

## 스웨덴 포쉬마크 중저준위 방사성 폐기물 지하 처분장 확장 계획 소개

권새하, 민기복\*, 우베 스테판손

### An Introduction to the Expansion Plan of the Underground Repository of Low- and Intermediate-level Radioactive Waste In Forsmark, Sweden

Saeha Kwon, Ki-Bok Min\*, Ove Stephansson

**Abstract** The world's first underground repository for low- and intermediate- level radioactive waste (SFR1) has been in operation since 1988. SFR1 can accommodate 1,000 m<sup>3</sup> of radioactive waste per year with 4 chambers and 1 silo with a total capacity of 63,000 m<sup>3</sup> of radioactive waste. With extended operation time of 10 of the 12 nuclear power reactors and dismantling of the other 2 nuclear reactors, more nuclear waste need to be disposed in the future. Therefore, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB) submitted a license application for a repository extension (SFR3) that consists of 6 additional rock chambers with a capacity of 108,000 m<sup>3</sup> of radioactive waste and for accommodating 9 boiling water reactor tanks. In this study, plans for the extension SFR3 are presented with the geological, geomechanical and hydrogeological issues to be considered.

**Key words** Underground Radioactive Waste Repository, Low and Intermediate Radioactive Waste

**초 록** 스웨덴 포쉬마크 (Forsmark) 지역에서는 1988년부터 세계 최초의 동굴식 중저준위 방사성 폐기물 처분장 (SFR1)이 운영되고 있다. 4개의 터널 및 1개의 사일로에 용량 63,000 m<sup>3</sup>의 처분공간이 확보되어 연간 1,000 m<sup>3</sup>의 폐기물을 처분할 수 있었지만, 스웨덴 내 12기 중 10기의 원자로의 수명이 연장되고, 나머지 2기의 원자로가 폐쇄되어 추가 폐기물 처분에 대한 요구가 발생하게 되었다. 따라서 6기의 수평터널을 추가로 건설하여 폐기물과 9개의 반응로 용기 처분을 위한 108,000 m<sup>3</sup>의 처분 공간을 확보할 계획으로 스웨덴 방사성폐기물 관리주식회사 (SKB)는 SFR3으로의 확장을 위한 허가 신청서를 2014년 정부에 제출하였다. 본 연구에서는 SFR3의 추가 확장 계획에 대해 소개하고, SFR3의 계획 시에 고려된 지질학적, 암반공학 및 암반수리학적 요소들을 소개하였다.

**핵심어** 지하 방사성 폐기물 처분장, 중저준위 방사성 폐기물

## 1. 서 론

국내 최초의 중저준위 방사성 폐기물 처분장이 2015년 경주에 건설되어 6개의 사일로에 총 100,000드럼의 처분공간이 확보되어 있다 (KORAD, 2016). 그리고 지난 2016년 7월에는 고준위 방사성 폐기물 관리 기본계

획이 확정되어 부지선정, 지하연구시설 및 영구처분시설 건설 등에 관한 로드맵이 수립된 바 있다 (MOTIE, 2016). 본 기술보고에서는 관련기술의 해외동향 파악을 위해 스웨덴의 중저준위 지하처분장 관련 기술적용 사례를 소개하고자 한다.

스웨덴에는 현재 총 10기의 원자력 발전소가 가동 중으로 총전력량의 약 34%를 원자력발전이 담당하고 있다 (IAEA, 2016). 2009년에는 스웨덴 방사성 폐기물 처분 주식회사(SKB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company)에서 고준위 방사성 폐기물 지하처분장의 부지로 포쉬마크(Forsmark) 지역을 선정하여 현재 스웨덴 정부는 해당부지의 적합성 여부에 대한 심사를 진행 중에 있다. 또한 사용 후 핵연료 중간저장 시설

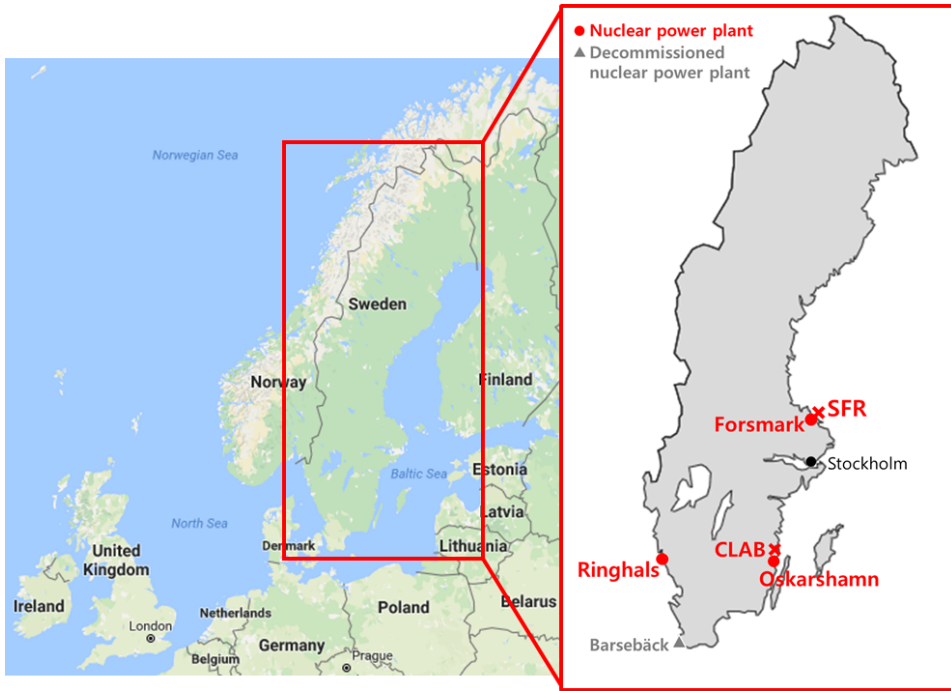
**Received:** Sep. 13, 2016

**Revised:** Sep. 23, 2016

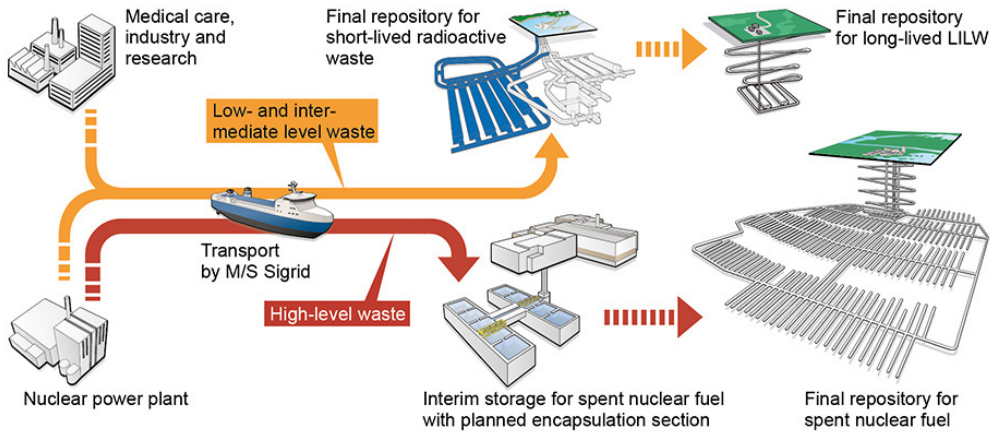
**Accepted:** Oct. 12, 2016

**\*Corresponding Author:** Ki-Bok Min  
Tel) +8228809074, Fax) +8228770925  
E-Mail) kbmin@snu.ac.kr

Department of Energy Resources Engineering, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, Korea



(a) Location of SFR in the map of Sweden

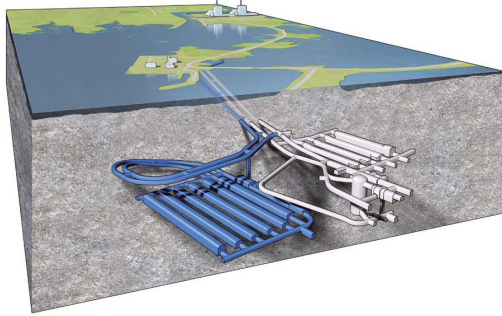


(b) Swedish system of disposal of radioactive waste (SKB, 2016)

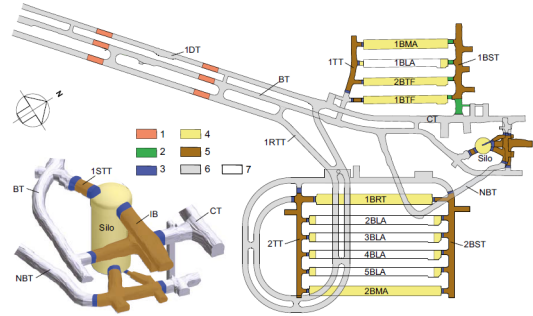
Fig. 1. Nuclear waste disposal in Sweden

(CLAB, Central Interim Storage Facility for Spent Fuel) 과 중저준위 방사성 폐기물 처분장(SFR, Slutförvaret För kortlivat Radioaktivt avfall)은 각각 1985년과 1988년부터 운영해 오고 있다(Fig. 1). 이 중 스웨덴 외 스트하마르 코문의 포쉬마크 지역에 위치한 중저준위 방사성 폐기물 처분장(SFR)은 세계 최초의 동굴식 처분

장으로 해수면으로부터 60미터 아래에 굴착되어 4개의 처분터널 및 1개의 콘크리트 사일로에 중저준위 방사성 폐기물을 처분하고 있다. 설계된 처분장에는 총 63,000 m<sup>3</sup>의 처분 공간이 확보되어 연간 1,000 m<sup>3</sup>의 폐기물을 처분 가능하도록 계획되었지만, 발전이 중단된 바르세벡(Barsebäck) 지역 발전소 2기의 해체와 기존 원자력 발



**Fig. 2.** The existing SFR1 (grey, right) and extension SFR3 (blue, left) and access tunnel (SKB, 2014a)



**Fig. 3.** Schematic plan of SFR 1 and SFR 3, with a detailed view of the silo. 1) Plugs in access tunnels 2) Transition material 3) Mechanical plug of concrete 4) Backfill material of macadam 5) Hydraulically tight section of bentonite 6) Backfill material in access tunnels and the central area of the tunnel system 7) Non-backfilled openings. (SKB, 2014b)

전소의 연장 가동으로 인하여 중저준위 방사성 폐기물의 양이 증가할 것으로 예상되어 처분공간의 확대가 필요한 실정이다. 이에 따라 2014년에 스웨덴 방사성폐기물 처분 주식회사는 기존의 처분장인 SFR1 인근에 SFR3 (Fig. 2 참조)이라는 추가 처분 공간의 확보를 위한 허가 신청서를 정부에 제출하였으며 스웨덴 방사선 안전청 (SSM, Swedish Radiation Safety Authority)과 국토환경법원(Land and Environmental Court) 양 기관에 의해서 검토된 의견을 바탕으로 스웨덴 정부는 최종 확장 허가 발급 여부를 결정할 예정이다. 본 기술보고에서는 SFR3의 확장계획을 SFR1의 사례와 비교하여 암반공학 및 암반수리학적 측면을 중심으로 소개하고자 한다.

## 2. 중저준위 처분장 확장 계획 및 부지 조사

### 2.1 확장 계획

현재 계획 중인 SFR3은 SFR1과 동일하게 중저준위 방사성 폐기물 처분을 목적으로 하는 처분장으로, 폐기물을 처분할 수 있는 5개의 처분터널과 원자로용기(reactor vessel)의 중간저장을 위한 1개의 처분터널로 각 터널의 연장은 240 m에서 275 m이다. SFR3의 중저준위 폐기물 처분터널에는 추가적으로 수명이 연장된 발전소들에서 발생하는 폐기물들과 바르세벡 발전소의 해체로 인해 발생하는 폐기물 및 폐 원자로 용기를 처분할

것으로 계획하였고 완공될 경우 대략 108,000 m<sup>3</sup>의 처분 공간이 추가 확보되어 현재 SFR1의 두 배에 가까운 여유 공간이 확보될 계획이다(Table 1).

Fig. 3에 나타난 바와 같이 SFR3은 SFR1 부지의 남동쪽에 동일한 종단방향으로 건설 계획으로 SFR1에서 사용되었던 진입 터널 등을 공유하며 처분 후 처분장이 완전히 밀폐할 계획도 수립이 되어 있다(Fig. 3). SFR3 처분터널의 심도는 해수면으로부터 120 m로 SFR1의 처분터널(60 m)에 비해 더 깊은 곳에 위치할 예정이다.

Fig. 4는 SFR3에 건설될 터널의 종단면을 나타내며 최종 면은 슛크리트로 마감을 하도록 되어 있다. Table 2는 터널의 크기와 용도를 나타낸다.

### 2.2 지질학적 정보

스웨덴 방사성 폐기물 처분 주식회사(2013)는 SFR3 굴착 예상지역의 안정성 평가를 위해 새로운 지질학적 모델을 구축하였다(Fig. 5). 여기에는 기존 SFR1의 건설 당시에 32개의 시추공으로부터 얻었던 정보들과 이번에 새로이 굴착한 8개의 시추공으로부터 얻은 정보들을 취합한 결과를 반영하였다. SFR 부지 주변 암반은 화강암

**Table 1.** Information of SFR1 and SFR3, (SSM, 2016)

	SFR1	SFR3
Depth (m)	60 m	120 m
Capacity of facility (m <sup>3</sup> )	63,000 m <sup>3</sup>	108,000 m <sup>3</sup>
Excavated rock volume (m <sup>3</sup> )	400,000 m <sup>3</sup>	500,000 m <sup>3</sup>
Number of vaults	4 vaults + 1 silo	6 vaults

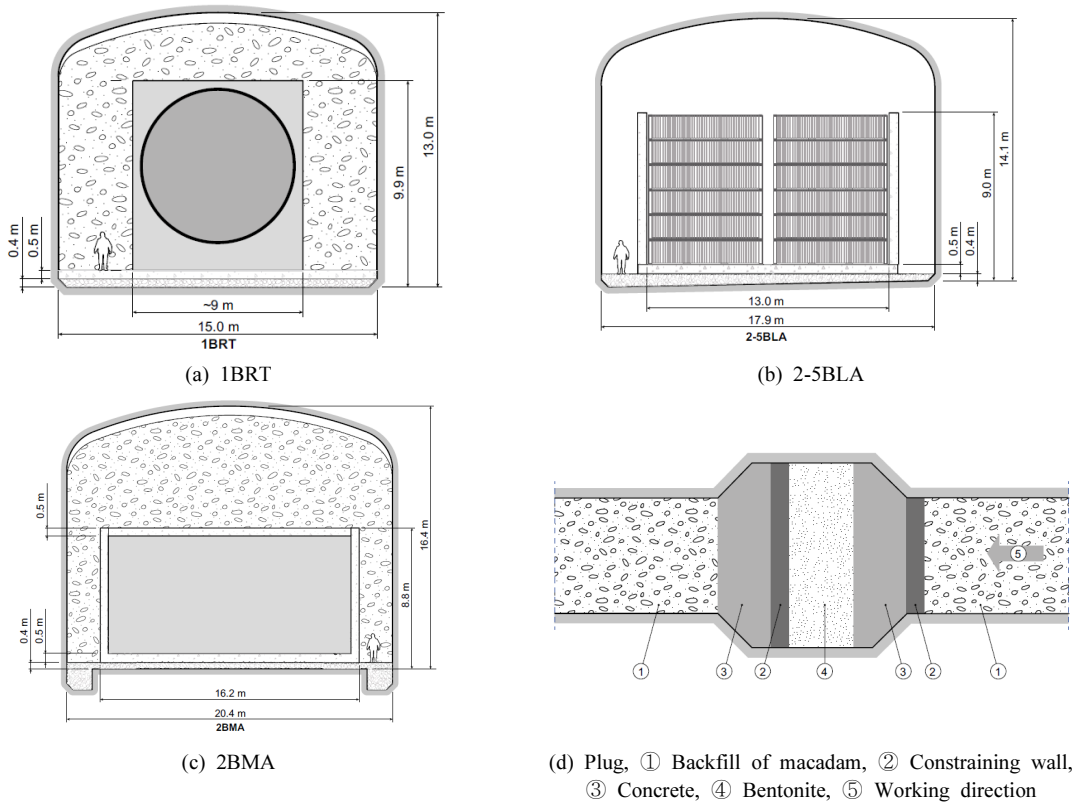


Fig. 4. Schematic cross section of SRF3 repository tunnels and plug. (SKB, 2014b)

Table 2. Dimensions of repository tunnels in SFR1 and SFR3 (SKB, 2014c)

Repository	Name	Area	Length	Waste
SFR1	Silo	Width 29.4m, Height 68.7m	Silo	Intermediate-level
	1BMA	Width 19.6m, Height 16.5m	160 m	Intermediate-level
	1BLA	Width 14.7m, Height 12.7m	160 m	Low-level
	1BTF	Width 14.7m, Height 9.5m	160 m	Concrete tank
	2BTF			
SFR3 (Extension)	1BRT	Width 15.0m, Height 13.0m	240 m	Reactor pressure vessels
	2BLA	Width 17.9m, Height 14.1m	275 m	Low-level
	3BLA			
	4BLA			
	5BLA			
2BMA	Width 20.4m, Height 16.4m	275 m	Intermediate-level	

(granite) 및 화강섬록암(granodiorite)이 지배적으로 분포 해있고, 그 외에 거정암(pegmatite), 거정화강암(pegmatitic granite), 각섬암(amphibolite)이 분포한다.

부지 내부로는 두 개의 대규모 변형대가 북서방향으로 형성되어 있고, 이로 인해 엽리 등과 같은 연성 구조들이 다수 발견되었다. 그 외에 부지 근처에 Singö 변형

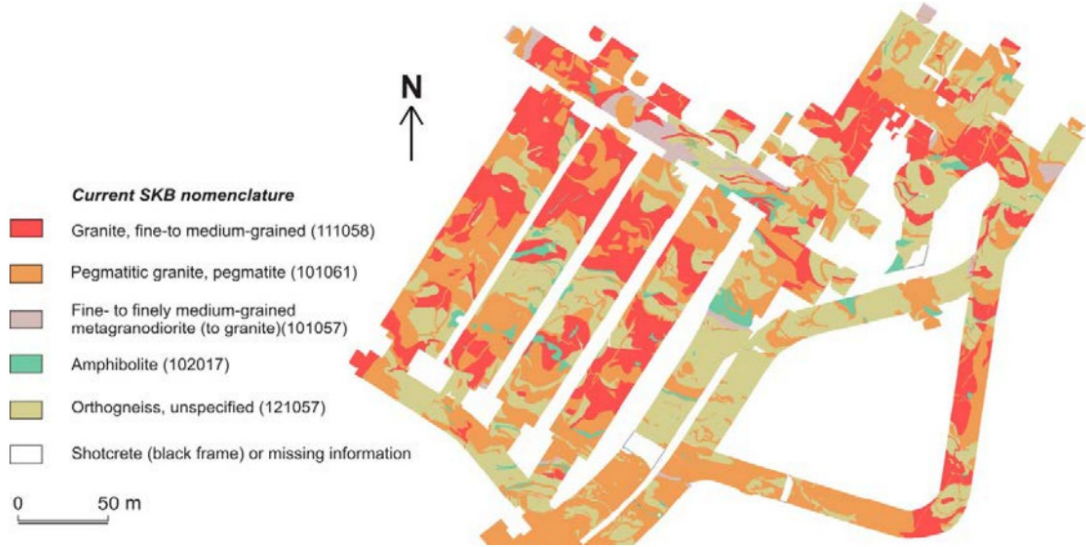


Fig. 5. Geological map in existing SFR1 (SKB, 2013)

대가 존재하는 것이 확인되었다. Singö 변형대는 스웨덴 우플랜드(Upland) 지역에서 가장 두드러지게 나타나는 단층대로, 포쉬마크 지역에서는 약 200 m 너비에 경사와 경사방향은 90/120으로, 거의 수직 방향으로 형성되어 있다. Singö 변형대는 SFR1 진입 터널의 초반부와 교차하여 터널의 안정성 분석에 역학적 영향을 준 바 있기 때문에, SFR1의 건설 후에도 대규모 변형대의 영향에 대한 분석들이 진행되었다(Carlsson and Christiansson, 2007) (Min, 2008). 그리고 SFR3에서도 Singö 변형대가 진입 터널 및 처분 터널의 일부가 교차할 수 있어 이에 대한 주의가 필요할 것으로 판단된다(SSM, 2016).

2.3 암반공학적 정보

SFR3 부지에 대한 안정성 평가는 SFR1의 건설 당시 사용되었던 시추공 자료로 진행되었다. 각 시추공들은 지표면으로부터 20~250 m 심도까지 굴착되어 해당 심도에서의 암반공학적, 수리지질학적, 지화학적 정보들을 보여준다.

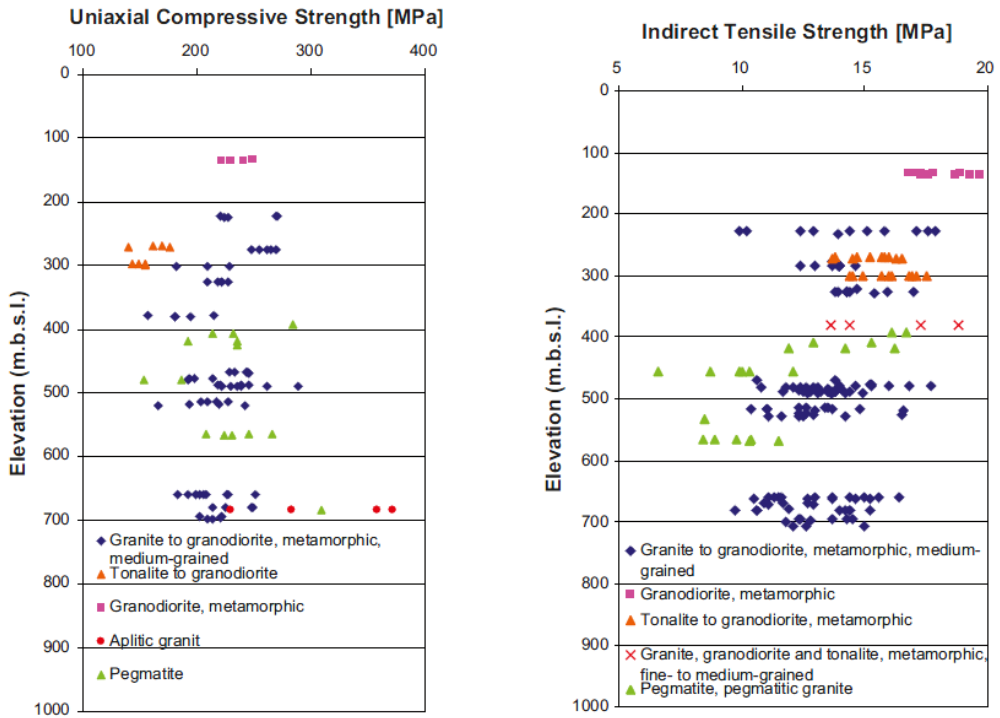
SKB(2013)의 결과에 따르면 평균 RMR 지수는 74, Q 지수는 20~40으로 비교적 좋은 암중으로 분류되었다. 모어-쿨롱 파괴조건식을 위해 산정된 암반의 평균 점착력은 13 MPa, 내부마찰각은 50°~60°로 나타났다. 평균 탄성계수는 50 GPa, 포아송 비는 0.34로 얻어졌다.

변형대가 포함된 전이구간에서의 평균 점착력은 2 MPa, 내부마찰각은 51°로 나타났고, 평균 탄성계수는 13 GPa, 포아송 비는 0.35로 얻어졌다. 주 변형대 내부에서 얻어진 시료는 평균 점착력 2 MPa, 내부마찰각 37°에 평균 탄성계수는 2.6 GPa, 포아송 비는 0.46의 값을 가졌다.

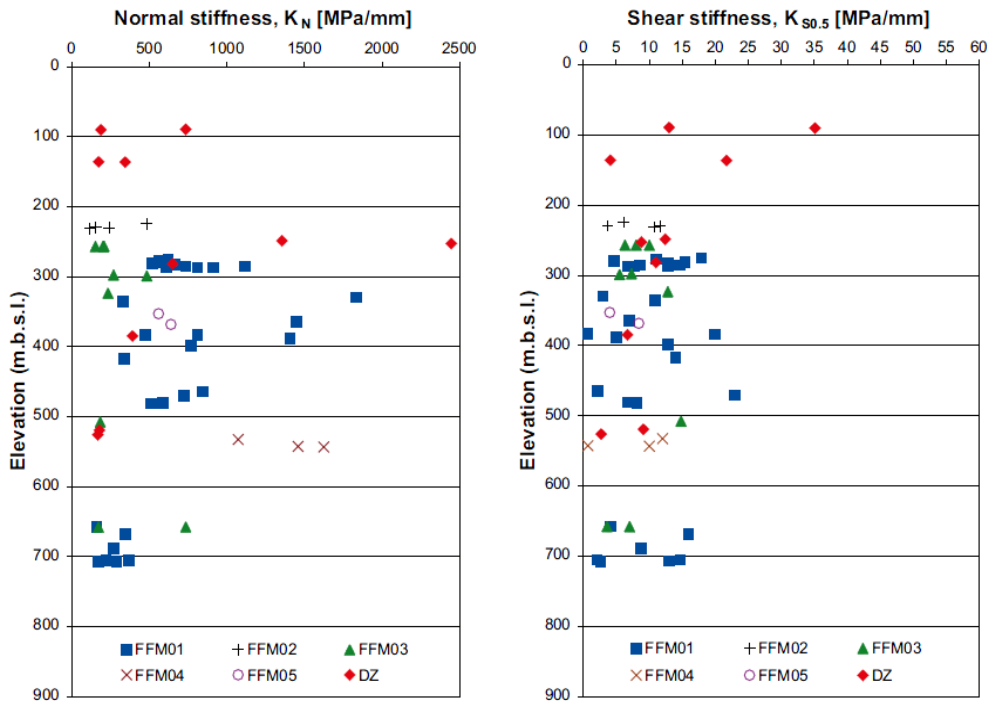
추가적으로 Glamheden et al.(2007)은 포쉬마크 지역 부지의 다양한 암종을 가진 무결암 시료에 대해 단축압축시험과 간접인장시험을 수행하여 깊이에 따른 탄성계수, 포아송 비, 단축압축강도, 인장강도를 측정하였고, 조사 도중에 얻은 작은 크기의 절리 샘플들로부터 수직강성과 전단강성을 측정했다(Fig. 6).

현지응력은 포쉬마크 지역에 위치한 12개의 시추공으로부터 결정되었다. 각 시추공마다 얻어지는 응력구배(stress gradient)는 넓은 범위를 갖으나, 응력 자체는 심도가 깊어질수록 분명한 증가추세를 보이는 것이 확인되었다. SKB(2013)는 250 m 깊이까지의 응력 모델을 제시하였고, 깊이에 따른 주응력 분포는 아래와 같으며 주응력의 방향은 N142°E로 추정하였다.

$$\begin{aligned} \sigma_1 (MPa) &= 5 + 0.07z (m) \\ \sigma_2 &= 0.07z \\ \sigma_3 = \sigma_z &= 0.027z \end{aligned} \tag{1}$$



(a) Uniaxial compressive strength and indirect tensile strength distribution by elevation



(b) Normal and shear stiffness by elevation

Fig. 6. Mechanical properties of rock at Forsmark with respect to depth (Glamheden et al., 2007)



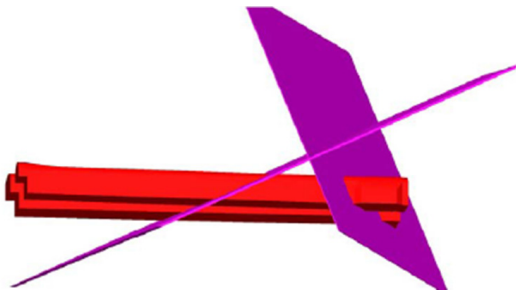
### 3. 암반공학적 고려 사항

SFR3의 처분 터널 종단방향은 SFR1과 같은 북동 방향으로 초기응력의 주방향(N142°E)과 수직한 방향으로 설계되었다. 통상적으로 터널의 종단면 방향을 현지응력의 주방향과 일치하도록 하는 경향과는 반대이지만, 포쉬마크 지역의 암반 압축강도 평균이 230 MPa 정도로 매우 커서 낮은 심도에서의 응력집중에는 충분히 견딜 수 있으며, 높은 수평응력이 오히려 암반의 구조적 안정성(structural stability)을 높일 수 있는 것으로 판단하고 있다. Fig. 7은 두 개의 변형대와 교차하는 SFR1의 두 처분터널(BLA, BMA) 모델을 3차원 경계요소 수치 해석 프로그램인 3DEC(Itasca, 2011)으로 해석한 예로 블록의 변위를 분석한 결과 별다른 보강 없이도 매우 낮은 마찰각(5.7°~8.7°) 하에서만 대규모 붕락이 발생한다는 결과가 얻어졌다(Mas Ivars et al., 2014).

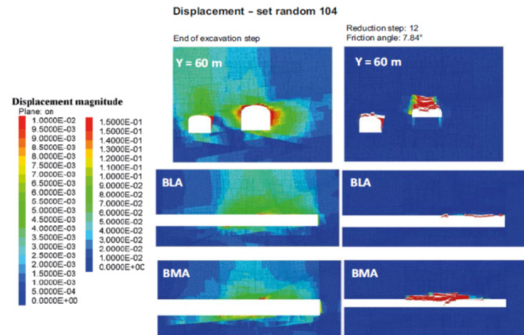
SFR3 터널의 안정성은 과거 SFR1 건설 경험으로부터

터 많은 요인을 고려해야 할 것으로 생각된다. 대표적으로 SFR1의 굴착 당시에 진입 터널의 초반부와 일부 처분 터널이 Singö 변형대의 영향을 받아 Forsmark 3 터널 굴착과정에서 최대 7.5m의 여굴이 발생한 바 있다 (Fig. 8). SFR3에 위치하게 될 6개의 처분터널 중 반응로 용기 처분 터널의 경우 반응로 용기의 부피 때문에 새로운 진입 터널이 필요할 것으로 판단된다. 여기서 진입 터널의 예상 경로에 Singö 변형대가 교차할 것으로 예상되기 때문에, 마찬가지로 변형대의 영향을 고려한 안정성 평가를 적용하여 여굴을 미리 예방하여야 한다.

또한 기존 사일로에서 관찰되었던 천달침하(Fig. 9a)의 경우 이론적 결과와 실제 침하량이 흡사하게 도출되었다. 그 외에도 SKB에서는 1988년 이후로 터널 내로 유입되는 지하수 용출량의 감소 추세를 계속해서 기록하고 있다(Fig. 9b). 이렇게 SFR1으로부터 얻은 역학적 및 수리학적 경험들을 새로운 터널 건설에 활용하여 해당 지역에 적합한 모델이 수립되어야 할 것으로 생각된다.



(a) Constructed tunnel model with two minor deformation zones



(b) Displacement contour from 3DEC simulation

Fig. 7. Numerical simulation of rock fall at IBLA and IBMA cavern in SFR1 (Mas Ivars et al., 2014)

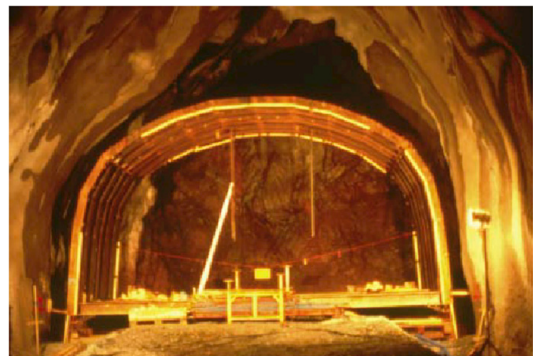
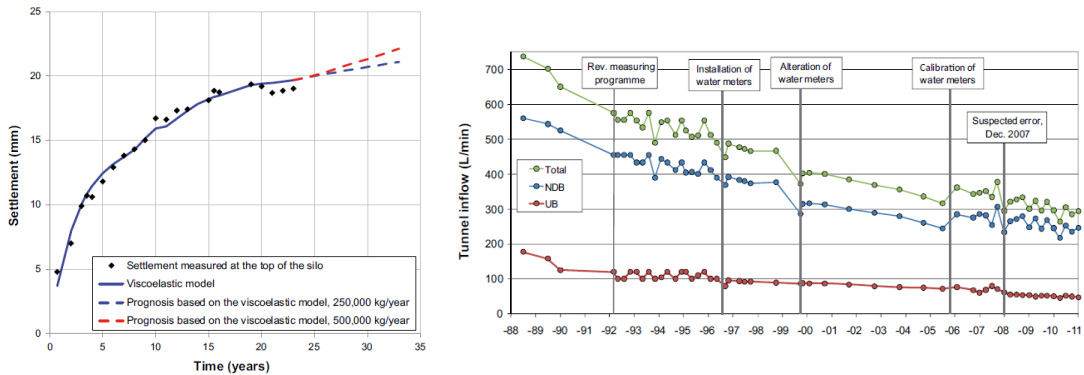


Fig. 8. Overbreak during excavation of Forsmark 3 tunnel (Carlsson and Christiansson, 2007)



**Fig. 9.** Long term mechanical and hydraulic behavior in Forsmark. (a) Measured settlements in silo in SFR1 and prediction by viscoelastic model (SKB, 2014a), (b) Inflow of groundwater to the existing SFR between 1988 and 2011 (x-axis). UB and NDB refer to drainage of the pumping pits in the operational area and in the lower construction tunnel, respectively (SKB, 2013)

스웨덴 방사성 폐기물 처분 주식회사가 선정한 고준위 방사성 폐기물 처분장 예상 부지는 SFR3로부터 약 1.5 km 떨어져 있다. 사용 후 핵연료 처분 시설은 향후 긴 기간 동안 발생하는 열에 의해 주변 암반에 영향을 줄 수 있고, 특히 포쉬마크 지역에 존재하는 균열망과 변형대에서 온도의 증가로 인한 전단거동이 발생할 경우, 투수율이 증가하여 SFR1 및 SFR3 처분터널에 예기치 못한 암반수리학적 영향을 끼칠 수 있으므로 이에 대한 고려도 필요할 것으로 생각된다(SSM, 2016).

스웨덴 등 스칸디나비아 지역은 최근에 빙하기를 겪어서 빙하 후퇴에 따른 지방용기가 지속적으로 발생하고 있다. 빙하에 의한 지면의 용기는 오랜 시간이 지난 후에는 처분장 주변 환경에 영향을 줄 수 있다. 실제로 포쉬마크 지역은 지면의 용기가 연간 6 mm씩 진행되고 있어서 이에 따른 처분장의 수리역학적 안정성에 대한 검토도 필요하다(SSM, 2016). 또한 지진 안정성은 콘크리트 구조물에 대하여서만 실시되었으나 처분 터널에 대한 안정성 해석 또한 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 기술보고에서는 스웨덴에서의 원자력발전소 수명 연장 및 폐쇄에 따라 1988년부터 운영되고 있는 중저준위 방사성 폐기물 지하 처분장의 확장 계획 사례를 소개하였다. 스웨덴 방사성 폐기물 처분 주식회사는 기존 처분장인 SFR1의 설계를 위해 지질학적, 암반공학적 조사결과를 바탕으로 처분장의 모델을 구축하고 건설, 가동, 폐쇄 계획을 세웠다. 추가적으로 건설될 처분장인

SFR3은 SFR1의 운영경험과 고준위 방사성 폐기물 처분장 부지조사 자료를 활용하여 건설예정이다.

처분장의 확장을 위해 처분장 터널의 중단 방향, 터널 내 용수, 지방용기, 지진, 인근 고준위 방사성 폐기물 처분장 건설에 따른 영향 등이 고려되어야 한다.

국내에서도 경주에 건설될 중저준위 방사성 폐기물 처분장이 2015년 이래로 운영되고 있으나 용량이 충분치 않고, 원전폐쇄로부터 발생하는 폐기물, 사용 후 핵연료 등 원자력 에너지 이용에 따른 방사성 폐기물 처분은 아직 사회적으로나 기술적으로 해결해야 할 문제가 많이 남아있다. 그런 측면에서 스웨덴 등 해외 선진국의 성공적인 운영 사례 등을 우리 현실에 맞게 참고하는 노력이 필요하다.

#### 사 사

본 연구는 스웨덴 방사성 안전청(SSM, Swedish Radiation Safety Authority)과 산업통상부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(과제번호 20133030000240) 및 서울대학교 공학연구원의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다. 본 기술보고는 저자들만의 의견을 알려준다.

#### References

1. Carlsson, A. and R. Christiansson, 2007, Construction experiences from underground works at Forsmark, Compilation of report, SKB R-07-10, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB).



2. Glamheden, R., A. Fredriksson, K. Röshoff, J. Karlsson, H. Hakami and R. Christiansson, 2007, Rock Mechanics Forsmark. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2, SKB R-07-31, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB).
3. Itasca Consulting Group, 2011, OPG's deep geologic repository for low & intermediate level waste, Long-term geomechanical stability analysis, NWMO DGR-TR-2011-17.
4. Mas Ivars, D., M. Veiga Rios, W. Shiu, F. Johansson and A. Fredriksson, 2014, Long term stability of rock caverns BMA and BLA of SFR, Forsmark, SKB R-13-53, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB).
5. Min, KB, 2008, Effect of deformation zones on the state of in situ stress at a candidate site of geological repository of nuclear waste in Sweden, Tunneling & Underground Space, 18. 2, 134-148.
6. Ministry of Trade Industry and Energy(MOTIE), Press release on 11 Aug 2016.
7. SKB, 2013, Site description of the SFR area at Forsmark at completion of the site investigation phase, SDM-PSU Forsmark, SKB TR-11-04, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB).
8. SKB, 2014a, Safety Analysis for SFR, Long-term safety, Main report for the safety assessment SR-PSU, TR-14-01, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB).
9. SKB, 2014b, Initial state report for the safety assessment SR-PSU, TR-14-02, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB).
10. SKB, 2014c, Site description of the SFR area at Forsmark at completion of the site investigation phase SDM-PSU Forsmark, TR-14-04, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB).
11. SSM, 2016, SSMs external experts' reviews of SKBs safety assessment SR-PSU - engineered barriers, engineering geology and chemical inventory. initial review phase, Swedish Radiation Safety Authority (SSM) 2016:12.
12. <https://www.iaea.org/pris/> (visited on 19 Aug 2016)
13. [https://www.korad.or.kr/krmc2011/user/2016\\_new/02\\_10\\_30\\_10/bangpyenews\\_main.jsp](https://www.korad.or.kr/krmc2011/user/2016_new/02_10_30_10/bangpyenews_main.jsp) (visited on 5 Oct 2016)
14. <https://www.skb.com/our-operations/the-swedish-system/> (visited on 19 Aug 2016)

### 권 새 하



2014년 서울대학교 에너지자원공학과 공학사

Tel: 02-880-7230  
E-mail: ksha225@gmail.com  
현재 서울대학교 에너지시스템공학부 석박사통합과정

### 우베 스테판손



1967년 스웨덴 옘살라대학교 이학고급 석사 (Licentiate) (광물학 및 암석학)  
1972년 스웨덴 옘살라대학교 이학박사 (구조지질 및 암석역학)

Tel: +49-331-2881384  
E-mail: ove@gfz-potsdam.de  
현재 독일 연방지질과학연구원(GFZ German Research Center for Geoscience) 지진재해 및 응력장 연구부(Seismic Hazard and Stress Field) 겸임교수

### 민 기 복



1994년 서울대학교 자원공학과 공학사  
1999년 서울대학교 자원공학과 공학석사  
2004년 스웨덴 왕립공과대학(Royal Institute of Technology) 공학박사

Tel: 02-880-9074  
E-mail: kbmin@snu.ac.kr  
현재 서울대학교 에너지자원공학과 교수