

차세대 원전에서의 방사선방호설계 예비평가

김희근, 김학수, 류경영
전력연구원

요약

국내 원전의 가동에 비례하여 방사선 피폭 및 방사성폐기물 발생이 계속적으로 증가되어왔다. 이에 상응하여 원전에서 방사선피폭이나 폐기물 발생량을 줄이기위한 노력도 계속되어 실질적으로 크게 감소하였다. 그러나 차세대 원전에서는 방사선피폭이나 폐기물 방출량을 획기적으로 줄일 계획으로 있어 추가 노력이 요구된다. 본 논문에서는 국내 원전의 방사선 피폭 및 방사성폐기물 발생현황과 ALARA 추진실적등을 근거로 KNGR의 방사선피폭 및 폐기물 발생량을 평가하였다.

I. 서론

KNGR은 기존 경수로에 비하여 성능을 획기적으로 개선하는 것을 목표로 삼고 있다. 여기에 관련되는 요소중의 하나가 방사선피폭과 방사성폐기물 발생량에 관한 방사선방호 설계 분야이다. 방사선 피폭과 방사성폐기물 발생량은 ALARA 원칙에 입각해서 일정한 설계목표치 이내로 유지할 필요가 있다. 한편 KNGR 개념설계 단계에서 방사선방호 설계목표치를 집단선량(Collective dose)은 100 Man·rem/unit·yr로 설정되었고, 방사성폐기물은 기체가 200Ci/unit·yr, 액체가 0.05Ci/unit·yr, 고체가 50 m³(250 Drum)/unit·yr 이하로 발생하도록 설계목표가 설정되었다.

본 논문에서는 KNGR의 방사선방호 분야의 중간 설계결과물에 대해 개념설계단계에서 설정한 설계기본요건(Utility Requirements Document: URD)의 타당성과 이를 KNGR설계시 만족시킬 수 있는지 평가하였다. 여기에는 국내에서 운영중인 원전에서의 방사선 피폭 및 방사성폐기물 발생현황과 KNGR의 설계결과물에 대한 평가자료등이 제시되었다.

II. 방사선방호 설계목표 현황

국내 원전의 방사선피폭 현황이 원전설계시 예상한 설계목표치와 어떻게 연관되는가를 살펴보기위해 집단선량(Collective dose)에 관한 설계예상치를 조사하였는데, 그 내용은 표 1 과 같다. 한편 국내 원전별 방사성 폐기물에 관한 설계예상치도 조사되었는데 그 내용은 는 아래 표 2와 같다.

표 1 국내 원전 설계시 예상한 집단선량 목표치

구 분	집단선량(Man · rem/unit · yr)	용 량(MWe)
고리 원자력 2호기	305.0	650
고리 3,4호기, 영광1,2호기	436.6	950
울진 원자력 1,2호기	435.0	950
영광 원자력 3,4호기	199.2	1,000
울진 원자력 3,4호기	168.3	1,000
영광 원자력 5,6호기	161.0	1,000
KNGR	100	1,350

근거자료 : 각원전별 최종안전성분석보고서(FSAR)

표 2 국내 원전별 방사성폐기물 발생량에 관한 설계예상치

구 분	고리1호기	고리2호기	고리3,4호기	영광1,2호기	울진1,2호기	KNGR
기체(Ci/yr)	11,800	465	5,140	5,500	8,070	200
액체(Ci/yr)	139	3.6	1.41	1.83	9.9	0.05
고체(Drum/yr)	610	610	2,606	2,606	2,112	250

근거 자료 : 각 원자력발전소별 FSAR

III. 방사선피폭 및 방사성폐기물 발생현황

1. 국내원전의 방사선 피폭현황

지금까지 국내 원전의 작업자들이 받은 피폭량은 약 160 Man · rem 정도이며, 1인당 평균선량은 약 230 mrem 정도이다. 이를 표 3에 보였다. 한편 고리 1,2호기 및 월성 1호기를 제외한 호기당 피폭량은 120 Man · rem 내외이고, 1인당 평균피폭 선량은 160 mrem 정도로 나타나고 있다. 국내 원전의 피폭량은 정기보수기간중에 받은 피폭량이 정상운전기간중에 받은 피폭량에 비해 약 3배 정도 높게 나타나고 있다. 한편 고리 3,4호기, 영광 1,2호기 및 울진 1,2호기에서 그 비율은 약 5배로 더욱 확대되는 경향을 보인다. 한편 최근 6 년동안 국내 원전에서 작업종사자 전체가 받은 피폭선량 분포를 보면 전체 작업종사자의 60-70%가 100 mrem 미만의 방사선피폭을 받는 것으로 나타나고 있다.

2. 국내 원전의 방사성폐기물 발생현황

국내 원전에서 발생된 기체 폐기물은 평균적으로 210 Ci/yr 정도이나, 1990년 이후에는 호기별 평균 50 Ci/yr로 매우 안정된 현황을 보이고 있다. 한편 액체 폐기물의 평균치는 0.35 Ci/yr 정도이나 1990년 이후에는 0.01 Ci/yr 정도로 역시 하향 안정된 경향을 보이고 있다. 그러나 국내 원전에서 발생한 고체폐기물의 평균치는 530 Drum/yr 정도로 비교적 높은 수준이며 1990년 이후에도 이 수준이 유지되고 있다. 이 결과를 표 4에 보였다

표 3 국내 원자력발전소의 방사선 피폭량 통계(단위: Man · rem)

년도	정상	보수	합계	종사자수	호기수	호기당피폭량	1인당평균선량
77	21.8	0	21.8	259	1	21.8	84
78	129.1	0	129.1	523	1	129.1	247
79	103.9	242.9	346.8	646	1	346.8	537
80	223.7	0	223.7	607	1	223.7	369
81	173.7	305.7	479.4	770	1	479.4	623
82	137.4	324.1	461.5	785	1	461.5	588
83	172.5	351.3	523.8	1,689	3	174.6	310
84	228.5	464.2	692.7	2,412	3	230.9	287
85	268.2	678.6	946.8	3,504	4	236.7	270
86	502.3	721.4	1,223.7	5,459	6	203.9	224
87	367.0	865.4	1,232.4	5,422	7	176.0	227
88	302.4	1,778.6	2,081.0	6,639	8	260.1	313
89	342.0	1,129.8	1,471.8	6,375	9	163.5	231
90	259.9	1,229.1	1,489.0	7,111	9	165.4	209
91	252.5	566.2	818.7	6,432	9	91.0	127
92	306.2	849.2	1,155.4	5,453	9	128.4	212
93	274.2	872.3	1,146.5	5,302	9	127.4	216
94	263.6	828.6	1,092.2	5,462	10	109.2	200
95	330.8	954.0	1,284.8	7,445	11	128.4	172
합계	4,658.7	12,161.4	16,821.1	72,295	-	163.3	233
분율(%)	27.9	72.1	100	-	-	-	-

근거 자료 : 원자력발전소 방사선관리연보(1995, 한국전력공사)

표 4 국내 원전의 기체, 액체 및 고체방사성 폐기물 발생 실적

년도	호기수	기체발생량(Ci)	액체발생량(Ci)	고체발생량(Drum)	평균기체발생량(Ci)	평균액체발생량(Ci)	평균고체발생량(Drum)
81이전	5	428.0	26.8	3,828	85.6	5.36	765.6
82	1	1,102.9	0.124	1,058	1,102.9	0.124	1,058
83	2	368.8	0.47	1,149	184.4	0.235	574.5
84	2	836.9	0.238	1,657	418.5	0.119	828.5
85	4	925.3	0.357	1,396	231.3	0.089	349.0
86	6	1,262.1	0.383	2,207	210.4	0.064	367.8
87	6	1,183.8	0.372	2,986	197.3	0.062	497.7
88	8	1,004.7	0.354	3,348	125.6	0.044	418.5
89	8	820.9	0.234	5,897	102.6	0.03	737.1
90	8	663.9	1.839	4,711	83.0	0.23	588.9
91	8	702.6	0.113	4,200	87.8	0.014	525.0
92	8	2,936.7	0.158	4,352	367.1	0.02	544.0
93	8	5,739.9	0.072	3,871	717.5	0.009	483.9
94	8	515.3	0.081	3,090	64.4	0.01	386.3
95	8	196.6	0.041	3,874	24.6	0.005	484.3
합계	-	18,688.3	31.636	47,624	207.65	0.3515	529.2

근거 자료 : 원자력발전소 방사선관리연보(1995, 한국전력공사)

IV. 방사선 피폭 및 폐기물 발생량 설계기본요건 평가

1. 방사선 피폭선량 평가

국내 원전의 방사선 피폭실적은 설계예상치(430 Man·rem 대비)의 약 40%에 해당되는 값이다. 고리 1,2호기와 중수로형 월성 원전을 제외할 경우 120 Man·rem/unit·yr으로 낮아져 설계예상치 대비 30%에 해당된다. 특히 1990년 이후 전체 원전의 집단선량은 점차 낮아져 120 Man·rem/unit·yr 이하로 나타나고 있다. 일반적으로 방사선피폭은 원전 가동이후 처음 5년 동안에는 운전 및 보수 기술의 미숙으로 높게 나타나고, 그 이후에는 감소하였다가 10년이후에 다시 증가하는 경향을 보인다. 이때 방사선 피폭은 10년 동안 약 10% 정도 증가된다고 알려져 있다. 따라서 영광 3,4호기 이전 원전의 방사선 피폭은 현재 120 Man·rem/unit·yr으로 계통선량율의 영향에 의한 증가를 고려하더라도 수명기간말에 150 Man·rem/unit·yr로 넘지 않을 것으로 여겨진다(즉, $120 \times 1.25 \approx 150$ Man·rem/unit·yr). 이러한 결과는 영광 3,4,5,6호기 및 울진 3,4호기에도 유사하게 적용될 것으로 예상된다.

KNGR의 설계가 현재 기본 설계단계에 머물러 있어 KNGR의 집단선량을 예측하기는 매우 어렵다. 그러나 주관적이기는 하나 System 80+ 제작자인 ABB-CE사의 ALARA 담당자와의 토의와 ABB-CE사에서 발행된 System 80+의 Design certification 등 자료에 근거할 경우 영광 5,6호기에 비해 약 70 Man·rem 정도의 피폭저감이 기대된다. 따라서 KNGR에서는 집단선량을 90 Man·rem/unit·yr(즉, $161 - 70 \approx 90$ Man·rem/unit·yr) 정도로 유지할 수 있을 것으로 판단된다. 이를 정리한 결과가 표 5에 나타나 있다.

2. 방사성폐기물 발생량 평가

국내 원전에서 발생된 기체폐기물은 고리 2호기를 제외하고 설계예상치 대비 5% 미만으로 양호한 결과를 보이고 있다. 특히 1990년 이후에는 평균 50 Ci/yr 정도로 낮게 유지되고 있다. 한편 국내 원전에서 발생된 액체폐기물은 전체 원전의 평균 설계예상치 대비 3% 미만으로 양호한 결과이다. 특히 최근에는 각 원전에서 기체 및 액체 방출량 저감을 위한 ALARA 프로그램을 강력히 시행중에 있어 상당히 낮게 유지되고 있다. 따라서 이런 경험을 KNGR 설계에 반영하므로써 URD는 달성가능하다고 판단된다.

국내 원전에서 매년 호기별로 발생된 고체폐기물의 평균치는 530 드럼 정도이다. 그러나 최근에 각 원전에 설치하였거나 설치중에 있는 농축폐액 및 폐수지 건조설비와 초고압 압축기의 감용효과가 반영된다면 고체폐기물은 크게 낮아질 것으로 예상된다. 이 경우 KNGR에서 고체폐기물은 200드럼 정도 발생되는 것을 예상할 수 있다. 이 내용을 정리하여 표 6에 보였다.

KNGR에서 증발기 대신 무기기온 교환수지를 사용할 경우 농축된 봉산폐액이 전혀 발생하지 않으며 폐수지양도 1/3 ~ 1/2로 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 더욱 유리화에 의한 감용까지 고려한다면 고체폐기물 양은 크게 낮아질 것으로 예상된다. 이 내용을 요약하여 표 6에 보였다.

표 5 기본설계 단계에서의 KNGR의 집단선량 예비평가

항 목	설 계 개 선 내 용	피폭저감(rem)
1. 방사선원 저감	<ul style="list-style-type: none"> ○ 핵연료건전성 향상(핵연료손상율을 0.1% 이하) ○ 냉각재계통/기기 Co함유량 0.05 wt% 이하로 제한 ○ S/G 세관의 코발트함유량 0.015% 이하 ○ 냉각재펌프 베어링 Sb 최소화, 방사성입자의 발생 저감 	10 12(아래 항목을 포함) 2
2. 일반배치	<ul style="list-style-type: none"> ○ 방사성계통과 비방사성계통을 분리 ○ CVCS 계통과 사용후핵연료저장조 정화계통을 폐기물처리계통에 근접설치 배관길이 및 접합부위 최소화, 사용후수지탱크를 탈염기하부에 설치 ○ 저방사능구역에 작업자들을 위한 대기장소를 확보 ○ Hot Machine Shop 을 저방사능구역에 설치 ○ 원자로건물 구형 설계(직경200 ft 넓은 작업공간 확보) ○ 원자로 공동에 잠김출입구를 설치 ○ 영구차폐체 설치, 운전중 기기보수/점검 가능토록 설계 	25
3. 기기설계	<ul style="list-style-type: none"> ○ 증발기를 이온교환 탈염기로 교체 ○ 가압기에 설치된 방출노즐배관을 가압기방출탱크로 연결하여 압력용기 상부제거시의 피폭량 저감 	6
4. 보수/점검을 용이하게 개선	<ul style="list-style-type: none"> ○ S/G, RCP주위에 영구작업대 설치 ○ 증기발생기 점검시 로봇 사용 ○ 증기발생기 출입구 확장, Handhole 설치 	15
총 합	기존 원전에 비해서 방사선원(Co-58 & Co-60) 저감, 일반 배치(General Arrangement) 개선, 기기설계 개선 및 보수/점검 공간을 획기적으로 개선	70

표 6 국내 원전 및 KNGR에서의 고체폐기물 발생 예측(단위: Drum)

구분	국내원전평균	기존원전의 향후 예상치	KNGR의 예상치	비고
농축폐액	182	20	-	증발기 사용안함 폐수지 약간증가 폐필터 약간증가 (한외여과수지 사용) 유리화 적용
폐수지	48	15	30	
폐필터	11	15	40	
잡고체	288.2	150	30	
합계	529.2	200	100	

V. 결론

국내 원전의 작업종사자들이 매년 평균적으로 받은 집단선량은 160 Man · rem/unit · yr 정도로서, 설계목표치의 40% 이하의 실적이다. 한편 고리 3,4호기, 영광 1,2호기 및 울진 1,2호기 원전의 작업자가 받은 평균 집단선량은 120 Man · rem/unit · yr 정도로 설계 목표치의 30% 이하 수준이다. 특히 1990년 이후에 집단선량은 계속적으로 하향하여 120

Man · rem/unit · yr 정도로 매우 안정된 실적을 보여주고 있다. 따라서 영광 3,4,5,6 호기 및 울진 3,4호기에서의 방사선 피폭도 국내 기존원전의 방사선피폭과 유사하게 120 Man · rem/unit · yr 정도에 머물것으로 예상되어진다. 한편 영광 5,6호기 및 System 80+에서 반영된 설계개선사항이나 방사선 방호설계개념이 대부분 KNGR에도 반영된다는 것을 전제로 KNGR의 집단선량을 예측해 본 결과 집단선량은 90 Man · rem/unit · yr 내외의 수준에 머무를 것으로 예상되었다. 그러나 KNGR 설계시 방사선피폭을 정확히 평가하고 더욱 저감하기 위해서는 국내의 원전에서의 설계 개선사항, 운전 및 보수 경험을 KNGR 설계에 반영할 필요가 있다고 판단된다.

국내 원전에서 연간 발생된 기체폐기물 양은 210 Ci/yr 정도이나 1991년 이후에는 50 Ci/yr 정도로 나타나고 있다. 또한 지금까지 국내 원자력발전소에서 연간 발생한 액체폐기물 양은 0.35 Ci/yr 정도이나, 1991년 이후 0.01Ci/yr 이하로 낮게 발생되고 있다. 이는 원전에서 추진중인 방사성 폐기물 저감을 위해 추진중인 ALARA 프로그램의 영향으로 생각된다. 따라서 이런 경험을 KNGR 설계에 반영함으로써 URD를 만족시킬 수 있을 것으로 생각된다. 국내 원자력발전소에서 연간 호기당 발생된 고체폐기물은 평균 530 Drum/yr 정도로 비교적 높게 나타나고 있다. 그러나 최근에 전원전을 대상으로 농축폐액 건조설비, 폐수지 건조설비 및 초고압 압축기 등을 설치중에 있어 고체폐기물의 큰 저감이 기대된다. 또한 영광 5,6호기 및 KNGR에서는 무기이온 교환수지를 폐액 증발기 대신 사용할 계획으로 있다. 이러한 설비 및 설비 및 설계개선에 의한 감용 효과를 고려하면 고체폐기물의 발생량은 약 200 Drum/yr 이하로 예상된다. 그러나 고체폐기물의 최종 처분을 고려한다면 감용을 위한 끊임없는 노력이 요구된다 하겠다. 한편 유리화같은 감용비가 큰 감용기술의 도입이 전제된다면 방사성폐기물의 양은 더욱 낮아질 것으로 예상된다.