

《기술보고》

방사성폐기물 소각시설의 현황 및 안전지침

박원재 · 이병수 · 이승행

한국원자력안전기술원

김준형

한국원자력연구소

서용철

연세대학교

(1995. 3. 21 접수)

요 약

원자력발전소 및 동위원소 사용기관에서 발생하는 가연성 고체 폐기물 및 유기폐액의 소각기술의 활용에 있어서 이의 안전성 확보를 위한 기술적 기준의 설정을 위한 고려인자들을 조사하였다. 국내외의 소각기술 활용현황을 알아보았고 본 기술의 국내 도입시 필요한 기술적 안전지침에 관한 외국의 사례를 조사하고 국내 관련 규정도 검토, 비교, 분석하여 주요 고려항목을 도출하였다. 안전성 확보를 위한 고려항목을 크게 일반산업시설 적용항목, 원자력시설상 안전조건, 소각시설의 기술적 요구사항, 기타 제반사항으로 나누어 제시할 수 있었다. 이들 내용은 기존 원자력 및 환경시설에 적용되는 안전성분석보고서 및 환경영향평가서로 작성될 수 있다고 보았으며 시설의 개요, 시설의 기술적 사항과 이에 따르는 안전을 위한 조건, 폐기물의 인수조건 등이 포함되며 기존 관련 법규의 적용 및 확인이 필요하였다. 기술적 사항에는 공정의 제염제수, 연소효율, 소각재의 형상, 배기가스의 방출농도, 작업자 및 인근주민의 피폭 등이 확인되어야 하며 소각재의 처리방법 및 조건이 제시되어야 하고 소각재의 침출특성 등이 주요한 인자라고 보았다. 아울러 소각대상폐기물의 인수조건이 명시되어 소각성능에 따른 이의 안전성이 입증되어야 한다. 따라서 인허가 후 건설된 시설에서의 사용전 시험소각절차의 제시 및 이에 대한 관련 규제기관의 검사제도가 있어야 하며 품질보증절차 역시 관련지침에 따라 실시되어야 한다. 이와같은 내용을 포함하는 안전기술지침의 설정이 절대적으로 필요하며 본 연구조사 결과의 활용이 기대된다.

1. 서 론

방사성폐기물 중 30% 이상이 가연성 폐기물이며 이는 부패, 화재의 위험성을 잠재적으로 지니고 있어 영구 처분후의 안전성을 높이기 위해서는 가용한 처리기술의 활용이 되어져야 한다. 이와 관련하여 방사성폐기물 소각처리에 대한 기술개발이 한국원자력연구소에서 지속적으로 추진되어 현재 실증단계에 있으며 머지 않아 이

의 실용화가 기대된다. 그러나 현재까지 국내는 물론 상용소각시설이 운전되고 있는 여러 원자력 선진국에서도 일부 국가는 방사성폐기물 소각시설에 대한 별도의 기술기준이 확립되어 있지 못한 실정이며 이에 대한 안전성 규제는 원자력발전소의 방사성폐기물 관리제통의 기술기준에 의존해 오고 있으나 고온의 소각계통 및 다양한 배기체 처리계통은 물론 소각재 취급계통 등을 포함하는 방사성폐기물 소각시설에 대해 적용이 어려우므로

이에 대한 별도의 안전성 확보를 위한 기술기준이 요구되어 온 실정이다.

원자력법 시행령의 제212조 (폐기시설)의 5호에는 폐기시설의 일부로서 방사성폐기물 소각시설에 관한 기본적인 사항만 기술되어 있으므로 방사성폐기물의 최종 처분 등을 고려하여 이러한 소각시설의 설계, 건설 및 운영을 위한 기술기준의 확립이 필요하다. 이에 따라 본 연구의 목적은 기술기준 확립을 위한 첫번째 단계로서 기술기준개발의 방향설정 및 주요인자들을 분석하는데 있다. 이로부터 방사성폐기물 소각시설의 특성에 따라 원자력법 시행령 및 관련고시의 충족을 위한 규제적 기준의 기본 방향이 제시됨은 물론 나아가 규제적 지침의 마련을 위한 기본자료로 사용될 수 있도록 한다. 즉 소각시설의 안전성 확보와, 소각으로 인한 작업자와 환경 및 주변 주민을 보호, 그리고 최종처분시 처분농도제한 등을 고려하여 소각시설에 대한 설계, 건설 및 운영에 고려되어야 할 세부적인 내용을 포함하는 기술기준의 개발은 필수적이다.

방사성폐기물 소각기술의 외국 활용현황을 간단히 소개하고 이를 비교하여 보았다. 현재 일본의 경우가 제일 활발히 소각로를 활용하고 있으며 약 20기 이상이 발전소에 보급되어 있다. 또한 국내의 방사성폐기물 소각기술개발 현황으로 한국원자력연구소에서 1987년부터 연구개발을 시도하여 실험용 소각로(5-10kg/hr) 및 실증용 소각시설(30kg/hr)을 운전해 오고 있는데 이의 개요를 소개하였고 외국의 방사성 폐기물 소각로를 건설, 운영하는데 필요한 안전확보를 위한 규제상황을 IAEA, 미국, 일본 및 영국의 경우를 대상으로 조사하였다. 이러한 조사비교된 각국의 규제들을 비교검토하여 안전성확보를 위한 지침에 포함되어야 할 항목을 1) 산업시설의 일반적인 적용항목, 2) 원자력 시설상의 안전조건, 3) 소각시설에의 요구사항, 4) 기타 요구사항으로 나누어 기술하였다. 이러한 것들 중에 크게 나누어 기술기준 시에 확인되고 제시되어야 할 것으로 사료되는 주요사항으로서 안전성 분석보고서, 환경영향평가, 관련법규 적용, 배출제한, 피폭선량, 소각로 기술조건, 2차 폐기물(소각재 등)의 처리, 폐기물 인수조건, 시험소각, Q/A 등에 대해 좀 더 세부적으로 소개하여 안전성 확보를 위한 기준 설정에 도움을 주도록 하였다.

2. 외국의 방사성 폐기물 소각기술 활용현황

2.1. 일 본

방사성 폐기물의 소각로가 가장 많이 설치/활용되고 있는 나라는 일본이다. 원전에서 발생하는 가연성 폐기물을 대부분 소각처리하여 발생량을 1/40 이하로 줄이고 있다. 1973년 쓰루가 원전에서 수직 샤프트형 소각로를 설치하여 운전한 결과 예상보다 훨씬 좋은 감용효과 및 운용효율을 얻을 수 있었으므로 다른 원전에도 소각로를 설치하게 되었다. 소각로의 형태 및 실제 건설된 설비의 현황이 표 2-1에 나타나 있다 [1]. 1994년 7월 현재 건설중인 소각로를 포함하여 모두 약 37기가 있다. 원자력발전소에 건설된 소각로는 대부분 수직장원통형(Long Vertical Shaft Cylindrical Chamber)으로서 원래 기술은 독일에서 시작된 것으로 일본의 NGK사에서 고온 세라믹 여과기와 함께 도입한 것이다. 그리고 최근에 고온 용융소각로가 원자력발전소에 몇기 도입되었고 기타 소각로는 원자력발전소 이외의 시설에서 사용되고 있으며 대부분이 화격자소각로이다.

2.2. 미 국

미국의 경우 소각로개발이 1950년대 초에 Argonne 연구소에서 실시됨에도 불구하고 일본과 같이 활발한 활용이 없는 이유는 대중의식이 아직 소각에 대한 처분의 효율성(부지등과 관련한)보다는 소각이 가지고 있는 복잡성, 난이성 및 부차적인 대기오염의 발생에 집착되어 있기 때문이다. 즉 처분에 난이성 및 처분부지의 선정 등이 부지가 작은 나라보다는 덜하다고 할 수 있다는 것이다.

현재의 소각로 이용현황 [2]을 보면 에너지성(DOE) 산하의 시설로서 LANL(Los Alamos National Lab.)의 제어공기 소각로, Oak Ridge의 TSCA(Toxic Substances Control Act) 로타리킬른 소각로, RFP(Rocky Flats Plant)의 유동층 소각로, INEL(Idaho National Engineering Lab.)의 WERP 공기제어 소각로 등이 운전중이다. 계획중인 것으로는 LANL에 새로운 공기제어소각로 및 Savannah River Site에 로타리킬른형 소각로가 있다. 또한 INEL의 PREPP에도 소각로 계획이 있었으나 취소된 상태이다. DOE 산하 연구소 이외에 상용규모 소각로로는 SEG(Scientific Ecology Group)에서 1989년부터 운전개시된 자동제어 및 부분열분해 소각로인데 이 소각로는 스웨덴의 Studsvik 소각로(1976년부터 운전)를 기초로 만들어졌다.

본 소각로는 Oak Ridge에 있으며 700kg/hr 이상의 용량을 가지고 있어 미국 중남부일대의 발전소 폐기물을 운반하여 처리하고 있다. Richland (Washington 주 소재)에 있는 ANF(Advanced Nuclear Fuels)에서는 2개의 연소실을 갖는 제어공기소각로를 이용하여 우라늄으로 오염된 고체 및 액체 폐기물을 소각하고 있으며 1988년에 운전되어 핵연료제조 공정에서 발생하는 가연성 물질을 처리하고 있다. 혼합폐기물(mixed waste)의 열적소각처리용 상용시설은 1990년에 허가되어 1991년에 운전되는 DSSI(Diversified Scientific Services, Inc.)의 RI 사용기관(대학, 병원 등)에서 발생되는 액상폐기물용 소각로가 있다. 열회수 목적으로 보일러가 연결되어 있고 분당 2 gallon의 유기액체를 소각할 수 있다.

일부 원자력발전소에서도 유동층 소각로의 건설을 완료하여 운전을 하였으나 발전소 전체 폐기물 처리공정의 변경에 따라 대상폐기물의 발생량이 줄어들어 현재 운전하지 않고 있다. 이 두 발전소는 Duke Power의 Oconee Station과 CE의 Byron and Braidwood Station 등이다.

상기에 소개된 소각로 이외에도 소형소각로를 이용하여 병원 및 연구소 등의 RI폐기물을 처리하고 있다. 정확한 통계는 없지만 1984년에 약 200기가 허가되어 100,000ft³가 처리된 보고가 있다.

2.3. 캐나다

캐나다에는 2기의 소각로가 운전중에 있다. 1기는 Bruce원전내에 있는 저준위 폐기물 종합처리장에 설치되어 있고, 다른 1기는 AECL의 Chalk River 연구소에 설치, 운영되고 있다. 두 시설 모두 Trecan에서 공

급한 batch형 열분해 소각로로 저준위 폐기물 종합처리장에 설치된 소각로는 한주기 동안 2,750kg을, Chalk River 연구소에 있는 것은 1,135kg을 소각하도록 설계되었다.

소각로 구입전에는 건조폐기물을 PVC백에 수집하였으나, PVC를 소각할때 생성되는 염산 문제 때문에 PVC백이 플라스틱백으로 바뀌었다. 각 건조폐기물 수집 백의 평균 표면선량은 87%가 1mR/hr 이하이고 소각처리되는 폐기물은 주로 방호복, 장갑, 종이, 플라스틱류 등으로서 이중 종이와 플라스틱류가 80% 정도를 차지한다. 이와 같은 폐기물을 소각할 경우 감용비는 약 40정도이며, 운전효율은 아주 좋은 것으로 보고되고 있다. 현재 가동중인 저준위 폐기물 종합처리장의 처리용량 및 기기의 성능이 Ontario Hydro 전력회사 산하의 모든 원전에서 발생하는 저준위 폐기물을 처리하기에는 부적절하므로 새로운 저준위 폐기물 종합처리 설비의 건설을 계획중에 있다. 새로운 종합 처리설비에는 150kg/hr 용량의 신형 소각로가 설치되며, 하루에 24시간 연속운전하여 2-5일동안 가동할 계획이다. 신형 소각로가 설치되는 새로운 종합처리설비의 운전이 1996년 중반에 시작되면 현재 가동중인 소각로는 해체 철거할 예정으로 알려져 있다.

2.4. 유 럽

영국에는 가동중인 소각로가 2기, 건설중인 것이 1기 있고, 프랑스에는 모두 SGN사가 공급한 4기가 가동중에 있으며 Marcoule 재처리 센터에는 시험로가 1기 운전되고 있다. 그외 독일에 2기, 벨기에, 스웨덴, 스위스, 오스트리아에 1기씩 가동되고 있다.

독일의 경우는 현재 법령으로 가연성 폐기물은 반드시

표 2-1. 일본의 방사성 폐기물 소각로 건설현황

()은 건설중

소각로형식	원자력발전소	연구시설	핵연료시설	우라늄시설	RI	합 계
장원통형(NGK)	19 (1)	2	1 (1)		1	23
공기제어(회분식)		1		1		2
교반식 고정상로		1				1
열분해 가스화로	1					1
고온 용융소각로	2 (1)					2
회전화격자로		2	2			4
기타				4		4

시 소각처분 하도록 규제하고 있다. 1962년부터 1970년까지 25kg/hr 용량의 과잉 공기형 소각로를 운전하여 그 경험으로 1971년 2월 60kg/hr 용량의 소각로를 설계, 20,000시간 이상 가동하였으며 일본 쓰루가 발전소에도 같은 형의 소각로가 설치되었다. 건식 필터를 사용하므로 요오드를 제거할 수 없어 감쇄를 위해서 폐기물이 저장되어야 한다. 폐기물 종류와 요오드에 따라 75일에서 700일간 저장되고 있다. SiC의 세라믹 필터는 500-1000시간 가동후 교체되며 교체에 8시간이 소요된다. 비산재는 Prefilter의 바닥에서 제거되며 소각로의 운전은 발전소 운전자가 발전소 운영과 동시에 수행한다. 전형적인 폐기물은 종이 50%, 의류 20%, 3%의 고무와 2%의 PVC를 포함한 30%의 플라스틱류로 구성되어 있다. 수분은 5-7wt% 정도이고 평균방사능은 5mCi/m³이다. 원래의 내부 내화재는 3년간 사용되었으나 1974년 설치된 세라믹 내화벽들은 아직까지 사용하고 있다. 소각로는 매 주말 가동이 정지되고 400-500°C까지 냉각되며 다시 가동을 시작할 때 추가의 연료를 사용치 않아도 된다. 가동방법에 따라 다르나 배풍기는 1000-3500시간 가동후 세척되어야 한다.

독일의 열분해 소각로는 1969년부터 개발되었는데 이 소각로는 열분해실과 연소실로 나누어져 있다. 용량은 100kg/hr이고 1977년 가동이 시작된 이래 시험로가 수천 시간 가동되어 왔다. 소각로는 선별과정이나 분쇄과정을 거칠 필요가 없도록 설계되어 있으므로 연속작업에 지장을 초래하지 않으면서 비가연성 고체물질을 처리할 수 있다. 자체연소를 위하여 폐기물은 최소 1000Kcal/kg 이상의 열량을 가져야 한다. 소각로는 대개 주말과 매일 저녁 가동이 정지된다. 일요일 저녁 천연가스를 사용해 12-15시간동안 가열하여 800-850°C로 예열한다. 예열후 열분해실은 300-400kg(8개 드럼의 양)으로 채워진다. 8-9시간의 한 Shift동안 25개, 드럼이 처리된다. 배기가스 처리시설중 HEPA 필터는 10,000kg의 폐기물을 소각한 후 혹은, 120시간 가동후 교환된다.

이외에 스웨덴에서는 1976년 이후 Studsvick에서 가연성 건조폐기물의 소각을 위해 소각로가 가동되고 있다. 처리용량은 초기에는 250kg/hr이었으나 점차적으로 그 성능이 저하되어 1989년에는 220kg/hr로 감소되었다. 이 소각로는 1989년까지 약 4,000톤의 가연성 건조폐기물을 소각처리 하였으며, 현재는 규제요건 강

화에 맞추어 성능개선 작업중에 있다. 성능이 강화될 소각로는 연간 약 600톤의 가연성 건조폐기물을 처리할 예정이다.

2.5. 주요소각로의 비교

현재 상용화되어 활발히 운전되고 있는 대표적인 소각로를 국가별로 비교한 것이 표 2-2에 나타나 있다.

3. 국내 방사성 폐기물 소각기술 개발현황

1980년대 초부터 방사성폐기물의 효과적인 관리의 문제가 거론되기 시작하여 1984~5년에는 한국전력공사 및 한국원자력연구소에서 방사성폐기물의 소각에 대한 타당성을 조사하고 이에 관한 기술적 현황분석을 실시하였다 [3, 4]. 또한 일부 기업에서도 국내에 도입타당성 및 기술적인 개념 설계와 도입제안서 등을 작성하기도 하였다. 소각기술의 도입과 관련하여 기초적인 연구 단계로서 1987년부터 5년에 걸쳐 시간당 5-10kg/h의 용량을 소각할 수 있는 실험용 소각공정을 연구소에 설치하여 약 3년간 실험소각을 실시하여 경험을 얻었고 이 결과를 토대로 1990년에는 실증용 소각시설을 약 100평의 부지에 소각공정 및 실험실 등을 설치하여 다중 소각대상물질을 가지고 실증시험을 수행하여 왔다 [5, 6]. 그림 1에 실증용 소각공정의 설비가 소개되어 있다. 본 시설에 대해 간단히 설명하면 다음과 같다. 소각로는 30kg/h의 용량이며, 2개의 소각실과 열교환기, 공기회석 냉각기, bag filter, wet scrubber, HEPA filter를 갖춘 배가스 처리장치 계통으로 되어 있다. 후연소 장치는 배가스 중의 미연소된 탄소를 줄이기 위해 필요하고, 공기 회석기와 같은 적당한 냉각장치가 있는 bag filter가 전처리여과장치로서 설치되었으며 폐기물에 PVC가 포함 될 가능성을 대비하여 HCl gas의 배출방지를 위하여 wet scrubber가 설치되었다.

소각설비의 운전의 상세 설명은 다음과 같다. cardboard box로 재 포장된 폐기물은 2개의 sliding gate를 이용하여 소각로로 들어간 후 소각된다. 소각로에서 나오는 배가스 중 soot와 hydrocarbon과 같은 타지 않은 물질은 후연소장치에서 연소된다. 후연소장치는 배가스 중 약간의 입자를 제거하기 위한 cyclone과 같은 기능

표 2-2. 주요 방사성 폐기물 소각로의 기술적 비교

	NGK	AECC	Studsvik	Julich	CEA	MOL
	Incinerator (일 본)	Incinerator (미 국)	Incinerator (스웨덴)	Incinerator (독 일)	Incinerator (프랑스)	Incinerator (벨기에)
T y p e	Vertical Shaft Furnace Self Sustaining Combustion	Fluidized Bed Furnace	Multi-chamber Rectangular Furnace	Vertical Rectangular Furnace	Vertical Rectangular Furnace	High Temperature Slagging Incinerator
e	Dry System	Wet System	Dry System	Dry System	Wet System	
T r e a t m e n t	Off Gas					
C h a r a c t e r i s t i c	Simplified Furnace Structure No grate, No moving parts (No Maintenance)	Simplified Furnace Structure No moving parts Sand Exchange Required	Short lifetime of refractories caused by rectangular structure	Hard maintenance work for swinging grate Short lifetime of refractories caused by rectangular structure	Hard maintenance work for swinging grate Short lifetime of refractories caused by rectangular structure	Hard maintenance work for moving grate Short lifetime of refractories because of high temperature (1500°C)
O p e r a t i o n	No pretreatment No high-technical operation	Pretreatment Difficult control of furnace pressure	No pretreatment No high-technical operation	High-technical control of combustion air No pretreatment	No pretreatment No high-technical operation	High-technical Operation due to high temperature Pretreatment
S a f e t y	D.F. > 10 ⁷ Negative pressure in system No possibility of explosion Heat-resistant filter	D.F. > 10 ⁵	D.F. > 10 ² - 10 ³ Possibility of filter fire	D.F. > 10 ⁵ - 10 ⁶ Possibility of explosion due to pyrolysis	D.F. > 10 ⁴ - 10 ⁵	D.F. > 10 ⁴ - 10 ⁵ Positive pressure in furnace
O t h e r s	No liquid waste No auxiliary fuel	Generation of liquid waste No auxiliary fuel	Auxiliary fuel required No liquid waste	Auxiliary fuel required No liquid waste	Limited capacity Auxiliary fuel required No liquid waste	Generation of liquid waste Auxiliary fuel required Granular ash

을 갖도록 구조가 되어 있다. 후연소장치에서 나오는 배가스는 1,000°C 이상이며 열교환기에서 500°C로 떨어진다. 공기회석기는 온도를 200°C 이하로 유지시키는 냉각장치로 설치되었고, 이는 초기 여과장치로서 bag filter의 운전 허용농도이다. HEPA filter장치는 최종 여과 장치로 사용된다. wet scrubber는 산성가스의 농도에 따라 선택적으로 사용될 수 있다. 이러한 배열은 실험 중 소각공정의 운전 중 얻은 경험을 기초로 한 것이다. wet scrubber를 통해 배가스는 열교환기로 부터 나온 후연소장치로 들어간다.

설비의 운전 중 유해 가스와 먼지의 농도가 각각 관찰되고 data logging system으로 기록된다. 각 점에서 온도, 압력, 유량 역시 폐기물과 공기 주입율을 조절하기 위해 관찰된다. 바닥의 재는 운전후 밀폐된 glove box를 통해 드럼에 수집된다. 설비는 소각로나 후연소 장치의 위에서 spraying mechanism을 이용하여 약간의 유기용액 역시 소각할 수 있도록 되어 있다. 소각설비의 개략은 다음과 같다.

-용량 : 고체폐기물 20kg /h, 유기용액 15L /hr, (열용량 420MJ /h)

-폐기물 구성

- 1) DAW : PVC <10wt%, 고무 <20wt%, 물 <20wt%, 종이 /의복 등 >40wt%

2) Oil, Solvent, Scintillation liquid : 물 <20wt%

-핵종 :

β/γ 핵종 <0.2 mCi /kg

표면선량 <200mR /h

-제염계수 : 10^5 이상 (비취발성에 대해)

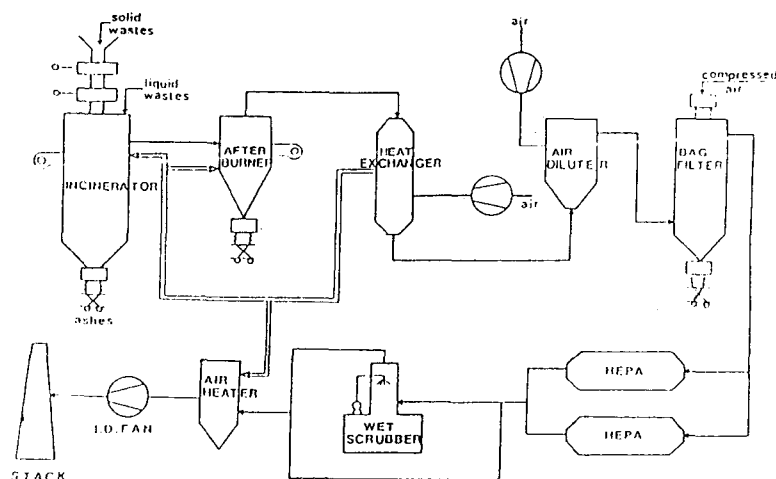
-배가스 배출 : 농도 < 1×10^{-11} Ci /cc

-감용계수 : 50~100

-감중율 : 20~50

실증용 소각시설을 통해서 1992년부터는 방사선동위원소를 tracer로 이용하여 실험하며 원전 및 RI 폐기물의 시험소각을 위해 RI 사용시설로 허가를 득하여 현재까지 시험소각을 실시하고 있다. 또한 안전성 분석 및 기타 관련 연구를 수행하여 소각 및 고온 처리 기술의 기술습득을 하였으며 1994년까지 실증을 완료하여 실제 폐기물을 소각하는 시설로의 전환하려는 시도를 하고 있다.

이러한 기술의 실용화를 위해서도 본 안전성연구 및 시설에 대한 안전 및 기술 기준이 제시 되어야 할 것이며 국가적인 적절한 지원속에서 본 방사성폐기물의 소각이 조속히 이루어져야 할 것이다. 결론적으로 국내에서도 방사성폐기물을 소각할 수 있는 기술이 어느정도 확보되어 있으며 뒷장에 소개되는 일반 및 산업폐기물의 소각시설을 보완적으로 활용한다면 국내의 기술진에 의한 소각시설의 활용이 되리라고 본다.



4. 소각시설 안전성을 위한 기준

방사성폐기물 소각로의 안전성을 위한 규제적인 입장에서 참고되어야 할 기준 및 법규등으로는 국내의 일반 및 특정폐기물 소각로에 관한 규제와 IAEA 및 각국의 기준 및 규제가 있는데 이들을 요약하여 소개하면 다음과 같다.

4.1. 국내 폐기물 소각로의 설치 및 성능기준

일반폐기물 및 특정폐기물로 구분하여 시설기준, 관리기준 및 성능검사기준 등이 제시되어 있는데 각 기준 모두 공통사항으로서 일반적인 주의 사항 및 공통기준이 기술되어 있고 특정폐기물 소각시설의 경우에는 다음사항을 추가로 고려하여야 한다.

- ① 형식 및 기능 : 대상폐기물 온도, 체류시간, 소각재의 감열감량, 배가스의 오염정도, 운전방법
- ② 처리능력 : 용량 (설계기준이상)
- ③ 구조 : 내열성, 밀봉성, 공기조절기능, 보조버너, 평행통풍, 소각재의 비산방지, 내화재, 회전소각로의 경우 회전속도, 외부표면온도, 연돌의 높이 및 구조
- ④ 부대시설 : 연소실 온도감시, 검시공, 냉각시설, 압력 측정, 밀봉성, 배출허용기준 만족을 위한 배가스 처리설비, 폭발화재 안전설비, 투입설비.

본 기준은 현재 성능검사기관(3개기관)에서 성능검사시 활용하고 있으나 아주 기본적인 특정내용을 포함하고 있으며 현재 기준의 일부는 개정을 시도하고 있다. 예를 들면 외부 표면온도의 제한 및 소각재 중의 감열감량(가연성분의 퍼센트)의 규정은 유기성 폐기물(플라스틱 등)의 경우 적용이 어려우며 오히려 DRE(Destruction & Removal Efficiency 분해제거 효율, 초기 가연성분중 제거된 성분의 퍼센트)의 도입등을 고려하고 있다.

4.2. IAEA의 소각로 설계 및 운전에 관한 지침 [7]

본 IAEA지침이 방사성 폐기물 소각시설의 설계 및 운전단계에서의 안전에 관해 가장 자세하게 기술적인 고려사항을 제시해 주고 있다. 본 내용은 서론으로 배경, 목적, 구성, 목표 등을 기술한 후 모두 12항목으로 나누어 기술하고 있으나 주 내용을 구분하면 첫째, 타

원자력 시설에서도 적용되는 기본적 안전사항으로 일반 시설에서 포함되는 화재, 폭발, 산업안전, 2차폐기물, 방호조치, 재료의 재질, 품질보증(QA), 제동의 제어와 감시, 설비의 배치, 용량, 경제성, 건물의 구조적 안전, 조직 및 행정, 서류의 관리 등이 있고 둘째로 원자력 시설상의 안전조치 사항으로 방사능의 제한, 방사능오염, α 함유시 조치, ALARA개념의 도입을 주로한 작업자 및 인근주민의 피폭등을 위한 방사선 제어 및 감시, 방사선 차폐, 환기 및 공정과 시설의 부압유지, 비정상 운전시 조치사항등을 들 수 있고 셋째로는 소각설비의 사항으로 폐기물의 투입과 인수기준(전처리, 검사), 소각재의 특성, 감용율, 연소기술 및 배가스 처리기술, 소각재의 취급 및 고화, 비산재의 제거, 사용후 여과소재의 처리, 세정수의 처리, 그리고 각 구성품(버너, 후연소로, 열교환기, 공기공급설비, 증발냉각기, 사이클론, 여과기, 흡착탑, 세정기, 송풍기, 굴뚝)의 요구조건, 시운전 및 운전계획 등을 포함한다. 따라서 이와같은 ① 산업시설의 일반 적용조건 ② 원자력시설상의 안전조건 ③ 소각시설의 요구조건 등으로 나누어 안전성 관련 고려인자를 해석하는 것이 타당할 것이다.

4.3. 미국의 소각로 관련기준 [2]

미국의 경우는 소각로의 안전성 확보를 위한 규제가 크게 NRC, RCRA(Resource Conservation and Recovery Act, 환경처 관할), 주 규정(State Regulation)으로 나누어 각각의 경우 이러한 규제를 모두 만족시켜야 한다. NRC의 규제는 주로 시설의 건설시에 안전성 분석보고서 및 환경영향 평가서 등의 제출에 의해 건설 허가를 득하는 것이고 RCRA요구사항은 시설 인·허가후 건설된 시설의 최종검사에서 성능검사와 같은 것이다. 또한 주 규정은 배출농도의 규제에 중점을 두고 NRC 규제를 재확인 하는 의미가 있다고 보여진다.

1) NRC적용 법규

1980년대 초반에 미국에서는 방사성폐기물의 감량의 필요성이 절실히 요구되면서 소각기술 활용을 권장하는 소위 LLW의 감량에 대한 정책 제언이 제출되어 NRC는 긴급수단으로 소각시설의 운영을 허가 할 것을 밝혔다. 그때에 소각대상폐기물 또는 처리 기관에 따라 다르

게 적용하여 인·허가 기준을 제시하였다. 즉 연구시설, 상업적 소각시설 및 원자력발전소의 시설등 3개 부류의 소각설비에 각각 다른 절차를 요구하게 되었으며 내용은 다음과 같다.

- ① 연구기관 소각시설 - NRC지역사무소(Regional Office) NRC시설 물질허가 취득기관 : 70개소, 그중 50개소는 state 허가획득
- ② 상업적 소각시설 - NRC지역사무소. 연구기관의 허가에 공중보건, 안전 및 환경 영향평가 추가
- ③ 발전소 소각시설
 - i) 원자로와 함께 인허가 되는 경우 소각로 제조업자는 원자로 규제 기관 (NRR)의 NRC에 일반안전성보고서(Topical Safety Report)를 제출한다.
 - Safety Report의 포함 사항 : 공정설명, 장치설명, 설계근거 및 공정변수, 배열, 시료 채취 및 감시장비의 설명, 품질보증계획서, 적용 연방규정의 검토, 소각로로부터의 배출물 등.
 - Safety Report에 포함되지 않았던 사항에 관한 안전문제 발생 또는 인허가 사항의 변경을 10CFR50.59 및 50.92의 적용을 받아 NRC에 의해 추가적 기술 작업이 요구된다. 이때 배출기준의 적용 및 작업자의 피폭등이 계산되어야 한다.
 - ii) 원자로가 건설중인 경우 소각시설을 허가 신청하는 경우 :
 - 최종 안전성 분석 보고서(FSAR)에 언급
 - 10CFR 30, 40, 70하의 허가시 타부대시설의 인·허가 경우와 흡사함
 - FSAR에 포함되어야 할 사항. 주요설계기준, 시설설계, 공정계통, 공정의 차단 및 관리, 방사선 방호, ALARA계획.
 - 환경영향 분석보고서로 제출
 - iii) 위의 두 경우 모두 10 CFR 61에 제시된 원자력 발전소에서 발생하는 폐기물 및 소각재를 방사성 농도에 따른 구분(A, B 또는 C)을 해야하며, 이의 종합적인 관리규정과 운반, 처분 등에 만족됨을 보여 주어야 한다.

2) RCRA의 요구사항

EPA 또는 관련 State에서 승인된 RCRA승인서가 필요하고 승인서를 받은후 정상운전이 가능하다. 이것은 특히 혼합폐기물(Mixed Waste : radioactive and hazardous waste)의 경우에 적용이 되며 환경관련 법

규라고 볼수 있다. Part A 와 B로 나누는데 그내용은 다음과 같다.

i) PART A

시설의 위치 작업내용의 상세 내용, 40CFR 264 규정의 만족.

ii) PART B

대상폐기물의 물리화학적 분석, 안전조치, 유해물질의 노출방지 및 고장과 파손이 완화되도록 설계된 공정, 구조 및 장비, 지진 및 홍수의 위험지역 인가 확인, 작업자 훈련계획, 보험, 출입통제 및 경계지역 표시 지형도, 피해에 대한 재정적 책임, 40 CFR 270. 19(C)에 나타난 시험소각 계획내용(승인전에 시험소각)

3) 주 규정

주로 대기오염 배출 규정(유해성 및 방사성 물질)을 통제, NRC의 규정에 부합되도록 주 규정을 정하는데 비제한 구역에 대한 핵종 유출농도기준이 포함된다. 병원, 연구시설, 상업시설, 산업시설(발전소)등이 주로 해당되며, DOE산하 소각로는 주 규정에 제재를 받지 않는다. 따라서 NRC규정과 EPA의 배출농도 및 피폭 등의 규정이 포함되어 있다고 볼 수 있다.

4.4. 일본의 소각로 관련기준

미국과 비슷하게 소각로에 대한 별도의 규제 보다는 원자력 시설의 규제 및 그 중 방사성 폐기물 처리시설에 관한 규제(원전설비중)에 맞게 시설을 설계, 운전하도록 되어있으며 시설의 내용을 포함하는 신청서 제출시 심사위원회의 검토를 거쳐 허가를 받으며 이때 특별한 규정을 기준해서 심사를 받지는 않는다. 그러나 실제의 시설을 운영하고 있는 상황을 보면 다른 나라보다도 안전성을 중시하며 시설을 건설하고 있다. 즉 별도의 규정은 없지만 타폐기물관리시설에 준하여 시설의 안정성을 심의하게 되며 인허가를 득한 후 설비를 설치하게 된다.

심의를 위한 신청서의 내용에 포함할 사항은 다음과 같다.

- 폐기물 취급/보관 설비
- 설비의 용량
- 소각공정의 설명
- 굴뚝의 높이
- 제염계수

- 소각로 형식의 설명
- 용기 및 설비의 재질

4.5. 영국의 소각로 관련기준

영국의 경우도 운전상 안전성 분석보고서(SAR) 및 환경영향평가(ER)를 주로 하여 미국의 NRC에서 제시하는 내용을 포함하고 있으며 특이한 것으로는 다음사항을 제시하도록 되어 있다. 폐기물의 인수기준, 폐기물 감시 및 계측설비, 방출제한 기준, 운전제한 기준, 규제에 대한 실증확인 절차, 자료기록 절차, 운전요원의 자격 및 훈련 등이며 별도로 실증시험소각을 하도록 되어 있다. 그외에도 영국의 일반/산업 폐기물 소각시설 기준과 비추어 어느 지역 특히 Scotland의 경우는 폐기물의 종류 및 소각용량, 폐기물 취급 보관설비, 화학오염물질의 방출기준, 감시와 시료 채취 및 배출 오염물 측정방법, 소각조건(온도, 버너, 경보, 체류시간, 투입), 소각재의 처분, 굴뚝의 높이, 유속 및 구조, 일반 운전사항으로 보수성, 감독 및 작업자의 구성, 총운전시간, 청결상태 등에 대해 규정하고 있다.

5. 소각시설 안전성 확보의 고려인자

방사성 폐기물 소각시설의 안전성 확보를 위한 규제 및 기술적인 지침에 포함되어야 할 항목을 앞절에서 비교된 각국의 내용을 토대로 알아보고자 한다. 수집가지의 항목을 나열할 수도 있으나 다음과 같이 산업시설의 일반적인 적용항목, 원자력시설상의 안전조건, 소각시설에의 요구기술사항, 그리고 기타 제반사항으로 나누어 알아본다.

5.1. 고려인자의 분류 및 항목

5.1.1. 산업시설의 일반적인 적용항목

- 시설의 목표설정
- 건물 및 구조의 견고성 (바닥, 벽, 골조 등)
- 화재 및 폭발
- 산업안전 및 재해 방지
- 배출물에 대한 조치
- 배치상의 문제
- Utility, 전기, 스팀 및 물 등

- 주위 설비와의 연계성
- 압력과부하에 대한 보호
- 운전상 신뢰성 및 보수성

5.1.2. 원자력 시설상의 안전조건

- 안전성 분석보고서 (원자력 안전, 구조 및 기계적 안전, 배가스처리, 공정의 설명)
- 환경영향 평가서
- 부지특성조사
- 타 원자력 관계법규 적용사항 (원자력법, 시행령, 시행규칙상 폐기물 관련법규, 원자력 폐기물 처리시설 기준 : IAEA Safety Series 50)
- 방사성 물질의 방출기준
- ALARA Concept의 적용
- 작업자 및 주민의 피폭선량 (방사선 피폭)
- 지진에 대한 대책
- 방사선 방호 : 방사선원의 통제, 차폐, 환기 및 차단 (Confinement), 지역 및 대기의 방사선 감시, α -핵종에 대한 제한
- 폐기물 및 시설의 표면선량 제한
- 설비의 기밀성 (Tightness, Sealing)

5.1.3. 소각시설에의 요구사항

- 설비의 용량 및 대상 폐기물의 제한 (인수조건, 성상, 투입물질의 제한 : PVC, 금속 등)
- 설비의 개요 (형식, 구조 및 사양, 배치, 공정의 흐름, 운전계획)
- 폐기물 전처리 및 투입
- 소각성능 평가사항 : 소각온도 및 조절기능 (버너), 체류시간, 연소효율, 제염계수, DRE (분해제거효율), 강열감량, 화염감시, 감용 및 감중비, 소각재의 특성, 연소실 외부온도
- 연소용 공기공급 조절장치
- 배기가스의 규제 (환경 및 방사성물질 대기방출기준)
- 2차 폐기물(소각재 등)의 취급 (흡탈립 방지 등) 분석 및 처리
- 설비 각 구성품 (투입, 소각로, 후연소로, 버너, 열교환기, 공기주입기, 증발냉각기, 사이클론, 여과기, 탄소여과기, 세정탑, 송풍기, 굴뚝)의 성능, 특성, 운전방법
- 실증 시험소각계획 및 시행

- 비정상운전시 대처사항 (전기, 예비송풍기의 설치)
- 부대설비
- 공정의 부압 유지 (환기계통과 연계)
- 감시 및 기록 (시료채취, 측정)
- 보수 및 개선 등의 보전성
- 설비의 재질 (품질보증 규정에 기술도 가능)

5.1.4. 기타 요구사항

- 설비의 운영조치
- 각종 서류의 구비 (운전지침 및 절차서, 방사선 안전 관리 절차서 등, 설계기준, 기본서류)
- 품질보증 (원자력 시설준용, 재료 및 설비기준 : 내식성 용접 등)
- 제반 인허가 절차 및 담당기관 (인허가, 성능시험 운전 등)
- 예외규정 (타시설 준용 대처항목의 제정)
- 운전요원의 교육계획

5.2. 주요 고려사항의 내용

외국의 경우의 방사성폐기물 소각시설 안전성을 위한 규제 및 지침 등을 비교 조사한 결과에서도 기술하였듯이 미국이나 유럽의 국가들은 주로 안전성분석보고서 및 환경영향평가를 중심으로 하여 여러 안전 및 기술적인 사항을 포함하도록 하고 있고 역시 IAEA 안전지침의 내용의 대부분이 이러한 보고서에 포함될 수 있다고 본다. 즉 안전성 확보를 위한 기술기준 또는 인허가 서류에 이러한 안전성분석보고서 및 환경영향평가를 포함시키면서 주요 포함내용 및 인허가상 개요 등을 제출한다. 또한 일본의 경우는 특별한 서식이나 포함내용 및 규정이 없이 이러한 내용을 포함한 신청서를 제출하도록 되어 있으며 이를 원자력 안전심의회 등에서 검토하여 허가하도록 되어 있다. 방사성 유기폐액의 소각지침이 있으나 본 내용 역시 RI 사용기관에서 동위원소 사용허가시에 본지침에 따라 유기폐액 소각설비를 하도록 되어 있는 정도이다.

본 절에서는 이러한 여러가지 고려사항들 중에 주요한 항목의 내용을 소개하면 다음과 같다.

5.2.1. 산업시설의 일반적용항목

본 항목에는 시설의 설계 및 운전상의 목표로서 안전성 목표, 성능상 목표, 운전상 목표치를 제시하고 기타

기본적인 안전사항이 포함되어야 한다. 기타 기본적인 안전사항에는 건물의 구조 및 견고성, 계통 안전분석, 사고상황 예측 및 대책, 화재 및 폭발에 대한 조치, 산업안전 및 재해방지, 시설의 배치 및 운전상 신뢰성 및 보수성, 주위설비와의 연계, Utility, 압력과부하에 대한 보호 등을 포함하며 이러한 사항들은 일반산업 및 원자력 시설에서 고려하는 내용으로 대처할 수 있다. 한 예를 들면 설계기준으로 건축물의 설계기준을 참고하며 설계하중으로 각 용도에 따른 지붕, 사무실, 제어실, 창고 벽 등의 하중 강도치의 제시, 적재하중, 풍하중 등을 고려한다. 또한 화재 및 폭발의 규제는 대상폐기물 및 소각시설 사용재료의 내화성 및 폭발/발화성 등이 검토되어야 하고 안전 밸브 등의 조치와 화재 소화 설비의 준비 등이 제시될 수 있다. 그러나 이러한 모든 일반 산업 안전사항도 안전성 분석보고서의 내용으로 포함될 수 있다.

5.2.2. 안전성 분석보고서

안전성 분석보고서의 내용, 작성요령 및 인허가시 제출서류로의 제시가 필요할 것이다. 앞에서 제시된 산업시설의 일반 적용항목이 보고서의 서두에 포함되고 추가적으로 방사선학적 안전에 대한 항목과 소각로의 설계 및 운전상 안전성 확보의 내용이 포함되어야 한다. 국내 원자력 시설 및 실증용 소각시설의 안전성 분석보고서 [8] 등이 참고될 수 있으며 미국의 TSCA 소각로 (PCB 및 방사성 물질에 오염된 Mixed Waste 용 소각로)의 안전성 분석보고서 [9] 등을 고려하여 내용을 살펴보면 다음의 내용을 포함해야 하는 것이다.

- 1) 일반사항 (사업개요, 목적, 안전분석의 요약)
- 2) 부지특성
- 3) 주요 설계기준
 - 일반산업 설비의 기준
 - 방사선 방호
 - 2차 폐기물의 관리
- 4) 소각시설 및 공정의 설명
 - 건물의 개요
 - 방사선 및 비방사선 구역의 구분
 - 공정의 부압유지
 - 대상폐기물의 특성
 - 소각공정 계통설명 : 설계기준, 열/물질수지, 준비계통(폐기물의 전처리, 투입), 소각계통, 배기체 처리계통, 연돌, 배기팬

- 소각재 처리제통 : 소각재 수거부, 여과기의 재 수거부
- 소각로 운전절차
- 5) 부대설비의 설명
 - 감시 및 방호계통
 - 공정감시 및 기록
 - 시설의 환기 및 차단벽 (Confinement)
 - 시료채취 및 분석계통
 - 화재 및 폭발 안전계통
 - 행정 절차
- 6) 방사선 방호
 - 지역, 공기, 배가스 중 방사선 감시
 - 투입 폐기물의 방사선원 및 방사선량
 - 방사선 방호시설 : 관리구역 구분 및 관리 (Health Physics), 출입자의 통제
 - 종사자의 피폭선량
 - 인근주민의 피폭선량 : 피폭경로, 선원, 선량 계산
 - 차폐
 - 보건물리 계획 : 조직, 기기, 설비, 절차, 교육, 출입통제, 취급 및 운반 등
- 7) 사고분석
 - 공정누출 (유해물, 독성)
 - 중대사고 평가
 - 화재 / 폭발 / 고압
 - 계통시험 : 실증시험 소각계획 (시운전, 동위원소 사용시험)
 - 사고시 영향 평가
 - 시설 시험계통
 - 비정상 조건 및 사고대책
 - 자연현상(지진, 태풍, 홍수)의 대비
 - 작업장의 안전 및 보건
 - 대중보건의 영향
- 8) 운전수행
 - 조직 및 훈련
 - 운전절차
 - 문서 및 심사계획
 - 응급조치계획
 - 기록 보관 유지
 - 시험운전
- 9) 품질보증 (Q/A)

5.2.3. 환경영향 평가서

개발적인 시설의 개요 등은 안전성 분석보고서의 내용을 포함하게 될 것이다. 그러나 소각대상 폐기물로 부터의 방출에 대한 주위환경의 영향평가 등이 중점적으로 분석되어야 한다. 역시 타 원자력 시설에 영향평가를 중심으로 조사되어야 할 것이다. 주위환경 (대기, 수질, 토양 등)에의 오염가능성을 평가하기 위해 기상학적인 자료, 부지의 특성, 주위시설의 현황 등의 자료가 종합되어야 하며 본 시설에서 배출될 수 있는 각종 방사성 및 물리화학적인 오염인자의 파악이 되어 이에 대한 환경으로의 오염경로 및 영향해석이 되어야 한다. 특히 가장 중심이 되어야 하는 내용이 대기중의 방출과 이에 대한 영향이 분석, 평가되어야 한다. 또한 각 배출물(가스 및 2차폐기물)에 대한 저감방안 및 환경영향 감소방안 등이 제시되어야 하며 이들의 감시, 관리, 기록 등의 수단도 포함되어야 할 것이다. 아울러 필요시에 주민의 여론에 대한 상황 및 영향도 고려하여 기술할 수도 있을 것이다. 이에 필요한 조직 및 대민/대관 활동과 종사자의 책임 등도 포함할 수 있다. 어쨌든 타 원자력시설에 준용하여 본 평가서를 작성해야 한다.

실제로 원자력 발전소 환경영향평가서 작성지침(고시 제 84-8호)에 준하여 내용을 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 소각시설의 건설계획 개요
- 2) 환경의 현황 : 부지, 토지, 물, 생태계, 기상, 수문, 해황, 지질, 인구 및 사회, 경제, 문화
- 3) 소각시설의 현황 : 외관, 각 계통의 설명, 방출가스 및 2차 폐기물, 화학 폐기물, 위생, 방사선 감시 및 누출 방지기능
- 4) 소각시설 건설이 환경에 미치는 영향 : 부지 준비 및 건설시 영향, 방사능 영향, 악영향 최소화계획
- 5) 소각시설 가동시 환경에 미치는 영향 : 열발산 영향, 방사능 영향, 화학물질 배출의 영향, 2 차 폐기물의 영향, 기타 및 악영향 최소화 계획
- 6) 환경감시계획 : 가동 전 및 가동 후 감시 계획
- 7) 사고로 인한 영향 : 방사능 수반사고 영향, 기타사고 영향
- 8) 종합 평가 : 불가피한 환경에의 악영향, 자연의 훼손, 종합평가
- 9) 기타 : 참여자 및 참여기관, 비용

5.2.4. 타 원자력 관련 법규의 적용

국내의 법규(원자력법, 시행령, 시행규칙)에서 방사성 폐기물 처리 및 처분에 관한 제반 조항이 검토되어 이에 만족해야 할 것이다. 이러한 예로는 시행령 제 90조 (폐기물 처리설비), 시행령 제 110조 (사업소안의 폐기), 시행령 제 212조 (폐기시설의 시설기준; 소각시설 내용포함) 등이 있다. 그외에도 방사성물질의 배출에 대해 고시 제 90-11호 (방사선량 등에 관한 규정)에 의해 표면방사선량을 및 2차 폐기물의 규제와 중요한 대기중의 배출허용농도 등의 제한값이 만족하는가를 확인해야 한다. 또한 고시 제 90-7호 (방사성 동위원소 폐기물 분류, 수거 및 인도 규정)의 내용도 폐기되는 소각재 등의 인도를 위해 적용되어야 할 것이다.

5.2.5. 환경 및 방사성 물질의 배출 제한

앞에 제시되었던 국내의 방사선량 등에 관한 규정에서도 배기체중의 방사성 물질의 농도를 제한하고 있듯이 이러한 방사성 배출물질 및 화학적 환경오염 물질의 규제가 되어야 한다. 이러한 내용에 대해 다른 나라의 규제를 알아보면 다음과 같다. 일반적으로 모든 방사성 폐기물 소각로의 경우 타원자력시설의 한 부분으로 고려하여 배가스의 방출의 적정성 등을 제한하고 있으며 전반적인 환경영향이 적도록 규제하고 있다.

1) 방사성 물질의 방출

방사성물질의 방출의 제한은 우리나라의 고시와 같이 미국의 경우에도 10CFR 20등에 같은 값으로 제한하고 있다. 그러나 이외에도 다음과 같은 원칙 및 계산을 적용하고 있다.

- ALARA 개념 (ICRP)

- 역환경영향 계산 (피폭제한치로 부터 방출기준 계산)

- 제염계수 (DF)

DF=

$$\frac{\text{input activity}}{\text{total emitted off-gas activity to the environment}} \div 10,000 : \text{요구되는 값}$$

이러한 DF와 방출제한 농도로 부터 대상폐기물의 인수시 폐기물 단위중량에 대한 최대 허용농도의 산출도 가능하다. 또한 주민 및 작업자의 피폭선량으로 부터의 방사성물질 방출 및 취급 농도를 계산해 볼 수 있다. 이러한 평가가 방사선학적 안전성평가에 중요한 사항이 된다.

2) 화학물질의 방출

우리나라 환경부의 대기환경보전법에 제시되어진 화학오염물질의 대기 방출기준을 고려해야 할 것이다. 표 5-1은 화학물질의 방출기준의 국가별 내용과 우리나라

표 5-1. 화학적 물질의 방출 기준의 요약

Material	Limit in air		한국 (ppm)	Remarks
	(mg/m ³)	(ppm)		
Dust	50-500		100	
HCl (or Cl ⁻)	30-700	60-400	60	Calculated at 11% O ₂ (독일) or 7% CO ₂ (프랑스)
SO ₂	500-800	180-200	300	Not always specified
NO _x	250-500	120-240	200	Not always specified
CO	100	100	600	Not always specified, may be set as CO : CO ₂ ratio
HF (or F ⁻)	3-50	6-60	10	Not always specified, calculated as for HCl
Heavy metals				
Pb+Zn	5		-	
Hg or Cd	0.1	5		

* 우리나라법의 경우 1995년 적용예정기준이며 중금속의 mg/m³임

의 기준을 종합하여 각 물질별 범위를 나타내었다. 국내의 경우 방사성폐기물 소각로의 운전시 적용을 받도록 규정되어 있지는 않지만 대기보전을 위해 이의 감시도 필요하다.

5.2.6. 작업자 및 주민의 피폭선량

방사선 방호의 주요한 것중에 하나가 ALARA 개념에 의한 최대한의 안전대책의 강구이지만 또한 아주 보수적인 상황 즉 주어진 조건에서 최대의 방사선량이 누출 또는 배출될 때의 인근주민 및 시설내의 작업자에 대한 피폭선량의 평가가 반드시 실시되어 안전성 분석보고서 등에 포함되어야 할 것이다. 특히 이러한 계산이 결국 투입되는 소각대상 폐기물 중의 방사능 농도를 계산해주게 한다 [10]. 굴뚝으로부터 방출되는 방사능 농도의 최대 가능치로 부터 대기확산 모델 등을 이용하여 인근주민의 흡입 섭취 및 외부 피폭되는 선량의 계산이나 소각재중에 함유될 수 있는 최대 방사능치로 부터 차폐를 고려하고 소각재 취급작업 등을 실시하는 작업자의 흡입 및 외부 피폭선량의 계산 등이 선행되어 시설의 안전성이 평가되어야 할 것이다.

5.2.7. 소각로의 기술적 조건

설비의 개요로서 소각로의 형식, 용량, 대상폐기물, 구조 및 사양, 공정흐름도 등이 기술되어야 하고 소각로의 성능을 확인하는 내용으로는 국내의 특정폐기물 소각로 성능기준이나 외국의 확인 항목을 보면 소각로의 온도 및 조절기능, 체류시간, 연소효율, 제염계수, 분해 제거효율, 강열감량, 화염감시, 감용·감중비, 소각재의 특성, 소각로의 외부온도 등의 항목이 있다. 여기서 각 항목에 대한 수치를 제한하는 것은 소각로의 형식과 대상폐기물 및 기타 법규 등에 따라 달라지게 되지만 각각에 대해 간단히 기술하면 다음과 같다.

소각로의 온도는 주로 750°C에서 1200°C 정도까지의 온도를 소각로의 종류 및 형식과 대상폐기물에 따라 규정하고 있으며 온도의 유지를 위해 필요시 가동되는 예비용 버너의 부착 등을 규정하고 있기도 하다. 체류시간의 경우는 온도가 높은 부분(주로 최종연소실)을 기준하여 0.5초에서 특정유해성분 함유시에는 2초 정도까지도 제시하고 있다. 원자력발전소 폐기물의 경우 화학적으로는 그다지 난분해성이 아니므로 0.5-1.0초 정도의 체류시간이 적용될 수도 있다. 연소효율의 경우 총 유기물의 투입량 즉 총 가연성분의 투입량에 대해 잔류하거

나 방출되는 가연성분의 양을 제외한 분해/연소된 가연성분의 양으로 보통 백분율로 나타낸다. 약 99% 이상의 연소효율을 갖도록 소각로가 운전되어야 할 것이며 분해 제거효율(DRE)로 표시하여 규정할 수도 있다. 또는 가스 및 액체의 연소시에는 발생가스 중의 CO 및 CO₂ 농도의 비를 가지고 정의된 연소효율을 계산하기도 하지만 본 소각시설의 경우에는 적용되지 않을 것이다. 소각로의 연소효율과 이어지는 배기가스의 처리설비를 포함한 전 공정의 평가를 위해서 총 발생하는 재에 포함된 방사능량에 대한 소각로 및 배가스 처리계통에서 제거되는 재에 포함된 방사능량을 가지고 각 단위공정 또는 전 공정의 포집효율을 계산할 수도 있다. 또한 모든 핵종성분이 소각재에 침적되어 거동한다고 하면 즉 비휘발성 핵종이 재에 골고루 분배되어 있다고 보면 이 포집효율은 바로 제염계수로 계산되어 질 수도 있다. 즉 각 구성설비의 소각재 포집효율을 η_i 라고 하고 정의하면 다음과 같다.

$$\eta_i = \left(\frac{C_i - C_o}{C_i} \right) \times 100(\%)$$

$$= \left(1 - \frac{C_o}{C_i} \right) \times 100(\%)$$

여기서 C_i 는 구성설비의 inlet 농도이고 C_o 는 outlet의 농도이다. 또한 핵종이 비휘발성이고 소각재에 고르게 분배되어 있다는 가정에서 제염계수를 다음과 같이 쓸수도 있다.

$$DF_i = \frac{100}{100 - \eta_i}$$

또한 여러 설비가 연결된 전체 설비에 대한 제염계수는 다음과 같다.

$$DF_{total} = \prod_{i=1}^n DF_i$$

또는 각 핵종에 대한 실험을 통해서 각 구성설비의 제염계수를 구성하는데 해당 핵종에 대한 제거(포집)효율과 제염계수를 계산하여 전체의 제염계수를 정의한다. 현재 일본의 경우나 다른 외국의 경우에 물론 대상 폐기물과 핵종에 따라 다르지만 $10^4 - 10^5$ 이상의 제염계수를 요구하고 있다. 휘발성이 강한 H-3, I-131 등의 핵종의 경우는 소각설비에서는 큰 제염계수를 기대하기는 어려우므로 필요시 추가적인

후처리 설비 또는 투입량을 제한하여야 한다.

화염의 감시, 소각로 내/외부의 온도 등은 중요한 항목이 아니지만 규제하는 경우가 있고 화염의 감시는 실제 운전자의 경험에 의한 소각상태의 판단 조건이 되기도 한다. 그러나 감용·감중율이 소각을 이용한 부피축소의 효과의 척도가 되므로 특정한 폐기물에 대한 시험 및 예상효과의 제시값으로 사용될 수 있다. 일반 원자력 발전소 폐기물의 경우 약 40-100 이상의 감용효과가 있는 것으로 알려져 있으며 소각로의 성능시험시 포함되어야 하는 결과일 것이다.

마지막으로 발생하는 소각재의 특성으로는 소각재의 구성성분 특히 유기가연물의 함량을 측정하는 강열감량 또는 공업분석(수분, 휘발분, 고정탄소, 불연성분)이 필요하다. 국내 특정폐기물 소각로의 성능기준에도 이와 같은 소각재 중의 가연성분의 측정을 통한 강열감량의 값이 15% 또는 20% 이하가 되도록 규정하고 있다. 그러나 소각대상물 중의 불연성분(재성분)이 극히 없는 플라스틱류의 경우는 유기 가연물의 연소 또는 분해가 99.9% 이상 이루어져도 발생하는 재중의 가연물의 양이 많아져 15%의 강열감량을 얻기가 힘들다. 물론 소각재 중의 유기가연물을 적게 하여 고화 또는 최종처분시에 안정성이 확보되므로 이의 규제가 필요하나 분해제거 효율의 적용이 보완적으로 이루어져야 한다.

소각로 이외에도 배가스 처리설비의 성능에 대한 평가가 이루어져야 하는데 앞에 제시한 포집효율 및 기능의 평가가 이루어져야 하며 포괄적으로 하여 각 성분 핵종에 대한 총괄 제염계수가 제시되는 값 이상이어야 할 것이며 시설물의 재질과 부식 등의 문제도 특수한 폐기물(PVC 등) 포함시에는 고려되어야 할 것이다.

5.2.8. 소각재 및 2차 폐기물의 처리

소각로, 후연소로, 배기체 처리장치에서 발생하는 소각재와 세정탑과 같은 습식 처리장치를 사용하는 경우 발생하는 액체 폐기물 등에 대한 감시 및 추후처리 방법에 대한 안전성이 확보되어야 한다. 가장 간단한 포함내용 중에는 소각재의 취급상 문제로서 흘날림 없게 해야 하는 것이 있고 소각재의 특성 분석과 고형화 또는 포장 등의 최종처분에 합당한 형태로의 후처리방법이 제시되어야 한다. 환경규제상의 폐기물 공정시험법에서는 소각재의 용출(침출)실험 방법과 용출액의 평가가 제시되어 있다. 본 소각재의 경우에도 소각재 그 자체 또는 소각재의 고형화 방법(시멘트, 폴리머, 아스팔트, 용융슬

래그, 유리화)이 제시된 최종 폐기물의 핵종의 침출특성이 평가되어야 한다. 또한 폐기물의 특성검사 항목에 제시되는 강도, 생물학적 분해, 연소성, 반응성, 부식성, 가스발생 등의 점검이 필요하다. 따라서 소각재의 특성조사 및 처리방법에 대한 기본적인 연구와 조사가 실시되어야 할 것이다. 폐수 및 2차 폐기물에 대한 처리 및 취급 방안의 제시도 소각재와 동일하게 특성을 파악하고 이에 대해 각 처리방법의 적절성 등이 확인되어야 할 것이다. 아울러 최종처분될 용기의 규정 등도 타 규제에 적용제시를 하는 것이 바람직하다고 본다. 또한 소각재 취급위치인 소각로 하단의 재 수집함의 차폐 및 기밀성 유지와 원격제어의 실시를 통해 작업자의 피폭감소를 꾀해야 한다.

5.2.9. 폐기물 인수조건

소각로의 성능 및 대기중 방출과 소각재의 배출과 관계하여 폐기물의 인수조건이 제시되어야 한다. 소각로의 대상폐기물의 성상, 핵종농도, 화학적 조성, 크기, 중량 및 발생처 등의 제시가 필요하다. 특히 소각로에서의 대기 방출기준이나 소각로에 의한 환경영향 평가에 따른 주위주민의 피폭선량과 작업자의 피폭선량으로 부터 소각로의 성능(제염계수)을 기준으로 역산하여 대상폐기물 단위중량 당 핵종의 최대부하율이 계산되어 대상폐기물을 제한하게 된다. 핵종뿐만 아니라 화학적으로 문제가 되는 PVC, PCB 등의 물질의 제한도 포함시켜야 한다. 또는 다른 폐기물 처리설비와 동일하게 사용되는 인수/인계시 규정 또는 양식 등을 이용할 수도 있다. 독일의 경우 폐기물 처리설비에서 사용되는 인수/인계 양식 및 세부사항이 원자력연구소 보고서에 나타나 있다 [11]. 또한 국내의 고시 제 90-7호(방사성 동위원소 폐기물의 분류, 수거 및 인도 규정)에 제시된 양식 등을 이용하여 인수를 받으면서 소각설비의 특성에 따라 그 내용의 각 항목을 제한할 수도 있을 것이다.

5.2.10. 실증 시험소각 (Trial Burns)

외국의 경우 몇개국에서 소각시설의 건설후 운영하기 전에 모의폐기물 및 제한된 양의 대상폐기물을 가지고 시험소각을 실시하여 소각설비의 성능을 확인하게 된다. 또한 국내의 특정폐기물의 소각설비에 대한 성능검사 실시도 이러한 실증시험소각의 절차라고 볼 수 있다. 즉 화학적으로 유사한 대상 모의폐기물을 만들어 기지의 핵종을 주입하여 모의 소각실험을 주어진 조건에서

실시하는 것이다. 그리고 소각로 뿐만 아니라 안전성 분석보고서의 내용 및 기타 안전 규제내용의 점검이 동시에 이루어질 수 있다. 또한 자체적으로도 이러한 시험소각 계획을 세워 필요한 정보를 축적하여 필요시 제시하는데 사용할 수 있다.

시험소각의 경우도 시험소각 계획서를 작성하여 이에 대한 제출 및 검토를 하는 것이 바람직하며 또한 필요시에는 어느 특정기관(연구기관)으로 하여금 제반규정 준수사항 및 성능시험 소각을 검사받도록 하는 절차 [11]도 포함될 수 있다고 본다.

5.2.11. 품질보증 (QA)

품질보증으로 원자력 설비에 해당하는 QA 계획 및 활용을 하도록 해야 할 것이다. 주 내용을 크게 나누면 전반적인 Q/A program, Engineering Q/A program, Project Q/A assessment and plan 등으로 구성된다. 참고 내용으로는 방사성폐기물 관리사업 품질보증 기본절차서 (RWQA-G-003 원자력연구소)와 같은 절차서를 따라서 설계관리, 설계품질 확인, 자재 및 부품관리, 감독절차 등의 내용을 확인하고 특히 소각설비 및 부대설비 또는 건물 등의 제반 시설의 재료와 용접/제작 규제를 원자력 시설기준에 따르도록 하는 규제가 필요하다. 사용되는 방사선을 제어하기 위한 여러 측정 및 감시 기기의 품질보증도 역시 제시되어야 한다.

5.2.12. 유기폐액의 소각

가연성 고체폐기물을 주 대상으로 한 방사성폐기물 소각시설의 안전성을 위한 고려사항 이외에 유기폐액의 소각에 관한 기술적 요구사항 및 지침도 포함되어야 할 것이다. 일본의 경우 [12] 병원, 연구소 등에서 사용되는 scintillation liquid의 경우 화학 성분상 인화성 및 유해성 등을 고려하여 운송, 보관이 위험하므로 발생현장에서 소각하도록 하고 있다. 이 경우 RI 사용시설의 인허가 내용에 안전 지침을 따라 설비하도록 하고 있다. 방출기준, 시험소각결과 등을 고려하여 설비하게 되며 인허가 절차 역시 간단하게 되어 있다. 시간당 1~2ℓ의 소각용량을 가지며 병원 등에서 방사선 구역 실험실 등에 간단히 설치할 수 있도록 되어 있다. 국내의 RI 폐기물의 양의 증가와 유기폐액의 위험성 등을 고려할때 이의 지침이 필요하다고 본다.

6. 결론 및 제언

가연성 방사성폐기물 소각시설에 대한 안전성을 확보하면서 적절한 설계, 건설 및 운영을 하기 위한 기술기준 및 규제를 위해 실시된 안전성에 관한 연구를 국내외 소각기술의 현황 및 활용상황과 관련기술기준 및 규제에 포함할 항목 등을 중심으로 수행하였다. 앞으로의 연구방향의 제시 및 안전성확보를 위한 최종 기술기준의 참고자료로 본 내용이 적절히 활용되기를 기대하면서 다음과 같이 결론을 요약해 본다.

- 1) 국내의 소각대상 폐기물 발생현황 및 해외의 소각기술활용 등을 고려할 때 소각기술의 도입은 절실히 요구되며 이를 위한 준비가 원전, 폐기물 관리 주체 및 관련 부처에서 이루어져야 할 것이다.
- 2) 국내의 비방사성폐기물 소각기술산업, 안전 및 기술적 지침이 마련되어 있고 외국의 경우에도 시설의 안전한 설계, 건설 및 운영을 위한 여러형태의 규제가 실시되고 있는 실정으로서 이의 비교 및 적절한 도입으로 국내에서 필요한 안전성 확보를 위한 기술기준 및 지침이 확립되어야 한다. 아울러 지침의 일부로 인화성, 유해성 등으로 인한 보관, 수송이 어려운 Scintillation 용액과 같은 유기폐액의 적절한 소각 기술기준도 마련되어 안전성이 확보되어야 한다.
- 3) 이러한 기술기준 및 지침을 위해 조사된 국내의 자료를 토대로 ① 산업시설의 일반적용항목, ② 원자력 시설상의 안전조건, ③ 소각시설의 기술적 요구사항, ④ 기타요구사항 등으로 나누어 검토가 되어야 할 것이며 외국의 경우를 참고해 볼때 안전성분석보고서 및 환경영향평가서 등 원자력 시설의 건설시에 필요한 중요 작성서류가 필수적이라고 보아지며 이런 서류의 내용에 제반 일반사항 및 소각시설의 기술적 요구사항, 또한 배출제한, 방사선 피폭제한, 소각재의 처리 및 조건, 폐기물 인수조건 등이 포함된 관련법규의 적용 및 확인이 되어야 할 것이다. 그외에도 시험소각의 실시를 포함하여 이의 결과 및 확인(검사) 항목에 제시되어야 하고 품질보증 (Q/A) 내용이 있어야 할 것이다. 또한 미국의 경우 시설의 종류 및 용도 (연구소 시험시설, 발전소 부지내 상업적 시설)에 따라 다르게 규제하고 있는데 일부의 사항, 즉 연구시험시설이나 발전소 부지내 건설시에는 일부 타 원자력시설과 중복되는 항목 (예 : 환경영향평가 및 부지특성) 등은 기존의 것을 적용하는 방법

으로 대체하는 절차를 포함시킬 수도 있을 것이다.

- 4) 결론적으로, 본 연구결과가 폐기물 소각시설의 안전성 확보를 위한 최종적인 기술기준 및 규제의 확립에 필요한 내용의 기초가 되리라고 확신하며 3)항에서 제시한 주요사항의 자세한 검토가 추후에 이루어져야 할 것이며 이를 근거로 기술기준(안)이 마련되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 방사성폐기물 관리기금의 위탁과제로 수행된 것임.

참고문헌

1. Tokura, T. "Present State of Radioactive Waste Incineration Technology", NGK 입수자료 (1994)
2. EPA Research Series, "Radiation and Mixed Waste Incineration", Government Insititute Inc (1994)
3. 84N-T15, "소각로 설치에 대한 세부타당성 조사연구", 한국전력기술 (1984)
4. KAERI /RR-472 /85, "방사성폐기물의 고화처리 관련연구", 한국에너지연구소 (1985)
5. KAERI-NEMAC /RR-44 /91, "방사성폐기물 처리기술개발 (Ⅳ)-실증용소각공정의 시운전", 한국 원자력연구소 (1991)
6. KAERI-NEMAC /RR-94 /93, "방사성폐기물 처리기술개발 (Ⅵ)-가연성폐기물 소각특성연구 (Ⅱ)", 한국원자력연구소 (1993)
7. IAEA, "Design and Operation of Radioactive Waste Incineration Facilities", IAEA, Safety Series No. 108 (1992)
8. KAERI-NEMAC /AR-15 /193, "방사성폐기물 실증소각시설의 안전성분석보고서", 원자력연구소 (1993)
9. "Draft of Safety Assessment Report for TS-CA incineration", ORNL (1991)
10. KAERI /RR-893 /89, "방사성폐기물 처리기술개발 (Ⅱ)", 과기처 (1989)
11. KAERI II /RR-9 /90, "방사성폐기물 처리기술개발 (Ⅱ)", 과기처 (1990)
12. 일본과기청, "방사성 유기폐액의 소각에 관한 안전 지침" (1986)