

TECHNICAL NOTE

사용후핵연료 최종처분장 건설과정에서의 굴착손상영역(EDZ)의 현장평가 방법 및 시공품질관리 체계에 관한 사례검토

김형목^{1*}, 남명진¹, 박의섭²

¹세종대학교 지구자원시스템공학과 교수, ²한국지질자원연구원 국토지질연구본부 심층처분환경연구센터장

A Review of In-Situ Characterization and Quality Control of EDZ During Construction of Final Disposal Facility for Spent Nuclear Fuel

Hyung-Mok Kim^{1*}, Myung Jin Nam¹, and Eui-Seob Park²

¹Professor, Department of Energy Resources and Geosystems Engineering, Sejong University

²Leader, Deep Subsurface Storage and Disposal Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

*Corresponding author: hmkim@sejong.ac.kr

Received: April 6, 2022

Revised: April 19, 2022

Accepted: April 22, 2022

ABSTRACT

Excavation-Disturbed Zone (EDZ) is an important design factor in constructing final disposal facilities for spent nuclear fuel, since EDZ affects mechanical stability including a spacing between disposal holes, and the hydraulic properties within EDZ plays a significant role in estimating in-flow rate of groundwater as well as a subsequent corrosion rate of a canister. Thus, it is highly required to characterize in-situ EDZ with precision and control the EDZ occurrence while excavating disposal facilities and constructing relevant underground research facilities. In this report, we not only reviewed EDZ-related researches carried out in the ONKALO facility of Finland but also examined appropriate methods for field inspection and quality control of EDZ occurrence. From the review, GPR can be the most efficient method for in-situ characterization of EDZ since it does not demand drilling a borehole that may disturb a surrounding environment of caverns. And the EDZ occurrence was dominant at a cavern floor and it ranged from 0 to 70 cm. These can provide useful information in developing necessary EDZ-related regulations for domestic disposal facilities.

Keywords: EDZ, In-situ characterization, Construction quality control, Final disposal facility, Spent nuclear fuel

초록

사용후핵연료 최종처분장 건설 과정에서 발생하는 굴착손상영역(EDZ)은 처분시설의 역학적 안정성 및 처분공 간격 설정 등의 설계요소로서 고려해야 할 뿐만 아니라 영역 내 투수특성은 폐쇄 후 지하수 유입량 변화에 따른 처분용기 부식 속도 및 핵종유출 등에도 막대한 영향을 미치게 된다. 따라서, 처분시설 및 관련 지하연구시설(URL)의 건설과정에서는 EDZ의 발생양상을 현장에서 정확하게 파악하고 미리 규정된 요건을 만족할 수 있도록 철저하게 관리할 수 있어야 한다. 이 논문에서는 핀란드 온칼로 시설에서의 EDZ 관련 연구사례를 검토하고 처분시설 굴착과정에서의 EDZ의 현장평가방법 및 시공품질관리 체계에 대해 검토하였다. EDZ 현장 평가를 위해서는 굴착 갱도 주변의 교란을 유발하는 시추공 굴착이 불필요한 GPR 탐사가 가장 적합함과 온칼로 처분시설의 EDZ는 바닥부에서 두드러지게 발생하여 0~70 cm의 두께로 발생함을 확인하였다. 이들 결과는 국내 처분환경에 적합한 EDZ 관련 규제요건 개발에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어: 굴착손상영역, 현장평가, 시공품질관리, 최종처분장, 사용후핵연료



1. 서론

고준위방사성폐기물이란 열 발생량과 방사능의 준위가 높은 방사성폐기물을 의미하며, 원자력안전법 상에서는 열 발생량이 2 kW/m³, 반감기 20년 이상의 알파선을 방출하는 핵종으로 방사능 농도가 그램당 4,000 베크렐(Bq)이상인 것으로 규정하고 있다. 우리나라의 고준위방사성폐기물은 사용후핵연료가 대부분이다.

사용후핵연료는 원자로에서 원자력발전을 위해 사용된 핵연료물질을 말한다. 원자력발전은 원자로 안에서 핵연료를 핵분열 시켜 발생한 열을 이용해서 전력을 생산하는 방식이다. 일정 기간(경수로형 원자로의 경우 4~5년, 중수로형 원자로의 경우 10개월 정도)이상 핵연료를 사용하게 되면 경제성을 확보가능한 발전에 필요한 충분한 열이 발생되지 않기 때문에 새로운 핵연료로 교체해야 하는데, 이때 인출된 핵연료가 사용후핵연료에 해당한다.

사용후핵연료의 관리방안으로는 크게 직접처분(direct disposal), 재처리(reprocessing), 중간저장(interim storage) 방식이 있다. 직접처분은 사용후핵연료를 재처리하지 않고 처분하는 것으로 사용후핵연료의 높은 열과 방사능을 차단하기 위하여 지하 500 m 이상의 암반층에 처분하는 것이 일반적이다. 재처리는 사용후핵연료에 남아있는 여전히 사용가능한 우라늄과 같은 유용자원을 물리·화학적 방법을 사용하여 분리, 추출하고 핵연료로써 재활용하는 것인데, 이러한 재처리 시설은 영국, 프랑스, 일본 등의 제한된 국가에서만 운영 중이다. 중간저장은 임시저장과 최종처분의 중간 과정에 해당하는 것으로 직접처분이나 재처리의 사용후핵연료 정책을 최종 결정하기까지 관망(wait and see)하는 방식에 해당한다고 할 수 있다. 중간 저장은 크게, 저장수조 내 물을 이용하여 사용후핵연료에서 방출되는 열을 냉각시키고 방사선을 차폐하는 습식(wet)방식과 불활성기체를 이용하여 냉각하고 방사선은 콘크리트 및 금속용기에 보관하여 차단하는 건식(dry) 방식으로 세분된다.

현재 국내에서 사용후핵연료는 원자력발전소 내 임시저장시설에 보관하고 있다. 이러한 임시저장시설의 포화에 대비하여 사용후핵연료의 안전관리체계를 구축하고 제반 관리시설(지하연구시설, 중간저장시설, 영구처분시설 등)을 적기에 확보하기 위한 범부처(과학기술정보통신부, 산업통상자원부, 원자력안전위원회) 사업이 2021년부터 진행 중에 있다(사용후핵연료관리핵심기술개발사업단, <http://www.iksnf.or.kr>). 이 사업은 사용후핵연료 저장·처분 핵심솔루션 개발 및 관리기반 구축을 목표로 사용후핵연료 건식저장 안전성 실증 및 시험(저장분야), 지하연구시설에서 처분시스템 실증 기반(평가기술, 방법론) 확보(처분분야), 심층처분과 관련된 규제요건 및 검증기반 확보(규제분야) 내용으로 구성되어 있다. 사용후핵연료 관리사업의 시작을 준비하기 위해, 지하연구시설 실증 전단계까지의 핵심기술 확보, 사용후핵연료의 안전관리를 위한 종합안전성(safety case) 입증자료 확보와 세부 규제요건의 개발, 규제요소의 안전성 및 적합성에 대한 적절한 검증 방법론 및 검증 도구의 개발이 함께 진행되고 있다. 국내 고준위방사성폐기물 관련 규제체계(Fig. 1)를 살펴보면, 원자력안전법 이하 시행령과 시행규칙이 제정되어 있으며 하위에 원자력안전위원회 행정규칙 및 고시를 통해 제반 상세규정이 명시되어 있다.

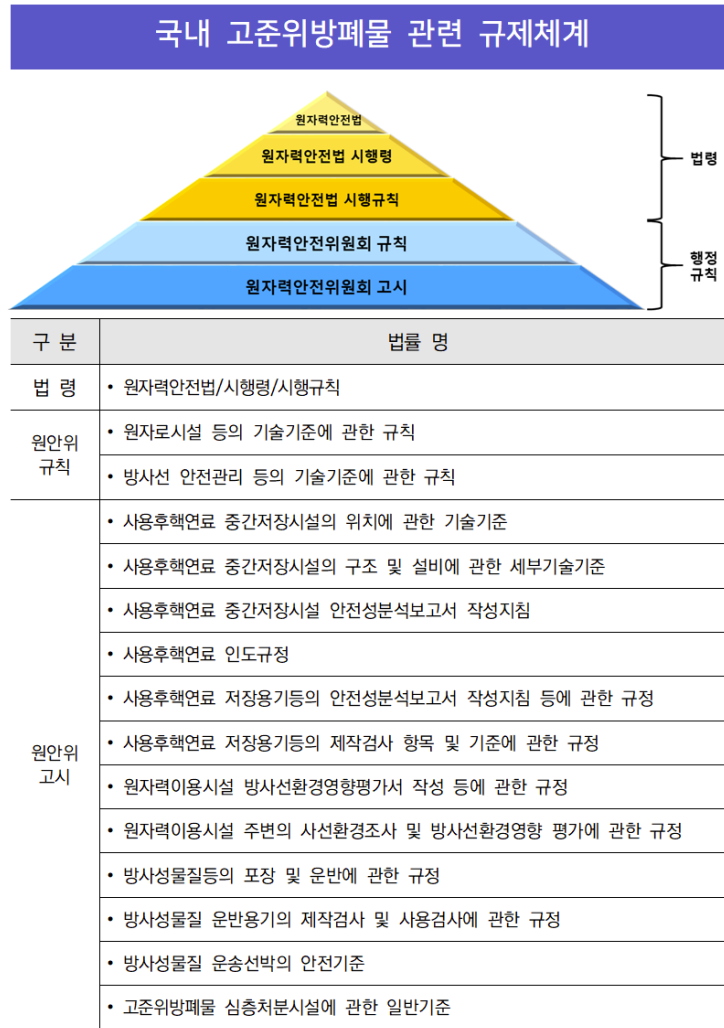


Fig. 1. Laws and technical standards for high-level radioactive wastes (KORAD, 2021)

원자력안전위원회 고시「고준위방폐물 심층처분시설에 관한 일반기준」에서 심층처분이란 방사성폐기물을 사람의 접근과 방사성 핵종의 생태계 유입을 제한할 수 있도록 깊은 지하의 안전한 지층구조에 처분함으로써 인간 생활권으로부터 영구히 격리하는 것으로 정의한다. 따라서, 처분심도 부근의 지질학적 특성 파악 및 처분장 건설을 위한 제반 공학적 기술의 성능 검증, 개발되는 국내 고유 심층처분시스템의 성능 및 안전성에 대한 입증은 하기 위해서는 지하연구시설(Underground Research Laboratory, URL)을 건설하고 운영하는 것이 필수불가결하다. 이에 「고준위방폐물 심층처분시설에 관한 일반기준」에 지하연구시설의 종합안전성 입증 자료 구축에 활용할 필요성이 명시되어 있으나 지하연구시설에서 수행하는 연구 및 설치/운영에 대한 구체적인 내용은 수록되어 있지 못한 실정이다.

지하연구시설에서의 현장실험을 통해 파악해야 할 처분시설의 주요 성능인자로는 심부 지질환경, 지하수 산화-환원 상태, 심부 열전달 및 열응력 발생 양상, 굴착손상영역(Excavation-Damaged Zone, EDZ)의 수리-역학 특성, 처분용기의 응력부식률 평가등이 처분시설의 건설 및 운영단계별로 있다(Fig. 2). 굴착손상영역은 처분장 건설을 위한 암반 굴착과정에서 응력집중 및 재분배로 인해 발생한다. 굴착손상영역에서는 균열 생성 및 기존 균열의 변형이 수반되기 때문에, 암반의 물리-역학적 및 수리학적 특성이 변

화되어 처분장으로 유입되는 지하수 유입량, 지하수 유입량 변화에 따른 공학적 방벽 재료의 장기적 변형, 장기 운영 안전성 관점에서 방사성 핵종의 유출 거동 등에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 한편, 굴착손상영역의 물리·역학적 및 수리학적 특성 파악과 이에 근거한 EDZ 폭의 추정에 대한 기존 연구는 다수 발표된 바 있으나(Kim et al., 2008, Kim and Park, 2020, Kwon and Cho, 2007, Kwon and Min, 2020, Lee et al., 2011) 건설 과정에서의 EDZ의 현장 평가 및 품질 확보를 위한 관리 기준 체계에 대한 연구결과는 매우 제한적이다(Um and Hyun, 2022).

본 고에서는 최종처분장의 종합 안전성에 막대한 영향을 미치는 굴착손상영역의 현장평가방법 및 현장시공 품질관리 체계에 관한 핀란드 사례를 검토함으로써 일반적이면서도 선연적 수준에 머물고 있는 국내 심층처분시설의 설계 및 건설에 필요한 굴착손상영역 관련 세부 규제요건 개발을 위한 참고자료를 제공하고자 한다.

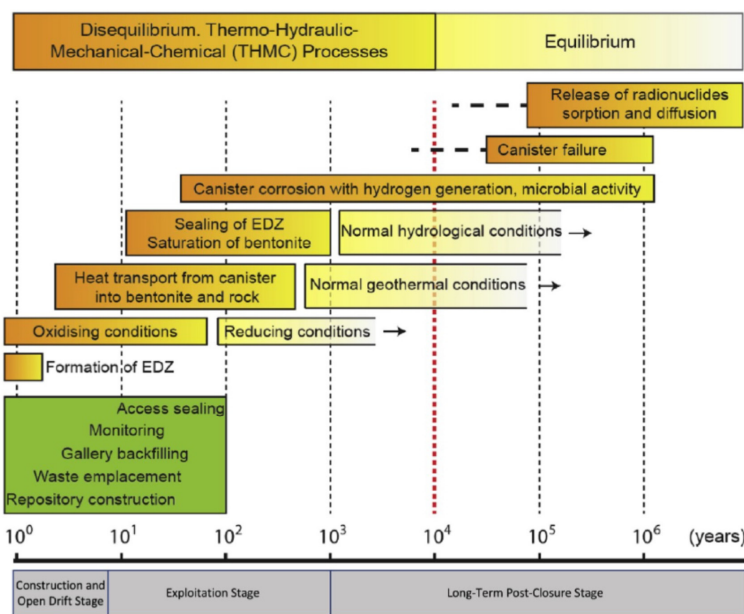


Fig. 2. Major design parameters of disposal facility at each stage of construction, exploitation and long-term operation (Birkholzer et al., 2019)

2. 핀란드 온칼로(ONKALO)에서의 굴착손상영역(EDZ) 연구

2.1 EDZ 연구 개요

핀란드 온칼로 부지에서의 실증연구에서는 굴착손상을 굴착영향과 구별하였다. 즉, 굴착손상영역(Excavation Damaged Zone, EDZ)은 갱도 굴착에 의해 터널 주변에 균열이 새롭게 생성된 영역으로 정의하고 굴착영향영역(Excavation Influenced Zone, EIZ) 혹은 Excavation disturbed Zone, EdZ)은 균열 생성 없이 굴착으로 인해 기존 균열에 변형(개폐 혹은 전단)만이 발생한 영역으로 정의하였다. 굴착갱도주변 EDZ 및 EIZ (EdZ)의 발생양상을 도식화하여 살펴보면(Fig. 3), 갱도 하부에서 굴착에 사용되는 공당 화약량이 상대적으로 많기 때문에 EDZ가 보다 폭넓게 형성된다는 것을 알 수 있다. 다만, EDZ 및 EIZ 모두 균일하게 발생하지 않고 자연 균열 시스템, 현지 암반 강도 및 이방성, 굴착 형태 및 방향, 발파 장약 패턴, 초기응력상태(주응력 크기 및 방향) 및 이방성

등에 의해 불규칙하게 발생(즉, 위치 및 형성 폭이 달라짐)하므로 현장평가를 통해 파악할 필요가 있다. 핀란드 온칼로에서의 처분 터널(disposal tunnels) 굴착 프로세스의 기본 원칙을 요약하면 다음과 같다.

- 모든 처분터널은 천공 발파(drill and blast)에 의해 굴착한다.
- 굴착 후 터널 바닥면은 기계장비(load header 등)를 이용하여 평탄화(levelling) 작업을 수행한다.
- 수직구(shaft) 및 바닥면에서의 처분공(deposition holes)은 기계굴착(Tunnel Boring Machine, TBM)을 적용한다.



Fig. 3. The concept of excavation-induced damage and influenced (or disturbed) zones (Follin et al., 2021)

핀란드 사용후핵연료 최종처분 프로그램의 EDZ 관련 연구는, 초기에는 DECOVALEX 등을 포함한 국제공동연구에 참여하는 형태로 실시되었으며 2004년 Okiluoto 부지에서 온칼로(ONKALO) 시설 굴착을 시작한 이후 본격적으로 진행되었다. 온칼로 시설에서의 EDZ 관련 연구는 크게 3단계(EDZ300 project, 2007-2008, EDZ09 project, 2008-2010, EDZ study area project, 2012-2016)로 수행되었다. EDZ300 프로젝트는 온칼로의 여러 갱도에서 수행하였으며 EDZ 평가 장치 및 방법의 개발과 굴착과정에서의 EDZ 제어 방법 개선 연구를 수행하였다. EDZ09는 EDZ 발생을 최소화하기 위한 굴착 프로세스 제어기술과 품질보증/품질관리(quality assurance/quality control, QA/QC) 방안에 대한 연구와 EDZ 검증(verification)을 위한 지구물리학적 도구(geophysical tools)에 대해 검토하였다. 마지막으로 EDZ study area 프로젝트에서는 EDZ 검증을 위한 지구물리학적 기법의 상세 검토와 EDZ 내 개별균열망(Discrete Fracture Network, DFN)모델 구축 및 해석, 용질이동 해석을 병행함으로써 처분장의 장기 안정성 평가에 필요한 EDZ 관리 체계 및 기준을 연구하고 제안하였다.

온칼로 시설에서의 굴착 갱도 형태와 EDZ 관련 연구가 수행된 위치를 살펴보면(Fig. 4), EDZ 관련 연구가 집중적으로 실시된 ONK-TKU-3620 연구 모듈(Fig. 4의 붉은색 원)은 지표로부터 345 m 심도에 EDZ 연구 목적으로 굴착되어 EDZ09 연구수행 후 처분 갱도 필라(pillar)의 역학적 안정성 평가를 위한 POSE (Posiva's Olkiluoto Spalling Experiment) project를 위하여 2010년 확폭되었다. EDZ study area 프로젝트에서는 해당 연구모듈의 바닥면(floor)에 형성된 EDZ를 대상으로 상세 조사 및 해석을 실시하였다.

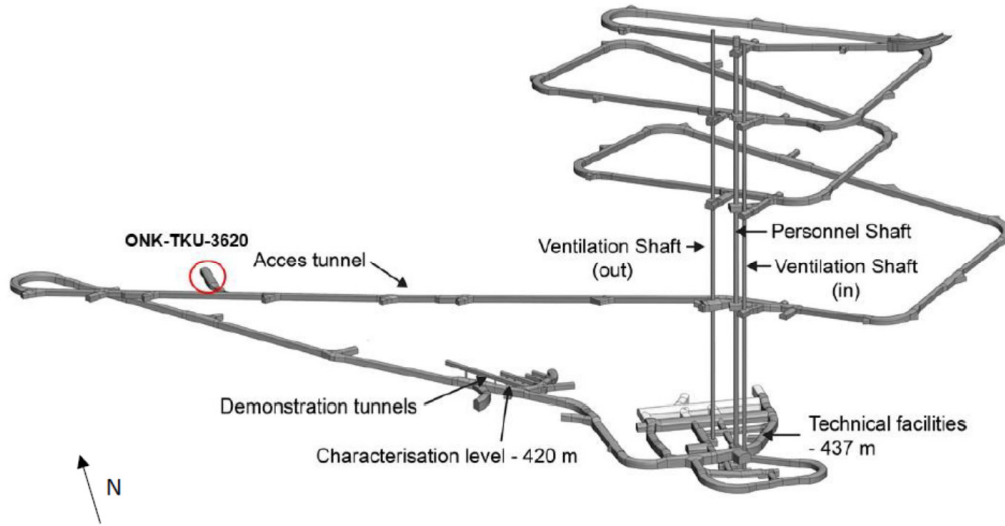


Fig. 4. Geometry of underground facility in ONKALO facility and the location of EDZ study area (Follin et al., 2021)

ONK-TKU-3620 갱도 확폭 전후의 굴착갱도(Fig. 5) 직경은 각각 4.8 m와 9 m이며 길이는 52.4 m이다. 갱도 굴착은 발파를 이용하여 실시하였고 두 종류의 폭약을 사용하였는데(Fig. 6), 갱도 길이방향의 절반은 에멀전(emulsion) 폭약(EMU1, EMU2)을 사용하였고 나머지 절반은 카트리지(cartridge, PATR1, PATR2)를 이용한 발파 기법을 적용하였다. 1 발파당 굴진장은 약 4 m이며 총 12회 발파를 실시하였다(Mustonen et al., 2010). EDZ는 대부분 최외곽공(contour holes) 주변에 형성된 소규모 균열(short fractures)로 구성되고 터널 측벽보다는 바닥에서 두드러지게 발생하여 터널 바닥에서 0-70 cm의 두께(30 cm가 가장 빈번하게 발생)로 관측되었다. 발파공 천공 정밀도가 EDZ의 품질 관리에 중요하여 발파공의 천공 편차가 ± 25 cm 이내가 되도록 관리하였다.

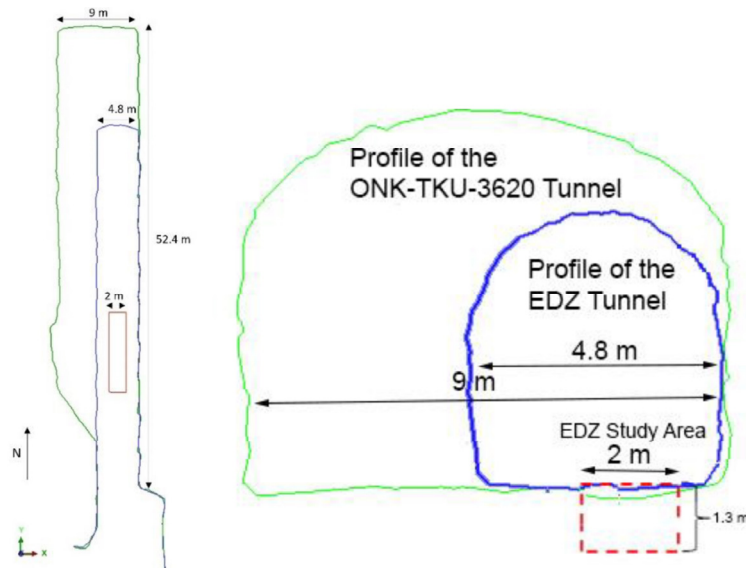


Fig. 5. The dimensions of excavated caverns for EDZ study in ONKALO facility (Follin et al., 2021)

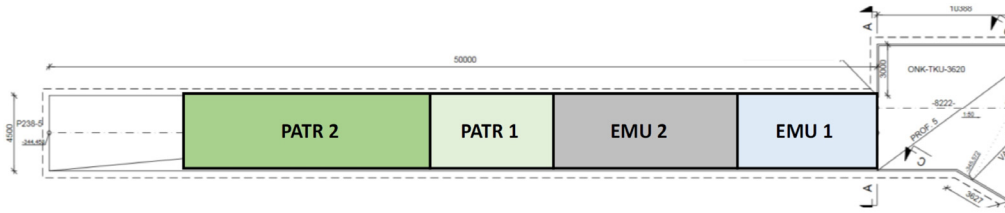


Fig. 6. The separations of EDZ study cavern in ONKALO with respect to the types of used explosives (Follin et al., 2021)

EDZ 상세 연구를 위해 ONK-TKU-3620 갱도 내 바닥부 2 m × 9 m의 영역에 총 30개의 조사시추공을 굴착하였다(Fig. 7). 조사시추공의 길이는 바닥면으로부터 1.2–1.3 m 정도이고, 지구물리학적 탐사를 비롯한 균열의 육안 관측, 시추공 수리실험 등을 실시하여 EDZ 발생 양상의 정합성을 파악하였다. 육안 관측을 위해 줄톱(wire saw)을 이용하여 암반 블록을 샘플링한 지역(Fig. 7에서 붉은색 사각형)에서 암반 블록 샘플로부터 EDZ 내 균열의 상세 관측을 실시한 뒤, 파악된 균열 정보를 이용하여 개별균열망(discrete fracture model, DFN)모델을 형성, 지하수 유동 및 핵종 거동 파악에 활용하였다(Fig. 8).

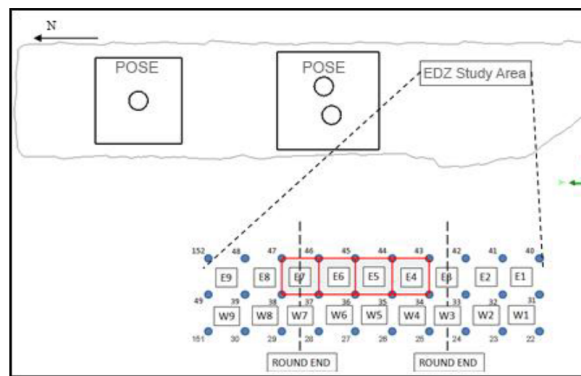


Fig. 7. Close-up of the location of the EDZ study area within the ONK-TKU-3620 cavern (Follin et al., 2021)

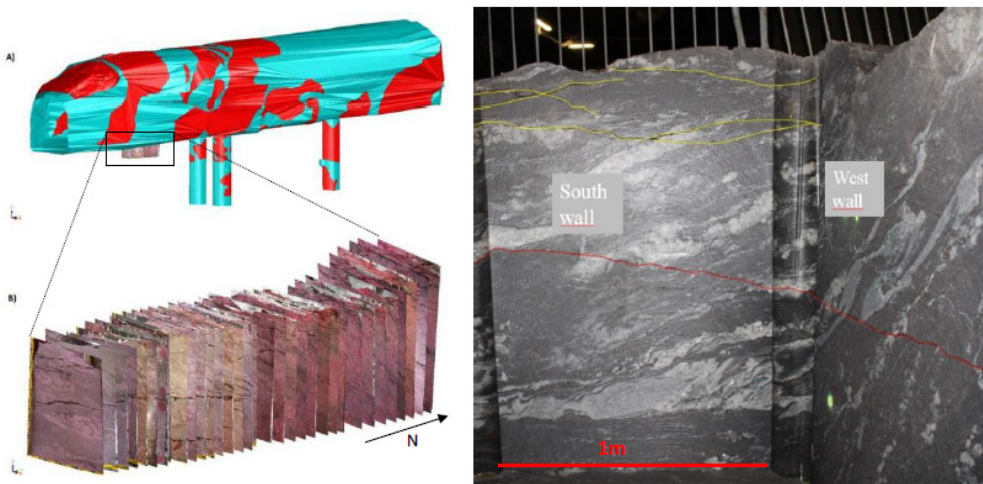


Fig. 8. 3D visualization of an wire-sawed section of the EDZ Study Area (left) and the photograph of bedrock planes (1.3 m deep) being wire sawed for the observation of EDZ fractures (Kiuru et al., 2021)

2.2 EDZ 현장평가 방법의 장·단점 분석

EDZ의 형성폭 및 발생 양상을 파악하기 위하여 다양한 방법과 기술들을 분석하였으며, 개별 기술 및 방법의 현장 적용 결과는 참고문헌(Heikkinen et al., 2021), 을 통해 파악할 수 있으므로 이 논문에서는 EDZ의 현장평가에 유용할 것으로 기대되는 방법들의 장단점을 1) 해상도(resolution), 2) 측정영역(coverage), 3) 준비과정의 용이도(required setup), 4) 시간 및 비용 성능(performance), 5) 부지 교란정도(destructiveness), 6) 해석의 정확성(anomaly identification) 관점에서 검토한 결과만을 Table 1에 수록하였다. 이 결과를 보면, 지표투과레이더(ground penetrating radar, GPR) 탐사법이 EDZ의 현장평가에 가장 유용한 방법에 해당함을 알 수 있다. GPR 탐사는 약 100 Mhz 에서 2 GHz 사이의 전자기파(electromagnetic wave)의 송신하고 수신하여 얻은 레이더그램(radargram) 영상에서 전자기파 혹은 레이더파의 감쇠(attenuation) 및 반사(reflection) 특성을 분석하여 매질 내부의 특성을 파악할 수 있는 기법으로, 탐사 가능 심도는 작지만 고해상도의 영상을 얻을 수 있다는 장점이 있다. GPR EDZ 기법은 EDZ 평가를 목적으로 GPR 영상 분석기술을 이용하여 Posiva에서 개발한 기법 및 장치를 지칭한다. Fig. 9은 GPR EDZ 기법을 온칼로의 EDZ Study 연구모듈 갱도에 적용하여 획득한 측선 단면 영상이다.

인공분극법(Mise-a-la-Masse, MaM)기법은 시추공 사이의 전기적 연결성을 파악하기 위한 전기탐사기법의 일종으로 시추공을 교차하는 상대적으로 큰 스케일의 균열 혹은 전도성 물질로 구성된 지층 구조를 파악하는 데 유용하다. 넓은 영역의 구조를 파악하는 데 유용하나 현장 적용을 위해서는 시추공을 천공해야 하므로 갱도 주변 환경의 교란을 초래할 수 있다. 한편 일반적인 전기비저항탐사법(electrical resistivity survey/tomography, ERT)은 갱도 주변 암반의 전기비저항 분포를 파악함으로써 EDZ의 형성 및 발생 양상을 파악할 수 있다. 고해상도의 영상을 제공함으로써 EDZ 판독의 정밀도를 높일 수 있으나 MaM과 마찬가지로 실험을 위해서는 시추공 굴착이 선행되어야 한다는 단점이 있다. 탄성파 토모그래피(seismic tomography)는 암반의 P파와 S파 탄성파 속도를 이용한 평가 방법으로 EDZ 영역에서 균열 생성으로 인해 공극률이 증가로 인한 탄성파 속도 감소를 파악함으로써 EDZ를 판별할 수 있다. 탄성파 속도를 이용한 EDZ 현장평가는 EDZ 및 주변 신선암의 물리적·역학적 물성을 간접적으로 파악할 수 있는 장점이 있다.

Table 1. Advantages and disadvantages of methods used for EDZ characterization (reproduced from Follin et al., 2021)

Method	Resolution	Coverage	Required setup	Performance	Destructiveness	Anomaly identification	Reference
MAM	○	⊙	○	○	●	○	Heikkinen et al., 2021
ERT	⊙	⊙	○	○	●	○	
GPR image analysis	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	○	
GPR EDZ method	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	○	Reyes-Montes and Flynn, 2021
Seismic tomography	○	⊙	○	○	●	○	
Petrophysical laboratory testing	⊙	○	○	○	●	⊙	Kiuru et al., 2021
Mechanical laboratory testing	○	○	○	○	●	⊙	

⊙: High
○: Moderate & Low

⊙: Wide
○: Limited

⊙: Least setup
○: Setup required

⊙: Fast survey
○: Time consuming

⊙: Non-destructive (only cleaning requires)
●: Destructive due to drilling and instrumentation)

⊙: No interpretation needed
○: Interpretation required

(⊙: advantageous, ○: disadvantageous, ●: exclusively disadvantageous)

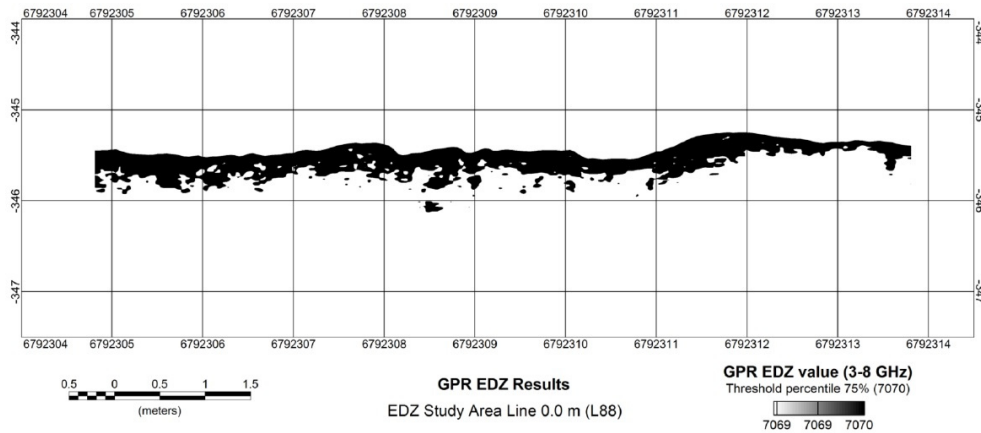


Fig. 9. The GRP EDZ result from one investigation line (GPR Line L88) at the EDZ study area in ONKALO (Heikkinen et al., 2021)

2.3 EDZ 품질 관리 체계

핀란드의 원자력 시설 관련 안전규제는 Nuclear Energy Act (990/1987) 및 Nuclear Energy Degree (1988/161)에 근거한다. 사용후핵연료 및 방사성폐기물에 관한 상세 안전규제는 원자력안전규제기관(Radiation and Nuclear Safety Authority, STUK)에서 규정하는 YVL guides (Nuclear safety and security guides)에 명시되어 있다. YVL guides는 A부터 E까지의 다섯 개의 그룹으로 구성되며 그룹 D가 방사성 재료 및 폐기물에 관한 내용에 해당한다. 그룹 D는 다시 7개의 세부 지침들(guides)로 세분되며 D.5가 ‘방사성폐기물의 처분’에 관한 지침으로 최종처분장의 안전요건을 규제하고 있다. EDZ에 관한 규제 근거(regulatory base)는 D.5 및 D.7에 해당한다(Fig. 10).

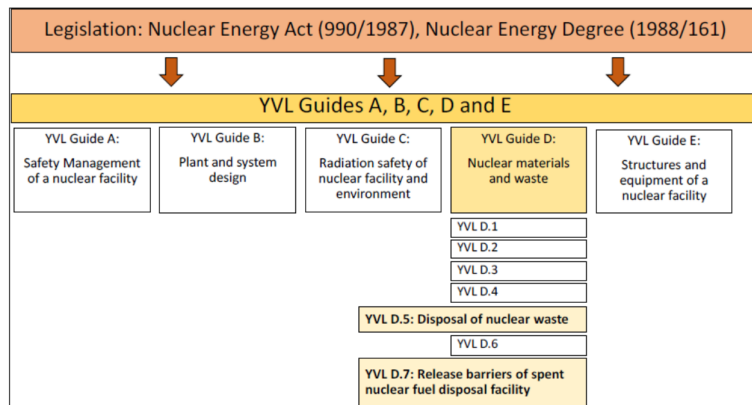


Fig. 10. Legislation guidance for the EDZ in Finnish disposal program (Follin et al., 2021)

Posiva에서는 최종처분시설의 설계 및 건설을 위해 성능요구조건 관리 시스템인 VAHA 시스템(Posiva SKB, 2017)을 구축하였다. VAHA 시스템은 최종처분시설 건설에 요구되는 다양한 인자(factors)를 수록한 데이터베이스(database)에 해당하고 각 인자들 간의 상호관계를 파악하고 최종처분시설 설계에 반영하기 위한 목적으로 운영된다. VAHA의 장기 안전성 설계요소는 아래와 같은 총 5개의 단계(level)로 분류된다.

- Level 1: 법률로 규정된 이해당사자의 요구조건(stakeholder requirements)
- Level 2: 안전규제(safety concept and safety function) 정의를 위한 장기 안전성 개념(long-term safety principles)
- Level 3: 성능 요구조건(performance requirements)으로 공학적 방벽(engineered barriers)을 위한 성능 목표(performance target)와 기반암(host rock)의 목표 특성(target properties)로 구성
- Level 4: 설계 요구조건(design requirements)으로 공학적 방벽 및 지하 굴착, 암반 적합성(rock suitability criteria)을 포함
- Level 5: 설계 시방(design specifications)에 해당

또한, VAHA 시스템에 수록된 EDZ 관련 요구조건(ID)의 단계와 주요 선언적 내용을 정리하면 아래와 같다.

- L3-ROC-45: 지하 굴착(underground openings)의 설계 및 시공은 처분장의 장기 안정성을 확보해야 한다.
- L2-ROC-22: 실증터널(demonstration tunnels) 및 실험 처분공(experimental deposition holes)의 요구조건은 처분갱도(disposal tunnels) 및 처분공(deposition holes)과 동일하게 적용하나 상세설계(design specification)에서의 예외는 인정한다.
- L4-ROC-46: 지하 굴착은 주변 암반에의 손상 영역(damage zone) 발생을 최소화할 수 있도록 제어해야 한다. 특히, 터널 길이방향으로의 연결된 유동 통로의 형성은 억제해야 한다.
- L5-ROC-22: 천공발파에 의해 건설되는 수직구(shaft) 및 수직구 단면의 EDZ 두께(thickness)는 400 mm 이하가 되도록 한다.
- L5-ROC-35: 접근 갱도(access tunnels), 주갱도(central tunnels) 및 운영실(technical rooms)의 발파는 천정 및 측벽부에서의 EDZ 두께가 400 mm 이하, 바닥부에서는 800 mm 이하가 되도록 설계해야 한다.
- L5-ROC-57: 처분갱도의 발파는 천정부, 측벽부, 바닥부에서의 EDZ 두께가 400 mm 이하가 되도록 설계해야 한다.
- L5-ROC-58: 플러그 설치위치(plug slot)에서의 EDZ 두께는 200 mm 이하여야 한다.
- L5-ROC-99: EDZ 형성 최소화를 위한 굴착 방법(excavation practices)은 Posiva 내부 보고서(internal Memorandum, POS-023054)를 따른다.
- L5-ROC-132: 처분시설 위치에 상관없이 두께가 400 mm를 초과하는 연결된(continuous) EDZ가 터널 탐사영역의 80% 이상에서 형성되어서는 안 된다.

최종처분장 시설을 구성하는 다양한 갱도에서의 측벽부(wall)와 바닥부(floor)에서의 EDZ 허용최대두께 기준을 Table 2에 요약하였다.

Table 2. Allowed maximum thickness of the EDZ layer in different tunnels (Follin et al., 2021)

Tunnel type	EDZ max. at wall (mm)	EDZ max. at floor (mm)
Access tunnel	400	800
Central tunnel	400	800
Technical tunnel	400	800
Demonstration tunnel	400	400
Final disposal tunnel	400	400
Plug site	200	200

처분갱도 굴착 후 EDZ의 현장평가에 GPR 탐사법이 가장 유용함을 확인하였고 현장 GPR 탐사 결과를 바탕으로 Posiva에서는 사용후핵연료 최종처분장 건설 과정에서의 EDZ 품질 관리 체계(Fig. 11)를 제안하고 있다. GPR 탐사 결과는 크게 3단계(class)로

구분하여 단계별로 조치사항을 제시하고 있다.

Class 1: 부분적으로 허용최대두께 기준을 초과하는 경우로 별도의 조치 불필요

Class 2: 허용최대두께 기준을 초과하는 면적이 조사 지역의 50% 이상일 경우, 평가보고서(nonconformance report)를 작성해야 한다. 굴착 일지(excavation document)를 검토하여 설계대로 굴착이 수행되었는지 확인한다. 지질조사를 실시하고 자연균열에 기인한 경우 별도의 조치는 요구되지 않는다. 검토 결과 설계 이상이 발견되지 않을 경우 천공 및 발파 방식을 변경해야 한다.

Class 3: 허용최대두께 기준을 초과하는 면적이 조사 지역의 80% 이상의 경우로 Class 2의 조치에 추가하여 기술 전문가 그룹(LOUHI) 및 관계 기관(NORT: 처분시설의 계획 및 건설 주관 그룹, TER: Posiva의 관련 기술부서)에 보고하여 굴착 설계의 변경 및 기계굴착으로의 전환을 승인받아야 한다.

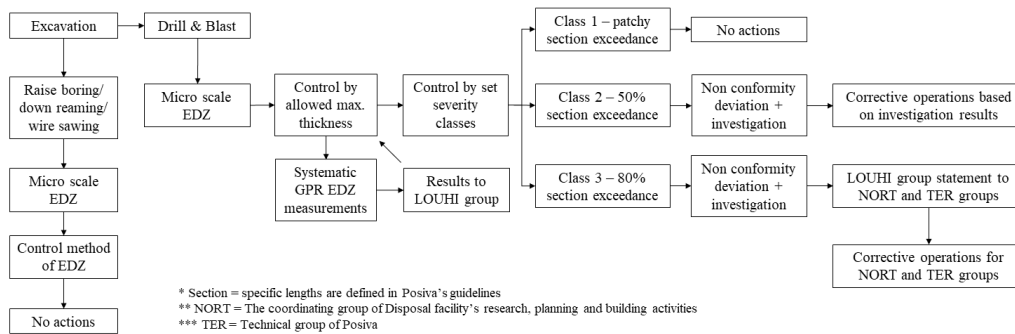


Fig. 11. The flowchart of Posiva's EDZ control processes (Follin et al., 2021)

3. 결론

국내에서도 사용후핵연료 안전관리에 대한 관심 및 관련 사업이 본격화되고 있다. 2021년 발표된 사용후핵연료 관리정책에 대한 재검토 권고안에서는 관련 정책결정과 기술개발이 조화롭게 추진될 수 있도록 심층처분방식을 비롯한 다양한 연구처분방식의 안전성과 타당성 검증 기술 확보를 위한 고준위방폐물 관리 기본계획의 수립이 촉구되고 있다. 또한, 사용후핵연료 관리 핵심기술 개발 사업단이 출범하여 2021년부터 2029년까지 사용후핵연료의 저장·처분 안전성 확보를 위한 핵심기술개발사업을 추진할 계획이다. 이 사업에서는 사용후핵연료를 안전하게 저장하고 영구처분하기 위한 기술개발뿐만 아니라 심층처분시스템의 안전성 심사에 필요한 규제요소와 검증기술 개발 내용도 별도로 마련해 두고 있다.

사용후핵연료 및 고준위방폐물의 심층처분 관련 규제는 원자력안전위원회에서 고시하는 「고준위방폐물 심층처분시설에 관한 일반기준」에 수록되어 있으며 종합안전성 구축을 위한 지하연구시설(URL)의 건설·운영 필요성을 명시하고 있다. 따라서, 지하연구시설의 구축 및 운영 과정에서 다양한 현장실험을 통하여 개발되는 국내 고유 심층처분시스템의 성능 및 안전성이 입증되어야 한다. 다만, 현재 국내의 심층처분시설 설계에 대한 규제기반은 미비한 수준으로 상기의 일반기준 내용은 일반적(generic)이고 선연적인 수준으로 규제요건, 부합성 기준 및 검증방법론과 도구에 대한 보다 구체적인 내용을 개발할 필요가 있다.

본 고에서는 지하연구시설 및 심층처분시설 건설에 필요한 규제 요건 및 검증체계 구축에 활용할 목적으로 핀란드 온칼로(ONKALO) 시설부지에서 수행한 EDZ 관련 연구 내용과 이를 통해 제안된 EDZ 현장평가 방법 및 품질관리 체계에 대한 검토결

과를 소개하였다. 검토 결과, 지하연구시설 및 처분시설 건설과정에서 EDZ 발생양상의 현장평가에는 다양한 물리탐사 기법 중에서도 GPR 탐사가 가장 효과적임을 알 수 있었다. EDZ 평가에 사용된 물리탐사 기법을 해상도, 대상영역, 준비과정의 용이도, 소요 시간 및 비용, 부지 교란정도, 해석의 정확성 의 관점에서 비교분석한 결과, GPR 탐사는 EDZ 평가를 위해 굴착 터널 주변의 교란을 촉진할 수 있는 시추공 굴착이 필요 없을 뿐만 아니라 상대적으로 수월하게 터널 주변 넓은 영역과 불규칙한 터널 벽면을 대상으로 높은 해상도의 영상도 획득할 수 있어 보다 효과적으로 EDZ를 파악할 수 있었다. GPR을 이용한 관측 결과, 온칼로 처분시설의 지하 굴착갱도에서는 측벽보다 바닥부에서 EDZ가 폭넓게 형성되고 있었으며 터널 바닥부에서는 0~70 cm 범위의 두께로 EDZ가 발생하였음을 확인하였다.

핀란드는 최종처분시설의 설계 및 건설에 반영하기 위한 EDZ 관련 규제 요건이 일부 개발되어 운영 중에 있다. 대표적인 규제 요건으로는 천공 발파에 의해 건설되는 수직구(shaft), 접근갱도(access tunnels) 및 처분갱도(disposal tunnels)의 측벽부 EDZ 두께는 400 mm 이하, 처분갱도 바닥부의 EDZ 두께는 800 mm 이하가 되도록 규정하고 있다. 또한, GPR 탐사를 통해 파악된 이들 규제 요건을 초과하는 면적 비율이 50%와 80%를 초과할 경우, 별도의 조치 방안을 수립하여 최종처분시설의 EDZ 형성을 제어하고 관리하고 있음을 확인하였다. GPR 탐사는 운영방식에 따라 핸드형과 차량형, 주파수 대역별로 접촉식과 비접촉식, 센서 방식에 따라 Impulse와 Step-Frequency 등 그 종류가 다양하다. 따라서, EDZ 관련 규제 요건 개발에 GPR 탐사 적용을 위해서는 국내 지질환경 및 처분시설 사양에 맞는 운영방식, 주파수 대역, 센서 특성 등을 분석하고 지하갱도 탐사에 적합한 운영방식 및 장비 사양을 결정할 필요가 있다.

사용후핵연료 처분시설 구축과정에서의 허용 EDZ 폭은, 처분갱도 혹은 처분공의 역학적 안정성뿐만 아니라 지하수 유입에 의한 처분용기 부식 및 핵종누출에의 영향도 종합적으로 검토하여 설정하여야 한다. 따라서, EDZ 내 균열망 모델 구축, 이를 통한 지하수 유입량 산정 해석과 EDZ 내 투수특성 및 핵종이동 지연특성, 처분공 간격에 따른 온도 상승 해석 등과 연계하여 국내 처분환경에 적합한 EDZ 폭에 대한 규제 요건이 개발되어야 할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2022년도 원자력안전위원회의 재원으로 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단 및 한국원자력안전재단의 지원(2109092-0121-WT112)을 받았습니다. 또한, 제1 저자는 과학기술정보통신부 재원 한국연구재단의 지원(2022R1A2C1009524)을 받았습니다. 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

- Birkholzer, J.T., Tsang, C.F., Bond, A.E., Hudson, J.A., Jing, L., and Stephansson, O., 2019, 25 years of DECOVALEX – Scientific advances and lessons learned from an international research collaboration in coupled subsurface processes. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences*, 122: 103995.
- Follin, S., Koskinen, L., Sukkanen, J., Riihiluoma, N., Kantia, P., Kiuru, R., and Mustonen, S., 2021, Characterisation of EDZ for final disposal facility of spent nuclear fuel in Olkiluoto, Posiva 2021-16. Posiva Oy. Olkiluoto, Finland.

- Heikkinen, E., Kantia, P., Kiuru, R., and Riihiluoma, N., 2021, EDZ Study Area in ONK-TKU-3620: Geophysical tests conducted between 2012 and 2014. Posiva Working Report 2017-53, Posiva Oy. Olkiluoto, Finland.
- Kim, H.M., Ryu, D.W., and Synn, J.H., 2008, In-Situ Evaluation Technique for Hydraulic Conductivity in Excavation Disturbed Zone (EDZ), *TUNNEL & UNDERGROUND SPACE*, 18(2): 91-97.
- Kim, H.M. and Park, E.S. 2020, Review of Numerical Approaches to Simulate Time Evolution of Excavation-Induced Permeability in Argillaceous Rocks, *TUNNEL & UNDERGROUND SPACE*, 30(6): 519-539.
- Kiuru, R., Heikkine, E., Jacobsson, L., and Kovacs, D., 2021, EDZ Study Area in ONK-TKU-3620: Petrophysical, rock mechanics, and petrographical testing and analysis conducted on drill core specimens between 2104 and 2016. Posiva Working Report 2017-56, Posiva Oy. Olkiluoto, Finland.
- KORAD, 2021, News Letter for high-level radioactive wastes. KORAD TI 2021-03.
- Kwon, S. and Min, K.B., 2020, An Introduction to the DECOVALEX-2019 Task G: EDZ Evolution – Reliability, Feasibility, and Significance of Measurements of Conductivity and Transmissivity of the Rock Mass, *TUNNEL & UNDERGROUND SPACE*, 30(4): 306-319.
- Kwon, S.K. and Cho, W.J., 2007, Investigation of excavation disturbed zone around a tunnel by blasting, *Explosives & Blasting*, 25(1): 15-29.
- Lee, C., Kwon, S., Choi, J.W., and Jeon, S., 2011, An Estimation of the Excavation Damaged Zone at the KAERI Underground Research Tunnel, *TUNNEL & UNDERGROUND SPACE*, 21(5): 359-369.
- Mustonen, S., Mellanen, S., Lehtimäke, T., and Heikkinen E., 2010, EDZ09 Project and related EDZ studies in Onkalo 2008-2010. Working Report 2010-27, Posiva Oy, Olkiluoto, Finland.
- Posiva SKB., 2017, Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. Conclusions and recommendations from a joint SKB and Posiva working group, Posiva SKB Report 01, Posiva Oy, Olkiluoto, Finland and Svensk Karnbranslehantering AB, Stockholm, Sweden.
- Reyes-Montes, J. and Flynn, W., 2021, EDZ study area in ONK-TKU-3620: Seismic cross-hole tomography, Posiva Working Report 2015-24, Posiva Oy, Olkiluoto, Finland
- Um, J.-G. and Hyun, S.G., 2022, Rock Mechanics Site Characterization for HLW Disposal Facilities, *Econ. Environ. Geol.* 2022 Feb; 55(1): 1-17.