

'99 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

ICRP-60 방사선방호체계에 근거한 주민피폭선량 검증코드<sup>1)</sup>  
Off-site Dose Calculation Code for Implementing the ICRP-60  
Recommendations

장시연, 김창규

한국원자력안전기술원

대전광역시 유성구 구성동 19번지

요 약

방사선영향평가에 관한 세계적 추세인 유효선량 개념 및 최신 선량환산계수의 적용 등을 고려하여 주민피폭선량 검증용 코드인 GASDOS 및 LIQDOS를 보완하였다. 코드의 현장 적용성을 평가하기 위하여 월성 주변에서 실측한 공기중 및 솔잎중 삼중수소 농도와 예측값을 비교하였고 규제 실무에 적용하였을시의 최적 입력방안을 도출하였다. 또한, 기존 코드 및 수정된 코드간의 계산결과에 대한 비교를 수행하였고, 사용자의 편의성을 극대화하기 위하여 GUI 구축작업을 수행하였다. 동 코드의 현장 적용성을 평가한 바에 따르면, 실측치의 불확실성, 지형의 복잡성, 해륙풍의 영향 등과 같은 제한점에도 불구하고, 방사성물질의 환경중 거동을 잘 묘사하는 것으로 나타났다.

Abstracts

The GASDOS and LIQDOS, which are computer codes for verifying licensee's results regarding off-site doses to the public, were updated to implement the ICRP-60 recommendations and newly recommended dose coefficients by IAEA and ICRP. In order to analyze the impact of applying the revised codes on nuclear facilities, the predicted results of radioactivity concentrations in air and vegetables were compared with measured tritium concentrations in air and pine-needle around the Wolsung site and the predicted results from

---

1) 이 글은 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구결과입니다.

updated codes were in addition compared with those from their old versions, GUI-interface was constructed using Power Builder to operate the updated codes user-friendly. The predicted radioactivity concentrations in air and vegetables were shown to have good agreement with measured values, although there were some limitations such as uncertainties in measured values, complex topology around the site, and the limitations of code predictions by the characteristics of coastal weather conditions.

## 1. 서론

원자력시설에서는 정상가동시에 기체 및 액체유출물의 형태로 방사성물질이 환경으로 방출된다. 환경으로 방출된 방사성물질은 지질계(공기, 토양, 지표수, 지하수)와 생태계(식물, 동물) 양쪽에서 나뉘어 이동하게 된다. 방사성물질이 환경중에서 이동하는 동안 많은 복합적인 상호작용이 일어나게 되는데, 주민이 받는 피폭은 방사성물질에 대한 외부(직접 선량) 및 내부(호흡, 섭취)피폭에 의해서 일어난다. 상술하면, 대기 및 해양을 통하여 부지경계선 외부로 확산된 방사성물질로부터 부지주변 주민 및 동·식물이 받는 방사선피폭은 오염된 대기, 토양 및 해양에 노출됨으로써 받게 되는 외부피폭과 호흡 및 음식물 섭취로 인해 체내에 축적되는 방사성물질에 의한 내부피폭으로 구분할 수 있다. 그 이외에 원자력발전소로부터의 직접피폭이 있다.

우리나라의 경우, 사업자는 원자력시설로부터 환경으로 방출되는 기체 및 액체유출물에 의한 제한구역 경계에서의 피폭선량이 과학기술부장관 고시 제98-12호의 선량요건[1]을 만족하는지를 인허가심사 단계에서 보여야 하며, 발전소의 정상가동시에도 매년 정부에 제출하는 환경연보[2]를 통해 상기 선량요건을 준수한다는 것을 보여야 한다.

규제기관은 주민이 받는 피폭선량이 상기 법령을 준수하는지 확인하기 위하여 사업자가 제출한 방사선영향평가 결과를 검토하여야 하며, 이러한 검토를 위하여는 사업자의 방사선영향평가 코드와 별도로 검증계산을 수행할 수 있는 코드를 확보하여 사용하여야 한다. 지금까지는 한국원자력안전기술원의 전신인 한국원자력연구소 부설 원자력안전센터가 1989년에 개발한 코드인 GASDOS 및 LIQDOS [3]를 주로 사용하여 검증계산을 수행하였다. 그렇지만, 국내에서 사용중인 주민피폭선량평가 검증코드는 ICRP-9의 결정장기 개념에 근거하여 개발된 것으로서 방사선영향평가에 관한 세계적 추세인 유효선량개념 및 새로운 체내피폭선량 평가모델에 근거한 연령별 선량환산계수의

적용 등이 미반영되어 있는 상태이다.

본 연구에서는 방사선 환경영향평가에 관한 국제동향(유효선량개념의 도입, 새로운 체내피폭선량평가 모델에 근거한 연령별 선량환산계수 적용)(4)에 능동적으로 대처하고 방사선방호 신개념(ICRP-60 신권고, IAEA-BSS)의 국내제도 반영에 따른 후속조치의 일환으로 방사선 영향평가 검증기술을 확보하며 우리나라의 환경특성에 적합한 주민피폭선량 평가방법을 확립하기 위하여, 환경중으로 방출되는 방사성물질에 의한 시설 주변의 주민이 받는 주민피폭선량을 평가하는 규제 검증코드인 GASDOS 및 LIQDOS를 수정·보완하였다. 또한, 기존 코드 및 수정된 코드간의 계산 결과에 대한 비교검토를 수행하였고, 코드의 현장 적용성을 평가하기 위하여 월성 주변에서 실측한 공기중 및 솔잎중 삼중수소 농도와 예측값을 비교·검토하였다. 그 이외에, 코드 사용자의 편의성 및 이용성을 극대화하기 위하여 window 환경에서 작동되도록 GUI를 구축하였다.

## 2. 주민피폭선량 평가모델

### 피폭선량평가 모델

기존 코드와 주요 국가 및 국제기구의 피폭선량평가 모델에 대한 검토를 수행하였으며, 이를 통하여 국내의 규제기관에서 기사용중인 GASDOS 코드의 모델중 보완이 필요한 사항들을 도출하였다. 대부분의 피폭선량 평가모델은 미국 NRC의 규제지침인 1.109(1977년)의 방법론에 근거하고 있으며, 그 이후에 수행된 연구결과를 반영하여 일부 보완된 것이었다.

본 연구에서 도출된 주요 보완필요사항으로는 H-3에 의한 농작물내 농도평가 모델의 경우, GASDOS 에서는 대기중 H-3 농도의 절반이 식물체내에 골고루 분포되어 있다고 가정하였으나, 최근의 연구결과 및 평가모델의 비교결과에 따르면 대기내 수분중의 H-3 농도가 식물체내의 H-3 농도와 비슷한 수준이고[5], 실질적으로 가축이 섭취하는 것은 사료 및 물이므로, 이를 모두 고려하여 animal product내의 H-3 농도를 평가할 필요가 있다. 곡식에서의 방사성핵종 농도평가 모델의 경우, GASDOS 코드는 껍질을 까서 먹는 곡류(쌀, 보리 등)에 대하여 농작물 표면에 침적되어 남아있는 방사성물질이 껍질과 함께 전량이 제거되어 이에 의한 기여분을 고려하지 않았다. 그러나, 각종 실험결과 및 평가모델에 대한 비교결과, forage에 침적된 방사성물질의 일부는 가식부(edible part)로 전이된다는 것이 밝혀졌으므로 translocation factor를 고려할 필요가 있다[5, 6]. 육

류에서의 방사성핵종 농도평가 모델의 경우, GASDOS 코드는 가속이 섭취하는 곡물이 겹질을 제거한 것이므로 곡물의 방사성핵종 농도 계산시 forage 침적에 의한 기여분을 고려하지 않았으나 translocation factor의 필요성이 인정되므로 forage 침적에 의한 기여분을 고려하여야 한다. 방사성핵종의 농작물내 침적과 관련한 retention factor의 경우, GASDOS 코드는 입자상 핵종과 방사성요오드를 구분하여 농작물에 관계없이 일정한 값을 적용하였다. 그러나, 각종 실험결과 및 평가 모델에 대한 비교결과, 기적용된 값들이 과소평가된 것들도 있으므로 농작물별로 제시된 실험식에 근거한 retention factor를 고려할 필요가 있다[5].

LIQDOS 코드의 경우, 대부분의 피폭선량 평가모델은 미국 NRC의 규제지침인 1.109(1977년)의 방법론에 근거하고 있는 바, 평가모델에 대한 수정·보완의 필요성은 크지 않았으며, 다만 유효선량 개념, 연령군 및 대상장기의 세분화 그리고 최신 선량환산계수의 도입에 따른 코드의 수정·보완이 필요하다.

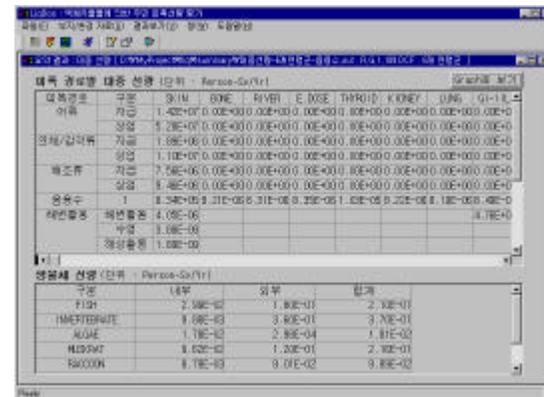
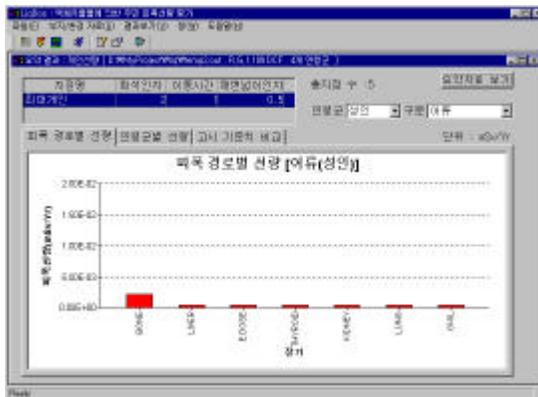
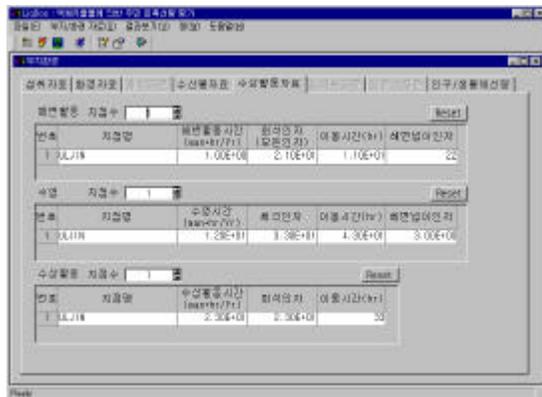
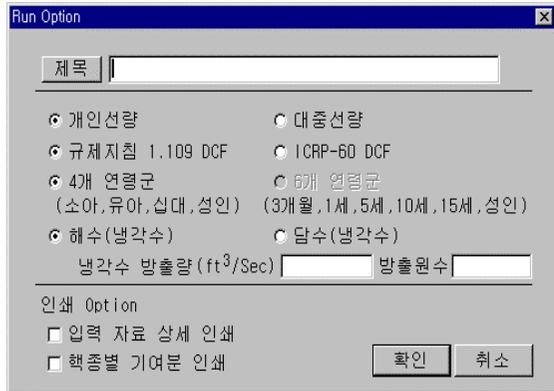
#### **환경특성자료 및 선량환산계수**

환경특성자료의 선정을 위하여 국내에서 발간된 주요 연구보고서, 건설 및 운영허가심사를 위해 사업자가 규제기관에 제출한 환경영향평가서 그리고 각종 통계자료를 입수하여 조사하였으며 이를 통하여 환경특성자료에 대한 현황파악을 수행하였다[7, 8]. 그 이외에 국내의 관련 데이터가 미비한 자료는 기존의 코드에 적용된 값을 조사하였으며, 입수된 자료들을 비교·분석하여 코드에 적합한 자료를 선정하였다. 기수집된 각종 자료에 근거하여 retention factor, translocation factor 등을 검토하였으며, 이를 바탕으로 환경특성자료를 선정하였다.

주요 국가(미국, 일본, 캐나다, 독일 등)의 법령 또는 기술기준에 적용된 선량환산계수를 입수하여 비교,검토한 결과, ICRP-30에 제시된 reference man의 값을 적용하거나 이를 일부 보완한 것을 적용하고 있었다[8]. 국제기관(ICRP, IAEA)이 권고한 최신의 선량환산계수에 대한 조사를 수행하였는데 ICRP는 ICRP-30 이후에 ICRP-66 모델 등에 근거한 최신의 선량환산계수(ICRP-67, ICRP-68, ICRP-69, ICRP-71, ICRP-72)를 권고하였으며, 1996년에 발표된 IAEA의 방사선방호 관련 기본안전요건에서도 ICRP의 최신 선량환산계수에 근거하여 권고하였다. 본 연구에서는 ICRP 및 IAEA에서 권고하는 최신의 연령군별 선량환산계수(ICRP-67, ICRP-68, ICRP-69, ICRP-71, ICRP-72)를 선정하였다.

IAEA가 권고하는 선량환산계수는 연령군을 6개의 그룹(3개월, 1세, 5세, 10세 15세, 성인)으로





2. LIQDOS GUI

구분한 것으로서 기존의 4개 연령군 구분(유아, 소아, 십대, 성인)에 비해 매우 상세하다. 아직까지도 환경영향평가에 많은 불확실성이 내재되어 있고 6개 연령군에 대한 선량평가에 제한(즉, 환경 특성자료가 6개 연령군별로 제시되지 않을 수도 있음)이 따를 수 있으므로, 본 연구에서는 6개 연령군 뿐만 아니라 현재와 같이 4개 연령군에 대한 주민피폭선량평가를 수행할 수 있도록 각각에 대한 데이터 파일을 작성하였다. 따라서, 사용자가 연령군의 개수를 선택하여 주민피폭선량을 평가할 수 있도록 하였으며, 기존의 GASDOS 코드에 포함된 미국 NRC의 규제지침 1.109의 선량환산계수를 이용한 계산도 가능하도록 하였다.

주민피폭선량이 계산되는 대상장기에 있어서도 기존에는 전신을 포함하여 총 8개 장기만이 고려되었으나, 유효선량을 포함하여 총 23개 장기를 고려하였다. 이를 통하여, 과기부고시 제98-12호에서 정하고 있는 ICRP-60 방사선방호체계에 근거한 조직가중계수를 모두 고려할 수 있도록 하였다.

### **GASDOS 및 LIQDOS 코드의 보완**

주민피폭선량 평가모델의 비교·검토시 도출된 보완필요사항을 적용하여 GASDOS 코드를 보완하였다. 수정·보완된 사항으로는 H-3에 의한 농산물내 농도평가 모델, 곡식에서의 방사성물질 농도평가 모델, 육류에서의 방사성물질 농도평가 모델, 방사성물질의 농작물내 침적과 관련한 retention factor 및 농작물의 가식부(edible part)로의 translocation factor 등 이다. LIQDOS 코드의 경우, 환경거동 모델의 보완은 없다.

주민 피폭선량 평가를 위한 대상 장기(organ)의 경우, 기존에는 전신선량을 포함하여 8개 장기를 고려하였으나 방사선방호 신개념(ICRP-60)의 조직가중계수 평가에 적용된 장기를 모두 포함하도록 23개로 확대하였다. 피폭선량 평가를 위한 대상 연령군(age group)의 경우, 기존에는 4개(유아, 소아, 십대, 성인)로 구분하였으나, IAEA/BSS-96에 제시된 선량환산인자를 반영하여 6개(3개월, 1세, 5세, 10세, 15세, 성인)으로 세분화하였으며, 이를 통해 일반인이 받는 피폭선량을 보다 상세하게 평가할 수 있도록 보완하였다. 또한, 코드 사용자의 선택에 의하여 기존 모델도 사용할 수 있도록 하였으며 GUI의 구축을 통하여 사용자에 의한 모델 선택의 편의성을 극대화하였다.

### **3. GASDOS/LIQDOS의 GUI 구축**

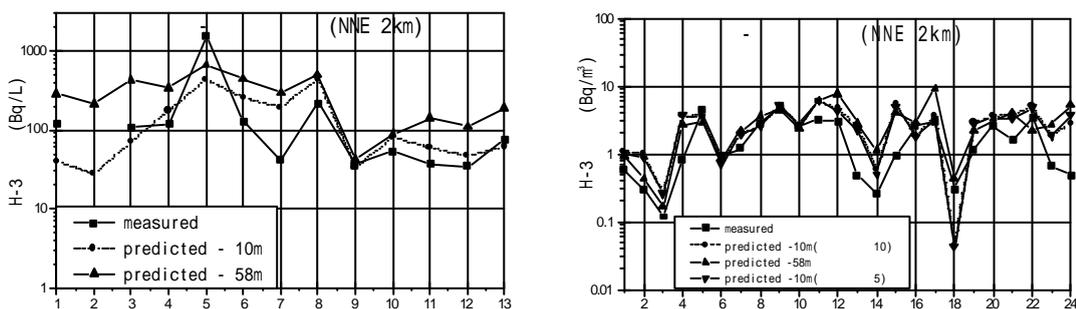
기체 및 액체 유출물에 의한 주민 피폭선량 평가는 Fortran으로 작성된 GASDOS 및 LIQDOS

에서 수행되며, 사용자의 편의성을 극대화하기 위하여 GUI를 Power Builder를 이용하여 구축하였다. GASDOS의 입력창은 그림 1에서 보는 바와 같이 Run Option 창, 대기확산인자 창(개인선량용, 집단선량용), 선원항 창, 부지환경 창(일반자료, 인구분포, 육류생산량, 농작물생산량, 섭취자료, 환경자료, 기타자료 등)으로 구성되며, 입력창을 작성한 이후에 코드실행 명령을 클릭하면 GASDOS Fortran 프로그램이 입력창에서 작성한 자료를 토대로 계산을 수행하고 그 결과를 요약표와 그래프로써 화면에 제시해 준다.

LIQDOS의 입력창은 그림 2에서 보는 바와 같이 Run Option 창, 선원항 창, 부지환경 창(섭취자료, 환경자료, 개인자료, 수산물자료, 수상활동자료, 농작물자료, 음료수자료, 인구/생물체선량 등)으로 구성되며, 입력창을 작성한 이후에 코드실행 명령을 클릭하면 LIQDOS Fortran 프로그램이 입력창에서 작성한 자료를 토대로 계산을 수행하고 그 결과를 요약표와 그래프로써 화면에 제시해 준다.

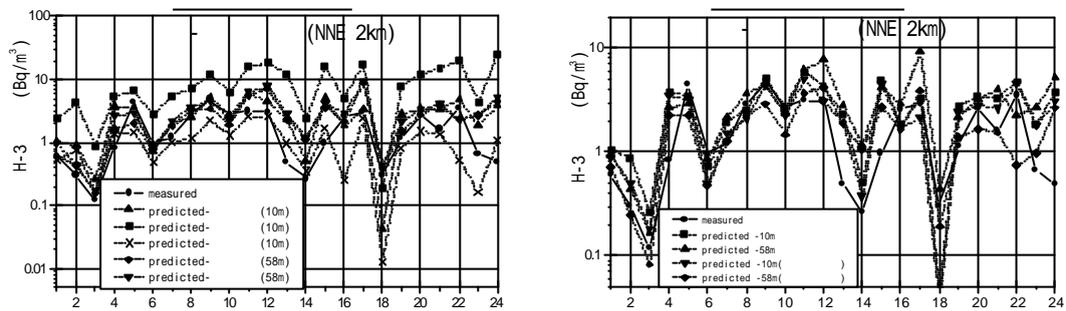
#### 4. 결과 및 논의

코드의 검증과 현장 적용성 검토를 위하여 월성원전 주변 삼중수소 실측치와 코드 예측치의 비교·검토를 수행하였다. 이를 위하여 '93, '96, '97년도에 걸쳐 한전과 KINS가 수행한 매 2주간 및 매 월간 공기중 삼중수소 실측값을 조사하였으며, '96, '97년도에 KINS가 수행한 솔잎중 삼중수소 실측값을 조사하였다. 그림 3은 월성원전 주변 삼중수소 실측값과 코드 예측치의 검토결과의 일부이며, 측정값의 불확실성, 지형의 복잡성, 해륙풍의 영향 등의 제한점에도 불구하고 규제검증에 필요한 정도의 보수성을 유지하면서도 삼중수소의 거동을 잘 모사함을 확인하였다.[9]



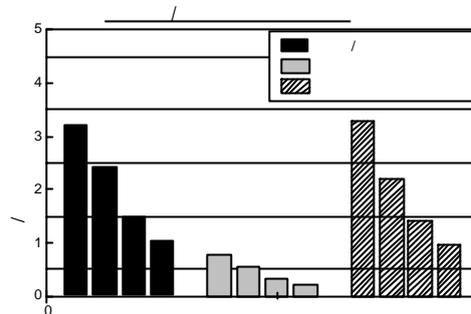
[ 그림 3. 월성원전 주변 삼중수소 실측치 및 예측치의 비교 ]

방사성물질의 환경중 방출모드(고공방출, 지표면 방출, 혼합방출), 풍속분류, 풍하거리, 지형 고려 유무 등에 따른 삼중수소 예측값의 변화를 분석하였고, 측정값과 비교함으로써, 동 코드를 규제실무에 적용하였을시의 최적 입력방안을 도출하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 민감도 분석결과 중 풍속분류에 따른 영향은 미미하였으나 지형에 따른 영향 및 방출모드(특히, 풍속 및 대기안정도 측정 높이)는 예측치에 미치는 영향이 크며, 지형의 고려와 58m 기상자료에 근거한 혼합방출 모드를 적용하는 입력방안을 도출하였다.



[ 그림 4. 지형 및 방출모드에 따른 민감도 분석결과 ]

규제실무에 적용되고 있는 기존코드와 개발중인 코드의 결과를 비교·검토하였으며, 이를 통하여 개발중인 코드를 규제실무에 적용할 경우의 규제영향을 사전에 파악하고자 하였다. GASDOS의 경우, 규제에 미치는 영향중 유효선량은 전반적으로 증가하나 일반적으로 limiting value가 장기선량이므로 규제에 미치는 영향은 크지 않았다(그림 5 참조). 장기선량은 선량환산인자의 변동에 따라 증감이 있었으며, 원전의 주요 결정장기인  $^{14}\text{C}$ 의 섭취에 의한 장기선량(Bone)은 감소(factor of 3) 하였다. 따라서,  $^{14}\text{C}$ 를 다량 방출하는 중수형 원전의 영향평가와 관련하여 추가적인 여유도를 확보할 수 있음을 확인하였다.



[ 그림 5. 규제에 미치는 영향평가 결과 ]

한국전력기술주식회사(KOPEC)는 ICRP-60 방사선방호 체계에 적합하도록 GUI 환경에서 작동되는 TEDII-60 주민피폭선량 평가코드를 개발하였으며, 규제검증 코드와의 검증을 위하여 KINS가 개발중인 코드와의 1차 비교작업을 수행한 바 있다. 불활성기체에 의한 immersion 및 호흡에 의한 피폭선량은 대체적으로 잘 일치하였으나, 지표면침적 및 섭취로 인한 영향은 입력변수 및 선량환산계수의 차이로 인하여 상당한 오차를 보였다. 동 작업은 코드개발 작업이 완료되지 않은 시점에서 수행된 것으로 1999년도 하반기에 2차 비교작업을 수행할 예정이다.

개발중인 코드에 반영한 사항들을 종합하여 주민피폭선량 평가지침(안)을 개발하고 있으며, 동 지침(안)의 최종목표는 규제 지침화 하는 것이다. 이를 통하여 국내에서 수행되고 있는 주민피폭선량 평가의 일관성을 유지할 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 ICRP-60 방사선방호 신개념의 국내제도 반영에 따른 후속조치의 일환으로 방사선 영향평가 기술을 확보하며 우리나라 국토의 환경특성에 적합한 주민피폭선량 평가방법을 확립하기 위하여, 환경중으로 방출되는 방사성물질에 의한 주민피폭선량 검증코드인 GASDOS 및 LIQDOS를 보완하였다. 코드의 현장 적용성을 평가하기 위하여 월성 주변에서 실측한 공기중 및 솔잎중 삼중수소 농도와 예측값을 비교하였고 규제실무에 적용하였을시의 최적 입력방안을 도출하였다. 또한, 기존 코드 및 수정된 코드간의 계산결과에 대한 비교를 수행하였고, 사용자의 편의

성을 극대화하기 위하여 GUI 구축작업을 수행하였다. 국내에서 수행되고 있는 주민피폭선량 평가의 일관성을 유지하기 위하여, 주민피폭선량 평가지침(안)을 개발하고 있다.

동 코드의 현장 적용성을 평가한 바에 따르면, 실측치의 불확실성, 지형의 복잡성, 해륙풍의 영향 등과 같은 제한점에도 불구하고, 규제검증에 필요한 정도의 보수성을 유지하면서도 실제 삼중수소의 환경중 거동을 잘 모사하는 것으로 나타났다. TEDII-60과의 1차 비교작업시 예측결과가 일치하지 않은 지표면침적 및 섭취로 인한 영향 평가 결과에 대한 비교작업을 재수행할 예정이다.

## 5. 참고 문헌

1. 원자력법, 시행령, 시행규칙, 관련 장관고시
2. 월성원전 주변 환경방사능조사보고서(1998년), 한국전력공사
3. 고리주변 환경종합평가 및 관련모델 개발, 한국에너지연구소, 1989
4. 원자력안전규제 기술개발 (방사선방호 신개념의 제도화를 위한 연구, 최종연도 보고서), 한국 원자력안전기술원, 1997
5. GENII 코드 매뉴얼, PNL, 1988
6. 섭취 및 호흡에 의한 방사선 내부피폭선량 평가 코드 개발, 한국원자력연구소, 1990
7. 환경영향평가서(울진3,4,5,6호기, 월성2,3,4호기, 영광5,6호기)
8. 방사선안전규제 기술개발(방사선 환경영향평가 규제기술개발), 한국원자력안전기술원, 1998
9. 장시영 등, "GASDOS의 수정 및 적용성 검토", 1998년도 추계 대한방사선방어학회 발표논문집, 1998.