リングサイクロトロン^{*}の真空系^{*}清水 昭^{**}

(受付1988年12月7日, 掲載決定1989年2月4日)

Vacuum System of a Ring Cyclotron

Akira SHIMIZU^{**}

(Research Center for Nuclear Physics, Osaka University, Ibaraki, Osaka)

(Received December 7, 1988, Accepted February 4, 1989)

1. はじめに

大阪大学核物理研究センターでは、陽子や α 粒子をそれぞれ400 MeV, 比較的軽いイオン ($A \leq 40$) を核子当り100 MeVまで加速する可変粒子, 可変エネルギーのリングサイクロトロン^{*}の建設を進めている。既に稼働中のAVFサイクロトロン (陽子90 MeV, α 粒子140 MeV, 重イオン核子当り35 MeVまで加速が可能) を入射加速器として加速されたイオンは, それに続くエネルギー一定数 $K=400$ のリングサイクロトロン (入射半径2.0 m, 引出し半径4.06 m) で, 本格的に加速される。

AVFサイクロトロンから引き出されたビームは, 既設の実験室を経由するビームライン (約80 m) を通る。ここに入射ビームのエネルギー幅, 時間幅, エミッタンス等を調整, 制御するためのビーム分析器, ビームパンチャー (ビーム位相の圧縮器), ビーム間引き装置等のビーム処理系や診断系が配置され, 性質の良いビームのみがリングサイクロトロンによって加速される¹⁾。

リングサイクロトロン本体は, 既に詳細設計を終え, 工場で製作が進んでおり, 真空容器のテストも開始している。本体主要部は, 1989年末には搬入を開始し, 組立て, 調整を行う。ちなみに, 我が国においてリングサイクロトロンは, 理化学研究所において主として重イオンを加速するためのほぼ同規模のものが, 1986年秋に完成している²⁾。

2. リングサイクロトロン^{*}の構成と真空槽

建設中のリングサイクロトロンは, 6個のスパイラル状に捻られた扇形電磁石とそれらの間のバレー部から成り, 12分割されている。これらバレー部のうち, 120°対称の三方向にRFキャビティが置かれ, これに高周波電圧を励振させてビームを加速する。他のバレー部には, RFキャビティの3倍の高周波でビームを減速してビームの位相特性を改良するフラットトップ共振空洞やビームの入射・引出しに必要な電磁石や電極を収める2個のバレー部真空槽が置かれる。Fig. 1に, リングサイクロトロン^{*}の平面図を示す。

直径10 mに及ぶこれら構成要素の真空槽は, 必然的にそれぞれに分割したものを, 現地で繋ぎ合わせる構造を採用することとなる。

扇形電磁石の真空槽は, 上下の磁極そのものを真空壁の一部として利用し, その磁極の根元に台形のSUS316Lの厚板を溶接して天(底)板とする。この底板の周囲に側板を溶接し, 上部磁極の天板とはパッキングを介して締め上げる。バレー部に接する両側面は, 加速ビームの通路であり, 長さ3 m, 高さ0.2 mの開口部をもつ。加速ビームの種類やエネルギーに応じて, 磁場分布を調整するためのトリムコイル (水冷管付きの幅8 cm, 厚さ0.8 cmの平角銅板) を, ビーム軌道に沿った円弧状に上下の磁極に36組絶縁物を介して直接ボルトで締付ける。トリムコイルの表面は, 電気的絶縁のため, 厚さ0.15 mmのアルミナがプラズマ溶射されている。このアルミナが磁極箱の放出ガスの主因となる。Fig. 2に示すように, これらトリムコイルは, 天(底)板を貫

^{*} 昭和63年11月9日 第29回真空に関する連合講演会で講演 (9Bp-4)

^{**} 大阪大学核物理研究センター (大阪府茨木市美穂ヶ丘)

Fig. 1 Plan view of the ring cyclotron.

Fig. 2 Plan view of the magnet chamber with trim coils on the pole.

通する水冷されたリード線で外部に引き出され、励磁電源に接続される。Fig. 3 に、下側の磁極箱真空槽を示す。

Fig. 3 Magnet chamber.

電磁石の間に置かれ、イオンを加速する高周波電圧を発生する RF キャビティやフラットトップ空洞は、非磁性、電気及び熱の良導体、耐食性に優れ、放射化の減衰が早い等の材質が要請される。一方、可変周波数（30～50 MHz）で電極間に500 kV の加速電圧を発生するため、マルチバクタリング等の真空中に於ける放電に耐えるものが要である。良伝導性の純アルミ A1070材の溶

Fig. 4 RF cavity chamber.

接構造のプロトタイプ RF キャビティを試作し、真空試験、励振試験を行ったが、後者の要請に欠ける点があり、設計変更となった。製作中のキャビティは、長さ4 m、高さ3 mのケーキカット型の、 H_{101} モードで励振するシングルギャップ型のものである。この内部に、加速電極と周波数を変える同調機構、周波数微調整のためのコンベンセーター、RF 電力導入ループ等が収められる。RF キャビティ真空槽は、Fig. 4 に示すように、厚さ35 mm の SUS304N1 材を用いて、ケーキカットの5面は溶接構造とし、内面に水冷管付きの銅板を内張りして、共振器の外壁導体とする。内面にリブが溶接されているの見えるのは、冷却管の太さに相当するだけ銅板を外壁から浮かせて取付けることが必要なためで、このリブに銅板を銅ビスで固定する。内蔵物を組み込んだ後、やはり銅板で内張りされた第6面を、電気的にはコンタクトフィンガー、真空的にはパッキングを介してボルトで締付ける。

この真空槽は、このままで減圧すると変形限界を越えるので、単体で排気するには内部に支柱を入れて変形を防がねばならない。サイクロトロンとして、電磁石真空槽と結合するには、真空的には後述するエクспанションシールで接合し、変形阻止のためには、剛性の高い電磁石真空槽の天（底）板へ外壁を引掛ける支持治具を備えている。

バレー箱真空槽は、ほぼ RF キャビティに等しい底面積を有するが、その高さは0.6 m と遥かに低い。この槽の内部には、ビームの入射及び引き出しに必要な電磁チャネル（ビーム軌道を決めるための空芯又は鉄芯付きの磁石）や静電インフレクター、デフレクター、ビーム診断機器等が搭載される。槽の構造は、RF キャビティと同様に、ケーキカットの5面を溶接し、内蔵物を収めて第6面をボルトで締付ける。

Fig. 5 Cross-sectional view of the pneumatic expansion seal.

Fig. 6 Pneumatic expansion seal.

3. 各真空槽の連結

それぞれの真空槽に収められている機器の保守に当っては、互いに隣接する槽を切り離さなければならない。そのため6個の電磁石は一旦据付けられると固定されるが、その間に置かれるキャビティやバレー箱は、電磁石から比較的簡単に切り離して半径方向に引き出せるよう台車の上に載せられる。隣接する真空槽の連結面はそれぞれ半径方向に約3 mの長さがあるが、その面に沿ってトリムコイルのリードやRF キャビティの冷却水の配管の導入部が林立していて、通常の方法でフランジを繋ぎ合わせる作業スペースが取り難い。そこで隣接する槽を連結する方法として3 mのレストラック型ドーナツフランジ2枚を二重ペローズで溶接接続し、ペローズの中間部分を加圧してその張力をパッキングの締付力として利用する“空圧式エクспанションシール”を採用する³⁾。中間部を減圧すると、2枚のレストラック型フランジの間隔が縮まり、両槽間に隙間ができて、キャビティやバレー箱を半径方向に引き出せる。Fig. 5 にシールの断面図を、Fig. 6 にその写真を示す。

このエクспанションシールは、ペローズの役割りがあるので、大型の真空槽が減圧されるときに生ずる変形

や、機械工作や据付け精度の誤差を、その伸縮範囲内で吸収することができる。ペローズの伸縮ストロークを6 mm として設計し、1 kg/cm² 程度の加圧で良好に作動し、シール性も確かめられた。このシールの採用により、キャビティやバレー箱の電磁石との連結、切離しは、作業スペースの悪条件の下での多数のボルト締付工程を無くし、エヤーバルブによる加圧・減圧の切替えだけで、間口3 m の真空槽接続面をシールしたり、解放することができる。

キャビティとフラットトップ空洞には、それぞれ隣接する両側の電磁石との間にエクспанションシールがあり、それらの真空槽を所定の半径位置に固定して、両側のエクспанションシールを同時に加圧すれば、位相方向の張力がバランスして、位相方向の力が相殺される。ところが、バレー箱の片側にはエクспанションシールを設けることができない。理由は、ビームの入射軌道がシールと干渉することである。このため、バレー箱には片側にしかエクспанションシールが付いていない。他方は直接磁極箱と連結しなければならないが、連結作業は他の連結部と同様に作業が困難である。そこでバレー箱の連結方法は、箱の架台を所定の半径方向に固定してエクспанションシールを加圧すると、架台の上でバレー箱が位相方向に移動して、相手の磁極箱との間のエラストマーを押し付ける。バランス効果が無いので、真空槽を減圧すると、大気の手によって更に押し付け力が加わるように開口部の形状を決める。下手をすると、真空槽が大気の間は十分な押し付け力があっても、減圧するにつれて、それが弱くなり、リークが発生する。

4. 排 気 系

加速器で必要とされる真空度は、ビームが加速器内に滞在する間に残留ガスとの相互作用により、荷電変換してビームが失われるのを、どこまで許容するかで決まる。サイクロトロンは、比較的加速電圧が高いので、滞在時間が短かく、質量数の大きい重イオンを除けば、10⁻⁷ Torr 台で良い。一方、サイクロトロンは装置が大きく、真空槽内に種々の電磁石コイルやビーム制御機器、診断装置等を内蔵していて、放出ガス負荷は大きい。製造中のリングサイクロトロンでは、トリムコイルや電磁チャネルのコイルがアルミナ溶射の絶縁被覆で、それらの中には2,000 A の励磁電流を流すものがあり、温度上昇に伴って放出ガスが増大する。理化学研究所のリングサイクロトロンでは、これらのコイルの大半を、ビームが通過する空間との間に仕切り板を入れて、補助排気する構造としている。われわれの場合は空間的な制約と構造の簡便さを優先したため、これらの総てが高真

Table 1 Characteristics of the vacuum chamber
12 separate chambers connected with pneumatic expansion seals

Diameter	inside	~3 m
	outside	~10 m
Height	Cavity section	~3 m
	Valley section	~0.6 m
	Magnet section	~0.4 m
Volume		~50 m ³
Surface Area inside vacuum	Metals: Fe, SUS, Al, Cu, etc.	~1,000 m ²
	Ceramic coat for Trim Coils	~150 m ²
	Poly-imide sheets	~200 m ²
	Polymer, Elastmer gaskets, etc.	~4 m ²
Feedthrough	Trim coils, cooling water pipes, beam diagnoses, etc.	~1,500

空側にむき出しになっている。装置が大型で形状が複雑であり、内蔵物が多岐にわたり、エラストマーシールを用いていることから、ペーキングや放電洗浄による積極的なガス出しやクリーニングが期待できない。Table 1 に、真空槽の概略諸元と露出表面積を示す。

各種材料からの放出ガス負荷を、実測による評価も含めて推定した。それによると、排気後20時間で (2~3) × 10⁻² Torr·l/sec 程度の放出ガスが見込まれる。その主たる源は、コイルに溶射されるアルミナ被覆やカプトン等のポリイミド樹脂系絶縁物からで、H₂O を主とする凝縮性のものであると考えられる。

約50 m³ の容量を、大気圧から約30分で10⁻³ Torr 台まで回転ポンプ（キニー、メカニカルブースター、分子ポンプを含む）で粗引きする。その後、各磁極箱の底板に吊下げられた形で設けられる拡散ポンプ群で中間引きして、約3時間で10⁻⁶ Torr 台に入る。このポンプは、既設の AVF サイクロトロンの排気系を踏襲して、主ポンプ（16吋口径）のバックを小型の拡散ポンプ（4吋口径）で排気する分留型のもので、2段冷凍バッフルで油の逆流を厳重に防ぐ対策を施し、H₂O に対して有効排気速度を高める狙いをもっている。その後はクライオポンプを動員する。N₂ に対して7,500 l/sec（16吋口径）のもの3台を6個の磁極箱の一台おきの上部に据え、10,000 l/sec（20吋口径）のもの6台をキャビティ又はバレー箱に配置する。Fig. 7 に、排気系統図のうち、紙面の都合でその半分だけを載せる。

サイクロトロンは、ビームの入射、加速、引き出しに至る重要な機器の総てが、全体として一体の大きな真空槽に収められ、それらの一部の保守・点検作業にも、全

Fig. 7 Blockdiagram of the evacuation system (only half of the whole system).

系を大気圧にする必要があり、その頻度は他の加速器に比べてかなり高いといえる。従って、長時間排気後の到達真空度の他に、ビーム加速が可能になる排気時間の短縮に設計のポイントを置くことが、加速器の効率的な運用に貢献することになる。その意味で、粗引系、中間引系にそれぞれの圧力範囲に応じて大きな排気速度を有するポンプを配置することが重要である。この計画では、大気圧から 8 時間程度で 1×10^{-6} Torr 台になり、陽子や α 粒子等の軽いイオンは加速が可能となり、更に数時間排気すれば、重いイオンも加速できる筈である。

5. ま と め

現在製作中のリングサイクロトロンは、電磁石やRFキャビティ等の12個に分割された真空槽を、互いに連結して、全体としては直径10 m、キャビティの高さ3 mの容器に組み上げる。それぞれの槽は、溶接構造を主体とするケーキカット型の内部に、サイクロトロンとしての主要な機器を収納してから、所定の位置に固定する。

それぞれの連結面の間口は長さが3mあり、かなり頻繁に行う連結・切離しの作業を迅速、簡単に行うため、空圧式エクспанションシールを採用する。排気系については、大量の放出ガス負荷をできるだけ短時間に減圧し、大気圧から10時間程度でビームが加速できるよう、粗引きや中間引きポンプにも配慮しながら、9台のクライオポンプを磁極箱、キャビティ、バレー箱に分散配置する。到達真空度は、 1×10^{-7} Torr程度と推定している。

本体主要部は、住友重機新居浜製造所で製造中であり、既に真空試験も始まっている。本機的设计・製造に当っては、同社の阿部準也、市田彰治、田口勲の各氏に負う所が多い。ここに記して感謝の意を表します。

〔文 献〕

- 1) I. Miura et al.: Proc. of 11th International Cyclotron Conference, Tokyo (1986) p. 207.
- 2) H. Kamitsubo: *ibid.* p. 17.
- 3) A. Shimizu et al.: *ibid.* p. 396.