

# 국내 사이클로트론 이전 및 해외 해체 사례 분석을 통한 해체 계획 기준 도입 연구

우리나\*, 김용민\*, 송민철†, 조대형†, 이재성†, 김완태†

\*대구가톨릭대학교 방사선학과, †한국원자력안전기술원

2012년 3월 6일 접수 / 2013년 4월 3일 1차 수정 / 2013년 4월 24일 2차 수정 / 2013년 4월 26일 채택

사이클로트론은 그 자체의 수명에 의한 마모·파손뿐만 아니라 사용목적의 변경, 장소 이전, 업그레이드 등의 다양한 이유로 해체 또는 폐기를 경험하게 된다. 실제 미국과 유럽에서도 후자의 이유로 해체된 사례가 많고 또한 많은 양의 저준위 방사성 폐기물을 발생시켰으며 이에 따른 큰 해체 비용을 야기하였다. 유럽과 미국에서는 미래 해체 비용 감소를 위해 많은 연구를 수행하였으며 미국에서는 허가시 해체 자금 계획(DFP, Decommissioning Funding Plan)을 제출하도록 하고 있다. 사이클로트론 해체를 위해서는 기술적 측면(해체 절차, 제염 기술 등)과 안전성 측면(잔류 방사능, 예상선량 등)에서 해체 작업의 성취 정도를 예측함으로써 해체 비용의 감소 및 방사성 폐기물관련 문제를 해결할 필요가 있다. 본 연구에서는 ANL (Argonne National Laboratory)과 벨기에(유럽위원회 주관)에서 수행된 사이클로트론 해체 사례를 분석하고 2012년 12월 수행된 국내 서울대학교병원 사이클로트론 해체 이전 사례를 살펴봄으로써 향후 사이클로트론 해체 기준 수립을 위한 기초 자료를 제공하고자 하였다. 이를 위하여 IAEA (International Atomic Energy Agency)와 NRC (Nuclear Regulatory Commission)의 사이클로트론 해체 관련 기준을 분석하고 향후 방사성 폐기물 규제해제(이하 자체처분) 및 재사용과 해체 자금 계획(DFP)의 국내 도입 방안을 제시하였다. 도출된 자료는 사이클로트론 해체시 방사화되는 정도를 예측하고 국내에 적용할 수 있는 효율적인 해체 요건과 기준들을 정립하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

중심어: 사이클로트론, 해체, 방사화, 해체 자금 계획(DFP), 규제해제농도기준

## 1. 서론

### 1.1 국내 사이클로트론 동향과 연구의 필요성

1929년 Ernest O. Lawrence가 자기장이 구심력을 만드는 원리를 이용해 사이클로트론을 개발하면서 1934년 캘리포니아 대학교(버클리)에 최초의 사이클로트론이 설치되었다. 초기 사이클로트론은 기초과학연구나 입자 물리연구에 주로 사용되어 그 이용이 한정적이었지만, 1970년대 PET (Positron Emission Tomography, 양전자단층촬영)이 개발되면서 의료용 동위원소 추적자를 생산하는 장비로 그 수가 급격히 증가하였다. 국내에서는 정부의 권역별 사이클로트론센터 구축사업에 의해 대형병원들을 중심으로 국산 사이클로트론이 설치되었으며, Table 1에 기술된 바와 같이 양성자치료용을 제외하고 2011년을 기준으로 36기의 사이클로트론이 전국적으로 가동되고 있다. 국내 최초 도입된 사이클로트론 MC-50은 1986년 원자력의학원에 설치되었고, 1994년 서울대학교병원에 설치되었던 TR-13 사이클로트론은 근래 성균관대학교로 이

전되었다. 최근의 치료용이 아닌 의료용 동위원소 생산용 사이클로트론은 고에너지를 필요로 하지 않는 경향에 따라 15 MeV 이하의 소형 사이클로트론이 주를 이루고 있으며, 인출반경을 짧게 하여 크기, 무게, 전력소모량을 최소화 하는 형태의 사이클로트론이 추세를 이루고 있다 [1,2].

이러한 의료용 사이클로트론은 에너지 및 시설규모가 크지 않고 핫셀과 같은 부대시설과 함께 설치된다. 때문에 의료용 사이클로트론은 일반적인 원자력 시설의 해체 절차와는 다르게 적용되어야 한다.

사이클로트론의 일반적인 수명은 30년으로 예상되지만, 국외의 사이클로트론 해체 사례를 보면 실제로 장비 노후화에 의한 이유보다 사용목적의 변경, 장소이전, 업그레이드 등의 이유로 조기해체가 이루어지고 있다. 해체 기간은 시설 규모에 따라 상이하며 짧게는 몇 주일에서 길게는 2년까지 나타났다. 실제로 국내 사이클로트론 해체 작업도 장비 노후화가 아닌 서울대학교병원에서 성균관대학교로 이전하면서 수행되었다. 따라서 기계자체의 수명에 의한 사이클로트론 해체보다 예상치 못한 조기해체와 사용목적의 변경을 고려하고 대비할 필요가 있다.

교신저자 : 김용민, ymkim17@cu.ac.kr  
경상북도 경산시 하양읍 금락리 대구가톨릭대학교

**Table 1.** The Operation Status of Cyclotron for Radioisotope Production in Korea (2011).

Company	Energy(MeV)	11~15 MeV	16~20 MeV	30MeV~	Total
Domestic		9	-	1	10
Imported		13	12	1	26
Total		22	12	2	36

**Table 2.** The Main Radioisotopes in Concrete Activation.

Isotope	Reaction	Half-life	Principal $\gamma$ 's MeV (%)
<sup>152</sup> Eu	<sup>151</sup> Eu(n, $\gamma$ ) <sup>152</sup> Eu	13.4 y	0.122 (37%), 0.344 (27%), 0.799 (14%), 0.96 (15%), 1.087 (12%), 1.11 (14%), 1.408 (22%)
<sup>154</sup> Eu	<sup>153</sup> Eu(n, $\gamma$ ) <sup>154</sup> Eu	8.5 y	0.12 (38%), 0.72 (21%), 1.00 (31%), 1.278 (37%)
<sup>60</sup> Co	<sup>59</sup> Co(n, $\gamma$ ) <sup>60</sup> Co	5.27 y	1.17 (100%), 1.33 (100%)
<sup>134</sup> Cs	<sup>133</sup> Cs(n, $\gamma$ ) <sup>134</sup> Cs	2,065 y	0.57 (23%), 0.605 (98%), 0.796 (99%)

**1.2 연구의 목적 및 사이클로트론 대상 설정**

사이클로트론 해체시 고려해야 할 사항은 많으나 그 중에서도 사이클로트론 부품과 주변 차폐체의 방사화 및 잔류 방사능, 해체 규제 절차 그리고 해체 후 자재들의 폐기문제 등은 중요한 사항들이다. 이러한 사항들을 중심으로 국내 실정에 맞는 해체에 관한 기준을 수립하기 위해 이미 선행되어진 국외 해체 사례들을 살펴보았다. 본 논문에서는 NRC (Nuclear Regulatory Commission)의 해체 자금 계획(DFP; Decommissioning Funding Plan)[9] 및 IAEA Technical Report Series 보고서의 방사성 폐기물 자체처분 처리 절차[13]를 살펴보고 국내 사이클로트론의 해체시 필요한 요건들을 분석하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 구체적으로는 국내 대부분인 소형 사이클로트론(평균 에너지 15~20 MeV)을 주요한 시설로 보고 주변 콘크리트(차폐체) 방사화와 해체 비용 등을 분석할 것이다.

**2. 해외 사이클로트론 해체 관련**

원자력이용시설에 대한 해체관련 국내연구는 원자력 발전소 및 연구용 핵주기 시설에 국한되어 주로 수행되어져 왔고[3,4], 사이클로트론과 같은 소규모 시설에 대한 해체 연구는 구체적으로 진행되지 않았다. 국외에서는 원자력 시설 해체에 대한 연구가 1970년대부터 OECD/NEA, IAEA 등의 회원국들 사이에서 국제 공동 연구 형태로 활발하게 진행되고 있고, 사이클로트론에만 해당하는 특정 기준이나 요건은 존재하지 않지만 소규모 원자력시설에 사이클로트론을 포함하여 해체 연구가 계속 진행되고 있다[5,6].

**2.1 사이클로트론의 방사화**

동위원소 생성용 사이클로트론에서의 방사화과정은 <sup>18</sup>O(p,n)<sup>18</sup>F반응으로 생성된 중성자가 주위 콘크리트(차폐체)내에서 감속되어 반응단면적이 커지면서 (n, $\gamma$ )반응

을 통해 물질을 방사화한다<sup>1)</sup>. 이러한 과정으로 투과력이 강한 2차 감마선을 방출하는 방사성 폐기물이 발생하며 해체 작업과정 중 피폭을 유의할만한 동위원소는 그리 많지 않지만, 장반감기를 가진 동위원소들 중 <sup>152</sup>Eu, <sup>154</sup>Eu, <sup>60</sup>Co, <sup>134</sup>Cs가 상대적으로 큰 반응단면적을 가진 것으로 확인되었다.(<sup>152</sup>Eu: 5,900 $\sigma$ , <sup>60</sup>Co: 17 $\sigma$ , <sup>134</sup>Cs: 29 $\sigma$ ) 그 자세한 에너지와 내용은 Table 2와 같다[7].

**2.2 ANL 및 EUR의 사이클로트론 해체 사례**

1991년 ANL (Argonne National Laboratory)에서 해체한 전자석직경 60" 사이클로트론은 1952년 건설되었고 양성자, 중양자, <sup>3</sup>He과 <sup>4</sup>He 이온을 11, 21, 34, 45 MeV로 가속시킬 수 있는 장치로 주된 이온빔 에너지 대역은 11 MeV이다.

사이클로트론 해체시 발생하는 콘크리트 방사성 폐기물은 작업자들의 심각한 피폭을 고려해야할 만큼 고 방사선량을 가지진 않지만(4.36 mSv, 실제로 Table 3,4와 같이 많은 양의 저준위 고체 방사성 폐기물의 발생(200 ft<sup>3</sup> 1,887 MBq)과 처리비용 문제(한화 약 40억원 이상)를 야기하였다. 미국의 경우 10CFR61.55 방사성 폐기물 분류 기준에 의해 저준위 방사성 폐기물(LLW)은 고준위 방사성 폐기물(HLW)<sup>2)</sup>, 초우라늄 폐기물(TRU Waste)<sup>3)</sup>, 우라늄제조과정에서 발생하는 찌꺼기를 제외한 모든 방사성 폐기물을 말하고 규제나 관리 목적에 따른 핵종의 종류와 반감기로 Class A, Class B, Class C, GTCC (Greater than Class C)로 나뉜다. Class C 수준 이하의 방사성 폐기물들은 폐기물 처리 시설에서 처분할 수 있을 정도의 낮은 방사능 농도이며, 그 이상의 방사능 농도를 가지면

1) 중성자의 속도가 느리면 원자핵에 충돌하여 흡수되어 버리므로 순간적으로 원자핵이 여기상태가 되어 그 에너지를 감마선 형태로 방사하여 안정 상태로 된다. (중성자 포획반응)  
 2) ① 조사된 핵연료 ② 제1단계 용매추출 운전에서 발생한 액체폐기물 또는 이에 상응하는 것 ③ 용매추출 후단에서 농축된 폐기물 또는 이에 상응하는 것, 이러한 액체 폐기물이 변환된 고형물을 말한다.  
 3)  $\alpha$ 선을 방출하는 핵종으로 ① 원자번호 $\geq 92$  ② 반감기 $\geq 5$ 년(NRC), 20년(DOE, EPA) ③ 농도 $\geq 3.7 \times 10^8$  Bq kg<sup>-1</sup>

**Table 3.** Task List & Results of Decommissioning Cyclotron Facility at ANL.

Section	Contents
Project planning and engineering	Quality assurance Project control Training Health physics Safety
Decommissioning operations	Preparatory activities Radiological conditions and activities D&D activities
Verification survey	Cost (\$3.9 million) Exposure (0.436 person-rem) Waste volume ( $5.1 \times 10^2$ Ci, 177 ton)

**Table 4.** Low Level Radioactive Waste (LLRW) and Mixed Waste Package from ANL cyclotron Decommissioning.

Contents	Number of Packages	Volume* (ft <sup>3</sup> )	Weight* (lb)	Activity (Ci)	Maximum Dose Rate (mR h <sup>-1</sup> ) at 1m
LLRW	74	6,971	377,159	$5.1 \times 10^2$	50.0
Mixed Waste	6	115	12,811	$2.9 \times 10^3$	0.20
<b>Total</b>	<b>80</b>	<b>7,086</b> ( $\approx 200\text{m}^3$ )	<b>389,970</b> ( $\approx 177\text{ton}$ )	<b><math>5.1 \times 10^2</math></b>	

\*Including liners, when applicable.

정부에 의해 지정된 처분장에 폐기할 수 있다.

ANL에서 사이클로트론 해체시 상대적으로 두꺼운 금속 물체는 44 ft<sup>3</sup> ( $\approx 1.25 \text{ m}^3$ ) 크기의 B-12 상자로 이동하였으며 다른 일반 물질들은 105 ft<sup>3</sup> ( $\approx 2.97 \text{ m}^3$ ) 크기의 B-25 상자로 이동하였다. 약 5.3 ton의 납 중 20 % 정도는 재사용되었고 나머지는 혼합 형태의 방사성 폐기물로 처분되었다. 제염해체 과정에서 액체 방사성 폐기물은 350 gallon ( $\approx 1,300 \text{ L}$ )이 발생되었다. ANL에서 해체한 사이클로트론의 주요 해체 결과는 Table 3, 4와 같다[8].

1997년 유럽연합 집행위원회(EUR, European Commission)는 유럽에서 250여기가 운영되고 있는 가속기들

의 미래 해체 비용을 감소시키기 위해 ‘해체 입자가속기의 방사화 및 비용 결과 평가(Evaluation of the radioactive and economic consequences of decommissioning particle accelerators)’란 과제를 제안하였고 43 MeV 사이클로트론, 200 MeV 전자가속기, 6 GeV의 양성자 싱크로트론이 선정되었다. 사이클로트론의 해체 시설로 선정된 VUB (Vrije Universiteit Brussel) 사이클로트론은 1985년에 벨기에 브뤼셀에 Brije 대학에 건설되었다. VUB 사이클로트론은 에너지를 변화시킬 수 있으며, 다중 입자, 최대 43 MeV의 양성자 에너지 그리고 최대전류 100  $\mu\text{A}$ 의 특징을 가지고 있다[5].

**Table 5.** Waste Volumes and Decommissioning Costs for Each of the Scenarios (at VUB).

	SCENARIO	WASTE	VOLUMES (tons)	COSTS (k€)	Costs (w/o waste management, k€)	
Immediate	German scenario	LLW (concrete)	686	7,700	2,000	
		LLW (metals)	5			
	French scenario	LLW	14	4,340	3,220	
		VLLW <sup>1)</sup>	2,105			
Deferred	British scenario	LLW	648	3,550	1,480	
		LLW	0,005			980
Immediate	German criteria, EC-recommended clearance levels	LLW (concrete)	74	1,545	895	
		LLW (metals)	5			
	French criteria, EC-recommended clearance levels	LLW	13	810	700	
		VLLW	78			
	British criteria, EC-recommended clearance levels	LLW		91	830	540

**Table 6.** Estimated Dismantling Costs of VUB Cyclotron in Brussel [5].

Section	Costs
Dismantling and approval planning	90,000 €
Dismantling of plant components	2,500 € ton <sup>-1</sup>
Packaging of plant components	500 € ton <sup>-1</sup>
Dismantling of activated concrete (50 cm layer)	
- Mechanical means (including packaging)	-3,500 € m <sup>2</sup>
- Detonation 650	-650 € m <sup>2</sup>
- Packaging of detonation debris	-1,250 € m <sup>2</sup>
· Dismantling of non-activated concrete	
- Lightweight mechanical means	-1,000 € m <sup>2</sup>
- Large-size equipment	-160 € m <sup>2</sup>
- Detonation	-225 € m <sup>2</sup>

VUB 사이클로트론 해체는 1998년에 수행되었으며, 사이클로트론 주변 콘크리트 분석 결과 방사화된 핵종은 전체의 70%가 <sup>152</sup>Eu으로 나타났고 25%가 <sup>60</sup>Co 그리고 <sup>134</sup>Cs, <sup>154</sup>Eu, <sup>54</sup>Mn 등이 방사화된 핵종으로 나타났으며 최대 비방사능은 2,200 Bq kg<sup>-1</sup>으로 확인되었다. 보고서에서는 비용을 산정하기 위해 영국, 독일, 프랑스에 대하여 규제해제농도기준(clearance level)에 따라 방사성 폐기물량을 추정하고 그에 따른 처리비용을 Table 5와 같이 계산하였으며 처분 비용 계산시 적용된 기준들은 Table 6과 같다[5].

국가별 방사성 폐기물 규제해제농도기준은 아래와 같다[5].

**Table 7.** Different Decommissioning Scenarios about Four Activation Levels.

0 ~ 0.4 kBq kg <sup>-1</sup>	Materials which can be considered for free release under UK conditions
0.4 ~ 1 kBq kg <sup>-1</sup>	Materials which can be considered for free release under EC conditions
1 ~ 200 kBq kg <sup>-1</sup>	Materials which can be considered for melting and recycling (German conditions)
200 kBq kg <sup>-1</sup> ~	Materials which have to be considered for nuclear disposal

EU에서 제시한 사이클로트론의 해체 비용은 시나리오에 따라 최소 8.3 백만유로(약 12억원)에서 최대 77 백만 유로(약 100 억원) 수준으로 나타났다. Table 5에서 국가별로 비용이 다른 것은 방사성 폐기물을 관리하는 비용과 인건비의 차이로 나타난다. 인건비는 독일이 가장 높았으며 숙련 정도에 따라 다른 인건비를 적용하여 계산하였다. 주목할 만한 사항은 독일과 프랑스는 인건비가 비슷하나 프랑스는 극저준위(VLLW) 방사성 폐기물을 적용하고 있기 때문에 극저준위 방사성 폐기물의 처분 비용은 프랑스 저준위 방사성 폐기물 비용의 1/10, 독일 저준위 방사성 폐기물 비용의 1/25를 적용함으로써 방사성 폐기물 관리 비용 측면에서 독일보다 저렴하게 나타났다. 다만 방사성 폐기물 처분 비용을 제외한 값은 프랑스가 더 높게 나타나는 것으로 추정되었다. 방사성 폐기물량은 시

나리오에 따라 80 톤에서 2,100 톤으로 나타났다.

### 2.3 ANL 및 EUR의 사이클로트론 해체 사례 결과 및 분석

사이클로트론 운전시 발생하는 중성자로 인해 생성되는 주요 장반감기 동위원소는 그리 많지 않았고 선행된 사례를 통해 살펴본 바와 같이 해체로 인한 많은 양의 저준위 고체 방사성 폐기물과 이에 따른 처리 비용 문제가 있다.

결과적으로 해체시 발생하는 주요문제는 방사성 폐기물과 관련되어 있고 방사성 폐기물 발생량을 줄인다면 전반적인 해체비용을 감소시킬 수 있다는 것을 의미한다. 본 연구에서 사이클로트론 해체시 다루고자 하는 문제와 그 내용을 정리하면 다음과 같다.

1. 국내 사이클로트론 해체시 해체와 관련된 안전한 절차 및 계획 요건 수립
2. 국외 사이클로트론 해체 사례를 바탕으로 해체시 발생하는 방사성 폐기물처리비용 감소 방안

## 3. 국내 사이클로트론 해체 사례 분석

사이클로트론의 해체와 관련하여 국내에서도 2012년 12월 서울대학교병원에서 사이클로트론의 해체 작업이 수행되었다. 1994년 설치되어 서울대학교병원에서 사용하던 사이클로트론(모델 TR-13 제조회사 Ebc.)을 성균관대학교에 재설치하기 위함이다. 사이클로트론의 부품 중 타겟트리(Tagetry), 스톱퍼(Stopper), 디(Dee) 및 전자석의 일부 부품은 (p,n)반응이 이루어지는 주요 위치이므로 방사화 가능성이 높으며 특히 타겟트리(Tagetry) 및 스톱퍼(Stopper)의 경우 실제 방사화가 되었음이 확인되었고 표면 방사선량율이 최대 1.21 mSv hr<sup>-1</sup>가 측정되었으나 주변 콘크리트 쪽에는 방사화가 진행되지 않은 것으로 확인되었다. 사이클로트론 부품과 차폐체의 방사선량율은 Table 8과 같다.

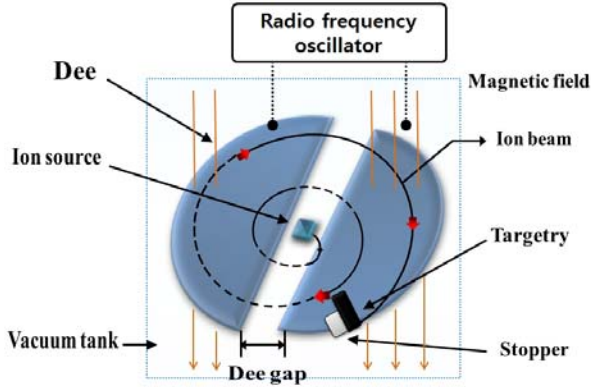
**Table 8.** Dose Rate after Cyclotron Dismantling.

Site	Dose rate ( $\mu\text{Sv hr}^{-1}$ )			
	surface	10 cm	50 cm	100 cm
Stopper	1320	100	6.2	2.1
Beam Extraction	8.7	1.3	0.2	0.15
Targetry	180	30	5.2	0.3
Beam Collimator	27	1.3	0.30	0.15
DEE(up)	18	2.3	0.23	0.15
DEE(down)	25	2.5	0.46	0.15
Shield plate(up)	98.9	7.0	1.01	0.2
Shield plate(down)	60	6.0	0.22	0.15
Target body	37.5	7.6	0.48	0.20
Targetry side	7.2	1.2	0.54	0.15

**Table 9.** Type of Transport Package and Major Properties.

	Bin(Stopper, Targetry)	Body(Magnet, Cover)	Shielding Housing
Radioisotope*	$^{22}\text{Na}$ , $^{54}\text{Mn}$ , $^{56}\text{Co}$ , $^{58}\text{Co}$ , $^{60}\text{Co}$ , $^{65}\text{Zn}$	$^{54}\text{Mn}$ , $^{22}\text{Na}$ , $^{56}\text{Co}$ , $^{40}\text{K}$ , $^{60}\text{Co}$ , $^{65}\text{Zn}$	$^{54}\text{Mn}$ , $^{40}\text{K}$ , $^{60}\text{Co}$
Maximum estimated Radioactivity	61.61 MBq	500 MBq	92.3 MBq
Surface dose rate	$\sim 0.5 \text{ mSv h}^{-1}$	$\sim 0.0005 \text{ mSv h}^{-1}$	$\sim 0.005 \text{ mSv h}^{-1}$
Weights	11.2 kg	20,000 kg	9,230 kg

\*not including backgrounds :  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  decay series and  $^{40}\text{K}$ .



**Fig. 1.** The Basic Structure of Cyclotron.

사이클로트론 부품 운반물은 방사선 안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙 운반물 및 덧포장의 등급 분류기준에 따라 모두 제3종 황색운반물 등급이고, 표면오염검사를 실시하여 관리구역에서 반출하는 물품 표면의 방사성 물질 오염도가 허용표면오염도의 1/10이하로 반출하였다. 그리고 해체 비용은 안전관리비용 8천만원, 초기 예상비용은 2억원이고 최대 3억원을 예상하였으나 그 이상 비용이 사용되었다. 현재 서울대학교병원 사이클로트론 사용시설은 해체 작업 및 제염작업이 완료되면서 일반시설로 전환되었다. 이는 국내 최초의 사이클로트론 해체 사례이다. 폐기가 아닌 이전 작업이었기 때문에 관련 비용이나 방사성 폐기물 발생량은 폐기의 경우와 직접적인 비교가 어려운 점이 있지만, 이전 작업에도 상당한 비용이

투입되었고 원래의 계획보다 더 많은 비용과 인력이 소모되었다.

#### 4. 국외 사이클로트론 해체 조건 관련 기준

##### 4.1 미국원자력규제위원회(NRC)의 해체 자금 계획 (DFP) 요구

미국의 경우 성공적인 해체 작업의 수행을 위해서 사이클로트론 시설의 건설단계부터 해체에 대한 계획을 수립한다. NRC에서는 10 CFR Part 30.35를 통해 120일 이상의 반감기를 가진 방사성핵종이나 정해진 양을 초과하는 방사성핵종을 생산하는 시설은 허가를 받을 때 해체 자금 계획(DFP; Decommissioning Funding Plan)을 제출할 것을 요구하고 있다[9]. 이는 사이클로트론 사용자로 하여금 선행되는 투자금으로 미리 해체에 대한 자금을 준비하는 것인데, 사이클로트론의 에너지 크기 및 시설의 규모에 따라 보증보험 금액 또한 달라질 수 있다. 해체 자금 계획(DFP)에 포함되어야 하는 사항은 다음과 같다 [9].

- 해체에 대한 비용 견적
- 해체 보증금 보장 방법에 대한 설명
- 운영기간동안 정기적인 비용 견적 및 관련 자금 수준을 조정하기 위한 수단에 대한 설명
- 견적비용의 인증
- 금융 보증 서명 원본

NRC는 사이클로트론과 관련하여 해체 비용이 \$200,000~1,000,000 정도이며 자체 차폐형이 아닌 경우 더욱 비싸질 수 있음을 나타냈고 실제 이 비용을 소유하고 있을 필요는 없으나 비용을 보증할 수 있는 문서로 제시하여야 한다고 하였다. 실제로 2010년 West Virginia University에 설치하고자 한 IBA (Ion Beam Application)사의 자체 차폐형 GE PET trace Self-Shielded Cyclotron에 대하여 방사화 될 수 있는 핵종들과 해체 자금 계획(DFP) \$356,263.68 (약 4억원)을 구체적으로 승인하였다[10,11]. 이후 사이클로트론 해체 자금 계획(DFP)을 \$150,000로 제출한 International Cyclotron Inc.에 대해 미흡한 해체 자금 계획(DFP)제출로 인한 벌금과 허가 중지를 내린 바 있다[12].

국내의 경우 사이클로트론 포함 원자력 시설 운영 후 해체가 결정되면 사전 준비 작업을 통해 시설의 특성에 따른 해체 방법을 검토하여 해체 계획을 수립한다. 해체 계획 수립 후 규제 기관으로부터 승인을 받게 되면 해체가 수행된다. 이러한 과정은 해체에 대한 기준이 명확할 경우 효율적으로 수행될 수 있으나, 시설 해체에 대한 절차나 방사성 폐기물 관련 기준이 명확하지 않을 경우 혼란을 야기할 수 있다. 서울대학교병원 사이클로트론 역시 운영 후 해체가 결정되었을 때 해체 계획이 수립되었고, 성공적으로 이전 작업을 수행하긴 하였으나 예상보다 더 큰 비용과 시간이 소요되었다. 이 후 사이클로트론의 해체를 고려하던 병원에서 해체를 보류하는 상황도 나타나고 있다.

앞서 해외 사례로 볼 때 사이클로트론의 해체 비용은 방사성 폐기물의 양과 처분 방식에 따라 크게 증가될 수 있음을 확인하였다. 사이클로트론 30기 이상이 가동되고

있는 국내 상황에서 해체에 관한 적절한 절차가 수립되어 있지 않다면 많은 양의 저준위 방사성 폐기물의 발생과 큰 방사성 폐기물 처리 비용 등으로 혼란을 야기할 수 있을 것으로 예상된다. 이에 시설 건설시 해체계획을 세우는 해체 자금 계획(DFP) 방안은 추후 해체가 이루어질 때 신뢰할 만한 해체 계획을 마련하고 예상치 못한 조기 해체에 대비할 수 있을 것이라 판단된다. 그대로 해체 자금 계획(DFP)을 도입하는 것은 무리가 있을 수 있기 때문에 현 국내 실정에 맞는 해체 자금 계획(DFP) 적용방안 체계를 수립할 필요성이 있다. 특히 사이클로트론의 방사화 영향력이 큰 타겟트리(Targetry), 스톱퍼(Stopper), 전자석(Magnet), 디(Dee) 같은 부품의 해체시 처리 방안은 제조사(판매사)측과 사전 논의를 통하여 해체 자금 계획(DFP) 문서에 마련해야 할 것이다. 이를 바탕으로 추후에 해체가 이루어질 때 필요에 따라 변경·보완하여 적절한 예산으로 효율적인 해체의 자체평가기준으로 사용할 수 있을 것이라 예측된다.

4.2 방사성 폐기물 규제해제 또는 자체 처분 절차

해체 비용의 감소를 위해선 필수적으로 방사성 폐기물 자체처분 조건을 수립해야 한다. 이는 사이클로트론의 해체시 발생하는 많은 양의 저준위 고체 방사성 폐기물의 처리 비용을 감소할 수 있다. IAEA Technical Reports Series No.414 보고서에서는 일반적인 관점에서(원자력 시설의 활동수준과 국가 기준 분류에 따라 상이한 것을 인정하고) 사이클로트론 해체시 발생하는 방사성 폐기물의 처리 절차 방법을 Fig. 2와 같이 제시하였다[13].

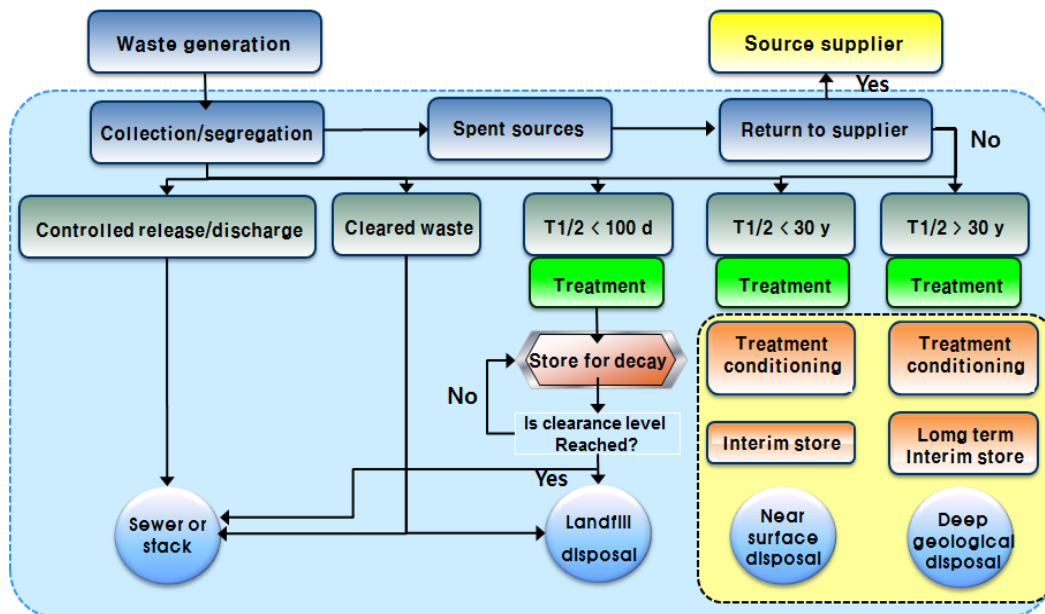


Fig. 2. Management of a Waste Management Strategy.

IAEA는 방사성 폐기물의 방사능도와 반감기에 따른 처리 단계를 수립하였고 또한 제염이 가능한 수준의 방사성 폐기물은 그 효용가치에 따라 자체처분에 의한 방식과 재사용 처분 방식을 권고하고 있다. 미국의 경우 제염된 콘크리트의 약 70%가 도로 조성용 기반 자재로 사용되고 있으며 재사용이 부적합하거나 인허가를 받지 못한 고준위 또는 중준위급 방사성 폐기물은 그 사용이 제한적이기 때문에 시설 인근부지에서 재처리되거나 파쇄하는 방식을 적용하고 있다[14,15]. 이러한 방사성 폐기물의 분류 및 처리 방법의 수립은 방사성 폐기물 처분 비용의 감소 뿐만 아니라 새로운 자원으로의 재사용이라는 경제적 이득을 가져올 수 있다.

현재 국내 방사성 폐기물 재사용 기준은 수립된 바 없다. 국제적으로 재사용 기준은 규제해제 기준과 동일하며 방사성 폐기물 재사용에 의하여 일반인들에 대한 피폭선량이 개인에 대해서는  $10 \mu\text{Sv y}^{-1}$ 와 집단에 대해서는  $1 \text{man-Sv y}^{-1}$  미만으로 규정된다. 이러한 기준치에 따라 재사용 대상이 되는 방사성 폐기물들은 제염 후 재사용 시나리오를 수립하여 예상피폭선량 평가를 수행하고, 잔류 방사능이 피폭선량 기준에 따라 도출된 핵종별 규제해제 농도기준치 이하임을 입증해서 안전성을 확보한 뒤 재사용되고 있다.

국내의 방사성 폐기물 규제해제(이하 자체처분)에 관하여는 원자력안전법 등에 정의되어 있다. 원자력안전법 시행령에 따르면 자체처분을 “원자력관계사업자가 발생시킨 방사성 폐기물 중 위원회가 정하는 값 미만의 방사성 폐기물을 소각, 매립 또는 재활용 등의 방법으로 처분하는 것”으로 정의하고 있다. 그리고 원자력안전법 시행규칙 제 99조 및 원자력안전위원회고시 제 2012-29호 ‘방사성 폐기물의 자체처분에 관한 규정’에서 20여개의 단반감기 베타/감마 방출핵종에 대한 규제해제 농도를 명시하고 있고, 위의 20개 핵종 이외의 기타 방사성핵종의 경우 개인에 대한 연간 피폭방사선량이  $10 \mu\text{Sv}$  미만이고 집단에 대한 총 피폭방사선량이  $1 \text{man-Sv}$  미만이 되는 것이 입증되는 농도로 규정하고 있다[16,17]. 이러한 법적 기준을 근거로 자체처분 신청시 시료가 대상 방사성 폐기물에 대한 대표성을 확보하고 있는가의 여부를 검토하여 방사성 폐기물 표면방사선량률 측정의 적절성 및 핵종분석 방법론 및 결과의 적합성 등을 근거로 재사용 승인하는 과정을 거친다. 향후 사이클로트론의 해체 방사성 폐기물 자체처분 및 재사용 처분 계획도 이를 바탕으로 평가하는 것이 바람직하다[17].

## 5. 논의

본 연구는 국외 사이클로트론 해체 사례와 국내 사이클로트론 이전 사례를 바탕으로 국내 사이클로트론 해체시 적용할 수 있는 요건들을 분석하였다. 이를 위해서 NRC (Nuclear Regulatory Commission)의 해체 자금 계획(DFP; Decommissioning funding plan) 및 IAEA technical report series 보고서의 방사성 폐기물 자체처분 처

리 절차를 살펴보았다. 선행된 해체 사례와 본 논문에서 다루고자 하는 연구문제를 중심으로 필요한 기준수립 사항을 제시하면 다음과 같다.

### 5.1 해체 자금 계획 도입

사이클로트론 해체는 사용자가 설치하는 순간 필연적으로 경험해야할 사항이며, 가속 에너지와 시설 규모의 정보를 통해 사이클로트론 건설시 해체 계획을 수립하는 해체 자금 계획(DFP) 방안이 필요할 것으로 판단된다. 현재 국내에서는 해체를 결정한 시점에서 해체계획서를 원자력안전위원회에 제출하도록 되어 있다. 방사성동위원소등의 사용허가를 위해서는 현재 원자력안전법 시행령 79조에 따라 위원회가 정하는 바에 의한 허가신청서를 제출하도록 되어 있으며 시행규칙 63조에 따라 방사선안전보고서, 안전관리규정, 장비구입, 인력기준, 보상계획을 제출하도록 되어 있다. 다만 국내에는 사용자가 방사선발생장치 사용허가시 해체 자금 조달 방법에 대한 서류를 제출하지 않고 있기 때문에 해체 자금 계획의 도입도 논의할 필요가 있을 것으로 판단된다. 상세한 내용의 해체 계획을 미리 결정해야할 필요는 없으나, 해체시 필요한 자금과 방법 등은 사이클로트론의 에너지와 용도에 따라 대략적으로 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

### 5.2 방사성 폐기물 자체처분 및 재사용 절차 도입

또한 사이클로트론 해체시 발생하는 방사성 폐기물의 자체처분 및 재사용의 이득적인 측면을 고려하여 국내 실정에 맞는 처리 절차를 구축할 필요가 있다. 이는 성공적인 사이클로트론 해체를 위해 기술적인 측면(해체 절차, 제염 기술 등)과 안전성 측면(잔류 방사능, 예상선량 등)을 모두 고려하여 방사성 폐기물의 재사용 대상을 적절히 선정해 방사성폐기물처분장으로 가는 경우와 구분할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 사이클로트론 해체 방사성 폐기물의 재사용시 발생할 수 있는 방사선의 부정적 인식관련, 지역주민들의 반발 등이 발생할 수 있으므로 다양한 시나리오 검토를 통해 안전하고 합리적인 재사용이 이루어질 수 있는 기준 수립에 관한 연구의 필요성도 요구된다.

## 6. 결론

국내 사이클로트론 해체 기술 개발 및 적용은 이제 시작 단계로 볼 수 있다. 서울대학교병원에서 성균관대학교로 이전 해체 작업이 처음 수행되었을 뿐이다. 본 연구는 국내 사이클로트론 해체시 적용할 수 있는 주요 해체 기준과 개선방안을 분석하였다.

해체 자금 계획(DFP)의 제출은 사용자로 하여금 설치시 부담으로 다가올 수 있지만 미래 해체 비용의 감소와 사이클로트론 건설단계의 차폐체 설계방안 개선 및 무분별한 사이클로트론의 설치 방지 등의 효과를 가져올 수 있을 것으로 예측된다. 다만 현 상황에서 시급하게 해체 자금 계획(DFP)을 도입하기 보다는 먼저 국내 사이클로

트론 해체 시나리오를 구성하고 해체 자금의 기준 설정을 위해 안전관리 및 해체계획 수립 비용, 방사성 폐기물 처리 비용, 주요 방사화 핵종에 대한 자체처분 기준 설정, 전문인력의 인건비, 주요 기자재의 파쇄 및 제염 작업 비용 등에 대한 상세 검토가 이루어져야 한다. 국제적인 추세로 볼 때 사이클로트론의 해체 비용은 설치 비용보다 상회하는 것으로 볼 수 있으며 방사성 폐기물 자체처분 및 재사용은 사이클로트론 해체 비용을 줄이는 효과적인 방법이다. 시설에 따라 해체시 발생하는 방사성 폐기물의 양을 먼저 파악하고 비용을 예상하여 안전하고 합리적인 재사용 처리절차를 마련하여야 한다.

본 연구를 통해 국내 사이클로트론 해체시 방사성 폐기물 처리 비용의 감소뿐만 아니라 국내 규제 및 제도 방안 개선, 향후 사이클로트론을 포함한 원자력시설 해체에 대비할 수 있는 기초 자료를 체계화하는데 도움이 될 것이라 예상된다.

**약어 및 영단어 표현**

- DFP: Decommissioning Funding Plan 해체 자금 계획
- ANL: Argonne National Laboratory 아르곤국립연구소
- EUR: European commission 유럽연합 집행위원회
- IAEA: International Atomic Energy Agency 국제원자력기구
- NRC: Nuclear Regulatory Commission 미국원자력규제위원회
- PET: Positron Emission Tomography 양전자방출 단층촬영술
- LLRW: Low Level Radioactive Waste 저준위 방사성 폐기물
- VUB cyclotron: Vrije Universiteit Brussel cyclotron 브뤼셀브리예대학교
- VLLW: Very Low Level Waste 극저준위 방사성 폐기물
- Tagetry (타겟트리)
- Stopper (스토퍼)
- Dee (디)

**감사의 글**

본 연구는 원자력연구개발사업(과제명:방사선원 안전성 검증 선진기술 개발)의 지원으로 수행되었습니다. 서울대학교병원 사이클로트론 해체 작업과 관련하여 자료를 제공해주신 (주)엑트 관계자분들에게 감사드립니다.

**참고문헌**

1. 채중서. 의료용 사이클로트론 수출 기반 확대 방안 연구. 한국원자력의학원. 2007.
2. 채중서. KOTRON-13과 상용 PET 사이클로트론의 최근 기술 동향. 핵의학 분자영상. 2005;39(1):1-8.
3. 김상진. 원자력시설 영구정지 후 해체전 단계의 규제 절차 개발. 한국원자력안전기술원. 2011.

4. 박승국, 최운동, 문제권. 원자력발전소 시설특성 조사 및 해체폐기물량 예측 평가. 한국원자력연구원. 2012.
5. European Commission Nuclear Safety and the Environment. Evaluation of the radiological and economic consequences of decommissioning particle accelerators (REPORT EUR 19151). March 1999.
6. IAEA SAFETY STANDARDS SERIES NO. WS-G-2.2. Decommissioning of medical, industrial and research facilities. IAEA, 1999.
7. Carroll LR. Predicting long-lived, neutron-induced activation of concrete in a cyclotron vault. American Institute of Physics. 2001.
8. Collins EL, Boyance J, Clark FR, Tinnin DJ, Williams A. Decontamination and decommissioning of the 60" cyclotron facility at Argonne National Laboratory-East project final report. ANL/D&D/01-1. 2011.
9. U.S. NRC. Financial assurance and recordkeeping for decommissioning (10 CFR 30.35). Available in <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part030/part030-0035.html>.
10. U.S. NRC, Additional information concerning application for new license NRC documents (ML101260158). March 1, 2010.
11. U.S. NRC, Re; Statement of intent (ML101260167), April 29. 2010.
12. U.S. NRC, International Cyclotron, Inc. Notice of violation and proposed imposition of civil penalties - \$7,000 - and order suspending licensed activities within 60 days (ML11347A244). December 23, 2001 available in <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1134/ML11347A244.html>.
13. IAEA. Decommissioning of small medical, industrial and research facilities (IAEA Technical Reports Series NO.414). 2003.
14. 이재민, 양희창, 이수홍. 원전 해체에 의한 부지 및 폐기물 재이용 안전성 검증 기술 개발. 한국원자력안전기술원. 2009.
15. 이재민, 양희창, 이수홍. 원전 해체에 의한 부지 및 폐기물 재이용 안전성 검증 기술 개발II. 한국원자력안전기술원. 2010.
16. 원자력안전위원회 고시 제2012-29호, 방사성폐기물의 자체처분에 관한 규정. 01.2012.
17. 서범경, 홍상범, 정관성. 대형 해체부지 재이용 및 대량 해체 폐기물 재활용 기준 및 검증지침 개발. 한국원자력안전기술원. 2012.



## A Study on the Adoption of Cyclotron Decommissioning Plan Criteria by the Analysis of Domestic Relocation and Abroad Dismantling Practices

Rina Woo\*, Yongmin Kim\*, Minchul Song<sup>†</sup>, Daehyung Cho<sup>†</sup>, Jaesung Lee<sup>†</sup>, and Wantae Kim<sup>†</sup>

\*Department of Radiological Science, Catholic University of Daegu, <sup>†</sup>Korea Institute of Nuclear Safety

**Abstract** - There are many reasons for decommissioning of cyclotron such as not only age-related deficiency, any serious wear or damage but also relocation, upgrade and changing mission. Decommission of cyclotron in USA and EU give rise to a lot of low-level radioactive waste and costs. Various research on decommissioning of particle accelerator have been carried to reduce the cost of decommissioning in USA and EU. In USA, the NRC require DFP (Decommissioning Funding Plan) to authorized licenser by 10 CFR Part 30.35. To resolve radioactive waste problem and reduce the estimated cost of cyclotron decommissioning, we should consider technical aspects (decommissioning procedures, decontamination techniques, etc.) and safety aspects(residual radioactivity, the expected dose, etc) for decommissioning. In this study, we analyzed practical information on the decommissioning of cyclotron in ANL (Argonne National Laboratory) and Belgium (EU). And we investigated the experience on the cyclotron relocation from SNUH (Seoul National University Hospital) to SKKU (Sungkyunkwan University). From these results, we provide the basic data for establishing of relevant standards on domestic cyclotron decommissioning. It is necessary to adopt the DFP for safe and economic decommissioning and waste recycling. These result could be utilized for the establishment on the standards and useful requirements.

**Keywords** : Cyclotron, Decommissioning, Activation, DFP (Decommissioning Funding Plan), Clearance