

Investigation of the Safety and Technical Criteria for HLW Disposal in Other Countries

Jong Won Choi, San Gi Kwon, Won Il Ko and Chul Hyung Kang

Korea Atomic Energy Research Institute

세계 각국의 고준위폐기물 처분안전 및 기술기준 고찰

최종원 · 권상기 · 고원일 · 강철형

한국원자력연구소

(2001년 1월 30일 접수, 2001년 5월 3일 채택)

Abstract - This paper provides the basic technical and safety criteria to guide establishing the reference HLW geological repository system that has been developing based on the recommendations from the international organizations such as IAEA and ICRP as well as the comparison of the regulations of several leading countries in HLW disposal. The proposed criteria and guidelines were categorized by the basic principles and general criteria for the radiological safety and the functional criteria of the repository system components. They would be useful for the development of the national regulations and criteria for HLW disposal in the future. They, of course, will be revised based on the deep geological investigation in Korean Peninsular which will be implemented in the future.

Key words : HLW disposal, safety criteria, technical criteria, functional criteria

요약 - 본 연구에서는 IAEA, OECD/NEA, ICRP 등과 같은 국제기구에서 제안하는 권고기준과 고준위폐기물 처분사업을 계획하고 있는 국가의 관련기준을 비교·분석하여 현재 우리가 추구하고 있는 “고준위폐기물 기준 처분개념 설정”을 위한 안전 및 기술기준으로 도출하였다. 이 기준은 처분 안전성을 위한 일반 원칙과 기준 그리고 처분시스템의 성능요건 등으로 구분하여 작성하였다. 본 연구에서 제시된 기준들은 향후 예상되는 국가적인 기준이나 규제사항 개발에 좋은 참고자료로 사용될 수 있을 것이다. 또한 이들은 향후 국내의 심부 지질환경에 대한 특성조사 및 안전성 분석 등을 통하여 얻어지는 자료를 근거로 계속 수정될 것이다. 고준위폐기물 처분시스템의 개발 경험이 없는 우리 실정에서는 외국의 처분시스템 개발과 인허가 및 기술적 요건들의 변화과정과 원인 등을 주시하면서 우리 환경에 맞는 독자적 기술기준을 개발해 나가는 자세가 지속되어야 할 것이다.

중심어 : 고준위폐기물 처분, 안전기준, 기술기준, 성능기준

서론

지하 300~1000m 깊이에 처분하여 인간 생활권과 격리시키고자하는 고준위폐기물 처분의 안전기준은 기본적으로 ICRP (International Committee for Radiation Protection, 국제방사선 방호 위원회)의 방사선 방호원리에 근거하고는 있으나, IAEA (International Atomic Energy Agency, 국제원자력기구), OECD/NEA (Organization for Economic Cooperation and Development / Nuclear Energy Agency, 경제개발 협력기구)와 같은 국제기구와 원자력을 이용하는 세계각국에서는 장기적

방사성독성도(Radiotoxicity) 때문에 중·저준위폐기물 처분과는 다른 별도의 기준 및 인허가규제요건 등을 제시하고 있다. 그러나 심부 처분시스템에 대한 안전성 평가 기준의 범위와 적용 방법론에 있어서는 각국 국민의 원자력 이해도와 심부지질환경 특성 및 처분시스템의 특성에 따라 조금씩 다르게 나타나고 있다.

우리나라의 경우 중·저준위폐기물 처분시설에 대한 기술기준들이 과학기술부 고시로 나와 있으나, 고준위폐기물 처분에 대해서는 아직 마련되지 않은 상태이다. 1997년도부터 한국원자력연구소를

중심으로 고준위폐기물 처분시설의 장기 안전성 확보를 위한 기초연구가 본격적으로 시작되고 있어 이를 뒷받침할 수 있는 관련 기준 및 적용 범위 등에 대한 논의가 필요한 시점이다.

본 연구에서는 고준위폐기물 처분시설의 안전 기준에 대한 국제기구들의 권고하는 기준들을 조사하고, 현재 고준위폐기물 처분을 계획하고 있는 국가에서 사용되고 있거나 또는 준비 중에 있는 안전기준들을 비교·분석하여 현재 연구 중인 고준위폐기물 처분시스템의 기준 개념 설정을 위한 참고기준으로 활용하고자 한다. 이러한 기준들은 아직 확정된 것은 아니며, 향후 심부 지질환경에 대한 특성조사 및 안전성 분석 등을 통하여 얻어지는 자료를 근거로 계속 수정될 것이다. 고준위폐기물 처분시스템의 개발 경험이 없는 우리 실정에서는 외국의 처분시스템 개발과 인허가 및 기술적 요건들의 변화과정과 원인 등을 주시하면서 우리 환경에 맞는 독자적 기술기준을 개발해 나가야 할 것이다.

안전 및 기술기준에 대한 국제기구 권고사항

1. 국제방사선방호위원회(ICRP)

ICRP는 1977년 ICRP-26[1]에서 권고하고 있는 방사선방호에 대한 기본원칙, 즉 정당화, 최적화, 선량제한을 근거로 1987년에 방사성폐기물 처분장에 대한 방사선방호 원리를 ICRP-46[2]으로 발표한 바 있다. 1990년 개정된 방호개념인 ICRP-60[3]을 반영한 ICRP-46의 개정은 아직 이루어지지 않고 있다. ICRP-46 권고내용 중 방사선방호와 관련된 핵심사항인 개인선량 및 위험도(risk) 제한에 관한 부분은 다음과 같이 요약된다.

1.1. 개인선량 제한

- 선량제한치의 적용을 위해서 어떤 결정그룹(critical group)을 대상으로 평균 피폭량이 다른 방사선원에 의한 피폭량을 고려하더라도(의료 및 자연방사선 영향 제외) 제한치를 초과하지 않아야 한다.
- 결정그룹은 가장 많이 방사선 피폭을 받을 것으로 예상되는 집단으로서 거주지역, 생활습관, 식생활 등에 있어서 상대적으로 균질(homogeneous)한 집단이어야 한다.
- 처분장으로 인한 피폭의 상당량은 확률 값으로

나타내어지는 비정상 사건들에 기인되기 때문에, 처분 안전성 목표를 개인위험도 제한 개념에 입각하여 제시하는 것이 최선의 방법이다. 위험도 개념을 적용시키기 위해서는 피폭확률과 피폭의 크기를 알아야 한다.

- 여러 시나리오들이 고려된 전체 시스템의 위험도를 제한하는 경우와 시나리오별로 위험도를 독립적으로 취급하여 제한하는 경우를 상정할 수 있다. 전자 경우는 후자보다 적용상 간단하지만 반드시 적절하다고 볼 수 없다. 두 개의 위험도를 제한하기 위하여 서로 다른 설계 및 운영개념이 적용될 수 있기 때문이다. 따라서 현재의 정상시나리오에 대해서는 선량제한을, 확률적인 사건에는 위험도 개념으로 분리하여 적용할 것을 권고한다.
- 연간평균 1mSv의 선량은 약 10^{-5} 보다 작은 위험도를 유발시키므로 확률적인 사건에 대해서 결정그룹에 대한 연간 위험도를 10^{-5} 보다 작게 한다.
- 미래세대에 대한 위험도 제한도 현 세대에 적용하는 위험도와 동일한 개념으로 적용되어야 한다.

1.2. 개인선량 제한치의 적용

- 결정그룹이 받는 총선량은 평가대상 시설의 방사선원으로 인한 영향뿐 아니라 주변지역의 다른 원자력시설(현재 운영중인 시설일 수도 있고, 미래의 어느 시점에 도입될 수도 있음)의 방사선원으로 인한 영향도 고려되어야 한다. 이를 위하여 선량한도(dose limit)와 각 방사선원에 적용되는 선량 상한치(dose upper bound)개념이 도입된다.
- 평가대상 시설에 대한 선량기준을 정하기 위하여 장래에 예기치 않는 다른 시설의 선원까지를 고려하여 각 방사선원으로부터의 선량제한 값을 시설들에 할당하여 선량 상한치로 적용하여 사용한다.

1.3. 방사선방호 최적화

ICRP-37[4]에 제시된 방사선 방호 최적화 개념 적용·최적화는 폐기물 처분장의 시스템 구성요소에 따라 여러 단계로 나누어 적용할 수 있다.

2. 국제원자력기구(IAEA)

IAEA는 1989년에 고준위폐기물 처분시설에 대한 안전성 확보 원칙과 기술 기준에 관해서 발표한바 있는데[5], 이 보고서에서 제안하고 있는 정성적인 기준과 원칙은 다음과 같다.

2.1. 안전성 확보 원칙

- 미래세대에 대한 부담
 - 고준위폐기물은 적절한 시점에 안전하게 처분함으로써 미래세대에 부담을 최소화해야 한다.
 - 고준위폐기물 처분시스템은 폐쇄 후 인위적인 부지 감시 혹은 제도적 관리가 필요없도록 안전성이 확보되어야 한다.
 - 고준위폐기물의 격리(isolation) 정도는 미래에 현재수준 이상의 환경영향 및 인간의 건강에 문제가 되지 않도록 설정하여야 한다.
 - 기본적으로 처분장으로 인한 방사선영향이 국경을 벗어났을 경우 자국에서 적용하는 안전성 정도보다 작게 제한해서는 안된다.
- 방사선적 안전성
 - 고준위폐기물 처분장에서 발생하는 점진적인 과정(gradual process)에 기인한 결정그룹의 연간 피폭선량은 선량상한치(dose upper bound)를 초과하지 말아야 한다. (여기서 선량상한치는 1mSv/yr에서 유도).
 - 고준위폐기물 처분장의 연간 개인위험도는 규제기관에서 제시한 위험도 상한치(risk upper bound)를 초과하지 말아야 한다 (여기서 위험도 상한치는 위험도 제한치인 $10^{-5}/yr$ 로부터 유도).
 - 고준위폐기물 처분장은 사회 및 경제적 요소를 고려한 ALARA(As Low As Reasonably Achievable) 원칙이 적용되어야 한다.

2.2. 기술 기준

- 전체 시스템 : 고준위폐기물 처분시스템의 장기 안전성은 다중방벽(multibarrier) 원리에 의하여 유지되고, 또 이것은 전 시스템에 대한 성능평가에 근거하여야 한다.
- 폐기물 : 처분장 설계 시에 적용된 폐기물 수용기준(waste acceptance criteria)에 따라 처분되는 고준위폐기물은 고체상태이어야 하며, 핵종을 격리하기에 적합한 물리적·화학적 특성을 갖추어야 한다.

을 갖추어야 한다.

● 처분장 :

- 고준위폐기물 처분장은 초기 기간동안에 방사성폐기물을 완전히 고립시킬 수 있도록 설계되어야 하며, 기반암 및 주변환경이 폐기물을 밀봉(sealing)하는 기능이 계속 유지되도록 설계, 건설, 운영 및 폐쇄되어야 한다.
- 고준위폐기물 처분장은 항상 핵적 미임계(nuclear subcritical)가 되도록 설계되어야 한다.

● 부지

- 고준위폐기물 처분장은 물리적 방법의 붕괴를 제한하고, 방사성핵종이 생태계로 이동되는 것을 제한할 수 있는 기반암에, 그리고 충분한 깊이에 위치하여야 한다.
- 고준위폐기물 처분장은 경제적 가치가 있다고 판단되는 지하자원을 취득하기 위한 접근이 실질적으로 불가능할 곳에 위치하여야 한다.

2.3. 안전성 보증 (Assurance of compliance)

- 처분장이 안전 목표치에 부합되는지에 대한 여부는 실증된(validated) 모델을 사용한 안전성 평가에 의해 검증(demonstrated)되어야 한다.
- 고준위폐기물 처분장을 구성하는 모든 요소와 설계, 건설, 운영 및 시설 폐쇄에 수반되는 모든 활동에 대해서 관련 기준에 부합되는지를 보기 위한 품질보증이 이루어 져야 한다.

IAEA는 상기 기준 외에 선량 및 위험도 제한을 적용하는 시간규모는 미래 세대의 건강을 보호한다는 측면에서 원칙적으로 제한 없이 적용돼야 한다고 기술하고 있다. 그러나 장기간에 이 규정을 적용하는 경우 많은 불확실성이 필연적으로 수반되기 때문에 안전성 평가에 어떤 방법으로든지 불확실성을 고려할 것을 제안하고 있다.

세계 주요국의 고준위폐기물 처분 안전 및 기술기준

1. 미국

1.1. 고준위폐기물 처분 인허가 규정

고준위폐기물 처분관련 인허가 기준 작성은 EPA(Environmental Protection Agency)와 NRC(Nuclear Regulatory Commission)가 담당하고 있다. EPA는 가장 중요한 인허가 기준인 방사선적 환경영향 기준을 제시하고, NRC는 이를 기준으로 대상 시 및 시스템의 세부적인 기술기준을 정립하는 것으로 역할분담을 하고 있다. 고준위폐기물 처분과 관련하여 연방정부 차원에서 제시하고 있는 규제기준은 약 10 여가지 정도인데, 이들 중에서 고준위폐기물 심지층 처분에 직접적으로 기술 및 안전기준과 인허가 요건을 명시하고 있는 것은 NRC의 10CFR60[6]과 EPA에서 1993년에 발표한 40CFR191[7]을 들 수 있다. 40CFR191에서는 방사선적 환경영향 관점에서 규제기준을 제시하고 있으며, 10CFR60에서는 처분용기 성능, 공학적 방벽 성능, 지하수 이동시간 등 구체적인 유도기준(derived criteria)들을 포함하고 있다. 두 기관에서 제시하고 있는 규정별 주요 세부기준을 보면 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 40CFR191 (1985년)
 - 일반 주민 피폭 선량 : < 25 mrem/yr over 1000 yr
 - 식수 오염 : < 4 mrem/yr
 - 방사성핵종 격납 요건 : 10,000 년 동안 환경으로 누출되는 누적 방사선량이 표 1에 제시된 수치를 초과할 확률이 0.1보다 작아야하고, 제시된 수치의 10배를 초과할 확률이 0.001보다 작아야 함

Table 1. 방사성핵종의 누출에 대한 격납 기준 (처분 후 10,000년간 누적 누출량기준)

방사성 핵종	1,000 MTHM당 누출량(uries)
Americium-241 or -243	100
Carbon-14	100
Cesium-135 or -137	1,000
Iodine-129	100
Neptunium-237	100
Plutonium-238, -239, -240, or -242	100
Radium-226	100
Strontium-90	1,000
Technetium-99	10,000
Thorium-230 or -232	10
Tin-126	1,000
Uranium-233, -234, -235, -236, or -238	100
Any other α-emitting radionuclide with a half-life greater than 20 years	100
Any other radionuclide with a half-life greater than 20 years that does not emit alpha particles	1,000

- 연소도 : 25,000 ~ 40,000 MWd/MTHM
- 반감기가 20년~100년인 gamma 혹은 beta 방출 핵종에 대해 각 100,000,000 curies
- 반감기가 100년보다 큰 gamma 혹은 beta 방출 핵종에 대해 각 1,000,000 curies 혹은 반감기가 20년보다 큰 alpha 방출 핵종
- 반감기가 20년보다 큰 alpha 방출 초우라늄 핵종 1,000,000 curies을 포함하는 초우라늄 폐기물의 양
- 만일 고준위폐기물 50,000톤과 알파방출 초우라늄 핵종 5,000,000 curies을 포함하는 특별한 처분 시스템 경우에,

$$\frac{50,000 \text{ MTHM}}{1,000 \text{ MTHM}} + \frac{5,000,000 \text{ curies}}{1,000,000 \text{ curies}} = 55$$

- 연소도가 25,000 MWd/MTHM 보다 작거나 40,000 MWd/MTHM 보다 클 경우, 30,000을 실제 연소도로 나눈 수치를 곱해준다. 그리고 평균연소도가 5,000 MWd/MTHM 이하, 혹은 10,000 MWd/MTHM 이상일 경우에 연소도는 각각 5,000 MWd/MTHM, 1,000,000 MWd/MTHM으로 가정한다.
- 핵종 A, B, C가 있을 경우,

$$\frac{Q_a}{RL_a} + \frac{Q_b}{RL_b} + \frac{Q_c}{RL_c} \leq 1$$

- 40CFR191 (수정, 1993년)
 - 일반 주민 피폭 선량 : < 15 mrem/yr over 1000 yr
 - 식수 오염 : safe drinking water act를 만족 시켜야 함
 - 방사성핵종 격납 요건 : 10,000년 동안 환경으로 누출되는 누적 방사선량이 표 II-2에 제시된 수치를 초과할 확률이 0.1보다 작아야하고, 제시된 수치의 10배를 초과할 확률이 0.001보다 작아야 함
- 10CFR60
 - 처분용기 성능 : 300 ~ 1000 년
 - 공학적방벽 성능 : 공학적방벽을 통한 방사성 핵종의 누출율이 처분장 폐쇄후 1000년 되는 시점에서 평가되는 방사성물질의 양(inventory)의 1/10⁵ 보다 작아야 함
 - 지하수 이동 시간 : accessible environment까지 지하수의 가장 빠른 이동 경로를 통한 이동시간이 1000년을 초과해야 함
 - 처분이 시작되는 시점에서 50년후 고준위폐기물의 회수(retriability)가 가능해야 됨.

1.2. 인허가 규정 개정 방향

현재 진행중인 인허가 수정 작업은 1992년에 발표된 에너지 정책법(Energy Policy Act)에 따라 이루어지고 있다. 이 에너지 정책법에 의하면,

“EPA는 국립과학아카데미의 권고를 기본으로 유카마운틴에 건설될 처분장에 적용할 새로운 안전 기준을 마련해야하며, NRC는 이를 반영한 관련 세부 기술기준을 포함한 인허가 기준을 수정”하도록 하고 있다. 1995년 8월에 국립과학아카데미(National Academy of Science, NAS)의 기술검토 보고서[8]가 발표된 후, 여러 번의 공청회 등을 거쳐서 현재는 이를 반영한 수정작업이 EPA 및 NRC에 의해 진행중인 것으로 알려지고 있다. 새로 개정되는 규정은 유카마운틴 처분장 설계/건설에 적용될 환경 기준으로서 40CFR197로 공포될 예정으로 있는데, 이에 반영될 국립과학아카데미의 고준위폐기물 처분장 인허가 기준 수정 권고사항의 주요내용은 다음과 같다.

- 안전기준 형태(form of standard): 치명적인 암 발생 위험도(risk)에 대한 일반주민의 연간 제한치 사용을 권고.
 - 그 이유로는, 기존의 선량-위험도 관계함수(dose-response relationship)가 변경되더라도 리스크에 근거한 기준(risk-based standard)을 개정할 필요가 없게 되고,
 - 다른 원자력 관련시설, 즉 원자력발전소, 재처리 시설 등에서의 리스크와 합리적으로 비교할 수 있으며,
 - 일반 대중이 이해하기가 쉽도록 하기 위한.
- 안전성 평가 대상 기간: 기존의 40CFR191에는 폐쇄 후 안전성 평가 기간이 10,000년으로 되어 있었으나, 최대 리스크를 보이는 시점이 10,000년을 초과할 가능성이 있기 때문에 이를 반영해야 함.
- 인간 침입: 폐쇄후 처분장에 인간의 고의 혹은 부주의로 침입할 확률을 예측한다는 것이 현실적으로 어렵기 때문에 모든 시나리오를 고려하는 종합 안전성분석에서 이를 제외하고 평가해야 함.
- 개인 선량평가에 있어서 결정그룹(critical group) 사용: 개인 선량평가에 있어서 결정그룹 사용을 권고하고, 결정그룹을 정의하기 위한 두 가지 방법, 즉 확률론적 방법과 subsistence farmer 사용방법을 제시하고 있음. 현재 어느 방법이 우수한지에 대한 논란이 계속되고 있음.
- 개인에 대한 방사선 방호 기준: 위험도의 수준을 결정하는 것은 기술적인 문제라기 보다는 사회적인 문제로 보고 있으며, 그 연간 위험도를 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 부터 토론이 시작되어야 한다고 제시.
- 지하수 보호 요건: 40CFR191에는 개인선량 제

한과 지하수를 보호하기 위하여 Safe Drinking Water Act (SDWA)에 제시된 지하수 보호요건을 함께 제시하고 있으나, NAS는 이처럼 지하수 기준을 분리하여 규제하는 것보다 개인의 위험도를 기준으로 통합하여 규제하여야 함을 제시.

1.3. 고준위폐기물 처분장 설계 기준

다음내용은 기존에 제시된 EPA 및 NRC의 안전 기준들을 반영하여 DOE에서 처분장 개념설계를 위하여 작성된 것으로서 기술적인 요건뿐만 아니라 설계 편의를 위한 많은 가정사항들이 포함되어 있다.

- 방사성핵종 누출율
방사성핵종의 연간 누출율은 처분후 1000년 시점에서 평가된 방사성핵종 총량의 $1/10^5$ 을 초과해서는 안된다 [10 CFR60.113(a)(1)(ii)(B)].
- 책임계
최소한 예기치 않은 두 개의 독립적이고 연속적인 사건하에서도 책임계사고는 일어나지 말아야 한다.[10CFR60.113(a)(ii)(A)].
- 방사선 준위/유출
처분장이 완전 폐쇄될 때까지 방사선 제한구역으로의 방사선 누출율은 10CFR20의 방사선 방호 규정이 준수되어야 한다 [10CFR60.131(a)].
- 처분장 최대 저장용량
처분장의 용량은 두 번째 처분장이 운영될 때까지 70,000 톤을 초과하지 말아야 한다.
- 지하시설의 일반 기준
지하시설의 기하학적 구조, 방향, 처분장 깊이 등 뿐만 아니라, 지하시설의 일부본인 공학적방벽의 설계는 방사성핵종을 효과적으로 격납할 수 있도록 하여야 한다 [10CFR60.133(a)].
- 열 부하
지하시설은 열 및 열역학적 반응으로 암반, 주위 지층 및 지하수 체계에 대한 변화를 충분히 고려하여 설계하여야 한다 [10 CFR60.133(i)].
- 격납
처분용기내에서의 고준위폐기물 격납은 처분장 폐쇄후 300년에서부터 1,000년 동안은 유지되어야 한다 [10CFR60.113(a)(ii)(A)].
- 폐기물 회수
처분장 및 공학적방벽 시스템은 향후 폐기물 회수가 가능하도록 설계되어야 한다 [10CFR60.111(b)(1)].
- 대안분석을 위한 일반설계기준

공학적방벽 및 자연방벽의 효율성에 대한 평가가 방사성핵종의 누출관점에서 다루어 져야 한다. 이를 위하여 주요 설계 특징들에 대한 비교 평가가 이루어져야 한다 [10CFR60.21(c)(1)(ii)(D)].

2. 캐나다

2.1. 고준위폐기물 처분 관련 인허가 규정

캐나다에서는 원자력법(Atomic Energy Control Act)이 모든 원자력 활동을 규제하는 기본법이다. 이 법에 따라 규제기관으로 AECB (Atomic Energy Control Board)가 만들어 졌으며, 현재 원자력 시설의 인허가 활동, 기술적인 규칙 제정 등의 업무를 맡고 있다. 현재 사용되고 있는 방사성 폐기물 처분과 관련된 주요 관련 법규, 인허가 규정 및 지침의 주요내용은 다음과 같다[9-11].

● 원자력 인허가 규정(Atomic Energy Control Regulations)

이것은 1974년에 만들어 졌으며, AECB의 규정 중에서 원자력관련 시설의 건설/운영 및 응용에 관한 가장 광범위한 인허가 규정을 담고 있다. 여기서 방사선 안전성과 관련된 규정을 보면 작업자의 경우 연간 5rem, 일반주민에 대하여 연간 0.5rem을 기준으로 제시하고 있으나, 1991년 수정된 규정에는 작업자는 연간 2rem, 그리고 일반주민은 연간 100mrem으로 기준치를 강화하고 있다.

● AECB Regulatory Document R-71: 1985년 AECB에 의해서 "Regulatory Policy Statement for Deep Geological Disposal of Nuclear Fuel Waste: Background Information and Regulatory Requirements Regarding the Concept Assessment Phase" 제목으로 발표되었는데, 방사성폐기물 심지층 처분관련하여 다음과 같은 요건을 제시하고 있다.

- 폐쇄전 처분시스템은 다음의 인허가 규정이 준수해야 한다.
 - 방사선적 보건물리 및 안전 요건
 - 일반적인 보건물리 및 안전 요건
 - 환경 보호
 - 핵물질보장조치
 - 방사성물질 수송
- 처분장 폐쇄 후 일반주민 피폭량은 자연방사선량 보다 낮아야 한다.
- 폐기물처분장은 미래세대에 부담을 주어서

는 안된다.

- 처분시스템은 공학적방벽 및 자연방벽을 고려한 다중방호 원리를 적용해야 한다.
- 처분시스템은 모든 단계에서 품질보증이 이루어 져야 한다.
- 처분시스템은 자연적으로 발생 가능한 모든 사고를 고려해야 한다.
- 운영중 비상수단으로서 폐기물 회수가 가능해야 한다.
- AECB Regulatory Document R-72: 1987년에 AECB에 의해서 "Regulatory Guide Geological Considerations in Siting a Repository for Underground Disposal of High Level Radioactive Waste" 제목으로 발표되었는데 다음과 같은 처분장 부지관련 요건을 제시하고 있다.
 - 처분장의 암반과 주위 지질시스템은 방사성 물질의 이동 및 누출을 지연시킬 수 있는 특성을 갖추어야 한다.
 - 처분부지는 향후 지하자원 탐사 가능성이 낮은 지역이어야 한다.
 - 처분장 부지는 지질학적으로 안정된 지반이어야 한다.
 - 처분장의 암반과 주위 지질시스템은 자연방벽의 변형없이 응력에 견딜 수 있는 지역이어야 한다.
- AECB Regulatory Document R-104: 1987년에 AECB에 의해서 "Regulatory Policy Statement Regulatory Objectives, Requirements and Guidelines for the Disposal of Radioactive Waste - Long Term Aspects" 제목으로 발표되었는데 다음과 같은 처분장 요건을 제시하고 있다.
 - 처분장은 다음의 방법으로 미래 세대의 부담을 최소화해야 한다.
 - 처분장은 안전성 확보를 위한 제도적 관리기간을 필요로 하지 않도록 설계되어야 한다.
 - 처분시점은 기술적, 사회적 및 경제적 요소를 고려하여 적절한 시점에서 이루어져야 한다.
 - 현재 받아들일 수 없는 미래의 예견된 인간 및 자연환경에 대한 리스크가 없어야 하며, 방사성폐기물에 의해 미래의 지하자원 이용이 방해받아서 안된다.
 - 폐기물 처분장에 의해서 받는 개인의 방사선적 위험도(치명적 암발생 위험도)가 10^{-6} 을 초과해서는 안된다. 이것은 제도적 관리를

하지 않는 상태에서의 계산한 것이라야 하며, 리스크는 시나리오 발생확률과 각 시나리오의 선량 그리고 선량당 영향확률의 곱으로 나타낸 결과의 합으로 표시된다.

또한 R-104에는 기본적인 방사선적 요건에 대한 지침을 다음과 같이 제시하고 있다.

- 장기적으로 개인의 리스크는 자연방벽의 경계와 상관없이 리스크가 가장 크게 일어날 수 있는 사람들의 집단 및 시점을 선택해서 계산해야 한다.
- 피폭 시나리오 확률은 상대적인 발생확률에 근거하든지 혹은 best estimate와 엔지니어링 판단에 근거한 수치가 사용되어야 한다.
- 수학적인 모델을 사용한 개인 리스크 평가는 10,000년을 초과할 필요가 없다. 여기서 평가된 리스크가 10,000년 이내에 피크를 보이지 않을 경우, 10,000년 이후의 리스크가 갑작스럽게, 그리고 크게 증가되지는 않는다는 것을 보여야 한다.
- 개인 리스크 계산은 리스크-선량 환산인자(risk conversion factor, $2 \times 10^{-2}/sv$)와 각 시나리오의 확률을 사용하여 계산하여야 한다. 여기서 개인선량은 결정론적인 경로 분석 결과로 도출된 연간 개인 선량 혹은 확률적인 분석 결과의 선량 분포에서의 평균값이 사용될 수 있다.

2.2 처분개념의 설계기준 원칙

고준위폐기물 처분기술의 연구개발 전담기관인 ACEL은 고준위폐기물 관리 프로그램에 따라 처분개념 연구를 원활히 수행하기 위하여 일반요건(General Requirement)을 설정하였다. 이 일반요건의 내용은 캐나다 정부와 온타리오 주정부간의 협약내용과 전문기관 AECB의 원자력 관련시설의 인허가 요건들에 근거하여 작성하였다. 또한 IAEA 및 OECD/NEA 등의 국제기관의 처분관련 권고안을 참조하였으며, 그 내용은 다음과 같다.

- 인간의 건강과 자연환경이 보호되어야 한다.
- 미래 세대에의 부담을 최소화해야 하며, 여기에 사회적/경제적 요소가 고려되어야 한다.
- 프로그램이 진행되는 모든 단계에서 일반 주민이 참여가 보장되어야 한다.
- 처분개념은 캐나다의 지질학적 여건에 부합되어야 하며, 경제적이어야 한다.

이러한 일반요건을 만족시키기 위한 정성적 기술적 목표는 다음과 같이 요약된다.

- 결정질암에서 처분시설의 건설, 운영, 시설해체 및 시설 폐쇄기술이 확보되어야 한다.
- 처분시설은 장기적인 제도적 관리기간을 필요로 하지 않도록 충분하고 안전하게 설계되어야 한다.
- 처분시설은 현재 가능한 기술을 이용해야 하며, 현재 인허가 요건뿐만 아니라 향후 요건의 변경 가능성을 고려하여야 한다.
- 처분후 감시 및 폐기물 회수(retrievability)가 가능해야 한다.
- 처분장 안전성을 평가하기 위한 평가방법이 개발되고 검증되어야 한다.

3. 스웨덴

스웨덴의 경우 미국의 10CFR60과 40CFR191에서 처럼 처분장 설계기준이 정량적으로 구체적으로 제시된 바는 없으며, 단지 IAEA 혹은 ICRP 등과 같은 국제기구는 물론 주변 노르딕 국가(노르웨이, 핀란드, 덴마크 등)와 합의한 방사성폐기물 처분에 관한 기본기준 및 원칙에 충실히 따르고 있다.

3.1 처분안전성 관련 일반 원칙

방사성폐기물 처분시설 인허가 및 규제 업무와 관련하여 환경자원성(Ministry of Environment and Natural Resources) 산하의 원자력 검사원(National Nuclear Power Inspectorate : SKI)이 처분시설을 포함한 모든 원자력 시설의 안전성 측면에서의 규제업무를 담당하고 있고, 국립방사선방호연구소(National Institute of Radiation Protection : SSI)는 방사선방호 측면에 대한 규제업무를 담당하고 있다. 이들 기관에서 주도하고 있는 방사성폐기물 처분과 관련된 일반 원칙은 다음과 같다.

- 사용후핵연료 처분공정에서 비롯되는 모든 방사선피폭은 정당화되어야 하고, 그의 방사선 작업은 최적화 되어야하며 개인 피폭선량은 규정된 허용값 이하여야 한다.
- 장기적 처분관점에서의 방사선 방어는 핵연료 주기의 방사선적 작업과 갈래 취급되어야 한다.

사용후핵연료 심지층 처분장 건설 계획시, 장기적 관점에서 고려되어야할 지침은 다음과 같다.

- 처분장의 장기적 안전성과 관련하여 처분장 유지/보수 및 감시등이 다음 세대에 의존되어

서는 안 된다. 그러나 이런 요건이 처분장 폐쇄후 일정기간 동안 감시가 필요 없다는 것을 의미하는 것은 아니다.

- 처분장은 먼 미래에 처분한 폐기물 회수 또는 처분장 변경이 가능하도록 유연성 있게 설계 되어야 한다.
- 처분장의 장기적 안전성은 처분시스템을 구성 하는 여러 가지의 다중 방어벽의 총체적인 성능에 의하여 유지되기 때문에 어느 한 방어벽이 문제가 되더라도 처분장 전체시스템의 안전성에는 별 영향이 없도록 구성되어야 한다.
- 처분안전성을 합리적으로 예측할 수 있는 기간동안 (reasonably predictable period of time), 사용후핵연료 처분으로부터 비롯되는 개인 방사선량은 0.1 mSv/yr을 초과하지 말아야 한다. 이것은 지하 심지층 처분장에서부터 생태계까지 누출된 방사성물질의 흐름이 natural flow 수준 이하로 제한적이어야 한다는 것을 의미한다.
- 예기치 못한 극한상황의 결과 또는 확율은 그 사건으로 인해 손상될 어느 특정집단의 위험도를 개인 방사선량 0.1mSv/yr 기준으로 비교하여 결정하여야 한다.

스웨덴에서 추구하고 있는 방사성폐기물 처분장 안전성은 폐기물의 방사성 독성과 접근 용이성 (accessibility)에 달려 있다고 보고 있다. 우선 처분 안전성 평가는 독성이 감소되는 시간과 처분장 성능을 정량화하는데 있어서의 불확정성 등에 영향을 받는다. 즉 전자는 시간에 따라 감소하는 반면 후자는 증가한다. 그리고 안전성 평가기간인 "reasonably predictable period of time" 개념은 처분장 성능의 불확정성이 시간에 따라 변한다는 것을 포함하고 있다. 그리고 방사성물질의 이동경로 역시 시간에 따라 변하나 그 변하는 정도는 처분 방법별로 다르다. 경험적으로 보아 생태계에서의 중요한 변화는 약 100년에서 1000년 동안 일어날 것으로 예측되고 있으나 스웨덴에서 고려중인 처분장 지하 환경은 백만년 동안 비교적 안정적일 것으로 보여진다. 결과적으로 심지층 처분안전성 또는 위험도(risk)는 시간의 함수로 평가될 수 있으므로 SSI (National Radiation Protection Institute)가 요구하고 있는 방사선 방어 관점에서 시간의 영향은 다음과 같이 정리된다.

- 처분장 운영 및 폐쇄까지 처분장의 방사선 방어에 특별히 세심한 주의를 기울여야 한다. 그리고 처음 1000년동안은 근처 주민에 대하여 방사선방어의 초점을 둔다.

- 다음 빙하기까지 (약 10,000년후)의 개인 방사선량을 오차 범위까지 정확히 예측·평가되어야 하고 (best estimate with an estimated margin of error), 같은 기간동안의 환경보호 (environmental protection) 측면까지 기술되어야 한다.
- 빙하기 이후는 처분장에 어떤 일이 발생할 것인가에 대해서 정성적으로 평가하되 방사성물질의 누출을 증가시킬 수 있는 인위적인 것까지 포함한다.

3.2 고준위폐기물 처분장 구성요소의 성능

3.2.1 격리

처분대상 폐기물인 사용후핵연료가 우리의 생활권과 완전히 격리되는 한, 방사성물질은 인간 또는 우리 자연환경에 노출되는 일 없이 시간에 따라 붕괴될 것이다.

사용후핵연료의 완전 격리는 처분용기의 밀봉·포장에 의해서 이루어진다. 우선 처분용기의 재질이 충분한 건전성을 유지하여야함은 물론 사용후핵연료를 넣고 용접하는 밀봉과정도 주어진 품질에 맞도록 수행되어야 한다.

처분용기의 성능에 영향을 줄 수 있는 요소는 공학적 방벽의 설계와 품질, 부지 특성, 처분장 깊이와 처분장 설계 등이다. 이와 같은 요소들을 보다 구체적으로 처분용기 성능보장을 위한 요건으로 나열해 보면 다음과 같다.

- 처분용기 재질과 규격 및 처분용기 품질 검사 방법
- 완충재의 물리·화학적 특성
- 완충재 제조 및 완충 공정의 품질검사 방법
- 처분공의 기하학적 구조/크기 및 건설 방법
- 처분공 주변의 역학적, 화학적, 수리학적 조건
- 처분장 모암의 안정성
- 처분장의 방사선 준위 및 온도 분포

스웨덴에서의 폐기물 처분에 대한 방사성물질 격리 목표기간은 100,000년이다. 즉, 처분용기 내부에 들어 있는 사용후핵연료는 용기의 부식, 완충재의 팽윤압 및 지하수압, rock movement 등의 복합적인 영향하에서도 천연우라늄 방사성독성도 수준으로 감소되는 100,000년까지 격리되어야 한다. 먼 미래 빙하기 때, 얼음의 하중에 의해 손상될 처분용기의 수는 상당히 제한되어야 한다.

3.2.2 방사성물질 이동 지연

만약, 처분용기의 “격리” 성능이 소실되었을 때, 처분용기로부터 누출된 방사성물질은 지하 환경을 경유하여 인간 생활 환경까지 이동하면서 다음과 같은 과정에 의해 그 이동이 지연되어야 한다.

- 사용후핵연료의 낮은 용해/용출: 관련 인자는 폐기물에 포함된 방사성물질의 인벤토리(핵종, 핵종, 농도, 수량 등)와 물리/화학적 특성, 처분용기 내·외부 온도 및 방사선 분포, 처분용기 손상 특성, 처분용기 및 완충재의 물질 특성/작용, Near-field에서의 완충재 특성 및 거동, 지하수의 화학적 특성
- Near-field에서의 방사성물질 이동지연 : 관련 인자는 공학적 방법의 설계 및 그 특성, 처분공/터널 설계특성, 처분공간 굴착 방법에 따른 주변의 영향, 처분장의 지형학, 지질학적 구조 및 수문학적 연계, 주변 물질의 흡착 특성
- Far-field 에서의 핵종이동 지연: Far-field에서의 암반을 통한 방사성물질 대규모 이동 (the large-scale transport of radionuclides through the rock)은 처분장 주변 이동경로에 따른 암반의 흡착면적, matrix diffusion 및 수리지구 화학 조건에 따라 영향을 받는다.

3.2.3 수납조건

지하처분장으로부터 누출된 방사성물질이 생태계에서 인간 생활권까지 도달할 이동경로는 지표에서의 희석효과, 물의 이용, 토지의 이용 및 관개/지하수 개발 등의 여러 가지 요인에 의해 영향을 받는다.

3.3 고준위폐기물 처분장 설계 원칙

스웨덴의 처분개념에는 미국 경우와 같이 처럼 처분장 설계기준이 정량적으로 구체적으로 명시되지는 않고 있으나 국제기구에서 제시한 일반적인 기준 및 원칙에 충실히 따르고 있다. 현재 개발 중인 기준 처분장에 적용되고 있는 설계 일반 요건은 다음과 같이 요약될 수 있다[13-14].

- 사용후핵연료의 취급 및 처분에 있어서 안전성 정도는 국가 및 국제기관에서 제시하고 있는 권고 사항을 만족해야 한다.
- 전체 시스템의 안전성은 방벽중에서 한 개의 방벽이 파손되더라도 크게 영향을 받지 않도록

다중방벽의 개념에 근거하여야 한다.

- 처분장의 설계 및 시설배치는 스웨덴의 지형을 고려해야 하며, 가용한 기술을 이용하되 지하시설 굴착 및 건설방법은 conventional한 것을 사용한다.
- 처분장의 장기 안전성은 제도적 관리기관에 의존해서는 안된다.
- 처분장으로 인하여 그 지역의 자연방사선 조건을 변경해서는 안된다.
- 합리적으로 예견된 기간에는 예상 가능한 방사성핵종 누출에 기인한 피폭율이 연간 10mrem 이내이어야 한다.
- 기대하기 어려운 중대사고시의 방사선피폭도 확률과 리스크 개념을 적용하여 고려해야 한다.
- 방사성폐기물은 처분용기에 밀봉·포장되어 심지층 처분장에 처분한다.
- 처분용기 (waste package and transport protection포함) 무게는 100톤 이하
- 처분용기는 결정질암층의 지하 500미터에 처분 : 처분용기 수명, 지하수 이동시간, 공학적방법에서의 핵종 누출을 등과 같은 각 방벽에 대한 세부 기준은 제시하지 않은 이유는 전체 시스템의 최적화를 방해하기 때문이라고 명시하고 있다. 그러나 실제 설계 시는 내부적으로 부 시스템의 성능기준을 마련하여 사용되고 있다. 가령 규제관점에서 용기의 수명을 명시하고는 있지 않으나 (미국의 경우 처분후 300년에서 1000년 동안은 심각한(Substantial) 용기 파손이 일어나지 않아야 한다고 명시되어 있음) 용기 수명에 관한 다양한 평가를 통하여 충분히 오랜 시간 동안 용기의 건전성이 보장된다는 것을 보여주고 있다. 현재까지 개발된 처분용기의 설계기준은 다음과 같다.
- 건전성
 - 초기 건전성 (initial integrity) : 사용후핵연료는 처분용기에 밀봉·포장되고 적절한 절차에 따른 품질검사를 받는다. 그러나 이와같은 과정에서 발견되지 못하고 방사성물질의 처분초기 누출경로가 될 수 있는 초기 제조결함 발생율은 0.1%이하이어야 한다.
 - 내부식성 (corrosion resistance) : 처분후 처분용기는 초기 100,000년동안 부식에 의해 물이 침투되지 않아야 한다.
 - 기계적 강도(strength) : 처분용기는 처분후 지하 400-700미터의 깊이에서 야기되는 지하수압 (최고 7MPa)과 완충재의 팽윤압 (최고 10MPa)에 견딜수 있어야한다.

- 내 방사선 : 처분용기는 100,000년동안의 누적 방사선에도 재료의 특성이 변하지 않아야 한다.
- 다른 방벽의 성능에 영향을 미치지 않아야 함.
 - 처분용기 재질 및 그의 부식 생성물은 완충재와 주변 암반의 특성에 영향을 주지 않아야 한다.
 - 처분용기는 그 주변을 둘러 싸고 있는 압축벤토나이트 완충재의 온도가 90°C 이하가 되도록 설계 되어야 한다.
 - 처분용기는 주변 물질 (지하수, 완충재 등)의 방사분해 생성물이 용기 부식에 기여하지 못하도록 하기 위하여 500mGy/hr의 방사선량이하로 제한될 수 있도록 차폐성을 가져야 한다.
 - 처분용기는 내부로 물이 침투되더라도 미입계를 유지할 수 있도록 설계되어야 한다.

세계 각국의 처분 안전 및 기술기준에 대한 비교.분석

방사성폐기물 처분 안전성을 목표로 하고 있는 기술 및 안전기준이 나라마다 다른데, 미국을 제외한 나라들은 가장 상위의 설계 목표인 방사선적 안전성 기준만을 잠정적으로 결정한 상태에 있으며, 구체적인 부 시스템 성능요건 등은 설계 시 설계자가 가정한 임의의 기준을 사용하고 있는 상태이다. 그러나 미국은 향후 변경될 여지는 있지만 자세한 기술적 요건까지 인허가 요건으로 규정하여 사용하고 있다. 특히 스웨덴의 경우에는 부 시스템의 성능을 제한할 경우에 전체시스템의 최적화에 방해가 된다고 보고 이의 필요성에 반대하고 있는 입장이다.

표 2 는 세계 주요국과 주요 국제기구에서 권고하고 있는 정량적인 고준위폐기물 처분장 안전성 기준을 비교한 결과이다. 대부분의 국가에서 개인 리스크 제한치를 10^{-5} 으로 제한하고 있으며, 캐나다의 경우는 최대 개인리스크를 10^{-6} 로 제한하고 있다. 정량적인 안전성 평가기간을 미국, 캐나다 및 독일에서는 10,000년까지로 의무화하고 있다. 이것은 지금부터 10,000년 이후의 상황 (geosphere, biosphere)을 예측하기가 매우 어렵기 때문인 것으로 보인다. 그러나 10,000년 이후도 정성적인 평가를 해야한다는 단서를 달고 있다.

또 하나의 규제관점에서 논란의 대상은 일반 원자력시설에 적용되고 있는 ALARA(As Low

As Reasonable Achievable) 개념을 처분장에도 도입을 해야하는지의 문제이다. 일반적으로 ALARA 개념은 방사선적 안전성 제한치를 만족한 후, 비용·효과 분석을 통하여 타당성이 입증될 경우 추가 수단을 사용하여 방호해야 한다는 최적화 개념이다. 그러나 이를 처분장에 적용할 경우에 몇 가지 어려운 문제가 발생한다는 것이다. 먼저 처분장 설계의 대안이 한정되어 있고, 더구나 설계에 반영한다 해도 새로운 설계 대안에 대한 혜택(benefit)을 증명하거나 확인할 방법이 극히 제한되어 있다는 것이다. 이에 대한 미국의 국립과학아카데미의 입장도 ALARA 개념을 처분장설계에 반영할 수 있는 과학적 토대가 아직은 마련되어 있지 않다고 시인하고 있다.

일반적으로 정성적으로 정의되는 규제 원리는 추상적이며 해석이 분명하지 않기 때문에 효율적인 설계와 인허가를 위해서는 더 분명한 하위기준들이 요구된다. 그러나 최하위의 유도기준들은 상위기준보다 더욱 구체적이며 기술적인 접근을 하는 것이나 효과적인 연구방향을 설정하는데 오히려 제약 요인이 되고 있다. 예를 들어 1987년의 Oversby 연구[15]에 의하면 공학적방벽에서의 누출량을 규제하는 US NRC 규제관점에서 Am-241은 매우 중요한 것으로 나타났다. 그러므로 US NRC의 규제요건을 만족시키기 위하여 연구의 우선순위는 Am-241의 용해도 및 흡착 연구이어야만 할 것이다. 그러나 지금까지 많은 고준위폐기물 연구에서 Am-241은 자연방벽에서 흡착이 잘 되어서 Am-241로 인한 방사선적 영향이 매우 작고 방사선적 안전기준을 충분히 만족된다는 것이 밝혀졌다. 이것은 유도기준의 맹점을 잘 설명해주고 있다. 또한 유도기준은 설계대안 분석을 방해한다. 즉 설계자로 하여금 새로운 처분시스템의 도입이나 다중방벽 구성의 최적화 기회를 박탈하는 결과를 초래할 수도 있다는 것이다. 아직 유도기준을 인허가 기술기준으로 정해야 하는지에 대한 국제적인 콘센서스가 아직은 이루어지지 않았다고 볼 수 있다.

먼 미래의 환경변화를 예측한다는 것은 그 기간이 수 만년을 넘을 때는 매우 어렵다. 예를 들면, 지구의 빙하기는 순환적으로 우리에게 다가왔으며, 이를 근거로 향후 10,000년 이내에 다시 올 것으로 많은 전문가들은 예상하고 있다. 이런 기간에는 분명히 지질시스템뿐만 아니라 생태계에 중요한 변화가 일어날 것이다.

Table 2. 주요국의 안전성 평가 기준

기구/국가	주요 목표 및 기준	기타 주요 특징
OECD/NEA (1984)[23]	최대 개인리스크 $10^{-5}/yr$	- ALARA/최적화 적용에 대한 콘센서스가 없음
ICRP pub. 46 (1985)	정상시나리오시 $1mSv/yr$, 확률적시나리오시 $10^{-5}/yr$	- ALARA가 대안분석에 유용하나 가장 중요한 부지선정 요소는아님
IAEA Safety Series 99(1989)	ICRP46(1985)와 동일	- 처분시스템에 정성적인 기준을 포함하고 있음
캐나다 AECB (1987)	최대 개인리스크 $10^{-6}/yr$	- 안전성 평가기간은 10,000년으로 하되 10,000년이후에 선량이 갑작스런 증가가 없어야 됨 - 그외 정성적인 요건을 포함하고 있으나 최적화에 대한 분명한 언급은 없음
독일 (1989)	모든 합리적인 시나리오에 대해 여 $0.3mSv/yr$ 보다 작아야 함	- 안전성 평가기간은 10,000년으로 하되 10,000년이후에도 방사성핵종의 Isolation가능성평가
노르딕 국가 (1989)[24]	정상시나리오 시 $0.1mSv/yr$, 사고 시나리오에 대해서 $10^{-5}/yr$	- 처분시스템에 정성적인 기준을 포함
스페인	정상시나리오시 $0.1mSv/yr$, 어떤 상황에서도 리스크는 $10^{-5}/yr$ 보다 작아야 됨.	
미국 40CFR191 10CFR60		- 일반주민피폭선량: $<15mrem/yr$ over 1000 yrs - 10,000 년 동안 환경으로 누출되는 누적 방사선량이 표 1-1에 제시된 수치를 초과할 확률이 0.1보다 작아야하고, 또한 제시된 수치의 10배를 초과할 확률이 0.001 보다 작아야 함, - 공학적방벽에서의 방사성핵종 누출율이 처분장 폐쇄후 1000년 되는 시점에서의 재고량(inventory)의 $1/10^5$ 보다 작아야 함 - accessible environment까지 지하수의 가장 빠른 이동 경로를 통한 이동시간이 1000년을 초과해야 함 - 처분이 시작되는 시점에서 50년후 폐기물의 회수(retriability)가 가능해야 됨 - 처분용기 성능 : 300 ~ 1000 년

환경 조건이나 미래 세대가 영향을 섭취하는 방식 등이 오늘날과 크게 다를지도 모른다. 이러한 상황에서 위험도 및 선량을 수 천년 이후까지 평가한다는 것은 의미가 없을지도 모른다. 이를 고려하여 캐나다, 미국에서는 정량적인 평가 기간을 10,000년으로 정하고 있다. 그러나 지금까지 여러 기관들에서 예비적으로 수행한 안전성평가 결과들을 보면 최대 위험도가 10,000년 이후에 발생하는 것으로 알려져 있다. 이를 고려하여 미국에서도 평가를 연장하는 방안을 고려하고 있으나, 그 이후의 불확실성 처리문제로 고민하고 있다.

처분심도는 각국의 처분장 부지의 지질학적/수리학적 특성에 따라 다르다. 현재 고려되고 있는 미국은 응회암층 300m, 캐나다/스웨덴/핀란드 등에서는 결정질암층의 지하 400-700m를 적절한 처분심도 범위로 예상하고 있다. 처분심도가 수 km인 경우도 고려할 수도 있겠으나 안전성 관점에서의 장단점을 비교해보면 다음과 같다.

- 수 km 처분심도의 장점
 - 낮은 수리전도도, 낮은 수두구배 및 높은 염도로 인해 지하수의 유동성이 낮음 (low groundwater flow).
 - 처분용기방향으로 산화성물질의 이동과 처분용기 손상시 누출되는 방사성물질의 이동성 저하
 - 방사성물질의 이동거리가 길어 생태계까지의 도달시간이 길어짐.
 - 빙하 및 permafrost에 의한 영향이 작아지고
 - 인간의 자발적/무의식적 침입 가능성이 적음.
- 단점
 - 암반응력 및 지하수압 증가로 건설작업 어려움(reduced constructability).
 - 처분장 모암에대한 지질학적, 수리학적 체계 이해와 특성분석 곤란.
 - 지하수의 염도가 높아 벤토나이트 완충제의 기능 저하.

- 처분장 건설 및 운영에 있어 예기치 않았던 사고 위험성과 안전성 분석의 불확정성 증가.

앞에서 살펴본 바와 같이 각국에서 고려하고 있는 고준위폐기물 처분의 안전성 및 기술기준은 결국 기술적, 환경 보호 및 안전성 관점에서 심지층 처분 시스템의 성능이 최적상태로 유지시켜 줄 수 있도록 설계/건설 및 운영하는 기반인 것이다.

우리나라 고준위폐기물 처분안전성 확립을 위한 기술 및 안전기준 제안

아직 우리나라에는 고준위폐기물 처분안전성과 관련된 안전성 평가기준이 마련되어 있지 않지만, 과기부에서 ICRP Publication 60 권고사항을 기준으로 개정 발표한 방사선량기준 (과기부고시 제 98-12호, 1998. 8.11)을 근거로 앞에서 논의된 각국의 안전성 및 시설 설계기준 등을 참조하여 현재 개발되고 있는 고준위폐기물 처분시설의 설계 및 장기적 처분안전성을 위하여 다음과 같은 기준을 설정하였다.

1. 방사선적 안전 원칙 및 일반 기준

- 처분의 장기적 안전성은 미래 세대의 처분장 유지/보수나 감시에 의존하지 않고 독립적으로 확보되어야 한다. 그러나 이런 조건이 처분장 폐쇄후 감시가 필요 없다는 것을 의미하는 것은 아니다.
- 처분장은 미래에 어떤 원인으로 인해 폐기물 회수 또는 처분장 변경이 가능하도록 설계되어야 한다.
- 처분안전성은 "passive" 다중방어벽의 종합적 기능에 기초하고 있어 어느한 방벽의 기능이 상실되더라도 처분장 전체의 성능 및 안전성에 문제가 없도록 구성되어야 한다.
- 처분장 건설 및 운영기간동안 안전성과 관련된 특별한 보호장치가 마련되어야 하며, 특히 처분장 운영에 따른 방사선적 안전성 기준은 국내 원자력법 (과기부 고시 98-12호)에서 명시하고 있는 선량기준 -방사선 작업자 전신 20 mSv/년 (년간 50mSv를 넘지 않는 한도 내에서 5년간 100mSv, 1mrem/hr), 일반인 1 mSv/년-을 적용하고, 처분 후 안전성은 처분장 폐쇄후 1000년 동안 근처의 주민을 주요 감시 대상으로 하여 처분안전성 예측기간 동안 (a reasonably predictable period of time), 방사성물질의 누출로 인한 개인 피폭선량은 0.1 mSv/y이하로 제한하고, 사고에 대한 피폭 리스크는 10^{-5} /년보다 작아야 한다. 여기서 제시된 값은 과기부 고시 98-12호의 일반인 개인피폭한도 선량치의 1/10이하이고 또한 고준위폐기물 처분개념을 설정한 여러나라들 중 가장 많이 채택하고 있는 기준으로 이해될 수 있다.

- 장기적인 처분안전성 기간은 처분 후 10,000년 동안 설정된 특정그룹의 인간과 자연을 대상으로 정량적 분석을, 그리고 그 이후에 대한 정성적인 분석 결과를 확률적 위험도 분석과 함께 수행하여야 한다.

2. 처분시스템 주요 구성요소의 성능요건

2.1 처분용기

- 처분장 운영기간
 - 심지층 지하환경에 처분하기 위한 처분용기는 엄격한 품질검사 및 관리를 통하여 제조 결함율은 1/1000 이하가 되어야 한다.
 - 처분용기는 밀봉,포장공정, 수송 및 취급과정에서 예기치 않게 일어날 사고에서도 방사성물질의 누출이나 허용치 이상의 방사선 피폭이 되지 않아야 한다.
 - 처분용기는 지하 처분시설로의 운송 및 거치공정 등을 위하여 안전하게 취급될 수 있도록 설계되어야 한다.
 - 처분용기는 50년간의 운영기간을 포함하여 100년동안 안전한 상태로 회수될 수 있도록 설계되어야 한다.
- 처분장 폐쇄후 기간
 - 처분용기는 처분 후 어떠한 조건하에서도 1,000년 이상 동안 폐기물을 완전 격리시킬 수 있도록 그의 수명이 보장되어야 한다. 이와 같은 조건을 만족시키기 위한 요건은 다음과 같다.
 - 초기 건전성 (initial integrity) : 지상의 밀봉,포장시설에서 엄격한 품질검사 및 관리 체제하에서 만들어 진다 하더라도, 처분용기의 발견되지 못할 미세 결함 확률은 10^{-3} 이하 이어야 한다.
 - 내 부식성 (chemical resistance) : 예상되는 어떠한 처분조건하에서도 처분용기의 수명기간 동안 내화학적 성질을 갖어야 한다.

- 기계적 강도 (지하수압, 완충재의 팽윤압 및 암반의 이동) : 처분용기는 예상되는 지하수압 5MPa과 벤토나이트 완충재의 팽윤압 15MPa의 합 20MPa의 외압에 견딜 수 있도록 기계적 강도를 유지하여야 한다.
- 다른 방벽 성능에 영향을 주지 않도록 하기 위하여 :
 - 처분용기와 그의 부식생성물이 완충재 및 처분장 모암과의 반응으로 각 방벽의 성능에 지장이 없는 재질로 선택
 - 처분용기의 표면온도는 완충재의 성능유지를 위하여 100℃를 넘지 않도록 설계
 - 핵연료의 물리.화학적 건전성 유지를 위하여 핵연료 온도가 공기중에서 250℃ 이하가 되도록 그리고 피복관 온도는 200℃ 이하가 되도록 설계
 - 처분용기의 표면선량은 주변의 방사분해에 의한 성능저하를 방지하기 위하여 500mGy/hr이하가 되도록 설계
- 처분용기는 미핵임계를 유지 : $K_{eff} < 0.95$

2.2 처분장

다중방어 원칙에 따른 처분장의 설계 원칙은 다음과 같다.

- 처분장 부지에 대한 특성조사 범위는 처분장 성능 및 안전성 평가에 충분하도록 설정되어야 한다.
- 폐기물의 방사선 준위가 여전히 높은 상태에서 침식/융기 같은 자연현상에 의해 자연에 노출되지 않도록 충분히 깊은 곳에 처분되어야 하며 그와 같은 장기적 가능성이 기후변화와 함께 고려되어야 한다.
- 심지층에 처분된 방사성폐기물이 충분히 격리되어 있기 위해서는 (adequate degree of separation from underlying and overlying strata and flanking transition zones and fault, etc.) 처분 지점 주변의 지질매체가 충분한 두께와 어느 정도 수평방향으로의 확장성이 가능한 지역이어야 한다.
- 처분장 주변의 모암은 지질학적으로 안정하거나 미래에도 안정하다고 예상되어야 한다.
- 지하처분시설의 모든 공간은 폐쇄후 방사성물질의 이동 통로가 될 수 없도록 잘 뒷 채움되거나 밀봉되어야 한다.
- 처분장 위치는 먼 미래에 처분장의 건전성을 해칠 가능성이 있는 인위적인 개발이 예

상되지 않는 곳에 위치하여야 한다.

- 처분장 주변의 수리.지질학적 특성은 처분장 구역을 통과하는 지하수 흐름이 최소화 될 수 있어야 한다.
- 처분장은 지하 환경이 바람직하지 못하게 변화되거나 수리지질학적 특성이 안전성에 해가되는 방향으로 변할 가능성이 없는 곳에 위치하여야 한다.
- 처분장 구성 시스템 결정 시에는 폐기물의 포장(재질)과 지하수의 바람직하지 못한 화학적 반응 (부식/부식생성물, 방사분해생성물에 의한 부식 증가, 지하수의 화학적 특성 변화)이 일어나지 않도록 세심한 고려가 필요하다.
- 핵종의 지중이동 지연효과에는 천연 및 공학적 방벽에 의한 효과도 같이 고려되어야 한다.
- 처분장의 공학적 방벽 시스템과 지질학적 구조 등은 고준위폐기물로부터 방출되는 방사선 및 열에 의해 충분히 그 건전성이 유지될 수 있어야 한다.
- 처분장은 공학적 방벽 시스템의 파손에 의해 핵종의 새로운 이동 경로가 생성되지 않도록 설계되어야 한다.
- 바람직한 처분장 부지특성 요소
 - 방사성물질 유동성 지하수에 노출시킬 가능성을 최소화 할 수 있는 수리.지질학적 특성 보유.
 - 지하 처분장으로부터 누출된 방사성물질이 생태계에 도달하기 전에 그 이동 및 농도가 상당히 지연 또는 고정화될 수 있다는 것을 확신할 수 있는 지화학적.지질학적 특성을 보유.
 - 고준위폐기물로부터 방출되는 붕괴열에 의해 처분장/처분모암이 천연방벽으로서의 역할을 충분히 수행할 수 있음을 보장하는 열·역학적 특성 보유.
 - 처분장 운영기간동안 처분장의 물리적 건전성에 문제없음을 보장 할 수 있는 구조적 강도와 안정성 (structural strength and stability) 보유.

감사의 글

본 논문은 과학기술처 원자력증장기 개발사업 기금으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. ICRP Publication 26, "Recommendation of the International Commission on Radiological Protection,"(1977).
2. ICRP Publication 46, "Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste", ICRP(1985).
3. ICRP Publication 60, "1990 Recommendation of the International Commission on Radiological Protection,"(1990).
4. ICRP Publication 37, "Cost Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection," (1983).
5. Safety Series No. 99, "Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High Level Radioactive Waste, IAEA(1989).
6. "10CFR (Code of Federal Regulations) 60, Energy: Disposal of High-Level Radioactive Wastes in Geologic Repositories", The Office of the Federal Register National Archives and Records Administration,(1997).
7. 40CFR191, "Environmental Radiation Protection Standards for Management and Disposal of Spent Nuclear Fuel, High-Level and Transuranic Radioactive Wastes", The Office of the Federal Register National Archives and Records Administration,(1997).
8. NAS Report, "Technical Bases for Yucca Mountain Standards", National Academy Press"(1995).
9. AECB Regulatory Document R-104, "Regulatory Policy Statement Regulatory Objectives, Requirements and Guidelines for the Disposal of Radioactive Waste - Long Term Aspects"(1987).
10. AECL-10721, "Summary of Environmental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste", AECL(1994).
11. AECL-10715, "The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: Engineering for a Disposal Facility", AECL(1994).
12. "Disposal of High Level Radioactive Waste, Consideration of Some Basic Criteria", Radiation Protection and Safety Authorities in Denmark Finland, Iceland, Norway and Sweden(1993).
13. RD&D-Programme 92, "Treatment and Final Disposal of Nuclear Waste", Swedish Nuclear Fuel Supply Co.(1992).
14. RD&D-Programme 95, "Treatment and Final Disposal of Nuclear Waste", Swedish Nuclear Fuel Supply Co.(1995).
15. Oversby,V.M, "Important Radionuclides in High Level Waste Disposal", Nucl. and Chem. Waste Management 7, 149-161 (1987).