

## KAERI 소각시설의 실용화를 위한 방사학적 안전성 분석

양희철, 김정국, 김창희, 박원만, 김봉환, 김준형, 오원진, 박현수  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

5 년간의 기술실증 및 안전성 검토를 거쳐 한국원자력연구소내 실증소각시설을 자체발생 가연성  $\beta/\gamma$  폐기물을 소각하는 시설로 인허가를 얻었다. 동위원소포함 모의폐기물 및 원전발생 가연성폐기물 실증소각 결과에 기준을 두고 연간 배출오염원 및 가상 사고시의 방사학적 위해성을 평가하여 저준위 폐기물을 부지내에서 소각처리할 때 그 위해성은 무시할 수 있을 것으로 미미함을 확인하였다. 실증시험으로 주된 배출 방사선원은 고온의 소각로에서 휘발성이 크고 저준위 폐기물내 농도가 큰 반휘발성 Cs-137 및 Cs-134로, 발전소 가연성폐기물과 같은 핵종조성을 가진 0.109 mCi/kg 의 소각시 Cs-137 및 Cs-134의 배출농도가 공기중허용농도의 10%를 약간 상회하는 것으로 평가되었다. 비방사성 CsCl을 이용한 시험소각을 통하여 사용되는 저온배기체처리계통에서의 휘발된 Cs의 배기체 냉각시 입자화 및 제거특성을 고찰한 결과 휘발된 기체상 Cs성분은 건식배기체 냉각공정을 거치면서 대부분 마이크론 크기이하의 입자로 생성되지만 5% 미만이 전이영역 크기에 분포하여 주여과장치인 여과포집진기에서 제거효율이 99.9% 이상이었다.

### 1. 서론

한국원자력연구소에서는 실증용 소각시설(Demonstration-Scale Incineration Plant: DSIP)을 건설하고 이후 지속적인 단계별 소각기술의 실증을 위한 연구들을 진행한 후 그 결과에 근거하여 시설의 실용화를 위한 개선과 운전시의 방사학적 안전성을 평가하고 1997년에 원자력연구소내 발생 가연성폐기물을 소각처리할 수 있는 소각시설로서의 인허가를 취득하였다. 본 논문에서는 소각 시설의 상시운전시의 방사학적 위해성에 대한 평가결과를 논하였다. 먼저 정상운전시의 방사성 핵종의 배출농도는 시험소각결과 및 대상폐기물내 핵종의 농도분포에 기준을 두고 정상운전시 주요 핵종별 배출농도를 공기중 허용농도와 비교하였으며 정상운전 및 가상사고시의 방사학적 위해성을 평가하였다. 아울러 실증소각 결과로 결정된 주된 오염원인 방사성 세습성분에 대한 적용되는 저온배기체 처리공정의 제거성능을 입증하기 위한 추가적인 시험소각을 통하여 소각로에서 휘발되어 배기체 냉각시에 응축되는 세습성분의 입도분포특성과 주여과장치인 여과포집진기에서의 제거효율에 대해 논하였다.

### 2. 방사학적 안전성 분석

#### 가. KAERI 방사성 폐기물 소각시설 개요

KAERI 방사성 폐기물 소각공정도를 그림 1에 나타내었다. 20-25 kg/h 용량(열용량: 470 MJ/h)으로 2기의 연소로와 배기체 처리계통으로 구성된다. 배기체 처리계통은 저온 건식 및 습식 배기체 처리계통으로 폐기물내 염화물의 농도가 많을 때에만 습식배기체 처리계통을 사용한다. 1991년 이후 1996년 초반까지 진행된 단계별 소각기술의 실증시험을 표 1에 나타내고 이에 필요 하였던 인허가 사항을 요약하였다. 1단계로, 1992년에는 비방사성 모의폐기물을 이용한 시험소각을 수행하였다[1]. 계속해서 1993년에서 1997년까지 비방사성 유해 중금속성분 및 방사성 핵종에 대한 고온 거동 특성들에 대한 연구가 진행되었다[2,3,4]. 사용된 중금속 성분들은 As, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Hg, Mn 및 Pb로 각각 산화물, 염화물 및 원소금속을 포함하는 폐기물이 모의폐기물로 이용되고 시험결과들이 비교되어 실증용 소각공정에서의 중금속 및 핵종의 물리화학적 특성, 특히 휘발성 및 응축성에 따른 기본적인 거동특성에 대한 고찰이 이루어졌다. 이러한 실험의 단계별 결

과에 기초하여 1993년도에는 하반기에 동위원소를 이용한 시험소각에 대한 허가를 얻고 1994년도에는 저준위 가연성폐기물내 주요 동위원소(Co-60, Cs-137 및 Mn-54)를 이용한 추적자 실험 및 1995년에는 실패기물(고리원전발생) 시험소각을 수행하여 배출방사선원 및 허용방사능량을 결정하였다.

#### 나. 소각시설의 최대허용 비방사능

시험소각결과부터 도출된 각 단위장치의 제염계수(DF)와 주요 방사성 핵종에 대한 공기중 허용농도(MPCs: Maximal Permissible Concentrations, mCi/Nm<sup>3</sup>)에 따라 소각시설에서 처리될 수 있는 폐기물의 최대허용 비방사능(MSA: Maximal Specific Activity, mCi/kg)은 다음과 (1) 식과 같이 계산된다[5].

$$MSA = \frac{Q_n \cdot MPC}{W \cdot SF} \cdot \prod DF, \quad (1)$$

위 식에서 Q<sub>n</sub>은 평균 배기체 유량(Nm<sup>3</sup>/h), W는 소각대상 폐기물의 투입속도(kg/h), SF는 안전인자(Safety Factor)로 10으로 정하였다. 표 2에 원전 가연성 폐기물의 시험결과로부터 추정되는 주요 방사성 동위원소에 대한 MSA를 나타내었다. 적용된 원전 가연성 폐기물의 평균농도는 시험소각된 폐기물에서 시료채취된 폐기물의 핵종별 농도분포와 1996년도말 과기처에 보고된 한전원전 관리연보에 따른 가연성폐기물의 총비방사능에 기준을 둔 것이다. 적용된 제염계수는 Ru와 Nb의 경우 반휘발성으로 Cs 동위원소의 실험결과에 의한 제염계수와 동일하다고 보았다. 표 2에서 핵종의 배출농도는 핵종의 휘발특성 및 핵종의 농도에 크게 좌우한다는 것을 알 수 있다. 반휘발성이면서 농도가 큰 Cs-137 및 134의 경우 0.192 mCi/kg의 비방사능을 가진 폐기물을 소각하였을 배출농도가 MPC의 약 10% - 30%의 범위에 있음을 알 수 있다.

#### 다. 정상운전시 환경 영향

앞의 표 2에 제시한 바와 같은 정상운전시 핵종별 배출농도에 기준하여 정상운전시의 방사학적 영향을 평가하였다. 제한구역경계(EAB: Excursion Area Boundary)를 소각시설의 연도에서 반경 25m 경계로 설정하고 U. S. NRC의 Regulatory Guide 1.111[6] 내 모델을 수행하는 전산프로그램인 XOQDOQ를 이용하여 상대대기확산인자 및 침적인자들을 계산하였다. 풍향, 풍속 및 대기안정도와 같은 입력 기상자료들은 소각시설 인근에 설치된 10 m 높이의 기상탑에서 1995년 1월 1일부터 1995년 12월 31일까지 측정된 값에 기준한 것이다. 배기체 배출형식은 소각시설의 연도가 15 m인 것을 감안하여 지상배출로 하였다. 계산결과, EAB에서의 개인별 방사선량은 8.49 μSv/yr로 규제상의 기준치인 5 mSv/yr의 0.17% 및 설계기준치인 0.05 mSv/yr의 17%에 해당되는 값으로 평가되었다.

#### 라. 가상된 잠재적 사고시의 환경영향

국외의 다른 상용소각시설과 마찬가지로 본 원자력연구소 소각시설도 사고와 비정상운전의 가능성을 근본적으로 배제하거나 이를 완화할 수 있는 설비들, 즉 비정상운전시 경보 및 지시계통, 압력 배출 밸브(pressure relief valve), 비상용 자가발전기, 대기용 공정배기 및 환기팬(stand-by draft fans) 등이 설비되어 있다. 따라서 실제 화재, 폭발, 단전 등에 의한 주요사고의 발생확률은 거의 없고 실제 일어날 수 있는 사고는 공정의 운전상의 미숙 및 착오 등에 기인되는 운전원의 실수로 인한 폐기물 및 소각재의 취급시에 발생하는 국부적 오염사고로 그 영향은 경미한 것이라고 볼 수 있다. 그러나 국내에는 소각 등과 같은 방사성폐기물의 열처리시설이 전무하여 규제당국이나 시설의 실용화를 수행하는 기관에서 참고할 경험적 자료가 부족하여 가상된 사고를 그 영향이 크다고 판단되는 화재 및 폭발, 배기관 파손 및 여과기 손상으로 보수적으로 분류하여 평가하였다.

상대대기확산인자들의 결정에 사용된 컴퓨터 코드는 PAVAN으로 미국 NRC규제지침 Regulatory Guide 1.145에 기준한 계산프로그램이다[7,8]. 앞의 정상운전시 방사선적 영향평가를

위해 사용된 기상자료와 동일한 기상자료가 사용되었으며 역시 지표방출모델과 25 m EAB가 적용되었다. 표 3에 4가지 가상된 사고시의 대한 방사선적 영향 평가의 결과를 나타내었다. 가장 사고영향이 큰 소각로 폭발의 경우에도 평가된 개인별 몸전체에 대한 2시간 단기간동안의 피폭선량은 3.2 mSv로 과기초고시[9]에서 정하는 기준치인 0.25 Sv의 1.3%를 하회하는 것으로 평가되었다.

### 3. 저온 배기체 처리계통에서의 반휘발성 세슘의 제거특성

#### 가. 저온건식배기체 처리계통

KAERI 소각시설의 저온 건식 배기체 처리계통의 기체흐름형태를 그림 2에 나타내었다. 후연소로를 지나는 900 - 1000 °C의 배기체는 수직형 공기-배기체 열교환기에 의해 약 450 - 500 °C까지 냉각되어 여과포집진기로 진입된다. 열교환과정에서 약 250 °C 까지 가열된 냉각공기의 약 35%는 소각로 및 후연소로의 연소공기로 사용되고 나머지는 연도에서의 수분의 응축을 방지하기 위한 가열공기로 사용된다. 일차 여과기인 여과포집진기를 거친 세정된 배기체는 다시 고성능 공기여과기를 거쳐 연도로 배출된다.

#### 나. 시험소각방법

방사성동위원소 이용기관에서 배출되는 폐기물중 장기간 보관되어 방사능이 소멸되었다고 평가되는 플라스틱병과 주사기를 폐기물로 이용하고 각 2 kg의 폐기물 포장에 5 g 썩의 CsCl의 고순도의 분말상 시료를 넣은 약 20 kg의 폐기물을 시험소각하였다. 가스버너로 소각로를 약 450 °C까지 충분히 예열한 후 시료를 포함하지 않은 폐기물을 소각로의 운전온도가 약 900 °C에 도달할 때까지 지속적으로 투입한 다음 CsCl 분말을 함유하는 모의폐기물을 지속적으로 투입하였고 이 때 소각로의 온도가 평균 900 °C에서 약 980 °C 까지 상승하였다. CsCl을 포함하는 폐기물을 소각하기 시작하면서 여과포집진기의 입.출구 각각에서 Cascade Impactor를 포함한 입자상 물질 시료채취장비를 사용하여 시료채취하였다. 시료흡인속도는 초기에 시료채취점에서의 배기체 유속에 따른 등속흡인속도로 고정하였으며 Impactor 단계별 압력손실이 커져 90%의 초기 등속유속까지 떨어지면 시료채취를 중단하였다. 각 금속 임팩터 및 백업필터의 무게측정 후 이를 굽어내어 방사화 분석을 통해 각 크기 단계별 세슘의 함량을 분석하였다.

#### 다. 여과포집진기의 세슘 제거특성

포대 여과기 전, 후단부에서의 입자상 물질 및 Cs의 입자크기별 분포특성을 그림 3에 각각 나타내고 같은 그림의 오른쪽을 기준으로 전체 입자상 물질 및 입자상 세슘성분의 제거효율을 나타내었다. 여과포집진기의 입자상 물질에 대한 제거효율은 99.96 %로 측정되었다. 약 200 °C의 여과포집진기 입구 배기체내의 입자상 중금속 성분들은 0.29 - 1.45 μm 크기이하의 입도범위에 약 10% 미만으로 존재하고 대부분 0.29 μm 미만으로 존재함으로써 고여과면적으로 확산에 의한 포집기구를 활용하는 여과포집진기의 이에 대한 여과특성이 우수함을 보여주고 있다. 결정된 여과포집진기의 제거효율은 세슘에 대해 99.93%로 소각공정의 1차 제진장치로서의 우수성을 보여주었다.

### 4. 결 론

시험소각결과를 기준으로 KAERI 소각시설의 방사학적 안전성을 평가한 결과, 정상운전은 물론 최악으로 가상된 사고시에도 환경적 악영향이 미미한 것으로 평가되었다. 고온공정인 소각시설의 주된 오염원은 역시 폐기물내 그 농도가 크고 또 휘발성이 큰 세슘으로 평가되어 사용되는 저온배기체 처리계통에 대한 이러한 반휘발성 세슘의 제거특성을 실험적으로 고찰한 결과, 열교환기 및 공기혼합기를 이용한 배기체 냉각과정에서 입자화된 세슘은 0.29 μm 이하에 주로 분포하고 따라서 미세한 입자의 확산기구에 의한 제거효율이 우수한 여과포집진기가 1차 제진장치로서 우수함을 보여주었다.

## 참고문헌

1. J.H. KIM et al., The Development of Radioactive Waste Treatment Technology (V), KAERI, KAERI-NEMAC/RR-62/92: 2-1-2-10 (1992).
2. H.C. YANG, W.Z. OH, J.H. KIM, K.S. LEE and Y.C. SEO, The behavior of arsenic, mercury and cesium in an incinerator with low-temperature dry off-gas system Proceedings of 1997 International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologies 755-759 (1997).
3. H.C. YANG, J.H. KIM, W.J. OH and H.S. PARK, Removal Characteristics of Volatile Metals in Incinerator Off-gas with Low-Temperature Dry Off-Gas System, IchemE Symposium Series No. 143, 159 (1997).
4. J.H. KIM et al. Radwaste management basic research and development - Technology development for radwaste volume reduction and solidification (II) KAERI-NEMAC/RR-177/96: 2-30-2-31 (1997).
5. H.C. YANG, I.T. KIM, J.G. KIM, J.H. KIM and Y.C. SEO, Trial burns of dry active waste at KAERI demonstration-Scale incineration plant, J. of Korean Nuclear Society, 27: 767-744 (1995).
6. U. S. NRC, Users Guide to GASPAR Code, NUREG-0597 (1980)
7. U. S. NRC, XOQDOQ, A Computer Program for the Meteorological Evaluation of Routine Effluent Releases at Nuclear Power Station, NUREG/CR-2919 (1982)
8. U. S. NRC, PAVAN, An Atmospheric Dispersion Program for Evaluating Design-Basis Accidental Releases of Radioactive Materials from Nuclear Power Station, NUREG/CR-2585, PNL-4413 (1982)
9. Notice of MOST No. 96-5, Regulations on Radiation and etc., Korea Ministry of Science and Technology (1996)
10. S. K. FRIEDERLANDER, Smoke, Dust and Haze-Fundamentals of Aerosol Behavior, John Wiley and Sons, Inc., 118-119 (1973)

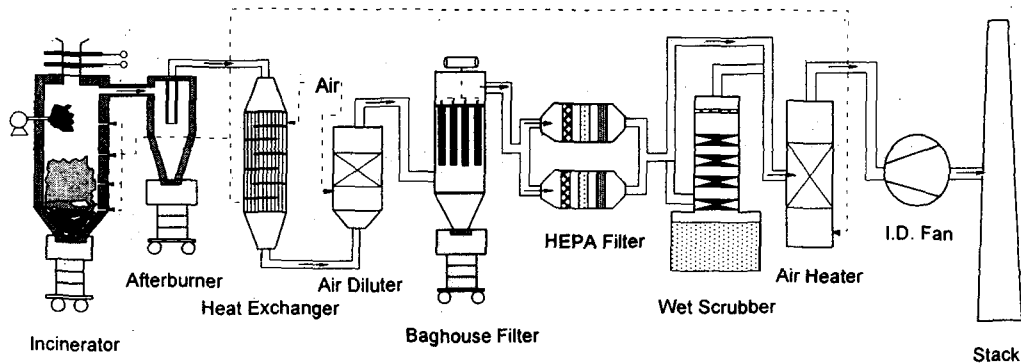
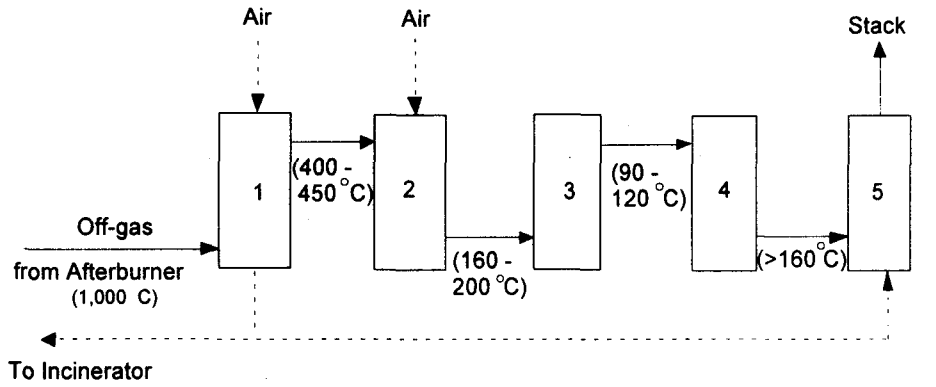


Fig. 1. The Schematic Diagram of Demonstration-Scale Incineration Plant



1. Heat Exchanger 2. Air Mixing Cooler 3. Bag Filter 4. HEPA filter 5. Air Mixing Heater

Fig. 2. Gas flow patterns in low-temperature dry off-gas system

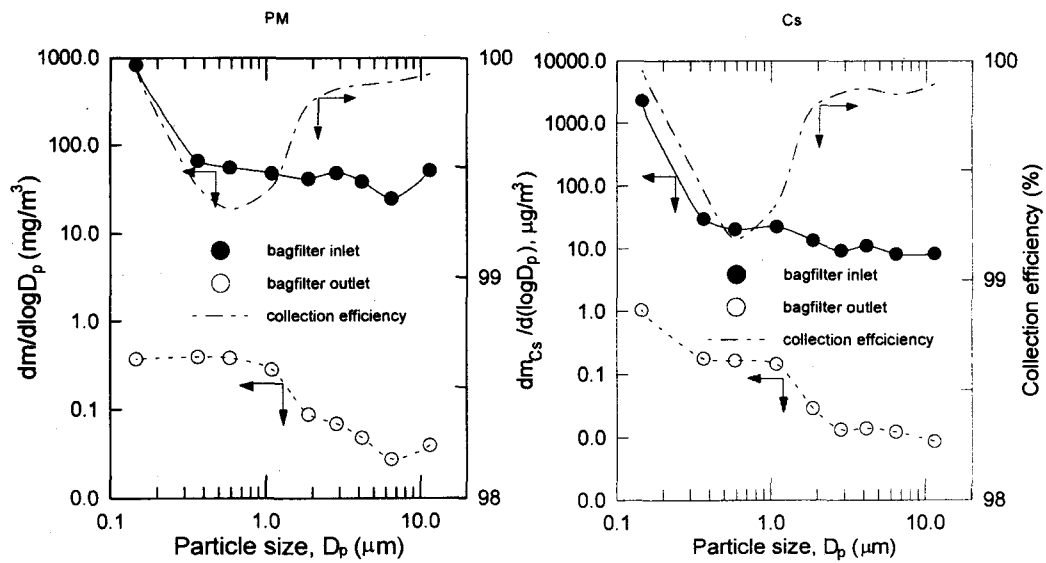


Fig. 3. Mass distribution of particulate matters and cesium species in the off-gas before and after passing bagfilter

Table 1. Activities for Incineration Technology Demonstration and Required Permission

Year	Activity for Technology Demonstration	Required Permission
1991	Construction of DSIP	-
1992	Trial burns of inactive simulated waste	-
1993	Trial burns of simulated waste with hazardous metals	-
1994	Trial burns of simulated waste with radioisotopes (RI)	Use of 20 mCi of RI per year
1995	Trial burns of real DAW from KNPS	Use of 15 drums of DAW from KNPS
1996	Trial burns of real DAW from radioisotope users	Use of 20 drums of DAW from RI users

Table 2. Estimated Release Concentrations of Major Nuclides and MSA for Routine Operation

Nuclide	Fraction (%)	Average Specific Activity in DAW (mCi/kg)	Release Concentration ( $\mu\text{Ci/cc}$ )	DF	MPC ( $\mu\text{Ci/cc}$ )	Release Concentration per MPC (%)	MSA (mCi/kg)
Co-60	49.0	5.37	$1.5 \times 10^{-11}$	$4.7 \times 10^5$	$3.0 \times 10^{-10}$	5	10.7
Cs-137	27.0	2.96	$1.5 \times 10^{-10}$	$2.6 \times 10^4$	$5.0 \times 10^{-10}$	29.89	0.99
Cs-134	8.6	0.943	$4.8 \times 10^{-11}$	$2.6 \times 10^4$	$4.0 \times 10^{-10}$	11.9	0.792
Co-58	9.8	1.07	$3.8 \times 10^{-12}$	$4.7 \times 10^5$	$2.0 \times 10^{-9}$	0.15	7.16
Mn-54	0.72	0.0789	$1.7 \times 10^{-13}$	$6.2 \times 10^5$	$1.0 \times 10^{-9}$	0.02	4.72
Ru-106	2.4	0.263	$1.3 \times 10^{-11}$	$2.6 \times 10^4$	$2.0 \times 10^{-10}$	6.64	0.396
Nb-95	2.4	0.263	$1.3 \times 10^{-11}$	$2.6 \times 10^4$	$3.0 \times 10^{-9}$	0.44	5.94

Table 3. Results of Risk Assessment in Case of Typical Severe Accidents

Types of Accident	Total Release (Ci)	Individual Whole Body Dose (mSv)	% Dose Limit
Fire	$1.1 \times 10^{-2}$	1.2	0.6
Explosion	$5.5 \times 10^{-2}$	3.2	12.8
Rupture of off-gas pipe before bag filter	$1.1 \times 10^{-3}$	0.12	0.048
Failure of filters	$2.6 \times 10^{-5}$	0.031	0.013