

◆ 원 저 ◆

## 사이클로트론 구성부품별 고장통계분석

조준호<sup>1</sup> · 정재은<sup>2</sup> · 정흥문<sup>2</sup> · 원도연<sup>2</sup>

<sup>1</sup>케어캠프(주)-영남대학교병원 · <sup>2</sup>대구보건대학교 방사선과

## Analysis on Failure Statistics of Cyclotron Component

June-Ho Cho<sup>1</sup> · Jae-Eun Jung<sup>2</sup> · Hong-Moon Jung<sup>2</sup> · Do-Yeon Won<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Carecamp(inc) · <sup>2</sup>Daegu Health College

### Abstract

The demand of cyclotron for PET (positron emission tomography) has rapidly grown as the more use of PET or PET-CT equipment requires the increased amount of radioactive isotopes for clinical positron emission. While research on failure statistics of medical equipment used in medical centers has continued to be done, the analysis and study on failure statistics of cyclotron have rarely been conducted. However, the growing demand shows the urgency of systematical management guideline and countermeasures for device failure to minimize any supply delay of radiopharmaceuticals occurred by such failure and complains from waiting patients for PET-CT diagnosis. Therefore, this study aims to analyze the failure report from Minitrace equipped in cyclotron which is owned by the department of nuclear medicine at Yeungnam University Medical Center and draws on the data to build effective management system for cyclotron.

**Key words** : Cyclotron, Statistic, PET-CT, Radioisotope

---

Received: Jan 3, 2014, 1st Revised: Jan 31, 2014,

Accepted for Publication: Jul. 7, 2013,

Corresponding Author: 정재은

15 Youngsong-Ro Buk-Gu, Deagu 702-722, Korea

Tel: 053-320-4521

E-mail: jejung@dhc.ac.kr

## I. 서론

최근 암을 진단하는 핵의학 기기인 양전자 방출 컴퓨터 단층촬영기(Positron emission tomography-computed tomography, PET-CT)의 활용이 보편화 되면서 반감기가 짧은 방사성동위원소의 수요가 증가됨에 따라 사이클로트론의 수요가 증가되고 있다. 사이클로트론은 1932년 Ernest Orlando Lawrence가 균일자장내에서의 하전입자의 원운동 주기와 고주파 전장에 의한 공진가속을 조합한 공진 원리를 적용시켜 80 keV 양성자 빔을 가속시킬 수 있는 장치로 개발하였다. 1950년대에 이르러 사이클로트론은 물리학뿐만 아니라 화학 생물학 그리고 의학에 보편적으로 이용되기 시작하였다. 근래에는 의료용으로 널리 보급되어 소형(10 MeV~30 MeV)은 PET용 단 수명 동위원소에 중형(30 MeV~70 MeV)은 의료용 방사성동위원소의 생산과 중성자선을 이용한 암치료장치로 대형(100 MeV~300 MeV)은 양성자 및 중이온 치료기로 사용되고 있다.<sup>1</sup> 최근 PET과 CT의 융합 형태로 발전된 PET-CT는 PET이 지닌 기능적 영상 진단은 물론 영상의 분해능 향상으로 주목할 만한 성능이 도출되어 핵의학 진단에 새로운 장을 열고 있다. 이에 따른 PET 및 PET-CT의 설치가 증가됨에 따라 진단용 양전자 방출 방사성동위원소의 필요량이 증가되어 PET용 사이클로트론의 수요도 급증하기 시작하였다. 이러한 사이클로트론의 고장은 경제적 측면과 더불어 환자만족도와 밀접한 관계를 가지고 있어, 고장시간(downtime)을 최소화하여 최상의 장비상태를 유지하는 것이 중요하다. 아울러 장비의 기능이 점점복잡해지면서 고장에 대한 개념도 단순히 방사선조사 유무에만 그치지 않고 보유한 기능을 충분히 발휘할 수 있는지에 대한 질적 개념으로 바뀌고 있다.<sup>2</sup>

사이클로트론의 안정적인 장비 운용을 위해서는 전문적인 지식과 효과적인 관리 시스템을 필요로 하며, 특히 장비의 고장으로 인한 방사성의약품 공급 지연 및 방사선 사고를 막기 위해 체계적인 관리지침과 고장발생시 대처 요령은 더욱 필요로 한다. 고장률을 최소화 하여 최상의 장비가동률을 유지하는 것은 사이클로트론을 보유하고 있는 병원 및 회사의 매월 지급되는 정비보수료를 절감할 수 있는 경제적 측면과 더불어 진료 대기중인 암환자의 만족도와 밀접한 관계를 가지고 있다.

따라서 본 연구는 영남대학교병원의 핵의학과 사이클로트론실에 설치된 Minitrace의 기기에 대한 고장내역

을 분석하여 사이클로트론의 효과적인 관리 시스템을 구축하기 위한 기초자료로서 활용하고자 한다.

## II. 실험재료 및 방법

### 1. 대상장비

#### 1) 대상장비

- ① 사이클로트론 : Minitrace(GE)

### 2. 연구방법

대상 장비의 경우 2005년 1월부터 2011년 12월 까지 7년 동안의 자료를 분석하였으며, 장비 엔지니어가 수리완료 후 기록한 장비수리일지와 작업자가 고장 내역 및 대안 등을 작성한 장비운영일지의 내용을 통계 분석하여 관리 실태를 분석하였다.

의료용 사이클로트론의 고장요인을 여러 방면으로 분석하기 위하여 고장분류를 가속기 시스템별로 구분하였고, 고장발생 시 그 가속기 정상가동에 미치는 영향에 따라 세 단계로 구분하여 분석 하였다. 고장이 가속기 작동에 미치는 영향을 객관적이고 세밀하게 평가하기 위해 빔 조사 가능, 빔 조사 능력 저하, 빔 조사 불가의 3단계로 구분하여 분석하였다.

장비의 문제가 발견이 되었지만 빔 조사에 큰 문제가 없이 가속기 작동이 가능한 상태를 빔 조사 가능으로 정하였다.

장비의 문제로 인해 빔 조사가 되지 않지만 장비의 재부팅이나 간단한 점검으로 1시간 이내 정상상태로 가동이 가능한 상태를 빔 조사 능력 저하로 정하였다.

장비의 고장으로 가속기 정상가동이 불가능한 상태, 장시간 수리가 요구되는 상황을 빔 조사 불가로 정하였다.

또한 장비의 사용량과 장비고장의 연관성을 분석하기 위해 연간 가속기 가동시간과 고장건수, 방사성동위원소의 생산량과 고장건수를 분석하였다.

## III. 결과

### 1. 시스템별 고장건수 분석

2005년도 1월부터 2011년도 12월까지의 7년간 발생한 대상 장비의 총 고장 건수는 154건으로 연평균 22건의 고장이 발생되었다.

Table 1. Number of failure cases according to Minitrace cyclotron system

| Division | Ion source system | Target system | Vacuum system | RF system | Magnet system | Extraction system | Water cooling system |
|----------|-------------------|---------------|---------------|-----------|---------------|-------------------|----------------------|
| 2005     | 10                | 2             | 5             | 31        | 7             | 1                 | 12                   |
| 2006     | 6                 | 5             | 2             | 12        | 4             | 1                 | 0                    |
| 2007     | 1                 | 1             | 3             | 3         | 0             | 0                 | 3                    |
| 2008     | 2                 | 1             | 6             | 0         | 1             | 1                 | 1                    |
| 2009     | 2                 | 1             | 1             | 1         | 1             | 0                 | 4                    |
| 2010     | 4                 | 4             | 4             | 2         | 0             | 0                 | 1                    |
| 2011     | 0                 | 0             | 0             | 6         | 0             | 1                 | 1                    |
| Sum      | 25(16.2)          | 14(9.1)       | 21(13.6)      | 55(35.7)  | 13(8.5)       | 4(2.6)            | 22(14.3)             |

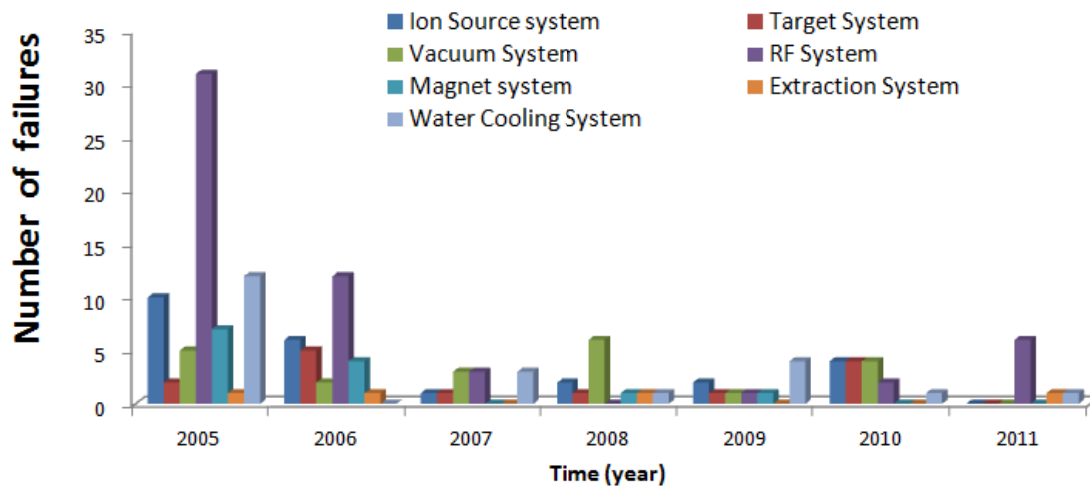


Fig. 1. Number of failure cases according to Minitrace cyclotron

사이클로트론의 시스템 별 고장건수를 분석해본 결과 35.7% 55건으로 RF system이 가장 높게 나타났으며, ion source system 16.2% 25건, water cooling system 14.3% 22건의 순으로 높게 나타났다. 가장 낮은 고장건수를 기록한 부위는 extraction system이었으며, 7년간 총 고장건수는 4건 밖에 되지 않았다 (Table 1, Fig. 1).

## 2. 고장의 경중을 고려한 장애영향분류

고장발생 시 가속기 가동에 미치는 영향의 정도에 따른 분류에서는 간단한 조치로 정상 가동이 가능한 상태의 고장이 전체의 38.3%(59건)을 차지해 가장 높게 나타났으며, 가속기 작동에 문제가 없는 빔 조사 가능한

고장은 37%(57건), 장비의 고장으로 가속기 정상작동이 불가능한 고장은 24.7%(38건)으로 가장 낮게 나타났다. 또한 시스템별 고장내역에 따른 장애영향을 분석하였다.

입자를 가속시켜주는 역할을 하는 핵심 부분인 RF system의 경우 고장의 상태가 중간인 상태가 16.9%로 가장 많았고 가장 장애 영향이 적은 상태가 14.3%, 가장 심각한 영향인 상태는 4.5%로 나타났다. RF system과 가장 밀접하고 가속입자를 플라즈마 상태를 이용해 발생시켜주는 ion source system의 경우 고장이 가장 심각한 영향인 상태가 6.5%로 가장 많았고, 가장 영향이 적은 상태가 5.9%, 장애의 영향이 중간인 상태가 3.9%로 나타났다(Table 2).

Table 2. The Analysis of failure grading according to a system category of Minitrace cyclotron.

| division             | Number of failures (%)       |                                |                        |
|----------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------|
|                      | possible to beam irradiation | decline of irradiation ability | impossible irradiation |
| Ion source system    | 9(5.9)                       | 6(3.9)                         | 10(6.5)                |
| Target system        | 3(2.0)                       | 3(2.0)                         | 8(5.2)                 |
| Vacuum system        | 7(4.5)                       | 9(5.8)                         | 5(3.2)                 |
| RF system            | 22(14.3)                     | 26(16.9)                       | 7(4.5)                 |
| Magnet system        | 7(4.5)                       | 5(3.2)                         | 1(0.6)                 |
| Extraction system    | 1(0.6)                       | 2(1.3)                         | 1(0.6)                 |
| Water Cooling system | 8(5.2)                       | 8(5.2)                         | 6(3.9)                 |
| Number of failure    | 57(37.0)                     | 59(38.3)                       | 38(24.7)               |

### 3. 방사성동위원소 생산량과 고장건수와의 상관관계

2005년도부터 2010년까지 방사성동위원소의 생산량

은 꾸준히 증가하는 추세였으나 고장횟수는 2005년도 68건을 시작으로 2008년 12건, 2009년 10건으로 감소하였다(Table 3, Fig. 2).

Table 3. Number of failure cases according to amount of radioisotope produced in Minitrace cyclotron.

| division | amount of radioisotope produced [Ci] | number of failures |
|----------|--------------------------------------|--------------------|
| 2005     | 280.6                                | 68                 |
| 2006     | 396.8                                | 30                 |
| 2007     | 579.7                                | 11                 |
| 2008     | 957.6                                | 12                 |
| 2009     | 995.4                                | 10                 |
| 2010     | 964.6                                | 15                 |

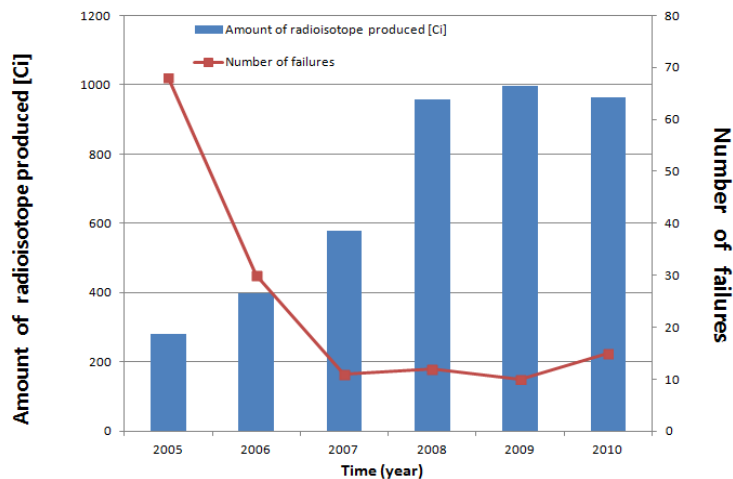


Fig 2. Number of failure cases according to amount of radioisotope produced in Minitrace cyclotron.

Table 4. Number of failure cases according to number of time being produced in Minitrace cyclotron

| division | number of times being produced | number of failures |
|----------|--------------------------------|--------------------|
| 2005     | 360                            | 68                 |
| 2006     | 480                            | 30                 |
| 2007     | 560                            | 11                 |
| 2008     | 673                            | 12                 |
| 2009     | 764                            | 10                 |
| 2010     | 794                            | 15                 |

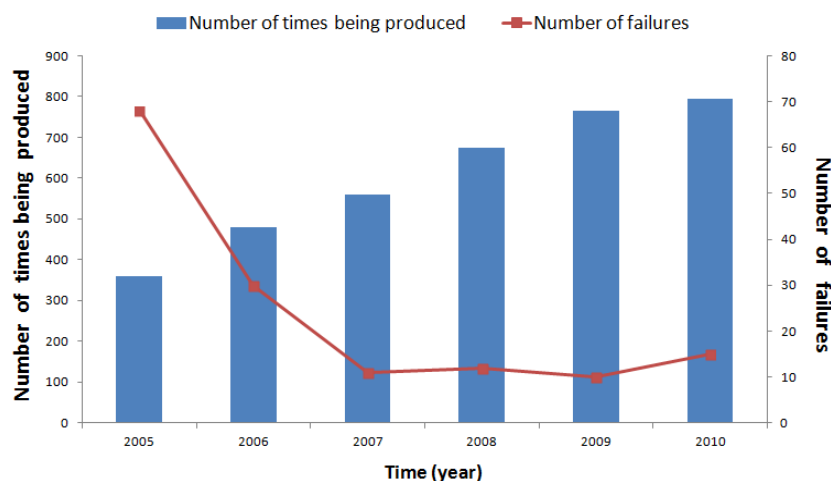


Fig 3. Number of failure cases according to number of time being produced in Minitrace cyclotron

#### 4. 사이클로트론 가동횟수와 고장건수와의 상관관계

PET-CT 환자가 증가함에 따라 2005년도 360건으로 시작하여 2010년 794건 까지 대상 장비의 가동횟수는 꾸준히 증가하였다. 이에 반대로 고장횟수는 2005년도 68건을 시작으로 2008년 12건, 2009년 10건으로 감소하였다(Table 4, Fig. 3).

#### IV. 결론 및 고찰

GE사의 사이클로트론 Minitrace의 7년간 고장건수는 154건으로 연평균 22건의 고장이 발생하였다.

설치 초기 2년 동안은 고장건수가 많다가 3년이 지난 시점부터는 고장건수가 현저히 줄어들고 그 변동의 폭이 좁아져 장비가 안정화 되는 사실을 발견하였다. 일반적인 예상으로 장비의 사용기간이 길어질수록 고장건수는 그에 비례하여 증가할 것이라 예측하였지만 다음

과 같은 요인에 의해 고장건수는 예상과는 반대로 줄어들었다.

첫째, 장비소모품이 지속적으로 업그레이드되었다. 주로 anode service kit, extraction foil, target foil 등 장비를 운영함에 있어 매우 중요한 역할을 하고 1개월에서 2개월 사이 주기적으로 교체하는 소모품들의 성능이 개선되었다.

둘째, 사이클로트론을 운영하는 작업자의 운용능력 및 응급조치능력이 증가되었다. 동일한 장비 문제점이 발생된 상황에도 작업자가 어떻게 응급조치를 하느냐에 따라 고장으로 확대 될 수도 있고 정상적인 장비컨디션으로 유지될 수도 있다. Helium cooling compressor의 교체, F-18 이동관 및 타겟 필터의 교체, 보조 컴퓨터로 사이클로트론 메뉴얼 작동, 각 시스템별 인터락 해제 및 설정, 빔 조정기 작동으로 ion source current 조절, 각 장치별 재설정 등 이러한 기본적인 조치능력을 습득하고 있다면 장비가동불가로 방사성동위원소의

생산이 되지 않는 시간을 최소화하거나 미연에 방지 할 수 있다.

영남대학교병원 사이클로트론센터에는 상주하는 장비 엔지니어가 없으므로 작업자의 기술능력향상은 장비가 동틀 향상에 큰 영향을 미쳤다. 대상 장비의 운용 중 발생한 장애의 영향은 소모품의 불량 및 소모품수명초과 등의 장비내부요인과 공급수의 문제 및 병원전체의 정전 등과 같은 외부요인으로 구분되며, 각 시스템별 고장원인을 분석해보면 다음과 같다.

첫째, RF system의 경우 ion source system과 magnet system과 밀접한 관계가 있으므로 이 시스템들과 균형이 맞지 않을 경우 RF를 정상적으로 발생시킬 수 없으므로 문제가 생기는 경우가 많았다. 특히 입사입자인 수소음이온이 발생되는 anode service kit 교체 시의 위치 부적절, RF power tube의 노후화 및 문제로 인한 고주파전극의 전압 흔들림, 관련 소모품 교체 후 RF tuning을 충분히 하지 않음으로 인한 가동 지연 등이 있었다.

둘째, ion source system은 저순도 가스 공급 및 세척 부적절로 인한 anode 내 이물질삼입, anode service kit 교체작업 시 위치조정오류로 ion source 전류값이 정상치를 초과하여 오랜 시간 빔 조사가 불가능한 고장이 있었다. 또한 저항소실로 인한 절연체파손 및 장비 사용시간이 길어짐에 따라 단축되는 소모품 교체 주기를 명확하게 결정짓지 못해 소모품 사용수명을 초과하여 장비가동이 불가능한 상태가 오는 경우도 있었다.

셋째, water cooling system의 경우 water chiller의 냉매 누설 및 압축기 고장으로 인한 급수 온도조절 능력 저하, 사이클로트론 내부 냉각수 튜브의 노후화로 인해 찢어진 부분에서 누수가 발생하여 타겟 내부온도 상승으로 타겟 포일이 파손된 경우가 있었다.

넷째, vacuum system은 high vacuum valve 오작동으로 진공이 10-7 mbar까지 음압이 되지 않는 경우가 수차례 있었으며, vacuum control unit과 diffusion pump와의 신호전달이 원활하지 않아 펌프가 작동하지 않은 경우가 있었다. 또한 퇴근 후 외부정전발생을 사전에 전달받지 못한 경우 diffusion pump 및 rotary pump에 전원공급이 중단되어 오랜 시간 작동하지 않은 경우가 있었다. 이 경우 diffusion pump의 온도가 저하되었기 때문에 안정된 진공상태를 유지하기 위해 예열시간 포함 약 4시간 정도 진공 펌프를 가동 시켜야 안정된 진공상태에서 빔 조사가 가능했다.

다섯째, target system의 경우 타겟을 냉각시켜주는 데 필요한 helium cooling compressor burning 및 membrane 파손이 가장 많았다. 다음으로 helium cooling unit의 노후화로 인한 누설, 얇은 빔 조사로 인한 Target Foil 파손 순이었다.

여섯째, magnet system은 대부분이 컴퓨터와 magnet system과의 신호전달문제였으며, 일곱째 extraction system의 경우 포일의 수명초과로 인한 파손과 포일의 위치를 이동시켜주는 모터의 고장이 있었다.

제조사가 권고하는 소모품 교체 권장주기는 장비를 안정적으로 사용 하였을 때의 일반적인 기준이다. 그러나 병원에서는 환자의 수가 증가하고 항상 최상의 장비의 컨디션을 유지할 수 없기 때문에 가동횟수 및 가동조건이 높아질 수밖에 없다.

이에 따라 갑작스런 소모품의 수명초과에 대처하는 능력이 필요하다. 이는 2회분 교체가 가능한 소모품 안전재고를 보유하고 있고 작업자의 장비 불안정 상태를 사전에 파악함으로써 어느 정도 문제해결을 할 수 있다. 하지만 이보다 항시 장비가동시간을 기록, 관리 하여 현 운영조건에 맞는 소모품 교체주기 설정이 선행되어야 한다. 부품수명이 다하기 전에 각 시스템별 소모품을 교체해주고 3개월 마다 시행하는 장비정기점검을 철저히 수행한다면 장비의 고장건수는 현저히 줄어 들 것이다.

구입처 및 장비의 종류에 따라 조금씩 차이는 있지만 일반적인 의료장비의 무상보증기간은 설치완료 후 2년이다. 2년간은 무상으로 장비수리가 가능하지만 이후부터는 장비제조사와 상호 협의된 내용을 바탕으로 유지보수계약을 체결 하여야 한다. 사이클로트론의 경우 지불하는 월 유지보수금액은 적게는 수백만원에서 많게는 수천만원에 이른다.

따라서, 장비의 장애영향을 최소화하여 장비의 고장 발생을 줄이고 최상의 컨디션으로 유지하는 것이 유지보수계약 시 지급금액을 절감하는데 중요한 요인으로 작용할 것이다. 또한 고장건수가 현저히 적다면 유지보수계약을 체결하지 않고 고장이 발생될시에만 엔지니어를 불러 수리를 하는 on call service형태로도 운영이 가능 할 것이다. 이를 위해서 변화되는 장비의 상태를 면밀히 파악하여 자체 소모품 교체주기, 장비 운영 일지작성, 각 고장별 조치내역, 원인분석대안 등이 포함된 장애 예방 절차 수립이 최선의 방법이다.

본 연구의 목적은 사이클로트론의 7년간 고장 및 수

리내역을 분석하여 효율적인 장비관리의 지표로 활용하고자 했다. 안정적인 장비운동을 위해 사전에 오랜 시간 장비가동이 불가한 장애의 발생을 방지하고 또한 고장의 영향을 최소화 하기 위해 장애방지를 위한 장비장애예방 절차를 수립하는 것이 바람직하다. 이러한 기존장비의 고장내역, 관리기록을 분석하여 도출해낸 각종 지표들이 장비장애의 예방 및 유지보수비용 절감을 위한 좋은 자료로 활용 될 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. 채종서: 13Mev 싸이클로트론 가속기 개발. 동위원소 회보, 2002, p 70.
2. 김재홍, 이지섭, 박형, 전권수: 양성자빔을 이용한 의료용 방사성동위원소 C-11과 Tc-99의 개발. 한국진공학회 동계학술대회 초록집, 2011, p 235.
3. 주상규, 허승재, 한영이, 서정민, 김원규, 김태중, 신은혁, 박주영, 여인환, 최동락, 안용찬, 박원, 임도훈, 박영환: 선형가속기의 10년간 가동률과 고장률에 관한 통계분석, 대한방사선종양학회지, 2005, p 188
4. 문영관: PET/CT 및 cyclotron 도입과 활용에 관한 연구. 석사학위논문, 인제대학교, 2008, p 6.
5. Carlos E. Gonzalez Lepera, Barrr Dembowski, Appl. Tadiat. Isot. Vol. 48, No. 5 (1997) 613-617.
6. A.D Robert, L.C. Daniel, R.J. Nickels, Nuclear Instrument and methods in Physics Research B 99 (1995) 797-799
7. 채종서: KOTRON-13과 상용 PET 사이클로트론의 최근 기술 동향. 핵의학분자영상, 2005, p 5.
8. GE Medical System, Minitrace Service Manual - Maintenance, 2000-2003