

고준위 방사성 폐기물 처분 시설의 장기적 안전성 기준의 문제점 고찰

고원일, 최종원, 강철형
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

우리나라에서도 고준위 폐기물 처분 시설의 장기 안전성 확보를 위한 기초연구가 시작되고 있어 안전성 기준에 대한 논의가 필요한 시점이다. 여기서는 고준위 폐기물 처분 시설의 안전성 기준에 대한 국제기관들의 권고하는 기준들을 조사하고, 현재 여러 나라에서 제안되거나 개정중에 있는 기준들을 비교 분석하였다. 안전성 기준에서의 큰 차이점은 유도 기준의 필요성(현재 미국만의 유도 기준을 사용), ALARA 적용 문제, 종합적 위험도 적용 방법론의 문제, 위험도 수준등에서 나타나고 있으며, 특히 미래 상황의 불확실성 때문에 현재 몇 개 국가에서 제시하고 있는 안전성 평가 기간(10,000년)은 계속 논란이 일 것으로 보인다. 미래 예측이 어느 정도 가능한 최소한의 기간(수천 년 혹은 만년)까지는 위험도를 기준으로, 그리고 그 이후는 지표로의 누출율을 기준으로 정하는 것도 바람직한 대안이 될 것으로 생각된다. 또한 안전성 기준은 설계자로 하여금 대안 분석을 통한 최적화를 방해하는 구체적인 유도 기준보다는 융통성을 어느 정도 부여하는 방향으로 설정되는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

1. 서 론

지금까지 단반감기를 갖는 중·저준위 방사성 폐기물은 여러 나라에서 지표면에 근접한 지하공간에 안전하게 처분되어 왔으나, 방사선 준위가 매우 높은 고준위 방사성 폐기물은 독성이 강한 장반감기 핵종을 포함하고 있고, 이들 핵종들의 방사선 붕괴로 인해서 많은 열을 방출하는 특성 때문에 아직까지도 상용화되지 못하고 있다. 그 동안 미국, 스웨덴, 캐나다 등에서는 여러 처분 방안들이 연구되어 왔는데, 그 중 지하 300~1000m 깊이에 처분하여 인간 생활권과 격리시키는 방안, 즉 심지층 처분 방안이 가장 유력하게 제안되어 현재는 모두 심지층 처분 연구에 집중되어 있는 상태이다.

고준위 폐기물 처분의 안전성 기준은 기본적으로 ICRP의 방사선 방호 원리에 근거하고는 있으나; IAEA, OECD/NEA와 같은 국제기구와 여러 나라에서는 중·저준위 폐기물 처분 시설과 분리하여 특별히 고준위 폐기물 처분 시설에 대한 인허가 규제요건을 만들어 제시하고 있다. 그러나 안전성 요건의 범위와 적용 방법론에 있어서는 나라마다 조금씩 다르며 아직까지도 전문가들 사이의 콘센서스가 이루어지지 않고 있다. 다른 원자력 관련 시설들과는 달리 고준위 폐기물 처분장에 있어서 안전성 기준이 왜 논쟁거리가 되는지를 보기 위해서는 먼저 다른 원자력 관련 시설과 고준위 폐기물 처분 시설의 안전성 개념의 차이를 볼 필요가 있다.

심지층 처분 시설의 안전성은 공학적 방벽(고화체, 처분용기, 완충재)과 자연방벽(지하암반 및 주변 지층)으로 이루어진 다중방호 개념에 의해 확보한다는 개념이다. 이 개념은 원자력 발전소의 다중방호 원리와 유사하다고 할 수 있다. 그러나 안전성 평가에서는 사용된 모델들의 정당성을 입증

하는 실험적 검증(validation)이 요구되는데, 모델들에 대한 실험적 검증이 불가능하거나 많은 불확실성을 포함하게 될 경우에 문제가 발생한다. 시설수명이 약 30년~50년에 불과한 원자력 관련 시설들의 안전성 평가는 정상상태(steady state)라는 가정하에 이루어지고 있다. 즉, 시설을 구성하고 있는 부품 혹은 장비들의 퇴보(degradation) 현상을 안전성분석에 고려하지 않는다는 것이다. 최근 들어 원자력발전소에서도 시간적 개념을 고려한 동적위험도(dynamic risk) 분석에 대한 논의가 이루어지고는 있으나 자료의 불확실성 등으로 활성화되지는 못하고 있다. 그러나 고준위폐기물의 경우 장반감기 핵종으로 인하여 평가대상 기간이 수만년 혹은 수십만년 이상을 요구하고 있다. 즉 수십만년간의 동적위험도 분석이 요구되는 것이다. 이는 처분시설을 구성하는 공학적방벽과 자연방벽, 그리고 인간생활권을 포함하는 생태계의 변화과정등이 시간의 함수로 모델링되어야 함을 의미한다. 그러나 불행하게도 수십만년 동안의 지하 환경의 변화, 생태계의 변화, 기후변화, 인간의 행위 예측 등을 정확하게 판단할 방법이 없다는 것이다. 어쩌면 이것들은 현재의 인간의 기술적 능력을 초과하는 것일지도 모른다. 이러한 심지층처분시설의 갖는 특성이 처분시설의 상용화를 제약하고 있을 뿐만 아니라 안전성 요건 설정에 있어서도 불확실성 혹은 모호성이 개입되어 어떤 기준이 가장 적합한지에 대한 당위성이 결여되어 논란이 일고 있는 것이다.

우리나라의 경우 중·저준위폐기물 처분시설에 대해서는 방사선적 안전성기준을 포함하는 인허가 요건이 과기처고시(과기처고시 제94-2호)로 나와 있으나, 고준위폐기물에 대해서는 안전성 기준에 대한 어떤 요건도 정해진 바 없는 상태이다. 1997년도부터 한국원자력연구소를 중심으로 고준위폐기물 처분시설의 장기안전성확보를 위한 기초연구가 본격적으로 시작되고 있어 안전성기준에 대한 논의가 필요한 시점이다. 여기서는 고준위폐기물 처분 시설의 안전성 기준에 대한 국제기관들의 권고하는 기준들을 조사하고, 현재 여러 나라에서 제안되거나 개정중에 있는 안전성 기준들을 비교·분석하여 관련 안전성 연구에 도움을 주고자 한다.

2. 안전성 기준 동향

일반적으로 안전성 기준은 규제원리, 선량제한 혹은 설계목표와 유도기준을 포함하는 계층구조를 갖고 있다. 그림 1에는 일반적인 안전기준의 계층구조와 원자력발전소 및 고준위폐기물처분에서의 예를 나타내고 있다.

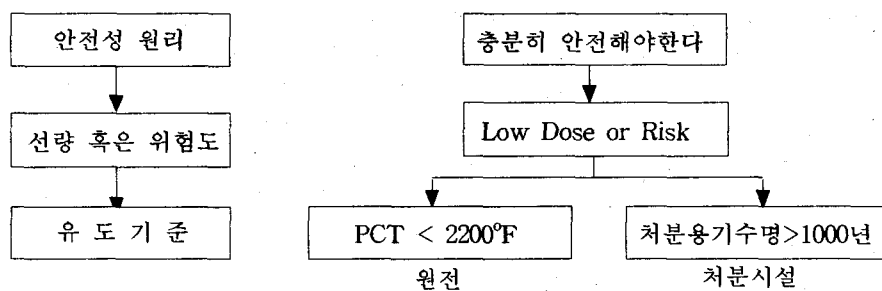


그림 1. 안전성 기준 계층구조(왼쪽)와 예(오른쪽)

만일 유도기준을 만족한다면 선량 목표 혹은 최상위의 규제원리도 만족할 것이다. 그러나 고준위폐기물 처분의 경우 과연 유도기준이 필요한 것인지, 선량제한은 어떤 방법으로 할 것인지 등에 있어서 나라마다 조금씩 견해가 다르다. 여기서는 여러 국제기구에서 제시하고 있는 안전성기준과 현재 각국의 인허가 기관에서 제시하고 있는 안전성 및 기술기준을 조사하여 비교하고자 한다.

■ 국제방사선방호위원회(ICRP)

ICRP는 1977년의 ICRP-26의 방사선방호에 대한 기본원칙, 즉 정당화, 최적화, 선량제한을 근거로 1987년에 방사성폐기물 처분장에 대한 방사선방호 원리를 ICRP-46[1]으로 발표한 바 있다. 1991년 개정된 방호개념인 ICRP60을 반영한 ICRP46의 개정은 아직 이루어지지 않고 있다. 여기서는 ICRP-46의 내용중 방사선방호와 관련된 핵심사항인 개인선량 및 위험도(risk) 제한 부분을 보면 다음과 같다.

- 선량제한치의 적용을 위해서 가장 피폭이 많을 것으로 기대되는 결정그룹이 정해져야 하며, 그 결정그룹의 피폭량이 다른 방사선원을 고려하여 제한치를 초과하지 않아야 한다.
- 처분장으로 인한 피폭의 상당량은 확률값으로 나타내어지는 비정상상태의 사건들에 의해서 오기 때문에, 처분장의 방사선방호 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. 전자의 경우는 후자보다 적용하기 더 간단하지만 반드시 적절하다고만 볼 수 없다. 두 개의 위험도를 제한하기 위하여 서로 다른 설계 및 운영개념이 들어가야 되는 상황이 발생할 수 있기 때문이다. 따라서 현재의 정상시나리오에 대해서는 선량제한을, 확률적인 사건에는 위험도 개념으로 분리하여 적용할 것을 권고한다.
- 평균 연간 1mSv의 선량은 약 10^{-5} 보다 작은 위험도를 유발시키므로 확률적인 사건에 대해서 결정그룹에 대한 연간 위험도를 10^{-5} 보다 작게 한다.
- 장래세대에 대한 위험도제한도 현 세대에 적용하는 위험도와 동일한 개념으로 적용되어야 한다.
- 현재 고려되는 시설에 대한 선량을 정하기 위하여 장래에 예기치 않는 선원까지를 고려하여 각 방사선원으로 부터의 선량제한을 시설들에 할당하여 사용한다.

■ 국제원자력위원회(IAEA)

IAEA는 1989년에 고준위폐기물 처분시설에 대한 안전성 원리 및 기술 기준에 관해서 정성적인 기준이 제시되었는데 그 주요 내용을 보면 다음과 같다[2].

● 안전성 원리

- 고준위폐기물물 적절한 시점에서 안전하게 처분함으로써 장래세대에 부담을 최소화해야 한다.
- 고준위폐기물 처분장은 시설 폐쇄후 인위적인 부지 감시 혹은 제도적인 관리를 필요하지 않도록 안전성이 확보되어야 한다.
- 고준위폐기물의 고립(isolation)의 정도는 장래에 오늘날 받아들여지고 있는 수준 이상의 환경영향 및 인간의 건강에 위해가 있어서는 안된다.
- 고준위폐기물 처분장은 사회경제적의 요소를 고려한 ALARA 원칙이 적용되어야 한다.

● 기술적인 기준

- 고준위폐기물 처분장의 장기 안전성은 다중방벽(multibarrier) 원리에 의하여 유지되고, 또 이것은 전체 시스템에 대한 성능평가에 근거하여야 한다.
- 처분장에 처분되는 고준위폐기물은 화학적으로 고체상태이어야 하며, 핵종을 가두기 쉬운 물리적 특성을 갖추어야 한다.

- 고준위폐기물 처분장은 물리적 방벽의 붕괴를 제한하고, 방사성핵종이 생태계로의 수송을 제한할 수 있는 기반암에, 그리고 충분한 깊이에 위치하여야 한다.
- 고준위폐기물 처분장은 가치 있다고 판단되는 지하자원을 취득하기 위한 접근이 실질적으로 불가능할 정도의 적절한 곳에 위치하여야 한다.
- 고준위방사성폐기물 처분장이 안전성 목표에 맞는지를 보여주기 위해 수행되는 안전성 평가시 적용된 모델은 가능한 타당성 검증(validation)된 것이라야 한다.

IAEA는 상기한 기준외에 선량 및 위험도 제한을 적용하는 시간규모는 미래 세대의 건강을 보호한다는 측면에서 원칙적으로 제한이 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.

■ 미 국

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 하여 세부적인 기술 기준을 정립하는 것으로 역할분담을 하고 있다. 이 중에서 고준위폐기물 처분시설에만 적용되며, 가장 구체적으로 설계 및 인허가 요건을 명시하고 있는 것은 NRC의 10CFR60[3]과 EPA에서 1993년에 발표한 40CFR191[4]을 들 수 있다. 40CFR191에서는 방사선적 환경영향 관점에서 규제기준을 제시하고 있으며, 10CFR60에서는 처분용기 성능, 인공방벽 성능, 지하수 이동시간 등 구체적인 유도기준들을 포함하고 있다. 현재는 기존의 규정을 개정하기 위한 작업이 진행중인데, 이는 1992년 발표된 에너지정책법(Energy Policy Act)에 따라 이루어지고 있다.

향후 개정될 인허가 규정 방향을 가늠해보기 위하여 국립과학아카데미의 기술검토보고서[5]의 주요 내용을 보면, 치명적인 암발생 위험도(risk) 형태로 일반주민에 대한 연간 제한치를 사용할 것을 권고하고 있다. 그 이유로는, 기존의 위험도 환산인자가 변경되더라도 위험도에 근거하는 기준(risk-based standard)은 개정할 필요가 없게 되고, 다른 원자력 관련시설, 즉 원자력발전소, 제처리 시설 등에서의 위험도와 합리적으로 비교할 수 있으며, 일반 대중이 이해하기가 쉽도록 하기 위함이라고 기술하고 있다. 안전성 평가 대상 기간에 있어서는 기존의 40CFR191에는 폐쇄후 안전성 평가 기간이 10,000년으로 되어 있었으나, 최대 위험도를 보이는 시점이 10,000년을 초과할 가능성이 있기 때문에 이를 반영해야 한다고 기술하고 있다. 개인 선량평가에 있어서 개인에 대한 위험도의 수준을 결정하는 것은 기술적인 문제라기 보다는 사회적인 문제로 보고 있으며, 연간 위험도를 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 부터 토론이 시작되어야 한다고 제시하고 있다. 새로 개정되는 EPA의 유카마운틴에 적용할 환경 기준은 40CFR197로 공포될 예정으로 있다.

■ 안전성기준 비교

표 1은 세계 주요국과 국제기구에서 권고하고 있는 정량적인 고준위방사성폐기물 처분장 안전성 기준을 비교한 결과이다. 대부분의 나라들은 가장 상위의 설계 목표인 방사선적 안전성 기준만이 잠정적으로 결정된 상태에 있으며, 구체적인 부시스템 성능요건은 없다. 반면에 미국은 방사선적 안전기준외에 처분용기 수명, 공학적방벽에서의 유출량, 자연방벽의 성능(지하수이동시간), 자연방벽에의 누출량 등 구체적인 유도기준까지 제시하고 있다. 정량적인 안전성 평가기간은 미래의 불확실성을 감안하여 미국, 캐나다 및 독일에서는 10,000년까지로 제시하고 있다. 또한 캐나다

와 미국에서는 정상 및 비정상시나리오를 종합한 위험도를 ICRP와 기타 국가에서는 정상시나리오의 선량을 기준으로 하고 비정상시나리오의 위험도를 기준으로 분리하여 규정하고 있다.

표 1. 주요 국제기구 및 국가의 처분 안전성 기준 비교

기구/국가	주요 기준	기타 주요 특징
NEA[6]	최대 개인위험도 10^{-7} /yr	ALARA/최적화 적용에 대한 콘센서스가 없음
ICRP[1]	정상시나리오시 100mrem/yr, 확률적시나리오시 10^{-5} /yr	ALARA가 대안분석에 유용하나 가장 중요한 부지선정 요소는아님
IAEA[2]	정성적인 기준 제시	처분시스템에 정성적인 기준을 포함하고 있음
캐나다[7]	개인위험도 $< 10^{-6}$ /yr	안전성 평가기간은 10,000년으로 하되 10,000년 이후에 선량이 갑작스런 증가가 없는 것을 정성적으로 보여야 함
독일[8]	모든 합리적인 시나리오에 대하여 < 30 mrem/yr	안전성 평가기간은 10,000년으로 하되, 그이후에도 방사성핵종의 Isolation 가능성을 평가
노르딕국가[9]	정상시나리오시 < 10 mrem/yr, 사고시나리오시 $< 10^{-5}$ /yr	처분시스템에 정성적인 기준을 포함하고 있음
스페인[10]	정상시나리오시 < 10 mSv/yr, 어떤 상황에서도 위험도는 $< 10^{-7}$ /yr	
미국[3,4]		<ul style="list-style-type: none"> -일반주민피폭선량: < 15mrem/yr over 1000 yrs -10,000년 동안 환경으로 누출되는 누적 방사선량이 제시된 기준농도를 초과할 확률이 0.1보다 작아야하고, 10배를 초과할 확률이 0.001보다 작아야 함, -공학적방벽에서의 방사성핵종 누출율이 처분장 폐쇄후 1000년 되는 시점에서 평가된 재고량(inventory)의 $1/10^5$ 보다 작아야 함 -accessible environ.까지 지하수의 이동시간이 최소 1000년을 초과해야 함 -처분이 시작되는 시점에서 50년후 폐기물의 회수(retrievability)가 가능해야 됨 -처분용기 수명은 최소 300년에서 1000년까지는 되어야 함

3. 안전성 기준의 문제점 고찰

일반적으로 정성적으로 정의되는 규제의 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[11]에 의하면 인공방벽에서의 누출량을 규제하는 US NRC 규제관점에서 Am-241은 매우 중요한 것으로 나타났다. 그러므로 US NRC의 규제요건을 만족시키기 위하여 연구의 우선순위는 Am-241의 용해도 및 흡착 연구 이어야만 할 것이다. 그러나 지금까지 많은 고준위폐기물 연구에서 Am-241은 자연방벽에서 흡착이 잘되어서 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 초래한다는 것이다. 결국 유도기준을 인허가 기술기준으로 정해야 하는지에 대한 국제적인 콘센서스가 아직은 이루어지지 않았다고 볼 수 있다.

일반 원자력 시설에 적용되고 있는 ALARA 최적화 개념을 처분장에도 도입을 해야하는지 논쟁이 일고 있다. 이 개념을 처분장에 적용할 경우에 몇 가지 어려운 문제가 발생한다는 것이다. 먼저 처분장 설계의 대안이 한정되어 있고, 더구나 설계에 반영한다 해도 불확실성이 너무 많아

새로운 설계 대안에 대한 혜택(benefit)을 증명하거나 확인할 방법이 극히 제한되어 있다는 것이다. 이에 대해서 IAEA는 ALARA 원리를 처분시설에 적용할 것을 권고하고는 있으나 적용의 어려움을 밝히고 있으며, 최근 미국의 고준위폐기물 처분시설 안전성을 종합평가하여 보고한바 있는 국립과학아카데미의 입장[5]도 ALARA 개념을 처분장설계에 반영할 수 있는 과학적 토대가 아직은 마련되어 있지 않다고 시인하고 있다.

먼 미래의 환경변화를 예측한다는 것은 그 기간이 수만년을 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. 환경 조건이나 미래 세대가 영양을 섭취하는 방식 등이 오늘날과 크게 다를지도 모른다. 이러한 상황에서 위험도 및 선량을 수천년 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 평가 기간을 연장하는 방안을 고려하고 있으나, 그 이후의 불확실성 처리문제로 고민하고 있다.

안전성기준은 분명히 설계자로 하여금 대안분석을 통한 최적화를 방해하는 구체적인 유도기준보다는 융통성을 어느 정도 부여하는 방향으로 정해져야 할 것으로 보인다. 또한 불확실성에 기인한 안전성평가기간은 미래 예측이 어느 정도 가능한 최소한의 기간(수천년 혹은 만년)까지는 위험도를 기준으로, 그리고 그 이후는 지표로의 누출율을 기준으로 정하는 것도 바람직한 대안이 될 것이다. 먼 미래의 생태계의 변화는 예측이 거의 불가능하지만 지질시스템은 지상의 환경변화보다는 상대적으로 안정될 것이기 때문이다.

참고문헌

- [1] ICRP Publication 46, "Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste", ICRP (1985)
- [2] Safety Series No. 99, "Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High Level Radioactive Waste, IAEA (1989)
- [3] 10CFR60. "Disposal of High-Level Radioactive Wastes in Geologic Repositories", Title 10, Code of Federal Regulation, Part 50 (1991)
- [4] 40CFR191, "Environmental Radiation Protection Standards for Management and Disposal of Spent Nuclear Fuel, High-Level and Transuranic Radioactive Wastes", Title 40, Code of Federal Regulation, Part 191 (1993)
- [5] NAS Report, "Technical Bases for Yucca Mountain Standards", National Academy Press" (1995)
- [6] "Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee on the Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal, OECD/NEA(95)4 (1995)
- [7] AECB Regulatory Document R-104, "Regulatory Policy Statement Regulatory Objectives, Requirements and Guidelines for the Disposal of Radioactive Waste - Long Term Aspects" (1987)
- [8] Section 45, Para 1 of Radiation Protection Ordinance, Federal Office for Radiation Protection (1989)
- [9] "Disposal of High Level Radioactive Waste, Consideration of Some Basic Criteria", Radiation Protection and Safety Authorities in Denmark Finland, Iceland, Norway and Sweden(1993)
- [10] Statement by Nuclear Safety Council (1987)
- [11] Oversby, V.M, "Important Radionuclides in High Level Waste Disposal", Nucl. and Chem. Waste Management 7, 149-161 (1987)