

평화로 노심 개념설계 연구

Conceptual Design Study for PEACER Core

정승호, 황일순, 박병기
서울대학교 원자핵공학과

양원식
조선대학교 원자력공학과

요약

원전 사용후연료를 재순환하여 소멸처리하기 위한 방안의 하나로서 중금속 냉각 고속로를 토대로 한 평화로를 개념설계하고 노심에 대한 모의 계산을 수행하였다. 핵확산 저항성과 환경친화성을 만족시킬 수 있는 노심 설계를 도출하기 위하여 fuel volume fraction, L/D 등을 변화시키며 Odd Ratio와 Support Ratio를 계산하였다. 기존 노심 설계 접근에 대조되는 저밀도의 중성자 고누설형의 노심 설계를 통해 목표로 하는 Odd Ratio와 Support Ratio를 달성할 수 있었다.

Abstract

PEACER based on heavy liquid metal fast reactor is conceptually designed and the core was simulated as a solution of nuclear power plant spent fuel transmutation. To achieve the core design which can satisfy the requirement of Proliferation-resistance and Environment-friendliness, Odd Ratio and Support Ratio was calculated by changing fuel volume fraction and L/D. The dilute and high leakage core design in contrast to the current core design approach can achieve the objective value of Odd Ratio and Support Ratio.

1. 서론

경수로 혹은 중수로에서 발생한 사용후연료를 핵변환하는 연소로의 이상적인 형태로서 평화로(PEACER: Proliferation-resistant, Environment-friendly, Accident-tolerant, Continuable, and Economic Reactor)라는 개념을 도입하였다. 즉, 핵확산 저항성, 환경 친화성, 사고 허용성, 연료 지속성 및 경제성을 지닌 이상적인 원자로 개념이 곧 평화로이다. 노심의 설계에서 이러한 이상적인 목표들을 이루기 위한 방법을 찾기 위해 개념설계 단계에서의 연소해석을 수행하였으며, 핵확산 저항성과 환경 친화성에 대해 분석하였다.

지금까지의 연구 자료와 문헌에 따르면 열중성자로는, Pu를 소멸시키는 데에는 매우 우수한 특성을 보이지만, 장반감기의 MA(Minor Actinide : Np, Am, Cm)를 소멸처리하기에는 부적절한 것으로 나타났다.[1] 포획 반응에 대한 핵분열 반응의 수가 고속중성자 스펙트럼에서 높아지기 때문에 MA의 소멸 처리에는 고속로가 우수한 특성을 보인다.[1,2] 따라서 PEACER 개념에서는 고속중성자를 이용한 연소로를 개발 대상으로 삼았다.

냉각재로는 기존의 Na가 아닌 Pb, 혹은 Pb-Bi 계열의 중액체금속을 가정하였다. 핵연료는 금속 합금 형태이며 MA(Minor Actinide: Np, Am, Cm)만을 포함했을 경우의 과도한 반응도 변화와 핵확산 저항성 등의 문제를 고려하여 fertile material이 포함되었다.

노심 및 연소 해석에는 미국 Argonne National Laboratory의 고속로 핵연료 주기 해석 코드 REBUS-3[5]를 사용하였다. REBUS-3 내의 3차원적 다군확산 해석 코드 DIF3D를 이용한 중성자속 계산을 통해 3차원적 연소 계산 및 재처리 등의 평형주기 해석을 수행하였다.

2. PEACER 노심 개념 설정

연소로로서의 이상적인 성능을 수행하기 위하여, PEACER는 핵확산 저항성과 환경 친화성을 동시에 갖추어야 한다. 이 두 가지는 노심의 TRU 원소 연소능력을 극대화하여 홀수 질량수 원소들의 비율을 낮추고 MA의 소멸처리를 증가시킴으로써 가능해진다. 이를 위해 기존의 설계보다도 중성자 누설을 늘리고 출력밀도를 낮추는 저밀도 노심을 구성하였다.

PEACER 노심은 1,575 MWt의 IFR(Integral Fast Reactor) burner 설계

[2]를 비교 모형으로 정하였다. 그림 1과 같이 기존의 IFR 노심보다 더욱 납작한 형태를 취하여 높이 방향의 중성자 누설을 늘리면서 가운데 영역에 반사체를 두어 반경 방향의 중성자 누설 또한 키운 형태이다.[2] 이러한 설계 위에 Pb-Bi 냉각재 고속로의 운전 경험이 많은 러시아의 설계를 참조하여 냉각재와 구조재의 부피가 연료의 부피에 비해 상대적으로 많은 개념을 적용, 출력밀도가 낮고 연료봉의 직경 대 피치 비 값이 큰 설계를 도출하였다.[8] 이로서 출력밀도를 낮추고 연료 내에서 Pu과 MA(Minor Actinide; Np, Am, Cm)와 같은 핵분열성 물질의 양을 늘리는 효과를 기대하였다.

노심의 성능을 나타내는 변수(performance parameter)로서 Odd Ratio와 Support Ratio를 설정하였다. 이들은 각각 핵확산 저항성(Proliferation-resistance)과 환경 친화성(Environment-friendliness)을 대표하는 지표가 된다. 핵확산 저항성을 표현하는 값으로서 핵무기의 원료가 되는 원소의 Odd Ratio(OR)라는 지표를 사용하였으며 아래와 같다.

$$OR = \frac{\text{선택된 원자의 홀수 번호 핵종의 질량}}{\text{선택된 원자의 전체 질량}} \quad (1)$$

OR은 식 (1)에서 볼 수 있는 바와 같이 핵분열 가능 원소 내에서 홀수 질량수를 가진 핵분열성 동위원소들의 비율을 표시하는 지표로 특정 원소내의 동위원소 분포가 무기로 전용이 가능한가를 알려준다. OR은 주로 노심에 새로 장전되는 연료와 재순환을 위해 노심에서 인출된 연료에 한하여 정의된 값이다. 노심 내의 핵연료는 도난에 의해 외부로 빠져나가 핵무기로 전용될 가능성이 낮으므로, 노외주기에서의 정의만으로도 충분하다고 판단하였다.

그림 3에서 보듯이 OR 값이 낮을수록 핵물질들은 무기로서의 가치를 잃게 된다.[3] 핵무기로써 가치를 지니는 Pu은 OR 값이 0.93 이상으로서 weapon grade로 불리며, OR이 0.8~0.93이면 fuel grade, 그리고 0.8 이하는 reactor grade로 정의되고 있다.[4] U의 경우 OR이 0.2이하일 경우, 핵무기 전용의 가능성이 없다는 것이 국제적으로 인정되어 있다.

Pu의 경우, 짝수 질량수 동위원소의 대표적인 물질인 Pu-238은 자발핵분열(spontaneous fission)을 잘 일으킬 뿐만 아니라, 강한 α -decay 물질로서 방사 붕괴열이 560 W/kg에 이른다. Pu-240, Pu-242 등도 홀수 질량수인

Pu-239, Pu-241에 비해 자발핵분열이 강한 물질로서 핵폭탄이 초임계로 가기 위해 기폭 장치가 가동되기 전에 핵물질을 예열시켜 폭발을 방해할 수 있다.[8] Pu에 대한 fissile content의 국제적 규제의 기준이 없으므로, De Volpi의 의견을 토대로 OR이 최대한 0.4~0.5(40%~50%) 근방을 넘지 않아야 충분한 핵확산 저항성을 갖추었다고 보고 이것을 잠정적인 Pu에 대한 핵확산 저항성의 목표치로 두었다.

환경친화성을 표현하는 변수로 소멸처리 능력을 표현한 Support Ratio(SR)를 사용하였으며 식 (2)와 같다. TRU 원소들의 감소량은 주기 초에 새로운 연료를 장전하기 위해 소멸처리로에 공급되는 경수로 사용후연료 내의 TRU 원소들의 양이며, TRU 원소들의 재고량 변화를 전력공급계획에 따라 예측할 수 있도록 열출력 대신 전기출력으로 정하였다.

$$SR = \frac{1\text{GWt 소멸처리로 1년 운전기간 후 감소되는 TRU 원소들의 질량}}{1\text{GWt 경수로에서 발생하는 TRU 원소들의 질량}} \quad (2)$$

열출력 및 주기 길이의 다양성으로 인해 SR 값을 정확히 정의에 쓰인 양만으로 계산하기는 불가능하기 때문에 열출력 또는 전기 출력 및 주기 길이의 값은 비례로 계산하였다.

연료주기와 경제성을 고려할 경우, SR 값은 최소 2.0은 되어야 하는 것으로 예측하였으므로, 이 값을 환경 친화성을 목표값으로 설정하였다.

L/D는 노심의 직경 대 높이 비로서, 노심이 얼마나 납작하게 설계되었는가를 나타내는 지표가 된다. 같은 크기의 원자로일 경우, L/D를 비교함으로써 중성자 누출이 상대적으로 얼마나 클지를 알아 볼 수 있다. 즉, 이 값이 작을수록 노심의 중성자 누설이 커짐을 의미한다. 여기서 L은 일반적인 설계에서와 다름 없이 노심의 길이 방향 분포에서 실제 연료가 장전되는 연료봉 부분이지만, D는 노심 가운데에 들어가 있는 반사체 영역을 포함하므로 반사 집합체 영역이 차지하는 만큼의 수치가 더 들어가 있다. 그림 1과 그림 2를 보면 알 수 있듯이, 정확히 말하자면 D는 노심 유효 최대 외경(Active Core Outer Diameter)이라고 표현할 수 있다.

핵분열을 통해 소멸시키고자 하는 TRU 원소의 양을 늘이기 위해, 연료의 부피비를 줄이고 핵분열성 물질의 질량비를 증가시키는 방법을 선택한다. VF

(Fuel Volume Fraction: 노내 핵연료 부피 분율)가 이것을 표현한 지표로서, 이 값이 작을수록 원자로의 출력밀도가 낮은 저밀도 노심으로 설계되었음을 의미한다. 일반적인 고속로의 연료인 U-Pu 산화물에서 Pu의 양은 약 20%에 달한다. 이 값은 전체에서 차지하는 연료의 부피가 약 35%에서 40%에 이르는 Na 원자로의 경우이며, 금속 핵연료 상태를 유지한 채로 러시아의 Pb-Bi 고속로에서와 같은 낮은 출력 밀도로 설계 할 경우, VF는 줄어들고 임계 유지에 필요한 TRU 원소의 양은 늘어나게 된다.

노심의 개념설계는 설계 변수(design parameter)인 L/D, VF를 변화시키며 성능 변수(performance parameter)인 OR, SR등을 살펴으로써 TRU 원소들의 연소를 극대화시키면서 핵확산 저항성을 유지할 수 있는 방향으로 수행하였다.

3. 노심 및 연소 해석

다음에 소개되는 결과들은 핵연료의 형태가 U-TRU-Zr 금속인 경우이다. 전체 노내 연소 시간은 365일을 가정하였고, 주기말에 원자로의 증배계수가 1.002에 이르도록 설정하여 연소 시간 동안 정상 운전이 되는 것을 가정하였다. 공급되는 핵연료의 악티나이드 질량밀도는 13.4g/cc로 두었다. 계산은 초기 노심을 비롯한 과도기간에 대해서 수행한 후, 평형 노심(연료 물질 수급의 평형상태) 단계로 도달하면 계산을 종료하였고, 본 결과는 평형노심에 대해 정리하였다.

이외에 계산을 수행하는 데에 사용된 가정은 다음과 같다.

1) 고속로에서는 핵분열 생성물의 노심에 대한 영향이 크지 않다. 그러므로 REBUS-3에서는 이들을 네 가지의 lumped fission product로 두어 근사적으로 계산한다. 핵연료의 연쇄반응 계산에서도 어느 한계 이상에서는 핵종의 추적을 멈추게 된다. 이 때도 역시 최종적으로 도달하는 악티나이드 원소를 코드 내에서 임의로 가상의 원소로 정하여 계산을 줄이는 방법을 택했다. 이러한 방법의 타당성은 REBUS-3 예제 계산과 전문가들을 통하여 확인하였다.[5]

2) 연쇄 반응 상에서 일어나는 아주 짧은 반응, 즉 U-238이 중성자를 잡아먹고 U-239로 되었다가 Np-239를 거쳐서 Pu-239가 되는 식의 반응은 그 중간 단계가 생략되었다. Th의 경우는 중간 단계인 Pa-233이 포함되었다. 이것은

Pa-233의 반감기(27.0days)가 Np-239의 반감기(2.35days)보다 열 배 이상 크기 때문에 따로 고려된 것이다.

3) 연쇄 반응에 포함된 원소는 다음과 같다.

Th-232, Pa-233, U-233, U-234, U-235, U-236, U-238, Np-237, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242, Am-241, Am-242, Am-243, Cm-242, Cm-243, Cm-244, Cm-245, Cm-246

4) 연료의 순환공정에서 계산의 단순화를 위하여 3)의 원소들은 100% 추출 및 순환되는 것을 가정하였다. 그러나 분리 공정의 실질적 효율성을 감안하여 이 가정에서 발생한 오차는 중요시되지 않는다고 판단된다.

5) 외부에서 공급되는 사용후연료는 1 GWe의 경수로를 운전할 때, 10 년의 냉각 기간을 거쳐 연간 방출되는 양을 TRU 원소의 구성비(표 1의 내용)는 그대로 유지하고 U 양만을 조절하여 공급되는 것으로 가정하였다.

6) 핵연료의 부피비를 변수로 한 결과에서 연료: 구조물(cladding을 포함): 냉각재의 비율은 구조물의 부피비를 고정한 채로 연료와 냉각재 간의 부피비만을 조정하였다.

7) 노심 전체에서 제어 어셈블리와 실제 운전상에 사용되는 제어 특성 부분은 빠졌다. 이는 순수히 인위적인 중성자 제어 장치가 빠진 상태에서의 거동을 살펴보기 위한 것이다.

8) L/D 및 VF와 같은 설계 변수(design parameter)의 변화에 따른 임계의 변화는 코드가 외부에서 공급되는 TRU 원소의 wt%를 조절함으로써 적절한 수준으로 유지가 가능하다. 다시 말해, 설계 변수의 변화에 따른 임계의 변화를 적절한 수준으로 유지하는 역할은 TRU 원소들이 수행한다.

3.1. 핵확산 저항성

핵확산 저항성을 표현하는 지표로는 성능 변수(performance parameter)인 OR(odd ratio)을 사용하였다. 일반적으로, 핵확산 저항성에 대한 근거로는 institutional barrier를 드는 것이 보통이다. PEACER의 핵확산저항성은 이뿐 만 아니라 OR을 낮추어 핵물질의 무기로서의 가치를 감퇴시키는 redundancy를 지향한다.

핵물질의 무기로서의 가치를 떨어뜨리는 것은 앞서 그림 3을 설명하면서 언

급하였듯이 주로 핵분열을 일으켜 에너지를 생산하는 역할을 하는 홀수 질량수의 동위원소 비율을 줄이는 것이다. 홀수 질량수의 동위원소 비율을 줄인다는 것은, 역으로 짝수 번 동위원소의 비율을 늘리는 것과 같은 의미이다.

그림 4(a)와 4(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 Pu의 OR 지표는 L/D와 부피를 감소시킴에 따라 감소함을 알 수 있다. Pu-239와 Pu-241 등 Pu 중에서도 이들 홀수 질량수의 동위원소들이 다른 짝수 질량수의 동위원소들에 비해 전체적으로 핵분열 단면적이 크며, 그 수밀도에 있어서도 초기 경수로의 사용후연료 구성비에서 알 수 있듯이 두 배 이상(사용후연료의 OR은 0.7) 크다. 그러므로 대부분의 핵분열은 Pu 중에서도 홀수 질량수 동위원소 특히 Pu-239에서 진행된다. Pu의 OR이 줄어드는 것은 바로 홀수 질량수 동위원소들이 상대적으로 더 많이 핵분열을 통해 핵분열 생성물로 소멸되기 때문이다. U-238이 중성자를 포획하여 지속적으로 Pu-239로 변환되지만, Pu-239가 그보다 빨리 핵분열 하도록 설계되어 있어서 주기말에는 그 양이 줄어든다.

Pu의 소멸량이 증가했다고 말하는 것은 실제로는 TRU 원소로 재생산되는 U의 양이 줄었다는 의미가 된다. 즉, TRU 원소의 양이 증가하여 상대적으로 U의 양이 줄어들기 때문에 포획 반응을 통해 Pu-239로 증식되는 양이 줄어들고 이것은 곧 Pu 및 TRU 원소의 순감소율을 늘리는 것이 된다.

주기초와 주기말 지표값 OR의 차이는 약 0.04 이고 전체적으로 PEACER의 OR은 0.5 근처이며 이는 경수로의 0.7인 경우에 비해 크게 낮다. 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 L/D 및 부피비의 변화는 Pu의 핵물질로서 성능을 약 10 배에서 100배 이상 감퇴시킴을 알 수 있다.

3.2. 환경친화성

PEACER의 환경친화성을 나타내는 지표로 사용되는 SR을 L/D와 VF을 변화시키며 비교해 보았다. 좀더 정밀한 환경 친화성의 분석은 TRU 원소를 비롯하여 장수명의 핵분열 생성물에 대한 핵변환 효과도 고려되어야 할 것이다. 본 연구에서는 아직 핵분열 생성물에 대한 핵자료를 확보하지 못하여 핵분열 생성물에 대한 해석은 수행되지 않았으며 앞으로 설명하게 될 SR은 악티나이드 계열의 폐기물에 국한한다.

개념 설계 단계에서는 MA (Minor Actinide: Np, Am, Cm)에 대한 소멸

처리 효과를 보는 것으로도 충분한 의의를 가질 것으로 판단한다. 그림 5(a)와 5(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 L/D와 VR를 감소시킴에 따라 SR은 증가함을 볼 수 있다. 식 (2)에서 설명하였듯이, SR은 1 기의 PEACER가 변환해내는 같은 출력 같은 주기의 경수로 사용후연료의 양으로서, SR 값에 해당하는 만큼의 경수로에서 나오는 사용후연료를 핵변환함을 의미한다. L/D가 0.103, VF가 15.8%인 기존 설계의 경우, 2.0을 뛰어넘는 2.07을 달성할 수 있었다.

L/D와 VF의 변화에 따른 이와 같은 변화는 전적으로 얼마나 많은 TRU 원소들을 태워내는가에 달려있다. 노심 내의 TRU 원소들의 양을 늘리는 것은 곧 공급되는 핵연료 내의 TRU 원소 양을 늘리는 것과 일맥상통하며 이는 더 많은 TRU 원소가 타서 없어지므로 SR이 증가한다는 의미가 된다. 동시에 TRU 원소가 탈 때 상대적으로 핵분열 단면적이 높은 흡수 질량수의 동위원소가 더 많이 소멸되므로, 이것은 곧 OR의 감소를 가져오고 핵확산 저항성에도 좋은 결과를 가져온다.

4. 결론

연소로로서의 이상적인 개념을 집약한 PEACER(Proliferation-resistant, Environment-friendly, Accident-tolerant, Continuable, and Economic Reactor)의 노심을 개념설계하였다. 미국 ANL의 REBUS-3 코드를 이용하여 OR을 통해 핵확산 저항성을, SR을 통해 환경 친화성을 각각 산출하였다. L/D와 fuel volume fraction이 작은 저밀도, 고누설형 노심으로 목표한 성능변수 값을 만족할 수 있었다. 앞으로 핵분열 생성물에 대한 핵자료 및 여러 가지 환경에서의 반응 단면적 자료 확보를 통해 추가적인 환경 친화성을 계산하고 반응도가와 같은 동특성 해석을 수행하여 노심 안전성을 분석하게 될 것이다.

감사(acknowledgement)

서울대학교 원자핵공학과 김창효 교수님, 국방연구소 신성택 박사님, 원자력 연구소 김상지 박사님, 양맹호 박사님.

참고문헌

- [1] 박원석 외, 한국원자력연구소, 장수명 핵종 핵변환 기술 개발, 1995.
- [2] Edited by T. D. Beynon and D. J. Dudziak, "Progress in Nuclear Energy, special issue: The Technology of the Integral Fast Reactor and its Associated Fuel Cycle", volume 31, number 1/2, 1997, pp. 13-42.
- [3] Alexander De Volpi, "Proliferation, Plutonium and Policy/Institutional and Technological Impediments to Nuclear Weapons Propagation", Pergamon Press, 1979, pp. 328
- [4] J. Carson Mark, "Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium", Science & Global Security, 1993, Volume 4, pp.111-128
- [5] B. J. Toppel, "A user's guide for the REBUS-3 fuel cycle analysis capability", 1990.
- [6] Manson Benedict, et al., "Nuclear Chemical Engineering", pp. 369
- [7] Alan E. Waltar, et al., "Fast Breeder Reactors"
- [8] O. M. Borisov, "Requirements to the core of Brest-type Reactors", Conference on Heavy liquid Metal Coolant for Nuclear Technology, 1998, B.19
- [9] 조만 외, 한국원자력연구소, 액체금속로 설계 개념 연구, 1996
- [10] J. Bultman, "Actinide Transmutation in Nuclear Reactors"
- [11] 양원식 외, 한국 원자력 연구소, 액체금속로 요소기술 개발, 1996.

표 1. 원전으로부터 PEACER 노심으로 매년 공급되는 사용후연료의 U과 TRU 원소의 동위 원소 원자수비 [6].

U	공급질량(kg/yr)	동위원소 구성비	TRU 원소	공급질량(kg/yr)	동위원소 구성비
U-234	0.0298	1.21×10^{-4}	Np-237	25.8	0.0751
U-235	2.04	8.26×10^{-3}	Pu-238	7.58	0.0221
U-236	1.08	4.38×10^{-3}	Pu-239	182	0.530
U-238	244	0.987	Pu-240	74.8	0.217
			Pu-241	35.0	0.102
			Pu-242	12.2	0.0355
			Am-241	1.67	4.86×10^{-3}
			Am-242	0.0151	4.38×10^{-5}
			Am-243	3.14	9.13×10^{-3}
			Cm-242	0.168	4.89×10^{-4}
			Cm-243	0.00248	7.21×10^{-6}
			Cm-244	1.15	3.35×10^{-3}
			Cm-245	0.0701	2.04×10^{-4}
			Cm-246	0.00788	2.29×10^{-5}
합계	247	1.00	합계	344	1.00

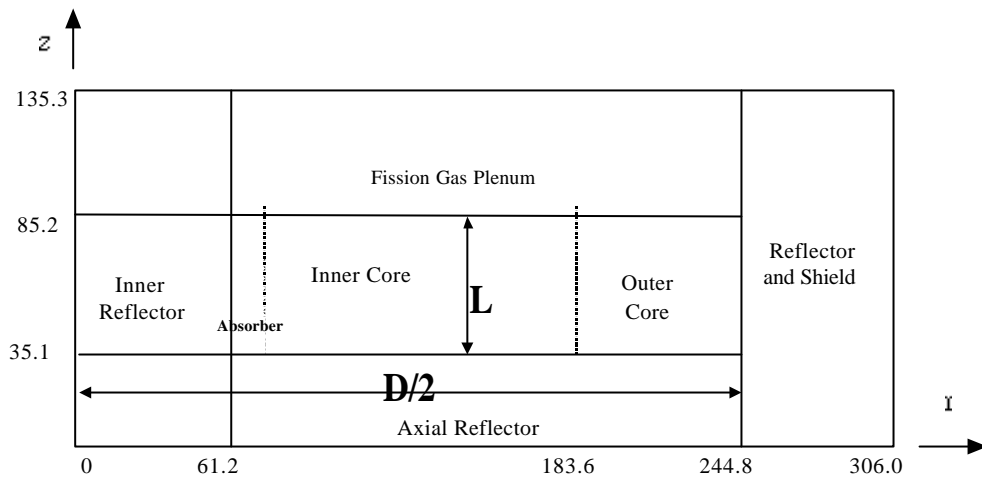


그림 1. PEACER 기준설계의 1/4노심 측면도(노심 중심에서 반경방향 및 축방향 거리(cm)),

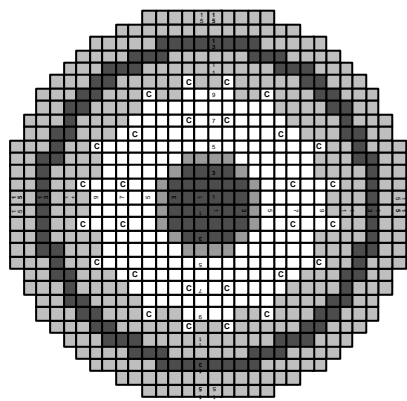


그림 2. PEACER 기준설계 노심의 평면도.

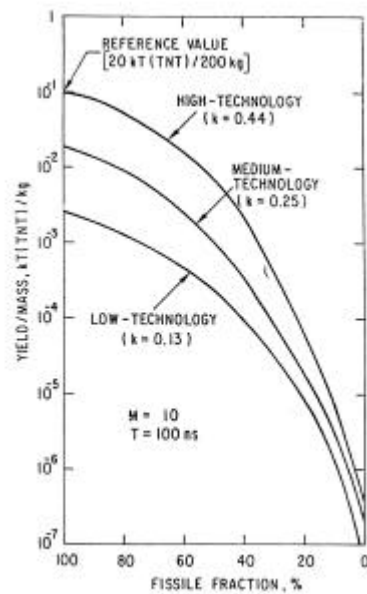
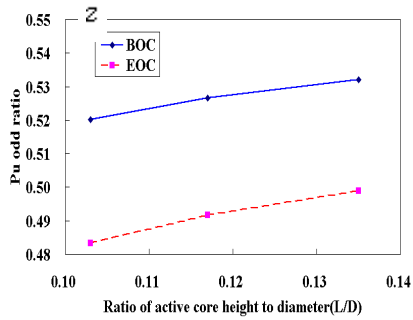
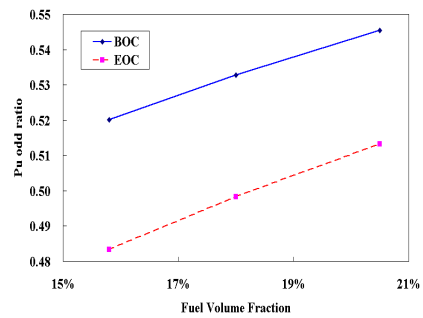


그림 3. Effect upon fission explosive yield caused by denatured plutonium [1].



(a)

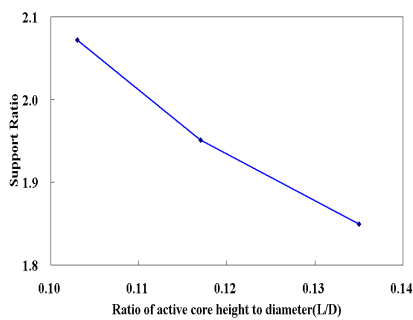


(b)

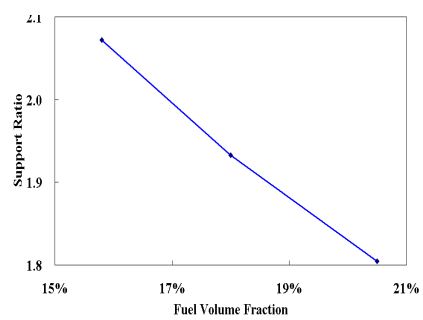
그림 4. U-TRU-Zr 연료 형태에서의 Pu Odd Ratio의 변화

(a) Active core height to diameter 비율(L/D)에 따른 변화: 핵연료 부피비(fuel volume fraction)=0.158, 평형주기 결과.

(b) Fuel volume fraction(VF, 핵연료 부피비)에 따른 변화: active core height to diameter 비율(L/D)=0.103, 평형주기 결과.



(a)



(b)

그림 5. U-TRU-Zr 연료 형태에서 Support Ratio의 변화

(a) Active core height to diameter 비율(L/D)에 따른 변화: 핵연료 부피비(fuel volume fraction)=0.158, 평형주기 결과.

(b) Fuel volume fraction(VF, 핵연료 부피비)에 따른 변화: active core height to diameter 비율=0.103, 평형주기 결과.