Preliminary Study on the Internal Dosimetry Program for Carbon-14 at Korean CANDU Reactors

중수로원전에서 발생하는 ^{14}C에 대한 내부피폭 선량평가 프로그램에 관한 예비 조사

T.Y.Kong, H.G.Kim, G.Park, D.W.Kang, G.J.Lee+, S.K.Lee*, S.C.Park*

Korea Electric Power Research Institute, 103-16, Munji-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-38

+Chosun University, 375 Susuk-dong, Dong-gu, Gwangju, 501-75

*Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd, 167 Samseong-dong, Gangnam-gu, Seoul, 135-79

공태영,김희근,박규준,강덕원,이경진+,이상구*,박성철*

한국전력공사 전력연구원, 대전광역시 유성구 문지동 103-16

+조선대학교, 광주광역시 동구 서석동 375번지

*한국수력원자력주식회사, 서울특별시 강남구 삼성동 167번지

eagertae@kepri.re.kr

Abstract

More strict radioactive regulations are applied to Korean nuclear power plants (NPPs) since ICRP-60 recommendation for radiation protection and has been enforced since 2003. In particular, carbon-14 and tritium concentrations are significantly higher at CANDU reactors compared to PWR reactors and this increases the risk of internal radiation exposure to workers at CANDU NPPs. Thus, it is necessary to estimate the exact amount of internal radiation exposure to workers for radiological protection at CANDU reactors. In this paper, the current dosimetry method for carbon-14 is analyzed for the establishment of internal dosimetry for carbon-14 at domestic NPPs.

Key word : Carbon-14 Dosimetry, CANDU Reactor, Internal Radiation Exposure, Radioactive Carbon Dioxide ($^{14}CO_2$)

요 약

방사선방호 신개념(ICRP-60)이 국내에서 법제화되어 2003년부터 시행됨에 따라 원자력발전소에 대한 보다 엄격해진 방사선방호 기준이 적용되고 있다. 특히, 중수로 원자력발전소의 경우 ^{14}C와 삼중수소로 인한 방사선작업종사자에 대한 방사선 위해가 경수로 원자력발전소보다 상대적으로 크기 때문에 작업종사자의 내부피폭 선량을 정확하게 측정하고 평가하여 내부피폭을 예방하는 노력이 필요하다. 본 보고서에는 중수로 원자력발전소에서 발생된 ^{14}C의 체내 흡입으로 인한 방사선

작업종사자의 내부피폭 선량평가 방법을 정립하기 위해 예비적으로 ^{14}C로 인한 인체대사모델을 분석하였고 ^{14}C에 대한 내부피폭 선량평가 방법을 기술하였다.

중심단어 : ^{14}C 선량평가, 중수로원전, 내부피폭, 방사성 이산화탄소($^{14}CO_2$)

1. 서 론

국제방사선방호위원회(ICRP)에서 권고한 ICRP-60의 방사선방호 개념이 국내에서도 2003년 법제화되어 시행되고 있다. 이에 따라 원자력발전소에서 방사선 관리는 보다 엄격해진 방사선방호기준을 적용하고 있다. 원자력발전소에서 운영과정에서는 소량이나마 방사성물질이 발생되고 있고, 이로 인한 원전종사자의 방사선피폭도 불가피하게 발생된다. 따라서 방사성물질이나 방사선으로 인한 방사선 위해를 방지하기 위해서는 이를 보다 안전하게 관리하여야 하고 또한 원전종사자와 발전소 주변주민의 피폭을 감시하고 줄이데 많은 노력이 필요하다.

현재 국내에서는 4기의 중수로 원전이 운영 중에 있다. 특히, 중수로 원전의 경우 ^{14}C와 삼중수소로 인한 방사선 위해가 경수로 원전에 비해 상대적으로 크기 때문에 ^{14}C와 삼중수소로 인해 종사자에 미치는 내부피폭 선량을 정확하게 측정하고 평가할 필요가 있다.

본 논문에는 중수로 원자력발전소에서 발생된 ^{14}C의 체내 흡입으로 인한 원전종사자의 내부피폭 선량평가 방법을 정립하기 위해 ^{14}C에 대한 생성 메커니즘을 조사하고 특성을 조사하였다. 또한, 국외 원전에서 ^{14}C 내부피폭 사례와 인체대사모델을 분석하였다.

2. ^{14}C의 발생 및 특성

2.1 ^{14}C 생성 메커니즘

국내 중수로 원전의 최종안전성분석보고서(FSAR)에 의하면 연간 약 370Ci(월성 2, 3, 4호기)의 ^{14}C가 생성되는 것으로 예상하고 있다[1,2,3]. 표 1은 중수로 원자력발전소(CANDU)에서 ^{14}C가 발생되는 주요 반응을 보여주고 있다[4].

표 1. 중수로 원전에서 ^{14}C의 주요 생성 반응

Target nuclide	Natural abundance	Reaction	Thermal neutron cross section
^{17}O	0.037%	$^{17}O(n,\alpha)^{14}C$	0.235 barn
^{14}N	99.63%	$^{14}N(n, p)^{14}C$	1.820 barn
^{13}C	1.11%	$^{13}C(n,\gamma)^{14}C$	0.009 barn

2.2 ^{14}C의 물리 방사화학적 특성

^{14}C는 평균 방사선 방출에너지가 49KeV이며 최대 방출에너지가 156KeV인 순수 베타선 방출체로서 공기 중에서는 24cm의 비정을 가지나 체내 연조직에서는 0.28mm의 비정을 가진다. 이처럼 ^{14}C는 투과력이 약하기 때문에 외부피폭 보다 ^{14}C 핵종의 섭취 또는 인체 흡입으로 인한 내부피폭

에 대해 많은 주의를 필요로 하는 방사성핵종이다[4].

^{14}C는 물리적 반감기가 5,730년이며 약한 베타선과 반중성미자를 방출하며 안정한 ^{14}N으로 붕괴한다. 이때 발생되는 베타선에 의해 저에너지의 내부 제동방사선이 낮은 비율로 방출된다. ^{14}C의 붕괴도식은 다음과 같다.

$$^{14}_{6}C \rightarrow \beta^{-} + ^{14}_{7}N + \bar{\nu} \quad (1)$$

동식물에 흡수되는 대부분의 ^{14}C는 주로 $^{14}CO_2$의 형태로 흡입된다. 탄소는 유기조직에 쉽게 고착하는 성질이 있으며, 고착된 조직의 분해에 의해서만 환경으로 배출된다. 체내로 유입된 탄소는 대부분 CO_2나 요소의 형태로 제거되며 소량은 신체에 남아있게 된다. 또한, $^{14}CO_2$는 혈액 속에서 중탄산염(HCO_3^-)으로 변환되며 호흡을 통해 유입된 CO_2의 99% 이상은 약 4시간 이내에 체내에서 배출된다[4].

3. ^{14}C 방사능 측정 및 선량평가

3.1 $^{14}CO_2$ 방사능 측정 및 선량 평가

캐나다 OPG(Ontario Power Generation)의 Pickering 원전에서는 1985년에 $^{14}CO_2$를 흡입한 원전종사자중 지원자를 대상으로 소변시료 중에 존재하는 ^{14}C의 선량을 측정 및 평가하는 연구를 수행하였다. 흡입된 $^{14}CO_2$에 의해 내부피폭이 일어난 후 몇 주 동안 실험지원자의 소변과 호흡에서 배출되는 $^{14}CO_2$의 양을 감시하였으며 감시 결과, 흡입된 $^{14}CO_2$의 약 90%가 흡입 후 몇 시간 내에 체내에서 호흡을 통해 배출되었다. 나머지 $^{14}CO_2$는 호흡과 소변을 통해 감시기간 동안 배출되기 때문에 호흡과 소변시료 모두를 통해 ^{14}C의 선량평가를 수행하였다.

대부분의 ^{14}C 베타 입자들의 방출에너지(Emax ~156KeV)가 삼중수소의 최대 베타 방출에너지(Emax ~18.6KeV)보다 높기 때문에 액체섬광계수기(LSC: Liquid Scintillation Counter)를 사용하여 동일한 시료에 대해 에너지 차이를 이용하여 ^{14}C와 삼중수소의 농도를 구하고 있다.

최근에는 $^{14}CO_2$ 섭취로 인해 연간 피폭선량이 일정준위를 초과하는 경우 해당 종사자에 대해 추가 생체분석 등을 내부피폭 선량을 평가하고 있다. 일반적으로 삼중수소로 인한 피폭선량을 계측하기 위해서는 0.5분의 시료 측정이 이루어지지만, ^{14}C의 경우 0.5분의 시료 측정시간은 너무 짧아 ^{14}C의 낮은 방사능 준위에 대해 불확실성이 커질 수 있다. 따라서 정확한 ^{14}C 선량 측정을 위해서는 계측 에러(Counting Error)를 줄일 수 있는 10분 안에 반복적인 시료 측정이 필요하다[10].

$^{14}CO_2$ 섭취 이후 체내에서 $^{14}CO_2$의 배출율이 초기 몇 주 동안 급격하게 변화하기 때문에 섭취시기를 선형보간법(Linear Interpolation)을 사용하여 결정하는 것은 적합하지 않다. ICRP-54에서는 $^{14}CO_2$ 섭취는 소변시료 제출주기의 중간시점에서 발생한다는 가정을 세우고 있으나 이는 통계적인 편차를 일으킬 가능성이 있다. 따라서 소변시료 제출주기 동안 균일하게 $^{14}CO_2$가 종사자 체내로 섭취된다고 가정하여 평균선량(Most Probable Dose)을 계산하도록 권고하고 있다[10].

다른 내부피폭 선량평가 방법으로 종사자의 배출하는 공기 중에 포함된 방사성 이산화탄소를 분석하는 Bioassay Program을 적용하는 방법이 고려되었다. 그러나 프로그램 운영에 너무 많은 비용이 들며 적절한 시료를 모두 수집하고 구별하는데 많은 어려움이 있는 것으로 밝혀졌다.

3.2 불용성 ^{14}C 입자에 의한 방사능 측정 및 선량 평가

캐나다 Pickering 원전에서는 환형기체 계통에서 발생한 ^{14}C를 포함하는 입자에 대해 물리적 화학적으로 광범위한 분석을 실시하였다. 또한, 이러한 입자의 신체 배출경로를 밝혀내기 위해 ^{14}C 시료입자를 실험용 쥐의 폐에 주입하여 생물학적인 분석을 수행하였다. 이러한 분석결과, 폐에서 배출되는 ^{14}C를 포함하는 불용성의 입자들은 ICRP Class Y의 특성(방사성핵종이 폐에서부터 생물학적으로 제거되는 기간이 년[Y: Year] 단위임)을 보이고 있으며 체내에서 배출될 때 주로 대변을 통해 배출되고 소변을 통한 배출은 적다는 것이 밝혀졌다(ICRP 79)[12].

저 준위 배설물에 대한 ^{14}C 방사능 측정이 명확하지 않고, ^{14}C로 인한 폐의 내부피폭을 명확하게 규명하고자 Phoswich Counting을 사용하는 방법이 개발되었다[12]. 그러나 이 방법은 민감도가 낮아 많이 사용되는 방법은 아니라 할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 해외 원전 등에서 수행된 방사성 탄소의 흡입에 따른 방사능 측정과 내부피폭 선량평가 현황에 대해 조사하였다. 여기에 따르면 중수로원전에서 방사성탄소의 생성과 방출 량이 많지 않기 때문에 종사자의 방사선피폭에는 기여하는 기여도는 미미하다고 판단되었다. 그러나 방사선안전관리 측면에서 방사성탄소의 흡입 등에 의한 예상되는 방사선피폭을 고려할 때 추가적인 검토와 기술 개발을 필요로 한다고 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 월성원자력 2, 3, 4호기 최종안전성분석보고서, 한국전력공사, 개정 31, pp. 11.3-13 ~ 18, 2000.
2. 영광원자력 3,4호기 최종안전성분석보고서, 한국전력공사, pp. 11.3-13~18, 2000.
3. 울진원자력 3,4호기 최종안전성분석보고서, 한국전력공사, pp. 11.1-19~20, 1998.
4. 2002년도 H-3 및 C-14 기술교류회 결과보고서, 한국전력공사, TM.02.NE07.P2002.321, 2002.
5. 원전의 C-14 발생원 및 인체 대사모델 검토 보고서, 한국전력공사, TM.00NE21.P2001, 2001.
6. 캐나다 방사선방호 전문가 초청결과 보고서, 한국전력공사, TM.00NE21. P2001.641, 2001.
7. 삼중수소 및 C-14 선량평가 기술체계 확립 최종보고서, 한국전력공사, pp. 12 ~ 58, 2002.
8. Kim, H. G., Lee, H. S., and Ha, G. H. "An Analysis of Carbon-14 Metabolism for Internal Dosimetry at CANDU NPPs," Journal of KARP, Vol. 28. No. 3, pp. 207~214, 2003.
9. ICRP, Evaluation of Radiation Doses to Body Tissues from Internal Contamination Due to Occupational Exposure, New York : Pergamon Press; ICRP Publication 10, 1968.
10. Whillans, D. W., and Hayes, M. J. Dose Assessment Programme for Exposure to Carbon-14 Dioxide, Ontario Power Generation, 1995.
11. Whillans, D. W., and Johnson, J. R. Interpretation of Urinary Excretion Rate Data in the Assessment of Uptake of Carbon-14, IAEA-SM-276/50, 1985.
12. Maletskos, C. J. Radiation Protection at Nuclear Reactors, Medical Physics Publishing, pp. 185~212, 1995.