

해외 방사성금속폐기물 재활용 기술 검토 연구
The Study on the Overseas Recycling Technology of the Radioactive Metallic Wastes

김희령, 정운수, 신재인
한국원자력연구소

요약

물질 방출의 규제 기준은 나라마다 서로 달라 국제적인 기준은 현재 수립되어 있지 않는 것으로 파악되었다. 그러나 방사성폐기물 처분장 확보의 어려움과 자원의 재활용/재사용, 처분 비용 절감 등의 목적으로 대부분의 원자력선진국들은 금속성폐기물의 재활용 등을 위한 연구를 계속하고 있다. 실제적으로, 선진국에서는 자국의 기준에 따라 금속폐기물을 용융 등의 기술을 사용하여 재활용/재사용함으로써 처분과 비교하여 수십%의 비용 이득을 산출하고 있다. 우리나라의 경우, 원자력시설 해체시 발생하는 Cs-137(반감기 30년) 및 Co-60(반감기 5.26년) 등의 장반감기 및 기타 단반감기 핵종 함유 방사성폐기물에 대한 자체처분 기준은 수립되어 있으나 재활용 또는 재사용에 관한 규정은 아직까지 확립되어 있지 않다. 따라서 장차 국내 원자력시설 해체시 발생하는 금속폐기물의 재활용/재사용을 위한 규제 기준값의 제안과 법제화 과정이 요청된다.

Abstract

It was understood that regulation criteria for material release varied with countries and that international standards were not setup. But, most advanced countries are continuously studying on the recycling of metallic wastes for the purpose of the reuse of resources and disposal cost reduction. Practically, the advanced countries make a lot of cost profits compared with disposal as their metallic wastes are recycled and reused through technology like melting. In our case, the recycle criteria for radioactive waste containing radioactive nuclide with long half-life such as Cs-137(half-life: 30y) and Co-60(half-life: 5.26y) including others, which are generated from the nuclear fission or dismantling of nuclear facilities, are not yet established. Therefore, it is required that the recommendation and legalization of the regulatory criteria be carried out for the recycle and reuse of metallic wastes to be generated from the dismantling of domestic nuclear facilities in the future.

I. 서론

전세계적으로 산재해 있는 수많은 원자력시설은 한계수명에 도달하게 되고 궁극적으로 해체단계를 맞이한다. 이때 해체시 발생하는 폐기물은 금속, 콘크리트 등 종류도 다양하며 발생량 또한 방대하다. 실제로 OECD/NEA 자료에 의하면, 향후 50년 동안 원자력 시설 해체시 발생하는 금속폐기물(또는 조각금속)의 양은 약 3,000만 톤 정도가 될 것으로 추산된다. 이때 해체시 발생하는 조각금속의 대부분은 아주 미미하게 방사성오염되어 있을 것으로 예상된다. 만약 이러한 조각금속을 모두 회수하여 재사용할 수만 있다면, 1990~1993년간의 미국 조각금속 가격 산정기준으로 볼 때, 100~150억 달러의 가치가 있을 것으로 평가된다. 국내적으로도 연구로 1, 2호기의 경우 해체시 발생하는 금속폐기물은 구조재, 배관재 등을 포함하여 수십톤 이상이 될 것으로 예상되며, 대부분의 금속 폐

기물은 적절한 제염처리만 한다면 다시 사용해도 무방할 것으로 예측하고 있다.

한편, 사용 가능한 저준위 폐기물 처분장은 현재 전세계의 원자력시설 해체시 발생될 조각금속을 수용하기에는 부족하다. 뿐만 아니라 새로운 폐기물 처분시설의 부지선정과 인허가는 강한 정치적 반대에 봉착해 왔고, 처분 관련 비용 또한 계속적으로 증가추세에 있다. 그러므로, 이러한 조각금속을 처분장에 처분해 버린 후, 또다시 채광하고 새로운 금속을 상업적으로 생산하여 사용하기보다는 귀중한 자원의 절약과 처분비용 절감 차원에서, 처분/대체 이외의 재활용 방안을 심도 있게 고찰할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 해체시 발생하는 조각금속의 재활용(Recycle)/재사용(Reuse)에 관한 국제적인 기준 및 기술 현황을 검토하여 결과적으로 국내 연구로 및 원자력시설 해체 금속폐기물의 재활용 방안 수립을 위한 기초 정보를 제공하고자 한다.

II. 금속성 방사성폐기물에 대한 국제적인 규제기준

국제적인 규제기준을 검토하기 위하여 IAEA 및 EC 권고안을 각각 표 1 ~ 표 3에 나타내었다. 우선, 표 1은 International Basic Safety Standards의 개정안에서 제안된 면제기준과 IAEA's Safety Series No. 111-G-1-5의 Clearance 권고 기준을 비교한 것이다. 면제기준과 Unconditional clearance 기준의 차이는 각 핵종에 따라 다르다. IAEA 방사능 농도 값은, 규제적 통제하의 시설로부터 물질의 Unconditional clearance에 허용되는 기준이다. 표면 오염도(Bq/cm^2)에 대한 IAEA clearance 기준의 수치값은 비방사능(Bq/g)에 대한 수치와 같다. 적절한 경우, 질량 및 표면 요건이 동시에 적용되어야 한다.(예: 금속대상물과 건물). 많은 물질에 대하여, Mass 농도 값(예: 절연재와 같이 평평하지 못하거나 거친 표면을 가진 물질에 대하여)만을 적용하는 것이 가능할 것이다.

IAEA의 Unconditional clearance 기준의 유도는 매립지 처분과 폐기물 소각, 그리고 철 및 비철 금속과 콘크리트의 재활용 및 재사용에 관계된 최근 수년동안의 방사선학적 평가에 기초한다. 이러한 연구결과로부터 $10 \mu Sv/a$ 를 기준으로 정규화된 값들은 각 핵종에 대한 전반적인 범위를 설정하는데 사용되어 왔다. 이러한 범위로부터, 권고된 Clearance 준위는 가장 보수적인 시나리오의 분석결과에 기초한다.

EC Basic Safety Standards(BSS)는 방사선 이온화의 위험에 대한 일반주민과 작업자의 보건방호를 보증할 의도로 작성되었는데, 주로 ICRP 간행물 No. 26과 No. 30에 기초한다. European treaty 31조에 따라, 전문가 집단은 원자력시설의 해체시 발생하는 물질의 재활용에 대한 방사선학적 방호요건에 대한 권고안을 1988년에 간행하였다. 방사선 방호 No. 43은 원자력발전소 해체시의 철 금속조각과 장비에 대한 Clearance 기준을 제시하고 있다. 그러나 최근의 경험과 새로운 분석에 의거하여, 전문가 집단은 원래 권고값을 보완하고 그 값을 철 합금, 알루미늄, 알루미늄 합금, 구리 그리고 구리합금을 포함하는 다른 물질로 확장하기 위해 특별조사위원회(Working party)를 소집키로 결정하였다.

이 자료에 포함된 권고값은 ICRP 간행물 60, EC Basic Safety Standards, 그리고 현재 간행되지 않은 채로 있는 최근의 몇몇 연구에 기초한다. 이 자료에 의하면 근소하게 오염된 방사성 조각금속, 구성요소, 그리고 원자력시설로부터의 장비들이 일반적인 공공 지역에서 사용할 수 있도록 인가될 수 있다.

표 1. IAEA의 면제 및 해제 기준 권고치(Bq/g)

Nuclide	IAEA Basic Safety Standards exemption levels	IAEA recommended unconditional clearance levels	Nuclide	IAEA Basic Safety Standards exemption levels	IAEA recommended unconditional clearance levels
H ³	1,000,000	3,000	Ru ¹⁰⁶	-	3
C ¹⁴	10,000	300	I ¹²⁹	-	30
P ³²	1,000	300	I ¹³¹	-	3
S ³⁵	100,000	3,000	In ¹¹¹	100	3
C ¹³⁶	10,000	300	I ¹²³	100	30
Ca ⁴⁵	-	3,000	I ¹²⁵	1,000	30
Cr ⁵¹	-	30	Cs ¹³⁷	10	0.3
Fe ⁵⁵	10,000	300	Pm ¹⁴⁷	10,000	3,000
Fe ⁵⁹	10	3	Au ¹⁹⁸	100	3
Co ⁵⁷	100	30	Tl ²⁰¹	100	30
Co ⁵⁸	10	3	Ra ²²⁶	10	0.3
Co ⁶⁰	10	0.3	Pu ²³⁹	1	0.3
Ni ⁶³	100,000	3,000	Am ²⁴¹	1	0.3
Kr ⁸⁵	100,000	-	Ce ¹⁴⁴	-	30
Sr ⁸⁹	1,000	300	Pu ²⁴¹	-	30
Sr ⁹⁰	100	3	Ir ¹⁹²	-	3
Y ⁹⁰	-	300	Po ²¹⁰	-	3
Tc ⁹⁹	10,000	300	Np ²³⁷	-	0.3
Cd ¹⁰⁹	-	300	U ²³⁸	-	0.3

한편, EC 특별조사위원회의 규제해제 접근 방식을 살펴보면, 물질을 방출하기 위한 2개의 뚜렷한 선택사항, 즉, 직접적인 재사용, 그리고 재활용 및 재사용에 따른 용융에 관한 것들이 나타나 있다. 직접 재사용에 대하여, EC 특별조사위원회가 제안한 규제해제 기준은 표면 오염에만 적용된다.(표 2). 반면 Mass specific과 Surface specific 기준(표 3)은 용융에 의해 재활용될 물질에 대하여 적용된다. 표 5와 6에서는 철, 구리 또는 알루미늄에 대하여 그들 중 가장 낮은 값을 제시하고 있다. 다음 조항들이 규제해제 기준의 사용에 적용된다.

- Mass specific 규제해제기준은 방출되는 금속의 단위 질량당 전체 방사능이고 적절한 양의 금속의 평균값으로 의도된다.(즉, 수백 kg 이하의 질량)
- Surface specific 해제 기준은 전체 표면 방사능농도, Fixed plus non-fixed, 그리고 적절한 면적에 대한 평균값으로 의도된다.(여기서, 수백 cm²). 접근 불가능한 표면에 대하여, 표면 오염도의 정도가 합리적으로 기대될 수 있다면 표면방사능에 대한 규제해제 기준은 초과됨이 가정되어야 한다.

또한 EC 초안에 의하면, 경제적이기만 하다면 언제든지 원자력산업내에서의 재활용은 공공지역에서의 사용을 위한 규제해제에 비해 우선권을 가져야 한다고 제안하였다. 더욱이, 제안된 규제해제기준은 규제해제 이전에 규제적 통제하에서 용융되었던 금속조각에는 적용되지 않는다.

표 2. 금속 직접재사용에 대한 Nuclide specific clearance level의 EC제한값

Nuclide	Surface specific (Bq/cm ²)	Nuclide	Surface specific (Bq/cm ²)
H ³	10,000	Cs ¹³⁷	10
C ¹⁴	1,000	Pm ¹⁴⁷	1,000
Mn ⁵⁴	10	Sm ¹⁵¹	1,000
Fe ⁵⁵	1,000	Eu ¹⁵²	1
Co ⁶⁰	1	Eu ¹⁵⁴	1
Ni ⁵⁹	10,000	U ²³⁴	0.1
Ni ⁶³	1,000	U ²³⁵	0.1
Zn ⁶⁵	10	U ²³⁸	0.1
Sr ⁹⁰	1	Np ²³⁷	0.1
Nb ⁹⁴	1	Pu ²³⁸	0.1
Tc ⁹⁹	1,000	Pu ²³⁹	0.1
Ru ¹⁰⁶	10	Pu ²⁴⁰	0.1
Ag ^{108m}	1	Pu ²⁴¹	1
Ag ^{110m}	1	Am ²⁴¹	0.1
Sb ¹²⁵	10	Cm ²⁴⁴	0.1
Cs ¹³⁴	1		

표 3. 금속 재활용에 대한 Nuclide specific clearance level의 EC제한값

Nuclide	Mass specific (Bq/g)	Surface specific (Bq/cm ²)	Nuclide	Mass specific (Bq/g)	Surface specific (Bq/cm ²)
H ³	1,000	100,000	Cs ¹³⁴	0.1	10
C ¹⁴	100	1,000	Cs ¹³⁷	1	100
Mn ⁵⁴	1	10	Pm ¹⁴⁷	1,000	1,000
Fe ⁵⁵	10,000	10,000	Sm ¹⁵¹	10,000	1,000
Co ⁶⁰	1	10	Eu ¹⁵²	1	10
Ni ⁵⁹	10,000	10,000	Eu ¹⁵⁴	1	10
Ni ⁶³	1,000	1,000	U ²³⁴	1	0.1
Zn ⁶⁵	1	100	U ²³⁵	1	0.1
Sr ⁹⁰	10	1	U ²³⁸	1	0.1
Nb ⁹⁴	1	10	Np ²³⁷	1	0.1
Tc ⁹⁹	100	1,000	Pu ²³⁸	1	0.1
Ru ¹⁰⁶	1	10	Pu ²³⁹	1	0.1
Ag ^{108m}	1	10	Pu ²⁴⁰	1	0.1
Ag ^{110m}	1	10	Am ²⁴¹	1	0.1
Sb ¹²⁵	10	100	Cm ²⁴⁴	1	0.1

IAEA와 EC 계획은 원자력시설 해체시 발생하는 폐기물에 대한 일관적인 국제 규제 해제 표준 수립을 위한 의미 있는 첫발을 내디뎠다. 그러나 그 계획은 조건적인 해제를 강조할 뿐만 아니라 제한된 수의 나라에도 적용된다. 각 계획을 살펴보면, 포괄적이어서 즉각 수용될 만한 공통적인 방출기준을 나타낼 만한 표준을 개발하려 하고 있음을 알 수 있다. 방출요건을 개발하기 위한 현재의 국제적인 노력의 일반적인 주제에 관한 평가를 요약하면 다음과 같다.

- IAEA제안은 최소(De minimis) 방출요건을 제공하는 것을 의도한다. 단, 그러한 요건이 어떤 맥락에서는 유용할 지라도, 유용하고 유효한 재활용 기술을 배제하거나 적어도 감추는 것으로 오해될 수도 있다.
- 방출요건을 개발하려는 노력은 불확정성과 불허용성에 대한 Safeguard로서 보수적인 가정들을 통합하는 모델에 계속적으로 기초하고 있다. 게다가 모델은 종종 분석에 사용된 기본 가정들의 보수화를 증대시키는 등, 다른 모델들에 대한 기초로도 사용된다. 결과적으로, 방사선학적 위험은 물질과 관련된 비방사선학적 위험이나 관련 공정으로부터의 위험보다 감소될 수 있다.
- 방사성 금속, 비방사선학적 보편, 환경적, 그리고 물질의 처분/대체와 관련된 사회경제학적 위험은 재활용을 부인할 뿐만아니라 그 이상이다.
- 측정과 최근의 모델링으로부터 얻어진 다량의 Data는 무조건적이고 조건적인 방출 표준을 개발하기 위한 적절한 기초자료를 제공한다. 모델과 계산된 가정에 대한 신용은 의심스럽거나 지나치게 보수적인 결과를 초래할 수 있다.

III. 해외의 방사성 금속 재활용/재사용 기술 검토

표 4는 방사성 금속폐기물의 재활용/재사용/처분 사례를 나타내었으며, 최종적으로 그림 1은 종래의 처분 방안을 이용하여 물질을 처분하는데 대한 원래 평가비용의 백분율을 나타낸 것으로서, 비용절감효과를 보여주고 있다. 여기서는 이러한 절감효과를 가져오는 처분 방법들 중의 하나인 Abrasive blasting과 용융사례에 관하여 논의한다.

III.1 Abrasive blasting

재활용이 뒤따르는 Abrasive blasting이용의 적용성을 결정하기 위한 Belgoprocess의 초기 실증 과제는 이 기술이 종래의 Supercompaction과 처분에 비해 본질적인 비용절감효과를 가져옴을 보여주었다. 그 기술이 입증한 비용효율성에 기초하여, Belgoprocess는 309톤의 조각 금속을 제염하기 위해 건식 Abrasive blasting 시스템을 산업적 규모로 자동화한 시설의 상대적인 장점을 결정하기 위하여 심층적인 평가를 수행하였다. 그 평가는 특히, Eurochemic 재처리 공장의 해체와 연관된 물질과 관련 비용에 국한되었다. 그러나 Belgoprocess 평가는 Abrasive blasting이 종래의 저준위폐기물 초고압축과 처분보다 67%의 비용절감을 가져오는 것으로 나타났다.

III.2 용융

CEA는 PEGASE 원자로의 Loop를 용융하여 폐기물 저장용기를 생산하도록 재사용하는 것이 종래의 저준위폐기물 처분보다 52%의 비용절감효과를 가져올 수 있다고 평가하였다. 이 52% 절감은 돈으로 약 1,067,000FF(1993)에 해당된다.

표 4. 재활용/재사용/처분의 사례

No.	Project	Category	Technology	Status
1	BWR Preheater	Free release/recycling	Melting	Completed
2	PHWR steam generator	Free release/recycling	Decon/melting	Completed(ingots stored for decay)
3	PWR steam generator	Free release/recycling	Decon/melting	Study
4	Fuel racks SGHWR	Free release/recycling	Decon/measurement	Study
5	Fuel racks Belgoprocess	Free release/recycling	Melting	Completed(ingots stored for decay)
6	Aluminum heat exchangers	Free release/recycling	Melting	In progress
7	Drip tray-reprocessing plant	Free release/recycling	Decon/measurement	Completed
8	Reprocessing plant components	Free release/recycling	Decon/measurement	Planned
9	Eurochemic pilot project	Free release/unrestricted disposal	Measurement	Completed
10	Concrete from G3	Free release/unrestricted disposal	Measurement/crushing	Completed
11	Heads of prestressing cables-G3	Free release/unrestricted disposal	Measurement	Completed
12	G1 scrap air circuit	Restricted release/authorized disposal	Decon/measurement	In progress
13	Contaminated soil	Restricted release/authorized disposal	Measurement	Completed
14	G2/G3 glasswool	Restricted release/authorized disposal	Measurement	Completed
15	Siloe reactor heat exchangers	Restricted release/controlled recycling	Decon/melting	Completed(cast into shield blocks)
16	Nuclear centre scrap	Restricted release/controlled recycling	Decon/melting	Completed
17	G2/G3 scrap	Restricted release/controlled recycling	Decon/melting	Completed(ingots stored for reuse)
18	Rapsodie stainless steel primary circuit	Restricted release/controlled recycling	Decon/melting	Completed(ingots stored for reuse)

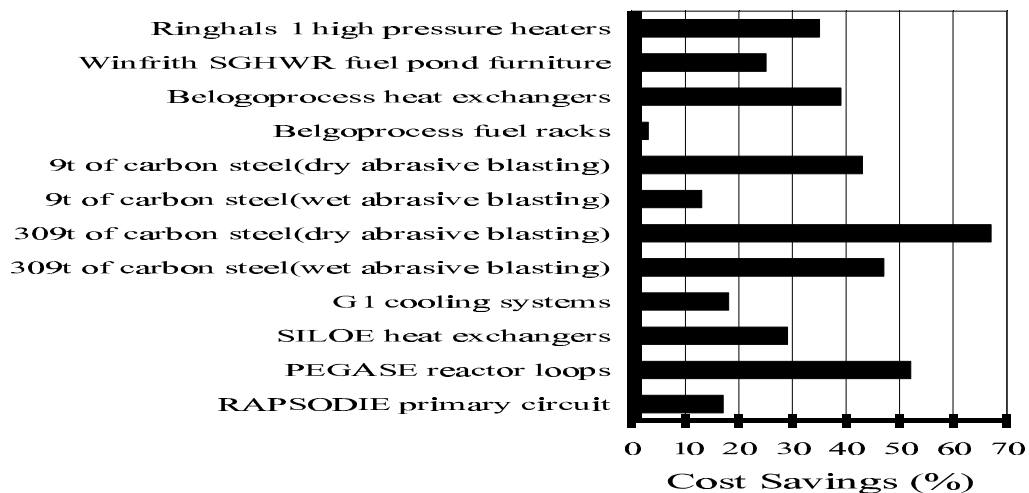


그림 1. 종래의 저준위폐기물 처분 방안에 대한 비용 절감 백분율

III.3 결과

사례 연구에 의해서도 나타나듯이, 재활용 방안이 종래의 저준위폐기물 처분 방안보다 상당한 비용절감을 야기할 수 있을 것으로 실증되었다. 이때 평균 비용절감은 적용가능한 처분 비용의 47%인 것으로 평가되었다.

IV. 국내 재활용 현황

국내적으로는 연구로 1,2호기가 현재 해체활동 중에 있으며, 이때 발생하는 금속성 방사성폐기물의 양은 철금속이 약 13톤(1.54m³) 그리고 스테인레스스틸이 약 60톤(40m³) 정도일 것으로 추산된다. 또한 연구로 1, 2호기 해체시에는 방사선학적 위험이 거의 없을 것으로 생각되는 자체처분 허용 기준값 이하로 오염된 금속폐기물도 다량 발생할 것으로 예상된다. 그리고 이들 금속의 대부분은 Co-60과 같은 γ 방출 핵종으로 오염되어 있는 것으로 평가된다. 따라서 오염정도가 크지 않은 것들은, 경제성만 확보된다면, 제염, 용융과 같은 적절한 처리과정을 거친 후 귀중한 자원으로 재활용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 우리나라는 원자력시설해체시 발생하는 Co-60 핵종을 함유한 폐기물에 대한 재활용과 관련한 국내 법적 요건 및 기준이 아직까지 마련되어 있지 않다. 다만, 과학기술부 고시 2001-30호에 의하여 표 7에서와 같이 자체처분 허용기준을 만족하는 방사성폐기물에 대하여는 자체처분 절차서를 마련한 후 자체처분을 할 수 있도록 되어 있다.

표 7. 자체처분 허용기준 및 핵종별 농도

방사성핵종	제한농도
H-3, C-14, Fe-18, Na-24, P-32, S-35, K-42, Ca-45, Ca-47, Sc-46, Cr-51, Fe-59, Ga-67, Ge-71, De-75, Br-82, Sr-85, Rb-86, Mo-99, Tc-99m, In-111, Sn-113, I-123, I-125, I-131, Pr-144, Yb-169, Au-198, Tl-201, Hg-203 및 반감기 100일 이하의 β, γ 방출 핵종	100 Bq/g
기타 방사성핵종	개인에 대한 연간 방사선 피폭선량이 $10 \mu\text{Sv/y}$ 미만이고, 집단에 대한 총 피폭방사선량이 1man-Sv/y 미만인 것이 입증되는 농도

V. 결론

물질 방출의 규제 기준이 나라마다 서로 달라 국제적인 일관성이 없다. 실제적으로 동일한 규제 요건과 핵종에 대한 규제 기준도 나라마다 차이를 보여 일관된 국제 기준은 현재 수립되어 있지 않는 것으로 파악되었다. 그러나 방사성폐기물 처분장 확보의 어려움과 자원의 재활용/재사용, 처분 비용 절감 등의 목적으로 대부분의 원자력선진국들은 금속성폐기물 및 기타 폐기물의 재활용 등을 위한 연구를 계속하고 있다.

또한 이러한 폐기물의 재활용을 위한 국제기구(IAEA, NEA)들 간의 공동노력도 활발히 진행되고 있기 때문에 머지 않은 장래에 합리적인 국제기준이 마련될 것으로 기대된다. 이러한 국제기준과는 별도로 벨기에, 프랑스, 스웨덴 및 스페인 등 선진국들은 자국의 기준을 수립하고 재활용 기술을 적극 이용함으로써, 금속성폐기물이나 콘크리트폐기물 등을 재활용/재사용해 나가고 있다.

국내적으로는, Cs-137(반감기 30년) 및 Co-60(반감기 5.26년) 등의 장반감기 핵종을

포함하여 각종 방사성 핵종을 함유하는 방사성폐기물에 대한 자체처분 기준만 수립되어 있고 재활용에 대한 요건은 마련되어 있지 않아 이에 대한 제안 및 법제화 과정이 요청된다. 따라서 본 연구에서 검토 파악된 정보 및 자료는 추후 금속성 방사성폐기물 재활용을 위한 국내 규제기준을 수립할 때 기초적인 자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. OECD/NEA, Recycling and Reuse of Scrap Metals, Paris, 1996.
2. 정기정, 제19차 OECD/NEA 해체협력 프로그램 회의 참석보고서, 한국원자력연구소, 2000.
3. 연구로 1호기 및 2호기 폐로사업 해체계획서, 한국원자력연구소, 2000.
4. 정기정 외, 연구용 원자로 폐로사업, 한국원자력연구소, 1999.
5. 정기정 외, 연구용 원자로 폐로사업, 한국원자력연구소, 2001.
6. OECD/NEA, The NEA Co-operative Programme on Decommissioning, Paris, 1996.
7. 과학기술부고시 제2001-30호, 방사성폐기물의 자체처분에 관한 규정, 2001.