

Investigation of PWR Spent Fuels for the Design of a Deep Geological Repository

심층처분시스템 설계를 위한 경수로 사용후핵연료 현황 분석

Dong-Keun Cho*, Jungwoo Kim, In-Young Kim, and Jong-Youl Lee

Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

조동건*, 김정우, 김인영, 이종열

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로989번길 111

(Received August 26, 2019 / Revised September 16, 2019 / Approved September 18, 2019)

Based on the 8th Basic Plan for Electric Power Demand and Supply, an estimation has been made for inventories and characteristics of spent fuel (SF) to be generated from existing and planned nuclear power plants. The characteristics under consideration in this study are dimensions, fuel array, ²³⁵U enrichment, discharge burnup, and cooling time for each fuel assembly. These are essentially needed for designing a disposal facility for SFs. It appears that the anticipated quantity by the end of 2082 is about 62,500 assemblies for PWR SFs. The inventories of Westinghouse-type and Korean-type SFs were revealed to be 60% and 40%, respectively as of the end of 2018. The proportion of SFs with initial ²³⁵U enrichment below 4.5 weight percent (wt%) was shown to be approximately 90% in total as of the end of 2018. As of 2077, more than 97% of SFs generated from Westinghouse-type nuclear reactors were shown to have cooling time of over 50 years. As of 2125, more than 98% of SFs generated from Korean-type nuclear reactors were shown to have cooling time of over 45 years. Based on these results, for the efficient design of a disposal system, it is reasonable to adopt two types of reference spent fuel. SF of KSFA with ²³⁵U enrichment of 4.5 wt%, discharge burnup of 55 GWd/tU, and cooling time of 50 years was determined as reference fuel for Westinghouse-type SFs; SF of PLUS7 with ²³⁵U enrichment of 4.5 wt%, discharge burnup of 55 GWd/tU, and cooling time of 45 years was determined as reference fuel for Korean-type SFs.

Keywords: Spent fuel, Discharge burnup, Cooling time, Deep geological repository

*Corresponding Author.

Dong-Keun Cho, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: dkcho@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-4899

ORCID

Dong-Keun Cho <http://orcid.org/0000-0003-4152-8605>

In-Young Kim <http://orcid.org/0000-0003-1445-0398>

Jungwoo Kim <http://orcid.org/0000-0001-6896-471X>

Jong Youl Lee <http://orcid.org/0000-0001-8482-9008>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

제8차 전력수급기본계획에 근거하여 현재 운영중이거나 계획중인 원자력발전소에서 발생할 사용후핵연료의 양과 특성을 추정하였다. 본 연구에서 고려된 특성은 핵연료집합체에 대한 제원, 핵연료봉 배열, ^{235}U 초기 농축도, 방출연소도, 냉각기간이다. 이들은 사용후핵연료 처분시스템을 설계하는데 필수적인 항목이다. 2082년까지 가압경수로 사용후핵연료의 예상발생량은 약 62,500 다발로 추정되었다. 2018년 말까지 발생한 사용후핵연료 중 상대적으로 길이가 짧은 웨스팅하우스형 원전 연료가 약 60%, 상대적으로 길이가 50 cm 정도 긴 한국형 원전 연료가 약 40%를 차지하였다. ^{235}U 초기 농축도 4.5 wt% 이하를 갖는 사용후핵연료의 비율은 전체 발생량의 약 90%를 차지하였으며, 방출연소도는 98%의 물량이 55 GWd/tU 이하로 나타났다. 2077년을 기준으로 웨스팅하우스형 원전에서 발생한 사용후핵연료의 냉각기간은 50년 이상이 97% 정도를 차지하였으며, 본 논문에서 가정한 처분 완료시점인 2125년을 기준으로 한국형 원전에서 발생한 사용후핵연료의 냉각기간은 45년 이상이 98% 정도를 차지하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 효율적인 처분시스템 설계를 위해 기존 사용후핵연료는 제원적 특성을 고려하여 두 가지 형태로 설정하였으며, 웨스팅하우스형 원전 연료의 경우, 집합체 제원으로 KSFA, 초기 농축도 4.5 wt%, 방출연소도 55 GWd/tU, 냉각기간 50년으로, 한국형 원전 연료의 경우, 집합체 제원으로 PLUS7, 초기 농축도 4.5 wt%, 방출연소도 55 GWd/tU, 냉각기간 45년으로 설정하였다.

중심단어: 사용후핵연료, 방출연소도, 냉각기간, 심층처분시스템

1. 서론

국내에는 현재 운영 중인 원전이 25기, 영구정지된 원전이 1기 존재[1]하며, 이로부터 2018년 12월 기준으로 가압경수로 사용후핵연료가 18,600여 다발, 중수로 사용후핵연료가 451,000여 다발이 발생하였다. 이처럼 많은 사용후핵연료를 안전하게 관리하기 위하여 정부는 2016년 7월 25일, 「고준위방사성폐기물 관리 기본계획」을 발표[2]하였으며, 현재 이를 보완하기 위한 작업을 진행 중에 있다.

사용후핵연료를 안전하게 관리하기 위한 기술 개발도 지속적으로 수행 중에 있는데, 한국원자력연구원에서는 1997년부터 2006년까지 사용후핵연료를 심부암반에 영구격리하기 위한 개념을 개발하여 한국형 기준 처분시스템[Korean Reference Disposal System, KRS]을 제시[3]하였으며, 2007년부터는 파이로 공정에서 발생한 고준위폐기물 및 장반감기 폐기물을 처분하기 위한 연구를 수행하여 선진핵주기폐기물 기준 처분시스템(Advanced Korean Reference Disposal System for Radwastes from Pyroprocessing of PWR Spent Fuels)을 제시[4]하였다. 2018년부터는 원자력연구개발 사업에서 사용후핵연료를 처분하기 위한 연구를 다시 수행함에 따라 현재는 한국형 처분시스템을 개량하는 연구를 한국원자력연구원에서 진행 중에 있다.

처분시스템 개발에 기초자료로 활용되는 방사선원향 관련 연구도 함께 진행되었으며, 이의 결과물로 한국형 기준 처분시스템(KRS) 설계를 위한 가압경수로 기준 사용후핵연료는 집합체 제원으로 KSFA (Korean Standard Fuel Assembly), 초기농축도 4.0 wt%, 방출연소도 45 GWd/tU, 냉각기간 40년을 사용하였다[5]. 파이로 공정 설계 및 선진핵주기폐기물 기준 처분시스템(A-KRS) 설계를 위한 가압경수로 기준 사용후핵연료는 집합체 제원으로 PLUS7, 초기농축도 4.5 wt%, 방출연소도 55 GWd/tU를 적용하였다[6]. 이때 가압경수로 사용후핵연료의 파이로 공정처리 시점은 원자로 방출 후 10년, 폐기물의 처분시점은 원자로 방출 후 40년을 적용하였다[6].

사용후핵연료는 현재에도 지속적으로 발생하고 있으며, 이로 인해 처분대상이 되는 사용후핵연료의 물리적 제원, 초기농축도, 방출연소도, 냉각기간 분포도 지속적으로 변한다. 처분시스템을 타당하게 설계하고 지나친 보수성을 감소시키기 위해서는 기존 사용후핵연료를 적절히 사용하기 위한 분석도 지속적으로 수행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 가압경수로 사용후핵연료만을 대상으로 발생물량, 설계제원, 장전핵연료 농축도, 방출연소도, 냉각기간 등에 대해 현황 및 향후 추이를 분석하였으며, 이를 통해 가상적인 기준 사용후핵연료를 제안하였다.

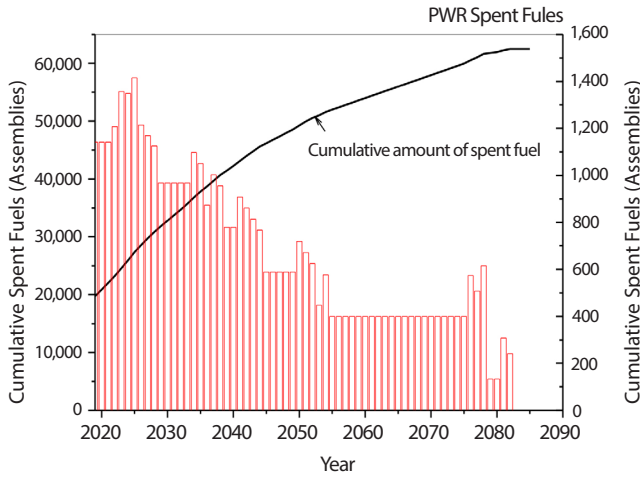


Fig. 1. Spent fuel amount from existing and planned reactors.

2. 사용후핵연료 발생량

2.1 국내 원전수급계획

우리나라는 현재 가압경수로 21기와 가압중수로 4기를 운영 중[1]이며, 정부에서 확정 고시한 제8차 전력수급기본계획[7]에 의하면, 2022년까지 1,400 MWe급 가압경수로 4기가 순차적으로 건설 완료할 예정이다.

2.2 국내 사용후핵연료 발생량 추이

앞서 언급한 제8차 전력수급기본계획을 근거로 현재 운영 중이거나 향후 건설할 가압경수로에서 발생할 사용후핵연료만을 대상으로 연도별 발생량 및 누적량을 산출하였다. 2018년까지 가압경수로에서 발생한 사용후핵연료 물량은 저장실적 자료를 이용하여 산출하였으며[8], 현재 운영중인 가압경수로에서 향후 발생할 사용후핵연료의 물량은 「고준위방사성폐기물 관리 기본계획」에서 사용후핵연료 발생전망 추정시 사용한 연간발생량 예측 값을 적용하여 추정하였다. 1,400 MWe급 원자로를 제외한 모든 원자로에 대해서는 40년 운전기간을 가정하는 한편, 1,400 MWe급 원자로의 경우는 60년 운전기간을 가정하였다.

각 원자로 호기별 사용후핵연료 누적량 예측 모델로 식 (1)을 사용하였다. 식 (1)에서 C_f^k 는 k호기에 대한 최종

사용후핵연료 발생 누적량을 의미하며, C_c^k 는 기준연도까지의 사용후핵연료 발생 실제 누적량, L_c^k 는 노심 내 핵연료 총장전량, n은 기준연도부터 폐로 시까지 향후 운전기간(년)을 의미한다.

$$C_f^k = C_c^k + \sum_1^n D_{avg}^k + L_c^k \quad (1)$$

여기서, D_{avg}^k 는 k호기의 연평균 사용후핵연료 발생량을 의미하며, 이 값은 앞서 언급한 연간발생량 예측 값이다.

이와 같은 방법으로 산출한 가압경수로 사용후핵연료 발생량 추이는 Fig. 1과 같다. 예측된 연간 사용후핵연료 발생량은 모든 원자로를 가동하는 2020년 중반 1,400다발 정도 발생하여 피크를 이루다가 점차 원자로의 수명이 종료됨에 따라 감소함을 볼 수 있다. 모든 원자로의 가동종료 최종시점인 2082년에서의 사용후핵연료 예측 누적량은 약 62,500다발 정도를 나타냈다.

3. 사용후핵연료 설계제원 및 연소특성 분석

사용후핵연료의 기하학적 구조, 크기, 냉각기간, 연소도, 방사선원의 세기 및 스펙트럼, 붕괴열량, 방사성물질 농도 등은 처분시스템 설계에 필요한 기본 자료이다. 그런데, 우리나라의 경수로 원자로에서 사용하는 핵연료의 설계제원, 초기농축도 및 방출연소도 등은 매우 다양하므로 이에 대한 총체적 분석을 통해 개념설계에 사용할 대표성을 갖는 사용후핵연료를 선정하여야 한다.

3.1 사용후핵연료의 설계제원

지금까지 사용한 핵연료집합체는 14×14, 16×16, 17×17 등의 세 가지 핵연료봉 배열을 갖는다. 고리 1호기에는 세 가지 종류의 핵연료 타입이 사용되었으며, 웨스팅하우스(이하 WH) 14×14 OFA (Optimized Fuel Assembly) 핵연료가 최종적으로 사용되다가 영구정지 되었다. 16×16 핵연료집합체에 대해서는 너비 및 길이 측면에서 크게 두 가지 형태의 핵연료집합체가 사용되고 있는데, 하나는 WH형 원전에 사용되는 연료[19.7×19.7×405.8 cm]로서 고리 2호기에, 다른 하나는 한국형 원전에 사용되는 연료[20.7×20.7×

Table 1. Inventory ratio of spent fuels for each reactor and fuel type (unit: percent)

Assembly Design		KORI 1	KORI 2	KORI 3&4 HANBIT 1&2 HANUL 1&2	HANBIT 3~6 HANUL 3~6	SHIN-KORI 1&2, SHIN-HANUL 1&2	SHIN-KORI 3	Proportion (%)
14×14	SFA	1.98						1.98
	OFA	4.29						4.29
	KOFA	1.20						1.20
16×16	SFA		5.41					5.41
	KOFA		0.84					0.84
	ACE7		1.61					1.61
17×17	SFA			1.71				1.71
	FRA			1.99				1.99
	OFA			5.06				5.06
	KOFA			8.11				8.11
	Vantage 5H			12.34				12.34
	RFA			8.56				8.56
	ACE7			6.48				6.48
16×16	PLUS7				15.31	1.35	0.54	17.21
	KSFA				9.43			9.43
	CESFA				0.65			0.65
	HIPER16				0.04			0.04
	GUARDIAN	0.00			9.56			9.56
Total		7.48	7.86	44.26	34.99	4.88	0.54	100.00

452.8 cm]로서 울진 3, 4, 5, 6호기, 영광 3, 4, 5, 6호기, 신월성 1, 2호기, 신고리 1, 2, 3호기에 사용되고 있다. WH형 원전인 고리 3, 4호기, 울진 1, 2호기, 영광 1, 2호기에는 17×17 핵연료집합체인 ACE7 연료[21.4×21.4×405.8 cm]가 장전되고 있다. 한국형 원전에 이미 장전되어 있는 핵연료는 한국표준형연료인 16×16 PLUS7이 대부분이며, 새로이 교체되는 핵연료는 모두 PLUS7으로 장전되고 있다[8].

지금까지 발생된 핵연료집합체의 종류는 18가지로 분류할 수 있으며, 가압경수로 핵연료를 영구격리하기 위한 심층 처분시스템 개념설계안은 이 모든 핵연료집합체를 수용해야 하는데, 핵연료집합체 길이 측면에서 보면, 고리 1, 2호기에 사용되는 16×16 연료 및 WH형 원전에 사용되는 17×17

연료가 405.8 cm이며, 그 외의 한국형 원전에 사용되는 연료의 길이가 452.8 cm이다. 단면적 측면에서는 WH형 원전 연료의 경우는 21.4×21.4 cm가 가장 크며, 한국형 원전 연료의 경우는 20.7×20.7 cm가 가장 크다.

Table 1에는 2018년 말까지 발생한 핵연료 종류별 발생량을 수록하였는데, 고리 1, 2호기 연료가 15.3%, WH형 원전의 17×17 핵연료가 44.3%, 한국형 원전의 연료가 40.4%를 차지하고 있다. 처분용기는 사용후핵연료를 모두 수용하도록 설계해야 하므로, 이러한 자료는 길이별로 구분하지 않고 한 개 타입의 기준 사용후핵연료를 대상으로 처분시스템을 설계한다면, 2018년 기준으로 약 60%의 핵연료는 처분용기가 상대적으로 50 cm의 빈 공간을 갖게 됨을 의미한다.

Table 2. Portion of short- and long-length assemblies

	2018	2030	2040	2050	2060	2070	2082
Westinghouse-type spent fuel	0.60	0.43	0.33	0.29	0.26	0.24	0.23
Korean-type spent fuel	0.40	0.57	0.67	0.71	0.74	0.76	0.77

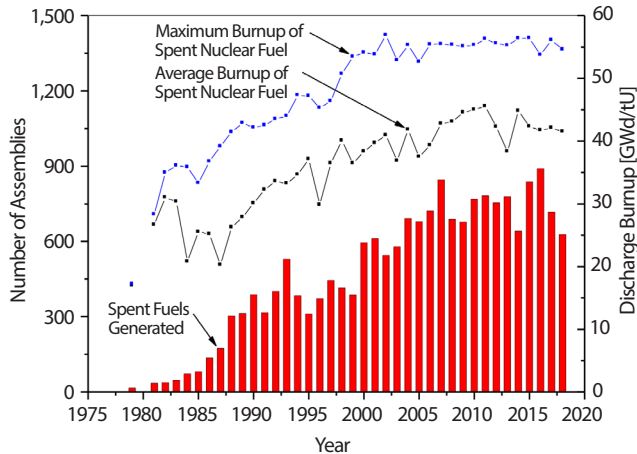


Fig. 2. Chronological average discharge burnup of spent fuel.

달리 말하면, 사용후핵연료 길이를 고려하여 두 개의 핵연료 타입을 기준 사용후핵연료로 선정하여 설계한다면 보다 효율적인 처분시스템 설계안을 도출할 수 있다.

Table 2에는 짧은 길이를 갖는 사용후핵연료(Table 2에서 Westinghouse-type spent fuel)와 상대적으로 긴 길이를 갖는 사용후핵연료(Table 2에서 Korean-type spent fuel)의 점유율을 연도별로 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이, 한국형 원전 연료의 점유율이 점점 증가하여 2082년에는 77% 정도를 차지함을 볼 수 있다.

3.2 장전핵연료 농축도 추이

핵연료의 초기 농축도는 사용후핵연료의 방출연소도 및 사용후핵연료 핵종 재고량과 상관성이 있으므로 향후 발생할 사용후핵연료의 농축도 추이분석은 중요하다. 각 원자로 호기별로 지금까지 장전된 핵연료의 초기 농축도에 대해 설명하면 다음과 같다. 고리 1호기에는 1996년 이후로 ²³⁵U 농축도(이하 농축도) 3.8 weight percent(이하 wt%)인 핵연료

가 장전되었으며, 2014년에만 일부 핵연료에 대해 4.1 wt% 농축도가 사용되었다. 고리 2호기에 대해서는 1996년부터 2008년까지 3.8 wt% 농축도가 사용되다가, 그 이후부터는 농축도를 증가시켜 현재는 4.65 wt%인 핵연료가 장전되고 있다. 고리 3, 4, 영광 1, 2, 울진 1, 2호기에는 90년대 초반에 농축도 3.6 wt% 정도인 핵연료가 사용되다가 90년대 중반부터 4.1~4.2 wt%인 Vantage 5H가 장전되었고, 2000년대 초반부터 4.5 wt% Vantage 5H, RFA, ACE7이 순차적으로 장전되다가 2010년대 초반부터는 4.65 wt%인 핵연료가 장전되고 있다. 한국형 원전에는 90년대 말 4.2 wt% 핵연료가 사용되다가 2000년대 초반부터 4.5 wt%인 핵연료가 장전되기 시작하였으며, 2010년대 중반부터는 4.65 wt% 핵연료가 사용되고 있다.

2018년 말 기준으로 발생한 가압경수로 사용후핵연료는 18,600여 다발이며, 앞서 언급한 것처럼 모든 원전의 수명이 종료되는 2082년까지 발생할 사용후핵연료가 62,500 다발을 감안할 때 4.65 wt%인 사용후핵연료가 최종 물량의 약 72% 정도를 차지할 것으로 예측되었다. 좀 더 세분해 보면, WH형 원전의 경우는 4.65 wt%가 30%, 4.5 wt%가 25%, 4.2 wt%가 15%, 4.2 wt% 이하가 나머지를 차지하고, 한국형 원전의 경우는 4.65 wt%가 약 85%를 차지할 것으로 예상되었다.

이와 같은 자료를 바탕으로 볼 때, 궁극적으로는 4.65 wt%를 기준 사용후핵연료의 농축도로 선정하는 것이 바람직할 것으로 판단되나, 2018년까지의 발생실적 자료만을 보면 아직까지 4.5 wt% 이하의 사용후핵연료가 90% 정도를 차지하므로 2019년 현 시점에서는 4.5 wt%를 기준 사용후핵연료의 농축도로 설정하는 것이 바람직해 보인다.

3.3 사용후핵연료 연소도 분포

사용후핵연료 연소도 분포를 정확히 추정하는 것은 앞서 언급했듯이, 핵임계, 방사선차폐, 안전성 평가 측면에서 중요하다. Fig. 2에는 우리나라 원전에서 발생한 사용후핵연료 연간발생량과 연소도의 분포가 표기되어 있다. 그림에서 보듯이 연간 발생하는 사용후핵연료는 가동원자로의 증가로 인해 꾸준히 증가하는데 가압경수로의 경우 현재 연간 900 다발 정도가 발생하고 있다. 방출연소도는 1980년대 중반에는 30 GWd/tU 정도이었으나, 80년대 말부터 핵연료의

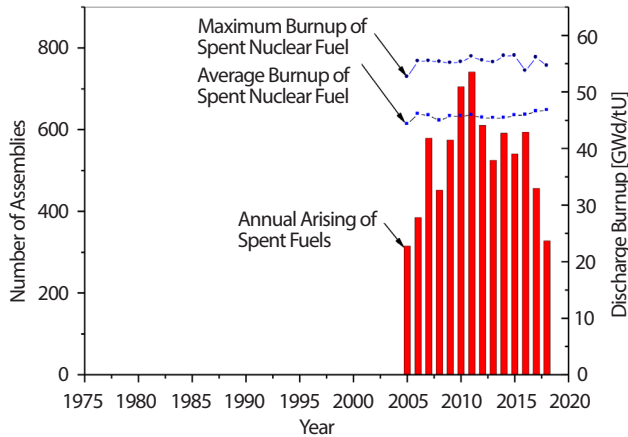


Fig. 3. Chronological average discharge burnup of spent fuel from equilibrium core.

농축도를 3.2 wt%에서 3.8 wt%로 순차적으로 늘리면서 90년대 중반부터는 37 GWd/tU 정도를 나타냈다. 90년대 중·후반부터 초기농축도가 4.1~4.2 wt%인 핵연료를 장전하면서 2000년대 초반에는 방출연소도가 40 GWd/tU 정도를 상회하였고, 2000년대 중반부터 4.5 wt%인 핵연료를 장전하면서 2010년 초에 45 GWd/tU 정도를 상회하였으며, 현재는 다시 평균연소도가 감소추세를 보이거나 이는 최근 건설된 원전의 가동으로 인해 초기노심을 구성하는 초기 농축도가 낮은 사용후핵연료가 발생하여 15 GWd/tU의 낮은 방출연소도를 갖는 사용후핵연료가 발생했기 때문이다. 최대 방출연소도는 지속적으로 증가하여 2000년대 초반부터는 55 GWd/tU 이상을 유지함을 볼 수 있다.

Fig. 3에는 향후 방출될 사용후핵연료의 연소도를 예측하기 위해 평형노심 상태의 국내 원전에서 발생한 사용후핵연료의 연소도분포를 나타낸 것이다, 고리 3, 4, 영광 1~6, 울진 1~6 호기를 분석대상으로 하였으며, 2005년도부터 발생한 사용후핵연료 중, 초기노심 해당물량은 제외하였으며 평형노심에서 발생한 사용후핵연료를 만을 대상으로 하였다. 그림에서 보듯이, 2005년 이후로도 평균연소도가 약간씩 증가하고 있는데, 이는 2005년 이후에도 농축도를 4.65 wt%까지 증가시켜왔기 때문이다. 2005년도 이후 평형노심에서 발생한 사용후핵연료의 평균연소도 및 표준편차는 각각 45.7 GWd/tU, 3.6 GWd/tU의 값을 보여 향후 발생할 사용후핵연료의 연소도 분포는 95% 신뢰수준에서 38.8 ~ 52.9

GWd/tU의 범위 안에 사용후핵연료의 방출연소도 값이 산포할 것으로 예상된다.

2018년 기준으로 발생한 사용후핵연료가 약 18,600 다발이고 향후 발생할 다발수가 43,900 다발 정도 되므로 현재까지 발생한 물량은 총 물량의 30% 정도밖에 발생하지 않은 상태이다. 즉 향후 발생할 사용후핵연료의 방출연소도는 기존에 발생한 통계치 만으로 판단하기에는 여전히 불확실성이 매우 크다. 따라서 한국형 원전에서 발행한 기준 사용후핵연료의 기준 연소도는 현 단계에서는 보수적으로 설정할 수밖에 없는 실정이며, 따라서 기존에 발생한 사용후핵연료의 최대 값 부근인 55 GWd/tU으로 설정하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 2018년까지 발생한 사용후핵연료의 집합체별 방출연소도 또한 99% 정도가 55 GWd/tU 이하에 속하는 것으로 나타나 향후 발생할 사용후핵연료의 방출연소도에 대한 불확실성을 고려한다 해도 55 GWd/tU을 적용하면 처분시스템 설계에 문제가 없을 것으로 판단된다.

3.4 사용후핵연료 냉각기간 분포

처분시스템 설계에 있어서 냉각기간을 얼마로 설정할 것인가는 방사선차폐, 안전성 평가 측면에서 중요하지만 무엇보다도 처분장 면적을 결정하는데 있어서 중요한 역할을 한다. 그런데, 사용후핵연료의 냉각기간은 처분시점을 언제로 할 것인가에 따라 달라진다. 본 분석에서는 참고문헌 [9]에서 적용한 처분시나리오를 가정하였다. 참고문헌 [9]에서는 「고준위방사성폐기물 관리 기본계획」을 참고하여 2053년부터 처분장운동을 시작하여 10년 동안은 중수로 사용후핵연료를 처분하고 그 후 15년 동안은 WH형 원전에서 발생한 사용후핵연료를 처분하고 그 이후부터는 한국형 원전에서 발생한 사용후핵연료를 처분하여 2125년까지 완료한다는 시나리오를 적용하고 있다. 그리고 처분율은 매년 1,000 다발의 가압경수로 사용후핵연료를 처분하는 것으로 가정하고 있다. Fig. 4는 이 시나리오를 적용하였을 경우, WH형 원전 및 한국형 원전에서 발생한 사용후핵연료에 대한 처분시점별 냉각기간을 보여주고 있다. 제일 오래된 핵연료부터 매년 1,000 다발씩 처분한다고 가정하면 그림에서 보듯이, 2063년에 처분되는 사용후핵연료의 냉각기간은 74년이나, 2070년에는 61년으로 감소하다가 마지막 물량을 처분하는 시점에는 48년의 냉각기간을 갖는 것으로 나타났다. 이 자료로부터

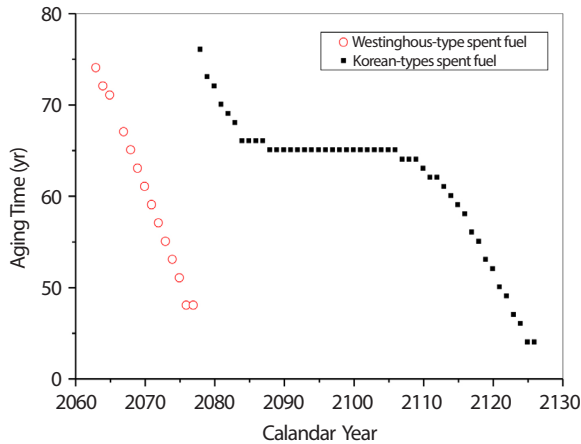


Fig. 4. Cooling time of spent fuels at the time of disposal.

WH형 원전의 사용후핵연료 냉각시간은 50년으로 결정하였다. 실제로 냉각기간이 긴 사용후핵연료와 짧은 사용후핵연료를 하나의 처분용기에 함께 처분하는데 문제가 없고 2077년 시점에서 50년 이상 냉각된 WH형 사용후핵연료의 물량이 97%를 상회하므로 냉각기간 50년은 충분한 보수성을 갖는다. 한국형 원전에서 발생한 사용후핵연료에 대해서는 최초 처분시점인 2078년 사용후핵연료의 냉각기간은 76년으로 나타났으며, 2100년에는 65년, 2110년에는 63년으로 나타나다가 처분 마지막 연도인 2125년에는 44년의 냉각기간을 갖는 것으로 나타났다. 이 자료로부터 한국형 원전으로부터 발생한 사용후핵연료의 냉각시간은 45년으로 결정하였다. 앞서와 마찬가지로 냉각기간이 긴 사용후핵연료와 냉각기간이 짧은 사용후핵연료를 하나의 처분용기에 함께 처분하는데 문제가 없고 2125년 시점에서 45년 이상 냉각된 한국형 사용후핵연료의 물량이 98%를 상회하므로 냉각기간 45년은 충분한 보수성을 갖는다.

4. 결론

사용후 핵연료 심층처분시스템 설계를 위하여 국내 사용후핵연료의 발생량, 집합체 제원별 현황, 장전핵연료 농축도, 연소이력 및 냉각기간 현황을 파악하였다. 2082년까지 경수로 사용후핵연료 발생량은 약 62,500 다발로 추정되었다. 2018년 말까지 발생한 사용후핵연료 중 상대적으로

길이가 50 cm 정도 짧은 WH형 원전연료가 약 60%, 상대적으로 길이가 긴 한국형 원전 연료가 약 40%를 차지하였으며, 2082년에는 한국형 원전 연료가 약 77%를 차지하는 것으로 나타났다. 핵연료의 농축도는 현재 4.65 wt%가 장전되고 있으나, 현재까지 발생한 물량 기준으로는 4.5 wt% 이하가 90% 정도를 차지하는 것으로 나타났다. 평형노심에서 발생한 사용후핵연료의 평균 방출연소도는 약 46 GWd/tU으로 나타났으며, 98%의 물량이 55 GWd/tU 이하로 나타났다. 2077년을 기준으로 WH형 원전에서 발생한 사용후핵연료의 냉각기간은 50년 이상이 97% 정도를 차지하였으며, 처분 완료시점인 2125년을 기준으로 한국형 원전에서 발생한 사용후핵연료의 냉각기간은 45년 이상이 98% 정도를 차지하는 것으로 나타났다.

앞서의 결과를 바탕으로 볼 때, 효율적인 처분시스템 설계를 위해서는 기준 사용후핵연료는 제원적 특성을 고려하여 두 가지 형태로 설정하는 것이 바람직해 보이며, WH형 원전 연료의 기준 사용후핵연료는 집합체 제원으로 KSFA (단면적 21.4×21.4 cm, 축방향 길이 405.8 cm), 초기 농축도 4.5 wt%, 방출연소도 55 GWd/tU, 냉각기간 50년으로 설정하고, 한국형 원전 연료의 기준 사용후핵연료는 집합체 제원으로 PLUS7 (단면적 20.7×20.7 cm, 축방향 길이 452.8 cm), 초기 농축도 4.5 wt%, 방출연소도 55 GWd/tU, 냉각기간 45년으로 설정하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 단 처분시스템 설계 시 핵임계 안전성 측면에서는 초기농축도, 방출연소도를 모두 높게 설정하는 것이 극한설정(bounding approach)이 아니므로 이는 별도로 분석하여 설정하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 지원에 의한 원자력기술개발사업 처분시스템 성능평가체계 개발(NRF-2017M2A8A5014856)의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCE

[1] Jul. 26 2019. "Reactor Power Information System." Interna-

- tional Atomic Energy Agency, Accessed Jul. 26 2019, Available from: <http://www.iaea.org>.
- [2] Atomic Energy Commission. Basic Plan on the Management of High-level Wastes, Jul, 25 2016 (2016).
- [3] J.Y. Lee, D.K. Cho, H.J. Choi, and J.W. Choi. "Concept of a Korean Reference Disposal System for Spent Fuels", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 44(12), 1565-1573 (2007).
- [4] J.Y. Lee, D.K. Cho, D.H. Kook, M.S. Lee, J.W. Choi, and H.J. Choi. High-level Waste Long-term Management Technology Development: Development of a Geological Disposal System, Korea Atomic Energy Research Institute Report, KAERI/RR-3417/2011 (2011).
- [5] C.H. Kang, J.W. Choi, W.I. Ko, Y.M. Lee, J.H. Park, Y.S. Hwang, and S.K. Kim. Reference Spent Fuel and Its Characteristics for the Concept Development of a Deep Geological Disposal System, Korea Atomic Energy Research Institute Report, KAERI/TR-914/97 (1997).
- [6] D.K. Cho, S.K. Yoon, H.J. Choi, J.W. Choi, and W.I. Ko, "Reference Spent Nuclear Fuel for Pyroprocessing Facility Design", *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, 6(3), 225-232 (2008).
- [7] Ministry of Trade, Industry and Energy. The 8th Basic Plan for Electric Power Demand and Supply (2017~2031), Notice 2017-601 (2017).
- [8] Korea Hydro & Nuclear Power Co., LTD. Official Letter for Request on Data for the Design of Geological Disposal System for Spent Fuels, Jun. 18 2019, (2019).
- [9] J.Y. Lee, I.Y. Kim, H.J. Choi, and D.K. Cho. "An Improved Concept of Deep Geological Disposal System for Spent Fuels Considering Spent Fuels Arising Characteristics from Domestic Nuclear Power Plants", *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, Under Review (2019).