

사용후핵연료 연소이력 추정 프로그램 iBEST에 대한 모니터 핵종 별 연소이력 추정 능력 평가

안길훈^{1*}, 윤종호¹, 유형준²

¹한국원자력통제기술원, 대전광역시 유성구 유성대로 1534

²한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

*ahn@kinac.re.kr

1. 서론

사용후핵연료를 사용한 핵활동을 정확히 평가하기 위해서는 질량분석법, 알파분광분석법 또는 감마분광분석법 등을 이용한 물질의 조성에 관한 측정도 중요하지만, 측정된 결과를 이용하여 연소이력을 정확히 추정하는 것이 무엇보다 중요하다[1]. 최근에 이를 위한 프로그램 iBEST (Inverse Burnup ESTimator)가 경희대학교에서 개발되었다[2].

본 연구에서는 OECD-NEA의 사용후핵연료에 대한 공개 분석 정보를 이용하여 iBEST의 입력에 사용되는 핵종들에 대해 연소이력 추정 능력을 평가하였다. 이는 예측 결과에 대한 불확실성을 줄임으로써 결과에 대한 신뢰성을 향상시킬 뿐 아니라 핵종 분석의 우선순위를 설정함으로써 분석에 소요되는 시간 절약을 위해서도 중요한 과정이라 할 수 있다.

2. 본론

2.1 iBEST

iBEST는 ORIGEN-S를 기반으로 사용후핵연료의 연소도, 농축도, 원자로 유형 및 냉각시간을 역추정하는 프로그램이다.[2] Fig. 1은 계산절차를 보여주고 있으며, iBEST의 입력에 사용되는 핵종은 Table 1과 같다.

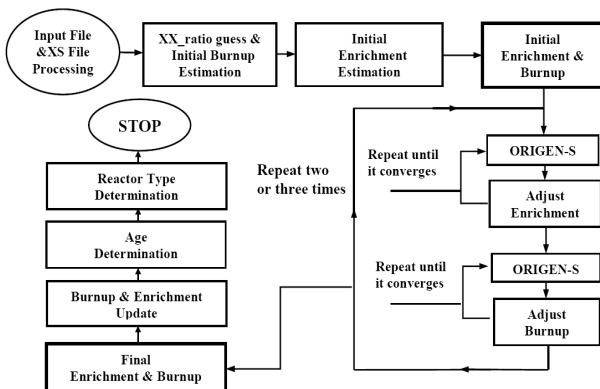


Fig. 1. Calculation procedure.

Table 1. Monitor nuclides

Burnup Monitors	¹⁴⁰ Ce, ¹⁰⁰ Mo, ⁹⁸ Mo, ⁹⁷ Mo, ¹³⁸ Ba, ¹⁴² Ce, ¹⁴⁸ Nd
Enrichment Monitors	²³⁴ U, ²³⁵ U, ²³⁶ U, ²³⁸ U, ²³⁹ Pu, ²⁴⁰ Pu, ²⁴¹ Pu
Reactor Type Monitors	¹⁰⁹ Ag, ¹⁵³ Eu, ¹⁵⁶ Gd, ¹⁴³ Nd, ²⁴⁰ Pu, ¹⁰⁸ Cd, ¹¹³ Cd, ¹⁴⁹ Sm, ¹⁶⁶ Er, ¹³² Ba, ⁹⁸ Tc, ¹¹⁵ In, ⁷² Ge, ¹¹⁵ Sn
Age Monitors	⁹⁰ Sr, ⁹³ Nb, ¹⁰⁶ Ru, ¹⁰¹ Rh, ¹⁰² Rh, ¹²⁵ Sb, ¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs, ¹⁴⁶ Pm, ¹⁴⁷ Pm

2.2 사용후핵연료 측정 자료

사용된 공개 정보는 OECD-NEA의 사용후핵연료 동위원소 조성 DB 내 Mihama-3 원자로에 대한 분석 자료이다[3]. 이유는 Table 1에 나열된 핵종들에 대한 정보가 일부라도 포함된 유일한 측정자료이기 때문이다. Mihama-3는 일본의 가압경수이며, DB에는 3개의 15*15 핵연료 집합체로부터 추출된 9개의 샘플에 대한 측정자료가 있다. Table 2에 사용된 핵종들을 요약하였다.

Table 2. Input nuclides for the Mijama-3

	Nuclides
Burnup Estimators	²³⁵ U, ²³⁶ U, ²³⁸ U, ²³⁷ Np, ²³⁹ Pu, ²⁴⁰ Pu, ²⁴¹ Pu, ²⁴² Pu
Burnup Monitors	¹⁴⁸ Nd
Enrichment Monitors	²³⁵ U, ²³⁶ U, ²³⁸ U, ²³⁹ Pu, ²⁴⁰ Pu, ²⁴¹ Pu, ²⁴² Pu
Reactor Type Monitors	¹⁴⁸ Nd, ²⁴⁰ Pu, ¹⁴³ Nd
Age Monitors	¹⁰⁶ Ru, ¹²⁵ Sb, ¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs

2.3 평가 방법

핵종이 1개뿐인 연소도 모니터 핵종을 제외한 4개 분야에 대하여 개별 핵종 값이 없을 경우, 해당 분야의 연소이력과 얼마나 차이가 있는지 살펴보았다. Table 3에 9개 시료에 대한 연소이력을 요약하였다.

Table 3. Reference value for the Mihama-3

Sample ID	연소도 (MWD/kg)	농축도 (wt%)	냉각시간 (Yr)
JPNNM3PWR-1	8.3	3.208	5.0
JPNNM3PWR-2	6.9	3.208	5.0
JPNNM3PWR-3	21.2	3.203	5.0
JPNNM3PWR-4	15.3	3.203	5.0
JPNNM3PWR-5	14.6	3.203	5.0
JPNNM3PWR-6	29.44	3.21	5.0
JPNNM3PWR-7	32.3	3.21	5.0
JPNNM3PWR-8	33.7	3.21	5.0
JPNNM3PWR-9	34.1	3.21	5.0

2.4 결과

iBEST의 초기 가정에 반드시 필요한 ^{235}U 와 ^{238}U 값을 제외한 영향 평가 결과는 Fig. 2 ~ 5와 같다.

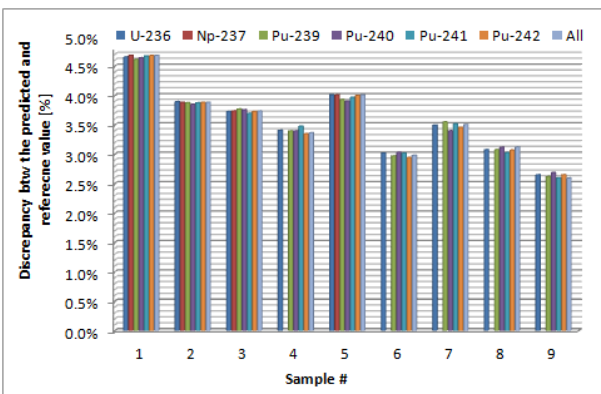


Fig. 2. The results for burnup monitors.

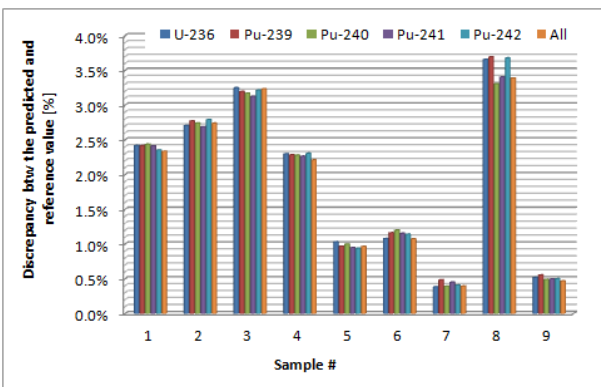


Fig. 3. The results for enrichment monitors.

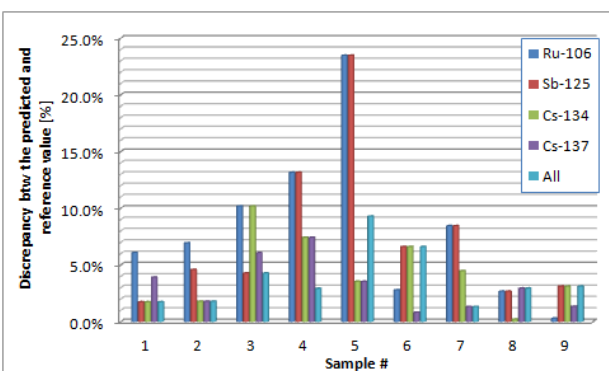


Fig. 4. The results for age monitors.

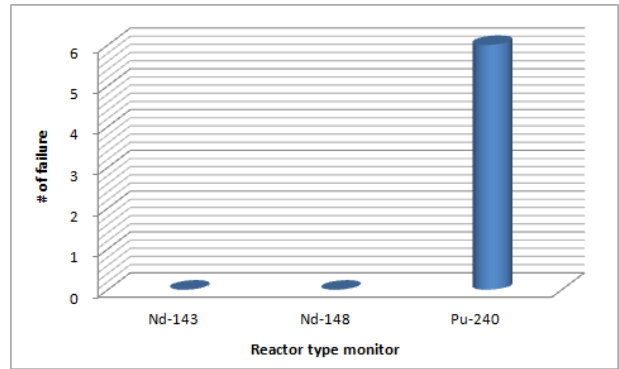


Fig. 5. The results for reactor type monitors.

연소도와 초기 농축도의 경우 개별 핵종들의 영향이 동일한 것으로 나타났다. 그러나, 냉각시간을 추정함에 있어서는 Cs-137을 제외한 세가지 핵종 모두 결과에 큰 영향을 미치는 것으로 보여지고, 마지막으로 원자로 유형을 추정할 때에는 Pu-240의 역할이 중요한 것으로 판단된다.

3. 결론

본 연구에서는 경수로에 한해서 iBEST의 역추정 능력에 영향을 미치는 입력 변수에 대한 평가를 수행하였다. 결과적으로 초기 가정에 반드시 필요한 ^{148}Nd , ^{235}U 및 ^{238}U 의 측정 결과만으로도 연소도와 초기농축도에 대한 추정은 근사하게 수행되는 것을 확인하였으며, 원자로형 추정을 위해서는 ^{240}Pu 에 대한 측정이 반드시 수반되어야 함을 알 수 있었다. 다만, 냉각시간 추정은 사용된 공개정보의 입력변수 제한으로 인해 판단이 어려운 바, 정확한 결론을 내기 위해서는 더 많은 측정 자료를 활용한 평가가 필요하다.

4. 참고문헌

- [1] M. Wallenius, P. Peerani and L. Koch, "Origin determination of plutonium material in nuclear forensics", JRNC, 246(2), 317-321 (2000).
- [2] D.Y. Kim, S.G. Hong and G.H. Ahn, "iBEST : A Program for Burnup History Estimation of Spent Fuels Based on ORIGEN-S", NET, 47(5), 596-607 (2015).
- [3] OECD/NEA, Post Irradiation Examination for Spent Fuel Samples, <http://www.oecd-nea.org/sfcompo/Ver.2/Eng/index.html>.