

2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

해체시 방사선 피폭선량 평가 방안 연구 Study on Radiation Exposure Dose Assessment in Decommissioning

김학수, 손중권, 최영조, 강기두, 신상운
한국수력원자력(주) 원자력환경기술원
대전광역시 유성구 덕진동 150

이윤근
한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

본 연구에서는 향후 국내에서 예상되는 원전해체에 대비하여 해체시 원전부지에 잔존하는 잔류 방사능에 의한 피폭선량평가 방안을 수립하기 위해 해외의 연구사례와 여러 문헌을 검토 분석하여 해체시 고려되는 시나리오와 시나리오별 피폭경로를 선정하였다. 주요 피폭 시나리오는 시설물 보수(renovation) 및 시설물내 거주(occupancy) 그리고 부지내 거주(residential)로 구분하였으며, 시나리오별 피폭경로로는 시설물보수 및 거주 시나리오의 경우, 체적 및 표면선원으로부터의 외부피폭, 공기중에 부유하고 있는 방사성 먼지 호흡 및 재부유된 표면오염호흡, 부주의로 인한 유리성 표면오염 섭취등으로 선정하였으며, 부지내 거주 경우에는, 실내외에 존재하는 체적토양 선원에 의한 피폭, 실내외에 재부유된 토양 호흡, 실내 토양 흔적의 재부유된 표면선원 호흡 그리고 토양의 직접섭취, 실내 토양흔적의 부주의에 의한 섭취, 오염된 식물, 동물, 어류 및 음용수의 섭취등으로 선정하였다.

Abstract

To establish the methodology of radiation exposure dose assessment due to residual radioactive contamination in decommissioning, we reviewed and analyzed the exposure scenarios and pathways associated with the decommissioning of nuclear power plant. As the results of the study, the major exposure scenarios were the renovation and occupancy in building, and residential on site. The exposure pathways to building were the external dose to penetrating radiation from volume and surface source, inhalation of airborne radioactive dust and of resuspended surface contamination, and inadvertent ingestion of surface contamination. Also, the exposure pathways of residential on site were the external dose to penetrating radiation from volume soil source existed indoors and outdoors, inhalation to resuspended soil existed indoors and outdoors, inhalation to resuspended surface source of soil tracked indoors, direct ingestion of soil, inadvertent ingestion of soil tracked indoors, and ingestion of contaminated plant, animal, fish and drinking water.

1. 서론

국내에서 운영중인 혹은 건설중인 원전에 대한 방사성유출물의 방출로 인한 환경영향평가 프로그램은 최근 ICRP-60의 법제화에 따라 새로운 평가 프로그램이 개발되어(K-DOSE60, INDAC등) 사용되고 있으나, 해체와 관련된 방사선학적 환경영향평가 프로그램은 개발된 것이 없으며, 관련 법규체계도 아직 준비되어 있지 않은 실정이다. 원자력 관계시설과 부지를 해체할 경우, 시설과 부지의 무제한적 이용을 위해 개방하는 경우에 오염된 시설과 부지를 어느 수준까지 방사능 오염을 제염하는가가 어려운 문제점으로 직면하게 될 것이다. 또한 해체 시설과 부지내 잔류방사능 준위의 수용가능 여부와 해체시 방사선의 위험으로부터 작업자와 일반대중의 보건과 안전성 확보 그리고 주변환경을 보호하기 위해 원자력시설 해체에 대한 방사선학적 기준은 없어서는 안 될 요소가 될 것이다. 따라서 원자력관계시설 해체후 시설과 부지내에 미량으로 존재하는 방사성물질로 인한 피폭가능성 여부와 피폭정도를 분석, 평가하기 위해 방사선학적 기준개발과 더불어 해체와 관련된 피폭시나리오와 시나리오별 피폭경로의 검토가 필요하다.

많은 해체 경험을 가지고 있는 원전선진국에서는 원자력발전소를 해체할 경우, 그 부지의 사용목적에 따라 무제한 개방 혹은 제한개방으로 구분하고, 부지 개방에 따른 방사선학적 환경영향을 평가하기 위한 많은 연구와 경험을 바탕으로 관련 법규와 해체시 고려되는 시나리오 및 시나리오별 피폭경로를 수립하였으며, 이를 수학적 모델링으로 전산화한 프로그램을 개발하여 현재 널리 사용되고 있다. 국내의 경우에는 원자력발전의 역사가 외국에 비해 짧은 관계로 원전 해체와 관련된 기술개발이 활발하지 않다. 따라서 본 연구에서는 향후 전개될 원전 해체에 대비하여 해체시 원전부지에 잔존하는 잔류 방사능에 의한 피폭선량평가를 할 수 있는 방안을 수립하기 위해 우선적으로 해외의 연구사례와 여러 문헌을 중심으로 해체시 고려되는 시나리오와 시나리오별 피폭경로 등을 검토 분석하여 주요 시나리오 및 시나리오별 피폭경로를 선정하였다

2. 피폭시나리오 및 핵종이동모델(피폭경로)

원자력발전소를 해체할 경우, 그 부지의 사용목적에 따라 조건없이 개방하거나 일정한 관리 절차에 의하여 개방하는 것으로 크게 구분된다. 해체원전의 부지를 상기 목적에 맞게 개방하기 위해서는 부지 또는 건물내의 잔류방사능에 의한 피폭선량을 평가해야 한다. 이러한 평가를 위해서 우선적으로 원자력발전소를 해체할 경우 예상되는 피폭시나리오와 시나리오별 핵종이동모델(피폭경로)등을 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 해외에서 수행된 연구결과 또는 여러 참고 문헌등을 토대로 원자력발전소 해체시 고려되는 시나리오와 피폭경로 등을 검토하였다.

2.1 피폭 시나리오

원자력발전소를 해체하고 그 부지를 활용하기 위해서는 부지에 잔존하고 있는 잔류 방

사능에 의한 환경영향 평가를 수행해야 한다. 통상적으로 원자력발전소를 해체할 경우 예상되는 것으로서는 건물과 부지를 예상할 수 있으며 특히 부지의 경우, 그 사용목적에 따라 개방하거나 제한 개방함으로써 원전부지내에 주민이 생활하거나 농축산물을 재배하고 수확할 수 있을 것이다. 따라서, 원자력발전소를 해체할 경우 예상되는 피폭시나리오는 크게 부지내 거주와 시설물로 구분할 수 있다. 시설물 이용의 경우에는 해체후 시설을 재사용하기 위해 내부 보수하는 경우와 시설물내에 상주하면서 근무 및 일상적인 일을 하는 경우등으로 분류된다. 부지 이용시에는 주거에 대한 피폭시나리오를 생각해 볼 수 있다.

2.2 시나리오별 피폭경로

원자력발전소를 해체할 경우 부지내에 잔존하는 잔류방사능에 의해 인체에 미치는 영향을 평가하기 위해 예상되는 피폭경로는 일반적으로 정상운전시 방사성 유출물 방출에 의한 소외선량 평가(ODCM : Off-site Dose Calculation Manual)시 고려되는 피폭경로와 유사하며, 다음과 같이 예상할 수 있다. 우선 해체부지에 거주민이 상주할 경우, 토양에 잔류하는 방사성 핵종이 지하수로 이동하여 오염된 물이 관개수로 사용되어 농작물에 사용될 경우, 또한 오염된 토양이나 오염된 물에 의해 사육된 동물을 인간이 먹었을 경우, 오염된 물속에서 자란 어류를 섭취할 경우, 오염된 물을 음용수로 사용할 경우 등 매우 복잡한 경로를 통해 부지에 거주하고 있는 사람의 인체에 영향을 미친다. 또한 시설물의 보수나 건물내 거주하는 경우에는 건물벽, 마루 그리고 천장등에 잔존하는 방사성핵종으로부터 직접 방사선을 피폭받는 경우, 절삭 및 표면 제거등의 작업에 의해 부유된 방사성핵종을 호흡했을 경우 등의 여러 경로를 통해 인체에 영향을 미친다. 시설내 작업에 의한 인체 영향은 공간에서 부유하고 있는 또는 시설물내에 잔존하고 있는 선원에 의한 단기 피폭으로, 시설물내 거주에 의한 인체 영향은 건물표면에서 유리성 상태로 잔존하고 있던 저준위의 방사성핵종에 의한 장기 피폭을 평가할 때 주로 고려된다. 해체시 고려될 수 있는 시나리오별 피폭경로를 그림 1에 간략히 도시하였다.

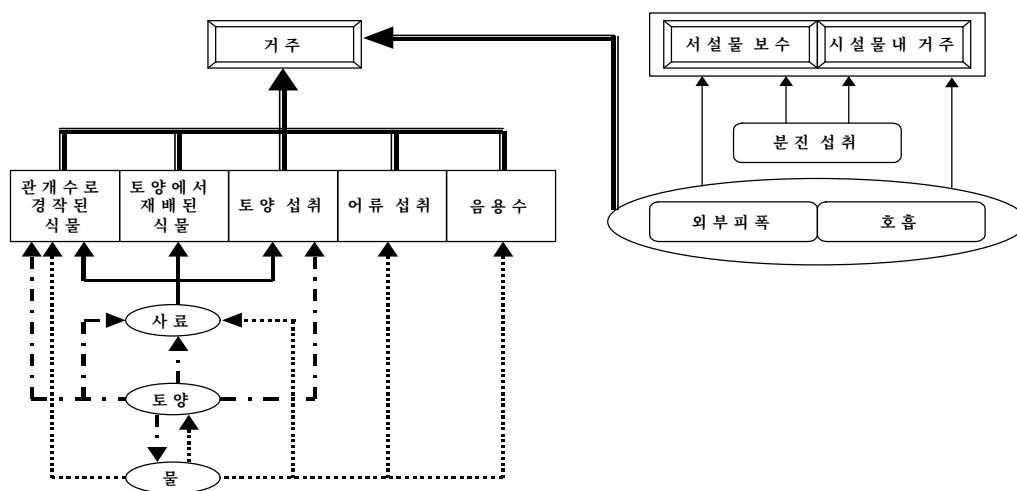


그림 1 피폭시나리오별 피폭경로 개략도

2.2.1 시설물내 보수에 대한 피폭경로

원자력발전소를 해체하고자 할 때, 즉 원전 운영종료시에는 잔류 방사성오염선원을 제염하여 상당량을 제거하거나 효율적으로 절감할 수 있을 것이다. 시설물을 보수하거나 철거할 동안에 표면이나 체적선원들이 산재되어 유리성 오염원을 생성할 것이다. 이러한 유리성 오염원은 아직 보수가 진행되지 않거나 철거되지 않은 시설물내의 공기 혹은 표면에서의 방사성 핵종의 농도를 더욱 증가시킬 것이다.

시설물의 보수나 철거시 예상되는 피폭경로는 구별하기가 매우 어렵다. 왜냐하면 두 시나리오에 동일한 개념 모델을 적용하여 피폭경로를 고려하기 때문이다. 몇몇 조건에서는 철거가 매우 보수적인 상황을 나타낼 수 있으며, 다른 한편으로 보수가 더 보수적인 상황을 나타낼 수 있다. 예를 들어 건물을 철거할 경우, 철거동안의 피폭기간이 보수기간동안의 피폭시간보다 더 길 수 있으나, 철거작업은 통상 철거 장비를 이용하여 잔류방사성물질로부터 먼거리에서 작업이 용이한 반면에 보수작업은 잔류 방사성물질과 직접 접촉하여 실내에서 작업을 하는 관계로 더 많은 피폭을 받을 것이므로, 시설물의 보수가 철거보다 더 보수적이라 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 시설물내에서의 보수작업과 관련된 피폭경로만을 고려하기로 하였다. 이는 시설물내에서의 보수작업과 관련되어 고려되는 피폭경로에 철거와 관련된 피폭경로가 다 포함된다고 볼 수 있기 때문이다.

시설물 보수 작업에는 여러 형태의 작업등이 있으며 수행되는 작업에 따라 피폭경로 등을 예상할 수 있다. 예를 들면 콘크리트 구조물의 일부를 제거하는 작업으로부터 유리성 오염물이 발생할 것으로 예상할 수 있으며, 목공, 도장공사 그리고 배관공사 같은 작업으로 인해서도 역시 유리성 오염물이 발생할 수 있을 것이다.

이러한 시설물 보수에 관련한 여러 가지 작업으로부터 예상되는 피폭경로는 아래 표 1과 같다.

표 1 시설물 보수 작업시 고려되는 피폭경로

피폭경로
• 체적선원에 의한 외부피폭 • 공기중 방사성 먼지의 침수에 의한 외부피폭
• 공기중 방사성 먼지 호흡 • 실내 라돈 에어로졸 호흡
• 유리성 표면오염원의 부주의에 의한 섭취
• 건물보수동안 생긴 상처부위를 통한 내부 오염 • 방사성핵종의 잔피흡착

2.2.2 시설물내 거주에 대한 피폭경로

무제한적 이용을 위해 시설을 개방하기 전에 당초 해당시설은 상업적으로 이용되었기 때문에 운영허가 종료 후에도 시설 내에서의 거주는 상업적으로 활용된다는 의미를 가지게 된다. 즉, 사무실, 연구실, 창고 등으로 시설이 활용될 때 인간이 거주하는 것을 의미한다. 해체된 원자력발전소의 많은 시설에는 잔류 방사성물질(표면 오염원)들이 잔존하게 된다. 따라서 잔존하는 방사성물질들을 제염 운전으로 전부 제거할 수 없기 때문에 이러한 환경 내에서 일상적인 업무나 작업을 할 경우 이들 표면오염원으로부터 시설물내의 거주에 대한 피폭을 예상할 수 있다. 시설물내에 거주하는 사람에게 피폭을 야기하는 선원으로서 고려되는 것은 얇은 층에 있는 선원이거나 표면오염선원들이다.

인간이 시설내에 거주할 경우 잔류방사능의 표면 선원을 고의로 산재시키지는 않을 것이다. 즉 이것은 유리성 오염에 의한 피폭가능성이 높다는 것을 의미한다. 운영허가 종료 이후 즉시, 추가적인 방사성붕괴가 일어나기 전에, 시설은 상업적으로 활용되어 시설내 인간이 거주한다고 가정하는 것은 피폭시간에 대한 보수적인 차원에서 적절하다고 생각된다.

시설물 보수작업에서 고려된 피폭경로와 마찬가지로 시설물내 거주와 관련하여 많은 피폭경로를 예상할 수 있다. 예상되는 피폭형태로는 표면오염원으로부터 직접 피폭받는 경우, 방사성을 띠는 먼지의 부유물을 호흡했을 경우, 부주의로 인한 표면오염원을 섭취했을 경우 그리고 작업이나 일상적인 업무에서 발생할 수 있는 그러나 예상가능성이 희박한 부상부위에 의한 피폭, 실내에 잔존하고 있는 라돈 에어로졸의 호흡, 그리고 방사성핵종의 진피흡착에 의한 피폭등을 예상할 수 있다. 아래 표 2에는 시설물내 거주시에 예상되는 피폭경로등을 보여주고 있다.

표 2 시설물내 거주시 고려되는 피폭경로

피폭경로
• 표면선원에 의한 외부피폭 • 공기중 방사성 먼지의 침수에 의한 외부피폭
• 재부유된 표면오염원 호흡 • 실내 라돈 에어로졸 호흡
• 유리성 표면오염원의 부주의에 의한 섭취
• 표면오염원에 의한 상처부위를 통한 내부 오염 • 방사성핵종의 진피흡착

2.2.3 부지내 거주에 대한 피폭경로

원자력발전소를 운전중이거나 해체할 경우에 건물내에 존재하는 잔류 방사성물질에 의한 시설물 시나리오와 마찬가지로 원전부지의 방사성물질로 오염된 토양에 의한 피폭경로도 고려해야 한다. 원자력시설 운영으로 인한 부지내 토양은 아주 다양한 방법과 절차

에 의해 오염된다. 방사성물질에 의한 부지 오염의 원인은 방사성물질의 계획적인 처분에 의한 환경방출, 우발적인 액체 방사성물질 유출 사고 또는 발전소 정상운전시 환경으로 방출된 방사성 핵종의 장기간 누적에 의한 부지 오염 등을 들 수 있다.

토양내 잔류 방사성 오염물질에 의한 피폭개념모델은 매우 다양하고 복잡한 피폭경로와 조건들을 고려해야 한다. 그러나 환경조건의 복잡성으로 인해 피폭모델링시 고려되어야 하는 피폭경로와 장기 설정에는 많은 어려움이 있다. 오염된 부지에서 생활하는 거주자에 대한 피폭경로는 환경조건에 따라 매우 다양하다.

부지내 오염된 토양으로부터 예상할 수 있는 피폭경로로는 재부유된 오염토양을 함유한 공기를 호흡, 오염된 우물에서 식수를 섭취 또는 오염된 지표수내의 생선 섭취, 오염된 토양내에서 경작 및 목축, 그리고 동, 식물의 생산물 섭취등을 고려할 수 있을 것이다.

또한, 토양내 잔류 방사성물질에 대한 많은 피폭경로가 존재하며 이러한 피폭경로는 여러인자에 의해 영향을 받는데, 이들 인자들로는 오염원의 특성과 분포, 방사성핵종의 물리화학적 특성 그리고 환경조건(습하거나 건조한 환경, 따뜻하거나 추운기후등)을 들 수 있다. 통상적으로 피폭형태에 따라 오염부지로부터 인체에 미치는 피폭경로는 아래 표 3 과 같다.

표 3 부지내 거주와 관련된 피폭경로

피폭경로
• 실내외 체적 토양 선원에 의한 외부피폭 • 실내 토양 흔적에 의한 외부피폭 • 공기중 부유하고 있는 방사성 토양내 침수로 인한 외부피폭 • 오염된 지표수 선원과 관련된 수영과 해변활동으로 인한 외부피폭
• 실내외에 재부유된 토양 호흡 • 실내 토양 흔적의 재부유된 표면 선원의 호흡 • 실내외 라돈 에어로졸 호흡
• 토양의 직접 섭취 • 실내 토양흔적의 부주의로 인한 섭취 • 지하수 선원으로부터 음용수 섭취 • 오염된 토양에서 재배된 식물 섭취 • 오염된 지하수로 경작된 식물 섭취 • 부지내에서 사육된 동물의 생산물 섭취 • 오염된 지표수 선원으로부터의 음용수 섭취 • 오염된 지표수 선원으로부터의 어류 섭취
• 상처부위를 통한 내부오염 • 방사성 핵종의 진피흡착

오염된 부지내에서 거주자에 대한 피폭경로를 모델링하는 것은 매우 복잡하다. 한 예로

오염된 토양으로부터 생산되는 농산물의 섭취에 의한 피폭을 평가하기 위해 고려되는 농작물로부터 인체로의 피폭경로는 매우 복잡하다. 식물 뿌리로부터의 직접 호흡, 공기중에 부유하고 있는 오염 토양분진에 축적된 방사성핵종이 식물 잎사귀에 축적되어 섭취할 경우, 관개수에 축적되어 있는 오염물을 섭취했을 경우 등 농축산물에 의한 피폭경로를 모델링하는 것은 매우 어렵다. 그림 2는 부지내 거주에 대한 피폭영향을 평가하기 위해 고려되는 피폭경로의 모델링을 간략히 보여주고 있다.

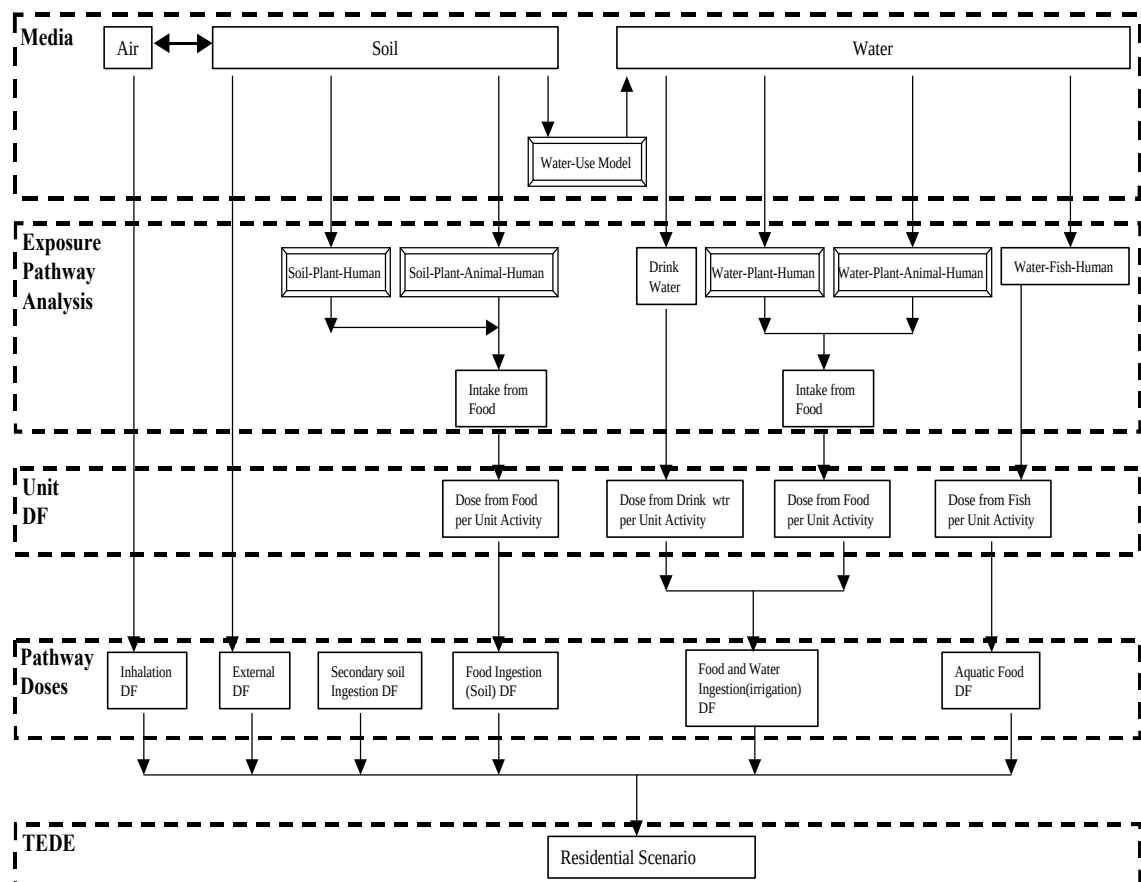


그림 2 부지내 거주에 대한 피폭 모델링 개략도

3. 적정 피폭시나리오 및 피폭경로 선정

지금까지 조사된 시나리오별 피폭경로를 바탕으로 여러 참고 자료 및 해체를 경험한 원전의 주요 보고서 그리고 해외 주요 규제지침서 등을 참고로 하여 주요 시나리오와 시나리오별 피폭경로를 선정하였다.

시설내 보수 및 거주 시나리오에서 언급하고 있는 Air submersion에 의한 피폭경로는 주로 원자력발전소 운영중 사고시에 고려되는 주요 피폭경로로서 해체관련 연구보고서에서는 Air submersion에 의한 외부 피폭은 표면이나 체적선원에 의한 외부피폭에 비해

그 영향이 상당히 작아 고려하지 않는다고 언급되어 있다. 작업이나 일반적인 레저 활동으로 발생하는 상처부위에 의한 피폭은 예측가능하진 않지만 그 발생빈도가 상당히 작을 것으로 알려져 있어 피폭경로에서 고려하고 있지 않고 있는 실정이다. 또한 진피흡착에 의한 피폭은 일부분의 핵종들, 주로 삼중수소의 경우에 중요하게 고려되며, 기타 다른 핵종의 진피흡착으로부터 야기될 수 있는 선량은 호흡 및 섭취와 비교하여 낮다고 볼 수 있다. 즉, 상처부위에 의한 그리고 진피흡착에 의한 내부피폭은 고려하지 않았다. 또한 몇몇 조건하에서, 우라늄 연쇄붕괴로부터의 라돈 에어로졸의 호흡은 매우 중요한 피폭경로가 될 수 있다. 실내 라돈의 농도는 우라늄 양, 건물설계특성 및 실외공기와의 반응률등의 함수로서 매우 다양하게 존재한다. 또한 실내에 존재하는 라돈은 자연적으로 발생하는 우라늄 연쇄붕괴로부터 존재하며, 허가된 작업활동으로부터 잔류 방사성오염물로서 존재하는 것은 아니다. 따라서 실내 라돈에 의한 피폭은 부지특성의 성질을 가지고 있으며, 자연에서 존재하는 양이 상당히 큰 영향을 미치므로 상업용으로 사용된 원자력관계시설에서의 라돈 피폭영향은 미비하여 고려하지 않았다.

오염된 부지내 거주자에 대한 시나리오에서도 시설물 보수 및 거주 시나리오에서 제외한 피폭경로와 동일한 이유로 위에서 논의한 Air submersion, 상처부위 및 진피흡착에 의한 내부피폭 그리고 라돈 에어로졸의 호흡에 의한 피폭경로는 제외하였다.

따라서, 상기 검토결과를 토대로 원자력발전소 해체시 고려되는 주요 시나리오와 시나리오별 피폭경로를 표 4에 제시하였다.

표 4 주요 시나리오와 시나리오별 피폭경로

피폭 형태	주요 시나리오별 피폭경로	
	부지내 거주	시설(보수 및 거주)
외부피폭	● 실내외 체적토양선원으로부터의 피폭	● 체적 및 표면선원으로부터의 피폭
호흡	● 실내외 재부유된 토양의 호흡 ● 실내 토양혼적의 재부유된 표면선원 호흡	● 공기중 방사성 먼지의 호흡 ● 재부유된 표면오염원의 호흡
섭취	● 토양의 직접 섭취 ● 실내 토양 혼적의 부주의에 의한 섭취 ● 지하수 선원으로부터의 음용수 섭취 ● 오염된 토양에서 재배된 식물 섭취 ● 오염된 지하수로 경작된 식물 섭취 ● 부지내에서 사육된 동물의 생산물 섭취 ● 오염된 지표수선원으로부터 음용수 섭취 ● 오염된 지표수선원으로부터 어류 섭취	● 유리성 표면오염원의 부주의에 의한 섭취

4. 결론

운영중인 혹은 건설중인 원전에 대한 방사성 유출물의 환경 방출에 대한 환경영향평가를 위한 프로그램은 최근 ICRP-60의 법제화에 따라 새로운 평가 프로그램이 개발되어 (K-DOSE60, INDAC등) 사용되고 있으나, 해체와 관련한 방사선학적 환경영향평가 프로그램은 개발된 것이 없다. 본 연구에서는 원자력발전소 해체시 피폭선량평가 체계를 확립하기 위한 기초연구로서 해체시 고려되는 피폭시나리오와 각 시나리오별 피폭경로등을 해외의 연구사례 및 자료를 토대로 검토하였으며 주요 시나리오와 시나리오별 피폭경로를 선정하였다. 본 연구결과는 향후 해체관련 환경영향평가 프로그램을 개발하는데 많은 도움이 될 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관하는 원자력중장기 개발사업의 일환으로 수행되었음

참고자료

1. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Decision Methods for Dose Assessment to Comply with Radiological Criteria for License Termination",1998
2. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Residual Radioactive Contamination from Decommissioning", NUREG/CR-5512, 1992
3. Yu, C., et al., "User's Manual for RESRAD Version 6", Argonne National Laboratory, 2000
4. 한국원자력안전기술원, "원자력시설의 해체 인·허가 제도 개발에 관한 연구", 1998
5. 원자력환경기술원, "원자력발전소 제염·해체 안전성평가 방법 개발(2차년도 연구보고서)", 2001