2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

방사성폐기물관리에 관한 지속 가능한 개발지표의 평가

Assessment of the Indicator of Sustainable Development for Radioactive Waste Management

정재학, 박원재
한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요약

1992년 리우 환경개발회의에서 채택된 Agenda 21에서 방사성폐기물의 안전관리를 위한 정책방향이 결정된 후, 유엔(UN)은 방사성폐기물 안전관리를 지속 가능한 개발의 범위에 포함하여 국제원자력기구의 주관 하에 관련 지표의 개발 및 적용을 추진하고 있다. 2002년 국제원자력기구는 방사성폐기물관리에 관한 지속 가능한 개발지표를 확정하고 현재 운영중인 방사성폐기물 데이터베이스 시스템인 NEWMDB와 연계하여 회원국의 방사성폐기물관리 체계 및 현황을 정량적인 지표로 평가할 예정이다. 본 논문에서는 방사성폐기물에 관한 지속 가능한 개발지표의 도입근거를 분석하고, 국제원자력기구가 제시한 지표의 평가방법과 표준화된 절차를 도식화하였다. 도출된 평가절차에 따라 우리나라를 포함한 주요 국가의 방사성폐기물관리 체계 및 현황자료를 이용하여 각 국의 방사성폐기물관리에 관한 지속 가능한 개발지표를 평가하고 그 결과를 비교/분석하였다. 또한 지표의 향상을 통해 국내 방사성폐기물관리의 지속 가능성을 제고할 수 있는 방안을 도출하였다.

Abstract

As a follow up to the Agenda 21's policy statement for safe management of radioactive waste adopted at Rio Conference held in 1992, the UN invited the IAEA to develop and implement indicators of sustainable development for the management of radioactive waste. The IAEA finalized the indicators in 2002, and is planning to calculate the member states' values of indicators in connection with operation of its Net-Enabled Waste Management Database system. In this paper, the basis for introducing the indicators into the radioactive waste management was analyzed, and calculation methodology and standard assessment procedure were simply depicted. According to the proposed standard procedure, the indicators for some countries including Korea were calculated and compared, by use of each country's radioactive waste management framework and its practices. In addition, a series of measures increasing the values of the indicators was derived so as to enhance the sustainability of domestic radioactive waste management program.

1. 서론

1992.06월 브라질 Rio De Janeiro에서 개최된 유엔(UN) 환경개발회의 이후, UN의 Department of Economic and Social Affairs(DESA)는 International Atomic Energy Agency(IAEA) 주관으로 방사성폐기물관리의 지속 가능한 개발을 위한 지표(Indicator)의 개발을 추진하였다 [1]. 이에 따라 IAEA의 Department of Nuclear Energy 산하 Division of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology(NEFW)는 회원국의 방사성폐기물관리 체계 및 관행의 지속 가능성을 평가할 수 있는 지표로 ISD(Indicator of Sustainable Development)-RW(Radioactive

Waste)를 개발하였다.

1999년 IAEA는 일차로 9종의 ISD-RW를 도출하였으나 DESA는 다수의 지표들을 통합하여 방사성폐기물의 발생체적에 근거한 단일 ISD-RW를 제안하였다. DESA가 제시한 지표는 다음과 같은 점에서 근본적인 한계를 갖고 있다.

- 각국의 현재 관행 및 체계에 관한 베이스라인(Baseline)이 고려되지 않음.
- 관리되고 있는 기타 폐기물의 존재가 고려되지 않음.
- 상이한 종류의 원자력시설에서 발생된 폐기물의 구분이 불가능함.
- 저준위폐기물과 고준위폐기물의 상대적인 위해도에 대한 구분이 불가능함.
- 저준위폐기물의 발생량을 체적만으로 평가함.
- 핵연료주기 사업을 추진하는 국가의 경우 상대적으로 불리한 평가가 불가피함.
- 방사성폐기물관리의 궁극적인 목표인 처분(End Point)이 고려되지 않음.
- 처분이 가능한 폐기물과 그렇지 않은 폐기물이 차별화 되지 않음.
- 폐기물의 체적이 환경 및 건강에 영향을 준다는 불합리한 가정에 근거함.

이에 따라 2001-2002년 IAEA는 DESA가 선정한 단일 ISD-RW의 한계점을 개선하기 위한 작업에 착수하여, 폐기물의 체적만을 기준으로 한 접근방법의 한계를 극복할 수 있도록 무차원(Dimensionless) 지표를 도출하였다. 이러한 지표는 방사성폐기물관리의 "지속가능성"이 "처분을 위해 대기중인 방사성폐기물의 수량이 더 이상 증가하지 않고 폐기물은 처분에 요구되는 최종적인 형태로 안전하게 저장되고 있는 상태"라는 정의에 근거하여 도출된 것이다.

최종적으로 확정된 ISD-RW는 각국의 방사성폐기물 분류기준에 따른 폐기물의 종류별로 2종의 인자(형태인자 및 처분인자)를 적용하여 지속 가능성을 평가하고, 2종의 인자 평가결과를 합산하여 해당 국가의 전체적인 방사성폐기물관리에 관한 지속 가능한 개발지표를 산출하는 개념으로 요약할 수 있다. 각 인자는 방사성폐기물관리의 완성도에 따라 4가지 단계로 구분되며, 최종적으로 산출되는 지표인 ISD-RW는 0 - 100의 범위(0은 지속가능성이 가장 열악한 상태이며, 100은 지속 가능성이 가장 우수한 상태)를 갖는다 [2].

이러한 ISD-RW는 방사성폐기물관리의 현재 상태뿐만 아니라 향후 지속 가능한 개발을 위한 관리의 진전도를 평가할 수 있는 수단을 제공하고 있으며, 이러한 평가는 국가별 또는 동일 국가 내 원자력 이용분야별로 이행될 수 있다. ISD-RW는 관리되고 있는 방사성폐기물만을 고려하며 환경으로 배출된 방사능물질은 고려되지 않는다. 또한 NORM(Naturally-Occurring Radioactive Material), 방사능으로 오염된 부지 등은 ISD-RW의 고려 대상에서 제외되었다.

2. ISD-RW 평가방법 및 절차

IAEA가 최종적으로 도출한 ISD-RW는 각국의 분류체계에 따른 방사성폐기물 종류별로 적용되며, 다음과 같이 형태인자와 처분인자의 합으로 정의된다 [3]:

$$ISD - RW_{i,j} = FF_{i,j} + EF_{i,j},$$

여기서, i = 특정한 국가명, j = 방사성폐기물의 종류, $FF_{i,j}$ = 국가 i의 방사성폐기물 j에 대한 형태인자, $EF_{i,j}$ = 국가 i의 방사성폐기물 j에 대한 처분인자, $ISD\text{-}RW_{i,j}$ = 국가 i의 방사성폐기물 j에 대한 지속 가능한 개발지표. 상기 2종의 인자는 방사성폐기물관리 현황을 반영하고 폐기물의 처분과 관련하여 수행되고 있는 관리 프로그램의 완성도를 평가하기 위한 목적으로 유도된 것이다. 도출된 2종의 인자는 독립적으로 표기되었으나 서로 상관관계가 있다. 예를 들어, 처분에 적합한 형태로 방사성폐기물을 처리할 수 있는 능력을 판정하기 위해서는 처분 관련정보가 확보되어야 하지만, 반드시 처분시설에 대한 설계 및 부기가 승인되어야 함을 의미하는 것은 아니다. 각 인자별 평가방법 및 원칙은 다음과 같다 [2].

2.1 형태인자(Form Factor)

형태인자는 방사성폐기물의 저장 또는 처분적합성에 관한 지표로서 다음과 같이 4단계로 구분된다(표 1 참조).

표 1. 형태인자의 분류 및 설명

형태인자	값	비고
F1	0	저장에 적합하지 않거나 적합하지 않은 것으로 알려진 방사성폐기물
F2	10	저장을 위해 방사성폐기물 처리할 수 있는 능력이 확보된 상태
F3	25	처분을 위해 방사성폐기물 처리할 수 있는 능력이 확보된 상태
F4	50	처분에 적합하지 않은 방사성폐기물의 재고량이 증가하지 않는 상태

가. 형태인자 F1

F1은 규제기준의 만족 또는 국제적인 지침과 부합함으로써 달성되는 저장의 적합성의미한다. 특정한 방사성폐기물이 저장에 부적합한 것으로 판정되는 대표적인 사례는 다음과 같다: (1) 해당 국가에 적합성을 판단할 수 있는 규제기관이 부재한 경우, (2) 저장에 따른 규제요건을 충족시키지 못한 경우, (3) 저장의 타당성을 평가할 수 있는 법적 체계가 부재한 경우, (4) 다른 원인에 의해 저장의 안전성에 대한 평가가 수행되지 못한 경우

나. 형태인자 F2

F2에서 방사성폐기물을 저장이 가능하도록 처리하는 능력이란, 해당 폐기물이 저장에 관한 최소한의 국제적인 안전기준을 만족함이 입증된 형태를 확보하고 있음을 의미한다. 안정화 처리된 방사성폐기물, 적절한 용기에 포장된 잡고체 폐기물, 적절한 탱크에 저장된 액체폐기물 등은 F2로 분류될 수 있다. 또한 F2는 방사성폐기물을 저장할 수 있는 적절한 저장시설이 확보되어 있음을 의미한다.

다. 형태인자 F3

F3에서 방사성폐기물을 처분에 적합한 형태로 처리하는 능력이란 (1) 방사성폐기물관리의 최종적인 처분방안이 명시되고, (2) 폐기물의 형태가 처분기준에 부합하는 상태를 의미한다. 또한 폐기물의 형태가 적합한 시설 내에 저장될 수 있으며, 동 시설은 폐기물을 처분시설로 발송하기 전까지 폐기물을 저장할 수 있는 충분한 설계수명을 확보하고 있어야 한다. 형태인자 분류시 F3를 F2와 유사한 개념으로 오해할 수 있으나, F3에서는 폐기물이 처분기준을 만족해야 한다는 조건이 추가로 명시되어 있다는 점에 유의할 필요가 있다.

라. 형태인자 F4

F4는 처분에 적합하지 않은 폐기물의 재고량이 증가되지 않은 상태를 의미한다. 이러한 조건의 만족여부를 입증하기 위해서는 단위 시간당 폐기물의 생성량과 처분량에 관한 정보가 필요하다. 방사성폐기물이 처분에 부적합한 형태로 생성될 경우, 이를 처리하기 위한 시설을 확보하여 이들 폐기물을 처분에 적합한 형태로 처리해야 하며, 이때 단위 시간당 처리되는 폐기물의 수량은 생성량과 같거나 더 커야 한다.

마. 형태인자 평가절차

ISD-RW의 산출을 위한 형태인자의 표준 평가절차는 그림 1과 같이 정리할 수 있으며, 각 판정단계별 검토기준은 표 2와 같다.

표 2. ISD-RW 산출을 위한 형태인자 평가방법

판정 단계	비고
방사성폐기물의 안전한 저장여부?	다음 조건들이 모두 만족할 경우 "YES"로 판정한다. 1) 현존하는 폐기물과 향후 발생될 폐기물에 대하여 안전한 저장을 위한 평가가 수행되었음. 2) 상기 평가결과에 의해 현존 폐기물이 안전하게 저장되었음이 입증되었음. 3) 상기 평가결과에 의해 저장조건 및 저장기간 동안 현존 폐기물이 지속적으로 안전하게 저장될 것임이 입증되었음. 4) 상기 평가결과에 의해 향후 발생될 폐기물이 안전하게 저장될 것임이 입증되었음.
저장을 위한 처리능력 확보여부? - 폐기물의 99%이상 - 생성된 폐기물 자체가 저장에 적합한 경우, "YES"로 판정	다음 조건들이 모두 만족할 경우 "YES"로 판정한다. 1) 저장을 위해 적합한 형태로 모든(99% 이상) 폐기물을 처리할 수 있는 기술을 확보하고 있음. 2) 이를 위하여 충분한 재원과 인력을 확보하고 있음. 3) 필요한 처리시설이 운영허가를 받은 상태임.
WUD(Waste Unsuitable for Disposal)가 부재하고 향후에도 발생되지 않을 것인가?	다음 조건들이 모두 만족할 경우 "YES"로 판정한다. 1) 저장중인 폐기물과 이미 처분된 폐기물의 처분조건에 대한 평가가 이미 수행되었음. 2) 현존하는 폐기물에 대한 평가를 통해 모든 폐기물이 처분에 적합한 형태임이 입증되었음. 3) 향후 발생될 폐기물에 대해 안전한 처분조건을 고려한 평가가 수행되었음. 4) 상기 평가결과, 향후 발생될 모든 폐기물이 처분에 적합한 것으로 입증되었음. - 저장중인 폐기물의 경우, 저장시설에서 반출하여 처분시설에 적치하기까지 의도하는 처분시설에 적합한 형태를 갖추어야 함. - 처분된 폐기물의 경우, 처분시설에 적치하는 시점에 처분에 적합한 형태를 유지하고 있었어야 함. - 과거 처분관행이 현행 기준을 만족하지 못할 경우, 일부 폐기물은 WID(Waste Improperly Disposed) 상태로 평가될 수 있음.
WUD의 처분을 위한 처리능력을 확보하고 있는가? - 폐기물의 99%이상 - 생성된 폐기물 자체가 처분에 적합한 경우, "YES"로 판정	다음 조건들이 모두 만족할 경우 "YES"로 판정한다. 1) 모든 WUD를 처분에 적합한 형태로 처리할 수 있는 기술을 이미 확보하고 있음. 2) 이를 위하여 충분한 재원과 인력을 확보하고 있음. 3) 필요한 처리시설이 운영허가를 받은 상태임.
WUD의 체적이 증가되지 않은가?	다음 조건들이 모두 만족할 경우 "YES"로 판정한다. 1) 현재 WUD와 과거 WUD의 체적을 비교하였음. 2) 상기 평가결과, WUD의 체적이 증가되지 않았음. 3) 현재 WUD의 체적과 향후 WUD 예상체적을 비교하였음. 4) 상기 평가결과, 가까운 미래(2-5년 후)에 WUD의 체적 증가가 예상되지 않음.

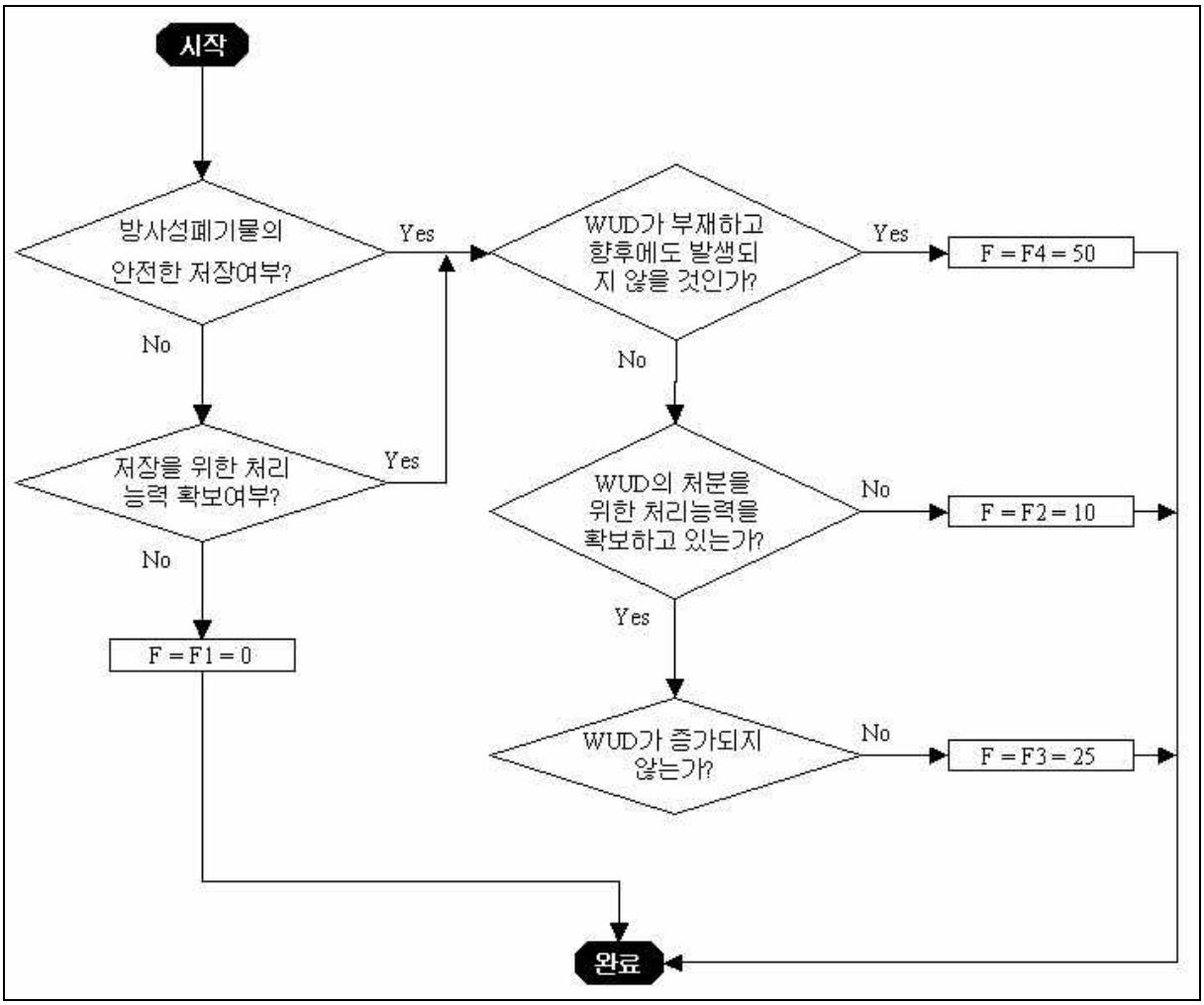

그림 1. ISD-RW 산출을 위한 형태인자 평가절차 [2]

2.2 처분인자(Endpoint Factor)

IAEA가 ISD-RW 산출을 위해 제안하고 있는 처분인자는 방사성폐기물의 최종적인 상태에 대한 현재 상태의 상대적인 지표로서 표 3과 같이 요약할 수 있다.

표 3. 처분인자의 분류 및 설명

처분인자	값	비고
E1	0	방사성폐기물 처분계획이 수립되지 못한 상태
E2	10	설계 및 부지승인 상태
E3	25	시설의 운영상태
E4	50	처분에 적합하지 않은 방사성폐기물의 재고량이 증가하지 않는 상태

가. 처분인자 E1

처분인자 E1은 특정 국가의 방사성폐기물 처분계획이 부재하거나 또는 일정한 기한 내에

폐기물을 처분할 수 있음을 보장할 수 없는 경우에 적용된다. 방사성폐기물의 최종적인 관리목표를 처분으로 결정하였으나 평가시점을 기준으로 관련 시설의 설계 또는 부지에 대한 승인이 이루어지지 못한 경우에도 처분인자 E1을 부여한다.

나. 처분인자 E2

처분인자 E2는 방사성폐기물의 처분을 위한 주요 장애요인이 해결된 상태를 의미한다. 즉, 방사성폐기물을 처분하기 위한 부지 및 시설의 설계가 승인된 국가의 경우 처분인자 E2을 적용한다.

다. 처분인자 E3

처분인자 E3는 처분시설에 대한 운영허가가 발급된 경우에 적용한다. 그러나 반드시 해당 시설이 전면적으로 운영되거나 실제로 폐기물을 인수하고 있는 상태를 의미하는 것은 아니며, 방사성폐기물을 처분시설에 인도할 수 있는 상태를 유지하고 있는 경우 처분인자 E3를 부여할 수 있다.

라. 처분인자 E4

처분인자 E4는 처분시설로 인도하기 위해 저장시설에서 대기하고 있는 방사성폐기물의 재고량이 증가되지 않고 있는 상태를 의미한다. 처분인자 E4는 해당 국가의 단위 기간 동안 방사성폐기물의 생성량과 처분량에 대한 정량적인 정보에 근거하여 적용될 수 있다. 처분인자 E4가 적용되는 국가는 최종적인 관리단계(처분)에 도달하지 못한 방사성폐기물의 재고량을 저감하기 위한 노력이 실현되고 있는 것으로 평가되며, 방사성폐기물의 적극적인 감용(Volume Reduction) 정책 또한 처분인자 결정단계에서 고려될 수 있다. 형태인자 F4와 마찬가지로 처분인자 E4는 방사성폐기물의 관리 능력(Capability)이 아닌 관리용량(Capacity)에 관한 지표로 이해할 수 있다.

마. 처분인자 평가절차

IAEA가 제시한 ISD-RW의 산출을 위한 처분인자의 표준 평가절차는 그림 2와 같이 정리할 수 있으며, 각 판정단계별 검토기준은 표 4와 같다.

표 4. ISD-RW 산출을 위한 처분인자 평가방법

판정 단계	비고
처분부지가 승인되고 처분시설의 설계가 존재하는가?	다음 조건들이 모두 만족할 경우 “YES”로 판정한다. 1) 규제기관이 처분부지를 이미 승인하였음. 2) 처분시설의 설계가 완료되었음. 3) 건설허가 승인신청서가 이미 규제기관에 제출되었음.
처분시설이 운영되고 있는가?	다음 조건들이 모두 만족할 경우 “YES”로 판정한다. 1) 규제기관이 시설의 운영을 승인하였음.
WND(radioactive Waste Not in Disposal) 및 WID(radioactive Waste Improperly Disposed)가 증가되지 않는가?	다음 조건들이 모두 만족할 경우 “YES”로 판정한다. 1) 현재 WND 및 WID의 체적과 과거 WND 및 WID의 체적을 비교하였음. 2) 상기 평가결과, 체적이 증가되지 않았음. 3) 현재 WND 및 WID의 체적과 향후 WND 및 WIND의 예상 체적을 비교하였음. 4) 상기 평가결과, 가까운 미래(2-5년 후)에 WUD의 체적 증가가 예상되지 않음.

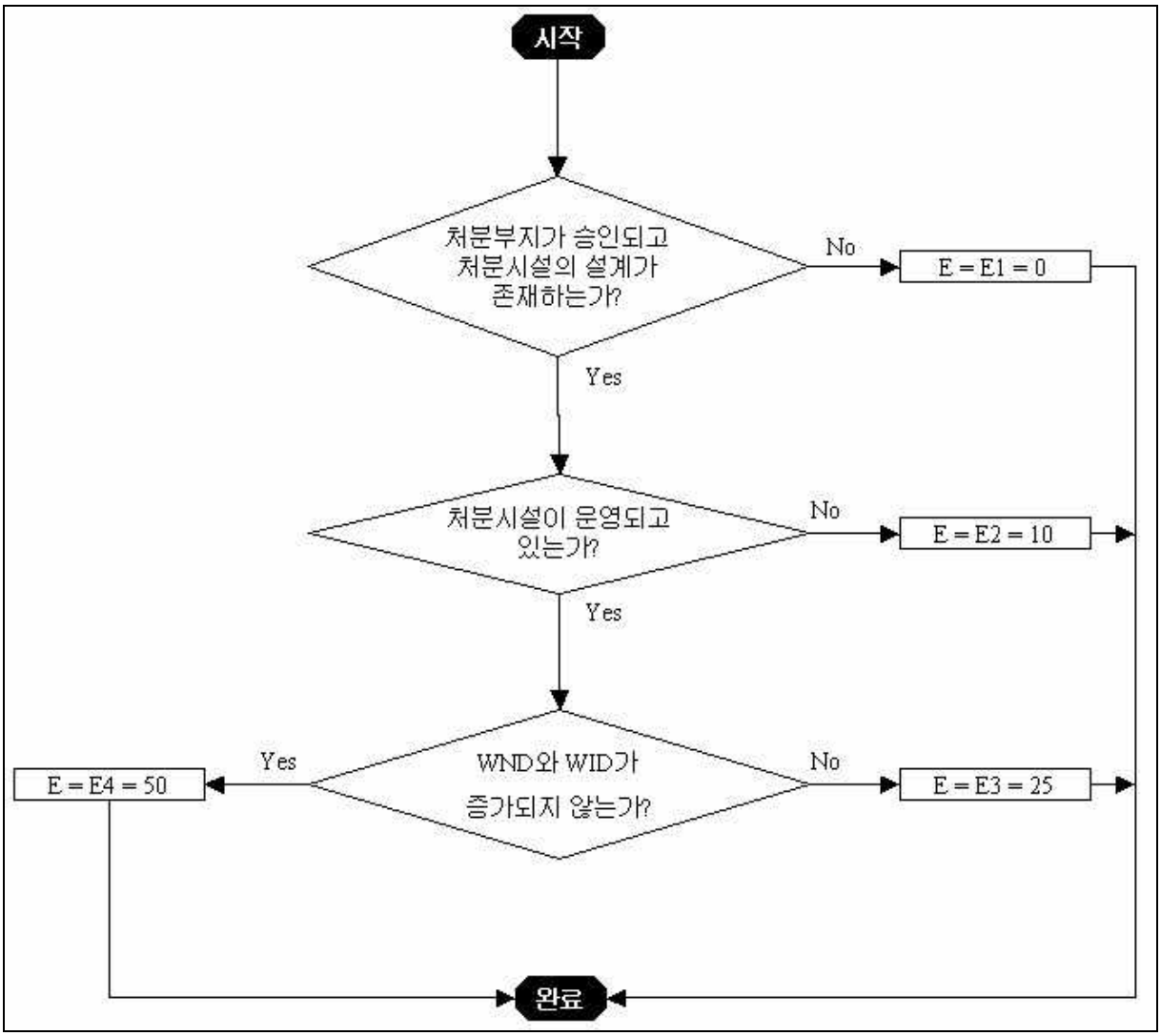

그림 2. ISD-RW 산출을 위한 처분인자 평가절차 [2]

3. 국가별 ISD-RW 평가

우리나라를 포함한 미국, 독일, 스페인, 일본, 프랑스, 핀란드의 방사성폐기물 관리현황자료를 조사한 후, 각 국의 ISD-RW 지표를 시범적으로 평가하였다. 각국의 형태인자 및 처분인자는 그림 3 및 4에, 형태인자와 처분인자의 합으로 표시되는 최종적인 ISD-RW는 그림 5에 도시하였다.

3.1 대한민국

국내 방사성폐기물 분류체계는 LILW(Low and Intermediate Level Waste), HLW 및 SF로 정의되며, 개별 폐기물에 대한 관리 특성은 다음과 같다(지표 산출결과는 표 5 참조).

가. LILW

- 저장단계의 안전성에 적합한 형태로 폐기물을 처리할 수 있는 능력을 확보하고 있으나, 아직까지 처분요건을 만족하지 못한 상태로 저장중인 일부 LILW이 존재한다 (F = F2 = 10).
- LILW 처분시설 후보부지가 선정되었으나, 아직까지 부지 또는 시설에 대한 승인은

이루어지지 못하고 있다(E = E1 = 0).

나. HLW

- 사용후핵연료를 제외한 고준위폐기물의 재고량은 미미한 수준이나 처분안전성을 만족할 수 있도록 HLW를 처리할 수 있는 상태라고 판정하기 어렵다(F = F2 = 10).
- 관련 법령 등에서 HLW의 최종적인 관리단계를 아직까지 정의하지 못하고 있다(E = E1 = 0).

라. SF

- SF는 발생시설 또는 저장시설에서 안전한 조건으로 저장되고 있다(F = F2 = 10).
- SF 중간저장시설을 최종적인 관리단계로 볼 수 없으며, SF의 처분 등 최종적인 관리단계에 관한 구체적인 정책은 부재한 상태이다(E = E1 =0).

표 5. 대한민국의 ISD-RW 평가결과

폐기물의 종류	형태인자	처분인자	ISD-RW
LILW	10	0	10
HLW	10	0	10
SF	10	0	10

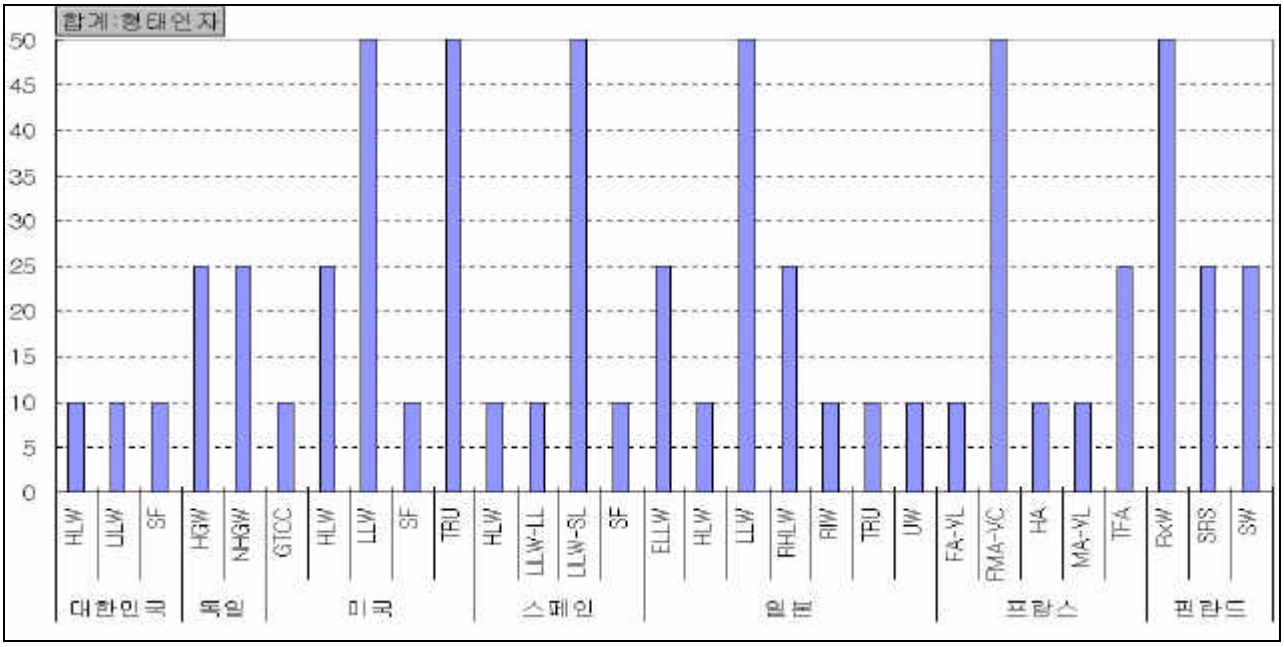

그림 3. 각국의 방사성폐기물 종류별 형태인자(Form Factor) 비교

3.2 미국

미국은 방사성폐기물을 LLW(Low Level Waste), GTCC(Greater Than Class C), HLW(High Level Waste), TRU(TransUranics) 및 SF(Spent Fuel)로 분류하고 있으며, ISD-RW 유도를 위한 방사성폐기물 관리의 특성은 다음과 같이 정리할 수 있다 [4].

가. LLW 및 TRU

- 처분에 부적합한 LLW 및 TRU의 재고량은 증가하지 않고 있다(F = F4 = 50).

- 처분을 위해 저장시설에서 대기중인 폐기물의 수량이 증가하지 않고 있다(E = E4 = 50).

나. GTCC

- GTCC를 안전한 저장조건으로 유지할 수 있는 능력을 확보하고 있다(F = F2 = 10).
- GTCC 처분시설에 관한 상세한 사항은 확립되지 않았다(E = E1 = 0).

다. HLW

- 고준위폐기물을 처분할 수 있는 능력을 확보하고 있다(F = F3 = 25).
- 처분시설의 상세한 사항은 아직 확립되지 않았다(E = E1 = 0).

라. SF

- 사용후핵연료는 안전한 저장조건으로 유지되고 있다(F = F2 = 10).
- 처분시설의 상세한 사항은 아직 확립되지 않았다(E = E1 = 0).

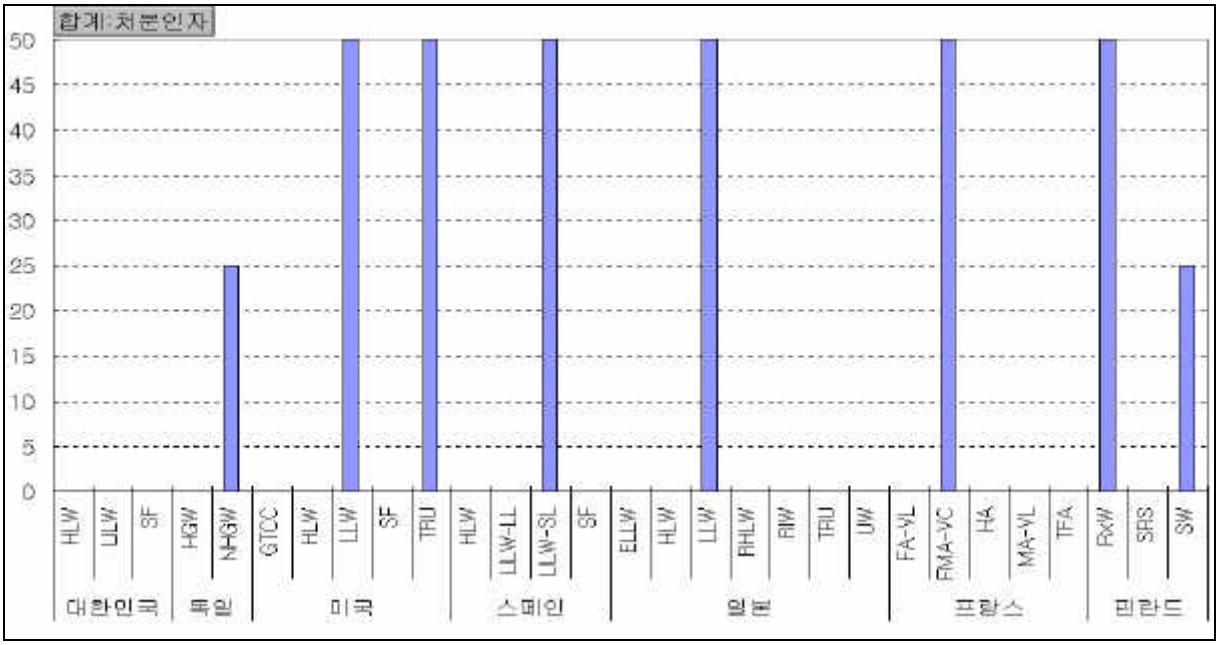

그림 4. 각국의 방사성폐기물 종류별 처분인자(Endpoint Factor) 비교

3.3 독일

독일은 자국에서 발생된 방사성폐기물을 HGW(Heat-Generating Waste) 및 NHGW(Negligible Heat Generating Waste)로 분류하고 있으며, 모든 HGW는 IAEA 표준분류체계에 따른 HLW에 해당하며 NHGW는 LILW-SL(90%) 또는 LILW-LL(10%)에 해당한다[2]. 현재 독일의 방사성폐기물 관리의 체계 및 특성은 다음과 같다.

가. HGW

- HGW를 처분에 적합한 형태로 처리할 수 있는 능력을 확보하고 있으며, 일부 HGW는 유리화된 상태로 저장되고 있다(F = F3 = 25).
- Gorleben 부지에서 HGW를 처분할 계획이 수립되어 있으나, 동 처분시설은 부지선

정만 완료된 상태이다(E = E1 = 0).

나. NHGW

- 현재 발생되고 있는 NHGW는 처분요건에 적합한 형태로 처리하여 저장하고 있다(F = F3 = 25).
- 1971-1998년까지 Morsleben 처분시설에서 NHGW 36,753 m^3를 처분하였으나, 이후 추진중인 Konrad 및 Gorleben 처분시설의 경우 아직까지 운영되지 못하고 있다. Konrad 처분시설은 운영허가를 취득하였으나 법적 소송 등으로 인하여 폐기물을 인수하지 못하고 있다(E = E3 = 25).

3.4 스페인

스페인은 방사성폐기물을 HLW, LILW-LL, LILW-SL 및 SF로 분류하고 있으며, ISD-RW 유도를 위한 방사성폐기물 관리의 특성은 다음과 같다 [2].

가. HLW

- HLW는 안전한 저장조건으로 유지되고 있다(F = F2 = 10).
- 처분시설의 상세한 사항은 아직 확립되지 않았다(E = E1 = 0).

나. LILW-LL

- LILW-LL은 안전한 저장조건으로 유지되고 있다(F = F2 = 10).
- 처분시설의 상세한 사항은 아직 확립되지 않았다(E = E1 = 0).

다. LILW-SL

- 발생된 LILW-SL은 처분요건을 충족하도록 처리된 후 처분되고 있다(F = F4 = 50).
- 1993년 이후 El Cabril 처분시설(CELDAS)에 LILW-SL을 처분하고 있으며, 2000년 기준으로 처분용량(50,000 m^3)의 36%에 해당하는 폐기물이 처분되었다(E = E4 =50).

라. SF

- SF는 안전한 저장조건으로 유지되고 있다(F = F2 = 10).
- 처분시설의 상세한 사항은 아직 확립되지 않았다(E = E1 = 0).

3.5 일본

일본은 처분안전성 측면에서 자국 내 방사성폐기물을 세분하여 개별 폐기물에 대한 관련 법령 및 요건을 설정하고 있다. 지금까지 확인된 법령상의 방사성폐기물 분류기준은 ELLW(Extremely Low Level Waste), HLW, LLW, RHLW(Relatively Higher Level Waste), RIW(Radio isotope/Institute Waste), SF, TRU 및 UW(Uranium Waste)로 세분할 수 있다. 개별 방사성폐기물에 대한 관리체계 및 관행은 다음과 같다 [5].

가. ELLW

- 대부분의 ELLW는 처분을 위한 별도의 처리가 요구되지 않는 폐기물이므로, 처분요건에 부합하도록 저장되고 있다고 볼 수 있다(F = F3 = 25).
- ELLW는 별도의 보강장치가 없는 천층 또는 피트(Pit)에 처분한다는 계획을 수립하고 실증실험 등을 수행한 바 있으나, 아직까지 ELLW 처분시설을 운영하지 않고 있다(E = E1 = 0).

나. HLW

- HLW는 안전한 저장조건으로 유지되고 있다(F = F2 = 10).
- 처분시설의 상세한 사항은 아직 확립되지 않았다(E = E1 = 0).

다. LLW

- 발전용원자로에서 발생된 LLW는 Aomori 처분시설에 처분되고 있다(F = F4 = 50).
- 처분시설이 운영되고 있음에 따라 처분을 위해 대기중인 LLW의 수량은 증가하지 않고 있다(E = E4 = 50).

라. RHLW

- 일본은 비교적 높은 준위의 방사성폐기물(LLW 처분시설의 처분상한치를 초과하는 폐기물)을 충분한 깊이의 지하에 처분할 계획이며, 이로 인하여 현재 저장중인 폐기물의 추가적인 처리 등은 요구되지 않는 것으로 판단하고 있다(F = F3 = 25).
- RHLW의 처분을 위한 법령과 기본 규제요건은 확립되었으나, 아직까지 처분 부지의 선정은 이루어지지 못하고 있다(E = E1 = 0).

마. RIW

- 방사성동위원소 폐기물 및 기타 연구기관 등에서 발생된 RIW는 저장에 적합한 형태로 저장되고 있다(F = F2 = 10).
- Aomori 처분시설은 발전용원자로에서 발생된 폐기물만을 인수하고 있으며, RIW의 처분을 위한 부지의 선정 등은 아직까지 수행되지 않고 있다(E = E1 = 0).

바. TRU 및 UW

- TRU 및 UW는 안전한 저장조건으로 유지되고 있다(F = F2 = 10).
- 현재 TRU 및 UW의 처분에 관한 규제요건을 개발하고 있는 단계이다(E = E1 =0).

3.6 프랑스

프랑스는 방사성폐기물을 FA-VL(LILW-LL), FMA-VC(LILW-SL), HA(HLW), MA-VL(중준위 장수명폐기물), TFA(극저준위폐기물)로 분류하고 있으며, 개별 폐기물에 대한 관리현황은 다음과 같다 [2].

가. FA-VL

- 장수명 중저준위폐기물인 FA-VL은 저장에 적합한 형태로 보관중이다(F = F2 =10).
- 현재 발생된 FA-VL은 전량 저장되고 있으며, 관련 처분시설은 부재한 상태이다(E = E1= 0).

나. FMA-VC

- FMA-VC는 la Manche 처분시설(1969-1994년 운영)에 처분되었거나 l' Aube 처분시설(1992-2060년 운영예정)에 처분되고 있다(F = F4 = 50).
- 현재 FMA-VC를 인수하고 있는 l' Aube 처분시설은 1999년 기준으로 저장용량(170,000m^3)의 66%가 포화된 상태이며 향후 FMA-VC를 처분용량을 1,000,000m^3으로 확장할 예정이다. 따라서 향후 지속적인 FMA-VC의 처분이 가능할 것으로 판단된다(E = E4 =50).

다. HA

- HA는 처리된 상태 또는 처리하지 않은 상태로 저장되고 있다(F = F2 = 10).
- HA 처분시설은 아직까지 운영되지 못하고 있다(E = E1 = 0).

라. MA-VL

- 장수명 중준위폐기물에 해당하는 MA-VL은 처리된 상태 또는 처리하지 않은 상태로 저장되고 있다(F = F2 = 10).
- MA-VL 처분시설은 아직까지 운영되지 못하고 있다(E = E1 = 0).

마. TFA

- TFA는 주로 원자력시설의 해체과정에서 발생되는 극저준위 폐기물로 단순한 매립 시설에 처분할 예정이다. 따라서 현재 동 폐기물은 처분에 적합한 형태로 저장되고 있는 것으로 평가된다(F = F3 = 25).
- TFA를 처분하기 위한 시설은 아직까지 운영되지 않고 있다(E = E1 = 0).

3.7 핀란드

핀란드는 방사성폐기물을 RxW(Reactor Waste), SW(Small Waste), SRS(Spent Sealed Sources)로 분류하고 있으며, ISD-RW 유도를 위한 방사성폐기물 관리의 특성은 다음과 같다 [6].

가. RxW

- RxW는 Loviisa 원전부지 및 Olkiluoto 원전부지의 처분시설에 처분되고 있으며, 처분을 위해 대기중인 RxW의 재고량 증가는 없는 것으로 조사되었다(F = F4 = 50; E = E4 = 50).

나. SW

- SW는 소량의 SRS와 오염폐기물로 구성되며 현재 동굴에 저장중이다. 향후 핀란드는 SW를 RxW와 함께 처분할 계획인 것으로 알려져 있다. 저장중인 SW는 처분요건을 만족한 상태로 저장되고 있는 것으로 평가된다(F = F3 = 25).
- SW의 처분을 위하여 RxW 처분시설을 그대로 이용할 예정이므로 SW 처분시설이 운영중인 것으로 볼 수 있다(E = E3 = 25).

다. SRS

- SRS는 처분에 적합한 형태로 처리되어 Olkiluoto 원전의 VJL-Cave 등의 동굴에 저장되고 있다(F = F3 = 25).
- SRS의 처분계획은 아직까지 명확하게 알려진 바 없다(E = E1 = 0).

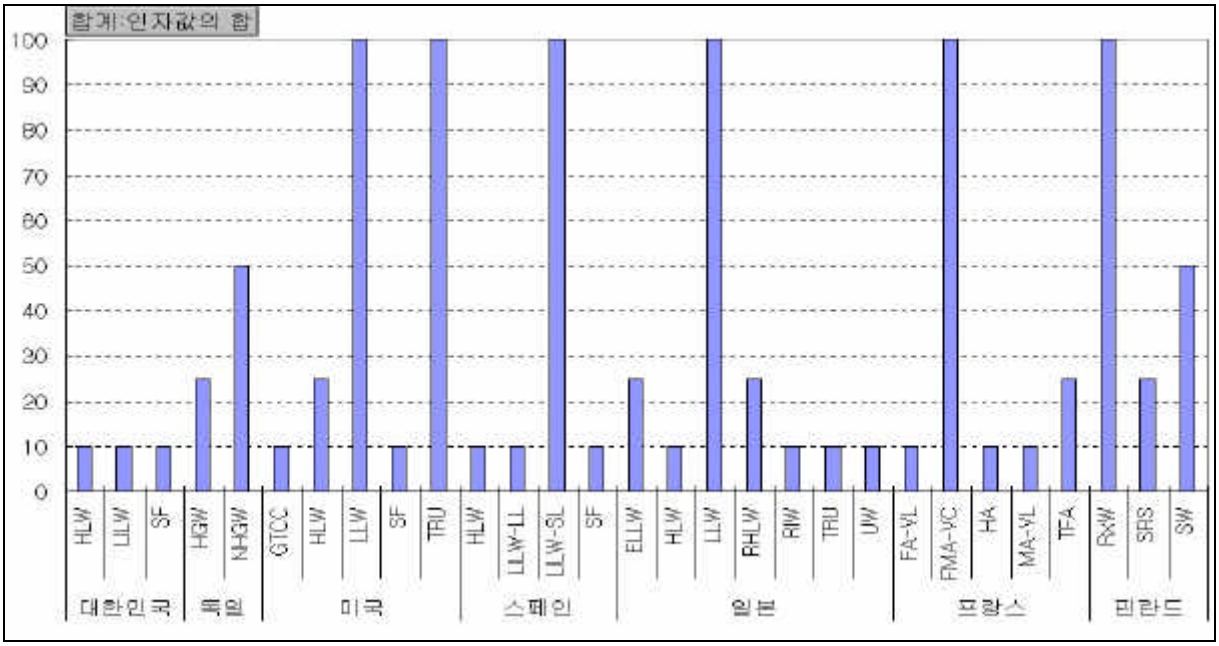

그림 5. 각국의 방사성폐기물 종류별 ISD-RW 지표 비교

4. ISD-RW 제고방안 및 향후 대책

4.1 ISD-RW 적용의 한계

IAEA가 제시한 ISD-RW 지표는 각국의 방사성폐기물관리 관행과 UN이 추구하는 지속가능한 개발방향과의 부합성에 대한 정량적인 척도로 유용하게 활용될 수 있으며, 또한 특정 국가의 방사성폐기물관리 관행이 지속 가능성 측면에서 점차 진전되고 있는가 또는 퇴보하고 있는가의 여부를 확인하기 위한 목적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 방사성폐기물관리에 영향을 미치는 방대한 수량의 인자를 단순화함에 따라 실제 적용과정에서 ISD-RW는 다음과 같은 한계를 내포하고 있는 것으로 분석되었다.

가. 상이한 방사성폐기물 분류기준의 적용

IAEA가 제시한 ISD-RW는 표준화된 방사성폐기물 분류체계가 아닌 국가별로 상이한 분류체계에 근거하여 평가하도록 개발됨에 따라 평가결과의 국가별 비교에 어려움이 있을 것으로 예상된다. 예를 들어 저준위폐기물을 A, B, C 및 GTCC등급으로 세분하고 있는 미국의 경우, 개별 폐기물의 관리에 대한 ISD-RW의 산출이 가능하다. 그러나 상기 폐기물을 LLW로 통합하여 정의할 경우 개별 폐기물관리에 대한 지속 가능성 지표의 평가가 현실적으로 불가능하다. 이 경우 LLW의 ISD-RW는 가장 보수적인 결과를 보여주고 있는 GTCC의 지표로 적용되어야 하므로 LLW 관리에 관한 지표가 상대적으로 과소평가될 수 있다. 따라서 국가별 ISD-RW를 비교할 경우 각국의 방사성폐기물 분류기준이 얼마나 상세하게 정의되어 있는가에 대한 평가가 선행되어야 할 것이다.

나. 최종적인 관리단계의 가변성

ISD-RW는 개별 방사성폐기물의 최종적인 관리단계에 도달할 경우 가장 큰 가중점을 부여하도록 구성되었으며, 최종 관리단계에 대한 정의는 국가별로 가변성이 있다. 즉, SF를 포함한 방사성폐기물의 최종적인 관리단계는 “처분” 또는 “장기저장”으로 정의될 수 있으며, 따라서 폐기물 관리수준이 유사한 경우에도 최종적인 관리단계에 대한 국가별 정의에 따라 ISD-RW 산출결과가 상이할 수 있다. 또한 국가 방사성폐기물 관리정책 변화(예; SF의 직접처분에서 순환핵연료주기로 선회)는 ISD-RW의 변경을 유발할 수 있다는 점에 유의할 필요가 있다. 따라서, 국가별 ISD-RW의 상호 비교를 위해서는 해당 국가의 방사성폐기물 관리정책 및 최종적인 관리목표에 대한 사전검토가 전제되어야 한다.

4.2 ISD-RW 제고방안

가. 처분안전성에 근거한 LILW 관리

LILW의 최종적인 관리단계를 처분으로 정의하고 있으나 아직까지 처분시설을 확보하지 못하고 있는 국내 상황을 고려할 때, 처분요건에 부합하는 형태를 갖도록 폐기물을 처리하여 저장함으로써 형태인자를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 현재 국내 원자력이용시설에서 발생되어 저장중인 대부분의 LILW는 처분요건과 부합하고 있으나, 일부 폐기물의 경우 처분안전성 측면에서 추가적인 고려가 필요할 것으로 예상된다. 이와 관련하여 현재 부분적으로 적용되고 있는 파라핀(Paraffin)을 이용한 안정화(Stabilization) 처리방법, HDPE(High Density Polyethylene) 재질의 폐수지 저장용기 등에 대한 처분 안전성 측면의 적합성에 대한 재검토가 필요할 것이다 [7]. 물론 구체적인 처분요건은 향후 국내 처분시설의 설계와 연계되어 도출될 것으로 예상되지만, 저장단계에서 국제적인 안전기준에 근거한 기본적인 처분요건을 준용함으로써 형태인자를 제고하고 처분단계에서 요구될 수 있는 재포장/재처리 등의 가능성을 최소화할 수 있을 것이다.

나. 최종적인 관리단계의 결정

ISD-RW의 구성요소인 형태인자 및 처분인자를 제고하기 위해서는 우선 방사성폐기물 종

류별로 최종적인 관리단계에 대한 정의가 선행되어야 한다. 국내 원자력관계법령에 따르면 LILW의 최종적인 관리단계는 천층처분으로 정의할 수 있으나, SF의 경우 최종적인 관리단계에 대한 정의가 명확하지 않은 상태이다. 그러나 아직까지 후행핵연료주기 정책결정을 유예하고 있는 상황에서 지질학적 처분을 SF의 최종 관리단계로 선언하는 것은 타당하지 못하다. 따라서 SF의 최종적인 관리단계는 현재 추진중인 고준위폐기물관리법 등과 연계하여 신중하게 결정하고, 그 이전까지 ISD-RW의 적용 대상에서 SF를 제외하는 방안을 강구할 필요가 있다.

다. 방사성폐기물 분류체계의 개선

국내 원자력관계법령에서는 방사성폐기물을 LILW, HLW 및 SF로 분류하고 있으며, 이러한 분류체계는 처분안전성에 근거한 1994년 IAEA의 표준 분류체계를 반영한 것으로 방사성폐기물관리의 지속 가능성 측면에서 과거 법령체계에 비해 진일보된 것으로 평가된다. 그러나 아직까지 국내 법령에서 별도로 구분하지 않고 있는 혼합폐기물(Mixed Waste), 처분상한치를 초과하는 폐기물(미국의 GTCC에 해당) 등은 처분안전성 측면에서 기타 LILW와 구분하여 세분할 필요가 있다. 최종적인 관리단계 또는 처분요건에 따라 방사성폐기물의 분류기준을 보다 세분화함으로써, 개별 폐기물관리의 지속 가능성을 보다 상세하게 평가할 수 있고 상대적으로 ISD-RW가 낮게 평가된 폐기물에 대한 관리정책의 수립에 도움이 될 것으로 기대된다.

4.3 방사성폐기물 데이터베이스와 ISD-RW의 연계성

가. IAEA의 NEWMDB

IAEA가 운영중인 Net Enabled Waste Management Database (NEWMDB)은 UN의 지속 가능한 개발에 관한 지침을 충족하기 위한 목적으로 개발되었으며, 회원국의 방사성폐기물 관련 정보를 주기적으로 수집/저장하는 기능 이외에 ISD-RW 평가를 지원하기 위한 기능도 함께 갖추고 있다. IAEA는 NEWMDB을 이용하여 지속 가능한 개발을 위한 UN의 지표적용을 위한 훈련 및 시험프로그램을 이행할 계획이다. 그러나 현재 운영중인 NEWMDB는 지표의 평가에 필요한 모든 정보를 제공하지는 못하고 있으며, 따라서 향후 ISD-RW를 산출하기 위해 필요한 정보가 NEWMDB에 추가될 것으로 예상된다. 또한 관련 지표는 각 회원국에서 채택하고 있는 방사성폐기물 분류체계에 따른 개별 폐기물에 대해 산출되므로, IAEA는 방사성폐기물 분류체계에 대한 국제적인 합의를 통해 NEWMDB 및 ISD-RW의 활용성을 제공한다는 전략을 수립하고 있는 것으로 알려져 있다 [8].

나. WACID 시스템

2001.07월 공포된 제2차 원자력진흥종합계획에서는 안전규제의 효과 및 효율성을 제고하기 위한 추진계획의 하나로 국내 방사성폐기물과 사용후핵연료에 대한 안전관리 통합정보시스템을 우선적으로 구축하여 폐기물의 안전관리내용을 일반대중에게 적극적으로 공개하기로 하였다. 이와 관련하여 한국원자력안전기술원은 2004.05월 운영을 목표로 인터넷을 기반으로 일반대중 및 국내외 이해관계자에게 신뢰성 있는 정보를 제공하기 위한 목적으로 방사성폐기물 안전관리 통합 시스템(WACID: WAste Comprehensive Information Database)을 개발하고 있다 [9].

WACID 시스템은 향후 관리의 효율성을 제고하기 위하여 데이터의 특성에 따라 중저준위폐기물, 사용후핵연료, 액체/기체 방사성유출물, 해체폐기물, 동위원소폐기물(밀봉/개봉선원) 등 모듈별로 개발되고 있으며, 방사성폐기물의 소외운반, 사용후핵연료의 중간저장을 비롯하여, 영구처분시설 관련 기초정보까지 취급할 수 있는 기능이 포함될 예정이다. 이에 따라 향후 국내 방사성폐기물관리의 지속 가능성을 평가하고 이를 토대로 관련 정책의 수립 및 이행을 지원하기 위하여, ISD-RW 지표의 평가를 위한 데이터의 수집 및 평가도구를 WACID에 반영하는 방안을 적극적으로 검토하고 있다.

6. 결론

최근 방사성폐기물관리는 UN이 중점적으로 추진하고 있는 "지속 가능한 개발"의 일환으로 논의되고 있으며, IAEA가 개발한 ISD-RW 지표는 NEWMDB의 적용과 더불어 향후 활용범위가 점차 확대될 것이다. ISD-RW 지표는 궁극적으로 각국의 방사성폐기물관리 체계 및 관행을 정량적으로 상호 비교하는 목적으로 이용될 것으로 예상된다. 이와 관련하여 본 연구에서는 ISD-RW의 도출과정과 산출절차를 사전에 정립하고, 우리나라를 포함한 주요 국가의 방사성폐기물관리 체계 및 관행에 대한 지속 가능성 지표를 시범적으로 산출하였다. 그 결과 주요 원자력 선진국에 비해 국내 방사성폐기물관리의 지속 가능성 지표는 상대적으로 열악한 상황인 것으로 평가되었으며, 향후 (1) 방사성폐기물 분류기준의 세분화, (2) 처분안전성을 고려한 폐기물 처리체계 보완, (3) 처분안전성을 고려한 구체적인 요건설정, (4) LILW 처분시설 및 SF 중간저장시설 건설사업의 지속적인 추진 등이 보완대책으로 도출되었다.

앞으로 국내 방사성폐기물 관리사업은 UN의 지속 가능한 개발방향과 부합하고 ISD-RW 지표를 증대할 수 있는 방향으로 추진되어야 할 것이며, 관련 정책의 수립 및 이행과정에서 지속 가능성 지표에 대한 사전 검토와 보다 상세한 평가가 요구된다. 이와 관련하여 현재 개발중인 국내 방사성폐기물 안전관리 통합정보시스템에 ISD-RW의 산출을 위한 평가도구와 관련 데이터를 반영하는 방안이 적극적으로 검토되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구기반확충사업 중 "방사성폐기물 안전관리 통합정보시스템의 구축 및 운영" 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. United Nations, Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies, 2001.
2. International Atomic Energy Agency, Radioactive Waste Management Profiles - a Compilation of Data from the Net Enabled Waste Management Database(NEWMDB), No. 4, 2002.
3. G.W. Csullog et al., "The Net Enabled Waste Management Database in the Context of Radioactive Waste Classification", International Conference on Issues and Trends in Radioactive Waste Management, Dec. 9-13, Vienna, 2002.
4. US DOE, Integrated Data Base Report-1996: US Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste Inventories, Projections and Characteristics, DOE-RW-0006, 1997.
5. Yasuo Nakagami, Waste Management Program in JNC and its Contribution to National Program, PBNC, China, Oct. 21-25, 2002.
6. STUK, Treatment and Storage of Radioactive Waste at a Nuclear Power Plant, YVL 8.3, 1996.
7. 정재학 등, 주요 핵종별 규제해제기준(안)의 도출 및 기타 방사성폐기물의 안전관리 체계에 관한 고찰, 방사선안전평가 심포지움, 2002.
8. 정재학 등, "방사선량 등을 정하는 기준" 제정/공포에 따른 후속조치, 원자력안전, Vol. 11, 한국원자력안전기술원, 1999.
9. W.J. Park and J.H. Cheong, Development of the Comprehensive Database System for Radioactive Waste Management, 1st International Workshop on Radiation and Environment Technology, April 11, Seoul, 2003.