



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2021년02월22일
(11) 등록번호 10-2217775
(24) 등록일자 2021년02월15일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G21C 1/32 (2006.01) F22B 1/06 (2006.01)
F22B 1/12 (2006.01) F22B 37/00 (2006.01)
F28D 7/10 (2006.01) F28F 1/42 (2006.01)
G21C 13/02 (2006.01) G21C 15/04 (2006.01)
G21C 3/30 (2006.01) G21C 7/28 (2006.01)
G21D 5/02 (2006.01)
- (52) CPC특허분류
G21C 1/32 (2013.01)
F22B 1/063 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2015-7009109
- (22) 출원일자(국제) 2013년09월12일
심사청구일자 2018년08월14일
- (85) 번역문제출일자 2015년04월09일
- (65) 공개번호 10-2015-0109324
- (43) 공개일자 2015년10월01일
- (86) 국제출원번호 PCT/US2013/059445
- (87) 국제공개번호 WO 2014/043335
국제공개일자 2014년03월20일

- (73) 특허권자
울트라 세이프 뉴클리어 코퍼레이션
미국 워싱턴 시애틀 웨스트 코모도어 웨이 2288
스위트 300 (우: 98199-1465)
- (72) 발명자
플리폰, 클라우디오
미국 메릴랜드주 20740, 칼리지파크, 8708 48번가
플레이스
베네리, 프란체스코
미국 뉴멕시코주 87544, 로스알라모스, 피에드라
루프 188
- (74) 대리인
강철중

- (30) 우선권주장
61/699,864 2012년09월12일 미국(US)
- (56) 선행기술조사문헌
JP05139376 A*
(뒷면에 계속)

전체 청구항 수 : 총 36 항

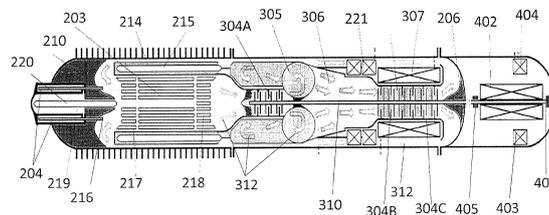
심사관 : 윤연숙

(54) 발명의 명칭 모듈식 이동식 핵 발전기

(57) 요약

본 발명은 일반적으로 핵 코어를 수용하는 단일 압력 용기 내에 완전히 통합된 출력 변환 및 전기 발전 설비를 포함하는, 빠르게 배치하고 회수 가능한 모듈식, 소형, 이동식, 경화 핵 발전기를 사용하는 전력 및 프로세스 가열 발전에 관한 것이다. 결과적으로 이동식 핵 발전기는 비용이 많이 드는 부지 준비를 요구하지 않고, 그리고 완전히 가동할 준비가 갖추어져 수송되어질 수 있다. 이동식 핵 발전기는 다른 핵 발전기에 대해 실질적으로 감소된 비상 탈출 영역을 요구하고, 이것은 냉각수 총 손실 시나리오 하에서도 붕괴 열 제거를 허용하는 용융 방지 전도성 세라믹 코어를 가지고 작동하게 구성되어 있다.

대표도



(52) CPC특허분류

F22B 1/123 (2013.01)
F22B 37/007 (2013.01)
F28D 7/106 (2013.01)
F28F 1/424 (2013.01)
G21C 13/02 (2013.01)
G21C 15/04 (2013.01)
G21C 3/30 (2013.01)
G21C 7/28 (2013.01)
G21D 5/02 (2013.01)

(56) 선행기술조사문헌

KR1020120083437 A*
US04088535 A*
US05247553 A*
US20120140867 A1*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

명세서

청구범위

청구항 1

이동식 핵 발전기는,

통합 출력 변환 모듈 및 발전에 제공되는 냉각수/작동 유체에 열에너지를 발생시키도록 핵연료를 태우는 핵 코어, 제어 시스템, 그리고 냉각수 유동 역전 구조를 수용하는 원자로 출력 모듈,

원자로 출력 모듈로부터 냉각수/작동 유체로부터 에너지를 수용하는 발전 모듈에 제공되는 기계적 에너지를 발생시키는 터보기계 설비 및 열교환기를 포함하는 출력 변환 모듈,

그리고 출력 변환 모듈로부터 기계적 에너지를 수용하는 전기 에너지를 발생하는 발전 전동기, 전자 제어장치 및 무정전 전원을 포함하는 발전 모듈을 포함하고,

원자로 출력 모듈, 출력 변환 모듈, 그리고 발전 모듈은 단일 용기로서 작동하는 핵 발전기를 형성하도록 서로에 열-수력으로 연결되게 구성되며,

원자로 출력 모듈은, 연료 교체 작동이 새로운 또는 소비된 핵연료를 함유하는 원자로 출력 모듈을 제거하고 이것을 새로운 핵연료를 가진 새로운 원자로 출력 모듈로 교체함으로써 수행될 수 있도록 더 구성되어 있고,

상기 냉각수 유동 역전 구조는, 낮은 유체역학적 항력을 제공하도록 구성되고, 전도 열전달 기구에 의해서 코어로부터 이동식 핵 발전기의 외부 편까지 붕괴 열 에너지의 전달을 보장하는 동안에 코어 구조적 지지를 제공하도록 구성되는 이동식 핵 발전기.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

원자로 출력 모듈, 출력 변환 모듈, 그리고 발전 모듈은 분리하여 제조 및 수송되고, 수평 또는 수직 구성으로 작동하도록 더 구성되어 있는 이동식 핵 발전기.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

원자로 출력 모듈, 출력 변환 모듈, 그리고 발전 모듈은 열전달 표면을 통한 열의 전도에 의해 발생하는 자연적인 냉각수 순환을 통하여 수동적으로 냉각되게 더 구성되어 있는 이동식 핵 발전기.

청구항 4

제 1 항에 있어서,

원자로 출력 모듈, 출력 변환 모듈, 그리고 발전 모듈은 외부 배관 또는 설비를 요구하는 것 없이 자립식 유닛으로 작동하도록 더 구성되어 있는 이동식 핵 발전기

청구항 5

제 1 항에 있어서,

원자로 출력 모듈은 용융 방지 열전도성 세라믹 핵 코어를 포함하는 이동식 핵 발전기.

청구항 6

제 1 항에 있어서,

전도 열전달 기구에 의해 코어에서 외부 편까지 붕괴 열 에너지의 전달을 보장하는 동안에 코어 구조 지지를 제공하는 내부 편에 의해 형성된 냉각수 경로를 더 포함하고, 냉각수 경로는 냉각수 완전 부재에서도 이동식 핵 발전기를 둘러싸는 환경에 안전하고 수동적으로 붕괴 열 에너지를 전달하도록 구성되어 있는 이동식 핵 발전기.

청구항 7

제 1 항에 있어서,

원자로 발전 모듈은,

- (1) 안전을 위한 흡수 모드에서 수동적으로 결합되게 구성된 중성자 흡수 및 반사하는 물질을 포함하는 중성자 반사 장치에서 제어봉 또는 회전 드럼,
 - (2) 원자로 내 제어봉의 배열,
 - (3) 수동 시스템을 통하여 코어내로 중성자 흡수 물질을 주입하는 비상 운전 정지 시스템
- 중에서 적어도 하나의 반응도 제어 시스템을 더 포함하는 이동식 핵 발전기.

청구항 8

제 1 항에 있어서,

출력 변환 모듈을 위한 냉각수 및 작동 유체로서 불활성 기체를 더 포함하고, 냉각수는 CO₂, 헬륨, 또는 아르곤 일 수 있는 이동식 핵 발전기.

청구항 9

제 1 항에 있어서,

원자로 출력 모듈, 출력 변환 모듈, 그리고 발전 모듈은 전기를 발생시키도록 재생 브레이튼 사이클을 수행하도록 더 구성되어 있는 이동식 핵 발전기.

청구항 10

제 1 항에 있어서,

원자로 출력 모듈로 완전하게 둘러싸인 제1차 루프,

제1차 루프에서 순환하는 냉각수 및 감속재로서 물,

원자로 출력 모듈에서 제1차 루프 및 출력 변환 모듈에서 제2차 루프 사이에서 열적 결합을 제공하도록 구성된 하나 이상의 통합 분리 열교환기,

과열 증기를 발생하도록 제1차 루프로부터 열에너지를 수용하는 제2차 루프에서 순환하는 물을 더 포함하고,

제2차 루프에서 물은 랭킨 출력 사이클에 따라 전기를 발생하도록 과열 증기의 형태로 출력 변환 모듈에서 통합 터보기계로 열에너지를 전달하고, 그리고 터보기계에서 팽창한 후, 증기는 증기를 응축하도록 출력 변환 모듈의 내부 및 외부적으로 연장된 냉각원에 수동적으로 열에너지를 전달하는 통합 응축기로 내보내어지는 이동식 핵 발전기.

청구항 11

제 10 항에 있어서,

응축된 증기를 재-가압하고 제2차 루프로 통합 분리 열교환기의 제2차 측면의 입구에서 결과적으로 과냉각 물을 펌핑하는 하나 이상의 펌프를 더 포함하는 이동식 핵 발전기.

청구항 12

제 1 항에 있어서,

원자로 출력 완전하게 둘러싸인 제1차 루프,

제1차 루프에서 재순환 펌프에 의해 능동적으로 순환된 냉각수로서 액체 금속,

원자로 출력 모듈에서 제1차 루프 및 출력 변환 모듈에서 제2차 루프 사이에서 열적 결합을 제공하도록 구성된 하나 이상의 통합 분리 열교환기,

제2차 루프에서 작동 유체로서 기체 또는 물을 더 포함하고,

기체가 작동 유체로서 사용되어질 때, 터보기계는 재생 브레이튼 출력 사이클의 요구사항들을 만족시키도록 구성되고, 그리고 물이 작동 유체로서 사용되어질 때, 터보기계는 랭킨 출력 사이클 요구사항들을 만족시키도록 구성되는 이동식 핵 발전기.

청구항 13

제 1 항에 있어서,

출력 변환 모듈에서 터보기계를 형성하는 회전 구성요소,

발전 모듈의 발전 전동기를 형성하는 회전 구성요소,

터보기계를 형성하는 회전 구성요소와 발전 전동기를 형성하는 회전 구성요소가 공통 속도를 가지고 회전하도록 직접 기계적 커플링의 형태로 발전 모듈의 발전 전동기를 형성하는 회전 구성요소와 출력 변환 모듈에서 터보기계를 형성하는 회전 구성요소를 연결하는 회전축을 더 포함하고,

축의 회전속도는 출력 변환 시스템의 열 수력, 전기 발전 전동기 기계를 조정하는 전자 제어 시스템의 부하 조건 및 설정에 의해 결정되고, 그리고 발전기 전원의 주파수 및 다른 전기 매개 변수는 통합 전자 조절 회로에 의해 제어되는 이동식 핵 발전기.

청구항 14

제 13 항에 있어서,

발전 전동기는 이동식 핵 발전기의 작동 동안에 전기를 발생시키고, 발전 전동기는 시동 동안 및 운전 정지 후 출력 변환 모듈의 터보기계를 구동하기 위하여 전기 전동기로서 사용되고, 그리고 시동 출력은 무정전 전원 또는 외부 전원을 통하여 시동 동안에 발전 전동기에 제공되는 이동식 핵 발전기.

청구항 15

제 1 항에 있어서,

담수화, 바이오 연료 처리, 지역난방, 또는 산업적 용도에 제공된 설비에 분포되어지는 열교환기를 더 포함하는 이동식 핵 발전기.

청구항 16

작동 가능한 핵 원자로를 형성하도록 서로에 대해 열-수력으로 결합되어지게 구성된 원자로 출력 모듈, 출력 변환 모듈, 그리고 발전 모듈을 포함하고,

상기 원자로 출력 모듈은 핵 코어, 제어 시스템 및 냉각수 유동 역전 구조를 둘러싸고,

상기 냉각수 유동 역전 구조는, 낮은 유체역학적 항력을 제공하도록 구성되고, 전도 열전달 기구에 의해서 코어로부터 이동식 핵 발전기의 외부 핀까지 붕괴 열에너지의 전달을 보장하는 동안에 코어 구조적 지지를 제공하도록 구성되는 이동식 핵 발전기를 연료 교체하는 방법에서,

상기 방법은,

새로운 또는 소비된 핵연료를 가진 제1 원자로 출력 모듈을 제거하고, 그리고 새로운 핵연료를 가지고 있는 제2 원자로 출력 모듈로 제1 원자로 출력 모듈을 교체하는 것을 포함하는 핵 발전기를 연료 교체 방법.

청구항 17

제 5 항에 있어서,

용융 방지 열전도성 세라믹 핵 코어는 SiC 펠릿에 밀봉된 3중 구조 등방성(tri-structural isotropic (TRISO)) 핵분열성 연료를 포함하는 모놀리식 연료 요소(monolithic fuel elements (MTF))를 더 포함하는 이동식 핵 발전기.

청구항 18

제 17 항에 있어서,

SiC 펠릿은 나노 침투 및 일시 공융(共融)-단계 (a nano-infiltration and transient eutectic-phase(NITE)) 소결 공정을 사용하여 생성된 구조들로 있는 이동식 핵 발전기.

청구항 19

제 17 항에 있어서,

MTF 요소가 SiC 또는 SiC 복합 요소로 밀봉된 SiC 펠릿을 포함하는 이동식 핵 발전기.

청구항 20

제 17 항에 있어서,

SiC 펠릿은 연료 공급된 영역을 둘러싸는 연료 공급되지 않은 SiC의 층을 더 포함하는 이동식 핵 발전기.

청구항 21

제 17 항에 있어서,

SiC 펠릿은 산화물, 탄화물, 산화 탄화물 또는 우라늄, 플루토늄, 토륨 또는 다른 핵분열성 동위원소의 질화물을 더 포함하는 이동식 핵 발전기.

청구항 22

제 17 항에 있어서,

SiC 펠릿은 SiC 펠릿에 포함된 에르비아 또는 가돌리니아를 포함하는 가연성 독물 희토류 산화물을 더 포함하는 이동식 핵 발전기.

청구항 23

제 17 항에 있어서,

용융방지 열전도성 세라믹 핵 코어는 가연성 독물을 포함하는 비-연료 피복된 입자를 포함하는 이동식 핵 발전기.

청구항 24

제 17 항에 있어서,

용융방지 열전도성 세라믹 핵 코어는 SiC 섬유로 단일 방향의 섬유 강화 NITE-소결 SiC의 복합구조를 포함하는 연료 요소를 더 포함하는 이동식 핵 발전기.

청구항 25

제 17 항에 있어서,

SiC 펠릿은 고농도 비-다공성 SiC 코팅을 더 포함하는 이동식 핵 발전기.

청구항 26

제 17 항에 있어서,

MTF 요소는 사각 블록, 육각 블록, 또는 4분의 1 원 플레이트를 포함하고, 그리고 MTF 요소는 냉각수를 위한 유동 경로를 제공하는 홈을 포함하는 이동식 핵 발전기.

청구항 27

제 26 항에 있어서,

탄소 또는 SiC를 포함하는 중성자 반사장치 요소를 더 포함하고, 중성자 반사장치 요소는 MTF 요소들의 기하학적 구성에 대응하도록 기하학적으로 구성되어 있는 이동식 핵 발전기.

청구항 28

제 26 항에 있어서,

MTF 요소들은 전도성 세라믹 코어의 열전도성 강화하고 코어 수동 열전달 특성들을 강화하도록 MTF 요소들 사이의 갭을 제거하도록 밀접 배치되어 있는 이동식 핵 발전기.

청구항 29

제 17 항에 있어서,

용융 방지 열전도성 세라믹 핵 코어는 코어의 입구 및 출구에 제공된 압력 플레이트를 더 포함하고, 압력 플레이트는 냉각수를 위한 유동 경로를 제공하는 대응하는 냉각수 홀을 포함하고, 그리고 압력 플레이트가 압축 하에서 코어를 유지하는 압축력을 제공하도록 구성되어 있는 이동식 핵 발전기.

청구항 30

제 17 항에 있어서,

용융 방지 열전도성 세라믹 핵 코어는 다발로 배치되고 금속 또는 세라믹 피복재를 가진, 산화물, 질화물 또는 금속의 형태로 핵분열성 물질을 포함하는 연료봉을 더 포함하는 이동식 핵 발전기.

청구항 31

제 30 항에 있어서,

다발들은 냉각수에 대해 양호한 열 수송 특성을 가지도록 기하학적으로 배치되어지는 이동식 핵 발전기.

청구항 32

제 17 항에 있어서,

용융 방지 열전도성 세라믹 핵 코어는 구체 조약돌의 형태로 형성된 연료 요소들을 더 포함하며, 연료 요소들은 서로 느슨하게 형성되는 이동식 핵 발전기.

청구항 33

제 17 항에 있어서,

용융 방지 열전도성 세라믹 핵 코어는 냉각수 부재에서도 수동 냉각을 허용하도록 구성되어 있는 이동식 핵 발전기.

청구항 34

제 17 항에 있어서,

용융 방지 열전도성 세라믹 핵 코어는 SiC-Gd^{203} 와 Er^{203} 의 소결 혼합으로 만들어진 제어봉, 그리고 제어봉 슬리브를 더 포함하는 이동식 핵 발전기.

청구항 35

제 17 항에 있어서,

용융 방지 열전도성 세라믹 핵 코어는 섬유 보강 탄소 또는 SiC 복합재료로 만들어진 제어봉 채널을 더 포함하는 이동식 핵 발전기.

청구항 36

제 17 항에 있어서,

이동식 핵 발전기가 동적 응력 또는 충격을 받는 경우에 SiC 펠릿으로 전달되는 크랙 없이 MTF 요소의 제어된 파괴를 허용하도록 부분 절개를 포함하는 이동식 핵 발전기.

청구항 37

삭제

청구항 38

삭제

청구항 39

삭제

청구항 40

삭제

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 일반적으로 핵 코어(a nuclear core)를 수용하는 단일 압력 용기 내에 충분히 통합된 전력 변환 및 전기 발생 장치를 포함하는 모듈식이고, 소형이며, 이동식, 경화 핵 발전기(a modular, compact, transportable, hardened nuclear generator)를 빠르게 배치 및 복구할 수 있는 것을 사용하는 전력 및 프로세스 열 발생에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 핵 발전기는 운전 정지(shut down) 후 붕괴 열 에너지(decay thermal energy)를 생성하는 핵 코어를 당연히 포함한다. 일반적으로 몇 가지 요소들 중에, 운전 정지 후 생산된 붕괴 열 에너지의 양은 핵 코어를 특징짓는 연료 발전 역사 및 출력 밀도에 비례한다. 코어의 어떤 위치에서 핵연료의 과열을 방지하기 위하여, 붕괴 열 에너지는 코어를 포함하도록 설계된 용기 및 구조들의 외부에 있는 시스템에 의해 일반적으로 지원된 과도한 열전달 메커니즘을 사용하는 코어로부터 전달되어진다. 이들 중복 냉각 시스템은 코어를 포함하는 용기의 바깥쪽에 위치되어 코어에서 주변 환경(즉, 최종 열 흡수원(an ultimate heat sink))으로 열에너지를 전달하도록 제공되는 열교환기에 코어를 열-수력으로 결합하는 복잡한 배관 시스템을 포함한다. 이들 열교환기를 통한 냉각수는 전기적으로 구동되는 재순환장치(즉, 펌프, 송풍기)를 사용하여 적극적으로 순환시키고, 그리고 중복 부분들은 비교적 복잡한 배관 네트워크를 통하여 냉각수를 경로 또는 다른 경로로 제공된 밸브에 의해 조절되는 다수의 열교환기를 사용하여 나타내어지게 된다. 대안적으로, 냉각수는 가열 또는 냉각될 때 냉각수 밀도가 변화한다는 실에 기초하여 중력 구동되는 자연 순환 메커니즘에 의해, 추가 코어 열교환기에 코어를 열-수력으로 결합하는 유사한 복합 배관 네트워크를 통하여 수동적으로 순환한다. 현대 원자로(nuclear reactor)는 수동적으로, 능동적으로 또는 양쪽의 결합으로 작동되어지는 중복 코어 붕괴 열 제거 시스템(redundant core decay heat removal systems)에 의존한다.

[0003] 붕괴 열 에너지를 제거하기 위하여, "능동적(active)" 안전 설비(safety features)를 채택하는 원자로 설계들은 운전 정지 후에 안전 온도에서 코어가 유지되기 위한 전력에 광범위하게 의존한다. 항상 안전 작동 및 붕괴 열 에너지 제거를 보장하기 위하여, 이들 설계는 최소의 두 개의 외부 전력 망(a minimum of two off-site power grids)에 연결되는 전력, 그리고 제공된 중복하는 발전소 내의 비상용 디젤 발전기(on-site emergency diesel generators (EDGs))를 요구한다.

[0004] 수동 안전 설비의 일부 타입은, 다른 한편으로는, 코어에 대해 비교적 높은 고도에 위치한 탱크 또는 물 구조물에 일반적으로 저장된 물의 중력 및 큰 재고량에 단지 종속한다. 코어 및 냉각수 저장 구조물 사이의 고도 차이는 자연 순환 사이펀닝(natural circulation siphoning)을 냉각수가 받도록 요구되고, 그리고 코어로부터 붕괴 열 에너지를 효과적으로 제거한다. 저장된 냉각수에 기초한 수동 안전 설비를 위해, 장기적인 붕괴 열 제거를 적절하게 제공하는 능력은 냉각수 재고량 및 다양한 환경 온도 및 습도 상태 하에서 중력 구동되는 코어 냉각 메커니즘의 유효성에 크게 종속한다. 일반적으로, 환경 온도가 증가함에 따라 대류 코어 냉각을 수동적으로 생성하는 능력은 점점 제 기능을 못하게 된다. 결과적으로 저장된 냉각수 재고량에 기초한 수동 붕괴 열 제거는

온화한 기후에서 작동하는 핵 발전기에 가장 적합하다.

[0005] 수동 및 능동 안전 시스템은 일반적으로 코어를 수용하는 용기를 외부적으로 발전시킴에 따라, 결과는 중복 배관, 밸브, 열 교환기는 물론 펌프/송풍기 및 보조 전력과 제어 유선 네트워크(즉, 능동 시스템을 위한 기전력(motive-electric power) 및 제어를 제동하기 위하여 요구되는)의 복잡한 시스템이 된다. 코어로부터 열에너지를 제거하기 위하여 제공된 배관과 열-수력(즉, 열교환기) 및 전기 장치(즉, 펌프)의 복잡한 시스템이 일반적으로 원자로부분 이외의 기기(balance of plant)로 정의되어진다. 대부분의 핵 발전기의 원자로부분 이외의 기기의 대소는 실질적으로 큰 공장 공간을 야기하고, 핵 발전기가 전개되어지는 현장을 규제하고, 그리고 핵 발전기 설치를 특징시키는 자본 비용을 상당히 증가시킨다.

[0006] 상업적으로 운용하는 원자로의 핵 코어는 일반적으로 물로 냉각되어지고, 그리고 고온 물/증기가 있는 곳에서 산화하는 재료로 피복된 핵연료 구성요소로 장전되어진다. 코어가 예를 들어 냉각수의 손실 또는 능동 또는 수동 코어 붕괴 열 제거 시스템의 고장 때문에 과열을 경험하면, 피복 재료와 물/증기 사이의 화학 반응은 수소의 생성하는 결과가 된다. 수소는 그때 축적하여 결국 자기 점화하고, 그것에 의해 심각한 안전 문제를 제기한다. 결과적으로, 원자력 발전소는 예를 들어 제어된 점화 및 큰 수소 양의 축적을 방지하도록 중복 수소 관리 설비로 설치되어 있다. 그러나 이런 추가 안전 설비는 또한 복잡성을 부가하고, 운용 경비를 증가시키고, 그리고 예를 들어 일본 후쿠시마 다이이치(Fukushima Daiichi) 핵발전소에서 일어난 사고처럼 여러 가지 핵 사고들에 의해 실증된 것처럼 관리할 수 없다. 능동, 수동, 또는 양쪽 안전 시스템의 조합을 보장하도록 사용된 중복 부분들의 레벨은 안전 기능들이 일반적으로 상정된 설계 기준 사고 시나리오에 기초한 확률적 위험도 평가(probabilistic risk assessments)의 결과로 있게 실행한다. 설계 기준 사고 시나리오를 넘어 일어날 가능성이 매우 적기 때문에 모든 가능한 사고 시나리오가 고려되어지는 것은 아니다. 유감스럽게도, 코어에서 환경으로 방사능의 누출, 코어 멜트다운(core meltdown), 수소 폭발, 격납 건물 균열(containment breach) 및 큰 방사성 낙진(large radioactive fall out)에 중복 부분 및 다수의 조작된 방벽(multiple engineered barriers)에도 불구하고 안전 운용을 위한 가장 최근의 조절 지침에 따르는 원자력 발전소(즉, 후쿠시마 다이이치 발전소)에서 조차 일어났고, 그래서 설계 기준 사고 시나리오를 넘어서 촉발된 것처럼 비극적인 사고들은 그들의 일어날 가능성이 매우 적을지라도 용납할 수 없는 안전 및 경제적 충격을 가지고 있는 것을 입증하고 있다. 설계 기준 사고 시나리오를 넘는 것은 과도한 지진, 지진 해일(tsunami), 날씨 관련된 것, 테러범/적대적인 행사에 의해 나타나게 된다.

[0007] 소형 모듈식 원자로 설계는 커다란 현대 원자로 설계와 비교할 때 더 작고, 모듈식이고 좀 더 용이하게 이동식 구성요소들에 의해 특징이 있다. 그러나 이들 구성요소 또는 모듈은 첫째 배치 현장에서 열-수력(그리고 전기적)으로 결합되어지는 것 없이 작동할 수 있다. 이들 모듈식 구성요소들의 결합은 코어를 포함하는 용기의 바깥에 구성된 배관, 밸브, 수동 및/또는 능동 코어 냉각 시스템(원자로부분 이외의 기기)의 복잡한 네트워크의 상호 연결에 의해 일어난다. 결과적으로 배치, 그리고 소형 모듈식 원자로 설계에 기초한 전기 발전소의 설치 준비, 원자로부분 이외의 기기 장비의 설치, 그리고 소형 모듈식 원자로의 크기에 상관없이 모든 보조 장치의 결합을 위해 수개월을 요구한다. 사실, 소형 모듈식 원자로 시스템이 한번 결합되면, 전체 소형 모듈식 반응 기초 전기 발전소 공간 및 비상 대비 구역은 보통 또는 매우 낮은 전력 소요량을 생산하기 위한 소형 모듈식 원자로 설계에 대해서 조차 여전히 실질적으로 남아 있다. 한번 조립되며, 소형 모듈식 원자로 설계는 수송되어 회수되어질 수 없고, 따라서 순조롭게 배치될 수 없고, 그들은 여러 가지 개별 및 잠재적 방사능 소형 모듈식 원자로 구성요소의 제거를 위한 일반적으로 장황한 분해 절차들을 가지고, 원자로부분 이외의 기기의 분해에 제공된 수개월 및 모듈식 구성요소들의 분해를 받지 않고 현장으로부터 회수 될 수 없다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 전술한 관점에서, 어떤 기후 조건들에서 안정하게 운용할 수 있는 프로세스 가열(process heat)을 제공하는 선택권을 가지고, 극심한 환경적 스트레스 요인(심각한 지진 및 홍수를 포함하는)에 안전하게 대처할 수 있는 능력을 가진 어떤 현장에서, 그리고 설계 기준 사고 시나리오를 넘을 뿐만 아니라 상정된 설계 기준의 결과를 본질적으로 줄이는 방법으로 안전하게 전기 에너지를 생산하기 위한 진정한 이동 가능하고, 완전히 운용 가능하고, 소형 모듈식 핵 발전기 시스템에 대한 진행 중인 요구가 있다.

과제의 해결 수단

- [0009] 상기의 관점에서, 이동식 경화 소형 모듈식 핵 발전기(transportable hardened compact modular nuclear generator)가 기재되어진다. 기재된 발전기는 설계 기준 사고 시나리오 및 설계 기준 공격 시나리오를 넘는 것을 포함하여, 모든 사고 시나리오 하에서 수동적으로 코어 냉각을 보장하는 설비를 포함하고, 원자로부분 이외의 여분의 용기에 대한 요구 없이 통합 전력 변환 및 발전 장비(an integral power conversion and power generation equipment)를 포함하는 용기에 수용된 핵 코어에 의해 형성된다.
- [0010] 특정 장소의 전기적 요구(그리고 프로세스 가열 요구조건들)에 의존하여, 이 이후에 간단하게 이동식 핵 발전기(transportable nuclear generator)로서 간단 언급되는, 수송가능하고, 경화 소형 모듈 핵 발전기는, 다양한 열역학적 동력 사이클(즉, 브레이튼, 램킨) 및 특정 장소의 전기적 요구조건들과 어울리도록 전압 및 주파수를 조정하게 구성되어진 발전 장비와 작동하도록 구성된 통합 전력 변환 장비를 사용하여 전기 및 프로세스 가열로 코어에 의해 생성된 열에너지를 변환하도록, 다양한 코어 구성, 재료, 냉각수 및 감속재(moderators)와 작동하도록 구성되어진다.
- [0011] 일부 구성에서, 이동식 핵 발전기는 가스-브레이튼 사이클을 통하여 열에너지를 변환하도록 구성된 전력 변환 모듈과 작동할 때 약 45%의 효율성을 가지고 10MWt((Mega-Watt-thermal(메가와트 열출력))의 정격 전력(power ratings)을 제공한다. 이 예시적인 구성 하에서, 단일의 이동식 핵 발전기는 4.5MWe((Mega-Watt-electric(메가와트 전기 출력))에서 18MWe(Mega-Watt-electric)를 생산할 수 있는 전력 발생 유닛을 나타낸다. 이동식 핵 발전기가 그것의 열전달 표면을 가로질러 자연 공기 순환을 통하여 수동 냉각으로 작동함에 따라 특정 장소 전기 및/또는 프로세스 가열 요구에 대응하도록 다수의 이동식 핵 발전기 유닛으로 모여질 수 있다. 이동식 핵 발전기가 용이하게 수송 및 회수 가능함에 따라 다양한 적용 분야에 적합하고, 예를 들어 외딴지역 및 격자 연결되지 않은 위치(remote areas or grid-unattached locations)에서 발전 및 프로세스 가열 적용을 위해 사용되어질 수 있다. 추가적 적용 분야는 다양한 육상 또는 인공 섬 산업 공정(채굴, 오일-가스 추출, 군사 시설), 선박 추진, 그리고 임계적 용량 전력 격자 상호 연결(critical bulk power grid interconnections)에서 빠른 격자 백업 시스템(rapid grid back-up system)을 위한 발전을 포함한다.
- [0012] 하나의 예시적인 구성에서, 이동식 핵 발전기는 (1) 코어, 제어 시스템 및 구조를 반전시키는 냉각수 유동을 수용하는, 교환 가능한 원자로 출력 모듈(the swappable reactor power module), (2) 터보 기계 장치, 그리고 열교환기를 포함하는 동력 변환 모듈(the power conversion module), 그리고 (3) 시동 작업 동안에 사용되어지는 빠른 발전 전동기, 전자 제어기 및 무정전 전원(Uninterruptable Power Sources)(즉, 배터리)을 포함하는 전력 발전 모듈(the power generation module)의 3개 주요 모듈에 의해 형성되어진다. 실링 플랜지를 통하여 열-수력으로 한번 결합되면, 3개의 모듈은 주위 환경과 열에너지를 수동적으로 교환하는 단일 경화 용기(a single hardened vessel)를 형성한다. 전력 변환 모듈의 터보기계 시스템을 형성하는 회전 장치는 전력 발전 모듈의 발전 전동기에 탑재된 회전 구성요소들의 축에 기계적으로 또한 결합된 단일 축에 기계적으로 결합되고, 그래서 모든 회전 장치는 자기 베어링(magnetic bearings)을 사용하여 마찰 없이 같은 속도에서 회전하도록 대응되어 있다. 각각의 모듈은 독립적으로 수송되어지고, 또는 3개 모듈 모두가 이동식 핵 발전기를 손조롭게 운용할 수 있도록 허용하는 단일 용기에 완전히 조립되어진다. 이동식 핵 발전기의 완전한 조립 또는 별도 모듈에서 수송은 수송 표준(즉, 표준 수송 장비를 사용하는)에 대응하여 실행되어진다. 완전히 조립되어 수송될 때, 이동식 핵 발전기는 빠르게 배치되어 회수 가능한 완전한 가동 전력 발전기를 나타낸다.
- [0013] 하나의 예시적 구성에서, 이동식 핵 발전기는 수평으로 작동하는 단일 경화 압력 용기를 형성하도록 실링 및 잠금 플랜지를 사용하여 결합되어진다. 방향 변환(re-oriented)되는 외부 및 내부 이동식 핵 발전기 열전달 핀을 가진 다른 구성에서, 이동식 핵 발전기 수직으로 한다. 모든 3개 모듈은 다수의 내부 및 외부 구조 리브를 형성하는 것에 의해 실질적으로 전체 구조를 보강하는 동안에 내부 구성요소에 지원을 제공하도록 구성된 내부 및 외부 핀에 의해 형성된 고집적 열교환기를 포함한다. 통합 터보기계 및 발전 전동기와 결합된 통합 열교환기는 원자로부분 이외의 외부 기기에 대한 요구 없는 작동을 허용하고, 그것에 의해 실질적으로 공간, 취약성, 그리고 냉각수 손실의 가능성 시나리오를 실질적으로 감소시킨다. 이동식 핵 발전기는 용융방지 전도성 세라믹 코어(melt-proof conductive ceramic cores)를 포함하는 여러 가지 타입의 코어를 사용한다. 이동식 핵 발전기 냉각수 유동 경로는 전기 에너지로 열에너지의 고효율 변환을 보장하도록 구성되어 있다. 이들 냉각수 경로들은 전도 열전달 메커니즘에 의해 코어에서 이동식 핵 발전기 외부 핀까지 붕괴 열 에너지의 전달을 보장하는 동안에 코어 구조 지원을 제공하는 낮은 유체 역학적 항력을 가지고 내부 핀을 위치시키는 것에 의해 얻어진다. 이 구성에서, 이동식 핵 발전기 코어는 냉각수의 완전한 부재에서도 이동식 핵 발전기를 둘러싸는 환경에 안전하게 수동적으로 붕괴 열에너지를 전달할 수 있다. 단일 용기 이동식 핵 발전기를 형성하는 3개 모듈이 지금 좀 더 상세히 기술되어진다.

- [0014] 하나의 구성에서, 원자로 출력 모듈은 핵분열성 농축 물질(enriched fissile material)(즉, 우라늄 또는 플루토늄)로 연료 공급된 원자로 코어, 중성자 반사체(neutron reflectors), 다중 반응도 제어 시스템(multiple reactivity control systems), 냉각수를 출력 변환 모듈에 원자로 출력 모듈을 결합하는 원자로 출력 모듈 및 열-수력 시스템을 통하여 효율적으로 순환시키는 유동 채널을 통합시킨다. 원자로 출력 모듈 용기는 C-C 복합재료 또는 적합한 금속 재료로 특별하게 만들어진다. 코어는 정격 출력 요구를 만족시키는 재료 구성물(material composition) 및 열전달 특성으로 가진 어떤 적합한 코어이다.
- [0015] 특별한 코어 구성은 연료 요소(fuel elements)를 형성하도록 탄화규소(SiC)에 넣어진 세라믹 마이크로 캡슐화된 연료를 가진 전도성 세라믹 코어를 포함한다.
- [0016] 하나의 예시적인 구성에서, 이동식 핵 발전기는 모놀리식 3중 구조 등방성 연료(monolithic tri-structural isotropic fueled (MTF))를 포함하는 "멜트다운 방지(melt-down proof)" 코어로 설치되어 있다. 이 구성에서, 코어는 완전 세라믹 마이크로 캡슐화 연료(fully ceramic micro-encapsulated(FCM) fuel)처럼, SiC 또는 SiC-복합재 요소에 밀봉되거나, 또는 MTF 요소로 분배된 3중 구조 등방성(tri-structural isotropic(TRISO)) 입자를 갖는 것으로 이 이후에 언급된, SiC 펠릿에 TRISO 연료를 가지고 제조된 연료요소로 만들어진다. 어떤 소결(sintering), 다짐(compacting) 또는 다른 SiC 조립 공정이 펠릿 및/또는 블록에서 방사(irradiation)에 대해 적절한 구조 강도 및 저항성의 SiC를 생산하는 것에 사용되어진다. 하나의 바람직한 구성에서 나노 침투 및 일시 공융(共融)-단계 탄화규소(a nano-infiltration and transient eutectic-phase(NITE) SiC) 소결 공정이 사용되어진다.
- [0017] TRISO 입자에 사용된 분열성 연료는 산화물, 탄화물, 산화 탄화물(oxy-carbide) 또는 우라늄, 플루토늄, 토륨 또는 다른 핵분열성 동위원소(fissile isotope)의 질화물이다. 에르비아(Erbia) 또는 가돌리니아(Gadolinia) 같은 가연성 독물 희토류 산화물이 SiC 세라믹 콤팩트에 포함되어진다. 가연성 독물은 펠릿을 형성하는 연료 입자로 혼합된 특별한 피복 입자에 또한 포함되어진다. TRISO 입자, FCM 연료 펠릿의 밀집 SiC 매트릭스(the dense SiC matrix of the FCM) 및 연료 구성요소에서 SiC의 고농도 비공기성 SiC 코팅(the high-density non-porous SiC coating)은 동시에 방사성 내성(radiation tolerant), 열전도 및 고온 작동과 양립하게 있는 형태로, 핵분열 생산물 이동 및 분산에 대한 다수의 장벽을 제공한다.
- [0018] 다른 예에서, 이동식 핵 발전기는 열적으로 전도성 세라믹 코어로 장전되고, 전도성 세라믹 코어는 MTF 요소 또는 블록으로 구성되고, 그리고 유사하게는 반사 소자(reflector elements) 또는 블록(예를 들어, 탄소 또는 SiC 복합재료로 구성된)으로 구성된다. 이 구성에서, MTF는 작동 동안에 과도한 열응력(thermal stresses)을 방지하는 크기로 설계되어 있다. 일례는 도 24 및 24A에 나타난 4분의 1 원의 10-cm 두께 플레이트이다. 다른 예들은 육각형 또는 사각형 연료 블록이다. 모든 구성들에서, 연료 및 반사 블록 또는 요소들은 냉각수가 유동하는 홈을 포함한다. 모든 구성에서, 냉각수 홈에 대응하는 압력 플레이트는 항상 압축 하에서 코어를 유지하기 위하여 코어의 입구 및 출구에 포함되어진다. 전도성 세라믹 코어 매트릭스의 열전도성은 또한 연료 콤팩트와 블록 사이의 갭의 제거 및 블록들 사이의 갭의 감소에 의해 향상되어지고, 그것에 의해 연료 온도를 감소시키고, 모든 사고 시나리오 하에서 수송 가능한 핵 발전기 코어 수동 열전달 능력을 지원한다.
- [0019] 코어 반응도는 반사장치에서 중성자를 흡수하고, 그들이 코어로 재진입하는 것을 방지하고, 그리고 코어 중성자를 흡수하는 것에 의해 제어된다. 이송 가능한 핵 발전기에서 코어 반응도는,
- [0020] (1) 안전을 위한 흡수 모드에서 수동적으로 결합되는 방법으로 배치된 물질들을 흡수 및 반사하는 중성자를 포함하는 반사 장치에서 제어봉(control rods) 또는 회전 드럼(rotary control drums);
- [0021] (2) 원자로 내 제어봉의 배열(an array of in-core control rods);
- [0022] (3) 다른 시스템들이 작동되지 않으면 수동 시스템을 통하여 코어에서 중성자 흡수 물질(neutron poison)을 주입하는 비상 운전 정지 시스템에 의해 제어된다. 제어 드럼은 회전 위치에 종속하는 코어로 되돌아가게 반사되거나 또는 중성자가 거의 탈출하는 것을 허용하도록 기하학적으로 배치된 흡수 및 반사 물질들을 특히 포함한다. 중성자 흡수 물질은 붕소 또는 희토류 중성자 포집 물질(a rare earth neutron capturing material)을 가진 SiC-기초 또는 C-기초 세라믹이고, 반면에 중성자 반사장치 부분은 좋은 중성자 반사 특성을 가진 적합한 고온 호환 형태에서 베릴륨 또는 다른 물질을 사용한다. 이들 반응도 제어 설비는 특징은 독립적으로 작동하고, 각각은 출력을 조절하고 반응로 운전 정지를 이루기 위하여 코어 반응도의 완전 또는 부분 제어할 수 있다.
- [0023] 금속 또는 세라믹 피복을 가진 산화물, 질화물, 금속 또는 다른 형태로 핵분열성 물질을 포함하는 연료봉 같은

다른 원자로 코어 구성들이 사용되어지며 냉각수 매질(the coolant medium)에 적합하게 다발(bundles)로 배치되어진다. 구체 조약돌(spherical pebbles)과 같은 적절한 기하학적 형상의 느슨한 연료 요소(loose fuel elements)가 또한 사용되어진다.

- [0024] 한 구성에서, 이동식 핵 발전기 코어는 출력 변환 모듈을 위한 냉각수 및 작동 유체로서 불활성 기체를 사용한 다. 이 구성에서, 냉각수는 CO₂, 헬륨, 또는 다른 바람직한 불활성 가스(즉, 아르곤)일 수 있다. 이 예에서, 이동식 핵 발전기 코어는 다양한 통합 열 교환기로 결합된 터보기계가 고출력 변환 효율을 달성하는 재생 브레이튼 사이클(a regenerative Brayton cycle)을 수행하는데 기여하는 동안에 열에너지를 생산한다.
- [0025] 다른 구성에서, 이동식 핵 발전기 코어는 냉각수로서 물을 사용하고 부분적으로 원자로 출력 모듈에 완전히 둘러싸인 제1차 루프(a primary loop)에서 순환하는 감속재(a moderator)로 사용한다. 제1차 루프에서 압력은 통합 가압기(an integral pressurizer)를 사용하여 조절되어진다. 하나 또는 다수의 통합 분리 열교환기는 원자로 출력 모듈에서 제1차 루프 및 출력 변환 모듈에서 제2 루프(a secondary loop) 사이에서 열적 결합을 제공한다. 제2차 루프에서 순환하는 물은 과냉각 액체(sub-cooled liquid)에서 과열 증기로 열역학적 상태를 변화시키도록 분리 열교환기의 제1차 루프 측으로부터 열에너지를 수용한다. 제2차 루프에서 물은 제1차 루프에서 순환하는 물과 혼합하지 않는다. 이 구성에서 이동식 핵 발전기 코어 열에너지는 과열 증기의 형태로 출력 변환 모듈에서 터보기계로 전달되어진다. 터보 기계에서 팽창 후, 증기는 수동적으로 열에너지를 내부로 전달하는 통합 응축기(an integral condenser)로 배출되어 외부적으로 출력 변환 모듈의 냉각핀이 연장되어진다. 증가 응축하면, 펌프 세트에 의해 재가압되고, 그리고 열교환기의 제2차 측의 입구에서 과냉각 물을 펌핑하는 것에 의해 제2차 루프가 재설정되어진다.
- [0026] 다른 구성에서, 이동식 핵 발전기 제1차 루프는 사용하여 능동적으로 순환된, 또는 재순환 펌프, 또는 수동적으로 하나 또는 다수 분리 열교환기의 제2차 측에 열에너지 전달을 위한 액체 금속을 포함한다. 이 이동식 핵 발전기 코어 구성에서, 제2차 측은 작동 유체로서 기체를 재생 브레이튼 출력 사이클의 요구사항들을 만족시키도록 설계된 터보기계를 사용하는 출력 변환 모듈 또는 작동 유체로서 물을 가지고, 랭킨 출력 사이클의 요구사항들을 만족시키도록 설계된 터보기계 및 응축기를 사용하는 출력 변환 모듈에 결합되어진다.
- [0027] 출력 변환 모듈 구성들과 독립적으로, 브레이튼 또는 랭킨 출력 사이클의 요구사항들을 지원하도록 설계된 구성 요소들을 사용하여, 출력 변환 모듈은 출력 변환 모듈에서 터보기계를 형성하는 회전 구성요소들처럼 발전 모듈에 직접적으로 결합되어지고, 그리고 발전 모듈의 발전 전동기를 형성하는 회전 구성요소들은 같은 속도로 회전하도록 회전축에 직접 기계적으로 결합되어진다. 축의 회전 속도는 출력 변환 시스템의 열-수력학, 전기 발전 전동기 기계를 조절하는 전자 제어 시스템의 장전 조건 및 설정에 의해 결정되어진다. 발전기 출력의 주파수 및 다른 전기적 변수는 통합 전자 조절 회로에 의해 제어되어진다.
- [0028] 하나의 구성에서, 발전 모듈에서 출력 발전기는 운전 정지 후 시동 동안에 출력 변환 모듈의 터보 기계를 구동하는 전기 모터로서 작동하도록 전환되어진다. 이 구성에서, 시동 출력은 배터리 세트(즉, 무정전 전원), 또는 외부 전원(예를 들어, 소형 디젤-전기 장치)을 통하여 제공된다.
- [0029] 대부분의 구성들에서, 출력 변환 모듈 및 발전 모듈에 통합된 모든 회전 구성요소들을 결합하는 축은 자기 베어링을 사용하는 대응 모듈의 정지 구조물에 결합되어진다. 모든 모듈의 완전한 분리 및 독립을 보장하기 위하여, 결합되어질 때, 출력 변환 모듈 및 발전 모듈은 기계적으로 축을 결합하도록 플렉시블 커플링(a flexible coupling)을 사용한다.
- [0030] 다른 구성에서, 클러치를 상상하면, 발전 모듈의 회전 구성요소는 출력 변환 모듈 회전 구성요소들로부터 해제하도록 요구되어지거나 또는 특별한 적용은 이들 두 개의 모듈의 회전 구성요소들 사이에서 다른 회전 속도를 요구한다. 아래의 논의는 핵심 및 일반적 이동식 핵 발전기 설비를 강조한다.
- [0031] 모든 구성에서(즉, 냉각수 및/또는 작동 유체로서 기체 또는 액체를 사용하는) 이동식 핵 발전기는 매우 소형의 이동식 발전 유닛을 빠르게 배치 및 회수 기능하게 제공하도록 고등 구성요소-레벨 모듈성 및 통합성을 나타낸다. 이동식 핵 발전기는 결합될 때 단일 용기를 형성하는 3개의 미리 구성 모듈을 포함하는 것을 특징으로 한다. 각 모듈은 대량 생산되어질 수 있고, 용이하게 독립적으로 이송되거나 또는 완전한 조립되어 운용할 수 있게 되어 있다. 원자로 출력 모듈은 연료 교체 사이클의 끝에서 새롭게 교체(hot swapped)되어질 질 수 있거나 또는 비상시(즉, 군사작전)는 예를 들어, 항공 인양(즉, C17 항공 수송 또는 중량 화물 인양 헬리콥터 수송)을 통하여, 코어를 빠르게 회수하는 것을 요구한다.
- [0032] 3개의 모듈을 형성하는 이동식 핵 발전기 구성요소들은 기존 기술(다양한 상업적 적용으로부터 터보기계, 그리

고 자기 베어링을 가진 빠른 교류 모터 기술로부터 발전 전동기)에 의존하거나, 또는 국가 실험실 및 국제적 실험실(예를 들어, FCM 연료)에서 개발되고 테스트된 성숙한 기술에 의존한다. 터보기계(기체 냉각의 이동식 핵 발전기 구성을 위한 터빈 및 압축기 설비), 선택된 냉각수 및 열역학적 출력 사이클(즉, 재생식의, 또는 브레이튼 또는 램킨)에 맞도록 된 통합 열교환기(즉, 열회수장치(recuperator), 예냉기(pre-cooler) 및 중간 냉각기(inter-cooler)), 그리고 시동기/발전기 유닛을 포함하는 원자력 발전기를 포함하는 핵 코어, 출력 변환 모듈을 포함, 지원, 보호 및 냉각한다.

[0033] 완전하게 조립된 이동식 핵 발전기는 최소 부지 준비로 수평으로 또는 지하 설치를 위해 수직으로 작동하도록 구성되어 있다. 모든 구성들에서, 이동식 핵 발전기는 빠른 필딩(fielding) 및 기동뿐만 아니라 전체 원자로 또는 개별 모듈의 빠른 복구(fast retrieval)를 허용한다. 연료 교체(refueling)는 소모된 코어를 포함하는 "사용된(used)" 원자로 출력 모듈을 새로운 코어를 포함하는 새로운 모듈로 교체하는 것에 의해 실행되어진다. 오동작이 출력 변환 모듈 또는 발전 모듈에서 생기면, 그들의 교체는 새로운 또는 공장-재정비된(factory-refurbished) 것으로 오동작하는 모듈을 단순히 교체하는 것에 의해 실행되어진다.

[0034] 선택된 작동 유체에 의존하여, 이동식 핵 발전기는 모든 소형 모듈 원자로 설계의 발전소의 균형을 정상적으로 형성하는 설비 및 배관의 복잡한 네트워크를 요구하지 않는다. 이동식 핵 발전기는 완전하게 통합되어 배치 후에 즉각적으로 전력을 생산할 준비가 되어 있다. 이동식 핵 발전기가 수평 작동을 위해 구성되어지면, 결과적으로 전력 발전기는 지진 활동, 탑재된 선박 및 임계 출력을 요구하는 여러 가지 다른 적용 분야들이 특징인 현장에서 용이한 배치를 허용한다. 원자로 출력 모듈, 출력 변환 모듈, 그리고 발전 모듈은 민간 및 군용 수송 표준에 따라 다양한 수송 선택권을 가지고, 표준화된 수송, 가동성 및 저장 플랫폼에 개별적 및 독립적으로 고정되어지게 설계되어진다.

[0035] 이동식 핵 발전기는 그것의 수동 냉각을 위한 많이 물이 물려있는 것을 요구하지 않고, 그리고 그것의 최종 열 흡수원으로서 지역의 물 또는 건조하고, 비-증발하는 물, 또는 단순히 주변 환경 공기를 이용한다. 비정상적 상황에서, 이동식 핵 발전기는 전도 열전달(코어 냉각수의 완전 부재에서)을 통하여 코어로부터 핀 모듈의 벽에 전도 열전달(코어 냉각수의 완전 부재에서), 그리고 이동식 핵 발전기를 둘러싸는 외기(the ambient air)로 수동적 대류 열전달을 통하여 코어부터 수동 붕괴 열에너지 제거를 단지 의존할 수 있다. 연료 교체를 위한 이동식 핵 발전기의 나머지로부터 분리될 때, 원자 출력 모듈은 복사 및 외기 대류 메커니즘에 기초하여 단지 수동 붕괴 열 제거를 할 수 있다.

[0036] 이동식 핵 발전기가 브레이크 사이클 변환에 기초한 출력 변환 모듈로 작동하도록 구성되어질 때, 다양한 공정의 열 적용분야를 지원하기 위하여 사용되어질 수 있는 고온 제거 열을 사용하는 선택권을 제공한다. 이 구성에서, 이동식 핵 발전기는 담수화, 바이오 연료 처리, 지역난방, 또는 다른 산업적 용도에 제공된 설비에 분포되어지는 저급 및/또는 고급의 프로세스 열의 생산을 위한 열교환기를 가지고 설치되어진다.

[0037] 통합 배터리 팩(즉, 발전 모듈과 비교하여), 또는 소형 외부 디젤 발전기에 의해 나타나는 무정전 전원의 지원으로 이동식 핵 발전기 제1차 루프를 가열 및 가압하는 동안에 터보기계를 시동하도록 구성되어진다. 완전히 조립된 이동식 핵 발전기 유닛은 일시적 및 비상상태 동안에 수동적으로 안전한 연료 온도 차이(temperature margins)를 유지하는 동안에 시동, 운전 정지, 정상 작동을 할 수 있는 발전소를 나타낸다.

[0038] 본 발명의 다른 장치, 기구, 시스템, 방법, 특징 및 이점들은 아래의 도면 및 상세한 설명의 검토로 관련 기술 분야에서 통상을 지식을 가진 자에게 분명하게 될 것이다. 모든 그런 추가 시스템, 방법, 특징 및 이점들은 이 설명 내에 포함되어지고, 발명의 범위 내에 있고, 그리고 첨부된 청구항들에 의해 보호되는 것으로 의도되어 있다.

도면의 간단한 설명

[0039] 발명은 아래의 도면을 참조하여 보다 잘 이해되어질 수 있다. 도면에서 구성요소들은 일정한 비율로 있을 필요는 없고, 대신에 강조는 발명의 원리를 예시하는 것에 주어져 있다. 도면에서, 도면 번호는 다른 도면을 통하여 대응하는 부품을 표시한다.

도 1은 예시적인 구현의 원자로 출력 모듈, 출력 변환 모듈, 그리고 발전 모듈의 경계를 포함하는 일례의 이동식 핵 발전기 블록 다이어그램의 상부 사시 단면도이다.

도 2는 이동식 핵 발전기의 수평 또는 수직 작동을 위해 모든 설비를 포함하는 단일 용기를 나타내는 일례의 이동식 핵 발전기 블록 다이어그램의 상부 사시 단면도이다.

도 3은 수동 냉각, 구조 경화(structural hardening) 및 차폐 설비(shielding features)를 위해 향상된 열전달 영역을 제공하도록 하는 방법으로 개발된 외부 이동식 핵 발전기 핀을 예시하는 도 1에 도시된 구현 예의 측면도이다.

도 4 및 5는 도 1에 도시된 이송 가능한 핵 발전기의 구현 예의 기체 냉각 구성의 단면도 및 기능 다이어그램을 나타내고 있다.

도 6은 도 1에서 이동식 핵 발전기의 버전을 구현 예의 내부의 상세한 단면의 개략도이다.

도 7은 도 1 및 6에 도시된 이동식 핵 발전기의 원자로 출력 모듈의 구현 예의 단면 사시도이다.

도 8 및 9는 이동식 핵 발전기 원자로 출력 모듈의 예로서 상부 코어 반사장치가 없는 원자로 출력 모듈 및 상부 코어 반사장치를 가진 원자로 출력 모듈의 사시도이다.

도 10a 10b, 10c는 도 6에 예시된 출력 변환 모듈과 비교된 "열회수장치(recuperator)"로서 기능하는 저배압 통합 열교환기(a low backpressure integral heat exchanger)의 구현 예의 사시도이다.

도 11은 터보기계를 나가는 작동 유체 및 도 6 예시되고, 그리고 도 10a, 10b, 및 10c에 도시된 압축기로부터 회수되는 유체 사이에 분리를 제공하는 저배압 통합 열교환기의 완전 조립된 예시적인 구성의 사시도이다.

도 12는 도 10a에 도시된 열교환기의 입구로 들어가는 유체 및 출력 변환 모듈의 중간 냉각기 섹션으로부터 회수되는 유체 사이에서 분리 유동 형태에 의해 야기된, 그것 때문에 열에너지의 회복하는 기능을 실행하고, 그렇지 않으면 도 1 및 도 6에 도시된 이동식 핵 발전기의 구현 예의 유체의 팽창에 제공된 터보기계의 배출에 소모된 열전달을 예시하는 도 11에 예시된 완전하게 조립된 저배압 통합 열교환기의 구현 예의 예시도이다.

도 13은 수송 또는 저장 준비에 원자로 출력 모듈의 실행 및 대체하는 원격 유압 고온 원자로 출력 모듈에 제공된 장치의 구현 예의 사시도이다.

도 14 및 15는 원자로 출력 모듈(코어) 교체를 위한 분리 및 실링하는 완전히 조립된 이동식 핵 발전기 및 원격 실행 유압 모듈로부터 원자로 출력 모듈을 분리하도록, 또는 출력 변환 모듈의 일 측면에 유지 관리를 실행하도록 채택된 예시적인 순서를 예시하는 사시도이다.

도 16은 수송 표준에 부합하고, 수송 및 작동 동안에 모듈을 고정하는 것을 허용하도록 안내부가 설치되어, 배치 현장에서 중량 화물 인양 크레인을 요구한 것 없이 빠른 결합 또는 분리를 위한 슬라이딩 모듈을 허용하는 예시적인 차량 이동식 핵 발전기 플랫폼을 예시하는 사시도이다.

도 17은 빠른 원자로 출력 모듈의 고온 회수(hot retrieval)(운전 정지 후 짧은 시간)를 실행하기 위하여 추가된 차폐 및 수동 냉각 구조를 가진 도 16에 도시된 예시적인 차량 이동식 핵 발전기 플랫폼을 예시하는 사시도이다.

도 18은 이동식 핵 발전기의 수평(또는 수직) 작동을 위한 모든 설비를 포함하는 단일 용기가 적어도 하나의 분리 열교환기에 의해 분리된 제1차 루프 및 제2차 루프를 사용하여 랭킨 출력 사이클의 냉각수 및 작동 유체로서 물과 작동하게 구성되는 도 1에서 도시된 예시적인 이동식 핵 발전기 블록 다이어그램의 수정된 버전의 상부 단면도이다. 이동식 핵 발전기의 이 구성은 브레이튼 또는 랭킨 출력 사이클을 이용을 허용하고 분리 열교환기에 의해 출력 변환 모듈로부터 분리된 액체 금속-냉각 원자로 출력 모듈에 또한 적용한다.

도 19 및 20은 도 18에 도시된 예시적인 이동식 핵 발전기 블록 다이어그램의 각각의 평면도 및 기능 다이어그램이다.

도 21은 도 18에 도시된 이동식 핵 발전기의 버전의 구현 예의 내부의 상세한 단면 개략도이다.

도 22는 빠른 배치를 위해 표준 수송 플랫폼에 고정된 예시적인 완전히 조립된 이동식 핵 발전기의 축적 표시를 제공하는 사시도로 어떤 배치 현장에서 출력을 발생하도록 준비가 되어 있다.

도 23 및 23a는 고온 코어 제거 시나리오 하에서 방사능 차폐를 보장하도록 추가 수동 냉각 설비 및 팽창 차폐(inflatable shields)를 가지고 여기에 도시된, 빠른 "고온(hot)" 원자로 출력 모듈 차량(즉, 비상 현장 추출(emergency site extraction))을 위한 표준 차량 플랫폼에 고정된, 이동식 핵 발전기의 예시적인 원자로 출력 모듈의 사시도이다.

도 24 및 24a는 냉각수의 완전 부재에서도 수동적으로 냉각되어질 수 있는 용융방지 코어(a melt-proof core)를

형성하는 완전 세라믹 마이크로 캡슐화 연료 요소(Fully Ceramic Micro-encapsulated fuel elements) 및 특별한 전도세라믹 코어 요소의 사시도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0040] 여기에 기재된 이동식 핵 발전기 예시적인 구성들은 전기 에너지 및 프로세스 가열(process heat)을 요구하는 다양한 적용을 위한 안전하고, 빠르게 수송 및 운용 가능한 핵 발전기 시스템을 제공하는 내용으로 기술되어진다. 관련 기술분야의 통상의 지식을 가진 자는, 이미 고온영비 및 오염물질 배출을 가진 디젤-전기 발전기를 사용하는 다른 대안이 없는 위치에서, 이동식 핵 발전기 통합 모듈이 신뢰성 있고 연속적인 전력의 필요성을 가지는 어떤 전력 수요가 있는 적용 분야에 구성되어지는 것을 이해할 것이다. 이동식 핵 발전기는 이동식 핵 발전기 내부에서 주변 환경(최종 열 흡수원)으로 수동 열전달 메커니즘을 향상시키도록 다른 핀 형상으로 구성되어진다.
- [0041] 도 1은 예시적인 구현의 원자로 출력 모듈(200), 출력 변환 모듈(300), 그리고 발전 모듈(400)의 경계를 나타내는 일례의 이동식 핵 발전기(100) 블록 다이어그램의 상부 사시 단면도이다. 도 2는 3개의 모듈(원자로 출력 모듈, 출력 변환 모듈, 그리고 발전 모듈)을 결합하고, 수평 또는 수직 작동을 위한 모든 통합 장비를 포함시키는 것에 의해 형성된 단일 용기 이동식 핵 발전기(100)를 도시하는 일례의 이동식 핵 발전기 블록 다이어그램의 상부 사시 단면도이다.
- [0042] 원자로 발전 모듈의 외부 핀(208), 전력 변환 모듈의 핀(208, 208A), 그리고 발전 모듈의 핀(208)을 포함하는 각 모듈을 예시하는 도 1에 도시된 구현 예의 측면도이다. 핀(208, 208A)은 이동식 핵 발전기(100)의 수동 냉각, 구조 경화(structural hardening) 및 차폐 설비(shielding features)를 위한 향상된 열전달 영역을 제공하는 방법으로 발달되었다.
- [0043] 도 1 및 2를 참조하면, 이동식 핵 발전기(100)는 3개 주요 모듈에 의해 형성된다. 코어(203), 제어 및 코어 운전 정지 시스템(204), 코어 제어 및 반사 장치 시스템(205), 냉각수 유동 역전 구조(206)(도 7에 상세히 도시됨), 그리고 수동 코어 열전달 구조(207)를 수용하는 교체 가능한 원자로 출력 모듈(200). 원자로 출력 모듈은 실링 및 지지플랜지(201)에 의해 출력 변환 모듈(300)에 결합되어진다. 출력 변환 모듈(300)은 실링 플랜지(301)를 사용하여 원자로 출력 모듈에 시일되고, 그리고 출력 변환 모듈(300) 및 발전 모듈(400)의 모든 회전 구성요소에 기계적으로 결합된 터보기계 장치(304), 저배압 열교환기인 "열회수장치(recuperator)(305)", "예냉기(pre-cooler)(306)" 및 "중간냉각기(intercooler)(307)", 유동 역전 구조(309)(206과 유사) 및 축(310)을 포함한다. 출력 변환 모듈(300)은 플랜지(301)를 사용하여 발전 모듈(400)에 시일되어 결합된다. 발전 모듈(400)은 실링 플랜지(401)를 사용하여 출력 변환 모듈(300)에 시일되고, 그리고 내장형 전자 제어기를 가진 빠른 발전기 모터(a fast generator-motor)(402), 시동 작동 동안에 사용되는 무정전 전원(404)(즉, 배터리), 발전기 통합 냉각 시스템/열교환기(404), 터보기계(304)의 회전축과 기계적으로 결합하도록 인터페이스하는 가요성 커플링(interfacing and flexible coupling structures)을 가진 실링 자기 베어링(405)을 포함한다. 실링 플랜지(201-301, 301-401) 통하여 열-수력으로 한번 결합되면, 3개의 모듈은 핀(208, 208A)을 사용하여 주위 환경과 열에너지를 수동적으로 교환하는 단일 경화 용기(a single hardened vessel)(100)를 형성한다. 모듈 내부에서 이동식 핵 발전기(100) 외부 환경까지 열에너지 전달을 보장하도록 열전달 설비를 제공하는 것에 추가하여, 핀(208) 및 연장된 핀(208)은 또한 경화 구조 및 차폐 설비를 가지고 있다. 원자로 출력 모듈(200)에서 칸막이(209)에 의해 형성된 압력 경계는 다른 냉각수 및 제어 시스템(204, 205)을 수용하는 챔버(210)에 의해 나타난 제2 압력 경계를 가진 제1차 압력 경계(311)에 의해 나타난 환경의 분리를 감안한다. 유사하게, 발전 모듈(400)에서 칸막이(406)는 내부적으로 출력 변환 모듈(300)을 나타낸 환경(311)으로부터 발전 전동기 환경(the generator-motor environment)(407)의 실링 및 분리를 허용한다. 출력 변환 모듈(300)의 터보기계 시스템(304)을 형성하는 회전 설비는 발전 모듈(400)의 발전 전동기(402)에 통합된 회전 구성요소들의 축에 기계적으로 또한 결합된 단일 축(310)에 기계적으로 결합되어지고, 그래서 모든 회전 설비는 마찰이 없는 자기 베어링(frictionless magnetic bearings)(405)(단지 터보기계 시스템(301) 및 발전 전동기(402)의 일 측면에 단지 도시됨)을 사용하여 같은 속도로 회전하도록 일치되어져 있다.
- [0044] 각 모듈은 독립적으로, 또는 3개 모두 완전하게 조립되어 완전히 가동할 수 있는 이동식 핵 발전기 용기(100)를 형성하여 수송되어진다. 모든 모듈은 압력 및 케이블 이음 포트(cabling fittings ports)(211)를 통하여 인터페이스 된다. 이들 포트는 냉각수 충전 또는 배출 작동, 다양한 전기적 기능(즉, 제어봉 구동 또는 회전 제어 및 반사장치 메커니즘)의 모니터링 및 제어를 허용한다. 부가적으로, 이음 포트(211)는 배치 현장에서 발전 전동기(402)에서 전기 격자(the electric grid)까지 전기 버스 연결(electric bus connections)을 허용한다.

- [0045] 이동식 핵 발전기(100)의 완전한 조립 또는 분리 모듈 수송이 수송 표준(즉, 표준 수송 설비를 이용하는)에 따라 실행되어진다. 완전히 조립되어 수송될 때, 이동식 핵 발전기(100)는 빠르게 배치 및 회수 가능하게 완전히 작동하는 전력 발전기를 나타낸다.
- [0046] 한 구성에서, 각 모듈을 나타내는 압력 용기를 형성하는 재료는 반사 장치 및 또한 압력 경계(압력 용기)로서 탄소(Carbon) 및 탄화규소(Silicon carbide)의 복합 구조를 사용한다. 경량의 저 중성자 흡수 용기(a light weight low-neutron absorption vessel)의 사용은 소형 크기 코어(203)(도 1)의 중성자 경계를 증진시키기 위하여 중성자 반사의 외부 메커니즘을 사용하는 선택을 허용한다.
- [0047] 도 1에 도시된 하나의 예시적인 구성에서, 이송 가능한 핵 발전기 모듈은 수평으로 작동하는 단일 경화 압력 이동식 핵 발전기 용기(400)를 형성하도록 실링 및 잠금 플랜지(201-301, 301-401)를 사용하여 결합된다. 또 다른 구성에서, 예를 들어 도 2에 도시된, 외부 이동식 핵 발전기(100) 열전달 핀(208B, 208C, 208D)을 재방향 설정(re-orienting)하는 것에 의해, 이동식 핵 발전기는 수직으로 작동하도록 구성되어진다. 모든 모듈은 예를 들어, 도 1 및 2에 도시된 내부 핀(212, 207, 305, 306, 307, 404)에 의해 형성된 고 통합 열교환기를 포함한다. 이들 통합 열교환기는 이동식 핵 발전기(100)가 수직 작동 또는 지하 설비 내에 작동하기 위해 재방향 설정될 때 도 1에서 외부 핀(208, 208A) 및 핀(208B, 208C, 208D)(도 2)에 열적으로 결합된다. 각 모듈에서 모든 내부 핀은 그들이 다수 구조 리브를 형성하기 때문에 전체 이동식 핵 발전기 구조를 실질적으로 보장하는 동안에 내부 구성요소에 지원을 제공하고, 그래서 전체 이동식 핵 발전기 용기(100)를 강화하고, 그리고 냉각수 유동 채널로서 구성되어진다.
- [0048] 한 구성에서, 이동식 핵 발전기(100) 원자로 제어 메커니즘은 예를 들어 도 4에 도시된 제어 구동 기구(control drive mechanisms)(205)를 포함하고, 중성자 반사 장치(214)의 영역 내에서 중성자 흡수 물질(215)을 삽입/철회하는 것에 의해 중성자 흡수 물질(215)을 제어하도록 구성되고, 코어(203)의 영역으로 중성자 흡수 물질(215)을 삽입/철회하도록 구성된 제어 구동 기구(204)에 부가하고, 그리고 코어(203)에 실질적으로 중심이 되는 영역 내에 중성자 흡수 물질을 삽입하도록 구성된 중심 제어봉 구동 기구(219)를 부가하도록 구성되어 있다.
- [0049] 또 다른 구성에서, 이동식 핵 발전기(100) 원자로 제어 기구는 제어 구동 기구(221)(도 6)를 포함하고, 중성자 반사 장치(214)의 영역 내에 중성자 흡수 물질(215)을 삽입/철회하는 것에 의해 중성자 흡수 물질(215)을 제어하도록 구성되고, 코어(203)의 실질적인 중심 위치로/중심위치로부터 중성자 흡수 물질(220)을 삽입/철회하도록 구성된 중심 제어 구동 기구(219)에 부가하도록 구성되어 있다.
- [0050] 또 다른 구성에서, 도 7에 도시된, 이동식 핵 발전기(100) 원자로는 일 측면에 중성자 흡수 물질을 포함하는 회전 드럼(213) 및 각 회전 드럼의 대향하는 측면에 중성자 산란 물질(반사 장치)을 포함하는 원자로 제어 기구를 포함하는 원자로 출력 모듈(200)을 이용하도록 구성되어 있다. 회전 드럼(213)은 중성자 흡수 물질이 코어(203)와 마주치고, 그래서 코어(203)의 임계 미만 조건(a sub-critical condition)을 강요하는 방법으로 그들을 회전시키는 것에 의해 드럼을 수동적으로 항상 방향을 정하는 자기 커플링을 포함한다. 회전 제어 드럼(213)이 전자기 제어(즉, 도 7에는 도시되지 않은, 솔레노이드, 전자기, 보조 모터가 달린 또는 공압 작동)를 사용하여 회전되어질 때, 회전 드럼은 코어(203)에 중성자 반사 장소(the neutron reflective site)를 노출시키고, 그것에 의해 그것의 임계성을 증가시킨다. 전력 손실의 경우에, 회전 제어 드럼은 중성자 흡수 측면이 코어(203)와 마주하고, 그것에 의해 운전 정지 조건들을 강요하는 방법으로 그들 자신을 항상 수동적으로 방향을 정한다. 이 구성은 이동식 핵 발전기 용기(100)가 그것의 지지플랫폼으로부터 제자리를 벗어나고, 예를 들어 적대적인 사건들에 의해 야기된 폭발들의 결과로서 회전되어짐에도 불구하고 유효한 상태로 있다.
- [0051] 도 5, 6, 8, 9 및 21에 도시된 바와 같이, 냉각수 유동 방향에 대해 코어(203)의 입구 및 출구 섹션은 각각 중성자 반사 장치(217, 218)에 의해 마주치게 된다. 부가적으로, 원자로 출력 모듈은 모든 다른 제어 시스템이 작동하지 않으면 수동 시스템을 통하여 코어에 중성자 흡수 물질(neutron poison)을 주입하는 비상 운전 정지 시스템을 포함한다.
- [0052] 원자로 제어를 설명하는 측면들을 간단히 설명하자면, 코어(203)를 위한 반응성 제어는 안전을 위한 흡수 모드에서 수동적으로 결합되어지는 방법으로 배치된 흡수 및 반사하는 물질을 포함하는 반사 장치(214)에서 제어봉(215), 그리고 다수의 원자로 내 제어봉(216)을 구동시키는 것에 의해 하나의 구성에서 수행되어진다. 또 다른 구성에서 코어(203)의 반응성 제어는 원자로 내 제어봉(216), 중심 제어봉(220) 및 회전 제어 드럼(213)의 구동, 또는 추가적 도립 코어(203) 운행 정지 메커니즘을 제공하도록 비상 중성자 흡수 물질 주입에 부가하는 이들 구성들의 조합에 의해 수행되어진다. 제어봉 재료는 반사장치 재료로서 붕소, 희토류 흡수 물질 및 베릴륨

을 가진 SiC 기초 또는 C 기초 세라믹일 것 같다.

- [0053] 도 1을 참조하면, 원자력 출력 모듈(200) 내에 통합 열교환기(212)는 제어봉 구동 기구(204, 205)에 수동 냉각을 제공하도록 구성되어 있다. 도 1, 2 및 5를 참조하면, 통합 열교환기(207)는 내부 코어(203), 그리고 원자로 출력 모듈(200) 외부 핀(208)(도 1 및 3), 또는 핀(208B)(도 2) 사이의 전도 열전달을 통하여 코어(203)로부터 붕괴열을 수동적으로 제거하도록 구성되어 있다. 통합 열교환기(207)는 냉각수 전체 손실 시나리오 아래에서 코어(203)로부터 붕괴 열에너지를 전달하도록 구성되어 있다. 일부 구성에서, 코어(203)는 예를 들어 도 7에 도시된 것처럼 높은 열전도성 경로(207)를 형성하는 물질에 열적으로 결합된 연료 요소에 의해 형성되어진다. 도 4 및 5를 참조하면, 출력 변환 모듈(300)은 일련의 통합 열교환기를 포함한다. 이들은 브레이튼 출력 사이클의 열역학적 구성과 일치하는 열회수장치(305), 예냉기(306), 그리고 중간냉각기(307)로서 기능하도록 구성되어 있다. 모듈에 제공되어 완전히 통합된 추가의 통합 열교환기들은 발전 모듈(400)에 통합된 발전 전동기 열교환기(404)에 의해 나타난다.
- [0054] 도 1, 2, 3, 4 및 5의 단일 용기(100)에 통합된 이동식 핵 발전기의 하나의 특별한 구성에서, 출력 변환 모듈(300)은 원자로 출력 모듈(200)에서 생산된 열을 회전하는 축(310)에 결합된 기계적 출력으로 변환하도록 터보기계 시스템(304) 및 통합 열교환기 하드웨어를 수용한다. 같은 축(310)에 회전 터보기계를 결합하기 위하여, 그리고 출력 변환 모듈(300)에 의해 나타난 인클로저에서, 원자로 출력 모듈, 입구 가스 터빈(304A)에서 코어(203)를 통한 유동에 의해 생산된 고온 기체(312)의 적절한 열-물리 특성을 가진 작동 유체로서 기체(312)(도 5)를 가정한다.
- [0055] 도 5 및 6을 참조하면, 터빈(304A)의 다양한 단계에서 팽창 후, 기체는 낮은 항력 역전 구조(a low-drag flow reversing structure)(206)를 사용하여 유동 방향을 역전시키고, 열회수장치(305)의 고온 측(the hot side)에 유동시키고, 그리고 원자로 출력 모듈(200)에서 코어(203)의 저온 측(the cold side)을 주입하는 것에 의해 브레이튼 가스 사이클을 최종적으로 재설정하기 전에 통합 중간냉각기(307)를 통하여 유동하는 기체로 압축기(304C)의 고압축 및 압축기(304B)의 저압축으로 들어가기 전에 열회수장치(305)로 정의된 통합 열교환기, 그리고 예냉기(306), 그리고 중간냉각기(307)로 들어간다. 예냉기(306) 및 중간냉각기(307)는 핀(208) 및 연장된 핀(208A)(도 3)을 통하여 수동적으로 최종 열 흡수원으로 잔류 폐열(the residual waste heat)을 전달하는 기체 대 공기 또는 기체 대 액체 열교환기로 구성되어진다. 이 구성에서 원자로 냉각 기체(312) 및 브레이튼 작동 기체(312)는 같다. 기체(312)는 열역학적 및 코어 요구사항들을 만족시키는 열-물리 특성들을 가진 CO₂, 헬륨, 아르곤 또는 다른 유체이다.
- [0056] 재생 브레이튼 사이클 구성 하에서, 이동식 핵 발전기 출력 변환 효율은 거의 45%이다. 바이패스 밸브(313)는 코어를 나가는 기본적으로 단락 기체(short-circuiting gas)(312)에 의해 전기적 요구에 따라 부하에 따른 실행을 할 수 있다.
- [0057] 축(310)이 출력 변환 모듈(300)에서 발전 모듈(400) 및 터보 압축기에 기계적으로 연결되어질 때, 발전 전동기(402)는 발전기를 전동기로 변환하기 위하여 무정전 전원 공급 유닛(403)에 통합된 배터리 및 시동과 운전 정지에서 기체 순환 시스템으로서 작동하도록 터보기계를 위한 구동으로 발전 전동기(402)를 사용하도록 시동 운전으로 구성되어진다.
- [0058] 한 구성에서, 축(310)은 이동식 핵 발전기 제어 시스템, 전자 제어기 또는 전자기 베어링 코일 오작동 내에서 전력의 갑작스런 손실의 경우와 맞물리는 캐치 베어링(catcher bearings)을 가진 자기 베어링(405)을 사용하여 출력 변환 모듈 및 발전 모듈의 정지 요소(stationary elements)에 결합되어진다. 발전 모듈로부터 출력 변환 모듈이 분리되는 것을 감안하여(즉, 개별 모듈 수송 동안에), 축(310)은 모듈 커플링 플랜지(301-401)의 위치에서 유연한 고속 커플러(a flexible high-speed coupler)에 의해 결합된 두 개의 개별 축에 의해 형성되어진다. 통합 터보 기계 및 발전 전동기 설비는 원자로 이외의 외부 기기에 대한 요구 없는 작동을 허용하고, 그것에 의해 실질적으로 전체 공간, 취약성, 그리고 냉각수 손실 가능성 시나리오를 감소시킨다.
- [0059] 도 7, 8 및 9를 참조하면, 원자로 출력 모듈(200)은 용융 방지 전도성 세라믹 코어를 포함하는 다수의 타입의 코어(203)를 사용한다.
- [0060] 도 7에 도시된 하나의 예시적인 구성에서, 코어(203)는 다양한 기하학적 구조를 가지고 연료 요소(221)에 의해 형성되어진다. 연료 요소(221)는 유동 경로 내를 순환하는 동안에 냉각수에 전달된 열에너지의 고효율 변환을 보장하도록 냉각수 유동 경로(222)를 포함하도록 구성되어 있다. 연료 요소(221)를 통하여 유체가 유동을 허용 및/또는 냉각수 유동 경로(222)는 코어(203)로부터 삽입 또는 철회되어지는 제어 기구를 허용하도록 구성되어

있다.

- [0061] 코어(203)의 한 구성에서, 전도 열전달 기구를 높이기 위하여, 냉각 경로(207)는 그들이 내부 핀(207A)을 통하여 외부 핀(208)까지 코어(203) 내부 위치들로부터 열전달 도관을 제곱함에 따라 전도성 냉각 경로(207)를 형성하는 핀들과 연료 요소(221)를 열적으로 결합하는 것에 의해 얻어진다. 핀(207A)은 유동 역전 구조(206)로 열회수장치(305)를 나가는 기체 유동을 안내하도록 구성되고, 반면에 코어에서 핀(208)으로 수동적으로 열에너지(즉, 붕괴 가열)를 전달하는 코어(203) 내부 및 열전달 경로를 위한 구조적 지지를 제공한다. 유동 역전 구조(206)는 낮은 유체역학적 항력을 제공하도록 구성되어지고, 그리고 전도 열전달 기구에 의해 코어에서 이동식 핵 발전기 외부 핀(208)까지 붕괴 열에너지의 전달을 보장하는 동안에 코어 구조적 지지를 제공한다. 따라서 코어(203)는 냉각수의 완전 부재에도 이동식 핵 발전기를 둘러싸는 환경에 붕괴 열에너지를 안정하고 수동적으로 전달한다.
- [0062] 도 10a, 10b 및 10c는 출력 변환 모듈(300)로 통합된 저배압 열회수장치 통합 열교환기의 구현 예의 사시도이다. 이들 도 10a, 10b 및 10c에 도시된 바와 같이, 작동 유체, 기체(312)는, 일 측면의 열회수장치(305)를 삽입하고, 완전히 360도, 실행하고, 열회수장치(하나의 예시적인 구성에서 대칭적인)를 순환하여 나간다. 이 방법에서, 기체(312)는 열회수장치(305)의 외부 표면과 열적 접촉에서 유체와 혼합하는 것 없이 열회수장치의 내부 표면과 열에너지를 교환한다.
- [0063] 도 11은 출력 변환 모듈(300)에 통합된 저배압 통합 열회수장치(305) 열교환기의 완전 조립된 예시적 구성의 사시도이다. 이 구성은 터보 기계를 나오는 작동 유체(고온 기체(hot gas)), 그리고 도 5 및 6에 기재된 압축기(304C)로부터 회수하는 유체(312)(냉 기체(cold gas)) 사이에서 분리를 제공한다. 도 12는 도 10a에 도시된 열교환기(305)의 입구로 들어가는 유체(312A) 및 출력 변환 모듈의 중간 냉각기 섹션(307)으로부터 회수되는 유체(312B) 사이에서 분리 유동 형태에 의해 야기된, 그것 때문에 열에너지의 회복하는 기능을 실행하고, 그렇지 않으면 열교환기의 단일 기하학적 구조 때문에 최소 배압을 가진 터보기계의 배출에 소비된 열전달을 예시하는 도 11에서 완전하게 조립된 저배압 통합 열교환기(305)의 구현 예의 사시도이다. 도 13은 수송 또는 저장 준비에 원자로 출력 모듈의 실링을 실행하는 것이 구체화되고 "고온(hot)" 원자로 출력 모듈을 교체하도록 구성된 장치의 구현 예의 사시도이다. 이 도면에 도시된 바와 같이, 모듈 교체 장치(a module swapping device)(500)의 구현 예는 원자로 출력 모듈(200)의 실링 및 출력 변환 모듈(300)의 분리를 실행하도록 플랜지(503)와 결합되어지는 플랜지(505)를 사용한다. 플랜지(503) 및 플랜지(505)가 결합되어짐에 따라 그들은 도 1에 도시된 플랜지(201) 및 플랜지(301)를 밀폐한다. 유압으로 작동된 체결요소(fasteners)(501)는 기구(502)가 원자로 출력 모듈(200)을 밀폐하는 폐쇄 섹션(a closing section)(501)을 삽입하는 동안 플랜지(201) 및 플랜지(301)를 분리한다. 완전히 조립된 이동식 핵 발전기 단일 용기(100)로부터 원자로 출력 모듈(200)을 분리 및 실링 플랜지(501)를 가진 원자로 출력 모듈(200)을 실링하기 위하여 교체 장치(500)를 사용한 예시적인 순서를 예시하는 사시도이다.
- [0064] 도 16은 수송 및 작동 동안에 모듈(200, 300, 400)을 고정하는 것을 허용하도록 가이드(601)가 설치되고 수송 표준과 부합하는 예시적인 모듈 수송 플랫폼(600)을 예시하는 사시도이다. 이 구성에서, 모듈은 배치 현장에서 중량 화물 인양 크레인을 요구하는 것 없이 빠른 결합 또는 분리를 위해 슬라이드 이동한다.
- [0065] 도 17은 빠른 원자로 출력 모듈(200) "고온(hot)" 회수(운전 정지 후 짧은 시간 코어 회수)를 허용하도록 추가된 차폐(700) 및 수동 냉각 구조(701)를 가진 도 16에 도시된 예시적인 차량 이동식 핵 발전기 플랫폼(600)을 예시하는 사시도이다. 이 실시 예에서, 전체 이동식 핵 발전기 단일 용기(100), 또는 단지 원자로 출력 모듈(200)이 열전달을 증가시키도록 넘쳐나게 되면, 원자로 출력 모듈(200)은 운전 정지 후 비교적 짧은 시간에 수송되어야 한다. 이 구성에서, 코어는 팽창 차폐(inflatable shields)(700)가 빠른 코어 회수 동안에 방사선장(a radiation field)을 완화시키도록 두꺼운 수관 벽을 형성하도록 물로 채워지는 동안에 수동적으로 냉각시키는 것을 계속한다.
- [0066] 도 18은 도 1에 도시된 예시적 이동식 핵 발전기 블록 다이어그램의 수정 버전의 측면 단면도이고, 이동식 핵 발전기의 수평(또는 수직) 작동을 위한 모든 설비를 포함하는 단일 용기가 전형적인 가압 수형 원자로(Pressurized Water Reactor(PWR))로서 말하면 제1차 루프에서 순환하는 코어(203) 냉각수로서 물(804)을 가지고 작동하게 구성되어 있다. 랜킨 출력 사이클을 형성하는 제2차 루프에서 작동 유체(805) 또한 물이다. 이 구성에서 이동식 핵 발전기는 제1차 측면(802)이 원자로 냉각수 펌프(801)를 통하여 강제 대류에 의하여 순환하는 물(804)을 통하여 코어(203)로부터 열에너지를 수용하는 분리 열교환기에 분리된 제1차 루프 및 제2차 루프를 포함한다.

- [0067] 도 18, 19, 20 및 21을 참조하면, 냉각수 및 작동 유체로서 물과 작동하는 이동식 핵 발전기의 예시적 구성에서, 원자로 냉각수 펌프(801)는 도 18에 도시된 것처럼 건조 헤드 또는 챔버(the dry head or chamber)(210), 또는 도 21에 도시된 환형 덮개(the annular jacket)에 위치한 캔형 펌프로 구성되어진다. 제1차 루프에서 압력은 가열장치(800B)와 분무장치(800A)(도 21)를 포함하는 가압장치(a pressurizer)(800)를 사용하여 조절되어진다. 이 구성에서 제어 및 수동 붕괴 열 제거 시스템은 도 1-7에 기술된 것과 유사하다.
- [0068] 유동 경로(805)에 의해 나타난 제2차 루프는 분리 열교환기(802, 803)를 사용하여 제1차 루프로부터 열에너지를 수송한다. 물은 급수 펌프(808)를 사용하여 열교환기(803)의 제2차 측면을 통하여 순환되어진다. 증기가 열교환기(803)의 제2차 측면을 나옴에 따라, 이것은 터보기계(806)에서 팽창하고, 증기 에너지는 출력 변환 모듈(400) 및 발전기(402)로 전달된 기계 에너지로 변환되어진다. 터보기계(806) 및 빠른 발전기(402)는 도 1-7에 기재된 것들처럼 출력 변환 모듈(300) 및 발전 모듈(400) 사이에서 축(310) 및 분리 기구를 사용하여 기계적으로 결합되어진다. 증기가 터보기계(806)의 배출에서 내보내어짐에 따라 이것은 응축기(807)에서 응축하기 전에 통합 열교환기 재가열기(809)(도 19 및 20)로 들어가고, 그래서 랭킨 출력 사이클을 재설정한다.
- [0069] 응축기(807)는 도 1-7에서 기재된 것처럼 중력 구동 열전달 기구를 가진 핀(208)을 상용하여 환경에 열에너지를 전달한다. 코어(203)로부터 단기 붕괴 열 제거는 UPS(403)의 사용에 의해 전력 부재로 실행되어진다. 코어(203)가 용융 방지 세라믹 재료에 의해 형성되는 구성들에서, 전도 기구들에 의해 수동 냉각하는 것은, 냉각수의 완전 손실 시나리오에서도, 안전 여유 아래에서 코어 온도를 보장한다. 다른 압력 경계에서 작동하는 제1차 및 제2차 루프를 포함하는 이동식 핵 발전기 구성은 제2차 루프에서 브레이튼 또는 랭킨 출력 사이클의 이용을 허용하고 분리 열교환기에 의해 출력 변환 모듈로부터 분리된 액체 금속 냉각 출력 모듈을 또한 사용한다.
- [0070] 도 22는 매우 건조하고 극한 환경 조건들을 가진 현장을 포함하는 어떤 배치 현장에서 빠른 배치 및 발전 준비를 하기 위해 표준 수송 플랫폼(900)에 고정된 예시적 완전 조립된 이동식 핵 발전기의 축적 표시를 제공하는 사시도이다.
- [0071] 도 23 및 23a는 고온 코어 제거 시나리오 하에서 방사능 차폐를 보장하도록 추가 수동 냉각 설비(701) 및 팽창 차폐(700)를 가지고 도시된, 빠른 "고온(hot)" 원자로 출력 모듈 차량(즉, 비상 현장 추출(emergency site extraction))을 위한 표준 차량 플랫폼(900)에 고정된, 이동식 핵 발전기의 예시적인 원자로 출력 모듈의 사시도이다.
- [0072] 도 24 및 24a는 냉각수의 완전 부재에서도 수동적으로 냉각되어질 수 있는 용융방지 코어(a melt-proof core)를 형성하는 완전 세라믹 마이크로 캡슐화 연료 요소(Fully Ceramic Micro-encapsulated fuel elements)(901) 및 특별한 전도 세라믹 코어 섹션(221)의 사시도이다. FCM 연료는 예를 들어, 탄화규소(SiC)처럼 저 중성자 흡수 세라믹 복합재료를 이용한다. SiC 복합재료는 그들이 높은 온도에서 물과 공기와 함께 내부 낮은 반응 속도(very low reaction kinetics)를 가짐에 따라 원자로에서 사용하기 위한 흑연에 대하여 많은 이점들을 가지고 있고, 탄소 먼지를 생성하지 않고, 발광(irradiation) 후에 낮은 온도에서 빠른 에너지 방출로부터 위그너 효과(Wigner effect)를 가지지 않고, 방사선에 대해 좋은 허용 범위를 가지고, 이것은 발광 하에서 매우 낮은 치수 변화를 나타내고, 그리고 초고온에서도 핵분열 생성물 확산에 대해 비-다공성 불침투성의 장벽을 제공한다.
- [0073] 한 구성에서, 코어(203)는 인성(toughness)을 보강하도록 SIC를 가진 단일 방향의 섬유 강화 NITE-소결 SiC의 복합 구조로 만들어진 연료 요소(901) 및 연료 요소(221)에 의해 형성되어진다. 코어(203) 받침대(restraints)와 고온 덕트와 모든 유동 경로(220A)와 제어봉 채널(222)은 또한 섬유 강화 복합재료로 만들어진다. 예를 들어, 도 6에 도시된 통합 열회수장치(305) 열교환기는 소형이고, 유효성 있고, 그리고 저배압을 제공하도록 터보기계 주위의 환형 공간을 이용할 수 있게 적합하도록 설계된 SiCPC(인쇄 배선)기체-기체 열교환기로 형성되어진다. SiC-Gd²⁰³ 과 Er²⁰³ 의 소결 혼합으로 만들어진 제어봉 및 제어봉 슬리브를 포함한다. 마지막으로 압력 용기는 예응력(pre-stressed) SiC 복합재료로 만들어진다. 일부 구성들에서, 연료 요소(221)는 콤팩트(902) 또는 연료 요소(901)를 통하여 전과하는 크랙 없이 연료 요소(221)의 제어된 파괴(controlled fractioning)를 허용하도록 부분 절개(906) 및 부분 절개(905)를 제공하고, 이들은 예를 들어, 적대적 사건(미사일 공격)에 의해 야기된, 폭발에 의해 초래된 것들과 같이 심각한 동적 응력(kinetic stresses)을 받게 된다. 이 방법에서, 그리고 비극적인 공격의 결과로, 연료 블록 또는 연료 요소(221)는 제어된 부분 절개(906) 또는 부분 절개(905)를 따라 균열되어지고, 그것에 의해 연료 요소(901)를 떠나서는 설계 기준 사고 또는 공격 시나리오를 넘어서 가장 심한 사건 하에서도 활동하지 않는다. 이 설비는 코어 또는 그것의 균열된 연료 블록(221)이 모든 휘발성 물질(all volatiles)을 포함하고 심각한 코어 파손 시나리오(a severe core breach scenario)의 결과를 상당히 완화시킨다. 모든 방사능 휘발물질이 설계 기준 사고 또는 공격 시나리오를 넘고, 그리고 심각한 설계 기준 하

에서 연료 요소(901) 내에 갇혀서 남아 있으면, 이동식 핵 발전기는 모든 SMR 및 큰 원자로에 요구된 것처럼 대 피 계획 구역을 요구하지 않는다.

[0074] 관련 기술분야의 통상의 지식을 가진 자는 기재된 특징들의 조합이 도면에 특별하게 도시되지 않은 구현 예에 도달하기 위하여 어떻게 형성되는지 이해하게 될 것이다.

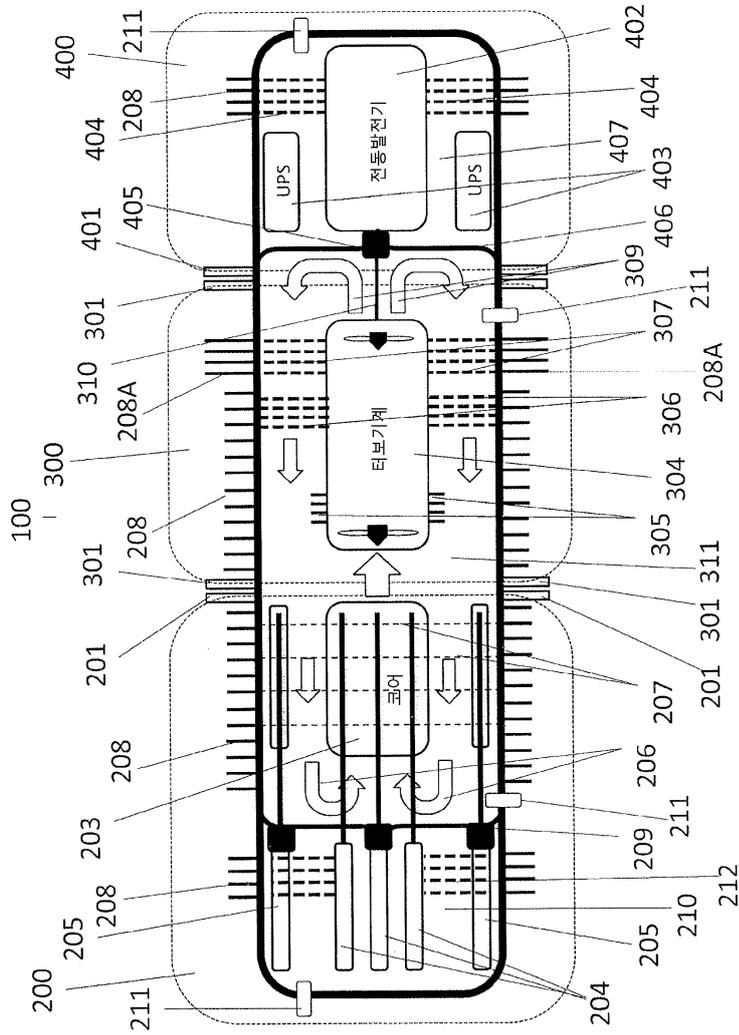
[0075] 본 발명의 다양한 측면 및 상세한 것들이 발명의 범위로부터 이탈하는 것 없이 변경되어지는 것을 이해하게 될 것이다. 또한, 앞의 설명은 단지 예시의 목적으로 있고, 그리고 제한을 목적으로 하는 것은 아니고, 발명은 청구항들에 의해 정의되어진다.

부호의 설명

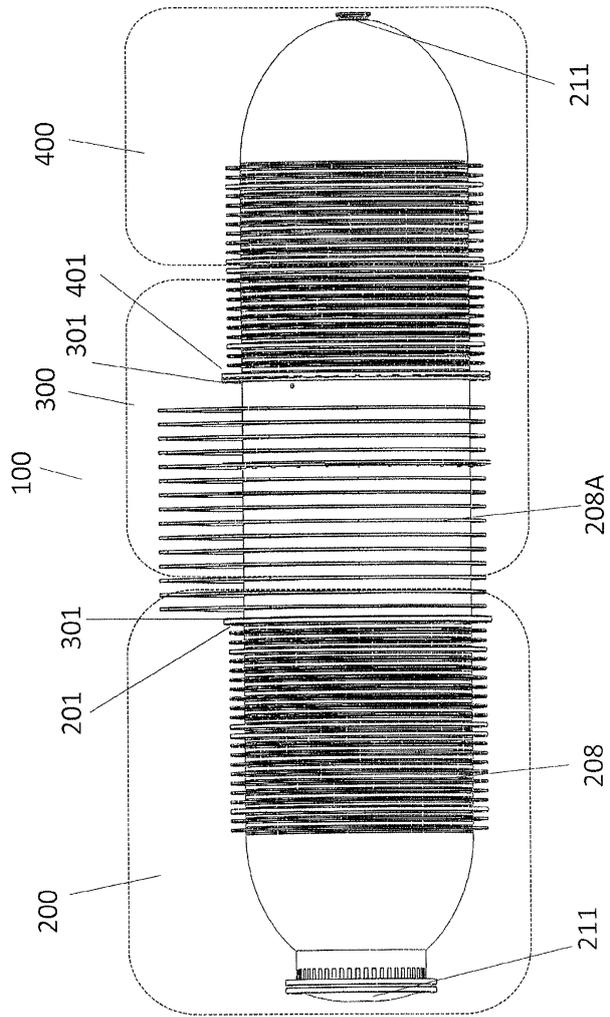
- [0076] 100: 이동식 핵 발전기
- 200: 원자로 출력 모듈
- 203: 코어
- 204: 제어 구동 기구
- 208, 208A: 핀
- 219: 중심 제어봉 구동 기구
- 214: 중성자 반사 장치
- 215; 중성자 흡수 물질
- 300: 출력 변환 모듈
- 305: 열회수장치
- 306: 예냉기
- 307: 중간냉각기
- 400: 발전 모듈
- 402: 발전 전동기
- 404: 무정전 전원(UPS)

도면

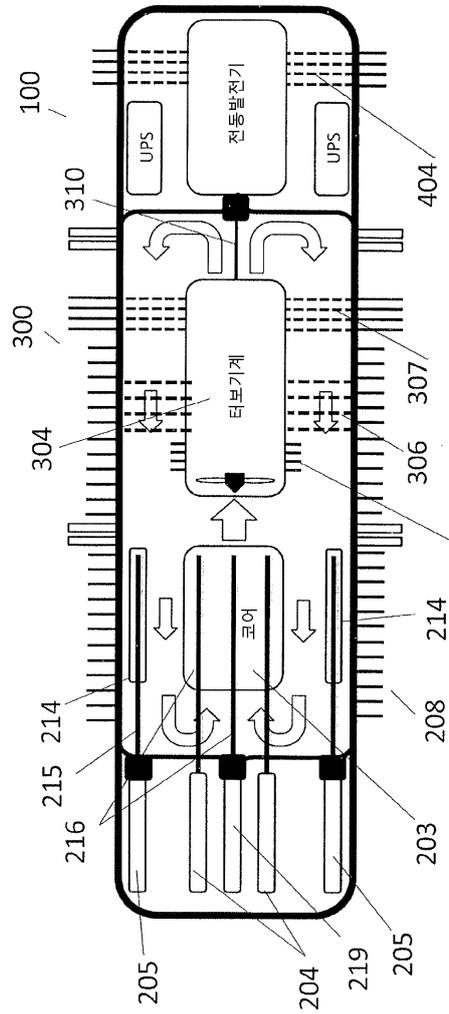
도면1



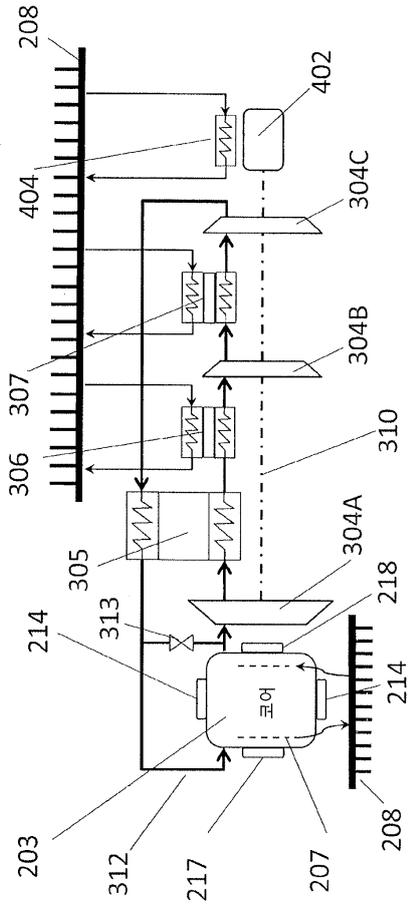
도면3



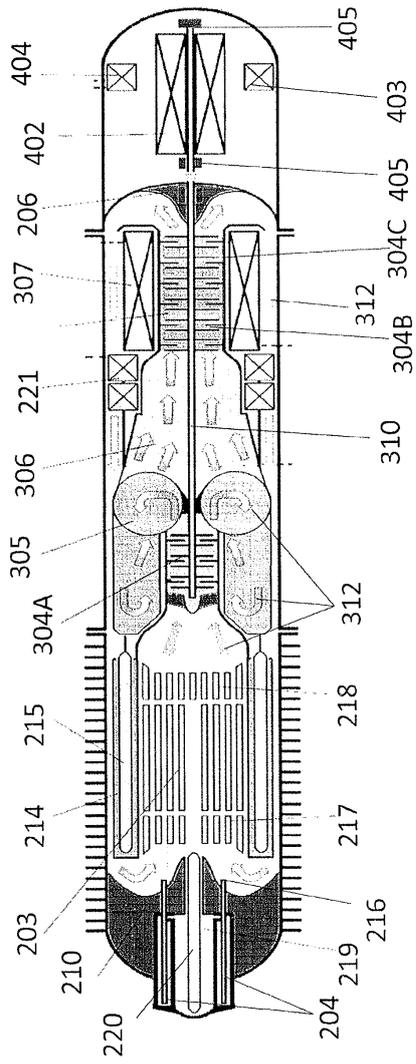
도면4



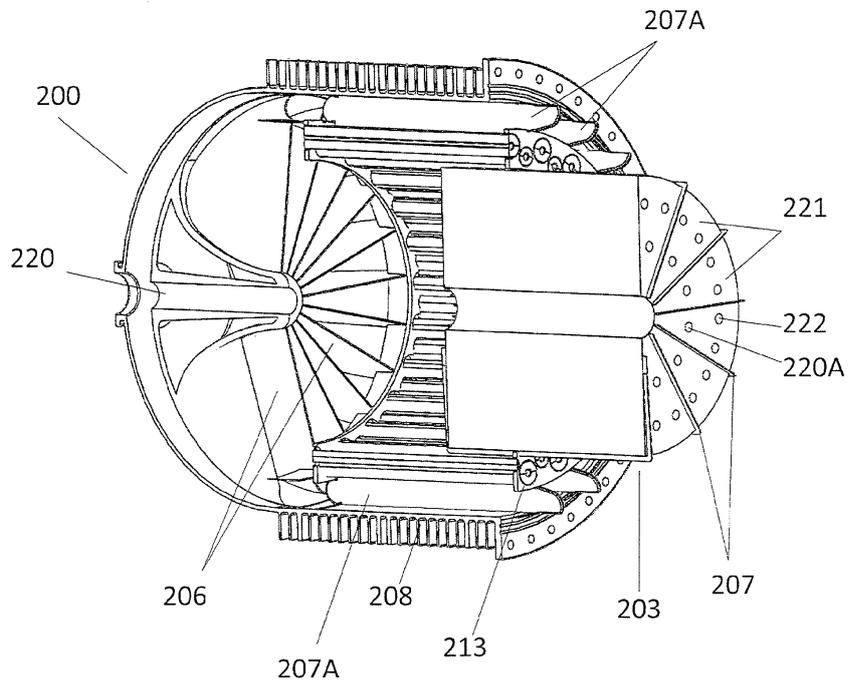
도면5



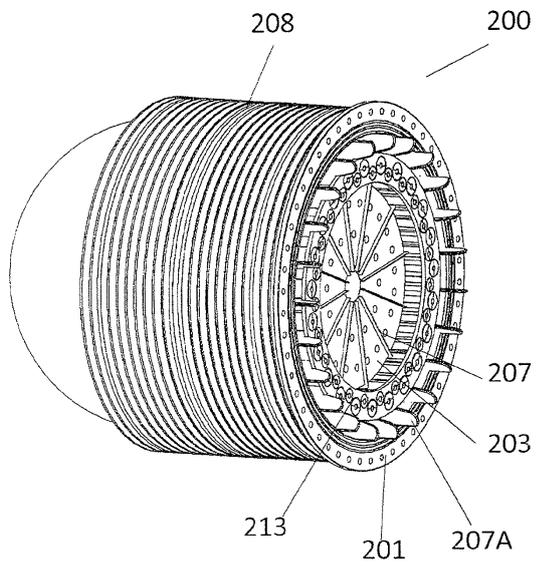
도면6



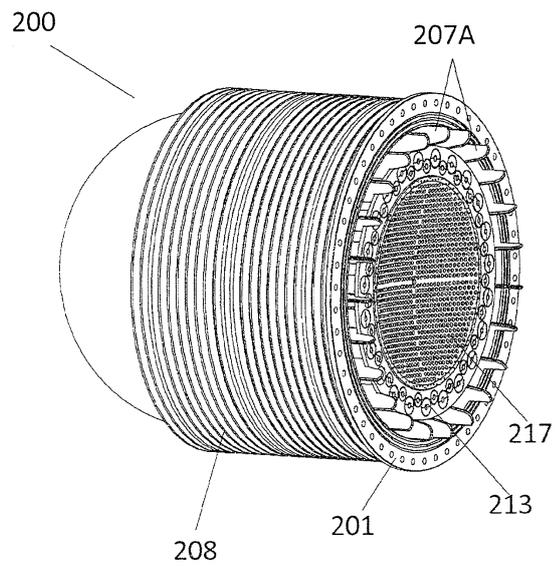
도면7



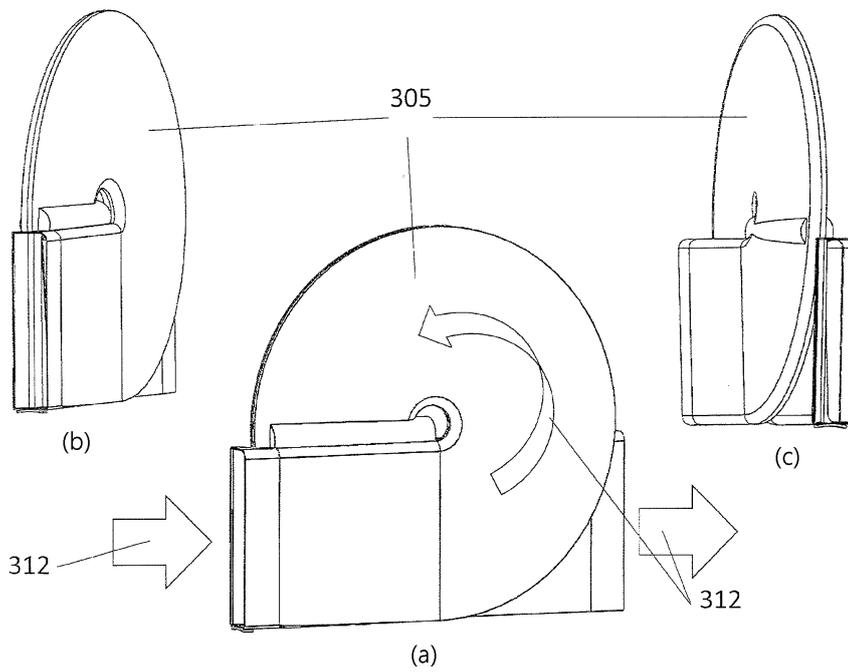
도면8



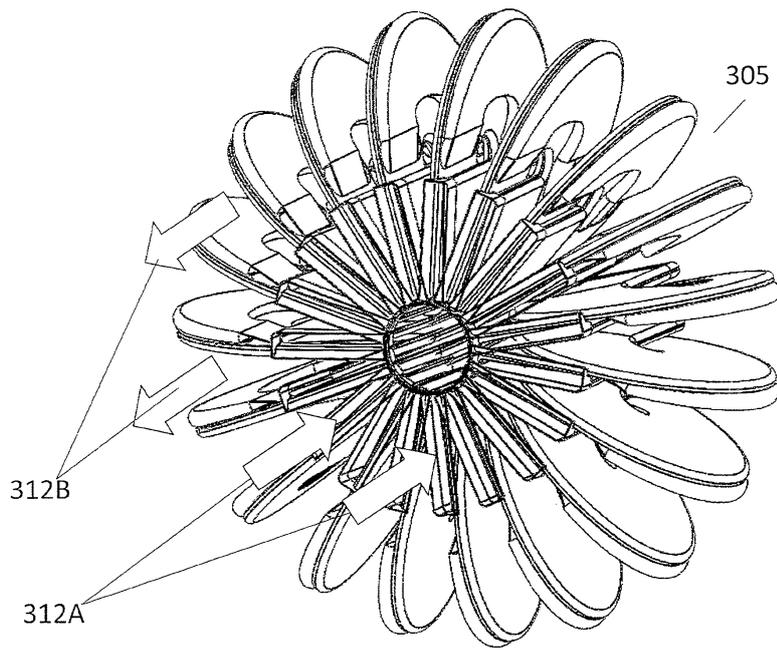
도면9



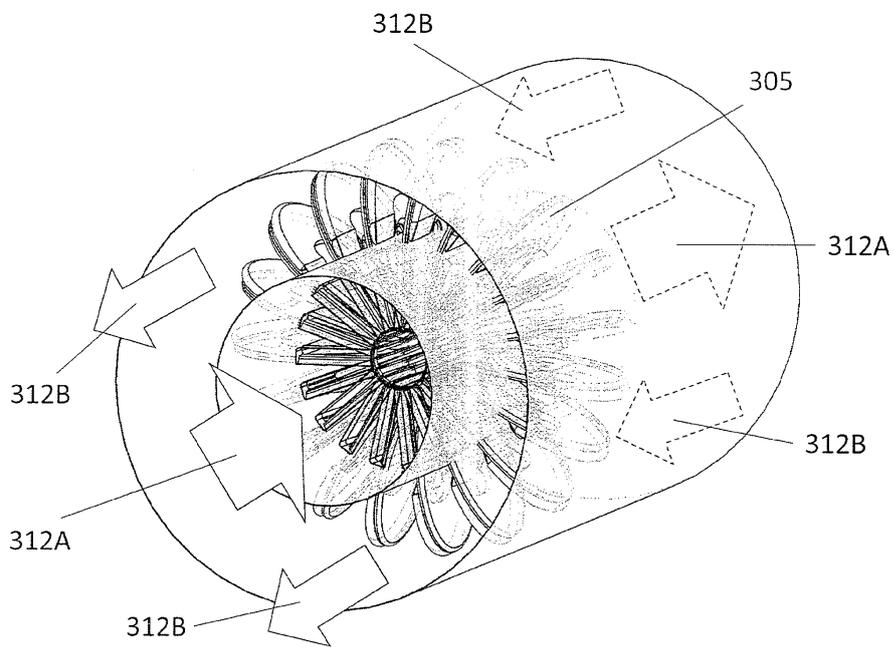
도면10



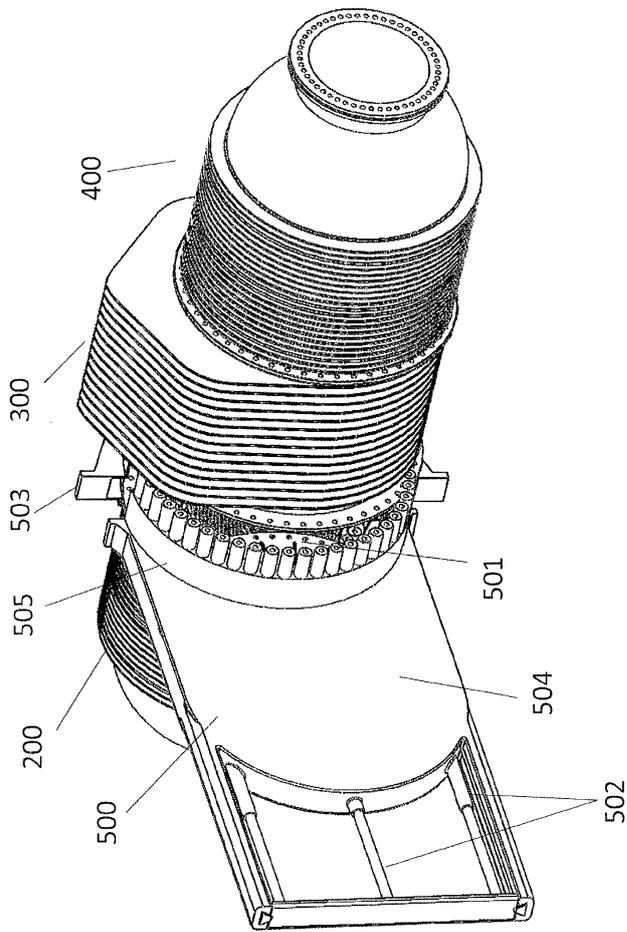
도면11



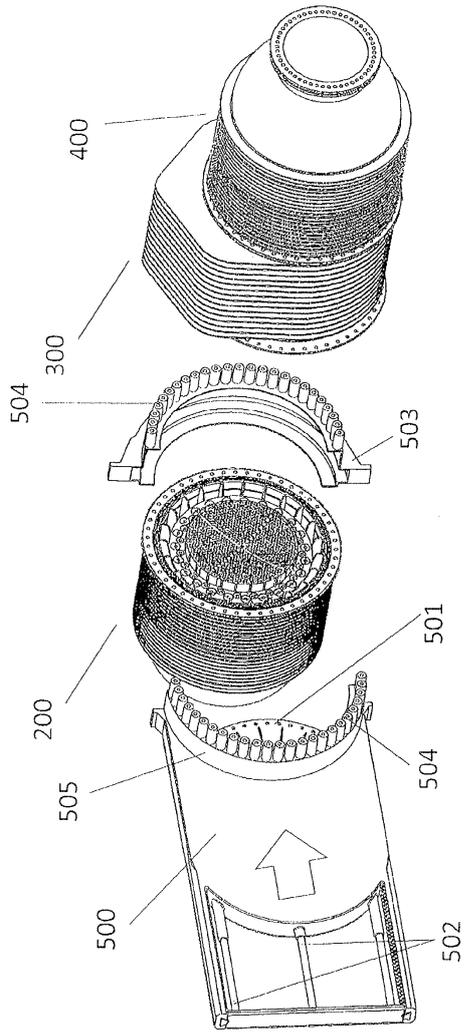
도면12



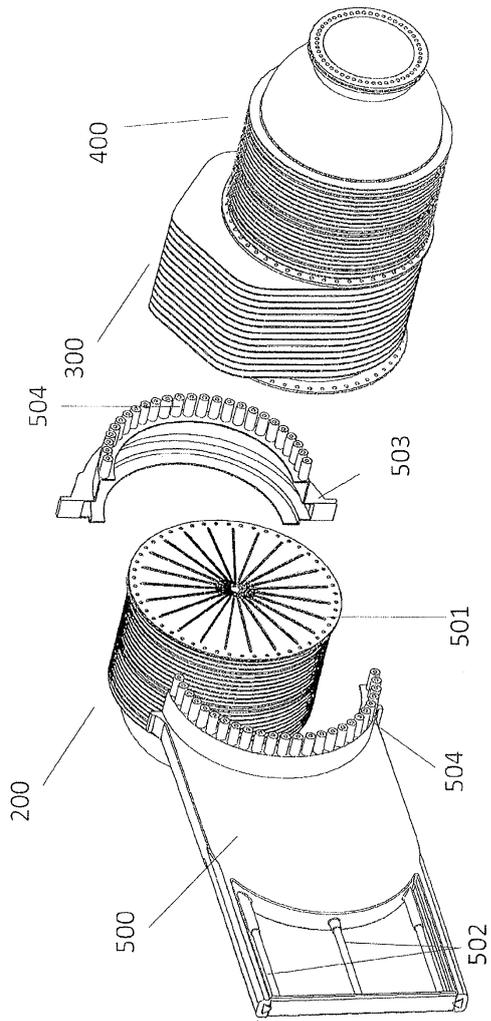
도면13



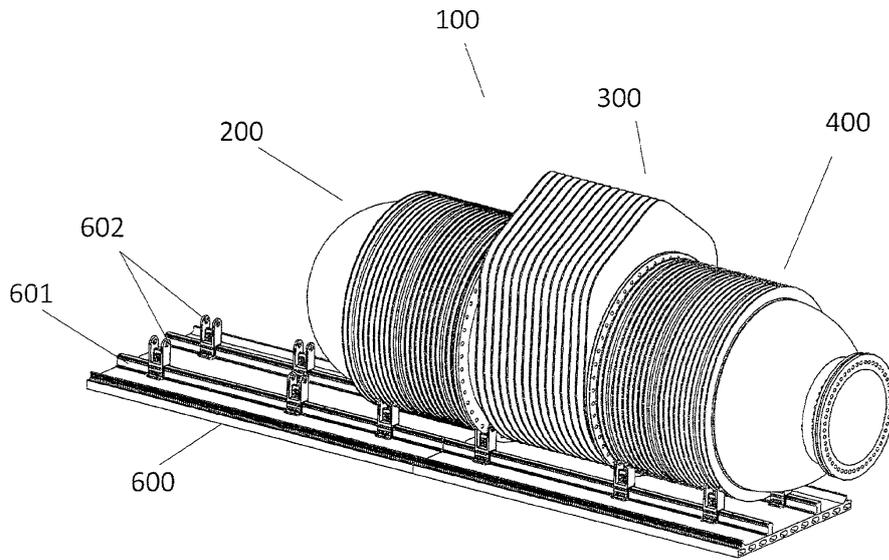
도면14



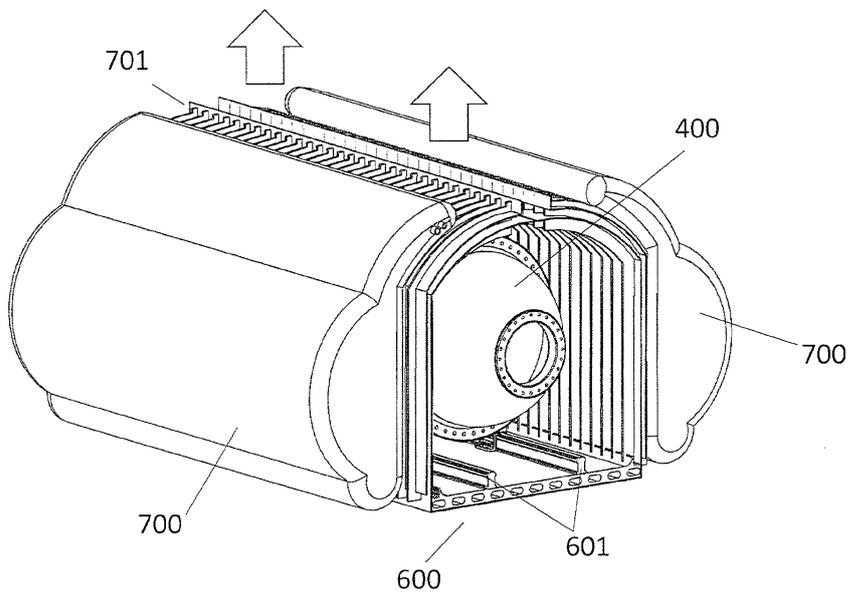
도면15



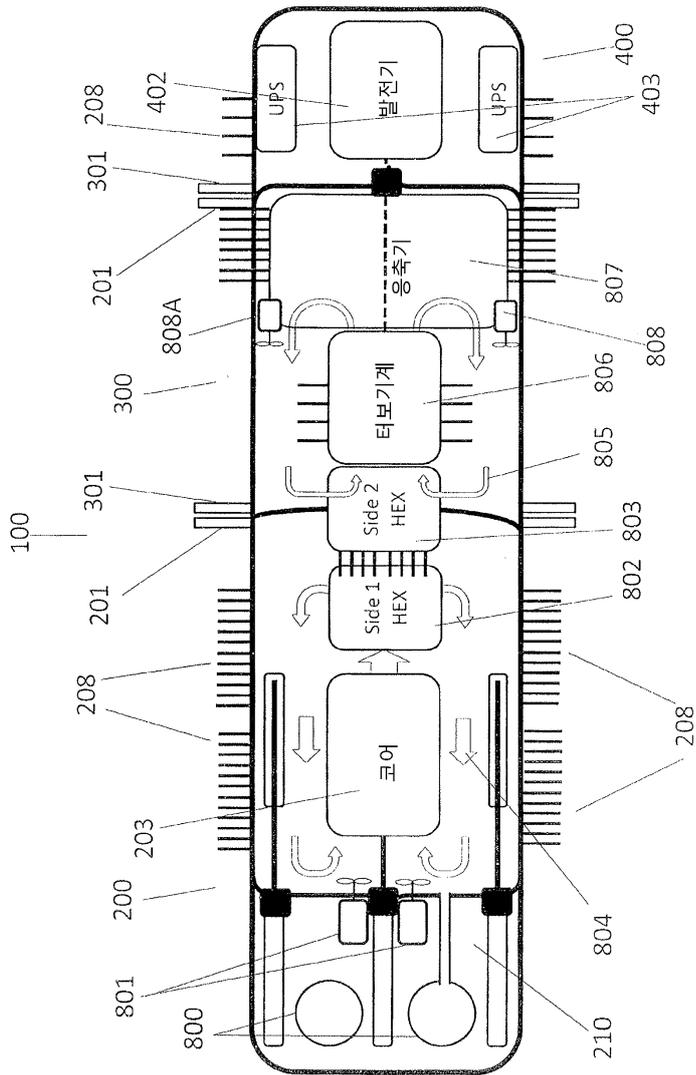
도면16



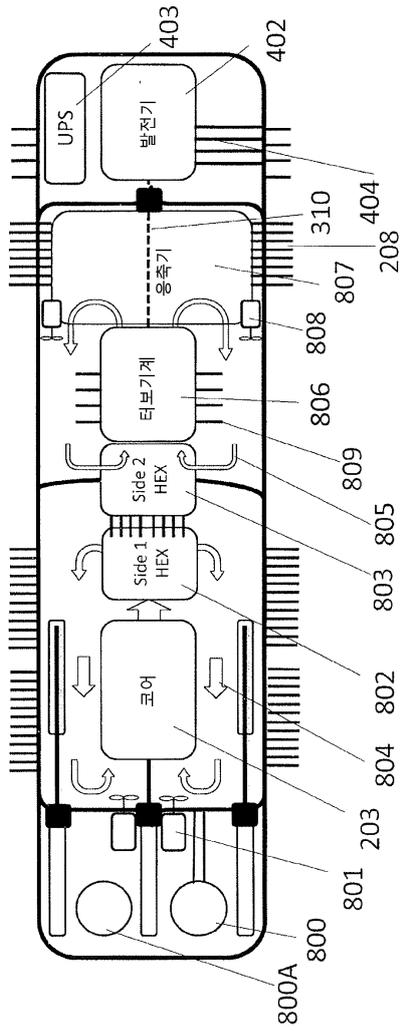
도면17



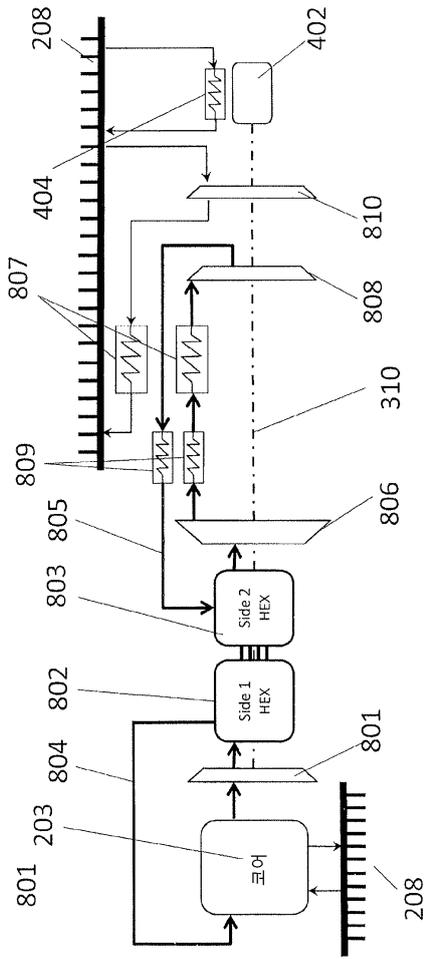
도면18



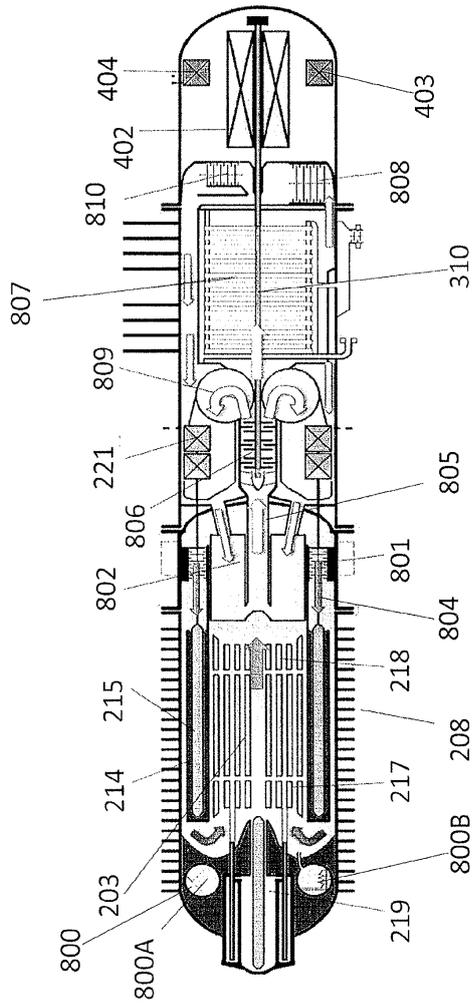
도면19



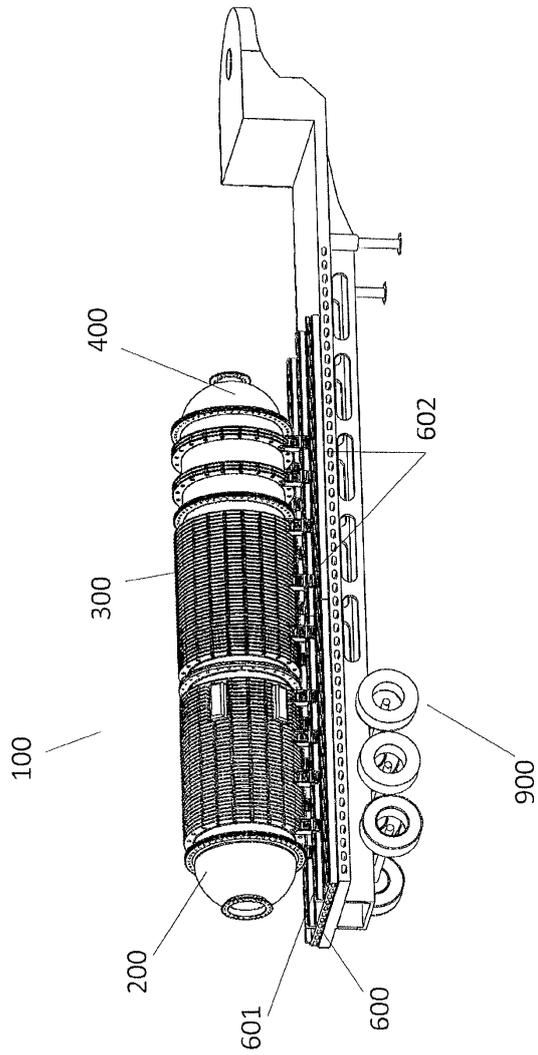
도면20



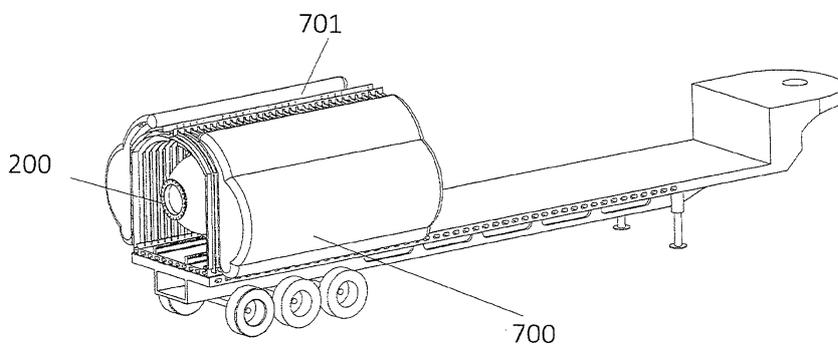
도면21



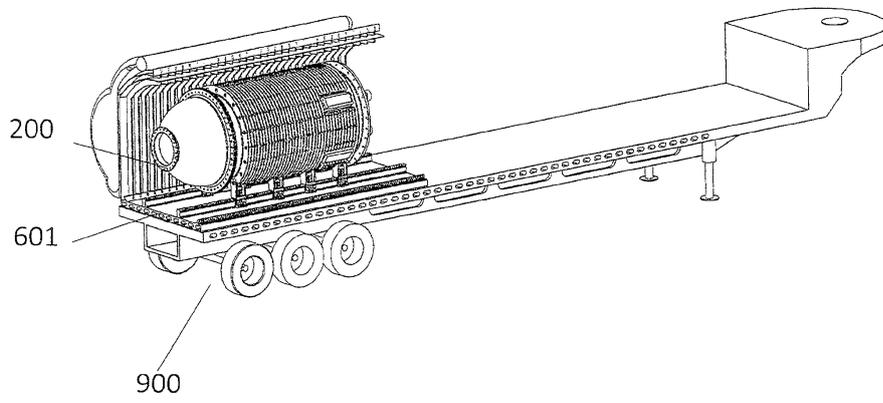
도면22



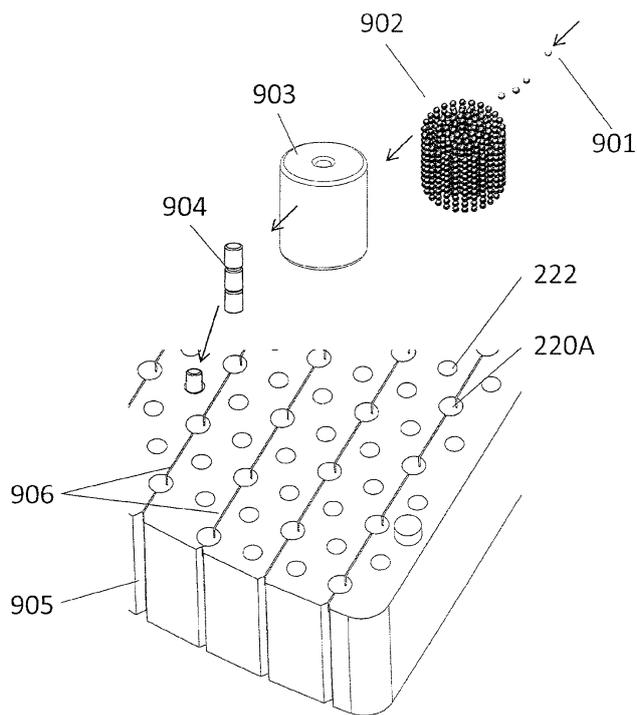
도면23



도면23a



도면24



도면24a

