

KCCH-50 MeV 싸이클로트론의 진공계통에 관한 연구

박주식 · 채종서 · 류성렬

한국에너지 연구소 원자력병원

=요 약=

본 논문에서는 원자력병원에 설치된 50MeV-proton 싸이클로트론의 진공계통에 관한 일반적인 특성과 측정된 진공결과를 기술하고 있다.

진공장치는 5개의 그룹으로 구성되어 있으며, 동작순서는 EPROM-PC 장치에 의해 자동제어된다.

정상가동중의 도달 진공도는 각각 5×10^{-6} mbar(I, II), 2×10^{-6} mbar(III), 1.2×10^{-6} mbar(IV), 1.5×10^{-6} mbar(V)였으며 이 진공도는 50 MeV-proton 빔을 가속하기에 충분함을 보여 주었다.

서 론

당 병원에서 국내 최초로 설치, 가동중에 있는 의학용 싸이클로트론 KCCH-50은 에너지 가변의 경이온 가속용 AVF(Azimuthal Varying Field)[1~3] 싸이클로트론으로 가속에너지와 빔 세기의 제어가 용이하고 양질의 빔을 인출할 수 있어 속중성자 치료[4~6], 동위원소 생산등 의학분야에 이용함은 물론 생물학, 약학, 공학분야에도 활용이 가능하도록 설계되어 있다.

규모는 양자의 최대 가속 에너지가 50 MeV, 빔 전류의 세기가 최대 70 μ A로서 의학용으로는 대형급에 속하며, 장치의 구성은 전자석 계통, RF-발전계통, 이온원, 빔 인출계통, 빔 진단계통, 진공계통, 컴퓨터 제어 계통 및 빔 수송 계통으로 이루어져 있다.

본 논문에서는 위의 여러 계통중 진공 계통에 대한 특성을 조사하고 실제의 실험결과를 논의하겠다.

본 론

1. 이론적 배경

싸이클로트론 뿐만 아니라, 모든 다른 원형 가속기에서 필요로 하는 진공도가 충족되지 않을 때 수반되는 문제점은 크게 두 가지로 나누어 생각할 수 있다. 하나는 가속 입자가 가속 도중, 공간에 잔류한 기체와 충돌하여 그 진로가 구부러져 안정 궤도에서 벗어나거나, 전하 상태가 변하여 공명 조건이 만족되지 않거나

하여 가속되지 않게 되는 것이다. 다른 하나는 가속용 전극과 이 전극과 마주보고 있는 Liner 사이에서 방전이 생겨 가속전압이 발생하지 않는 것이다. 이 두가지 요소중에서 보다 진공을 필요로 하는 것에 의해 진공도가 결정된다. 싸이클로트론의 경우, 전자에 대한 현상은 이론적으로나 실험적으로도 비교적 잘 알려져 있다. 가속하는 입자가 α 입자나 수소 혹은 중수소 이온 일 경우에는 압력이 1×10^{-4} mbar 보다 낮을 때 전자에 대한 영향을 무시할 수 있다. 그러나 수소 분자 이온 (H_2^+)이나, 음 이온(H^-, D^-), 다하중(multi-charged) 이온을 가속할 때는 압력이 1×10^{-6} mbar 혹은 그 이하의 진공도를 요구한다. 후자의 경우, 진공도는 전극사이의 공간 압력에 비례하는 것이나, 진공 방전의 입장에서 생각하면 전극이나 Liner 표면의 성질이 중요하며 또 방출 가스의 량에 의해 압력이 증감하여 결국 전극이나 Liner 표면의 청결정도가 진공도로서 표시되고 있다고 생각해도 무리가 없을 것이다. 즉 고진공중에서 방전의 발생을 규정하는 것은 먼저 전극의 형상이나 전압에 의해 주어지는 전계 강도이며 다음으로 전극 표면의 청결 정도이다. 이것에는 다음과 같은 요소를 들 수 있다. 전극의 재질과 표면의 요철정도, 흡착 또는 흡장된 가스의 종류와 량 또는 방전 발생시 국부적으로 온도가 높아져 그때 방출되는 가스등이 그 요소이다. 이와같은 조건을 만족하기 위해서는 전극이나 Liner의 재료로 순도가 높은 구리를 쓰는 경우가 많다. 표면처리는 가능한 한 요철이 적도록 기계적으로 연마하고 또 화학적 처리를 한다.

진공방전에 관한 연구는 많이 되어 있고 현재도 계

속되고 있으나, 아직 싸이클로트론 전극 간의 방전을 충분히 설명하고 있지는 못하다[7]. 그 원인의 하나는 싸이클로트론 전극 표면의 상태가 방전 현상을 설명하기에 너무 많은 복잡한 조건을 갖고 있기 때문이다. 보통 싸이클로트론에서 방전이 되지 않으면서 인가할 수 있는 전압 V 와 거리 d 와의 사이에는 $V^2 \propto d$ 의 관계가 있다. 이와같이 싸이클로트론이 필요로 하는 진공도는 한마디로 결정하기 힘들다 보통 10^{-6} mbar에서 $2 \sim 4 \times 10^{-6}$ mbar 라고 알려져 있다[7].

한편 진공 장치의 배기 속도는 다음과 같이 서술된다. 우선 진공함 내부에서의 가스원은 다음의 3가지로 생각해 볼 수 있다. 즉 이온원에서 주입 가스(수소, 중수소 및 헬륨 가스 등) q_i , 기벽(진공함, 전자석 선단부, Liner, Dee 전극 등) 표면에서의 방출 q_g 및 진공용기의 결합부를 통하여 들어오는 누출량 q_l 이다. 진공 펌프의 유효 배기 속도를 S 라 하면 측정점에서의 압력 P 는

$$P = P_0 + \frac{q_i + q_g + q_l}{S}$$

로 나타낼 수 있다.

P_0 는 배기하여야 할 기체가 존재하지 않을 때 진공 펌프가 나타내는 압력으로 도달 진공도라 하며 주로 진공 펌프에 쓰이는 oil의 증기압에 의해 결정된다. q_i 는 주입 가스량으로 보통 수 SCCM 정도이다. q_g 는 용기의 재료 및 진공적인 이력에 현저한 영향을 받는 량이다. 실제 싸이클로트론에서는 $q_i \approx q_g$, $q_l \approx (1/10 \sim 1/100)q_i$ 가 되도록 설계되는 것이 많다.

싸이클로트론의 진공도를 가능한 한 높이기 위해서

는 진공펌프가 될 수 있는대로 큰 배기 속도를 갖는 대형인 것이 바람직하다. 그러나 싸이클로트론에 진공 펌프를 부착할 때 다른 제약 조건이 따르기 때문에 합부로 큰 진공 펌프를 부착하는 것은 불가능하고 어느 정도의 크기로 타협해야 한다. 경험적으로 싸이클로트론의 용적과 진공 펌프의 배기속도 사이에서 어떠한 관계를 구할 수 있다. 즉, 용적이 10^4 이상일 경우에는 배기 속도 값은 용적값의 1~3배이며 용적이 10^4 보다 적을 경우에는 표면적은 용적이 감소하는 것보다 서서히 감소하므로 $S(l/sec) \geq V(l)$ 가 된다. 특히 KCCH-50과 같은 compact 싸이클로트론의 경우에는 배기 속도 값이 용적값의 5~10배 정도인 것이 보통이다.

2. KCCH-50 MeV 싸이클로트론의 진공 계통

KCCH-50 진공 계통의 계통도는 Fig. 1과 같이 I, II group은 싸이클로트론 진공함, III-group은 main switching magnet 부분, IV-group은 중성자 치로기 빔라인, V-group은 동위원소 생산용 빔라인의 진공을 위한 5개 펌프 그룹으로 구성되어 있다[8]. 가동시 진공함 내부의 정상 압력은 10^{-6} mbar 이하로 유지되어야 하며 이 값은 앞에서 언급한 바와 같이 각 진공 그룹의 진공 펌프의 배기속도와 이온원으로 부터 주입되는 가스량에 따라 결정된다.

Fig. 1을 통해 알 수 있듯이 배기속도가 4,000 l/sec인 확산 펌프 2대(BALZERS 제품, DC 704 오일사용, 수냉식)가 용적이 1.5 m³인 진공함의 배기를 맡고 있으며 확산유의 역류를 막기 위해 수냉식 방지(baffles)

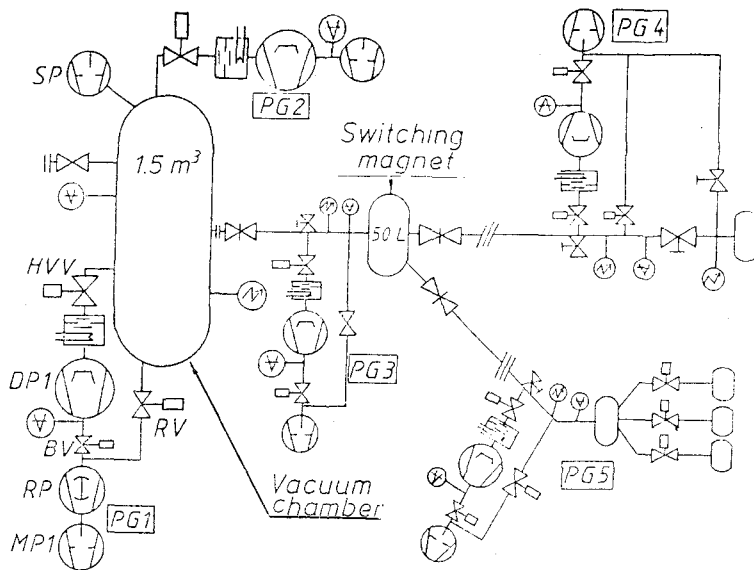


Fig. 1. Vacuum pump system for KCCH-50.

Table 1. Pumping speed for the vacuum system of KCCH-50MeV Cyclotron

Group No.	Volume (l)	Pumping Speed(l/sec)	Measuring Unit
I, II	1,500	8,000	PKG 100
III	50	240	TPG 100
IV	50	90	TPG 100
V	50	90	TPG 100

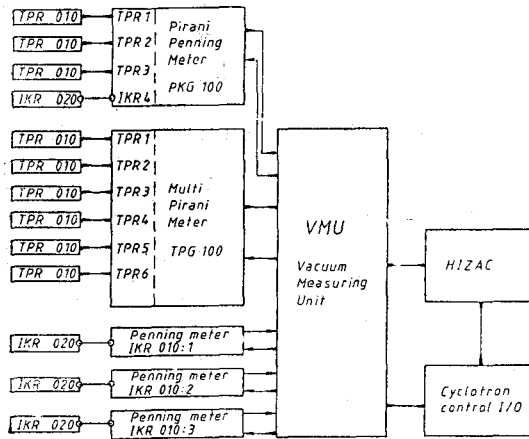


Fig. 2. Vacuum measuring system.

장치가 확산 펌프 상부에 부착되어 있다. 또한 확산 펌프와 진공함 사이에는 fast-acting electropneumatic 밸브가 설치되어 있다. Table 1은 각 펌프 그룹별 용적과 배기 속도의 값을 보여준다. 각 펌프 그룹 사이에는 차단용 gate 밸브가 위치하고 있으며 배기 순서는 진공 제어장치인 HIZAC 장치(3개의 D-64(HITACHI)로 구성)에 의해 자동 조절되게끔 구성되어 있다. 또한 이 진공 제어장치는 안전운전을 위해 펌프 그룹의 압력, 냉각수의 유량, 온도등을 측정하여 안전장치와 연동작용을 하도록 되어 있을 뿐만 아니라 운전자의 오조작이나 기기의 이상으로 인해 발생할 수 있는 진공 파피로부터 장치가 보호받도록 program 이 작성되어 있다. 예를 들어, 가동시 진공함에 이상이 발생할 경우에는 fast acting electropneumatic 밸브가 작동하여 진공계를 보호하게 되며 싸이클로트론 자체의 진공은 빔 출구 밸브에 의해 빔 라인 진공부와 서로 분리된다. 진공도의 측정은 Fig. 2와 같이 구성되며 측정 gauge는 Fig. 2에서 알 수 있듯이 penning gauge[9]와 pirani gauge[10]를 이용한다. 또한 모든 진공에 대한 정보는 I/O장치를 통해 control console

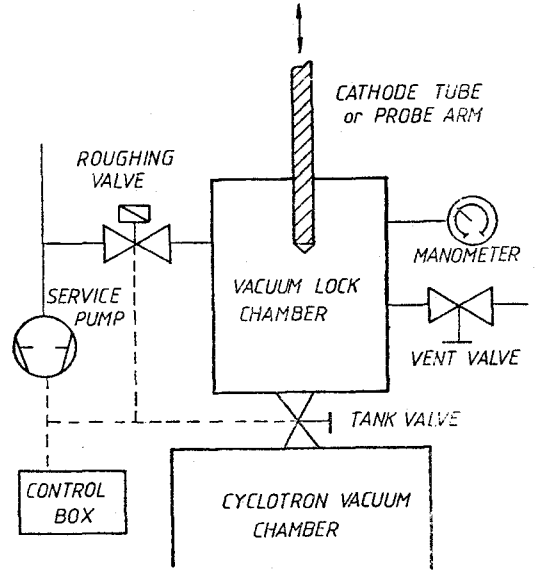


Fig. 3. Vacuum locking system.

의 display terminal 에 나타나며 이것은 싸이클로트론 운전상의 중요한 지표의 하나가 된다. 이 지표를 통해 진공 펌프가 정상적으로 동작하여 가속 공간의 진공이 좋다는 것 이외에 이온원에 가스가 공급되는 상태, 대량 진공 누출이 없는 것등을 파악할 수 있다. 그리고 Dee 나 공진계에 이상 방전이 발생한 경우에는, 대략 그로우(glow)방전이 되며 기벽, 특히 공진계에서의 가스방출이 현저하게 되어 높은 압력 지표를 나타내게 된다.

진공함과 빔 수송관은 모두 알루미늄으로 제작되어 있고 대부분의 sealing 은 Nitril 고무 O-ring 과 ISO 표준 flange 로 구성되어 있다. 그러나 RF 장치의 feedthrough, 이온원의 양극, deflector probe, 인출계통 등 몇몇 부위에는 빔 발생시 온도가 상승하므로 Viton O-ring 을 사용하고 있다. 또한 KCCH-50에는 이온원 음극을 교환하거나 보수할 때 진공함 전체의 진공과 피없이 이온원 음극 부분을 취급할 수 있도록 Fig. 3 과 같은 vacuum locking 장치를 갖추고 있다.

이밖에 진공 부품에 대한 방사선 상해를 고찰해 보면, 진공 gasket 로 많이 쓰이는 합성 고무는 다량의 방사선 조사에 의해 경화되어 장 기간의 사용에는 기밀을 보지 하지 못할 위험성이 있다[11]. 이것을 피하기 위해 금속 gasket 를 쓸 경우에는 고무 gasket 에 비하여 flange 홈의 공작이 힘들고 또 수회의 조립 후에는 새로운 금속 gasket 를 사용해야 하는 등 많은 불편이

따른다. 특히 자극 선단부의 대형 gasket 이 자극 선단부의 자장에 의한 반복 응력 때문에 피로하여 진공 누출을 방지할 수 없다. 실제 운전 실적에서는 상시 사용하는 빔 강도에서 설계시의 예상치 보다도 방사선 손상이 적은 것으로 판명되어 금속 gasket 를 폐지하고 고무 gasket 를 쓰도록 개선되었다. Septum 입구나 빔 인출구 등 가속된 빔이 다량으로 집중하여 충돌하는 부분에 가까이 위치해 있는 고무 gasket 의 수명은 1년 정도로 짧은 경우가 있다. KCCH-50의 경우, 이 부분의 고무 gasket 는 leak 가 발생하지 않더라도 1년에 한번씩 정기적으로 교체해 주는 것을 원칙으로 하고 있다. 실제로 이온원의 양극과 main probe 의 고무 gasket 에서 이와같은 현상을 경험한 바 있다.

3. 진공 계통 시험 결과

5개의 진공 그룹으로 구성되어 있는 싸이클로트론 진공 장치의 가동 순서는 3대의 programmable controller(HIZAC, D-64)에 의해 자동으로 가동 순서가 제어된다. 그리고 pirani gauge 나 penning gauge 에 의해 진공도를 파악할 수 있으며 gauge 제어기의 출력 신호를 이용하여 각종 진공 밸브가 동작하게 된다. Fig. 4는 싸이클로트론 진공함을 완전히 대기압의 공기로 채운 다음, 2시간후에 배기를 시작하여 빔 가속이 가능한 진공도까지 높이는 데 소요되는 시간을 측정해 본 것이다. Fig. 4의 결과 진공도를 높일 때 걸리는 시간은 진공 함 내부에서 수행된 작업 내용, 공기를 채우는 방법, 펌프 오일의 상태, 진공함 내부의 청결상태 등의 요인들이 크게 좌우함을 확인할 수 있었다.

실제 펌프 오일의 상태는 다음의 방법으로 배기속도를 측정함으로써 점검할 수 있었다.

① 이온원 가스를 주입하지 않은 상태에서 싸이클로트론 진공 함 내부 압력 P_1 을 측정한다.

② 이온원 가스를 3 SCCM ($=5 \times 10^{-2} \text{ l} \cdot \text{mbar}/\text{sec}$) 만큼 주입한 다음 싸이클로트론 진공함 내부 압력 P_2 를 측정한다.

③ 배기속도는 $Seff = \frac{5 \times 10^{-2}}{P_2 - P_1}$ 의 식에 의해 계산할 수 있다.

이때 Seff 는 확산 펌프 사양에서 규정하고 있는 펌핑 속도는 될 수 없다. 또한 이 값은 conductance 나 gauge head 위치에 따라 변화될 수 있다. 그러나 정기적으로 Seff 값을 점검하여 Seff 값이 급격히 감소할 경우 oil 의 질이 급격히 저하됨을 확인할 수 있다.

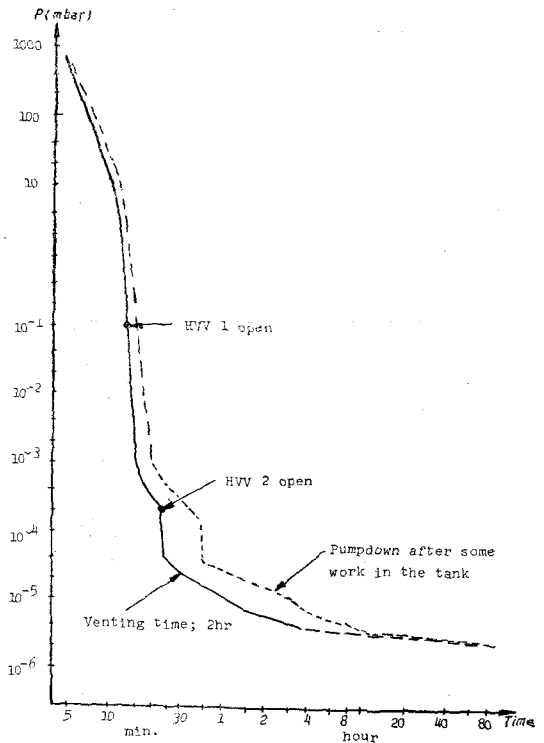


Fig. 4. Vacuum down curve for KCCH-50.

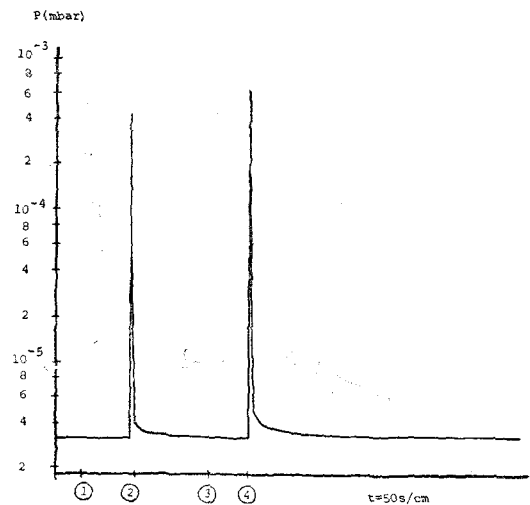


Fig. 5. Pressure in vacuum chamber during an exchange of cathode.

이온원의 음극을 교체하거나 main-probe 의 유지, 보수를 위해 vacuum locking 장치를 사용할 때의 진공도 변화는 Fig. 5와 같이 측정되었다. 즉, Fig. 5의

Table 2. Partial pressure in the vacuum chamber

m/e	A	B
	Pressure (10 ⁻⁷ mbar)	Pressure (10 ⁻⁷ mbar)
18(H ₂ O)	54	2
28(N ₂ /CO)	6	2
32(O ₂)	1	0.3
41(Hydrocarbons)	2	0.5
55(Hydrocarbons)	2	0.4

②, ④는 각각 음극 몸체나 main-probe 를 진공함에서 빼내거나 다시 집어 넣을 때 진공도가 순간적으로 급격히 상승함을 보여준다. 그리고 gas analyzer 를 사용하여 싸이클로트론 진공함 내부에의 진공 누출검사를 실시한 결과, 다음 Table 2와 같은 질량수에 대한 누출율을 얻을 수 있었다.

여기서 A는 새로운 sealing 으로 교체한 후 즉시 측정된 결과이며 B는 빔 가동 4주후에 측정된 값이다. 위의 결과로 미루어 볼 때 진공함 내부에 있는 Liner 와 Dee 에서의 냉각수 누출이 대부분의 누출량을 차지함을 파악할 수 있다.

이상의 진공 계통 시험 결과, 정상 가동(proton 가속)시 이온원 가스 manifold 를 통해 3 SCCM 의 수소 가스를 주입했을 때 각 진공 그룹의 최종 압력은 각각 5×10⁻⁶mbar (I, II), 2×10⁻⁶mbar (III), 1.2×10⁻⁵mbar (IV), 1.5×10⁻⁶mbar (V)였다. 따라서 동위원소 생산을 위한 빔 라인의(진공 그룹 V) 진공도가 가장 양호함을 알 수 있다.

결 론

본 논문은 국내 최초로 설치된 KCCH-50 의학용 싸이클로트론 진공 계통의 안전한 운전, 유지 및 보수를 목표로 하였으며 이 목표에 맞추어 계통의 특성을 조사하였다. 조사 결과 도달 진공도는 수소가가스 3 SCCM 을 주입했을 때 진공 그룹별로 각각 5×10⁻⁶(I, II), 2×10⁻⁶mbar (III), 1.2×10⁻⁵mbar (IV), 1.5×10⁻⁶mbar (V)의 진공도를 얻을 수 있었다. 이러한 진공도는 입자 빔(P, d, He³, α)을 가속하기에는 충분한 것이며 실제 빔가속시 진공 문제로 인해 KCCH-50이 정지된

경우는 경험하지 못했다. 그리고 10⁻⁶mbar 정도의 진공도를 항상 유지함으로써 진공함 내부 장치의 조절(conditioning)[12,13]시간을 현저히 단축시킬 수 있었고 진공 누출의 대부분은 진공함 내부를 순환하는 냉각수에서 발생하는 것을 파악하였다.

한편 진공부품의 많은 부분을 유기물이 차지하고 있으므로 싸이클로트론 가동시 발생하는 다량의 방사선에 의한 방사선 손상문제에 대하여 앞으로 더 연구해야 될 것으로 보여진다. 그리고 진공 장치는 다른 구성 계통과 달리 년중 연속적으로 가동되어야 하기 때문에 정기적으로 펌프 오일 상태, gasket 의 sealing 상태, 각종 진공 계기의 보수 및 교정 작업을 정기적으로 수행해야만 한다.

참 고 문 헌

- 1) L.H. Thomas, *Phys. Rev.*, **54**, 580(1938).
- 2) D.J. Clark, et al., *Nuclear Instr. and Methods*, **18**, 1(1962).
- 3) M.S. Livingston and J.P. Blewett, *Particle Accelerators*, McGraw-Hill, New York (1962).
- 4) R.S. Stone, *Amer. J. Roentgenol.*, **59**, 771 (1948).
- 5) M. Clatterall, *Br. J. Radiol.*, **49**, 203(1976).
- 6) G.W. Barendsen, J. Broerse and K. Breur, *High LET Radiations in Clinical Radiotherapy*, Pergamon(1979).
- 7) J.J. Livingood, *Principles of Cyclic Particle Accelerators*, Van Nostrand, New York(1961).
- 8) *MC-50 Manual B550*, Scanditronix, 6(1982).
- 9) F.M. Penning, *Physics*, **4**, 71(1937).
- 10) M. Pirani and J. Yarwood, *Principles of Vacuum Engineering*, Chapman & Hall, London(1961).
- 11) A. Roth, *Vacuum Technology*, North-Holland, Amsterdam(1976).
- 12) *MC-50 Manual B550*, Scanditronix, 4(1982).
- 13) L.L. Alston, *High-Voltage Technology*, Oxford Univ. Press, London(1968).

Study on the Vacuum System of the KCCH-50MeV Cyclotron

Joo Shik Bak, Jong Seo Chai, Seong Yul Yoo, M.D.

Korea Cancer Center Hospital Korea Advanced Energy Research Institute

=Abstract=

In this paper, general features and measured results of vacuum pressure on the vacuum system of 50 MeV proton KCCH-cyclotron which was installed in Korea Cancer Center Hospital are described.

The vacuum system comprises five subgroups and the operating sequences are automatically controlled by EPROM-programmable controller.

In normal operation, the obtained ultimate pressures of vacuum groups were 5×10^{-6} mbar(I, II), 2×10^{-6} mbar(III), 1.2×10^{-5} mbar(IV), 1.5×10^{-6} mbar(V), respectively. It was confirmed that these pressures was enough to accelerate the 50 MeV-proton beam.