

2001 춘계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## 원자력시설 제염·해체시 비정상 방사성 폐기물의 관리에 대한 고찰

### Management of Abnormal Radioactive Waste from Decontamination and Decommissioning of Nuclear Facilities

정경환, 이동규, 신재인, 정기정  
한국원자력연구소

#### 요 약

제염·해체 설계단계에서 예견하였던 것과는 다르게 실제 제염·해체 과정에서는 비정상적인 조건과 상황이 야기됨으로써, 실제 폐기물의 특성과 양이 당초 예상과는 또다른 비정상 폐기물도 발생하게 된다. 이러한 비정상 폐기물을 관리하기 위한 관리시스템을 분석하고, 이에 대한 최적 처리방법 및 공정을 선정할 수 있는 단위기술을 고찰하였다. 또한 원자력시설 제염·해체 동안 비정상적인 상황에서 사용할 수 있는 적절한 기술과 공정관리시스템도 도출하였다.

#### Abstract

The abnormal conditions and working situations during decontamination and decommissioning practice may cause the production of abnormal wastes, which can differ in character or in quantity from the waste anticipated during D&D planning. The management of such kind of wastes involves the need to evaluate existing waste management system in order to determine how abnormal wastes should be well handled and treated. In this study, the investigation of existing management practices which can be also applied to the abnormal waste management, was carried. Simultaneously, assistance in selection of appropriate technologies and processes is investigated which can be used when abnormal situations occur during decontamination and decommissioning practice.

## 1. 서 론

서울의 구 한국원자력연구소 연구용 원자로 1, 2호기(TRIGA Mark-II&III)는 원자력 과학기술 발전 뿐만 아니라 원자력산업 기술발전에 크게 기여한 바 있다. 그러나 1995년 30MW급 다목적 연구로인 하나로가 대전에서 준공·가동에 들어갔는 데다, 지난 30여 년간의 운영으로 수명을 다하게 된 연구용 원자로 1, 2호기는 폐로의 길을 걷게 되었다. 이에 따라 1997년부터 연구로와 관련 부대시설 및 부지 등에 대한 특성을 파악하고 제염·해체 설계를 하였다.

연구용 원자로의 운영과 동위원소 생산, 그리고 연구로를 이용한 응용연구, 이와 관련한 각종 실험실 내에서의 실험활동 등으로 인하여, 물리·화학적으로 서로 다른 특성의 제염·해체 대상물이 발생하게 된다. 이에 따라 일반적으로 고려될 수 있는 방사성폐기물에 대한 관리시스템은 제염·해체 설계 단계에서 이미 구축된 바 있다.

그러나 제염·해체 대상물에 대한 충분한 특성파악에도 불구하고 그 특성상 설계단계에서 예측하지 못하였거나, 혹은 구축된 방사성 폐기물 관리시스템에서 수용할 수 없는 방사성 폐기물이 발생할 수 있는데, 이러한 폐기물을 흔히 비정상 폐기물(abnormal wastes)로 규정한다.

다양한 형태의 비정상 폐기물은 다음의 특성 중 한 개 이상에 해당되는 것으로 볼 수 있다. 즉,

- 1) 구축된 방사성 폐기물 관리시스템에서 수용할 수 없을 정도로 많이 발생하는 폐기물
- 2) 방사능 준위 및 방사성 농도가 높아 구축된 방사성 폐기물 관리시스템에서 정상적으로 안전하게 처리하는 데 위험을 가할 정도의 폐기물
- 3) 핵종이나 화학적 조성 그리고 물리적 형태가 구축된 방사성 폐기물 관리시스템에서 처리할 수 없는 폐기물
- 4) 기타 폐기물의 물리적 특성이 구축된 방사성 폐기물 관리시스템에서 처리할 때 안전 관리상 적합하지 못한 폐기물

본 연구에서는 현재 구축된 관리시스템과는 별개로 제염·해체시 발생하는 비정규 방사성 폐기물을 안전하게 관리할 수 있도록 기술적 처리방법을 확립하고자 한다.

## 2. 비정상 액체폐기물 관리

### 2-1 액체폐기물의 특성

비정상 액체폐기물을 나타내는 기준으로는 폐기물의 화학적 특성, 물리적 특성, 방사능적 특성 그리고 생화학적 특성 등이 있다. 이들 비정상 액체폐기물의 다양한 특성은 처리공정 선정에 결정적인 요인이 된다.

화학적 그리고 생화학적 특성에는 폐액의 화학적 조성, pH, 현탁입자를 포함할 때의 제타 포텐셜, 산소 요구량, 독성, 그리고 생화학적 활동도 등이 있다. 물리적 특성에는 전도도, 에멀전화 정도, 밀도, 점도, 표면장력, 그리고 탁도 등이 있다. 또한 방사능적 특성에는 핵종의 조성, 방사능 안정도, 그리고 자체 차폐효과 등을 들 수 있다.

### 2-2 액체폐기물의 처리

액체폐기물의 처리기술은 지난 수 십년간의 연구로 다양한 기술이 확립되었으며, 비정상 폐기물의 처리에 적용될 가능성이 있는 처리기술은 여과, 이온교환, 증발농축, 막 기술 등이 있는데, 이를 요약하면 Table 1과 같다. 그리고 액체와 고체폐기물 처리기술에 대한 유사기술로 묶어 전환, 분리, 농축, 그리고 변환기술로 나누어 Table 2에 정리하였다.

Table 1. Radioactive Liquid Waste Treatment Technologies

Alternative system	Use	Filtering	First stage	Second stage	Third stage	Effluents
Ion Exchange/zeolite	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High and intermediate decontaminated water</li> <li>• Water based decontaminated liquids</li> </ul>	Filter	Zeolite bed	Cation bed	Mixed bed	Processed water, expended filters, inorganic and organic media
Multistage ion exchange	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intermediate level water</li> <li>• Water based decontaminated liquids with low solid content</li> </ul>	Filter	Cation bed	Mixed bed	Mixed bed	Processed water, expended filters and organic media
Evaporator/ion exchange resin	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intermediate level water</li> <li>• Water based and chemical decontaminated liquids</li> <li>• Liquids with medium to high solid content</li> </ul>	Filter	Evaporator	Cation bed	Mixed bed	Processed water, expended filters, bottoms, inorganic and organic media
Bitumen/ion exchange resin	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intermediate level water</li> <li>• Water based and chemical decontaminated liquid.</li> </ul>		Extruder Evaporator	Cation bed	Mixed bed	Processed water, expended organic media, bitumenized solid waste
Zeolite/evaporator	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High level water</li> <li>• Water based decontaminated liquids</li> </ul>	Filter	Zeolite bed	Evaporator	Mixed bed	Processed water, expended filters, inorganic and organic media and evaporator bottoms
Membrane technique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low level liquids</li> <li>• Decontaminated liquids</li> </ul>		Stage depends on technique chosen			Extended membranes, processed water
Chemical precipitation and solid phase separation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low and intermediate level liquids</li> <li>• Chemical decontaminated liquids</li> </ul>		Stage depends on technique chosen			Radioactive sludge, processed liquid

Table 2. Matrix of Treatment Technologies

Type of technology	Liquids	Solids	
		Wet	Dry
<b>Transfer and separation technologies</b>			
Decontamination	-	-	X
Filtration	X	X	-
Ion exchange	X	-	-
Chemical regeneration	-	X	-
Ultrafiltration	X	-	-
Reverse osmosis	X	-	-
<b>Concentration technologies</b>			
Evaporation	X	-	-
Distillation	X	-	-
Crystallization	X	-	-
Flocculation	X	-	-
Precipitation	X	-	-
Sedimentation	X	X	-
Centrifugation	X	X	-
Drying	-	X	-
Dewatering	-	X	-
Compaction	-	-	X
Baling	-	-	X
Shredding	-	-	X
Integrated system	X	X	-
<b>Transformation technologies</b>			
Incineration	X	X	X
Calcination	X	X	-

### 2-3 비정규 액체폐기물의 처리기술 선정

비정규 액체폐기물의 처리기술 선정은 이미 확보되었거나 확보할 수 있는 처리기술의 특성과 발생된 방사성 폐기물의 특성에 따라 다르다. 어떠한 경우라도 최종폐기물의 형태는 정부의 법령이나 규정에 맞게 혹은 처분 인수기준에 적합하게 되도록 하여야 한다. Fig. 1은 비정규 액체폐기물이 발생되었을 때 선정할 수 있는 처리계통의 예이다.

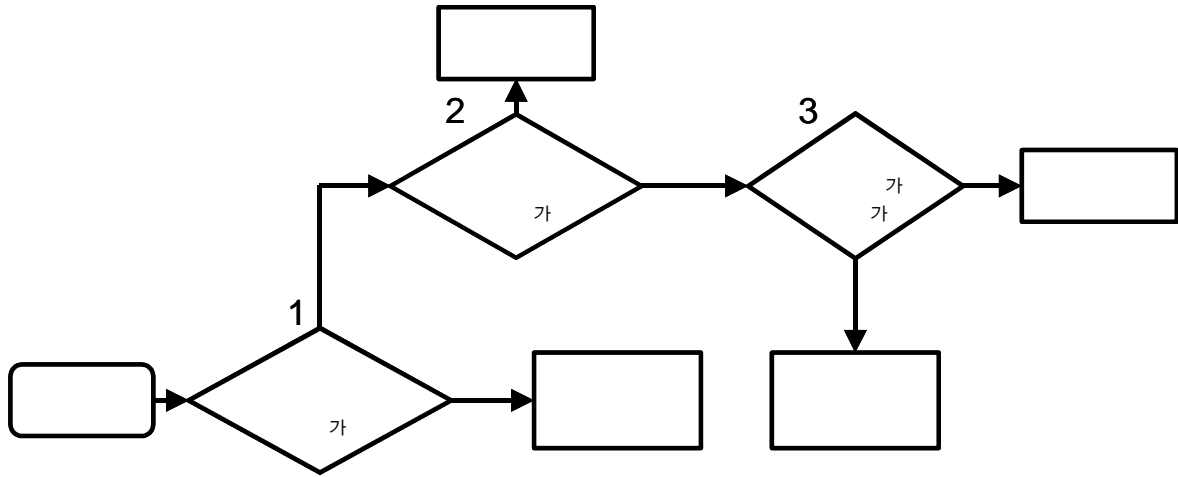


Fig. 1 Overview of Liquid Waste Treatment Technology

이때 선정 지점에서의 판단 기준은 다음과 같다.

Point 1 : 현탁입자의 제거여부

액체폐기물에서 대부분의 방사능은 콜로이드를 포함한 현탁입자에 포함되어 있다. 이러한 경우 현탁입자만 제거되면 폐액은 재사용 하거나 자연증발 처리하기에 적절한 상태가 된다. 현탁입자의 제거는 입자의 농도, 크기 그리고 밀도에 따라 전환기술과 농축기술 중 적절히 선정될 것이다. 액체폐기물에서 분리된 고체(입자)는 함수율이 매우 높은 형태로 다른 처리시스템을 적용하거나 고정화 될 수 있다. 분리된 정제 액체는 재사용 되거나 자연증발 처리될 것이다.

Point 2 : 폐기물의 화학적 특성(유기물 함유)

오일을 함유한 폐액이나 제염제를 사용한 제염폐액 또는 금속성 오염물을 제염하기 위한 유기성 제염폐액, 침전제를 함유한 수용액 등은 전환기술이나 농축기술로 처리하기가 매우 어렵다. 유기물이나 침전제 불순물을 처리하기 위해서는 일반적인 변환기술이나 소각기술 등이 적용되고 있다. 그러나 분리 후 함수율이 매우 높은 고체폐기물에 유기물까지 다량 함유되면 시멘트고화 등 고정화에 커다란 어려움이 따른다.

### Point 3 : 용해성 이온 농축물

액체폐기물의 화학적 특성은 처리기술 선정에 있어서 매우 중요한 요소이다. 용해성 이온의 함유량이 적은 폐액의 경우는 전환기술로 처리가 가능한데, 대표적인 처리기술로는 이온교환, 역삼투(RO), 그리고 한외여과 등이 있다. 전환기술 사용시 일반적으로 고려될 수 있는 수용액 내의 염 함유량은 600 mg/kg 이상이다. 그러나 방사성 액체폐기물 처리기술 선정에 있어서는 염의 제거율 보다는 방사성 물질의 제거율이 더 중요한 인자로 고려되어야 한다. 폐액 내에 방사성 핵종, 선정된 처리기술 그리고 사용될 장비의 특성에 따라 처리효율이 크게 좌우된다. 또한 처리 후 최종적으로 발생하는 폐기물의 부피는 처분비용에 크게 영향을 미치기 때문에 처리기술 선정에서 매우 중요하게 고려하여야 할 사항이다.

용해성 이온의 함유량이 많은 폐액은 농축기술로 고형분을 분리할 수 있다. 이때 폐액의 pH, 비등점, 증기압 등의 특성은 농축기술 선정시 중요한 고려인자이다.

## 3. 비정상 고체폐기물 관리

### 3-1 고체폐기물의 특성

비정상 고체폐기물을 나타내는 기준으로는 폐기물의 화학적 특성, 물리적 특성, 방사능적 특성 등이 있다. 그리고 이러한 비정상 고체폐기물의 다양한 특성은 처리공정의 선정에 중요한 결정인자가 된다.

화학적 특성으로는 일반적으로 폐기물 자체특성 즉 가연성, 비가연성 그리고 금속성 여부 등의 분류기준이 적용되며, 오염특성으로는 표면오염도, 부식층의 존재여부 그리고 방사화 여부 등이 대표적인 특성으로 나타난다. 한편 물리적 특성에는 밀도, 물리적 형태 및 크기 등이 고려되는데, 이러한 제반특성들이 고체폐기물의 처리시스템 선정에 매우 중요한 인자가 된다. 그리고 방사능적 특성에는 방사능 준위에 따른 분류로 처리와 취급에 기준이 되고 있다.

### 3-2 고체폐기물의 처리

원자력시설 제염·해체 과정에서 발생하는 비정상 고체폐기물은 우선 함수 상태와 건조 상태로 분류될 수 있다.

함수 고체폐기물은 액체폐기물 처리시스템으로부터 발생되거나 공정폐기물 등으로부터 발생되는데 일반적으로 이온교환수지, 여과 슬러지, 코팅된 재료 등이 있다. 이들의 처리기술 선정시 영향을 주는 주된 인자는 다음과 같다.

- 방사능 농도와 방사능 준위
- 물리적 특성 : 유리수 함유량, 고체함유량, 점도, 그리고 끓는점
- 화학적 특성 : 화학적 조성, 유기/무기물, 연소특성, 산화정도 그리고 pH

함수 고체폐기물 처리기술을 크게 분리, 농축, 그리고 변환기술로 나누어 각 분야별 기술들에 대한 특성을 Table 3에 정리하였다.

Table 3. Technologies Used for Processing Various Wet Solids

Type of technology	Evaporator concentrates and micellaneous sludges	Spent ion exchange resins	Filter sludges	Filter cartridges
Separation technologies				
Filtration	X	-	-	-
Concentration technologies				
Sedimentation	X	-	-	-
Centrifugation	X	-	-	-
Dewatering	X	X	X	-
Transformation technologies				
Incineration	X	X	X	X
Calcination	X	X	X	-
Wet oxidation	-	X	X	-



건조 고체폐기물은 일반적으로 가연성, 압축성 및 비압축성으로 분류되는데, 비압축성 폐기물이 주요 관심 대상물이다. 여기에는 장비를 포함하여 해체과정에서 발생하는 크고, 다루기 힘든 폐기물들이 해당된다. 이러한 폐기물들은 처리나 처분하기 전에 작은 조각으로 절단할 필요가 있다.

건조 고체폐기물 처리기술을 크게 전환, 농축, 그리고 변환기술로 나누어 각 분야별 기술들에 대한 특성을 Table 4에 정리하였다.

Table 4. Dry Solid Waste Treatment Technologies

Type of technology	Trash	Contaminated equipment	Irradiated hardware
Transfer technologies			
Decontamination	-	X	-
Concentration technologies			
Compaction	X	X	X
Shredding or sectioning	X	X	X
Baling	X	-	-
Transformation technologies			
Combustion	X	-	-
Incineration	-	-	-

### 3-3 비정상 함수 고체폐기물의 처리기술 선정

비정상 함수 고체폐기물의 처리기술 선정은 발생된 방사성 폐기물의 특성에 따라 다르다. Fig. 2는 비정규 젖은 고체폐기물이 발생되었을 때 선정할 수 있는 처리계통의 예이다.

이때 선정 지점에서의 판단기준은 다음과 같다.

#### Point 1 : 고정화 대상물인가

즉시 고정화를 할 것인가 아니면 다른 처리방법을 선택할 것인가의 결정에 대한 중요한 판단기준은 다음과 같다. 발생된 폐기물의 총 부피나 발생량은 규모의 경제성을 고려해야 하고, 폐기물에 함유된 액체가 수용액인가 혹은 유기용액인가를 확인하여야 한

다. 그리고 액체함량, pH, 방사능핵종 등이 처리기술 선정에 있어서의 중요한 인자이다. 정상적인 고정화 방법으로 처리할 수 없는 유기성물질 함유 폐기물을 제외하고, 이 결정단계에서 처리를 할 것인가 혹은 고정화를 할 것인가를 기술적인 평가와 함께 경제적인 평가도 비교·검토하여 결정해야 한다.

유리수가 아주 작거나 또는 많은 수용액을 포함하고 있지만 폐기물의 양이 적다면 고강도 용기를 이용한 처분방법이 오히려 경제적이다. 그리고 유리수가 많이 함유된 것은 고체폐기물은 운송이나 처분시 안전성에 결정적인 문제를 일으킬 수 있기 때문에, 이를 건조하는 기술을 이용하는 것이 매우 중요하다.

#### Point 2 : 주성분이 유기물인가

액체성 유기성분을 포함한 고체폐기물은 소각과 같은 연소기술로 효과적으로 처리할 수 있다. 그러나 연소공정 사용 이전에 수분을 분리·제거함으로써 연소효율을 높여야 한다.

#### Point 3 : 낮은 점도를 갖는 것은 고체폐기물인가

80% 이상의 수분을 함유한 것은 고체폐기물은 슬러리 함유 폐액 처리시스템으로 수용된다. 점도가 높으면 하소법(calcination)을 이용하여 수용액과 고형분으로 분리한 후 처리할 필요가 있다.

### 3-4 비정상 건조 고체폐기물의 처리기술 선정

Fig. 3에 비정상 건조 고체폐기물이 발생하였을 때, 선정할 수 있는 처리시스템의 예를 언급하였다. 고체폐기물 처리기술 선정에 영향을 주는 인자는 금속함유 여부, 개체 크기, 가연성 여부 그리고 방사능 준위 등이다. 만일 표면만 오염된 금속 고체폐기물이라면 적절히 세척하여 재사용 하거나 규제해제 폐기물화 한다. 이러한 처리방법 선정에는 경제성 분석이 필요하다. 또한 폐기물을 세단하거나 압축함으로써 부피를 감소시킬 수 있다. 폐기물의 화학적 특성은 연소공정 적용에 결정적 요인이 된다.

기술의 선정 지점에서의 판단기준은 다음과 같다.

Point 1 : 제염의 경제성

오염된 폐기물을 제염하여 재사용할 수 있게 하거나 규제해제 폐기물화 할 수가 있다. 그러나 제염에 따른 비용이 크거나 2차폐기물의 발생량이 과다하면 효과적이지 못하다. 표면이 오염된 금속성 폐기물에 대하여 제염이 실용적이고 경제적인 것으로 판단될 경우 또는 처분대상 폐기물이 운송에 적합할 경우 적절한 제염을 하는 것은 매우 효과적이다. 이때 제염용액은 액체폐기물로서 처리된다.

Point 2 : 재사용이나 규제해제 폐기물로의 전환에 따른 규정에 적합한가

제염 이후에 폐기물의 오염도를 검사하여 법적 기준값과 비교하여 재사용 여부 및 규제해제 폐기물화 할 것인가를 결정한다. 이 기준값을 초과하는 폐기물은 부가적인 제염 여부나 처분 여부를 판단할 수 있는 평가를 하여 결정한다.

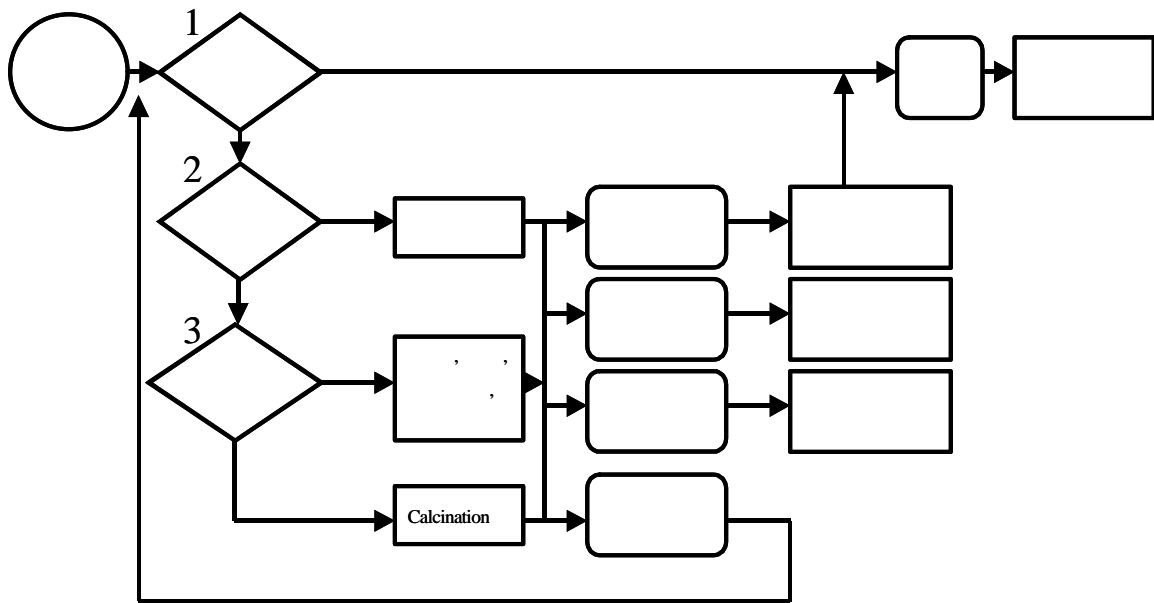


Fig. 2. Diagram for Selecting a Special Wet Solid Waste Treatment Technology

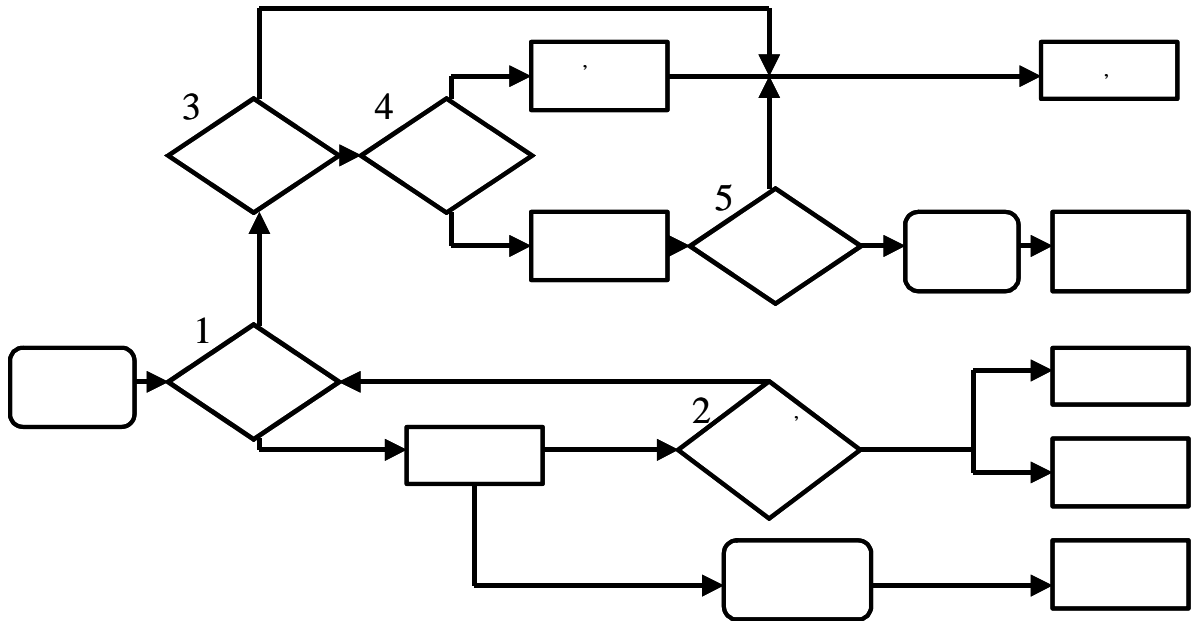


Fig. 3. Diagram for Selecting a Dry Solid Waste Treatment Technology

Point 3 : 감용효과에 따른 경제성

폐기물의 발생량과 폐기물의 특성에 따라 감용 여부를 결정한다. 비교적 높은 빈 공간이 있는 가연성폐기물과 압축성 폐기물은 부피 감용을 한다. 만약 감용 대상 폐기물이 소량 발생되면 장치개발 등의 고비용으로 인하여 감용기술의 적용이 경제적이지 못하다.

Point 4 : 농축기술과 변환기술의 경제성

발생된 폐기물을 대상으로 농축과 변환기술들에 대한 감용효과와 경제성을 분석하여 적합한 처리기술을 선정한다. 가연성 폐기물이라 하여도 배기가스의 성분에 따라 배기체 처리시스템의 추가 여부 등이 경제성에 큰 영향을 미치기 때문에 사전 분석연구가 필연적이다.

Point 5 : 고정화 여부

변환기술의 적용 후에 나오는 소각재 등은 처분을 위해 고정화 하여야 하나, 용융에 의한 용융염은 바로 처분이 가능하다.

## 4. 결 론

비정상 방사성폐기물 처리기술 선정에 영향을 주는 중요 인자중 하나는 폐기물의 물리적 형태이다. 본 연구에서는 액체, 함수 고체, 그리고 건조 고체 등의 3가지 물리적 형태로 방사성 폐기물을 분류하고, 각각의 폐기물에 대해 처리시스템을 확립하였다. 비정상 폐기물의 특성분석 및 적절한 분류는 폐기물 처리기술 선정에 매우 중요한 인자이다. 이러한 평가는 원자력시설 제염·해체 과정에서 비정상 방사성폐기물이 발생하였을 때, 이의 처리기술 선정 및 관리에 커다란 도움을 줄 것이다.

## 후 기

본 연구는 한국원자력연구소 기관고유사업의 일환으로 수행한 것입니다.

## 참 고 문 헌

1. 정기정 외, "연구용 원자로 폐로사업", KAERI/RR-1993/99, 한국원자력연구소, 1999
2. 정기정 외, "연구로 1호기 및 2호기 해체계획서 - 수정·보완", KAERI/TR-1654/2000, 한국원자력연구소, 2000
3. 정기정 외, "연구용 원자로 폐로사업", KAERI/RR-2099/2000, 한국원자력연구소, 2000
4. International Atomic Energy Agency, "Treatment of Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste Concentrates", Tech. Rep. Series No. 82 (1982)
5. International Atomic Energy Agency, "Management of Radioactive Waste from Nuclear Power Plants", Safety Series No. 69 (1985)
6. International Atomic Energy Agency, "Treatment of Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste Concentrates", Tech. Rep. Series No. 236 (1984)
7. International Atomic Energy Agency, "Treatment of Low- and Intermediate-Level Radioactive Waste Concentrates", Tech. Rep. Series No. 223 (1983)
8. International Atomic Energy Agency, "Management of Abnormal Radioactive Wastes at Nuclear Power Plants", Tech. Rep. Series No. 307 (1989)