

## 이중구조 가연성 독봉의 핵설계 특성 평가

이대진, 김명현, 송근우\*, 정연호\*  
경희대학교, 한국원자력연구소\*

### An Evaluation of Nuclear Design Characteristics of Duplex Burnable Absorber Rods

Dae-Jin Lee, Myung-Hyun Kim, Keun-Woo Song\*, Yeun-Ho Chung\*  
KyungHee University, Korea Atomic Energy Research Institute\*

#### 요 약

이중구조 가연성독봉(Duplex BP)의 성능을 평가하기 위해 한국표준형발전소 24개월 주기를 기준으로 16개 Gadolinia 독봉이 장전된 핵연료집합체에 대해 핵적 평가를 수행하였다. 16개 Gd 독봉이 장전된 핵연료집합체와 동일한 반응도 억제가를 갖는 Duplex 독봉집합체를 설계하기 위해 내심에 Natural U-12wt%Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 외심에는 4.95wt%UO<sub>2</sub>-2w/oEr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>을 넣어 이중 성형한 24개의 이중구조 가연성독봉이 장전된 핵연료집합체를 설계하였다. 또한 같은 방법으로 140개의 Erbia 독봉이 장전된 등가핵연료집합체를 설계하였다. 핵설계 특성평가를 위해 연소도에 따른 무한증배계수, 반응도억제가, 첨두봉출력 그리고 냉각재 온도계수에 대한 변화에 대해서 비교하였다. Duplex 독봉은 Gadolinia 독봉에 비해 k-inf의 2차 첨두현상을 완화시켜 반응도 제어면에서 유리한 것으로 나타났다. 그러나, 다량의 Erbia 독봉을 전체적으로 끌고루 장전한 핵연료집합체보다는 Duplex BP를 장전한 핵연료집합체가 노심내 반응도 제어면에서 유리하지 못한 것으로 나타났다.

#### Abstract

Nuclear design characteristics of duplex burnable poison rod were evaluated based on 24 month cycle fuel for Korean Standard Nuclear Plant. A fuel assembly with duplex burnable poison rod was designed for an equivalent assembly to 16 gadolinia BPs. Duplex BP is composed of inner region of natural U-12wt%Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and outer shell of 4.95wt%UO<sub>2</sub>-2wt%Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. In order to compare this duplex option, assemblies with 140 erbia pins were designed as an alternative option. The variation of k-infinite, rod worth, pin peaking and MTC were compared. Duplex BP had the better neutronic

performance than gadolinia BP in all parameters. However, Duplex BP was worse than erbia BP in the aspect of safety,

## 1. 서론

가압경수로에 독물질을 사용하는 것은 주기 초 잉여반응도 제어와 관련하여 붕산 용액의 과다사용에 따른 양의 냉각재 온도계수를 피하고, 노심내 침투출력인자를 설계 허용범위내로 제한하여 출력분포를 조절하기 위해서이다. 이러한 목적을 만족시키는 독물질로서 현재  $Gd_2O_3$ 가 널리 사용되어지고 있다. 일체형 가연성흡수물질로 사용되어지고 있는  $Gd_2O_3$ 는 강력한 중성자 흡수력으로 적은 양으로도 탁월한 반응도 제어효과를 얻을 수 있고 연소 후의 잔존 중성자 흡수량이 적은 장점이 있는 반면,  $UO_2$ 에 혼합하였을 때 열전도도가 나빠지므로 출력제어를 위하여 낮은  $U^{235}$  농축도의 핵연료봉에만 사용이 가능하다는 단점이 있다. 또한 핵연료집합체에 장전할 때 집합체의 대칭성 유지를 위하여 일반적으로 4의 배수형태의 장전만이 가능하므로 핵연료 집합체 반응도 제어효과의 조절이 비교적 자유롭지 못하다. 가연성 중성자 흡수물질의 핵연료집합체 반응도 제어효과를 더욱 다양하게 조절하려면 현재 가연성독봉 개수와 가연성 흡수물질 농도 조절에 한정되어있는 가연성독봉 설계에 더 많은 다양성이 필요하다. 그 방안중 하나가 이중구조로 된 가연성독봉이다. [1]

이중구조 가연성 독봉은 하나의 소결체를 내부와 외부로 나누어서 내심에는 natural U-12wt% $Gd_2O_3$ , 외곽에는  $UO_2$ -2wt% $Er_2O_3$ 를 배치한 장주기용 가연성 독봉이다. 이중가연성 독봉은  $Gd_2O_3$ 가 함유된 내부 영역의 두께를 조절하여 보다 다양한 핵연료 집합체 반응도 제어가 가능하며, 외부 연료봉에 비교적 연소속도가 느린  $Er_2O_3$ 를 장전하여 내부 연료봉의 반경이 감소함으로써 발생하는  $Gd_2O_3$ 의 연소속도 증가를 억제할 수 있다. [2]

본 연구에서는 현재 연구, 개발되어지고 있는 이중구조 가연성 독봉이 장주기용 원자로의 반응도 제어효과에 미치는 영향을 알아보고자 한국표준형발전소 24개월 주기계획용 16Gd 독봉이 장전된 핵연료집합체와 동일한 억제가를 갖는 Duplex 독봉집합체, 그리고 Erbia 독봉집합체를 설계하여 핵적 특성을 HELIOS 코드를 이용하여 비교하였다.

## 2. Gadolinia가 장전된 핵연료집합체

그림1 는 한국표준형발전소 24개월 주기계획용 핵연료집합체 구조를 나타낸 것이다. 24개월 주기를 만족하는 한국표준형발전소는 4.95wt%와 4.45wt%의 농축 우라늄을 핵연료로 사용하며, 천연우라늄에 8wt%  $Gd_2O_3$ 를 혼합한 형태의 가연성독봉이 장전되어져 핵연료집합체의 반응도를 제어하게 된다. 한국 표준형 발전소의 24개월 주기 운전의 핵연료집합체 설계에서는 12개 및 16개의  $Gd_2O_3$  가연성독봉이 장전된 핵연료집합체를 사용한다. 이중 12개의 가연성독봉이 장전된 핵연료집합체는 노심의 외곽에 위치하여 연소 중 출력상승이 상대적으로 적고 가연성흡수물질에 의한 반응도 제어량도 비교적 적으므로 노심장전모형 설계에 큰 지장을 초래하지 않는다. 하지만, 노심의 중간부에 장전되는 16개의 가연성독봉이 장전된 핵연료 집합체는 노심의 연소가 진행됨에 따라 출력이 증가하여 노심의 침투출력을

증가시키는 원인이 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 노심의 침투출력을 야기 시키는 16개의 가연성독봉이 장전된 핵연료집합체를 비교 대상 모델로 선정하고 이 핵연료집합체와 동일한 반응도 억제가를 갖는 이중구조 가연성독봉집합체 및 Erbia 독봉집합체를 설계하여 연소에 따른 핵적 특성을 비교해보았다.

## 2. Duplex BP 및 Erbia등가 핵연료집합체 설계

### 2.1 Duplex 독봉집합체 설계

표1 과 그림2 은 Duplex BP의 설계제원을 나타낸 것이다. 현재 연구되어지고 있는 Duplex BP에 대한 설계제원을 이용하였으며 이를 통해 16개 Gd 가 장전된 핵연료집합체와 동일한 주기 초 반응도 억제가를 갖도록 하는 24개 Duplex BP를 장전한 핵연료집합체를 개략적으로 설계하였다. [3] 또한 독봉의 장전위치는 대칭형을 이루도록 하였다. 그림3 은 24개 Duplex BP가 장전된 핵연료집합체 구조를 나타낸 것이다. 주기 초 반응도 억제가 계산 결과 16Gd가 장전된 핵연료집합체의 주기 초 무한증배계수가 1.1518인데 비해 24개 Duplex BP가 장전된 핵연료집합체의 무한증배계수는 1.1523으로 50pcm 차이를 보였다. 이 또한 완전히 동일한 주기 초 무한증배계수값으로 나타내지는 못하였지만 50 pcm 정도의 차이는 노심 핵설계에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단되어 동일한 주기 초 무한증배계수를 보이는 독봉집합체를 24개의 Duplex BP를 사용하여 올바르게 설계되어졌다고 판단하였다.

### 2.2 Erbia 독봉집합체 설계

Erbia 독봉집합체의 장전모형은 서울대에서 설계한바있는 16개 Gd가 장전된 독봉집합체와 동일한 반응도 억제가를 갖게 하기 위해 설계되어진 장전모형을 이용하였다. 이 장전모형은 Erbia를 1wt%로 고정시키고 Erbia 독봉의 개수만을 변화시켜 물질양에 따른 주기 초 반응도억제가의 변화를 통해 4wt%  $Gd_2O_3$ 의 독봉이 16개 장전된 핵연료집합체와 동일한 주기 초 반응도 억제가를 갖도록 설계되어진 Erbia 독봉집합체이다. 이 독봉집합체에는 140개 Er 독봉이 장전되어지며 독봉 장전위치는 여러 가지 설계변수에 의한 민감도 분석을 통해 도출되어진 Erbia 독봉집합체의 최적모형이다. 그림 4은 140Er이 장전된 독봉집합체의 구조를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 독봉의 개수와 장전모형은 위에서 제시한 핵연료집합체를 사용했으며 단지 Erbia의 농축도를 변화시키면서 24개월 주기계획에 사용되어지는 16개 Gd 독봉이 장전된 핵연료집합체와 동일한 반응도 억제가를 갖는 Erbia의 농축도를 찾아 독봉집합체를 설계하였다. 140개 Er 독봉이 장전된 핵연료집합체에는 각기 다른 농축 우라늄에 Erbia를 혼합한 형태의 독봉을 사용하게 되는데 핵연료의 농축도는 각각 24개월 주기계획에 사용되어지는 핵연료의 농축도를 이용하였으며 Erbia의 농축도는 1 wt% - 2wt%까지 0.1wt% 간격으로 증가시면서 16개 Gd 독봉이 장전된 핵연료집합체와 동일한 반응도 억제가를 갖는 Erbia의 농축도를 도출하였다. 이러한 반복계산을 통해 16개 Gd 독봉이 장전된 핵연료집합체와 동

일한 반응도 억제가를 갖기 위해서는 1.4wt% Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 독봉이 필요하게 되며 이를 독봉집합체 설계에 적용하였을 때의 주기 초 무한증배계수값은 표 2에서 보는바와 같이 16개 Gd 독봉이 장전된 핵연료집합체의 무한증배계수보다 130pcm 정도 높게 나타났다. 완전히 동일한 주기 초 무한증배계수를 나타내지는 못하였지만 130 pcm 정도의 차이는 노심 핵설계시 큰 영향을 주지 못하므로 동일한 주기 초 무한증배계수를 보이는 Erbia 독봉집합체가 올바르게 설계되어졌다고 판단하였다.

### 3. 독봉집합체별 독특성 비교

16개 Gd 독봉이 장전된 핵연료집합체와 등가 반응도 억제가를 갖는 140개 Er 독봉집합체 및 24개 Duplex BP 장전 핵연료집합체 설계가 이루어졌다. 각각의 독봉집합체에 대해 연소에 따른 무한증배계수와 잔여 반응도 억제가를 통해 주기길이 측면에서의 경제성을 비교하였으며, 연소에 따른 점두봉출력인자를 통해 효과적인 반응도 제어를 평가하였고, 연소에 따른 냉각재온도계수를 확인하여 노심 설계 시 기본적으로 요구되어지는 안전성측면에서의 핵적 특성을 비교 평가하였다.

#### 3.1 무한증배계수 특성

표 2는 주요 연소시점에서의 독봉집합체 무한증배계수를, 그림 5는 연소에 따른 무한증배계수를 비교한 것이다. 24Duplex BP 장전 핵연료집합체는 연소 중 16개 Gd 독봉장전 핵연료집합체와 비교했을 때 반응도 증가현상에 대하여 800 pcm의 반응도 억제효과를 얻을 수 있으며 가연성흡수물질의 연소 후 무한증배계수가 연소도 40,000 MWD/MTU에서 550 pcm이 증가하였다. 또한 140개 Er 독봉이 장전된 경우 오히려 연소 중 반응도 증가현상에 대하여 2200 pcm의 반응도 효과를 상실했으나 가연성흡수물질의 연소 후 연소도 40,000 MWD/MTU에서 620 pcm의 무한증배계수 증가하였다. 이는 주기 길이 측면에서 볼 때 주기 말 무한증배계수가 16개 Gd 장전경우보다 550 pcm의 증가를 본 Duplex BP와 620 pcm의 증가를 본 Erbia 독봉을 사용하는 것이 유리하다고 판단된다.

#### 3.2 잔여 반응도 억제가 특성

그림 6는 연소도에 따른 잔여 반응도 억제가를 16개 Gd 독봉이 장전된 핵연료집합체와 이의 등가독봉집합체에 대해 나타낸 것이다. 16개 Gd 와 24개 Duplex BP를 장전한 핵연료집합체 모두 연소초기에는 반응도억제가가 동일한 속도로 감소하는 반면 Erbia 독봉집합체의 반응도 억제가는 지수형태로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 15,000 MWD/MTU 부터는 140개 Er 독봉장전 핵연료집합체의 반응도 억제가의 감소는 완만해지고 16개 Gd와 24개 Duplex BP 장전 핵연료집합체는 140개 Er 독봉 장전 핵연료집합체의 반응도 억제가 감소속도보다 빨리 독작용이 사라지는 것으로 나타났다. 이후 30,000 MWD/MTU 이후로는 24개 Duplex BP와 140개 Er 독봉 장전 핵연료집합체의 잔여반응도 억제가는 주기 말에 거의 영향이 없지만 16개 Gd 독봉 장전 핵연료집합체는 미미한 양이지만 계속 남는다. 따라

서 주기 길이 측면에서 장주기 설계 시에는 연소 후 잔존 독작용이 거의 없는 Duplex BP와 Erbium을 적용하는 것이 유리할 것으로 판단된다,

### 3.3 침투봉출력인자 제어 특성

그림 7은 연소도에 따른 침투봉 출력인자를 16개 Gd 독봉집합체와 이의 등가독봉집합체에 대해 나타낸 것이다. Gadolinia 침투봉 출력인자는 Duplex BP의 침투봉 출력인자에 비해 비교적 크게 나왔으며 Duplex BP의 침투봉 출력인자는 연소도가 증가함에 따라 점차 감소하는 반면 Gadolinia 독봉집합체의 침투봉 출력인자는 연소초기에 독물질의 급격한 소멸로 인한 2차 침투현상이 나타났다. Duplex 독봉집합체의 경우 내심의 빠른 연소를 보이는  $Gd_2O_3$ 의 연소특성으로 인한 2차 침투현상을 외곽의  $Er_2O_3$ 가 보상해줌으로서 Gadolinia가 보이는 2차 침투현상을 완화시킬 수 있었다. 이에 비해 140개 Er 독봉집합체는 전반적으로 두 독봉집합체보다는 뛰어난 침투봉출력 제어효과를 보였는데 이는 140개라는 많은 개수의 독봉이 핵연료집합체에 전반적으로 고루 장전되어 집합체 침투출력 제어가 효과적이기 때문이라 판단된다.

### 3.4 냉각제온도계수 특성

그림 8은 연소도에 따른 냉각제 온도계수를 나타낸 것이다. 모든 독물질이 음의 냉각제 온도계수를 보였다. Duplex BP 독봉집합체의 냉각제 온도계수는 Gadolinia 독봉집합체의 냉각제 온도계수에 비해 낮게 나타났는데 이는 Duplex BP 외부 반경에 위치되어지는  $Er_2O_3$ 의 특성으로 인한 영향이라 볼 수 있다. 또한 Erbium 독봉집합체는 이 두 형태의 독봉보다도 월등히 좋은 냉각제 온도계수 효과를 보였다. 이는 Erbium 동위원소중 독효과가 큰  $Er^{167}$ 이 0.5eV 근방의 에너지대에서 매우 큰 공명흡수단면적을 갖기 때문에 다른 독물질보다 냉각제 온도계수 면에서 유리한 특징을 갖게 되는 것이다. 아래 그림7 에서 보는 바와 같이 Duplex BP는 Gadolinia 독봉집합체가 갖는 냉각제 온도계수보다는 좋게 나타났지만 그 차이가 크지 않게 나타났다.

## 4. 결론

24개월 주기계획용 한국표준형원전의 핵연료집합체중 16개 Gadolinia가 장전된 독봉집합체에 대해서 동일한 반응도 억제가를 갖는 이중구조 가연성독봉이 장전되어진 독봉집합체와 Erbium이 장전된 독봉집합체를 설계하여 핵적 특성을 평가하였다. 각 독봉집합체간의 독특성 조사를 위해 4가지 비교항목을 두어 핵특성을 비교하였으며 장주기 원자로의 효과적인 반응도 제어에 유리한 독봉을 평가하였다. 4가지 핵특성 비교결과 Erbium을 사용한 경우 Gadolinia와 Duplex를 사용한 경우보다 경제성 및 안전성 측면에서 유리한 것으로 나타났다. 특히 연소도에 따른 침투봉출력인자 변화에서는 2차 침투출력현상이 뚜렷이 보이는 Gadolinia 독봉집합체에 비해 Erbium을 다량으로 사용한 경우에 이러한 2차 침투출력현상을 크게 완화시켰을 뿐만 아니라 주기 말의 잔여 독작용이 두 독물질에 비해 작게 나타난것으

로 알 수 있다. 그러나 핵연료집합체내 24개의 Duplex BP가 장전되는데 비해 Erbia는 140개 독봉을 장전하여야 동일한 주기 초 반응도 억제가를 갖을 수 있다. 이렇듯 Erbia 독봉을 다량 사용함으로써 생기는 생산비용의 증가는 24개의 Duplex BP를 사용하는 핵연료집합체에 비해 경제성 측면에서 불리하다고 볼 수 있다.

#### 참고 문헌

1. 경수로용 신형핵연료 개발 : 소결체재료신기술개발 보고서, KAERI/RR-2023/99, 2000.
2. 이영우 외 : “이중가연성 흡수 소결체의 균열 형성 및  $UO_2$   $Gd_2O_3$  치밀화 속도에 미치는 첨가제 및 소결 분위기, 승온 속도의 영향”, 한국원자력학회 추계학술발표회논문집, 용평, 2002.
3. 차세대원자로 기술개발(II) : 노심특성 개량 연구 및 노심 핵설계 평가, KEPRI/TR.95ZJ16.J1999.115/vol. 2.2, KEPRI, 1999.
4. R.J.J. Stamm'ler, J.J. Casal, E.A. Villarino, HELIOS Method, HELIOS Documentation Rev. No. 2. Scanpower A/S, 1933.

Table 1. Design parameters of duplex burnable absorber for KSNP 24 month fuel cycle.

Inner Fuel Rod Material	Natural U + 12wt% $Gd_2O_3$
Outer Fuel Rod Material	4.95wt% $U^{235}$ $UO_2$ + 2wt% $Er_2O_3$
Inner Fuel Rod Diameter (cm)	0.5448
Outer Fuel Rod Diameter (cm)	0.8255
Cladding Outer Diameter (cm)	0.9721
Number of BP Rod/Assembly	24

Table 2. K-inf vs. various burnable absorbers

	16 Gd 핵연료집합체	24 Duplex BP 핵연료집합체	140 Er 핵연료집합체
주기초 (No Xe)	1.1518	1.1523	1.1531
연소중 최대값	1.1174	1.1094	1.1316
4000 MWD/MTU	0.9613	0.9668	0.9675

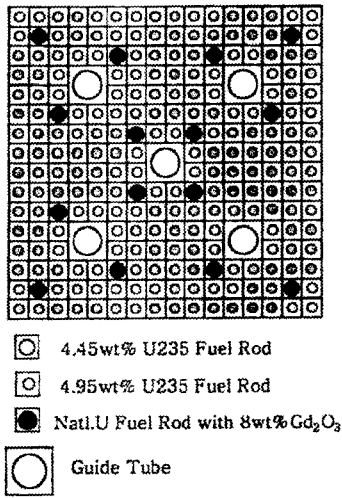


Figure 1. Assembly configuration

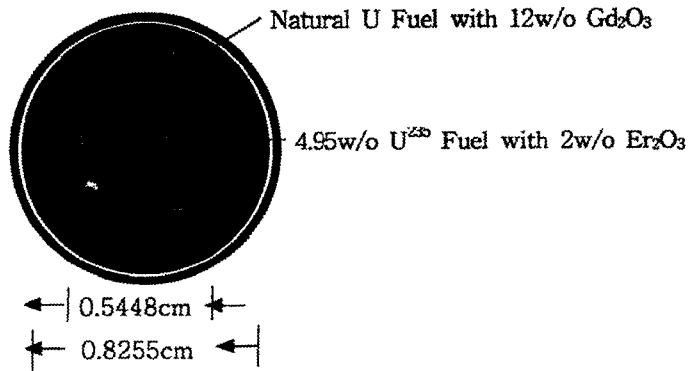
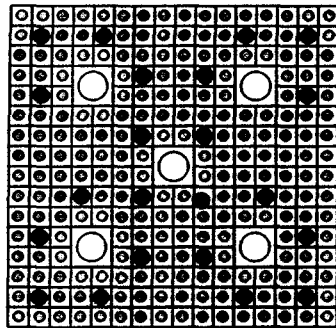


그림 2. Duplex BP configuration







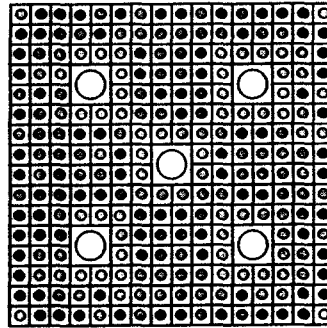
-  4.45wt% U235 Fuel Rod
-  4.95wt% U235 Fuel Rod
-  Duplex Burnable Poison Rod
-  Guide Tube

Figure 3. 24Duplex BP assembly







-  4.95wt% UO<sub>2</sub> Fuel Rod
-  4.45wt% UO<sub>2</sub> Fuel Rod with 1.4wt%Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
-  4.95wt% UO<sub>2</sub> Fuel Rod with 1.4wt%Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
-  Guide Tube

Figure 4. 140Erbia assembly

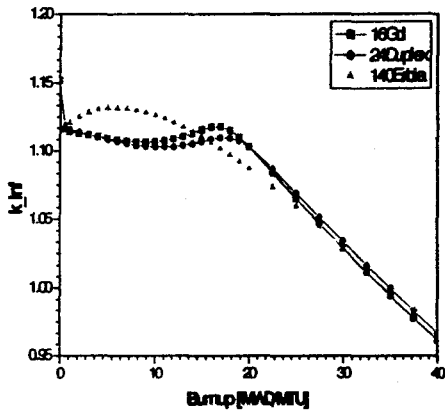


Figure 5. K-inf vs. burnup

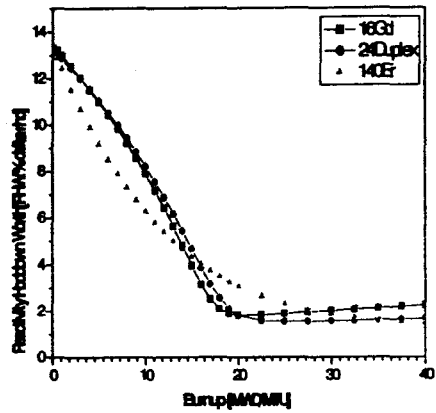


Figure 6. RHW vs. burnup



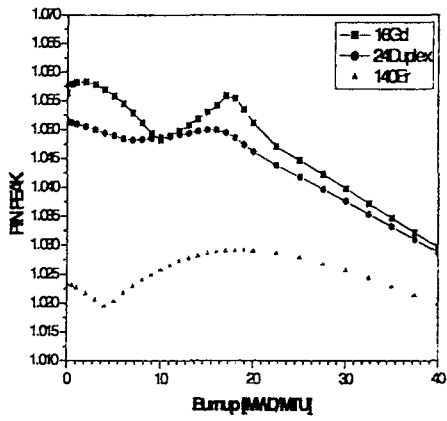


Figure 7.1 Pin peaking vs. burnup

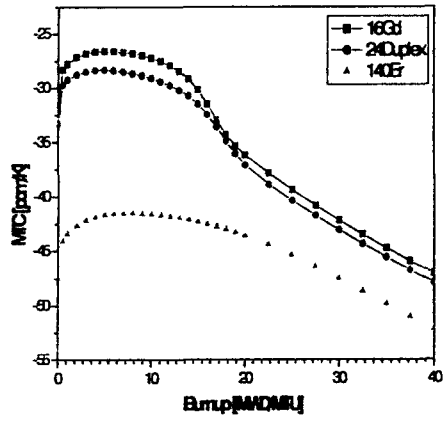


Figure 8. MTC vs. burnup