



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2017년09월05일
(11) 등록번호 10-1775023
(24) 등록일자 2017년08월30일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G21C 3/08 (2006.01) G21C 21/10 (2006.01)
G21C 3/322 (2006.01) G21C 3/326 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2012-7029003
(22) 출원일자(국제) 2011년05월11일
심사청구일자 2016년04월18일
(85) 번역문제출일자 2012년11월05일
(65) 공개번호 10-2013-0080436
(43) 공개일자 2013년07월12일
(86) 국제출원번호 PCT/US2011/036034
(87) 국제공개번호 WO 2011/143293
국제공개일자 2011년11월17일
(30) 우선권주장
61/333,467 2010년05월11일 미국(US)
(뒷면에 계속)
(56) 선행기술조사문헌
US20090252278 A1*
US5737375 A
US3275564 A
GB876399 A
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
토콤 파워 인코포레이티드
미국 버지니아 22102 맥린 타이슨즈 블러바드
1600 스위트 550
(72) 발명자
바시키르트세프, 세르게이, 미카하일로비치
러시아, 125080, 모스크바, 아파트먼트 31, 하우스 10, 울릿사 브루벨야
쿠즈네트소프, 발렌틴, 페도로비치
러시아, 111402, 모스크바, 아파트먼트 68, 빌딩 3, 하우스 4, 베쉬야코브스카야 울릿사
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
김순웅

전체 청구항 수 : 총 45 항

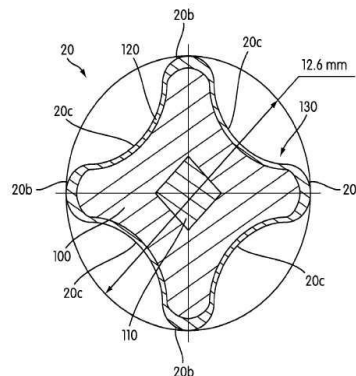
심사관 : 이용호

(54) 발명의 명칭 핵연료 집합체

(57) 요약

핵연료 집합체는 빌렛으로 소결 또는 주조되고 나선형의 다중-로브의 형상으로 공압출되는 연료 요소를 포함한다. 연료 커널은 금속 연료 물질과 금속 비-연료 물질의 금속 합금 또는 금속 비-연료 물질의 매트릭스 내의 세라믹 연료일 수 있다. 연료 요소는 안전한 작동 온도를 유지하면서 더욱 고농도로 농축된 핵분열성 물질을 이용할 수 있다. 이러한 하나 이상의 실시형태에 따르는 연료 요소는 종래의 산화 우라늄 연료봉으로 가능한 것보다 더욱 안전하고, 낮은 온도에서 많은 전력을 제공할 수 있다. 핵연료 집합체는 또한 다수의 종래의 UO₂ 연료봉을 포함할 수 있으며, 이는 핵연료 집합체가 종래의 원자로의 공간 요구사항을 준수하게 할 수 있다.

대표도



(72) 발명자

케브룰레프, 발레리, 블라디미로비치

러시아, 123368, 모스크바, 아파트먼트 209, 빌딩
2, 하우스 9, 페레우로크 안젤로프

모로조프, 알렉세이, 글레보비치

러시아, 123423, 모스크바, 아파트먼트 221, 빌딩
2, 하우스 22, 오폴체니야, 울릿사 나로드노고

몽고메리, 마이클, 에이치.

미국, 버지니아 20158, 해밀턴, 페인즈 레인 38992

(30) 우선권주장

61/393,499 2010년10월15일 미국(US)

61/444,990 2011년02월21일 미국(US)

명세서

청구범위

청구항 1

원자력 반응로(nuclear power reactor)의 노심에서의 사용을 위한 핵연료 집합체에 있어서,

상기 원자로 내부의 노심 구조에 장착되는 하부 노즐을 포함하는 프레임; 및

상기 프레임에 의해 지지되는 다수의 길다란 압출 연료 요소를 포함하여 구성되고, 상기 다수의 연료 요소들 각각은

비-연료 금속의 매트릭스 내에 배치된, 핵분열성 물질을 포함하는 연료 물질을 포함하는 연료 커널, 및

상기 연료 커널을 둘러싸는 클래딩(cladding)을 포함하며,

상기 다수의 연료 요소의 다수는 각각 다수의 나선형 리브를 정의하는 나선형으로 트위스트된(spirally twisted), 4-로브의(multi-lobed) 프로파일을 갖고,

상기 핵연료 집합체는 평면상에서 사각형의 형상을 이루는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 다수의 길다란, 압출 연료 요소는 다수의 길다란 압출 금속 연료 요소를 포함하고;

상기 연료 물질은 금속 연료 물질을 포함하고; 및

상기 연료 커널은 금속 비-연료 물질과 금속 연료 물질의 합금을 포함하는 금속 연료 합금 커널을 포함하는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 3

제 2 항에 있어서,

상기 커널은 δ -상 UZr_2 를 포함하는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 연료 물질은 금속 비-연료 물질의 매트릭스 내에 배치된 세라믹 연료 물질을 포함하는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 5

제 1 항에 있어서,

상기 다수의 길다란 연료 요소는 상기 핵연료 집합체의 모든 연료 요소의 전체 부피의 적어도 60%를 제공하는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 6

제 5항에 있어서, 상기 핵연료 집합체의 모든 연료 요소의 전체 부피는 하부 노즐에 의해 지지된 모든 연료 요소의 전체 부피를 포함하는 것을 특징으로 하는 핵 연료 집합체.

청구항 7

제 1 항에 있어서,

상기 클래딩의 평균 두께는 적어도 0.6 mm인 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 8

삭제

청구항 9

제 1 항에 있어서,

상기 핵연료 집합체는 상기 원자력 반응로 내에 배치되는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 10

제 9항에 있어서, 원자력 반응기가 중수 반응기를 포함하는 것을 특징으로 하는 핵 연료 집합체.

청구항 11

삭제

청구항 12

제 1 항에 있어서,

상기 다수의 연료 요소의 각각의 연료 커널은 상기 연료 물질과 금속 비-연료 물질의 소결을 통해 형성되는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 13

제 1 항에 있어서,

상기 다수의 연료 요소의 다수와 관련하여,

상기 연료 커널의 연료 물질은 우라늄-235 또는 우라늄-233에 의해 20% 이하로 농축되고 상기 연료 커널의 20%와 30% 사이의 부피 분율을 포함하며; 및

상기 비-연료 금속은 상기 연료 커널의 70%와 80% 사이의 부피 분율을 포함하는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 14

제 13 항에 있어서,

상기 다수의 연료 요소의 다수와 관련하여, 상기 연료 물질 농축은 15%와 20% 사이인 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 15

제 13 항에 있어서,

상기 다수의 연료 요소의 다수와 관련하여, 상기 연료 커널의 비-연료 금속은 지르코늄을 포함하는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 16

제 1 항에 있어서,

상기 다수의 연료 요소의 다수와 관련하여,

상기 연료 커널의 연료 물질은 플루토늄을 포함하고;

상기 연료 커널의 비-연료 금속은 지르코늄을 포함하고; 및

상기 연료 커널의 비-연료 금속은 연료 커널의 70%와 97% 사이의 부피 분율을 포함하는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 17

제 1 항에 있어서,

상기 연료 물질은 우라늄과 토륨; 플루토늄과 토륨; 또는 우라늄, 플루토늄, 및 토륨의 조합을 포함하는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 18

제 1 항에 있어서

상기 다수의 연료 요소의 다수의 클래딩은 상기 연료 커널에 야금으로(metallurgically) 접합되는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 19

제 1 항에 있어서,

상기 다수의 연료 요소의 다수의 비-연료 금속은 알루미늄을 포함하는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 20

제 1 항에 있어서,

상기 다수의 연료 요소의 다수의 비-연료 금속은 내화 금속을 포함하는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 21

제 1 항에 있어서,

상기 다수의 연료 요소의 다수의 클래딩은 지르코늄을 포함하는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 22

삭제

청구항 23

제 1 항에 있어서,

상기 다수의 연료 요소의 인접한 연료 요소들의 스페이서 리브는 상기 연료 요소의 축방향 길이에 걸쳐 주기적으로 서로 접촉하고, 이러한 접촉은 상기 연료 요소가 서로에 대해 간격을 유지하도록 하는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 24

제 1 항에 있어서,

상기 4-로브의 프로파일은 인접한 로브들 사이의 오목한 부분을 포함하는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 25

제 1 항에 있어서,

상기 4-로브의 프로파일은 로브 팁(lobe tip) 및 인접한 팁 사이의 교차점을 포함하고, 및

상기 다수의 연료 요소의 다수와 관련하여, 상기 클래딩은 교차점에서보다 팁에서 더 두꺼운 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 26

제 1 항에 있어서,

상기 핵연료 집합체는 가연성 독소를 포함하는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 27

제 26 항에 있어서,

상기 다수의 길다란 연료 요소 중 적어도 하나는 가연성 독소를 포함하는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 28

제 1 항에 있어서,

상기 프레임에 의해 지지되는 다수의 UO_2 연료 요소를 더 포함하고, 상기 다수의 UO_2 연료 요소 각각은 다수의 UO_2 연료를 포함하는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 29

제 28 항에 있어서,

상기 다수의 UO_2 연료 요소 중 적어도 일부는 상기 다수의 길다란 금속 연료 요소로부터 외측을 향해 측면으로 배치되는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 30

제 29 항에 있어서,

상기 다수의 길다란 금속 연료 요소를 통과한 냉각수 흐름으로부터 상기 다수의 UO_2 연료 요소를 통과한 냉각수 흐름을 분리하는 슈라우드(shroud)를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 31

제 28 항에 있어서,

상기 UO_2 연료는 15% 이하의 U-235 농축을 갖는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 32

제 1항에 있어서,

상기 연료 요소의 영역 내의 감속재(moderator) 대 연료비는 2.4 이하이며,

상기 감속재 대 연료비는 다수의 연료 요소의 세로 축에 대해 수직이고 다수의 연료 요소를 통하여 연장하는 단면적 내의 면적비로서, 이 비율은 (1) 다수의 연료 요소에 대한 감속재 흐름을 위해 이용가능한 총 면적 대 (2)다수의 연료 요소의 연료 커널의 총 면적인 것을 특징으로 하는 핵 연료 집합체.

청구항 33

제 1항에 있어서, 다수의 연료 요소의 우라늄 프랙션은 25 부피% 이하인 것을 특징으로 하는 핵 연료 집합체.

청구항 34

원자력 반응로의 노심에서의 사용을 위한 핵연료 집합체를 제조하는 방법에 있어서,

분말로 된 연료 물질을 분말로 된 금속 비-연료 물질과 혼합하고, 여기서 상기 분말로 된 연료 물질은 핵분열성 물질을 포함하고,

상기 혼합된 분말로 된 연료 물질과 금속 비-연료 물질을 소결하여 연료 코어 스톡(core stock)을 형성하고,

상기 연료 코어 스톡을 클래딩 물질로 둘러싸고, 그리고

상기 연료 코어 스톡과 클래딩 물질을 공압출하여 연료 요소를 형성함으로써,

다수의 길다란 연료 요소들 각각을 제조하는 단계; 및

상기 다수의 길다란 연료 요소를 상기 핵연료 집합체의 프레임에 장착하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 35

제 34 항에 있어서,

상기 다수의 길다란 연료 요소는 다수의 길다란 금속 연료 요소를 포함하고; 및

상기 분말로 된 연료 물질은 분말로 된 금속 연료 물질을 포함하고; 및

상기 연료 코어 스톱은 상기 금속 연료 물질과 상기 금속 비-연료 물질의 합금을 포함하는 금속 연료 코어 스톱을 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 36

제 34 항에 있어서,

상기 분말로 된 연료 물질은 분말로 된 세라믹 연료 물질을 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 37

제 34 항에 있어서,

상기 다수의 길다란 연료 요소는 상기 핵연료 집합체의 모든 연료 요소의 전체 부피의 적어도 60%를 제공하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 38

제 34 항에 있어서,

공압출 이후의 상기 클래딩의 평균 두께는 적어도 0.6 mm인 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 39

제 34 항에 있어서,

상기 소결 단계 이전에 디스플레이서(displacer)를 상기 혼합된 분말로 된 연료 물질과 금속 비-연료 물질 내에 배치하여, 상기 소결 단계에서 상기 디스플레이서를 포함하는 연료 코어 스톱을 형성하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 40

제 34 항에 있어서,

상기 프레임은 원자력 반응로의 노심에 장착되는 하부 노즐을 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 41

제 40 항에 있어서,

상기 핵연료 집합체를 지상용 원자력 반응로에 배치하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 42

제 34항에 있어서, 감속재 대 연료비는 다수의 연료 요소의 세로 축에 대해 수직이고 다수의 연료 요소를 통하여 연장하는 단면적 내의 면적비로서, 이 비율은 (1) 다수의 연료 요소에 대한 감속재 흐름을 위해 이용가능한 총 면적 대 (2)다수의 연료 요소의 연료 커널의 총 면적이며; 그리고

감속재 대 연료비는 2.4 이하인 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 43

원자력 반응로의 노심에서의 사용을 위한 핵연료 집합체에 있어서,

상기 원자로 내부의 노심 구조에 장착되는 형상을 갖고 구성되는 하부 노즐을 포함하는 프레임;

상기 프레임에 의해 지지되는 다수의 길다란 압출 연료 요소, 상기 다수의 연료 요소들 각각은

금속 비-연료 물질의 매트릭스 내에 배치된 연료 물질을 포함하는 연료 커널, 상기 연료 물질은 핵분열성 물질을 포함하고, 및

상기 연료 커널을 둘러싸는 클래딩을 포함하고; 및

상기 프레임에 의해 지지되는 다수의 추가의 길다란 연료 요소를 포함하고,

상기 핵연료 집합체의 단면에서 볼 때, 상기 다수의 추가의 길다란 연료 요소는 상기 다수의 길다란 압출 금속 연료 요소를 둘러싸는 단일 연료 요소에 걸친 링(single-fuel-element-wide ring) 내에 배치되며,

상기 다수의 길다란 금속 연료 요소는 상기 핵연료 집합체의 모든 연료 요소의 전체 부피의 적어도 60%를 제공하고,

상기 다수의 연료 요소의 다수는 각각 다수의 나선형 리브를 정의하는 나선형으로 트위스트된(spirally twisted), 4-로브의(multi-lobed) 프로파일을 갖고,

상기 핵연료 집합체는 평면상에서 사각형의 형상을 이루는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 44

제 43 항에 있어서,

상기 다수의 추가의 길다란 연료 요소는 각각 펠렛화된(pelletized) UO_2 연료가 내부에 배치된 중공 봉(hollow rod)을 포함하는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 45

제 43 항에 있어서,

상기 다수의 추가의 길다란 연료 요소를 지지하는 상기 핵연료 집합체의 일부는 상기 다수의 길다란 압출 연료 요소를 지지하는 상기 핵연료 집합체의 일부와 분리될 수 없는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 46

제 43 항에 있어서,

상기 다수의 추가의 길다란 연료 요소는 상기 다수의 길다란 압출 연료 요소로부터 하나의 유닛으로서 분리될 수 없는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 47

제 43항에 있어서,

상기 핵연료 집합체는 17×17 패턴 위치를 정의하고;

상기 다수의 길다란 압출 연료 요소 각각은 패턴 위치들 중 하나에 배치되고;

상기 다수의 길다란 압출 연료 요소 어느 것도 17×17 패턴의 주변 위치에 배치되지 않고; 및

상기 다수의 길다란 압출 연료 요소 각각은 17×17 패턴의 주변 위치 중 다른 하나에 배치되는 것을 특징으로 하는 핵연료 집합체.

청구항 48

삭제

청구항 49

제 43 항에 있어서, 상기 핵연료 집합체의 모든 연료 요소의 전체 부피는 하부 노즐에 의해 지지된 모든 연료 요소의 전체 부피를 포함하는 것을 특징으로 하는 핵 연료 집합체.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 교차 참조

[0002] 본 출원서는 모두 "금속 핵연료 집합체"라는 제목으로 2010년 5월 11일 출원된 미국 가출원 제 61/333,467호, 2010년 10월 15일 출원된 미국 가출원 제 61/393,499호, 및 2011년 2월 21일 출원된 미국 가출원 제 61/444,990호의 우선권의 혜택을 주장하며, 이들 각각은 본원에서 전체 내용이 참조로 포함된다.

[0003] 본 발명은 일반적으로 원자로의 노심에서 사용되는 핵연료 집합체에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 금속 핵연료 요소에 관한 것이다.

배경 기술

[0004] 이의 전체 내용이 본원에 참조로 포함된, 미국 특허 출원 공개 제 2009/0252278 A1호는 시드 및 블랭킷 서브어셈블리(seed and blanket sub-assemblies)를 포함하는 핵연료 집합체를 도시하고 있다. 블랭킷 서브어셈블리는 토륨-기반 연료 요소를 포함한다. 시드 어셈블리는 중성자를 방출하는데 사용되는 우라늄 및/또는 플루토늄 금속 연료 요소를 포함하고, 방출된 중성자는 토륨 블랭킷 요소에 포집됨으로써, 현장에서 연소되어 원자력 발전소에 대해 열을 방출하는 핵분열성(fissionable) U-233을 생성한다.

[0005] 종래의 원자력 발전소는 일반적으로 원통형 튜브 내에 산화 우라늄 연료를 각각 포함하는 다수의 연료봉을 포함하는 핵연료 집합체를 사용한다.

[0006] 발명의 요약

[0007] 종래의 연료봉의 원통형 튜브의 표면적은 봉으로부터 1차 냉각수로 전달되는 열의 방을 제한한다. 열 유속 제거(heat flux removal)를 위한 제한된 표면적을 고려하여 연료봉의 과열을 막기 위해, 이러한 산화 우라늄 연료봉 또는 혼합 산화물(플루토늄 및 우라늄 산화물) 연료봉 내의 핵분열성 물질의 양은 종래에 상당히 제한되었다.

[0008] 본 발명의 하나 이상의 실시형태는 종래의 산화 우라늄 연료봉을 순금속성(all-metal), 다중-로브의(multi-lobed), 분말 야금(powder metallurgy) 공압출(co-extruded) 연료봉(연료 요소)으로 대체함으로써 이들의 다양한 단점을 극복한다. 금속 연료 요소는 산화 우라늄 연료봉의 대응물보다 상당히 큰 표면적을 가지며, 따라서 낮은 온도에서 연료 요소로부터 1차 냉각수로의 훨씬 더 많은 열 전달을 용이하게 한다. 다중-로브의 연료 요소의 나선형 리브(rib)는 연료 요소에 구조적 지지를 제공하여, 필요할 수 있는 스페이스 격자(spacer grid)의 양의 감소 또는 제거를 가능하게 할 수 있다. 이러한 지지 격자의 양의 감소 또는 제거는 유리하게도 냉각수 상의 유압 드래그(hydraulic drag)를 감소시켜, 냉각수로의 열 전달을 향상시킬 수 있다. 금속 연료 요소가 종래의 산화 우라늄 연료봉의 대응물보다 상대적으로 더 컴팩트할 수 있으므로, 핵연료 집합체 내의 더욱 많은 공간이 냉각수에 제공되고, 이는 다시 유압 드래그를 감소시키고 냉각수로의 열 전달을 향상시킨다. 금속 연료봉으로부터 냉각수로의 더욱 높은 열 전달은, 금속 대 산화물의 상당히 높은 열 전도율로 인해 낮은 작동 온도에서 연료 요소를 동시에 유지시키면서, 더욱 많은 열(즉, 전력)을 생성할 수 있다는 것을 의미한다. 종래의 산화 우라늄 또는 혼합 산화물 연료봉은 일반적으로 과열 문제로 인해 대략 4 내지 5%의 핵분열성 물질의 로딩으로 제한되기는 하지만, 본 발명의 다양한 실시형태에 따른 금속 연료 요소의 높은 열 전달 특성은, 안전한 연료 성능을 계속 유지하면서, 사용되는 핵분열성 물질의 상당히 큰 로딩을 가능하게 한다. 궁극적으로, 본 발명의 하나 이상의 실시형태에 따른 금속 연료 요소의 사용은 종래의 산화 우라늄 또는 혼합 산화물 연료봉으로 가능한 것보다 동일한 노심(reactor core)으로부터 더욱 많은 전력을 제공할 수 있다.

[0009] 본 발명의 하나 이상의 실시형태에 따른 순금속 연료 요소의 사용은 유리하게 연료 손상의 위험을 줄일 수 있으며, 이는 종래의 산화 우라늄 또는 혼합 산화물 연료봉에서 가능한 바와 같이, 금속 연료 요소가 1차 냉각수로의 핵분열 기체 방출의 위험을 줄이기 때문이다.

[0010] 본 발명의 하나 이상의 실시형태에 따른 순금속 연료 요소의 사용은 또한 종래의 산화 우라늄 연료봉보다 더욱 안전할 수 있으며, 이는 순금속 설계가 연료 요소 내의 열 전달을 증가시키고, 이에 따라 연료 요소 내의 온도 변화를 줄이고 연료 요소의 국부적인 과열의 위험을 줄일 수 있다.

[0011] 본 발명의 하나 이상의 실시형태는 원자력 반응로(예를 들어, 지상용 또는 해상 원자로)의 노심에서의 사용을

위한 핵연료 집합체를 제공한다. 상기 집합체는 원자로 내부의 노심 구조에 장착되는 형상을 갖고 구성되는 하부 노즐을 포함하는 프레임과, 상기 프레임에 의해 지지되는 다수의 길다란 금속 연료 요소를 구비한다. 상기 다수의 연료 요소들 각각은 금속 연료 물질과 금속 비-연료 물질을 포함하는 금속 연료 합금 커널(kernel)을 포함한다. 상기 연료 물질은 핵분열성 물질을 포함한다. 각각의 연료 요소는 또한 상기 연료 커널을 둘러싸는 클래딩(cladding)을 포함한다. 상기 다수의 길다란 금속 연료 요소는 핵연료 집합체의 전체 핵분열성 물질의 적어도 70%의 부피를 제공한다.

[0012] 본 발명의 하나 이상의 실시형태는 원자력 반응로의 노심에서의 사용을 위한 핵연료 집합체를 제공한다. 상기 집합체는 원자로 내부의 노심 구조에 장착되는 형상을 갖고 구성되는 하부 노즐을 포함하는 프레임을 구비한다. 상기 집합체는 또한 상기 프레임에 의해 지지되는 다수의 길다란 압출 금속 연료 요소를 구비하며, 상기 다수의 연료 요소들 각각은 금속 연료 물질과 금속 비-연료 물질을 포함하는 금속 연료 합금 커널을 포함한다. 연료 물질은 핵분열성 물질을 포함한다. 연료 요소는 또한 상기 연료 커널을 둘러싸는 클래딩을 포함한다. 금속 연료 요소의 영역 내의 감속재(moderator) 대 연료비는 2.5 이하이다.

[0013] 본 발명의 하나 이상의 실시형태는 원자력 반응로의 노심에서의 사용을 위한 핵연료 집합체를 제조하는 방법을 제공한다. 상기 방법은 분말 금속 연료를 분말 금속 비-연료 물질과 혼합하고, 여기서 상기 분말 금속 연료 물질은 핵분열성 물질을 포함하고, 상기 혼합된 분말 금속 연료와 금속 비-연료 물질을 소결하여 연료 코어 스톡(core stock)을 형성하고, 상기 연료 코어 스톡을 클래딩 물질로 둘러싸고, 그리고 상기 연료 코어 스톡과 클래딩 물질을 공압출하여 연료 요소를 형성함으로써 다수의 길다란 금속 연료 요소들 각각을 제조하는 단계를 포함한다. 상기 방법은 또한 상기 다수의 길다란 금속 연료 요소를 핵연료 집합체의 프레임에 장착하는 단계를 포함한다. 금속 연료 요소의 영역 내의 감속재 대 연료비는 2.5 이하이다. 상기 방법은 상기 소결 단계 이전에 디스플레이서(displacer)를 상기 혼합된 분말 금속 연료 물질과 금속 비-연료 물질 내에 배치하여, 상기 소결 단계에서 디스플레이서를 포함하는 연료 코어 스톡을 형성하게 할 수 있다. 상기 핵연료 집합체는 지상용 원자력 반응로에 배치될 수 있다.

[0014] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 다수의 길다란 금속 연료 요소는 핵연료 집합체의 모든 연료 요소의 전체 부피의 적어도 60%를 제공한다.

[0015] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 클래딩의 평균 두께는 적어도 0.6 mm이다.

[0016] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 핵연료 집합체는 지상용 원자력 반응로에서의 운영을 위해 열역학적으로 설계되고 물리적인 형상을 갖는다.

[0017] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 핵연료 집합체는 지상용 원자력 반응로와 함께 사용될 수 있으며, 여기서 상기 핵연료 집합체는 지상용 원자로 내에 배치된다.

[0018] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 다수의 연료 요소의 다수와 관련하여, 상기 연료 커널의 연료 물질은 우라늄-235 및/또는 우라늄-233에 의해 20% 이하로 농축되고 연료 커널의 20%와 30% 사이의 부피 분율을 포함하며; 상기 비-연료 금속은 연료 커널의 70%와 80% 사이의 부피 분율을 포함한다. 상기 다수의 연료 요소의 다수와 관련하여, 상기 연료 물질 농축은 15%와 20% 사이일 수 있다. 연료 커널의 비-연료 금속은 지르코늄을 포함할 수 있다.

[0019] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 커널은 δ -상 UZr_2 를 포함한다.

[0020] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 다수의 연료 요소의 다수와 관련하여, 상기 연료 커널의 연료 물질은 플루토늄을 포함하고; 상기 연료 커널의 비-연료 금속은 지르코늄을 포함하며; 및 상기 연료 커널의 비-연료 금속은 연료 커널의 70%와 97% 사이의 부피 분율을 포함한다.

[0021] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 연료 물질은 우라늄과 토륨; 플루토늄과 토륨; 또는 우라늄, 플루토늄, 및 토륨의 조합을 포함한다.

[0022] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 다수의 연료 요소의 다수의 클래딩은 연료 커널에 야금으로(metallurgically) 접합된다.

[0023] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 다수의 연료 요소의 다수의 비-연료 금속은 알루미늄을 포함한다.

[0024] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 다수의 연료 요소의 다수의 비-연료 금속은 내화 금속(refractory metal)을 포함한다.

- [0025] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 다수의 연료 요소의 다수의 클래딩은 지르코늄을 포함한다.
- [0026] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 다수의 연료 요소의 다수는 연료 커널과 클래딩의 공압출을 통해 제조된다.
- [0027] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 핵연료 집합체, 하나 이상의 연료 요소, 및/또는 이의 하나 이상의 연료 커널은 가연성 독물을 포함한다.
- [0028] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 다수의 길다란 금속 연료 요소는 핵연료 집합체의 전체 핵분열성 물질의 적어도 80%의 부피를 제공한다.
- [0029] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 지상용 원자력 반응로는 2010년 이전에 실제로 사용된 원자로 설계를 갖는 종래의 원자력 발전소를 포함한다. 상기 프레임은 종래의 원자로용 산화 우라늄 핵연료 집합체를 대신해서 지상용 원자력 반응로에 꼭 맞는 형상을 갖고 구성될 수 있다.
- [0030] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 하나 이상의 연료 요소는 다수의 나선형 리브를 정의하는, 나선형으로 트위스트된(spirally twisted), 다중-로브의 프로파일을 갖는다. 상기 다수의 연료 요소의 인접한 연료 요소들의 스페이스 리브는 연료 요소의 축방향 길이에 걸쳐 주기적으로 서로 접촉할 수 있고, 이러한 접촉은 연료 요소가 서로에 대해 간격을 유지하도록 한다. 핵연료 집합체는 적어도 2.5 또는 2.5 이하의 감속제 대 연료비를 가질 수 있다. 다중-로브의 프로파일은 인접한 로브들 사이의 오목한 부분을 포함할 수 있다.
- [0031] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 다수의 금속 연료 요소들의 각각의 금속 연료 합금 커널은 연료 물질과 금속 비-연료 물질의 소결을 통해 형성된다.
- [0032] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 다중-로브의 프로파일은 로프 팁(lobe tip) 및 인접한 팁 사이의 교차점을 포함하며, 상기 클래딩은 교차점에서보다 팁에서 더 두껍다.
- [0033] 본 발명의 하나 이상의 이러한 실시형태는 지상용 원자력 반응로의 노심에서의 사용을 위한 핵연료 집합체를 제조하는 방법을 제공한다. 상기 방법은 분말 금속 연료를 분말 금속 비-연료 물질과 혼합함으로써, 여기서 상기 분말 금속 연료 물질은 핵분열성 물질을 포함하고, 다수의 길다란 금속 연료 요소들 각각을 제조하는 단계를 포함한다. 상기 길다란 금속 연료 요소들 각각을 제조하는 단계는 또한 상기 혼합된 분말 금속 연료와 금속 비-연료 물질을 소결하여 연료 코어 스톱을 형성하는 단계, 상기 연료 코어 스톱을 클래딩 물질로 둘러싸는 단계, 및 상기 연료 코어 스톱과 클래딩 물질을 공압출하여 연료 요소를 형성하는 단계를 포함한다. 상기 방법은 또한 상기 다수의 길다란 금속 연료 요소를 지상용 원자력 반응로의 노심에 장착되는 형상을 갖고 구성되는 하부 노즐을 포함하는 핵연료 집합체의 프레임에 장착하는 단계를 포함한다. 상기 다수의 길다란 금속 연료 요소는 핵연료 집합체의 전체 핵분열성 물질의 적어도 70%의 부피를 제공한다. 상기 핵연료 집합체는 지상용 원자력 반응로에서의 운영을 위해 열역학적으로 설계되고 물리적인 형상을 갖는다.
- [0034] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 방법은 또한 상기 소결 단계 이전에 디스플레이서(displacer)를 상기 혼합된 분말 금속 연료 물질과 금속 비-연료 물질 내에 배치하여, 상기 소결 단계에서 디스플레이서를 포함하는 연료 코어 스톱을 형성하게 할 수 있다.
- [0035] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 방법은 또한 핵연료 집합체를 지상용 원자력 반응로에 배치하는 단계를 포함한다.
- [0036] 본 발명의 하나 이상의 이러한 실시형태는 가압 중수형 원자로(pressurized heavy water reactor)와 상기 가압 중수형 원자로 내에 배치된 핵연료 집합체를 포함하는 원자로를 제공한다. 상기 핵연료 집합체는 서로에 대해 장착되는 다수의 길다란 금속 연료 요소를 포함한다. 상기 다수의 연료 요소들 각각은 금속 연료 물질과 금속 비-연료 물질을 포함하는 분말 야금 금속 연료 합금 커널을 포함하고, 상기 연료 물질은 핵분열성 물질을 포함한다. 각각의 연료 요소는 또한 상기 연료 커널을 둘러싸는 클래딩을 포함한다. 상기 다수의 길다란 금속 연료 요소는 핵연료 집합체의 전체 핵분열성 물질의 적어도 70%의 부피를 제공한다. 각각의 연료 요소는 다수의 나선형 스페이스 리브를 정의하는, 나선형으로 트위스트된, 다중-로브의 프로파일을 가질 수 있다.
- [0037] 본 발명의 하나 이상의 이러한 실시형태는 가압 중수형 원자로와 상기 가압 중수형 원자로 내에 배치된 핵연료 집합체를 포함하는 원자로를 제공한다. 상기 핵연료 집합체는 서로에 대해 장착되는 다수의 길다란 금속 연료 요소를 포함하며, 상기 다수의 연료 요소들 각각은 금속 연료 물질과 금속 비-연료 물질을 포함하는 금속 연료 합금 커널과, 상기 연료 물질은 핵분열성 물질을 포함하고, 상기 연료 커널을 둘러싸는 클래딩을 포함한다. 금

속 연료 요소의 영역 내의 감속재 대 연료비는 2.5 이하이다.

[0038] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 핵연료 집합체는 또한 프레임에 의해 지지되는 다수의 UO_2 연료 요소를 포함하며, 상기 다수의 UO_2 연료 요소들 각각은 UO_2 연료를 포함한다. 상기 다수의 길다란 UO_2 연료 요소 중 적어도 일부는 상기 다수의 길다란 금속 연료 요소로부터 외측을 향해 측면으로 배치될 수 있다. 상기 UO_2 연료 요소는 15% 이하의 U-235 농축을 가질 수 있다.

[0039] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 슈라우드(shroud)는 상기 다수의 길다란 금속 연료 요소를 통과한 냉각수 흐름으로부터 상기 다수의 UO_2 연료 요소를 통과한 냉각수 흐름을 분리한다.

[0040] 본 발명의 하나 이상의 이러한 실시형태는 원자로의 노심에서의 사용을 위한 핵연료 집합체를 제공한다. 상기 집합체는 원자력 반응로 내부의 노심 구조에 장착되는 형상을 갖고 구성되는 하부 노즐을 포함하는 프레임을 구비한다. 상기 집합체는 또한 상기 프레임에 의해 지지되는 다수의 길다란 압출 금속 연료 요소를 구비한다. 상기 다수의 연료 요소들 각각은 금속 연료 물질과 금속 비-연료 물질을 포함하는 금속 연료 합금 커널과, 상기 연료 물질은 핵분열성 물질을 포함하고, 상기 연료 커널을 둘러싸는 클래딩을 포함한다. 집합체는 프레임에 의해 지지되는 다수의 추가의 길다란 연료 요소를 포함한다. 상기 핵연료 집합체의 단면에서 볼 때, 상기 다수의 추가의 길다란 연료 요소는 상기 다수의 길다란 압출 금속 연료 요소를 둘러싸는 단일 연료 요소에 걸친 링(single-fuel-element-wide ring) 내에 배치될 수 있다. 상기 다수의 길다란 금속 연료 요소는 핵연료 집합체의 모든 연료 요소의 전체 부피의 적어도 60%를 제공한다.

[0041] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 다수의 추가의 길다란 연료 요소는 각각 펠렛화된(pelletized) UO_2 연료가 내부에 배치된 중공 봉(hollow rod)을 포함한다.

[0042] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 다수의 추가의 길다란 연료 요소를 지지하는 핵연료 집합체의 일부는 상기 다수의 길다란 압출 금속 연료 요소를 지지하는 핵연료 집합체의 일부와 분리될 수 없다.

[0043] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 다수의 추가의 길다란 연료 요소는 상기 다수의 길다란 압출 금속 연료 요소로부터 하나의 유닛으로서 분리될 수 없다.

[0044] 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 상기 핵연료 집합체는 17x17 패턴 위치를 정의하고; 상기 다수의 길다란 압출 금속 연료 요소들 각각은 패턴 위치들 중 하나에 배치되고; 상기 다수의 길다란 압출 금속 연료 요소들 어느 것도 17x17 패턴의 주변 위치에 배치되지 않으며; 상기 다수의 길다란 압출 금속 연료 요소들 각각은 17x17 패턴의 주변 위치들 중 다른 하나에 배치된다.

[0045] 하나 이상의 상기 실시형태에 따르면, 상기 커널은 금속 연료 물질 대신에 세라믹 연료 물질을 포함할 수 있다. 하나 이상의 이러한 실시 형태에서, 연료 물질은 금속 비-연료 물질의 매트릭스 내에 배치된 세라믹 연료 물질을 포함한다. 정반대로, 하나 이상의 금속 연료 실시형태에서, 상기 다수의 길다란 압출 연료 요소는 다수의 길다란 압출 금속 연료 요소를 포함하고; 상기 연료 물질은 금속 연료 물질을 포함하며, 연료 커널은 금속 연료 물질의 합금과 금속 비-연료 물질의 매트릭스를 포함하는 금속 연료 합금 커널을 포함한다.

[0046] 본 발명의 다양한 실시형태의 이들 및 기타 양태뿐만 아니라, 구조의 관련 요소의 운용 방법과 기능 및 제조 부품과 경제의 조합은, 본 명세서의 일부를 구성하는 첨부한 도면을 참조로 다음의 설명과 첨부된 청구 범위를 고려하여 더욱 명백해질 것이며, 여기서 동일한 참조 번호는 다양한 도면에서 해당 부품을 나타낸다. 본 발명의 일 실시형태에서, 본원에 도시된 구조 요소는 확대되어 도시된다. 그러나 도면은 오직 실례와 설명을 목적으로 하며 본 발명을 한정하려는 것이 아니라는 것을 분명히 알 수 있을 것이다. 또한, 본원의 임의의 일 실시형태에 도시되고 설명된 구조적 특징은 또한 다른 실시형태에서 사용될 수 있음을 이해해야 할 것이다. 본 명세서 및 청구 범위에서 사용된 바와 같이, 단수 형태는 문맥에서 달리 명확하게 지시하지 않는 한 복수의 대상물을 포함한다.

도면의 간단한 설명

[0047] 본 발명의 실시형태뿐만 아니라 이의 기타 목적 및 추가 기능의 더 나은 이해를 위해, 첨부한 도면과 함께 사용되는 다음의 설명이 참조된다, 여기서:

도 1은 본 발명의 일 실시형태에 따른 핵연료 집합체의 자체-간격(self-spacing)의 평면 상에서 취한 단면도이고;

도 2는 도 1의 관점에서 연료 요소의 트위스트의 1/8만큼 이동한 평면 상에서 취한 도 1의 핵연료 집합체의 단면도이고;

도 3은 핵연료 집합체의 축 방향과 평행한 평면 상에서 취한 도 1의 핵연료 집합체의 단면도이고;

도 4는 도 1의 핵연료 집합체의 연료 요소의 사시도이고;

도 5는 도 3의 연료 요소의 단면도이고;

도 6은 정다각형 내에 외접한 도 3의 연료 요소의 단면도이고;

도 7A는 가압 중수형 원자로 내에서의 사용을 위한, 대안적인 실시형태에 따른 핵연료 집합체의 단면도이고;

도 7B는 도 7A의 핵연료 집합체의 부분 측면도이고;

도 8은 도 7A 및 도 7B에 도시된 핵연료 집합체를 사용하는 가압 중수형 원자로의 도면이고;

도 9는 도 3의 연료 요소의 단면도이고; 및

도 10은 본 발명의 일 실시형태에 따른 핵연료 집합체의 단면도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0048] 도 1 내지 도 3은 본 발명의 일 실시형태에 따른 핵연료 집합체(10)를 도시한다. 도 3에 도시된 바와 같이, 핵연료 집합체는 프레임(25)에 의해 지지되는 다수의 연료 요소(20)를 포함한다.
- [0049] 도 3에 도시된 바와 같이, 상기 프레임(25)은 슈라우드(30), 가이드 튜브(40), 상부 노즐(50), 하부 노즐(60), 하부 타이플레이트(70, tie plate), 상부 타이플레이트(80), 및/또는 집합체(10)가 원자로 내에서 핵연료 집합체로 가동되도록 하는 기타 구조물(들)을 포함한다. 프레임(25)의 하나 이상의 이러한 실시형태는 본 발명의 범위를 벗어나지 않고 다양한 실시형태에 따라 생략될 수 있다.
- [0050] 도 3에 도시된 바와 같이, 상기 슈라우드(25)는 상부 노즐(50)과 하부 노즐(60)에 장착된다. 하부 노즐(60)(또는 집합체(10)의 다른 적절한 구조물)은 집합체(10)와 상기 집합체(10)가 내부에 배치되는 원자로(90) 사이의 유체 통신 인터페이스를 제공하도록 하는 형상을 갖고 구성되어 하부 노즐(60)을 통해 집합체(10)를 거쳐 노심 내부로의 냉각수 흐름을 용이하게 한다. 상부 노즐(50)은 집합체(10)로부터 발전소의 증기 발생기(가압수형 원자로(PWR)용), 터빈(비등수형 원자로(BWR)용) 등으로의 가열된 냉각수의 이동을 용이하게 한다. 노즐(50, 60)은 원자로 내부 구조와 적절히 일치하도록 특별히 설계된 형상을 갖는다.
- [0051] 도 3에 도시된 바와 같이, 상기 하부 타이플레이트(70)와 상부 타이플레이트(80)는 바람직하게 슈라우드(30) 또는 하부 노즐(60)(및/또는 집합체(10)의 다른 적절한 구조 요소)에 (예를 들어, 용접, 적절한 체결장치(예를 들어, 볼트, 나사) 등을 통해) 단단하게 장착된다.
- [0052] 상기 요소(20)의 하부 축 단부는 하부 타이플레이트(70) 내의 홀(70a)에 꼭 맞는 핀(20a)을 형성하여, 요소(20)를 지지하고 요소(20)의 적절한 간격을 유지하도록 한다. 핀(20a)은 요소(20)가 이들 축에 대해 회전하거나 하부 타이플레이트(70)에 대해 축방향으로 이동하는 것을 방지하는 방식으로 홀(70a)에 장착된다. 이러한 회전에 대한 제한은 인접한 요소들(20) 사이의 접점들이 모두 요소들(20)을 따라 동일한 축 위치에서 발생하도록 보장하는 것을 도와준다. 핀(20a)과 홀(70a) 사이의 연결은 용접, 억지 끼워맞춤(interference fit), 회전을 방지하는 접합형 비원통형(mating non-cylindrical) 특징부(예를 들어, 키웨이 및 스플라인), 및/또는 하부 타이플레이트(70)에 대해 요소(20)의 축방향 및/또는 회전 이동을 제한하기 위한 그 밖의 다른 적절한 메커니즘에 의해 이루어질 수 있다. 하부 타이플레이트(70)는 축방향으로 연장된 채널(예를 들어, 격자 모양의 개구부)을 포함하며, 상기 채널을 통해 냉각수가 요소(20)를 향해 흐른다.
- [0053] 상기 요소(20)의 상부 축 단부는 상부 타이플레이트(80) 내의 홀(70a)에 자유롭게 꼭 맞는 핀(20a)을 형성하여, 요소들(20) 간의 간격을 유지하도록 하면서, 상부 핀(20a)이 상부 타이플레이트(80)를 통해 자유롭게 축방향으로 상향 이동하게 한다. 그 결과, 요소(20)가 핵분열 시 축방향으로 성장할 때, 연장된 요소(20)는 상부 타이플레이트(80)로 자유롭게 더욱 연장될 수 있다.
- [0054] 도 4에 도시된 바와 같이, 상기 핀(70a)은 요소(20)의 중앙 부분으로 전환된다.
- [0055] 도 4 및 도 5는 집합체(10)의 개별 연료 요소/봉(20)을 도시한 것이다. 도 5에 도시된 바와 같이, 연료 요소(20)의 길다란 중앙 부분은 4-로브 단면을 갖는다. 요소(20)의 단면은 요소(20)의 중앙 부분의 길이에 걸쳐 실질적

으로 균일하게 유지된다. 각각의 연료 요소(20)는 내화 금속 및 핵분열성 물질을 포함하는 연료 물질을 포함하는 연료 커널(100)을 갖는다.

[0056] 내화 금속을 포함하는 디스플레이서(110)는 연료 커널(100)의 중간에 종방향 축을 따라 배치된다. 디스플레이서(110)는 연료 요소(20)의 가장 두꺼운 부분의 중간에서의 온도를 제한하도록 하며, 이는 이러한 공간을 점유하고 열 유속의 변화를 최소화하는 핵분열성 물질을 연료 요소의 표면을 따라 배치함으로써 이루어진다. 다양한 실시형태에 따르면, 디스플레이서(110)는 완전히 제거될 수 있다.

[0057] 도 5에 도시된 바와 같이, 상기 연료 커널(100)은 내화 금속 클래딩(120)에 의해 둘러싸인다. 바람직하게 클래딩(120)은 커널(100)의 방사선 유도 팽창(radiation-induced swelling)을 확실하게(예를 들어, 커널(100)을 클래딩(120) 외부의 환경에 노출시키지 않고) 견딜 수 있을 만큼 충분히 두껍고, 튼튼하며, 유연하다. 하나 이상의 실시형태에 따르면, 전체 클래딩(120)은 적어도 0.3 mm, 0.4 mm, 0.5 mm, 및/또는 0.7 mm의 두께이다. 하나 이상의 실시형태에 따르면, 클래딩(120)의 두께는 팽창에 따른 고장, 산화에 따른 고장, 및/또는 클래딩(120)의 그 밖의 다른 고장 메커니즘의 위험을 줄이기 위해 적어도 0.4 mm이다.

[0058] 상기 클래딩(120)은 환형 방향으로(즉, 도 5의 단면도에 도시된 바와 같이 클래딩(120)의 외주 주위에) 그리고(도 4에 도시된 바와 같이) 커널(100)의 축방향/종방향 길이에 걸쳐 실질적으로 균일한 두께를 가질 수 있다. 대안적으로, 도 5에 도시된 바와 같이, 하나 이상의 실시형태에 따르면, 클래딩(120)은 로브(20b) 사이의 오목한 교차점/지역보다 로브(20b)의 끝에서 두껍다. 예를 들면, 하나 이상의 실시형태에 따르면, 로브(20b)의 끝에서의 클래딩(120)은 오목한 교차점/지역(20c)에서의 로브(20b)보다 적어도 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%, 125%, 및/또는 150% 더 두껍다. 로브(20b)의 끝에서의 두꺼운 클래딩(120)은 자체-간격의 평면(아래에 설명됨)에서 인접한 연료 요소들(20)이 서로 접촉하는 로브(20b)의 끝에서 향상된 내마모성을 제공한다.

[0059] 상기 디스플레이서(110), 연료 커널(100), 및 클래딩(120)에서 사용되는 내화 금속은 본 발명의 하나 이상에 따라 지르코늄을 포함한다. 본원에서 사용된 바와 같이, 지르코늄이란 용어는 순수 지르코늄 또는 다른 합금 재료(들)와 결합한 지르코늄을 의미한다. 그러나, 본 발명의 범위를 벗어나지 않고 지르코늄 대신에 다른 내화 금속(예를 들어, 니오븀, 몰리브덴, 탄탈륨, 텅스텐, 레늄, 티타늄, 바나듐, 크롬, 지르코늄, 하프늄, 루테튬, 오시뮴, 이리듐, 및/또는 기타 금속)이 사용될 수 있다. 본원에서 사용된 바와 같이, "내화 금속"이란 용어는 섭씨 1800도(2073K) 이상의 용해점을 갖는 모든 금속/합금을 의미한다.

[0060] 또한, 특정 실시형태에서, 상기 내화 금속은 예를 들어, 알루미늄과 같은 또 다른 비-연료 금속으로 대체될 수 있다. 그러나, 비-내화 비-연료 금속의 사용은, 저온에서 가동되는 노심(예를 들어, 대략 1 미터의 높이와 100 MWe 이하의 정격 출력을 갖는 소형 노심)에 대해 가장 적합하다. 내화 금속은 더욱 높은 작동 온도를 갖는 노심에서의 사용에 바람직하다.

[0061] 도 5에 도시된 바와 같이, 상기 연료 커널(100)과 클래딩(120)의 중앙 부분은 나선형 스페이스 리브(130)를 형성하는 4-로브 프로파일을 갖는다. 디스플레이서(110)는 또한 상기 리브(130)에서 외측으로 돌출하도록 하는 형상을 가질 수 있다(예를 들어, 사각형 디스플레이서(110)의 모서리는 리브(130)와 정렬됨). 본 발명의 대안적인 실시형태에 따르면, 연료 요소(20)는 본 발명의 범위를 벗어나지 않고 더욱 많거나 적은 수의 리브(130)를 가질 수 있다. 예를 들어, 미국 특허 출원 공개 제2009/0252278 A1호의 도 5에 일반적으로 도시된 바와 같이, 상기 연료 요소는 바람직하게 원주방향으로 서로 이격된 세 개의 리브/로브를 가질 수 있다. 리브/로브(130)의 수는, 적어도 부분적으로, 핵연료 집합체(10)의 형상에 따라 달라질 수 있다. 예를 들면, 4-로브 요소(20)는(예를 들어, AP-1000에서 사용되는 바와 같이) 사각형 단면의 핵연료 집합체(10)와 함께 잘 작동할 수 있다. 그에 반해, 3-로브 연료 요소는(예를 들어, 러시아형 가압수형 경수로(VVER)에서 사용되는 바와 같이) 육각형 핵연료 집합체와 함께 잘 작동할 수 있다.

[0062] 도 9는 하나 이상의 실시형태에 따른 연료 요소(20)의 다양한 크기를 도시하고 있다. 하나 이상의 실시형태에 따르면, 이러한 크기, 매개변수 및/또는 범위는, 아래의 표에 나타난 바와 같이, 본 발명의 범위를 벗어나지 않고, 최대 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 40%, 50% 이상 증가하거나 감소할 수 있다.

표 1

[0063]

연료 요소(20)의 매개변수	기호	값들의 예	단위
외접 직경	D	9-14 (예를 들어, 12.3, 12.4, 12.5, 12.6)	mm
로브 두께	Δ	2.5 내지 3.8 (예를 들어, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 3.0, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8), 변수	mm
최소 클래딩 두께	δ	0.4 내지 1.2 (예를 들어, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2)	mm
로브에서의 클래딩 두께	$\delta^{\max}$	0.4 내지 2.2 (예를 들어, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0, 2.1, 2.2), 1.5δ , 2δ , 2.5δ	mm
평균 클래딩 두께		0.4 내지 1.8 (예를 들어, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8), 적어도 0.4, 0.5 또는 0.6	mm
로브 주변부에서의 클래딩의 곡률반경	r	$\Delta/2$, $\Delta/1.9$, 변수	mm
로브 주변부에서의 연료 코널의 곡률반경	r_f	0.5 내지 2.0 (예를 들어, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0), $(\Delta-2\delta)/2$, 변수	mm
인접한 로브 사이의 곡률 반경	R	2 내지 5(예를 들어, 2, 3, 4, 5) 변수	mm
중앙 디스플레이서의 변 길이	a	1.5 내지 3.5(예를 들어, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 3.0, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5)	mm
연료 요소의 외주		25 내지 60 (예를 들어, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60)	mm
연료 요소 면적		50 내지 100(예를 들어, 50, 60, 70, 80, 90, 100)	mm ²
연료 커널 면적		30 내지 70(예를 들어, 30, 40, 50, 60, 70)	mm
농축		≤ 19.7	없음
U 분획		≤ 25	없음

[0064]

도 4에 도시된 바와 같이, 상기 디스플레이서(110)는 정사각형의 단면 형상을 가지며, 정사각형의 모서리는 리브(130)와 정렬되어 있다. 디스플레이서(110)는 디스플레이서(110)의 모서리가 연료 커널(100)의 축방향 길이를 따라 리브(130)와의 정렬된 상태를 유지하도록 리브(130)의 나선을 따르는 나선을 형성한다. 더욱 많거나 적은 리브(130)를 갖는 대안적인 실시형태에서, 바람직하게 디스플레이서(110)는 요소(20)가 리브를 갖는 것만큼의 많은 변을 갖는 정다각형의 단면 형상을 갖는다.

[0065]

도 6에 도시된 바와 같이, 상기 요소(20)의 중앙 부분의 단면적은 바람직하게 사각형(200)의 면적보다 실질적으로 작으며, 여기서 각각의 리브(130)의 끝은 사각형(200)의 일변과 접한다. 더욱 일반적인 용어로, n 개의 리브를 갖는 요소(20)의 단면적은 바람직하게 n 개의 변을 갖는 정다각형의 면적보다 작으며, 여기서 각각의 리브(130)의 끝은 다각형의 일변과 접한다.

[0066]

다양한 실시형태에 따르면, 요소(20)의 면적과 사각형(또는 네 개보다 많거나 적은 리브(130)를 갖는 요소(20)와 관련된 정다각형)의 면적의 비율은 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.35, 0.3 이하이다. 도 1에 도시된 바와 같이, 이러한 면적비는 얼마나 많은 슈라우드(30) 내의 공간이 연료 요소(20)가 차지하는지를 계산하고, 따라서 더 낮은 비율은 더 많은 공간이 냉각수에 대해 바람직하게 사용될 수 있다는 것을 의미하고, 이는 또한 중성자 감속재의 역할을 하고, 감속재 대 연료비(중성자에 있어서 중요함)를 증가시키고, 유압 드래그를 감소시키고 요소(20)로부터 냉각수로의 열 전달을 증가시킨다.

[0067]

다양한 실시형태에 따르면, 그 결과로 획득한 감속재 대 연료비는 적어도 2.0, 2.25, 2.5, 2.75, 및/또는 3.0이다(중래의 원통형 산화 우라늄 봉이 사용될 때의 1.96과는 대조적임). 마찬가지로, 다양한 실시형태에 따르면, 핵연료 집합체(10)의 유동 면적(flow area)은, 원통형 산화 우라늄 봉을 사용하는 하나 이상의 핵연료 집합체를

사용하는 것에 비해 16% 이상 증가한다. 증가된 유동 면적은 (종래의 산화 우라늄 집합체에 비해) 상기 집합체 (10)를 통해 냉각수 압력 강하를 줄일 수 있고, 이는 상기 집합체(10)를 통한 냉각수 펌핑에 대한 장점을 가질 수 있다.

[0068] 도 4에 도시된 바와 같이, 상기 요소(20)는 축방향으로 연장된다. 도시된 실시형태에서, 각각의 요소(20)는 전장형(full-length) 요소이며 집합체(10)의 하부에서 또는 그 근처에서의 하부 타이플레이트(70)로부터 집합체 (10)의 상부에서 또는 그 근처에서의 상부 타이플레이트(80)까지 전구간 내내 연장된다. 다양한 실시형태 및 원자로 설계에 따르면, 이는 1 미터(소형 원자로)에서 4 미터 이상 긴 요소(20)를 형성할 수 있다. 따라서, 일반적인 원자로에 있어서, 상기 요소(20)는 1 내지 5 미터일 수 있다. 그러나, 상기 요소(20)는 본 발명의 범위를 벗어나지 않고 그 밖의 다른 크기의 원자로를 수용하기 위해 길어지거나 짧아질 수 있다.

[0069] 도시된 요소(20) 그 자체는 전장형인 반면, 요소(20)는 대안적으로 분할될 수 있고, 따라서 다수의 분절들이 함께 전장형 요소를 형성할 수 있다. 예를 들면, 4 개의 1 미터 요소의 세그먼트들(20)이 전장형 요소를 효과적으로 형성하기 위해 단부와 단부를 이어 정렬될 수 있다. 세그먼트들의 축방향 간격과 배열을 유지하기 위해 추가의 타이플레이트(70, 80)가 세그먼트들 사이의 교차점에 제공될 수 있다.

[0070] 하나 이상의 실시형태에 따르면, 상기 연료 커널(100)은 내화 금속/합금과 연료 물질의 조합을 포함한다. 상기 내화 금속/합금은 지르코늄 합금을 포함할 수 있다. 상기 연료 물질은 저농축 우라늄(예를 들어, U235, U233), 플루토늄, 또는 아래에 정의된 바와 같이 저농축 우라늄 결합된 토륨 및/또는 플루토늄을 포함할 수 있다. 본원에서 사용된 바와 같이, "저농축 우라늄"은 전체 연료 물질이 20 wt% 이하의 핵분열성 물질(예를 들어, 우라늄-235 또는 우라늄-233)을 포함하는 것을 의미한다. 다양한 실시형태에 따르면, 우라늄 연료 물질은 우라늄-235의 1 w% 내지 20 w%, 5 w% 내지 20 w%, 10 w% 내지 20 w%, 및/또는 15 w% 내지 20 w%로 농축된다. 하나 이상의 실시형태에 따르면, 연료 물질은 19.7%의 농축 우라늄-235를 포함한다.

[0071] 다양한 실시형태에 따르면, 상기 연료 물질은 연료 커널(100)의 3 내지 10%, 10 내지 40%, 15 내지 35%, 및/또는 20 내지 30%의 부피 분율을 포함할 수 있다. 다양한 실시형태에 따르면, 상기 내화 금속은 연료 커널(100)의 60 내지 99%, 60 내지 97%, 70 내지 97%, 60 내지 90%, 65 내지 85%, 및/또는 70 내지 80%의 부피 분율을 포함할 수 있다. 하나 이상의 실시형태에 따르면, 하나 이상의 이들 범위 내의 부피 분율은 명시된 합금 성분에 대한 물질 위상도에 정의된 바와 같은 유리한 특성을 갖는 합금을 제공한다. 상기 연료 커널(100)은 δ -상 UZr_2 , 또는 δ -상 UZr_2 및 α -상 Zr의 조합으로 구성된 고합금 연료(즉, 우라늄 성분에 비해 비교적 높은 합금 성분 농도)인 Zr-U 합금을 포함할 수 있다. 하나 이상의 실시형태에 따르면, U-Zr 2원 합금 시스템의 δ -상은 연료 커널(100)의 대략 65 내지 81 vol%의(대략 63 내지 80 atom%)의 지르코늄 성분부터이다. 하나 이상의 실시형태는 연료 요소(20)의 낮은 용적의 방사선 유도 팽창을 야기하는 것으로 확인되었다. 하나 이상의 이러한 실시형태에 따르면, 핵분열 기체는 금속 커널(100) 그 자체 내에 혼입되어, 연료 요소(20)의 하나 이상의 실시형태는 종래의 가스 간극을 연료 요소(20)에서 생략할 수 있다. 하나 이상의 실시형태에 따르면, 이러한 팽창은 저합금(오직 α -상) 성분이 사용되는 경우(예를 들어, 적어도 10%, 20%, 30%, 50%, 75%, 100%, 200%, 300%, 500%, 1000%, 1200%, 1500%)보다 훨씬 덜 발생할 수 있고, 또는 저합금 α -상 U-10Zr 연료가 사용된 경우보다 원자 백분율 연료소비(burnup) 당 용량 백분율 팽창에서 더 큰 감소가 발생할 것이다. 본 발명의 하나 이상의 실시형태에 따르면, 연료 요소(20) 또는 이의 커널(100)의 방사능 유도 팽창은 원자 백분율 연료소비 당 20, 15, 10, 5, 4, 3, 및/또는 2 이하의 용량 백분율일 수 있다. 하나 이상의 실시형태에 따르면, 팽창은 원자 백분율 연료소비 당 1 용량 백분율 근처일 것으로 예상된다.

[0072] 본 발명의 하나 이상의 대안적인 실시형태에 따르면, 연료 커널은 상기한 U-Zr 연료 커널(100)과 동일하거나 유사한 용량 백분율을 갖거나 또는 상기한 U-Zr 연료 커널(100)과는 다른 용량 백분율을 갖는 플루토늄-지르코늄 2원 합금으로 대체된다. 예를 들면, LEU 우라늄이 핵분열성 U-235 동위원소의 20% 이하의 무게 분율을 갖는 반면, 플루토늄은 일반적으로 핵분열성 동위원소의 대략 60 내지 70%의 무게 분율을 갖기 때문에, 상기 커널(100) 내의 플루토늄 부분은 대응하는 우라늄 기반 커널(100) 내의 대응하는 우라늄 부분보다 실질적으로 작을 수 있다. 다양한 실시형태에 따르면, 커널(100) 내의 플루토늄 부피 분율은 15% 이하, 10% 이하, 및/또는 15% 이하일 수 있으며, 내화 금속의 부피 분율은 그에 따라 조절된다.

[0073] 본 발명의 하나 이상의 실시형태 고합금 커널(100)의 사용은 또한 방사 시 핵분열 기체의 유리한 보존을 제공할 수 있다. 산화물 연료 및 저합금 금속 연료는, 일반적으로 방출된 핵분열 기체를 가두기 위해 연료봉 내에 플레넘(plenum)을 갖는 연료 설계에 의해 일반적으로 수용되는, 상당한 핵분열 기체 방출을 일반적으로 보인다. 본 발명의 하나 이상의 실시형태에 따르는 상기 연료 커널(100)은 그에 반해서 핵분열 기체를 방출하지 않는다. 이

는 부분적으로는 연료 커널(100)의 낮은 작동 온도로 인한 것이고, 핵분열 기체 원자(구체적으로 Xe 및 Kr)가 마치 고체 핵분열 생성물처럼 거동하는 사실로 인한 것이다. 핵분열 기체 기포의 생성과 상기 연료 커널(100)의 외부로의 결정립계(grain boundary)를 따른 이동은 하나 이상의 실시형태에 따라 발생하지 않는다. 하나 이상의 실시형태에 따른 충분한 고온에서, (수 마이크로미터 직경의) 작은 핵분열 기체 기포가 생성될 수 있다. 그러나, 본 발명의 하나 이상의 실시형태에 따르면, 이들 기포는 상기 연료 커널(100)과 분리된 상태를 유지하고 핵분열 기체 방출을 용이하게 할 수 있는 상호 연결된 네트워크를 형성하지 않는다. 상기 연료 커널(100)과 클래딩(120) 간의 야금 접합은 핵분열 가스 방출에 대해 추가의 장벽을 제공할 수 있다.

[0074] 다양한 실시형태에 따르면, 상기 하나 이상의 연료 요소(20)의 연료 커널(100)(또는 클래딩(120) 또는 연료 요소(20)의 그 밖의 적절한 부품)은 가돌리늄, 보론, 에르븀 또는 그 밖의 적절한 중성자 흡수 물질과 같은 가연성 독물로 함금되어 일체형 가연성 독물 연료 요소를 형성할 수 있다. 핵연료 집합체(10) 내의 다른 연료 요소(20)는 다른 가연성 독물 및/또는 다른 양의 가연성 독물을 함유할 수 있다. 예를 들면, 핵연료 집합체(10)(예를 들어, 75% 이하, 50% 이하, 20% 이하, 1 내지 15%, 1 내지 12%, 2 내지 12%)의 일부 연료 요소(20)는 25 wt%, 20 wt%, 및/또는 15 wt% 이하의 가돌리늄(예를 들어 1 내지 25 wt%, 1 내지 15 wt%, 5 내지 15 wt% 등)을 갖는 커널(100)을 포함할 수 있다. 핵연료 집합체(10)(예를 들어 10 내지 95%, 10 내지 50%, 20 내지 50%, 가돌리늄을 사용하는 연료 요소(20)보다 더 많은 수의 연료 요소(20))의 다른 연료 요소(20)는 10 또는 15 wt% 이하의 에르븀(예를 들어, 0.1 내지 10.0 wt%, 0.1 내지 5.0 wt% 등)을 갖는 커널(100)을 포함할 수 있다.

[0075] 다양한 실시형태에 따르면, 가연성 독물은 커널(100) 내부에 가연성 독물을 포함하지 않는 연료 요소(20)에 관한 연료 물질(내화 금속 대신에)을 대체한다. 예를 들면, 커널이 독물의 부재 하에 65 vol%의 지르코늄과 35 vol%의 우라늄을 포함하는 연료 요소(20)의 일 실시형태에 따르면, 상기 연료 요소(20)는 16.5 vol%의 가돌리늄, 65 vol%의 지르코늄, 및 18.5 vol%의 우라늄인 커널(100)을 포함한다. 하나 이상의 실시형태에 따르면, 상기 가연성 독물은 연료 물질 대신에 내화 금속을 대체한다. 하나 이상의 실시형태에 따르면, 상기 연료 커널(100) 내의 가연성 독물은 내화 금속과 연료 물질을 비례해서 대체한다. 그 결과, 다양한 이들 실시형태에 따르면, 상기 연료 커널(100) 내의 가연성 독물은 UZr_2 의 δ -상 또는 Zr의 α -상 내에 배치되어 가연성 독물의 존재가 이 가연성 독물이 배치된 UZr_2 합금 또는 Zr의 상을 변경시키지 않도록 할 수 있다.

[0076] 가연성 독물을 갖는 커널(100)을 구비한 연료 요소(20)는 노심에서 사용되는 하나 이상의 핵연료 집합체(10)의 연료 요소(20)의 독물(예를 들어, 0 내지 100%, 1 내지 99%, 1 내지 50% 등)을 형성할 수 있다. 예를 들면, 가연성 독물을 갖는 연료 요소(20)는, 전력 분배 제어를 제공하고 운전 사이클에서 수용성 붕소의 농도를 조기에 줄일 수 있도록, 가연성 독물을 갖지 않는 연료 요소(20)를 또한 포함하는 집합체(10)의 핵연료 집합체 격자 내의 전략적 위치에 배치될 수 있다. 마찬가지로, 가연성 독물을 갖는 연료 요소(20)를 포함하는 엄선된 핵연료 집합체(10)는, 전력 분배 제어를 제공하고 운전 사이클에서 수용성 붕소의 농도를 조기에 줄일 수 있도록, 가연성 독물을 갖는 연료 요소(20)를 포함하지 않는 집합체(10)에 관한 노심 내의 전략적 위치에 배치될 수 있다. 이러한 일체형 가연성 독물 흡수제의 사용은 연장된 운전 사이클의 설계를 용이하게 할 수 있다.

[0077] 대안적으로 및/또는 추가적으로, 별도의 비-연료를 함유한 가연성 독봉(non-fuel bearing burnable poison rod)이 (예를 들어, 하나 이상의 연료 요소(20)를 대신해서, 제어봉 등을 수용하지 않는 핵연료 집합체(10) 내의 가이드 튜브로 삽입되는 연료 요소(20)에 인접한) 핵연료 집합체(10) 내에 포함될 수 있다. 하나 이상의 실시형태에서, 이러한 비-연료 가연성 독봉은 밥콕 앤 윌콕스(Babcock and Wilcox) 또는 웨스팅하우스(Westinghouse)가 설계한 원자로에서 사용되는 것(가연성 독봉 집합체, burnable poison rod assembly (BPRA)라 함)과 유사한 스파이더 집합체(spider assembly) 내에 설계될 수 있다. 이들은 이후 제어봉 가이드 튜브 내에 삽입될 수 있고, 반응도 조정(reactivity control)을 위한 운전의 최초 사이클 동안 제어 बैं크(control bank)가 없는 엄선된 핵연료 집합체(10) 내부에 고정될 수 있다. 가연성 독물 클러스터가 사용되는 경우, 이는 핵연료 집합체가 다음 연료 사이클을 위해 이전될 때 제거될 수 있다. 별도의 비-연료 함유 가연성 독봉이 하나 이상의 연료 요소(20)를 대신해서 배치되는 대안적인 실시형태에 따르면, 상기 비-연료 가연성 독봉은 핵연료 집합체(10) 내에 배치되고, 핵연료 집합체(10)가 사용 가능한 수명에 도달한 경우 다른 연료 요소들(20)과 함께 배출된다.

[0078] 상기 연료 요소(20)는 분말 야금 공압출을 통해 제조된다. 일반적으로, 연료 커널(100)용 분말로 된 내화 금속과 분말 금속 연료 물질(뿐만 아니라, 상기 커널(100)에 포함된 경우, 분말로 된 가연성 독물)이 혼합되고, 빈(blank) 디스플레이서(100)가 분말 혼합물 내에 배치되며, 이후 분말과 디스플레이서(110)의 조합을 (예를 들어, 상기 혼합물을 소결하기 위해 다양한 시간 대에 걸쳐 다양한 범위로 가열되는 금형 내에서) 압축하고 소

결하여 연료 코어 스톡/빌렛(fuel core stock/billet)을 형성한다. 상기 빈 디스플레이서(110)는 최종적으로 제조되는 디스플레이서(110)와 동일하거나 유사한 단면 형상을 가질 수 있다. 대안적으로, 상기 빈 디스플레이서(110)는 압출 시 디스플레이서(110)의 의도된 단면 형상으로 변형되도록 설계된 형상을 가질 수 있다. (디스플레이서(110) 및 소결된 연료 커널(100) 물질을 포함하는) 연료 코어 스톡은 밀봉된 튜브 베이스와 다른 단부 상의 개구부를 갖는 중공 클래딩(120) 내로 삽입된다. 다른 단부 상의 개구부는 이후 클래딩과 동일한 물질로 제조된 엔드 플러그(end plug)로 밀봉되어 빌렛을 형성한다. 상기 빌렛은 원통형 형상일 수 있거나, 또는 예를 들어, 도 5 및 도 9에 도시된 바와 같이, 상기 요소(20)의 최종 단면 형상과 더욱 유사한 형상을 가질 수 있다. 상기 빌렛은 이후 다이 세트(die set)를 통해 온도와 압력 하에서 공압출되어, 최종적인 형상의 커널(100), 클래딩(110) 및 디스플레이서(120)를 포함하는 요소(20)를 형성한다. 비원통형 디스플레이서(110)를 사용하는 다양한 실시형태에 따르면, 상기 빌렛은, 디스플레이서(110)의 모서리가 연료 요소(20)의 로브(20b)와 함께 정렬되도록 압출 프레스 다이에 대해 적절하게 배향될 수 있다. 압출 공정은 (빌렛을 고정 다이를 통해 이동시키는) 직접 압출 또는 (다이를 고정 빌렛을 향해 이동시키는) 간접 압출에 의해 이루어질 수 있다. 상기 공정은 연료 커널(100)에 야금으로 접합된 클래딩(120)을 형성하여, 연료 커널(100)로부터 클래딩(120)의 박리 위험을 줄인다. 상기 클래딩(120)의 튜브와 엔드 플러그는 야금으로 서로 접합되어 클래딩(120) 내부의 연료 커널(100)을 밀봉한다. 연료 요소(20)에서 사용되는 내화 금속의 높은 용해점은 분말 야금을 이들 물질로 구성 요소를 제조하는 방법을 선택 가능하게 하는 경향이 있다.

[0079] 하나 이상의 대안적인 실시형태에 따르면, 연료 요소(20)의 연료 코어 스톡은 소결 대신에 주조(casting)를 통해 제조될 수 있다. 분말로 된 또는 한 덩어리로 된 내화 금속과 분말로 된 또는 한 덩어리로 된 연료 물질(뿐만 아니라, 상기 커널(100)에 포함된 경우, 분말로 된 가연성 독물)이 혼합되고, 용해되어 금형에서 주조될 수 있다. 상기 금형은 주조된 커널(100) 내의 빈 디스플레이서 형상의 공동(void)을 형성하여, 클래딩(120)이 추가되어 압출되는 빌렛을 형성하는 방식과 동일한 방식으로, 상기 커널(100)이 주조된 이후 빈 디스플레이서(110)가 삽입되게 할 수 있다. 상기 연료 요소(20)를 제조하기 위한 나머지 단계는 주조 대신에 소결을 활용하는 상기한 실시형태에 동일하거나 유사한 단계일 수 있다. 후속적인 압출은 커널(100)과 클래딩(120) 간뿐만 아니라 디스플레이서(110)와 커널(100) 간의 야금 접합을 형성한다.

[0080] 하나 이상의 대안적인 실시형태에 따르면, 상기 연료 요소(20)는 분말로 된 금속 연료 물질 대신에 분말로 된 세라믹 연료 물질을 사용하여 제조된다. 나머지 제조 단계는 분말로 된 금속 연료 물질을 사용하는 실시형태와 관련하여 위에서 논의한 것과 동일할 수 있다. 다양한 금속 연료의 실시형태 및 세라믹 연료의 실시형태에서, 제조 공정은 금속 비-연료 물질 내에 배치된 연료 물질을 포함하는 연료 커널(100)을 생산할 수 있다. 하나 이상의 금속 연료의 실시형태에서, 생성된 연료 커널(100)은 금속 연료 물질과 금속 비-연료 물질(예를 들어, 우라늄-지르코늄 합금)의 매트릭스를 포함하는 금속 연료 합금 커널을 포함한다. 하나 이상의 세라믹 연료의 실시형태에서, 상기 커널(100)은 금속 비-연료 물질의 매트릭스 내에 배치된(예를 들어, 금속 비-연료 물질의 매트릭스의 사이사이에 배치된) 세라믹 연료 물질을 포함한다. 다양한 실시형태에 따르면, 제조 공정에서 사용되는 세라믹 연료 물질은 분말로 된 우라늄 또는 플루토늄 산화물, 분말로 된 우라늄 또는 플루토늄 질화물, 분말로 된 우라늄 또는 플루토늄 탄화물, 분말로 된 우라늄 또는 플루토늄 수소화물, 또는 이들의 조합을 포함할 수 있다. UO_2 펠렛이 튜브 내에 배치된 종래의 UO_2 연료 요소와는 대조적으로, 본 발명의 하나 이상의 실시형태에 따른 제조 공정은 비-연료 물질이 고체 매트릭스(예를 들어 지르코늄 매트릭스) 내에 배치되는 세라믹 연료를 생성한다.

[0081] 도 4에 도시된 바와 같이, 상기 나선형 리브(130)의 축방향 나선형성 피치(axial coiling pitch)는 인접한 연료 요소들(10)의 축을, 연료 요소의 단면 내의 모서리에 걸친 폭과 동일한 간격으로 배치하는 조건에 따라 선택되며 연료 요소(20)의 길이의 5% 내지 20%일 수 있다. 일 실시형태에 따르면, 상기 피치(즉 로브/리브가 완전히 회전하는 축방향 길이)는 대략 21.5 cm인 반면, 요소(20)의 전체 활성 길이는 420 cm이다. 도3에 도시된 바와 같이, 상기 하부 타이플레이트(70)에 의해 하부에서, 상부 타이플레이트(80)에 의해 상부에서, 그리고 슈라우드(30)에 의해 노심의 높이에 대해, 연료 요소(20)의 수직 배치의 안정성이 제공된다. 도 1에 도시된 바와 같이, 상기 연료 요소들(20)은, 임의의 두 개의 인접한 연료 요소들(20)의 로브 프로파일이 연료 요소 다발의 적어도 하나의 단면 내에서 두 개의 인접한 연료 요소들(20)을 통과하는 일반적인 대칭 평면을 갖도록, 원주의 배향을 갖는다.

[0082] 도 1에 도시된 바와 같이, 상기 연료 요소들(20)의 배향과 함께 이들의 나선형 트위스트는 하나 이상의 자체-간격 평면이 존재하는 것을 보장한다. 도 1에 도시된 바와 같이, 이러한 자체-간격 평면에서, 인접한 요소(20)의 리브는 서로 접촉하여 이들 요소(20) 사이의 적절한 간격을 보장한다. 따라서 요소들(20)의 중심 간격은 각각의

요소(20)의 모서리 간의 폭(도 5에 도시된 요소에서 12.6 mm)과 대략 동일할 것이다. 각각의 연료 요소(20) 내의 로브(20b)의 수와 연료 요소들(20)의 상대적인 기하학적 배열에 따라, 모든 인접한 연료 요소들(20) 또는 인접한 연료 요소들(20)의 일부만이 서로 접촉할 것이다. 예를 들면, 도시된 4-로브 실시형태에서, 각각의 연료 요소(20)는 각각의 자체-간격 평면에서 네 개의 모든 인접한 연료 요소들(20)과 접촉한다. 그러나, 연료 요소들이 육각형 패턴으로 배열되어 있는 3-로브 연료 요소 실시형태에서, 각각의 연료 요소는 주어진 자체-간격 평면에서 여섯 개의 인접한 연료 요소들 중 오직 세 개의 연료 요소들과만 접촉할 것이다. 3-로브 연료 요소는 축방향으로 이격된 그 다음 자체-간격 평면(즉 이전의 자체-간격 평면으로부터 옹셋된 회전의 1/6)에서 다른 세 개의 인접한 연료 요소들과 접촉할 것이다.

[0083] n 개의 연료 요소가 하나의 특정 연료 요소(20)에 인접해 있는 n-로브 요소(20)에서, 자체-간격 평면은 매 1/n 나선형 회전마다 존재할 것이다(예를 들어, 네 개의 다른 연료 요소들(20)이 연료 요소(20)와 인접하도록 사각형 패턴 내에 배치된 4-로브 요소(20)에 대한 매 1/4 나선형 회전마다; 세 개의 연료 요소들이 하나의 연료 요소에 인접해 있는 3-로브 요소에 대한 매 1/3 나선형 회전마다(즉, 연료 요소 외주 주위의 매 120도마다). 나선의 피치는 연료 요소들(20)의 종방향 길이에 걸쳐 더욱 많은 또는 적은 자체-간격 평면을 형성하기 위해 변경될 수 있다. 일 실시형태에 따르면, 각각의 4-로브 연료 요소(20)는, 연료 요소(20)의 다발의 종방향 길이에 걸쳐 다수의 자체-간격 평면이 존재하도록, 다수의 트위스트를 갖는다.

[0084] 도시된 실시형태에서, 모든 요소들(20)은 동일한 방향으로 트위스트된다. 그러나, 대안적인 실시형태에 따르면, 인접한 요소들(20)은 본 발명의 범위를 벗어나지 않고 반대 방향으로 트위스트될 수 있다.

[0085] 연료봉 길이를 따른 자체-간격 평면의 수에 대한 공식은 다음과 같다:

[0086] $N=n*L/h$, 여기서,

[0087] L: 연료봉 길이

[0088] n: 로브(리브)의 수 그리고 하나의 연료 요소에 인접한 연료 요소의 수

[0089] h: 나선형 트위스트 피치

[0090] 상기 공식은 로브의 수와 하나의 연료 요소에 인접한 연료 요소의 수가 동일하지 않는 경우 약간 다르다.

[0091] 이러한 자체-간격의 결과, 상기 핵연료 집합체(10)는 집합체(10)의 길이를 따른 요소의 적절한 간격을 보장하는데 필요할 수 있는 스페이스 격자를 생략할 수 있다. 스페이스 격자를 제거함으로써, 냉각수는 집합체(10)를 통해 더욱 자유롭게 유통할 수 있으며, 이는 요소(20)로부터 냉각수로의 열 전달을 유리하게 증가시킨다. 그러나, 본 발명의 대안적인 실시형태에 따르면, 상기 집합체(10)는 본 발명의 범위를 벗어나지 않고 스페이스 격자(들)를 포함할 수 있다.

[0092] 도 3에 도시된 바와 같이, 상기 슈라우드(30)는 연료 요소(20)의 전체 길이를 따라 축방향으로 연장되고 연료 요소들(20)을 둘러싸는 관형 셸(tubular shell)을 형성한다. 그러나, 본 발명의 대안적인 실시형태에 따르면, 상기 슈라우드(30)는 각각 요소 요소들(20)을 둘러싸는 축방향으로 이격된 밴드를 포함할 수 있다. 하나 이상의 이러한 밴드는 자체-간격 평면들과 축방향으로 정렬될 수 있다. 축방향으로 연장된 모서리 지지부는 이러한 밴드를 지지하기 위해, 밴드의 정렬을 유지하기 위해, 그리고 집합체를 짧게 하기 위해, 축방향으로 이격된 밴드들 사이에서 연장될 수 있다. 대안적으로 및/또는 추가적으로, 슈라우드(30)가 지지를 필요로 하거나 원하지 않는 곳곳에 관형/다각형 슈라우드(30) 내로 홀을 절단할 수 있다. 하나의 전체 슈라우드(30)의 사용은 각각의 핵연료 집합체(10)를 통한 별도의 냉각수 흐름의 제어를 더욱 용이하게 할 수 있다. 반대로, 밴드, 또는 홀을 갖는 슈라우드의 사용은 인접한 핵연료 집합체들(10) 사이의 양호한 냉각수 혼합을 용이하게 할 수 있고, 이는 인접한 핵연료 집합체들(10) 사이의 냉각수 온도 구배를 유리하게 줄일 수 있다.

[0093] 도 1에 도시된 바와 같이, 상기 슈라우드(30)의 단면 외주는 내부에 상기 집합체(10)가 사용되는 원자로를 수용하는 형상을 갖는다. 사각형 핵연료 집합체를 사용하는 AP-1000과 같은 원자로에서, 슈어우는 사각형 단면을 갖는다. 그러나, 상기 슈라우드(30)는 이것이 사용되는 원자로(예를 들어, VVER 원자로(예를 들어, 미국 특허 출원 공개 제2009/0252278 A1호의 도 1에 도시된 바와 같은)에서의 사용을 위한 육각형 형상)에 따라 선택적으로 임의의 적절한 형상을 가질 수 있다.

[0094] 가이드 튜브(40)는 탄화 붕소(B4C), 은 인듐 카드뮴(Ag, In, Cd), 티탄산 디스프로슘 dysprosium titanate (Dy2O3 TiO2) 또는 반응도 조정(미도시)을 위해 사용되는 그 밖의 적절한 합금 또는 물질을 근거로 한 제어 흡수체 요소 및 탄화 붕소, 산화 가돌리늄(Gd2O3) 또는 그 밖의 적절한 물질(미도시)의 삽입을 제공하고 탄성 축

방향 변위(elastic axial displacement)의 능력을 갖는 상부 노즐(50) 내에 배치된다. 가이드 튜브(40)는 지르코늄 합금을 포함할 수 있다. 예를 들면, 도 1에 도시된 가이드 튜브(40)의 배치는 AP-1000 원자로(예를 들어, 17×17 격자 내에 도시된 위치에서 두 개의 환형 열(annular row) 내에 배치된 24 개의 가이드 튜브]에서 사용되는 배치이다.

- [0095] 프레임(25)의 형상, 크기 및 특징은 상기 집합체(10)가 사용될 특정 노심에 따라 달라진다. 따라서, 본 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자는 상기 핵연료 집합체(10)를 위해 어떻게 적절한 형상과 크기를 갖는 프레임을 구성할 것인가를 이해할 것이다. 예를 들면, 상기 프레임(25)은 종래의 발전소 노심용 산화 우라늄 또는 혼합 산화물 연료 집합체 대신에 종래의 원자력 발전소의 노심에 꼭 맞는 형상을 갖고 구성될 수 있다. 원자력 발전소는 2010년 이전에 실제로 사용된(예를 들어, 2, 3 또는 4-루프 가압수형 원자로(PWRs); 비등수형 원자로(BWR-4)) 노심 설계를 포함할 수 있다. 대안적으로, 원자력 발전소는 상기 핵연료 집합체(10)와 함께 사용하기 위해 특별히 맞춘 전적으로 새로운 설계된 것일 수 있다.
- [0096] 위에서 설명한 바와 같이, 도시된 핵연료 집합체(10)는 AP-1000 또는 유럽형 가압경수로(EPR) 원자로에서의 사용을 위해 설계된다. 상기 집합체는 17×17 배열의 연료 요소(20)를 포함하며, 이들 중 24 개는 EPR 내의 총 265 개의 연료 요소(20) 또는 AP-1000 내의 총 264 개의 연료 요소(20)에 대해 위에서 설명한 바와 같이 가이드 튜브로 대체된다(AP-1000에서, 가이드 튜브와 대체되는 24 개의 연료 요소에 더해, 중앙 연료 요소가 또한 계측 튜브(instrumented tube)로 교체된다).
- [0097] 바람직하게 상기 요소들(20)은 핵연료 집합체(10)의 전체 핵분열 물질의 100%를 제공한다. 대안적으로 상기 핵연료 집합체(10)의 핵분열 물질의 일부는 요소들(20)(예를 들어, 비-로브 요소, 산화 우라늄 요소, 요소들(20)과는 다른 연료비 및/또는 농축을 갖는 요소들) 이외의 연료 요소들을 통해 제공될 수 있다.
- [0098] 본 발명의 하나 이상의 실시형태에 따른 금속 연료 요소(20)의 사용은, 웨스팅하우스-설계 AP-1000, AREVA-설계 EPR 원자로, 또는 GE-설계 ABWR과 같은 (비등수형 원자로 및 가압형 원자로를 포함하는) 경수형 원자로(light water nuclear reactor, LWR)에서 종래에 사용된 산화 우라늄 또는 혼합 산화물 연료에 대해 다양한 장점을 가능하게 한다. 예를 들면, 하나 이상의 실시형태에 따르면, 표준 산화 우라늄 또는 혼합 산화물 연료로 가동되는 LWR에 대한 정격 출력은, 기존 타입의 경수형 원자로 또는 제시된 새로운 타입의 경수형 원자로에서 사용되는 표준 산화 우라늄 연료 및 핵연료 집합체를 순금속 연료 요소(20) 및/또는 핵연료 집합체(10)로 대체함으로써 최고 30% 정도 상승될 수 있다.
- [0099] 표준 산화 우라늄 연료로 가동되는 경수형 원자로의 정격 출력을 증가시키는 것에 대한 주요 제약 중 하나는 이러한 연료를 사용하는 원통형 연료 요소의 작은 표면적이었다. 원통형 연료 요소는 연료 요소의 모든 유형의 단면 프로파일에 있어서 가장 낮은 표면적 대비 부피비를 갖는다. 표준 산화 우라늄 연료에 대한 또 다른 주요 제약은, 허용 연료 성능 기준을 계속 충족하면서 이러한 연료 요소가 가능하게 도달할 수 있는 비교적 낮은 연료 소비였다. 그 결과, 표준 산화 우라늄 또는 혼합 산화물 연료와 관련된 이들 요인은 기존의 원자로의 정격 출력이 증가될 수 있는 정도를 크게 제한한다.
- [0100] 순금속 연료 요소(20)의 하나 이상의 실시형태는 상기한 한계를 극복한다. 예를 들면, 위에서 설명한 바와 같이, 스페이서 격자의 결핍은 유압 저항을 감소시키고, 따라서 요소(20)로부터 1차 냉각수로의 냉각수 흐름과 열 유속을 증가시킨다. 연료 요소(20)의 나선형 트위스트는 냉각수 혼합과 난류를 증가시키고, 이는 또한 요소(20)로부터 냉각수로의 열 유속을 증가시킬 수 있다.
- [0101] 본 발명의 하나 이상의 실시형태에 따라 예비 중성자 및 열 수력 분석은 다음을 나타낸다:
- [0102] ● LWR 원자로의 정격 열출력은 30.7% 이상 증가될 수 있다(예를 들어, EPR 원자로의 정격 열출력 4.59 GWth 6.0 GWth로 증가될 수 있다).
- [0103] ● 우라늄-지르코늄 혼합물에서 25%의 우라늄 부피 분율과 19.7%의 우라늄-245 농축을 가지고, 4-로브 금속 연료 요소(20)의 구성을 갖는 EPR 노심은, (매 18개월에 한 번인) 배치(batch) 당 72 개의 핵연료 집합체가 교체되는 경우 6.0 GWth의 증가된 정격 열출력에서 대략 500 내지 520일의 유효 전출력 운전일(effective full power day, EFPD) 동안 또는 (매 18개월에 한 번인) 배치 당 80 개의 핵연료 집합체가 교체되는 경우 540 내지 560일의 유효 전출력 운전일 동안 가동될 수 있다.
- [0104] ● 다중-로브 연료 요소에서 증가된 표면적으로 인해, 6.0 GWth의 증가된 정격 출력에서도, 다중-로브 연료 요소의 평균 표면 열 유속은 4.59 GWth의 정격 열출력에서 가동되는 원통형 산화 우라늄 연료 요소보다 4 내지 5% 낮은 것으로 나타났다. 이는 한계 열 유속(예를 들어, PWR에서 증가된 핵 비등 이탈(departure from nucleate

boiling) 여유 또는 BWR에서 한계 출력비의 최대분율(maximum fraction limiting critical power ratio)에 대해 증가된 안전 여유를 제공할 수 있다. 또한, 이는 가연성 독소를 갖는 집합체 당 12 개의 연료 요소의 사용을 가능하게 할 수 있다. 가연성 독소는 사이클 초기에 과잉 반응도를 제거하고 또는 노심의 가열 동안 도플러 효과를 증가시키는데 사용될 수 있다.

- [0105] ● 상기 핵연료 집합체(10)는 종래의 산화 우라늄 또는 혼합 산화물 핵연료 집합체보다 낮은 연료 작동점에서 더 큰 열출력을 제공할 수 있다.
- [0106] 상기 집합체(10)의 증가된 출력을 활용함으로써, 종래의 발전소가 업그레이드될 수 있다(예를 들어, 더 큰 및/또는 추가의 냉각수 펌프, 증기 발생기, 열 교환기, 가압기, 터빈). 실제로, 하나 이상의 실시형태에 따르면, 이러한 업그레이드는 기존 원자로로부터 30 내지 40%의 많은 전기를 제공할 수 있다. 이러한 가능성은 완벽한 제 2 원자로를 건설할 필요를 방지할 수 있다. 변경 비용은 증가된 전기 출력을 통해 스스로 신속하게 충당할 수 있다. 대안적으로, 새로운 발전소가 상기 집합체(10)의 높은 열출력을 처리하고 활용할 수 있는 적절한 기능을 포함하도록 구성될 수 있다.
- [0107] 또한, 본 발명의 하나 이상의 실시형태는 원자로의 중대한 변경 없이 기존의 원자로 시스템을 이용하여 표준 산화 우라늄 또는 혼합 산화물 연료를 사용하는 것과 동일한 정격 출력에서 LWR가 가동되도록 할 수 있다. 예를 들어, 일 실시형태에 따르면:
- [0108] ● EPR은 종래의 산화 우라늄 연료가 사용되는 것처럼 동일한 출력(4.59 GWt)을 가질 것이다;
- [0109] ● 우라늄-지르코늄 혼합물에서 25%의 우라늄 부피 분율과 대략 15%의 우라늄-245 농축을 가지고, 4-로브 금속 연료 요소(20)의 구성을 갖는 EPR 노심은, 배치(batch) 당 72 개의 핵연료 집합체가 교체되는 경우 대략 500 내지 520일의 유효 전출력 운전일 동안 또는 배치 당 80 개의 핵연료 집합체가 교체되는 경우 540 내지 560일의 유효 전출력 운전일 동안 가동될 수 있다.
- [0110] ● 요소(20)에 대한 평균 표면 열 유속은, 종래의 산화 우라늄 연료를 갖는 원통형 봉(예를 들어, 39.94 v. 57.34 W/cm²에서의 그것과 비교해서 대략 30% 증가된다. 집합체(10)를 통한 냉각수의 온도 상승(예를 들어, 입구와 출구 온도의 차이)과 집합체(10)를 통한 냉각수 유량이 종래의 핵연료 집합체와 비교해서 거의 동일하기 때문에, 감소된 평균 표면 열 유속은, 한계 열 유속(예를 들어, PWR에서 증가된 핵 비등 이탈 여유 또는 BWR에서 한계 출력비의 최대분율)에 대해 증가된 안전 여유에 기여하는 연료봉 표면 온도의 상응하는 감소를 초래한다.
- [0111] 추가적으로 및/또는 대안적으로, 본 발명의 하나 이상의 실시형태에 따른 핵연료 집합체(10)는 종래의 핵연료 집합체를 대신해서 노심에 단계적으로 도입될 수 있다. 전환 기간 동안, 종래의 핵연료 집합체와 비교할 만한 핵분열성/중성자성/열 출력을 갖는 핵연료 집합체(10)는 발전소의 작동 매개변수를 변경하지 않고 순차적인 연료 교체에 걸쳐 이러한 종래의 핵연료 집합체를 점차적으로 교체할 수 있다. 따라서, 핵연료 집합체(10)는 전환 기간 동안 중요할 수 있는 기존의 노심에 새로 장착될 수 있다(즉 핵연료 집합체(10)를 갖는 부분적인 노심으로 부터 출발해서 핵연료 집합체(10)의 전체 노심으로의 단계적인 전환).
- [0112] 또한, 집합체(10)의 핵분열성 물질의 로딩은 발전소 운영자가 원하는 특정 전환에 맞출 수 있다. 예를 들면, 핵분열성 물질의 로딩은, 집합체(10)가 대체하는 종래의 핵연료 집합체의 사용과 관련하여, 원자로의 열출력을 어디에서든 0% 내지 30% 또는 그 이상 증가시키도록 적절하게 증가될 수 있다. 그 결과, 발전소 운영자는 업그레이드 시 여러 경우에 기존 발전소의 기반시설 또는 발전소의 능력에 근거해서, 원하는 특정 출력 증강을 선택할 수 있다.
- [0113] 상기 핵연료 집합체(10) 및 연료 요소(20)의 하나 이상의 실시형태는 본 발명의 범위를 벗어나지 않고 (경수형 원자로와는 대조적인) 고속로(fast reactor)에서 사용될 수 있다. 고속로에서, 연료 커널(100)의 비-연료 물질은 바람직하게 몰리브덴 합금(예를 들어, 순수 몰리브덴 또는 몰리브덴과 다른 금속과의 합금)과 같은 내화 금속이고, 클래딩(120)은 바람직하게 스테인리스 강(이의 모든 변형 합금을 포함함) 또는 이러한 원자로에서 냉각수와 함께 사용하기에 적합한 기타 물질(예를 들어, 나트륨)이다. 이러한 연료 요소(20)는 상기한 공압출 공정을 통해 제조될 수 있고 또는 그 밖의 다른 적절한 방법(예를 들어, 진공 용해)에 의해 제조될 수 있다.
- [0114] 도 7A, 도 7B 및 도 8에 도시된 바와 같이, 본 발명의 하나 이상의 실시형태에 따른 핵연료 집합체(510)는 캐나다형 중수로인 캔두로(CANDU reactor)와 같은 가압 중수형 원자로(500)(도 8 참조)에서 사용될 수 있다.
- [0115] 도 7A 및 도 7B에 도시된 바와 같이, 상기 핵연료 집합체(510)는 프레임(520)에 장착되는 다수의 연료 요소(2

0)를 포함한다. 상기 프레임(520)은 연료 요소(20)의 마주하는 축 단부에 (예를 들어, 용접, 억지 끼워맞춤, 요소(20)를 하부 타이플레이트(70)에 부착하기 위한 상기한 다양한 형태의 부착 방법을 통해) 장착되는 두 개의 엔드 플레이트(520a, 520b)를 포함한다. 상기 핵연료 집합체(510)에서 사용되는 요소(20)는 집합체(10)에서 사용되는 요소(20)보다 일반적으로 매우 짧다. 다양한 실시형태 및 원자로(500)에 따르면, 상기 원자로(500)에서 사용되는 요소(20)와 집합체(510)는 대략 18 인치 정도의 길이일 수 있다.

[0116] 상기 요소들(20)은, 자체-간격 평면이 집합체(10)와 관련해서 상기한 방식으로 요소들(20) 사이의 간격을 유지하도록, 집합체(510) 내에서 서로에 대해 배치될 수 있다. 대안적으로, 상기 집합체(510)의 요소들(20)은 인접한 요소들(20)이 서로 접촉하지 않도록 서로 이격될 수 있고, 그 대신 요소(20)의 간격을 유지하기 위해 전적으로 프레임(520)에 의존할 수 있다. 또한, 인접한 요소들(20)을 접촉하고 요소(20)의 간격을 유지할 수 있도록 요소(20)의 축방향 길이를 따라 다양한 위치에서 요소(20) 또는 이들의 리브에 (예를 들어, 봉의 간격을 유지할 수 있도록 가압 중수형 원자로용 종래의 핵연료 집합체의 종래의 연료봉에서 스페이서가 사용되는 것과 유사한 방식으로) 스페이서가 부착될 수 있다.

[0117] 도 8에 도시된 바와 같이, 상기 집합체(510)는 원자로(500)의 칼란드리아 관(500a, calandria tube)(본 기술분야에서 가끔은 칼란드리아(500)로 불림)에 공급될 수 있다. 상기 원자로(500)는 감속재 및 1차 냉각수로서 중수(500b)를 사용한다. 상기 1차 냉각수(500b)는 관(500a)을 통해 수평으로 순환하고 이후 열 교환기로 순환하는데, 여기서 열은 일반적으로 터빈을 통해 전기를 생성하는데 사용되는 2차 냉각수 루프로 전달된다. 핵연료 집합체 로딩 메커니즘(미도시)은, 일반적으로 원자로(500)가 가동 중일 때, 핵연료 집합체(510)를 칼란드리아 관(50a)의 일면으로 로드하고 그리고 사용된 집합체(510)를 관(500a)의 타면으로 밀어내는데 사용된다.

[0118] 상기 핵연료 집합체(510)는 기존의 종래의 가압 중수형 원자로(예를 들어, 캔두로)용 종래의 핵연료 집합체(본 기술분야에서 핵연료 다발로도 알려짐)에 대한 직접 대체물로 설계될 수 있다. 이러한 일 실시형태에서, 상기 집합체(510)는 종래의 집합체/다발을 대신해서 원자로(500) 내로 공급된다. 이러한 핵연료 집합체(510)는 대체되는 종래의 집합체와 유사한 중성자성/열 특성을 갖도록 설계될 수 있다. 대안적으로, 상기 핵연료 집합체(510)는 열출력 증강을 제공하도록 설계될 수 있다. 이러한 증강 실시형태에서, 더욱 높은 열출력을 수용하도록 새로운 또는 업그레이드된 원자로(500)가 설계될 수 있다.

[0119] 본 발명의 다양한 실시형태에 따르면, 상기 핵연료 집합체(10)는 종래의 원자로의 종래의 핵연료 집합체를 대체하도록 설계된다. 예를 들면, 도 1에 도시된 핵연료 집합체(10)는 17×17 배열의 UO_2 연료봉을 이용하는 종래의 핵연료 집합체를 대체하도록 구체적으로 설계된다. 상기 집합체(10)의 가이드 튜브(40)가 종래의 핵연료 집합체와 함께 사용되는 것과 정확하게 동일한 위치에 남는 경우, 그리고 모든 연료 요소들(20)이 동일한 크기인 경우, 연료 요소/봉들 사이의 피치는 종래의 UO_2 핵연료 집합체와 하나 이상의 핵연료 집합체(10) 사이에서(예를 들어 12.6 mm 피치) 변하지 않는다. 다시 말해, 상기 핵연료 집합체(920)의 종축은 비교할 만한 종래의 핵연료 집합체 내에 있는 종래의 UO_2 연료봉의 종축과 동일한 위치에 배치될 수 있다. 다양한 실시형태에 따르면, 연료 요소(20)는 비교할 만한 UO_2 연료봉(예를 들어, 일반적인 UO_2 연료봉에 있어서의 9.5 mm의 외경과 비교할 때 12.6mm)보다 더욱 큰 외접 직경을 가질 수 있다. 그 결과, 도 1에 도시된 자체-간격 평면에서, 연료 요소들(20)이 차지하는 공간의 단면 길이와 폭은 종래의 핵연료 집합체에서의 종래의 UO_2 연료봉이 차지하는 것보다 약간 클 수 있다(예를 들어, 각각 12.6 mm 피치만큼 분리된 17×17 배열의 9.5 mm UO_2 연료봉을 포함하는 종래의 UO_2 핵연료 집합체에 있어서, 211.1 mm인 것과 비교할 때, 핵연료 집합체(10)(즉 17 개의 연료 요소(20) × 연료 요소 당 12.6 mm의 외접 직경)에 있어서 214.2 mm). 종래의 UO_2 핵연료 집합체에서, 스페이서 격자는 연료봉을 둘러싸며, 종래의 핵연료 집합체의 전체 단면 외피를 214 mm × 214 mm로 증가시킨다. 상기 핵연료 집합체(10)에서, 슈라우드(30)는 마찬가지로 핵연료 집합체(10)의 단면 외피를 증가시킨다. 상기 슈라우드(30)는 임의의 적절한 두께(예를 들어, 0.5 mm 또는 1.0 mm 두께)를 가질 수 있다. 1.0 mm 두께의 슈라우드(30)를 사용하는 일 실시형태에서, 핵연료 집합체(10)의 일 실시형태의 전체 단면 외피는 216.2 mm × 216.2 mm(예를 들어, 17 개의 12.6 mm 직경의 연료 요소(20)가 차지하는 214 mm + 슈라우드(30)의 1.0 mm 두께의 두 배)일 수 있다. 그 결과, 본 발명의 하나 이상의 실시형태에 따르면, 상기 핵연료 집합체(10)는 일반적인 UO_2 핵연료 집합체(214 mm × 214 mm)보다 약간 클 수 있다(예를 들어, 216.2 mm × 216.2 mm). 이러한 큰 크기는 상기 집합체(10)가, 종래의 UO_2 핵연료 집합체와 함께 사용할 수 있도록 설계된 하나 이상의 종래의 원자로의 핵연료 집합체 위치에 적절하게 맞도록 하는 능력을 손상시킨다. 이렇나 크기 변화를 수용하기 위해, 본 발명의 하나 이상의 실시형태

에 따르면, 상기 핵연료 집합체(10)의 큰 크기를 수용하도록 새로운 원자로가 설계되고 구성될 수 있다.

[0120] 본 발명의 대안적인 실시형태에 따르면, 모든 연료 요소들(20)의 외접 직경은 핵연료 집합체(10)의 전체 단면 크기를 줄일 수 있도록 약간 감소될 수 있다. 예를 들면, 각각의 연료 요소(20)의 외접 직경은 0.13 mm 내지 12.47 mm만큼 감소시켜, 핵연료 집합체(10)가 차지하는 전체 단면 공간을 종래의 214 mm × 214 mm의 핵연료 집합체(예를 들어, 17 개의 12.47 mm 직경의 연료 요소(20) + 슈라우드의 두 개의 1.0 mm 두께, 이는 대략 총 214 mm이 된다)와 비교할 만하게 할 수 있다. 17×17 배열의 이러한 크기의 감소는 종래의 핵연료 집합체 내의 가이드 튜브의 위치에 비해 상기 핵연료 집합체(10) 내의 가이드 튜브(40)의 위치를 약간 변화시킬 것이다. 튜브(40) 위치의 이러한 약간의 위치 변경을 수용하기 위해, 원자로 내의 해당 제어봉 배열 및 제어봉 구동 메커니즘의 위치를 재배치된 가이드 튜브(40)를 수용하도록 마찬가지로 이동될 수 있다. 대안적으로, 종래의 원자로 내의 제어봉을 위해 충분한 여유와 허용 오차가 제공되는 경우, 종래의 방식으로 배치된 제어봉은 상기 핵연료 집합체(10)의 약간 이동된 튜브(40)에 적합하게 맞을 수 있다.

[0121] 대안적으로, 주변의 연료 요소들(20)의 직경은 전체 집합체(10)가 종래의 핵연료 집합체를 위해 설계된 종래의 원자로에 맞도록 약간 감소될 수 있다. 예를 들면, 연료 요소들(20)의 외부 열의 외접 직경은, 핵연료 집합체의 전체 크기가 214 mm × 214 mm가 되도록 1.1 mm만큼 감소될 수 있다(예를 들어, 15 개의 12.6 mm 연료 요소(20) + 2 개의 11.5 mm 연료 요소(20) + 슈라우드(30)의 두 개의 1.0 mm 두께). 대안적으로, 연료 요소들(20)의 외부 열의 외접 직경은, 핵연료 집합체의 전체 크기가 214 mm × 214 mm가 되도록 0.55 mm만큼 감소될 수 있다(예를 들어, 13 개의 12.6 mm 연료 요소(20) + 4 개의 12.05 mm 핵연료 집합체 + 슈라우드(30)의 두 개의 1.0 mm 두께). 각각의 실시형태에서, 연료 요소들(20)의 중앙 13×13 배열의 피치 및 위치는, 가이드 튜브(40)가 종래의 원자로에서 제어봉 배열 및 제어봉 구동 메커니즘과 정렬되도록 변경되지 않는다.

[0122] 도 10은 본 발명의 대안적인 실시형태에 따른 핵연료 집합체(610)를 도시하고 있다. 다양한 실시형태에 따르면, 상기 핵연료 집합체(610)는, 종래의 다양한 UO₂ 핵연료 집합체와 함께 사용하기 위해 설계된 원자로의 제어봉의 위치를 유지하면서, 종래의 원자로 내의 종래의 UO₂ 핵연료 집합체를 대체하도록 설계된다. 상기 핵연료 집합체(610)는 일반적으로, 위에서 설명되고 도 1에 도시된, 핵연료 집합체(10)와 유사하지만, 성가 집합체(610)가 제어봉 위치 또는 제어봉 구동 메커니즘을 변경하지 않고 하나 이상의 기존의 원자로 타입(예를 들어, 17×17 배열의 UO₂ 봉을 사용하는 웨스팅하우스의 핵연료 집합체 설계)에 더욱 잘 맞도록 하기 위한 몇 가지 차이가 있다.

[0123] 도 10에 도시된 바와 같이, 상기 핵연료 집합체는 17×17 배열의 스페이서를 포함한다. 도 1에 도시된 유사한 핵연료 집합체(10)와 관련하여 상기한 바와 같이 중앙의 15×15 배열은, 200 개의 연료 요소(20) 및 25 개의 가이드 튜브(40)가 차지하고 있다. 특정 원자로 설계에 따라, 원자로 설계가 중앙 튜브(40)를 사용하지 않는 경우(즉, 201 개의 연료 요소(20) 및 24 개의 가이드 튜브(40)), 중앙 가이드 튜브(40)는 추가의 연료 요소(20)로 대체될 수 있다. 상기 가이드 튜브(40)의 위치는 종래의 UO₂ 핵연료 집합체를 사용하도록 설계된 원자로에서 사용되는 가이드 튜브의 위치에 대응한다.

[0124] 17×17 배열/패턴의 핵연료 집합체(610)의 주변 위치(즉, 연료 요소(20)로부터 외측을 향해 측면으로 배치된 위치)는 64 개의 연료 요소/봉(650)이 차지한다. 본 기술분야에 공지된 바와 같이, 상기 연료봉(650)은 중공 봉에 배치된 표준 UO₂ 펠렛화된 연료를 포함할 수 있다. 상기 UO₂ 펠렛화된 연료는 20% 이하, 15% 이하, 10% 이하 및/또는 5% 이하만큼 U-235로 농축될 수 있다. 상기 봉(650)은 연료 요소(20)의 외접 직경보다 약간 작은 직경(예를 들어, 9.50 mm)을 가질 수 있고, 이는 핵연료 집합체(610)의 전체 단면 크기를 약간 감소시키고 따라서 상기 집합체(610)는 종래의 UO₂ 핵연료 집합체를 위해 할당된 공간에 잘 맞는다.

[0125] 도시된 실시형태에서, 상기 연료봉/요소(650)는 UO₂ 펠렛화된 연료를 포함한다. 그러나, 상기 연료봉/요소(650) 대안적으로 하나 이상의 핵분열성 및/또는 핵연료 물질(예를 들어, 토륨, 플루토늄, 우라늄-235, 우라늄-233, 이들의 모든 조합)의 그 밖의 다른 적절한 조합을 사용할 수 있다.

[0126] 하나 이상의 대안적인 실시형태에 따르면, 상기 연료봉(650)은 64 개의 모든 주변 위치 미만을 차지할 수 있다. 예를 들면, 상기 연료봉(650)은 주변부의 상부 열 및 좌측 행을 차지할 수 있고, 반면에 주변부의 하부 열 및 우측 행은 연료 요소들(20)이 차지할 수 있다. 대안적으로, 상기 연료봉(650)은 핵연료 집합체의 그 밖의 다른 두 면을 차지할 수 있다. 슈라우드(630)는 핵연료 집합체의 주변부에서 추가의 연료 요소들(20)을 둘러싸도록 변경될 수 있다. 이러한 변경된 핵연료 집합체는, 하나의 집합체에서 주변의 연료 요소들(650)의 열/행이 항상 인접한 핵연료 집합체의 연료 요소들(20)의 열/행과 인접하도록, 상호 인접하게 배치될 수 있다. 그 결과, 인접

한 집합체들 간의 인터페이스가 주변의 인터페이스 측의 연료 요소들(650)을 포함하는 집합체를 향해 약간 이동되는 사실로 인해 핵연료 집합체를 위한 추가의 공간이 제공된다. 이러한 변경은 상기 핵연료 집합체(610)에 의해 제공된 더욱 많은 수의 높은 열출력 연료 요소(20)의 사용을 제공할 수 있다.

[0127] 슈라우드(630)는 연료 요소들(20)의 배열을 둘러싸고 상기 요소(650)로부터 요소(20)를 분리한다. 노즐(50, 60), 슈라우드(630), 이들 사이에 형성된 냉각수 통로, 요소(20)와 요소(650)를 통한 상대 압력 강하, 및/또는 요소들(650)을 둘러싸는 스페이스 격자(660)(아래에서 설명됨)를 통한 증가된 압력 강하는, 슈라우드(630) 외부의 그리고 비교적 낮은 열출력 연료봉(650)을 통과한 유속보다 높은 슈라우드(630) 내의 그리고 높은 열출력 연료봉(20)을 통과한 냉각수 유속을 형성할 것이다. 여기에서의 통로 및/또는 오리피스는 이들 각각의 열출력 및 설계된 작동 온도를 근거로 요소들(20, 650)을 통과한 상대 냉각수 유속을 최적화하도록 설계될 수 있다.

[0128] 다양한 실시형태에 따르면, 상기 핵연료 집합체(610)의 연료 요소(20)에 대한 감속재 대 연료비는 to 2.7, 2.6, 2.5, 2.4, 2.3, 2.2, 2.1, 2.0, 1.9, 및/또는 1.8보다 작거나 같다. 도시된 실시형태에서, 감속재 대 연료비는 (1) 냉각수/감속재에 대해 이용할 수 있는 슈라우드(630) 내의 전체 면적(예를 들어, (가이드 튜브(40)가 냉각수로 가득 찼다고 가정할 때) 슈라우드(630) 내의 총 단면적 - 연료 요소들(20)이 차지하는 총 단면적에 의해 계산됨) 대 (2) 슈라우드(630) 내의 연료 요소들(20)의 커널들(100)의 총 단면적의 비율과 같다.

[0129] 본 발명의 대안적인 실시형태에 따르면, 위에서 설명한 바와 같이, 상기 슈라우드(630)는 하나 이상의 환형 밴드로 대체될 수 있고 또는 슈라우드(630) 내의 홀을 구비할 수 있다. 밴드, 또는 슈라우드(630) 내의 홀의 사용은 연료 요소(20)와 연료 요소(650) 사이의 냉각수의 교차 혼합을 용이하게 할 것이다.

[0130] 도 10에 도시된 바와 같이, 상기 연료 요소들(650)은 일반적으로 종래의 UO_2 핵연료 집합체에서 사용되는 스페이스 격자의 외부와 비교할 만한 환형 스페이스 격자(660) 내에 배치된다. 상기 스페이스 격자(660)는 (예를 들어, 용접, 볼트, 나사, 또는 그 밖의 체결장치를 통해) 슈라우드(630)와 단단히 연결될 수 있다. 바람직하게 상기 스페이스 격자(660)는, 중앙의 연료 요소들(20) 사이에 제공된 바와 같이 연료 요소(650)와 연료 요소(20) 사이에 동일한 피치(예를 들어, 모든 연료 요소들(20, 650)의 축 사이의 12.6 mm 피치)를 제공하기 위한 크기를 갖는다. 이러한 간격을 제공하기 위해, 연료 요소(650)는 스페이스 격자(660)의 외면에 슈라우드(630) 및 스페이스 격자(660)의 내면보다 더욱 가깝게 배치될 수 있다. 바람직하게 상기 핵연료 집합체(610) 및 스페이스 격자(660)는 또한 인접한 핵연료 집합체의 연료 요소들(650) 사이에 동일한 피치(예를 들어, 12.6 mm 피치)가 제공되도록 크기를 가지고 배치된다. 그러나, 임의의 연료 요소들(20, 650) 사이의 간격은 본 발명의 범위를 벗어나지 않고 다른 연료 요소들(20, 650) 사이의 간격에 비해 변경될 수 있다.

[0131] 다양한 실시형태에 따르면, 연료 요소들(20)은 핵연료 집합체(610)의 모든 핵분열성 물질을 함유한 연료요소들(20, 650)의 전체 부피의 적어도 60%, 65%, 70%, 75%, 및/또는 80%를 제공한다. 예를 들면, 핵연료 집합체(610)가 각각 대략 70 mm^2 의 단면적을 갖는 201 개의 연료 요소(20) 및 각각 9.5 mm의 직경을 갖는 64 개의 연료 요소(650)를 포함하는 하나 이상의 실시형태에 따르면, 연료 요소들(20)은 모든 연료 요소들(20, 650)의 전체 부피의 대략 75.6%를 제공한다($201 \text{ 개의 연료 요소}(20) \times 70 \text{ mm}^2$ 는 $14,070 \text{ mm}^2$ 이고; $64 \text{ 개의 연료 요소}(20) \times \pi \times (9.5/2)^2 = 4,534 \text{ mm}^2$; 연료 요소들(20, 650)의 면적은 본질적으로 연료 요소의 부피에 비례하며; $(14,070 \text{ mm}^2 / (14,070 \text{ mm}^2 + 4,534 \text{ mm}^2)) = 75.6\%$ 임).

[0132] 상기 핵연료 집합체(610)의 높이는, 집합체(610)가 대체할 수 있는 비교할 만한 종래의 핵연료 집합체의 높이(예를 들면, 웨스팅하우스 또는 AREVA 원자로 설계를 위한 표준 핵연료 집합체의 높이)와 일치한다.

[0133] 도시된 핵연료 집합체(610)는 웨스팅하우스 4-루프 설계, API1000, 또는 AREVA EPR과 같은 17×17 PWR에서 사용될 수 있다. 그러나, 상기 핵연료 집합체(610)의 설계는 또한 그 밖의 다양한 원자로 설계(예를 들어, 육각형 핵연료 집합체를 사용하는 원자로 설계, 이 경우 육각형의 외주는 UO_2 봉이 차지할 수 있는 반면, 내부 위치는 연료 요소들(20)이 차지하며, 또는 비등수형 원자로, 또는 소형 모듈형 원자로)를 수용하도록 변경될 수 있다. 특정 실시형태와 관련하여 특정 크기가 설명되었지만, 대안적으로 다양한 크기의 연료 요소(20, 650) 및 핵연료 집합체(10)가 본 발명의 범위를 벗어나지 않고 다양한 원자로 또는 원자로 형태와 함께 사용될 수 있다.

[0134] 특정 원자로 설계에 따라, 핵연료 집합체의 추가의 봉 위치가 UO_2 봉으로 대체될 수 있다. 예를 들면, 상기 핵연료 집합체(610)가 외주 열에서 오직 UO_2 봉을 포함하는 반면, 집합체(610)는 대안적으로 본 발명의 범위를 벗

어나지 않고 두 개의 외부 열에서 UO_2 봉을 포함할 수 있다.

[0135] 다양한 실시형태에 따르면, 연료 요소(650)를 지지하는 핵연료 집합체(610)의 일부는 연료 요소(20)를 지지하는 핵연료 집합체(610)의 일부와 분리될 수 없다. 다양한 실시형태에 따르면, (각각의 연료 요소들(20, 650)이 예를 들어, 각각의 연료 요소의 고장을 근거로, 집합체(610)로부터 제거될 수 있기는 하지만) 연료 요소(20)는 핵연료 집합체(610)의 연료 요소(650)로부터 하나의 유닛으로서 분리될 수 없다. 마찬가지로, 핵연료 집합체(610)의 연료 요소(20)에 핵연료 집합체의 연료 요소(650) 부분을 선택적으로 잠그는 잠금 메커니즘이 없다. 다양한 실시형태에 따르면, 핵연료 집합체(610)의 연료 요소(20)와 연료 요소(650)는, 전체 핵연료 집합체(610)가 원자로 내에서 사용되고 이후 하나의 사용된 유닛으로서 제거되도록, 동일하게 설계된 수명 사이클을 갖는다.

[0136] 다양한 실시형태에 따르면, 핵연료 집합체(610) 내의 연료 요소(20)의 증가된 열출력은 집합체(610)가 대체하는 종래의 모든 UO_2 연료봉 집합체에 대해 출력 증강을 제공할 수 있다. 다양한 실시형태에 따르면, 상기 출력 증강은 적어도 5%, 10%, 및/또는 15%이다. 다양한 실시형태에 따르면, 상기 증강은 1 내지 30%, 5 내지 25%, 및/또는 10 내지 20% 사이일 수 있다. 다양한 실시형태에 따르면, 상기 핵연료 집합체(610)는 적어도 18 개월의 연료 사이클을 제공하나 24+ 또는 36+ 개월의 연료 사이클로의 이동을 용이하게 할 수 있다. 도 10에 도시된 요소(20)와 관련해서 위에서 논의한 예시적인 매개변수를 갖는 연료 요소(20)를 사용하는 핵연료 집합체(610)의 일 실시형태에 따르면, 상기 집합체(610)는 아래의 표에 나타난 작동 매개변수 하에 종래의 UO_2 핵연료 집합체에 비해 17%의 증강을 제공한다.

표 2

AREVA EPR 원자로에 대한 작동 매개변수	값	단위
원자로 전력	5.37	GWt
연료 사이클 길이	18	월
재로딩 배치 크기	1/3	코어
연료 요소(20)의 농축	≤ 19.7	없음
봉(650)의 UO_2 의 농축	≤ 5	없음
냉각수 유속	117&	rv

[0138] * rv = 기준값

표 3

핵연료 집합체의 매개변수	값	단위
핵연료 집합체의 설계	17×17	
핵연료 집합체의 피치	215	mm
핵연료 집합체의 외피	214	mm
활성 연료의 높이	4200	mm
연료봉의 수	265	
연료 요소(20)의 피치	12.6	mm
연료 요소(20)의 평균 외경(외접 직경)	12.6	mm
연료 요소(20)의 평균 최소 직경	10.44	mm
감속재 대 연료비, 시드 영역(요소(20)의 주위)	2.36	
감속재 대 연료비, 블랭킷 (연료봉(650)의 주위)	1.9	

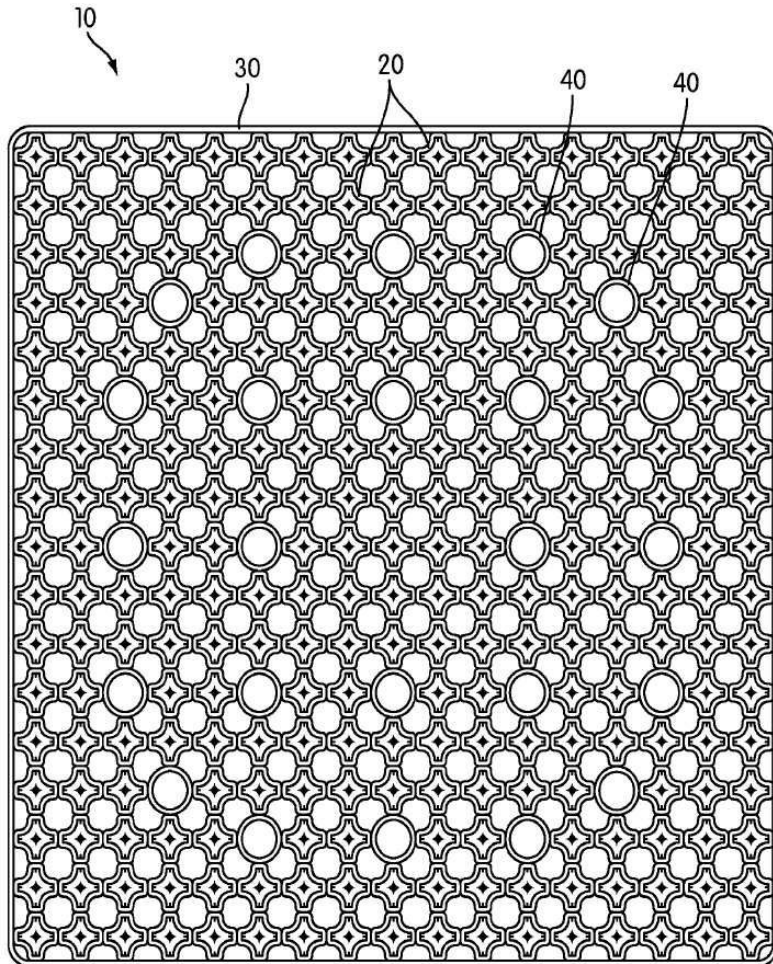
[0140] 바람직하게 상기 핵연료 집합체(10, 510, 610)는 전기를 생성하도록 설계되고 및/또는 열기 전기 이외의 목적(예를 들어, 탈염, 화학 처리, 증기 생성 등)으로 사용되는 지상용 원자력 반응로(90, 500)(예를 들어, (BWR 및 PWR를 포함하는 지상용 LWR, 지상용 고속로, 지상용 중수형 원자로)에서의 사용을 위해 열역학적으로 설계되고 물리적인 형상을 갖는다. 이러한 지상용 원자력 반응로(90)는, 특히 VVER, AP-1000, EPR, APR- 1400, ABWR, BWR-6, CANDU, BN-600, BN-800, Toshiba 4S, 몬주(Monju) 등을 포함한다. 그러나, 본 발명의 대안적인 실시형태에 따르면, 상기 핵연료 집합체(10, 510, 610)는 해상용 원자로(예를 들어, 선박 또는 잠수함 발전소; 내륙에서의 사용을 위해 전력(예를 들어, 전기)을 생성하도록 설계된 발전선) 또는 그 밖의 원자로 적용에서 상용을

위해 설계될 수 있다.

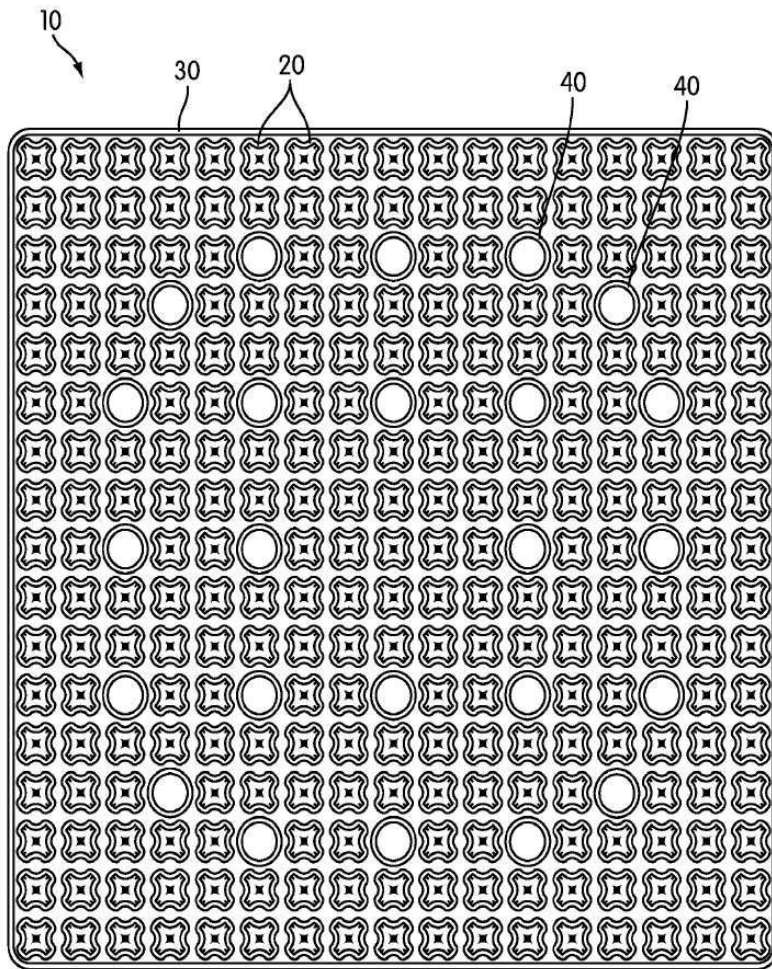
[0141] 전술한 도시된 실시형태는 본 발명의 구조적 및 기능적 원리를 설명하기 위해 제공되며 제한하려는 의도는 아니다. 이와는 반대로, 본 발명의 원리는 다음의 청구범위의 사상과 범위 내에서 모든 변경, 변화 및/또는 대체를 망라하도록 의도된다.

도면

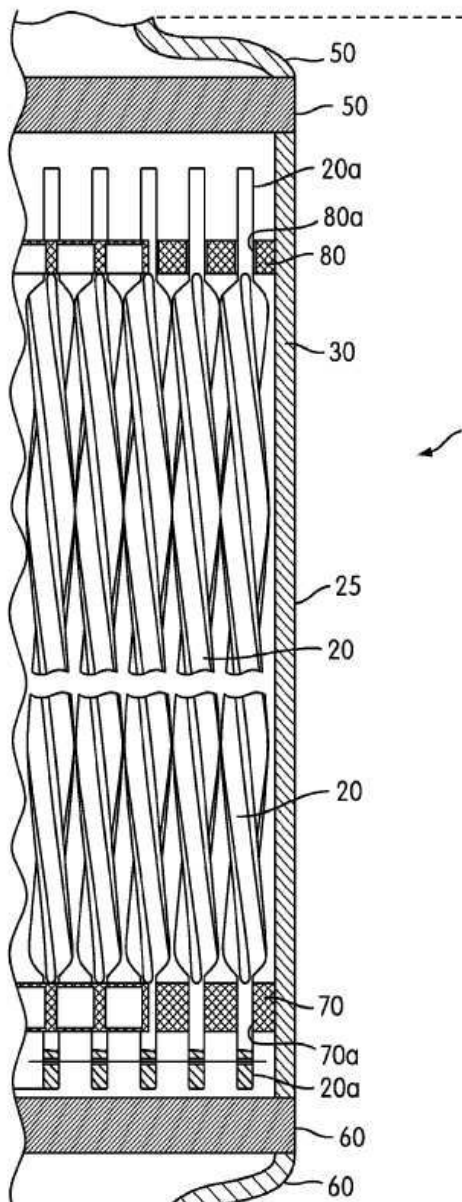
도면1



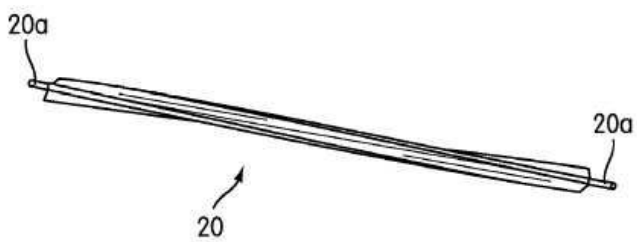
도면2



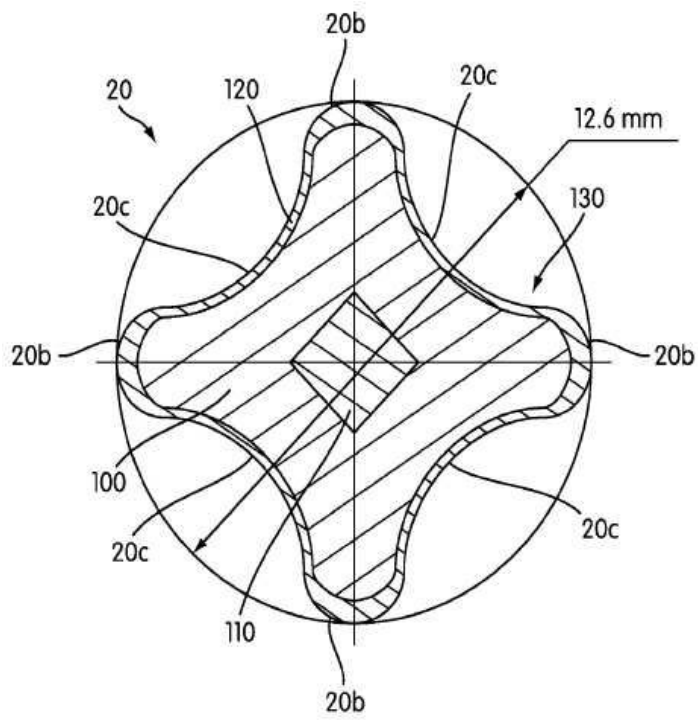
도면3



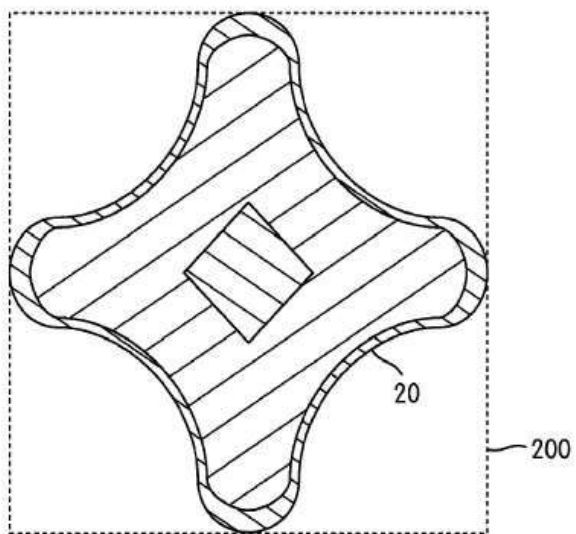
도면4



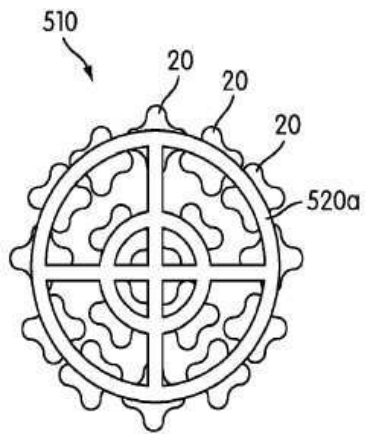
도면5



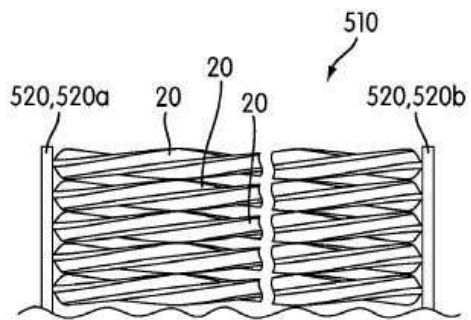
도면6



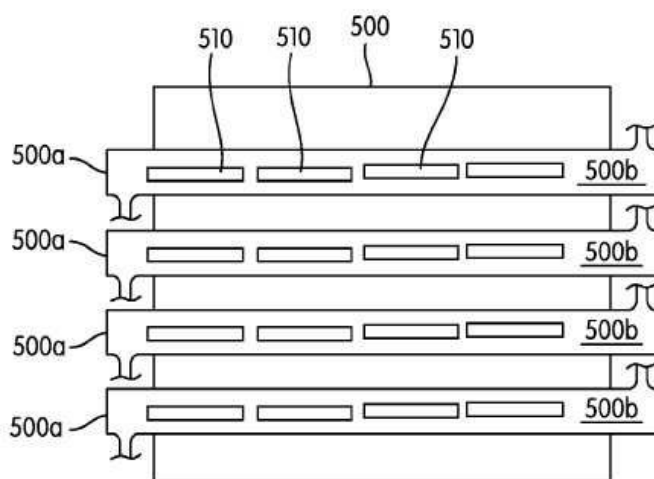
도면7a



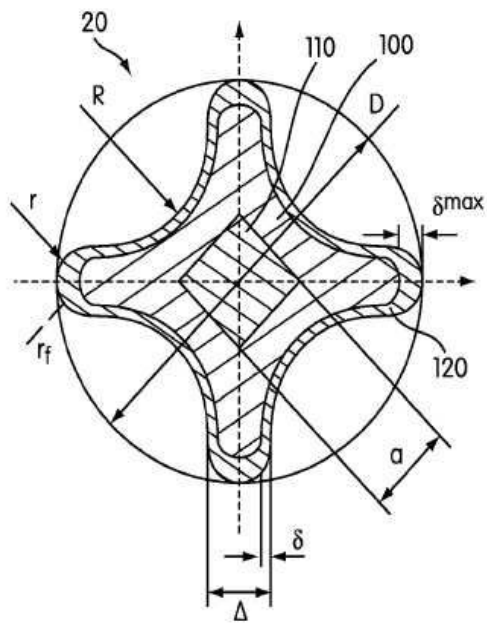
도면7b



도면8



도면9



도면10

