30 MeV 사이클로트론 시설 위험성 평가

정교성[1,2] · 김종일[2] · 이진우[1,2,*]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소, [2]전북대학교 방사선과학기술학과

Risk Assessment of 30 MeV Cyclotron Facilities

Gyo-Seong Jeong[1,2], Chong-Yeal Kim[2] and Jin-Woo Lee[1,2,*]

[1]*Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, 29, Geumgu-gil, Jeongeup-si, Jeollabuk-do 56212, Republic of Korea*
[2]*Department of Radiation Science and Technology, Chonbuk National University, 567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do, 54896, Republic of Korea*

Abstract - A cyclotron is a kind of particle accelerator that produces a beam of charged particles for the production of medical, industrial, and research radioisotopes. More than 30 cyclotrons are operated in Korea to produce ^{18}F, an FDG synthesis at hospitals. A 30-MeV cyclotron was installed at ARTI (Advanced Radiation Technology Institute, KAERI) mainly for research regarding isotope production. In this study, we analyze and estimate the items of risk such as the problems in the main components of the cyclotron, the loss of radioactive materials, the leakage of coolant, and the malfunction of utilities, fires and earthquakes. To estimate the occurrence frequency in an accident risk assessment, five levels, i.e., Almost certain, Likely, Possible, Unlikely, and Rare, are applied. The accident consequence level is classified under four grades based on the annual permissible dose for radiation workers and the public in the nuclear safety law. The analysis of the accident effect is focused on the radioactive contamination caused by radioisotope leakage and radioactive material leakage of a ventilation filter due to a fire. To analyze the risks, Occupation Safety and Health Acts is applied. In addition, action plans against an accident were prepared after a deep discussion among relevant researchers. In this acts, we will search for hazard and introduce the risk assessment for the research 30-MeV cyclotron facilities of ARTI.

Key words : Risk assessment, Hazard, Cyclotron, Radiation accident, Radiation protection

서 론

한국원자력연구원 첨단방사선연구소에 설치된 연구용 30 MeV 사이클로트론 운영시설은 원자력안전법에 규정된 개봉 방사성동위원소 생산시설의 기술기준에 의거하여 방사선방호에 관련된 여러 시설이나 장치 등을 설치하여 운영하고 있다(한국원자력연구원 2011). 이와 같은 안전시설 및 장치를 설치 · 운영을 하여도 예측 가능 혹은 불가능한 사고가 발생할 수 있다. 따라서 사이클로트론 시설의 운영에서 기인하는 유해 · 위험요인을 찾아내어 위험성 평가를 실시하고 필요한 경우에는 조치를 취하여야 한다.

위험성 평가란 사업장의 유해 · 위험요인을 파악하고 해당 유해 · 위험요인에 의한 부상 또는 질병의 사고의 발생가능성(빈도)과 중대성(강도)을 추정하여 위험도를 결정하고 감소 대책을 수립하여 산업재해를 예방하는 데 그 목적

* Corresponding author: Jin-Woo Lee, Tel. +82-63-570-3271, Fax. +82-63-570-3279, E-mail. jinwoo@kaeri.re.kr

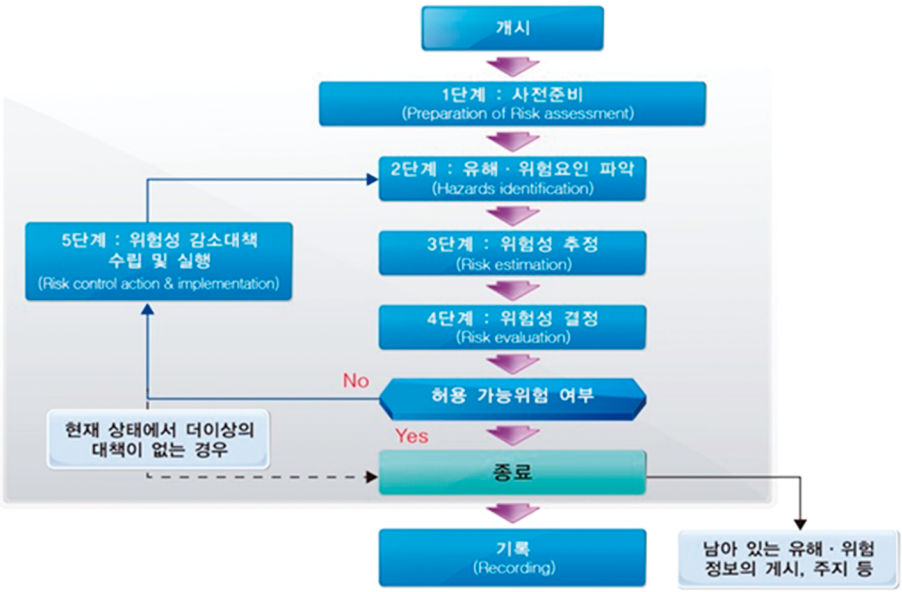

Fig. 1. Risk assessment process.

이 있다.

현재 원자력안전법에 발전용원자로 운영자는 발전용원자로 및 관계시설의 안전성을 주기적으로 평가하고 그 결과를 원자력안전위원회에 제출하도록 하는 필수조항이 있다. 발전용원자로 운영자는 해당 원자로시설의 운영허가를 받은 날부터 10년마다 안전성을 종합적으로 평가하고, 평가보고서를 작성하여 위원회에 제출하여야 한다. 주기적 안전성 평가의 내용으로는 '안전에 중요한 구조물 · 계통 및 기기의 실제 상태에 관한 사항', '결정론적 · 확률론적 안전성 평가에 관한 사항', '위해도 분석에 관한 사항' 등 총 14가지의 평가 항목이 있다.

그러나 같은 원자력안전법의 적용을 받는 방사성동위원소 사용 시설 등에 해당하는 안전성 평가 또는 위험성 평가에 대한 필수조항이 없다. 방사성동위원소 사용 시설 등은 발전용원자로 및 관계시설과는 성격이 다르기 때문에 원자력안전법에서 규정하는 안전성 평가보다는 산업안전보건법에 규정된 위험성 평가를 참고하여 사이클로트론 시설의 운영에 있어 방지 가능한 위험을 예측하고 그 대책을 마련하고자 한다.

재료 및 방법

사이클로트론의 위험성 평가는 Fig. 1의 절차에 의해 수행하였다(안전보건공단 2012). 1단계에서는 위험성 평가 대상을 작업별로 분류하여 선정하며 설비 등을 포함한다. 2단계에서는 유해 · 위험요인을 파악한다. 유해 · 위험요인을 파악하는 방법으로는 사업장 순회점검, 현장의 방사선 작업 종사자와 면담을 통한 청취조사, 안전보건 자료, 안전보건 체크리스트 작성 등의 방법이 있다. 3단계에서는 파악된 유해 · 위험요인의 위험성을 추정한다. 위험성이란 위험한 정도를 말하며, 부상 또는 질병이 발생할 가능성과 부상 또는 질병이 발생하였을 때 초래되는 중대상의 조합을 의미한다. 4단계에서는 추정된 위험성의 크기가 받아들여질 만한 수준인지 아닌지의 여부를 판단하는 단계이다. 위험성 감소조치가 필요한지 판단하는 단계로서 위험성 평가에서 매우 중요한 단계이다. 마지막으로 5단계에서는 위험성 감소 대책을 수립하고 실행하는 단계이다. 이 단계에서는 위험성의 크기가 큰 것부터 위험성 감소 대책의 대상으로 하고, 안전보건 상 중대한 문제가 있는 것은 위험성 감소 조치를 즉시 실시하여야 한다(이영순 2016).

사이클로트론 시설의 운영상 위험요소와 사고의 영향 분석은 시설의 운영 때문에 발생할 수 있는 사고의 전 영역을 고려하였다. 사이클로트론 시설의 위험요소는 사이클로트론, 핫셀, RI 이송설비, 배기설비, 방사성폐액 저장 및 이송설비, 외부사고(도난, 지진)로 분류하여 일반인과 방사선 작업 종사자에 의한 잠재적인 사고 분석, 발생 가능성의 평가, 관련된 예방 및 완화 특징의 분류와 평가, 안전에 중요한 시설의 구조, 시스템 및 구성요소의 분류 그리고 선택된 사고의 대상의 분류 등이 있다(한국원자력연구원 2013).

위험성을 추정하는 방법에는 행렬(Matrix)법, 곱셈법, 덧셈법, 분기법이 있다. 행렬법은 사고의 발생 가능성(빈도)과 중대성(강도)의 정도를 종축과 횡축으로 척도화하여 위험성이 할당된 표를 사용해서 위험성을 추정하는 방법이다.

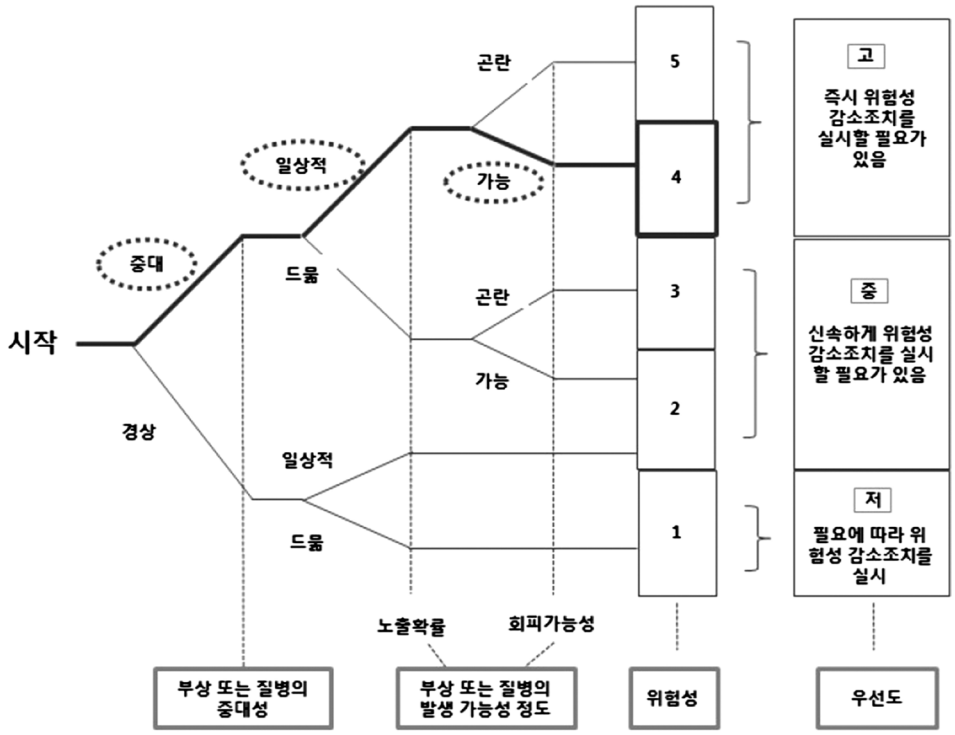

Fig. 2. Offset method example.

위험성의 크기는 가능성과 중대성의 조합이다. 곱셈법은 사고의 발생 가능성과 중대성을 일정한 척도에 의해 각각 수치화한 뒤 이것을 곱셈하여 위험성을 추정하는 방법이다. 덧셈법은 사고의 발생 가능성과 중대성을 일정한 척도에 의해 각각 추정하여 수치화한 뒤 이것을 더하여 위험성을 추정하는 방법이다. 분기법은 Fig. 2와 같이 사고의 발생 가능성과 중대성을 단계적으로 분기해 가는 방법으로 위험성을 추정하는 방법이다. 본 연구에서는 상기 4가지 방법 중 일반 산업분야에서 많이 사용하는 곱셈법을 사용하여 위험성을 추정하였다.

Table 1의 가능성 중 '최상'은 사이클로트론 설비 운전기간 중 연 수차례 이상 발생할 것으로 예상되는 사건이고, '상'은 사이클로트론 설비 운전기간 중 연 1회 이상 수차례 미만 발생 사건, '중'은 사이클로트론 설비 수명 기간 중 1회 이상 발생할 것으로 예상되는 사건, '하'는 사이클로트론 설비 수명기간 중 발생이 거의 없을 것으로 예상되는 사고, '최하'는 발생이 전혀 없을 것으로 예상되는 사고로 정의하였다.

중대성 중 1급 사고는 작업자 및 일반인에게 연간 허용선량 이상의 방사선 피폭을 야기하거나 설비에 심각한 영향을 주는 사고, 2급 사고는 작업자에게 연간 허용선량 이상의 방사선 피폭을 야기하거나 설비에 상당한 영향을 주지만 대중에게 연간 허용선량 이하의 방사선 피폭을 야기하는 사고, 3급 사고는 작업자에게 연간 허용선량 이하의 방사선 피폭을 야기하거나 설비에 다소 영향을 주지만 대중에게 무시할 수 있는 정도의 방사선 피폭을 야기하는 사고이며 4급 사고는 작업자 및 대중에게 전혀 위해를 야기하지 않고 환경에도 특별한 영향을 야기하지 않는 사고로 정의하였다(한국원자력연구원 2013).

Table 2의 위험도 1~6은 필요에 따라 개선이 가능한 허

Table 1. Risk estimation example

	Consequence	4th grade	3rd grade	2nd grade	1st grade
Frequency	Score	1	2	3	4
Rare	1	1	2	3	4
Unlikely	2	2	4	6	8
Possible	3	3	6	9	12
Likely	4	4	8	12	16
Almost certain	5	5	10	15	20

Table 2. Risk evaluation example

Risk estimation		Acceptance	Improvement
16~20	Critical risk	Unacceptable	Immediate
15	High risk		Rapid
9~12			Rapid possibly
8	Moderate risk		Systematic
4~6	Low risk	Acceptable	When necessary
1~3			

용 가능 상태이다. 위험도 8~20은 가능한 빨리 개선하거나 즉시 개선이 필요한 허용 불가능 상태이다. 따라서 위험도 8 이상은 위험도가 큰 것으로 볼 수 있다(이영순 2016).

결 과

사이클로트론 운영상의 위험요소와 사고의 영향 분석은 시설의 운영 때문에 발생할 수 있는 사고의 전 영역을 고려하였다. 예를 들면 일반인과 방사선 작업종사자에 의한 잠재적인 사고 분석, 발생 가능성의 평가, 관련된 예방 및 완화 특징의 분류와 평가, 안전에 중요한 시설의 구조, 시스템 및 구성요소의 분류 그리고 선택된 사고의 대상의 분류 등이 있다.

사건의 강도 및 빈도 정의와 사고영향 수준 정의에 의해 사이클로트론 시설의 위험요소를 분석하였고, 그 결과는 다음과 같다.

1. 사이클로트론(방사성물질)
   가. 사이클로트론 고장(위험도: 4(가능성)×1(중대성)=4)
      사이클로트론의 고장이 발생할 경우 시설이 가동 중단되어 더 이상의 방사선원의 발생이 중지된다.
   나. 냉각수 상실 및 유틸리티 설비 고장(위험도: 3×1=3)
      1) 냉각수 상실 사고 시 제어실에 냉각수 배관의 압력 손실이 경보된다.
      2) 냉각수 상실의 경우 사이클로트론 설비가 가동 중단되므로 방사선원의 발생이 중지된다.
   다. 작업자의 볼트실 무단 진입(위험도: 1×3=3)
      1) 볼트실 및 표적조사실의 출입문이 잠겼을 경우에만 사이클로트론 시설을 가동할 수 있다.
      2) 가동 중 출입문이 열렸을 경우 사이클로트론 시설이 자동 중지되게 연동장치가 반영되어 있다.
      3) 무단 진입 방지를 위해 방사선관리구역 출입구 및 내부에 CCTV를 설치하여 운영 중이다.
2. 핫셀(방사성물질)
   가. 조작중 취급 부주의로 인한 RI의 낙하에 따른 오염(위험도: 4×1=4)
      1) 핫셀은 기밀구조를 이룬 격납기능을 수행하므로 RI의 낙하 시에도 핫셀 내에 가둘 수 있다.
      2) 분진의 발생 경우에도 환기설비에 의해 배기계통 내에 포집되므로 작업자 및 일반인의 피폭 우려가 없다.
   나. 조작 중 차폐문의 열림(위험도: 2×3=6)
      1) 핫셀은 환기설비에 의해 주변지역보다 부압을 유지하고 있으므로 핫셀 외부로의 누출 우려는 없다.
3. RI 이송설비
   가. RI 이송설비의 고장으로 인한 RI의 누출 · 오염(위험도: 3×2=6)
      1) 압축공기의 손실은 유틸리티 제어반에서 감시, 사고를 발견할 수 있다.
      2) RI 이송설비는 바닥의 트렌치 내에 설치되어 누출 사고 시 트렌치 내부로 국한된다.
4. 배기설비(방사성물질)
   가. ACU 배기팬 고장으로 인한 관리구역 부압 상실(위험도: 3×1=3)
      1) 배기팬 고장 시 경보기능으로 운전자에게 고장신호 전달된다.
      2) 관리구역 내 작업자의 대피
   나. 화재에 의한 필터손실(위험도: 2×3=6)
      1) 차콜필터에는 소화수가 공급되어 화재 시 진화 가능.
      2) 필터의 화재사고 시 ACU Fan이 가동 중단되므로 대기로의 방출을 차단할 수 있다.
5. 방사성폐액 저장
   가. 저장탱크의 범람 및 파손(위험도: 2×2=4)
      1) 저장탱크의 수위특정기로 탱크의 범람 및 파손을 운전자가 파악이 가능하다.
      2) 저장탱크실은 범람을 방지하기 위한 Dike가 반영되어 Dike 내에 폐액을 가둘 수 있다.
      3) 저장탱크가 지하층의 탱크실 내에 설치되어 탱크의 파손 시에도 탱크실 내에 방사성폐액을 가둠으로써 외부로의 방사능 유출 우려는 없다.
6. 외부사고(분실 및 도난)
   가. 방사성물질의 분실 및 도난(위험도: 2×2=4)
      1) 사이클로트론 시설은 볼트실 내에 고정 · 설치되어 있다.
      2) 사이클로트론 시설의 출입은 Card-key system에 의한 시건장치가 구비되어 일반인의 출입 우려가 없다.
7. 외부사고(지진)
   가. 지진발생(위험도: 1×4=4)
      1) 사이클로트론 종합연구동은 내진해석을 적용하여 설계되었다.
      2) 지진 시에도 시설 내의 모든 방사성물질을 가둠 기능을 수행한다.

상기 결과를 Table 3에 정리하였다. 특히 Table 3에서 주목해야 할 유해 · 위험요소는 RI 이송설비 고장으로 인한 RI 누출 및 오염과 배기설비의 화재에 의한 필터 손실이다. 이 두 가지 위험요소는 대책이 마련되지 않았을 경우 방사선 작업종사자에게 심각한 영향을 초래할 것으로 예상되기 때문이다.

RI 이송설비 고장으로 인한 RI 누출 및 오염에 대한 대책

Table 3. Risk assessment for cyclotron facilities

Work: Cyclotron management			Risk assessment			
Facility/Device	Hazard identification		Protection/Monitoring	Risk estimation		
	Risk source	Beginning accident		Probability	Severity	Risk
Cyclotron operation	Radiation material	Malfunction	In the case of the malfunction, the cyclotron does not produce the radiation because it is stopped.	4	1	4
Cyclotron operation	Radiation material	Loss of the coolant and malfunction of the utility	In the case of the loss of the coolant, the loss of the pressure is informed the control room. In the case of the loss of the coolant, the cyclotron does not produce the radiation because it is stopped.	3	1	3
Cyclotron operation	Radiation exposure	Trespass in the Vault room	Cyclotron is operated when the enter of the Vault and the target room is locked. If the enter is open on operating, the device to stop operating the cyclotron is installed.	1	3	3
Hot cell	Radiation contamination	Contamination by radioisotope falling: due to carelessness on operating	Radioisotope falling is confined in the lead cell due to the pressurized structure. When the dust occurs, there is no concern about exposure for workers and the public. Because the dust is captured in the vent system.	4	1	4
Hot cell	Radiation exposure	Open of the shielding door on operating	There is no concern about the leakage outside the lead cell. Because the negative pressure is kept in the cyclotron facilities.	2	3	6
Conveying facility for radioisotope	Radiation contamination	Contamination of radioisotope leakage due to the malfunction of the conveying facility	The control panel can monitor and detect the loss of the compressed air. The leakage accident is limited to the internal trench because the conveying facility is installed internal trench.	3	2	6
Exhaust equipment	Radiation contamination	Lose of negative pressure due to ACU (air clean unit) Fan malfunction	Operators can be aware of the malfunction signal by the alarm when ACU Fan breaks down. 2) worker's evacuation from the controlled area	3	1	3
Exhaust equipment	Radiation contamination	Loss of filters due to fire	The fire is put out with the fire fighting water. Radiation material could not be released in the air because ACU Fan is stopped operation.	2	3	6
Radioactive waste water	Radioactive waste	Damage and flooding of the storage tank	Operators can be aware of the damage and the flooding of the storage tank with the water level controller. The radioactive waste water is confined in the dike that it is constructed in the tank room against flooding. The radioactive waste water could not be released outside because it is confined in the tank.	2	2	4
Outside accident	Loss and theft	Loss and theft of the radiation material	Cyclotron facilities are fixedly installed in the Vault room. The public can't enter the facilities because the entrance to the cyclotron facilities depends on the locking devices with card-key system.	2	2	4
Outside accident	Earthquake	Earthquake	Cyclotron facilities are constructed by applying the seismic analysis. All of the radiation materials are confined in the facilities during the earthquake.	1	4	4

■ 〈서식 11-2〉

KRAS(**표준 위험성평가**) **예시**

담당	부장	대표

작업공정명 :			위 험 성 평 가							평가일시 : 2015-04-15		
세부 작업 내용	유해 위험요인 파악		관련근거 (법적기준)	현재의 안전보건조치	위 험 성			위험성 감소대책	개선후 위험성	개선 예정일	완료일	담당자
	위험 분류	위험발생 상황 및 결과			가능성 (빈도)	중대성 (강도)	위험성					
원료 입고	기계적 요인	무자격자가 지게차를 임의 운전하여 근로자와 부딪힐 위험	안전보건규칙제98조 [운전위치 이탈시의 조치]	유자격자 운전 시동키 분리보관	1	2	2(낮은)	-	-	-	-	-
원료 입고	전기적 요인	인화성액체(유기용제) 주입 중 정전기에 의한 화재폭발 위험	안전보건규칙제325조 [정전기로 인한 화재 폭발 등 방지]	-	3	2	6(높음)	정전기의 발생 억제 또는 제거 조치 (배관Bonding/Grounding)	2(낮음)	2015-05-30	2015-05-15	홍길동
원료 입고	화학(물질)적 요인	외부에서 탱크로 불씨가 유입 시 화재 폭발 위험	안전보건규칙제269호 [화염방지기의 설치 등]	-	2	3	6(높음)	1. 안전작업허가 절차 준수 2. 화염방지기 설치	3(보통)	2015-05-30	2015-05-15	서비스
원료 입고	화학(물질)적 요인	인화성 액체의 증기가 점화되어 화재·폭발 위험	안전보건규칙제290조 [폭발의 위험이 있는 장소의 설정 및 관리]	작업자 교육	2	3	6(높음)	폭발 위험장소 설정/관리 (폭발위험장소 구분도 작성)	3(보통)	2015-06-30	2015-06-15	황건설
원료 입고	화학(물질)적 요인	주입구 주변 유증기 흡입으로 인한 건강장해 발생 우려	안전보건규칙제450조 [호흡용 보호구의 지급 등]	보호구 미착용	2	2	4(보통)	개인보호구 사용 (방독마스크)	2(낮음)	2015-05-30	2015-05-15	이보건

Fig. 3. Risk assessment example of other industry.

으로 압축공기 손실은 유틸리티 제어반에서 감시가 가능하고, RI 이송설비는 바닥의 트렌치 내에 설치되어 RI 누출 시 트렌치 내부로 국한된다. 따라서 위험도는 '6'이고 RI의 외부로의 누출 및 오염의 가능성은 없다.

배기설비의 화재에 의한 필터 손실의 대책으로는 배기설비에 설치된 차콜필터에 소화수가 공급되어 화재 시 진화가 가능하다. 필터 화재 사고 시 ACU (Air Control Unit) 배기팬의 가동이 중단되므로 위험도는 '6'이고 방사성물질의 대기중으로 방출이 차단되어 안전하다.

고 찰

일반 산업분야에서는 Fig. 3과 같이 일반적인 유해 · 위험요인을 파악하여 그 대책을 마련하고 있다. 그러나 방사선 사용 시설 등에 같은 방법으로 위험성 평가를 실시하는 것보다는 방사선 분야에 맞게 수정할 필요가 있다.

유해 · 위험요인 중 RI 이송설비 고장으로 인한 RI 누출 및 오염의 경우, 현재의 안전보건 조치를 유지한다면 사고는 발생하지 않을 것이다. 그러나 이러한 사고가 발생하였다고 가정할 경우에는 오염을 제거하기 위한 긴급작업을 수행하는 방사선 작업종사자에게 상당히 큰 영향을 미칠 가능성이 있다. 따라서 오염제거 작업에 투입되는 방사선 작업종사자의 피폭선량을 평가할 필요가 있다.

보수적인 가정을 하여 사이클로트론에서 생산하는 F-18의 1 batch 생산량인 2 Ci의 50%가 흘러 바닥을 오염시키는 사고를 가정할 경우, 사고 시 제염작업에 소요되는 시간은 30분 이하이고 최대 접근거리를 50 cm라고 가정할 때 예상되는 방사선 작업종사자의 외부피폭선량은 다음과 같이 계산된다(이진우 2015).

$$\dot{X} = \frac{\Gamma \times S}{r^2} = \frac{5.7 \times 1{,}000}{50^2} = 2.28\,\mathrm{R\,hr^{-1}}\ (\text{Herman Cember 2009})$$

$\dot{X}$: 조사선량률 ($\mathrm{mR\,hr^{-1}}$)
Γ: 감마상수 ($\mathrm{R \cdot cm^2\,mCi \cdot hr^{-1}}$)
S: 선원의 Activity (mCi)
r: 선원과 측정지점과의 거리 (cm)

작업 소요시간이 30분이므로 사고 시 제염작업으로 인한 예상피폭선량은 약 1.14 R = 0.014 Sv[1)]가 될 것으로 추정된다(한국원자력연구원 2013).

RI 이송설비 고장으로 인한 RI 누출 및 오염의 경우, 오염을 제거하는 방사선 작업종사자의 피폭선량을 평가한 결과는 원자력안전위원회 고시 제2014-34호 "방사선방호 등에

[1)] 보수적으로 1 R ≒ 1 rem으로 가정한다.

관한 기준” 제14조(방사선 긴급작업 시 선량제한)의 선량에 비해 적은 양뿐만 아니라 일반인에 대한 선량한도 수준임을 알 수 있었다

결 론

사이클로트론 운영에 있어 위험성 요인을 파악하고 그 대책에 대해 Table 3과 같이 고찰해 보았다. 위험성 평가는 원자력안전법 상의 필수조항은 아니다. 그러나 방사선 분야 외의 다른 산업에서는 산업안전보건법의 위험성 평가를 매년 1회 정기적으로 실시한다. 따라서 이를 참고하여 사이클로트론 설비 등의 성능을 점검하고 현재 수립되어 있는 위험성 감소 대책의 유효성 등을 종합 검토하여 사이클로트론 시설 및 방사선 작업종사자에게 발생할 수 있는 위험을 차단하고, 사고 발생을 미연에 방지하며 사고 발생 시 그에 대한 대처를 할 수 있어야 하겠다.

위험성 평가는 1회성으로 끝나는 것이 아닌 지속적인 것이고, 유해 · 위험요인 또한 지속적인 업데이트를 통해 관리하고 개선하여야 한다. 이는 기존 방사선안전관리의 보완적인 활동으로 사이클로트론뿐만 아니라 다른 방사성동위원소 사용 시설 등에도 기존의 방사선안전관리의 보완 차원에서 주기적으로 위험성 평가를 실시하여 유해 · 위험요인에 대한 실태를 파악하고 이를 평가할 수 있다. 위험성 평가를 방사선 분야에 도입하여 방사선안전관리에 도움이 될 수 있을 것이라 판단한다.

참 고 문 헌

안전보건공단. 2012. 사업장 위험성 평가 매뉴얼. pp. 1-2.

이영순. 2016. 위험성 평가 해설 지침서. 한국산업안전보건공단. pp. 7-9.

이진우. 정교성. 김종일. 2015. 연구용 사이클로트론 종사자의 외부 피폭선량 평가. *대한방사선방어학회 학술발표회 논문요약집* **10**:108-109.

한국원자력연구원. 2013. 사이클로트론 생산허가 방사선안전 보고서. pp. 52-56.

Herman Cember. Thomas E. Johnson. 2009. Introduction to Health Physics. 4th. Mc Graw Hill Medical. pp. 223-226.

KAERI. 2011. Radiation Technology and Its Application. pp. 61-62.

Received: 9 December 2016
Revised: 25 January 2017
Revision accepted: 2 March 2017