

차세대원전 방사선비상계획 단순화 관련 주민보호조치지침 선량평가

The Protective Action Guideline's Dose Evaluation for KNGR EPZ Simplification

오해철, 이재성

한전전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

차세대원자로(KNGR)의 경우 1단계 개념 설계단계에서부터 기본요건 (Top-Tier)요건에 향후 방사선비상계획 범위축소가 가능토록 설계할 것을 설정하고 있으며, 이에 대한 기술적 근거로는 새로운 방사선원항 적용과 노심손상빈도의 감소 등과 같은 안전성 향상 그리고 중대사고 발생시 격납건물 대처 성능강화 등 EPRI URD에서 제시된 세 가지 요건을 따르고 있다. 본 논문에서는 현재의 차세대원자로 설계를 기준으로 위 세 가지 기술요건 중 방사선 비상계획 축소를 위한 주민보호조치지침 선량기준을 만족하는 거리를 확률론적으로 평가하였다.

Abstract

One of the top-tier requirements for the development of Korean Next Generation Reactor (KNGR) was set to make it possible to simplify emergency planning. Technical basis for this requirement is based on the use of new source term, the safety increase such as the reduced core damage frequency, and the enhanced containment performance. The probabilistic method was used to evaluate the distance meeting Protective Action Guideline's dose criteria for emergency planning simplification based on the current KNGR design.

I. 서 론

원자력발전소는 설계, 건설, 운영이 모두 엄격한 법규와 기술 기준을 따르고 있으며, 방사능 유출에 대한 다중방호벽설치, 안전계통의 다중화와 독립성, 공학적 안전설비 설치, 안전규제 운영등으로 원전사고는 사전에 예방되고 있다. 또한 1979년 3월 미국 TMI (Three Mile Island) 원전에서 발생한 사고이후 세계 각국에서는 자국의 원전 방사선 비상계획을 재검토하여 발전소 주변주민과 환경보전을 위한 대책을 강구하고 있다. 그 일환으로 설정되어 시행중인 방사선비상계획 구역(EPZ) 거리는 현재 국내 및 미국의 경우, NUREG-0396(NRC-EPA, 1978)에서 제일 심각한 중대사고를 고려하여 개발된 방사성운에 의한 피폭방지를 목적으로 10 mile(국내는 8~10km)을 설정하여 원전노형에 관계없이 일률적으로 시행되고 있다. 기존의 방사선비상계획거리는 보수적인 WASH-1400의 방사선원항을 적용한 소외결말분석을 근거로 10 mile(국내는 8~10km) 기준치로 설정하여 시행되고 있다. TMI 사고후 지난 20년에 걸쳐 계속 수행되어온 중대사고 현상분석 및

현실적 방사선원향 연구결과로 미국 NRC는 신형원전에 대해서는 새로운 방사선원향인 NUREG-1465[1] 사용을 제시하였고, 현재 미국 신형원전은 설계기준사고 소외 선량 평가시 이를 적용하고 있다. Sys.80와 AP-600 같은 미국 신형원전들은 새로운 방사선원향 적용과 기존원전에 비해 노심손상빈도의 큰 폭의 감소 및 중대사고 발생시 격납건물 대처 성능강화 등을 근거로 기존의 10 mile EPZ를 부지경계거리인 0.5 mile의 대응구역(Response Area)으로 축소하기 위한 법제화 노력을 추진 중이고 이에 대한 기술적 기준(Technical Criteria)으로 EPRI URD(Utility Requirement Documents)[2]에서 제시된 다음의 세 가지 기준을 들고 있다. 첫째는 중대사고시 격납건물 건전성 보장이고, 둘째는 노심손상빈도 및 소외결말의 안전성 목표 만족, 마지막으로 미국 EPA에서 제시한 주민보호조치지침(Protective Action Guidelines : PAG) 선량 만족 등을 기술요건으로 설정하였다. 미국의 신형원전과 같은 개념으로 설계 중인 차세대원자로(KNGR)의 경우 1단계 개념설계단계에서 설정된 기본요건 (Top-Tier)요건에 향후 방사선비상계획 범위축소가 가능토록 설계할 것을 설정하고 있으며, 이에 대한 기술적 기준도 EPRI URD에서 제시된 세 가지 요건을 따르고 있다[3]. 본 논문에서는 현재의 차세대원자로 설계를 기준으로 위 세 가지 기술요건 중 주민보호조치지침 선량기준을 만족하는 거리를 확률론적으로 평가하였다.

II. 차세대원전 PAG 선량 계산

차세대원자로의 주민보호조치지침 선량 계산은 미국 신형원전의 EPZ 축소를 위한 기술기준을 담고 있는 EPRI TR-113059 『Technical Aspects of ALWR Emergency Planning』에서 제시한 PAG 선량 계산 방법론과 선량 제한치를 근거로 했으며, 중대사고시 선원향으로 NUREG-1465의 5단계 방출을 고려하여 평가하였다.

1. 주민보호조치지침 선량 제한치

EPRI URD PAG 요건은 손상된 노심으로부터 방출된 핵분열생성물로 인해서 부지경계거리에서의 24시간 동안의 주민보호조치지침(PAG) 선량을 초과해선 안된다고 명시하고 있다. EPA 지침서에서 권고된 PAG 범위는 1 ~ 5 rem으로 하한값인 1 rem은 Median 선량값 (즉, 50th percentile 기상자료 적용시 값)으로 대표되고, 상한값인 5 rem은 극한기상조건 (즉, 90th percentile)시의 선량 제한치다. 본 평가에서는 두 개의 선량제한치가 모두 만족되는 원자로 노심으로부터의 반경거리를 계산하였다.

2. 평가 방법론

PAG 선량을 계산하기 위한 적용한 평가방법은 그림 1에 나타나있다. 가상의 중대사고 LOCA가 발생한 후 격납건물에서 환경으로 24시간 동안 방출된 총 방사능을 계산하기 위해서 물리적 근거의 방사선원향을 모델할 수 있는 STARDOSE 코드가 사용되었다. 설계기준사고를 넘어서는 중대사고시 노심으로 부터의 방사선원향을 모사하기 위하여 NUREG-1465에 기술된 gap release, early in-vessel, ex-vessel, late in-vessel releases 단계까지 5단계의 방출을 고려하여 계산하였다. 차세대원전의 설계누설율, 초기 노심재고량, 격납건물 살수제거율 등과 NUREG-1465의 시간별 방출분율이 STARDOSE코드 입력자료로 들어가고 코드 출력 결과로는 중대사고 LOCA 발생 후 환경으로 방출된 총 방사능량이 계산된다. 계산된 총 방사능량과 EPRI URD에서 제시한 포괄부지 기상자료를 적용하여 확률론적 소외결말 분석 전산프로그램인 MACCS 코드[4]로 기상변화에 따른 거리별 선량을 계산하였다. 평가시 사용한 가정 및 제한사항은 다음 절에 기술하였다.

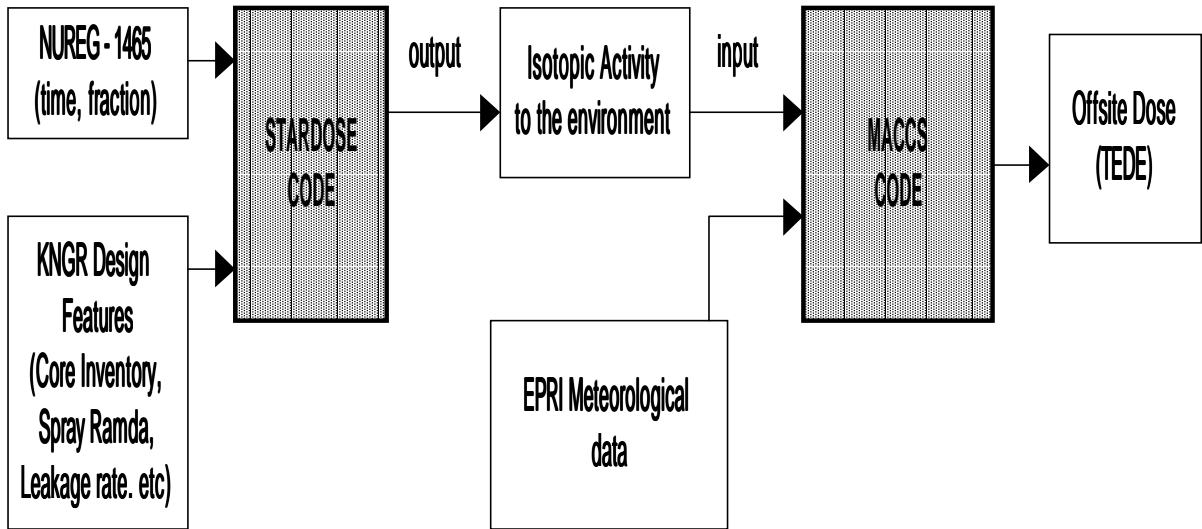


그림 1. 차세대원전 PAG 계산 흐름도

3. 가정 사항 및 제한사항

차세대원전 PAG 계산과 관련한 가정 및 제한사항은 이와 관련된 국내근거자료가 없는 관계로 주로 EPRI URD 방법론에 따랐고, 계산에 필요한 기본자료는 차세대원전 기술개발 3단계 예비설계에 근거했다.

1) 선량 제한치인 1rem과 5rem은 기존의 전신선량 (Whole-body dose)대신 방사성운 및 지표면으로 부터의 외부 피폭에 의한 심층선량당량 (Deep Dose Equivalent)와 방사성운 흡입에 의한 50년 예탁선량당량 (Committed Effective Dose Equivalent)의 합인 총유효선량당량 (Total Effective Dose Equivalent : TEDE)으로 계산되어 비교되었다.

2) KNGR 방사선 비상계획을 위한 1 rem PAG 선량과 비교 하기위한 통계적 측정인자는 Median 선량으로 비교하였고, 5 rem PAG 선량은 90th percentile 선량으로 비교하였다.

3) 평가에 사용한 기상자료는 국내원전부지 측정자료 대신 EPRI URD 1장의 부록 A에서 제시한 포괄부지 기상자료 (미국 Beaver Valley 원전 '76~ '77년 측정자료)로 이는 미국 전체 원전의 80 ~ 90%를 포괄하는 기상자료다.

4) 방사선원항 중 유기 요오드에 의한 피폭은 거의 무시할 만한 수준으로 본 평가에서 고려되지 않았다.

5) 선량계산에 사용된 방사성 핵종은 MACCS 코드에서 고려하고 있는 60개의 핵종 모두를 고려하였다.

6)선량환산인자

EPRI URD에 제시된 것 처럼 방사성운과 지표면에 의한 외부피폭 선량환산인자는 참고문헌 [5]와 내부피폭 선량환산인자는 참고문헌[6]의 선량환산 인자를 적용하였다.

7) 방사성운 확산 모델

방사선 비상계획의 선량 제한치를 만족하는 거리를 계산하기 위해 사용된 대기확산 모델은 단순 가우시안 방사성운 확산 모델(Straight Gaussian Plume model)이고 방사성운 중앙선의 선량이 계산되었다. 부지경계거리에서의 선량이 PAG를 초과하지 않는다는 것을 보이기 위해 결과로 도출된 값은 최대 중앙선 값 (Peak Centerline Value)이다. 수평 및 수직확산 매개변수 (σ_y and σ_z) 는 Pasquill-Gifford 곡선에 근거해서 계산되었다. 수직방향으로의 확산 매

개변수 σ_z 는 상관식 $\sigma_z = aX^b$ 에 의해서 계산되고, 이때 X 는 방사성운이 확산된 거리 이고, 상관계수 a, b는 MACCS 코드에서 주어진 고정값이다. 이 계수값은 다음과 같이 주어진다.

대기안정도	a	b
A	2.47E-4	2.118
B	0.078	1.085
C	0.144	0.911
D	0.368	0.6764
E	0.2517	0.6720
F	0.184	0.6546

8) 방사성운 방출 높이와 에너지

물리적 근거의 방사선원항 (NUREG-1465)이 적용된 방사성운의 방출 높이와 에너지는 보수적으로 Cold 방출(방출에너지는 0)과 지표면방출로 가정되었다.

9) 고려된 지표면으로 부터의 피폭 기간

노심으로부터 핵연료의 방출 시작후 24시간 동안의 지표면 피폭이 고려되었다.

10) 방사성운 방출 개수 (Plume Segments) 및 방출기간(Release Duration)

방사성운이 단일일 경우 10시간 방출의 방출기간이 적용되고, 복수의 방사성운 방출을 고려할 경우는 24시간이 사용된다. 본 평가에서는 단일 방출을 가정하여 10시간 방출기간이 적용되었다.

11) 본 평가에서는 중대사고시 격납건물의 건전성이 보장된다는 가정을 하였고, 계산된 시간 동안의 격납건물 누설율은 차세대원전 3단계 설계에 근거하여 0.15 vol%/day의 방출율을 적용하였다.

12) 핵분열 생성물의 노심 재고량은 3983 MWt x 102 %의 노심출력을 적용하여 ORIGEN 코드로 계산된 값을 적용하였다.

13) 살수구역에서 제거되는 핵분열 생성물 제거율(λ)을 계산하기 위해 STARNAUA 코드가 사용되었고, 계산된 값은 다음과 같다.

기간 (min)	Value (1/hr)
0 - 120.5	20
0.5 - 230.5	2
0.5 - 830.5	0.4
830.5 - 1440	0.4

14) 차폐계수(Shielding Factor)

방사성운 피폭에 대한 차폐계수(Shielding factor)는 0.75, 지표면 오염에 의한 피폭에 대한 차폐계수는 0.33이 적용되었다.

15) 호흡율은 일반인 성인호흡율을 가정하여 $3.3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}$ 가 적용되었다.

16) 요오드 핵종에 대한 건침적 속도는 1.0 cm/sec로 기타 다른 입자핵종에 대해서는 0.1 cm/sec의 침적율이 가정되었다.

17) 노심에서 격납건물로의 방출기간은 아래와 같이 NUREG-1465에 제시된 기간이 적용되었다.

노심방출기간 :

Gap Activity.....	1/2 min	-	30.5 min
Early In-Vessel	30.5 min	-	110.5 min
Ex-Vessel	110.5 min	-	230.5 min
Late In-Vessel	230.5 min	-	830.5 min

18) 노심으로부터 방출되는 요오드의 화학적 형태는 NUREG-1465 가정을 따라 다음과 같이 적

용된다.

- 유기화합물 (Organic) 0.15 %
- 원소형 (Elemental) 4.85 %
- 입자형(Particulate) 95 %

19) PAG 선량계산을 위해 고려된 방출경로는 공학적안전설비실 (ESF room)을 통한 방출과 격납건물 누설에 따른 방출경로만 고려하였다. 격납건물 소용량배기 (Containment Purge)로 인한 소외선량 기여도는 무시할 만하므로 본 평가에서도 무시하였다.

20) 살수제거효과와 함께 공학적안전설비 작동에 의한 핵분열 생성물 제거를 허용하는 NUREG-1465 가정에 따라 차세대원자로의 경우 원자로용기 파손시 원자로공동침수계통 작동에 의한 Pool Scrubbing 효과를 고려하여 Ex-Vessel 단계에서의 불활성기체를 제외한 전 핵종에 제염계수 (Decontamination Factor) 10이 적용되었다.

21) 격납건물로 방출된 핵종들은 살수구역과 비살수구역으로 균일하게 방출된다고 가정되고, 격납 건물의 25%가 비살수구역으로 고려되었다.

22) 격납건물로 방출되는 핵종은 거동특성 및 화학적 형태에 따라 NUREG-1465에서는 다음과 같이 9개 방출군으로 분류되고, 선량평가를 위해서 STARDOSE와 MACCS 코드에서 다음과 같이 확장되어 재분류되었다.

핵종군	NUREG-1465 군분류	STARDOSE와 MACCS 코드에서의 재분류
Group 1	Xe, Kr	Xe, Kr
Group 2	I, Br	I, Br
Group 3	Cs, Rb	Cs, Rb
Group 4	Te, Sb, Se	Te, Sb,
Group 5	Sr	Sr
Group 6	Ru, Rh, Pd, Mo, Tc	Co, Ru, Rh, Mo, Tc
Group 7	La, Zr, Nd, Eu, Nb, Pm, Pr, Sm, Y	Am, Cm. La, Zr, Nd, Nb, Pr, Y
Group 8	Ce, Pu, Np	Ce, Pu, Np
Group 9	Ba	Ba

23) 불활성기체와 유기요오드, 원소형 요오드의 침적은 없는 것으로 가정된다.

24) 차세대원전의 PAG 계산에 고려된 NUREG-1465의 핵종별 노심방출분율은 표 1과 같다.

표 1. PAG 계산을 위한 핵종별 방출분율

		Gap Release	Early In-vessel	Ex-vessel 주1)	Late In-vessel
노심방출시간 (hr)		0.5	1.3	2.0	10.0
Chemical Group	Noble Gases	0.05	0.95	0	0
	Halogens	0.05	0.35	0.25	0.1
	Alkali Metals	0.05	0.25	0.35	0.1
	Tellurium group	0	0.05	0.25	0.005
	Barium, Strontium	0	0.02	0.1	0
	Noble Metals	0	0.0025	0.0025	0
	Cerium group	0	0.0005	0.005	0
	Lanthanides	0	0.0002	0.005	0

주 1) Ex-vessel 방출단계에서 methyl iodine과 Noble Gase를 제외한 핵종들에 대해서 제염계수 10이 적용됨.

4. 차세대원전 PAG 선량 계산 결과

계산결과는 부지경계거리 별로 방사성운과 지표면에 의한 외부피폭과 방사성운의 흡입에 의한 예탁유효선량의 합인 총 유효선량당량 (TEDE)로 표시되었고, PAG 선량 제한치와 비교되었다. MACCS 코드의 선량 계산결과는 상변화에 따른 확률적 분포를 갖기 때문에 LHS 방법론을 적용하여 50번의 Random 추출을 하였고, 그에 대한 외부피폭선량과 예탁유효선량의 50 percentile 및 90 percentile 분포를 구한 후 각각에 대한 총 유효선량당량을 구하였다. 거리별 계산결과는 표 2~ 표 4에 그리고 그림 2에 각각 나타내었다. 아울러 미국 신형원전의 0.5 mile에서 계산된 PAG 선량과 비교한 결과를 표 5에 나타내었다.

표 2. 거리별 50th Percentile 총유효선량당량

노심으로부터의 반경 (m)	TEDE (rem)	선량 제한치
700	1.02	1 rem
800	0.85	
900	0.74	
1000	0.64	
1100	0.57	

표 3. 거리별 90th Percentile 총유효선량당량

노심으로부터의 반경 (m)	TEDE (rem)	선량 제한치
700	5.23	5 rem
800	4.02	
900	3.49	
1000	3.21	
1100	3.08	

표 4. 거리별 총유효선량당량 분포

거리		External Exposure (rem)		CEDE (rem)	TEDE (rem)	기준 선량 (rem)
		Ground	Cloud			
700 m	50 th percentile	0.15	0.11	0.76	1.02	1
	90 th percentile	0.74	0.48	3.93	5.23	5
800 m	50 th percentile	0.13	0.10	0.62	0.85	1
	90 th percentile	0.6	0.4	3.30	4.02	5
900 m	50 th percentile	0.11	0.09	0.54	0.74	1
	90 th percentile	0.53	0.39	2.76	3.49	5
1000 m	50 th percentile	0.08	0.09	0.47	0.64	1
	90 th percentile	0.45	0.34	2.46	3.21	5
1100 m	50 th percentile	0.07	0.08	0.41	0.57	1
	90 th percentile	0.36	0.34	2.2	3.08	5

표 5. 해외 신형원전과의 PAG 계산결과 비교 (@800 m EAB)

비교 신형원전	선량	TEDE (rem)	선량 제한치
KNGR	50th Percentile Dose	0.85	1 rem
	90th Percentile Dose	4.02	5 rem
AP-600 ⁽¹⁾	50th Percentile Dose	0.72	1 rem
	90th Percentile Dose	3.52	5 rem
Sys.80+ ^(1,2)	50th Percentile Dose	0.33	1 rem
	90th Percentile Dose	1.65	5 rem

주 1) AP-600, Sys.80+ 계산결과는 EPRI-TR 113509에서 인용함

주 2) Sys.80+ 계산결과는 TEDE 대신 Whole-Body Dose 만 고려

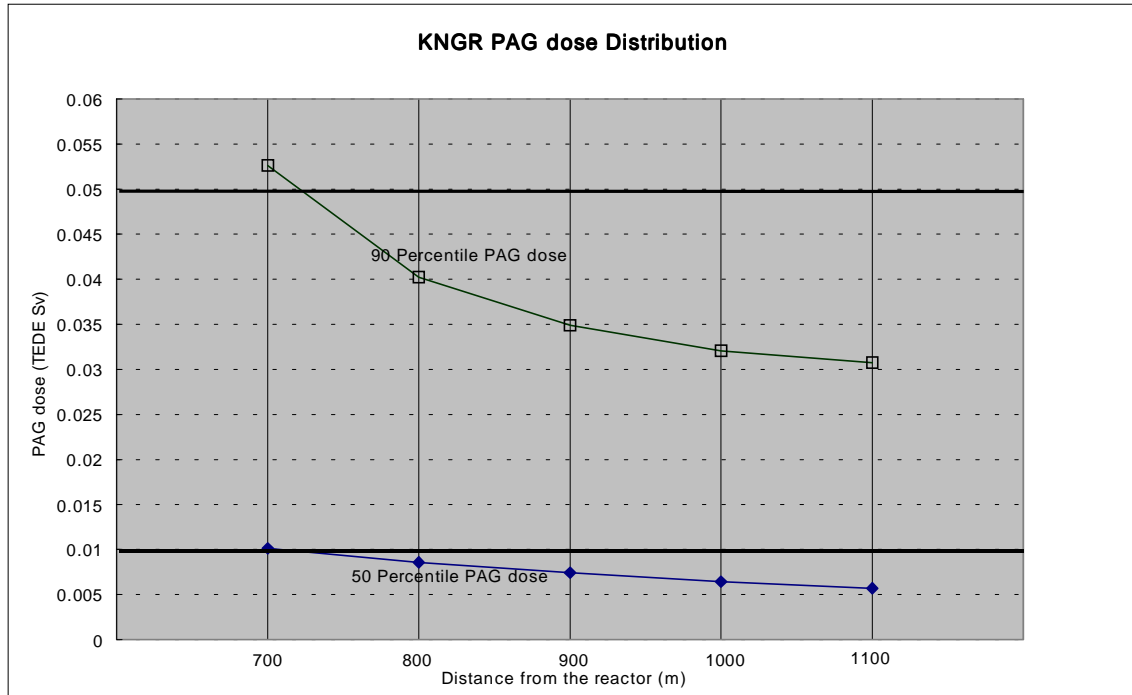


그림 2. 거리별 KNGR PAG 선량 분포

III. 결 론

본 논문에서는 미국 신형원전의 방사선 비상계획범위 단순화 연구현황을 파악하고, 미국 산업계에서 추진중인 ALWR 비상계획 단순화 요건으로 제시된 방사선비상계획 축소와 관련된 기술기준(Technical Criteria) 중 주민보호조치지침 선량(PAG dose)에 대한 평가를 수행하였다. 평가결과, 표 4와 그림 2에서 보이는 것과 같이 800 m EAB 거리에서 50th percentile과 90th percentile의 두 가지 선량 제한치를 만족하는 것으로 나타났다. 미국 신형원전의 결과와 비교에서 알 수 있듯이 차세대원전 3단계 설계결과는 미국 신형원전과 비슷한 결과를 보이고 있다. 위 결과는 보수적인 EPRI URD 기상자료를 근거로 평가한 것으로 국내원전 부지의 기상자료를 적용하면 더 줄어든 선량 값을 가질 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] US NRC, "Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Plants", NUREG-1465(Final), February, 1995
- [2] EPRI, "Technical Aspects of ALWR Emergency Planning", EPRI TR-113059, September, 1999
- [3] 차세대원자로 기술개발 (I) 1권 차세대원전 기본요건 (최종보고서), 1994
- [4] D. I. Chanin, et al, "MELCORE Accident Consequence Code System(User's Guide)", NUREG/CR-4691, SAND86-1562, Vol 1, February, 1990
- [5] Kocher, D.C., "Dose Rate Conversion Factors for External Exposure to Photons, and Electron Radiation from Radionuclides Occuring in Routine Release from Nuclear Fuel Cycle Facilities," Health Phys., Volume 38, pp. 543-621 (1980).
- [6] Federal Guidance Report No.11, "Limiting Values of Radionuclide Intake and Air Concentration and Dose Conversion Factors for Inhalation, Submersion and Ingestion," Office of Radiation Programs, USEPA (1988)