

이온분석법을 이용한 경수로 증기발생기 세관 On-Line 누설 감시기술

강덕원, 김승일, 김현기, 허준, 성진현
한국정수공업(주), 경기도 안산시 목내동 400
world2is@haji.co.kr

1. 서론

원자로에서 생성한 열을 증기로 바꾸어 터빈 축으로 전달하는 증기발생기는 장시간의 운전으로 인해 열화, 튜브의 피로 및 상부다발 침적물에 의한 부식 등으로 종종 세관파단(Tube Rupture) 현상이 발생한다. 이러한 1차계통 냉각재의 2차계통으로의 누설(Primary-to-Secondary Leak, PSL) 발생은 방사성 물질의 외부환경 오염야기와 원전 안전성 홍보 및 대외 이미지 관리에도 나쁜 영향을 미치게 된다. 따라서, 모든 원자력발전소는 원자로 운전정지 및 방사능 누설사고를 사전에 방지하기 위하여 증기발생기 세관 파단 전에 발생하는 2차측으로의 누설(Leak Before Break, LBB)을 실시간으로 감지해 오고 있다.

본 논문에서는 기존의 경수로 원전에서 사용하고 있는 누설감시방법의 원리와 특징을 간략히 소개하고 원자로 출력 20% 이하 저출력 및 비상 정지 시에도 SG세관의 누설 감시가 가능한 기존 누설감시의 한계를 극복할 수 있는 이온분석법을 이용한 누설 감시법에 대해 소개하고자 한다.

2. 본론

2.1 기존 SG 세관 누설 감시

현재 가압경수로형 원자력발전소에서 누설여부 및 누설량을 감시하기 위해 사용하고 있는 방법으로는 1) ^{16}N 을 이용하는 방법 2) ^{133}Xe 을 비롯한 불활성 기체를 이용하는 방법 3) RCS에 인위적으로 ^{40}Ar 을 주입해 ^{41}Ar 하는 방법 및 4) 취출수의 ^3H 농도를 이용하는 방법 등이 있으나, 1995년, 미국 EPRI에서 제정한 PSL 감시 가이드라인에서는 ^{16}N 감시법을 적용하도록 권고하고 있고, 이에 따라 대부분의 경수로에서는 이 기술을 채택하여 증기발생기 주증기 출구단에 설치하여 감시, 운영해오고 있다.

2.1.1. ^{16}N 감시 기술

^{16}N 감시법은 측정감도는 우수하나 ^{16}N 의 반감기가 매우 짧기 때문에 원자로의 운전이 정지되거나

원자로 출력 20%이하에서는 중성자 플럭스가 충분히 형성되지 않아 사용이 불가능한 단점이 있다. 실제로 2002년 울진 4호기에서 O/H기간 중 저출력 운전 때 다른 ^{16}N 누설감시기의 누설감시능력 상실로 증기발생기 세관파열(SGTR)사고가 발생하여 45m^3 의 냉각수가 유출되는 사고가 일어난 바 있다.

2.1.2. 복수기 방출기체 방사능 감시 기술

불활성 방사성기체를 이용한 방법으로 원자로 냉각재중에 방사성 핵종인 불활성기체(Ar-41 , Kr-85m , Kr-88 , Kr-87 , Xe-133 , Xe-135 , Xe-135m 등)을 이용하며 Condenser off-gas system의 증기식 공기추출기계통(SJEA) 또는 진공펌프계통(Vacuum Pump System)에 총베타 방사선 감시기를 설치하여 이들의 총 베타방사선을 측정하여 누설율을 계산하는 방법으로 반감기가 ^{16}N 에 비해 상대적으로 길기 때문에 원자로 출력 20% 이하에서도 누설감시가 가능하다. 그러나, ^{41}Ar 을 제외한 핵분열 생성물의 RCS 내 농도는 핵연료의 손상정도에 영향을 많이 받으므로 정확성이 높지 않은 단점이 있다.

2.1.3. ^{40}Ar 주입 기술

인위적으로 ^{40}Ar 을 주입하여 방사화에 의해 계통내 ^{41}Ar 의 농도를 높여줌으로써 누설감시 감도를 향상시키는 방법으로 Diablo Canyon 원전과 Comanche Peak 원전에서 적용하고 있는 방법으로 감도향상을 통해 미량의 누설도 감시가 가능한 장점이 있으나 계통내에 방사능을 인위적으로 증가시킨다는 점에서 원전 운영자들의 거부감이 있고, 누설발생시 어느 증기발생기에서 누설되고 있는지는 확인할 수 없어 누설이 감지되면 증기발생기의 시료 각각을 독립적으로 채취하여 파악하여야 한다는 단점이 있다.

2.1.4. ^3H 감시 기술

취출수로 방출되는 액상시료내의 삼중수소의 방사능을 측정하여 누설을 감시하는 기술로서 hide-out 또는 hideout return등에 대한 고려가 필요 없으며 정확도가 우수한 장점이 있으나, 긴 반감기로 인하여 평형상태 도달에 장시간이 소요

되고 그에 따라 새로운 누설 발생 시에 대한 감도가 저하되는 단점이 있다.

2.2 Li 이온을 이용한 온라인 감시법

Lithium은 RCS내에서 운전모드에 따라 최저 100ppb에서 최고 2,000ppb의 농도범위에서 존재하기 때문에 PSL 발생에 대한 누설지시자로서 이용이 가능하지만 1차계통내에서의 농도가 매우 낮은 상태이므로 누설시 2차측에서 감지하기 위해서는 ppt 수준의 극미량 농도의 측정 및 분석이 필요하며 연속적인 시료채취 및 분석이 이루어져야만 실시간 감시의 효과를 얻을 수 있다. 이 기술은 방사성 핵종이 아닌 원자로 냉각재 내에 일정량 함유되어 있는 화학종인 Li의 이온농도를 이용하여 누설을 감지하기 때문에 원자로 출력과는 무관하게 감시할 수 있는 특징이 있다.

2.2.1. 극미량 이온 분석실험

Li을 이용한 누설 감시의 가능성을 확인하기 위해 Lithium standard solution(1,000ppm, KANTO Chemical Co. Inc. Japan)을 희석하여 각각 5, 10, 20, 50, 100ppt의 표준용액을 제조한 후 온라인 이온분석장치를 이용하여 검량선을 작성하고 각 시료에 대해 연속적으로 10회씩 측정하여 측정값의 재현성을 확인하여 보았다.

2.2.2. 검교정 곡선 작성

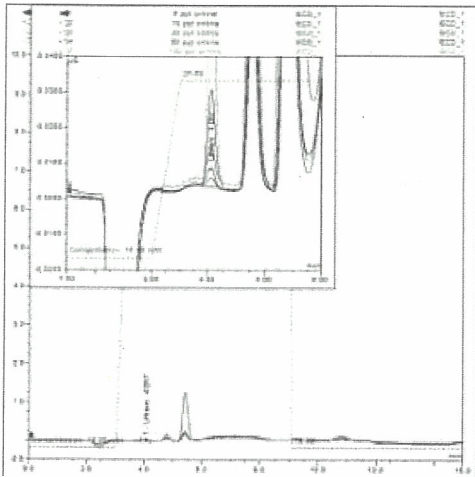


Fig. 1. Analytical result of Li standard solution.

Li On-line IC를 이용하여 유사 조건으로 제조한 시료를 이용하여 측정해 본 결과, 약 4.06min에서 피크가 분리되었고 표준용액으로 작성된 검량선은 상관계수가 0.99986인 직선식으로 나타났다.

2.2.3. 재현성 실험

Fig. 2는 Li농도 5ppt인 표준용액을 온라인 이온 분석장치에 장착하여 연속적으로 10회 측정된 결과를 나타낸 것이다.

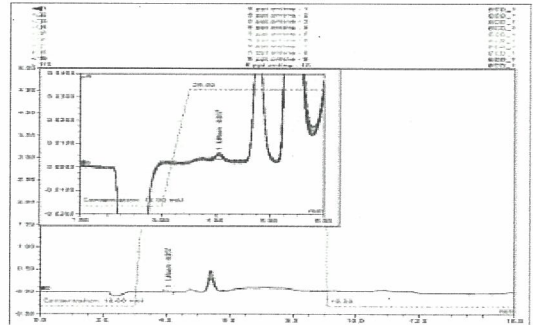


Fig. 2. Analytical results of 5ppt Li solution.

5ppt 용액을 온라인 상태로 연속적으로 10회 측정된 결과, 유사한 결과를 얻을 수 있었으며 10개 측정값에 대한 상대표준편차는 0.326%로 재현성 높은 결과를 얻을 수 있었다. 동일한 방법으로 각각 10, 20, 50, 100ppt의 표준용액을 연속적으로 10회씩 측정된 결과, 각 시료에 대한 표준편차가 각각 1.136%, 1.235%, 0.358%, 0.770%로 재현성 있는 분석결과를 얻을 수 있었다.

3. 결론

증기발생기의 1차측 냉각재의 2차측으로의 누설감시기술으로써 온라인 이온분석법의 적용가능성을 확인하여 보았다. 약 1% 내외의 편차 범위 내에서 ppt수준으로 이온농도를 측정할 수 있었다. 온라인으로 수행한 연속 10회의 측정에서도 유사한 값을 얻을 수 있어, 누설량 계산 프로그램 및 시료 분석시스템의 적절한 조합이 이루어진다면 온라인상에서 ppt 수준의 극미량 누설감시가 가능할 것으로 여겨진다. 이러한 극미량 누설감시 기술은 저출력 및 비정상 원자로 운전상태에서도 증기발생기의 조기 누설의 감시가 가능하기 때문에 원자로 냉각재 내에 함유되어 있는 화학종인 Li을 누설 indicator로 활용시 보다 안정적이고 효과적인 SG 세관 누설감시가 가능할 것으로 기대된다.

4. 참고문헌

[1] “중수로 SG 중수누설 감시장치 개발”, 최중보고서, R-2004-0-150 산업자원부, 2007.