

양성자치료기 가속기 시설에서의 작업종사자의 방사선 피폭 연구

국립암센터 양성자치료센터, *서울아산병원 방사선종양학과

이상훈 · 신동호 · 윤명근 · 신정욱 · 라정은 ·곽정원* · 박성용
신경환 · 이두현 · 안성환 · 김대용 · 조관호 · 이세병

국립암센터에 설치된 양성자 치료기는 양성자 가속기의 운영을 통해 많은 양의 이차방사선을 방출하게 되는데, 이는 양성자 빔이 가속 중에 주위의 물질과 반응을 하여 이차 입자를 발생하고 방사성 동위원소도 생성하기 때문이다. 생성된 방사성 동위원소에 의한 방사선량은 시간에 따라 감소되지만 양성자 치료기의 운영 및 유지보수를 위해 수시로 가속기 작업종사자들이 시설내부로 접근해야 하며 이로 인해 이차방사선에 의한 피폭 문제가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 양성자 가속기(Cyclotron)를 포함한 양성자 치료기의 운영을 위해 필요한 작업종사자들의 작업환경을 평가하고, 적절한 수준의 방사선 방호대책을 수립하기 위해 양성자 치료기 운영 중 가장 높은 수준의 방사선이 발생하는 양성자 가속기(Cyclotron) 및 주변 지역에서의 가속기 가동에 따른 방사선 발생 정도를 측정하였고 그 지속시간을 분석하였다. 이를 위해 양성자 빔의 손실이 가장 큰 가속기 주변과 에너지 선택 시스템(Energy Selection System, ESS)지역의 탄소(graphite, ^{12}C) 재질로 구성된 에너지 감쇠장치(degrader)에서의 방사선 변화를 추적하고, 가속기에서 생산된 230 MeV의 고정된 에너지 빔이 에너지 감쇠장치(degrader)를 거쳐 ESS를 통해 전송된 빔의 효율을 산출하고 빔의 전송 구간에서의 상대적인 방사화 정도를 분석하였다. 이러한 분석 자료를 토대로 작업종사자들의 작업간 피폭 수준을 계산하고 연간 피폭 정도를 측정하였다. 작업 중 가속기 시설내의 선량은 수십 $\mu\text{Sv/h}$ 로 다른 방사선 치료기에 비해 상대적으로 높은 수준이지만 작업시간을 고려한 연간 총 피폭 선량은 작업자에 따라 1~3 mSv/year 정도로, 연간 피폭 한계 선량보다 충분히 낮은 수준으로 운영이 가능하였다.

중심단어: 양성자 가속기, 사이클로트론, 감마선, 이차방사선

서 론

국립암센터 내의 양성자치료센터에서 설치되어 운영되고 있는 Cyclotron (Proteus235, IBA, Belgium)은 양성자(H^+)를 230 MeV의 에너지로 가속할 수 있으며 이는 현재 국내에 설치된 양성자 가속기로는 가장 큰 에너지를 생산할 수 있는 시설이다. 양성자 치료실은 2기의 회전형 갠트리와 1기의 고정형 빔 조사장치를 갖추고 있으며, 양성자 빔은 Cyclotron 가속기에서 생성되어 에너지 선택 시스템(Energy Selection System, ESS)과 빔 이송 시스템(Beam Transport System, BTS)을 거쳐 각각의 치료실로 빔을 전달해 주게 된다(Fig. 1).

이 논문은 국립암센터 기관교유사업의 지원을 받아 수행하였음(과제번호 0610230, 0910110).

이 논문은 2009년 3월 3일 접수하여 2009년 3월 18일 채택되었음.

책임저자 : 이세병, (410-769) 경기도 고양시 일산동구 마두1동 809

국립암센터 양성자치료센터

Tel: 031)920-1729, Fax: 031)902-0149

E-mail: sblee@ncc.re.kr

2007년 3월 첫 환자를 치료한 이래, 양성자 가속기를 이용한 중앙 치료뿐만 아니라 관련 분야의 연구 및 실험이 활발히 이루어 지고 있으며, 이와 비례하여 가속기 가동률 또

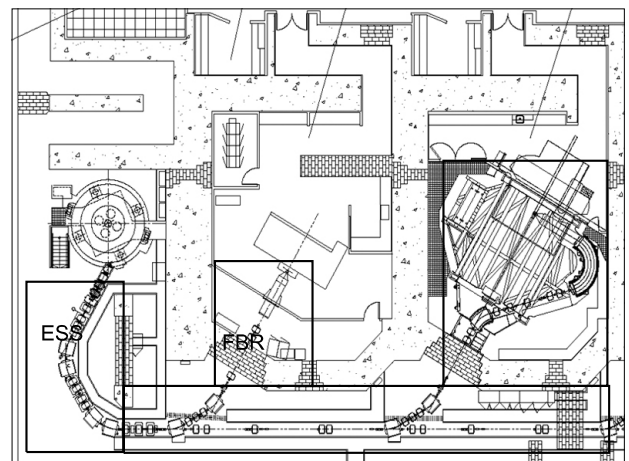


Fig. 1. Layout of the proton beam line equipment in National Cancer Center.

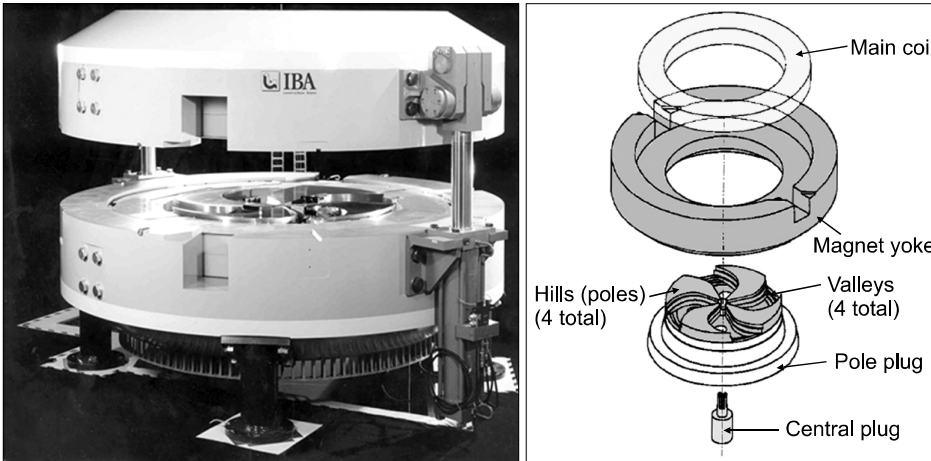


Fig. 2. IBA cyclotron & cyclotron magnet (lower half only) layout.

한 증가하고 있다. 가속기의 가동 시간의 증가는 출력되는 빔을 통해서 2차적으로 발생하는 방사선 강도와 지속시간에 영향을 미치게 되며 이는 양성자 가속기 시설의 작업종사자에 대한 방사선 피폭 선량 증가의 직접적인 원인이 된다. 따라서, 본 연구에서는 양성자 치료를 위한 가속기 가동 직후 작업 종사자들의 피폭량 증가의 직접적인 원인이 되는 감마선의 영향을 확인하기 위하여 양성자 가속기 시설내의 방사선 발생 정도와 그 지속시간을 분석하였으며 작업종사자의 피폭 정도를 평가하였다.

재료 및 방법

1. 가속기 주변 이차 방사선 발생 환경

가속기를 통해 가속된 양성자 빔은 빔의 진로를 조정하기 위한 조향 장치(deflector)등의 외부 출력 시스템(extraction system)과 에너지 조절을 위한 에너지 감쇠 장치(degrader)등을 통과하면서 주변 물질과 반응하여 방사선동위원소를 생성하게 된다. 생성된 방사선동위원소에서 발생하는 감마선 방출을 본 논문에서는 이차방사선(secondary radiation)이라고 정의하였다. 양성자 가속기 주변의 이차방사선(secondary radiation) 발생 정도는 가속기의 운영 시간과 사용되는 빔의 에너지 값에 직접적인 영향을 받는다. 본 연구에서는 가속기의 운영시간은 빔을 가속하기 전, 준비시간을 제외한 실제 양성자 빔이 가속되어 Cyclotron 가속기 외부로 방출되는 시간으로 한정하였다. Cyclotron 내부의 중심부(central region)에서 시작되는 ion source는 최종적으로 외부출력 시스템(extraction system)을 거쳐 가속기 외부로 방출되며 이때 가속기 내부에서 발생하는 이차방사선의 선량은 Cyclotron을 둘러싸고 있는 main coil과 magnet yoke에 의해

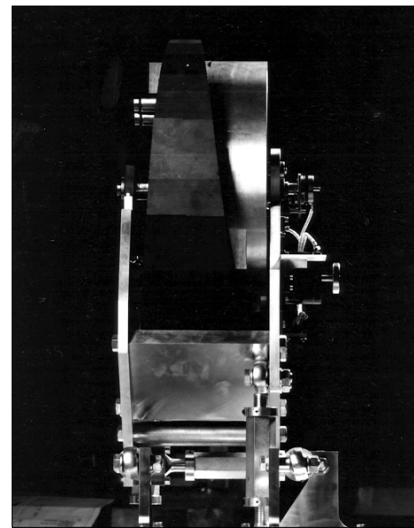
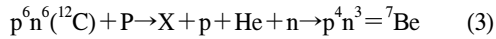
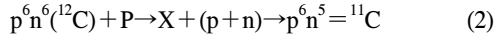
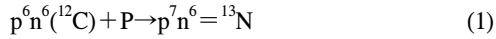


Fig. 3. Degradation picture & layout.

상당부분 차폐된다(Fig. 2).¹⁾ 국립암센터에 설치된 양성자 가속기는 230 MeV의 일정한 에너지로만 가속되기 때문에 치료에 필요한 최대에너지를 종양의 위치에 전달하기 위해서는 각기 다른 두께로 구성된 탄소(graphite, ^{12}C) 재질의 에너지 감쇠장치(degrader)를 이용하여 가속기에서 생산되는 빔을 70~230 MeV 사이의 에너지로 조정하게 된다(Fig. 3). Cyclotron 가속기로부터 생성된 230 MeV 에너지는 감쇠장치(degrader)를 통과하면서 주로 전기적인 반응과정을 통하여 치료에 필요한 에너지를 얻게 되는데 일부 양성자 빔은 주변의 원자핵과 반응하여 핵변환을 유발시키게 된다.^{1,2)} 이러한 반응은 방사성 동위원소를 생성시켜 가속기 가동 이후에도 Cyclotron과 에너지 감쇠장치(degrader)를 중심으로 일정시간 동안 감마선이 방출되는 주요 원인이 되

고 있다(Fig. 4).³⁾

이때 가속기 가동을 통한 빔 생성시 발생하는 방사화의 영향은 대부분 탄소(graphite, ¹²C)로 구성된 감쇠장치(degrader)와 양성자와의 반응을 통해 생성된다. 주요 생성 동위원소는 다음의 식(1), (2), (3)와 같이 ¹³N, ¹¹C, ⁷Be 등의 동위원소가 생성됨을 반응식을 통해 알 수 있다.⁴⁾



여기서 ⁷Be (Half Time: 53.29 days)를 제외한 ¹³N, ¹¹C 등의 주요 발생 동위원소는 십 여분 이내의 반감기를 가지고 있다. 이러한 이차방사선의 방사화 영향은 에너지 선택을 위한 bending 형태의 beam line magnet 구조에서도 발생하게 되는데 Fig. 4은 하전입자가 에너지 선택 시스템(ESS)을 통과하면서 빔 에너지의 세기에 따른 전송 손실을 나타내고 있으며 에너지에 따른 전송 효율을 양성자 치료시설 설치 당시 측정을 통해 적용된 값으로 빔 라인을 통해 낮은 에너지를 전송할수록 전송 효율은 떨어지게 되고 이러한 손실의 증가는 빔 라인에서의 원자핵 반응의 증가로 나타나 이차 방사선 발생에 영향을 주게 된다. 가속기 가동 직후 양성자 치료시설 중 상대적으로 많은 양의 이차방사선이 에너지 감쇠장치(degrader)에서 지속적으로 방출되기 때문에 이를 전제로 본 연구에서는 Cyclotron과 에너지 감쇠장치(degrader) 근처의 감마선 계측기(detector)를 통해 발생하는 이차방사선 선량과 지속시간을 평가하였다.

2. 측정방법

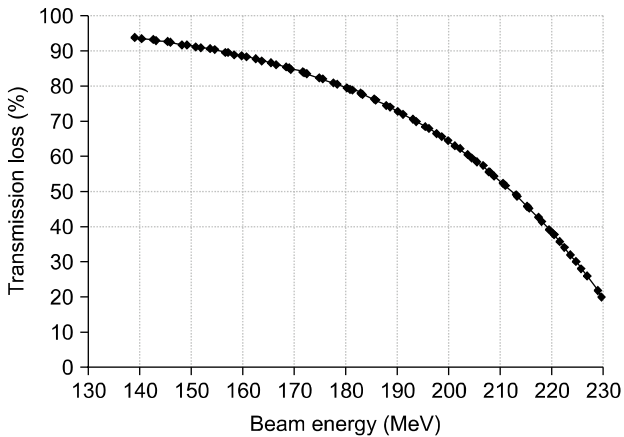


Fig. 4. ESS (energy selection system) transmission loss (%) of beam energy.

본 연구에서는 wall-mount area monitor (375/2, Ludlum Measurements Inc., USA)를 이용하여 양성자 치료기 주요시설 내의 이차방사선에 의해 발생하는 중성자와 감마선을 24시간 계측하여 기록장치에 분 단위로 데이터를 실시간 수집, 보관하였다(Fig. 5, 6). 이렇게 지난 1년간의 가속기 운영을 통해 축적된 데이터를 분석하여 장시간 가속기 가동 시에 발생하는 이차방사선인 감마선의 세기를 측정하고 적정수준까지의 감쇠 도달 시간을 계산하였다. 이때 가속기는 실제 환자를 치료하기 위한 치료모드(treatment mode)와 치료기의 QA (quality assurance) 및 연구를 위해 빔 데이터를 측정하기 위한 서비스모드(service mode)로 구분하여 가동 직후의 방사선 발생 정도를 평가하였으며 계측기의 특성상 문턱값(threshold)은 1,000 $\mu\text{Sv/h}$ 이하로 고정시켜 사용하였다. 환자 치료 시에 사용되는 가속기의 양성자 빔의 전류는 6~200 nA 이내의 범위에서 운영되고, ESS (Energy selection system)와 BTS (Beam transport system)를 거쳐 최종적으로 치료실에 전달되는 양성자 빔의 전류는 5~10 nA 수준이며 본 연구에서도 같은 빔 조건을 사용하였다.

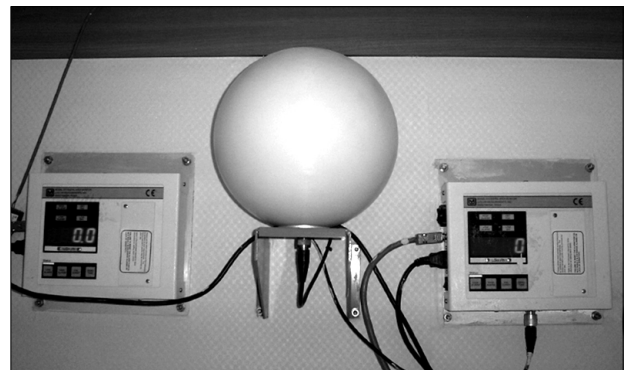


Fig. 5. Model 375/2 area monitor with internal gamma detector.

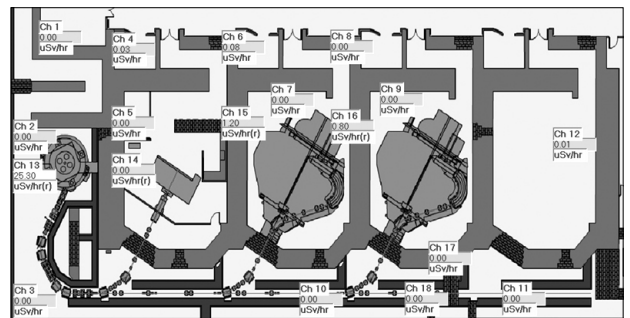


Fig. 6. Layout and installed detector of proton therapy facility.

결 과

Fig. 7의 결과에서 보듯이 가속기 시설 내에서의 이차방사선의 주 발생부위는 예상했던 대로 에너지 감쇠장치 (degrader)였으며 비교적 Cyclotron 주위에서의 이차방사선의 측정값은 가속기 시설내의 다른 위치에서의 측정값과 대동소이하게 측정됨을 알 수 있었다. 또한 Fig. 8은 일상적인 양성자 치료실 운영에 따른 감마선의 발생을 모니터 한 결과의 예를 보여주는 것으로 양성자 빔의 조사 시에는 순간

적으로 최대 감마선량을 방사하게 되고 빔 조사 대기 및 운영 중지 구간에선 뚜렷한 감마 방사선의 감쇠 현상을 확인 할 수 있다. Fig. 9은 빔 조사가 종료되고 가속기 가동을 정지한 직후 이차방사선 선량을 측정된 결과를 나타낸 것으로 가속기 정지 30분 이내에 선량이 급격하게 감소하였으며 이후에는 완만한 곡선을 그리고 감소하다가 1~2시간 정도 이후엔 감마선 방출량이 20 $\mu\text{Sv/h}$ 이하로 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 양성자 빔에 의한 방사성동위원소의 발생이 탄소재질의 에너지 감쇠장치에서 일어나고 여기서 발생된 비교적 짧은 반감기의 동위원소에 의한 영향이 빔 가동 정지 직후에 주로 영향을 주다가 일정한 시간 이후에는 양성자 빔의 조율(tuning) 과정에서 빔 라인상

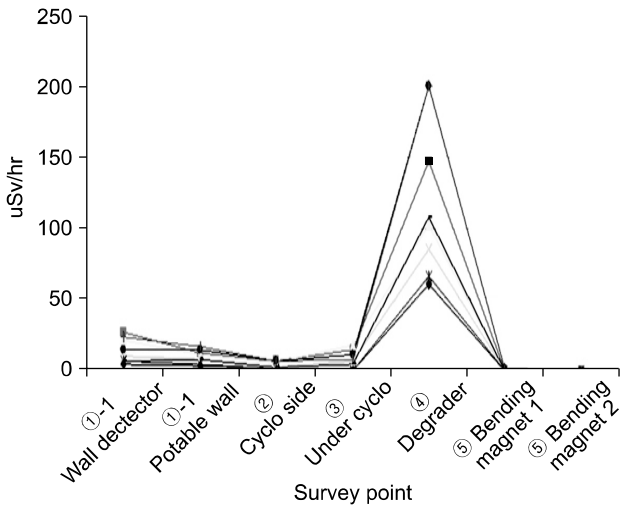


Fig. 7. A level of radiation around cyclotron and energy selection system area through random measurements after accelerator operation.

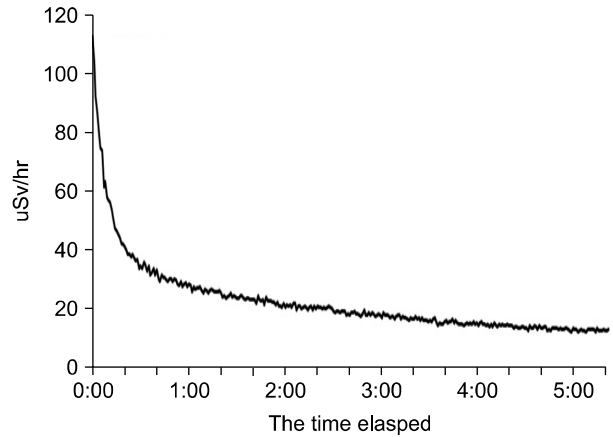


Fig. 9. A level of radiation attenuation after accelerator operation (4 hrs) for beam data measurement

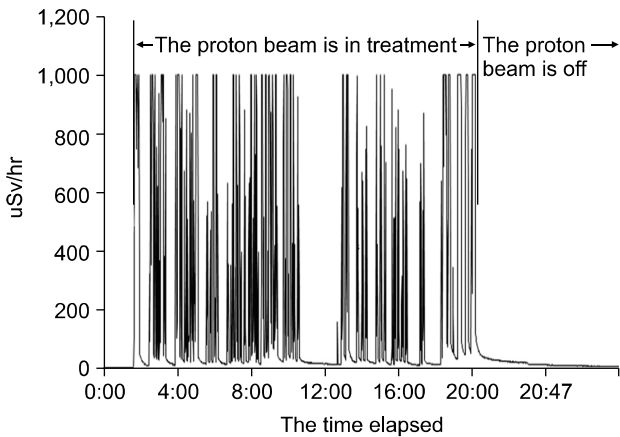


Fig. 8. A level of radiation according to accelerator operation for patient treatment.

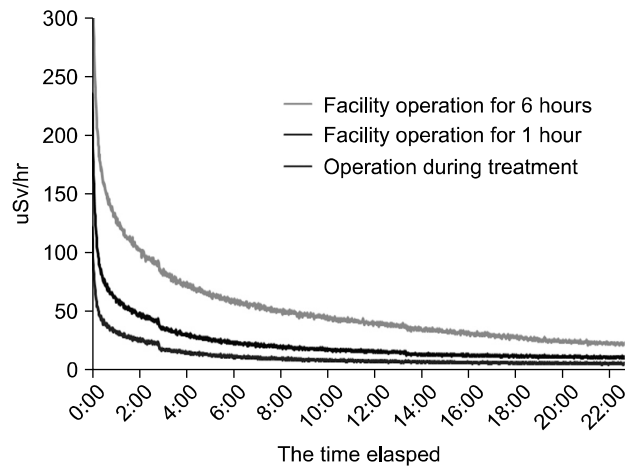


Fig. 10. A level of radiation attenuation by operation condition.

에서 발생한 상대적으로 반감기가 긴 동위원소들의 영향으로 예상 할 수 있다. Fig. 10은 다양한 빔 운영상태를 적용하여 가속기를 가동한 후에 이차방사선의 세기 및 감쇠유형을 측정된 것으로 양성자 빔의 조사량의 변화가 이차방사선의 감쇠 유형엔 영향을 주진 않았고 전반적인 방사화의 세기에만 영향을 주는 것을 확인 할 수 있었다. 특히 실험을 위해 6시간의 장시간 양성자 빔을 조사한 실험에서는 작업환경 조건인 20 $\mu\text{Sv/h}$ 수준 이하로 떨어지는 데는 약 24시간 정도가 소요 되는 것으로 측정 되었다.^{5,6)}

고찰 및 결론

양성자 가속기 가동 중 방출되는 방사선은 인체에 심하고 영구적 손상을 줄 수 있는 높은 수준의 이차방사선을 방출하게 된다.^{7,8)} 따라서 국립암센터 내에 설치된 양성자 가속기 Proteus235는 TSS (therapy safety system)와 SCU (safety control unit)등과 같은 2중, 3중의 안전장치를 운영하고 있으며 가속기 가동 중 작업자나 외부인원이 주요시설에 접근하게 되면 자동으로 가속기 가동을 차단할 수 있는 시스템이 갖추어 있어 예기치 못한 가속기 작동 및 인적 오류(human error) 등으로 인한 오작동 또는 오조작을 사전에 방지 할 수 있도록 되어 있다. 따라서 실제 가속기 운영 중 높은 방사선에 노출이 될 수 있는 확률은 극히 낮아지게 된다. 양성자치료시설의 실질적인 안전상의 문제는 가속기 운영에 따른 내부 점검 및 유지 보수 등에 투입되는 작업종사자들의 저 선량 장기 피폭에 의해 발생 될 수 있다. 이에 양성자치료시설 중 가장 높은 수준의 방사선이 지속적으로 방출되는 가속기 주변 및 에너지 선택 시스템(ESS)의 에너지 감쇠장치(degrader)주변의 이차방사선 변화를 추적하여 가속기 주변에서의 작업 시 작업종사자들의 안전을 보장하기 위한 적절한 수준의 방호대책이 요구된다. 가속기 주변에서 발생하는 이차방사선의 선량에 대한 추적 데이터에서 알 수 있듯이 가속기 가동 중에는 높은 수준의 이차방사선이 방출되고 가동 직후부터는 이차방사선 방출 정도는 급격하게 낮아지지만 약 20 $\mu\text{Sv/h}$ 정도의 선량은 상당히 오랜 기간 지속적으로 가속기 시설 주변에서 발생하고 있음을 확인 할 수 있다. 본 연구에서는 양성자 가속기 시설 주변의 선량제약(dose constraint) 및 선량한도(dose limit)를 시설내의 작업자를 위한 선량제약치로써 연간 선량한도 내에서 월평균 비율로 가속기내의 작업시간을 고려하여 안전하게 작업 가능한 수준인 20 $\mu\text{Sv/h}$ 이하로 제한하였다.^{6,9)} 방사선 작업종사자의 연간 최대 피폭한도를 고

려한 누적 피폭 선량이 5년 평균 20 mSv/year 이하로 이 기준을 충족 시키기 위해 이차방사선 방출선량을 20 $\mu\text{Sv/h}$ 이하의 기준으로 한달 평균 약 80시간 정도를 가속기 시설 내에서 유지보수를 위해 사용할 수 있게 된다. 그러나 이러한 결과는 단순히 고정형 감마선 계측기로 측정된 계산 결과이기 때문에 가속기 시설 내에서의 방사선 작업종사자의 작업 내용과 환경에 따라 다른 결과를 가져올 수 있다. 즉 외부피폭의 방사선 방호 원칙에 따른 거리, 시간, 차폐 등 3가지 요소의 조건변화에 따라 피폭선량에서 큰 차이를 가져올 수 있는데 특히 양성자 가속기 시설에서는 거리와 차폐 상태에 따라 피폭선량 변화의 가장 주요한 요인으로 작용한다. 양성자 가속기 시설 내에 설치된 고정형 감마선 계측기는 가장 많은 이차 방사선을 방출하는 탄소(graphite, ^{12}C)로 구성된 에너지 감쇠장치(degrader)와는 7.5 m 정도 떨어진 거리에 있으며 Cyclotron과는 3.6 m 정도 떨어진 거리에서 측정된 데이터이기 때문에 Cyclotron 내부작업이나 에너지 감쇠장치(degrader)와 같은 방사선 주요 발생 인근에서의 작업은 환경적 영향에 따라 작업 종사자들의 피폭 선량에는 큰 차이를 가져올 수 있다. 또한 정비를 위해 Cyclotron 개방 시에는 빔 조향장치(deflector)와 같은 빔 출력 시스템(beam extraction system)에서 높은 수준의 이차방사선이 차폐체를 거치지 않고 직접적으로 방출되게 되며 또한 Cyclotron 주변부를 둘러싸고 있는 main coil이나 magnet yoke와 같이 방사선을 차폐해줄 수 있는 차폐체가 전혀 없는 상태이기 때문에 작업 내용에 따라 작업자의 방사선 피폭 정도에 큰 차이를 줄 수 있다. 실제로 양성자 치료기의 운영을 통해 작업간 피폭선량은 시간당 수십 μSv 로 다른 방사선 치료기에 비해 상당히 높은 수준이지만 연간 피폭 선량은 작업자에 따라 1~3 mSv/year 정도로 양성자치료기 운영시기인 2007년부터 2년여 간의 운용을 통해 측정된 연간 피폭 선량은 제한 피폭선량보다 현저하게 낮은 수준으로 나타났다. 따라서, 예상 가능한 양성자 가속기 시설 내에서의 작업자의 방사선 노출은 허용범위 내에서 운영이 가능하지만 Cyclotron의 정기 점검 및 수리 시에는 작업시간 및 노출 정도의 사전예측이 어렵기 때문에 별도의 관리가 필요할 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

1. William R Leo: *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. 2nd ed, Springer-Verlag (1994), pp. 17-65
2. Agosteo S: Secondary neutron and photon dose in proton therapy. *Radiotherapy and Oncology* 48:293-305 (1998)

3. IBA (Ion Beam Application) Co.: Proton Therapy System, Maintenance Manual for the National Cancer Center, IBA, Belgium (2006), pp 3:1-4
4. 한국원자력연구소 한국 핵자료연구회: <http://atom.kaeri.re.kr>
5. ICRP Publication 60: *International Commission on Radiological Protection: Recommendations of the ICRP*, ICRP pub.60, Pergamon Press (1991)
6. 원자력 관계 법령: 과학기술부고시 제2002-23호, 제4조.
7. Schneider U, Agosteo S, Pedroni E, Besserer J: Secondary neutron dose during proton therapy using spot scanning Int J Radiat Oncol Biol Phys 53:244-251 (2002)
8. Jun IS: Effects of secondary particles on the total dose and the displacement damage in space proton environments. Nuclear Science, vol 48:162-175 (2001)
9. Wioletta Wieszczycka Waldemar H.Scharf: Proton Radiotherapy Acceleratprs, World Scientific, Poland (2001), pp. 131- 202

A Study of Radiation Exposure in Proton Therapy Facility

Sang Hoon Lee, Dongho Shin, Myonggeun Yoon, Jungwook Shin, Jeong-Eun Rah, Jungwon Kwak*, Sung Yong Park, Kyung Hwan Shin, Doo-Hyun Lee, Sung Hwan Ahn, Dae Yong Kim, Kwan Ho Cho, Se Byeong Lee

Proton Therapy Center, National Cancer Center,
*Department of Radiation Oncology, Asan Medical Center, Seoul, Korea

Proton therapy facility, which is recently installed at National Cancer Center in Korea, generally produces a large amount of radiation near cyclotron due to the secondary particles and radioisotopes caused by collision between proton and nearby materials during the acceleration. Although the level of radiation by radioisotope decreases in length of time, radiation exposure problem still exists since workers are easily exposed by a low level of radiation for a long time due to their job assignment for maintenance or repair of the proton facility. In this paper, the working environment near cyclotron, where the highest radiation exposure is expected, was studied by measuring the degree of radiation and its duration for an appropriate level of protective action guide. To do this, we measured the radiation change in the graphite based energy degrader, the efficiency of transmitted beam and relative activation degree of the transmission beam line. The results showed that while the level of radiation exposure around cyclotron and beam line during the operation is much higher than the other radiation therapy facilities, the radiation exposure rate per year is under the limit recommended by the law showing 1~3 mSv/year.

Key Words: Proton accelerator, Cyclotron, Gamma ray, Secondary radiation