

운전 안전성 관점에서의 *AMBIDEXTER* 방사능특성 거동분석

윤정선, 장남복, 오세기  
아주대학교

*Assessment of the AMBIDEXTER Radioactivity Behaviors  
with Respect to Operational Safety*

*JungSun Yoon, NamBok Chang and SeKee Oh  
Ajou University*

1. 서론

원자력 에너지 이용에 가장 중요한 문제로 부각되고 있는 것은 대형사고 시 과손핵연료로부터 고방사성 핵분열생성물질이 외부로 다량 누출될 가능성과 고준위 방사성폐기물 관리시설에 저장된 장반감기 핵분열생성물질과 초우란 방사성원소의 누설로 인한 인체와 생태계에 미치는 영향이다. 농축우라늄 고체핵연료를 사용하는 기존의 발전용 원자로에서는 핵연료 집합체가 일단 노내 장전된 후에는 핵연료물질의 조성을 인위적으로 조절할 수가 없고 운전 중 수시 연료교체가 용이하지 않으므로 핵연료봉 내에 포함된 핵분열생성물질을 최대한으로 이용하기 위해서 가능한 한 오랜 기간동안 노내에 잔류하면서 중성자를 조사시킨다. 하지만 이러한 핵연료의 이용은 연소가 진행됨에 따라 핵연료 속에 핵분열생성물질이 누적되므로 사고 시 누출가능한 방사선원의 증가와 더불어 높은 방사성 위험도를 보유한다.

또한 근본적으로 핵물질 SEU(Slightly Enriched Uranium)를 생산시키기 위한  $^{235}\text{U}$  농축과 노내에서  $^{238}\text{U}$ 의 중성자포획으로 전환·생성되는 Pu 누적에 따른 핵확산 우려와 현재까지 국내 법규로는 고준위 방사성폐기물로 분류되는 사용후핵연료를 처리·처분하는데 따르는 정책적·기술적 장기 전망의 불확실성 문제가 대두되고 있다. 따라서 기존의 U 및 Pu-U 핵연료 주기에 비해, 장반감기 핵분열생성물질과 초우란원소의 누적에 대한 부담을 줄일 수 있는 방안으로 Th-U 핵연료 주기가 많은 관심을 모으고 있다.

현재 개념설계를 개발하는 연구가 진행되고 있는 AMBIDEXTER (Advanced Molten-salt Break-even Inherently-safe Dual-mission EXperimental and TEst Reactor) 원자력에너지 시스템은 표준 Th/ $^{233}\text{U}$  핵연료주기에 기초하여, 고온의 불화용융염 상태의 핵연료가 내장형 열교환기를 포함하는 무배관 일체형 원자로계통 내를 순환하면서 1차 열전달계통을 이루고, 이와 독립된 온라인 정화계통을 통해 핵연료의 일부를 운전 중에 연속적으로 추출 및 정화를 거쳐 성분을 재조절하므로 핵연료가 항상 노물리적 및 방사화학적으로 순화된 액체상태를 유지할 수 있는 장점을 갖는다.

본 연구는 이와 같이 온라인 정화시스템의 설계 특성에 의해 핵분열반응으로 생성되는 방사성 물질의 노내 누적 및 방출가능량을 획기적으로 줄일 수 있는 AMBIDEXTER 원자로시스템에서 방사성물질의 노물리적, 방사화학적 거동을 기존의 PWR 경우와 비교하여 분석하므로 새로운 개념의 AMBIDEXTER 원자로의 향상된 고유 안전특성을 입증하였다.

## 2. 해석방법

### 2.1. ORIGEN2 코드

AMBIDEXTER의 용융염핵연료가 원자로계통과 핵연료정화공정계통으로 연결된 폐회로 내를 순환하면서 유지되는 핵종의 평형농도는 각 핵분열생성물질의 분리처리 반응도 특성과 전환율을 높이기 위한  $^{233}\text{Pa}$ 의 격리처리 반응도 특성으로부터 결정되는 정화공정 시간상수, 그리고 노심의 핵적 자활설요건으로서 임계도 유지를 위해 재순환되는 핵분열성물질  $^{235}\text{U}$ 과 전환율 유지를 위해 보충되는 잠재핵분열성물질  $^{232}\text{Th}$ 의 연속주입율에 의해 결정된다.

이러한 연속주입 및 연속제거를 모사할 수 있는 코드로서 원자로와 차폐설계의 주요 입력 자료로서 방사성물질의 생성·소멸·처리계산에 보편적으로 이용되는 ORIGEN2의 모델을 선택하였으며 모델의 지배방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{dX_i}{dt} = \sum_{j=1}^N l_{ij} \lambda_j X_j + \phi \sum_{k=1}^N f_{ik} \sigma_k X_k - (\lambda_i + \phi \sigma_i + \gamma_i) X_i + F_i \quad (1)$$

$i=1, 2, \dots, N$

$\gamma_i$  : i원소의 제거율

$F_i$  : i원소의 공급율

$X_i$  : i원소의 농도

$l_{ij}$  : j원소로부터 분리에 의한 i 원소로의 변화분율

$\lambda_i$  : i원소의 분리상수

$f_{ik}$  : k원소로부터 중성자 흡수에 의한 i 원소로의 변화분율

$\sigma_i$  : i원소의 미시적 흡수단면적

$\phi$  : 중성자속 밀도

정상상태 핵분열성물질의 농도는 초기 장전한 핵분열생성물질의 핵분열에 의해 환산되는 출력을 일정하게 유지하도록 결정되므로, 정해진 출력에 따른 정상상태 중성자속을 식 (2) 같이 근사적으로 구할 수 있다.

$$\phi = \frac{P}{\sum_i X_i \sigma_i K_i} \quad (2)$$

$P$  : 출력, MW

$X_i^f$  : 핵분열성 핵종량, g · atom

$\sigma_i^f$  : 미시적 핵분열 흡수단면적, barn

$K_i$  : 핵분열반응당 회수가능 에너지, MeV/fission

또한 핵분열반응당 회수가능 에너지,  $K_i$ 는 핵분열성 핵종에 따라 근사적으로 다음과 같은 식 (3)으로 표현된다.

$$K_i (\text{MeV/fission}) = 1.29927 \times 10^{-3} (Z^2 A^{0.5}) + 33.12 \quad (3)$$

[  $Z$  : 원자번호,  $A$  : 원자질량 ]

## 2.2. AMBIDEXTER 모델

본 연구에서 사용한 원자로시스템 모델은 현재 개념설계가 진행 중인 표준형 250MW<sub>th</sub> AMBIDEXTER 모듈로서, 초기에 장전된 <sup>232</sup>Th와 <sup>233</sup>U의 농도비가 전 운전기간을 통해 균일하게 유지되도록 외부에서 일정량을 주입한다고 가정하므로, 노내 생성된 Pa가 완전히 격리되어 유실없이 <sup>233</sup>U로 변환된 후 재 주입되는 이상상태의 공정을 모델하였다. 정화공정의 원소별 정화시간상수 설정에 근거한 동일 상수별 핵종들을 구분하여 시간에 따라 연속적으로 핵종들을 제거하는 것으로 하였다.

초기 장전되는 용융염핵연료의 핵종별 농도는 표 1과 같다. AMBIDEXTER 노심의 핵연료 채널 용적량이 8700.84 l이고, <sup>7</sup>LiF-BeF<sub>2</sub>-<sup>232</sup>ThF<sub>4</sub>-<sup>233</sup>UF<sub>4</sub>의 조성을 갖는 불화 용융염 혼합물의 분자별 성분비는 71.625-16-12-0.375[mole %]이므로, 이에 대한 각 원소의 총 장전량[g]은 <sup>232</sup>Th는 12472180.5, <sup>233</sup>U은 391443.5, <sup>7</sup>Li은 2250886.6, F는 645870.3, Be은 13030641.1로 계산된다.

핵연료 물질인 <sup>232</sup>Th의 농도는 원자로 운전시간과 관계없이 항상 일정하게 유지되는 것으로 가정하여 정상상태의 초기 장전량을 유지하도록 <sup>232</sup>Th의 연속주입률을 계산하였다. 그리고, 초기 노심에는 <sup>233</sup>U만이 유일한 핵분열성 물질로 장전되나 원자로 운전시간 경과에 따라 다른 핵분열성 물질들이 노내에서 생성될 것이므로, Th/<sup>233</sup>U 핵연료주기에서는 근사적으로 정상상태에서 <sup>233</sup>U과 <sup>235</sup>U만을 핵분열성물질 생성분율을 갖는 핵분열성물질로 취급하였다.

중성자속은 초기 <sup>233</sup>U 장전량이 정상상태에서도 유지된다고 가정하면, 초기 상태와 정상상태에서 같은 출력을 만족하는 제약조건으로부터 <sup>233</sup>U과 <sup>235</sup>U의 정상상태 농도분포식을 유도할 수 있으며 다음과 같은 식 (4)로 표현된다.

$$K_{23} \sigma_{23}^f X_{23} + K_{25} \sigma_{25}^f X_{25} = K_{23} \sigma_{23}^f X_{23 \text{ initial}} \quad (4)$$

$K_{23}$  : <sup>233</sup>U의 핵분열당 회수가능 에너지, MeV/fission

$K_{25}$  : <sup>235</sup>U의 핵분열당 회수가능 에너지, MeV/fission

$\sigma_{23}^f$  : <sup>233</sup>U의 1군 (n,fission) 반응단면적, barn

$\sigma_{25}^f$  : <sup>235</sup>U의 1군 (n,fission) 반응단면적, barn

$X_{23}$  : <sup>233</sup>U의 노내 농도, mole

$X_{25}$  :  $^{235}\text{U}$ 의 노내 농도, mole

이 식에서  $^{233}\text{U}$ 의 주입률을 반복법을 이용하여 계산하였다. 이렇게 계산한  $^{232}\text{Th}$ 와  $^{233}\text{U}$ 의 연속주입률은 2560g/day 및 299g/day이다.

온라인 정화공정은 원자로로부터 일정량인 1차계통 연료용융염 체적의 10%를 처리하는 것으로 하였다. 핵적 자활성 및 공정경제성을 고려하여  $^{233}\text{Pa}$ 의 정화주기는 3일[노심잔류량/일], 별도의 정화공정을 필요로 하는 할로겐군과 희토류원소군 정화공정은 설계용량의 경제성과 처리효율성 간의 최적점을 산출하도록 50일(0.02[노심잔류량/일])의 정화주기로 설정하였다.

화학군별 정화주기 설정은 표 2와 같다. 불활성가스군은 AMBIDEXTER 원자로계통의 압력조절을 위해 주입되는 헬륨기포에 포획되어 생성 즉시 제거되므로 표준 AMBIDEXTER 원자로 설계사양으로부터 계산된 용융염핵연료의 노심 통과 시간을 고려하여 10초로 설정하였다. 불활성금속군 및 반불활성금속군의 정화처리량은 현재의 연구수준으로는 금속용기 표면흡착 제거현상에 대한 제한적 유추만이 가능하므로 과거 MSBR의 연구프로그램을 참조하여 각각 50초, 200일로 설정하였으며, 활성금속군은 용융염의 부분폐기만으로 제거되는 핵종군으로 3000일로 설정하였다. 중성자 이용 관점에서 노내 잔류하는 것이 폐기처분하는 것보다 경제성이 떨어지는 핵종군을 폐기처분군이라 명칭하고 정화시간상수에 따라 8200일로 설정하였다.

핵연료의 톤당 연소량은 정격 열출력  $250\text{MW}_{\text{th}}$ 를 핵연료 초기 장전량과  $^{232}\text{Th}$ 의 외부 주입률을 고려한 총 핵연료양으로 나누어 핵연료 톤당 연소량을 구하였다. 핵종 농도의 상대적인 비교를 위한 연소를  $33,000[\text{MWD}]$ 로 설정하였을 때, 연소도는 아래 식 (5)에 따라  $8.34[\text{MW}_{\text{th}}/\text{ton}]$ 으로 계산되었다.

$$\frac{250 \text{ MW}}{S_{\text{total}}} \times T = 33,000 \text{ MWD} \quad (\text{단, } S_{\text{total}} = F_{\text{initial}} + F_{\text{feed}} \times T) \quad (5)$$

$S_{\text{total}}$  : 총 핵연료양, ton

$F_{\text{initial}}$  : 핵연료 초기 장전량, ton

$F_{\text{feed}}$  :  $^{232}\text{Th}$ 의 외부 주입률, ton/day

$T$  : 운전기간, day

### 3. AMBIDEXTER 핵종 농도 분포상태 해석

AMBIDEXTER 원자로와 같은 액체핵연료시스템에서는 핵분열생성물질의 농도를 장전된 핵물질의 단위질량당 생산된 총에너지량으로 정의되는 핵연료의 연소도의 함수로 나타낼 수 없기 때문에 단위출력당 시간함수로 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 핵종 농도의 상대적인 분석 비교를 위해 전노심에 3.5% 농축 산화우라늄 핵연료를 장전하여 평균 최대연소도가  $33,000\text{MWD}/\text{TeU}$ 에 도달하게 운전되는 PWR을 참조모델로 하였으며 AMBIDEXTER 원자로 시스템의 주요 개념요소인 온라인 정화공정의 성능을 정량적으로 분석할 수 있도록 고온의 전기화학공정이 가동되지 않는 상태도 포함하였다.

#### 3.1 연소도와 Pu 생성량 및 분율

표 3에  $\text{Th}-^{233}\text{U}$  핵연료주기를 이용하는 AMBIDEXTER 원자로에서 중성자흡수반응으로

생성되는 Pu의 농도와 동위원소별 분율을 PWR과 비교하여 정리하였다. 예상한대로 순수한 토륨핵주기로 제한하는 한, AMBIDEXTER에서 Pu를 비롯한 초우란 원소의 생성율이 PWR과 비교하여 무시할 수 있으며 따라서 핵확산저항성 관점에서 뿐만 아니라 고준위 방사성 폐기물의 저장 또는 처분과 관련하여 장기 안전성 관점에서도 탁월한 성능을 보유한 것으로 판단된다. 특히 고준위방사성폐기물의 영구폐기 처분장에서 자연 초임계상태의 발생가능성을 평가하기 위해 출력정지 후 1000년의 냉각기간에 걸친 폐기물 내 Pu의 핵종 분율 변화 거동을 보면, AMBIDEXTER은 비교 대상인 PWR에 비해 양적으로 무시할 만한 뿐만 아니라 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 이는 Th-<sup>233</sup>U핵주기의 연쇄반응고리가 단순하여 Np를 비롯한 Pu의 2차 생성 모핵종의 잔존량이 PWR과는 달리 무시되기 때문이다. 또한 비록 미량이지만 전체 Pu량의 약 99.9~94%를 차지하는 <sup>238</sup>Pu은 원자력전지의 원료 물질로서 우주항공의 에너지원이 되는 매우 가치가 큰 Pu 동위원소이다.

### 3.2 Minor Actinide의 노내 제고량

일반적으로 PWR을 비롯한 기존 원자로에서 사용되는 핵연료에 대해서는 Pu을 제외한 중원소를 Minor Actinide(이후 MA라 통칭)로 분류하며 주로 <sup>238</sup>U의 다중 중성자흡수반응과 이에 뒤따르는 일련의  $\beta$  붕괴로 인해 생성된다. 이러한 MA는 대부분이 장반감기의 핵종들이며, 다중의  $\alpha$  붕괴를 거치면서 강한 방사선을 방출하는 물질이다. Th-<sup>232</sup>U 핵연료주기를 사용하는 경우는 농축 U 핵연료주기를 사용하는 원자로에 비해 상대적으로 낮은 MA의 생성비를 볼 수 있는데, 이는 Th이 U에 비해 원자번호가 작고 자연에 <sup>232</sup>Th 단일 동위원소로 존재하고 있기 때문이다.

그림 1은 연소에 따른 노내 MA 농도 변화를 AMBIDEXTER와 PWR에 대해 도시한 것으로서 두 로형 모두 초기상태 이후 핵연료의 연소시간이 증가함에 따라 평탄한 지수함수 형태로 증가하고 있으나, AMBIDEXTER의 경우 절대제고량이 PWR에 비해 약 2%에 불과한 것으로 나타났다. 이는 고준위폐기물 처분시설의 장기 안전성이 상대적으로 매우 높음을 의미한다.

### 3.3 핵분열생성물질의 중성자 기생흡수 효과

AMBIDEXTER 원자력에너지 시스템의 온라인 정화공정 용량 최적화 설계는 정화공정 유효시간상수로 나타낼 수 있는데, 이는 설계요건의 우선 순위에 따라 상당한 차이가 있을 수 있다. 즉, 안전성을 중요시할 경우 사고 시 누출대상인 휘발성 핵분열생성물질의 핵연료 내 농도를 최소화하도록 공정을 구성함이 바람직한 반면에 중성자 경제성 제고를 우선하는 설계에서는 중성자흡수 단면적이 큰 물질을 효과적으로 제거하는 공정 설계가 최우선 고려 조건이 요구될 것이다. 현재 AMBIDEXTER 설계에 고려된 시간상수 분류는 미국 ORNL의 열중성자 증식로, MSBR의 기준을 가정하여 결정하였다.

중성자 경제성 관점에서 용융염핵연료의 고유한 장점 중에 하나는 기체상태의 물질은 부력에 의해 자연적으로 핵연료로부터 신속히 분리되는 현상에 의해 중성자흡수단면적이 매우 큰 <sup>135</sup>Xe( $\sigma_a = 8.18 \times 10^4$  barns)를 비롯하여 <sup>87</sup>Kr( $\sigma_a = 14.3$  barns)와 같은 불활성기체의 노내 잔류시간을 크게 단축할 수 있다는 점이다.

그림 2에 PWR과 정화공정을 고려하지 않은 AMBIDEXTER를 포함하여 연소진행에 대한 미시적 흡수단면적 변화를 비교, 도시한 것이다. 정상가동 중인 AMBIDEXTER 로심에서 핵분열생성물질에 의한 열중성자 기생흡수는 PWR에 비해 약 9.5%에 불과하며 비록 정화

계통의 가동이 중단된다고 하더라도 용융염핵연료의 고유 특성에 의해 불활성기체 및 희귀 금속류의 핵분열생성물질이 자연제거가 이루어지므로 PWR에 비해 월등히 우수한 중성자 경제성을 보유함을 확인할 수 있다.

### 3.4 휘발성 핵분열생성물질의 노내 제고량

핵연료가 노내에서 연소가 진행되면서 핵반응에 의해 생성, 소멸, 누적되는 방사성물질의 방사능강도 변화는 원자로 운전 중 사고가 발생했을 때 유출 가능한 방사선원량을 산출하는 기본자료이다. 원자로 사고 시 유출 가능한 물질은 일차적으로 원자로격납건물 내에 확산된 핵분열생성물질의 휘발성화합물로서 Xe, Kr과 같은 불활성 기체와 I, Br과 같은 할로젠원소가 주성분을 이룬다.

그림 3에서 PWR, 온라인 정화공정을 고려하지 않은 AMBIDEXTER 및 온라인 정화공정 고려한 AMBIDEXTER의 경우 연소도에 따른 휘발성 원소의 핵연료 내 제고량을 비교해 놓았다. 휘발성물질의 방사능강도는 온라인 정화공정을 고려하지 않은 AMBIDEXTER 경우에도 PWR의 약 3% 정도 수준으로 매우 낮은 값을 보이며, 온라인 정화공정을 고려한 AMBIDEXTER 경우에는 약 1.6% 수준에 불과하다. 이는 앞서 논의한대로 액체핵연료가 보유하는 고유한 장점으로써 다량의 핵연료가 파손되는 중대사고를 가정하더라도 누출된 방사성물질의 대기확산으로 인한 주민 피폭 위험은 AMBIDEXTER의 경우 PWR에 비해 무시할 수준으로 미약하다고 할 수 있다.

### 3.5 고준위 폐기물의 장기저장과 방사능 강도

사용 후 핵연료로부터 누출되는 방사능의 강도는 폐기물 저장을 위한 차폐시설의 설계 요건이 된다. PWR과 AMBIDEXTER에 대한 사용 후 핵연료의 방사능 강도를 그림 4를 통해 비교하였다. 저장기간 1000[년]에 대해, 온라인 정화공정을 고려한 AMBIDEXTER의 방사능 강도는 최대  $2.5 \times 10^4$ [Ci]를 초과하지 않았으며, PWR의 경우 이러한 수준에 도달하기에는 약 250[년]이 요구됨을 볼 수 있다. 또한 초기 방사선 강도는 약  $1.5 \times 10^4$ [Ci]로서 PWR의 0.047%에 불과하다. 따라서, 온라인 정화공정을 고려한 AMBIDEXTER는 고준위 폐기물의 장기 저장에 대한 차폐문제를 획기적으로 경감시키는 특성을 소유함을 알 수 있다.

### 3.6 잔여열원과 운전정지 후 냉각요건

원자로 운전 정지 후, 핵분열 생성물질의 붕괴열 출력에 대한 개략적인 냉각요건을 평가하였다. 이를 위해 PWR 및 AMBIDEXTER의 핵연료를 2500[MWD]로 연소시킨 후 원자로를 정지한 것으로 가정하였으며, 이후 1000[년]의 기간에 대한 붕괴 열출력을 그림 5에 나타내었다. 온라인 정화공정을 하지 않은 AMBIDEXTER의 경우, 약 5년까지는 감소하며 그 이후로는 증가하는 경향을 보이나, 온라인 정화공정을 고려한 AMBIDEXTER의 경우 운전정지 후 전기간에 대해, 최대 705[W<sub>th</sub>]를 초과하지 않음을 볼 수 있다. 정화공정을 고려한 AMBIDEXTER의 초기 붕괴열은 약 212[W<sub>th</sub>]로서 PWR에 비교할 때 약 0.2%의 수준이다. 결론적으로, 원자로 운전 정지 후 잔여 열원에 대한 AMBIDEXTER의 냉각요건은 PWR에 비교할 때, 별도의 강제냉각계통에 의존도가 매우 낮음을 예상할 수 있다.

## 4. 결론 및 토의

본 연구를 통해 AMBIDEXTER 원자로시스템에서 방사성물질의 노물리적, 방사화학적 거동을 기존의 PWR 경우와 비교, 분석하여 다음과 같은 AMBIDEXTER의 고유 안전특성을 입증하였다.

첫째, 핵확산 문제의 관점으로 Pu 동위원소를 운전 기간 300[일] 및 운전 정지 후 1000[년]의 기간에 대해 비교한 결과, AMBIDEXTER의 Pu 생성을 및 폐기물 내 핵종 분을 변화 거동은 PWR에 비해 양적으로 극히 미비하고, 지속적으로 감소하는 경향을 보였다.

둘째, MA의 절대 재고량을 비교한 결과 AMBIDEXTER는 PWR의 약 2%수준이므로 장기적인 측면의 고준위 폐기물 시설에 대한 안전성을 보였으며, 중성자 경제성을 고려하여 핵분열 생성물질의 미시적 중성자 흡수 단면적을 300[일]의 운전기간에 대해 비교한 결과, AMBIDEXTER의 경우 온라인 정화 공정과 불활성 기체 제거의 개념에 의해 미시적 중성자 흡수 단면적은 PWR의 약 9.5%에 불과하므로 노내 중성자 기생 흡수는 획기적으로 감소됨을 알 수 있었다.

셋째, 원자로 사고 해석으로 300[일]의 운전 중 노내 휘발성 물질의 외부 유출을 가정하여 분석한 결과, 온라인 정화공정을 고려한 AMBIDEXTER의 경우는 PWR의 방사능 강도에 약 1.6%에 불과하므로, 중대사고의 가정에 대한 방사선 피폭의 위험수준은 매우 낮은 것으로 확인되었다.

넷째, 고준위 폐기물 저장 문제와 운전 정지 후 냉각 요건을 PWR의 환경으로 비교, 해석한 결과, AMBIDEXTER의 사용 후 핵연료 방사능 강도는 운전 정지 후 1000[년]에 대해 최대  $2.5 \times 10^4$ [Ci]로서 고준위 폐기물 저장에 대한 차폐 문제가 획기적으로 경감되고, 초기 붕괴열 또한  $212[W_{th}]$ 로 PWR의 0.2% 수준이며 최대  $705[W_{th}]$ 를 초과하지 않으므로 별도의 강제냉각계통에 대한 의존도가 매우 낮음을 예상 할 수 있었다.

결론적으로, 현재 개념설계 단계인 AMBIDEXTER 원자력 에너지 시스템은 핵확산 저항성, 사고 발생 시 방사능 피폭에 대한 안전성, 고준위 폐기물의 처리 문제에 대한 고유 해결 능력을 갖춘 시스템으로 판단된다.

## 5. 감사문

본 연구는 99년도 과학기술부 원자력 기초연구사업으로 수행되었습니다.

## 6. 참고문헌

- [1] 원성희, "SAMS : 가변 재처리 시간상수를 고려한 용융염핵연료 원자로 평형핵종농도분석 코드", 공학석사 학위논문, 아주대학교, 1999
- [2] 오세기, 정근모, 원성희, 임현진, 조재국, "AMBIDEXTER 원자력 보일러 시스템의 노심 관리 및 반응도 효과 연구", '98 원자력 기초연구과제 최종 보고서', 과학기술부, 1999
- [3] 원성희, 조재국, 임현진, 김태규, 윤정선, 오세기, "가변 재처리 시간상수를 고려한 용융염핵연료 원자로 평형핵종농도분석 코드 개발", 한국에너지공학회, 춘계학술발표회 논문집, 1999
- [4] 임현진, 원성희, 조재국, 오세기, "AMBIDEXTER 일체형 원자로의 내장형 열교환기 개념 설계", 한국에너지공학회, 추계 학술발표회 논문집, 1998
- [5] 조재국, "AMBIDEXTER 원자로 노심의 핵적자활성 최적화 설계 연구", 공학석사 학위

논문, 아주대학교, 1999

[6] A. G. Croff, "A User's Manual for The ORIGEN-2 Computer Code", Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-7175, 1980

[표 1] 핵연료 용융염 구성

용융염 용적량 (l)	8700.84	
용융염 평균 밀도(g/cc)	3.309	
용융염 핵연료 농도 [mole %]	<sup>7</sup> LiF	71.625
	BeF <sub>2</sub>	16.0
	<sup>232</sup> ThF <sub>4</sub>	12.0
	<sup>233</sup> UF <sub>4</sub>	0.375
초기 장전 핵종 농도(g)	<sup>232</sup> Th	12472180.5
	<sup>235</sup> U	391443.5
	<sup>7</sup> Li	2250886.6
	F	645870.3
	Be	13030641.1

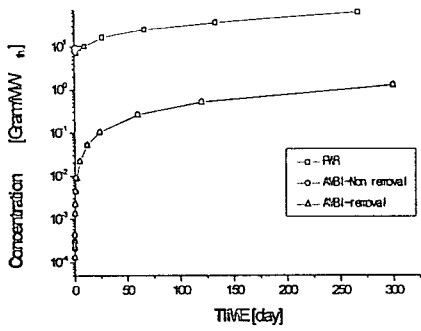
[표 2] 화학군별 정화주기 설정

화학군	정화주기
불활성가스군	10 초
불활성금속군	50 초
반불활성금속군	200 일
희토류원소군	50 일
할로젠군	50 일
활성금속군	3000 일
폐기처리군	8200 일

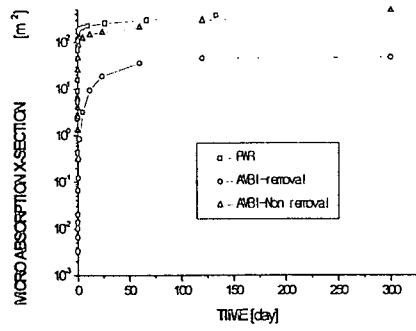
[표 3] 연소 및 냉각기간에 대한 Pu 농도 특성

			총 Pu 재고량 (g/MW)	Pu 동위원소 (분율)			
				Pu239	Pu240	Pu241	Pu242
연소 기간 (일)	5	PWR	1.E+00	4.E+03	2.E+01	1.E-01	1.E-04
		AMBI	1.E-24	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00
	60	PWR	3.E+01	9.E+04	5.E+03	4.E+02	7.E+00
		AMBI	9.E-18	3.E-19	3.E-27	0.E+00	0.E+00
	300	PWR	1.E+02	3.E+05	5.E+04	2.E+04	1.E+03
		AMBI	4.E-14	6.E-15	6.E-18	2.E-20	0.E+00
냉각 기간 (년)	10	PWR	1.E+05	1.E+05	5.E+03	3.E+02	3.E+02
		AMBI	6.E-12	4.E-15	4.E-18	6.E-21	0.E+00
	100	PWR	1.E+05	1.E+05	5.E+03	3.E+00	3.E+00
		AMBI	6.E-14	7.E-17	7.E-20	1.E-23	0.E+00
	1000	PWR	1.E+05	1.E+05	4.E+03	3.E-09	3.E-09
		AMBI	9.E-34	5.E-34	5.E-37	0.E+00	0.E+00

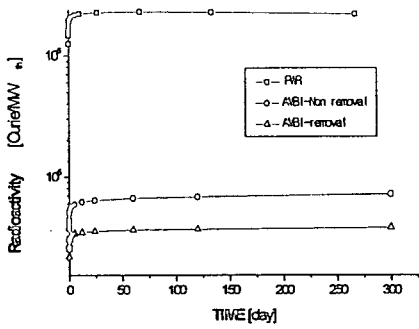




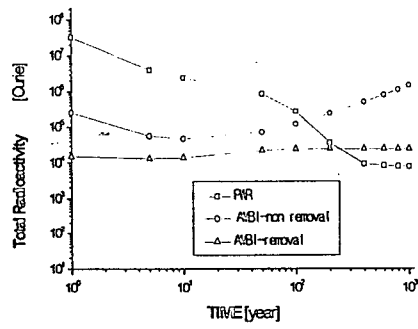
[그림 1] 노내 Minor Actinide의 잔류량



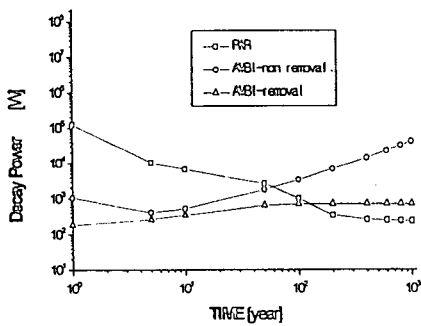
[그림 2] 노내 Fission products의 중성자 기생흡수 효과



[그림 3] 노내 Volatile Releasable Inventory



[그림 4] 운전 정지 후 핵연료 전체 방사선 강도



[그림 5] 운전 정지 후 붕괴 열출력