

방사성 폐기물 지층 처분장과 암반의 역학적 특성 변화 - ANDRA의 예 -

정소걸^{1)*}, 신중호¹⁾

Mechanical evolution of radioactive waste repository and rock mass

- A review on ANDRA's case -

So-Keul CHUNG, Joong-Ho SYNN

Abstract Thermo-hydro-chemico-mechanical evolution of the radioactive waste repository and surrounding geological media is one of the key issues for the radioactive waste disposal. This article describes not only the basic context for the site selection but also a reasonable strategy for the repository related research based on the results of the French repository project carried out by ANDRA (National radioactive waste management agency). To have some alternatives for the determination of a preferable depth and geological media, it would be recommendable to establish a database system. The curing process of the fractures or microfissures in the EDZ (Excavation Disturbed Zone) during operation time has to be examined considering the evolution of the EDZ and the reversibility of the repository. It is prerequisite to carry out a feasibility study and to validate the design concept and design parameters in a properly constructed underground research laboratory (URL) in Korea.

Key words Mechanical evolution, EDZ curing, URL

초 록 지하 500 m의 처분장 주위 암반이 수 십 만년 이상 장기적으로 지압과 열하중을 받음으로 인해 발생하는 역학적-열적-수리적-화학적 특성변화에 대한 프랑스의 연구 결과를 분석하고 우리나라의 방사성 폐기물 처분에 관련된 연구 방향 설정과 부지확보 등 기초자료를 도출하고자 하였다. 우리나라에서 방사성 폐기물 관련 사업을 수행함에 있어 선택의 폭을 넓히기 위해서는 첫째, 처분심도를 비롯한 처분 대상 지질매체(화성암 및 퇴적암)의 결정을 위한 데이터베이스의 구축이 시급하며, 특히 처분장 건설시에 갱도 혹은 처분 셀 주위에 발생되었던 파쇄 균열이 처분장을 장기간 운영하는 과정에서 치료되는 특성에 대한 규명이 필요할 것이다. 둘째, 장기적 EDZ 거동 변화에 대한 검증이 필요하며 처분 개념의 가역성(reversibility)에 대한 검토도 이루어져야 할 것으로 판단된다. 셋째, 한국형 방사성 폐기물 지층처분에 관한 타당성 검토와 개념설계를 바탕으로 구축된 지하실험실을 이용하여 처분장 설계 개념을 검증하는 연구 개발이 시급한 것으로 판단된다.

핵심어 역학적 거동특성변화, 굴착손상대의 치료, 지하실험실

1. 서론

최근 국내외적으로 방사성폐기물 처분장의 심도를 지하 500 m 내외로 설정하는 경향이 뚜렷하다. 그 이유 중 하나는 지하 심부에서 발생하는 응력문제를 극복하기 위해서이다. 본 논문에서는 지하 500 m의 처분장 주

위 암반이 수 십 만년 이상 장기적으로 지압과 열하중을 받음으로 인해 발생하는 역학적-열적-수리적-화학적 특성변화에 대한 프랑스의 연구 결과를 분석하고 우리나라의 방사성 폐기물 처분에 관련된 연구 방향 설정과 부지확보 등 기초자료를 도출하고자 하였다.

프랑스에서는 1980년대부터 화강암을 대상으로 한 지층처분 연구를 수행해 왔으며 그 후 1991년 12월 말 고준위와 장주기 방사성폐기물에 대한 처분 관련 법안이 통과되면서 ANDRA(Agence Nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 영문명: National radioactive waste management agency)를 중심으로 본격적인 연구

¹⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원

* 교신저자 : skchung@kigam.re.kr

접수일 : 2008년 6월 3일

심사 완료일 : 2008년 6월 16일

게재 확정일 : 2008년 6월 17일

가 시작되었다. 여러 가지 기초 실험과 개념설계 및 현장 조사를 토대로 1999년 Meuse/Haute-Marne 지방 Bure의 지하 500 m 하부에 지하실험실(Underground Research Laboratory) 건설이 착수되었고 2007년 현재 -490 m 수준에서 지하실험갱도의 건설이 완료되었다. 2001년부터는 심층 연구가 수행되었는데 본 논문은 2002년부터 2005년까지 수행된 연구 중에서 지층 처분장과 지질 매체의 역학적인 거동 특성변화에 대한 내용을 다루었다. 그 간 국내외에서 화성암 등 결정질 암반을 대상으로 많은 연구가 수행되어 왔으나 퇴적암 내에 처분장을 건설할 계획을 가지고 점토질 암반인 Argillite 지층에 지하실험실을 건설한 프랑스의 전략은 독창적인 것으로 평가된다.

본 논문에서는 프랑스의 방사성 폐기물 처분 관련 연구 배경과 지하실험실 주위의 지질 개요, 방사성 폐기물의 유형별 처분 패키지, 처분개념 및 방법 그리고 굴착손상대를 포함한 지질 매체의 역학적 특성 변화, 열-수리-역학-화학 커플링 문제 즉, 처분장의 장기적 운영에 따른 암반의 특성변화가 처분장의 장기적 안정성에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 살펴보았다.

2. 폐기물 처분 유형 및 지질매체

2.1 처분유형

프랑스에서 처분대상으로 하는 방사성 폐기물의 종류는 크게 두 가지로 분류된다. 첫째, C형 폐기물로서 유리화되고 재처리된 고준위 폐기물로서 금속 용기에 저장되어 있으며 높은 열의 발생에 의한 열하중을 고려하여 처분장내에서 처분용기와 암반 사이의 공간을 벤토나이트로 충전한다. 그리고 사용후 핵연료에 대해서는 아직 구체적인 계획이 없으나 대개 C형 폐기물과 유사한 방법으로 처분한다. C형 폐기물 저장 용기는 지름이 60 cm이고 길이가 1.3-1.6 m의 실린더 모양으로 되어 있다. 둘째, B형 중저준위 폐기물로서 고성능 콘크리트 용기에 저장되어 있으며 용기의 형태는 한변이 1.5-2 m인 육면체이고 그 무게는 6-25톤에 이른다. B형 폐기물은 발열량이 적어 열하중이 미미하다(Fig. 1 - Fig. 4).

2.2 점토질 암반의 거동 특성 변화

처분장이 건설되기 이전의 점토질 암반(argillite)은 역학적으로나 열, 수리, 화학적으로 수 백만년 동안 안정되었을 것으로 가정할 수 있으며, 처분장이 건설된 이후에는 지하 공동의 굴착 영향으로 역학적인 불균형 상

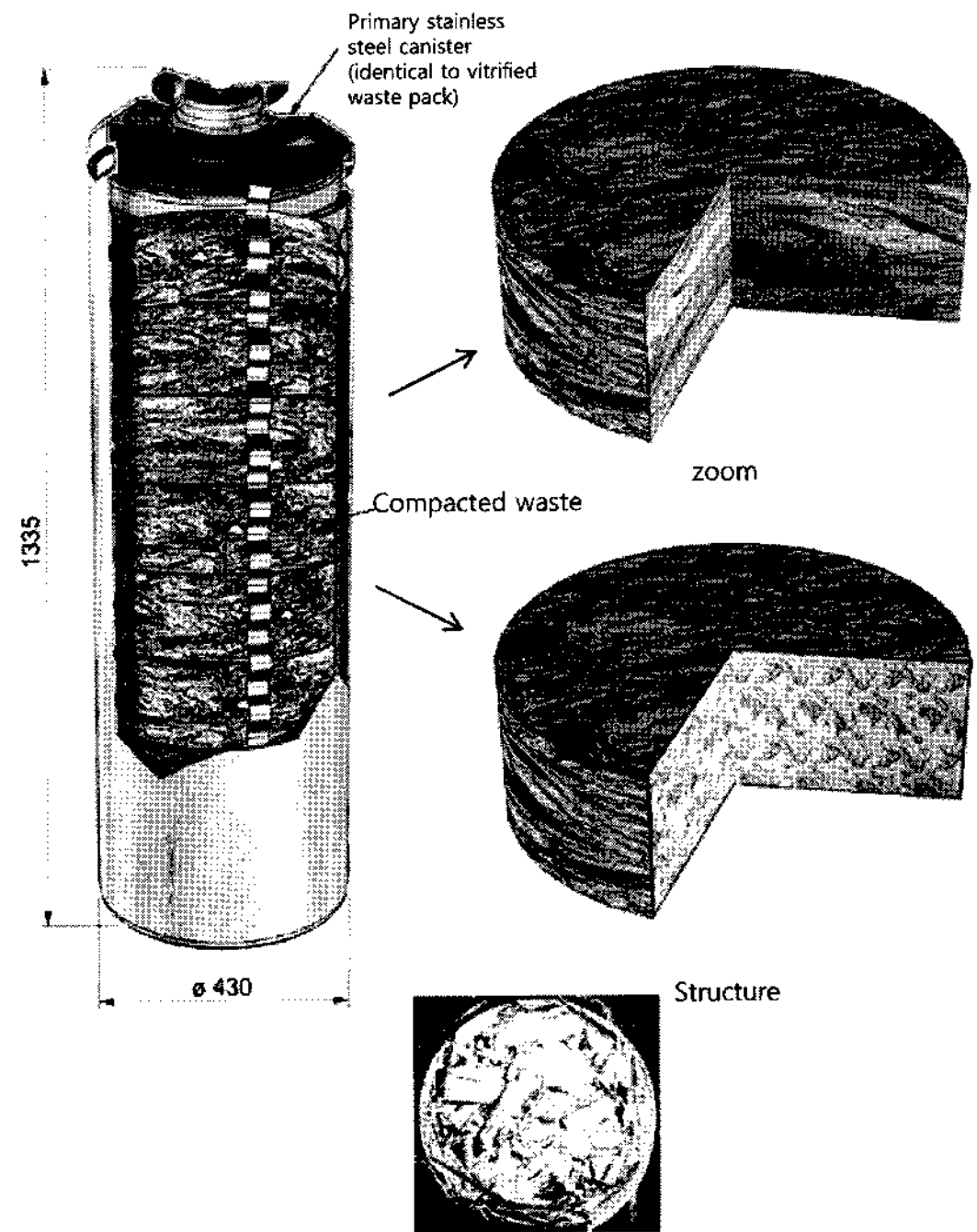


Fig. 1. Diagram of B waste pack containing hulls, end caps and compacted technological radioactive waste(B5 waste pack)

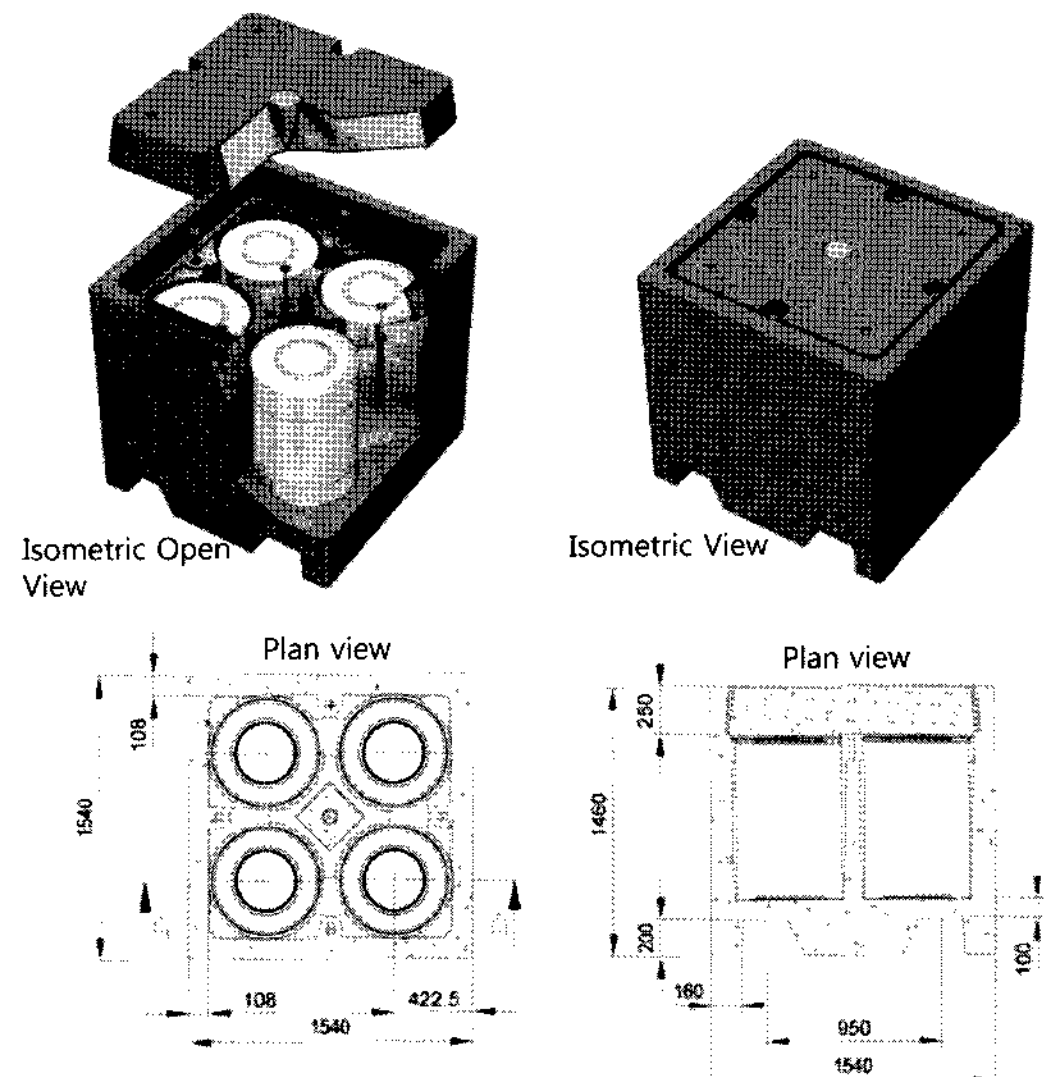


Fig. 2. Example of a basic diagram of a B waste disposal pack

태가 발생되어 공동 주위 암반의 구속압이 감소하고, 처분 공동과 주변 암반 내에 열적, 수리적, 화학적 상호작용으로 인하여 다음과 같은 결과가 유도된다. 첫째,

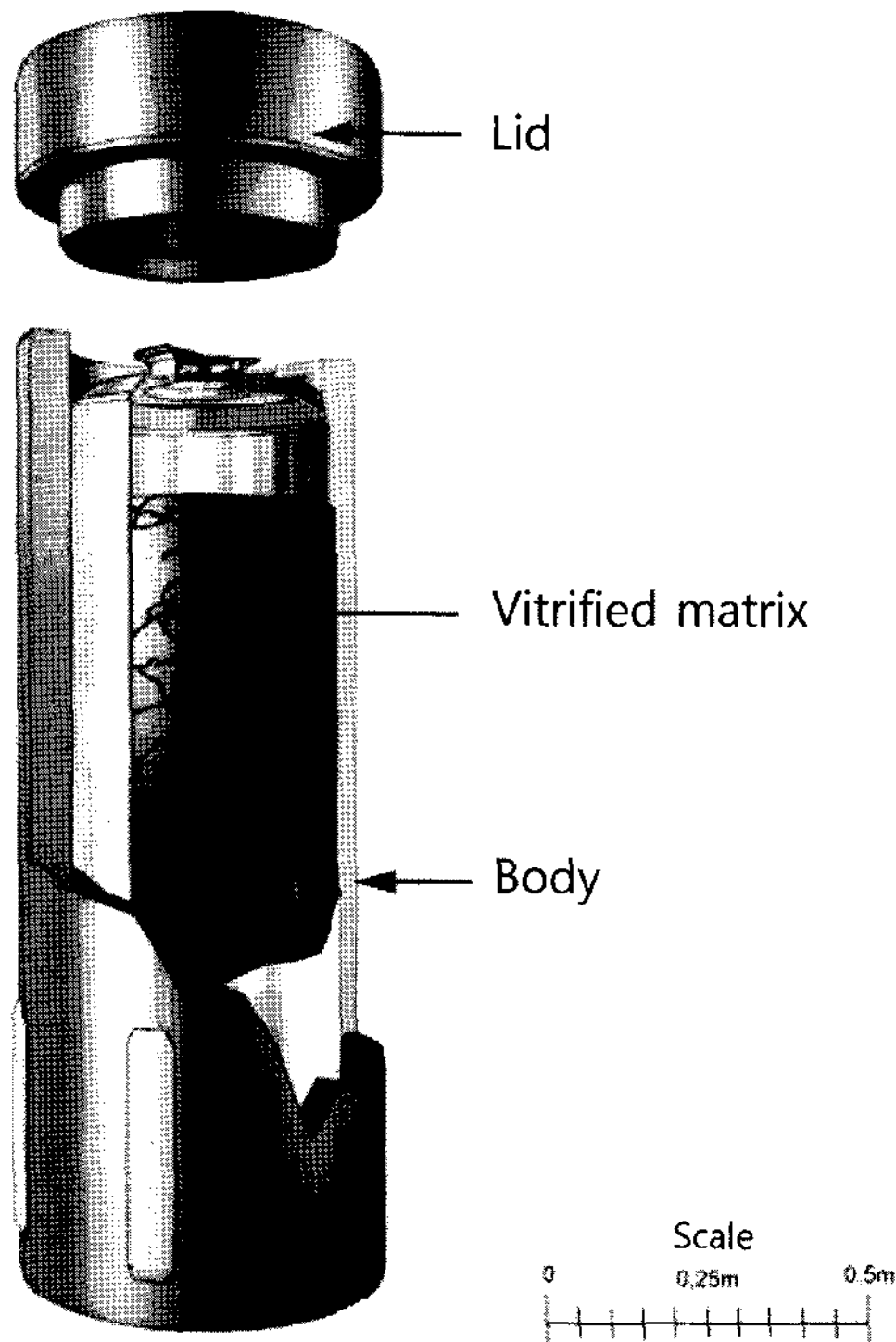


Fig. 3. Diagram of C waste disposal pack

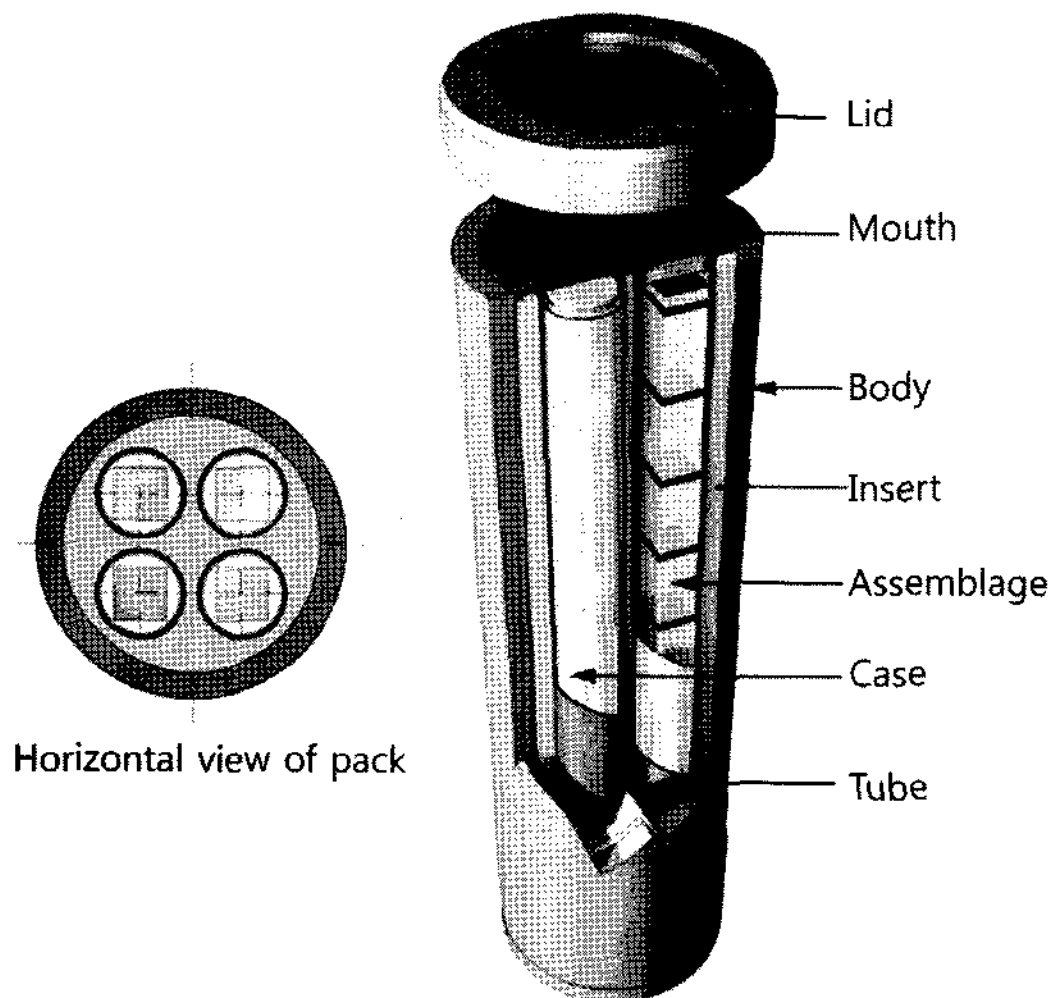


Fig. 4. Diagram of a CUI spent fuel disposal pack

굴착 손상대와 같이 굴착 작업에 의해서 발생하는 공동 주위 암반의 역학적 거동변화이며, 둘째, 수리역학적 커플링으로서 굴착 초기에는 공동 일부 혹은 전체가 불포화 상태로서 화학적 물성의 변화는 제한적이거나, 공동 주위의 굴착손상대에서 시간의존적 거동이 나타난다.

처분장을 폐쇄한 후 완전 포화상태가 되려면 열수리화학적 거동의 수치해석 결과 약 20만년(포화율 97% 이상)이 소요되며, 포화율은 암반의 시간의존 거동 혹은 벤토나이트(충전재)의 압력 변화 등에 영향을 미치게 된다. 셋째, 역학적 커플링으로서 사용후 핵연료는 처분장을 포함하는 전체 지층에 열하중을 발생시키는데 열하중 증가와 함께 지층내 온도가 상승하면 처분장과 암반의 변형 및 응력 변화가 수반된다. 넷째, 화학역학적 커플링으로서 수리적 조건과 열적 조건으로 인해 금속류의 부식과 화학 작용에 의한 물성저하를 유발함으로써 처분장의 역학적 변화를 초래하게 된다. 초기 10만년-20만년 사이에는 암반이 완전 포화 상태에 도달하지 못하기 때문에 화학 작용에 의한 물성 저하가 크지 않으며 포화상태로 환원된 후에도 처분장 내 유량이 적고 유속도 낮아 암반 물성의 변화가 느리게 일어난다. 처분장의 거동에 대한 예측은 처분 셀(storage cell), 갱도, 충전재 및 수갱을 대상으로 초기로부터 시작하여 처분장 폐쇄후 100만년까지 지속된다.

2.3 점토질 암반의 물성

점토질 암반의 단축압축강도는 21 MPa 이상을 보이고 열전도도는 $1.4-2.7Wm^{-1}K^{-1}$ 로서 국내 중생대 지층의 퇴적암류 보다 작은 값을 보인다. 공극률은 10-18%이며 공극의 평균 크기는 0.05 micron, 투수계수는 $10^{-12}-10^{-14} m/s$ 를 보이며 점토질 암반 인접 지층의 투수계수는 $10^{-7}-10^{-9} m/s$ 를 보이고 있다. 점토질 암반으로 구성된 본 지층의 두께는 약 130 m에 달한다. 암반의 대표적인 물성을 살펴 볼 때 암반의 강도가 불과 21 MPa 정도이나 이는 지하 500 m 하부에 처분 공동을 건설하고 처분장을 안전하게 운영할 수 있는 범위의 강도 값이며, 특히 투수계수가 극히 작다는 것이 특징이라고 할 수 있다. 즉, 투수계수가 낮으면 처분장이 장기간 운영될 때 열-수리-역학-화학적 커플링으로 인해 지하수가 처분장의 안정성에 미치는 영향을 최소화할 수 있다는데 착안한 것으로 볼 수 있다.

3. 지하실험실 및 처분장

3.1 지질개요 및 지하실험실

대상 지역은 중생대의 쥐라기 지층(Fig. 5)으로서 지표로부터 지하 450 m까지는 석회암류의 지층으로 구성되어 있고 450 m-600 m 사이에는 두께 약 130 m의 점토질 암반으로 구성된 지층이며 630 m 하부는 또 다시 하부 석회암류로 구성되어 있다.

지하실험실은 진입 수갱과 보조수갱으로 연결되며 지

하 -445 m에 실험갱도가 있고 그 하부 - 490 m에 주요 실험실과 실험갱도로 구성되어 있다(Fig. 6).

지하실험실을 굴착하기까지 10년 동안 탄성과 탐사, 심부 시추, 시험갱도 굴진, 갱내 시추 등 충분한 기본 조사가 수행되었다.

3.2 처분장 및 처분 개념도

처분장은 4개의 수갱을 통하여 운영되는데 저준위 폐기물 처분장(Fig. 6의 zone B)과 고준위 폐기물 처분장

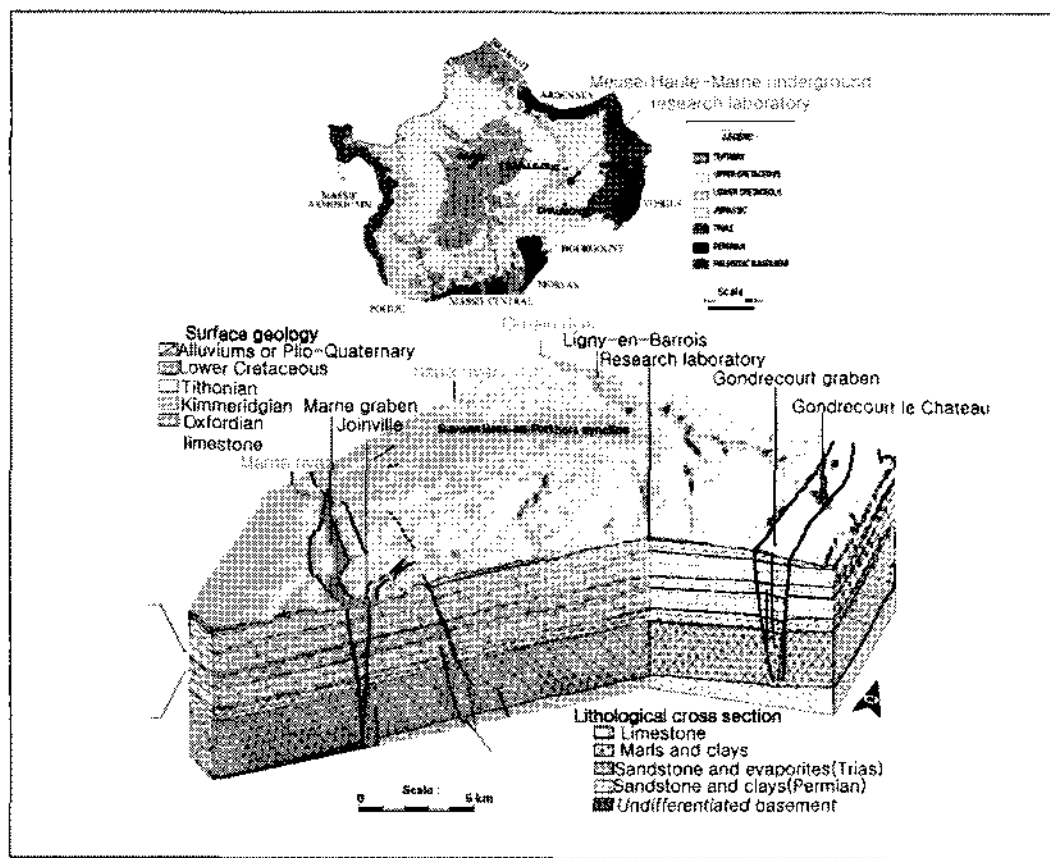


Fig. 5. 3D geological block diagram of the Meuse/Haute-Marne sector

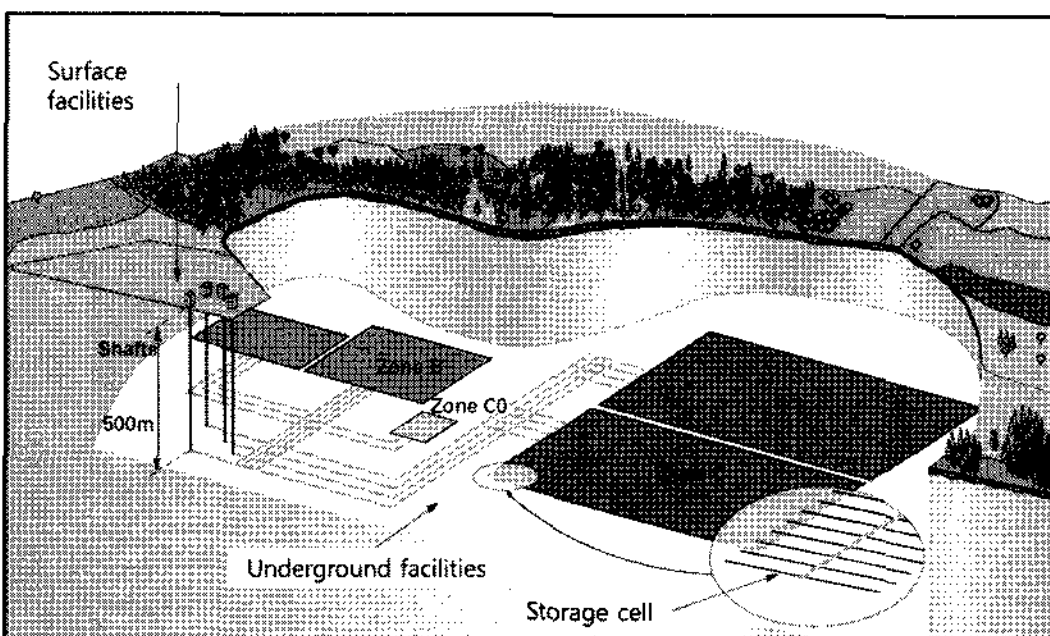
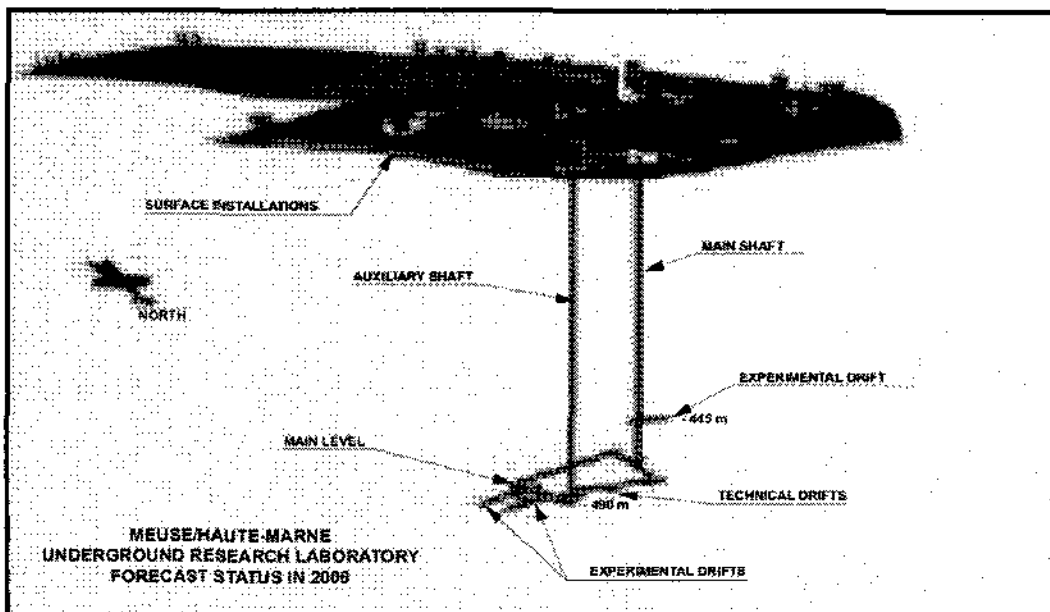


Fig. 6. Basic diagram of a repository layout during operation

(Fig. 6의 zone C)으로 나뉜다. Fig. 7은 처분장의 건설 및 운영계획을 나타낸 것으로서 하나의 단위 처분장이 완성되면 이어서 크로스 갱도 굴진 방향으로 그 다음 단위 처분장이 건설되어 갱도 오른편의 단위 처분장들이 모두 완성되고 난 후 반환점으로부터 다시 단위 처분장들을 건설하여 진입 갱도까지 다다르게 되면 첫 번째 구역(sub zone)이 완성된다. 두 번째 구역 역시 첫 번째 구역에 인접하여 같은 방법으로 진행된다.

4. 처분방법 및 이론적 배경

4.1 중저준위, 고준위 폐기물 및 사용후 핵연료의 처분

Fig. 8에서와 같이 중저준위 처분용기는 콘크리트 상자로 포장되어 있으며 이를 처분 셀 막장으로부터 후퇴식으로 쌓아 나온다. 이 때 처분 셀은 직경이 10-12 m,

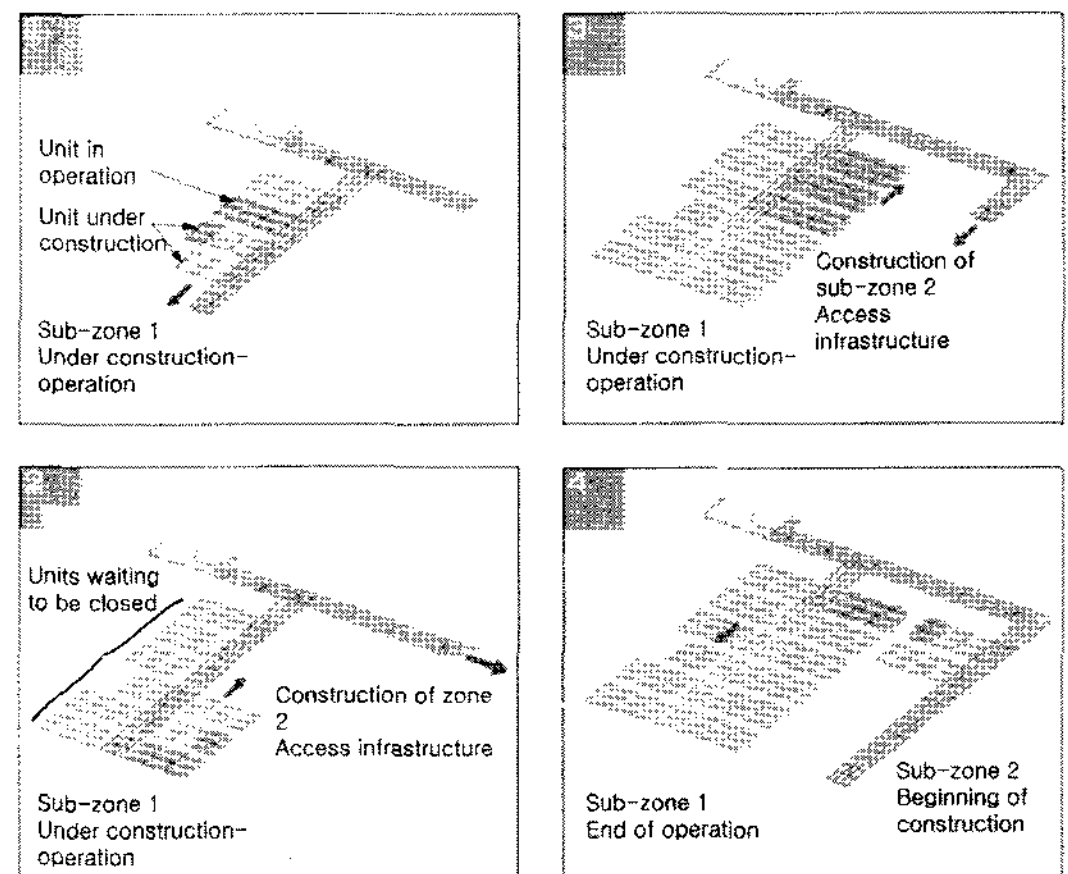


Fig. 7. Phases in the construction and operation of a C waste repository zone

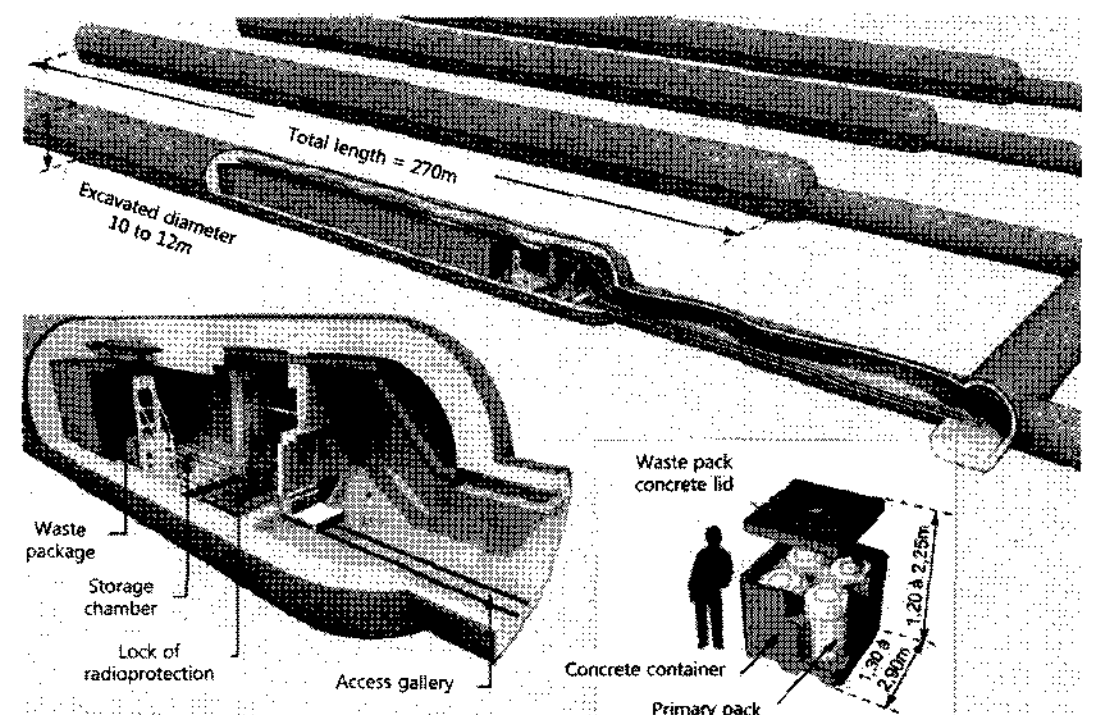


Fig. 8. Basic diagram of a B waste pack disposal cell in operating configuration

길이 약 270 m에 달하는 갱도이다(Fig. 9).

고준위 폐기물은 직경이 약 0.7 m이고 길이가 약 40 m인 소형 갱도인 처분 셀 내에 처분하며 막장으로부터 후퇴식으로 저장해 나온다.

4.2 충전재에 의한 셀 폐쇄

중저준위 폐기물과 고준위 폐기물의 저장이 완료되면 셀 입구를 충전재로 폐쇄(플러그)한다(Fig. 9, Fig. 11, Fig. 12). 충전재의 특성을 살펴 보면 Fig. 13과 같다. Fig. 13은 충전재의 밀도가 증가하면 투수계수는 감소하고 팽창압은 증가함을 보여주고 있다.

4.3 점토질 암석내 굴착 손상대(EDZ)

일반적인 EDZ는 Fig. 14와 같이 셀 측벽으로부터 파쇄대(fracture zone) 그리고 미소파쇄대(microfissure zone)로 나타나지만 본 지역에서는 셀 주위에 전단파쇄대가 나타났다.

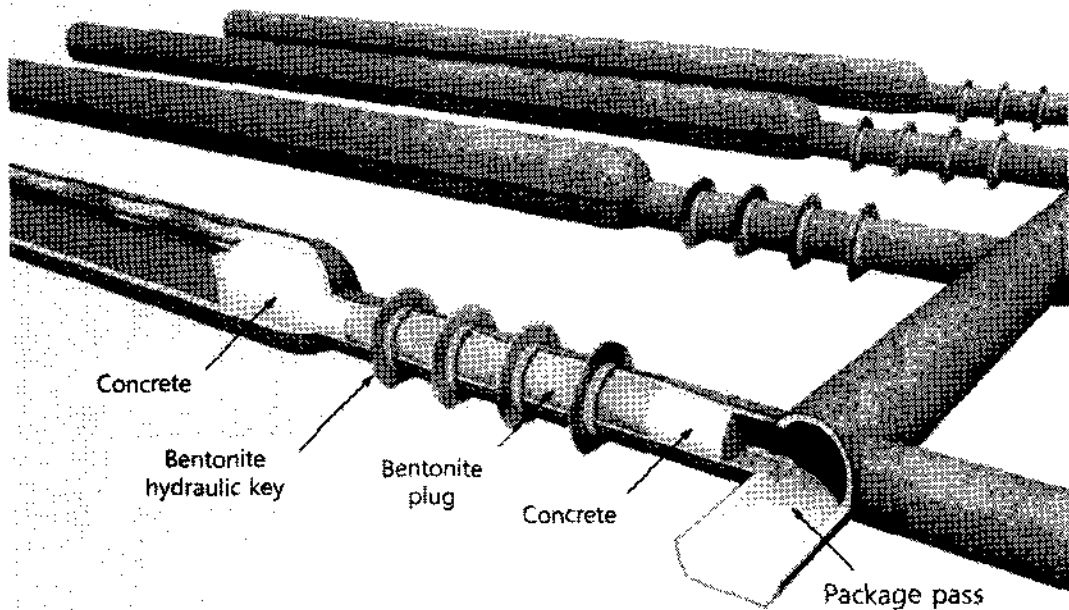


Fig. 9. Basic diagram of a B waste disposal cell

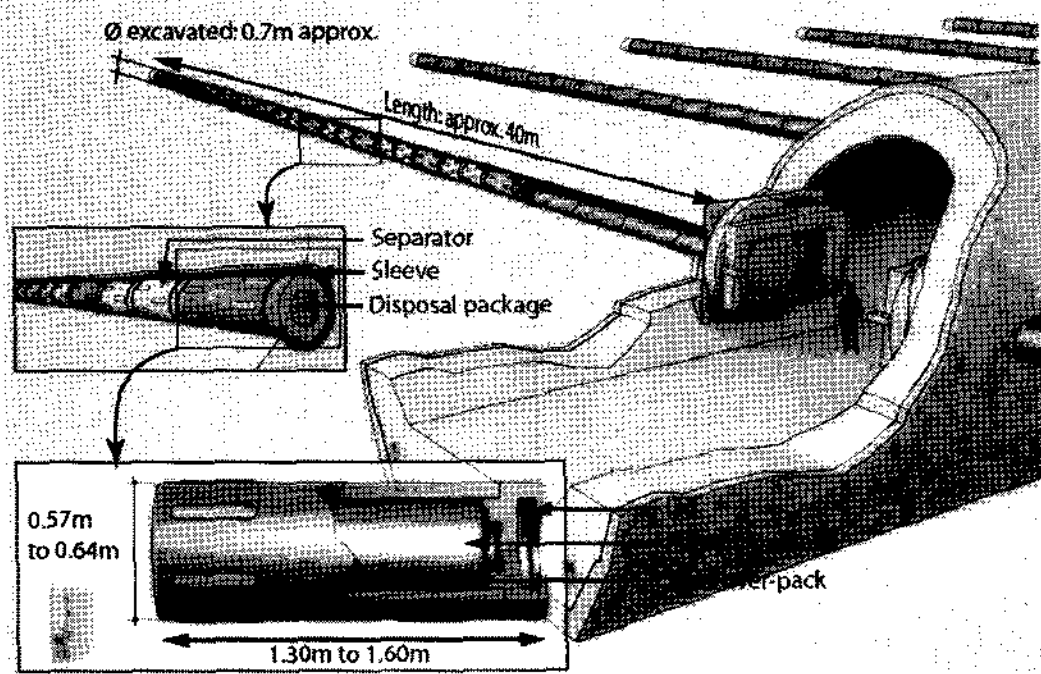


Fig. 10. C waste cell while in operating configuration

Fig. 15는 단축압축시험에서 볼 수 있는 응력-변형률 변화 곡선이다. 영역 I은 응력-변형률의 관계가 선형적으로 나타나며, 영역 II에서는 EDZ가 시작되어 응력수준이 압축강도에 이르게 되면 선형성이 종료되어 비가역적 거동을 보이며 미소균열이 발생하고 암석의 물성 감소와 함께 투수계수가 증가되는 구간으로서 미소파쇄대에 해당된다. 영역 III은 최대 하중 이후의 거동을

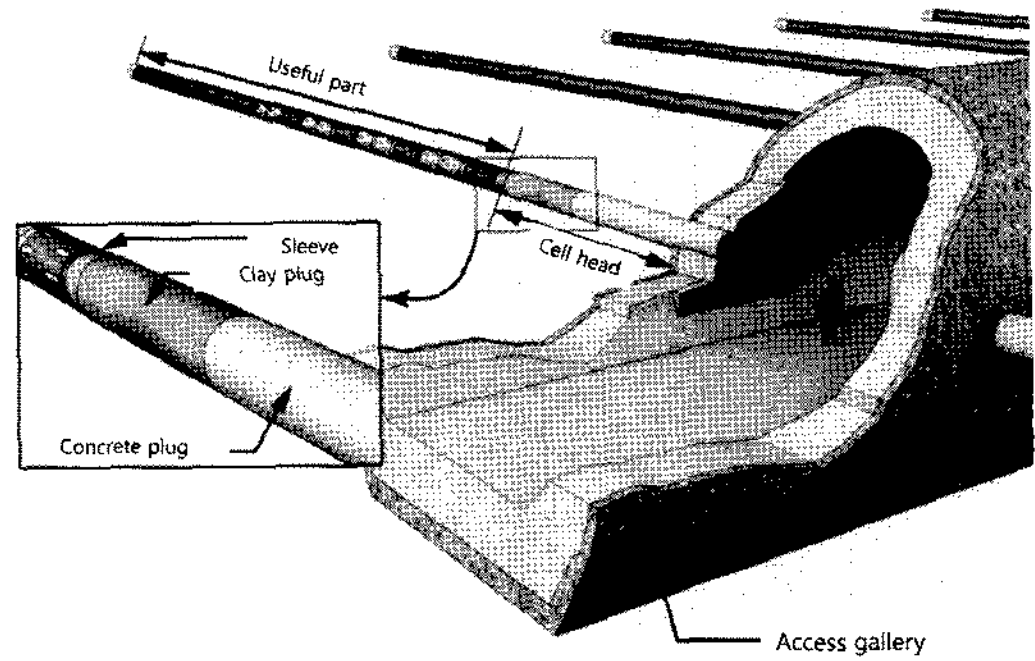


Fig. 11. Basic diagram of a C waste disposal cell

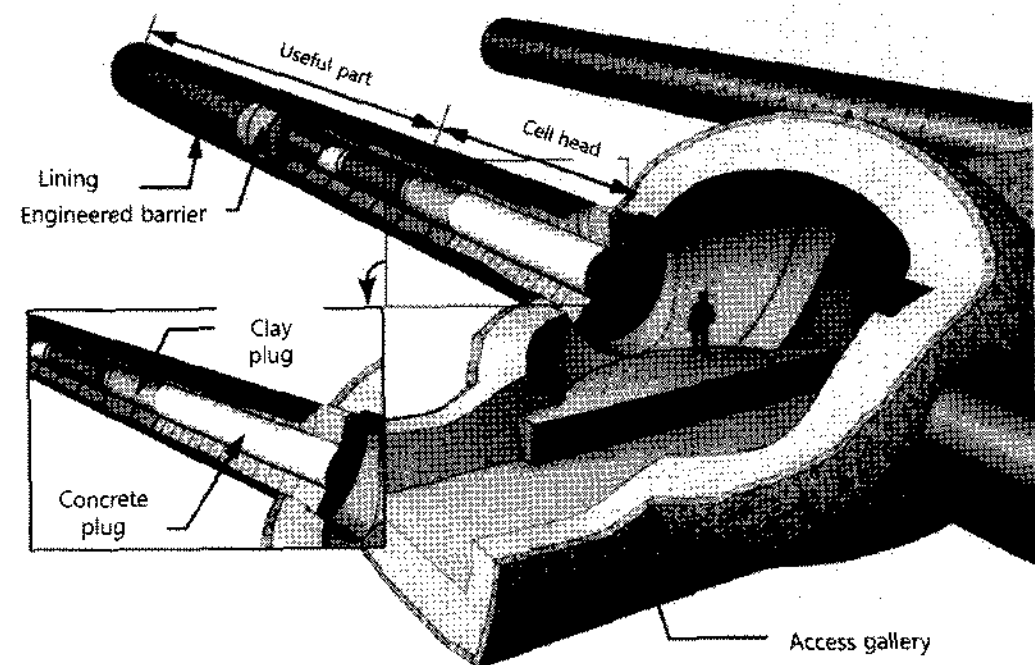


Fig. 12. Basic diagram of a sealed spent fuel disposal cell

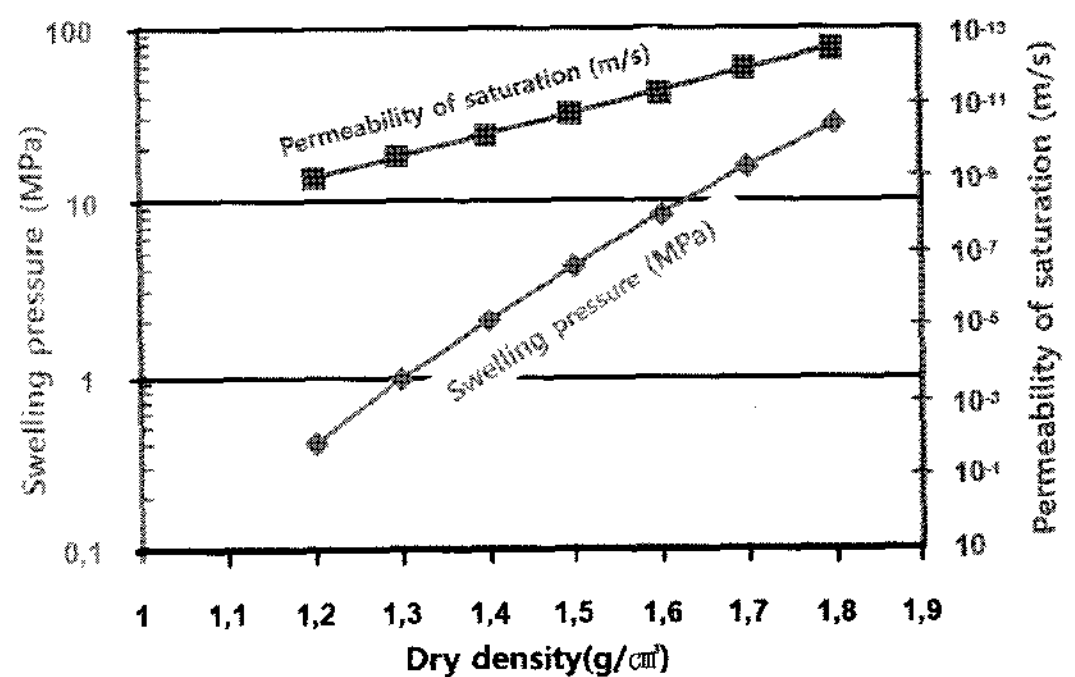


Fig. 13. Swelling pressure and water permeability curves for MX80 swelling clay

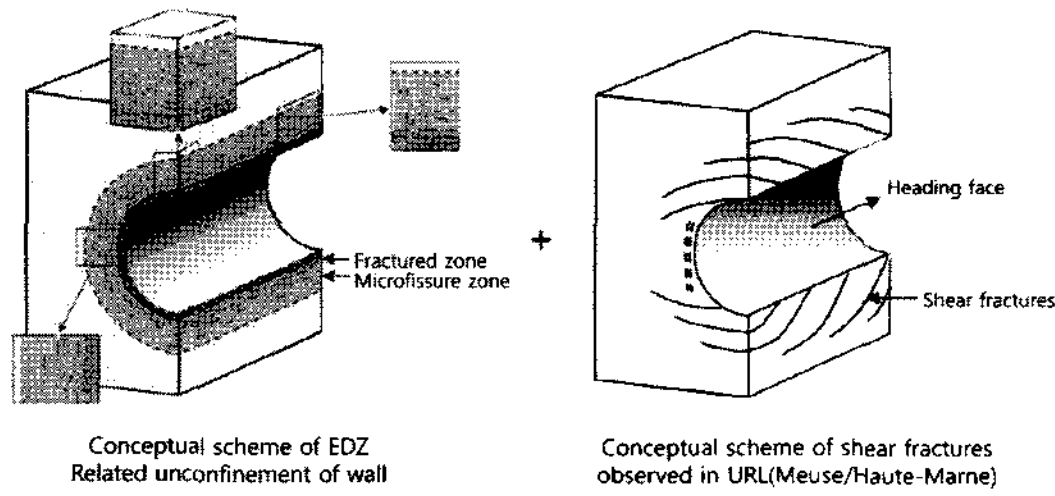


Fig. 14. EDZ conceptual scheme(hypothesis of an initial, isotropic stress state perpendicular to the axis of the engineered structure)

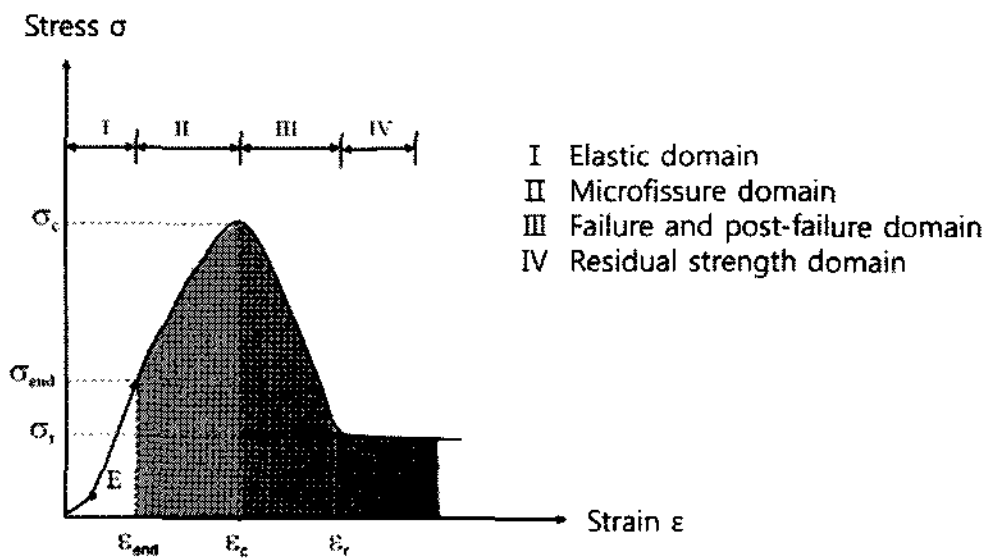


Fig. 15. Diagram of a uniaxial compression test illustrating the short-term mechanical behaviour of the argillites and characteristic value of the mechanical properties of the argillites in the locality of the repository

나타내며 불안정한 거동을 보여 거동에 대한 제어가 불가능하다. 또한 투수계수가 증가하고 점착력이 감소하여 잔류강도에 도달함으로써 파괴이후 영역 혹은 파쇄 영역에 해당된다. 마지막으로 영역 IV에서는 임의의 변형이후에는 잔류 강도가 일정한 특성을 보인다.

4.4 응력 이방성과 EDZ 및 크립현상

Fig. 16의 왼쪽 그림은 처분장의 수갱과 셀에서 나타나는 응력 조건으로서 최대 수평 응력이 연직 응력 보다 클 때 파쇄대가 셀의 측벽에서 보다 천장과 바닥에서 더 큰 이방성을 보이며, 오른쪽 그림은 주로 처분 셀에서의 응력 상태로서 연직응력과 최소 수평응력의 크기가 같을 때에 셀로부터 동일한 심도에서 파쇄대가 형성됨을 보여 준다. Fig. 17은 지하 공동의 방향이 최대 수평응력 방향과 같을 경우 미소파쇄 균열의 수는 공동 천장과 측벽에서 다소 많이 나타나며 이들 중 연결된 미소 균열들은 공동 반경의 0.2배 범위까지 분포하고 있음을 보여 준다.

셀의 지보와 라이닝에 가해지는 최대 허용 응력은 8 MPa로서 크립에 따른 점토질 압석의 100년 후 최대 응력은 이 보다 낮은 4 MPa을 보여 장기적인 안정성을 보여 준다.

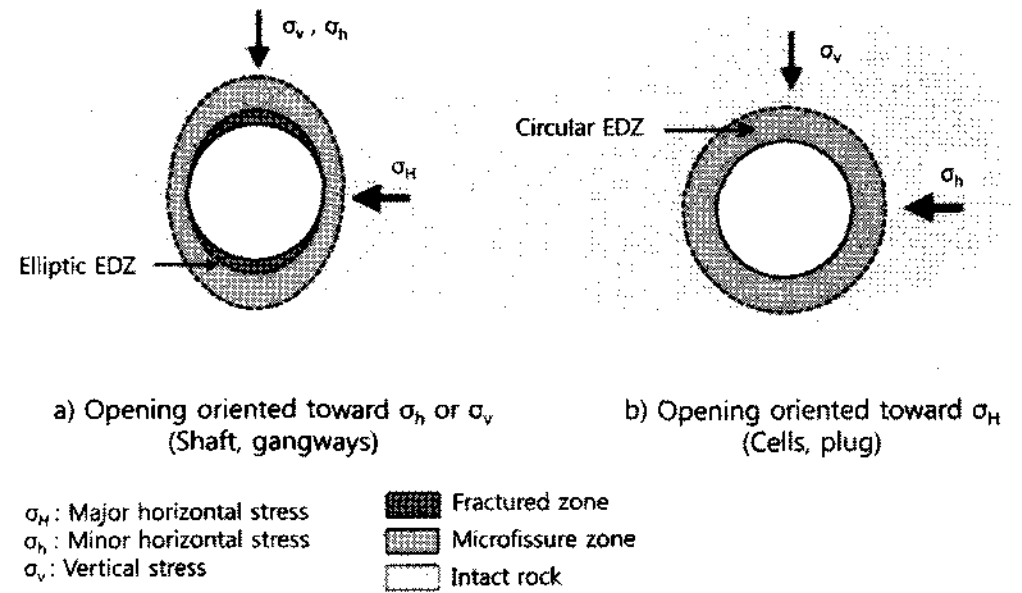
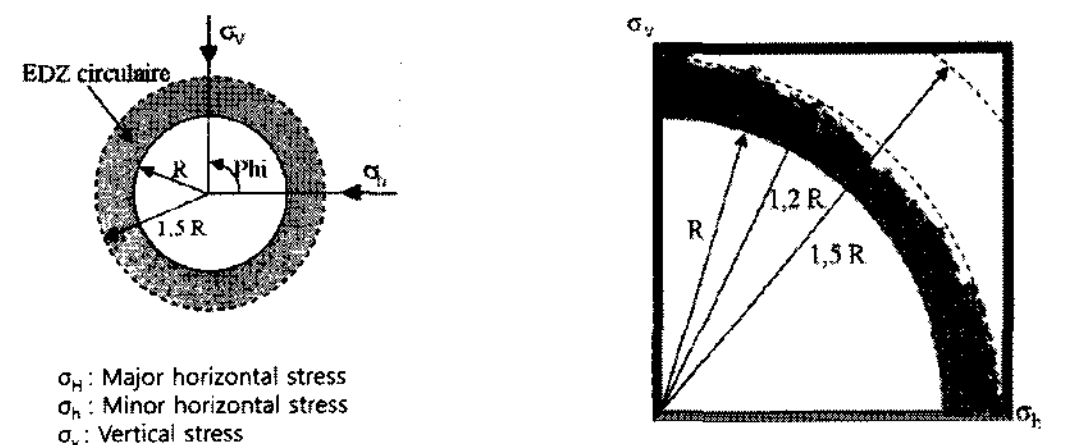
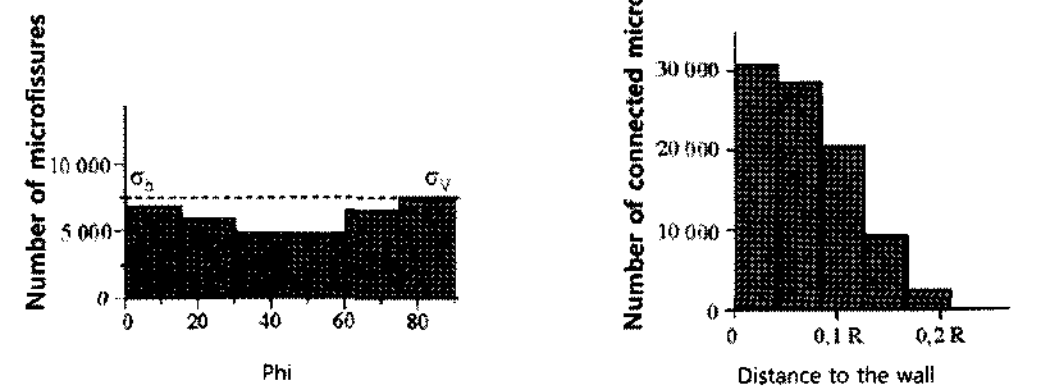


Fig. 16. Geometry of the initial EDZ based on the orientation of the engineered structures with respect to the state of natural stress



a) EDZ(circular microfissure zone) 0.5 times radius of opening
b) Development of microfissure up to a depth equipment to 0.5 times the radius of opening



c) Quasi-isotropic distribution of microfissures oriented the opening orienting to σ_H
d) Diminution of the connectivity of fissures with the distance to the wall

Fig. 17. Sample network of connected microfissures obtained by simulating the excavation of an engineered structure oriented σ_H using the PFC code

5. 처분장 폐쇄후의 지보 및 라이닝 거동

5.1 중저준위 처분 셀

Fig. 17은 셀을 굴착한 직후 셀 반경의 0.5배에 해당되는 심도까지 굴착으로 인한 초기 EDZ가 형성되는 것을, 그리고 Fig. 18은 폐기물 저장 후 운영기간 중에 셀 주위에 나타나는 현상을 보여주는데 갱도 측벽에서는 불포화(desaturation)로 인한 균열이 발생하고 암반의 크립으로 발생된 응력이 라이닝에 가해진다. 처분장 폐쇄 후 10,000년이 경과하게 되면 열하중에 의해 라이닝에 균열이 발생하고 암반의 크립 현상과 팽창으로 인한 응력이 라이닝에 작용하는 한편 EDZ의 영역이 작아지며,

EDZ 내의 균열이 점진적으로 닫히면서 투수계수도 감소하게 된다. Fig. 19는 열응력과 크립에 의한 장기적(5000년) 응력 증가를 고려하더라도 지보와 라이닝의 최대 허용 강도인 8 MPa에는 미치지 못하고 있음을 보여 준다.

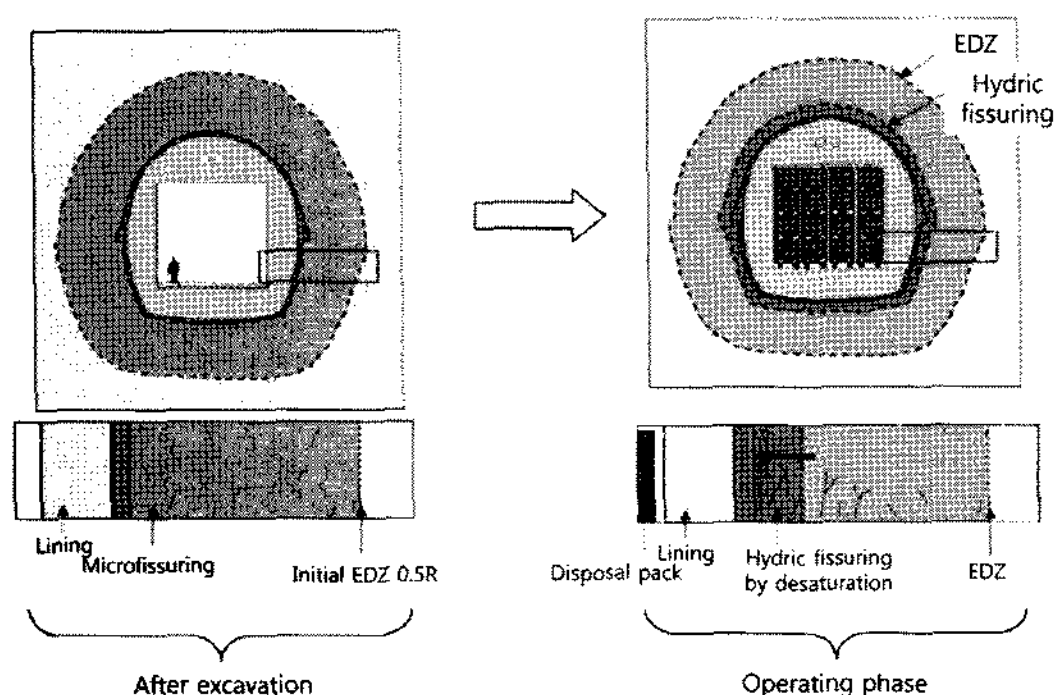


Fig. 18. Scheme of the EDZ evolution around a B type disposal cell during operation phase

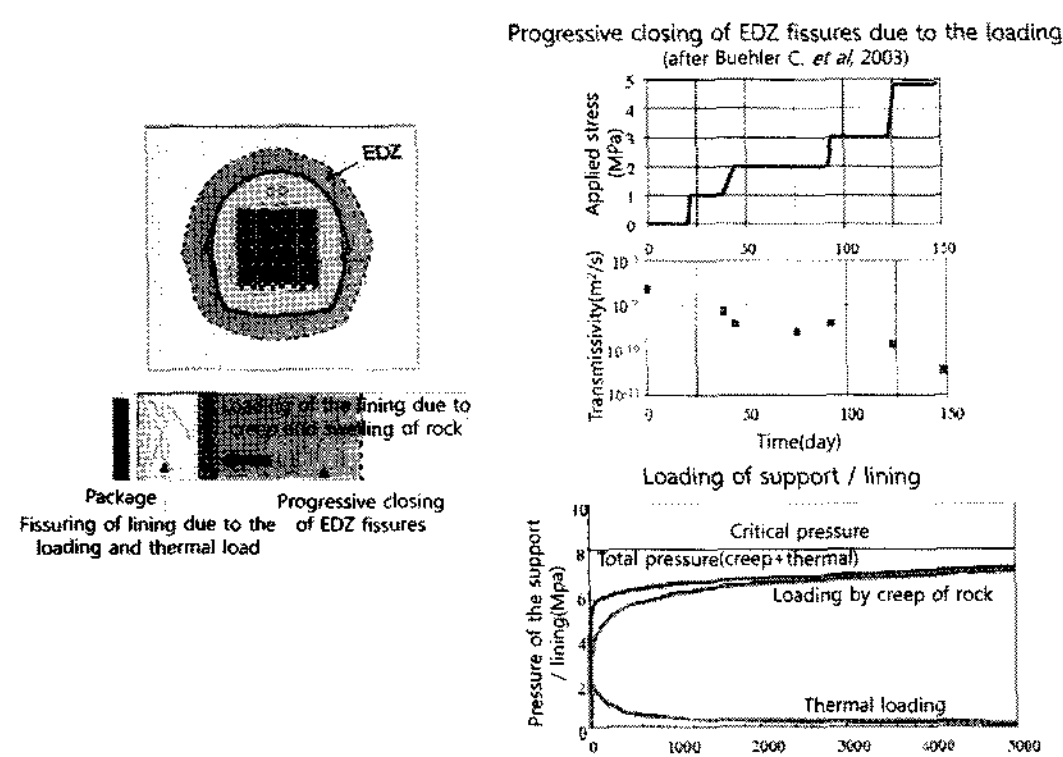


Fig. 19. Loading on ground support/sleeve and evolution of EDZ around an exothermic B waste disposal cell during the first thousands of years after closure

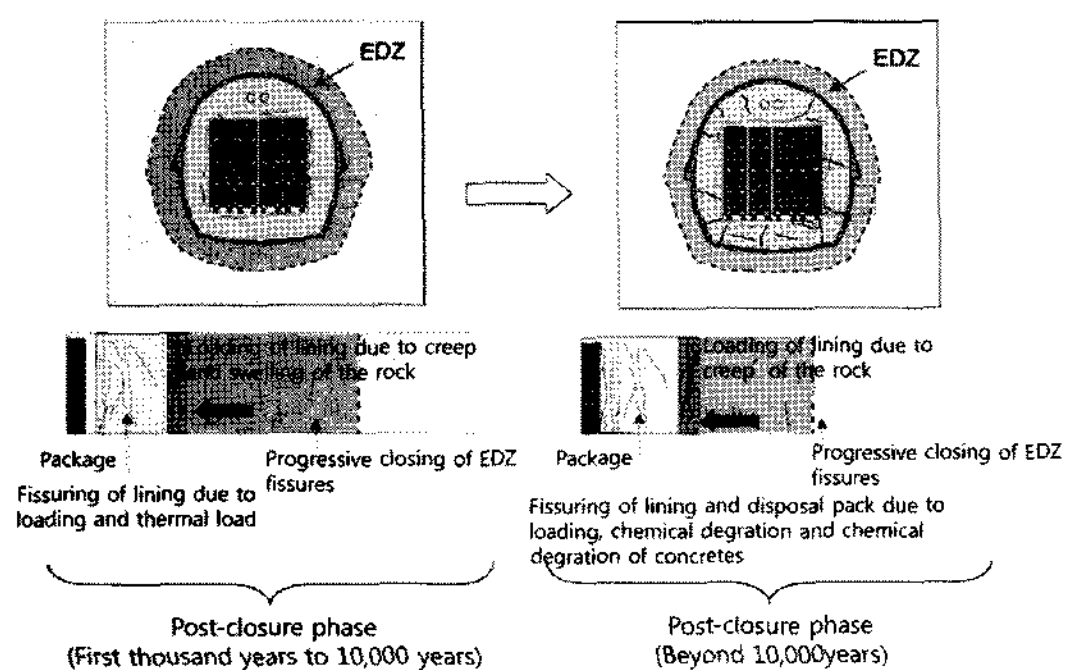


Fig. 20. Evolution of the EDZ around a B waste disposal cell with the chemical degradation of the concretes (beyond 10,000 years)

화학적 작용에 의한 지보재와 라이닝의 물성 저하에 대하여 살펴보면 초기 수 천년으로부터 10,000년까지 크립과 암반의 팽창으로 인해 응력과 열하중이 증가하여 라이닝 내에 균열을 발생시키는 반면 EDZ 내의 균열은 점진적으로 닫히게 된다. 10,000년 이후부터는 크립 현상에 의해 라이닝에 가해지는 응력이 계속 증가하여 라이닝 내에 균열이 발생하며 EDZ 내의 균열은 지속적으로 닫히는데 이 때 화학 반응에 의해 콘크리트의 물성이 저하된다(Fig. 20).

5.2 고준위 처분 셀

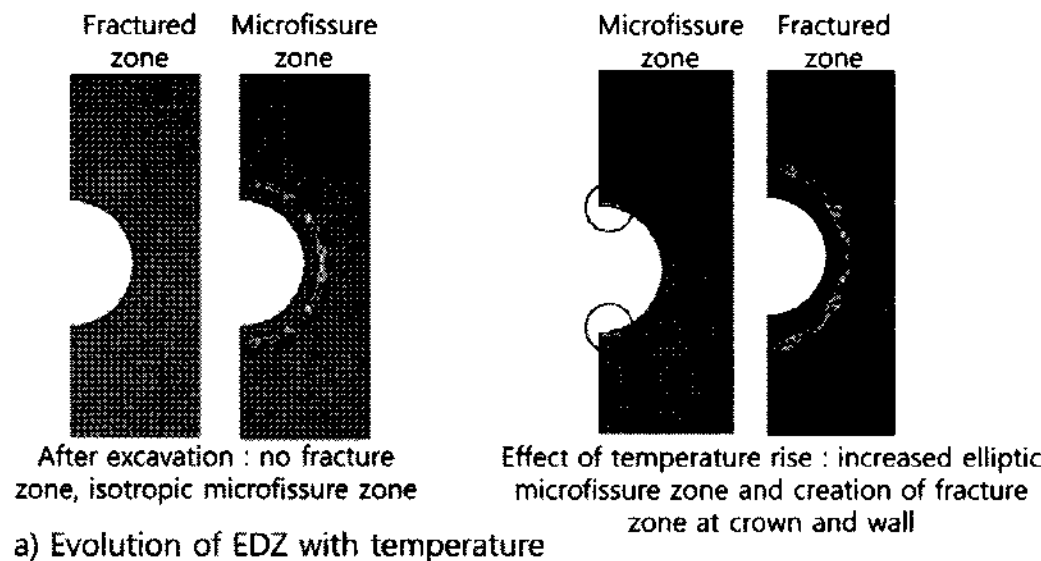
온도 변화에 따른 EDZ 거동 변화를 살펴보면 굴착 직후(Fig. 21) 파쇄대는 형성되지 않고 미소파쇄대는 등방성으로 발달한다. 온도가 증가하면 미소파쇄대는 인장응력이 증가함으로 인해 타원형으로 발달하며 셀의 천장과 바닥에서 소규모의 파쇄대가 생성된다.

Fig. 22는 온도 증가와 함께 파쇄대의 범위와 미소 파쇄대의 범위가 셀 반경의 0.1배 내외로 증가함으로써 셀 반경방향의 컨버전스가 발생된다. 이로 인해 지보 및 라이닝이 암반에 밀착하게 되어 굴착직후 지보와 라이닝 시공시에 벌어졌던 공간이 닫히게 된다.

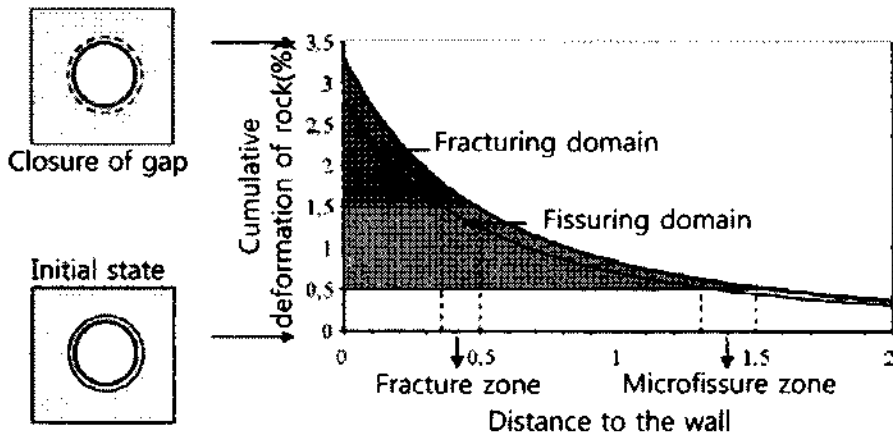
처분 셀의 입구를 벤토나이트로 충전한 플러그와 암반 사이가 그림과 같이 초기에는 비어 있었으나 충전재의 외부가 재포화되면 충전재의 팽창으로 이 공간이 작아지고 충전재의 팽창압이 셀의 반경방향으로 암반에 작용함으로써 암반내 EDZ가 점차 치료되며 충전재는 외부로부터 셀의 반경방향으로 재포화된다.

처분장 폐쇄후 100-150년이 경과하였을 때(Fig. 23) 고준위 폐기물이 저장된 부분에서는 파쇄대가 다소 이방성을 보이는 것 이외의 다른 변화는 없으나 충전물에 의해 충전된 셀의 플러그에서는 플러그의 팽창압으로 열역학적 하중에 의한 변형이 발생하여 파쇄대가 닫히며 플러그의 충전재가 포화된다. 사용후 핵연료 처분 셀의 경우는 굴착 직후 공학적 방벽(engineering barrier)이 불포화 상태에 있으나 폐기물 저장 후에 처분 셀 주위의 파쇄대와 미소파쇄대가 이방성을 보이며 포화 상태가 된다. 처분 셀의 플러그 주위의 암반 역시 유사한 거동을 보이며 포화 상태가 된다.

수 백년에서 수 천년이 경과하였을 때(Fig. 24) 즉, 처분 셀의 라이닝과 슬리브가 항복 강도에 도달하기 전에는 처분 셀 주위의 암반 내 EDZ의 균열은 크립 영향에 의해 닫히며 파쇄대는 소멸된다. 사용후 핵연료를 처분한 셀 주위의 암반은 크립 영향으로 EDZ가 닫히고 파쇄대가 소멸되면서 공학적 방벽이 포화 상태가 된다. 처분 셀의 라이닝과 슬리브가 항복 강도에 도달하고 난



a) Evolution of EDZ with temperature



b) Evolution of EDZ with convergence

Fig. 21. Evolution of the EDZ under the effect of the rise in temperature and the deferred convergence around a C waste disposal cell (hypothesis of maximum clearance)

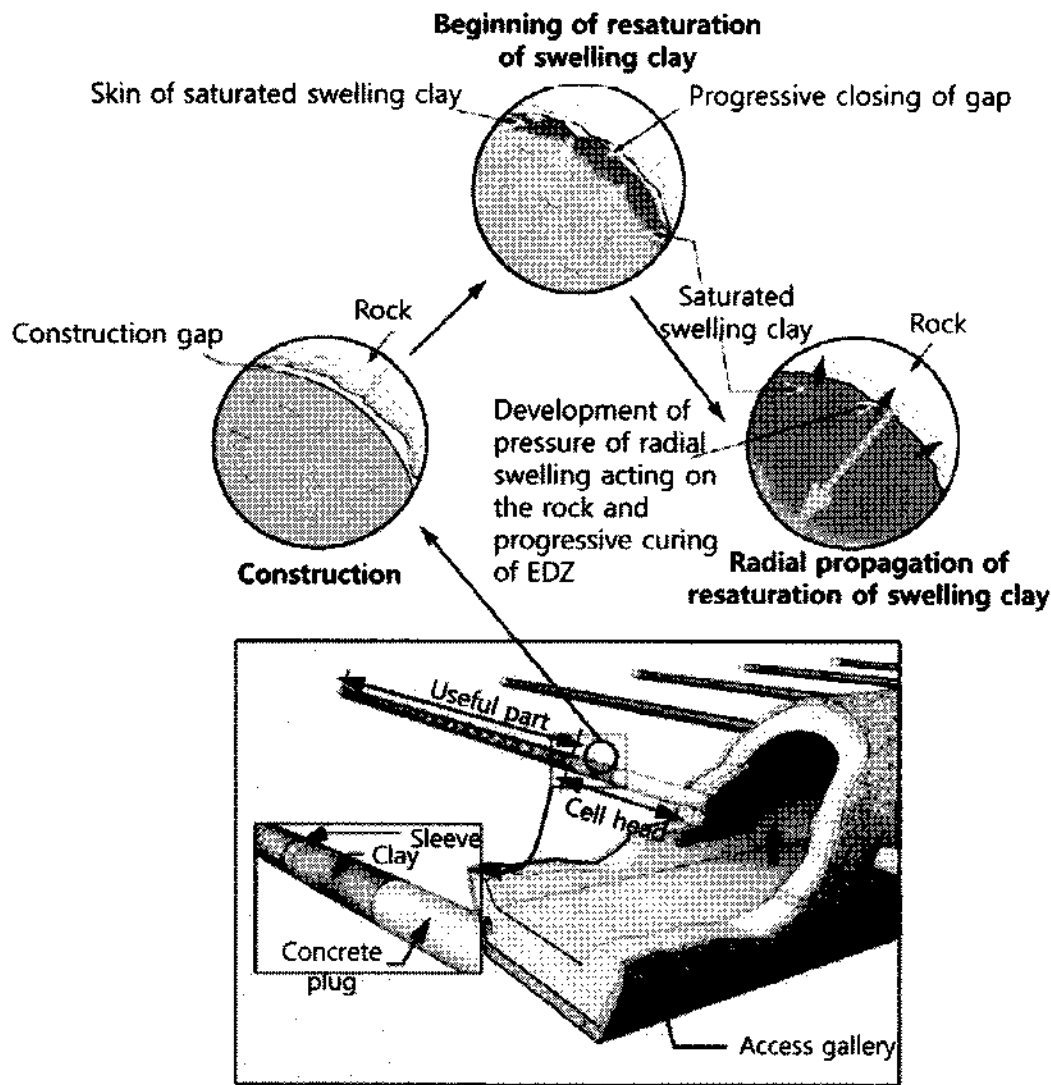


Fig. 22. Resaturation process of the swelling clay—example of C waste disposal cell plug

후 즉, 처분장 폐쇄 후 수 만년으로부터 수십 만년이 경과하게 되면(Fig. 25) 고준위 폐기물이 저장된 처분셀 주위의 EDZ 내 균열은 크립의 영향으로 인해 지속적으로 닫히게 되며 처분 셀 플러그 주위에서는 암반의 크립 영향과 플러그의 충전재 팽창압에 의해 플러그 주위의 EDZ가 치료되고 플러그가 포화된다. 사용 후 핵연료가 저장된 처분 셀의 경우 역시 EDZ가 치료되고 공학

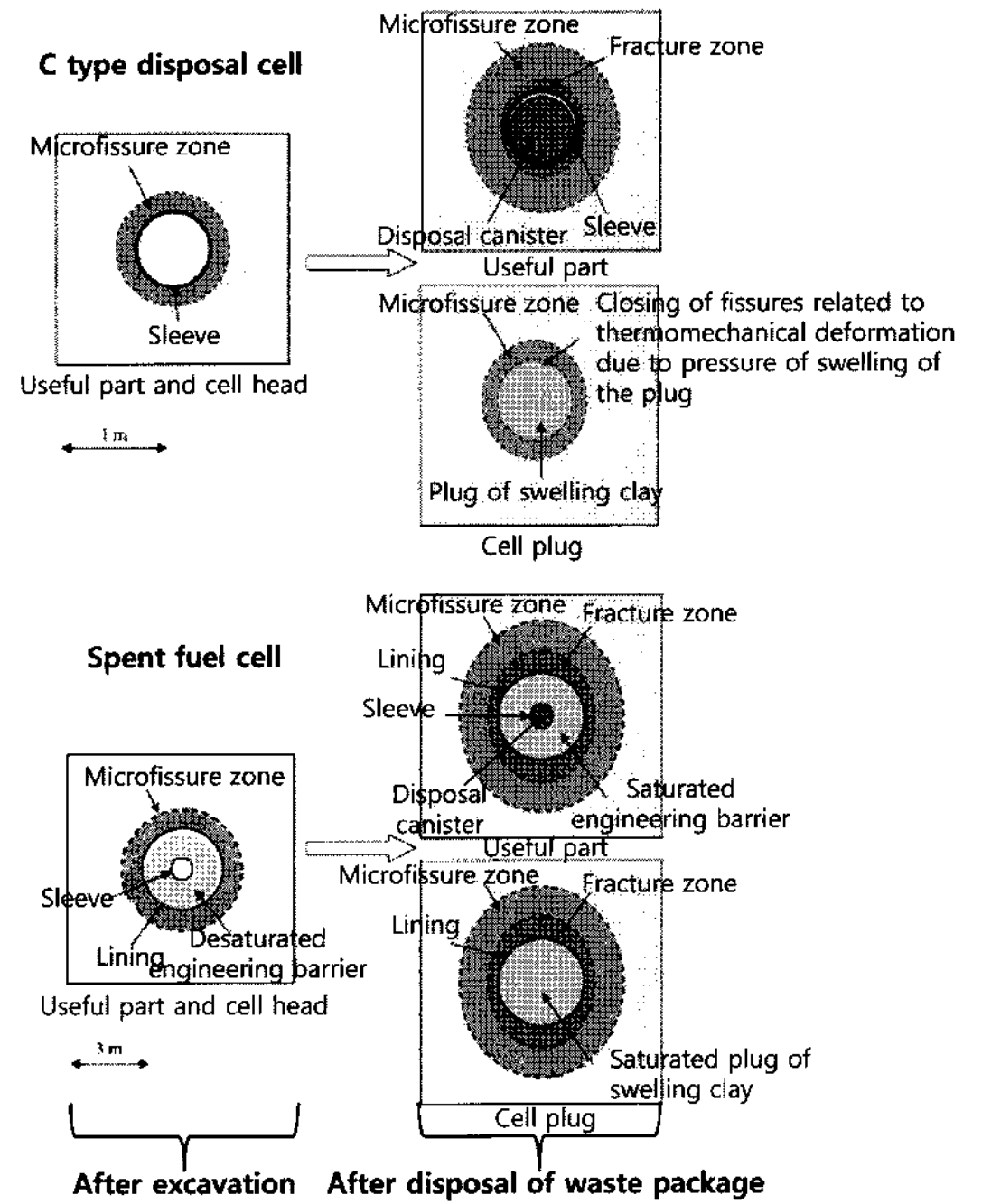


Fig. 23. Diagram showing evolution of EDZ around a C waste disposal cell and a spent fuel disposal cell under thermo-mechanical coupling (timescale of 100 to 150 years)

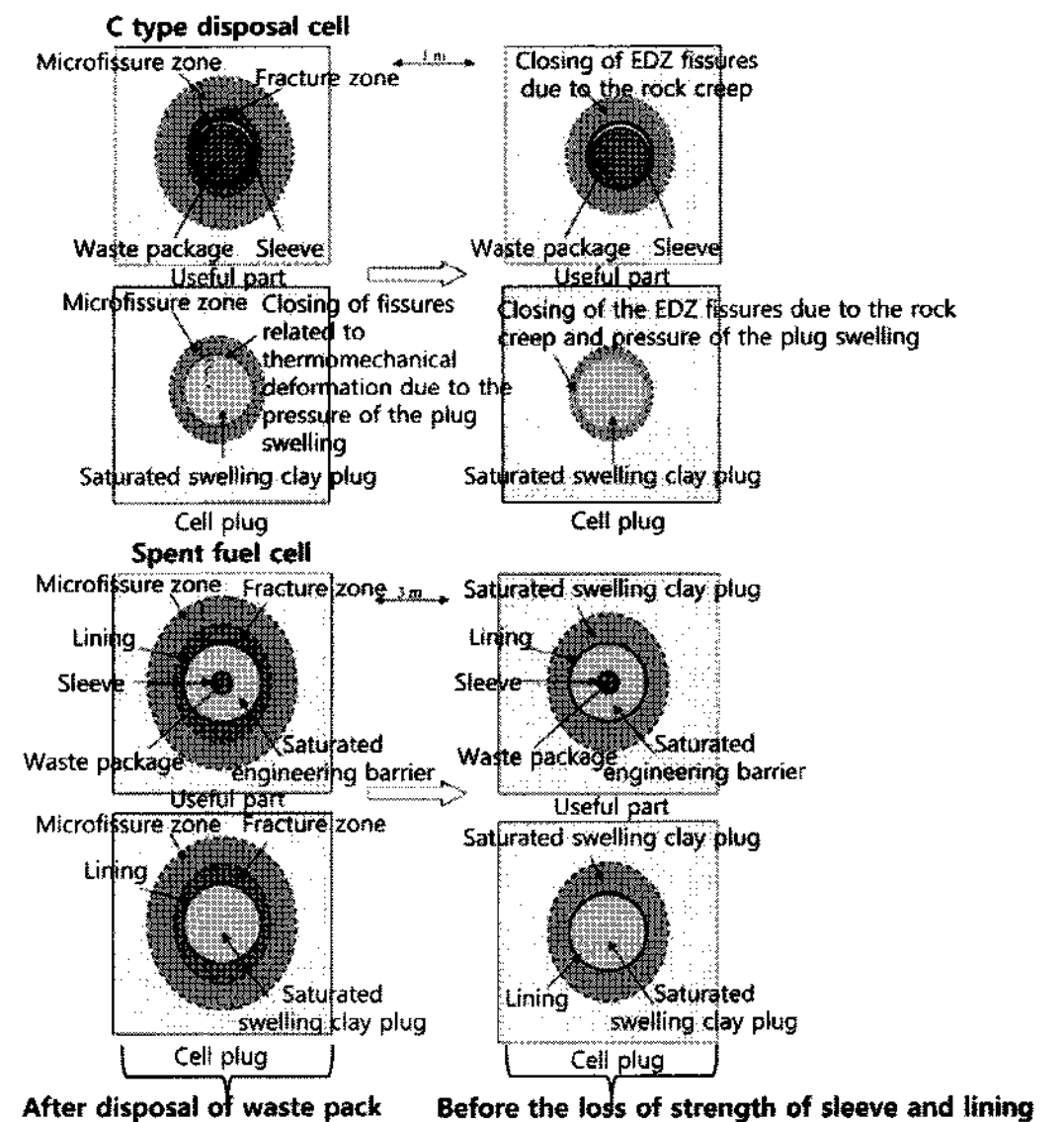


Fig. 24. Diagram showing evolution of EDZ around a C waste disposal cell and a spent fuel disposal cell before rupture of the lining and sleeve (timescale of several hundred to thousands of years)

적 방벽이 포화 상태가 된다. 플러그 주위의 암반 내

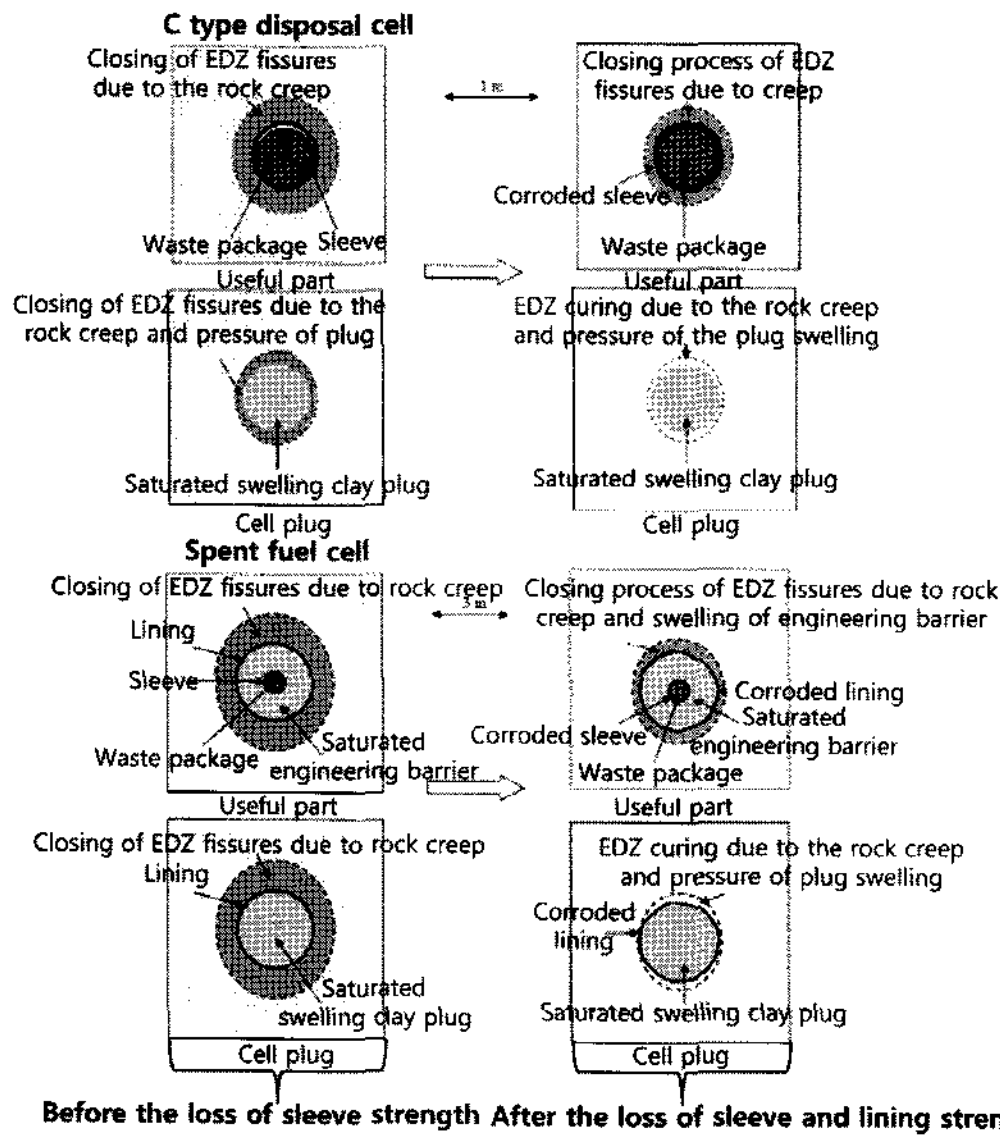


Fig. 25. Diagram showing evolution of EDZ around a C waste disposal cell and a spent fuel disposal cell after rupture of the lining and before rupture of the over-pack (timescale of several thousand to several tens thousands of years)

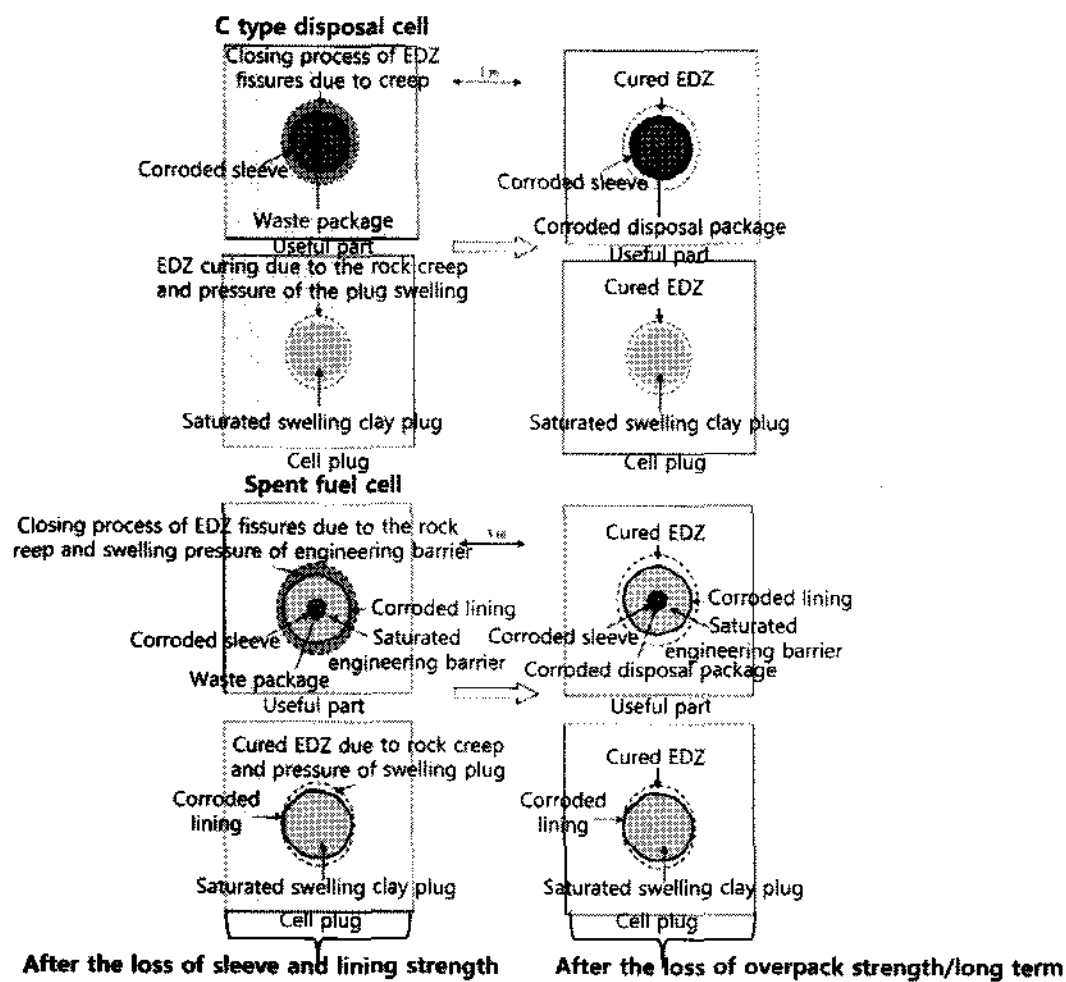


Fig. 26. Diagram showing evolution of EDZ around a C waste disposal cell and a spent fuel disposal cell after discharge of strength of over-packs and in the long term (timescale of tens of years)

EDZ는 치료되며 충전재 또한 포화 상태가 된다.

처분 용기가 파괴된 후 즉, 수 십 만년 이후에는(Fig. 26) 고준위 처분 셀 주위 암반의 EDZ는 완전히 치료가 되며 플러그 주위의 EDZ 또한 완전히 치료가 되고 충전재는 포화 상태가 된다. 이 무렵 사용후 핵연료 처분

셀 주위의 암반 역시 유사한 거동을 보이게 되어 셀 주위의 EDZ가 모두 치료되며 공학적 방벽과 플러그의 재포화 상태가 된다.

6. 결론 및 고찰

프랑스의 경우 단축압축강도가 21 MPa인 점토질 암반을 처분 대상 지층으로 설정하고 처분장 건설에 따른 공학적 설계 요소들을 분석하였다. 지금까지 분석된 결과를 지하실험실 연구를 통하여 검증하는 단계에 와 있는데 프랑스의 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

6.1 중저준위 처분 셀의 장기적 EDZ 거동 특성

처분장 폐쇄 후 10,000년이 경과하게 되면 열하중에 의해 라이닝에 균열이 발생하고 암반의 크립 현상과 팽창으로 인해 발생된 응력이 라이닝에 작용하는 한편 EDZ의 영역이 작아지며, EDZ 내에 균열이 점진적으로 닫히면서 투수계수도 감소하는 것으로 나타났다. 또한 열응력과 크립에 의한 장기적 응력 증가를 고려하더라도 지보와 라이닝의 안정성이 검증된다.

크립과 암반의 팽창으로 인해 응력과 열하중이 증가하여 라이닝 내에 균열을 발생시키기는 하나 EDZ 내의 균열은 점진적으로 닫히게 된다. 이와 같은 메커니즘은 처분 셀의 장기적 안정성에 긍정적으로 작용할 것으로 판단된다.

6.2 고준위 및 사용후 핵연료 처분 셀의 장기적 EDZ 거동 특성

처분장 내 온도 증가와 함께 파쇄대의 범위와 미소 파쇄대의 범위가 셀 반경의 0.1배 내외로 증가함에 따른 컨버전스의 발생으로 굴착후 지보 및 라이닝과 암반이 밀착되어 안정성이 향상되는 것으로 나타났다.

플러그 충전재의 팽창압으로 인해 암반내 EDZ가 점차 치료되는 효과가 나타나 처분 셀의 안정성이 향상될 것으로 본다.

처분장 폐쇄후 시간이 경과하면서 충전된 셀의 플러그에서는 플러그의 팽창압과 열역학적 하중에 의한 변형이 발생하여 파쇄대가 닫히는 효과가 발생한다.

수 백년으로부터 수 천년이 경과하였을 때 즉, 처분 셀의 라이닝과 슬리브가 항복 강도에 도달하기 전의 경우에 처분 셀 주위의 암반 내 EDZ의 균열은 크립 영향에 의해 닫히며 파쇄대는 소멸된다. 사용후 핵연료를 처분한 셀 주위 암반도 크립 영향으로 EDZ가 닫히고 파쇄대가 소멸된다. 처분 셀의 라이닝과 슬리브가 항복 강도에 도달하고 난 후 즉, 처분장 폐쇄후 수 만년으로

부터 수십 만년이 경과하게 되면 고준위 폐기물이 저장된 처분셀 주위의 EDZ 내 균열은 크립의 영향으로 인해 지속적으로 닫히게 되며 처분 셀 플러그 주위에서는 암반의 크립 영향과 플러그의 충전재 팽창압에 의해 플러그 주위의 EDZ가 치료된다. 사용후 핵연료가 저장된 처분 셀의 경우에도 플러그 주위의 암반 내 EDZ가 치료되는 것으로 나타났다.

처분 용기가 파괴된 후 즉, 수십 만년 이후에는 고준위 폐기물 처분 셀 주위 암반과 플러그 주위의 EDZ는 완전히 치료가 된다. 이 무렵 사용후 핵연료 처분 셀 주위의 암반 역시 유사한 거동을 보이게 되어 셀 주위의 EDZ가 모두 치료된다.

지금까지 살펴 본 연구 결과는 퇴적암인 점토질 암반을 대상으로 하여 도출되었으며 실험실 시험과 물성시험, 현장조사 등으로부터 보수적인 기준을 적용하여 분석된 결과로서 신뢰성이 높을 것으로 평가된다. 이를 토대로 우리나라에서 방사성 폐기물 관련 사업을 수행함에 있어 선택의 폭을 넓히기 위해서는 다음과 같은 제안들이 필요할 것으로 본다.

첫째, 처분심도를 비롯한 처분 대상 지질매체(화성암 및 퇴적암)의 결정으로서 국내에 분포하는 주요 후보 지층군(THMC 키플링/환경/안정성 등 고려)에 대한 데이터베이스의 구축이 시급하고 고유의 고준위 폐기물 처분 시나리오 구성이 바람직할 것이다. 이와 함께 후보 지층군에 대한 장기적 안정성의 분석과 공학적 방벽과 구조물에 대한 장기 거동 예측 모델링이 수행되어야 할 것으로 본다. 특히 처분장 건설시에 갱도 혹은 처분셀 주위에 발생되었던 파쇄 균열이 처분장을 장기간 운영하는 과정에 치료되는 특성이 나타난 점은 우리나라의 경우에서도 규명되어야 할 것이다.

둘째, 높은 강도(100 MPa 이상), 비교적 높은 투수율

의 국내 화성암 및 퇴적암을 대상으로 한 장기적 EDZ 거동 변화에 대한 검증이 필요하며 처분 개념의 가역성(reversibility)에 대한 검토도 이루어져야 할 것으로 판단된다.

셋째, 한국형 방사성 폐기물 지층처분에 관한 타당성 검토와 개념설계를 통하여 구축된 지하실험실을 이용하여 처분장 설계 개념을 검증하는 연구 개발이 시급한 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 '고심도 지하연구실험실(URL) 구축 및 실증실험연구'과제의 일환으로 수행되었습니다. 본 논문에서 인용한 모든 그림은 프랑스의 ANDRA에서 수행한 연구결과로서 이에 대한 출판을 허락해 주신 Louis Londe 박사와 관계자 여러분께 감사를 드립니다. 자료와 그림 정리에 수고한 전남대학교 대학원 정주환 군께 감사드립니다.

참고문헌

1. ANDRA, 2005, Evolution phénoménologique du stockage géologique, Collection Les Rapports, Dossier 2005 Argile, 520p.
2. ANDRA, 2005, Evaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse, Dossier 2005 Argile, 238p.
3. ANDRA, 2005, Les recherches de l'Andra sur le stockage géologique des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue, Résultats et perspectives, 36p.
4. ANDRA, 2005, Architecture et gestion du stockage géologique, Dossier Argile, 497p.
5. ANDRA, 2005, Dossier 2005 Argile, 239p.

정 소 걸



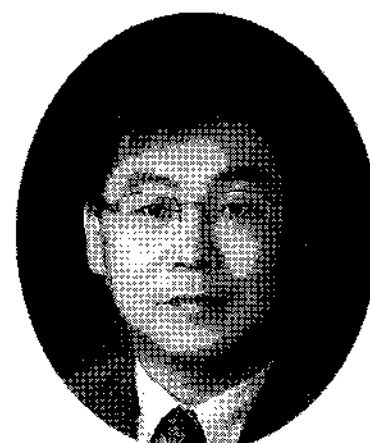
1975년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1982년 Ecole des mines de Nancy (France)
DEA
1984년 Orleans 대학(France) 공학박사

Tel: 042-868-3231

E-mail: skchung@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부
책임연구원

신 중 호



1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학석사
1990년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학박사

Tel: 042-868-3242

E-mail: jhsynn@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부
책임연구원