

방사성폐기물 유리화설비의 배기가스 처리계통 운영 사례 연구 A Case Study on Operation of Off-Gas Treatment System of Radioactive Waste Vitrification Facility

이혜현[†] · 박규원

Hye Hyun Lee[†] · Kyu Won Park

뉴클리어솔루션, 기술연구소

Research & Development Center, Nuclear Solution. Co., Ltd.

(Received February 17, 2016; Revised March 17, 2016; Accepted April 7, 2016)

Abstract : In this study, we investigated the main characteristics of off-gas generated from melting process and off-gas treatment system operation example to provide some primary data for commercial vitrification facility design. The purpose of vitrification facility operation is to treat hazardous materials in the radioactive wastes and harmful off-gas containing a variety of chemical species generated in the glass melting process. Constructing and operating vitrification facility essentially need to be licensed through safety analysis; it is very important to treat radionuclide and hazardous materials below the legal environment emissions regulation level. We must accurately understand the characteristics of off-gas and apply an appropriate off-gas treatment process accordingly. Thus, to design the appropriate off-gas treatment there must be a wide range of elements taken into account such as characteristics of waste and melter, regulation guidance of off-gas, characteristics of generated off-gas and off-gas treatment system performance assessment.

Key Words : Radioactive Waste, Vitrification Facility, Off-Gas Treatment System, Radionuclide, Hazardous Material

요약 : 본 연구에서는 상용 유리화설비 설계를 위한 기초자료에 도움이 되고자 용융공정에서 발생하는 배기가스의 특성과 배기가스 처리계통 운영사례를 조사하였다. 유리화설비 운영의 목적은 용융공정으로 투입된 방사성폐기물 내에 함유되어 있는 유해물질과 용융공정 내에서 발생된 다양한 화학종을 함유하고 있는 유해 배기가스를 처리하는 것이다. 유리화설비를 건설, 운영하기 위해서는 안전성 분석을 통한 인허가가 필수적이며, 부산물로 발생하는 방사성핵종이나 유해물질을 법적 환경 배출규제치 이하로 처리하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해서는 배기가스의 특성을 정확히 파악하여 그 특성에 따라 적절한 배기가스 처리공정을 설계해야 한다. 따라서 적절한 배기가스 처리계통을 설계하는 데는 폐기물 발생 특성, 용융로 특성, 배기가스 규제지침, 배기가스 발생 특성, 배기가스 처리장치에 대한 성능 평가 등의 광범위한 요소를 고려해야 한다.

주제어 : 방사성폐기물, 유리화설비, 배기가스 처리계통, 방사성핵종, 유해물질

1. 서론

원전에서 발생하는 방사성폐기물은 처분장 안전성에 대한 우려로 폐기물의 부피를 줄이면서 처분된 폐기물의 방사능이 자연방사능 수준까지 환경으로 유출되지 않도록 하는 처리기술이 절실히 필요하게 되었다. 이러한 요구에 적합한 처리기술로서 방사성폐기물을 고온 용융로에 투입해 열분해 시킨 후 방사성핵종을 안정한 유리물질 안에 영구적으로 가두어 고형화시키는 유리화(vitrification) 기술이 세계적인 추세로 발전되고 있다.¹⁻³⁾

유리화설비에는 방사성폐기물을 유리화하는 용융공정과 용융로에서 발생하는 배기가스를 처리하는 배기가스 처리계통으로 구성되어 있다. 방사성폐기물을 유리화할 경우 용융로에서 다양한 화학종을 함유하고 있는 배기가스가 발생될 수 있으며, 이들이 배기가스 처리계통에서 적절히 처리되지 않을 경우 금속, 탄화수소, 방사성핵종 등의 유해물질이 대기로 방출되어 사회, 환경적으로 심각한 문제를 야기시키게 된다. 따라서 유리화설비를 건설, 운영하기 위해서

는 안전성 분석을 통한 인허가가 필수적이며, 부산물로 발생하는 방사성핵종 및 유해물질을 중저준위방사성폐기물 소각기준,⁴⁾ 방사선방호 등에 관한 기준 및 방사성물질⁵⁾ 및 환경 유해물질의 배출기준과 제한구역 경계에서의 방사선 피폭선량 기준⁶⁾ 등 법적 환경배출규제치 이하로 처리하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해서는 배기가스의 특성을 정확히 파악하여 그 특성에 따라 적절한 배기가스 처리계통을 설계하고 특정 위치의 계통 내 기체 및 최종 배출구 전단의 배기가스를 분석함으로써 배기가스 처리설비의 제염성능을 평가해야 한다.⁷⁾ 제염성능은 오염의 원인이 되어 있는 방사성 물질이 제염처리에 의해 제거되는 정도를 표시하는 지표인 제염계수(Decontamination factor, DF)로 나타낼 수 있다.⁸⁾

Decontamination factors, DFs =

$$\frac{\text{before decontamination (radioactivity level)}}{\text{after decontamination (radioactivity level)}}$$

$$\% \text{ of Activity removed} = \left(1 - \frac{1}{DF}\right) \times 100 \quad (1)$$

[†] Corresponding author E-mail: leehh@nuclear-solution.com Tel: 042-933-9983 Fax: 042-933-9984

따라서 본 논문에서는 상용 유리화설비 설계를 위한 기초 자료에 도움이 되고자 용융공정에서 발생하는 대표적인 배기가스 특성과 배기가스 처리계통 운영사례를 조사하였다.

2. 배기가스 특성

2.1. 방사성물질

137Cs, 90Sr, 106Ru, 147Pm, 144Ce, 241Pu 등의 방사성 핵종은 일반적으로 용융로 내에서 가스화된 후, 기체상태로 배기가스 처리계통을 통과하면서 응축과 흡수를 통해 포집되어 제거된다. 특히 Ru와 Cs의 휘발 정도는 온도에 크게 의존하므로 용융로의 운전온도를 고려해야 한다. Ru의 경우 낮은 온도에서 형성되는 RuO₂이 배관표면에 침적되어 배기가스 공정 내 막힘 현상을 유발하기도 하며, Cs는 배기가스 공정 내에서 1~10 μm의 에어로졸(aerosol)로 응축되어 반휘발성 화합물 형태로 존재하기 때문에 제거가 어려운 물질로 알려져 있다.⁷⁾

2.2. 비방사성물질

배기가스 내 입자의 양과 크기 분포는 배기가스 공정기기의 성능 및 수명과 관련하여 배기가스 처리계통 설계 시 가장 고려되어야 할 사항이다. 입자상물질은 오염물질로 간주되며 일반적으로 배기가스 부피당 질량으로 배출 제한치가 규정되어 있다. 입자는 방사성핵종, 먼지, 탄화수소, 산성가스 등을 함유하고 있을 수 있다.

먼지는 일반적으로 용융로에서의 열처리 과정에서 발생되는데 폐기물 내에 함유되어 있는 금속을 포함한 재 입자가 배기가스로 유입되거나 먼지가 배기가스 내로 휘발하여 발생된

다. 배기가스가 냉각되면 휘발성금속은 배기가스와 함께 이동 중인 먼지 입자표면으로 응축된다. 온도가 다르면 증기압이 달라지므로 휘발에 의해 발생하는 금속들은 제어 시스템 내의 다양한 온도에 따라 배기가스 처리계통 전체로 분산된다.

탄화수소의 방출은 불완전 연소 생성물 및 연소 미연소 폐기물 내의 휘발성 탄화수소에서 비롯된다. 다이옥신(dioxin)과 퓨란(furan)의 독성물질 생성 정도는 배기가스 온도에 따라 달라지며 구리(Cu)와 같은 금속은 204~482℃의 배기가스 온도에서 독성물질을 생성시키는 촉매 역할을 한다.

산성가스는 폐기물에 따라 염화수소(HCl), 황산화물(SO_x), 질산화물(NO_x) 등이 존재한다. 특히 NO_x는 질산염에 기초한 공정에서 발생하는 고준위방사성폐기물의 용융공정에서 다량으로 발생된다.⁷⁾

3. 배기가스 처리계통 운영사례

3.1. 한국 HVF 공정

한울 원전 5호기에 건설된 유리화설비(Hanul Vitrification Facility, HVF)는 원전에서 발생하는 폐이온교환수지, 잡고체 등의 가연성 중저준위방사성폐기물을 2009년부터 처리하고 있다. 중저준위방사성폐기물은 균질한 폐액 상태인 고준위방사성폐기물과 달리 그 종류와 성상, 성분이 매우 다양하기 때문에 폐기물 용융시 생성되는 배기가스도 종류가 다양하고 고준위방사성폐기물을 유리화할 때보다 환경 규제물질이 많이 배출될 수 있다. 따라서 HVF 배기가스 처리계통은 중저준위방사성폐기물 고온 용융시 발생 가능한 배기가스의 특성을 바탕으로 환경배출규제 요건을 만족시키기 위한 설비로 설계되었다.⁹⁾

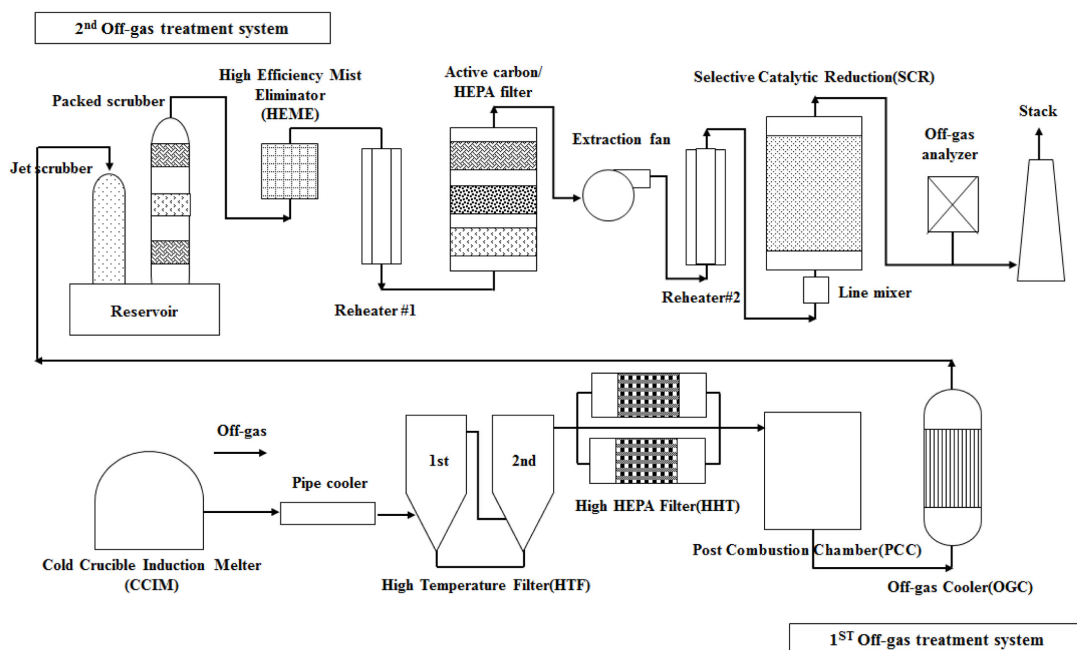


Fig. 1. HVF process off-gas treatment system in the Korea.

3.1.1. 배기가스 처리계통

Fig. 1에는 HVF의 배기가스 처리계통을 나타내었다. 배관냉각기는 수냉식으로 유도가열식저온용융로(Cold Crucible Induction Melter, CCIM)¹⁰에서 배출된 배기가스 내의 방사성핵종이 효과적으로 제거될 수 있도록 배기가스를 약 500℃까지 냉각시키는 역할을 한다. 고온필터(High Temperature Filter, HTF)는 배기가스 내의 먼지 및 방사성핵종을 1차로 포집한다. HTF에 포집된 먼지는 질소가스로 탈진되어 먼지재순환계통으로 배출된다. HTF는 먼지의 포집효율을 증가시키고 운전 중 발생할 수 있는 손상에 대비하여 2대를 직렬로 설치한다. 고온헤파필터(High temperature HEPA Filter, HHF)는 HTF를 통해 여과된 배기가스의 미세먼지 및 방사성핵종을 제거한다. HHF는 연속운전을 고려하여 2대를 병렬로 설치한다. 배기가스는 후단연소기(Post Combustion Chamber, PCC)로 유입되어 배기가스에 포함된 미연소유기물이 완전 연소된다. PCC에서 배출된 고온(약 1,100℃)의 배기가스는 배기가스냉각기(Off-gas Cooler, OGC)에서 세정기 운전에 적합한 400~500℃로 냉각된다. 세정기는 배기가스 내의 먼지를 제거하며 용해성 가스를 흡수하는 기능을 동시에 가지고 있다. 분사형세정기(jet scrubber)와 충전형세정기(packed scrubber)로 구성된 세정기에서 배기가스에 포함된 HCl 및 SOx 등의 산성기체들은 가성소다(NaOH)와 반응해 염으로 제거된다. 고효율액적제거기(High Efficiency Mist Eliminator, HEME)는 후단의 활성탄필터를 보호하기 위해 세정기에서 배출된 배기가스에 포함된 미세액적을 제거하는 역할을 한다. HEME에서 배출된 배기가스는 1차 재열기에서 가열된 후, 3단계로 구성된 활성탄/헤파필터(Active carbon/HEPA filter)로 유입된다. 활성탄/헤파필터는 배기가스에 포함된 먼지, 다이옥신, 입자상 유해물질을 최종적으로 제거한다. 배기팬은 용융로에서 발생한 배기가스를 대기로 배출시키고 용융로 및 배기가스 처리계통의 부압을 유지시킨다. 배기팬에서 배출된 배기가스는 2차 재열기에서 탈질온도인 270~400℃로 가열되고, 선택적촉매환원반응기(Selective Catalytic Reduction, SCR)로 유입되어 NOx가 제거된다. 배기가스는 대기로 방출되기 전에 환경유해물질 및 방사능 감시설비에 의해 연속 감시되며, 설정치 이상의

농도 감지 시 용융로의 폐기물 공급이 중단되도록 설계되어 있다.¹¹⁾

3.1.2. 제염특성

각 기기별 방사성물질의 설계기준 제염계수는 Table 1에 나타냈으며, HVF 유리화 공정의 총 제염계수는 핵종별로 휘발성핵종인 Tc의 1×10^6 부터 비휘발성핵종의 3.3×10^7 까지로 보고되고 있다.¹¹⁾

3.2. 프랑스 AVM 공정

프랑스는 1978년에 Marcoule의 AVM (Atelier de Vitrification Marcoule)에서 세계최초로 핵연료 재처리시설에서 발생하는 고준위방사성폐기물의 유리화가 상용 운전되었다. AVM 공정은 규모를 확대하여 프랑스의 La Hague R7/T7 시설과 영국의 Sellafield 유리화시설 등에 적용되고 있다. AVM 공정에서 발생하는 배기가스 중 가장 중요한 방사성핵종은 106Ru, 137Cs, 144Ce, 90Sr 등이며, 방사성 동위원소의 농도 비는 유리화되는 고준위방사성폐기물의 조성에 따라 달라진다.¹²⁾

3.2.1. 배기가스 처리계통

AVM 중 하소(calcination) 공정이 도입된 유리화 공정에서 폐기물이 처리될 경우 하소로(calciner) 상부에서 배출되는 배기가스에는 대부분 질소화합물 및 증기가 포함되어 있다.^{13,14)} Fig. 2를 보면 AVM 배기가스 처리계통에서는 배기가스가 유도가열식고속용융로(Hot Walled Induction Melter, HWIM)에서 하소로 상부까지 역류하여 배기가스 처리공정으로 방출되기 때문에 배기가스에 동반된 미립자 고형물의 농도가 상당히 존재한다. 이러한 미립자는 대부분 수용성 질산으로 역류세척을 수반한 baffle plate 세정기(dust scrubber)에서 질산염으로 제거된다. 세정기를 통과한 배기가스는 응축기에서 NOx 및 방사성핵종이 일부 제거된 후 세정탑으로 유입된다. 세정탑은 NOx 제거효율을 증가시키기 위해 2대의 컬럼(acid recovery column, washing column)을 직렬로 설치하고 경우에 따라 세정탑에 산화제 및 H₂O₂를 추가하기도 한다. 마지막으로 배기가스는 헤파필터로 유입되어

Table 1. Decontamination factors of melter and off-gas treatment system of the HVF plant

| Devices | Volatile radionuclide | | | | | Non-volatile radionuclide | | Radio active iodine |
|------------------------------|-------------------------------|---------|---------------------------------------|---------|----|-------------------------------|---------------------------------------|---------------------|
| | Combustibles dry active waste | | Combustibles spent ion-exchange resin | | | Combustibles dry active waste | Combustibles spent ion-exchange resin | |
| | Cs | Tc | Te, Cs | Tc | Ru | | | |
| Melter | 2.86 | 1 | 1.54 | 1 | 1 | 6.67 | 32.99 | 1 |
| High Temperature Filter | | | 1000 | | 1 | | 1000 | 1 |
| High temperature HEPA Filter | | | 100 | | 1 | | 100 | 1 |
| Scrubber | | | 10 | | 1 | | 10 | 10 |
| Active carbon/HEPA filter | | | 1 | | 1 | | - | 10 |
| Total DFs | 2.9E+06 | 1.0E+06 | 1.5E+06 | 1.0E+06 | 1 | 6.7E+06 | 3.3E+07 | 100 |

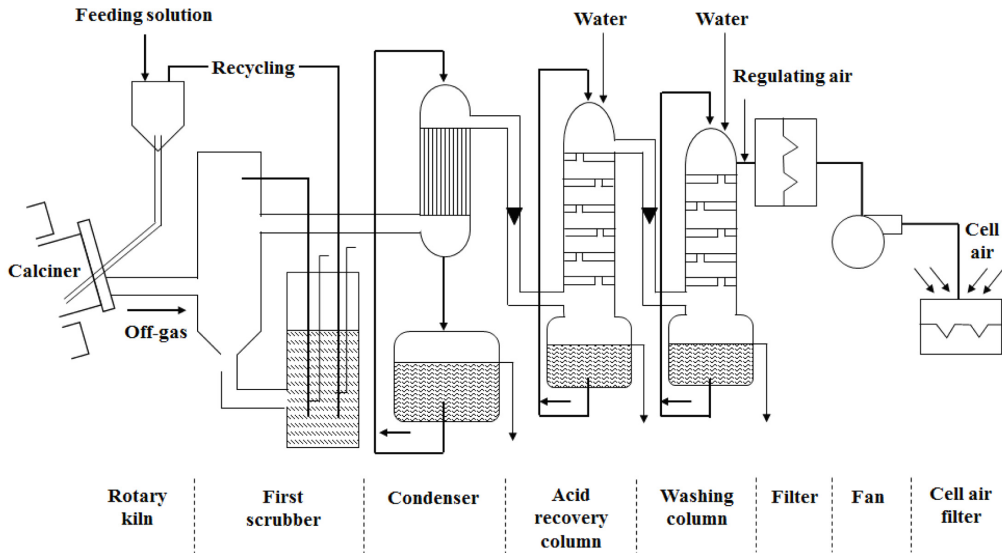


Fig. 2. AVM process off-gas treatment system in the France.

미세먼지 및 방사성핵종 등이 최종적으로 제거된다. 배기가스는 배기팬에 의해 대기로 배출되기 전 유해물질의 농도가 허용치 이상일 경우 추가적인 필터장치를 거치도록 설계되어 있다. 배기가스 처리공정에서 생성되는 이차 방사성폐기물은 대부분 하소공정(first scrubber) 또는 핵분열생성물 농축액 처리공정(condensate, acid recovery liquid)에서 재사용된다. 단, washing column에서 생성된 이차 방사성폐기물은 방사성 오염준위에 따라 저준위방사성폐기물 처리공정으로 전송되어 처리된다.^{14,15)}

3.2.2. 제염특성

Table 2는 AVM 배기가스 처리시스템의 효율을 평가하기 위해 acid recovery column을 통과한 후의 가스를 다양한 지점에서 채취하여 해당 샘플의 방사선량(GBq)을 측정하는 것이다. 이 결과값을 보면 하소-용융 과정 중 가장 휘발성이 높은 방사성핵종은 106Ru이며, 106Ru의 상당량은 세정기를 통과하여 응축기 및 acid recovery column에서 효율적으로 포집된 것을 보여주고 있다. 137Cs 및 144Ce는 세정기에서 상대적으로 낮은 효율이 관찰되었지만 응축기 및 washing column에서 포집이 효율적으로 이루어진 것을 알 수 있다. 90Sr은 방출된 양의 96%가 세정기에서 포집, 나머지 양은 응축기에서 포집되었으며 이후 비휘발성핵종으로 존재한다. 106Ru,

137Cs, 144Ce의 DF는 각각 1.2×10^7 , 1.2×10^9 , 2×10^7 으로 보고되고 있다. 이외에도 응축기와 세정탑에서 NOx는 각각 90%, 82% 이상 포집되는 것으로 알려져 있다.¹⁵⁾

3.3. 미국 DWPF 공정

미국의 Savannah River Site에 건설된 DWPF (Defense Waste Processing Facility)에서는 1996년부터 핵연료 재처리시설에서 발생하는 고준위방사성폐기물의 유리화가 상용 운전되고 있다.¹⁶⁾ DWPF 유리화 공정에서 발생하는 137Cs는 다른 방사성핵종에 비해 활성(activity)이 높고 배기가스 처리 공정 내에서 에어로졸로 존재함으로써 제거가 어렵기 때문에 각 단계별 배기가스 처리장치에서 137Cs의 제염계수가 기본적으로 요구되고 있다. 방사성물질 외에 발생하는 배기가스는 유기화합물이 분해되는 동안 수은원소, 수소가스, 일산화탄소가 생성되는 특징이 있다. 특히 수은은 사용후핵연료 재처리시설에서 알루미늄 피복 및 핵연료 용해를 위해 첨가되는 질산수은으로부터 발생되는데, 수은의 존재는 배기가스 처리시스템 전반에 부식을 유발하므로 반드시 분리 제거해야 된다.^{18,19)}

3.3.1. 배기가스 처리계통

DWPF 유리화 공정의 배기가스 처리계통은 Fig. 3과 같이

Table 2. Efficiency of the gas treatment for 37 GBq of each isotope

| Isotope | Campaign reference (GBq) | Release from the calciner (GBq) | Recycle to the calciner (GBq) | In the condensate ^{a)} (GBq) | In the acid recovery column ^{a)} (GBq) | In the washing column Solution ^{b)} (GBq) |
|---------|--------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|---|--|
| 106Ru | First / second | 14.43 / 7.4 | 8.14 / 4.81 | 6.29 / 2.59 | $2.41 \times 10^{-2} / 8.14 \times 10^{-3}$ | $3.7 \times 10^{-5} / 1.11 \times 10^{-6}$ |
| 137Cs | First / second | 4.07 / 2,368 | 3.7 / 1,924 | 0.518 / 0.444 | $1.22 \times 10^{-3} / 1.11 \times 10^{-3}$ | $4.81 \times 10^{-8} / 1.59 \times 10^{-7}$ |
| 144Ce | First / second | 2.22 / 1,443 | 1.48 / 0,814 | 0.74 / 0.629 | $1.48 \times 10^{-4} / 1.48 \times 10^{-4}$ | $1.85 \times 10^{-6} / 4.81 \times 10^{-7}$ |
| 90Sr | First / second | 1,924 / 1.11 | 1.85 / 1,073 | 0.074 / 0.037 | $1.30 \times 10^{-5} / 1.11 \times 10^{-5}$ | $2.74 \times 10^{-8} / 2.59 \times 10^{-8}$ |

^{a)} Returned to the fission product concentration facility

^{b)} Returned to the low-level waste treatment unit

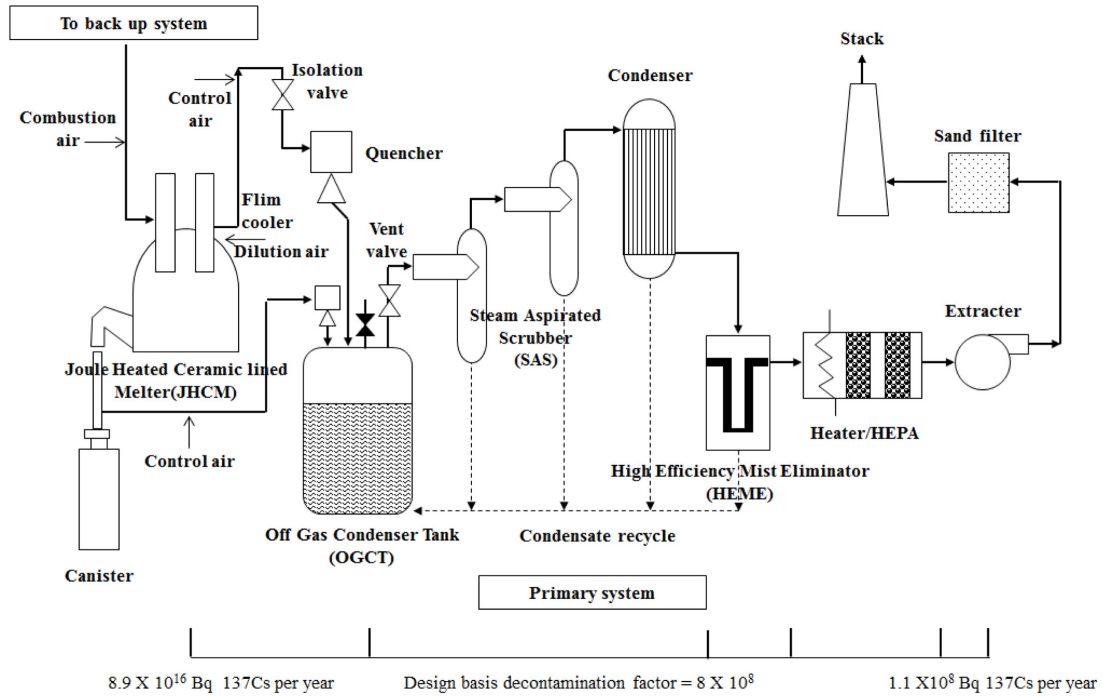


Fig. 3. DWPF process off-gas treatment system in the U.S.

전극가열식용융로(Joule Heated Ceramic lined Melter, JHCM)¹⁷⁾에서 배출된 배기가스가 상시 처리되는 일차계통(primary system)과 일차계통의 유지보수 또는 유희기간에 운전되는 예비계통(backup system)으로 이루어져 있어 배기가스 처리가 연속적으로 이루어진다. 막냉각기는 공정배관에 용융입자의 침적을 방지하기 위하여 용융로에서 발생된 배기가스를 400℃로 냉각시켜 용융입자를 포집하는 역할을 한다. 급냉기는 막냉각기에서 배출된 배기가스를 60℃로 냉각시켜 배기가스 내의 증기와 먼지를 응축시킨다. 기체응축수탱크(Off Gas Condenser Tank, OGCT)는 용융공정과 급냉기에서 발생된 응축수를 수집 및 저장한다. 이때 OGCT에 공기가 주입되어 수소, 일산화탄소, 잔류 유기증기 등이 폭발 하한치 이하의 농도가 되도록 희석된다. 증기분사형세정기(Steam Aspirated Scrubber, SAS)는 OGCT의 응축수가 노즐을 통해 순환 증기로 분무되어 배기가스 내의 미세먼지 및 NOx를 포집한다. 세정이 종료된 배기가스는 응축기에서 수은원소가 제거되고, HEME를 통과하면서 미세액적이 제거된다. SAS, 응축기, HEME에서 발생한 폐수는 OGCT에서 재순환되어 수용성 오염물질이 연속적으로 제거된다. HEME로부터 배출된 배기가스는 3단계로 구성된 헤파필터에 유입되어 미세먼지 및 방사성핵종이 포집된다. 배기팬을 통해 배출된 배기가스는 헤파필터와 유사한 역할을 하는 샌드필터에서 최종적으로 배기가스 내 오염물질이 제거된 후 대기로 방출된다.^{18,19)}

3.3.2. 제염특성

DWPF 유리화 공정의 배기가스 처리계통은 기본적으로 137Cs의 제염계수가 8×10^8 을 만족하도록 설계되었다. Table

Table 3. Cesium decontamination factors for different devices

| Devices | DF (Cesium) |
|----------|-------------|
| Melter | 40 |
| Quencher | 2 |
| Scrubber | 60 |
| HEME | 100 |

3의 각 단계별 배기가스 처리장치에서 측정된 137Cs 제염계수를 보면 137Cs는 세정기 및 HEME에서 효율적으로 포집된 것을 보여주고 있으며, 137Cs의 총 제염계수는 1.1×10^8 로 배기가스 처리계통의 설계기준을 만족한 것으로 보고되고 있다.^{18,19)}

4. 결론

지금까지 본 연구에서는 상용 유리화설비 설계를 위한 기초자료에 도움이 되고자 국내를 포함한 원자력 선진국인 프랑스, 미국의 유리화 공정에서 발생하는 배기가스의 특성과 배기가스 처리계통 운영사례를 조사하였다.

국내의 HVF 유리화시설에서는 원전에서 발생하는 가연성 중저준위방사성폐기물이 처리 및 처분되고 있으며, 이러한 중저준위방사성폐기물은 프랑스, 미국에서 유리화하고 있는 고준위방사성폐기물 보다 성상, 성분이 다양하여 유리화시 유해물질이 포함된 배기가스가 다양하게 발생한다. 따라서 HVF 배기가스 처리계통은 유해 배기가스의 안전한 처리 및 환경배출을 억제하기 위해 입자상 방사성물질 및 먼지를 제거하는 1차 처리계통과 방사성요소 및 환경유해

물질을 제거하는 2차 처리계통으로 구성된 7중 방벽의 배기 가스 처리계통으로 설계되었다.

프랑스는 사용후핵연료 재처리시설에서 발생하는 폐액상태의 고준위방사성폐기물을 하소시킨 하소폐기물을 유리화하기 위한 AVM 공정이 운영되었으며, 배기체 처리계통은 5중 방벽으로 구성되었다. 이 배기체 처리계통의 특징은 가스가 용융로에서 하소로 상부까지 역류 흐름으로 방출되는 과정에서 배기체 처리공정 전단에 미립자 고형물이 다량 축적되기 때문에 세정기의 성능이 매우 중요하다. 즉, 세정기의 제거효율은 AVM 전체 공정의 운영 효율에 크게 영향을 미친다고 할 수 있다.

미국의 DWPF 유리화시설에서는 사용후핵연료 재처리시설에서 발생하는 폐액상태의 고준위방사성폐기물을 유리화하고 있으며, 6중 방벽의 배기가스 처리계통이 설치되었다. 미국의 배기가스 처리계통은 상시 운전되는 일차계통과 유지보수 기간에 운전되는 예비계통으로 구성되어 있기 때문에 배기가스 처리의 운전연속성, 안정성, 효율성을 얻을 수 있다. 특히 이 배기가스 처리계통은 세습 제어에 중점을 두어 설계한 것이 주요 특징이다.

이처럼 각국의 다른 유리화 공정이라 할지라도 그 배기 가스 처리계통은 매우 유사함을 볼 수 있었다. 유사한 배기 가스 처리계통의 기능은 일산화탄소 및 잔류 유기물의 연소, 냉각 및 응축을 위한 세정, 먼지 제거, 산성가스 세정, 배기가스 추출 등을 말할 수 있다. 배기가스 처리계통을 설계하는 데는 폐기물 발생 특성, 용융로 특성, 배기가스 규제지침, 배기가스 발생 특성, 배기가스 처리장치에 대한 성능 평가 등의 광범위한 요소를 고려해야 한다. 향후 국내의 배기가스 규제지침이 날로 엄격해짐에 따라 배기가스 내 성분들의 화학적 거동 및 형태를 예측하여 배기가스 처리장치들의 성능 및 안정성을 확보해야 할 것이다.

KSEE

References

- Kim, C.-W., Choi, K.-S., Park, J.-K., Shin S.-W. and Soung, M.-J., "Radioactive waste vitrification," *Ceramist*, **3**(6), 55~66(2000).
- Donald, I. W., "Waste immobilisation in glass and ceramic based hosts: Radioactive, toxic and hazardous wastes," Wiley-Blackwell, p. 526(2010).
- Ghussn, L., Martinelli, J. R. and Russo, D. O., "Comparison of the corrosion resistance of sintered and monolithic iron phosphate and niobium phosphate glasses containing U_3O_8 ," *Glass Technol.*, **50**, 269~272(2009).
- Low-and Intermediate-Level radioactive Waste (LILW) incineration standards, Notification No. 2014-60 of the Nuclear Safety and Security Commission (NSSC), enforcement in Nov. 11th(2014).
- Standards on radiation protection, etc., Notification No. 2014-34 of the Nuclear safety and security commission, enforcement in Nov. 11th(2014).
- USA 10 CFR 50 appendix I.
- IAEA, "Design and operation of off-gas cleaning systems at high level liquid waste conditioning facilities," Technical reports series No.291(1988).
- Boing, L. E., "Decontamination Technologies," US DOE report, Argonne National Laboratory Decommissioning Program, p. 10(2011).
- Kim, C. W. et al., "Radioactive wastes vitrification using induction Cold Crucible Melter: Characteristics of vitrified form," *J. Korean Ceram. Soc.*, **39**(6), 576~581(2002).
- Bonnetier, A., Hollebecque, J. F., Lacombe, J., Quang, R. D. and Rivat, P., "Development of an advanced cold crucible for direct induction melting of glass," In Proceedings of the 4th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials, Lyon, France(2003).
- Ji, P.-G., Yang G.-H. and Shin, S.-W., "Characteristicson off-gas treatment system of the Low-and Intermediate-Level radioactive Waste (LILW) vitrification facility," *Proc. Korean Radioact. Wastes Soc.*, **5**(2), 137-138(2007).
- Quang, R. D., Petitjean, V., Hollebecque, F., Pinet, O., Flament, T. and Prod'homme, A., "Vitrification of HLW produced by uranium/molybdenum fuel reprocessing in COGEMA's Cold Crucible Melter," WM'03 Conference, Tucson, AZ(2003).
- Bonnaud, R., Sombret C., and Rancon, D., "Vitrification of fission products concentrated solutions: Technological studies," Symposium on Treatment and Storage of High-Level Radioactive Waste, IAEA Vienna, Austria(1962).
- Bonnaud, R., Jouan, A. and Sombret, C., "Large scale waste glass production," high-Level Radioactive Solid Waste Forms (Proc. Conf. Denver, 1978), Rep. NUREG/CP-0005, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, pp. 157~197 (1978).
- Chotin, M., Bonnaud, R., Jouan, A. and Rabot, G., "Operational experience of the first industrial HLW vitrification plant," paper presented at Symp. Cincinnati, April-May(1979).
- Allan, B. Barnes, et al., "Feasibility evaluation and retrofit plan for CCIM deployment in the DWPF at SRS-8118," WM'08 Conference, Phoenix, AZ(2008).
- Chapman, C. C., "Experience with a Joule-Heated Ceramic Melter while converting simulated High-Level Waste to glass," BNWL-2071, Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA (1976).
- Kessler, J. L. and Randall, C. T., "Performance of a large-scale melter and off-gas system utilizing simulated SRP DWPF waste," Waste Management (Proc. Symp. Tucson, 1984), Arizona Board of Regents, Tucson, AZ(1984).
- Jain, V., "Survey of Waste Solidification Process Technologies," Defense Waste Processing Facility at Savannah River Site, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, pp. 17~28(2001).