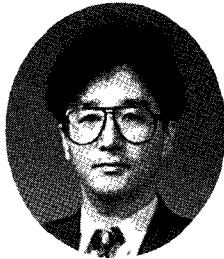


# 原電 放射線管理의 現況과 課題



송 종 순  
조선대학교 원자력공학과 조교수

**국** 제방사선방호위원회(ICRP)는 1977년의 ICRP 26을 거쳐 1990년말에 ICRP 60을 발행하면서 방사선 작업종사자의 연간피폭선량 한도를 종래의 연간 50mSv(5rem)에서 5년간 100mSv(10rem)로 하향 조정하여 권고함으로써 향후 이 권고안이 법제화될 경우 원자력발전소의 설계 및 운영 측면에서 상당한 변화가 수반될 것으로 전망된다.

ICRP 60의 권고치를 실제 적용하는 데는 기술적인 문제보다 경제적인 문제가 가장 크게 대두되며 종사자의 피폭관리에 있어서도 개인연간선량 2rem 초과는 발전소 이용률 향상과도 직접 관련되는 보수작업에서 주로 발생할 소지가 있

으므로 국내 원전에서도 원전별 피폭실적을 분석, 평가하여 이에 대비한 부문별 장단기 피폭저감대책의 수립 및 실행이 절실한 실정이다. 또한 원자력발전소의 건설 및 운영에 대한 점증하는 대중의 우려는 방사선피폭 저감에 대한 지속적인 노력을 요구하고 있다.

따라서 방사선방호체계 기본목표의 하나로서 「방사선방호의 최적화」는 원전 종사자의 피폭저감 실현을 위한 합리적이고 구체적인 도구로서 그 가치가 크다고 할 수 있는데 이는 방사선피폭을 저감하려는 일련의 행위 도입시 경제성 및 기술적 측면에서 최적의 대안을 도출해 내는 일에서부터 비롯된다고 할 수 있다. 그러기 위해서는 현재

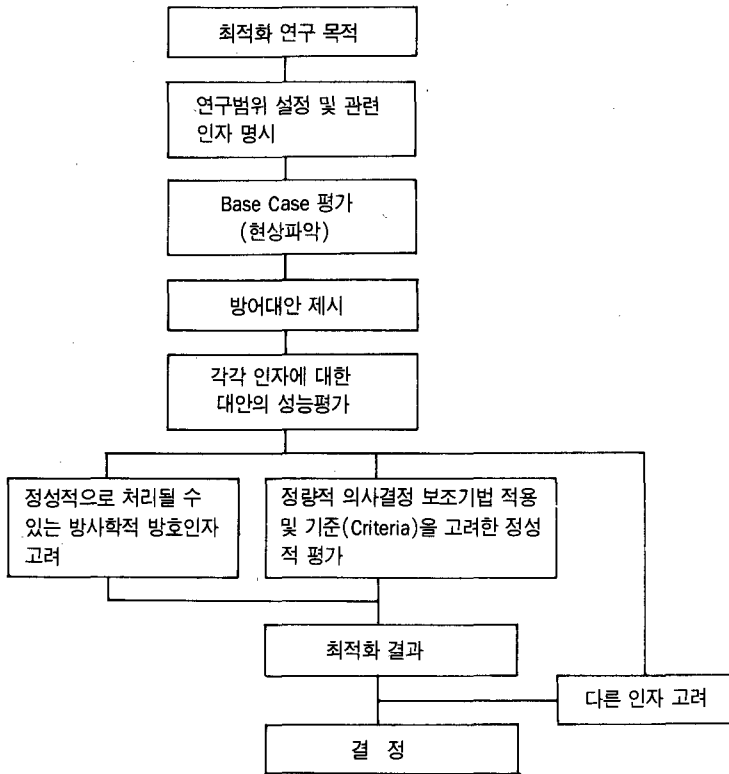
국내외에서 추진하고 있는 여러 가지 피폭저감대안들에 대해 「최적방호」 개념에 입각한 피폭저감계획 및 수행절차의 확립이 필요하다. 참고로 발전소 운전시 최적화 절차를 <그림 1>에 나타내었다.

본고에서는 국내 및 해외 원전의 지난 수년간의 운전실적을 중심으로 작업자의 피폭현황과 그 원인을 파악하고 피폭저감을 위한 방안들을 요약하여 보겠다. 방사선관리의 최적화란 문제는 실제로 관련 정책결정자의 의지에 크게 좌우된다고 볼 수 있는데 정책결정과정에서의 객관성과 합리성을 유지하기 위해서는 최적화 방법론의 도입이 필수적이다. 그러나 우리나라의 경우 최적화 방법론에 관한 연구는 지금도 초보적인 수준에 머무르고 있는 실정이다.

## 원전종사자 방사선피폭 현황 및 원인분석

국내 원전 종사자의 방사선피폭 실적 및 그 분석결과는 <표 1>과 같다. <표 1>에서 보는 바와 같이 전반적으로 해를 거듭함에 따라 피폭량은 감소 추세에 있으며 해외 원전의 평균치 수준을 유지하고 있는 실정이다(<표 6> 참조). 이는 안정된 설비운영, 방사선방어기술의 향상 그리고 꾸준한 작업방법의 개선 등에 기인한다고 본다.

<표 1>의 내용을 구체적으로 분석해 보면 먼저 고리 1호기의 경우 평균피폭선량이 518man-rem으로서 다른 호기보다 상대적으로 높은 편인데 이는 가동년수의 장기화에



〈그림 1〉 운전시 최적화 절차

〈표 1〉 국내 원전 호기별, 연도별 피폭실적(86~91)

(단위 : man-rem)

발전소	호 기	86	87	88	89	90	91	평 균
고리 1	#1	635	-	794	595	461	107	518
	#2	239	246	181	-	143	73	176
고리 2	#3	118	215	213	174	-	122	168
	#4	-	274	308	194	164	154	219
월 성	#1	184	-	169	-	117	56	131
영 광	#1	-	267	180	151	107	90	159
	#2	-	-	229	165	267	100	190
평 균		294	251	296	256	210	100	223

(주) 울진 1, 2호기 제외

따라 설비의 노후화로 인해 피폭선량이 증가하였기 때문인 것으로 판단된다. 월성 1호기의 경우는 가압

중수로 원전으로서 타 호기에 비해 상대적으로 피폭선량이 낮은 편인데 이는 핵연료교체를 정상운전중

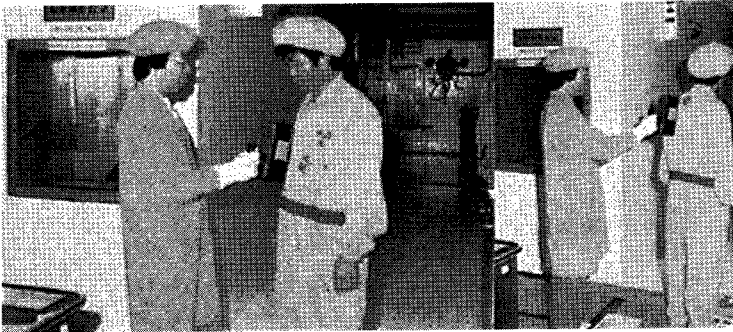
에 수행함으로써 정기보수기간이 다른 PWR 발전소보다 짧기 때문이다.

국내 PWR 원전의 경우 계획에 방정비 동안의 피폭선량이 전체 선량의 상당 부분을 점유하며 〈표 2〉에서 보는 바와 같이 그 중에서도 증기발생기 검사 및 보수작업 그리고 핵연료교체 작업시의 피폭선량이 전체의 50% 이상을 차지하므로 이 분야에 대한 집중적인 피폭저감 노력이 필요하다. 울진 1, 2호기는 가동 초기단계로서 비교대상에서 제외하였다.

〈표 2〉에서 보는 바와 같이 5개 분야 작업으로 피폭선량이 전체의 65.5%를 점유하는 바 증기발생기 관련 작업과 더불어 원자로 스택드 볼트 결합, 해체작업 그리고 세척작업 등에도 조속한 신형장비 도입 등의 피폭저감 노력이 필요하다.

한편 연도별 최대 방사선피폭자의 선량은 〈표 3〉과 같다. 그리고 ICRP 60에서 권고하고 있는 개인 연간선량 2rem 초과자의 수가 발전소의 가동년수 및 연간 집적선량에 비례하여 증가하는 경향이 있으며 아직까지는 개인연간선량 5rem 제한체계에 익숙되어 있어 현재로서는 보수인력관리에 어려움이 따를 것으로 예상된다. 그리고 연간 2rem을 초과하여 방사선을 받은 작업자의 대부분이 예방정비 기간에 발생되었으므로 이 기간의 피폭저감화를 위해서는 현대화된 장비도입이나 작업방법과 설비의 개선 등의 구체적인 노력이 필요하다.

국내 원전 종사자의 피폭원인을



〈표 2〉 계획예방정비중 주요 작업별 선량분포(최근 6년간)

주요 작업	피폭선량(man-rem)	점유율(%)	비고(%)
증기발생기 관련 작업	2,131	36.4	50.7
핵연료교체작업	835	14.3	
1차계통펌프 점검정비	315	5.4	
1차계통밸브 점검정비	314	5.4	
가동중검사	241	4.0	
기타	2,023	34.5	
계	5,859	100.0	

(주) 올진 1, 2호기 제외, 고리 1호기 91년도분 제외

〈표 3〉 연도별 최대 피폭자의 방사선량

(단위: rem)

연도	발전소				
	고리 1	월성	고리 2	영광	비고
1977	0.760				
1978	2.843				
1979	4.457				
1980	3.283				
1981	3.787				
1982	4.258				
1983	4.629	1.077			
1984	4.476	3.306			
1985	4.774	2.413	0.371		
1986	4.406	2.864	2.166	2.595	
1987	3.074	1.467	4.898	3.128	
1988	3.887	3.172	4.475	3.500	
1989	3.622	1.496	3.140	3.895	
1990	2.721	1.634	2.185	2.270	
1991	4.659	1.276	2.965	1.915	

분석한 결과는 〈그림 2〉와 같다. 먼저 노내 핵연료손상에 따른 냉각재계통 방사능농도 증가를 들 수 있는데 호기별 핵연료 손상발생 및 냉각재계통 방사능농도 현황(PWR)은 〈그림 2〉와 같다.

핵연료가 손상을 받게 되면 냉각재계통에 직접 영향을 주게 되며 이는 냉각재계통의 방사능농도를 증가시킨다. 그리고 냉각재계통의 방사능농도 증가는 기기표면 및 주변 방사능준위를 상승시키고 결국 종사자의 피폭선량을 증가시키는 요인이 된다.

다음으로 증기발생기 튜브 노후화에 따른 보수작업자의 피폭량 증가를 들 수 있는데 증기발생기 튜브 Plugging 및 Sleaving 양에 따라 큰 차이가 있으며 고리 1호기의 경우 증기발생기 보수작업 과다로 이 작업과 관련된 피폭량이 타 호기보다 높은 편이다.

또한 신형 보수장비 도입 미흡으로 인한 피폭량의 증가를 확인할 수 있는데, 현재로서는 고리 1발전소의 증기발생기 ECT 장비(SM-10)를 제외하고는 그 활용도가 아주 저조한 편이며 참고로서 고리 1호기 증기발생기 ECT 장비의 사용으로 인한 피폭저감효과는 50%였다.

참고로서 국외 원전의 원자로형별 방사선관리 실적은 〈표 6〉, 〈표 7〉, 〈표 8〉과 같다.

〈표 6〉에서 미국의 평균 방사선량은 320man-rem으로서 여타 국가보다 높은 편인데 이는 상대적으로 가동년수가 오래되고 원전의 수도 또한 많기 때문인 것으로 판단되며

(주) RCS 방사능농도는 1~5주기까지의 평균값

RCS 방사능농도 ( $\mu\text{Ci}/\text{cc}$ )	4	X					
	3						
	2						
	1						
호 기		X	X	X	X	X	
구 분		고리 1	고리 2	고리 3	고리 4	영광 1	영광 2
RCS 방사능농도 ( $\mu\text{Ci}/\text{cc}$ )		4.88	0.27	0.62	0.96	0.31	0.30
손상된 핵 연료봉 수		148	0	4	6	0	0

<그림 2> 호기별 핵연료 손상발생 및 냉각재계통 방사능농도 현황(PWR)

(주) 깊이가 40% 이상 손상된 세관

보수율 (%)	20.0	(18.8)					
	10.0	X					
	1.0	(1.68)	(0.12)	(0.19)	(0.21)	(0.17)	
		X	X	X	X		
호 기		고리 1	고리 2	고리 3	고리 4	영광 1	영광 2
구 분		고리 1	고리 2	고리 3	고리 4	영광 1	영광 2
보수율(%)		18.8	1.68	0.12	0.19	0.21	0.17
보수관누계(개)		1,271	189	20	32	35	28
피폭선량 (man-rem)		654	241	8	9	6	6

<그림 3> 증기발생기 튜브 노후화에 따른 보수작업자의 피폭량 현황(PWR)

1990년도 세계 PWR 원전의 호기별 평균선량은 176man-rem, PHWR 원전은 113man-rem 그리고 BWR 원전의 경우 176man-rem으로 나타났다.

### 운전중 방사선피폭 저감대안

원자력발전소 운전중 종사자의

피폭을 저감하기 위해 현재 국내에서 추진중인 분야별 개선방안을 열거하면 다음과 같다.

#### 1. 운전방법 및 설비 개선분야

- (1) 원자로 냉각재 고 pH 운전 (현행 6.9 → 7.4)
- (2) 1차계통 미세 여과제 설치(현행 25미크론 → 2미크론으로 변경)

(3) 핵연료 재장전수 저장탱크 정화운전

(4) 원자로 온도측정계통 개선: RTD By-Pass Line 제거

(5) 1차계통 주요 배관의 배기 및 배수라인 영구 설치

(6) 원자로 냉각재계통 기기의 저코발트 합량재질 사용

(7) 노내 핵계측계통 개선

(8) 원자로 냉각재펌프 Seal 및 Spool Piece Type 개선

(9) 기타 작업환경 개선

#### 2. 신형장비 확보분야

(1) 신형 및 자동원격보수장비 도입 및 활용

① 증기발생기 ECT 장비(SM-10), MST 장비 확보

② 원자로 스테드 볼트 신장기 확보(고리 1, 2호기 해당)

③ 원자로 스테드 볼트와 밀봉면 세척기(현행 수동 → 자동) 등

(2) 자동개인선량계 개선

(3) Surrogate Tour Video Disc System 확보 및 운영

(4) 휴대용 선원점검장비 확보 및 운영

(5) 방사선차폐체 개발 사용

#### 3. 운영, 제도 개선분야

(1) 피폭저감화(ALARA) 운영 활성화

(2) 고방사선구역 작업절차서 보완

(3) 방사선작업계획 및 허가관련 절차서 보완

(4) 작업감독자 감독업무전담제도 수립 및 운영

(5) 경상 방사선안전관리구역 확

〈표 4〉 국가별 집적선량 제한(연간)

(단위 : man-rem)

국 가	제 한 값	비 고
日 本	100	개량형 발전소의 목표
스 위 스	400	-
미 국	100	개량형 발전소의 목표
옛 유 고	200	ALARA 제한값

〈표 5〉 고리 1호기 증기발생기 ECT 장비사용으로 인한 피폭저감효과

구 분 \ 년 도	88	89	비 고
사용장비	구형(SM-4)	신형(SM-10)	약 50%
피폭선량(man-rem)	41	20	저감효과

〈표 6〉 국가별 가압경수형 원자로(PWR)의 평균방사선량

(단위 : man-rem/ 호기(호기수))

국 가 \ 년 도	1987년도	1988년도	1989년도	1990년도
미 국	368	345	292(68)	237(72)
프 랑 스	210	194	210(47)	182(48)
옛 소 련	-	-	-	246(21)
日 本	172	217(16)	-	146(17)
옛 서 독	336	339(10)	-	29(11)
한 국	207	317	200(7)	159(8)
스 페 인	229	303	228(7)	365(7)
벨 기				119(7)
체 코 (CSP)				2(4)
체 코 (SLP)				132(4)
형 가 리				73(4)
스 웨 덴	146	145(3)		122(3)
스 위 스				141(3)
남 아 프리 카				125(2)
핀 란 드				90(2)
홍 灣	49	106	95(2)	69(2)
네 델 란 드				171(1)
브 라 질	50	262	126	20(1)
옛 유 고	19	170	133	203(1)

(1) INPO 1989 year-end Report(International NPP Performance Report)

(2) WANO Performance Indicator Report 1990

〈표 7〉 국가별 가압중수형 원자로(PHWR)의 평균방사선량

(단위 : man-rem/ 호기(호기수))

국 가 \ 년 도	1987년도	1988년도	1989년도	1990년도
캐 나 다	103	86	93(18)	102(18)
인 도	-	-	-	347(4)
한 국	56	169	71	115(1)

대, 시행

#### 4. 교육, 훈련 개선분야

(1) 방사선 관리요원 증원 및 자질향상

(2) 용역업체 직원의 자격요원 강화

(3) 고급과정 방호교육 개발

### 외국의 피폭저감 개선사례

원자력발전소의 방사선 작업종사자에 대한 방사선피폭 저감화를 위해 외국에서 추진하고 있는 주요 개선사례는 다음과 같다.

#### 1. 미 국

(1) 1차냉각수계통의 기기나 부품 중의 코발트 함량의 최소화

(2) 1차냉각수 중의 산소농도와 pH의 적정 관리

(3) 1차냉각수 정화운전으로 부식생성을 형성 최소화

(4) 특수공구의 사용

(5) 발전소 설계시 ALARA 개념 적극 도입

(6) 발전소 표준화

#### 2. 스웨덴

(1) 방사성물질 함유계통이나 기기와 비방사성계통 및 기기와의 철저 분리

(2) 적정 pH 제어

(3) 모든 관리구역 바닥을 에폭시 페인팅함으로써 오염을 용이하게 함

#### 3. 프랑스

(1) 표준화된 체계적 측정계획

수립

- (2) 1차계통 구조물의 코발트 함량 감소
- (3) 정상운전중 1차냉각수의 화학제어방법 개선
- (4) 1차냉각수의 정화계통 개선
- (5) 원격조작기구나 방사선장 내에서의 작업시간을 단축 가능하게 하는 기구 등의 개발
- (6) 보수작업을 용이하게 하며 소요시간을 단축하기 위한 기기개선
- (7) 개인훈련 및 작업관리의 개선

4. 독 일

- (1) 코발트 함유 1차계통 구조물 표면은 다른 물질로 교체하고 노심 내의 니켈성분 함유물질은 지르칼로이드로 대체
- (2) 부식생성물의 원자로심 밖으로의 이동특성을 고려하여 pH값을 보론 농도에 관계없이 6.6~6.7 수준 유지
- (3) 부식생성물의 누적 감소를 위해 배관 등을 포함한 기기의 설계원칙에 매끄러운 표면처리, Dead Legs의 제거, 경사가 일정한 배

관설계

이 외에도 고방사능 입자 제거를 위해 미국의 경우 30 $\mu$ m 여과재를 설치하여 운전하는 발전소도 있고 서독의 경우엔 String Wound 여과재를 선정하여 운전하고 있으며 방사선방어개념을 ALARA보다는 ALAP(As Low As Practicable)를 적용하고 있는 상태이다. 또한 외국 BWR 발전소의 경우 계통에 아연(Zinc) 주입 및 1차계통수 고 pH 운전을 실시하고 있는 나라도 있으나 Zircaloy의 산화와 증기발생기 튜브의 PWSCC(고인장 잔류응력에 의한 부식균열)에 미치는 리튬의 영향 등 몇가지 문제점이 있다.

결 론

국내 원전 종사자들의 방사선피폭량은 해를 거듭해 감에 따라 전반적으로 감소 추세에 있으며 해외 원전의 평균치를 유지하고 있는데 이는 꾸준한 작업방법의 개선, 방어기술 향상 등에 힘입은 바 크다고 할 수 있다. 그러나 아직은 높은 수준이며 특히 계획예방정비기간중 「증기발생기 관련작업」이나 「핵연

료 교체작업」과 관련한 피폭량이 상당한 바 이 분야의 개선에 대한 집중적인 노력이 필요하다. 현재 우리나라의 원자력법이나 방사선방어 관련규정에 ICRP 60 권고사항을 수용할 경우 기존의 방호체계에 상당한 변화가 수반될 것으로 예상되는 바 이러한 변화에 능동적으로 대처하기 위해서는 방사선관리에 관한 장단기대책의 수립 및 시행이 절실하다. 우선 단기대책으로서

- 1. 구체적인 보수계획을 수립하여 보수인력관리 및 보수작업시 피폭저감을 위한 제반 노력 즉, 작업시 임시 차폐체를 설치한다든지 반복성 작업에 대해서는 보수인력이나 경험이 철저히 전수되도록 하는 등의 노력이 필요하고

- 2. 현재 운용중인 방사선 목표관리치를 재조정할 필요가 있다.

장기 대책으로서는

- 1. 종사자 피폭저감을 위해 기존의 ALARA 프로그램을 보완 및 개선하여 활성화하고
- 2. 성능면에서 우수성이 인정되고 상당한 피폭저감효과가 있는 신형 장비 및 원격제어장비 등을 조속도입하며

- 3 원자로냉각재 고 pH 운전, 1차계통 미세여제 설치 및 핵연료 재장전수 저장탱크 정화운전 등 운전방법이나 설비개선 등에 힘쓰고 새로운 보수기술 개발과 보수전문요원 및 방사선관리요원의 양성이 필요하다. 또한 방사선관리정책의 결정에 있어서 최적화 절차의 도입에 의한 합리성과 효율성을 갖추는 것이 매우 시급한 일이라 하겠다.

<표 8> 국가별 비등수형 원자로(BWR) 원전의 평균방사선량

(단위 : man-rem/ 호기(호기수))

년 도		1987년도	1988년도	1989년도	1990년도
미	국	521	511	442(34)	446(34)
日	本	345	311(18)	-	276(19)
스	웨	117	139(9)	-	108(9)
옛	서	240	260(7)	-	213(7)
臺	灣	468	367	566(4)	356(4)
인	도	-	-	-	322(2)
핀	란	-	-	-	79(2)
스	위	-	-	-	222(2)
스	페	542	558	209(2)	513(2)