

# 냉각수 정화 장치 내 핵종 누적량 예측 기법

황주호 · 이재민

경희대학교

**계** 통 내의 핵종 누적량에 대한 평가는 원자력발전소가 직면하고 있는 여러 가지 문제 해결에 도움을 줄 수 있다.

이러한 문제 중에서, 방사선 피폭에 관한 ICRP-60과 같은 새로운 규제나 처분장의 안전성 평가 및 허가를 위해서는 가동중 발생하는 방사성 핵종의 양 및 분포를 알아야만 한다.

여과기와 이온 교환 수지는 비록 그 양이 적지만 원전 가동중 발생하는 폐기물 내 방사능의 대부분을 차지하고 있다.

여과기와 이온 교환 수지의 방사능 누적량을 계산하기 위하여 여과기와 이온 교환 수지의 제염 계수 측정 자료가 필요하다.

지금까지는 가동중 측정된 제염 계수를 평균하여 얻은 평균 제염 계수로 방사성 핵종 누적량을 평가하였다.

그러나 오차의 범위가 크게 발생하였다.

이는 평균 제염 계수가 운전 상황의 변화를 반영하지 못하기 때문이

다.

그래서 운전 상황 변화를 반영하는 예측 방법을 연구하였다.

새로운 방법은 발전소에서 주기적으로 측정하여 생산되고 있는 제염 계수, 즉 순간 제염 계수를 이용하여 개발하였다.

냉각수 정화 장치 내 방사성 핵종의 누적량을 평가하는 데에 본 연구의 목적이 있다.

평균 제염 계수 대신 순간 제염 계수를 이용한 전산 프로그램을 작성하여 방사성 핵종의 누적량을 평가하였다.

가압 경수로의 경우 작업자 피폭의 주요 선원은 1차 계통 내 부식 생성물이며, 이 중 Co 핵종은 매우 중요한 구성 원소이다.

부식 생성물의 선량 기여에 있어 약 70%가 Co-58에 의한 것이며, 약 25%가 Co-60에 의한 것이다.

본 연구에서는 부식 생성물로는 Co, 핵분열 생성물로는 Cs을 모사 실험의 대표 원소로 선택하였다.

## 이론 및 실험

### 1. 방사성 핵종 누적량 예측 기법

핵종 누적량을 계산하기 위하여 작성된 포트란 프로그램은 정화 장치를 통과하는 전후단부 핵종 농도 측정 자료와 제염 계수 측정 자료를 입력 자료로 한다.

이들 자료는 원전 운영 지침에 의하여 주기적으로 측정하고 있다.

3개의 정화 장치가 연결되어 있을 경우, 정화 장치별 핵종 누적량은 다음 식 (1)~(6)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$A_{ACC} = (INCONC - A_{OUT}) \times FLOW \quad \dots (1)$$

$$B_{ACC} = (A_{OUT} - B_{OUT}) \times FLOW \quad \dots (2)$$

$$C_{ACC} = (B_{OUT} - C_{OUT}) \times FLOW \quad \dots (3)$$

$$A_{OUT} = \frac{INCONC}{DF_A} \quad \dots (4)$$

$$B_{OUT} = \frac{A_{OUT}}{DF_B} \quad \dots (5)$$

$$C_{OUT} = \frac{B_{OUT}}{DF_C} \quad \dots (6)$$

위 식에서  $A_{OUT}$ ,  $B_{OUT}$ ,  $C_{OUT}$ 는 정화 장치 A, B, C를 통과하여 나온 냉각수 내 핵종의 농도이며, INCONC는 정화 장치 A로 유입되는 냉각수 내

핵종 농도이다.

그리고  $DF_A$ ,  $DF_B$ ,  $DF_C$ 는 정화 장치 A, B, C의 제염 계수이며,  $AACC$ ,  $BACC$ ,  $CACC$ 는 정화 장치 A, B, C에 누적된 핵종 누적량이다.

마지막으로 FLOW는 각 정화 장치로 유입되는 냉각수의 유량이다.

제염 계수 측정 자료를 입력 자료로 이용하여 매일매일의 제염 계수를 선형 보간으로 생산한다.

이 제염 계수는 계산 프로그램에서 초기 제염 계수로 사용한다.

초기 제염 계수는 계산 프로그램에서 초기값으로 사용하는 값이다.

INCONC와  $C_{out}$ 은 정화 장치에서 주기적으로 측정하여 알 수 있는 값들이다.

위의 식으로  $C_{out}$ 을 계산한다면 예측한  $C_{out}$  값은 이의 검증에 사용할 수 있다.

두 값의 차가 허용 오차 이상이면 새로운 제염 계수, 순간 제염 계수를 사용하여 보정을 시작한다.

이 순간 제염 계수는 다음과 같은 식으로 계산한다.

$$DF_{\Sigma} = DF_A + DF_B + DF_C \quad \dots (7)$$

$$DF_A = DF_A \pm \left( \frac{DF_A}{DF_{\Sigma}} \right) \times C1 \quad \dots (8)$$

$$DF_B = DF_B \pm \left( \frac{DF_B}{DF_{\Sigma}} \right) \times C2 \quad \dots (9)$$

$$DF_C = DF_C \pm \left( \frac{DF_C}{DF_{\Sigma}} \right) \times C3 \quad \dots (10)$$

식(8)~(10)에서의 C1, C2, C3는 부식 생성물의 입자 분포 변화에 따른 정화 장치별 보정 상수로 다음

절에서 설명하였다.

$DF_{\Sigma}$ 는 식(8)~(10)에서의 제염 계수 보정을 위하여 새로이 정의

〈표 1〉 정화 효율 변화

운전 상황	입자 분포	여과기의 제염 효율	이온 교환 수지의 제염 효율
가동시	증가	증가	감소
정지시	감소	감소	증가

〈표 2〉 부식 생성물 보정 상수

운전 상황	제염 매질	C1	C2	C3
가동시	여과기	1.5	1.5	1.5
	이온 교환수지	0.2	0.2	0.5
정지시	여과기	0.5	0.75	0.75
	이온 교환수지	2.0	1.5	1.5

한 인자이다.

계산 오차가 허용 오차보다 클 경우, 여기서 ±는 계산된 후단부 핵종 농도가 입력 자료로서의 후단부 핵종 농도보다 클 경우 +이고 작을 경우 -이다.

이러한 방법으로 허용 오차를 만족할 때까지 반복하여 계산을 실행한다.

평균 제염 계수를 이용한 방법의 경우 초기에 주어진 제염 계수만으로 계산하며 초기값으로 주어진 제염 계수의 보정 과정은 없다.

가동시와 정지시의 냉각수 내 부식 생성물의 급격한 농도 변화를 반영하기 위하여 제염 계수를 보정한다.

본 방법에서는 계산 과정에서 이러한 제염 효율의 변화를 고려하여 보정 과정에서 제염 계수를 감소 또는 증가시킨다.

식(8)~(10)에서의 보정 인자는 이러한 목적을 위한 것이다.

이 인자값은 정화 장치의 배열 및 종류에 따라 결정하였다.

보정 인자는 〈표 2〉에 설명하였다. 〈그림 1〉에는 계산 과정의 전체적인 흐름을 나타내었다.

## 2. 부식 생성물 입자 분포 변화의 반영

부식 생성물은 운전 상황에 따라 입자의 분포가 변한다.

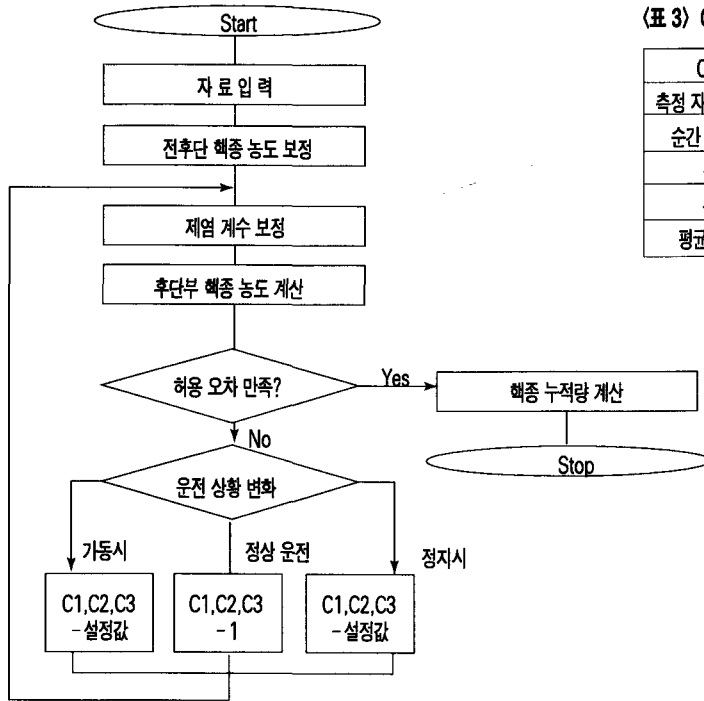
부식 생성물의 입자 분포 변화는 1차 냉각수 정화 장치의 정화 효율에 상당한 영향을 주게 되는데, 이를 가동시와 정지시를 비교하여 살펴보면 〈표 1〉과 같다.

## 3. 예측 기법의 검증

가. 발전소 계측 자료를 통한 검증  
예측 기법의 검증을 위하여 미국 Rancho-Seco 발전소의 계측 자료를 이용하였다.

계측 자료는 78년 9월 7일부터 79년 3월 1일까지의 자료를 사용하였다.

**특집 II · 방사성 폐기물 처리 기술의 혁신**



(그림 1) 핵종 누적량 계산 흐름도

(표 3) Co-60의 총방출량 : 예측 기법 결과와 계속 자료의 비교

Co-60 총방출량	계산
측정 자료로 계산된 총방출량	3.487E-1Ci
순간 제염 계수(본 방법)	3.293E-1Ci
평균 제염 계수	2.248E-1Ci
본 방법의 오차	5.6%
평균 제염 계수의 오차	35.5%

Co-60과 Cs-137을 회석하여 사용하였다.

실험 장치의 개략적인 구성은 (그림 2)와 같다.

급격한 유량 변화를 위해 Peristaltic 펌프로 유량 조절을 하였다.

모의 냉각수는 급격한 농도 변화를 반영하기 위하여 세 가지의 다른 농도로 구성하였다.

(그림 3)과 (그림 4)에서 알 수 있듯이 실험에서는 급격한 유량 변화와 냉각수 내 핵종 농도의 변화를 주며 실행하였다.

혼상 탈염기에 사용된 이온 교환 수지는 IRN-150이며, 양이온 탈염기에는 IRN-77 이온 교환 수지를 사용하였다.

여과기는 스테인리스 스틸(25 $\mu$ m) 재질의 것을 사용하였다.

각 정화 장치의 제염 계수 및 저장조 내의 방사성 핵종 농도는 주기적으로 계속하였다.

정화 장치 내 핵종량은 다음과 같은 방법으로 계산할 수 있다.

정화 장치 내 총핵종량 = 실험에 사용한 모의 냉각수 내 핵종량 - 채취한 시료 중에 포함된 핵종량 - 저

Co-60의 높은 방사능을 고려하여 1차 냉각수 정화 계통의 자료를 선택하여 검증에 이용하였다.

이 계통은 냉각수 내 부유 물질을 제거하기 위한 취출수 여과기(let-down filter), 이온성 핵종을 정화하기 위한 혼상 탈염기(purification demineralizer)와 보충수 여과기(makeup filter)로 구성되어 있다.

냉각수는 이 계통을 지나 원자로로 되돌아 가고 일부는 액체 폐기물 계통으로 간다.

위의 기간 중에 계통에서 방출한 Co-60의 총량 계산을 통하여 검증

하였다.

방출 총량은 보충수 여과기 후단부 핵종에 유량을 곱하여 계산하였다.

순간 제염 계수와 평균 제염 계수를 이용한 두 가지 계산 방법을 사용하여 계산 결과를 비교하였다.

**나. 실험 자료를 통한 검증**

실험 장치는 국내 웨스팅하우스형 원자로인 고리 1호기의 화학 및 체적 조절 계통(CVCS)을 모사하여 제작하였다.

실험 장치에 장착된 정화 장치는 두 개의 혼상 탈염기, 양이온 탈염기, 여과기이며, 모의 냉각수는 증류수에

장조 내의 핵종량...(11)

실험을 통한 결과와 프로그램을 통한 정화 장치 내 핵종 누적량 계산의 비교에 있어 실험을 통하여 각각의 정화 장치 내에 누적된 핵종량을 얻을 수 없어 모든 정화 장치 내에 누적된 총핵종량을 통하여 검증하였다.

결과 및 토의

발전소 계측 자료로 계산한 Co-60의 총방출량에 순간 제염 계수를 이용한 예측 기법으로 계산한 결과와 평균 제염 계수로 계산한 결과의 비교를 <표 3>에 나타내었다.

계산 1의 경우 순간 제염 계수에 의한 계산은 5.56%의 오차를 낸 반면, 평균 제염 계수에 의한 계산은 계측 자료와의 검증에서 35.53%의 오차를 나타내었다.

<그림 5>와 <그림 6>은 예측 기법에서 계산한 제염 계수가 실측 제염

계수와 얼마나 잘 일치하는가를 보여주고 있다.

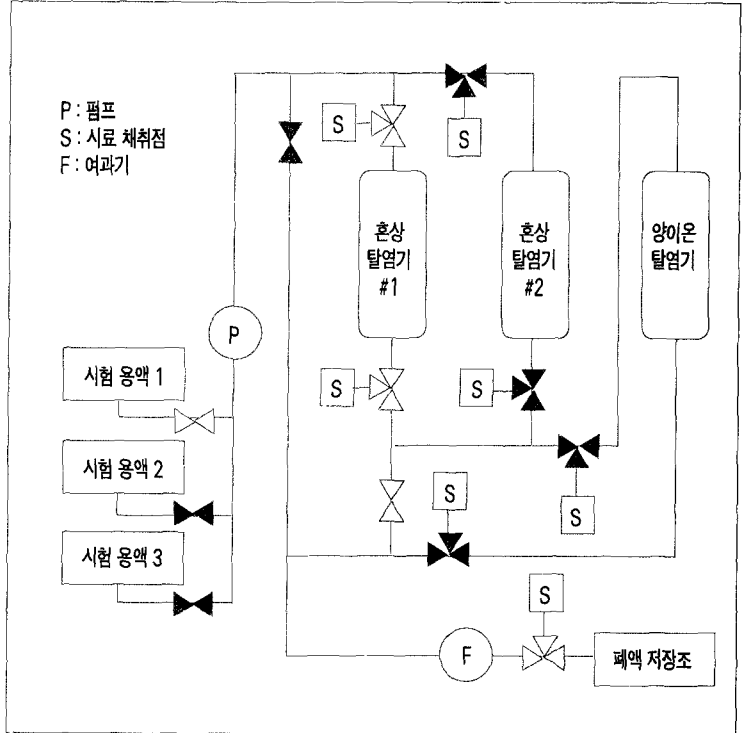
일부는 실측 자료와 약간의 차이를 내고 있음을 알 수 있다.

실험 장치 내 총핵종 누적량 계측값과 예측 기법으로 계산한 값을 <표 4>에 비교하였다.

계측 제염 계수와 제염 계수 계산값의 비교는 <그림 7>과 <그림 8>에 나타내었다.

제염 계수 값은 Co-60의 경우 1에서 100 정도, Cs-137은 1에서 1000의 범위였다.

이는 실제 원전의 경우와는 다른

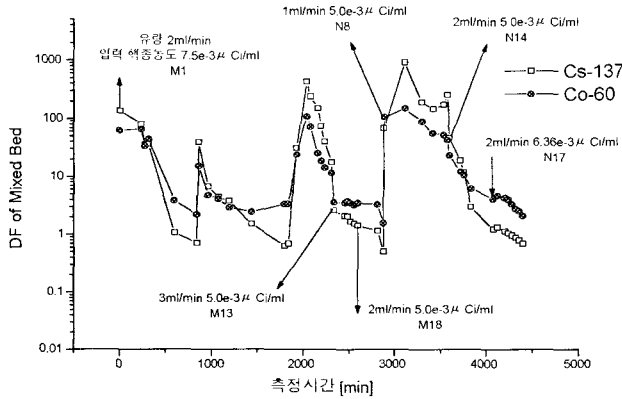


(그림 2) 실험 장치도

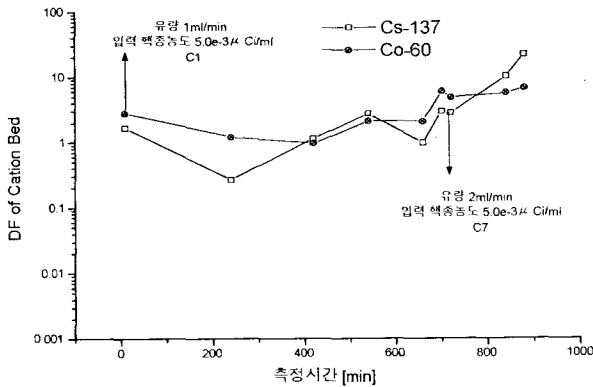
<표 4> 실험 정화 장치 내 총핵종 누적량 계산

핵종량 및 오차		Co-60	Cs-137
모의 냉각수 내 핵종량		55.35 $\mu$ Ci	55.35 $\mu$ Ci
채취 시료 내 핵종량		4.46 $\mu$ Ci	7.09 $\mu$ Ci
저장조 내 핵종량		9.42 $\mu$ Ci	20.84 $\mu$ Ci
정화 장치 내 총핵종량		41.47 $\mu$ Ci	27.42 $\mu$ Ci
프로그램 계산 정화 장치 내 총핵종량	계산 1	43.59 $\mu$ Ci	29.54 $\mu$ Ci
	계산 2	44.33 $\mu$ Ci	32.48 $\mu$ Ci
프로그램 계산 오차	계산 1	5.12%	7.73%
	계산 2	6.90%	18.45%
평균 제염 계수 계산		49.13 $\mu$ Ci	47.46 $\mu$ Ci
평균 제염 계수 오차		18.47%	73.05%

주: 계산 1: 모든 제염 계수를 입력 자료로 사용  
계산 2: 제염 계수의 수를 계산 1의 2/3으로 줄여 입력



〈그림 3〉 실험 상황 변화에 따른 제염 계수의 변화(혼상 탈염기)



〈그림 4〉 실험 상황 변화에 따른 제염 계수의 변화(양이온 탈염기)

상황의 값이다.

정화 장치 내 Co-60의 핵종 누적량 계산 경우 실험 계측 자료와의 비교에서 순간 제염 계수는 5.12%의 오차를 나타낸 반면, 평균 제염 계수

는 18.47%의 오차를 나타내었다.

계산은 입력 자료의 수를 줄여 두 번에 걸쳐 수행하였다.

계산 2의 경우 입력 자료의 1/3을 제외하고 계산하였고 예상대로 더 큰

오차가 발생하였다.

Cs-137에 대한 계산이 Co-60에 비해 더 컸다.

이는 이온 교환능에 따라 이온 교환 수지 내의 Cs-137이 Co-60에 의하여 방출된 결과이다.

〈그림 8〉에서 제염 계수가 1 이하인 경우를 볼 수 있는데 계산 프로그램에서는 1 이하의 제염 계수를 1로 보정하도록 되어 있어 오차가 커진 것으로 판단된다.

순간 제염 계수를 사용한 본 예측 기법은 프로그램 계산 수행을 위하여 정화 장치 전후단부 핵종 농도와 정화 장치별 제염 계수를 입력 자료로 한다.

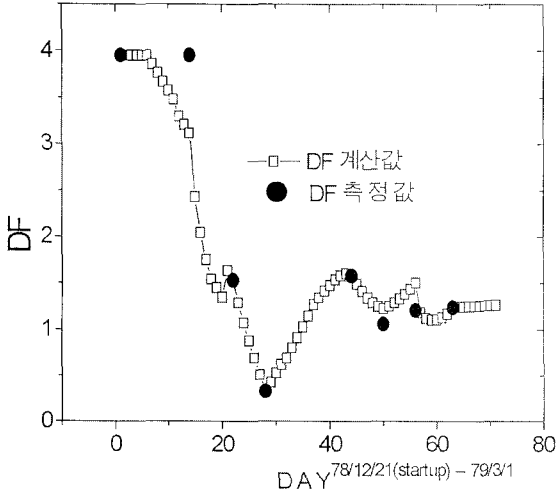
실제 원전예의 적용을 위하여 자료를 이용할 수 있는 실제 환경을 고려하여야 하며 핵종 농도와 제염 계수의 상대적 중요도 역시 고려하여야 한다.

Rancho-Seco 발전소의 자료는 두 기간의 것을 선택하였다.

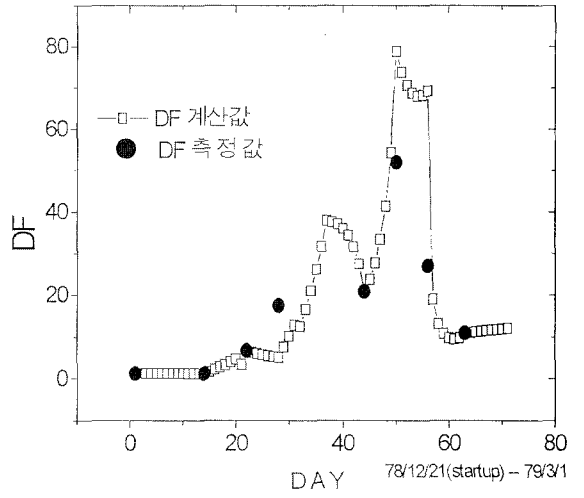
한 기간은 가동 정지 이전의 약 9주간의 자료이고 두 번째 자료는 가동후 약 9주간의 자료이다.

이 기간 동안 제염 계수는 약 1주일 간격으로 계측되었고 전단부 핵종 농도는 매일 계측되었으며 후단부 핵종 농도는 1주 간격으로 계측되었다. 제염 계수 자료 수를 줄여 계산한 결과는 〈표 5〉와 〈표 6〉에 나타내었다.

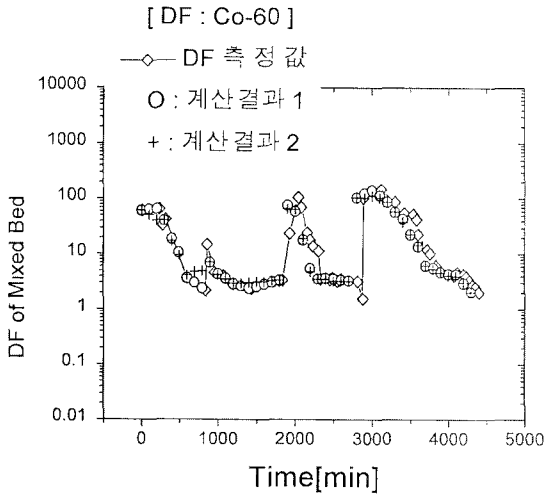
이용할 수 있는 입력 자료 중 제염



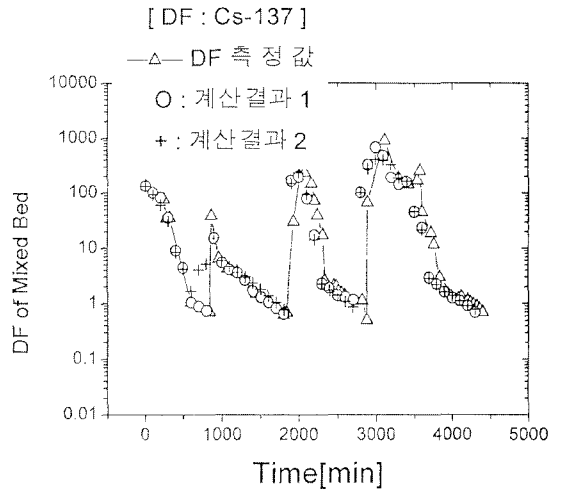
〈그림 5〉 취출수 여과기 제염 계수(Co-60)



〈그림 6〉 혼상 탈염기 제염 계수(Co-60)



〈그림 7〉 혼상 탈염기 제염 계수(Co-60)



〈그림 8〉 혼상 탈염기 제염 계수(Cs-137)

〈표 5〉 제염 계수 입력 감소에 따른 계산 결과 분석(78. 9. 7~78. 11. 15)

Co-60 총방출량		계산 1	계산 3
계측값		3.487E-1Ci	3.487E-1Ci
계산값		3.334E-1Ci	3.315E-1Ci
본 방법의 오차		4.39%	4.93%
제염 계수 입력 자료 수	LF	8	3
	PD	8	3
	MF	2	2

주: LF: 취출수 여과기(Letdown Filter)  
 PD: 혼상 탈염기(Purification Demineralizer)  
 MF: 보충수 여과기(Makeup Filter)

〈표 6〉 제염 계수 입력 감소에 따른 계산 결과 분석(78. 12. 21~79. 3. 1)

Co-60 총방출량		계산 1	계산 3
계측값		7.264E-1Ci	7.264E-1Ci
계산값		7.271E-1Ci	7.100E-1Ci
본 방법의 오차		0.10%	2.26%
제염 계수 입력 자료 수	LF	7	2
	PD	7	3
	MF	4	2

〈표 7〉 핵종 농도 입력 감소에 따른 계산 오차 분석(78. 9. 7~78. 11. 15)

Co-60 총방출량	계산 1	계산 2	계산 3
계측값	3.487E-1Ci	3.487E-1Ci	3.487E-1Ci
계산값	3.334E-1Ci	3.002E-1Ci	4.664E-1Ci
본 방법의 오차	4.39%	13.91%	33.75%
핵종 농도* 입력수	8	7	6

주: \*정화 장치 후단부에서 계측한 핵종 농도

〈표 8〉 핵종 농도 입력 감소에 따른 계산 오차 분석(78. 12. 21~79. 3. 1)

Co-60 총방출량	계산 1	계산 2	계산 3
계측값	7.264E-1Ci	7.264E-1Ci	7.264E-1Ci
계산값	7.271E-1Ci	7.105E-1Ci	2.889E-1Ci
본 방법의 오차	0.10%	2.19%	60.23%
핵종 농도* 입력수	6	5	3

주: \*정화 장치 후단부에서 계측한 핵종 농도

계수만을 줄였다. 여도 오차는 약간의 증가만이 있었다.  
 제염 계수 입력수를 50% 이하로 줄 반면에 핵종 농도 수를 줄인 계산

에서는 오차가 크게 증가하였다.

〈표 7〉에 후단부 핵종 농도 입력 자료 수를 줄인 계산 결과를 나타내었다.

입력수를 2/3로 줄였을 경우 오차는 8배 가량 증가하였다.

〈표 8〉에서는 오차의 증가가 더 큰 것을 알 수 있다.

이는 후단부 핵종 농도를 이용하는 본 예측 기법의 오차 보정 방법에 기인한다.

**결 론**

본 연구에서 개발한 프로그램은 이온 교환 수지 및 여과기 내의 핵종 농도를 계산한다.

그러나 검증에 있어서 각각의 정화 장치별로 누적량을 평가하지 못하고 정화 계통 전체에 누적된 총핵종량을 통하여 평가하였다.

본 예측 기법은 부식 생성물 입자 분을 변화에 따른 제염 효율 변화를 반영하도록 개발하였다.

핵종 누적량 예측을 위하여 평균 제염 계수 대신 순간 제염 계수를 사용하였다.

발전소 계측 자료에 의한 검증에서 순간 제염 계수를 통한 계산은 10% 이내의 오차를 보였지만, 평균 제염 계수로의 계산은 약 6배 이상의 오차를 보였다.

실험 자료를 통한 검증에서도 이와 유사한 결과를 보여주었다. ☻