

제염공정 적용을 위한 금속 폐기물 발생 및 오염 특성

Characteristics on Contamination and Generation of Radioactive Metal Wastes for Decontamination Process Application

안용수, 이지훈, 양호연, 김경덕, 하중현
hyyang@kepc.co.kr

한국전력 원자력환경기술원
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

국내의 원자력발전소를 기준으로 금속폐기물의 발생량, 오염특성 및 재활용기준에 대하여 조사하였다. DOE 각 설비, 가압경수로형 원전인 Trojan 원전등을 중심으로 조사한 결과 1000 MWe 가압경수로 1호기당 발생하는 금속폐기물의 발생량은 재료별로는 탄소강, 스테인레스강의 순으로, 구조물별 방사능 준위는 Reactor Vessel 내부가 416만 Ci로 높은 준위를 보였다. 일차계통내 내부표면에 침착한 핵종들의 경우 Co-58, Co-60의 방사능이 전체의 약80%를 차지하였다. 금속폐기물의 재활용은 자원의 절감효과와 동시에 인간의 건강 RISK 및 환경에 미치는 영향을 줄일 수 있고 영구 처분에 비해 50%이상 비용 절감효과가 기대된다. 하지만 세계적으로 각국의 방출기준이 서로 다르고 국제적으로 인정되는 배출기준이 없기 때문에 국내 금속 폐기물 재활용기준을 설정하는 것이 현재로서는 시급한 실정이다.

Abstract

A survey has carried out on metal rad waste generation, contamination characteristics and recycling criteria for NPPs including other nuclear facilities. Particularly, NPPs under DOE facilities and Trojan NPP have investigated. The results were that the metal radwaste generation from every PWR 1000 MWe reactor was rich in carbon steel and stainless steel in order in material respect. Radioactivity level was the highest in reactor vessel of 4,160,000 Ci in structural point of view. Co-58 and Co-60, were the most dominant radionuclides in the primary coolant system. These radionuclides covered about 80% of the whole radionuclides contributed for surface contamination. Recycling of metal waste would have advantages on saving resources, safety for human health and environmental effect. Furthermore it will be cost effective about more than 50% compared with its permanent disposal cost. However to establish recycling criteria on metal waste in korea will be rather early at this time, because there are no international criteria on radioactive metal waste release and also the criteria of every country are different from one another.

1. 서론

원자로의 운전이 정지되고 연료가 노심으로부터 철거된 후의 원자로에는 운전중에 중성자의 조사를 받아 방사화된 방사성 물질이 여러 장소에 잔류하게 된다. 이러한 방사성 물질이 존재하는 장소, 그 핵종 및 양은 원자력 발전소 폐지조치 방식의 결정, 해체공사 방법의 계획, 해체 작업 종사자의 피폭관리, 방사성 폐기물의 양과 처분의 방법 등에 영향을 미치는 중요한 인자의 하나이다. 따라서 원자로 폐지조치 사업이 추진중인 각국에서는 상업용 원자력 발전소에 존재하는 방사능의 종류와 양을 추정하기 위한 계산 또는 측정이 진행되고 있다. 방사능의 종류, 양 및 분포는 원자로가 정지되기 까지의 발전소의 운전이력, 기기, 배관 등의 배치와 구성재료의 재질 등에 따라 다르다.

국내의 경우에도 향후 노후화된 원자력시설의 해체시 막대한 양의 금속폐기물이 발생할 것으로 추정되며, 이에 대비한 기술의 개발이 필요할 것이다. 따라서 본 논문에서는 미국의 원전 및 시설에서의 금속폐기물 발생현황, 특성, 재활용 기준을 조사하여 국내 적용을 목적으로 재활용에 소요되는 다양한 기술의 필요성 및 향후 연구 방향을 제시하였다.

2. 미국 원전 및 시설의 방사성 금속폐기물 발생특성

가. DOE(Department of Energy) 시설 금속폐기물 발생특성

방사성 금속폐기물의 재고량(Inventories) 및 특성은 다양한 정보를 통하여 얻어진다. 폐기물 재고량 정보를 얻는 3 가지 주요한 카테고리는 첫째로 DOE 시설 및 상업용 원자로의 운전으로부터 금속폐기물이 얼마만큼 축적되는가에 대한 평가 및 DOE 환경 복구 프로그램에 의한 폐기물 발생량, 추정량 평가이고 둘째로 과제로부터의 금속폐기물 특성기술의 고찰 및 재고량의 연구이며 끝으로는 해체 작업을 통한 재고량의 평가이다. DOE 및 상업적 설비에서의 금속폐기물은 운전 및 환경 복구작업으로부터 저준위 폐기물(LLW, Low-Level Waste) 와 TRU(Transuranic)를 포함한다. 저준위 폐기물(LLW)은 원자력발전, 우라늄 농축, 방사선 방어작업, Naval Nuclear Propulsion Program, 환경복구작업, 기타 R & D 등이 오염 및 발생원이 된다. DOE 시설들로부터 발생한 저준위 금속폐기물 발생량을 표1.에 나타내었다. 1991년 한해동안 제염 및 해체 파편으로부터의 금속폐기물 방출량은 33.674 m³이다. 1990년 DOE 시설로부터 발생된 폐기물 전체 부피에 대해 대략 26 %가 오염 기기로부터 발생되었다(1980-1984년에는 14 % 발생). 금속 기기로부터 발생하는 비율이 높아지는 추세이므로 재순환 및 재사용으로 인한 비용절감의 효과가 상당할 것이다.

표1. DOE 시설들에서의 저준위 폐기물 발생량
(근거 : Oak Ridge National Laboratory, 1991)

	Volumes in cubic meters	
	1990	1991#
부지내 발생		
오염 기기	18350	19427
제염 파편##	3325	5376
저장		
오염 기기	1223	1218
제염 파편##	2433	4381
매립		
오염 기기	15730	13029
제염 파편##	3827	11110
합계		
오염 기기	35303	33674
제염 파편##	9585	20867

Projected volumes

##Wastes from decontamination and decommissioning construction debris.
etc.(unknown percentage of metal)

나. PWR형 원전의 금속폐기물 발생특성

미국에서 상업용으로 가동되는 원자로는 123개이며 현재(1997년 기준) 8개 호기가 원자로 정지상태에 있으며, 20~30년 후에는 현재 운전되는 원자로의 대부분이 그들의 계획된 40년 수명에 도달한다. 일본 종합 에너지조사회 원자력부서 모임 보고서 「상업용 원자력 발전 시설의 폐지 조치(1997. 5. 1)」에 따르면 원전 해체에 따라 발생하는 원전 1호기당 폐기물의 발생량을 추정해보면 표2와 같다. 방사성 물질로서의 취급할 필요가 없는 것은 IAEA 기술문서 TECDOC-855에서는 클리어런스 준위를 기초로 추정한 량이다.

향후 50년간 원자력시설에서 약 3천만 톤에 달하는 금속 방사성폐기물이 발생하고 비용은 1990년대 시세로 약 150억 달러가 소요될 것으로 추정된다. 또한 주민들의 반대 등으로 인해 영구 처분장의 부족 때문에 폐기물의 처분비용은 지속적으로 증가하리라 예상된다.

표2. 원전 해체에 따라 발생하는 폐기물의 발생량 추정

원자로 형태		PWR (110만 kW등급)			BWR (110만 kW급)		
		금속	콘크리트	합계	금속	콘크리트	합계
저준위 폐기물	저준위	0.01	0.01	0.02	0.01	0	0.01
	기타	0.2	0.1 이하	0.3	0.2	0.1 이하	0.2
	극저준위	0.2	0.1	0.3	1 이하	1 이하	1
방사성 물질로서 취급할 필요가 없는 것		4	45	49	3	50	53
합계		4	45	50	4	50	55

(단위 : 만 톤)

1000 MWe 가압경수로에 해당되는 금속폐기물의 조성을 표3. 에 나타내었다. 금속폐기물은 주로 스텐레스강, 탄소강, 니켈, 알루미늄 등으로 구성되어 있고 이중 탄소강이 3.3×10^4 Metric ton으로 가장 많이 발생되며 그 다음이 스텐레스강으로서 2.1×10^3 톤이 발생된다. 탄소강은 주로 부식저항성이 크게 중요하지 않은 배관이나 계통 부품에 사용되어 진다. 또한 상당부분이 철근, I-빔, 판금, 받침쇠, 계단 등에 사용된다. 부식저항성이 있는 스텐레스강은 주로 발전로나 터빈계통에 사용되어 진다.

표3. 1000 MWe급 PWR, 자재별 금속폐기물 재고량 (1971-Vintage)

자재	총량(톤)
금속:	
카본강	3.3×10^4
(철근)	(1.3×10^4)
(기타 금속)	(2.0×10^4)
스텐레스강	2.1×10^3
합석	1.3×10^3
구리	6.9×10^2
인코넬	1.2×10^2
납	4.6×10^1
청동	2.5×10^1
알루미늄	1.8×10^1
황동	1.0×10^1
니켈	1.0
은	<1.0

1980년에 미국의 원자력 발전소에서 발생하는 6000여 개의 오염된 장비 및 장치를 대상으로 제염실험을 수행하였다. 약 1100 m³의 부피로 5500 kg의 방사능으로 오염된 알루미늄, 강철 등의 금속폐기물이 발생되었으며 이를 전해연마제염으로 제염한 결과 40 배의 폐기물 부피의 감용효과를 얻었으며 장비의 재이용으로 1.5백만 불의 경비가 절약되었다. 금속장비의 제염전 오염도를 표4. 에 제시하였다. 표면오염도는 200 dpm에서 많게는 100만 dpm으로 나타났다.

표4. 금속 기계 및 장비 오염량 및 준위(McVey et al., 1981)

Item	Quantity	Minimum	Activity Level (smearable) (dpm/100cm ²) Maximum
aluminum generator dams	32	200000	1200000
aluminum steam generator tracks	16	5000	70000
dam clamps	100	4000	75000
stainless strongback-steam generator	4	40000	95000
stainless turn buckles	8	20000	60000
stainless braces	29	5000	50000
dam brace	1	300000	300000
NDT test equipment	10	3200	42000
probe pusher	6	1800	425000
electric pump	1	2500	25000
electric drills and grinders	48	200	45000
electric adapters	7	200	5000
large stainless shaft	1	500000	500000
1" hose	*	14000	14000
welding cable	*	3500	3500
electrical cord	*	3000	3000
miscellaneous hand tools	**		15000
stainless generator brackets	23	17000	800000
relief valve	1	300000	300000
miscellaneous electrical equipment	32	200	3900

* record of actual feet not maintained

** drill bits, putty knives, files, levels, hammers, channellocks, scissors, saw blades, crow-bars, crescent wrenches, rotary hammers, wire wheels, hand saws, "C" clamps, torque gauges, torque wrenches, 3ton chain falls, pulleys, pipe cutters, etc.

3. 미국 PWR형 원전의 금속폐기물 방사능 특성

1,175 MWe급 미국 Trojan 원전을 표본 PWR원전으로 하여 금속폐기물 방사능 특성에 대하여 조사하여 보았다. Trojan 원전은 Portland General Electric Company(PGE)

Westinghouse가 설계하였으며 NUREG/CR-0130, NUREG/CR-5884 에 따르면 1976년 3월 상업운전(2011년 2월까지 가동예정)을 시작하였으며 1992년 9월 “B” 증기발생기에서의 누출로 원자로가 정지되었으며 이로 인해 1993년 1월 NRC로부터 영구가동정지처분을 받았다. 총 17년 동안 가동(14주기, 3,300EFPD)되었으며 PGE 해체계획에 의하면, 계획 일로부터 5년 후에 DECON(즉시해체)방식으로 접근할 계획이다. 대부분은 이동이 불가능한 원자로 압력용기 내부 및 주위의 구조물에 존재하며 약간의 방사능은 냉각수 유동에 의해 손상연료로부터 방사성 부식 생성물 및 핵분열 생성물등의 형태로 나타난다. 잔류방사능은 다음 표5와 같이 그룹화 된다.

표5. PWR 발생원별 잔류방사능 (NUREG/CR-0130)

발생원별 분류	방사능(Ci)
방사화된 스텐레스강	4.8×10^6
방사화된 카본강	2.4×10^3
방사화된 구조재, 철근, 금속판금, I-빔	1.2×10^3
배관 및 장비 내부표면 오염	4.8×10^3
장비, 바닥, 벽, 기타표면의 외부 오염	1.1×10^2 (NUREG-1496)

구조물 중에 존재하는 방사능에 주로 영향을 주는 주요 핵종은 Cr-51, Mn-54, Fe-55, Fe-59, Co-58, Ni-59, Ni-63 이다(근거 : NUREG/CR-0130). 중성자 조사에 관련된 구조물에서의 특정 핵종에 대한 방사능 농도는 모핵종의 농도와 모핵종 중성자 단면적, 방사성 핵종의 물리적 반감기, 중성자속 레벨, 중성자 노출 지속기간에 영향을 받는다. 원전 수명을 40년으로 보고 EFPY (Effective Full Power Year)로 30년 가동된다고 가정하면 방사화된 용기와 내부의 총 방사능은 4.8×10^6 Ci이다. 외부용기자재(reactor cavity steel liner, reinforcement steel(rebar)의 방사능은 1.2×10^3 Ci이다.

표6.은 1993년 또는 원자로 정지 1년 후 방사화 생성물의 재고량 재계산한 것이다. 4.2×10^6 Ci 로 13 % 줄어든 값이 나왔으며 실제 원전 운전과 40년 동안 운전한다는 가정에서의 17년 차이를 반영한 수치이다.

표6. Trojan 원전 방사화 준위(원자로정지 1년 후)

위 치	방사능(Ci)
Reactor Vessel	6,200
Reactor Vessel Internals	4,160,000
Vessel Clad and Insulation	23,700
Bioshield Wall	830
Total	4,190,000

위치별로 방사능 농도 차이가 심하다. 가장 낮은 준위를 보이는 부분도 무구속적(Unconditional) 재사용을 위한 허용준위보다 훨씬 높은 수치를 보인다. 내부 표면오염 준위도 높게 나타난다.

표7.에 Trojan 발전소의 일차계통(Primary loop) 내부표면에 침착한 핵종의 방사능 오염 준위가 평가하였다. 원자로 정지시 및 시간경과 후의 각 핵종별 방사능 분율을 나타내었다. 원자로 정지시 각 핵종들의 수치를 비교해보면 Co-58과 Co-60이 전체 방사능에서 차지하는 분율이 각각 46 %, 32 %로 약 80 %를 차지한다.

일차냉각재가 흐르는 일차계통 표면의 오염준위는 0.23 Ci/m^2 이다. 참고로 BWR원전인 Big Rock Point 원전(67 MWe급, NUREG/CR-0672근거)에서 장비 및 배관에서 내부표면에 침착된 부식막의 오염준위를 살펴본 결과 Co-60과 Mn-54가 원자로 정지시 전체 방사능에서 차지하는 분율이 각각 47 %, 39 %로 가장 높았다.

표7. 일차계통내 Trojan PWR 원전의 내부 표면 오염 계측

Radionuclide	Deposited Radioactivity ($\mu\text{Ci}/\text{m}^2$)	Fractional Radioactivity at Decay Times of:			
		Shutdown	10Years	30Years	50Years
Cr-51	5.3×10^3	2.4×10^{-2}	-	-	-
Mn-54	8.0×10^3	3.6×10^{-2}	1.1×10^{-3}	-	-
Fe-59	1.8×10^3	8.2×10^{-3}	-	-	-
Co-58	1.0×10^3	4.6×10^{-4}	-	-	-
Co-60	7.1×10^4	3.2×10^{-1}	8.6×10^{-2}	6.2×10^{-3}	4.4×10^{-4}
Zr-95	8.8×10^3	5.6×10^{-2}	-	-	-
Nb-95	1.2×10^4	5.6×10^{-2}	-	-	-
Ru-103	5.9×10^3	2.6×10^{-2}	-	-	-
Cs-137	2.6×10^2	1.2×10^{-3}	9.5×10^{-4}	6.0×10^{-4}	3.8×10^{-4}
Cs-141	1.5×10^4	6.6×10^{-2}	-	-	-
Total	2.3×10^3	1.0	8.7×10^{-2}	6.8×10^{-3}	8.2×10^{-4}

표8.에서는 원자로 계통(Reactor system) 내부 표면에 침착된 부식막의 오염준위 및 방사능을 제시하였다.

표8. 원자로 계통내 축적 방사성 부식생성물 오염준위 및 량

System	Surface (m^2)	Activity Level (Ci/m^2)	Total (Ci)
Reactor Vessel and Internals	5.7×10^2	0.23	130*
Steam Generators	1.9×10^4	0.23	4,400
Pressurizer	8.7×10^1	0.04	4
Piping (Except RCS)	1.1×10^3	0.06	60
RCS Piping	1.9×10^2	0.86	160
TOTALS	219×10^2		4,800

* 방사화 생성물에 대한 고준위 방사능은 포함되지 않았음.

4. 국내 원전 금속폐기물 발생량

국내 원전에서의 방사성 금속폐기물의 발생량을 살펴보면 원자력 연구소의 정련시설을 해

체하면서 250드럼(약 50톤), 원전에서 가동중에 발생한 Scrap metal이 2,600드럼(약 520톤) 정도이며, 향후 TRIGA 연구로를 해체할 경우 약 500드럼 정도가 발생할 것이며 울진 1호기 사용후연료 저장조 철거(스테인레스스티일)시 약 65톤, 고리 3호기 사용후 연료 저장대(S/S)가 약 105톤 정도가 될것으로 예상된다. 또한 계속해서 상당량의 금속폐기물이 각 원전에서 발생할 전망이다. 원전의 해체가 시작되면 호기당 발생하는 금속 폐기물 발생 추정량은 5만톤 정도에 이르를 것이며 2040 년까지 추정해보면 약 80 만톤 정도가 될 전망이다. (근거 : 과학기술처, 핵시설 제염, 해체 기술개발)

표9.는 고리 1호기 10주기 O/H기간중 채집한 증기발생기 수실 crud의 방사능 측정된 것이다. PWR 에서의 일차계통 부식생성물의 조성 특성 및 방사능을 나타내고있다.

표9. O/H 기간중 채집한 증기발생기 수실 crud 방사능 (고리1호기 10주기)

	핵종	방사능	백분율(%)	시료 채취방법
1. 증기발생기(A) 단위: μ Ci/g	^{60}Co	104.00	48.00	Scraping
	^{57}Co	0.42	0.19	
	^{58}Co	99.3	45.4	
	^{54}Mn	1.9	0.8	
	^{60}Zn	1.3	0.5	
	^{90}Nb	9.9	4.5	
	^{125}Sb	1.6	0.7	
	총계	218	100	
2. 증기발생기(B) 단위: Ci/시료	^{60}Co	2.0×10^{-1}	48.00	Scraping
	^{57}Co	7.9×10^{-4}	0.18	
	^{58}Co	1.8×10^{-1}	43.00	
	^{54}Mn	6.1×10^{-3}	1.40	
	^{60}Zn	6.1×10^{-3}	1.40	
	^{90}Nb	2.0×10^{-2}	4.8	
	^{125}Sb	4.9×10^{-3}	1.17	
	총계	4.17×10^{-1}	100	

5. 재활용 기준

세계적으로도 해체사업이 다수 진행되고 있으나 인체에 미치는 건강상 문제 및 환경의 문제가 고려되어야하고 재활용의 경제성을 적절히 평가해야 하는등 까다로운 기준등에 의해 제한되고 있다. 일관적이고 국제적으로도 인정되는 기준이 없으면 재활용이 제약될 것이고 현재 OECD/NEA(원자력국) 및 IAEA를 중심으로 여러 검토가 이루어지고있는 실정이며 재활용에 관련된 국제기구인 ICRP, IAEA, EU, OECD/NEA가 있다. OECD/NEA와 IAEA가 협력하여 규제와 관련된 인허가, 신고 등 기본 안전체제로 부터의 면제 정책을 권고하는

Safety Series 89(1988)를 발간하고“행위”로부터 연간 개인 최대선량을 10 μ Sv/년(백그라운드 이상)으로 최대집단선량을 1 man-Sv으로 규정하였다. 우리나라의 경우 일부 단반감기 핵종에 대하여 적용하고 있는 자체 처분 기준치(과기처 고시 제1997-19호 방사성폐기물 자체처분등에 관한 규정)개념이 클리어런스 준위에 해당된다고 볼 수 있을 것이다.

표10. IAEA가 제안한 면제준위와 클리어런스 준위 비교(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
³ H	1 000 000	3 000	¹⁰⁶ Ru	-	3
¹⁴ C	10 000	300	¹²⁹ I	-	30
³² P	1 000	300	¹³¹ I	-	3
³⁵ S	100 000	3 000	¹¹¹ In	100	3
³⁶ Cl	10 000	300	¹²³ I	100	30
⁴⁵ Ca	-	3 000	¹²⁵ I	1 000	30
⁵¹ Cr	-	30	¹³⁷ Cs	10	0.3
⁵⁵ Fe	10 000	300	¹⁴⁷ Pm	10 000	3 000
⁵⁹ Fe	10	3	¹⁹⁸ Au	100	3
⁵⁷ Co	100	30	²⁰¹ Tl	100	30
⁵⁸ Co	10	3	²²⁶ Ra+	10	0.3
⁶⁰ Co	10	0.3	²³⁹ Pu	1	0.3
⁶³ Ni	100 000	3 000	²⁴¹ Am	1	0.3
⁸⁵ Kr	100 000	-	¹⁴⁴ Ce	-	30
⁸⁹ Sr	1 000	300	²⁴¹ Pu	-	30
⁹⁰ Sr+	100	3	¹⁹² Ir	-	3
⁹⁰ Y	-	300	²¹⁰ Po	-	3
⁹⁹ Tc	10 000	300	²³⁷ Np	-	0.3
¹⁰⁹ Cd	-	300	²³⁸ U	-	0.3

표10. 에 IAEA가 제안한 면제준위와 클리어런스 준위를 예시하였다. 금속 폐기물의 재활용에 있어서는 방사성 금속 폐기물을 처분하고 그에 해당하는 금속을 재생산하는 영구처분과 클리어런스 준위를 적용하여 재사용이나 재활용하는 측면이 있다.(근거 : OECD/NEA 금속 폐기물 스크랩 재활용(1996))

6. 결론

국내외 원자력발전소를 기준으로 금속폐기물의 발생량, 방사능 발생특성 및 금속폐기물 재활용기준에 대하여 조사하였다. 미국의 경우 1000 MWe 가압경수로 1기당 발생하는 금속폐기물의 발생량은 탄소강이 3.3×10^4 톤으로 가장 많이 발생하였으며 그 다음이 스텐레스강이었다. 구조물별로는 Reactor Vessel 내부가 416만 Ci의 방사능을 띄었다. PWR 일차계통내 내부표면에 침착한 핵종들의 경우 Co-58과 Co-60이 전체 방사능에서 차지하는 비율이 각각 46 %, 32 %로 약 80 %를 차지한다. 금속폐기물의 재활용은 자원의 절감효과와 동시에 인간의 건강 RISK 및 환경에 미치는 영향을 줄일 수 있다. 기존 기술을 이용하여 재활용할 경우 영구처분에 비해 50%이상 비용 절감효과가 기대된다(근거 : 과학기술처, 제염복구 및 재활용기술개발). 하지만 일관적이고 국제적으로 인정되는 배출 기준이 없기 때문에 재활용 제한이 따르는 실정이므로 국내의 금속폐기물 재활용기준을 설정하는 것이 시급한 실정이다.

참 고 문 헌

1. John MacKinney, "Evaluation of the Potential for Recycling of Scrap Metals from Nuclear Facilities", Peer Review Draft, Technical Support Document-EPA(1997)
2. Bayrakal, Suna, "Analysis of the Application of Decontamination Technologies to Radioactive Metal Waste Minimization Using Expert System",
3. T. Hertzler, et al., "Recycle of DOE Radiologically Contaminated Metal",
4. 오원진, 문제권, 정종현 등, "방사성 금속폐기물 재활용기술 현황", KAERI/AR-474/97
5. 과학기술처, "방사성폐기물 처리/기반기술 개발 - 제염해체기술 개발(I)", KAERI-NEMAC/RR-176/96
6. 일본 종합 에너지 조사회, 원자력부서 모임 보고서 「상업용 원자력 발전 시설의 폐기 조치」 (1997)
7. 강덕원 외, "RCP 및 SG 제염공정 개발을 위한 타당성 조사연구[최종보고서]", 전력연구원, TR.97NS09.S1999.58, (1999)