

한울1호기 아연주입 시의 아연의 거동

이두호*, 권혁철, 성기방

한국수력원자력(주) 중앙연구원, 대전광역시 유성구 유성대로 1312번길 70

*dooho.lee@khnp.co.kr

1. 서론

한울 1호기는 국내 원전에서는 최초로 일차계통의 선량을 저감과 발전소 구조재료의 건전성 확보를 위한 목적으로 일차냉각재에 5 ppb 수준의 아연을 주입하는 운전을 적용중이다. 한울 1호기 17주기 중반인 2010년 4월에 최초로 아연주입 운전을 개시한 이후 현재까지도 지속적으로 아연주입 운전을 시행하고 있다. 본 논문에서는 국내 원전에서는 최초로 시행된 한울 1호기의 아연주입 적용 결과를 아연의 주입과 분석, 거동 및 발전소 운전 에 미친 영향의 관점에서 간략히 요약하였다.

2. 본론

2.1 아연의 주입

한울 1호기는 아연의 목표농도를 5 ppb로 설정하고, 화학 및 체적제어계통(CVCS : Chemical and Volume Control System) 내 체적제어탱크와 충전펌프 사이의 배관을 통해 아연을 주입하고 있다. 아연주입장치는 100 갤런 용량의 탱크, 0.2 gph 유량의 아연주입펌프와 제어판넬 등으로 구성되어 있으며, 아연용액의 보충 없이도 한 달간 연속운전이 가능하도록 설계되어 있다. Zn-64의 방사화에 의한 Zn-65 발생을 억제하기 위하여 Zn-64의 함유량을 1% 미만으로 감소시킨 정제아연(Depleted Zinc)을 zinc acetate 화합물의 형태로 주입하고 있다. 정제아연의 주입에 의해 일차냉각재 중의 Zn-65 핵종 농도는 주입 전 또는 아연을 주입하지 않은 한울 2호기와 거의 유사한 수준으로 유지됨을 확인하였다.

2.2 아연의 분석

아연은 유도결합플라즈마 분광광도계(ICP-AES : Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy)를 활용하여 분석 중이다. 아연농도 분석시 붕소 매질에 의한 간섭현상을 배제하기 위하여 월 1~2회, 분석 당시의 일차냉각재 중의 붕소 농도를 고려하여 표준시료를 제작, 검량선을 재

작성하여 분석값을 도출하고 있다.

한울 1호기에서는 최초 아연주입 후(17주기) 아연이 검출되기 전에는 1회/일, 아연이 검출된 후 아연이 목표농도로 도달하기 전에는 2회/일, 그리고 아연이 목표농도로 안정적으로 유지된 이후부터는 1회/주의 분석주기로 아연을 분석하고 있다. 현재까지의 운전경험에 따르면 아연주입 운전이 안정화된 이후부터는 주당 1회의 분석만으로도 아연농도의 관리가 가능한 것으로 나타났다.

2.3 발전소 정상운전 중 아연의 거동

한울 1호기에서는 17주기 기동 후 389 일이 경과된 시점에서 아연주입 운전을 착수하였으며, 아연주입 개시 후 아연이 일차냉각재 시료에서 최초 검출되기 전까지 66 일이 소요되었다. 참고문헌 [1]에서는 동 과정에서 일차계통 단위표면적당 아연 유입량을 식 (1)의 회귀식으로 표현한 바 있다.

$$m_{inc} = 0.0053\ln(t) - 0.0088 \quad (1)$$

여기서, m_{inc} : 단위표면적당 아연의 유입량 (g/m^2)

t : 운전일수 (day)

위의 식에 따르면, 한울 1호기의 경우 아연주입 후 아연의 최초 검출 시까지 66일이 소요되었으므로 대략 $0.013 g/m^2$ 의 아연이 계통 산화막으로 유입된 것으로 계산된다. 이를 통상적인 계통 표면적 조건인 $25,000 m^2$ (연료 및 증기발생기 표면) 하에서의 총 유입량 값으로 환산하면 약 335 g으로 계산되며, 이를 다시 일 평균 유입율로 환산하면 5 g/day로 계산된다. 한울 1호기에서는 최초 아연주입율을 6 g/day로 운전하다가, 아연의 최초 검출이 다소 지연되자 40 일 정도 경과된 시점에서 아연주입율을 6 g/day에서 12 g/day로 높여 운전한 바 있다. 이에 따라 아연이 최초 검출되기 전까지 주입된 아연의 양은 587 g에 해당하였으며, 이는 식 (1)에서 계산한 총 유입량 값인 335 g보다 높은 값이다. 즉, 아연이 최초 검출되기 전까지 소요되는

시간은 단순히 계통 표면적만의 함수가 아니라 계통 산화막과 연료 크러드의 총량에 의해서도 변화됨을 알 수 있었다. 특히 이들 변수들은 발전소별 운전이력에 따라 달라지므로 아연의 최초 검출 시까지의 소요시간 역시 발전소별로 큰 폭의 변화를 보일 것으로 예상된다. 아연의 최초 검출 시까지의 아연주입량만으로 판단해보면 한울 1호기는 계통 내 크러드 재고량이 평균적인 경우보다 높았음을 알 수 있다(국외 발전소의 경우 평균적으로 20 일 내외에 검출).

한울 1호기 18주기에는 주기 착수 후 약 3개월 경과한 시점에서 아연주입 운전을 재개하였으며, 아연주입 전부터 아연이 냉각재에서 검출되었으므로 17주기와 같은 아연의 검출지연 현상은 나타나지 않았다. 특히 아연이 목표농도에 도달된 이후에는 아연의 농도를 안정적으로 유지 관리할 수 있음을 확인하였다. 또한, 한울 1호기 19주기에도 18주기와 유사한 아연농도의 변화를 보였다.

2.4 발전소 정지시 아연의 거동

발전소가 정지되는 과정에서는 일차계통 산화막으로 유입되었던 아연이 냉각재 중으로 재용출되는 현상이 나타날 수 있다. 가압경수로형 원전에서의 발전소 정지시 크러드 용출현상은 일반적으로 니켈의 거동에 의해 지배되므로, 발전소 정지시의 아연의 거동 역시 니켈의 거동과 밀접한 연관이 있을 것으로 판단된다. 이는 일차계통 크러드의 주성분인 니켈 화합물이 용해되는 과정에서 동 화합물의 구성성분으로 유입되어 있던 아연 역시 냉각재로 용출되는 현상이 나타날 것이기 때문이다. Fig. 1에는 한울 1호기 19차 O/H시에 측정된 냉각재 중의 니켈, 철 및 아연농도의 변화를 보여주고 있다. 본 그림에서 확인할 수 있듯이 발전소 정지 시에는 아연을 함유하고 있는 니켈 화합물의 용해에 의해 냉각재 중의 아연농도가 100 ppb 수준까지 증가하였음을 알 수 있다.

2.5 아연주입에 따른 핵종농도 변화

한울 1호기에서의 아연주입 후 냉각재 중 방사성 코발트 변화경향을 살펴보면 아연주입 운전의 개시에 따라 방사성 코발트의 농도가 어느 정도 증가된 경향을 보이다가, 이후 아연주입 운전이 지속적으로 수행됨에 따라 점차 안정화 되어감을 확인할 수 있다. 한울 1호기의 경험에 따르면 아연주입 운전에 따른 냉각재 중의 방사성 코발트의 농도 변

화가 기존 CVCS 계통의 이온교환수지와 필터에 의해 충분히 처리될 수 있는 범위였으므로 아연주입 운전이 발전소 운전에 별다른 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 특히, CVCS 계통 이온교환수지탑의 경우 수지의 포화여부와는 관계없이 매 O/H 기간에 수지 교체운전을 실시하였으므로 아연주입 운전에 의해 수지 소모량이 증가되지 않았으며, CVCS 필터 교체량 역시 아연주입 전과 유사한 수준임을 확인하였다.

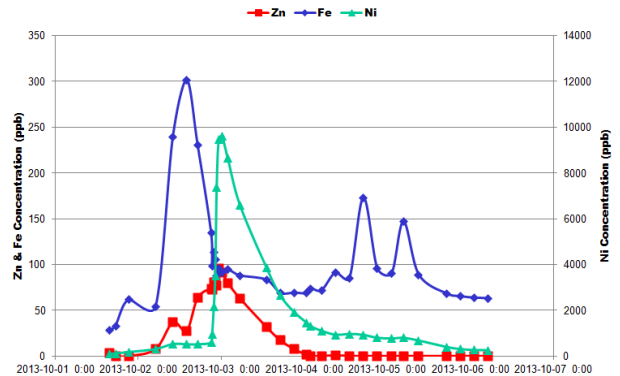


Fig. 1. Trends of Ni, Fe, Zn during RFO 19.

3. 결론

본 논문에서는 한울 1호기에서 국내 최초로 시행된 일차냉각재 아연주입 운전 결과를 아연의 주입, 분석, 유지관리 측면에서 간단히 요약하였다. 전반적으로 한울 1호기의 운전경험에 따르면 일차계통 내에 아연을 주입하고, 분석하여 목표농도로 유지하는 데에는 별다른 어려움이 없음을 확인하였다. 다만, 발전소 불시정지와 같은 단기적인 과도 현상 발생 시의 분석자료가 확보되지 못해서 동 현상 발생 시의 평가가 수행되지 못하였다. 따라서, 향후에는 동 기간 중 아연의 거동 평가가 필요할 것으로 판단된다.

4. 참고문헌

- [1] S.E. Ziemniak and M.E. Hanson, "Zinc Treatment Effects on Corrosion Behavior of Alloy 600 in High Temperature, Hydrogenated Water", Lockheed Martin Corporation. Schenectady, NY, 2004. LM-04K144.