

SCALP 프로그램에 의한 PWR 정지화학 운전해석

나정원 · 성기웅

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

성기방 · 강덕원

전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

국내 PWR 원전에서는 계획예방 정지운전 중의 일차측 정지화학 제어에 의해 노심의 부의 방사선장을 감소시키므로써 작업종사자의 피폭을 최소화하도록 많은 노력을 경주해 오고 있으며, 보다 나은 정지화학 제어를 위해서는 정지운전 자료에 대한 보다 정밀한 평가와 예측이 요구되고 있다. 본 연구에서는 정지화학을 평가하고 정지후 운전시간에 따른 방사능준위의 변화를 예측하기 위해서 계산프로그램(SCALP)을 개발하여 이를 국내 PWR 원전 A에 적용하고 그 정지운전 특성을 해석하였다.

1. 서 론

PWR 원전의 일차측 정지운전 중에는 주요핵종인 니켈 및 Co-58이 산성-환원조건에서 금속형태로 환원되고 산성-산화조건에서 이온형태로 산화되어 냉각재내로 용출되며, 이 방사성핵종들은 이온교환기나 여과재에 의해 제거되므로써 냉각재중의 방사능준위는 감소된다. 따라서, 운전시간 경과에 따른 방사능준위를 예측할 수 있다면, 사전에 적절한 정지운전 계획을 수립하는 것이 가능하다. 이를 위하여, 정지화학 운전중의 정화반감기, 방사능제거량, 제거누적분율, 방사능 방출속도, Co/Ni 비방사능, Co-58/Co-60 방사능비 및 니켈제거량을 계산하기 위한 SCALP(Shutdown chemistry CALculation Program) 프로그램을 개발하고, 이를 국내 원전 A에 적용하여 정지운전 특성을 해석하고자 하였다.

2. 본 문

2.1 정화반감기

정화계통 이온교환기에서 방사성핵종이 제거될 때 시간에 따른 냉각재중 핵종농도는 정화효율이 100 %일 경우 (제염계수가 무한대일 때), 다음과 같은 식

$$C = C_0 e^{-\frac{q}{V}t}$$

으로 주어진다. 정화유량(q)이 크고 냉각재량(V)이 적을수록 냉각재중 핵종농도(C)는 시간에 대해 빨리 감소하게 된다. 정화반감기, $t_{1/2}$ 은 식

$$t_{1/2} = \ln 2 \frac{V}{q}$$

으로 표현된다.

2.2 핵종의 방출량 및 속도식

냉각재로 방출되는 방사성 핵종량은 이산시간에 대해 아래 식으로 주어진다.

$$RQ = \left[(C_{t2} M_{t2} - C_{t1} M_{t1}) + \left(C_0 \frac{(f-1)}{f} \Delta t \right) \right] K$$

위 방출량식에서 우변의 둘째 항은 정화계통 이온교환기에 의해 제거되는 양을 나타내고 첫째 항은 제거된 양만큼 냉각재중 핵종농도의 감소를 나타낸다. 따라서 방출량식에서 RQ는 구조재에서 일차계통 냉각재로 방출되는 핵종의 순수한 방출량을 나타내며, 방출속도는 이산시간에 대해 다음 식으로 계산된다.

$$RR = \frac{RQ}{\Delta t}$$

방출량과 속도식은 정지운전의 효과를 평가하는 진단목적으로 유용하게 사용되어 진다.

2.3 Co-58의 비방사능

Co-58의 주방출원은 정지운전기간중 어느 시점에서든 니켈의 주방출원과 같다고 가정한다면, 정지기간중 제거되는 노심외부 방사능량은 냉각재중 Co-58의 비방사능 수치 (Co-58/Ni Ci/g)와 냉각재 화학데이터로부터 추정될 수 있다.

노심 평균 비방사능값은 0.2 ~ 1.5 Ci/g 범위이고 노심외부 crud 침적물의 비방사능값은 대개 0.05 ~ 0.1 Ci/g 범위이다. 정지운전 기간중의 Co-58 비방사능값으로부터 노심 비방사능값에서 노심외부 비방사능값으로 변화하는 시점을 판단하여 Co-58 냉각재 비방사능이 노심내에서 발생하는지 노심외부에서 발생하는지의 여부를 판단할 수 있다.

3. 결 과

3.1 정지운전중 1차계통 화학

Fig. 1에 국내원전 A의 정지운전중 수화학 조건을, Fig. 2에 냉각재 방사능준위를 시간에 따라 나타내었다. Co-58은 총방사능의 대부분을 차지하고 있으며 가장 중요한 방사성핵종임을 알 수 있다. Co-60은 Co-58에 비해 방사능준위는 낮지만 Co-58과 유사한 경향을 나타내고 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 정지운전 초기의 산성산화상태에서 방사능 준위가 증가하기 시작하여 과산화수소가 주입된 후 방사능 준위는 첨두값을 나타내고 있는 것을 보여 주고 있다.

3.2 정확반감기

냉각재에 과산화수소가 주입된 후 방사능준위는 첨두값에서 점차 감소하게 되는데, 정화계통의 제염계수가 급격히 감소되기 전까지는 냉각재중 방사능준위의 감소는 거의 정화계통 이온교환기의 반감기에 따르게 된다. 국내원전 A의 정지운전중 방사능준위가 첨두값을 나타낸 이후부터 냉각재 배수직전까지의 방사능준위를 Fig. 3에 나타내었다. 위 방사능준위 데이터에 식

$$C = Co e^{-\frac{t}{T}}$$

을 적용한 결과를 Fig. 3에 실선으로 나타내었다. 이론적으로 유도된 식과 데이터가 잘 일치함을 보여 주고 있으며, 회귀계산 결과 반감기는 8.5 시간으로 계산되었다.

3.3 총방사능 제거량 및 누적분율

국내원전 A의 정지운전중 첨두 방사능값은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 $3.69 \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ 로 정지운전초기의 $0.0328 \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ 에 비해 113 배이다. 총 방사능제거량은 각 이산시간동안에서의 방출량식 우변 둘째 항의 합으로 계산될 수 있다. 국내원전 A의 정지운전중 제거된 총방사능량을 SCALP 프로그램으로 계산한 결과 2313 Ci 이었으며, 정지운전중 제거된 총방사능량은 시간에 따른 누적분율로 Fig. 4에 나타내었다. 과산화수소가 주입되기 전까지의 산성환원상태에서의 누적방사능 분율은 약 25 %로 계산되었다.

3.4 방사성코발트 방출량 및 속도

국내원전 A의 정지운전중 구조재에서 냉각재로 방출되는 방사성코발트의 양과 속도를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 방출량은 전체적으로 양의 값을 나타내고 있는데 이는

냉각재에서 구조재로 재침적되는 현상이 없고 정지기간중 방사성코발트가 구조재에서 냉각재로 방출되는 것을 의미한다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 과산화수소가 주입된 직후의 산화상태에서의 짧은 시간동안에 방사성코발트의 방출률은 첨두값을 나타내었으며, 첨두 방사능값은 약 270 Ci/hr 이었다. 이후 방출률은 급격히 감소함을 보여주고 있다.

3.5 총 니켈 제거량 및 누적분율

니켈은 노심에서 중성자반응에 의해 Co-58을 생성하므로 잠재적 방사선원으로서 대단히 중요한 의미를 갖는다. 그러므로 니켈은 Co-58과 마찬가지로 정지운전기간중 관리해야 할 중요한 인자중의 하나이다. 정지운전 기간중 니켈을 되도록 많이 제거함으로써 다음 핵연료주기에서 발생하는 Co-58의 양을 감소시킬 수 있다.

Fig. 7에 국내원전 A의 정지운전중 냉각재중 니켈과 철의 농도를 시간에 따라 나타내었다. 과산화수소가 주입되기 전까지의 산성환원상태에서는 니켈의 농도가 서서히 증가하여 과산화수소가 주입된 직후의 산화상태에서 급격한 니켈농도의 첨두값을 나타내었다. 이와 같은 현상은 Co-58의 거동과 유사하다. SCALP 프로그램으로 계산한 결과 제거된 니켈의 총량은 2374 g 이었다. 제거된 니켈량을 시간에 따른 누적분율로 Fig. 8에 나타내었으며, 산성환원상태에서의 누적분율은 약 30 %로 계산되었다. 니켈 방출속도 첨두값은 약 280 g/hr 이었다.

3.6 Co-58의 비방사능

국내원전 A의 정지운전중 Co-58의 비방사능을 Fig. 9에 나타내었다. 전반적으로 Co-58의 비방사능값이 0.4 Ci/g으로 높고 과산화수소 주입 전·후의 비방사능값이 급격한 변화를 나타내고 있다. 대체적으로 Co-58은 노심에서 냉각재로 방출된 것으로 판단되고 과산화수소가 주입되기 직전의 산성환원 상태에서는 노심외부에서 제거되는 Co-58의 양이 증가하는 것으로 보인다. 과산화수소가 주입된 후 산성산화 상태에서는 노심에서 제거되는 Co-58의 양이 다시 증가되는 것으로 해석된다.

4. 결 론

PWR 원전 일차측 정지화학 제어에 대한 보다 정밀한 평가 및 예측을 위해 SCALP 프로그램을 작성하였으며, 국내 원전 A의 정지시 일차측 냉각재의 냉각시간에 따른 방사능준위 변화의 예측을 위한 정화반감기, 총방사능 제거량 및 누적분율, 방사성코발트 방출량 및 방출속도, 총 니켈제거량 및 누적분율, Co-58의 비방사능 등을 계산하여 정지화학 제어특성을 해석하였다.

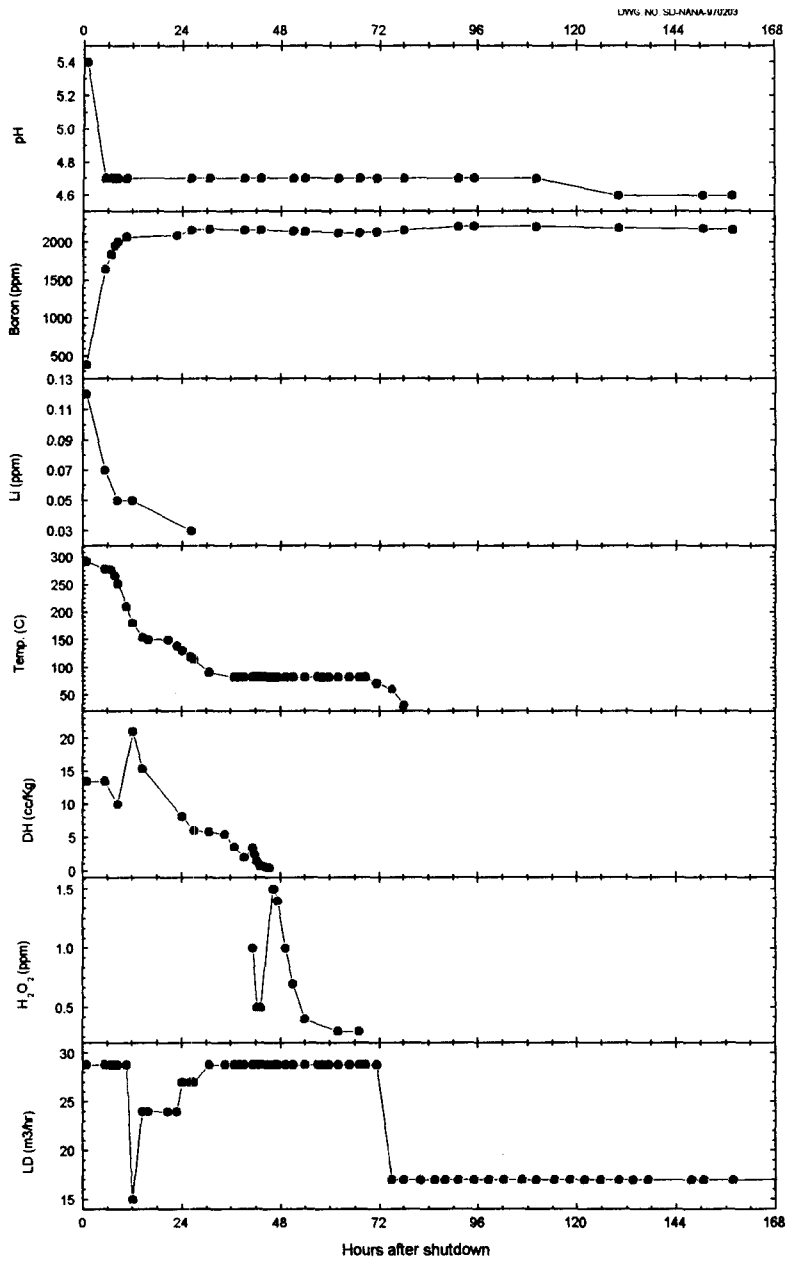


Fig. 1 Primary water chemistry during shutdown for annual inspection of PWR unit A

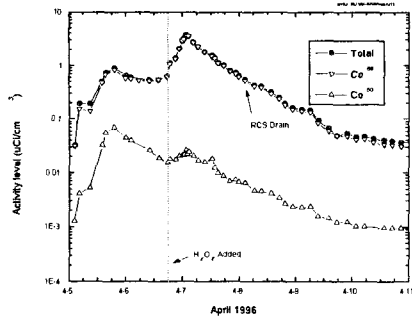


Fig. 2 Activity levels during shutdown operation at PWR unit A

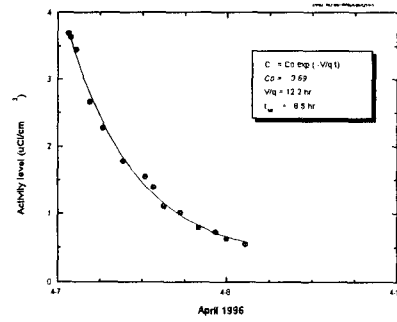


Fig. 3 Calculation of purification half life during shutdown operation at PWR unit A

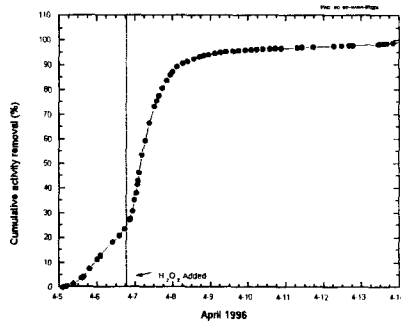


Fig. 4 Cumulative activity removal during shutdown operation at PWR unit A

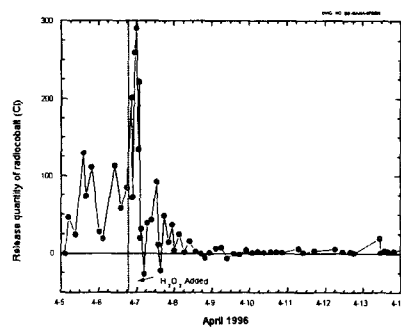


Fig. 5 Release quantity of radiocobalt during shutdown operation at PWR unit A

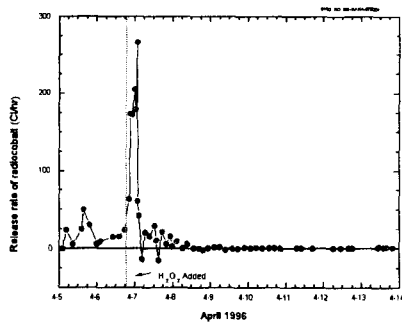


Fig. 6 Release rate of radiocobalt during shutdown operation at PWR unit A

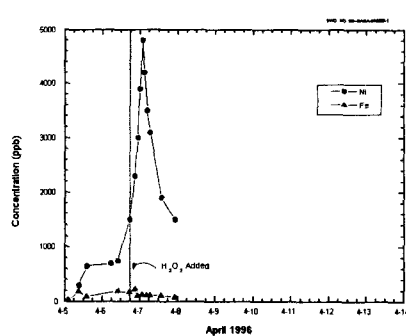


Fig. 7 Concentration of nickel and iron during shutdown operation at PWR unit A

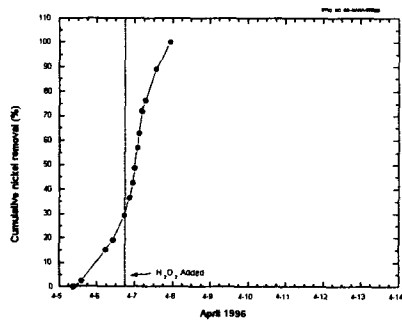


Fig. 8 Cumulative nickel removal during shutdown operation at PWR unit A

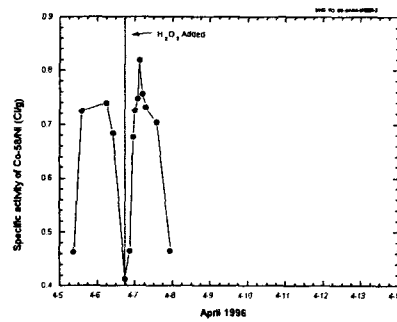


Fig. 9 Specific activity of Co-58/Ni during shutdown operation at PWR unit A