

Current Status and Projection of Spent Nuclear Fuel for Geological Disposal System Design

심지층 처분시스템 설계를 위한 사용후핵연료 현황 분석 및 예측

Dong-Keun Cho, Jongwon Choi and Pil Soo Hahn

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

dkcho@kaeri.re.kr

조동건, 최종원, 한필수

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

(Received October 10, 2005 / Approved November 24, 2005)

Abstract

Inventories, and characteristics such as dimension, fuel rod array, weight, ^{235}U enrichment, and discharge burnup of spent nuclear fuel (SNF) generated from existing and planed nuclear power plants based on National 2nd Basic Plan for Electric Power Demand and Supply were investigated and projected to support geological disposal system design. The historical and projected inventory by the end 2057 is expected to be 20,500 and 14,800MTU for PWR and CANDU spent nuclear fuel, respectively. The quantity of SNF with initial ^{235}U enrichment of 4.5 wt.% and below was shown to be 96.5% in total. Average burnup of SNF revealed ~ 36 GWD/MTU and ~ 40 GWD/MTU for the period of 1994-1999 and 2000-2003, respectively. It is expected that the average burnup of SNF will be ~ 45 GWD/MTU at the end of 2000's. From the comprehensive study, it was concluded that the imaginary SNF with 16×16 Korean Standard Fuel Assembly, cross section of $21.4 \text{ cm} \times 21.4 \text{ cm}$, length of 453 cm, mass of 672 kg, initial ^{235}U enrichment of 4.5 wt.%, discharge burnup of 55 GWD/MTU could cover almost all SNFs to be produced by 2057.

Key words : spent nuclear fuel, geological disposal system, high-level waste, reprocessing, radioactive waste

요약

제2차 전력수급기본계획에 의거 2017년까지 계획된 원자로만을 대상으로 심지층 처분시스템 설계 시 필요한 국내 사용후핵연료의 발생량, 제원적 특징, 초기농축도 및 방출연소도 등에

대하여 현재 및 미래 현황을 파악하고 예측하였다. 2057년까지 PWR 및 CANDU 사용후핵연료 발생량은 각각 20,500 및 14,800 MTU로 나타났다. 초기 농축도에 대해서는 4.5 wt.% 이하를 갖는 사용후핵연료가 96.5%를 차지하는 것으로 나타났다. 사용후핵연료의 평균 방출연소도는 90년대 후반에는 36 GWD/MUT 정도, 2000년대 초반에는 40 GWD/MTU를 나타냈으며, 2000년대 중·후반부터는 45 GWD/MTU가 될 것으로 나타났다. 광범위한 분석 및 예측 결과, 총 처분물량을 대표할 수 있는 가상적인 기준 사용후핵연료는 16 6 한국표준형연료, 단면적 21.4cm×21.4 cm, 길이 453cm, 무게 672 kg, 초기 농축도 4.5 wt.%, 방출연소도 55 GWD/MTU로 나타났다.

중심단어: 사용후핵연료, 심지층 처분시스템, 고준위폐기물, 재처리, 방사성폐기물

I. 서 론

2005년 10월 현재, 우리나라의 원자력발전소는 20기가 운영되고 있으며, 이로부터 매년 많은 양의 사용후핵연료가 발생한다. 한국원자력연구소에서는 이를 안전하게 심지층에 처분하고자 1997년부터 고준위폐기물 처분시스템을 개발해 왔다. 그런데, 처분시설의 용량 및 처분시나리오를 타당하게 도출하기 위해서는 현재 및 향후 발생될 사용후핵연료의 양을 정확히 파악하여야 한다.

사용후핵연료에 관한 정보는 처분시스템 설계 과정에서 특히 중요한데, 사용후핵연료에서 발생하는 붕괴열과 방사선은 처분용기, 완충재 및 주변 환경의 온도를 상승시키는 열원과, 처분용기의 부식을 가속시키는 요인으로 각각 작용하여 공학적 방벽 및 천연 방벽의 성능을 저하시킨다. 따라서 붕괴열은 방벽의 성능이 확보되는 온도 제한치 이하로 소산시켜야 하며, 처분용기의 표면선량률은 부식억제를 위한 제한치 이하로 차폐설계 하여야 한다. 10CFR60.131(h) 항목에서 언급하고 있는 처분장에서의 책임계 안전성도 중요한 설계인자중의 하나이다. 이처럼 붕괴열, 방사능 및 책임계는 안전성 측면에서 중요하나, 이 인자들은 사용후핵연료의 연소도에 매우 종속적이므로 사용후핵연료의 초기농축도 및 연소도 분포 등의 현황을 정확히 파악하여야 한다.

1997년도에 국내 사용후핵연료 현황을 파악하고 이로부터 대표 값을 갖는 기준 사용후핵연료를 선정[1]한 바 있으나, 이후로 많은 시간이 경과되어 사

용후핵연료에 대한 자료가 많이 축적된 상태이므로 이를 보완하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 심지층 처분시스템 설계의 기초자료로 활용코자 현재 및 미래의 국내 사용후핵연료 현황을 파악하고 예측하였다.

II. 사용후핵연료 발생량

가. 국내 원전수급계획

국내에는 현재 가압경수로 16기와 중수로 4기가 운영 중이며, 현재까지 정부에서 확정 고시한 2017년까지의 제2차 전력수급기본계획[2]을 반영하면, 2010년부터 1,000 MW급 원자로가 4기, 1,400 MW급 원자로가 4기, 즉, 향후 2017년까지 8기의 원전이 추가 건설될 예정으로 있어, 2013년에 폐로예정인 월성 1호기를 고려하면 2017년에는 26.6 GWe의 용량, 총 27기의 원전이 가동될 예정이다.

나. 국내 사용후핵연료 발생량 추이

앞서 언급한 2017년까지의 전력수급기본계획을 근거로 건설될 원자력발전소만을 대상으로 사용후핵연료 연도별 발생량 및 누적량을 추정하였다. 2004년까지 발생한 사용후핵연료는 실제 발전소에 저장되어 있는 사용후핵연료 자료[3,4]를 근거로 산출하였으며, 현재 운영 중인 원전에서 향후 발생될 사용후핵연료의 예상발생량은 예측[5]을 통해 2057년까지 발생될 사용후핵연료의 추이를 파악하였다. 향후 건설되어 2010년부터 운영될 8기의 원자로는 PWR로

가정하였으며, 월성 1호기는 2013년에 폐로됨을 가정하였다. 그 외의 호기에 대해서는 운영기간을 40년으로 가정하였다. 1,000 MW급 원전에 적용될 핵연료는 한국표준형 연료(Korean Standard Fuel Assembly, KSFA)를 가정하였으며, 1,400MW급 차세대 원자로의 사용후핵연료 발생량은 '차세대 원자로 설계개발(II)'[6]에서 제시한 값을 사용하였다.

이와 같은 방법으로 산출된 사용후핵연료 발생량 추이는 그림 1 및 2와 같다. 처분예상 시점인 2040년에서의 누적량은 PWR 17,400 MTU 및 CANDU 14,800 MTU 임을 볼 수 있으며, 다발 기준으로는 PWR 4만8천여 다발, CANDU 78만여 다발 정도임을 볼 수 있다. 총 처분물량인 2057년까지의 사용후핵연료 발생량은 PWR의 경우 20,500MTU, CANDU의 경우는 약 14,800MTU 정도인 것으로 나타났다.

III. 사용후핵연료 특성

사용후핵연료의 기하학적 구조, 크기, 무게, 냉각 기간, 연소도, 방사선원, 붕괴열량, 방사성물질 농도 등은 심지층 처분시스템의 설계 및 안전성평가에 필요한 기본 자료이다. 그런데, 우리나라의 PWR 원전에 사용되는 핵연료의 제원, 초기농축도 및 방출연소도 등은 매우 다양하다. 따라서, 처분시스템을 설계하기 위해서는 이 모든 인자를 분석하여 대표성을 갖는 사용후핵연료를 선정하여야 한다.

가. 사용후핵연료의 제원 추이

우리나라에서 지금까지 사용된 사용후핵연료 제원을 보면, 14×14, 16×16 및 17×17 등의 세 가지 핵연료봉 배열 형태가 있다. 고리 1호기에는 웨스팅하우스(이하, WH) 14×14[19.7cm(가로)×19.7cm(세로)×405.7cm(길이)] OFA(Optimized Fuel Assembly) 핵연료가 사용되고 있다. 16×16 핵연료는 두 종류의 집합체가 현재 사용되고 있는데, 하나는 WH 표준형 연료[19.7cm×19.7cm×405.8cm]로서 고리 2호기에 사용되고 있으며, 다른 하나는 한국표준형 연료[20.7cm×20.7cm×452.8cm](Korea Standard Fuel Assembly)로서 울진 3,4,5,6호기 및 영광 3,4,5,6호기에 장전되고 있다. 현재 사용되고 있는 17×17 연료는 Vantage 5H[21.4cm×21.4cm×405.8cm]로서 고리 3,4호기, 울진 1,2호기, 및 영광 1,2호기에 장전되고 있다. 17×17 연료가 KOFA(Korean Optimized Fuel Assembly)에서 Vantage 5H로 대체되면서 두드러진 변화는 고연소도 정책에 따라 농축도가 3.7-3.8 wt.%에서 4.2 wt.%로 상향조정된 것이다. 지금까지 사용된 핵연료 집합체의 종류는 12가지이며, 캐니스터 바스켓은 모든 핵연료 집합체를 수용해야 하는데, 핵연료 집합체 단면적은 17×17 연료가 21.4cm×21.4cm로 가장 크며, 축방향 길이는 16×16 KSFA 연료가 453cm로 다른 집합체에 비해 50cm 이상 큰 특징이 있다. 핵연료 무게에 대해서는 KSFA 및 Vantage 5H 핵연료가 각각 651 및 672 kg으로 지금까지 발생한 핵연료

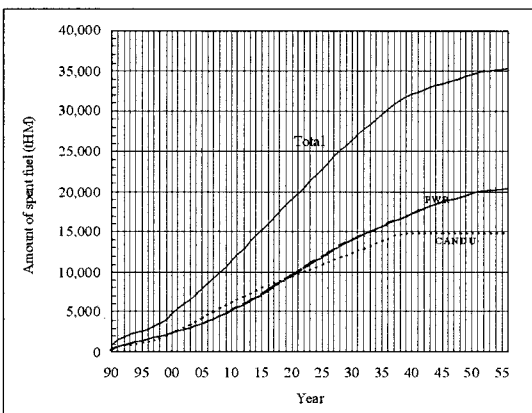


Fig. 1. Spent fuel arising from existing and planned reactors with 40 year-lifetime except Wolsung 1 (unit : ton heavy metal)

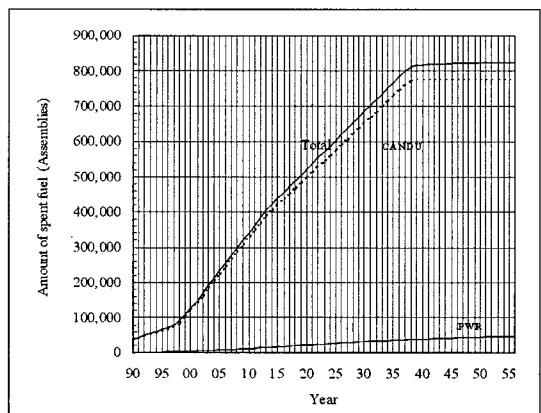


Fig. 2. Spent fuel arising from existing and planned reactors with 40 year-lifetime except Wolsung 1 (unit : assemblies)

중에서 가장 무거운 핵연료는 672 kg 인 것으로 나타났다.

표 1에는 2003년 말까지 발생한 핵연료 종류별 발생량이 기재되어 있는데, 기존에 기준 사용후핵연료 [1]로 선정한 17×17 핵연료가 약 56%를 차지하고 있으며, KSFA 핵연료가 약 25% 정도를 차지하고 있다. 그림 3은 향후 발생될 핵연료를 제원별로 예측한 것인데, KSFA의 다량 방출로 인해 17×17 핵연료가 상대적으로 감소하여 2010년대 중반부터는 16×16 핵연료가 17×17 핵연료에 비해 더 많이 발생하게 되고 최종적으로는 총 처분물량의 약 70% 정도 차지하는 것으로 나타났다. 각 핵연료 종류별 발생량 예측 시 향후 건설될 원자로의 핵연료는 16×16 KSFA 핵연

료를 가정[6]하였다.

현재 사용되고 있는 핵연료를 대체하고자 개발·시험 중인 개량핵연료에 대해 언급하면 다음과 같다. 평균 방출연소도 48 GWD/MTU를 목표로 개발된 Vantage 5H를 대체할 17×17 개량핵연료는 평균 방출연소도 55 GWD/MTU 이상을 목표로 개발되었으며, 열적성능은 현재 사용중인 Vantage 5H 연료에 비해 10% 이상 향상되었다. 이 연료는 약 2008년경에 상용원자로의 연료로 쓰일 예정이다. KSFA 핵연료 집합체를 대체할 16×16 개량핵연료 역시 평균 방출연소도 55 GMWD/MTU 이상, 열적성능이 10% 이상 향상되었으며, 2006년경에 상용원자로에 장전될 예정이나 기존 핵연료와 비교하여 농축도 및 목표 방출연소도를 제외한 물리적 제원의 변화는 거의 없다.

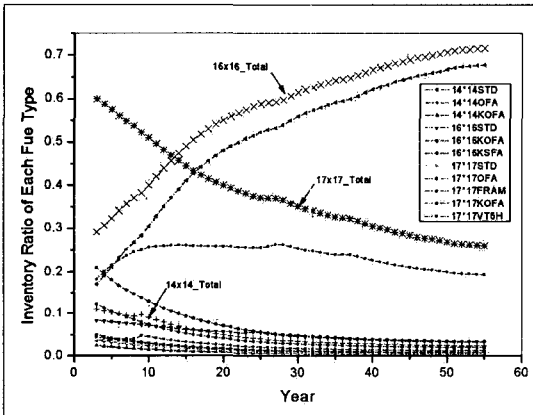


Fig. 3. Projected inventory trend for fuel type

나. 장전핵연료 농축도 추이

핵연료의 초기 농축도는 사용후핵연료의 방출연소도와 긴밀한 상관성이 있으므로 향후 발생될 사용후핵연료의 연소도 추이분석을 위해서는 이에 대한 분석이 필요하다. 각 원자로별로 지금까지 장전된 핵연료의 초기 농축도는 그림 4와 같다. 고리 1, 2호기는 1996년경부터 3.8 wt.%인 핵연료가 장전되었으며, 앞으로도 이 농축도가 계속 사용될 예정이다. 고리 3, 4, 영광 1, 2, 울진 1, 2호기는 90년대 초반에는 3.6 wt.% 정도인 핵연료가 사용되다가 90년대 중

Table 1. Inventories of spent fuel as functions of reactor and fuel type (unit: assemblies)

핵연료 종류	고리1	고리2	고리3	고리4	영광1	영광2	영광3	영광4	울진1	울진2	울진3	울진4	합 계
14 × 14	STD ¹⁾	386											386
	OFA ²⁾	274											274
	KOFA ³⁾	189											189
16 × 16	STD		639										639
	KOFA		292										292
	KSFA ⁴⁾						460	378			242	242	1,322
17 × 17	STD			157	149								306
	OFA			216	155	317	253						941
	FRAMA ⁵⁾								200	153			353
	KOFA			182	223	345	233		284	357			1,624
	V5H ¹⁶⁾			306	221	244	251		205	184			1,411
합 계		849	931	861	748	906	737	460	378	689	694	242	7,737

반부터 4.1~4.2 wt.%인 Vantage 5H가 장전되고, 2000년대 초반에는 4.5 wt.% Vantage 5H가 장전되었다. 표준형원전은 90년대 말에는 4.2 wt.% 핵연료가 사용되다가 2000년대 초반부터는 4.5 wt.%인 핵연료가 장전되었다. 대체적으로 보면, 1995년 이전에는 4.0 wt.% 이하, 1995년부터 4.0~4.5 wt.%, 2000년대 초반부터 4.5 wt.%가 적용되고 있음을 볼 수 있다.

방출된 사용후핵연료 초기농축도의 현황을 살펴 보면 그림 5와 같다. 2003년 시점으로 4.0 wt.% 이하가 전체 물량의 약 70% 정도를 차지하는 것으로 나타났으며, 이는 현재 사용하는 기준 사용후핵연료[1]가 초기농축도 측면에서 70% 정도를 수용할 수 있음을 의미한다. 그림 4와 차이를 보이는 이유는 장전된 핵연료가 방출되기까지는 약 4~5년 정도가 소요되기 때문에 4.2 wt.%가 많이 장전되었음에도 불구하고

고 4.0 wt.% 이하가 차지하는 비율이 높다. 4.0 wt.% 이상인 핵연료에 대해서는 90년대 말에 장전된 4.2 wt.% 핵연료가 거의 대부분을 차지하고 있다.

향후 추이는 그림 6과 같다. 기본가정으로 고리 1, 2호기는 3.8 wt.%, 고리 3, 4, 영광, 울진, 신고리, 신월성 원자로는 4.5 wt.%, 새로 건설될 1400 MWe급 원자로에는 재장전시마다 4.437 wt.% 68다발, 4.407 wt.% 8다발, 4.59 wt.% 16다발이 장전됨[6]을 가정하였다. 그림에서 보듯이, 2010년 초반에는 4.0 wt.% 이상이 약 55% 정도, 4.5 wt.% 이상이 45% 정도를 차지하다가, 최종 시점에서는 4.5 wt.% 이상이 총 처분물량의 66%, 초기 농축도 4.0 wt.% 이상으로 사용하는 사용후핵연료 총 처분물량의 87%를 차지하는 것으로 나타났다. 또한, 초기 농축도 4.5 wt.%를 초과하는 사용후핵연료의 양은 총 처분물량의 약 3.5% 정도로 나타나, 기준 농축도를 4.5 wt.%로 설정하면

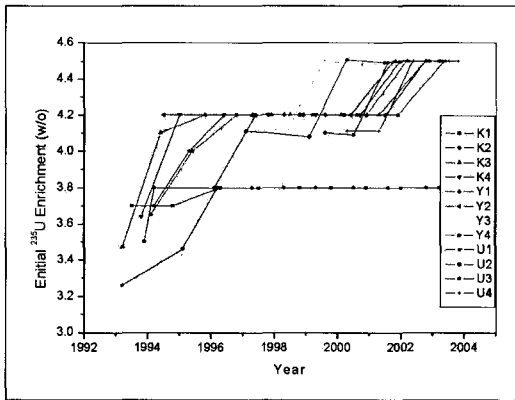


Fig. 4. Initial ²³⁵U enrichment in fresh fuel in the past

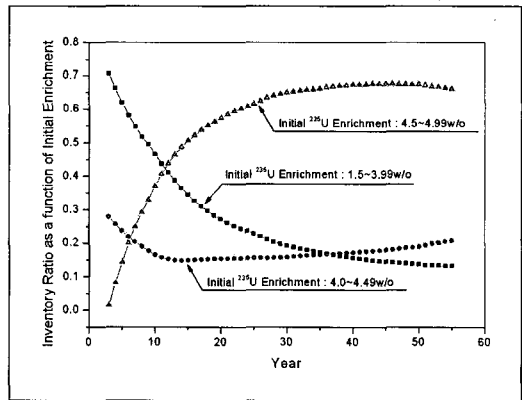


Fig. 6. Projected inventory trend for initial ²³⁵U enrichment

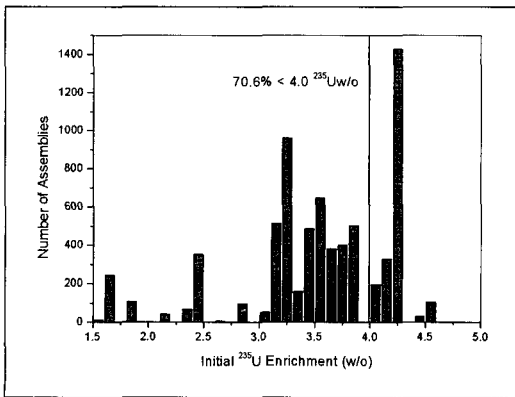


Fig. 5. Inventory as a function of initial ²³⁵U enrichment

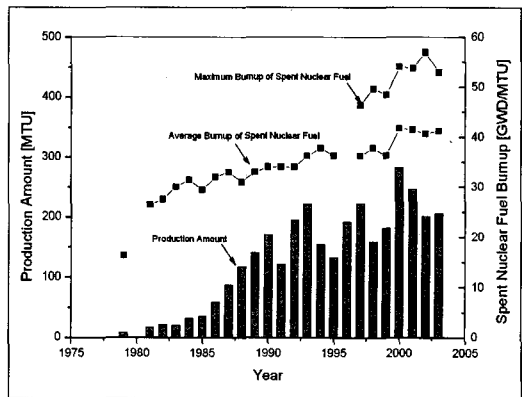


Fig. 7. Discharge burnup trend of spent fuel

사용후핵연료의 96.5%를 수용할 수 있는 것으로 나타났다.

다. 사용후핵연료의 연소도 분포

사용후핵연료 연소도 분포를 정확히 추정하는 것은 앞서 언급했듯이, 핵임계, 방사선차폐, 안전성 평가 측면에서 매우 중요하다. 그림 7은 현재까지의 사용후핵연료 발생량과 발생한 핵연료의 평균연소도를 나타내고 있는데, 그림에서 보듯이 연간 발생하는 사용후핵연료는 가동원자로의 증가와 더불어 꾸준히 증가하여 가압경수로의 경우 현재 연간 ~200 MTU 정도가 발생하고 있다. 방출되는 핵연료집합체의 평균연소도(이하 방출연소도)는 1980년대 중반에는 약 30 GWD/MTU 정도이었으나, 80년대 말부터 핵연료의 평균농축도를 3.2 wt.%에서 3.8 wt.%로 순차적으로 늘리면서 90년대 중반부터는 약 37 GWD/MTU정도에 이르다가, 90년대 중·후반부터 초기농축도가 4.1~4.2 wt.%인 Vantage 5H 핵연료가 장전되면서 2000년대 초반에는 방출되는 핵연료의 방출연소도가 약 40 GWD/MTU 정도를 상회하고 있다. 최대 방출연소도는 90년대 후반에는 45 GWD/MTU 정도이었으나, 2000년대 초반에는 55 GWD/MTU 정도인 것으로 나타났다.

그림 8에는 누적된 사용후핵연료를 대상으로 초

기농축도와 방출연소도와의 상관성을 나타내었다. 모든 노심이 경제성을 위해 고연소도 추세를 지향하여 농축도를 지속적으로 증가시켜 왔기 때문에 평형노심 상태에서 발생한 사용후핵연료가 아니어서 희귀분석을 통해 상관성을 찾는 것이 큰 의미는 없지만 초기농축도, 방출연소도, 발생량 등을 바탕으로 상관성을 나타내면 그림 8에 표기된 직선과 같다. 이상관성을 바탕으로 볼 때, 초기농축도가 4.5 wt.%인 KSFA의 핵연료가 본격적으로 방출되는 2000년대 중·후반부터는 방출연소도가 대부분 45 GWD/MTU에 분포할 것으로 판단된다.

그림 8을 바탕으로 초기농축도가 4.0 wt.% 이하인 사용후핵연료만을 대상으로 방출연소도를 분석해보면, 대부분의 핵연료가 1997년에 설정한 4.0 wt.%, 45 GWD/MTU 이하 영역에 모두 위치하고 있음을 볼 수 있으며, 농축도와 방출연소도와의 상관 값보다 10 MWD/MTU 높은 값을 나타내는 점선 영역 아래에 위치하는 사용후핵연료는 약 99% 정도로 나타났다. 따라서, 4.5 wt.% 인 핵연료가 상관관계로부터 약 45 GWD/MTU의 방출연소도를 나타내므로 이로부터 보수적으로 10 MWD/MTU를 추가로 적용하여, 향후 발생할 모든 핵연료의 기준 사용후핵연료를 4.5 wt.%, 55 GWD/MTU로 설정하여 처분시스템의 개념을 도출하면 대부분의 핵연료가 이의 범위 내에 위치할 것으로 판단된다. 참고로, 캐나다의 경우에는

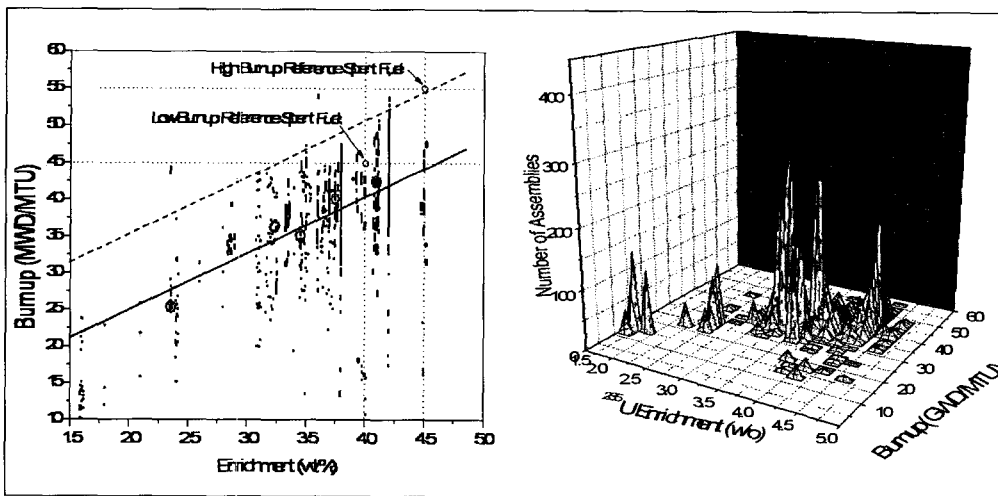


Fig. 8. Correlation between initial ²³⁵U enrichment and discharge burnup

연소도 분포를 도출한 후, 95% 핵연료를 수용할 수 있는 방출연소도를 기준연소도로 선정하여 처분시스템을 설계 중에 있다.

IV. 결과요약 및 결론

처분시스템 설계를 위한 기초 자료로 사용되는 국내 사용후핵연료의 발생량, 제원별 현황, 장전핵연료 농축도 및 연소이력 현황을 파악하였다. 2057년까지 PWR 및 CANDU 사용후핵연료 발생량은 각각 20,500 및 14,800 MTU로 나타났다. 핵연료의 단면적은 17×17 연료가 21.4cm×21.4cm로 가장 크며, 축방향 길이는 16×16 KSFA 연료가 453cm로 가장 긴 것으로 나타났다. 핵연료 무게는 Vantage 5H 핵연료가 672 kg으로 가장 무거운 것으로 나타났다. 핵연료봉 배열은 17×17 핵연료가 2003년 기준으로 전체대비 56%를 점유하는 것으로 나타났으나, 최종시점에서는 16×16 KSFA 사용후핵연료 발생량이 급격히 증가하여 70% 정도를 점유하는 것으로 나타났다. 초기 농축도 4.5 wt.%를 초과하는 사용후핵연료의 발생량은 최종 처분물량의 3.5%로 나타났으며, 방출연소도는 2000년대 중·후반부터는 대부분 45 GWD/MTU에 분포할 것으로 보인다. 지금까지 발생한 사용후핵연료를 대상으로 도출된 초기농축도와 방출연소도의 상관성을 고려해 볼 때, 초기농축도를 4.5 wt.%, 방출연소도를 55 GWD/MTU로 설정하면 대부분의 처분물량을 수용할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 2017년까지 계획된 원자로에서 원전수명동안 발생할 사용후핵연료를 심지층 처분시스템 설계관점에서 모든 핵연료를 수용할 수 있는 가상적인 사용후핵연료는 연료봉 배열 16×16, 집합체 단면적 21.4cm×21.4cm, 집합체 길이 453cm, 집합체 무게 672kg, 초기농축도 4.5 wt.%, 방출연소도 55 GWD/MTU로 최종 요약될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 시행한 원자력 중장기 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1]강철형, 최종원, 고원일, 김성기, 이연명, 박정화, 황용수, 심지층 처분시스템 개념설정을 위한 기준 사용후핵연료 선정 및 특성 분석, 한국원자력연구소 보고서, KAERI/TR-914/97(1997).
- [2]제1차 전력수급기본계획(2002~2015), 산업자원부 공고 제2002-158호(2002).
- [3]2002년도 방사선관리 연보, (주)한국수력원자력 (2002).
- [4]이희환, personal communication (2004)
- [5]Nuclear Design Report for Kori(Yonggwang, Ulchin) Nuclear Power Plant, Korea Nuclear Fuel Company, Ltd.
- [6]최영상 외, "차세대원자로 설계개발(II) : 초기노심 설계개발," MOCIE-044/98, 산업자원부(1998).