2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

중·저준위 방사성 폐기물 드럼의 평가 대상 핵종별 평가 방법 설정에 대한 기초 연구

Preliminary Study on the Establishment of the Radionuclide Declaration methods for Radionuclides in LILW Radioactive Waste Drum

황기하, 이건재
한국과학기술원
대전광역시 유성구 구성동 373-1

정찬우
원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19번지

요 약

국내 원전에서 발생되고 있는 중·저준위 방사성폐기물 드럼내의 핵종별 평가 방법에 대한 예비 연구를 수행하였다. 이는 국내 원전 발생 중·저준위 방사성폐기물내의 핵종 재고량 평가 방법의 예비 설정 차원에서 정성적인 방법을 통한 평가 대상 핵종의 선정과 각 핵종별로 예상되는 정규화된 평가 방법에 대한 예비안을 도출하였다. 이를 위해 우선적으로 국외 중·저준위 방사성 폐기물내 평가 대상 핵종의 선정 내역과 핵종별 평가 방법을 조사 및 분석하였다. 이를 토대로 평가 대상 핵종의 정성적 선정안을 도출하고 이에 근거하여 평가 대상 핵종을 선정하였다. 또한 선정된 평가 대상핵종별 규명 방안에 대한 예비안을 이끌어내었다.

Abstract

The preliminary study on declaration methods has been done for each radionuclide in LILW radwaste drum in Korean NPPs. View from the preliminary establishment of radionuclide declaration methods, The selection of assessment target nuclide through the qualitative method and preliminary criteria for routine declaration methods in each

radionuclide was derived. First of all, selection criteria and preliminary assessment method for each target radionuclide was surveyed and investigated. And, the selection criteria and selected the target radionuclides from the basis on criteria was derived. And the preliminary suggestion about the declaration methods for each target radionuclide was established.

1. 서 론

국내 원전 발생 중·저준위 방사성 폐기물 드럼은 최종적으로 중·저준위 방사성폐기물 처분장에 처분될 것이며, 처분시에는 국내의 관련 법규 및 요건[1]을 충족해야만 한다. 현재 "원자력법시행규칙 (2001. 7. 25 과학기술부령 제29호에 의해 개정)"의 "제88조 방사성 폐기물의 인도 기준"에는 중·저준위 방사성폐기물 처분장에 처분대상이 되는 방사성 폐기물은 종류 및 방사능 농도에 따라 이를 분류하도록 요구하고 있다. 또한, 규제 요건상의 핵종 재고량 관련 세부 요건은 고시에 언급되어 있다. 특히 "중·저준위 방사성폐기물 인도규정(과학기술처 고시 2001-32호)"에 가장 구체적으로 언급되어 있다. 여기에는 핵종별 농도 제한의 필요성과 이를 위한 폐기물의 종류 및 방사능 농도에 따른 분류와 폐기물내의 핵종별 농도와 총방사능량 정보를 규명해야 함을 언급하고 있다. 결국 국내의 관련 규제 요건은 규제 대상이 되는 폐기물에 대한 보다 명확한 정의와 폐기물내 규명 대상이 되는 핵종의 세부적인 설정과 핵종별 농도제한치 등을 설정하는 추가적인 작업을 수행해야 한다. 따라서 이러한 규제 측면의 작업의 일환으로써, 규제 대상 핵종의 선정과 대상 핵종별 규명 방안을 설정하는 작업이 필요하다. 특히, 규제 대상 핵종의 선정과 처분제한치 설정에는 처분 대상 폐기물내의 핵종별 재고량의 반영과 세부적인 평가 시나리오의 설정 작업을 병행한 종합적인 평가를 통해 이루어지게 된다. 본 연구는 이러한 종합적 평가 이전에 국내 원전 발생 중·저준위 방사성폐기물내의 핵종 재고량 평가 방법의 예비 설정 차원에서 정성적인 방법을 통한 평가 대상 핵종의 선정과 각 핵종별로 예상되는 정규화된 평가 방법에 대한 예비안을 도출하였다. 이를 위해 우선적으로 국외 중·저준위 방사성 폐기물내 평가 대상 핵종의 선정 내역과 장기 안전성 측면에서 중·저준위 방사성 폐기물 드럼내의 평가 대상이 되는 핵종을 조사 및 분석하였다. 이를 토대로 국내에서 평가 대상으로 고려가 되어야할 핵종들을 선정하였다. 이어서, 국외 원전에서 중·저준위 방사성 폐기물 처분장의 처분대상이 되는 폐기물내의 핵종 재고량을 평가하기 위한 주요한 평가 방법을 조사 분석하였다. 이를 토대로 하여 선정된 평가 대상 핵종별 예상되는 규명 방안에 대한 예비안을 이끌어내었다.

2. 국내 평가 대상 핵종 예비 선정

본 연구에서의 평가 대상 핵종 선정 방안은 크게 1)기존에 규제 내지 안전성 측면에서 평가 대상 핵종을 설정한 국가의 선정내역, 2) 장기 안전성 측면에서 중요한 핵종 내역을 기준으로 정하였다. 평가 대상 핵종 선정 시에는 이어서 언급할 고려 사항들을 염두에 두어야 한다. 실제적으로도 평가 대상 핵종 선정 방안으로 설정된 해외 사례나 장기 안전성 측면 자체에도 이러한 고려사항들이 반영된 것으로 볼 수 있다.

2.1. 평가 대상 핵종 선정시 고려 사항

평가 대상 핵종 선정시에는 안전성 측면의 핵적 특성 처분이라는 관점에서 장기 안전성에 미치는 영향이 큰 핵종을 고려해야 한다. 안전성 측면의 핵적 특성과 관련된 사항으로는 다음과 같은 것이 있으며, 핵적 특성에 따라 고려되어야 하는 사항은 다음과 같다.

2.1.1. 반감기

반감기 측면에서는 장반감기와 단반감기 측면에서 나누어 살펴보아야 한다. 장반감기 핵종을 고려하는 경우는 운영중 사고뿐만 아니라 장기적인 측면에서 폐쇄후 지하수 이용이나 인간침입을 고려했을 경우에 해당한다. 단반감기 핵종을 고려하는 경우는 폐쇄이전의 운영기간중에 발생할 수도 있는 사고를 고려하여 작업자의 방호를 위해 고려하게 된다.

2.1.2. 방사성 및 생물학적 독성

이는 섭취, 호흡, 외부피폭을 고려한 선량인자로 표현되는 방사선 독성과 생물학적 특성을 나타내게 된다.

2.1.3. 핵종의 이동 특성

핵종의 이동특성은 설정된 시나리오상에서 중요한 영향을 미치게 된다. 이는 시나리오가 핵종의 이동성 관련 변수에 의존적이며, 설정된 처분 방식 및 대상 폐기물 특성에 의존적이기 때문이다.

2.1.4. 중요한 딸핵종을 지닌 핵종

처분된 폐기물내의 모핵종이 붕괴함에 따라 발생되는 딸핵종이 방사선학적 영향 측면에서 중요한 경우 모핵종을 중요하게 고려해야 한다.

2.1.5. 알파 방출 핵종

알파 방출 핵종의 경우는 내부 피폭 측면에서 방사선학적 영향이 상대적으로 크기 때문에 중요하게 고려되는 핵종이다.

또한, 평가 대상 핵종을 선정할 때에는 핵적 특성과 다른 측면 즉 처분장에 처분된 폐기물의 장기 안전성 관련 특성을 고려해야 한다. 실질적으로 장기 안전성 요건은 핵적 특성과 직·간접적으로 연관되어 있다. 처분시 사고해석 즉 폐쇄후의 안전성 측면을 고려했을 때 중요하게 고려해야 하는 사항으로는 다음과 같은 것이 있다.

2.1.6. 장수명 및 이동성

장수명 즉 장반감기를 지니는 핵종은 핵종 자체의 영향이 장시간 유지된다는 측면에서 중요하며 이동성이 큰 핵종의 경우 장기적으로 처분장에 지하수가 침투했을 경우 큰 이동성으로 인하여 생태계내로 빠르게 이동할 우려가 크다는 점에서 고려해야 한다.

2.1.7. 알파 방출 핵종

알파 방출 핵종은 처분장에 지하수가 침투하거나 인간침입에 의해 파손되었을 경우 중요시 되는 것으로 내부피폭 관점과 중요한 딸핵종의 성장과 그 특성에 의존적이게 된다.

2.2 기설정 국가의 사례 반영안

처분장을 운영중인 국가를 중심[2)3)4)]으로 하여 규제 및 안전성 평가 측면에서 평가 대상으로 중요한 핵종에 대하여 다음의 6개국과 IAEA에서 언급한 핵종 중심으로 검토하였다. (그림 1)

- 미국 (12개 핵종과 반감기가 5년 이상인 Total alpha)
- 프랑스
    - 로브처분장(방사능 제한치가 설정된 19개 핵종과 Total alpha)
    - 라망쉬처분장(67개 핵종에 추가적 일부 핵종)
- 일본 (18개 핵종 내지 11개+Total alpha)
    - (9개의 Most importance 핵종, 4개의 Importance 핵종, 5개의 Reference 핵종, 그중 4개 핵종은 TRU)
- 스페인 (15개 핵종)
- 스웨덴 (20개 핵종)
- 벨기에 (20개 핵종)
- IAEA (15개 핵종)

여기서 IAEA를 제외한 6개 국가의 경우 특기할 만 한 점은 공통적으로 중요 핵종으로

선정된 핵종들이 존재한다는 점으로 국외의 사례 결과에 대한 주요 공통 핵종을 취하여 국내에 적용하는 것이 가능함을 보여주고 있다. 공통 핵종을 취함에 있어 그 가중치를 정확히 반영할 수는 없지만 일반적으로 4개국 이상에서 공통되는 핵종은 그림 1에 표시한 바와 같이 약 17개의 핵종이 해당됨을 알 수 있다.

2.3 장기 안전성 반영안

평가 대상 핵종을 선정하는데 있어 장기 안전성 측면에서 중요한 핵종을 선정해야 한다. 장기 안전성[4)5)] 측면에서 고려되는 주요한 핵적 특성은 다음의 세가지 항목을 들 수 있다.

- 장수명 핵종
- 이동성이 큰 핵종
- 알파방출핵종

2.3.1. 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. 또한 지하수에 의한 이동성이 큼으로 인하여 상대적으로 적은 농도제한치를 유도하는 것으로 판단되고 있다. 또한 U.S. NRC에서는 H-3, C-14, Tc-99, I-129를 장수명 측면과 이동성 측면 모두에 있어서 중요한 핵종으로 고려하고 있다.

2.3.2. 알파방출핵종

U.S. NRC에서는 알파방출핵종중 Np-237,Pu-239가 처분시 장기 안전성 측면에서 중요한 핵종으로 논의되고 있으며 특히 핵종 이동 관점에서 중요한 것으로 취급되고 있다. 또한 U.S. NRC에서는 Th-232, U-238이 높은 선량환산인자라는 측면과 딸핵종의 성장 측면에서 중요한 핵종으로 논의되고 있다. 이와는 별도로 Tc-99, Np-237의 경우에는 고준위 폐기물의 경우 누출 관점에서 가장 중요한 방사성 핵종으로 취급되고 있다. 이와 같이 장기 안전성 측면에서 있어서 중요한 핵종은 장수명 및 이동성 측면뿐만 아니라 알파방출핵종 측면 등의 여러 요인들이 서로 복합적으로 취급되고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 내용을 토대로 하여 장기 안전성 측면의 중요 핵종을 선정하였다. (표 1)

2.4 국내 평가 대상 핵종 예비 선정 내역

국내 평가 대상 핵종의 선정은 위에서 논의된 규제 내지 안전성 측면에서 중요한 평가 대상 핵종을 설정한 국외 사례와 장기 안전성 측면에서 중요한 핵종을 토대로 하였다. 이를 그림2에 나타내었으며, 그림 3에서 보는 바와 같이 총 20개 핵종에 추가적으로 Total Alpha를 포함하였다.

3. 핵종 재고량 평가 방법

앞서 선정된 평가 대상 핵종별로 정규화된 재고량 평가 방법을 설정하는 것이 필요하다. 핵종 재고량 평가 방법은 크게 직접적인 방법과 간접적인 방법을 활용하고 있다.

3.1 직접적인 핵종 평가 방법

직접적인 핵종 평가 방법은 크게 비파괴적인 방법과 파괴적인 방법으로 나뉜다.

3.1.1. 비파괴적인 분석 방법(Nondestructive Assay Method)

비파괴적인 분석 방법은 드럼 외부에서 계측기를 이용하여 강한 γ선이나 중성자를 측정함으로써 계측하고자 하는 폐기물 내지 드럼을 파괴하지 않고 분석하는 방법으로 정기적인(Routine) 계측을 하고자 할 때 사용하는 방법이다.

3.1.2. 파괴적인 분석 방법(Radiochemical Analytical Method)

비파괴적인 방법과는 달리 파괴적인 방법은 시료를 방사화학 분석하는 방법으로, 분석하고자 하는 폐기물 내지 폐기물을 수용하고 있는 용기를 파괴하여 폐기물로부터 시료를 채취한 후 이를 방사화학 분석 과정을 거쳐 폐기물내의 핵종 재고량을 분석하는 방법이다. 이는 비파괴적인 방법을 통하여 분석하기 힘든 β선이나 X선이나 약한 γ선을 방출하는 핵종의 분석이 그 주요한 용도이며 강한 γ선이나 중성자를 계측하는 것과는 달리 계측이 용이하지 않고 다른 방사선과의 구분 등을 위하여 분석 과정에 다양한 처리 과정을 거치게 된다. 이 방법은 비용이나 작업자의 과다 피폭 등의 우려가 수반됨으로 일상적인 폐기물 분석에 사용하기 보다는 Q/A나 Q/C에 사용된다.

3.2 간접적인 핵종 분석 방법

간접적인 방법에는 직접적인 핵종 분석 방법에 비하여 보다 다양한 방법이 사용된다. 간접적인 핵종 분석 방법은 직접적인 핵종 분석 방법을 통하여 만족할 만한 결과를 얻기 힘들거나 혹은 보다 좋은 결과를 수반할 경우에 사용하게 된다. 간접적인 방법은 또한 크게 실험적인 방법 내지 실험 결과를 병행한 이론적인 방법과 순수하게 이론적인 방법을 이용하는 방법으로 나뉜다.

3.2.1. 척도인자 (Scaling factor)

척도인자 방법은 간접적인 핵종 분석 방법 중 대표적인 방법이다. 척도인자 방법은 분석하고자하는 대표시료의 방사화학 분석 결과를 토대로 하여 알고자 하는 DTM (Difficult-To-Measure) 핵종과 Key (Easy-To-Measure) 핵종간의 통계 분석 내지 이론적 방법을 병행을 통하여 상관성을 분석하여 비율을 산정하게 된다. 이를 토대로 하여 드럼 외부에서 Key 핵종을 측정하여 DTM 핵종을 예측하게 된다.

3.2.2. 평균 방사능 농도 (Mean Activity Concentration)

균질폐기물내에서 발생원(Source)이 핵종 농도의 변화를 유발하는 변화가 적을 때 적용가능한 방법으로 시료상의 평균 방사능 농도를 전체 폐기물의 평균 농도로 간주하는 방법이다.

3.2.3. 대표 스펙트럼(Representative Spectrum)

폐기물이 많고 균질폐기물일때 γ선 측정을 통하여 이 값을 전체시료의 농도 값을 대표하는 것으로 간주하는 방법으로 시료의 대표성을 확인하는 과정이 필요하다.

3.2.4. 연소도 (Burn-up)

핵연료의 연소도 계산을 통하여 핵종의 농도를 결정하는 방법으로 핵연료의 방사화에 의한 생성 또는 핵분열 생성물의 농도를 예측하는데 사용된다. 상관성을 지닌 두 개의 핵종이 발생뿐만 아니라 이동 특성까지 유사해야 좋은 결과를 이끌어 낼 수 있다. 주로 알파 방출 핵종이나 핵분열 생성핵종에 적용하는 방법이다.

3.2.5. 방사화 (Activation)

원자로 내와 그 주변 환경이 유사한 중성자속을 지니는 경우 중성자속에 의한 방사화에 의한 축적을 계산하여 핵종의 농도를 예측하는 방법으로 일반적으로 부식 생성 핵종 내

지 냉각수내 존재하는 핵종에 적용될 수 있다.

3.2.6. 붕괴 (Decay)

모 핵종과 딸 핵종의 붕괴시 평형을 이용하는 방법으로 Transient 또는 Secular 평형을 이용하는 방법이다. 모핵종과 딸 핵종의 상관성을 이용하는 이 방법은 모핵종의 반감기가 딸 핵종의 반감기보다 길어야 하며, 두 핵종 모두의 거동 특성이 유사해야 한다.

4. 평가 대상 핵종별 평가 방법

4.1 평가 대상 핵종별 평가 방법 설정 절차

원전 발생 중·저준위 폐기물내의 핵종을 평가하기 위해서는 별도의 세부적인 핵종 재고량 평가 방법의 설정이 필요하다. 척도인자 방법 (Scaling Factor Method)을 주요한 방법으로 활용하면서 여기에 직접 측정 방법 [Nondestructive Assay Method, Radiochemical Analytical Method]을 병행하는 방식이다. 우선적으로 분석 대상이 되는 방사성 폐기물의 대표 시료를 채취하여 방사화학 분석을 수행하여 평가 대상이 되는 핵종간의 상관관계를 살펴보게 된다. 이를 근거로 하여 계측이 용이한 핵종(Key nuclide)과 계측이 어려운 핵종(DTM nuclide)과의 상관성을 분석하여 상관성이 만족할 만한 수준일 경우 척도인자 방법과 비파괴 직접 측정 방법을 병행하여 직접 측정을 통한 Key nuclide의 핵종 농도를 계측한 후 척도인자를 적용하여 DTM nuclide를 계측하는 방법을 이용한다. 방사화학 분석을 통한 상관관계 분석시에 만족스러운 수준의 결과가 안나옴으로 인하여 직접적인 척도인자 적용이 어려운 경우에는 다른 간접적인 방법을 사용하게 된다. 우선적으로는 이론적인 접근 방법을 사용하여 이론적으로 계산하는 방법 [Burnup Calculation method, Activation Calculation method, Decay Calculation method]을 적용하게 된다. 그러나 위의 방법들을 적용하기 어렵고, 분석 대상 폐기물내의 평가 대상 핵종의 농도 변화가 제한된 범위 내에 있을 경우 평균 방사능 농도를 활용하거나(Mean activity concentration method) 대표 시료의 스펙트럼을 분석하여 대표 값으로 쓰는 방법(Representative Spectrum method)을 사용하게 된다. 이상과 같은 핵종별 재고량 평가 방안을 설정하는 과정을 그림 4에 나타내었다.

4.2 평가 대상 핵종별 평가 방법 설정

앞서 선정된 평가 대상 핵종과 핵종 평가 방법을 토대로 핵종별 평가 방법을 설정하였

다. 이는 국가별 원자로 형태별로 국가마다 규제 내지 평가 대상 핵종에 대한 평가 방법의 분석을 토대로 하였다. 국가마다 차이가 존재하지만 일반적으로 척도인자 방법을 사용하고 있으며 척도인자 방법을 적용하기 힘든 경우에는 다른 방법을 병행하고 있다. 평가 대상 핵종으로 선정된 핵종에 관하여 원자로 형태(PWR, PHWR)별 핵종에 관한 평가 방법을 그림 5에 나타내었다. 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.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 원전 발생 중·저준위 방사성 폐기물 드럼의 핵종 재고량 평가 방안을 설정하기 위해 국외 중·저준위 방사성 폐기물내 평가 대상 핵종 및 핵종 재고량 평가 방법을 조사 및 분석하였다. 이를 토대로 정성적인 방법을 통하여 평가 대상 핵종을 선정하였고, 평가 대상핵종(별) 핵종 재고량 평가 방법의 예상안을 이끌어내었다. 이를 통해 향후 처분 대상 폐기물내 핵종 재고량과 세부적인 평가 시나리오를 토대로 한 정량적 평가를 통한 평가 대상 핵종 선정과 평가 대상 핵종별 규제 측면의 평가 방법을 설정하기 위한 근거를 마련하였다. 또한 현 단계에서 평가 대상이 될 것으로 고려되는 핵종뿐만 아니라 유사 특성의 핵종에 대해서도 재고량 평가 방법의 설정을 용이하게 해주었다. 이를 근거로 하여 평가 대상 핵종 선정 이후의 핵종별 재고량 평가 방법에 대한 지침의 설정을 용이하게 할 수 있는 예비 지침안 설정이 가능하게 되었다.

감사의 글

본 연구는 원자력안전기술원의 방사성폐기물 규제기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1) 과학기술부, most.go.kr

2) ISTec GmbH & GNS mbH, "International workshop on "Determination and declaration of nuclide specific actiity inventories in radioactive wastes" (2001)

3) RADWAP 2002, "4th International Seminar on radioactive waste products" (2002)

4) KINS/HR-471, "천층처분시설의 처분제한치 설정을 위한 성능평가 방법론 개발",(2002)

5) OECD/NEA, "Shallow land disposal of radioactive waste-Reference levels for the acceptance of long-lived radionuclides", 1986

표 1 . 장기 안정성 측면의 고려 대상 핵종

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

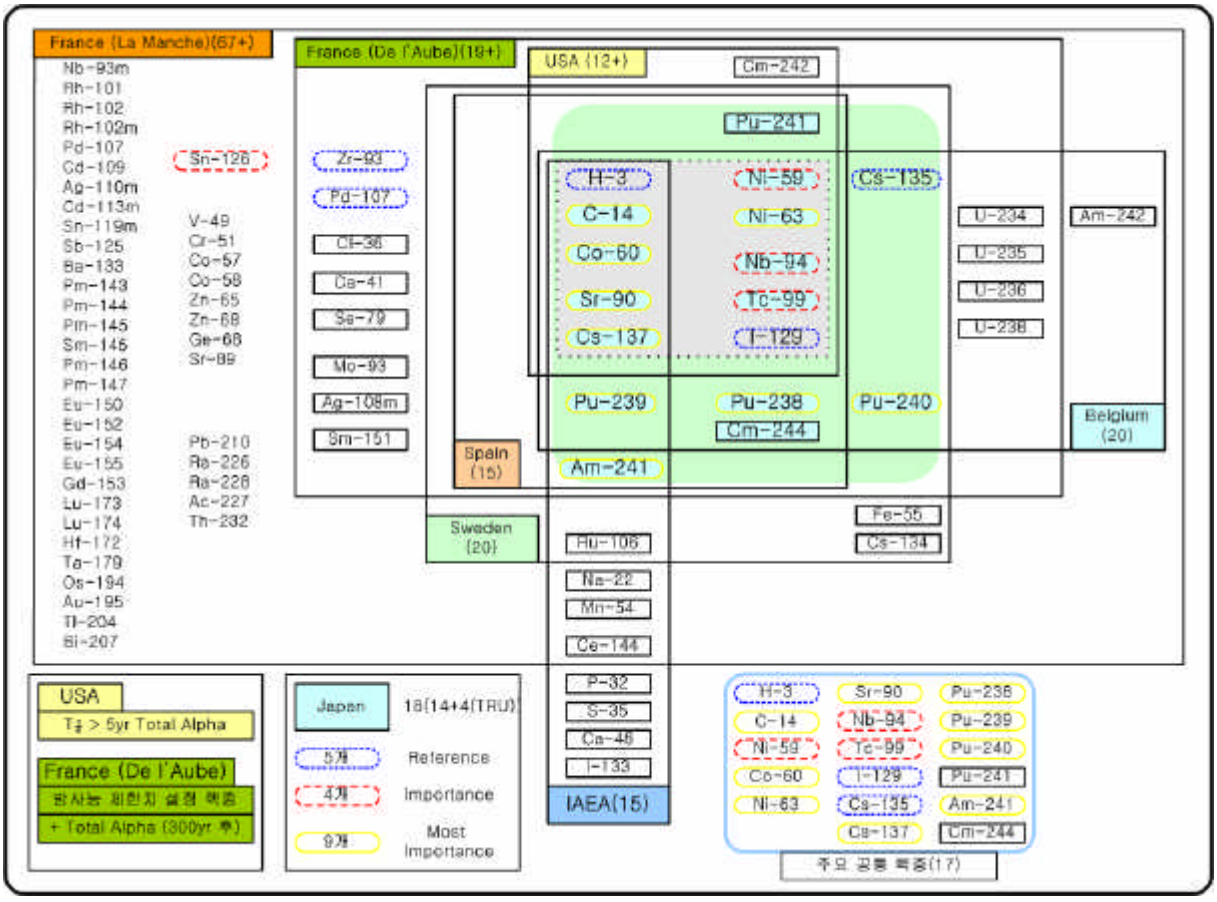

그림 1 국외의 처분 대상 폐기물내의 규제 및 안전성 평가 측면에서 중요한 핵종 비교

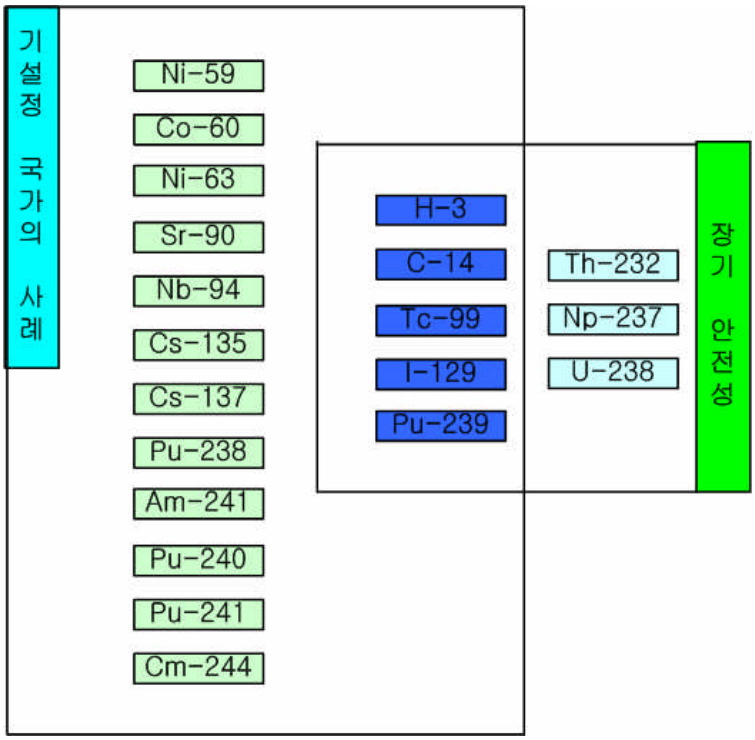

그림 2 평가 대상 핵종 예비 선정 내역

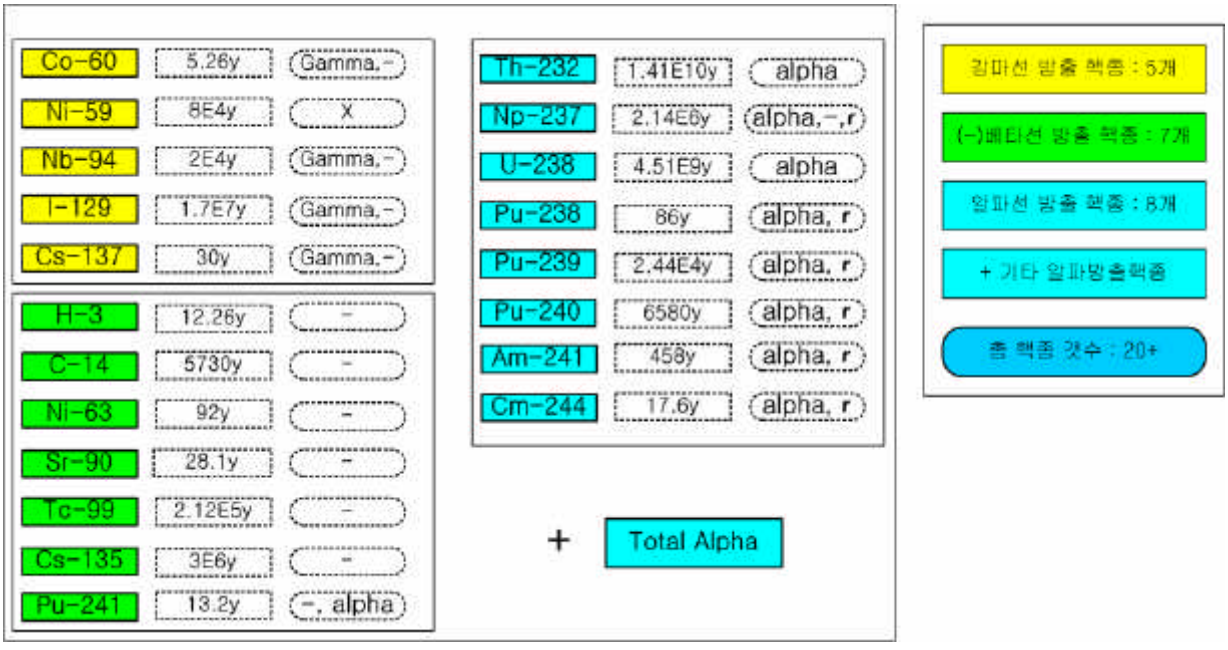

그림 3 평가 대상 핵종별 특성

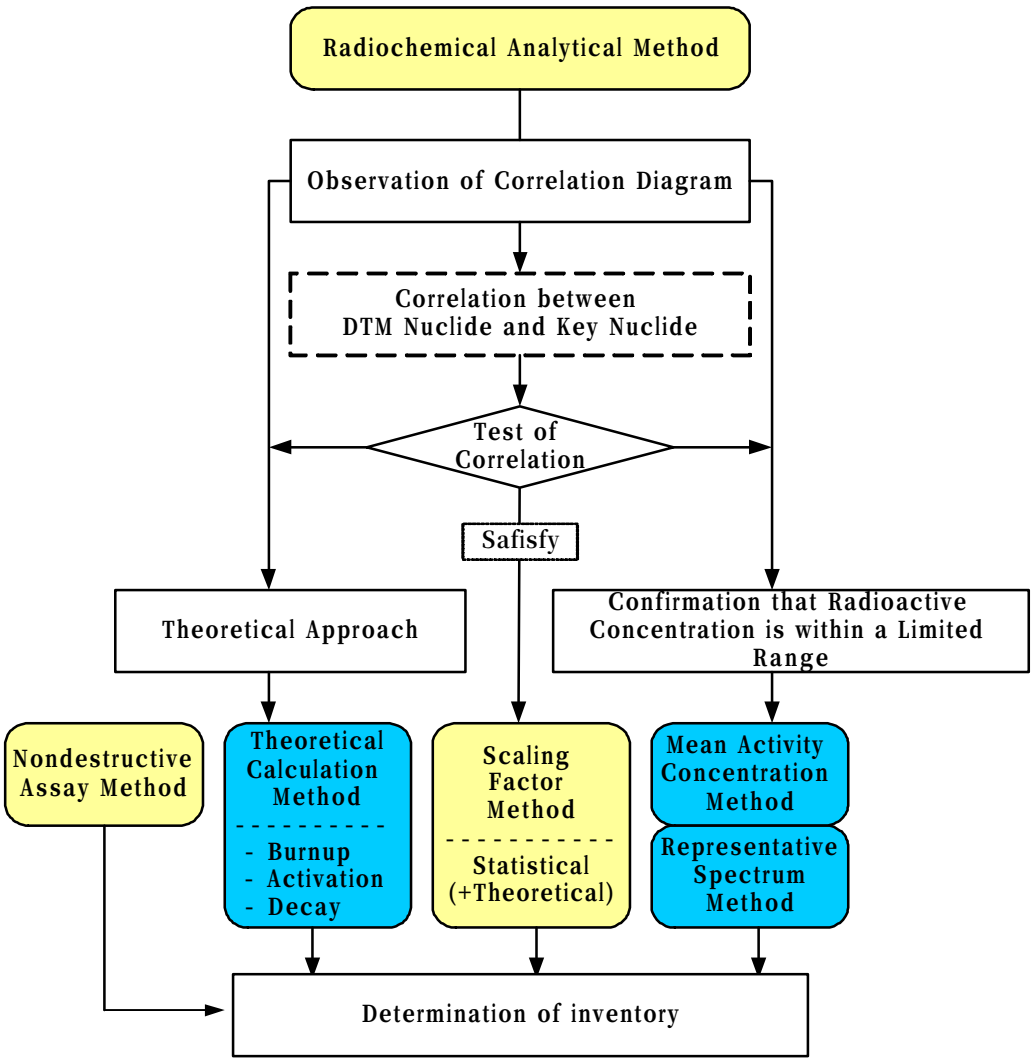

그림 4 핵종 재고량 평가 방법 선정 절차

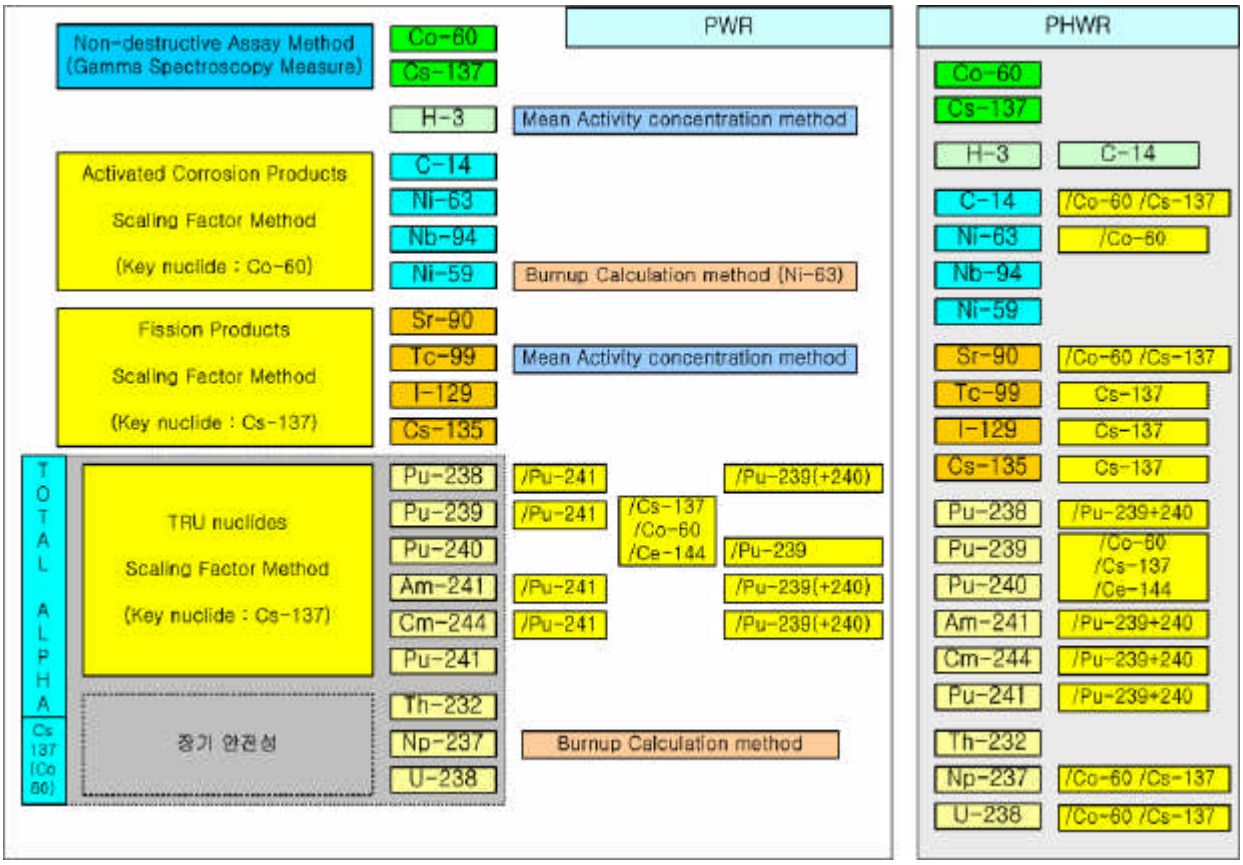

그림 5 핵종별 재고량 평가 방법 (예상안)