



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2017-0077277
(43) 공개일자 2017년07월05일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G21C 3/326 (2006.01) G21C 3/328 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G21C 3/326 (2013.01)
G21C 3/328 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2017-7017346(분할)
(22) 출원일자(국제) 2010년11월15일
심사청구일자 없음
(62) 원출원 특허 10-2013-7015370
원출원일자(국제) 2010년11월15일
심사청구일자 2015년11월12일
(85) 번역문제출일자 2017년06월23일
(86) 국제출원번호 PCT/IB2010/002914
(87) 국제공개번호 WO 2012/066367
국제공개일자 2012년05월24일

(71) 출원인
아토믹 에너지 오브 캐나다 리미티드
캐나다 케이0제이 1제이0 온타리오 초크 리버 초크 리버 레보라토리
(72) 발명자
쿠란 세르멧
캐나다 엘5에이치 3케이5 온타리오주 미시소가 포 쿡파인 애비뉴 946
부셰 무스타파
캐나다 엘7엠 0이2 온타리오주 벌링턴 블랙넬 로드 4680
(74) 대리인
(뒷면에 계속)
유미특허법인

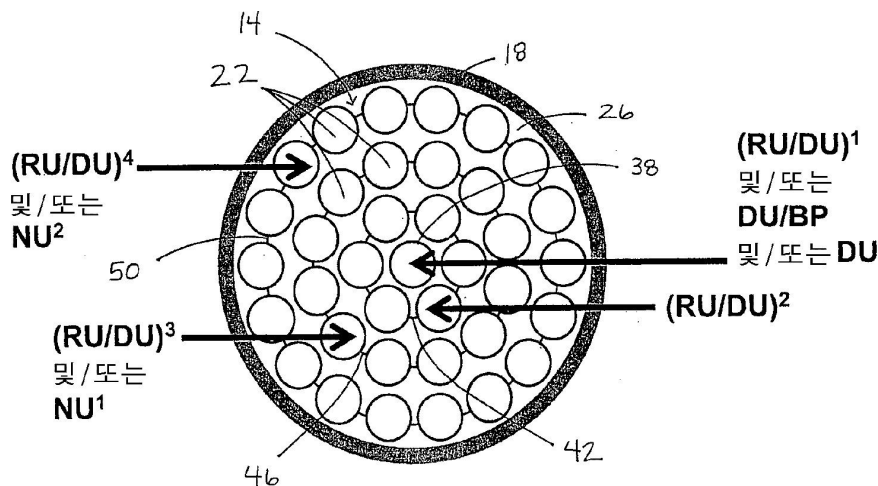
전체 청구항 수 : 총 1 항

(54) 발명의 명칭 재생 우라늄 및 감손 우라늄을 함유하는 핵연료, 핵연료 다발 및 그것을 포함하는 원자로

(57) 요약

본 발명은 원자로용 연료 다발에 대해 기재하고 예시하는데, 몇몇 예에 있어서, 재생 우라늄인 제1 연료 성분; 및 감손 우라늄과 천연 우라늄 중 하나 이상이 상기 제1 연료 성분과 블렌딩되어 있는 제2 연료 성분을 각각 포함하는 연료 엘리먼트를 포함하고, 블렌딩된 상기 제1 및 제2 연료 성분은 ^{235}U 1.2중량% 미만의 제1 핵분열성 물질 함량을 가진다. 다른 연료 다발도 기재되고 예시되는데, 그러한 연료 다발은, 재생 우라늄을 포함하고 ^{235}U 0.72중량% 이상의 제1 핵분열성 물질 함량을 가지는 제1 연료 엘리먼트; 및 감손 우라늄과 천연 우라늄 중 하나 이상을 포함하고, ^{235}U 0.71중량% 이하의 제2 핵분열성 물질 함량을 가지는 제2 연료 엘리먼트를 포함한다.

대표도



(52) CPC특허분류

Y02E 30/38 (2013.01)

(72) 발명자

코트렐 캐시

캐나다 엘9케이 1엔3 온타리오주 앤캐스터 쏘로브
레드 블리바드 79

아라우조 에릭 칼 알멘드라

캐나다 엠8엑스1에이1 온타리오주 토론토 올드 밀
테라스 45

명세서

청구범위

청구항 1

프로그램.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 재생 우라늄 및 감손 우라늄을 함유하는 핵연료, 핵연료 다발 및 그것을 수용하는 원자로에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 원자로는 우라늄-235(^{235}U)와 같은 핵연료 내의 핵분열성(fissile) 원자의 핵에 의해 자유 중성자가 흡수되는 핵 연쇄반응(즉, 핵 분열)으로부터 에너지를 생성한다. 해당 기술 분야에 널리 알려져 있는 바와 같이, 자유 중성자가 흡수되면, 핵분열성 원자는 쪼개져서 더 가벼운 원자로 되고, 다른 핵분열성 원자에 의해 흡수되는 더 많은 자유 중성자를 방출함으로써, 핵 연쇄반응이 이루어진다. 핵 연쇄반응으로부터 방출되는 열 에너지는 당업자에게 잘 알려져 있는 여러 가지 다른 공정을 통해 전기 에너지로 변환된다.

[0003] 핵분열성 물질 함량의 함량이 낮은(예를 들면, 천연 우라늄의 수준 만큼 낮은) 핵연료를 연소시키도록 되어 있는 원자로의 출현은 가연성 핵연료의 많은 새로운 소스를 발생시켰다. 이러한 소스는 다른 반응기로부터의 폐 우라늄 또는 재생 우라늄을 포함한다. 이것은 비용 절감의 관점에서뿐만 아니라, 폐우라늄을 연료 사이클로 재순환시켜 이용할 수 있다는 점에서도 매력적이다. 사용된 핵연료의 재생은, 고가의 제한된 핵 폐기물 격납 시설에 폐기하는 것과는 현저히 대조적이다.

[0004] 이러한 이유와 기타 이유에서, 핵연료 및, 핵연료를 재생하고 그 연료를 원자로에서 연소시키는 실무를 지원하는 핵연료 처리 기술이 필요하다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 본 발명의 목적은 재생 우라늄 및 감손 우라늄을 함유하는 핵연료, 핵연료 다발 및 그것을 수용하는 원자로를 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0006] 본 발명의 몇몇 구현예에 있어서, 재생 우라늄인 제1 연료 성분; 및 감손 우라늄과 천연 우라늄 중 하나 이상이 상기 제1 연료 성분과 블렌딩된 제2 연료 성분을 각각 포함하는 복수 개의 연료 엘리먼트를 포함하는, 원자로용 연료 다발로서, 상기 블렌딩된 제1 및 제2 연료 성분은 ^{235}U 1.2중량% 미만의 제1 핵분열성 물질 함량(fissile content)을 가지는, 원자로용 연료 다발이 제공된다.

[0007] 본 발명의 몇몇 구현예는, 재생 우라늄을 포함하고 ^{235}U 0.72중량% 이상의 제1 핵분열성 물질 함량을 가지는 제1 연료 엘리먼트; 및 감손 우라늄과 천연 우라늄 중 하나 이상을 포함하고, ^{235}U 0.71중량% 이하의 제2 핵분열성 물질 함량을 가지는 제2 연료 엘리먼트를 포함하는, 원자로용 연료 다발을 제공한다.

[0008] 몇몇 구현예에 있어서, 전술한 임의의 연료 다발과 방법은 가압 중수형 원자로에 활용되고, 상기 연료 다발은 가압수의 하나 이상의 튜브 내에 위치하고, 상기 가압수는 상기 연료 다발을 통과하여 흐르고, 상기 연료 다발로부터 열을 흡수하여 상기 연료 다발의 하류에서 일을 실행한다.

[0009] 본 발명의 다른 측면은 상세한 설명 및 첨부된 도면을 참조함으로써 명백해질 것이다.

발명의 효과

[0010] 본 발명에 의하면, 재생 우라늄 및 감손 우라늄을 함유하는 핵연료, 핵연료 다발 및 그것을 수용하는 원자로가 제공된다.

도면의 간단한 설명

[0011] 도 1은 본 발명에 따른 핵연료 다발의 제1 구현예의 단면도로서, 연료 다발 내의 연료 배열이 여러 가지로 가능하다는 것을 나타내는 도면이다.

도 2는 본 발명에 따른 핵연료 다발의 제2 구현예의 단면도로서, 역시 연료 다발 내의 연료 배열이 여러 가지로 가능하다는 것을 나타내는 도면이다.

도 3은 본 발명에 따른 핵연료 다발의 제3 구현예의 단면도로서, 역시 연료 다발 내의 연료 배열이 여러 가지로 가능하다는 것을 나타내는 도면이다.

도 4는 본 발명에 따른 핵연료 다발의 제4 구현예의 단면도로서, 역시 연료 다발 내의 연료 배열이 여러 가지로 가능하다는 것을 나타내는 도면이다.

도 5는 도 1 내지 4의 핵연료 다발 중 어느 하나를 이용하는 원자로의 개략도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0012] 본 발명의 구현예를 설명하기 전에 알아야 할 것은, 본 발명은 본 발명의 적용에 있어서 이하의 설명에 제시되고 첨부 도면에 예시되는 구현예의 상세한 내용 및 컴포넌트의 구성에 한정되지 않는다는 것이다. 본 발명은 다른 구현예를 통해서도 실행될 수 있고, 또는 다양한 방식으로 수행될 수 있다.

[0013] 본 발명의 다양한 구현예에 따른 몇 가지 핵연료가 본 명세서에 개시된다. 이들 연료는 다양한 원자로에 사용될 수 있고, 본 명세서에서는 가압 중수형 원자로를 참조하여 설명된다. 그러한 원자로는, 예를 들면, 연료가 수용되어 있는 가압형 수평관 또는 수직관을 가질 수 있다. 그러한 원자로의 예는 캐나다형 중수로(Canadian Deuterium Uranium(CANDU) nuclear reactor)로서, 그 일부가 도 5에 개략적으로 도시되어 있다. 다른 타입의 원자로는, 구멍을 가진 비가압형 수평관 또는 수직관을 가질 수 있다.

[0014] 가압 중수형 원자로는 본 발명의 다양한 핵연료가 연소될 수 있는 한 가지 형태의 원자로일 뿐이다. 따라서, 본 명세서에서 그러한 원자로는 단지 예로서 기재되는 것이며, 본 발명의 다양한 연료는 다른 타입의 원자로에서도 연소될 수 있는 것으로 이해되어야 한다.

[0015] 마찬가지로, 본 명세서에 기재된 본 발명의 다양한 연료는 연소시키는 원자로 내에서 임의의 형태로 위치할 수 있다. 단지 예로서, 연료는 튜브 내에 장입될 수 있고, 또는 다른 기다란 형태로 수용될 수도 있다(그 각각은 통상적으로 "핀(pin)" 또는 "엘리먼트(element)"라 지칭되고, 본 명세서에서는 간단히 "엘리먼트"라고만 지칭함). 본 발명의 몇몇 구현예에서 사용되는 엘리먼트의 예가 도 1~4에서 참조번호 22로 표시되어 있고, 이하에 보다 구체적으로 기재된다. 튜브 내에 수용된 연료의 경우에, 튜브는 지르코늄, 지르코늄 합금, 또는 경우에 따라서는 낮은 중성자 흡수율을 특징으로 하는 다른 적합한 물질 또는 물질들의 조합으로 만들어지거나, 또는 그러한 물질을 포함할 수 있다.

[0016] 복수 개의 엘리먼트는 통합적으로 원자로 내에서 연료 다발을 형성할 수 있다. 그러한 연료 다발이 도 5에서 참조번호 14로 개략적으로 표시되어 있다. 각 다발(14)의 엘리먼트들은 다발 내에서 서로 평행하게 연장될 수 있다. 원자로가 복수 개의 연료 다발(14)을 포함하는 경우에, 그 다발들(14)은 압력관(18) 내부에 엔드-투-엔드(end-to-end) 방식으로 설치될 수 있다. 다른 타입의 원자로에 있어서, 연료 다발(14)은 필요에 따라 다른 방식으로 배열될 수 있다.

[0017] 도 5를 참조하면, 원자로(10)가 가동중일 때, 중수 냉각제(26)가 연료 다발(14) 위로 흘러 연료 엘리먼트를 냉각시키고, 핵분열 공정에서 나오는 열을 제거한다. 본 발명의 핵연료는 또한 열 수송과 감속제(moderator) 시스템 내 액체/기체의 여러 가지 상이한 조합을 가진 압력관 반응기에도 적용가능하다. 어느 경우에도, 핵연료로부터 열을 흡수하는 냉각제(26)는 하류 장치(예; 스팀 발생기(30))에 열을 전달하여 전기 에너지를 생성하도록 원동기(prime mover)(예; 터빈(34))를 구동시킬 수 있다.

[0018] 1996년 4월 25일에 출원된 캐나다 특허출원 제2,174,983호에는 본 명세서에 기재된 임의의 핵연료를 포함할 수

있는 원자로용 연료 다발의 예가 기재되어 있다. 캐나다 특허출원 제2,174,983호의 내용은 원용에 의해 본 명세서에 포함된다.

[0019] 본 발명의 다양한 핵연료는 하나 이상의 다른 물질과 함께(예; 블렌딩되어) 사용될 수 있다. 단독으로 사용되거나, 다른 물질과 조합되어 사용되거나 관계없이, 핵연료는 펠릿 형태, 분말 형태, 또는 다른 적합한 형태나 형태들의 조합으로 되어 있을 수 있다. 몇몇 구현예에 있어서, 본 발명의 연료는, 소정의 형태로 가압된 연료 봉, 다른 물질의 매트릭스 내에 수용된 연료봉 등과 같은 봉의 형태를 가진다. 또한, 본 발명에 따른 연료로 만들어진 연료 엘리먼트는 튜브와 봉 및/또는 다른 타입의 엘리먼트들의 조합을 포함할 수 있다.

[0020] 이하에서 더 구체적으로 설명하는 바와 같이, 본 발명의 다양한 구현예에 따른 연료는 감손 우라늄(DU), 천연 우라늄(NU), 및 재처리 즉 재생 우라늄(RU)과 같은 핵연료의 다양한 조합을 포함할 수 있다. 본 명세서와 첨부된 특허청구범위에 사용되는 용어로서, 핵연료에 포함된 물질의 구성 성분의 "퍼센트"라는 표현은 달리 명시되지 않는 한 중량%를 의미한다. 또한, 본 명세서에 정의되는 바에 따르면, DU는 ^{235}U 약 0.2중량% 내지 약 0.5중량%(약 0.2중량% 및 약 0.5중량% 포함)의 핵분열성 물질 함량을 가지고, NU는 ^{235}U 약 0.71중량%의 핵분열성 물질 함량을 가지고, RU는 ^{235}U 약 0.72중량% 내지 약 1.2중량%(약 0.72중량% 및 약 1.2중량% 포함)의 핵분열성 물질 함량을 가진다.

[0021] 재생 우라늄

[0022] 재처리 즉 재생 우라늄(RU)은 경수형 원자로(LWR)를 사용하여 원자력 제조 공정으로부터 생성된 폐연료로 제조된다. 폐연료의 부분은 우라늄으로 보충된다. 따라서, 폐연료의 화학적 재처리는 분리된 우라늄을 남기게 되는데, 이것은 공업적으로 재처리 우라늄 또는 재생 우라늄으로 지칭된다. 천연 우라늄(NU)은 세 가지 동위원소, ^{234}U , ^{235}U , 및 ^{238}U 만을 함유한다. 그러나, LWR에서 조사(irradiation)되고 냉각된 후, 얻어지는 RU는 천연 우라늄과는 상이한 동위원소 구성을 가진다. 특히, RU는 천연 우라늄에는 존재하지 않는, 다음과 같은 네 가지 추가적 타입의 우라늄 동위원소를 포함한다: ^{236}U , ^{232}U , ^{233}U , 및 ^{237}U (일반적으로 불순물로 간주됨). 따라서, 이러한 네 가지 추가적 동위원소의 존재는 RU에 대한 특징으로 간주될 수 있다.

[0023] RU의 동위원소 구성은, 조사되기 전 연료(즉, 새 연료) 중의 초기 ^{235}U 함량, 연료의 원천, 연료가 연소된 원자로의 타입, 원자로 내 연료의 조사(irradiation) 이력(예; 번업(burnup) 포함), 및 조사 후 연료의 냉각 및 저장 기간과 같은 많은 요인에 의존한다는 것을 이해해야 한다. 예를 들면, 조사된 대부분의 연료는 방사능 안전을 보장하기 위해 특수하게 제작된 수조(pond)에서 적어도 5년 동안 냉각된다. 그러나, 냉각 기간은 10년, 15년, 또는 그보다 더 길게 연장될 수 있다.

[0024] RU는 연료 클래딩, 연료 도핑, 및 RU에 대해 사용되는 분리와 정제 방법에 의해 초래되는 화학적 불순물(예; 가돌리늄)을 종종 포함한다. 이러한 화학적 불순물은 매우 소량의 초우라늄 동위원소(transuranic isotope), 예를 들면, 플루토늄-238(^{238}Pu), ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , 넵투늄-237(^{237}Np), 아메리슘-241(^{241}Am), 퀴륨-242(^{242}Cm), 및 핵분열 생성물, 예를 들면 지르코늄-95/니오븀-95($^{95}\text{Zr}/^{95}\text{Nb}$), 루테튬-103(^{103}Lu), ^{106}Ru , 세슘-134(^{134}Cs), ^{137}Cs , 및 테크네튬-99(^{99}Tc)를 포함할 수 있다. 다음과 같은 다른 불순물이 RU 중에 종종 존재한다: 알루미늄(Al), 붕소(B), 카드뮴(Cd), 칼슘(Ca), 탄소(C), 염소(Cl), 크롬(Cr), 구리(Cu), 디스프로슘(Dy), 플루오르(F), 철(Fe), 마그네슘(Mg), 망간(Mn), 몰리브덴(Mo), 니켈(Ni), 질소(N), 인(P), 칼륨(K), 규소(Si), 나트륨(Na), 황(S), 및 토륨(Th).

[0025] 감손 우라늄

[0026] 앞에서 언급한 바와 같이, 감손 우라늄(DU)은 ^{235}U 약 0.2중량% 내지 약 0.5중량%(약 0.2중량% 및 약 0.5중량% 포함)의 핵분열성 물질 함량을 가진다. DU는 주로 동위원소인 우라늄-238(^{238}U) 및 우라늄-235(^{235}U)로 구성된다. 이에 비해, 천연 우라늄(NU)은 약 99.28중량%의 ^{238}U , 약 0.71중량%의 ^{235}U , 및 약 0.0054중량%의 ^{234}U 로 구성된다. DU는 우라늄 농축 공정의 부산물이며, 일반적으로는 천연 우라늄에 비해 1/3 미만의 ^{235}U 및 ^{234}U 를 함유한다. DU도 다음과 같은 다양한 불순물을 포함한다: 알루미늄(Al), 붕소(B), 카드뮴(Cd), 칼슘(Ca), 탄소(C), 염소(Cl), 크롬(Cr), 구리(Cu), 디스프로슘(Dy), 플루오르(F), 가돌리늄(Gd), 철(Fe), 마그네슘(Mg),

망간(Mn), 몰리브덴(Mo), 니켈(Ni), 질소(N), 인(P), 칼륨(K), 규소(Si), 나트륨(Na), 황(S), 및 토륨(Th).

[0027] **블렌딩된 연료**

[0028] 많은 응용분야에 있어서, 다수의 핵연료의 우라늄 함량은 지나치게 높거나 낮아서, 수 많은 원자로가 그러한 연료를 연소시킬 수 없는 것으로 알려져 있다. 이와 유사하게, 전형적으로 RU에서 발견되는 RU(^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , 및 ^{238}U) 및 전술한 불순물(^{232}U , ^{233}U , ^{237}U)의 구성 성분으로 인해 많은 원자로에서 RU가 사용될 수 없다. 그러나, 본 발명자들은 RU를 DU와 블렌딩함으로써, 얻어지는 핵연료 중의 ^{235}U 의 핵분열성 물질 함량이, 가압 중수형 원자로(예를 들면, CANDU 원자로와 같은 수평 연료관을 가진 가압 중수형 원자로) 등의, 수 많은 원자로에서 새 연료로서 연소될 수 있는, 허용가능한 범위에 들어가도록 할 수 있다는 것을 발견했다. 얻어지는 핵연료 중 ^{235}U 의 핵분열성 물질 함량을, 새 연료로서 연소되기에 허용가능한 범위로 감소시키기 위해, RU와 NU를 블렌딩하는 경우에도 유사한 결과를 얻을 수 있다.

[0029] DU 또는 NU 중 어느 것과 블렌딩되든 간에, RU는 산 용액 또는 건조 혼합을 이용하는 방법과 같은 해당 기술 분야에 알려져 있는 임의의 방법(단, 이들 방법에 한정되는 것은 아님)을 이용하여 블렌딩될 수 있다.

[0030] 몇몇 구현예에 있어서, 본 발명의 원자로 연료는 제1 연료 성분 RU와 제2 연료 성분 DU를 포함하고, 이들 성분이 함께 블렌딩되어 1.2중량% 미만의 ^{235}U 의 조합된 핵분열성 물질 함량을 가진다. 그러한 연료에 있어서, RU는 ^{235}U 약 0.72중량% 내지 약 1.2중량%의 핵분열성 물질 함량을 가질 수 있다. 다른 구현예에 있어서, 그러한 연료 중 RU는 ^{235}U 약 0.8중량% 내지 약 1.1중량%의 핵분열성 물질 함량을 가질 수 있다. 다른 구현예에 있어서, 그러한 연료 중 RU는 ^{235}U 약 0.9중량% 내지 약 1.0중량%의 핵분열성 물질 함량을 가질 수 있다. 또 다른 구현예에 있어서, 그러한 연료 중 RU는 ^{235}U 약 0.9중량%의 핵분열성 물질 함량을 가질 수 있다. 이러한 구현예 각각에 있어서, 그러한 연료 중 DU는 ^{235}U 약 0.2중량% 내지 약 0.5중량%의 핵분열성 물질 함량을 가질 수 있다.

[0031] 따라서, 상대적으로 낮은 ^{235}U 핵분열성 물질 함량의 DU와 상대적으로 높은 ^{235}U 핵분열성 물질 함량의 RU를 블렌딩함으로써, 얻어지는 블렌딩된 RU/DU 핵연료는 몇몇 구현예에 있어서 ^{235}U 1.0중량% 미만의 핵분열성 물질 함량을 가질 수 있다. 다른 구현예에 있어서, 얻어지는 블렌딩된 RU/DU 핵연료는 ^{235}U 0.8중량% 미만의 핵분열성 물질 함량을 가질 수 있다. 다른 구현예에 있어서, 얻어지는 RU/DU 핵연료는 ^{235}U 0.72중량% 미만의 핵분열성 물질 함량을 가질 수 있다. 또 다른 구현예에 있어서, 얻어지는 RU/DU 핵연료는 ^{235}U 약 0.71중량%의 핵분열성 물질 함량을 가질 수 있으며, 그 결과 RU와 DU의 블렌딩에 의해 생성되는 천연 우라늄과 동등한 연료가 얻어진다.

[0032] 몇몇 구현예에 있어서, 본 발명의 원자로 연료는 제1 연료 성분 RU와 제2 연료 성분 NU를 포함하고, 이들 성분이 함께 블렌딩되어 ^{235}U 1.2중량% 미만의 조합된 핵분열성 물질 함량을 가진다. 그러한 연료에 있어서, RU는 ^{235}U 약 0.72중량% 내지 약 1.2중량%의 핵분열성 물질 함량을 가질 수 있다. 다른 구현예에 있어서, 그러한 연료 중 RU는 ^{235}U 약 0.8중량% 내지 약 1.1중량%의 핵분열성 물질 함량을 가질 수 있다. 다른 구현예에 있어서, 그러한 연료 중 RU는 ^{235}U 약 0.9중량% 내지 약 1.0중량%의 핵분열성 물질 함량을 가질 수 있다. 또 다른 구현예에 있어서, 그러한 연료 중 RU는 ^{235}U 약 0.9중량%의 핵분열성 물질 함량을 가질 수 있다.

[0033] 따라서, ^{235}U 핵분열성 물질 함량이 상대적으로 낮은 NU와 상대적으로 높은 RU를 블렌딩함으로써, 얻어지는 블렌딩된 RU/NU 핵연료는 몇몇 구현예에 있어서 ^{235}U 1.0중량% 미만의 핵분열성 물질 함량을 가질 수 있다. 다른 구현예에 있어서, 얻어지는 블렌딩된 RU/NU 핵연료는 ^{235}U 0.8중량% 미만의 핵분열성 물질 함량을 가질 수 있다. 다른 구현예에 있어서, 얻어지는 RU/NU 핵연료는 ^{235}U 0.72중량% 미만의 핵분열성 물질 함량을 가질 수 있다. 또 다른 구현예에 있어서, 얻어지는 RU/NU 핵연료는 ^{235}U 약 0.71중량%의 핵분열성 물질 함량을 가질 수 있으며, 그 결과 RU와 NU의 블렌딩에 의해 생성되는 천연 우라늄과 동등한 연료가 얻어진다.

[0034] 몇몇 구현예에 있어서, RU는 DU뿐 아니라 NU와 블렌딩되어, 블렌딩된 RU/DU 핵연료 및 블렌딩된 RU/NU 핵연료에 관해 전술한 것과 동일한 함량 또는 함량 범위의 ^{235}U 핵분열성 물질 함량을 가지는 연료가 제조된다. 그러한 경우에, RU의 ^{235}U 핵분열성 물질 함량과 함량 범위, 및 DU의 ^{235}U 핵분열성 물질 함량과 함량 범위가 전술한 것들과 동일할 수 있다.

[0035] 본 발명의 다양한 구현예에 따른 핵연료는 가연성 독물(burnable poison; BP)을 포함할 수 있다. 예를 들면, 본 명세서에 기재된 임의의 핵연료는 RU와 가연성 독물(BP)을 가진 DU의 블렌드, 또는 RU와 가연성 독물(BP)을 가진 NU의 블렌드를 포함할 수 있다. 가연성 독물은 본 명세서에 기재된 다양한 RU/DU 블렌드, RU/NU 블렌드, 및 RU/DU/NU 블렌드와 블렌딩될 수 있다.

[0036] 연료 다발 구성

[0037] 핵연료 블렌딩(전술한 바와 같은)은 다른 경우에는 사용할 수 없는 RU로부터 새 핵연료를 제조하는 유력한 방식이다. 그러나, 그러한 블렌딩은 가압 중수형 원자로와 같은 많은 원자로 형태에서 연소시키는 데에 RU가 사용될 수 있는 하나의 기술에 불과하다. 많은 응용분야에 있어서, 본 명세서에 기재된 블렌딩된 RU 연료는, 적어도 부분적으로는 연료 다발에서의 그러한 블렌딩된 연료의 위치에 따라, 연료 다발에서 높은 효율로 사용될 수 있다. 또한, RU는 전술한 바와 같이 반드시 블렌딩되지 않고도 연료 다발에서도 성공적으로 활용될 수 있다. 대신에, RU가 연료 다발에서 특정 위치에 포함되고, 소정의 ^{235}U 핵분열성 물질 함량을 가지고, 및/또는 DU 및/또는 NU의 목표 조합과 함께 사용된다면, 얻어지는 연료 다발은 매우 바람직한 특성을 가지게 된다. 이러한 특성으로는, 보다 큰 연료 변업 컨트롤 및 낮은 냉각제 보이드 반응성(coolant void reactivity)(이하에 설명됨)이 포함된다.

[0038] 도 1~4는, 예를 들면 도 5에 개략적으로 도시된 가압 중수형 원자로(10)와 같은 원자로에서 사용하기 위한 핵연료 다발의 다양한 구현예를 나타낸다. 특히, 도 1~4는 각각 압력관(18) 내에 위치한 연료 다발(14)의 몇 가지 구현예의 단면도를 나타낸다. 도 1~4 각각에 도시된 연료 배열은 예로서 제공된 것으로, 도 1~4의 연료 다발 내에 다른 연료 배열이 가능하며, 그러한 배열도 본 발명의 사상과 범위에 포함되는 것으로 이해된다. 도 1~4와 관련하여 이하에 기재되는 다양한 연료(RU, DU, NU, RU/DU 블렌드, RU/NU 블렌드, 및 RU/DU/NU 블렌드)의 특성(^{235}U 핵분열성 물질 함량 및 ^{235}U 핵분열성 물질 함량 범위)가 앞에 제공되어 있음을 알아야 한다.

[0039] 압력관(18) 내에는 중수 냉각제(26)가 수용되고, 연료 다발(14)의 연료 엘리먼트들(22) 사이의 서브채널을 차지한다. 연료 엘리먼트(22)는 중앙 엘리먼트(38), 상기 중앙 엘리먼트(38)로부터 바깥쪽으로 방사상으로 위치한 복수 개의 제1 엘리먼트(42), 상기 복수 개의 제1 엘리먼트(42)로부터 바깥쪽으로 방사상으로 위치한 복수 개의 제2 엘리먼트(46), 및 상기 복수 개의 제2 엘리먼트(46)로부터 바깥쪽으로 방사상으로 위치한 복수 개의 제3 엘리먼트(50)를 포함할 수 있다. 다른 구현예에서, 연료 다발(14)은 이보다 적거나 많은 엘리먼트를 포함할 수 있고, 도 1~4에 예시된 것과는 다른 구성으로 된 엘리먼트를 포함할 수 있다. 예를 들면, 연료 엘리먼트(22)는 하나 이상의 평면에 서로 평행하게 설치될 수 있고, 매트릭스로 배열되거나, 블록 형상 또는 임의의 다른 단면 형상을 가진 어레이로 배열될 수 있고, 임의의 다른 패턴 또는 무패턴(patternless) 구성으로 배열될 수 있다. 압력관(18), 연료 다발(14) 및/또는 연료 엘리먼트(22)는 또한 다양한 형상과 크기로 구성될 수 있다. 예를 들어, 압력관(18), 연료 다발(14) 및 연료 엘리먼트(22)는, 희망하는 바에 따라 임의의 단면 형상(도 1~5에 도시된 원형이 아닌 형상) 및 크기를 가질 수 있다. 또 다른 예로서, 각각의 연료 다발(14) 내의 연료 엘리먼트(22)는 임의의 상대적 크기(도 1~4에 도시된 연료 엘리먼트(22)의 균일한 크기 또는 2종 크기 버전이 아닌 것)를 가질 수 있다.

[0040] 도 1 및 도 2의 구현예에 있어서, 37개 엘리먼트 연료 다발이 도시되어 있고, 모든 연료 엘리먼트(22)는 균일한 단면 크기(또는 원형 단면 형상을 가진 엘리먼트의 경우에는 직경)를 가진다. 도 1 및 도 2 각각에서, 복수 개의 제1 엘리먼트(42)는 대체로 원형 패턴으로 서로 평행하게 배열된 6개의 엘리먼트를 포함한다. 도 1과 도 2 각각에서, 복수 개의 제2 엘리먼트(46)는, 마찬가지로 대체로 원형 패턴으로 서로 평행하게 배열된 12개의 엘리먼트를 포함한다. 도 1과 도 2 각각에서, 복수 개의 제3 엘리먼트(50)는, 마찬가지로 대체로 원형 패턴으로 서로 평행하게 배열된 18개의 엘리먼트를 포함한다. 중앙 엘리먼트(38), 복수 개의 제1 엘리먼트(42), 복수 개의 제2 엘리먼트(46), 및 복수 개의 제3 엘리먼트(50)는 모든 엘리먼트(22)들이 서로 평행하도록 동심으로(concentrically) 배열되어 있다. 대체로 원형인 엘리먼트들(22)의 위치를 표시하는 도 1 및 도 2에 포함된 선은 예시를 위한 것일 뿐이고, 엘리먼트들(22)이 반드시 함께 묶여 있거나 또는 특별한 배열로 결합되어 있다는 것을 표시하는 것은 아님을 이해해야 한다.

- [0041] 도 3 및 도 4의 구현예에 있어서, 43개 엘리먼트 연료 다발(14)이 도시되어 있다. 도 3과 도 4 각각에서, 복수 개의 제1 엘리먼트(42)는 대체로 원형 패턴으로 서로 평행하게 배열된 7개의 엘리먼트를 포함한다. 도 3과 도 4 각각에서, 복수 개의 제2 엘리먼트(46)는 대체로 원형 패턴으로 서로 평행하게 배열된 14개의 엘리먼트를 포함한다. 도 3과 도 4 각각에서, 복수 개의 제3 엘리먼트(50)는 대체로 원형 패턴으로 서로 평행하게 배열된 21개의 엘리먼트를 포함한다. 중앙 엘리먼트(38), 복수 개의 제1 엘리먼트(42), 복수 개의 제2 엘리먼트(46), 및 복수 개의 제3 엘리먼트(50)는 모든 엘리먼트(22)들이 서로 평행하도록 동심으로 배열되어 있다. 중앙 엘리먼트(38) 및 복수 개의 제1 엘리먼트(42)는 각각 제1 단면 크기(또는, 원형 단면 형상을 가지는 엘리먼트의 경우에는 직경)를 가지고, 복수 개의 제2 엘리먼트(46) 및 복수 개의 제3 엘리먼트(50)는 각각 상기 제1 단면 크기와는 상이한 제2 단면 크기(또는, 원형 단면 형상을 가지는 엘리먼트의 경우에는 직경)를 가진다. 특히, 제1 단면 크기는 제2 단면 크기보다 크다. 이와 관련하여, "단면 형상"이라는 용어는, 본체(body)의 길이 방향 축에 수직인 배향에서 지칭되는 본체를 관통하는 평면에 의해 만들어지는 단면 형상을 의미한다. 또한, 대체로 원형인 엘리먼트(22)의 위치를 표시하는 도 3과 도 4에 포함된 선은 예시를 위한 것일 뿐이고, 엘리먼트들이 반드시 함께 묶여 있거나 또는 특별한 배열로 결합되어 있다는 것을 표시하는 것은 아님을 이해해야 한다.
- [0042] 몇몇 구현예에 있어서, 도 1~4의 각각의 연료 엘리먼트(22)는 핵연료로 채워진 관을 포함한다. 상기 관은 지르코늄, 지르코늄 합금, 또는 몇몇 경우에 중성자 흡수율이 낮은 것을 특징으로 하는 다른 적합한 재료 또는 재료들의 조합으로 만들어지거나 그러한 재료를 포함할 수 있다. 상기 관은, 핵연료 단독 또는 다른 물질들과의 조합과 같은 1종 이상의 물질로 채워질 수 있다. 상기 물질(들)은 펠릿 형태, 분말 형태, 또는 다른 적합한 형태나 형태들의 조합으로 되어 있을 수 있다. 다른 구현예에 있어서, 각각의 연료 엘리먼트(22)는, 다른 재료의 매트릭스 내에 수용된 핵연료와 같은 1종 이상의 물질로(예를 들면, 핵연료 단독 또는 다른 물질들과의 조합으로) 형성된 봉(rod)을 포함한다. 또한 몇몇 구현예에 있어서, 연료 다발(14) 내 연료 엘리먼트(22)는 관과 봉의 조합 및/또는 연료-수용 엘리먼트를 포함할 수 있고, 연료 엘리먼트(22)는 특별한 용도에 적합한 다른 구성으로 이루어질 수 있다.
- [0043] 도 1~4에 도시되어 있는 바와 같이, 연료 엘리먼트(22)는 감손 우라늄(DU), 천연 우라늄(NU), 및 재처리 또는 재생 우라늄(RU)과 같은 핵연료의 다양한 조합을 포함할 수 있다. 도 1의 중앙 엘리먼트(38)는 제1 핵분열성 물질 함량을 가진 RU와 DU의 블렌드(즉, $(RU/DU)^1$) 및/또는 DU와 가연성 독물(BP)의 블렌드 및/또는 DU를 포함한다. 전술한 바와 같이, 물질의 블렌드(본 명세서에서는 일반적으로 사선 "/"을 이용하여 표시됨)는, 제한되지는 않지만, 산용액 또는 대상 물질의 건조 혼합과 같은 종래 공지되어 있는 임의의 방법을 이용하여 생성될 수 있다. 도 1로 돌아가서, 복수 개의 제1 엘리먼트(42)는 제2 핵분열성 물질 함량을 가진 RU와 DU의 블렌드(즉, $(RU/DU)^2$)를 포함한다. 복수 개의 제2 엘리먼트(46)는 제3 핵분열성 물질 함량을 가진 RU와 DU의 블렌드(즉, $(RU/DU)^3$) 및/또는 제1 핵분열성 물질 함량을 가진 NU(즉, NU^1)를 포함한다. 복수 개의 제3 엘리먼트(50)는 제4 핵분열성 물질 함량을 가진 RU와 DU의 블렌드(즉, $(RU/DU)^4$) 및/또는 제2 핵분열성 물질 함량을 가진 NU(즉, NU^2)를 포함한다.
- [0044] 도 1에 도시된 구현예(및 본 출원의 다른 도면의 구현예)에 있어서, 블렌딩된 물질들은 사선 "/"으로 표시된다. 그러나, 그러한 각각의 경우에 있어서, 그러한 엘리먼트에 대한 대안적 연료 배열은 각각 언급된 단 하나의 연료를 가진 연료 엘리먼트(22)를 포함하지만, 언급된 다른 연료를 가진 연료 엘리먼트(22)와 함께 사용된다. 상이한 연료 타입의(예를 들면, 엘리먼트(22)의 동일한 링(ring)에 있는) 상기 엘리먼트(22)의 사용은 전술한 연료 타입의 블렌드를 가진 엘리먼트(22) 대신에, 또는 추가적으로 제공될 수 있다.
- [0045] 예를 들면, 도 1의 엘리먼트(22)의 $(RU/DU)^2$ 의 링은 복수 개의 제1 엘리먼트(36) 중 각각의 도시된 엘리먼트(22)가 RU와 DU의 블렌드라는 것을 나타낸다. 그러나, 대안적으로 또는 추가적으로, 복수 개의 제1 엘리먼트(26)는 하나 이상의 RU의 엘리먼트 및 하나 이상의 DU의 엘리먼트를 포함할 수 있다. 얻어지는, RU 또는 DU를 함유하는 연료 엘리먼트(22)는 연료 다발(14) 주위에서 원주상 위치가 변하는 교대형 패턴과 같은 다양한 구성으로 배열될 수 있다.
- [0046] 몇몇 구현예에 있어서, 도 1의 연료 다발(14)에 포함된 RU/DU 블렌드의 ^{235}U 핵분열성 물질 함량은 거의 동일하다(링에서 링까지, 또는 연료 다발(14)의 중심으로부터 방사상 거리의 변화에 따라). 다른 구현예에 있어서, 연료 다발(14)에 포함된 RU/DU 블렌드의 ^{235}U 핵분열성 물질 함량은 링에서 링까지, 또는 연료 다발(14)의 중심으로부터 방사상 거리의 변화에 따라 변한다. 예를 들면, 도 1의 중앙 엘리먼트(38), 복수 개의 제1 엘리먼트

(42), 복수 개의 제2 엘리먼트(46), 및 복수 개의 제3 엘리먼트(50) 중 하나 이상에 포함된 RU/DU 블렌드는 하나 이상의 다른 엘리먼트에 포함된 블렌드의 핵분열성 물질 함량과는 상이한 핵분열성 물질 함량을 가질 수 있다. 몇몇 구현예에 있어서, 도 1의 중앙 엘리먼트(38)에 포함된 $(RU/DU)^1$ 블렌드는 일반적으로 복수 개의 제1 엘리먼트(42)에 포함된 $(RU/DU)^2$ 블렌드보다 낮은 퍼센트의 ^{235}U 를 가지며, 복수 개의 제1 엘리먼트(42)에 포함된 $(RU/DU)^2$ 블렌드는 일반적으로 복수 개의 제2 엘리먼트(46)에 포함된 임의의 $(RU/DU)^3$ 블렌드보다 낮은 퍼센트의 ^{235}U 를 가지며, 복수 개의 제2 엘리먼트(46)에 포함된 $(RU/DU)^3$ 블렌드는 일반적으로 복수 개의 제3 엘리먼트(50)에 포함된 임의의 $(RU/DU)^4$ 블렌드보다 낮은 퍼센트의 ^{235}U 를 가진다. 따라서, 연료 다발(14)에 포함된 핵연료의 ^{235}U 핵분열성 물질 함량은 연료 다발(14)의 중심으로부터 반경 방향으로 바깥 쪽으로 갈수록 증가될 수 있다. 그러나, 다른 구현예에서는 ^{235}U 핵분열성 물질 함량이 연료 다발(14)의 중심으로부터 반경 방향으로 바깥 쪽으로 갈수록 감소된다.

[0047] 유사하게, 도 1의 구현예에서 사용되는 임의의 NU의 핵분열성 물질 함량은 대체로 동일하거나, 연료 다발(14)의 중심으로부터의 거리가 변함에 따라 변동될 수 있다. 예를 들면, 복수 개의 제2 엘리먼트(46)에 포함된 임의의 NU^1 는, 일반적으로 복수 개의 제3 엘리먼트(50)에 포함된 임의의 NU^2 보다 낮은 퍼센트의 ^{235}U 를 가질 수 있다. 대안적으로, 복수 개의 제3 엘리먼트(50)에 포함된 임의의 NU^2 는, 일반적으로 복수 개의 제2 엘리먼트(46)에 포함된 임의의 NU^1 보다 낮은 퍼센트의 ^{235}U 를 가질 수 있다.

[0048] 또한, 몇몇 구현예에 있어서, 특정 연료 엘리먼트(22)의 특정 핵분열성 물질 함량은 복수 개의 엘리먼트(42, 46, 50) 중 하나 이상에 걸쳐(예를 들면, 연료 다발(14) 내의 원주 방향으로), 또는 연료 다발(14)의 길이방향 길이를 따라 변동될 수 있다. 또한, 도시된 중앙 엘리먼트(38)와 같이, 도 1의 연료 엘리먼트(22) 중 어느 하나 또는 전부에 BP가 포함될 수 있다.

[0049] 이하의 연료 다발 배열은 도 1에 도시된 연료 다발 구현예에 의거한 것이며, 특히 바람직한 특성을 가진 연료 다발의 예로서 제시되어 있지만, 본 발명의 범위 또는 도 1에 의해 한정되는 다른 가능한 구현예를 제한하려는 것은 아니다. 본 명세서에서 사용되는 "링(ring)"이라는 용어는 중앙 엘리먼트만을 포함한다.

[0050] 실시예 #1

[0051] 중앙 엘리먼트: RU/DU

[0052] 엘리먼트(42)의 제1 링: RU/DU

[0053] 엘리먼트(46)의 제2 링: RU/DU

[0054] 엘리먼트(50)의 제3 링: RU/DU

[0055] 실시예 #2

[0056] 중앙 엘리먼트: $(RU/DU)^1$

[0057] 엘리먼트(42)의 제1 링: $(RU/DU)^2$

[0058] 엘리먼트(46)의 제2 링: $(RU/DU)^3$

[0059] 엘리먼트(50)의 제3 링: $(RU/DU)^4$

[0060] 여기서, $(RU/DU)^2$ 는 $(RU/DU)^1$ 보다 큰 ^{235}U 핵분열성 물질 함량을 가지고, $(RU/DU)^3$ 는 $(RU/DU)^1$ 및/또는 $(RU/DU)^2$ 보다 큰 ^{235}U 핵분열성 물질 함량을 가지고, 및/또는 $(RU/DU)^4$ 는 $(RU/DU)^1$, $(RU/DU)^2$ 및/또는 $(RU/DU)^3$ 보다 큰 ^{235}U 핵분열성 물질 함량을 가진다.

[0061] 실시예 #3

[0062] 중앙 엘리먼트: $(RU/DU)^1$

- [0063] 엘리먼트(42)의 제1 링: $(RU/DU)^2$
- [0064] 엘리먼트(46)의 제2 링: $(RU/DU)^3$
- [0065] 엘리먼트(50)의 제3 링: NU
- [0066] 여기서, $(RU/DU)^2$ 는 $(RU/DU)^1$ 보다 큰 ^{235}U 핵분열성 물질 함량을 가지고, $(RU/DU)^3$ 는 $(RU/DU)^1$ 및/또는 $(RU/DU)^2$ 보다 큰 ^{235}U 핵분열성 물질 함량을 가진다.
- [0067] 실시예 #4
- [0068] 중앙 엘리먼트: $(RU/DU)^1$
- [0069] 엘리먼트(42)의 제1 링: $(RU/DU)^2$
- [0070] 엘리먼트(46)의 제2 링: NU
- [0071] 엘리먼트(50)의 제3 링: $(RU/DU)^3$
- [0072] 여기서, $(RU/DU)^2$ 는 $(RU/DU)^1$ 보다 큰 ^{235}U 핵분열성 물질 함량을 가지고, $(RU/DU)^3$ 는 $(RU/DU)^1$ 및/또는 $(RU/DU)^2$ 보다 큰 ^{235}U 핵분열성 물질 함량을 가진다.
- [0073] 실시예 #5
- [0074] 중앙 엘리먼트: $(RU/DU)^1$
- [0075] 엘리먼트(42)의 제1 링: $(RU/DU)^2$
- [0076] 엘리먼트(46)의 제2 링: NU
- [0077] 엘리먼트(50)의 제3 링: NU
- [0078] 여기서, $(RU/DU)^2$ 는 $(RU/DU)^1$ 보다 큰 ^{235}U 핵분열성 물질 함량을 가진다.
- [0079] 도 2는 37개의 엘리먼트를 포함하는 연료 다발(14)의 또 다른 구현예를 나타낸다. 도 2의 중앙 엘리먼트(38)는 제1 핵분열성 물질 함량을 가진 RU(즉, RU^1) 및/또는 제1 핵분열성 물질 함량을 가진 DU(즉, DU^1)를 포함한다. 도 2의 복수 개의 제1 엘리먼트(42)는 제2 핵분열성 물질 함량을 가진 RU(즉, RU^2) 및/또는 제2 핵분열성 물질 함량을 가진 DU(즉, DU^2)를 포함한다. 복수 개의 제2 엘리먼트(46)는 제3 핵분열성 물질 함량을 가진 RU(즉, RU^3)를 포함한다. 복수 개의 제3 엘리먼트(50)는 제4 핵분열성 물질 함량을 가진 RU(즉, RU^4)를 포함한다.
- [0080] 각각의 연료 엘리먼트(22)에 포함된 RU의 ^{235}U 핵분열성 물질 함량은 대체로 동일하고, 및/또는 변동될 수 있다. 도 2의 RU의 ^{235}U 핵분열성 물질 함량이 변동되는 구현예에 있어서, 이러한 변화는 연료 다발의 중심으로부터의 방사상 거리(radial distance) 및/또는 연료 다발(14) 내 원주상 위치에 따라 일어날 수 있고, 도 2에 도시된 링 중 어느 하나 또는 전부 사이, 및/또는 임의의 링의 어느 하나 또는 모든 원주상 위치 사이에 존재할 수 있다. 예를 들면, 몇몇 구현예에 있어서, 중앙 엘리먼트(38)에 포함된 NU^1 는, 일반적으로 복수 개의 제1 엘리먼트(42)에 포함된 NU^2 보다 낮은 퍼센트의 ^{235}U 를 가지며, 복수 개의 제1 엘리먼트(42)에 포함된 임의의 NU^2 는, 일반적으로 복수 개의 제2 엘리먼트(46)에 포함된 NU^3 보다 낮은 퍼센트의 ^{235}U 를 가지며, 및/또는 복수 개의 제2 엘리먼트(46)에 포함된 임의의 NU^3 는, 일반적으로 복수 개의 제3 엘리먼트(50)에 포함된 NU^4 보다 낮은 퍼센트의 ^{235}U 를 가진다. 따라서, 몇몇 구현예에 있어서, 연료 다발(14)의 핵연료의 ^{235}U 핵분열성 물질 함량은 연료 다발(14)의 중심으로부터 반경 방향으로 바깥 쪽으로 갈수록 증가된다. 그러나, 다른 구현예에서는 ^{235}U 핵분열성 물질 함량이 연료 다발(14)의 중심으로부터 반경 방향으로 바깥 쪽으로 갈수록 감소된다.

- [0081] 도 2의 연료 다발(14)에 포함된 RU의 핵분열성 물질 함량이 전술한 어느 하나의 방식으로 변동될 때에도, 각각의 연료 엘리먼트(22)는 일반적으로 약 0.72중량% 내지 약 1.2중량%의 ^{235}U 범위(약 0.72중량% 및 약 1.2중량% 포함)로 ^{235}U 핵분열성 물질 함량을 가진다는 것을 이해해야 한다. 단지 예를 들자면, 중앙 엘리먼트(38)에 포함된 RU^1 의 핵분열성 물질 함량은 RU에 대한 상기 범위로부터 선택되고, 복수 개의 제1 엘리먼트(42)에 포함된 RU^2 의 핵분열성 물질 함량도 동일한 상기 범위로부터 선택되지만, 중앙 엘리먼트(38)에 대해 선택된 핵분열성 물질 함량과는 상이할 수 있다.
- [0082] 유사하게, 도 2의 구현예에서 사용되는 임의의 DU의 핵분열성 물질 함량은 대체로 동일하거나, 또는 연료 다발(14)의 중심으로부터 방사상 거리에 따라, 또는 연료 다발(14) 내 원주상 위치의 변화에 따라 변동될 수 있다. 또한 단지 예를 들자면, 중앙 엘리먼트(38)에 포함된 임의의 DU^1 는 일반적으로 복수 개의 제2 엘리먼트(42)에 포함된 임의의 DU^2 보다 낮은 퍼센트의 ^{235}U 를 가질 수 있다. 대안적으로, 복수 개의 제1 엘리먼트(42)에 포함된 임의의 DU^2 는 일반적으로 중앙 엘리먼트(38)에 포함된 임의의 DU^1 보다 낮은 퍼센트의 ^{235}U 를 가질 수 있다.
- [0083] 또한, 몇몇 구현예에 있어서, 특정 연료 엘리먼트(22)의 특정 핵분열성 물질 함량은 복수 개의 엘리먼트(42, 46, 50) 중 하나 이상에 걸쳐(예를 들면, 연료 다발(14) 내의 원주 방향으로), 또는 연료 다발(14)의 길이방향 길이를 따라 변동될 수 있다. 또한, 도 2의 연료 엘리먼트(22) 중 어느 하나 또는 전부에 BP가 포함될 수 있다.
- [0084] 이하의 연료 다발(14) 배열은 도 2에 도시된 연료 다발 구현예에 의거한 것이며, 특히 바람직한 특성을 가진 연료 다발(14)의 예로서 제시되어 있지만, 본 발명의 범위 또는 도 2에 의해 상정되는 다른 가능한 구현예를 제한하려는 것은 아니다. 본 명세서에서 사용되는 "링"이라는 용어는 중앙 엘리먼트만을 포함한다.
- [0085] 실시예 #6
- [0086] 중앙 엘리먼트: DU^1
- [0087] 엘리먼트(42)의 제1 링: DU^2
- [0088] 엘리먼트(46)의 제2 링: RU^1
- [0089] 엘리먼트(50)의 제3 링: RU^2
- [0090] 여기서, DU^2 는 DU^1 보다 큰 ^{235}U 핵분열성 물질 함량을 가지고, RU^2 는 RU^1 보다 큰 ^{235}U 핵분열성 물질 함량을 가진다.
- [0091] 도 3의 구현예는, 연료 다발(14)이 43개 엘리먼트를 가진 연료 다발이고, 전술한 바와 같이 불균일한 크기의 연료 엘리먼트(22)를 가진 것 이외에는, 전술한 도 1의 구현예와 실질적으로 유사하다. 중앙 엘리먼트(38), 복수 개의 제1 엘리먼트(42), 복수 개의 제2 엘리먼트(46), 및 복수 개의 제3 엘리먼트(50) 내 핵연료의 분포는 각각도 1과 유사하기 때문에, 도 3에 도시된 구현예(및 그에 대한 가능한 대안)에 관한 더 구체적인 사항에 대해서는 상기 도 1에 수반되는 설명을 참조한다.
- [0092] 이하의 연료 다발 배열은 도 3에 도시된 연료 다발 구현예에 의거한 것이며, 특히 바람직한 특성을 가진 연료 다발의 예로서 제시되어 있지만, 본 발명의 범위 또는 도 3에 의해 상정되는 다른 가능한 구현예를 제한하려는 것은 아니다. 본 명세서에서 사용되는 "링"이라는 용어는 중앙 엘리먼트만을 포함한다.
- [0093] 실시예 #7
- [0094] 중앙 엘리먼트: RU/DU
- [0095] 엘리먼트(42)의 제1 링: RU/DU
- [0096] 엘리먼트(46)의 제2 링: RU/DU
- [0097] 엘리먼트(50)의 제3 링: RU/DU
- [0098] 실시예 #8

- [0099] 중앙 엘리먼트: RU/DU
- [0100] 엘리먼트(42)의 제1 링: RU/DU
- [0101] 엘리먼트(46)의 제2 링: RU/DU
- [0102] 엘리먼트(50)의 제3 링: NU
- [0103] 실시예 #9
- [0104] 중앙 엘리먼트: RU/DU
- [0105] 엘리먼트(42)의 제1 링: RU/DU
- [0106] 엘리먼트(46)의 제2 링: NU
- [0107] 엘리먼트(50)의 제3 링: RU/DU
- [0108] 실시예 #10
- [0109] 중앙 엘리먼트: DU/BP
- [0110] 엘리먼트(42)의 제1 링: $(RU/DU)^1$
- [0111] 엘리먼트(46)의 제2 링: $(RU/DU)^2$
- [0112] 엘리먼트(50)의 제3 링: $(RU/DU)^3$
- [0113] 여기서, $(RU/DU)^2$ 는 $(RU/DU)^1$ 보다 큰 ^{235}U 핵분열성 물질 함량을 가지고, $(RU/DU)^3$ 는 $(RU/DU)^2$ 및/또는 $(RU/DU)^1$ 보다 큰 ^{235}U 핵분열성 물질 함량을 가진다.
- [0114] 실시예 #11
- [0115] 중앙 엘리먼트: DU
- [0116] 엘리먼트(42)의 제1 링: $(RU/DU)^1$
- [0117] 엘리먼트(46)의 제2 링: $(RU/DU)^2$
- [0118] 엘리먼트(50)의 제3 링: $(RU/DU)^3$
- [0119] 여기서, $(RU/DU)^2$ 는 $(RU/DU)^1$ 보다 큰 ^{235}U 핵분열성 물질 함량을 가지고, $(RU/DU)^3$ 는 $(RU/DU)^2$ 및/또는 $(RU/DU)^1$ 보다 큰 ^{235}U 핵분열성 물질 함량을 가진다.
- [0120] 실시예 #12
- [0121] 중앙 엘리먼트: DU/BP
- [0122] 엘리먼트(42)의 제1 링: $(RU/DU)^1$
- [0123] 엘리먼트(46)의 제2 링: $(RU/DU)^2$
- [0124] 엘리먼트(50)의 제3 링: NU
- [0125] 여기서, $(RU/DU)^2$ 는 $(RU/DU)^1$ 보다 큰 ^{235}U 핵분열성 물질 함량을 가진다.
- [0126] 실시예 #13
- [0127] 중앙 엘리먼트: DU/BP
- [0128] 엘리먼트(42)의 제1 링: $(RU/DU)^1$
- [0129] 엘리먼트(46)의 제2 링: NU

- [0130] 엘리먼트(50)의 제3 링: $(RU/DU)^2$
- [0131] 여기서, $(RU/DU)^2$ 는 $(RU/DU)^1$ 보다 큰 ^{235}U 핵분열성 물질 함량을 가진다.
- [0132] 도 4의 구현에는, 연료 다발(14)이 43개 엘리먼트를 가진 연료 다발이고, 전술한 바와 같이 불균일한 크기의 연료 엘리먼트(22)를 가진 것 이외에는, 전술한 도 2의 구현예와 실질적으로 유사하다. 중앙 엘리먼트(38), 복수 개의 제1 엘리먼트(42), 복수 개의 제2 엘리먼트(46), 및 복수 개의 제3 엘리먼트(50) 내 핵연료의 분포는 각각 도 2와 유사하기 때문에, 도 4에 도시된 구현예(및 그에 대한 가능한 대안)에 관한 더 구체적인 사항에 대해서는 상기 도 2에 수반되는 설명을 참조한다.
- [0133] 이하의 연료 다발 배열은 도 4에 도시된 연료 다발 구현예에 의거한 것이며, 특히 바람직한 특성을 가진 연료 다발의 예로서 제시되어 있지만, 본 발명의 범위 또는 도 4에 의해 상정되는 다른 가능한 구현예를 제한하려는 것은 아니다. 본 명세서에서 사용되는 "링"이라는 용어는 중앙 엘리먼트만을 포함한다.
- [0134] 실시예 #14
- [0135] 중앙 엘리먼트: DU/BP
- [0136] 엘리먼트(42)의 제1 링: RU
- [0137] 엘리먼트(46)의 제2 링: RU
- [0138] 엘리먼트(50)의 제3 링: RU
- [0139] 실시예 #15
- [0140] 중앙 엘리먼트: DU
- [0141] 엘리먼트(42)의 제1 링: RU
- [0142] 엘리먼트(46)의 제2 링: RU
- [0143] 엘리먼트(50)의 제3 링: RU
- [0144] 실시예 #16
- [0145] 중앙 엘리먼트: DU
- [0146] 엘리먼트(42)의 제1 링: DU
- [0147] 엘리먼트(46)의 제2 링: RU
- [0148] 엘리먼트(50)의 제3 링: RU
- [0149] 도 3 및 도 4의 구현에는, 본 발명을 구현하면서도 연료 엘리먼트의 특정 갯수, 연료 엘리먼트 배열(예; 도시된 구현예에서의 엘리먼트들의 링), 연료 엘리먼트 크기, 및 상대적 연료 엘리먼트 크기를 변경할 수 있는 방법의 예를 제공한다. 몇몇 구현예에 있어서, 핵연료의 ^{235}U 핵분열성 물질 함량은 연료 다발(14)의 중심으로부터 반경 방향으로 바깥 쪽으로 갈수록 감소된다. 다른 구현예에 있어서, ^{235}U 핵분열성 물질 함량은 연료 다발(14)의 중심으로부터 반경 방향으로 바깥 쪽으로 갈수록 증가된다.
- [0150] 중수 냉각형 원자로에 있어서, 냉각제 보이드 현상이 일어나면 중성자 증배(neutron multiplication) 속도가 증가된다. 냉각제 보이드 현상은, 예를 들면, 냉각제가 비등하기 시작할 때 일어난다. 냉각제 보이드 반응성은 원자로가 중성자를 증배시키는 능력의 척도이다. 이 현상은 포지티브 냉각제 보이드 반응성에 기인하며, 여러 가지 시나리오에 대해 모든 원자로에서 일어날 수 있다. 본 발명은 냉각제 보이드 반응성을 현저히 감소시킬 수 있으며, 또한 네거티브 연료 온도 계수 및/또는 네거티브 파워 계수를 제공할 수 있다.
- [0151] 이상과 같이 설명되고 도면에 도시된 구현예는 단지 예시를 목적으로 제시된 것이며, 본 발명의 개념과 원리를 한정하려는 것이 아니다. 따라서, 당업자는 엘리먼트와 그의 구성과 배열에 있어서 본 발명의 사상과 범위로 부터 벗어나지 않고서 다양한 변화가 가능하다는 것을 이해할 것이다. 예를 들면, 본 명세서에 기재 및/또는 예시된 다양한 구현예에 있어서, RU와 DU 블렌드는 여러 가지 타입의 핵연료 또는 다른 물질과 추가로 블렌딩되어 소정의 핵분열성 물질 함량을 가진 핵연료를 생성한다. 예를 들면, RU와 DU는 약간 농축된 우라늄(SEU) 및 저

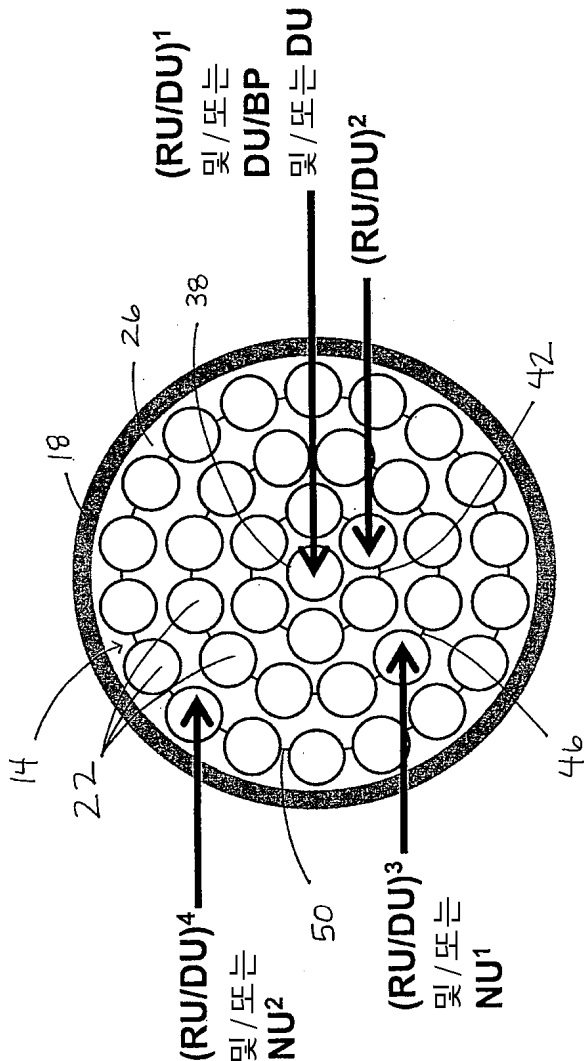
농축 우라늄(LEU)과 함께 블렌딩될 수 있다(단독으로 또는 RU/DU 블렌드로서). 본 명세서에 정의된 바와 같이, SEU는 ^{235}U 약 0.9중량% 내지 약 3중량%(약 0.9중량% 및 약 3중량% 포함)의 핵분열성 물질 함량을 가지고, LEU는 ^{235}U 약 3중량% 내지 약 20중량%(약 3중량% 및 약 20중량% 포함)의 핵분열성 물질 함량을 가진다.

[0152]

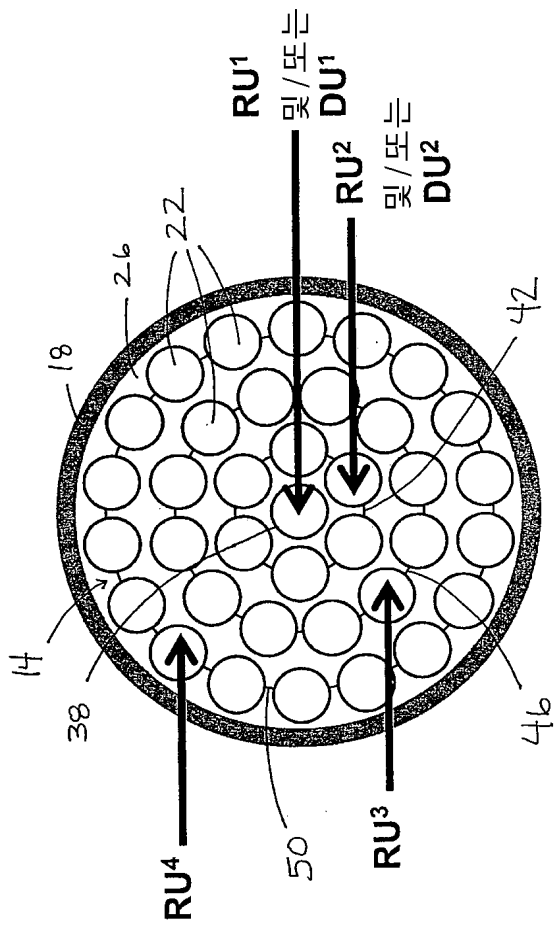
또한, 본 명세서에 기재된 구현예들은 현재의 압력관 원자로에 사용되는 것보다 크거나 작은 압력관과 함께 사용될 수 있고, 미래의 압력관 원자로에 사용될 수도 있다. 또한, 본 발명은 상이한 갯수와 상이한 엘리먼트 배열을 가진 연료 다발에서 이용될 수 있으며, 예로서 도 1~4에 도시된 것과 같은 43개 엘리먼트 및 37개 엘리먼트 연료 다발 디자인에 한정되는 것은 아니다. 예를 들면, 도 3과 4의 구현예에서는 도시된 연료 다발(14)에서 2개의 상이한 엘리먼트 크기가 사용되는 반면, 도 1과 2의 구현예에서는 도시된 연료 다발(14)에 걸쳐 균일한 엘리먼트 크기가 사용되고 있지만, 본 명세서에 기재된 연료 다발은 어느 것이나, 본 발명의 사상과 범위 내에 포함되는 상태에서 연료 다발 내 상이한 링 및/또는 상이한 원주상 위치에서 동일하거나 상이한 크기의 엘리먼트를 가질 수 있다는 것이 이해될 것이다. 또 다른 예로서, 상대적으로 큰 엘리먼트가 반드시 연료 다발(14)의 제1 및/또는 제2 링에만 위치해야 하는 것은 아니다. 다른 구현예에 있어서, 그러한 상대적으로 큰 엘리먼트는 연료 다발(14)의 방사상 외측 링(예; 방사상 최외곽 링 및/또는 거기에 인접한 링)에 위치한다.

도면

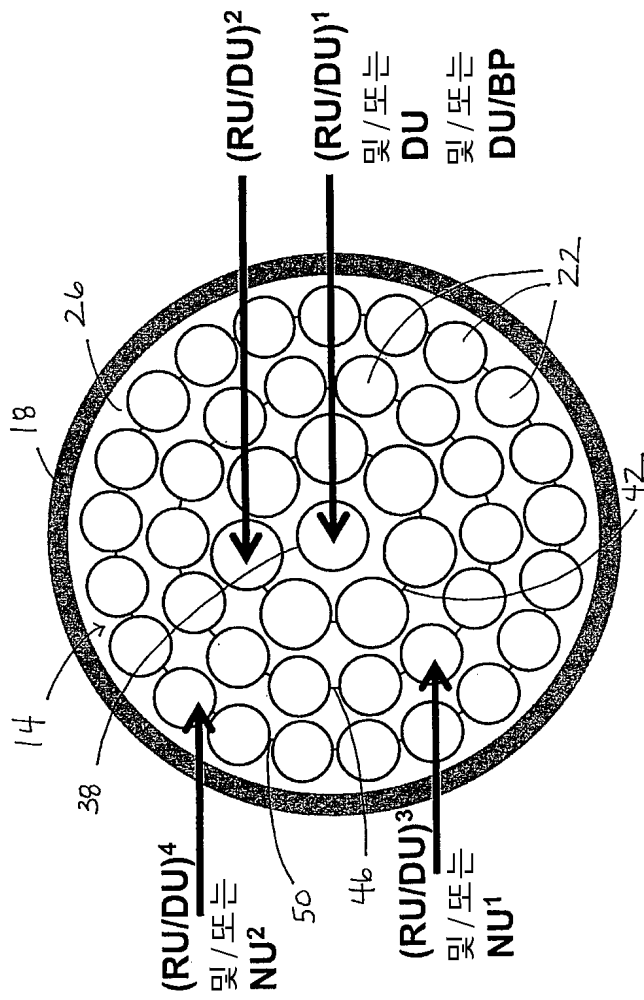
도면1



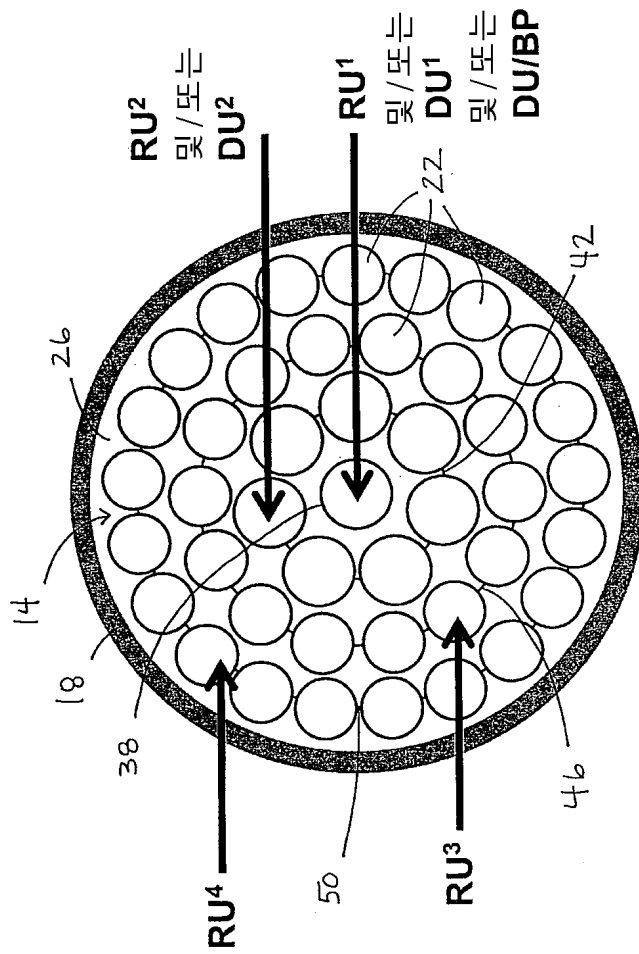
도면2



도면3



도면4



도면5

