

Development of ACBIO: A Biosphere Template Using AMBER for a Potential Radioactive Waste Repository

AMBER를 이용한 방사성폐기물처분장 생태계 평가 템플릿 ACBIO 개발

Youn-Myoung Lee, Yongsoo Hwang, Chul-Hyung Kang and Pil-Soo Hahn

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duckjin-dong, Yuseung-gu, Daejeon

vmlee@kaeri.re.kr

이연명, 황용수, 강철형, 한필수

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

(Received December 21, 2004 / Approved March 14, 2005)

Abstract

Nuclides in radioactive wastes are assumed to be transported in the geosphere by groundwater and probably discharged into the biosphere. Quantitative evaluation of doses to human beings due to nuclide transport in the geosphere and through the various pathways in the biosphere is the final step of safety assessment of the radioactive waste repository. To calculate the flux to dose conversion factors (DCFs) for nuclides appearing at GBIs with their decay chains, a template ACBIO which is an AMBER case file based on mathematical model for the mass transfer coefficients between the compartments has been developed considering material balance among the compartments in biosphere and then implementing to AMBER, a general and flexible software tool that allows to build dynamic compartment models. An illustrative calculation with ACBIO is shown.

Key words : radioactive waste repository, biosphere, ACBIO, AMBER, dose conversion factor

요 약

심부 및 천부 지질 환경을 갖는 지하 모암 내의 방사성 폐기물 처분장으로부터 유출된 핵종은 다양한 인공 및 지하 매질을 거쳐 궁극적으로 인간 생태환경으로 도달하게 된다. 그 결과로 인간에게 주는 피폭선량을 정량적으로 계산하는 것은 처분안전성 평가의 최종 단계가 된다. 방사성 폐기물에 포함된 핵종에 대해 붕괴사슬을 고려하고 방사성폐기물처분 시스템의 주요한 부분

을 이루는 생태계를 구획으로 모델링 한 후 이들 구획간의 핵종이동에 대한 전이계수를 적용하여 동적 구획모델을 기반으로 하는 AMBER를 이용한 케이스화일로서 ACBIO템플릿을 개발하고 이를 이용하여 각 핵종별 선량환산인자를 평가해 보았다.

중심단어 : 방사성폐기물처분장, 생태계, ACBIO, AMBER, 선량환산인자

I. 서론

심부 및 천부 지질환경내 결정암류의 모암 내에 위치한 고준위 방사성폐기물 처분장에 처분된 폐기물 내의 핵종은 지하수와 접촉이 시작되면 필연적으로 처분용기를 나와 주변 환경으로 유출하게 된다. 유출된 핵종은 지하수의 유동을 따라 특성을 갖는 인공 및 천연방벽의 매질을 따라 궁극적으로 지표에 도달하여 인간 생태계로 전이, 이동하게 된다. 생태계로 유출된 핵종이 인간에게 주는 피폭을 시간에 따른 정량적인 영향, 즉 피폭 선량률로서 산출하기 위해서는 일련의 생태계 피폭 시나리오를 도출하고 이를 개념적/수학적 방법을 통해 모델링하여야 한다. 이러한 평가는 처분시스템의 방사선적 안전성평가의 최종 단계가 된다.

생태계에서의 방사성 핵종의 이동 및 확산에 관한 연구는 원전의 건설 및 운영에 따른 인허가 과정을 위해 유사한 안전성평가 방법론으로 접근되어 온 사례가 있지만, 원전의 안전성평가에 관련된 주요 방사성 핵종이나 핵종 각각의 이동 특성과 메커니즘은 처분장의 그것과 상이하다. 일례로 원전의 경우 대기와 해양을 통한 지상에서의 확산 이동이 주요한 이동 메커니즘이 된다면 처분장의 경우는 심부 및 천부 지질 환경에서의 지하수의 유동과 생태환경에서의 섭생 경로에 의한 복잡한 형태의 핵종 이동이 그 주요한 이동 메커니즘이 될 수 있다.

두 경우는 매질과 시스템 측면에서의 차이를 보이기도 하지만, 처분장의 경우는 대상 핵종의 반감기나 다양한 매질을 거쳐 생태계로의 이동에 있어서 매우 느린 속도를 보여 원전의 경우와는 본질적으로 다른 평가모델과 방법론을 요구하게 된다.

생태계 평가의 한 방법으로서, 우선 평가 대상이

되는 처분 시스템 주변 특정 지역에 대한 지역 생태계 특성들을 자세히 파악하여 지하수가 생태계로 방출되는 위치, 즉 지하매질과 경계를 이루는 접점 지역을 찾아 이 곳을 생태계 평가를 위한 선원항으로서 GBI (Geosphere- Biosphere Interface)로 간주하면 이후의 생태계에 대한 모델링은 지하매질에서의 핵종의 이동과는 별도로 수행해 나갈 수 있다. GBI를 나온 핵종의 전이 및 이동에 관련된 다양한 FEPs(Features, Events, and Processes)로부터 취사 선택과정 (Screening process) 및 조합과정을 통하여 가능한 핵종 유출 및 전이 시나리오를 도출해 내고 이에 대한 개념 모델을 선정한 다음 정량적인 평가가 가능한 수학적 모델로 전환한다. 모델이 완성되면 실제 평가를 위해서는 적당한 평가도구로서의 전산코드와 이에 필요한 관련 입력자료가 요구된다.

평가의 결과로서 피폭 대상 개인당 핵종별 연간 피폭선량률을 얻게 되는데 GBI를 통해 생태계로 유입되는 핵종별 단위 유출 방사능 플럭스 (1 Bq/yr)에 대하여 피폭대상이 받는 선량률 ($\frac{Sv}{yr}$)로서 선량환산인자 (Flux-to-dose conversion factor; DCF)를 단위 방사능 유출률당 피폭선량률로 산출하게 된다. 그러면 이 단위선량률을 통해, GBI로 유입되는 핵종별 방사능값을 연간 개인별 피폭선량률로 환산할 수 있게 되어 처분장의 안전성과 처분시스템에 대한 인간 환경에 대하여 장기간에 걸친 방사선적 안전성을 보이기 위한 방안, 즉 안전 기준치와의 비교를 위한 지표 (Safety indicator)로 사용할 수 있게 된다.

그러나 신뢰도 제고를 위해서는 생태계 피폭계산에 사용된 입력 변수들이 충분히 확보되어야 하고 이들 파라미터의 신뢰도에 대한 불확실성에 대한 평가도 뒤따르는 것이 바람직한 것은 물론이다.

이 논문에서는 방사성폐기물처분장과 이 처분장

이 총체적으로 관련되어 있는 처분 시스템에 대해 임의로 선정된 18개 모핵종과 이들의 자핵종을 합하여 총 31개 핵종에 대하여 여러가지 발생 가능한 핵종의 전이 및 이동 경로에 대한 모델링을 거쳐 이에 대한 정량적 평가를 위한 템플릿을 개발하고 이를 이용한 평가를 수행하여 보았다. 개발된 ACBIO (Amber Case for BIOSphere modeling) 템플릿은 동적 구획 모델링을 가능하게 하는 범용 AMBER [1]를 기반으로 하여 개발된 케이스 파일로서 각 핵종별 선량 환산 인자를 도출하고 생태 시스템 파라미터에 대해서 확률론적 평가를 가능하게 하는 코드로 다양한 파라메트릭 스터디를 통한 민감도 분석도 수행할 수 있다. ACBIO 템플릿은 최소한의 수정 및 독립적으로 관리 가능한 입력화일의 상호 공유를 통하여 향후 개발되는 처분시스템을 탄력적으로 반영하여 DCF를 계산해 낼 수 있도록 개발되었다. AMBER는 그 자체로 다양한 구획간의 동적 질량 이동에 관한 모델링에 유용하여 개발된 생태계 모델링 외에 핵종의 이동 등에도 다양한 응용이 가능하여 ACBIO 템플릿의 개발과 병행하여 다른 상세한 처분장 안전성 평가를 위한 템플릿 코드 개발을 위해서도 다양하게 활용되고 있다. [2~4]

II. 생태계 평가를 위한 기본 개념과 가정

평가 대상으로서 생태계는, 보다 정적이며 상대적으로 단순한 지하매질에 비해서는 그 자체로서 시간과 공간에 따른 변동이 심하고, 미래의 환경변화에 따른 불확실성을 필연적으로 내재하게 되어 현 시점의 관점에서는 아무래도 개념적으로나 수학적으로나 정확하게 예측하기 힘든 시스템이다.

이 때문에 보다 합리적인 기준생태계(Reference Biosphere)라는 개념의 도입이 필요하게 되어, 1999년 IAEA 국제공동연구로 진행되었던 BIOMASS[5~7]를 통해 기준생태환경이라는 개념이 제안되었다. BIOMASS 연구를 통하여 제시된 기준 생태계는 “처분장에서 장기간에 걸쳐 생태 환경으로 유출된 방사성 핵종으로 인한 방사선적 영향을 평가하기 위한 일관된 개념을 마련하기 위해 요구되는 합리적인 가정

과 가설의 집합”으로 정의되고 있는데, 이로서 1996년 BIOMOV5 II[8]를 통해 도출된 생태계 FEP 리스트와 국제방사선방호위원회(ICRP)의 처분장에 관련된 제원칙 등을 고려한 생태계에 대한 기준 시스템이 한 가지 방법론(Reference Biosphere Methodology) [9~10]으로서 제시되었다.

이 기준생태계 방법론은 H12 보고서[11] 등 여러 나라에서 널리 사용하고 있는 개념으로 생태계 조건들의 변화는 시간의 흐름에 따라 수밖에 없더라도 현재 시점의 조건 및 환경들이 변화하지 않고 그대로 유지된다고 가정하는 것이 정확한 입력 자료가 없고 다른 대안이 없는 현 시점에서는 가장 적합한 개념으로 보여지기 때문에 이 논문을 통해서도 이러한 기준생태계를 가정하여 적용하였다.

처분시스템과 생태환경을 분석하여 생태계 평가에 대한 골격(Assessment context)이 만들어지면 지질환경, 지하수의 유동, 그리고 지표의 지형지세(Topography) 등 이 시스템에 대한 상세한 기술과 적합한 가정을 통해 생태계와의 직접GBI, 즉 지하수가 생태계로 유입되는 지점을 찾아낸 후 대상 피폭집단을 결정한다. 다음 BIOMOV5 II와 같은 국제 공동연구와 자체 국지적 연구 등에서 개발된 FEP리스트를 분석 선별하여 평가 대상 생태계에 적합하고 가능한 리스트를 가려내면 이로부터 평가 시나리오를 도출할 수 있게 된다.

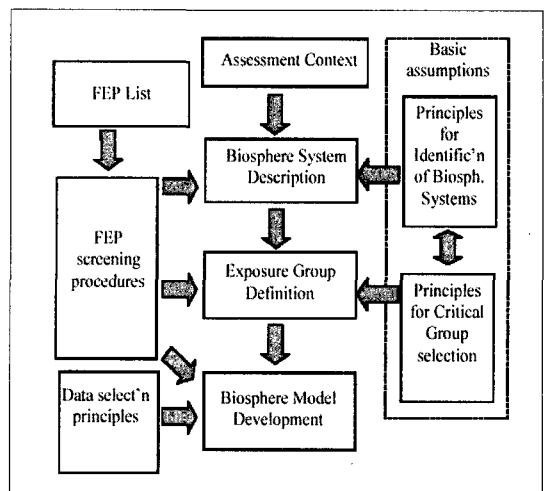


그림 1. Reference biosphere methodology.

피폭 대상을 결정하는 방법으로는 핵종이 이동하는 경로를 따라 그 끝에 최종적으로 위치하는 피폭 대상 집단을 취해 단일한 피폭 대상으로 결정하는 방법도 가능하겠지만 피폭 집단의 위치를 먼저 결정하고 이 곳에 이르는 핵종에 대한 영향에 대한 평가를 수행한 후 피폭집단간 상호 비교를 통해 특정 위치의 집단을 결정집단(Critical group)으로 간주하는 방법도 있을 수 있다.

후자의 경우는 개개의 핵종에 대해 이들 핵종의 지하 및 생태환경에서의 특성적이고 선호적인 거동을 반영하여 이에 따라 다수의 피폭 집단들이 그 특정한 위치에 따라 동일한 핵종이라도 차별적으로 피폭을 받을 수 있다는 이유에서 보다 합리적인 것처럼 보여진다. 따라서 이 논문에서도 몇 개의 가능한 피폭 집단을 미리 설정하고 이를 평가한 후 비교하여 피폭집단 사이에서 결정적인 피폭집단(Critical exposure group)을 찾아 내는 방법을 도입하였다.

표 1과 같은 생태계 평가를 위한 가정은 현재의 전형적인 한국 임해 환경을 고려한 것이다.

그림 2에서 보는 바와 같이 대수층으로 유출된 모든 핵종들은 강이나 하천 같은 지표수, 또는 바다를 향하여 이동하게 되어 사실상 이들이 주요한 GBI로 되어 이 경로를 통해 핵종이 생태계로 직접 도달한다는 전형적인 가정이 가능하다. 이는 우리나라 임해 환경에 비추어 어느 정도 타당하다고 판단된다. 방법론이 중요한 현 시점에서 가장 대표적인 시나리오로

서 강이나 하천을 통하여 생태계로 핵종이 유입되는 경우와 바다로 직접 유입되는 경우의 2개로만 한정하기로 하여 이 논문을 통해서는 따로 우물이나 호수 등의 지표수를 고려하지는 않지만 GBI는 이보다 더 다양한 형태로 존재할 수도 있으며 이러한 GBI는 따로 부지특성에 맞게 심도있는 연구를 통하여 찾아내야만 한다.

이에 따라 전형적인 한국 임해 처분장 환경을 고려하여 농축산업(Farming), 담수어업(Freshwater Fishing), 그리고 해양어업(Marine Fishing) 이렇게 3개의 피폭집단을 도출해 보았다.

우리나라의 환경 생태계 섭생 자료에 따라 보다 합리적인 피폭집단의 도출이 필요하겠지만, 평가의 단순화를 위해 국지적 농축산물이나 수해산물의 섭취 방식의 분류에 따른 정의를 통하여 집단 내에서 자급자족이 이루어지는 농축수산물에 대해서만 한정된 피폭 경로를 가정함으로써, 가령 농축산업의 경우에는 해산물의 섭취를 무시하고, 해양어업의 경우에는

표 1. Assumptions for constructing reference biosphere

위 치	미정인긴 하지만 한국내의 임해 처분장
처분 환경	강물 등 하천에 의해서만 관개가 이루어지는 농토와 임해 연안지역, 그 근방의 어장
지표지형조건 (Topography)	산악지역에서 해안으로 완만한 경사를 갖는 지형으로 처분장과 바다 사이에 지표수로서 강이나 하천이 존재하나 따로 식수를 위한 우물은 존재하지 않음
기 후	현재 한국의 기후와 온도 (영구 불변)
토지 이용	경작지의 경우는 농업 및 목축업, 그리고 강과 바다인 경우는 어업 및 수산업
생활형태	오늘날의 한국 사회 환경으로 해당 지역에서 산출되는 농수산물의 섭취. 가령 타지역 반입 농산물 사용은 반영하지 않음

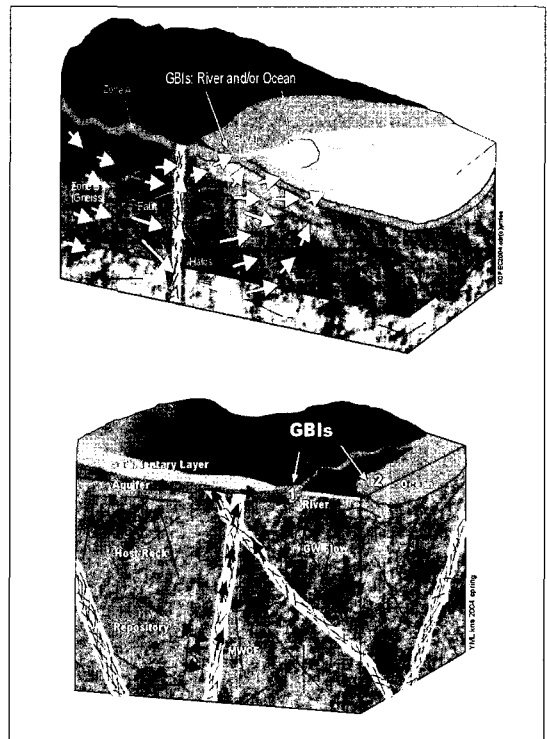


그림 2. Nuclide transport concept from the repository to GBIs.

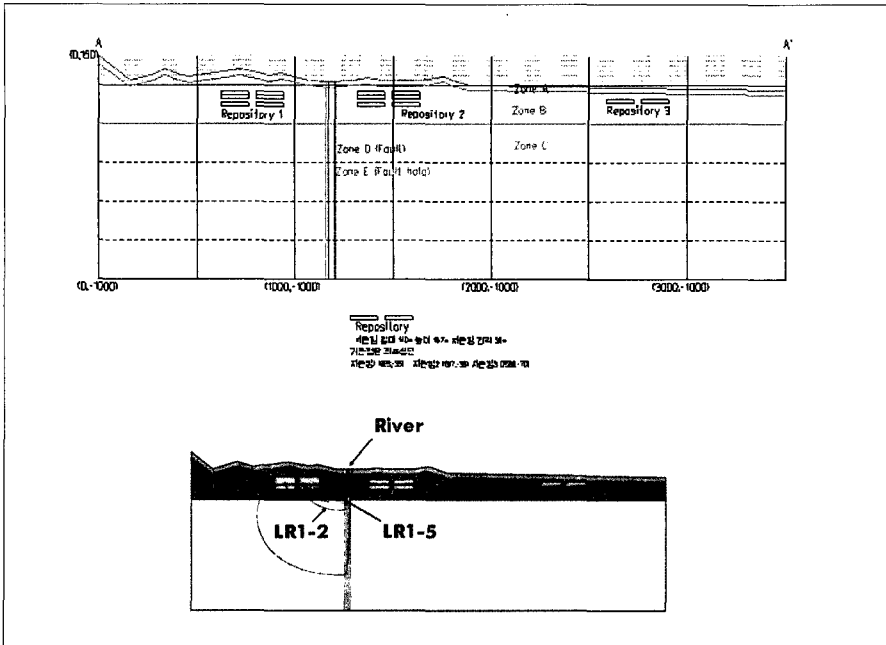


그림 3. Geological concept around the repository and groundwater flow pathways.

는 평가대상 생태계 내에서의 음용수나 쌀의 섭취는 무시하는 방법으로 피폭집단별로 타 집단에 대해 폐쇄적인 개념을 도입하기로 한다.

Ⅲ. FEP 상호 관계 및 생태계 개념 모델링

생태계 내에서 방사성 물질의 전이와 이동을 모델링하고 평가하기 위해서는 대상 생태계 시스템을 이루는 각 요소, 즉 구획 상호간 핵종의 전이와 이동 메커니즘을 파악하는 것이 필요하다. 구획은 아무래도 강이나, 바다, 우물, 그리고 강에서도 강물과 강바닥 등 이렇게 물리적으로나 이동현상으로나 현저하게 구분될 수 있는 형태를 따라가는 것이 모델링상으로도 편리하다. 즉, 지표 토양층과 가변 불포화 토양층, 지표수와 그 바닥, 그리고 강물과 핵종의 유입해 영향을 받을 만한 넓이를 갖는 연안해수층과 그 침전층은 경계가 분명하게 나타나는 좋은 구획이 된다.

구획 모델링 방법은 캐나다 AECL의 EIS[12], 스웨덴 SKB-91[13], SITE-94[14] 그리고 미국 EPR[15]의 생태계 평가에 사용되었던 보편적인 접근 방법으로 이러한 구획을 따라 전이, 이동, 분포하는 핵종은 다

양한 경로의 섭취나 호흡, 그리고 외부피폭 등을 통해 어느 정도는 단계적으로 인간에게 전달되어 피폭을 주게 되므로 이 모든 경우에 대해 구획 개념을 도입할 수 있게 되어 편리하다. 그렇지만 곡류와 가금류, 그리고 인간과의 직간접적인 먹이사슬을 형성하고 있는 경우와 같이 복잡한 모델링 방법론이 요구되고 이에 따른 방대한 자료를 가능한 한 정확하게 평가하기 위해서는 핵종 이동 경로에 대한 이해와 함께 타당한 피폭 경로 설정과 신뢰도 있는 데이터가 요구된다는 점에서는 주의가 필요하다.

GBI가 강이 되는 경우에는 농축산업이나 민물어업에 관련된 취락을 고려하여 지표수에서 근원된 피폭 경로가, 그리고 처분장이 임해에 위치하게 된다는 전제 하에 GBI가 바다로 되는 경우에는 해양 어업집단에 관련되어 바다에서, 즉 해수에서 근원된 피폭경로가 고려되는 것으로 하였다.

처분장이 위치하는 천부 및 심부 지하매질로부터 유출된 핵종이 이 두 생태계와의 경계로서 강과 바다를 목표 지점으로 하여 이동해 나와 생태계로 들어선 순간부터 생태계의 각 구획사이에서 일어나는 전이와 이동을 고찰하는 것으로 하면, 각 구획간의 상호

반응은 그림 4와 같이 매트릭스 형태로 표시할 수 있어 일목요연해진다. 생태계 내 각 구획간의 상호 반응을 도시한 이러한 매트릭스를 RES(Rock Engineering System)[16]라고 하는데, 이러한 행렬을 통하여 생태계 평가를 위한 기본 요소(주대각선; Leading diagonal element)와 이들 사이의 상호 반응(ODE; Off-diagonal elements)이 명확하게 설정되고 파악 될 수 있다.

각 주대각선은 생태계를 이루는 단위 요소로서의 구획이 되는데, 그림 4a는 GBI가 강으로 되는 경우로, 선원항으로서 생태계로 유입하는 지하수와 그 지하수가 들어 오는 강물(River water), 강물에 의해 관개나 홍수 등에 의해 2차 오염되는 표토(Surface soil), 표토로부터 오염된 지하수가 스며들 표토 하부의 가변 충전층(Vadose zone), 강물내의 오염물이 침전하게 될 강바닥(River sediment), 그리고 마지막으로 시스템외로 벗어나는 구획을 기술하는 최종 Sink항 이렇게 6개의 구획으로 구성될 수 있다. 그러나 핵종의 유출지점이 바다가 되는 경우는 이보다 단순해져서 처분장이 해저 암반매질 내에 위치하는 경우나 지표수와는 관계없이 모두 해수로 유입되게 되는 경우로 되어 그림 4b와 같이 해수 (Marine water)와 해수바닥(Marine sediment)과 선원항, 그리고 Sink항 이렇게 단지 4개만의 구획이 주대각선에 위치하는 것으로 충분할 수 있다.

주대각선 주변의 외대각선은 이 주대각선상 구획들간의 상호반응을 보여주게 되는데, 이들이 곧 선별된 FEPs가 된다.

시스템 및 개념적 모델링이 완료되어 이들 각 구획에서 인간 피폭에 이르기까지 다양한 섭생경로를 통한 직접적인 피폭이나 혹은 수증기나 대기층 또는 식물군 등에 대한 간접적인 경로를 통하여 이루어지는 메커니즘에 대한 수학적 모델이 만들어지면 비로소 AMBER와 같은 범용 구획모델링 코드를 이용하여 정량적인 피폭 선량을 계산해 낼 수 있는 모델을 개발할 수 있게 된다. AMBER 그 자신은 그저 유일하게 방사성 붕괴항만 가지고 있는 범용 동적 구획모델링 코드이지만 다양한 기능과 사용자 편의 환경으로 특히 생태계 평가와 같은 선형 구획 모델 및 평가 코드 개발에 유용하게 적용할 수 있는 원형코드로 이를 이용하여 케이스 파일로서의 ACBIO 템플릿을 개발하였다.

평가대상이 되는 생태계에 대한 구획은 RES 상호 반응 행렬에 나타난 주대각선의 구획들과 이 구획 상호간의 반응, 즉 핵종 이동 및 전이 경로들을 고려하여 그림 5와 같이 만들어 질 수 있다.

방사성 핵종의 이동은 결국 이러한 구획들간의 상호 반응과 섭생을 통한 전이 및 이동으로 설명되며, 이때 대기(Atmosphere), 식물(Plant), 그리고 동물(Animal)의 경우에 대해서는 지표 토양, 강과 해양 구획내에 존재하는 핵종들의 농도는 평형에 도달하였다고 가정한다.

한편, 처분시스템 내 각 구획으로부터 인간환경으로의 세부 피폭경로(Pathway), 즉 선정된 세 개의 피폭 집단, 즉 농축산업, 담수어업, 그리고 해양 어업집단들에 대한 섭취 경로들은 그림 6과 표 2에 요약되

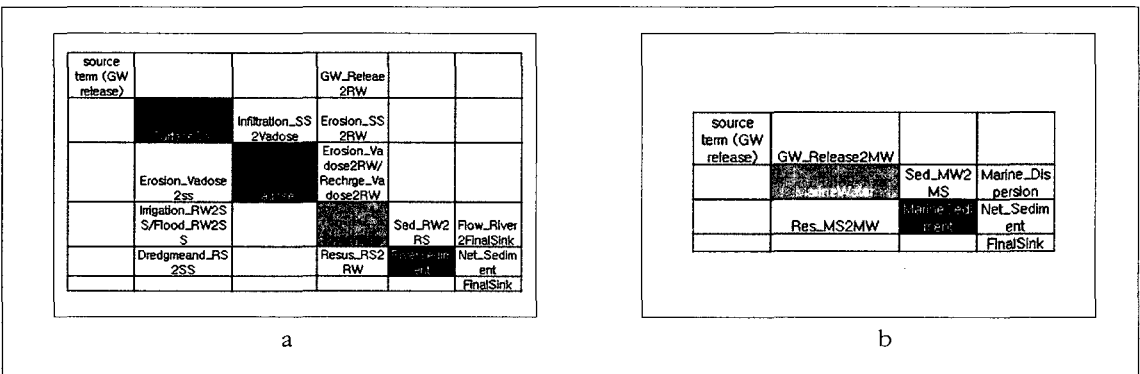


그림 4. Interaction matrix for biosphere modeling (GBI: a. river; b. ocean).

어 있다.

이들 세 피폭집단의 일반적인 생활 양식은, 피폭 집단에 속한 개인의 나이와 식생활 습관 생활양식 등의 차이는 있겠지만, 각 집단의 평균적인 피폭을 평가하기 위하여 편의상 대상을 성인으로 한정하였다. 각 집단의 개인의 피폭선량은 피폭집단 내의 모든 경로에 대한 선량의 합으로 계산 된다.

IV. 수학적 모델링

기준생태계 내의 핵종 이동을 그림 5와 6과 같이 구획으로 도시하고 나면 구획 내의 핵종의 양의 변화와 구획간의 상호 반응을 수학적으로 기술할 수 있는데 이를 위하여 시간에 따른 구획간의 물질 이동을 기술하는 물질이동상수(Mass transfer

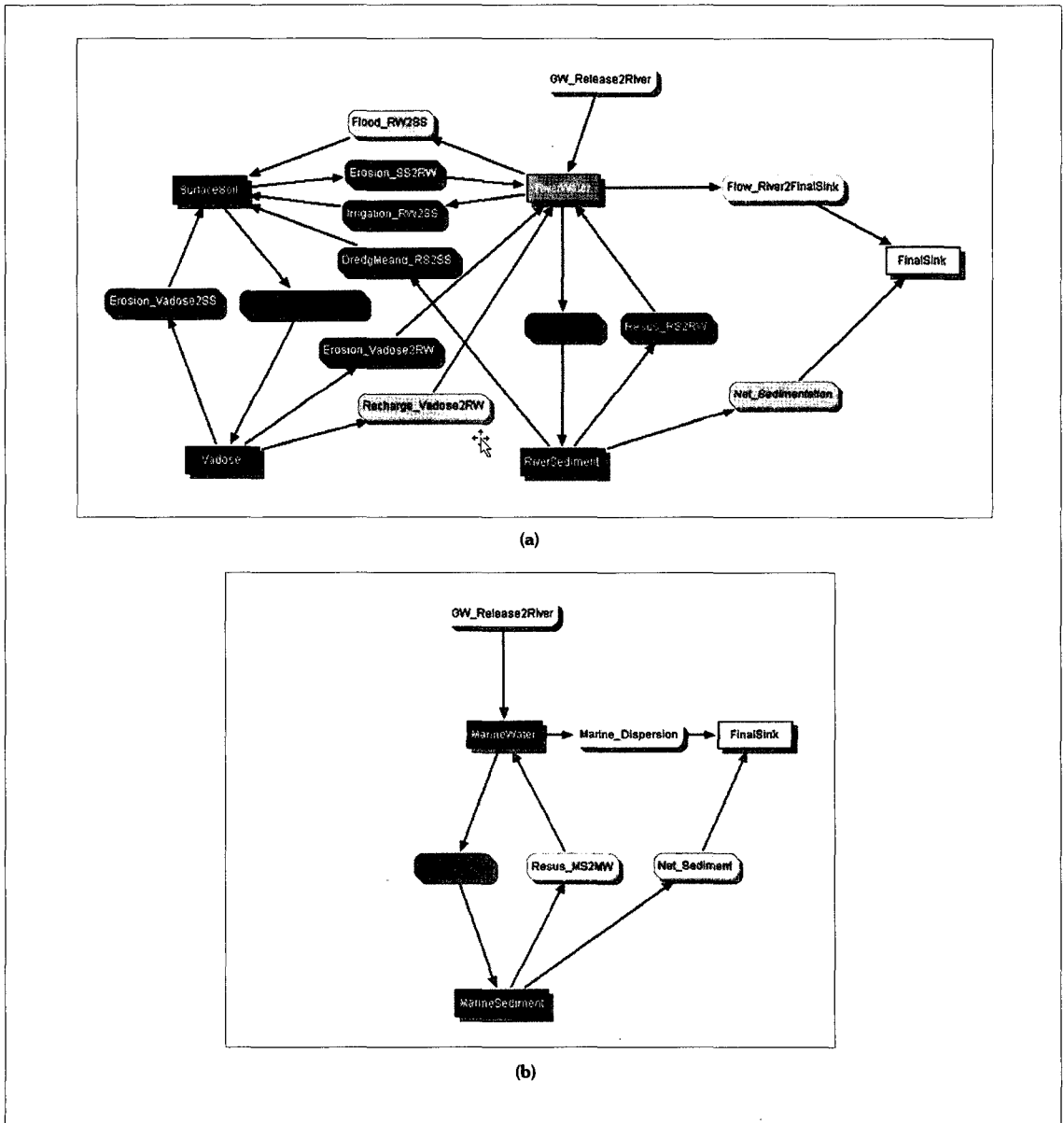


그림 5. Compartments for biosphere modeling (GBI: a. river; b. ocean).

coefficient)뿐만 아니라 구획 내 피폭 경로를 통한 물질 이동을 표현하는 다양한 수식들을 도출하여 AMBER 프로그램의 케이스화일로서 ACBIO를 개발하였다. 일본 H12 연구에서도 생태계 평가 모델 개발시 AMBER 프로그램을 이용하였으며 영국, 스페인 그리고 미국 등 여러나라에서도 사용되어 이렇게 개발된 생태 평가 케이스 파일들은 국제공동연구 BIOMOV5 II를 통해서 다른 생태계 평가 코드들을

이용하여 다양하게 검증되기도 하였다.

그림 7은 구획 모델링을 위한 물질 수지를 이용한 수학적 모델링 개념이다.

구획 i 에 존재하는 방사성 핵종의 질량[mol] (N_i) 에 대한 보존방정식은 아래 식 (1)과 같이 표시되는데,

$$\frac{dN_i}{dt} = \left[\sum_{j=1} f_{ji} N_j + \lambda_{Ni} M_i + S_i(t) \right] - \left[\sum_{j=1} f_{ij} N_i + \lambda_{Ni} N_i \right] \dots\dots\dots (1)$$

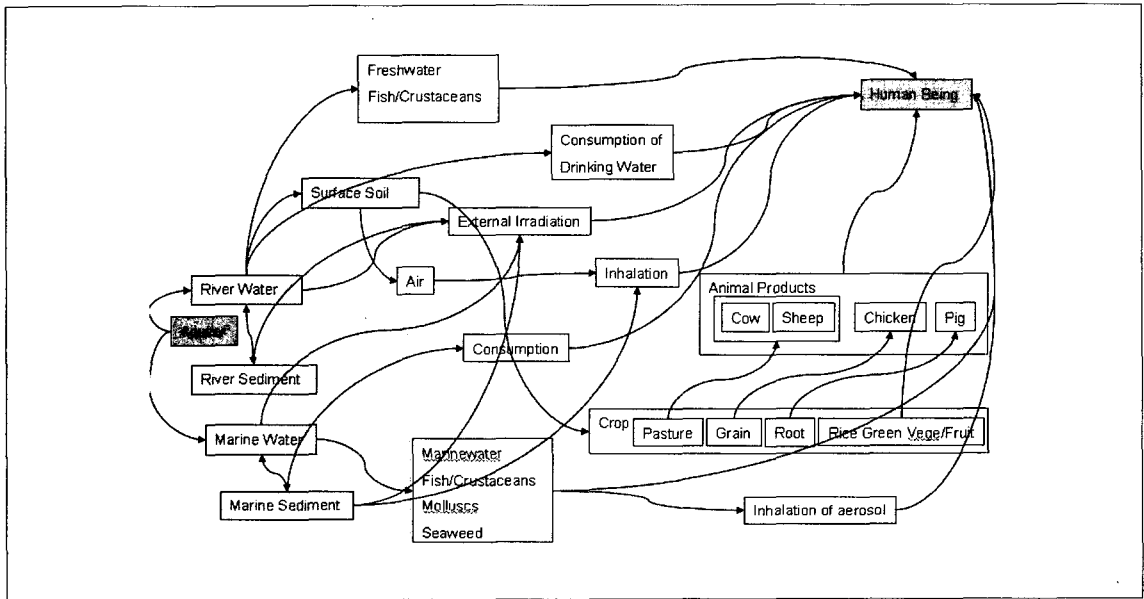


그림 6. Exposure Pathways.

표 2. Intake pathways for each exposure group

섭취경로 (Intake pathway)		농축산업 (Farming)	담수어업 (Freshwater fishing)	해양어업 (Marine fishing)
섭취 (ingestion)	농작물 (Crops)	알곡류 (Grains) 쌀 (Rice) 녹채류 (Green vegetables) 근채류 (Root vegetables) 과일 (Fruit)		
	축산물/수해산물 (Animal products/Aquatic foodstuffs)	소고기, 소간, 우유 (Beef, Cow liver, Cow milk) 돈육 (Pork) 양고기 (Mutton) 닭고기, 계간, 계란 (Chicken, chicken liver, chicken eggs)	민물어류 (Freshwater fish) 민물갑각류 (Freshwater crustaceans)	생선 (Marine fish) 바다갑각류 (Marine crustaceans) 해양연체류 (Marine molluscs) 해조류 (Seaweed)
	기타 (Others)	물 (Water) 흙 (Soil)	물 (Water) 침적물 (Sediment)	침적물 (Sediment)
흡입 (Inhalation)		먼지 (Dust)	먼지 (Dust)	먼지 (Dust)
외부피폭 (External irradiation)		물 (Water) 흙 (Soil)	물 (Water) 침적물 (Sediment)	물 (Water) 침적물 (Sediment)

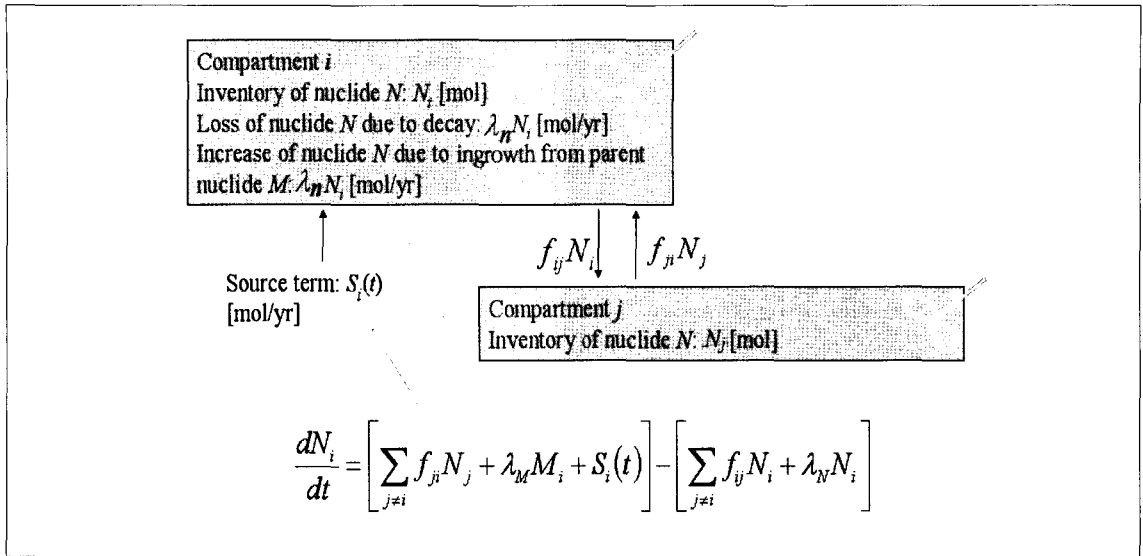


그림 7. Transfer between each compartment

여기에서,

N_i = 구획 i 내의 방사성핵종 N 의 양 (질량) [mol]

N_j = 구획 j 내의 방사성핵종 N 의 양 [mol]

M_i = 구획 j 내의 방사성핵종 M 의 양 (핵종 N 의 모핵종) [mol]

$S_i(t)$ = 구획 i 로 유입되는 핵종 N 의 선원항 유입률 [mol/y]

λ_M, λ_N = 핵종 M 과 N 의 붕괴상수 [y^{-1}]

f_{ji}, f_{ij} = 구획 j 에서 구획 i 로, 구획 i 에서 구획 j 로 이동하는 핵종의 전달계수 (Transfer coefficient) [y^{-1}]

각 구획 내에서 핵종들의 양 또는 질량에 관한 보존을 나타내는 식 (1)을 각 구획 별로 연결하여 얻어진 연결 방정식과 필요한 경계 및 초기조건 등 부대조건(Side condition)을 이용하여 핵종별 방사능의 양을 구한 후 각 구획 내의 체적을 통하여 구획내의 각 핵종의 농도를 구해낼 수 있게 된다.

피폭 대상 그룹에 대한 피폭 경로는 세 개로 구분되어 섭취 (Ingestion)와 흡입 (Inhalation)에 의한 내부피폭(Internal exposure)과 외부피폭(External exposure)으로 나누어 고려하는데 이 세 피폭 경로

를 통한 연간 개인피폭선량은 각 구획의 핵종농도로 부터 아래의 식 (2)~(4)과 같이 섭취 및 흡입량 등과 핵종별 선량환산계수를 통해 선형적으로 구해낸다 [11].

즉, 섭취(Ingestion)에 의한 내부피폭, [Sv/y]은 아래 식 (2)로 산출된다.

$$D_{ing} = DCF_{ing}INGC_{ing} \dots\dots\dots(2)$$

여기에서

DCF_{ing} = 음식물섭취에 대한 선량환산계수 (Dose coefficient for ingestion) [Sv/Bq]

ING = 연간 음식물 섭취량 [Kg/y]

C_{ing} = 개인이 섭취한 음식물에 대한 핵종의 농도 [Bq/kg]

같은 방법으로 흡입(Inhalation)에 의한 내부피폭, D_{inh} [Sv/y]은 아래 식 (3)으로 산출된다.

$$D_{inh} = DCF_{inh}BR_{comp}O_{comp}C_{inh} \dots\dots\dots(3)$$

여기에서

DCF_{inh} = 흡입에 대한 선량환산계수 [Sv/Bq]

BR_{comp} = 흡입률, [m³/h]

O_{comp} = 점유율 (Occupancy), [h/y]

C_{inh} = 개인이 흡입한 공기에 존재하는 핵종의 농도 [Bq/m³]

끝으로, 외부피폭 (External dose), [Sv/y] 은 아래 식 (4)로 산출된다.

$$D_{ext} = DCF_{ext} O_{comp} C_{ext} \dots\dots\dots (4)$$

여기에서

DCF_{ext} = 외부 피폭에 대한 선량 환산 계수 [(Sv/h)/(Bq/m³)]

O_{comp} = 점유율 [h/y]

C_{ext} = 외부 방사선을 방출하는 물 또는 흙에 존재하는 핵종 농도 [Bq/m³]

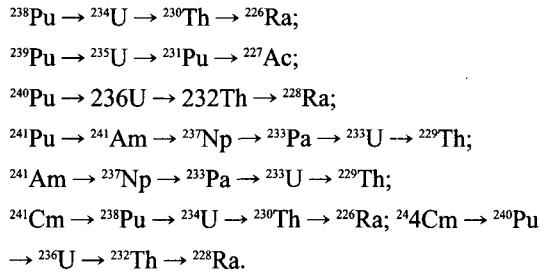
V. 생태계 영향 평가 결과

평가에 고려된 대상 핵종은 표 3에 보이는 대로 단

표 3. Nuclide specific input data

Parent	Daughter	ln2/half-life	Bq/y	Chain
Cm-244	Pu-240	0.0383	1	4N
Pu-240	U-236	0.000106	1	
U-236	Th-232	2.96E-08		
Th-232	Ra-228	4.95E-11		
Ra-228	Th-228	0.121		
Th-228	NULL	0.363		
Pu-241	Am-241	0.0481	1	4N+1
Am-241	Np-237	0.0016	1	
Np-237	Pa-233	3.24E-07		
Pa-233	U-233	9.38		
U-233	Th-229	4.36E-06		
Th-229	NULL	9.44E-05		
Cm-242	Pu-238	0.000147	1	4N+2
Pu-238	U-234	8.77E+01	1	
U-234	Th-230	2.83E-06		
Th-230	Ra-226	9.00E-06		
Ra-226	NULL	0.000433		4N+3
Pu-239	U-235	2.88E-05	1	
U-235	Pa-231	9.85E-10		
Pa-231	Ac-227	2.11E-05		
Ac-227	NULL	0.0318		
H-3	NULL	12.33	1	FP/AP
C-14	NULL	0.000121	1	
Ni-59	NULL	9.19E-06	1	
Co-60	NULL	0.132	1	
Ni-63	NULL	0.00722	1	
Sr-90	NULL	0.0238	1	
Nb-94	NULL	2.00E+04	1	
Tc-99	NULL	3.25E-06	1	
I-129	NULL	4.41E-08	1	
Cs-135	NULL	3.01E-07	1	
Cs-137	NULL	0.0231	1	

위값의 초기 핵종 유출률을 갖는 모핵종 18개와 이들의 붕괴사슬에 의해 나타나는, 따라서 초기의 유출율이 0이 되는 13개의 자핵종으로 이루어지는데 이 때 고려된 붕괴사슬은 다음과 같다:



- 그 외 평가를 위한 주요한 가정은 다음과 같다:
- 지하수를 따라 생태계 모델로 유입되는 방사성 핵종의 생태 매질 내 지연 효과는 고려하지 않는다.
 - 지하수와 관련된 구획 내의 핵종들의 농도는 구획을 완전혼합구획(Mixing tank)으로 본다.
 - 구획간 또는 구획 내의 핵종들의 전달/이동률 (Turn over, precipitation, sedimentation 등)은 연간 평균값을 사용한다.
 - 각 구획 내의 물수지는 연간표면유출(Runoff), 강수, 그리고 증발에 의한다.
 - 보수적으로 구획 내에서 생물학적 섭취 (Biological uptake)에 의한 핵종의 고갈 등 농도의 변화는 없다.
 - 먹이연쇄에서 핵종 전달은 항상 정상상태를 유지한다.
 - 생태계의 현재 조건과 구획내 피폭 대상의 생활양식은 계산이 진행되는 동안 시간에 따라 변하지 않는다.
 - 동물의 섭취 경로와는 독립적으로 우유와 고기에 존재하는 핵종 농도는 동일하다.
 - 음식의 섭취 준비 과정에서 일어나는 핵종 농도 변화는 없다.
 - 평가는 피폭이 최대치에 이를 때까지 특정한 시간의 제한 없이 수행한다.

생태계 평가를 위해서는 방대한 자료가 요구되지

표 4. Consumption rates

foodstuff		units	best estimate	min	max
agricultural products	rice	kg-fw/y	81.9	5	150
	grain	kg-fw/y	29.6	5	150
	root veges	kg-fw/y	8.9	5	400
	green veges	kg-fw/y	98.3	25	200
	fruits	kg-fw/y	62.7	0	100
animal products	beef	kg-fw/y	9.7	4	100
	muton	kg-fw/y	0.6	4	100
	pork	kg-fw/y	13.3	4	100
	chicken	kg-fw/y	4	1	100
	cow liver	kg-fw/y	6.7	0	40
	chicken river	kg-fw/y	0	0	40
	chicken eggs	kg-fw/y	6.7	10	200
	cow's milk	kg-fw/y	32.9	20	400
freshwater products	freshwater fish	kg-fw/y	1	n/a	n/a
	freshwater crustaceans	kg-fw/y	0.1	n/a	n/a
marine products	marine fish	kg-fw/y	12.4	n/a	n/a
	marine crustaceans	kg-fw/y	3.9	n/a	n/a
	marine molluscs	kg-fw/y	1.5	n/a	n/a
	marine plants	kg-fw/y	2.2	n/a	n/a
others	water	m ³ /y	0.61	0.4	0.75
	soil	kg-fw/y	0.037	0.001	0.1

만 현시점에서 국내에서는 구할 수 없는 것이 많아 이들 중 상당 부분에 대하여 문헌치나 다른 나라의 입력자료를 주로 사용하였다. 그러나 활용 가능한 우리나라의 국지적인 데이터들, 예를 들어 관개수의 양, 강의 유량, 음식의 생산 및 소비량 등은 가능한 국내에서 발간된 문헌과 통계치들을 이용하였는데 표 4에는 계산에 사용된, 보건복지부에서 2002년도에 실시한 계절별 국민영양조사자료로 부터 가공하여 얻은 식품별 1인1일 평균 섭취량이다[17].

이 값들은 가을, 지역별 그리고 식품별 1인1일 평균 섭취량에서 얻은 자료로, 다만 실제 계산을 위해서는 편의상 이들 자료 중 양고기는 개고기와 오리고기로, 민물 갑각류 (Freshwater crustaceans)는 민물 연체류(Freshwater mollusks)로 우리 생활에 보다 근접한 측면에서 임의의 가정을 통하여 대체하였고 섭취량은 모두 성인 1인 평균값으로 고려하였다.

표 5는 구획간의 물질 이동을 기술하는 물질 이동 상수에 관해 분포로 주어진 시스템 관련 입력 자료로 대부분의 자료는 현 시점에서 따로 구할 수 없어 강물의 유량(River flow)을 제외하고는 우리와 환경이 비슷한 일본에서 H12의 평가에 사용된 값이나 스웨덴에서 사용된 문헌치[18] 등을 준용하였다. 각 구획별 면적은 주요한 파라미터이지만 전형적인만큼 문

표 5. Best Estimate for transfer processes among biosphere compartments

	transfer process	AMBER parameter	units	best estimates	min	max
Liquid transfers	irrigation	Q_{irr}	m ³ /yr	4.40E+03	-	-
	infiltration/recharge	d_d	m/yr	7.00E-01	4.50E-01	1.00E+03
	flooding	Q_{fw}	m ³ /yr	1.00E+02	1.00E+01	1.00E+03
	river flow	Q_{rw}	m ³ /yr	6.31+09	3.00E+05	3.00E+10
	marine discharge	Q_m	m ³ /yr	4.00E+11	4.00E+09	2.00E+11
	Solid transfers	erosion	E_{sed}	m ³ /yr	1.00E-04	6.40E-06
dredging/maintenance		v_{dm}	m ³ /yr	1.60E+00	5.00E-01	5.00E+00
river sediment suspension		r_{sed}	m/yr	1.00E-04	6.40E-06	3.40E-03
river gross sedimentation		s_g	m/yr	1.60E-03	1.60E-06	1.60E-04
bed-load		B_l	kg/yr	1.60E+05	1.00E+05	2.20E+05
diffusion due to bioturbation in a local marine environment		B_{msed}	m ³ /yr	3.20E-05	3.20E-06	3.20E-04
gross sedimentation in a local marine environment		s_g	m/yr	7.50E-05	3.80E-06	3.70E-04
Net sedimentation		s_{nf}	m/yr	5.00E-05	7.50E-06	3.70E-03

헌치를 대개 참조하였으나 가능한 한 우리나라의 전형적인 환경을 고려하여 표 6과 같이 추정하였다. 이러한 자료를 사용하여 계산한 결과를 그림 8~11에 나타내고 시간에 관계없이 그 최대값으로서의 선풍산인자를 표 7에 요약하였다.

Ⅱ 6. Compartment specific parameters.

Parameter	Units	Surface soil	Variably saturated zone	River Water	River sediment	Local marine water	Local Marine sediment
		Best est.	Best est.	Best est.	Best est.	Best est.	Best est.
Depth	m	3×10^1	2	5×10^{-1}	1×10^{-1}	5	5×10^{-1}
Area	m^2	2×10^4	2×10^4	1×10^4	1×10^4	2×10^6	2×10^6
Volume	m^3	6×10^3	4×10^4	5×10^3	1×10^3	1×10^7	1×10^6
Total porosity	-	4×10^{-1}	4×10^{-1}	9.9998×10^{-1}	5×10^{-1}	9.999996×10^{-1}	5×10^{-1}
Water-filled porosity	-	3×10^{-1}	3.5×10^{-1}	9.9998×10^{-1}	5×10^{-1}	9.999996×10^{-1}	5×10^{-1}
Suspended sediment concentration	kgm^{-3}	-	-	5×10^{-2}	-	1×10^{-3}	-
Water density	kgm^{-3}	1.0×10^3	1×10^3	1×10^3	1×10^3	1×10^3	1×10^3
Sediment grain density	kgm^{-3}	2.65×10^3	2.65×10^3	2.65×10^3	2.65×10^3	2.65×10^3	2.65×10^3

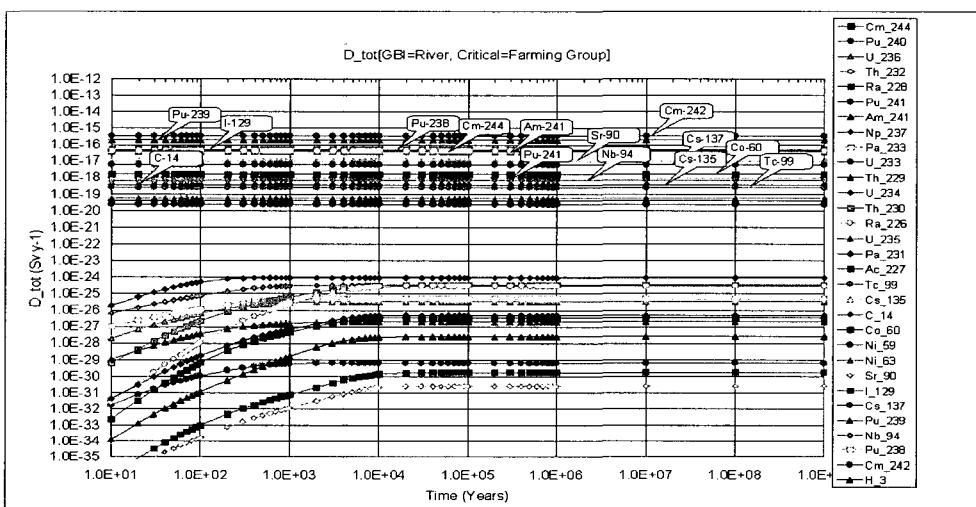


그림 8. Response of the biosphere assessment model to steady, unit flux input (1 Bq/yr) @ River GBI (Farming exposure group).

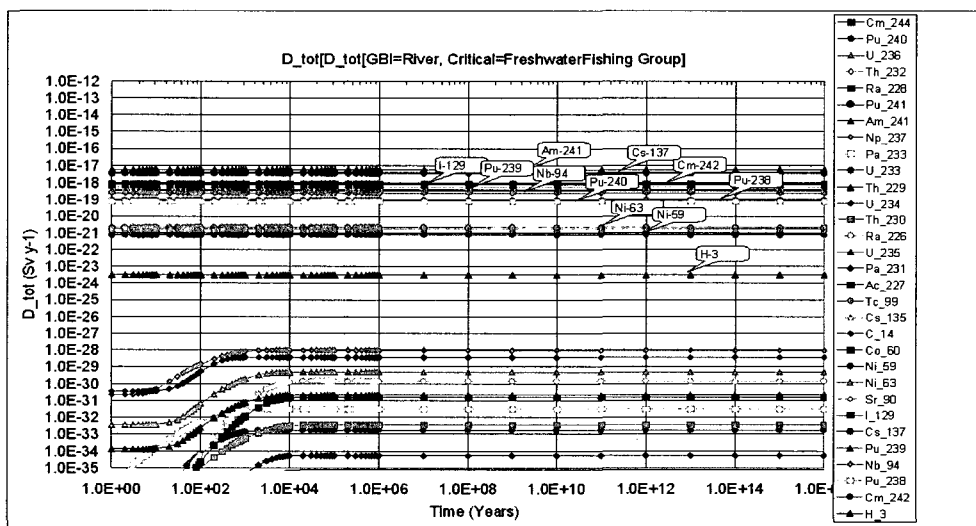


그림 9. Response of the biosphere assessment model to steady, unit flux input (1 Bq/yr) @ River GBI (Freshwater Fishing exposure group).

그림 8과 9는 모두 GBI가 강인 경우에 대해서 연간 단위 유출 방사능, 즉 모든 모핵종이 1Bq/yr의 유출률을 가지고 강물을 통해 생태계로 유입된 경우에 대한 단위 방사능 플럭스당 총 피폭선량을 나타내고 있다. 그림 8은 농축산업에 종사하는 피폭집단이, 그리고 그림 9는 담수어업 종사자 피폭 집단내 성인이 받을 수 있는 최대 선량률을 보이고 있다. 따라서 y축은 1Bq/yr의 방사능에 대한 Sv/yr로 나타나 이에 대한 최대값을 취하여 처분장으로부터 GBI를 통하여 이루어지는 핵종의 유출 농도 플럭스에 대한 결과로서의 생태계 피폭을 계산할 수 있는 선량환산인자로 사용할 수 있게 된다.

이 결과에 따라 정점이 나타나는 시간에 관계없이 최대 피폭 선량을 각각의 핵종이 줄 수 있는 GBI 유입 단위 방사능당 피폭선량환산인자로 하여 그림 10과 표 7에 요약해 놓았다. 이 계산 결과로만 보면 농축산업피폭 집단에 대해서는 어느 핵종의 경우에도 연간 1Bq의 유출 방사능에 대해 연간 10^{15} Sv/yr의 선량률을 넘지는 않는 것으로 나타나고 있는 것을 알 수 있고, 담수어업 피폭집단의 경우는 이보다 더 낮아 어느 핵종의 경우라도 연간 10^{17} Sv/yr의 선량률을 넘지는 않는 것으로 나타나고 있다. 즉 GBI가 강으로 되는 경우에는 ^{14}C 를 제외한 모든 핵종에 대하여 선

표 7. Flux to dose conversion factors (Sv/Bq).

GBI	River		Ocean
	Farming	FreshwaterFishing	MarineFishing
Ac_227	3.61E-27	1.52E-31	8.70E-36
Am_241	3.97E-17	5.81E-18	7.96E-18
C_14	3.79E-19	9.05E-19	5.22E-19
Cm_242	3.52E-16	3.43E-18	4.36E-17
Cm_244	4.23E-17	4.12E-19	6.18E-18
Co_60	1.71E-18	8.24E-19	4.99E-19
Cs_135	9.92E-19	6.05E-19	7.63E-21
Cs_137	6.43E-18	4.01E-18	5.05E-20
H_3	4.06E-20	3.14E-24	9.44E-23
I_129	5.23E-17	8.68E-19	6.23E-19
Nb_94	7.38E-19	2.64E-19	3.92E-20
Ni_59	2.39E-20	7.32E-22	2.57E-21
Ni_63	5.64E-20	1.74E-21	6.12E-21
Np_237	3.16E-25	9.54E-29	1.23E-26
Pa_231	4.95E-27	5.31E-35	1.35E-34
Pa_233	5.07E-26	3.25E-32	1.93E-29
Pu_238	4.60E-17	8.51E-20	1.86E-18
Pu_239	1.96E-16	3.62E-19	7.91E-18
Pu_240	5.05E-17	9.25E-20	2.02E-18
Pu_241	9.58E-19	1.78E-21	3.85E-20
Ra_226	2.90E-25	1.34E-30	1.03E-34
Ra_228	1.78E-30	5.42E-36	4.09E-39
Sr_90	1.01E-17	3.36E-19	6.06E-21
Tc_99	2.68E-19	2.07E-21	1.21E-20
Th_229	2.53E-28	7.52E-36	3.82E-37
Th_230	3.60E-25	3.60E-33	3.99E-31
Th_232	2.60E-31	2.99E-39	2.53E-38
U_233	6.31E-30	1.70E-33	4.06E-34
U_234	9.35E-25	3.72E-29	1.24E-26
U_235	2.01E-27	2.11E-31	4.19E-30
U_236	3.48E-26	4.87E-30	1.25E-28

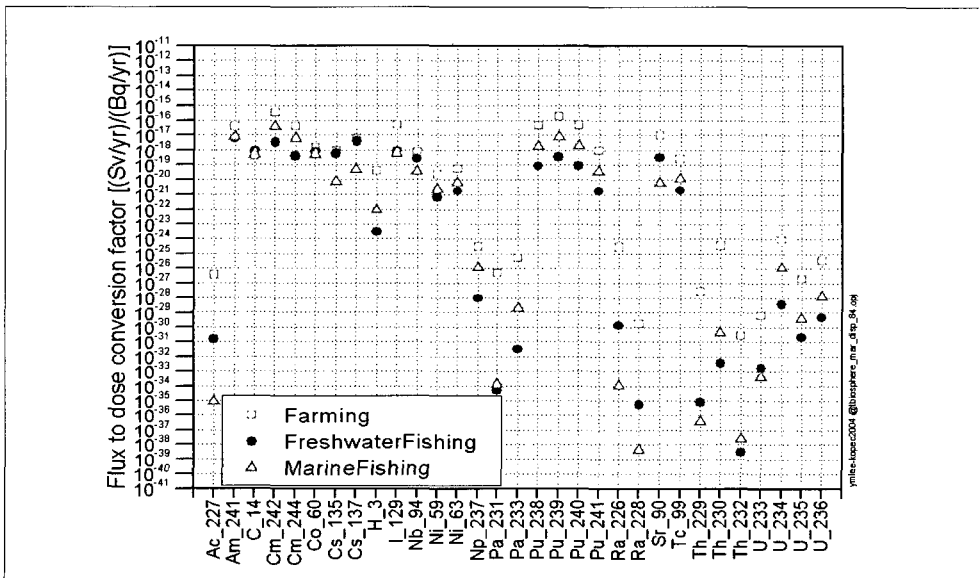


그림 10. Flux to dose conversion factor for each nuclide for each exposure group.

량환산인자가 농축산업피폭집단의 경우가 담수어업 피폭집단의 경우보다 높아 결정집단으로 될 수 있다는 것을 알 수 있다.

피폭에 주로 기여하는 핵종은 ^{242}Cm 나 ^{239}Pu 과 같은 액티나이드 핵종과 함께, ^{129}I 와 ^{90}Sr 그리고 ^{137}Cs , ^{60}Co 과 같은 핵종들이 그 기여가 상당히 큰데 반하여 ^{99}Tc 의 경우는 상대적으로 낮은 값을 보여주는 것도 알 수 있다.

한편 GBI가 해수로 되는 경우에 대한 그림 11에서 보면 해양 어업에 종사하는 집단이 유일한 피폭집단으로 되는데, 이 경우에도 다른 액티나이드 핵종과 함께 특히 ^{242}Cm 의 피폭이 여전히 두드러지는 것도 알 수 있다.

^{227}Ac , ^{231}Pa , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{229}Th , ^{232}Th 그리고 ^{234}Th 와 같은 붕괴사슬 자핵종은 GBI가 강으로 되는 경우와 마찬가지로 GBI가 바다로 되는 경우에도 여전히 피폭에 거의 기여하지 않는 것으로 나타나는 것도 알 수 있다. GBI가 강으로 되는 경우에 비해 GBI가 바다로 되는 경우에도 ^{242}Am 등 액티나이드 핵종이 농축산업 피폭집단의 경우와 비슷하게 최상위에서 기여하지만 전체적으로는 낮은 최고치를 주고 있어 어느 핵종의 경우에도 계산결과로는 연간 10^{16} Sv/yr를 넘

지는 않는 것으로 나타나고 있다

한편 생태계 구획모델에서 구획시스템의 크기나 핵종의 전이율이 결과에 미치는 영향을 검토해 보기 위해 ^{129}I 핵종에 대해서만 임의의 변화를 주어 간단한 파라메트릭스터디를 따로 수행해 보았다.

대상 파라미터는 방사능이 최초로 유입되는 강물 구획에 대해 인접구획으로의 전이에 관계되는 파라미터와 농축산업피폭집단에 직접적으로 영향을 주는 것으로 경작에 의한 주요한 섭생경로에 영향을 미칠 수 있는 표토층의 넓이 또는 부피이다. 그러나 전이에 관련된 4개의 파라미터, 즉 강물의 유량률 (River flow, Q_{rw}), 표토로의 관개율 (Irrigation, Q_{irr}), 표토로의 홍수율 (Flooding, Q_{fw}), 그리고 강물에서 강바닥으로의 침적율에 관계되는 침적률 (River gross sedimentation, s_g)중에서는 강바닥으로의 침적률은 무시할 수 있을 정도로 민감도를 보이지 않았다.

가장 민감하게 나타난 강물의 유량률은 시간당 강물이 흐르는 유량을 나타내는 것으로 그림 12에서 보면 피폭선량 결과에 직비례하여 나타나는 것을 알 수 있다. 선원향으로서 강물로 유입되는 핵종의 방사능이 희석된 후 모델링 시스템 영역 밖으로 빠져

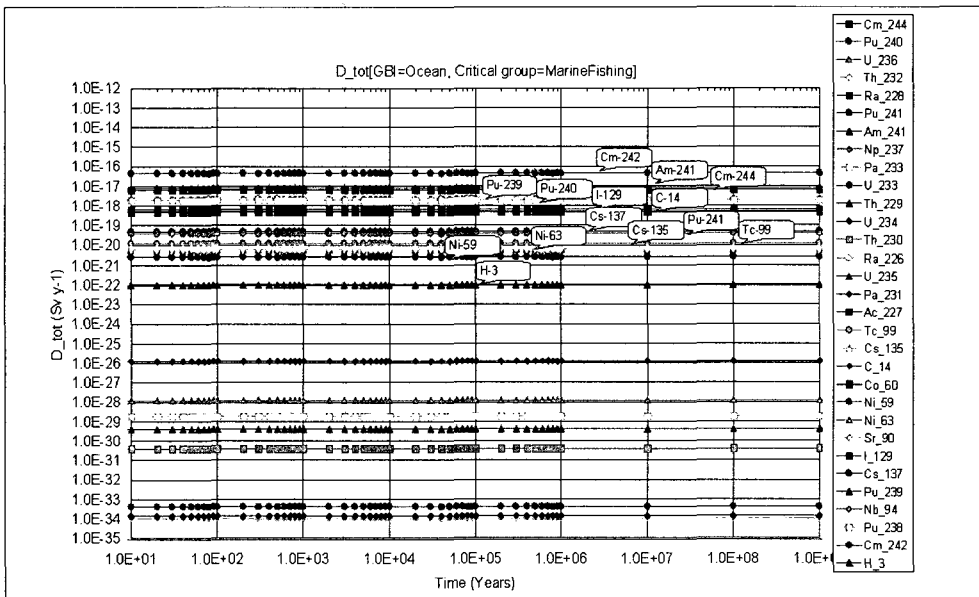


그림 11. Response of the biosphere assessment model to steady, unit flux input (1 Bq/yr) @ Ocean GBI (Marine Fishing exposure group).

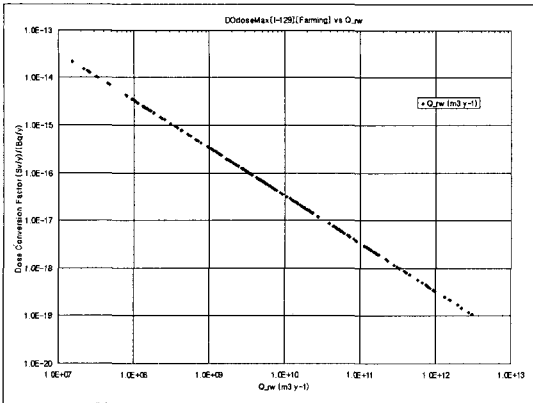


그림 12. Sensitivity of river flow (Q_{rw}) to DCF for ^{129}I (LogTri (6.8, 9.8, 12.8) sampling=200).

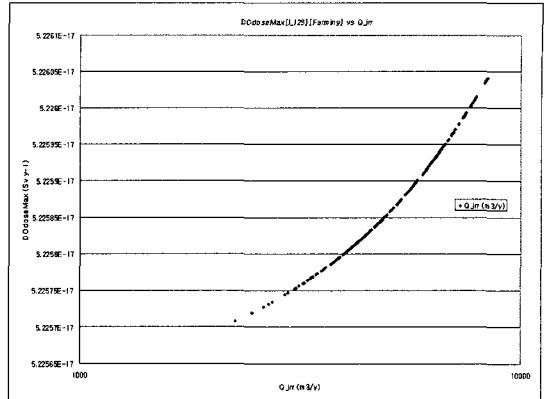


그림 14. Sensitivity of irrigation (Q_{irr}) to DCF for ^{129}I (Tri (2200, 4400, 8800) sampling=200).

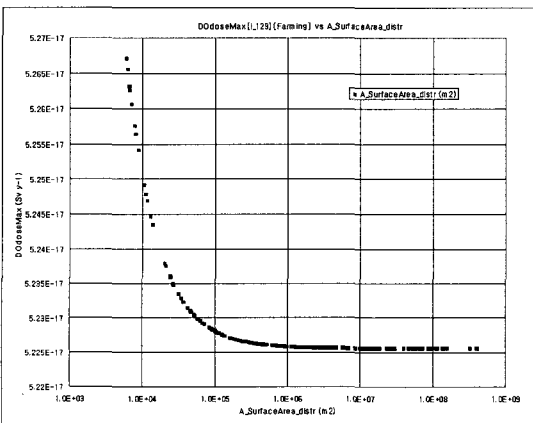


그림 13. Sensitivity of area (surface soil) to DCF for ^{129}I (LogTri (3, 6, 9) sampling=200).

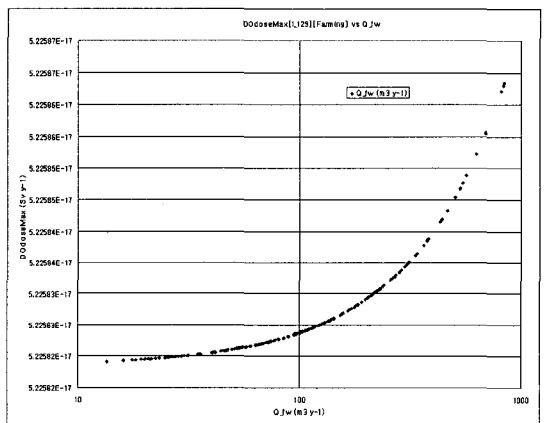


그림 15. Sensitivity of flooding (Q_{fw}) to DCF for ^{129}I (LogTri (1, 2, 3) sampling=200).

나가게 되어 이러한 결과가 나타나는 것으로 추측된다. 그러나 그림 12~15에서 보여지는 대로 Q_{rw} 를 제외한 3개의 파라미터에 대해서는 변화는 보이지만 그렇게 강한 민감도는 보이지 않는 것으로 나타났다. 이는 그 외 다른 파라미터도 같은 이유이지만 관계수의 경우를 볼 때, 처음 강물로 방사성 핵종의 유입이 이루어지면 구획모델에 따라 질량보존을 위한 핵종의 전이가 이루어지면서 강물에 녹아 있는 ^{129}I 가 관계수를 따라 표토층으로 이동하게 되고 그 질량과 표토층의 부피에 의해 표토층의 ^{129}I 의 농도가 결정되면 이 농도에 의해 피폭경로를 따른 피폭이 이루어지게 되는데, 관계에 사용되는 강물의 양이 강물 전체에 비해 보다 작은 값으로 되기 때문으로 보인다.

VI. 결 론

방사성 폐기물 처분장으로부터 지하수에 의해 유출된 핵종은 지하수의 유동을 따라 지표에 도달한 후 인간 생태계로 전이, 이동하게 된다. 이 때 유출된 핵종이 인간에게 어느 정도의 피폭을 주는지 알기 위해 정량적인 결과로서 선량률, 즉 생태계의 인간에게 주는 선량 환산 인자(Flux to dose conversion factor)가 요구된다.

피폭 대상 개인당 핵종별 연간 피폭선량률은 결국 생태계로 유입되는 핵종별 단위 방사능에 대한 선량률, 그러니까 선량환산인자가 되는데 이렇게 구해진 방사선피폭선량률은, GBI로 유입되는 핵종별 단위 방사능에 대한 유출률을 알 수 있을 때 이 값에 선량

환산인자를 선형적으로 반영함으로써 처분장의 안전 성과 처분시스템의 인간 환경에 대한 장기간에 걸친 방사선적 안전성을 보이기 위해 요구되는 안전 기준치와의 비교를 위한 안전지표 (Safety indicator)로 활용될 수 있게 된다.

이 연구를 통하여 지하수가 생태계로 방출되는 GBI 지점을 강물과 해수로 보아 이 곳을 선원항으로 하여 생태계 내에서 핵종 전이 및 이동에 관련된 다양한 FEPs로부터 이동 시나리오를 도출해내고 개념 및 수학적 모델링을 거쳐 AMBER를 이용하여 케이스화일로서 ACBIO템플릿을 개발한 후 관련 입력 자료를 통하여 선량환산인자에 대한 계산을 수행해 보았다.

피폭집단은 3가지 집단 즉, 농축산업, 담수어업 피폭집단 및 해수어업 피폭집단으로 고려하였고, 각 집단에 대하여 흡입(Inhalation), 섭취(Ingestion), 외부 피폭(External irradiation)을 주피폭 메카니즘으로 고려하였다.

국내 실측 섭생자료와 함께 문헌이나 해외의 사례를 준용하여 GBI가 다른 생태계 시나리오에 대하여, 그리고 방사성 폐기물에 관련된 18개 핵종과 그 자핵종을 포함한 31개 핵종에 대하여 최대 선량치가 나올 때까지 계산을 수행하여 3개의 피폭집단에 대하여 상호 비교를 통하여 결정피폭집단을 선별함으로써 그 집단이 받는 최대 선량치를 선량환산인자로 제시해 보았다.

계산결과와 함께 이 논문을 통하여 제시된 방법론은 이전에 수행된 한국형 처분 시스템에 대한 생태계 평가 방법론(19~21)을 확장한 것으로 그 결과와 함께 예비 생태계 평가를 통하여 단위 방사능 유입당 선량률을 구할 수 있는 도구로서 템플릿과 평가방법론을 확보한다는 측면에서도 매우 유용한 결과로 활용될 것이 기대된다.

참고문헌

1. AMBER 4.4 Reference Guide, Environs Quantisci, HenleyonThames, U.K., 2002.
2. Youn-Myoung Lee, et al., "Nuclide release

calculation in the near-field of a reference HLW," pp. 747-748, Proceedings of 2004 Korean Nuclear Society Autumn Meeting, 2004. 10. 28~29, Yongpyeong.

3. Youn-Myoung Lee, et al., "A Compartment Model for Nuclide Release Calculation in the Near- and Far-field of a HLW Repository," Proceedings of the Korean Radioactive Waste Society, 2004, 한국방사성폐기물학회 학술논문집, 2004년 가을, 2004. 11. 10~12, 제주 라마다호텔 (2004).
4. Youn-Myoung Lee et al., "Nuclide Transport Calculation in Near- and Far-field of a Reference HLW Repository Using AMBER," to be presented at WM'05, February 27-March 4, 2005, Tucson, AZ, U.S.A.
5. BIOMASS, Alternative Assessment Contexts: Implications for Development of Reference Biospheres and Biosphere Modelling, BIOMASS Theme 1 Working Document : BIOMASS/T1/WD02, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1999.
6. BIOMASS, Longterm Releases from Solid Waste Disposal Facilities: The Reference Biosphere Concept, BIOMASS Theme 1 Working Document : BIOMASS/T1/WD01, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1999.
7. BIOMASS, Biosphere System Identification and Justification, BIOMASS Theme 1 Working Document: BIOMASS/T1/WD06, IAEA, Vienna, 1999.
8. BIOMOVS II, Biosphere Modelling for Dose Assessments of Radioactive Waste Repositories, BIOMOVS II TR No.12, Sweden.
9. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (adopted January 17, 1977), ICRP Publication 26, Pergamon Press, Oxford, 1977.
10. Radiation Protection Principles for the Disposal

- of Solid Radioactive Waste, 25 Annals of the ICRP, 15, No.4, ICRP Publication 46, Pergamon Press, Oxford, 1985.
11. H12, Project to Establish Technical Basis for HLW Disposal in Japan, JNC, 1999.
 12. Davis, P.A. et al., The Biosphere Model, BIOTRAC, for Postclosure Assessment, AECL10720, COG9310, 1993.
 13. SKB 91 Final Disposal of Spent Nuclear Fuel; Importance of the Bedrock for Safety, SKB TR 9220, 1992.
 14. SKI SITE94 Deep Repository Performance Assessment Project, SKI Report 96:36, Swedish Nuclear Power Inspectorate, Stockholm, 1996.
 15. Smith, G.M. et al., Biosphere Modeling and Dose Assessment for Yucca Mountain, EPRI Report TR107190 329418, 1996.
 16. Hudson, J., Rock Engineering Systems: Theory and Practice, Ellis Horwood, Chichester, 1992.
 17. 2002년도 계절별 국민영양조사, 보건복지부, 2002. 12.
 18. Ulla Bergström et al., Models for dose assessments Modules for various biosphere types, TR9914, 1999.
 19. 이연명외, 한국형 처분시스템에 대한 생태계 평가의 한 예시, 한국방사성폐기물학회논문집, 제주대학교, 2003. 11.
 20. 이연명외, 생태계 접점에 따른 선량환산 인자 평가, 대한방사선방어학회 춘계학술발표 논문집, 지리산, 2004. 4.
 21. 이연명외, AMBER를 이용한 방사성폐기물 처분 시스템에 대한 생태계 선량환산인자 평가, 2004 원자력학회 춘계학술발표회 논문집, 경주 2004. 5.