

1차 계통수 내의 부식생성물과 거동에 관한 연구 : 고리4호기에 적용

성 병욱, 박 광현
경희대학교

이 찬복
원자력 연구소

요약

원자력 발전소 내의 1차계통수에 존재하는 부식생성물과 노심에서 방사화된 여러 핵종들의 종류와 그 양에 대해서 CRUDSIM/MIT모형을 이용해서 분석하였다. 고리4호기의 1차계통수내의 수화학 조건을 이용하여 CRUDSIM/MIT모형에 적용하고 그 결과를 냉각수의 Activity자료와 증기 발생기의 Activity자료와 서로 비교 분석하였고, 노심과 증기 발생기의 Crud양과 Activity를 예상하였다. 이 모형의 주요 인자인 β_c 와 β_a 값을 증기 발생기의 Activity측정자료에 의해서 구하였다. 그리고 발전소 운전 중에 증기 발생기와 냉각수의 Activity를 최소화 할 수 있는 최적 조건 범위도 냉각수의 온도, pH, 수소농도 등을 변화시켜서 구하였다. 고리4호기에 이 모형을 적용할 때 입력 자료에서, Activation Factor와 Recoil Release 등의 인자와 증기 발생기의 방사선양과 핵연료 표면의 Crud양을 구할 수 있으면 더욱 정확한 결과 값을 얻을 수 있다.

I. 서론

원자로에서 주로 증기발생기의 튜브를 구성하는 재질의 부식 및 용해(Dissolution)에 의하여 냉각수에 유입된 부식 생성물중 크기가 수 μm 정도의 산화물 상태로 존재하는 입자가 있는데, 이것을 Crud라 한다[1]. Crud의 주된 성분은 Nickel ferrite와 Magnetite로 알려져 있다. 방사선 핵종들은 Co-58, Co-60, Mn-54, Fe-59, Cr-51 등이 있는데, 이들은 노심에서 방사화된 후에 다시 증기 발생기에 쌓이게 된다. 이중에서 Co-58과 Co-60이 총 선량률로 비교하면 95%를 차지하므로 이 두 핵종을 기준으로 증기 발생기의 방사선량을 계산한다. 본 논문에서는, 노심 교체시 보수와 관계되는 피폭선량을 줄이기 위하여 CRUDSIM/MIT모형을 고리4호기에 적용하여 주요 인자를 구하고, 이를 바탕으로 최적 운전 조건(수화학조건)을 찾아보았다.

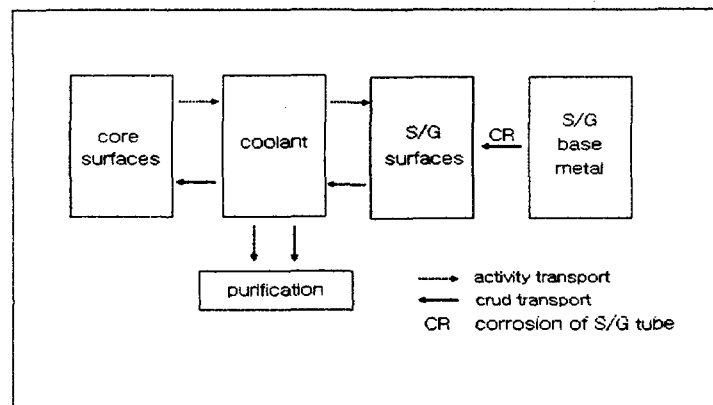
II. 본론

2.1 CRUDSIM/MIT모형

CRUDSIM/MIT모형은 기존의 CRUDSIM모형을 개선한 코드로서 주기적인 수화학 자료 (Li, B, H₂, 수소, 온도, 출력)을 이용하여 노심과 증기 발생기에서의 Crud양과 방사선량을 예측하는 모형이다.[2] 이 모형은 주어진 기간의 운전된 온도에서 붕소와 리튬 농도에 따라 pH가 계산되고 그 pH에 의해 부식생성물 거동의 Driving force인 용해도가 계산되어 Crud와 방사선 핵종의 거동을 설명하고 발전소 피폭 선량에 대한 여러 가지 화학 운전의 영향을 평가하는데 이용될 수 있다.

CRUDSIM/MIT모형은 CRUDSIM모형에서 다른 β 값(Transport rate for crud and activity)을 β_c 와 β_a 로 나누어 고려했고, 또한 냉각수에서 용해성 물질뿐만 아니라 입자의 형성 및 이동도 고려하였다.

그림1은 PWR 1차계통내에서 Crud는 증기 발생기 튜브에서 용해되어 냉각수로 유입되고 다시 노심에 침적이 된다. 그리고 노심에서 방사화된 Crud는 노심 핵연료 표면에서 용해되어 냉각수로 유입되어 증기 발생기에 침적이 된다.



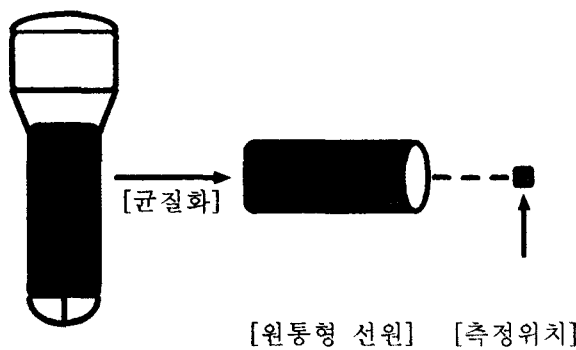
[그림 1] 모형에 사용한 PWR 1차 계통도[2]

1차 계통에서 증기 발생기의 표면과 노심의 표면에서 부식생성물과 방사선 핵종은 이온 상태로 녹아서 이동을 하지만, 이동 과정이나 노심과 증기 발생기 표면에서 이온이 모여 입자를 형성하여 침적되기도 한다. 침적된 입자는 다시 용해되어 이동한다. CRUDSIM 모형은 크게 3개의 노드(Core, Coolant, S/G)로 나누어서, 부식생성물과 Activity에 대한 평형식을 유도하여 그 값을 계산한다.

2.3 CRUDSIM/MIT모형의 고리 4호기에 적용

본 모형에 적용한 고리 4호기에 관한 자료는 냉각수의 수화학(Water chemistry)자료와 증기 발생기의 Exposure Rate값이다. 우선 수화학 자료에는 붕소, 리튬, 용존수소의 농도와 냉각수 내에서의 각 핵종별 Activity값이 있다. 고리 4호기는 1996년 현재 10주기에 운전 중이므로 9주기까지의 자료를 이용하여 이 모형에 적용하였다. 입력문에 사용되는 수화학 자료는 1개월간의 평균값을 얻어서 다시 주기 전체의 평균값으로 입력하였다. 운전 시간은 30일을 1개월로 정하고 각 주기별로 나눠서 정한다.

주요인자인 β_a 를 구하기 위해서는 S/G의 Activity값을 구해야 한다. 고리4호기에서 측정하는 값은 Exposure Rate이다. 그림2에서는 S/G의 튜브가 있는 부분을 Inconel600의 구성성분으로 균질화한 원통형선원을 나타낸다. 표1은 원통형선원의 재질과 그 구성성분들에 대한 차폐체 밀도를 나타내고 선원으로부터 측정거리를 정하여 Co-58/Co60의 비율을 기준으로 Micro-Shield 코드를 사용하여 두핵종의 방사선량을 계산한다.

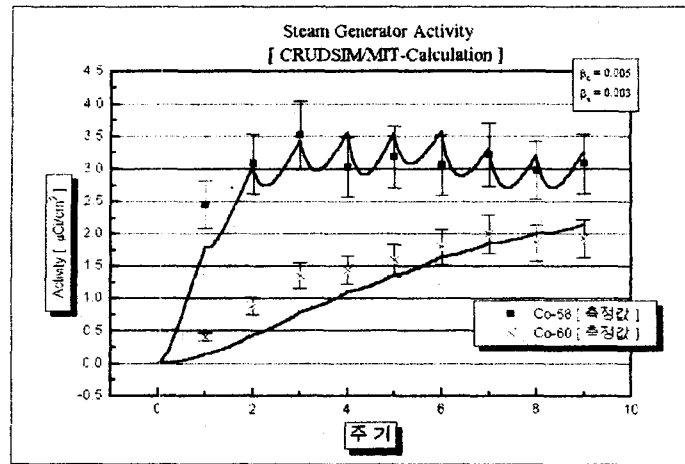


[그림 2] S/G의 Activity 계산 방법

구성 성분	Ni	Fe	Cr	Air
밀도	8.90	7.87	7.19	0.0012
Inconel 성분비	74%	8%	18%	-
부피 분율	0.172			0.828
선원내 밀도	1.133	0.108	0.223	0.001

[표 1] 선원내의 차폐체 밀도

Co-58/Co60의 비율은 다른 발전소의 자료를 기준으로 CORA코드를 이용하여 계산한 값을 사용하였다. 이 비율은 두 핵종의 양에 대한 상대적인 값이므로 이 계산에 적용하였다. 그래서 계산된 두핵종의 방사선량과 본 모형으로 계산된 방사선량을 서로 비교하여 가장 적합한 β_a 값을 구하였다. 증기 발생기에서 두 핵종의 방사선량에 거의 일치하는 β_a 값은 0.003이고 β_c 값은 참고 자료를 이용하여 0.005로 정하였다.



[그림 3] 고리4호기 증기발생기의 방사선양

그림 3은 실제 측정된 조사선량율에 의한 Co-58과 Co-60의 방사선양과 본 모형으로 계산된 값을 비교하였다. 두 값이 거의 일치함을 알 수 있다. 그래서 CRUDESIM/MIT 모형에서 구한 주요 인자인 β_a 와 β_e 값을 기준으로, 앞에서 계산된 다른 노드(Node)의 Crud양과 Activity양을 예측할 수 있다.

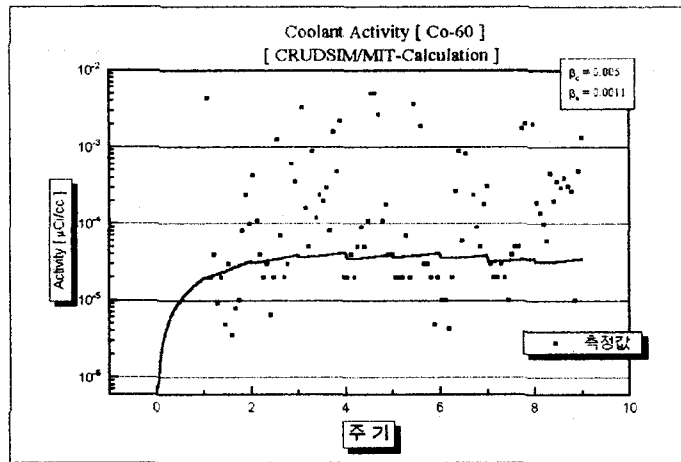
β_a 값은 각 원자로마다 고유의 값을 가진다. 여기서 β_a 값을 구한 방법으로 다른 원자로에도 적용하여, 각 발전소의 β_a 값을 얻어서 다른 노드의 Crud와 방사선양을 예측하고 운전조건을 개선시키는 자료가 된다.

	Activation Factor		Co-모핵의 비율		반감기		냉각수 온도	
	α_{58}	α_{60}	Ni^{58}/Fe	Co^{57}/Fe	Co-58	Co-60	Tin	Tout
β_a								
0.003	7.38E-2	2.145E-3	0.289	0.0025	72day	5.27yr	285℃	320℃

[표 2] CRUDESIM/MIT 모형에서 β_a 에 관계되는 입력자료

표2는 β_a 값을 구하는데 관계되는 본 모형의 입력 자료이다. 반감기를 제외한 자료는 고리4호기와 유사한 1000MW급(Westinghouse) 원자로를 기준으로 계산한 값들이다.[2]

그림 4는 냉각수내의 Co-60핵종에 대한 측정된 방사선양과 모형으로 계산한 값을 나타낸다. 실제 자료에서 두 핵종에 대한 방사선양의 분포는 범위가 아주 커서 정확하게 비교하기가 어렵지만 측정시 오차를 고려한다면 측정값은 계산된 값주위에 분포함을 알 수 있다.



[그림 4] Co-60대한 계산값과 측정값 비교

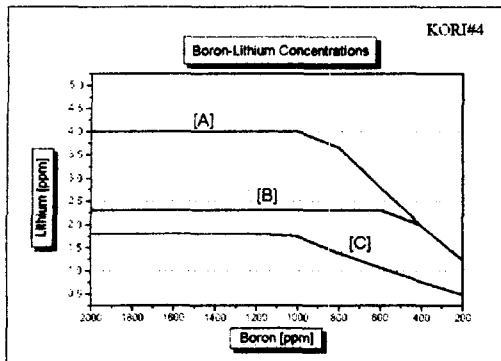
2.4 CRUDSIM/MIT모형에 의한 최적 조건

1차 계통에서 생성되는 Crud와 방사선양을 수화학조건, 즉 붕산수의 농도, LiOH의 농도, 용존 수소의 농도 등을 변화시켜 그 생성량을 최소화시키는 것이 최적 조건을 찾는 것이다. 이미 기존의 발전소에서는 pH조절을 통해서 방사선양의 생성을 줄이고 있다. 그래서 고리4호기에 직접 CRUDSIM/MIT 모형을 이용하여 이들 인자들을 변화시켜서 증기 발생기에서의 방사선양이 어떻게 변화하는지 분석하였다.

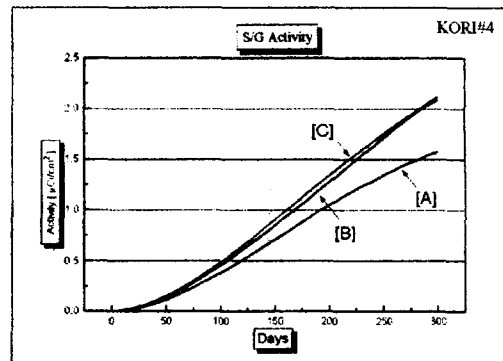
pH가 증가할수록 Crud의 양과 방사선의 양은 감소한다. 이것은 pH가 증가할수록 노심과 증기 발생기 사이의 용해도차가 증가하여 침전되는 양이 줄어들기 때문이다.

CRUDSIM/MIT 모형에 사용된 고리4호기의 수화학 자료와 β_a 와 β_c 값을 이용하여 붕소와 리튬의 양을 변화시켜서 증기발생기의 방사선양을 분석하였다. 그림 5에서 3가지의 경우를 나타낸다. (A)는 리튬의 최대 허용농도를 크게 하였고 (B)경우는 9주기의 수화학 자료를 이용한 값이고, (C)경우는 2주기의 수화학자료를 이용하여 계산하였다.

그 결과는 그림 6에서 처럼, (B)와 (C)의 경우는 거의 같은 값을 가지고 (A)경우는 훨씬 작은 방사선양을 나타낸다. 여기서 고리4호기의 2주기와 9주기가 비슷한 값을 가지는 것으로 보아 고리4호기의 2주기는 고리1호기에 통해 이미 운전이 많이 개선되었다고 본다. (A)경우, 높은 리튬의 농도 방사선양을 줄이기 때문에, 최대 허용농도를 가능하면 높여 주는 것이 좋다.



[그림 5] 붕소와 리튬의 농도 변화



[그림 6] pH조절에 의한 Co-58의 방사선양

III. 결론

1. 증기 발생기에서 측정된 조사선량율을 Micro-Shield 코드를 이용하여 주요 핵종인 Co-58과 Co-60의 방사선량을 직접 계산하였고, 조사선량율에 의한 두 핵종의 방사선량을 기준으로 CRUDSIM/MIT모형의 주요 인자이며 고리4호기의 고유값인 $\beta_a=0.003$ 을 구하였고, 모형으로 예측된 증기 발생기의 방사선량과 측정된 방사선량은 거의 일치하였다.
2. CRUDSIM/MIT 모형을 고리4호기에 적용한 결과, 측정된 냉각수의 Co-58과 Co-60의 방사선양 분포 범위에 계산된 값이 실제 값보다 약간 낮게 분포하였다. 그러나 냉각수내 방사선양의 측정시 오차를 고려한다면 계산된 값은 측정값과 거의 비슷한 분포를 가진다고 볼 수 있다
3. 최적 조건에서 pH값이 주요 인자이고, 리튬의 농도를 높여서 pH값을 증가시켜 주면 방사선양의 생성이 줄어들므로, 리튬의 최대 허용 농도를 잘 설정해야 한다.

IV참고 문헌

1. 백승우 "CRUDSIM코드에 의한 국내 PWR 수화학 운전 평가" 1991.
2. Lee Chan Bok, "Modeling of corrosion product transport in PWR primary coolant" 1990
3. C.A Bergman & W.T.lindsay,et al "The role of coolant chemistry in PWR radiation field buildup" EPRI NP-4247,1985.
4. K.Dinov,K.Ishigure, C.Matssuura & D.Hirorish, J.Nucl.Mater. 207 (1993) 266
5. "PWR Primary Water Chemistry Guidelines:Revision 2" EPRI NP-2493.Nom.1990