

## 방사성고체폐기물의 감용을 위한 압축 파쇄 및 소각처리

### Compaction, Shredding, and Incineration for Volume Reduction of the Radioactive Solid Wastes

강일식, 이범철, 김태국, 이형권, 김길정

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

하나로시설의 본격적인 가동 및 핵연료주기시설의 다변화와 연구시설의 증대에 따른 방사성폐기물의 발생량 및 누적량이 지속적으로 증가될 전망이다. 이의 안전성 확보 및 방사성폐기물 감용처리를 위한 노력은 더욱 강조되어야 할 것이다. 본 논문에서는 연구소에 설치되어 있는 기존의 방사성고체폐기물 처리설비를 활용하여 압축, 파쇄, 제염 및 재활용을 통한 폐기물의 감용처리 기술과 경험 사례를 기술하고 있다. 고체폐기물 처리설비를 활용하여 처리한 결과, 60톤 압축기를 사용하여 200ℓ 페드럼 1,614개를 압축처리하여 181개로 감용처리하였다. 20ℓ 페플라스틱통은 파쇄기를 사용하여 2,786개를 절단 처리함으로써 1/5의 감용효과를 얻었다. 폐필터는 전처리장치를 개발하여 폐HEPA 필터를 1차로 원주형상으로 축소 성형한 후 다시 60톤 압축기로 보내져 압축하였다. 가연성폐기물은 연구용 실증시설로 소각처리한 결과, 감용비는 1/250이었다. 공드럼 686개는 분사연마기에서 제염하여 방사성폐기물 수집용기로 재활용하였다.

#### Abstract

Generation and accumulation of radioactive wastes is expected to be increased into large quantities, due to the full power operation of the HANARO reactor, the diversification of nuclear fuel cycle facilities, and the expansion of research laboratories. In this regard, we must endeavor to ensure safety and initiate measures to minimize the volume of generated wastes. This report describes the effective utilization of existing radioactive solid waste treatment systems through compaction, shredding and reuse of materials by decontamination. Using a solid waste treatment system, 60-ton compactor was used to press 1,614 spent drums of 200 liters capacity, while a shredder was used on 2,786 spent plastic barrels with 20 liters capacity. The use of the spent filter pretreatment system primarily reduce the original dimensions of spent HEPA filter and press those filters into a cylindrical shape, and then compact using 60-ton compactor. The volume reduction ratio marked a factor of 250 by an experimental incineration of combustible wastes. The amount of 686 spent drums were decontaminated using abrasive blasting machines and reused as Radioactive waste collection drums.

## 1. 서론

원자력 산업의 지속적인 성장과 방사성동위원소 이용의 급격한 증가, 하나로시설의 본격적인 가동 및 핵연료주기시설의 다변화와 연구시설의 증대에 따른 방사성폐기물의 발생량 및 누적량이 급격히 증대될 전망으로 이의 안전성 확보 및 방사성폐기물 감용처리를 위한 노력은 더욱 강조되어질 것이다. 특히 방사성고체폐기물은 액체나 기체 폐기물과는 달리 상당히 오랜기간 동안 저장을 해야 하기 때문에 발생량의 감소와 감용처리에 대해서 지속적인 연구와 기술 개발이 절실히 요구되고 있다. 물론 국내외 방사성폐기물 관련 실무 및 연구기관 등의 연구발표 내지는 경험개선 사례 등이 활발히 이루어지고 있으며, 많은 기술개발을 통해 좋은 감용효과를 갖는 설비들도 개발 운영되고 있으나 발생기관에 따른 동일 폐기물에 대해서도 처리 및 포장방법이 서로 다르며 소각, 용융, 유리화 등 신기술 개발은 아직 제작 및 실용 단계라기 보다는 연구단계에 머물러 있는 실정이다. 한편 연구시설의 해체로부터 발생하는 대형 폐기물의 효율적인 관리와 처리에 관한 연구를 수행하여야 하며, 처분장 인도기준을 정비하여 이에 따른 방사성폐기물 처리방법 및 수집용기의 개선이 뒤따라야 할 것이다. 이러한 시점에서 본 논문에서는 연구소에서 갖추어져 있는 기존의 방사성고체폐기물 처리설비를 활용하여 압축, 파쇄 및 제염 재활용을 통한 폐기물의 감용과 저장고의 저장용량을 확보하고 있는 사례를 기술하고 있으며 이에 따라 폐기물 처리방법 및 설비의 개선으로 향후 발생될 방사성폐기물에 대해서는 이와 같은 처리방법에 따라 분류되어 수집하고 처리됨으로써 폐기물 발생량을 현저히 감소하는데 기여하고자 한다.

## 2. 방사성고체폐기물 처리방법 및 지침

### 2.1. 처리 방법

방사성폐기물의 처리 목적은 폐기물의 발생량을 감소시키고, 최종생성물을 화학적, 방사선적으로 안정한 형태로 전환시켜 추후에 폐기물의 수송과 최종처분에 적합하도록 하는데 있다. 이러한 폐기물의 처리는 폐기물의 상, 성상, 물리화학적 특성, 방사능준위 등에 따라 적절한 방법을 사용하게 된다[1]. 폐기물의 ‘처리’와 ‘처분’은 구분해 둘 필요가 있다. 그 정의를 그대로 설명하는 것도 부적당하기 때문에 간단히 설명하면 ‘처리’는 폐기물이 최종적으로 ‘처분’될 때까지의 과정을 말하며, ‘처분’이란 폐기물이 인간에 의한 관리나 처리행위로부터 떨어져 나가는 상태에 이르는 것을 말한다. 한국원자력연구소에서는 고체 및 액체폐기물을 그림 1과 같이 처리하고 있다.

#### 2.1.1. 절단

절단처리방법에는 전극과 피 절단물 사이에 플라즈마아크를 발생시켜, 동작가스를 전리시킴으로써 고온상태를 얻어 피 절단물을 국부적으로 가열 용융해서 절단하는 플라즈마아크 절단법과 고속회전(300~1,200rpm)하는 블레이드와 피 절단물 사이에 고전류 아크를 발생시키고, 피 절단물을 국부적으로 용융하여 블레이드의 회전으로 용융물을 제거 절단하는 아크톱 절단법, 회전하는 원판상, 또는 주행하는 밴드톱형 전극과 피 절단물사이에 직류전압을 걸어서 발생하는 아크 열을 이용해 용융 절단하는 방전가공 절단법, 소모전극인 와이어를 보내면서, 절단물과의 사이에서 아크를 발생시켜서 노즐에서 고압 물제트를 분사하여 용융금속을 불어 날리면서 절단하는 용극식 물제트 절단법 등의 전기 에너지 절단과 가스화염(산소, 아세틸렌염 등)으로 절단부를 예열시켜 점화구 중심에서 산소를 분사하여 철을 산화 연소시키면서 절단하는 가스 절단, 원반형 커터날을 피 절단부에 대고, 날끝이 피 절단부를 파고 든 상태에서 이동시킴으로써 절단하는 물리적 절단, CO<sub>2</sub> 가스 등의 레이저광선을 발생물질인 구성원자를 여기시켜서 발생한 레이저광을 렌즈로 집속시켜 에너지밀도가 높은 열원으로 대상물을 절단하는 레이저 절단법이 있다.

#### 2.1.2. 압축감용

압축감용법은 폐기물을 기계적으로 짓눌러 찌부러뜨려 용적을 줄인다. 이것은 폐기물 자체의

용적을 작게 함으로써 용기 하나에 들어가는 폐기물의 양을 늘리고, 그 결과로 전체 폐기물의 용적을 낮게 억제하는 방법이다. 압축처리는 소각처리나 기타 처리가 적합하지 않은 경우에 효과적이며 현재 널리 사용되고 있으며 핵주기시설에서 발생하는 저준위 고체폐기물의 70~80%가 압축처리가 가능하나 폐기물의 조직이 너무 치밀하고 단단하여 부피 감소를 무시할 수 있거나 극히 작은 것 또는 압축기 및 압축용기를 손상시킬 수 있는 물질, 인화성 및 폭발성 물질, 액체를 함유하고 있는 물질은 압축처리 할 수 없다. 압축처리에 사용되는 압력은 4.5톤에서 1,500톤으로 다양하며, 사용압축력이 100톤 미만일 때는 저압압축, 그 이상일 때는 고압압축이라 한다. 압축처리시 얻을 수 있는 감용비는 3~10정도이다[2]. 국내 원자력발전소에서는 기존의 10톤 압축기로 1차 압축하여 생성된 폐기물드럼을 2,000톤 용량의 초고압압축기로 재압축하여 잡고체폐기물의 최종 발생량을 감소시키고 있다.

### 2.1.3. 소각처리

원자력시설에서 발생하는 방사성고체폐기물중의 상당부분이 가연성 물질로 구성되어 있어 이를 소각처리할 경우 감용비는 약 40~100 정도이다. 소각처리는 이와 같이 폐기물의 감용효과가 클 뿐 아니라 폐기물을 불활성 또는 반응성이 작은 소각재의 형태로 전환시켜, 추후 수송 및 저장시의 문제 발생을 감소시켜 주므로 미국을 비롯한 원자력 선진국에서 과거 수십년 이상 시행되어 왔다[3]. 소각공정은 원리는 간단하나 폐기물의 불완전연소, 배기체 처리계통의 과도한 부식, 필터 및 기타 배기체 장치에 타르 및 매연의 오염, 배기체 처리효율 저하, 방사선 환경하에서의 소각기 조작에 따른 기계적 문제 등이 제기되고 있어 이를 해결하기 위한 연구 개발이 진행중에 있다. 도시 폐기물이나 산업폐기물의 처리에 이용되는 것과 같이 방사성폐기물의 소각처리 목적은 가연성 폐기물의 감용, 무기안정화 및 유가물의 회수에 있으며 특히 감용효과가 크다. 소각처리는 발생량이 많은 가연성 잡고체의 대량처리에 적합할 뿐 아니라 달리 적당한 처리방법이 없는 동물 사체나 오염의 처리방법으로 좋다. 또 소각재는 무균이며 불연성이며 분해가 어렵고 안정한 고화체를 만들기 쉬운 점등 폐기물 처분상 매우 좋은 장점을 갖고 있다.

### 2.1.4. 파쇄 처리

가연성잡고체중에는 폴리에틸렌 통이나 호스, 튜브 같은 내용물이 없는 상태에서 공간만 차지하는 폐기물이 있다. 또한 폴리에틸렌 통은 압축처리 할 경우 스프링백이 커서 실제로 감용율이 크지 않다. 따라서 이들 빈 용기를 포장용기내에 그대로 넣으면 부피만 차지함으로 몇 개 집어넣지 못한다. 이와 같이 연질의 종이류나 플라스틱류의 폐기물은 용기에 수집하기 전, 또는 소각처리 하기 전에 파쇄기에 넣고 잘게 썰어 부피를 축소하는 방법을 사용하는 것이 효율적이다.

### 2.1.5. 용융

프레스를 사용하여 기계적으로 압축감용하는 방법에는 한계가 있기 때문에 기계적이 아니라 열적으로 감용을 꾀하는 ‘용융처리’라고 하는 방법이 있다. 이것은 기계로 눌러 찌부러뜨린다는 미적지근한 방법이 아니라, 전기로에서 단숨에 녹여서 금속덩어리로 만드는 것으로 방사능 준위가 낮은 금속폐기물을 제염, 용융(smelting) 처리한 후 방사능을 측정하여 무구속한계의 이하임을 확인하여 재사용하는 방법이다[4]. 용융처리에서는 폐기물 중의 일부 방사성폐기물을 제거할 수 있는 장점도 있다. 이것은 ‘슬래그제염’이라고 하는 것으로 폐기물을 적당한 용융온도로 하여, 그때 용점이 낮은 불순물을 슬래그로서 제거하고 비등점이 낮은 불순물을 기화시켜서 금속 덩어리 밖으로 내보낸다는 것이다. 그 결과 용융처리된 금속의 방사능 농도를 그만큼 줄일 수 있는 것으로 기대된다. 또한 이상의 장점 이외에 잘 제거되지 않았던 Co-60 등 방사성물질에 대해서는 금속덩어리 중에서 균일하게 혼합 분포시키면 내부에 분포된 방사성물질로부터의 방사선이 금속 자체의 차폐효과에 의해 표면에 이르기까지 자연히 약화되는 효과(소위 ‘자기차폐’ 효과)가 기대된다. 이와 같이 용융처리는 감용효과뿐 만 아니라, 폐기물의 방사능농도 그리고 표면의 방사선강도를 내리는 효과도 기대할 수 있어 일석이조 이상의 일을 하는 폐기물처리기술로서 유망시 되고 있다.

## 2.1.6. 고화처리

### 2.1.6.1. 시멘트 고화 (Cementation)

시멘트고화법은 중저준위 방사성폐기물의 고화방법으로 가장 많이 사용[5]되고 있으며 주로 고체를 많이 함유하고 있는 슬러지, 농축폐액, 소각재, 이온교환수지 등을 처리하는데 적합하다. 이때 사용되는 시멘트는 ASTM type I 과 ASTM type II이며 시멘트에 대한 폐기물의 중량비는 20~30% 정도이다. 시멘트고화시 방사성핵종이 Sr, Pu, Am인 경우에는 핵종이 시멘트내에 잘 결합되어 있기 때문에 좋으나 Cs, Ru인 경우에는 핵종의 침출율이 상당히 높아 이에 대한 대책이 필요하다. 시멘트와 폐기물의 혼합방법으로는 in-drum 혼합방식과 in-line 혼합방식이 있다.

### 2.1.6.2. 아스팔트 고화 (Bituminization)

아스팔트고화공정은 폐기물의 고화매체로서 아스팔트를 사용하는 공정으로서 100℃ 이상의 아스팔트와 방사성폐기물을 혼합시켜 고화시키며, 이때 폐기물내에 함유된 수분의 99.5% 이상이 증발되고 나머지 폐기물과 아스팔트가 저장용기에 담겨져서 냉각된다. 최종생성물의 조성은 아스팔트 60%, 폐기물 40% 정도이다. 최종고화체의 표면선량율은 시멘트고화체보다 높으나, 시멘트고화체에 비해 감용비가 훨씬 크고 침출율은 훨씬 작다. 반면에 아스팔트고화체는 용점이 낮고, 기계적 강도가 낮으며, 물과 접촉시 팽윤현상을 나타내는 점이 단점으로 지적되고 있다. 현재 사용되고 있는 아스팔트고화공정 중 대표적인 것은 회전식공정, extruder공정 및 박막증발공정이 있다.

### 2.1.6.3. 폴리머 고화 (Polymerization)

이 공정은 최근에 개발된 고화공정으로서, 고화매체로 폴리머를 사용한다. 이때 사용되는 폴리머는 polyester/epoxy, urea formaldehyde, polyethylene, styrene-dephenyl benzene 등 여러 가지가 있으며 사용 폴리머에 따라 혹은 60℃에서 서서히 monomer의 중합반응이 일어난다.

### 2.1.6.4. 유리화 (Vitrification)

유리화공정은 사용후 핵연료의 재처리과정에서 발생된 고준위폐액을 고화하기 위한 공정으로 프랑스, 영국, 일본 및 미국에서 개발중 또는 상용화하고 있다. 일반적으로 고준위폐액의 고화처리공정은 증발, 가소 또는 탈질산 및 유리화의 3단계로 나누어 생각할 수 있다. 제1~2단계에서 얻어지는 고화체는 가소물(calcine)이라고 하는데 이 가소반응은 500~800℃에서 종료된다. 제3단계에서는 제2단계의 탈질산공정에서 얻어진 분말상의 가소물 첨가제와 혼합하여 900~1,000℃에서 유리(주로 borosilicate glass)와 함께 용융시켜 고화체를 제조하는 공정으로 유리화를 위한 첨가제는 폐기물의 조성구성과 공정에 따라 선택되며 silicon, boroncalcium, titanium 등이 사용된다.

## 2.1.7. 제염 재활용

오염된 기기나 장비의 제염은 앞에서 언급한 절단, 소각, 압축 등과 같은 감용처리와는 다른 방사성폐기물 저감뿐 만 아니라 자원의 재이용을 목적으로 함과 동시에 폐기물의 운반이나 보관 관리 등 취급을 용이하게 하는 것을 목적으로 하는 것이다.

### 2.1.7.1. 물리적 방법

회전브러시로 표면 오염을 씻어내는 브러시세척과 고압수를 노즐로 분사하여 표면의 오염물을 박리, 제거하는 물 제트, 초음파에 의하여 발생한 국부적인 충격력에 의하여 오염을 박리, 제거하는 초음파 세정, 특수한 페인트를 오염면에 바르고 그 후 건조 고화된 페인트를 오염물질과 함께 벗겨내는 도막박리 제염, 탱크 안에 제염대상물과 연마재를 넣고 진동을 가함으로써 오염을 연마 제거하는 진동 제염이 있다.

### 2.1.7.2. 화학적 방법

전해액 중에서 제염대상물에 전류를 흘리고 표면의 얇은 층을 전기화학적으로 용해함으로써 오염을 제거하는 전해연마제염과 화학 제염액에 제염대상물을 침지하여 화학반응에 의해 용해시켜 오염을 제거하는 침지화학 제염방법이 있다. 방사성폐기물처리시설에는 화학침수조, 분사연마기, 초음파연마기 등의 제염설비가 구비되어 있다.

## 2.2. 방사성고체폐기물 처리지침

한국원자력연구소에서 발생하는 방사성고체폐기물의 특성확인, 분류, 처리 및 수집포장에 관한 지침[6]은 다음과 같다.

### 2.2.1. 특성확인

발생부서로부터 관리의뢰한 방사성고체폐기물을 접수할 때는 비방사능, 선량율, 방사성 핵종, 독성 및 물리화학적 특성, 방사선의 형태 등 처리시에 필요한 사항을 함께 통보 받아야 한다.

### 2.2.2. 분류

방사성고체폐기물은 다음과 같이 분류하여 처리한다.

#### 2.2.2.1. 압축 가능성에 의한 분류

- 압축성 폐기물 : 압축기에 의한 처리가 가능한 물질
- 비압축성 폐기물 : 압축기에 의한 처리가 불가능한 물질
- 특수 폐기물 :  $\alpha$ 방사선을 방출하는 물질과 그밖의 특별한 주의를 요하는 물질

#### 2.2.2.2. 방사성 준위에 따른 분류(여기서 D는 표면에서의 radiation dose임)

- 저준위 고체폐기물( $D \leq 0.2$  R/h) : 어떠한 특별한 주의없이 취급과 운송이 가능하다.
- 중준위 고체폐기물( $0.2 \leq D \leq 2$  R/h) : 콘크리트나 납의 얇은 층에서 차폐된 단순한 용기로 운송이 가능하다.
- 고준위 고체폐기물 : ( $2 \leq D$  R/h)

### 2.2.3. 고체폐기물 처리지침

고체폐기물의 절단은 주로 금속으로 구성되었거나 때로는 플라스틱 등의 부피가 큰 폐기물을 다룰 때 행하여진다. 부피가 큰 폐기물을 포장용기내로 넣기 위해 크기를 감소시키거나 또는 절단한다. 절단작업은 반드시 환기설비가 가동하는 상태에서 절단실에서 수행해야 한다. 압축은 직접처분 또는 처리, 운반을 위한 준비과정에서 수행된다. 트리튬, 알파방출체, 고준위폐기물 등의 압축시에는 특히 작업자의 외부 또는 체내피폭에 주의하여야 한다.

### 2.2.4. 방사능준위별 처리공정

#### 2.2.4.1. 저준위 고체폐기물 처리공정

저준위폐기물 처리는 압축성과 비압축성으로 각각 처리한다. 압축성폐기물은 비닐백에 넣어 100ℓ 드럼에 담겨진 후 60톤 압축기에 의하여 200ℓ 드럼내에 넣고 압축처리한 후 시멘트고정화하여 저준위저장고로 보낸다. 비압축성폐기물은 절단실에서 비닐포장을 벗기고 60kw plasma cutter, pneumatic cutting mill, shear 등으로 절단한다.

#### 2.2.4.2. 중·고준위 고체폐기물 처리공정

100mm lead padirac cask 또는 150mm 납 용기에 넣어 운반된 중·고준위폐기물이 수집된 드럼을 35cm 두께의 콘크리트 셀에 넣고 bitumen-concrete를 채워 넣는다. 24시간후 뚜껑을 덮고 중저준위저장고로 옮긴다.

## 3. 방사성고체폐기물 처리

하나로의 본격가동과 연구시설의 증대로 방사성고체폐기물의 발생량이 해마다 증가하여 저장고의 저장용량이 포화상태에 접근함에 따라 저장중인 부식드럼 및 폐공드럼의 압축처리를 통한 부피 감용과 폐플라스틱통의 파쇄처리에 의한 감용, 폐드럼의 제염 재활용에 의하여 저장고의 저장용량을 확보하였다. 또한 방사성폐기물처리시설에 새로 제작 설치한 폐필터 압축 전처리장치의 정상가동과 현재 연구중인 가연성폐기물의 소각처리와 오염토양 폐기물의 제염에 의한 감용을 통하여 저장고의 용량을 획기적으로 확보할 수 있을 것이다. 표 1은 폐기물 처리방법별 처리량을 나타내고 있다.

### 3.1. 페드럼 압축

방사성폐기물처리시설에서는 방사성고체폐기물 중 압축성 폐기물은 저장고의 저장공간확보 및 안정화를 위하여 60톤 용량의 압축기를 이용하여 압축처리하고 있다. 폐기물의 수집용기인 탄소강 드럼 역시 장기간 저장으로 인한 부식 및 방사성폐기물을 담았던 드럼의 내용물을 재포장 또는 처리를 위해 꺼냄으로써 공드럼 상태로 발생한 것 중에는 오염정도가 심해 제염등의 방법으로 재활용할 수 없는 것은 방사성폐기물로 발생된다. 또한 핵연료 제조를 위해 천연이산화우라늄의 국외로부터 수입시 수송용기로서 200ℓ 드럼을 이용하고 있으며, 이 드럼 역시 폐기물로서 구분되어진다. 그러나 이러한 드럼은 전체 폐기물 발생량에 비해 상당한 양을 차지하고 있어 저장고의 저장공간을 확보하기에 어려움을 주고 있다. 페드럼의 경우는 공극율(void volume)이 일반 고체 폐기물에 비해 상당히 크므로 압축에 의한 부피감용이 요망된다. 여기에서는 방사성폐기물처리시설에 설치되어 있는 60톤 용량의 압축기를 이용하여 페드럼을 압축처리하기 위해 압축력에 따른 페드럼의 감용에 대한 실험 및 페드럼의 처리에 대하여 기술하였다.

#### 3.1.1. 압축실험

##### 3.1.1.1. 실험방법

압축실험에 사용된 드럼은 천연이산화우라늄의 포장용기로서 높이 884mm, 직경 597mm 및 두께 3mm인 200ℓ 용량이며 재질은 탄소강으로 이루어져 있다. 운대는 밑면에서 297mm, 576mm 및 797mm 위치에 각각 설치되어 있으며, 볼트체결식 밴드로 뚜껑을 덮는 개방형용기를 이용하여 실험을 수행하였다. 실험에 이용된 압축기는 방사성폐기물 처리시설에 설치되어 있는 60톤 용량의 유압식이며, 10bar에서 200bar까지 최대 압축력은 임의로 조절 가능하게 되어있다. 압축기는 원래 100ℓ 드럼을 200ℓ 드럼 안에서 압축하는 in-drum 방식으로 설계되어 있으나 200ℓ 드럼을 압축하기 위해 sleeve에 부착되어 있는 interlock을 해제하고 드럼상부에 200bar의 힘을 전달 수 있는 12mm의 철판을 올려놓고 실험을 수행하였다. 실험전에 드럼의 높이를 측정하고 압축력을 10bar에서 30bar까지는 5bar씩 증가시키고, 30bar에서 160bar까지는 10bar씩 증가시키면서 압축력에 따른 드럼 높이 변화를 측정하였으며 압축력이 제거된 후 역시 드럼의 높이를 측정하여 spring back을 구하였다.

##### 3.1.1.2. 압축결과

그림 2는 압축력을 가하고 있을 때와 압축력을 제거한 후의 변위를 압축력에 따라 나타낸 것이다. 변위와 압축력과의 관계는 포물선을 나타내며 압축력을 가하고 있을 때의 변위와 압축력을 제거한 후의 변위의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 30bar의 압축력이 가해졌을 때의 변위는 압축력을 제거했을 때, 즉 램을 상부로 올려놓은 상태에서는 48cm이고, 압축력이 가해진 상태에서의 변위는 49cm로 스프링백 현상은 크지 않았고, 압축력이 80bar까지 변위 폭이 크게 나타나다가 100bar 이상에서는 변위 폭이 크지 않았다. 따라서 실험결과로부터 본 압축기에서의 최대 압축효과를 거두기 위해서는 압축력이 100bar가 적당하였다. 그림 3은 압축력에 따른 변위율을 나타낸 것이다. 변위율과 압축력과의 관계는 멱함수로 나타나며 다음과 같이 표시할 수 있다. 즉,

$$\frac{dH}{H} = 0.29 F^{0.25} \text{ 로 나타낼 수 있다.} \quad (1)$$

### 3.1.2. 페드럼 압축처리

#### 3.1.2.1. 200ℓ 페드럼

200ℓ 페드럼은 핵연료가공시설 및 우라늄변환시설에서 천연이산화우라늄 분말의 포장용기로서 국외로부터 수입시 드럼의 오염을 막기 위하여 비닐슈트로 우라늄 분말을 포장하여 들어온다. 그러나 드럼에서 우라늄 분말을 꺼내는 과정에서 비닐슈트의 일부가 찢어져 드럼의 내부가 오염된다. 이들 드럼 내외부의 오염도를 측정하여 법적허용치보다 낮은 것은 제염하여 방사성폐기물 포

장용기로서 재사용하였고, 법적허용치보다 높은 것은 폐기물로 분류하여 저장고에서 임시저장하고 있었다. 저장고의 저장용량 확보를 위해서 이들 폐드럼을 압축처리하였다. 압축처리된 것은 200ℓ 드럼보다 약간 큰 220ℓ 드럼을 제작하여 수집 포장하였다. 위의 200ℓ 폐드럼의 압축실험결과를 토대로 220ℓ 드럼 1개에 압축폐드럼 8개를 포장할 수 있었다. 따라서 200ℓ 드럼의 압축감용비는 1/8이었다. 총 730개의 200ℓ 드럼을 압축하여 220ℓ 드럼 92개에 포장하였다.

### 3.1.2.2. 100ℓ 폐드럼

방사능으로 오염된 철재 및 토양폐기물, 특히 우라늄 메탈 칩 등은 포장 중량이 무거워 작업자로 하여금 취급하기에 불편하여 보통 100ℓ 드럼에 수집 포장하였다. 그러나 100ℓ 드럼은 당초 폐기물을 포장한 상태에서 드럼과 함께 압축하기 위하여 두께가 얇게 제작되어 있다. 따라서 폐기물을 포장한 상태로 수년간 저장하면 쉽게 부식되고 내용물이 무거워 드럼의 밑부분이 내려앉을 우려가 있다. 이들 100ℓ 드럼의 폐기물은 철판의 두께가 두꺼운 200ℓ 드럼에 재포장 하고 발생한 100ℓ 공드럼을 압축처리 하였다. 200ℓ 드럼 1개에 100ℓ 압축드럼 20개까지 포장할 수 있었다. 따라서 100ℓ 드럼의 압축감용비는 1/10이었다. 총 1,768개의 100ℓ 드럼을 압축하여 200ℓ 드럼 89개에 포장하였다. 그림 4는 폐드럼의 압축전 상태이고, 그림 5는 1차 압축된 폐드럼 4개를 동시에 올려놓고 재압축하는 장면을 보여주고 있다.

## 3.2. 폐플라스틱용기 파쇄

### 3.2.1. 파쇄기 설치

액체폐기물 수집용 폴리에틸렌통이나 플라스틱통 및 오염된 호스 등은 소각가능한 가연성폐기물로 분류되지만 소각처리 할 때까지 저장고에 임시저장 할 경우 공간율이 커서 많은 공간을 차지하게 된다. 또한 이들을 압축처리 할 경우는 스프링백이 커서 감용율이 떨어지게 된다. 절단기는 20마력 용량의 모터 2대로 축을 구동하며 사용전원은 380V이다. 축 회전 속도는 고속축이 21.5~44.1rpm이며 저속축이 18.2~37.3rpm이다. 축에는 폐통을 절단하기 위하여 직경 255mm, 두께 30mm의 나이프가 34개로 설치되어 있다. 나이프와 축의 결합부가 6각으로 설계되어 있기 때문에 절단물의 종류에 따라 최적의 조건으로 날 배열의 변경이 가능하게 되어 있다. 절단물을 투입하는 투입구의 크기는 1,050 x 1,400mm이며 절단물이 투입되어 나이프에 물릴 수 있게 절단물을 눌러주는 역할을 하는 램이 축 상부에 설치되어 있다. 절단기의 전체치수는 W1,130 x L2,740 x H1,930이며 무게는 2,050kg이다. 절단능력은 시간당 1,000kg이며 축에 과부하가 걸렸을 경우 회전방향이 자동으로 역회전되어 이물질들을 배출하고 일정기간 경과 후 정방향으로 정상운전 되도록 되어 있다. 폐통의 절단처리중 분진의 확산을 방지하고 제거하여 작업자의 피폭 및 주위오염을 방지하기 위하여 절단기 상부에 기존 환기시스템의 덕트와 연결하여 절단기 내부에 부압이 유지되도록 하였으며 절단기 하부에는 호퍼를 설치하였으며 호퍼 밑에 드럼을 놓아 절단된 폐기물이 자유낙하에 의해 드럼에 충전 되도록 하였다.

### 3.2.2. 파쇄 처리

방사성액체폐기물을 수집하였던 오염된 폐통을 부피감용하기 위하여 절단기를 이용하여 절단처리 하였다. 절단처리 후 발생한 폐통 조각은 200ℓ 드럼에 수집하였으며 1드럼에 약 20개에서 25개의 폐통을 파쇄하여 수집할 수 있었다. 본 파쇄처리를 통해 절단처리하지 않고 드럼에 저장할 경우 1드럼에 4개의 폐통이 충전되나 압축처리 할 경우는 약 7~8개의 폐통이 충전되는 것으로 보아 이와 같이 절단처리에 의한 감용효과는 뛰어난 것으로 생각된다. 한편 파쇄기 칼날의 두께가 30mm로 비교적 두꺼워 잘게 썰어지지 못하며 피절단물의 크기가 제한되는 단점이 있어 너무 얇은 경우는 절단효과가 떨어질 것으로 생각된다. 압축대상 폐통은 20ℓ 기준으로 총 2,786개 있었으며 절단 처리후 발생한 폐기물은 200ℓ 드럼 139개에 수집, 포장하여 가연성폐기물로 저장관리 하였다. 따라서 당초 20ℓ 통 4개를 포장했을 때와 비교하였을 때의 감용비는 1/5이었다. 이렇

게 파쇄된 폐통은 향후 소각로에서 소각처리될 것으로 파쇄되지 않은 상태의 것보다 소각로에 투입이 용이하고 또한 소각 성능이 향상될 것이다.

### 3.3. 폐 HEPA 필터 전처리

저장고에는 100ℓ 기준으로 1,400여개의 폐필터가 저장중에 있으며 대단위 연구시설의 증대로 다른 어떤 폐기물보다도 발생량이 급증하고 있으나 이에 대한 전용 처리장치를 보유하고 있지 못한 상태이기 때문에 기 발생된 폐필터는 현재 전량이 방사성폐기물저장고에 임시저장 중에 있다. 폐필터 폐기물은 부피가 크기 때문에 방사성폐기물저장고의 상당량을 이들이 점유하고 있으며, 이는 저장고 저장용량을 한계점에 이르게 하는 큰 요인이 되고 있다. 따라서, 이들 폐기물을 처리하기 위하여 폐HEPA 필터 전용처리 장치를 개발하게 되었다. 이는 처리시설에 설치되어 있는 압축처리 장치를 그대로 활용할 수 있도록, 폐 HEPA필터의 외형 및 치수를 변형시키는 장치이다. 폐 HEPA 필터는 직육면체 형상(L610mm x W610mm x H292mm)인데, 이를 1차 압축, 성형하여 500(+0, -50)mm Dia. x 300(+0, -50)mm H 의 원주 형상으로 축소 변형시켜서, 최종 처리단계인 압축처리공정용 압축기에 투입할 수 있도록 한다.

#### 3.3.1. 장치 제작

폐 HEPA 필터의 처리방식으로, 본 처리시설에서는 폐필터를 압축하여 200ℓ 드럼에 넣은 다음 시멘트로 고화하는 방식을 채택하고 있다. 그런데, 폐필터의 형상 및 그 크기가 200ℓ 드럼에 그대로는 넣을 수 없는 상태이기 때문에, 폐필터를 200ℓ 드럼에 원활히 들어갈 수 있는 형상 및 크기로 전처리하여야 한다. 이를 위해서, 폐필터의 형상을 직경 500mm 이내의 원주 형태로 성형하기로 하였다. 또한, 작업대상물이 방사성폐기물임으로 처리과정에서 작업자가 폐필터를 직접 접촉하지 않도록 공정을 자동화하고 압축성형 과정에서 발생할 수 있는 분진으로 인한 작업자의 피폭을 방지하기 위하여 장치내부의 공기를 전용배기팬을 사용하여 흡출하도록 하였다. 본 전처리 장치의 작업공정은 폐 HEPA 필터 장입 준비단계, 장입 단계, lifting 단계, 압축성형 전단계, 압축성형 완료 단계로 되어 있으며 유압 유니트부분, 유압 실린더 부분, 프레임 및 하우징 부분, 압착성형 조(jaw) 부분, 제어계통 부분, table lift 및 폐필터 장입 배출구 부분과 배기덕트 및 집진필터 박스 부분으로 구성되어 있다.

#### 3.3.2. 폐필터 처리결과

직육면체 형상의 폐 HEPA 필터(L610mm x W610mm x H292mm)를 전처리장치를 사용해서 시험 처리한 결과, 500(+0, -20)mm Dia. x H300(+0, -8)mm의 원주형상으로 양호하게 성형 압축되었다. 폐필터 전처리장치에서 원형으로 1차 축소된 필터는 200ℓ 드럼내에 수집이 가능하게 되었다. 드럼내에 수집된 폐필터는 다시 60톤 압축기로 보내져 페드럼 압축처리방법과 같은 방법으로 압축 감용한다. 이와 같이 폐필터를 1차 전처리한 후 2차 압축감용 하였을 때 폐필터는 200ℓ 드럼내에 모두 6개를 수집할 수 있었다. 따라서 폐필터를 처리하기 전에 1개를 넣을 수 있는 것과 비교하였을 때 감용비는 1/6이었다. 이와 같이 우리 연구소에는 폐필터를 처리할 수 있는 전용처리장치가 없기 때문에, 그동안 소내에서 발생되었던 폐필터 전량을 방사성폐기물저장고에 그대로 임시 보관하고 있는 실정이었는데, 이번에 자체 개발한 장치를 활용함으로써 이를 모두 처리할 수 있게 되었으며 이로 인한 폐기물 부피 감용으로 방사성폐기물저장고의 저장공간을 확보할 수 있을 것이다.

### 3.4. 소각처리

#### 3.4.1. 분류 및 포장

실증소각에 투입된 소형 폐기물 꾸러미는 수분을 함유하지 않은 건조상태의 폐기물을 형태별, 핵종별로 분류한 후 소각로 투입에 적합한 양이 되도록 하였으며 폐기물의 유출을 막기 위해 비



닐봉투로 1차 포장하여 밀봉하고 다시 종이봉투로 재포장하였다. 이 소형 폐기물 꾸러미의 무게는 3.5kg, 부피는 약 1.8ℓ 정도이었다. 또한 대상 폐기물의 시료를 채취하여 각각에 대해 공업분석과 발열량을 측정하였다. 측정 결과 거의 모든 폐기물이 재가 거의 남지 않는 휘발성 물질인 것으로 나타났으며, 평균 발열량이 12,000kcal/kg 정도이었다.

### 3.4.2. 소각 결과

소각처리하는 동안 후연소로 하단에서 측정한 연소기체의 농도는 표 2에 나타난 바와 같이 배출허용기준치 이하로 만족스러웠다. 소각후 수거한 재를 관찰한 결과 플라스틱 성분은 거의 열분해 후 완전연소되어 거의 남지 않은 반면 예열단계에서 사용한 제염지중 미연분이 일부 남아 있음을 확인하였다. 그리고 녹아서 달라붙어 있는 플라스틱도 소각로 벽보다는 대부분 소각로하단의 재회수부의 틈새에서 발견되었다. 가연성폐기물을 대상으로한 실증소각실험 결과를 표 3에 나타내었다. 수거한 재료부터 계산한 폐기물의 감중비(소각전 폐기물 무게/소각후 수거된 재 무게), 감용비(소각전 폐기물 부피/소각후 수거된 재 부피)는 각각 1/30, 1/250이었다. 감중비에 비해 감용비가 상대적으로 큰 것은 대부분의 폐기물이 공간을 많이 차지하고 있는 딱딱한 용기형태로 압축되지 않은 상태로 드럼에 담겨져 있기 때문으로 보인다.

## 3.5. 공드럼 제염 재활용

방사능에 의한 오염정도가 미미하거나 고가의 장비인 경우에는 폐기하지 않고 재사용 또는 재활용하여야 한다. 최근에 방사성폐기물의 발생량을 줄이는 방안으로 제염의 필요성이 대두되고 있으며 가까운 장래에 처분장의 건설과 폐기물의 효과적인 감용처리가 수행되지 않은 한 적극적인 제염을 통하여 폐기물의 발생량을 최소화할 수 있는 기술축적이 선행되어야 한다. 제염기술은 각 분야의 모든 기술이 요구되는 공학적 기술분야로서 최근에 원자력산업에서 급속하게 성장하고 있는 기술이다. 이 기술은 인체피폭 저감과 방사성폐기물 처리비용 절감의 대안으로서 현재까지 원자력 선진국가에서 많은 연구개발이 진행되어 개발된 기술을 상용화하여 이용하고 있다.

### 3.5.1. 제염방법

우라늄변환시설 및 핵연료가공시설에서 관리의뢰한 고체폐기물중의 우라늄분말을 담았던 공드럼 686개를 방사성폐기물 포장드럼으로 재활용하기 위하여 분사연마기에서 제염을 수행하였다. 이때 발생하는 저준위 액체폐기물의 양을 줄이기 위하여 제염후 제염액을 직접 배수탱크에 보내지 않고 고체성분인 우라늄 분말, 녹, 찌꺼기들은 3개의 액체필터에 의해서 여과되도록 하였다. 공드럼의 제염에는 제염액으로 탈염수를 순환펌프에 의해 순환시키면서 분사노즐에서 4.5 bar의 압축공기를 페달에 의해 필요시 공급하여 드럼의 내부에 제염액을 가압 분사시키면서 제염하였다. 연마기 내부의 환기 및 감압상태를 유지하기 위하여 배기팬을 가동하고 연마기 내부의 안개현상을 방지하고 작업장면을 관찰할 수 있도록 건조기를 가동하였다. 제염액은 일정시간 사용한 후 오염도를 측정하여 오염도가 높거나 또는 액체필터의 막힘으로 제염액 순환이 원활하지 않으면 배수밸브를 열어 배수탱크로 보낸다. 제염과정에서 발생된 액체폐기물은 드럼당 약 2.5ℓ 정도였다. 제염시간은 드럼 1개당 최대의 효과를 얻을 수 있는 10분 정도로 제한하였다.

### 3.5.2. 제염효과

제염후의 오염도는 α핵종의 경우 법적허용한도인  $10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$  미만이었으며 제염계수는  $10^4 \sim 10^6$  사이로 제염효과는 양호하여 방사성폐기물 수집용기로 재활용하기에 충분하였다. 압축 또는 절단등의 처리되기 전까지 폐기물 저장고에 저장되었던 공드럼과 같은 방사성폐기물을 이와 같이 제염하여 재활용함으로써 저장고의 저장공간을 확보하고 폐기물 처리에 따른 처리, 처분비용과 수집용기의 관리비용을 절감할 수 있을 것이다. 표 4는 제염전 및 제염후의 드럼표면오염도와 제염계수를 나타내고 있다. 제염전, 후 드럼의 표면오염도는 smear test로 α, β를 측정하였다. 실제 오염된 공드럼 등의 제염작업에는 제염액으로 단순히 탈염수만으로도 제염이 충분히 가능하

였으나 보다 제염효과를 높이기 위해서는 제염시약을 사용하여 드럼내부의 고착성 오염물질을 제거할 수 있을 뿐만 아니라 제염효과를 향상시킬 수 있다고 사료된다.

표 5는 폐기물 형태별로 처리방법에 따른 감용비를 비교하여 나타낸 것이다.

#### 4. 결과 및 고찰

하나로의 본격가동과 연구시설의 증대로 방사성고체폐기물의 발생량이 해마다 증가하여 저장고의 저장용량이 포화상태에 접근함에 따라 저장중인 부식드럼 및 폐공드럼의 압축처리를 통한 부피 감용과 폐플라스틱통의 파쇄처리에 의한 감용, 폐드럼의 제염 재활용에 의하여 저장고의 저장공간을 확보하였다. 또한 방사성폐기물처리시설에 새로 제작 설치한 폐필터 압축 전처리장치의 정상가동과 현재 연구중인 가연성폐기물의 소각처리와 오염토양 폐기물의 제염에 의한 감용을 통하여 저장고의 용량을 획기적으로 확보할 수 있을 것이다.

방사성폐기물처리시설의 고체폐기물 처리설비를 활용하여 처리한 결과로서 60톤 압축기로 200ℓ 폐드럼 730개를 압축하여 220ℓ 드럼 92개에 포장하였다. 압축결과로부터 최대압축효과를 거두기 위해서는 100bar의 압축력이 적당하였으며 감용비는 1/8이었고, 100ℓ 공드럼 1,768개를 압축하여 200ℓ 드럼 89개에 포장하여 이때의 감용비는 1/10이었다. 파쇄기에서 폐플라스틱통 20ℓ 기준으로 2,786개를 절단하여 200ℓ 드럼 139개에 수집 포장하여 향후 소각로에서 소각처리할 때 투입이 용이하고 소각 성능이 향상될 수 있도록 하였으며 이때의 감용비는 1/5이었다. 폐필터 전처리장치를 사용하여 직육면체 형상의 폐HEPA 필터를 1차로 원주형상으로 축소 성형한 후 200ℓ 드럼내에 수집하고 다시 60톤 압축기로 보내져 압축감용처리 하였으며 이때의 감용비는 1/6이었다. 가연성잡고체폐기물의 실증소각처리한 결과 배기체의 농도는 배출허용기준치 이하로 만족스러웠으며 수거한 재료부터 계산한 폐기물의 감중비와 감용비는 각각 1/30, 1/250이었다. 천연우라늄분말을 담았던 공드럼 686개를 방사성폐기물 포장드럼으로 재활용하기 위하여 분사연마기에서 제염한 결과 오염도는 α핵종의 경우 법적 허용한도인  $10^{-5}\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$  미만이었으며 제염계수는  $10^4 \sim 10^6$  사이로 제염효과는 양호하여 방사성폐기물 수집용기로 재활용하기에 충분하였다.

방사성폐기물의 효율적인 관리를 위해서는 저장폐기물의 원활한 처리가 수반되어야 한다. 발생폐기물을 저장고에 계속적으로 저장하는 동안에 드럼의 부식과 폐기물의 유출 및 작업자의 과다피폭 우려가 있고 또한 무엇보다도 연구시설의 증대에 따라 폐기물의 발생이 증가함으로써 저장용량이 포화상태에 이르게 된다. 따라서 점차 증가하는 방사성폐기물 발생량과 또한 점차 엄격해지는 방사성폐기물 관리대책 등을 고려할 때 보다 효과적인 저장폐기물의 처리공정 개발과 경제적, 기술적인 적용의 필요성 및 향후 처분에 대한 안전성 확보를 고려한 종합적인 처리계획이 필요하다.

한편 발생폐기물의 시설별 특성을 분석하여 불필요한 폐기물의 발생을 최대로 억제하고 방사성폐기물 및 비방사성폐기물의 구분을 철저히 하며 자체처분을 적극 도입함으로써 방사성폐기물의 발생량을 최소화하여야 할 것이다.

#### 참고 문헌

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, " Treatment of Low-and Intermediate Level Solid Radioactive Wastes ", Technical Report Series No. 236, IAEA, Vienna (1984).
2. Trigils G., "Volume Reduction Technique in LLW Waste Management" NUREG/CR/2206, USNRC (1981).

3. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, "Treatment of Low-and Intermediate Level Solid Radioactive Wastes", Technical Report Series No. 223, IAEA, Vienna (1983).
4. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, " Factors Relevant to the Recycling or Reuse of Componen함으로서 폐기물 발생량을 줄였다.ts Arising from the Decommissioning and Refurbishment of Nuclear Facilities", Technical Report Series No. 293, IAEA, Vienna (1988).
5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, "Conditioning of Low-and Intermediate Level Solid Radioactive Wastes", Technical Report Series No. 222, IAEA, Vienna (1983).
6. 방사성폐기물처리시설 운전지침서, "방사성폐기물 처리지침" (1993).

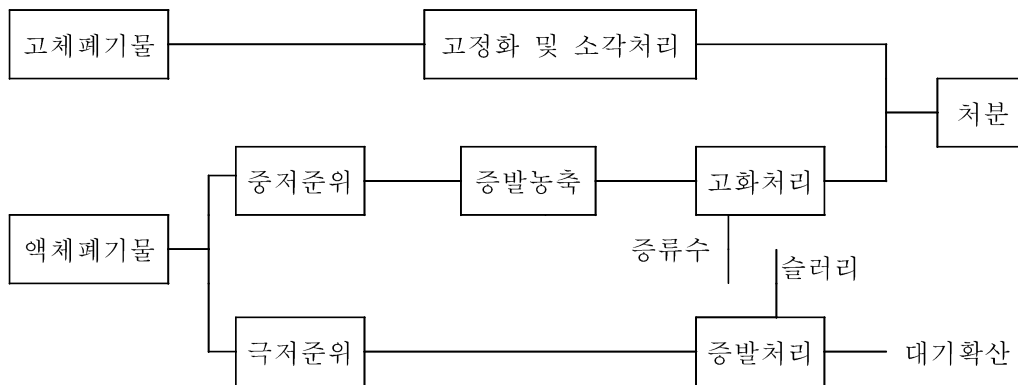


Fig. 1. Treatment Procedures of Radioactive Wastes in KAERI

Table 1. The Amount of Treated Radioactive Solid Wastes

처리방법	폐기물 종류	형 태	부 피	처리량
압축감용	폐드럼	공드럼, 부식드럼	200L	1,614
파 쇄	가연성	폐플라스틱 용기	20L	2,786
소 각	가연성	비닐, 종이, 플라스틱	100L	6
제염 재활용	폐드럼	우라늄분말 공드럼	200L	686

Table 2. Concentration of Exhausted Gas when Incinerating

성 분	농 도	배출 허용기준치
CO	185 ppm	600 ppm
SO <sub>2</sub>	2 ppm	60 ppm
HCl	1 ppm 이하	50 ppm
HF	1 ppm 이하	-
NO <sub>x</sub>	20 ppm	200 ppm
CO <sub>2</sub>	7.2 %	-

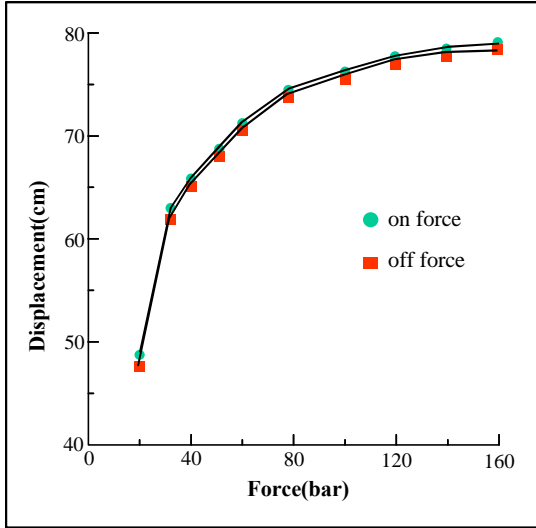


Fig. 2. Relation of Force and Displacement

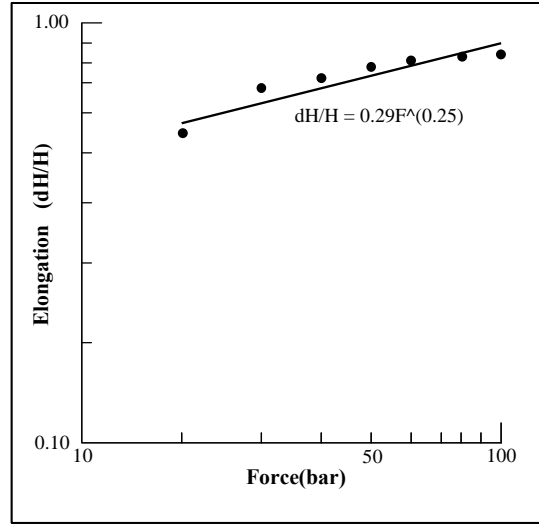


Fig. 3. Relation of Force and Elongation



Fig. 4. Before Compacting of Spent Drum



Fig. 5. Under Compacting of Spent Drum

Table 3. Result of Incineration for Testing

항 목	방사성동위원소 폐기물	비 고
폐기물 투입량 - 무게(kg) - 부피(L)	33.34 180	- 부피는 산술계산 으로 얻은 값
소각재 발생량(kg) - 소각로 - 후연소로 - 포대 여과기 합계 : 무게 (부피)	1.06 0.04 ≈0.01 <hr/> 1.11 (0.71L)	- 부피는 산술계산 으로 얻은 값
감 중 륜	30	
감 용 륜	250	

Table 4. Decontamination Results of Spent Packaging Drums

Drum No.	α (μCi/cm <sup>2</sup> )			β (μCi/cm <sup>2</sup> )		
	제 염 전	제 염 후	제염계수	제 염 전	제 염 후	제염계수
1	7.86E-1	9.50E-6	8.3E4	2.70E-1	6.64E-6	4.1E4
2	2.23E-2	1.31E-6	1.7E4	6.43E-1	1.45E-5	4.4E4
3	1.35E-1	2.15E-7	6.3E5	1.07E-1	1.71E-6	6.3E4
4	2.96E-2	1.85E-7	1.6E5	2.32E-2	7.46E-7	3.1E4
5	3.53E-1	3.27E-7	1.1E6	4.63E-1	2.85E-6	1.6E5

Table 5. Volume Ratio according to Treatment Methods

폐기물 형태	부 피	압축 전 크기(mm)	처리 방법	감용비
폐공드럼	100 ℓ	∅440x670x0.8t	압축 감용	1/10
	200 ℓ	∅571x873x1.2t		1/8
P.E 통	20 ℓ	237x295x377	절단 파쇄	1/5
HEPA필터	100 ℓ	610x610x292	전처리 후 압축감용	1/6
가연성 잡고체	-	-	소 각	1/250(감용비) 1/30(감중비)