



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2022-0070319  
(43) 공개일자 2022년05월30일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
G21D 5/02 (2006.01) B64D 27/22 (2006.01)  
G21C 1/12 (2006.01) G21C 11/06 (2006.01)  
G21C 3/62 (2006.01) G21C 7/12 (2006.01)  
G21C 9/02 (2006.01)
- (52) CPC특허분류  
G21D 5/02 (2013.01)  
B64D 27/22 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2022-7014930
- (22) 출원일자(국제) 2020년10월04일  
심사청구일자 없음
- (85) 번역문제출일자 2022년05월03일
- (86) 국제출원번호 PCT/US2020/054190
- (87) 국제공개번호 WO 2021/067903  
국제공개일자 2021년04월08일
- (30) 우선권주장  
62/910,561 2019년10월04일 미국(US)

- (71) 출원인  
울트라 세이프 뉴클리어 코퍼레이션  
미국 워싱턴 시애틀 웨스트 코모도어 웨이 2288  
스위트 300 (우: 98199-1465)
- (72) 발명자  
베네리 파올로 프란체스코  
미국 98199-1465 워싱턴주 시애틀 스위트 300 웨  
스트 코모도어 웨이 2288  
이즈 마이클 존  
미국 98199-1465 워싱턴주 시애틀 스위트 300 웨  
스트 코모도어 웨이 2288  
(뒷면에 계속)
- (74) 대리인  
양영준, 윤정호

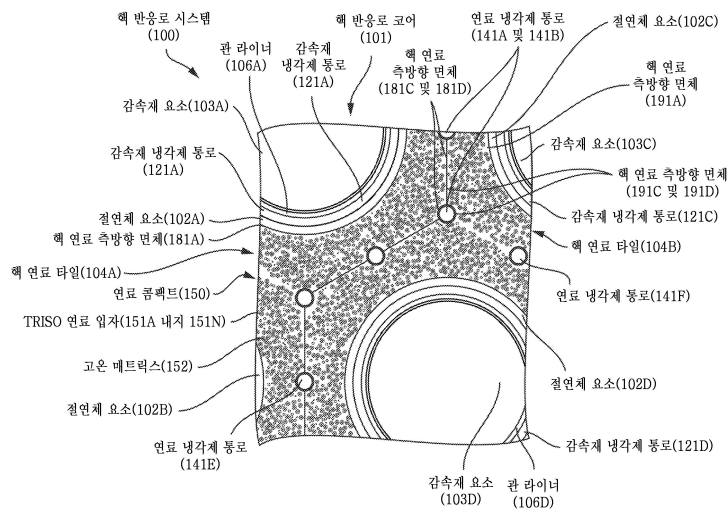
전체 청구항 수 : 총 40 항

(54) 발명의 명칭 열 전달 및 안전성이 향상된 핵 반응로 코어 아키텍처

(57) 요약

핵 반응로 코어를 위한 향상된 아키텍처가, 안전성, 신뢰성, 열 전달, 효율, 및 콤팩트함을 개선하기 위해서, 몇 개의 기술: (1) 핵 연료 타일(S-Block); 및 (2) 고온 열 절연체 및 저온 고체-상 감속재를 갖는 관 라이너(U-Mod)를 포함한다. S-Block에서, 핵 연료 타일은 핵 연료 타일들 사이의 그리고 핵 연료 냉각제 내로의 열 전달을 최적화하기 위해서 그리고 핵 연료 냉각제가 핵 연료 타일과 직접 접촉되게 하기 위해서 상호 록킹 기하형태 패턴으로 설계된 연료 형상을 포함한다. 핵 연료 타일은 불연속적인 핵 연료 측방향 면체로 성형될 수 있고, 연료 냉각제와 핵 연료 타일 사이의 직접적인 접촉을 제공하기 위해서 내부에 형성된 연료 냉각제 통로를 가질 수 있다. U-Mod에서, 낮은 수소 확산율을 갖는 관 라이너가, 상승된 온도에서도, 수소를 저온 고체-상 감속재 내에서 보유하고, 고온 열 절연체는 고체-상 감속재를 핵 연료 타일로부터 절연시킨다.

대표도



(52) CPC특허분류

*G21C 1/12* (2018.01)  
*G21C 11/06* (2013.01)  
*G21C 3/626* (2013.01)  
*G21C 7/12* (2013.01)  
*G21C 9/02* (2013.01)  
*Y02E 30/30* (2020.08)  
*Y02T 90/40* (2020.08)

(72) 발명자

수자 켈시

미국 98199-1465 워싱턴주 시애틀 스위트 300 웨스  
트 코모도어 웨이 2288

디즌 웨슬리

미국 98199-1465 워싱턴주 시애틀 스위트 300 웨스  
트 코모도어 웨이 2288

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

핵 반응로 시스템이며:

핵 반응로 코어로서:

절연체 요소의 절연체 요소 어레이;

감속재 요소의 감속재 요소 어레이로서, 각각의 감속재 요소가, 각각의 절연체 요소 내에 배치된 저온 고체-상 감속재로 형성되는, 감속재 요소 어레이를 포함하는, 핵 반응로 코어; 및

핵 연료 타일의 핵 연료 타일 어레이로서, 각각의 핵 연료 타일은, 각각의 절연체 요소 또는 다른 각각의 핵 연료 타일을 경계 짓는 복수의 핵 연료 측방향 면체를 포함하는, 핵 연료 타일 어레이를 포함하고;

각각의 감속재 요소는 각각의 절연체 요소에 의해서 핵 연료 타일의 핵 연료 타일 어레이로부터 절연되는, 핵 반응로 시스템.

#### 청구항 2

제1항에 있어서,

핵 반응로 코어는 수소 장벽 재료로 형성된 복수의 관 라이너를 더 포함하고; 그리고

각각의 감속재 요소는 수소 보유를 위해서 각각의 관 라이너 내에 배치되는, 핵 반응로 시스템.

#### 청구항 3

제2항에 있어서,

복수의 감속재 냉각제 통로를 더 포함하고:

각각의 관 라이너는 각각의 감속재 냉각제 통로에 의해서 둘러싸이고; 그리고

각각의 감속재 냉각제 통로는 각각의 절연체 요소에 의해서 둘러싸이는, 핵 반응로 시스템.

#### 청구항 4

제3항에 있어서,

각각의 관 라이너는 각각의 감속재 요소와 각각의 감속재 냉각제 통로 사이에 위치되고; 그리고

각각의 감속재 냉각제 통로는 각각의 관 라이너와 각각의 절연체 요소 사이에 위치되는, 핵 반응로 시스템.

#### 청구항 5

제3항에 있어서,

각각의 절연체 요소는 각각의 감속재 냉각제 통로와 각각의 핵 연료 타일 사이에 위치되는, 핵 반응로 시스템.

#### 청구항 6

제2항에 있어서,

각각의 관 라이너는, 각각의 감속재 요소를 차폐하는 클래딩으로서 형성되는, 핵 반응로 시스템.

#### 청구항 7

제6항에 있어서,

클래딩은 밀폐식으로 밀봉된 컨테이너를 포함하고; 그리고

각각의 감속재 요소를 형성하는 저온 고체-상 감속재 재료는 밀폐식으로 밀봉된 컨테이너 내에 배치되는, 핵 반응로 시스템.

**청구항 8**

제6항에 있어서,

각각의 관 라이너는, 각각의 감속재 요소 상에 코팅으로서 형성되고; 그리고

각각의 감속재 요소를 형성하는 저온 고체-상 감속재 재료가 코팅 내에 배치되는, 핵 반응로 시스템.

**청구항 9**

제2항에 있어서,

수소 장벽 재료는  $Al_2O_3$ , SiC, ZrC, MgO, Mo, W, Cu, Ni, Cr, 또는 이들의 조합을 포함하는, 핵 반응로 시스템.

**청구항 10**

제1항에 있어서,

절연체 요소의 각각이 고온 열 절연체로 형성되고; 그리고

고온 열 절연체는 저밀도 SiC, 안정화된 지르코늄 산화물, 알루미늄 산화물, 저밀도 ZrC, 저밀도 탄소, 또는 이들의 조합을 포함하는, 핵 반응로 시스템.

**청구항 11**

제1항에 있어서,

저온 고체-상 감속재는  $MgH_x$ ,  $YH_x$ ,  $ZrH_x$ ,  $CaH_x$ ,  $ZrO_x$ ,  $CaO_x$ ,  $BeO_x$ ,  $BeC_x$ , Be, 부화된 붕소 탄화물,  $^{11}B_4C$ ,  $CeH_x$ ,  $LiH_x$ , 또는 이들의 조합을 포함하는, 핵 반응로 시스템.

**청구항 12**

제1항에 있어서,

각각의 절연체 요소는, 길이방향으로 내부에 형성된 감속재 개구부를 포함하는 프리즘 또는 실린더로서 성형되고; 그리고

각각의 감속재 요소는 감속재 개구부 내에 배치되는, 핵 반응로 시스템.

**청구항 13**

제12항에 있어서,

각각의 절연체 요소는, 각각의 절연체 요소를 프리즘으로 함께 성형하는 복수의 절연체 요소 측방향 면체를 포함하는, 핵 반응로 시스템.

**청구항 14**

제13항에 있어서,

각각의 절연체 요소는 프리즘으로서 성형되고;

프리즘은 복수의 절연체 요소 경계 벽을 포함하고; 그리고

절연체 요소 경계 벽의 각각은 절연체 요소 측방향 면체의 하위 세트를 포함하는, 핵 반응로 시스템.

**청구항 15**

제14항에 있어서,

절연체 요소 측방향 면체는 평면형, 비구면, 구면, 또는 자유형태 표면인, 핵 반응로 시스템.

**청구항 16**

제15항에 있어서,  
절연체 요소 경계 벽은 평면형 표면과 비구면 또는 구면 표면의 교번적인 패턴을 포함하는, 핵 반응로 시스템.

**청구항 17**

제14항에 있어서,  
프리즘은 삼각형 프리즘이고; 그리고  
각각의 절연체 요소는 3개의 절연체 요소 경계 벽을 포함하는, 핵 반응로 시스템

**청구항 18**

제1항에 있어서,  
핵 연료 타일의 각각은, 고온 매트릭스 내에 내재된 코팅된 연료 입자로 구성된 연료 콤팩트로 형성되고; 그리고  
고온 매트릭스는 규소 탄화물, 지르코늄 탄화물, 티타늄 탄화물, 니오븀 탄화물, 텅스텐, 몰리브덴 또는 이들의 조합을 포함하는, 핵 반응로 시스템.

**청구항 19**

제18항에 있어서,  
코팅된 연료 입자는 삼중 구조-등방성(TRISO) 연료 입자 또는 이중 구조-등방성(BISO) 연료 입자를 포함하는, 핵 반응로 시스템.

**청구항 20**

제1항에 있어서,  
복수의 핵 연료 측방향 면체는 각각의 핵 연료 타일의 외부 주변부를 형성하기 위해서 불연속적인, 핵 반응로 시스템.

**청구항 21**

제20항에 있어서,  
외부 주변부는 복수의 평면형, 비구면, 구면, 또는 자유형태 표면을 포함하는, 핵 반응로 시스템.

**청구항 22**

제1항에 있어서,  
핵 연료 측방향 면체는, 경계를 형성하는 각각의 절연체 요소와 다른 각각의 핵 연료 타일 사이에서, 교번적인, 핵 반응로 시스템.

**청구항 23**

제1항에 있어서,  
핵 연료 측방향 면체는 복수의 타일 인터페이스 벽 및 복수의 절연체 요소 인터페이스 벽을 포함하고; 그리고  
각각의 타일 인터페이스 벽은 각각의 절연체 요소 인터페이스 벽과 교번적이고, 그에 따라 외부 주변부의 교번 패턴을 형성하는, 핵 반응로 시스템.

**청구항 24**

제23항에 있어서,  
각각의 타일 인터페이스 벽은 평면형 표면을 포함하는, 핵 반응로 시스템.

**청구항 25**

제23항에 있어서,

각각의 타일 인터페이스 벽은, 핵 연료 측방향 면체는 사이에서 연장되는 대향 단부들 상에서, 2개의 핵 연료 측방향 면체를 포함하고;

대향 단부들 상의 2개의 핵 연료 측방향 면체는 평면형 표면을 포함하고; 그리고

사이에서 연장되는 핵 연료 측방향 면체가 비구면 또는 구면 표면을 포함하는, 핵 반응로 시스템.

**청구항 26**

제23항에 있어서,

각각의 타일 인터페이스 벽은 다른 각각의 핵 연료 타일을 경계 짓고; 그리고

각각의 절연체 요소 인터페이스 벽은 각각의 절연체 요소를 경계 짓는, 핵 반응로 시스템.

**청구항 27**

제23항에 있어서,

각각의 절연체 요소 인터페이스 벽은 비구면 또는 구면 표면을 포함하는, 핵 반응로 시스템.

**청구항 28**

제27항에 있어서,

각각의 절연체 요소는 관 또는 파이프로서 성형되고; 그리고

각각의 절연체 요소는 2개 이상의 핵 연료 타일의 각각의 절연 인터페이스 벽을 라이닝하는, 핵 반응로 시스템.

**청구항 29**

제1항에 있어서,

각각의 감속재 요소가 내부에 배치된 각각의 절연체 요소는 그 내부에 형성된 각각의 감속재 냉각제 통로를 포함하는, 핵 반응로 시스템.

**청구항 30**

29에 있어서,

각각의 감속재 냉각제 통로는 각각의 감속재 요소와 각각의 절연체 요소 사이에 위치되는, 핵 반응로 시스템.

**청구항 31**

29에 있어서,

각각의 감속재 냉각제 통로는 편평한 링 형상의 개구부인, 핵 반응로 시스템.

**청구항 32**

29에 있어서,

각각의 감속재 냉각제 통로는: (i) 냉각제를 가열하는 것, 및 (ii) 각각의 감속재 요소를 냉각하는 것 모두를 위해서, 냉각제를 유동 통과시키고;

각각의 핵 연료 타일은, 냉각제가 감속재 냉각제 통로를 통해서 유동한 후에, 각각의 핵 연료 타일에 의해서 냉각제를 후속하여 가열하기 위해서 내부에 형성된 하나 이상의 연료 냉각제 통로를 포함하고; 그리고

냉각제가 가스 또는 액체인, 핵 반응로 시스템.

**청구항 33**

제29항에 있어서,

각각의 감속재 냉각제 통로는: (i) 감속재 냉각제를 가열하는 것, 및 (ii) 각각의 감속재 요소를 냉각하는 것 모두를 위해서, 감속재 냉각제를 유동 통과시키고; 그리고

각각의 핵 연료 타일은, 각각의 핵 연료 타일과의 직접적인 접촉을 통해서 핵 연료 냉각제를 가열하기 위해서, 핵 연료 냉각제가 유동하는 내부에 형성된 하나 이상의 핵 연료 냉각제 통로를 포함하는, 핵 반응로 시스템.

#### 청구항 34

제33항에 있어서,

각각의 감속재 냉각제 통로를 통해서 유동하는 감속재 냉각제는, 감속재 요소의 감속재 요소 어레이에 지정된 그리고 핵 연료 냉각제 통로를 포함하는 연료 냉각제 루프로부터 열적으로 절연되고 분리된, 감속재 냉각제 루프 내에 있는, 핵 반응로 시스템.

#### 청구항 35

제34항에 있어서,

감속재 냉각제 루프는 감속재 냉각제를 핵 연료 냉각제로부터 열적으로 절연시켜 열을 감속재 요소로부터 능동적으로 제거하고, 그에 따라 핵 반응로 코어의 동작 중에, 감속재 요소를 연료 타일의 핵 연료 타일 어레이에 비해서 더 낮은 온도에서 유지하는, 핵 반응로 시스템.

#### 청구항 36

제34항에 있어서,

감속재 냉각제는 핵 연료 냉각제와 상이한, 핵 반응로 시스템.

#### 청구항 37

제34항에 있어서,

감속재 냉각제가 핵 열 추진을 위한 추진체이거나;

감속재 냉각제가 핵 전기 추진 또는 핵분열 표면 과위를 위한 작업 유체인, 핵 반응로 시스템.

#### 청구항 38

제34항에 있어서,

감속재 냉각제는 복수의 핵 연료 타일과 화학적으로 양립될 수 없는, 핵 반응로 시스템.

#### 청구항 39

제34항에 있어서,

감속재 냉각제 루프는 히트 싱크를 포함하고; 그리고

감속재 냉각제는 히트 싱크에 열적으로 커플링되는, 핵 반응로 시스템.

#### 청구항 40

제39항에 있어서,

펌프, 압축기, 송풍기, 또는 이들의 조합을 더 포함하고:

펌프, 압축기, 송풍기, 또는 이들의 조합은, 핵 반응로 코어의 동작 중에, 감속재 냉각제를 유동시키고 히트 싱크를 통해서 유동시켜 복수의 감속재 요소를 냉각시키는, 핵 반응로 시스템.

### 발명의 설명

### 기술 분야

- [0001] 관련 출원에 대한 상호 참조
- [0002] 본원은 2019년 10월 4일자로 출원되고 그 전체가 본원에서 참조로 포함되는 "Nuclear System for Power Production in Space"라는 명칭의 미국 가특허출원 제62/910,561호에 대한 우선권을 주장한다.
- [0003] 본원은 2020년 10월 4일자로 출원되고 그 전체가 본원에서 참조로 포함되는 "Integrated In-Vessel Neutron Shield"라는 명칭의 국제 출원 제PCT/US2020/XXXXXX호에 관한 것이다. 본원은 또한 2020년 10월 4일자로 출원되고 그 전체가 본원에서 참조로 포함되는 "Automatic Shutdown Controller for Nuclear Reactor System with Control Drums"라는 명칭의 국제 출원 제PCT/US2020/XXXXXX호에 관한 것이다.
- [0004] 본 청구 대상은 예를 들어 외부 우주와 같은 원격 지역에서 파워를 생산하고 추진하기 위한 핵 반응로 시스템 및 핵 반응로의 예에 관한 것이다. 본 청구 대상은 또한, 핵 연료 타일 및 저온 고체-상 감속재를 포함하는 핵 반응로 코어 아키텍처를 포함한다.

**배경 기술**

- [0005] 핵 분열 반응로는 열형 또는 고속형 반응로를 포함한다. 현재, 동작되는 거의 모든 핵 분열 반응로는 열적인 것이다. 핵 분열 반응로는 핵 반응로 코어 내의 핵 연료, 및 핵 분열이 계속될 수 있도록 고속 중성자를 감속시키는 감속재를 포함한다. 일반적으로, 핵 연료는 원통형 형상의 연료 콤팩트 또는 펠릿으로 형성된다. 연료 콤팩트가 연료 핀 또는 연료 봉 내로 적재되고, 클래딩되고(cladded), 핵 반응로 코어 내의 다수의 연료 요소의 컬럼 내에 적층된다. 불행하게도, 그러한 핵 연료 기하형태는 핵 연료로부터 냉각제 내로의 열 전달을 최대화하지 못하고, 핵 반응로 코어의 기하형태에서 한계를 부여한다는 점에서 제한적이다.
- [0006] 핵 분열 반응로의 현재의 고온 반응로 설계에서, 냉각 경로 및/또는 열 제거 메커니즘은 핵 연료와 감속재 사이에서 공유된다. 이는, 임의의 고체 중성자 감속재가 핵 연료와 동일한 고온 환경을 견딜 수 있어야 한다는 것을 의미한다. 이러한 문제는, 일반적으로 그라파이트(C)를 중성자 감속재로서 이용하는 것 또는 중성자 감속재의 사용을 완전히 배제함으로써, 현재의 핵 반응로 설계에서 방지된다.
- [0007] 그라파이트는, 자연적으로 발생하는 육각형 구조로 배열되는 원자를 갖는 원소 탄소의 결정질 형태이다. 그라파이트는 표준 조건에서 탄소의 가장 안정적인 형태이다. 그라파이트는 작은 중성자 흡수 횡단면을 가지나, 비교적 큰 중성자 산란 횡단면을 갖는다. 그라파이트의 중성자 산란 횡단면( $\sigma_s$ )은 4.7 barn이고, 그라파이트의 중성자 흡수 횡단면( $\sigma_a$ )은 0.0035 barn이다.
- [0008] 오늘날, 많은 수의 가스-냉각형 시스템(예를 들어, 프리즘형 또는 페블-베드(pebble-bed)) 및 염-냉각 시스템은 매우 많은 그라파이트 감속 핵 반응로 코어 로딩을 가질 것이다. 단일 감속 재료로서 그라파이트를 프로세스하기 위한 방법의 지속적인 개선이 있었지만, 여전히 그라파이트에서 더 높은 온도 및 보다 양호한(더 등방적인 그라파이트의 형태) 경질 감속재 수명 한계 모두를 제공하는 것이 요구된다. 본질적으로, 조사-유도된(irradiation-induced) 이방성 결정 팽창의 물리학은, 그라파이트 감속재 재료의 전체 치수 변화, 미세 균열, 및 그라파이트 감속재 재료의 무결성의 손상으로 이어진다. 약 200 메가와트 전기(MWe)의 일반적인 고온 가스-냉각형 반응로(HTGR)는 약 600 톤의 연관된 그라파이트 로딩을 갖는다. 새롭게 예상되는 염-냉각형 시스템은 유사하게 큰 그라파이트 폐기 스트림을 가질 것이다.
- [0009] 불행하게도, 이제까지 처리된 약 250,000 톤의 그라파이트 폐기물에 의해서 입증된 바와 같이, 오염된 그라파이트는 이러한 핵 반응로 시스템에서 심각한 폐기물 문제를 제기한다. 오염의 레벨이 핵 반응로 시스템, 핵 연료, 및 핵 연료 품질에 따라 다르지만, 탄소-14 ( $^{14}\text{C}$ ) 및  $^3\text{T}$  오염은 불가피하다. 이러한 핵 폐기물 문제는, 고-파워(큰 중성자 영향) 시스템을 위한 그라파이트 감속재 수명이 상당한 양의 핵 반응로 코어의 사용-중 교체 를 의무화한다는 사실에 의해서 복잡해진다. 따라서, 핵 반응로 코어를 위한 감속재의 개선이 필요하다.
- [0010] 일반적으로, 우주 적용예를 위한 핵 시스템, 예를 들어 핵 열 추진(NTP)의 분야에서, 파워 시스템은 "무기 등급 재료" 또는 "무기 등급 핵 연료"를 이용한다. 그러한 무기 등급 핵 연료는 20% 이상의 우라늄-235으로 부화된(enriched) 고-부화 우라늄 또는 유사한 핵분열 재료 조성물이다. 이는 확산 위험을 유발할 뿐만 아니라, 개인 소유 기업이 시스템을 개발 및/또는 운영하는 것을 방지한다.
- [0011] 태양열, 풍력, 화석 연료, 화학 물질, 및 지열 발전 시스템과 같은 비-핵 시스템은 핵에 대한 대안적인 옵션이지만, 그 동작을 위해서는 지속적인 연료 공급 라인과 복잡하고 번거로운 물리적 장치를 필요로 하고, 또한 그 수명 전체를 통해서 주기적인 유지 관리를 필요로 한다. 더욱이, 그러한 비-핵 시스템은 파워 밀도가 낮고, 이



는 대형 중 파워 시스템을 초래하며, 이는, 지구 궤도 내로 그리고 이를 넘어서 무거운 페이로드(payload) 및 대형 물체를 발사하는 것과 관련된 고유의 어려움으로 인해서, 외부 우주에서의 사용을 방지한다.

[0012] 핵 시스템은 비-핵 시스템보다 단위 질량당 더 높은 파워를 가지며, 핵 시스템의 성공적인 구현은 미래의 외부 우주의 탐사 및 정착을 가능하게 할 수 있다. 그러나, 비-무기 등급 핵 연료를 사용하는 현재의 핵 반응로 코어 아키텍처는 외부 우주의 상업적이고 자급-자족적인 정착에 장애물을 제시한다. 따라서, 핵 반응로 코어를 위한 핵 연료의 개선이 필요하다.

**발명의 내용**

**해결하려는 과제**

**과제의 해결 수단**

[0013] 본원에서 개시된 다양한 예는 우주 또는 육지 적용에 모두를 위한 핵 반응로 시스템을 위한 핵 반응로 코어 기술에 관한 것이다. 핵 반응로 시스템(100)은 이하의 몇 가지 유리한 기술을 구현하는 핵 반응로 코어(101)를 포함한다: (1) 핵 연료 타일(104A 내지 104N)(S-Block); 그리고 (2) 고온 열 절연체(102A 내지 102N) 및 저온 고체-상 감속재(103A 내지 103N)(U-Mod)를 갖는 관 라이너(106A 내지 106N). S-Block 및 U-Mod는 핵 반응로 코어(101)의 안전성, 사고 허용성(tolerance), 신뢰성, 열 전달, 효율, 및 콤팩트함을 개선한다.

[0014] S-Block에서, 핵 연료 타일(104A 내지 104N)은 유리하게 핵 연료 타일(104A 내지 104N) 사이의 그리고 핵 연료 냉각제(170B) 내로의 열 전달을 최적화하기 위해서 그리고 핵 연료 냉각제(170B)가 핵 연료 타일(104A 내지 104N)과 직접 접촉되게 하기 위해서 상호 록킹 기하형태 패턴으로 설계된 연료 형상을 포함한다. 핵 연료 타일(104A 내지 104N)은 불연속적인 핵 연료 측방향 면체(181A 내지 181N)로 성형될 수 있고, 핵 연료 냉각제(170B)와 핵 연료 타일(104A 내지 104N) 사이의 직접적인 접촉을 제공하기 위해서 내부에 형성된 연료 냉각제 통로(141A 내지 141N)를 갖는다.

[0015] U-Mod에서, 개별적인 관 라이너(106A 내지 106N)는 개별적인 저온 고체-상 감속재 요소(103A 내지 103N) 주위의 클래딩 또는 코팅이다. 관 라이너(106A 내지 106N)는, 상승된 온도에서도 수소를 보유할 수 있는 낮은 수소 확산율의 재료로 형성된다. 감속재 요소(103A 내지 103N)는, 절연체 요소(102A 내지 102N)에 의해서 핵 연료 타일(104A 내지 104N)로부터 열적으로 절연된 저온 고체-상 감속재로 형성된다. 관 라이너(106A 내지 106N)는, 상승된 동작 온도에서도 감속재 요소(103A 내지 103N) 내에서 수소를 보유하기 위해서 낮은 수소 확산율을 갖는 수소 장벽 재료로 형성된다. 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)와 절연체 요소(102A 내지 102N)의 조합은 감속재 요소(103A 내지 103N)가 핵 연료 타일(104A 내지 104N)보다 상당히 더 낮은 동작 온도에 있을 수 있게 한다. U-Mod는 유리하게 핵 연료 타일(104A 내지 104N)로부터 구분되어 분리되고 열적으로 절연된 감속재 요소(103A 내지 103N)를 위한 냉각 경로 및/또는 열 제거 메커니즘, 그리고 핵 연료 타일(104A 내지 104N)을 위한 냉각 및/또는 열 제거 경로를 제공한다.

[0016] 또한, 그라파이트 감속형 핵 반응로 시스템은 대형이고 우주 적용에 적합하지 않다. 그라파이트가 중성자를 적게 흡수하지만, 이는 고속 중성자를 감속시키기 위해서 많은 양을 필요로 한다. 감속재가 콤팩트해질 수 있는 그리고 효과적으로 감속할 수 있는 능력은 거시적 감속 파워로 지칭되고, 그라파이트는 작은 거시적 감속 파워를 갖는다. U-Mod는, 그라파이트보다 큰 거시적 감속 파워를 가질 수 있는 감속재의 이용을 가능하게 한다. 큰 감속 파워를 갖는 감속재(예를 들어, ZrH, Be, BeO, 등)는 보다 콤팩트한 핵 반응로 코어(101)를 가능하게 한다.

[0017] S-Block 및 U-Mod를 구현하는 예시적인 핵 반응로 시스템(100)은, 절연체 요소(102A 내지 102N)의 절연체 요소 어레이(112) 및 감속재 요소(103A 내지 103N)의 감속재 요소 어레이(113)를 포함하는, 핵 반응로 코어(101)를 포함한다. 각각의 감속재 요소(103A 내지 103N)는 각각의 절연체 요소(102A 내지 102N) 내에 배치된 저온 고체-상 감속재로 형성된다. 핵 반응로 코어(101)는 핵 연료 타일(104A 내지 104N)의 핵 연료 타일 어레이(114)를 더 포함한다. 각각의 핵 연료 타일(104A 내지 104N)은, 각각의 절연체 요소(102A 내지 102N) 또는 다른 각각의 핵 연료 타일(104A 내지 104N)을 경계 짓는 복수의 핵 연료 측방향 면체(181A 내지 181N)를 포함한다. 각각의 감속재 요소(103A 내지 103N)는, 각각의 절연체 요소(102A 내지 102N)에 의해서 핵 연료 타일(104A 내지 104N)의 핵 연료 타일 어레이(114)로부터 절연된다.

[0018] 예의 부가적인 목적, 장점 및 신규 특징이 부분적으로 이하의 설명에서 기술될 것이고, 부분적으로 이하의 설명 및 첨부 도면으로부터 당업자에게 자명해질 것이고, 또는 예들의 생산 또는 동작에 의해서 학습될 수 있다. 본 청구 대상의 목적 및 장점은 첨부된 청구항에서 특별하게 언급된 방법, 기구, 및 조합에 의해서 실현되고 획득될 수 있다.

**도면의 간단한 설명**

[0019] 도면은, 단지 예로서, 비제한적으로, 본 개념에 따른 하나 이상의 구현예를 도시한다. 도면에서, 유사한 참조 번호는 동일하거나 유사한 요소를 지칭한다.

도 1은 핵 반응로 시스템의 핵 반응로 코어의 횡단면도이다.

도 2는 감속재 냉각재 통로 및 연료 냉각재 통로의 상세 부분을 도시하는, 도 1의 핵 반응로 코어의 일부의 등각도이다.

도 3은 절연체 요소, 관 라이너, 감속재 요소, 및 핵 연료 타일의 상세 부분을 도시하는, 도 1의 핵 반응로 코어의 횡단면의 확대도이다.

도 4a 및 도 4b는 절연체 요소의 절연체 요소 어레이, 감속재 요소의 감속재 요소 어레이, 및 핵 연료 타일의 핵 연료 타일 어레이의 제1 상호 록킹 기하형태 패턴을 도시한다.

도 5는 절연체 요소 어레이, 감속재 요소 어레이, 및 핵 연료 타일 어레이의 제2 상호 록킹 기하형태 패턴을 도시한다.

도 6은 절연체 요소 어레이, 감속재 요소 어레이, 및 핵 연료 타일 어레이의 제3 상호 록킹 기하형태 패턴을 도시한다.

도 7은 최대 반응로 배출구 온도 및 공칭 파워 레벨을 도시하는 반응로 배출구 온도 그래프이다.

도 8은 절연체 요소를 형성하기 위한 2개의 후보의(candidate) 고온 열 절연체 및 그라파이트에 비교되는 감속재 요소를 형성하기 위한 6개의 후보의 저온 고체-상 감속재에 관한 U-Mod 물리적 특성 표이다.

도 9는 온도가 축방향 거리에 따라 어떻게 달라지는지를 보여주는, S-Block 및 U-Mod를 구현하는 핵 반응로 코어의 열 분석 그래프이다.

도 10은 S-Block 및 U-Mod를 구현하는 핵 반응로 코어의 감손 그래프이다.

도 11은, 6개의 상이한 핵 반응로 시스템의 핵 반응로 질량, 파워 레벨, 질량당 파워, 배출구 온도, 및 우라늄 235(U-235) 부화를 비교한, 핵 반응로 코어 성능 및 특성 비교 표이다.

부품 목록

- 100 핵 반응로 시스템
- 101 핵 반응로 코어
- 102A 내지 102N 절연체 요소
- 103A 내지 103N 감속재 요소
- 104A 내지 104N 핵 연료 타일
- 106A 내지 106N 관 라이너
- 107 핵 반응로
- 112 절연체 요소 어레이
- 113 감속재 요소 어레이
- 114 핵 연료 타일 어레이
- 115A 내지 115N 제어 드럼
- 116 반사체 재료

- 117 흡수제 재료
- 121A 내지 121N 감속제 냉각제 통로
- 140 반사체
- 141A 내지 141N 연료 냉각제 통로
- 150 연료 콤팩트
- 151A 내지 151N TRISO 연료 입자
- 152 고온 매트릭스
- 160 압력 용기
- 170 냉각제
- 170A 감속제 냉각제
- 170B 핵 연료 냉각제
- 181A 내지 181N 핵 연료 측방향 면체
- 182A 내지 182N 타일 인터페이스 벽
- 183A 내지 183N 절연체 요소 인터페이스 벽
- 186 외부 주변부
- 191A 내지 191N 핵 연료 측방향 면체
- 195A 내지 195N 감속제 개구부
- 196A 내지 196N 절연체 요소 측방향 면체
- 198A 내지 198N 절연체 요소 경계부 벽
- 700 반응로 배출구 온도 그래프
- 705 공칭 파워 레벨
- 710 최대 반응로 배출구 온도
- 720 기준선 핵 반응로 코어
- 730 기본 S-Block 및 U-Mod
- 740 진보된 S-Block 및 U-Mod
- 800 U-Mod 물리적 특성 표
- 802A 및 802B 후보 고온 열 절연체
- 803A 내지 803F 후보 저온 고체-상 감속제
- 810 그라파이트
- 900 열 분석 그래프
- 903 감속제 요소 최대 온도
- 904 핵 연료 타일 최대 온도
- 905 측방향 거리
- 910 온도
- 970A 감속제 냉각제 최대 온도
- 970B 핵 연료 냉각제 최대 온도

- 1000 핵 반응로 코어의 감손 그래프
- 1005 수명
- 1010 K-유효
- 1100A 내지 1100F 핵 반응로 시스템
- 1101 핵 반응로 코어 성능 및 특성 비교 표
- 1105A 내지 1105F 핵 반응로 질량
- 1106A 내지 1106F 파워 레벨
- 1107A 내지 1107F 질량당 파워
- 1108A 내지 1108F 배출구 온도
- 1109A 내지 1109F 우라늄-235 부화

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

- [0020] 이하의 구체적인 설명에서, 수 많은 구체적인 상세 내용이 관련 교시 내용의 완전한 이해를 제공하기 위해서 예로서 기술된다. 그러나, 당업자는, 이러한 상세 내용이 없어도 본 교시 내용이 실시될 수 있다는 것을 명확하게 이해할 수 있을 것이다. 다른 경우에, 본 교시 내용의 양태를 불필요하게 불명확하게 하는 것을 방지하기 위해서, 잘 알려진 방법, 절차, 구성요소, 및/또는 회로를, 상세 내용이 없이, 비교적 높은-레벨로 설명하였다.
- [0021] 본원에서 사용된 바와 같은 "커플링된"이라는 용어는 임의의 논리적 또는 물리적 연결을 지칭한다. 달리 설명되지 않는 한, 커플링된 요소들 또는 장치들이 반드시 서로 직접적으로 연결되어야 하는 것은 아니고, 중간 구성요소, 요소 등에 의해서 분리될 수 있다.
- [0022] 달리 설명되지 않는 한, 이하의 청구항을 포함하는 본 명세서에서 설명된 임의의 그리고 모든 측정, 값, 등급, 위치, 규모, 크기, 각도, 및 다른 사양은 정확한 것이 아니고 개략적인 것이다. 그러한 양은, 관련 기능 및 해당 기술 분야에서 통상적인 것과 일치되는 합리적인 범위를 갖도록 의도된다. 예를 들어, 달리 명시적으로 표시되지 않는 한, 매개변수 값 또는 기타는 언급된 양으로부터 ± 5%만큼 또는 ± 10%만큼 다를 수 있다. "대략적으로" 또는 "실질적으로"라는 용어는, 매개변수 값 또는 기타가 언급된 양으로부터 ± 10%까지 다르다는 것을 의미한다.
- [0023] 임의의 도면에 도시된 바와 같은, 핵 반응로 코어(101), 핵 반응로(107), 연관된 구성요소, 및/또는 핵 반응로 코어(101)를 포함하는 핵 반응로 시스템(100)의 배향은, 도시 및 설명을 위해서, 단지 예로서 주어진 것이다. 특정 핵 반응로 시스템(100)을 위한 동작에서, 핵 반응로(107)는 핵 반응로(107)의 특정 적용예에 적합한 임의의 다른 방향으로, 예를 들어 직립형, 측방향, 또는 임의의 다른 배향으로 배향될 수 있다. 또한, 본원에서 사용된 범위까지, 임의의 방향 관련 용어, 예를 들어 측방향, 길이방향, 위쪽, 아래쪽, 상부, 하부, 상단부, 하단부, 및 측면은 단지 예로서 사용된 것이고, 본원에서 달리 설명되는 바와 같이 구성된 임의의 핵 반응로(107) 또는 핵 반응로(107)의 구성요소의 방향 또는 배향과 관련하여 제한되지 않는다. 이제 첨부 도면에 도시되고 이하에서 설명되는 예를 구체적으로 참조한다.
- [0024] 도 1은 핵 반응로 시스템(100)의 핵 반응로 코어(101)의 횡단면도이다. 핵 반응로 시스템(100)은 이하의 몇 가지 향상된 기술을 포함하는 핵 반응로 코어(101)를 위한 아키텍처를 포함한다: (1) ("S-Block"로 지칭되는) 핵 연료 타일(104A 내지 104N); 그리고 (2) ("U-Mod"로 지칭되는) 저온 고체-상 감속재를 갖는 고온 열 절연체.
- [0025] S-Block 기술에서, 핵 연료 타일(104A 내지 104N)은, 핵 연료 냉각제(170B)를 핵 연료 타일(104A 내지 104N)과 직접 접촉시키는 것에 의해서, 핵 연료 냉각제(170B) 내로의 열 전달을 최적화하도록 설계된 연료 형상을 포함한다. 핵 연료 타일(104A 내지 104N)은, 타일 기하형태의 형상 및 크기로 인해서 제조하기가 비교적 단순한 단위-격자 요소로서 성형될 수 있다. U-Mod 기술에서, 고온 감속재는, 감속재 요소(103A 내지 103N) 주위에 수소 장벽 클래딩 또는 코팅으로 도포된 관 라이너(106A 내지 106N)에 의해서 둘러싸인다. 관 라이너(106A 내지 106N)는 고체 상 수소화물로 형성될 수 있고, 핵 연료 타일(104A 내지 104N)의 상승된 온도에서도 수소를 보유할 수 있다. 절연체 요소(102A 내지 102N)는 고온 열 절연체 재료로 형성된다. 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)와 절연체 요소(102A 내지 102N)의 조합은 감속재 요소(103A 내지 103N)가 핵 연료 타일(104A 내지 104

N)보다 상당히 더 낮은 동작 온도에 있을 수 있게 한다.

- [0026] 핵 반응로 시스템(100)은, 핵 연료 냉각제(170B) 내로의 열 전달을 최대화하기 위해서 고온 핵 연료를 핵 연료 타일(104A 내지 104N)(S-Block)의 맞춤형 기하형태 형상으로 구현하는, 고온, 가스-냉각형, 열 스펙트럼 반응로 일 수 있다. 핵 반응로 시스템(100)은 또한 절연체 요소(102A 내지 102N), 감속제 요소(103A 내지 103N), 관 라이너(106A 내지 106N), 및 감속제 냉각제 통로(121A 내지 121N)(U-Mod)의 조합에 의해서 형성된 고온 및 고성능 중성자 감속제를 구현한다.
- [0027] 핵 반응로 시스템(100)은 핵 반응로(107)를 포함한다. 핵 반응로(107)는 핵 반응로 코어(101)를 포함하고, 핵 반응로 코어 내에서는 제어된 핵 연쇄 반응이 발생되고 에너지가 방출된다. 핵 반응로 코어(101) 내의 중성자 연쇄 반응은 중요하고 - 각각의 핵분열 핵으로부터의 하나의 중성자는 다른 핵의 핵분열을 초래한다 - 연쇄 반응은 반드시 제어되어야 한다.
- [0028] 제어된 핵 분열을 유지함으로써, 핵 반응로 시스템(100)은 열 에너지를 생산한다. 예시적인 구현예에서, 핵 반응로 시스템(100)은, 성능 이득을 달성하기 위해서 감속제 냉각제(170A) 및 핵 연료 냉각제(170B)가 가스인 가스-냉각형 핵 반응로(107)로서 구현된다. 가스-냉각형 핵 반응로(107)에서, S-Block 및 U-Mod에 의해서 가능해진 핵 반응로 코어(101)의 높은 파워 밀도, 정격 파워 출력, 및 안전 케이스는 핵 에너지의 비용을 크게 감소시키고, 모듈형의 외부(offsite) 구성을 가능하게 한다. 그러나, S-Block 및 U-Mod 기술은 또한, 대형 유틸리티 규모 반응로, 히트 파이프 반응로, 및 용융-염-냉각형 반응로를 포함하는, 다른 열 스펙트럼 핵 반응로 시스템(100)에서도 획기적인 성능을 가능하게 할 수 있다.
- [0029] 도시된 예에서, 핵 반응로 코어(101)를 갖는 핵 반응로 시스템(100)이 핵 열 추진(NTP) 시스템과 같은 우주 환경에서 이용된다. 핵 반응로 코어(101)의 S-Block 및 U-Mod 아키텍처가 구현될 수 있는 예시적인 NTP 시스템이, 전체가 본원에서 참조로 포함되고 명칭이 "Passive Reactivity Control of Nuclear Thermal Propulsion Reactors"인 2020년 5월 5일자로 미국 워싱턴 시애틀에 소재하는 Ultra Safe Nuclear Corporation에게 허여된 미국 특허 제10,643,754호의 도 1 및 도 2 그리고 연관된 문장에서 설명되어 있다. 다른 예에서, 핵 반응로 코어(101)를 갖춘 핵 반응로 시스템(100)이 행성 표면에서의 전기 파워 생산을 위해서 우주 반응로에서 이용된다.
- [0030] 통상적인 우주 반응로 설계는 일반적으로, 저-질량 및 고온 출력 모두를 갖기 위해서 매우-부화된 우라늄(HEU) 연료(무기 등급)를 이용한다. 본원에서 설명된 핵 반응로 코어(101)를 위한 아키텍처가 직접적으로 적용되어 효율을 높이기 위한 저-질량, 고온, 저-부화 우라늄(LEU) 연료형(비-무기 등급) 핵 반응로의 개발을 가능하게 할 수 있고, 구체적으로 우주 적용예를 위해서 설계될 수 있다. 예를 들어, 핵 반응로 코어(101)를 포함하는 핵 반응로 시스템(100)은 핵 열 로켓 반응로, 핵 전기 추진 반응로, 화성 표면 반응로, 또는 달 표면 반응로일 수 있다.
- [0031] 그러한 NTP 시스템(예를 들어, 콤팩트한 우주 핵 반응로)에서, 생성된 추력은, 로켓, 드론, 무인 항공기(UAV), 항공기, 우주선, 미사일 등과 같은, 핵 반응로 코어(101)를 수용하고, 그와 일체로 형성되고, 연결 또는 부착되는 운반체를 추진한다. 일반적으로, 이는, 추진체, 일반적으로 핵 반응로 코어(101)로부터의 열 에너지를 이용하여 저분자량 수소를 2,600 ° K 초과까지 가열하는 것에 의해서 이루어진다. 또한, NTP 핵 반응로 시스템(100)은 잠수함이나 선박의 추진에서 이용될 수 있다.
- [0032] 앞서 주목한 바와 같이, 핵 반응로 시스템(100)은 또한 예를 들어, 외부 우주, 천체, 행성체, 및 지구 상의 원격 지역을 포함하는, 원격 지역 적용예를 위해서 핵 파워(예를 들어, 열적 및/또는 전기적 파워)를 제공하기 위한 육지 적용예에서의 핵 파워 플랜트일 수 있다. 핵 반응로 코어(101)의 S-Block 및 U-Mod 아키텍처가 구현될 수 있는 예시적인 육지 핵 반응로 시스템이, 전체가 본원에서 참조로 포함되는, 2020년 1월 23일에 공개된, 미국 워싱턴 시애틀에 소재하는 Ultra Safe Nuclear Corporation의 "Composite Moderator for Nuclear Reactor Systems"라는 명칭의 미국 특허 제2020/0027587호의 도 1 및 연관된 문장에서 설명되어 있다.
- [0033] 핵 반응로 시스템(100)은 또한, 핵분열 표면 파워(FSP) 시스템을 위한 핵 전기 추진(NEP) 시스템과 같은, 육지 파워 시스템일 수 있다. NEP는 로봇 및 인간 우주선을 위한 홀-효과 추진기(Hall-effect thruster)와 같은 전기 추진기에 파워를 공급한다. FSP는 달 및 화성과 같은 행성체를 위한 파워를 제공한다. NEP 및 FSP 파워 적용예에서, S-Block 및 U-Mod 기술이 가능한 핵 반응로 시스템(100)은 파워 변환 시스템(예를 들어, Brayton)을 통해서 작업 유체(예를 들어, He, HeXe, Ne, CO<sub>2</sub>)를 가열하여 전기를 생산한다. 또한, NEP 및 FSP 파워 적용예에서, 핵 반응로 시스템(100)은 추진체를 포함하지 않고, 그 대신 파워를 생산할 때 반응로 유입구를 통과하는

작업 유체를 포함한다. NEP 및 FSP 파워 적용예에서, 감속재 요소(103A 내지 103N)는, 작업 유체가 핵 연료 타일(104A 내지 104N)를 통과하기 전에 반응로 유입구 작업 유체(예를 들어, 환열기로부터의 유동)를 통해서 냉각될 수 있다.

[0034] 본원에서 설명된 2개의 S-Block 및 U-Mod 핵 반응로 기술의 이용은, 고온, 콤팩트, 사고 허용성을 가지고 핵 반응로 시스템(100)의 수명 전체를 통해서 안전하고 신뢰 가능하게 동작하는, 핵 반응로 시스템(100)을 가능하게 한다. 예를 들어, 핵 반응로 시스템(100)은 단기 우주 작업, 달 착륙선을 위한 작은 상용 핵분열 파워 시스템, 또는 현장 자원 활용과 같은 큰-파워 우주선 또는 대규모 표면 작업을 위한 상용 핵분열 파워 시스템일 수 있다.

[0035] 도시된 바와 같이, 핵 반응로 코어(101)는, U-Mod 기술을 구현하는, 절연체 요소 어레이(112) 및 감속재 요소 어레이(113)를 포함한다. U-Mod 기술은, 상업적으로 이용 가능한 충분히 큰 파워 밀도, 정격 파워 출력, 및 수명을 갖는 콤팩트한 핵 반응로 시스템(100)의 구축을 가능하게 한다. 도시된 바와 같이, 절연체 요소 어레이(112)는 37개의 절연체 요소(102A 내지 102N)를 포함하고, 감속재 요소 어레이(113)는 37개의 감속재 요소(103A 내지 103N)를 포함한다. 각각의 감속재 요소(103A 내지 103N)는 각각의 절연체 요소(102A 내지 102N) 내에 배치된(예를 들어, 내부에 위치된) 저온 고체-상 감속재로 형성된다. 비록 A가 알파벳의 첫 번째 문자이고 N은 알파벳의 14번째 문자이지만, 알파벳의 제한으로 인해서, 102, 103, 104, 121, 141, 등과 같은 참조 번호 후의 "A 내지 N"의 표시는 26개 초과와 그러한 동일한 요소를 지칭할 수 있다.

[0036] U-Mod 기술은 폐쇄-루프 파워 사이클을 이용하는 핵 반응로 코어(101) 내에서 고체-상 감속재를 냉각하기 위한 현재의 방법보다 우수한 개선이다. U-Mod는 핵 연료 타일(104A 내지 104N)로부터 구분되어 분리되고 열적으로 절연된 감속재 요소(103A 내지 103N)를 위한 냉각 경로 및/또는 열 제거 메커니즘, 그리고 핵 연료 타일(104A 내지 104N)을 위한 냉각 및/또는 열 제거 경로를 제공한다. 감속재 요소(103A 내지 103N)의 열 절연은 이하의 2개의 분리된 절연 메커니즘에 의해서 달성된다: (1) 고온 열 절연체(예를 들어, 절연체 요소(102A 내지 102N)); 및 (2) 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)를 포함하는 감속재 냉각제(170A)(예를 들어, 기체 또는 액체)를 위한 별도의 감속재 냉각 루프. 절연체 요소(102A 내지 102N)를 형성하는 고온 열 절연체는, 핵 연료 타일(104A 내지 104N)과 감속재 요소(103A 내지 103N)의 감속재 요소 어레이(113) 사이의 인터페이스인 고체 열 절연체이다. 고온 열 절연체는 핵 연료 타일(104A 내지 104N)의 상승된 온도에서 동작할 수 있는 낮은 열 전도도의 재료로 제조된다.

[0037] U-Mod 기술은, 핵 연료 타일(104A 내지 104N)로부터 구분되어 분리되고 낮은 동작 온도에서, 감속재 요소(103A 내지 103N)를 유지할 수 있게 한다. 따라서, U-Mod 기술은, 감속재 요소(103A 내지 103N)를 형성하는 저온 고체-상 중성자 감속재 재료가 폐쇄-루프 파워 사이클을 이용하는 고온 열 핵 반응로 시스템(100) 내에서 낮은 온도에서 유지될 수 있게 한다. U-Mod에서, 절연체 요소(102A 내지 102N)의 각각은 낮은 열 전도도를 갖는 고온 열 절연체 재료로 형성된다. 절연체 요소(102A 내지 102N)는 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N) 및 관 라이너(106A 내지 106N)와 함께 형성되며, 이는 낮은 수소 확산율을 가능하게 한다.

[0038] 고온 열 절연체 재료는 저밀도 탄화물, 금속-탄화물, 금속-산화물, 또는 이들의 조합을 포함할 수 있다. 더 구체적으로, 고온 열 절연체 재료는 저밀도 SiC, 안정화된 지르코늄 산화물, 알루미늄 산화물, 저밀도 ZrC, 저밀도 탄소, 또는 이들의 조합을 포함한다. 관 라이너(106A 내지 106N)는 낮은 수소 확산율을 갖는 수소 장벽 재료로 형성된다. 수소 장벽 재료는 감속재 요소(103A 내지 103N) 내에서 수소를 보유하기 위해서  $Al_2O_3$ , SiC, ZrC, MgO, Mo, W, Cu, Ni, Cr, 또는 이들의 조합을 포함한다. 감속재 요소(103A 내지 103N)는 저온 고체-상 감속재로 형성된다. 저온 고체-상 감속재는  $MgH_x$ ,  $YH_x$ ,  $ZrH_x$ ,  $CaH_x$ ,  $ZrO_x$ ,  $CaO_x$ ,  $BeO_x$ ,  $BeC_x$ , Be, 부화된 붕소 탄화물,  $^{11}B_4C$ ,  $CeH_x$ ,  $LiH_x$ , 또는 이들의 조합을 포함한다. 일 구현예에서, 감속재 요소(103A 내지 103N)는, 관 라이너(106A 내지 106N)(도 3 참조)가 코팅된 ZrH를 포함하는 저온 고체-상 감속재로 형성된다. 감속재 요소(103A 내지 103N)가 2-통과 코어-내 냉각제 경로(two-pass in-core coolant pathway)에 커플링되어, 핵 반응로 코어(101) 및 LEU 핵 연료의 콤팩트한 크기가 핵 연료 타일(104A 내지 104N)에서 구현될 수 있게 한다. 수소 보유를 위해서, 각각의 감속재 요소(103A 내지 103N)가 각각의 관 라이너(106A 내지 106N)의 내측에 배치된다.

[0039] 감속재 요소(103A 내지 103N)를 형성하는 저온 고체-상 감속재의 온도를 더 향상시키기 위해서 그리고 동작 조건 및 사고 조건 중에 핵 연료 냉각제(170B)(예를 들어, 수소와 같은 추진제)의 손실을 방지하기 위해서, 관 라이너(106A 내지 106N)가 수소 장벽 재료로서 구현된다. 관 라이너(106A 내지 106N)의 수소 장벽 재료는 수소를 저온 고체-상 감속재 재료 내에서 유지한다. 저온 고체-상 감속재 재료 내의 수소는 핵 반응로 코어(101) 내의

중성자를 감속시키는 것이다. 수소가 항상 저온 고체-상 감속재 재료를 빠져 나가려 하고 수소가 저온 고체-상 감속재 재료를 통해서 확산하기 때문에, 수소 장벽 재료가 필요하다.

- [0040] 제1 구현예에서, 관 라이너(106A 내지 106N)는 저온 고체-상 감속재 재료의 표면의 주위에 또는 표면 상에 도포된, 예를 들어 코팅된 수소 장벽 재료 코팅이고, 저온 고체-상 감속재 재료는 수소 장벽 재료 코팅 내에 배치된 감속재 요소(103A 내지 103N)를 형성한다. 제2 구현예에서, 관 라이너(106A 내지 106N)는 밀폐식으로 밀봉된 컨테이너와 같은 수소 장벽 재료 클래딩으로서 구현될 수 있고, 저온 고체-상 감속재 재료는 수소 장벽 재료 클래딩 내에 배치된 감속재 요소(103A 내지 103N)를 형성한다.
- [0041] 핵 반응로 코어(101)는, S-Block 기술을 구현하여 핵 반응로 코어(101)의 모듈형 구성을 향상시키고 핵 반응로 시스템(100)의 장소에 특정된 환경 설계 필요성을 감소시키는, 핵 연료 타일 어레이(114)를 더 포함한다. 또한 S-Block 연료의 안전 특성은 위험을 감소시키고, 사람이 핵 반응로 시스템(100)을 모니터링하여야 하는 요건을 감소시킬 수 있다. S-Block 기술은, 복수의 핵 연료 타일(104A 내지 104N)을 포함하는 핵 연료 타일 어레이(114)에 의해서 달성된다. 핵 연료 타일(104A 내지 104N)은 핵 연료 타일(104A 내지 104N) 내로의 열 전달을 증가시키기 위한 그리고 안전 마진을 효과적으로 감소시키기 위한 연료 형상으로 형성되고, 더 큰 파워의 핵 반응로 시스템을 제공하고, 결과적으로 핵 반응로 코어(101)의 경제성을 개선한다.
- [0042] 핵 연료 타일(104A 내지 104N)은 핵 연료 타일들(104A 내지 104N) 사이의 열 전달 경로를 생성하고, 제조 비용을 개선하기 위한 모듈형 기하형태를 갖는다. 도 3의 예에 도시된 바와 같이, 핵 연료 타일(104A 내지 104N)은, 삼중-구조 등방성 연료(TRISO) 연료 입자(151A 내지 151N)를 포함하는 기본 핵 연료로 형성된다. TRISO 연료 입자(151A 내지 151N)는 이하의 층에 의해서 코팅된 연료 커널(fuel kernel)을 포함한다: (1) 저밀도 그래파이트; (2) 열분해 그래파이트(PyG); (3) 규소 탄화물(SiC); (4) PyG; 및 (5) SiC. TRISO 연료 입자(151A 내지 151N)가 고온 매트릭스(152) 내에서 현탁되어(suspended) 기본 핵 연료를 형성한다. 고온 매트릭스(152)(도 3 참조)는 SiC, 내화 금속 탄화물, 텅스텐, 몰리브덴 또는 이들의 조합을 포함할 수 있다. 고온 매트릭스를 형성하는 내화 금속 탄화물은 지르코늄 탄화물(ZrC), 티타늄 탄화물(TiC), 니오븀 탄화물(NbC) 등을 포함할 수 있다.
- [0043] 핵 연료 타일(104A 내지 104N)은 기존 핵 연료 한계를 초과하는 고성능 핵 연료를 가능하게 한다 - 내화 탄화물 콤팩트의 이용은 3,000 도 켈빈(K)을 초과하는 핵 반응로 코어(101)의 동작을 가능하게 한다. 고성능 내화 탄화물은 NERVA/Rover 프로그램과 같은 우주 적용예(예를 들어, NTP)에서의 고온 수소 환경 및 관련 연료 입자 코팅(PyC)과 화학적으로 양립 가능하고, 고온에서 가장 낮은 증발율의 일부를 제공하여 전체 엔진 수명을 향상시키고 핵 반응로 코어의 잠재적인 재사용을 가능하게 한다. 현대의 제조 기술, 예를 들어 반응성 스파크 플라즈마 소결(SPS) 및 진보된 산화물 첨가제는 내화 탄화물을 이용하여 핵 연료 타일(104A 내지 104N)을 형성할 수 있게 한다. 많은 내화 탄화물은 작은 중성자 흡수 횡단면 및 큰 감속 파워를 갖는다. 이는 연료 커널로서의 LEU로 임계값을 달성할 수 있게 한다.
- [0044] 핵 연료 타일(104A 내지 104N)은 (예를 들어, 도 4a 및 도 4b, 도 5, 도 6에 도시된)기본 형상 또는 그 절두 부분으로 구현되고, 이는 유리하게 핵 연료 타일들(104A 내지 104N) 사이의 직접적인 접촉을 가능하게 하여 핵 연료 타일들(104A 내지 104N) 사이의 열 전달을 증가시킬 수 있다. 핵 연료 타일(104A 내지 104N)의 기본 형상은 또한 핵 연료 냉각제(170B) 내로의 열 전달을 증가시킨다. 핵 연료 타일(104A 내지 104N)은, 복잡한 코어 기하형태를 포함하는, 다수의 핵 반응로 코어(101) 기하형태 요건에 피팅(fit)되도록 용이하게 타일 작업되는(tiled) 재생 가능 단위 셀을 제공하고, 고밀도 중성자 감속재가 활성 핵 반응로 코어(101) 내에서 감속재 요소(103A 내지 103N)로서 이용될 수 있게 한다. 통상적인 원통형 형상의 핵 연료 펠릿과 대조적으로, 핵 연료 타일(104A 내지 104N)은 핵 연료 타일(104A 내지 104N)과 핵 연료 냉각제(170B) 사이의 온도차를 감소시키고, 냉각제 손실 사고의 경우에 핵 연료 타일(104A 내지 104N)로부터 핵 반응로 코어(101) 외부의 핵 반응로 시스템(100)의 구조물까지의 전달 경로를 제공하며, 핵 연료 냉각제(170B) 내로의 열 전달을 개선한다.
- [0045] 핵 연료 타일(104A 내지 104N)의 연료 형상은, 1 미만의 L/D(관 유사)를 가지기 때문에, 스파크 플라즈마 소결(SPS) 또는 다른 소결 기술을 이용하여 제조될 수 있다. 이는 비교적 단순한 요소의 제조를 가능하게 하여, 최종 조밀화 스테이지에서 수직 프레스 거리를 감소시킬 수 있게 한다. 적층 제조가 그 대신 이용될 수 있다.
- [0046] NTP, NEP, 또는 FSP 핵 반응로 시스템(100)에서, 핵 반응로(107)는 복수의 제어 드럼(115A 내지 115N) 및 반사체(140)를 포함할 수 있다. 제어 드럼(115A 내지 115N)은, 제어 드럼(115A 내지 115N)을 회전시키는 것에 의해서 핵 반응로 코어(101)의 반응성을 변경하기 위해서, 절연체 요소(102A 내지 102N)의 절연체 요소 어레이(112), 감속재 요소(103A 내지 103N)의 감속재 요소 어레이(113), 및 핵 연료 타일(104A 내지 104N)의 핵 연료

타일 어레이(114)를 측방향에서 둘러쌀 수 있다. 도시된 바와 같이, 제어 드럼(115A 내지 115N)은 압력 용기(160)의 둘레부 또는 주변부 상에 놓일 수 있고, 핵 반응로 코어(101)의 절연체 요소(102A 내지 102N), 관 라이너(106A 내지 106N), 감속재 요소(103A 내지 103N), 및 핵 연료 타일(104A 내지 104N) 주위에서 원주방향으로 배치된다. 제어 드럼(115A 내지 115N)은, 동작 중에 중성자 개체수 및 핵 반응로 파워 레벨을 선택적으로 조절하기 위해서, 반사체(140)의 영역 내에, 예를 들어 핵 반응로 코어(101)를 바로 둘러싸는 외부 반사체 지역 내에 위치될 수 있다. 예를 들어, 제어 드럼(115A 내지 115N)은 원통형 형상일 수 있고 제1 외부 표면 상의 반사체 재료(116)(예를 들어, 베릴륨(Be), 베릴륨 산화물(BeO), BeSiC, BeMgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 등) 및 제2 외부 표면 상의 흡수체 재료(117) 모두로 형성될 수 있다.

[0047] 반사체 재료(116) 및 흡수체 재료(117)는 제어 드럼(115A 내지 115N)의 원통형 형상의 대향 측면들 상에, 예를 들어 그 외부 원주의 부분들 상에 위치될 수 있다. 반사체 재료(116)는 실린더 또는 그 절두형 부분으로 성형된 반사체 기재를 포함할 수 있다. 흡수체 재료(117)는 흡수체 판 또는 흡수체 코팅을 포함할 수 있다. 흡수체 판 또는 흡수체 코팅이 반사체 기재 상에 배치되어, 제어 드럼(115A 내지 115N)의 각각의 원통형 형상을 형성한다. 예를 들어, 흡수체 판 또는 흡수체 코팅이 반사체 재료로 형성된 반사체 기재를 덮어, 제어 드럼(115A 내지 115N)을 형성한다.

[0048] 도시된 원통형-형상의 제어 드럼(115A 내지 115N)의 회전은, 핵 반응로 코어(101)에 대한 제어 드럼(115A 내지 115N)의 흡수체 재료(117)(예를 들어, 붕소 탄화물(B<sub>4</sub>C))의 근접도를 변경하여, 중성자 반사의 양을 변경한다. 반사체 재료(116)가 핵 반응로 코어(101)를 향해서 내측으로 대면되고 흡수체 재료(117)가 외측으로 대면될 때, 중성자가 핵 반응로 코어(101) 내로 역으로 산란(반사)되어 더 많은 핵분열을 유발하고 핵 반응로 코어(101)의 반응성을 증가시킨다. 흡수체 재료(117)가 핵 반응로 코어(101)를 향해서 내측으로 대면되고 반사체 재료(116)가 외측으로 대면될 때, 중성자가 흡수되고 추가적인 핵분열은 중단되며, 그에 따라 핵 반응로 코어(101)의 반응성을 감소시킨다. 육지 적용예에서, 핵 반응로 코어(101)는, 자체 핵분열이 없이 많은 중성자를 흡수할 수 있는 붕소, 은, 인듐, 및 카드뮴과 같은 화학적 원소로 구성된 제어 봉(미도시)을 포함할 수 있다.

[0049] 예를 들어, 외부 반사체 지역으로 도시된, 중성자 반사체(140)는 최외측 핵 연료 타일(104A 내지 104N)과 제어 드럼(115A 내지 115N) 사이뿐만 아니라 제어 드럼(115A 내지 115N)의 주위에 배치된 필터 요소일 수 있다. 반사체(140)는, 최외측 핵 연료 타일(104A 내지 104N)과 (예를 들어 베릴륨으로 형성된) 선택적인 배럴(barrel) 사이에 배치되는 감속재로 형성될 수 있다. 반사체(140)는 육각형 또는 부분적으로 육각형으로 성형된 필터 요소를 포함할 수 있고, 중성자 감속재(예를 들어, 베릴륨 산화물(BeO))로 형성될 수 있다. 비록 요구되지는 않지만, 핵 반응로(107)는, 반사체(140)뿐만 아니라, 핵 반응로 코어(101)의 절연체 요소 어레이(112), 관 라이너(106A 내지 106N), 감속재 요소 어레이(113), 핵 연료 타일 어레이(114)를 포함하는 번들형 집합체를 둘러싸기 위해서 선택적인 배럴(미도시)을 포함할 수 있다. 도시된 바와 같이, 제어 드럼(115A 내지 115N)은 압력 용기(160)의 둘레부에 놓이고, 반사체(140) 내에 산재 또는 배치될 수 있고, 예를 들어 반사체(140)를 형성하는 필터 요소(예를 들어, 반사체 블록(141A 내지 141N))의 하위 세트를 둘러쌀 수 있다.

[0050] 압력 용기(160)는 알루미늄 합금, 탄소-복합체, 티타늄 합금, 내방사선성 SiC 복합체, 니켈계 합금(예를 들어, Inconel<sup>TM</sup> 또는 Haynes<sup>TM</sup>), 또는 이들의 조합으로 형성될 수 있다. 압력 용기(160) 및 핵 반응로 시스템(100)은, 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)를 통해서 유동하는 감속재 냉각제(170A); 및 연료 냉각제 통로(141A 내지 141N)를 통해서 유동하는 추진체(예를 들어, 수소 가스 또는 액체)와 같은 별도의 핵 연료 냉각제(170B)를 전달하는 실린더, 파이핑, 및 저장 탱크를 포함하는, 다른 구성요소로 구성될 수 있다. 감속재 냉각제(170A) 및 핵 연료 냉각제(170B)는 가스, 또는 예를 들어 NTP 핵 반응로 시스템(100)에서 추력을 생성하기 위해서 핵 반응로 코어(101)의 연소 사이클 중에 액체로부터 가스로 전이되는 액체일 수 있다. 수소는 NTP 핵 반응로 시스템(100)을 위한 것이다. NEP 또는 FSP 적용예에서, 핵 반응로 시스템(100)은, 그 대신, He, 네온, HeXe, CO<sub>2</sub>와 같은 작업 유체를 순환시킨다.

[0051] 핵 반응로 시스템(100)은 유리하게 감속재 냉각제(170A)가 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)를 통해서 유동할 수 있게 하고 별도의 핵 연료 냉각제(170B)(예를 들어, 수소 가스와 같은 추진체)가 연료 냉각제 통로(141A 내지 141N)를 통해서 유동할 수 있게 한다. 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)는, 감속재 냉각제(170A)가 예를 들어 전용 감속재 냉각제 루프를 통해서 핵 반응로 코어(101)를 통해서 그리고 히트 싱크(미도시) 내로 전달될 수 있게 하는 채널 또는 홀과 같은 납작한 링 형상(예를 들어, O-형상) 개구부이다. 연료 냉각제 통로(141A 내지 141N)는, 예를 들어, 핵 연료 냉각제(170B)가 핵 반응로 코어(101) 내를 통해서 그리고 별도의 핵



연료 냉각제 루프 내의 추진을 위한 추력 챔버(미도시) 내로 전달될 수 있게 하는 채널 또는 홀이다.

[0052] 대안적인 구현예에서, 감속재 요소(103A 내지 103N)와 핵 연료 타일(104A 내지 104N) 사이에 공유되는 냉각제 (170)는 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N) 및 연료 냉각제 통로(141A 내지 141N) 모두를 통해서 유동될 수 있으나, 대안적인 구현예는 본원에서 설명된 향상된 성능적 이득을 달성하지 못할 수 있다. 대안적인 구현예에서, 핵 연료 타일(104A 내지 104N)을 통해서 유동하는 냉각제(170)는 헬륨, 리튬 불화물(LiF)로 형성된 FLiBe 용융 염, 베릴륨 불화물(BeF<sub>2</sub>), 나트륨, He, HeXe, CO<sub>2</sub>, 네온, 또는 HeN을 포함할 수 있다. 대안적인 구현예에서, 공유된 냉각제(170)는, 공유된 냉각제(170)가 핵 연료 타일(104A 내지 104N) 내에서 가열되기 전에, 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)를 통해서 유동한다. 이는 감속재 요소(103A 내지 103N)를 저온으로 유지한다.

[0053] 도 2는 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N) 및 연료 냉각제 통로(141A 내지 141N)의 상세 부분을 도시하는, 도 1의 핵 반응로 코어(101)의 일부의 등각도이다. 도시된 바와 같이, 각각의 절연체 요소(102A 내지 102N)는 관 또는 파이프로서 성형된다. 각각의 감속재 요소(103A 내지 103N)가 내부에 배치된 각각의 절연체 요소(102A 내지 102N)는 그 내부에 형성된 각각의 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)를 포함한다. 각각의 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)는 각각의 감속재 요소(103A 내지 103N)와 각각의 절연체 요소(102A 내지 102N) 사이에 위치된다.

[0054] 일부 예(예를 들어, 도 4a 및 도 4b 및 도 5 참조)에서, 절연체 요소(102A 내지 102N)는 원통형 형상의 관 또는 파이프로서 도시되어 있고, 감속재 요소(103A 내지 103N)는 실린더로서 도시되어 있고, 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)는 링 형상으로 도시되어 있고, 연료 냉각제 통로(141A 내지 141N)는 실린더로서 도시되어 있다. 그러나, 절연체 요소(102A 내지 102N), 감속재 요소(103A 내지 103N), 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N), 및 연료 냉각제 통로(141A 내지 141N)는 다양한 형상으로 형성될 수 있다. 2-차원적인 공간에서 원형 또는 다른 둥근 형상인 것에 더하여, 절연체 요소(102A 내지 102N), 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N), 및 연료 냉각제 통로(141A 내지 141N)가 난형, 정사각형, 직사각형, 삼각형, 또는 다른 다각형 형상일 수 있다. 예를 들어, 절연체 요소(102A 내지 102N)는 3-차원적인 공간 내에서 다면체(예를 들어, 도 6에 도시된 바와 같은 삼각형 프리즘 또는 입방체)일 수 있다. 절연체 요소(102A 내지 102N) 내에 배치되도록 하기 위해서, 감속재 요소(103A 내지 103N)는, 절연체 요소(102A 내지 102N) 및 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)의 형상에 일치되는 형상일 수 있다.

[0055] 핵 반응로 코어(101)의 아키텍처는, 핵 파워 반응로에서, 감속재 요소(103A 내지 103N)로서 도시된 고체-상 감속재의 냉각을 개선한다. 폐쇄-루프 냉각제 사이클은, 핵 연료 타일(104A 내지 104N)로서 도시된, 핵 연료의 냉각 시스템과 간섭하지 않는 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)를 통해서 감속재 요소(103A 내지 103N)를 냉각하기 위한 분리된 그리고 절연된 메커니즘을 달성한다.

[0056] 저온 고체-상 감속재로 별도로 형성된 감속재 요소(103A 내지 103N)를 절연하고 별도로 냉각하는 것에 의해서, 저온 고체-상 감속재는 핵 연료(예를 들어, 핵 연료 타일(104A 내지 104N))에 비해서 저온으로 유지될 수 있다. 이러한 것은 저온 고체-상 감속재(예를 들어, 수화물-계 및 베릴륨-계)의 구현을 가능하게 하고, 이는, 고온 고체-상 감속재(예를 들어, 탄소-계 그래파이트)에 비해서 더 큰 저온 고체-상 감속재의 중성자 감속 능력으로 인해서, 매력적이다.

[0057] 고온에 도달하는 경우에, 감속재 요소(103A 내지 103N)를 형성하는 저온 고체-상 감속재가 분리 또는 분해되기 시작할 수 있고, 결과적으로 반응성의 순 손실을 초래하여, 핵분열 또는 연쇄 반응을 감속시킬 수 있다. 감속재 요소(103A 내지 103N)를 관 라이너(106A 내지 106N) 내에 넣거나 코팅하는 것(도 3 참조), 절연체 요소(102A 내지 102N)로 감속재 요소(103A 내지 103N)를 핵 연료 타일(104A 내지 104N)로부터 절연시키는 것, 그리고 이어서 핵 연료 타일(104A 내지 104N)의 연료 냉각제 통로(141A 내지 141N)와 별개인 감속재 냉각 루프 내에서 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)를 생성하는 것에 의해서, 작은 크기에 최적화된 고온 핵 반응로(107)가 달성된다.

[0058] 감속재 요소(103A 내지 103N)를 위해서 저온 고체-상 감속재를 사용하는 것은, 저-부화 우라늄(LEU)을 핵 연료로서 사용하는 작은 크기에 최적화된 고온 핵 반응로에 있어서 중요하다. 감속재 요소(103A 내지 103N)를 형성하는 저온 고체-상 감속재가 더 큰 감속 파워 및 감속 비율(거시적 감속 파워)을 가지기 때문에, 저온 고체-상 감속재는 적은 양의 핵분열 재료를 갖는 콤팩트한 핵 반응로 시스템(100)을 가능하게 한다(예를 들어, 핵 반응로 코어(101) 내에서 필요로 하는 우라늄의 양을 감소시킨다). 따라서, 도시된 핵 반응로 코어(101)는 더 넓은 범위의 동작 온도, 루프 구성, 및 적용예를 제공한다.

- [0059] 따라서, 도 2의 도시된 예에서, 각각의 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)는: (i) 감속재 냉각제(170A)를 가열하는 것, 및 (ii) 각각의 감속재 요소(103A 내지 103N)를 냉각하는 것 모두를 위해서, 감속재 냉각제(170A)를 통해서 유동한다. 각각의 핵 연료 타일(104A 내지 104N)은, 각각의 핵 연료 타일(104A 내지 104N)과의 직접적인 접촉을 통해서 핵 연료 냉각제(170B)를 가열하기 위해서 감속재 냉각제(170A)로부터 분리되고 그와 상이한, 핵 연료 냉각제(170B)가 유동하는, 내부에 형성된 하나 이상의 핵 연료 냉각제 통로(141A 내지 141N)를 포함한다. 핵 연료 냉각제(170B)는 핵 열 추진(NTP)을 위한 추진체(예를 들어, 수소)일 수 있다. 다시 말해서, 각각의 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)를 통해서 유동하는 감속재 냉각제(170A)는 감속재 요소(103A 내지 103N)의 감속재 요소 어레이(113)에 대해서 지정된 감속재 냉각제 루프이고, 이는 핵 연료 냉각제(170B)가 유동하는 연료 냉각제 통로(141A 내지 141N)를 포함하는 핵 연료 냉각제 루프로부터 열적으로 절연되고 분리된다. NEP 또는 FSP 핵 반응로(107)에서, 그 대신, He, 네온, HeXe, CO<sub>2</sub> 등과 같은 작업 유체가 순환된다.
- [0060] 감속재 냉각제 루프는 감속재 냉각제(170A)를 핵 연료 냉각제(170B)로부터 열적으로 절연시켜 열을 감속재 요소(103A 내지 103N)로부터 능동적으로 제거하고, 그에 따라 핵 반응로 코어(101)의 동작 중에, 감속재 요소(103A 내지 103N)를 연료 타일(104A 내지 104N)의 핵 연료 타일 어레이(114)에 비해서 낮은 온도에서 유지한다. 감속재 냉각제 루프는, 핵 반응로 시스템(100)의 압력 용기(160) 또는 다른 구성요소의 외부에 장착될 수 있는, 히트 싱크를 포함하고, 감속재 냉각제(170A)가 히트 싱크에 열적으로 커플링된다.
- [0061] 비록 도시하지는 않았지만, 핵 반응로 시스템(100)은 적어도 하나의 터빈 및 펌프를 포함하는 감속재 냉각제 터보펌프 조립체를 더 포함할 수 있고, 이러한 감속재 냉각제 터보펌프 조립체는, 핵 반응로 코어(101)의 동작 중에, 감속재 냉각제(170A)를 이동시켜 히트 싱크를 통해서 유동하게 하고 그에 따라 복수의 감속재 요소(103A 내지 103N)를 냉각시킨다. 감속재 냉각제 터보펌프 조립체 내의 펌프 및 터빈은 감속재 냉각제(170A)를 감속재 냉각제 파이핑, 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N), 그리고 이어서 히트 싱크를 통해서 유동시키고, 여기에서 감속재 냉각제(170A)는 히트 싱크를 통과한 후에 냉각되기 시작한다. 핵 반응로 시스템(100)은 또한 압축기, 그리고 감속재 냉각제(170A)를 이동시키는 송풍기를 포함할 수 있다. 감속재 냉각제(170A)가 액체 상태에 대비되는 가스 상태인 경우에, 압축기 및 송풍기는 감속재 냉각제(170A)를 감속재 냉각제 파이핑, 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N), 그리고 이어서 히트 싱크를 통해서 이동시킨다. 감속재 냉각제(170A)가 액체 상태일 때, 펌프는 감속재 냉각제(170A)를 유동시킨다. NTP 핵 반응로 시스템(100)에서, 감속재 요소(103A 내지 103N) 및 핵 연료 타일(104A 내지 104N)이 동일 터보펌프 조립체로부터 인출될 수 있다.
- [0062] 핵 반응로 시스템(100)은, 핵 반응로 코어(101)의 동작 중에, 핵 연료 타일(104A 내지 104N)을 통해서 유동하도록 핵 연료 냉각제(170B)를 유동시켜 파워를 생성하는 핵 연료 냉각제 터보펌프 조립체를 더 포함한다. 핵 연료 냉각제 터보펌프 조립체 내의 펌프 및 터빈은 핵 연료 냉각제(170B)(예를 들어, 추진체)를 핵 연료 냉각제 파이핑 그리고 이어서 연료 냉각제 통로(141A 내지 141N)를 통해서 이동시킨다. 연료 냉각제 통로(141A 내지 141N)를 통과하는 것에 의해서, 핵 연료 냉각제(170B)는 핵 반응로 코어(101)의 핵 연료 타일(104A 내지 104N) 내에서 과열되기 시작하고, 예를 들어 추력 또는 파워 생성을 위해서 가스로 팽창된다. NEP 또는 FSP 적용예에서, 핵 반응로 시스템(100)은, 냉각제(170A 및 170B)를 위해서 터보펌프 조립체 대한 터보젯(예를 들어, 터빈 및 압축기)을 포함한다.
- [0063] 앞서 주목한 바와 같이, 분리된 감속재 냉각제 루프 및 핵 연료 냉각제 루프는 감속재 요소(103A 내지 103N)를 핵 연료 타일(104A 내지 104N)로부터 추가적으로 절연시키는 역할을 할 뿐만 아니라, 내부 가열로 인한 열을 감속재 요소(103A 내지 103N)로부터 능동적으로 제거한다. 저온 고체-상 감속재 재료가 저온에서 유지될 수 있게 하는 것에 더하여, 가열된 감속재 냉각제(170A) 자체가 또한 이하의 유리한 목적을 위해서 사용될 수 있다. 첫 번째로, 감속재 냉각제(170A)는 이차적인 파워 사이클을 구동하기 위한 및/또는 핵 반응로 시스템(100) 내에서 부가적인 중성자 감속재를 공급하기 위한 복수의 핵 연료 타일(104A 내지 104N)과 화학적으로 양립될 수 없다. NEP 또는 FSP 적용예에서, 핵 반응로 시스템(100)의 핵심은 파워를 생성하는 것이다. 두 번째로, 감속재 냉각제(170A)는 직접적으로 또는 간접적으로 핵 연료 냉각제(170B)의 예열을 가능하게 하여, 더 높은 반응로 배출구 온도를 가능하게 한다. 세 번째로, 감속재 냉각제(170A)는, 핵 연료 타일(104A 내지 104N) 냉각 경로 및/또는 열 제거 메커니즘의 동적 유체 시스템 성능에 영향을 미치지 않고, 핵 반응로 시스템(100)의 다른 부분을 냉각시킬 수 있게 한다. 네 번째로, 감속재 냉각제(170A)는, 감속재 요소(103A 내지 103N)가 수소의 저온 고체-상 감속재로 형성될 때, 수소 과압이 유지될 수 있게 한다. 다섯 번째로, 감속재 냉각제(170A)는, 사고 시나리오에서 도달되는 고온으로 인해서 중성자 감속재의 분해가 발생하는, 고유의 안전 메커니즘의 적용을 가능하게 한다. 중성자 감속재의 분해는 임의의 재-임제의 발생을 억제할 수 있다.

- [0064] 고온 및 콤팩트한 핵 반응로 시스템(100)을 달성하는 것이 중요하지 않은 적용예에서, 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)는 연료 냉각제 통로(121A 내지 121N)와 동일한 냉각 루프일 수 있다. 따라서, 그러한 적용예에서, 각각의 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)는: (i) 냉각제(170)를 가열하는 것, 및 (ii) 각각의 감속재 요소(103A 내지 103N)를 냉각하는 것 모두를 위해서, 냉각제(170)를 통과 유도시킨다.
- [0065] 도 3은 절연체 요소(102A 내지 102D), 관 라이너(106A 내지 106D), 감속재 요소(103A 내지 103C), 및 핵 연료 타일(104A 내지 104B)의 상세 부분을 도시하는, 도 1의 핵 반응로 코어(101)의 횡단면의 확대도이다. 2개의 핵 연료 파일(104A 내지 104B)이 도 3에서 횡단면으로 도시되어 있다. 핵 연료 타일(104A 내지 104N)의 각각은 연료 콤팩트(150)로 형성되고, 연료 콤팩트는: 고온 매트릭스(152) 내에 내재된 삼중 구조-등방성 (TRISO) 연료 입자(151A 내지 151N)와 같은 코팅된 연료 입자로 구성된다. 일부 구현예에서, 연료 콤팩트(150)는 고온 매트릭스(152) 내에 내재된 이중 구조-등방성(BISO) 연료 입자로 구성된다. 고온 매트릭스(152)는 규소 탄화물, 지르코늄 탄화물, 티타늄 탄화물, 니오븀 탄화물, 텅스텐, 몰리브덴 또는 이들의 조합을 포함한다. TRISO 연료 입자(151A 내지 151N)의 각각은 다공성 탄소 버퍼 층, 내부 열분해 탄소 층, 세라믹 층, 및 외부 열분해 탄소 층에 의해서 둘러싸인 연료 커널을 포함할 수 있다.
- [0066] 통형 형상의 핵 연료 콤팩트를 형성하기 위해서 규소 탄화물 매트릭스 내에 분산된 TRISO 연료 입자에 관한 설명이, 전체 내용이 본원에서 참조로 포함되는, 미국 워싱턴 시애틀에 소재하는 Ultra Safe Nuclear Corporation의 이하의 특허 및 공개에서 제공되어 있다: "Fully Ceramic Nuclear fuel and Related Methods"라는 명칭의, 2016년 3월 29일자로 허여된 미국 특허 제9,299,464호; "Fully Ceramic Micro-encapsulated (FCM) fuel for CANDUs and Other Reactors"라는 명칭의, 2018년 7월 24일자로 허여된 미국 특허 제10,032,528호; "Method for Fabrication of Fully Ceramic Microencapsulation Nuclear Fuel"라는 명칭의, 2018년 10월 23일자로 허여된 미국 특허 제10,109,378호; 명칭이 "Dispersion Ceramic Micro-encapsulated (DCM) Nuclear Fuel and Related Methods"이고, 2017년 4월 11일에 허여된 미국 특허 제9,620,248호 및 2019년 11월 12일에 허여된 제 10,475,543호; 명칭이 "Composite Moderator for Nuclear Reactor Systems"이고 2020년 1월 23일자로 공개된 미국 특허공개 제2020/0027587호; 및 명칭이 "Nuclear Fuel Particle Having a Pressure Vessel Comprising Layers of Pyrolytic Graphite and Silicon Carbide"이고, 2020년 2월 25일자로 허여된 미국 특허 제 10,573,416호. 이러한 Ultra Safe Nuclear Corporation 특허들에서 설명된 바와 같이, 핵 연료는 일반적으로 원통형 형상의 핵 연료 콤팩트를 생성하기 위해서 규소 탄화물 매트릭스 내에 내재된 TRISO 연료 입자로 구성된 원통형 연료 콤팩트 또는 펠릿을 포함한다.
- [0067] 핵 연료 타일(104A 내지 104N)을 형성하는, TRISO 연료 입자(151A 내지 151N) 또는 BISO 연료 입자를 포함하는, 코팅된 연료 입자를 내재시킬 수 있는 가능한 고온 매트릭스(152) 재료 중에서, 규소 탄화물(SiC)이 양호한 조사 거동 및 제조를 제공한다. SiC는, 상승된 온도에서 공기에 노출될 때 조밀하고 접착력이 있는 이산화 규소(SiO<sub>2</sub>) 표면 스케일을 신속히 형성하여 추가적인 산화를 방지하는 것으로 인해서, 우수한 내산화성을 갖는다. TRISO 연료 입자(151A 내지 151N)는, 하나 이상의 등방성 재료를 둘러싸는 하나 이상의 층으로 코팅된 연료 커널(예를 들어, 중심의 UC 또는 우라늄 산탄화물(UCO))을 포함할 수 있다. TRISO 연료 입자(151A 내지 151N)는 3개의 등방성 재료의 4개의 층을 포함한다. 예를 들어, 4개의 층은: (1) 탄소를 제조된 다공성 버퍼 층, 이어서 (2) 열분해 탄소의 조밀 내부 층(PyC); 이어서 (3) 상승된 온도에서 핵분열 생성물을 유지하기 위한 그리고 TRISO 연료 입자(151A 내지 151N)에 강한 구조적 무결성을 제공하기 위한 이원계 탄소 층(예를 들어, SiC의 세라믹 층 또는 내화 금속 탄화물 층); 이어서 (4) PyC의 조밀 외부 층을 포함할 수 있다. TRISO 연료 입자(151A 내지 151N)의 내화 금속 탄화물 층은 티타늄 탄화물(TiC), 지르코늄 탄화물(ZrC), 니오븀 탄화물(NbC), 탄탈륨 탄화물, hafnium 탄화물, ZrC-ZrB<sub>2</sub> 복합체, ZrC-ZrB<sub>2</sub>-SiC 복합체, 또는 이들의 조합 중 적어도 하나를 포함할 수 있다. 고온 매트릭스(152)는 TRISO 연료 입자(151A 내지 151N)의 이원계 탄화물 층과 동일한 재료로 형성될 수 있다.
- [0068] TRISO 연료 입자(151A 내지 151N)는 1,600 °C를 초과하는 온도에서 응력 또는 핵분열 가스 압력으로 인해서 균열되지 않도록 설계되고, 그에 따라 최악의 사고 시나리오에서 연료 커널을 수용할 수 있다. TRISO 연료 입자(151A 내지 151N)는, 핵 반응로 코어(101)를 포함하는 고온 가스-냉각형 반응로(HTR)에서 사용되도록 그리고 LWR의 온도보다 상당히 더 높은 온도에서 동작되도록 설계된다. 핵 연료 타일(104A 내지 104N)은 뛰어난 핵분열 생성물 보유력을 갖는다. TRISO 연료 입자(151A 내지 151N)는 1500 °C미만에서 극히 낮은 파괴를 나타낸다. 또한, 고온 매트릭스(152)의 존재는 핵분열 생성물 방출에 대한 부가적인 강건한 장벽을 제공한다.
- [0069] 각각의 핵 연료 타일(104A 내지 104N)은, 각각의 절연체 요소(102A 내지 102N) 또는 다른 각각의 핵 연료 타일

(104A 내지 104N)을 경계 짓는 복수의 핵 연료 측방향 면체(181A 내지 181N)(도 4a 및 도 4b, 도 5 및 도 6 참조)를 포함한다. 핵 연료 측방향 면체(181A 내지 181N)는 관찰자에게 많은 면체를 갖는 절단 원석과 같은 곡선형 표면 또는 편평한 표면으로 보인다. "면체"는 편평한 세그먼트(예를 들어, 평면형 표면) 또는 곡선형 세그먼트(예를 들어, 비구면 또는 구면 표면)일 수 있다. 다수의 핵 연료 측방향 면체(181A 내지 181N)는 핵 연료 타일(104A)의 불연속적인 (예를 들어, 불균일한 또는 들쭉날쭉한) 외부 주변부(186)를 형성한다. 본원에서 사용된 바와 같이, "인터페이스 벽"은, 외부 주변부(186)가 분할된 외부 주변부(186)의 섹션을 포함한다. 인터페이스 벽은 도 4b의 절연체 요소 인터페이스 벽(183A)과 같은 하나의 면체(단일 면체형) 또는 도 4b의 타일 인터페이스 벽(182A)과 같은 다수 면체(다수-면체형)으로 형성될 수 있다.

[0070] 핵 반응로 코어(101)는 감속재 냉각제(170A)를 위한 절연된 경계 내의 관 라이너(106A 내지 106N)를 포함하고, 그에 따라 감속재 냉각 루프의 유동 경로 내에서 절연체 요소(102A 내지 102N)와 감속재 요소(103A 내지 103N) 사이에서 인터페이스한다. 각각의 관 라이너(106A 내지 106N)는, 각각의 감속재 요소(103A 내지 103N)를 핵 연료 타일(104A 내지 104N)의 핵 연료 타일 어레이(114)로부터 차폐하는, 낮은 수소 투과도의 클래딩으로서 형성된다. 따라서, 감속재 요소(103A)는 유리하게 관 라이너(106A), 감속재 냉각제 통로(121A), 절연체 요소(102A), 그리고 이어서 핵 연료 타일(104A)에 의해서 둘러싸인다.

[0071] 각각의 감속재 요소(103A 내지 103N)는, 각각의 절연체 요소(102A 내지 102N)에 의해서 핵 연료 타일(104A 내지 104N)의 핵 연료 타일 어레이(114)로부터 절연된다. 제1 핵 연료 타일(104A)을 보면, 제1 감속재 요소(103A)가 제1 관 라이너(106A) 내에 배치되고; 제1 절연체 요소(102A)는 제1 핵 연료 타일(104A) 내에 배치된다. 제1 감속재 냉각제 통로(121A)는 제1 관 라이너(106A)와 제1 절연체 요소(102A) 사이에 배치된다. 제2 감속재 요소(103B), 제2 관 라이너(106B), 및 제2 감속재 냉각제 통로(121B)(확대도에서 보이지 않음)가 유사한 관계로 배치된다. 제1 핵 연료 타일(104B)은 제1의 복수의 핵 연료 측방향 면체(181A 내지 181N)를 포함한다. 핵 연료 측방향 면체(181A)는 제1 절연체 요소(102A)를 경계 짓고; 핵 연료 측방향 면체(181C)는 제2 핵 연료 타일(104B)을 경계 짓는다. 도 3에서, 핵 연료 측방향 면체(181A)는 구면 표면을 포함하고, 핵 연료 측방향 면체(181C)는 평면형 표면을 포함한다.

[0072] 제3 핵 연료 타일(104C)을 보면, 제3 감속재 요소(103C)가 제3 관 라이너(106C) 내에 배치되고; 제3 절연체 요소(102C)는 제2 핵 연료 타일(104B) 내에 배치된다. 제3 감속재 냉각제 통로(121C)는 제3 관 라이너(106C)와 제3 절연체 요소(102C) 사이에 배치된다. 제4 감속재 요소(103D), 제4 관 라이너(106D), 및 제4 감속재 냉각제 통로(121D)(확대도에서 보이지 않음)가 유사한 관계로 배치된다. 제2 핵 연료 타일(104B)은 제2의 복수의 핵 연료 측방향 면체(191A 내지 191N)를 포함한다. 핵 연료 측방향 면체(191A)는 제3 절연체 요소(102C)를 경계 짓고; 핵 연료 측방향 면체(191C)는 제1 핵 연료 타일(104A)을 경계 짓는다. 예에서, 핵 연료 측방향 면체(191A)는 구면 표면을 포함하고, 핵 연료 측방향 면체(191C)는 평면형 표면을 포함한다.

[0073] 더 도시된 바와 같이, 제1의 복수의 핵 연료 측방향 면체(181A 내지 181N) 및 제2의 복수의 핵 연료 측방향 면체(191A 내지 191N)는 5개의 연료 냉각제 통로(141A 내지 141E)를 함께 형성하도록 서로 경계 지어진다. 예에서, 제1 핵 연료 타일(104A)의 핵 연료 측방향 면체(181D) 및 제2 핵 연료 타일(104B)의 핵 연료 측방향 면체(191D)의 각각은 구면 표면을 포함하여, 제2 연료 냉각제 통로(141B)의 각각의 부분(예를 들어, 절반체 링)을 형성한다.

[0074] U-Mod를 구현하는 핵 반응로 코어(101)는 수소 보유를 위해서 각각의 관 라이너(106A 내지 106N) 내에 배치된 각각의 감속재 요소(103A 내지 103N)를 포함한다. 각각의 관 라이너(106A 내지 106N)는 각각의 감속재 요소(103A 내지 103N)와 각각의 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N) 사이에 위치된다. 각각의 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)는 각각의 관 라이너(106A 내지 106N)와 각각의 절연체 요소(102A 내지 102N) 사이에 위치된다. 각각의 절연체 요소(102A 내지 102N)는 각각의 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)와 각각의 핵 연료 타일(104A 내지 104N) 사이에 위치된다.

[0075] 관 라이너(106A 내지 106N)는 고온 열 절연체(절연체 요소(102A 내지 102N)) 및 저온 고체-상 중성자 감속재(감속재 요소(103A 내지 103N))를 위한 지지부를 포함할 수 있다. 관 라이너(106A 내지 106N)는, 감속재 요소(103A 내지 103N) 내의 수소 보유력을 제공하고, 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)와 절연체 요소(102A 내지 102N)의 조합은 감속재 요소(103A 내지 103N)가 핵 연료 타일(104A 내지 104N)보다 상당히 더 낮은 온도일 수 있게 한다. 관 라이너(106A)는 감속재 요소(103A)와 감속재 냉각제 통로(121A) 사이에 위치된다. 감속재 냉각제 통로는 관 라이너(106A)와 핵 연료 타일(104A) 사이에 위치된다.

[0076] 관 라이너(106A)는 수소 장벽 재료로 형성되고, 절연체 요소(102A)는 낮은 열 전도도의 재료로 형성된다. 관

라이너(106A 내지 106N)는, 감속재 요소(103A 내지 103N)를 클래딩하기 위한 연속 직조 핵 등급 SiC/SiC 복합체 페쇄-단부 관일 수 있다. 단부-조인트 설계는, 양호한 조사 및 기계적 성능을 달성하는 조합된 기계적 및 액체 상 소결(LPS) 조인트일 수 있다.

[0077] U-Mod 시스템을 구현하기 위해서, 핵 반응로 시스템(100)은 또한 저온 히트 싱크를 포함할 수 있다. 페쇄-루프 파워 사이클에서, 가장 직접적인 방법은 파워 사이클의 저온 단부이다. 다른 옵션은 가열되지 않은 반응로 유입구이고, 여기에서 감속재 냉각제(170A)는 파워 사이클의 반응로 유입구, 압축기 배출구, 또는 저온 단부와 같은 파워 사이클의 저온 부분으로부터 온다. 또한, 외부 히트 싱크, 외부 콜드 싱크(cold sink), 또는 별도의 파워 사이클 모두가 또한 이용될 수 있다.

[0078] 도 4a 및 도 4b는 절연체 요소(102A 내지 102N)의 절연체 요소 어레이(112), 감속재 요소(103A 내지 103N)의 감속재 요소 어레이(113), 및 핵 연료 타일(104A 내지 104N)의 핵 연료 타일 어레이(114)로 이루어진 제1 상호 록킹 기하형태 패턴(400)을 도시한다. 도 4a 및 도 4b의 제1 상호 록킹 기하형태 패턴(400)에서, 19개의 절연체 요소(102A 내지 102N), 19개의 감속재 요소(103A 내지 103N), 42개의 핵 연료 타일(104A 내지 104N), 19개의 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N), 및 78개의 완성된 연료 냉각제 통로(141A 내지 141N)가 도시되어 있다.

[0079] 핵 연료 타일(104A 내지 104N)은 연속적인 상호 록킹 패턴을 갖는 최적화된 기하형태를 가지며, 그에 따라 핵 연료 타일들(104A 내지 104N) 사이의 갭을 최소화하고 사고 시나리오에서 핵 반응로 코어(101) 열 전달을 최대화한다. 최적화된 기하형태는 핵 연료로부터 핵 연료 냉각제(170B) 내로의 그리고 주위 구조물 내로의 열 전달을 최대화하고 핵 연료 타일들(104A 내지 104N) 사이의 열 전달을 가능하게 하고, 코어-내 고성능 감속재와 통합하며, 고온 매트릭스(152) 내에 내재된 TRISO 연료 입자(151A 내지 151N)를 구현한다. 핵 연료 타일(104A 내지 104N)의 고온 매트릭스(152) 내에 현탁된 TRISO 연료 입자(151A 내지 151N)는 파워 생산을 위한 높은 가스 배출구 온도를 제공하고/하거나 감속재 요소(103A 내지 103N) 내의 온도를 제한하면서 열을 프로세스한다.

[0080] 도시된 바와 같이, 핵 연료 타일(104A)은, 각각의 핵 연료 타일(104A 내지 104N)의 외부 주변부(186)를 형성하기 위한 불연속적인 복수의 핵 연료 측방향 면체(181A 내지 181L)를 포함한다. 본원에서 사용된 바와 같이, "불연속적"은, 집합체 내의 핵 연료 측방향 면체(181A 내지 181N)에 의해서 형성된 외부 주변부(186)가 연속적인 등근(예를 들어, 원형 또는 난형) 둘레를 형성하지 않는다는 것을 의미한다. 외부 주변부(186)는 복수의 평면형, 비구면, 구면, 또는 자유형태 표면을 포함한다. 본원에서 사용된 바와 같이, "자유형태 표면"은, 평면형 표면; 또는 비구면 또는 구면 표면(예를 들어, 실린더, 원뿔형, 이차 표면)과 같은 규칙적인 표면과 달리, 고정된 반경방향 치수를 가지지 않는다.

[0081] 핵 연료 측방향 면체(181A 내지 181C, 181E 내지 181G, 181I 내지 181K)는 타일 인터페이스 벽(182A 내지 182C)을 각각 형성한다. 핵 연료 측방향 면체(181D, 181H, 및 181L)은 절연체 요소 인터페이스 벽(183A 내지 183C)을 각각 형성한다. 각각의 타일 인터페이스 벽(182A 내지 182C)은 각각의 절연체 요소 인터페이스 벽(183A 내지 183C)과 교번적이고, 그에 따라 외부 주변부(186)의 교번 패턴을 형성한다. 각각의 타일 인터페이스 벽(182A 내지 182C)은 평면형 표면을 포함한다.

[0082] 도 4b에 도시된 바와 같이, 타일 인터페이스 벽(182A)은, 핵 연료 측방향 면체(181B)가 사이에서 연장되는, 대향 단부들 상에서 2개의 핵 연료 측방향 면체(181A, 181C)를 포함한다. 타일 인터페이스 벽(182A)의 예에서, 2개의 핵 연료 측방향 면체(181A, 181C)(예를 들어, 제1 및 제2 단부 세그먼트)가 대향 단부들 상에 위치되고, 평면형 표면을 각각 포함한다. 사이에서 연장되는 핵 연료 측방향 면체(181B)(예를 들어, 중앙 세그먼트)는 비구면 또는 구면 표면을 포함한다. 타일 인터페이스 벽(182AB 내지 C)는 타일 인터페이스 벽(182A)의 기하형태와 유사한 각각의 기하형태로 형성된다. 각각의 타일 인터페이스 벽(182A 내지 182C)은 다른 각각의 핵 연료 타일(104A 내지 104N)과 경계 지어진다. 각각의 절연체 요소 인터페이스 벽(183A 내지 183C)은 다른 절연체 요소(102A 내지 102N)와 경계 지어진다. 각각의 절연체 요소 인터페이스 벽(183A 내지 183C)은 비구면 또는 구면 표면을 포함한다.

[0083] 앞서 주목한 바와 같이, 그라파이트-감속 핵 반응로는 일반적으로 매우 크다. 그라파이트-감속 핵 반응로를 더 작게 만드는 것은 핵 반응로 코어의 재-연료 공급을 필요로 하는데, 이는 코어가 적은 핵분열 재료를 포함하기 때문이다. 빈번한 재-연료 공급은, 현장에서 재-연료 공급되지 않는, 콤팩트한 핵 반응로와 양립될 수 없다. U-Mod는, 저온 고체-상 감속재의 구조적 강도를 높이기 위해서 그리고 열적으로 절연하여 수용 가능한 저온을 유지하기 위해서, 감속재 요소(103A 내지 103N)(예를 들어, ZrH 또는 Be-계 저온 고체-상 감속재)를 절연체 요소(102A 내지 102N)(예를 들어, 내방사성 고온 재료)로 둘러싸는 것에 의해서 구현된다. 이는, 핵 연료

타일(104A 내지 104N)(S-block)이, 감속재 요소(103A 내지 103N)가 아니라, 더 큰 부피의 핵 반응로 코어(101)가 될 수 있게 하고, 이러한 것은 콤팩트한 핵 반응로 코어(101)에서 더 긴 수명을 가능하게 한다. U-Mod에 의해서 가능해진 더 작은 핵 반응로 코어(101) 크기는, 그라파이트-감속 시스템보다, 더 콤팩트한 형상 인자가 될 수 있게 하고, 또한 건설 비용을 줄일 수 있고 큰 파워 밀도로 동작되면서도 운반성을 높일 수 있다.

[0084] U-Mod의 다른 이점은, TRISO 연료 입자(151A 내지 151N) 내의 저-함량(low-assay) 저-부화 우라늄(LEU) 연료(일반적으로 10% <sup>235</sup>U 미만)를 이용할 수 있게 하는 작은 핵 반응로 시스템(100)을 가능하게 한다는 것이다. 많은 새로운 진보된 반응로 시스템이 큰-함량 저-부화 우라늄 연료(일반적으로 10% <sup>235</sup>U 초과)를 필요로 하고, 이는 현재 생산되지 않고 더 많은 확산(proliferation)-관련 문제를 갖는다.

[0085] 도 5는 절연체 요소(102A 내지 102N)의 절연체 요소 어레이(112), 감속재 요소(103A 내지 103N)의 감속재 요소 어레이(113), 및 핵 연료 타일(104A 내지 104N)의 핵 연료 타일 어레이(114)로 이루어진 제2 상호 록킹 기하형태 패턴(500)을 도시한다. 도 5에서, 각각의 핵 연료 타일(104A 내지 104N)의 핵 연료 측방향 면체(181A 내지 181F)는, 경계를 이루는 각각의 절연체 요소(102A 내지 102N)와 다른 각각의 핵 연료 타일(104A 내지 104N) 사이에서, 교번적으로 위치된다.

[0086] 도 5의 제2 상호 록킹 기하형태 패턴(500)에서, 7개의 절연체 요소(102A 내지 102G), 7개의 감속재 요소(103A 내지 103G), 24개의 핵 연료 타일(104A 내지 104X), 7개의 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121G), 및 24개의 연료 냉각제 통로(141A 내지 141X)가 도시되어 있다. 각각의 절연체 요소(102A 내지 102G)는 관 또는 파이프로서 성형된다. 각각의 절연체 요소(102A 내지 102N)는 규소 탄화물을 포함할 수 있다. 각각의 절연체 요소(102A 내지 102G)는 2개 이상의 핵 연료 타일(104A 내지 104N)의 각각의 절연 인터페이스 벽(183A 내지 183C)을 라이닝한다. 절연체 요소(102A 내지 102G)는 감속재 요소(103A 내지 103G)를 클래딩하기 위한 핵 등급 SiC 또는 SiC 복합체 페쇄-단부 관일 수 있다.

[0087] 도시된 바와 같이, 각각의 절연체 요소(102A 내지 102G)는, 길이방향으로 형성된 복수의 감속재 개구부(195A 내지 195G)의 각각의 감속재 개구부(195A 내지 195G)(예를 들어, 공간 또는 홀)를 포함하는 실린더로서 성형된다. 각각의 감속재 요소(103A 내지 103G)는 각각의 감속재 개구부(195A 내지 195G) 내에 배치된다. 각각의 감속재 요소(103A 내지 103N)는 예를 들어 베릴륨 탄화물 또는 베릴륨 산화물과 같은 베릴륨을 포함할 수 있다.

[0088] 제1 U-Mod 예에서, 감속재 요소(103A 내지 103G)는 베릴륨이 침투된 큰 부피 분율의 절단된-섬유 베릴륨 탄화물(Be<sub>2</sub>C) 복합체로 형성된다. Be<sub>2</sub>C-Be 복합체의 소결은, Be와 C 사이의 발열 반응의 장점을 취할 수 있고, 습윤 향상을 위해서 적은 양의 Si를 사용한다. 소결에 의해서, 감속재 요소(103A 내지 103G)는, Be<sub>2</sub>C 웹 내의 Be로 구성될 수 있는 Be-금속 매트릭스로서 형성된다. Be-금속 매트릭스는 설정된 매트릭스 부피 분율(약 0 내지 약 50%)을 포함한다. 제2 U-Mod 예에서, 감속재 요소(103A 내지 103G)의 고체-상 감속재는, 구조적으로 강한 절연체 요소(102A 내지 102G) 내에 클래딩되는 원통형 펠릿으로 성형될 수 있는, ZrH를 포함한다. 감속재 요소(103A 내지 103G)는 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121G)에 의해서 핵 연료 타일(104A 내지 104X)로부터 분리된 냉각 경로 내에서 냉각된다.

[0089] 고온 매트릭스(152) 내에 내재된 TRISO 연료 입자(151A 내지 151N)로 형성된 핵 연료 타일(104A 내지 104N)은 직류 소결(DCS)을 통해서 형성될 수 있다. 핵 연료 타일(104A 내지 104N)은 높은 연료 연소 레벨(>>100 GWd/톤)을 달성하고, 극단적인 온도(예를 들어, 약 1,200 °C)에서 동작하며, 조사 하에서 우수한 거동을 갖는다. 핵 연료 타일(104A 내지 104N)은, 고온 매트릭스(152) 내에서 50 부피%보다 큰 팩킹 분율의 TRISO 연료 입자(151A 내지 151N)를 포함할 수 있다. 고온 매트릭스(152) 내에 분산된 TRISO 연료 입자(151A 내지 151N)는, 저밀도 탄소, 이원계 탄소 층, 및 열분해 그라파이트의 교번적인 또는 순차적인 층들에 의해서 코팅된 연료 커널을 포함할 수 있다. 이원계 탄화물 층은 규소 탄화물(SiC) 또는 내화 금속 탄화물, 예를 들어 티타늄 탄화물(TiC), 지르코늄 탄화물(ZrC), 니오븀 탄화물(NbC), 또는 이들의 조합을 포함할 수 있다. 이원계 탄화물 층이 내화 금속 탄화물로 형성될 때, 몇 가지 장점이 제공될 수 있다. 이원계 탄화물 층을 형성하는 제1 내화 금속 탄화물은, TRISO 연료 입자(151A 내지 151N)가, 초고온 동작(3000도 켈빈 초과)을 위한 핵분열 연료 커널을 유지하는 다수의 보호 장벽을 제공할 수 있게 한다. 내화 금속 탄화물은 또한 핵분열 생성물을 감쇠시켜, 고온 매트릭스(152)의 조사 손상을 감소시킨다. 따라서, 내화 탄화물 층은, 핵분열 생성물을 포획하여 NTP 핵 시스템(100)에서 핵 연료 냉각제(170B)(예를 들어, 수소와 같은 추진체) 내로 빠져 나가는 것 또는 고온 매트릭스(152)와 상호 작용하는 것을 방지하는, 압력 용기 층으로서 거동한다.

[0090] 도 6은 절연체 요소(102A 내지 102N)의 절연체 요소 어레이(112), 감속재 요소(103A 내지 103N)의 감속재 요소

어레이(113), 및 핵 연료 타일(104A 내지 104N)의 핵 연료 타일 어레이(114)로 이루어진 제3 상호 록킹 기하형태 패턴(600)을 도시한다. 도 6의 예에서, 2개의 절연체 요소(102A 및 102B), 2개의 감속재 요소(103A 및 103B), 10개의 핵 연료 타일(104A 내지 104J), 2개의 감속재 냉각제 통로(121A 및 121B), 그리고 32개의 완성된 연료 냉각제 통로(141A 내지 141N)가 도시되어 있다. 도 6의 제3 상호 록킹 기하형태 패턴(600)에서, 각각의 핵 연료 타일(104A 내지 104J)은 2개의 타일 인터페이스 벽(182A 및 182B) 및 2개의 절연체 요소 인터페이스 벽(183A 및 183B)을 포함한다. 타일 인터페이스 벽(182A 및 182B)의 각각은, 구면 또는 비구면 표면과 평면형 표면의 교번적인 패턴인, 10개의 핵 연료 측방향 면체(181A 내지 181J 및 181M 내지 181V)로 형성된다. 절연체 요소 인터페이스 벽(183A 및 183B)의 각각은, 마찬가지로 구면 또는 비구면 표면과 평면형 표면의 교번적인 패턴인, 2개의 핵 연료 측방향 면체(181K 및 181L 및 181W 및 181X)로 형성된다.

[0091] 도 6에 도시된 바와 같이, 각각의 절연체 요소(102A 및 102B)는, 길이방향으로 내부에 형성된 각각의 감속재 개구부(195A 및 195B)를 포함하는 프리즘으로 성형된다. 각각의 감속재 요소(103A 및 103B)는 각각의 감속재 개구부(195A 및 195B) 내에 배치된다. 각각의 절연체 요소(102A 및 102B)는, 예에서 삼각형 프리즘인, 프리즘으로 각각의 절연체 요소(102A 내지 102N)를 함께 성형하는 복수의 절연체 요소 측방향 면체(196A 내지 196N)(예를 들어, 30개가 도시되어 있다)를 포함한다. 절연체 요소 측방향 면체(196A 내지 196N)는 평면형, 비구면, 구면, 또는 자유형태 표면이다. 프리즘은 복수의 절연체 요소 경계 벽(198A 내지 198C)을 포함하고, 예를 들어 3개의 절연체 요소 경계 벽(198A 내지 198C)이 삼각형 프리즘 예에서 도시되어 있다. 절연체 요소 경계 벽(198A 내지 198C)의 각각은 절연체 요소 측방향 면체(196A 내지 196N)의 하위 세트를 포함한다.

[0092] 절연체 요소 경계 벽(198A 내지 198C)은 평면형 표면과 비구면 또는 구면 형상의 표면의 교번적인 패턴을 포함한다. 도 6의 예에서, 10개의 절연체 요소 측방향 면체(196A 내지 196J)가, 평면형 형상의 표면과 비구면 또는 구면 형상의 표면의 교번적인 패턴을 갖는 제1 절연체 요소 경계 벽(198A)을 형성한다.

[0093] 도 7은 °C의 최대 반응로 배출구 온도(710) 및 메가와트(MW)의 공칭 파워 레벨(705)을 도시하는 반응로 배출구 온도 그래프(700)이다. 반응로 배출구 온도 그래프(700)는 기준선 핵 반응로 코어(720)를, 도 5에 도시된 것과 같은 기본 S-Block 및 U-Mod(730) 및 도 6에 도시된 것과 같은 진보된(Advanced)(Adv.) S-Block 및 U-Mod(740)을 구현하는 핵 반응로 코어(101)를 위한 아키텍처와 비교한다. 반응로 배출구 온도 그래프(700)에 도시된 바와 같이, 기준선 핵 반응로 코어(720)에 비교하면, S-Block 및 U-Mod(730, 740)를 구현하는 핵 반응로 코어(101)는, 안전성, 신뢰성, 콤팩트함, 및 효율을 유지하면서, 더 넓은 범위의 최대 반응로 배출구 온도(710) 및 공칭 파워 레벨(705)을 달성한다. 도시된 바와 같이, 진보된 S-Block 및 U-Mod(740)는 500 °C의 배출구 온도에서 약 70 MWth, 또는 1000 °C가까이에서 10 MWth로 동작할 수 있다. 기본 S-Block 및 U-Mod(730) 및 진보된 S-Block 및 U-Mod(740) 아키텍처 모두는 보다 양호한 핵 반응로 코어(101) 내의 열 전달, 평균 핵 반응로 코어(101) 비열, 및 열을 핵 반응로 코어(101)로부터 제거할 수 있는 능력의 증가를 가능하게 한다.

[0094] 도 8은 절연체 요소(102A 내지 102N)를 형성하기 위한 2개의 후보의 고온 열 절연체(802A 및 802B) 및 그래파이트(810)에 비교되는 감속재 요소(103A 내지 103N)를 형성하기 위한 6개의 후보의 저온 고체-상 감속재(803A 내지 803F)에 관한 U-Mod 물리적 특성 표(800)이다. U-Mod 물리적 특성 표(800)에 기재된 바와 같이, 모든 저온 고체-상 감속재(803A 내지 803F)는 파워를 감속시키는 것에 의한 그래파이트(810)보다 상당히 양호한 중성자 감속재이다. 고온 열 절연체(802A 및 802B)는 파워 감속에 의한 그래파이트보다 양호한 중성자 감속재는 아니다. 고온 열 절연체(802A 및 802B)를 저온 고체-상 감속재(803A 내지 803F)와 조합함으로써, 더 우수한 엔지니어링 성능이 U-Mod에 의해서 달성된다. U-Mod를 위한 2개의 엔지니어링 구조가 더 우수하다. 제1 엔지니어링 U-Mod 구조에서, 감속재 요소(103A 내지 103N)는, 핵-등급 화학증착(CVD) SiC 복합체 클래딩으로 형성된 강성 클래딩 고온 열 절연체(802A) 내에 수용된 지르코늄 수화물(ZrH)(803A)을 포함하는 고체-상 감속재(803A)로 형성된다. 제2 엔지니어링 U-Mod 구조에서, 감속재 요소(103A 내지 103N)는, 핵-등급 SiC 복합체 클래딩으로 형성된 고온 열 절연체(802A) 내에 유사하게 수용된 베릴륨 탄화물(Be<sub>2</sub>C)(803B)을 포함하는 고체-상 감속재(803B)로 형성된다.

[0095] 도 9는 온도가 측방향 거리(905)에 따라 어떻게 달라지는 지(910)를 보여주는, S-Block 및 U-Mod를 구현하는 핵 반응로 코어(101)의 열 분석 그래프(900)이다. 열 분석 그래프(900)에 도시된 바와 같이, 핵 연료 타일(104A 내지 104N)(S-Block)의 핵 연료 타일 최대 온도(904)는, 약 0 센티미터 내지 0.3 센티미터의 측방향 거리(905)에서 약 1,200도 켈빈이다. 핵 연료 냉각제(170B)의 핵 연료 냉각제 최대 온도(970B)는 약 0 센티미터 내지 0.1 센티미터의 측방향 거리(905)에서 약 1,150도 켈빈이다. 감속재 요소(103A 내지 103N)(U-Mod)의 감속재 요소 최대 온도(903)는 약 0.3 센티미터 내지 0.7 센티미터의 측방향 거리(905)에서 약 800도 켈빈이다. 감속재

냉각제(170A)의 감속제 냉각제 최대 온도(970A)는 약 0.5 센티미터 내지 0.7 센티미터의 축방향 거리(905)에서 약 750도 켈빈이다. 따라서, 핵 연료 타일(104A 내지 104N)의 S-Block 아키텍처는 핵 연료 타일들(104A 내지 104N) 사이의 열 전달을 증가시켜 효율을 높이고, 감속제 요소(103A 내지 103N) 및 절연체 요소(102A 내지 102N)의 U-Mod 아키텍처는 열을 감속제 요소(103A 내지 103N)로부터 제거할 수 있는 능력을 높인다.

[0096] 도 10은 S-Block 및 U-Mod를 구현하는 2개의 상이한 핵 반응로 코어(101A 및 101B)의 감손 그래프(1000)이다. 도시된 바와 같이, 수년간 핵 반응로 코어(101)에서 측정된 수명(1005)에 걸친 계수 k-유효(k-eff)(1010)가 개선된다. 중성자 증식 인자로도 알려진 K-eff(1010)는, 핵 연료 타일(104A 내지 104N)의 고온 매트릭스(152) 내에 현탁된 TRISO 연료 입자(151A 내지 151N) 내의 핵분열 재료의 임계 상태를 특성화한다. 일반적으로,  $K\text{-eff} = \text{생성된 중성자의 수} / (\text{누출 또는 흡수를 통해서}) \text{ 손실된 중성자의 수}$ 이다. K-eff(1010)가 1 이상인 경우에만, 핵의 핵분열 연쇄 반응이 유지될 수 있다. 도시된 바와 같이, 기본 S-Block 및 U-Mod(730)는 핵 반응로 코어(101A)가 약 10년의 수명(1005A)을 가질 수 있게 한다. 진보된 S-Block 및 U-Mod(740)는 핵 반응로 코어(101B)가 약 15년의 수명(1005B)을 가질 수 있게 한다. 기본 S-Block 및 U-Mod(730) 및 진보된 S-Block 및 U-Mod(740) 모두는 핵 반응로 시스템(1000)이 상업적으로 이용될 수 있게 하는 높은 파워 밀도를 가능하게 한다.

[0097] 도 11은, 6개의 상이한 핵 반응로 시스템(1100A 내지 1100F)의 핵 반응로 질량(1105), 파워 레벨(1106), 질량당 파워(1107), 배출구 온도(1108), 및 우라늄 235(U-235) 부화(1109)를 비교한, 핵 반응로 코어 성능 및 특성 비교 표(1101)이다. 킬로그램(kg)의 핵 반응로 질량(1105), 킬로와트-전기(kWe)의 파워 레벨(1106), 킬로그램당 와트 전기(We/kg)의 질량당 파워(1107), 및 도 켈빈(K)의 배출구 온도(1108)에 의해서 측정되는 바와 같이, 핵 반응로 코어(101)에서 기본 S-Block 및 U-Mod(730)를 구현하는 제1 핵 반응로 시스템(1100A)은 JIMO 핵 반응로 시스템(1100D)에 비해서 약간 개선된 성능을 달성한다. 중요한 것은, 기본 S-Block 및 U-Mod(730)로 달성된 약간 개선된 성능이, JIMO 핵 반응로 시스템(1100D)에서 구현된 고-부화 우라늄(HEU) U-235 부화가 아니라, 저-부화 우라늄(LEU)인 U-235 부화(1109A)로 달성되었다는 것이다. JIMO 핵 반응로 시스템(1100D)은, 전체가 본원에서 참조로 포함되는, [미항공우주국의 "Prometheus Project Final Report" 982-R120461]에 설명되어 있다.

[0098] 핵 반응로 코어(101)에서 진보된 S-Block 및 U-Mod(740)를 구현하는 제2 핵 반응로 시스템(1100B)은 KiloPower Derived 핵 반응로 시스템(1100C)의 핵 반응로 질량(1105E)와 동일한 핵 반응로 질량(1105B)을 가지나, 진보된 S-Block 및 U-Mod(740)은 주로 파워 레벨(1106B), 질량당 파워(1107B), 및 배출구 온도(1108B)를 개선한다. KiloPower Derived 핵 반응로 시스템(1100C)은, 전체가 본원에서 참조로 포함되는, [Patrick McClure, David Poston, "Design and Testing of Small Nuclear Reactors for Defense and Space Applications, Invited Talk to ANS Trinity Section]에서 설명된다.

[0099] 기본 S-Block 및 U-Mod(730)의 핵 반응로 질량(1105A)은 단지 1,500 kg이고, 진보된 S-Block 및 U-Mod(740)의 핵 반응로 질량(1105B)은 3,000 kg이다. S-Block 및 U-Mod와 마찬가지로, Megapower 핵 반응로 시스템(1100F)은 LEU U-235 부화(1109F)를 구현하나; 핵 반응로 질량(1105F)은 거의 22,000 킬로그램이고, 질량당 파워(1107F)는, 기본 S-Block 및 U-Mod(730)의 100 We/kg의 개선된 질량당 파워(1107A) 및 진보된 S-Block 및 U-Mod(740)의 333 We/kg의 질량당 파워(1107B)에 비교되는, 91 We/kg이다. Megapower 핵 반응로 시스템(1100F)은, 전체가 본원에서 참조로 포함되는, [Patrick McClure, David Poston, "Design and Testing of Small Nuclear Reactors for Defense and Space Applications, Invited Talk to ANS Trinity Section]에서 설명된다.

[0100] 마지막으로, NASA Fission Surface System 핵 반응로 시스템(1100C)은, 전체가 본원에서 참조로 포함되는, [David I. Poston, "Reference Reactor Module Design for NASA's Lunar Fission Surface Power System," Proceedings of Nuclear and Emerging Technologies for Space 2009, Atlanta, GA. June 2009]에 설명되어 있다. 전체적으로, NASA Fission Surface System이 HEU U-235 부화(1109C)를 이용함에도 불구하고, NASA Fission Surface System 핵 반응로 시스템(1100D)은, 기본 S-Block 및 U-Mod(730) 및 진보된 S-Block 및 U-Mod(740)에 비교되는, 핵 반응로 질량(1105C), 파워 레벨(1106C), 질량당 파워(1107C), 배출구 온도(1108C), 및 우라늄 235 (U-235) 부화(1109C)를 포함하는, 열등한 성능 및 특성을 갖는다.

[0101] 도 11의 핵 반응로 코어 성능 및 특성 비교 표(1101)은, 핵 반응로 코어(101)의 아키텍처에서 구현된 S-Block 및 U-Mod 기술이, LEU U-235 부화에서도, 비교적 가벼운 핵 반응로 질량(1105), 큰 파워 레벨(1106), 큰 질량당 파워(1107), 및 높은 배출구 온도(1108)를 달성한다는 것을 보여준다. 요약하면, S-Block 및 U-Mod 향상은 핵 반응로 코어(101)의 안전성, 신뢰성, 열 전달, 효율, 및 콤팩트함을 개선한다.

[0102] 보호 범위는 이하의 청구항에 의해서만 제한된다. 그러한 범위는, 본 명세서 및 이하의 기재 기록에 비추어 해



석될 때 청구항에서 사용된 언어의 일반적인 의미와 일치하는 것으로 그리고 모든 구조적 및 기능적 등가물을 포괄하는 것으로 의도되고 해석되어야 한다. 그럼에도 불구하고, 어떠한 청구항도 특허법 시행령의 101, 102 또는 103 섹션의 요구 사항을 충족하지 못하는 청구 대상을 포함하지 않으며, 그러한 방식으로 해석되어서도 안 된다. 그러한 청구 대상의 어떠한 의도되지 않은 포함도 여기에서 청구되지 않는다.

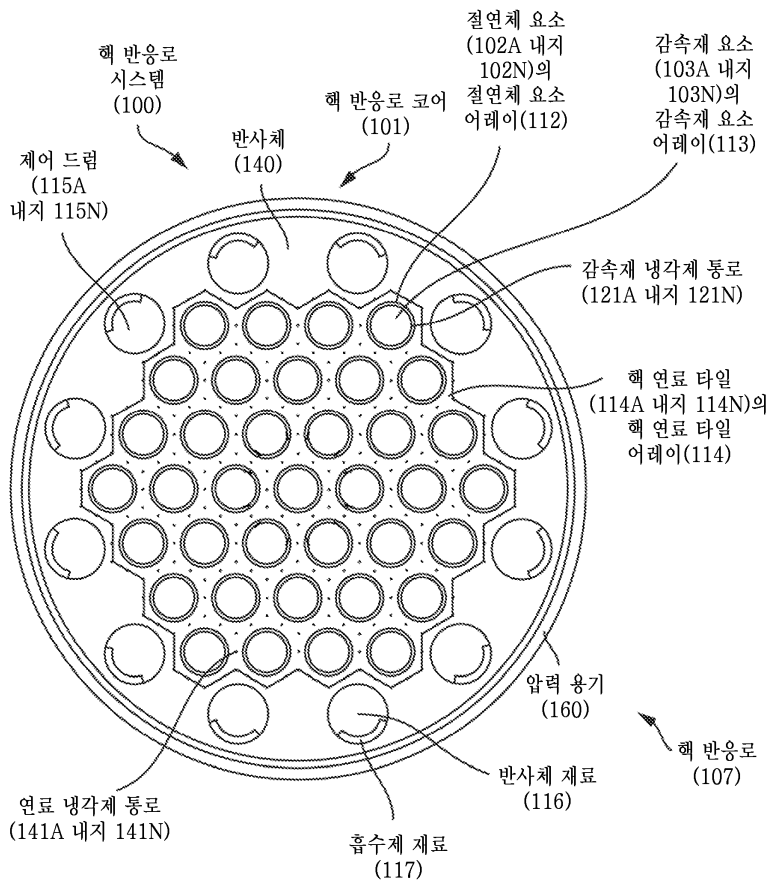
[0103] 또한, 본원에서 사용된 용어 및 표현은, 특정 의미가 본원에서 달리 설명된 경우를 제외하고, 그들의 상응하는 각각의 조사 또는 연구 분야에 대해 그러한 용어 및 표현에 부여된 일반적인 의미를 갖는다는 이해할 것이다. 제1 및 제2 등과 같은 관계 용어는, 해당 개체들 또는 작용들 간의 실제 관계 또는 순서를 반드시 요구하거나 암시하지 않으면서, 하나의 개체 또는 작용을 다른 개체 또는 작용과 구별하기 위해서만 사용될 수 있다. "포함한다", "포함하는", "포괄한다", "포괄하는", "갖는다", "가지는", "이용한", "~로 형성된"이라는 용어, 또는 그 임의의 다른 변형된 용어는 비-배타적인 포함을 커버하기 위한 것이고, 그에 따라 요소 또는 의 목록을 포함하거나 포괄하는 프로세스, 방법, 물품, 또는 장치는 이러한 요소 또는 단계만을 포함하는 것이 아니고, 그러한 프로세스, 방법, 물품, 또는 장치에 대해서 명백하게 나열되지 않거나 내재되지 않은 다른 요소 또는 단계를 포함할 수 있다. 부정관사("a" 또는 "an")가 앞에 오는 요소는, 추가 제약 없이, 그러한 요소를 포함하는 프로세스, 방법, 물품 또는 장치에서 추가적인 동일한 요소의 존재를 배제하지 않는다.

[0104] 또한, 전술한 구체적인 설명에서, 개시 내용의 간결화를 목적으로 여러 특징이 다양한 예에서 함께 그룹화되는 것을 확인할 수 있을 것이다. 이러한 개시 내용의 방법은, 청구된 예가 각각의 청구항에서 명시적으로 인용된 것 보다 많은 특징부를 요구하는 의도를 반영하는 것으로 해석되지 않는다. 오히려, 이하의 청구항이 반영하는 바와 같이, 청구 대상은 공개된 단일 예의 모든 특징보다 적다. 그에 따라, 이하의 청구항은 이에 의해서 상세한 설명 내로 통합되고, 각각의 청구항은 별개의 청구된 청구 대상으로서 자체적으로 존립한다.

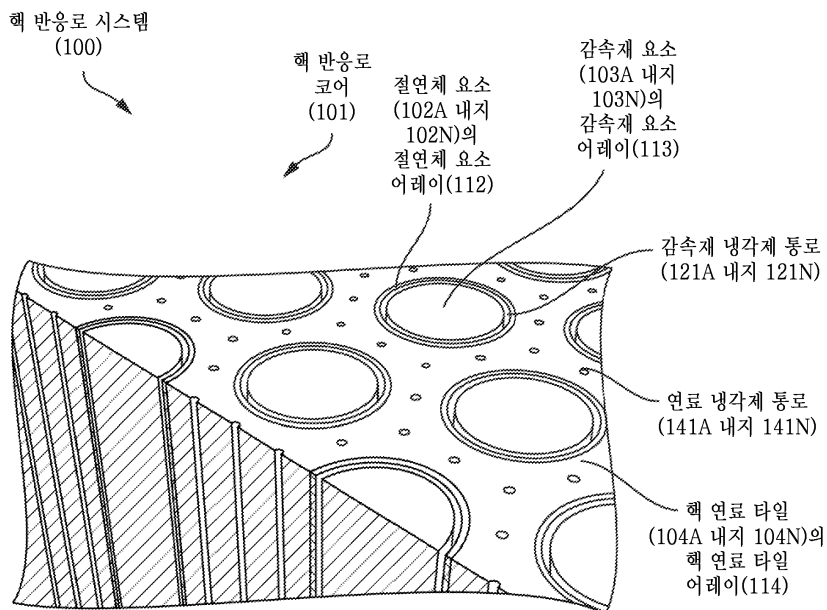
[0105] 이상에서 최선의 모드 및/또는 다른 예라고 생각되는 것을 설명했지만, 그 안에서 다양한 수정이 이루어질 수 있고 여기에 개시된 청구 대상은 다양한 형태 및 예로 구현될 수 있으며, 그것들은 수많은 적용예에서 적용될 수 있으며, 그 중 일부만이 여기에 설명되었다. 이하의 청구항은, 본 개념의 진정한 범위에 속하는 임의의 그 그리고 모든 수정 및 변형을 청구하기 위한 것으로 의도된 것이다.

도면

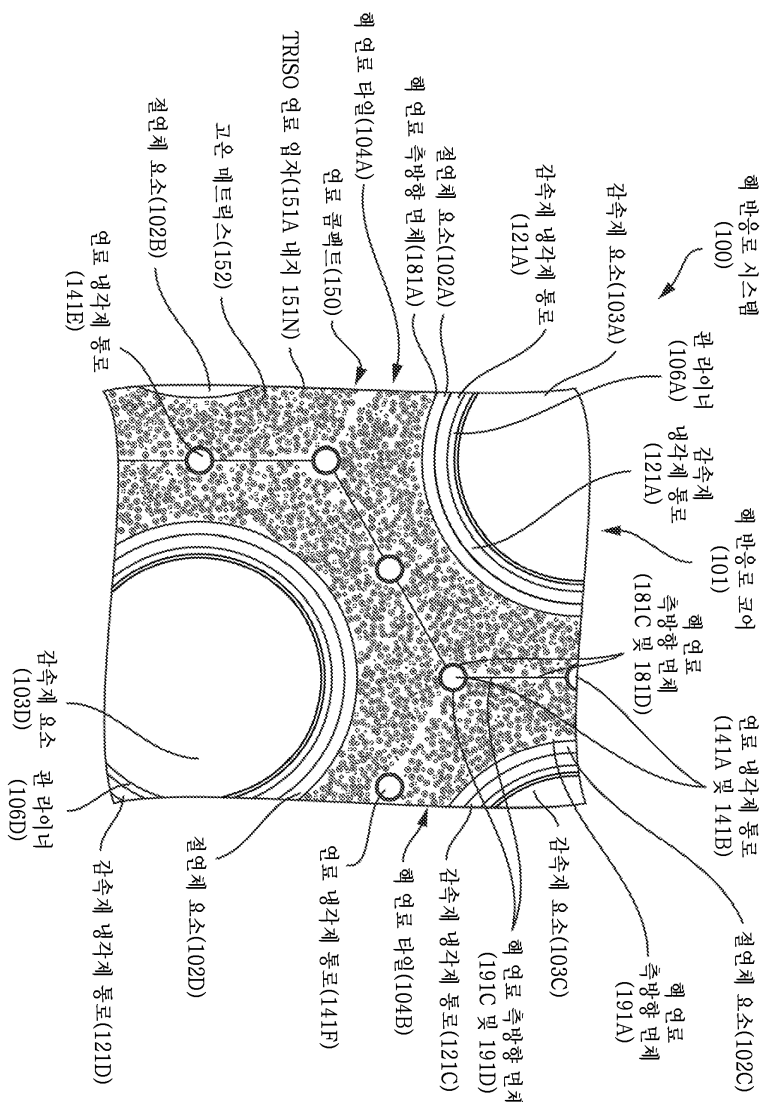
도면1



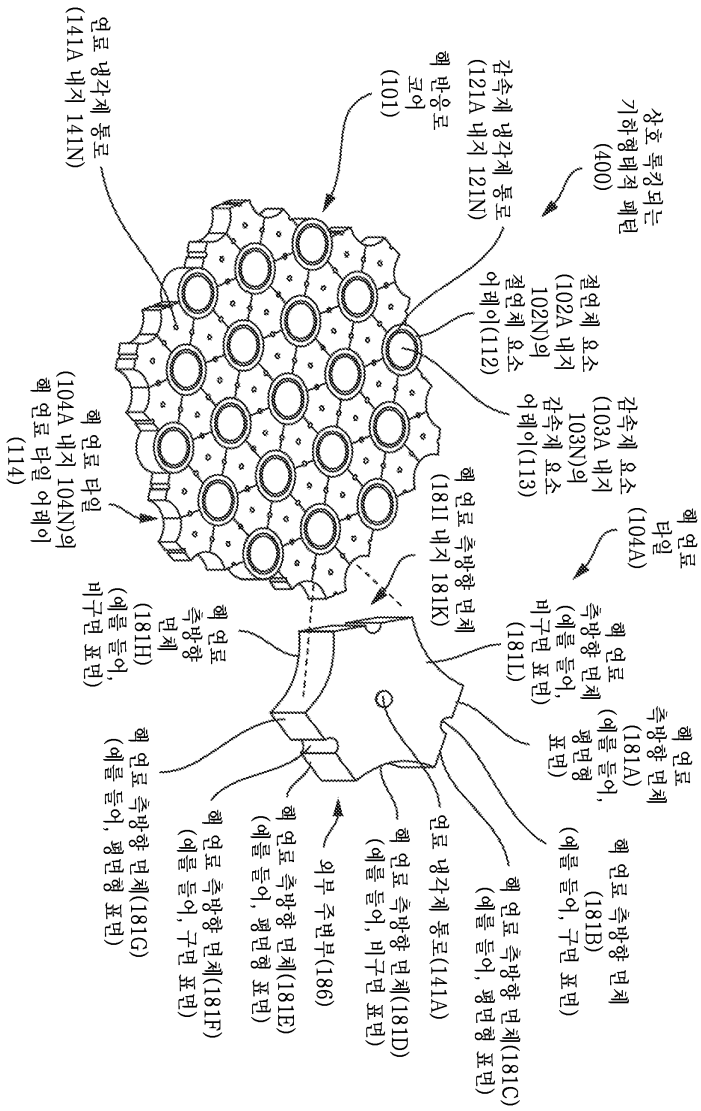
도면2



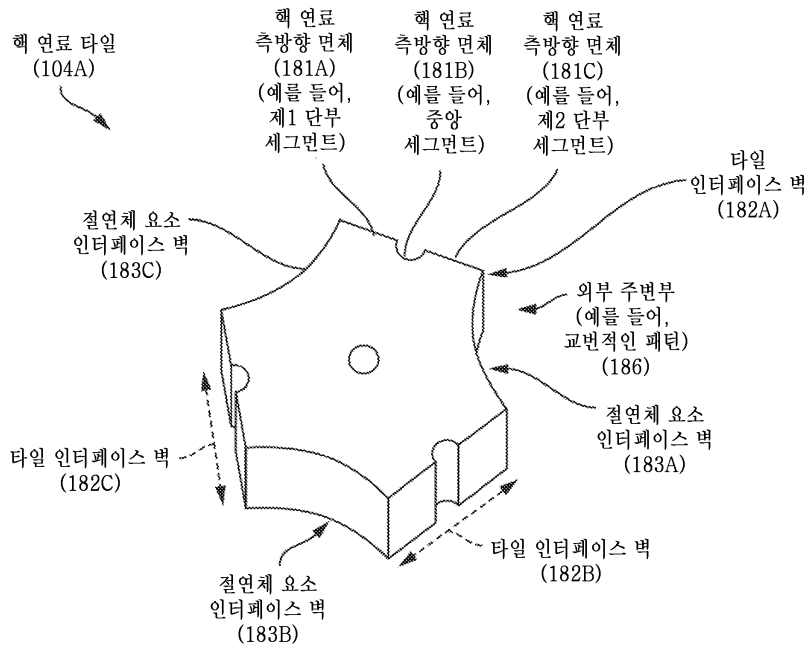
도면3



도면4a



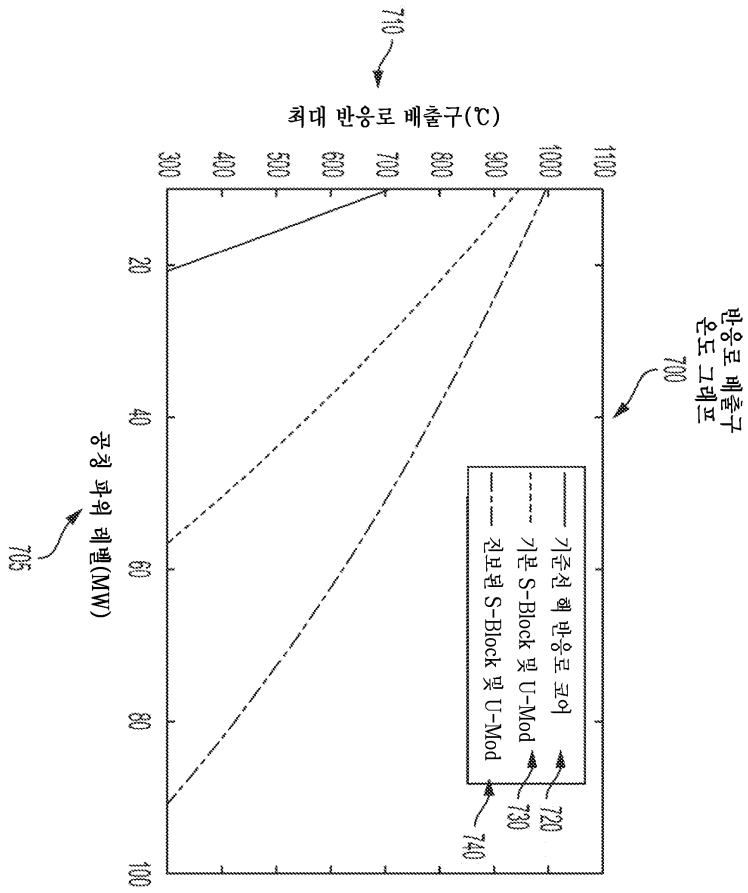
도면4b







도면7

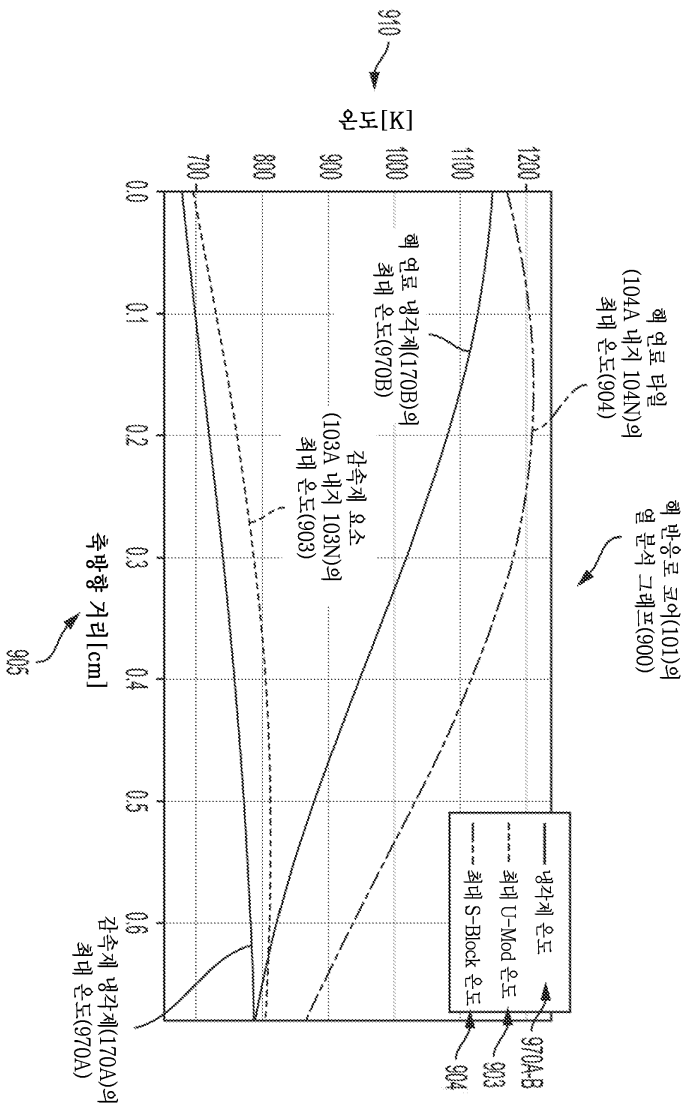




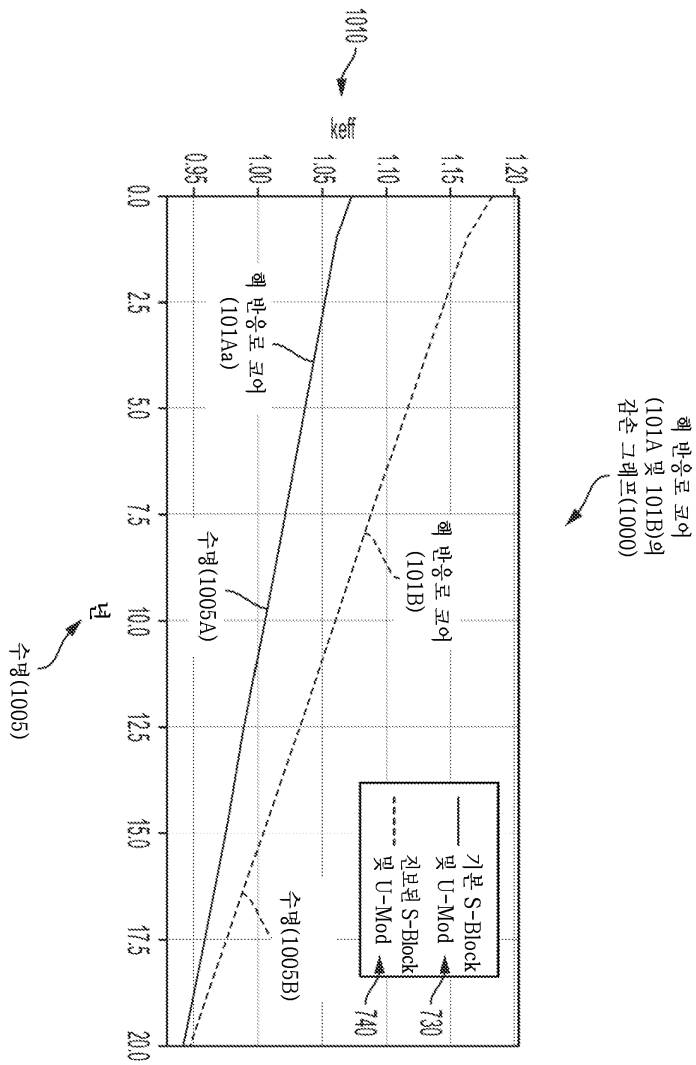
**U-Mod 물리적 특성 표**  
 절연체 요소(102A 내지 102N)를 형성하기 위한 후보의 고온 열 절연체(802A 및 802B) 및 그라파이트(810)에 비교되는  
 절연체 요소(103A 내지 103N)를 형성하기 위한 후보의 저온 고체-상 절연체(803A 내지 803F)

후보 재료 감속제 (803A 내지 803G) 또는 절연체(802A 및 802B) 재료	감속 파워 (%)	T <sub>max</sub> (T <sub>decomp</sub> ) (°C)	밀도 (g/cc)	화학적 반응성 (O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O)	결정	조사 마지막하게, (~500°C, >20 dia)	Therm. Cond. (@~550°C) W/mK
810 그라파이트	0.077	>(3000)	1.8	O <sub>2</sub> Rx@800C	유각형	불량	~20
802A CVD SiC	0.044	(2860)	3.2	매우 낮음	입방체	우수	~80
803A ZrH	0.859	>(850)	5.86	중상	입방체	알 수 없음	~17
802B MgO	0.080	2853	3.58	중상	입방체	우수	~50
803B Be <sub>2</sub> C	0.125	(~2100)	1.9	NRx@>1100C O <sub>2</sub> Rx@800C	입방체	알 수 없음	~22
803C ZrBe <sub>13</sub>	0.129	1525	2.72		입방체	알 수 없음	~40
803D TiBe <sub>12</sub>	0.138	1925	2.26		육각형	알 수 없음	
803E BeO	0.124	2807	3.015	매우 낮음	육각형	매우 나쁜, 이방성	~30
803F Be	0.16	1287	1.85	O <sub>2</sub> Rx@500C	유각형	나쁜	~60


도면9



도면10



도면11

핵 반응로 코어 성능 및 특성 비교 표  1101

1100A	핵 반응로 시스템 (1100A 내지 1100F)	핵 반응로 질량(kg) (1105A 내지 1105F)	과외 데벨 (kWe) (1106A 내지 1106F)	질량당 과외 (We/kg) (1107A 내지 1107F)	배출구 온도(K) (1108A 내지 1108F)	U-235 부화 (1109A 내지 1109F)
1100A	기본 S-Block 및 U-Mod (730)	1,500	150	100	1,150	LEU
1100B	진보된 S-Block 및 U-Mod (740)	3,000	1,000	333	1,150	LEU
1100C	NASA Fission Surface System	1,400	40	16	850	HEU
1100D	JIMO Reactor	1,600	200	125	1,150	HEU
1100E	KiPower Derived System	3,000	200	67	~1,000	LEU
1100F	Megapower	22,000	2,000	91	~1,000	LEU