^{-2}$ Pa および  $5 \times 10^{-3}$ Pa でそれぞれ 470h 程度、さらにその後  $2 \times 10^{-6}$ Pa で約 100h の試験を行ったところ、指示圧力は見かけ上 30 % 程度減少した。BA ゲージの脱ガス処理後の値を基準にすると、約 15 % 程度の感度変化が発生していることになる。

これらの試験の結果、 $5 \times 10^{-3}$ Pa では CC の相対感度は変化しなかったが、 $5 \times 10^{-2}$ Pa では約 500h で 15 % 程度の見かけの感度増加が発生した。また一連の試験後、ゲージ内部のアルコールによる洗浄と 70 °C での熱処理によるクリーニング効果も確かめたが、指示値の相対的な変化は前述の圧力範囲でおおよそ 10 ~ 50 % に達した。

実際に運用する真空セクションの圧力が、到達圧力目標値の 10 倍の  $6.7 \times 10^{-4}$ Pa 程度と想定

し、圧力指示値の変動幅を約20%程度まで許容して、さらにゲージ内の汚れが指示圧力と経過時間の積に比例するという条件では、CCのゲージ部分は約39000h（約4.5年）までメインテナンスフリーと推測される。

#### 4.5.2 真空計コントローラーの耐放射線性試験

圧力の指示値は、対象とする真空セクションの設置場所においても読み取れる設計としたため、真空計コントローラーのTPG-300(CG)は計測ゲージの近傍に配置されることが想定される。そのため特にサイクロトロン本体室や軽イオン室内では、イオンビーム照射での2次放射線による損傷が考えられるので、あらかじめガンマ線に対する概略の耐放射線性を評価し、CGの設置位置などを検討した。

CGの照射試験は、高崎研究所のRI工学試験棟の円筒状線源( $^{60}\text{Co}$ , 26.6PBq)を用いて、アラニン線量計<sup>39)</sup>で測定した平均照射線量率 $0.25\text{C}/\text{kg} \cdot \text{h}$  ( $9.68 \times 10^3\text{R}/\text{h}$ )で実施した。その結果、照射時間11.5hでCGは完全に損傷し、圧力指示値の計測・表示等の動作は不能となった。この時の照射線量は $2.88\text{C}/\text{kg}$  ( $1.1 \times 10^4\text{R}$ )となり、シリコン中の吸収線量(Gy)に換算すると、空気およびシリコンの質量エネルギー吸収係数はいずれも $0.0266\text{cm}^2/\text{g}$  [文献40]で各元素毎に与えられている表の値から、ラグランジェ補間で $1.25\text{MeV}$ のエネルギーに対して求めた値]であるので、 $97\text{Gy}$ と求まる。したがって各種の半導体素子がガンマ線に対して一般的に $50\sim 100\text{Gy}$ で損傷するとされており<sup>41)~44)</sup>、CGがCMOS Static RAMなどのICパートを搭載していることを考慮すると、前述の吸収線量の数値は妥当な結果と思われる。

一方サイクロトロン本体室での集積線量は、年間のサイクロトロンの運転時間が約3600hで、軽イオンビームと重イオンビームの利用割合を40%と60%とし、線量当量の評価<sup>45)</sup>におけるいくつかの仮定を基にして計算すると、周囲の壁面部分で中性子線の寄与が $100\sim 300\text{Sv}/\text{y}$ 程度となる。ここでCGに対する中性子線とガンマ線の照射効果が等価であるとすると、本体室内では1年内に損傷することになる。しかし半導体が搭載されているこれらの機器を保護するため、本体室内に遮蔽体を配置するのは空間的にも非効率的で、しかも各種の室内作業に支障を来すことから、それらは放射線レベルが低い本体室直下のサイクロトロン本体ピット室に設置した。また第1軽イオン室では、技術的な理由により同室内に配置することが必要となつたため、ターゲット部分からの散乱放射線の影響が最も小さくなるビームライン上流方向の壁面近傍(約 $140\text{Sv}/\text{y}$ )に、真空計用のコントロールラックを設置した。

#### 4.6 速動バルブの性能試験

ビーム輸送系で使用している速動バルブは、オールメタル仕様で新たに設計・製作されたものであるため、動作時間およびHeリーキ量などの性能試験を実施した。それらの試験結果をTable10に示す。FCVの開閉動作は2分間のインターバルで行い、閉鎖の動作時間は光センサーを用いて高精度で測定したが、開放動作はストップウォッチを使用して計測した。圧空の圧力は $4.5\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$ であり、開閉動作は合計1000回まで実施した。開閉動作時間の測定は100回毎に行い、また本体および弁座部分のHeリーキ量は500回毎にチェックした。FCVの閉鎖時間は、開閉

動作1000回後においても16msが保持されていることが確かめられたが、Heリーキ量については本体部分が初期値の35%増の $1 \times 10^{-10}$ Pa・m<sup>3</sup>/s、弁座部分が約8倍の $6.4 \times 10^{-10}$ Pa・m<sup>3</sup>/sとなった。これらの結果から、FCVの性能は開閉サイクル1000回以上、本体リーキ量 $1 \times 10^{-9}$ Pa・m<sup>3</sup>/s以下等の設計仕様値を満足することが確かめられた。

Table 10 速動バルブの動作・性能試験結果

動作回数	閉鎖時間 m s	開放時間 s	He 漏洩 試験		真空度変化
			本 体	弁 座	
			Pa · m <sup>3</sup> / s		
1	15. 90	2. 69	5. 8 × 10 <sup>-10</sup> 以下	5. 8 × 10 <sup>-10</sup> 以下	異常なし
100	15. 85	2. 80	—	—	"
200	15. 85	2. 72	—	—	"
300	15. 85	2. 88	—	—	"
400	15. 90	2. 72	—	—	"
500	15. 95	2. 75	7. 4 × 10 <sup>-10</sup> 以下	7. 4 × 10 <sup>-10</sup> 以下	"
600	15. 95	2. 78	—	—	"
700	15. 95	2. 72	—	—	"
800	15. 95	2. 66	—	—	"
900	15. 95	2. 69	—	—	"
1000	16. 00	2. 96	8. 0 × 10 <sup>-10</sup> 以下	4. 8 × 10 <sup>-9</sup> 以下	"

註) He漏洩試験の測定値は、Heガスを封入してから5分後の値とした。また圧空操作圧力は4.5 kg/cm<sup>2</sup>Gとした。

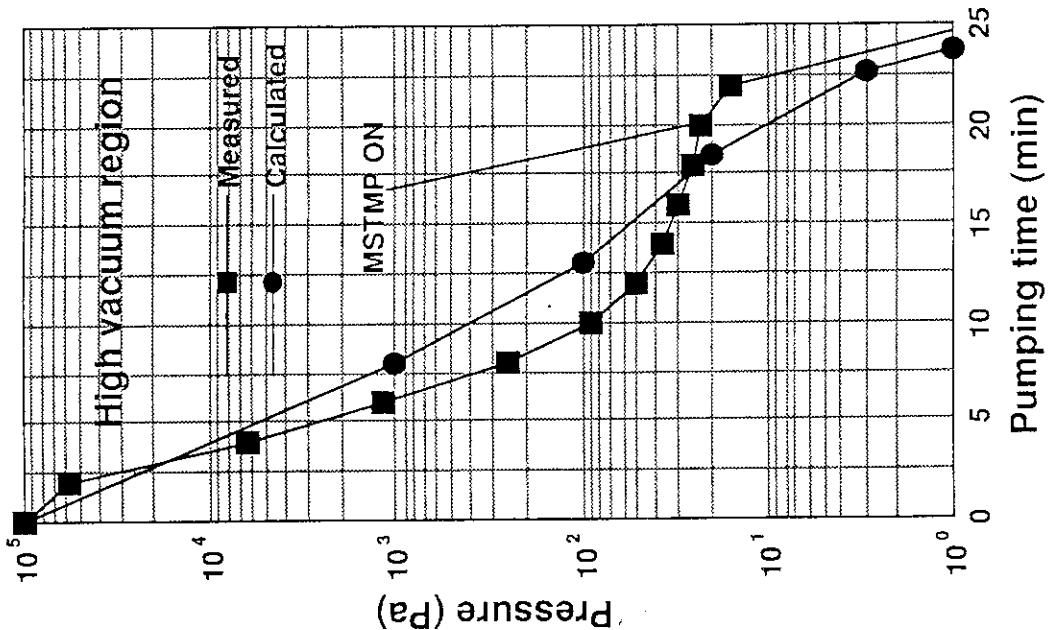


Fig.19 A 原研 AVF サイクロトロン本体高真空領域の初期排気特性  
測定結果の一例 (A)

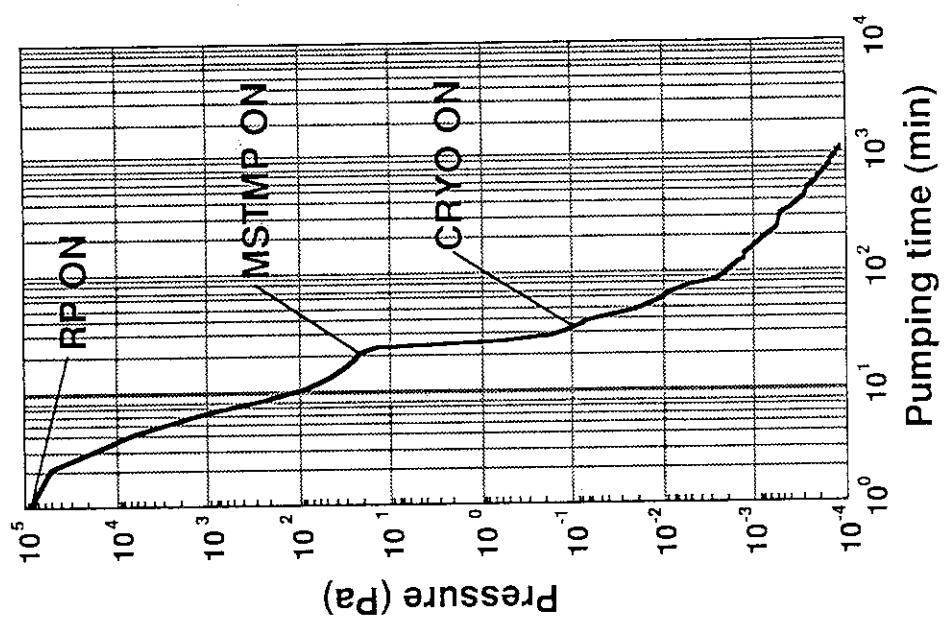


Fig.18 原研 AVF サイクロトロン本体加速箱の排気特性  
測定結果の一例 (A)

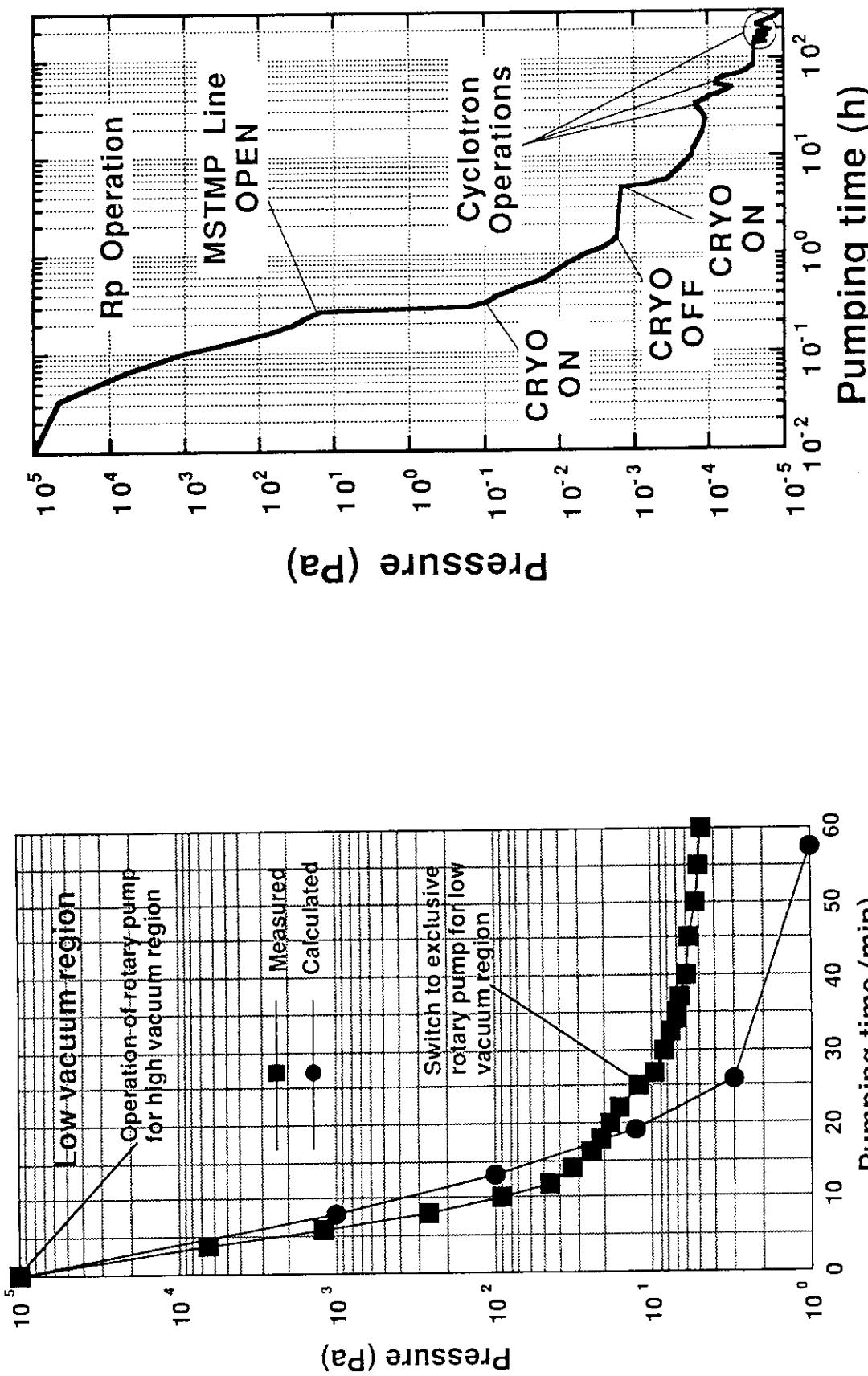


Fig.20 原研 AVFサイクロトロン本体加速器の排気特性  
測定結果の一例 (B)

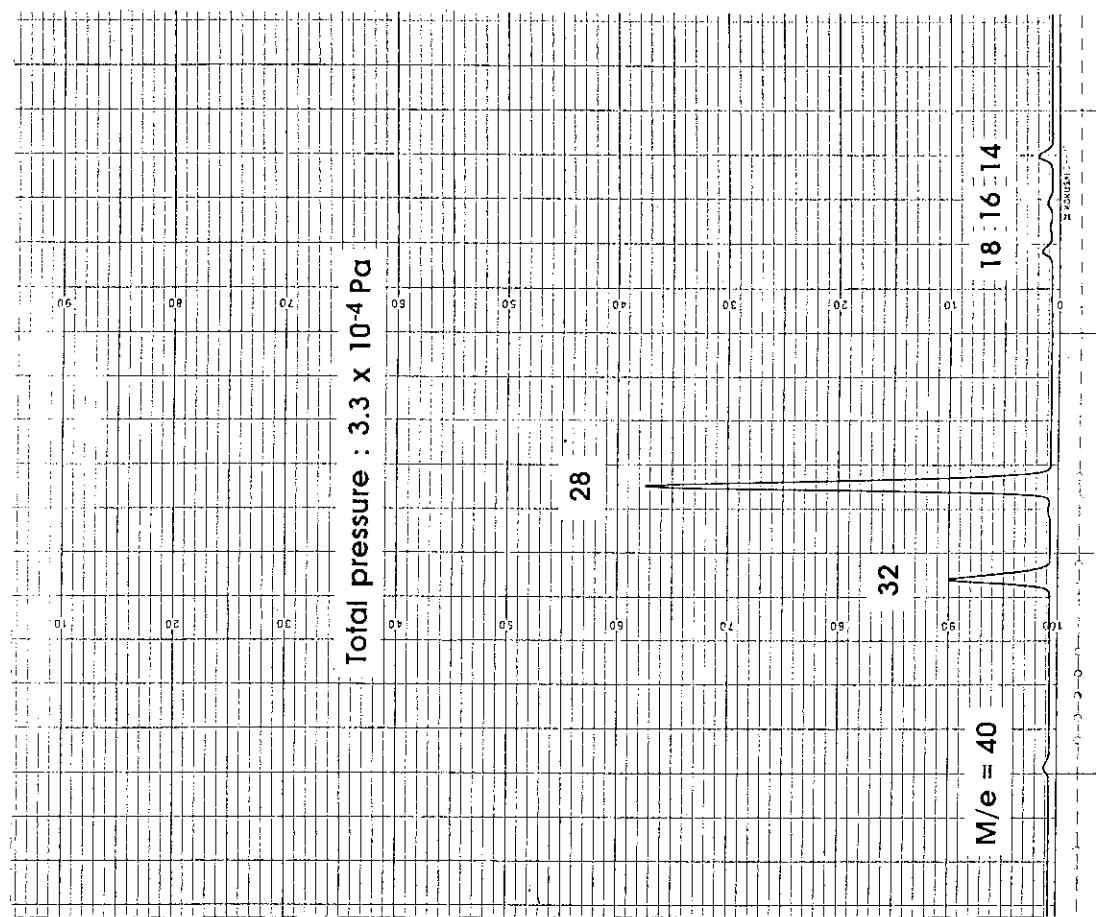


Fig.22 A サイクロotron本体加速箱内の残留ガススペクトル  
測定結果(全圧  $3.3 \times 10^{-4}$  Pa の場合)

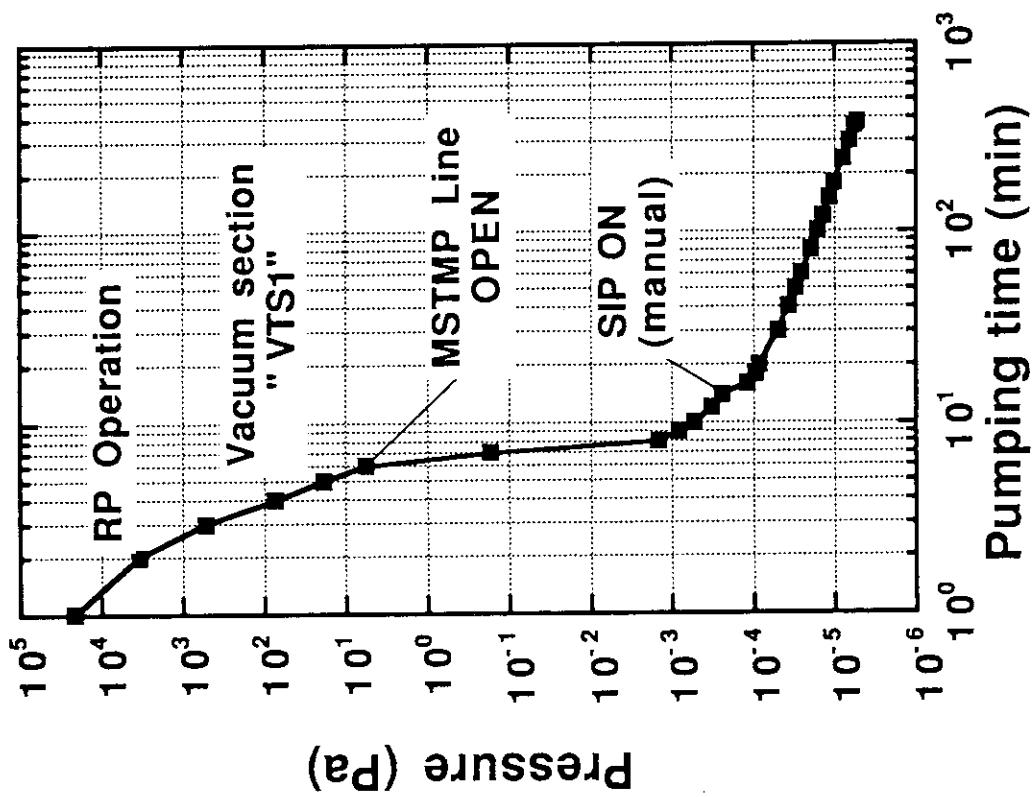
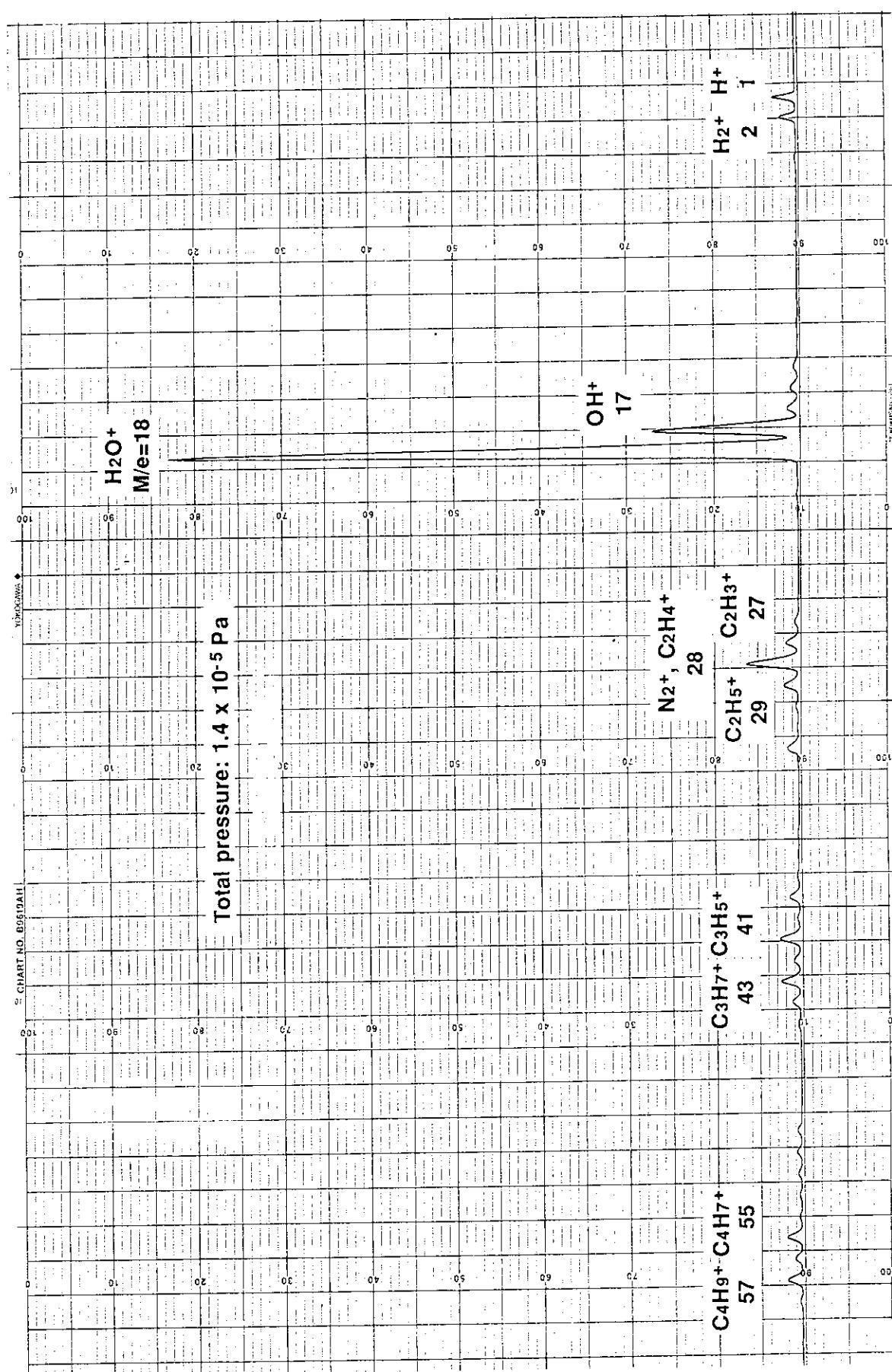


Fig.21 ビーム輸送系真空セクション(VTS1)の排気特性



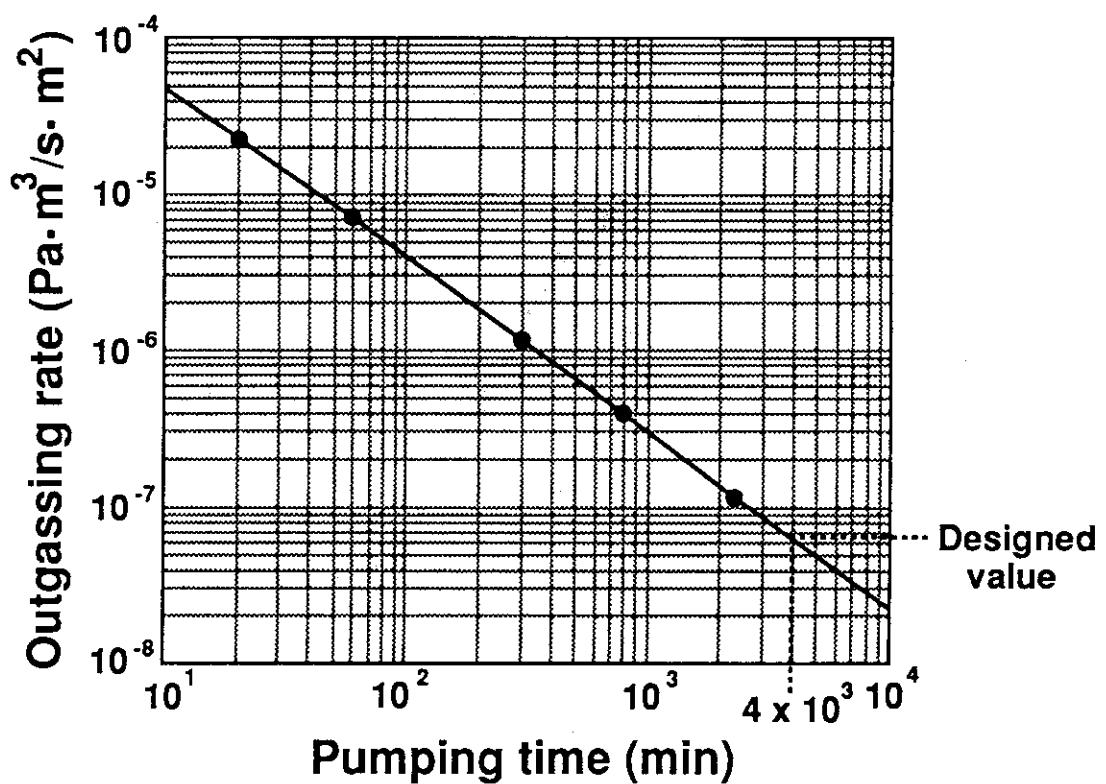
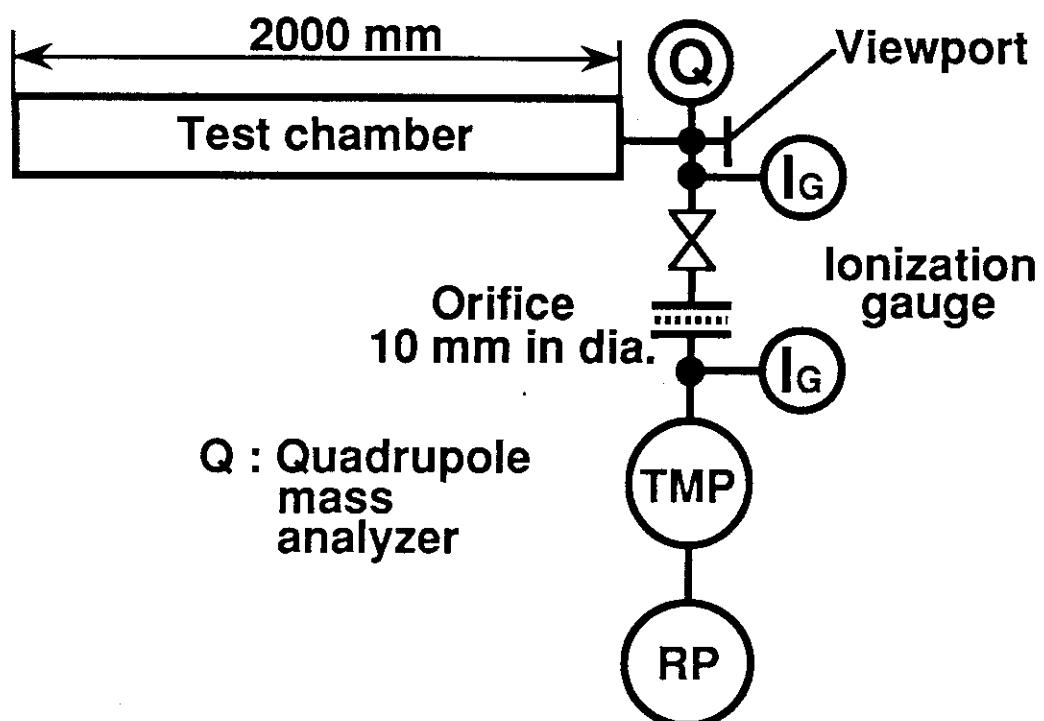


Fig.23 ビーム輸送系に使用したアルミニウムダクトのガス発生率測定方法  
および測定結果

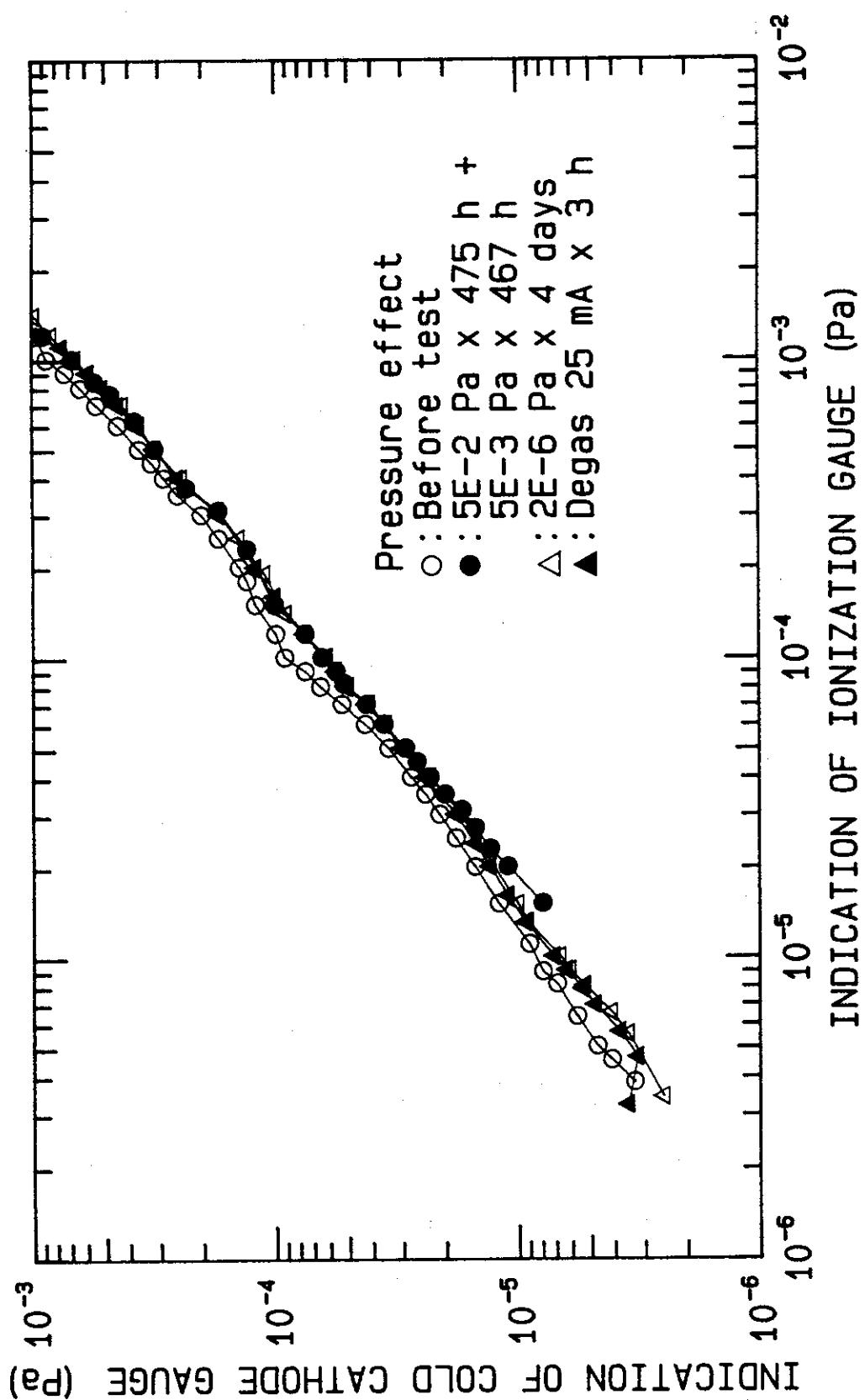


Fig.24 コールドカソードゲージ指示値の信頼性確認試験結果の一例

## 5. あとがき

真空排気系の基本的な要件である到達圧力は以下のようにして決めた。まずイオン入射系、サイクロトロン本体系およびビーム輸送系それぞれの各系統において、イオンビームの残留ガスとの相互作用は荷電変換反応が支配的であるものとし、サイクロトロンで加速を予定している重イオンで、その荷電変換断面積が既知である<sup>84</sup>Kr<sup>15+</sup>あるいは<sup>86</sup>Kr<sup>17+</sup>の損失を評価した。

またイオンビームは、イオン入射系やビーム輸送系での輸送や、サイクロトロン本体での加速および引き出しなどの過程において、少なくとも20%程度は減衰するものと考えられるため、これらの損失と残留ガスによる損失とを同程度にすることを設計の指針とした。その結果残留ガスに起因するイオンビームの損失は、イオン入射系で約5%，サイクロトロン本体系で12%，ビーム輸送系で1%程度とすることとし、それぞれの目標到達圧力を  $6.7 \times 10^{-6}$ Pa,  $6.7 \times 10^{-5}$ Pa および  $6.7 \times 10^{-5}$ Pa に決定した。

次に各系統の真空セクションについて、構成素材のガス放出率とその表面積、コンダクタンス、真空ポンプの排気速度および設置位置などから、排気特性、到達圧力および圧力分布の評価などを行った。これらの解析の結果、いずれの系統においても設計圧力（前述の目標到達圧力の1/2）を満足する数値が得られた。

真空排気系の構成については、コントロール・表示、真空ポンプ、真空計、ゲートバルブなどの共通的な機能や機器の内容を記述し、次に各系統の真空セクションの系統図などを示して具体的な構成を明らかにした。

さらにこれまでに得られているサイクロトロン本体の排気特性測定、サイクロトロン本体加速箱内残留ガスの分析やビームダクトガス放出率の測定などの結果を示した。またワイドレンジ真空計の信頼性確認試験として、真空計ゲージ指示値の信頼性および真空計コントローラーの耐放射線性の2つの試験結果、そして速動バルブの性能試験結果も掲げた。

真空排気系は1990年10月の運動開始以来、特に大きな故障もなく順調に稼働している。この間における主な小故障は、1) 共振器内部のショート板コンタクトフィンガー用圧空接続部でのリーク、2) 位相スリット（II）駆動軸XリングおよびIS5\_FCのSUSベローズ部分でのリーク、3) ワイドレンジ真空計TPG-300の動作不具合、4) 速動バルブの開放動作不良などであった。

各真空セクションにおける定常状態での圧力は、イオン入射系が  $5 \sim 8 \times 10^{-6}$ Pa、サイクロトロン本体系が  $1 \sim 2 \times 10^{-5}$ Pa、ビーム輸送系の大部分が  $7 \times 10^{-5} \sim 6 \times 10^{-6}$ Pa 程度で推移している。しかしながらビーム輸送系のRSを含むいくつかの真空セクションでは、その圧力が  $6.7 \times 10^{-5}$ Pa の目標値を超えていたため、可搬式真空排気セットを取り付けたまま運用している。

なおこれまでサイクロトロン装置で加速された軽イオンのH<sup>+</sup>, 10MeVあるいは重イオンの<sup>40</sup>Ar<sup>13+</sup>, 460MeV および<sup>84</sup>Kr<sup>20+</sup>, 520MeVなどの代表的なイオンビームに対しても、残留ガスとの相互作用に起因すると考えられるビームの損失は、観測されていない。

サイクロトロン装置の真空排気系<sup>46), 47)</sup> は、事前の設計仕様あるいは検討内容が十分に反映さ

れた状態となっており、全体的な性能および特性などについてもほぼ満足な結果が得られている。

### 謝　　辞

サイクロトロン本体系およびイオン入射系における真空排気系の設計・製作、さらには初期段階での運転・調整等において、献身的にしかも長期間にわたって努力していただいた住友重機械工業KK、量子機器事業部設計部の立川敏樹、林義弘、石井宏一の各氏、また同製造部の金倉純、福田忠幸の各氏に深く感謝いたします。

ビーム輸送系の真空排気系の設計・製作、運転・調整等に努力していただいた日立製作所日立工場、電力設計部核装置設計の垣内俊二および鈴木啓之両氏、品質保証部検査課の外岡経行氏に謝意を示します。

真空排気系の検討にあたって、多面的な角度からの議論およびコメントなどをしていただくとともに、色々とご指導いただいたビームオペレーション株式会社（元放射線高度利用研究推進室付）丸山倫夫氏、および放射線高度利用推進室、田中隆一次長に感謝いたします。

さらにワイドレンジ真空計TPG-300の指示值信頼性試験および耐放射線性試験に際して、試験装置を提供していただきなどいろいろと便宜を計っていただいた伯東株式会社（前）応用科学事業部、大塚喜人主任に感謝いたします。

れた状態となっており、全体的な性能および特性などについてもほぼ満足な結果が得られている。

### 謝　　辞

サイクロトロン本体系およびイオン入射系における真空排気系の設計・製作、さらには初期段階での運転・調整等において、献身的にしかも長期間にわたって努力していただいた住友重機械工業 KK、量子機器事業部設計部の立川敏樹、林義弘、石井宏一の各氏、また同製造部の金倉純、福田忠幸の各氏に深く感謝いたします。

ビーム輸送系の真空排気系の設計・製作、運転・調整等に努力していただいた日立製作所日立工場、電力設計部核装置設計の垣内俊二および鈴木啓之両氏、品質保証部検査課の外岡経行氏に謝意を示します。

真空排気系の検討にあたって、多面的な角度からの議論およびコメントなどをしていただくとともに、色々とご指導いただいたビームオペレーション株式会社（元放射線高度利用研究推進室付）丸山倫夫氏、および放射線高度利用推進室、田中隆一次長に感謝いたします。

さらにワイドレンジ真空計 TPG-300 の指示値信頼性試験および耐放射線性試験に際して、試験装置を提供していただくなどいろいろと便宜を計っていただいた伯東株式会社（前）応用科学事業部、大塚喜人主任に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Tanaka, R. : Proc. 11th Sympo. on Ion Sources and Ion - Assisted Technology, Kyoto, Japan, p245 (1987)
- 2) 萩原 幸 : 放射線化学, 44, p67 (1987)
- 3) Takehisa, M. : Atoms in Japan, 30 - 8, p12 (1987)
- 4) 武久 正昭 他 : 原子力工業, 33 - 8, p37 (1987)
- 5) 武久 正昭 : 放射線化学, 45, p33 (1988)
- 6) 萩原 幸, 田中 隆一 : 日本原子力学会誌, vol.31, No.9, p983 (1989)
- 7) Tanaka, R., Arakawa, K. et al. : Proc. 12th Int. Conf. on Cyclo. and their Applic., Berlin, Germany, p566 (1989)
- 8) Hseuh, H. C., Feigenbaum, I. et al. : IEEE Trans. Nucl. Sci., NS - 32, No.5, p3797 (1985)
- 9) Belmont, J. L. : Rapport Interne, ISN 86 - 106, ISN Grenoble (1986)
- 10) Bol, J. L., Jongen, Y. et al. : IEEE Trans. Nucl. Sci., NS - 32, No.5, p1817 (1985)
- 11) Shimizu, A., Miura, I. et al. : Proc. 12th Int. Conf. on Cyclo. and their Applic., Berlin, Germany, p228 (1989)
- 12) Ikegami, K., Nakajima, S. et al. : Proc. 11th Int. Conf. on Cyclo. and their Applic., Tokyo, Japan, p392 (1986)
- 13) Botha, A. H., Jungwirth, H. N. et al. : Proc. 11th Int. Conf. on Cycl. and their Applic., Tokyo, Japan, p9 (1986)
- 14) Botha, A. H., Burger, S. J. et al. : Proc. 11th Int. Conf. on Cycl. and their Applic., Tokyo, Japan, p515 (1986)
- 15) 林 主税, 小宮 宗治 : 真空ハンドブック (改定版) 日本真空技術KK (1985)
- 16) Ikegami, K., Ishibe, Y. and Be, S. H. : RIKEN Accel. Prog. Rep., vol. 19, p193 (1985)
- 17) 林 主税, 辻 泰 他 : 真空技術「実験物理学講座4」共立出版 (1985)
- 18) 谷田 和雄 : 真空システム工学 養賢堂 (1977)
- 19) 富士精工KK, 丸文KK : カタログ「ALL - アルミ合金製超高真空用機器・部品」
- 20) 清水 昭 : 加速器科学, vol.2, No.2 (1985)
- 21) Okumura, S., Agematsu, T. et al. : Proc. 8th Symp. on Accel. Sci. and technol., Saitama, Japan, p356 (1991)
- 22) National Accelerator Centre : NAC/AR/88 - 01 (Annual Report), p17, p50 (1988)
- 23) Balzers (伯東) : private communication
- 24) Yokota, W., Arakawa, K., et al. : Proc. 7th Symp. on Accel. Sci. and technol., Osaka, Japan, p68 (1989)

- 25) Dupont, C., Jongen, Y. et al. : Rev. Sci. Instr. 61, 265 (1989)
- 26) Yokota, W., Ishibori, I. et al. : Proc. 8th Symp. on Accel. Sci. and Technol., Saitama, Japan, p70 (1991)
- 27) Yokota, W., Nara, T., et al. : Proc. 13th Int. Conf. on Cycl. and their Applic., Vancouver, Canada, p336 (1992)
- 28) Kamiya, T., Yokota, W. and Arakawa, K. : Proc. 6th Symp. on Accel. Sci. and Technol., Tokyo, Japan, p281 (1987)
- 29) 小川 博 : Private communication
- 30) Ikegami, K., Nakajima, S. et al. : RIKEN Accel. Prog. Rep., vol.17, p156 (1983)
- 31) Zhang, Shuxiu : Proc. 11th Int. Conf. on Cycl. and their Applic. Tokyo, Japan, p399 (1986)
- 32) National Accelerator Centre : NAC/AR/87-01 (Annual Report), p13, (1987)
- 33) 西出 昭彦, 金戸 成 他 : 第21回真空に関する連合講演会プロシーディングス, vol.24, No.4, p185 (1981)
- 34) 西出 昭彦, 橋本 祥一 他 : 第24回真空に関する連合講演会プロシーディングス, vol. 27, No.5, p419 (1984)
- 35) 橋本 祥一, 和田 薫 他 : 第27回真空に関する連合講演会プロシーディングス, vol.30, No.5, p226 (1987)
- 36) Nishide, A. and Be, S. H. : RIKEN Accel. Prog. Rep., vol. 21, p205 (1987)
- 37) 神谷 富裕, 横田 渉, 荒川 和夫 : JAERI - M 88 - 064 (1988)
- 38) 田中 進, 中村 義輝 他 : 日本原子力学会「1991年秋の大会」要旨集, M55, p807 (1991)
- 39) 小島拓治, 田中隆一 他 : JAERI - M 86 - 137 (1986)
- 40) Storm, E. and Israel, H. I. : LA - 3753 (1967)
- 41) Battisti, S. et al. : Nucl. Instrum. Methods vol.136, p451 - 472 (1976)
- 42) Long, D. M. : IEEE Trans. Nucl. Sci., NS - 27, No.6, p1674 (1980)
- 43) Marks, K. and Measel, P. : IEEE Trans. Nucl. Sci., NS - 29, No.6, p1662 (1982)
- 44) Schiff, D. et al. : IEEE Trans. Nucl. Sci., NS - 32, No.6, p4050 (1985)
- 45) 田中 進 : Private communication
- 46) Nakamura, Y., Arakawa, K. et al. : Proc. 8th Symp. on Accel. Sci. and Technol., Saitama, Japan, p194 (1991)
- 47) Arakawa, K., Nakamura, Y. et al. : "1. AVF Cyclotron", JAERI - M 93 - 047 (JAERI TIARA Annual Report vol.1), p34 (1993)
- 48) Arakawa, K., Nakamura, Y. et al. : Proc. 4th Japan - China Joint Symp. on Accel. for Nucl. Sci. and their Applic., Beijing, China, p173 (1990)
- 49) Arakawa, K., Nakamura, Y. et al. : Proc. 8th Symp. on Accel. Sci. and technol., Saitama, Japan, p34 (1991)
- 50) Arakawa, K., Nakamura, Y. et al. : Proc. 13th Int. Conf. on Cycl. and their Applic., Vancouver, Canada, p119 (1992)

- 51) Fukuda, M., Arakawa, K., et al. : Proc. 8th Symp. on Accel. Sci. and technol., Saitama, Japan, p138 (1991)
- 52) Kumata, Y., Fukumoto, Y., et al. : Proc. 13th Int. Conf. on Cycl. and their Applic., Vancouver, Canada, p526 (1992)
- 53) Okumura, S., Agematsu, T., et al. : Proc. 13th Int. Conf. on Cycl. and their Applic., Vancouver, Canada, p648 (1992)
- 54) 上松 敏, 奥村 進 他: 第35回放射線化学討論会予稿集, p73 (1992)
- 55) Yokota, W., Fukuda, M., et al. : Proc. 13th Int. Conf. on Cycl. and their Applic., Vancouver, Canada, p581 (1992)

## 付録 TIARA 施設および原研 AVF サイクロトロン装置の概要

### (1) TIARA 施設

TIARA 施設全体の 1 階および地階平面図をそれぞれ Fig.A1 および Fig.A2 に示す。TIARA 施設 (Photo.A1 参照) は、サイクロトロン棟、複合ビーム棟およびイオン照射研究棟から構成され、それぞれ各棟は廊下等により機能的に連結されている。

このうちイオンビーム研究棟は、延べ面積  $4700\text{m}^2$ 、地下 1 階地上 2 階建の鉄筋コンクリート構造で、主として施設の運転管理に必要な室、外部利用者のための共同利用室、ホットの実験を行う室および電気・機械室等から構成されている。

複合ビーム棟は、延べ面積  $4400\text{m}^2$ 、地下 1 階地上 2 階建の構造であり、地階に 2 つのターゲット室や加速器設備関連の室など、1 階にはタンデム加速器等 3 台の加速器を収納する本体室、3 つのターゲット室および制御室など、2 階には計測・測定室や準備室などがそれぞれ配置されている。

サイクロトロン棟は、延べ面積  $8100\text{m}^2$ 、地下 1 階地上 3 階建の鉄筋コンクリート構造となっている。地階部分の 3 つのイオン室とサイクロトロン装置関連の室のほか、実験者のための軽・重イオン準備室や排水処理関連の室など、1 階には、サイクロトロン本体室のほか 5 つのイオン室、ISOL (Isotope Separator On Line) 関係の室など、2 階（棟北側隅の一部分）にはホット廃ガス処理室が、それぞれ設置されている。

これら TIARA 施設の大部分は、第 1 種管理区域（空気または物の表面が放射性同位元素で汚染される可能性のある区域）と第 2 種管理区域（外部放射線のみが対象となり、1 週間につき線量当量が  $300 \mu\text{Sv}$  を超えるか、あるいは超えるおそれのある区域）に分割されて、放射線安全管理が実施されている。

なお TIARA 施設の建設は、第 1 期および第 2 期工事に分割して実施された。このうち第 1 期工事分として、サイクロトロン棟とイオン照射研究棟全体、および複合ビーム棟の一部（タンデム本体室および第 1 ターゲット室部分）が、先行して建設された。第 1 期分施設の建設は、1988 年 7 月に着工され、約 1 年 5 ヶ月後の 1990 年 12 月には竣工した。第 2 期工事分は、前掲 Fig. A1 および Fig.A2 中に示したように複合ビーム棟の大部分の範囲であり、1991 年の 11 月に着工され、1993 年の 7 月には竣工した。

### (2) 原研 AVF サイクロトロン装置

原研 AVF サイクロトロン装置<sup>48) - 50)</sup> の空間的な構成は、イオン源系、イオン入射系<sup>28)</sup>、サイクロトロン本体系およびビーム輸送系<sup>37), 47)</sup> の 4 つの部分に大別されるが、機能的な観点からは電磁石系、RF 系<sup>51), 52)</sup>、ビーム診断系、計算機制御系<sup>21), 53)</sup>、電源系<sup>47)</sup>、真空排気系<sup>46), 47)</sup> および純水冷却系<sup>47)</sup> などにも分類できる。

軽イオン用のマルチカスプイオン源<sup>27)</sup>、あるいは重イオン用の ECR (Electron Cyclotron Resonance) 型イオン源 (OCTOPUS)<sup>24) - 27)</sup> のいずれかで生成されたイオンビームは、イオン入射系を水平に輸送され、AVF サイクロトロン真下の中心位置で、上方に 90 度偏向されて垂直入射される。イオンビームはインフレクターにより水平面内の軌道に移され、ディーに発生し

ているRF電場と上下磁極間の磁場により螺旋状に加速された後、静電デフレクターやマグネットィックチャンネルなどによりさらに軌道が外側に曲げられ、加速箱から引き出される。

サイクロトロンから引き出されたイオンビームは、ビーム輸送系に配置されている4電極磁石、ステアリング電磁石および偏向電磁石、さらには各種のビーム診断機器などを用いて、選択されているいざれかのビームポートまで輸送され、実験に利用される。

これらのサイクロトロン装置の主要な諸元および性能一覧表をTableA1に示す。サイクロトロン本体(Photo.A2参照)は、住友重機械工業製のAVF(Azimuthally Varying Field)型であり、2ディーの4セクターで、引き出し半径92.3cm(設計値)である。RF周波数は10.6~22.0MHzであり、同軸型共振器の採用により、ディー電圧は最大60kVまで発生できる。加速ハーモニック数は、1, 2および3が可能であり、加速可能粒子はM/Zの比が6.5以下となっている。

ビーム輸送系のビームラインは、水平の主ビームコース8本のほか、副ビームコース5本(このうち4本は垂直ビームコース)が設置されており、これらのビームコースに配置されている実験利用ポートは、合計16ヶ所となっている。

サイクロトロン装置におけるイオンビームの特徴的な利用については、大面積均一照射および単一パルスビームの発生等が可能な設計となっている。このうち大面積均一照射については、ビーム輸送系のビームライン3ヶ所(LX, LDおよびHYコース)にビームスキャナー<sup>47), 54)</sup>が設置されており、最大100×100mm<sup>2</sup>の試料範囲をフルーエンス±10%の均一度で照射可能にしている。またイオンビームの単一パルス化<sup>55)</sup>は、イオン入射系に設置されているパルス(P)型チョッパーと、ビーム輸送系に設置されている正弦波(S)型チョッパーの組み合わせにより、パルス間隔1μs~1msの範囲で実現されている。

### (3) サイクロトロン装置の製作・据え付け・調整等の経緯

サイクロトロン装置導入についての具体的な検討は、1985年頃から開始され、1987年7月にはサイクロトロン本体の機種を住友重機械工業(住重)製の930型とすることに決定した。1988年10月から住重の新居浜工場において、まずサイクロトロン本体の磁場測定が開始され、翌1989年の3月まで継続された。同年4月にはベルギーのIBA社において、ECRイオン源のイオン生成試験が行われた。1989年の10月からRF系の特性試験やパワーテストが行われ、1990年の3月にはサイクロトロン本体の最終工場立ち会い試験検査、4月には制御系の総合試験が行われた。

引き続いて1990年5月から、サイクロトロン装置搬入のための準備作業および工事が、現地の高崎研究所サイトで開始された。6月には、計画通りサイクロトロン装置の搬入が始まり、最初にまずサイクロトロン本体(ヨーク部分)の搬入が実施された。6月にはイオン入射系とビーム輸送系の一部(主にビーム振分室部分)が、7月にはイオン源系が相次いで搬入された。9月にはビーム輸送系偏向電磁石の試験検査後、各イオン室部分の機器が順次段階的に搬入され、それぞれの据え付け・調整等の作業がこれらに併行して行われた。

1990年の11月には、イオン源、イオン入射系およびサイクロトロン本体系の据え付け工事がほぼ終了し、12月からは個別に各機器・装置の調整等が開始された。1991年の1月には、電源等の通電試験などが行われるとともに、ECRイオン源の調整および現地ビーム生成テストなど

も再開された。同年3月の初旬から住重によりサイクロトロン本体の調整運転が行われ、3月17日（日）18時53分に ${}^4\text{He}^{2+}$ , 50MeV（ハーモニック数：2）でのファーストビームの引き出し（約25nA）が実現された。

さらに各種のイオンビーム保証値を満足するためのビームテストが約7ヶ月間にわたって継続され、同年11月末には正式に原研側に引き渡された。原研側では調整運転等を経て、1992年の3月には試験的に実験利用者にビーム提供を開始した。その後いくつかの新しいイオン種についての加速試験も加えながら、同年9月より24時間の本格的な連続運転に移行している。

Table A 1 原研AVFサイクロトロン装置の主要諸元・性能一覧表

サイクロトロン本体	AVF型 住友重機械工業製	930型	サイクロトロン引き出し電流(実績値)	
			$H^+$	$D^+$
K値	110		1.0 MeV	1.4 MeV
セクタ一数	4	T	2.0 MeV	6 e $\mu$ A
最大平均磁場(引き出し半径)(設計値)	1.67 cm		4.5 MeV	e $\mu$ A
最大引出磁石重量	9.2 kg	mm	7.0 MeV	c $\mu$ A
主電磁石コイル数	2156	ton	9.0 MeV	0.5 e $\mu$ A
トリムモニタ電極数	229	対	1.0 MeV	e $\mu$ A
ハーモニクスコイル数	12	対	1.1 MeV	e $\mu$ A
デイーディー電圧	8.6 kV		4.1 MeV	e $\mu$ A
デイーディーRF出力	6.0 kW		2.1 MeV	e $\mu$ A
最大加速周波数範囲	5.0 ~ 2.2 MHz		5.0 MeV	e $\mu$ A
周波数共振器	1.0 ~ 1.0 <sup>-6</sup>		2.0 MeV	5 e $\mu$ A
加速ハーモニックモード	$\lambda/4$ 型、ショート板方式		5.0 MeV	e nA
(M : 質量数、Z : 荷電数)	1, 2, 3, 5		5.2 MeV	
イオン源・イオン入射系				
イオン源設置方式				
入射方法				
軽イオン源				
重イオン源				
バンチヤング形式				
バンチフレクター				
加速エネルギー範囲				
軽イオン	$H^+$		5 ~ 9.0 MeV	パルス型 + 正弦波型 (イオン入射系)(ビーム輸送系)
	$D^+$		5 ~ 5.3 MeV	最小パルス幅 ~ 2 ns
重イオン	$^4He^{2+}$		1.0 ~ 1.08 MeV	パルス間隔 1 μs ~ 1 ms
	$2.5 \times M$		1.10 × $Z^2/M$ MeV	制御方式 計算機制御
照射方式の特徴				
(1) 大面積均一照射				
軽イオン				
重陽子(D)				
(2) パルス照射				
チョップピング方式				
外部イオン源方式				
外部垂直入射				
マルチカスプ型				
ECR型(OCTOPUS)				
2ギヤップ、 $\lambda/2$ 型				
2.5 ~ 3.0				
スピラル型				
加速エネルギー範囲				
軽イオン	$H^+$		5 ~ 9.0 MeV	
	$D^+$		5 ~ 5.3 MeV	
重イオン	$^4He^{2+}$		1.0 ~ 1.08 MeV	
	$2.5 \times M$		1.10 × $Z^2/M$ MeV	
主ビームコース数			8 本	
副ビームコース数			5 本 (4本は垂直ビームコース)	

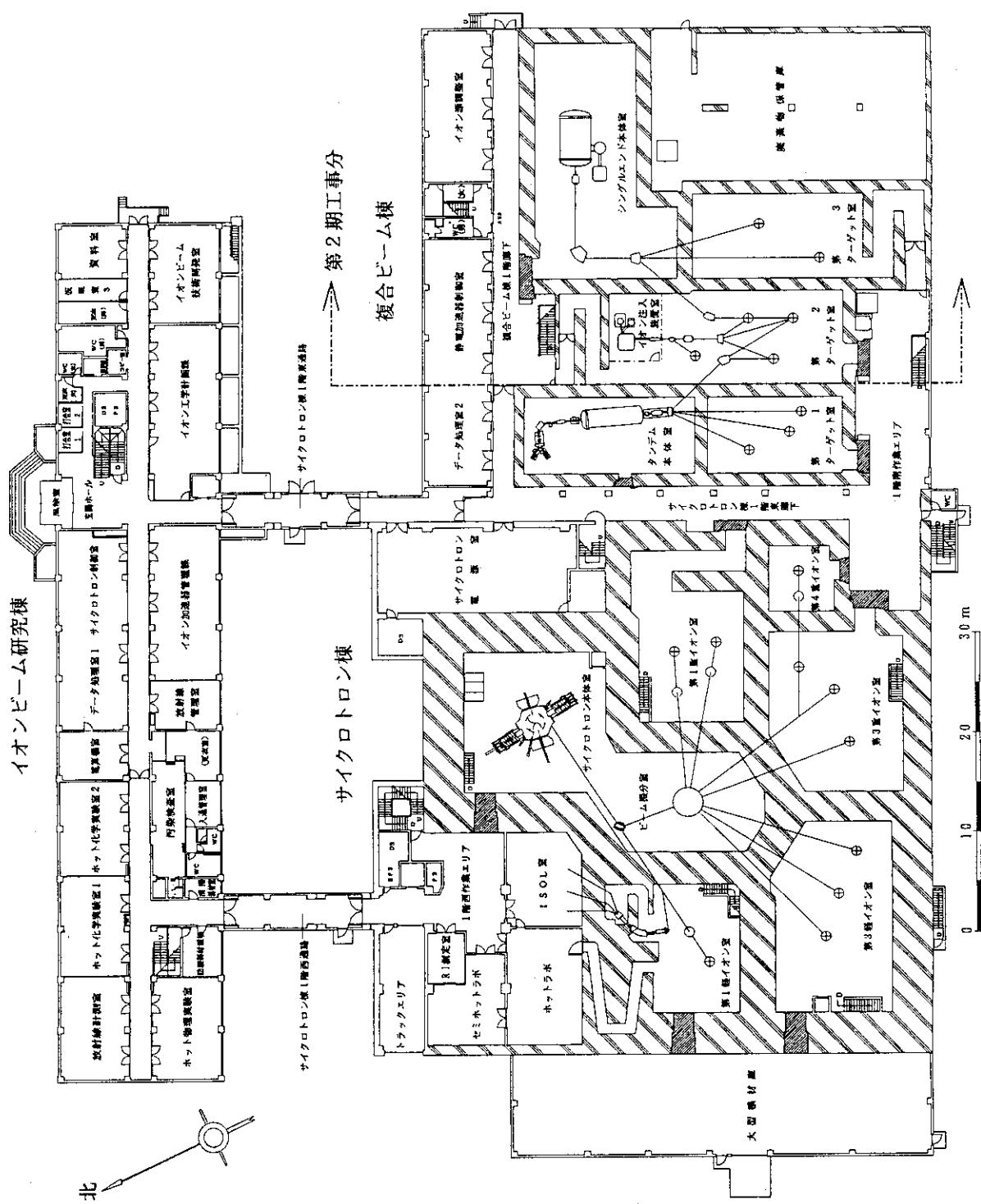


Fig.A 1 イオン照射研究施設 1 階平面図

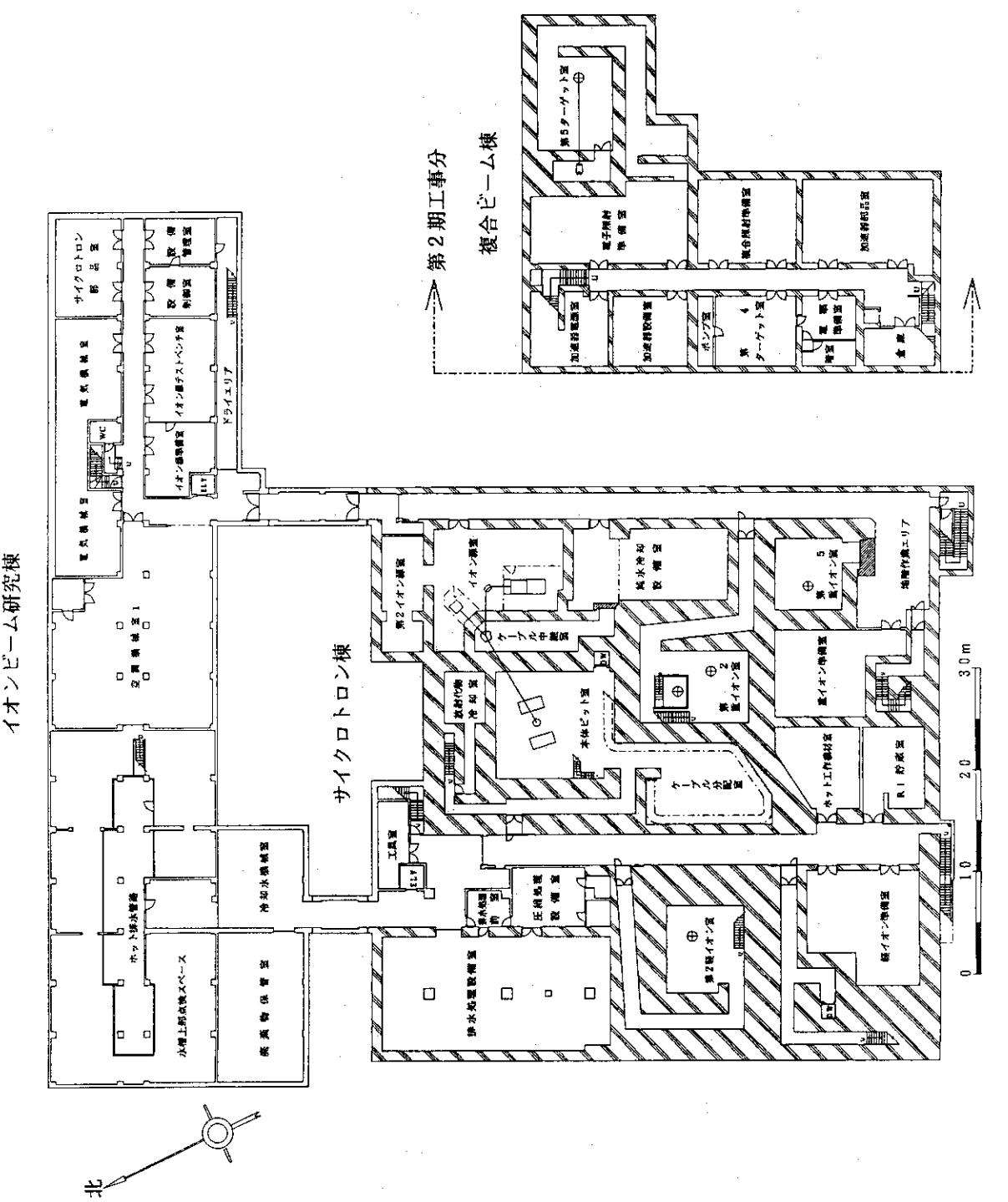


Fig. A 2 イオノ照射研究施設地階平面図

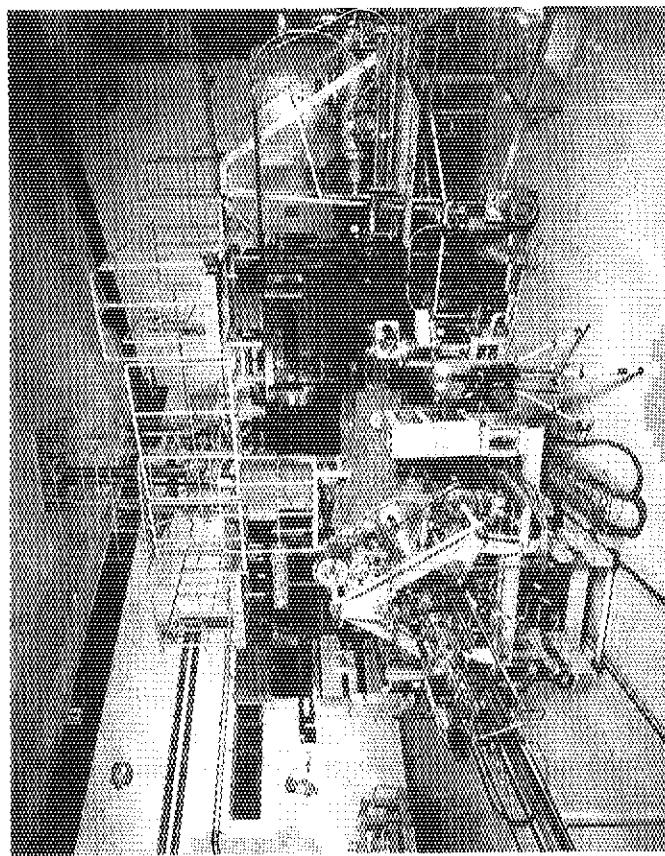


Photo A 2 原研 AVFサイクロトロンの外観 (No. 1 共振器  
側から)。

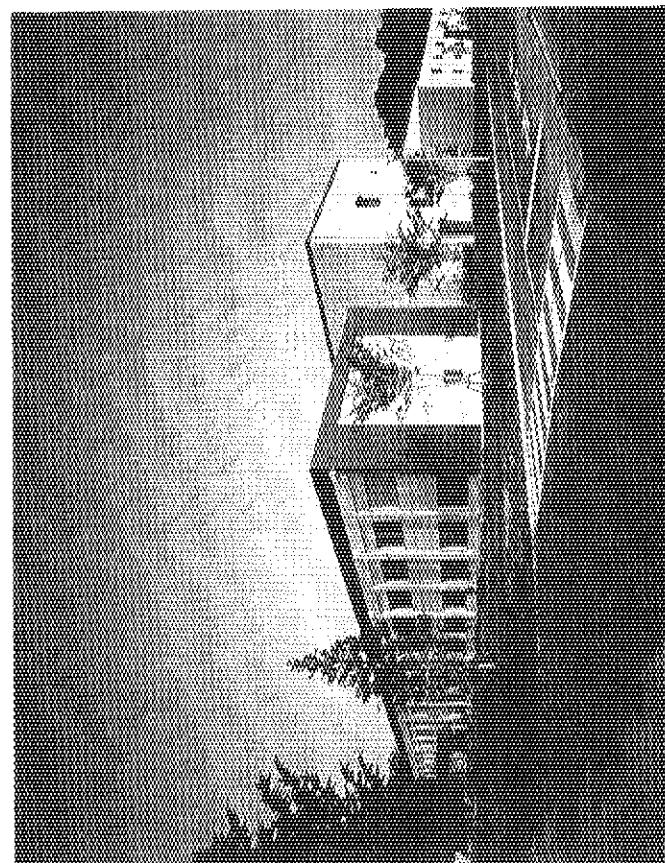


Photo A 1 TIARA施設の全景。手前の建屋がイオンビ  
ーム研究棟、後方がサイクロトロン棟 (Fig.  
A 1 中の方位記号方向で北側からの写真)。