



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0066618
(43) 공개일자 2023년05월16일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G21C 11/02 (2006.01) G21C 13/02 (2006.01)
G21C 7/24 (2006.01) G21C 7/26 (2006.01)
G21D 1/02 (2006.01) G21F 5/14 (2006.01)
- (52) CPC특허분류
G21C 11/022 (2013.01)
G21C 13/02 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2023-7012628
- (22) 출원일자(국제) 2021년09월18일
심사청구일자 없음
- (85) 번역문제출일자 2023년04월13일
- (86) 국제출원번호 PCT/US2021/051004
- (87) 국제공개번호 WO 2022/061195
국제공개일자 2022년03월24일
- (30) 우선권주장
63/080,292 2020년09월18일 미국(US)

- (71) 출원인
울트라 세이프 뉴클리어 코포레이션
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 울트라 세이프 뉴클리어
코포레이션 내
이즈 마이클 존
미국 98199-1465 워싱턴주 시애틀 스위트 300 웨
스트 코모도어 웨이 2288 울트라 세이프 뉴클리어
코포레이션 내
파텔 비살
미국 98199-1465 워싱턴주 시애틀 스위트 300 웨
스트 코모도어 웨이 2288 울트라 세이프 뉴클리어
코포레이션 내
- (74) 대리인
양영준, 윤정호

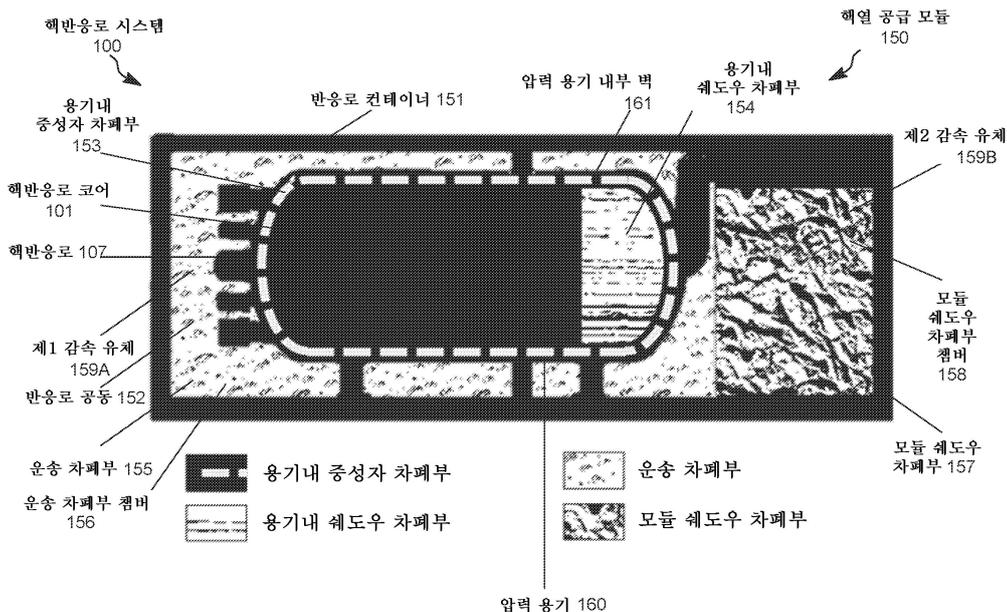
전체 청구항 수 : 총 30 항

(54) 발명의 명칭 **컴팩트하고 운송 가능한 핵 파워 시스템을 위한 방사선 차폐부**

(57) 요약

이동식 반응로 방사선 차폐 해결책은 구조 재료의 활성화를 방지하여 살아있는 유기체에 대한 방사선 피폭 위험을 감소시키고 운송을 위한 시간표를 가속화한다. 차폐 해결책은 용기내 중성자 차폐부, 용기내 섀도우 차폐부, 운송 차폐부 및 모듈 섀도우 차폐부를 포함할 수 있다. 용기내 중성자 차폐부는 구조 재료의 활성화를 감소시키 (뒷면에 계속)

대표도



고 방지하며 활성화된 구조 재료로부터의 감마 방출에 대해 차폐하기 위해 무거운 차폐의 필요성을 상당히 감소시킨다. 용기내 섀도우 차폐부는 반응로와 보조 기기(BOP) 모듈과 제어 시스템 사이에 중성자 및 감마 차폐를 제공한다. 용기내 섀도우 차폐부는 활성 핵 코어 부근에 배치되어 차폐부의 크기를 최소화하는 동시에 보호 아크를 최대화하여 운송을 위해 핵반응로를 준비하면서 방사선 작업자를 차폐한다. 운송 차폐부는 살아있는 유기체가 반응로에 근접하게 될 때 운송 중에 사용된다. 모듈 섀도우 차폐부는 동작 중에 반응로 제어 구성요소와 BOP 모듈을 차폐한다.

(52) CPC특허분류

G21C 7/24 (2013.01)

G21C 7/26 (2013.01)

G21D 1/02 (2013.01)

G21F 5/14 (2013.01)

Y02E 30/30 (2020.08)

Y10S 376/909 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

핵반응로 시스템이며,

핵열 공급(NHS) 모듈을 포함하고, 핵열 공급 모듈은:

반응로 공동을 포함하는 반응로 컨테이너;

반응로 컨테이너 내의 압력 용기로서, 내부 벽을 포함하는, 압력 용기;

압력 용기 내에 위치한 핵반응로 코어로서, 복수의 연료 요소 및 적어도 하나의 감속제 요소를 포함하는, 핵반응로 코어;

핵반응로 코어를 둘러싸도록 압력 용기의 내부 벽에 위치한 용기내 중성자 차폐부;

압력 용기 내부의 용기내 쉘도우 차폐부;

제1 감속 유체를 수용하기 위한 TS 챔버를 반응로 공동 내에 포함하는 반응로 컨테이너 내부 및 압력 용기 외부의 운송 차폐부(TS); 및

제2 감속 유체를 수용하기 위한 MSS 챔버를 반응로 공동 내에 포함하는 반응로 컨테이너 내부 및 압력 용기 외부의 모듈 쉘도우 차폐부(MSS)를 포함하는, 핵반응로 시스템.

청구항 2

제1항에 있어서,

운송 차폐부는 TS 챔버를 실질적으로 채우는 제1 감속 유체를 더 포함하고;

모듈 쉘도우 차폐부는 MSS 챔버를 실질적으로 채우는 제2 감속 유체를 더 포함하는, 핵반응로 시스템.

청구항 3

제1항에 있어서,

NHS 모듈은 중간 열 교환기 및 가스 순환기를 더 포함하고;

열 교환기는 핵반응로 코어에 열적으로 커플링되는, 핵반응로 시스템.

청구항 4

제1항에 있어서,

운송 차폐부는 제1 감속 유체를 더 포함하고;

제1 감속 유체는 TS 챔버를 실질적으로 채우는, 핵반응로 시스템.

청구항 5

제4항에 있어서,

NHS 모듈은 활성 상태 및 비활성 상태를 포함하고;

NHS 모듈이 비활성 상태에 있는 동안 NHS 모듈에 의해 유도된 NHS 모듈 외부의 인체 윌트겐 당량(렘) 선량은 시간당 50 렘(rem/hr) 미만이고;

제1 감속 유체는 물(H₂O)을 포함하는, 핵반응로 시스템.

청구항 6

제4항에 있어서,

NHS 모듈은 활성 상태 및 비활성 상태를 포함하고;

NHS 모듈이 비활성 상태에 있는 동안 NHS 모듈에 의해 유도된 NHS 모듈 외부의 인체 린트겐 당량(렘) 선량은 시간당 10 렘(rem/hr) 미만이고;

제1 감속 유체는 물(H₂O)을 포함하고, 제1 감속 유체는 대략 1.63 입방 센티미터당 그램(g/cc) 이상의 Pb(NO₃)₂의 농도를 함유하는, 핵반응로 시스템.

청구항 7

제4항에 있어서,

NHS 모듈은 활성 상태와 비활성 상태를 갖고;

NHS 모듈이 비활성 상태에 있는 동안 NHS 모듈에 의해 유도된 NHS 모듈 외부의 인체 린트겐 당량(렘) 선량은 시간당 0.5 렘(rem/hr) 미만이고;

제1 감속 유체는 물(H₂O)을 포함하고, 제1 감속 유체는 대략 5 입방 센티미터당 그램(g/cc) 이상의 ZnBr₂의 농도를 함유하는, 핵반응로 시스템.

청구항 8

제1항에 있어서,

모듈 웨도우 차폐부는 제2 감속 유체를 더 포함하고;

제2 감속 유체는 MSS 챔버를 실질적으로 채우는, 핵반응로 시스템.

청구항 9

제1항에 있어서,

복수의 연료 요소는 복수의 방사선 입자를 방출하고;

용기내 웨도우 차폐부는 초기에 복수의 방사선 입자 중 제1 방사선 입자를 차단하는, 핵반응로 시스템.

청구항 10

제9항에 있어서,

용기내 중성자 차폐부는 용기내 웨도우 차폐부를 통과하는 복수의 방사선 입자 중 제2 방사선 입자를 차단하는, 핵반응로 시스템.

청구항 11

제9항에 있어서,

운송 차폐부는 용기내 웨도우 차폐부 및 용기내 중성자 차폐부를 통과하는 복수의 방사선 입자 중 제3 방사선 입자를 차단하는, 핵반응로 시스템.

청구항 12

제9항에 있어서,

모듈 웨도우 차폐부는 용기내 웨도우 차폐부, 용기내 중성자 차폐부, 및 운송 차폐부를 통과하는 복수의 방사선 입자 중 제4 방사선 입자를 차단하는, 핵반응로 시스템.

청구항 13

제1항에 있어서,

NHS 모듈 외부에 배치된 보조 기기 모듈을 더 포함하고;

반응로 컨테이너는 운송 차폐부, 모듈 웨도우 차폐부, 압력 용기, 용기내 웨도우 차폐부, 핵반응로 코어, 및 용기내 중성자 차폐부를 수용하고;

보조 기기 모듈은 터보기계, 발전기 및 반응로 제어 시스템을 포함하는, 핵반응로 시스템.

청구항 14

제13항에 있어서,

제1 감속 유체는 방사선 입자를 차단하여 방사선 입자가 보조 기기 모듈로 이동하는 것을 방지하는, 핵반응로 시스템.

청구항 15

제13항에 있어서,

제2 감속 유체는 방사선 입자를 차단하여 방사선 입자가 보조 기기 모듈로 이동하는 것을 방지하는, 핵반응로 시스템.

청구항 16

제1항에 있어서,

용기내 웨도우 차폐부, 용기내 중성자 차폐부, 제1 감속 유체 및 제2 감속 유체는 하나 이상의 중성자 흡수 재료를 포함하는, 핵반응로 시스템.

청구항 17

제1항에 있어서,

용기내 중성자 차폐부는 특정 동위원소 또는 천연 동위원소 조성이 풍부한 중성자 감속제와 중성자 흡수 재료를 갖는 복합 재료 또는 다층 재료로 형성되고;

제1 감속 유체는 수소 밀집 액체를 포함하고;

제2 감속 유체는 물(H₂O)을 포함하는, 핵반응로 시스템.

청구항 18

제17항에 있어서,

중성자 감속제는 금속 수소화물, 폴리에틸렌, 플라스틱, 베릴륨 함유 화합물 또는 그 조합을 포함하는, 핵반응로 시스템.

청구항 19

제17항에 있어서,

중성자 흡수 재료는 붕소, 붕소 탄화물, 금속 붕화물, 가돌리늄, 유로퓸, 텅스텐 또는 그 조합을 포함하는, 핵반응로 시스템.

청구항 20

제1항에 있어서,

용기내 중성자 차폐부는 2개 이상의 중성자 흡수 재료로 형성되고,

2개 이상의 중성자 흡수 재료는 거의 흑색의 중성자 흡수 재료 및 회색 중성자 흡수 재료를 포함하는, 핵반응로 시스템.

청구항 21

핵반응로 전개 방법이며,

핵반응로 코어를 포함하는 핵열 공급(NHS) 모듈의 운송 차폐부(TS) 챔버를 제1 감속 유체로 실질적으로 채우는 단계;

NHS 모듈을 제1 위치로부터 제2 위치로 운송하는 단계;

NHS 모듈을 제2 위치에서 지면에 커플링하는 단계; 및

핵반응로 코어의 중성자 플럭스를 임계 레벨로 증가시키는 단계를 포함하는, 핵반응로 전개 방법.

청구항 22

제21항에 있어서,

NHS 모듈을 운송한 후, NHS 모듈의 모듈 웨도우 차폐부(MSS) 챔버를 제2 감속 유체로 실질적으로 채우는 단계를 더 포함하고;

핵반응로 코어의 중성자 플럭스를 임계 레벨로 증가시키는 단계는 MSS 챔버를 제2 감속 유체로 실질적으로 채우는 단계 후에 발생하는, 핵반응로 전개 방법.

청구항 23

핵반응로 차폐 방법이며,

핵반응로 코어를 포함하는 핵반응로 시스템의 핵열 공급(NHS) 모듈의 운송 차폐부(TS) 챔버를 제1 감속 유체로 실질적으로 채우는 단계;

NHS 모듈을 제1 위치로부터 제2 위치로 운송하는 단계; 및

제1 감속 유체를 TS 챔버에서 실질적으로 배수하는 단계를 포함하는, 핵반응로 차폐 방법.

청구항 24

제23항에 있어서,

NHS 모듈을 운송하기 전에, 핵반응로 코어의 중성자 플럭스를 아임계 레벨로 감소시키는 단계; 및

NHS 모듈을 운송한 후, 모듈 웨도우 차폐부의 모듈 웨도우 차폐부(MSS) 챔버를 제2 감속 유체로 실질적으로 채우는 단계를 더 포함하는, 핵반응로 차폐 방법.

청구항 25

제24항에 있어서,

MSS 챔버를 제2 감속 유체로 실질적으로 채운 후에, 핵반응로 코어의 중성자 플럭스를 임계 레벨로 증가시키는 단계를 더 포함하는, 핵반응로 차폐 방법.

청구항 26

제25항에 있어서,

핵반응로 코어의 중성자 플럭스를 아임계 레벨로 감소시킨 후 및 NHS 모듈을 운송하기 전에, NHS 모듈로부터 보조 기기 모듈을 디커플링하는 단계;

NHS 모듈을 운송한 후 및 핵반응로 코어의 중성자 플럭스를 임계 레벨로 증가시키기 전에, 보조 기기 모듈을 NHS 모듈에 재커플링하는 단계를 더 포함하는, 핵반응로 차폐 방법.

청구항 27

제26항에 있어서,

핵반응로 코어의 중성자 플럭스를 아임계 레벨로 감소시킨 후, 핵반응로 코어가 비활성 상태에 도달하기를 대기하는 단계를 더 포함하는, 핵반응로 차폐 방법.

청구항 28

제23항에 있어서,

NHS 모듈을 제1 위치로부터 제2 위치로 운송하는 단계는 육상 차량, 항공기 또는 선박을 통한 제1 여행에서 NHS 모듈을 제1 위치로부터 제2 위치로 운송하는 단계를 포함하는, 핵반응로 차폐 방법.

청구항 29

제23항에 있어서,

항공기를 통한 비행에서 NHS 모듈을 제2 위치로부터 제3 위치로 공수하는 단계;

NHS 모듈을 공수하기 전에 제1 감속 유체를 TS 챔버에서 실질적으로 배수하는 단계; 및

NHS 모듈을 공수한 후 제1 감속 유체로 TS 챔버를 실질적으로 채우는 단계를 더 포함하는, 핵반응로 차폐 방법.

청구항 30

제29항에 있어서,

비행에서 제2 위치로부터 제3 위치로 NHS 모듈을 공수하기 전에, NHS 모듈로부터 보조 기기 모듈을 디커플링하는 단계;

다른 비행에서 제2 위치로부터 제3 위치로 보조 기기 모듈을 공수하는 단계; 및

보조 기기 모듈을 제2 위치로부터 제3 위치로 공수한 후, 보조 기기 모듈을 NHS 모듈에 재커플링하는 단계를 더 포함하는, 핵반응로 차폐 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] **관련 출원에 대한 상호 참조**

[0002] 본 출원은 그 전체 내용이 본 명세서에 참조로서 함체되어 있는, 2020년 9월 18일 출원되고, 발명의 명칭이 "컴팩트하고 운송 가능한 핵 파워 시스템을 위한 방사선 차폐(Radiation Shielding for Compact and Transportable Nuclear Power Systems)"인 미국 가특허 출원 제63/080,292호의 우선권을 주장한다.

[0003] **기술 분야**

[0004] 본 발명의 주제는 핵반응로 운송 시스템 및 운송 가능한 핵반응로 시스템과 같은 핵반응로 시스템의 예에 관한 것이다. 본 발명의 주제는 또한 콤팩트하고 운송 가능한 핵 파워 시스템을 위한 방사선 차폐를 포함한다.

배경 기술

[0005] 안전하고, 신뢰적이며, 강인한 전기적 파워는 현대 민간 및 군사 작전에 필수 불가결하다. 세계의 외딴 지역, 미개발 지역, 또는 분쟁 지역에서 발생하는 작업은 종종 현대 파워 그리드의 네트워크 내에서 발생하는 작업과 동일하거나 더 광범위한 요구 사항을 갖는다. 전통적으로 석유화학 발전은 북극권 내 또는 활발한 전쟁 구역 내와 같은 원격 작업에서 중요한 기반 시설에 파워를 공급하는 데 사용되어 왔다. 그러나, 휴대용 또는 다른 방식인 파워 플랜트에 가공된 석유화학 제품을 제공하기 위한 물류 공급 라인은 악천후, 변화하는 정치적 제한, 적대적인 민병대에 의한 봉쇄에 의해 쉽게 붕괴될 수 있다. 풍력 터빈과 태양광 패널과 같은 천연 에너지 소스는 국경에서의 보호 무역 주의적 거동에 의해 영향을 받지 않지만, 여전히 흐린 날씨와 바람 적도 무풍대에 취약하다. 10년 이상 지속적으로 운전하도록 설계된 독립형 연료 공급 장치를 갖는 핵 파워 전개는 파워 공급을 방해하는 번덕스럽거나 단호한 외부 세력에 대한 해결책이다.

[0006] 핵 파워 전개는 전통적으로 본질적으로 극도로 고정되는데: 대량의 콘크리트 작업물이 타설되고, 일단 완료되면 구조물이 제위치에 고정된다. 이들 고정 구조물은 파워 수요의 이동식 코어를 갖는 작업에 적합하지 않은데: 전통적인 파워 플랜트로부터 이동 채광 작업 또는 군대로 파워를 송전하는 것은 전기 라인을 연장하는 것을 필요로 하고, 임의의 다른 정착 파워 공급과 동일한 문제의 회생양이 된다. 더욱이, 전통적인 핵 파워 전개는 해체하고 이전하는 데 수년이 걸릴 수 있다. 많은 원격 설정에서, 이 광범위한 지연 기간은 일시적인 강인한 파워를 제공하는 데 수용 불가능한 부담이다.

[0007] 모듈식 운송 가능 핵 발전기는 그 전체 내용이 본 명세서에 참조로서 함체되어 있는, 2019년 3월 12일 허여되고, 발명의 명칭이 "모듈식 운송 가능 핵 발전기(Modular Transportable Nuclear Generator)"인 미국 특허 제10,229,757호에 설명되어 있다. 불행하게도, 핵 발전기의 운송은 일반적으로 살아있는 유기체와 대중에 대한 핵 방사선의 방사선 피폭 위험을 최소화하기 위해 운송 전에 장시간 기간 대기를 필요로 한다.

발명의 내용

[0008] 따라서, 핵반응로 운송 시스템 및 운송 가능한 핵반응로 시스템에서 추가 개선의 여지가 있다. 핵반응로(107)의 더 신속한 운송을 가능하게 하기 위해, 구조 재료의 활성화를 방지하여 대중에 대한 방사선 피폭 위험을 감소시키고 운송을 위한 시간표를 가속화하는 이동식 반응로 방사선 차폐 해결책이 본 명세서에 설명된다. 차폐 해결책은 이동식 핵반응로(107)의 차폐 요구를 해결한다. 특히, 차폐 해결책은 동작, 정지 및 운송 중에 필요한 차폐를 제공한다. 동작 중 차폐는 2개의 양태: 구조 재료의 활성화를 감소시키는 것 및 작업자에 대한 방사선 선량을 최소화하는 것이 해결될 것을 필요로 한다. 정지 및 운송 중에, 차폐는 반응로를 운송하는 직원 및 운송 중에 반응로에 가깝게 있을 수도 있는 대중의 방사선 선량을 최소화하는 데 중점을 둔다. 부가적으로, 운송을 가능하게 하기 위해 차폐부의 질량이 최소화된다.

[0009] 본 명세서에 개시된 운송 가능 핵반응로 기술을 구현하는 핵반응로 시스템(100)은 핵 파워 시스템의 휴대성을 증가시킨다. 다른 휴대용 파워 시스템 또는 다른 핵 파워 시스템과 대조적으로, 운송 가능 핵반응로 기술은 휴대용 핵반응로(107)가 안전하게 운송될 수 있게 한다. 예를 들어, 핵반응로(107)는 인구 밀집 지역을 통해 세미 트럭에 의해 안전하게 운송될 수 있고; 핵반응로 도착 후 72시간 이내에 블랙 스타트(black-start)를 수행하고, 반응로 정지 후 7일 이내에 안전하게 제거될 수 있다. 운송 가능 핵반응로 기술은 플러그 앤 플레이(plug-and-play) 설계를 허용하여, 보조 기기(balance-of-plant: BOP) 모듈(170)을 핵열 공급(NHS) 모듈(150)로부터 분리하고, BOP 모듈(170) 및 NHS 모듈(150)이 육상 차량(501), 운송 항공기(502) 또는 선박(503)에 의해 운송 가능하게 될 수 있게 하기에 충분히 질량 효율을 개선한다.

[0010] 예에서, 핵반응로 시스템(100)은 핵열 공급(NHS) 모듈(150)을 포함한다. NHS 모듈(150)은 반응로 컨테이너(151)를 포함한다. 반응로 컨테이너(151)는 반응로 공동(152)을 포함한다. NHS 모듈(150)은 반응로 컨테이너(152) 내에 압력 용기(160)를 더 포함한다. 압력 용기(160)는 내부 벽(161)을 포함한다. NHS 모듈(150)은 압력 용기(160) 내에 위치한 핵반응로 코어(101)를 더 포함한다. 핵반응로 코어(101)는 복수의 연료 요소(104A 내지 104N) 및 적어도 하나의 감속재 요소(103A)를 포함한다. NHS 모듈(150)은 핵반응로 코어(101)를 둘러싸도록 압력 용기(160)의 내부 벽(161)에 위치한 용기내 중성자 차폐부(153)를 더 포함한다. NHS 모듈(150)은 압력 용기(160) 내부에 용기내 쉘도우 차폐부(154)를 더 포함한다. NHS 모듈(150)은 제1 감속 유체(159A)를 수용하기 위한 TS 챔버(156)를 반응로 공동(152) 내에 포함하는 운송 차폐부(TS)(155)를 반응로 컨테이너(151) 내부 및 압력 용기(160) 외부에 더 포함한다. NHS 모듈(150)은 제2 감속 유체(159B)를 수용하기 위한 MSS 챔버(158)를 반응로 공동(152) 내에 포함하는 모듈 쉘도우 차폐부(MSS)(157)를 반응로 컨테이너(151) 내부 및 압력 용기(160) 외부에 더 포함한다.

[0011] 제2 예에서, 핵반응로 전개 방법(400)은 핵반응로 코어(101)를 포함하는 핵열 공급(NHS) 모듈(150)을 제1 위치로부터 제2 위치로 운송하는 단계를 포함한다. 핵반응로 전개 방법(400)은 NHS 모듈(150)을 제2 위치에서 접지에 커플링하는 단계를 더 포함한다. 핵반응로 전개 방법(400)은 NHS 모듈(150)을 제1 위치로부터 운송한 후, 운송 차폐부(TS) 챔버(156)를 제1 감속 유체(159A)로 실질적으로 채우는 단계를 더 포함한다. 핵반응로 전개 방법(400)은 TS 챔버(156)를 제1 감속 유체(159A)로 실질적으로 채운 후에, 핵반응로 코어(101)의 중성자 플럭스를 임계 레벨로 증가시키는 단계를 더 포함한다.

[0012] 제3 예에서, 핵반응로 차폐 방법(500)은 핵반응로 시스템(100)의 핵열 공급(NHS) 모듈(150)의 운송 차폐부 챔버(156)를 제1 감속 유체(159A)로 실질적으로 채우는 단계를 포함한다. NHS 모듈(150)은 핵반응로 코어(101)를 포함한다. 핵반응로 차폐 방법(500)은 NHS 모듈(150)을 제1 위치로부터 제2 위치로 운송하는 단계를 더 포함한다. 핵반응로 차폐 방법(500)은 제1 감속 유체(159A)를 운송 차폐부 챔버(156)에서 실질적으로 배수하는 단계를 더 포함한다.

[0013] 예의 부가적인 목적, 장점 및 신규 특징이 부분적으로 이하의 설명에서 기술될 것이고, 부분적으로 이하의 설명 및 첨부 도면으로부터 통상의 기술자에게 자명해질 것이고, 또는 예의 생산 또는 동작에 의해서 학습될 수 있다. 본 발명의 주제의 목적 및 장점은 첨부된 청구항에서 특별하게 언급된 방법, 기구, 및 조합에 의해서 실현되고 획득될 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0014]

도면은, 단지 예로서, 비제한적으로, 하나 이상의 구현예를 도시한다. 도면에서, 유사한 참조 번호는 동일하거나 유사한 요소를 지칭한다.

도 1a는 핵열 공급 모듈을 도시하고 (1) 용기내 중성자 차폐부, (2) 용기내 웨도우 차폐부, (3) 운송 차폐부 및 (4) 모듈 웨도우 차폐부를 포함하는 차폐 해결책을 구현하는 핵반응로 시스템의 절결도이다.

도 1b는 도 1a의 NHS 모듈 뿐만 아니라 NHS 모듈에 연결된 보조 기기(BOP) 모듈의 모두를 포함하는 도 1a의 핵반응로 시스템의 등각도이다.

도 1c는 핵반응로 코어, 용기내 중성자 차폐부, 운송 차폐부 및 반응로 컨테이너를 나타내고 있는 핵열 공급 모듈의 단면도이다.

도 1d는 핵반응로 코어에 의해 방출될 때 용기내 웨도우 차폐부 보호 아크, 모듈 웨도우 차폐부 보호 아크, 및 복수의 방사선 입자 및 경로를 도시하고 있다.

도 2는 보조 공급 모듈 및 이산 제어 모듈을 더 포함하는, 도 1b의 핵반응로 시스템의 블록도이다.

도 3a는 BOP 모듈이 NHS 모듈로부터 소정 거리 이격하여 있는, 전개 상태에서 도 1b의 핵반응로 시스템의 등각도이다.

도 3b는 BOP 모듈이 NHS 모듈에 매우 근접해 있는, 패키징 상태에서 도 1b의 핵반응로 시스템의 등각도이다.

도 4는 핵반응로 전개 방법의 흐름도이다.

도 5a는 핵반응로 시스템이 패키징 상태에 있고, 육상 차량에 적재되고, 항공기 내에 적재될 준비가 되어 있는 핵반응로 차폐 방법의 단계의 개략도이다.

도 5b는 살아있는 유기체가 방사선에 노출되는 위험을 완화하기 위한 핵반응로 차폐 방법의 흐름도이다.

도 6은 핵반응로 시스템의 다양한 구성요소의 예상 또는 추정 중량을 포함하는 중량 표이다.

도 7은 운송 차폐부 챔버를 채우기 위해 물만이 사용될 때와 비교하여, 운송 차폐부 챔버를 채우기 위해 질산납 포화수가 사용될 때 NHS 모듈의 상이한 위치에서 수신되는 광자 선량의 히트 맵이다.

도 8은 운송 차폐부 챔버를 채우기 위해 질산납 포화가 사용될 때 NHS 모듈의 상이한 위치에서 수신되는 광자 선량의 히트 맵이다.

부품 목록

100: 핵반응로 시스템

101: 핵반응로 코어

102A 내지 102N: 절연체 요소

103A 내지 103N: 감속재 요소

104A 내지 104N: 연료 요소

107: 핵반응로

112: 절연체 요소 어레이

113: 감속재 요소 어레이

114: 핵 연료 타일 어레이

115A 내지 115N: 제어 드럼

116: 반사체 재료

117: 흡수체 재료

140: 반사체

- 141A 내지 141N: 반사체 블록
- 142A 내지 142N: 연료 냉각제 통로
- 150: 핵열 공급(NHS) 모듈
- 151: 반응로 컨테이너
- 152: 반응로 공동
- 153: 용기내 중성자 차폐부
- 154: 용기내 쉐도우 차폐부
- 155: 운송 차폐부(TS)
- 156: 운송 차폐부(TS) 챔버
- 157: 모듈 쉐도우 차폐부(MSS)
- 158: 모듈 쉐도우 차폐부(MSS) 챔버
- 159A: 제1 감속 유체
- 159B: 제2 감속 유체
- 160: 압력 용기
- 161: 압력 용기 내부 벽
- 170: 보조 기기 모듈
- 171: 열 교환기
- 172: 가스 순환기
- 173: 터보기계
- 174: 발전기
- 175: 반응로 제어 시스템
- 176: 열 교환 인터페이스
- 177: 보조 기기 컨테이너
- 180: 가스 커넥터 라인
- 190A: 용기내 쉐도우 차폐부 비보호 아크
- 190B: 용기내 쉐도우 차폐부 보호 아크
- 191A: 모듈 쉐도우 차폐부 비보호 아크
- 191B: 모듈 쉐도우 차폐부 보호 아크
- 192A 내지 192I: 방사선 입자
- 250: 보조 공급 모듈
- 270: 보조 기기 모듈
- 275: 제어 모듈
- 400: 핵반응로 전개 방법
- 405 내지 425: 핵반응로 전개 방법 단계
- 500: 핵반응로 차폐 방법
- 501: 육상 차량

- 502: 항공기
- 503: 선박
- 505 내지 560: 핵반응로 차폐 방법 단계
- 600: 중량 표
- 605: NHS 모듈 소개
- 610: BOP 모듈 소개
- 615: 총 핵반응로 시스템 질량
- 700: 질산납 포화수 히트 맵의 상대 광자 선량
- 705: 물과 비교하여 질산납 포화수의 상대 광자 선량
- 710: 반응로 코어로부터의 수평 거리
- 715: 반응로 코어로부터의 수직 거리
- 800: 질산납 포화수 히트 맵의 절대 광자 선량
- 805: 질산납 포화수의 절대 광자 선량

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0015] 이하의 상세한 설명에서, 수많은 구체적인 상세 내용이 관련 교시 내용의 완전한 이해를 제공하기 위해서 예로서 기술된다. 그러나, 통상의 기술자는, 이러한 상세 내용이 없어도 본 교시 내용이 실시될 수도 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.
- [0016] 본 명세서에서 사용된 바와 같은 "커플링된"이라는 용어는 임의의 논리적 또는 물리적 연결을 지칭한다. 달리 설명되지 않는 한, 커플링된 요소 또는 디바이스는 반드시 서로 직접적으로 연결되어야 하는 것은 아니고, 중간 구성요소, 요소 등에 의해서 분리될 수도 있다. 용어 "유체 연통"은 본 명세서에 사용될 때, 액체 또는 기체와 같은 물질이 유동할 수 있는 것을 의미한다. 각각의 방사선 입자(192A 내지 192I)를 언급할 때 본 명세서에 사용되는 바와 같은 용어 "차단", "차단하다", "차단된" 또는 "차단하는"은 각각의 방사선 입자(192A 내지 192I)를 흡수, 반사, 편향 또는 감속하는 것을 의미한다.
- [0017] 본 명세서에 사용될 때 용어 "실질적으로 채우는"은 50 내지 100%만큼 점유하는 것을 의미한다. 본 명세서에 사용될 때 용어 "실질적으로 채운다"는 50 내지 100%만큼 점유한 것을 의미한다. 본 명세서에 사용될 때 용어 "실질적으로 채워진"은 50 내지 100%만큼 점유된 것을 의미한다. 본 명세서에 사용될 때 문구 "실질적으로 배수하는"은 90 내지 100%만큼 비워지는 것을 의미한다. 본 명세서에 사용될 때 문구 "실질적으로 배수된"은 90 내지 100%만큼 비워진 것을 의미한다.
- [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. 이러한 양은, 이들이 관련되는 기능 및 이들이 속하는 관련 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 수도 있다. "대략적으로"라는 용어는, 매개변수 값 또는 기타가 언급된 양으로부터 ± 10%까지 다르다는 것을 의미한다.
- [0019] 임의의 도면에 도시되어 있는 바와 같은, 핵반응로 시스템(100), 핵반응로(107), 핵반응로 코어(101), 핵열 공급 모듈(150), 보조 기기 모듈(170), 연관 구성요소, 및/또는 핵반응로 코어(101), 연료 요소(104A 내지 104N), 제어 드럼(115A 내지 115N), 용기내 중성자 차폐부(153), 용기내 웨도우 차폐부(154), 운송 차폐부(155) 또는 모듈 웨도우 차폐부(157)를 포함하는 임의의 핵반응로 시스템(100)의 배향은 예시 및 설명의 목적으로, 단지 예로서만 제공된다. 특정 핵반응로 시스템(100)을 위한 동작에서, 구성요소는 핵반응로 시스템(100)의 특정 적용에 적합한 임의의 다른 방향으로, 예를 들어 직립형, 측면, 또는 임의의 다른 배향으로 배향될 수도 있다. 또한, 본 명세서에서 사용된 범위까지, 임의의 방향 관련 용어, 예를 들어 측방향, 종방향, 위쪽, 아래쪽,

상부, 하부, 상단, 하단, 및 측면은 단지 예로서 사용된 것이고, 본 명세서에서 달리 설명되는 바와 같이 구성된 임의의 핵반응로 시스템(100) 또는 핵반응로 시스템(100)의 구성요소의 방향 또는 배향과 관련하여 제한되지 않는다.

[0020] 본 명세서에 개시된 운송 가능한 핵반응로 기술은 핵 파워 시스템(100)의 휴대성을 실질적으로 증가시켜 전개 및 분해 속도를 개선하고, 파워 생산 안정성을 개선하며, 동작 중 연료 공급 의존도를 감소시킨다. 핵 파워 시스템(100)의 성공의 핵심은 방사선 차폐에 대한 새로운 접근법이다. 전통적인 차폐가 핵반응로 코어(101) 주위에 무거운 방사선 보호 장벽을 구축하는 데 중점을 둔 반면, 핵반응로 시스템(100)은 구조 재료의 활성화를 최소화하고 동작 중에 차폐를 위해 현장 재료 및 자원을 사용하는 데 초점을 맞춘 다층 방사선 전략을 사용하는 데 중점을 둔다. 이는 경량이고 예를 들어 정지 후 10일 미만 이내에 이전되는 것이 가능한 핵반응로 시스템(100)을 야기한다.

[0021] 특히, 차폐 해결책은 동작, 정지 및 운송 중에 필요한 차폐를 제공한다. 동작 중 차폐는 2개의 양태: 구조 재료의 활성화를 감소시키는 것 및 작업자에 대한 방사선 선량을 최소화하는 것이 해결될 것을 필요로 한다. 정지 및 운송 중에, 차폐는 반응로를 운송하는 직원 및 운송 중에 핵반응로(107)에 가깝게 있을 수도 있는 대중의 방사선 선량을 최소화하는 데 중점을 둔다. 부가의 요구 사항은 운송을 가능하게 하기 위해 차폐부의 질량이 최소화되어야 한다는 것이다.

[0022] 이동식 핵반응로 시스템(100) 방사선 차폐 해결책은 핵열 공급(NHS) 모듈(150)에 통합된 4개의 차폐부: (1) 용기내 중성자 차폐부(153), (2) 용기내 쉘도우 차폐부(154), (3) 운송 차폐부(TS)(155), 및 (4) 모듈 쉘도우 차폐부(MSS)(157)로 구성된다. 용기내 중성자 차폐부(153)는 핵반응로 코어(101)를 떠나는 중성자 플루언스를 감소시킴으로써 압력 용기(160) 및 주변 구조물의 활성화를 감소시킬 것이다. 용기내 쉘도우 차폐부(154)는 방사선 작업자가 NHS 모듈(150)의 일 측면에 접근하여 의무 선량 한계 미만으로 유지하면서 운송을 위해 준비할 수 있게 한다. 운송 차폐부(155)는 NHS 모듈(150)의 반응로 공동(152)을 실질적으로 채우는 제1 감속 유체(159A), 예를 들어 TS 챔버(156)를 실질적으로 채우는 수소 함유 액체(물과 같은)를 포함할 수 있다. 운송 차폐부(155)는 NHS 모듈(150)이 공공 지역을 통해 육상으로 운송되고 공공 선량 한계 미만으로 유지될 수 있게 하기 위해 핵반응로(107)의 정지 후에 구현될 수도 있다. 운송 차폐부(155)의 제1 감속 유체(159A)는 NHS 모듈(150)이 운송을 위해 항공기(502)에 적재되기 전에 배수될 수 있다. 모듈 쉘도우 차폐부(157)는 핵반응로(107) 입구/출구의 다른 측면에서 NHS 모듈(150) 내에 배치되어 보조 기기 모듈(170)이 NHS 모듈(150)에 더 근접하게 배치되고 기지 직원에 의해 접근될 수 있게 할 수 있다. 모듈 쉘도우 차폐부(157)는 운송 중에 비어 있는 MSS 챔버(158)를 포함할 수 있고, 이는 설치 중에 물 또는 다른 현장 재료와 같은 제2 감속 유체(159B)로 설치 중에 실질적으로 채워진다. 모듈 쉘도우 차폐부(157)는 물로 채워질 수 있는데, 이는 물이 MSS 챔버(158)의 모든 공극을 쉽게 채울 것이기 때문이다.

[0023] NHS 모듈(150)에 통합된 4개의 차폐부는 차폐 해결책을 포함하고, 이 자체는 4개의 요소: (1) 용기내 중성자 차폐부(153), (2) 용기내 쉘도우 차폐부(154), (3) 운송 차폐부(TS)(155), 및 (4) 모듈 쉘도우 차폐부(MSS)(157)로 구성된다. 본 명세서에 설명된 차폐 해결책은 지상 및 우주 핵반응로 시스템(100)의 모두에 적용 가능하다. 모든 4개의 구성요소는 핵반응로 시스템(100)의 차폐, 질량, 체적 및 동작 요구 사항을 충족시키기 위해 함께, 개별적으로 또는 상이한 조합으로 적용될 수 있다. 이 차폐 해결책은 임의의 이동식 핵반응로(107)에 대한 기준선 차폐 해결책일 수 있다.

[0024] 운송 가능 핵반응로 기술은 완전 세라믹 마이크로캡슐화(FCM™) TRISO 기반 연료와 규소 탄화물을 사용하는 세라믹 전도성 "장갑(armored)" 코어를 이용할 수 있다. 양 경우 모두, 완전히 밀집한, 구조적 규소 탄화물은 고온 가스 냉각 반응로에서 전통적으로 사용되는 흑연을 대체하여, 강도, 외부 위협에 대한 저항 및 방사능 보유의 개선을 도입할 수 있다. 핵반응로 시스템(100)의 전개는 원격 기지의 신속한 전개를 용이하게 하고, 임시 기지의 이동성을 크게 향상시키고, 기지 보급과 연관된 잠재적 손해 및 다른 위험을 극적으로 감소시킬 것이다.

[0025] 이제 첨부 도면에 도시되어 있고 이하에 설명되는 예를 상세히 참조한다. 도 1a는 핵열 공급(NHS) 모듈(150)을 도시하고 차폐 해결책을 구현하는 핵반응로 시스템(100)의 절결도이다. 차폐 해결책은 (1) 용기내 중성자 차폐부(153), (2) 용기내 쉘도우 차폐부(154), (3) 운송 차폐부(155) 및 (4) 모듈 쉘도우 차폐부(157)를 포함한다. NHS 모듈(150)은 반응로 컨테이너(151)를 포함한다. 이 예에서 이 반응로 컨테이너(151)는 CONEX 또는 ISO 상자 스타일의 선적 컨테이너이다. 반응로 컨테이너(151)는 대략 20 피트 길이일 수 있고, 핵반응로(107)를 안전하고 안정한 방식으로 장착하고 수용하도록 구성된다. 반응로 컨테이너(151) 내의 공극 공간은 핵반응로(107)가 존재하는 반응로 공동(152)(예를 들어, 내부 체적)을 형성한다. 반응로 공동(152) 내에는 운송 차폐부(TS)

챔버(156)(예를 들어, 제1 챔버)가 있다. TS 챔버(156)는 제1 감속 유체(159A)로 실질적으로 채워진 후에 유체에 대해 불투과성(예를 들어, 방수성)일 수 있는 데, 그 이유는 반응로 컨테이너(151)가 방수성이기 때문이거나, 또는 반응로 공동(152) 내부의 밀봉체 또는 인벨로프가 TS 챔버(156)를 방수성이 되게 하기 때문이다. 반응로 컨테이너(151) 또는 반응로 컨테이너(151)의 하위챔버는 제1 감속 유체(159A)를 수용하는 것이 가능해야 한다. 몇몇 예에서 반응로 공동(152)은 반응로 공동(152)을 세분화하기 위해 반응로 공동(152) 내에 더 이상의 분할 벽 또는 체적이 없으면 자체로 TS 챔버(156)일 수도 있다.

[0026] 대부분의 상황에서, TS 챔버(156)의 형상 및 체적은 반응로 공동(152)의 치수에 합치하는데, 이는 TS 챔버(156)가 직사각형 프리즘과 같은 형상이거나 반응로 컨테이너(151)가 캡슐과 같은 형상인 경우 등근 형상일 수 있다는 것을 의미한다. 그러나, 몇몇 실시예에서, TS 챔버(156)는 핵반응로(107)의 치수에 합치할 수도 있는데, 이는 TS 챔버(156)가 일반적으로 핵반응로(107)의 직경보다 큰 직경이지만, 반응로 컨테이너(151)의 폭 또는 높이 이하의 직경을 갖는 캡슐과 같은 형상일 것이라는 것을 의미한다.

[0027] 반응로 컨테이너(151)는 일반적으로 물품을 저장하거나 운송하는 데 사용되는 대형 금속 내후성 컨테이너인 CONEX 또는 ISO 상자 스타일의 선적 또는 저장 컨테이너에 통상적인 임의의 수단에 의해 운송되도록 설계된다. 반응로 컨테이너(151)는 세미 트레일러 트럭 또는 기차와 같은 육상 차량(501)의 트럭 베드, 트레일러 또는 레일 차량 위에; Lockheed Hercules™ C-100 또는 C-130™과 같은 항공기(502) 위에; 또는 배와 같은 선박(503) 위에 배치될 수 있다. 핵반응로(107)는 반응로 컨테이너(151) 내에 장착되고, 예상되는 충격, 낙하, 온도 변화, 압력 변화, 습도, 및 CONEX 또는 ISO 상자의 내용물이 견딜 것으로 예상되는 임의의 다른 일반적인 환경 영향을 견디도록 설계된다. 부가적으로, 군사 환경에서 핵반응로(107)는 임의의 상용 파워 시스템보다 더 높은 사고 확률을 경험할 수도 있다. 타겟으로서 NHS 모듈(150)의 유인성 및 운송 중 사고의 확률은 핵반응로(107)의 복원력 및 안전을 가장 중요하게 만든다. 따라서, 핵반응로(107)는 큰 재료 온도 마진, 강한 음의 반응성 피드백 및 거의 완전한 핵분열 생성물 보유를 갖는다.

[0028] 핵반응로(107) 부근에 장착된 반응로 공동(152) 내의 반응로 컨테이너(151) 내에는, 모듈 웨도우 차폐부(MSS) 챔버(158)(예를 들어, 제2 챔버)가 있다. MSS 챔버(158)는 또한 제2 감속 유체(159B)로 실질적으로 채워진 후에 유체에 대해 불투과성(예를 들어, 방수성)일 수 있다. 실질적으로 채워진 후, TS 챔버(156) 및 MSS 챔버(158)의 모두는 MSS 챔버(158)와 TS 챔버(156) 사이의 유체 연통을 방지하여 제1 감속 유체(159A) 및 제2 감속 유체(159B)를 서로로부터 분리되고 격리하여 유지할 수 있다. TS 챔버(156) 및 MSS 챔버(158)가 실질적으로 배수될 때, TS 챔버(156) 및 MSS 챔버(158)는 더 이상 유체에 대해 불투과성이 아니다.

[0029] 몇몇 예에서, MSS 챔버(158)는 도 1a에 도시되어 있는 바와 같이, 반응로 컨테이너(151)의 상단, 하단, 측면 및 전방과 직접 접촉한다. 이들 예에서, TS 챔버(156) 내의 제1 감속 유체(159A)는 MSS 챔버(158) 주위를 유동할 수 없고, 단지 TS 챔버(156)와 MSS 챔버(158) 사이의 공유 벽까지만 유동할 수 있다. 그러나, 도 1b에서, MSS 챔버(158)는 MSS 챔버(158)와 반응로 컨테이너(151) 사이의 모든 면에 작은 간극을 갖는 것으로 도시되어 있다. 이들 예에서, 도 1b와 같이, MSS 챔버(158)는 기술적으로 TS 챔버(156) 내부에 있을 수도 있고, TS 챔버(156) 내의 제1 감속 유체(159A)는 MSS 챔버(158) 주위를 유동할 수도 있다.

[0030] TS 챔버(156) 및 MSS 챔버(158)는 감속 유체(159A, 159B)를 선택적으로 유지하기 위해 방수성이다. 감속 유체(159A, 159B)는 중성자 플럭스를 감속시켜, TS 챔버(156) 및 MSS 챔버(158) 내의 고속 중성자를 감속시키는 능력을 위해 선택된 유체이다. 간단한 접근법에서 감속 유체(159A, 159B)는 물이다. 감속 유체(159A, 159B)로서 사용되는 물은 화학적으로 순수한 물일 필요는 없고, 현장 음용수 또는 미처리수가 감속 유체(159A, 159B)로서 사용될 수 있다. 감속 유체(159A, 159B)는 물, 높은 수소 함량을 갖는 액체 유기 화합물일 수 있고, 중성자 및 감마 차폐를 향상하기 위한 첨가제를 함유할 수 있다. 도 7 및 도 8은 특히 질산납으로 포화된 물을 이용하여 그리고 브롬화아연으로 포화된 물을 이용하여, 물을 사용하는 것에 비한 개선을 설명한다. 감속 유체(159A, 159B)는 동일한 유체일 수도 있는데, 즉, 이들은 모두 질산납으로 포화된 물일 수도 있다. 대안적으로, 제1 감속 유체(159A)는 브롬화아연으로 포화된 물일 수도 있는 제2 감속 유체(159B)와는 상이한 유체, 예를 들어 우물 물일 수 있다. 제1 감속 유체(159A)는 음용수와 같이 더 이용 가능하고 덜 효율적인 감속 유체일 수도 있고, 반면 제2 감속 유체(159B)는 금속으로 포화된 물일 수도 있는데, 이는 물과 조합하기 위해 현장으로 미립자 금속을 가져오거나 개선된 감속 효율과 교환하여 현장에서 금속으로 미리 포화된 물을 가져오는 것을 필요로 한다. 상이한 감속 유체(159A, 159B)는 감속제로서 상이한 효능을 갖는데: 물은 핵반응로 코어(101)에서 핵분열 생성물의 붕괴 중에 생성되는 감마 방사선을 차폐하도록 양호하게 작용하는 많은 수의 수소 및 산소 반응로 인해 양호한 감속 유체로서 작용한다. 물에 첨가된 금속은 고속 중성자를 흡수하거나, 반응로 컨테이너(151)로

부터 이격하여 고속 중성자를 유도한다.

- [0031] TS 챔버(156)가 적어도 실질적으로 제1 감속 유체(159A)로 채워질 때, TS 챔버(156) 내의 제1 감속 유체(159A)는 운송 차폐부(TS)(155)를 형성한다. 운송 차폐부(155)는 제1 감속 유체(159A)를 포함하기 때문에, 핵반응로(107)를 둘러싸고 운송 차폐부(155) 내부 및 운송 차폐부(155) 외부에서 중성자 플루언스를 감소시킨다. 운송 차폐부(155) 및 제1 감속 유체(159A)는 핵반응로(107) 내로 연장되지 않는다는 것을 주목하라. 핵반응로(107)의 내부와 TS 챔버(156) 사이에는 유체 연통이 없고, 제1 감속 유체(159A)는 핵반응로(107) 내의 중성자 플루언스를 감소시키지 않는다.
- [0032] 운송 차폐부(155)의 목적은 주로 지상 운송 중에 또는 인구 밀집 지역을 통해 이동할 때 핵반응로(107)를 안전하게 운송하는 것이다. 운송 차폐부(155)는 운송 중에 살아있는 유기체(예를 들어, 사람)가 다수의 방향으로부터 핵반응로(107)에 근접하려고 할 때 사용된다. 운송 차폐부(155)는 TS 챔버(156)가 감속 유체(159A)로 채워지는 동안 인간 조작자/작업자가 핵반응로(107) 주위를 안전하게 걸어나가도록 설계된다. 제1 감속 유체(159A)는 동작 중에 제거되거나, 지상 운송 중에 또는 인구 밀집 지역을 통해 이동할 때 추가될 수 있는 수소 밀집 액체일 수 있다. 운송 차폐부(155)의 제1 감속 유체(159A)는 이어서 항공 운송을 위해 항공기(502)에 적재되고 일단 다시 지상에 재적재되는 경우 제거될 수 있다. 구현예에 따라, TS 챔버(156)는 핵반응로(107)를 활성화하기 위해 반드시 제1 감속 유체(159A)를 실질적으로 배수할 필요는 없다. 그러나, 잠수형 핵반응로(107)는 장비 고장의 경우에 기술자가 접근하고 유지 보수하는 것이 더 어렵기 때문에, 제1 감속 유체(159A)가 무기한으로 또는 활성화 사용 동안 운송 차폐부(155)에 남아 있지 않는 것이 바람직하다.
- [0033] MSS 챔버(158)가 제2 감속 유체(159B)로 실질적으로 채워질 때, MSS 챔버(158) 내의 제2 감속 유체(159B)는 모듈 쉘도우 차폐부(157)를 형성한다. 모듈 쉘도우 차폐부(157)는 그렇지 않으면 모듈 쉘도우 차폐부 보호 아크(191B)를 통해 모듈 쉘도우 차폐부(157)를 통과할 것인 핵반응로 코어(101)로부터 모듈 쉘도우 차폐부 비보호 아크(191A) 내에서 이동하는 고속 중성자를 차단하도록 설계되고, 동작 중에 반응로 제어 시스템(175) 구성요소 및 보조 기기 모듈(BOP)(170)을 차폐하는 역할을 한다. 모듈 쉘도우 차폐부(157)의 크기, 형상 및 위치는 모듈 쉘도우 차폐부(157)가 도 1b에서 더 설명되는 바와 같이 BOP 모듈(170)을 보호하고 운송을 위해 핵반응로(107)를 준비하는 동안 방사선 작업자를 차폐하도록 설계된다. 모듈 쉘도우 차폐부(157)는 모듈 쉘도우 차폐부 보호 아크(191B)를 최대화하면서 모듈 쉘도우 차폐부(157)의 크기를 최소화하기 위해 핵반응로 코어(101) 부근에 배치된다.
- [0034] 일반적으로, 모듈 쉘도우 차폐부(157)는 핵반응로(107)의 운송 동안 비어 있고 반응로 작동을 위해 실질적으로 채워진다. 현장 재료 또는 개별적으로 운송되는 재료는 모듈 쉘도우 차폐부(157)를 채우는 데 사용된다. 몇몇 동작 체제에서, 운송 차폐부(155)는 핵반응로 시스템(100) 구조의 중성자 활성화를 감소시키기 위해 동작 중에 실질적으로 채워질 수 있다.
- [0035] 핵반응로(107) 자체로 이동하면, 핵반응로(107)는 압력 용기(160)를 갖는다. 압력 용기(160)는 도 1c에서 아래에 설명된다. 압력 용기(160) 외부는, 감속 유체(159A, 159B)(예를 들어, 물 또는 더 복합 유체)에 잠수된 모듈식 반응로에 의해 경험되는 부식 또는 산화를 추가로 감소시키기 위해 코팅으로 처리되거나 특정 금속 또는 화학 물질로 단조 또는 제조될 수도 있다.
- [0036] 압력 용기(160)는 용기내 중성자 차폐부(153)가 장착되는 압력 용기 내부 벽(161)을 갖는다. 용기내 중성자 차폐부(153)는 구조 재료의 활성화를 감소 및 방지하는 주요 목적을 담당한다. 용기내 중성자 차폐부(153)는 활성화된 구조 재료로부터의 감마 방출에 대해 차폐하기 위한 무거운 차폐부의 필요성을 상당히 감소시킨다. 용기내 중성자 차폐부(153)는 특정 동위원소 또는 천연 동위원소 조성이 풍부한 중성자 감속재(금속 수소화물, 폴리에틸렌, 플라스틱, 베릴륨 함유 화합물 또는 그 조합과 같은) 및 중성자 흡수 재료(붕소, 붕소 탄화물, 가돌리늄(Gd), यू로퓴, 텅스텐(W) 또는 그 조합과 같은)을 갖는 복합 재료 또는 다층 재료일 수 있다.
- [0037] 용기내 중성자 차폐부(153)는 압력 용기(160)의 내부 압력 용기 내부 벽(161) 상에 있고, 용기내 중성자 차폐부(153)는 연속적인 재료이거나 또는 압력 용기(160)의 내부 압력 용기 내부 벽(161)을 코팅하도록 조립된 더 작은 모듈식 구성요소의 합일 수 있다. 용기내 중성자 차폐부(153)는 중온 내지 고온 재료로 제조되고, 섭씨 300도 초과 온도에서 동작한다. 용기내 중성자 차폐부(153)는 별개의 감속 및 중성자 흡수 층을 가질 수 있고, 중성자 흡수 재료, 벌크 재료를 가질 수 있거나, 또는 용기내 중성자 차폐부(153)의 동작 온도를 증가시키기 위해 고온 매트릭스에 추가로 매립될 수 있다. 용기내 중성자 차폐부(153)는 핵반응로 코어(101)를 떠나는 중성자 플루언스를 감소시킴으로써 압력 용기(160) 및 반응로 컨테이너(151) 또는 BOP 모듈(170)과 같은 주변 구조물의 활성화를 감소시킨다. 용기내 중성자 차폐부(153)는 그 전체 내용이 본 명세서에 참조로서 합체되어

있고, 2021년 4월 8일자로 국제 공개 번호 WO 2021/067901로서 공개된, 2020년 10월 4일자로 출원된, 발명의 명칭이 "통합 용기내 중성자 차폐부(Integrated In-Vessel Neutron Shield)"인 국제 출원 번호 PCT/US2020/054188에 설명된 용기내 차폐부(105)와 같이 구현될 수 있다.

[0038] 핵반응로 코어(101)와 MSS 챔버(158) 사이의 용기내 중성자 차폐부(153)의 내부에는 용기내 쉘도우 차폐부(154)가 있다. 용기내 쉘도우 차폐부(154)는 핵반응로(107)와 BOP 모듈(170) 뿐만 아니라 반응로 제어 시스템(175) 사이에 중성자 및 감마 차폐를 제공한다. 용기내 쉘도우 차폐부(154)는 용기내 쉘도우 차폐부 보호 아크(190B)를 최대화하면서 용기내 쉘도우 차폐부(154)의 크기를 최소화하기 위해 활성 핵반응로 코어(101) 부근에 배치된다. 용기내 쉘도우 차폐부(154)의 목적은 운송을 위해 핵반응로(107)를 준비하는 동안 방사선 작업자를 차폐하는 것이다.

[0039] 용기내 쉘도우 차폐부(154)는 중금속으로 구성되고, 고속 중성자를 차단하고 그렇지 않으면 용기내 쉘도우 차폐부 보호 아크(190B) 내의 용기내 쉘도우 차폐부(154)를 통과할 것인 핵반응로 코어(101)로부터 용기내 쉘도우 차폐 비보호 아크(190A) 내에서 이동하는 감마 방사선으로부터 차폐를 제공하도록 설계된다. 용기내 쉘도우 차폐부(154)의 크기, 형상 및 위치는 용기내 쉘도우 차폐부(154)가 도 1b에서 추가로 설명되는 BOP 모듈(170)을 보호하도록 설계된다. 용기내 쉘도우 차폐부(154)는 용기내 쉘도우 차폐부 보호 아크(190B)를 최대화하면서 용기내 쉘도우 차폐부(154)의 크기를 최소화하기 위해 압력 용기(160) 내에서 핵반응로 코어(101) 부근에 배치된다.

[0040] 운송 차폐부(155) 및 용기내 중성자 차폐부(153)는 한 쌍의 유사한 차폐부로서 고려될 수 있고, 모듈 쉘도우 차폐부(157) 및 용기내 쉘도우 차폐부(154)는 다른 한 쌍의 유사한 차폐부로서 고려될 수 있다. 운송 차폐부(155)(활성이고 제1 감속 유체(159A)로 채워질 때) 및 용기내 중성자 차폐부(153)는 핵반응로 코어(101)를 완전히 둘러싸고, 모든 방향에서 핵반응로 코어(101)를 떠나는 고속 중성자를 감쇠시키려고 추구한다. 모듈 쉘도우 차폐부(157)(활성이고 제2 감속 유체(159B)로 채워질 때) 및 용기내 쉘도우 차폐부(154)는, 모듈 쉘도우 차폐부 보호 아크(191B)를 설정하고 핵반응로 코어(101)로부터 연장하는 용기내 쉘도우 차폐부 보호 아크(190B)를 추가로 향상시키기 위해, 핵반응로 코어(101)에 가능한 한 근접하게 핵반응로 코어(101)의 동일 단부에 배치된다. "비보호 아크"는 방사선이 각각의 차폐부(154, 157)에 의해 차단되지 않는 핵반응로 코어(101)와 각각의 차폐부(154, 157) 사이의 3차원 공간을 칭한다. "보호 아크"는 방사선이 각각의 차폐부(154, 157)에 의해 차단되는 그 경계가 각각의 차폐부(154, 157) 사이에 있고 각각의 차폐부(154, 157) 너머에 있는 3차원 공간을 칭한다. 모듈 쉘도우 차폐부(157), 용기내 쉘도우 차폐부(154) 및 BOP 모듈(170)은 BOP 모듈(170)이 모듈 쉘도우 차폐부(157) 및 용기내 쉘도우 차폐부(154)에 의해 보호되는 보호 아크(190A, 191A) 내에 있도록 배치된다.

[0041] 마찬가지로, 운송 차폐부(155)와 모듈 쉘도우 차폐부(157)는 상이한 유형의 유사한 아날로그 차폐부의 쌍으로서 고려될 수 있고, 용기내 중성자 차폐부(153)와 용기내 쉘도우 차폐부(154)는 유사한 차폐부의 다른 쌍으로서 고려될 수 있다. 운송 차폐부(155) 및 모듈 쉘도우 차폐부(157)는 그 각각의 챔버(TS 챔버(156) 및 MSS 챔버(158))를 감속 유체(159A, 159B)로 채움으로써 선택적으로 활성화된다. 운송 차폐부(155) 및 모듈 쉘도우 차폐부(157)는 감속 유체(159A, 159B)에 의해 감속되는데: 이 예에서, TS 챔버(156) 및 MSS 챔버(158)는 스테인리스 강으로 제조되고, TS 챔버(156), MSS 챔버(158)는 감속 유체(159A, 159B) 없이 마진 감속 효과를 갖는다. TS 챔버(156) 및 MSS 챔버(158)에 대한 대체 금속은 알루미늄 합금, 탄소-복합체, 티타늄 합금, 내방사선성 SiC 복합체, 니켈계 합금(예를 들어, Inconel™ 또는 Haynes™), 또는 이들의 조합을 포함한다. 다른 예에서, TS 챔버(156) 및 MSS 챔버(158)는 고체 감속 재료로 형성될 수 있다는 것을 주목하라. 그러나, 고체 감속 재료의 증가된 중량 및 두께는 운송 챔버(158) 및 MSS 챔버(158) 자체의 감속 능력을 개선하기 위해 수용 불가능한 절충안을 야기할 수 있다. 운송 차폐부(155) 및 모듈 쉘도우 차폐부(157)의 유체 선택성은, TS 챔버(156) 및 MSS 챔버(158) 너머의 영역에서 증가된 방사능의 절충안을 갖고, TS 챔버(156) 또는 MSS 챔버(158)에서 감속 유체(159A, 159B)가 실질적으로 배수될 때 NHS 모듈(150)이 상당한 질량을 흘릴 수 있게 한다.

[0042] 이에 비교하여, 용기내 중성자 차폐부(153) 및 용기내 쉘도우 차폐부(154)는 영구적으로 활성이고, 용기내 중성자 차폐부(153) 및 용기내 쉘도우 차폐부(154)의 체적을 통과하는 핵반응로 코어(101) 너머의 영역에서 중성자 플럭스를 항상 감소시킨다. 용기내 중성자 차폐부(153)와 용기내 쉘도우 차폐부(154)는 유체가 아닌 금속으로 제조되고, 선택적으로 맞물릴 수 없다. 용기내 중성자 차폐부(153) 및 용기내 쉘도우 차폐부(154)의 질량은 NHS 모듈(150)에 항상 존재한다.

[0043] 도 1b는 핵열 공급(NHS) 모듈(150) 뿐만 아니라 NHS 모듈(150)에 연결된 보조 기기(BOP) 모듈(170)의 모두를 포함하는 도 1a의 핵반응로 시스템(100)의 등각도이다. 여기에 도시되어 있는 핵반응로 시스템(100)은 전개 상태

에 있고, 여기서 NHS 모듈(150)과 BOP 모듈(170)은 분리되어 있지만, 가스 커넥터 라인(180)에 의해 연결되어 있다. 핵반응로(107)는 또한 여기서 활성인데: 핵반응로 코어(101)는 임계 상태이고, 핵반응로(107)는 열을 최적으로 발생시킨다.

- [0044] NHS 모듈(150)로부터 BOP 모듈(170)을 분리하는 것은 2개의 방식으로 BOP 모듈(170) 및 BOP 모듈(170)의 인간 조작자의 방사선 노출을 감소시킨다. 첫째, 증가된 거리는 고속 중성자가 반응로 컨테이너(151)를 빠져나가 BOP 모듈(170)을 향해 지향할 때 감속되거나 흡수될 수 있게 한다. 둘째, 용기내 쉘도우 차폐부(154) 및 모듈 쉘도우 차폐부(157)는 핵반응로 코어(101)로부터 비보호 아크(190B, 191B)로 이동하는 고속 중성자를 감속시킨다. 용기내 쉘도우 차폐부(154) 및 모듈 쉘도우 차폐부(157)로부터 BOP 모듈(170)까지의 거리가 용기내 쉘도우 차폐부(154) 및 모듈 쉘도우 차폐부(157)로부터 핵반응로 코어(101)까지의 고정 거리에 비교하여 증가함에 따라, 용기내 쉘도우 차폐부(154) 및 모듈 쉘도우 차폐부(157)에 의해 보호되는 보호 아크(190A, 191A)는 더 커지고, BOP 모듈(170) 뿐만 아니라 BOP 모듈(170) 부근에서 있는 인간 조작자를 더 많이 보호한다.
- [0045] 핵반응로(107)의 압력 용기(160)는 또한 핵반응로 코어(101)로부터의 열을 하나의 매체로부터 다른 매체(예를 들어, 기체, 액체, 고체 또는 그 조합)로 교환하는 열 교환기(171)를 포함하는 것으로 도시되어 있다. 이 예에서 열 교환기(171)는 또한 용기내 쉘도우 차폐부(154)로서 작용하지만, 이들 2개의 구성요소는 개별적일 수 있고, 열 교환기(171)는 용기내 쉘도우 차폐부(154)와 동일한 압력 용기(160)의 측면 또는 부분에 있을 필요가 없다.
- [0046] 열 교환기(171)에 의해 가열된 가스(예를 들어, He)는 NHS 모듈(150)의 가스 순환기(171)에 의해 가스 커넥터 라인(180)을 따라 BOP 모듈(170)을 향해 순환된다. 일단 BOP 모듈(170)이 고온 가스를 이용하고 이에 의해 가스를 냉각시키면, 가스 순환기(172)는 가스 커넥터 라인(180)의 잔여부를 통해 가스를 다시 열 교환기(171)로 순환시켜, 열 교환기(171)에 의해 재가열되고 재순환되게 한다. 이러한 재순환은 핵반응로(107)가 활성이고 BOP 모듈(170)이 고온 가스를 수용하도록 구성되는 한 발생한다.
- [0047] BOP 모듈(170)은 또한 반응로 컨테이너(151)와 유사한 CONEX 또는 ISO 상자 또는 캡슐 스타일의 선적 컨테이너인 BOP 컨테이너(177) 내에 있다. BOP 컨테이너(177)는 또한 반응로 컨테이너(151)와 같은, CONEX 또는 ISO 상자 스타일의 선적 컨테이너에 통상적인 임의의 수단에 의해 운송되도록 설계된다. 그러나, 이 예에서, BOP 모듈(170)이 더 적은 공간을 필요로 하기 때문에, BOP 컨테이너(177)는 단지 10 피트 길이이다. 즉, 이 예시적인 핵반응로 시스템(100)이 패키징 상태에 있고 NHS 모듈(150)과 BOP 모듈(170)이 함께 패키징될 때, 핵반응로 시스템(100)은 30 피트 길이: 20 피트의 NHS 모듈(150), 및 10 피트의 BOP 모듈(170)이다.
- [0048] BOP 모듈(170)은 가스 커넥터 라인(180)으로부터의 고온 가스 내의 열을 동기식 전기로 변환하도록 구성된다. BOP 모듈(170)은 이를 이하와 같이 달성한다: 터보기계(173)는 열 교환 인터페이스(176)를 갖고 고온 가스를 흡입한다. 고온 가스는 터보기계(173)의 압축기 터빈으로 진입하고, 압축기 터빈은 터보기계(173)의 샤프트를 통해 기계적 작업 출력을 생성한다. 터보기계(173)의 샤프트는 발전기(174)에 커플링된 기어 또는 벨트를 통해 직접적 또는 간접적으로 제어된다. 발전기(174)는 터보기계(173)의 기계적 작업 출력을 동기식 교류 전기 출력으로 변환한다. 발전기(174)의 전기 출력은 핵반응로 시스템(100)이 동작되는 전기 출력이다.
- [0049] 핵반응로(107) 및 제어 봉(115A 내지 115N), 열 교환기(171), 가스 순환기(172), 터보기계(173) 및 발전기(174)와 같은 내부 구성요소는 계기를 갖는 반응로 제어 시스템(175)에 의해 제어된다. 이 예에서 반응로 제어 시스템(175)은 BOP 컨테이너(177) 내에 수용되지만, 다른 예에서 반응로 제어 시스템(175)은 제거되어 BOP 컨테이너(177)로부터 원격으로 동작될 수 있다.
- [0050] 도 1c는 핵반응로 코어(101), 용기내 중성자 차폐부(153) 및 운송 차폐부(155)를 도시하고 있는, NHS 모듈(150)의 단면도이다. 반응로 컨테이너(151) 및 핵반응로(107)를 포함하는 구성요소의 개요가 또한 도시되어 있다. 전술된 바와 같이, 핵반응로 시스템(100)은 압력 용기(160) 및 압력 용기(160) 내에 배치된 핵반응로 코어(101)를 포함한다. 압력 용기(160)는 실질적으로 TS 챔버(156)를 채우는 제1 감속 유체(159A)를 포함하는 운송 차폐부(155)에 의해 둘러싸여 있다. TS 챔버(156)는 자체로 반응로 컨테이너(151)의 반응로 공동(152) 내에 있다.
- [0051] 핵반응로 코어(101)는 복수의 연료 요소(104A 내지 104N) 및 적어도 하나의 감속제 요소(103A)를 포함한다. 연료 요소(104A)는 자유 중성자를 방출하고, 핵반응로 시스템(100)의 핵반응로 코어(101) 내에서 열 에너지를 생성하도록 설계된다. 도 1c의 예에서, 감속제 요소(103A)는 연료 요소(104A)와 쌍을 이루고, 핵반응로 코어(101)가 여전히 열 에너지를 생성할 수 있게 하면서 고속 중성자를 감속시키도록 설계된다. 핵반응로 시스템

(100)은, 압력 용기(160) 내에 종방향으로 배치되고 복수의 연료 요소(104A 내지 104N) 및 적어도 하나의 감속재 요소(103A)를 측방향에서 둘러싸서 핵반응로 코어(101)의 반응성을 제어하는, 복수의 제어 드럼(115A 내지 115N)을 더 포함한다. 제어 드럼(115A 내지 115N)의 각각은 외부 표면(165)의 제1 부분(166) 상의 반사체 재료(116) 및 외부 표면(165)의 제2 부분(167) 상의 흡수체 재료(117)를 포함한다. 가연성 독은 비상시 핵반응로 코어(101)를 정지시키기 위해 복수의 연료 요소(104A 내지 104N) 및 적어도 하나의 감속재 요소(103A) 내에 통합될 수 있다.

[0052] 제어 드럼(115A 내지 115N)은, 다른 핵반응로 시스템 내의 제어 봉과 같이, 핵반응로 코어(101) 내의 중성자 개체수 및 핵반응로(107) 파워 레벨을 조절한다. 핵반응로 코어(101) 내의 중성자 플럭스를 증가 또는 감소시키기 위해서, 제어 드럼(115A 내지 115N)이 회전되는 반면; 제어 봉은 핵반응로 코어(101) 내로 삽입되거나 그로부터 제거된다. 제어 드럼(115A 내지 115N)은 핵반응로 코어(101)의 반응성을 조정하기 위해서, 삽입되고 제거되는 대신, 회전되기 때문에, 제어 드럼(115A 내지 115N)은 영구적으로 고정된 종방향 위치를 갖는다: 제어 드럼(115A 내지 115N)은 핵반응로 코어(101) 또는 압력 용기(160)의 내외로 이동하지 않는다. 제어 봉 구멍 내의 오정렬 또는 막힘으로 인해서 제어 봉이 핵반응로 코어(101) 내로 완전히 삽입되지 않을 수도 있는 위험이 있고, 제어 드럼(115A 내지 115N)을 이용하는 것은 유리하게 이러한 위험을 감소시킨다. 그럼에도 불구하고, 제어 봉이 이용될 수 있는데: 이 예에서 도 1a 및 도 1b에 도시되어 있는 바와 같은 제어 드럼(115A 내지 115N)의 헤드는 모듈 섀도우 차폐부(157)로부터 이격하여 있다.

[0053] 도 1c에 도시되어 있는 바와 같이, 제어 드럼(115A)의 외부 표면의 제1 부분은, 일반적으로 고탄성 산란 중성자 단면을 갖는 재료로 형성되는, 반사체 재료(116)를 포함한다. 반사체 재료(116)가 핵반응로 코어(101)를 향해서 내측으로 대면될 때, 중성자 플럭스가 증가되고, 이는 핵반응로 코어(101)의 반응성 및 동작 온도를 증가시킨다. 제어 드럼(115A)의 외부 표면의 제2 부분은, 중성자 흡수 물질(neutron poison)로 형성될 수 있는, 흡수체 재료(117)를 포함한다. 중성자 흡수 물질은, 자유 중성자를 흡수하는데 특히 적합한 큰 중성자 흡수 단면을 가지는 동위원소 또는 분자이다. 흡수체 재료(117)가 핵반응로 코어(101)를 향해서 내측으로 대면될 때, 중성자 플럭스가 감소되고, 이는 핵반응로 코어(101)의 반응성 및 동작 온도를 감소시킨다.

[0054] 핵반응로 시스템(100)은 제어 드럼(115A) 또는 복수의 제어 드럼(115A 내지 115N)을 선택적으로 회전시켜 흡수체 재료(117)를 핵반응로 코어(101)를 향해서 대면시킴으로써 중성자 플럭스 및 동작 온도를 감소시키거나, 반사체 재료(116)를 핵반응로 코어(101)를 향해서 대면시킴으로써 중성자 플럭스 및 동작 온도를 증가시킬 수 있다. 따라서, 핵반응로 시스템(100)은 핵반응로 코어(101)의 중성자 플럭스를 선택적으로 증가 또는 감소시킬 수 있다. 신속하게 중성자 플럭스를 감소시키고 감소된 플럭스 상태를 달성하기 위해서, 핵반응로 시스템(100)은 제어 드럼(115A)을 회전시켜 제어 드럼(115A)의 흡수체 재료(117)를 핵반응로 코어(101)의 연료 요소(104A 내지 104N)에 대해서 최대도 노출시킬 수 있고, 이에 의해 더 많은 자유 중성자를 흡수할 수 있고 중성자 플럭스를 감소시킬 수 있다. 신속하게 중성자 플럭스를 증가시키고 증가된 플럭스 상태를 달성하기 위해서, 핵반응로 시스템(100)은 제어 드럼(115A)을 회전시켜 제어 드럼(115A)의 반사체 재료(116)를 핵반응로 코어(101)의 연료 요소(104A 내지 104N)에 대해서 최대도 노출시킬 수 있고, 이에 의해 더 많은 자유 중성자를 반사할 수 있고 중성자 플럭스를 증가시킬 수 있다. 중성자 플럭스의 중간 조절을 하기 위해서 또는 그 연속적인 레벨을 유지하기 위해서, 핵반응로 코어(100)는 제어 드럼(115A)을 회전시켜 제어 드럼(115A)의 흡수체 재료(117)를 핵반응로 코어(101)의 연료 요소(104A 내지 104N)에 대해서 부분적으로 노출시킬 수 있다.

[0055] 반사체 재료(116)의 부분 또는 전체 노출은 핵반응로(107)를 임계 상태로 이동시킬 수 있고, 지속된 임계 상태는 활성 상태를 유도할 것이다. 핵반응로(107)가 활성 상태에 있을 때, 핵반응로(107)는 BOP 모듈(170)을 통해 최적의 양의 열 및 따라서 전기, 뿐만 아니라 핵반응로 코어(101)를 빠져나갈 수도 있는 높은 레벨의 자유 중성자를 생산하고 있다. 이 예에서, 핵반응로(107)는 비활성 상태에서부터 완전 활성 상태에 도달하는 데 대략 3일이 걸린다.

[0056] 흡수체 재료(117)의 부분 또는 전체 노출, 또는 연료 요소(104A 내지 104N)의 물질적으로 완전한 소비는 핵반응로(107)를 아임계 상태로 이동시킬 것이고; 지속된 아임계 상태는 비활성 상태를 유도할 것이다. 핵반응로(107)가 비활성 상태에 있을 때, 핵반응로(107)는 최소량의 열을 생산하고 있으며, BOP 모듈(170)이 비활성 NHS 모듈(150)에 커플링되어야 하면, BOP 모듈(170)을 통해 전기를 거의 생산하지 않을 것이다. 비활성 상태에서 핵반응로(107)는 또한 핵반응로 코어(101)를 빠져나갈 수도 있는 최소량의 자유 중성자를 생산하고 있다. 이 예에서, 핵반응로(107)는 활성 상태에서부터 완전 비활성 상태에 도달하는 데 대략 7일이 걸린다. 일단 핵반응로(107) 및 따라서 NHS 모듈(150)이 비활성 상태에 도달하고, TS 챔버(156)가 감속재 유체(159A)로 채워짐으로 인

해 운송 차폐부(155)가 전개되면, NHS 모듈(150)은 운송 준비가 된다.

[0057] 핵반응로 코어(101) 내의 복수의 연료 요소(104A 내지 104N)는 핵 연료 타일(104A 내지 104N)의 핵 연료 타일 어레이(114)로서 배열된다. 핵반응로 코어(101)는 복수의 감속재 요소(103A 내지 103N)를 포함한다. 핵반응로 코어(101)의 이러한 구현에는 그 전체 내용이 본 명세서에 참조로서 합체되어 있고, 2021년 4월 8일자로 국제 공개 번호 WO 2021/067903으로서 공개된, 2020년 10월 4일 출원되고, 발명의 명칭이 "향상된 열 전달 및 안전을 갖는 핵반응로 코어 아키텍처(Nuclear Reactor Core Architecture with Enhanced Heat Transfer and Safety)"인 국제 출원 번호 PCT/US2020/054190에 설명되어 있다. 제2 예에서, 핵반응로 코어(101)는, 그 전체 내용이 본 명세서에서 참조로서 합체되어 있는, 2020년 5월 5일 허여되고, 발명의 명칭이 "핵열 추진 반응로의 수동 반응성 제어(Passive Reactivity Control of Nuclear Thermal Propulsion Reactors)"인 미국 워싱턴주 시애틀 소재의 Ultra Safe Nuclear Corporation의 미국 특허 제10,643,754호의 도 3 및 도 4 그리고 연관된 텍스트에서 설명된 핵반응로 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 텍스트에서 설명된 것과 유사한 연료 요소(310A 내지 310N)와 유사하게 구현될 수 있고, 감속재 요소(103A 내지 103N)는 그러한 것에서 설명된 타이 튜브(320A 내지 320N)와 유사하게 구현될 수 있다.

[0058] 제3 예에서, 핵반응로 코어(101)는, 그 전체 내용이 본 명세서에서 참조로서 합체되어 있는, 2020년 1월 23일 허여되고, 발명의 명칭이 "핵반응로 시스템용 복합 감속재(Composite Moderator for Nuclear Reactor Systems)"인 미국 워싱턴주 시애틀 소재의 Ultra Safe Nuclear Corporation의 미국 특허 출원 공개 제 2020/0027587호의 도 2c 및 연관된 텍스트에서 설명된 핵반응로 코어(101)와 유사하게 구현될 수 있다. 제3 예에서, 연료 요소(104A 내지 104N)는 미국 특허 공개 제2020/0027587호의 도 2c 및 연관된 텍스트에서 설명된 연료 요소(102A 내지 102N)와 유사하게 구현될 수 있고, 감속재 요소(103A 내지 103N)는 그러한 것에서 설명된 복합 감속재 블록과 유사하게 구현될 수 있다.

[0059] 핵반응로(107)는 압력 용기(160) 내부에 위치한 반사체(140)(예를 들어, 외부 반사체 영역)를 포함한다. 반사체(140)는, 복수의 연료 요소(104A 내지 104N) 및 적어도 하나의 감속재 요소(103A)를 측방에서 둘러싸는 복수의 반사체 블록(141A 내지 141N)을 포함한다.

[0060] 핵반응로(107)는 핵반응로 코어(101)를 포함하고, 핵반응로 코어 내에서는 제어된 핵 연쇄 반응이 발생되고 에너지가 방출된다. 핵반응로 코어(101) 내의 중성자 연쇄 반응은 중요하고 - 각각의 핵분열 핵으로부터의 단일 중성자는 다른 핵의 핵분열을 야기함 - 연쇄 반응은 반드시 제어되어야 한다. 제어된 핵분열을 유지함으로써, 핵반응로 시스템(100)은 열 에너지를 생성한다. 예시적인 구현예에서, 핵반응로 시스템(100)은 가스-냉각형 고온 핵반응로(107)로서 구현된다. 그러나, 핵반응로 시스템(100)은 히트 파이프 핵반응로, 용융-염-냉각형 핵반응로, 헬륨-냉각형 핵반응로, 흑연 감속 핵반응로, 염-내-연료 핵반응로, 초임계 CO2 반응로, (개방 또는 폐쇄) 브레이튼(Brayton) 사이클 반응로 또는 나트륨-냉각형 고속 핵반응로로서 구현될 수 있다. 특히, 핵반응로 시스템(100)은 가스-냉각형 그라파이트-감속 핵반응로, 가스-냉각형 그라파이트-감속 핵반응로보다 더 많은 열 중성자 플럭스를 갖는 불화물 염-냉각형 고온 핵반응로, 또는 가스-냉각형 그라파이트-감속 핵반응로보다 더 고속의 중성자 플럭스를 갖는 나트륨 고속 핵반응로로 구현될 수 있다.

[0061] 핵 연료 타일(104A 내지 104N)로서 도시되어 있는 연료 요소(104A 내지 104N)의 각각이 핵 연료를 포함한다. 핵 연료는, 고온 매트릭스 내부에 매립된 3구조-등방성(TRISO) 연료 입자와 같은 코팅된 연료 입자로 구성된 연료 콤팩트를 포함한다. 몇몇 구현예에서, 핵 연료는 고온 매트릭스 내부에 매립된 이중구조-등방성(BISO) 연료 입자로 구성된 연료 콤팩트를 포함한다. 또 다른 구현예에서, 핵 연료는 TRISO 연료 입자로서 알려진 TRISO의 변형으로 구성된 연료 콤팩트를 포함한다. TRISO 연료 입자는 TRISO 연료 입자의 규소 탄화물 층을 지르코늄 탄화물(ZrC)로 대체한다. 대안적으로, TRISO 연료 입자는 TRISO 연료 입자의 일반적인 코팅 및 연료 커널 주위의 부가의 얇은 ZrC 층 코팅을 포함하며, 이는 이어서 TRISO 연료 입자의 일반적인 코팅으로 둘러싸인다. 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, 이원 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 이원 탄화물 층과 동일한 재료로 형성될 수 있다.

[0062] 핵 연료는 그 자체의 내부에 핵분열 생성물을 보유하고 있어, 핵 폐기물 생성물의 즉각적인 폐기의 필요성을 감

소시킨다. 코팅된 연료 입자는 또한 상용 경수로 연료와 비교하여 확산 위험을 감소시킨다.

[0063]

원통형 형상의 핵 연료 콤팩트를 형성하기 위한 규소 탄화물 매트릭스 내에 분산된 TRISO 연료 입자의 설명은, 그 전체 내용이 본 명세서에서 참조로서 합체되어 있는, 미국 워싱턴주 시애틀 소재의 Ultra Safe Nuclear Corporation의 이하의 특허 및 공개에서 제공되어 있다: 발명의 명칭이 "완전 세라믹 핵 연료 및 관련 방법(Fully Ceramic Nuclear fuel and Related Methods)"인 2016년 3월 29일자로 허여된 미국 특허 제9,299,464호; 발명의 명칭이 "CANDU 및 다른 반응로용 완전 세라믹 마이크로캡슐화(FCM) 연료(Fully Ceramic Microencapsulated (FCM) fuel for CANDUs and Other Reactors)"인 2018년 7월 24일자로 허여된 미국 특허 제 10,032,528호; 발명의 명칭이 "완전 세라믹 마이크로캡슐화 핵 연료의 제조 방법(Method for Fabrication of Fully Ceramic Microencapsulation Nuclear Fuel)"인 2018년 10월 23일자로 허여된 미국 특허 제10,109,378호; 발명의 명칭이 "분산 세라믹 마이크로캡슐화(DCM) 핵 연료 및 관련 방법(Dispersion Ceramic Microencapsulated (DCM) Nuclear Fuel and Related Methods)"인 2017년 4월 11일에 허여된 미국 특허 제9,620,248 호 및 2019년 11월 12일에 허여된 제10,475,543호; 발명의 명칭이 "핵반응로 시스템용 복합 감속재(Composite Moderator for Nuclear Reactor Systems)"인 2020년 1월 23일자로 공개된 미국 특허 공개 제2020/0027587호; 및 발명의 명칭이 "열분해 그라파이트 및 규소 탄화물의 층을 포함하는 압력 용기를 갖는 핵 연료 입자(Nuclear Fuel Particle Having a Pressure Vessel Comprising Layers of Pyrolytic Graphite and Silicon Carbide)"인 2020년 2월 25일자로 허여된 미국 특허 제10,573,416호. 이러한 Ultra Safe Nuclear Corporation 특허에서 설명된 바와 같이, 핵 연료는, 원통형 형상의 핵 연료 콤팩트를 생성하기 위해서 규소 탄화물 매트릭스 내부에 매립된 TRISO 연료 입자로 구성된 원통형 연료 콤팩트 또는 펠릿을 포함할 수 있다. 원통형 형상 핵 연료 콤팩트를 형성하기 위해 지르코늄 탄화물 매트릭스에 분산된 TRISO, BISO 또는 TRIZO 연료 입자의 설명은, 그 전체 내용이 본 명세서에 참조로서 합체되어 있는, 2021년 1월 7일 공개되고, 발명의 명칭이 "초고온 지르코늄 탄화물 마이크로캡슐화 핵 연료 처리(Processing Ultra High Temperature Zirconium Carbide Microencapsulated Nuclear Fuel)"인 미국 워싱턴주 시애틀 소재의 Ultra Safe Nuclear Corporation의 미국 특허 출원 공개 제 2021/0005335호에 제공되어 있다.

[0064]

도시된 바와 같이, 핵반응로 코어(101)는 절연체 요소(102A 내지 102N)의 절연체 요소 어레이(112) 및 감속재 요소(103A 내지 103N)의 감속재 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. 감속재 요소(103A 내지 103N)는 저온 고상 감속재로 형성된다. 저온 고상 감속재는 MgH_x, YH_x, ZrH_x, CaH_x, ZrO_x, CaO_x, BeO_x, BeC_x, Be, 농축된 붕소 탄화물, ¹¹B₄C, CeH_x, LiH_x, 또는 그 조합을 포함한다.

[0065]

이 핵반응로 시스템(100)에서, 핵반응로(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 핵반응로 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 수도 있다. 도시된 바와 같이, 제어 드럼(115A 내지 115N)은 압력 용기(160)의 둘레부 또는 주변부 상에 놓일 수 있고, 핵반응로 코어(101)의 절연체 요소(102A 내지 102N), 감속재 요소(103A 내지 103N), 및 핵 연료 타일(104A 내지 104N) 주위에서 원주방향으로 위치된다. 제어 드럼(115A 내지 115N)은, 동작 중에 중성자 개체수 및 반응로 파워 레벨을 선택적으로 조절하기 위해서, 반사체(140)의 영역 내에, 예를 들어 핵반응로 코어(101)를 바로 둘러싸는 반사체 블록(141A 내지 141N)으로 형성된 외부 반사체 영역 내에 위치될 수도 있다. 예를 들어, 제어 드럼(115A 내지 115N)은 원통형 형상일 수 있고 외부 표면(165)의 제1 부분 상의 반사체 재료(116)(예를 들어, 베릴륨(Be), 베릴륨 산화물(BeO), BeSiC, BeMgO, Al₂O₃, 등) 및 외부 표면의 제2 부분(예를 들어, 외부 원주) 상의 흡수제 재료(117) 모두로 형성될 수 있다.

[0066]

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 형성된 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 재료(116)로 형성된 반사체 기재를 덮어, 제어 드럼(115A 내지 115N)을 형성한다. 반사체 재료(116)가 실린더의 절두형 부분일 때, 흡수제 재료(117)는 절두형 부

분에 대한 상보적인 본체 형상을 가져 원통형 형상을 형성한다.

- [0067] 제어 드럼(115A 내지 115N)이 연속적인 표면, 예를 들어 둥근, 비구면, 또는 구면 표면으로 형성되어, 쌍곡면, 원뿔, 타원체, 포물면 등과 같은 2차 표면을 형성하기 위한 실린더 또는 다른 원뿔형 표면을 형성할 수 있다. 대안적으로 또는 부가적으로, 제어 드럼(115A 내지 115N)은 (예를 들어, 입방체 또는 다른 다면체, 예를 들어 육각형 프리즘을 형성하기 위한) 복수의 불연속적인 표면으로 형성될 수 있다. 본 명세서에 사용될 때, "불연속적"은, 집합체 내의 표면이 제어 드럼(115A 내지 115N)의 둥근(예를 들어, 원형 또는 난형) 돌레인 연속적인 외부 표면(165)을 형성하지 않는다는 것을 의미한다. 도 1c에서, 도시되어 있는 외부 표면은 둥근 연속적 표면이다.
- [0068] 도시되어 있는 원통형-형상의 제어 드럼(115A 내지 115N)의 회전은, 핵반응로 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 핵반응로 코어(101)를 향해서 내측으로 대면되고 흡수제 재료(117)가 외측으로 대면될 때, 중성자가 핵반응로 코어(101) 내로 역으로 산란(반사)되어 더 많은 핵분열을 유발하고 핵반응로 코어(101)의 반응성을 증가시킨다. 흡수제 재료(117)가 핵반응로 코어(101)를 향해서 내측으로 대면되고 반사체 재료(116)가 외측으로 대면될 때, 중성자가 흡수되고 부가의 핵분열은 중단되며, 그에 따라 핵반응로 코어(101)의 반응성을 감소시킨다.
- [0069] 예를 들어, 외부 반사체 영역으로 도시된, 중성자 반사체(140)는 최외측 핵 연료 타일(104A 내지 104N)과 제어 드럼(115A 내지 115N) 사이 뿐만 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) 선택적 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, 핵반응로(107)는, 반사체(140), 뿐만 아니라, 핵반응로 코어(101)의 절연체 요소 어레이(112), 감속재 요소 어레이(113), 핵 연료 타일 어레이(114)를 포함하는 다발형 집합체를 둘러싸기 위해서 선택적 배럴(도시되어 있지 않음)을 포함할 수 있다. 도시된 바와 같이, 제어 드럼(115A 내지 115N)은 압력 용기(160)의 돌레부에 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.
- [0070] 압력 용기(160)는 알루미늄 합금, 탄소-복합체, 티타늄 합금, 내방사선성 SiC 복합체, 니켈계 합금(예를 들어, Inconel™ 또는 Haynes™), 또는 이들의 조합으로 형성될 수 있다. 압력 용기(160) 및 핵반응로 시스템(100)은, 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)를 통해서 유동하는 감속재 냉각제; 및 연료 냉각제 통로(142A 내지 142N)를 통해서 유동하는 추진제(예를 들어, 수소 가스 또는 액체)와 같은 개별 핵 연료 냉각제를 전달하는 실린더, 파이핑, 및 저장 탱크를 포함하는, 다른 구성요소로 구성될 수 있다. 감속재 냉각제 및 핵 연료 냉각제는 감속 유체(159A, 159B)와 유체 연통하지 않는 가스 또는 액체일 수 있다.
- [0071] 도 1c의 예에서, 핵반응로 시스템(100)은 감속재 냉각제가 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)를 통해서 유동할 수 있게 하고 개별 핵 연료 냉각제가 연료 냉각제 통로(142A 내지 142N)를 통해서 유동할 수 있게 한다. 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)는, 감속재 냉각제가 예를 들어 전용 감속재 냉각제 루프를 통해서 핵반응로 코어(101)를 통해서 그리고 히트 싱크(도시되어 있지 않음) 내로 통과될 수 있게 하는 채널 또는 구멍과 같은 납작한 링 형상 (예를 들어, O-형상) 개구부이다. 연료 냉각제 통로(142A 내지 142N)는 BOP 모듈(170)용 가스를 가열하기 위해 핵 연료 냉각제가 핵반응로 코어(101)를 통해 열 교환기(171) 내로 또는 그 부근으로 통과할 수 있게 하는 채널 또는 구멍이다.
- [0072] 대안적인 구현예에서, 감속재 요소(103A 내지 103N)와 핵 연료 타일(104A 내지 104N) 사이에서 공유되는 냉각제는 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N) 및 연료 냉각제 통로(141A 내지 141N) 모두를 통해서 유동될 수도 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 감속재 냉각제 통로(121A 내지 121N)를 통해서 유동한다. 이는 감속재 요소(103A 내지 103N)를 저온에서 유지한다.
- [0073] 도 1d는 핵반응로 코어(101)에 의해 방출될 때 용기내 쉘도우 차폐부 비보호 아크(190A), 용기내 쉘도우 차폐부 보호 아크(190B), 모듈 쉘도우 차폐부 비보호 아크(191A), 모듈 쉘도우 차폐부 보호 아크(191B), 및 복수의 방사선 입자(192A 내지 192I) 및 경로를 도시하고 있다. 용기내 쉘도우 차폐부(154)에 의해 설정된 용기내 쉘도우

우 차폐부 보호 아크(190B)와 모듈 섀도우 차폐부(157)에 의해 설정된 모듈 섀도우 차폐부 보호 아크(191B)는 완전히 중첩하지 않을 수도 있다. 따라서, 핵반응로 코어(101)로부터 나오는 개별 방사선 입자(192A 내지 192I)는 다양한 경로를 따라 차단될 수 있다. 용기내 중성자 차폐부(153), 용기내 섀도우 차폐부(154), 운송 차폐부(155) 및 모듈 섀도우 차폐부(157)는 다양한 방사선 입자, 특히 알파, 베타 및 감마 입자를 차단할 수 있다. 그러나, 다른 방사성 입자와 비교하여 감속체를 통해 쉽게 이동하는 이들의 능력으로 인해, 그리고 이들이 제시하는 장비 및 인간 수명에 대한 위험으로 인해, 용기내 중성자 차폐부(153), 용기내 섀도우 차폐부(154), 운송 차폐부(155), 및 모듈 섀도우 차폐부(157)는 바람직하게는 감마 입자를 차단하도록 설계될 수 있다.

[0074] 제1 방사선 입자(192A)는 용기내 섀도우 차폐부(154)에 타격할 수 있고 차단된다. 제2 방사선 입자(192B)는 용기내 섀도우 차폐부(154)를 통과하고, 용기내 중성자 차폐부(153)에 타격할 수 있고, 차단된다. 제3 방사선 입자(192C)는 용기내 섀도우 차폐부(154) 및 용기내 중성자 차폐부(153)를 통과하고, 운송 차폐부(155)에 타격할 수 있고, 차단된다. 제4 방사선 입자(192D)는 용기내 섀도우 차폐부(154), 용기내 중성자 차폐부(153) 및 운송 차폐부(155)를 통과하고, 모듈 섀도우 차폐부(157)에 타격할 수 있고, 차단된다.

[0075] 제5 방사선 입자(192E)는 용기내 중성자 차폐부(153)에 직접 타격하여 정지할 수 있다. 제6 중성자 입자(192F)는 용기내 중성자 차폐부(153)를 통과하고 운송 차폐부(155)에 타격할 수 있고, 차단된다. 제7 방사선 입자(192G)는 용기내 중성자 차폐부(153) 및 운송 차폐부(155)를 통과하고, 모듈 섀도우 차폐부(157)에 타격할 수 있고, 차단된다. TS 챔버(156)가 MSS 챔버(158)를 둘러싸는 예에서, 제8 방사선 입자(192H)는 용기내 중성자 차폐부(153), 운송 차폐부(155)를 첫째로, 그리고 모듈 섀도우 차폐부(157)를 통과하고, 운송 차폐부(155)를 두 번째로 타격할 수 있고, 차단된다. TS 챔버(156)가 MSS 챔버(158)를 둘러싸는 다른 예에서, 제9 방사선 입자(192I)는 용기내 섀도우 차폐부(154), 용기내 중성자 차폐부(153), 운송 차폐부(155)를 첫째로, 모듈 섀도우 차폐부(157)를 통과하고, 운송 차폐부(155)를 두 번째로 타격할 수 있고, 차단된다.

[0076] 따라서, 도 1a 내지 도 1d는 핵열 공급(NHS) 모듈(150)을 포함하는 핵반응로 시스템(100)을 도시하고 있다. NHS 모듈은 반응로 컨테이너(151)를 포함한다. 반응로 컨테이너(151)는 반응로 공동(152)을 포함한다. NHS 모듈(150)은 반응로 컨테이너(152) 내에 압력 용기(160)를 더 포함한다. 압력 용기(160)는 내부 벽(161)을 포함한다. NHS 모듈(150)은 압력 용기(160) 내에 위치한 핵반응로 코어(101)를 더 포함한다. 핵반응로 코어(101)는 복수의 연료 요소(104A 내지 104N) 및 적어도 하나의 감속체 요소(103A)를 포함한다. NHS 모듈(150)은 핵반응로 코어(101)를 둘러싸도록 압력 용기(160)의 내부 벽(161)에 위치한 용기내 중성자 차폐부(153)를 더 포함한다. NHS 모듈(150)은 압력 용기(160) 내부에 용기내 섀도우 차폐부(154)를 더 포함한다. NHS 모듈(150)은 제1 감속 유체(159A)를 수용하기 위한 TS 챔버(156)를 반응로 공동(152) 내에 포함하는 운송 차폐부(TS)(155)를 반응로 컨테이너(151) 내부 및 압력 용기(160) 외부에 더 포함한다. NHS 모듈(150)은 제2 감속 유체(159B)를 수용하기 위한 MSS 챔버(158)를 반응로 공동(152) 내에 포함하는 모듈 섀도우 차폐부(MSS)(157)를 반응로 컨테이너(151) 내부 및 압력 용기(160) 외부에 더 포함한다.

[0077] 운송 차폐부(155)는 TS 챔버(156)를 실질적으로 채우는 제1 감속 유체(159A)를 더 포함한다. 모듈 섀도우 차폐부(157)는 MSS 챔버(158)를 실질적으로 채우는 제2 감속 유체(159B)를 더 포함한다. NHS 모듈(150)은 중간 열 교환기(171) 및 가스 순환기(172)를 더 포함한다. 열 교환기(171)는 핵반응로 코어(101)에 열적으로 커플링된다. 운송 차폐부(155)는 제1 감속 유체(159A)를 더 포함한다. 제1 감속 유체(159A)는 TS 챔버(156)를 실질적으로 채운다.

[0078] NHS 모듈(150)은 활성 및 비활성 상태를 포함한다. 제1 예에서, NHS 모듈(150)이 비활성 상태에 있는 동안 NHS 모듈(150)에 의해 유도된 NHS 모듈(150) 외부의 인체 린트겐 당량(roentgen equivalent man: 램(rem)) 선량은 시간당 50 램(rem/hr) 미만이다. 제1 감속 유체는 물(H₂O)을 포함한다. 제2 예에서, NHS 모듈(150)이 비활성 상태에 있는 동안 NHS 모듈(150)에 의해 유도된 NHS 모듈(150) 외부의 램 선량은 시간당 10 램(rem/hr) 미만이다. 제1 감속 유체(159A)는 물(H₂O)을 포함하고, 제1 감속 유체(159A)는 대략 1.63 입방 센티미터당 그램(g/cc) 이상의 Pb(NO₃)₂(질산납)의 농도를 함유한다. 제3 예에서, NHS 모듈(150)이 비활성 상태에 있는 동안 NHS 모듈(150)에 의해 유도된 NHS 모듈(150) 외부의 램 선량은 시간당 0.5 램(rem/hr) 미만이다. 제1 감속 유체(159A)는 물(H₂O)을 포함하고, 제1 감속 유체(159A)는 대략 5 입방 센티미터당 그램(g/cc) 이상의 ZnBr₂(브롬화아연)의 농도를 함유한다.

[0079] 모듈 섀도우 차폐부(157)는 제2 감속 유체(159B)를 더 포함한다. 제2 감속 유체(159B)는 MSS 챔버(158)를 실질적으로 채운다. 복수의 연료 요소(104A 내지 104N)는 복수의 방사선 입자(192A 내지 192I)를 방출한다. 용기

내 웨도우 차폐부(154)는 초기에 복수의 방사선 입자(192A 내지 192I) 중 제1 방사선 입자(192A)를 차단한다. 용기내 웨도우 중성자 차폐부(153)는 용기내 웨도우 차폐부(154)를 통과하는 복수의 방사선 입자(192A 내지 192I) 중 제2 방사선 입자(192B)를 차단한다. 운송 차폐부(155)는 용기내 웨도우 차폐부(154) 및 용기내 중성자 차폐부(153)를 통과하는 복수의 방사선 입자(192A 내지 192I) 중 제3 방사선 입자(192C)를 차단한다. 모듈 웨도우 차폐부(157)는 용기내 웨도우 차폐부(154), 용기내 중성자 차폐부(153), 및 운송 차폐부(155)를 통과하는 복수의 방사선 입자(192A 내지 192I) 중 제4 방사선 입자(192D)를 차단한다.

[0080] 핵반응로 시스템(100)은 NHS 모듈(150) 외부에 배치된 보조 기기(BOP) 모듈(170)을 더 포함한다. 반응로 컨테이너(151)는 운송 차폐부(155), 모듈 웨도우 차폐부(157), 압력 용기(160), 용기내 웨도우 차폐부(154), 핵반응로 코어(101), 및 용기내 중성자 차폐부(153)를 수용한다. BOP 모듈(170)은 터보기계(173), 발전기(174) 및 반응로 제어 시스템(175)을 포함한다. 제1 감속 유체(159A)는 방사선 입자(192C)를 차단하여(예를 들어, 방사선 입자(192C)를 흡수함으로써) 방사선 입자(192C)가 BOP 모듈(170)로 이동하는 것을 방지한다. 제2 감속 유체(159B)는 방사선 입자(192D)를 차단하여(예를 들어, 방사선 입자(192D)를 흡수함으로써) 방사선 입자(192D)가 BOP 모듈(170)로 이동하는 것을 방지한다.

[0081] 용기내 웨도우 차폐부(154), 용기내 중성자 차폐부(153), 제1 감속 유체(159A) 및 제2 감속 유체(159B)는 하나 이상의 중성자 흡수 재료를 포함한다. 용기내 중성자 차폐부(153)는 특정 동위원소 또는 천연 동위원소 조성이 풍부한 중성자 감속제와 중성자 흡수 재료를 갖는 복합 재료 또는 다층 재료로 형성된다. 제1 감속 유체(159A)는 수소 밀집 액체를 포함한다. 제2 감속 유체(159B)는 물(H₂O)을 포함한다. 중성자 감속제는 금속 수소화물, 폴리에틸렌, 플라스틱, 베릴륨 함유 화합물 또는 그 조합을 포함한다. 중성자 흡수 재료는 붕소, 붕소 탄화물, 금속 붕화물, 가돌리늄, यू로퓴, 텅스텐 또는 그 조합을 포함한다. 용기내 중성자 차폐부(153)는 2개 이상의 중성자 흡수 재료로 형성된다. 2개 이상의 중성자 흡수 재료는 거의 흑색의 중성자 흡수 재료 및 회색 흡수 재료를 포함한다.

[0082] 도 2는 보조 공급 모듈(250) 및 이산 제어 모듈(275)을 더 포함하는, 도 1b의 핵반응로 시스템(100)의 블록도이다. NHS 모듈(150)은 도 1a 내지 도 1d와 동일하고, 핵반응로 코어(101)가 열을 발생시키고, 열 교환기(171)로 교환되고, 이어서 가스 순환기(172)에 의해 BOP 모듈(170)로 순환된다. BOP 모듈(270)은 도 1a 내지 도 1d의 BOP 모듈(170)과 유사하지만, 반응로 제어 시스템(175)은 분리된 제어 모듈(270)로 구현된다. BOP 모듈(270)은 여전히 NHS 모듈(170)로부터 열을 수용하고, 파워 변환 시스템에서 터보기계(173)를 사용하여 고온 가스를 기체적 회전 에너지로 변환하고, 이는 발전기(174)를 회전시켜 동기식 교류 전기를 생성한다. 이 NHS 모듈(150)은 파워 변환을 위해 열 교환기(171)를 통해 2차 루프에 커플링된 헬륨-냉각형 핵반응로(107)이다.

[0083] 핵반응로 시스템(100)은 보조 공급 모듈(250)을 포함한다. 이 보조 공급 모듈(250)은 NHS 모듈(150)이 비활성 상태에 있을 때 실행된다. 이 보조 공급 모듈(250)은 석유화학 제품에 의해 구동될 수 있고, 대형 배터리일 수 있으며, 대체 에너지 소스를 사용할 수 있다. 보조 공급 모듈(250)은 또한 핵반응로 코어(101)로부터 잔열을 흡수하도록 설계될 수 있다. 보조 공급 모듈(250)은 이 잔열을 사용하여 전기, 기계 에너지 또는 심지어 NHS 모듈(150)과 같은 고온 가스를 생성할 수도 있다. 또는 보조 공급 모듈(250)은 단순히 NHS 모듈(150)로부터 열 또는 자유 중성자를 방출하는 것을 도울 수도 있어, 원할 때 NHS 모듈(150)을 활성 상태에서부터 비활성 상태로 더 신속하게 이동시킬 수도 있다.

[0084] 또한, 핵반응로 시스템(100)은 전술된 제어 모듈(275)을 포함한다. 제어 모듈(275)은 NHS 모듈 및 BOP 모듈을 제어하도록 지시된 반응로 제어 시스템(175)을 통합한다. 부가적으로, 제어 모듈(275)은 보조 공급 모듈(250)을 제어할 수 있다.

[0085] 도 3a는 BOP 모듈(270)이 NHS 모듈(150)로부터 소정 거리 이격하여 있는, 전개 상태에서 도 1b의 핵반응로 시스템(100)의 등각도이다. 이 전개 상태에서, NHS 모듈(150)로부터의 증가된 거리로 인해 직원은 BOP 모듈(270)과 더 안전하게 상호 작용할 수 있다. 가열된 가스는 여전히 가스 커넥터 라인(180)을 통해 NHS 모듈(150)로부터 BOP 모듈(270)로 이동할 수 있다. 전개 상태에서 핵반응로 시스템(100)의 도시는 모두 NHS 모듈(150) 및 BOP 모듈(170, 270)을 축방향으로 수평으로, 예를 들어 편평하거나 지면과 같은 높이로 배향된 것으로서 도시하고 있다. 이들 축방향 수평 배향은 물류 및 전개를 개선하고 지진 문제를 최소화할 수 있다. 그러나, NHS 모듈(150)은 임의의 방향으로 배향될 수 있고, 심지어 사면에 또는 사면 아래에 매립될 수 있다. 부분적으로 또는 완전히 사면 아래에 매립되는 것은 NHS 모듈(150) 부근에서 경험되는 램 선량을 감소시킬 수 있고, 이들 직원에 대한 차폐 요구 사항 또는 안전 요구 사항을 감소시킬 수도 있다. 매립은 땅에 매립되는 것, 콘크리트에 시멘트를 바르는 것, 뿐만 아니라 물에 가라앉는 것으로서 이해되어야 한다. NHS 모듈(150)은 또한 건물 내에, 사

면에, 사면 위, 또는 아래에 배치될 수 있다. NHS 모듈(150)을 지하의 매우 높은 곳에 또는 사면 아래에 배치하는 것은 또한 직원에 대한 차폐 요구 사항 또는 안전 요구 사항을 감소시킬 수 있다. NHS 모듈(150)은 또한 BOP 모듈(170, 270)로부터 임의의 적당한 거리에 있을 수 있지만, 더 긴 가스 커넥터 라인(180)은 가스 순환기(172)가 가열된 가스를 NHS 모듈(150)로부터 BOP 모듈(170, 270)로 송출하기 때문에 더 많은 열 손실을 야기할 가능성이 있다.

[0086] 도 3b는 BOP 모듈(270)이 NHS 모듈(150)에 매우 근접한 패키징 상태에서 도 1b의 핵반응로 시스템의 등각도이다. 제어 모듈(275)은 BOP 컨테이너(177) 내에 BOP 모듈(270)과 함께 패키징된다. 이 패키징 상태에서, 핵반응로 시스템(100)은 단일 세미 트레일러 트럭 트레일러에 장착되어 운송이 쉽다. 핵반응로 시스템(100)은 이러한 구성에서 동작될 수 있지만; 이는 BOP 모듈(270) 및 핵반응로 시스템(100)을 조작하는 직원에 과도한 방사선을 배치할 수도 있다. 예를 들어, 용기내 웨도우 차폐부 보호 아크(190B) 및 모듈 웨도우 차폐부 보호 아크(191B)가 BOP 모듈(270) 및 직원이 서 있을 BOP 모듈 주위의 인접 영역을 완전히 덮지 않는 경우이다.

[0087] 도 4는 핵반응로 시스템(100)에 대한 핵반응로 전개 방법(400)의 흐름도이다. 핵반응로 전개 방법(400)의 단계 405, 410, 415, 420, 및 425는 임의의 순서로 수행될 수 있지만, 제시된 순서는 방사선 노출이 문제되는 핵반응로 시스템(100)의 구성요소에 충분히 근접한 살아있는 유기체 또는 플랜트 직원에게 가장 안전할 것이다. 단계의 순서는 NHS 모듈(150)을 장착하기 위해 플랜트 직원이 핵반응로(107) 부근에서 밀접하게 작업하기 전에, 가장 넓은 차폐부(운송 차폐부(155))를 먼저 설정하고, 이어서 특정 차폐부(MSS(157))를 설정하는 것이다.

[0088] 단계 405에서 시작하여, 핵반응로 전개 방법(400)은 핵열 공급(NHS) 모듈(150)의 운송 차폐부(TS) 챔버(156)를 제1 감속 유체(159A)로 실질적으로 채우는 단계를 포함한다. NHS 모듈(150)은 핵반응로 코어(101)를 포함한다. 단계 410으로 이동하면, 핵반응로 전개 방법(400)은 NHS 모듈(150)을 제1 위치로부터 제2 위치로 운송하는 단계를 더 포함한다.

[0089] 이제, 단계 415로 계속하면, 핵반응로 전개 방법(400)은 NHS 모듈을 운송한 후에, NHS 모듈(150)의 모듈 웨도우 차폐부(MSS) 챔버(158)를 제2 감속 유체(159B)로 실질적으로 채우는 단계를 더 포함한다. 단계 420에서, 핵반응로 전개 방법(400)은 NHS 모듈(150)을 제2 위치에서 접지에 커플링하는 단계를 더 포함한다. NHS 모듈(150)을 지면에 커플링하는 것은 NHS 모듈(150)을 지면, 구조물 또는 플랫폼에 부착하는 것, 또는 NHS 모듈(150)을 지면, 사면 아래에 부분적으로 또는 완전히 매립하는 것을 의미할 수 있다. NHS 모듈(150)을 자체가 지면에 직접적으로 또는 간접적으로 부착되거나 커플링되는 물체에 부착하는 것은 NHS 모듈(150)을 지면에 부착 및 커플링한다. 단계 425에서 종료하여, 핵반응로 전개 방법(400)은 핵반응로 코어(101)의 중성자 플럭스를 임계 레벨로 증가시켜, 궁극적으로 보조 기기 모듈(170)이 전기를 발생시키기에 충분한 열을 발생시키는 단계를 더 포함한다. 일반적으로, 핵반응로 코어(101)의 중성자 플럭스를 임계 레벨로 증가시키는 단계 425는 MSS 챔버(158)를 제2 감속 유체(159B)로 실질적으로 채우는 단계 후에 발생한다.

[0090] 도 5a는 핵반응로 시스템(100)이 패키징 상태에 있고, 육상 차량(501)에 적재되고, 항공기(502) 또는 아마도 선박(503)에 적재될 준비가 되어 있는 핵반응로 차폐 방법(500)의 단계의 개략도이다. 전술된 바와 같이, 핵반응로 시스템(100)은 패키징될 때 세미 트레일러 트럭 트레일러에 장착될 수 있다. 육상 차량(501)에 있을 때, 핵반응로 시스템(100)은 비활성 상태에 있고, 운송 차폐부(155)는 제1 감속 유체(159A)로 채워져 감속된다.

[0091] 핵반응로 시스템(100)은 또한 Lockheed Hercules™ C-100 또는 C-130™과 같은 항공기(502) 내에 장착될 수 있다. 그러나, 특정 항공기(502)(및 일부 육상 차량(들)(501))의 크기 및 중량 요구 사항을 충족시키기 위해, NHS 모듈(150) 및 BOP 모듈(170)은 개별적으로 분리되어 운송될 필요가 있을 수도 있다. 이어서, 그 각각의 여정을 완료할 때, NHS 모듈(150) 및 BOP 모듈(170)은 그 여정을 계속하기 위해 패키징 상태로, 또는 파워 제공을 시작하기 위해 전개 상태에서 재결합될 수 있다. 핵반응로 시스템(100)은 CONEX 또는 ISO 상자 스타일의 선적 컨테이너의 체적 내에 장착될 수 있고 안전 공차를 갖기 때문에, 핵반응로 시스템(100)은 또한 컨테이너 선박과 같은 선박(503)에 의해 수용될 수 있다.

[0092] 도 5b는 살아있는 유기체가 방사선에 노출되는 위험을 완화하기 위한 핵반응로 차폐 방법(500)의 흐름도이다. 핵반응로 차폐 방법(500)의 단계는 임의의 순서로 수행될 수 있지만, 제시된 순서는 방사선 노출이 문제되는 핵반응로 시스템(100)의 구성요소에 충분히 근접한 살아있는 유기체 또는 플랜트 직원에게 가장 안전할 것이다. 대체로, 이 핵반응로 차폐 방법(500)은 비활성 상태가 되고, 트럭, 이어서 비행기, 이어서 다시 트럭에 의해 이동하고, 활성 상태가 되는 핵반응로 시스템(100)을 커버한다. 단계 505에서 시작하여, 핵반응로 차폐 방법(500)은 핵열 공급(NHS) 모듈(150)을 운송하기 전에, NHS 모듈(150)의 핵반응로 코어(101)의 중성자 플럭스를 아임계 레벨로 감소시키는 단계를 포함한다. 다음에, 단계 510에서, 핵반응로 차폐 방법(500)은 핵반응로 코어

의 중성자 플럭스를 아임계 레벨로 감소시킨 후, 핵반응로 코어(101)가 비활성 상태에 도달하기를 대기하는 단계를 포함한다. 이 예에서, 비활성 상태는 7일 이내에 도달한다. 단계 510은 스킵될 수 있지만, NHS 모듈(150)은 운송될 때 실질적으로 더 많은 방사선을 방출할 것이고 더 많은 예방 조치가 취해질 필요가 있을 것이다. 다음에 단계 515에서, 또는 단계 505 및 510과 동시에, 핵반응로 차폐 방법(500)은 핵반응로 시스템(100)의 핵열 공급(NHS) 모듈(150)의 운송 차폐부(TS) 챔버(156)를 제1 감속 유체(159A)로 실질적으로 채우는 단계를 포함한다. 전술된 바와 같이, 핵반응로 시스템(100)은 핵반응로 코어(101)를 포함한다.

[0093] 단계 520으로 이동하면, BOP 모듈(170)의 중량이 핵반응로 시스템(100)이 육상 차량(501), 항공기(502) 또는 선박(503)의 중량 용량 한계를 초과하게 하는 경우, 또는 안전 또는 효율적인 물류 상의 이유로, 핵반응로 차폐 방법(500)은 핵반응로 코어(101)의 중성자 플럭스를 아임계 레벨로 감소시킨 후, NHS 모듈(150)로부터 보조 기기(BOP) 모듈(170)을 디커플링하는 단계를 포함할 수 있다. 단계 520에서, 예를 들어 육상 차량(501)의 중량 용량 문제로 인해, BOP 모듈(170)이 NHS 모듈(150)로부터 분리될 필요가 있다고 가정한다. 대안적으로, 단계 520은 NHS 모듈(150)을 제2 여행에서 제2 위치로부터 제3 위치로 공수하기 전에, 그러나 단계 525 후에 발생할 수 있다.

[0094] 단계 525로 계속하면, 핵반응로 차폐 방법(500)은 NHS 모듈(150)을 제1 위치로부터 제2 위치로 운송하는 단계를 포함한다. NHS 모듈(150)을 제1 위치로부터 제2 위치로 운송하는 단계 525는 육상 차량(501), 항공기(502) 또는 선박(503)을 통한 제1 여행에서 NHS 모듈(150)을 제1 위치로부터 제2 위치로 운송하는 단계를 포함할 수 있다. 예를 들어, NHS 모듈(150) 및/또는 보조 기기(BOP) 모듈(170)은 육상 차량(501), 항공기(502) 또는 선박(503) 상에 적재될 수 있고, 제1 여행에서 제1 위치로부터 제2 위치로 운송될 수 있다. 단계 525 전에, 핵반응로 시스템(100)은, BOP 모듈(170)이 NHS 모듈(150)로부터 개별적으로 운송되지 않으면, 패키징 상태로 배치된다. 핵반응로 시스템(100)이 육상 또는 바다 위에서 단지 단일 여행만을 하는 예에서, 단계 545는 스킵될 수 있다. 핵반응로 시스템(100)이 육상 또는 바다 위에서 단지 단일 여행만을 하고, BOP 모듈(170)이 NHS 모듈(150)과 함께 운송되는 예에서, 단계 545는 스킵될 수 있고, 단계 550은 생략될 수 있다.

[0095] 이제 선택적 단계 530으로 계속하면, 제1 감속 유체(159A)의 중량이 핵반응로 시스템(100)이 제2 항공기의 중량 용량 한계를 초과하게 하면, 핵반응로 차폐 방법(500)은 NHS 모듈(150)을 운송(예를 들어, 공수)하기 전에 제1 감속 유체(159A)를 TS 챔버(156)에서 실질적으로 배수하는 단계를 포함할 수 있다. 단계 530은 선택적이며 중량 용량이 문제가 되지 않으면, 제1 감속 유체(159A)는 TS 챔버(156)로부터 실질적으로 배수되지 않는다. 단계 520은 바람직하게는 단계 530 전에 발생하는 데, 이는 운송 차폐부(155)가 BOP 모듈(170)로부터 NHS 모듈(150)을 디커플링하는 직원을 보호할 것이기 때문이다.

[0096] 단계 535에서, 핵반응로 차폐 방법(500)은 NHS 모듈(150)을 제2 여행에서 제2 위치로부터 제3 위치로 운송하는 단계를 포함한다. 일반적으로, NHS 모듈(150)을 비행에서 제2 위치로부터 제3 위치로 공수하기 전에, 핵반응로 차폐 방법(500)은 보조 기기 모듈(170)을 NHS 모듈(150)로부터 디커플링하는 단계 520을 구현한다. 예를 들어, 단계 535는 예를 들어 항공기(502)를 통한 비행에서 제2 여행에서 제2 위치로부터 제3 위치로 NHS 모듈(150)을 공수하는 단계를 포함할 수 있다. 단계 535 전 또는 후에 제2 항공기(제1 항공기, 차량(501) 또는 선박(503)보다 잠재적으로 더 낮은 중량 용량을 가짐) 또는 동일한 항공기(502)를 사용하여, 핵반응로 차폐 방법(500)의 단계 540은 예를 들어, 항공기(502)를 통한 다른 비행에서 BOP 모듈(170)을 제2 위치로부터 제3 위치로 운송(예를 들어, 공수)하는 단계를 포함할 수 있다. 일단 NHS 모듈(150) 비행편이 착륙하면, 단계 545가 발생할 수 있지만, 선택적 단계 530이 발생하면 선택적 단계 541이 발생한다.

[0097] 선택적 단계 541에서, 핵반응로 차폐 방법(500)은 예를 들어 NHS 모듈(150)을 운송(예를 들어, 공수)한 후에, TS 챔버를 제1 감속 유체(159A)로 실질적으로 채우는 단계를 포함한다. 단계 541은 선택적이며 단계 530이 발생하는 경우에만 발생할 수도 있다. 제1 감속 유체(159A)의 이러한 제2 실질적인 채움은 다른 비행편으로 운송되는 사실상 동일한 유체, 또는 화학적으로 동등한 유체일 수 있다. 그 유체가 또한 제1 감속 유체(159A)와 같은 강한 중성자 감속 특성을 갖는 한, 상이한 유체가 또한 사용될 수 있다.

[0098] NHS 모듈(150)은 BOP 모듈(170)이 제3 위치에 착륙하기를 대기할 수 있다. 일단 NHS 모듈(150)이 제3 위치에 도달하면, 단계 545가 발생한다. 단계 545에서, 핵반응로 차폐 방법(500)은 NHS 모듈(150)을 운송한 후, 모듈 웨도우 차폐부(157)의 모듈 웨도우 차폐부(MSS)(158) 챔버를 제2 감속 유체(159B)로 실질적으로 채우는 단계를 포함한다.

[0099] 이제 단계 550으로 이동하면, 핵반응로 차폐 방법(500)은 NHS 모듈(150)을 운송한 후 및 핵반응로 코어(101)의 중성자 플럭스를 임계 레벨로 증가시키기 전에, 보조 기기 모듈(170)을 NHS 모듈(150)에 재커플링하는 단계를

포함한다. 예를 들어, 단계 550은 보조 기기 모듈(170)을 제2 위치로부터 제3 위치로 공수한 후에, 보조 기기 모듈(170)을 NHS 모듈(150)에 재커플링하는 단계를 포함할 수 있다. 이 단계는 BOP 모듈(170)이 단계 520에서 NHS 모듈(150)로부터 디커플링된 경우에만 발생한다는 점을 주목하라. 이 시점에, 핵반응로 시스템(100)은 이어서 전개 상태에 배치된다. NHS 모듈(150)이 전개된 상태에서, 단계 555에서, 핵반응로 차폐 방법(500)은 제1 감속 유체(159A)를 TS 챔버(156)에서 실질적으로 배수하는 단계를 포함한다. 이제, 단계 560에서 종료하여, 핵반응로 차폐 방법(500)은 MSS 챔버(158)를 제2 감속 유체(159B)로 실질적으로 채운 후에, 핵반응로 코어(101)의 중성자 플럭스를 임계 레벨로 증가시키는 단계를 포함한다. 직후에, 핵반응로 코어(101)는 임계 상태에 진입할 것이고, BOP 모듈(170)은 전기를 생산할 수 있다.

[0100] 몇몇 상황에, 단계는 스킵되거나 순서외로 수행될 수 있다. 특히, 단계 555에서 TS 챔버(156)의 최종 배수는 생략될 수도 있다. MSS 챔버(158)는 연장된 시간 기간 동안 NHS 모듈(150) 부근에 착석할 수도 있는 승무원을 보호하기 위해, 육상 차량(501) 또는 선박(503)에서 핵반응로 시스템(100)을 여행하기 전에 채워질 수도 있다. 마찬가지로, 중량 한계가 허용되는 경우, 연장된 시간 기간 동안 NHS 모듈(150) 부근에 착석할 수도 있는 항공기 승무원을 보호하기 위해, TS 챔버(156)가 비행을 위해 배수될 때 MSS 챔버(158)가 채워질 수도 있다. 대안적으로, TS 챔버(156)는 중량 한계 내에 머물고 항공기 승무원을 차폐하기 위해 액체 감속제(159A, 159B)의 일부만이 항공 운송 중에 남아 있을 수 있게 하는 개별 섹션으로 분할될 수도 있다.

[0101] 도 6은 핵반응로 시스템(100)의 다양한 구성요소의 예상 또는 추정 중량을 포함하는 중량 표(600)이다. 세미 트레일러 트럭은 일반적으로 80,000 lbs를 운송하도록 정격되고, C-130은 단지 42,000 lbs를 운송하도록 정격되고, C-100은 단지 51,050 lbs를 운송하도록 정격되기 때문에, 중량 표(600)가 중요하다. 중량 표(600)를 보면 전체 핵반응로 시스템 질량(615)이 60,088 lbs로 예상된다는 것을 알 수 있다. 즉, 핵반응로 시스템(100)은 80,000 lbs 정격의 단일 세미 트레일러 트럭 트레일러에 장착될 수 있지만, C-100에 대해서도 너무 무겁다. 그러나, NHS 모듈(150)의 중량인 NHS 모듈 소계(605)는 44,217 lbs이고, C-100에 수용될 수 있다. C-130 내에 장착되기 위해, 감속 유체(159A, 159B)의 형태의 7,714 lbs의 차폐부(즉, 운송 차폐부(155) 및 모듈 쉼도우 차폐부(157))는 부분적으로 또는 완전히 배수될 수 있다. 일단 감속 유체(159A, 159B)의 형태의 차폐부(155, 157)의 2,217 lbs 이상이 배수되면, NHS 모듈(150)이 이어서 42,000 lbs의 중량일 것이기 때문에, NHS 모듈(150)은 C-130에 의해 운송될 수 있다. 감속 유체(159A, 159B)의 형태의 모든 차폐부(155, 157)가 배출된 NHS 모듈(150)의 최소 중량은 36,503 lbs이다.

[0102] BOP 모듈(170)의 중량인 BOP 모듈 소계(610)는 BOP 모듈이 C-130 또는 C-100에 여유 공간을 두고 장착되어야 하는 것을 나타낸다. 배수된 감속 유체(159A, 159B)의 일부는 잠재적으로 BOP 모듈(170)과 쌍을 이룰 수 있고, 감속 유체(159A, 159B)는 C-100 비행에서 BOP 모듈(170)과 함께 패키징될 수 있다. 이 패키징된 감속 유체(159A, 159B)는 이어서 도착시 NHS 모듈(150)로 다시 펌핑될 수 있다.

[0103] 도 7은 물만이 감속 유체로서 TS 챔버(156)를 채우기 위해 사용될 때에 비교하여, 질산납 포화수가 감속 유체(159A)로서 TS 챔버(156)를 채우기 위해 사용될 때 NHS 모듈(150)의 상이한 위치에서 수신된 광자 선량의 질산납 포화수 히트 맵에서의 상대 광자 선량(700)이다. 질산납($Pb(NO_3)_2$)은, 질산납이 수중에서 완전히 가용성이기 때문에, 물과 함께 사용을 위한 양호한 도펀트이다. 질산납은 물의 밀도를 약 50%만큼 효과적으로 증가시키고, 물에 고 Z 재료를 추가한다. 질산납은 활성화 문제로서 새로운 재료를 추가하지 않는다. 양호한 감속 유체(159A, 159B)는 고-Z 재료를 포함할 것이고, 활성화 문제가 되지 않을 것이다. 수중 질산납의 용해도는 섭씨 0도에서 376 리터당 그램(g/l) 내지 섭씨 100도에서 1270 g/l의 범위이다. 도 6 및 도 7은 1000 g/l의 용해도를 가정하는데, 이는 1.63 g/cc의 수중 질산납 밀도를 야기한다. 브롬화아연($ZnBr_2$)은 더 낮은 Z-재료를 희생시키면서, 더 높은 도펀트 밀도를 허용하는 다른 일반적인 도펀트이다. 따뜻한 반응로에서, 5 g/cc의 수중 브롬화아연 밀도가 달성 가능하다.

[0104] 도 7에서, 질산납 포화수 히트 맵에서의 상대 광자 선량(700)은 4년 동안 활성화이고, 이어서 7일 동안 아임계 및 비활성 상태가 되어, 7일의 붕괴를 허용하는 핵반응로(107)를 대표한다. 핵반응로 코어의 외부에 있는 선량 평면은 (0, 0)에 있다. 반응로 코어로부터의 수직 거리(715)의 단위는 센티미터이고, 반응로 코어로부터의 수평 거리(710)의 단위도 또한 센티미터이다. (0, 0)에서, 그리고 (0, 100), (200, 100), (200, -100) 및 (0, -100)에 의해 경계 지정된 영역에서, 물과 비교하여 질산납 포화수의 상대 광자 선량(705)의 개선이 없다는 것을 볼 수 있다. 이는 상자가 핵반응로 코어(101) 자체를 구성하기 때문이다. 좌측으로 이동하면, 물에 비교하여 질산납 포화수의 상대 광자 선량(705)이 궁극적으로 좌측 400 센티미터에서 약 10^{-5} 로 감소하는 것을 볼 수 있다. 부가적으로, 상단에서, 약 (100, 125)에서 물에 비교하여 질산납 포화수의 상대 광자 선량(705)이 0.2이

고, 또는 질산납 물 선량이 물의 선량의 1/5인 것을 볼 수 있다. 브롬화아연이 대신에 사용되면, 물과 비교하여 브롬화아연 포화수 상대 선량은 0.0006일 것이고, 또는 물 선량은 그 거리에서 브롬화아연 포화수 선량보다 1,667배 더 크다.

[0105] 도 8은 질산납 포화가 운송 차폐부 챔버(156)를 채우기 위해 사용될 때 NHS 모듈(150) 내의 상이한 위치에서 수신된 광자 선량의 질산납 포화수 히트 맵(800)에서의 절대 광자 선량이다. 도 8에서, 운송 차폐부 챔버(156)가 물로 채워질 때 경험된 실제 광자 선량이 도시되어 있다. 반응로 컨테이너(151)의 외부 표면이 대략적으로 있을 것인 (-50, 0)에서, 질산납 포화수는 광자 선량을 약 10 rem/hr로 5배만큼 감소시켰다. 브롬화아연을 5 g/cc로 사용함으로써, 광자 선량은 20배만큼 더 감소될 수 있어, 반응로 컨테이너(151)의 외부 표면에서 0.5 rem/hr 선량을 야기한다.

[0106] 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 주제를 포함하지 않으며, 그러한 방식으로 해석되어서도 안된다. 이러한 주제의 어떠한 의도되지 않은 포함도 여기에서 청구되지 않는다.

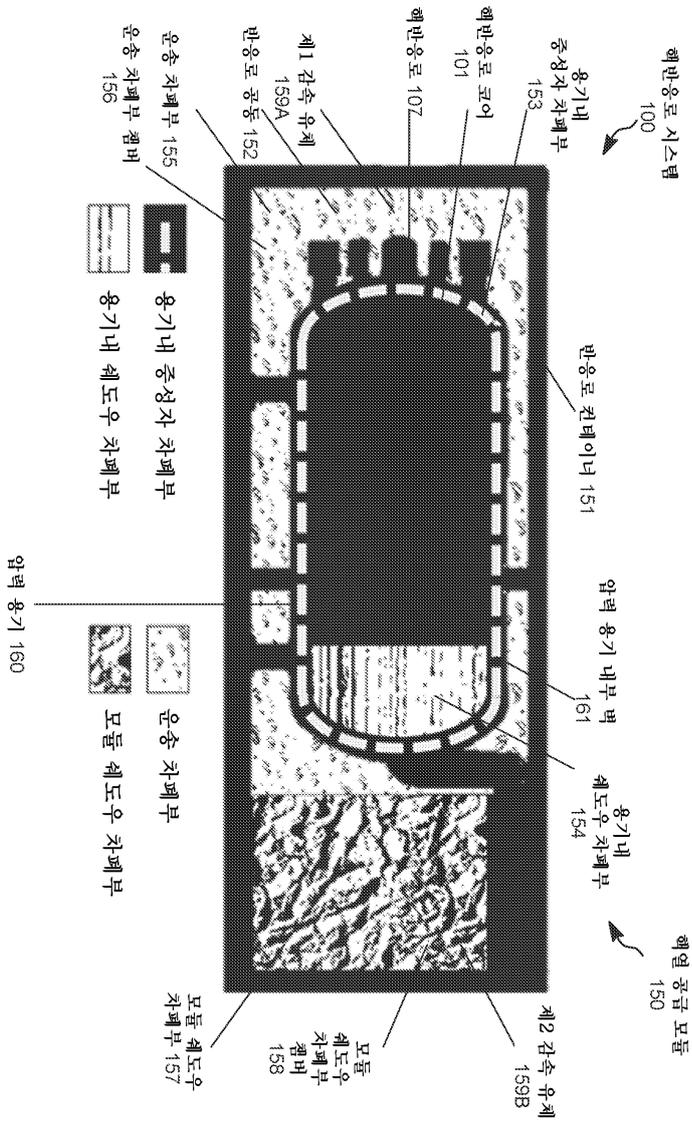
[0107] 또한, 본 명세서에서 사용된 용어 및 표현은, 특정 의미가 본 명세서에서 달리 설명된 경우를 제외하고, 그의 상응하는 각각의 조사 또는 연구 분야에 대해 그러한 용어 및 표현에 부여된 일반적인 의미를 갖는다는 이해할 것이다. 제1 및 제2 등과 같은 관계 용어는, 해당 개체들 또는 작용들 간의 실제 관계 또는 순서를 반드시 요구하거나 암시하지 않으면서, 하나의 개체 또는 작용을 다른 개체 또는 작용과 구별하기 위해서만 사용될 수 있다. "포함한다", "포함하는", "구비한다", "구비하는", "갖는다", "갖는", "함유한다", "함유하는", "구비한", "~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. 단수 표현의 요소는, 추가 제약 없이, 그러한 요소를 포함하는 프로세스, 방법, 물품 또는 장치에서 추가적인 동일한 요소의 존재를 배제하지 않는다.

[0108] 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 것보다 많은 특징부를 요구하는 의도를 반영하는 것으로 해석되지 않는다. 오히려, 이하의 청구항이 반영하는 바와 같이, 주제는 공개된 단일 예의 모든 특징보다 적다. 그에 따라, 이하의 청구항은 이에 의해서 상세한 설명 내로 통합되고, 각각의 청구항은 별개의 청구된 주제로서 자체적으로 존립한다.

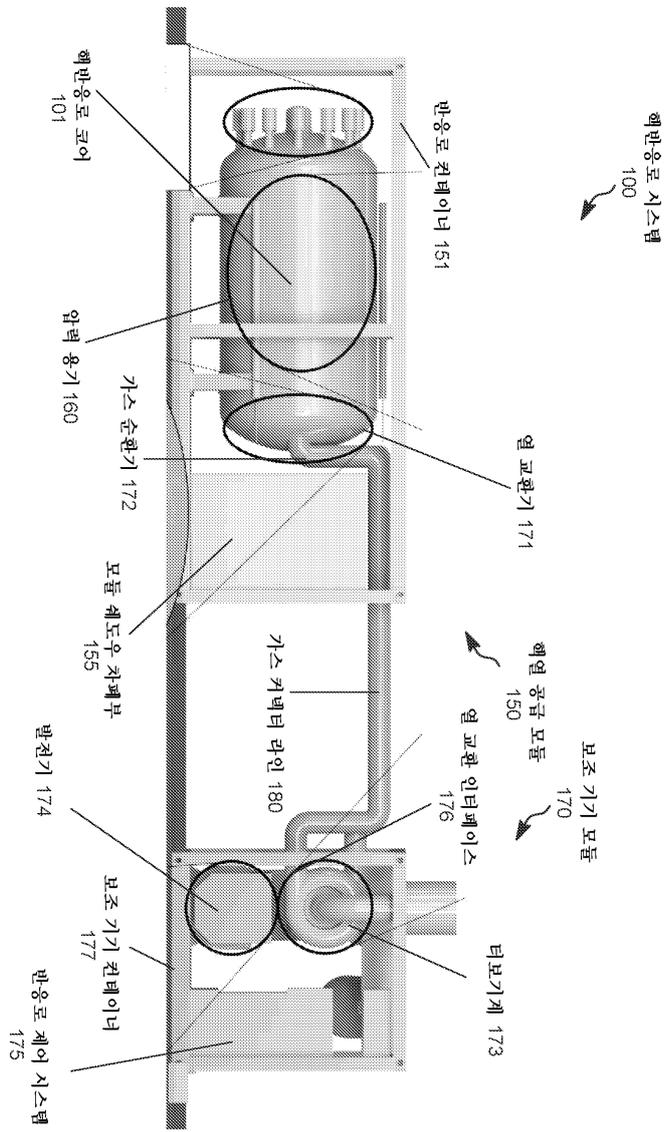
[0109] 이상에서 최선의 모드 및/또는 다른 예라고 생각되는 것을 설명했지만, 그 안에서 다양한 수정이 이루어질 수 있고 여기에 개시된 주제는 다양한 형태 및 예로 구현될 수 있으며, 그것들은 수많은 적용예에서 적용될 수 있으며, 그 중 일부만이 여기에 설명되었다는 것이 이해되어야 한다. 이하의 청구항은, 본 개념의 진정한 범위에 속하는 임의의 그리고 모든 수정 및 변형을 청구하기 위한 것으로 의도된 것이다.

도면

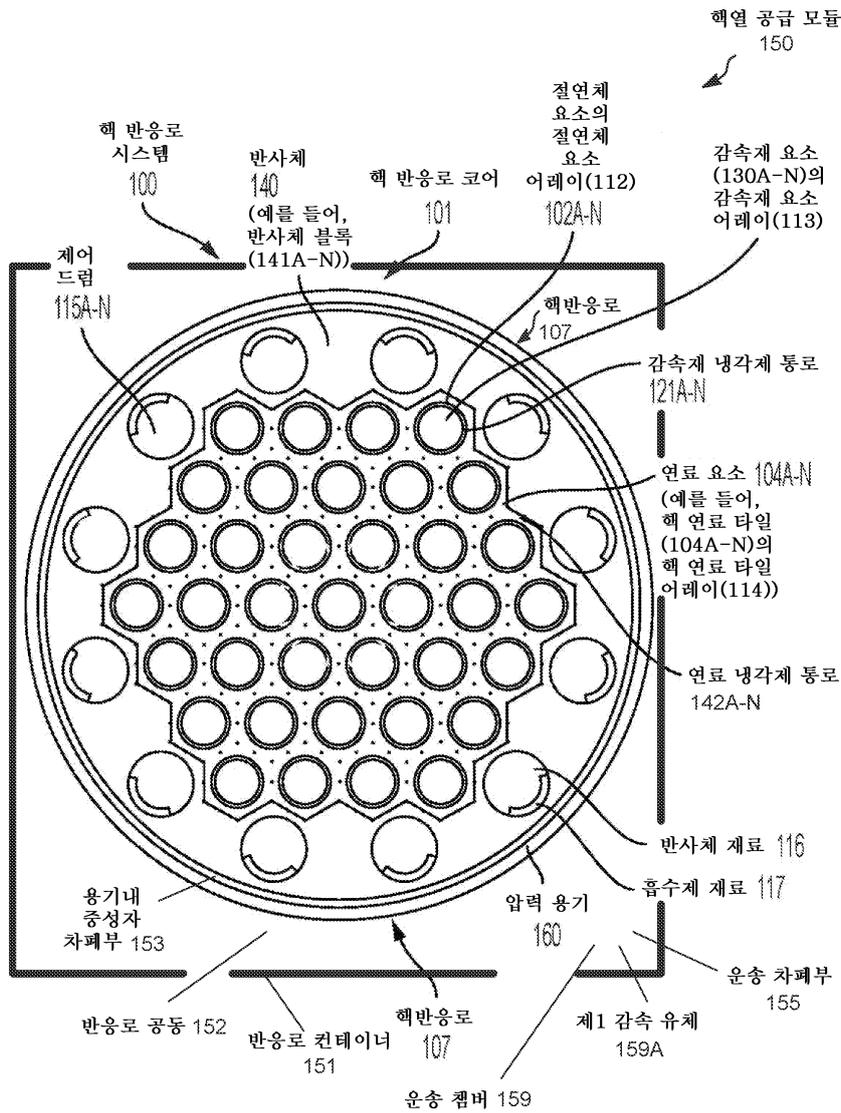
도면1a



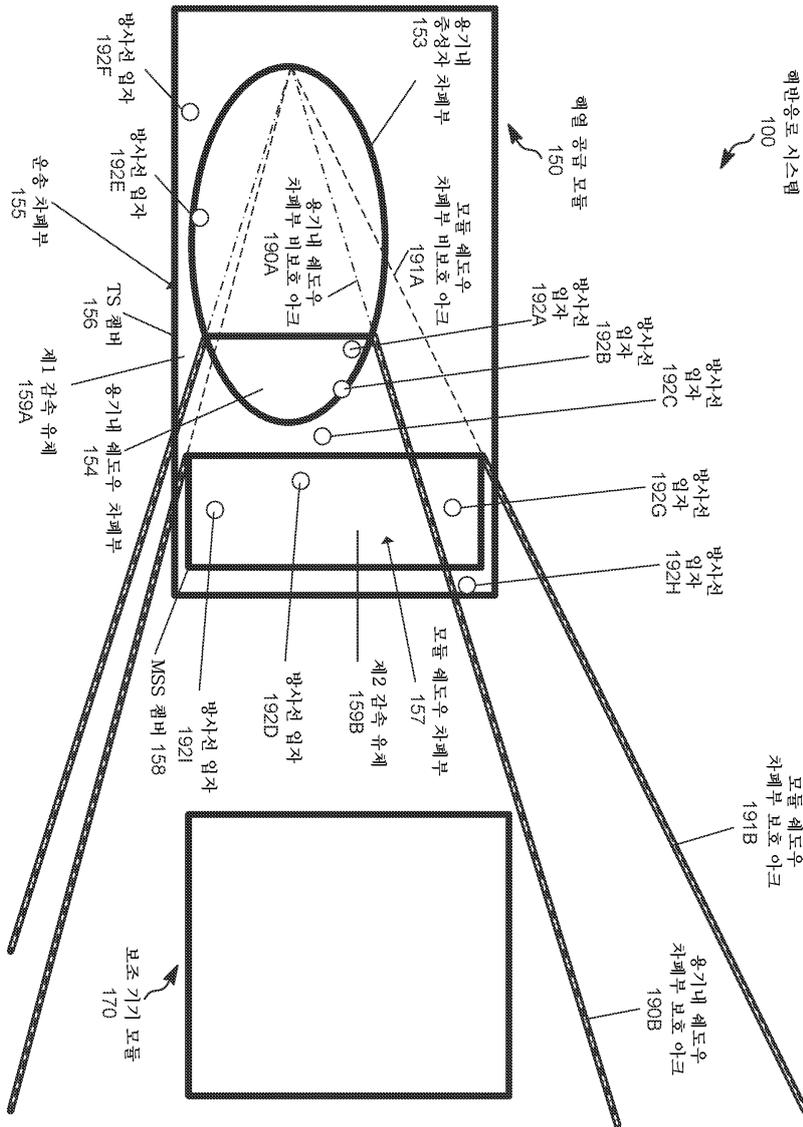
도면1b



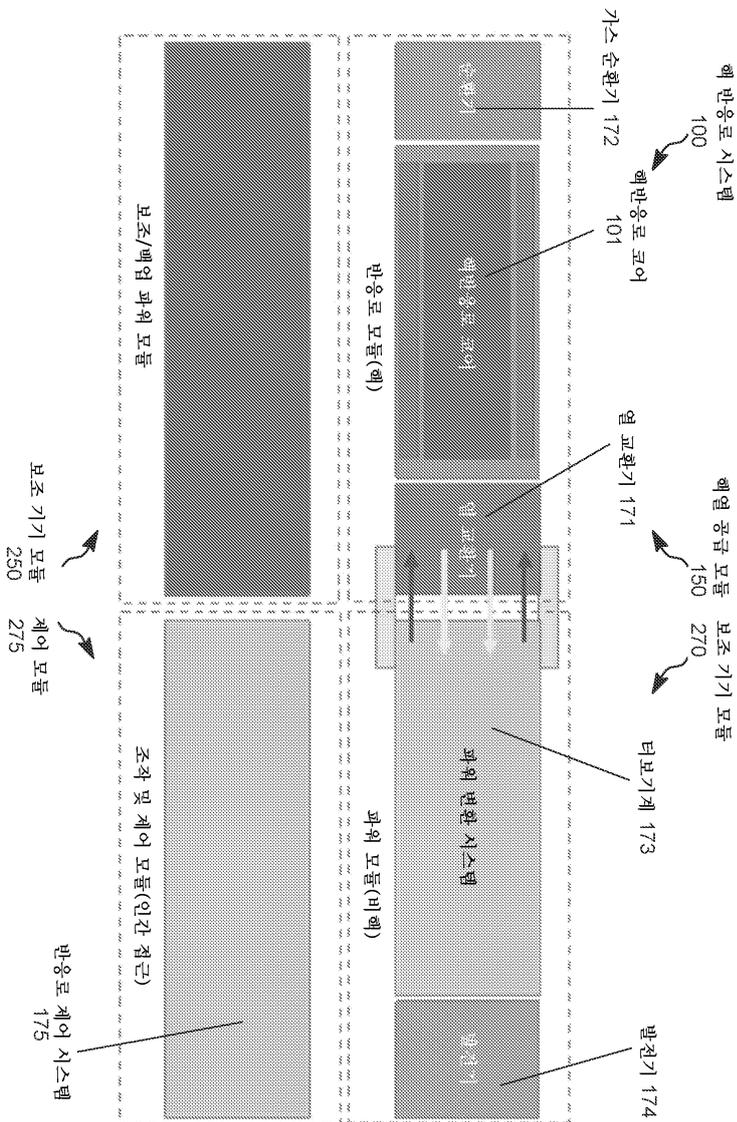
도면1c



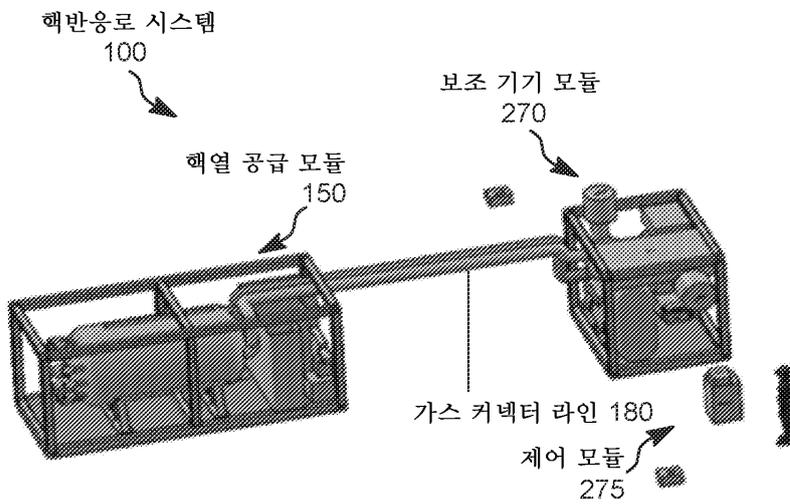
도면1d



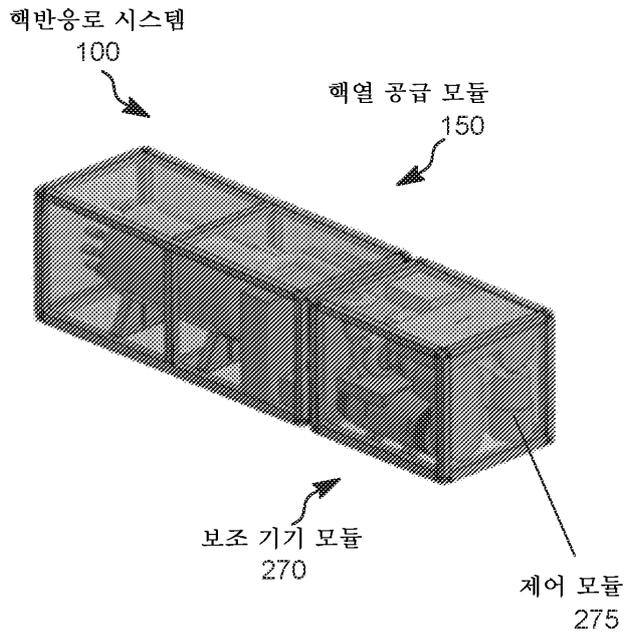
도면2



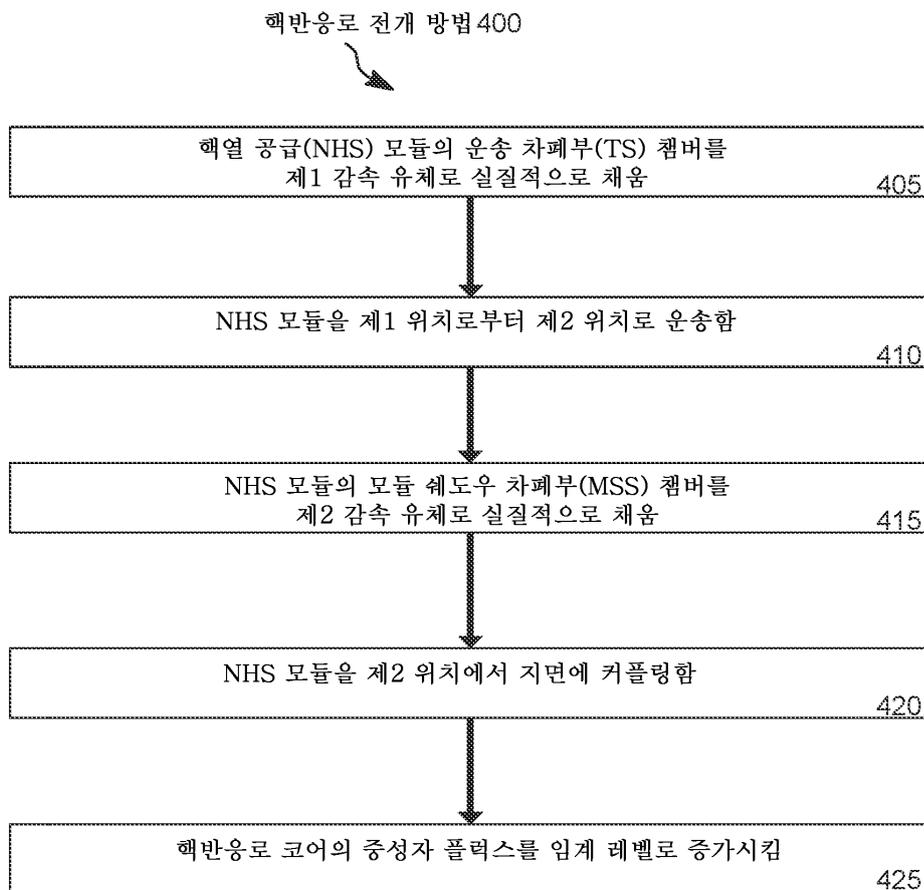
도면3a



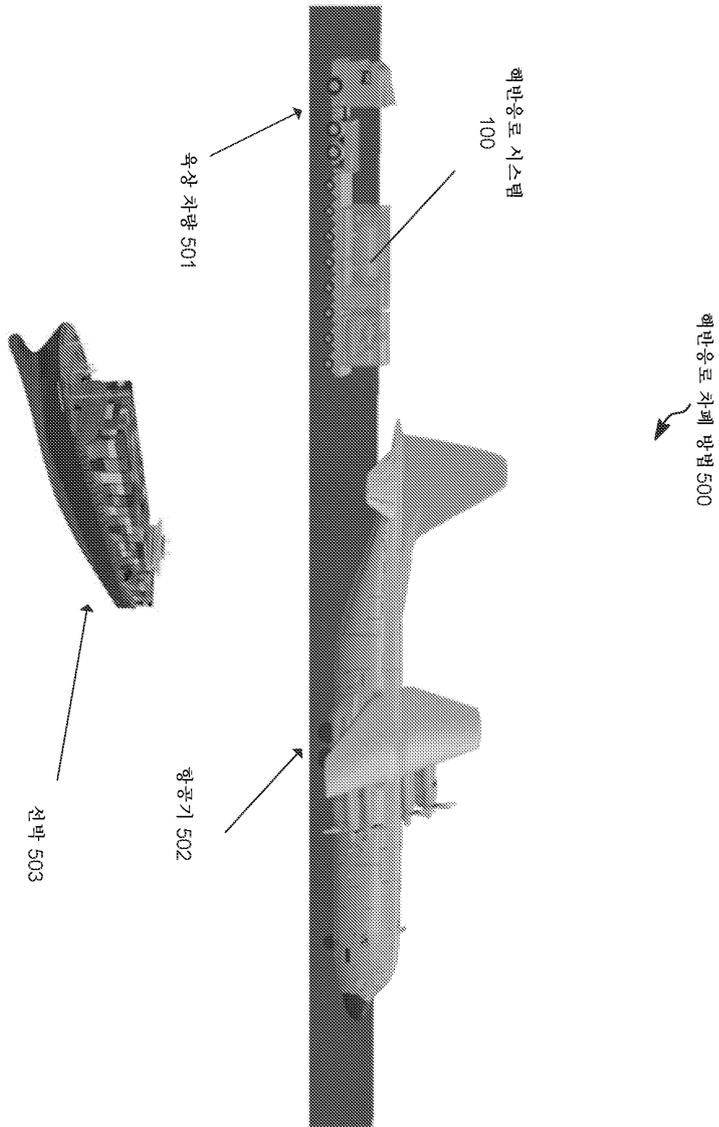
도면3b



도면4

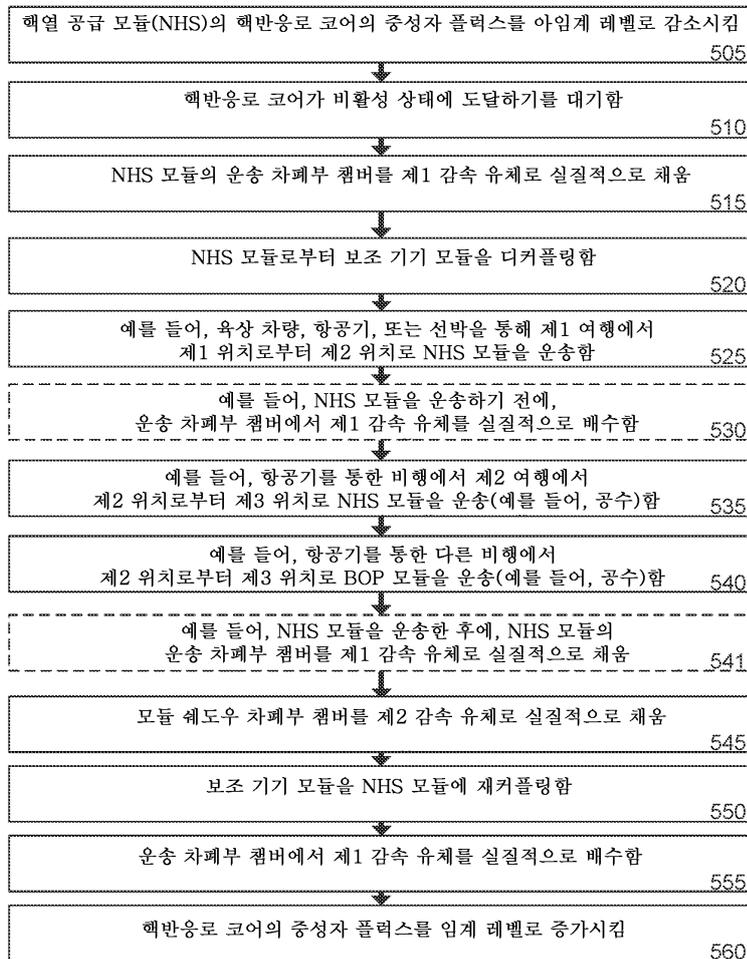


도면5a



도면5b

핵반응로 차폐 방법 500

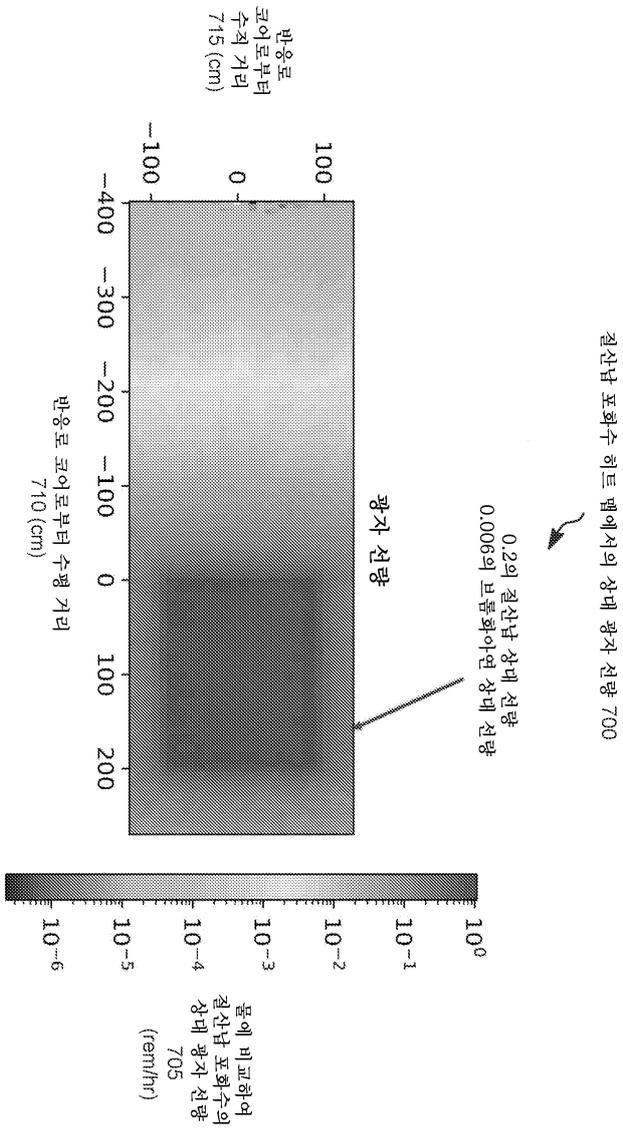


도면6

중량 표 600 

	구성요소	중량 (lbs)
핵열 공급(NHS) 모듈 <u>150</u>	핵반응로 코어 <u>101</u> , 압력 용기 <u>160</u> , 차폐부 <u>153, 154</u>	23,142
	중간 열 교환기 <u>171</u> 및 가스 순환기 <u>172</u>	6,061
	반응로 컨테이너 <u>151</u>	5,290
	차폐부 <u>155, 157</u>	7,714
	기타 NHS	2,010
	NHS 모듈 소계 <u>605</u>	44,217
보조 기기(BOP) 모듈 <u>170</u>	터보기계 <u>173</u>	1,713
	발전기 <u>174</u> 및 기어박스	9,676
	열 교환 인터페이스 <u>176</u>	440
	계기 및 반응로 제어 시스템 <u>175</u>	88
	BOP 컨테이너 <u>177</u>	2,645
	기타 BOP	1,309
	BOP 모듈 소계	15,871
	총 핵반응로 시스템 질량 <u>615</u>	60,088

도면7



도면8

