

심지층처분시스템 설정을 위한 기준 사용후핵연료 선정

최종원, 고원일, 강철형
한국원자력연구소
대전광역시 유성우체국 사서함 105 호

요 약

고준위방사성폐기물의 기준 처분시스템 (Reference Geological Disposal System)의 개념설정을 위하여 현재 국내 원전에서 발생되고 있거나 향후 2010까지 건설될 원전으로부터 발생될 모든 사용후핵연료연료의 특성(크기, 무게, 초기농축도, 연소도, 냉각기간 등)을 대표할 수 있는 기준 사용후핵연료를 선정하였다.

1. 서 론

고준위 방사성폐기물 (이하 고준위폐기물) 처분장은 그 구성 계통이 원자력발전소 만큼 복잡하지 않지만, 심지층 지하환경에 대한 자세한 정보확보가 어렵고 또한 수만년 이상 동안 진행될 지하 및 생태계 환경 변화과정에 대한 예측이 어렵고, 지하처분환경 모사를 통한 실증시험 결과의 확보가 제한적이기 때문에 전체 처분시스템의 성능평가(Total System Performance Assessment) 및 장기적 안전성 평가결과에 대한 불확실성이 크게 된다. 또한 사용후핵연료를 포함하는 고준위폐기물은 고 방사능과 함께 붕괴열을 수반하기 때문에 이들로 인한 처분환경 변화과정이 완전 격리기간 (confinement period) 동안 어떤 기구(mechanism)를 통하여 얼마나 영향을 받을 것인가에 대한 해석에도 많은 가정도입이 불가피하다.

고준위폐기물 처분장 성능 및 안전성평가에 수반되는 이와 같은 불확실성을 가능한 한 최소화하기 위해서는 우선 공학적으로 규명할 수 있는 것부터 체계적으로 수행하여야 한다. 심지층 부지특성 자료조사/분석 이외에도 안전성평가 기술개발과 병행하여 폐기물 처분용기 개념, 처분공의 형상과 공학적 방벽의 구성요소 및 지하시설의 배치/형태 등과 같은 기준 처분시스템 (Reference Geological Disposal System)의 개념 정립이 필요하다. 이를 위해서는 기준 처분시설 용량과 사용후연료 특성과 같은 기본 인자들에 대한 기초 자료가 요구된다.

본 연구에서는 2010년까지 건설되는 원전의 수명 기간동안 발생하는 사용후핵연료 총량을 일단 기준 처분시설의 용량으로 가정하였다. 현재까지 국내 원전에서 발생되고 있거나 향후 발생할 사용후핵연료의 특성자료(크기, 무게, 초기농축도, 연소도, 냉각기간 등)을 근거로 하여 모든 사용후핵연료를 대표할 수 있는 기준 사용후핵연료를 선정하였다.

2. 사용후핵연료 발생량 추정

1995년 정부에서 발표한 2010년까지의 원자력발전 계획[1]을 바탕으로 총 27기의 원전 (PWR23기, CANDU 4기)으로부터 발생되는 사용후핵연료 발생·누적량을 추정하였다. 사용후핵연료 발생량은 원자력발전소 수명에 따라 차이를 보이게 되는데, 아직 우리나라에는 원전수명에 대한 정의가 명확히 이루어지지 않고 있다. 현재의 원자력발전소는 설계수명을 30년 또는 40년으로 하여

인·허가를 득하여 운전되고 있으나, 이를 원전 수명으로 단정짓기는 곤란하다. 따라서 여기서는 일단 고리 1호기의 수명은 30년 그리고 다른 발전소의 수명은 40년으로 가정하여, 사용후핵연료 발생량을 추정하였다. 1996연말까지의 사용후핵연료 발생·누적량과 현재 가동중인 원전의 예상 연간 발생량은 한전에서 제공된 자료를 이용하였으며, 2007년 이후에 도입될 예정인 차세대 가압경수로에서 발생하는 사용후핵연료 양은 원자로 수명: 40년; 원자로 열효율: 31%; 이용률: 80%; 발전 용량: 1,300MWe; 평균 연소도: 55,000 MWD/MTU등의 가정[2]을 통하여 연간 약 22.3톤이 발생하는 것으로 추정하였다 $[(1,300MW) \times (0.8/0.31) \times 1/55,000MTU/MWD] \times (365 \text{ days/year}) = 22.3MTU/year$]. 이와 같은 가정하에서 산출된 사용후핵연료 총 발생량은 약 36,000톤이며, 이 중 PWR사용후핵연료가 약 55% (20,000 톤), CANDU사용후핵연료가 약 45% (16,000톤)를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 여기서 2010년 이후의 PWR 및 CANDU 사용후핵연료 발생량은 추가 건설되는 원전의 노형에 따라 달라지겠지만, 현 단계에서 고려되는 기준 처분시스템의 개념설정에 있어서는 CANDU 사용후핵연료 특성에 대한 고려가 상당히 반영되어야 함을 알 수 있다.

3. 국내 사용후핵연료의 특성

사용후핵연료의 특성(기하학적 구조, 크기, 무게, 냉각기간, 연소도, 방사선원, 붕괴열량, 방사성물질 농도 등)은 처분시설을 구성하는 모든 관련 시스템의 설계/건설/운영 및 사후관리는 물론 처분시스템 성능 및 안전성 평가에 필요한 기본 입력자이다. 국내에서 발생하는 사용후핵연료는 원자로형에 따라 PWR 및 CANDU형 핵연료로 분류될 뿐만 아니라, PWR 핵연료인 경우에는 각 발전소별 노심 설계특성 및 원자로 운전특성에 따라 다르고 또한 핵연료의 연소이력도 다르다. 이와 같이 다양한 특성을 갖는 모든 종류의 사용후핵연료가 수용될 수 있는 기준 처분시스템을 설정하기 위해서는 모든 종류의 사용후핵연료 특성을 대표할 수 있는 기준 사용후핵연료를 선정하는 것이 매우 중요한 선결요건이다. 기준 사용후핵연료 선정을 위한 사용후핵연료의 연소특성 분석 범위에는 현재까지 발생된 사용후핵연료는 물론 향후 발생될 예정인 것까지 포함하였다.

가. 핵연료의 설계특성

가압경수로형 원자로에 사용되고 있는 핵연료집합체는 대체적으로 U-235가 초기노심의 경우에는 대략 1.5/2.1/3.2 wt.%와 같은 농도분포의 핵연료가 사용되나, 평형노심 상태에서는 대략 3.5~4.2wt.%의 농축도를 가진 핵연료가 사용되고 있으며 최근에는 4.5wt.%까지 증가되고 있다[3].

가압경수로형 핵연료 집합체의 크기는 핵연료봉 배열에 따라 다른데 대체적으로 14x14, 16x16 핵연료 집합체는 19.8²x405.8(cm) 이고, 17x17핵연료 집합체는 21.4²x405.8(cm)이다. 그러나 한국표준형연료(KSFA)의 크기는 20.7²x452.8(cm)로서 다른 핵연료에 비해 약 50cm 이상 길다. 그리고 핵연료 집합체의 총 무게 역시 각 핵연료의 형태에 따라 다르나 대체적으로 약 360~440kg의 우라늄 무게를 포함하여 약 515~665kg이다. 그리고 CANDU핵연료는 길이가 약 49.5 cm되는 37개의 연료봉을 직경 약 10.2 cm되게 다발로 묶은 것으로 전체무게는 19~20kg의 우라늄을 포함하여 약 23.6kg 이다.

표 1 은 '79년부터 '97년까지 국내 원전에서 발생된 연도별 사용후핵연료 발생·누적량이다. PWR사용후핵연료 중 17x17 사용후핵연료가 발생량의 약 66%를 점하고 있으며, 또한 고리 1호기와 2호기를 제외한 모든 경수로 원전에서는 1990년도부터 잠전되기 시작한 17x17 KOFA 핵연료의 비중이 점차 증가하여 1997년도까지 약 30%를 차지하고 있는 것으로 나타나고 있다. 한편, 영광 3호기에서 사용하고 있는 국산표준핵연료인 16x16 핵연료가 1995년부터 배출되기 시작하고 있고 이러한 유형의 핵연료가 올진 3,4호기까지 이어질 전망이나, 현시점에서 볼 때, 차세대 원자로가

도입되는 2007년대 중반까지는 17x17 KOFA 핵연료가 가장 많이 발생될 것으로 전망된다.

나. 핵연료의 배출 연소도

장주기 고연소도 핵연료의 이용이 전력생산 단가를 낮출 수 있고 단위전력생산량에 대한 사용후핵연료의 발생량을 상당히 줄일 수 있다는 경제적 이득 때문에 원자력 선진국들을 중심으로 고연소도 핵연료를 개발하기 위한 노력이 지속적으로 추진되고 있다. 실질적으로 현재 50,000 MWD/MTU까지의 연소도는 상용화된 상태이다. 미국, 일본, 독일에서 추진되고 있는 고 연소도 PWR핵연료 개발 프로그램에 따르면 90년대말까지 연소도 55,000~60,000MWD/MTU 달성한다는 목표이다[4]. 이와 같은 세계 추세와 같이, 우리나라에서도 기존의 원자력 발전소에서 채택되던 노심 및 핵연료 관리체계가 장주기-고연소도 핵연료 도입체제로 전환되고 있다. 80년대 중반까지 12개월 주기로 약 33,000MWD/MTU 범위의 연소도를 유지하던 것이 80년대 말부터 연소주기를 15개월로 늘리면서 순차적으로 핵연료의 평균 농축도도 3.2→3.5→3.8wt%로 증가되어, 평균연소도는 39,000MWD/MTU에 이르고 있다. 또한 최근에는 초기 농축도가 약 4.0~4.5wt%인 VANTAGE5H 핵연료가 도입되면서 평균 연소도가 45,000MWD/MTU으로 증가하고 있는 추세에 있으며 최고 연소도는 52,000MWD/MTU이 넘고 있는 것으로 나타나고 있다[3]. 그림 1은 연도별로 사용후핵연료 발생량과 평균연소도 변화추이를 보여주고 있다. 1994년부터 1996년까지 고리 1&2호기에서 배출된 176개의 사용후핵연료와 영광 3&4호기로부터 1996년에 배출된 96개의 사용후핵연료(제 1주기 연소)에 대해서는 연소이력 정보의 부족으로 포함되지 않았다. 그러나 이 그림으로부터 PWR사용후핵연료의 평균 연소도가 매년 증가하여 90년대 중반이후부터는 평균연소도가 40,000MWD/MTU에 근접하고 있음을 알 수 있다. 또한 2007년경부터 도입 예정으로 있는 차세대 원자로 핵연료의 최대연소도는 60,000 MWD/MTU, Batch 평균연소도는 55,000MWD/MTU으로 예상되고 있다[2].

따라서 우리나라의 원전에서 발생된 사용후핵연료의 연소도 추이를 요약해 보면, 80년대에 약 30,000~33,000 MWD/MTU, 90년대 초반에 15~18개월의 장주기 개념이 도입되면서 약 33,000~39,000MWD/MTU으로 증가되었고, 90년대 말에는 45,000~50,000MWD/MTU, 그리고 차세대 원자로가 도입되는 2007년경이면 55,000MWD/MTU까지 증가될 것으로 전망된다. 그러나 현재까지의 세계적인 고 연소도 핵연료의 개발현황을 종합해 볼 때, 당분간 평균연소도가 60,000MWD/MTU를 초과하기는 어려울 것으로 전망된다.

다. 기준 사용후핵연료 선정

국내에서 발생하는 다양한 종류의 모든 사용후핵연료를 대표할 수 있는 기준 사용후핵연료를 선정하기 위하여 우선 크기, 무게등과 같은 기계적 설계특성 인자들은 가장 보수적인 값들로 그리고 초기 농축도 및 연소도와 같은 핵적 특성인자들은 현재 및 향후 발생될 사용후핵연료의 특성자료를 분석하여 가상적인 기준 사용후핵연료를 선정하였다.

핵연료의 초기농축도는 사용후핵연료의 처분용기 밀봉,포장을 위한 제반 공정 및 처분 전, 후의 책임계 및 안전성평가에 중요한 선원항 결정 요소이다. 현재까지 사용되고 있는 핵연료의 초기농축도가 다양한 범위를 보여주고 있고, 또한 향후 핵연료의 고 연소도화가 일반화되어 있는 추세에 있기 때문에 기준 사용후핵연료의 초기농축도 선정이 쉽지 않다. 그러나 핵연료 설계해석 및 성능측면에서 핵연료의 농축도와 사용후핵연료의 연소도는 어떤 범위내에서 일정한 관계를 보여주기 때문에 일단 기준 사용후핵연료의 연소도를 먼저 추정된 후에 이에 대응할 수 있는 적절한 초기농축도를 추정하는 방법으로 접근하였다. 미국 ORNL (Oak Ridge National Lab.)에서는 CDB (Characteristics Data Base) 프로그램차원에서 사용후핵연료의 연소도와 초기농축도와의 관계를 발

표한바 있다[5]. 실제로 미국의 고준위폐기물 처분장 설계에 활용하기 위하여 미국 내 원전에서 발생된 대부분의 사용후핵연료 특성자료를 데이터베이스화하여 얻어진 통계적 결과인데, 사용후핵연료의 연소도가 40,000MWD/MTU일 경우 핵연료의 초기농축도는 3.02~4.42% (평균치는 3.72%), 그리고 45,000MWD/MTU일 경우의 초기농축도는 3.56~4.96% (평균치는 3.99%)의 범위를 보여주고 있다. 우리나라에서 발생된 사용후핵연료의 연소도와 초기농축도와의 관계를 살펴보면, 특별한 경우 (초기노심핵연료, 운영중 파손사고로 인출된 핵연료)를 제외하고는 대부분 이 범주에 포함되고 있다.

기준핵연료의 연소도를 추정하기 위하여 그림 1 및 표 1 에 있는 사용후핵연료 발생량과 이에 상응하는 각 노형별 사용후핵연료의 평균 연소도 값을 총 처분물량 36,000톤에서 차지하는 비율로 표 2 와 같이 나타내었다. 이 표는 1996년까지 발생된 사용후핵연료량이 총 처분물량의 8%에 지나지 않으며, 평균 연소도가 45,000MWD/MTU인 사용후핵연료는 약 56%에 이르고 있다는 것을 보여주고 있다. 이는 기준핵연료의 연소도를 45,000MWD/MTU으로 선정할 경우 총 처분대상 핵연료의 약 64%를 수용할 수 있음을 의미하게 된다.

이상의 결과로부터, 기준 사용후핵연료의 평균연소도는 일단, 총 처분대상 핵연료의 64%를 수용할 수 있는 45,000MWD/MTU으로 정하고 2009년 이후부터 차세대 원자로에 발생하게 될 평균 연소도 55,000 MWD /MTU을 보완 연소도 값으로 설정하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 그리고 이러한 연소도에 대응하는 초기 농축도 값은 미국 ORNL의 CDB자료로부터 45,000MWD/MTU일 때 4.0%, 55,000 MWD /MTU일 때 4.5%으로 결정하였다. 그러나 앞으로 20~30년 이상 진행될 처분 연구개발을 위해서는 사용후핵연료의 특성이 규명된 것을 대상으로 하되 고 연소도 핵연료의 상용화 추이에 따라 단계적으로 개선해 나가는 전략이 필요할 것으로 보인다. 한편, 가압중수로인 경우는 천연우라늄 연료만을 사용한다는 가정 하에서는 현재 월성 1호기에서 배출되는 사용후핵연료를 기준으로 하여 연소도 7,500MWD/MTU으로 선정하였다.

사용후핵연료의 특성인자중 중요한 것으로 붕괴열을 들 수 있다. 붕괴열은 사용후핵연료 내에 존재하는 방사성물질의 붕괴로 발생하는 것으로 처분관점에서는 방사선과 달리 차폐함으로써 해결되는 문제가 아니고 주어진 열적 제한치 (처분시스템의 성능보장을 위한) 내로 소산시켜야만 하는 것이다. 이렇듯 사용후핵연료가 처분시점에서 방출하는 붕괴열량은 처분시스템의 장기적 성능 및 안전성은 물론 처분밀도 및 경제성에도 큰 영향을 미치게 되므로 가능한 한 작은 값을 유지시키도록 설정하는 것이 좋을 것이다. 핵연료의 붕괴열은 시간에 따라 감소하기 때문에 기준 사용후핵연료의 냉각시간은 기준 처분시스템 설정에 중요한 변수가 된다. 사용후핵연료의 붕괴열이 냉각시간에 따라 감소되는 양상을 살펴보면, 냉각시간이 30년에서 40년으로 증가될 때의 붕괴열 감소율이 다른 구간보다 다소 크게 나타나고, 또한 중간저장시설의 수명이 40년이 보편화되어 있는 점을 고려할 때, 일단 기준핵연료의 냉각시간은 40년으로 설정하고, 그 보다 큰 냉각시간(50년, 70년, 100년)은 기준 처분시스템을 설정한 후 처분 효율성 및 안전성과 경제성 측면에서 trade-off 분석을 통하여 그의 영향을 최종 비교·평가하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

4. 기준 사용후핵연료 선정

현재 발생되고 있거나 향후 발생될 사용후핵연료의 정성적 분석 결과를 근거로 국내에서 발생되는 모든 종류의 사용후핵연료를 대표할 수 있는 기준 사용후핵연료의 발생량과 초기 농축도, 연소도, 냉각기간 등과 같은 처분시스템 설정에 필요한 주요입력 인자를 다음과 같이 선정하였다.

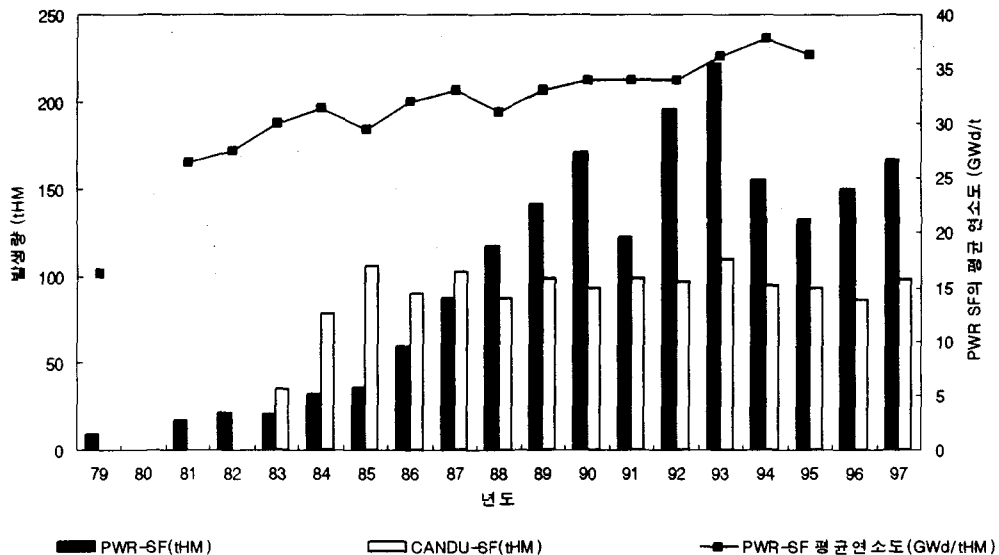
○ 기준 사용후핵연료 형태

- PWR : 17X17 핵연료봉 배열의 집합체
 - 핵연료 집합체 무게: 665 kg(WH/STD)

- 핵연료 집합체 단면적: 21.4 x 21.4 cm (KOFA, WH/OFA)
- 핵연료 길이: 453 cm (ABB-CE)
- CANDU 핵연료 다발
 - 핵연료 다발 무게: 25 kg
 - 핵연료 다발 지름: Ø10 cm
 - 핵연료 다발 길이: 49.5 cm
- 기준 사용후핵연료의 초기농축도와 연소도
 - PWR 사용후핵연료 집합체
 - 45,000MWD/MTU일 때 4.0 % wt. U-235
 - 55,000MWD/MTU일 때 4.5 % wt. U-235
 - CANDU 사용후핵연료
 - 75,000 MWD/MTU (0.7 %wt, U-235, 천연우라늄)
- 기준 사용후핵연료의 냉각기간 : 40년

참고문헌

- [1] "95 장기 전원 수급계획", 통산산업부 공고 제 1995-174호, 1995.12
- [2] 박종근 외, "차세대 원자로 기술개발", KAERI/TR-388/93 (1993).
- [3] Private Communication, 원전연료(주), 1997.
- [4] 한국원자력산업회의, "1996년 원자력년감 : 원전연료의 고도화", pp.374-375 (1996).
- [5] R.S.Moore, "Interpolation functions for use with ORIGEN-2 Data", International High Level Radioactive Waste Management Conference, Las Vegas, NV(Apil 12-16, 1992)



· PWR 사용후핵연료의 평균연소도는 평형노심에서 3주기동안 연소된 것들만 고려

그림 1. 현재까지 발생된 사용후핵연료의 발생량과 연소도 변화 추이

표 1. 발전소별 배출한 사용후핵연료의 종류 및 발생량

년도	고리1	고리2	고리3	고리4	영광1	영광2	영광3	영광4	울진1	울진2	PWR 사용후핵연료		CANDU 사용후 핵연료	총계 (tHM)
	집합체 수										집합체	tHM	(tHM)	
'79	19										19	8.36	0	8.4
'80	0										0	0	0	0.0
'81	38										38	16.72	0	16.7
'82	48										48	21.12	0	21.1
'83	47										47	20.68	34.8	55.5
'84	34	38									72	31.68	78.5	110.2
'85	40	41									81	35.64	106.3	141.9
'86	49	39	48								136	59.84	90.3	150.1
'87	0	48	56	42	53						199	87.56	102.2	189.8
'88	46	53	25	37	52	53					266	117.04	87	204.0
'89	52	0	70	50	55	41			52		320	140.8	99	239.8
'90	47	52	60	43	52	46			52	36	388	170.72	94	264.7
'91	2	48	0	64	48	59			0	56	277	121.88	99	220.9
'92	52	66	53	73	64	40			48	48	444	195.36	97.4	292.8
'93	44	120	67	38	76	63			48	48	504	221.76	109.4	331.2
'94	44	0	64	60	0	55			64	64	351	154.44	95	249.4
'95	0	48	56	0	76	65			56	0	301	132.44	94	226.4
'96	40	44	0	60	60	0	48	48	60	76	436	191.84	86.3	278.1
'97	40	44	56	60	0	64	64	64	63	52	507	223.08	98	321.1
계	642	641	555	527	536	486	112	112	443	380	4434	1951	1371.2	3322.2

표 2. PWR 사용후핵연료와 연소도와의 관계

발생기간	Batch 평균연소도 (MWD/MTHM)	처분대상 PWR 사용후핵연료	
		물량 (MTHM)	점유율(%)
~ 1989	30,000 ~ 33,000	500	3
1990 ~ 1996	33,000 ~ 39,000	1,000	5
1997 ~ 2008	~ 45,000	3,000	15
2009년 이후	~ 45,000	8,100	41
	~ 55,000이상	7,400	36