

2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

인도 규정상의 핵종재고량 평가 방법에 대한 척도인자 중심의 규제요건에 대한 연구

Study on the Establishment of the Regulatory Criteria for the Radionuclide Inventory Declaration Methods Based on Scaling Factor Method in Acceptance Criteria

황기하, 이건재
한국과학기술원
대전광역시 유성구 구성동 373-1

정찬우
원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19번지

요 약

국내 원전에서 발생되고 있는 중·저준위 방사성폐기물 드럼내의 규명 대상 핵종에 대한 핵종 재고량 평가 방법을 설정하는데 있어서 규제 측면에서 필요한 주요 요건에 대하여 척도인자방법을 중심으로 연구를 수행하였다. 척도인자의 구체적인 적용은 핵종별로 차이를 보임으로 우선적으로 정성적인 방법을 통하여 규명 대상 핵종을 선정하였다. 선정된 규명 대상 핵종별로 정규화된 평가 방법을 조사 및 분석함으로써, 핵종별로 예상되는 평가 방법을 도출하였다. 특히 핵종별 방사능 평가의 주요한 방법으로 사용되는 척도인자 방법론에 대한 현황과 실제적으로 적용하고자 할 때의 문제점 분석을 통해 그 해결 방안을 살펴보았다. 이를 통해 척도인자 방법론을 중심으로 한 핵종규명방법을 설정하는데 있어서 국내 규제 요건에서 필요로 하는 중요한 사항을 이끌어내었다.

Abstract

The preliminary regulatory criteria for the radionuclide declaration methods based on scaling factor has been studied for each target radionuclide in LILW radwaste drum in Korean NPPs. Assessment target nuclides were selected through the qualitative method. Routine declaration methods in each radionuclide

were derived through the analysis of the state of arts. From the review of the issues and problems in the application of scaling factor method, preliminary criteria for the radionuclide declaration methods based on the scaling factor methods were derived and established.

1. 서 론

“원자력법시행규칙 (2001. 7. 25 과학기술부령 제29호에 의해 개정)”의 “제88조 방사성폐기물의 인도 기준”에는 중·저준위 방사성폐기물 처분장에 처분대상이 되는 방사성 폐기물(이하 “폐기물”이라 한다)은 종류 및 방사능 농도에 따라 이를 분류하도록 요구하고 있다.¹⁾ 따라서 원자력법시행규칙 제88조 제2항의 규정에 따라 “중·저준위 방사성폐기물 인도규정(과학기술처 고시 2001-32호)”가 고시되어 있다. 여기에는 핵종별 농도 제한의 필요성과 폐기물의 종류 및 방사능 농도에 따른 분류, 그리고 폐기물내 핵종별 농도와 총방사능량 정보를 규명해야 함을 언급하고 있다. 그러나 규명 대상 핵종, 핵종 규명 방법 및 이에 대한 평가 기준에 대한 규제 기준 및 요건이 언급되어 있지 않다. 따라서 국내의 관련 규제 요건은 규제 대상이 되는 폐기물내 규명 대상 핵종의 선정과 평가 방법, 그리고 핵종별 농도제한치에 대한 설정이 포함되어야 한다. 특히, 규명 대상 핵종의 선정과 처분 제한치 설정에는 처분 대상 폐기물내의 핵종 재고량의 반영과 세부적인 평가 시나리오 설정 작업을 병행한 종합적인 평가를 필요로 한다. 본 연구에서는 이러한 종합적인 평가 이전에 핵종 재고량 평가 관련 규제 요건의 예비 설정 차원에서 정성적인 방법을 통하여 규명 대상 핵종을 선정하고, 각각의 규명대상 핵종별로 정규화된 평가 방법에 대한 예비안을 기존 사례를 통하여 도출하였다. 특히 핵종별 방사능 평가 방법으로 척도인자 방법론의 일반적인 문제점을 분석하고, 국외의 척도인자 중심의 적용 사례 및 기본적인 규제 요건의 분석을 통해 이러한 문제점에 대한 해결 방안을 모색함으로써 척도인자 방법론을 국내에 적용하는데 있어서 규제 측면에서 필요로 하는 주요한 규제 기준을 마련하였다.

2. 규명 대상 핵종 선정

규명 대상 핵종 선정은 1)국외의 규제 기준 및 안전성 평가 측면에서 규명 대상으로 선정된 핵종, 2) 장기 안전성 측면에서 중요한 핵종을 기준으로 선정하였다.²⁾ 이어서 초우라늄핵종의 경우 핵종의 실제 방사능 존재비를 근거로 한 비교 분석을 통하여 최종 대상 핵종을 선정하였다.

2.1 선정 기준 및 대상 핵종

가. 국외의 규제 기준 및 안전성 평가 측면에서 규명 대상으로 선정된 핵종

처분장을 운영중인 국가를 중심³⁾⁴⁾⁵⁾으로 하여 규제 기준 및 안전성 평가 측면에서 규명 대상이 되는 핵종에 대하여 6개국(미국(기준안), 프랑스, 일본, 스페인, 스웨덴, 벨기에)과 IAEA에서 언급한 핵종에 대해 조사하여 이를 비교 및 분석하였다. 여기서 IAEA를 제외한 6개 국가의 경우, 특기할 만한 사항은 중요 핵종으로 선정된 내역에 공통적인 핵종이 존재한다는 점으로 국외의 사례를 바탕으로 하여 주요 공통 핵종을 취하여 국내에 적용하는 것이 가능함을 보여주고 있다. 공통 핵종을 취함에 있어 그 가중치를 정확히 반영할 수는 없지만 일반적으로 4개국 이상에서 공통되는 핵종 17개와 기준안인 미국의 10CFR61에 언급된 Cm-242를 포함하여 18개의 핵종을 선정하였다.(그림 1)

나. 장기 안전성 반영 핵종⁴⁾⁶⁾ (표 2)

장기안전성 측면에서는 장수명, 큰 이동성, 알파방출 특성 등의 여러 요인이 복합적으로 작용하는 핵종의 역할이 커지는 것이 일반적이다.

- 장수명 및 이동성이 큰 핵종

OECD/NEA에서는 C-14, Tc-99, I-129의 경우 장수명이면서 이동성이 큰 핵종으로 처분시 장기 안전성 측면에서 중요한 핵종으로 논의되고 있다. 이러한 핵종들은 지하수에 의한 이동성이 크기 때문에 유도되는 농도제한치가 상대적으로 적은 값을 지니는 특징이 있다. 또한 U.S. NRC에서는 H-3, C-14, Tc-99, I-129를 장수명이면서 이동성이 크기 때문에 중요한 핵종으로 고려하고 있다.

- 알파방출 핵종

U.S. NRC에서는 알파방출 핵종 중 Np-237, Pu-239가 처분시 장기 안전성 측면뿐만 아니라 핵종 이동 관점에서 중요한 것으로 논의되고 있다. 또한 U.S. NRC에서는 Th-232, U-238이 높은 선량환산인자를 지닌 측면과 딸핵종의 성장 측면에서 중요한 핵종으로 논의되고 있다.

2.2 규명 대상 핵종 선정

규명 대상 핵종의 선정은 위에서 논의된 규제 및 안전성 측면에서 중요한 규명 대상 핵종에 대한 국외 사례와 장기 안전성 측면에서 중요한 핵종을 토대로 하였다

(그림 2). 이중에서 초우라늄 핵종의 경우 개별 핵종으로 평가하거나 Total alpha로 평가할 수도 있다. 일반적으로 개별 핵종으로 평가하기 위해서는 핵종간 구분 등의 어려움이 뒤따르게 되고, 중·저준위 폐기물내에 존재량이 매우 적으므로, 초우라늄 핵종을 선정하는데 있어서 실질적인 핵종 재고량을 반영할 필요가 있다. 이를 위해 초우라늄 핵종의 연간 발생하는 핵종별 재고량 비율(표 2)⁷⁾을 분석한 결과 초우라늄 핵종의 경우 규명 대상 핵종이 7개로 압축되었다. 최종적으로 총 18개 핵종이 평가 대상 핵종으로 선정되었다(그림 3). 결과적으로 보았을 때 장기 안전성 측면의 핵종을 별도로 고려하지 않고 국외의 사례만을 통하여 평가 대상 핵종을 선정한 결과와 같음을 알 수 있다. 이러한 이유는 초우라늄 핵종 중 일부 핵종의 경우 장기 안전성 측면에서는 중요하나 핵종 재고량 자체가 적어서 규명 대상 핵종에서 배제되었기 때문이다.

3. 핵종별 재고량 평가 방법 및 평가 방법 선정 절차

규명 대상 핵종은 핵종별로 정규화된 재고량 평가 방법을 설정하게 된다. 핵종 재고량 평가 방법으로는 크게 직접적인 방법과 간접적인 방법이 활용되고 있으며, 핵종별 평가 방법은 상호 보완적으로 사용되고 있다.

3.1 핵종 재고량 평가 방법과 핵종별 평가 방법 설정 절차²⁾

원전 발생 중·저준위 폐기물내의 핵종을 평가하기 위해서는 별도의 세부적인 핵종 재고량 평가 방법의 설정이 필요하다. 일반적으로 척도인자 방법(Scaling Factor Method)을 중심으로 하여 직접 측정 방법을 병행하는 방식을 사용하게 된다. 우선, 분석 대상이 되는 폐기물의 대표 시료를 채취한 후 방사화학 분석(Radiochemical Analytical Method)을 수행하여 평가 대상이 되는 핵종간의 상관관계를 살펴보게 된다. 이를 근거로 하여 계측이 용이한 핵종(Key nuclide)과 계측이 어려운 핵종(DTM nuclide)과의 상관성을 분석하고, 상관성이 만족할 만한 수준일 경우 척도인자 방법과 비파괴 직접 측정 방법(Nondestructive Assay Method)을 병행하여 직접 측정을 통한 Key nuclide의 핵종 농도를 계측한 후 척도인자를 적용하여 DTM nuclide의 방사능을 예측하게 된다. 방사화학 분석 결과를 이용하여 상관관계 분석을 수행한 결과가 설정된 기준을 만족하지 못할 경우 직접적인 척도인자 적용이 어려우며, 이때는 다른 간접적인 방법을 사용하게 된다. 우선적으로는 이론적인 접근 방법을 사용하여 이론적으로 계산하는 방법(연소도 방법 (Burn-up Method), 방사화 방법 (Activation Method), 붕괴 방법 (Decay Method))을 적용하게 된다. 또한 위의 방법들을 적용하기 어렵고, 분석 대상 폐기물내의 평가 대상 핵종의 농도 변화가 제한된 범위 내에 있을 경우에는 평균 방사능 농도를 활용(평균 방사능 농도 방법(Mean Activity Concentration Method))하거나 대표 시료의 스펙트럼을 분석

하여 대표값으로 쓰는 방법(대표 스펙트럼 방법(Representative Spectrum Method))을 사용하게 된다. 일반적으로 핵종별 재고량 평가 방안을 설정하는 과정을 그림 4에 나타내었다.

3.2 규명 대상 핵종별 평가 방법 설정

앞서 선정된 규명 대상 핵종과 핵종 평가 방법을 토대로 핵종별 평가 방법을 설정하였다. 이는 국가별 원자로 형태별로 규제 내지 평가 대상 핵종에 대한 평가 방법의 분석을 통하여 이끌어 낸 것이다. 국가마다 일부 차이가 있지만 일반적으로 척도인자 방법을 주요한 핵종 평가 방법으로 사용하고 있다. 평가 대상 핵종으로 선정된 핵종에 관하여 원자로 형태(PWR, PHWR)별 핵종에 관한 평가 방법 예상안을 이끌어 내었다(그림 5). 대부분의 경우 척도인자 방법의 적용이 가능하며 일부 핵종의 경우에는 다른 방법을 활용하고 있다. 척도인자 방법이 적용되고 있는 핵종의 경우에도 다른 방법을 병행하거나 Key 핵종을 다르게 선택할 수도 있음을 알 수 있다.

4. 척도인자 적용 방안

4.1 척도인자 적용상의 문제점 및 규제 요건 설정의 필요성

척도인자를 적용하기 위해서는 선택된 시료의 대표성과 규명 대상이 되는 핵종의 계측 여부 및 계측된 시료 개수 그리고 계측 결과의 정확성이 중요하게 작용한다. 이러한 대표시료의 선택과 분석은 비용과 이득 측면에 대한 고려뿐만 아니라 작업자의 피폭에 의해서도 제한되게 된다. 이는 결국 통계적인 방식을 통해 척도인자를 적용하는데 있어 어려움과 불확실성으로 작용하게 된다. 척도인자의 예측의 정확성이 중요한 이유는 척도인자의 정확도에 따라 관련된 핵종 재고량의 평가에 직접적인 영향을 미치기 때문이다. 특히 척도인자 값이 크게 설정될 경우 핵종 재고량의 과대평가와 폐기물 분류의 오류 그리고 경우에 따라서 폐기물의 추가적인 안정화 작업과 같은 불필요한 추가적인 처리를 유발하게 된다. 결국 척도인자를 적용함에 있어서 예측의 정확성이 가장 중요한 관건이 되므로 규제기관에 평가 결과의 정확성에 대한 기준을 설정하여 제시하는 것이 필요하다.

4.2 척도인자 적용성 분석

척도인자를 적용하는데 있어서 주요하게 고려해야 하는 사항들을 분석하기 위해 실제 방사화학 분석 자료를 근거로 하여 적용하고자 할 때의 고려사항들을 분석할 필요가 있다. 즉 해외의 분석 사례 및 데이터베이스⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾을 이용하여 척도인자의 활용 측면과 적용하고자 할 때의 고려 사항을 분석하여 보았으며, 규제 측면의 고려 사

향을 살펴보기 위해 U.S. NRC의 척도인자 적용하고자 할 때의 평가 기준에 대하여 분석하였다.

가. 시료 분석 개수의 의존성과 발전소별 적용 필요성

U.S. NRC에서는 척도인자를 활용한 평가 결과가 10배 이내의 정확성을 만족하도록 요구하고 있다. 이를 기준으로 살펴보도록 하겠다. 표 3에 나타난 규명 대상 핵종 18개에 대해 예상되는 핵종 재고량 평가 방법을 기술하였으며 핵종별 분석 자료가 있는 경우 이를 분석하였다. 여기서 U.S. NRC에서 요구한 바와 같이 10배 이내의 정확성 요건을 적용할 경우 L.M.D(Log Mean Dispersion) 값이 10 이하의 값을 보여야 한다. 표 3에서 살펴보았을 경우 기본적으로 척도인자 값의 신뢰도는 분석된 샘플 개수에 의존적임을 알 수 있다. 일반적으로 샘플링 개수가 증가할수록 L.M.D값이 작아지게 된다. 또한 핵분열 생성핵종과 초우라늄 핵종의 경우 전체 발전소에 대하여 동일한 척도인자 값을 적용할 경우 잘 맞지 않음을 알 수 있다. 결국 이는 1) 일정 수준의 샘플링 개수가 필요하다는 점, 2) 핵종에 따라서는 발전소별로 개별 적용되어야 한다는 점을 말해주고 있다.

나. 폐기물별 척도인자 적용성 평가

개별 발전소별로 구분하여 척도인자를 적용한 경우라 하더라도 전체 폐기물을 단일 폐기물로 간주하는 경우보다 폐기물 종류별로 구분하여 적용하는 것이 일반적으로 정확성이 높아지게 된다(표 5). 일반적으로 방사화 부식 생성 핵종의 경우 발전소별 구분이 정확도에 커다란 영향을 보이지 않는데 반하여 초우라늄 핵종과 핵분열 생성핵종 특히 핵분열 생성핵종의 경우 폐기물별로 구분하여 척도인자를 적용하는 것이 정확성을 높이게 된다. 단 분석 데이터 개수가 충분하지 않을 경우에는 개별 발전소내에서 폐기물별로 구분하여 척도인자를 적용하고자 할 경우 시료 분석 자료의 부족으로 통계 분석 자체가 어렵게 된다. 결론적으로 충분한 시료 분석 데이터를 확보하여 개별 발전소내에서도 폐기물별로 구분하여 핵분열생성핵종과 초우라늄 핵종에 대한 척도인자를 구하여 적용하는 것이 일정 수준의 정확성을 확보하는데 필요하게 된다.

다. 시료의 대표성 향상과 진보된 계측 기술의 적용의 필요성

EPRI NP-5077(1987)과 EPRI NP-5677(1989)의 데이터 비교를 통하여 시료의 대표성 향상이 미치는 영향과 적용된 계측 기술 및 기기가 정확도 향상에 미치는 영향을 살펴보았다(표 6). 척도인자의 예측의 정확성에 미치는 영향은 크게 두 가지로 볼 수 있다. 첫째는 대표 시료의 선택에 있다. NP-5077에서는 잡고체의 대표 시료를 취하기 위해 floor smear을 활용하는 대체시료(Surrogate Sample)를 사용한 것

에 비하여 NP-5677에서는 실제 잡고체 폐기물내에서 대표 시료를 취해 시료의 대표성을 높임으로써 정확성을 높였다. 두 번째는 적용된 계측 기술의 차이에 있다. NP-5077에서는 Photon counting을 활용한 반면에 NP-5677에서 질량 분석기를 활용함으로써 계측 결과의 정확성을 높였다. 특히 폐기물의 농도가 계측 장비의 계측 하한치 수준에 이를 정도로 낮은 경우에 계측 결과의 정확성에 미치는 영향이 매우 커지게 된다. 이때는 계측기의 계측 능력이 정확한 척도인자의 도출을 위해 필수불가결한 요인이 된다. 두 경우 모두 NP-5677에서의 결과가 시료 분석 데이터 개수는 적음에도 불구하고 보다 좋은 결과를 보임을 알 수 있다. 결국 1) 가능한 평가 대상이 되는 실제폐기물을 시료로 선택함으로써 시료의 대표성을 향상시켜야 한다는 점, 2) 핵종 농도가 낮은 폐기물의 경우 계측 능력이 높은 계측 장비와 기술의 활용이 필요하다는 점을 알 수 있다.

라. U.S NRC의 척도인자 적용 기준

10 CFR 61.55에 언급된 척도인자 적용 가능성에 근거하여 규제 측면에서 척도인자 적용과 관련하여 다음과 같은 기준을 정하고 있다.¹¹⁾¹²⁾

- 평가 방법의 예측의 정확도 : 평가 방법의 정확도는 10배 이내로 유지할 것.
- 발전소별 (폐기물별) 척도인자 적용 : 척도인자 구축 및 적용은 발전소별로 행할 것
- 대표 시료의 분석 데이터 구축 : 분석을 위해 필요로 하는 대표 시료에 대한 합리적인 선정, 샘플링 그리고 분석을 수행할 것
- 품질관리 프로그램 및 이행 프로그램 마련 : 척도인자의 구축을 위한 합리적인 노력과 주기적인 분석을 통한 보정 및 수정을 포함하는 프로그램의 마련할 것

4.3 척도인자 중심의 핵종 재고량 평가와 관련된 주요 규제 요건

척도인자 중심의 핵종 재고량 평가와 관련해서 규제 기준으로 필요한 것은 정성적 내지 정량적 측면에서 척도인자의 적용시 핵심 기준을 설정하는 것과 이러한 기준에 대한 성실한 이행을 살펴볼 수 있는 프로그램의 설정과 이행을 요구하는 것이다. 이를 각각 구분하여 각 필요항목을 나열하면 다음과 같다.

가. 척도인자 적용 기준

- 합리적인 수준에서 대표 시료의 샘플링과 분석 데이터의 구축을 통하여 척도인자 사용의 근거를 마련하여야 한다.
- 평가 방법의 예측의 정확도는 실제 폐기물내 방사능의 10배 이내로 유지되어야 한다.
- 핵종간 척도인자는 발전소별 폐기물 종류별로 설정하여야 한다.

- 모든 규명 대상 핵종에 대하여 주기적인 직접 측정을 통해 척도인자에 대한 정기적인 보정 및 검증을 수행하여야 하며, 1 주기내에 최소 1회 이상을 수행하여야 한다.
- 다음과 같이 척도인자에 커다란 변화를 유발하는 경우에는 주기 분석 이외의 경우에도 이를 반영하여야 한다.
 - 초기에 척도인자를 도출할 때에 전제된 기본 요건에 커다란 영향을 미치는 운영환경의 변경으로 척도인자 값의 변경이 불가피하다고 판단될 경우
 - 주요 핵종의 농도가 10배 이상 변할수 있는 운영환경의 변경이 있을 경우

나. 품질 보증 및 이행 프로그램

- 위탁자등의 일련의 핵종 규명 관련 프로그램은 개별 발전소별로 이루어져야 한다.
- 척도인자 적용 기준 및 관련 규제 기준을 충족하며 이와 관련된 품질을 지속적으로 유지함을 살펴볼 수 있는 품질관리 프로그램(Quality Control Program)과 이를 성실히 수행하고 있음을 살펴볼 수 있는 이행 프로그램(Implementation Program)을 마련해야 한다.
- 각각의 프로그램에는 각각의 방법에 대해 다음과 같은 요건을 충족하기 위한 합리적인 노력이 포함되어 있어야 한다.

가. 직접적인 방법

- 평가 방법의 정확성에 대한 평가와 이에 대한 검증 방법이 포함되어야 한다.
- 오차 발생을 최소화하기 위한 노력과 주요 기기에 대한 보정 방법이 포함되어야 한다.

나. 간접 측정 방법

- 대표 시료 분석 자료의 구축을 통해 대표성 근거 자료를 구축해야 한다.
- 정확성에 대한 정량화된 평가가 포함되어야 한다.
- 적용된 방법이 실제 적용하는데 있어서 타당한지 여부를 평가하는 과정이 포함되어야 한다.
- 적용된 방법의 신뢰도 유지 및 향상을 위한 합리적 노력이 포함되어 있어야 한다.

4.4. 규제 요건 이행 관련 논의 사항

규제 측면에서 핵종 재고량 평가 방법을 합리적으로 설정하고 처분업자가 처분 대상 폐기물을 원활히 평가하기 위해서는 경제성, 안전성, 기술성의 고려가 이루어져야 한다.²⁾ 여기서 경제성이라 함은 평가 방법의 설정 및 수행과 관련된 전반적인

비용에 대한 고려가 필요함을 말한다. 또한, 안전성이라 함은 평가 방법의 수립 및 평가 과정에서 작업자, 대중, 미래세대에 미치는 방사선적 영향을 고려해야 하며, 특히 중요한 것은 작업자의 안전성에 대한 고려가 최우선시 된다. 또한 기술성이라 함은 평가 기술이 지니는 신뢰성과 정확성을 고려하여 구현 가능한 기술 중 최적의 기술을 활용해야 함을 나타낸다. 결국 규제 측면에서 핵종 재고량 평가 방법을 설정한다는 것은 경제성, 안전성, 기술성에 대한 합리적인 고려가 포함되어야 하며, 이는 사업자와의 지속적인 합의 과정과 객관적인 근거 및 자료 평가 과정을 요구하게 된다.

이러한 과정을 통하여 처분장에 처분하게 되는 폐기물에 대한 정기적이고 지속적인 핵종방사능 평가가 가능하게 된다.

결국 규제기관에서 합리적이면서 현실적인 측면에 바탕을 둔 주요한 핵심 규제 요건을 제시하고 사업자가 이를 합리적인 수준에서 충족하는 것이 필요하다. 이때 규제기관의 규제요건은 합리적이면서 현실에 바탕을 두어야 하며, 사업자는 규제 요건에 대한 성실한 준수 및 이행을 규제 기관에 보여주어야 한다. 또한 이견이 있는 부분의 경우 해외의 사례와 국내 현황을 고려하여 합리적인 합의점을 찾는 노력도 필요하다. 이를 통해서만이 규제요건의 성실한 이행과 충족이 가능할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 규제 측면에서 국내 원전 발생 중·저준위 방사성 폐기물 드럼의 핵종 재고량 평가 방안을 설정하는데 있어서 필요로 하는 규제 요건을 설정하는 연구를 수행하였다. 우선적으로 해외사례를 중심으로 한 정성적인 분석을 통하여 규명 대상 핵종을 선정하였고, 규명 대상핵종(별) 핵종 재고량 평가 방법의 예상안을 이끌어내었다. 또한 핵종 규명 방법 중 핵심이 되는 척도인자 방법론과 관련하여 실제 분석 사례와 규제 사례의 분석을 통해 적용상의 문제점과 척도인자 적용시 주요한 규제 요건을 분석하였다. 이를 토대로 하여 척도인자 중심의 핵종 재고량 평가와 관련된 주요 규제 요건에 대한 정성적 정량적 기준 및 요건과 규제 요건 이행시 필요로하는 논의 사항을 분석하였다. 이러한 논의는 규제 기관이 제시해야할 기본 요건에 대한 제시와 사업자의 성실한 이행에 기반을 두어야 하며, 최종적으로 규제 기관과 사업자 특히 처분업자와의 합리적인 논의와 노력이 뒷받침이 되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 원자력안전기술원의 방사성폐기물 규제기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

-
- 1) 과학기술부, most.go.kr
 - 2) 춘계 한국원자력학회 “중·저준위 방사성 폐기물 드럼의 평가 대상 핵종별 평가 방법 설정에 대한 기초 연구” (2003.05)
 - 3) ISTec GmbH & GNS mbH, "International workshop on "Determination and declaration of nuclide specific activity inventories in radioactive wastes" (2001)
 - 4) RADWAP 2002, "4th International Seminar on radioactive waste products" (2002)
 - 5) KINS/HR-471, "천층처분시설의 처분제한치 설정을 위한 성능평가 방법론 개발“(2002)
 - 6) OECD/NEA, "Shallow land disposal of radioactive waste-Reference levels for the acceptance of long-lived radionuclides", 1986
 - 7) EPRI NP-1494 "Activity levels of Transuranic Nuclide in Low-Level Solid Wastes From U.S. Power Reactors", (1980)
 - 8) EPRI NP-4037 "Radionuclide Correlations in Low-Level Radwaste", (1985)
 - 9) EPRI NP-5077 "Updated Scaling Factors in Low-Level Radwaste" (1987)
 - 10) EPRI NP-5677 "Below Regulatory Concern Owners Group: radionuclide characterization of potential BRC waste types from nuclear power stations" (1989)
 - 11) IE information Notice No.86-20, " Low-Level Radioactive Waste Scaling Factors, 10 CFR part 61" (1986)
 - 12) HPPOS-081 PDR-9111210220, " Low-Level Radioactive Waste Scaling Factors, 10 CFR part 61" (1992)

표 1 장기 안전성 측면의 고려 대상 핵종

장기 안전성 측면의 중요 핵종 (8개)
H-3, C-14, Tc-99, I-129, Th-232, Np-237, U-238, Pu-239

표 2 . 초우라늄 핵종 방사능의 생성 비율

핵종	반감기	% (A안)	Pu-241, Cm-242 제외(%) (B안)
Pu-236	2.8 y	0.4	6.2
Pu-238	88 y	2.9	47
Pu-239	2.4E4 y	0.3	4.2
Pu-240	6.5E3 y	0.4	6.2
Pu-241	13.2 y	81.4	-
Pu-242	3.8E5 y	0.001	0.02
Am-241	432 y	0.13	2.1
Am-242	152 y	0.003	0.05
Am-242m	16 h	0.003	0.05
Am-243	7.4E3 y	0.01	0.2
Cm-242	162.8 d	12.7	-
Cm-243	28.3 y	0.003	0.04
Cm-244	18.1 y	2.1	34
(A안)에서 1% 이상인 경우 (B안)에서 1% 이상이면서 반감기가 5년 이상인 경우 [(A안) ∪ (B안)] Pu-238, 239, 240, 241, Am-241, Cm-242, 244			

표 3 척도인자의 적용성 분석 (I) : 샘플링 개수와 발전소별 적용성 여부

핵종	상관 핵종	EPRI-4037		EPRI-5077		EPRI-5077	
		ALL PWR(423)		ALL PWR(448)		Individual Plant 49	
		LMA	LMD	LMA	LMD	LMA	LMD
Co60		Gamma Spectroscopy Measurement Method					
Cs137		Gamma Spectroscopy Measurement Method					
H-3		Mean Activity Concentration Method					
C14	C14/Co60	1.00E-02	18	1.20E-02	18	1.60E-02	8
	C14/Cs137					3.75E-02	9
	Fe55/Co60	-	-	8.90E-01	6	3.97E+00	2
Ni59	Ni59/Co60	Scaling Factor					
	Ni59/Ni63	Burnup Calculation Method					
Ni63	Ni63/Co60	3.00E-01	6	3.70E-01	4	4.18E-01	3
Sr90	Sr90/Co60					2.70E-03	7
	Sr90/Cs137	5.00E-03	23	4.80E-03	15	6.31E-03	7
Nb94	Nb94/Co60	Scaling Factor					
Tc99	Tc99/Co60					2.30E-04	12
	Tc99/Cs137	8.00E-04	37	7.80E-04	50	4.98E-04	35
I129	I129/Co60					1.89E-05	4
	I129/Cs137	2.00E-04	100	3.10E-04	104	2.72E-04	7
Cs135	Cs135/Cs137	Scaling Factor					
Pu239 (+Pu240)	Pu239/Ce144	3.03E-03	10	6.00E-03	7	9.20E-03	9
	Pu239/Co60	1.00E-04	27	9.00E-05	21	1.60E-04	11
	Pu239/Cs137	4.00E-04	50	2.00E-04	36	3.60E-04	25
Pu238	Pu238/Pu239	1.20E+00	3	9.80E-01	4	8.30E-01	7
Pu241	Pu241/Pu239	1.30E+02	3	1.10E+02	3	9.89E+01	2
Am241	Am241/Pu239	6.00E+00	5	4.30E-01	4	4.02E-01	9
Cm242	Cm242/Pu239	1.80E+00	7	8.10E-01	7	4.30E-01	8
Cm244	Cm244/Pu239	5.00E-01	6	3.80E-01	7	4.50E-01	27

LMA : Log Mean Average

LMD: Log Mean Dispersion

표 4 척도인자의 적용성 분석 (II) : 척도인자의 폐기물별 적용성

Individual PWR (EPRI-5077)					
샘플 개수		Tc99/Co60	Tc99/Cs137	Pu239/Co60	Cm244/Pu239
ALL DATA	Count	32	28	53	52
	LMA	2.30E-04	4.98E-04	1.60E-04	4.50E-01
49	LMD	12	35	11	27
DAW	Count	15	13	27	23
	LMA	3.00E-04	7.72E-04	2.20E-04	5.30E-01
27	LMD	9.7	17	7.1	6.9
RESIN	Count	4	4	4	4
	LMA	4.30E-05	5.10E-06	1.70E-05	3.00E-02
4	LMD	4.7	13	3	6.4
FILTERS	Count	7	7	14	14
	LMA	1.10E-04	1.00E-03	1.50E-04	4.20E-01
14	LMD	5	7.2	4.4	5.9
LIQUID SLUDGE	Count	4	4	7	9
	LMA	1.90E-04	3.10E-04	5.10E-04	1.50E-01
4	LMD	10.1	8.2	52.4	21

표 5 척도인자의 적용성 분석 (III) : 시료 대표성 향상 및 향상된 계측 기술의 반영

핵종	상관 핵종	NP-5677		NP-5077		NP-5077	
		DAW(44)		ALL(448)		DAW(90)	
		LMA	LMD	LMA	LMD	LMA	LMD
Sr90	Sr90/Co60	1.70E-03	13	5.80E-03	N/A	4.40E-03	N/A
	Sr90/Cs137	2.50E-03	5.5	4.80E-03	15	4.60E-03	14
Tc99	Tc99/Co60	계측 데이터가 적음					
	Tc99/Cs137						
I129	I129/Co60	7.70E-08	3.8	1.20E-04	N/A	8.10E-04	N/A
	I129/Cs137	2.00E-07	3.1	2.00E-04	100	1.40E-03	N/A
Pu239	Pu239/Co60	3.90E-05	7	9.00E-05	21	2.00E-04	17
	Pu239/Cs137	9.10E-05	4.3	2.00E-04	36	4.00E-04	25

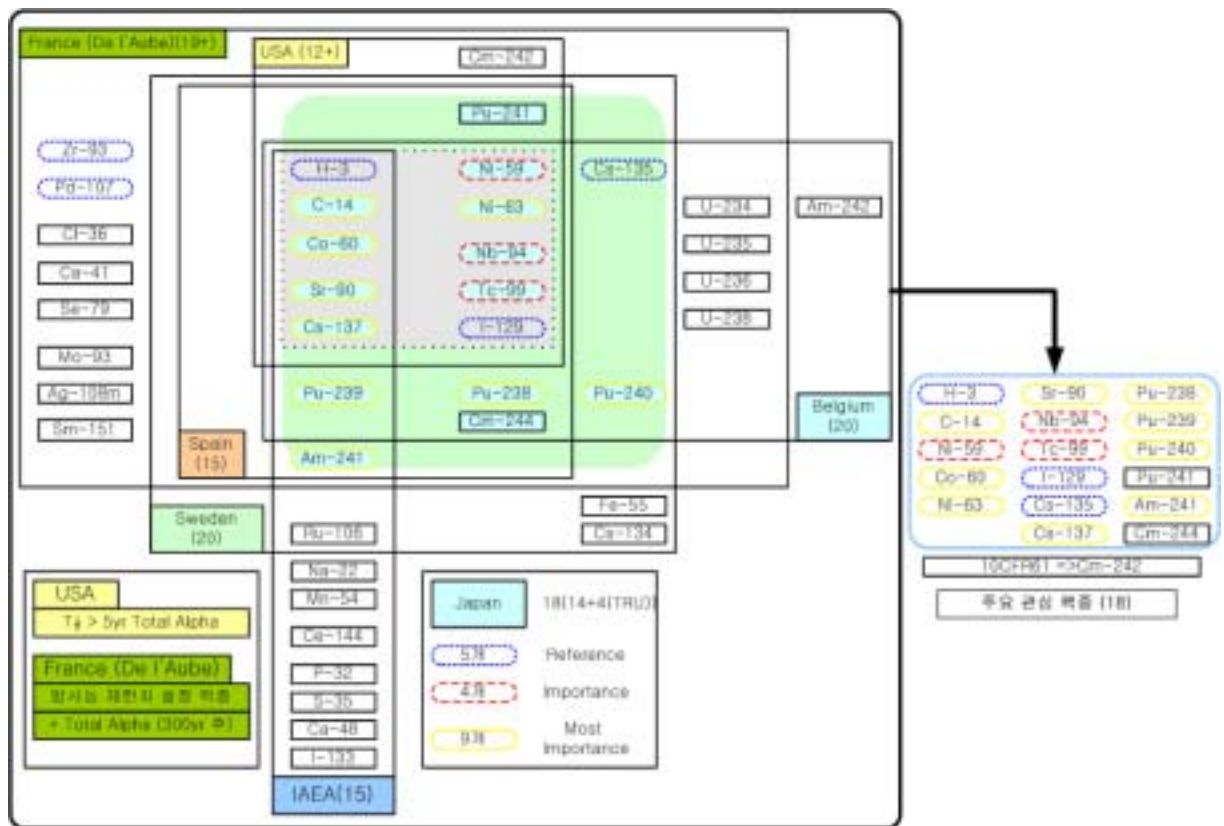


그림 1 국외의 처분 대상 폐기물내의 규제 및 안전성 평가 측면에서 중요한 핵종 비교

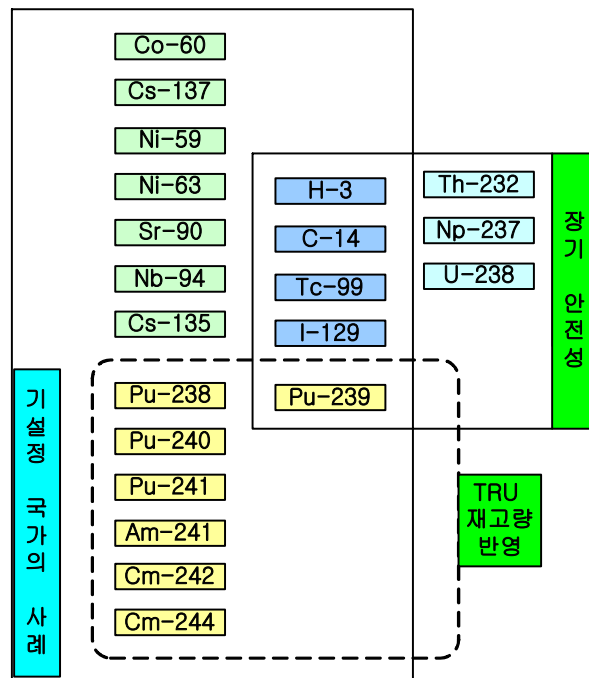


그림 2 평가 대상 핵종 예비 선정 내역

Co-60	5.26y	Gamma, -
Cs-137	30y	Gamma, -
H-3	12.26y	-
C-14	5730y	-
Ni-59	8E4y	X
Ni-63	92y	-
Sr-90	28.1y	-
Nb-94	2E4y	-, Gamma
Tc-99	2.12E5y	-
I-129	1.7E7y	-, Gamma
Cs-135	3E6y	-

Pu-238	88y	alpha, r
Pu-239	2.44E4y	alpha, r
Pu-240	6580y	alpha, r
Pu-241	13.2y	-, alpha
Am-241	458y	alpha, r
Cm-242	162.8 d	alpha
Cm-244	17.6y	alpha, r

+

Total Alpha

방사화생성핵종 및 핵분열생성핵종 : 11개
TRU 핵종 : 7개
+ 기타 방사성핵종
총 핵종 갯수 : 18+

그림 3 평가 대상 핵종별 반감기 및 방출 방사선

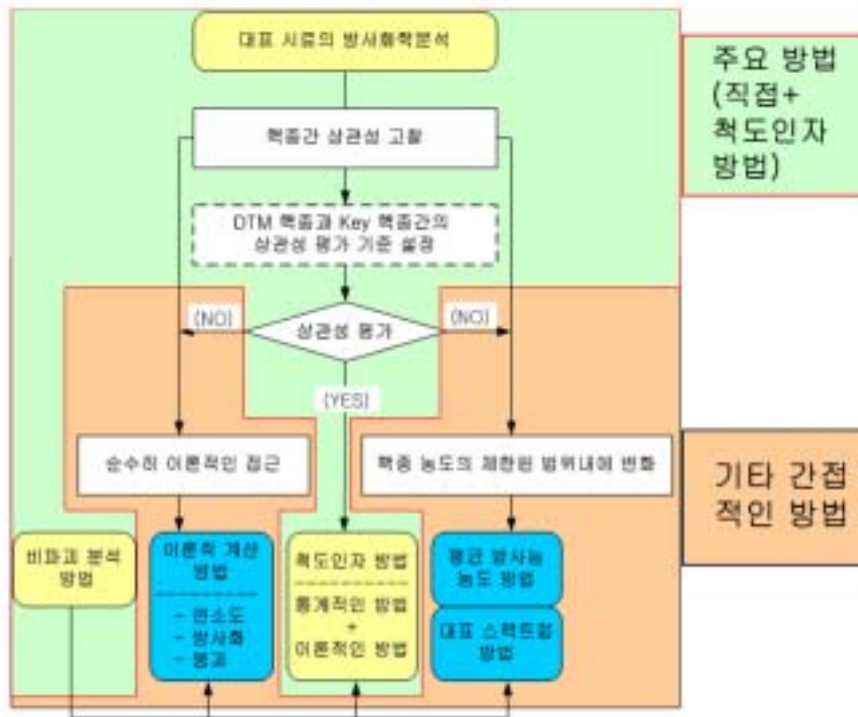


그림 4 핵종 재고량 평가 방법 선정 절차

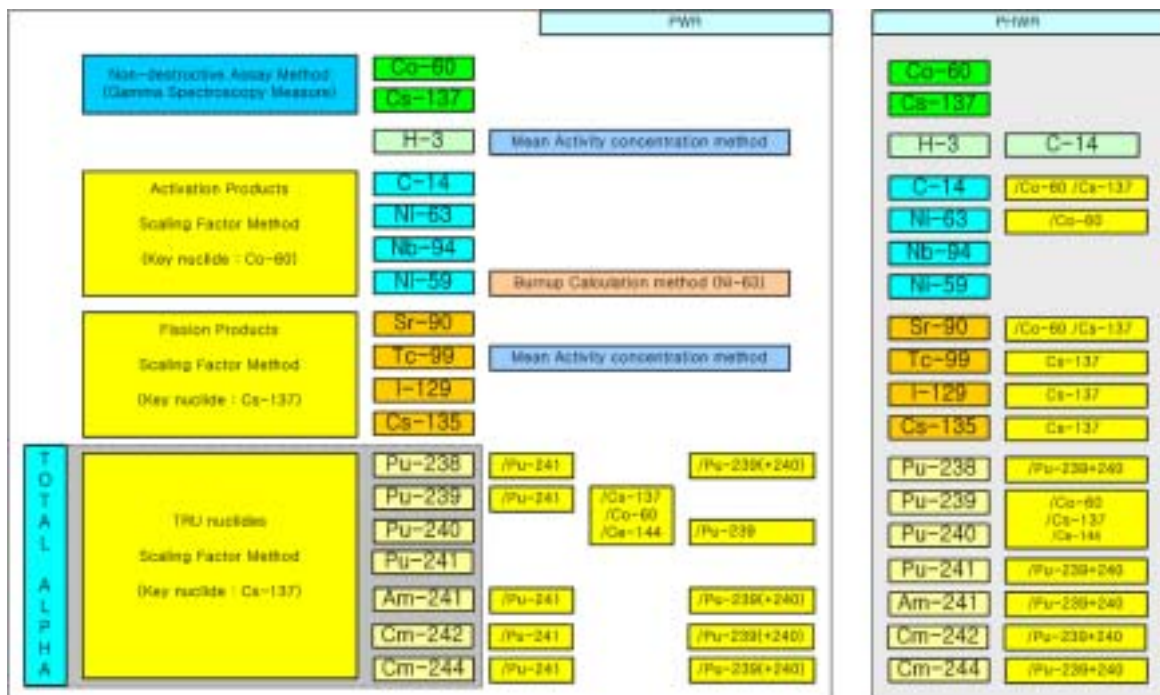


그림 5 핵종별 재고량 평가 방법 (예상안)