

고준위 방사성폐기물 심층처분을 위한 수리지구화학 부지기술모델 설정 및 개발 방법론: 스웨덴 Forsmark 사례를 중심으로

김호림^{1*} · 정희원² · 박세혁¹ · 최한나¹ · 김한나³ · 오준섭⁴ · 이정환⁵ · 윤성택⁴

¹한국지질자원연구원, ²충남대학교, ³수원대학교, ⁴고려대학교, ⁵한국원자력환경공단

Hydrogeochemical Site Descriptive Modeling Development Methodology for Deep Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste: A Review of the Swedish Forsmark Case

Ho-Rim Kim^{1*}, Heewon Jung², SeHyeok Park¹, Hanna Choi¹, Hanna Kim¹, Junseop Oh³, Jeong-Hwan Lee⁵, and Seong-Taek Yun⁴

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

²Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

³Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

⁴Korea Radioactive Waste Agency, Republic of Korea

ABSTRACT

A hydrogeochemical site descriptive model (SDM) is essential for evaluating the long-term safety of deep geological repositories for high-level radioactive waste (HLW). This review analyzes the hydrogeochemical SDM methodology developed by the Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB) for the Forsmark repository site. The SDM framework integrates quantitative field-based models with process-oriented conceptual models, evolving iteratively from feasibility study through initial and complete site investigation stages. The hydrogeochemical workflow comprises data acquisition and quality management, explorative analysis identifying groundwater types and end-member compositions (Deep Saline, Glacial, Littorina Sea, and Altered Meteoric Waters), quantitative modeling through M3 mixing calculations and PHREEQC geochemical simulations, and interdisciplinary integration with hydrogeological and transport models. The Forsmark SDM successfully characterized the stratified groundwater system, confirmed the long-term stability of reducing and pH-buffering conditions at repository depth, and quantified the role of paleohydrogeological events in shaping present-day hydrochemistry. Based on these findings, methodological considerations for developing a hydrogeochemical SDM in Korea are suggested, including updated thermodynamic database, open-source reactive transport codes, site-specific end-member definition, and global sensitivity analysis for uncertainty quantification.

Key words: Site descriptive model (SDM), Hydrogeochemistry, Deep geological disposal, Forsmark, Groundwater mixing

1. 서 론

고준위 방사성폐기물(high-level radioactive waste, HLW)의

주저자: 김호림, 선임연구원

공저자: 정희원, 부교수; 박세혁, 선임연구원; 최한나, 선임연구원; 김한나, 조교수; 오준섭, 연구교수; 이정환, 팀장; 윤성택, 교수

*교신저자: 김호림, 선임연구원

E-mail: honeius@kigam.re.kr

Received : 2026. 02. 15 Reviewed : 2026. 03. 01

Accepted : 2026. 03. 17 Discussion until : 2026. 06. 30

안전한 처분은 원자력 이용 국가가 직면한 가장 중요한 과학기술적 과제 중 하나이다. 현재 국제적으로 채택된 심층 지질처분(deep geological disposal) 개념은 지하 약 400~700 m 깊이의 결정질 기반암 또는 점토질 암반에 사용후핵연료를 격리하는 방안으로서, 다중방벽체계(multi-barrier system)를 통해 방사성 핵종의 생태계로의 유출을 방지하는 것을 목표로 한다(NEA, 2008; SKB, 2010; IAEA, 2011).

이러한 처분 개념에서 지하수의 화학적 조건은 공학적 방벽의 장기 안정성과 방사성 핵종의 용해도 및 이동성을 직접적으로 제어하는 핵심 인자이다. 캐니스터 파손 시

방사성 핵종의 용해 및 이동 거동은 심부 지하수의 pH, 산화환원전위(Eh), 용존 황화물 농도, 콜로이드 특성 등 지화학적 조건에 의해 지배되며, 이러한 조건은 궁극적으로 핵종의 생태계 도달 가능성을 결정한다(Smellie et al., 2002). 따라서 처분장 부지의 수리지구화학적 특성을 정량적으로 규명하고, 과거 기후변동에 따른 지하수의 기원과 진화(즉, 고수문계)를 이해하며, 장기 안전성 평가에 필요한 매개변수를 도출하는 것이 안전성 평가의 전제 조건이 된다.

부지기술모델(site descriptive model, SDM)은 이러한 부지 특성화 결과를 체계적으로 통합하는 프레임워크로서, 지질학, 암반역학, 열적 특성, 수리지질학, 수리지구화학, 용질이동 특성, 생태계의 7개 학문 분야를 포괄하는 3차원 통합 기술 모델이다(Andersson, 2003). 그중 수리지구화학 부지기술모델(hydrogeochemical SDM)은 암반 및 지층의 지하수 화학 성분과 분포, 기원 및 진화에 관련된 수리지구화학적 과정을 기술하는 분야로서, 장기 처분장 안전성 계산에 필수적인 품질 보증 데이터(pH, Eh 등)를 제공한다(Smellie et al., 2002; Laaksoharju et al., 2008; Choi et al., 2022).

스웨덴 핵연료 폐기물관리공사(Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB)는 20여 년에 걸친 Forsmark 부지조사를 통해 국제적으로 가장 체계적인 수리지구화학 SDM 사례 중 하나를 구축하였다. Forsmark은 2009년 사용후핵연료 최종 처분장 부지로 선정되었으며, 2022년 정부 승인과 2024년 환경허가를 거쳐 2025년 초 착공에 들어갔다. Forsmark SDM은 반복적(iterative) 모델 발전, 다중 접근법(multiple lines of evidence) 적용, 학제간 통합이라는 세 가지 원칙을 구현한 대표적 사례로서, 향후 심층처분 부지 특성화를 추진하는 국가에 중요한 참고 사례를 제공한다.

우리나라는 고준위 방사성폐기물 관리를 위한 부지 선정 과정이 초기 단계에 있으며, 심부 지하수의 수리지구화학적 특성화 방법론에 대한 체계적 논의가 본격화되고 있는 시점이다(Choi et al., 2022; Park et al., 2024). 특히, Choi et al. (2022)은 미국, 캐나다, 스웨덴, 핀란드, 프랑스, 독일, 스위스, 일본 등 8개국의 심부 지하수 환경 연구 동향을 개괄적으로 조망하여 국내 연구 방향 설정에 중요한 기초를 제공할 바 있다. 본 리뷰 논문에서는 이를 보완하여, SKB의 수리지구화학 SDM 개발 방법론과 품질관리 체계, 학제간 통합 과정을 보다 심층적으로 분석하고, Forsmark 부지에서의 구체적 적용 성과를 검토하여 향후 국내 SDM 개발 전략 수립에 활용토록 기여하고자 한다. 이를 위해 먼저 SDM의 기본 개념과 개발 철학(제2장), 수리지구화학 SDM의 4단계 수행 절차(제3장), Forsmark 부지에서의 주요 성과

(제4장), 타 학제 모델과의 연계(제5장)를 차례로 검토하고, 국내 SDM 적용을 위한 방법론적 고려사항(제6장)을 논의한 후, 결론(제7장)을 제시한다.

2. 부지기술모델(SDM)의 개념 및 개발 방법론

2.1. SDM의 정의와 구조

SDM은 처분장 부지와 그 주변 환경에 대한 현재 상태 및 자연적 과정의 통합적 기술이다(Andersson, 2003). SDM은 주로 ‘기술(description)’이지만, 매개변수와 기하학적 프레임워크의 선택이 부지의 기저 개념 모델에 기반한다는 점에서 ‘모델’의 성격을 가진다. SDM은 기반암과 피복층의 다양한 기하학적 단위로 구성된 3차원 모델이며, 파쇄대 기하학과 암중 분포에 의해 결정되는 각 단위에 대해 역학적, 열적, 수리적, 수리지구화학적 특성을 종합적으로 기술한다(SKБ, 2000).

SDM은 안전성 평가(safety assessment, SA)와 암반 공학(rock engineering, RE)에 필수적 입력자료를 제공하되, 미래 부지 진화 시뮬레이션이나 터널 안정성 추정은 그 범위에 포함되지 않는다(Andersson, 2003). 즉, SDM은 현재 상태의 ‘진단’에 집중하며, 미래 예측은 건설 후 안전성 평가의 영역으로 구분된다.

수리지구화학 SDM은 정량적 모델과 정성적 모델의 이중 구조(dual-model approach)로 구성된다(Smellie et al., 2002). 정량적 모델은 현장 측정 데이터에 기반하여 지하수의 화학 조성, 동위원소 특성, 혼합 비율 등을 수치적으로 기술하는 반면, 정성적 모델은 지하수 진화 과정에 대한 프로세스 지향적 개념(conceptual) 모델을 제공한다. 이 두 접근법의 결합을 통해 모델의 내적 일관성을 검증하고 불확실성을 구조적으로 관리할 수 있다.

2.2. 반복적 모델 개발과 ‘살아있는 문서’ 철학

SDM 개발의 근본 철학은 ‘반복성(iterativeness)’과 ‘통합성(integration)’에 있다(Smellie et al., 2002; Andersson, 2003). 모델은 단일한 고정된 결과물이 아니라, 새로운 측정 데이터가 점진적으로 추가됨에 따라 지속적으로 수정되고 개선되는 ‘살아있는 문서(living document)’로 간주된다. 초기 예측은 데이터가 들어올 때마다 검증되며, 예측과 실제 측정값 간의 일관성은 모델 신뢰도를 높이는 척도가 된다.

구체적으로 수리지구화학 SDM은 세 가지 주요 단계에 걸쳐 발전한다(Table 1). 타당성 연구(Feasibility Study, FS) 단계에서는 기존 표면 지하수 데이터와 지형 데이터를

Table 1. Evolution stages of the hydrogeochemical site descriptive model (Modified from Smellie et al., 2002; Laaksoharju et al., 2008)

Investigation stage	Model version	Input data	Major outputs and contributions
Feasibility Study (FS)	Version 0	Geographic location, topographic data, existing well records, and empirical knowledge from analogous sites	Generalized site descriptive model, predictions of major groundwater flow directions, chemical variability, and paleohydrogeochemical evolution
Initial Site Investigation (ISI)	Version 1	Surface/near-surface samples (precipitation, lakes, and wells), deep borehole data (1–2 cored boreholes), and hydrological data	Regional characterization of the groundwater system, identification of major groundwater types, mixing/reaction-based chemical variability, and basis for CSI planning
Complete Site Investigation (CSI)	Version 2	ISI data + additional boreholes (10–20), long-term monitoring data, fracture mineralogy, and rock matrix porewater data	Depth-specific hydrogeological/hydrogeochemical characterization (distribution, chemistry, mixing, reactions), parameters for long-term safety analysis and performance assessment

종합하여 일반화된 부지 서술 모델(버전 0)을 구축하고, 심층 시추 계획 수립을 위한 초기 지침을 제공한다. 초기 현장 조사(Initial Site Investigation, ISI) 단계에서는 1~2개 코어 시추공에서 확보한 제한된 심부 암반 데이터를 포함하여 정성적 수리지구화학 SDM(버전 1)을 생성한다. 완전한 현장 조사(Complete Site Investigation, CSI) 단계에서는 10~20개 추가 시추공의 데이터, 장기 모니터링 데이터, 과쇄광물학, 암석 매질 유체 데이터를 포함하여 지질학적 및 수문지질학적 모델과 완전히 통합된 최종 수리지구화학 SDM(버전 2)을 구축한다(Smellie et al., 2002; Laaksoharju et al., 2008; Ström et al., 2008). 각 단계의 특성화 결과는 새로운 모델 버전(예: 2.1, 2.2)으로 지속적으로 업데이트되어 모델 신뢰도를 향상시킨다.

2.3. 불확실성 관리와 신뢰도 평가

SDM 개발에서 불확실성의 체계적 관리는 핵심 요소이다. Andersson(2003)은 불확실성을 11가지 유형으로 분류하였으며, 이 중 SDM과 직접 관련되는 주요 유형은 개념적 불확실성(conceptual uncertainty)과 자료 불확실성(data uncertainty)이다.

개념적 불확실성은 분석 대상 시스템의 구조와 구성 과정에 대한 불완전한 이해에서 비롯되며, 개별 과정에 대한 이해 부족과 과정 간 상호작용의 범위 및 성질에 대한 불확실성 모두를 포함한다. 자료 불확실성은 모델 매개변수 값의 불확실성으로서, 측정 오류, 해석 오류, 공간적 외삽(extrapolation)에 의해 발생한다. 한편 공간 변동성(spatial variability)과 시간 변동성(temporal variability)은 그 자체로 불확실성이 아니지만, 자료 불확실성의 원인이 되는 경우가 많다.

특히 주목할 점은 신뢰도(confidence)와 불확실성의 관계이다. 기술 모델의 신뢰도는 모델을 지지하는 동기, 표시, 논거의 총체적 조합으로서, 높은 신뢰도는 낮은 불확실성과 동의어가 아니다. 불확실성 기술이 논리적 근거가 탄탄하면 신뢰도가 높을 수 있고, 반대로 불확실성이 낮더라도 이를 뒷받침하는 근거가 빈약하면 신뢰도는 낮게 평가되어야 한다(Andersson, 2003). 이러한 개념적 구분은 SDM에서 신뢰도를 ‘데이터의 양’이 아니라 ‘다중 독립 증거의 수렴(convergence of multiple independent lines of evidence)’, 즉 ‘데이터의 질’로 평가해야 함을 시사한다.

수리지구화학 SDM에서는 전통적 수리지구화학 평가, 다변량 혼합 질량수지 계산, 지구화학 평형 모델링(PHREEQC)의 세 가지 독립적 모델링 구성 요소에 내재된 불확실성을 각각 다루고(Choi et al., 2022), 세 접근법의 결과가 상호 수렴하는지를 통해 전체 모델의 신뢰도를 평가한다(Smellie et al., 2002). Äspö 지하연구시설(HRL)에서의 경험에 기초하면, 시추 불확실성은 측정값의 ±10~20%, 시료 채취 불확실성은 ±10%, 분석 불확실성은 ±5%, 혼합 계산 불확실성은 95% 신뢰구간 내에서 ±10% 수준이다(Smellie et al., 2002).

3. 수리지구화학 SDM 수행 절차

스웨덴 SKB에서 수리지구화학 SDM의 구축은 4단계 수행 절차(workflow)로 체계화된다(Fig. 1). 각 단계는 품질관리 체계와 연동되어 SDM 구축의 신뢰성을 확보하며, 수리지구화학적 매개변수의 불확실성 정량화와 모델 검증을 통합적으로 수행할 수 있도록 설계된다.

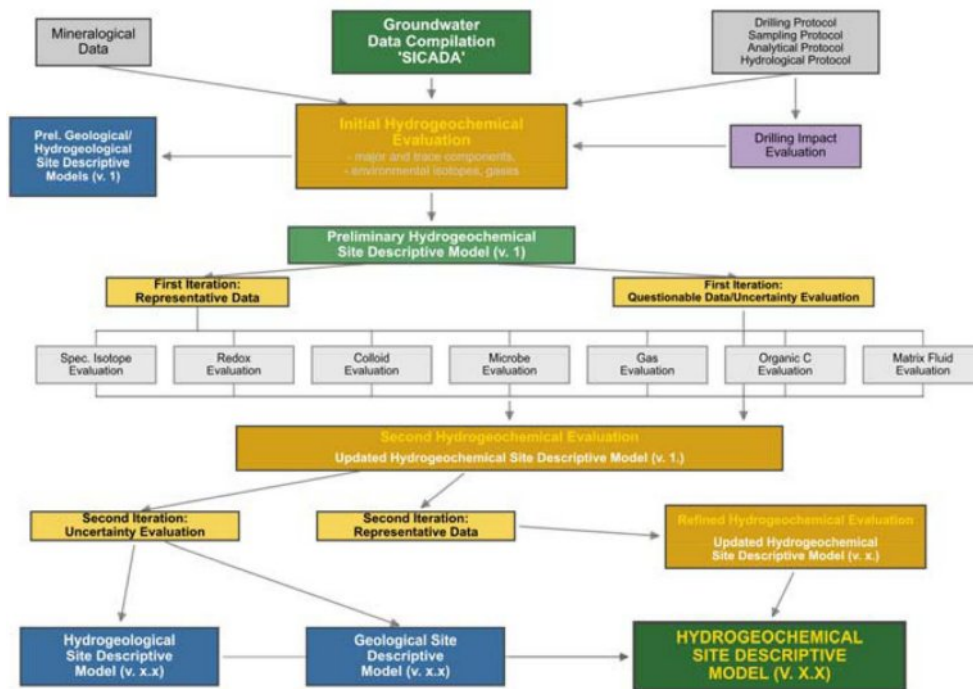


Fig. 1. Flowchart showing the step-wise approach of integration and development involved in the hydrogeochemical evaluation during the Initial Site Investigation (ISI) stage to produce a hydrogeochemical site descriptive model. Gold-colored boxes indicate the major stages in the hydrogeochemical evaluation. Modified from Smellie et al. (2002).

Table 2. Sampling and analysis classes defined in the SKB hydrogeochemical program (Based on Smellie et al., 2002)

Class	Description	Representative analysis items
1	Simple monitoring	EC, pH, uranium, and temperature
2	Type classification	Major ions (partial) and field parameters
3	Main components (excluding redox)	Major ions and stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$)
4	Complete characterization	Major/minor ions, environmental isotopes, and redox parameters
5	Complete characterization with specialized analyses	Class 4 + U-Th isotopes, trace elements, dissolved gases, colloids, and humic/fulvic acids

3.1. 1단계: 데이터 수집 및 품질 관리

수리지구화학 SDM의 첫 번째 단계는 현장 데이터의 체계적 수집과 엄격한 품질 관리이다. 수리지구화학, 수문 지질학, 지질학 등 다양한 분야의 자료를 수집하되, 데이터의 신뢰성을 수집 단계에서부터 철저히 관리한다.

데이터 관리 인프라. 모든 조사 결과(1차 자료)는 SKB의 지구과학 데이터베이스인 SICADA(Site Characterisation Database)에 통합 저장된다(Andersson, 2003). SICADA는 지하수 분석 데이터, 일일 기록, 시료채취 프로토콜, 광물학 정보를 포함하며, 자료 추적성(traceability)을 보장하기 위해 목적별 소프트웨어와 연동된다. 3차원 지하학적 정보의 해석과 시각화는 Rock Visualisation System(RVS)을 통해 수행된다.

3.1.1. 시료채취 등급 체계

수리지구화학 프로그램에서는 연구 목적에 따라 5개 등급(Class 1~5)의 시료채취 및 분석 수준을 정의한다(Table 2; Smellie et al., 2002). Class가 높아질수록 분석 항목이 증가하고 시료 처리 및 보존 절차가 복잡해진다.

시추공 시료 품질 분류. 시추공에서 채취한 지하수 시료의 품질은 5개 범주(Category 1~5)로 평가된다(Table 3; Laaksoharju et al., 2008). Category 1~3은 수리지구화학 모델링의 요건을 충족하며, Category 4는 탐색적 용도에 적합하고, Category 5는 수리지질학적 해석에서 보조적으로 참고할 수 있으나 해석에 주의가 필요하다. 이러한 품질 등급 체계의 실용적 의미는 보존성 추적자인 염소(CI)를 예로 들면 명확해진다. CI은 광물 반응에

Table 3. Quality categories for borehole groundwater samples (Based on Laaksoharju et al., 2008; Smellie et al., 2008)

Category	Drilling water	Time-series data	Analytical data	Charge balance	Remarks
1	≤1%	Adequate	Complete (major ions + environmental isotopes)	± 5%	Reliable redox values; no short circuiting
2	1–5%	Adequate	Incomplete (absence of ¹⁴ C, ¹³ C, less trace elements)	± 5%	Similar to Cat. 1 but with analytical gaps
3	5–10%	Inadequate	Incomplete (some isotopes, redox data absent)	± 10%	Instability during sampling possible
4	>10%	Absent or very incomplete	Mostly Cl, Br, ¹⁸ O, Mg, HCO ₃ , Na, Ca, and SO ₄	> 10%	Exploratory samples; PLU equipment
5	> 10%	Absent or very incomplete	Some major ions or ¹⁸ O missing	> 10%	Tube samples; open-hole mixing effects

거의 관여하지 않아 시료 품질이 상대적으로 낮은 Category 4~5에서도 깊이에 따른 농도 증가 경향을 일관되게 보여주며, 이를 통해 지하수 시스템의 전반적인 층상 구조를 파악할 수 있다. 한편 Category 1~3의 고품질 데이터는 이 경향에 더하여 단성분수 혼합 비율과 공간적 변이를 정밀하게 규명하는 데 필수적이다. 이 방법론을 활용하면 전체 데이터의 잠재력을 최대한 활용하면서도, 민감한 모델링에 부적합한 데이터로 인한 오류를 방지하게 해준다.

3.1.2. 시추 영향 연구

현장 시추 및 시료채취 활동은 지하수의 원천적인 화학적 특성을 교란할 수 있다(Laaksoharju et al., 2008; Yu et al., 2023). 시추수에 의한 교란, 대기 중 산소 접촉에 의한 산화환원 전위(Eh) 변화, 용존 환원성 화학종(Fe²⁺, HS⁻ 등)의 산화 등이 발생할 수 있으며, Forsmark 현장에서는 비정질 철수산화물 침전과 우라늄 함량 증가, 황화물 함량 변화 등이 관찰되었다. 이에 따라 시추 영향 연구(Drilling Impact Study, DIS)가 시추공 굴착 즉시 수행되며, 시추 및 양수 과정에서 유입/추출되는 지하수의 체적을 정량화 하고 시료의 대표성을 평가해야 한다(Smellie et al., 2002; Laaksoharju et al., 2008; Yu et al., 2023).

3.2. 2단계: 탐색적 분석

데이터 품질이 확보된 후, 탐색적 분석(explorative analysis)을 통해 지하수 시스템의 기본적인 특성을 파악한다. 깊이별 경향 분석. 주요 화학 성분(Cl, Mg, Na, Ca, SO₄)과 안정동위원소(¹⁸O, ²H)를 깊이별로 도시하여 지하수 시스템의 층상 구조를 규명한다. 이를 통해 얕은 깊이의 담수로부터 심부의 염수까지의 일반적 경향, 특정 깊이 구간에서의 연안(Littorina) 해수 성분 등을 확인할 수 있다(Laaksoharju et al., 2008).

3.2.1. 단성분(end-member)수 규명

Forsmark 부지 지하수의 화학적 조성은 지난 수십만 년 동안의 빙하기, 간빙기, 탈빙기 및 해수면 변동 등 고수리 지질학적 사건들의 결과로 형성되었으며, 현재 지하수는 네 가지 주요 단성분수의 혼합과 반응을 통해 구성된다(Laaksoharju et al., 2008):

1. **심부 염수(Deep Saline Water):** Laxemar KLX02 시추공 1,625 m 깊이의 고염분 지하수(총용존고형물 75 g/L)를 기반으로 정의되며, Ca-Na-Cl 조성과 세계순환천수선(GMWL)으로부터 크게 벗어나는 특징으로 1.5 Ma 이상의 체류 시간을 가진다.

2. **빙하용수(Glacial Water):** 마지막 빙하기(약 11,000년 전)의 빙하 용빙수로서, 매우 낮은 용존 고형물과 가벼운 동위원소 특징(¹⁸O -21%, ²H -158‰)을 특징으로 한다.

3. **리토리나 연안해수(Littorina Sea Water):** 약 8,500~5,000 BP의 고염도 해수로서, 높은 Mg²⁺ 및 SO₄²⁻ 함량과 ¹⁸O -4.7‰을 특징으로 한다.

4. **변질 순환천수(Altered Meteoric Water):** 최근의 강수가 토양과 천부 암반층을 통과하며 물-암석 반응을 겪어 변질된 물로, 짧은 체류 시간과 높은 HCO₃ 함량을 특징으로 한다.

이러한 단성분수의 정의는 ¹⁸O-²H 관계도, Cl 대 깊이 프로파일, 그리고 지질학 및 고수리지질학적 기록에 기초한다. 부지에서 관측되는 지하수의 화학적 특성은 부지의 장구한 역사에 대한 기록이며, 과거 기후 변화가 고지리적 환경을 변화시켜 특정 단성분수의 침투를 유발하고 이들의 혼합과 반응이 복잡한 지화학적 패턴을 형성한다(Laaksoharju et al., 2008).

3.3. 3단계: 정량적 모델링

탐색적 분석 결과를 기반으로, 세 가지 독립적 정량적 모델링 접근법을 적용한다.

3.3.1. M3 질량 균형 및 혼합 모델링

다변량 혼합 및 질량수지 계산(Multivariate Mixing and Mass-balance calculations, M3)은 주성분 분석(PCA)을 활용하여 지하수 시료를 단성분의 혼합으로 분해하고, 각 시료에서의 혼합 비율을 정량적으로 산출하는 도구이다(Laaksoharju et al., 1999; Chae et al., 2006; Kim et al., 2017). M3는 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 불확실성 고려, 혼합과 반응의 상호작용 분석 기능을 제공하며, 95% 신뢰구간 내 $\pm 10\%$ 수준의 불확실성을 가진다(Smellie et al., 2002). 혼합 모델의 결과는 각 깊이, 각 균열 영역(fracture domain)에서 어떤 단성분수가 어느 비율로 기여하는지를 보여주며, 이는 지하수 화학 조성의 공간적 변이를 지질 구조와 연결하는 핵심 정보가 된다.

3.3.2. PHREEQC 지구화학적 반응 모델링

PHREEQC는 화학평형, 반응, 이류수송 및 역모델링을 위한 코드로서(Parkhurst and Appelo, 2013), WATEQ4F 열역학 데이터베이스를 사용하여 물-암석 반응의 불확실성을 열역학적으로 계산한다(Laaksoharju et al., 2008). 물-암석 반응 시뮬레이션, 담수화(flushing) 계산과 양이온 교환 반응, 그리고 안전성 평가에 필요한 지구화학적 매개변수(pH, Eh, 방해석 포화지수 등)를 산출하는 데 활용된다. 특히 M3 혼합 결과가 PHREEQC 반응 모델에서 재현되는지를 확인함으로써, 혼합만으로 설명되지 않는 반응(방해석 용해/침전, 양이온 교환, 산화환원 반응 등)의 기여를 분리할 수 있다(Gimeno et al., 2008; Kim et al., 2017).

3.3.3. ConnectFlow 3D 지하수 유동 및 용질이동 모델링

ConnectFlow는 3차원 지하수 흐름 및 용질이동 모델링 코드로서, 수리지질 모델에서 계산된 유동장(flow field)에 기반하여 지하수의 이동 경로, 체류 시간, 혼합 패턴을 모사한다(Follin, 2008). 이를 통해 화학적 예측이 물리적 흐름과 일치하는지를 검증하고, 수리지구화학적 데이터와 수리지질학적 데이터의 상호 보완을 수행한다.

세 모델 간의 검증 체계는 다음과 같다: M3 결과 → PHREEQC 입력(혼합 모델의 결과가 반응 모델에서 재현되는지 확인), PHREEQC 결과 → ConnectFlow 검증(화학적 예측이 물리적 흐름과 일치하는지 확인), ConnectFlow 결과 → 현장 데이터 비교(최종 예측이 실제 측정과 부합하는지 검증).

3.4. 4단계: 모델 검증 및 통합

마지막 단계에서는 모델 결과와 실제 현장 데이터를

비교하여 신뢰도를 평가하고, 학제간 통합적 이해를 바탕으로 한 최종 SDM을 도출한다.

3.4.1. 학제간 일관성 검증

수리지구화학 모델에서는 지질학적 모델 및 수문지질학적 모델의 기하학적 프레임워크를 기본 입력 자료로 활용한다. 각 학문 분야 내에서의 데이터 평가와 더불어, 지질학적 모델이 수리지질학적 모델의 기하학적 프레임워크를 제공 하듯이, 학제 간 일관성을 지속적으로 확인하는 과정을 포함한다(Andersson, 2003).

3.4.2. 대안 모델 관리

대안 모델(alternative model)의 생성은 모델 개발과 신뢰도 탐색의 수단이다. 그러나 7개 유관 학문 분야(지질학, 암반역학, 열적 특성, 수리지질학, 수리지구화학, 용질이동 특성, 생태계)에 걸친 대안 모델의 조합은 '조합의 폭발적 증가(variant explosion)' 문제를 야기할 수 있으므로, 구조적으로 관리해야 한다(Andersson, 2003). 스웨덴 원자력안전감독원(Swedish Nuclear Power Inspectorate, SKI)의 SITE-94 안전성 평가 프로젝트(SKI, 1996)에서 보듯이, 대안 생성 후 지지(supporting) 증거를 검토하여 일부를 기각하는 접근법이 효과적이다.

4. Forsmark에서의 수리지구화학 SDM 주요 성과

Forsmark 부지는 스웨덴 Uppsala Östhammar 지역에 위치하며, 1.89~1.85 Ga에 형성된 변성화강암류가 우세한 결정질 기반암으로 구성된다(Laaksoharju et al., 2008). SDM-Site Forsmark은 2002년부터 수행된 부지조사 결과를 종합하여 구축된 최종 모델로서, Level II 보고서(R-08-47)와 5편의 Level III 보고서(R-08-84, R-08-85, R-08-86, R-08-87, R-08-105)로 구성된다.

4.1. 지하수 시스템의 층상 구조와 공간 분포

Forsmark 부지의 수리지구화학적 시스템은 주요 경사진 변형대(ZFMA2, ZFMF1)에 의해 하반 암반 구역(footwall; FFM01, FFM02)과 상반 암반 구역(hanging wall; FFM03)으로 구분된다(Fig. 2; Laaksoharju et al., 2008; Follin, 2008). 이 구분은 수리지구화학적 특성의 공간적 변이를 설명하는 핵심 프레임워크이다.

4.1.1. 하반 암반 구역(FFM01)

하반 암반 구역은 개방된 균열의 빈도가 낮고 투수성이

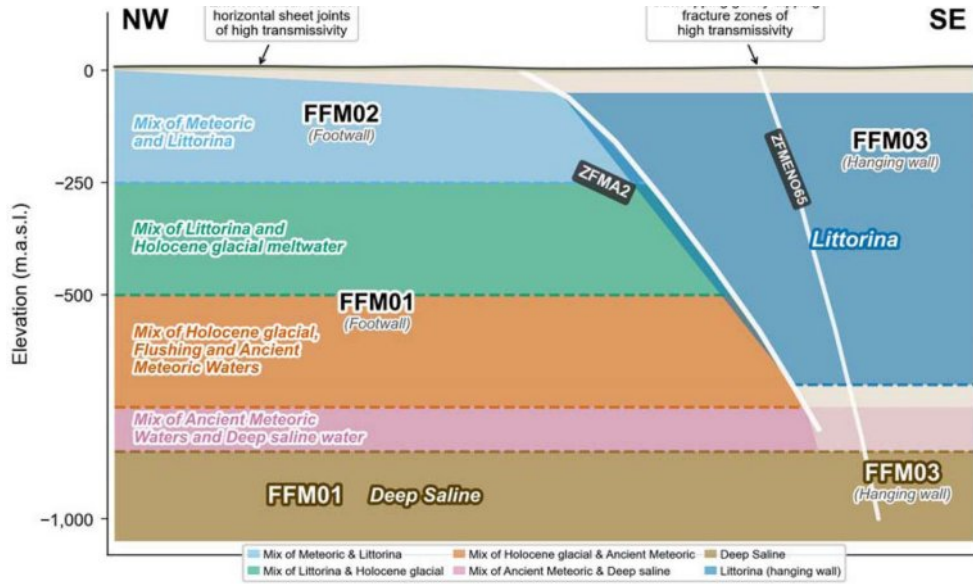


Fig. 2. Conceptual model of geological conditions, hydraulic conditions, and groundwater type distribution at Forsmark. NW-SE cross-section showing the distribution of groundwater types in the footwall (FFM01 and FFM02) and hanging wall (FFM03) bedrock segments. Modified from Smellie et al. (2008).

낮아(느린 매질 확산) 제한적인 지하수 순환으로 인해 오랜 연령의 지하수가 보존되어 있는 특성을 보인다. FFM01은 200 m 이하에서는 개방된 흐름 균열의 강도가 전반적으로 낮고 투수율이 점진적으로 감소하며, 특히 400 m 이하 심도에서는 개방 균열 간 연결성이 크게 제한되어 투수 임계점(percolation threshold)에 가깝다(Follin, 2008). 이는 처분장 깊이(약 470 m)에서의 제한적 지하수 순환을 의미하며, 이러한 순환 특성은 수리지구화학적으로 심부에 오래된 고염분 지하수(Ca-Na-Cl형)가 보존되는 결과를 유도하였다.

4.1.2. 상반 암반 구역(FFM03)

상반 암반 구역은 특징적으로 환경사 변형대의 높은 균열 빈도와 높은 투수성을 가진다. 마지막 탈빙기와 홀로세 동안의 연안 해수의 침투는 변형대를 따라 평균 약 600~700 m 심도까지 도달한 반면, 하반 암반에서는 최대 약 250~300 m 까지만 침투하여 탈빙기 이후 해수 혼입영향으로부터 크게 차단되었다(Laaksoharju et al., 2008).

4.1.3. 천부 대수층의 역할

FFM02는 50~200 m 깊이의 얇은 암반 대수층으로서, 준수평 및 환경사 균열의 높은 빈도를 특징으로 한다. 이 천부 대수층은 북동쪽 방향으로의 근 지표 함양수의 측방 수송을 촉진하고, 더 깊은 대수층으로의 추가적인 함양을 효과적으로 제한한다(Follin, 2008). 상반 암반에서는 이러한

얇은 암반 대수층이 발달하지 않는다.

4.1.4. 지화학적 구획(geochemical zoning)

Forsmark SDM의 핵심 발견 중 하나는 ‘지질 구조에 따른 수리적 특성 차이가 지하수 화학적 조성의 공간적 분포를 직접적으로 제어한다’는 것이다. 연안 해수성(marine) 단성분 지하수와 오래된 비해수성 지하수 사이의 명확한 경계는 지질 구조에 의해 형성되며, 이는 지질 구조가 지화학적 구획을 직접 제어함을 보여주었다(Laaksoharju et al., 2008).

4.2. 산화환원 조건 및 pH 완충

처분장의 장기 안전성 확보에서 산화환원 조건과 pH 완충은 가장 중요한 지화학적 안전 기능이다.

4.2.1. 환원 환경의 안정성

Forsmark 부지의 심부 환경은 전반적으로 환원 환경이 지배적이다. 심부의 환원 상태는 적철석(hematite, Fe₂O₃)과 같은 결정질 철 산화물에 의해 제어되어 안정적으로 유지되고 있으며, 모델링 연구를 통해 이러한 환원 조건의 지속성이 확인되었다(Laaksoharju et al., 2008). 녹니석(chlorite)과 황철석(pyrite) 같은 균열 충전 광물들이 산화환원 완충 작용을 제공하며, 과거 산화성 유체의 침투가 이들의 환원 완충 능력을 고갈시키지 못한 점은 시스템이 외부 교란으

로부터 견고함을 보여준다. 이는 심지층 처분장 운영 중 발생할 수 있는 산소 유입이나 환경 변화에 대해서도 지화학적 안정성을 유지할 수 있음을 의미하며, 결과적으로 방사성 폐기물 처분 부지로서의 높은 적합성과 장기적인 안전성을 뒷받침하는 핵심적인 근거가 된다.

4.2.2. pH 완충 체계

pH 완충 작용은 천부(20 m 이내)에서는 탄산염 풍화와 생물학적 CO₂ 유입으로, 그리고 심도 100 m 이상에서는 균열 내 방해석(calcite)의 용해로 조절된다. 과거 빙하/탈빙기 사건에서도 방해석이 전부 용해되지 않은 점은 충분한 완충 능력을 의미한다(Laaksoharju et al., 2008; Gimeno et al., 2008). 이러한 지화학적 완충 시스템은 pH와 산화환원 조건 모두에서 장기적 안정성을 제공하여 핵폐기물 처분장의 안전성 확보에 필수적인 화학적 환경을 유지하는 역할을 수행한다(Fig. 3).

4.3. 미생물, 콜로이드 및 용존 가스

미생물 활동. 미생물 군집의 대사 활동은 지하수 화학에 중요한 영향을 미치며, 다양한 산화환원 쌍(H₂O/O₂, NO₃⁻/N₂, S²⁻/SO₄²⁻, Fe²⁺/Fe³⁺)을 이용하여 암반 지하수 내에서 지구화학적 반응을 촉진한다(Hallbeck and Pedersen, 2008). 주요 미생물 그룹으로는 철 환원 박테리아(Iron Reducing Bacteria, IRB), 황산염 환원 박테리아(Sulfate Reducing Bacteria, SRB), 메탄 생성균 등이 확인되었으며, 이들의 활동은 특정 지화학적 지표와 상관관계를 보인다. 예를 들어, Forsmark 부지에서는 황화물(S²⁻) 농도가 심도 600 m 이하에서 증가하는데, 이는 해당 심도에서 황산염 환원 박테리아가 활발하게 활동함을 지지한다(Hallbeck and Pedersen, 2008).

4.3.1. 콜로이드

콜로이드는 1 nm에서 1 μm 범위의 입자로, 침강하지 않아 지하수에서 방사성 핵종을 수송할 수 있는 잠재적 매개체 역할을 한다. Forsmark 지하수의 평균 콜로이드 농도는 58.4 μg/L로, 다른 결정질 암반 환경(스위스 10~30 μg/L, 캐나다 300 μg/L)과 유사한 수준이며, 주로 알루미늄, 규소, 철, 황 화합물로 구성된다(Laaksoharju et al., 2008). 콜로이드에 결합된 우라늄은 총 우라늄 농도의 약 10%에 불과하여, 우라늄의 주된 수송 메커니즘은 용존 상태임이 명확히 규명되었다.

4.3.2. 용존 가스

심도에 따라 N₂, He, CH₄, H₂ 농도가 증가하지만, 물은

과포화되지 않은 상태를 유지한다. 용존 가스의 기원은 맨틀(질소)과 지각 생성 과정(헬륨, 수소)으로 판단되었으며, 메탄은 대부분 비생물학적 기원을 가지지만, 특정 지점(KFM01D의 445 m 심도)에서는 생물학적 기원의 흔적이 발견되었다(Hallbeck and Pedersen, 2008).

4.4. 공극수와 고수리지구화학(paleo-hydrogeochemistry)

공극수(porewater) 연구는 Forsmark 부지의 장기적 수리지구화학적 진화 역사를 확인하는 데 필수적 정보를 제공한다(Waber et al., 2009).

4.4.1. 하반 암반 구역의 공극수

심부 하반 암반 구역의 공극수는 희석된 Na-Ca-HCO₃ 유형에서 염수성 Ca-Na-Cl 유형으로 연속적 변화를 보이며, 낮은 Mg²⁺ 농도(연안 해수 성분의 부재를 지시)와 빙하용수에 비해 보다 무거운 δ¹⁸O 및 δ²H 값(온난 기후 강수를 지시)을 보여, 플라이스토세 이전 온난기에 침투한 고대 천수(old meteoric water) 기원으로 해석된다. 낮은 수리활동성(hydraulic activity)과 느린 매질 확산으로 수십만 년 이상 보존된 특성을 나타내며, 해당 부지가 홀로세와 플라이스토세 동안 수리적으로 비활성 상태였음을 시사한다(Waber et al., 2009).

4.4.2. 상반 암반 구역의 공극수

상반 암반 구역의 공극수는 희석된 Ca-Na-HCO₃ 및 Na-Ca-HCO₃ 유형이 심도에 따라 불규칙하게 교대하며, 높은 Mg²⁺ 농도를 보여 연안 해수의 영향을 지시하며, 이는 균열 지하수의 급격한 변화가 매질로 빠르게 확산되어 영향을 주는 상태를 나타낸다(Waber et al., 2009).

4.4.3. 공극수-파쇄대 지하수 비평형

공극수와 파쇄대 지하수 사이의 비평형 상태가 최소 650 m 깊이까지 관찰되어, 암석 매질의 공극수가 고대(ancient)의 희석된 지하수의 순환과 진화를 기록하고 있음을 시사한다. ³⁶Cl 및 ⁴He 연대측정에 기초하여 공극수의 체류시간이 최소 1.5 Ma로 추정되었으며(Waber et al., 2009; Laaksoharju et al., 2008), 하반 암반 구역의 공극수가 수십만 년 동안 거의 변화하지 않았다는 결과는 해당 심도에서 지하수 환경의 장기적 안정성을 뒷받침하는 주요 근거가 되었다.

4.5. 우라늄의 지화학적 이동 및 수송

우라늄은 방사성폐기물 안전성 평가에서 중요한 고려 대상이다(Laaksoharju et al., 2008; Kalinowski, 2008; Choi et

al., 2023). Forsmark의 일부 지하수 시료에서 발견된 높은 우라늄 농도는 연안 해수 성분을 포함하고 중탄산염 농도가 높은 기수성(brackish) 지하수와 상관관계를 보이기 때문으로 보고되었다.

우라늄의 지화학적 이동 메커니즘과 관련하여, 용존 우라늄은 ‘산화수의 심부 침투가 아니라 중탄산염 농도 (>30 mg/L)가 충분한 약한 환원 환경에서 탄산염 우라늄(VI) 상태로 착화되어 용존 상태로 이동되기 때문’으로 해석되었다(Laaksoharju et al., 2008). 한편, 투수성이 높은 균열에서 낮은 투수성 영역으로 전환되는 지점이 우라늄이 농축될 수 있는 중요한 위치로 파악되었으며, 이는 우라늄 이동성이 pH, Eh, 중탄산염 농도에 의해 복합적으로 제어됨을 의미한다. 한편, 우라늄 붕괴 계열 분석을 통해 우라늄 이동이 지난 100만 년 동안 발생했지만, 대부분의 우라늄 농축은 부지의 고수리지질학적 진화와 밀접하게 연관되어 더 오래된 시기에 기인하였다고 해석하였다.

5. 타 학제 분야 모델과의 연계

수리지구화학 SDM은 독립적으로 작동하는 모델이 아니라, 지질 모델, 수리지질 모델, 용질이동 모델, 지표환경 모델과의 긴밀한 상호 연계를 통해 통합적 완성도를 갖춘다

(Fig. 4). SDM의 7개 학제 분야(지질학, 암반역학, 열적 특성, 수리지질학, 수리지구화학, 용질이동 특성, 생태계) 간의 통합적 평가는 SDM 구축의 핵심 원칙이다(Andersson, 2003).

5.1. 지질 모델과의 연계

수리지구화학 모델에서는 지질 모델로부터 제공되는 변형대와 암반 영역의 3차원 기하학적 프레임워크를 기본 입력 자료로 활용한다. 지하수의 화학적 조성이 지질 구조에 따라 어떻게 달라지는지를 해석하는 데 필수적이며, 고투수성 변형대와 저투수성 암반 매질 간의 경계는 서로 다른 단성분수의 분포를 제어하는 주요 인자로 작용한다(Laaksoharju et al., 2008; Geier et al., 2012).

또한 지질 모델에서 제공하는 암석의 광물학적 특성과 전암 화학 조성 정보는 수리지구화학 모델에서 물-암석 상호작용을 해석하는 데 중요한 역할을 한다. 특히 장석 풍화, 방해석 용해, 황화광물 산화 등의 반응 메커니즘을 정량적으로 모델링하는 데 필요하며, 암석 매질의 양이온 교환 용량과 광물학적 완충 능력은 지하수 pH와 산화환원전위(Eh) 조건을 예측하는 데 활용된다(Gimeno et al., 2008).

5.2. 수리지질 모델과의 연계

수리지질 모델과의 연계는 수리지구화학 SDM에서 가장

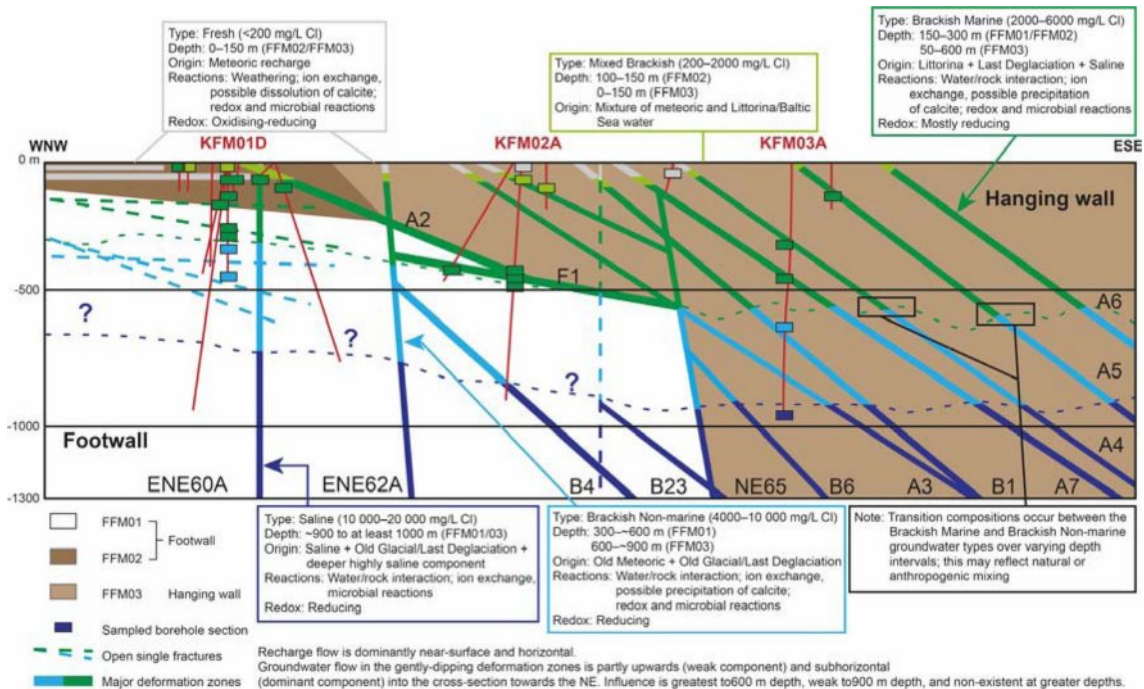


Fig. 3. WNW-ESE 2D cross-section through the central part of the candidate area showing the groundwater types and their properties (salinity, origin, major reactions, and redox conditions). The footwall (FFM01 and FFM02) and hanging wall (FFM03) bedrock segments are indicated, separated by gently-dipping deformation zones. Modified from Laaksoharju et al., (2008).

밀접한 관계에 있다. 연계의 핵심 요소는 다음과 같다.

5.2.1. 수리적 영역 구분 및 투수성 분포

수리 전도체 영역(Hydraulic Conductor Domains, HCD), 수리적 암반 영역(Hydraulic Rock Domains, HRD), 수리적 토양 영역(Hydraulic Soil Domains, HSD)의 구분은 수리지구화학 모델에서 지하수 화학 조성의 공간적 변화를 해석하는 데 필수적이다. 각 영역별로 상이한 투수성과 수리전도도 분포는 지하수의 체류 시간과 혼합 과정을 제어하여, 최종적으로 화학조성의 공간적 변이를 결정한다(Follin, 2008). SKB 사례에서, 고투수성 변형대에서는 연안 해수가 600 m 깊이까지 침투한 반면, 저투수성 암반 영역에서는 300 m에 그친 현상은 수리적 특성이 화학적 조성 분포에 미치는 직접적인 영향을 보여준다.

5.2.2. 지하수 유동 방향, 속도 및 유동장 매개변수

수리지질 모델에서 제공되는 지하수의 유동 방향과 속도는 수리지구화학 모델에서 화학종의 이동 경로와 반응 시간을 결정하는 핵심 매개변수이다(Follin, 2008; SKB, 2010). 또한, 수리지질 모델에서 계산된 입자 추적 결과는 특정 지점에서 방출된 가상 입자의 이동 경로를 시각화하여, 수리지구화학적 이상 현상(예: 우라늄 농도 상승)의 기원을 추적하는 데 중요한 정보를 제공한다.

5.2.3. 암반 매질로의 확산 매개변수 및 공극수 특성

수리지질 모델에서 제공하는 암반 매질의 확산 매개변수는 수리지구화학 모델에서 공극수와 파쇄대 지하수 간의 화학적 평형 과정을 모델링하는 데 활용된다. 특히, 저투수성 암반 영역(예: FFM01)에서 관찰되는 공극수와 파쇄대 지하수 간의 화학적 비평형 상태는 지하수 순환이 매우 느리고 정체되어 있음을 시사하며, 이는 수리지질 모델의 “정체된 조건(stagnant conditions)” 가설을 뒷받침하는 중요한 증거이다(Waber et al., 2009).

5.2.4. 경계 조건 및 시간 의존적 시나리오

수리지질 모델에서 설정된 경계 조건과 고수리지질학적(paleohydrogeological) 시나리오는 수리지구화학 모델에서 지하수 진화 과정을 해석하는 데 필수적이다. 예를 들어 SKB의 경우, 마지막 빙하기 이후의 지각 융기, 연안 해수 침투, 담수 재함양 등과 같은 시간 의존적 경계 조건은 현재 관찰되는 지하수 화학 조성을 설명하는 핵심 요소이며, 두 모델 간 상호 피드백의 기반이 된다(Follin et al., 2008; Laaksoharju et al., 2008).

5.3. 용질이동 모델과의 연계

수리지구화학 SDM과 용질이동특성(solute transport properties) 모델의 연계는 안전성 평가의 최종 단계에서 특히 중요하다.

5.3.1. 단성분수 조성 및 다성분 혼합 모델

수리지구화학 모델에서 다변량 혼합 및 질량수지 계산(M3)을 통해 도출된 단성분수의 화학적 조성과 혼합 비율은 용질이동 모델에서 초기 조건과 경계 조건을 설정하는 데 활용된다. 이러한 단성분수의 특성적 화학 지표(염화물, 브롬, 안정동위원소 등)는 용질이동 시뮬레이션에서 보존성 추적자 역할을 수행하여, 장기간에 걸친 지하수 혼합과 용질 분산 과정을 현실적으로 모사할 수 있게 한다(SKB, 2010; Kim et al., 2017).

5.3.2. 화학적 지연 인자 및 반응 속도 상수

수리지구화학 모델에서 계산된 화학종 별 흡착 특성과 침전-용해 반응 속도는 용질이동 모델에서 화학적 지연 인자(retardation factor)를 결정하는 데 사용된다. 이는 안전성 평가에서 핵심적인 매개변수로 활용된다. 또한, 산화환원 조건의 변화에 따른 용해도 변화와 콜로이드 형성 가능성도 용질이동 모델의 중요한 입력 자료로 제공된다(SKB, 2010).

5.4. 지표환경 모델과의 연계

수리지구화학 SDM은 처분장 심부 환경과 함께 지표환경(surface environment) 모델과도 중요한 연계를 가진다.

5.4.1. 천부 지하수의 화학적 특성

수리지구화학 모델에서 도출된 천부 지하수(상부 20~200 m)의 화학적 특성 정보는 지표환경 모델에서 환경영향을 평가하는 데 사용된다. 특히, 지각 융기 이후 약 900년 전부터 재함양된 담수의 화학적 조성 및 계절별 변화 패턴은 지표환경에서의 수질 변화와 생태계 영향을 평가하는 데 필수적이다. 삼중수소(tritium) 농도의 급격한 감소 특성은 현대 지하수의 체류 시간을 지시하여, 지표환경 모델에서 지하수-지표수 상호작용의 시간 척도를 설정하는 데 활용된다(Laaksoharju et al., 2008).

5.4.2. 지하수-지표수 상호작용 및 염분 침투 특성

수리지구화학 모델에서 예측된 담수-염수 전이대(fresh-saline water interface)의 위치와 이동 특성은 지표환경 모델에서 연안 생태계의 염분 농도 변화를 평가하는 데

중요한 정보를 제공한다. SKB의 경우, 연안 해수 성분의 잔존과 현재 담수의 침투 과정은 지표환경에서 관찰되는 염분 농도의 공간적 변이를 설명하는 데 활용된다(Smellie et al., 2008).

5.4.3. 자연 방사성 핵종 및 미량 원소의 배경 농도

수리지구화학 모델에서 평가된 우라늄, 라돈, 라듐 등 자연 방사성 핵종과 중금속의 농도 분포는 지표환경 모델에서 자연 배경 농도(natural background concentration)를 설정하는 중요한 기준이 된다. 일부 지하수에서 발견되는 높은 우라늄 농도의 기원에 대한 수리지구화학적 해석(Kalinowski, 2008)은 향후 처분 시설에서 방출될 수 있는 방사성 핵종의 환경영향을 평가할 때 자연 배경 농도와와의 비교 분석을 가능하게 한다.

5.4.4. 생지구화학적 순환 및 산화환원 조건

수리지구화학 모델에서 도출된 질소, 인, 황 등 주요 영양염류의 지하수 내 농도와 산화환원 상태는 지표환경 모델에서 생지구화학적 순환(biogeochemical cycling)을 모델링하는 데 활용된다. 심부에서 관찰되는 환원 조건의 변화와 관련된 불확실성은 미생물 활동과 영양염류 순환에 미치는 영향을 평가하는 데 중요한 고려 사항이 된다. 지하수 유출을 통한 영양염류의 지표 생태계 공급은 1차 생산성과 생태계 구조에 직접적인 영향을 미치므로, 수리지구화학 모델의 예측 결과는 지표환경 모델의 생태학적 평가에서 핵심적인 입력 자료로 활용된다(SKB, 2010).

6. 국내 적용을 위한 방법론적 고려사항

앞서 검토한 SKB의 수리지구화학 SDM 방법론은 2000

년대 초반에 확립된 체계로서, 국제적 모범 사례로서의 가치는 여전히 유효하다. 그러나 지구화학 모델링 도구 및 열역학 데이터베이스의 발전, 오픈소스 수치모델링 환경의 성숙, 그리고 한국 지질환경의 고유한 특성을 고려할 때, 국내 적용 과정에서는 방법론적 갭신이 수반되어야 한다.

국내에서도 심부 지하수의 수리지구화학적 특성화와 관련한 선행연구가 축적되어 왔다. Ryu et al.(2012)은 한국원자력연구원 지하연구시설(KAERI Underground Research Tunnel, KURT)의 심부 시추공 지하수를 대상으로 PHREEQC 지구화학 모델링을 수행하여 물-암석 상호작용 메커니즘(사장석 풍화, 방해석 용해/침전, 양이온 교환)을 정량적으로 분석하였으며, Kim et al.(2023)은 KURT에서 수행된 현장 실험(시추공 가열 시험, 굴착손상영역 시험, 추적자 시험 등)의 종합 개관을 제시한 바 있다. Yu et al.(2021)은 원주 지역 화강암에 굴착한 750 m 심부 시추공에서 이중패커 폐쇄 시스템을 이용한 심부 수리화학 조사 방법론을 개발하여 한국형 심부 지하수 조사 기술의 기준 선을 제시하였다. 최근 Kim et al.(2025)은 결정질 암반을 선호하는 처분 선도국(스웨덴, 핀란드, 캐나다 등)의 심부 지하수 수리지구화학 환경을 염분도 중심으로 비교하여, 한국 지하수 조건의 국제적 위치를 파악할 수 있는 기초 자료를 제공하였다. 이러한 국내 선행연구들은 아직 SKB의 체계적 SDM 방법론과 비교하면 개별 연구 수준에 머물러 있으나, 향후 통합적 SDM 구축을 위한 기초 자료와 방법론적 경험을 제공하고 있다.

6.1. 열역학 데이터베이스의 현행화

SKB의 수리지구화학 SDM에서 PHREEQC 기반 지구화학 모델링에 사용된 WATEQ4F 데이터베이스(Parkhurst and Appelo, 2013)는 주요 이온과 일반 광물에 대해 광범

Table 4. Major thermodynamic databases applicable to PHREEQC-based geochemical modeling for radioactive waste disposal

Database	Developer	Key features	Activity model	Ionic strength range
WATEQ4F	USGS	Major ions, common minerals; included with PHREEQC	WATEQ/Davies	< ~0.5 mol/kg
NEA-TDB	OECD/NEA	Internationally peer-reviewed actinide data (U, Np, Pu, Am, Tc, Se, Ni, and Zr)	Ion-association	Standard conditions
ThermoChimie	ANDRA/NWS/ONDRAF	Extension of NEA-TDB for nuclear waste disposal; PHREEQC format available	SIT	Moderate-high
PSI/Nagra	PSI/Nagra (Switzerland)	Actinide and radionuclide data with SIT parameters	SIT	Moderate-high
THEREDA	HZDR (Germany)	Comprehensive Pitzer parameters for deep disposal conditions	Pitzer	Up to ~6 mol/kg
pitzer.dat	USGS (PHREEQC built-in)	Major ions in high-salinity solutions	Pitzer	Up to ~3 mol/kg (NaCl)

위한 열역학 자료를 제공하지만, 악티나이드(actinide) 원소의 존재형태(speciation) 자료가 제한적이며, 활동도 계수 보정이 Davies/WATEQ 방정식에 기반하여 이온 강도(ionic strength) 약 0.5 mol/kg 이하에서만 신뢰할 수 있다는 한계가 있다. 따라서 이온 강도 보정 모델과 열역학 데이터베이스의 선택은 SDM 구축 초기에 확립해야 할 핵심 사항이다.

현재 방사성폐기물 처분 분야에서 활용 가능한 주요 열역학 데이터베이스를 Table 4에 정리하였다.

국내 SDM 개발 시에는 부지 지하수의 이온 강도 범위를 사전에 파악하고, 이에 적합한 활동도 모델을 선정하는 단계적 접근이 권장된다. 이온 강도가 0.5 mol/kg 이하인 경우 기존 WATEQ나 MINTEQA 기반 데이터베이스로 충분하나(Choi et al., 2008), 심부 염수가 존재하는 경우 SIT(Specific Ion Interaction Theory) 또는 Pitzer 모델로의 전환이 필요하며, 이 경우 악티나이드 존재형태에 관한 자료의 내적 일관성이 보장되어야 한다.

6.2. 3차원 유동 및 반응성 용질이동 모델링의 접근

SKB가 사용한 ConnectFlow는 Discrete Fracture Network (DFN, 이산 균열 네트워크)과 Equivalent Continuous Porous Medium (ECPM, 등가 연속 다공질 매체) 간 업스케일링 기능을 갖춘 상용 코드이지만(Follin, 2008), 라이선스 비용과 코드 접근성의 제약이 있다. 최근 다양한 수치 모델링 코드가 방사성폐기물 처분 연구에 적극 활용되고 있어(Table 5), 국내 SDM 개발에서의 적용 가능성을 검토할 필요가 있다.

PFLOTRAN은 미국 에너지부(DOE) 산하 Sandia 국립 연구소의 지질처분 안전성 평가 프레임워크(Geologic Disposal Safety Assessment, GDSA)에서 핵심 시뮬레이션 엔진으로 채택된 대규모 병렬 반응성 용질이동 코드이다. 결정질 기반암 내 파쇄 매체에서 수천 년 규모의 지하수 화학 진화를 모사한 실적이 있으며, Los Alamos 국립연

구소에서 개발한 DFN 프레임워크인 dfnWorks(Hyman et al., 2015)와 연동하여 이산 균열 네트워크 내 유동 및 용질이동을 직접 모사할 수 있다. dfnWorks는 결정론적 또는 확률론적으로 생성된 균열 네트워크에 대해 ECPM 기반의 업스케일링을 지원할 뿐만 아니라, 균열과 주변 매질 간의 상호작용을 명시적으로 고려하는 방법론을 함께 제공한다. OpenGeoSys(OGS)는 다공질 및 파쇄 매체에서의 열-수리-역학-화학(THMC) 결합 과정을 모사하는 유한요소 기반 오픈소스 코드로서, 독일 핵폐기물 처분 부지 선정 과정의 OpenWorkFlow 플랫폼에서 핵심 시뮬레이터로 활용되고 있다. Park et al. (2024)에서는 국내 암반역학 및 열물성 SDM 전략에서 OGS를 기술한 바 있어, 수리지구화학 SDM에서도 동일 코드를 활용할 경우 학제간 통합 모델링의 일관성 확보에 유리할 수 있다.

특히 PFLOTRAN, dfnWorks, OpenGeoSys 등 오픈소스 코드의 활용은 결과의 재현성과 투명성을 확보하고, 국제 연구 네트워크와의 협력을 촉진하는 장점이 있다. 다만, ConnectFlow의 DFN-ECPM 통합 업스케일링 체계와 동등한 기능의 구현 여부에 대한 코드별 비교 평가가 선행될 필요가 있으며, 이는 향후 별도의 기술 검토가 필요한 과제이다. 한편, 다성분 반응성 용질이동(multi-component reactive transport) 모델링의 경우, PFLOTRAN의 내장 기능 외에도 TOUGHREACT(Xu et al., 2012), CrunchFlow(Steeffel et al., 2015) 등이 활용 가능하나, 결정질 기반암의 DFN 기반 모델링과의 직접적 결합에는 제약이 있어 향후 코드 간 비교 평가가 필요하다.

6.3. 한국 지질환경 특성의 반영

한국의 지질환경은 SKB 사례의 페노스칸디아 순상지(Fennoscandian Shield)와 구별되는 특성을 가지므로, SDM 방법론의 직접적 단순 적용보다는 맞춤형 적용이 필요하다.

첫째, 한반도의 화강암은 페노스칸디아 순상지의 선캄브리아기(1.8 Ga 이상) 화강암과 달리 중생대 쥐라기-백

Table 5. Comparison of major numerical modeling codes applicable to hydrogeochemical SDM development

Code	Developer	License	DFN support	Reactive transport	Nuclear waste applications
ConnectFlow	Jacobs (UK)	Commercial	DFN-ECPM upscaling	External coupling	SKB Forsmark/Laxemar SDM
PFLOTRAN	DOE/Sandia (US)	Open source	Via dfnWorks coupling	Built-in (multicomponent)	GDSA framework (US)
dfnWorks	LANL (US)	Open source	Native DFN generation and meshing	Via PFLOTRAN	Crystalline rock DFN studies
OpenGeoSys	Helmholtz UFZ (Germany)	Open source	FEM-based fracture elements	iPhreeqc coupling available	OpenWorkFlow (German site selection)

약기(약 200~65 Ma) 관입체가 우세하다. 암체의 연령 차이는 균열 특성, 광물학적 이력, 공극수 체류시간 등에서 차이를 유발할 수 있으므로, 단성분수의 정의와 고수리지 질학적 시나리오 수립에서 이를 반영해야 한다.

둘째, 동아시아 몬순 기후에 의한 계절적 강수 패턴은 지하수 재함양 메커니즘과 안정동위원소($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) 특징에 직접적 영향을 미친다. Forsmark의 단성분수 체계(심부 염수, 빙하용수, 연안 해수, 변질 순환천수)는 페노스칸디아 고유의 빙하-간빙기 순환과 발트해 진화에 기반하므로, 한반도의 고수리지질학적 역사(해수면 변동, 단층 활동, 풍화 이력 등)에 기반한 고유의 단성분수 체계를 새롭게 정립할 필요가 있다. 한반도 고유 단성분수의 선정은 M3 혼합 모델링, PHREEQC 반응 모델링, 유동 모델 검증의 모든 단계에 기초 입력으로 작용하므로, SDM 구축을 위해 가장 근본적인 선행 과제 중 하나이다. Kim et al. (2020)은 한반도 부존 심부 지하수의 수리지구화학 유형을 구분하고, 유형별로 부존 특성과 대표적인 화학조성 및 유형별 혼합특성 등을 밝힌 바 있다. 심부 지하수계에 대한 조사 연구자료가 매우 희박한 국내 상황에서 이러한 선행자료는 한반도 심부 지질환경에서의 방사성폐기물 처분과 관련한 안전성평가에 효과적으로 활용될 수 있다.

셋째, 공극수 연구는 Forsmark 사례에서 장기적 지하수 환경 안정성을 입증하는 핵심 증거를 제공하였으나(Waber et al., 2009), 국내에서는 아직 이해 부족 및 기술(시추 및 공극수 샘플링) 부족으로 인해 체계적으로 수행되지 않은 분야이다. 지질체 내의 공극수 채취 및 분석 방법론(out-diffusion 기법 등)을 조기에 확립할 필요가 있다.

넷째, SKB의 SDM은 주기적 모델 버전 업데이트에 기반한 반복적 개발 체계이나, 센서 기술과 데이터 처리 기술의 발전을 반영하여 연속적 데이터 동화(data assimilation) 기반의 실시간 모델 갱신 체계의 도입도 고려할 수 있다.

다섯째, SKB의 M3 도구는 PCA 기반 선형 혼합 모델로서 단성분 혼합 비율을 정량적으로 산출하는 핵심 방법론이나, 비선형 지구화학 반응이 혼합에 중첩된 경우 해석에 한계가 있고 M3의 공개 배포 여부가 불명확하다. 국내에서는 Kim et al. (2020)에서와 같이 end-member mixing analysis(EMMA) 기반의 대안적 구현 접근이 유효하다. EMMA는 보존성 추적자(Cl, Br, $\delta^{18}\text{O}$ 등)를 이용한 다변량 혼합 분석의 일반적 프레임워크로서, PCA 외에도 독립 성분 분석(ICA) 등 다양한 통계적 기법과 결합할 수 있어, 부지 특성에 적합한 혼합 분석 체계를 구축할 수 있다.

여섯째, SKB의 5단계 시료 품질 분류 체계(Category 1~5)는 스웨덴의 시추 장비와 시료채취 프로토콜에 최적

화되어 있으므로, 국내 시추 환경과 장비 특성에 맞게 분류 기준(시추수 혼입률 허용 범위, 전하 균형 기준 등)을 수립할 필요가 있다.

6.4. 불확실성 정량화와 민감도 분석의 고도화

SKB의 SDM에서는 세 가지 독립적 모델링 접근법(M3, PHREEQC, ConnectFlow)의 결과 수렴을 통해 모델 신뢰도를 평가하고, 각 접근법에 내재된 불확실성을 개별적으로 기술하는 방식을 채택하였다(Smellie et al., 2002). 이 접근법은 효과적이나, 모델 매개변수의 상대적 중요도와 상호작용 효과를 정량적으로 분석하는 체계적 민감도 분석(sensitivity analysis)을 도입함으로써 보완될 수 있다.

전역 민감도 분석(Global Sensitivity Analysis, GSA) 기법을 적용하면, 다수의 입력 매개변수를 동시에 변화시켜 모델 출력에 대한 각 매개변수의 상대적 기여도와 상호작용 효과를 정량화할 수 있다. Sobol' 지수(Sobol' indices; Sobol', 2001), Morris 스크리닝(Morris screening; Morris, 1991) 등의 GSA 기법(Saltelli et al., 2008)을 수리지구화학 모델에 적용함으로써, 불확실성 저감을 위해 우선적으로 개선해야 할 매개변수를 식별하고 제한된 조사 자원을 효율적으로 배분하는 의사결정 근거를 마련할 수 있다. 또한, 베이지안 추론(Bayesian inference) 기반의 불확실성 정량화를 통하여 사전 지식과 관측 데이터를 체계적으로 결합함으로써 모델 매개변수의 사후 분포를 추정할 수 있으며, 이는 반복적 모델 업데이트 과정에서 불확실성 감소 정도를 정량적으로 추적하는 데 유용하다.

국내 SDM 개발에서는 SKB의 다중 증거 기반 수렴 접근법을 기본으로 하되, 정량적 GSA와 불확실성 전파(uncertainty propagation) 분석을 체계적으로 도입함으로써 모델 신뢰도 평가의 객관성을 강화할 필요가 있다.

7. 결론 및 시사점

본 리뷰 논문에서는 스웨덴 SKB에서의 수리지구화학 SDM 개발 방법론을 종합적으로 검토하고, Forsmark 부지에서의 적용 성과를 분석하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

첫째, 수리지구화학 SDM은 정량적 모델과 정성적 개념 모델을 결합하는 이중 구조로 구성되며, 타당성 연구(FS)로부터 완전한 현장 조사(CSI)에 이르는 3단계에 걸친 반복적 발전을 통해 모델 신뢰도를 체계적으로 향상시키고 있다. 살아있는 문서로서의 SDM 개발 철학은 데이터 축적에 따른 모델의 지속적 개선을 보장한다.

둘째, 수리지구화학 SDM의 4단계 수행절차, 즉 데이터

수집/품질 관리 → 탐색적 분석 → 정량적 모델링 → 모델 검증/통합에서는 각 단계의 업무를 품질관리 체계와 연동함으로써 데이터 수집부터 최종 모델 도출까지 신뢰성 확보가 가능하다. 특히 5단계 시료 품질 분류 체계와 시추영향 연구(DIS)는 데이터 신뢰성의 기반을 제공한다.

셋째, Forsmark 부지에서는 수리지구화학 SDM 적용을 통하여 지질 구조(하반/상반 암반 구역)에 의한 지하수 화학 조성의 공간적 구획, 네 가지 단성분(심부 염수, 빙하용수, 연안 해수, 변질 순환천수)의 상호 혼합에 의한 지하수 화학성 진화, 처분장 깊이에서의 환원 환경 및 pH 완충의 장기 안정성, 그리고 공극수 수리화학 특성 분석을 통해 장기(150만년 이상) 지화학적 안정성을 성공적으로 규명하였다.

넷째, 수리지구화학 SDM은 지질, 수리지질, 용질이동, 지표환경 모델과의 학제간 통합을 통해 통합적 완성도를 갖추게 되며, 이러한 통합적 접근을 통하여 모델의 내적 일관성과 예측 능력을 크게 향상시킨다.

우리나라의 고준위 방사성폐기물 처분 프로그램은 현재 초기 단계에 있으나, 향후 부지 선정 및 특성화 과정에서 SKB의 수리지구화학 SDM 방법론은 중요한 참고 사례가 될 수 있다. 그러나 국내 지질 환경과 부지 특성을 반영한 맞춤형 접근방식이 반드시 필요하며, 이를 위해서는 SKB의 국제적 방법론을 기반으로 하되 국내 실정에 적합하게 수정 적용하는 전략이 필요하다. SICADA에 상응하는 통합 지질 환경 데이터베이스 체계의 구축, 시추공 시료 품질 분류 체계의 조기 확립, 다중 독립 증거자료에 기반한 모델(혼합모델, PHREEQC, 유동 모델 등) 검증 체계의 도입, 그리고 수리지구화학을 중심으로 다양한 학제적 통합 모델링 팀의 조직적 운영 등이 유용한 참고 사항이 될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)의 재원으로 사용 후핵연료관리핵심기술개발사업단(iKSNF) 및 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받은 연구개발과제(No. RS-2023-KP002657)의 일환으로 수행되었으며, 한국지질자원연구원(3차원 부지기술 모델링 및 예측모델 개발)과 고려대학교(광역규모 지하수 지구화학 환경 특성화)가 공동으로 참여하였습니다.

References

Andersson, J., 2003, Site descriptive modelling – strategy for integrated evaluation: SKB R-03-05, Svensk Karnbranslehantering AB, Stockholm, 44 p.

J. Soil Groundwater Environ. Vol. 31(2), p. 1-15, 2026

Chae, G.T., Yun, S.T., Kim, K., and Mayer, B., 2006, Hydrogeochemistry of sodium-bicarbonate type bedrock groundwater in the Pocheon spa area, South Korea: water-rock interaction and hydrologic mixing, *Jour. Hydrol.*, **321**(1-4), 326-343.

Choi, B.-Y., Koh, Y.-K., Yun, S.-T., and Kim, G.-Y., 2008, Conceptual modeling on the adsorption and transport of uranium using 3-D groundwater flow and reactive transport models, *Econ. Environ. Geol.*, **41**(6), 719-729.

Choi, J., Yu, S., Park, S., Park, J., and Yun, S.-T., 2022, Status and implications of hydrogeochemical characterization of deep groundwater for deep geological disposal of HLW in developed countries, *Econ. Environ. Geol.*, **55**(6), 737-760 (in Korean with English abstract).

Choi, J., Park, S., Seo, H., Ahn, H.T., Lee, J.H., Park, J., and Yun, S.T., 2023, Geochemical Modeling on Behaviors of Radionuclides (U, Pu, Pd) in Deep Groundwater Environments of South Korea. *Econ. Environ. Geol.*, **56**(6), 847-870 (in Korean with English abstract).

Follin, S., 2008, Bedrock hydrogeology Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark: SKB R-08-95, Svensk Karnbranslehantering AB, Stockholm, 163 p.

Follin, S., Stephens, M.B., Laaksoharju, M., Nilsson, A.-C., Smellie, J.A.T., and Tullborg, E.-L., 2008, Modelling the evolution of hydrochemical conditions in the Fennoscandian Shield during Holocene time using multidisciplinary information, *Appl. Geochem.*, **23**(7), 2004-2027.

Geier, J.E., Bath, A.H., and Stephansson, O., 2012, Comparison of site descriptive models for Olkiluoto, Finland and Forsmark, Sweden: STUK-TR 14, Radiation and Nuclear Safety Authority, Helsinki, 190 p.

Gimeno, M.J., Auque, L.F., Gomez, J.B., and Acero, P., 2008, Water-rock interaction modelling and uncertainties of mixing modelling. Site descriptive modelling SDM-Site Forsmark: SKB R-08-86, Svensk Karnbranslehantering AB, Stockholm, 159 p.

Hallbeck, L. and Pedersen, K., 2008, Explorative analysis of microbes, colloids and gases together with microbial modelling. Site descriptive modelling SDM-Site Forsmark: SKB R-08-85, Svensk Karnbranslehantering AB, Stockholm, 180 p.

Hyman, J.D., Karra, S., Makedonska, N., Gable, C.W., Painter, S.L., and Viswanathan, H.S., 2015, dfnWorks: A discrete fracture network framework for modeling subsurface flow and transport, *Comput. Geosci.*, **84**, 10-19.

IAEA, 2011, Disposal of Radioactive Waste: IAEA Safety Standards Series No. SSR-5, International Atomic Energy Agency, Vienna, 62 p.

Kalinowski, B.E. (ed.), 2008, Background complementary hydrogeochemical studies. Site descriptive modelling SDM-Site Forsmark: SKB R-08-87, Svensk Karnbranslehantering AB,

Stockholm, 148 p.

Kim, J.-W., Kim, J.-S., Lee, C., Kwon, S., Ko, N.-Y., and Kim, G. Y., 2023, KAERI underground research laboratory: Overview of in-situ experiments, *Rock Mech. Bull.*, **2**(3), 100059.

Kim, J.H., Kim, K.H., Thao, N.T., Batsaikhan, B., and Yun, S.T., 2017, Hydrochemical assessment of freshening saline groundwater using multiple end-members mixing modeling: A study of Red River delta aquifer, Vietnam, *Jour. Hydrol.*, **549**, 703-714.

Kim, K.H., Yun, S.T., Yu, S., Choi, B.Y., Kim, M.J., and Lee, K.J., 2020, Geochemical pattern recognitions of deep thermal groundwater in South Korea using self-organizing map: Identified pathways of geochemical reaction and mixing, *Jour. Hydrol.*, **589**, 125202.

Kwon, E., Kwon, J.-S., Park, K.-W., and Ju, Y.J., 2025, A comparative review on groundwater hydrogeochemistry in countries preferring crystalline rock for deep geological disposal, *Nucl. Eng. Technol.*, **57**(6), 103463.

Laaksoharju, M., Skarman, C., and Skarman, E., 1999, Multivariate Mixing and Mass-balance (M3) calculations, a new tool for decoding hydrogeochemical information, *Appl. Geochem.*, **14**(7), 861-871.

Laaksoharju, M., Smellie, J., Tullborg, E.-L., Gimeno, M., Hallbeck, L., Molinero, J., and Waber, N., 2008, Bedrock hydrogeochemistry Forsmark. Site descriptive modelling SDM-Site Forsmark, SKB R-08-47, Svensk Karnbranslehantering AB, Stockholm, 160 p.

Morris, M.D., 1991, Factorial sampling plans for preliminary computational experiments, *Technometrics*, **33**(2), 161-174.

NEA, 2008, Moving Forward with Geological Disposal of Radioactive Waste: NEA No. 6433, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, 22 p.

Park, S., Cho, S., Kim, K.Y., and Lee, J., 2024, Strategy for rock mechanics and thermal properties site descriptive modeling for high-level waste disposal based on case studies, *Tunnel Undergr. Space*, **34**(6), 543-563.

Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J., 2013, Description of input and examples for PHREEQC version 3 – A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: USGS Techniques and Methods, book 6, chap. A43, 497 p.

Ryu, J.-H., Cho, S.-J., Hama, K., Yoshida, H., Shin, H.-S., and Kwon, J.-S., 2012, Geochemical characterization of deep groundwater in the KAERI Underground Research Tunnel (KURT) using geochemical modeling, *J. Environ. Eng.*, **138**(3), 377-385.

Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., and Tarantola, S., 2008, Global Sensitivity Analysis, *The Primer*, John Wiley & Sons, Chichester, 292 p.

SKI, 1996, SITE-94: Deep repository performance assessment project: SKI Report 96:36, Swedish Nuclear Power Inspectorate, Stockholm.

SKB, 2000, Geoscientific programme for investigation and evaluation of sites for the deep repository: SKB TR-00-20, Svensk Karnbranslehantering AB, Stockholm.

SKB, 2010, Model summary report for the safety assessment SR-Site: SKB TR-10-51, Svensk Karnbranslehantering AB, Stockholm, 545 p.

Smellie, J., Laaksoharju, M., and Tullborg, E.-L., 2002, Hydrogeochemical site descriptive model – a strategy for the model development during site investigations: SKB R-02-49, Svensk Karnbranslehantering AB, Stockholm, 71 p.

Smellie, J., Tullborg, E.-L., Nilsson, A.-C., Sandstrom, B., Waber, N., Gimeno, M., and Gascoyne, M., 2008, Explorative analysis and expert judgement of major components and isotopes. Site descriptive modelling SDM-Site Forsmark: SKB R-08-84, Svensk Karnbranslehantering AB, Stockholm, 216 p.

Sobol', I.M., 2001, Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates, *Math. Comput. Simul.*, **55**, 271-280.

Steeffel, C.I., Appelo, C.A.J., Arora, B., Jacques, D., Kalbacher, T., Kolditz, O., Lagneau, V., Lichtner, P.C., Mayer, K.U., Meussen, J.C.L., Molins, S., Moulton, D., Shao, H., Simunek, J., Spycher, N., Yabusaki, S.B., and Yeh, G.T., 2015, Reactive transport codes for subsurface environmental simulation, *Comput. Geosci.*, **19**(3), 445-478.

Ström, A., Andersson, J., Skagius, K., and Winberg, A., 2008, Site descriptive modelling during characterization for a geological repository for nuclear waste in Sweden, *Appl. Geochem.*, **23**, 1747-1760.

Waber, N., Gimmi, T., and Smellie, J., 2009, Porewater in the rock matrix. Site descriptive modelling SDM-Site Forsmark: SKB R-08-105, Svensk Karnbranslehantering AB, Stockholm, 107 p.

Yu, S., Lee, J., Ha, K., Cho, B., and Kim, K.-J., 2021, Deep hydrochemical investigations using a borehole drilled in granite in Wonju, South Korea, *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, **19**(2), 247-260.

Yu, S., Kwon, J.S., Do, H.K., Chae, G.T., Park, J., Park, S., Choi, J., and Yun, S.T., 2023, Hydrochemical and isotopic comparison of crystalline bedrock aquifers in two geological disposal research sites in South Korea using samples collected during and after borehole drilling, *Appl. Geochem.*, **149**, 105560.

Xu, T., Spycher, N., Sonnenthal, E., Zhang, G., Zheng, L., and Pruess, K., 2012, TOUGHREACT Version 2.0: A simulator for subsurface reactive transport under non-isothermal multiphase flow conditions, *Comput. Geosci.*, **37**(6), 763-774.