

A Sensitivity Study on Nuclide Release from the Near-field of a Pyroprocessed Waste Repository System: Part 2. A Deterministic Approach

파이로처리 폐기물 처분 시스템 근계 영역 내 핵종 유출 민감도: 제 2 부 결정론적 접근

Youn-Myoung Lee* and Jongtae Jeong

Korea Atomic Energy Research Institute, 111 Daedeok-daero 989, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

이연명*, 정종태

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received February 21, 2014 / Revised March 13, 2014 / Approved March 17, 2014)

A parametric sensitivity to the annual exposure dose rate to the farming exposure group has been deterministically carried out for three principal elements identified in the near-field of the pyroprocessed waste repository system as a series study of Part 1 of the coupled paper with the same title. Credit time for both metal and ceramic containers, annual nuclide release rate and the degree of loss of bentonite buffer around the container are selected and investigated deterministically for important nuclides. To this end the A-KRS has been assessed and then compared among each other with the normal, the worst, and the best case scenarios associated with their extreme values these elements could have. All the elements are shown to be sensitive to the results as was in Part 1. Methodology studied through this study and the results are expected to make a good feedback to the repository design.

Keywords: A-KRS, Pyroprocessed waste, Safety assessment, Deterministic sensitivity, GoldSim

당해 연구의 제 1 부 논문에서 확률론적으로 접근한 데 이어, 파이로처리 방사성 폐기물 처분장에 대하여 폐쇄 후 처분장의 성능에 영향을 줄 수 있는 근계 영역 내 세가지 주요 설계 관련 요소에 대하여 각 핵종별로 최종 피폭 선량에 주는 민감도를 결정론적인 방법을 통하여 조사해 보았다. 농축 피폭 집단에 방사선 피폭을 주는 주요한 핵종들이 처분장에서 유출된 후 처분 시스템 근계 영역 내 다양한 매질을 이동하는 것에 관련되어 이들 요소가 어느 정도의 영향을 주게 되는지 보기 위하여 제 1 부에서 처분 용기의 수명, 선원향으로서의 처분 용기에서의 연간 핵종 유출률, 그리고 처분장 주요 인공 방벽으로서의 완충재의 손실도 등의 변화를 확률론적 접근 방법으로 검토한 데 이어, 제 2 부의 이 연구를 통해서 통계적인 확률론적 민감도를 검토하는 대신 세가지 인자에 대하여 가장 나쁜 경우와 이상적인 조합을 구성한 후 이를 결정론적으로 평가하여 인지된 3개의 요소들이 제 1 부에서의 결과와 동일하게 처분장 설계에 매우 중요할 수 있다는 결과를 얻을 수 있었다.

중심단어: A-KRS, 파이로처리 폐기물, 안정성평가, 결정론적 민감도, 골드심

*Corresponding Author.

Youn-Myoung Lee, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: ymlee@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-2853

1. 서론

이 연구의 제 1 부에서는 인간 환경 내 농축 피폭 집단에 방사선 피폭을 주는 주요한 핵종들이 A-KRS[1] 처분장에서 유출된 후 다양한 처분 시스템 내 매질을 이동하는 것에 관련되어 피폭 선량에 어느 정도의 영향을 주는지 보기 위한 연구가 수행되었다[2]. 제 1 부의 연구를 통하여 근계 영역 내 주요한 인자로서 처분 용기의 수명, 즉 방벽으로서의 신뢰 시간(credit time), 선원향으로서의 처분 용기에서의 연간 핵종 유출률(annual nuclide release rate) 그리고 처분장 주요 인공 방벽으로서의 완충재(buffer)의 손실도(degree of loss) 등 이렇게 세 개를 인지하고 이들에 대한 영향과 민감도를 검토하기 위하여 처분장에 대한 확률론적 안전성 평가를 병행 수행하였다.

폐쇄 후 처분장 근계 영역 내 처분장의 성능에 영향을 줄 수 있는 이러한 세 가지 주요 설계 관련 요소에 대한 영향과 민감도를 검토해 본 결과, 완충재의 손실과 용기 신뢰시간도 거의 동일하게 상대적으로 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타나고 있는 것을 알 수 있었고, 금속 폐기물에서의 민감도만으로 볼 때, 이 두 인자보다는 다소 낮은 해도 용기에서의 핵종의 유출률도 여전히 영향이 큰 것으로 나타나는 결과를 얻을 수 있었다.

이어서 별도로 수행되는 이 제 2 부 연구의 목적은, 확률론적인 방법으로 고찰해 보는 대신, 이들 세 가지 인자에 대하여 가장 나쁜 경우와 가장 이상적인 조합을 구성하여 결정론적인 접근 방법으로 평가하기 위한 것이다. 이 연구를 통하여 이러한 결과를 정상적인 경우와 비교하는 방법을 통하

여, A-KRS 폐쇄 후 처분장 근계 영역 내 처분장의 성능에 영향을 줄 수 있는 세 가지 주요 설계 관련 요소에 대하여 핵종별로 최종 피폭 선량에 주는 민감도를 검토하여 보았다.

2. 모델링

제 2 부의 연구에서도 A-KRS 시스템 내 핵종의 거동과 다양한 매질 내 이동에 관한 모델링은 이전의 연구[3-8] 및 제 1 부에서 고려된 처분 시스템과 동일하게 고려하여 A-KRS 처분 시스템의 처분장 주변의 인공방벽, 즉 근계 영역에 논의로 국한시킨다.

처분된 파이로처리 폐기물에서 정상적으로 유출된 핵종의 근계 영역 내에서의 거동을 예측 하기 위한 모델을 기반으로 하여, 정상 시나리오(normal case scenario)를 참조 시나리오(reference scenario)로서 도출하였다. 그리고 3 개의 인자의 가장 나쁜 변화가 극단적으로 이루어지는 경우의 최악 시나리오(worst case scenario)와, 가장 이상적으로 변화하는 경우의 최선 시나리오(best case scenario) 등 2 개의 추가 시나리오를 상정하여 이들을 평가해 그 결과를 참조 시나리오의 경우에 대하여 상호 비교하게 된다. 제 1 부에서와 마찬가지로 상용 모사 프로그램 개발을 위한 GoldSim[9]을 이용하여 개발된 프로그램을 평가에 사용하였다.

선별된 3 개의 요소들의 최종 피폭 선량에 대한 민감도와 영향을 평가하기 위한 계산에 사용한 각종 입력 자료는 제 1 부에서 사용한 값을 그대로 사용하였다.

Fig. 1은 금속 폐기물 처분 개념과 이러한 평가를 위하여

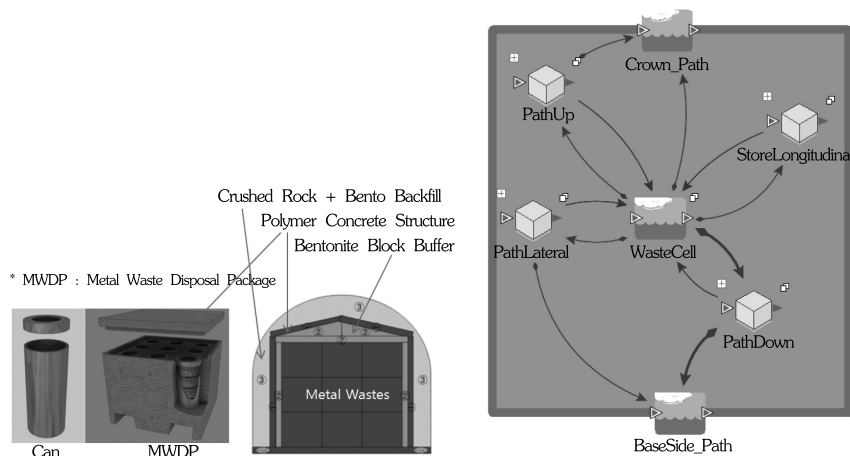


Fig. 1. Release pathways from the A-KRS metal waste repository.

GoldSim을 이용하여 구현한 금속 폐기물 처분장 모듈을 도시한 것이다. 그림에서 보면 금속 폐기물의 경우, WasteCell로 표시된 선원항에서 핵종의 유출이 연간 일정한 유출률로 일어나면 상부의 Crown_Path, 측면과 하단의 BaseSide_Path의 벤토나이트 완충재를 통하여 근계 영역 내 동굴 굴착에 따른 간섭 지대, 즉 EDZ (Excavated Disturbed Zone)로 그 이동이 진행된다. 이후 모암 내 암반 매질의 균열 네트워크 내 유동 지하수를 만나면 천면 방벽으로서의 모암 내 원계 영역으로 핵종의 전달이 이루어진다.

균열 암반 매질을 이동해 나간 핵종은 단층이나 규모가 큰 균열과 같이 지하수의 유동이 급격히, 그리고 대량적으로 이루어지는 경로로서의 MWCF(Major Water Conducting Feature or Gault) 지역을 필연적으로 만나게 되고, 이를 통하여 지하매질과 생태계의 경계(Geosphere-Biosphere Interface; GBI)로 간주되는 강의 바닥층을 통하여 생태계로 유출되고, 이 후로는 인간 생태 환경에서의 다양한 이동 및 피폭 경로를 통하여 인간에게 피폭을 주게 된다.

Fig. 2는 세라믹 폐기물의 처분 개념과 이를 GoldSim 모듈로 구현한 것을 도시한 것이다. 세라믹 폐기물 내의 핵종이 유출되면 수평 및 수직 방향으로 동시에 이뤄지는 확산으로 기술되어, 비교적 단순한 확산적 이동이 이루어지는 금속 폐기물의 경우와는 달리 다소 복잡한 양상이 된다. 그림에서 보는 대로 “Canister”로 표시된 선원항에서 핵종이 유출되면 “Buff”와 “Plug”로 표시된 완충재로 확산을 통하여 이동해 나간다. 이후 원계 영역으로의 핵종 전달의 통로가 되는 EDZ를 통하여 금속 폐기물 처분장의 경우와 동일하게 균열 암반 매질로 전달 이동된다. 이에 대한 상세 모델은 제 1 부의 연

구와 이전의 연구[3-8]에 기술된 대로다.

제 1 부의 연구와 마찬가지로 10^{-7} mSv/yr 이상의 선량을 피크를 가지는 8 개의 핵종 만을 선별하여 3 가지 시나리오에 대해 비교 평가를 수행하였다. 선별된 8 개의 핵종은 ^{14}C ($T_{0.5} = 5,701$ 년), ^{93}Zr (1.53×10^6 년), ^{126}Sn (2.23×10^5 년), ^{135}Cs (2.30×10^6 년), ^{229}Th (7,339 년), ^{231}Pa (3.28×10^4 년), ^{239}Pu (2.41×10^4 년), 그리고 ^{242}Pu (3.75×10^5 년) 이다. 이 때 ^{14}C 과 ^{126}Sn 은 금속폐기물에만, ^{229}Th 은 세라믹 폐기물에만 들어 있는 핵종이고, 그 외 나머지 ^{93}Zr , ^{135}Cs , ^{231}Pa , ^{239}Pu , 그리고 ^{242}Pu 는 금속과 세라믹 폐기물에 모두 들어 있는 핵종이다.

3. 시나리오 별 계산 결과

제 1 부에서는 금속폐기물의 용기에 대해서는 100년과 10,000년 사이에서, 그리고 세라믹폐기물의 용기에 대해서는 Table 1과 같이 1,000과 100,000년 사이에서 모두 균등분포(uniform distribution)를 따르는 것으로 가정하였고, 핵종 유출률도 정상적인 10^{-5} yr^{-1} 으로 간주하는 대신, 금속 폐기

Table 1. Waste package failure time distribution

Waste Type	Nominal, yr	Distribution, yr
Metal Waste	100	Uniform{ $100 \times (1, 100)$ }
Ceramic Waste	1,000	Uniform{ $1,000 \times (1, 100)$ }

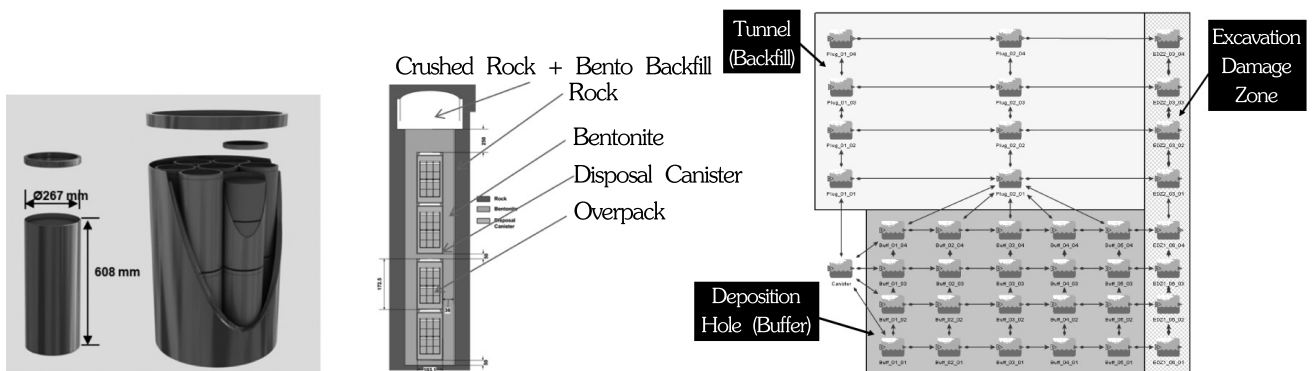


Fig. 2. Release pathways from the A-KRS ceramic waste repository.

물과 세라믹 폐기물에 대해 Table 2에서와 같이 통계적으로 10^{-6} yr^{-1} 와 10^{-4} yr^{-1} 사이에서 균등 분포를 가지고 변화하는 것으로 가정하였다. 또한 정상적인 완충재의 공극률인 0.41값 대신, 금속 폐기물과 세라믹 폐기물에 대해서 공히 Table 3에서와 같이 통계적으로 0과 1사이에서 균등 분포를 갖는 것으로 가정하여 확률론적 계산을 수행하였다.

그러나 제 2 부의 이 연구를 통해서는, 제 1 부에서 수행한 통계적인 민감도를 확률론적으로 검토하는 대신, 세가지 인자에 대하여 가장 나쁜 경우와 이상적인 조합을 Table 4와 같이 구성하여 이를 결정론적으로 평가한 후 그 결과를 정상적인 경우와 비교하여 보았다.

그 결과로서 얻어진 Fig. 3에서 보면 세 경우에 대하여 그 차이가 뚜렷이 나타나는 것을 알 수 있다. 최악 시나리오, 정상 시나리오, 그리고 최선 시나리오에 대해서 각각 $4.28 \times 10^{-4} \text{ mSv/yr}$, $1.54 \times 10^{-4} \text{ mSv/yr}$, 그리고 $5.37 \times 10^{-6} \text{ mSv/yr}$ 의 값을

Table 2. Fixed nuclide release rate distribution

Waste Type	Nominal, yr ⁻¹	Distribution, yr ⁻¹
Metal Waste	10^{-5}	Uniform{ $10^{-5} \times (0.1, 10)$ }
Ceramic Waste	10^{-5}	Uniform{ $10^{-5} \times (0.1, 10)$ }

Table 3. Backfill loss rate distribution

Waste Type	Nominal (by porosity)	Distribution (by porosity)
Metal Waste	0.41	Uniform{0,1}
Ceramic Waste	0.41	Uniform{0,1}

Table 4. Parameter values used for 3 scenarios

Parameter	Worst Case Scen.	Normal Case Scen.	Best Case Scen.
Buffer Porosity	0.99	0.41	0.01
Metal Container Credit, yr	100	100	10,000
Ceramic Container Credit, yr	1,000	1,000	100,000
Release Rate (Metal), yr ⁻¹	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
Release Rate (Ceramic), yr ⁻¹	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}

농축 피폭 집단에 대한 피크치로 보여 주었다. 이는 완충재의 방사선적 저지능과 폐기물 용기로 부터 핵종의 유출률, 그리고 용기의 파손까지 걸리는 시간 모두 이전의 확률론적 민감도 결과와 마찬가지로 결정론적인 평가 결과에서도 이들 요소의 변화가 최종 피폭 선량률에 상당한 영향을 주고 있다는 의미가 된다.

이러한 결과에 가장 영향을 주는 핵종으로 판단되는 ^{14}C , ^{126}Sn , 그리고 ^{242}Pu 이렇게 3 개의 핵종 각각에 대하여 농축 피폭 집단에 기여하는 선량률을 도시한 Fig. 4~6에서 이들 핵종의 기여에 의한 영향을 관찰할 수 있다.

그러나 이러한 결과는 제 1 부의 확률론적인 평가를 통해서도 알 수 있었듯이 대부분 피크치에 전적으로 기여하는

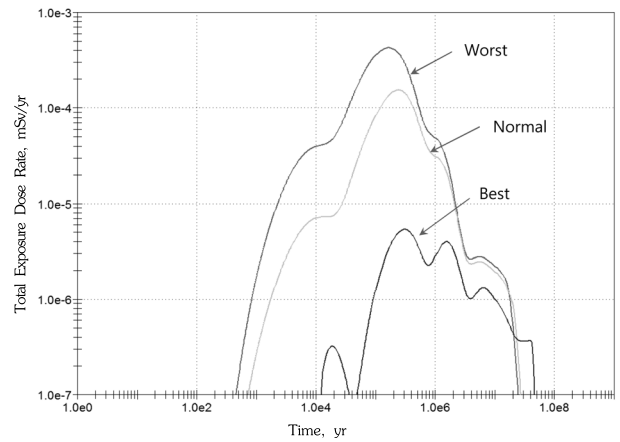


Fig. 3. Total dose rates for 3 scenario cases.

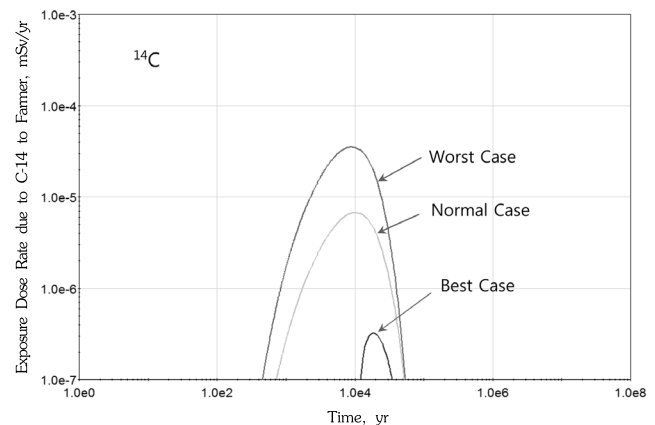


Fig. 4. Dose rates due to ^{14}C alone for 3 scenario cases.

금속폐기물 처분장 내 핵종에 의한 것임을 알 수 있다. 이를 확인하기 위하여 금속 폐기물을 제외하고 세라믹 폐기물 처분장에 의한 전적인 기여에 대해서 검토도 수행하여 보았다.

Table 4의 값에 대하여, 금속 폐기물 처분장에 대해서만 변화를 갖는 경우, 세라믹 폐기물 처분장에 대해서만 변화를 갖는 경우, 그리고 두 폐기물 처분장에 대해서 그 결과를 Fig. 7에 도시해 보았다. 그림에서 보면 두 처분장에 대하여 이들 파라미터 값이 모두 변하는 경우와 금속 폐기물 처분장에 대해서만 변화하는 경우가 사실상 거의 서로 일치하여 구분되지 않는 것을 알 수 있었지만, 세라믹 폐기물 처분장에 대해서는 이러한 변화가 여전히 그다지 인지되지 않는 것을 알 수 있다. 이런 현상은 주요한 3 개의 핵종에 대해 별도로 도시한

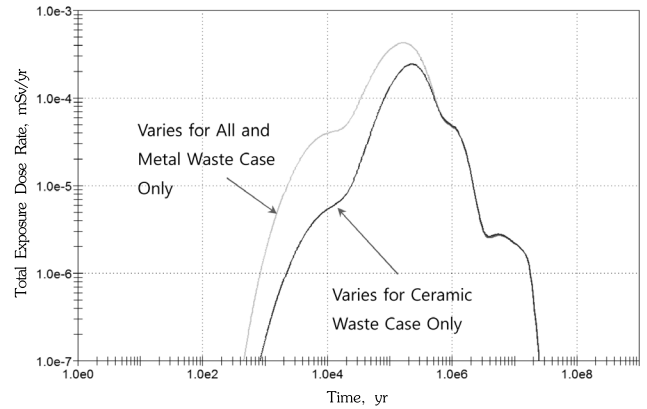


Fig. 7. Total dose rates for 3 scenario cases, each of which exclusively varies, compared to the case all vary.

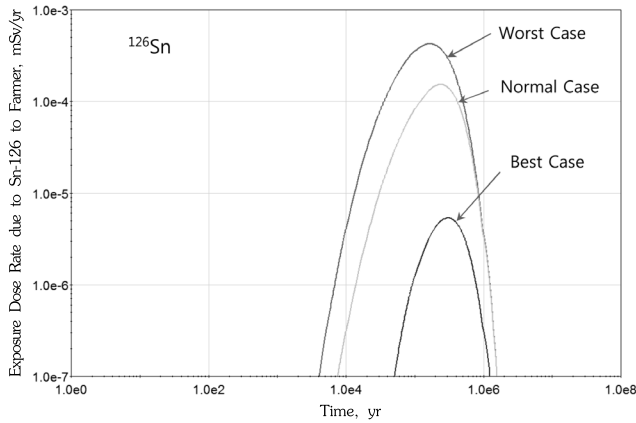


Fig. 5. Dose rates due to ^{126}Sn alone for 3 cases.

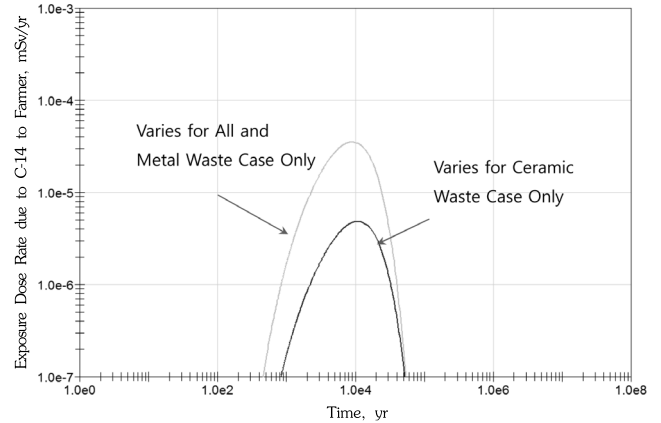


Fig. 8. Dose rates due to ^{14}C for 3 scenario cases, each of which exclusively varies, compared to the case all vary.

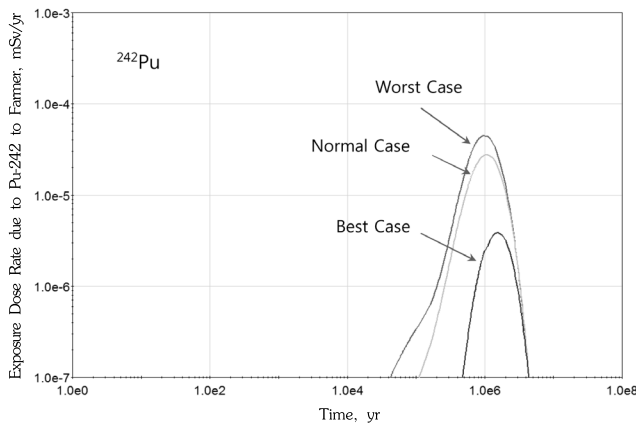


Fig. 6. Dose rates due to ^{242}Pu alone for 3 scenario cases.

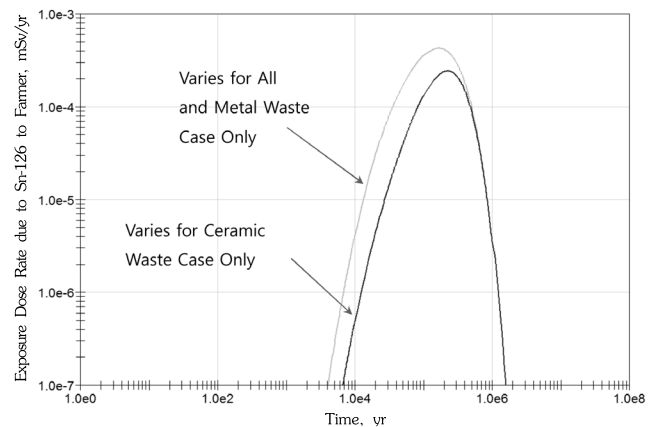


Fig. 9. Dose rates due to ^{126}Sn for 3 scenario cases, each of which exclusively varies, compared to the case all vary.

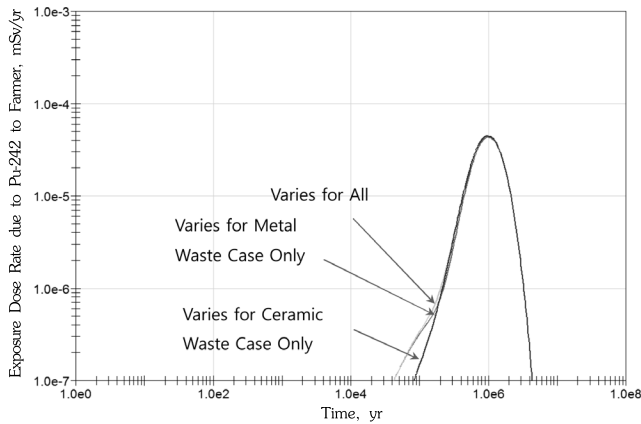


Fig. 10. Dose rates due to ²⁴²Pu for 3 scenario cases, each of which exclusively varies, compared to the case all vary.

Fig. 8~10에서도, 잘 나타나고 있는 것을 알 수 있어서, 실제로 피크치에 전적으로 기여하고 있는 것은 금속 폐기물 처분장 내의 핵종들인 것을 알 수 있다.

3. 결론

제 1 부의 확률론적인 접근 방법을 통한 연구에 이어, 제 2 부의 이 연구에서는 A-KRS에 대하여, 폐쇄 후 처분장 근계 영역 내 처분장의 성능에 영향을 줄 수 있는 세가지 주요 설계 관련 요소를 인지하고 핵종별로 최종 피폭 선량에 주는 민감도를 결정론적으로 접근해 보았다.

인간 환경 내 농축 피폭 집단에 방사선 피폭을 주는 주요한 핵종들이 처분장에서 유출되어 다양한 처분 시스템 내 매질을 이동하는 것에 관련되어 피폭 선량에 어느 정도의 영향을 주는지 보기 위하여, 근계 영역 내 주요한 인자로서 처분 용기의 수명, 즉 방벽으로서의 신뢰 시간, 선원향으로서의 처분 용기에서의 연간 핵종 유출률 그리고 처분장 주요 인공 방벽으로서의 완충재의 손실도 등 이들 세 요소에 대하여 이들의 물리적인 설계치의 변화에 대한 비교 결과를 제시하였다.

최종 피폭 선량률의 영향과 민감도를 확률론적인 방법으로 검토해 본 제 1 부의 연구 결과에 이어, 마찬가지로 제 2 부의 이 연구에서도 이들 세가지 인자에 대하여 가장 나쁜 경우와 가장 이상적인 조합으로 구성되었을 때에 대하여 결정론적인 접근 방법으로 평가되었을 때 나타나는 결과를 정상적인 경우와 함께 비교되었을 때에 그 차이가 뚜렷이 보이지

는 것을 알 수 있었다.

따라서 파이로폐기물 처분 시스템 근계 영역 내 이러한 요소에 관련된 설계 변수들에 대하여 폐기물 내에 들어 있는 핵종들 각각의 영향을 잘 연계하여 방사선적으로 보다 안전한 방벽이나 처분장 설계에 고려하여야 할 것으로 보인다. 제 1부에서 다뤄진 확률론적 접근 방법의 민감도 연구 결과와 함께 이 연구에서 다뤄진 연구 내용과 그 결과는 향후 처분장의 근계 영역 내 핵종의 유출 및 이동 관련하여 처분 시스템 설계에 모범적인 방법론을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (원자력연구개발사업, No. 2012M2A8A5025589)

REFERENCES

- [1] H.J. Choi and J.Y. Lee, "Preliminary Conceptual Design of a Geological Disposal System for High-level Wastes from the Pyroprocessing of PWR Spent Fuels", Nuclear Engineering and Design, 241, 3348 (2011).
- [2] Y.M. Lee and J.T. Jeong, "A Sensitivity Study on Nuclide Release from a Pyroprocessed Waste Repository System: Part 1. A Probabilistic Approach", J. Korean Radioact. Waste Soc., 12(1), pp. 19-35 (2014).
- [3] Y.M. Lee and J.T. Jeong, "A-KRS GoldSim Model Verification: A Comparison Study of Performance Assessment Model", J. Korean Radioact. Waste Soc., 11(2), pp. 103-114 (2013).
- [4] Y.M. Lee and J.T. Jeong, "An Evaluation of an Earthquake Scenario for a Pyroprocessed Waste Repository", Progress in Nuclear Energy, 66, pp. 133-145 (2013).
- [5] Y.M. Lee and J.T. Jeong, "A Deterministic Safety Assessment of a Pyro-processed Waste Repository", J. Korean Radioact. Waste Soc., 10(3), pp. 1-11

(2012).

- [6] Y.M. Lee and J.T. Jeong, "A Probabilistic Safety Assessment of a Pyro-processed Waste Repository", *J. Korean Radioact. Waste Soc.*, 10(4), pp. 263-273 (2012).
- [7] Y.M. Lee and J.T. Jeong, "Evaluation of nuclide release scenarios for a hypothetical LILW repository", *Progress in Nuclear Energy*, 53, pp. 760-774 (2011).
- [8] Y.M. Lee and Y.S. Hwang, "A GoldSim Model for the Safety Assessment of an HLW Repository", *Progress in Nuclear Energy*, 51, 746 (2009).
- [9] GoldSim Contaminant Transport Module, User's Guide, Version 5, GoldSim Technology Group, Seattle, USA (2006).