

원전해체 시 사용후핵연료 아일랜드 전환설계 설계요소 및 Case 분석

이동진*, 정재훈

한국전력기술(주), 경북 김천시 혁신로 269

*djlee@kepc0-enc.co.kr

1. 서론

2017년 6월 고리 1호기 영구정지가 결정됨에 따라 본격적인 해체작업에 들어가기 전에 전환단계(transition period)가 존재한다. 이 단계에 수행되는 작업들은 본격적인 해체작업을 수행하기 위한 준비 단계이며 사용후핵연료아일랜드 전환설계도 이 단계에 시작한다. 해체 및 사용후핵연료 관리 전략에 따라 사용후핵연료아일랜드 전환설계가 수행되지 않고 인접호기로 사용후핵연료를 이송하는 Case가 있으나 이는 임시방편에 해당하고 Case도 많지 않다. 원전해체 선협국의 Case를 살펴볼 때 효율적이고 안전한 해체를 위해 사용후핵연료아일랜드 전환설계가 이루어지는 경우가 많다. 사용후핵연료 중간저장시설이 없는 경우 더욱 그러하다. 우리나라의 경우 원전해체 시 사용후핵연료 관리전략이 결정되지 않았으므로, 사용후핵연료아일랜드 전환설계를 고려하는 권장된다.

본 논문에서는 원전해체 시 사용후핵연료 전환설계 개념 및 필요성을 살펴보고, 설계요소 및 Case를 심층적으로 분석하여 향후 국내 원전으로의 적용점을 도출하기 위한 기술적 근거를 확보해보고자 한다.

2. 본론

2.1 개념 및 필요성

사용후핵연료아일랜드는 원전해체 시 구조물, 계통, 기기들의 해체를 용이하게 하기위해 사용후핵연료 저장조를 기존 원전의 냉각계통, 전원계통 등과 격리하고 독립된 시스템으로 구성하는 개념이다. 구체적으로 아일랜드 전환설계에 필요한 기기 및 계통을 설치한 후, 사용후핵연료 저장조 압력 경계와 연결된 모든 배관을 인접한 장소에서 격리, 절단, 포장시키는 작업을 일컫는다.

이는 사용후핵연료 냉각 및 정화계통과 관련된 배관을 제거하기 전에 저장조의 핵종 재고량에 부정적인 영향(수위감소 및 핵종누출)을 야기시키는 의도치 않은 해체작업 사고가능성을 제거하기 위함

이다. 다시 말해 사용후핵연료 냉각 및 정화계통은 핵연료취급 및 복합건물에 폭넓게 연계되어 있기 때문에 아일랜드 전환설계를 통해 저장조 근처의 기기 및 계통을 비전원화 및 제거하기 위한 선제작업이다. 또한 공정 측면에서 아일랜드 전환설계 및 해체 작업을 병행할 수 있어 해체작업 효율성을 높일 수 있으며 해체 작업자의 방사선 피폭량을 줄일 수 있다는 장점이 있다.

2.2 설계요소 분석

사용후핵연료아일랜드 전환설계시 고려해야 할 설계요소는 다음과 같다.

- 최대열부하
- 냉각기능상실시 최대온도상승률
- 최대허용온도제한치
- 냉각계통 구성
- 정화계통 구성

최대열부하는 원전해체 시 사용후핵연료 저장조의 냉각기능 및 용량의 확보를 의미하며, 해체작업 수행시 원자로에 저장된 핵연료가 저장조에 수송할 경우의 최대 열부하를 고려하여 설계변경해야 한다. 또한 최대온도상승률은 능동적인 냉각기능이 상실될 경우 설계 제한치에 도달하는 시간을 확인하고 이에 대응하기 위한 설계변경 사항을 도출하는 데 의미가 있다. 이는 1차적으로 열부하와 연관이 되고, 2차적으로 열을 제거하기 위한 열제거원(heat sink) 용량을 설정하는데 설계근거가 된다. 최대허용온도제한치는 저장조의 건전성 유지와 관련이 있으며, 원전해체 시 일반적으로 화씨 140~150도로 설정값을 기준으로 적용한다. 냉각계통은 사용후핵연료아일랜드 전환설계를 구성할 때 각 원자력발전소마다 조금씩 차이가 있다. 냉각계통을 구성할 때 다중성(redundancy)를 고려하기도 하지만, 이를 고려하지 않고 단일 계통을 구성하는 경우도 다수 존재한다. 또한 최종 열제거원으로 대기 또는 해수를 사용하는데, 이는 각 발전소의 특성에 적합한 계통 구성을 채택한다. 미국의 변경허가 하에서 아일랜드 냉각계통은 비안전등급이며, 비상시 전원공급원을 구성한다. 정화계통은 일반적으로 스

키머/스트레이너, 필터, 탈염기로 구성이 된다. 필터의 공극사이즈는 발전소마다 다르지만, 일반적으로 0.2 ~ 25 μm 범주이다. 혼상탈염기 용량을 일반적으로 30 ft^3 이며, 사용후핵연료 저장조 내부 또는 외부에 위치하여 정화계통을 구성한다.

2.3 Case 분석

사용후핵연료아일랜드 전환설계 Case를 분석하기 위한 가장 좋은 선형국은 미국이다. EPRI에서 발행한 원전별 Decommissioning Experience Report를 분석한 결과 원자로형, 해체전략, 아일랜드 전환설계 여부에 따라서 6개 원전으로 선정하였다. Big Rock Point, Dresden 1, Homboldt Bay 3, Lacrosse 원전 등은 비등형 경수로이므로 분석대상에서 제외했고, Indian Points 1은 경수로이지만 자연해체방식으로 사용후핵연료아일랜드 전환설계를 수행하지 않아서 제외하였다. 선정된 6개 원전은 Table 1과 같다.

Table 1. Summary of SFPI during transition period

| Plant | MWe | Summary of Contents |
|--------------------|------|--|
| Connecticut Yankee | 590 | Spent Fuel Pool Cooling, Purification and Heat Sink |
| Maine Yankee | 825 | Spent Fuel Pool Cooling, Purification, and Heat Sink |
| Rancho Seco | 916 | Lower capacity chiller, filter and demineralizer system, |
| Trojan | 1130 | Modular Spent Fuel Pool Cooling and Cleanup system |
| Yankee Rowe | 185 | Auxiliary Service Water System |
| Zion 1,2 | 1040 | Spent Fuel Nuclear Island Pool Cooling System |

Connecticut Yankee와 Maine Yankee 원전에서 제시된 “Spent Fuel Pool Cooling, Purification, and Heat Sink”가 사용후핵연료아일랜드 전환설계를 가르키는 것이다. Connecticut Yankee는 냉각계통을 이중루프로 구성하였으며, 수냉식 및 공랭식으로 열제거하는 계통을 구성하였다. 정화계통은 단일루프로 구성하였으며, 10 μm 필터를 포함한 스키머 펌프 2대, 혼상수지탑 2대, 후단필터 1대를 설치하여 구성하였다. Rancho Seco 원전의 냉각계통은 공랭방식을 채택하

되, 단일루프로 구성하여 냉각기(chiller unit)을 핵연료 건물 내부에 설치하고 응축기(condensing unit)을 인접한 외부에 설치하여 구성하였다. 정화계통은 단일루프로 구성하며, 필터(5 μm) 및 혼상탈염기를 핵연료 건물 내부에 설치하였다. 또한 사용후핵연료를 건식용기에 저장하는 경우를 대비하여 기존의 정화계통을 유지하였다. Trojan 원전의 사용후핵연료아일랜드 전환설계에 있어서 특징은 냉각계통과 정화계통의 펌프(2대)를 공유한다는 점이다. 정화계통을 구성시 5 μm 필터 및 혼상탈염기(30 ft^3)로 구성하며, 사용후핵연료 이송시에는 2.5 μm 필터로 교체한다. Yankee Rowe 원전은 별도의 보조급수계통을 설치하여 열제거원 기능을 추가하였다. 수냉식을 채택하며 해체시 버려진 계통으로부터 추출한 열교환기를 재활용했다. 정화계통은 단일루프로 스키머 펌프 1대가 있고, 혼상탈염기(30 ft^3)가 수조 내 설치하여 구성하였다. Zion 1,2호기의 냉각계통은 공랭식이며 운영 중 사용후핵연료 저장조 열교환기를 활용하여 냉각탑을 설치하고 관련 배관작업을 수행하였다. 냉각펌프 2대 및 열교환기는 핵연료 건물 내부에 설치하였다. 정화계통은 필터 및 운영 중 사용한 탈염기를 활용하여 구성하였다.

3. 결론

우리나라 고리1호기 사용후핵연료아일랜드 구성을 위해서 참조할 만한 Case를 선정하여 분석하였다. 미국의 경우 원전해체를 위한 변경허가하에 해체작업을 수행하고 있으며, 이에 따른 설계요건을 고려하여 전환설계를 수행하고 있다. 원전해체 경험이 풍부한 미국의 전환설계 Case로 미루어 볼 때, 우리나라의 원전해체 시 사용후핵연료 관리방안이 정해지지 않은 시점에서 사용후핵연료아일랜드 전환설계는 효율적이고 안전한 해체작업에 필수적인 절차로 고려될 수 있다. 후속 연구에서는 사용후핵연료아일랜드 전환설계와 관련된 요건 분석 및 연계계통을 파악하여 국내 적용점을 도출할 계획이다.

4. 참고문헌

- [1] EPRI, Spent Fuel Pool Cooling and Cleanup Systems-Experience at Decommissioning Plants, 2004.
- [2] EPRI, Lessons Learned for EPRI Decommissioning Program, Pre-planning and early decommissioning Tasks, 2015.