



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2022-0069957
(43) 공개일자 2022년05월27일

- (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 10-2022-7011744
- (22) 출원일자(국제) 2022년10월04일
심사청구일자 없음
- (85) 번역문제출일자 2022년04월08일
- (86) 국제출원번호 PCT/US2020/054188
- (87) 국제공개번호 WO 2021/067901
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
이즈 마이클 존
미국 98199-1465 워싱턴주 시애틀 스위트 300 웨
스트 코모도어 웨이 2288
베네리 파올로 프란체스코
미국 98199-1465 워싱턴주 시애틀 스위트 300 웨
스트 코모도어 웨이 2288
- (74) 대리인
양영준, 윤정호

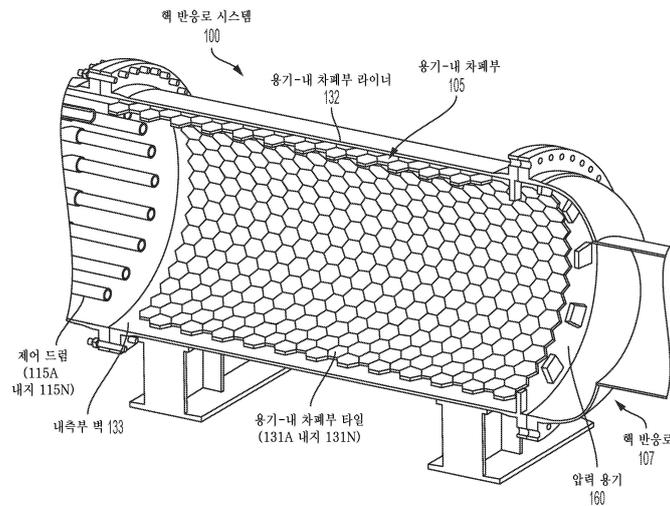
전체 청구항 수 : 총 40 항

(54) 발명의 명칭 **통합된 용기-내 중성자 차폐부**

(57) 요약

핵 반응로 시스템의 크기 및 질량을 줄이기 위해서, 통합된 용기-내 중성자 반사체 또는 중성자 차폐부의 역할을 분리한다. 핵 반응로 시스템은 압력 용기를 포함하고, 압력 용기는 내측부 벽 및 압력 용기의 내측부 벽 내에 위치한 핵 반응로 코어를 포함한다. 핵 반응로 코어는 복수의 연료 요소 및 적어도 하나의 감속제 요소를 포함한다. 핵 반응로 시스템은, 복수의 연료 요소 및 적어도 하나의 감속제 요소를 측방향에서 둘러싸는 복수의 반사체 블록을 포함하는 압력 용기 내에 위치되는 반사체를 포함한다. 핵 반응로 시스템은 반사체 블록을 둘러싸기 위해서 압력 용기의 내측부 벽에 위치되는 용기-내 차폐부를 포함한다. 용기-내 차폐부는 2개 이상의 중성자 흡수 재료로 형성된다. 2개 이상의 중성자 흡수 재료는 거의 검은색의 중성자 흡수 재료 및 회색의 중성자 흡수 재료를 포함한다.

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)

명세서

청구범위

청구항 1

핵 반응로 시스템이며:

내측부 벽을 포함하는 압력 용기;

압력 용기의 내측부 벽 내에 위치되는 핵 반응로 코어로서, 복수의 연료 요소의 연료 요소 어레이 및 적어도 하나의 감속제 요소를 포함하는, 핵 반응로 코어;

복수의 연료 요소 및 적어도 하나의 감속제 요소를 측방향에서 둘러싸는 복수의 반사체 블록을 포함하는 압력 용기 내에 위치되는 반사체; 및

복수의 반사체 블록을 둘러싸기 위해서 압력 용기의 내측부 벽 상에 위치되는 용기-내 차폐부를 포함하고:

용기-내 차폐부는 2개 이상의 중성자 흡수 재료로 형성되고, 그리고

2개 이상의 중성자 흡수 재료는 거의 검은색의 중성자 흡수 재료 및 회색의 중성자 흡수 재료를 포함하는, 핵 반응로 시스템.

청구항 2

제1항에 있어서,

거의 검은색의 중성자 흡수 재료가 복합 세라믹 재료를 포함하고;

회색의 중성자 흡수 재료가 중금속 재료를 포함하며; 그리고

복합 세라믹 재료 및 중금속 재료가 용기-내 차폐부를 형성하는, 핵 반응로 시스템.

청구항 3

제2항에 있어서,

복합 세라믹 재료가 붕소 탄화물(B_4C), 하프늄 탄화물(HfC), 또는 가돌리늄 산화물(Gd_2O_3)을 포함하고; 그리고

중금속 재료는 텅스텐(W), 철(Fe), 니켈(Ni), 또는 구리(Cu)를 포함하는, 핵 반응로 시스템.

청구항 4

제3항에 있어서,

복합 세라믹 재료는 알루미늄 산화물(Al_2O_3) 또는 규소 탄화물(SiC)을 더 포함하는, 핵 반응로 시스템.

청구항 5

제2항에 있어서,

복합 세라믹 재료가:

붕소-10 탄화물($^{10}B_4C$),

50 중량%의 붕소-10 탄화물의 붕소-10 탄화물 및 알루미늄 산화물 복합체($^{10}B_4C-Al_2O_3$),

50 중량%의 붕소-10 탄화물의 붕소-10 탄화물 및 규소 탄화물 복합체($^{10}B_4C-SiC$), 또는

5 중량%의 붕소-10의 붕소화 스테인리스 강 합금을 포함하고; 그리고

중금속 재료는 90 중량% 이상의 텅스텐 함량을 갖는 원자화된 텅스텐 중금속을 포함하는, 핵 반응로 시스템.

청구항 6

제2항에 있어서,

복합 세라믹 재료는, 평균 입자 직경이 약 80 나노미터 이상이고 약 100 마이크로 이하인 복수의 복합 세라믹 입자를 포함하는, 핵 반응로 시스템.

청구항 7

제6항에 있어서,

복수의 복합 세라믹 입자가 중금속 재료의 중금속 매트릭스 내에 매립되어 용기-내 차폐부를 형성하는, 핵 반응로 시스템.

청구항 8

제7항에 있어서,

용기-내 차폐부가 복수의 용기-내 차폐부 타일로서 형성되고; 그리고
 복수의 용기-내 차폐부 타일은 내측부 벽 상에 배치되는, 핵 반응로 시스템.

청구항 9

제8항에 있어서,

복수의 용기-내 차폐부 타일의 전부 또는 하위세트가 곡선형 다면체 형상 또는 그 절두형 부분인, 핵 반응로 시스템.

청구항 10

제8항에 있어서,

복수의 용기-내 차폐부 타일은 인터록킹 기하형태 패턴을 갖는 기본 형상을 포함하는, 핵 반응로 시스템.

청구항 11

제10항에 있어서,

내측부 벽은 복수의 연속적인 표면 또는 불연속적인 표면으로 형성되고; 그리고
 복수의 용기-내 차폐부 타일의 상호 록킹 기하형태적 패턴이 결합되어 내측부 벽의 연속적인 또는 불연속적인 표면을 덮고 용기-내 차폐부 라이너를 함께 형성하는, 핵 반응로 시스템.

청구항 12

제11항에 있어서,

핵 반응로 코어 내의 활성화 생성물의 내부 밀도; 및
 핵 반응로 코어 외측의 활성화 생성물의 외부 밀도를 더 포함하고;
 핵 반응로 코어의 동작 중에, 활성화 생성물의 외부 밀도는 활성화 생성물의 내부 밀도보다 낮은, 핵 반응로 시스템.

청구항 13

제1항에 있어서,

복수의 반사체 블록의 반사체 블록이 반사체 두께, 반사체 확산 계수, 및 반사체 거시적 흡수 횡단면을 가지며;
 용기-내 차폐부는 용기-내 차폐부 두께, 용기-내 차폐부 확산 계수, 및 용기-내 차폐부 거시적 흡수 횡단면을 가지고;

반사체 블록 및 용기-내 차폐부는 적어도: 반사체 두께, 반사체 확산 계수, 반사체 거시적 흡수 횡단면, 용기-내 차폐부 두께, 용기-내 차폐부 확산 계수, 및 용기-내 차폐부 거시적 흡수 횡단면을 기초로, 조합된 확산 길이를 가지고; 그리고

함께 합쳐진 반사체 두께 및 용기-내 차폐부 두께는 조합된 확산 길이의 2배 미만인, 핵 반응로 시스템.

청구항 14

제1항에 있어서,

연료 요소의 각각이 핵 연료를 포함하고;

핵 연료는, 고온 매트릭스 내에 매립된 코팅된 연료 입자로 구성된 연료 콤팩트를 포함하고; 그리고

고온 매트릭스는 규소 탄화물, 지르코늄 탄화물, 티타늄 탄화물, 니오븀 탄화물, 텅스텐, 몰리브덴 또는 이들의 조합을 포함하는, 핵 반응로 시스템.

청구항 15

제14항에 있어서,

코팅된 연료 입자는 3구조-등방성(TRISO) 연료 입자 또는 이중구조-등방성(BISO) 연료 입자를 포함하는, 핵 반응로 시스템.

청구항 16

제15항에 있어서,

복수의 제어 드럼을 더 포함하고:

제어 드럼은 반사체 내에 산재 또는 배치되는, 핵 반응로 시스템.

청구항 17

제1항에 있어서,

핵 반응로 시스템은 가스-냉각형 고온 핵 반응로, 용융 염 냉각형 핵 반응로, 연료-내-염 핵 반응로, 또는 나트륨-냉각형 고속 핵 반응로를 포함하는, 핵 반응로 시스템.

청구항 18

제1항에 있어서,

복수의 연료 요소를 통해서 유동하는 냉각제를 더 포함하고, 냉각제는 헬륨, 리튬 불화물(LiF) 및 베릴륨 불화물(BeF₂)로 형성된 FLiBe 용융 염, 나트륨, He, HeXe, CO₂, 네온, 또는 HeN을 포함하는, 핵 반응로 시스템.

청구항 19

방법이며:

용기-내 차폐부를 형성하기 위한 2개 이상의 중성자 흡수 재료를 선택하는 단계로서, 2개 이상의 중성자 흡수 재료는 거의 검은색의 중성자 흡수 재료 및 회색의 중성자 흡수 재료를 포함하는, 단계;

세라믹 흡수 분말을 제조하기 위해서 거의 검은색의 중성자 흡수 재료를 공정 소결하는 단계;

회색의 중성자 흡수 재료와 세라믹 흡수 분말을 동역학적으로 혼합하여 용기-내 차폐부 혼합물을 생성하는 단계; 및

용기-내 차폐부 혼합물을 용기-내 차폐부로 냉간 프레스 소결하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 20

제19항에 있어서,

거의 검은색의 중성자 흡수 재료가 복합 세라믹 재료를 포함하고; 그리고
회색의 중성자 흡수 재료가 중금속 재료를 포함하는, 방법.

청구항 21

제20항에 있어서,
복합 세라믹 재료가 붕소 탄화물(B₄C), 하프늄 탄화물(HfC), 또는 가돌리늄 산화물(Gd₂O₃)을 포함하고; 그리고
중금속 재료는 텅스텐(W), 철(Fe), 니켈(Ni), 또는 구리(Cu)를 포함하는, 방법.

청구항 22

제21항에 있어서,
복합 세라믹 재료는 알루미늄 산화물(Al₂O₃) 또는 규소 탄화물(SiC)을 더 포함하는, 방법.

청구항 23

제20항에 있어서,
복합 세라믹 재료가:
붕소-10 탄화물(¹⁰B₄C),
50 중량%의 붕소-10 탄화물의 붕소-10 탄화물 및 알루미늄 산화물 복합체(¹⁰B₄C-Al₂O₃),
50 중량%의 붕소-10 탄화물의 붕소-10 탄화물 및 규소 탄화물 복합체(¹⁰B₄C-SiC), 또는
5 중량%의 붕소-10의 붕소화 스테인리스 강 합금 중 적어도 하나를 포함하고; 그리고
중금속 재료는 90 중량% 이상의 텅스텐 함량을 갖는 원자화된 텅스텐 중금속을 포함하는, 방법.

청구항 24

제20항에 있어서,
복합 세라믹 재료는, 평균 입자 직경이 약 80 나노미터 이상이고 약 100 마이크론 이하인 복수의 복합 세라믹 입자를 포함하는, 방법.

청구항 25

제19항에 있어서,
세라믹 흡수 분말은, 평균 입자 직경이 약 80 나노미터 이상이고 약 100 마이크론 이하인 복수의 복합 세라믹 입자를 포함하는, 방법.

청구항 26

제24항에 있어서,
용기-내 차폐부 혼합물을 용기-내 차폐부로 냉간 프레스 소결하는 단계는 용기-내 차폐부를 형성하기 위해서 복수의 복합 세라믹 입자를 중금속 재료의 중금속 매트릭스 내에 매립하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 27

제26항에 있어서,
용기-내 차폐부 혼합물을 용기-내 차폐부로 냉간 프레스 소결하는 단계는 용기-내 차폐부를 복수의 용기-내 차폐부 타일로 형성하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 28

제27항에 있어서,

복수의 용기-내 차폐부 타일을 압력 용기의 내측부 벽 상에 배치하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 29

제28항에 있어서,

복수의 용기-내 차폐부 타일의 전부 또는 하위세트가 곡선형 다면체 형상 또는 그 절두형 부분인, 핵 반응로 시스템.

청구항 30

제28항에 있어서,

복수의 용기-내 차폐부 타일은 인터록킹 기하형태 패턴을 갖는 기본 형상을 포함하는, 방법.

청구항 31

제30항에 있어서,

내측부 벽은 복수의 연속적인 표면 또는 불연속적인 표면으로 형성되고; 그리고

방법은 인터록킹 기하형태 패턴을 결합시키는 것에 의해서, 내측부 벽의 연속적 또는 불연속적 표면을 복수의 용기-내 차폐부 타일로 덮는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 32

제30항에 있어서,

적어도 부분적으로:

- (i) 팽창에 대한 내성;
- (ii) 중성자 스트리밍 경로의 감소; 또는
- (iii) 이들의 조합을 기초로, 용기-내 차폐부 타일의 기본 형상을 선택하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 33

제32항에 있어서,

기본 형상이 곡선형 다면체 형상 또는 그 절두형 부분인, 방법.

청구항 34

제19항에 있어서,

2개 이상의 중성자 흡수 재료를 선택하는 단계가:

- (i) 용기-내 차폐부의 용기-내 차폐부 두께;
- (ii) 용기-내 차폐부의 기하형태적 구성;
- (iii) 압력 용기가 용기-내 차폐부를 둘러싸고 용기-내 차폐부가 핵 반응로 코어를 둘러싸는, 압력 용기의 용기 내 고속 플루언스의 추정된 감소;
- (iv) 용기-내 차폐부의 예상 수명; 또는
- (v) 이들의 조합을 기초로 하는, 방법.

청구항 35

제19항에 있어서,

2개 이상의 중성자 흡수 재료를 선택하는 단계가:

- (i) 압력 용기의 내측부 직경;
- (ii) 핵 반응로 코어의 외측부 직경;
- (iii) 반사체의 반사체 두께; 또는
- (iv) 이들의 조합을 기초로 하는, 방법.

청구항 36

제19항에 있어서,

세라믹 흡수 분말을 제조하기 위해서 거의 검은색의 중성자 흡수 재료를 공정 소결하는 단계가 스파크 플라즈마 소결로 수행되는, 방법.

청구항 37

제19항에 있어서,

용기-내 차폐부와 페어링하기 위한 반사체 블록을 선택하는 단계; 및
 용기-내 차폐부의 용기-내 차폐부 두께를 선택하는 단계를 더 포함하고;
 반사체 블록은 반사체 두께, 반사체 확산 계수, 및 반사체 거시적 흡수 횡단면을 가지고;
 용기-내 차폐부는 용기-내 차폐부 확산 계수 및 용기-내 차폐부 거시적 흡수 횡단면을 가지며;
 반사체 블록 및 용기-내 차폐부는 적어도: 반사체 두께, 반사체 확산 계수, 반사체 거시적 흡수 횡단면, 선택된 용기-내 차폐부 두께, 용기-내 차폐부 확산 계수, 및 용기-내 차폐부 거시적 흡수 횡단면을 기초로, 조합된 확산 길이를 가지고; 그리고
 함께 합쳐진 반사체 두께 및 선택된 용기-내 차폐부 두께는 조합된 확산 길이의 2배 미만인, 방법.

청구항 38

제19항에 있어서,

거의 검은색의 중성자 흡수 재료를 선택하는 단계가 동위원소적으로-맞춤된 거의 검은색의 중성자 흡수 재료를 선택하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 39

제19항에 있어서,

핵 반응로 시스템을 선택하는 단계를 더 포함하고; 그리고
 용기-내 차폐부를 형성하기 위한 2개 이상의 중성자 흡수 재료를 선택하는 단계가:
 (i) 핵 반응로 시스템의 압력 용기의 압력 용기 직경;
 (ii) 압력 용기에 대한 고속 중성자 플루언스; 및
 (iii) 핵 반응로 시스템 외부의 중성자 플루언스를 기초로 하는, 방법.

청구항 40

제19항에 있어서,

용기-내 차폐부를 압력 용기의 내측부 벽 상에 장착하는 단계를 더 포함하는, 방법.

발명의 설명

기술 분야

- [0001] 관련 출원에 대한 상호 참조
- [0002] 본원은 2019년 10월 4일자로 출원되고 그 전체가 본원에 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 본원에 참조로 포함되는 "Nuclear Reactor Core Architecture with Enhanced Heat Transfer and Safety"라는 명칭의 국제 출원 제PCT/US2020/XXXXXX호에 관한 것이다. 본원은 또한 2020년 10월 4일자로 출원되고 그 전체가 본원에 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, 용기-내 중성자 차폐부를 포함하는 핵 반응로 및 용기-내 중성자 차폐부를 제조하기 위한 방법을 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 감속제를 포함한다. 일반적으로, 핵 연료는 원통형 형상의 연료 콤팩트 또는 펠릿으로 형성된다. 연료 콤팩트가 연료 핀 또는 연료 봉 내로 적재되고, 클래딩되고(claddeed), 핵 반응로 코어 내의 다수의 연료 요소의 컬럼 내에 적층된다.
- [0006] 핵 반응로 코어는, 자유 중성자가 시간 당 부피로 이동하는 거리인, 중성자 플루언스(neutron fluence) 또는 중성자 플럭스를 증가시킨다. 중성자 플루언스는 열 및 에너지를 생성하는데 있어서 핵 반응로에서 필수적이나, 중성자 플루언스, 특히 고속 중성자 플루언스 또는 14,000km/s 이상의 속력으로 이동하는 중성자의 중성자 플루언스는 물질 및 인간 수명 모두에 매우 위험하다. 그에 따라, 큰 고속 중성자 플루언스는 핵 반응로 코어로부터 더 먼 거리에서 안전 레벨까지, 이상적으로 핵 반응로 자체를 막 넘어 썼을 때 안전 값까지 감소된다. 중성자 반사체와 같은 핵 반응로의 일부 구성요소는 이러한 작용을 수행한다: 반사체는 자유 중성자를 핵 반응로 코어를 향해서 역으로 지향시키고, 그에 의해서 핵 반응로 내의 중성자 플루언스를 증가시키고, 에너지 효율을 개선하며, 핵 반응로 외측의 중성자 플루언스를 감소시켜, 주위 영역을 더 안전하게 만든다.
- [0007] 통상적인 육지에서의 적용을 위한 통상적인 핵 반응로 시스템, 예를 들어 핵 파워 플랜트를 건설할 때, 핵 반응로의 크기(예를 들어, 공간 또는 부피) 및 질량은 주요 관심사가 아니다. 일반적으로, 에너지 효율을 위해서 중성자를 핵 반응로 코어로 다시 반사시키기 위한 핵 반응로의 실제 두께는, 고속 중성자 플루언스를 핵 반응로 너머에서 안전 레벨까지 적절히 감소시키는데 필요한 요구 두께보다 훨씬 더 두껍다. 그에 따라, 통상적인 핵 반응로는, 핵 반응로 외부로의 중성자 플루언스를 감소시키기 위해서, 매우 두꺼운 중성자 반사체를 갖는 경향이 있다. 일반적으로, 중성자 반사체는, 자유 중성자를 핵 반응로 코어로 다시 반사시키는데 필요한 최적의 중성자 성능을 위해서 요구되는 것보다 훨씬 두껍다. 본질적으로, 중성자 반사체는 부가적으로 중성자 차폐부로서의 역할을 한다.
- [0008] 그러나, 핵 반응로 시스템의 크기 및 질량은 핵 열 추진(NTP)에서 그리고 외부 우주, 천체, 행성체, 및 지구 상의 원격 지역을 포함하는 원격 지역 적용예에서 핵 파워(예를 들어, 열 파워 및/또는 전력)를 제공하는데 있어서 중요한 인자이다. 예를 들어, 핵 반응로 시스템의 질량은 NTP 및 우주 적용예에서, 질량 당 파워와 같은, 성능에 직접적으로 영향을 미치고; 불필요한 제조 비용을 부가할 수 있다. 또한, 원격 지역 적용예에서, 더 작은(더 콤팩트한) 폼 팩터(form factor)는, 큰 파워 밀도에서의 핵 반응로의 동작을 허용하면서, 구축 비용을 줄이고 운반성을 증가시킨다. 따라서, 중성자 반사체를 우주-비효율적 중성자 차폐부로서 통상적으로 구현하는 것에 대한 개선이 필요하다.

발명의 내용

해결하려는 과제

과제의 해결 수단

- [0009] 본원에서 개시된 다양한 예는 우주 또는 육지 적용에 모두를 위한 핵 반응로 시스템을 위한 핵 기술에 관한 것이다. 여전히 최적의 중성자 성능을 획득하면서도 중성자 반사체 및 중성자 차폐부의 역할을 분리하기 위해서 통합형 용기-내 중성자 차폐부(105)를 구현하는 것에 의해서, 핵 반응로 시스템(100)은 유리하게 핵 반응로(107)의 크기 및 질량을 줄인다. 통합형 용기-내 차폐부(105)는 방사선 차폐를 핵 반응로(107)의 압력 용기(160) 내로 도입하고, 이는 핵 반응로 시스템(100)의 질량을 감소시킬 수 있게 하고 공간 및 질량 효율적 중성자 차폐부를 달성할 수 있게 한다.
- [0010] 통합형 용기-내 차폐부(105)는 이하의 장점을 갖는다. 첫 번째로, 용기-내 차폐부(105)는 압력 용기(160)와 활성 핵 반응로 코어(101) 사이의 필요 거리를 감소시키고, 그에 따라 압력 용기(160)의 전체 크기를 감소시킨다. 예를 들어, 용기-내 차폐부(105)는 더 얇은 반사체(140) 및 더 작은 전체적인 압력 용기(160)를 가능하게 한다. 종래의 중성자 반사체는 압력 용기(160)의 직경을 불필요하게 증가시켜, 압력 용기(160)의 보다 큰 직경을 초래하고, 이는 제조 비용이 더 많이 들고 운반 및 필드 작업(field)이 더 어렵다. 두 번째로, 용기-내 차폐부(105)는, 압력 용기(160)에 대한 고속 플럭스를 감소시킴으로써 압력 용기(160)의 수명을 연장한다. 세 번째로, 용기-내 차폐부(105)는 핵 반응로 코어(101) 외부의 활성화를 감소시키고, 그에 따라 핵 반응로(107)의 설치를 더 쉽게 한다. 네 번째로, 용기-내 차폐부(105)는 이미 건설된 핵 반응로(107) 내로 또는 새로운 핵 반응로(107)의 설계 내로 통합될(예를 들어, 개장될) 수 있다.
- [0011] 획기적인 성능을 달성하기 위해서, 용기-내 차폐부(105)는 거의 검은색의 중성자 흡수 재료 및 회색의 중성자 흡수 재료를 포함하여, 핵 반응로(107)의 압력 용기(160)의 내부에 존재하는 방사선 환경 및 열적 환경을 견딘다. 용기-내 차폐부(105)의 제조를 위해서, 고급 3D 프린팅 및 스파크 플라즈마 소결 방법을 이용할 수 있다. 용기-내 차폐부(105)는, 거의 검은색의 중성자 흡수 재료 및 회색의 중성자 흡수 재료를 압력 용기(160) 내의 내측부 벽(133) 상의 배치에 상당히-적합한 인터록킹 기하형태 패턴(interlocking geometry pattern)으로 성형하는, 복수의 용기-내 차폐부 타일(131A 내지 131N)로서 성형되고 중성자 스트리밍 경로를 제거한다. 용기-내 차폐부(105)는 부피-제약되는 핵 반응로(107)에서 압력 용기(160)에 대한 고속 플루언스를 제한하는 문제를 해결하고, 외측부를 갖는 압력 용기(160)에 대한 고속 플럭스를 감소시킨다. 용기-내 차폐부(105)는 핵 반응로(107) 주위의 방사선 필드를 감소시키고, 이는 다시 핵 반응로(107) 주위의 영역 내의 활성화를 감소시키고 설치를 돕는다.
- [0012] 예시적인 핵 반응로 시스템(100)은 압력 용기(160)를 포함하고, 압력 용기는 내측부 벽(133) 및 압력 용기(160)의 내측부 벽(133) 내에 위치한 핵 반응로 코어(101)를 포함한다. 핵 반응로 코어(101)는 복수의 연료 요소(104A 내지 104N) 및 적어도 하나의 감속제 요소(103)를 포함한다. 핵 반응로 시스템(100)은, 복수의 연료 요소(104A 내지 104N) 및 적어도 하나의 감속제 요소(103)를 측방향에서 둘러싸는 복수의 반사체 블록(141A 내지 141N)을 포함하는 압력 용기 내에 위치되는 반사체(140)를 포함한다. 핵 반응로 시스템(100)은 반사체 블록(141A 내지 141N)을 둘러싸기 위해서 압력 용기(160)의 내측부 벽(133)에 위치되는 용기-내 차폐부(105)를 포함한다. 용기-내 차폐부(105)는 2개 이상의 중성자 흡수 재료로 형성된다. 2개 이상의 중성자 흡수 재료는 거의 검은색의 중성자 흡수 재료 및 회색의 중성자 흡수 재료를 포함한다.
- [0013] 예시적인 방법은 용기-내 차폐부(105)를 형성하기 위해서 2개 이상의 중성자 흡수 재료를 선택하는 단계를 포함한다(블록(610)). 2개 이상의 중성자 흡수 재료는 거의 검은색의 중성자 흡수 재료 및 회색의 중성자 흡수 재료를 포함한다. 방법은 세라믹 흡수 분말을 제조하기 위해서 거의 검은색의 중성자 흡수 재료를 공정 소결(eutectic sintering)하는 단계를 더 포함한다(블록(615)). 방법은 회색의 중성자 흡수 재료와 세라믹 흡수 분말을 동역학적으로 혼합하여 용기-내 차폐부 혼합물을 생성하는 단계를 더 포함한다(블록(620)). 방법은 용기-내 차폐부 혼합물을 용기-내 차폐부(105)로 냉간 프레스 소결하는 단계를 더 포함한다(블록(625)).
- [0014] 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

- [0015] 도면은, 단지 예로서, 비제한적으로, 하나 이상의 구현예를 도시한다. 도면에서, 유사한 참조 번호는 동일하거나 유사한 요소를 지칭한다.
- 도 1a는 핵 반응로 시스템의 성능을 향상시키기 위한 용기-내 차폐부를 포함하는 압력 용기의 절취도를 도시하

는 등각도이다.

도 1b는 핵 반응로 시스템의 핵 반응로 코어의 횡단면도이다.

도 1c는 내측부 벽 상에서 용기-내 차폐부 라이너를 갖추고 복수의 제어 드럼을 포함하는 압력 용기를 구현하는 핵 반응로 시스템을 도시한다.

도 1d는 내측부 벽 상에서 용기-내 차폐부 라이너를 갖추고 복수의 제어 붐을 포함하는 압력 용기를 구현하는 핵 반응로 시스템을 도시한다.

도 2는 핵 반응로의 11개의 상이한 구현예에서 반사체 및 용기-내 차폐부에 대한 전체적인 차폐 두께 그래프이다.

도 3은 2가지 상이한 유형의 핵 반응로 코어의 예시적인 감손 그래프이다.

도 4는 핵 반응로 시스템에 대한 용기-내 차폐부 재료 최적화 차트이다.

도 5는 용기-내 차폐부 재료 선택 방법을 도시하는 흐름도이다.

도 6은, 용기-내 차폐부 설계 및 설치를 위한 기술뿐만 아니라, 용기-내 차폐부 제조를 포함하는 용기-내 차폐 방법을 도시하는 흐름도이다.

부품 목록

- 100 핵 반응로 시스템
- 101 핵 반응로 코어
- 101A 및 101B 핵 반응로 코어
- 102A 내지 102N 절연체 요소
- 103A 내지 103N 감속제 요소
- 104A 내지 104N 연료 요소
- 105 반사체
- 105 용기-내 차폐부
- 107 핵 반응로
- 107A 내지 107K 핵 반응로 코어
- 112 절연체 요소 어레이
- 113 감속제 요소 어레이
- 114 핵 연료 타일 어레이
- 115A 내지 115N 제어 드럼
- 116 반사체 재료
- 117 흡수제 재료
- 118A 내지 118N 제어 붐
- 131A 내지 131N 용기-내 차폐부 타일
- 132 용기-내 차폐부 라이너
- 133 내측부 벽
- 140 반사체
- 141A 내지 141N 반사체 블록
- 160 압력 용기

- 200 전체 차폐 두께 그래프
- 205A 내지 205K 용기-내 차폐부로서의 전체 차폐 백분율
- 206A 내지 206K 총 두께
- 210A 내지 210K 용기-내 차폐부 두께
- 211A 내지 211K 반사체 두께
- 300 핵 반응로 코어의 감손 그래프
- 301A 내지 301B 핵 반응로 코어 아키텍처
- 305 수명
- 305A 내지 305B 수명
- 310 K-유효
- 400 용기-내 차폐부 재료 최적화 차트
- 401 짧은 수명
- 402 중간 수명
- 403 긴 수명
- 405 비용
- 406 압력 용기 내 고속 중성자 플루언스의 감소
- 411 짧은 파레토 프론트(Short Pareto Front)
- 412 중간 파레토 프론트
- 413 긴 파레토 프론트
- 500 용기-내 차폐부 재료 선택 방법
- 600 용기-내 차폐 방법
- 601 용기-내 차폐부 제조
- 602 용기-내 차폐부 설계 및 설치

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0016] 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.
- [0017] 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.
- [0018] 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.
- [0019] 임의의 도면에 도시된 바와 같이, 핵 반응로 코어(101), 핵 반응로(107), 연관된 구성요소, 및/또는 용기-내 차폐부(105)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.

[0020] 도 1a는 핵 반응로 시스템(100)의 성능을 향상시키기 위한 용기-내 차폐부(105)를 포함하는 압력 용기(160)의 절취도를 도시하는 등각도이다. 도 1a에 도시된 바와 같이, 핵 반응로 시스템(100)은 핵 반응로(107)를 포함한다. 핵 반응로(107)는, 내측부 벽(133)을 포함하는 압력 용기(160)를 포함한다.

[0021] 도 1b는 핵 반응로 시스템(100)의 핵 반응로 코어(101)의 횡단면도이다. 핵 반응로 시스템(100)은 핵 반응로 코어(101)를 포함하고, 핵 반응로 코어(101)는 압력 용기(160)의 내측부 벽(133) 내에 위치된다. 일반적으로, 핵 반응로 코어(101)는 복수의 연료 요소(104A 내지 104N) 및 적어도 하나의 감속제 요소(103)를 포함한다. 도 1b의 구현예에서, 복수의 연료 요소(104A 내지 104N)는 핵 연료 타일(104A 내지 104N)의 핵 연료 타일 에레이(114)로서 배열되고, 핵 반응로 코어(101)는 복수의 감속제 요소(103A 내지 103N)를 포함한다. 제2 예에서, 핵 반응로 코어(101)는, 전체가 본원에서 참조로 포함되는, 2020년 5월 5일에 미국 워싱턴 시애틀에 소재하는 Ultra Safe Nuclear Corporation에게 허여된, "Passive Reactivity Control of Nuclear Thermal Propulsion Reactors"라는 명칭의 미국 특허 제10,643,754호의 도 3 및 도 4 그리고 연관된 문장에서 설명된 핵 반응로 코어(110)와 유사하게 구현될 수 있다. 제2 예에서, 연료 요소(104A 내지 104N)는 미국 특허 제10,643,754호의 도 3 및 도 4 그리고 연관된 문장에서 설명된 것과 유사한 연료 요소(310A 내지 310N)와 유사하게 구현될 수 있고, 감속제 요소(103A 내지 103N)는 그러한 것에서 설명된 타이 관(320A 내지 320N)과 유사하게 구현될 수 있다.

[0022] 제3 예에서, 핵 반응로 코어(101)는, 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 2c 및 연관된 문장에서 설명된 핵 반응로 코어(101)와 유사하게 구현될 수 있다. 제3 예에서, 연료 요소(104A 내지 104N)는 미국 특허 공개 제2020/0027587호의 도 2c 및 연관된 문장에서 설명된 연료 요소(102A 내지 102N)와 유사하게 구현될 수 있고, 감속제 요소(103A 내지 103N)는 그러한 것에서 설명된 복합 감속제 블록과 유사하게 구현될 수 있다.

[0023] 도 1b에 더 도시된 바와 같이, 핵 반응로(107)는 압력 용기(160) 내측에 위치한 반사체(140)(예를 들어, 외부 반사체 지역)를 포함한다. 반사체(140)는, 복수의 연료 요소(104A 내지 104N) 및 적어도 하나의 감속제 요소(103)를 측방향에서 둘러싸는 복수의 반사체 블록(141A 내지 141N)을 포함한다. 도 1a에 도시된 바와 같이, 핵 반응로(107)는 반사체 블록(141A 내지 141N)을 둘러싸기 위해서 압력 용기(160)의 내측부 벽(133)에 위치되는 용기-내 차폐부(105)를 포함한다.

[0024] 용기-내 차폐부(105)는 2개 이상의 중성자 흡수 재료로 형성된다. 2개 이상의 중성자 흡수 재료는 거의 검은색의 중성자 흡수 재료 및 회색의 중성자 흡수 재료를 포함한다. 거의 검은색의 중성자 흡수 재료는 복합 세라믹 재료를 포함한다. 회색의 중성자 흡수 재료는 중금속 재료를 포함한다. 복합 세라믹 재료 및 중금속 재료는 용기-내 차폐부를 형성한다. 복합 세라믹 재료는 붕소 탄화물(B₄C), 하프늄 탄화물(HfC), 또는 가돌리늄 산화물(Gd₂O₃)을 포함한다. 복합 세라믹 재료는 알루미늄 산화물(Al₂O₃) 또는 규소 탄화물(SiC)을 더 포함할 수 있다. 중금속 재료는 텅스텐(W), 철(Fe), 니켈(Ni), 또는 구리(Cu)를 포함한다.

[0025] 보다 구체적으로, 복합 세라믹 재료는: 붕소-10 탄화물(¹⁰B₄C), 50 중량%의 붕소-10 탄화물의 붕소-10 탄화물 및 알루미늄 산화물 복합체(¹⁰B₄C-Al₂O₃), 50 중량%의 붕소-10 탄화물의 붕소-10 탄화물 및 규소 탄화물 복합체(¹⁰B₄C-SiC), 또는 5 중량%의 붕소-10의 붕소화 스테인리스 강 합금을 포함할 수 있다. 중금속 재료는 90 중량% 이상의 텅스텐 함량을 갖는 원자화된(atomized) 텅스텐 중금속을 포함한다. 복합 세라믹 재료는, 평균 입자 직경이 약 80 나노미터 이상이고 약 100 마이크로 이하인 복수의 복합 세라믹 입자를 포함할 수 있다. 복수의 복합 세라믹 입자가 중금속 재료의 중금속 매트릭스 내에 매립되어 용기-내 차폐부(105)를 형성할 수 있다.

[0026] 용기-내 차폐부(105)는, 내측부 벽(133)을 라이닝하기에 적합한 형상, 예를 들어 관 또는 파이프 형상인 용기-

내 차폐부 라이너(132)로서 일체로(예를 들어, 하나의 구성요소, 부품, 또는 단편으로) 형성될 수 있다. 대안적으로, 용기-내 차폐부(105)는 분리되어 형성되고 이어서 함께 연결되는 몇 개의 구성요소로 형성된다. 따라서, 도 1b에 도시된 바와 같이, 용기-내 차폐부(107)는, 함께 결합되어 용기-내 차폐부 라이너(132)를 형성하는, 복수의 용기-내 차폐부 타일(131A 내지 131N)로서 형성된다. 복수의 용기-내 차폐부 타일(131A 내지 131N)이 내측부 벽(133)에 배치되어(예를 들어, 부착되어) 용기-내 차폐부(105)를 형성한다.

[0027] 용기-내 차폐부 타일(131A 내지 131N)은 팽창에 대해서 내성을 가지고 중성자 스트리밍 경로를 감소시킨다. 용기-내 차폐부 타일(131A 내지 131N)은, 특히 핵 반응로 시스템(100)을 위해서 설계될 수 있는 조성 및 기하형태를 가지며, 예를 들어, 복수의 용기-내 차폐부 타일(131A 내지 131N)은 인터록킹 기하형태 패턴을 갖는 기본 형상을 포함한다. 도 1a에서, 용기-내 차폐부(105)는 기본 형상을 갖는 용기-내 차폐부 타일(131A 내지 131N)로 구성된다. 복수의 용기-내 차폐부 타일(131A 내지 131N)의 전부 또는 하위세트가, 내측부 벽(133)의 곡률에 매칭되는 곡선형 다면체 형상 또는 그 절두형 부분일 수 있다. 용기-내 차폐부 타일(131A 내지 131N)은 또한 내측부 벽(133)의 표면(들)의 윤곽(들)(예를 들어, 곡률)에 일치되게 매칭되도록 성형된다. 도 1b에서, 용기-내 차폐부 타일(131A 내지 131N)은 3-차원적인 공간 내의 곡선형 육각형 프리즘 또는 2-차원적인 공간 내의 곡선형 육각형으로서 성형된다. 용기-내 차폐부 타일(131A 내지 131N)은 3-차원적인 공간 내의 다른 다면체 형상(예를 들어, 삼각형 프리즘 또는 입방체) 또는 2-차원적인 공간 내의 원형, 난형, 정사각형, 직사각형, 삼각형, 또는 다른 다각형 형상일 수 있다.

[0028] 내측부 벽(133)이 연속적인 표면, 예를 들어 둥근, 비구면, 또는 구면 표면으로 형성되어, 쌍곡면, 원뿔, 타원체, 포물면 등과 같은 4차 표면을 형성하기 위한 실린더 또는 다른 원뿔형 표면을 형성할 수 있다. 대안적으로 또는 부가적으로, 내측부 벽(133)은 (예를 들어, 입방체 또는 다른 다면체를 형성하기 위한) 복수의 불연속적인 표면으로 형성될 수 있다. 본원에서 사용된 바와 같이, "불연속적"은, 집합체 내의 표면들이 내측부 벽(133)의 연속적인 둥근(예를 들어, 원형 또는 난형) 둘레를 형성하지 않는다는 것을 의미한다. 도 1a에서, 도시된 내측부 벽(133)의 일부는 둥근 연속 표면이다. 복수의 용기-내 차폐부 타일(131A 내지 131N)의 인터록킹 기하형태 패턴이 결합되어 내측부 벽(133)의 연속적인 또는 불연속적인 표면을 덮고 용기-내 차폐부 라이너(132)를 함께 형성한다.

[0029] 이제 도 1b를 참조하면, 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 핵 분열 핵으로부터의 하나의 중성자는 다른 핵의 핵 분열을 초래한다 - 연쇄 반응은 반드시 제어되어야 한다. 제어된 핵 분열을 유지함으로써, 핵 반응로 시스템(100)은 열 에너지를 생산한다. 예시적인 구현예에서, 핵 반응로 시스템(100)은 가스-냉각형 고온 핵 반응로(107)로서 구현된다. 그러나, 용기-내 차폐부(105)를 갖춘 핵 반응로 시스템(100)은, 대형 유틸리티 규모의 핵 반응로, 히트 파이프 핵 반응로, 용융-염-냉각형 핵 반응로, 염-내-연료 핵 반응로, 또는 나트륨-냉각형 고속 핵 반응로에서 질량 및 크기를 줄이는 것 그리고 질량당 파워를 개선하는 것에 의해서, 획기적인 성능을 달성할 수 있게 한다. 예를 들어, 용기-내 차폐부(105)는 핵 반응로 시스템(100), 예를 들어 가스-냉각형 그라파이트-감속 핵 반응로, 가스-냉각형 그라파이트-감속 핵 반응로보다 더 많은 열 중성자 플럭스를 갖는 불화물 염-냉각형 고온 핵 반응로, 또는 가스-냉각형 그라파이트-감속 핵 반응로보다 더 고속의 중성자 플럭스를 갖는 나트륨 고속 핵 반응로에 포함될 수 있다.

[0030] 도시된 예에서, 핵 반응로 코어(101)를 갖는 핵 반응로 시스템(100)이 핵 열 추진(NTP) 시스템과 같은 우주 환경에서 이용된다. 통합된 용기-내 차폐부(105)가 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. 예를 들어, 용기-내 차폐부(105)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 원

격 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. 용기-내 차폐부(105)가 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. 예를 들어, 핵 반응로 시스템(100)은 단기 우주 작업, 달 착륙선을 위한 작은 상용 핵 분열 파워 시스템, 또는 현장 자원 활용과 같은 큰-파워 우주선 또는 대규모 표면 작업을 위한 상용 핵 분열 파워 시스템일 수 있다. 다른 예에서, 용기-내 차폐부(105)를 갖춘 핵 반응로 시스템(100)이 행성 표면에서의 전기 파워 생산을 위해서 우주 반응로에서 이용된다.

[0033] 핵 반응로 시스템(100)은 또한, 분열 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, 핵 반응로 시스템(100)은 파워 변환 시스템(예를 들어, Brayton)을 통해서 작업 유체(예를 들어, He, HeXe, Ne, CO₂)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, 감속제 요소(103A 내지 103N)는, 작업 유체가 연료 요소(104A 내지 104N)를 통과하기 전에 반응로 유입구 작업 유체(예를 들어, 환열기로부터의 유동)를 통해서 냉각될 수 있다.

[0034] 핵 연료 타일(104A 내지 104N)로서 도시된 연료 요소(104A 내지 104N)의 각각이 핵 연료를 포함한다. 핵 연료는, 고온 매트릭스 내에 매립된 3구조-등방성(TRISO) 연료 입자와 같은 코팅된 연료 입자로 구성된 연료 콤팩트를 포함한다. 일부 구현예에서, 핵 연료는 고온 매트릭스 내에 매립된 이중구조-등방성(BISO) 연료 입자로 구성된 연료 콤팩트를 포함한다. 고온 매트릭스는 규소 탄화물, 지르코늄 탄화물, 티타늄 탄화물, 니오븀 탄화물, 텅스텐, 몰리브덴 또는 이들의 조합을 포함한다. TRISO 연료 입자의 각각은 다공성 탄소 버퍼 층에 의해서 둘러싸인 연료 커널, 내부 열분해 탄소 층, 이원계 탄화물 층(예를 들어, SiC의 세라믹 층 또는 내화 금속 탄화물 층), 및 외부 열분해 탄소 층을 포함할 수 있다. TRISO 연료 입자의 내화 금속 탄화물 층은 티타늄 탄화물(TiC), 지르코늄 탄화물(ZrC), 니오븀 탄화물(NbC), 탄탈륨 탄화물, 하프늄 탄화물, ZrC-ZrB₂ 복합체, ZrC-ZrB₂-SiC 복합체, 또는 이들의 조합 중 적어도 하나를 포함할 수 있다. 고온 매트릭스는 TRISO 연료 입자의 이원계 탄화물 층과 동일한 재료로 형성될 수 있다.

[0035] 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 11일자로 허여된 미국 특허 제9,620,248호 및 2019년 11월 12일자로 허여된 미국 특허 제10,475,543호; 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 제10,573,416호. 이러한 Ultra Safe Nuclear Corporation 특허들에서 설명된 바와 같이, 핵 연료는, 원통형 형상의 핵 연료 콤팩트를 생성하기 위해서 규소 탄화물 매트릭스 내에 매립된 TRISO 연료 입자로 구성된 원통형 연료 콤팩트 또는 펠릿을 포함할 수 있다.

[0036] 도시된 바와 같이, 핵 반응로 코어(101)는 절연체 요소(102A 내지 102N)의 절연체 요소 어레이(112) 및 감속제 요소(103A 내지 103N)의 감속제 요소 어레이(113)를 포함한다. 절연체 요소(102A 내지 102N)는 열 전도도가 작은 고온 열 절연체 재료로 형성된다. 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. 감속제 요소(103A 내지 103N)는 저온 고체-상 감속제로 형성된다. 저온 고체-상 감속제는 MgH_x, YH_x, ZrH_x, CaH_x, ZrO_x, CaO_x, BeO_x, BeC_x, Be, 부화된(enriched) 붕소 탄화물, ¹¹B₄C, CeH_x, LiH_x, 또는 이들의 조합을 포함한다.

- [0037] 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), 감속제 요소(103A 내지 103N)의 감속제 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), 감속제 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 반사체 블록(141A 내지 141N)으로 형성된 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, Al₂O₃, 등) 및 제2 외부 표면 상의 흡수제 재료(117) 모두로 형성될 수 있다.
- [0038] 반사체 재료(116) 및 흡수제 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. 흡수제 재료(117)는 흡수제 판 또는 흡수제 코팅을 포함할 수 있다. 흡수제 판 또는 흡수제 코팅이 반사체 기재 상에 배치되어, 제어 드럼(115A 내지 115N)의 각각의 원통형 형상을 형성한다. 예를 들어, 흡수제 판 또는 흡수제 코팅이 반사체 재료로 형성된 반사체 기재를 덮어, 제어 드럼(115A 내지 115N)을 형성한다.
- [0039] 도시된 원통형-형상의 제어 드럼(115A 내지 115N)의 회전은, 핵 반응로 코어(101)에 대한 제어 드럼(115A 내지 115N)의 흡수제 재료(117)(예를 들어, 붕소 탄화물(B₄C))의 근접도를 변경하여, 중성자 반사의 양을 변경한다. 반사체 재료(116)가 핵 반응로 코어(101)를 향해서 내측으로 대면되고 흡수제 재료(117)가 외측으로 대면될 때, 중성자가 핵 반응로 코어(101) 내로 역으로 산란(반사)되어 더 많은 핵 분열을 유발하고 핵 반응로 코어(101)의 반응성을 증가시킨다. 흡수제 재료(117)가 핵 반응로 코어(101)를 향해서 내측으로 대면되고 반사체 재료(116)가 외측으로 대면될 때, 중성자가 흡수되고 추가적인 핵 분열은 중단되며, 그에 따라 핵 반응로 코어(101)의 반응성을 감소시킨다. 육지 적용예에서, 핵 반응로 코어(101)는, 자체 핵 분열이 없이 많은 중성자를 흡수할 수 있는 붕소, 은, 인듐, 및 카드뮴과 같은 화학적 원소로 구성된 제어 봉(118A 내지 118N)(도 1D 참조)을 포함할 수 있다.
- [0040] 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 감속제로 형성될 수 있다. 반사체(140)는 육각형 또는 부분적으로 육각형으로 성형된 필터 요소를 포함할 수 있고, 중성자 감속제(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), 감속제 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 하위세트를 둘러쌀 수 있다.
- [0041] 압력 용기(160)는 알루미늄 합금, 탄소-복합체, 티타늄 합금, 내방사성 SiC 복합체, 니켈계 합금(예를 들어, Inconel™ 또는 Haynes™), 또는 이들의 조합으로 형성될 수 있다. 압력 용기(160) 및 핵 반응로 시스템(100)은, 감속제 냉각제 통로(121A 내지 121N)를 통해서 유동하는 감속제 냉각제; 및 연료 냉각제 통로(141A 내지 141N)를 통해서 유동하는 추진체(예를 들어, 수소 가스 또는 액체)와 같은 별도의 핵 연료 냉각제를 전달하는 실린더, 파이핑, 및 저장 탱크를 포함하는, 다른 구성요소로 구성될 수 있다. 감속제 냉각제 및 핵 연료 냉각제는 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, CO₂와 같은 작업 유체를 순환시킨다.
- [0042] 도 1b의 예에서, 핵 반응로 시스템(100)은 유리하게 감속제 냉각제가 감속제 냉각제 통로(121A 내지 121N)를 통

해서 유동할 수 있게 하고 별도의 핵 연료 냉각제(예를 들어, 수소 가스와 같은 추진체)가 연료 냉각제 통로(141A 내지 141N)를 통해서 유동할 수 있게 한다. 감속제 냉각제 통로(121A 내지 121N)는, 감속제 냉각제가 예를 들어 전용 감속제 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 냉각제가 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.

[0043] 대안적인 구현예에서, 감속제 요소(103A 내지 103N)와 핵 연료 타일(104A 내지 104N) 사이에서 공유되는 냉각제는 감속제 냉각제 통로(121A 내지 121N) 및 연료 냉각제 통로(141A 내지 141N) 모두를 통해서 유동될 수 있다. 대안적인 구현예에서, 복수의 연료 요소(104A 내지 104N)를 통해서 유동하는 냉각제는 헬륨, 리튬 불화물(LiF)로 형성된 FLiBe 용융 염, 베릴륨 불화물(BeF₂), 나트륨, He, HeXe, CO₂, 네온, 또는 HeN을 포함할 수 있다. 공유 냉각제가 핵 연료 타일(104A 내지 104N) 내에서 가열되기 전에, 공유 냉각제는 감속제 냉각제 통로(121A 내지 121N)를 통해서 유동한다. 이는 감속제 요소(103A 내지 103N)를 저온에서 유지한다.

[0044] 도 1c는, 내측부 벽(133) 상에서 용기-내 차폐부 라이너(132)를 갖추고 제어 드럼(115A 내지 115N)을 포함하는 압력 용기(160)를 구현하는 핵 반응로 시스템(100)을 도시한다. 도 1d는, 내측부 벽(133) 상에서 용기-내 차폐부 라이너(132)를 갖추고 제어 봉(118A 내지 118N)을 포함하는 압력 용기(160)를 구현하는 핵 반응로 시스템(100)을 도시한다. 제어 봉(118A 내지 118N)은, 핵 반응로 코어(101)의 반응성을 변경함으로써 동작 중에 중성자 개체수 및 핵 반응로 파워 레벨을 조절하기 위해서, 핵 반응로 코어(101)의 영역 내에 배치될 수 있다. 제어 봉(118A 내지 118N)은 압력 용기(160)의 상단부로부터 돌출되고, 핵 반응로(107)의 길이로 삽입될 수 있으나, 또한 핵 반응로(107)로부터 회수될 수 있다. 제어 드럼(115A 내지 115N)은, 보다 용이하게 운반 및 전개될 수 있는, 핵 반응로(107)를 위한 수평의 축방향 대칭 구성을 가능하게 한다. 제어 드럼(115A 내지 115N)은 또한, 반사체(140) 내로 통합될 수 있기 때문에, 핵 반응로 코어(101) 내의 가용 부피를 최대화하는 한편, 제어 봉(118A 내지 118N)은 회수될 때 핵 반응로 코어(101) 내에서 비-연료 공급 공간(un-fueled void)을 남긴다.

[0045] 반사체(140)는 핵 반응로 코어(101)를 둘러싸도록 일체로 형성된 본체(예를 들어, 관 또는 파이프)일 수 있거나, 핵 반응로 코어(101)를 둘러싸는 반사체 블록(141A 내지 141N)으로 제조된 반사체 지역과 같이 몇 개의 구성요소 또는 부품일 수 있다. 반사체(140)는 핵 반응로 코어(101)를 빠져 나오려 하는 중성자를 탄력적으로 산란시키고, 이러한 중성자를 핵 반응로 코어(101)를 향해서 다시 재지향시켜 보다 많은 핵 분열 이벤트를 생성하고 그에 따라 더 많은 에너지를 생성한다. 반사체(140)는 또한 이차적인 목적을 갖는다: 중성자를 핵 반응로 코어(101)를 향해서 다시 재지향시킴으로써, 반사체(140)는 압력 용기(160)에 충돌하고 영역을 넘어서는 중성자의 양을 필수적으로 감소시킨다. 반사체(140)는 고속 중성자 플루언스 또는 고속 중성자 플럭스, 모든 자유 고속 중성자가 시간당 이동하는 총 길이, 및 핵 반응로 코어(101) 외측의 부피를 감소시킨다. 전자 산란 및 고속 중성자 플루언스 감소 모두에서의 반사체(140)의 효율은 반사체(140)의 두께를 증가시킴으로써 대수적으로 개선된다.

[0046] 통상적인 핵 반응로에서, 반사체(140)의 두께는, 반사체(140) 외측의 고속 중성자 플루언스가 수용 가능하게 낮아질 때까지, 증가되고: 이러한 두께는 종종 중성자를 핵 반응로 코어(101)를 향해서 다시 효율적으로 지향시키는데 필요한 두께를 실질적으로 넘어선다. 대조적으로, 본원에서 설명된 핵 반응로 시스템(100)은 용기-내 차폐부(105)를 부가적으로 포함하고, 이러한 용기-내 차폐부는 중성자 흡수 물질(neutron poison)로서 거동할 수 있고, 자유 중성자를 핵 반응로 코어(101)를 향해서 역으로 반사하는 대신, 자유 중성자를 흡수하도록 설계된다. 용기-내 차폐부(105)는 자유 중성자를 흡수하여 중성자 흡수 물질을 통한 고속 중성자 플루언스를 중단시킬 수 있다. 용기-내 차폐부(105)는, 반사체(140)보다 상당히 얇지만, 그럼에도 불구하고 반사체(140)와 동일한 양만큼 영역 내에서 고속 중성자 플루언스를 감소시킬 수 있다. 용기-내 차폐부(105)가 중성자 흡수 효과를 가질 수 있지만, 용기-내 차폐부(105)는 순수 중성자 흡수 물질로서 거동하지 않는데, 이는 중성자 흡수 물질이 용기-내 차폐부(105)를 형성하기 위해서 감속제 내에 함성되기 때문이다. 핵 반응로(107)의 반사체(140)와 압력 용기(160) 사이의 용기-내 차폐부(105)로서 큰 중성자 흡수 횡단면을 갖는 재료들의 조합을 이용함으로써, 고속 중성자 플루언스가 수용 가능한 레벨까지 감소될 수 있다.

[0047] 압력 용기(160)는, 중성자를 핵 반응로 코어(101)로 다시 재지향시키기 위한 일차적인 목적을 위해서, 그리고 이차적으로 압력 용기(160)에서 그리고 이를 넘어서 고속 중성자 플루언스를 수용 가능 레벨까지 감소시키기 위해서, 내부에 배치된 반사체(140)를 포함한다. 이어서, 압력 용기(160)는 이어서, 압력 용기(160)에서 그리고

이를 넘어서 고속 중성자 플루언스를 수용 가능 레벨로 감소시키기 위한 일차적인 목적을 가지고, 용기-내 차폐부(105)로 라이닝된다. 용기-내 차폐부(105)는 압력 용기(160)와 반사체(140) 사이에 배치된다. 용기-내 차폐부(105) 및 반사체(140)는 함께, 압력 용기(160)에서 그리고 이를 넘어서, 고속 중성자 플루언스를 수용 가능 레벨까지 감소시킬 수 있는 한편, 용기-내 차폐부(105)와 반사체(140)의 조합된 두께는, 고속 중성자 플루언스를 동일한 수용 가능 또는 등가 레벨까지 감소시키는 페어링된 용기-내 차폐부(105)가 없는 등가 반사체(140)보다 전체적으로 얇다. 전체적으로, 이는 조합된 반사체(140) 및 용기-내 차폐부(105)가 반사체(140) 단독 보다 더 얇아 질 수 있게 하고, 부피 및 질량이 감소된 더 작은 압력 용기(160) 및 핵 반응로(107)를 가능하게 한다.

[0048] 고속 중성자 플루언스로 인해서, (크거나 작은) 임의의 크기의 핵 반응로 시스템(100)이 용기-내 차폐부(105)로부터 이점을 취할 수 있다. 대형 핵 반응로 시스템(100)에서, 압력 용기(160)에 대한 고속 중성자 플루언스는 압력 용기(160)로부터의 활성화 핵 반응로 코어(101)의 거리에 의해서 제한된다. 부피-제한되는 소형 핵 반응로 시스템(100)에서, 용기-내 차폐부(105)의 사용이 매우 유리할 수 있다. 용기-내 차폐부(105)는 핵 반응로 시스템(100) 주위의 방사선 필드를 감소시키고, 이는 다시 핵 반응로(107) 외측의(예를 들어, 주위의) 영역 내의 활성화를 감소시키고, 풋프린트를 감소시키며, 용이한 설치를 돕는다.

[0049] 핵 반응로 시스템(100)의 동작 중에, 압력 용기(160) 내에 배치된 재료는 활성화 생성물이 되어, 자유 중성자에 의해서 방사성이 된다. 핵 반응로 시스템(100)은 핵 반응로 코어(101) 내의 활성화 생성물의 내부 밀도 및 핵 반응로 코어(101) 외측의 활성화 생성물의 외부 밀도를 포함한다. 핵 반응로 코어(101)의 동작 중에, 활성화 생성물의 외부 밀도는 활성화 생성물의 내부 밀도보다 낮다. 이는, 반사체(140)의 목적이 자유 중성자를 핵 반응로 코어(101) 내로 다시 재지향시켜 코어 활성화를 증가시키는 것이기 때문이다. 용기-내 차폐부(105)는, 재료가 자유 중성자를 흡수하면서도 최소적으로 방사성이 되는 이유로 선택되는 재료로 제조되고: 이는, 핵 반응로 코어(101) 내의 활성화에 비해서, 핵 반응로 코어(101) 외측의 활성화를 더 감소시킨다.

[0050] 용기-내 차폐부(105)는 2개 이상의 중성자 흡수 재료로 형성되고, 그 중 적어도 하나는 거의 검은색의 중성자 흡수 재료이고, 다른 하나는 회색의 중성자 흡수 재료이다. 거의 검은색의 중성자 흡수 재료는, 유사한 양의 회색의 중성자 흡수 재료보다, 자유 중성자 흡수 및 중성자 플루언스 감소에 있어서 더 효율적이다. 거의 검은색의 중성자 흡수 재료는 복합 세라믹 재료, 즉 복합 고온 중성자 흡수 세라믹이다. 예를 들어, 복합 세라믹 재료는, 방사선 유도 팽창을 최소화하기 위해서, Al_2O_3 및 SiC와 같은 내방사성 재료를 갖는 B_4C , HfC, 및 Gd_2O_3 와 같은 중성자 흡수 세라믹의 혼합물을 포함한다. 복합 세라믹 재료를 형성하기 위한 Al_2O_3 및 SiC와 같은 내방사성 재료의 첨가는 거의 검은색의 중성자 흡수 재료의 온도 및 방사선 내구성을 증가시킨다.

[0051] 회색의 중성자 흡수 재료는 증금속을 포함한다. 거의 검은색의 중성자 재료 및 회색의 중성자 흡수 재료는 용기-내 차폐부(105)를 함께 형성한다. 용기-내 차폐부(105)는 차폐를 위해서 특별히 엔지니어링된 복합 재료의 진보된 제조를 통해서 제조된다. 이는, 아마도 약간의 정도의 동위원소 부화(isotopic enrichment)와 함께, 일반적인 분류의 엔지니어링 합금 및 구조적 세라믹의 선택을 기초로 하는 현재의 차폐부 선택의 패러다임과 대비된다. 용기-내 차폐부(105)는 주로 복합 세라믹으로 제조되고, 그에 따라 또한 그러한 예에서 복합 세라믹 차폐부로서 설명될 수 있다.

[0052] 도 2는 핵 반응로(107A 내지 107K)의 11개의 상이한 구현예에서 반사체(140) 및 용기-내 차폐부(105)에 대한 전체적인 차폐 두께 그래프(200)이다. 전체 차폐 그래프(200)는, 핵 반응로(107)의 총 두께(206A 내지 206K)의 감소가: (a) 용기-내 차폐부 두께(210A 내지 210K)의 증가; 및 (b) 반사체 두께(211A 내지 211K)의 감소에 의해서 달성된다는 것을 보여준다. 다시 말해서, 용기-내 차폐부(205A 내지 205K)로서 전체적인 차폐의 백분율을 증가시키는 것은 핵 반응로(107)의 총 두께(206A 내지 206K)를 직접적으로 감소시킨다. 따라서, 용기-내 차폐부(105) 기술은, 핵을 더 가볍고 더 콤팩트하게 함으로써, 핵 반응로 시스템(100)의 성능을 개선할 수 있다.

[0053] 전체 차폐 두께 그래프(200)에서, 백색 막대는 용기-내 차폐부(105)에 의해서 부가된 용기-내 차폐부 두께(210A 내지 210K)를 나타내는 한편, 검은색 막대는 반사체(140)에 의해서 부가된 반사체 두께(211A 내지 211K)를 나타낸다. 전체 두께(206A 내지 206K)는 용기-내 차폐부 두께(210A 내지 210K)와 반사체 두께(211A 내지 211K)의 합이다. 도시된 바와 같이, 핵 반응로(107A)의 제1 구현예에서, 핵 반응로(107A)는 30 센티미터(cm)의 총 두께(206A)를 포함하고, 여기에서 반사체 두께(211A)는 30 cm이고 용기-내 차폐부 두께(210K)는 0 cm이다. 핵 반응로(107K)의 제11 구현예에서, 핵 반응로(107K)는 10 센티미터(cm)의 총 두께(206K)를 포함하고, 여기에서 반사체 두께(211K)는 0 cm이고 용기-내 차폐부 두께(210K)는 10 cm이다.

[0054] 전체 차폐 두께 그래프(200)의 총 두께(206A 내지 206K)를 기초로, 용기-내 차폐부(105)는 반사체(140)의 반사

체 확산 길이보다 3배 더 짧은 차폐부 확산 길이를 갖는다. 확산 길이는, 부분적으로, 재료의 확산 계수뿐만 아니라 해당 재료의 거시적 흡수 횡단면의 인자이다. 반사체(140)와 용기-내 차폐부(105) 사이의 이러한 3의 확산 길이차는 용기-내 차폐부(105) 및 반사체(140)를 형성하는 재료에서의 차이를 기초로 한다. 확산 길이차는, 예를 들어, 선택된 재료들, 용기-내 차폐부 두께(210A 내지 210K), 반사체 두께(211A 내지 211K)의 차이, 및 핵 반응로 코어(101)의 전체적인 기하형태를 기초로 달라질 수 있다.

[0055] 도 2에서, 총 두께(206A 내지 206K)는 전체적으로 동일한 양의 중성자 플루언스 감소를 나타낸다. 도시된 바와 같이, 용기-내 차폐부(105)에 대한 10 cm의 용기-내 차폐부 두께(210K)는 반사체(140)에 대한 30 cm의 반사체 두께(211A)와 동일한 중성자 플루언스 감소를 초래한다. 유리하게, 용기-내 차폐부(105)에 대한 10 cm의 용기-내 차폐부 두께(210K)는 20 cm 더 작은 반경의 압력 용기(160)를 달성하고, 이는 총 두께(206K)의 66% 감소에 해당한다. 또한, 10 cm의 용기-내 차폐부 두께(210K)가 등가의 30 cm의 반사체 두께(211A)보다 가벼운 중량을 가질 수 있음에 따라, 핵 반응로(107K)는 더 가벼울 수 있고, 용기-내 차폐부(105)는 압력 용기(160)에서 그리고 이를 넘어서 고속 중성자 플루언스를 동등하게 감소시킨다.

[0056] 핵 반응로(107B)의 제2 구현예는 1 cm의 용기-내 차폐부 두께(210B)를 가지며, 이는, 용기-내 차폐부(105)가 존재하지 않는 핵 반응로(107A)의 제1 구현예에 비해서, 2 cm만큼 총 두께(206B)를 감소시킨다. 용기-내 차폐부 두께(210)의 1 cm마다, 3 cm의 반사체 두께(211)의 필요성을 감소시킨다. 전체 차폐 두께 그래프(200)를 기초로, 최적의 균형을 만족시킬 수 있다: 자유 중성자를 핵 반응로 코어(101)를 향해서 다시 효율적으로 반사시키기 위해서 15 cm의 반사체 두께(211F)만이 필요한 경우에, 핵 반응로(107F)의 제6 구현예는, 압력 용기(160)에서 그리고 이를 넘어서 고속 중성자 플루언스를 수용 가능 레벨까지 효율적으로 감소시키는데 있어서 5 cm의 용기-내 차폐부 두께(210F)만이 필요하다는 것을 보여준다.

[0057] 용기-내 차폐부(105)가 없는 통상의 핵 반응로에서, 자유 중성자를 핵 반응로 코어(101)를 향해서 다시 적절히 반사시키기 위해서 그리고 압력 용기(160)에서 그리고 이를 넘어서 고속 중성자 플루언스를 수용 가능 레벨까지 효율적으로 감소시키기 위해서, 압력 용기(160)는 30 cm의 부가적인 반경을 필요로 한다. 유리하게, 용기-내 차폐부(105)를 갖춘 핵 반응로 시스템(100)은, 자유 중성자를 핵 반응로 코어(101)를 향해서 다시 적절히 반사시키기 위해서 그리고 압력 용기(160)에서 그리고 이를 넘어서 고속 중성자 플루언스를 수용 가능 레벨까지 효율적으로 감소시키기 위해서, 20 cm의 부가적인 반경만을 필요로 한다. 핵 반응로 시스템(100)이, 핵 반응로 코어(101)의 반사체(140)의 반사체 블록(141A 내지 141N) 및 감속제 요소(103A 내지 103N)를 달리 대면시키기 위한 드럼 폼 팩터의 제어 봉(118A 내지 118N)을 포함하는 경우에, 크기 및 질량 감소에서의 보다 추가적인 개선이 달성될 수 있다. 제어 봉(118A 내지 118N)을 갖는 그러한 핵 반응로 시스템(100)에서, 압력 용기(160)는, 자유 중성자를 핵 반응로 코어(101)를 향해서 역으로 반사시키기 위한 완전히 효율적인 반사체(140)를 반드시 필요로 하지는 않는다.

[0058] 따라서, 도 2의 전체 차폐 두께 그래프(200)는 핵 반응로 시스템(100)을 어떻게 설계할 지를 보여주고, 여기에서 복수의 반사체 블록(141A 내지 141N)의 반사체 블록(141)은 반사체 두께(211), 반사체 블록(141)을 형성하는 반사체 재료를 기초로 하는 반사체 확산 계수, 및 반사체 재료를 기초로 하는 반사체 거시적 흡수 횡단면을 갖는다. 따라서, 용기-내 차폐부(105)는 용기-내 차폐부 두께(210), 용기-내 차폐부(105)를 형성하는 용기-내 차폐부 재료를 기초로 하는 차폐부 확산 계수, 및 용기-내 차폐부 재료를 기초로 하는 용기-내 차폐부 거시적 흡수 횡단면을 갖는다. 용기-내 차폐부(105)와 조합된 반사체 블록(140)은, 적어도: 반사체 두께(211), 반사체 재료를 기초로 하는 반사체 확산 계수, 반사체 재료를 기초로 하는 반사체 거시적 흡수 횡단면, 용기-내 차폐부 두께(210), 용기-내 차폐부 재료를 기초로 하는 차폐부 확산 계수, 및 용기-내 차폐부 재료를 기초로 하는 용기-내 차폐부 거시적 흡수 횡단면을 기초로 하는, 조합된 확산 길이를 갖는다. 예시적인 효율적 핵 반응로 시스템(100)에서, 반사체 두께(211) 및 용기-내 차폐부 두께(210)는, 함께 부가될 때, 조합된 확산 길이의 2배 미만이다(예를 들어, 더 두껍지 않다). 이는, 반사체(140)가 반사체 재료의 확산 길이의 2배 초과 두꺼울 때, 반사체(140)의 성능이 실질적으로 개선되지 않기 때문이다. 그에 따라, 반사체(140) 및 용기-내 차폐부(105) 모두를 포함하는 핵 반응로 시스템(100)은 반사체(140)를 포함하는(그리고 용기-내 차폐부(105)를 포함하지 않는) 통상적인 핵 반응로 시스템과 동일한 양의 확산을 제공할 수 있으나, 훨씬 작은 양의 공간에서 동등한 확산을 제공할 수 있다.

[0059] 도 3은 2가지 상이한 유형의 핵 반응로 코어(101A 및 101B)의 예시적인 감손 그래프(300)이다. 도시된 바와 같이, 수년간 핵 반응로 코어(101A 및 101B)에서 측정된 바와 같은 수명(305)에 걸친 계수 k-유효(k-eff)(310)가 개선된다. 중성자 증배 인자로도 알려져 있는 K-eff(310)는 핵 반응로 코어(101) 내의 핵 분열 재료의 임계 상태를 특성화한다. 일반적으로, $K_{eff} = \text{생성된 중성자의 수} / (\text{누출 또는 흡수를 통해서}) \text{ 손실된 중성자의 수}$

다. $K_{\text{eff}}(310)$ 가 1 이상인 경우에만, 핵의 핵 분열 연쇄 반응이 유지될 수 있다. 도시된 바와 같이, 제1 핵 반응로 코어 아키텍처(301A)는 핵 반응로 코어(101A)가 약 10년의 수명(305A)을 가질 수 있게 한다. 제2 핵 반응로 코어 아키텍처(301B)는 핵 반응로 코어(101B)가 약 15년의 수명(305B)을 가질 수 있게 한다. 핵 반응로 코어(101A 및 101B)의 예상 수명(305A 및 305B)을 기초로, 적절한 양 및 유형의 용기-내 차폐부(105) 및 반사체(140)가 선택된다. 용기-내 차폐부(105) 또는 반사체(140)가 비-연소성 중성자 흡수 물질인 경우에도, 최종적으로 모든 중성자 흡수 물질의 효율이 감소되는데, 이는 이들이 긴 기간 동안 중성자 플루언스에 노출되기 때문이다. 따라서, 예를 들어 임의의 기하형태적 좌굴(geometrical buckling)의 영향이 핵 반응로 코어 아키텍처(301A 및 301B) 모두에서 유사한 것으로 가정하면, 제1 핵 반응로 코어(301A)는 제2 핵 반응로 코어(301B)보다 더 두꺼운 용기-내 차폐부(105)를 잠재적으로 필요로 할 수 있다.

[0060] 도 4는 핵 반응로 시스템(100)에 대한 용기-내 차폐부 재료 최적화 차트(400)이다. 용기-내 차폐부 재료 최적화 차트(400)는, 짧은 파레토 프론트(411), 중간 파레토 프론트(412), 및 긴 파레토 프론트(413)를 포함하는, 3개의 파레토 프론트(411 내지 413)를 도시한다. 각각의 파레토 프론트(411 내지 413)는, 상이한, 짧은 수명(401)을 갖는 용기-내 차폐부 재료, 중간 수명(402)을 갖는 용기-내 차폐부 재료, 및 긴 수명(403)을 갖는 용기-내 차폐부 재료 사이에서 분할된다.

[0061] 도 3에서 설명된 바와 같이, (K-유효(305)와 상호 관련되는) 수명(305)은, 핵 반응로 시스템(100)이 얼마나 오랫동안 동작될 수 있는지를 나타낸다. 도 4에서, 3개의 수명(401 내지 403)이 용기-내 차폐부 재료 최적화 차트(400)의 가장 일반적인 공통 초기 선택 기준인 것으로 가정한다. 짧은 수명(401), 중간 수명(402), 및 긴 수명(403)은 파레토 프론트(411 내지 413)의 수를 결정한다. 파레토 프론트(411 내지 413)는 핵 반응로 시스템(100)의 설계 옵션을 평가하기 위해서 활용되고, 설계 옵션이 다른 감도 지수(figures of merit)를 감소시키지 않으면서 모든 감도 지수에서 가능한 한 가장 높은 점수를 받는 경우에, 설계 옵션은 파레토 프론트(411 내지 413)에 있다. 그에 따라, 주어진 비용(cost)(405)에서 짧은 파레토 프론트(411) 상의 용기-내 차폐부 재료는, 짧은 수명(401)을 갖는 핵 반응로 시스템(100)을 위한 압력 용기 고속 중성자 플루언스(406)의 가장 큰 감소를 가질 것이다.

[0062] 도 4의 3개의 파레토 프론트(411 내지 413)는, 상이한 중성자 흡수 물질들이 용기-내 차폐부(105)의 설계 내에 어떻게 피팅(fit)될 수 있는지를 보여준다. 첫 번째로, 단순한 B_4C 재료가 최소 비용으로 고속 중성자 플루언스를 효과적으로 감소시킨다. B_4C 내의 붕소-10($^{10}B_4C$ 라고도 또한 알려짐)는 고속 스펙트럼 중성자의 큰 흡수 횡단면을 갖는다. 이는, B_4C 로 형성된 용기-내 차폐부(105)는 고속 스펙트럼 중성자의 더 작은 흡수 횡단면을 갖는 다른 재료로 형성된 다른 용기-내 차폐부(105)만큼 두꺼울 필요가 없다는 것을 의미한다. 순수 B_4C 는 짧은 수명을 갖는데, 이는 방사선 환경 내에서 B_4C 가 체험하는 헬륨-유도 팽창 때문이다. 따라서, 순수 B_4C 재료가 짧은 파레토 프론트(411)의 라인 상에 위치된다.

[0063] 두 번째로, $B_4C-Al_2O_3$ 복합체 또는 B_4C-SiC 복합체는 약 50 중량% B_4C 일 수 있고 B_4C 의 팽창을 보다 잘 수용할 수 있다. $B_4C-Al_2O_3$ 복합체 또는 B_4C-SiC 복합체는 순수 B_4C 보다 고속 중성자의 차폐에서 덜 효과적이다. 따라서, $B_4C-Al_2O_3$ 복합체 또는 B_4C-SiC 복합체는 중간 파레토 프론트(412)의 라인 상에 있다.

[0064] 세 번째로, 붕소화 스테인리스 강은 5 중량% 붕소 미만이나, 조사 하에서 매우 치수-안정적이다. 붕소화 스테인리스 강은 긴 파레토 프론트(413)의 라인 상에 있다. 용기-내 차폐부 재료 최적화 차트(400)를 기초로, 거의 검은색의 중성자 흡수 재료 및 회색의 중성자 흡수 재료를 포함하는, 용기-내 차폐부(105)를 형성하기 위한 둘 이상의 중성자 흡수 재료가 선택된다.

[0065] 도 5는 용기-내 차폐부 재료 선택 방법(500)을 도시하는 흐름도이다. 이러한 예는, 종속 변수가 재료비이고, 독립 변수가 핵 반응로 시스템(100)의 수명(305), 반사체 두께(211), 반사체(140)에 의해서 감소되는 고속 중성자 플루언스의 양, 및 압력 용기(160)의 최대 변경인 것으로 가정한다. 이러한 독립 변수 중 임의의 것이 종속 변수로 전환될 수 있다: 예를 들어 핵 반응로 시스템(100)이 이미 압력 용기(160)를 가지고 용기-내 차폐부(105)로 개장된 경우에, 재료 선택 방법(500)은, 효율적 작동을 위해서 핵 반응로 시스템(100)에 필요한 반사체(140)의 반사체 두께(211)를 결정할 수 있다. 용기-내 차폐부 재료 선택 방법(500)은, 핵 반응로 코어(101)의 반경 및 핵 반응로 코어(101)에 의해서 생성되는 고속 중성자 플루언스가 알려진 값인 것으로 가정한다.

[0066] 블록(510)에서, 용기-내 차폐부 재료 선택 방법(500)은 핵 반응로 시스템(100)의 수명(305)을 결정하는 단계를

포함한다. 블록(520)으로 이동하면, 용기-내 차폐부 재료 선택 방법(500)은: (i) 핵 반응로 코어(101); (ii) 반사체(140)를 형성하기 위해서 이용된 반사체 재료; (iii) 압력 용기(160)의 기하형태; 또는 (iv) 이들의 조합을 기초로, 효율적인 반사체 두께(211)를 결정하는 단계를 더 포함한다. 최종적으로, 중성자를 핵 반응로 코어(101)로 다시 가장 효율적으로 재지향시키는 반사체 두께(211)가 결정된다.

[0067] 블록(530)으로 계속되면, 용기-내 차폐부 재료 선택 방법(500)은 반사체(140)에 의해서 유발된 압력 용기(160)에서 그리고 이를 넘어서는 용기 내 고속 중성자 플루언스의 감소를 결정하는 단계를 포함한다. 반사체(140)에 의한 고속 중성자 플루언스 감소의 임의의 양은 용기-내 차폐부(105)에 의해서 요구되는 고속 중성자 플루언스 감소의 양을 감소시키고, 그에 따라 핵 반응로 시스템(100)에 대한 압력 용기(160) 내 고속 중성자 플루언스의 목표 감소를 보존한다. 블록(540)에서, 용기-내 차폐부 재료 선택 방법(500)은: (i) 설치; (ii) 운반; 및/또는 (iii) 핵 반응로 시스템(100)의 풋프린트 요건, 예를 들어 핵 반응로 코어(101)의 핵 반응로 코어 반경을 기초로, 압력 용기(160)의 최대 압력 용기 반경을 결정하는 단계를 포함한다.

[0068] 블록(550)에서, 용기-내 차폐부 재료 선택 방법(500)은 용기-내 차폐부의 용기-내 차폐부 재료를 선택하는 단계를 포함한다. 도 4의 용기-내 차폐부 재료 최적화 차트(400)를 참조하여, 적절한 파레토 프론트(411 내지 413)가 짧은 수명(401), 중간 수명(402), 및 긴 수명(403)을 기초로 선택될 수 있다(블록(510) 참조). 압력 용기 고속 중성자 플루언스의 감소는 2개의 인자: (i) 압력 용기(160)의 고속 중성자 플루언스 요건의 감소; 및 (b) 용기-내 차폐부(105)의 최대 두께에 의해서 결정된다. 압력 용기(160)의 고속 중성자 플루언스 감소 요건은, 블록(530)으로부터의, 핵 반응로 코어(101)에 의해서 생성된 고속 중성자 플루언스와 반사체(140)로 인한 고속 중성자 플루언스 감소 사이의 차이이다. 용기-내 차폐부(105)의 최대 두께는 블록(540)으로부터의 압력 용기(160)의 반경에서, 블록(520)으로부터의 핵 반응로 코어(101)의 반경 및 반사체(140)의 반사체 두께(211)를 뺀 것이다.

[0069] 압력 용기(160)의 고속 중성자 플루언스 감소 요건 및 용기-내 차폐부(105)의 최대 두께에서, 적절한 파레토 프론트(411 내지 413) 상의 용기-내 차폐부 재료가, 용기-내 차폐부(105)의 최대 두께 이하이면서, 압력 용기(160)의 고속 중성자 플루언스 요건의 감소를 만족시키는데 충분하게 고속 중성자 플루언스를 감소시킬 수 있는 확산 길이와 함께 확인된다. 용기-내 차폐부 재료의 선택에서 고려되는 인자들의 목록은: 핵 반응로 코어(101)의 평균 및 피크 온도; 냉각제의 재료 및 부피; 핵 반응로 시스템(100)의 기하형태; 및 용기-내 차폐부(105)를 형성하기 위한 다양한 용기-내 차폐부 재료의 핵, 열, 및 기계적 한계를 더 포함할 수 있다.

[0070] 용기-내 차폐부 재료를 선택하는 것은, 열적, 기계적, 및 시간-의존적 조사 효과를 조합하는 연산적 다중-물리 연산 모델을 기초로 용기-내 차폐부(105)의 효율성을 결정하는 것을 포함할 수 있다. 연산적 다중-물리 모델은 시간-의존적 중성자 플럭스를 갖는 도구일 수 있다. 연산적 다중-물리 모델을 또한 이용하여, 수명(305) 및 용기-내 차폐부(105)의 기하형태적 형태를 알릴 수 있다. 블록(560)에서의 종료에서, 용기-내 차폐부 재료 선택 방법(500)은 용기-내 차폐부 재료 비용을 수용하는 단계를 포함한다. 적절한 파레토 프론트(411 내지 413) 상의 압력 용기(160)의 고속 중성자 플루언스의 감소를 만족시키는, 용기-내 차폐부 재료 최적화 차트(400)로부터의 용기-내 차폐부 재료가 선택되면, 압력 용기(160)의 고속 중성자 플루언스(406)의 충분한 감소를 갖는 적절한 파레토 프론트(411 내지 413) 상의 가장 낮은 비용(405)을 갖는 용기-내 차폐부 재료가 핵 반응로 시스템(100)을 위해서 수용된다.

[0071] 도 6은, 용기-내 차폐부 설계 및 설치(602)를 위한 기술뿐만 아니라, 용기-내 차폐부 제조(601)를 포함하는 용기-내 차폐 방법(600)을 도시하는 흐름도이다. 도 6에 도시된 바와 같이, 제조 흐름(601)은, 설계 및 설치 흐름(602)의 하위세트인, 블록(610, 615, 620, 및 625)을 포함한다. 제조 흐름(601)은 용기-내 차폐부(105)를 제조하기 위한 세라믹 및 야금학적 프로세스에 초점을 맞춘다. 설계 및 설치 흐름(602)은 제조 흐름(601)을 포함하고, 부가적으로 블록(610 및 630)을 포함한다. 설계 및 설치 흐름(602)은 특정 핵 반응로 시스템(100)을 위한 용기-내 차폐부(105)를 설계하는 것을 포함하고, 이는 핵 반응로 시스템(100)을 위한 적절한 크기 및 형상의 용기-내 차폐부(105)(예를 들어, 용기-내 차폐부 타일(131A 내지 131N))를 형성하는 것을 포함한다. 설계 및 설치 흐름(602)은 또한, 예를 들어 용기-내 차폐부 타일(131A 내지 131N)을 압력 용기(160)의 내측부 벽(133)에 장착하는 것에 의해서, 용기-내 차폐부(105)를 설치하는 것을 포함한다.

[0072] 블록(605)에서 시작하여, 용기-내 차폐 방법(600)은 핵 반응로 시스템(100)을 선택하는 단계를 포함하고, 이는 핵 반응로 시스템(100)의 고유 매개변수, 예를 들어 압력 용기(160)에 대한 고속 중성자 플루언스, 압력 용기(160)의 반경, 반사체 두께(211), 및 용기-내 차폐부(105)의 설계와 관련된 다른 매개변수를 포함한다. 핵 반응로 시스템(100)은, 약 500 열 메가와트(thermal megawatt)까지 생산하도록 설계된 소형 핵 반응로(107)를 포

합할 수 있다. 소형 핵 반응로(107)은 용기-내 차폐부(105)에 의해서 달성되는 공간 절감으로부터 더 큰 이점을 가질 수 있다.

[0073] 블록(610)으로 이동하면, 용기-내 차폐 방법(600)은 2개 이상의 중성자 흡수 재료를 선택하는 단계를 포함한다. 도 5의 재료 선택 방법(500)에 더하여, 제1 예에서, 둘 이상의 중성자 흡수 재료를 선택하는 것은: (i) 용기-내 차폐부(105)의 용기-내 차폐부 두께(210); (ii) 용기-내 차폐부(105)의 기하형태적 구성; (iii) 압력 용기(160)가 용기-내 차폐부(105)를 둘러싸고 용기-내 차폐부(105)가 핵 반응로 코어(101)를 둘러싸는, 압력 용기(160)의 용기 내 고속 플루언스의 추정된 감소; (iv) 용기-내 차폐부(105)의 예상 수명; 또는 (v) 이들의 조합을 기초로 할 수 있다. 제2 예에서, 둘 이상의 중성자 흡수 재료를 선택하는 것은: (i) 압력 용기(160)의 내측부 직경; (ii) 핵 반응로 코어(101)의 외측부 직경; (iii) 반사체(140)의 반사체 두께(211); 또는 (iv) 이들의 조합을 기초로 할 수 있다. 제3 예에서, 용기-내 차폐부(105)를 형성하기 위한 둘 이상의 중성자 흡수 재료를 선택하는 것은: (i) 핵 반응로 시스템(100)의 압력 용기(160)의 압력 용기 직경; (ii) 핵 반응로 시스템(100)의 압력 용기(160)에 대한 고속 중성자 플루언스; 및 (iii) 핵 반응로 시스템(100) 외측의 중성자 플루언스를 기초로 할 수 있다.

[0074] 2개 이상의 중성자 흡수 재료는 적어도 하나의 거의 검은색의 중성자 흡수 재료 및 적어도 하나의 회색의 중성자 흡수 재료를 포함한다. 블록(610)의 선택 프로세스는 도 5의 용기-내 차폐부 재료 선택 방법(500)의 블록(510, 520, 530, 540, 550, 및 560)에서 설명된 것과 유사하다. 거의 검은색의 중성자 흡수 재료는 복합 세라믹 재료를 포함하는 한편, 회색의 중성자 흡수 재료는 중금속 재료를 포함한다. 거의 검은색의 중성자 흡수 재료를 선택하는 것은 동위원소적으로-맞춤된 거의 검은색의 중성자 흡수 재료를 선택하는 것을 포함할 수 있다.

[0075] 복합 세라믹 재료는 붕소 탄화물(B_4C), 하프늄 탄화물(HfC), 또는 가돌리늄 산화물(Gd_2O_3)을 포함할 수 있고; 이들 각각은 강력한 중성자 흡수 물질로서 작용하여, 중성자 플루언스 감소에서 거의 검은색의 중성자 흡수 재료의 효능을 제공한다. 복합 세라믹 재료는 알루미늄 산화물(Al_2O_3) 또는 규소 탄화물(SiC)을 더 포함할 수 있고; 이러한 구조 재료는 견고하고, 불활성이며, 작은 중성자 캡처-횡단면을 가지며: 이들은 물리적으로 강력한 중성자 흡수 물질을 지지하는 한편 자체적으로는 강력한 중성자 흡수 물질이 아니며, 중성자 감속제로서 분류될 수 있다. 선택된 거의 검은색의 중성자 흡수 재료는 동위원소적으로-맞춤된 거의 검은색의 중성자 흡수 재료일 수 있다. 복합 세라믹 재료를 형성하기 위한 강력한 중성자 흡수 물질 및 구조적 재료의 특정 조합은: 붕소-10 탄화물($^{10}B_4C$), 50 중량% 붕소-10 탄화물의 붕소-10 탄화물 및 알루미늄 산화물 복합체($^{10}B_4C-Al_2O_3$), 50 중량% 붕소-10 탄화물의 붕소-10 탄화물 및 규소 탄화물 복합체($^{10}B_4C-SiC$), 또는 5 중량% 붕소-10의 붕소화 스테인리스 강 합금을 포함한다. 붕소-10 탄화물 및 붕소화 스테인리스 강은 단독적인 복합 세라믹이 아니고, 복합 세라믹을 형성하기 위해서 다른 세라믹과 페어링되어야 한다.

[0076] 회색의 중성자 흡수 재료의 중금속 재료는, 예를 들어, 원자화된 텅스텐 중금속 형태의, 텅스텐(W), 철(Fe), 니켈(Ni), 또는 구리(Cu)를 포함한다. 중금속 재료는, 원자화된 텅스텐 중금속의 형태일 때, 텅스텐 함량이 90 중량% 이상인 원자화된 텅스텐 중금속을 포함할 수 있다.

[0077] 블록(615)으로 계속되면, 용기-내 차폐 방법(600)은, 세라믹 흡수 분말을 제조하기 위해서 거의 검은색의 중성자 흡수 재료의 기본 분말을 공정 소결하는 단계를 포함한다. 세라믹 흡수 분말을 제조하기 위해서 거의 검은색의 중성자 흡수 재료를 공정 소결하는 단계는 스파크 플라즈마 소결로 수행된다. 예를 들어, 세라믹 흡수 분말을 형성하기 위한 기본 분말은 약 80 nm 내지 50 마이크로 범위의 평균 입자 크기를 포함한다. 기본 분말은 세라믹 흡수 분말을 형성하기 위해서 스파크 플라즈마 소결된다. 세라믹 흡수 분말은, 평균 입자 직경이 약 80 나노미터 이상이고 약 100 마이크로 이하인 복수의 복합 세라믹 입자를 포함한다. 블록(615 및 625)에서의 소결은 고-진공 직류 소결을 포함할 수 있다. 일부 예에서 소결 동작은 고급 3D 프린팅 프로세스로 대체될 수 있거나 포함할 수 있다.

[0078] 블록(620)에서, 용기-내 차폐 방법(600)은 회색의 중성자 흡수 재료를 블록(615)에서 제조된 세라믹 흡수 분말과 동역학적으로 혼합하여 용기-내 차폐부 혼합물을 생성하는 단계를 더 포함한다. 이는 완전한, 그리고 불순물이 없는 분산을 보장한다.

[0079] 블록(625)으로 이동하면, 용기-내 차폐 방법(600)은 용기-내 차폐부 혼합물을 용기-내 차폐부(105)로 냉간 프레스 소결하는 단계를 포함한다. 용기-내 차폐부 혼합물을 용기-내 차폐부(105)로 냉간 프레스 소결하는 단계는 용기-내 차폐부(105)를 형성하기 위해서 중금속 재료의 중금속 매트릭스 내에 복수의 복합 세라믹 입자를 매립

하는 단계를 포함한다. 앞서 주목한 바와 같이, 복합 세라믹 입자는, 약 80 나노미터 이상이고 약 100 마이크로 이하인 평균 입자 직경을 포함한다.

[0080] 용기-내 차폐부 혼합물을 용기-내 차폐부(105)로 냉간 프레스 소결하는 단계는 용기-내 차폐부(105)를 복수의 용기-내 차폐부 타일(131A 내지 131N)로 형성하는 단계를 더 포함한다. 복수의 용기-내 차폐부 타일(131A 내지 131N)의 전부 또는 하위세트는 곡선형 다면체 형상 또는 그 절두형 부분이다. 복수의 용기-내 차폐부 타일(131A 내지 131N)은 인터록킹 기하형태 패턴을 갖는 기본 형상을 포함할 수 있다. 용기-내 차폐부 타일(131A 내지 131N)의 기본 형상은 부분적으로: (i) 팽창에 대한 내성; (ii) 중성자 스트리밍 경로의 감소; 또는 (iii) 이들의 조합을 기초로 선택될 수 있다.

[0081] 마지막으로 블록(630)에서, 용기-내 차폐 방법(600)은, 예를 들어 복수의 용기-내 차폐부 타일(131A 내지 131N)을 압력 용기(160)의 내측부 벽(133) 상에 배치하는 것에 의해서, 용기-내 차폐부(105)를 압력 용기(160)의 내측부 벽(133)에 장착하는 단계를 포함한다. 내측부 벽(133)은 복수의 연속적인 표면 또는 불연속적인 표면으로 형성된다. 따라서, 블록(630)은, 인터록킹 기하형태 패턴을 결합시키는 것에 의해서, 내측부 벽(133)의 연속적 또는 불연속적 표면을 복수의 용기-내 차폐부 타일(131A 내지 131N)로 덮는 것을 포함할 수 있다.

[0082] 보호 범위는 이하의 청구항에 의해서만 제한된다. 그러한 범위는, 본 명세서 및 이하의 기재 기록에 비추어 해석될 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.

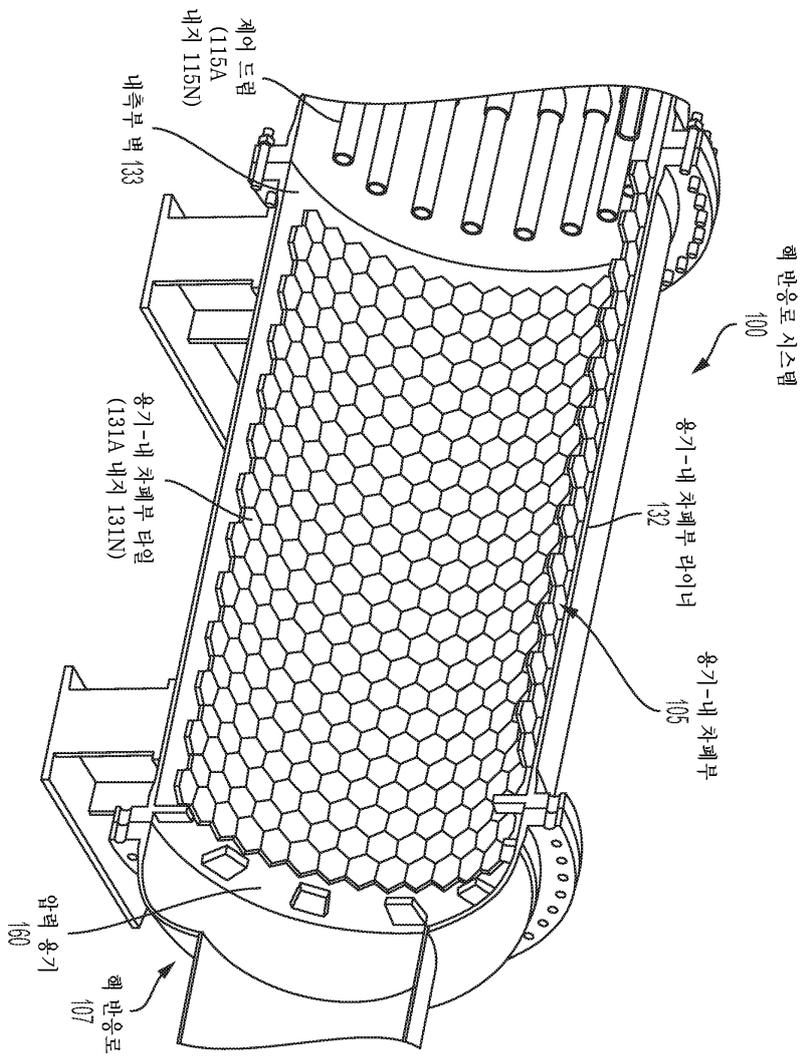
[0083] 또한, 본원에서 사용된 용어 및 표현은, 특정 의미가 본원에서 달리 설명된 경우를 제외하고, 그들의 상응하는 각각의 조사 또는 연구 분야에 대해 그러한 용어 및 표현에 부여된 일반적인 의미를 갖는다는 이해할 것이다. 제1 및 제2 등과 같은 관계 용어는, 해당 개체들 또는 작용들 간의 실제 관계 또는 순서를 반드시 요구하거나 암시하지 않으면서, 하나의 개체 또는 작용을 다른 개체 또는 작용과 구별하기 위해서만 사용될 수 있다. "포함한다", "포함하는", "포괄한다", "포괄하는", "갖는다", "가지는", "이용한", "~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.

[0084] 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, 보호 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.

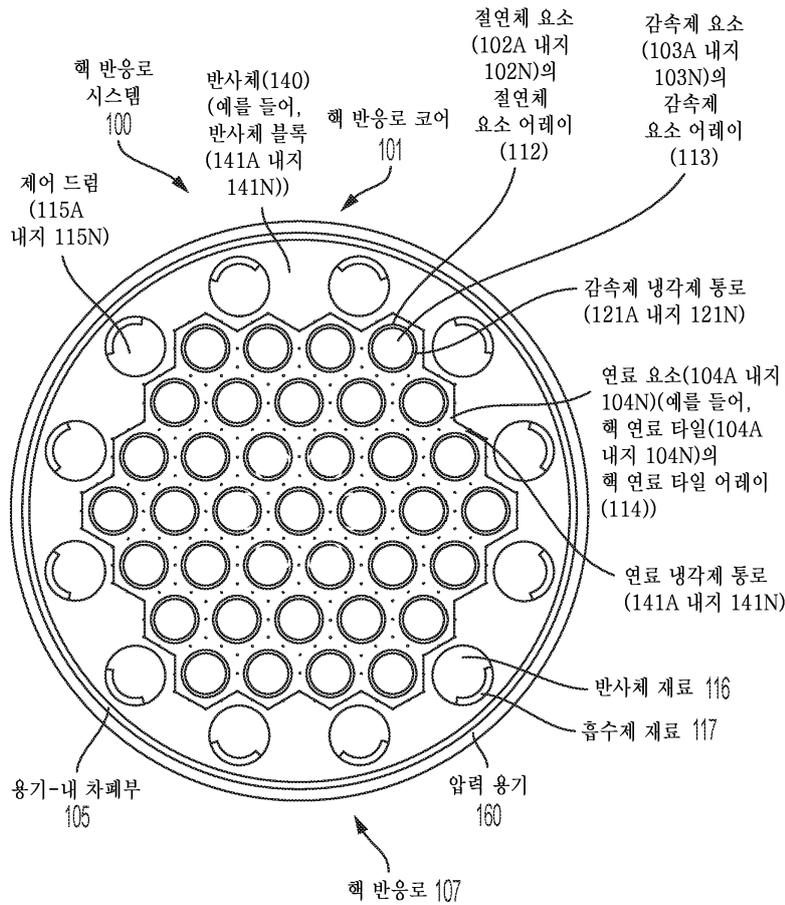
[0085] 이상에서 최선의 모드 및/또는 다른 예라고 생각되는 것을 설명했지만, 그 안에서 다양한 수정이 이루어질 수 있고 여기에 개시된 청구 대상은 다양한 형태 및 예로 구현될 수 있으며, 그것들은 수많은 적용예에서 적용될 수 있으며, 그 중 일부만이 여기에 설명되었다는 것이 이해된다. 이하의 청구항은, 본 개념의 진정한 범위에 속하는 임의의 그리고 모든 수정 및 변형을 청구하기 위한 것으로 의도된 것이다.

도면

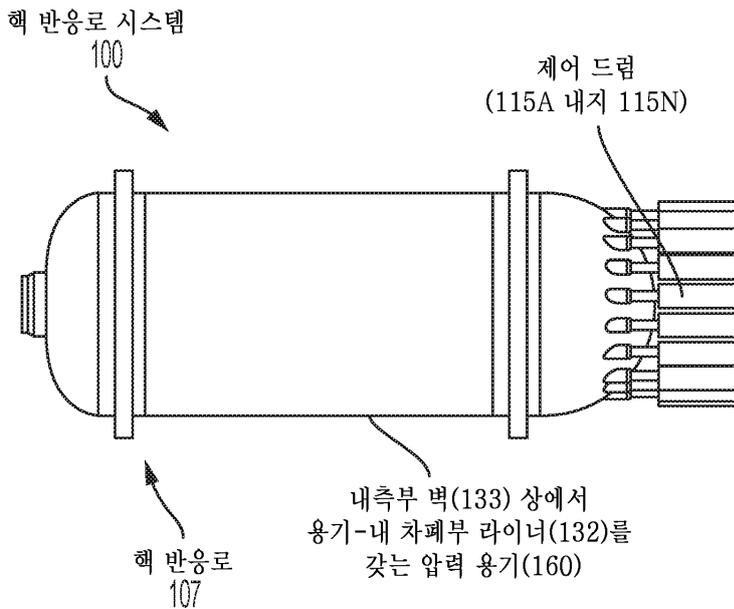
도면1a



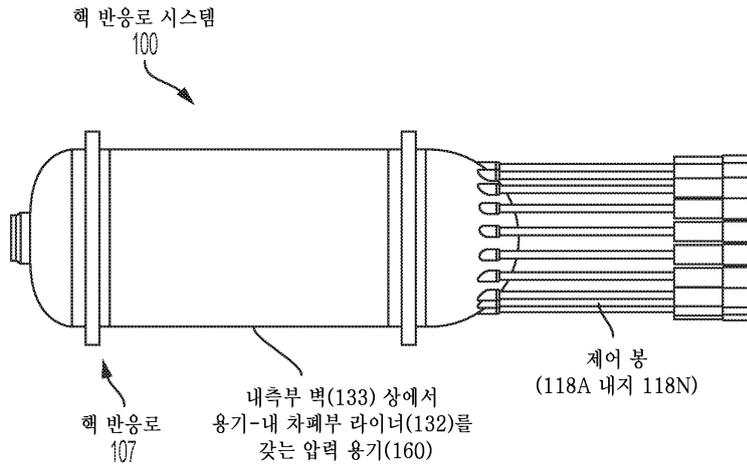
도면1b



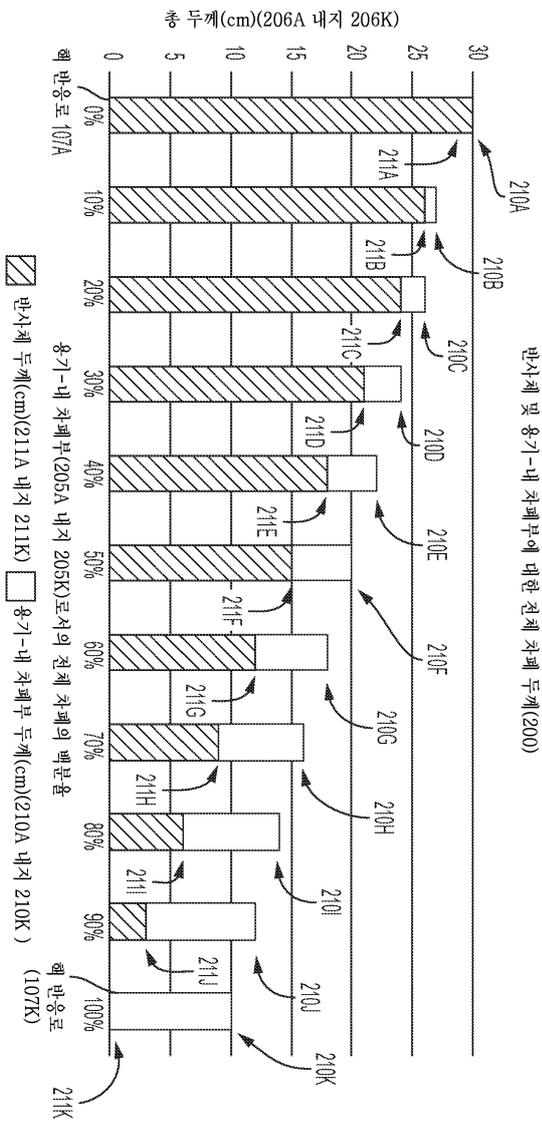
도면1c



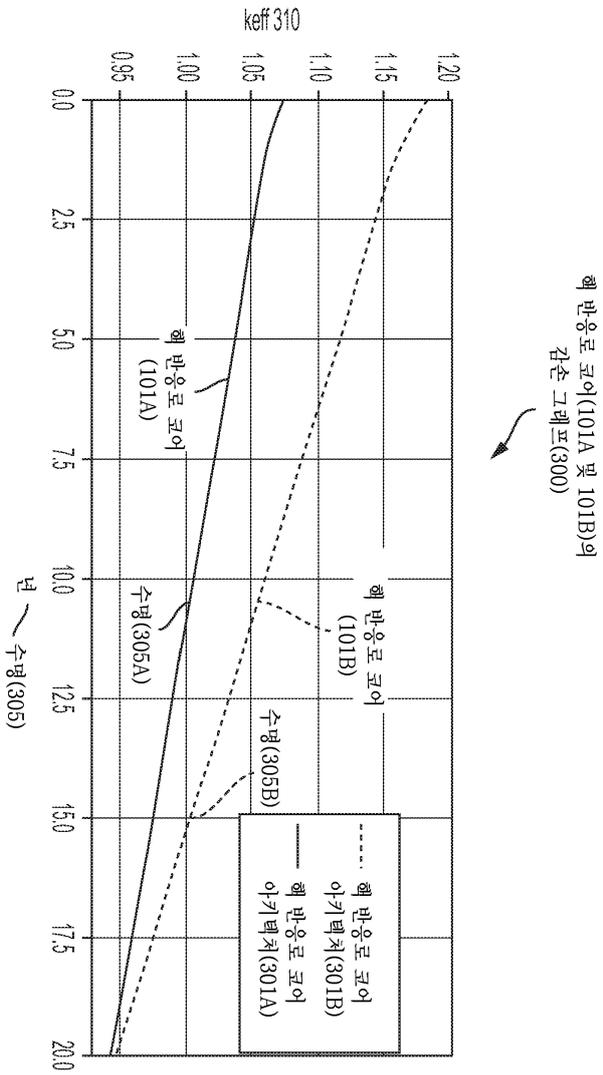
도면1d



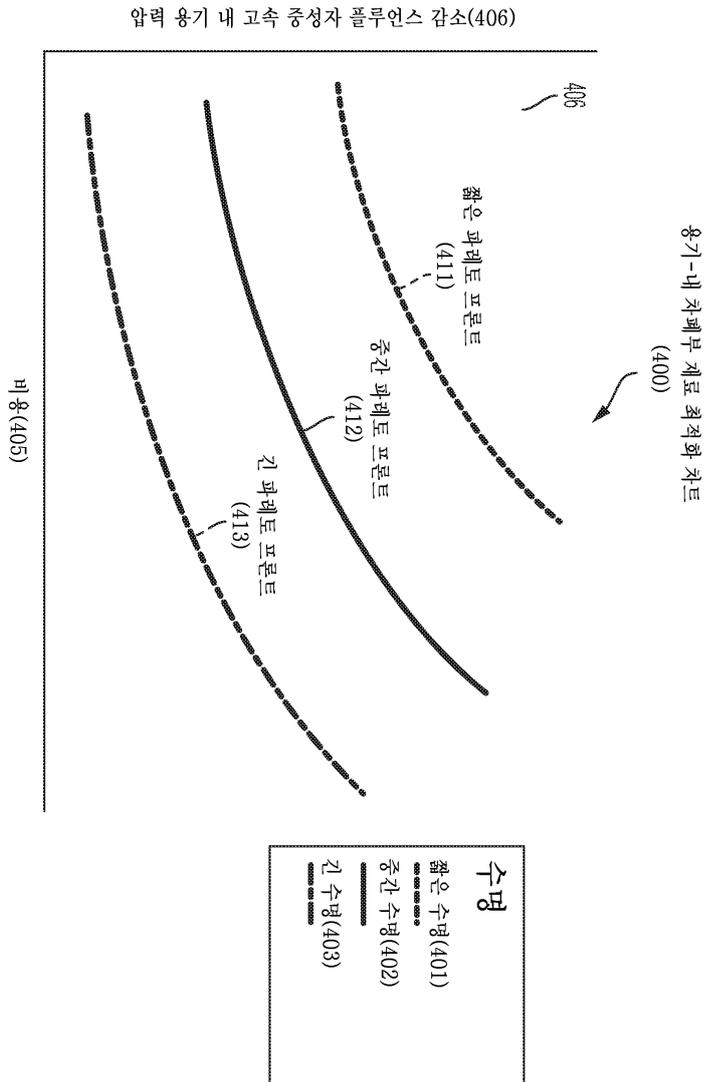
도면2



도면3

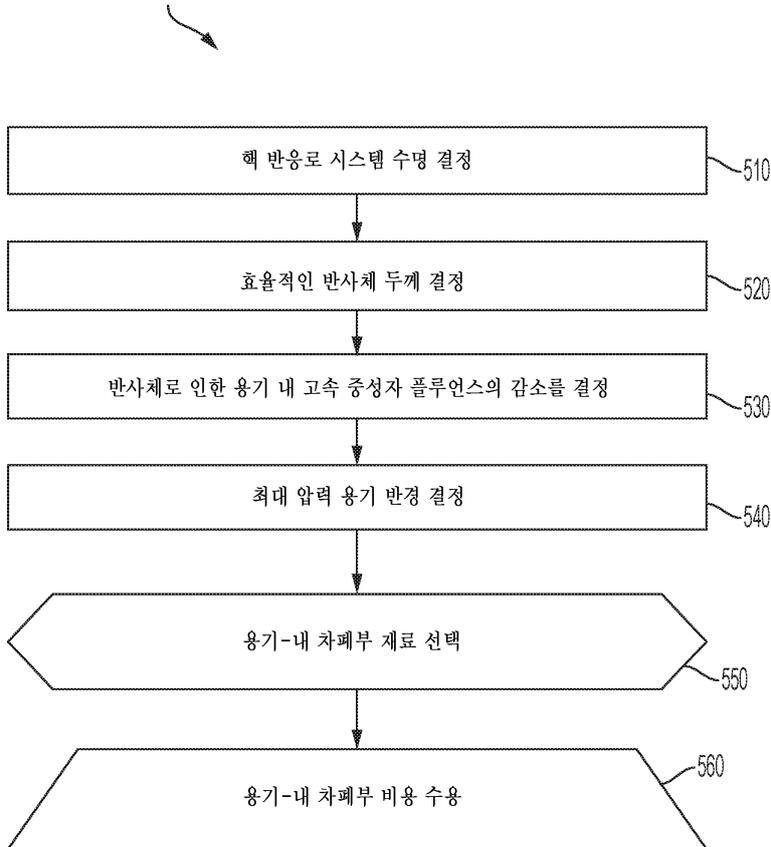


도면4



도면5

용기-내 차폐부 재료 선택 방법
(500)



도면6

