

# 핵의학용 사이클로트론

포항공과대학교 물리학과

오 세 응

한국원자력연구소부설원자력병원 사이클로트론응용연구실

채 종 서

## Cyclotrons for Nuclear Medicine

Sae-Woong Oh

POSTECH Department of Physics

Jong-Seo Chai

KAERI KCCH Cyclotron Application Laboratory

### 서 론

1932년 E.O.Lawrence는 균일 자장 내에서의 하전 입자의 원운동 주기와 고주파 전장에 의한 공진가속을 조합한 공진원리를 적용시켜 80KeV의 양성자 빔을 가속시킬 수 있는 최초의 사이클로트론을 개발하였다. 그후 전기공학의 급격한 기술 발전에 힘입어 1930년대 후반에 수십MeV급의 장치들이 세계 곳곳에서 건조되어 원자핵 반응 연구, 방사성 동위원소의 제조 등에 사용되어 원자핵에 관한 많은 사실을 발견하는데 주요 장치로 공헌하였다. 1950년대에 이르러 사이클로트론(cyclotron: 원형입자가속기)은 물리학뿐만 아니라 화학 생물학 그리고 의학에 보편적으로 이용되기 시작하였다. 근래에는 의료용으로 널리 보급되어 소형(10MeV-30MeV)은 반감기가 짧은 단수명 동위원소 제조에 중형(30MeV-70MeV)은 중성자선을 이용한 암치료기로 대형(100MeV-300MeV)은 양성자 및 중이온 치료기로 사용되고 있다. 1990년대에 들어서서는 컴퓨터 기술과 영상 신호 처리 기술의 급속한 발전에 따라 고분해능의 영상과 고속처리를 할 수 있는 PET (Positron Emission Tomography)의 기술개발

로 단수명 동위원소인 PET tracer의 생산 장치로 더욱 각광을 받기 시작하였다.

일반적으로 핵의학용으로 사용되는 사이클로트론은 양성자 에너지 30MeV이하의 것으로 그 구조에 따라 고전형(classical) 사이클로트론, FM(Frequency Modulated) 사이클로트론, SF(Sector Focused) 사이클로트론으로 분류된다. 의학용은 대부분 SF형에 속하며 compact 형태로 하고 표적장치를 사이클로트론 진공함 내에 설치하여 빔효율을 높였다. 또 가속 이온의 종류에 따라 H<sup>+</sup> 이온과 H<sup>-</sup> 이온용으로 구분되는데 최근에는 H<sup>-</sup> 빔용 사이클로트론이 많이 제작되고 있다. 이들 사이클로트론은 가속된 입자빔이 표적물 속에서(p, xn) 핵반응을 유발하여 <sup>201</sup>Tl, <sup>123</sup>I, <sup>67</sup>Ga, <sup>68</sup>Ga, <sup>81</sup>Rb, <sup>18</sup>F 등과 같은 진단용 방사성 동위원소의 생산을 위하여 사용되는데 이들 방사성 동위원소는 단수명이어서 핵의학용으로 무리 없이 사용될 수 있다. 따라서 강한 빔전류를 투자하는 표적 장치를 외부에 설치 가능하여 빔조정이 원활 할 뿐 아니라 이중의 빔을 획득할수있어 동시에 2개의 표적물에 빔을 조사할 수 있다.

## 2. PET 사이클로트론의 기본구조

상품화된 PET 사이클로트론의 빔에너지는 10-18MeV이다. Table 1를 살펴보면 그 추세가 뚜렷이 보인다.  $^{123}\text{I}$ (30MeV가 필요)를 제외한 나머지 중요한 네개의 B+ 붕괴 동위원소  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$  및  $^{18}\text{F}$ 의 생산은 이 빔에너지 범위에서 이루어지기 때문이다.

Table 2에 이 네가지 동위원소 생산에 관한 실제 예를 TR-13의 경우에서 인용하였다.

PET 사이클로트론의 개략적인 3차원 구조를 Fig. 2에 실었다. 이 그림은 TR-13의 실제 형태를 모델로 그린 것이며 좌반부를 열어 놓은 상태에서 자기장의 구조 및 Dee의 위치를 보인 것이다. 좌반부를 닫은 상태에서 hill gap은 불과 3.5cm 인데 비해 valley(4개의 hill 사이에 4개의 valley가 있다. 그중 두 valley는 Dee가 차지하고 있다) gap은 이의 3배 정도여

서 hill 자기장은 1.8T 정도로 비교적 높고 valley 자기장은 불과 0.6T 정도이다. 두개의 시료함이 Fig에 표시 되어 있다(시판된 실지 TR-13은 시료함의 구조가 그림과 다르다).

Fig. 3는 Fig. 2의 측면도이다.  $\text{H}^-$  이온원이 Fig. 3의 윗부분에 표시되어 있다.

발생한  $\text{H}^-$  빔은 축을 따라 사이클로트론 중심부에 도달한다. 여기서 electrostatic inflector(Fig. 3의 1번 위치: Fig. 3에서 내부 이온원을 썼을 경우로서 이때는 PIG형 이온원 등이 쓰인다)에 의해서  $90^\circ$  방향전환(Fig. 2에서 수직에서 수평방향으로) 한 후 Dee의 고주파 전압에 의해서 가속되어 나선형 궤도에 따라(Fig. 3에서 2번 점선) 점점 밖으로 나간다. TR-13의 경우 65회전 하면 13MeV에 도달하며 이 궤도의 위치에 stripping foil(0.01mm 정도 두께의 carbon 박막)을 삽입하여  $\text{H}^- \rightarrow \text{p} + 2\text{e}^-$ 로 2개의 전자를 떼어

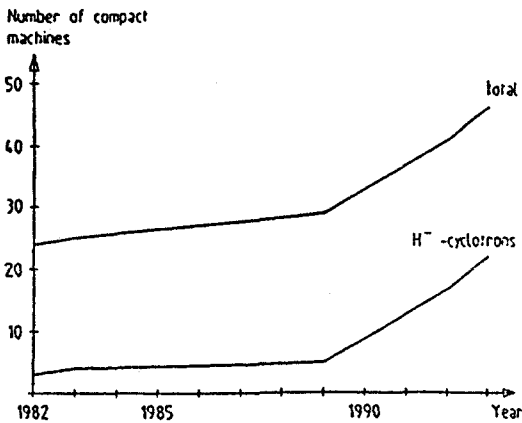


Fig. 1. 중소형 사이클로트론의 연도별 제작대수.

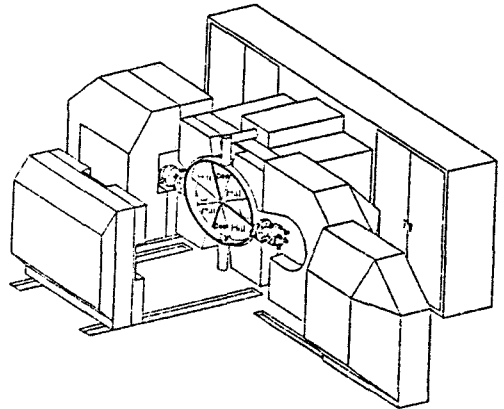


Fig. 2. TR13의 3차원적 구성도.

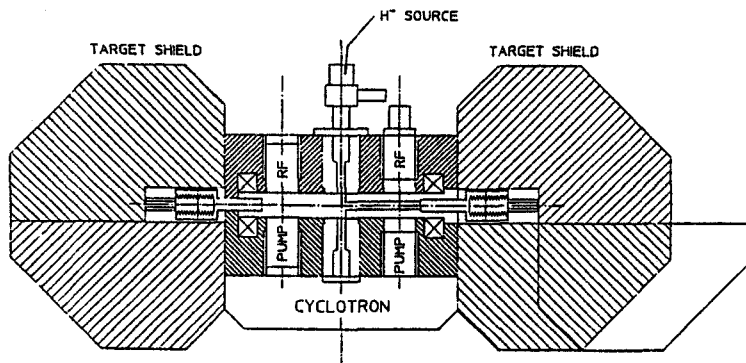
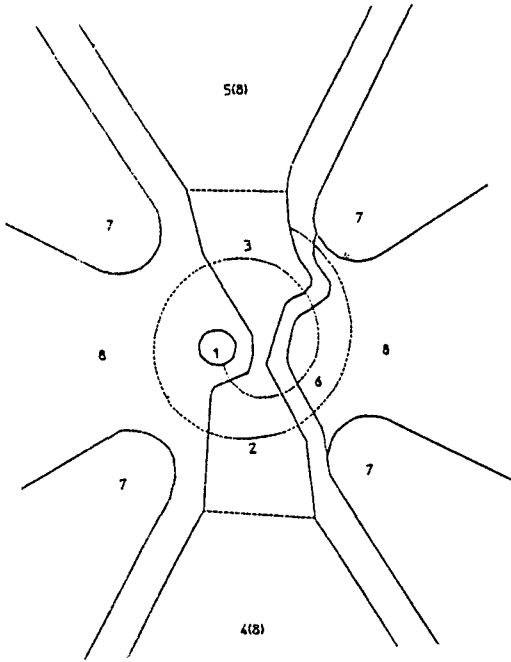


Fig. 3. TR-13의 측면도.



**Fig. 4.** Cyclotron중심부 1 : lon source, 2 및 3 : dees tpls 4 및 5 : dees, 6 : dummy dees(OV), 7 : hills, 8 : valleys.

내어 양성자로 전환시킨다.

이때부터는 나선형궤도가 반대쪽으로 향하게 되어 사이클로트론 밖으로 나가는데 나가기 직전에 표적장치를 두어 표적물을 조사시키게 된다.

빔이 stripping foil을 지나는 동안에 충돌에 의한 열발생으로 carbon foil은 고열로 되어 발광하게 되므로 받침대를 통한 강력한 수냉각이 필수이다. 또 표적물도 빔에너지를 전부 흡수하므로 수냉각을 한다.

빔이 지나가는 전공간은 진공이어야 하며 따라서 이 온원에서 시작 표적장치까지는 진공챔버로 진공을 유지한다. H<sup>-</sup> 빔의 경우는 잔류공기 분자와 충돌시 쉽게 H<sup>-</sup> → H<sup>0</sup>+e가 되어 빔을 잃으므로 고진공(5×10<sup>-7</sup> torr)을 유지해야 한다.

이런 기본구조하에서 빔 전류의 세기, 에너지, 전력 소모율, 운전 및 안전장치 그리고 유지보수등 중점사항들에 대해서 아래에 기술하겠다.

### 1) 빔 전류의 세기

현 단계에서 요구되는 가속빔 전류의 세기는 최대 50마이크로 암페어(μA)이다. 그러나 장래에는 경제

**Table 1.** 11MeV에서 300MeV의 Cyclotron으로 생산된 방사성 동위원소

Nuclide	Half Life τ <sub>1/2</sub>	Target	Reaction	Energy (MeV)	Currents (uA)
<sup>11</sup> C	20.4m	<sup>14</sup> N	(p,α)	13	20
<sup>13</sup> N	9.96m	<sup>16</sup> O	(p,α)	13	20
<sup>15</sup> O	2.03m	<sup>15</sup> N	(p,n)	8.5	20
<sup>18</sup> F	109.8m	<sup>18</sup> O	(p,n)	13	20
<sup>38</sup> K	7.63	Na <sup>35</sup> Cl	(α,n)	21	15
		NaCl	(α,n)	22.5	10
<sup>45</sup> Ti	3.08h	Sc	(p,2n)	11.5	
<sup>75</sup> Br	98m	Cu <sub>2</sub> <sup>76</sup> Se	(p,2n)	28	7
		<sup>76</sup> Se	(d,nα)	24	30
		<sup>78</sup> Kr	(d,α)	21.5	10
		<sup>78</sup> Kr	(α,2n)	20	13
<sup>77</sup> Br	57h	Cu <sub>3</sub> <sup>75</sup> As	(p,α)	28	120
		<sup>80</sup> Kr	( <sup>3</sup> He,xn)	20	13
<sup>73</sup> Se	7.1h	Ge	(α,xn)	27/37	
		Ge	(α,n)	27/40	
		Cu <sub>3</sub> <sup>70</sup> Ge	(d,2n)	28	30
<sup>89</sup> Zr	78.4h	Y	(d,nα)	16	5
		<sup>80</sup> Br	4.42h	<sup>83</sup> K	(p,n)
<sup>80</sup> Br	4.42h	<sup>80</sup> Se	(p,n)	15	25
		<sup>80</sup> SeCu	(p,n)	15	2.5
<sup>79</sup> Kr	50s	NaBr	(p,n)	14	
<sup>94</sup> Tc	52m	<sup>94</sup> MoO <sub>3</sub>	(p,n)	11	40
<sup>95</sup> Tc	61d	<sup>95</sup> Mo	(p,n)	14.8	1.2
<sup>123</sup> I	13.1h	<sup>124</sup> Te <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(p,2n)	24	30
		<sup>124</sup> Te <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(p,2n)	24	30
		<sup>122</sup> Te	(d,n)	14	30
<sup>124</sup> I	4.17d	<sup>124</sup> Te	(p,2n)	26.4	30
		<sup>124</sup> Te	(d,2n)	15	85
<sup>127</sup> Xe	69s	<sup>121</sup> Sb	(α,n)	25.1	20
		NaI/KI	(p,n)	14	
<sup>211</sup> At	7.21h	Bi	(α,2n)	28	10

성을 고려할 때 500μA 정도까지 가속빔 전류를 바랄 단계가 도래 가능하다. 그러려면 이런 잠재력이 있는 사이클로트론이 바람직하다. 현재 상품화된 사이클로트론은 대별하여 빔 집속력이 약한 형(SF 사이클로트론에서 hill(강자기장)과 valley(약자기장)의 깊이가 크지 않은 것으로서 이로인한 집속력의 약점을 sector를 나선형으로 하여 어느 정도 보충)과 빔 집속력이 강한 형(hill과 valley의 깊이가 크다. sector는 방사형)으로 구분된다. 저 집속력형은 나선형태의 3또는 4 sector의 구조로 되어있어 50-100μA의 빔을 얻을 수 있다. 고집속 형의 경우 4 sector의 구조를 가졌으

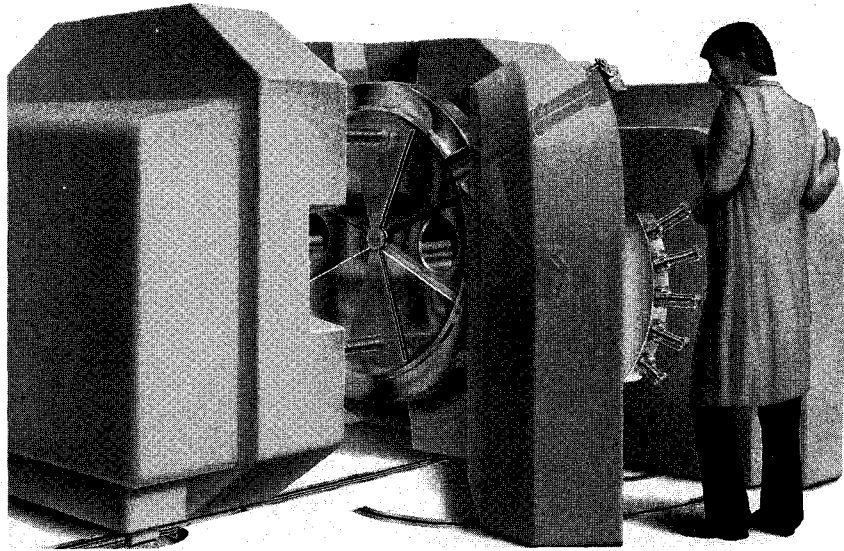


Fig. 5. EBCO사의 TR-13의 내부 모양.

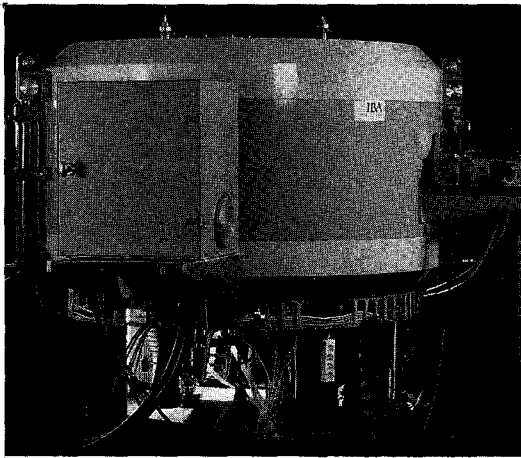


Fig. 6. IBA사의 CYCLOTRON 18/9의 외관.

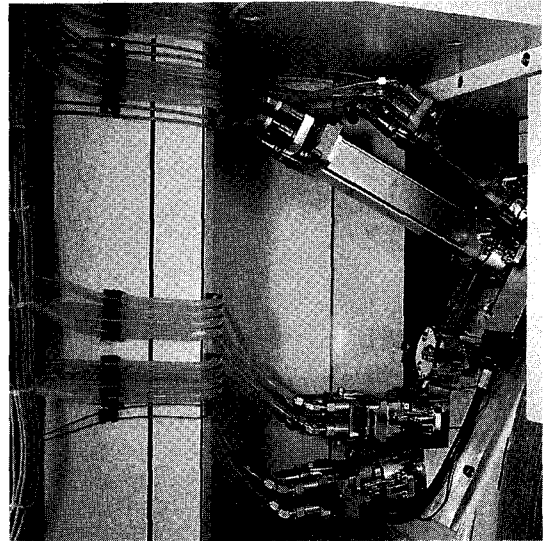


Fig. 7. GE사의 PET TRACER(SCX M17모델)의 표적 장치.

며 250-500 $\mu$ A 정도까지 내부 빔 전류를 얻을 수 있어 잠재적 장점을 가진 것으로 보인다.

### 2) 에너지 크기

단수명 동위원소 생산용인 PET 싸이클로트론의 빔 에너지 영역은 10MeV -18MeV인 반면 대부분 의학용 방사성 동위원소 생산을 위한 빔 에너지 영역은 18MeV에서 30MeV이다. Table 1은 의료 진단에 주로 사용되는 핵종에 대한 조사 빔 에너지 크기이다. 물론 이보다 큰 싸이클로트론에서 인출된 빔도 빔 에너지 감쇄장치를 사용하여 원하는 빔 에너지로 내릴

수 있으나 경제적으로 적합하지 않으며 빔도 산란되어 빔 조정이 여의치 않다. 따라서 적당한 에너지에 맞는 싸이클로트론이 적합하다.

### 3) 전력소모율

싸이클로트론은 가동시에 비교적 많은 전력을 소모하여 운영에 적지 않은 경제적 부담을 준다. 이렇게 소모되는 전력 중 일부는 빔을 원하는 에너지(이에 소요되는 빔전력=빔전류×입자의 최종에너지)로 가속시키기 위한 것으로 낭비성이 아니지만 이 부분을 제

외한 전력은 싸이클로트론 자체를 켜 놓는데 사용되는 것으로 결국은 열로 바뀌어 냉각수를 통해서 버려지는 낭비성 부분이다. 그러므로 낭비성 전력소모가 0(효율 100%)이 이상적이지만 실재 있어서 초기의 의료용 싸이클로트론은 10kW 미만의 빔을 인출하는데 총전력 소요가 수백kW에 이르러 에너지 효율이 1-3%에 머물렀으나 싸이클로트론 전자석의 자극간 틈새를 매우 작게 설계한 신 기종들은 기종에 따라 효율이 15%에 이르는 것도 있다. 개량형 들은 소모 전력이 150kW 내외이다.

**4) 운전 및 안전장치**

방사성 동위원소의 일상 생산을 위하여 싸이클로트론의 운전 시스템은 컴퓨터에 의한 완전 자동화가 필수이다. 대부분의 핵의학용 싸이클로트론은 빔수송 과정을 거치지 않고 싸이클로트론 챔버 내부에 삽입된 표적물에 빔이 직접 조사 되기 때문에 빔튕닝 없이 버튼 하나로 빔의 조사가 가능하다. 핵의학용 싸이클로트론은 대부분 병원에 설치되어 운영 되기 때문에 가속기 전문가 없이 가동되어야 하므로 사용자가 전문 지식 없이도 싸이클로트론의 운전이 임할 수 있도록 사용자 지침이 컴퓨터 모니터 상에 쉽고 소상하게 나올 수 있어야 한다. 시동 버튼만 누르면 그로부터는 컴퓨터가 알아서 장치의 각 기능을 유기적으로 작동하여 싸이클로트론이 정상 가동 상태에 도달하도록 하며 이어지는 가동도 필요한 몇가지의 단순한 지식만 넣어주면 역시 컴퓨터에 내장된 소프트웨어가 알아서 자동적으로 진행되게 자동화가 완벽하게 되어 있어야 한다. 외부교란(순간 정전등)으로 유발되는 싸이클로트론의 가동정지시 동작 정지에 대한 진단 사항이 모니터 상에 표시되고 관련직원이 그 루틴에 의하여 조속히 정상복구가 가능하도록 배려 되어 있음 또한 중요하다.

**5) 유지보수**

싸이클로트론 장치의 사용자 입장에서는 그 장치가 견고하고 단순하게 설계되어 가동 정지 횟수 및 시간의 극소화가 바라는 바다. 아래에 신속한 보수를 돕는 사항들을 몇가지 나열하였다.

1) 자석 및 진공함이 상하로 분리가능한 기종은 상승책의 길이가 충분히 길어서 싸이클로트론을 분리했을때 간격이 충분하여 중심부에 쉽게 접근할 수 있어야 하며 진공함의 개폐시 손쉽게 냉각수관의 연결이 되도록 렉코넥터 등을 사용함이 바람직 하며 전선 부

분의 연결도 분해 조립 없이 사용할 수 있는 내구성 플러그 연결 방식이 좋겠다.

2) 진공함및 다른 싸이클로트론 부품들의 방사화되는 것을 줄이기 위하여 빔의 인출 효율이 높아야 하며(다행히도 stripper foil을 사용했을 때의 효율은 사실상 100%이다) 고전압 대전류및 열에 강한 내방사능 재질 부분품들로 제작되어야 한다.

3) 이온원장치, cathode, stripper foil등 정기적으로 점검되는 부분은 진공 벨프로 분리하여 진공함의 진공을 유지한 채로 점검할 수 있을 것.

4) 장치자체가 갖추어야 될 요소이외에 제작회사 및 부품 공급회사의 저렴하고 양질의 A/S(after service)의 중요성은 두 말할 요하지 않는다. 이것은 싸이클로트론의 잦은 가동정지 내지는 장기 가동정지 방지에 필수조건이다.

적절한 유지보수를 게을리 하면 싸이클로트론의 수명을 현저히 단축 시킬 수 있다.

**3. 싸이클로트론 제작사및 제품특성**

**1) 싸이클로트론제작사**

**(1) EBCO**

1956년 하이텍 회사로 출발한 캐나다의 회사이다. 캐나다 Vancouver의TRIUMF 가속기연구소에서 1986년부터 의료용 싸이클로트론 설계를 시작하였고 곧이어 1989년 EBCO와 TRIUMF간에 제작에 관한 협정을 맺음으로써 싸이클로트론 제작을 시작하여 1992년까지 TR-30 모델을 2대 제작하여 가동시켰으며 1994년에 서울대학병원에 TR-13모델을 제작 가동시킨바 있다. 두 모델 모두 이온원(Ion Source)을 싸이클로트론 외부에 장착한 후 발생된 빔을 싸이클로트론축을 따라 인도하여 중심부에서 정전형 Inflector를 사용하여 빔궤도에 진입시키는 방법을 썼으며 강집속형이다.

**(2) IBA (Ion Beam Application)**

1986년에 설립된 벨기에의 신생 회사로 Luvain-la-Neuve 대학교의 싸이클로트론 전문가 Yve Jongen 박사가 주도하여 설계되었으며 골이 깊은 강집속형으로서 높은 빔전류를 인출할 수 있는 싸이클로트론을 설계 제작하고 있다. 1992년까지 대표적인 모델인 cyclone-30을 14대, PET tracer인 cyclone-18과 cyclone-10을 각각 5대와 2대 제작 가동시키고 있다.

**Table 2. PET용 Cyclotron TR-13으로 생산되는 양전자 발생용 방사성 동위원소**

Target	Half Life T <sub>1/2</sub>	Reaction	Currents (uA)	Beam Time minutes	Product (Activity) (mC)
<sup>15</sup> O	122s	<sup>15</sup> N(p,n) <sup>15</sup> O	20	10	O <sub>2</sub> (1000) CO(500) CO <sub>2</sub> (500)
<sup>13</sup> N	9.97m	<sup>16</sup> O(p,α) <sup>13</sup> N	20	20	NH <sub>3</sub> (200)
<sup>11</sup> C	20.3m	<sup>14</sup> N(p,α) <sup>11</sup> C	40	40	CO <sub>2</sub> (1500)
<sup>18</sup> F	109.8m	<sup>18</sup> O(p,α) <sup>18</sup> F	20	120	F <sup>-</sup> (1000)

**(3) NIEFA(D.V. Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus)**

1952년부터 러시아에서 사이클로트론과 선형 가속기를 제작하던 회사로 저가의 사이클로트론을 제작 공급하고 있다. 제작 모델로는 PET tracer용으로 PIC-10, PIC-35, MGC-20이 있으며 동위원소 생산용으로 U-250이 있다.

**(4) Scanditronix**

스웨덴의 잘 알려진 가속기제작사로 1965년 설립되어 소형의 사이클로트론, 마이크로트론부터 썬크로트론 등의 대형 가속기까지 다양하고 많은 수의 가속기를 건설하여 왔다. 그러나 1989년 MC-17모델의 제작권을 GE Medical System에 넘기고 주로 대형 사이클로트론과 연구용 가속기 및 마이크로트론을 제작하여 오다 2차례에 걸쳐 운영자가 바뀐 뒤 1994년 11월에 부도로 인하여 현재 Scanditronix Medical로 개명되었으며 주로 방사선 의료 장비의 A/S 및 판매를 하고 있다. 생산 모델로는 MC-30, MC-40, MC-50, MC-60이 있었다. MC-17은 현재 GE에서 생산 판매하고 있다.

**(5) CTI-Siemens**

미국의 오랜 역사를 가진 사이클로트론 제작사 The Cyclotron Corporation의 모델인 TCC CS-15, TCC CS-22 등의 설계를 인수받아 제작하다 현재 PET tracer인 RDS-112등을 제작 판매하고 있다.

**(6) Oxford Instruments**

영국의 가속기 및 부품 제작회사로서 superconducting magnet을 사용한 PET 사이클로트론을 제작하고 있다. 자기장의 세기는 superconducting magnet 치고는 상당히 얇은 2.75T인데 그 이상의 자기장에서

는 H<sup>-</sup>이온이 원하는 에너지에 도달하기 전에 그중 한 개의 전자를 벗겨내기 시작하며 이로 인하여 가속된 빔을 잃게 된다.

**(7) 기타**

일본의 사이클로트론 제작사는 스미토모 중공업과 저팬스틸이 있다. 스미토모중공업은 불란서의 사이클로트론 제작사인 CGR MeV로 부터 기술을 제공받아 사이클로트론을 제작 하여 오다 CGR MeV가 도산함에 따라 독자적으로 사이클로트론을 제작하고 있으며 저팬스틸은 내수용으로 제작하다 현재 기술 진흥을 위하여 벨기에의 IBA사와 기술 협력을 맺어 제작하고 있다.

Table 3은 사이클로트론 주요 제작사들의 모델과 특성을 나타낸 것이다.

**2) 상용 사이클로트론의 특성**

**(1) 공통점**

최근에 설계 제작되는 사이클로트론은 음이온을 가속시키는 형태로 stripper foil의 위치 이동으로 원하는 에너지를 얻는다. 따라서 재래식처럼 추출에너지에 따른 사이클로트론 자기장 변동이 필요없게 되었다. 이 결과 설계 및 제작을 정밀화하여 radial profile 자기장 조정용 코일 및 조화코일 등 복잡한 부수 구조물을 삭제하여 장치의 견고화 및 단순화 그리고 제조 단가 인하를 초래하였다. 먼저 이온원 장치는 거의 전부가 CUSP형을 택하여 사이클로트론 밖에 두었다(GE의 MC17등 이온원을 내부에 장착한 형태도 아직 있다). 진공장치는 초기형의 경우 오일확산펌프가 주종을 이루었으나 신형들은 크라이어펌프가 주종을 이루고 있다. 오일확산펌프는 효율이 아주 좋은 특색이 있는 반면 지지분한 것이 단점이며 특히 원자형태의 수소를 많이 발생하는 음이온을 사용하는 사이클로트론에서는 주기적으로 펌프오일을 교체하고 펌프자체를 청소해야 한다. 오일확산펌프와 크라이어펌프가 드물게나마 병용 되는 수도 있으나 이때는 크라이어펌프를 오염시키지 않도록 각별한 주의가 필요하다. Dee에 공급되는 고주파 공진 전력의 주파수도 고정되어 RF장치가 간단하게 되고 음이온 가속기이므로 빔 인출부에 양이온 사이클로트론에서 보는 고전압 정전 편향기와 같은 특별한 빔인출장치가 필요하지 않아 인출 빔전류도 최대 300μA 이상이 가능하다. 제어장치는 마이크로 컴퓨터와 PLC를 결합한 제어 방식을 사용하고 있다. 음이

**Table 3. Cyclotron의 모델별 특성표**

Manufacturers	Model	Description	
IBA	cyclone 3	1.9MeV/uD	4sect
"	cyclone 10/5	10MeV H-, 2.5MeV/u D-	4sect
"	cyclone 18/9	18MeV H-, 4.5MeV/u D-	4sect
"	cyclone 30	30MeV H-	4sect
Ebco Technologies	TR-13	13MeV H-	
"	TR-30	30MeV H-	4sect
The Japan Steel Works, LTD.	BC168	16MeV P, 8MeV D	4sect
"	BC1710	17MeV P, 10MeV D	4sect
"	BC2211	22MeV P, 11MeV D	4sect
"	BC3015	30MeV P, 15MeV D	4sect
Sumitomo Heavy Industry, LTD.	HM-18	18MeV H-, 10MeV D	4sect
"	480AVF	30MeV P	4sect
"	750AVF	70MeV P	4sect
"	930AVF	90MeV P	4sect
D.V Efremov Institute(Niiefa)	PIC-10	11MeV P	4sect
"	MGC-20	18MeV P, 5MeV/u D,...	3sect
"	U-250	40MeV/u 2H+, ..., h.i, K=200	4sect
Scanditronix	MC-17	17Mev P, D	3sect
"	MC-30	30Mev P	4sect
"	MC-32 NI	32Mev H-, D-	3sect
"	MC-35, 40	40Mev P,...	3sect
"	MC-50	50Mev P,...	3sect
"	MC-60PF	60Mev P,...	3sect
CTI-Simens-TCC	TCC CS-15	15Mev P, 8MeV D	3sect
"	TCC CS-22	22Mev P, 12MeV D	3sect
"	TCC CS-28	24Mev P, 14MeV D	3sect
"	TCC CS-30	26Mev P, 15MeV D	3sect
"	TCC CS-42	42Mev H-	3sect
"	RDS-112	11Mev H-	3sect

은 빔인출은 음이온의 stripper를 지나는 동안 2개의 전자가 떨어져나가  $H^- \rightarrow p + 2e$ 가 도면서 p가 진행 방향을 이탈 하면서 이루어 진다.

**(2) 차이점**

가) RF장치

대부분의 사이클로트론은 RF amplifier가 사이클로트론 본체 근처에 설치되어 있어 RF 공진기에 직접 결합되어 있으나 EBCO사의 TR series는 파워앰프와 공진기사이에서 동축 전송선로로 결합되어져 있다.

나) 이온원장치

외부 이온원장치의 위치가 사이클로트론의 꼭대기에 위치한 것으로는 IBA의 Cyclone 시리즈와 스칸디트로닉스의 MC 시리즈이며 EBCO와 NIIIEFA의 기종들은 본체의 밑부분 피트에 위치한다. 한편 EBCO의

이온원장치는 10mA의  $H^-$ 빔( 0.44mm/mrad의 빔 emittance)을 발생하는 강력한 CUSP형태의 이온원 장치를 사용하였으며 사이클로트론이 수평으로 설치 되어 있기때문에 이의 축에 따른 수평 위치에 놓여 있다. injection의 경우 IBA사 제품은 buncher를 중간에 사용 injection 효율을 높인다. EBCO, NIIIEFA, SCX 제품은 bunching 시스템 없이 주입한다.

다) 진공장치

진공함에 대한 진공장치로 SCX제품은 오일확산펌프로만 진공을 만들지만 NIIIEFA와 IBA제품은 오일 확산펌프와 크라이어펌프로 EBCO제품은 크라이어펌프로만 진공을 유지한다.

라) 빔인출 NIIIEFA제품을 제외하고는 모든 회사의 제품들은 사이클로트론 둘레를 따라 상호 180도 떨어져

저 있는 2개의 빔라인으로 빔을 제각기 인출할 수 있으며 NIIIEFA 제품은 60도의 빔라인 2개로 빔을 인출할 수 있다. IBA의 Cyclone의 경우 인출 반대편 출구에 선택 자석이 부착되어 있어 빔의 인출 방향을 선택 가능하다. EBCO 제품은 2개의 빔라인으로 인출시 빔에너지 및 빔전류를 서로 독립적으로 바꿀 수 있다.

이들 제품들은 각자 자기 나름의 축적된 노하우 (know how)를 가지고 있어 그 우열은 성능 제원표에 나타난 수치들 이외에 오랜 사용 경험을 바탕으로 함이 바람직하다.

#### 4. 결론

전술한 바와 같이 싸이클로트론은 여러 회사에서 각각의 특징과 장점 및 단점을 가지고 다양한 기종을 설계 제작하고 있다. 현재 싸이클로트론의 가격은 회사와 기종별로 다르나 150만불에서 250만불까지 호가하는 고가의 장비이다. 싸이클로트론은 고가의 장비로 도입도 중요하지만 고장시 부품비도 상당히 비싸며 싸이클로트론 제작사들의 부침이 예상되어 항상 예비 부품을 보유하여야만 계속적으로 장비를 유지시킬 수 있다. 통상 싸이클로트론의 수명은 적절히 유지 보수를 계속 했을 때 20년에서 30년까지 예상되는데 지난 30년동안 싸이클로트론의 주요 생산 회사였던 미국의 TCC 불란서의 CGR MeV가 도산하였고 독일의 AEG는 생산을 중지하였으며 스웨덴의 SCX도 여러 차례 부도후 현재 의료기기회사로 전략 해 버린 실정이다. 싸이클로트론의 주요 부품들은 회사별로 특징적으로 설계되어 회사가 도산하면 부품조달 및 고장 수리가 어렵게 된다. 따라서 장비 도입시 여벌의 중요 예비 부품의 도입을 권장한다.

싸이클로트론이 국내에 도입된 지 10년 가까이되었고 실제로 한국에서 소형의 연구용이기는 하지만 이미 1959년에 양성자빔 1MeV의 싸이클로트론도 제작했던 기록도 있다. 현재 국내에는 PET용 싸이클로트론

이 2대 도입되어 가동 중에 있다. 그러나 앞으로 PET가 각광을 받게 됨으로 싸이클로트론의 숫자는 훨씬 증가할 것으로 예상되므로 국내에서 싸이클로트론을 설계 제작하여 주요 포스트에서 PET용 동위원소를 공급하고 병원에서는 PET scanner 만을 운용하는 방식을 채택한다면 효율적인 싸이클로트론의 운용과 표준화된 부품 사용으로 부품 조달이 용이하여 신뢰성 있게 PET가 활용되어 국내에서 이 분야의 발전이 예상된다.

#### REFERENCES

- 1) 채종서외: MC50 싸이클로트론 운영 보고서, KAERI/MR-224/193 pp 1-3, 과학기술처 1993
- 2) 오세웅: PET용 싸이클로트론의 개발현황, 제1회 의료용가속기학술회의 논문집, pp32-36, 1994
- 3) V Bechtold: Commercially Available Compact Cyclotrons for Isotope Production, Proceedings of 13th International Conference on Cyclotrons, pp 110-114, 1992
- 4) Current and Future Aspects of Cancer Diagnosis with Positron Emission Tomography, Proceedings of 11th International conference on Cyclotrons, pp 597-601, 1986
- 5) J Jacky, R Risler: Formal specifications for a Cyclotron control system, Proceedings of 13th International Conference on cyclotrons, pp 689-692, 1992
- 6) R Keitel, D Dale, B Milton: The TR-30 Control System, Proceedings of 13th International Conference on Cyclotrons pp 685-688, 1992
- 7) General Electric Cyclotron Brochure, 1994
- 8) Ion Beam Application News 1/2994, Company Newsletter, 1994
- 9) NIIIEFA, Cyclotron Manual, 1991
- 10) Scanditronit, Cyclotron Manual, 1984
- 11) EBCO, TR-13 Radiochemical Production System Revision 3, 1992