

# MC-50 의학용 싸이클로트론의 특성조사

원자력병원 싸이클로트론실

박 주 식

## -Abstract-

The general features and measured results of the 143cm, variable-energy, three sector-focused MC-50 cyclotron installed at Korea Cancer Center Hospital are described. The MC-50 cyclotron is designed to produce beams of protons, deuterons, He-3 and alpha particles of maximum energies 50MeV, 25MeV, 66MeV and 50MeV respectively to be used for neutron therapy and radioisotope production. The azimuthal field variation is produced by three sets of spiral ridges having a maximum spiral angle of 55°. The RF system, a two-dee quarter-wave system is designed to provide a continuously variable frequency from 15.5 to 26.8 MHz. The first external beam was obtained in January 1986. Subsequent internal and external beam studies with protons and alphas show a well-behaved beam through the whole beam transport system.

## 1. 序 論

1932년 E.O. Lawrence 가 처음으로 싸이클로트론을 만들어낸 이후 지금까지 수없이 많은 Cyclotron 이 세계 곳곳에서 만들어졌고 각기 특수한 모양과 특성을 가지고 있고 당 병원에서 국내 최초로 설치, 가동중에 있는 의학용 Cyclotron MC-50 은 SWEDEN Scanditronix 사에서 제작한 것으로, 에너지 가변의 경이온 가속용 SF Cyclotron 이다. Cyclotron 의 종류는 가속원리에 따라 보통의 재래식 Cyclotron, FM Cyclotron, SF Cyclotron 으로 분류될 수 있다. 이중 SF형의 특징을 간단히 살펴보면 첫째 상대론의 제한을 극복하고 있으므로 보통형 Cyclotron 으로 실현할 수 없는 높은 에너지의 입자를 가속할수있다. 둘째 축 방향의 집속을 강하게 할 수 있으므로 보통형 보다도 좁은 간격에서 같거나 혹은 더 높은 빔 전류의 세기를 얻을수있다. 셋째 Synchro-Cyclotron 에 비하여 보다 연속적인 빔을 얻을수

있다는 점이다. MC-50 은 양자의 최대 에너지가 50 MeV, 빔 전류의 세기가 최대 70  $\mu$ A로서 암환자를 위한 중성자 치료용으로 충분하며 또한 양성자, 중양자, He-3, He-4 의 네 가지 입자를 가속할 수 있을뿐만 아니라 에너지 가변형이기때문에 50여종의 동위원소도 생산할 수 있다. 본 논문에서는 MC-50 Cyclotron 의 동작원리와 구조는 물론 각 구성장치의 특성 및 빔성능을 분석하고 있으며 이 분석 결과는 안전한 운전 및 유지에 유용한 자료로 활용될것이다.

## 2. 本 論

### 1. MC-50 의 주요 장치별 특성

#### 1.1) 주 전자석

Cyclotron 에서 가속되는 하전입자의 최대 에너지 (T) 는 그 입자의 하전수 q, 질량수 M에 의해서 다음처럼 표시된다.

$$T = K \frac{q^2}{m} \quad (\text{MeV})$$

여기서 K는 Cyclotron 상수로서 자석의 크기를 결정짓는 특성수이며 이값은 자석의 평균자장

과 입자의 인출반경에 의해 결정된다. MC-50의 경우 K값은 실험적으로  $47.9 \times (BR)^2$ 의 값을 갖는다. 전자석 형태는 보통의 H형이며 자기 통로는 4-Piece의 상, 하 Yoke와 2-Piece의 좌, 우 Yoke, 그리고 2개의 상, 하 자극으로 이루어져 있다. 이러한 자석 Yoke와 자극의 전체 무게는 코일무게를 포함하여 92톤이며 가장 무거운 Piece의 무게는 약 14.5톤이다. Yoke의 재료는 탄소함량이 낮은 저 탄소강을 사용하고 있다. 전자석을 구성하고 있는 코일은 주코일, 10 조의 동심원형 조절코일, 그리고 4 조의 조화코일로 되어 있다. 주코일은 입자의 동기운동을 지배하는 역할을 하며, 10 조의 동심원형 조절코일은 가속중에 있는 입자가 RF-발전계의 가속주파수와 동기성 (Isochronism)을 유지하도록 반경방향의 기울기를 조절한다. 또한 자장의 비대칭 정도는 4 조의 조화코일에 의해 조절된다. 조화코일중 가장 바깥쪽 코일은 인출효율을 최대로 하기 위해서 케도 반경간의 간격을 증가시키는데 사용된다. 그리고 극간 사이에 놓여 있는 3개의 Sector를 이용하여 필요한 집속력을 얻을 수 있다. 전자석에 대한 개략적인 사항은 다음 표 1 처럼 요약할 수 있다.

주 코일과 동심원형 조절코일은 직접 코일 내부로 냉각수가 통과하면서 냉각되며, 조화코일은 극의 Valley부분 표면에 부착되어 전도 방식으로 냉각된다. 그리고 분해, 조립의 편리함은 물론, 진공함 내부의 보수 및 유지를 용이하게 할 목적으로, 전자석의 상부를 최대 80 cm까지 들어 올릴 수 있는 유압식 Yoke-lifting 장치가 Side Yoke에 부착되어 있다.

### 1. 2) RF-발전계

RF-발전계는 이온원으로 부터 가속입자를 인출하여 원하는 최종 에너지까지 입자를 가속시키는 계통으로 입자의 종류에 따라 160회 내지 450회 정도 회전하며, 매 회전마다 다음과 같은 에너지 증가율을 갖는다.

$$\frac{dE}{dn} = 4V_{Dee} \times \sin\left(\frac{1}{2}\theta_{Dee} \times N\right)$$

Table 1. Specification for MC-50 electromagnet.

Pole dia.	143 cm
Root dia.	155 cm
Min. gap (hill)	11 cm
Max. gap (valley)	19.7 cm
Magnet dimension	3.62m x 1.55m x 2.36m
No. of sector	3
Spiral angle	max. 55°
Circular trim coils	10 pairs
Extraction radius	57 cm
Fe-weight	88.2 ton
Coil-weight	3.8 ton
Coils	320 turns, water cooled hollow Cu conductor
Max. current	900 A
Power	126 KW
Max. average field	17.5 KG
Min. average field	10.5 KG
Max. hill field	20.5 KG
Main coil current stability	10 <sup>-5</sup>
Cooling water	90 L/min

여기서  $V_{Dee}$ 는 Dee의 인가전압, N은 harmonic 수,  $\theta_{Dee}$ 는 가속전극 Dee의 각도를 각각 나타낸다. 가속계는 2개의 90°-Dee 전극과 1/4 파장의 개방선단 공진기로 구성되어 있다. 그리고 2가지 가속mode인 push-pull mode와 push-push mode에서 각각 일회전당  $2\sqrt{2}$ , 4 배의 유효 가속전압을 얻을 수 있다.

발전형태는 종래의 짜여진 방식이 아니라 구동방식으로써 2개의 동일한 power amplifier 장치로 구성된다. 따라서 자여진 방식에서 발생할 수 있는 고주파 증배현상<sup>2)</sup> (multifactoring)을 피할 수 있다. 한편, 가속에너지 및 가속입자의 종류에 대응하여 주파수 변화가 가능하게 RF-cavity부분의 stem길이를 변화시키는 piston과 Dee의 용량(C)를 변화시키는 flap의 2가지 방식을 병행하고 있다. 표 2는 RF-발전계의 주요한 사항을 보여주고 있다.

Table 2. Specification for MC-50 RF system.

Dee electrode	2
Dee angle	90°
Dee voltage	40 KV Max.
Dee voltage stability	10 <sup>-3</sup>
Min. aperture	2.0 cm
Frequency range	15.5-26.8 MHz
Frequency stability	10 <sup>-6</sup>
Mode	push-pull, push-push
Water cooling	80 L/min per system
Compressed air	7-9 Bar
Time for frequency change	8 min
Inter dee phase, stability	1°
Power tube	4CW 50000E (Eimac.water cooling)
Total power	60 KW

1. 3) 이온원

이온원과 중심부의 구성은 가속전극인 2개의 90° Dee, 접지전극인 2개의 dummy Dee, 이온원 그리고 이와 관련된 기계부품 및 가스 주입 장치로 되어있다. 이온원의 역할과 중심부의 이온 광학적 특성은 높은 세기 및 양호한 질의 빔을 얻고 인출 효율을 높이는데 있다. 앞에서 기술한 바와 같이 RF-발진계는 2가지 mode를 갖기 때문에 이온원도 2조로 구성되어 있다. 따라서 P, d, He-3, He-4를 가속시키는 것이 가능하다. P, I, G<sup>4)</sup> 이온원의 음극은 상, 하 Yoke의 중심부분을 관통하여 삽입하도록 되어 있고 anode 부분은 lower cathode 부분과 결합되어 있다. 빔 인출은 side 인출방식을 채택하고 있으며 그림 1은 빔 가속의 초기 궤도 부분을 보여주고 있다.

음극재료로는 N = 1 일때 LaB<sub>6</sub><sup>5)</sup>를, N = 2 일때는 HfC를 사용한다. 보통 LaB<sub>6</sub>, HfC의 수명은 고진공 상태에서 고온의 재질표면에서 일어나는 evaporation 현상이나 가속된 양이온에 의한 sputtering 현상에 의해 제한을 받지만 La

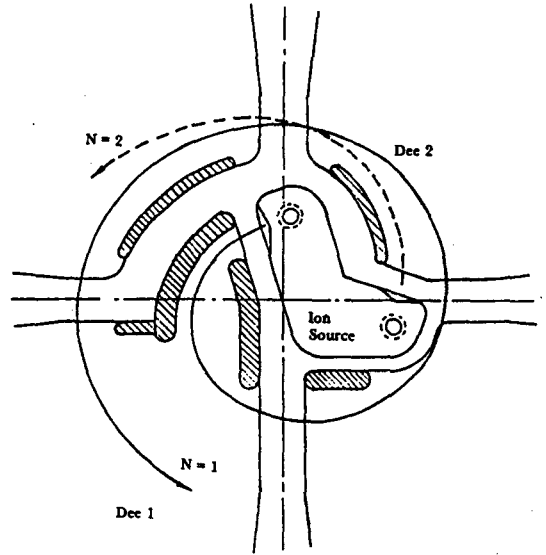


Fig. 1. Initial ion paths

B<sub>6</sub>는 평균 1.5개월 HfC는 40시간 사용후 교체한다.

1. 4) 인출장치

빔 인출장치는 가동부분인 electrostatic deflector와 EMC(Electromagnetic Channel) 그리고 상부자극과 진공함에 각각 부착되어 있는 집속 Channel I, II로 구성되어 있다. 빔이 deflector로 입사할 때 off-centering은 5~6mm이며 인출시 궤도 간격은 약 5mm이다. Deflector의 전극간격은 위치에 따라 4.5~6mm를 유지하고, anti-septum에 인가되는 최대 전압은 60KV까지 가능하며 deflector의 위치는 servo 장치를 통해 원격조절된다.

두번째 인출장치인 EMC는 주코일 자장의 역방향으로 자장을 발생시키는 장치로, 빔이 EMC를 통과할 때 빔은 더 큰 원주를 그리게 된다. EMC의 최대 전류값이 1050A일때, 최대 1.7 KGauss의 자장세기를 원주방향으로 35°에 걸쳐 감소시킬 수 있다. 집속 Channel은 위의 두 장치를 거친 빔을 손실없이 빔 라인 인출구로 보내는 역할을 하는 고정된 빔 인출장치이다. 또한 이 Channel을 이용하여 감소되는 Fringing Field에 의해 야기되는 빔의 수평방향 확산을 방지할 수 있다.

### 1. 5) 진단장치

진공함 내부의 빔을 측정하기 위한 장치로는, 반경 방향으로 움직일 수 있는 2개의 probe (A,B)와 집속 Channel I과 내부 Steering 자석 전단에 위치해 있는 2개의 고정 흑연판이 있다. 진공함을 빠져 나온 빔의 진단 장치로는 Faraday Cup, 가동 Slit, SBD (Stray Beam Detector) 및 BPM (Beam Profile Monitor) 을 사용하고 있다. 주로 빔의 미분 강도를 측정하고 내부 빔의 방향, 집속정도 등을 파악하는데 이용되는 Probe A는 반경 23cm에서 100cm 까지 움직일 수 있으며 미분 head의 형태를 갖고 있다. 1kW까지의 빔 Power가 허용되며 수냉식이다. Deflector probe는 Deflector 출구 뒤쪽에 위치하여 빔의 Deflector 통과 효율을 측정하는데 이용한다. Head의 형태는 단일형으로 반경 55cm에서 62cm까지 움직일 수 있고 3kW까지 빔 Power를 수용한다.

### 1. 6) 진공장치

진공계통도는 그림 2와 같이 싸이클로트론 진공함 (I, II), 주 Switching 자석부 (III), 중성자 치료용 빔라인 (IV), 동위원소 생산용 빔라인 (V)의 진공을 위한 5개의 Pump group으로 구성되어 있다.

가동시 진공함 내부의 정상 압력은  $10^{-6}$  torr 이하로 유지 되어야 하며 이 값은 각종 진공펌프의 pumping 속도와 이온원에서 주입되는 가스량에 따라 결정된다. 용적 1.5m<sup>3</sup>인 진공함의 배기는 pumping 속도가 4,000 L/sec인 확산펌프 2대가 맡고 있으며 확산유의 역류를 막기 위해 수냉식 baffle 장치가 확산 펌프 상부에 부착되어 있다.

사각 펌프그룹 사이에는 차단용 gate 밸브가 위치하며 pumping 순서는 vacuum controller인 HIZAC (히타치, D-64 4대) 장치에 의해 자동조절 된다. 또한 이 controller는 안전한

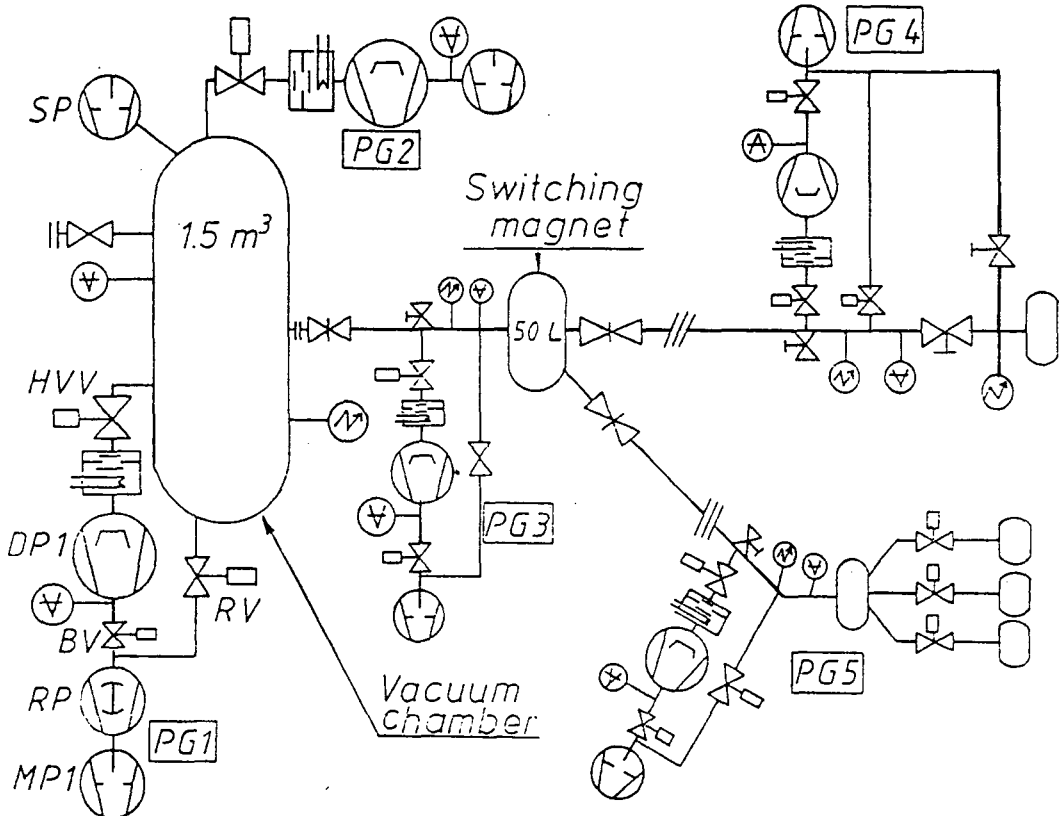


Fig. 2. Vacuum pump system for MC-50

안전장치와 연동작용을 하도록 설계되어 있다.

진공함과 빔 수송관은 모두 Al 으로 제작되어 있고 대부분의 Sealing 은 Nitril 고무 O-ring 과 ISO 표준 flange 로 구성되어 있다. 그러나 RF 장치의 feed-through, 이온원의 anode, deflector probe, 인출계통 등 온도 상승부위에는 Viton O-ring 과 Apiezon grease T 를 사용한다. 진공도의 측정은 Penning gauge 와 Pirani gauge 를 사용한다. 6)7)

### 1. 7) 제어장치

제어장치는 PDP 11/23+ 마이크로 컴퓨터와 I/O계통으로 크게 구분할 수 있다. RSX-11M 을 OS로 갖는 PDP 11/23+의 CPU 최대 기억 용량은 512Kb 이며 그 구성은 그림 3 과 같이 요약해 볼 수 있다.

즉 CPU module 과 2 대의 10M-byte 용량의 disk drive unit, 그리고 4 대의 terminal 과 I/O 장치로 구성되어 있다. I/O 와 Computer 사이의 interfacing 은 DMA 로 수행되

며, I/O 장치는 Z-80 Microprocessor 에 의해 제어를 받는다. I/O 장치는 5 개의 crate 로 구성되어 있고 각 crate 마다 DIP, DOP, ADC, DAC card 가 15 장씩 조합을 이루고 있다.

### 1. 8) 빔 수송장치

빔 수송장치는 사이클로트론에서 빔을 인출하여 주 Switching 자석 전단까지 빔을 수송하는 주 수송 line 과, 주 Switching 자석을 통과한 후, 중성자 치료기와 동위원소 생산실로 향하는 빔 line A, B 의 3 개의 수송 통로로 구분할 수 있으며 그림 4 와 같이 요약된다.

빔 수송통로에는 빔을 집속하거나, 빔의 위치를 조절하는 장치와, 빔의 세기나 모양을 측정하기 위한 빔 진단부품이 부착되어 있다. 전체 수송 line 은 Switching 자석 2 대, Quadrupole 5 대, Steering 자석 4 대, Faraday Cup 7 대, Collimator 1 대, SBD 9 대, BPM 7 대 및 중성자 치료기 내부에 있는 2 대의 bending 자석으로 구성되어 있다.

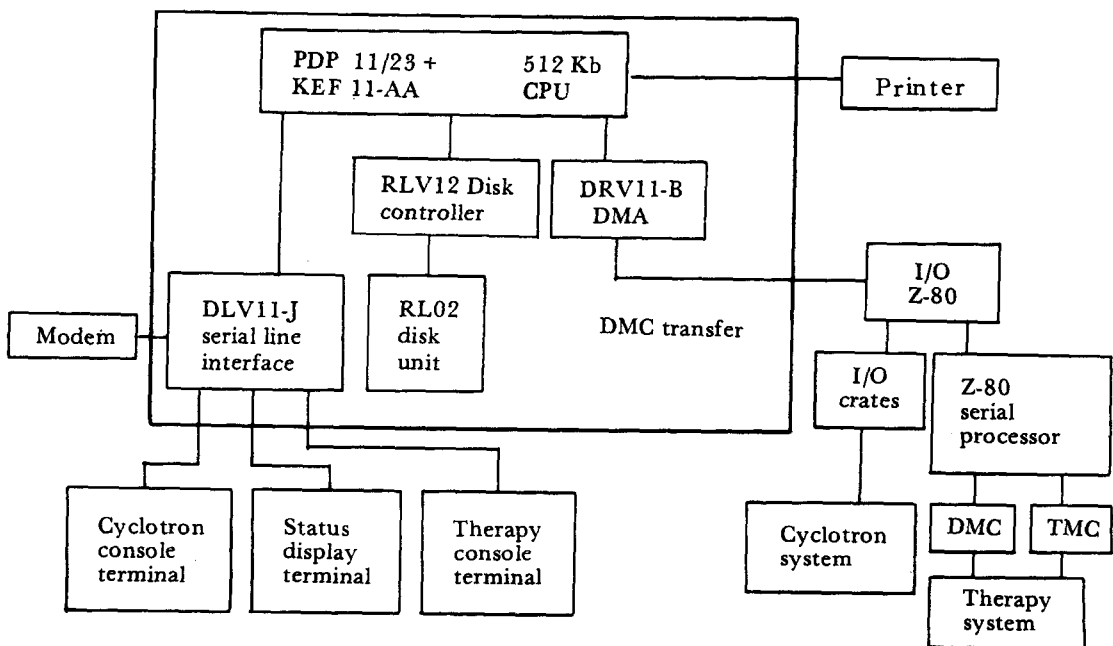


Fig. 3. Layout of control system

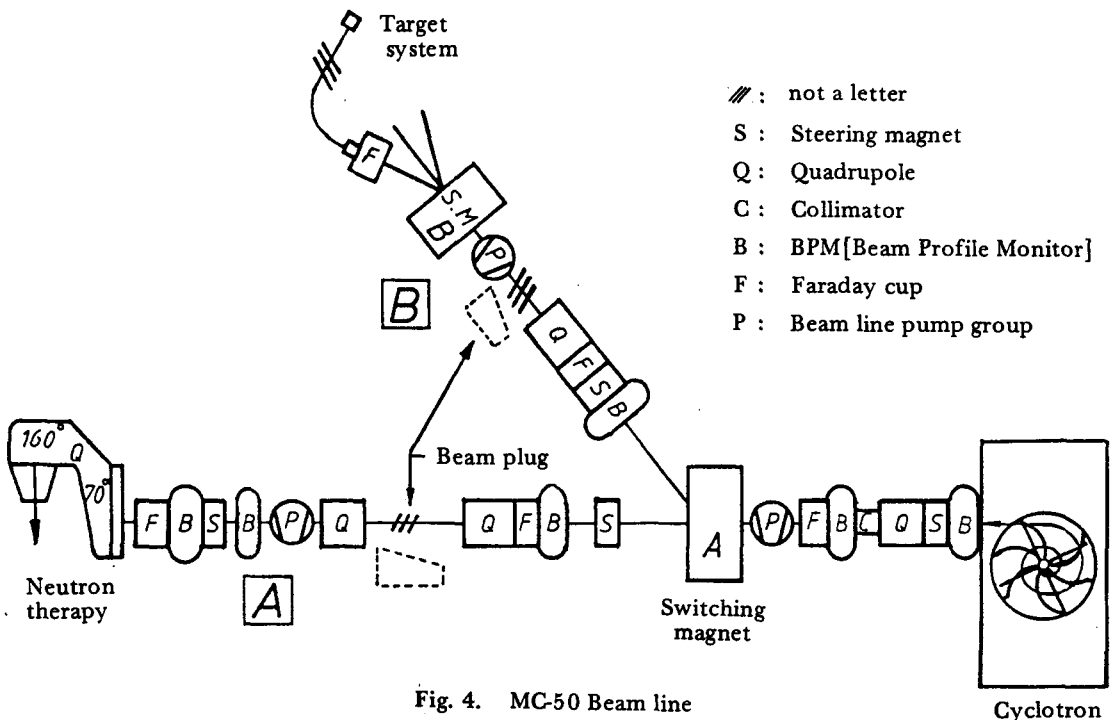


Fig. 4. MC-50 Beam line

2. 빔 특성조사

빔의 특성은 두가지 측면, 즉 양과 질적인 면에서 살펴볼 수 있다. 먼저 양적인 면의 결과는 다음 표 3과 같이 최대 빔 전류의 세기를 요약해 볼 수 있다.

Table 3. Characteristics for beam intensity

Particle	E (MeV)	I <sub>arc</sub> (mA)	I <sub>beam</sub> (μA)
Proton	18	73	51.7
	32	77	64.2
	50	80	70.2
He-4	18	129	10.1
	35	328	18.2
	48	462	35.1

위의 수치는 FCI에서 측정된 것이며, 현재로서는 아크전류값을 80mA 이상으로 증가시켜 더 강한 양자 빔 전류 세기를 얻을 수도 있지만 이때는 이온원 전원공급장치가 불안정하여져 빔전류값도 불안정하게 된다. 보통 표 3과 같은 최

대 빔 전류치를 얻을 때 Septum의 온도상승은 25°C 정도이다. 만약 Septum의 온도상승이 42.5°C 이상이 될 경우에는 Septum을 보호하기 위해 빔 인출이 중지된다. 빔 인출효율은 반경 40cm에서의 빔 전류세기에 대한, Faraday Cup 1에서의 빔 전류세기의 비율로 정의했으며, 빔의 종류나 에너지에 따라 다소 차이가 있기는 했지만 평균 60%를 얻을 수 있었다. 그리고 FCI에 대한 target에서의 빔 전류세기의 비율, 즉 그림 4와 같은 수송계통을 통과할 때의 빔 수송효율은 A, B라인에서 모두 90%까지 얻을 수 있었다. A-라인에서는 빔 plug에서, 그리고 B-라인에서는 Switching 자석 B에서 주로 빔 상실이 측정되었다. 질적인 면에서 빔을 평가할 때는 주로 에너지 및 그것의 FWHM값과 빔의 크기 그리고 emittance 값을 측정함으로써 파악할 수 있을 것이다. 그러나 본 장치에는 에너지 측정장비가 갖추어져 있지 않으므로 전자석의 B-field 값, 주파수, 인출전압등의 변수 값을 통해 에너지를 계산하고 있으며, 양자의 경

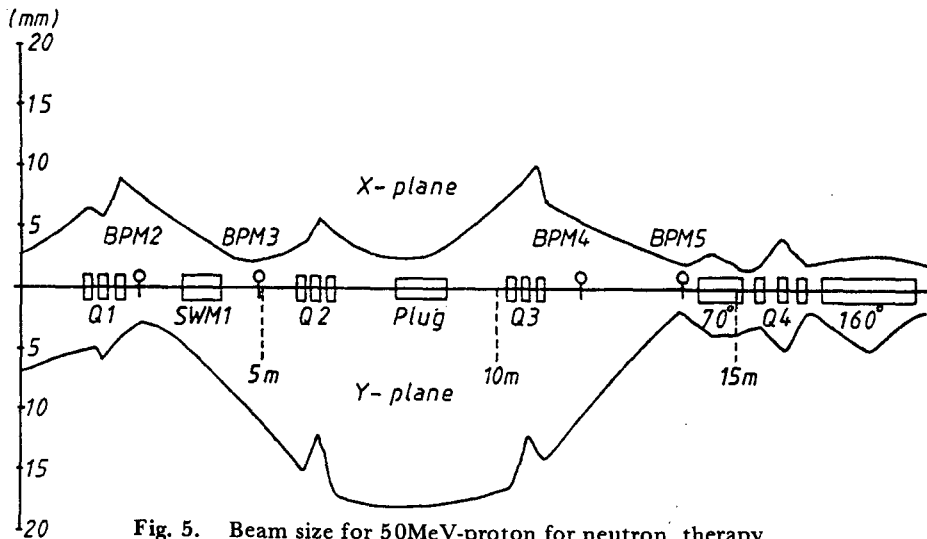


Fig. 5. Beam size for 50MeV-proton for neutron therapy

우 0.5%, He-4의 경우는 1%의 FWHM 값을 각각 갖는 것으로 추정하고 있다. 빔의 크기는 빔 수송라인 A에 대하여 빔 optic계산결과, 그림 5와 같은 결과를 얻었다.

실제 빔의 크기를 SBD, BPM을 통해 측정해 본 결과, BPM5에서 계산결과와 동일한 Waist를 갖는 것을 확인하였다. 그리고 Target에서의 빔 크기는 BPM5에서 mirror 관계를 갖도록 설계하여 BPM5에서 빔의 크기를 파악함으로써 target에서의 빔 크기를 알 수 있도록 하였다. 실제 BPM5에서의 빔 크기는 4mm  $\phi$ 로 측정 되었다. 한편 빔의 emittance는 빔 출구 벨브로부터 각각 0.52m, 1m떨어진 곳에 Slit 1, 2를 설치하여 측정했으며, 그 결과는 표 4와 같이 모두  $15\pi \text{ mm-mrad}$  이하의 값으로 나타났다.

Table 4. Characteristics for beam emittance

Particle	E (MeV)	$\epsilon$ (mm-mrad)
Proton	18	$12.5\pi$
	32	$13\pi$
	50	$14\pi$
He-4	18	$12\pi$
	32	$15\pi$
	48	$12\pi$

이밖에 빔 전류의 세기가  $25\mu\text{A}$ 일때, 50MeV의 양성자 빔을 8시간 동안 빔의 중단없이 연속적으로 얻을 수 있을 만큼 빔의 안정도가 확인되었다.

### 3. 結 論

MC-50을 구성하는 각 계통의 동작원리와 구조를 파악할 수 있었다. 그리고 MC-50으로는 가속에너지와 빔 세기의 제어가 용이할 뿐만 아니라 매우 안정된 양질의 빔을 얻을 수 있어 중성자 치료와 동위원소 생산에 적합함을 확인하였다.

### 參 考 文 獻

1. A. A. Garren and L. Smith, International Conference on Sector Focused Cyclotrons, CERN (1963).
2. A. J. Hatch, Nuclear Instr. and Methods, 41, 261 (1966).
3. J. J. Livingston, Principles of Cyclic Particle Accelerators, Van Nostrand, New York (1961).
4. C. B. Mills and C. F. Barnett, Rev. Sci. Instr., 25, 1200 (1954).
5. D. M. Goebel, J. T. Crow and A. T. Forrester, Rev. Sci. Instr., 49, 469 (1978).
6. F. M. Penning, Physics, 4, 71 (1937)
7. M. Pirani and J. Yarwood, Principles of Vacuum Engineering, Chapman & Hall, London (1961).