가압중수로 1차계통 내 부식생성물의 거동 메커니즘과 해체 방사선원항 평가방법에 관한 연구

조훈조, 이상헌, 김선일, 김동민, 신승수, 송종순*
조선대학교, 광주광역시 동구 필문대로 309
gnsdud66@naver.com

1. 서론

현재 국내 원전의 월성 1호기 계속운전, 고리 1호기 영구 정지, 노후화 원전의 증가로 인한 선원항 평가기술 및 제염 해체 기술 개발의 중요성이 강조되고 있다. 본 연구에서는 가압중수로 1차계통 내에서의 부식생성물의 거동 메커니즘과 방사선원항 평가방법 중 CRUDTRAN 코드를 선정하여 월성 1호기에 적용하였다. 먼저, 코드를 통한 계산 결과 값과 실제 원전에서의 실측값을 비교하였고 코드에서 계산되지 않는 다른 방사성핵종들은 핵종 농도비 자료를 이용하여 계산하였다. 본 연구결과는 향후 노후화된 원전 해체 및 운전 보수 시 선원항 예측 연구에 기여할 것으로 예상한다.

2. 본론

2.1 부식생성물의 생성

2.1.1 증기발생기에서의 부식

중수로 S/G 전열관 재료로 우리나라에서 운영중인 월성1호기는 Alloy 800을 사용하고 있다. Alloy 800은 Ni 합금인 Alloy 600, 690과는 달리 Ni과 Cr을 다량 함유한 Fe 합금으로써 화학조성으로는 아래 Table 1에 제시되어 있다.

Table 1. The chemical composition of the S/G tubes material Alloy 600, 800 (wt%)

성분	Alloy 600	Alloy 800
Ni	≥72.0	32.5~35.0
Cr	14.0~17.0	21.0~23.0
Fe	6.0~10.0	bal.
Mn	≤1.00	≤1.00

따라서 S/G에서의 부식반응으로 인하여 Ni, Cr, Fe과 같은 금속부식생성물이 발생되며, Table 2에서 제시된 노심에서의 방사성부식생성물 반응으로 인하여 방사성물질이 생성된다.

Table 2. Reaction of Radioactive corrosion product

Nuclide	Half-Life	Reaction
^{51}Cr	27.8d	$^{50}Cr(n,\gamma)^{51}Cr$
^{54}Mn	312d	$^{54}Fe(n,p)^{54}Mn$
^{59}Fe	45d	$^{59}Fe(n,\gamma)^{59}Fe$
^{58}Co	71d	$^{58}Ni(n,p)^{58}Co$
^{60}Co	5.23yr	$^{59}Co(n,\gamma)^{60}Co$

2.1.2 피더관에서의 유체가속부식

피더관은 중수로의 핵연료채널과 연결되어 약 310℃의 중수인 냉각수가 흐르는 배관이다. 피더관에서의 유체가속부식은 방사성물질의 주요 생성원이며, 재료가 흐르는 유체환경에 놓일 때 견고한 부동태 피막을 형성하지 못하는 가속화된 부식 손상기구이다. 피더관의 재료로 철에 탄소를 합금한 저탄소강(SA 106 Gr. B)재질로써 화학조성으로서는 아래 Table 3에 제시되어 있다.

Table 3. The chemical composition of the Feeder tubes material low carbon steel (wt%)

성분	저탄소강
C	0.3
Mn	0.29 ~ 1.06
P, S	0.035
Cr	0.4

따라서 피더관에서의 유체가속부식으로 인하여 Mn, Cr과 같은 금속부식생성물이 발생되며, Table 2에서 제시된 노심에서의 방사성부식생성물 반응으로 인하여 방사성물질이 생성된다.

2.2 부식생성물 거동 메커니즘(중수로)

중수로 1차계통 내 부식생성물의 생성 및 계통 내외의 이동 메커니즘은 Fig. 1와 같다. 피더관 출구에서 유체가속부식과 S/G에서의 부식으로 인하여 용해된 철이 1차계통 내 냉각수로 방출되고 이 용해된 철은 S/G tube의 저온관, 피더관 입구, 핵연료장전관 입구에서 부식생성물 형태로 침전한다. 일부 부식생성물은 노심을 지나면서 노심표면에 침전되고 이 후 높은 열과 중성자에 의해 방사화된다. 방사화된 물질들은 수압에 의한 침식과 박리에 의해 노심표면 침전물로부터 냉각수로 방출되어 1차계통 전 영역으로 확산된다.

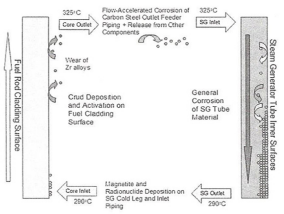


Fig. 1. Processes involved in PHWR corrosion products transport.

2.3 국내 중수로 원전에 적용

2.3.1 CRUDTRAN 코드 선정 배경

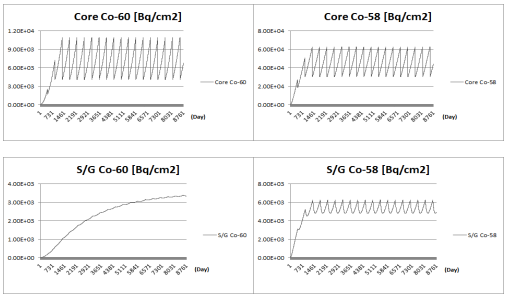
용해성 및 입자성 부식생성물의 거동을 예측하기 위해 개발된 코드로서 본래는 경수로 원전에 적용되는 코드이지만, 중수로 원전에 맞게 인자값들을 보정하였다. 노드는 Core, Coolant, S/G에 대하여 평가되며, 고려되는 주요 방사능 핵종은 Co-58, Co-60 이다. CRUDTRAN 코드는 다른 선원항 평가 코드들에 비해 정확한 결과를 보여주며, 부식생성물 거동 시 냉각재 화학변화에 따른 영향을 고려할 수 있기 때문에 이 코드를 선정하였다.

2.3.2 월성 1호기에 적용

Co의 7년간 실제원전 측정 자료를 제공받아 데이터를 확보하여 그 중 Core, S/G, Coolant 내의 Co-58, Co-60의 변화를 평가하였다. CRUDTRAN 코드에 적용되는 인자들을 확보하기 위하여 원전 측정 자료 이외에도 월성 1호기 자료들과 해외 논문들을 참고하여 추가로 확보하였다. 그리고 Co 이외의 주요핵종인 Mn-54, Cr-51을 평가하기 위하여 방사성핵종 농도비를 계산하여 평가하였다.

2.3.3 결과

CRUDTRAN 코드를 이용하여 모델링 결과 Core, S/G, Coolant 내의 Co-58, Co-60은 주기에 따른 추이를 Fig. 2에서 볼 수 있고 Co-58과 Co-60에 대한 측정값과 실측값을 비교한 그래프는 Fig. 3과 같다. 이는 CRUDTRAN을 활용한 평가결과와 실측값이 유사함을 보였다. 그리고 Co의 농도비를 이용하여 Mn-54, Cr-51 농도는 다음 Fig. 4와 같다.



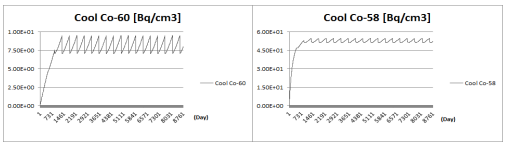


Fig. 2. The variation of the Co concentration in the primary system during 7 years.

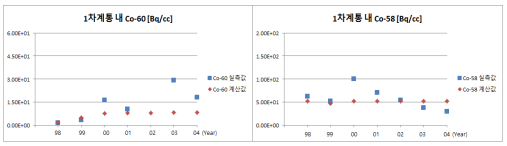


Fig. 3. The comparison of measured and calculated values at Wolsong #1 during 7 years.

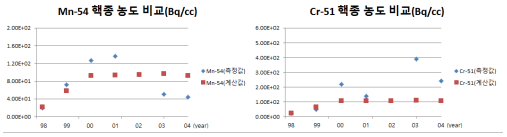


Fig. 4. The comparison of ^{54}Mn & ^{51}Cr in RCS at Wolsong #1 by using the radionuclide concentration ratio.

3. 결론

본 연구에서는 중수로에서의 부식생성물의 주요 발생원과 거동 메커니즘에 대해서 분석하였고, CRUDTRAN을 이용하여 중수로 선원항 평가를 실행하였다. 향후 제염 및 해체 시 사전 연구로서의 충분한 활용 가능성이 입증되며, 이는 해체 시 방사성 폐기물량 및 비용 산정에 기여할 것으로 판단된다. 현재 중수로에 관한 코드 및 현장 자료들이 미비한 상황이다. 따라서 향후, 추가연구를 통하여 적합한 모델을 선정하고 국내 중수로 원전 선원항 평가연구에 기여하고자 한다.

4. 참고문헌

[1] IAEA-TECDOC-1672. "Modeling of Transport of Radioactive Substances in the Primary Circuit of Water-Cooled Reactors", IAEA VIENNA, 2012.

[2] Burrill. K. A. "An activity transport model for CANDU based on iron transport in the primary coolant", AECL-11805, 1998.

[3] J.H.Hong, "Nuclear Materials", Ird ed., 583-610, Hans House, Seoul (2012).

[4] M.J.Song, S.C Park, J.S Seo, "Radioactive Waste Management of Nuclear Power Plant", 1rd., 83-104, Seoul (2015).