2002년 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

중·저준위 방사성폐기물 유리화시설 안전성 평가
Safety Assessment on Vitrification Facicility of Low- and Intermediate- Level Radioactive Wastes

허균영, 이성진, 장순흥
한국과학기술원
대전광역시 유성구 구성동 373-1

지평국, 맹성준, 박종길, 신상운
한수원(주) 원자력환경기술원
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

중·저준위 방사성폐기물 유리화시설에 대한 안전성 평가 전략과 결과를 기술하였다. 실증시설을 대상으로 수행되었고 아직 정립된 기술기준이 없기 때문에 일반적인 시설에 적용이 가능한 안전성 평가 방법을 사용하였으며, 안전성 평가 결과 미흡하다고 판단되는 점에 대해서는 설계 개선안을 도출하였다. 안전성 평가 전략은 시설 친숙화, 위험요소 파악, 정성적 및 정량적 안전성 평가 단계로 구분된다. 액화석유가스에 의한 화재 및 폭발과 용융로 내부로 유입되는 냉각수에 의한 증기폭발은 널리 사용되고 있는 해석방법론을 적용하여 취약점을 파악한 뒤 설계 개선안을 도출하였다. 실증 유리화실증시설에 대한 안전성 분석 결과는 향후 울진 원자력발전소 5·6호기 방사성폐기물 처리건물에 건설될 상용시설의 인허가 보조자료 및 설계시 참고사항으로 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract

In this paper, the strategy and the results of safety assessment of low- and intermediate- level radioactive waste vitrification facility is described. Because the study was accomplished for the experimental facility and there is no technical standard, the strategy for evaluation of the general industrial process was used. Some design improvements were proposed for weak points from the safety viewpoint. The strategy of the safety assessment is composed of familiarization, hazard identification, qualitative and quantitative safety assessment. Fire and explosion caused by LPG and steam explosion caused by coolant leakage into the melter are major issues. In this study, modification

of some design parameters was proposed after evaluation of these problems using the validated analysis methods and technical standards. The results are expected to be used as the licensing support material and design references when a commercial vitrification facility is built at the radioactive waste building in Uljin nuclear power plant units 5&6.

1. 서 론

중·저준위 방사성폐기물 유리화기술은 원자력발전소에서 나오는 잡고체, 수지 및 기타 폐기물을 용융 유리 위에서 연소시키고, 방사성물질 및 중금속 등은 유리 구성물질에 화학적으로 결합시킴으로써 방사성폐기물의 감용과 안정화를 동시에 달성할 수 잇는 신기술이다. 한국수력원자력(주) 원자력환경기술원은 타당성연구 및 유리화 실증시험을 통해 유리화공정을 입증하였고, 울진 5,6호기에 최초로 원전 방사성폐기물 처리용 유리화 상용설비를 건설할 계획이다.
유리화 실증시설은 대전 장동 원자력환경기술원에 설치되어 있으며, 현재 실증시험을 수행하고 있다. 향후 상용시설의 건설 및 인허가에 필요한 자료를 도출하고 안전성 제고를 위한 상용시설에 대한 설계 개선안을 제안하기 위해서는 사고시나리오의 수립, 각 사고별 영향평가와 시설 운영에 따른 안전성 평가가 요구된다. 그러나 중·저준위 방사성폐기물 유리화시설에 대한 정립된 기술기준이 없기 때문에, 본 연구에서는 전반적인 안전성 평가 전략을 제안하고, 평가 전략별로 관련 법규, 기술기준, 해석 방법론 등을 수집하여 적용해보았다.
본 논문은 중·저준위 방사성폐기물 유리화시설을 소개하고, 현재까지 진행된 안전성 평가 연구의 전반적인 상황과 현안 문제점, 그리고 이를 해결할 수 있는 설계 개선안으로는 어떤 것들이 제안되었는지에 관하여 다룬다.

II. 유리화시설의 공정 설명

안전성 평가의 기본 작업인 시설 친숙화를 위하여 시스템 매뉴얼[1]을 참고하고, 수차례에 걸쳐 유리화시설을 방문하였으며 시설 전문가와의 면담을 수행하였다. 유리화시설은 그 기능에 따라 전체를 5개의 계통으로 구분할 수 있으며, 각 계통에 대한 간단한 설명은 다음과 같다.

○ 유도 가열식 저온로(Cold Crucible Melter; CCM) 계통
CCM 내부에는 유리가 용융상태로 유리되고 있으며 이 용융유리 위에 폐기물이 투입되면, 유기물은 분해되고 방사성물질 및 무기물은 유리구조와 결합하여 유리화된다. 용융로를 부식으로부터 보호하기 위해 용융로 내벽은 CCM 냉각계통에 의해 냉각된다. 또한 고주파 발생기는 유리에 직접 유도전류를 발생시켜 유리를 용융시켜주는 장치로서 독립적인 냉각계통이 있다.
○ 플라즈마 토치 용융로(Plasma Torch Melter; PTM) 계통
수지 및 잡고체 등을 유리화시키는 CCM과는 달리 금속이나 콘크리트와 같은 비가연성 폐기물을 용융 및 안정화시키기 위하여 고안된 설비로서 용기 내에 전환형 토치가 설치되

어 있다. 초기에는 용기냉각 방식이 공냉식이었으나 최근에는 수냉식으로 교체하였으며, 이에 따른 냉각설비가 제공된다.

○ 배기체 처리계통

CCM과 PTM으로부터 배출되는 유해가스의 처리를 위하여 제공되는 설비로서 일반적인 소각시설의 배기체 처리계통과 유사하다. 용융로의 후단부터 살펴보면, 휘발성 방사성 물질을 제거하기 위한 배관냉각기 및 고온필터, 유해물질의 완전 연소를 위한 후단연소기, SOx 및 HCl 등의 산성가스 제거를 위한 세정기, 연소후 미세입자의 필터링을 위한 재열기 및 HEPA 필터, 그리고 암모니아를 사용하는 질소산화물 제거계통과 배기팬, 연돌(Stack) 등으로 구성되어 있다.

○ 폐기물 공급계통

폐기물 공급계통은 각 용융로에 폐기물을 적당한 크기로 분쇄한 뒤, 적절한 속도로 주입시키는 장치이다. 가연성 잡고체, 이온교환수지 주입기, 유리 주입기로 구성된 CCM 계통용 공급장치와 비가연성 폐기물 주입기로 구성된 PTM 계통용 공급장치가 있다.

○ 기타계통

주전원으로 쓰이는 수전 설비, 안전계통 부하를 담당하는 연속/비상 디젤 발전기와 무정전 전원공급장치로 구분되는 전원공급계통, PLC를 이용하여 운전 상황 및 공정변수의 감시 및 제어를 수행하는 공정제어 계통, 기타 공정유지에 필요한 암모니아 공급 계통, 액화석유가스 공급 계통, 경유 공급 계통, 가성소다 공급 계통 등이 있다.

유리화 실증시설에 대한 세부공정 흐름도는 그림 1에 나타내었다.

III. 유리화시설의 안전성 평가

III.1. 평가 전략

연구 초기 단계에서부터 가장 중요하게 다루어졌던 부분 중의 하나가 전반적인 안전성 평가 전략을 구축하는 것이었다. 기존에 수행된 중·저준위 방사성폐기물 유리화시설에 대한 설계 및 운영 경험이 전 세계적으로도 거의 전무하기 때문에 현재까지도 적용 가능한 기술기준이 명확하지는 않다. 현재로서는 원자력 안전기술원에서 제공한 유리화시설 기술기준 초안[2]이 유일하게 참고할 수 있는 자료이다.

이러한 제반 여건을 고려하여 안전성 평가의 전략은 가급적 일반적인 공정에 적용이 가능한 방법론을 적용하기로 하고, 각 방법론을 적용하는 단계에서는 유리화시설 실무 담당자와 협의하여 적용 범위 및 세부 분석 방법을 결정하였다. 전체적인 안전성 평가 전략은 다음과 같다.

○ 위험요소 분석

유리화시설은 비교적 소규모의 시설에 속하지만, 위험요소를 분석하는 작업은 체계적인 접근 방법이 없다면 다루기가 쉽지 않다. 본 연구에서는 미국의 화학공학회 지침서[3]를 기반으로 위험요소를 분석함으로써 가급적 제외되는 위험요소가 없도록 하였다.

○ 부지의 특성을 고려한 위험요소의 제거

시설 내에 존재하는 위험요소는 여러 가지 방법에 의하여 안전하게 제어되거나 또는 완전히 제거될 수 있다. 가장 기본이 되는 방법은 바로 시설이 건설되는 부지의 특성을 이용하는 것이다. 이 방법론만큼은 현재의 실증시설을 기준으로한 평가가 무의미하다고 판단되어 실제 중·저준위 방사성폐기물 유리화시설이 건설될 울진 원자력발전소 5·6호기 방사성폐기물 처리건물에 대한 부지 특성을 분석하여 위험요소를 제거할 수 있는 방법을 모색한다.

○ 화재 및 비산물 방호계획에 의한 위험요소의 제거

본 연구가 시작되기 전부터 관심사항이던 안전성 문제점중의 하나는 액화석유 가스를 사용함으로써 발생될 수 있는 화재 및 폭발 영향이었다. 일반적으로 화재와 폭발에 의한 위험요소는 매우 다양한 요소에 의하여 발생가능하며, 그 영향 역시 매우 미비한 경우로부터 작업자와 대중에 치명적인 위험을 줄 수 있는 정도로 폭넓다. 따라서 이들 위험요소에 대해서는 사고의 빈도를 줄이는 접근 방법보다는 방호계획을 수립하여 사고의 영향을 줄이는 방법을 채택하기로 하였다.

○ 유해배기체에 의한 위험요소의 제거

유리화시설은 현행 법규상 원자력관계시설에 속하게 되어 원자력 관련법규에 영향을 받게 되지만, 소각시설과 유사한 점이 상당히 많다. 특히 용융로 후단부터의 공정은 일반 소각시설의 특성과 매우 유사하다. 소각시설에서 중요하게 다루어지는 위험요소 중의 하나는 유해배기체로서 이와 관련된 기술기준은 이미 정립되어 있다. 따라서 유리화시설의 유해배기체에 대한 안전성 평가는 주로 소각시설에 적용되는 기술기준을 근거로 수행된다.

○ 공정상 사용되는 유해물질에 의한 위험요소의 제거

앞에서 살펴본 바와 같이, 유리화시설의 공정상 사용되는 몇 가지 유해물질이 사용된다. 이들은 경유, 가성소다(수산화나트륨), 액화석유 가스, 암모니아 가스 등이다. 각각은 인화성, 유독성, 폭발성 등 다양한 위험요소를 지니고 있지만 공정상 필요한 요소이기 때문에 시설 내에 위치하고 있어야 한다. 이들 위험요소에 대해서는 저장 및 운영·관리에 대한 안전성을 향상시키는 방법으로 위험성을 제거하게 되며, 대체할 수 있는 환경친화적 방법이 존재하는 경우 이를 소개하도록 한다.

○ 방사성 유해물질에 의한 위험요소의 제거

이상에서 살펴본 위험요소들과는 달리 방사성 유해물질은 정량적인 안전성 평가 방법을 사용하여 위험요소를 유발시키는 초기사건에 대한 경중을 평가한다. 방사성 유해물질의 누출에 대해서는 ALARA 원칙을 적용하지만 기본적으로 방사선량과 관련된 기술기준을 만족하기 위하여 별도의 연구를 통해 도출된 방사선 방호 요건을 최종적인 설계 개선안으로 제시한다. 빈도가 높거나 건전성이 취약한 초기사건을 인지한 후, 여기에 대한 개선책을 제안하도록 한다.

이상에서 살펴본 안전성 평가 전략을 도식적으로 표시하고, 각 평가 전략으로부터 도출되는 결과물을 정리하면 다음의 그림 2와 같다.

III.2. 관련 기술기준

앞에서 설명한 안전성 평가 전략의 많은 부분은 현재의 국내 관련 법규 및 기술기준의 적용

이 가능하다. 즉 유리화시설을 전반적으로 규제하는 관점에서의 기술기준이 없을 뿐, 부분적인 관점에서는 적용이 가능한 기술기준이 이미 제공되고 있다. 향후 중·저준위 방사성폐기물의 기술기준이 정립될 경우에라도 부분 공정에 적용되는 기술기준은 현존하는 관련 법규를 적용하여 인허가를 수행할 것이라고 예상하였다. 이러한 측면을 지원하기 위하여 관련 법규 및 기술기준을 정리하였다. 표 1은 법규 또는 기술기준과 관련 공정을 연결하여 요약한 것이다.

III.3. 평가 내용 및 결과

III.3.1. 위험요소 분석

위험요소의 분석 결과는 표 2에 정리하였다. 위험요소를 정리하는 과정은 미국화학공학회 지침서[3]의 검토목록을 활용하였다. 발전소 내에 건설될 시설이기 때문에 발생가능한 위험요소에 의하여 원자로건물에 영향을 미치는지의 여부를 확인하는 것 또한 중요하게 다루어져야 한다. 이러한 항목으로는 대규모의 화재 또는 강력한 운동에너지를 갖는 비산물에 의한 위험요소가 해당될 수 있다.

III.3.2. 부지의 특성을 고려한 위험요소의 제거

유리화시설이 실제로 건설될 부지위치, 인접산업시설, 기상, 수문, 지진에 의한 외부사건이 이 단계에서 분석된다. 부지특성조사는 울진 원자력발전소 5, 6호기 예비안전성분석보고서[4]를 이용하여 수행되었다. 원자력발전소 주변에는 발전소를 위협할만한 시설과 항공기 위험요소가 없는 것으로 조사되었으며, 따라서 발전소 부지 내에 위치한 유리화시설도 안전한 것으로 판단된다. 극 기상 상태를 조사하여 유리화시설이 견디어야 할 건설 요건을 도출하였다. 주로 영향을 주는 항목은 바람에 의한 시설물의 건전성 측면이었다.

○ 풍하중

- 최대회전풍속: 39.5m/s
- 최대병진속도: 9.5m/s
- 총 기압강하: 18.7mb
- 최대회전풍속 반경: 50m

기온 및 강수량에 대한 조사도 수행되었으며, 최고/최저 온도 및 강수량에 따른 시설물의 설계 및 운영안도 제안하였다. 지진 특성을 조사하여 유리화시설의 내진범주를 설정하였는데, 중·저준위 방사성폐기물 유리화시설이 원자력발전소 내에 건설되는 일종의 보조건물이라는 점과 방사성폐기물 처리건물이 내진범주 II급이라는 점에 주목하였다. 또한 유리화시설에서 처리하는 대상 폐기물의 방사선 준위를 고려하여 유리화시설에서 방사성물질이 존재하는 경계 내의 모든 계통을 내진범주 II급에 포함시켰으며, 내진범주 II급과 III급의 경계에 있는 기기에 대해서는 원자력발전소의 규정과 마찬가지로 II급 경계를 넘어선 첫 번째 내진구속장치까지를 내진범주 II급으로 규정하였다. 내진범주 II급에 해당되는 계통 및 기기들은 운전정지지진 하에서의 구조물 건전성을 입증하는 작업이 부가적으로 요구된다.

III.3.3. 화재 및 비산물 방호계획에 의한 위험요소의 제거

화재와 비산물에 의한 위험요소는 그 원인과 영향의 범위가 매우 다양하므로, 이에 대해서는 충분한 방호계획을 수립하여 사고의 영향을 줄이는 방향으로 연구가 수행되었다. 유리화시설 역시 원자력발전소 내에 위치하므로 원자력발전소에 적용되는 방호원칙을 그대로 준수하는 것이 가장 올바를 것이다.

(1) 화재방호

원자력발전소에서는 미국화재방호협회의 코드(National Fire Protection Association Codes and Standards)를 준용하는 원자력발전소 화재방호지침(Branch Technical Position CMEB 9.5-1)[5]과 국내 소방법을 사용하여 화재방호 수단을 갖추고 있다. 방사성폐기물 처리건물 내에서 화재로부터 보호되어야 할 계통 및 기기 역시 명시적으로 기술되어 있는데 이들은 모두 비안전 기기이며, 화재의 영향도 경미할 것으로 예측하고 있다. 결론적으로 유리화시설은 자체 화재방호를 통하여 시설 내부에 위치하고 있는 내진범주 II급 기기를 보호하고 인접한 화재보호 기기에 영향이 가해지지 않도록 하여야 한다.

현재의 유리화시설에서는 ① 전기나 전자적 위험지역, ② 원격 통신 지역, ③ 인화성, 가연성 액체나 기체 사용 지역, 그리고 ④ 고가 재산이 위치한 지역이라는 점을 고려하여 하론 소화설비를 사용한다. 국내 소방법의 '소방기술에 관한 규칙'에 따라 화재의 영향을 분석하여 소화설비의 용량과 설치 위치를 결정하였다. 소화약제, 화재감지기, 소화설비의 구동 방법, 수동 구동 장치, 대체 소화설비를 각각 독립적, 다중적 개념으로 배치함으로써 심층방어 체계를 구현하였다. 상용시설에서는 유리화시설과 방사성폐기물 처리건물의 화재방호 기기 사이에 적절한 방호벽을 설치하면 화재방호 측면은 큰 문제는 없을 것으로 결론지었다.

(2) 비산물방호

부지특성 조사에서 결정된 내진범주 II급 기기들을 비산물방호 대상 기기로 선정하였다. 비산물은 특성별로 고려하여 유리화시설 내부비산물, 외부비산물, 그리고 자연현상에 의한 비산물로 구분하였다.

유리화시설의 내부비산물 중에서 고압 또는 회전으로 인한 비산물의 영향은 거의 미비할 것으로 판단하였다. 가장 심각한 비산물로는 액화석유가스 폭발에 의한 비산물로 파악되었는데 철제구조건물에 손상을 줄 정도의 영향력인 0.21kgf/cm^2의 압력이 나타나는 거리는 모든 액화석유가스 봄베의 누출을 가정한 사고시 대략 35m로 평가되었다. 따라서 액화석유가스 저장고는 원자로 건물과 반대편인 발전소 부지 서쪽으로 충분한 이격거리를 확보할 수 있도록 건설하고, 필요한 경우 방호벽 설치를 해야 할 것으로 판단된다. 더불어 액화석유가스로 인한 화재시 공정설비가 영향을 받는 37.5kW/m^2의 복사열이 미치는 거리가 대략 30m임을 감안한다면 충분한 이격거리 및 방호벽의 설치는 화재방호와 비산물방호 모두에 필요한 것이라 결론지었다. 본 연구에서 고려된 외부비산물로는 원자력발전소의 터빈비산물을 꼽았지만 안전성분석보고서에 기술된 터빈비산물의 저궤도 타격범위 및 타격 확률로 판단했을 때, 방사성폐기물 처리건물에 부딪힐 확률은 매우 적은 것으로 분석되었다[5]. 기타 자연현상에 의한 비산물은 부지특성에서 다루어졌다.

III.3.4. 유해배기체에 의한 위험요소의 제거

유해배기체는 폐기물 연소시 발생되는 가스 및 입자상의 물질이다. 유해배기체는 대기환경보전법 및 폐기물관리법에 의거하여 안전성을 평가하였다. 대기환경보전법과 폐기물관리법에서 다루는 유해배기체 중에서 유리화시설로부터 발생될 수 있는 총 10가지의 유해배기체를 검토하였다. 대기환경보전법에는 총 15가지의 대기오염 방지시설이 제시되어 있는데 유리화시설에는 세정집진시설(세정기), 여과집진시설(고온필터, HEPA), 직접연소에 의한 시설(후단 연소기), 흡착에 의한 시설(활성탄), 촉매반응을 이용하는 시설(질소산화물 처리계통)

을 설치하여 사용하고 있으며, 이에 대한 것은 그림 1의 공정도를 보면 알 수 있다. 표 3에는 선정된 10가지 유해배기체에 대한 배출허용기준을 정리하였다.
정상운전중에는 유해배기체가 모두 배기체 처리계통을 통하여 걸러지고, 최종 연돌로는 규제치 이하의 오염물질만이 방출되는 것으로 실증실험결과 나타났다. 비정상적인 상황에서 유해배기체가 규제치 이상으로 외부로 누출되는 경우에 대해서는 배출허용기준의 예외 사항을 적용한다. 일반적인 소각시설에 대하여 RCRA(Resource Conservation and Recovery Act)와 EPA(Environmental Protection Agency)에서 요구하는 배기체 감시설비를 설치하고 굴뚝자동측정관제센터에 측정결과를 자동으로 전송하는 사업장의 경우, 배출허용기준 초과 인정시간이 1시간으로 적용된다. RCRA에서 요구하는 배기체 감시설비로는 배기체내 일산화탄소, 이산화탄소, 산소, 염화수소의 농도측정기와 배기체 유속, 기타 독성중금속 감시설비가 있으며, 현재 유리화시설에는 이러한 계측기가 대부분 설치되어 있다.
이와 함께 주요 기기의 전/후단에서 공정 변수를 감시함으로써 유해배기체의 처리가 원활하게 이루어지지 않는 경우, 적절한 제어 조치를 취함으로써 사고의 가능성을 줄일 수 있다. 배기체 처리계통의 각 기기 전/후단에 설치된 계측기 목록을 파악하였으며, 특별히 개선되어야할 사항은 없는 것으로 평가되었다.
유리화시설의 배기체 처리계통은 배기팬에 의한 부압유지로 내부의 배기체가 외부로 빠져나가지 못하도록 설계되어 있다. 배기팬은 두 대로 구성되는데 각각은 독립적인 전원장치에 연결되어 있으며 100%의 용량을 지니고 있다. 따라서 배기팬의 작동 실패로 인하여 부압이 유지되지 못할 확률은 매우 작다고 할 수 있다. 그러나 모든 배기팬의 작동 실패와 동시에 폐기물 주입계통이 정지되고 용융로 전원이 차단되지 않는 등 공정 제어계통이 상실되어 유해배기체가 외부로 누출되는 경우에 대비하여 작업자 거주 공간과 배기체 처리계통 공간에 공기조화계통의 설치를 제안하였다. 결국 유해배기체로 인한 위험요소는 ① 공정감시, ② 부압유지 배기팬, ③ 가스감시계통, 그리고 ④ 공기조화계통으로 구성된 심층방어로 제거된다고 할 수 있다.

III.3.5. 공정상 사용되는 유해물질에 의한 위험요소의 제거
유해배기체 이외의 유해물질로는 공정 운영에 필요한 경유, 가성소다, 암모니아, 액화석유를 들 수 있다. 암모니아는 질소산화물 제거계통의 운전에 사용되며, 가성소다는 세정액의 pH 조절에 사용되고 있다. 액화석유가스는 후단연소기의 연료로 사용되며, 경유는 증기생산용 보일러의 연료로서 사용된다.
경유와 가성소다의 경우는 유해화학물질관리법과 소방법에서 기술기준을 찾을 수 있다. 경유와 가성소다는 유독물로 규정되어 있기는 하지만, 폭발성이나 유독가스를 방출하는 물질은 아니기 때문에 기술기준에서 요구하는 저장소 요건을 만족하기만 하면 안전성에는 큰 문제가 없는 것으로 조사되었다. 현재 시설에도 이들 기술기준에 따라 설계된 저장고 드레인 밸브 및 방류벽이 설치되어 있다. 경유 저장고의 경우 내벽에 내유처리를 하였으며, 가성소다 저장고는 내알카리처리를 하여 저장고의 건전성을 높였다.
암모니아의 경우는 독성가스로 분류되기 때문에 누출이 되는 경우, 현장 작업자의 피해가 있을 것으로 예상된다. 암모니아의 경우 고압가스 안전관리법, 대기환경보전법, 폐기물관리법에서 기술기준을 확인할 수 있다. 현재 원자력발전소에서도 암모니아는 사용되고 있기 때문에 원자력발전소의 기술기준을 그대로 사용하여 암모니아 저장 및 사용시설에 대한 기준을 마련하면 문제는 없을 것으로 판단된다. 부가적으로 본 연구에서는 비선택적 접촉환원법

(Nonselective Catalytic Reduction)과 흡착법과 같은 암모니아를 사용하지 않는 질소산화물 제거 방법을 몇가지 소개하였다. 액화석유가스의 경우 독성보다는 폭발 및 화재로 인한 영향이 중요하게 다루어지기 때문에 비산물방호와 화재방호를 통하여 안전성 측면이 평가되었다.

III.3.6. 방사성 유해물질에 의한 위험요소의 제거

(1) 초기사건 선정

방사성 유해물질에 대해서는 ALARA 원칙과 정량적 평가를 통한 설계 취약점 확인을 위하여 사고 시나리오를 도출하고 초기사건별로 위험도를 수치화하는 방법으로 안전성 평가가 진행되었다[6]. 앞서 설명한 위험요소 제거 방법을 거친 후에도 스크리닝(Screening)되지 않고 남은 위험요소를 분석하면 결국 열제거 실패로 인한 용융로 건전성의 상실로 귀착되었다. 열제거 실패와 관련한 초기사건을 분석하면 크게 다음과 같다.

- ○ 열원에 의한 과도한 열부하
- ○ 일차 냉각계통 냉각유로 손상(냉각배관 파손, 펌프 밀봉 손상, 밸브의 오동작)으로 인한 냉각수 누출
- ○ 일차 냉각계통 냉각회로의 차단이나 펌프 임펠러 고착으로 인한 유량 상실
- ○ 일차 냉각계통에서 이차냉각계통으로의 열제거 실패

(2) 사건시나리오의 정성적 거동 분석

용융로의 거동을 해석할 수 있는 검증된 코드가 없는 상태에서 사건시나리오의 종합적인 거동을 분석하는 것은 어려운 일이다. 따라서 여기에서는 최종적인 사고결말 상태인 용융로 손상이 발생하여 냉각수가 용융로 내부로 유입되는 경우와 외부로 빠져나가는 경우로 나누어 물리적으로 어떠한 현상이 나타날 것인지를 고찰하였다.

용융로 외부로 냉각수가 누출되는 경우는 일차냉각계통에 의한 열제거가 불가능하므로, 비상냉각계통에 의하여 용융로가 충분한 열제거가 되는지가 가장 중요하다. 사고발생시 전원공급은 자동 또는 수동으로 차단되어 더 이상 용융로로 유입되는 부가 열원은 없다고 가정한다. 일반적인 용융로의 운전에서 CCM은 전체 용융로 용기중에서 약 16cm 정도로 용탕 수위를 유지하고, PTM은 약 48cm 정도로 유지된다. 비상냉각수의 주입구는 용탕 수위의 가장 윗부분에 위치하도록 설계할 것을 제안하였다. 또한 주입 위치 근처에서의 파단을 고려하여 최소한 두 곳 이상의 주입구를 만들어 주는 것이 안전성 향상에 도움이 될 것으로 판단하였다. 현재의 유리화시설에서는 용융로의 열용량을 감안하여 설계된 비상냉각탱크에 냉각수를 저장하는 방식을 사용하고 있으며, 유리화시설의 가장 높은 위치에 설치되어 있다. 이는 비상냉각계통의 펌프가 이상이 있는 경우 수두차이를 이용한 냉각수 공급측면에서 유리하다.

용융로 내부로 냉각수가 누출되는 경우, 냉각수와 용융물이 직접적인 접촉에 의하여 빠른 속도로 용융물의 표면으로부터의 응고가 시작된다. 용융물의 급격한 냉각으로 고온의 용융물이 용융로를 손상시키는 경우는 드물 것으로 예상된다. 반면 용융로 내부에서의 증기폭발의 가능성이 있다. 그 동안의 증기폭발 실험에서 쌓인 경험에 의하면 용융물이 증기폭발에 민감한 알칼리 금속 계열도 아니며, 용융물에 냉각수가 투입된다는 점에서 일단 증기폭발의 가능성은 대단히 낮을 것으로 판단된다. 만일 증기폭발이 발생하는 경우, 용융로에 미치는

기계적 압력을 계산하기 위하여 NUREG-1150에서 Underwater Explosion 해석 방법에 사용한 TNT 등가해석법을 적용하였다[7, 8]. TNT 등가해석법에서 동하중 I는 다음과 같이 결정된다.

$$I = 1.46\ W^{1/3}(W^{1/3} \div R)^{0.89}$$

W : TNT 등가질량, W=2.2046EC/T
E : 용탕 에너지(MJ)
T : TNT 등가에너지, 5.1MJ/kg
C : 변환율, 3%(Al_2O_3인 경우, 일반적으로 사용하는 보수값)
R : 폭발원으로부터 용융로까지의 거리(ft)

CCM과 PTM의 계산에 사용된 주요 데이터와 가정은 표 4에 정리하였다. 모든 용융물이 물로 열에너지를 전달하여 증기폭발을 일으킨다는 가장 보수적인 상황을 가정하였다. 결과적으로 동하중은 CCM의 경우 0.422psi-sec, PTM의 경우 6.23psi-sec로 계산되었다. 증기폭발 관련 연구에 따라 동하중이 3msec인 삼각파를 가정하는 경우 CCM은 281psi(19.4bar), PTM은 4153psi(286.2bar)로 계산된다. 계산결과로부터 CCM의 경우는 약 20기압정도에 견딜 수 있는 용기를 제작하면 증기폭발에 의한 문제는 없을 것으로 판단된다. PTM은 약 290기압을 견디는 용기를 제작하여야 하는데, 현실적으로 너무 보수적인 가정이 들어갔으므로 이에 대한 적절한 고찰이 필요할 것으로 예상된다. PTM의 경우 배기체 배관에 파열판이 설치되어 있는데 과도한 압력상승이 나타나는 경우 파열판이 터지면서 과압을 방지하는 기능이 제공되고 있다. 추가적인 연구가 수행되어야 하겠지만, 현재 판단으로는 파열판을 용융로에 직접 설치하고, 파열판과 연결된 적절한 부피의 탱크를 설치한다면 증기폭발로 인한 비산물 영향과 고온의 용융물의 피해를 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

(3) 사건시나리오의 정량적 평가
몇가지 초기사건으로부터 용융로가 손상되기까지의 사건시나리오에 대해서는 정량적인 평가를 통하여 가장 안전성에 취약한 초기사건, 기기, 운영방법 등에 대한 분석이 수행되어야 한다. 이 부분에 대한 내용은 현재 진행중이며, 완전한 설계가 끝나지 않은 실증시설이라는 점을 고려하여 사건시나리오는 사고수목으로 구성한 뒤, 주요 핵심기기에 대한 고장수목을 부가하여 정량화하는 방법을 검토하고 있다. 인적오류와 같은 부분은 아직 고려되지 않는다.

IV. 결론 및 토론

본 논문에서는 중·저준위 방사성폐기물 유리화시설에 대한 안전성 평가 전략과 결과를 기술하였다. 운전경험이 많지 않고 아직 완전한 설계가 이루어지지 않았다는 점을 고려하여 안전성 평가는 되도록 일반적인 시설에 적용이 가능한 안전성 평가 방법을 사용하였으며, 안전성 평가 결과 미흡하다고 판단되는 점에 대해서는 설계 개선안을 도출하였다. 시설친숙화, 위험요소 확인, 정성적 및 정량적 안전평가 순으로 연구는 진행되었다.
가장 현안이 되었던 안전성 측면의 문제는 액화석유가스에 의한 화재 및 폭발과 용융로 내

부로 유입되는 냉각수에 의한 증기폭발이었다. 이들에 대해서는 현재 널리 사용하고 있는 해석방법론을 적용하여 설계 개선안을 도출하였다. 사건시나리오의 정량적 평가 연구가 남아있는 상태이며, 이 부분은 계속 진행중이다.
최종적인 결과물은 울진 원자력발전소 5·6호기 방사성폐기물 처리건물에 건설될 상용시설의 인허가 자료 및 설계안으로 참고할 수 있을 것으로 기대된다.

V. 참고문헌

1. 한국전력공사 원자력환경기술원 “중·저준위 방사성폐기물 유리화 기술개발”, TR.96NJ17.J2000.3, 2000. 6.
2. 한국원자력안전기술원 “유리화시설의 안전성평가 방법에 관한 연구”, KINS/HR-386, 2001. 3.
3. American Institute of Chemical Engineers “Guidelines for Hazard Evaluation Procedures with Worked Examples”, 1992.
4. 한국전력공사 “울진 원자력발전소 5, 6호기 예비안전성분석보고서”.
5. 한국원자력안전기술원 “경수로형원자력발전소 안전심사지침서”, KINS-G-001, 1992.
6. 장순흥, 백원필 “원자력안전”, 청문각, 1999.
7. 한국원자력연구소 “차세대 원전 증기폭발 영향평가”, KAERI/TR-1303/99, 1999. 3.
8. 송진호 외 “원자로 물질을 이용한 다차원 용융물-냉각수 반응에 대한 실험적 연구”, 한국원자력학회 99 추계 학술발표회, 1999.

표 1. 유리화시설 안전성 평가 관련 법규 및 기술기준 현황

과학기술부 고시	방사선 방호 등에 관한 기준 (제 2001-2호)	방사성 유해물질 안전성 평가
	중저준위 방사성폐기물 소각기준 (제 1997-8호)	
	방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정 (제 96-38호)	
환경부 고시	폐기물소각시설 및 매립시설의 세부검사 방법에 관한 규정 (제 2000-10호)	소각부산물 처리방법
	폐기물 회수 및 처리 방법에 관한 규정 (제 1994-45호)	
산업안전 보건기준	사업장 방폭구조 전기기계, 기구, 배선 등의 선정·설치 및 보수 등에 관한 기준 (제 1993-19호)	일반 산업 안전 및 기기 설계
	보일러 제작기준·안전기준 및 검사기준 (제 1993-34호)	
	압력용기 제작기준·안전기준 및 검사기준 (제 1997-34호)	
	크레인 제작기준·안전기준 및 검사기준 (제 1997-32호)	
	가스누출감지경보기 설치에 관한 기술상의 지침 (제 1993-18호)	
기타	액화석유가스 저장 및 취급기준	액화석유가스 저장 및 관리
	액화석유가스 집단공급시설 시설기준 및 기술기준	
	미국화재방호협회 코드	화재방호
	소방법	
	대기환경보전법	유해배기체 평가
	폐기물관리법	공정상 유해물질 평가
	고압가스 안전관리법	
	유해화학물질관리법	

표 2. 유리화시설에 대한 위험요소 분석 결과물

계통	위험요소	초기사건	잠재적 재해
모든 계통	Impact	• 내·외부 물체에 의한 충돌	• 구조물의 손상 • 방사성/비방사성 물질의 외부누출 • 고온 열원 방출
CCM PTM 배기체 처리계통	Falling Object	• 크레인 낙하	• 구조물의 손상 • 방사성/비방사성 물질의 외부누출 • 고온 열원 방출
모든 계통	Elec. Shock	• 케이블 피복 손상 및 누전 • 누수에 의한 감전	• 작업자 감전
전기를 사용하는 모든 계통	Elec. Overheat	• 케이블 합선 • 제어기 고장	• 국부적 화재 • 배기체 처리 성능 저하 • 소각로 손상
LPG 공급계통 후단연소기	Explosive Gas	• 공급배관파단 및 스파크	• 고온 열원 방출 • 폭발로 인한 구조물 손상 • 방사성/비방사성 물질의 외부누출
CCM PTM 배기체 처리계통	Source of Heat, Nonelec.	• 냉각계통고장 • 배관파단에 의한 열원 누출	• 구조물의 손상 • 작업자 피해
모든 계통	Hot Surface Burn	• 작업자 실수	• 작업자 피해
폐기물 주입계통	Rotating Equip.	• 파쇄기 고장	• 이웃 구조물 피해 • 방사성 물질의 외부누출
CCM PTM 배기체 처리계통	Compressed Gas	• 배기측 배관 이상 • 냉각계통 이상으로 인한 계통 가압	• 이웃 구조물의 손상 • 고압 열원 방출 • 방사성/비방사성 물질의 외부누출
CCM PTM 폐기물 주입계통	Ionizing Radiation	• 용기 파손 • 주입구 차폐 이상	• 방사성 물질의 외부누출
CCM PTM 배기체 처리계통 유해 기체/액체 공급계통	Toxic Gas or Liquid	• 용기 또는 배관 파손	• 비방사성 유해 물질의 외부누출

표 3. 유해배기체 배출허용기준

오염물질	배출시설(구분)	적용기간 및 배출허용기준	
		2004.12.31까지	2005.1.1 이후
암모니아	기타시설	100ppm 이하	100ppm 이하
일산화탄소	소각용량이 200kg/시간 미만인 소각시설 또는 소각보일러	600ppm 이하	300ppm 이하
질소산화물		200ppm 이하	150ppm 이하
황산화물		300ppm 이하	100ppm 이하
염화수소		50ppm 이하	50ppm 이하
먼지		100mg/Sm^3 이하	100mg/Sm^3 이하
탄화수소	배출가스량이 10,000m3/시간 미만인 시설	-	100ppm 이하
비산먼지	모든 배출시설	0.5mg/Sm^3 이하	0.5mg/Sm^3 이하
수은화합물	소각시설 또는 소각보일러	5mg/Sm^3 이하	0.1mg/Sm^3 이하
다이옥신*	시간당 처리능력 2톤 미만 0.2톤 이상 소각시설	5ng-TEQ/Nm^3 (신규시설에 한함)	

* : 폐기물관리법에 의거, 나머지는 대기환경보전법에 의거함

표 4. TNT 등가해석법 관련 자료

	CCM	PTM
직경(cm)	55	59.06
용탕 높이(cm)	~16(실험으로 도출)	~48(실험으로 도출)
용탕 구성	주로 유리, Al_2O_3 성분 10% 가량 함유 (100% 유리용탕 가정)	철 또는 콘크리트 (100% 철용탕 가정)
용탕 온도(℃)	~1250(실험으로 도출)	~1650(실험으로 도출)
용탕 비중	~2.1(실험으로 도출)	7.86(20℃ 철로 가정)
용탕 비열(kJ/kg℃)	0.93(유리, 보수적인 값으로 가정)	0.45(20℃ 철로 가정)

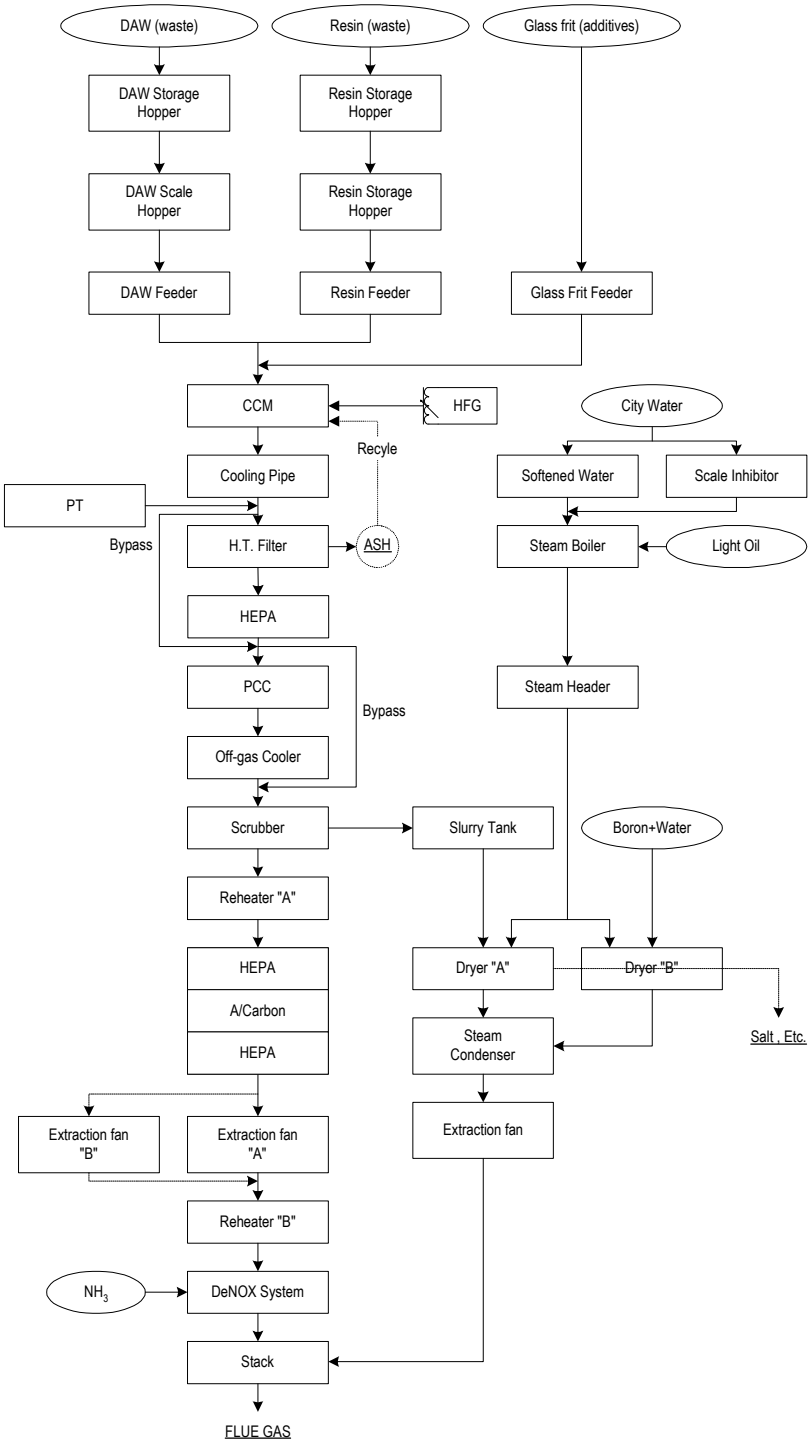

그림 1. 유리화 실증시설의 세부공정 흐름도

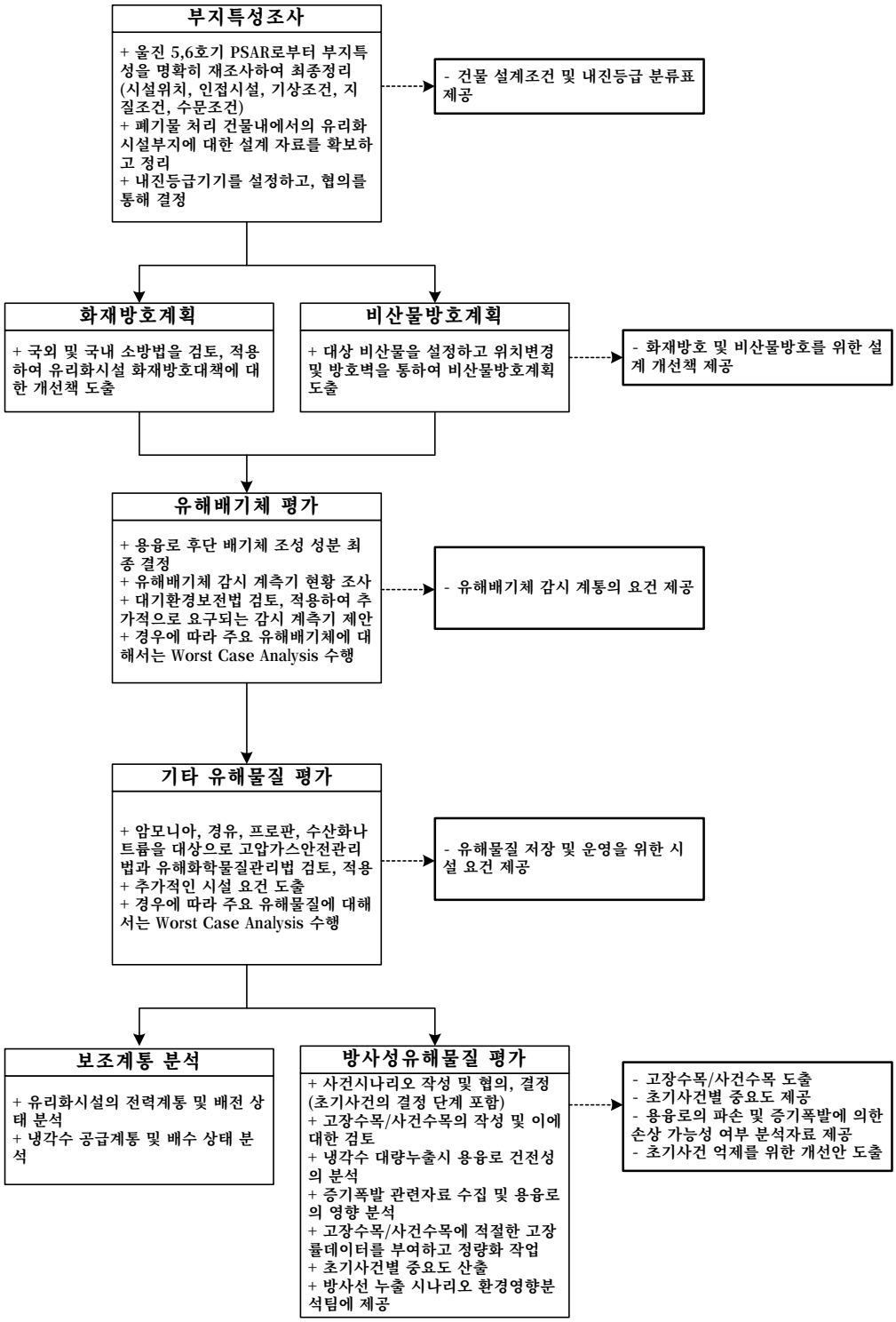

그림 2. 안전성 평가 전략 흐름도