

압력관 크립이 CANDU-6 원자로의 노물리 변수에 미치는 영향 Pressure Tube Creep Impact on the Physics Parameters for CANDU-6 Reactors

김원영, 민병주
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

감성천, 김만웅
한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

중수로인 월성 1호기의 경우, 가동연수가 20년을 초과하고 있어 경년열화에 따른 압력관 크립(Creep)현상과 처짐(Sagging) 현상이 발생하여 노심에 대한 안전성이 우려되고 있다.

이에 본 연구에서는 중수로 압력관의 경년열화에 따른 크립률 증가가 노심의 격자에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 CANDU-6 원전에 대해 정상상태시 기본 격자모델과 압력관 크립률 증가에 따른 격자모델로 개발하여 압력관 크립이 노심의 격자에 미치는 영향에 대하여 평가하였다. 이를 위해 WIMSD-5B, WIMS-AECL, MCNP 코드를 사용하여 압력관 크립이 지름의 2.5%와 5%인 경우에 대한 냉각재 기포 반응도, 핵연료의 상대 출력밀도(relative fission density), 그리고 Pu 동위원소의 수밀도(atom density) 등의 노물리 특성을 비교하였으며 이를 HELIOS 코드의 계산결과와 비교하였다.

Abstract

The lattice cell calculations are performed to assess the sensitivity of the reactor physics parameters to pressure tube creep resulting from radiation aging. The physics parameters of the lattice cell are calculated by using WIMSD-5B code, WIMS-AECL code, and MCNP code. The reference model(normal state) and two perturbed models accounting for the pressure tube creep are developed on the basis of CANDU-6 lattice cell. The 2.5% and 5% values of pressure tube diameter creep are considered. Also, The effects of the analyzed lattice parameters which are the coolant void reactivity, the fuel fission density and the atom density of Pu isotopes on the lattice

characteristics of CANDU-6 are investigated for the reference model and two perturbed models.

1. 서론

중수로인 월성 1호기의 경우, 가동연수가 20년을 초과하고 있어 경년열화에 따른 압력관 크립(Creep)현상과 처짐(Sagging) 현상이 발생하여 노심에 대한 안전성이 우려되고 있다. 특히 CANDU형 원자로의 경우, 압력관의 크립 및 처짐은 중요한 안전현안 중 하나로, 캐나다의 규제기관인 CNSC(Canadian Nuclear Safety Commission)에서도 일반안전현안(GAI: Generic Action Items)으로 분류하였다[1]. 이에 따라서 AECL에서는 압력관 경년열화로 인한 크립률 증가가 안전성에 미치는 영향에 대한 평가를 지속적으로 수행하고 있다. 한편 국내에서도 월성 1호기의 압력관 크립률이 지속적으로 증가함에 따라 이를 전량 교체할 예정으로 있다.

이에 본 연구에서는 중수로 압력관 크립률 증가에 따른 노심의 안전성 평가를 위하여 격자의 노물리 변수들에 대한 민감도를 분석·평가하였다. 이를 위해 CANDU-6 원자로에 대한 정상 상태시 격자모델과 압력관 크립률 증가(2.5%, 5%)시에 대한 격자모델을 각각 개발하여 WIMSD-5B, WIMS-AECL, MCNP 코드를 사용하여 격자계산을 수행하였다. 본 논문에서는 연소도 증가에 따른 냉각재 기포 반응도, 핵연료의 상대출력밀도(relative fission density), Pu 동위원소의 수밀도(atom density) 등의 노물리 변수들에 대하여 격자계산을 수행하여, HELIOS의 결과와 비교하였다.

2. 압력관 크립에 따른 격자의 노물리 변수 평가

2.1 평가모델 개발

중수로 압력관의 경년 열화에 따른 크립(creep)이 노물리 변수에 미치는 영향을 분석하기 위하여 천연우라늄 핵연료 다발 37개봉이 충전된 CANDU-6 원자로 노심에 대하여 격자계산이 수행되었다. 이 압력관 크립이 노물리 변수에 미치는 영향 분석을 위한 격자계산에는 WIMSD-5B 코드, MCNP 코드와 WIMS-AECL 코드가 사용되었다.

본 연구에서는 정상상태의 기본 모델과 2.5%와 5%의 압력관 크립에 의해 압력관 지름이 늘어난 변형된 모델을 사용하였다. 변형된 모델은 정상상태의 모델과 비교하여 크립의 양에 따라 압력관의 내부 반경이 증가한 것이며, 압력관의 두께는 정상상태의 압력관 부피를 고정시켜 크립의 양에 따라 정한다. 또한, 변형된 모델은 정상상태와 비교하여 아래로 처진 형태이며 MCNP 코드는 이러한 비대칭 모델을 모사할 수 있지만, WIMSD-5B와 WIMS-AECL은 대칭적 모델만 모사가능하다. 따라서 WIMS 코드의 모델은 평균화함으로써 이를 보완하였다. 그림 1은 MCNP 코드에서 사용한 모델로서 정상상태의 모델과

5% 크립에 대한 모델이다. 그림 2는 WIMS-코드에 대한 기본적인 격자 모델이다. MCNP 코드에서 사용한 라이브러리는 ENDF/B-V를 사용하였으며, WIMSD-5B는 69 그룹의 ENDF/B-VI 라이브러리가 사용되었고, WIMS-AECL은 89 그룹의 ENDF/B-VI 라이브러리가 사용되었다.

2.2 노물리 특성 평가결과

중수로 압력관 크립이 노물리 변수에 미치는 영향 분석을 위해 CANDU-6 원자로의 핵연료채널에 대해 2차원 기본 격자모델과 압력관 크립에 의한 물리적 변화(직경의 증가)를 고려한 변형된 격자모델에 대해 각각 무한증배계수, 냉각재 기포반응도, 상대 출력 밀도(relative power density)와 Pu 동위원소의 수밀도(atom density)등을 계산하여 비교 검토하였다.

무한증배계수

WIMSD-5B, WIMS-AECL과 MCNP코드를 이용하여 냉각상태에서의 크립에 따른 무한증배계수(k_{inf})의 변화를 그림 3, 그림 4과 그림 5에 도시하였다. 그림에서 보는바와 같이 WIMSD-5B, WIMS-AECL과 MCNP의 결과는 정상상태에서의 기본모델을 기준으로 하여 크립의 양이 커짐에 따라 무한증배계수가 조금씩 작아지는 것을 볼 수 있다. 정상상태와 비교할 때 2.5% 크립의 경우 약 1mk 작게, 그리고 5% 크립의 경우 약 2mk 작게 무한증배계수가 나타난다. 따라서 크립이 증가함에 따라 무한증배계수의 값이 작아짐으로서 안전성에 미치는 부정적인 영향은 비교적 적다고 생각된다.

냉각재 기포반응도

냉각재 기포반응도는 냉각상태와 100% 기포상태(0.001 g/cm^3)를 가정하여 계산하였다. 그림 6~그림 8에서 보는바와 같이 냉각재 기포반응도는 크립의 양이 증가함에 따라 증가한다. 이는 크립이 증가함에 따라 냉각상태의 기본모델과 비교할 때, 냉각재의 양이 증가하기 때문이다. 이로 인한 영향은 100% 기포 상태보다 냉각 상태일 때 무한 증배계수가 더 낮게 나타냄으로서 크립이 증가함에 따라 냉각재 기포반응도는 증가함을 알 수 있다. 또한 연소가 진행됨에 따라 냉각재 기포반응도는 점점 작아짐을 알 수 있다. 즉 연소가 진행됨에 따라 각 코드에서의 냉각재 기포반응도는 WIMSD-5B 코드인 경우, 2.5% 크립의 경우 1.6mk에서 0.9mk로, 5% 크립의 경우 3.1mk에서 1.2mk로 변한다. 또한 WIMS-AECL 코드의 경우 2.5% 크립일 때, 1.4mk에서 0.7mk로, 5% 크립일 때 2.7mk에서 1.2mk로 변한다. 또한 HELIOS 코드의 결과는 2.5% 크립일 때 0.7mk에서 1.1mk까지, 5% 크립일 때 1.4mk에서 2.4mk 까지 변한다. MCNP 코드의 계산 결과 연소 초기에 2.5% 크립일 때 약 0.5mk 높게, 5% 크립일 때 약 1.5mk 높게 나타난다. 한편 WIMS 코

드의 계산 결과는 연소가 진행됨에 따라 기포반응도의 변화가 점점 감소하지만, HELIOS의 계산 결과는 약 3000MWD/T까지 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보인다. 따라서 코드의 계산 결과, 냉각재 기포반응도 변화는 5% 크립의 경우 2.5% 크립의 약 2배이며 압력관 크립이 진행 될수록 노심의 안전성에 더 영향을 미칠 것으로 판단된다.

상대출력밀도(Relative power density)

WIMS-AECL 코드를 이용하여 연소가 진행됨에 따라 각 링별 상대출력밀도를 계산하였고, HELIOS 코드의 계산결과와 비교하였다.(그림 9, 그림 10) 정상상태와 비교할 때, 압력관 크립이 나타나는 경우 WIMS-AECL코드와 HELIOS의 계산 결과는 상대출력밀도의 변화가 링 1, 링 2와 링 3은 양의 값을, 링 4는 음의 값을 갖는다. 또한 HELIOS의 상대출력밀도의 변화량은 WIMS-AECL 코드의 약 1/2이며, 연소가 진행됨에 따라 상대출력밀도 변화의 절대값이 점점 작아짐을 알 수 있다. 크립의 양에 따른 상대출력밀도의 변화는 5% 크립일 때 2.5% 크립의 약 두 배이다.

Pu 동위원소의 수 밀도(atom density)

2.5% 크립과 5% 크립인 경우와 정상상태에서의 Pu 동위원소인 Pu^{239} , Pu^{240} , Pu^{241} 과 Pu^{242} 의 수밀도의 변화를 연소도에 따라 비교하였다.(그림 11~그림 13) HELIOS의 계산 결과 Pu 동위원소의 수밀도 변화가 연소가 진행됨에 따라 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 또한 WIMS 코드는 Pu 동위원소 수밀도의 변화가 항상 양의 값인데 반하여 HELIOS의 경우 Pu^{239} 에 대한 결과는 연소 초기를 제외하고 음의 값이다. 이처럼 WIMS 코드와 HELIOS 코드는 다른 결과를 보이며, 적은 양의 Pu 동위원소의 증가도 안전성에 심각한 영향을 끼칠 수 있으므로 이에 대해서는 앞으로 계속 검토할 필요가 있다.

3. 결론

본 연구에서는 압력관 크립에 따른 중수로 노물리 변수들의 영향 평가를 위하여 격자 계산을 수행하였다. WIMSD-5B 코드와 WIMS-AECL 코드, MCNP 코드를 이용하여 냉각재 기포 반응도, 핵연료의 상대출력밀도(relative fission density), 그리고 Pu 동위원소의 수밀도(atom density)등의 노물리 변수를 계산하였고 HELIOS 코드의 결과와 비교하였다. CANDU-6 원자로 노심을 참고로 한 기본 모델과 압력관 크립이 2.5%와 5%인 경우에 대한 변형된 모델에 대하여 격자계산이 수행되었다.

- (1) 2.5% 크립과 5% 크립을 비교하면, 크립의 양이 커짐에 따라 연소도의 증가에 따른 무한증배계수가 점점 작아지며, 정상상태와 비교할 때 2.5% 크립의 경우 약 1mk 작게, 5% 크립의 경우 약 2mk 작게 나타난다. 따라서 크립이 증가함에 따라 무한증배

계수의 값이 선형적으로 감소하여 노심 안전성에 미치는 부정적인 영향은 적음을 알 수 있다.

- (2) 정상상태와 비교할 때 압력관 크립이 생기면 냉각재 기포반응도는 점점 커진다. 격자 계산 결과 2.5% 크립일 때 약 1mk에서 3mk 까지, 5% 크립일 때 약 2mk에서 5mk 까지 냉각재 기포반응도가 증가하므로 크립이 발생하는 경우, 냉각재 상실사고시 안전성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.
- (3) WIMS-AECL과 HELIOS 코드의 계산 결과 링 4의 상대출력밀도의 변화는 음의 값을 갖고, 링 1, 링 2와 링 3은 양의 값을 갖는다. 정상상태와 비교할 때 5% 크립이 나타나는 경우 상대출력밀도의 변화는 2.5% 크립의 경우의 약 2배이다.
- (4) 압력관 크립에 따른 플루토늄 동위원소의 수밀도 변화에 대한 HELIOS 코드의 결과 연소가 진행됨에 따라 점점 감소하나, WIMS 코드의 계산결과는 HELIOS코드와 다른 양상을 보인다.

이상의 결과로부터 크립이 증가함에 따라 CANDU-6 원자로의 노심 안전성에 부정적인 영향을 끼칠 수 있으므로 이에 대해 지속적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 연구개발 중장기계획사업 지원의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- [1] AECL position statement 1999.
- [2] J.V. Donnelly, "WIMS-CRNL A User's Manual for the Chalk River Version of WIMS", AECL Report AECL-8955, 1986.
- [3] M.J. Halsall and C.J. Taubman, "WIMSD: A Neutronics Code for Standard Lattice Physics Analysis", AEA Technology, 1986.
- [4] G. Ilas, F. Rahnema, V. Khotylev, D. Serhiuta and R. J. Stamm'ler, "Impact of pressure tube aging on physics parameters of a CANDU lattice cell", ANFM2003.

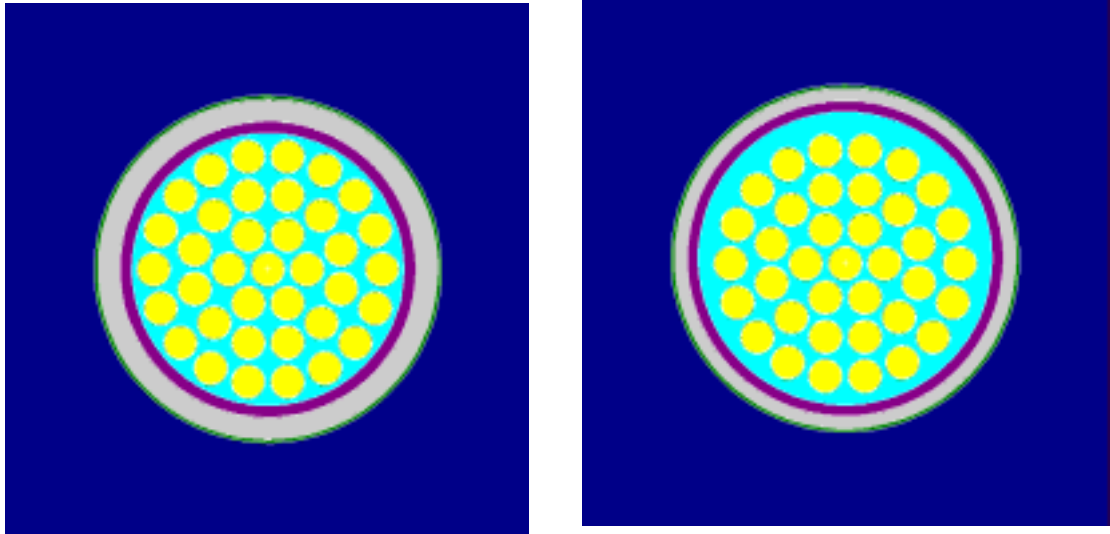


그림 1 CANDU-6 원자로에 대한 정상상태(왼쪽)와 5% 크랙(오른쪽)의 MCNP 코드 격자모델

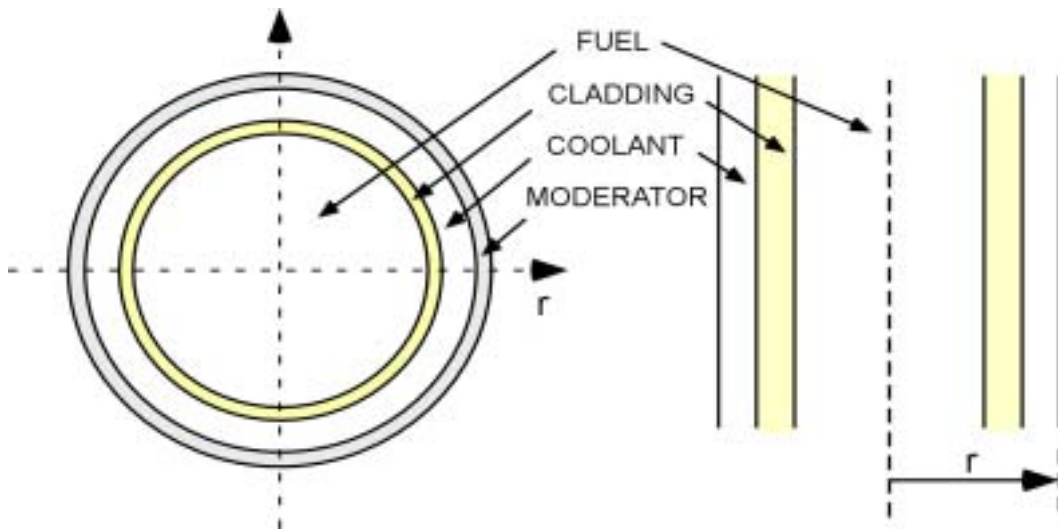


그림 2 CANDU-6 원자로에 대한 WIMS 코드 격자 모델

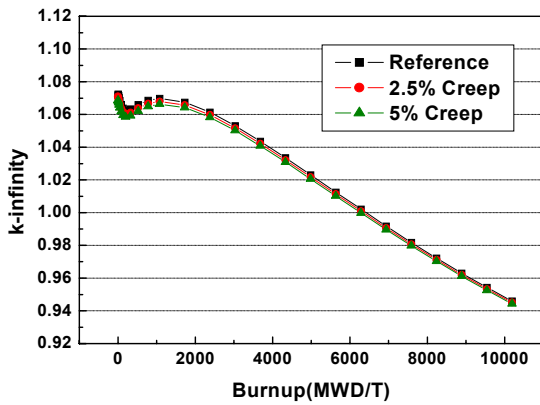


그림 3 WIMSD-5B를 이용한 냉각상태에서의 무한증배계수

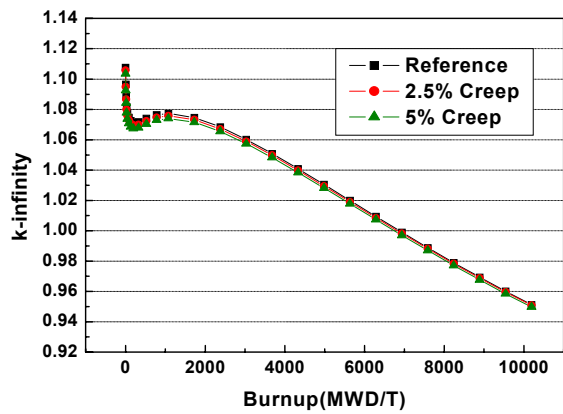


그림 4 WIMS-AECL을 이용한 냉각상태에서의 무한증배계수

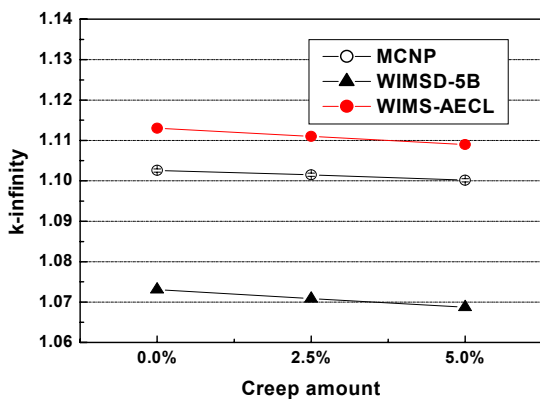


그림 5 크립의 양에 따른 무한증배계수의 변화

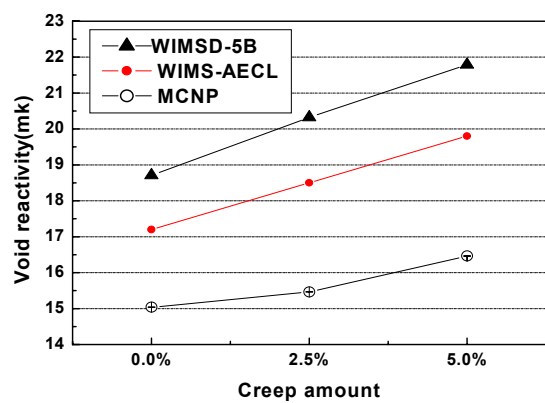


그림 6 크립의 양에 따른 기포반응도의 변화

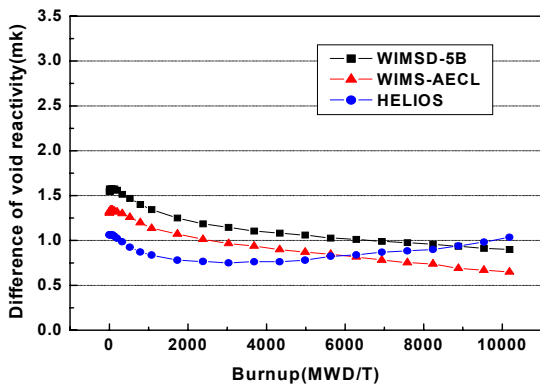


그림 7 2.5% 크립에서의 기포반응도의 변화

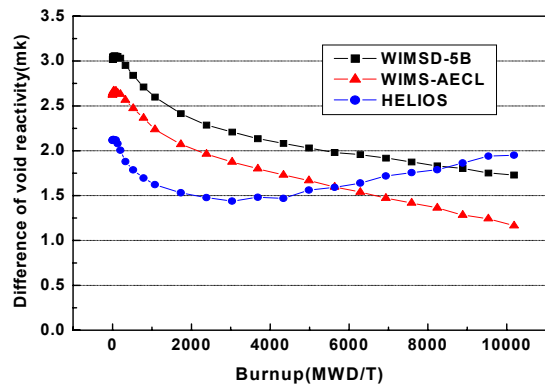


그림 8 5% 크립에서의 기포반응도의 변화

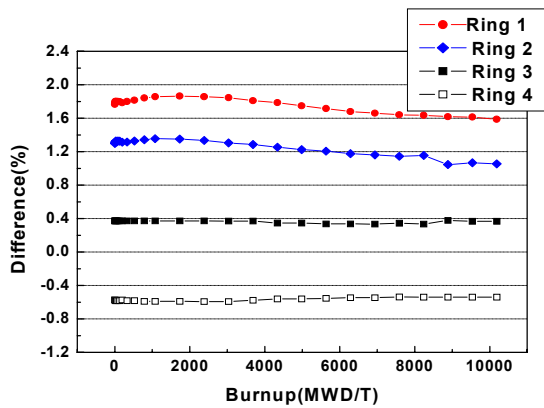


그림 9 5% 크립에서의 링별 상대출력밀도의 변화(WIMS-AECL)

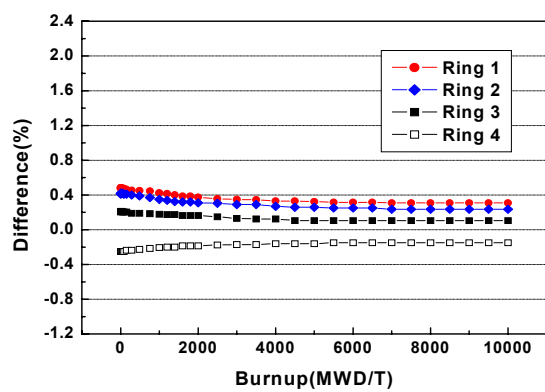


그림 10 5% 크립에서의 링별 상대출력밀도의 변화(HELIOS)

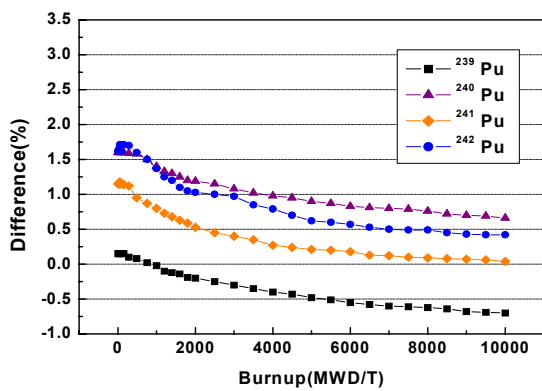


그림 11 5% 크립에서의 Pu 동위원소의 수밀도의 변화(HELIOS)

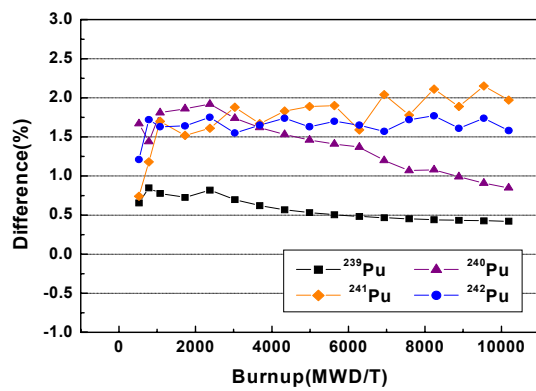


그림 12 5% 크립에서의 Pu 동위원소의 수밀도의 변화(WIMSD-5B)

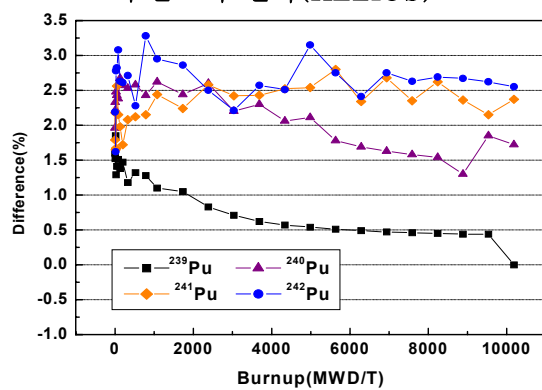


그림 13 5% 크립에서의 Pu 동위원소의 수밀도의 변화(WIMS-AECL)