

국내 가압경수로형 원전 내 아연주입 실적용을 위한 방안

Strategy for Implementing Zinc Injection in Korean PWRs

이두호, 강덕원, 손욱
한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요약

원자로 계통의 선량을 저감이나 PWSCC 완화 측면에서 비등수형 원자로나 가압경수로형 원자로에 아연을 주입하는 기술은 기술적으로나 경제적으로 선택가능한 대안으로 자리매김 하고 있다. 가압경수로형 원전의 경우 1994년, 미국 Farley-2 원전, 10주기에 처음으로 아연주입 시범 프로그램이 적용된 이래 현재는 웨스팅하우스사에서 설계한 8기의 원전(미국)과 독일의 지멘스사에서 설계한 4기의 원전(3기는 독일, 1기는 브라질)에 실적용되고 있다. 본 연구는 해외 원전의 아연주입 적용 경험과 결과를 요약, 정리하여 국내 PWR 원전의 아연주입 적용을 위한 방안을 수립하는데 목적이 있으며, 본 연구를 통해 아연주입이 선량을 저감측면에서는 계통에 별다른 영향을 미치지 않고 만족할만한 결과를 줄 수 있을 것으로 검토되었다.

Abstract

Zinc injection of the boiling water reactor (BWR) or pressurized water reactor (PWR) coolant system is now technically and economically feasible as a method to mitigate dose rate and primary water stress corrosion cracking (PWSCC). At present zinc has been added to the reactor coolant systems of eight Westinghouse designed PWRs in U.S. and four Siemens designed PWRs (three in Germany and one in Brazil) since the first demonstration program was initiated at Farley Unit 2 during Cycle 10 in 1994.

The object of this study is to establish the strategy associated with use of zinc for the target Korean plant by reviewing the results of the operating experience obtained at all PWRs implementing adding zinc. It is concluded that from this study, zinc injection is expected to lower shutdown dose rate without any operating restrictions or other negative effects on plant systems and components.

1. 이론적 배경

원자로 일차계통에 아연을 주입하여 얻을 수 있는 선량율과 부식율 감소효과는 기본적으로 주입된 아연과 일차계통 표면의 산화막과의 반응으로 설명될 수 있다. 일반적인 PWR 환경에서 Alloy 600/690과 스테인레스강의 표면에는 그림 1과 같은 이중 산화막 층(duplex oxide layer)이 생성되는데, 주로 안쪽에는 크롬이 부화된 크로마이트(chromite) 층이, 바깥쪽에는 철이 부화된 페라이트(ferrite) 층이 자리잡게 된다[1]. 이중 산화막 층은 서로 다른 메커니즘에 의해 형성된다. 이중 층의 안쪽에 자리잡은 산화막은 산화물/금속(모재)의 계면에서 생성되며, 원자로 냉각재가 산화막 층의 미세기공(micropores)을 통한 확산과정에 의해 모재의 표면으로 이동하여 재질과의 반응에 의해 산화물을 형성하게 된다. 반대로 바깥쪽에 자리잡고 있는 산화막 층은 원자로 냉각재와 산화물과의 계면에서 형성되며, 산화물/금속의 계면에서 생성된 이온들이 산화물의 입자 경계면을 따라 확산되어 냉각재와의 계면에서 냉각재와 지속적인 반응을 통해 더 많은 산화물들을 형성, 성장하게 된다[4].

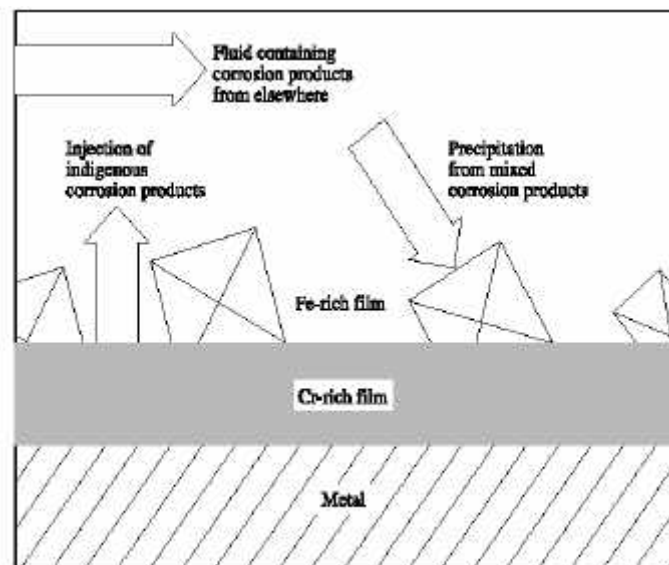


그림 1. 원자로 일차계통에 형성되는 산화막층의 개략도

이중 산화막 층은 모두 스피넬 구조로 이루어져 있는데, 스피넬 구조란 2가, 3가의 금속 양이온들과 이를 둘러싸고 있는 산소 음이온으로 구성된 일종의 혼합 금속산화물의 형태로 규정된다[2]. 일반적으로 안쪽에 형성되어 있는 산화막 층의 화학적 조성은 $\text{Co}_x\text{Ni}_y\text{Fe}_{1-x-y}\text{Cr}_2\text{O}_4$ 로, 바깥쪽의 산화막 층은 $\text{Co}_x\text{Ni}_y\text{Fe}_{1-x-y}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 로 표현될 수 있으며, 대개 $x+y < 1$ ($x \ll y$)의 관계를 나타낸다. 스피넬 구조는 사면체와 팔면체 내에 Ni, Co, Cr, Fe, Zn와 같은 금속원소들을 상당량 포함할 수 있으며, 이러한 2가, 3가의 금속 양이온의 분포 형태에 따라 normal spinel과 inverse spinel로 구분된다.

Normal spinel (예; FeCr_2O_4 , NiCr_2O_4 , CoCr_2O_4 , ZnCr_2O_4 , ZnFe_2O_4 등)에서는 2가의 양이온들(예; Zn^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{2+} , Co^{2+} 등)은 사면체 내에, 3가의 양이온들(예; Fe^{3+} , Cr^{3+} 등)은 팔면체 내에 위치하며, inverse spinel(예; Fe_3O_4 , CoFe_2O_4 , NiFe_2O_4 등)에서는 2가의 양이온들이 팔면체 내에, 3가의 양이온들은 사면체와 팔면체 내에 위치하게 된다. 스피넬 구조에서의 이러한 금속 이온들의 분포는 각각의 원소가 가지는 site preference energy에 의해 결정될 수 있다(그림 2 참조) [5].

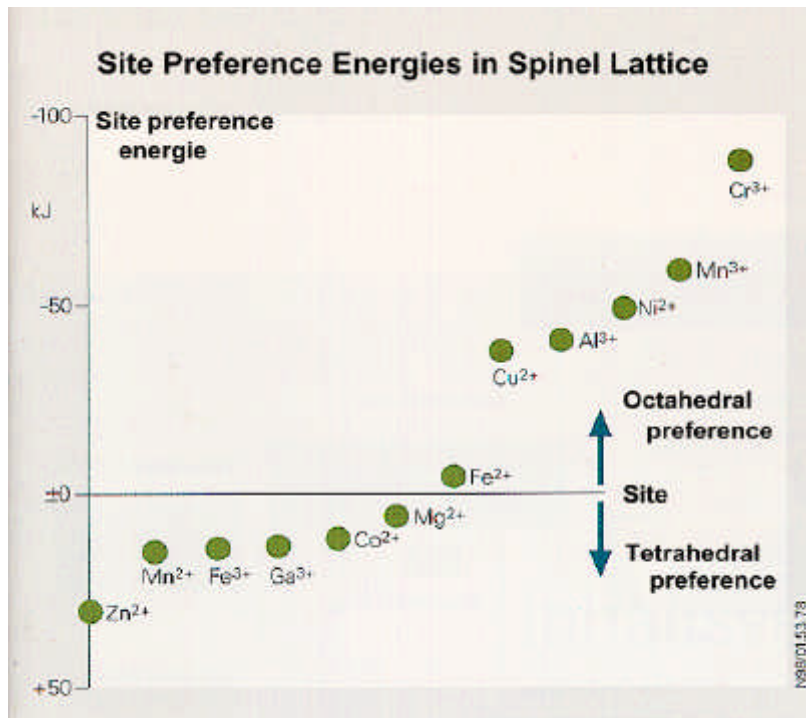


그림 2. 스피넬 구조의 각 배위 사이트 내 금속 이온들의 결합에너지

그림에서 Cr^{3+} 의 경우 팔면체 자리에 대해 높은 preference energy를 가지고 있으므로 다른 이온들보다 우선적으로 팔면체 내로 치환해 들어가 자리잡게 되고, Ni^{2+} , Co^{2+} 와 같은 금속 이온들은 사면체 내에 자리잡게 되어 결과적으로 크로마이트 (MeCr_2O_4)는 normal spinel 구조를 갖게 된다. 반대로 Fe^{3+} 의 경우 사면체 내에 우선적으로 들어가 결합하려는 경향이 크기 때문에 먼저 사면체 위치를 차지하게 되며, 사면체 자리를 다 채우고 남은 Fe^{3+} 는 다시 팔면체 내로 들어가게 된다. 한편 2가의 양이온들은 Fe^{3+} 가 채우고 남아있는 팔면체 자리로 들어가 결합하게 되므로, 결과적으로 페라이트(MeFe_2O_4)는 inverse spinel 구조를 갖게 되는 것이다[1,3].

Cr^{3+} 와 Zn^{2+} 이온은 각각 팔면체와 사면체 내로 들어가 결합하려는 site preference energy가 가장 큰 원소들이므로 아연의 경우 열역학적으로 페라이트 스피넬 구조보다는 크로마이트 스피넬 구조로 안정한 화합물을 형성하는 한편, 기존의 Ni^{2+} , Fe^{2+} , Co^{2+} 이온들에 비해 훨씬 안정한 화합물을 형성하려는 경향성이 크기 때문에 위 금

속 이온들이 차지하고 있던 사면체 자리로 치환해 들어가게 된다. 즉 냉각재 내에 아연이 존재하는 경우 기존 산화물의 사면체 내에 존재하던 니켈, 코발트 등은 아연에 의해 치환되어 냉각재로 용출되므로(치환되어 나온 양이온들은 CVCS 계통의 수지탑에서 제거된다)[2], 결국 기존의 일차계통 표면에 존재하던 산화막은 아연으로 치환된 안정된 산화막으로 변화하게 된다[6]. 이렇듯 아연에 의해 계통 산화막이 보다 안정한 화합물 형태로 변화됨에 따라 산화막의 성장이 느려지게 되고, 이에 따라 부식속도 역시 저하되는 효과를 나타내는 것으로 해석되고 있으며[2], 또한 이러한 산화막 형태의 변화로 인해 다른 2가의 금속 양이온들(예; ^{60}Co , ^{58}Co 등)이 산화막으로 유입되려는 경향을 감소시켜 주요재질 표면의 선량율을 낮추게 되는 직접적인 원인으로 작용하게 된다. 한편 이에 대한 발전소 실적용 경험에 따르면 주입된 아연에 의해 안정한 화합물이 형성되면서 핵연료 계통에서 방사화되어 새로 생성된 ^{60}Co 이 더 이상 산화막 내로 유입되지 않는으나, 산화막 최하부층에 이미 자리 잡고 있던 ^{60}Co 의 경우에는 앞서 언급했던 아연에 의한 치환작용이 잘 일어나지 않고 있음이 밝혀졌으며, 이를 바탕으로 아연주입에 의해 얻을 수 있는 최소한의 연간 선량율 저감효과는 산화막 최하부층에 자리 잡고 있던 ^{60}Co 의 반감기에 의한 자연 감소분인 10 % 정도로 예상할 수 있다[7,8,9].

아연주입 효과를 설명하기 위하여 위에 언급한 Site Preference Energy Model 이론은 엄밀히 말해서 산화막 내부층을 형성하고 있는 크로마이트에 대해서만 적용될 수 있다. 산화막 외부층은 대부분 Fe^{3+} 가 사면체 자리를 채우고 있는 inverse spinel 구조인 페라이트로 구성되어 있으며, 결과적으로 페라이트에 대한 아연의 친화도 (affinity)는 크로마이트의 경우보다는 훨씬 떨어지게 된다[7].

PWR 일차계통 환경에서 CoO 는 NiCr_2O_4 를 비롯한 모든 형태의 산화막으로 용해되어 들어갈 수 있는 반면, ZnO 의 경우 NiCr_2O_4 와 NiFe_2O_4 등의 산화막에 용해되어 들어가지 않고 안정화되어 입자 경계면에 잔류할 가능성이 있다. 입자 경계면에 충분한 양의 ZnO 가 존재하는 경우 일종의 blocking agent로 작용하여 계통 재질로부터 산화막으로 이동하려는 이온 성분의 입자 경계면을 통한 확산이 억제되어 산화막 층의 성장이 억제되는 한편, 냉각재에서 산화막으로의 방사화된 핵종의 유입이 억제되어 선량 감소효과가 나타나게 된다. 고온의 냉각재 환경에서 코발트와 아연 이온의 입자 경계면에서의 확산계수는 평균 확산계수(bulk diffusion rate)에 비해 4배 정도 큰 $10^{-15} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 정도로서 입자 경계면을 따라 발생하는 반응의 중요성을 알 수 있다. 반면 이러한 Boundary Incorporation Model로는 일차계통에 아연이 주입되면서 나타나는 부식생성물(주로 니켈과 철)의 급격한 용출현상을 설명할 수 없어 아연주입에 의한 효과를 완전히 표현하진 못하고 있다. 이상의 Boundary Incorporation Model에 대해 요약해보면 원자로 일차계통에 아연이 존재하는 경우 스피넬 구조의 빈자리나 구조적인 결함이 감소되면서(그림 3 참조), 산화막층을 통한 이온들의 이동이 억제되어 부식율과 부식 방출율을 억제되고 선량율 또한 저감되는 효과를 나타내는 것으로 해석할 수 있다[10].

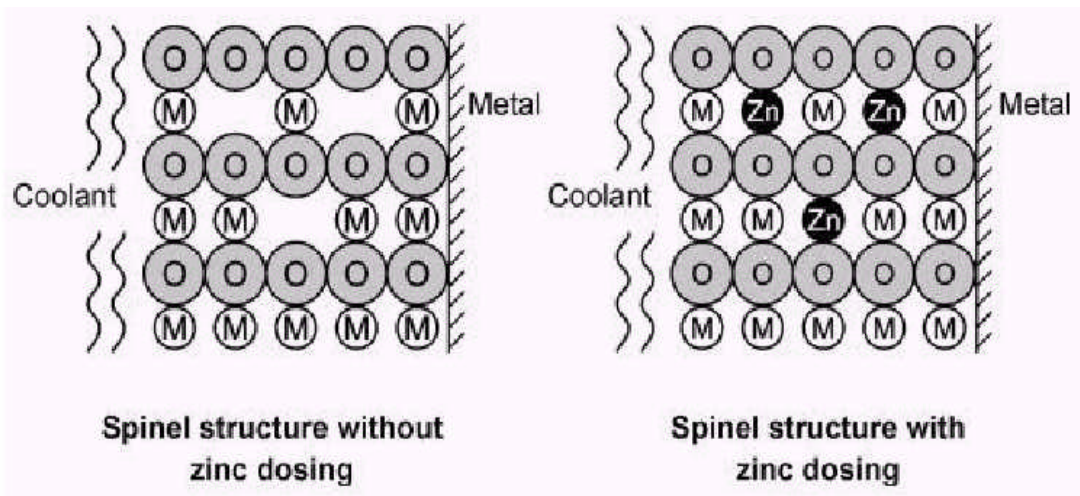


그림 3. 아연주입의 효과

아연주입에 의한 효과를 요약해보면 다음과 같다. 아연은 크롬과 함께 열역학적으로 보다 안정한 형태의 스피넬 산화물을 형성하게 된다. 아연이 주입되면 일차계통 표면에 이미 생성되어 있던 크로마이트의 사면체 자리는 아연으로 치환되어 채워지게 되고, 2가의 양이온이나 방사성 핵종들은 치환되어 냉각재로 빠져 나오게 된다. 열역학적인 계산에 따르면 이러한 치환효과는 페라이트에서는 훨씬 작게 나타나는 것으로 알려져 있다. 한편 치환되어 나온 이온들은 일시적으로는 냉각재의 부식생성물 함량을 증가시키게 되나, 계속적으로 아연이 주입되어 산화막 층의 재구성 과정이 완료되면 냉각재로 방출되는 부식생성물의 양은 다시 감소하게 된다. 따라서 발전소에 아연을 주입하는 경우 초기단계에 산화막의 재구성이 일어나는 과정에서 일시적으로 부식생성물의 방출량이 급격히 증가하게 되어 핵연료 계통에 대한 크러드 부하량을 증가시키는 결과를 가져올 수 있으므로, 이러한 산화막 재구성 과정에 대해서는 아연주입 초기단계에서부터 주의 깊게 모니터링하여 필요에 따라서는 적절한 방법을 통해 조절되어야 한다. 이를 위해서는 산화막 층에서 일어나는 물리적, 화학적인 반응에 대한 정확한 이해를 바탕으로 냉각재 내 아연농도를 최적화하는 것이 반드시 필요할 것으로 사료된다[8].

2. 해외 원전의 아연주입 적용 경험

현재까지 아연주입이 실 적용되고 있는 가압경수형 원전은 미국의 Farley 1, 2호기와 Diablo Canyon 1, 2호기, Palisades 원전, Sequoyah 1, 2호기, 그리고 Beaver Valley 1호기와 독일의 Biblis-A&B 원전과 Obrigheim 원전, 브라질의 Angra-2 원전 등 8개 원전, 12개 호기에 달하고 있으며(그림 4 참조), 이들 원전의 경험으로부터 원자로 냉각재에 아연을 주입하는 기술은 매우 쉽고 단순하며, 주입 유량이나 주입액 농도를 변화시킴으로서 5~40 ppb의 설정값으로 제어하는 데에도 아무런 어려움이 없음을 확인하였다.

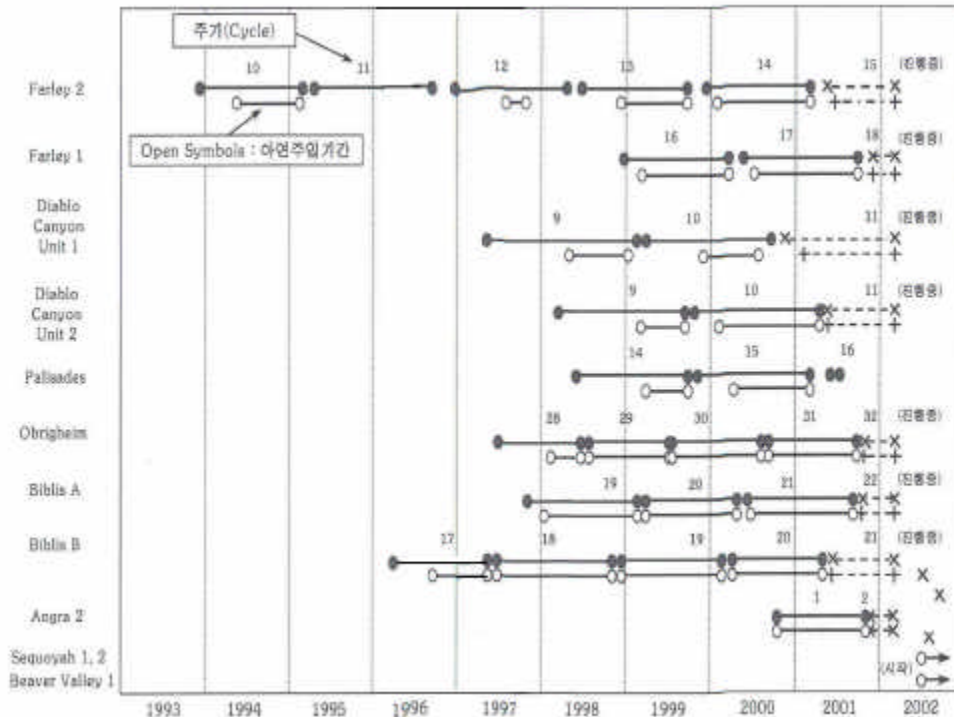


그림 4. 가압경수형 원전의 아연주입 현황

냉각재 시료의 아연 농도를 원하는 수준으로 조절하기 위해서는 아연 농도의 분석을 위한 냉각재 시료를 적절한 주기에 맞게 채취하여 정확한 분석을 실시하는 것이 중요한 과정이 되는데, 이를 위해 평균 일 1회의 냉각재 시료를 채취하여 산성화시키는 전처리 단계를 거쳐 AAS나 ICP-MS 등의 장비를 이용해 분석하고 있는 것으로 조사되었다. 정해진 주기동안 일차계통으로 순수하게 유입된 아연의 양은 각 발전소마다 약간의 차이가 있지만 대략 1~5 kg의 범위에 속하고 있으며, 아연주입 초기 단계에는 주입된 아연으로 인한 일차계통 표면 산화막의 재구성 반응으로 인해 상당량의 ^{58}Co , ^{60}Co 및 Ni이 냉각재로 용출되어 나오게 되나 아연주입이 계속되면서 이러한 반응이 새로운 동적 평형상태를 찾아 나감에 따라 방사성 코발트와 니켈의 방출량은 이후 주기부터는 점차 감소하게 됨을 확인할 수 있었다. 한편 아연주입에 따른 방사성 코발트와 부식생성물의 변화 양상은 각 발전소별로 다르게 나타나는 특징을 보이고 있는데, 이는 아연주입에 따른 영향이 각 발전소의 설계상의 차이나 수화학 운전이력, 또는 주입된 아연의 농도에 따라 달라질 수 있음을 의미한다.

현재 아연주입을 실적용하고 있는 모든 가압경수형 원전에서 아연주입에 따른 분명한 선량을 저감효과를 나타내고 있는 것으로 조사되었다. 5 ppb 수준으로 depleted zinc를 주입하고 있는 독일 원전들의 경우 매 주기별 12~14 %의 선량을 감소 현상을, 30~40 ppb의 natural zinc를 주입하고 있는 미국 원전들의 경우 아연주입에 의해 매 주기별로 15~16 %의 선량을 저감효과를 보이는 것으로 나타났다.

한편 발전소 실운전 경험으로부터 5 ppb의 아연 농도만으로도 충분한 선량을 저감 효과를 나타낼 수 있으며, 이 경우 적용 효과를 극대화하기 위하여 depleted zinc를 사용하는 것이 바람직함을 알 수 있었다.

아연주입에 의해 계통 재질의 부식율이나 부식 방출율을 낮출 수 있다는 데에는 별다른 이견이 없으나, PWSCC 억제효과에 대해서는 이를 충분히 뒷받침해 줄 수 있는 현장 실적용 결과가 아직 부족한 것으로 조사되고 있다. PWSCC의 억제측면에서 아연주입을 진행중인 미국 원전의 실적용 결과를 살펴보면, 아연주입 이후 PWSCC 결함으로 인해 관막음 조치가 수행된 전열관의 수가 꾸준히 감소하는 경향을 나타내고 있으나 검사방법 등의 변화로 인해 이러한 감소 경향이 전적으로 아연주입에 의한 것인지는 아직 결론 내리기에는 이른 단계로 평가하고 있다(그림 5 참조).

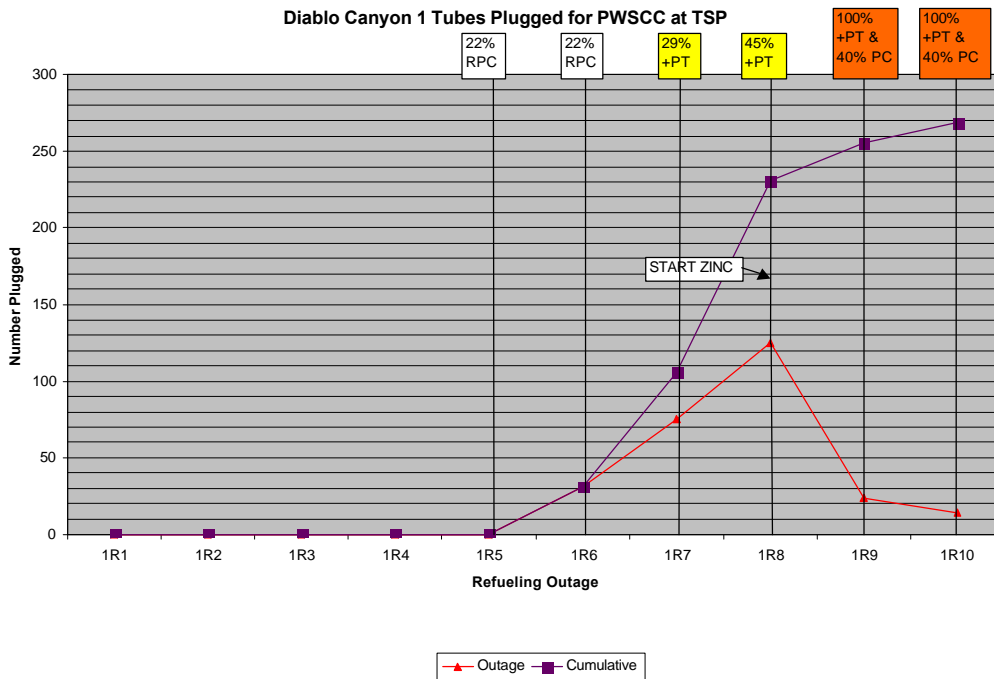


그림 5. 검사방법의 변화와 아연주입 적용에 따른 PWSCC 감소 경향

아연주입을 실적용 중인 모든 원전에서 아연주입으로 인한 핵연료 계통의 건전성에 별다른 영향을 받지 않았던 것으로 평가되고 있다. 다만 Farley 2호기의 10주기 말 핵연료 와전류탐상검사에 의한 핵연료 피복관의 산화막 두께 측정결과, 아연주입 적용 주기에서의 산화막 두께가 아연주입 전주기 결과로부터 예상되었던 것보다 두꺼운 것으로 나타났으나 이에 대한 상세분석을 통해 이는 아연주입에 의한 것보다는 high duty fuel design에 의한 것으로 평가되어 아연주입이 핵연료 피복관의 부식 거동과는 무관함을 알 수 있었다. 아울러 원자로 냉각재 펌프 밀봉장치의 누설율과 축(shaft)과 프레임의 진동에 대한 조사결과 역시 아연주입으로 인한 문제점이 전혀 없는 것으로 나타났으며, 원자로 냉각재 계통의 각종 밸브류의 유지보수

이력에도 아연주입 전·후에 큰 차이가 없는 것으로 조사되었다.

3. 국내 적용을 위한 수행전략

해외 원전의 경험에 비추어 국내 원전에 아연주입기술을 적용하는 경우에는 다음과 같은 관점에서 진행되어야 할 것으로 판단된다. 먼저 각 발전소의 아연주입 적용시기는 가급적 빠른 것이 좋은데, 이는 적은 양의 아연만으로도 산화막의 재구성 반응이 완료될 수 있어 일차계통에 미치는 영향이 최소화될 수 있으며, 아울러 보호성 높은 산화막이 일찍 형성되면서 아연주입에 의한 효과를 극대화할 수 있기 때문이다. 현 시점에서 국내 원전에 아연을 주입하는 경우 선량을 저감측면에 초점을 맞추어 저농도(5 ppb 수준)로 주입하는 방법을 채택하는 것이 가장 바람직할 것으로 판단되는데 이는 운전(안전)상의 여유도를 확보할 수 있다는 장점 이외에도 아연주입 운전 초기에 주입된 아연으로 인한 부식생성물의 방출현상을 보다 적절하게 조절할 수 있어 핵연료 계통에 침적되는 크러드의 양을 최소화할 수 있는 장점을 가질 수 있기 때문이다. 아연 농도의 조절을 위해서는 평균적으로 하루에 1개의 시료를 채취해 분석하는 것으로도 충분할 것으로 판단되며, 일차계통의 산화막이 재구성되는 과정을 모니터링하기 위해서는 냉각재 내의 철과 니켈의 함량에 대해서도 지속적인 분석이 요구되는 바, 아연 농도뿐만 아니라 철과 니켈의 함량도 저농도 수준까지 동시에 분석이 가능한 ICP-MS를 이용하는 것이 가장 효과적일 것으로 여겨진다. 선량을 저감측면에서 아연주입 운전을 고려하는 경우 natural zinc보다는 depleted zinc를 사용하는 것이 주입효과를 극대화할 수 있다는 측면에서 훨씬 유리하며, 이 경우 5 % 미만의 depleted(in ^{64}Zn) zinc를 사용하는 것만으로도 충분한 것으로 판단된다. 한편 계통 내 30~40 ppb의 아연을 주입하여 PWSCC 억제효과를 얻고자 하는 경우에도 처음 1~2 주기 동안에는 선량을 저감측면에서 접근하는 방법과 동일하게 5 ppb 수준으로 아연을 주입하여 계통 산화막과 주입된 아연에 의한 반응이 충분히 평형상태에 도달하도록 한 후에 원하는 목적에 맞게 주입되는 아연의 농도를 단계적으로 증가시키는 방안을 선택하며, 특히 high duty plant나 비정상 축방향 출력편차(AOA; Axial Offset Anomaly) 발생이력이 있는 발전소의 경우 주기 초반부터 아연을 주입하는 것보다는 pH 운전체계가 안정화되어 가는 주기 중반부터 아연을 주입하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

이상의 결과를 종합해보면, 아연주입으로 인해 재질의 건전성이나 핵연료 계통의 건전성에 해로운 영향을 주지 않으면서, 계통 표면에 안정한 산화막을 형성하여 큰 폭의 선량을 저감효과와 계통 재질의 부식율과 부식 방출율을 낮추는 효과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었으며, 다소 정량적인 실적용 평가결과가 부족하긴 하지만 대체적으로 아연주입으로 인해 PWSCC를 억제하는 효과를 나타내는 것으로 평가하고 있다. 아연을 주입하는 기술 그 자체는 매우 단순하여 발전소 실적용에 수반되는 별다른 문제점은 없을 것으로 판단되나, 아연주입기술이 운영중인 발전소에 적용된다는 관점에서 대상 발전소에 대한 광범위한 사전 평가작업이 수행되어야 하

는데 이 평가작업에 필요한 기반기술들을 확보하는 것이 본 아연주입 기술 적용의 성공적인 수행을 위한 중요한 관건이 될 것으로 여겨지며, 이러한 기반기술의 확보를 통해 국내 원전수화학 분야의 기술자립에도 크게 기여할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 이상의 해외 원전의 아연주입 적용결과와 국내 원전의 아연주입 시범적용 프로그램 운영을 위한 전략을 요약하면 다음의 표 1과 같다.

표 1. 해외 원전의 아연주입 경험과 국내 원전의 수행전략

해외 원전의 아연주입 적용결과	
선량을 저감 측면	· 아연주입을 실적용 중인 모든 발전소에서 확실한 적용효과를 나타냄
PWSCC 억제 측면	· 계통 재질의 부식율, 부식 방출율을 낮출 수 있음 (크러드 발생량 저하 → AOA 발생확률 낮춤) · 대체적으로 긍정적인 효과를 나타낼 수 있을 것으로 기대되고 있으나 확실한 결론을 내리기엔 미흡함
핵연료 건전성 측면	· 별다른 영향 없음 (아연주입 초반기에는 일시에 많은 부식생성물의 방출현상이 발생되지 않도록 주의)
계통 양립성	· RCP 성능, 각종 밸브의 교체이력에 별다른 변화가 없으며, 방사성폐기물 관련 문제도 크지 않음
국내 원전의 아연주입 시범적용 프로그램 운영을 위한 수행전략	
주입 목적	· 선량을 저감 (5 ppb 수준/5 % 미만의 depleted zinc)
주입 및 분석법	· CVCS 계통의 Hot Leg Sampling Line을 통해 주입 · 별개의 아연주입장치를 제작, 활용 · ICP-MS를 활용하여 일 1회 분석 실시 (아연, 철, 니켈 함량의 동시 분석)
권고 사항	· 별도의 감시프로그램 수립 및 운영 - 계통 선량을 평가를 위한 프로그램 - 핵연료 계통의 건전성 평가 프로그램 - 계통 양립성(compatibility)에 대한 평가 프로그램

참고문헌

- [1] D.H. Lister, R.D. Davidson and E. McAlpine, "The mechanism and kinetics of corrosion product release from stainless steel in lithiated high temperature water", Corrosion Science. 27, p.113-140, 1987.

- [2] M. Juergensen, D. Sommer, B. Stellwag, "Zinc injection for further reduction of radiation fields at Obrigheim nuclear power plant", *Nuclear Energy*, 40, 2001.
- [3] D.H. Lister, "Effects of zinc on out-core corrosion process", Presentation at EPRI Robust Fuel Program, Working Group 1 Meeting, Las Vegas, Nevada, U.S. Feb. 14-15, 2002.
- [4] J. Robertson, "The mechanism of high temperature aqueous corrosion of stainless steels", *Corrosion Science*, Vol. 32, No. 4, 1991.
- [5] A. Miller, "Distribution of cation in spinels", *J. Appl. Phys.*, 30, 24s, 1959.
- [6] J. Korb, B. Stellwag, "Thermodynamics of zinc chemistry in PWRs - effects and alternatives to zinc", *Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 7*, BNES, p.566-572, 1996.
- [7] D. Nieder, B. Stellwag, "Zinc addition for radiation reduction : Status and experience gathered in German PWRs", *International Symposium Fontevraud IV*, 1998.
- [8] M. Juergensen, D. Sommer, B. Stellwag, "Zinc injection for further reduction of radiation fields on German PWR plants; A status report", *Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 8*, BNES, 2000.
- [9] D. Nieder, B. Stellwag, R. Ruf, J. Haag, M. Jurgensen, "Zinc injection in the primary coolant of PWR for dose rate reduction; Experience from Biblis and Obrigheim", *Power Plant Chemistry 2(5)L*, 2000.
- [10] J.N. Esposito, G. Economy, W.A. Byers, J.B. Esposito, F.W. Pement, R.J. Jacko and C.A. Bergmann, "The addition of zinc to primary reactor coolant for enhanced PWSCC resistance", *Proceeding of 5th International Symposium on Environmental Degradation of Material in Nuclear Power Systems - Water Reactors*, p.495-501, 1991.