

원전수거물 처분장 후보부지 특성평가 방안

Site Characterization for a Low-level Radioactive Waste Repository

김천수, 배대석, 박천수
한국원자력연구소

요 약

지층처분연구를 통한 지구과학분야의 기술적 발전은 천연방벽의 특성을 이해하기 위한 계층방법 및 단계적 부지조사·평가과정을 확립하였으나, 아직도 지하매질의 불균질성과 규모 종속적인 특성 때문에 후보부지특성에 대한 이해는 부족한 상태이다. 부지특성 평가결과의 불확실성으로 인한 시간적·경제적 부담을 줄이기 위해서는 무엇보다도 후보부지를 중심으로 계획된 정확하고 치밀한 부지특성평가계획의 수립과 전반적인 수행과정 및 결과에 대한 품질보증 시스템의 적용이 요구된다. 또한 원전수거물 처분시설에서 요구되는 충분조건과 필요조건으로 구분하여 단계별로 평가하여야 한다.

Abstract

The geoscientific study on geological disposal for radioactive wastes has established the stepwise site characterization program, methods and investigation technology. However the intrinsic properties of geological material such as heterogeneity and scale dependent properties make difficulty on satisfactory understanding of geological conditions. To avoid unnecessary time delay and unexpected extra-cost for site investigation, the accurate and complete site investigation program should be established in a stepwise manner and the QC programs for investigation methods and procedures. Moreover, the technical requirements and preferences for a repository should be distinguished and be assessed at the end of each investigation step.

1. 서 론

방사성폐기물의 관리목적은 폐기물로부터 발생되는 위해로부터 인간과 환경을 보호하는 것이다. 방사성폐기물을 격리하여 보관함으로써 현재뿐만 아니라 미래의 후손에게 책임을 전가하지 않으며, 폐기물처분으로 인하여 후손의 자유를 구속하지 않는 것을 포함한다. 지난 30년 동안 방사성 폐기물의 지층처분에 대한 연구는 활발히 진행되어왔으나 기본개념은 변하지 않고 있다. 이와 같은 연구결과, 지층처분은 현재 인정되고 있는 최적의 방사성폐기물 처분방식으로서, 규정대로 설계·건설된 시설은 충분한 안전성이 유지될 수 있으나, 상기술에 대한 공감대가 아직도 일반대

중에게 충분히 이루어지지 않고 있다.

처분장의 안전성은 다중방벽(multi-barrier)에 의한 격납(containment)과 격리(isolation)기능으로 인위적인 행위가 필요 없는 수동적인 안전성(passive safety)을 확보하게 되며, 각 방벽의 독립적 기능(Russian doll type)보다는 역학적, 수리적, 화학적인 상호보완 기능으로 안전성이 유지되는 것이다. 천연방벽(natural barrier/geosphere)이 장기적 안전성을 확보하는데 주요한 기능을 갖게 한다. 일반적인 방사성폐기물처분장의 안전성기능은 다음과 같이 요약된다[1].

- 격납기능 (containment): 폐기물의 보관은 폐기물로부터 위대한 핵종이 누출되지 않도록 설계하는 것을 의미하며, 고준위폐기물인 경우 격납기능(containment)은 1차적으로 폐기물 고화체와 용기로 수백 년에서 수천 년까지 기능을 유지하게 된다.
- 격리기능 (isolation): 처분장의 1차적 안전성기능인 격리기능은 방사성폐기물의 주요 위해요소들을 생태계로부터 격리시키는 것으로 방사능이 대부분 소멸 될 때까지 공학적방벽(engineered barrier)과 천연방벽에 의하여 폐기물을 생태계와 인간 활동으로부터 보호한다.
- 지연기능 (retardation): 지연기능은 처분장의 격리기능의 보완 역할인 처분장의 2차적 안전성기능으로서, 장기간동안 생태계로의 핵종이동을 지연시켜 궁극적으로 생태계로 누출되는 핵종의 위해성을 법적규제 기준치 이하로 최소화시키는 것이다.
- 희석과 분산기능 (dilution and dispersal): 폐기물위해성의 희석과 분산은 3차적인 안전성기능으로 고려되었으나 이는 예측하기가 어렵고 또한, 장기안전성개념과 위배되어, 처분안전성평가는 처분장의 안전성기능에서 제외하고 있다. 그러나 안전성기능으로는 고려되지 않지만 부지특성에 따른 희석조건은 안전성에 중요하게 작용하고 있다.

원전수거물(저준위방사성폐기물) 처분장 후보부지에 대한 부지특성평가 (site characterization)의 목적은 처분장의 건설인·허가를 획득하기 위해서 시설의 설계와 함께 건설·운영으로 인한 방사선적·비방사선적 안전성평가 및 환경영향평가의 선행 수행업무에 해당하는 사항이다. 부지특성평가를 수행하기 위한 평가계획에는 조사항목과 방법에 대한 자세한 계획이 먼저 수립되어야 한다.

2. 지질환경자료의 특성

지층처분은 안정된 지질환경을 활용하는 것으로 천연방벽은 처분장 안전성에 근본적으로 기여하게 된다. 그러나 지질환경특성의 시·공간에 따른 변화와 이와 관련된 해석/평가의 불확실성 때문에 지층처분에서 천연방벽의 역할이 축소 평가되고 있다. 지층처분연구를 통한 지구과학분야의 기술적 발전은 천연방벽의 특성을 이해하기 위한 계측방법 및 단계적 부지조사·평가과정을 확립하였으나, 아직도 지하매질의 특성에 대한 이해는 부족한 상태이다. 지하매질특성평가의 당면한 문제점들은 불확실성이 높은 다음과 같은 요소에 기인한다.

- 부지의 장기적인 지질학적 변화특성
- 공간적인 지질학적특성(역학적, 화학적, 수리적)변화
- 규모에 따른 특성의 변화 및 불균질성

이러한 문제점을 감소시킬 수 있는 방안으로 처분부지 조건의 복잡성을 야기하는 요소는 아무리 처분환경에 도움이 되는 요소라도 불리한 요소로 평가하고 있다. 처분안전성과 관련된 지질환

경자료의 특성은 다음과 같이 요약된다.

- 천연방벽의 기능이 신뢰성 있는 자료에 근거하여 상세하게 기술되어야 한다.
- 안전성평가에 사용되는 인자나 부지특성자료는 직접적으로 계측될 수 없으며, 이들 자료는 지질학적인 관찰, 해석 및 지질구조모델링, 지질구조모델에 근거한 수리학적 자료해석, 수리학적 모델에 기반으로 해석된 지구화학자료에 의하여 도출된다.
- 현장에서 계측된 자료는 부지환경특성모델(site descriptive model)에 의한 평가/재해석 없이 직접적으로 안전성 평가모델에 사용될 수 없다.

원전수거물 처분장의 부지특성평가도 일반적으로 모든 상용프로젝트에서 접근하는 절차가 진행되어야 한다.

첫째, 기존자료 분석과 현안문제점 도출

둘째, 문제점의 범위 및 수행방법(시험·측정) 선정

셋째, 조사 업무의 시행 및 감시관리·감독

넷째, 현안문제의 해결 및 추가조사 여부의 결정

상기와 같은 일련의 업무는 필요시 반복적으로 수행될 것이다. 그러나 재시행으로 인한 시간적·경제적 부담을 줄이기 위해서는 무엇보다도 정확하고 치밀한 부지특성평가계획(site characterization program)의 수립, 전반적인 수행과정 및 결과에 대한 품질보증(quality assurance: QA)시스템의 적용이 반드시 요구된다. 부지특성평가 프로그램은 후보부지를 중심으로 계획된 프로그램이 요구된다.

3. 단계별 부지특성평가

현안문제의 발굴은 “중·저준위방사성폐기물 천층처분시설의 위치에 관한 기술기준(과학기술부 고시 제2002-24호, 2003)[2]”, “사용후핵연료 중간저장시설의 위치기준” (과학기술처고시 제91-8호, 1991)[3], “중·저준위방사성폐기물 부지특성평가보고서 작성 지침(과기처고시 제94-4호, 1994)”[4] 및 “사용후핵연료 중간저장시설의 부지특성보고서 작성지침” (과학기술처고시 제96-12호, 1996)[5]의 내용을 토대로 후보부지를 중심으로 접근하여야 한다. 현안문제의 발굴을 위한 출발은 처분장의 기본기능인 격리효과와 지연효과 평가를 위한 자료도출과 안전한 관리를 위해 해결하여야 할 장기적인 시설의 성능과 안전성 확보 차원에서 규명하는 주제로 구성된다. 이를 위해서 원전수거물 처분시설에서 요구되는 충분조건과 필요조건(requirements and preferences)으로 구분하여 평가(characterization)하여야 한다. 평가 시, 조사될 내용의 구성은 처분방식의 결정과 함께 이를 전제로 제기되는 주요 요소 (main issues)를 비롯하여, 세부적인 다양한 현안과제들(sub-issues)이 도출되어야 한다.

수행 방법 및 범위의 선정에 있어서 가장 핵심 요소는 현안문제들의 해결을 위하여 적용되는 방법으로서 현재의 기술수준으로 공인된 방법을 활용하는 것이다. 현재, 지정고시를 위한 2차 지질조사 업무가 계획·발표되어 있고, 후속 업무로 처분시설건설 인·허가 단계를 위한 후보부지특성평가로 이어지는 일련의 기술·행정적인 절차를 감안할 경우, 크게 두 단계로 접근하는 것이 타당하다. 즉, 지정고시단계와 부지특성평가단계로 양분하여 현안문제를 광역적 규모에서 부지규모로, 개략적인 접근에서 단계별로 기술적인 정밀성·정확성의 심도를 증대시켜 나가는 전술이 필요하다. 이를 위하여 선행업무에서 발굴, 또는 새로 제기된 현안문제를 해결하기 위한 단계별 접근을 위해 다양한 분야 및 규모별 부지환경특성모델(site-descriptive model)의 구축이 바람직하다. 부지환경특성모델의 구축과정은 다양한 분야의 종합적인 해석·평가(multidisciplinary

interpretation)에 의해 반복적으로 수정·보완해 나가는 일련의 과정(iterative step)이다. 이러한 접근방법은 현재 지하공간 개발프로젝트에서도 유사한 개념으로 적용·수행되고 있다. Geoscientific model 도출을 위한 구성모델체계는 그림 1과 같다.

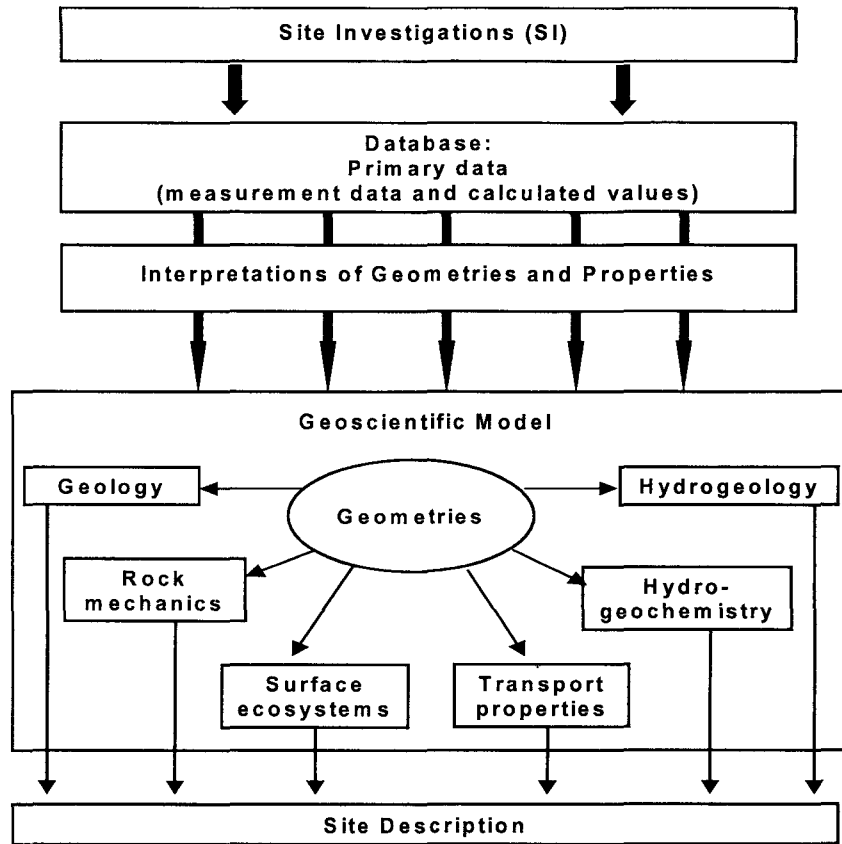


그림 1 Site Descriptive models for a LLW repository[6]

개념모델들을 수정·보완해 나가기 위하여, 지정고시단계와 부지특성평가 단계를 중심으로 업무의 선행·후행 여부를 분류한 후, 부지환경특성모델-v.1 및 v.2 등으로 각각 구분하고 생산 시점은 공정개념에 입각해서 접근하여야 한다(표 1; 그림 2). 근본적으로 본 처분장의 건설사업이 여러 장소에 반복적으로 수행되는 것이 아니기 때문에 이러한 부문별·단계별 개념모델링은 환경보전과 안전성측면에서 원자력산업의 본래 특성인 방어산업개념(defence work)에 근거하여 모든 업무의 진행과정과 결과의 투명성에서 이루어져야 한다. 부지환경특성모델링 업무의 특성을 정리하면 다음과 같다.

- 자연환경 특성의 단순화: 공간적 불균질성 및 이방성, 규모 종속성, 시간적 변화성
- 자연환경 특성의 이해: 개념적 접근 및 다양한 개념모델 설정
- 정량적 정보도출 및 정성적 자료의 적용: 지질환경의 이해도 제고
- 다양한 분야의 자료를 종합 해석 및 평가
- 미확인 또는 확인 불가능한 특성에 대한 외삽·내삽으로 추정
- 시간 종속적인 특성 변화에 대한 예측

표 1 단계별 부지환경특성모델링(site descriptive modeling)

후보부지 특성평가 단계	주요 기본방향	대상범위	부지지질환경특성 모델
사전 후보부지조사	<ul style="list-style-type: none"> 타당성검토 및 부지지정 기존·문헌·자료 의존, 개략적인 현지조사 병행 	<ul style="list-style-type: none"> 우선검토대상 부지에 대한 광역적 및 지자체 주변의 환경 특성 	<ul style="list-style-type: none"> 개략적인 개념모델, 광역규모(v.0).
지정고시 단계	<ul style="list-style-type: none"> 개괄적인 조사: 기상, 지표, 및 천부 지하환경 정밀부지조사 지표 및 심부지질환경에 대한 조사 	<ul style="list-style-type: none"> 대상지역 및 후보부지 (광역 및 국지규모) 우선검토대상 부지영역 (광역 환경) 	<ul style="list-style-type: none"> 부지규모 영역의 선정 개념모델 (v.1.1) 광역 및 국지규모의 예비 개념 모델 (v.1.2) 후보부지의 예비 지질환경 특성모델
후보부지 특성평가 단계	<ul style="list-style-type: none"> 심부지질환경특성 조사 (일부 천부영역 포함) 	<ul style="list-style-type: none"> 광역 및 부지 환경 	<ul style="list-style-type: none"> 광역·국지·부지규모의 지질환경모델(v.2.1)
	<ul style="list-style-type: none"> 단계별, 보완적 개념의 부지조사 증대 및 평가 (심부영역 중심, 일부 천부 영역 포함) 	<ul style="list-style-type: none"> 광역 및 부지 환경 	<ul style="list-style-type: none"> 광역·국지·부지규모의 수정·보완된 지질환경모델 (v.2.2)
	<ul style="list-style-type: none"> 부지특성조사 추가 항목 수행 (현안문제 평가·해결 여부에 따라 추가 업무 결정) 	<ul style="list-style-type: none"> 광역 및 부지 환경 	<ul style="list-style-type: none"> 광역·국지·부지규모의 최종 부지지질환경특성 모델(v.2.n) 완성

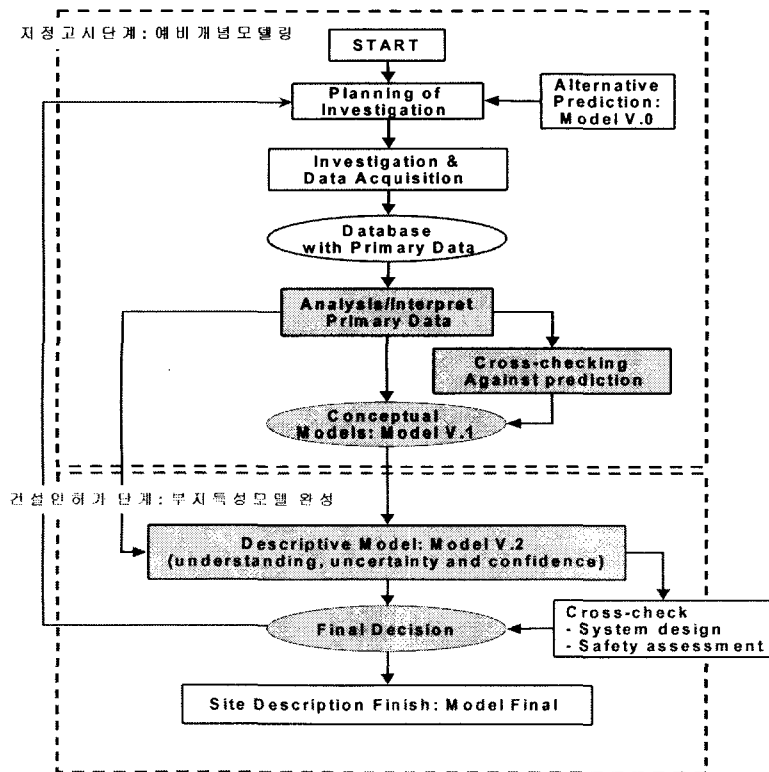


그림 2 Flow diagram of Site Description [6]

4. 처분안전성 평가를 위한 주요부지특성

4.1 투수성구조

천연방벽(geosphere)의 격리기능은 장기적 지질안정성, 처분모암, 지질구조, 역학적특성, 지하수 유동체계, 지화학적조건 등이 종합적으로 평가되어야하나, 그중 근간을 이루는 것은 처분장에서 생태계에 발달한 투수성구조가 천연방벽의 격리특성을 대표하게 된다. 스웨덴의 지하시험시설에서 관찰된 가상 처분공에서 지표까지의 지하수 유동로는 규모가 다른 투수성구조로 구성된 유동로 개념이 제시되고 있다[7]. 공학적방벽을 통과한 방사성물질은 투수성이 적은 제한된 크기의 투수성구조를 접하게 되며, 이들은 용이한 단열들의 연결망에 의하여 점차 큰 규모의 투수성이 높은 단열체계로 이동하게 된다. 이들의 특성은 다음과 같이 분류된다.

- 소규모 단열: 주로 background fracture로 구성되며, 크기는 수 센티미터에서 수 미터의 범위
- 소규모 단열망내에 발달된 단열군(fracture cluster)
- 터널규모의 투수성구조: 중규모(mesosopic)단열망, High Permeable Features
- 광역규모 단열대: Regional and Local major fracture zones

단열대는 단열의 빈도가 m당 10개 이상의 경우로 SKB [7]는 정의하고 있으며, 시추공간에 단열의 연장성이 확인되면 이를 fracture cluster로 구분하고 있다. 수리적 연결성이 확인되지 않은 단열들은 암반의 background fracture로 분류하며 이의 특성은 통계학적으로 분석되고 있다. 투수성구조의 특성중 하나는 단열의 기하학적 분포와 역학적 특성은 규모에 따라self-similar하지 않다는 특징이다. 이는 단열들 간에는 유사한점이 있으나 규모에 따라 기하학적으로 상이한점을 갖고 있는 것으로 해석하고 있다. 대부분 큰 규모의 투수성구조는 단층으로 이루어 졌으며, 단층비지(fault gouge)는 흔히 단층을 채우고 있고 주기적으로 지하수의 유동로 역할을 한 것으로 해석하고 있다. 광역규모 단열은 대체적으로 선형이며 수 km이상이 추적된다. 중규모의 단층들은 주단층대와 분기된 단열들로 구성되나, 소규모의 암반단열(background fracture)들은 중규모 단층에서 관찰되는 형태를 전혀 보이지 않는다. 또한 소규모 단열들은 일정한 형태 없이 불규칙하게 구성되어 다소 규칙적인 큰 규모 단열들과 대조를 이루고 있다.

원전수거물을 처분공동(deposition chamber)에 적치하는 경우는 상기 기술된 투수성구조에서 처분공동을 교차하는 중규모의 단열들과 광역규모 단열대가 투수성구조의 주 평가대상이 되며, 처분모암의 투수성은 소규모 암반단열특성으로 정의 된다 (표 2).

표 2. 규모별 단열체계특성 [7]

구분	내용	비고
광역 규모 단열대	<ul style="list-style-type: none"> ● Regional lineament, interpreted as a fault or fracture zone. Length >5 km. ● Local major lineament, interpreted as a fault or fracture zone. Length 1-5 km. ● Local major lineament indicated in connection with magnetic data. ● Local major lineament of uncertain character, Length 1-2 km. ● Local lineament, connected. Length <1 km. ● Local lineament, fragmented. Length <1 km. 	
터널 규모	<ul style="list-style-type: none"> ● Single fault ● Swarm of single faults ● Fault zone ● Fault zone with rounded geometries ● Parallel fault zones with long connecting splays. 	
소규모 단열	<ul style="list-style-type: none"> ● Open fractures ● Open fractures with fault gouge 	

체계	<ul style="list-style-type: none"> ● Tight fractures ● Zones of open fractures ● Zones of tight fractures ● Zones of open fractures with fault gouge 	
----	--	--

4.2 처분장주변 암반의 지하수유동 인자

스웨덴의 모든 고준위폐기물처분후보지역에서 도출된 지표하 500m 암반의 지하수유동량(Darcy velocity)은 10^{-5} ~0.1m/y 범위로 나타나며, 안전성예비평가에서 계산된 결과는 지하수의 Darcy 유속이 약 0.01m/y보다 클 때 완충재와 암반경계에서 지연작용은 미미한 것으로 발표된 바 있다[8]. 이는 핵종이동 관점에서 암반의 지연기능은 처분장주변 지하수유동량의 제한적인 범위 내에서 지연작용을 하며, 처분장주변 지하수의 Darcy 유속은 지연효과의 상한값으로 0.01m/y (3×10^{-10} m/s)가 제시될 수 있다. 이러한 지하수유동량은 수리경사가 1%, flow wetted surface를 $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 로 가정할 때, 30m 규모암반의 수리전도도는 약 10^{-8} m/s 보다 낮게 계산된다. 스웨덴의 현장조사에서 예측된 수리전도도의 통계학적 분석결과는 파쇄대의 수리전도도(30m규모)는 1.5×10^{-5} ~ 2×10^{-10} m/s 이고, 암반의 수리전도도(30m규모)는 10^{-6} ~ 10^{-12} m/s의 범위를 갖고 있다. 현재 국내에서 수행되는 구간별(10~30m) 정압주입시험결과 도출된 모든 암반의 수리전도도값은 상기범위에 속하는 것으로 나타나고 있다.

따라서 원전수거물 처분장에서 천연방벽의 효율적인 지연효과를 위해서는 처분공동 주변암반의 수리전도도를 10^{-8} ~ 10^{-9} m/s 이하로 유지시켜야 할 것이다. 또한 지하수의 Darcy 유속은 부지적합성평가인자로 사용될 수 있으나, 시추공에 의한 조사단계(surface based investigation stage)에서는 지하수유속자료 도출이 매우 어렵기 때문에 처분장 모암으로의 적합성 판단에 제한적으로 적용하게 된다.

참 고 문 헌

- [1] IAEA, Geological Disposal of Radioactive Waste: Draft Safety Requirements, IAEA safety standards series DS154 (2003)
- [2] 과학기술부고시 제2002-24호, 중·저준위방사성폐기물 천층처분시설의 위치에 관한 기술기준, 과학기술부 (2002)
- [3] 과학기술처고시 제91-8호, 사용후핵연료 중간저장시설의 위치기준, 과학기술처 (1991)
- [4] 과학기술처고시 제94-4호, 중·저준위방사성폐기물 처분장 부지특성보고서 작성지침, 과학기술처(1994)
- [5] 과학기술처고시 제96-12호, 사용후핵연료 중간저장시설의 부지특성보고서 작성지침, 과학기술처(1996)
- [6] SKB, Site descriptive modeling - strategy for integrated evaluation, SKB R-03-05, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, Sweden (2003)
- [7] SKB, Aspo hard Rock Laboratory: Analysis of fracture networks based on the integration of structural and hydrogeological observation on different scales; SKB TR-01-21, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, Sweden (2001)
- [8] SKB, What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock; SKB TR-00-12, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, Sweden (2000)