

A Mathematical Model to Evaluate the Radiological Risks for the Reuse of Decommissioning Site

원자력시설 해체부지의 재이용을 위한 방사선학적 리스크 평가모델

Jae Hak Cheong

Korea Institute of Nuclear Safety, 19 Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon

radwaste@kins.re.kr

정재학

한국원자력안전기술원, 대전광역시 유성구 구성동 19

(Received September 13, 2006 / Approved October 16, 2006)

Abstract

In order to evaluate the potential radiological risks for the reuse of the site after decommissioning of nuclear facilities, a mathematical model was developed and materialized into the Microsoft Excel[®] spreadsheets frame. A set of input parameter values was proposed, which is useful in the preliminary risk screening step before the detailed evaluation with the site-specific data. It appeared that the screening levels calculated by the present model was agreed with the derived concentration guideline limits resulted from RESRAD Ver.6.2 and the German dose criteria for releasing a nuclear site from regulatory control.

Key Words : Decommissioning, Site Reuse, Screening, Radiological risk

요 약

원자력시설 해체부지를 재이용하는 과정에서 유발될 수 있는 방사선학적 리스크를 사전에 선별하기 위한 목적으로 단순화된 방사선량 평가모델을 개발하고, 이를 Microsoft Excel[®] 스프레드시트와 내장된 Visual Basic 및 매크로 기능을 활용하여 기능별로 모듈화된 평가도구를 구현하였다. 이와 함께 부지 특성자료가 불충분할 경우 신속한 사전평가를 위해 적용할 수 있는 일련의 입력변수 값 목록을 제안하였다. 동일한 조건에서 이 연구에서 개발된 평가도구를 이용해 유도한 사전 선별준위가 RESRAD Ver.6.2를 이용해 계산된 유도농도지침한계 및 독일 방사선방호령에 규정된 핵종별 부지 재이용 기준농도를 합리적으로 근사할 수 있음을

확인하였다.

중심단어 : 해체, 부지 재이용, 사전선별, 방사선학적 리스크

I. 서론

원자력시설의 운영이 영구 종료된 후에는 방사성 물질에 의해 오염된 건물 또는 부지를 제염하고, 잔류방사능의 준위가 기준값 이하임이 확인되면 건물 또는 부지를 규제로부터 제외하여 일반 건물 또는 부지로 재이용하는 일반적인 절차를 따르게 된다[1]. 해체 후 건물 또는 부지의 재이용을 위해서는 합리적으로 설정된 피폭경로에서 잔류방사능에 의해 유발될 것으로 예상되는 방사선학적 영향에 대한 평가가 필요하며, 지금까지 잔류방사능 평가를 위한 많은 평가 모델과 도구들이 개발되었다[2,3].

현재 국내에서는 연구로 1,2호기와 우라늄변환시설 등 중소형 원자력시설에 대한 해체사업이 진행되고 있으며, 이들 시설에 대한 해체계획서 안전심사 과정에서는 건물이나 부지의 제염목표치 만족시 예상되는 방사선학적 영향평가에 대한 검증은 사례별 수계산(hand calculations)이나 외국에서 개발된 전산코드(예: RESRAD 등)를 이용해 수행한 바 있다 [4,5]. 그러나 사례별 수계산을 통한 검증은 모델링과 검증평가에 많은 시간과 인력의 투입이 필요하고 사례별 검증결과의 일관성을 확보하기 어렵고, 외국의 전산코드를 적용할 경우 국내 규제요건이나 시설의 고유특성을 반영하기 어렵다는 단점이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 국내 원자력시설의 해체계획서 안전심사에 효과적으로 적용할 수 있는 표준화된 검증용 평가도구의 개발이 필요하다.

한편 최근 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)나 미국 등에서는 원자력시설 해체안전성 평가에 차등접근법(Graded Approach, GA)의 적용 필요성이 강조되고 있다[6]. 안전성평가 분야에서 사전선별(screening)은 적용대상 사례에 대한 몇 가지 정보를 이용하여 예상되는 리스크를 신속하게 예비적으로 평가하고 그 결과에 따라 추가 상

세평가 필요성을 판단하기 위한 자료를 생산하는 과정으로, GA 개념에 따른 해체안전성 평가에도 활용될 수 있다. 지금까지 해체작업자와 해체시 환경으로 방출되는 방사성물질의 대기확산에 따른 방사선학적 영향의 사전선별 방법론은 일부 연구자에 의해 보고된 바 있으나, 아직까지 해체부지의 잔류방사능에 의한 영향평가에 대한 체계적인 사전선별 방법은 보고된 바 없다[7].

이에 따라 이 연구에서는 향후 규제수요가 예상되는 국내 원자력시설의 해체 후 부지의 잔류방사능에 의해 예상되는 방사선학적 영향 검증하는 과정에서, 리스크의 사전선별 목적으로 이용할 수 있는 표준 평가모델과 평가도구를 개발하였다.

II. 피폭경로별 모델링

가. 피폭경로의 표준화

해체부지의 잔류방사능은 다양한 경로를 통해 부지 또는 부지 주변에 체류하는 작업자나 일반인에게 방사선피폭을 유발할 수 있다. 그러나 해체작업자의 경우 방사선작업종사자로 지정되어 별도의 피폭관리 프로그램에 따라 관리되고 작업자의 피폭은 부지가 재이용되기 전까지만 예상되므로, 해체 후 부지의 재이용 적합성을 평가하기 위한 평가모델에서는 고려

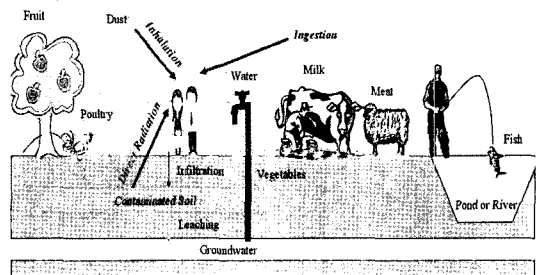


Fig. 1. Schematic view of the exposure pathways during reuse of contaminated site after release from regulatory control.

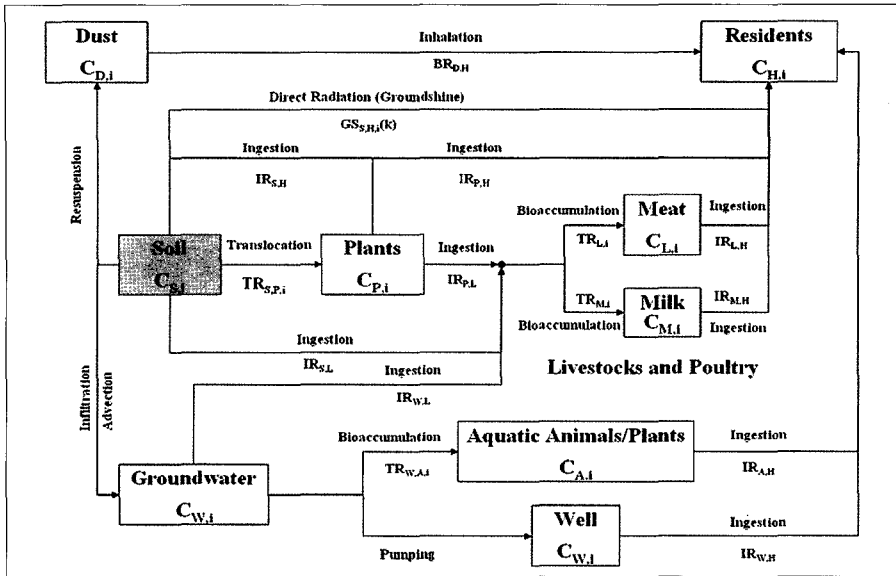


Fig. 2. Models to calculate radiation exposure to the residents above the contaminated site released from regulatory control.

할 필요가 없다. 따라서 이 연구에서는 해체후 부지 재이용 과정에서 부지 상부에 거주하는 일반인만을 평가대상으로 선정하였다. Fig. 1은 해체부지에서 예상되는 피폭상황의 개념도를 보여주고 있으며, Fig. 2는 이 연구에서 고려된 모든 피폭경로와 평가모델을 도식화한 것이다.

나. 외부피폭경로

해체 후 부지에서 예상되는 외부피폭경로에는 오염토양으로부터 직접방사선(groundshine)과 공기중 오염분진으로부터 직접방사선(cloudshine)을 예상할 수 있다. 그러나 불활성기체 이외의 방사성핵종은 cloudshine에 대한 선량환산인자가 미미하므로 일반적인 해체부지에서의 외부피폭은 오염토양으로부터의 groundshine이 지배적이다. 따라서 이 연구에서는 오염토양으로부터 직접방사선만을 외부피폭 경로로 고려하였다. 오염토양에 의한 외부피폭 방사선량은 수식 (1)을 이용해 산출할 수 있다[8]:

$$ED_{EX,i} = DCF_{GS,H_s(k)} \cdot \rho_s \cdot C_{S,i} \dots\dots\dots(1)$$

여기서, $ED_{EX,i}$ = 오염토양으로부터 외부피폭에 의한 유효선량(Sv/y), k = 오염토양의 기하학적 형태

및 피폭자 위치에 따른 구분자, i = 오염토양층에 존재하는 방사성핵종의 일련번호, $DCF_{GS,H_s,i}(k)$ = 오염토양으로부터 외부피폭에 따른 선량환산인자(Sv/y per Bq/m²), ρ_s = 오염토양의 밀도 (g/m³), $C_{S,i}$ = 오염토양에 존재하는 방사성핵종 i 의 농도 (Bq/g).

오염토양의 기하학적 형태와 피폭자의 위치는 Table 1과 같이 4가지 중에서 하나를 선택할 수 있도록 하였다.

다. 오염된 분진의 흡입

해체부지 상부에 체류하는 거주자는 잔류방사능에 의해 오염된 분진을 흡입할 수 있으며, 이를 통해 내부피폭이 유발될 수 있다. 방사성핵종의 흡입에

Table 1. Geometry and receptor conditions which can be selected in the mathematical model developed in this study(In each case, the length of contaminated area to lateral direction is infinite.).

Identification Number(k)	Depth of contaminated soil	Receptor Point	References
1	Infinite	Center, 1m above ground	[9]
2	1cm	Center, 1m above ground	[9]
3	5cm	Center, 1m above ground	[9]
4	15cm	Center, 1m above ground	[9]

의한 내부피폭 방사선량은 다음 수식 (2)를 이용해 계산할 수 있으며, 계산을 위해 필요한 입력변수 값은 부록1과 2에 도시하였다.

$$ED_{In,i} = DCF_{In,i} \cdot BR_{D,H} \cdot C_{D,i} = DCF_{In,i} \cdot BR_{D,H} \cdot (C_{D,at} \cdot \rho_s), \quad (2)$$

여기서, $ED_{In,i}$ = 오염부지 공기중 분진 흡입에 의한 유효선량(Sv/y), $DCF_{In,i}$ = 단위 방사능 흡입에 따른 선량환산인자(Sv/Bq), $BR_{D,H}$ = 호흡률 (m³/y), $C_{D,i}$ = 공기중 방사성핵종(i)의 농도(Bq/m³), $C_{D,at}$ = 공기중 분진의 농도(g/m³).

라. 섭취에 의한 내부피폭

해체부지에서 방사성핵종의 섭취에 의해 유발될 수 있는 내부피폭 방사선량은 수식 (3)을 이용해 계산할 수 있다:

$$ED_{IG,f,i} = DCF_{IG,i} \cdot IR_{f,H} \cdot C_{f,i}, \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서, $ED_{IG,f,i}$ = 음식물(f)의 섭취에 의한 유효선량(Sv/y), $DCF_{IG,i}$ = 단위 방사능 섭취에 따른 선량환산인자(Sv/Bq), $IR_{f,H}$ = 인간의 음식물(f) 섭취율(g/y), $C_{f,i}$ = 음식물(f) 내 방사성핵종(i)의 농도 (Bq/g).

① 부주의한 오염토양 섭취

오염토양의 부주의한 섭취(inadvertent ingestion)로 인한 내부피폭은 거주자가 오염부지 상부에 체류하는 기간 동안 오염된 피부에 묻어 있는 방사성핵종의 섭취를 통해 일어날 수 있다. 일반인이 부주의하게 섭취하는 토양의 양에 관한 국내문헌은 확인되지 않았으나, 이 연구에서는 영국 National Radiological Protection Board(NRPB)의 조사결과를 반영하여 부주의한 토양 섭취율($IR_{S,H}$) 표준값을 37.0g/y로 설정하였다[10].

② 농산물 섭취

잔류방사능은 오염토양에서 재배된 농산물로 전이(translocation)될 수 있으며, 인간이 오염된 농산물을 섭취할 경우 내부피폭이 유발될 수 있다. 농산물 섭취에 의한 내부피폭 방사선량은 수식 (4)를 이용해 계산할 수 있다:

$$ED_{IG,P,i} = DCF_{IG,i} \cdot IR_{P,H} \cdot C_{P,i} \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서, $ED_{IG,P,i}$ = 오염된 농산물(p) 섭취에 의한 유효선량(Sv/y), $DCF_{IG,i}$ = 단위 방사능 섭취에 따른 선량환산인자(Sv/Bq), $IR_{P,H}$ = 인간의 농산물(p) 섭취율(g/y), $C_{P,i}$ = 농산물(p) 내 방사성핵종(i)의 농도(Bq/g). 연간 농산물 섭취율은 농작물의 종류와 연령군에 따라 상이하며, 이 연구에서 적용한 섭취율 설정근거는 부록 1과 2에 기술하였다.

농산물 생체 내에 존재하는 방사성핵종의 농도는 다음 수식 (5)를 이용해 계산할 수 있다:

$$C_{P,i} = C_{S,i} \cdot TR_{S,P,i}, \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기서, $C_{P,i}$ = 농산물(p)에 존재하는 방사성핵종(i)의 농도(Bq/g-식물), $TR_{S,P,i}$ = 토양에서 농작물로 방사성핵종(i)의 전이계수 (Bq/g-생체 per Bq/g-토양). 토양에서 농작물로의 전이계수는 농작물의 종류에 따라 원소(element)별로 상이하며, 이 연구에서 적용한 전이계수 설정근거는 부록 2에 기술하였다.

③ 오염된 음용수 섭취

해체 후 부지내 오염토양에 함유된 잔류방사능은 강수(precipitation)에 의한 침출현상 (leaching)에 의해 불포화층, 포화층으로 침투(infiltration)됨에 따라 궁극적으로 부지 하부의 지하수를 오염시킬 수 있다. 오염된 지하수는 향후 오염부지 상부 또는 하류(downstream)에 건설될 가능성이 있는 관정(well)을 통해 음용수 또는 관개수(irrigation water) 등으로 이용될 수 있으며, 부지 환경조건에 따라 오염된 지하수가 하천 또는 바다와 같은 지표수로 전이될 경우에는 지표수 생태계의 먹이사슬을 통해 수산물(어류, 연체갑각류 및 조류)과 이를 섭취하는 인간의 피폭을 유발할 수 있다.

오염된 음용수의 섭취에 따른 내부피폭 방사선량은 다음 수식 (6)을 이용해 계산할 수 있다:

$$ED_{IG,W,i} = DCF_{IG,i} \cdot IR_{W,H} \cdot C_{W,i}, \quad \dots\dots\dots (6)$$

여기서, $ED_{IG,W,i}$ = 오염된 물 섭취에 의한 유효선

량(Sv/y), IR_{W,H} = 음용수 섭취율(m³/y), C_{w,i} = 음용수 내 방사성핵종(i)의 농도(Bq/m³). 이 연구에서 적용한 음용수 섭취량 설정근거는 부록 1에 기술하였다.

④ 지하수를 통한 오염물질 이동

이 연구에서는 음용수 내 방사성핵종의 농도가 해체부지 하부의 대수층에 존재하는 지하수의 방사능 농도와 동일하다고 가정하였다. 지하수의 방사능 농도를 계산하기 위해서는 오염토양으로부터 지하수로 유입되는 방사성핵종의 이동현상을 고려해야 하며, 지금까지 방사성물질의 지하수 유입 및 지하수를 통한 이동현상을 모사하기 위해 다양한 수치해석 모델이 개발되었다[11]. 그러나 이들 수치모델의 경우 방대한 양의 부지특성 자료가 요구되는 등 계산을 위해 많은 시간과 노력이 요구되므로 해체안전성 검증에 위한 사전선별 목적에 적합하지 않다. 따라서 이 연구에서는 해체부지에서 지하수로 방사성물질의 이동현상을 모사하기 위한 단순한 모델로서 3단계 박스 모델(3-Box model)을 채택하였다. 이와 유사한 박스 모델은 미국 원자력규제위원회가 중소형 원자력시설 해체안전성 검증에 사용하고 있는 DandD 전산코드 등에서 채택된 바 있다[3].

Fig. 3은 해체부지에서 지하수로 잔류방사능이 이동하는 현상을 모사하기 위해 이 연구에서 설정한 3단계 박스모델의 개념도를 보여주고 있다. 오염토양과 포화대의 가로/세로길이 기본값은 각각 100m, 오염토양과 포화대의 두께 기본값은 각각 2m로 가

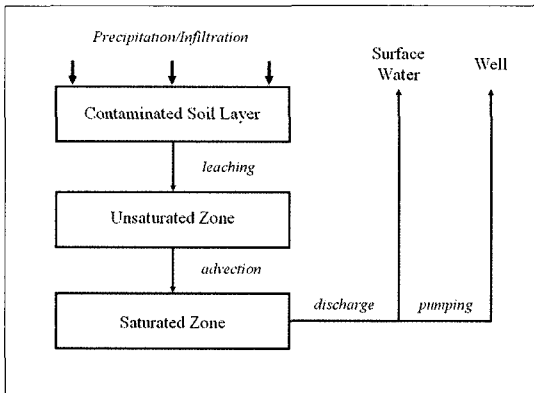


Fig. 3. Simplified 3-box model used to estimate the concentration of radioactivity in the surface water and the well.

정하였다. 한편 해체부지 지하의 포화대로 유입된 방사성핵종은 누적되지 않고 수리구배에 따라 즉시 하류로 배출되는 것으로 가정하였다[3].

3단계 박스모델에서, 특정 시점에 오염토양층, 불포화대 및 포화대 각 구획 내에 존재하는 방사성물질의 양과 지하수의 방사능 농도는 다음과 같은 연립 선형미분방정식으로 나타낼 수 있다:

$$\frac{dA_{Cont,i}(t)}{dt} = -(\lambda_{R,i} \cdot A_{Cont,i}(t)) - (\lambda_{C,U,i} \cdot A_{Cont,i}(t)), \dots (7a)$$

$$\frac{dA_{Usat,i}(t)}{dt} = -(\lambda_{R,i} \cdot A_{Usat,i}(t)) - (\lambda_{U,S,i} \cdot A_{Usat,i}(t)) + (\lambda_{C,U,i} \cdot A_{Cont,i}(t)), (7b)$$

$$\frac{dA_{Sat,i}(t)}{dt} = -(\lambda_{R,i} \cdot A_{Sat,i}(t)) - ((1) \cdot A_{Sat,i}(t)) + (\lambda_{U,S,i} \cdot A_{Usat,i}(t)) (7c)$$

$$A_{Cont,i}(0) = (W_{Cont} \cdot L_{Cont} \cdot H_{Cont}) \cdot \rho_S \cdot C_{S,i}(0), \dots (7d)$$

$$A_{Sat,i}(0) = A_{Usat,i}(0) = 0, \dots (7e)$$

$$C_{w,i}(t) = \frac{A_{Sat,i}(t)}{(W_{Sat} \cdot L_{Sat} \cdot H_{Sat})}, \dots (7f)$$

여기서, A_{Cont,i}(t), A_{Usat,i}(t), A_{Sat,i}(t) = 시각 t에 오염토양층, 불포화대 및 포화대에 존재하는 핵종 i의 방사능(Bq), λ_{C,U,i} = 오염토양층에서 불포화대로 핵종 i의 전이율(y⁻¹), λ_{U,S,i} = 불포화대에서 포화대로 핵종 i의 전이율(y⁻¹), λ_{R,i} = 방사성핵종 i의 붕괴상수(y⁻¹), C_{S,i}(0) = 오염토양층에 존재하는 핵종 i의 초기 방사능 농도(Bq/g), C_{w,i}(t) = 시각 t에 지하수(포화대)에 존재하는 핵종 i의 방사능농도(Bq/m³), W_{Cont}, L_{Cont}, H_{Cont} = 오염토양층의 가로, 세로의 길이 및 두께(m), W_{Sat}, L_{Sat}, H_{Sat} = 포화대의 가로, 세로의 길이 및 두께(m).

한편 수식 (7a)~(7e)와 같은 연립 선형미분방정

식의 해는 일반적인 수치해석법(예: 제4차 Runge-Kutta 방법)을 통해 구할 수 있으며, 오염토양층에서 불포화대로 방사성핵종 *i*의 전이율(침출율)은 다음 수식 (8)을 이용해 계산할 수 있다[3,12]:

$$\lambda_{C,U,i} = \frac{q_{In}}{(\theta_{Cont,W} \cdot H_{Cont} \cdot R_{Cont,i})}$$

$$R_{Cont,i} = 1 + \frac{\rho_S \cdot K_{d,Cont,i}}{\theta_{Cont,W}} \dots\dots\dots (8)$$

여기서, q_{In} = 오염토양층의 Darcy 속도(m/y), H_{Cont} = 오염토양층의 두께(m), $\theta_{Cont,W}$ = 오염토양층의 함수 유효다공도(-), $R_{Cont,i}$ = 오염토양층에서 핵종 *i*의 지연계수(-), $K_{d,Cont,i}$ = 오염토양층에서 핵종 *i*의 분배계수(m³/g). 한편, 불포화대에서 포화대로의 전이율도 수식 (8)과 유사한 방법으로 계산할 수 있다.

수식 (8)에서 오염토양층의 침투율은 증발산계수(Transevaporation coefficient)와 유거계수(Runoff coefficient), 관개율(Irrigation rate) 등을 이용하여 이론적인 방법을 통해 계산할 수 있다[2]. 그러나 이 연구에서는 부지 특성자료가 불충분할 경우에도 사전 예측을 수행할 수 있도록, 국내 밭작물(콩) 재배지의 연간 침투율(연간 강수량의 33~41% 범위)과 연평균 강수량(약1.4m)를 반영하여 해체부지의 표준 침투율을 0.5m/y(0.46~0.57m/y 범위)로 가정하였다[13]. 참고로 일본 원자력안전위원회는 방사성폐기물의 규제해제에 따른 방사선학적 영향을 평가하는 과정에서 자국내 농경지의 연간 침투율 0.4m/y로 가정한 바 있다[14].

⑤ 축산물 섭취

축산동물은 오염된 사료, 물 또는 흙을 섭취함으로써 이로부터 생산되는 고기와 우유에 방사성물질이 존재할 수 있으며, 사람이 오염된 고기와 우유를 섭취할 경우 내부피폭이 유발될 수 있다. 축산물 중 육류(고기) 섭취에 의한 내부피폭 방사선량은 수식 (9)를 이용해 계산할 수 있다:

$$ED_{IG,L,i} = DCF_{IG,i} \cdot IR_{L,H} \cdot C_{L,i} \dots\dots\dots (9)$$

여기서, $ED_{IG,L,i}$ = 오염된 축산 육류 섭취에 의한

유효선량(Sv/y), $IR_{L,H}$ = 육류 섭취율(g/y), $C_{L,i}$ = 육류 내 방사성핵종(*i*)의 농도(Bq/g-육류).

식용 육류에 존재하는 방사성핵종의 농도는 수식 (10)을 이용해 계산할 수 있다:

$$C_{L,i} = IR_{L,i} \cdot TR_{L,i} \dots\dots\dots (10)$$

여기서, $IR_{L,i}$ = 축산동물의 방사성핵종(*i*) 섭취율(Bq/y), $TR_{L,i}$ = 축산 육류로의 방사성핵종(*i*)농축계수(Bq/g-육류 per Bq/y).

축산물 중 우유 섭취에 의한 내부피폭 방사선량은 수식 (11)을 이용해 계산할 수 있다:

$$ED_{IG,M,i} = DCF_{IG,i} \cdot IR_{M,H} \cdot C_{M,i} \dots\dots\dots (11)$$

여기서, $ED_{IG,M,i}$ = 오염된 우유 섭취에 의한 유효선량 (Sv/y), $IR_{M,H}$ = 인간의 우유 섭취율(m³/y), $C_{M,i}$ = 우유 내 방사성핵종(*i*)의 농도(Bq/m³).

우유에 존재하는 방사성핵종(*i*)의 농도는 수식 (12)를 이용해 계산할 수 있다:

$$C_{M,i} = IR_{L,i} \cdot TR_{M,i} \dots\dots\dots (12)$$

여기서, $TR_{M,i}$ = 우유로의 방사성핵종(*i*) 농축계수(Bq/m³-우유 per Bq/y).

⑥ 수산물 섭취

오염된 물에서 성장한 수산 동식물의 생체 내에는 방사성물질이 존재할 수 있으며, 사람이 오염된 수산물을 섭취함으로써 내부피폭이 발생할 수 있다. 수산물 섭취에 의한 내부피폭 방사선량은 다음과 같은 관계식을 통해 계산할 수 있다:

$$ED_{IG,A,i} = DCF_{IG,i} \cdot IR_{A,H} \cdot C_{A,i} \dots\dots\dots (13)$$

여기서, $ED_{IG,A,i}$ = 오염된 수산물 섭취에 의한 유효선량(Sv/y), $IR_{A,H}$ = 사람의 수산물 섭취율(g/y), $C_{A,i}$ = 수산물 내 방사성핵종(*i*)의 농도(Bq/g). 수산물에 존재하는 방사성핵종의 농도는 다음과 같은 관계식을 이용해 구할 수 있다:

$$C_{A,i} = C_{W,i} \cdot TR_{W,A,i}, \dots\dots\dots (14)$$

여기서, $C_{A,i}$ = 수산물(A)에 존재하는 방사성핵종(i)의 농도 (Bq/g-수산물), $C_{W,i}$ = 지표수(W)에 존재하는 방사성핵종(i)의 농도 (Bq/m³-지표수), $TR_{W,A,i}$ = 지표수에서 수산물로의 방사성핵종(i)전이계수 (Bq/g-수산물 per Bq/m³-지표수).

Ⅲ. 평가도구의 구현

가. 기본요건

위에 기술한 바와 같이 해체부지의 잔류방사능에 의한 방사선학적 영향평가를 위해서는 많은 양의 기본데이터가 확보되어야 하며 유사한 형태의 반복계산이 필요하다. 또한 적용 사례의 특성에 따른 기본 데이터나 계산모델의 수정이 용이성, 유사한 부류의 데이터에 대한 체계적인 통합관리 기능이 확보되어야 하며, 향후 활용성 측면에서 일반적인 전산환경에서 공개된 소프트웨어에 기반한 운영이 바람직하다. 이와 같은 기본요건을 토대로 이 연구에서는 잔류방사능에 의한 해체리스크 사전선별을 위해 범용 운영체제 하에서 스프레드시트를 이용한 평가도구가 적합하다고 판단하였으며, 향후 평가도구의 개선과 품질보증의 용이성을 확보하기 위해 기본 데이터와 계산모델은 특성별로 모듈화하였다.

나. 평가도구의 구성

수식 (1) 내지 (14)에 기술된 모델을 기반으로 해체부지의 재이용에 따른 리스크 사전선별을 위한 평가도구인 KRES-DDS(KINS regulatory REsearch division's safety verification tool for Decommissioning and Decontamination - Screening purpose)를 개발하였다. KRES-DDS는 Microsoft Excel® 기반으로 데이터 구축과 단순한 계산은 스프레드시트로, 반복계산이 필요한 일부 계산과정은 Microsoft Excel®에 내장된 Visual Basic과 매크로(Macro) 기능을 이용해 구현되었다(Fig. 4 참조).

전체 평가도구는 그 기능에 따라 입력모듈, 계산모듈, 데이터베이스 모듈, 출력모듈로 구분된다. 입

력모듈은 일반적인 데이터 입력부(INP_GEN)와 방사선학적 데이터 입력부(INP_RAD)로 구성하였으며, 계산모듈은 흡입경로 평가부(COMP_INH), 섭취경로 평가부(COMP_ING), 오염토양으로부터 직접방사선 평가부(COMP_GS), 지하수 이동현상 평가부(COMP_GW)로 구성하였다. 섭취평가부는 물과 관계없는 토양섭취 평가부(COMP_ING_S)와 농작물섭취 평가부(COMP_ING_A), 물의 오염도에 의해 영향을 받는 음용수섭취 평가부(COMP_ING_W), 수산물섭취 평가부(COMP_ING_M), 축산물섭취 평가부(COMP_ING_LP)로 세분화하였다. 한편 데이터베이스 모듈에는 모델계산에 이용될 각종 기본데이터를 구축하였으며, 여기에는 NUC(핵종별 기본 데이터), DCF_ING(섭취에 의한 선량환산인자), DCF_INH(흡입에 의한 선량환산인자), DCF_GS(오염토양으로부터 직접방사선량 환산인자), HABIT_W(동물의 섭생자료), HABIT_H(인간의 섭생자료), Kd(핵종의 분배계수), BAF+CF(생체농축계수와 농축계수) 등이 포함된다. 마지막으로 출력모듈에서는 각종 예상선량 평가결과와 부지재이용 기준농도가 출력된다.

Ⅳ. 계산결과 및 고찰

가. 피폭경로별 예상선량

부록 1과 2에 제시된 원자력시설 해체부지에 대한 가상적인 조건에서, 부지 재이용 시점의 토양 잔류방사능이 ³H, ¹⁴C, ⁵⁴Mn, ⁶⁰Co 및 ¹³⁷Cs 각 각에 대하여

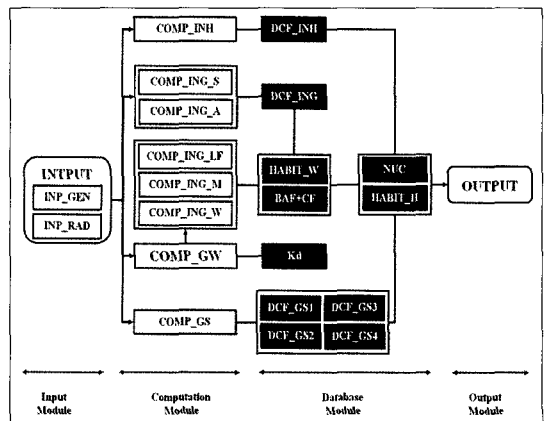


Fig. 4. Schematic view of the modularized structure of KRES-DDS.

1Bq/g일 때 예상되는 피폭경로별 방사선량을 KRES-DDS를 이용하여 평가하였다. 이들 방사성핵종들은 국내 연구용원자로 해체계획서 심사과정에서 주요 핵종으로 고려된 바 있으며, 순베타선을 방출하며 자연환경에서 이동성이 큰 대표핵종(^3H , ^{14}C), 방사화생성물 대표핵종(^{54}Mn , ^{60}Co), 핵분열생성물 대표핵종(^{137}Cs)이다[4].

Fig. 5는 주어진 조건에서 흡입(분진), 섭취(토양, 음용수, 농산물, 축산물, 담수 및 해수 수산물), 직접 피폭(오염토양 표면) 등 주요 피폭경로별 예상선량을 보여주고 있다. 부지 재이용 초기에 직접피폭이 가장 큰 선량을 유발하다가 점차 감소하는 현상은 주로 ^{54}Mn 및 ^{60}Co 와 같은 단수명 감마선 방출핵종에 기인하는 것이며, 시간 경과에 따라 점차 섭취 피폭경로의 기여분이 증가하는 현상은 ^{14}C 와 같은 장수명 베타선 방출핵종에 기인하는 것이다. 한편 초기 약 10년까지 수산물 섭취 피폭경로와 음용수 피폭경로 기여분의 시간 경과에 따른 변화추이가 상이함을 알 수 있다. 이는 내부피폭에 주로 기여하는 ^{14}C 과 ^3H 이 음용수에 존재할 경우 전량 그대로 섭취됨에 반하여, 수산물 생체 내에서는 반감기가 긴 ^{14}C 의 존재비가 상대적으로 크기 때문이다(^{14}C 의 수산물 생체농축계수가 ^3H 에 비해 상대적으로 큼).

나. 핵종별 예상선량

Fig. 6은 Fig. 5와 동일한 조건 하에서 KRES-DDS

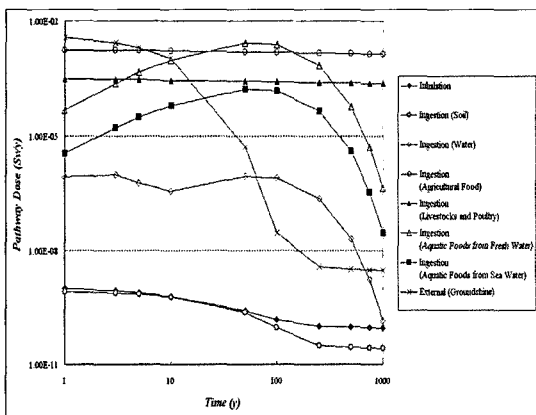


Fig. 5. Pathway dose rate along with time after the decommissioning site is released from regulatory control(calculated by KRES-DDS).

를 이용하여 계산한 방사성핵종별 예상선량 기여분의 시간 경과에 따른 변화추이를 보여주고 있다. 부지 재이용 초기에는 상대적으로 반감기가 짧은 감마선 방출핵종인 ^{60}Co 의 방사선량 기여분이 가장 크지만, 점차 내부피폭에 주로 기여하는 장수명 베타선 방출핵종인 ^{14}C 의 기여분이 증가됨을 알 수 있다. 이는 해체 후 부지 재이용 방안에 대한 안전성검증을 수행할 때, 방사선량에 지배적인 방사성핵종의 종류가 시간경과에 따라 달라질 수 있음에 유의할 필요가 있음을 암시하고 있다.

다. 사전 선별준위

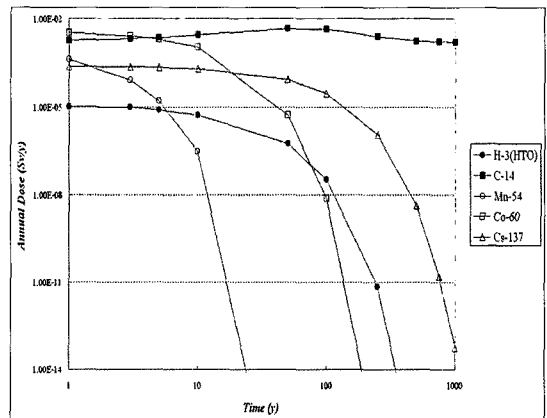


Fig. 6. Annual dose induced by each radionuclide along with time after the decommissioning site is released from regulatory control(calculated by KRES-DDS).

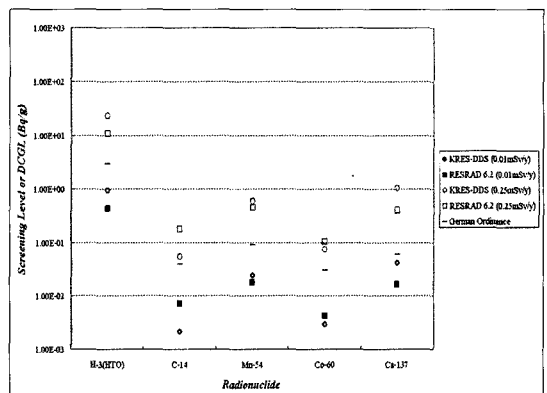


Fig. 7. Comparison of the radionuclide-specific screening levels calculated by KRES-DDS with the derived concentration guideline limits(DCGLs) by RESRAD Version 6.2 and site release criteria proposed in the German Radiation Protection Ordinance[15].

위의 같은 조건 하에서 해체부지 재이용 후 시간 경과에 따른 핵종별 방사선량을 계산하고, 각 핵종이 최대 선량을 보여주는 시점을 기준으로 부지 재이용 선량기준에 상당하는 핵종별 사전 선별준위 (Screening levels)를 계산하였다. 아직까지 국제적으로 합의된 부지 재이용에 관한 방사선량기준이 부재함을 고려하여, 이 연구에서는 사소한 위험도에 상당하는 선량준위(0.01mSv/y)와 미국에서 적용중인 부지 재이용 기준치(0.25mSv/y)를 부지 재이용 선량 기준으로 고려하였다.

Fig. 7은 KRES-DDS로 계산된 핵종별 사전 선별준위를 동일한 조건에서 RESRAD Ver.6.2 전산코드를 이용해 계산한 유도농도지침한계 (derived concentration guideline limit, DCGL) 및 독일 방사선방호령에 규정된 부지 재이용 기준농도와 비교한 결과이다[2,15]. ¹⁴C 및 ⁶⁰Co의 경우 KRES-DDS가 RESRAD에 비해 상대적으로 보수적인 결과를 보여주었으며, ³H, ⁵⁴Mn, 및 ¹³⁷Cs에 대해서는 RESRAD가

더 보수적인 결과를 보여주고 있으나, 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다(KRES-DDS의 사전 선별준위는 RESRAD의 핵종별 DCGL 대비 30.2~254.9% 범위). KRES-DDS와 RESRAD 계산결과의 차이는 기본모델과 선량환산인자가 서로 상이함에 기인하는 것이다. 한편 부지 재이용 선량기준을 0.01mSv/y로 가정하여 KRES-DDS를 이용해 유도된 핵종별 사전 선별준위값은 독일 방사선방호령에 규정된 핵종별 부지 재이용 기준농도 대비 5.4~69.4% 범위를 갖는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 해체 후 부지 재이용 방안에 대한 상세한 안전성 검증을 수행하기 전에, KRES-DDS를 이용해 간단하게 유도된 사전 선별준위를 이용해 비교적 신뢰도 있는 리스크 사전 선별 절차를 수행할 수 있음을 의미하는 것이다.

V. 결론

원자력시설 해체부지 재이용에 따른 방사선학적

Appendix 1. Radionuclide-independent input parameter values used in model predictions.

Parameter	Symbol	Value(s)	Unit	References	
Density of contaminated soil	Ps	1.5×10^{-6}	g/m ³	[2]	
Breathing rate	BR _{D,H}	7.4×10^{-3}	m ³ /y	[16]	
Airborne concentration of dust	C _{Dust}	1.0×10^{-5}	g/m ³	[10]	
Inadvertent soil ingestion rate	IR _{I,H}	37.0	g/y	[10]	
Ingestion rate of various foods	IR _{f,H}	$1.89 \times 10^{+5}$	Grain	g/y	[16]
		$6.63 \times 10^{+4}$	Fruit		
		$9.79 \times 10^{+4}$	Kimchi		
		$1.27 \times 10^{+5}$	Leafy vegetables		
		$2.07 \times 10^{+4}$	Beef		
		$1.24 \times 10^{+4}$	Pork		
		$2.20 \times 10^{+4}$	Chicken		
		$7.93 \times 10^{+4}$	Fish		
		$1.76 \times 10^{+4}$	Mollusc and crustacean		
		$1.58 \times 10^{+4}$	Algae		
		$6.30 \times 10^{+2}$	Milk	m ³ /y	[16]
Ingestion rate of water	IR _{w,H}	1.96×10^{-1}	m ³ /y	[16]	
Infiltration rate from contaminated soil to unsaturated zone	q _{in}	0.5	m/y	[13]	
Depth of contaminated soil	H _{Cont}	2.0	m	[2]	
Width of contaminated soil	W _{Cont}	100	m	[2]	
Length of contaminated soil	L _{Cont}	100	m	[2]	
Depth of saturated zone	H _{Sat}	2.0	m	[2]	
Width of saturated zone	W _{Sat}	100	m	[2]	
Length of saturated zone	L _{Sat}	100	m	[2]	

리스크 사전선별을 위한 평가모델을 개발하고 일반적인 전산환경에서 운영할 수 있는 Microsoft Excel® 기반의 평가도구를 구현하였다. 또한 예비적인 해체안전성 검증단계에서 부지 특성자료가 불충분할 경우에도 신속한 사전 예측을 수행할 수 있도록 일련의 입력변수 값 목록을 제시하고, KRES-DDS를 이용해 계산된 사전 선별준위가 RESRAD Ver.6.2의 DCGL 및 독일 방사선방호령에 규정된 핵종별 부지 재이용 기준농도를 합리적으로 근사하고 있음을 확인하였다.

KRES-DDS는 제안된 부지 재이용 방안의 잠재적

인 방사선학적 리스크를 신속하게 예측함으로써 이후 추가로 수행될 상세 검증평가의 수준을 차등화할 수 있는 기술적 근거를 제공할 수 있으며, 또한 KRES-DDS에서 제공되는 지배적인 방사성핵종 및 피폭경로, 최대선량 발현시점, 유도농도지침한계 등의 정보는 상세 검증평가에서 강조되어야 할 항목을 선정하는데 활용할 수 있다. 그러나 KRES-DDS는 일련의 가정, 기본모델 및 가상적인 입력변수에 근거해 개발되었으므로, 제안된 부지 재이용 방안이 이 연구에서 제안된 가정, 기본모델 및 입력변수와 편차가 클 경우에는 별도의 추가적인 모델링과 부지 특성자

Appendix 2. Radionuclide-dependent input parameter values used in model predictions.

Parameter	Symbol	Values for Radionuclides					Unit	References
		³ H	¹⁴ C	⁵⁴ Mn	⁶⁰ Co	¹³⁷ Cs		
Dose conversion factor for inhalation	DCF _{IH,i}	6.2 × 10 ⁻¹²	2.0 × 10 ⁻⁹	1.5 × 10 ⁻⁹	1.0 × 10 ⁻⁸	9.7 × 10 ⁻⁹	Sv/Bq	[17]
Dose conversion factor for ingestion	DCF _{IG,i}	1.8 × 10 ⁻¹¹	5.8 × 10 ⁻¹⁰	7.1 × 10 ⁻¹⁰	3.4 × 10 ⁻⁹	1.3 × 10 ⁻⁸	Sv/Bq	[17]
Decay coefficient of RN _i	λ _{Ri}	5.64 × 10 ⁻²	1.21 × 10 ⁻⁴	8.11 × 10 ⁻¹	1.32 × 10 ⁻¹	2.31 × 10 ⁻²	y ⁻¹	[17]
Distribution coefficient of RN _i in contaminated soil	K _{d,Cont,i}	1.0 × 10 ⁻¹¹	6.7 × 10 ⁻⁶	5.0 × 10 ⁻⁵	6.0 × 10 ⁻⁵	2.7 × 10 ⁻⁴	m ³ /g	[3]
Distribution coefficient of RN _i in unsaturated zone	K _{d,Unsat,i}	1.0 × 10 ⁻¹¹	6.7 × 10 ⁻⁶	5.0 × 10 ⁻⁵	6.0 × 10 ⁻⁵	2.7 × 10 ⁻⁴	m ³ /g	[3]
Translocation coefficient of RN _i from soil to agricultural food	TR _{S,P,i}	4.8 × 10 ⁻⁰ (grain)	5.5 × 10 ⁻⁰ (grain)	2.6 × 10 ⁻¹ (grain)	1.9 × 10 ⁻² (grain)	2.6 × 10 ⁻² (grain)	Bq/g-wet, food Bq/g-dry, soil	[16]
		4.8 × 10 ⁻⁰ (fruit)	5.5 × 10 ⁻⁰ (fruit)	2.9 × 10 ⁻² (fruit)	1.8 × 10 ⁻³ (fruit)	2.0 × 10 ⁻³ (fruit)		
		4.8 × 10 ⁻⁰ (kimchi)	5.5 × 10 ⁻⁰ (kimchi)	1.2 × 10 ⁻¹ (kimchi)	1.3 × 10 ⁻² (kimchi)	8.4 × 10 ⁻² (kimchi)		
		4.8 × 10 ⁻⁰ (leaves)	5.5 × 10 ⁻⁰ (leaves)	3.0 × 10 ⁻² (leaves)	1.0 × 10 ⁻³ (leaves)	2.0 × 10 ⁻² (leaves)		
Translocation coefficient of RN _i in livestock and poultry	TR _{L,i}	4.38 × 10 ⁺⁰ (Beef)	1.13 × 10 ⁺¹ (Beef)	1.83 × 10 ⁺⁰ (Beef)	3.65 × 10 ⁻¹ (Beef)	1.10 × 10 ⁺¹ (Beef)	Bq/g-flesh Bq/y	[16]
		4.38 × 10 ⁺⁰ (Pork)	1.13 × 10 ⁺¹ (Pork)	7.30 × 10 ⁺⁰ (Pork)	1.83 × 10 ⁻⁰ (Pork)	9.49 × 10 ⁺¹ (Pork)		
		4.38 × 10 ⁺⁰ (Chicken)	1.13 × 10 ⁺¹ (Chicken)	4.02 × 10 ⁺¹ (Chicken)	3.65 × 10 ⁻¹ (Chicken)	1.64 × 10 ⁺⁰ (Chicken)		
		3.65 × 10 ⁺⁰ (Milk)	4.38 × 10 ⁺⁰ (Milk)	5.84 × 10 ⁺² (Milk)	6.21 × 10 ⁻¹ (Milk)	3.03 × 10 ⁺⁰ (Milk)		
Translocation coefficient of RN _i from surface water to aquatic foods	TR _{W,A,i}	9.00 × 10 ⁻⁷ (Fish)	4.60 × 10 ⁻³ (Fish)	4.00 × 10 ⁻⁴ (Fish)	5.00 × 10 ⁻⁵ (Fish)	2.00 × 10 ⁻³ (Fish)	Bq/g-living body Bq/m ³	[16]
		9.00 × 10 ⁻⁷ (Mollusc)	9.10 × 10 ⁻³ (Mollusc)	9.00 × 10 ⁻² (Mollusc)	2.00 × 10 ⁻⁴ (Mollusc)	1.00 × 10 ⁻⁴ (Mollusc)		
		9.00 × 10 ⁻⁷ (Algae)	4.60 × 10 ⁻³ (Algae)	1.00 × 10 ⁻² (Algae)	2.00 × 10 ⁻⁴ (Algae)	5.00 × 10 ⁻⁴ (Algae)		

료를 이용한 재평가가 필요할 것이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부가 주관하는 2006년도 원자력연구개발 중장기계획사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Decommissioning Nuclear Power Plants: Policies, Strategies and Costs, OECD/NEA, 2003.
- [2] C. Yu et al., Manual for Implementing Residual Radioactive Material Guidelines Using RESRAD, Version 5.0, ANL/EAD/LD-2, Argonne National Laboratory, 1993.
- [3] R. Haaker et al., Comparison of the Models and Assumptions used in the DandD 1.0, RESRAD 5.61, and RESRAD-Build 1.50 Computer Codes with Respect to the Residential Farmer and Industrial Occupant Scenarios provided in NREG/CR-5512, NUREG/CR-5512, Vol. 4, 1999.
- [4] 신원기 등, 연구로1,2호기 해체계획서 심사보고서, KINS/AR-720, 한국원자력안전기술원, 1999.
- [5] 박윤원 등, 우라늄변환시설 해체계획서 심사보고서, KINS/AR-831, 한국원자력안전기술원, 2004.
- [6] IAEA, Graded Approach to Safety Assessment for Decommissioning of Nuclear Facilities, Draft Safety Report, 2005.
- [7] 정재학, 차등접근법에 근거한 원자력시설 해체 작업 단위별 잠재 위험도 사전선별 방법론, 한국방사성폐기물학회 2006 춘계학술발표회, 2006.
- [8] S.M. Williams and H. Richards, RADCONTAB 1.0: A Look-up Tables Tool for Radiological Assessment of Contaminated Land on Nuclear Licensed Sites, British Nuclear Fuel Limited (2005).
- [9] K.F. Eckerman and J.C. Ryman, External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil, Federal Guidance Report No. 12, EPA 402-R-93-081, Environmental Protection Agency, 1993.
- [10] K.R. Smith and A.L. Jones, Generalised Habit Data for Radiological Assessments, National Radiological Protection Board, NRPB-W41 (2003).
- [11] J.J. Cheng et al., Benchmarking Analysis of Three Multimedia Models: RESRAD, MMSOILS, and MEPAS, DOE/ORO-2033, US DOE, 1995.
- [12] P. Maul et al., Further AMBER and Ecolego Intercomparisons, SSI 2004:01, Swedish Radiation Protection Authority, 2004.
- [13] 송관철, 지형조건별 토양수분수지 규명시험, 농업과학기술원, 2000.
- [14] 주요 원자로시설에 있어서 규제해제기준에 관하여, 일본원자력안전위원회 방사성폐기물안전기준전문부회, 1999.
- [15] Ordinance Concerning Protection Against the Hazards of Ionizing Radiation, Germany, Bundesgesetzblatt, No.38, Part I, p.1714-1836 (2001).
- [16] 장시영 등, 주민피폭선량평가지침 및 INDAC 사용 자지침서, KINS/GR-199, 별책 1, 한국원자력안전기술원, 1999.
- [17] IAEA, International Basic Safety Standards for Protection Against Ionising Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 115, 1996.