



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2020년06월18일
(11) 등록번호 10-2124517
(24) 등록일자 2020년06월12일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G21C 3/60 (2006.01) C22C 43/00 (2006.01)
G21C 5/02 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G21C 3/60 (2013.01)
C22C 43/00 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2018-0004969
(22) 출원일자 2018년01월15일
심사청구일자 2018년01월15일
(65) 공개번호 10-2019-0086885
(43) 공개일자 2019년07월24일
(56) 선행기술조사문헌
KR101717942 B1*
KR101694409 B1*
KR1020120123098 A*
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
세종대학교산학협력단
서울특별시 광진구 능동로 209 (군자동, 세종대학교)
(72) 발명자
박창제
서울특별시 노원구 한글비석로 91, 108동 405호(하계동, 하계1차청구아파트)
최홍엽
서울특별시 광진구 능동로32길 82-32(능동)
무스 보라비
서울특별시 광진구 능동로21길 22, B01 (군자동)
(74) 대리인
유병욱, 한승범

전체 청구항 수 : 총 4 항

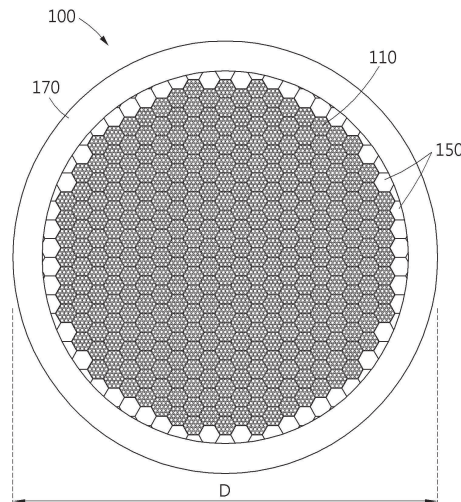
심사관 : 이용호

(54) 발명의 명칭 **금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심 및 이를 구비한 원자로**

(57) 요약

본 발명의 일 실시예에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심은, 핵분열 연쇄반응이 일어나기 위한 복수의 핵연료체를 포함하는 핵연료 집합체; 상기 핵연료 집합체의 사이에 배치되어 상기 핵분열 연쇄반응에 의해 방출된 에너지를 흡수하는 냉각재; 및 상기 핵연료 집합체를 둘러싸도록 배치되며 상기 핵연료 집합체로부터 발생하는 중성자의 외부 누출을 저감시키는 반사체를 포함하며, 상기 핵연료체는 토륨 및 우라늄 금속, 지르코늄 합금 및 중성자 에너지 영역 천이 첨가제를 포함하는 육각형 기둥으로 형성되고, 상기 토륨은 Th-232이며, 상기 우라늄은 상기 토륨 주기의 비증식 저항성을 보장하기 위해 U-233으로 마련될 수 있다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류
G21C 5/02 (2013.01)

공지예외적용 : 있음

명세서

청구범위

청구항 1

금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심에 있어서,

핵분열 연쇄반응이 일어나기 위한 복수의 핵연료체를 포함하는 핵연료 집합체;

상기 핵연료 집합체의 사이에 배치되어 상기 핵분열 연쇄반응에 의해 방출된 에너지를 흡수하는 냉각재; 및

상기 핵연료 집합체를 둘러싸도록 배치되며 상기 핵연료 집합체로부터 발생하는 중성자의 외부 누출을 저감시키는 반사체;를 포함하며,

상기 핵연료체는 토륨 및 우라늄 금속, 지르코늄 합금 및 중성자 에너지 영역 천이 첨가제를 포함하는 육각형 기둥으로 형성되고,

상기 토륨은 Th-232이며, 상기 우라늄은 상기 토륨 주기의 비증식 저항성을 보장하기 위해 원자가 233의 U-233만으로 마련되며,

상기 핵연료체는 90 중량%의 상기 토륨(Th)-232 및 우라늄(U)-233 금속과 10 중량%의 상기 지르코늄 합금을 포함하고,

상기 중성자 에너지 영역 천이 첨가제는 상기 핵연료체의 0.1중량% 내지 0.7중량%의 수소로 마련되며, 상기 핵연료체에 추가되는 상기 중성자 에너지 영역 천이 첨가제인 수소가 0.1중량%에서 0.7중량%로 증가함에 따라 유효증배계수(Keff)가 1.23505에서부터 1.59724까지 증가하고 중성자 에너지 스펙트럼이 열중성자 에너지 영역에서 열외 중성자 에너지 영역으로 이동하며,

열외중성자로 노심을 구비한 원자로가 임계 상태에 있도록 상기 토륨(Th)-232 및 우라늄(U)-233 금속에 대한 상기 우라늄(U)-233의 비는 1.4 보다 크고 1.6 보다 작은 것을 특징으로 하는 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 핵연료체에 수소가 추가됨에 따라 핵분열 반응에 의해 생성되는 고속 중성자의 에너지가 감속되고, 감속된 에너지를 이용하여 상기 토륨(Th)-232의 상기 우라늄(U)-233으로의 변환이 촉진되는 것을 특징으로 하는 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 냉각재는 납-비스무트로 마련되고, 상기 반사체는 흑연 반사체로 마련되는 것을 특징으로 하는 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심.

청구항 4

삭제

청구항 5

삭제

청구항 6

삭제

청구항 7

삭제

청구항 8

제1항 내지 제3항 중 어느 한 항에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심을 구비한 원자로.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심 및 이를 구비한 원자로에 관한 것으로, 보다 상세하게는 토륨의 우라늄(U)-233화를 가속화할 수 있는 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심 및 이를 구비한 원자로에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 원자로(Nuclear Reactor)는 핵분열성 물질의 연쇄 핵분열 반응을 인공적으로 제어하여 열을 발생시키거나 방사성 동위원소 및 플루토늄 생산 등 여러 목적에 사용할 수 있도록 만들어진 장치를 의미한다.

[0003] 일반적으로 원자로에서 사용되는 핵연료로 가공하기 위해서 농축 우라늄을 원통형 펠릿(pellet)으로 만드는 성형 가공을 한 후, 이 펠릿들을 다발 형태로 묶어 일련의 과정을 거쳐 연료봉을 제조한다. 상기 연료봉은 핵연료 집합체를 구성하며, 원자로 내에서 핵반응을 통해 연소하게 된다.

[0004] 상기 핵연료 집합체는 상기 연료봉을 다양한 형태의 격자상으로 조립하여 제조할 수 있으며, 봉형 핵연료 외에 관형 핵연료 등 다양한 형상의 핵연료로 제조될 수 있다.

[0005] 최근 들어, 우라늄 원자로의 단점이 부각되면서 원자력 발전의 안정성에 대한 관심이 높아지고 있으며, 기존의 우라늄 원전의 대안으로서 토륨 원자로가 주목을 받고 있다.

[0006] 토륨 원자로는 핵연료로 우라늄 대신 토륨을 사용하는데, 토륨은 지구상에서 납 보다 흔한 금속이며 매장량이 풍부하고 우라늄처럼 복잡한 가공처리 과정을 거칠 필요가 없어 차세대 원자력 시스템의 주요 연료 원천물질로 관심을 받고 있다.

[0007] 특히, 토륨은 분열 과정에서 발생하는 중성자 수가 부족하여 외부에서 중성자를 공급해 주어야 핵분열이 일어나며, 중성자 공급을 중단하면 핵분열도 멈추기 때문에 안전성이 보장되는 장점이 있다.

[0008] 핵 연료성 물질(fertile)인 토륨(Th)-232는 중성자를 흡수하여 핵 분열성 물질(fissile)인 우라늄(U)-233으로 변환되고, 풍부한 매장량, 저렴한 가격, 플루토늄의 생성유무 등 다양한 장점으로 인하여 차세대 원자력시스템의 주요 연료 원천물질로 관심을 받고 있다.

[0009] 한편, 원자로는 이용하는 중성자의 에너지 영역에 따라 약 100 KeV 이상의 고속중성자를 이용하는 고속로(fast reactor)형 원자로와 약 1 eV 이하의 열중성자를 주로 이용하는 열중성자로(thermal reactor)형 원자로로 분류될 수 있다. 대부분의 토륨 핵연료를 사용하는 원자로의 경우, 대단위 규모의 나트륨 냉각제를 사용한 고속 원자로 개념을 활용하여 설계되어 왔다.

[0010] 그러나, 고속 원자로의 경우, 규모 및 경비 면에서 쉽게 접근하기 힘들며 사고가 발생하였을 때 냉각제인 나트륨에 인한 2차 사고가 발생할 수 있다는 문제가 있다.

[0011] 본 출원인은, 상기와 같은 문제점을 해결하기 위하여, 본 발명을 제안하게 되었다.

선행기술문헌

특허문헌

[0012] (특허문헌 0001) 한국등록특허공보 제10-1221569호(2013.01.14.)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0013] 본 발명은 상기와 같은 문제점을 해결하기 위하여 제안된 것으로, 종래의 토륨 고속로 개념을 소형화 및 안전성이 확보될 수 있도록 금속핵연료 기반 토륨 육각핵연료집합체에 적용하는 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심 및 이를 구비한 원자로를 제공한다.

과제의 해결 수단

[0014] 상기한 바와 같은 과제를 달성하기 위한 본 발명의 일 실시예에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심은, 핵분열 연쇄반응이 일어나기 위한 복수의 핵연료체를 포함하는 핵연료 집합체; 상기 핵연료 집합체의 사이에 배치되어 상기 핵분열 연쇄반응에 의해 방출된 에너지를 흡수하는 냉각재; 및 상기 핵연료 집합체를 둘러싸도록 배치되며 상기 핵연료 집합체로부터 발생하는 중성자의 외부 누출을 저감시키는 반사체;를 포함하며, 상기 핵연료체는 토륨 및 우라늄 금속, 지르코늄 합금 및 중성자 에너지 영역 천이 첨가제를 포함하는 육각형 기둥으로 형성되고, 상기 토륨은 Th-232이며, 상기 우라늄은 상기 토륨 주기의 비증식 저항성을 보장하기 위해 U-233으로 마련될 수 있다.

[0015] 상기 핵연료체는, 90 중량%의 토륨 및 우라늄 금속과 10 중량%의 지르코늄 합금을 포함할 수 있다.

[0016] 상기 중성자 에너지 영역 천이 첨가제는, 중성자의 에너지 영역이 열중성자 에너지 영역에서 열외 중성자 에너지 영역으로 이동되게 할 수 있다.

[0017] 상기 중성자 에너지 영역 천이 첨가제는 0.1중량% 내지 0.7중량%의 수소로 마련될 수 있다.

[0018] 상기 중성자 에너지 영역 천이 첨가제가 첨가됨에 따라 유효증배계수(Keff)는 1.2 내지 1.6의 값을 가질 수 있다.

[0019] 상기 토륨(Th)-232 및 우라늄(U)-233 합금에 대한 우라늄(U)-233의 비는 1.3 보다 크고 1.6 보다 작을 수 있다.

[0020] 상기 중성자 에너지 영역 천이 첨가제는 붕소(Boron) 또는 중수(D₂O)로 마련될 수 있다.

[0021] 또한, 본 발명은 상술한 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심을 구비한 원자로를 제공할 수 있다.

발명의 효과

[0022] 본 발명에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심 및 이를 구비한 원자로는 원자로 내부의 핵분열에 의해 생성되는 고속중성자가 수소 수화물에 의해서 에너지가 감속되며 이러한 감속된 에너지를 이용하여 토륨(Th)-232의 우라늄(U)-233으로의 변환을 촉진시킬 수 있다.

[0023] 본 발명에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심 및 이를 구비한 원자로는 나트륨 냉각재가 아닌 납-비스무트 냉각재를 사용하기 때문에 원자로의 안전성을 증진시킬 수 있다.

[0024] 본 발명에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심 및 이를 구비한 원자로는 흑연 반사체를 구비하기 때문에 누설되는 중성자를 핵분열에 다시 활용할 수 있다.

[0025] 본 발명에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심 및 이를 구비한 원자로는 토륨 육각 핵연료 집합체의 개수를 조정하여 노심의 임계도 조정 및 노심의 연소 주기를 연장할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0026] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심을 나타내는 도면이다.

도 2는 도 1에 도시한 열외중성자로 노심에 마련된 핵연료 집합체를 나타내는 도면이다.

도 3은 도 2에 도시한 핵연료 집합체를 구성하는 핵연료체를 나타내는 도면이다.

도 4 및 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심에 있어서 중성자 에너지

영역 천이 첨가제에 따른 중성자 에너지 스펙트럼을 나타내는 실험 그래프이다.

도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심에 있어서 중성자 에너지 영역 천이 첨가제의 유무에 따른 유효증배계수를 보여주는 실험 그래프이다.

도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심에 있어서 토륨 및 우라늄의 조성비에 따른 유효증배계수를 나타내는 실험 그래프이다.

도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심에 있어서 중성자 에너지 영역 천이 첨가제의 변형예에 따른 중성자 에너지 스펙트럼을 나타내는 실험 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0027] 이하에서, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명에 따른 실시예들을 상세하게 설명한다. 그러나, 본 발명이 실시예들에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다. 각 도면에 제시된 동일한 참조 부호는 동일한 부재를 나타낸다.
- [0028] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심을 나타내는 도면, 도 2는 도 1에 도시한 열외중성자로 노심에 마련된 핵연료 집합체를 나타내는 도면, 도 3은 도 2에 도시한 핵연료 집합체를 구성하는 핵연료체를 나타내는 도면, 도 4 및 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심에 있어서 중성자 에너지 영역 천이 첨가제에 따른 중성자 에너지 스펙트럼을 나타내는 실험 그래프, 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심에 있어서 중성자 에너지 영역 천이 첨가제의 유무에 따른 유효증배계수를 보여주는 실험 그래프, 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심에 있어서 토륨 및 우라늄의 조성비에 따른 유효증배계수를 나타내는 실험 그래프, 도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심에 있어서 중성자 에너지 영역 천이 첨가제의 변형예에 따른 중성자 에너지 스펙트럼을 나타내는 실험 그래프이다.
- [0029] 도 1 내지 도 3에 도시된 바와 같이, 본 발명의 일 실시예에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심(100)은, 핵분열 연쇄반응이 일어나기 위한 복수의 핵연료체(120)를 포함하는 핵연료 집합체(110); 핵연료 집합체(110)의 사이에 배치되어 상기 핵분열 연쇄반응에 의해 방출된 에너지를 흡수하는 냉각재(150); 및 핵연료 집합체(110)를 둘러싸도록 배치되며 핵연료 집합체(110)로부터 발생하는 중성자의 외부 누출을 저감시키는 반사체(170)를 포함할 수 있다.
- [0030] 본 발명의 일 실시예에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심(100)은 쇄빙선(Icebreaker ship)에 적용될 수 있고, 임계 원자로 뿐만 아니라 미임계 원자로에도 적용될 수 있다.
- [0031] 핵연료 집합체(110) 및 핵연료 집합체(110)를 구성하는 복수개의 핵연료체(120)는 육각형 기둥 형태로 형성되는 것이 바람직하다. 핵연료 집합체(110)는 19개의 핵연료체(120)를 포함할 수 있다. 즉, 19개의 핵연료체(120)를 육각형 모양으로 배치함으로써 1개의 핵연료 집합체(110)가 형성될 수 있다.
- [0032] 여기서, 핵연료체(120)는, 토륨(Th)-232 및 우라늄(U)-233 금속, 그리고 지르코늄(Zr) 합금을 포함하는 금속핵연료(ThUZr)이다. 도 3을 참조하면, 핵연료체(120)는 원기둥 형상으로 마련되고, 핵연료체(120)를 둘러싸는 피복재(130)가 마련될 수 있다. 피복재(130)는 스테인리스 스틸 피복재(Stainless steel cladding)로 마련되는 것이 바람직하다. 피복재(130)의 외측에는 납-비스무트(Pb-Bi) 냉각재(140)가 마련될 수 있다.
- [0033] 핵연료체(120)를 둘러싸는 냉각재(140) 뿐만 아니라 핵연료 집합체(110)의 사이에 배치되거나 핵연료 집합체(110)와 반사체(170) 사이에 마련되는 냉각재(150)도 납-비스무트 냉각재로 마련될 수 있다.
- [0034] 본 발명의 일 실시예에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심(100)은, 냉각재(140,150)로 나트륨 또는 소듐(Sodium) 대신 납-비스무트를 사용하기 때문에 나트륨 또는 소듐이 물과 반응하여 화재가 발생하는 2차 사고를 방지할 수 있고, 결과적으로 원자로의 안전성을 증진시킬 수 있다. 액체 소듐 냉각재에 비해서 납-비스무트 냉각재가 물과 반응하지 않는 저항성이 커 원자로의 안전성을 높일 수 있다.
- [0035] 핵연료 집합체(110)를 둘러싸도록 배치되며 핵연료 집합체(110)로부터 발생하는 중성자의 외부 누출을 저감시키는 반사체(170)는 흑연 반사체가 사용될 수 있다.
- [0036] 본 발명의 일 실시예에 따른 열외중성자로 노심(100)은 439개의 핵연료 집합체(110)를 포함하며, 각각의 핵연료 집합체(110)는 19개의 핵연료체(120)를 포함할 수 있다. 이와 같이 형성된 열외중성자로 노심(100)을 구비한 원자로는 100 MWt/h의 출력을 낼 수 있다.

- [0037] 열외중성자로 노심(100)의 직경(D)은 152~161 센티미터(cm)이고, 핵연료 집합체(110)의 크기는 1.4 센티미터(cm)인 것이 바람직하지만 반드시 이에 한정되는 것은 아니다. 요구되는 원자로의 출력 등에 따라서 노심의 직경 또는 핵연료 집합체의 크기는 달라질 수 있다.
- [0038] 한편, 본 발명에 따른 열외중성자로 노심(100)의 핵연료체(120)는 토륨(Th)-232 금속을 포함하기 때문에, 중성자 에너지 영역이 고속 중성자 스펙트럼에서 열외 중성자 스펙트럼 영역으로 천이되는 장점이 있다.
- [0039] 상기에서 언급한 바와 같이, 핵연료체(120) 및 핵연료 집합체(110)는 모두 육각형 모양으로 형성되며, 핵연료체(120)를 형성하는 우라늄은 토륨 주기(Thorium cycle)의 비증식 저항성을 보장하기 위해 원자가 233의 우라늄(U-233)으로만 마련될 수 있다.
- [0040] 여기서, 토륨(Th)-232 및 우라늄(U)-233 금속은 90 중량%이고 지르코늄 합금(Zr alloy)은 10 중량%의 조성으로 마련될 수 있다.
- [0041] 한편, 본 발명의 일 실시예에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심(100)에 사용되는 핵연료체(120)는 중성자 에너지 영역 천이 첨가제를 포함할 수 있다.
- [0042] 상기 중성자 에너지 영역 천이 첨가제는 불순물의 일종으로서 부드러운 중성자 에너지 스펙트럼을 얻기 위해서 핵연료체(120)에 첨가될 수 있다. 핵연료체(120)에 상기 중성자 에너지 영역 천이 첨가제를 첨가함으로써 열외 중성자 에너지 영역의 스펙트럼을 높일 수 있다.
- [0043] 여기서, 상기 중성자 에너지 영역 천이 첨가제는 0.1중량% 내지 0.7중량%의 수소가 이용되는 것이 바람직하다. 본 발명의 발명자들은 중성자 에너지 영역 천이 첨가제로서 첨가되는 수소의 함유량(즉, 핵연료체에 포함된 수소의 중량%)에 따른 민감도 분석(Sensitivity analysis)을 하였으며, 그 결과는 다음 [표 1]과 같다.

표 1

구분	수소의 함유량 (%)	유효증배계수(Keff)
Case 1	ThU 90% and ZrH 10% (H 0.1 wt%)	1.23505
Case 10	ThU 90% and ZrH 10% (H 0.2 wt%)	1.34155
Case 11	ThU 90% and ZrH 10% (H 0.3 wt%)	1.42118
Case 12	ThU 90% and ZrH 10% (H 0.4 wt%)	1.48058
Case 13	ThU 90% and ZrH 10% (H 0.5 wt%)	1.52948
Case 14	ThU 90% and ZrH 10% (H 0.6 wt%)	1.56559
Case 15	ThU 90% and ZrH 10% (H 0.7 wt%)	1.59724

- [0044] 상기 [표 1]을 참조하면, 중성자 에너지 영역 천이 첨가제인 수소가 0.1중량%에서 0.7중량%로 증가함에 따라 유효증배계수도 가파르게 증가함을 알 수 있다.
- [0045] 도 4는 [표 1]에 따른 핵연료체(120)의 중성자 에너지 스펙트럼을 보여주는 그래프이다. 도 4를 참조하면, 중성자 에너지 영역 천이 첨가제인 수소가 0.1중량%에서 0.7중량%로 증가함에 따라 중성자 에너지 스펙트럼이 왼쪽으로 조금씩 이동함을 알 수 있다. 이는 열외 중성자 에너지 스펙트럼이 높아졌음을 의미한다. 다만, 중성자 에너지 스펙트럼이 너무 지나치게 왼쪽으로 이동하면 붙잡히는 중성자가 많아지기 때문에 좋지 않다.
- [0046] [표 1]을 참조하면, 상기 중성자 에너지 영역 천이 첨가제인 수소가 첨가됨에 따라 유효증배계수(Keff)는 1.2 내지 1.6의 값을 가질 수 있다.
- [0047] 도 5는 중성자 에너지 영역 천이 첨가제인 수소의 첨가량이 많아짐에 따라 중성자 에너지 스펙트럼이 열외중성자 에너지 영역에서 열외 중성자 에너지 영역으로 이동함을 보여 준다.
- [0048] 도 4 및 도 5에서 알 수 있듯이, 수소와 같은 중성자 에너지 영역 천이 첨가제를 핵연료체(120)에 추가함으로써, 원자로 내부의 핵분열 반응에 의해 생성되는 고속 중성자의 에너지가 감소되며, 이와 같이 감소된 에너지를 이용하여 토륨(Th)-232의 우라늄(U)-233으로의 변환을 촉진시킬 수 있고 중성자 에너지 스펙트럼을 열외 중성자 영역으로 이동시킬 수 있다.
- [0049] 또한, 본 발명의 일 실시예에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심(100)은, 핵연료체(120)에 수소와 같은 중성자 에너지 영역 천이 첨가제를 추가함으로써 핵연료체(120)를 장기간 동안 연소시킬 수 있고 높은 반응성을 얻을 수 있다.

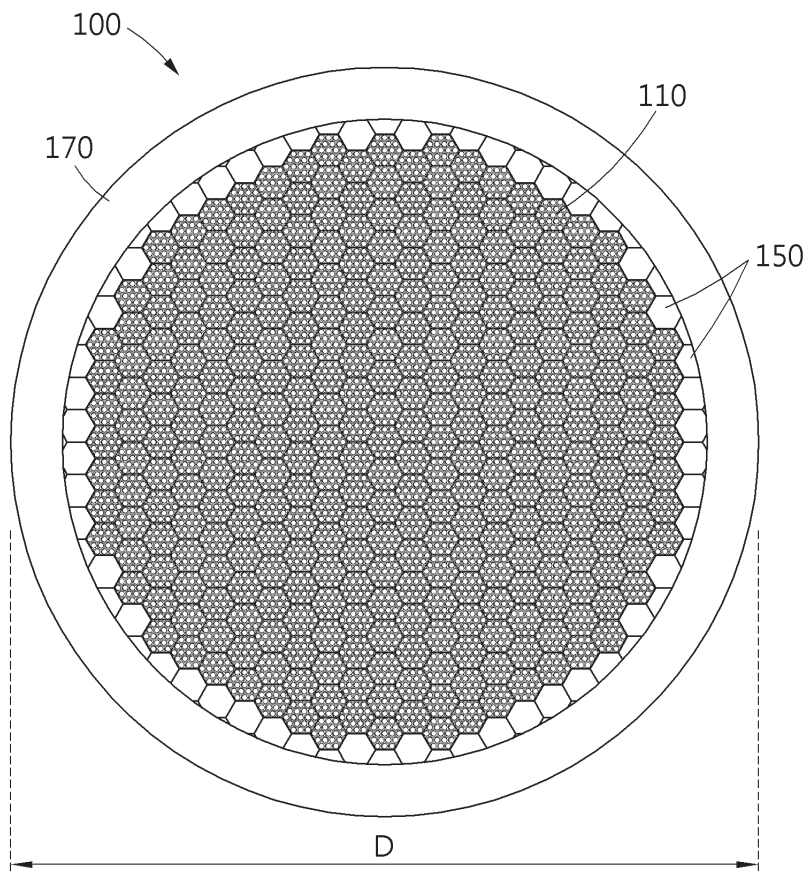
- [0051] 본 발명의 발명자들은 본 발명의 일 실시예에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심(100)에 대해서 MCNP6.1 코드를 사용하여 임계 계산 및 연소 실험을 하였다. 노심(100)의 유효증배계수(Keff)를 결정하기 위해서 MCNP6.1 코드의 KCODE 카드를 사용하고, 계산을 위해 50회의 비활성 주기(cycle)를 포함하여 총 250회의 활성 주기 동안 10,000개의 중성자를 사용하였다. 또한, 연소 계산을 위해서 MCNP6.1 코드의 BURN 카드를 사용했다.
- [0052] 도 6에는 수소와 같은 중성자 에너지 영역 천이 첨가제를 추가한 핵연료체(ThUZrH0.1)와 추가하지 않은 핵연료체(ThUZr)에 대한 유효증배계수(Keff)가 나타나 있다.
- [0053] 도 6을 참조하면, 수소와 같은 중성자 에너지 영역 천이 첨가제를 추가한 핵연료체(ThUZrH0.1)는 수소의 사용으로 인해서, 중성자 에너지 영역 천이 첨가제를 추가하지 않은 핵연료체(ThUZr) 보다 긴 수명과 높은 유효증배계수를 가진다는 것을 알 수 있다.
- [0054] 도 7은, 핵연료체(120)에 있어서 토륨(Th)-232와 우라늄(U)-233의 최적 조성비를 찾기 위한 실험 결과의 그래프이다. 즉, 도 7은 토륨(Th)-232 및 우라늄(U)-233 합금에 대한 우라늄(U)-233의 비에 대한 유효증배계수(Keff) 값을 보여 준다. 도 7에 의하면, 열외중성자로 노심(100)을 구비한 원자로가 임계 상태에 있기 위해서는 토륨(Th)-232 및 우라늄(U)-233 합금에 대한 우라늄(U)-233의 비가 1.3 보다 크고 1.6 보다 작은 것이 바람직함을 알 수 있다.
- [0055] 한편, 상기 중성자 에너지 영역 천이 첨가제는 수소 외에 다른 불순물이 사용될 수도 있다. 예를 들면, 상기 중성자 에너지 영역 천이 첨가제는 수소 수화물 뿐만 아니라 붕소(Boron) 또는 중수(D₂O) 등이 이용될 수 있다.
- [0056] 도 8은, 상기 중성자 에너지 영역 천이 첨가제가 붕소(Boron)인 경우에 붕소의 첨가량에 따른 중성자 에너지 스펙트럼을 보여주는 그래프이다. 도 8을 참조하면, 붕소가 첨가됨에 따라 중성자의 에너지가 감소됨을 알 수 있다.
- [0057] 상기한 바와 같은 본 발명에 따른 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심 및 이를 구비한 원자로는, 핵연료 집합체의 개수를 조정함으로써 노심의 임계도를 조정할 수 있고 노심의 연소 주기도 연장할 수 있다. 또한, 수소 수화물 등을 첨가함으로써 보다 큰 반응성, 긴 수명과 함께 고속 중성자의 에너지 감소로 인해 열외중성자 에너지 영역에 도달하여 토륨(Th)-232의 우라늄(U)-233화를 가속화시킬 수 있다.
- [0059] 이상과 같이 본 발명의 일 실시예에서는 구체적인 구성 요소 등과 같은 특정 사항들과 한정된 실시예 및 도면에 의해 설명되었으나 이는 본 발명의 보다 전반적인 이해를 돕기 위해서 제공된 것일 뿐, 본 발명은 상기의 실시예에 한정되는 것은 아니며, 본 발명이 속하는 분야에서 통상적인 지식을 가진 자라면 이러한 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 따라서, 본 발명의 사상은 설명된 실시예에 국한되어 정해져서는 아니 되며, 후술하는 청구범위뿐만 아니라 이 청구범위와 균등하거나 등가적 변형이 있는 모든 것들은 본 발명 사상의 범주에 속한다고 할 것이다.

부호의 설명

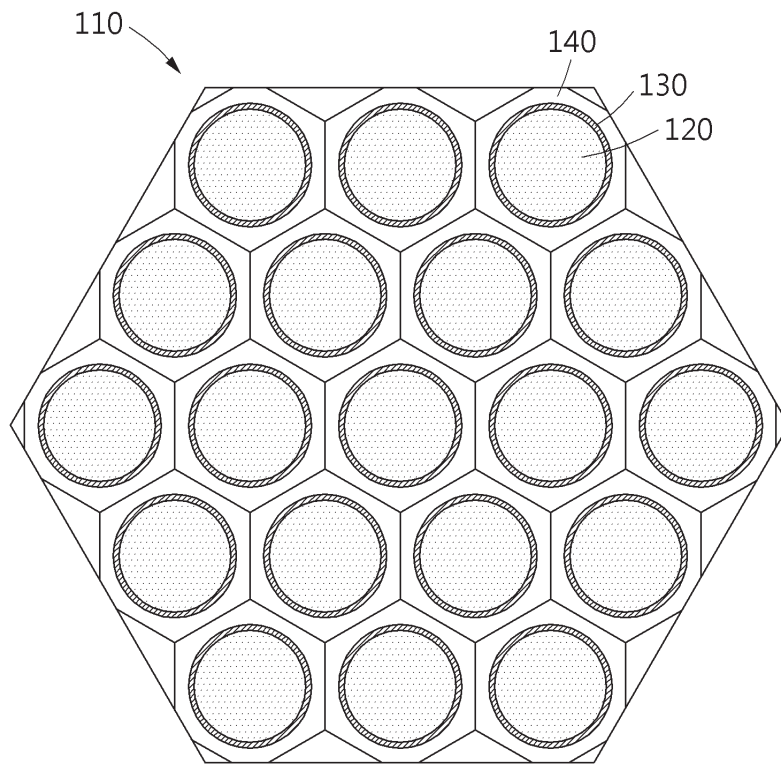
- [0060] 100: 금속핵연료 기반 토륨 열외중성자로 노심
- 110: 핵연료 집합체
- 120: 핵연료체
- 130: 피복재
- 140, 150: 냉각재
- 170: 반사체

도면

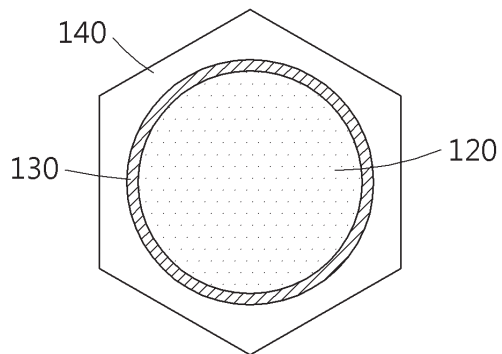
도면1



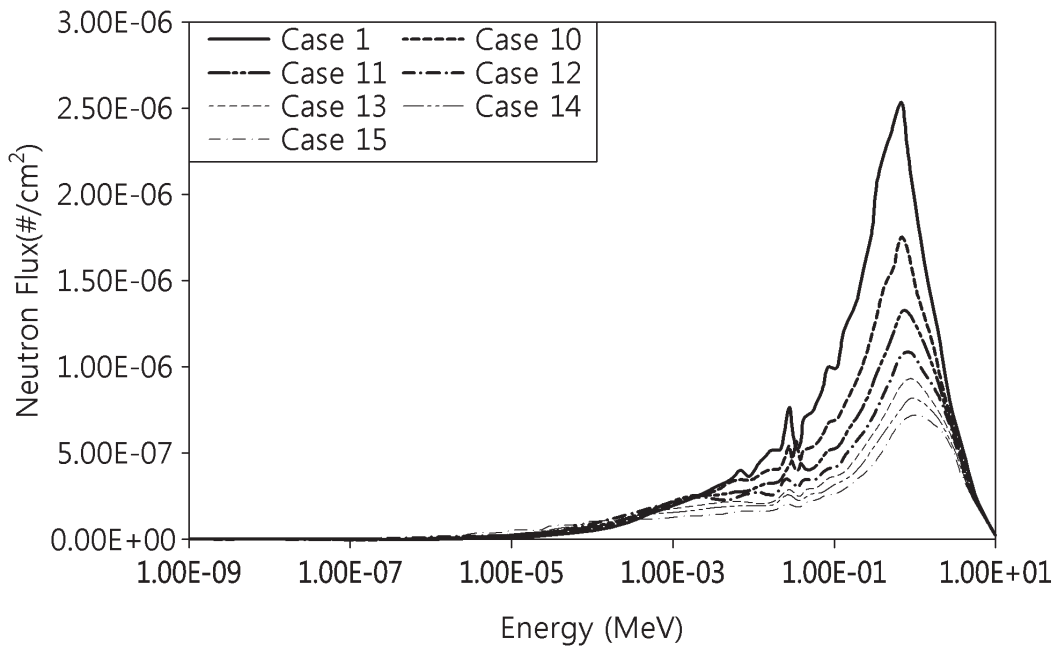
도면2



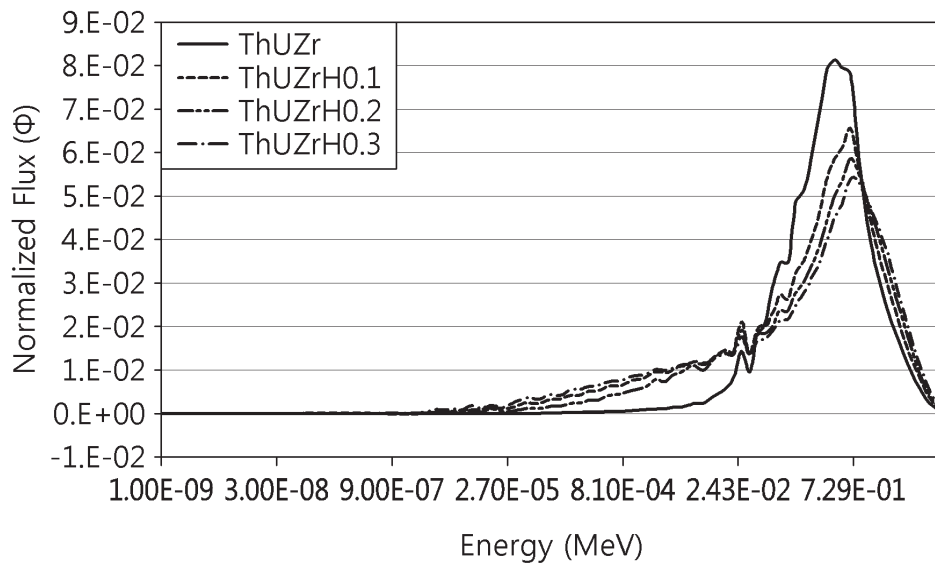
도면3



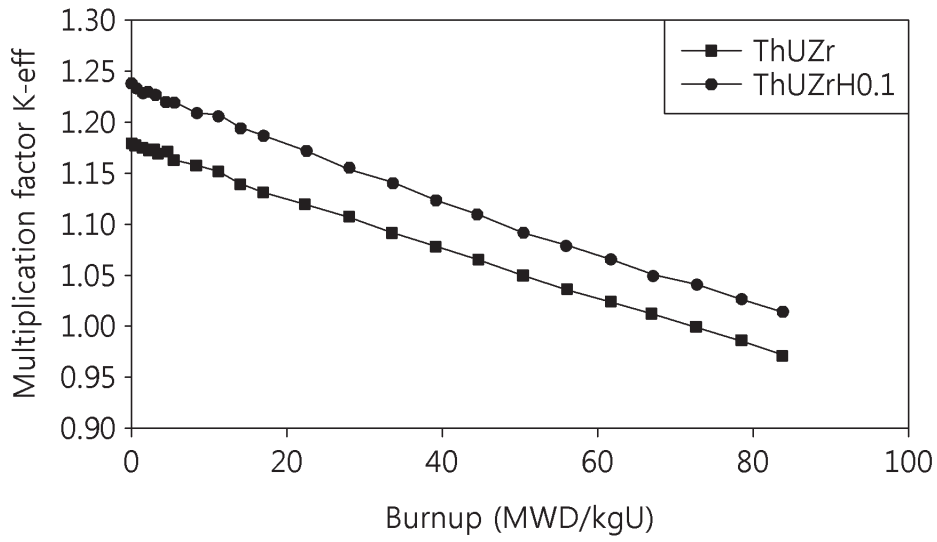
도면4



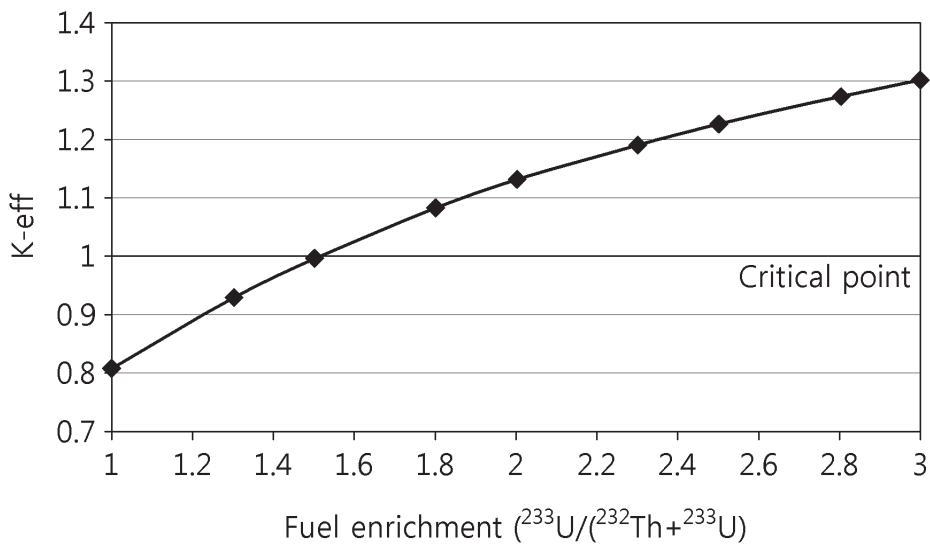
도면5



도면6



도면7



도면8

