2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Dy_2O_3를 이용한 이중구조 가연성 독봉의 핵설계 특성 평가

Nuclear Design Characteristics of Duplex Burnable Poison Rods using Dy_2O_3

윤석균, 김명현
경희대학교
경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

요 약

장주기 노심의 반응도 제어 및 다양한 독봉 설계안에 대한 핵특성을 평가하기 위해 경희대학교에서 Gd_2O_3와 Er_2O_3를 이용한 이중구조 가연성독봉(Duplex BP) 연구를 수행하였다. 이 연구내용에서 도출한 최적 독봉집합체 설계안을 바탕으로 독봉 외부영역에 Dy_2O_3를 위치한 Dupelx BP(Dysprosia Duplex BP)를 설계하였다. Dysprosia Duplex BP의 성능을 평가하기 위해 Gadolinia, Erbia, IFBA 및 독봉 외부영역에 Er_2O_3를 위치한 Duplex BP(Erbia Duplex BP) 등의 가연성 독봉에 대해 핵특성을 평가하였으며, 비교대상으로는 24개월 주기용 한국표준형원자로 노심의 16개의 Gadolinia 독봉이 장전된 핵연료집합체를 선정하였다. 비교대상과 등가 반응도억제가를 갖는 Dysprosia Duplex 독봉집합체를 설계하기 위해 내심에 천연우라늄 UO_2-Gd_2O_3, 외심에 농축우라늄 UO_2-Dy_2O_3를 장전한 이중구조 가연성독봉을 이용하여 설계하였다. 또한 같은 방법으로 Erbia, IFBA, Erbia Duplex BP 독봉설계안을 이용하여 등가독봉집합체를 설계하였다. 핵특성 평가 결과, Erbia Duplex BP 보다 무한증배계수, 첨두봉출력인자, 감속재온도계수 측면에서 유리하거나 별다른 차이를 보이지 않았다. 그러나 주기말 잔존독작용 측면에서는 불리한 결과를 보였다. 감속재온도계수 측면에서 Erbia 독봉이 가장 유리하였고, 주기말 잔존 독작용 최소화에는 IFBA가 가장 유리한 결과를 보였다. 마지막으로 Duplex BP의 노심 적용성 평가를 수행하였다. 24개월 주기용 한국표준형원자로를 비교대상으로 하여 Erbia Duplex와 Dysprosia Duplex 핵연료집합체를 이용한 노심설계를 수행하였다. 노심계산은 주기길이, 첨두봉출력 그리고 감속재온도계수에 대하여 비교하였다. 노심계산 결과, 주기길이 측면에서 Gadolinia BP 노심과 Erbia Duplex BP 노심보다 단축된 주기길이를 보여 경제성 측면에서 불리한 결과를 보였지만, 타 노심에 비해 낮은 감속재온도계수와 첨두봉출력인자 결과를 보여 안전성 측면에선 유리한 결과를 보였다.

Abstract

A design option of duplex burnable poison rods using Gd_2O_3 and Er_2O_3 studied by Kyung-Hee University(KHU). A different option of duplex BP with Dy_2O_3 instead of erbia was tested and compared with four integral type burnable absorbers ; gadolinia, erbia, IFBA, erbia duplex BP. Inter-comparison was done for 24 month cycle core of Korean Standard

Nuclear Power Plant(KSNP). A dysprosia duplex BP is composed of inner region of natural UO_2-Gd_2O_3 and outer region of enriched UO_2-Dy_2O_3. It was shown that dysprosia duplex BP gave favorable k-infinity letdown curve with more flattened variation. Reactivity Holddown Worth(RHW) and Moderator Temperature Coefficient(MTC) of dysprosia duplex BP is better than gadolinia BP, but made no difference compared with erbia duplex BP. However, dysprosia did not show favorable characteristics in residual reactivity penalty. At last, nuclear core design was performed using fuel assembly contained duplex burnable poison rods. The KSNP based on 24 month fuel cycle were selected as reference core. As the result of core calculation, the calculated fuel cycle length based on 24 month fuel cycle was shorter than that of core with gadolinia BP and erbia duplex BP. But MTC and pin peaking of dysprosia duplex BP was better than the other core for the safety of core.

1. 서 론

국내 원자력발전소의 재장전 주기는 1980년대에 약 12개월이었으나, 현재는 대부분의 원전을 약 15~18개월 주기로 운전하고 있다. 최근에는 24개월 주기 이상으로 연장하는 방안을 연구하고 있다. 노심의 운전 주기를 연장시키면 발전소의 이용률이 증대되기 때문에 핵연료의 경제성이 높아진다. 이러한 장주기 노심은 모두 가연성 독봉을 많이 사용해야 한다. 가연성 독봉은 주기길이를 연장시키기 위해 핵연료 농축도를 높일 경우 주기 초에 나타나는 잉여반응도를 효과적으로 감소시켜야 한다. 동시에 노심내의 높은 첨두출력을 주기말까지 효과적으로 억제하기 위해서는 핵연료 집합체의 여러 위치에 많은 수의 독봉을 삽입해야 한다. 대부분의 가연성 독봉 내 독물질은 핵연료 연소가 진행되면서 빠른 속도로 소진되지만, 어떤 경우는 주기말까지 소진이 덜 되는 수가 있다. 독봉의 선택 조건으로 주기말의 잔존 독작용이 가능한 없도록 선택하여야 한다. 이러한 설계 목적으로 새로운 구조와 새로운 독물질로 가연성 독봉을 설계하려는 추세이다. 또한 장주기 노심의 효과적인 반응도 제어를 위해서 핵연료 펠렛(fuel pellet) 크기의 소결체를 내부와 외부로 구분하여 서로 다른 독물질을 위치시키는 이중구조 개념의 가연성독봉을 한국원자력연구소에서 제시한 바 있고, 경희대학교에서 Gd_2O_3와 Er_2O_3를 동시에 이용한 이중구조 가연성독봉의 핵설계 평가가 완료되었다.[(1)(2)]

본 연구에서는 위의 설계안을 이용하여 독봉내 외부영역에 Dy_2O_3를 위치한 이중구조 가연성 독봉의 핵특성을 평가하였다. 비교대상으로는 24개월 주기 한국표준형원자로의 16개 Gadolinia BP를 사용한 핵연료집합체를 선정하였다. 우선적으로 Gadolinia 독봉집합체와 주기초 동일한 반응도억제가를 갖도록 Erbia, IFBA, Erbia Duplex BP 그리고 Dysprosia Duplex BP가 장전된 핵연료집합체들을 설계하였다. 격자계산 코드인 HELIOS 코드를 사용하여 동일한 출력조건에서 무한증배계수, 첨두봉출력인자, 반응도억제가, 감속재온도계수를 비교하였다. 또한 Duplex BP의 노심 적용성을 평가하기 위해 24개월 주기용 한국표준형원자로 노심을 비교대상으로 선정하였다. 비교대상과 동일한 장전모형을 이용하여 등가 반응도를 갖는 Dysprosia Duplex BP 핵연료집합체와 Erbia Duplex BP 핵연료집합체를 동일한 위치에 장전하였다. 노심설계 결과로써 주기길이, 첨두봉출력인자 그리고 감속재온도계수에 대하여 비교분석하였다.

2. Dy_2O_3를 이용한 Duplex BP 및 핵연료집합체 설계

2.1 Reference Assembly

핵연료 주기별 Duplex BP의 핵설계 특성을 평가하기 위해 16개의 Gadolinia BP를 장전한 24개월 주기용 한국표준형원자로(KSNP)의 독봉집합체를 비교대상으로 선정하였다. 또한 Duplex BP의 내부 및 외부에 위치한 독물질의 양과 농축도 그리고 독봉의 장전위치에 대한 민감도분석을 통해 최적의 독봉집합체를 설계하였다. 그림 1,2는 Duplex BP의 구조 및 24개월 주기에 대한 최적 Duplex BP 핵연료집합체 구조를 나타낸 것이다.

2.2 Dysprosia Duplex BP 설계안

본 연구에서는 이중구조 가연성독봉의 외부에 위치한 독물질을 Dysprosia로 사용하였다. 이 독물질은 기존 Duplex BP에서 쓰이는 Erbia보다 중성자 흡수단면적이 크다. 따라서 Erbia에 비해 적은 양으로도 동일한 독작용 효과를 얻을 수 있고, 경제적인 측면에서도 유리하다고 판단된다. 비교분석을 위해 독봉은 Erbia Duplex BP와 동일한 구조를 사용하였고, 주기초 동일한 반응도억제가를 갖도록 Dysprosia의 농축도를 조절하였다. 핵연료집합체모형도 Erbia Duplex BP 핵연료집합체와 동일하게 이용하였다. 표 1은 Erbia Duplex BP와 등가 반응도억제가를 갖도록 설계한 Dysprosia Duplex BP의 설계제원을 나타낸 것이다.

2.3 독봉설계안별 등가 핵연료집합체 설계

비교대상인 16개 Gadolinia가 장전된 핵연료집합체와 등가인 Erbia, IFBA, Erbia Duplex BP 및 Dysprosia Duplex BP를 설계하였다. 24개월 주기 등가 독봉집합체의 장전모형은 120개의 Erbia 독봉을 장전한 독봉집합체, 136개의 IFBA 독봉을 장전한 독봉집합체, 24개의 Erbia Duplex BP 및 Dysprosia Duplex BP를 장전한 독봉집합체로 선정하였다. 각각 주기초 동일한 반응도 억제가를 갖도록 독물질의 조성을 계산하였다. 표 2는 각 독봉설계안별 독물질 조성 및 독봉개수의 제원을 나타낸 것이다. 그림 3은 각 등가 핵연료집합체 장전모형을 나타낸것이다. [3][4]

3. 주기별 독봉집합체 핵특성 비교설계

3.1. 무한증배계수 특성

그림 4는 각 독봉설계안별 연소도에 따른 무한증배계수 특성을 비교한 것이다. 비교대상인 16개 Gadolinia BP 장전 핵연료집합체의 경우 무한증배계수 감소곡선이 17~20 MWD/kg-U 사이에서 낙타 혹 모양처럼 증가하는 현상을 보인다. 이러한 현상은 Gadolinia가 핵연료보다 빠르게 연소되어 독물질의 소진 후 핵연료의 연소로 나타나는 현상으로 핵연료집합체의 반응도를 제어하는데 불리하게 작용한다. 그러나 Erbia Duplex BP 장전 핵연료집합체의 경우는 외부에 Gd_2O_3보다 비교적 연소속도가 느린 Er_2O_3를 장전시킴으로써 연소초기에 급격한 Gd_2O_3의 연소속도를 지연시켜주기 때문에 비교대상 핵연료 집합체보다 무한증배계수 감소곡선이 평탄하게 나타난다. Dyprosia Duplex BP 핵연료집합체는 Erbia Duplex BP 핵연료집합체보다 더욱 평탄한 무한증배계수 곡선을 보였다. 이는 Dy_2O_3가 Er_2O_3보다 큰 중성자 흡수단면적을 갖기 때문이다. Dysprosia Duplex BP 핵연료집합체가 무한증배계수 측면에서 타 독봉집합체보다 유리하다고 판단된다. 표 3은 주요 연소시점에서의 무한증배계수를 비교한 것이다.

3.2 첨두봉출력인자 특성

그림 5는 각 독봉설계안별 연소도에 따른 첨두봉출력인자 특성을 비교한 것이다. Erbia BP와 IFBA 핵연료집합체의 첨두봉출력인자는 나머지 핵연료집합체에 비해 낮으면서 평탄한 변화를 보였다. 이는 Gadolinila와 Duplex BP 핵연료집합체에 비해 Erbia BP 핵연료집합체는 140개, IFBA 핵연료집합체는 136개라는 다량의 가연성독봉이 핵연료집합체내에 고루 장전되어 핵연료집합체의 출력분포를 평탄하게 만들기 때문이다. 또한 Er_2O_3와 Dy_2O_3를 장전한 Duplex BP 핵연료집합체는 Gadolinia BP 핵연료집합체에 비해 낮은 첨두봉출력인자를 보였다. Erbia와 Dysprosia Duplex BP 핵연료집합체를 비교해봤을 때는 첨두봉출력인자의 차이는 없었다. 이는 Er_2O_3를 사용했을 때와 마찬가지로 Gd_2O_3에 비해 Dy_2O_3가 갖는 중성자 흡수 능력이 월등히 작기 때문에 첨두봉출력 제어에는 큰 영향을 미치지 못하기 때문이라 판단된다. 따라서 노심내 출력분포 제어측면에서는 Erbia BP 핵연료집합체가 가장 유리하다. 그러나 핵연료집합체내 다량의 가연성독봉을 장전하게 되면 제조측면에서의 경제성에서 불리하므로 Erbia BP 핵연료집합체보다 적은 개수로 설계 제한치를 만족시키는 두 Duplex BP 설계안이 보다 유리하다고 판단된다.

3.3 반응도억제가 특성

그림 6은 각 독봉설계안별 연소도에 따른 반응도억제가 특성을 비교한 것이다. Erbia BP와 IFBA 핵연료집합체의 반응도억제가는 연소초기에 급격히 감소하지만 연소말에 갈수록 IFBA가 Erbia BP 핵연료집합체보다 잔여반응도 억제가가 작게 나타났다. 또한 Dysprosia BP 핵연료집합체의 반응도억제가는 타 독봉집합체에 비해 모두 크게 나타났다. 이는 그림 7의 연소도별 Er-167과 Dy-164에 대한 수밀도 변화로 알 수 있다. Erbia Duplex BP 내부에서 외부영역에 위치하는 Er2O3에서 주요 독작용에 기여하는 Er-167의 수밀도는 주기초 Dysprosia Duplex BP 내부에서 외부영역에 Dy_2O_3에 비해 높게 나타났다. 이는 주기초 동일한 반응도 억제가를 갖게 하기 위해서 Erbia Duplex BP는 2.0 wt%를, Dyprosia Duplex BP는 1.1 wt%의 비율로 독물질을 장전하였기 때문에 이로 인한 주기초 장전량 차이에서 오는 현상이라 할 수 있다. 주기 초에 Er-167은 지수함수 형태로 Dy-164보다 급격한 감소 경향을 보이는 반면 Dy-164의 수밀도 변화는 Er-167에 비해 선형적인 곡선으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 주기말에는 Er-167의 수밀도가 거의 zero로 가는 반면 Dy-164는 완전히 소진되지 못하여 주기 말까지 계속 핵연료집합체내에 잔존하여 독작용을 하게 됨을 알 수 있다. 이로서 Erbia Duplex BP보다 Dysprosia Duplex BP가 잔존 독작용 측면에서는 불리하다 하겠다. 반응도억제가 측면에서는 IFBA를 장전한 핵연료집합체가 잔여 독작용 측면과 주기길이 측면에서 유리한 결과를 보였다.

3.4 감속재온도계수 특성

그림 8은 각 독봉설계안별 연소도에 따른 감속재온도계수 특성을 비교한 것이다. 모든 독봉집합체 설계안이 음(-)의 감속재온도계수를 보였고, Erbia BP 핵연료집합체가 가장 낮은 감속재온도계수 특성을 보였다. Gadolinia, Erbia, 두 Duplex BP 핵연료집합체에 비해 주기초 IFBA의 MTC가 가장 높게 나타났으며, 연소가 진행됨에 따라 Erbia를 제외한 4가지 독봉집합체는 17 MWD/kg-U 이후로는 비슷한 감속재온도계수 감소현상을 보였다. Dysprosia Duplex BP 핵연료집합체의 감속재온도계수는 Gadolinia BP와 Erbia Duplex BP 핵연료집합체와 큰 차이를 보이지 않았다. IFBA 핵연료집합체가 감속재온도계수 측면에서 가장 불리하게 나타났고, 0.5 eV 근방에서 높은 공명흡수단면적을 갖는 Erbia BP 핵연료집합체가 가장 유리한 결과를 보였다.

4. Duplex BP를 적용한 노심설계

4.1. Reference Core

본 연구에서는 24개월 주기 노심에 대해 Duplex BP의 적용성을 평가하기 위해 영광 3/4호기를 비교노심으로 선정하였다. 표 4는 한국표준형원자로 노심의 24개월 주기, 3배치 노심의 핵연료집합체 자료를 나타낸 것이다. 1주기 및 2주기는 12개월 주기 영광 3/4호기 노심과 마찬가지로 초기 노심에는 저농축도봉을 사용하지 않은 핵연료집합체, 52개 저 농축도봉 핵연료집합체, 100개 저농축도봉을 사용한 핵연료집합체가 혼합 사용되고 있으며 재장전 노심에 장전하는 핵연료집합체는 모두 52개 저농축도봉 핵연료집합체를 사용하고 있다. 저 농축도봉이 사용된 경우 저 농축도봉은 고 농축도봉에 비해 초기 노심에는 농축도를 1.0 wt% 낮게 하였으며 재장전 노심에는 0.5 wt% 낮게 하였다. 독물질로는 Gadolinia BP를 사용하고 있으며 1주기 및 2주기에서는 6 wt% Gd_2O_3를, 18개월과 24개월 주기 평형노심까지 모두 8 wt% Gd_2O_3를 천연우라늄 핵연료에 혼합하여 사용하였다. 3주기 이후로 5주기까지 18개월 주기 평형노심과 6주기부터 9주기까지 24개월 평형노심에 장전되는 Gadolinia BP 핵연료집합체는 각각 12개와 16개의 가연성 독봉을 사용하여 노심내 출력을 제어한다. 재장전 노심에 공급되는 핵연료집합체는 18개월은 4.5/4.0 wt%, 24개월은 4.95/4.45 wt% 핵연료집합체가 장전되었다. 비교노심의 핵연료 집합체 제원과 장전모형에 관한 자료로 한국원자력연구소 자료를 참고하였다.

4.2 Duplex BP 핵연료집합체 노심설계

Duplex BP 노심은 Erbia Duplex BP 최적 핵연료집합체를 이용하여 설계하였다. 노심 장전 모형은 비교 노심의 장전모형을 이용하여 등가 반응도를 갖는 Duplex BP 핵연료집합체를 동일한 위치에 장전하는 등가 노심설계 개념으로 수행하였다. 1주기 및 2주기에서는 6 wt% Gd_2O_3를 사용하고, 3주기 이후로 5주기까지 18개월 주기 평형노심과 6주기부터 9주기까지 24개월 평형노심에 장전되는 Duplex BP 핵연료집합체는 각각 16개와 24개의 가연성독봉을 사용하였다. 재장전 노심에 공급되는 핵연료집합체는 한국표준형원자로와 동일하게 18개월은 4.5/4.0 wt%, 24개월은 4.95/4.45 wt% 핵연료집합체를 장전하였다. 그림 9는 24개월 주기 평형노심의 장전모형을 나타낸 것이다. 노심설계는 HELIOS-MASTER 전산체계를 이용하여 수행하였다.[(5)(6)]

5. 노심계산 결과

5.1. 주기길이

주기길이 측면에서 비교대상인 Gadolinia BP 노심에 비해 Erbia Duplex BP 노심은 7일 정도 주기길이가 연장되었지만, Dysprosia Duplex BP 노심은 12일 단축된 결과를 보였다. 표 5는 24개월 주기, 3배치 노심의 평형주기에 대한 Gadolinia BP와 두 Duplex BP 핵연료집합체를 장전한 노심의 주기길이를 비교한 것이다. 1주기와 2주기에는 3가지 노심 모두 동일하게 12개월 주기를 만족하는 Gadolinia 독봉집합체를 사용하여 주기길이가 동일하다. 그러나 3주기부터 서로 다른 가연성 독봉을 사용하게 되므로 이후 주기길이에는 변화가 있었다. 24개월 노형으로 설계한 3가지 노심 모두 24개월 주기에 대하여 9주기에서 평형노심을 이루었는데, Gadolinia BP 노심의 경우 598일, Erbia Duplex BP를 이용한 노심의 경우 604일, Dysprosia Duplex BP를 이용한 노심의 경우 585

일의 주기길이를 보였다. Dysprosia Duplex BP 노심의 주기길이가 비교노심보다 단축된 이유는 핵특성평가에서 보여졌듯이 주기말 큰 잔존독작용에 의해 나타난 결과라 판단된다. 결론적으로 주기길이 측면에서는 Erbia Duplex BP 노심이 유리하다 할 수 있다.

5.2 첨두봉출력

노심내 첨두봉출력인자는 핵설계에서 중요한 설계 제한치 중 하나이다. 24개월 주기 한국표준형 원자로의 반경방향 첨두봉출력 허용치는 1.55이다. 그림 10, 11은 주기별 노심의 반경방향 출력분포를 나타낸 것이다. Erbia Duplex BP 노심은 1.3206, Dysprosia Duplex BP 노심은 1.3016으로 모두 설계허용치를 만족하였다. 노심내 첨두봉출력인자 측면에서는 핵연료집합체의 핵특성 계산결과와 동일하게 반경방향 첨두봉출력(Fr)은 대체적으로 Gadolinia BP 노심보다 낮은 첨두봉출력인자 변화를 보였다. 그림 12은 연소에 따른 평형노심에서의 Fr을 나타낸 것이다. 두 Duplex BP 노심의 첨두봉출력인자 변화를 비교해 보면, 두 노심의 최대 첨두봉출력인자값을 보이는 13 MWD/kg-U 근방에서 Dysprosia Duplex BP 노심이 Erbia Duplex BP보다 더 낮은 첨두봉출력인자 변화를 보였다. 이는 Erbia 보다 Dysprosia가 큰 중성자 흡수 단면적을 갖고 있기 때문이라 판단된다. 그림 13는 축방향 첨두봉출력인자를 비교한 것인데 반경방향 첨두봉출력인자와 같은 경향을 보였다. 표 6은 주요 연소시점에서의 반경방향 첨두봉출력인자를 비교한 것이다. 연소중 최대 첨두봉출력인자를 비교해 보면 Gaodlinia BP 노심에 비해 Erbia Duplex BP 노심은 1.9 %, Dysprosia Duplex BP 노심은 3.3 % 정도 낮은 첨두봉출력값을 보였다. 결론적으로 Gadolinia BP 노심과 Erbia Duplex BP 노심보다 Dysprosia Duplex BP 노심이 안전성 측면에서 유리하다고 판단된다.

5.3 감속재온도계수

표 7은 주요연소시점에서의 감속재온도계수를 나타낸 것이다. 24개월 주기에 대해 세 노심 모두 음의 감속재온도계수를 보였으며, 그림 14에서와 같이 연소도별 임계붕산농도 변화는 Gadolinia BP 노심과 Erbia Duplex BP 노심은 비슷한 감소곡선을 보였지만, Dysprosia Duplex BP 노심은 전 구간에 걸쳐 타 노심에 비해 낮은 임계붕산농도를 보였다. 이 또한 Dysprosia에 의한 큰 독작용 효과라 판단된다. Boron 사용 감소로 인한 감속재온도 측면에서는 Dypsprosia Duplex BP 노심이 가장 유리한 결과를 보였다.

6. 결 론

현재 상업운전중인 한국표준형원자로에 사용되는 Gadolinia BP 핵연료집합체를 비교대상으로 선정하여 Erbia, IFBA, Erbia Duplex BP, Dysprosia Duple BP 핵연료집합체에 대해 핵특성을 비교하였다. 핵특성을 비교한 결과 Dysprosia Duplex BP 핵연료집합체가 무한증배계수 감소곡선을 평탄하게 하는 측면에서 가장 유리하였다. 핵연료집합체내 첨두봉출력 제어에 있어서는 Erbia BP 핵연료집합체가 가장 유리하게 나타났지만, 한국 표준형원자로에 사용되는 Gadolinia BP 핵연료집합체보다는 Dysprosia와 Erbia Duplex BP 핵연료집합체가 더 유리한 첨두봉 제어능력을 보였다. 감속재온도계수 측면에서는 Erbia BP 핵연료집합체가 가장 낮은 감속재온도계수를 보인 반면, IFBA 핵연료집합체는 가장 높은 감속재온도계수를 보여 장주기 노심에서의 안전성 측면에서 불리하게 나타났다. Dysprosia Duplex BP 핵연료집합체는 Gadolinia BP와 Erbia Duplex BP 핵연료

집합체와 비교해 볼 때 큰 차이를 보이지 않았다. 반응도억제가 측면에서는 IFBA 핵연료집합체가 가장 낮은 잔존독작용 효과를 보여, 주기길이 측면에서 유리하게 나타났고, Dysprosia Duplex BP 핵연료집합체가 가장 불리하게 나타났다. Dysprosia Duplex BP를 노심에 적용한 결과로 주기길이 측면에선 Gadolinia BP 및 Erbia Duplex BP 노심에 비해 12일과 19일 단축된 결과를 보여 노심 운용 및 경제성 측면에서 이득을 보지 못하였다. 하지만 타 노심에 비해 전 연소구간에 걸쳐 낮은 임계붕산농도와 첨두봉출력인자를 보여 안전성 측면에선 유리한 결과를 보였다.

참고문헌

1. 경수로형 신형핵연료 개발 ; 소결체재료신기술개발 보고서, KAERI/RR-2023/99, pp37-38. 한국원자력연구소, (2000)
2. 이대진, “이중구조 가연성 독봉의 핵설계 특성 평가,” 경희대학교 석사학위 논문, (2003).
3. 차세대원자로기술개발 최종보고서 ; 노심특성 개량연구 및 노심 핵설계 평가(Vol. 2.2), TR.95ZJ16.J1999.115, (1999)
4.. 영광 3/4호기 장주기 운전 타당성 연구 : 제3분기 보고서, KAERI/CR-021/96
5. R. Stammler et. al., "User's Manual for HELIOS" Scanpower, (1994).
6. B. O. Cho et al., "MASTER-2.0; Multi-purpose Analyzer for Static and Transient Effects of Reactors," KAERI/TR-1211/99, Korea Atomic Energy Reasearch Institute, (1999).

표 1. 24개월 주기용 Dysprosia Duplex BP 설계제원

Item	Parameter
Inner Fuel Rod Material	Natural UO_2 + 12 wt% Gd_2O_3
Outer Fuel Rod Material	4.95 wt% UO_2 + 1.1 wt Dy_2O_3
Inner Fuel Rod Diameter (cm)	0.5448
Outer Fuel Rod Diameter (cm)	0.8255
Cladding Outer Diameter (cm)	0.9721
Outer Annulus Thickness	0.2807/2
핵연료집합체당 수	24

표 2. 각 독봉설계안별 독물질 조성 및 독봉개수

	독물질 조성	핵연료집합체당 수
Gadolinia	8 wt% Gd_2O_3	16 개
Erbia	ZrB_2 (0.00125 cm 두께로 도포)	136 개
IFBA	1.4 wt% Er_2O_3	140 개
Erbia Duplex BP	12 wt% Gd_2O_3 _ 2 wt% Er_2O_3	24 개
Dysprosia Duplex BP	12 wt% Gd_2O_3 _ 1.1 wt% Dy_2O_3	24 개

표 3. 주요 연소시점에서의 무한증배계수

	16 Gadolinia	Erbia Duplex BP	136 IFBA	140 Erbia	Dysprosia Duplex BP
연소초(No.Xe)	1.1527	1.1522	1.1525	1.1569	1.1527
연소중 최대값	1.1205	1.1115	1.1677	1.1359	1.0968

표 4. 한국표준형원자로 노심의 24개월 주기, 3배치 핵연료집합체 제원

Assembly Type	UO_2 wt%	# of Rods	Burnable Absorbers			Cycle
	Normal/Low	Normal/Low	Material	wt%	# of BA's	Used
A	1.40	236				1
B	2.87/2.37	184/52				1
B1	2.87/2.37	176/52	Gd	6.0	8	1
C	3.37/2.87	184/52				1
C1	3.37/2.87	128/100	Gd	6.0	8	1
D	4.00/3.50	184/52				2
D1	4.00/3.50	176/52	Gd	8.0	8	2
D2	4.00/3.50	172/52	Gd	8.0	12	2
D3	4.00/3.50	124/100	Gd	8.0	12	2
E, F, G	4.50/4.00	184/52				3,4,5
E1,F1,G1	4.50/4.00	172/52	Gd	8.0	12	3,4,5
E3,F2,G2	4.50/4.00	168/52	Gd	8.0	16	3,4,5
H, I, J, K	4.95/4.45	184/52				6,7,8,9
H1,I1,J1,K1	4.95/4.45	172/52	Gd	8.0	12	6,7,8,9
H2,I2,J2,K2	4.95/4.45	168/52	Gd	8.0	16	6,7,8,9

표 5. 24개월 주기 3배치 Gadolinia BP와 두 Duplex BP 노심의 주기길이 비교

주기	Gadolinia BP Core		Duplex BP Core			
			12wt%_Gd_2O_3 2wt%_Er_2O_3		12wt%_Gd_2O_3 1.1wt%_Dy_2O_3	
	EFPD	MWD/kg-U	EFPD	MWD/kg-U	EFPD	MWD/kg-U
1	352.98	13.0185	352.98	13.0185	352.98	13.0185
2	339.13	12.5197	339.13	12.5197	339.13	12.5197
3	394.56	14.5755	395.61	14.6194	374.46	13.8367
4	428.87	15.8538	431.83	15.9741	420.57	15.5550
5	433.60	16.0326	434.92	16.0942	422.93	15.6480
6	591.86	21.8866	596.88	22.0922	580.96	21.4961
7	598.54	22.1439	605.15	22.4114	585.26	21.6652
8	597.77	22.1198	604.46	22.3903	585.55	21.6804
9	597.81	22.1209	604.48	22.3909	585.08	21.6627

표 6. 주요 연소시점에서의 반경방향 첨두봉출력인자

	24 month fuel cycle		
	Gadolinia BP Core	Erbia Duplex BP Core	Dysprosia Duplex BP Core
연소초	1.2870	1.2828	1.2915
연소중 최대값	1.3464	1.3206	1.3016

표 7. 주요연소시점에서의 감속재온도계수

	24 month fuel cycle		
	Gadolinia BP Core	Duplex BP Core (Gd12_Er2)	Duplex BP Core (Gd12_Dy1.1)
No.Xe. BOC	2.53 pcm/℃	2.04 pcm/℃	2.00 pcm/℃
Eq.Xe BOC	-17.27 pcm/℃	-17.87 pcm/℃	-17.96 pcm/℃
Eq.Xe EOC	-72.85 pcm/℃	-73.36 pcm/℃	-73.32 pcm/℃

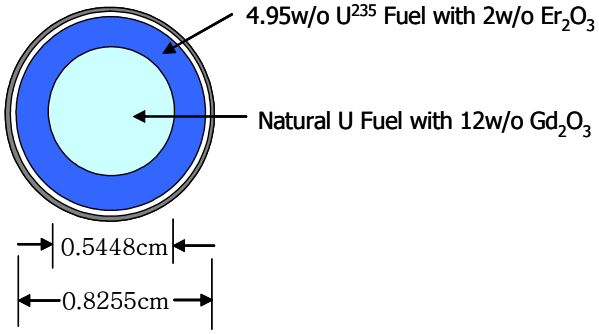


그림 1. Duplex BP의 구조

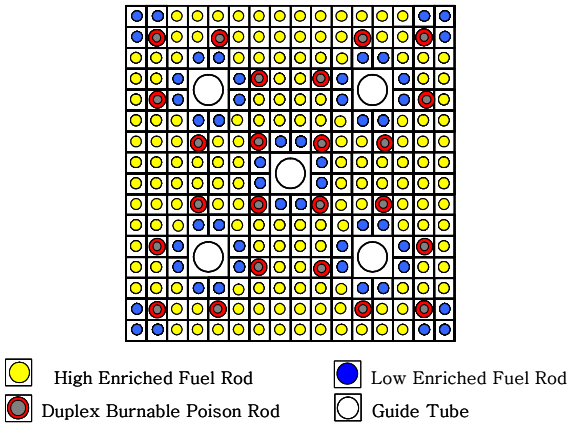
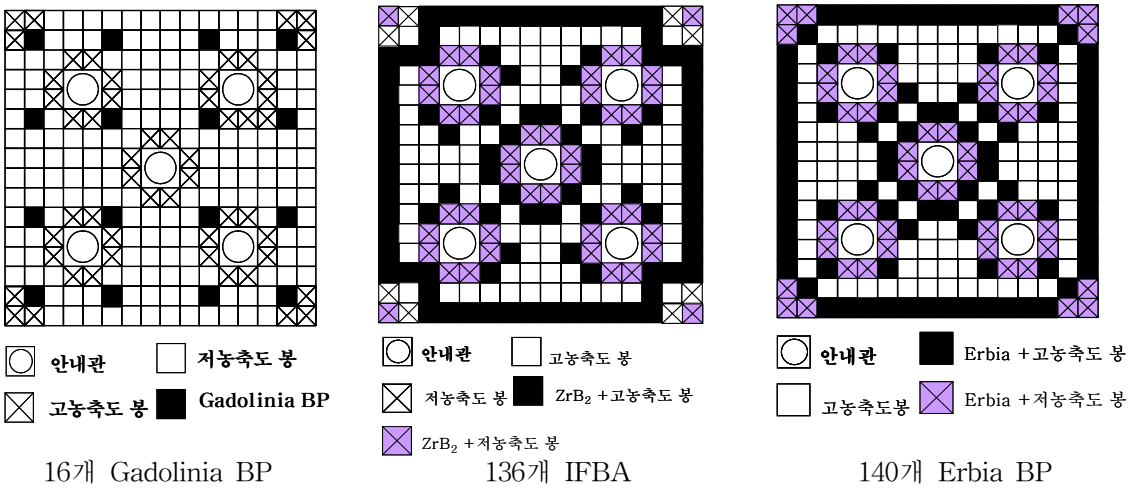


그림 2. 24개월 주기 최적 Duplex BP
핵연료 집합체 구조



16개 Gadolinia BP　　136개 IFBA　　140개 Erbia BP

그림 3. 각 등가 핵연료집합체 장전모형

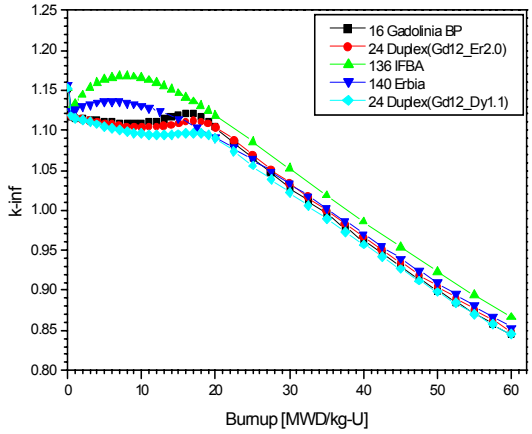


그림 4. 각 독봉설계안별 연소도에 따른 무한증배계수 특성

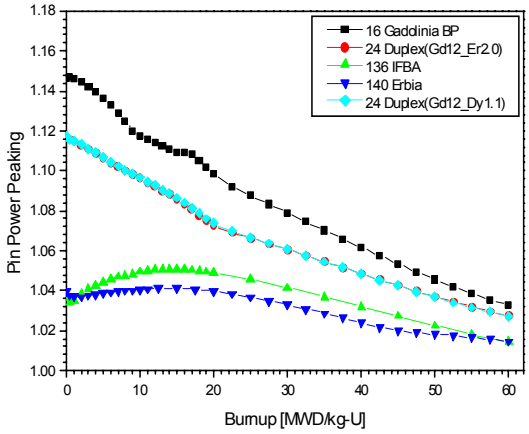


그림 5. 각 독봉설계안별 연소도에 따른 첨두출력인자 특성

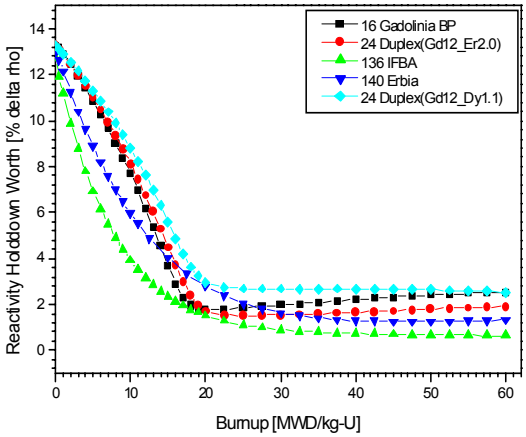


그림 6. 각 독봉설계안별 연소도에 따른 반응도억제가 특성

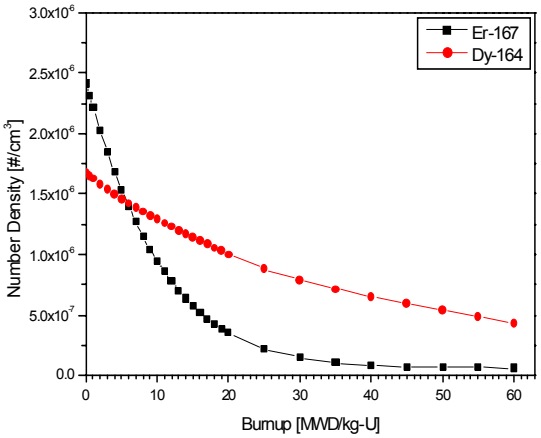


그림 7. 연소도별 Er-167, Dy-164의 수밀도 변화

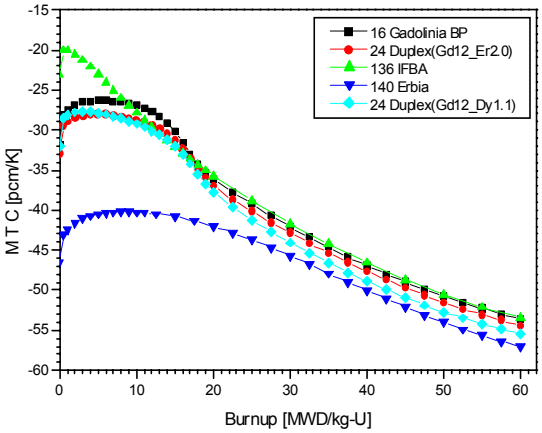


그림 8. 각 독봉설계안별 연소도에 따른 감속재온도계수 특성

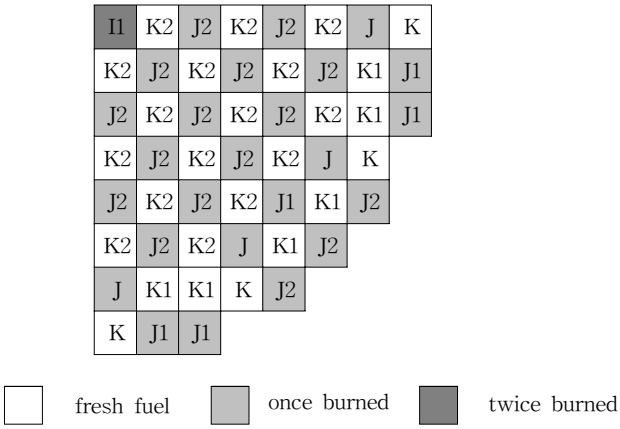


그림 9. 24개월 주기 평형노심의 장전모형

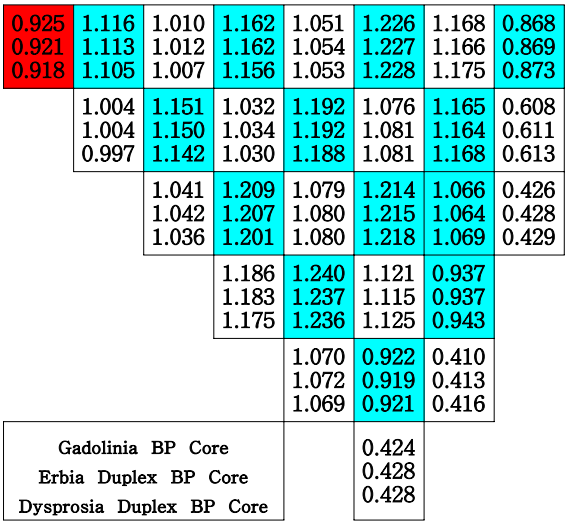


그림 10. 주기별 노심의 반경방향 출력분포(주기초)

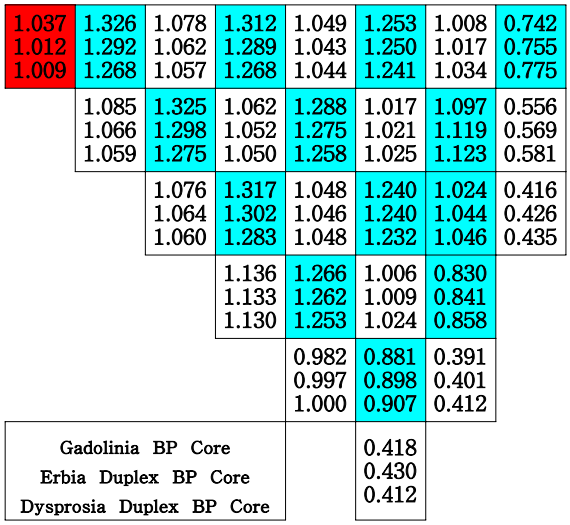


그림 11. 주기별 노심의 반경방향 출력분포(최대값)

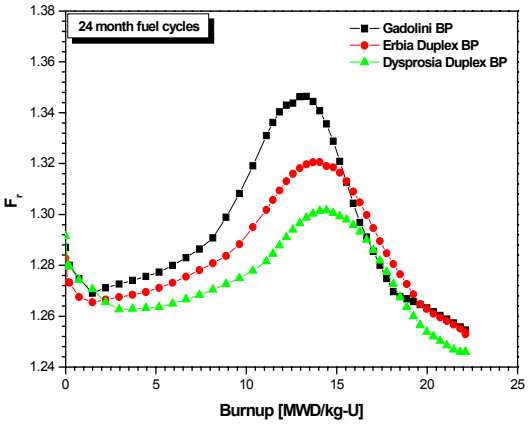


그림 12. 연소도에 따른 평형노심에서의 Fr

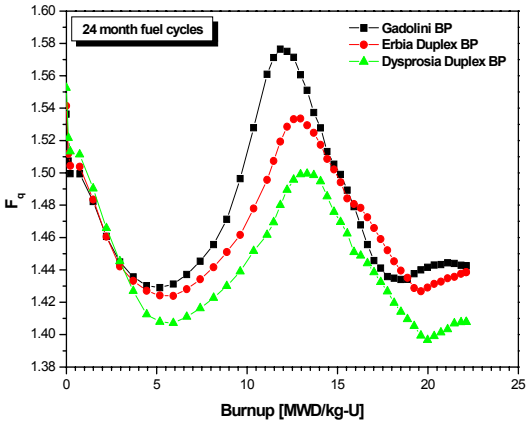


그림 13. 연소도에 따른 평형노심에서의 Fq

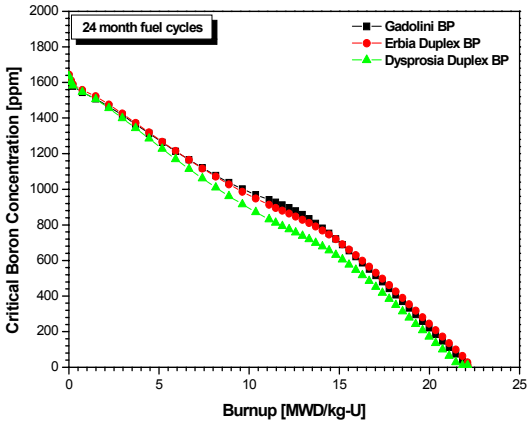


그림 14. 연소도에 따른 임계붕산농도 변화