

KNF-  
ENG-02

# 원자로 일차계통 아연주입 노심안전성 평가

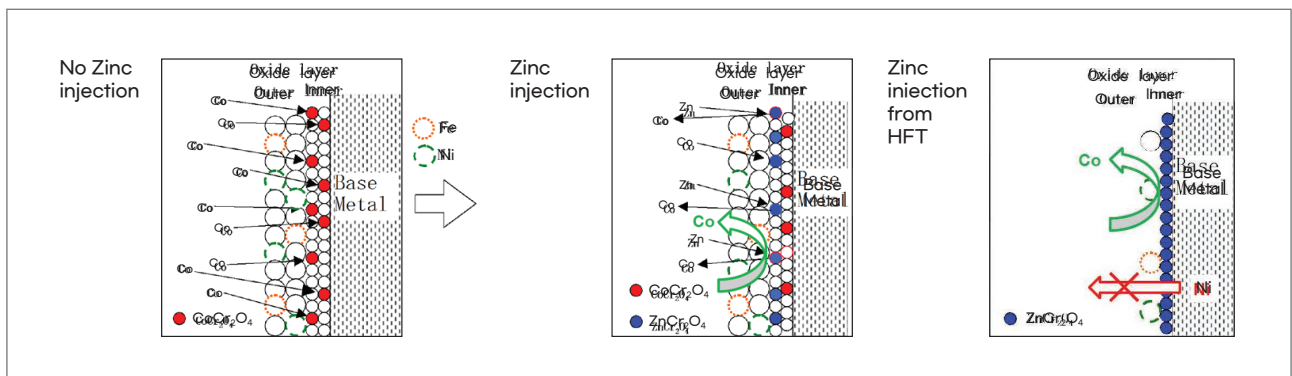
노심설계처 유병태  
T. 042-868-1831 E. btyu@knfc.co.kr

노심설계의 최적화, 일차계통의  
재료현안 해결 및 증사자의 피폭 저감을 위한  
원자로 일차계통 아연주입은 1990년대 중반  
이후부터 전반적인 1차 냉각수 수질관리,  
재질관리(일차계통 내 냉각수에 의한 응력부식균열,  
PWSCC), 선량감소 프로그램 등에 적용되어 왔음.  
원전 현장에서 연구개발을 통해 얻어진  
추가적인 정보들은 원전 내 방사선과  
PWSCC 분야에 아연주입에 따른  
효과를 보여주고 있음.

## 기술 내용

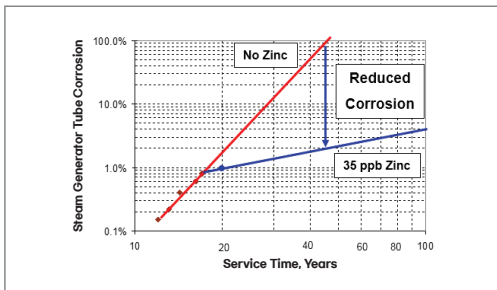
### ● 배경

- 부식 생성물(주로 니켈, 철 산화물 및 수용성 물질)은 원자로 일차계통(또는 노심냉각시스템, RCS) 내의 다양한 구성품들(특히 증기발생기)에서 방출된 뒤 노심 내 냉각수를 통해 순환됨. 부식 생성물은 일차계통 내의 모든 표면에서 방출되거나 침적될 수 있으며 이를 "Crud(크러드)"라고 함.
- 크러드 침적의 증가는 Crud Induced Power Shift (CIPS) 나 Crud Induced Localized Corrosion (CILC) 현상 발생의 위험을 증가시킴. CIPS 현상은 충분히 광범위한 크러드 침적과 크러드 층 내에 리튬-보론 화합물이 석출될 수 있는 충분히 높은 미포화 비등을 조건인 경우 발생하며 이는 보론 자체의 침적과 관계없이 축방향 출력분포 편이를 일으킬 수 있음. 국부적으로 두꺼운 크러드 침적은 열전도성을 감소시키고 연료 표면의 온도를 증가시킬 수 있으며 이는 CILC 현상을 발생시킬 수 있음.



● 목적 및 필요성

- 원자력연료의 피복관은 원자로 가동 중 방사선 핵분열 생성물 누설의 일차적인 방벽으로 작용하며 피복관의 건전성 유지는 발전소 운영사와 규제기관의 주요 목표임. 그러므로 아연주입과 같은 새로운 운전환경·조건은 엄격한 안전성 평가를 거쳐 시행됨.
- 원자로 일차계통 아연주입은 방사선 피폭의 감소 및 PWSCC 현상의 완화 이외에도, 장기적으로 저감된 부식률은 원자력연료 성능관련 현안인 크러드 원인물질 감소를 시킴. 그러나, 아연주입으로 단기적인 크러드 증가에 따른 위험도가 있으므로 발전소·주기별 적절한 노심 안전성 평가 수행 후 시행하여야 함.



< 아연주입 효과 - 증기발생기 세관 부식감소 >

● 기술원리

- 경수로 아연주입과 관련된 우려사항 중 하나는 크러드내 산화아연(ZnO)이나 규산아연(Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)의 침적 가능성임. 이와 같은 침적물은 다공성 크러드를 통한 열전달 감소와 원자력연료 피복관의 부식을 증가시킬 수 있으며 크러드 내에 비등집중 현상은 산화아연 또는 규산아연의 용해도 기준치를 초과하는 아연농도를 야기할 수 있음.
- 산화아연의 최소 용해도는 넓은 범위에서 대략적으로 170 ppb인 것으로 pH 6 ~ 8에 대해 확인되었음. 농도 20 ppb 수준의 아연주입 발전소에서 아연석출에 필요한 농축인자는 약 9이며 크러드 두께 및 질량 증발률은 농축인자와 연관성이 확실히 파악되지 않은 상태임. 규산아연은 원자력연료 피복관에 석출될 수 있는 또 다른 아연 합성물로, 산화아연과 같이 PWR 연료 침적물에 한번도 검출된 적은 없으나 PWR 이차 계통 침적물과 BWR 침적물에서 확인되었음. 열역학적 계산 결과 규산아연은 노심 냉각수의 규산질 농도 1 ppm 이하에서 산화아연에 비해 낮은 석출거동을 보여줌. 그러나, 냉각수내 알루미늄, 칼슘 및 마그네슘과 같은 낮은 수준의 기타 불순물은 아연의 용해도를 낮추고 결과적으로 더 복잡한 형태의 규산아연 합성물을 발생시

킬 수 있으며 이런 불순물 제한치에 대한 명확한 기준 확립이 요구되고 있음.

● 수행 범위

- 고객의 원자로 일차계통 아연주입 계획 실행을 위하여 가동중 원전 및 신규 원전에 대하여 아래의 역무를 지원함.
  - 원자력연료 및 노심설계 영향 분석 평가 (원자력연료 건전성·성능 부분 포함)
  - 안전해석 영향 평가 (LOCA·Non-LOCA 분야)
  - 수질감시기준 요건 설정(원자력연료 공급사 역무 범위) 및 운전절차서 검토·의견(필요시)
  - 운전중 CIPS 대응전략 개발
  - 산화막 두께 측정 및 초음파 연료 세정 (별도 요청시)

기술 우수성

- 최신 기술기준 및 고객요구에 부합하는 방법론·도구를 이용한 최선의 결과 제공
- 시운전 단계(고온기능시험 및 출력상승시험 등) 상세 영향 분석 결과 제공

기술 적용현황

● 국내

- 대부분의 WEC형 3 루프 및 OPR1000 발전소 : 한울 1호기(2010년 부터), 고리 3호기(2016년부터), 한빛 3호기(2017년부터) 등 가동원전 16기, 기타 발전소는 추진 중

● 해외

- 가동원전의 30% 이상 : Farelly 2호기(1994년부터)
  - 신규 발전소 HFT 부터 : Tomari 3호기(2008년), Watts Bar 2호기(2016년), Haiyang(2016년), Barakah 1~4호기(2019년부터\*)
  - 신규 발전소 1주기 운전부터 : Angra 2호기(2000년)
- \* 분석 및 기술지원을 KNF가 수행

제공 가능 품목

- 노심 안전성 평가 보고서
- 원자로 수질감시 요건(원자력연료 공급사 역무 범위)
- 규제기관 심사·인허가 지원
- 주기별 운전 CIPS 대응전략

기술완성도 (TRL)

- 양산 및 초기시장 진입

사업 방향

- 기술 이전
- 라이선싱
- 공동 연구
- 용역 수행
- 기타