

KINS/HR-490

최종보고서

방사선 방호 규제기술 개발
Development of Regulatory Technology
for Radiation Protection

원자력발전소 피폭저감화 기술 · 경험분석 및
규제활용방안 연구
Analysis of technologies & experiences for
reducing occupational radiation dose and
study for applying to regulations

2003. 1. 31

연구기관
기초전력공학공동연구소

한국원자력안전기술원

제 출 문

한국원자력안전기술원장 귀하

본 보고서를 “원자력발전소 피폭저감화 기술·경험분석 및 규제활용방안 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2003. 1. 31.

연구기관명 : 기초전력공학공동연구소

연구책임자 : 문 주 현

연구원 : 박 문 수

연구원 : 이 운 장

연구원 : 송 재 혁

연구원 : 김 병 수

연구원 : 김 종 욱

요 약 문

I. 제 목

원자력발전소 피폭저감화 기술·경험분석 및 규제활용방안 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

방사선 피폭의 효과적 저감을 위해서는 관련기술 개발 현황 및 피폭저감 경험에 대한 포괄적 조사·분석이 선행되어야 한다. 이러한 노력은 사업자뿐만 아니라, 인허가 측면에서도 병행할 때, 국내 원전의 방사선안전성이 획기적으로 증대될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 인허가 측면에서 국내외 원전의 선량저감기술·경험을 분석하여 규제측면에서의 활용방안을 도출하는데 목적을 두었다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구의 연구내용 및 범위는 아래와 같다.

- 국내·외 원전의 작업자선량 추이 파악
- 국내외 원전 피폭 저감기술 적용 실태 파악
- 피폭저감 기술의 피폭선량 저감효과 조사
- 조사·분석결과의 규제활용 방안 도출

IV. 연구개발결과

본 연구를 통해 작업자선량의 효과적 저감을 위해 규제측면에서 고려해야 할 사항을 도출된 사항을 정리하면 다음과 같다.

- 작업자 인적실수 저감 위한 제도적 방안 수립
- ALARA 수행체계 보완

- Sister unit group 결성
- 방사선작업의 체계적 분석

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구에서는 규제측면에서 작업자선량의 효과적 저감을 위한 방안을 도출하였다. 따라서 본 연구결과는 ALARA 관련 규제요건 개발의 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

SUMMARY

I. Title

Analysis of technologies & experiences for reducing occupational radiation dose and study for applying to regulations

II. Objective and Necessity of the Research

To reduce occupational radiation dose (ORD) effectively and enhance the radiological safety, the comprehensive assessment of the experiences to reduce ORD should be made by regulatory body as well as utilities. Hence, the objective of this study is to assess the experiences for reducing ORD from the regulatory viewpoint.

III. Contents and Scope of the Research

With the research objective, the followings are performed in this research:

- Analysis of occupational dose trends at domestic and foreign NPPs
- Identification of the effective technologies for reducing ORD
- Examination of the effects of the technologies for reducing ORD
- Derivation of the regulatory means for implementing the research results

IV. Results

As the results of this research, the items considered from the regulatory viewpoint are summarized as follows:

- Establishment of the regulatory means minimizing the human errors of worker's
- Reinforcement of ALARA implementation framework
- Organization of sister unit groups of NPPs
- Systematic analysis of radiation jobs

V. Suggestions for Utilizing the Results

From this study, the regulatory means for effective reduction of ORD are derived. Hence, the results can be utilized as a basic materials for ALARA requirements.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	1
Chapter 2. State of the art	3
Section 1. Distribution of occupational individual dose	3
Section 2. Distribution of occupational group dose	7
Chapter 3. Contents and results	10
Section 1. Analysis of ORE due to radiation job from domestic NPP	10
Section 2. Analysis of technologies & experiences for reducing occupational radiation dose	29
Section 3. ALARA requirements review	86
Section 4. Conclusions	97
Chapter 4. Conclusions	99
Chapter 5. Suggestions for utilizing the results	100
Chapter 6. References	102

목 차

제 출 문	i
요 약 문	ii
SUMMARY	iv
CONTENTS	vi
목 차	vii
표 목 차	viii
그 립 목 차	x
제 1 장 연구개발과제의 개요	1
제 2 장 국내·외 기술개발 현황	3
제 1 절 작업자 집단선량 분포	3
제 2 절 작업자 개인선량 분포	7
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	10
제 1 절 국내 원전의 방사선작업별 피폭선량 분석	10
제 2 절 작업자선량 저감기술 및 경험 조사·분석	29
제 3 절 ALARA 요건 검토	86
제 4 절 결론	97
제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 관련 분야에의 기여도	99
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	100
제 6 장 참고문헌	102

표 목 차

<표 1-1> 연구개발 목표 및 내용	2
<표 2-1> 작업자 피폭자료 분석 대상 발전소	3
<표 2-2> 발전소 유형별 작업자 집단선량	4
<표 2-3> 국내외 원전의 작업별 작업자선량 분포	5
<표 2-4> 국내외 원전의 노형별 작업자선량 분포	5
<표 2-5> 유럽연합의 작업자선량 분포	6
<표 2-6> 연도별 연간선량 20mSv 초과자수	7
<표 2-7> 최근 5년간 각 발전소별 연간 12.5mSv 초과자 주요업무내용	9
<표 3-1> 작업자 피폭선량 평가를 위한 작업분류 코드	11
<표 3-2> 방사선작업 내용 요약	12
<표 3-3> 주요 인자의 작업자선량 영향 순위	18
<표 3-4> 주요작업별 집단선량	19
<표 3-5> 고피폭선량 상위 10개 방사선작업	20
<표 3-6> 고피폭 상위 10개 작업의 인자별 통계치	20
<표 3-7> 세부작업별 작업자 피폭선량 통계치	25
<표 3-8> 백분위수별 상세 작업 및 상세 작업별 순위합과 순위	26
<표 3-9> 피폭 저감 우선순위 상위 20개 작업	28
<표 3-10> S/G Tube Plugging 작업 요약	30
<표 3-11> S/G Tube plugging 피폭 현황	31
<표 3-12> S/G 1차측 Manway Cover 개방 및 폐쇄 작업 요약	33
<표 3-13> S/G Manway Cover 개폐 피폭 현황	34
<표 3-14> S/G ECT 작업 요약	35
<표 3-15> S/G ECT 피폭 현황	36
<표 3-16> S/G Nozzle Dam 사용	37
<표 3-17> S/G Nozzle Dam 사용 피폭 현황	38
<표 3-18> RCP Seal 작업 요약	39
<표 3-19> RCP Seal 피폭 현황	40
<표 3-20> RCP DACS 작업 요약	41

<표 3-21> RCP DACS 피폭 현황	42
<표 3-22> 작업별 개선사항 요약	43
<표 3-23> Application of Robots at Salem and Hope Creek	70
<표 3-24> Cost Saving of Robots in the PSE&G Program	71
<표 3-25> Robotic Application Economic Factors	72
<표 3-26> Factors Generally Influencing the Use of Robots	73
<표 3-27> Technical Factors Affecting the Use of Mobile Robots	73
<표 3-28> Characteristics of the Robot of the Future	73
<표 3-29> 두 원전의 ALARA 프로그램 운영의 차이점	81

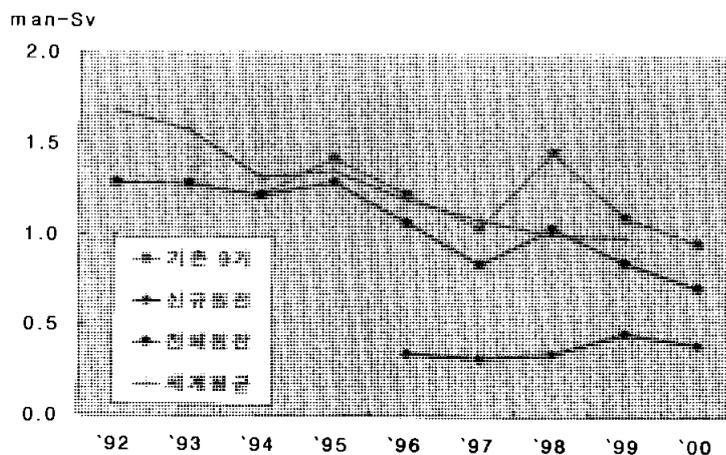
그림 목 차

<그림 1-1> 연간 호기당 방사선 피폭량	1
<그림 2-1> 연도별 20mSv 초과자 분포도	8
<그림 3-1> 데이터베이스 프로그램 화면(예)	15
<그림 3-2> 현재 사용 중인 로봇의 용도	74
<그림 3-3> Breakdown of Estimated Savings	75
<그림 3-4> 월성 제1발전소 ALARA 수행조치	76
<그림 3-5> ALARA 업무수행 흐름	77
<그림 3-6> 달링톤 원전 ALARA 수행조직	78
<그림 3-7> 달링톤 원전의 ALARA 업무수행 흐름	80
<그림 4-1> IAEA의 일반인에 대한 선량제약 절차 개략도	92

제 1 장 연구개발과제의 개요

현재 국내에는 1978년 고리 1호기 가동 이후 18기의 원전이 가동되고 있고, 4기의 원전이 추가로 가동될 예정에 있어 지속적인 원전의 양적 팽창이 예상되고 있다. 최근 국내에서는 방사선방호 신개념(ICRP-60)이 법제화되고, 방사선관리에 대한 규제가 더욱 강화되는 추세로, 원전 작업자의 개인피폭선량한도는 연간 50 mSv (5 rem)에서 5년 간 100 mSv (10 rem)(연평균 20 mSv)로 낮아지고, 또한 방사선 피폭선량의 법적 한도 준수이외에 방사선 피폭선량을 합리적으로 낮게 유지하도록 하는 이른바, ALARA(As Low As Reasonably Achievable) 개념도 법제화되어 원전의 방사선관리에 있어 큰 변화를 맞이하고 있다. 또한 작업자 집단선량 설계목표도 지속적으로 낮아져 0.9 man-Sv/unit-yr까지 도달된 집단선량 설계목표를 2010년까지 0.75 man-Sv/unit-yr까지 더 저감하려는 연구가 장기적으로 이루어지고 있다.

이에 비해 국내원전은 가동년수가 늘어남에 따라, 원전 설비 노후화, 일차계통내 방사선량을 증가, 설비의 노후에 따른 보수빈도의 증가, 이로 인한 원전 작업자의 방사선 피폭선량 증가와 같은 일련의 인과적 사건이 발생할 것으로 예상된다. 최근 국제기구(IAEA, OECD/NEA, WANO 등)에서 발간한 각종 자료를 보면, 국내 원전의 방사선 피폭실적은 전체적으로는 양호한 수준이나 최근 운전 개시한 영광 3, 4호기/울진 3, 4호기 등을 제외하면 세계수준에 못 미치고 있는 점을 고려할 때(<그림 1-1> 참조) 체계적인 방사선 피폭실적의 평가 및 효율적 피폭저감 기술의 적용이 필요하다.



<그림 1-1> 연간 호기당 방사선 피폭선량

방사선피폭저감이 과거보다 현재가 훨씬 어려운 점 - 즉, 과거에 비해 단위 피폭저감 한계비용의 대폭 증가 -을 고려할 때, 보다 경제적으로 방사선 피폭을 저감하기 위해서는 방사선 피폭저감 기술개발 현황 및 피폭저감 경험에 대한 포괄적 조사·분석과 경제성을 평가하여, 최적 또는 최선의 피폭저감기술을 원전에 적용하여야 한다. 이러한 노력은 사업자 측뿐만 아니라, 인허가 기관에서도 병행하여, 축적된 지식과 경험을 사업자와 공유할 때 국내 원전의 방사선안전성이 획기적으로 증대될 수 있을 것이다.

본 연구의 최종목표는 “국내·외 원전의 선량저감 기술·경험의 분석 및 규제 활용방안 연구”이다. 한편 연차별 연구개발목표 및 내용은 아래 표와 같다.

<표 1-1> 연구개발 목표 및 내용

연구개발목표	연구개발 내용 및 범위
국내·외 원전의 선량저감기술·경험의 분석 및 규제 활용방안 연구	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 국내·외 원전의 원전별, 방사선작업별 피폭선량 추이 파악 <ul style="list-style-type: none"> - 국내외 방사선피폭 실적자료 조사 - 원전별, 작업별 작업자 방사선피폭선량 추이 분석 - 고평폭 유발 주요 방사선작업 식별
	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 국내·외 원전별, 방사선 작업별 피폭 저감기술 적용 실태 파악 <ul style="list-style-type: none"> - 고평폭 방사선작업의 피폭선량 저감을 위해 적용된 기술현황 조사
	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 피폭저감화 기술에 따른 피폭선량 저감효과 분석 <ul style="list-style-type: none"> - 주요 피폭 저감기술의 비용-선량저감 효과에 대한 조사 - 효율적 피폭저감 기술 도출
	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 도출 결과의 규제활용방안 연구

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

제 1 절 작업자 집단선량 분포

본 절에서는 현재 운영중인 우리나라를 포함하여 미국 및 유럽연합의 작업자 선량 자료를 분석하였다. 작업자 선량 분석대상의 국내 및 미국 발전소는 <표 2-1>과 같다.

<표 2-1> 작업자 피폭자료 분석 대상 발전소

발전소	가 동 년 도	출력 (MWe)	일차냉각재 계통 (Loop)
CE형 원전			
Arkansas 2	1980	858	2
Calvert Cliffs 1,2	1975, 1977	845	2
Millstone Point 2	1975	870	2
San Onofre 2,3	1983, 1984	1070	2
St. Luice 1,2	1976, 1983	872	2
Water Ford 3	1985	1104	2
웨스팅하우스형 원전			
Beaver Valley 1,2	1976, 1987	830	3
Joseph M Farley 1,2	1977, 1981	829	3
North Anna 1,2	1978, 1980	915	3
Surry 1,2	1972, 1973	781	3
System 80 형 원전			
Palo Verde 1,2,3	1986, 1986, 1989	1270	2
국내 원전			
고리 3,4호기	1985, 1986	900	3
영광 1,2호기	1986, 1987	900	3
울진 1,2호기	1988, 1989	900	3

이들 발전소의 평균 작업자 집단선량은 <표 2-2>와 같다. 또한 작업별 작업

종사자 집단선량 분포는 <표 2-3> 및 <표 2-4>와 같다. 국내 원전의 경우 해외 원전에 비해서 작업자 피폭 선량이 매우 낮게 유지, 관리되고 있으며, 해외 원전의 경우 가장 최근에 건설된 System 80형 원전 작업자선량이 가장 낮은 것으로 나타났다.¹⁾

<표 2-2> 발전소 유형별 작업자 집단선량

연 도	작업자 집단선량 (man-rem)			
	CE형 원전	웨스팅하우스형 원전	System 80 형 원전	국내 원전
1984	329.4	-	-	-
1985	347.9	-	-	-
1986	243.3	661.2	-	-
1987	284.9	447.9	339.9	-
1988	314.3	144.6	323.7	-
1989	193.3	559.0	0.0	131.6
1990	231.8	235.1	166.0	144.3
1991	168.4	286.8	201.4	70.7
1992	158.0	278.4	175.8	95.8
1993	214.5	290.3	203.9	111.4
1994	-	-	-	100.0
평균 작업자선량	237.7	381.7	198.2	109.0

1) 본 자료는 “차세대원자로 기술개발 (II)”의 작업자선량 평가결과를 수록한 평가보고서 내용을 인용한 것임.

<표 2-3> 국내외 원전의 작업별 작업자선량 분포

작업구분 ¹⁾		작업자선량 분포 (%)
보수 작업	1. 핵연료 교체	12.0
	2. 증기발생기 와류 탐상시험	11.5
	3. 증기발생기 누설관 폐쇄 작업	4.7
	4. 증기발생기 세척 작업	1.6
	5. 증기발생기 관련 기타 작업	9.8
	6. 가동중 검사	4.6
	7. 가압기 점검 및 보수	3.8
	8. 펌프 점검 및 보수	5.0
	9. 밸브 점검 및 보수	6.8
	10. 스노바 검사	1.4
	11. 원자로 제염	1.9
	12. 방사성 폐기물 처리	1.9
	13. 보건 물리 활동	3.7
	14. 기타	14.2
계		82.8
정상 운전		17.2
계		100.0

<표 2-4> 국내외 원전의 노형별 작업자선량 분포

유형 작업구분	작업자선량 분포 (%)			
	CE형 원전	웨스팅하우스형 원전	System 80형 원전	국내 원전
정상 운전	10.7	10.8	11.9	20.9
정기 보수	33.7	45.9	56.5	31.2
가동중 검사	8.7	9.4	10.3	4.6
특수 보수	27.5	27.9	7.7	27.6
폐기물 처리	5.2	1.3	6.0	1.9
핵연료 교체	14.3	4.7	7.6	13.9
계	100.0	100.0	100.0	100.0

한편 유럽연합(EU) 가동원전의 노형별 작업자 선량분포 추이를 분석해 보면 <표 2-5>와 같다.2)

<표 2-5> 유럽연합의 작업자선량 분포

Three-year rolling average of total outage dose, outage duration and outage dose per day in European reactors				
	Years	BWR	PWR	VVER
Average outage dose (man-Sv)	1993-95	1449.70	1600.19	472.91
	1994-96	1385.40	1444.23	495.44
	1995-97	1515.95	1347.92	510.23
	1996-98	1539.03	1206.02	608.07
	1997-99	1302.89	1096.92	548.73
Average outage duration (No. of days)	1993-95	43.75	54.96	44.74
	1994-96	42.76	50.94	44.78
	1995-97	44.47	51.56	47.15
	1996-98	48.45	50.79	51.52
	1997-99	46.19	53.45	49.36
Average outage dose per day (man-Sv/day)	1993-95	33.13	29.12	10.57
	1994-96	32.40	28.35	11.07
	1995-97	34.09	26.14	10.82
	1996-98	31.77	23.75	11.80
	1997-99	28.21	20.52	11.12
Total number of outage	1993-95	57	230	38
	1994-96	59	234	40
	1995-97	58	237	41
	1996-98	60	229	42
	1997-99	57	230	42

<표 2-5>에서 보는 바와 같이 PWR의 경우 유지보수 기간이 감소하고, 효과적인 작업관리를 통해 작업자 선량이 감소하는 추세를 보인 반면, BWR에서는 특별한 추세를 발견할 수는 없었다.

한편 ISOE에서는 유사 발전소의 작업자선량을 비교 분석하기 위해 유사 발전소를 Sister Unit Group으로 정의하고 있다.

2) [참고문헌] Nuclear Energy Agency, IOSE, Information System on Occupational Exposure, 10 Years of Experience, 2002.

제 2 절 작업자 개인선량 분포³⁾

본 절에서는 국내 원전의 개인선량 관련 자료를 분석한 결과를 기술하기로 한다. 먼저 1999년까지 선량한도 초과자 현황을 정리하면 <표 2-6>과 같다. 한편 현재의 연간 선량한도인 20mSv를 초과하는 작업자 수의 분포를 <그림 2-1>에 요약하였다.

<표 2-6> 연도별 연간선량 20mSv 초과자수

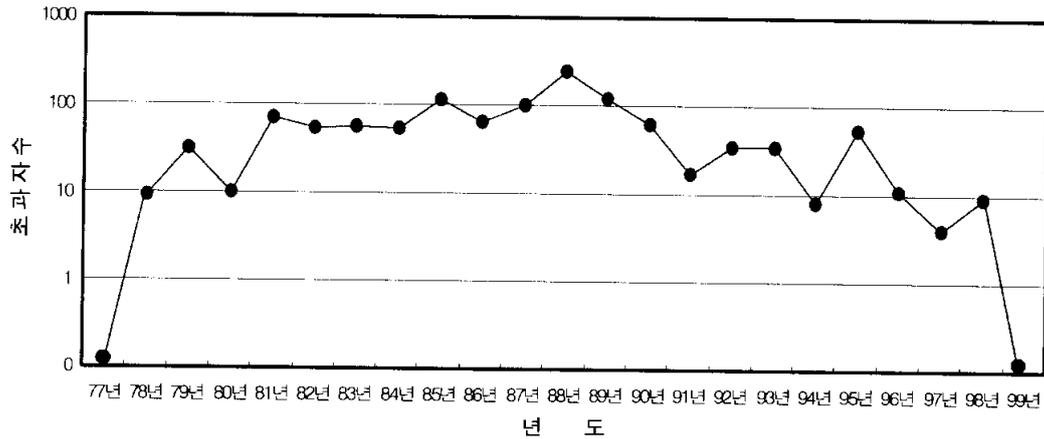
년도	종사자수 (명)	선량한도 초과자수(명)		20mSv 초과자수(명)	20mSv초과자 분 율(%)
		연간50mSv	분기30mSv		
1977	259	0	0	0	0.0
1978	523	0	0	9	1.7
1979	646	0	0	31	4.8
1980	607	0	0	10	1.7
1981	770	0	0	71	9.2
1982	785	0	0	53	6.8
1983	1,689	1 ¹⁾	1 ²⁾	57	3.4
1984	2,412	0	0	55	2.3
1985	3,504	0	0	113	3.2
1986	5,459	0	0	64	1.2
1987	5,422	0	0	102	1.0
1988	6,639	0	0	246	3.6
1989	6,375	0	0	118	1.9
1990	7,111	0	0	62	0.9
1991	6,432	0	1 ³⁾	17	0.3
1992	5,435	0	0	34	0.6
1993	5,302	0	0	34	0.6
1994	5,462	0	0	8	0.1
1995	7,445	0	0	55	0.7
1996	8,333	0	-	11	0.1
1997	8,307	0	-	4	0.05
1998	11,127	0	0	9	0.08
1999	10,814	0	0	0	0
계	연110,858	1	2	1163	1.05

주1) 고리1발(#2) IN-CORE 검출기 구동모타 수리작업('83. 9. 27) : 작업자 1인 선량 52.09mSv

주2) 고리1발 일상작업('83. 4) : 작업자 1인 선량 30.59mSv

주3) 고리1발 IN-CORE 안내관 청소('91. 4. 1) : 작업자 1인 선량 46.46mSv

3) [참고문헌] 안창석, “원자력발전소 방사선 작업종사자 피폭선량 분석 및 방사선 방호관리기법 소개,” 한일원자력주식회사, 2000



<그림 2-1> 연도별 20mSv 초과자 분포도

위의 자료를 토대로 연간 20mSv 초과자의 현황을 분석해 보면, 아래와 같다. <그림 2-1>에서 보는 바와 같이 원자력발전소가 증가한 1988년을 전후하여 원자로 분해조립작업시 비정상작업에 의하여 20mSv를 초과한 종사자가 증가하였다가, 1990년부터 감소하는 추세를 보이고 있다. 그러나 1995년, 고리 3&4호기와 영광1&2호기 원자로냉각재펌프 TVCS & DACS¹⁾ 교체작업으로 종사자 피폭선량이 잠시 증가했다. 그 후 연간 20mSv 초과자의 수는 감소하는 추세를 보이고 있다. 여기서 선량한도 제한치를 초과한 사례를 살펴보면 대부분이 인적실수에 의한 경우로 현재에도 이를 간과할 수는 없을 것이다. 이는 작업자 및 관리자 양쪽 모두의 한순간 방심에 의한 결과로 볼 수 있었다.

ICRP-60 권고치를 부분적으로 적용한 1998년부터 1999년말까지 연간 20mSv를 초과한 종사자는 10명이었다. 그 중 1999년에는 20mSv 초과자는 1명으로 예년과 대비해 보면 각 원자력발전소의 방사선관리에 대한 여러가지 방사선 작업환경 개선과 신장비 도입 등의 노력에 의한 결과라 하겠다.

향후 20mSv를 초과할 우려가 있는 최근 5년간 연 12.5mSv를 초과한 종사자의 주요 업무내용을 정리해 보면 <표 2-7>과 같다.

<표 2-7>의 발전소 별 20mSv 초과예상작업을 살펴보면, 경수로형 발전소의 경우, 정상운전시는 방사성폐기물처리작업과 드럼임시저장고 관리작업이 주요작업이며, 계획예방정비 기간 중에는 원자로분해 및 조립작업, 증기발생기관련작업, 각종 밸브정비작업 등이 있다. 반면 중수로형 발전소의 경우는 핵연료교체관련작업, 감속재 및 냉각재계통 관련작업, 증기발생기 관련작업 등이 있다.

<표 2-7> 최근 5년간 각 발전소별 연간 12.5mSv 초과자 주요업무내용

발전소(연도)		12.5mSv 초과자수	주요업무수행내용	
			정상업무기간	계획예방정비업무기간
고리1	1995년	27	<ul style="list-style-type: none"> ○ 잡고체 폐기물드럼 생성작업 ○ 드럼운반,저장관리 ○ 액체 폐기물고화처리 작업 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 원자로분해조립 ○ 증기발생기교체 및 관련작업 ○ 밸브 정비 ○ RCP TVCS, DACS¹⁾ 교체작업 ○ RTD 우회배관 제거작업 ○ 방사선안전관리
	1996년	42		
	1997년	19		
	1998년	8		
	1999년	27		
	계	123		
고리2	1995년	75	<ul style="list-style-type: none"> ○ 잡고체 폐기물드럼 생성작업 ○ 드럼운반,저장관리 ○ 액체 폐기물고화처리 작업 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 원자로분해조립 ○ 증기발생기관련작업 ○ 밸브 정비 ○ RTD 우회배관 제거작업 ○ RCP TVCS, DACS¹⁾ 교체작업 ○ RCP Motor 교체작업 ○ SI Line 설계변경 작업 ○ 방사선안전관리
	1996년	30		
	1997년	45		
	1998년	10		
	1999년	4		
	계	164		
영광1	1995년	75	<ul style="list-style-type: none"> ○ 잡고체 폐기물드럼 생성작업 ○ 드럼운반,저장관리 ○ 액체 폐기물고화처리 작업 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 원자로분해조립 ○ 증기발생기관련작업 ○ 밸브 정비 ○ RCP TVCS, DACS 교체작업 ○ RCP Motor 교체작업 ○ SI Line 설계변경 작업 ○ 방사선안전관리
	1996년	12		
	1997년	0		
	1998년	45		
	1999년	18		
	계	150		
영광2	*1995년	0	해당사항 없음	○ 원자로분해조립
	1996년	1		
	1997년	0		
	1998년	0		
	1999년	3		
	계	4		
월성1	1995년	28	<ul style="list-style-type: none"> ○ 핵연료교체관련작업 ○ 감속재 및 냉각재 수지교체 작업 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 원자로정비 작업 ○ 증기발생기관련작업 ○ 가동중검사 ○ 방사선안전관리
	1996년	56		
	*1997년	10		
	1998년	32		
	1999년	27		
	계	153		
월성2	-	-	해당사항 없음	
울진1	1995년	10	해당사항 없음	<ul style="list-style-type: none"> ○ 원자로부대설비관련 업무 ○ 증기발생기관련작업 ○ 밸브 정비 ○ 국부누설시험(LLRT)
	1996년	1		
	1997년	7		
	1998년	1		
	1999년	0		
	계	19		
울진2	-	-	해당사항 없음	

주1) TVCS & DACS : Turning Vane Cap Screw & Diffuser Adapter Cap Screw

*는 계획예방정비 없는 연도임.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 국내 원전의 방사선작업별 피폭선량 분석

1. 작업자선량 데이터베이스 프로그램

본 절에서는 고리 3, 4 호기를 참조 원전으로 설정하여 구축한 작업자선량 데이터베이스를 이용하여 보수 작업별 피폭선량을 분석하였다.⁴⁾

원전 작업종사자들의 방사선 피폭을 저감하기 위해서는 우선 고평폭을 유발하는 방사선작업들을 파악하는 것이 필요하다. 작업자선량 평가를 위하여, 원전 현장에서 수행되는 방사선작업들의 피폭관련 자료를 토대로 데이터베이스를 구축하였다. 구축된 데이터베이스는 원전 정기보수 기간 중 작업현장에서 수행되는 방사선작업에 대한 모든 상세한 피폭관련 데이터들을 포함하고 있다. 작업자 피폭자료는 1986년부터 1996년까지의 고리 3, 4호기 방사선작업허가서(RWP : Radiation Work Permit)의 기록 내용을 근거로 구축하였다. 자료내용은 작업호기, 작업연월일, RWP Number, 작업명, 작업내용, 최대선량율(mR/hr), 작업구역에서 최대 및 최소 공간방사선량율(mR/hr), 작업인원(man), 최대개인선량(mrem), 작업소요시간(hr) 등을 포함한다. 총 4334회의 작업에 대한 피폭관련자료를 데이터베이스화하였다.

작업 분류는 참조 원전인 고리 3, 4호기에서 현재 이행하고 있는 작업 분류를 따르는 것을 원칙으로 하여, 보수시 방사선 작업을 총 61개의 상세 작업으로 분류하였다. 이는 <표 3-1>과 <표 3-2>에 나타난 바와 같다. 데이터베이스 실행 화면의 예를 <그림 3-1>에 나타냈다.

4) [참고문헌]

- Y. H. Cho, et al., "INSTORE: A PC-Based Database Program for Occupational Radiation Exposure of a Nuclear Power Plant," Journal of the Korean Nuclear Society," 1998.
- Han-II Atomic Energy Corporation, "Report of Radiation Safety Management-Kori Unit 3 and 4 Maintenance Report," 1986-1995.

<표 3-1> 작업자 피폭선량 평가를 위한 작업분류 코드

주요 작업 코드	주요 작업명	상세 작업 코드	상세 작업명	주요 작업 코드	주요 작업명	상세 작업 코드	상세 작업명	주요 작업 코드	주요 작업명		
A	원자로 작업	A1	준비 작업	E	S/G Nozzle Dam 작업	E1	Dam 설치	N	RTD 점검 보수 작업		
		A2	원자로 해체			E2	Dam 제거				
		A3	핵연료 인출			F	S/G Lancing 작업	E3	기타 관련 작업	O	Snubber 점검 보수 작업
		A4	핵연료 검사					F1	준비 작업	P	Valve 점검 보수 작업
		A5	핵연료 장전	F2	H/H 관련 작업						
		A6	원자로 조립	F3	Lancing 수행						
		A7	원자로 검사	F4	장비 철거 및 제염	Q	P/P 점검 보수 작업				
		A8	기타 관련 작업	F5	기타 관련 작업						
B	S/G Man-way 작업	B1	Man-way Open	G	S/G 관련 기타 작업			R	열교환기 점검 보수 작업		
		B2	Man-way Close								
		B3	기타 관련 작업								
C	S/G ECT 작업	C1	준비 작업	H	RCP 점검 보수 작업	H1	준비 작업	S	Filter 관련 작업		
		C2	Inspection			H2	RCP Motor 관련 작 업				
		C3	Template 설치 제거			H3	RCP Seal 및 MFB 관련 작업				
		C4	장치 설비, 이동			H4	RCP TVCS 관련 작 업	T	Evaporator 관련 작업		
		C5	ECT 수행			H5	RCP DACS 교체	U	제염 세탁 작업		
		C6	기타 관련 작업			H6	기타 관련 작업				
D	S/G Tube 관련 작업	D1	준비 작업	I	PZR 점검 보수 작업			V	폐기물 처리 작업		
		D2	Inspection								
		D3	Template 설치 제거	J	RHR 점검 보수 작업	W	방사선 안전 관리				
		D4	장치 설비, 이동	K	가동중 검사						
		D5	Plugging	L	격납건물 누설 시험	X	계통 운전				
		D6	Sleeving								
		D7	장비 제염	M	In-core 작업	M1	Thimble 관련 작업	Y	폐기물 드럼 저장 작업		
		D8	기타 관련 작업			M2	DFMS 계통 작업				
						M3	Thermo-couple 관련 작업	Z	기타		
						M4	Detector 관련 작업				

<표 3-2> 방사선작업 내용 요약

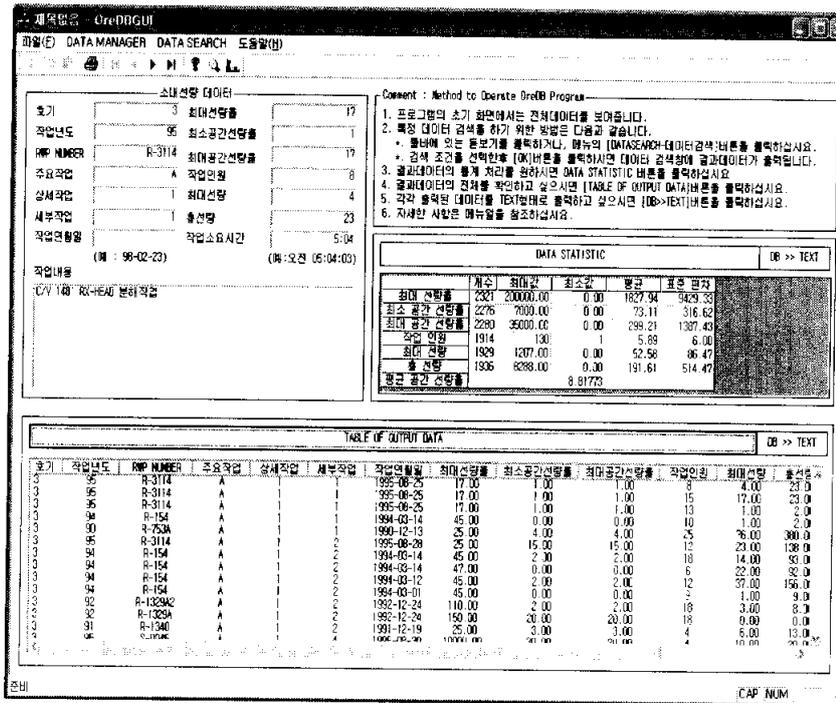
주작업	세부작업	주요작업내용	방사선안전관리 내용
1. 핵연료교체 작업	a. 작업준비	- 핵연료교체작업에 필요한 관련 장비(스터드 관린 장비, CRDM 분해장비, 천정크레인 등)들을 점검 또는 운반	- Stepping 설치
	b. 원자로부대시설 분해	- 원자로 상부 뚜껑을 인양하기 위하여 원자로 부대시설 (CRDM Cable, CRDM 관린배관, 원자로상부 보온재 등) 제거 - 재장전조 밀봉재, MST Guide Bridge 등을 설치	- 원자로상부 및 Cavity 주변 방사선량을 측정 - 작업자 비닐방호복 및 반면마스크 착용
	c. 원자로상부뚜껑 인양	- MST를 이용 Stud Bolt Detension 및 Stud Bolt 제거 - 원자로 상부 및 Cavity 제염 - R/F Machine을 이용 원자로상부뚜껑 인양 및 재장전조 충수	- 원자로상부뚜껑에서 납차폐체 설치 - Air Sampling 및 연속감시기 설치 - 작업자 반면마스크 착용 - Cavity 작업자 비닐방호복, 반면마스크, 납차폐복 착용
	d. 상부내장물 인양	- 원자로 상부내장물 인양 - CEA 인출, 교체, Test	- Bridge Machine 발판 납차폐체 설치 - 작업자 반면마스크 착용
	e. 핵연료 인출	- 전체 핵연료 인출 - 원자로내 이물질 유·무 확인 및 제거	- R/F Machine 바닥에 납차폐체 설치 - Cavity, SFP 수면, Cavity Filtration Unit 방사선량을 측정 - 연속감시기 확인, 감시
	f. 하부내장물 인양	- 원자로 하부내장물 인양	- Cavity 주변 납차폐체 - 작업자 납차폐복, 반면마스크 착용 - 방사선량을 측정 및 Air Sampling
	g. 핵연료검사 및 Rx Vessel UT	- 핵연료 육안검사 및 Rx Vessel UT - 핵연료 삽입체 교환 - 하부내장물 조사시편 제거	- Cavity, SFP 수면 방사선량을 측정
	h. 하부내장물 안착작업	- 하부내장물 안착	
	i. 핵연료 장전	- 핵연료재장전 작업	- R/F Machine 바닥에 납차폐체 설치 - Cavity, SFP 수면, Cavity Filtration Unit 방사선량을 측정 - 연속감시기 확인, 감시
	j. 상부내장물 안착	- 상부내장물 안착	
	k. 원자로 조립	- CEA 제어봉 삽입 - Stud Bolt Hole Plug 제거 및 Rx O-ring 교체 - 원자로상부뚜껑 인양 및 안착 - Stud Bolt Cleaning/MST 안착 - Stud Bolt 조립 및 Tensioning	- 작업자 반면마스크, 비닐방호복 착용 - Cavity 바닥 납담요 설치 - Air Sampling

<표 3-2> 방사선작업 내용 요약 (계속)

주작업	세부작업	주요작업내용	방사선안전관리 내용
2. S/G Manway 작업	a. S/G Manway 개방	- Manway Bolt Detensioner 설치 - S/G Insert Cover 제거 - Manway Open - 2차측 Manway Open 및 관련작업후 Close	- S/G 실 Stepping 설치 - S/G 주변 Platform 설치 - S/G Manway Open 전후 방사선량을 측정 - 작업자 반면마스크 측정
	b. S/G Manway 폐쇄	- Manway Bolt and Bolt Hole Cleaning - Insert Cover Tensioning	- 작업자 반면마스크 측정
3. S/G ECT 작업	a. 준비작업	- ECT 작업준비 - S/G 실내 Tent 설치 및 ECT 장비 점검	- S/G 실 지역분리대 설치 - 작업자 비닐방호복, 반면마스크 착용 - 고방사선부위 납차폐 실시 - S/G Manway 근접시 납조끼 착용
	b. S/G 고온관 template 설치	- S/G 고온관 Template 설치	
	c. S/G ECT 장비 설치	- ECT 장비 설치 및 Air Blower Duct 설치	
	d. S/G ECT 수행	- S/G Bobbin(반장) Test - S/G MRPC Test - U-band MRPC Test	
	e. 장비철거 및 정리정돈	- ECT 장비 철거 및 이동, 보관	
4. S/G tube 관련작업	a. Plugging	- Plugging	- S/G 수실내부 방사선량을 측정
5. S/G Nozzle Dam 관련 작업	a. Nozzle Dam 설치		- S/G 실내 Stepping 설치 - S/G 실내 작업자 반면마스크 착용
	b. Nozzle Dam 제거		- 수실내 작업자 공기공급형 작업복 착용
6. S/G Lancing 작업	a. S/G Lancing 준비	- S/G Lancing 장비 점검 및 반입	- S/G Rm 고방사선구역 납차폐체 설치
	b. S/G Lancing 수행	- S/G Lancing 수행 - S/G Hand Hole Open	- Lancing 수행후 H/H 임시 납차폐체 설치
	c. 마무리 작업	- S/G Hand Hole Cover, Bolt Hole Cleaning - S/G 가조립	
7. S/G 기타작업	a. 2차측 관련계통	- 이차측 Manway 작업 - Feeder Ring J-Nozzle 점검	
8. RCP 점검 보수 작업	a. RCP Motor 점검 작업	- Oil Leak 확인 및 Cleaning - 육안점검 - RCP 하부 베어링부위 및 상하부 Motor 부위 점검	- RCP Rm 입구 Stepping 설치 - RCP Rm 내 작업시 비닐방호복 또는 반면마스크 착용
	b. RCP 분해 준비 작업	- RCP 공구운반 및 장비 점검	- RCP 주변 RCS Line 납차폐 설치
	c. RCP 분해 점검 작업	- Leak-off Line, Spool, Coupling, Seal 분해 - Seal 점검 및 Cleaning	- 지역분리대 설치
	d. RCP 조립 작업	- RCP Alignment 완료 - RCP Oil 교체 - Coupling 조립 및 Leak-off Line 연결	

<표 3-2> 방사선작업 내용 요약 (계속)

주작업	세부작업	주요작업내용	방사선안전관리 내용
9. PZR 점검 보수작업		- PZR 작업 관련 장비 반입 - Manway Open - PZR 관련 V/V 분해점검, Cleaning, 조립 - Manway Blot/Bolt Hole Clearing - Manway Close - PZR 관련 작업 장비 반출	- 방사선량률 측정
10. 정지냉각계통 점검 보수			
11. ISI 관련 작업	a. 준비작업	- ISI 관련 현장위치파악 및 준비	- 작업구역 방사선량률 측정
	b. 검사부위 보온재제거 및 Brushing	- 검사부위(RCS, CVCS, SIS, CCWS, MS 배관), 보온재 제거, Brushing, Buffing 등	
	c. 검사수행	- 격납건물내 각종 배관 UT(Ultrasonic), VT(Visual), PT(Penetration), MT(Magnetic)	
	d. 검사수행 및 보온재 복구	- 보온재 복구	
12. 격납건물 누설시험	a. ILRT		
	b. LLRT	- 격납건물 Opening LLRT	
13. Incore 관련작업	a. Thermocouple 분해 및 Incore Thimble 인출	- Rx Head Thermocouple 분리, CRDM Cable 철거 - Rx Upper Cavity Sand Box Detector 교체	- 작업장입구 Stepping 설치 - 작업자 공기공급작업복 또는 납조끼 착용 - 납차폐체 설치
	b. Incore ECT 준비 및 Thimble Cleaning	- Incore Thimble Brushing - Incore Wet Flushing, Incore Thimble Dry - Incore ECT 준비	
	c. Incore Thimble ECT	- Incore ECT 수행	
	d. Incore 구동기 점검	- Incore Thimble 삽입 - Incore 구동기 점검 - Rx Head CRDM Cable, Incore Thermocouple 설치	
	e. 마무리 작업	- Incore 및 Excore Detector 점검 및 교체 - 작업마무리	
14. RTD 관련 작업			
15. Snubber 관련 작업	a. Snubber 성능시험을 위한 분해/조립	- 격납건물 전지역 Snubber 육안점검 및 Tag 부착 - Snubber 성능시험 및 조립	- 작업구역 방사선량률 측정
	b. 유압식 Snubber 장비	- 유압식 Snubber 조정 및 용접	- 작업구역 방사선량률 측정
16. V/V 점검보수		- RCS, RCGVS, SIS, CGCS, CCWS, SFPCCS 계통, V/V 분해, 점검, 조립	- 작업구역 방사선량률 측정
17. P/P 점검보수		- CV 계통 P/P, SFP P/P, Sump P/P, Aux. F/W, P/P, SI P/P 등	
18. 열교환기 점검 보수		- CV 계통 HX 이차계통 HX점검	
19. Filter 관련작업		- RC & RCP Filter, SI Filter, Cavity Filtration Filter	- 작업구역 방사선량률 측정
20. 중발기점검보수			
21. 재염세탁		- Rx cavity, Sump, Refueling Pool 등	
22. 폐기물처리작업			
23. 방사선안전관리			
24. 계통운전			
25. 폐기물드럼저장			
26. 기타			



<그림 3-1> 데이터베이스 프로그램 화면(예)

2. 주요 인자에 대한 작업자선량 분석

가. 선량율

26개의 주요작업에 대한 작업공간에서의 방사선량율을 조사한 결과는 <표 3-3> 첫 번째 두 열과 같다. 제시된 결과는 1986년부터 1996년까지 수행된 최대 선량율(해당 방사선작업구역에서의 선량율이 최대인 지점에서의 선량율)을 기준으로 그 값이 높은 순서대로 방사선작업을 나열한 것이다. 모든 S/G 관련작업들이 선량율이 높은 작업들의 최상위에 있으며, 나머지는 Filter 관련작업, 격납 건물 누설시험, 핵연료교체작업, 제염세탁 작업, RCP 점검보수 작업, 가동중 검사, In-core 작업등이 다음 순서를 차지하고 있다.

나. 작업인원

26개의 주요작업에 대해 작업에 투입된 작업인원을 조사한 결과는 <표 3-3> 두 번째 두 열과 같다. 제시된 결과는 1990년부터 1995년까지 작업을 수행한 작업인원의 총합을 기준으로 그 순위를 나열한 것으로, 가장 많은 작업인원이 투

여된 작업은 핵연료교체작업이며, 그 다음으로 RCP 점검보수 작업, Valve류 점검보수 작업, 가동중 검사, S/G ECT 작업, In-core 작업, S/G Lancing 작업, S/G Man-way 작업, 기타펌프 점검보수 작업, Snubber 점검보수 작업, Filter 관련작업 순으로 이어진다.

다. 작업빈도

26개의 주요작업에 대해 작업이 연간 수행된 횟수를 조사한 작업빈도 결과는 <표 3-3> 세 번째 두 열과 같다. 1990년부터 1995년까지의 작업횟수의 총합을 기준으로 그 순위를 보면 Valve류 점검보수 작업, 핵연료교체작업, RCP 점검보수 작업, 가동중 검사, S/G ECT 작업, In-core 작업, Snubber 점검보수 작업, S/G Lancing 작업, 기타펌프 점검보수 작업, Filter 관련작업 순으로 많은 횟수의 작업이 수행되었음을 알 수 있다. 그리고, 이 순위는 앞에서 작업인원을 기준으로 조사한 순서와도 대체로 일치하고 있다.

라. 집단선량 평가

연간 집단선량(Annual Collective Dose)은 개인피폭선량(Individual Dose)의 연간 총합으로 구할 수 있으며, 연간집단선량 값을 결정하는 주요 인자로는 작업구역에서의 방사선량을, 작업에 투입된 작업인원, 연간 수행된 작업횟수인 작업빈도, 작업 수행에 소요된 작업시간 등이 있다. 집단선량은 개인선량의 경우와는 달리 법적으로 제한된 규제치가 존재하는 것은 아니지만, ALARA 원칙에 준하여 원전 설계 단계에서 설계목표치를 설정하고 운전시 이 목표치를 준수하도록 하고 있다. 본 연구에서는 구축된 데이터베이스를 이용하여 26개의 주요작업에 대한 집단선량을 산출하였다. 1990년부터 1995년까지 수행된 방사선작업들을 근거로 평가한 주요작업별 집단선량은 <표 3-4>와 같다. <표 3-4>의 결과 중 가장 마지막 열에 제시된 1990년부터 1995년까지의 집단선량 총합을 이용하여, 집단선량이 큰 상위 10개 작업을 선별해 보면 다음 <표 3-5>와 같다. 전체 집단선량 총합에서 이들 상위 10개 작업의 집단선량의 합이 차지하는 비중은 약 94%이며, 상위 5개 작업과 상위 3개 작업이 차지하는 비중은 각각 약 70%, 50%이다.

상기 고피폭 방사선작업들에 대한 요인분석과 상호비교를 통해 고피폭의 원인을 파악하고 피폭저감 방향을 파악하였다. 고피폭 상위 10 개 주요작업들의 집단선량 및 주요 인자들의 통계치는 <표 3-6>과 같다. <표 3-6>에 제시된 집단선량, 작업인원, 작업횟수 값들은 1990년부터 1995년까지 합산한 값들을 비교한 값이다. 그리고, 최대선량을, 최소공간선량을, 최대공간선량을 값들은 1986부터 1996년 동안의 평균값이다. 그리고, 표의 각 열에서 괄호 안에 표기한 숫자들은 전체 작업에 대비한 해당 작업의 순위를 나타낸다.

RCP 점검보수 작업(코드 H)이 주요작업 중에서 집단선량이 가장 높은 것으로 나타났으며, 선량율면에서는 그 크기 및 순위가 증기발생기 작업들에 비해 상대적으로 높지 않으나 작업인원 및 작업횟수 면에서 각각 2 번째와 3 번째의 순위를 보이고 있어 그 고피폭의 원인이 작업에 투입된 인원이 많음과 다수의 작업빈도에 기인함을 알 수 있다. 핵연료교체 작업(코드 A)도 비슷한 양상을 보이는데 역시 선량율은 높지 않으나 투입된 작업인원과 작업횟수의 정도가 역시 고피폭의 원인이 됨을 알 수가 있다. 이 둘 두 주요작업에 대해서는 작업인원과 작업횟수를 줄이는 방향으로 피폭저감 노력이 이루어져야 함이 바람직하다.

S/G Nozzle Dam 작업(코드 E), S/G Manway 작업(코드 B), S/G Tube 관련 작업(코드 D) 등은 전반적으로 선량율면에서 최상위에 랭크되어 있으나 상대적으로 작업인원이나 작업횟수의 수치 및 순위는 그에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 다시 말하면, 증기발생기와 관련된 상기 작업들의 고피폭 원인은 작업 구역의 고선량에 전적으로 기인함을 알 수 있다. 그리고, S/G ECT 작업(코드 C), S/G Lancing 작업(코드 F) 등은 선량율, 작업인원, 작업빈도 등이 모두 비교적 높은 순위를 나타낸다. 이에 따라 증기발생기 관련 작업으로 인한 고피폭을 저감하기 위해서는 선량율 저감이 반드시 필요하다는 결론을 내릴 수 있다. Valve류 점검보수 작업(코드 P)은 집단선량 순위에서 4위의 고피폭작업으로 작업인원과 작업횟수를 그 원인으로 파악할 수 있다. 그 외에 가동중검사(코드 K), In-core 작업(코드 M) 등도 작업인원 및 작업횟수가 상대적으로 더 큰 요인임을 알 수 있다.

<표 3-3> 주요 인자의 작업자선량 영향 순위

최대선량		작업인원		작업빈도	
작업 코드	작업명	작업 코드	작업명	작업 코드	작업명
S	Filter 관련작업	A	핵연료교체 작업	P	Valve류 점검보수 작업
E	S/G Nozzle Dam 작업	H	RCP 점검보수 작업	A	핵연료교체 작업
D	S/G Tube 관련 작업	P	Valve류 점검보수 작업	H	RCP 점검보수 작업
L	격납건물 누설시험	K	가동중검사	K	가동중검사
C	S/G ECT 작업	C	S/G ECT 작업	C	S/G ECT 작업
A	핵연료교체 작업	M	In-core 작업	M	In-core 작업
B	S/G Manway 작업	F	S/G Lancing 작업	O	Snubber 점검보수 작업
U	제염세탁 작업	W	방사선 안전관리	F	S/G Lancing 작업
F	S/G Lancing 작업	B	S/G Manway 작업	Q	기타펌프 점검보수 작업
H	RCP 점검보수 작업	Q	기타펌프 점검보수 작업	S	Filter 관련작업
N	RTD 점검보수 작업	O	Snubber 점검보수 작업	W	방사선 안전관리
W	방사선 안전관리	S	Filter 관련작업	B	S/G Manway 작업
K	가동중검사	E	S/G Nozzle Dam 작업	J	RHR 점검보수 작업
V	폐기물처리 작업	J	RHR 점검보수 작업	Z	기타
Z	기타	Z	기타	I	PZR 점검보수 작업
M	In-core 작업	I	PZR 점검보수 작업	G	S/G 관련기타 작업
P	Valve류 점검보수 작업	D	S/G Tube 관련 작업	E	S/G Nozzle Dam 작업
O	Snubber 점검보수 작업	G	S/G 관련기타 작업	D	S/G Tube 관련 작업
I	PZR 점검보수 작업	U	제염세탁 작업	U	제염세탁 작업
Q	기타펌프 점검보수 작업	V	폐기물처리 작업	L	격납건물 누설시험
J	RHR 점검보수 작업	N	RTD 점검보수 작업	V	폐기물처리 작업
G	S/G 관련기타 작업	L	격납건물 누설시험	N	RTD 점검보수 작업
R	열교환기 점검보수 작업	R	열교환기 점검보수 작업	R	열교환기 점검보수 작업
T	Evaporator 관련작업	T	Evaporator 관련작업	T	Evaporator 관련작업
X	계통운전	X	계통운전	X	계통운전
Y	폐기물드럼 저장작업	Y	폐기물드럼 저장작업	Y	폐기물드럼 저장작업

<표 3-4> 주요작업별 집단선량

(단위: man-mrem/yr)

작업코드	1990	1990	1992	1993	1994	1995	총합
A	17,473	4,710	14,212	15,474	42,839	7,712	102,420
B	2,617	1,848	13,086	14,991	5,729	4,714	42,985
C	11,610	6,333	4,819	8,477	10,824	5,070	47,133
D	2,203	N/A	12,126	N/A	6,196	8,794	29,319
E	15,735	2,158	11,062	21,829	31,984	4,404	87,172
F	2,246	605	2,168	3,280	12,964	8,332	29,595
G	25	N/A	N/A	4	243	50	322
H	7,163	4,331	8,426	9,466	16,700	130,041	176,127
I	732	500	298	241	1,060	95	2926
J	N/A	86	N/A	19	2,352	0	2,457
K	2,703	2,473	7,524	13,163	5,097	5,667	36,627
L	17	N/A	N/A	49	325	88	479
M	2,193	3,376	10,139	5,889	6,827	3,263	31,687
N	N/A	N/A	N/A	652	N/A	973	1625
O	230	2,044	1,502	2,146	4,781	2,310	13,013
P	13,076	5,201	9,463	5,560	14,775	23,395	71,470
Q	431	40	34	828	964	9	2,306
R	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
S	371	522	239	2,264	575	1,020	4,991
T	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
U	N/A	N/A	303	N/A	878	564	1,745
V	366	22	N/A	N/A	N/A	25	413
W	473	217	886	854	822	4,818	8,070
X	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Y	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Z	211	728	145	813	697	637	3,231

<표 3-5> 고평폭선량 상위 10개 방사선작업

순 위	작업코드	주요작업명
1	H	RCP 점검보수 작업
2	A	핵연료교체 작업
3	E	S/G Nozzle Dam 작업
4	P	Valve류 점검보수 작업
5	C	S/G ECT 작업
6	B	S/G Manway 작업
7	K	가동중검사
8	M	In-core 작업
9	F	S/G Lancing 작업
10	D	S/G Tube 관련 작업

<표 3-6> 고평폭 상위 10개 작업의 인자별 통계치

작업	집단선량 (man-mrem)	최대선량을 (mR/hr)	최소공간선량을 (mR/hr)	최대공간선량을 (mR/hr)	작업인원 (man)	작업횟수
H	176127	1359(10)	63.9(11)	344(9)	4420(2)	512(3)
A	102420	3277.8(6)	49.1(12)	249.4(12)	4431(1)	532(2)
E	87172	11990.3(2)	1413(1)	4956.8(1)	280(13)	18(17)
P	71470	414(17)	39.7(17)	91(18)	2263(3)	761(1)
C	47133	3650(5)	132.9(8)	408.6(7)	1129(5)	342(5)
B	42985	3248.5(7)	171.4(6)	476.6(6)	556(9)	60(12)
K	36627	709.2(13)	76(9)	236.1(13)	2024(4)	428(4)
M	31687	453(16)	24.9(20)	66.4(19)	1019(6)	227(6)
F	29595	2658.8(9)	74.4(10)	143.3(17)	663(7)	178(8)
D	29319	8821.4(3)	1121.2(2)	3292.9(2)	154(17)	14(18)

3. 비모수 통계량을 이용한 고피폭 방사선작업 식별 체계

앞 절에서 일정 기간 중 작업자선량의 총합을 기준으로 고피폭 방사선작업을 식별하였다. 그러나 이와 같이 단일 값을 이용하는 통계치를 예측하는 경우, 데이터의 Central Tendency를 나타내는데는 매우 효율적이거나, 데이터의 분포 및 빈도 등과 같이 중요한 통계적 인자를 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 절에서는 비모수(Non-parametric) 통계량을 이용한 (반복적) 고피폭 방사선작업을 식별할 수 있는 체계를 제안하고자 한다.⁵⁾

가. 방법론

본 방법은 방사선작업의 작업자 (집단)선량값의 비모수 통계량인 순위(rank)를 이용하여 고피폭 방사선작업의 순위를 도출하여, 재원이 한정된 상황에서 (피폭선량 측면에서) 우선적으로 저감해야 하는 방사선작업의 우선순위를 가리는데 사용할 수 있다.

본 방법은 크게 4단계로 나눌 수 있다; 1) 상세작업별 집단선량 평가, 2) 상세작업별 집단선량에 대한 백분위수(Percentile) 산출, 3) 각 백분위수별 상세작업의 순위 산출, 4) 상세 작업의 순위합 산출 및 우선순위 도출

(1) 상세 작업별 집단선량 평가

집단선량은 선량율, 작업시간, 작업인원, 이 세 가지 인자를 가지고 기술할 수 있다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{집단선량} = \text{선량율} \times \text{작업시간} \times \text{작업인원} \quad (1)$$

(2) 상세 작업별 집단선량에 대한 백분위수 산출

상세 작업별 집단선량 평가를 하게 되면, 각 상세 작업별로 적게는 수십 개에서 많게는 수백 개의 집단선량 값들을 구할 수 있다. 피폭저감작업 우선순위

5) [참고문헌] Y. H. Cho, et al., "Use of Rank Sum Method in Identifying High Occupational Dose Jobs for ALARA Implementation," Journal of the Korean Nuclear Society," 1998.

를 도출함에 있어서 집단선량 값이 큰 작업부터 우선순위를 두어야 함은 자명하다. 그러나, 앞에서 설명한 바와 같이 상세 작업별 집단선량 값들은 변화가 매우 많기 때문에, 그 상세 작업을 대표할 만한 어떤 값을 설정하여 비교함이 바람직하다. 보통의 경우 평균값이나 중간값 또는 어떤 백분위수 값 등을 대표값으로 설정하여 비교하나, 본 연구에서는 이러한 값들을 모두 포함하면서 전체 집단선량 분포를 동시에 고려할 수 있도록 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 백분위수 값들을 대표값으로 설정하였다.

각 백분위수 값들을 계산할 때, 상세 작업별 집단선량 값들이 어떤 분포를 이룬다고 가정하여 그 분포를 결정하고 계산할 수도 있으나, 본 연구에서는 상세 작업별 집단선량 값들의 분포를 결정하지 않고 계산하였다. 왜냐하면, 상세 작업별 집단선량 값들의 개수가 어떤 분포를 이루기에는 충분하지 않거나, 그 개수가 분포를 이루기에 충분한 경우에도 구체적인 분포를 형성하지 않는 경우가 있기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 상세 작업별 집단선량 분포를 결정하지 않고, 그 값들을 작은 값부터 큰 값부터 나열하여 각 백분위수 값들을 구하였다.

(3) 각 백분위수별 상세 작업의 순위 산출

상세 작업별 집단선량의 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 백분위수 값들을 구하고 나면, 각 백분위수별로 상세 작업의 순위를 계산한다. 이 값들을 비교하여 가장 작은 집단선량 값을 갖는 상세 작업의 순위를 1위로 정하고, 집단선량 값이 커짐에 따라 상세 작업의 순위를 1씩 증가시킨다. 단, 집단선량 값이 같은 작업들의 순위는 평균으로 계산한다.

(4) 상세 작업의 순위합 산출 및 우선순위 도출

상세 작업의 순위합이란 해당 상세 작업의 각 백분위수별 순위를 모두 더한 것이다. 각 상세 작업의 피폭 저감 우선순위는 순위합의 크기에 따라 결정된다. 순위합의 값이 큰 작업이 순위합의 값이 작은 작업보다 우선순위가 높다. 즉, 순위합의 값이 가장 큰 작업이 피폭 저감 우선순위가 가장 높다고 할 수 있다.

나. 도출 결과

<표 3-3>의 작업 구분에 따르면 보수시 방사선 작업은 모두 61개의 상세 작업으로 나뉘어진다. 그러나, 이들 상세 작업 중에서 작업 구분상 존재하지만 실제로 작업은 이루어지지 않는 명목상의 작업들이 7개 존재한다. 그리고, 집단선량 평가를 함에 있어서 충분한 데이터를 확보하지 못한 작업들이 3개 있다. 이러한 작업들은 제외하고 상세 작업별 집단선량 평가를 한 결과, 모두 51개의 상세 작업에 대한 집단선량 평가 결과를 얻었다. 51개 상세 작업의 대표적 집단선량 값을 <표 3-7>에 요약하였다.

이 51개의 상세 작업별 집단선량 평가 결과를 이용하여, 각 상세 작업별 집단선량 값들의 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 백분위수를 산출하였다. 그리고, 최종적으로 각 백분위수별 상세 작업의 순위 및 상세작업별 순위합을 산출한 결과는 <표 3-8>과 같다.

<표 3-8>에서 첫 번째 세로 열은 <표 3-3>의 작업 구분에 따른 상세 작업의 작업 코드를 의미한다. 그리고, 두 번째부터 열 번째 세로 열은 상세 작업별 집단선량 값들의 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 백분위수를 이용하여 구한 각 백분위수별 상세 작업의 순위를 나타낸다. 한 칸에 표시된 숫자는 그 칸의 가로 행에 해당하는 작업의, 세로 열에 해당하는 집단선량 백분위수 값의 순위이다. 마지막 열한 번째 세로 열은 가로 행에서 각 백분위수별 순위를 모두 더한 순위합이다. 이 순위합의 크기에 따라 피폭 저감 우선순위가 결정되는 것으로, <표 3-8>을 보면 작업 코드 D5가 가장 큰 순위합을 갖는 것으로 나타났다. 작업 코드 D5는 <표 3-3>에서 보면 S/G Tube plugging 작업임을 알 수 있다.

피폭 저감 우선순위 도출 결과의 상위 20개 작업의 주요 작업명 및 상세 작업명은 <표 3-9>와 같다. ORE 데이터베이스 프로그램을 이용하여 계산해 본 결과, 피폭 저감 우선순위 상위 20개 작업들이 보수시 작업종사자가 받는 전체 집단선량 값 중에서 평균적으로 75% 정도를 차지하는 것으로 나타났다. 그리고, <표 3-9>에 제시된 피폭 저감 우선순위 상위 20개 작업들 중에서, 12개는 Steam Generator와 관련된 작업들이고, 3개는 RCP와 관련된 작업들임을 알 수 있다. 이를 <표 3-6>의 결과와 비교하면 순위에 있어 다소의 차이는 있으나, <표 3-6>에서 고피폭 방사선 작업으로 파악된 것들이 본 방법을 적용하였을 때에도 고피폭 방사선 작업인 것으로 선별되었음을 알 수 있다.

다. 프리드만 검정법을 사용한 결과 검정

프리드만 검정법을 하기 위한 입력은 <표 3-8>의 첫 번째 세로 열부터 열 번째 세로 열까지의 데이터와 마지막 열두 번째 세로 열의 데이터이다. <표 3-8>에서 첫 번째 세로 열은 상세 작업의 작업 코드를 의미한다. 그리고, 두 번째부터 열 번째 세로 열은 상세 작업별 집단선량 값들의 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 백분위수를 이용하여 구한 각 백분위수별 상세 작업의 순위를 나타낸다. 마지막 열두 번째 세로 열은 가로 행에 각 백분위수별 순위를 모두 더한 순위 합인 순위이다.

<표 3-7> 세부작업별 작업자 피폭선량 통계치

작업명		집단선량(man-mrem)	10 percentile	50 percentile	90 percentile
원자로작업	준비작업	0	46	199	
	원자로 해체	16	111	478	
	핵연료 인출	41	73	324	
	핵연료 검사	66	66	160	
	핵연료 장전	9	19	72	
	원자로 조립	8	138	855	
	원자로 검사	5	20	88	
	기타관련작업	13	61	147	
S/G Manway 작업	Manway Open	35	283	1281	
	Manway Close	1	596	1420	
	기타관련작업	0	250	1450	
S/G ECT 작업	준비작업	1	82	255	
	Template 설치/제거	100	1098	2400	
	장치설비, 이동	94	210	650	
	ECT 수행	7	48	178	
	기타관련작업	15	83	250	
S/G Tube 관련작업	Inspection	85	85	120	
	Template 설치/제거	275	438	3770	
	Plugging	430	2913	8288	
	장비제염	76	76	76	
S/G Nozzle Dam 작업	Dam 설치	0	2110	15441	
	Dam 제거	50	1137	3746	
	기타관련작업	309	309	1842	
S/G Lancing 작업	준비작업	0	65	497	
	H/H 관련작업	28	88	383	
	Lancing 수행	30	128	297	
	장비철거 및 제염	35	99	188	
S/G 관련 기타 작업	0	7	24		
RCP 점검 보수 작업	준비작업	17	120	467	
	RCP Motor 관련작업	0	100	437	
	RCP Seal 및 MFB 관련작업	9	113	450	
	RCP TVCS 관련 작업	0	179	2061	
	RCP DACS 교체	2	370	1286	
PZR 점검 보수 작업	10	60	180		
RHR 점검 보수 작업	0	10	87		
가동중 검사	0	55	300		
격납건물 누설시험	17	70	88		
In-core 작업	Thimble 관련 작업	21	107	411	
	DFMS 계통 작업	16	54	169	
	Thermocouple 관련 작업	20	42	86	
	Detector 관련 작업	17	56	157	
RTD 점검 보수 작업	21	218	573		
Snubber 점검 보수 작업	0	64	191		
Valve 점검 보수 작업	8	60	290		
P/P 점검 보수 작업	0	4	56		
Filter 관련 작업	1	15	77		
제염 세탁 작업	21	122	469		
폐기물 처리 작업	22	41	98		
방사선안전관리	5	35	281		
기타	0	18	201		

<표 3-8>의 데이터들을 SPSSPC를 이용하여 프리드만 검정을 실시하였다. 계산 결과, 프리드만 검정 통계량 값은 12.0941 이었다. 이 값을 χ^2 분포의 임계치 중 자유도 9(10-1)의 $\chi^2(0.05)$ 값과 비교하였다. 비교 결과, 프리드만 검정 통계량 S 값이 자유도 9의 값 $\chi^2(0.05)$ 보다 작았다. 이는 <표 3-8>의 열 개의 표본 - 각 백분위수별 순위 및 순위합의 순위 - 들이 동질성이 있으며, 모집단의 성질을 비교적 정확히 묘사하고 있음을 의미한다.

<표 3-8> 백분위수별 상세 작업 및 상세 작업별 순위합과 순위

작업 코드	각 백분위수 순위									순위합	순위합의 순위
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%		
A1	6	8	7	9	12	11	18	20	21	112	8
A2	28.5	28	24.5	27	33	35	35	34	36	281	32
A3	42	38	30	26	24	16	26	29	29	260	29
A4	44	44	36	28	22	33.5	28	23	16	270.5	31
A5	23.5	13	9	7	6	4.5	3	3	3	72	5
A6	21.5	36	34.5	37	38	38	38	39	40	322	40
A7	17.5	10	8	8	7	7	5	6	9	77.5	7
A8	26	24	26	21.5	19	18.5	22	21	14	192	21
B1	40.5	44.5	42	40	43	43	43	43	41	380	45.5
B2	13	43	43	46	47	46	45	45	43	371	43.5
B3	6	20.5	41	41	42	40	42	41	44	317.5	39
C1	13	20.5	15	19.5	26	28	27	25.5	24	198.5	22
C3	48	50	48	48	48	47	46	47	47	429	49
C4	47	46	44	42	40	42	40	40	39	380	45.5
C5	20	13	12	13	13	13	16.5	14	18	132.5	11
C6	27	31.5	33	30.5	27	25	22	25.5	23	244.5	26
D2	46	42	40	35	28	27	22	16	12	268	30
D3	49	48	49	47	46	44	47	46	49	425	48
D5	51	51	51	49	51	50	50	49	50	452	51
D7	45	41	38	33	25	18.5	11	8	4	223.5	24

<표 3-8> 백분위수별 상세 작업 및 상세 작업별 순위합과 순위(계속)

작업 코드	각 백분위수 순위									순위합	순위합의 순위
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%		
E1	6	10	39	51	50	51	51	51	51	360	42
E2	43	44.5	50	50	49	49	49	50	48	432.5	50
E3	50	49	47	44	44	48	48	48	45	423	47
F1	19	33	22	21.5	21	26	37	38	37	254.5	28
F2	38	35	31	32	29	29	32	31	30	287	34
F3	39	39	37	38	37	31	29	30	27	307	38
F4	40.5	31.5	32	25	30	24	25	18	19	245.5	27
G0	6	3	3	3	2	1	1	1	1	21	2
H1	31	29	29	34	35	33.5	31	36	34	292.5	35
H2	6	3	22	24	31	30	30	33	32	211	23
H3	23.5	34	34.5	36	34	32	36	35	33	298	37
H4	6	6	2	2	39	41	41	44	46	227	25
H5	15	47	46	45	45	45	44	42	42	371	43.5
I0	25	17.5	17.5	14.5	17.5	20	13	12	13	150	15
J0	6	3	5	4	3	3	6	5	7	42	3
K0	6	10	11	14.5	15	22	20	22	28	148.5	14
L0	31	16	28	30.5	23	14	9	9	8	168.5	17.5
M0	16	15	13	11	9	9	16.5	11	11	111.5	9
M1	35	30	27	29	32	36	33	32	31	285	33
M2	28.5	27	20	18	14	15	14.5	17	17	171	19
M3	33	26	17.5	12	11	8	8	7	6	128.5	10
M4	31	24	17.5	19.5	16	12	14.5	19	15	168.5	17.5
N0	35	22	45	43	41	39	39	37	38	339	41
O0	6	19	22	23	22	21	19	13	20	163	16
P0	21.5	17.5	17.5	17	17.5	23	24	24	26	188	20
Q0	6	3	1	1	1	2	2	2	2	20	1
S0	13	7	6	6	4	4.5	4	4	5	53.5	4
U0	35	37	24.5	39	36	37	27	27	35	297.5	36
V0	37	24	14	16	10	17	10	10	10	148	13
W0	17.5	13	10	10	8	10	12	28	25	133.5	12
Z0	6	3	4	5	5	6	7	15	22	73	6

<표 3-9> 피폭 저감 우선순위 상위 20개 작업

작업 코드	주요작업명	상세작업명	순위합
D5	S/G Tube 관련 작업	Plugging	452
E2	S/G Nozzle Dam 관련 작업	Dam 제거	432.5
C3	S/G ECT 작업	Template 설치 제거	429
D3	S/G Tube 관련 작업	Template 설치 제거	425
E3	S/G Nozzle Dam 관련 작업	기타 관련 작업	423
C4	S/G ECT 작업	장치 설비, 이동	380
B1	S/G Man-way 작업	Man-way Open	380
B2	S/G Man-way 작업	Man-way close	371
H5	RCP 점검 보수 작업	RCP DACS 교체	371
E1	S/G Nozzle Dam 관련 작업	Dam 설치	360
N0	RTD 점검 보수 작업	RTD 점검 보수 작업	339
A6	원자로 작업	원자로 조립	322
B3	S/G Man-way 작업	기타 관련 작업	317.5
F3	S/G Lancing 작업	Lancing 수행	307
H3	RCP 점검 보수 작업	RCP Seal 및 MFB 관련작업	298
U0	제염 세탁 작업	제염 세탁 작업	297.5
H1	RCP 점검 보수 작업	준비 작업	292.5
F2	S/G Lancing 작업	H/H 관련 작업	287
M1	In-core 작업	Thimble 관련 작업	285
A2	원자로 작업	원자로 해체	281

제 2 절 작업자선량 저감기술 및 경험 조사·분석

1. 원전 보수시 (고피폭) 방사선작업 분석

<표 3-9>에서 언급한 20개 방사선작업 중 최상위 10개 방사선작업을 다시 분류해보면, 고피폭 방사선작업은 증기발생기 Tube Plugging 작업, 증기발생기 Manway 작업, 증기발생기 ECT 작업, 증기발생기 Nozzle Dam 관련 작업, 그리고 원자로냉각재 펌프 점검 보수 작업 - RCP seal 및 DACS 작업 - 과 관련된 것임을 알 수 있다. 따라서 본 절에서는 상기 6개 방사선 작업에 대해 고리 3, 4호기 작업절차서를 근거로 직무분석을 수행하였다.

가. S/G Tube Plugging

증기발생기 Tube Plugging 작업과 관련된 작업요건, 초기조건, 작업순서 및 내용 등을 요약하면 <표 3-10>과 같으며, <표 3-11>은 1990~1995년까지 고리 3, 4호기 정기보수기간 중 S/G Tube Plugging 작업중 작업자가 받은 피폭선량 데이터이다.

개선이 필요한 사항에 대해 기술하면 다음과 같다. S/G Tube Plugging 작업은 피폭저감 대상 작업중 최상위로 판명된 작업이다. <표 3-11>에서 보듯이 본 작업이 이루어지는 장소의 선량율은 매우 높은 편이므로, 다른 작업에 비해서 작업자가 받게 되는 피폭이 매우 높다. 따라서, 본 작업을 수행하기 위한 작업 수행자는 특별히 훈련되어 있어야 한다고 작업 절차서에 명시되어 있으며, 이를 반영하듯 작업순서에 모의훈련이 포함되어 있다. 따라서, 본 작업의 피폭 저감화는 전체 ORE 저감화와 직결된다해도 과언은 아니다.

본 작업을 수행하기 위해서 작업종사자는 직접 S/G 수실 내부로 들어가야 한다. 관련 작업이 수실 내부에서 이루어지므로 이것이 고피폭의 한 요인으로 볼 수 있다. 수실 내부에서 이루어지는 작업으로는 Template 취외 및 설치, Tube Cleaning, Tube Sizing, Tube Plugging, Deplugging 작업 등이 있다. 이들 작업을 수행하기 위해 예비단계로 이루어지는 각종 검사 등은 모두 작업 종사자의 육안검사로 수행되게 되어 있다. 더욱이 수실 내부는 각종 장비를 휴대하고 들어가기에는 충분하지 않으며, 수실 바닥의 습분에 의해 전도 사고의 위험

성도 항시 존재하므로 작업자가 유의해야 한다. 이것은 작업시간 지연의 요인이 된다.

<표 3-10> S/G Tube Plugging 작업 요약

항목	내용	
작업명	S/G Tube Plugging 작업	
작업요건	작업책임자	다음과 같은 소정의 훈련을 받은자 - 이론 : 최소한 15시간 이상 - 실기 : 모의훈련 25시간 이상 - 원자력 보수 훈련소의 S/G 세관 정비과정 교육 훈련의 소정과정을 이수한 자
	작업수행자	- 발전소 근무경력 1년 이상 - 모의훈련에 합격한 자
초기조건	(1) S/G 1차측 수실의 Man-way는 개방되어야 하며 계통은 격리되어야 한다. (2) S/G 수실의 조명시설 설치 및 정비 중 사용되는 압축공기는 정비 기간 중 항상 가용해야 한다. (3) S/G Tube Plugging 대상은 식별이 용이하도록 Template에 표시되어야 하며 S/G 수실에 부착되어 있어야 한다. (4) 사용할 Plug의 사양 확인	
작업순서 및 작업내용	준비작업	작업을 준비하는 단계로서 사용할 장비 점검 및 실제 작업의 모의훈련 실시 - 장비점검 - 장비 Line-up 및 해체 - Torque 조정 - 모의훈련
	Template Marking	Plugging을 실시할 Template를 수실 밖으로 꺼내 Plugging 위치를 표시하고 재설치하는 단계 - Template 취외 : 작업 수행자가 수실내로 입실하여 고무 Plug 제거 및 Template 취외 - Template Marking : Template에 Plugging 위치를 표시 - Template 설치 : Plugging 위치가 표시된 Template를 수실내에 설치, 고무 Plug로 조정
	Tube Plugging	Tube Plugging을 실시하기 위해 해당 Tube의 내면을 세척하고 Tube sizing을 실시하여 Plugging이 정확히 이루어질 수 있도록 준비한 후 Plugging을 실시하는 단계 - Tube cleaning : 작업 수행자가 수실내에서 Wire Brush로 수행 - Tube sizing : 작업 수행자가 Plugging 대상 Tube에 실시 - Tube plugging
	Inspection & Deplugging	Plugging이 제대로 이루어졌는지 확인하고 제대로 Plugging이 이루어지지 않았을 경우 Deplugging을 실시 - Inspection : Plugging 간격 측정 및 작업수행 적정 유무 확인 - Deplugging

따라서, 본 작업의 ORD(Occupational Radiation Dose) 저감을 위해서는 피폭 선량율과 피폭시간을 동시에 저감시킬 수 있는 방안이 필요하다.

Tube Plugging 작업 수행을 위해 원격 장치 및 로봇의 도입이 필요하다. 이것은 S/G 수실 내부로 작업자가 들어가는 것을 완전히 배제하는 효과가 있으므로 피폭 저감효과가 다른 방안에 비해 뛰어나며, 부수적으로 관련 작업자의 수도 줄일 수 있는 효과도 따르게 된다. 그러나 이를 위해서는 원전 설계시 S/G 주변에 원격장치 및 로봇 운전을 위한 제어실을 고려해야 하므로 원전의 GA에 영향을 미칠 수 있다.

작업 수행중 실시하는 각종 검사를 작업자의 육안으로 수행하는 대신 원격 카메라를 사용하여 수행하는 것은 고려해 볼만하다. 이것은 미국의 경우 비용-효율도가 가장 높은 ORD 저감화 방안으로 나타났다. 참고문헌에 의하면 Plugging Inspection을 위한 Photographic Technique은 관련 비용이 1984년 기준으로 \$5,000이고 이에 따른 선량 저감 효과는 1,600 person-rem이 저감되는 것으로 나타났다. 이것은 비용-효율도가 3.1\$/person-rem 로 비용 면에서 아주 효과적인 것으로 볼 수 있다.

<표 3-11> S/G Tube Plugging 피폭 현황

연도	Man-hour	최대개인선량 (person-mrem)	집단선량 (person-mrem)	최대 선량율 (mR/hr)
1990	8.17	210	905	10,000
1992	294.50	580	12,126	8,000
1994	99.67	350	2,913	5,700
1995	155.67	734	8,718	22,000
평균	139.5 (man-hour/yr)	468.5 (person-mrem)	6,165.5 (person-mrem/yr)	11,425 (mR/hr)

나. S/G 1차측 Manway Cover 개방 및 폐쇄

S/G 1차측 manway cover 개방 및 폐쇄 작업과 관련된 작업요건, 초기조건, 작업순서 및 내용 등을 요약하면 <표 3-12>와 같으며, <표 3-13>은 1987~1995년까지 고리 3, 4호기 정기보수기간 중 S/G Manway Cover 개폐 작업중 작업

자가 피폭받은 선량 데이터이다.

개선이 필요한 사항에 대해 기술하면 다음과 같다. S/G Manway Cover 개폐 작업은 S/G Tube Plugging 작업 등 작업종사자가 S/G 수실 내로 들어가는 작업에 부수적으로 수행되는 작업이다. Manway Cover의 개폐는 Torque Wrench, Torque Multiplier를 이용하여 작업자가 수동으로 행하고 있고, 이에 따른 Bolt 고착사고가 잦다. Bolt가 고착되는 경우 이의 보수에는 외국의 전문 인력을 사용하는 등의 어려움이 존재한다.

Manway Cover의 무게는 약 295kg 정도로 취급시 사고를 발생시킬 수 있으므로 유의해야 한다. 또한, 작업 중 Manway Cover Insert Disk와 Bolt 낙하에 의한 안전사고에 주의해야 한다. 특히, Insert Disk를 분리하여 수실 개방시 오염된 냉각수 누설에 유의해야 하는데 현재 이를 위해서는 작업자가 20 리터 들이 양동이를 Manway 하단부에 설치하여 누설을 방지하고 있는 형편이다. 따라서 작업 중 오염된 냉각수가 담긴 양동이의 취급에 주의를 기울여야 한다.

S/G 수실 내부 세척 및 점검은 작업 수행자가 직접 수실 내부로 들어가서 행해야 하는데 이것은 고피폭의 요인이 된다. 이밖에 주변 구조물에 의한 Manway 접근로 및 작업 공간의 협소함도 작업시간 지연의 원인으로 들 수 있다.

Manway Cover의 개폐를 볼트의 조임과 풀림으로 수행하므로 이에 따른 Bolt 고착 문제를 해결하는 것이 피폭 저감화의 가장 커다란 관건이 된다. 이의 해결 방안으로 Manway Cover를 설계시 Hatch 식으로 설치하는 것을 고려해 볼만하다. 이는 Bolt 고착문제를 해결할 뿐만 아니라 기존의 개폐장비를 작업 수행자가 협소한 작업 장소로 운반할 필요가 없으므로 작업 시간 단축에 크게 기여를 할 것으로 예상된다. 더불어 설계시 Manway Hatch를 S/G에 부착함으로써 Lift 장비를 사용할 필요가 없어지므로 Cover 낙하에 의한 안전사고 또한 미연에 방지할 수 있을 것이다.

더 나아가 Hatch를 이중 Hatch로 설계하여 내부에 오염된 냉각수의 누설을 방지하기 위한 Discharge Tank 혹은 Drain을 설계한다면 작업 수행자가 양동이를 들고 오염된 냉각수를 처리하게 되는 번거로움도 덜 수 있을 것이다.

수실내의 검사는 작업 수행자가 육안으로 수행하는데 원격조정 사진 검사 장비 등을 이용하면 수실내 입실을 통한 고피폭을 방지할 수 있을 것이다.

<표 3-12> S/G 1차측 Manway Cover 개방 및 폐쇄 작업 요약

항목	내용	
작업명	S/G 1차측 Manway Cover 개방 및 폐쇄	
작업요건	작업수행자 및 책임자는 사내자격 일반기계 Level 1 이상 소지자이어야 한다. 단, 작업 보조자는 제외한다.	
초기조건	(1) 운전 절차서에 따라 계통 격리 및 Line-up이 수행되어야 한다. (2) S/G 1차측 수실의 압력방출, 배수상태 및 증기발생기 1차측 배수밸브 열림상태 등을 확인한다. (3) 사용 장비의 건전성 여부를 확인한다. (4) S/G 내부압력이 대기압 이상일 때는 절대로 작업을 수행해서는 안된다.	
작업순서 및 작업내용	Manway Cover 개방	작업 수행자가 Manway에 접근하여 Lift 장치를 설치하고 Manway Cover와 Insert Disk를 제거하고 수실내 이물질의 삽입을 방지하기 위해 임시 Cover를 부착 - Bolt 번호 부여 및 Unbolting - Manway Cover Lift 장비 설치 및 고정 - Manway Cover 분리 - Insert Disk 분리 : 오염된 냉각수 누설 유의 - Manway 가스켓 제거 - 임시 Cover의 부착 : 수실내에 이물질의 삽입 방지
	점검	분해된 Manway Cover Insert Disk, 각종 Bolt의 상태를 파악하고 파손된 Bolt는 새것으로 교환하고 청소를 수행한다. 이 후 수실내에 작업 수행자가 입실하여 수실내의 이상유무를 확인하고 이물질 제거작업을 실시 - 분해부품 점검 : Bolt의 나사산 및 Bolt Hole 점검 및 청소, Bolt Hole 삽입 점검 - S/G 수실 내부 점검 : 육안점검, 이물질 잔존시 청소
	Manway Cover 조립	수실내의 작업이 종료되면 원상태로 복귀하기 위해 Manway Cover 제거의 역순으로 작업을 수행하여 Manway Cover를 설치 - 수실내부 재확인 - 분해부품의 청소 및 조립준비 작업 - 가스켓과 Insert Disk 설치 - Manway Cover 조립 및 Bolting - Manway Lift 장비 제거 - Bolting 상태 재점검 - Manway Cover 및 Bolt의 이물질 제거
	성능시험	원자로의 고온대기 상태에서 누설유무를 확인

<표 3-13> S/G Manway Cover 개폐 피폭현황

연도	Man-hour	최대개인선량 (person-mrem)	집단선량 (person-mrem)	최대 선량율 (mR/hr)
1987	215.67	560	11,146	5,000
1989	96.00	25	100	50
1990	212.17	235	2,317	9,000
1991	737.33	195	1,483	9,000
1992	507.16	233	7,078	8,000
1993	173.50	735	5,228	25,000
1994	283.79	122	4,350	15,000
1995	140.33	341	4,694	20,000
평균	295.7 (man-hour/yr)	305.8 (person-mrem)	4,549.5 (person-mrem/yr)	11,381.3 (mR/hr)

다. S/G ECT

S/G ECT 작업과 관련된 작업요건, 초기조건, 작업순서 및 내용 등을 요약하면 <표 3-14>와 같으며, <표 3-15>는 1990~1995년까지 고리 3, 4호기 정기보수 기간 중 S/G ECT 작업중 작업자가 피폭 받은 선량 데이터이다.

개선이 필요한 사항에 대해 기술하면 다음과 같다. S/G ECT 작업은 크게 두 가지 단계로 구분된다. 첫 번째 단계는 작업에 필요한 각종 검사 장비들을 수실 내부 및 수실 주변 작업 장소에 설치 및 철수하는 것이고 두 번째 단계는 설치된 장비들을 이용하여 신호 수집 등의 작업을 수행하는 단계이다.

이중 첫 번째 단계인 장비의 설치 및 철수는 작업자가 S/G 수실 내부로 직접 입실하여 이루어지므로 고피폭을 수반하게 된다.

두 번째 단계인 신호수집 및 자료처리는 S/G 수실 주변에 작업 장소를 설치하여 오염 방지를 위한 Tent등을 설치하여 작업자의 피폭을 방지하고 있다.

앞의 두 작업에서 언급하였듯이 S/G 수실내부로 작업자가 입장하는 경우 고피폭이 필수적으로 수반되므로 수실 내부로의 입실을 배제하는 방안이 최우선적으로 검토되어야 한다. 이를 위해 S/G 수실내 작업용 원격조정 장치 및 탐재 장치의 도입이 요구된다. 실제로 CE사의 정기보수기간 단축연구에 의하면 작업자가 S/G 수실 내부로 입실하지 않고 채널 내에 장치될 수 있는 원격장치를 사

용함으로써 3기의 Ringhals 발전소 부지 내에서 25 man-rem의 피폭량을 저감시켰다고 알려져 있다.

<표 3-14> S/G ECT 작업 요약

항목	내용	
작업명	S/G 전열관 와류탐상 검사 신호 수집	
작업요건	S/G 수실내의 장비 설치 및 철수자	장비의 설치 및 철수에 대한 모의훈련을 받고 합격한 자
	신호수집업무	Level 2 이상 자격을 갖춘 자의 감독하에 Level 1 이상 자격을 갖춘 자가 수행
초기조건	(1) S/G 수실 내부 장비 설치 및 철수 작업 수행자는 사전에 모의훈련을 반복 실시하여 검사 장비를 신속하고 정확하게 설치 및 철수시킬 수 있어야 한다. (2) S/G 주변에 내부의 오염물질이 Tent 및 공기 배출기를 설치하고 분리대를 설치하여 필요없는 출입을 삼가야 한다. (3) 검사장비의 반입 및 반출은 오염확산을 위해 비닐 포장을 해야 한다.	
작업순서 및 작업내용	검사장비 및 부품 점검	탐촉자 위치 조정 및 탐촉자 운전장비, 보정 표준 시험관, 전열관 번호 판독판
	검사장비의 설치 및 결선	- 전열관 번호 판독판 설치 : 판독판과 전열관의 구멍이 일치하도록 설치 - 탐촉자 운전 장비 설치 - 탐촉자 보호망의 설치 - 탐촉자 위치 조정장비 설치 - 장비 결선, 케이블 설치 및 시험 - 보정 표준 시험관 설치
	신호 수집 및 기록	
	탐촉자 위치 조정	
	탐촉자 운전장비 (4D Probe Push Puller) 조작	
	검사장비의 철수 및 제염	- 검사장비의 이물질 제거 - 검사장비 확인 점검 - 제염
	장비 shutdown 및 자료관리	

또한, 1978년부터 Vermaat사에서 개발하기 시작한 원격장치는 몇 가지 시험을 거친 뒤 현재는 Tube Plugging, Pulling, Sleeving과 육안검사, Drilling, 용접 등의 작업공구 조작에도 사용되고 있다고 알려져 있다. 또한, Mitsubishi사에서 개발한 전자동 S/G ECT 설비는 수실밖에 설치된 전산시스템에 의한 원격조작

이 가능하고 운전 및 자료분석을 자동으로 수행하게 되어 있다. 이것은 Tube 2 개에 대해 병행 검사가 가능하다는 장점이 있다. 이것은 고피폭을 방지할 뿐 아니라 작업자의 수도 줄일 수 있는 방안으로 이러한 원격장치를 차세대 원전의 설계에 반영한다면 상당한 피폭의 저감이 예상된다.

또 하나의 개선방안으로 수실 주변에서 작업하는 작업자의 피폭을 방지하기 위해 휴대용 임시 차폐체를 이용하여 피폭을 저감화하는 것과 설계시에 영구 작업대를 설치하여 임시 작업대를 설치하는데 걸리는 시간을 단축하여 피폭을 저감화하는 방안도 검토해 볼만하다.

<표 3-15> S/G ECT 피폭현황

연도	Man-hour	최대개인선량 (person-mrem)	집단선량 (person-mrem)	최대 선량을 (mR/hr)
1990	322.81	470	7,322	10,000
1991	200.06	460	4,008	9,000
1992	56.65	500	2,802	10,000
1993	93.50	980	4,419	25,000
1994	56.83	712	2,958	9,000
1995	14.60	166	575	4,000
평균	124.1 (man-hour/yr)	548 (person-mrem)	3,680.7 (person-mrem/yr)	11,166.7 (mR/hr)

라. S/G Nozzle Dam 사용

증기발생기 Nozzle Dam 작업과 관련된 작업요건, 초기조건, 작업순서 및 내용 등을 요약하면 <표 3-16>과 같으며, <표 3-17>은 1989~1995년까지 고리 3, 4호기 정기보수기간 중 S/G Nozzle Dam 사용 작업중 작업자가 피폭받은 선량 데이터이다.

개선이 필요한 사항에 대해 기술하면 다음과 같다. S/G Nozzle Dam 관련 작업은 피폭 저감 우선순위의 2위를 차지하고 있다. 상기 S/G 관련 3개의 작업에서도 언급하였듯이 수실 내로 작업 수행자가 입장하여 작업이 이루어지는 것은 최대한 배제해야 한다. 이를 위해 수실 작업용 원격장치의 도입을 고려해 볼만하다.

<표 3-16> S/G Nozzle Dam 사용

항목	내용	
작업명	S/G Nozzle Dam 사용	
작업요건	해당부분 Level 2 이상 인자. 단, Level 2가 확보될 때까지의 해당 기기의 일반 점검은 정비경력 2년이상인 자, 정밀분해 점검은 정비경험이 4년 이상인 Level 1도 가능	
초기조건	<p>(1) 수압 시험시</p> <ul style="list-style-type: none"> - 훈련용 드럼이 준비되어 물을 공급할 수 있고 가압장치가 되어야 한다. - 수압을 측정할 수 있는 교정된 게이지가 준비되어야 한다. - Torque Wrench의 사용 방법이 숙지되어 있어야 한다. <p>(2) Nozzle Dam 사용시</p> <ul style="list-style-type: none"> - S/G 수실 내부에 적절한 환기 및 조명이 설치되어야 한다. - 원자로 냉각계의 수위는 노즐 링 이하로 유지되고 급격한 수위변동을 방지하기 위해 안전주입 탱크가 격리되어야 한다. - 수실내부의 온도가 충분히 낮아야 한다. - 충분한 사전 모의훈련을 수행하여 작업중 작업자의 피폭선량을 최소화해야 한다 	
작업순서 및 작업내용	수압시험	<p>(1) Nozzle Dam 설치 : Nozzle Dam과 수압시험장비를 설치하고 연결한다.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nozzle Dam 측면 및 중앙판의 손상, 균열 유무 확인 - Bolt Hole 주위, Hinge 및 Hinge Pin, 분할링 손상균열 유무 확인 - 다이어프램 및 모든 Bolt 검사 - Nozzle Dam과 다이어프램 양면의 청소 - 조립 - 수압 시험기와 Nozzle Dam 연결
		<p>(2) 시험 : 수압시험 실시</p> <ul style="list-style-type: none"> - 수압 시험기 이상여부 점검 - 수압 시험기 상부 배기 밸브를 닫는다. - 수압 공급 밸브를 열어 압력 조절 : 1.42kg/cm² - 수압시험 : 시험압력에서 최소 10분간 유지시킨 후 누설 여부를 검사 <p>(3) Nozzle Dam 제거 : Nozzle Dam을 제거하여 수실내 설치를 위해 포장한다.</p>
	Nozzle Dam 사용	<p>(1) Nozzle Dam 설치</p> <ul style="list-style-type: none"> - 액체침투 탐상검사 실시 - Nozzle Dam 측면 및 중앙판의 손상, 균열유무 확인 - Bolt Hole 주위, Hinge 및 Hinge Pin, 분할링의 손상 균열 유무 확인 - 다이어프램 및 모든 Bolt 검사 - 배수라인의 막힘여부 및 배수밸브의 열림상태 확인 - Bolting, 설치
		<p>(2) 검사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 수위 및 누수여부 확인 - 밀봉부위 누수여부 확인 - Nozzle Dam 누수 여부는 수시로 확인 <p>(3) Nozzle Dam 제거</p> <ul style="list-style-type: none"> - Unbolting 및 제거 : 고온관쪽을 먼저 제거한 후 저온관쪽 제거 - 수실내에서 Nozzle Dam 제거 - 수실내 이물질 점검 <p>(4) 보관</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nozzle Dam의 모든 부품 오염 제거 - 저장박스에 보관

작업 관련 데이터를 살펴 본 결과 Nozzle Dam 사용에 의한 피폭은 주로 기존의 Nozzle Dam을 설치하고 제거하는데 많은 피폭을 받고 있는 것으로 나타났다. 이는 기존의 Nozzle Dam의 중량과 크기로 인해 작업시간이 지연되기 때문으로 알려져 있다. 이를 위한 개선방안은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 하나는 Mitsubishi사에서 개발한 개량 Nozzle Dam을 사용하는 것으로 이것은 Support Arm으로 고정되어 있고 경량이므로 신속히 설치, 제거가 가능하다는 장점이 있다. 또한 크기도 소형이므로 S/G의 다른 관련 작업에 지장을 주지 않는다. 밀봉 신속성도 기존의 Nozzle Dam에 비해 뛰어난 것으로 알려져 있다.

두 번째 개선방안으로는 Manway 개폐 작업에 대한 개선 사항에서 제안한 것처럼 Nozzle Dam을 Hatch 형태로 설계하여 S/G에 부착시킨다면 Bolt의 조임과 풀림에 의한 작업시간이 단축될 것으로 예상된다.

<표 3-17> S/G Nozzle Dam 사용 피폭현황

연도	Man-hour	최대개인선량 (person-mrem)	집단선량 (person-mrem)	최대 선량을 (mR/hr)
1989	372.00	60	84	11,000
1990	167.42	530	15,735	10,000
1991	22.83	375	2,158	9,000
1992	118.60	416	11,062	8,000
1993	134.17	1,000	21,829	25,000
1994	286.12	940	31,984	15,000
1995	24.75	502	2,253	23,000
평균	160.8 (man-hour/yr)	546.1 (person-mrem)	12,157.9 (person-mrem/yr)	14,428.6 (mR/hr)

마. RCP Seal

RCP Seal 작업과 관련된 작업요건, 초기조건, 작업순서 및 내용 등을 요약하면 <표 3-18>과 같으며, <표 3-19>는 1987~1995년까지 고리 3, 4호기 정기보수 기간 중 RCP Seal 작업 중 작업자가 피폭 받은 선량 데이터이다.

개선이 필요한 사항에 대해 기술하면 다음과 같다. 작업 현황을 살펴보면

RCP Seal 작업 및 기타 RCP 관련 작업은 다른 작업에 비해 man-hour가 매우 큰 것을 알 수 있다. 물론 RCP 주변도 고 방사선 지역이지만 고피폭의 일차적 원인은 작업시간 및 작업 인원의 과다함에서 비롯된다고 할 수 있다. 따라서, 피폭 저감화는 주로 작업 시간 단축 및 작업인원 단축의 방향으로 검토되어야 할 것이다.

<표 3-18> RCP Seal 작업 요약

항목	내용	
작업명	RCP Seal 작업	
작업요건	해당부분 Level 2 이상인 자. 단, Level 2가 확보될 때까지의 해당기기의 일반점검은 정비경력 2년이상인 자, 정밀분해 점검은 정비경력이 4년이상인 Level 1도 수행가능	
초기조건	(1) 원자로 냉각재 펌프의 해체, 정비 작업은 정지상태에서 수행되어야 한다. (2) 원자로 냉각수가 원자로 용기 노즐 중심까지 배수되었는지 확인한다. (3) 원자로 냉각수 펌프 주 차단기의 차단 여부를 확인한다. (4) 밀봉수 공급 차단 밸브의 차단 여부를 확인한다. (5) 1번 밀봉 누출수 제어 밸브의 차단 여부를 확인한다. (6) 원자로 보충수 공급 격리밸브의 차단 여부를 확인한다. (7) 원자로 냉각수 펌프 모터 기기 냉각수 공급 격리밸브의 차단 여부를 확인한다.	
작업순서 및 작업내용	원자로냉각재펌프 밀봉장치의 제거 및 카트리지 seal 분해	<ul style="list-style-type: none"> - 분해 부품으로 인한 오염 확산 방지를 위해 바닥에 비닐을 설치 - Seal Housing Joint 누설 및 Bolt의 건전성 확인 - 봉산수 유입 방지 - 관련 장비의 설치 - Seal 몽치 및 Runner 몽치의 제거 - 카트리지 Seal의 제거 - 분해 부품 손상 및 혼합에 주의
	점검	<ul style="list-style-type: none"> - 1번 Sealing과 Runner의 Face Plate 및 클램프의 O-Ring 점검 교체 : 해당 부품의 조립 간극 점검, 청소, 윤활유 주입, 교체등 적절한 조치를 취한다. - Seal 및 Insert 점검 : 육안검사를 통하여 해당 부품의 균열, 마모흔적 등의 이상 유무를 점검한다.
	조립	<ul style="list-style-type: none"> - 원자로 냉각재 펌프 밀봉장치 조립 : 카트리지 셸, 압력조절 몽치, No1 셸링과 지지대 몽치의 조립 - 원자로 냉각재 펌프 밀봉장치 설치 : No1 Runner몽치, 셸몽치, 셸카트리지, 커플링, 스플 설치, 축정렬 및 균형을 맞춘다.
	성능시험	운전 절차서에 따라 기기 작동하여 베어링 온도와 진동 상태 그리고 각종 Seal Leak-Off량이 정상인지를 확인한다.

국내 원전의 RCP 관련 작업의 작업 시간 지연의 주원인은 기존 연구 결과에 의하면 접근성 및 작업 장소의 협소함으로 나타났다. 즉, RCP 관련 작업을 수행하기 위해 작업자가 작업 장소로 이동하는데 각종 배관으로 인한 접근성 불량으로 피폭 시간이 늘어나게 되고 작업 공간에서는 작업 시마다 임시로 작업대를 설치해야 하므로 작업대 설치 시간 동안의 피폭이 증가하게 된다. 따라서, 설계시 RCP 보수를 위한 접근로의 개선 및 영구작업대를 설치하는 것을 피폭을 줄일 수 있는 방안으로 제안할 수 있다.

또한, RCP 주변 역시 고평폭 지역으로 분류된다. 따라서, 많은 작업 보조 인원이 요구된다. 이들의 고평폭을 방지하기 위해 적절한 차폐체가 설치되어야 한다. 예를들어 프랑스 표준원전 및 영국의 Sizewell B 원전에서는 S/G와 RCP 사이에 차폐벽을 설치하여 RCP를 별도의 격실로 구분하고 있으며 특히, Sizewell B 원전에서는 RCP Seal 작업용 차폐철판을 설치하여 Pump Casing으로부터의 선량을 감소시키는 방안을 고려하고 있다. 이상의 두 가지 개선 사항은 RCP 관련 작업 전체를 대상으로 적용할 수 있다.

<표 3-19> RCP Seal 피폭현황

연도	Man-hour	최대개인선량 (person-mrem)	집단선량 (person-mrem)	최대 선량을 (mR/hr)
1987	319.41	248	2,619	60
1989	110.83	10	25	11
1990	457.33	110	3,025	120
1991	660.00	80	2,776	500
1992	173.50	70	6,242	200
1994	283.79	103	3,653	80
1995	140.33	392	7,869	10,000
평균	306.5 (man-hour/yr)	144.7 (person-mrem)	3,744.1 (person-mrem/yr)	1,567.3 (mR/hr)

바. RCP DACS

RCP DACS 작업과 관련된 작업요건, 초기조건, 작업순서 및 내용 등을 요약하면 <표 3-20>과 같으며, <표 3-21>은 1995~1996년까지 고리 3, 4호기 정기보

수기간 중 RCP DACS 작업 중 작업자가 피폭받은 선량 데이터이다. 개선이 필요한 사항에 대해 기술하면 다음과 같다. 기본적인 개선사항은 앞에서 제안한 내용과 같다. 즉, RCP 접근성 개선, 영구 작업대 설치 및 차폐체 설치는 본 작업에도 적용되는 방안이다.

<표 3-20> RCP DACS 작업 요약

항목	내용	
작업명	원자로냉각재 펌프 디퓨저아댑터 캡 스크류 교체	
작업요건	해당부분 Level 2 이상인 자. 단, Level 2가 확보될 때까지의 해당기기의 일반점검은 정비경력 2년이상인 자, 정밀분해 점검은 정비경력이 4년이상인 Level 1도 수행가능	
초기조건	(1) 계통내 RCS는 Middle Loop 이하로 배수되어 있어야 한다. (2) 모든 관련 배관 및 밀봉장치는 펌프로부터 분리되고 취외되어 별도의 안전한 장소에 보관되어야 한다. (3) 별도의 적절한 장소에 펌프 작업대가 준비되어야 한다. (4) 교체된 기존의 Diffuser Adapter와 Bolt를 담을 수 있는 방사성 폐기물 저장 드럼이 준비되어야 한다. (5) 사용 계측기는 검교정이 완료되어야 한다. (6) 작업 수행자는 사전에 충분한 모의훈련이 되어 있어야 한다.	
작업순서 및 작업내용	분해	분해는 두 가지 경우로 나누어서 수행된다. 첫 번째는 펌프 내장물과 Diffuser Adapter가 일체형인 경우이고 두 번째는 펌프 내장물과 Diffuser Adapter가 분리되어 인양되는 경우이다. 이 작업은 펌프로부터 Diffuser Adapter Cap Screw를 분해하여 지정된 장소에 보관 후 폐기시키는 단계이다. - 펌프 내장물 인양 : 고소 작업이므로 추락에 주의 - 펌프 내장물 및 임펠러 차폐용 캔 설치 - Cap Screw 번호 Marking - 로킹와이어 절단 - Cap Screw 취외 - Cap Screw Bolt 홀에 탭핑 작업 실시
	점검	로킹 와이어의 이탈 상태 및 Cap Screw의 머리, 나사산, 암나사부를 육안점검한다.
	조립	- 나사산 부위의 청소 - Diffuser Adapter의 설치 - 로킹 와이어의 설치 - 차폐용 캔의 제거 - 펌프 내장물 회전 - 본 계통 설치 - 조립 완료

<표 3-21> RCP DACS 피폭현황

연도	Man-hour	최대개인선량 (person-mrem)	집단선량 (person-mrem)	최대 선량을 (mR/hr)
1995	2160.73	663	31,759	35,000
1996	143.13	400	2	8,000
평균	1151.9 (man-hour/yr)	531.5 (person-mrem)	15,880.5 (person-mrem/yr)	21,500 (mR/hr)

사. 요약

본 절에서는 원전의 방사선작업 종사자 피폭량을 ALARA(As Low As Reasonably Achievable)개념으로 저감시키기 위하여 피폭저감방안을 도출하기 위한 한 방법으로 고피폭 유발 방사선작업을 파악하고, 이들 파악된 방사선 작업의 작업절차서를 검토하였다. 작업절차서를 검토한 결과를 요약하면 <표 3-22>와 같다. 위의 개선사항은 향후 신규원전 설계와 맞물려 설계 반영 타당성을 평가하여, 설계에 직접 반영할 수 있을 것으로 사료된다.

<표 3-22> 작업별 개선사항 요약

작업명	작업현황	개선방향	개선방안
S/G Tube Plugging	<ul style="list-style-type: none"> - 수실내로 작업수행자 직접 입실하여 수행 - 수실 입실이 고피폭의 요인 	<ul style="list-style-type: none"> - 수실내 작업 수행자 입실 배제 	<ul style="list-style-type: none"> - 로봇 및 원격 조정 장치 도입 - S/G 작용용 다용도 로봇 - 육안검사를 원격 사진기를 이용한 검사로 대체 - Photographic Tech. for S/G Inspection
S/G Man-way 개폐	<ul style="list-style-type: none"> - Man-way Cover를 Bolt 이용해서 개폐 - Bolt 고착사고 잦음 - 개폐장비 운반을 위한 접근로의 협소함 - Man-way Cover 중량에 의한 안전사고 가능 - 오염된 냉각수 처리를 위한 양동이 지참 -> 세심한 주의 요망 - 수실 내부의 각종 검사는 작업 수행자가 수실 내부에서 수행 - 고피폭 지역, 작업시간 지연으로 인한 고피폭 	<ul style="list-style-type: none"> - 수실내 작업 수행자 입실 배제 - 작업시간 지연요인 배제 	<ul style="list-style-type: none"> - Man-way Cover를 Quick Opening Hatch Type으로 교체(Bolt-free type) - S/G 하단에 Drain Tank, 혹은 Discharge Tank를 설치하여 오염된 냉각수의 누설방지 - 접근로의 확장 설계
S/G ECT	<ul style="list-style-type: none"> - 사용되는 장비를 수실내부에 직접 설치 - 수실 주변에 임시 작업대를 설치하여 작업 	<ul style="list-style-type: none"> - 수실내 작업 수행자 입실 배제 - 주변 작업 수행자의 과피폭 방지 	<ul style="list-style-type: none"> - S/G에 부착 가능한 원격 장치 및 탐재 장치의 도입 - 신호 수집 작업 수행자의 피폭을 방지하기 위한 휴대용 임시 차폐체 도입 - 임시 작업대 대신 영구 작업대의 설치
S/G Nozzle Dam 사용	<ul style="list-style-type: none"> - Bolt를 이용한 개폐 - 수실 내부 작업 수행 - Nozzle Dam 중량으로 인한 작업시간 지연 	<ul style="list-style-type: none"> - 작업시간 지연 요인 배제 - 수실내 작업 수행자 입실 배제 	<ul style="list-style-type: none"> - Quick Opening Hatch 도입(Bolt-free) - 개량형 소형, 경량 Nozzle Dam의 도입
RCP Seal 작업 및 RCP DACS 교체	<ul style="list-style-type: none"> - 작업 장비를 운반하는 접근로의 협소함으로 인한 작업시간 지연 - 작업 장소의 협소함으로 인한 작업시간 지연 	<ul style="list-style-type: none"> - 작업시간 지연 요인 배제 	<ul style="list-style-type: none"> - 접근로의 확장 설계 - 임시작업대 대신 영구 작업대의 설치

2. 국내 원전의 선량저감화 방안 및 방사선방호 관리 현황

작업자선량 측면에서 주요한 작업의 피폭선량 저감화 방안 및 방사선방호 관리 기법을 정리하면 다음과 같다.⁶⁾

□ CWDS(농축폐액건조처리설비운전) : 농축폐액드럼생성작업

가. 방사선조건

- 방사선작업조건 : 공간선량을 0.05 ~ 0.2 mGy/hr
- 작업투입인원 : 4명
- 예상집단선량 : 15.00 ~ 25.00 man-mSv
- 1인당 평균피폭선량 : 5.00 ~ 10.00 mSv

나. 방호관리

- 작업시간단축
- 모의훈련실시
- 방사선작업조건(설비개선) 및 환경개선
- 운전원 확보 및 피폭선량 분산(1인 2직능제 시행)
- 전담 보건물리원 관리체계 구축

□ SRDS(폐수지건조처리설비운전) : 폐수지드럼생성작업

가. 방사선조건

- 방사선작업조건 : 공간선량을 0.2 ~ 0.3 mGy/hr
- 작업투입인원 : 5명
- 예상집단선량 : 12.00 ~ 15.00 man-mSv
- 1인당 평균피폭선량 : 2.00 ~ 5.00 mSv

나 방호관리

- 작업시간단축
- 모의훈련실시
- 방사선작업조건(설비개선) 및 환경개선
- 전담 보건물리원 관리체계 구축

6) [참고문헌] 안창석, "원자력발전소 방사선 작업종사자 피폭선량 분석 및 방사선 방호관리기법 소개," 한일원자력주식회사, 2000

□ 방사성폐기물드럼 운반, 적재, 저장 및 저장고 관리작업

가. 방사선조건

- 방사선작업조건 : 공간선량을 0.1 ~ 0.2 mGy/hr
- 작업투입인원 : 6명
- 예상집단선량 : 40.00 ~ 50.00 man-mSv
- 1인당 평균피폭선량 : 5.00 ~ 10.00mSv

나. 방호관리

- 영구처분장 건설에 의한 임시저장 기간단축
- 작업시간단축
- 방사선작업조건(설비개선) 및 환경개선
- 전담 보건물리원 관리체계 구축

□ 핵연료교체관련작업

가. 방사선조건

- 방사선작업조건 : 공간선량을 0.4 ~ 0.5mGy/hr
- 작업투입인원 : 30 ~ 40명
- 예상집단선량 : 호기당 100.00 ~ 150.00man-mSv
- 1인당 평균피폭선량 : 호기당 3.00 ~ 4.00mSv

나. 방호관리

- 방사선원격납, 제거, 제염
- 차폐방안강구
- 작업시간단축
- 모의훈련실시
- 방사선작업조건 및 환경개선
- 전담 보건물리원 관리체계 구축

□ 증기발생기 Nozzle-Dam 설치 및 제거작업

가. 방사선조건

- 방사선작업조건 : 공간선량을 100 ~ 130mGy/hr
- 작업투입인원 : 22~25명
- 예상집단선량 : 호기당 100.00 ~ 150.00man-mSv
- 1인당 평균피폭선량 : 호기당 4.00 ~ 6.00mSv

나. 방호관리

- 신형 Nozzle-Dam 도입
- 작업시간단축
- 모의훈련실시
- 수질관리의 최적화로 계통선량 저감노력

□ 증기발생기 Tube Plugging작업

가. 방사선조건

- 방사선작업조건 : 공간선량을 100 ~ 130mGy/hr
- 작업투입인원 : 15 ~ 25명
- 예상집단선량 : 호기당 70.00 ~ 150.00man-mSv
- 1인당 평균피폭선량 : 호기당 4.00 ~ 6.00mSv

나. 방호관리

- 수질관리의 최적화로 계통선량 저감노력
- 모의훈련실시
- Robot 이용(국내보유장비:ROSAⅢ)
- 작업시간단축

□ 증기발생기 이물질 제거작업

가. 방사선조건

- 방사선작업조건 : 공간선량을 0.8 ~ 3mGy/hr
- 작업투입인원 : 10 ~ 15명
- 예상집단선량 : 호기당 50.00 ~ 100.00man-mSv
- 1인당 평균피폭선량 : 호기당 5.00 ~ 10.00mSv

나. 방호관리

- 차폐방안강구
- 모의훈련실시
- 방사선작업조건 및 환경 개선
- 전담 보건물리원 관리체계 구축

□ 각종 밸브정비

가. 방사선조건

- 방사선작업조건 : 공간선량을 0.3 ~ 3mGy/hr
- 작업투입인원 : 20 ~ 25명
- 예상집단선량 : 호기당 100.00 ~ 150.00man-mSv
- 1인당 평균피폭선량 : 호기당 5.00 ~ 6.00mSv

나. 방호관리

- 차폐방안강구
- 작업시간단축
- 모의훈련실시
- 전문인력(숙련작업자) 양성
- 방사선작업조건 및 환경 개선(수질개선)
- 전담 보건물리원 관리체계 구축

□ 방사성폐기물드럼(잡고체, 차폐, 필터드럼) 생성작업

가. 방사선조건

- 방사선작업조건 : 공간선량을 0.05 ~ 0.5mGy/hr
- 작업투입인원 : 5명
- 예상집단선량 : 호기당 20.00 ~ 30.00man-mSv
- 1인당 평균피폭선량 : 호기당 4.00 ~ 6.00mSv

나. 방호관리

- 방사성폐기물 발생량 최소화
- 방사성폐기물 최초 발생시 분류 수거
 - 고/중/저 준위별
 - 잡고체 종류별
- 지속적인 모의훈련을 통한 작업시간 단축

□ 기타 방사선 방호관리기법

가. 주요작업 공정 조정

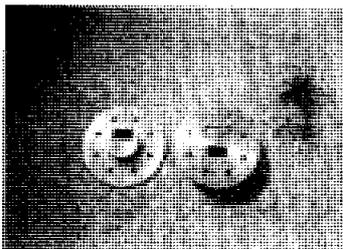
- 핵연료교체작업 : 원자로부대설비 분해·조립시 RCS수위 119.6ft 유지
- 방진기정비 : RCS수위 만수위시 → 고방사선작업 수행토록 공정 조정
- 가동중검사 : RCS수위 저수위시 → 저방사선작업 수행토록 공정

조정

- 2종류 이상의 작업이 동일지역에서 이루어 질 때 작업대 설치, 제거
중복방지: 주요작업별 작업대 설치 및 제거 시기를 부서간 협조로 조정 → 고방사선지역에서의 작업시간 지연 등 추가 피폭사례 방지
- 증기발생기(S/G) 2차측 배수시기 조정 : 3Loop 동시 배수하지 않고 Lancing작업 수행 Loop부터 순차적으로 배수토록 공정 조정 → RCP작업 및 기타작업자 통행시 피폭선량 저감

나. 차폐방안

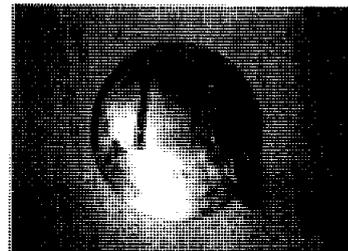
- 적절한 임시, 고정차폐물(차폐체: 납담요, 납판, 물차폐체) 설치
 - 증기발생기 몸체 차폐체 설치(몸체 차폐체 활용)
 - 증기발생기 Hand Hole 차폐체 설치(전용 차폐체 활용)
 - 증기발생기 Man-Way 차폐체 설치(전용 차폐체 활용)
 - 고방사선배관 차폐
 - 납커튼 설치
 - Green House 설치
 - 통로 및 바닥(그레이팅) 차폐
 - 고준위드럼 차폐체 설치(전용 차폐체 활용)
- 방사선원제거, 격납, 제염, Hot Spot 관리
- 보호구착용
 - 납조끼 착용
 - 마스크 착용
 - 기타 방호장비 착용(납안경, 납장갑등)



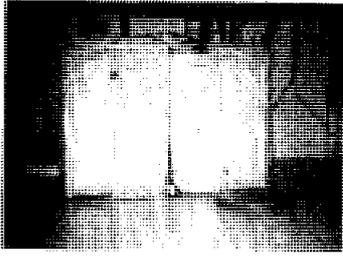
S/G Hand Hole 차폐체



고선량배관 차폐체



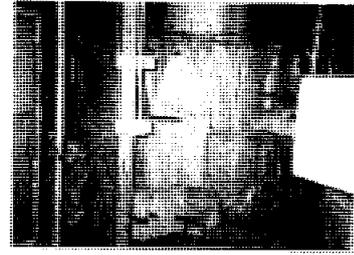
S/G Man-Way 차폐체



고선량드럼 차폐



차폐벽내 바닥 차폐



S/G 몸체차폐

다. 작업시간단축 및 거리유지

- 작업시간단축
 - 모의훈련실시
 - 숙련된 작업자 투입
 - 전문인력(숙련작업자) 양성
- 장비, 공구이용
 - 원격제어장비(Robot) 설치
 - 영상감시기(CCTV) 설치
 - 집게류(Tong)등 이용(방사선원과의 거리 유지)
 - 기타 공구
- 불필요한 인원통제
- 적절한 작업위치 선정
 - 선원으로부터 거리유지
 - 지역분리대 설치
 - 표지판 설치
 - 경고판 부착
- 주요작업장 최신 방사선정보(방사선량을, 표면오염도등) 제공

3. 선량저감 기술의 피폭선량 저감효과 조사

본 절에서는 현재 미국에서 적용되고 있는 각종 ORD 저감화 방안들을 살펴 보았다. 현재 미국에서는 ORD 저감화를 위한 수많은 방안들이 적용되고 있는데 본 연구에서는 다음과 같은 기준으로 검토 대상을 선정하였다. 첫째, 앞 절에서 서술한 작업들, 즉, 피폭 저감화 우선순위 작업들에 대해서 적용 가능한 방안들을 우선 검토 대상으로 하였다. 둘째, 로봇이나 원격 장치를 이용한 자동화 장비들을 검토하였다. 셋째, 특정 작업에만 적용되는 것이 아닌 모든 작업에 적용 가능한 방안들에 대해서도 살펴보았다. 넷째, 위의 세 가지 방안이 아니라도 비용-효율도가 뛰어난 방안들에 대해서도 검토하였다. 마지막으로 피폭 저감화 우선 순위 작업들과는 관계가 없는 방안이지만 변형을 통하여 적용시킬 수 있는 방안들도 검토 대상에 포함시켰다.⁷⁾

가. ORD 저감화 방안 검토

위에서 선정한 네 가지 기준은 이하 다음과 같이 표시한다.

- ◆ 순위 : 피폭저감화 우선 순위 적용 가능 방안
- ◆ 원격 : 자동화 장비
- ◆ 일반 : 모든 작업에 적용 가능한 방안
- ◆ 효율 : 비용-효율도가 뛰어난 방안
- ◆ 유사 : 피폭 저감 우선 순위 작업과는 직접 관련이 없지만 변형을 통해 적용시킬 수 있는 방안

(1) 공랭식 방호복, 원격 계측 장치 및 원격 통신 장치 (Air-Cooled Anticontamination Suit, Radio Dosimetry, and Radio Communication) - 일반

Atomic Industrial Forum Subcommittee에서는 ORD 저감화를 위한 방안 중

7) [참고문헌] 강창순, "차세대 원자로 기술개발(II), ORE의 ALARA 평가," NKD/ZZ-980048M, 한국전력공사 전력연구원

의 하나로 원격 통신 장치 및 원격 계측 장치의 개선 및 공기조절 장치 (air-conditioning)를 통해 공기를 공급하는 장치를 방호복에 부착하여 작업종사자의 작업 능력을 향상시키고자 하였다.

기존의 방호복은 방사선 피폭을 방지하기 위해 통풍이 잘 되지 않으므로 작업종사자는 작업시 더위로 인해 작업 능률이 저하된다. 따라서, 공기 조절 장치를 통해 방호복에 공급됨으로써 작업 능력 향상을 통해 작업시간 단축을 기대할 수 있다.

본 방안을 도입함으로써 5 person-rem/yr의 피폭 저감 효과가 있는 것으로 드러났다. 본 방안의 도입을 통하여 소요되는 비용은 연구 개발비용을 포함하여 \$56,000이고 추가적으로 받는 피폭은 없다. 분할 상환은 30년으로 가정하였다. 관련 상세 데이터는 다음과 같다.

비용 산정 기준 연도	1979
소요 비용 및 연구 개발비용	\$56,000
설치시 추가 피폭	0 person-rem
연간 선량 저감	5 person-rem/yr
분할 상환 기간	30 yr

(2) 차폐 지게차 (Shielded Forklift Truck for Rad waste Handling) - 일반

대부분의 발전소에서는 방사성 폐기물이 저장된 드럼의 운반 및 선적을 위해서 지게차를 이용한다. 그러나, 기존 지게차는 일반 지게차를 그냥 사용하므로 연간 수 person-rem의 피폭을 수반하게 된다. 따라서, 차폐체를 지게차에 설치하여 피폭을 방지하고자 하였다.

본 방안을 도입함으로써 3 person-rem/yr의 저감 효과가 있는 것으로 드러났다. 본 방안의 도입으로 인하여 소요되는 비용은 \$60,000이다. 관련 상세 데이터는 다음과 같다.

비용 산정 기준 연도	1979
소요 비용 및 설치비용	\$60,000
설치시 추가 피폭	0 person-rem
연간 선량 저감	3 person-rem/yr
분할 상환 기간	30 yr

(3) S/G 채널 헤드 휴대용 차폐체 (Portable Shielding System for the PWR Steam Generator Channel Heads) - 순위

S/G의 1차측 헤드 주변의 선량율은 4~50 rem/hr로 고방사선 지역이다. S/G Tube Plugging 작업을 포함한 보수시 작업종사자 집단선량은 평균적으로 100 rem/yr가 된다. 따라서, S/G 관련 작업의 피폭 저감을 위해서는 주변부의 선량율을 줄이는 것이 필요하다.

휴대용 차폐체를 도입함으로써 주변부의 선량은 50 rem/yr 정도가 된다고 드러났다. 본 방안의 도입을 통하여 소요되는 비용은 연구 개발비용을 포함하여 \$50,500이고 설치시 추가적으로 받게 되는 피폭은 10 person-rem이다. 관련 상세 데이터는 다음과 같다.

비용 산정 기준 연도	1979
소요 비용 및 연구 개발비용	\$50,000
설치시 추가 피폭	10 person-rem
연간 선량 저감	50 person-rem/yr
분할 상환 기간	30 yr

(4) 필터 카트리지 교체용 차폐 및 원격 장치 (Shielding and Remote Tools for Filter Cartridge Replacement in PWR) - 원격

원자로 보조 빌딩의 카트리지 형태의 필터는 필터에 찌꺼기 제거를 위해 정기적으로 교체되어야 한다. 카트리지 교체 작업은 필터 하우스의 격리 - 하우스 개방 - 카트리지 제거 - 새로운 카트리지 장착 - 오염된 사용한 카트리지를 차폐된 보관 용기에 보관하는 순서로 이루어진다. 이러한 작업은 평균적으로 14

person-rem/yr의 피폭을 수반한다. 특히, 작업종사자가 직접 하우징을 개방, 오염된 카트리지의 제거 및 처리할 때 피폭이 크게 된다.

따라서, 필터 하우징 주위에 추가적인 차폐체를 설치하고 원격 장치를 이용하여 하우징 개방 및 오염된 카트리지 제거 및 처리를 한다면 ORE가 크게 저감된다.

본 방안을 설치하는데에는 총 \$150,000이 소요되고 추가적으로 20 person-rem의 피폭을 받는다. 그리고 연간 선량 저감 효과는 7 person-rem /yr이다. 관련 상세 데이터는 다음과 같다.

비용 산정 기준 연도	1979
소요 비용 및 연구 개발비용	\$150,000
설치시 추가 피폭	20 person-rem
연간 선량 저감	7 person-rem/yr
분할 상환 기간	30 yr

(5) S/G Tube 검사 및 보수용 로봇 (PWR S/G Tube Inspection and Repair Robot) - 원격

일반적으로 알려진 ORE 저감화를 위한 가장 효과적인 방법은 S/G ECT, Tube 보수, 채널 헤드 용접 부분의 검사 등을 특별히 고안된 로봇 및 원격 장하다 사용하여 수행하는 것이다. 이러한 방안은 작업 수행자가 고피폭 지역인 S/G 수실 배부로 입실해야 할 필요가 없으므로 피폭이 크게 감소될 뿐 아니라 로봇 및 원격 장치 운전자만 작업을 수행하게 되므로 작업자 수가 줄어든다는 이점이 있다.

Westinghouse에서 개발한 ROSA(Remotely Operated Service Arm)이 대표적인 것으로 이 장치는 매우 복잡하고 다양한 제어 모드를 가지고 있다. 즉, ROSA에 여러 가지 특수 장치들을 장착하여 S/G 내부에서 이루어지는 작업들에 대해 다양하게 사용된다. 이 장치는 필요한 경우에 S/G 채널 헤드에 장착하여 S/G 내부로 작업종사자가 들어가지 않고 별도로 마련된 제어실에서 운전하여 작업을 수행하도록 해준다.

또한, Mitsubishi사에서 개발한 Remote Control Service Arm도 이와 유사한

장치로 다용도 로봇을 이용 각종 검사 및 검사기기를 고방사선 지역으로 운반하고 수실 외부에서 필요한 기기 교환을 하도록 설계되어 있다. 이 장치의 운전은 조작 패널에서 원격 프로그램을 이용하여 반복 작업을 수행하게 된다.

본 방안을 도입함으로써 소요되는 비용은 약 \$450,000이고 보수비용은 4%로 가정하였다. 본 방안에 의한 피폭 저감 효과는 Westinghouse의 4-loop 원전에 적용한 결과 75 person-rem/yr로 드러났다. 관련 상세 데이터는 다음과 같다.

비용 산정 기준 연도	1983
소요 비용 및 연구 개발비용	\$450,000
연간 보수비용	\$18,000
설치시 추가 피폭	0 person-rem
연간 선량 저감	75 person-rem/yr
분할 상환 기간	30 yr

(6) Multi-Stud Tentioner/Detentioner and Handling Device for PWR S/G
Man-way Cover - 우선

Man-way Cover 개폐를 수동으로 수행한다면 작업시간 지연으로 인해 많은 피폭을 받게 된다. 국내 원전에서는 Torque Wrench 등을 사용하여 Man-way Cover 개폐를 하고 있고 Man-way Cover를 들어내는 데에는 별도의 Lift 장비를 사용하고 있다.

본 방안은 유럽에서 많이 적용하고 있는 방안으로 Man-way Cover Bolt의 제거를 자동으로 수행할 뿐 아니라 연결된 장치를 통하여 Cover를 들어내는 작업까지 병행 할 수 있다. Sizewell B의 경우 하나의 S/G unit (2개)에 대해 2기의 장비가 요구된다.

본 방안을 적용함으로써 소요되는 비용은 장비 1기당 평균적으로 \$90,000로 알려져 있고 연간 보수비용은 4%로 가정하였다. 본 방안으로 인한 연간 선량 저감은 4Loop 발전소에 대해 약 3.5 person-rem/yr로 드러났다. 관련 상세 데이터는 다음과 같다.

비용 산정 기준 연도	1983
소요 비용 및 연구 개발비용	\$180,000
연간 보수비용	\$7,200/yr
설치시 추가 피폭	0 person-rem
연간 선량 저감	3.5 person-rem/yr
분할 상환 기간	30 yr

(7) Shielding of PWR RCP Motor Compartment and Provision of Permanent Access Features in Primary Loop Cells - 우선

정기 보수 기간의 ORE의 많은 비율을 차지하는 것 중의 하나는 RCP 관련 작업이다. 따라서, RCP 자체와 Motor 및 밀봉체 교체 작업 장소 사이에 차폐체를 설치하여 ORE 저감화를 꾀할 수 있다. 또, 작업 수행 시마다 고방사선 구역에 임시 작업대를 설치하는 대신 영구적인 접근로 및 작업대를 설치함으로써 작업시간을 단축시켜서 ORE 저감화를 꾀할 수 있다.

단, 본 방안의 적용 시에는 환기 및 하중 문제 등 다른 안전 사항들도 함께 고려하여 주의 깊게 설계, 적용하여야 한다.

본 방안을 적용한 Sizewell B 원전은 펌프실내에 5cm steel 차폐체를 설치하는 경우 \$75,000, 펌프와 S/G 사이에 10cm solid 차폐체를 설치하는 경우 \$300,000 그리고 Loop내에 영구 작업대를 설치하는 경우 \$220,000이 소요되었다. 연간 선량 저감은 9.7 person-rem/yr로 드러났다. 관련 상세 데이터는 다음과 같다.

비용 산정 기준 연도	1983
소요 비용 및 설치비용	\$600,000
설치시 추가 피폭	0 person-rem
연간 선량 저감	9.7 person-rem/yr
분할 상환 기간	30 yr

(8) PWR Refueling Machine (New Plant on critical path) - 효율, 원격

x-y 위치 조절이 가능한 원격 크레인을 이용하여 핵연료 재장전을 수행하는 방안이 Sizewell B 원전에 적용되었다. 이 장비는 핵연료 집합체뿐만 아니라 제어봉 집합체도 다룰 수 있다. 또한 수중 TV 장치와 연결되어 작업 수행을 검사할 수 있다.

본 방안을 적용하면 57시간의 재장전 시간을 단축시킴으로써 원전의 재가동이 빠른 시간에 이루어질 수 있으므로 전력 이득이 기존 방법에 비해 매우 큰 것이 특징이고 따라서, 비용-효율도 역시 매우 크게 나타났다. 관련 상세 데이터는 다음과 같다.

비용 산정 기준 연도	1983
소요 비용 및 설치비용	\$225,000
설치시 추가 피폭	0 person-rem
연간 전력 이득	\$1,710,000/yr
연간 선량 저감	3 person-rem/yr
연간 보수 비용	\$9,000/yr
분할 상환 기간	30 yr

(9) PWR Quick-Opening Hatch for Fuel Transfer Tube (Not on Critical Path) - 유사, 효율

대부분의 원전에서 재장전을 위한 Fuel은 Fuel Transfer Tube를 이용하여 수송된다. 일반적으로 이 Fuel Transfer Tube는 끝부분에 20개의 Bolt로 체결되는 Flange를 사용하고 있다. 이 작업은 각 재장전 때마다 수동으로 수행되고 있는 실정이다. 일반적으로 이러한 작업은 2명의 작업 수행자가 제거하는데에 1시간, 재장전시 설치하는데 2시간이 소요된다고 알려져 있다. 또한 Sizewell B 등의 몇몇 신형원전에서는 Bolt 체결 방식이 아닌 Quick Opening Hatch 형태로 개선하여 작업시간 단축은 물론 작업 인원 절감에 커다란 효과를 보였다.

그러나, 최근에는 잠수함에서 사용되는 형태의 Quick-Opening Hatch를 적용하고 있다. 이 방안은 앞장에서 살펴본 피폭 저감 우선 순위 작업의 피폭 저감 방안으로 직접 적용할 수는 없지만 약간의 변형을 통하여 S/G Man-way Cover

를 이같은 형태로 개선하면 커다란 피폭 저감 효과를 기대할 수 있을 것이다.

이 방안을 적용하는 경우 소요되는 비용은 \$20,000이고 설치시 추가 피폭은 1.7 person-rem으로 알려져 있다. 관련 상세 데이터는 다음과 같다.

비용 산정 기준 연도	1982
소요 비용 및 설치비용	\$20,000
설치시 추가 피폭	1.7 person-rem
연간 선량 저감	1 person-rem/yr
분할 상환 기간	30 yr

(10) Photographic Technique for PWR S/G Tube Plugging Inspection - 우선

S/G Tube 손상은 대부분의 원전에서 겪게 되는 문제이다. 손상된 Tube의 더 이상의 변형을 방지하기 위해서는 손상된 Tube에 Plugging을 실시해야 한다. 이러한 Plugging 작업이 완료되면 적절하게 작업이 수행되었는지를 검사해야 한다. 또한, 정기적으로 Tube Plugging 상태가 건전한지 여부를 검사해야 한다.

기존의 원전에서는 이러한 검사를 작업 수행자가 직접 S/G 수실 내부로 입실하여 수행하였다. S/G 수실 내부는 고방사선 구역이므로 과피폭을 방지하기 위해서는 방호복을 갖추어야 하고 빠른 시간 내에 작업이 완료되어야 한다. 그러나, 수실 내부 온도는 약 130°F이고 조명 시설의 어려움, 방호복으로 인한 행동의 제약 등 작업 여건의 열악함으로 인해 검사 작업의 효율성은 매우 낮은 상태였다. 더욱이 검사를 육안으로 수행해야 하므로 Plugging 상태의 건전성 여부를 정확하게 파악한다는 것은 매우 어려운 일이었다.

Photographic Technique는 이러한 어려움 들을 극복하기 위한 방안으로 Tube당 4장의 사진을 찍어서 확대 및 고화질로 현상하여 Tube Plugging 검사를 수행한다. 기존의 육안 검사를 수행하는 경우 검사 작업 수행자는 300~400 rem 정도의 피폭을, 그리고 작업 보조자는 약 2.7 person-rem의 피폭을 기록한 반면 본 방안을 적용하였을 경우, 검사 작업 수행자는 약 20 mrem, 작업 보조자는 130 mrem의 피폭을 기록하여 피폭저감화 효과가 뛰어난 것으로 드러났다.

또한, 작업시 총 man-hr도 S/G 1기당 16에서 3으로 감소하였다. 시간당 노동력의 가치를 \$20/hr로 가정하여 계산하면 연간 18번의 S/G 검사에 \$4,680/yr의 비용 절감 효과를 가져온 것으로 나타났다. 선량 저감 효과는 S/G 1기당 2.9 person-rem이므로 연간 18번의 검사에 대해 52.2 person-rem/yr의 선량 저감 효과를 보여주었다.

추가적으로 S/G 보수용 다용도 로봇을 적용하고 있는 원전의 경우 검사 카메라 장착을 위한 장치를 개발하여 다용도 로봇에 연결하여 사용한다면 피폭 저감 효과는 더욱 클 것으로 기대된다. 관련 상세 데이터는 다음과 같다.

비용 산정 기준 연도	1977
소요 비용 및 설치비용	\$5,000
노동력 절감	\$4,680/yr
연간 추가 물품 비용 (필름등)	\$2,000/yr
연간 보수비용	\$500/yr
설치시 추가 피폭	0 person-rem
연간 선량 저감	52.2 person-rem/yr
분할 상환 기간	30 yr

(11) Mock-Up Training for PWR S/G Jobs - 우선

S/G 관련 작업에 대해서 사전에 모의 훈련을 통해 충분한 훈련을 쌓은 후 실제 작업에 임함으로써 작업 효율의 향상을 통해 피폭을 저감화 할 수 있다. 특히, 이러한 작업 훈련 및 작업 관리는 상대적으로 적은 비용을 들여서 많은 피폭 저감을 기대할 수 있는 방안으로 많은 연구가 수행되어야 한다. 모의 훈련을 수행하는 S/G 관련 작업 및 작업 관련 데이터는 다음과 같다.

아래 표에 의하면 두 개의 채널 헤드를 가진 S/G의 대표적인 보수작업시 S/G 수실 내부에서 5 man-hr, 외부에서 56 man-hr가 소요된다. S/G 보수로 4-loop PWR의 연간 피폭 선량은 294 person-rem/yr로 예측되었다.

본 방안을 적용하였을 경우 집단선량이 약 1/3 내지 1/2로 저감되었다. 본 방안에 소요되는 비용은 모의 훈련 장비 및 연간 훈련비용으로 구성된다. 설치 비용은 약 \$60,000으로 예측되었고 채널 내부 작업 수행자의 훈련비용은 연간

\$9,600 (\$20/hr × 480 man-hr), 작업 보조자의 훈련비용은 연간 \$3,600 (\$15/hr × 240 man-hr) 로 추정되었다. 또한 훈련 인스트럭터 비용은 \$9,600으로 추정되었다.

작업 내용	작업인원	작업장소	작업시간
Equipment Setup	3인	S/G 외부	1시간
Opening Man-way	3인	S/G 외부	3시간
Primary Nozzle Dam Installation	1인	S/G 내부	40분
	2인	S/G 외부	
Finding and Marking Leakers	1인	S/G 내부	30분
Fitting and Welding Plug	1인	S/G 내부	20분
	2인	S/G 외부	
Inspecting and Pressure Testing	1인	S/G 내부	20분
	2인	S/G 외부	
Nozzle Dam Removal	1인	S/G 내부	40분
	2인	S/G 외부	
Closing Man-way	3인	S/G 외부	3시간
Testing and Cleanup	2인	S/G 외부	1시간 30분

본 방안을 적용함으로써 얻어지는 선량 저감 외에 추가적으로 얻어지는 이득으로는 작업 효율의 증가에 따른 노동력 절감이다. 관련 상세 데이터는 다음과 같다.

비용 산정 기준 연도	1983
소요 비용 및 연구 개발비용	\$60,000
설치시 추가 피폭	0 person-rem
연간 선량 저감	98 person-rem/yr
연간 훈련비용	\$22,800/yr
연간 노동력 절감	\$1,540/yr
분할 상환 기간	30 yr

(12) Remote Control of Filter and Dimineralizer Valves - 원격

필터나 탈염기 밸브로 인한 집단선량은 밸브실 위쪽에 따로 설치된 방에서

원격조종을 통해 밸브를 제어함으로써 저감될 수 있다. 밸브 제어실의 선량율은 밸브와의 거리와 두께 50cm의 콘크리트 바닥 때문에 무시할 만큼 작다. 반면, 밸브실의 선량율은 250 mrem/hr 이고 총 작업시간은 연간 8.5 man-hr/yr이다. 관련 상세 데이터는 다음과 같다.

비용 산정 기준 연도	1980
소요 비용 및 설치비용	\$46,000
연간 운전 및 보수비용	\$1,840/yr
연간 선량 저감	2.1 person-rem/yr
분할 상환 기간	30 yr

(13) S/G Channel Head Decontamination (Not on Critical Path) - 우선, 효율

PWR에서의 집단선량의 주요 요인으로는 S/G 관련 보수, 검사 등의 작업을 들 수 있다. 일반적으로 일차측 헤드의 방사선 준위는 약 20~25 R/hr이며 전형적인 S/G 관련 작업은 30,000개의 tube에 대해 와류탐상 검사를 수행, 2,000개의 수관을 설치, 384개의 tube plugging을 수행, 10개의 plug 용접부를 보수하는 것으로 이루어져 있다. 이와 같은 작업들을 제염이 이루어지지 않은 상태에서 수행한다면 약 4,800 person-rem의 피폭을 받는 것으로 추정된다.

S/G 채널 헤드의 제염은 다음과 같은 세 가지 단계로 수행된다. 첫 번째 단계는 실험 검사, 두 번째 단계는 제염을 위한 소외 주요 활동, 세 번째 단계는 S/G 채널 헤드 제염이다. S/G 저온관 쪽의 선량 저감 인자는 약 6.7 정도가 되는 것으로 추정되었다. 관련 상세 데이터는 다음과 같다.

비용 산정 기준 연도	1983
제염 비용	\$2,145,191
연간 노동력 절감	\$6,440,715
제염시 피폭	130 person-rem
차후 작업에 대한 선량 저감	3,790 person-rem
분할 상환 기간	24 yr

(14) Robotic Inspection of PWR Ice Condenser Area - 원격, 효율

PWR의 ice condenser는 동결과 ice 누적을 검사하기 위해서, 그리고 그들을 조절하는 기능이 적절하게 작동되는지를 시험하기 위해서 매일 출입해야 한다. 주변부의 선량율은 2~5 mrem/hr 정도이고 5.2 person-rem/yr의 피폭 받는 것으로 드러났다.

본 방안은 ice condenser 내부에 동력 모선과 로봇 검사 장비를 도입하여 검사를 수행하는 방안으로 로봇 검사 장비는 조명 시설이 구비된 컬러 TV 카메라와 망원렌즈를 보유하고 있다. 그리고 이들을 조종하기 위해 보조 건물 내부에 별도의 제어실을 마련하고 있다. 본 방안을 도입함으로써 작업 수행자 일인이 대략 1시간 정도의 검사를 수행할 수 있으므로 (기존에는 3인)약 2 man-hr의 작업시간이 절감되는 효과를 보였다. 보수비용은 총 비용의 45로 가정하였다. 관련 상세 데이터는 다음과 같다.

비용 산정 기준 연도	1983
소요 비용 및 설치, 시험 비용	\$76,800
연간 보수비용	\$3,072/yr
연간 노동력 절감	\$29,200/yr
연간 방호복 절감	\$7,300/yr
설치시 추가 피폭	1.4 person-rem
연간 선량 저감	5.2 person-rem/yr
분할 상환 기간	30 yr

나. 로봇 및 원격 장치

본 절에서는 원전에 적용 가능한 여러 가지 ORD 저감화 방안 중 특히, 로봇 및 원격 장치를 이용한 방안들에 대해 살펴보았다.

(1) 원전에서의 로봇 도입의 목적 및 배경

TMI-2 사고 후 청소 및 재염 작업을 위해 로봇이 최초로 도입된 이래로 로

봇은 원자력 발전에 있어서 중요한 기술 중의 하나가 되었다. 현재 원전에서의 로봇 사용은 점차 증가하고 있는 실정이며 궁극적으로 작업종사자 방사선 피폭 및 비용 절감의 핵심적인 요소로 떠오르고 있다. 로봇은 방사선 피폭을 저감시키고 과도한 열, 습기 및 화학 물질 등이 존재하는 작업 환경에서의 작업을 용이하게 할뿐만 아니라 발전소의 이용률을 증가시킨다. 또한, 로봇을 사용함으로써 원전의 안전성을 저해하지 않으면서 가동중 검사를 수행함으로써 피폭 선량을 저감한다. 게다가 다른 산업 분야에서의 로봇의 사용은 관련 기술의 발달을 촉진시키고 이의 경제적 가치를 시험적으로 보여준다. 따라서, 원전에서의 로봇의 사용은 방사선 안전에 관련해서 뿐만 아니라 작업 수행의 질과 경제성 면에서도 타당하게 수용되고 있는 실정이다.

다음의 다섯 가지의 요인이 원전에서의 로봇 사용을 뒷받침하고 있다.

- 낮은 방사선 피폭
 - 로봇을 사용함으로써 작업종사자의 방사선 피폭이 낮아지고 이는 방사선 피폭 규제 기준을 쉽게 만족시킬 수 있다.
- ALARA 원칙
 - 로봇의 사용은 '경제적, 사회적 인자를 고려하여 달성 가능한 한 낮게' ALARA의 원칙과 부합한다. 즉, 기존의 설비만으로도 방사선 피폭 규제 기준을 만족시킬 수 있더라도 추가적인 비용을 투입하여 로봇을 사용함으로써 방사선 피폭을 저감시킬 수 있다면 그렇게 해야 한다.
- 운전 및 보수비용의 절감
 - 로봇의 도입은 작업에 소요되는 작업 종사자의 수를 감소시킴으로써 운전 및 보수비용의 절감 효과를 가져온다.
- 원전 이용률 향상에 대한 경제적 압력
 - 로봇을 이용함으로써 각종 보수시에 운전 중지를 하지 않고도 작업이 가능하므로 원전 이용률은 증대된다.
- 원전 수명의 연장에 대한 욕구

위와 같은 요구에 대하여 로봇의 도입은 다음과 같은 해결책을 제시한다.

- 발전소내 잠재적 위험이 존재하는 구역에서 작업종사자의 해방

- 발전소 운전 정지 시간의 단축 및 이에 따른 발전소 이용률의 향상
- 발전소 가동중 보수 작업 가능
- 로봇을 도입하기 이전에는 수행하기 불가능했던 구역에 대한 검사 작업 수행
- 작업 속도 및 능률의 향상
- 발전소 수명의 연장

상업적으로 사용 가능한 로봇은 대략 \$40,000~\$125,000 정도이며, 보다 싸고 간단한 로봇은 \$10,000~\$30,000 정도이고 매우 복잡하고 비싼 로봇은 \$200,00~\$300,000을 상회한다. 원전에서 로봇을 도입하기 위해 가장 중요한 것은 로봇을 도입하여 수행할 작업과 로봇의 능력을 파악한 후 로봇을 구입해야 한다는 것이다. 먼저 로봇을 구입하고 나중에 수행 작업을 선정해서는 안 된다. 이르기 위해서는 로봇이 수행할 작업의 성격과 주변 환경에 대한 철저한 파악이 먼저 수행되어야 한다.

(2) 원전에서의 로봇 이용 현황

다음의 <그림 3-2>는 현재 사용 중인 로봇의 용도를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 현재는 배관 검사 및 일반 검사등 비교적 단순한 용도에 로봇이 사용되고 있지만 향후 원격 조정, 원자로 용기의 검사 및 수중 제염에 사용되는 비중이 증가할 것으로 보여진다.

로봇의 도입으로 인한 경제성은 점점 더 좋아지고 있고 미래에는 더욱 좋아질 전망이다. 이것은 방사선 피폭에 대한 각종 규제 기준의 강화에 따라 피폭 저감을 위한 장치들이 원전에 추가적으로 부착되면서 단위 집단선량 저감에 드는 비용이 점차로 증가하기 때문이다. 즉, 방사선 피폭 저감을 위한 비용인 방사선 방호 비용은 경제학적인 한계 효용의 법칙(또는 효용 체감의 법칙, Law of diminishing returns)을 따르기 때문이다. 예를 들어, 최초의 100이라는 선량 저감을 위해 100만권의 가치를 투여하였다면 나중에는 100이라는 선량 저감을 위해 100이상의 가치를 투여해야 한다는 것이다. 따라서, 최초에는 간단한 차폐체의 설치만으로도 규제 기준을 만족시킬 수 있는 수준으로까지 선량 저감이 가능해지지만 나중에는 보다 비용이 많이 소요되는 선량 저감 방안들이 도입되어

야 한다. 이러한 측면에서 로봇의 도입은 초기 원전에서는 선량 저감을 위한 방법으로 경제성이 문제가 되었지만 현재 및 미래에는 작업 능률뿐만 아니라 경제성 면에서도 만족할 만한 선량 저감 방법이 되고 있다.

(3) 원전에서의 로봇 이용의 경험 및 실제

Public Service Electric and Gas Company(PSE&G)사는 원전에서의 로봇 사용의 선구자로 1987년부터 1991년까지 가압경수로 2기 (Salem 1, 2)와 비등 경수로 1 기(Hope Creek)에 총 \$1.6 million을 투자하였다. 이를 통해 얻어지는 이득은 \$5.3 million(1993년까지 총 \$7 million)이 될 것으로 추정되었다. <표 3-23>은 Salem 및 Hope Creek에 사용된 로봇들에 대한 요약이다.

PSE&G사에서는 주로 다음과 같은 목적으로 로봇을 도입하였다.

- 수중 검사, 조사 및 청소
- 표면 제염,
- 원격 조종 및 보수
- 증기발생기 이차측 튜브 검사, 청소 및 외부 삼입물 제거

위와 같은 최초의 목적이 달성됨에 따라 PSE&G사에서는 다음과 같은 목적으로 두 번째 로봇 이용 프로그램을 도입하였다.

- 증기발생기 상부 지지대의 검사 및 청소
- 보건 물리 담당자의 증기발생기로부터의 피폭 저감
- 일반적인 운전 및 보수
- 방사선 구역에서의 검사
- 보충수 및 각종 배관 검사 및 보수

(가) Minirover

PSE&G사에서 첫 번째로 도입한 로봇은 MiniRover MK I 라는 소형 잠수 차량이다. 이 로봇은 Salem 1호기에서 10년 정기 검사에 사용되어 별 문제 없이

작업을 수행하였다. MiniRover의 주요작업은 다음과 같다.

- 노심 하부 내장물 조립 보조
- 노심 하부 내장물 조립 검사
- 노심 상부 내장물 조립 검사
- 원자로 압력 용기 검사
- 노심 상부 내장물 조립 작업 수행을 위한 작업종사자 보호
- 원자로 동공의 외부 삼입물 제거

MiniRover는 원자로 용기의 수심 7m으로 잠수하여 비디오 이미지를 전달함으로써 작업종사자의 작업 수행을 돕는다. 또한 원자로 용기의 노즐 부분 등을 검사한다. 이러한 작업은 로봇 없이 작업 종사자가 직접 수행할 경우 약 8시간이 소요되지만 MiniRover를 이용하여 약 1시간이면 작업을 수행할 수 있다. 즉, 작업시간 감소 및 피폭 저감을 통해 비용 절감 효과를 이루어 냈다.

MiniRover MK I 을 개선하여 보다 크고 강력한 로봇인 MiniRover MK II 를 구입하여 원자로 동공, 장비 pool, 핵연료 pool 및 핵연료 이송 pool 등의 수중 검사 작업에 사용하였다. MiniRover MK I 와 MiniRover MK II 모두 비용-효율도가 뛰어남이 입증되었다.

(나) SuperScavenger

SuperScavenger는 발전소 주변에서 반복적으로 각종 탱크, pool 및 잠수 청소 작업을 수행한다. PSE&G사에서는 2기의 SuperScavenger를 구입하여 1988년부터 사용하였다. SuperScavenger는 발전소에서 수행할 작업에 적합하도록 개선되어 다음과 같은 작업을 수행하였다.

- 사용후 핵연료 pool, 핵연료 pool 및 장비 pool의 청소 작업
- 원자로 동공 바닥의 제염
- 다양한 저장 탱크 및 역류 탱크의 청소 작업

(다) Surbot-T

Surbot-T는 1988년에 구입되어 일반적인 검사 및 감독용 원격 장비로 이용되었다. Surbot-T 주로 제한구역에서의 환경 감독 임무를 수행하며 해당 정보를 수집하고 오염 수준을 분석하기 위해 표본을 채집하는 업무도 수행한다. 또한 오염 확산의 원천 파악에도 도움을 준다.

(라) Cecil

CECIL은 증기발생기 이차측 검사, sludge 제거 및 외부 삼입물 제거를 위해 도입되었다.

(마) Kelly Vac

Kelly Vac은 표면 제염을 위한 로봇으로 TMI-2 원전의 해체 작업시에 개발되고 사용되었다. 최근에는 주로 SuperScavenger와 결합하여 원자로 동공 및 장비 pool의 바닥 청소 작업에 사용된다.

이상의 PSE&G사의 로봇 이용 경험에 의해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 로봇은 원전에서 검사, 감독 및 모니터링 작업을 수행할 수 있다.
- 로봇은 비용-효율도가 매우 높다.
- 현재 분석된 로봇 도입으로 인한 비용 절감 효과만으로도 로봇의 구입, 개발 및 적용을 정당화할 수 있다.
- 증기발생기 이차측에 로봇을 사용함으로써 증기발생기 보수 및 교체에 드는 비용을 크게 줄일 수 있다.

(4) 원전에서의 로봇 이용의 경제성 분석

전술하였듯이 PSE&G사에서는 로봇의 구입 및 개발비용으로 총 \$1.6 million을 투자하였다. 이로 인한 비용 절감 효과는 \$5.3 million으로 추정되었다. <표

3-24>는 PSE&G사의 로봇의 투자와 비용 절감에 대해 정리하였다.

<표 3-24>에서 보여지듯이 가장 많은 비용이 투자된 로봇은 CECIL이고 또한 비용 절감 효과가 가장 큰 것도 CECIL이다. CECIL은 증기발생기 이차측 검사 및 sludge 제거 및 외부 삼입 이물질 제거에 쓰이는 로봇으로 PSE&G 사의 경험에 의하면 Salem에서 CECIL은 총 3번 사용되었고 이에 따른 비용 절감 효과는 약 \$3 million으로 추정되었다.

<그림 3-3>의 (a), (b)는 CECIL을 포함시켰을 경우와 배제하였을 경우의 비용 절감 효과의 차이를 보여준다. 비용 절감 효과의 추정은 실제로 측정된 데이터와 미래에 발생할 비용 절감 효과를 현가화 평가하여 수행하였다. 이에 의하면 총 \$5.3 million의 비용 절감 중 CECIL에 의한 비용 절감은 \$3 million으로 약 60%에 이른다. CECIL에 의한 비용 절감 효과는 발전소 운전 정지 시간의 단축, 작업종사자 방사선 피폭 및 증기발생기 보수, 교체 등의 측면에서 CECIL이 기여하는 바를 추정하였다.

<그림 3-3> (a)에 의하면 CECIL을 포함하였을 경우 작업종사자 방사선 피폭 저감에 의한 비용 절감 효과가 \$1.6 million으로 매우 크고 이것은 1 person-rem 당 약 \$5,000으로 현재 미국에서 사용하고 있는 1 person-rem 당 \$10,000 보다 훨씬 낮다. 이러한 사실은 로봇을 도입하여 작업종사자의 피폭저감화를 꾀하는 것이 매우 타당함을 보여주는 것이다. 그리고 <표 3-25>는 경제성 분석에 고려하는 경제적 인자들을 요약하였다.

(5) 미래의 로봇 이용 전망

(가) 미래의 발전소에 로봇 도입의 근거

로봇 기술은 미래의 발전소에 통합시키는 측면에서 빠른 발전을 보이고 있다. PSE&G사의 로봇 이용 경험과 그의 경제성 분석은 이미 전술하였듯이 비용-효율도가 매우 큰 것으로 보고되었다.

Utility/Manufacturer Robot User Group (U/M RUG)의 조사에 의하면 1990년까지 44개사가 이미 원격 조정 로봇을 원전의 작업에 도입하고 있다고 한다. 미래에 로봇은 지능을 갖추어 발전소 작업의 중심으로 자리잡을 것이다. 즉, 인공지능의 도입으로 복잡한 발전소의 기하학적 구조를 습득하여 발전소를 스스

로 돌아다니며 각종 검사, 감독, 모니터링, 운전 및 보수 작업을 수행할 것이다. 특히, 사람이 접근할 수 없는 지역에서의 작업에 유효할 것이다.

그러나, 현재 도입된 대부분의 로봇들은 발전소의 환경 내에서 매우 제한적으로 사용되고 있다. 이것은 다음과 같은 이유 때문이다. 첫째, 발전소가 로봇의 이용을 고려하지 않고 설계되었다. 현재의 로봇은 작동하게 되는 환경에 매우 민감하다 따라서 발전소 환경이 로봇의 기능을 제한하게 되는 것이다. 둘째, 실제적인 이유로 현재의 로봇들은 대부분 검사 및 감독 작업에 사용되고 일부만 운전 및 보수에 사용된다. U/M RUG의 조사에 의하면 67%가 검사 및 감독 작업에 33%가 운전 및 보수 작업에 사용된다고 한다. 현재의 로봇은 복잡한 운전 및 보수 작업에 적합할 만큼 다양한 기능을 발휘하지는 못한다. 그러나, 인공지능, 신경망 이론 및 전문가 시스템 발전에 따라 의사 결정 기능을 포함한 다양한 기능을 로봇이 가까운 미래에 출현할 것으로 기대된다. 사회의 변화, 산업 및 기술의 발전은 사회에서만 아니라 발전소에서의 로봇 사용의 가속화에 영향을 미친다. <표 3-26>은 로봇의 사용에 영향을 미치는 인자들에 대해 요약한 것이다.

방사선 피폭을 비롯한 안전에 관련된 각종 규제들은 보다 강화될 것이고 이에 따라 각종 로봇들이 방사선 피폭의 위험이 존재하는 곳뿐만 아니라 모든 종류의 위험이 존재하는 곳에서 인간을 대치할 것이다. 반면에 인간은 주로 로봇 운전 및 보수 등에 작업에 중점을 두게 될 것이다.

현재에 사용되는 로봇들은 어떠한 면에서는 조악한 편이다. 왜냐하면 제한적인 환경에서 제한적인 기능만을 발휘하고 있기 때문이다. 그러나, 관련 기술이 발전하면서 향상된 시각계통(vision system), 감지기 및 인공지능 등의 발달로 보다 다양한 상황에 적합한 로봇들이 개발될 것이다. <표 3-27>은 로봇을 사용하는데 영향을 미치는 기술적인 인자들에 대해 요약한 것이다.

(나) 미래의 로봇

현재 많은 로봇들이 검사, 감독 및 모니터링 작업에 사용되고 있고 그중 몇몇은 운전 및 보수 작업에도 사용되고 있다. 미래의 보다 발전된 로봇은 인공지능, 개선된 감지기, 내장(on-board) 지능을 갖추고 발전소의 운전 및 보수 작업을 수행할 것이다. 그러나, 로봇 사용에 대한 현실적인 문제점이 발전소내에 존

제한한다. 그것은 부지 특성 혹은 발전소 특성에 따라 로봇의 도입 자체가 경제적으로 제한을 받는다든지 또는 해당 로봇의 기능을 완전하게 이용하지 못할 수도 있다는 것이다. 따라서, 보다 효율적으로 로봇을 이용하기 위해서는 원전의 설계 자체에 로봇의 이용을 통합시키는 것이 바람직하다.

대부분의 미래의 로봇은 두 가지 모드로 작동한다. 그것은 프로그래밍화 모드와 원격 조정 모드이다. 프로그래밍화 모드에서 로봇은 사전에 정해지거나 혹은 정기적으로 반복되는 작동을 한다. 이 모드에서는 문제점이 발견되는 지점으로 자동적으로 로봇이 전파된다. 이 로봇들은 인공지능을 이용하여 발전소의 기하학적 구조를 습득하여 필요한 장소로 이동한다. 일단 로봇이 지정된 장소에 도달하면 원격 조정 모드로 바뀌어 운전자가 필요한 일련의 조치를 로봇을 통해서 수행한다. 운전자가 직접 로봇을 운전할 필요가 없어진 이래로 한 사람의 운전자가 동시에 여러 로봇을 운전할 수 있게 되었다. <표 3-28>에 미래의 로봇의 특징에 대해서 요약하였다.

<표 3-23> Application of Robots at Salem and Hope Creek

Robot	Application
MiniRover MK I	<ul style="list-style-type: none"> • In-vessel 10 year in-service inspection of Salem 1 (1987) and Salem 2 (1990) • Fuel transfer mechanism inspections • Fuel pool inspections
MiniRover MK II	<ul style="list-style-type: none"> • Hope Creek torus coating inspections • Reactor vessel, fuel pool, and transfer pool inspections
SuperScavenger	<ul style="list-style-type: none"> • Underwater cleaning of spent fuel pools and transfer pools • Reactor cavity floor cleaning and decontamination • Cleaning of various storage and holding tanks
Kelly Vac *	<ul style="list-style-type: none"> • General purpose floor and surface decontamination • Combined with SuperScavenger(s) to perform transfer pool and reactor cavity floor(s) decontamination
SURBOT-T	<ul style="list-style-type: none"> • General health physics and routine surveillance • Plant monitoring
CECIL	<ul style="list-style-type: none"> • Steam generator secondary side inspection and sludge lancing of tube bundles • Foreign object search and retrieval **
ANDROS MK VI/8MISR	<ul style="list-style-type: none"> • Radioactive waste filter changeout • General plant health physics and surveillance/ monitoring tasks
<p>* Originally a manually operated cleaning tool, it was combined into the SuperScavenger mobile robot. PSE&G also converted another version of this technology for non-nuclear hazardous spill cleanup.</p> <p>** CECIL was a joint development effort among ConEdison, PSE&E, EPRI, SEERCO, and Foster Miler. Copies of this highly successful robot have been sold to Electricite de France, Japan, the U.S. Navy, and Westinghouse. Northern States Power also participated in testing the CECIL prototype.</p>	

<表 3-24> Cost Saving of Robots in the PSE&G Program

Description of Robot	Investment (\$)	Operational Savings (\$)
MiniRover MK I	55,000	1,200,000
MiniRover MK II	90,000	150,000
SuperScavenger(2) and related tools and equipment	120,000	300,000
Kelly Vac Decon System and associated special tools	190,000	250,000
SURBOT-T	200,000	200,000
CECIL	750,000	3,200,000
ANDROS MK VI/MISR	120,000	0
Hardware brought in support of the program <ul style="list-style-type: none"> · Camera / photographic equipment · Special radiation probes · Recording instruments · Spare parts / accessories · Miscellaneous special tools · Robot hardware upgrades · Minor robot repair 	75,000	Not applicable
Total	1,600,000	5,300,000

<표 3-25> Robotic Application Economic Factors

<p>Cost saving</p> <p>방사선 구역으로 작업종사자 출입의 최소화</p> <ul style="list-style-type: none"> · 개인 방사선 피폭 및 물리적 위험에의 노출 감소 · 작업시간 감소 · 작업자수 감소 · 작업종사자 안전의 개선 · 작업 수행의 반복성 · 보건물리 monitoring 시간의 감소 (업무량 감소) · 안전성 관련 기기 및 하드웨어수의 감소 · 방사성 폐기물의 감소 · 발전소 운전 중 다중 작업(multiple tasks) <p>작업 중 부상 감소</p> <p>발전소 운전 정지시간 감소</p> <p>누설 부위 청소의 로봇 이용</p>
<p>Expenses</p> <p>로봇 구입 비용</p> <p>부지 특성에 따른 설치비용</p> <p>로봇 원전 및 보수비용</p> <p>로봇 이용 비용</p> <p>운전원 훈련 비용</p> <p>제염 비용</p> <p>로봇 지원 스태프 운영비용</p>

<ㄧ 3-26> Factors Generally Influencing the Use of Robots

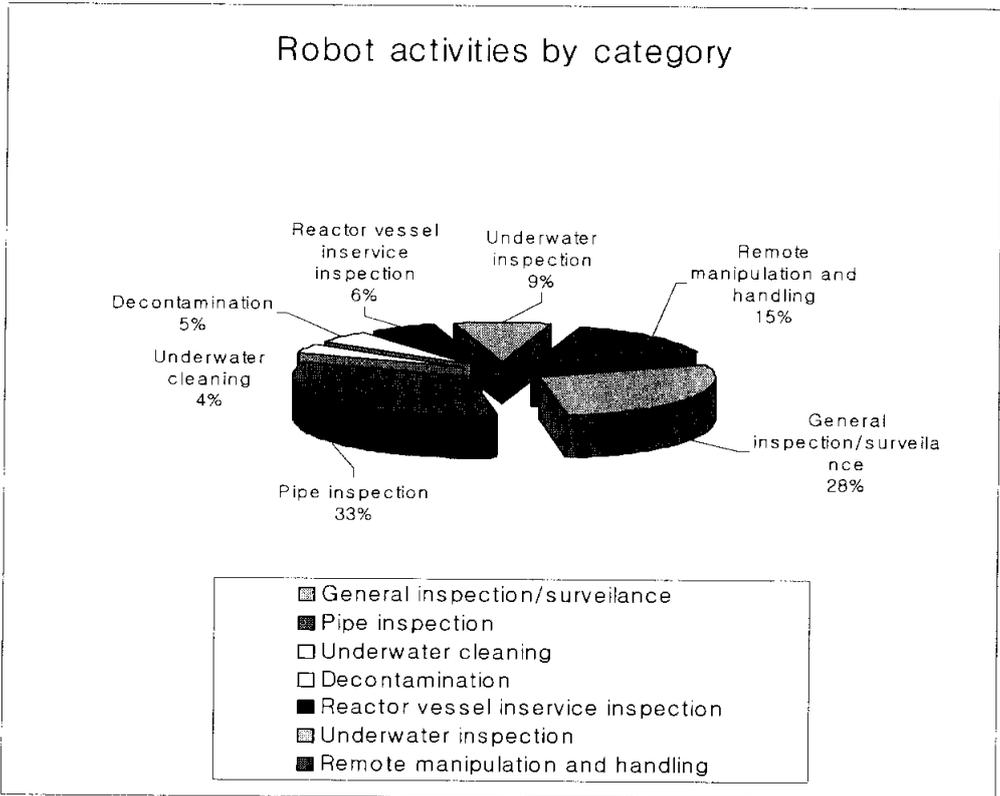
- Increasing O&M costs
- The need to inspect critical plant components more often life management
- Increasingly stricter NRC, EPA and OSHA standards
- Public acceptance of robots as versatile, intelligent tools
- Desire and need to clean up toxic waste sites
- Unwillingness of humans to expose themselves to hazards of any kind
- Standardization of robotic end effectors, software programming and communication protocols
- Standardization of utility equipment hardware so robots can operate upon it

<ㄧ 3-27> Technical Factors Affecting the Use of Mobile Robots

- Advanced technology use by NASA in the space station and other missions
- Microminiaturization of robots
- Advanced vision and tactile sensors
- Advances in medical technologies and prosthetic devices
- Extensive use of expert systems and artificial intelligence technologies
- Military use of robots
- Robots used in construction of buildings and structures
- Robots used in clean-up of the environmentally hazardous waste dumps

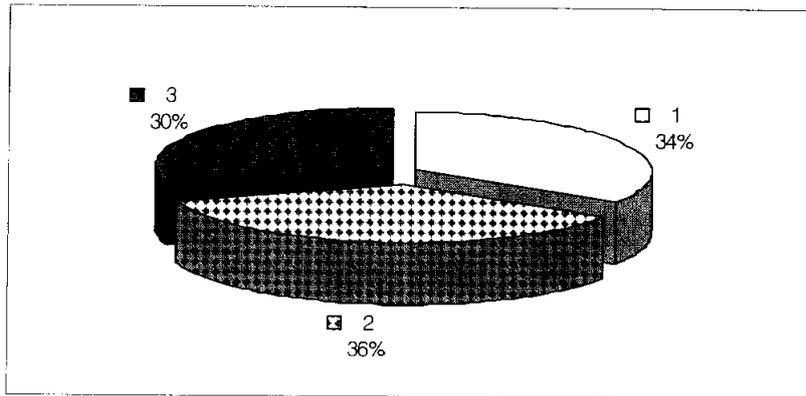
<ㄧ 3-28> Characteristics of the Robot of the Future

- Modular in design and capable of reconfiguration variety of useful applications
- Easy to decontaminate
- Highly mobile and able to contend with wide variety of plant obstacles and terrain type
- Long time between component/subsystem/total system failure (1000hr+)
- Must fail-safe and be capable of rescue by other robots
- Must be able to interact with and operate upon various pieces of equipment



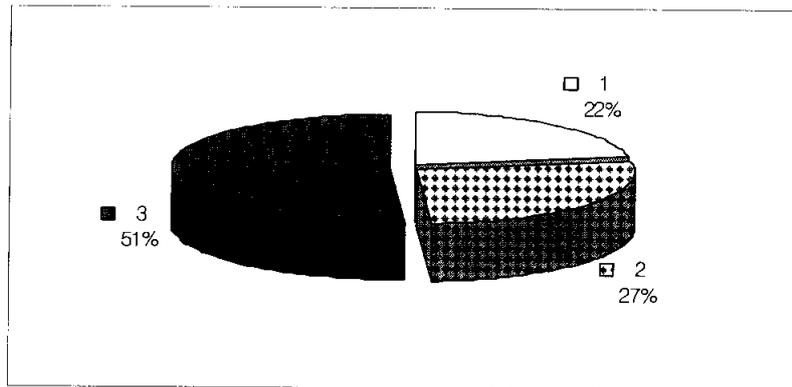
<그림 3-2> 현재 사용 중인 로봇의 용도

(a) with CECIL Robot included



1	Plant downtime	\$1.9 million
2	Radiation-Related Cost savings	\$1.6 million
3	Improvements in Labor, Time, and Task Efficiencies	\$1.8 million

(b) without CECIL Robot

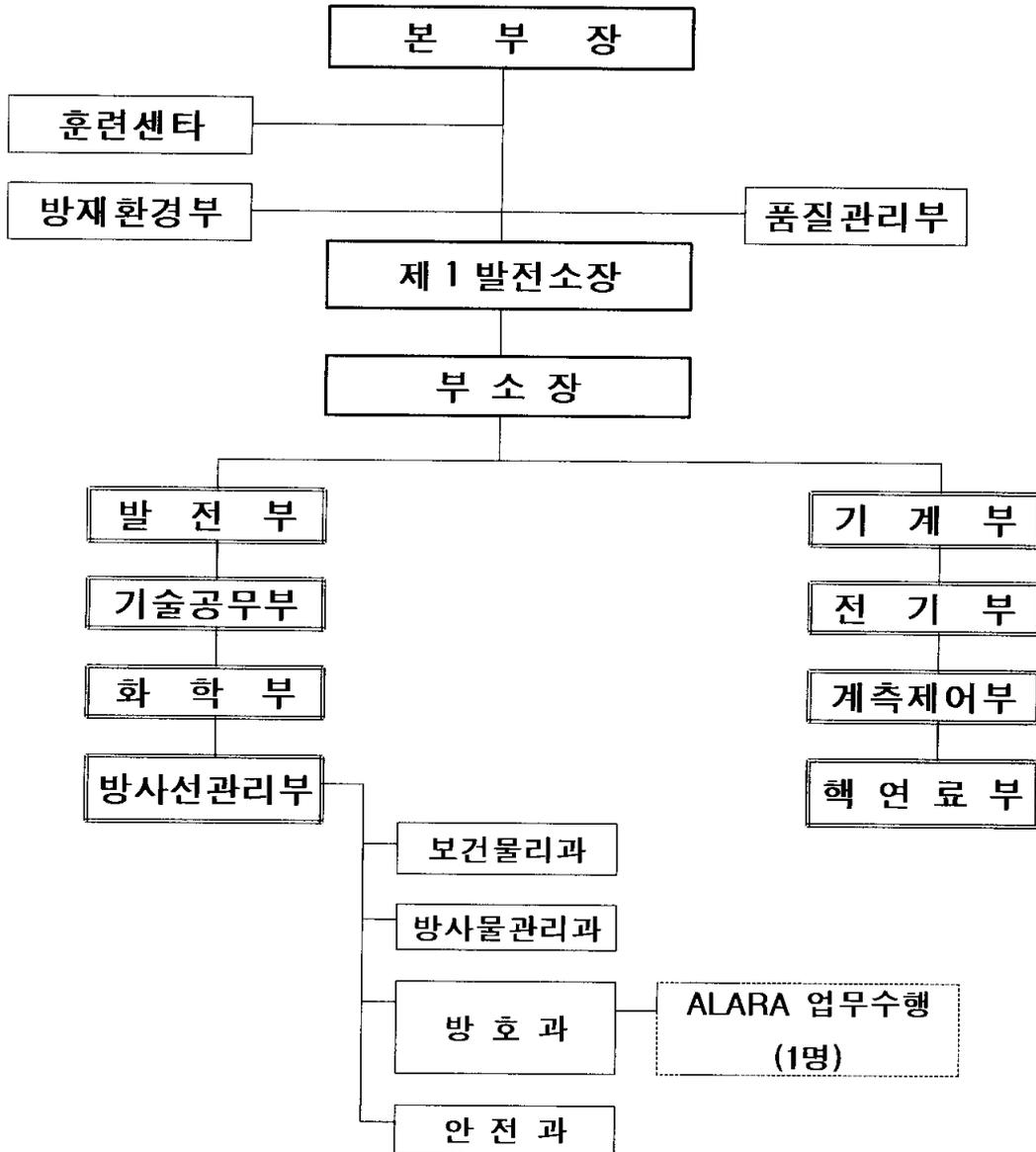


1	Plant downtime	\$0.4 million
2	Radiation-Related Cost savings	\$0.6 million
3	Improvements in Labor, Time, and Task Efficiencies	\$1.1 million

<그림 3-3> Breakdown of Estimated Savings

4. ALARA 수행체계 비교분석

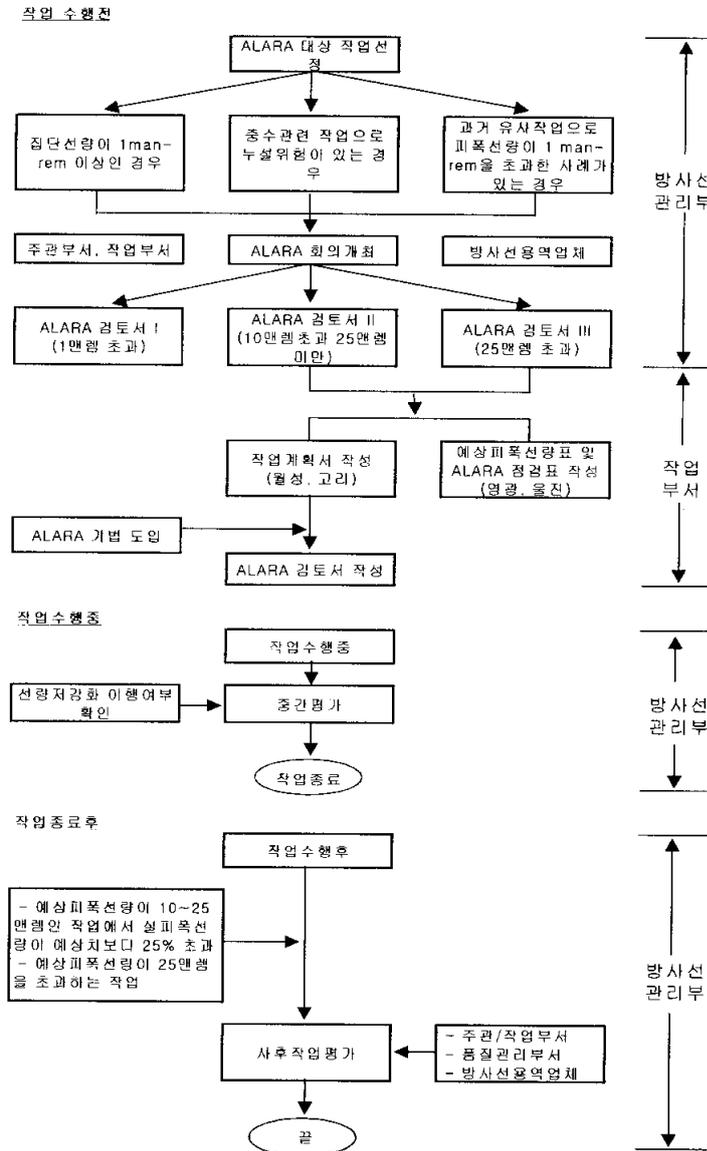
본 절에서는 국내 월성 제1발전소와 캐나다 온타리오 하이드로사의 달링통 원전의 ALARA 수행체계를 비교하기로 하겠다. 월성 제1발전소의 ALARA 수행조직 체계는 <그림 3-4>와 같다.⁸⁾



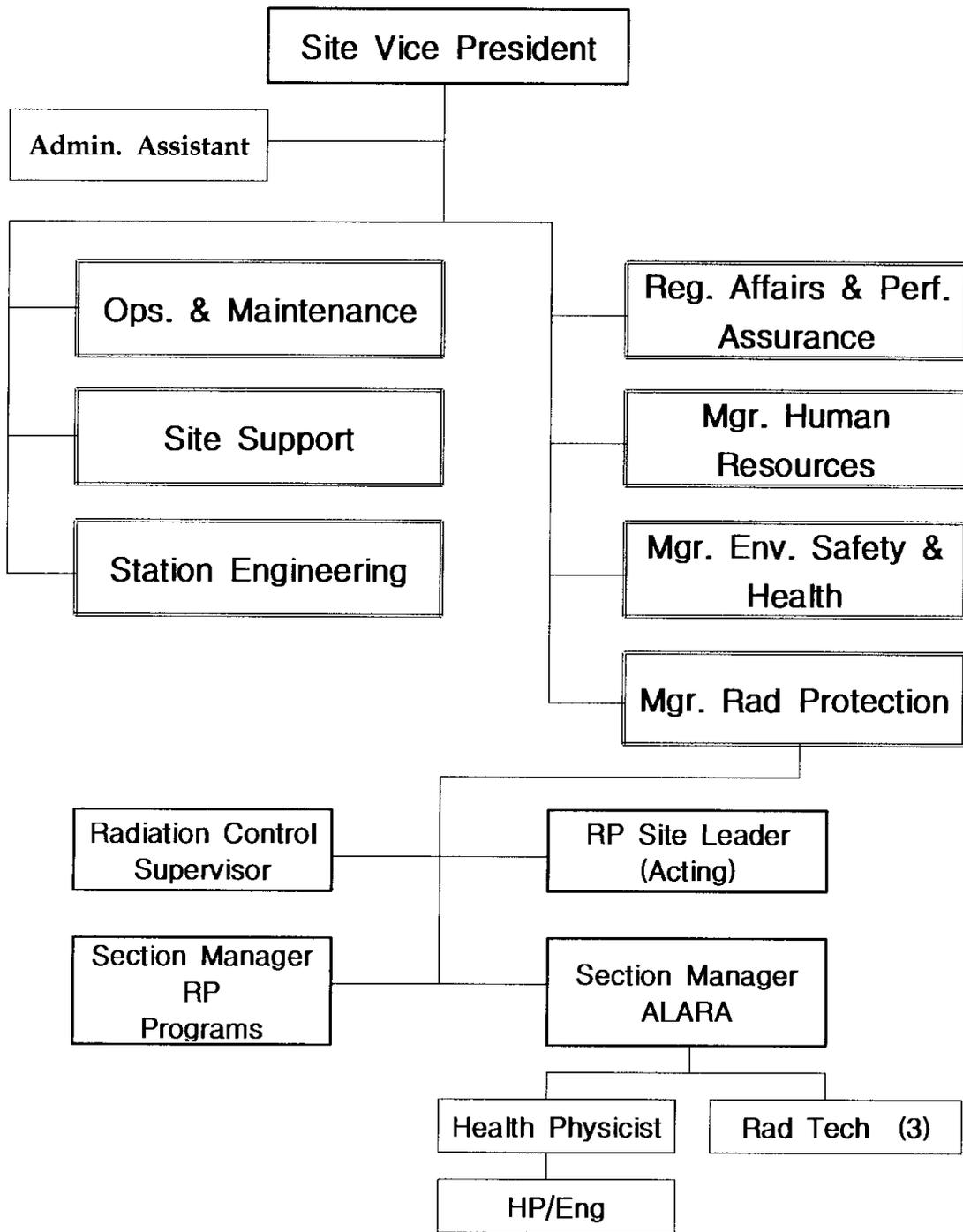
<그림 3-4> 월성 제1발전소 ALARA 수행조직

8) [참고문헌] 김영찬, ALARA 프로그램 수행에 따른 문제점 고찰, 월성 제1발전소, 2000

한편 ALARA 업무수행 흐름을 도식화하면 <그림 3-5>와 같으며, 달링톤 원전의 ALARA 수행조직은 <그림 3-6>과 같다.



<그림 3-5> ALARA 업무수행 흐름

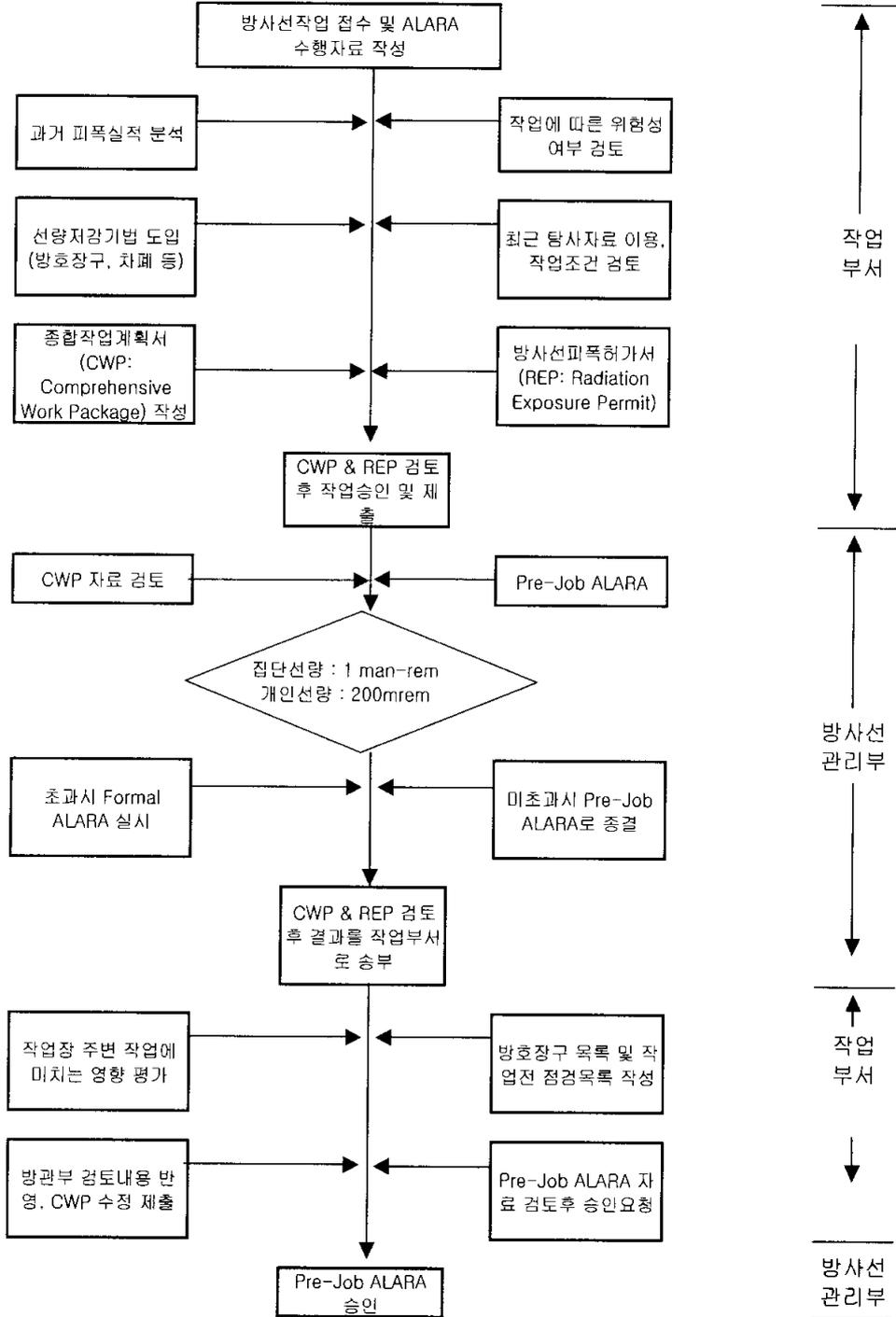


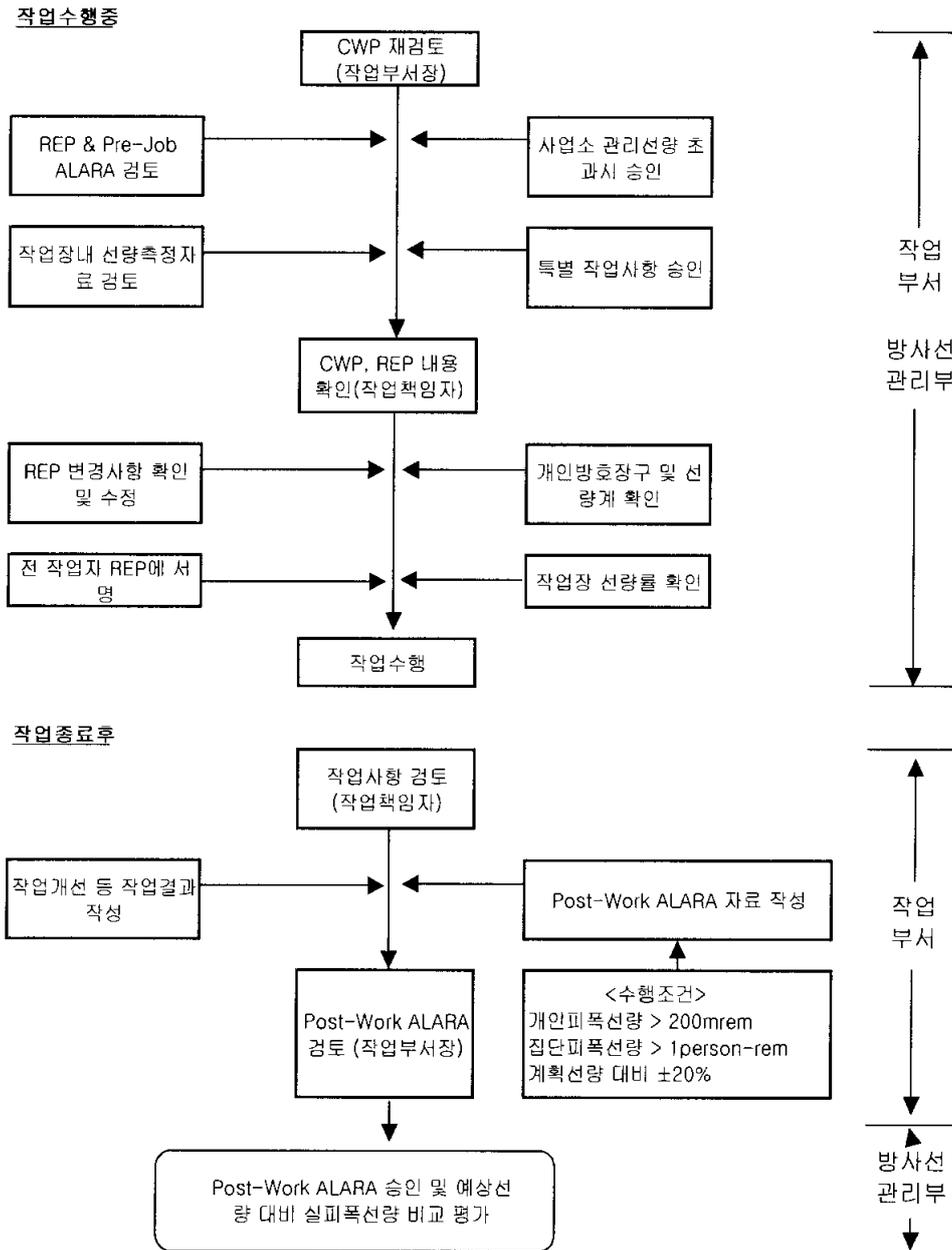
<그림 3-6> 달링톤 원전 ALARA 수행조직

한편 온타리오 하이드로 사의 달링톤 원전의 ALARA 업무수행 흐름을 도식

화하면 <그림 3-7>과 같다.

작업수행전





<그림 3-7> 달링톤 원전의 ALARA 업무수행 흐름

상기 표와 그림에서 기술된 월성 원전과 온타리오 하이드로사 원전의 ALARA 프로그램 운영상의 차이점을 정리하면 다음 <표 3-29>와 같다.

<표 3-29> 두 원전의 ALARA 프로그램 운영의 차이점

구 분		국 내	국 외	비 고
수 행 조 직	ALARA 담당	방호과	ALARA Section (별도의 조직 구성)	※ 국내 : 월성 1발
	수행인원 (본부)	2명	5명	
수 행 절 차	수행 기본 개념	ALARA	ALARA + CBA	※ 국외 : 온타리오 하이드로사 원전 기준
	수행 주체	방사선관리부	작업부서	
	검토대상 선정기준	집단선량	집단선량 + 개인선량	
	피폭이력 전산화	NRS	RIS 및 DMS	

한편 두 원전의 ALARA 운영체계 구성요소별 주요 차이점을 정리하기로 한다. 아래에서 국외원전이라 함은 온타리오 하이드로사의 달링톤 원전을 기준으로 하고 있음을 밝혀둔다.

□ ALARA 담당 및 수행인원

- 국내원전 : 현재 방사선관리부내 ALARA 수행은 방호과에서 담당직원 1명(발전소별)을 지정하여 운영하고 있으며 별도의 전담조직은 없음. 단, 종사자 교육 및 선량집계 부분은 보건물리과 담당자의 협조 하에 운영
- 국외원전 : 방사선관리부내 별도의 ALARA 수행조직이 구성되어 있으며 보건물리, 방사선 방호, 기술지원 등 3개 부분으로 세분화하여 본부 전체의 방사선안전관리 담당
- 검토의견 : 1인이 발전소(2개 호기) 전체의 방사선작업에 대한 방사선 작업에 대한 종합적인 ALARA를 담당한다는 것은 현실적으로 어려우며 특히, 대부분의 ALARA 검토가 수행되는 계획예방정비 기간 중에는 검토대상이 많아 적극적인 검토가 어려움

□ 수행 기본개념

- 국내원전 : ALARA 개념을 기본 바탕으로 수행되지만 실제로는 “사회적 경제적 인자가 고려된 순이익”은 배제되고 “가능한 낮게”란 항목만이 현재 원전에서 적용되는 ALARA의 개념임.
- 국외원전 : 레벨별 선량제한치 및 ALARA 검토대상 작업 선정기준 등이 CBA(Cost-Benefit-Analysis)에 근거. 온타리오 하이드로 발전소의 경우 US\$1000/person-rem 값을 적용
- 검토의견 : 현재까지 국내원전에서는 “집단선량 1맨렘 초과 작업시”라는 절차에 따라 ALARA 검토가 수행됨. 그러나 보다 효과적이고 체계적인 ALARA 달성을 위해서는 사회적, 경제적 요건이 반영된 가치 (Monetary valuation per unit Collective Dose)를 반영하여 선량저감을 위해 투입되는 자원(인적, 물적)의 필요성을 검토하여 불필요한 선량저감 노력을 지향함이 바람직함.

□ 수행 주체

- 국내원전
 - ALARA 담당 부서인 방사선관리부가 주체이며 회의체 운영에서 피폭저감 수립까지 전 과정 주관
 - ALARA 검토·수행은 대부분의 작업부서가 소극적이며, 선량저감화 추진사항 등, 방사선안전관리 사항은 방사선관리부 결정에 따르는 피동적인 자세이거나 방사선관리부의 적절한 제안내용 조차도 설비상 혹은 설치상의 이유를 들어 실행 불가함을 주장
- 국외원전
 - ALARA 수행의 주체가 방사선관리부가 아닌 실 작업부서
 - 작업부서 자체적으로 방사선 관련 업무 수행능력을 보유하고 ALARA 검토·수행
 - 방사선작업 수행에 따른 선량저감기법 도입, 종료후 개선사항 도출 부분도 실 작업자 관점에서 이루어져 보다 세부적으로 평가하고 경험사례를 유사 작업시 반영
 - 작업부서에 현장 방사선안전 관리에 대한 권한과 책임 부여
 - 작업부서장은 방사선작업에 따른 ALARA 수행을 검토 및 승인하

고 각 작업자는 작업수행시 보건물리원과 같은 권한을 갖고 보다 자율적으로 책임있는 방사선 안전관리 수행

- 검토의견

- 대체로 작업부서는 작업수행에만 관심이 있으며, 선량저감화 추진은 방사선관리부만의 관심사항이자 책임사항이라는 의식이 팽배해 있음
- 따라서 점차 강화되는 개인선량 한도 및 사업소 피폭선량 목표치를 달성하기 위해서는 무엇보다 작업을 실제 수행하는 부서의 자율적인 선량저감화 추진이 관건이며 이를 위한 제도적 보완이 필요함

□ ALARA 검토대상 선정기준

- 국내원전 : 집단선량이 1 man-rem을 초과하는 작업 혹은 유사작업으로 1man-rem이 초과된 사례가 있는 경우에 한함. 개인피폭 예상선량은 분기선량, 연간선량 차원에서 관리되며 단일 작업으로 인한 개인선량한도에 근거한 ALARA 검토 기준치는 없음.
- 국외원전 : 방사선관리구역에서 수행되는 전 작업에 대해 Pre-Job ALARA가 수행되며 CBA(Cost-Benefit Analysis) 개념을 바탕으로 한 기준(집단선량: 1man-rem, 개인피폭선량: 200mrem)을 설정하고 초과시 작업 중, 작업 후 평가가 수반되는 전형적인 ALARA 검토·수행
- 검토의견 : 국내원전의 경우, 발전소의 노후화에 비례하여 피폭 방사선량은 증가하고 있으나 선량기준은 점차 강화되는 추세에 있어 선정기준을 집단선량 개념에서 단위 작업별, 개인선량별로 세분화하여 ALARA 검토대상 선정기준을 수립·운영할 필요가 있음

□ 작업별 피폭이력 전산화

- 국내원전

- 현재 국내원전에서 활용되고 있는 프로그램은 NRS (New- Radiation System)으로 출입관리용인 ADR(Auto Dosimeter Reader) 시스템과 연계하여 작업자 피폭관리를 수행.
- 이외에 방사선안전관리시스템을 활용, 작업장 선량정보 및 개인별 피폭선량 이력을 확인할 수 있으며 향후 사업소내 LAN(근거리통신망 : Local Area Network)을 통해 작업부서에서도 확인이 가능하도록 추

진 중

- 국외원전

- 각 부서별로 LAN를 통해 RIS(Radiation Information System)과 DMS (Dose Management System)을 이용하여 과거 유사작업에 대한 집단/개인별 피폭이력 및 작업장내 방사선량 준위를 손쉽게 파악.
 - 방사선관리부가 전 지역에 대한 방사선(능) 준위를 측정하여 가장 최신자료로 Update하여 작업부서에서 종합작업계획서 및 방사선피폭허가서) 작성시 활용토록 자료 제공
 - 또한 과거피폭 실적 및 현재 선량정보를 기초로 한, 작업별 선량한도를 설정함으로써 최적의 피폭예상선량을 산출, 작업후 선량평가 및 향후 유사작업 예상선량 산출시 기초자료로 활용
- 검토의견 : 단일 항목에 대한 피폭관리에서 단위 작업별, 개인별 피폭관리 기법을 수립하여 세부적인 선량관리가 필요하며, 모든 자료는 전산화를 통해 작업부서에서 접근이 용이하도록 하여 작업계획 수립 및 사후평가지 활용하도록 해야 함

□ 기타사항

- 작업자 의식개혁 및 제도보완

- 작업자 스스로의 선량관리 : 선량저감의 기본원칙은 “시간”, “거리”, “차폐” 3가지 요소로 구성되어 있는데 이외에 “작업에 임하는 자세”를 추가함으로써 4가지 요소를 바탕으로 지속적인 작업자 의식을 전환시켜 나가야 함
 - 선량저감을 위한 동기 부여 : 방사선 작업에 따른 절차 혹은 작업공구 개선에 따른 선량저감 방안을 제시하고 이에 대한 포상 등 혜택을 부여함으로써 보다 개선된 작업 수행 능력 배양
 - 방사선 종사자의 피폭에 따른 보상방법 개선 : 현재 방사선관리구역 출입시간 또는 피폭실적을 기준으로 지급되고 있는 방사선관련 수당을 집단 및 개인의 선량저감화 측면에 이로운 일괄지급 방식으로 변경
- 작업조건 개선
- 방호장구 개선

- 한국인 체형에 적합한 방호장구 개발
- 방호장구의 경량화
- 다양한 형태의 방호장구 개발로 편의성 도모
- 방호관리 방법 개선
 - 고선량지역의 작업 및 방호관리를 위해 무인감시설비(방송설비 포함) 확충·운영
- 설비 개선
 - 고방사선 작업에 대해 설비개선을 통한 피폭선량저감 방안 아이디어 공모 및 실적내용의 교환

제 3 절 ALARA 요건 검토

1. 국내외 ALARA 수행요건

본 절에서는 국내외 ALARA 요건을 검토하였다. 먼저 ALARA와 관련하여 기술한 국내 법령 및 고시를 검토한 결과를 요약하면 아래와 같다.

□ 원자력법(99-2-8 개정)

第97條 (放射線障害防止措置) ①原子力關係事業者는 放射線障害를 방지하기 위하여 大統領令이 정하는 바에 따라 다음 各號의 措置를 하여야 한다. <改正 95-1-5, 99-2-8>

1. 放射線量 및 放射性汚染의 測定

2. 健康診斷

3. 被曝管理

4. 放射性物質의 放出量 및 被曝放射線量を 가능한 한 합리적으로 낮게 유지하기 위하여 필요한 措置

②原子力關係事業者는 放射線作業從事者 및 大統領令이 정하는 隨時出入者의 被曝放射線量이 大統領令이 정하는 線量限度를 초과하지 아니하도록 필요한 措置를 하여야 한다. <新設 99-2-8>

③原子力關係事業者는 放射線障害를 받은 者 또는 放射線障害를 받은 것으로 보이는 者에 대하여 原子力利用施設에의 出入制限 기타 保健上 필요한 措置를 하여야 한다. <改正 99-2-8>

□ 원자력법 시행령 (1999. 8. 31 개정)

제299조의3(피폭저감화 조치) 원자력관계사업자는 법 제97조제1항제4호의 규정에 의하여 원자력이용시설의 정상운전 및 비정상상태(사고를 제외한다)에서 원자력이용시설에 종사하는 방사선작업종사자 및 수시출입자와 시설주변 주민이 받게 되는 방사선피폭을 최소화하기 위하여 과학기술부장관이 정하는 바에 따라 다음 각호의 조치를 하여야 한다.

1. 방사선 작업특성에 부합하는 방호조치

2. 방사선차폐 및 시설의 적절한 배치

3. 선량저감에 효과적인 재료 및 기기의 사용

4. 적절한 작업공간의 확보

[본조신설 99·8·31]

□ 차세대원전 ALARA 설계 요건

① (방사선원의 감소 및 이를 위한 재료의 선택)

· 방사화된 액체를 함유하는 용기, 배관, 탱크, 밸브 등에 사용되는 재료는 가능한 한 내부식성 재질을 사용하여야 한다.

② (발전소 배치 및 차폐)

· 작업, 운전중 점검 및 시료채취시 작업자가 최단시간에 업무를 수행할 수 있도록 접근성이 확보되어야 한다.

· 방사선장의 체류시간을 최소화하기 위한 고려가 있어야 한다.

· 휴대형차폐를 위한 대비를 하여야 한다.

· 고방사선구역에 대해서 접근성을 유지하기 위한 배려가 있어야 한다.

· 해체시 피폭저감화 방안을 고려하여야 한다.

③ (방사성 물질의 누출 및 확산 방지)

· 핵분열생성물이 계통으로 누출되지 않도록 핵연료봉의 건전성이 충분히 유지되어야 하고, 운전중 점검과 시료채취등 운영시와 핵연료재장전, 정기보수 등 유지보수활동시 작업장의 방사선원을 최소화 할 수 있도록 방사선차폐, 계통에 함유된 방사성물질의 제거, 공기중 방사성물질의 제거등 선원저감능력 확보에 대한 고려가 있어야 한다.

· 방사화 부식생성물의 생성을 억제하고, 확산을 방지하며, 침적을 억제하는 방안을 고려하여야 한다.

④ (방사선구역의 설정)

· 원자력시설의 운영적 관리가 용이하도록 예상되는 방사선량률에 따라 구역을 분류하고, 방사선구역에서 종사자의 활동이 최소화되도록 설계시에 고려하여야 한다.

⑤ (설계검토)

· 원전의 설계에서 방사선방호원칙이 충분히 반영되어 종사자와 주변주민의 방사선피폭이 ALARA로 유지하는데 요구되는 사항들이 충분히 반영되어

2. 선량제약(Dose Constraint) 검토

가. 선량제약의 정의

방사선방호 개념의 변천을 살펴보기로 하자. ICRP-26(1977) 이전에는 방호의 주요목표는 방사선피폭으로부터 개인을 적절히 보호하는 것이었으며, 따라서 개인의 “최대허용선량(MPD)”을 강조하였다. 그러나 ICRP-26(1977)에서는 개인의 방사선피폭이 선량한도에 부합된다는 것만으로는 방호가 충분하지 않은 것으로 고려되어, ICRP-22(1973)에서 방사선방호의 최적화 개념이 최초로 언급되었고, ICRP-26에서 동 개념이 공식적으로 도입하였다. 한편 ICRP-60(1990)에서는 방사선방호 최적화 과정에서 인구집단 내 일부 개인에게 초래될 수 있는 수용 불가능한 피폭선량 관련 불공정성(inequity)을 사회적으로 수용가능한 어떤 최대값 이하로 제한하기 위해 선량제약 개념 도입하기에 이르렀다. ICRP-60 Paragraph (112) (b)에서는 이와 관련하여 다음과 같이 기술하고 있다.

“어떤 행위(practice)에서 취급되는 특정선원과 관련한 개인선량, 피폭자 수 그리고 잠재피폭의 가능성은 사회적, 경제적 인자들을 고려하여 합리적으로 성취가능한 수준으로 낮게 유지(ALARA)되어야 한다. 이러한 절차는 동 절차에서 고려되는 사회적, 경제적 판단의 결과로부터 초래될 수 있는 불공정성(예, 이득과 손해의 불공평 분포 등)을 제한할 수 있도록 개인의 선량을 제약(선량제약)하거나 잠재피폭의 경우에는 개인의 위험을 제약(위험제약)하여야 한다.”

선량제약의 정의¹⁴⁾는 다음과 같다.

선원(source), 행위(practice) 또는 작업(task)의 최적화 과정에서 수용가능한 것으로 판단할 수 있는 선원, 행위 또는 작업에 대한 개인선량의 상한값. 즉, 최적화 과정에서 예상되는 개인선량분포의 어떠한 값도 초과하지 않을 것으로 기대되는 개인선량의 상한값.

선량제약의 목적은 1) 기존 피폭행위 및 작업 외에 특정피폭(원/행위/작업)

14) 선량한도의 정의 : 수용불가능한 위험의 하한경계 (ICRP-60 Paragraph 123)

으로 인한 개인의 방사선피폭이 사전에 설정된 개인선량한도를 초과할 수 없게 함으로써, 수용불가능한 방사선위험의 초래 방지(선원상한개념), 2) 선량한도를 보완하여 다양한 여러 피폭행위의 조합으로 인하여 야기될 수 있는 개인의 이득과 손해간의 불공평성 저감(불공평성의 저감), 그리고 3) 특정선원에 대한 최소한의 요건(Good practice 최소요건)이다.

선량제약의 함축적 의미를 살펴보면, 1) 선량제약은 방사선방호의 최적화가 필요한 모든 상황의 계획단계(예: 원전 설계 또는 변경, 작업준비 등)에 적용되므로, 전망적(prospective) 의미를 가지고 있으며, 2) 선량제약은 개인선량으로 표현되나, 최적화 대상인 선원, 행위 또는 작업과 관계된 선원관련실용량(source-related quantity)임을 알 수 있다.

선량제약과 선량한도와와의 관계¹⁵⁾를 정리하면 아래와 같다.

- 선량한도 : 모든 방사선 취급행위 또는 작업으로부터 한 개인이 현재 그리고 가까운 미래에 피폭되어 받은 개인선량에 대한 법적한도의 의미를 갖는 개인관련실용량(person-related quantity).
- 선량제약 : 단일 특정선원, 행위 또는 작업에 착안하여 최적화 판단시 이용되는 개인선량의 상한값으로서, 선원관련 상한보다 최소한 작거나 같아야 함.

선량제약은 최적화의 대상이 되는 선원 취급행위 전체 또는 그 행위의 일부로 인하여 피폭되는 개인의 방사선방호에 적용한다. 그러나 적용시 주의사항도 있으니 이를 정리하면 다음과 같다.

- 선량제약 적용시 대상선원을 분명히 명시하여야 하며, 선택된 선량제약은 사용목적에 적합하여야 함.
- 선량제약은 최적화 단계에서 기대되는 개인선량의 상한이기 때문에, 실질적인 최적화 과정은 선량제약 이하의 개인선량 영역에서 수행되어야 함.

나. 선량제약의 설정

15) 참조사항

- 선량제약은 방호수단의 계획 및 수립에 이용되며, 개인이 실제로 받은 선량을 평가할 경우에는 선량제약 대신 선량한도가 기준이 됨.
- 단일선원에 의한 피폭선량을 선량한도의 일부분으로 제한하여, 모든 선원에 의한 총 개인선량을 선량한도 이내로 유지하는 접근방법(즉, 단일 선원에 대한 선량한도량 할당)은 개인선량 제한원칙에 속하며, 주어진 선원의 최적화를 위하여 선량제약을 설정하는 것과는 개념적으로 다름.

선량제약은 일차적으로 개인선량값으로 표현된다. 일반인과 작업자에 대한 선량제약은 다음과 같이 표현된다.

- 일반인 : 선원이나 행위에 대한 임계집단(또는 결정군, critical group) 평균선량으로 표현
- 작업자 : 특정 보수작업과 시설의 운영에 따른 특정선원에 의한 개인의 피폭선량을 대상으로 하며, 주어진 기간동안의 개인(집적)선량 또는 단일 선량으로 표현

운영상 편의를 위해, 선량제약치에 해당하는 유도실용량(derived operational quantity) 또는 유도선량제약(예: 연간 방사능방출량, 방사선발생장치의 조사선량을 등)으로 표현되기도 한다.

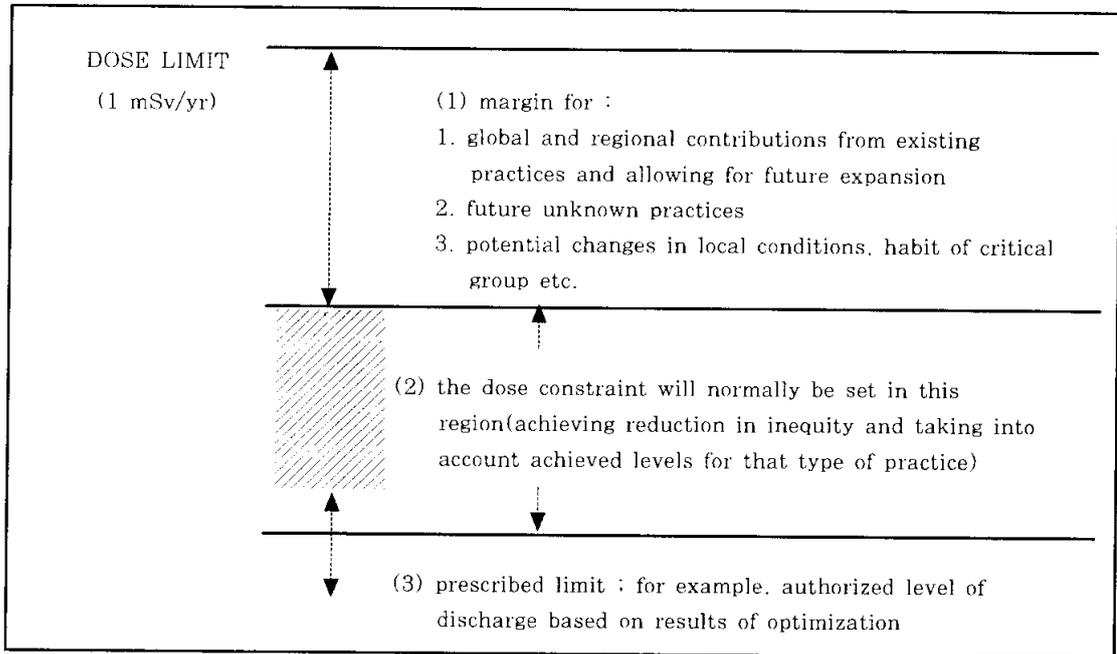
그러나 선량제약 설정시 유의사항이 있다. 이를 정리하면 아래와 같다.

- 선량제약은 규제자 및 운영자가 임의로 설정하는 것은 지양하며, 운영자와 규제자가 상호협조하여 설정하여야 함.
 - 비슷한 규모의 “모범적 실무경험(good practice)”을 참조하여 설정
 - 방호대안의 최종적 선택시 선량제약에 영향을 미칠 수 있는 정치적·사회적 상황이나 기타 사유의 영향을 적절히 고려
- 일반인 선량제약
 - 최적화된 선원에 의한 임계집단의 평균 피폭선량으로 표현되는 일반인의 선량제약은 다른 선원에 의한 임계집단의 피폭 가능성을 고려하여, 다른 선원에 의한 피폭기여가 허용될 수 있도록 설정되어야 함. 통상 각 선원에 대한 선량제약이 정해진 선량한도의 일정 분율을 초과하지 않도록 확인함으로써 상기 원칙을 만족시킬 수 있음.
 - 선량제약은 대개 일반인에 대한 모든 피폭경로에 의한 선량에 적용되나, 어떤 경우에는 특정 피폭경로¹⁶⁾에 대한 선량제약을 설정하는 것도 필요함. 피폭경로별로 고유한 선량제약은 액체 및 공기유출물 처리계통에 대하여 적용되는 최적화 과정의 상한이 됨.
 - IAEA의 일반인 선량제약 설정절차 개략도(<그림 4-1> 참조)
- 작업자 선량제약
 - 방사선의 광범위한 적용분야와 다양한 피폭경로의 존재로 인하여 작업자에 대하여 단일 선량제약을 설정하는 것은 매우 어려움. 그러나 보

16) 예 : 핵시설에 방출되는 액체 유출물에 의한 일반대중의 피폭

통의 직업적 피폭에 대한 선량제약은 대개 관련 선량한도보다 아주 낮은 수준으로 설정됨.

- 선량제약은 모범적 관행의 적용으로 달성할 수 있는 것이 무엇인가를 나타내는 지표로 간주되어야 함.
 - 선량제약은 선원중심의 양이므로, 그것이 관계되는 선원을 명시하여야 함. 선량제약은 한 행위의 구성요소에 대해 적용될 수도 있음.¹⁷⁾
 - 직무나 임무, 운영으로 인한 선량이 미미함이 기정사실인 경우, 선량제약을 설정할 필요없음.
- 새로운 선량제약 설정이 필요한 상황
- 운전조건의 변화, 신기술의 발전, 새로운 경제적·사회적 상황 또는 개인선량이 관련 운전지침을 초과하는 것이 발견될 경우 등



<그림 4-1> IAEA의 일반인에 대한 선량제약 절차 개략도

한편 운영상의 유의사항을 살펴보면 아래와 같다.

- 일단 최적화를 통해 단일 방호대안이 선택되어, 다른 방호대안의 선택을

17) 예를 들면 지정된 산업에서 지정된 업무나 어떤 운영 그룹에 대한 선량제약을 설정할 수 있음. 전자의 경우에는 선량제약이 단일선량으로 표현되며, 후자의 경우에는 주어진 기간에 걸친 선량으로 표현될 수 있음.

위한 최적화 과정이 요구되지 않으면, 선량제약은 더 이상 적용하지 않을 수 있음.

- 최적화된 방호대안의 예상성능의 만족도를 점검하기 위한 기준으로 규제자와 운영자에 의해 인가준위(authorized level) 및 운전준위(operation level)가 설정될 수 있음.

다. 외국의 선량제약 사례

(1) 북미

미국¹⁸⁾

- 방사성물질의 환경으로의 공기 중 방출에 대한 제약
 - 방사성물질(Rn-222 및 자핵종 제외)의 공기 중 방출에 의한 일반인의 최대 유효선량당량(total effective dose equivalent)이 연간 0.1 mSv (10 mrem)을 초과하지 못함

캐나다¹⁹⁾

- 정량적 ALARA 기준으로서 다음 선량 만족시 추가적인 ALARA 분석 불필요

(단위 : mSv/yr)

항목	선량
방사선작업종사자의 개인선량	1
일반인의 개인선량	0.05
연간 집단선량(작업종사자 및 일반대중)	1 person-Sv

(2) 유럽

영국²⁰⁾

18) [참고문헌] Standards for protection against radiation, 10CFR20.1101(d), NRC, 1991.
 19) [참고문헌] Guidelines on how to meet the requirement to keep all exposure as low as reasonably achievable, Regulatory Guide G-129(E), Page 4, AECB, 1997.
 20) [참고문헌] Safety Assessment Principles for Nuclear Plants, Page 5, HSE, 1992.

- 선량한도 개념의 BSL(Basic Safety Limit)과 ALARP²¹⁾ 원칙 준수를 위한 정량적 기준인 BSO(Basic Safety Objective)를 제시하고 다음과 같이 제시하고 있음

(단위 : mSv/yr)

항목		BSL	BSO
원자력시설 종사자의 선량제한	작업종사자의 연간선량	20	2
	작업종사자 이외 일반 근무자의 연간선량	5	0.5
	작업종사자의 연간평균선량	10	1
일반대중의 선량제한		1	0.02

□ 스웨덴²²⁾

- ICRP-60 권고안에 기초한 선량한도를 제시하고 있음. 선량제약의 경우, 정량적 수치를 제시하지는 않고 있으나, 규제지침에 행위 계획시 “선량제약” 설정을 명문화하고 있음.

(단위 : mSv/yr)

	Period of time Quantity	Dose
Works in general	Annual	
	Effective dose	50
	Dose equivalent to the lens of the eye	150
	Dose equivalent to the skin	500
	Dose equivalent to hands, forearms feet and ankles	500
	In addition, for 5 consecutive years Effective dose	100
선량제약 관련조항	§ 6. In the process of planning a practice or in a single case, the Radiation Protection Institute has the right to establish a dose constraint , by which is meant an exposure restriction to individuals from a given source	

21) 영국에서는 전통적으로 ALARA 대신 ALARP(As Low As Reasonably Practicable)로 표기하고 있음

22) [참고문헌] The Regulations of the Swedish Radiation Protection Institute concerning dose limits at work with ionizing radiation, SSI FS 1998:4, 1998.

□ 스위스²³⁾

- ICRP-60 권고안에 기초한 선량한도를 제시하고 있으며, 행위에 대한 최적화 원칙이 관련 법규에 포함되어 있지 않음.
 - Radiation Protection Ordinance(SR 814.501, 22.06.94) Art. 6에 최적화를 고려여부에 대한 판단기준을 제공하고 있음. 또한 동 원칙은 작업자 피폭의 경우, 0.1 mSv 초과, 일반인의 경우 0.01 mSv를 초과하는 행위에만 적용됨.
 - Radiation Protection Ordinance(SR 814.501, 22.06.94) Art. 7에 일반인에 대한 선량제한 조항이 정의되어 있음.

(3) 아시아 및 오세아니아

□ 일본²⁴⁾

- 작업자 및 일반인에 대한 선량한도는 ICRP-60 권고한도를 채택하고 있으며, 경수로의 경우 선량목표치를 설정·운영하고 있음.

(단위 : mSv/yr)

항목	선량
방사선작업종사자 개인선량	
- 5년 평균	20
- 연간 한도	50
일반인의 개인선량	1
선량목표치	0.05

□ 호주²⁵⁾

- 일반인에 대한 선량한도 이외에 선원 및 행위에 대한 선량제한과 추가적 ALAR 분석이 필요치 않은 ALARA 목표치 제시.

23) [참고문헌] Report of the International Regulatory Review Team (IRRT) to Switzerland, 25 February 1999.

24) 참고문헌 : 原子力手帖, 8장 原子力発電所と環境, 일본 원자력문화진흥재단

25) [참고문헌] Dose Limits, Constraints and the ALARA Principle, Nuclear Safety Bureau

(단위 : mSv/yr)

항목	선량
일반인의 개인선량 한도	1
각 선원 및 행위에 대한 선량제약	0.1
ALARA 목표치	0.02

제 4 절 결 론

국내외 원전의 작업자선량 자료를 분석하고, 선량저감 기술 및 체계를 검토한 결과를 정리하기로 한다. 정리한 결과는 작업자선량의 ALARA를 위한 제도적 장치 마련에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

□ 작업자 인적실수 저감 위한 제도적 방안 수립

- 충분한 모의훈련 실시 : 방사선작업 수행 전에 치밀한 작업계획을 수립하고, 이에 따른 충분한 모의훈련을 실시하여, 실제 작업수행 중에 작업자의 인적실수를 줄일 수 있도록 하는 것이 필요하다. 그러나 시간에 쫓길 경우 충분한 사전훈련 없이 수행할 경우가 발생할 가능성이 있는데, 고방사선구역으로 출입이 필요하거나 작업절차가 복잡한 방사선작업에 대해서는 일정 시간의 모의훈련을 실시하여야만 실제 작업을 수행할 수 있도록 제도적 장치를 마련하는 것이 필요한 것으로 판단된다.
- 작업자 의식개혁을 위한 안전문화 확산 : 작업자의 인적실수는 외부 환경 요인에 의해 감소시킬 수 있으나, 보다 근원적인 방안은 작업자 스스로 방사선안전의 중요성을 인식하고 실천해 나가는 것이다. 따라서 작업자가 방사선 안전을 몸에 체득할 수 있도록 작업자의 의식개혁을 위한 안전문화 확산에 힘쓸 필요가 있다.
- 현실적인 자발적 방사선량 저감 유인책 수립 등 : 작업자에게 방사선 안전관리를 스스로 이행할 경우 작업자의 건강은 물론 물질적으로도 이득이 될 수 있는 제도적 방안을 마련할 경우, 작업자 스스로의 방사선안전관리 체계가 강화될 수 있을 것으로 판단된다.

□ ALARA 수행체계 보완

- ALARA 전담조직 보완 : 캐나다 온타리오 하이드로 사의 ALARA 전담조직에서 보듯이 작업자의 피폭선량을 보다 체계적이고 엄격하게 관리할 수 있도록 ALARA 전담조직을 보완할 필요가 있다.
- 방사선작업 수행부서의 자율적 선량저감 노력을 촉진하기 위한 제도적 보완
- 방사선작업의 ALARA 검토대상 선정기준 보완: 집단선량 개념에서 단위작업별, 개인선량별로 세분화하여 ALARA 검토대상을 선정하고, 이를 토대로 방사선작업 수행계획 수립 및 이행을 해나가야 할 것으로

판단된다.

□ Sister unit group 결성

- 유사 노형 발전소의 작업자선량 저감 경험 및 정보의 비교분석 및 공유를 위한, Sister unit group 결성 및 운영하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

□ 방사선작업의 체계적 분석

- 작업자 집단선량 구성인자(선량율, 작업시간, 작업인원 등)에 따라 방사선작업을 분석하여 해당 방사선작업의 선량저감 기본방향 및 방안을 도출하고, 이 분석결과를 토대로 방사선작업의 유형((예) M/H가 큰 작업 對 작은 작업)을 구분하여 방사선작업 관리계획을 수립하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 관련 분야에의 기여도

본 연구에서는 국내·외 원전의 선량저감 기술·경험의 분석 및 규제 활용방안을 도출하였다. 연구계획 대비 실적을 정리하면 아래와 같다.

- 국내외 원전 작업자선량 추이 파악
 - 국내외 작업자 집단선량 분석
 - 국내 원전(고리 3,4) 작업자 선량 DB 구축
 - 주요 인자에 따른 방사선작업별 작업자선량 추이 분석
 - 선량율, 작업빈도, 인원
 - 고평폭 방사선작업 선별
- 국내외 원전 피폭 저감기술 적용 실태 파악
 - 고평폭 방사선작업의 작업절차 분석
 - 고평폭 방사선작업의 선량저감 기술현황 조사
 - 국내외 원전의 ALARA 수행체계 비교·분석
- 피폭저감 기술의 피폭선량 저감효과 조사
 - 주요 피폭 저감기술의 비용-선량저감 효과 조사
- 도출 결과의 규제활용 방안
 - ALARA 요건 검토
 - 선량제약(Dose Constraint) 검토
 - 규제활용을 위한 제안

앞서 기술한 바와 같이 당초 계획하였던 연구목표는 모두 달성한 것으로 판단된다. 본 과제의 성공적인 완수로 예상되는 기대성과를 기술하면 다음과 같다.

1) 기술적 측면

- 원전 방사선 피폭저감에 관한 종합적인 정보활용 체계 수립
- 원전 방사선량 저감화 관련 규제요건 수립 기초자료 수집

2) 경제·산업적 측면

- 방사선 피폭저감기술에 대한 규제기술개발로 방사선 작업종사자에 대한 방사선안전성 확보
- 방사선관리의 투명성 확보로 대국민 신뢰도/원전 입지 향상에 기여

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

최근 국내에서는 방사선방호 신개념(ICRP-60)이 법제화되고, 방사선관리에 대한 규제가 더욱 강화되는 추세임. 원전 작업자의 피폭선량한도는 연간 50 mSv (5 rem)에서 5년간 100 mSv (10 rem)(연평균 20 mSv)로 낮아지고, 또한 방사선 피폭선량의 법적 한도 준수이외에 방사선 피폭선량을 합리적으로 낮게 유지하도록 하는 이른바, ALARA(As Low As Reasonably Achievable) 개념도 법제화되어 원전의 방사선관리에 있어 일대 전환기적 시점을 맞이하고 있다.

이에 비해 국내원전은 가동년수가 늘어남에 따라, 원전 설비 노후화, 일차계통내 방사선량을 증가, 설비의 노후에 따른 보수빈도의 증가, 이로 인한 원전 작업자의 방사선 피폭선량 증가와 같은 일련의 인과적 사건이 발생할 것으로 예상됨. 최근 국제기구(IAEA, OECD/NEA, WANO 등)에서 발간한 각종 자료를 보면, 국내 원전의 방사선 피폭실적은 전체적으로는 양호한 수준이나 최근 운전 개시한 영광 3, 4호기/울진 3, 4호기 등을 제외하면 세계수준에 못 미치고 있는 점을 고려할 때 체계적인 방사선 피폭실적의 평가 및 효율적 피폭저감 기술의 적용이 필요하다.

방사선피폭저감이 과거보다 현재가 훨씬 어려운 점 - 즉, 과거에 비해 단위 피폭저감 한계비용의 대폭 증가 - 을 고려할 때, 보다 경제적으로 방사선 피폭을 저감하기 위해서는 방사선 피폭저감 기술개발 현황 및 피폭저감 경험에 대한 포괄적 조사·분석과 경제성을 평가하여, 최적 또는 최선의 피폭저감기술을 원전에 적용하여야 한다. 이러한 노력은 사업자 측뿐만 아니라, 인허가 기관에서도 병행하여, 축적된 지식과 경험을 사업자와 공유할 때 국내 원전의 방사선 안전성이 획기적으로 증대될 수 있을 것이다.

원전 방사선피폭 저감기술은 ICRP-60과 ALARA의 법제화에 의해 선량한도가 기존의 40% 수준으로 감소되고, 방사선 피폭선량을 합리적으로 낮게 유지하도록 규정함에 따라 향후 원전에서는 필요성이 증대될 것으로 예상된다. 특히 법적 선량한도 이내의 피폭일지라도 ALARA 요건을 만족시키기 위해서 방사선 피폭저감 기술개발은 필요할 것으로 예상된다. 특히 현재 한수원(주)에서 원전 방사선량 저감화 종합계획(1단계)이 1991~2000년에 시행된 바 있고, 원전 방사선량 저감화 종합계획(2단계)이 2001~2010년에 시행 중에 있어 방사선 피폭저감 기술개발은 필요성이 더욱 가속될 것으로 예상된다.

또한 IAEA에서도 국내 원전의 방사선피폭을 실질적으로 저감할 수 있는 방안을 찾도록 요구하고 있는 실정으로 관련 기술개발이 더욱 필요한 실정이다. 따라서 본 과제의 연구결과는 ALARA 관련 규제요건 개발의 기초자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

제 6 장 참고문헌

- [1] Y. H. Cho, et al., "INSTORE: A PC-Based Database Program for Occupational Radiation Exposure of a Nuclear Power Plant," Journal of the Korean Nuclear Society," 1998.
- [2] Han-Il Atomic Energy Corporation, "Report of Radiation Safety Management-Kori Unit 3 and 4 Maintenance Report," 1986-1995.
- [3] Y. H. Cho, et al., "Use of Rank Sum Method in Identifying High Occupational Dose Jobs for ALARA Implementation," Journal of the Korean Nuclear Society," 1998.
- [4] B. J. Dionne and J. W. Baum, "Occupational Dose Reduction and ALARA at Nuclear Power Plants: Study on High-Dose Jobs, Radwaste Handling, and ALARA Incentives," NUREG/CR-4254, May 1985.
- [5] I. R. Brookes and K. E. Schnuer, "Occupational Radiation Exposure in European Light Water Power Reactors 1981-1991," EUR 14685 EN, May 1994.
- [6] Nuclear Energy Agency, "ISOE, Information System on Occupational Exposure, 10 Years of Experience," 2002.

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
	KINS/HR-490				
제목/부제	방사선방호 규제기술 개발/원자력발전소 피폭저감화 기술·경험분석 및 규제활용방안 연구				
연구책임자 및 부서명	서울대학교 원자핵공학과 문주현				
연구자 및 부서명	박문수, 이운장, 송재혁, 김병수, 김종욱				
출판지	서울	발행기관	한국원자력안전기술원	발행일	2003. 1.
페이지	104쪽	도표	유(○), 무()	크기	26×19cm
참고사항					
비밀여부	공개(○), 대외비(), _급비밀		보고서종류	최종보고서	
연구위탁기관	기초전력공학공동연구소		계약번호		
<p><초 록> 방사선 피폭의 효과적 저감을 위해서는 관련기술 개발 현황 및 피폭저감 경험에 대한 포괄적 조사·분석이 선행되어야 한다. 이러한 노력은 사업자뿐만 아니라, 인허가 측면에서도 병행할 때, 국내 원전의 방사선안전성이 획기적으로 증대될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 인허가 측면에서 국내외 원전의 선량저감기술·경험을 분석하여 규제측면에서의 활용방안을 도출하는데 목적을 두었다. 본 연구를 통해 작업자선량의 효과적 저감을 위해 규제측면에서 고려해야 할 사항을 도출된 사항을 정리하면 다음과 같다; ○작업자 인적실수 저감 위한 제도적 방안 수립, ○ALARA 수행체계 보완, ○Sister unit group 결성, ○방사선작업의 체계적 분석. 본 연구에서는 규제측면에서 작업자선량의 효과적 저감을 위한 방안을 도출하였다. 따라서 본 연구결과는 ALARA 관련 규제요건 개발의 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.</p>					
주제명 키워드	ALARA, 작업자 선량, 선량저감, 안전규제기술요건				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
		KINS/HR-490			
Title/ Subtitle	Development of Regulatory Technology for Radiation Protection / Analysis of technologies & experiences for reducing occupational radiation dose and study for applying to regulations				
Project Manager and Department		Joo-Hyun, Moon Dept. of Nuclear Eng., Seoul National University			
Researcher and Department		Moon-Soo Park Un-Jang, Lee Jae-Hyuk, Song Byeong-Soo, Kim Chong-Uk, Kim			
Publication Place	Seoul	Publisher	KINS	Publication Date	2003. 1.
Page	104p.	Ill. & Tab.	Yes(○), No()	Size	26×19cm
Note					
Classified	Open(○),Restricted(),_Class		Report Type	Final Report	
Performing Organization	EESRC		Contract No.		
<p><Abstract> To reduce occupational radiation dose (ORD) effectively and enhance the radiological safety, the comprehensive assessment of the experiences to reduce ORD should be made by regulatory body as well as utilities. Hence, the objective of this study is to assess the experiences for reducing ORD from the regulatory viewpoint. With the research objective, the followings are performed in this research; ○ Analysis of occupational dose trends at domestic and foreign NPPs, ○ Identification of the effective technologies for reducing ORD, ○ Examination of the effects of the technologies for reducing ORD, ○ Derivation of the regulatory means for implementing the research results. From this study, the regulatory means for effective reduction of ORD are derived. Hence, the results can be utilized as a basic materials for ALARA requirements.</p>					
Subject Keywords	ALARA, Occupational Radiation Dose, Reduction of Radiation Dose, Regulatory Technical Requirements				

