

Acceptance Criteria and Evaluation Techniques for Radioactive Waste Forms (I)

Jeong-Guk Kim, Joon-Hyung Kim and Hun-Hwee Park

Korea Atomic Energy Research Institute

(Received August 31, 1990)

방사성폐기물 고화체의 인수기준 및 평가기술 (I)

김정국, 김준형, 박헌휘

한국원자력연구소

(1990. 8. 31 접수)

Abstract

In order to develop the acceptance criteria for the low and intermediate level radioactive wastes for the land disposal, the following items were reviewed : classifications of radioactive wastes with respect to disposal, basic requirements and criteria that have to be considered during waste management from the origin to disposal. From these studies, the standard test methods to evaluate radioactive waste forms(or packages) were shown.

요 약

방사성폐기물의 육지처분을 위한 인수기준을 개발하기 위하여 방사성폐기물의 처분관점의 분류법, 폐기물 발생에서 처분에 이르는 관리기간 동안 고려해야 할 기본요건 및 기준을 고찰하였다. 이로부터 방사성폐기물 고화체(또는 포장물)를 평가, 시험할 수 있는 표준시험방법을 보였다.

1. 서 론

이용가치를 상실한 방사성물질은 저장 및 처분 후에도 위해수준(harmful level) 이상의 방사능이 존재하는 동안 인간환경으로부터 격리시켜야 하는 방사성폐기물이 된다. 이러한 폐기물의 방사능 준위는 시간에 따라 감소하는데, 폐기물 관리에 있어 중요한 대부분의 핵종은 그 반감기가 다양하므로 상당기간에 대해 방사선 안전성을 확보하는 것이 필요하다.

방사성폐기물의 효율적이고 안전한 격리는 폐기물 관리시스템 전체의 성능에 따라 좌우되며, 육지처분의 경우 이 시스템은 적합한 용기에 들어있는 고정화된

(immobilized) 폐기물 고화체(또는 폐기물 포장물), 처분장내의 인공방벽, 그리고 처분부지의 천연방벽(즉, 모암과 주위의 지질학적인 매질)으로 구성된다[1]. 이러한 구성성분은 전체시스템과 함께 관련지어 인간환경을 보호하기에 필요한 격리가 이루어지도록 잘 선정되고 설계되어야 한다.

안정화된(conditioned) 방사성폐기물을 처분하기 위한 인수기준(acceptance criteria)을 확립함에 있어 규제기관은 처분시스템의 안전성평가를 할 필요가 있다. 또 어떤 고화매질에 얼마나 많은 폐기물이 고정화될 수 있으며, 제조된 고화체는 어느 정도의 내구성을 갖는가, 고화체가 받게 될 방사선 조사선량에도 안정한가 등의 성취가능성과 실제적인 내구한

제도 알아야 할 것이다.

일반적으로 방사성폐기물은 여러가지의 고화체 형태로 고정화되고 다양한 재질의 용기에 담겨져 안정화될 수 있다. 또 폐기물 발생자 또는 처리자는 가장 경제적인 방식을 택하여 처분장 운영자에게 인도할 수 있을 정도로 안정화시키길 바랄 것이다. 이와 같은 폐기물 발생자 또는 처리자의 활동과 처분장 운영자 및 규제기관 간의 상호이해는 전체적인 계통의 분석으로 집약되어야 하며 부지특성에 따라야 할 것이다[2].

현재 이러한 총괄적인 계통분석은 국제적으로도 실제처분장이 적고, 국내의 경우 아직 처분부지도 미정된 상태이므로 제한된 상태이다. 그러나 여러가지 관점에서 분석방법을 개발하려는 연구가 수행중에 있으며 [1, 2], 특히 폐기물 포장물의 인수기준에 관한 사항은 폐기물 발생자 및 처리자에게 있어 보다 중요한 관점이 되고 있어 이에 대한 연구가 필요한 실정이다.

본고에서는 방사성폐기물의 처분관점의 분류방법과 국내 발생의 대부분을 차지하는 중, 저준위 방사성 폐기물의 육지처분시 고려해야할 기본요건과 기준을 고찰하고 폐기물 인수기준에 관하여 안정화 측면에서의 고려사항을 검토하였다. 또 처분장에서의 인수기준을 확립하려면 폐기물 고화체를 시험검사하는 방법의 표준화가 선행되어야 하는데, 각국의 실제 시험방법과 인수기준을 살펴본 후 국내에서 발생되거나 발생이 예상되는 고화체에 적용할 수 있는 표준 시험방법을 제시하였다. 제시된 시험검사방법은 폐기물 고화체가 규제사항의 기준을 만족하는가를 확인하고, 여러 후보고화매질을 이용한 고화체간에서 비교가 가능하게 하여 보다 건전한 특성을 갖는 고화체를 개발하는데 적용할 수 있을 것으로 기대하며, 더 나아가 폐기물 처리공정을 보증하는 기술로도 응용할 수 있으리라 판단된다.

2. 방사성폐기물의 분류

원자력 산업으로부터 발생하는 방사성폐기물은 그 화학적, 물리적 형태가 매우 다양할 뿐만 아니라 방사능 역시 크게 다르다. 따라서 이들을 안전하고 용이하게 관리하기 위해서는 무엇보다도 우선 일정한 기준에 따라 분류가 이루어져야 하는데, 이러한

분류법에는 폐기물에 함유된 핵종의 반감기 뿐만 아니라 농도, 방사능, 독성, 물리적 형태 등에 따라 여러 방법이 있다. 여기서는 폐기물 분류법중 처분의 관점에 기준하여 분류하고 있는 외국의 예를 고찰하였다.

2.1. 미국

미국의 핵규제 위원회(Nuclear Regulatory Commission; NRC)는 10CFR61.55[3]에 방사성폐기물의 천층처분(near surface disposal)을 위해 폐기물 발생자나 처리자가 폐기물 고화상태, 영구처분조건을 결정할 수 있도록 함유된 핵종의 농도 및 성질에 의해 A, B, C급 폐기물로 분류하고 있다.

2.2.1. A급 폐기물

처분장에서 다른 등급의 폐기물과 분리시켜 처분해야 하는 폐기물로, 물리적인 형태와 특성은 10CFR61.56에 명시된 최소요건(minimum requirement)만 만족하면 작업자의 안전과 건강을 보호하는데 문제가 없어 포장물의 안전성을 증가시키기 위한 별도의 처리가 필요치 않는 폐기물이다. 장반감기 핵종(반감기가 5년 이상인 핵종)의 농도가 표 1에 명시된 값의 0.1배를 초과하지 말아야 하며, 단반감기 핵종의 농도가 표 2에 명시된 값을 초과하지 않는 폐기물을 말한다. 또 표 1, 2에 명시된 어느 핵종도 갖지 않는 폐기물도 A급 폐기물에 포함된다.

2.2.2. B급 폐기물

A급 폐기물보다 더 높은 핵종농도를 갖는 폐기물로서 처분 후에도 안정성을 보장하기 위해 보다 엄격한 조건, 즉 10CFR61.56의 최소요건과 안정화요건(conditioning requirement)을 만족해야 한다. 표 2의 1열에 명시된 값을 초과하나 2열의 값을 넘지 않는 폐기물이 여기에 속한다.

2.2.3. C급 폐기물

B급 폐기물보다 더 높은 핵종농도를 갖는 폐기물로서 처분 후 안정성을 보장하기 위한 요건 뿐만 아니라 부주의한 침입자(inadvertent intrusion)가 처분 시설에 들어 왔을 경우에도 이들을 보호하기 위한 부차적인 조치가 필요한 폐기물이다. 장반감기 핵종의 농도가 표 1에 명시된 값의 0.1배를 초과하나 그 값

표 1. 장반감기 핵종을 가진 폐기물의 농도기준 [3]

핵종	농도(Ci/m ³)
C-14	8
방사화된 금속종의 C-14	80
방사화된 금속종의 Ni-59	220
방사화된 금속종의 Nb-94	0.2
Tc-99	3
I-129	0.08
반감기가 5년 이상인 방출 핵종	100*
Pu-241	3,500*
Cm-242	20,000*

* : 단위 nCi/g

표 2. 단반감기 핵종을 가진 폐기물의 농도기준 [3]

핵종	방사능농도(Ci/m ³)		
	1 열	2 열	3 열
반감기 5년이상인 모든핵종의 합	700	(*)	(*)
H-3	40	(*)	(*)
Co-60	700	(*)	(*)
Ni-63	3.5	70	700
방사화된 금속종의 Ni-63	35	700	7,000
Sr-90	0.04	150	7,000
Cs-137	1	44	4,600

* : B, C급 폐기물중 이 핵종에 대해서는 무한대 임

을 넘지 않는 폐기물이거나, 단반감기 핵종의 농도가 표 2의 2열에 명시된 값을 초과하고 3열의 값을 넘지 않는 폐기물이 이에 속한다.

2.1.4. 기타 혼합된 폐기물

표 1, 2에 제시된 핵종이 서로 혼합된 폐기물의 경우, 장반감기 핵종에 대해 A급 폐기물이라면 단반감기 핵종의 값에 의해서만 분류되며, 장반감기 핵종에 대해 C급 폐기물이고 단반감기 핵종의 농도가 표 2에 명시된 3열의 값을 초과하지 않으면 이 폐기물은 C급 폐기물로 분류된다.

또한, 여러 종류의 방사성 핵종이 혼합된 경우에 대해서는 각 방사성 핵종의 농도를 적절한 제한치로 나누어 그 결과를 합함으로써 분수합을 결정하여야 한다. 이 적절한 제한치는 모두 동일한 표의 동일한 열로부터 취해야 하며, 폐기물의 분류가 해당 열에 의해 결정되려면 그 열에 있어 분수합이 1.0이하여

야 한다.

2.2. 프랑스

프랑스의 ANDRA(Agence Nationale pour la gestion des Dechets Radioactifs)에서는 방사성 폐기물을 다음과 같은 기준[4]에 의거하여 등급 1, 2, 3으로 나누고, 등급 2와 3은 다시 2A와 2B, 3A와 3B로 나누고 있다.

- 폐기물의 방사능 준위와 이에 따른 폐기물의 안정화 정도
- 폐기물의 특성과 균일정도
- 포장의 성질과 특성
- 포장물의 처분과 관련된 영향인자

2.2.1. 등급 1

차폐 및 고화대상이 되지 않고, 있는 그대로 처분되어지는 α, β, γ의 극저준위 방사능의 각종 고체폐기물을 함유하는 비압축성 포장물 형태가 이 등급에 해당된다. 이러한 형태의 포장물에 요구되는 특성들은 처분작업의 안정성 뿐만 아니라 처분장내의 적재 작업시에 안전성과 방사선 방어를 보장토록 하여야 한다.

2.2.2. 등급 2

비압축성화, 비분산화 또는 유리수가 제거되고 차폐처리된 α, β, γ의 극저준위 공정폐기물이나 각종 고체폐기물을 함유하는 포장물이 등급 2에 해당한다. 등급 1에서 요구되는 보장과 동일하다.

2.2.3. 등급 3

방사성 핵종의 장시간 누출억제를 보장토록 물리 화학적으로 안정한 물질내에 고정화된 고화 한계치 이상의 방사능을 갖는 공정폐기물이나 각종 고체폐기물을 함유하고 있는 포장물이 이 등급에 해당한다. 등급 2에서 요구되는 보장과 동일하다.

또, 등급 A는 불균일 폐기물을 나타내는데 각종 고체폐기물과 액체처리, 기체처리 및 환기시스템의 필터나 각종 여과장치 등이 해당되며, 등급 B는 침전물과 슬러지, 증발 농축액, 이온교환수지, 소각재 등과 같은 균일 폐기물을 나타낸다. 각각의 폐기물 포장물에 따른 분류등급을 표 3에 보였다.

그외에도 "지표위에 처분될 방사성 폐기물 포장물에

표 3. 포장물 형태에 따른 분류 등급 [4]

포장물 형태와 포장특성	폐기물의 물리특성	분류등급	방사능 형태
1. 금속용기와 기타 가벼운 포장	각종 고체폐기물 <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> } 액체처리 } 기체처리 } 환기 </div>	-	극저준위 β, γ
2. 금속용기와 기타 가벼운 포장	각종 고체폐기물 <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> } 액체처리 } 기체처리 } 환기 </div>	-	극저준위 α 극저준위 β, γ
3. 금속용기	비압축성 고체 폐기물	1	극저준위 α, β, γ
4. 금속용기 포장	각종 고체폐기물 <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> } 액체처리 } 기체처리 } 환기 </div> 슬러지, 조각재	2A	극저준위 α, β, γ
		2B	
5. 금속용기	각종 고체폐기물 <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> } 액체처리 } 기체처리 } 환기 </div> 슬러지, 조각재, 농축이온교환수지	3A	저준위 α 중저준위 β, γ
		3B	
6. 금속상자	각종 고체폐기물	-	극저준위 β, γ
7. 금속상자	각종 고체폐기물	-	저준위 α 중저준위 β, γ
8. 금속상자	각종 고체폐기물	2A	극저준위 β, γ
9. 금속상자	각종 고체폐기물	3A	저준위 α 중저준위 β, γ
10. 콘크리트 용기	각종 고체폐기물 <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> } 액체처리 } 기체처리 } 환기 </div> 슬러지, 조각재, 농축액 이온교환수지	3A	중저준위 β, γ
		3B	
11. 콘크리트 용기	각종 고체폐기물 <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> } 액체처리 } 기체처리 } 환기 </div> 슬러지, 조각재, 농축액 이온교환수지	3A	저준위 α 중저준위 β, γ
		3B	

대해 준수해야 할 질량당 방사능과 한계치의 결정”에 관한 ANDRA STP(Le Service de la Production Thermique) 1.1.1. A[5]에서 방사능 계산의 기준을 설정하고 있으며, 주요 동위원소나 방사능 방출체에 대해서 반감기에 의한 분류를 표 4에 보였

표 4. 허용방사능동위원소의 반감기(T) 분류 [5]

구 분	년
극단반감기	$T < 0.5$
단반감기	$0.5 \leq T < 6$
중반감기	$6 \leq T < 31$
장반감기	$T \geq 31$

2.3. 국제원자력위원회(IAEA)

2.3.1. 최대허용농도에 의한 분류 [6]

IAEA(International Atomic Energy Agency)는 방사성폐기물에 대해 기체, 액체, 고체로 나누고, 이들 각각에 대해 최대허용농도 (maximum permissible concentration; MPC)의 값으로 분류하는 일반적인 분류법을 표준화하여 추천하였으며, 그중 고체폐기물의 분류법을 표 5에 보였다.

표 5. 고체폐기물의 최대허용농도(MPC)에 따른 분류 [6]

분 류	폐기물표면에서의 방사선량D(R/h)	비 고
1	$D \leq 0.2$	β - γ -성분
2	$0.2 < D \leq 2$	α -성분 무시
3	$2 < D$	
4	α -방사능(Ci/m ²)	α -성분 우세 β - γ -성분 무시 임계성 위험 없음

2.3.2. 처분관점에서 의한 분류 [1, 7]

IAEA는 방사성 폐기물의 지중처분에 대한 기본 지침을 추천하면서, 적절한 방법으로 잘 안정화되어 포장된 폐기물에 대해 정성적으로 5가지 범주로 나누는 것을 제안했으며 이를 표 6에 나타내었다.

표 6. 처분에 따른 폐기물분류와 일반특성

폐기물 범주	주 요 상 태*
I. 고준위, 장반감기	높은 베타/감마 상당량의 알파 높은 방사성독성(radiotoxicity) 높은 열방출
II. 중준위, 장반감기	중간의 베타/감마 상당량의 알파 중간의 방사성독성 낮은 열방출
III. 저준위, 장반감기	낮은 베타/감마 상당량의 알파 중/저의 방사성독성 열방출 극소
IV. 중준위, 단반감기	중간의 베타/감마 알파 무시 중간의 방사성독성 낮은 열방출
V. 저준위, 단반감기	낮은 베타/감마 알파 무시 낮은 방사성독성 열방출 극소

*특성은 정성적이라 경우에 따라 차이가 있음; ‘상당량’이란 그 특성이 일반적으로 처분목적상 무시될 수 있음을 의미함.

2.3.3. 수송관점에서 의한 분류 [8]

IAEA는 “방사성 물질의 안전한 수송에 관한 규정” [8]에서 저비방사능(low specific activity, LSA) 물질을 LSA-I, II, III의 3그룹으로 분류하고(표 7 참조), 그 각각에 따른 포장 및 수송에 대한 제반사항을 규정하여 발표하였다.

3. 폐기물 인수기준

3.1. 기준의 체계

폐기물 고화체(또는 포장물)를 처분장에 인수하기 위해 갖추어야 할 기준을 개발하는 과정에 있어 세부적인 ‘폐기물 인수기준’에 앞서, 기준의 분류체계가 정의되어야 한다. 현재 이러한 분류체계는 다음과 같은 우선순위를 가진다 [2].

표 7. 수송관점에 의한 저 비방사능(LSA)물질의 분류 [8]

분 류	해 당 물 질
LSA-I	<ul style="list-style-type: none"> ●우라늄, 토륨과 같은 방사성 핵종을 가진 광석이나 그 농축물 ●미조사된 천연우라늄, 감손우라늄, 천연토륨의 고체 또는 그 고체나 액체화합물, 혼합물 ●A₂ 값이 제한되지 않은 핵분열성이 아닌 방사성 물질
LSA-II	<ul style="list-style-type: none"> ●토륨농축이 1 TBq/L(20 Ci/L)인 물 ●방사능이 전체에 분포되지 않고 그 추정평균비상사능이 고체, 기체는 10⁻⁴ A₂/g, 액체는 10⁻⁵ A₂/g을 넘지 않는 물질
LSA-III	<ul style="list-style-type: none"> ●방사성 물질이 고체나 고체집합체의 전체에 분포되었거나 콘크리트, 아스팔트, 세라믹 등 고체결합체내에 균일하게 퍼져있는 경우 ●방사성 물질이 비교적 불용성이나 본질적으로 불용성으로서 포장이 파손되어 물에서 7 일간의 침출로 인해 포장물당 방사성 물질의 손실이 0.1 A₂를 넘지 않는 경우 ●어떤 차폐도 없는 상태에서 추정평균비상사능이 2×10⁻³ A₂/g을 넘지 않는 경우

(주) A₂: 특별한 형태를 가지지 않는 방사성 물질의 최대방사능으로 IAEA Safety Series No.6[8]의 pp.17-30에 명시되었음.

-기본 보전안전기준(방사학적 방어기준)

ICRP (International Commission on Radiological Protection)의 추천사항[9, 10]과 기타 국제적인 지침에 준하여 국가적인 규제기관에 의해 확립된 기준[1, 11-13]

-폐기물 관리 일반기준

방사성폐기물 관리상의 모든 단계, 즉 취급, 임시 저장, 수송 및 최종처분에서 일반적으로 요구되는 기준

-처분장특수(site-specific) 기준

일반기준과 같은 형태를 지니나 개개의 처분장별로 그 특수한 처분환경에만 적용되어 요구되는 세부기준

-기술기준 및 경제적 고려

여러가지 안정화 방법의 기술적인 가능성과 그 비용에 대한 평가

이러한 기준에 대한 국제적인 논의가 아직 완결된 상태는 아니나, 그동안 폐기물 관리와 처리방식에 대한 기준을 확립하기 위한 노력이 여러기관 및 국가에서 추진되어 보고되었다. 일반적으로 인수기준은 그림 1과 같은 과정을 통해 유도되고 있는데 [2], 국내의 경우 처분부지가 확정되지 않은 상태이므로 처분장의 특성평가는 병행할 수 없는 형편이다. 그럼에도 불구하고 국내의 방사성폐기물의 발생량은 급

증하고 있어 이의 처리가 필연적인 바, 폐기물 발생자 및 처리자의 입장에서는 처분장 인수기준을 만족시키면서 안정하고 또한 경제적인 형태로의 안정화가 주요 관심이 되고 있다. 이러한 노력은 앞으로 처분장 특유의 조건과 관련된 기준이 확립되어 최종적으로 인수기준이 정량적인 수치를 통해 설정되고서야 완결될 수 있으며, 그후에도 계속적인 수정, 보완이 필요할 것이다. 여기서는 방사성폐기물의 관리에 직접 관련된 기준 및 고려사항에 대해서만 살펴 보았다.

3.2. 폐기물 관리 일반기준

방사성폐기물은 관리되는 여러단계에 따라 작업자의 안전을 보장하고 취급을 용이하게 하기 위한 기본요건과 정상조건 및 사고시에 폐기물의 손상을 방지할 수 있는 요건을 가져야 하는데, 여기서 폐기물이란 폐기물 자체, 안정화 매질 및 포장용기 등을 총칭하여 폐기물 포장물(waste package)이라고 쓰인다. 여기서는 이러한 기본요건을 관리하는 단계에 따라 크게 3개로 나누어 고찰하였다.

-확인 및 문서화 (document and identification)

-조업기간 (operational period)

-처분장 봉쇄후 (post-sealing period)

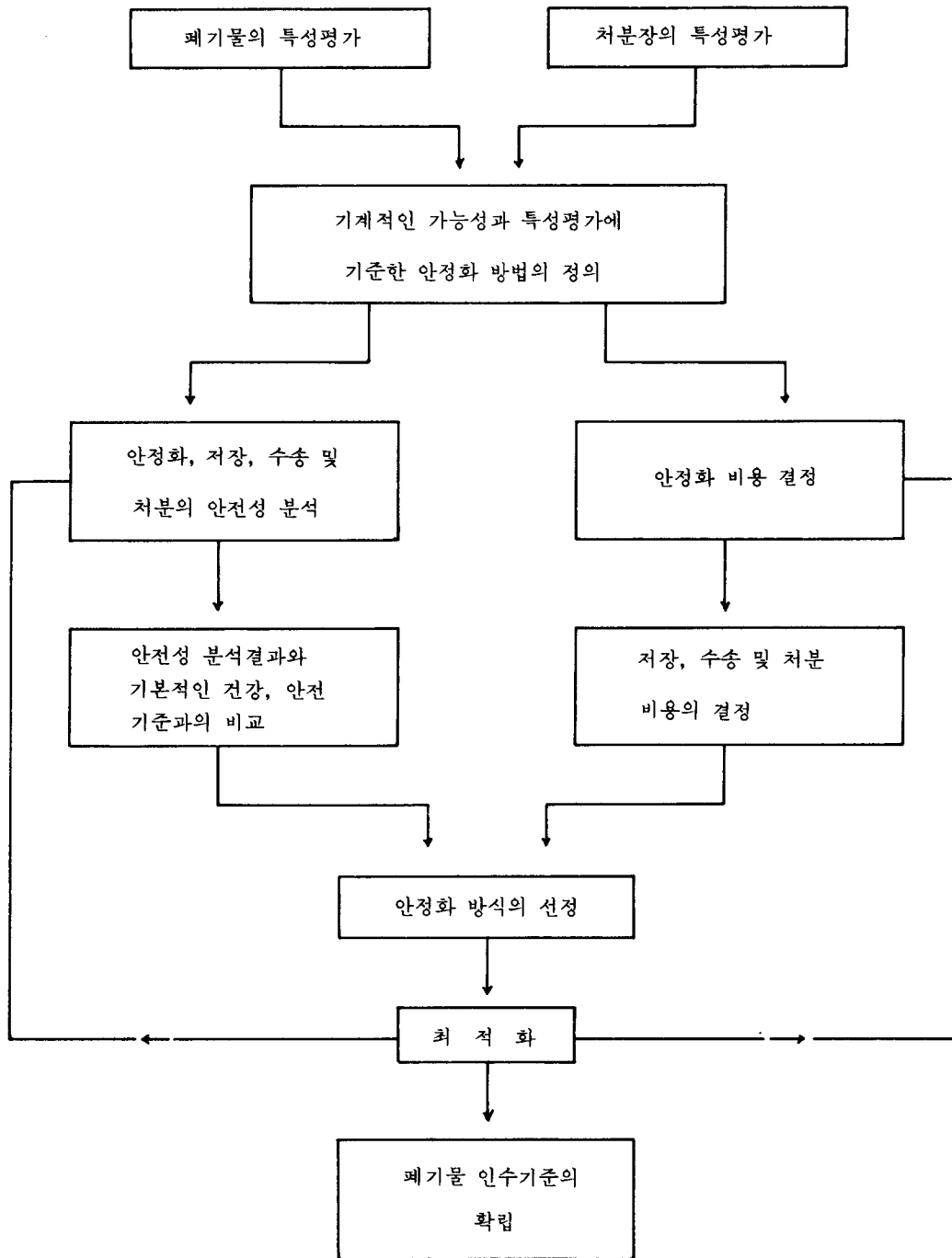


그림 1. 방사성폐기물 인수기준의 유도

3.2.1. 확인 및 문서화 요건

폐기물 포장물은 관리되는 모든 단계에서 취급 및 검사가 용이하도록 해야 한다.

- 1) 폐기물 포장물은 폐기물의 상태에 따라 실용적으로 표준화되어야 한다.
- 2) 폐기물 포장물은 각각 독특하게 구분되어 영구적으로 구분할 수 있어야 한다.
- 3) 폐기물 포장물마다 조성 및 함유핵종에 대한 정보가 포함될 기록이 작성되어 영구유지되도록 하여야 한다.

3.2.2. 조업기간 요건

폐기물 포장물은 포장, 수송, 저장설비 및 처분장 운영과 관련되어 예상되는 모든 조건에 대해 방사성 물질의 누출이 없도록 하여야 하며, 격리능력을 손상시킬 수 있는 포장물 간 또는 저장설비 및 처분장 구성요소와의 상호작용도 고려되어야 한다.

- 1) 폐기물 포장물은 처분장 봉쇄까지에 이르는 모든 관리기간을 통해 손상되지 않아야 한다.
- 2) 누출한도(limit of release) 분석시 화학반응, 부식, 생물학적 침해, 기체발생, 열효과, 기계적 효과, 방사학적 분해, 방사선 손상, 핵종유동성 및 기타 예견되는 상호영향 등이 고려되어야 한다. 누출을 제한하기 위하여 폐기물은 공기나 물에 잘 분산되지 않고 유리액체 (free liquid)를 갖지 않는 단일체(monolith)라야 한다.
- 3) 폐기물 포장물의 선량과 오염상태는 인가된 취급 방법 범위내라야 한다. 더우기 예견되는 취급사고, 장치에 의한 충격 및 낙하에도 손상이 없어야 한다. 만약 포장물이 깨어지게 되는 특별한 경우에도 입자 및 기체상 물질의 누출이 제한되어야 한다.
- 4) 폐기물 포장물은 “방사성 물질의 안전한 수송에 대한 IAEA의 규정”[8]을 만족해야 한다.
- 5) 폐기물 포장물은 연소가능성이 없어야 하며, 안전을 위협하는 폭발성, 인화성, 화학독성 및 부식성 물질을 포함하지 않아야 한다. 예외로 이런 물질이 포함된다면 특별한 고려가 있어야 한다.
- 6) 폐기물 포장물은 손상을 줄 정도의 양이나 압력으로 기체를 발생하지 말아야 한다.
- 7) 폐기물 포장물내에 핵분열성 물질의 함량은 모든 조업기간의 각 단계에서 임계성(criticality)을 고

려해 제한되어야 한다.

3.2.3. 처분장 봉쇄후 요건

포장용기의 손상 등으로 인해 누출되었을 경우 방사성물질의 이동이 충분히 천천히 일어나도록 해야 한다.

- 1) 포장물은 폐기물 관리제통의 한 부분으로 전체적인 안전성에 기여하여야 한다. 폐기물 고화체, 용기, 덧씌우개와 뒷채움의 기능은 상호 관련지어 분석되어야 한다.
- 2) 폐기물 포장물은 안전성이 요구되는 기간동안 방사성 물질을 포유(包有, containment)하는 능력을 가져야 하고, 이러한 포유능력의 상실은 천천히 일어나고, 또 단지 일부분만 누출되도록 한다.
- 3) 폐기물 포장물은 처분장의 방벽이나 다른 물질과 반응하여 손상을 일으키는 물질이 포함되지 않아야 한다.
- 4) 폐기물 포장물과 전체 처분계통은 책임제성을 방지하도록 하여야 한다.

3.2.4. 평가사항

앞서 제시한 기준들을 방사성폐기물의 안정화라는 측면에서 검토한다면, 제시된 기준과 관련된 폐기물 포장물의 특성을 다음과 같이 요약할 수 있다.

3.2.4.1. 확인 및 문서화

—폐기물 포장물의 표준화[14-16]

저장 및 취급 설비 또는 처분장 시설을 운영하는 관점에서 취급을 안전하고 용이하게 하기 위해 폐기물 포장물의 크기, 무게 등을 표준화하는 것이 필요하며, 이는 폐기물 발생자 또는 처리자와 처분장 운영자가 함께 아래사항을 고려하여 결정하여야 한다.

●용기의 크기, 무게 및 처분장에서의 적재를 포함한 모든 취급 방법

●처분장의 공간

—포장물의 확인과 기록[15]

모든 포장물은 처리공정을 떠나 처분장에 이르는 관리기간중 어느 곳에 있는지를 알기 위해 개별적으로 확인되어야 하며, 이를 위해 표준화된 기록 체계가 개발되어 포장물의 완전한 이력(history)

이 기록되어 관리되어야 한다. 그 기록에는 적어도 다음 사항들이 포함되어야 한다.

- 포장물 확인번호
- 폐기물 내용확인서
- 폐기물 발생지
- 처리 및 포장일자
- 최대표면선량률
- 중량
- 용기형태
- 폐기물의 물리적 형태
- 분석평가 정보
- 독극성 또는 부식성 물질의 내용물
- 유기내용물의 중량
- 수송일자
- 운반인 확인
- 기타 중요하다고 간주되는 정보

3.2.4.2. 조업기간

-폐기물 고화체와 용기의 양립성 (compatibility) [17-19]

고형화된 폐기물을 적절한 용기에 넣어 취급하는 모든 기간동안 안전성을 보장하는 것 외에도 고형화된 폐기물 고화체 또는 주변환경과 용기재질간의 상호작용은 핵종이 인간환경으로 유출되는 주요 통로가 되므로, 폐기물 고화체로 인한 내부부식과 주위환경으로 인한 외부부식을 확인하는 용기재질의 내식성시험이 필요하다.

-임계 안전성 [2]

안정화 설비로 유입되는 폐기물에 핵분열성 물질이 함유되어 있는지에 대한 분석이 필요하며, 만약 존재한다면 안정화 단계에서 특정성분과 함께 침전되어 폐기물 또는 고화체의 한쪽에 농축될 가능성이 있으므로 모든 공정의 조업상태를 완전히 이해하고 발생가능성을 확인해야 한다.

-기계적 안전성

폐기물 고화체가 제조되어 처분작업에 이르는 기간동안 물리적 건전성(integrity)을 유지하기 위한 어느 정도의 기계적 안전성을 가져야 하는데 [17], 건전성에 영향을 주는 인자로는 열응력(thermal stress), 내부 및 외부 압력, 그리고 기계적인 충격 등이다. 폐기물 포장물에 주어지는 기계적인 충격은 표면적의 증가를 가져오고, 용기의 손상시 흡

입가능한 미소한 분말도 발생하게 된다[20]. 또 처분장내에 적재시 압력도 견딜 수 있는 압축강도도 지녀야 한다[3, 20].

-표면선량[15, 16, 21, 22]

안정화 단계에서 이미 선량률이 제한되므로 중요한 요건은 아니지만 폐기물 포장물 표면에서 발생하는 기준치 이상의 표면선량이면 처분장 적재시 까지 원격취급을 해야 하며, 이에 따라 최대표면 선량률에 기준하여 적절한 차폐설비가 제공되어야 한다.

-표면오염[16, 22]

폐기물 포장물의 오염을 제한하면 저장, 수송 및 처분작업시 작업자의 피부를 줄일 수 있으며, 특히 옮겨지는 경우라면 저장 또는 처분환경의 내부나 외부도 오염될 수 있으므로 용기표면의 제거성(smearable) 오염에 대한 제한이 필요하다.

-기타

- 기체발생 [3, 21]
- 압축성 기체 [3, 21, 23]
- 연소성 [3, 16, 17, 21, 24]
- 인화성 [3, 16, 21, 22, 24]
- 폭발성 [3, 16, 21-24]
- 화학독성 [16, 17, 21-25]
- 부식성 물질 [26-29]
- 열순환 [20, 30, 31]
- 유리수 [20-22, 27, 32]

3.2.4.3. 처분장 봉쇄후

-방사선 안정성

장시간에 걸쳐 핵종의 감쇄로 야기되는 방사선 조사가 폐기물 고화체의 안정성에 미치는 효과는 평가해야 할 중요특성중 하나인데, 다음의 효과가 일어난다[17, 33, 34].

- 체적변화
- 온도상승
- 기체발생
- 침출(leach)속도의 증가
- 고화체의 파쇄, 표면적 증가

-화학적 내구성

장기 저장시 고려해야 할 가장 중요한 특성은 물과 고화체간의 접촉으로 인해 폐기물 또는 처분장으로부터 핵종이 환경으로 누출되는 것이다[35,

36]. 또, 폐기물 고화체의 특성을 변화시킬 수 있는 장시간에 대해 폐기물과 고화매질이 주위환경과 화학반응성을 가지는가에 대한 평가도 필요하다.

-임계 안전성 [37, 38]

어떤 임계성 위험도 피하기 위해 각각의 폐기물 포장물에 대해 핵분열성 물질의 함량을 확인해야 하며, 장기측면에서 평가해야 한다. 즉, 처분기간 동안 포장물이 손상되어 핵분열성물질이 침출되어 나올 수 있으며, 이러한 물질은 뒷채움 물질이나 모암내에 흡수되어져 선택적으로 농축될 가능성이 있으므로 처분장에 적재하는 방법 또는 폐기물중 핵분열성물질의 한계가 설정되어 확인되어야 한다.

-기계적 안정성 [2, 39]

장기적인 기계적 안정성은 폐기물 고화체의 압축강도와 밀접하게 관련된다. 강도가 고르지 않다면 쉽게 부스러질 수 있으므로 압축강도의 균일성에 대한 검토도 필요하다. 포장용기의 손상 후 물이 고화체와 접촉하여 핵종이 누출되는 특성은 표면적 뿐만 아니라 용기내의 빈공간, 고화체 내부의 공극 등도 주요 고려사항이다.

-주위환경과의 반응성

제염작업시 사용되는 착화합물이 고정화 후에도 누출될 수 있는 형태로 남아 있다면 이들이 모암의 핵종유동성에 중대한 영향을 줄 수 있으며 [40], 유기질의 폐기물 고화체에 생물학적 침해가 발생해 손상을 주거나 침출의 증가, 또는 기체생성을 야기할 수 있는 것 [41]에 대해서도 평가되어야 한다.

4. 시험검사방법

앞서 고찰한 특성평가사항과 관련된 시험은 각 나라별, 발생폐기물 고화체별로 다양할 뿐만 아니라 적용하고 있는 시험검사의 항목수도 많다. 이러한 시험검사의 전항목을 모든 고화체에 다 적용할 필요는 없고 고화매질의 특성, 취급, 저장, 수송 및 처분의 각 단계에서 요구되는 요건, 그리고 처분방식에 따라 시험의 중요도 [24, 39, 42, 43]에 따라 고화체의 특성을 잘 나타내고 인수기준에의 적합성 여부를 잘 평가하는 시험방법이 선정되어야 하지만, 여기서는 지금까지 고화체 평가에 적용된 방법을 관련된 특

성대로 물리, 기계, 열 및 온도, 화학, 내수, 방사선, 미생물, 그리고 기타 특성으로 분류하여 보았다. 분류된 시험방법은 평가결과의 이용확대 및 비교를 위하여 표준화가 되어야 하는데 외국의 경우 [20, 39] 각각 자국의 공업규격에 준하고 있어 가능한 관련된 한국공업규격 (KS)으로 표준화를 꾀하였고, 기타 KS에 명시되지 않은 항목은 방사성폐기물 고화체를 시험검사하는 방법으로 널리 알려진 것을 택하여 표 8에 나타내었다. 단, 폐기물 또는 고화체의 성분 및 방사능 분석이나 비파괴시험 등은 제외하였다.

5. 결 론

방사성폐기물 고화체(또는 포장물)에 대해 적용되는 분류방법과 육지 처분의 경우 인수기준의 일반조건 및 이에 따른 평가사항 등을 고찰하여 보았다. 이러한 고찰을 통해 방사성폐기물 고화체의 처분장 인수시 검사에 이용할 수 있는 시험방법을 보였으며, 이를 KS에 준한 표준방법으로 제시해 보았다. 제시한 시험검사방법은 고화체 처분장 인수시 평가기술 외에도 여러 후보고화체간의 특성비교가 가능하게 하여 보다 건전한 특성을 지닌 고화체를 개발하는데 뿐만 아니라 더 나아가 폐기물 처리공정을 보증하는 기술로도 응용할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. IAEA, "Criteria for Underground Disposal of Solid Radioactive Wastes", IAEA Safety Series(SS) No. 60, International Atomic Energy Agency, Vienna (1983)
2. IAEA, "Characteristics of Radioactive Waste Forms Conditioned for Storage and Disposal; Guidance for the Development of Waste Acceptance Criteria", IAEA-TECDOC-285, IAEA, Vienna(1982)
3. 10CFR61, "Licensing Requirements for Land Disposal of Radioactive Waste", Code of Federal Regulations(CFR), Office of Federal Register(1982)
4. ANDRA, "Definition des niveaux et program-

표 8. 폐기물 고화체의 검사항목과 관련규격

검 사 항 목		관 련 규 격
물 리 특 성	비중(밀도)	KS-A-0602, KS-M-3016
	공극률	KS-F-2353
	균질성	KS-M-2364
	비중분포	[39]
	압축강도분포	KS-A-0602, KS-M-3016
	공극, 균열의 분포	KS-L-5105, KS-M-2351
	방사성물질의 분포	KS-M-2364
	유리수 측정	[39]
	pH 측정	ANS 55.1
	형 태	KS-M-0011
안정성	원통굽힘시험 [44]	
수분함량	구멍이동시험 [44]	
		[45]
기 체 특 성	압 축 강 도	경질고화체 KS-M-3816, KS-L-5105
	인장강도	연질고화체 KS-F-2351
	휨강도	KS-L-5104, KS-M-3006
	경도	KS-F-2408
	충격압축강도	KS-M-3015, KS-M-3037
	충격인장강도	KS-M-3074
	충 격	KS-M-3056
	휨강도	Izod 시험 KS-M-3055
	자유낙하시험	Charpy 시험 KS-M-3056
	분쇄시험	[45,46]
		[45,46]
열 및 온 도 특 성	연화점 및 인화점	KS-M-3076, KS-M-2010
	연소성	산소지수법 KS-M-3032
	내화성	화재전파법 KS-M-3015
	열전도율	JIS-K-6911
	열팽창율	KS-F-2264, KS-F-2265
	성형수축	[39]
	비열	JIS-K-6911
	열분해기체 발생	ASTM-C-351
	방사성핵종의 휘발	[39]
	동결/융해순환 시험	[39]
		KS-F-2456
화 학	침 출 시 험	표준시험법 [47]
	침출지수법	ANS 16.1
	화학적산소요구량(COD)	KS-M-0115

침 수 시험	[43, 46]
방사선 조사 시험	[20, 43]
미생물영양 시험	KS-A-0702
기 표면 오염	KS-A-4504
타 표면선량율	[16]

- mes de caractérisation", Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs(ANDRA), 313.1 NT 04-14(1984)
5. ANDRA, "Détermination des activités massiques et de leurs limites à respecter pour les colis de déchets radioactifs destinés à être stockés sur un site de surface", ANDRA, le Service de la Production Thermique(STP) 1.1.1. A. (1985)
 6. IAEA, "Standardization of Radioactive Waste Categories", IAEA Technical Report Series(TR) No. 101, IAEA, Vienna (1970)
 7. IAEA, "Underground Disposal of Radioactive Wastes: Basic Guidance", IAEA SS No. 54, IAEA, Vienna (1981)
 8. IAEA, "Regulation for the Safe Transport of Radioactive Materials, 1985 Edition", IAEA SS No. 6, IAEA, Vienna(1985)
 9. ICRP, "Recommendations of the ICRP", ICRP Publication No.26, International Commission on Radiological Protection(ICRP), Pergamon Press, Oxford(1977)
 10. ICRP, "Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste", ICRP Publication No. 46, ICRP, Pergamon Press, Oxford(1985)
 11. OECD-NEA, "Objectives, Concepts and Strategies for the Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear Power Programmes", Nuclear Energy Agency (NEA), Organisation for Economic Cooperation and Development(OECD), Paris(1977)
 12. OECD-NEA, "Long-Term Radiation Protection Objectives for Radioactive Waste Disposal", NEA, OECD, Paris(1984)
 13. OECD-NEA, "Long-Term Radiological Aspects of Management of Waste from Uranium Mining and Milling", NEA, OECD, Paris(1984)
 14. IAEA, "Principles for Establishing Limits for the Release of Radioactive Materials into the Environment", IAEA SS No.45, IAEA, Vienna(1978)
 15. McGough, J.M., "TRU Waste-Certification-Compliance Requirements for Newly-Generated Contact-Handled Waste for Shipment to the WIPP", WIPP-DOE-114, U.S. Department of Energy(DOE), (1981)
 16. U.S. DOE, "TRU Waste-Certification-Compliance Requirements for Contact-Handled Waste Retrieved from Storage for Shipment to the WIPP", WIPP-DOE-137, DOE(1982)
 17. IAEA, "Conditioning of Low- and Intermediate-Level Radioactive Wastes", IAEA TR No. 222, IAEA, Vienna(1983)
 18. Vejmelka, P. and R.A.J. Sambell, "Characterization of Low and Medium-Level Radioactive Waste Forms; Joint Annual Progress Report 1982", EUR 9423, Commission of the European Communities, Belgium(1984)
 19. Colombo, P.C. and R.M. Neilson, JR., "Properties of Radioactive Wastes and Waste Containers; First Topical Report", BNL-NUREG-50957, Brookhaven National Laboratory(BNL), Upton, NY(1979)
 20. NRC, "Final Waste Classification and Waste Form Technical Position Papers", Branch Technical Position on Waste Form, U.S. Nuclear Regulatory Commission(NRC), (1983)
 21. DOE 5820.2, "Radioactive Waste Manage-

- ment", Chapter III, Management of Low-Level Waste, DOE, Washinton, D.C.(1984)
22. DOE Memorandum, "Guidance Document for DOE Order 5820.2, Chapter III, Management of Low-Level Waste", prepared by EG & G Idaho, Inc.(1984)
 23. Irby, H.H., "Report of the Steering Committee on TRU Waste Acceptance Criteria for the Waste Isolation Pilot Plant", WIPP-DOE-069, DOE(1980)
 24. IAEA, "Treatment of Spent Ion-Exchange Resins for Storage and Disposal", IAEA TR No. 254, IAEA, Vienna(1985)
 25. IAEA, "Treatment of Low- and Intermediate-Level Liquid Radioactive Wastes", IAEA TR No. 236, IAEA, Vienna(1984)
 26. 노윤래 외, "저준위 방사성 폐기물 처리 기술 개발(I)," KRC-85N-SO3, 한국전력공사 기술연구원(1986)
 27. Lennemann, W.M., "Nuclear Waste Management", A Final Report to the Div. Technical Assistance and Cooperation, IAEA, Under IAEA project No. ROK/9/022-1(1985)
 28. Green, B.J., et al., "Potential Radiation Criteria for Ontario Hydro's Reactor Waste Disposal Program", Waste Management '84, 1, 467(1984)
 29. IAEA-TECDOC-240, "Packaging of Radioactive Wastes for Sea Disposal", IAEA, Vienna(1979)
 30. Service Central de Sûreté des Installations Nucleaires(SCSIN), FRANCE, "Règles Fondamentales de Sûreté(RFS)", RFS. III .2.e(1986)
 31. Kalb, P.D. and P. Colombo, "Waste Form Development/Test", BNL-33675, BNL, Upton, NY(1983)
 32. Davis, R.E. and E.P. Gause, "Development of Low-Level Waste Form Criteria Testing of Low-Level Waste Forms", NUREG/CR-2813, BNL, Upton, NY(1983)
 33. IAEA, "Characteristics of High-Level Waste Products", IAEA TR No. 187, IAEA, Vienna(1979)
 34. IAEA-TECDOC-239, "Evaluation of Solidified High-Level Waste Forms", IAEA, Vienna(1981)
 35. 이진재, "방사성폐기물 처분장내의 고화폐기물의 용출결과와 방사성 핵종의 지층이동에 관한 연구", 한국과학기술원(1986)
 36. 한경원 외, "처분안전성 평가기술 개발", KAERI/RR-892/89, 한국원자력연구소(1990)
 37. Shord, A.L., "Preliminary Criteria for Shallow-Land Storage/Disposal of Low-Level Radioactive Solid Waste in and Arid Environment", RHO-CD-810, Rockwell Hanford Operations(RHO), Richland, WA(1979)
 38. Moore, E.L. and D.B. Calmus, "Rockwell Hanford Operations; Radioactive Waste Package Acceptance Criteria", RHO-CD-568, RHO, Richland, WA(1978)
 39. 日本 Plastic 固化體評價 Manual 檢討會, "Plastic 固化體 評價試驗指針書"(1984)
 40. Disalve, R., "Solidification of Chemical Docontamination Resin at Ginna", Waste Management '84, 2, 173(1984)
 41. Adolellah, N.A. and B.M.Pedersen, "Microbial Degradation of Bitumen used for the Conditioning of Low and Medium Level Radioactive Waste", Proceedings of Commission of the European Communities, Central Burea for Nuclear Measurements(CBNM), Geel, Belgium, 163(1983)
 42. 박헌휘 외, "방사성폐기물 고화체의 특성평가 기술", KAERI/RR-699/86, 한국원자력연구소(1987)
 43. 김정국, "방사성폐기물 고화체의 특성평가 및 검사방법 연구", 한국원자력연구소, '88년도 선임승격보고서(1988)
 44. Aittola, J.P. and R. Sjolem, "Characterization of Solidified Reactor Waste Products", Work carried out at STUDSVIK 1978-1981, IAEA-SR-57/22(1981)
 45. Commissariat l'Energie Atomique(CEA),

- FRANCE, "Caractérisation des colis de déchets radioactifs faible et moyenne activite", CEA(CEA-BECC) (1984)
46. 과학기술처, "방사성 물질등의 포장 및 운반에 관한 규정", 과기처 고시 제 85-8호(1985)
47. Hespe, E.D., Atomic Energy Review, 9(1), 195(1971)
48. KS-A-0602, "고체비중 측정 방법"(1980)
49. KS-M-3016, "플라스틱의 밀도 및 비중시험 방법"(1980)
50. KS-F-2353, "다져진 역청 혼합물의 걸보기 비중 시험 방법"(1980)
51. KS-F-2364, "다져진 역청혼합물의 공기혼합을 시험방법"(1982)
52. KS-L-5105, "수경성 시멘트 모르타의 압축강도 시험방법"(1982)
53. KS-L-2351, "역청혼합물의 압축강도 시험방법"(1980)
54. ANS 55.1, "Solid Radioactive Waste Processing System for Light Water Cooled Reactor Plants", (1979)
55. KS-M-0011, "수용액의 pH 측정방법"(1982)
56. KS-M-3816, "플라스틱의 압축강도 측정방법"(1982)
57. KS-L-5104, "수경성 시멘트 모르타의 인장강도 시험방법"(1981)
58. KS-M-3006, "플라스틱의 인장성 측정방법"(1983)
59. KS-F-2408, "콘크리트의 휨강도 측정방법(단순보의 3등분점 하중법)"(1981)
60. KS-M-3015, "열경화성 플라스틱 일반시험 방법"(1982) 61. KS-M-3037, "플라스틱의 로크웰 경도 시험 방법"(1983)
62. KS-M-3074, "경질플라스틱의 낙추 충격시험통칙"(1981)
63. KS-M-3056, "경질플라스틱의 샤르피 충격시험통칙"(1982)
64. KS-M-3055, "경질플라스틱의 아이조드 충격시험통칙"(1982)
65. KS-M-3076, "열가소성 플라스틱의 비카트 연화점 시험방법"(1982)
66. KS-M-2010, "원유 및 석유제품 인화점 시험방법"(1983)
67. KS-M-3032, "산소지수법에 의한 고분자 재료의 연소시험 방법"(1980)
68. KS-F-2264, "보온재의 열전도율 측정방법(평판 비교법)"(1981)
69. KS-F-2265, "보온재의 열전도율 측정방법(평판 직접법)"(1981)
70. JIS-K-6911, "열경화성 Plastic 일반시험 방법"(1979)
71. ASTM-C-351, "Standard Test Method for Mean Specific Heat of Thermal Insulation"(1982)
72. KS-F-2456, "급속 동결 용해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법"(1981)
73. ANS 16.1, "Measurement of the Leachability of Solidified Low-Level Radioactive Waste", American Nuclear Society, June 20, (1984)
74. KS-M-0115, "공업용수의 화학적 산소소비량(COD) 시험방법"(1981)
75. KS-A-0702, "곰팡이 저항성 시험방법"(1980)
76. KS-A-4504, "방사선 표면오염에 대한 문질러 채취하여 측정하는 방법"(1981)