

Analysis of Siting Criteria of Overseas Geological Repository (II): Hydrogeology

국외 심지층 처분장 부지선정기준 분석 (II) : 수리지질

Haeryong Jung*, Hyun-Joo Kim, Jae-Yeol Cheong, Eun Yong Lee and Jeong Hyoun Yoon
Korea Radioactive Waste Agency, 111, Daedeok-daero 989, Yuseong, Daejeon, Korea

정해룡*, 김현주, 정재열, 이은용, 윤정현

한국원자력환경공단, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received March 8, 2013 / Revised June 17, 2013 / Approved August 16, 2013)

Geology, hydrogeology, and geochemistry are the main technical siting factors of a geological repository for spent nuclear fuels. This paper evaluated the siting criteria of overseas geological repository with related to hydrogeologic properties, such as hydraulic conductivity, partitioning coefficient, dispersion coefficient, boundary condition, and water age. Each country establishes the siting criteria based on its important geological backgrounds and information, and social environment. For example, Sweden and Finland that have decided a crystalline rock as a host rock of a geological repository show different siting criteria for hydraulic conductivity. In Sweden, it is preferable to avoid area where the hydraulic conductivity on a deposition hole scale (~30m) exceeds 10^{-8} m/s, whereas Finland does not decide any criterion for the hydraulic conductivity because of limited data for it. In addition, partitioning coefficients should be less than 10^{-1} of average value in Swedish crystalline bedrock. However, the area where shows 100 times less than average partitioning coefficients of radionuclides in crystalline rock should be avoided in Sweden. In German, the partitioning coefficients for the majority of the long-term-relevant radionuclides should be greater than or equal to $0.001 \text{ m}^3/\text{kg}$. Therefore, it is strongly required to collect much and exact information for the hydrogeologic properties in order to set up the siting criteria.

Key words: Geological disposal, Repository, Hydrogeology, Siting factors, Criteria

본 연구에서는 심지층 처분장 부지선정 시에 고려되는 요소를 지질, 수리지질, 지화학 등으로 분류하고 그 두 번째 단계로 수리지질분야의 세부 항목을 투수성, 분배·확산계수, 경계조건, 지하수 연대로 분류하였다. 그리고 이들 항목에 대한 국외 기준분석을 수행하였다. 부지선정요소(Siting factor)에 대한 기준(Criteria)은 각 국가의 지질환경, 지질정보 및 사회환경에 따라 다른 조건 혹은 값을 제시하고 있다. 일 예로, 유사한 특성의 결정질 암반을 기반암으로 하는 스웨덴, 핀란드에서도 투수성에 대한 기준을 각기 다르게 적용하고 있다. 스웨덴에서는 수리전도도의 기준을 부지선정 <단계 3>에서 10^{-8} m/s 이하로 설정하고 있지만, 핀란드에서는 암반의 투수성에 대한 신뢰성 있는 자료가 많이 확보되지 않아 투수성을 부지선정 기준으로 적용하지 않고 있다. 또한, 분배계수에 대한 기준에서도 스웨덴에서는 평균 값의 100배 이하인 지역을 배제하지만, 독일에서는 $0.001 \text{ m}^3/\text{kg}$ 의 정량화 된 값을 제시하고 있다. 따라서, 수리지질 요소에 대한 심지층 처분장 부지선정 기준을 명확히 설정하기 위해서는 국내 기반암의 심부환경에 대한 많은 정보를 확보하여야 할 것으로 판단된다.

중심단어 : 심지층 처분, 처분장, 수리지질, 부지선정요소, 기준

*Corresponding Author. E-mail: nohul@korad.or.kr, Tel: +82.42.601.5314

1. 서론

1957년 미국 National Academy of Science (NAS) 보고서 The Disposal of Radioactive Wastes on Land에서 지층처분 개념을 제시한 이후[1], 지층처분 개념은 방사성 폐기물의 영구 처분전략에 중요한 방법으로 고려되고 있다. NAS 보고서에서는 군사시설에서 발생하는 액체 고준위폐기물의 지층처분을 권고하였다. 이와 관련하여 초기 단계 지층처분 개념은 현재 처분 개념과 많이 다르며, 현재의 지층처분 개념 및 방법론 그리고 안전성평가 방법은 1970년대에 확립되었다[2].

현재 원자력 발전소를 운영 중인 많은 국가에서 지층 처분장의 인허가, 설계 프로그램, 부지선정, 타당성 평가 등의 단계에 접어들었다[3]. 핵변환(transmutation), 재처리, 장기저장을 포함하는 대안 연구도 수행 중에 있지만, 이들 대안들도 결국에는 방사성폐기물의 안전한 관리의 최종 해법으로 지층처분이 수행되어야 한다는데 공감대가 형성되었다[4,5].

현재, 많은 국가에서 사용후핵연료(혹은 고준위폐기물) 처분을 위한 부지선정 작업을 수행 중에 있다. 핀란드 및 스웨덴은 성공적으로 부지를 선정하였으며, 그 외 영국, 일본, 프랑스, 스위스, 캐나다 등에서는 부지선정 작업을 진행 중에 있다. 이들 국가들은 대부분 부지선정 작업 수행 이전에 부지선정 절차에 대한 명확한 법적 근거를 확립하여 부지선정 작업 수행에 대한 절차적 정당성을 확보하였다. 또한, 부지선정 작업을 원활히 진행하기 위하여 부지선정 기준을 설정하였다. 일반적으로 부지선정 작업은 국가별로 3~4단계로 절차를 구분하고 있다. 이들 국가에서는 <사업단계>별로 부지선정요소에 대해 각기 다른 기준(Criteria)을 적용하고 있다[6].

하지만 국내에서는 아직 심지층 처분장 부지확보 프로그램이 확정되지 않아 부지선정 절차 및 이와 관련된 부지선정 기준 등이 설정되지 못하고 있는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 심지층 처분장 부지선정 작업에 적용되는 기준 등에 대한 해외사례 분석을 통하여 향후 국내에 적용 가능한 부지선정 기준 설정에 활용하고자 하였다.

본 연구에서는 심지층 처분장 부지선정 시에 고려되는 요소를 지질분야, 수리지질분야, 지화학분야 등으로 분류하고 이들 각 분야별로 세부 항목에 대한 국외 기준 분석을 수행하는 것을 목적으로 하고 있다. 본 논문에서는 그 두번째 단계로 수리지질분야의 세부 항목별 국외 기준 분석을 수행하였다. 논문 결과는 향후 국내의 처분장 부지선

정 기준 수립시에 중요한 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 수리지질학적 부지선정요소

암반을 통한 지하수 유동은 심지층 처분장의 격리 및 핵종이동 지연기능에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중의 하나이며, 특히 암반의 투수성과 수리경사에 의해 큰 영향을 받는다.

심지층 처분장 부지는 처분용기의 부식을 유발하는 지하수의 유입을 제한하기 위해 지하수 유속이 느린 환경이 선호되며, 완충재(벤토나이트)의 수분함량은 열전도율에 영향을 미친다. 처분용기의 손상을 방지하기 위해서는 완충재가 빠르게 포화되어 열전도율을 높여야 하지만 방사성핵종 이동에 대한 높은 지연효과를 얻기 위해서는 지하수 유속이 느린 환경이 더욱 중요하다[7].

본 논문에서는 국외 문헌 및 관련 전문가들의 의견을 참고하여 사용후핵연료 심지층 처분장 부지선정에서 고려되는 수리지질 요소를 투수성, 분배·확산계수, 경계조건, 지하수 연대로 분류하고 이와 관련한 국외 부지선정 기준을 분석하였다.

3. 수리지질요소 국외기준 분석

수리지질 조건은 심지층 처분장 부지의 핵종이동 특성을 결정하는 중요한 요소로서, 국내와 같이 결정질 암반이 발달한 지역에서 특히 중요하게 고려되는 요소이다. 수리지질 요소와 관련하여 심지층 처분장 부지를 선정한 경험이 있는 스웨덴, 핀란드, 미국과 현재 부지선정 작업을 진행 중에 있는 스위스, 독일, 영국, 일본 등에서 적용하고 있는 처분장 부지선정 기준을 분석하였다. 또한, 정량기준에 대한 근거를 파악하기 위하여 추가적인 문헌조사를 수행하였으며, 그 결과를 정리하였다.

3.1 투수성

암반의 투수성에 따라 지하수 유동량과 분포 범위가 결정된다. 결정질 암반 개별 단열(discrete fracture)의 투수성은 단열 간극에 의해 결정된다. 단열암반의 투수성은 암석 내 단열의 투수성과 연결성에 따라 달라진다. 단열 빈도가 낮은 암석은 투수성이 매우 낮으며 단열의 빈도가 높은 암반은 통계적 방법을 통해 투수성 평가를 수행한다.

광역·국지규모 단열대의 투수성에 대한 정량적인 값은 정해져있지 않다. 이와 같은 대규모 단열대는 광범위한 유동과 유동 경로와 관련이 있지만, 처분장 부지선정과 배치를 통해 배제할 수 있기 때문에 중요성이 제한된다. 하지만, 부지규모 단열대와 소규모 단열을 포함하는 암반의 투수성은 처분장 배치 및 설계 과정에서 중요한 인자로 고려된다.

스웨덴에서는 부지선정 <단계 1>에서 부지의 투수성을 비관정양수량(우물심도에 대한 초당 양수량)으로 전국을 도식화하여 분류하며, 비관정양수량이 낮은 지역을 선호한다. 또한, 30 m 거리(처분용기 정지축 직경)에서 수리전도도가 10^{-8} m/s 이하일 경우, Darcy 속도가 10^{-2} m/y($=3.17 \times 10^{-10}$ m/s)을 초과하지 않을 것으로 예상하고, <단계 3>에서 수리전도도가 10^{-8} m/s 이하인 지역을 선호한다[7]. 하지만, 최종 판단은 안전성평가에서 결정한다. 핀란드에서는 지형경사와 수리경사가 낮은 지역을 선호한다. 하지만, 암반의 투수성에 대한 신뢰성 있는 자료가 많이 확보되지 않아 부지선정시 중요한 인자로 고려하지 않는다[8]. 독일에서는 부지선정 <단계 2>에서 격리암반의 수리전도도가 10^{-12} m/s 이하를 선호하고 적어도 $10^{-12} \sim 10^{-10}$ m/s 범위여야 한다[9]. 미국에서는 수리전도도가 낮은 지역을 선호하며 수리지질학적 조건의 변화가 핵종의 이동을 증가시킬 것으로 예상되는 지역을 배제한다[10]. 일본에서는 지하수 유량이 적고 유속이 느린 지역을 선호한다[11].

스위스의 <단계 2>에서 적용하는 기준은 아래와 같다[12].

- 매우 적합 : $K \leq 10^{-12}$ m/s
- 적 합 : $10^{-12} \leq K \leq 10^{-11}$ m/s
- 보 통 : $10^{-11} \leq K \leq 10^{-10}$ m/s

3.2 분배·확산 계수

분배계수란 일반적으로 일정한 온도와 압력하에서 두 개의 서로 섞이지 않은 액체에 어떤 물질이 용해하여 평형을 이룰 때 각 용액중의 농도비를 말한다. 지하 처분환경에서는 처분장에서 유출된 핵종이 암반을 통해 이동하면서 암반 매질에 흡착되는 정도를 의미하며 지하수 내의 핵종농도에 대한 암반에 흡착된 핵종농도의 비율로 나타낸다.

지하수 이동이 없더라도 방사성 핵종은 격리 암반대를 통해 확산되어 생물권으로 이동할 수 있다. 따라서 격

리 암반대의 범위는 방사성 핵종이 확산되는데 장기간이 소요되도록 충분히 넓어야 한다. 이 요구조건에 따라 낮은 확산계수를 갖는 암반이 선호된다.

포화대를 통한 방사성핵종의 확산은 방사성 핵종의 농도경사와 암반의 유효확산계수(effective diffusion coefficient)에 의존한다. 방사성핵종의 확산 정도는 암반의 유효확산계수에 비례한다. 포화대를 통한 확산은 공극유도(pore channels)을 통해 발생한다. 또한, 방사성 핵종의 확산 정도는 암석의 입자크기분포 등에 따라 달라지며, 세립질 입자의 비율이 늘어남에 따라 확산 정도가 감소된다.

스웨덴의 경우 분배계수가 스웨덴 결정질 기반암의 평균 값보다 100배 이상 낮은 지역은 배제한다[7]. 미국에서는 주변으로 유출되는 최대 누적 핵종 유출량이 지연작용이 없는 경우와 비교하여 1/10 이상 감소하는 경우 선호지역으로 고려한다[10]. 독일에서는 부지선정 <단계 2>에서 대표 핵종에 대한 분배계수가 $0.001 \text{ m}^3/\text{kg}$ 이상이어야 하고, 확산계수가 $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ 이하인 지역을 선호한다[8]. 그 외 핀란드, 영국, 일본 등에서는 고려하지 분배·확산계수를 고려하지 않는다.

3.3 경계조건

공극압력, 수두(압력수두와 위치수두의 합), 지하수 유동, 함양지역과 배출지역의 특성 등은 지하수 유동에서 중요한 인자로 고려되지만, 수리지질 모델링에서 독립적 입력변수로 고려되지 않는다. 이들 인자들은 지하수 유동 모델링의 중요한 입력변수인 경계조건 설정에 활용될 수 있다.

3.3.1 수두경사(hydraulic gradient)

지하수의 수두경사는 지하수 유동을 야기 시키는 가장 중요한 요소로 간주되고 있다. 수두경사는 지형경사의 영향을 많이 받지만, 광역규모에서 지하수의 수두경사는 암반의 수리전도도 변화만큼 크게 변하지 않는다. 국내와 같이 산악지형이 발달한 지역에서는 지하수 유동 모델링에서 중요한 인자로 고려할 수 있다.

스웨덴에서는 Caledonian 산악지역을 제외한 대부분의 지형경사는 1% 이하로 관측되었다. 따라서, <단계 1>, <단계 2>에서 부적절하게 높은 수두경사를 가진 지역은 제외한다[7]. 핀란드에서는 지형경사 및 수두경사가 낮은 곳을 선호한다[8]. 독일에서는 수두경사가 10^{-2} 이하인 지역을 선호하며[9], 그 외 국가에서는 고려하지 않는다.

3.3.2 배출지역과 함양지역의 분포

심부 지하수유동은 암석의 투수성에 의해 결정되지만, 배출지역과 함양지역의 분포는 수리지질학 모델의 경계조건 설정에 있어 중요한 인자이다. 이론적으로 처분장을 통과하는 지하수는 결국 배출지역으로 유출되기 때문에 지하수의 유동경로 길이가 최대가 되기 위해서는 처분장이 함양지역 아래에 위치하는 것이 좋다. 또한 배출지역과 함양지역의 분포는 생태계로의 영향을 분석하는 안전성 평가에서 고려되어진다.

미국에서는 지표에서 침투된 지하수를 처분장이 아닌 다른 곳으로 유도하는 환경 및 배수가 용이한 모암을 선호하며[10], 그 외 국가에서는 고려하지 않는다.

3.3.3 해안선 변동(shoreline displacement)

지형의 융기/침강, 기후변동 등에 의해 해안선 변동(Shoreline displacement)이 야기되며, 해안선 변동은 해안 지역 근처에 위치한 모든 부지의 경계조건을 바꾸기 때문에 지하수 유동해석에 있어서 중요한 인자로 고려된다.

스웨덴에서는 북부지역의 융기 변동이 상대적으로 크게 나타날 것으로 예상되기 때문에 해안선 변동을 고려하여야 한다. 하지만, 이와 관련된 기준설정에 있어서 정확한 근거 자료 확보에 어려움이 있어 심지층 처분장 부지선정 요소로 고려하지 않는다. 다만, 안전성 평가에서 해안선 변동 인자를 포함하여 수행한다[7].

영국에서는 초기 배제조건으로 고려하지 않고 후속 부지특성조사에서 고려한다[13]. 그 외 국가에서는 고려하지 않는다.

3.4 지하수 연대

연대가 오래된 지하수는 대수층 내에 체류시간(residence time)이 길며 안정적인 상태에 있음을 보여준다. 그러므로 오래된 지하수는 장기간 지하수 이동이 낮고 안정한 수리화학적 지하수 조건의 지표가 된다.

특정 부지에 대해서만 수리화학적 및 동위원소-수리학적 지하수 조건 분석을 통해 지하수 연대 특징이 가능하다. 삼중수소, 중수소, C-14와 O-18은 환경 동위원소에 속하며 중수소와 O-18의 비율로부터 지하수 연대를 측정할 수 있다.

반면 백만 년 단위의 격리기간과 비교했을 때 삼중수소와 C-14의 농도는 연대가 오래되지 않은 지하수에서 신뢰할 수 있는 지표라 할 수 있다. 삼중수소와 C-14의 존재

는 지하수의 연대가 수십 년에서 수만 년에 해당한다는 것을 나타낸다. 따라서 심지층 처분장 암반내에 분포하는 지하수에는 삼중수소나 C-14를 포함하지 않아야 하지만, 이 기준 하나만으로는 충분히 오래된 지하수와 선호되는 지질학적 환경을 증명할 수는 없다.

독일에서는 부지선정 <단계 1>에서 상대적으로 오래된 지하수를 선호하며 C-14이 검출되지 않아야 한다[9]. 미국에서는 교란대에서 접근가능 지역까지의 지하수 이동 시간이 1만 년 이상인 지역을 선호하며, 지하수 이동 시간이 1천년 이하인 지역은 부적합한 것으로 고려한다[10]. 그 외 스웨덴, 핀란드, 스위스, 영국, 일본에서는 고려하지 않는다.

4. 결론

심지층 처분장 부지선정요소(Siting factor)에 대한 기준(Criteria)은 주로 <사업단계>에서 활용되며, 본 논문에서 참고한 많은 국외 문헌들도 <사업단계>에 접어든 국가들을 중심으로 분석하였다. 본 논문에서는 향후 활용가능성을 염두에 두고 심지층 처분장 부지선정 <사업단계>에 접어든 국가들을 중심으로 수리지질 관련 부지선정요소 <사업단계>별 적용가능한 기준을 분석하였다.

부지선정요소에 대한 기준은 각 국가가 처한 지질환경, 지질정보, 국내 사회환경에 따라 다른 조건 혹은 값을 제시하고 있다. 예로, 유사한 특성의 결정질 암반을 기반암으로 하는 스웨덴, 핀란드는 투수성, 분배계수 등 거의 모든 수리지질 요소에 대한 심지층 처분장 부지선정 기준에서 명확한 차이를 나타내었다. 즉, 핀란드에서는 스웨덴에 비해 정량화된 부지선정 기준이 상대적으로 정량화되어 있지 않은 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는, 핀란드에서 암반의 수리지질 특성에 대해 신뢰성 있는 자료가 많이 확보되지 않은 것에 기인하는 것으로 판단된다. 화산활동이 활발하고 활동성 단층대가 발달한 일본은 수리지질 요소에 대하여 상대적으로 명확하고 정량화된 심지층 처분장 부지선정 기준이 제시되지 않고 있다. 이는 공모제를 통해 심지층 처분장 부지선정 작업을 수행하고 있는 일본의 사회환경과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다. 따라서, 수리지질 요소에 대한 심지층 처분장 부지선정 기준을 설정하기 위해서는 국내 기반암의 심부환경에 대한 많은 정보를 확보하여야 할 것으로 판단된다. 또한, 국내 사회·정치적 환경 및 부지선정 방법 등도 충분히 고려하여

야 할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] National Academy of Science (NAS), The Disposal of Radioactive Waste on Land, Publication 519 (1957).
- [2] NEA. Objectives, Concepts and Strategies for the Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear Power Programmes, OECD-NEA (1977).
- [3] P. Witherspoon and G. Bodvarsson, Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation: Fourth Worldwide Review, LBNL-59808 (2006).
- [4] National Academy of Science (NAS). Disposition of High-Level Waste and Spent Nuclear Fuel, the Continuing Societal and Technical Challenges, National academy press, Washington DC (2001).
- [5] N. Chapman and C. McCombie. Principles and Standards for the Disposal of Long-Lived Radioactive Wastes, Pergamon Press, London (2003).
- [6] Korea Radioactive Waste Agency (KORAD), Siting Criteria of Geological Repository, 14215-K-TR-001 (2011).
- [7] J. Andersson, A. Strom and C. Svemar, What Requirements does the KBS-3 Repository Make on the Host Rock?, SKB TR-00-12 (2000).
- [8] POSIVA, The Site Selection Process for a Spent Fuel Repository in Finland-Summary Report (2000).
- [9] AkEND, Site Selection Procedure for Repository Sites, Recommendations of the AkEnd - Committee on a Site Selection Procedure for Repository Sites, AkEnd (2002).
- [10] US NRC, 10. 10CFR Part 960.
- [11] NUMO, EFQ: Evaluation Factors for Qualification; Siting Factors for the Selection of Preliminary Investigation Areas (2002).
- [12] Nagra, Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse, NTB 08-03 (2008).
- [13] NDA-RWMD, Geological Disposal: Steps Towards Implementation, NDA-RWMD Report NDA/RWMD/013 (2010).