

Review on Assessment Methodology for Human Intrusion Into a Repository for Radioactive Waste

방사성폐기물 처분장 인간침입 평가 방법론에 관한 고찰

Dong-Keun Cho*, Jung-Woo Kim, Jong-Tae Jeong, and Min-Hoon Baik

Korea Atomic Energy Research Institute, 111 Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

조동건*, 김정우, 정종태, 백민훈

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received March 29, 2016 / Revised June 17, 2016 / Approved July 4, 2016)

An approach to assess inadvertent human intrusion into radwaste repository was proposed with the assumption that the intrusion occurs after a loss of knowledge of the hazardous nature of the disposal facility. The essential boundary conditions were derived on the basis of international recommendations, followed by an overall approach to deal with inadvertent human intrusion. The interrelation between societal factors, human intrusion scenarios, and protective measures is described to provide a concrete explanation of the approach, including the detailed procedures to set up the human intrusion scenario. The procedure for deriving protective measures is also explained with four steps, including how to derive a safety framework, general measures, potential measures, and eventual protective measures on the basis of stylized scenarios. It is expected that the approach proposed in this study will be used effectively to reduce the potential for and/or the consequences of human intrusion during the entire process of realizing a disposal facility.

Keywords: Radioactive waste, Disposal facility, Human intrusion, Protective measure

*Corresponding Author.

Dong-Keun Cho, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: dkcho@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-4899

ORCID

Dong-Keun Cho <http://orcid.org/0000-0003-4152-8605>

Jong-Tae Jeong <http://orcid.org/0000-0001-7802-9370>

Jung-Woo Kim <http://orcid.org/0000-0001-6896-471X>

Min-Hoon Baik <http://orcid.org/0000-0003-0104-9183>

본 연구에서는 방사성폐기물 처분장이 건설·운영되고, 폐쇄 후 제도적 관리기간이 끝나게 되어 그 곳에 처분장이 존재한다는 사실과 위해(hazard)의 정도가 잊혀지면서 무의식적인(inadvertent) 처분장 인간침입이 일어날 경우 이를 어떻게 평가할 것인지에 대해 기술하였다. 처분장 인간침입을 평가하기 위한 전제조건을 국내 또는 국제적으로 권고한 사항에 근거하여 설정하고 처분장 인간침입 평가방법론에 대해 기술하였다. 처분장 인간침입 평가 방법론에서는 사회적으로, 인간침입 시나리오, 방지대책 도출시 상호 관계에 대해 언급하였으며, 시나리오 도출절차에 대해서도 언급하였다. 인간침입 방지대책을 도출하기 위한 절차를 네 단계로 구분하여, 기본 정보를 도출하는 방법, 일반방지대책을 도출하는 방법, 후보방지대책을 도출하는 방법, 정형화된 시나리오를 고려하여 최종적으로 인간침입 방지대책을 도출하는 방법 등에 대해 체계적으로 기술하였다. 본 연구에서 도출된 인간침입 평가 방법론은 향후 인간침입의 가능성을 감소시키고 인간침입 발생 시 위해를 줄이기 위한 방지대책 마련 시 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

중심단어: 방사성폐기물, 처분시설, 인간침입, 방지대책

1. 서론

방사성폐기물 처분시설이 건설·운영되고, 폐쇄 후 제도적 관리기간이 끝나게 되면 시간이 흐르면서 그 위치에 방사성폐기물이 처분되었다는 사실은 점점 잊히게 된다. 이는 결국 처분된 폐기물에 인간이 무의식적으로 접근할 수 있는 가능성을 증가시키게 되므로 방사성폐기물의 안전한 관리를 위해서는 부지선정, 처분장 개념수립·설계·건설·운영·폐쇄의 모든 단계에서 인간침입이 고려되어야 한다. 그런데, 처분장 인간침입은 먼 미래에 발생 가능한 것으로서 미래의 생활습관 및 미래의 기술을 예측하기가 어렵고 언제부터 인간침입이 가능할지 또한 예측하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 지금까지 국제기구에서 권고한 사항 및 국제원자력기구 주관으로 진행된 HIDRA(Human Intrusion in the context of Disposal of RadioActive Waste) 프로젝트에서 논의된 내용을 바탕으로 인간침입에 관한 전제조건을 설정하고 인간침입 방지대책을 도출하기 위한 방법론에 대해 기술하고자 한다.

2. 처분장 인간침입 전제조건

불확실성이 큰 미래 행위로 인한 결과를 평가하기 위해서는 어떤 관점에서 처분장 인간침입을 평가할 것인지, 어디까지를 처분장 인간침입으로 볼 것인지, 인간침입이 언제, 어떻게 발생할 것인지, 미래세대의 생활습관은 어떻게

고려할 것인지 등 여러 가지에 대한 전제조건이 필요하다.

2.1 설계 제한치 vs. 최적화

국제원자력기구의 SSR-5[1]에서는 인간침입과 관련하여, 처분장 인근에 사는 사람에 대한 연간선량이 1 mSv 이하로 평가되면, 인간침입 활동을 줄이기 위한 노력은 수반되지 않아도 되며, 인간침입으로 인하여 처분장 인근주민에 대한 연간선량이 20 mSv 이상으로 평가되면, 다른 처분개념을 고려하여야 한다고 언급하고 있다. 또한, 이로 인한 연간선량이 1~20 mSv 사이의 값에 위치하면, 처분시설의 최적화 작업을 통해 인간침입 가능성을 줄이거나, 또는 위해의 결과를 줄이기 위한 노력을 기울여야 한다고 언급하고 있다. 이를 기반으로 볼 때, 처분장에서의 인간침입을 평가하는 목적은 처분시설에 위해를 가하는 시나리오의 발생 가능성을 줄이고 처분시설의 견고성(robustness)을 최적화하는데 목적이 있는 것이지, 선량제한치(dose limit)를 만족하는지를 판단하기 위함이 아니라 할 수 있다. 다시 말해, 처분장 인간침입을 고려하는 목적은 처분시스템을 최적화하기 위함이 인간침입 관점에서 설계제한치를 만족하는 설계안을 도출하기 위함이 아니라는 것이다.

2.2 처분시스템에서의 인간침입 평가 범위

방사성폐기물처분장 바로 위 또는 인근에서 인간의 활동이

이루어질 때 어떤 것은 인간침입 대상으로 고려하고 어떤 것은 고려하지 않을 것인지에 대해 정의할 필요성이 있다. 이에 관해 SSR-5는 처분시스템에 직접적인 교란을 일으켜 건전성에 영향을 주고 결과적으로 방사선적 위해를 야기하는 행위를 인간침입으로 규정하고 있다. 또한 SSG-23[2]은 인간침입을 처분시설의 기능에 직접적으로 나쁜 영향(disturbance)을 주는 인간의 활동에만 국한한다. 따라서 폐기물, 공학적 방벽 및 오염된 근계영역(contaminated near field) 이외의 영역을 침범하는 경우에 대한 인간의 활동은 인간침입 고려 대상에서 제외하는 것이 타당하다.

2.3 인간침입 시나리오

미래에 발생할 인간의 행위를 다루는 인간침입 시나리오를 어느 정도까지 상세히 고려할 지에 대해 숙고할 필요성이 있다. 그런데, 미래의 인간행위는 기본적으로 불확실성이 크기 때문에 아주 상세한 인간침입 시나리오는 정당화되기 어려운 특성을 갖고 있다. 따라서 SSG-23에서는 정형화된 시나리오(stylized scenario)를 기반으로 인간침입을 평가하고, 인간침입 시나리오는 제한치를 만족하는지를 판단하기 위함이 아니라 인간의 행위가 처분장에 어떤 효과를 일으키는지를 설명하기 위한 목적으로 수립되어야 한다고 언급하고 있다. ICRP 81[3] 또한 인간침입에 대한 확률 평가의 어려움을 토로하고 있지만 발생가능성에 대해서는 배제할 수 없다고 언급하고 있다. 따라서 ICRP 81에서도 미래에 발생할 인간의 행위에 대해 처분장이 기능을 복원·유지할 지를 평가하기 위해 정형화된 시나리오를 이용할 것을 권고하고 있다. 따라서 인간침입 평가를 위해 상세 인간침입 시나리오를 수립하기 보다는 정형화된 몇 개의 인간침입 시나리오를 기반으로 평가하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

2.4 의도적인 vs. 무의식적인 인간침입

OECD/NEA에서는 방사성폐기물을 발생시킨 세대가 이를 안전하게 관리할 책임을 지며, 미래세대가 방사성폐기물로 인한 위해를 알고 행한 행위에 대해서는 현 세대가 이를 책임지지 않아도 된다고 언급하고 있다[4]. 따라서 의도적인 인간침입은 시나리오에서 고려할 필요가 없으며, 만일 의도 없는, 즉 무의식적인 인간침입이 처분장에 일어났더라도

위해함을 인지한 후에도 지속된 행위에 대해서는 고려하지 않는 것이 타당하다. 국제원자력기구의 SSG-23 및 국내의 원자력안전위원회 고시 제2015-021호[5]에서도 처분시설이 존재함을 알고 행한 고의적인 행위는 인간침입에서 제외되며, 따라서 처분시설이 존재함을 모르고 행한 인간의 활동만을 '처분장 인간침입'으로 간주하는 것이 타당하다.

2.5 인간침입 시기

처분장 인간침입을 평가하기 위해서는 언제 인간침입이 발생할 지에 대한 경계조건이 필요하다. 앞서 언급한 바와 같이 무의식적인 인간침입만을 고려하는 것이 타당하므로 천층처분시설에 대해서는 제도적 관리기간이 끝나자마자 일어남을 가정하는 것이 타당할 것으로 판단된다[6]. 처분장은 대중의 관심도가 높은 사안이므로 제도적 관리기간이 끝나자마자 인간침입이 발생할 가능성은 희박하므로 이렇게 가정하는 것은 매우 보수적인 가정이며 이는 곧 대중의 신뢰도 증진과 직결되기 때문이다. 만약, 제도적 관리기간 이후 인간침입이 일어남을 가정한다면, 이해당사자가 납득할 만한 타당한 근거를 제시하여야 할 것이다. 심층시설에 대해서는 피동적으로 충분히 안전하게 설계되어야 하므로 처분장에 제도적 관리기간과 같은 능동적 통제기간은 존재하지 않을 것이다. 이러한 경우에는 피동적 통제가 존재하는 한 인간침입은 존재하지 않을 것이며 피동적 통제는 결국 지식의 보존과 직결되므로 지식의 보존기간이 끝나자마자 인간침입이 발생하는 것으로 가정하는 것이 타당해 보인다[7, 8]. 여기서, 지식 보존의 기간은 과거 사례, 정보보존을 위한 대책 등을 고려하여 대중이 수용할 수 있도록 신중하게 결정하여야 할 것이다.

2.6 미래 생활습관

미래에 어떤 기술을 보유하고 어떤 패턴으로 삶을 영위할 지는 시나리오 수립 관점에서 중요하다. 현 사회에 존재하는 기술보다 미래사회에 존재할 기술이 더 진보할 것이라는 것은 과거의 사례를 통해 예측할 수 있다. 즉, 현재보다 미래에 방사선을 탐지해내는 능력이 더 진보할 수 있다. 그러나 경제위기, 전염병 등이 발생하면 기술이 단절되어 미래사회에는 방사선 탐지 능력이 존재하지 않을 수도 있다. 또한, 사막의 경우에 현재까지는 자발적인 인구증가가 일어나지

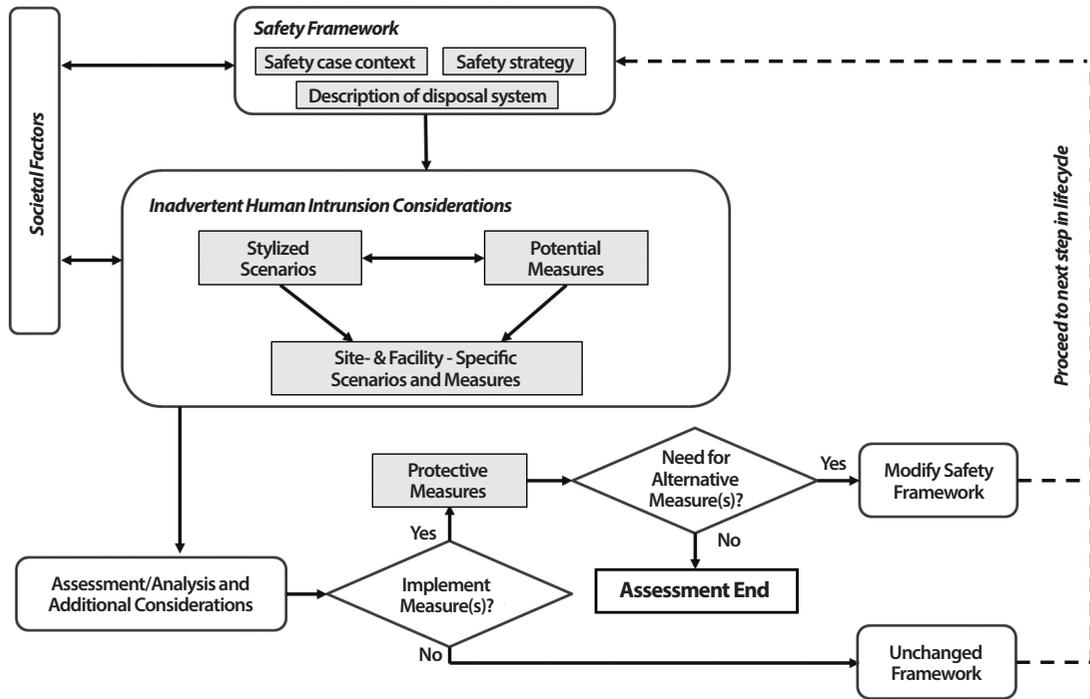


Fig. 1. Overall Approach for Assessment of Human Intrusion.

않지만 미래에도 반드시 일어나지 않을 것이라는 보장이 없다. 즉 미래사회를 예측하는 것은 많은 불확실성을 내포하게 된다. 따라서 가정에 근거한 시나리오 수립을 배제하기 위해서는 미래사회의 기술, 식생활 및 거주습관은 현재사회의 기술 및 생활습관과 동일하다고 전제하는 것이 타당하다. OECD/NEA에서 미래사회의 생활패턴은 현재사회의 생활패턴과 같다는 전제하에 인간침입 시나리오를 개발할 것을 권고[4]하고 있는 것은 이를 뒷받침하고 있다.

3. 인간침입 평가 방법론

본 절에서는 처분시스템의 최적화 관점에서 사회적요인, 인간침입 시나리오를 고려하여 어떻게 인간침입 방지대책을 도출할 것인지에 대해 논하고자 한다.

3.1 인간침입 평가 방법론

처분장 인간침입을 평가하는 궁극적인 목적은 인간침입

방지대책을 도출하는 것이며, Fig. 1에서 보는 바와 같이, 처분 안전성과 관련한 기본체계(safety framework)를 도출하는 것에서부터 시작하며, 이 과정에서는 주어진 처분시설에 대해 인간침입에 관하여 고려해야할 기본적인 사항을 규명하게 된다. 다음으로 인간침입에 관한 시나리오(human intrusion scenario)를 도출하고 평가에 적용할 후보방지대책을 규명하게 되는데, 이 과정에서는 주어진 시설에 어떤 시나리오와 어떤 방지대책을 적용할 것인지를 결정하게 된다. 이때 이 시나리오 및 후보방지대책 결정시 미래사회의 기술, 생활습관, 제도적 관리기간 등과 같은 사회적 요인(societal factor)이 고려되며, 이러한 과정을 통해 시나리오(site- and facility-specific scenario) 및 방지대책(site- and facility-specific potential measure)이 규명되면 이를 토대로 평가(assessment)를 수행하고, 이 방지대책이 적합한지의 유무를 최종적으로 판단하게 된다. 여기서 평가는 반드시 정량적으로 수행되는 것은 아니며, 천층처분의 경우에는 일반적으로 정량적으로 수행되나 심층처분의 경우에는 정량적인 평가가 어려우므로 주로 정성적으로 수행될 가능성이 크다. 여기서 중요한 것은 도출된 인간침입 방지대책(protective measure)은

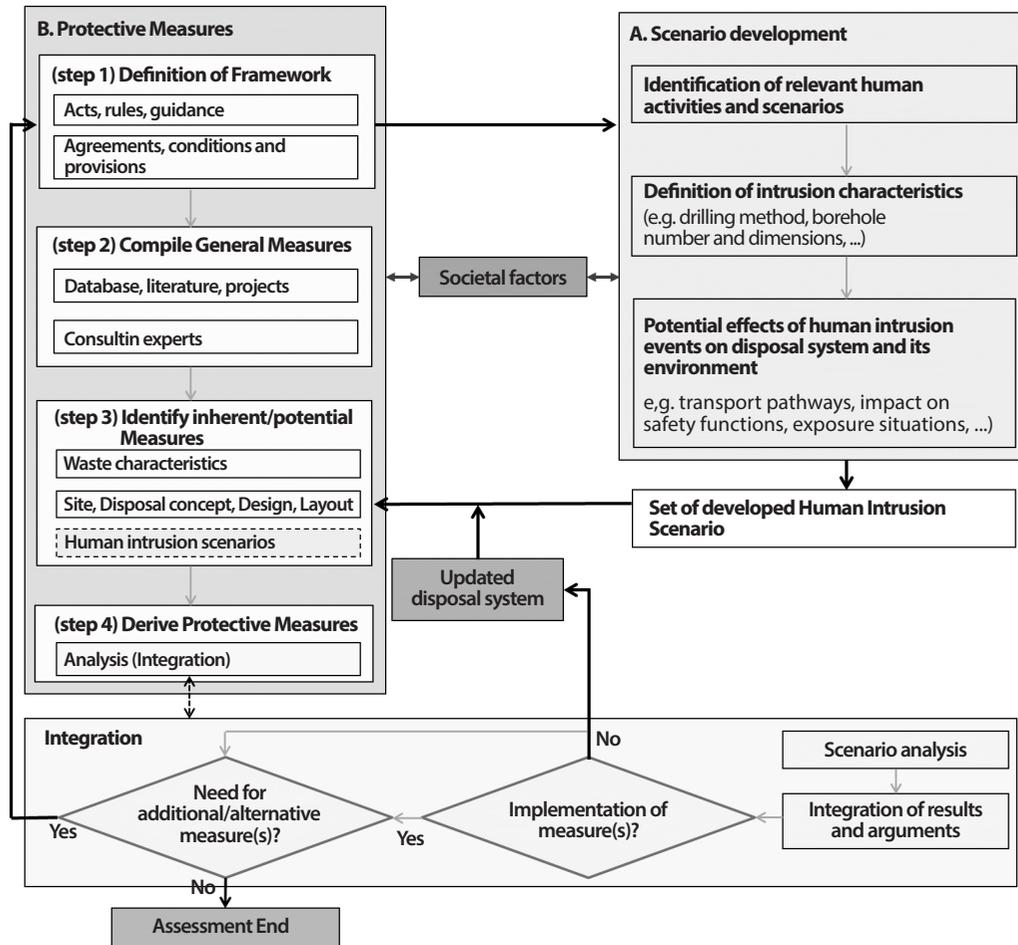


Fig. 2. Detailed Procedure to Derive Protective Measures.

인간침입의 방지 관점에서 아무리 효율적일지라도 운영 및 폐쇄후의 처분안전성에 부정적인 영향을 준다면 인간침입 방지대책으로 채택될 수 없다는 것이다.

3.2 사회적 요인, 시나리오, 방지대책과의 관계

인간침입에 대한 평가는 많은 불확실성을 내포하므로 이에 대한 타당성을 확보하기 위해서는 무엇보다도 이해당사자와의 소통이 중요하다. 앞서 인간침입을 평가하기 위한 타당한 전제조건에 대해 언급하였다. 그러나 이러한 것들은 과학적인 근거에서 도출되기 보다는 논리적 타당성에 의해 도출된 것이므로 이러한 것들이 타당성을 갖기 위해서는 Fig. 1을 좀 더 세분화한 Fig. 2와 같이 시나리오 수립 및

방지대책 도출시 이해당사자와 의견을 교환해야 한다. 즉, 정형화된 시나리오(stylized scenario) 도출시 미래 생활습관을 모르는데서 오는 불확실성을 줄이기 위해서 미래세대의 생활습관은 현세대와 동일하다고 가정하였다는 것은 이에 해당한다. 또한 심층처분장의 경우 인간침입 시기를 지식이 잇히는 시점으로 가정하였는데, 지식이 단절될 시점을 어떠한 근거에서 도출하였으며, 지금은 이와 같은 가정위에 평가를 하지만 지식의 보존기간을 증가시킬수록 처분장 인간침입을 줄어 들 것이 분명하므로 지식보존을 위해 어떠한 노력을 해야 할 지를 대중들과 공유하여야 한다. 또한 시나리오 수립과정에서 고려된 현재의 기술이 적절한지도 이해당사자와 공유해야 하며, 만일 이해당사자중에 인간침입과 관련한 시추 기술 전문가가 있다면 이들의 의견을 반영하여 시나리오를

보완해야 한다. 처분시설 설계과정에서도 인간침입 방지대책을 어떻게 반영하였는지를 지속적으로 대중과 커뮤니케이션해야 하며, 특히 인간침입은 선량제한치를 만족하는 설계안을 찾는 것이 아니라 최적화 관점에서 처분시스템을 인간침입에 더 견고하도록 만드는 것이 목적임을 지속적으로 이해시켜야 한다.

3.3 인간침입 시나리오

3.3.1 시나리오 개발 절차

정형화된 시나리오(stylized scenario)의 개발 목적은 처분장 부지에 특성화된 인간침입 시나리오(site-specific human intrusion scenario)를 도출하기 위함이다. Fig. 2의 A 부분은 인간침입 시나리오를 도출하기 위한 절차를 나타내고 있다. Fig. 2에서 설명한 바와 같이, 인간침입 시나리오는 인간침입과 관련한 규제요건 등을 포함하여 안전과 관련한 항목(safety context)을 기반으로 한다. 즉, 시나리오 수립에 기초가 되는 법적 규제요건, 안전성 확보전략(safety strategy), 처분시스템의 기본 특성 등의 입력자료가 확보되면, 첫 번째로 미래의 처분장에 발생할 수 있는 인간의 활동을 규명하게 된다. 이 단계에서는 주로 인간침입 사건과 시나리오를 선별(screening)하는 작업이 진행된다. 두 번째 단계에서는 구체적인 시나리오를 도출하기 위해 시추방법, 사용장비 등과 같은 인간침입과 관련한 구체적 기술적 사항을 결정하게 된다. 이 단계에서는 인간의 활동에 의해 인간침입이 일어나는 과정에서 처분시스템이 어떻게 손상되고, 방사성폐기물은 어떤 경로로 생태계에 위해를 가하게 되는지를 구체적으로 결정하게 된다. 이러한 과정을 통해 결정된 시나리오는 인간침입 방지대책 도출을 위한 인간침입 시나리오로 활용되게 된다.

앞서도 설명한 바와 같이, 인간침입 시나리오를 결정하는 과정에서 제도적 관리기간과 인간침입 시나리오의 정당성을 확보하기 위한 대중과의 커뮤니케이션 같은 사회적 요인을 고려하게 된다. 이때 시나리오의 불확실성이 크므로 보수적으로 결정되었음을 이해당사자에게 설명하는 것이 무엇보다 중요하며, 이해당사자 중에 인간침입의 활동과 관련한 전문가가 있다면 이들의 의견을 인간침입 시나리오 도출시 반영하는 것이 바람직하다. 특히 인간침입은 처분장이 존재한다는 사실이 잊혀진 먼 미래에 발생하므로

제도적 관리기간 또는 지식의 보존기간 등과 같은 인간침입 시기와 관련된 항목을 이해당사자와 논의하는 것이 중요하다.

3.3.2 시나리오의 예

앞서와 같은 방법을 통해 도출된 심층처분시설 시추시나리오의 예를 들면 다음과 같다. 이 시나리오는 심지층에 있는 처분장을 관통하여 시추공이 설치되는 경우이다. 시추작업으로 인해 방사성물질을 포함하고 있는 시추코어가 지표면으로 나오게 되고 방사성핵종은 대수층을 오염시킨다. 일차적인 피폭자는 시추공 작업자이며, 작업과 관련된 작업자 및 연구 관련자가 추가적인 피폭자가 될 수 있다. 일반인 측면에서 일차적인 피폭자는 대수층을 따라 처분장에서 떨어진 지역에 사는 농부가 될 수 있다. 이러한 심부시추는 일반적으로 권위기관의 허가를 받아서 진행하는 경우가 많으므로 처분장에 대한 기록이 보존되는 한 이 시나리오가 발생할 가능성은 적다.

방사성 물질 피폭의 일차 이동경로는 시추 시 채취된 시추코아 및 작업 중 먼지의 흡입이다. 방사성물질에 오염된 것을 섭취하는 것도 피폭경로가 될 수 있다. 거주자에 대한 2차 피폭 경로는 처분장으로부터 오염된 물을 식수원으로 사용하는 경우이다. 이 오염된 물을 이용하여 경작한 농작물을 섭취한 경우는 부차적인 오염경로가 될 수 있다. 방사성 핵종은 대수층을 따라 이동하면서 다른 식수원을 오염시킬 수 있으나, 이 경우 피폭량은 적을 것으로 예상된다. 작업자에 대한 피폭은 상대적으로 짧을 것으로 예상되며, 일반인에 대한 피폭은 장기간에 걸쳐 이루어질 것으로 예상된다.

3.4 인간침입 방지대책 도출

3.4.1 제1단계: 안전체계 분석

인간침입 방지대책(protective measure) 도출을 위한 첫 번째 단계는 Fig. 2의 B. step 1에서 보는 바와 같이 안전체계를 분석하는 것이다. 이 단계에서는 인간침입에 관한 법적 규제사항을 모두 도출하는 것이 핵심이다. 대부분의 나라에서 인간침입에 대해 비슷한 맥락을 갖고 있을 것으로 예상되지만 실제 방지대책을 수립하고 이행함에 있어 세부사항이 다를 수 있으므로 각 나라의 실정에 맞는 규제 요건 및 인간침입과 관련한 법적 제반사항을 모두 도출해야 한다. 독일이나

스웨덴처럼 처분장에 마커(marker)를 설치할 수 없도록 규정하고 있으면 이러한 일반방지대책(general measure)은 이러한 나라의 경우 후보방지대책(potential measure)에서 제외되는 것이다. 능동적 통제기간도 나라마다 다르므로 이 또한 인간침입 방지대책 도출을 위한 평가시 인간침입을 언제부터 고려할 것인지에 영향을 미치게 된다.

인간침입을 고려하기 위한 조건들도 첫 번째 단계에서는 규명된다. 즉, 의도적이지 않은 인간침입만을 대상으로 한다든지, 현재의 기술(technology) 및 생활습관(habit)을 미래세대의 생활습관 및 기술로 간주한다든지 등이 이에 해당된다. 이렇게 첫 번째 단계에서 도출된 기초자료는 두 번째 단계의 입력 자료로 활용된다.

3.4.2 제2단계: 일반방지대책 도출

두 번째 단계에서는 Fig. 2의 B. step 2에서 제시하는 바와 같이 적용가능한 방지대책을 모두 규명하여 데이터베이스화하는 것이 핵심이다. 이 단계에서는 처분부지, 모암특성, 처분 개념, 처분시스템에 대한 정보는 필요치 않지만, 이러한 정보가 많을수록 효율적인 데이터베이스를 구축할 수 있다. 이 단계의 결과물은 일반방지대책이며 이는 후보방지대책을 도출하기 위한 입력 자료로 활용된다. 여기서 일반방지대책은 후보방지대책을 도출하기 위해 고려되는 모든 방지대책을 말하며, 후보방지대책은 인간침입 방지대책으로서 가능성이 높은 방지대책을 말한다.

일반방지대책에 대한 데이터베이스는 해당 연구를 수행하거나 브레인스토밍을 통해 구축할 수 있다. 데이터베이스 구축 시 각 방지대책별로 적용특성, 즉 심층처분에 적합한 방지대책인지 천층처분에 적합한 방지대책인지, 부지선정 시 적용 가능한 것인지 공학적방벽에 적용 가능한 것인지, 능동적인 방지대책인지 피동적인 방지대책인지 등과 같은 것을 미리 분석해 놓으면 제3단계에서 후보방지대책을 도출할 때 매우 유용하다. 이 일반방지대책은 처분시스템 개발에서 폐쇄까지 각 단계마다 진화하고 지속적으로 개선되어야 한다.

기존에 존재하는 인간침입 관련 방지대책을 습득하여 일반방지대책을 보완하는 것도 좋은 방법이 될 수 있다. 이러한 자료는 자국 내에서 확보할 수도 있으며 국제적인 도움을 받아 참고할 수도 있다. 이렇게 얻어진 자료는 앞서 언급한 데이터베이스에 추가된다.

시추종사자 및 채광종사자와 같은 전문가의 도움을 통해

처분시스템을 손상시킬 수 있는 기술 등에 대해 자문을 구한 후 인간침입 일반방지대책을 구축하는 것도 좋은 방안이 될 수 있다. 예를 들어 시추를 시행할 때, 계획단계, 시추준비단계, 실행단계, 측정단계 등의 일련의 과정에서 일어나는 행위를 상세히 알 수 있다면 보다 적절한 일반방지대책을 구축할 수 있는 것이다. 이 방법을 통해 얻어진 자료 역시 앞서 언급한 데이터베이스에 추가된다.

3.4.3 제3단계: 후보방지대책 도출

세 번째 단계에서는 Fig. 2의 B. step 3에서 제시하는 바와 같이 제4단계에서 본격적으로 평가될 후보방지대책이 도출된다. 이 단계에서는 부지특성, 처분시스템 설계안, 폐기물 특성 및 형태, 처분개념, 설계 및 시설배치 등을 심도있게 고려하여 인간침입 방지대책으로 채택 가능성이 높은 일반방지대책을 후보방지대책으로 채택하게 된다. 후보방지대책을 도출하기 전에 시스템에 이미 적용되어 있는 고유방지대책을 규명하는 것이 중요하다. 이는 처분시스템의 성능을 이해하는데 도움이 되며, 인간침입 방지 효율성을 높이기 위해 고유방지대책을 보완하기 위해서도 필요하다. 이 단계에서 일부 일반방지대책은 규제요건에 의해 후보방지대책에서 제외되기도 한다. 예를 들어 법적으로 마커(marker)의 사용이 금지되어 있다면 이는 제외된다.

인간침입 방지대책을 도출하기 위한 평가에 고려될 후보방지대책은 다음의 사항을 고려하여 도출하여야 한다.

- 방지대책은 처분시스템의 안전기능을 손상하여서는 안된다.
- 방지대책은 인간 및 환경에 위해를 가해서는 안된다.
- 방지대책은 이익, 노력, 비용 관점에서 타당하여야 한다.

처분부지 관점에서 접근이 불가능하도록 지형을 바꾼다던가, 자원의 효율가치가 떨어지도록 다른 물질을 섞는다던가, 미래세대에 인간침입이 일어나지 않도록 모든 사람이 공유하는 공원으로 만든다던가 하는 조치는 후보방지대책의 일례가 될 수 있다.

후보방지대책은 처분시설을 어떻게 설계하고 배치하는냐에 따라 효과적일 수도 있고 부정적일 수도 있다. 예를 들어, 천층처분시설은 극저준위 및 저준위 방사성폐기물을 격리하기 위해 사용된다. 이 시설에 적용되는 폐기물의 용기 두께는

대부분 얇으나, 후보방지대책으로서 처분깊이를 증가시키면 인간침입 가능성은 줄어들지만, 증가된 하중으로 인해 처분용기가 파손될 수 있으며, 이는 가장 중요한 항목인 장기 안전성에 부정적인 영향을 주게 된다. 그러나 심층처분시설의 경우에는 일반적으로 외부 압력에 충분히 견딜 수 있도록 용기두께를 결정하므로 처분심도를 증가시킨다 해도 천층처분 시설과 같이 안전기능이 영향을 받지 않는다. 강화콘크리트의 사용, 암석이나 단단한 물질을 사용하는 드리프트 채움, 견고한 물질을 이용한 시추공 채움 등도 처분장 설계 및 배치를 어떻게 하느냐에 따라 후보방지대책으로서 적절하거나 부적절 할 수 있다.

처분용기의 두께를 증가시킨다거나 뒷채움재로 단단한 물질을 사용하는 것 등은 인간침입 가능성을 감소시키는 효과가 있는 반면, 폐기물을 분리시켜 적치한다는 것 등은 위해의 효과를 감소시키는데 효과가 있음을 인지해야 한다. 즉, 각 후보방지대책이 서로 다른 특성을 갖고 있음을 처분장 설계 시 고려해야 한다.

3.4.4 제4단계: 인간침입 방지대책

인간침입 방지대책을 도출하는 것이 마지막 단계이며, 제3단계에서 도출된 후보방지대책은 인간침입 방지대책으로 적합한지를 판단하기 위해 정형화된 시나리오를 바탕으로 정성적 또는 정량적으로 평가가 이루어진다. 평가의 일차 목적은 후보방지대책이 처분장의 안전목표와 상충하는 지를 평가하는 것이며, 이차 목적은 이 후보방지대책이 인간침입 가능성 감소 및 위해효과를 줄이는데 효과적이지를 판단하는 것이다. 이러한 평가는 후보방지대책을 설치하기 전과 설치한 후를 대상으로 논의(discussion) 또는 정량적인 계산을 통해 이루어진다.

이에 대해 좀 더 상세히 언급하면, 예를 들어 제3단계에서 시추를 막기 위한 후보방지대책으로 러버매트(rubber mats)를 설치하는 것이 도출되었다고 가정하자. 처분터널 천장에 설치된 러버매트는 드릴 날의 진행을 방해할 수 있으므로 인간침입 행위를 억제할 수 있다. 그러나 유기물질로 이루어져 있어 박테리아에 의해 분해될 수 있으며, 이는 결국 가스를 발생시켜 처분시스템의 밀봉기능에 손상을 초래하고 방사성물질이 이동하는 경로를 제공하게 된다. 이는 앞서 언급한 장기 안전성 및 폐기물의 장기격리에 대한 신뢰성 확보라는 목표에 부합하지 않는 것이다. 결과적으로,

이 러버매트는 인간침입 방지대책으로 부적합하거나 보완이 이루어져야 하는 것이다. 처분 안전목표에 부합하게 되면 다음으로 설치 가능성과 효율성 측면을 평가하게 되는데 이는 정성적인 또는 정량적인 방법에 의해 진행된다. 설치 가능성을 논할 때는 효과, 노력, 비용 등이 고려된다. 후보방지대책 설치과정에서 안전기능이 위배될 수 있는지 또한 병행하여 검토되어야 된다. 비용측면에서는 자산비용, 설치비용, 유지비용 등이 검토 된다. 설치 관점에서 예를 들면, 러버매트는 화학적으로 취성이 강하고 설치하기가 매우 어려운 특성이 있다. 이런 경우에는 설치가능성의 관점에서는 배제하거나 매우 낮은 점수를 줘야 한다.

이와 같은 과정을 통해 이 후보방지대책이 안전기능과 상충되지 않고 처분시설의 일부로서 설치하는데도 문제가 없으며, 인간침입 가능성 감소 및 위해를 줄이는데 효과적이라고 판단되면 최종적으로 인간침입 방지대책으로 채택된다.

4. 결론

본 연구에서는 방사성폐기물 처분장이 건설·운영되고, 폐쇄 후 제도적 관리기간이 끝나게 되어 그 곳에 처분장이 존재한다는 사실과 위해(hazard)의 정도가 일치 지면서 무의식적인(inadvertant) 처분장 인간침입이 일어날 경우 이를 어떻게 평가할 것인지에 대해 기술하였다.

처분장 인간침입을 평가하기 위한 전제조건을 국내 또는 국제적으로 권고한 사항에 근거하여 설정하고 처분장 인간침입 평가방법론에 대해 기술하였다. 처분장 인간침입 평가 방법론에서는 사회적요인, 인간침입 시나리오, 방지대책 도출시 상호 관계에 대해 언급하였으며, 시나리오 도출절차에 대해서도 언급하였다. 인간침입 방지대책을 도출하기 위한 절차를 네 단계로 구분하여, 기본 정보를 도출하는 방법, 일반방지대책을 도출하는 방법, 후보방지대책을 도출하는 방법, 정형화된 시나리오를 고려하여 최종적으로 인간침입 방지대책을 도출하는 방법 등에 대해 체계적으로 기술하였다. 본 연구에서 도출된 인간침입 평가 방법론은 향후 인간침입의 가능성을 감소시키고 인간침입 발생 시 위해의 효과를 줄이기 위한 방지대책 마련 시 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국제원자력기구 주관 하에 진행된 HIDRA (Human Intrusion in the context of RadioActive Waste) 프로젝트에서 논의된 내용[9]과 및 그 외 연구내용을 바탕으로 작성되었으며, 미래창조과학부가 시행한 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] International Atomic Energy Agency, Disposal of Radioactive Waste, International Atomic Energy Agency Report, Specific Safety Requirements, No. SSR-5 (2011).
- [2] International Atomic Energy Agency, The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, International Atomic Energy Agency Report, Specific Safety Guide, No. SSG-23 (2012).
- [3] International Commission on Radiological Protection, Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste, International Commission on Radiological Protection Report, Oxford: Pergamon Press, ICRP Publication 81; Ann. ICRP 28 (2000).
- [4] Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development. Future Human Actions at Disposal Sites- A Report of the NEA Working Group on Assessment of Future Human Actions at Radioactive Waste Disposal Sites, Organization for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency Report (1995).
- [5] Nuclear Safety and Security Commission, General Standard on Deep Geological Disposal Facilities for High-level Radioactive Wastes, Nuclear Safety and Security Commission: Notice 2015-021 (2015).
- [6] Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development. Consideration of Timescales in Post-closure Safety of Geological Disposal of Radioactive Waste, Organization for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency Report, NEA/RWM/IGSC(2006)3 (2007).
- [7] Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development. The Preservation of Records, Knowledge and Memory Across Generations, Improving our Understanding, Reference Bibliography within NEA RKM Project, Organization for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency Report, NEA/RWM/R (2013)3 (2013).
- [8] Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development. Loss of Information, Records, Knowledge and Memory – Key Factors in the History of Conventional Waste Disposal, Organization for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency Report, RK&M, NEA/RWM/R(2014)3 (2014).
- [9] International Atomic Energy Agency, HIDRA-The International Project on Human Intrusion in the context of Disposal of RadioActive Waste, Version 1.1, International Atomic Energy Agency Report (2015).