

원자력발전소 방사성 폐기물의 경향*

Peter Wilmer

OECD/NEA Nuclear Development Div.

지속 가능한 개발을 위한 정책적 차원에서, 폐기물 발생량을 최소화하는 것은 어느 산업에서도 중요한 목표이다. 원자력 에너지 부문도 사회를 보호해야 하는 원치 않는 물질의 발생으로부터 특별하지 않다.

수많은 산업체와 경제 활동에서 나오는 유독 폐기물은 원자력 에너지 부문의 방사성 폐기물보다 많은 양을 발생시킨다. 원자력 산업계는 폐기물 흐름을 감시, 억제 및 최소화하는 데 특별히 주목해 왔다.

미래 세대에 대한 책임감을 인식하여, 정부와 산업계는 방사성 폐기물의 관리 및 처분에 대한 안전한 방안을 보장하기 위하여 수많은 자원들을 이용해 왔다.

NEA 회원국 정부들은 방사성 폐기물의 안전한 관리 및 처분을 위하

여 포괄적인 법적 규제 체제를 시행해 왔다.

또한 정부들은 방사성 폐기물의 특성화, 처리 및 처분 분야에서의 연구 개발 프로그램을 지원하고 있다.

또한 현대적 통할 및 21세기의 사회적 수요에 적용된 폐기물 처분장의 입지, 인허가 및 운영을 위한 의사 결정 과정의 설계 및 시행에 참여하고 있다.

오염자 부담 원칙에 따라, 원자력 산업계는 그 활동으로부터 발생하는 방사성 폐기물의 관리에 대한 책임을 담당하며 관련 비용들을 부담한다.

환경적·윤리적 측면 뿐만 아니라 경제성은 원전 운영자로 하여금 방사성 폐기물 발생량 및 유독성과 처분 요구량을 저감시키기 위한 방

안과 수단을 개발하도록 이끌어 왔다.

시간에 따른 기술적 진전과 관리 개선은 단위 원자력 발전량당 폐기물 발생량과 처분량의 감축에 크게 기여해 왔다.

다음 내용은 원자력 산업계 폐기물의 상당 부분을 차지하는 원전의 운영 및 정비, 폐로로부터 발생하는 방사성 폐기물에 중점을 둔다.

과거 경험을 검토하고, 주요 경향을 살펴보면, 신형 원자로와 궁극적으로 제4세대 혁신적 원자력 시스템의 적용을 포함한 관리 개선 및 기술 진전을 통한 방사성 폐기물의 추가 감축에 대해 고찰해 본다.

방사성 폐기물 전망

원자력 에너지의 사용으로부터

*〈NEA News〉 2004-No.22, 1



나오는 방사성 폐기물은 적은 양으로서, 전형적으로 원자력산업을 가진 국가에서 비원자력 활동으로부터 나오는 전체 유독 폐기물의 1% 보다 훨씬 적다.

예를 들면, 유럽연합에서 대략 5,000m³의 방사성 폐기물이 매년 발생하는 반면, 유독 산업 폐기물의 양은 약 10,000,000m³에 달한다.

적은 양의 방사성 폐기물은 관리 가능하며, 여유있는 기술로 생활권으로부터 격리시킬 수 있다. 요구되는 처분장이 차지해야 하는 부지는 지리학적으로 매우 작다.

방사성 폐기물의 관리를 위하여 원자력 산업계에서 채택된 방법은 일반적으로 그들의 역류, 안전한 저장 그리고 접근 가능한 환경으로부터 격리된 처분장에서의 처분을 보장하기 위하여 폐기물을 처리하고 조절하는 것이다.

일부 다른 산업 부문에서는 그들의 잔류물을 관리하는 데 있어서 다른 방법을 이용하는데, 예를 들면 인가된 제한치 이하의 농도 수준에서 환경으로의 방출 및 확산에 의존한다.

이러한 조절 및 역류 방법에 따라, 일부 형태의 방사성 폐기물은 몇몇 OECD 국가에서 운영되는 많은 처분장에서 이미 처분되고 있다.

이미 운영중인 처분장들은 양호한 범주의 폐기물용으로 설계된다. 기타 범주의 처분은 개발중인 실용

적·현실적 사업들을 통하여 연구 및 분석된다.

실험실 수준에서의 연구와 경험에 토대하여 전문가들은 모든 형태의 방사성 폐기물의 관리와 처분이 만족스럽게 성취될 수 있다고 믿는다. 그러나 방사성 폐기물 관리와 관련된 과학 기술적 문제를 넘어, 선택된 방안의 사회적 수용을 위하여 규제 체제와 의사 결정 과정이 중요한 요소이다.

일반적으로 기술·안전·경제적 이유로 폐기물량을 최소화하는 것은 우수한 기술적 관행이다. 지질학적 압력에 견딜 수 있는 잘 압축된 폐기물은 처분장 내의 안정성을 주며, 적은 공간을 필요로 한다.

그러나 이러한 논리는 근접된 처분에 따라 폐기물의 건전성이 유지되는 최대치 이상의 더 높은 온도로 야기될 수 있는 열을 발산하는 방사성 물질에는 적용되지 않는다. 이러한 두 가지 측면은 OECD 국가에서 방사성 폐기물 관리 방법의 개발 및 시행에서 고려된다.

방사성 폐기물의 특징

방사성 폐기물은 보통 방사성 물질의 준위와 반감기에 따라 몇 가지 종류로 구분된다. 방사능은 폐기물에 포함된 방사성 핵종에서 나온다. 그들이 방출하는 방사선은 기본적인 특징, 에너지 및 시간에 따라 다

양하다.

더욱이 방사성 핵종은 상이하게 행동하는 다른 분자들, 그리고 여러 가지 형태로 인류 및 환경을 취약하게 하는 다른 분자들에 빈번하게 통합된다. 방사선 위해도는 이러한 취약성의 정도이다.

방사성 폐기물의 단순하고 포괄적인 구분의 정립은 숙제이며, 국제적으로 합의된 방사성 폐기물 구분의 부재는 국가간의 비교나 세계 추이의 평가를 어느 정도 어렵게 만든다.

그러나 대부분의 국가들은 폐기물 관리나 처분 목적으로 사용되는 법적 규제 체제 속에서 잘 정의된 범주를 정립해 왔다. 일반적으로, 채택된 구분은 3가지 주요 형태, 즉 저준위·중준위 및 고준위로 요약될 수 있다.

원자력 에너지 시설의 조사나 오염에 의한 발생에 관계없이 방사성 물질은 어떤 형태의 구조와 같은 비방사성 물질과 항상 결합된다.

관리 및 처분될 폐기물의 양은 방사능이 비방사성 물질로부터 분리되는 정도에 의존한다. 폐기물 관리자는 방사성 뿐만 아니라 그 자비로운 물질을 고려할 필요가 있다.

또한 저장 및 처분을 위하여 준비하는 과정에서 추가 물질이 종종 원래의 방사성 폐기물에 부가된다. 이것은 처분될 양을 증가시키지만 취급 및 안전 방호를 증대시킨다.

원전 운영중 방사성 폐기물

원자력발전소의 운영은 방사성 폐기물을 발생시키는데, 일반적으로 저준위 또는 중준위 그리고 저열 폐기물 범주에 속한다.

폐기물 수송 및 처분 비용과 지속 가능한 개발 정책 목표를 충족시킬 필요성 때문에 원전 운영자들은 진취적으로 이러한 종류의 폐기물량을 감축시켜 왔다.

폐기물의 양은 개선된 관리 기법과 폐기물 취급 및 포장에 대한 선진 기술의 수행을 통하여 현저하게 감소되어 왔다.

미국에서는 원전 운영으로부터 나오는 저준위 폐기물의 처분량이 1980년과 1990년 초 사이에 가동 기수의 증가에도 불구하고 크게 감소되었다. 프랑스에서도 같은 추이가 관측되었다.

폐로 방사성 폐기물

발전소가 수명을 다해 가동 정지 및 폐로, 해체될 때, 노심을 구성하는 구조물과 인접물들은 일반적으로 방사성 폐기물을 구성하게 되며, 대개 저준위 및 중준위 폐기물이다.

폐기물량은 연간 운영중인 원전에서 발생하는 양과 비교할 때 상당히 큰데, 암시적으로 향후 폐로 폐기물은 원자력 발전에서 나오는 총 폐기물량의 80%를 차지하게 되며,

반면 운영중 발생하는 폐기물은 대략 18%를 차지할 것이다.

폐로 폐기물의 질량과 체적은 발전소 수명에 관계없이 널리 일정하게 유지될 것이다. 폐로 폐기물에 포함된 방사성 물질의 양은 발전소 수명에 따라 증가하지만, 일정 비율로 시간에 따라 감소된다.

요즈음 증가 추세인 발전소 수명 연장은 단위 발전량에 대해 발생하는 폐기물의 질량과 체적을 감소시킨다.

발전소 운전이 시작될 때, 폐로 폐기물의 양을 감소시킬 기회는 폐기물 처리 분야의 기술적 타개의 부재시 제한된다. 하지만 효율적인 운영과 관리는 어느 정도까지는 발생하는 오염과 폐기물을 저감시킨다.

장기적으로 개선을 위한 가장 큰 기회는 발전소 설계자에 의존하게 되며, 신규 원전 설계의 잠재적인 공급사들은 이 사실을 잘 인식하고 있다.

EFR 또는 AP1000과 같은 신형 개선 3세대(Generation III⁺) 원전들은 60년의 수명과 폐로 폐기물의 양을 감축시키도록 설계된다. 이것은 혁신적 개념에 토대될 제4세대 원전에 대해서도 적용될 것이다.

고준위 폐기물 및 사용후 핵연료

이러한 종류의 폐기물은 일관형 연료 주기 방안을 선택한 국가의 원

전에서 배출된 사용후연료와 폐쇄형 연료 주기를 선택한 국가의 재처리에서 발생한 고준위 폐기물을 포함한다.

사용후연료와 고준위 폐기물은 원자력 에너지 활동으로부터 발생하는 총방사성 폐기물의 단지 3~4% (폐쇄형 주기에서는 약 2%)를 차지하지만, 산업계, 정부 정책 입안자 및 일반 대중의 주요 초점이다.

이러한 주목의 원인은 고준위 폐기물에 포함된 다량의 방사능과 이 종류의 폐기물에 의해 발생하는 열, 그리고 더욱이 이 폐기물 범주에 포함된 장수명 방사성 핵종의 안전한 관리 및 처분을 보장하기 위해 요구되는 장기적 관리 책임이다.

사용후연료와 관련하여, 원전 운영의 기술적 진보는 단위 발전량당 지속적인 감용으로 이끌었다. 사용후연료의 상당한 감소를 가져올 어떤 중요한 타개책도 나타나지 않았지만, 중요한 소득은 높은 발전소 이용률과 제고된 연료 관리 체계로부터 결과했다.

세계적으로 원전 운영자들의 추이는 질량이나 체적은 크게 변하지 않고, 주어진 연료 집합체로부터 발생된 에너지, 즉 전기를 증가시키는 연료 단위 설계 및 연료 관리 체계로 이동되어 왔다.

이러한 추세의 원인은 수송 및 저장될 폐기물의 양을 감소시키며, 환



경제 영향을 줄일 뿐만 아니라 경제성을 개선하는 것이다.

OECD 국가에서 설비 용량의 80% 이상을 차지하는 경수로(LWR)에 의한 고연소도의 추이에서, 방출된 경수로 연료의 평균 연소도가 1960년대초에서 2000년도까지 약 50% 증가했으며, 현재 대략 45GWd/tHM에 이르고 있다. 그러나 연소도의 증가에 의해서 얻어진 사용후연료 감용은 처분장으로 향하는 폐기물의 높은 특정 방사능을 야기한다.

사용후 연료의 구성 및 방사능은 노심에서의 연료 관리에 의존한다. 연료 조사가 증가함에 따라, 장기적으로 지층 처분 설계자의 주요 관심 사항인 이들 특정 방사성 핵종, 즉 장수명 악티늄 원소의 생성이 증가한다.

이와 관련하여 단위 발전량당 생성된 악티늄 원소에 대해 개선된 연료 이용의 이득이 있지만, 효과는 약 15%로 제한된다.

핵분열 물질인 우라늄과 플루토늄을 회수하기 위한 핵연료의 재처리하는 처분될 열발생 폐기물의 양을 크게 감소시키지만, 중준위 폐기물량의 증가를 가져온다.

핵분열 물질의 재순환은 또한 새로운 우라늄 수요를 감소시키며 따라서 우라늄 개발의 폐기물을 감소시킨다.

예를 들면, 현행 또는 신형 경수

로에서 MOX 연료의 우라늄 및 플루토늄의 재활용은 약 10% 우라늄 광의 수요를 저감시킨다.

재처리 후 재순환은 또한 고준위 폐기물 처분장으로 보내질 플루토늄 및 넵투늄의 양을 크게 감소시킨다.

차세대 원자로와 연료 주기

혁신적 원자력 에너지 체계는 특히 핵분열 물질의 효율 제고와 포괄적인 재순환을 통하여 폐기물의 체적과 방사능을 줄이도록 설계된다.

예를 들면, 고온 원자로는 50% 이상의 순열효율을 목표로 하며, 단위 발전량당 처분될 사용후연료의 양을 적어도 1/4로 줄이면서 100GWd/tHM 이상의 평균 연소도를 달성할 수 있다.

나트륨 냉각 고속로는 궁극적으로 거의 100% 악티늄 핵종의 회수 및 재활용을 결과하는 폐쇄형 연료 주기의 추가적인 이점과 함께 효율성과 연소도에서 유사한 수준을 목표로 하고 있다.

장기적으로 악티늄 원소의 '분할 및 변형(P&T)'을 포함하는 폐쇄 연료 주기는 100년 이상의 기간에 걸쳐 1/100의 방사선 위해도 저감을 달성할 수 있는 잠재성을 갖는다.

그러나 그러한 체제의 설계는 그들의 시행을 고려할 수 있기 전에 개념을 정당화하고 그들의 타당성

을 실증하기 위한 대규모 연구 개발 프로그램과 장기간의 연구 시험을 여전히 필요로 한다.

P&T에 대한 확고한 경제적 평가가 이 단계에서 수행되기 어렵지만, 다음 세대에 대한 책임 부담을 줄일 수 있는 이점이 궁극적인 비용/이득 분석에 반영되어야 할 것이다.

결론

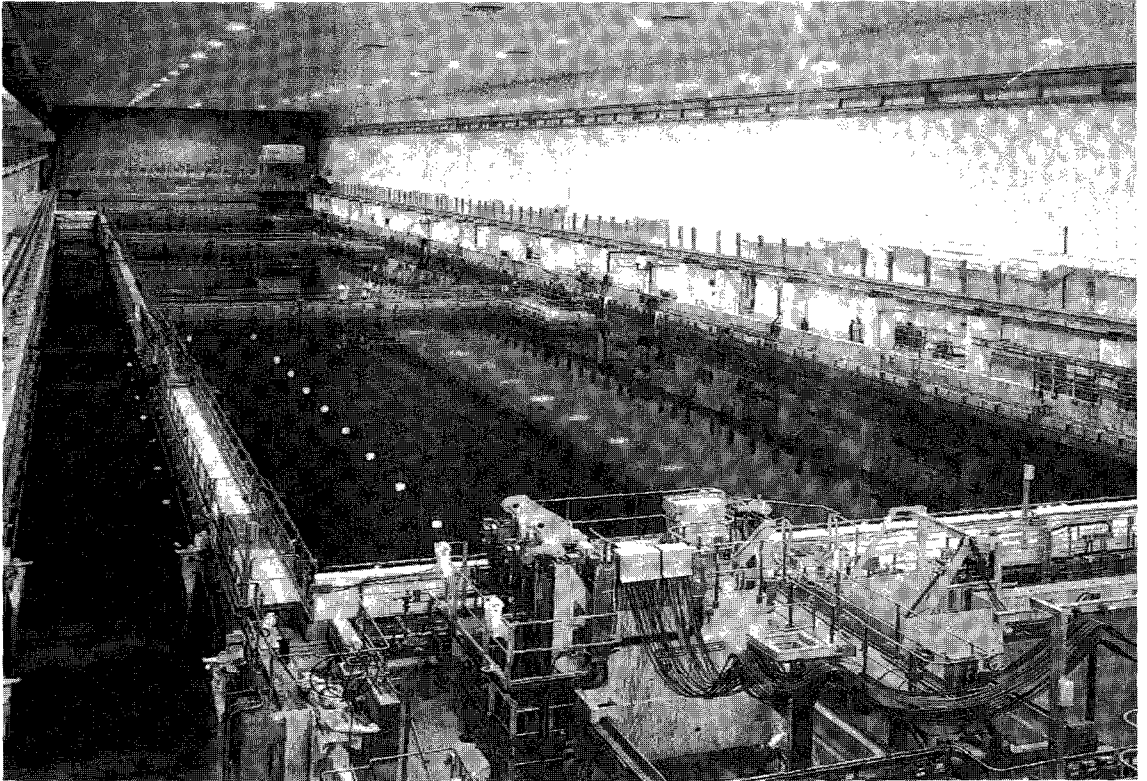
전기 생산으로부터 방사성 폐기물이 축적되는 비율은 기술 진보 및 우수한 설비 관리를 통하여 점진적으로 감축되어 왔다.

과거에 성취된 폐기물 감용은 특히 발전소 관리 개선과 선진 처리/포장 방법의 도입으로 운영중 원전의 폐기물에 대해서 괄목할만 하다.

현재 건설중인 신형 원자로 설계는 이러한 추세를 지속하고 있다. 높은 효율과 연소도를 달성하는 경수로로는 단위 발전량당 폐기물의 양을 더욱 감축하는 데 기여할 것이다.

개선된 노심 설계와 연료 관리 전략은 또한 방출된 조사 연료의 악티늄 원소 차원에서 중요한 이득으로 이끌 것이다.

더욱이 일부 OECD 국가에서 시행되는 재처리 및 재순환 방법은 새로운 우라늄의 수요뿐만 아니라 처분장으로 보내지는 고준위 폐기물의 방사선 위해도를 줄이는 데 기여



사용후연료 저장조

한다.

장기적으로, 고려중이거나 개발 중인 혁신적인 원자로 및 연료 주기는 폐기물의 특정 성분, 특히 장수명 악티늄 원소를 크게 감소시킬 수 있다.

그러나 혁신은 시간을 필요로 하며, 그러한 원자력 에너지 시스템은 30~40년 내에 개발될 것으로 예상되지 않는다. 더욱이 '분할 및 변형'을 포함하는 연료 주기는 폐기물 방사성 위해도 감축 차원에서 중요한 이득을 가져오기 위해서는 100년 이상의 운영을 필요로 할 것이다.

예정된 과정에 있어서 이들 혁신

적 운영의 경제적·환경적 및 사회적 차원을 충분히 평가하기 위하여 포괄적인 비용/이득 분석이 요구될 것이다.

잠재적인 향후 개선에 관계없이 기존 및 신형 원자력 에너지 시스템의 설계 및 운영은 지속 가능한 개발 원칙에 따라 방사성 폐기물의 관리를 위해 설정된다.

신형 설계는 현세대의 원전에서 이미 달성된 방사성 폐기물의 양 및 위해도의 최소화에 대한 추이를 재고시킨다.

방사성 폐기물은 경제·사회적 개발을 지원하는 산업계의 활동으로부터 야기되는 폐기물과 기타 부

담 차원에서 균형있게 고려되어야 한다.

전기 발전으로부터 발생하는 방사성 폐기물의 양과 위해도는 그들이 극복할 수 없는 기술적 또는 경제적 도전을 만들어내는 그러한 것이 아니다.

전문가들이 만족하다고 보는 기술적 해결책의 시행에 대한 사회적 이해와 수용은 여전히 도전으로 남아있다.

일부 회원국에서 모든 형태의 폐기물, 특히 고준위 폐기물 처분장의 인허가 및 운영은 이러한 점에서 주요한 진전이 될 것이다. ☞