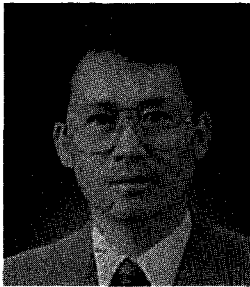


# 방사성폐기물 핵종 분석장치 개발

강 덕 원

한전 전력연구원 원자력연구실 책임연구원



원자력발전소에서 발생하는 방사성 폐기물 드럼 안에 있는 방사성 핵종과 그 양을 비파괴적인 방법으로 분석할 수 있는 방사성 폐기물 핵종 분석 장치가 개발되었다.

한전 전력연구원이 한국원자력연구소와 공동으로 개발한 이 장치는 기존의 계측 방법과 달리 슬라이드형 콜리메이터를 이용해 방사선량을 변화에 따라 드럼 안의 고방사능까지 효율적으로 측정할 수 있는 시스템을 갖추고 있다.

현재 이 시스템은 실험실 성능 시험을 마치고 고리 제4폐기물 저장고에 설치되어 시험 운전중이며, 성능 검증 시험을 마친 후 전 원전에 설치될 예정이다.

## 연구

자력 관련 시설에서 발생된 중·저준위 방사성 폐기물을 영구 처분장으로 운송·

처분코자 할 때는 방사성 폐기물 개개의 이력 관리, 즉 내재된 방사성 물질의 종류(핵종), 각각의 방사능 농도, 총방사능 및 폐기물 형태 등에 관한 사항들이 파악되어야 한다.

국내의 방사성 폐기물 인도 규정에서도 방사성 폐기물 내의 주요 핵종별 방사능 농도와 총방사능량을 영구 처분장으로 이송하기 전에 정확히 측

정하여 그 기록을 폐기물과 함께 인도하도록 요구하고 있다.

방사성 폐기물은 다양한 형태의 폐기물로 용기에 담겨져 있기 때문에 일반적인 파괴에 의한 화학 분석법으로는 작업자의 피폭, 2차적 방사성 폐기물의 발생 및 장시간 화학 처리 시간의 소요 등으로 인하여 핵종 분석이 매우 어렵다.

따라서 최근 일부 선진국에서는 발전소 폐기물 stream이나 고화 처리 전의 폐기물로부터 직접 시료를 채취

하여, 감마 핵종 분석 장치에 의해 측정이 쉬운 대표 감마 핵종과 측정이 어려운 알파나 베타 핵종들간의 상관 계수(척도 인자, scaling factor)를 도출하는 방법과 드럼 외부로부터 감마 방출 핵종의 방사능을 측정하는 비파괴 장치를 이용한 드럼 내 핵종별 방사능량을 측정하는 방법이 활용되고 있다.

고리 원자력발전소의 운전 상태에 따라 척도 인자를 예측할 수 있는 전산 코드를 개발하고, 이의 검증을 위

해 폐기물 stream별로 핵종별 방사능량을 산정하기 위해 화학 분석을 실시하였다.

이 전산 코드는 핵종 분석 시스템의 주 컴퓨터 내에 탑재시켜 핵종 분석 장치의 일부분으로써 역할을 할 수 있도록 하였다.

핵종 분석 시스템의 구성은 크게 드럼 내 감마 핵종을 분석하는 장치, 중·저준위 드럼을 입·반출시키는 대차와 스택커 크레인, 그리고 핵종 분석 결과를 드럼 표면에 마킹하는 잉크젯 프린터 등으로 구성되어 있다.

중준위 폐기물 드럼(폐수지 및 폐 필터 드럼)은 드럼의 입·반출시 핵종 분석 장치의 주변 백그라운드 및 취급의 안정성 등을 고려하여 드럼 단위로 처리토록 하였다.

저준위 드럼(잡고체 및 농축 폐액 드럼)은 20개의 드럼 단위로 구성된 랙(rack) 단위로 처리토록 설계하였다.

핵종 분석 시스템의 통합 운전은 기능에 따라 상위 레벨인 중앙 감시 및 제어 시스템과 하위 레벨인 대차, 스택커 크레인, 핵종 분석 장치 및 잉크젯 프린터의 운전으로 구분되어진다.

이들 단위 장치와 주제어 컴퓨터간의 통신은 RS-232C 포트를 이용한 동일한 통신 프로토콜(protocol)로 구성된 통신 시스템을 이용토록 하였으며, 하위 레벨의 모든 운전 과정은



국내에서 개발한 드럼 회전형 핵종 분석을 위한 콜리메이터 구동 및 제어 장치

상위 레벨인 중앙의 개인용 컴퓨터에 의해서 감시 및 제어된다.

#### 드럼 분할법에 의한 방사능 분석

일반적으로 폐기물 드럼 내 방사성 핵종의 방사능을 측정하기 위해서는, 드럼에 채워진 폐기물이 균질하게 분포되어 있으며 폐기물의 각 매질에 의한 자기 흡수가 없다는 가정하에 측정이 이루어지나, 실제로는 폐기물 드럼의 측정 및 평가시 이러한 가정에 의해 많은 오차가 발생하게 되므로 어떻게 하면 이러한 오차를 최소화 시킬 수 있는가 하는 것이 정확한 측정 및 평가의 관건이라 할 수 있겠다.

최근에 알려진 측정 기술 중 감마선 분할 측정(SGS Segmented Gamma Scanning)법이 있는데, 이 측정법은 균질/비균질 폐기물과 저밀도/고밀도 폐기물의 분석에 적합하게 개발되었다.

SGS 방법에서는 폐기물 드럼의 비균질성에 의한 오차 및 자기 흡수에 의한 영향을 줄이기 위해 다음과 같은 3가지 방법을 채택하고 있다.

- ① 높이에 따른 비균질성을 보완하기 위해 구간별로 나누어 측정한다.
- ② 드럼의 반경 방향으로의 비균질성을 보완하기 위해 각 구간의 측정시 드럼을 회전시킨다.
- ③ 각 구간의 시료에 의한 감쇠를

보정하기 위해 밀도를 측정한다.

폐기물 드럼 내의 방사능을 구하기 위해서는 다음과 같은 기본적인 원리에 의해 검출기의 측정값으로부터 방사능을 계산할 수가 있다.

고순도 게르마늄 검출기를 이용한 폐기물 드럼 측정의 기본적인 형태는 <그림 1>과 같은 기하학적 형태로 구성되어 있다.

**핵종 분석 장치 특성 실험**

**1. 감마 핵종 분석 장치의 개요**

핵종 분석 장치는 1대의 시스템으로 저준위 드럼과 고준위 드럼을 측정하도록 설계하였고, 장치의 전 자동화, 운전 및 유지·보수시의 용이, 사고나 고장시의 안전 대책, 그리고 적절한 방사선 차폐가 되도록 한 것 등을 기본적인 설계 개념으로 하여 제작하였다.

**가. 드럼 분할**

드럼 높이에 따른 매질의 비균질성을 보완하기 위해 드럼을 분할, 측정하도록 설계하였으며, 분할수는 8개 내지 9개 정도 되도록 하여 그에 맞는 검출기 콜리메이터의 크기를 결정하였고 검출기가 상하 이동을 할 수 있도록 설계하였다.

**나. 드럼 회전**

드럼 반경 방향에 대한 매질의 비균질성에 의한 측정 오차를 최소화하기 위해 드럼을 회전시키면서 측정할 수 있도록 하였다.

**다. 드럼과 검출기와의 거리**

드럼 내 선원 위치에 따른 응답 오차를 최소화하고 동시에 충분한 계수율을 얻을 수 있도록 드럼과 검출기 간의 최적 거리를 선정하였다.

거리의 일반적인 설정 기준은 드럼과 검출기와의 거리가 드럼 반경(30cm)의 3배, 혹은 드럼 높이

1/2(40cm)의 3배가 최적 거리로 알려져 있어, 이와같은 기준에 의거, 검출기와 드럼과의 거리를 설정하였다.

**라. 검출기 콜리메이터**

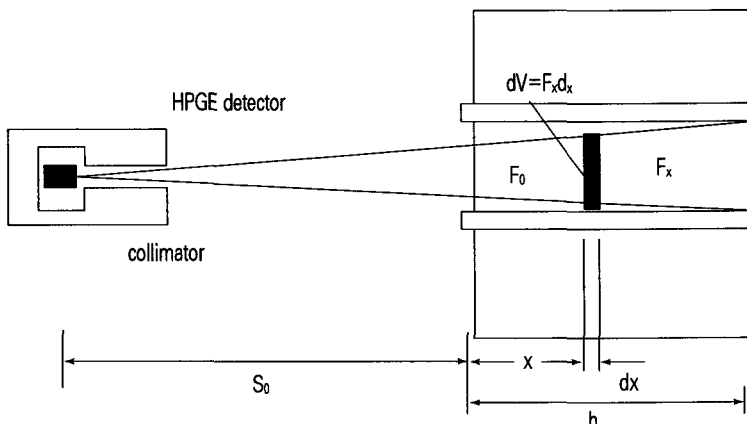
검출기 콜리메이터는 핵종 분석 장치의 하나로 가능한 한 원자력발전소에서 발생하는 모든 폐기물 드럼의 선량률 범위를 측정하여 분석할 수 있도록 설계하였다.

측정 가능한 드럼의 표면 선량률 범위는 검출기 콜리메이터를 연 상태에서 1mR/h ~ 200mR/h이고, 검출기 콜리메이터를 닫은 상태에서는 200mR/h ~ 50R/h까지이다.

이것은 검출기의 불감 시간을 고려해 고선량률 범위와 저선량률 범위의 2단계로 나누어 측정하고, 검출기 콜리메이터의 입구 크기를 조절할 수 있도록 설계하여 정해진 표면 선량률 이상에서는 콜리메이터 입구부가 자동으로 닫히고, 3개의 슬릿을 통해 콜리메이터가 열려있을 경우와 비교해 방사능이 0.7% 정도만이 들어오도록 설계하였다.

즉 표면 선량률이 최대 50R/h인 드럼에 대해서도 표면 선량률이 약 350mR/h인 드럼을 검출기 콜리메이터를 열고 측정하는 것과 같은 측정 효과를 지닐 수 있도록 검출기 콜리메이터를 제작하였다.

한편 검출기 콜리메이터 입구부의 차폐는 15cm 두께의 납으로 차폐하여 3개의 슬릿 외에는 드럼의 방사능에 의한 영향을 받지 않도록 하였고,



<그림 1> 폐기물 드럼을 고순도 Ge 검출기로 측정시 측정 방법의 기하학적 형태

검출기는 10cm두께의 납으로 차폐하여 주변 방사선량률에 의한 영향을 배제토록 하였다.

마. 드럼 내 매질에 의한 감쇠 보정  
폐기물 드럼 내 매질에 의한 감쇠 보정을 할 수 있도록 필요한 전송 선원을 일정 위치에 설치하였고, 감쇠 보정은 분석 소프트웨어에서 이루어지도록 하였다.

① 전송 선원 사용 : 드럼 내 매질에 의한 감쇠를 보정하기 위해 필요한 전송 선원은 측정하고자 하는 드럼에 함유되어 있지 않은 핵종으로서 충분한 감마선 에너지를 지니고 있어야 하며 반감기가 길어야 하며 계측

이 용이한 핵종으로서 충분한 방사능 세기를 지니고 있어야 한다는 조건을 만족해야 한다.

따라서 이러한 조건을 만족시킬 수 있는 Eu-152 선원(10mCi)을 전송 선원으로 사용하였다.

② 드럼 무게 측정 장치 설치 : 평균 무게 측정으로 드럼 내 매질의 평균 밀도를 구하기 위해, 드럼을 올려놓는 드럼 회전 테이블에 무게 측정 장치를 설치하여 측정하고자 하는 드럼의 무게를 잴 수 있도록 하였다.

취급할 수 있는 드럼의 무게는 최대 909kg까지 가능하다.

③ 고밀도 드럼의 경우 전송 선원

에 의한 계수값을 구할 수 없어 드럼 내 매질에 의한 감쇠 보정을 할 수 없기 때문에 드럼 내에 존재하는 핵종인 Co-60에 의한 에너지 피크차에 의한 보정법을 이용하여 드럼 내 매질에 의한 감쇠 보정을 할 수 있도록 하였다.

이 방법은 한 핵종에 반드시 2개 이상의 감마선 에너지를 갖고 있는 핵종이어야 이용 가능하며, 대부분의 폐기물 속에는 Co-60이 함유되어 있으며 충분한 감마선 에너지를 지니고 있는 핵종이므로 대부분 이 핵종을 선정하여 이용하고 있다.

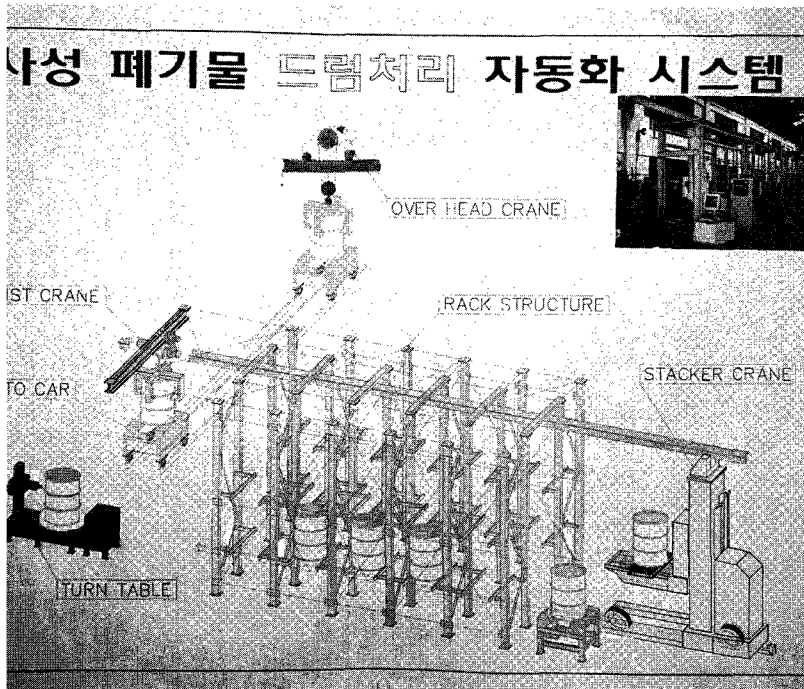
바. 비균질 보정

드럼 내 매질의 비균질 분포 및 선원의 비균질 분포에 의한 측정 오차를 최소화하기 위해 드럼의 비균질성을 보정할 수 있도록 하였다.

이를 위해 드럼을 반경 방향으로 등분하여 각 섹터에서의 측정값을 분리 측정할 수 있도록 하고, 이들 측정값을 평균하여 구하는 방법을 도입해 드럼의 비균질에 의한 측정 오차를 보정할 수 있도록 DMSS(dual multi-scaling storage) 모듈을 사용하였다.

사. 드럼 회전 테이블

드럼 회전 테이블은 드럼을 올려놓기가 쉽고, 동작 후 정해진 위치에서도록 제작하였으며, 핵종 분석 완료 후에는 이 회전 테이블을 일정 속도로 회전시키면서 드럼 마킹 시스템을 이용해 필요한 정보를 드럼 표면에



방사성 폐기물 드럼을 원격으로 취급할 수 있는 자동 제어 시스템의 전체 구성도

표시할 수 있도록 하였다.

아. 전송 선원 서터

전송 선원은 사용시에만 서터가 열리고, 그 외에는 서터가 항상 닫혀 있도록 설계하였으며, 전원의 상실시에도 자동적으로 서터의 무게에 의해 닫히도록 하여 운전자의 과피폭을 방지하도록 하였으며, 측정시 서터가 열려 있을 경우에는 경고등이 켜져 장치에 접근을 금지하도록 하였다.

그리고 전송 선원에 대한 차폐를 충분히 하여 누설 방사선량이 가능한 한 적도록 설계하였다.

한편 모든 기계 구동부는 동작의 이상이나 비상시 정지시킬 수 있도록 비상 정지 스위치를 설치하였으며, 기계 구동부는 동작 후 정지시에 항상 초기 위치에 와서 정지하도록 하였다.

그리고 모든 기계 구동부는 전원상 실시나 이상시 그 자리에서 정지되도록 전자 브레이크를 설치하였다.

2. 핵종 분석 시스템의 특성 평가

핵종 분석 장치의 특성 실험에서는 모델 드럼을 제작하고, 모델 드럼 내에 표준 감마 선원을 삽입하고 핵종 분석 장치를 이용해 측정을 한 후 그 분석 결과를 표준 감마 선원의 방사능값과 비교해 핵종 분석 장치에 대한 측정 특성을 평가하였다.

가. 드럼의 회전수 변화에 따른 방사능 분석 결과

최적의 드럼 회전 속도를 구하기

위해 표준 감마 선원을 드럼 내에 삽입한 후 테이블의 회전 속도 (rpm)를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 드럼 내 임의의 위치에 표준 선원을 넣고 회전수를 변화시키면서 측정을 실시하여 얻은 각 회전 속도 변화에 따른 방사능값을 <표 1>에 나타냈다.

분석 결과 10rpm일 때가 표준 감마 선원값과 가장 근사한 값을 나타내었다.

나. 측정 시간 변화에 따른 드럼 내 방사능 분석 결과

핵종 분석 장치를

<표 1> 회전 테이블의 속도 변화에 따른 분석 결과

회전 속도(rpm)	핵종 Co-60 ( $\mu\text{Ci}/\text{drum}$ )	Cs-137 ( $\mu\text{Ci}/\text{drum}$ )
8	90 $\pm$ 9	93 $\pm$ 18
9	94 $\pm$ 10	85 $\pm$ 17
10	92 $\pm$ 9	89 $\pm$ 18
11	94 $\pm$ 10	89 $\pm$ 17
12	84 $\pm$ 9	81 $\pm$ 16

- 주 : 1. 사용 재질 : 목재
- 2. 매질 밀도 : 0.68g/ml
- 3. 측정 시간 : 100초/segment
- 4. 사용 선원 : Co-60/Cs-137(93/86 $\mu\text{Ci}$ )

<표 2> 측정 시간 변화에 따른 드럼 내 방사능 분석 결과

측정시간(초)	핵종 Co-60 ( $\mu\text{Ci}/\text{drum}$ )	Cs-137 ( $\mu\text{Ci}/\text{drum}$ )
50	3.9 $\pm$ 1.1	2.7 $\pm$ 1.1
100	4.0 $\pm$ 0.9	3.5 $\pm$ 1.4
150	4.5 $\pm$ 1.0	4.1 $\pm$ 1.5
200	4.6 $\pm$ 1.0	4.4 $\pm$ 1.6
300	10.0 $\pm$ 1.7	10.6 $\pm$ 3.8

- 주 : 1. 사용 재질 : 목재
- 2. 매질 밀도 : 0.68g/ml
- 3. 회전 속도 : 10rpm
- 4. 사용 선원 : Co-60/Cs-137(10.5/10.3 $\mu\text{Ci}$ )
- 5. 선원 위치 : (5.7)

<표 3> 각 드럼 종류별 방사능 측정 결과

폐기물 형태	측정 시간	측정 핵종	표준 감마선원	측정값	오차
목재 드럼 (0.68g/ml)	100초	Co-60	93 $\mu\text{Ci}$	94.2 $\pm$ 12.8 $\mu\text{Ci}$	1.3%
		Cs-137	86 $\mu\text{Ci}$	95.8 $\pm$ 19.4 $\mu\text{Ci}$	11.4%
	300초	Co-60	10.6 $\mu\text{Ci}$	10.0 $\pm$ 1.7 $\mu\text{Ci}$	5.7%
		Cs-137	10.3 $\mu\text{Ci}$	10.6 $\pm$ 3.8 $\mu\text{Ci}$	2.9%
폐수지 드럼 (1.1g/ml)	100초	Co-60	8.7 $\mu\text{Ci}$	7.8 $\pm$ 3.5 $\mu\text{Ci}$	10.3%
		Cs-137	9.3 $\mu\text{Ci}$	9.65 $\pm$ 8.1 $\mu\text{Ci}$	3.8%
	200초	Co-60	93 $\mu\text{Ci}$	96 $\pm$ 20.7 $\mu\text{Ci}$	3.2%
		Cs-137	86 $\mu\text{Ci}$	109 $\pm$ 41.0 $\mu\text{Ci}$	26.7%
파라핀 고화 드럼 (1.13g/ml)	100초	Co-60	8.7 $\mu\text{Ci}$	8.2 $\pm$ 3.3 $\mu\text{Ci}$	5.7%
		Cs-137	9.3 $\mu\text{Ci}$	10.2 $\pm$ 7.4 $\mu\text{Ci}$	9.7%
	200초	Co-60	93 $\mu\text{Ci}$	83 $\pm$ 21 $\mu\text{Ci}$	10.8%
		Cs-137	86 $\mu\text{Ci}$	84 $\pm$ 36 $\mu\text{Ci}$	2.3%

이용해 실제 드럼에 대한 측정을 실시할 때 측정 시간을 얼마로 하는가 하는것은 핵종 분석 장치의 드럼에 대한 처리 능력을 나타내기 때문에 매우 중요하다.

본 실험에서는 가장 효율적이고 적절한 측정 시간을 도출하기 위하여 측정 시간을 변화시켜 가면서 실험을 실시하였다.

실험 결과 300초의 측정 시간에서 Co-60의 경우 약 4.8%, Cs-137의 경우 약 2.8%의 오차를 나타내 가장 근사한 값을 얻을 수 있었다.

다. 드럼 형태별 방사능 측정 결과 밀도가 각기 다른 3가지 드럼(목재, 폐수지 및 파라핀 고화 드럼)에 대해 표준 선원을 이용하여 측정을 실시하였다.

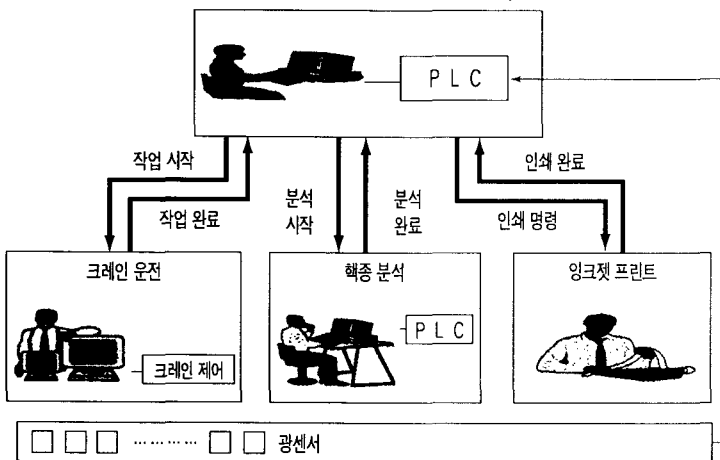
밀도가 낮은 드럼은 방사능세기 낮은 표준 감마 선원(Co-60, Cs-137)을 사용하였고 밀도가 1 이상인



핵종 분석 시스템을 통합 제어할 수 있는 중앙 제어반 컴퓨터

폐기물 드럼에 대해서는 방사능 세기가 다른 2가지 선원을 사용하였다.

비균질 보정법을 적용하여 시험해본 결과, 대부분의 방사능 측정값은 약 30%이내의 오차 범위를 나타내 계측의 신뢰성이 매우 높게 나타났다.

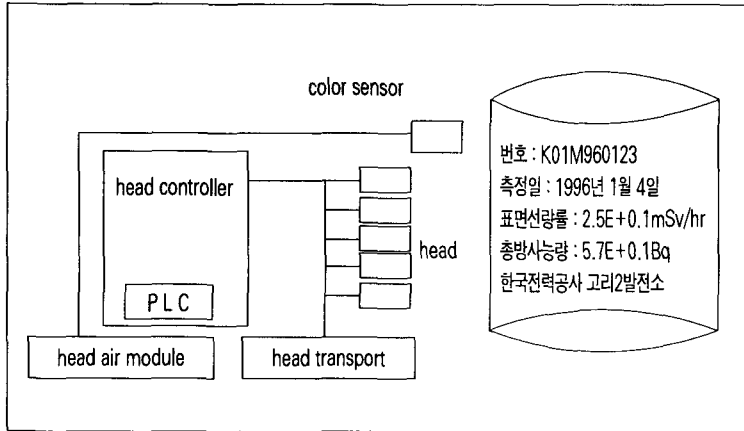


〈그림 2〉 핵종 분석 제어 시스템 구성도

**핵종 분석 시스템 통합 제어**

드럼 속의 폐기물 안에 함유되어 있는 방사성 물질의 핵종 및 양을 측정하는 기능을 갖는 핵종 분석 시스템은 그 기능에 따라 상위 레벨인 중앙 감시 및 제어 시스템과 하위 레벨인 크레인 운전, 핵종 분석 및 잉크젯 프린터부로 구분할 수 있다.





(그림 4) 드럼 마킹 시스템

프린터 헤드 이송 장치로 구성되며, 회전 테이블 위에서 드럼을 회전시키면서 드럼의 일련 번호, 측정일, 표면 선량률, 총방사능량 및 발전소명 등을 마킹한다.

### 맺음말

본 개발로 고리 원전의 폐기물 stream에서 대표 시료를 채취하여 직접 측정이 어려운 핵종을 정량 분석하였고, 그와 함께 분석된 대표 시료의 방사능값과 발전소의 운전 이력에 영향을 주는 냉각수 내의 Iodine 농도값을 기초로 최종적인 폐기물 stream에서의 척도인자(scaling factor)를 예측할 수 있는 모델과 척도 인자 결정 프로그램도 함께 개발하였다.

또한 방사성 폐기물 드럼을 자동으로 취급할 수 있는 드럼 이송 장치를

개발하여 분석을 위한 전 공정을 자동화하였으며, 본 시스템을 고리 제4 폐기물 저장고에 설치하였다.

계측을 위해 입사되는 방사능량을 조절할 수 있는 콜리메이터는 고선량률과 저선량률의 2단계로 나누어 동작되도록 설계하였으며, 서터를 연 상태에서는 1mR/hr ~ 200mR/hr, 닫힌 상태에서는 200mR/hr ~ 50R/hr까지 측정이 가능도록 제작하였다.

폐기물 드럼 내의 밀도 보정을 위해 평균 밀도 보정법(mean density correction), 에너지 피크차에 의한 보정법(differential peak absorption) 및 투과 선원 보정법(transmission source correction)을 독립 또는 병용하여 사용하였고, 비파괴에 의한 균질 및 비균질 드럼의 분할 측정을 위해 드럼을 상하로 8개의 섹터로 나누고, 1 segment당 최대 8개의

섹터로 나누어 스펙트럼을 얻을 수 있는 DMSS(dual multi-scaling storage) 모듈을 이용한 분석 기술을 채택하였다.

또한 계측시 측정에 영향을 미칠 수 있는 인자들을 사전 평가하여 최적 운전 조건을 도출하였다.

참고체 폐기물(저밀도 드럼)과 유사한 모델 드럼을 제작하여 모델 드럼 중앙에 저선량률의 표준 선원(Co-60 93 $\mu$ Ci, Cs-137 86 $\mu$ Ci)과 고선량률의 표준 선원(Co-60 8.7mCi, Cs-137 9.3mCi)을 넣고 측정한 결과 측정 오차는 각각 10% 이내였으며, 발전소의 필터 드럼(고밀도 드럼) 내에 표준 선원(Co-60 8.7mCi, Cs-137 9.3mCi)을 넣고 측정하였을 경우에는 측정 오차가 28% 이내로 당초 설정 목표인 30% 이내에 들어와 매우 만족스러운 결과를 얻었다.

또한 드럼 표면에 드럼의 고유 번호, 방사능량, 표면 선량률 및 생성 발전소 등이 기재되는 표지 마킹 시스템은 세계적으로 처음 적용되는 잉크젯 시스템으로 시험 결과 성능이 매우 양호하게 나타났다.

본 연구에서 개발한 핵종 분석 장치는 국내 원전에서 발생하는 모든 형태의 200리터 폐기물 드럼에 대해 핵종 분석이 가능하며, 향후 전 원전에서 매우 유용하게 사용될 것으로 기대된다. ☞