



등록특허 10-2823906



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2025년06월24일

(11) 등록번호 10-2823906

(24) 등록일자 2025년06월18일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G21B 3/00 (2006.01) *H05H 1/12* (2006.01)
H05H 1/16 (2006.01) *H05H 6/00* (2006.01)
- (52) CPC특허분류
G21B 3/006 (2013.01)
H05H 1/12 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2023-7044809(분할)
(22) 출원일자(국제) 2018년05월04일
심사청구일자 2024년01월25일
- (85) 번역문제출일자 2023년12월26일
(65) 공개번호 10-2024-0005998
(43) 공개일자 2024년01월12일
(62) 원출원 특허 10-2019-7036299
원출원일자(국제) 2018년05월04일
심사청구일자 2021년05월03일
- (86) 국제출원번호 PCT/US2018/031244
(87) 국제공개번호 WO 2018/208623
국제공개일자 2018년11월15일
- (30) 우선권주장
15/589,902 2017년05월08일 미국(US)
(뒷면에 계속)
- (56) 선행기술조사문헌
JP2013069926 A
WO2013026007 A2

- (73) 특허권자
알파 링 인터네셔널, 엘티디.
케이만군도, 케이와이1-1104, 그랜드 케이만, 어글랜드 하우스, 피오 박스 309
- (72) 발명자
윙, 알프레드 와이.
미국, 캘리포니아 90024, 로스 앤젤레스, 1017 웨스트홈 아베뉴
- (74) 대리인
윤앤리특허법인(유한)

전체 청구항 수 : 총 27 항

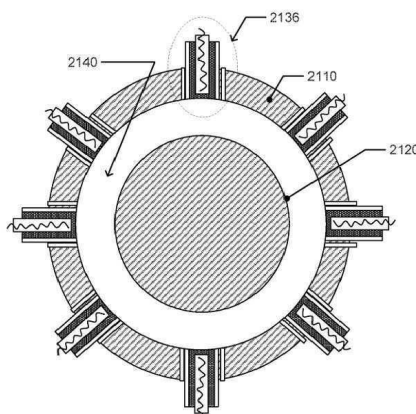
심사관 : 이용호

(54) 발명의 명칭 상호 작용하는 반응물에 대한 쿨롱 장벽 감소

(57) 요약

핵융합 반응을 생성하고 제어하는 방법, 기구, 장치 및 시스템이다. 이온-중성종 결합으로 인해, 수소원자 또는 기타 중성종(중성물)은 가둠 영역에서 회전운동이 유도되며, 그중 이온은 전기장과 자기장에 의해 구동된다. 제어된 융합 반응에는 일련의 반응이 포함되며, 양성자-붕소-11 융합 반응과 같은 무중성자 반응이 포함된다.

대표도 - 도21a



(52) CPC특허분류

H05H 1/16 (2013.01)
H05H 6/00 (2013.01)
Y02E 30/10 (2020.08)

(30) 우선권주장

15/589,913	2017년05월08일	미국(US)
15/589,886	2017년05월08일	미국(US)
15/589,905	2017년05월08일	미국(US)
62/503,680	2017년05월09일	미국(US)

명세서

청구범위

청구항 1

원자로에서 복수의 전극 중 적어도 두 개 전극 사이에 전위를 인가하는 단계를 포함하는 상기 원자로의 운전 방법에 있어서,

상기 원자로는,

적어도 부분적으로 가둠 영역을 둘러싸는 가둠 벽;

상기 가둠 영역에 인접한 복수의 전극;

상기 복수의 전극에서 적어도 두 개의 전극 사이에 전위를 인가하도록 구성되는 전압 소스 및 전류 소스 중 적어도 하나를 포함하되, 그중 인가하는 전위는 상기 가둠 영역 내에서 전기장을 생성하는 제어시스템; 및

상기 가둠 영역 내에 배치되는 반응물;

을 포함하되,

그중 상기 가둠 영역의 전기장은, 단독으로 또는 자기장과 결합하여, 상기 가둠 영역 내에서 대전입자와 중성물의 회전운동을 유도하며 또한 상기 대전 입자와 상기 중성물의 회전운동을 유지시키고,

상기 원자로 운전 중, 상기 반응물에 가까운 상기 가둠 영역에는 전자가 풍부한 영역이 포함되며, 양전하 입자에 비해 상기 전자가 풍부한 영역의 과잉 전자는 적어도 $10^6/\text{cm}^3$ 이며,

상기 원자로 운전 중, 상기 중성물은 상기 반응물에 반복적으로 충돌하여 에너지를 방출하고 생성물을 생성하며, 상기 생성물의 핵질량은 상기 중성물과 상기 반응물의 핵 중 어느 하나의 핵질량과 다른 원자로 운전 방법.

청구항 2

청구항 1에 있어서,

상기 복수의 전극은 상기 가둠 영역 주변에서 방위각으로 분포되고, 그중 상기 제어시스템은 상기 복수의 전극에 시간에 따라 변화하는 전압을 인가함으로써 상기 가둠 영역에서 대전입자와 상기 중성물의 회전 운동을 유도하도록 구성되는 원자로 운전 방법.

청구항 3

청구항 1에 있어서,

상기 가둠 영역에서 상기 전기장은 상기 자기장과 결합하여 작용을 일으킴으로써 상기 가둠 영역에서 상기 대전 입자와 상기 중성물의 회전 운동을 유도 및 유지하는 것 중 적어도 하나를 수행하는 원자로 운전 방법.

청구항 4

청구항 1에 있어서,

상기 원자로 운전 중, 상기 전자가 풍부한 영역 내의 전자와 양이온의 비율은 $10^6:1$ 내지 $10^8:1$ 인 원자로 운전 방법.

청구항 5

청구항 1에 있어서,

상기 원자로 운전 중, 상기 전자가 풍부한 영역의 전기장 강도는 적어도 10^6V/m 인 원자로 운전 방법.

청구항 6

청구항 1에 있어서,

상기 원자로 운전 중, 상기 전자가 풍부한 영역의 상기 중성물의 평균 에너지는 0.1eV 내지 2eV인 원자로 운전 방법.

청구항 7

청구항 1에 있어서,

상기 원자로 운전 중, 상기 전자가 풍부한 영역의 전자의 밀도는 10^{10} cm^{-3} 내지 10^{23} cm^{-3} 인 원자로 운전 방법.

청구항 8

청구항 1에 있어서,

상기 원자로 운전 중, 상기 전자가 풍부한 영역은 상기 반응물에서 상기 가둠 영역의 50나노미터 내지 50마이크로미터의 거리까지 확장되는 원자로 운전 방법.

청구항 9

청구항 1에 있어서,

상기 원자로 운전 중, 상기 반응물에 가까운 상기 가둠 영역의 상기 중성물의 농도는 적어도 $10^{16}/\text{cm}^3$ 인 원자로 운전 방법.

청구항 10

청구항 1에 있어서,

상기 원자로 운전 중, 상기 반응물에 가까운 상기 가둠 영역의 상기 중성물의 농도는 10^{16} cm^{-3} 내지 10^{18} cm^{-3} 인 원자로 운전 방법.

청구항 11

청구항 1에 있어서,

상기 원자로, 상기 가둠 영역 또는 상기 가둠 영역에 인접하게 배치되어 운전 중 상기 가둠 영역에서 전자를 생성하는 전자 방출체를 포함하는 원자로 운전 방법.

청구항 12

청구항 11에 있어서,

상기 가둠 영역 중 전자의 생성을 제어하는 단계를 포함하는 원자로 운전 방법.

청구항 13

청구항 12에 있어서,

상기 가둠 영역 중 전자의 생성을 제어하는 방법은 전류를 상기 전자 방출체와 열 연결된 필라멘트에 인가하는 단계를 포함하는 원자로 운전 방법.

청구항 14

청구항 13에 있어서,

상기 전자 방출체의 온도를 모니터링하는 단계를 더 포함하되, 그중 상기 필라멘트에 인가하는 전류는 모니터링한 전자 방출체의 온도에 기초하는 원자로 운전 방법.

청구항 15

청구항 12에 있어서,

상기 가둠 영역 중 전자의 생성을 제어하는 방법은 상기 전자 방출체를 상기 가둠 영역에 이입 또는 이출하는 단계를 포함하는 원자로 운전 방법.

청구항 16

청구항 15에 있어서,

상기 전자 방출체의 온도를 모니터링하는 단계를 더 포함하되, 그중 상기 전자 방출체를 상기 가둠 영역에 이입 또는 이출하는 것은 모니터링한 전자 방출체의 온도에 기초하는 원자로 운전 방법.

청구항 17

청구항 12에 있어서, 상기 가둠 영역 중 전자의 생성을 제어하는 방법은, 광빔을 발사하여 상기 가둠 영역을 통과하고 상기 전자 방출체 또는 상기 가둠 벽에 발사되도록 구성되는 레이저의 광 발사를 제어하는 단계를 포함하는 원자로 운전 방법.

청구항 18

청구항 17에 있어서,

상기 전자 방출체의 온도를 모니터링하는 단계를 더 포함하되, 그중 모니터링한 전자 방출체의 온도에 기초하여 상기 레이저의 광 발사를 제어하는 원자로 운전 방법.

청구항 19

청구항 11에 있어서,

상기 전자 방출체는 상기 가둠 벽에 부착되거나 삽입되는 원자로 운전 방법.

청구항 20

청구항 11에 있어서,

상기 전자 방출체는 붕소 또는 붕소를 함유하는 재료를 포함하는 원자로 운전 방법.

청구항 21

청구항 1에 있어서,

상기 반응물은 붕소-11을 포함하는 원자로 운전 방법.

청구항 22

청구항 1에 있어서,

상기 생성물의 핵질량은 상기 중성물과 상기 반응물의 핵 중 어느 하나의 핵질량보다 큰 원자로 운전 방법.

청구항 23

청구항 1에 있어서,

상호작용은 융합 반응인 원자로 운전 방법.

청구항 24

청구항 23에 있어서,

상기 융합 반응은 중성자가 휴대한 에너지가 방출된 총 에너지의 1%를 초과하지 않는 융합 반응인 원자로 운전 방법.

청구항 25

청구항 23에 있어서,

상기 융합 반응은 입방센티미터 당 초당 10^{17} 내지 10^{22} 개 융합 반응의 속도로 상기 전자가 풍부한 영역에서 발생하는 원자로 운전 방법.

청구항 26

청구항 1에 있어서,

상기 중성물은 중성수소, 중수소 및 삼중수소 중 적어도 하나를 포함하는 원자로 운전 방법.

청구항 27

청구항 1 내지 청구항 26 중 어느 한 항에 있어서,

대전 반응 생성물의 열 에너지, 운동 에너지 및 상기 원자로의 기계 에너지 중 적어도 하나를 전기 에너지 및 기계 에너지 중 적어도 하나로 전환시켜 상기 원자로 외부 작업을 수행하는 단계를 더 포함하는 원자로 운전 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 출원은 2017년 5월 9일 제출한 미국 임시 출원번호 62/503680의 권리를 청구한다. 본 출원은 또한 2017년 5월 8일 제출한 제목이 REACTOR USING ELECTRICAL AND MAGNETIC FIELDS(전기장과 자기장을 이용한 원자로)인 미국 특허출원번호 15/589902의 부분적인 계속출원이고, 번호가 15/589902인 미국 특허출원은 2014년 6월 27일 제출한 제목이 METHODS, DEVICES AND SYSTEMS FOR FUSION REACTIONS(융합 반응을 위한 방법, 장치 및 시스템)인 미국 특허출원번호 14/318246의 부분적인 계속출원이며, 번호가 14/318246인 미국 특허출원은, (i) 2013년 6월 27일 제출한 미국 임시 출원번호 61/840428; (ii) 2014년 1월 8일 제출한 미국 임시 출원번호 61/925114; (iii) 2014년 1월 8일 제출한 미국 임시 출원번호 61/925131; (iv) 2014년 1월 8일 제출한 미국 임시 출원번호 61/925122; (v) 2014년 1월 8일 제출한 미국 임시 출원번호 61/925148; (vi) 2014년 1월 8일 제출한 미국 임시 출원번호 61/925142; (vii) 2013년 7월 1일 제출한 미국 임시 출원번호 61/841834; (viii) 2013년 7월 4일 제출한 미국 임시 출원번호 61/843015의 권리를 청구한다. 미국 특허출원번호 14/318246은 또한 2014년 3월 11일 제출한 미국 임시 출원번호 14/205339(현재 2016년 1월 26일 등록 받은 미국 특허번호 9245654)의 부분적인 계속출원이며, 번호가 14/205339인 미국 특허는 2013년 3월 11일 제출한 미국 임시출원번호 61/776592의 권리를 청구한다. 본 출원은 또한 2017년 5월 8일 제출한 제목이 REACTOR USING ELECTRICAL AND MAGNETIC FIELDS(전기장과 자기장을 이용한 원자로)인 미국 특허출원번호 15/589902의 부분적인 계속출원이고, 2017년 5월 8일 제출한 제목이 REACTOR USING ELECTRICAL AND MAGNETIC FIELDS(전기장과 자기장을 이용한 원자로)인 미국 특허출원번호 15/589913의 부분적인 계속출원이며, 2017년 5월 8일 제출한 제목이 REACTOR USING ELECTRICAL AND MAGNETIC FIELDS(전기장과 자기장을 이용한 원자로)인 미국 특허출원번호 15/589886의 계속출원이고, 2017년 5월 8일 제출한 제목이 REACTOR USING AZIMUTHALLY VARYING ELECTRICAL FIELDS(방위각 가변 전기장을 이용한 원자로)인 미국 특허출원번호 15/589905의 계속출원이며, 이러한 각각의 우선권 출원의 전체 개시는 모든 목적을 위한 인용으로 되어 본 문서에 통합된다.

[0002] 본 개시는 핵간 반응 및 이런 핵간 반응을 개시하고 유지하는 원자로에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 20세기 50년대 이래, 과학기술계에서는 줄곧 제어가능하고 경제적으로 실행가능한 융합을 실현하기 위해 노력해 왔다. 융합은 아주 흡인력이 있는 에너지이지만, 많은 원인으로 인해, 수십억 달러와 수십년간의 연구를 거쳐 지속 가능한 융합이 청정에너지에 사용된다는 대부분 생각은 이미 헛된 꿈이 되었다. 경제적이고, 안전하며, 신뢰성이 있고, 환경에 해롭지 않은 방식을 찾아 융합 반응을 유지하는 것은 도전이었다. 이 도전은 이미 극히 어려운 것으로 증명되었다. 당해 분야에서 통상적인 신념은, 융합이 발전에 사용되는 가능한 선택이 되기 전에 25-50년의 연구가 더 필요하고, 마치 옛 농담처럼 "융합은 미래의 에너지이며 항상 그럴 것이다"("Next ITERation?," The Economist, 2011년 9월 3일).

[0004] 대규모 융합 연구에서 기존의 노력은 주로 융합 점화 조건을 만드는 두 가지 방법, 즉 관성 가둠 융합(ICF)과

자기 가둠 융합에 초점을 맞추고 있다. ICF는 핀헤드 크기의 작은 공 형태의 중수소와 삼중수소의 혼합물과 같은 융합 반응물을 압축하고 가열하여 융합 반응을 일으키려고 시도한다. 고에너지의 레이저 빔, 전자 빔 또는 이온 빔을 연료 타겟에 전달하여 연료에 에너지를 제공함으로써, 목표 연료가 가열된 외부층 폭발을 일으켜 충격파를 생성하고, 이 충격파는 연료 입자를 통해 내부로 전파되며, 융합 반응물을 압축하고 가열하여 융합 반응을 일으킨다.

[0005] 본 특허출원 제출시, 가장 성공적인 ICF 프로그램은 National Ignition Facility(국립 점화 시설, NIF)로, 35억 달러 가까이 들어 건립하고 2009년에 완료되었다. NIF는 연료 입자가 방출하는 에너지가 그에 가해지는 에너지를 초과하는 이정표에는 도달했지만, 2015년에 이르기까지 NIF 실험은 점화에 필요한 에너지의 1/3 정도밖에 되지 않는다. 지속 가능한 반응과 관련해 보도된 최장 ICF 융합 반응 시간은 약 150피코초이다. ICF의 노력이 점화 조건을 달성한다 하더라도, 그것을 실행 가능한 에너지로 만드는 데는 여전히 많은 장애물이 있다. 예를 들어, 연료 타겟과 드라이버 빔을 방해하지 않고 반응 챔버에서 열을 제거하는 해결책이 필요하며, 융합 반응물의 방사성 부산물(중수소 및 삼중수소 반응으로 인한 중성자)로 인한 융합 장치의 짧은 수명을 완화하기 위한 해결책이 필요하다.

[0006] 두 번째 주요한 연구방향인 자기 가둠 융합은, 자기장을 이용해 플라스마 형태의 뜨거운 융합 연료를 가둠으로써 융합을 유도하려고 시도한다. 이 방법은 이온이 가까이 접촉하는 시간을 연장하여 이들의 융합 가능성을 높이려 한다. 자기 융합 장치는 대전입자에 자력을 가하여, 구심력과 균형을 이루면, 플라스마 내에서 입자가 원형 또는 나선형 경로로 이동하도록 한다. 자기 가둠은 고온 플라스마가 그 원자로의 벽에 접촉하는 것을 방지한다. 자기 가둠에서 융합은 전적으로 플라스마 안에서 일어난다.

[0007] 자기 가둠의 대부분 연구는 토카막(Tokamak)의 설계를 기초로 하며, 고온 플라스마는 환상 자기장에 가두어진다. 뉴저지주 프린스턴에 위치한 토카막형 핵융합 실험로(TFTR)는 50/50 중수소/삼중수소로 구성된 플라스마로 광범위한 과학적 실험을 수행한 세계 최초의 자기 핵융합 장치다. 1980년에 설립된 TFTR은 궁극적으로 융합 에너지를 달성할 것으로 기대되었지만 이를 실현하지 못하고 1997년에 폐쇄되었다. 현재까지, 토카막의 가장 긴 플라스마 지속시간은 프랑스의 토레 수프라 토카막(Tore Supra tokamak)에서 보유하는 6분 30초이다. 현재 자기 가둠 융합에 대한 노력은 2013년부터 건설에 들어간 토카막 원자로인 국제 핵실험 원자로(ITER)에 집중되어 있다. 2015년 6월 현재 건설비가 140억 달러를 넘었으며, 2019년이 되어야 시설 건설이 가능하고, 2027년부터 중수소 삼중수소 실험이 시작될 것으로 보인다. 현재 당해 프로젝트의 비용 추정치는 500억 달러를 넘으며, 비용은 계속 상승할 것으로 보인다. 최근 상원 세출위원회 에너지 수자원 개발소 위원회는 미국이 ITER 프로젝트에서 탈퇴할 것을 권고하는 내용을 발표했다. 시장 현실과 핵융합 발전에 이용되는 토카막 설계의 고유한 한계로 인해, 많은 분석가들은 ITER와 같은 핵융합 원자로가 상업적으로 실현될 수 있을지 의심하고 있다.

[0008] 메릴랜드 대학의 메릴랜드 원심 실험(MCX)은 대체 형태의 자기 가둠을 연구하고 있다. 이는 원심 가둠과 속도 전단 안정화의 개념을 테스트한다. 이 실험에서, 커패시터는 자기장이 있는 상태에서 수소 가스를 통해 원기둥형 음극에서 주변 진공 챔버로 방출된다. 직교 전기장과 자기장($J \times B$ 로 표시)은 고온 이온화 플라스마($>10^5$ K)를 작동시켜 방전전극을 에워싸고 회전하는 힘을 생성한다. 플라스마 경계의 온도 변화가 뚜렷하기에 플라스마 흐름에 큰 영향을 미치는 저온 중성종이 필연적으로 존재한다. "중성립자는 융합에 필요한 플라스마의 회전을 방해한다" 라고 생각되기에, 연구는 중성종의 영향에 집중된다. "중성종(neutral species)" 또는 간단히 "중성물(neutrals)"이라 함은, 중성 전하를 띤 원자 또는 분자로, 즉 이들은 같은 수량의 전자와 양성자, 원자의 경우 같은 원자번호를 갖는다. 이온 또는 이온화 원자 또는 전하를 띤 다른 입자는 양성자보다 적어도 하나의 전자를 더 갖거나, 전자보다 적어도 하나의 양성자를 더 갖는다.

[0009] 고이온화 플라스마를 사용하지 않는 회전 플라스마 장치는 융합 연구에 사용되는 것이 고려되었지만, 중성물은 융합 조건에 도달하는데 있어서 줄곧 문제로 간주되어 왔다. 중성 저항력과 불안정성을 포함한 제한적 효과로 인해, 당해 분야의 한 연구자는 "전혀 불가능하지는 않지만 플라스마 회전만으로 자체 유지하는 융합 원자로를 만드는 것은 여전히 불가능하다" 라고 주장했다 (리뷰 페이퍼: 회전 플라스마(ROTATING PLASMAS), Lehnart, Nuclear Fusion 11(1971)).

[0010] 모든 신뢰할 수 있는 기존 접근방식은 모두 가둠 및 엔지니어링 문제에 직면한다. 융합 원자로의 총 에너지 균형 Q 는 다음과 같이 정의된다.

[0011]
$$Q = E_{\text{fusion}}/E_{\text{in}},$$

[0012] 여기서, E_{fusion} 은 융합반응을 통해 방출하는 총 에너지이고, E_{in} 은 반응을 생성하기 위한 에너지이다. 목표는 가

능한 에너지 소스를 만드는 과정이 끝날 때 Q가 하나 또는 "하나의 통일체"를 초과하는 것이다. 유럽공동토러스(JET) 관계자들은 $Q \approx 0.7$ 을 달성했다고 주장하고 있으며, 미국 국립 점화 시설은 최근 $Q > 1$ (레이저의 아주 실질적인 에너지 손실을 무시했음)을 달성했다고 주장하고 있다. $Q=1$ 인 조건을 임계조건(breakeven) 이라고 하는데, 투입한 에너지와 방출한 에너지가 같다는 것을 의미한다. 실제로, 전기를 생산하는데 사용되는 원자로는 1보다 훨씬 큰 Q 값을 상용화해야 한다. 왜냐하면 융합 에너지의 일부만이 유용한 형태로 변환될 수 있기 때문이다. 전통적인 생각은 상당한 양의 중성물이 존재하지 않는 강한 이온화 플라즈마만이 $Q > 1$ 을 달성할 가능성을 가지고 있다고 주장한다. 이러한 조건은 융합 원자로에서 달성할 수 있는 입자 밀도와 에너지 가둠 시간을 제한한다. 따라서, 당해 분야에서는 로슨 조건(Lawson criterion)을 제어된 융합 반응의 기준으로 삼아 왔으며, 모든 에너지 입력을 계산할 때 이 기준을 달성하는 사람은 아직 없다고 여긴다. 당해 분야에서 로슨 조건 또는 실질적으로 유사한 범례에 대한 추구는 이미 방대하고, 복잡하며, 관리하기 어렵고, 비용이 많이 들며, 경제적으로 실행 불가능한 융합 장치 및 시스템으로 이어졌다. 삼중중수로 알려진 로슨 조건의 일반적인 공식은 다음과 같다.

$$nT\tau_E > \frac{12k_B}{E_{ch}} \frac{T^2}{\langle \sigma v \rangle}$$

[0013]

[0014]

여기서 로슨 조건은 자세히 논의되지 않을 것이지만, 본질적으로 당해 조건은, 점화 조건에 도달하기 위해 입자 밀도(n), 온도(T) 및 가둠 시간(τ_E)의 승적은 대전된 융합 생성물의 에너지(E_{ch}), 볼츠만상수(k_B), 융합 횡단면(σ), 상대적 속도(v) 및 온도에 의해 결정되는 숫자보다 커야 한다고 규정하고 있다. 중수소-삼중중수소 반응의 경우, 삼중 생성물의 최소치는 $T=14$ keV에서 발생하고, 삼중 생성물의 최소치는 약 3×10^{21} keV s/m³ (J. Wesson, "Tokamaks", Oxford Engineering Science Series No 48(옥스포드 공학시리즈 제48기), Clarendon Press, Oxford, 제2판, 1997)이다. 실제로, 당해 산업표준의 범례는, 중수소-삼중중수소 융합 반응을 이용하여 양성 에너지 균형을 실현하려면 1.5억 섭씨도를 초과하는 온도를 필요로 함을 시사한다. 양성자-붕소 11 융합의 경우, 로슨 조건은 필요한 온도가 실제로 더욱 높을 것을 권장한다. 더 구체적으로 $n\tau \sim 10^{16}$ s/cm³는 중수소-삼중중수소 융합에 필요한 것보다 약 100배[George H. Miley와 S. Krupaker Murali 작 Inertial Electrostatic Confinement (IEC) Fusion: Fundamentals and Applications(관성 정전기 가둠(IEC) 융합: 기초와 응용)] 더 크다.

[0015]

로슨 조건의 한 측면은, 열 에너지가 반드시 연속으로 플라즈마에 첨가되어 손실된 에너지를 대체함으로써, 플라즈마 온도를 유지하고 그의 완전하거나 높은 이온화를 유지하는 전제를 근거로 한다. 특히, 전통적인 융합 시스템에서의 주요한 에너지 손실 원천은 이동 전자가 열 플라즈마에서의 이온과 상호작용할 때 전자의 제동복사와 사이클로트론의 회전 운동으로 인한 복사이다. 융합 방법에 이용되는 로슨 조건을 제정하는데 있어서, 전자 복사 손실은 중요한 고려이다. 이는 고도로 이동하는 전자의 심하게 이온화된 고온 플라즈마를 사용하기 때문이다.

[0016]

일반적인 생각은 높은 온도와 중성자가 크게 존재하지 않는 강한 이온화 플라즈마가 필요하다고 생각하기 때문에, 또한 반응의 값싼 물리적 가둠은 불가능한 것이라고 여긴다. 따라서, 가장 많이 추구되는 방법은, 자기 가둠 시스템(예를 들어, ITER 토카막)과 관성 가둠 시스템(예를 들어, NIF 레이저)에 이용되는 것과 같이 반응을 수용하기 위한 복잡하고 비싼 방안이다.

[0017]

사실 적어도 한 자료에 따르면 물리적 구조를 이용하여 융합 반응을 수용하는 것은 불가능하다고 인정하고 있다. "플라즈마 가둠을 제공하는 가장 간단하고 가장 뚜렷한 방법은 재료벽과 직접 접촉하는 것이지만, 벽은 플라즈마를 냉각시키고 대다수 벽재료는 용해되는 이 두 가지 근본적인 이유로 불가능하다. 우리는 여기서 융합 플라즈마는 약 10^8 K의 온도를 필요로 하는데, 금속은 보통 5,000K 미만의 온도에서 용해된다는 것을 기억해낼 수 있다"("Principles of Fusion Energy (융합 에너지 원리)", A.A.Harms 외). 극히 높은 온도를 필요로 한다는 것은, 전하를 띤 고에너지 이온만이 융합될 수 있고 쿨롱 반발력은 융합 사건을 제한한다는 믿음에 근거한 것이다. 현재 당해 분야의 사상은 이 기본 가설에 의존하며, 절대 다수의 연구와 프로젝트에서 모두 사용되고 있다.

[0018]

극소수 경우, 연구자들은 상호작용하는 양성 핵을 물리치는 쿨롱 장벽 또는 반발력을 낮추어 융합을 시작하고 유지하는데 필요한 에너지를 감소하는 방법을 고려했다. 이런 방법들은 대부분 상술한 방법으로는 실행할 수 없는 것으로 무시되어 왔다.

[0019]

20세기 50년대, Luis Alvarez는 캘리포니아대학 버클리분교에서 수소 거품 상자를 이용하여 묶은 촉매 융합 개

념을 연구하였다. Alvarez의 연구("Catalysis of Nuclear Reactions by μ Mesons (μ 중간자 촉매에 의한 핵 반응)" Physical Review. 105, Alvarez, L.W.외(1957))는 핵융합이 열핵융합에 필요한 온도보다 훨씬 낮은 온도에서 발생한다는 것을 증명했다. 이는 이론상에서 실온 또는 실온보다 낮은 온도에서도 융합이 발생할 수 있다고 제기하였다. 이 과정에서, 음전하를 띤 뮤온은 수소분자 중의 한 개 전자를 대체한다. 뮤온의 질량이 전자의 질량보다 207배 크기에, 수소 원자핵은 정상적인 분자보다 207배 가까이 당겨진다. 원자핵이 한데 접근하면, 실온에서 대량의 융합이 일어날 때까지 핵융합의 가능성이 크게 증가한다.

[0020] 뮤온의 촉매 작용에 의한 융합이 일부 주목을 받았지만, 뮤온 촉매 작용에 의한 융합을 제조하는 노력은 아직 성공하지 못했다. 현재 대량의 뮤온을 생성하는 기술은 대량의 에너지를 필요로 하며, 이는 촉매 작용에 의한 핵융합 반응을 생성하는데 필요한 에너지를 초과하기에 임계조건 또는 $Q>1$ 을 방해한다. 또한, 각각의 뮤온은 중 수소핵(중수소의 원자핵)과 삼중수소핵(삼중수소의 원자핵)의 핵융합에 의해 생성된 알파 입자에 "부착"하는 확률이 약 1%이며, 촉매 주기에서 "간헐" 뮤온을 제거한다. 이는 매 하나의 뮤온이 기껏해야 몇 백개 중수소-삼중 수소 융합 반응만 촉매할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서, 뮤온의 제조원가가 너무 높고 알파 입자에 부착되기 쉬운 이 두 가지 요소는, 뮤온 촉매 작용 융합을 실험실 호기심에 국한시킨다. 뮤온 촉매 작용에 의한 유용한 융합 반응을 발생하기 위해, 원자로로는 더욱 저렴하고 효과적인 뮤온 소스와 각각의 뮤온이 더욱 많은 융합 반응을 촉매하는 방식 중 적어도 하나를 필요로 한다. 현재까지 실행가능한 방법이나 이론조차 발견되지 않았다.

[0021] 1989년 3월, Martin Fleischmann과 Stanley Pons는 the Journal of Electroanalytical Chemistry(전기분석 화학 잡지)에 현재 "저온 융합"으로 불리우는 방법을 통해 쿨롱 장벽을 감소하는 방법을 발견하였다는 논문을 제출했다. Fleischmann과 Pons는 그들이 핵반응 부산물과 작은 탁상 실험에서 생성되는 수많은 열량을 관찰하였다고 주장했으며, 당해 실험은 팔라듐 전극 표면 상 중수의 전기 분해에 관한 것이다. 저온 융합의 한 가지 해석은, 수소와 그 동위 원소는 팔라듐과 같은 일부 고체에서 고밀도로 흡수될 수 있다고 여긴다. 수소의 흡수는 높은 부분압력을 생성하여 수소 동위 원소의 평균 분리를 감소시킴으로써 전위 장벽을 낮춘다. 다른 한 가지 해석은, 팔라듐 격자 중 양성 수소핵의 전자 차폐가 장벽을 낮추기에 충분하다는 것이다.

[0022] Fleischmann-Pons의 발견은 처음에 매체의 큰 주목을 받았지만, 조지아 공대의 한 그룹이 그들의 중성자 검출기의 문제를 빠르게 발견했고, 텍사스 A&M 대학교에서 온도계 배선 불량을 발견했기 때문에 과학계의 접수는 아주 중요하다. 이런 실험 실수, 그리고 유명한 실험실에서 Fleischmann-Pons 실험을 복제하는 실패한 시도는, 과학계로 하여금 어떠한 적극적인 실험 결과도 "융합"에 기인해서는 안된다는 결론을 내리게 하였다. 언론의 주목으로 인해 미국 에너지부(DOE)는 저온 융합 이론과 연구를 심사하는 특별팀을 구성했다. 미국 에너지부는 최초로 1989년 11월, 그리고 2004년에 "저온 융합" 현상이 유용한 에너지를 생성한다는 믿을만한 증거가 없다는 결론을 내렸다.

[0023] 쿨롱 장벽을 감소하는 다른 하나의 시도는 고체 매트릭스에서 전자 차폐를 이용하는 것이다. 전자 차폐는 먼저 항성 플라즈마에서 관찰되었는데 여기서 차폐인자가 몇퍼센트만 변화하면 융합 속도는 5개 수량급(Wilets, L.외, "Effect of screening on thermonuclear fusion in stellar and laboratory plasmas(차폐가 항성과 실험실 플라즈마 중의 열핵융합에 대한 영향)", 천체물리학잡지 530.1 (2000): 504)으로 변화하는 것이 확정된다. Wilets의 이론에 따르면, "플라즈마의 열핵융합 속도는 장벽 침투에 의해 결정된다. 장벽 자체는 융합 핵의 쿨롱 배척에 의해 지배된다. 장벽 전위가 Gamow 공식의 지수에 나타나기 때문에 계산 결과는 플라즈마에서 전자와 양이온의 차폐 효과에 매우 민감하다. 차폐는 장벽을 낮추기에 융합률을 향상시키고, 원자핵 전하가 클수록 차폐는 더욱 중요하다."

[0024] Robert Indech의 미국 특허 공개번호 US2005/0129160A1에서는 당해 전자 차폐 효과를 이용하여 점화 조건을 생성하려고 시도한 예를 제출한다. 당해 출원에서, Indech는 인가되는 전위로 인해 전자가 원추 구조의 맨 위에 집중될 때 미시적 원추 구조의 첨단 부근에 있는 두 중수소 사이의 양전하로 하전된 반발력의 전자 차폐를 설명했다. 개시된 바와 같이, 이 원추들은 3cm X 3cm의 표면에 배열되어 있다.

[0025] 반면 Indech 와 다른 사람들은 잠재적인 전자 차폐가 융합 원자로에 대한 쿨롱 장벽을 낮출 수 있는 것을 깨달았으나 어떤 노력도 성공적이었는지는 의문스럽다. 대부분의 이러한 노력은 지속적이고 제어된 융합 반응 방법이 아닌 점화 방법을 제안하는 것으로 보인다. ICF, 자기 가둠 융합과 쿨롱 장벽을 감소하는 다양한 방법에도 불구하고, 상업적으로 가능한 융합 원자로 설계는 아직 없다.

발명의 내용

과제의 해결 수단

- [0026] 본 개시는 원자로 설계와 운전의 다양한 측면에 관한 것이다. 특히 주목해야 할 것은, 전자 차폐를 이용하여 두 개 핵의 융합 쿨롱 장벽을 감소하는 원자로의 설계와 운전이다. 전자 차폐는 융합 반응이 촉진되는 전자가 풍부한 영역에서 제공된다.
- [0027] 본 개시의 일 측면은 원자로에 관한 것으로, 상기 원자로는, (a)적어도 부분적으로 가둠 영역을 둘러싸고, 대전 입자와 중성물이 상기 가둠 영역 내에서 회전할 수 있는 가둠 벽; (b)가둠 영역에 인접하거나 접근하는 복수의 전극; (c)상기 복수의 전극에서 적어도 두 개의 전극 사이에 전위를 인가하도록 구성되는 전압 소스 및 전류 소스 중 적어도 하나를 포함하는 제어시스템에 있어서, 인가하는 전위는 가둠 영역 내에서 전기장을 생성하고, 상기 전기장은 단독으로 또는 자기장과 결합하여 대전입자와 중성물이 가둠 영역에서의 회전운동을 유도 및 유지하는 것 중 적어도 하나를 수행할 수 있는 제어시스템; 및 (d)가둠 영역 또는 가둠 영역에 인접하게 배치되는 반응물에 있어서, 운전 중, 중성물과 반응물 간 반복적인 충돌은 반응물과의 상호작용을 생성하며, 상기 상호작용은 에너지를 방출하고 생성물을 생성하며, 상기 생성물의 핵질량은 중성물과 반응물의 핵 중 어느 하나의 핵 질량과 다르고, 운전 중, 반응물에 가까운 가둠 영역에는 전자가 풍부한 영역이 포함되며, 양전하 입자에 비해 전자가 풍부한 영역의 과잉 전자는 적어도 약 $10^6/\text{cm}^3$ 인 반응물;을 구성 요소로 포함하는 것을 특징으로 한다.
- [0028] 일부 실시형태에서, 전극은 가둠 영역 주변에서 방위각으로 분포되고, 제어시스템은 복수의 전극에 시간에 따라 변화하는 전압을 인가함으로써 가둠 영역에서 대전입자와 중성물의 회전 운동을 유도하도록 구성된다. 일부 실시형태에서, 원자로의 가둠 영역 내의 전기장과 인가된 자기장 사이 상호작용에 의해 가둠 영역에서 대전입자와 중성물의 회전 운동을 유도하도록 구성된다.
- [0029] 원자로 운전 중, 전자가 풍부한 영역은 이하 하나 또는 복수의 특징을 구비할 수 있다. (i)전기장 강도는 적어도 약 10^6 V/m ; (ii)전자의 평균 온도는 약 10000 K 내지 50000 K 사이; (iii)전자의 밀도는 약 10^{10} cm^{-3} 내지 약 10^{23} cm^{-3} ; (iv)전자와 양이온의 비율은 약 $10^6:1$ 내지 $10^8:1$ 사이; (v)중성물의 평균 에너지는 약 0.1eV 내지 2eV 사이; (vi)중성물의 농도는 약 $10^{16}/\text{cm}^3$ (어떤 경우 약 $10^{16}/\text{cm}^3$ 내지 약 $10^{18}/\text{cm}^3$ 사이), 그리고 (vii) 가둠 영역의 약 50나노미터 내지 50마이크로미터의 거리까지 확장하는 것 중 적어도 하나이다.
- [0030] 일부 실시형태에서, 원자로는, 가둠 영역 또는 가둠 영역에 인접하게 배치되어 운전 중 가둠 영역에서 전자를 발생하는 전자 방출체를 포함한다. 전자 방출체는 가둠 벽에 부착되거나 삽입될 수 있다. 어떤 경우, 하나 또는 복수의 절연층은 가둠 벽과 방출체를 분리시켜 단일 및/혹은 전기 절연을 제공한다. 이런 절연층은 산화지르코늄, 산화알루미늄, 질화아연 및 산화마그네슘으로 제조된다. 어떤 경우, 전자 방출체는 가둠 영역 내에까지 돌출된 기하 형상을 구비하는데 이는 전자의 발생을 증가한다.
- [0031] 어떤 경우, 원자로의 전자 방출체와 열 연결된 필라멘트를 구비할 수 있으며, 제어시스템은 필라멘트를 통과하는 전류를 인가하여 방출체를 가열하도록 구성될 수 있다. 원자로의 전자 방출체의 온도를 모니터링하기 위한 온도센서를 포함할 수 있으며, 제어시스템은 모니터링하는 온도에 기초하여 필라멘트에 인가하는 전류를 조절하도록 구성될 수 있다.
- [0032] 어떤 경우, 원자로의 레이저를 구비하며, 레이저는 광빔을 발사하여 가둠 영역을 통과하고 전자 방출체 또는 가둠 벽에 발사되어, 광빔과 전자 방출체 또는 가둠 벽 간 상호작용에 기초하여 전자가 가둠 영역에 방출되도록 구성된다. 원자로의 전자 방출체의 온도를 모니터링하기 위한 온도 센서를 포함할 수 있으며, 제어시스템은 모니터링하는 온도에 기초하여 레이저의 발사를 제어하도록 구성될 수 있다.
- [0033] 일부 실시형태에서, 전자 방출체는 원자로 운전 중 가둠 영역에 이입 이출되도록 구성된다. 제어시스템은, 전자 방출체의 온도(예를 들어, 온도 센서를 이용하여 측정)와 전자의 발생을 제어하기 위한 것과 같이, 전자 방출체의 위치를 이동 가능하도록 구성될 수 있다.
- [0034] 전자 방출체는 붕소 또는 붕소를 함유하는 재료를 포함할 수 있다. 어떤 경우, 원자로의 붕소-11을 포함한다. 어떤 경우, 생성물의 핵질량은 중성물과 반응물의 핵 중 어느 하나의 핵질량보다 크다. 상호작용은 융합 반응일 수 있으며, 어떤 경우 무중성자 융합 반응이다. 어떤 경우, 중성물은 중성수소, 중수소 및 삼중수소 중 적어도 하나를 포함한다.
- [0035] 어떤 실시형태에서, 원자로의 에너지 전환 장치를 더 포함하며, 에너지 전환 장치는 대전 반응 생성물의 열 에너지, 운동 에너지 및 원자로의 기계 에너지 중 적어도 하나를 추출하고, 상기 열 에너지, 운동 에너지 및 기계

에너지 중 적어도 하나를 전기 에너지 및 기계 에너지 중 적어도 하나로 전환시켜 외부 작업을 수행하도록 구성된다.

[0036] 본 개시의 다른 일 측면은 원자료를 운전하는 방법에 관한 것으로, 상기 방법은 원자로의 복수 전극의 적어도 두 개 전극 사이에 전위를 가하는 단계를 포함하며, 상기 원자로는, (a)적어도 부분적으로 가둠 영역을 둘러싸고 있는(enclosing) 가둠 벽; (b)가둠 영역에 인접하거나 접근하는 복수의 전극; (c)상기 복수의 전극에서 적어도 두 개의 전극 사이에 가둠 영역 내에서 전기장을 생성하는 전위를 인가하도록 구성되는 전압 소스 및 전류 소스 중 적어도 하나를 포함하는 제어시스템; 및 (d)가둠 영역 또는 가둠 영역에 인접하게 배치되는 반응물;을 구성 요소로 포함하는 것을 특징으로 한다. 가둠 영역의 전기장은 단독으로 또는 자기장과 결합하여 대전입자와 중성물이 가둠 영역에서의 회전운동을 유도 및 유지하는 것 중 적어도 하나를 수행한다. 또한, 반응물에 가까운 가둠 영역에는 전자가 풍부한 영역이 포함되며, 양전하 입자에 비해 전자가 풍부한 영역의 파인 전자는 적어도 약 $10^6/\text{cm}^3$ 이다. 또한, 중성물과 반응물 간 반복적인 충돌은 반응물과의 상호작용을 생성하며, 상기 상호작용은 에너지를 방출하고 생성물을 생성하며, 상기 생성물의 핵질량은 중성물과 반응물의 핵 중 어느 하나의 핵질량과 다르다.

[0037] 일부 실시형태에서, 복수의 전극은 가둠 영역 주변에서 방위각으로 분포되고, 제어시스템은 복수의 전극에 시간에 따라 변화하는 전압을 인가함으로써 가둠 영역에서 대전입자와 중성물의 회전 운동을 유도하도록 구성된다. 일부 실시형태에서, 가둠 영역의 전기장은 자기장과 결합하여 대전입자와 중성물이 가둠 영역에서의 회전운동을 유도 및 유지하는 것 중 적어도 하나를 수행한다.

[0038] 복수의 전극 사이에 전위를 인가할 때, 전자가 풍부한 영역은 이하 하나 또는 복수의 특징을 구비할 수 있다. (i)전기장 강도는 적어도 약 10^6V/m ; (ii)전자의 평균 온도는 약 10000 K 내지 50000 K 사이; (iii)전자의 밀도는 약 10^{10}cm^{-3} 내지 약 10^{23}cm^{-3} ; (iv)전자와 양이온의 비율은 약 $10^6:1$ 내지 $10^8:1$ 사이; (v)중성물의 평균 에너지는 약 0.1eV 내지 2eV 사이; (vi)중성물의 농도는 약 $10^{16}/\text{cm}^3$ (어떤 경우 약 $10^{16}/\text{cm}^3$ 내지 약 $10^{18}/\text{cm}^3$ 사이), 그리고 (vii) 가둠 영역의 약 50나노미터 내지 50마이크로미터의 거리까지 확장하는 것 중 적어도 하나이다.

[0039] 원자로는 가둠 영역 또는 가둠 영역에 인접하게 배치되어 운전 중 가둠 영역에서 전자를 발생하는 전자 방출체를 포함할 수 있다. 어떤 경우, 상기 방법은 가둠 영역에서 전자의 발생을 제어하는 작업을 포함할 수 있다.

[0040] 예를 들어, 어떤 경우, 전자 방출체와 열 연결된 필라멘트에 전류를 인가하여, 가둠 영역에서 전자의 발생을 제어한다. 어떤 경우, 전자 방출체를 가둠 영역에 이입 또는 이출하여 가둠 영역에서 전자의 발생을 제어한다. 어떤 경우, 전자 방출체 또는 가둠 벽 레이저로부터 오는 광 발사를 제어하여, 가둠 영역에서 전자의 발생을 제어한다.

[0041] 어떤 경우, 생성물의 핵질량은 중성물과 반응물의 핵 중 어느 하나의 핵질량보다 크다. 상호작용은 무중성자 융합 반응과 같은 융합 반응일 수 있다. 일부 실시형태에서, 융합 반응은 전자가 풍부한 영역에서 입방센티미터 당 초당 약 10^{17} 내지 약 10^{22} 개 융합 반응의 속도로 발생한다. 일부 실시형태에서, 중성물은 중성수소, 중수소 및 삼중수소 중 적어도 하나를 포함한다.

[0042] 일부 실시형태에서, 상기 방법은 대전 반응 생성물의 열 에너지, 운동 에너지 및 상기 원자로의 기계 에너지 중 적어도 하나를 전기 에너지 및 기계 에너지 중 적어도 하나로 전환시켜 상기 원자로 외부 작업을 수행하는 단계를 더 포함한다.

[0043] 관련 첨부 도면을 참조하여 본 개시의 이런 특징과 다른 특징을 더욱 상세하게 설명하도록 한다.

도면의 간단한 설명

[0044] 도 1a 내지 도 1c는 제1 실시형태 원자로의 몇 개 뷰를 도시한다.

도 2a 내지 도 2b는 가둠 벽 내에서 회전하는 대전입자와 중성입자의 운동을 예시적으로 설명한다.

도 3a 내지 도 3d는 중성물 및 대전입자와 가둠 벽의 상호작용을 예시적으로 도시한다.

도 4a 내지 도 4e는 무중성자 양성자-붕소-11 융합 반응의 각 단계를 예시적으로 도시한다.

도 5a 내지 도 5d는 역방향 전극 원자로를 도시한다.

도 6a 내지 도 6f는 하이브리드 원자로를 도시한다.

도 7a 내지 도 7b는 과동-입자 원자로를 도시한다.

도 8a 내지 도 8b는 제1 실시형태 원자로의 다양한 전극 구성을 도시한다.

도 9a 내지 도 9c는 제1 실시형태 원자로의 다양한 횡단면을 도시한다.

도 10a 내지 도 10d는 초전도 자석을 통해 축방향 자기장을 인가하는 제1 실시형태 원자로를 도시한다.

도 11a 내지 도 11d는 영구자석이 제1 실시형태 원자로에 축방향 자기장을 인가하도록 구성되는 제1 실시형태 원자로를 도시한다.

도 12a 내지 도 12b는 가둠 영역에 인가하는 자기장은 영구자석을 이용하여 인가되는 제1 실시형태 원자로를 도시한다.

도 13a 내지 도 13c는 제1 실시형태 원자로의 구성을 도시한다.

도 14a 내지 도 14c는 제1 실시형태 원자로의 구성을 도시한다.

도 15a 내지 도 15c는 링 자석이 어떻게 공동 축선을 따라 위치를 확정하여 기본적으로 당해 축선이 가리키는 방향을 따르는 자기장을 생성하는가를 도시한다.

도 16a 내지 도 16c는 가둠 영역에 인가하는 자기장은 링 자석을 이용하여 인가되는 제1 실시형태 원자로를 도시한다.

도 17a 내지 도 17c는 가둠 영역에 인가하는 자기장은 반경방향으로 오프셋된 자석을 이용하여 인가되는 제1 실시형태 원자로를 도시한다.

도 18a 내지 도 18d는 가둠 영역에 인가하는 자기장은 전자석을 이용하여 인가되는 제1 실시형태 원자로를 도시한다.

도 19a 내지 도 19b는 역방향 전극 원자로의 다양한 실시형태를 도시한다.

도 20a 내지 도 20b는 가둠 벽에 배치 가능한 다양한 전자 방출체를 도시한다.

도 21a 내지 도 21b는 가둠 벽에 배치 가능한 전자 방출 모듈을 도시한다.

도 22는 전자 방출체의 전자 방출을 증가하거나 제어하는 레이저로 구성된 원자로를 도시한다.

도 23a 내지 도 23c는 원자로 내 기체반응물의 구성을 확정하기 위한 핵자기 공명 센싱 구성을 도시한다.

도 24는 폐회로 궤환을 이용하여 원자로를 운전하기 위해 제어시스템을 어떻게 구성하는가를 도시한다.

도 25는 원자로의 운전에 사용 가능한 단계적인 프로세스 흐름의 예시를 도시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0045] 본 문서에서 개시되는 다양한 실시형태는 원자로와 원자로에 투입된 에너지보다 더 많은 에너지를 생성하는 방식으로 두 개 이상의 핵 사이의 반응을 유도하는 조건에서 이러한 원자로를 운전하는 방법과 관련된다. 본 개시는 이런 반응을 핵융합 반응 또는 간략하게 융합 반응이라 하지만, 반응의 각 측면은 일반적으로 핵융합을 특징으로 하는 반응의 각 측면과는 양적 또는 질적으로 다를 수 있다. 따라서, 본 개시의 나머지 부분에서 용어 "융합"이 사용될 때, 당해 용어는 일반적으로 핵융합으로 기술되는 모든 특징을 반드시 언급하지는 않는다. 본 문서에서 개시하는 일부 실시형태에서, 원자로는 실행 가능한 에너지원으로 적합하도록 지속적인 융합 반응을 일으킬 수 있다. 여기서 설명한 바와 같이, 지속적 융합 반응이란 원자로가 약 1초 이상 연속하여 작동할 수 있는 시간 단위의 융합 반응을 의미한다.

[0046] 다양한 실시형태에서, 융합 반응이 발생하는 원자로는 회전 물질을 제한 또는 구속하도록 설계되거나 구성되며, 상기 회전 물질은 통상적으로 융합 반응에 참가하는 하나 또는 복수의 원자핵을 포함한다. 회전 물질을 구속하기 위한 다양한 구조를 제공할 수 있다. 전형적으로 꼭 필요한 것은 아니지만, 이러한 구조는 견고한 물리적 외함을 규정한다. 본 문서의 다른 부분에서 상세하게 해석된 바와 같이, 상기 둘러싸인 구조는 원기둥 형상과 같은 다양한 형상을 가질 수 있다. 물리적 외함에 사용 가능한 적합한 구조의 예시는 도 1, 도 7 및 도 6에 도시

된다.

[0047] 다른 어떠한 기능을 막론하고, 원자로의 벽은 일반적으로 종(species)이 벽에 인접한 영역과 벽 내부에서 회전하도록 가두는데 사용된다. 회전종이 원자로 내에 머무르도록 가둔다는 의미에서, 벽은 구속적(confining)이다. 본 문서에서 설명한 바와 같이, 원자로의 당해 벽은 벽, 가둠 벽 또는 보호덮개로 불리운다. 다양한 실시형태에서, 벽은 또한 다른 기능으로도 사용되는데, 특히 전극, 자석, 융합 반응물(예를 들어 붕소화합물)의 원천과 전자 방출체 중 적어도 하나의 기능으로 사용된다. 벽은 자기장과 압력과(전통적인 융합 반응에서 사용됨)가 아닌 물리적 방법으로 반응물 종을 제한하기에 이는 어떠한 전통적인 융합 원자로의 설계와 다르다. 전압차를 전달하기 위한 전극, 자석, 반응물 재료의 원천으로서 그리고 전자 방출체와 같은 다른 기능은 기존 융합 원자로의 설계와 별도의 구별을 제공한다.

[0048] 일부 실시형태에서, 원자로는 상기 벽과 벽 내부의 공간(고리 모양일 수 있음)을 포함하며, 상당한 부분 또는 백분율의 중성물을 포함하는 반응물 물질은 회전하고, 원자로 벽 표면에 반복적으로 부딪치며, 때로는 벽에 존재하는 물질들과 융합하기도 한다. 원자로의 에너지 투입을 고려하면, 반응의 결과는 임계조건을 이룰 수 있고, 결과적으로 $Q > 1$ 이다. 구체적인 에너지 발전의 응용에 필요한 기간 동안 융합 반응이 지속될 수 있도록 에너지 생성과 에너지 투입의 비율은 1보다 훨씬 커야 한다. 이는 융합 반응을 통해 생성되는 에너지를 이용하여 융합 발생을 허용하는 조건(예를 들어, 가둠 영역에서 특징적인 플라즈마의 밀도)을 유지하는데 고유한 저효율성 때문이다. 일부 실시형태에서, 이 비율은 적어도 약 1.2여야 한다. 일부 실시형태에서, 이 비율은 적어도 약 1.5이어야 한다. 일부 실시형태에서, 이 비율은 적어도 약 2여야 한다. 일부 실시형태에서는 지속 가능한 조건에서 원자로를 연속하여 적어도 약 십오분 또는 적어도 약 한 시간 운전한다. 일 예시에서, 수소 원자는 원자로에서 회전하고 원자로 벽의 붕소 또는 리튬 원자와 부딪쳐 융합을 진행한다. 일부 실시형태에서, 원자로는 하나 또는 복수의 전자 플럭스를 생성하는 전자 방출체를 포함하며, 운전 중 상호작용하는 원자핵 사이 쿨롱 반발력을 감소하는 강한 장을 생성한다.

[0049] 반응물은 원자로 가둠 벽 내부 공간에서 융합 반응을 지지하는 모든 종(species)이 될 수 있다. 다양한 실시형태에서, 반응물 중 적어도 한 가지는 원자로 내부 영역 내에서 회전하는 종이다. 어떤 경우, 두 가지 반응물은 모두 회전하는 종이다. 어떤 경우, 반응물 중 한 가지는 회전하는 종이고, 다른 한 가지는 반응물이 회전하는 종을 구속하는 원자로 벽의 일부에 삽입되는 경우와 같이 정지해 있는 종이다. 어떤 경우, 회전하는 종 사이 또는 회전하는 종과 정지해 있는 종 사이에 융합이 일어날 수 있도록 회전하는 것과 정지해 있는 반응물의 조합이 있다. 반응하는 종이 회전하는 종이 위주인 경우, 원자로의 물리적 구조는 융합 반응을 지원하기 위해 회전하는 종이 원자로 벽 내표면을 대량으로 부딪칠 필요가 없도록 구성될 수 있다. 일부 설계에서, 회전하는 종은 힘(예로, 이들이 대량으로 원자로 벽을 부딪치는 것을 막는 힘)의 제약을 받는다. 이런 설계에서, 두 가지 회전하는 종은 가둠 벽 내부 영역(예로, 가둠 영역) 또는 벽 표면을 따라 융합을 진행한다. 일부 설계에서, 회전하는 종은 가둠 영역 내의 정지해 있는 종(예로, 타겟 물질)과 결합할 수 있다.

[0050] 일부 실시형태에서, 반응물은 무중성자 반응 종이다. 다른 실시형태에서, 반응물은 중성자 반응 종이다. 한 가지 또는 두 가지 반응물은 모두 중성 또는 전하를 띠지 않은 종일 수 있다. 때로는 원자로에 존재하는 종을 "입자"라고 한다. 그러나, 이런 종은 분자 또는 원자 규모의 입자일 뿐이다.

[0051] 개시되는 소형(예로, 탁상) 무중성자 원자로는 중성자 복사의 생물 차폐를 상대적으로 적게 필요하거나 전혀 필요로 하지 않는다. 본 문서에서 설명하는 원자로의 융합 반응은 특징적으로 "웜 융합(warm fusion)"이라 할 수 있으며, 융합이 1000K 내지 3000K와 같은 온도 범위에서 발생하기에, "고온 융합 원자로"(예를 들어 토카막 원자로)에 비해 다루기 쉽다. 융합이 실질상 무중성자적이고 또한 "웜(warm)"하기에, "웜 융합"원자로의 관련 원가는 훨씬 감소된다. 예를 들어, 어떤 경우 원형 원자로는 5만 달러 미만으로 완공되었다. 통상적으로 고온 플라즈마 원자로에 사용되는 복사 차폐와 공업급 하드웨어가 필요하지 않으므로 공개되는 소규모 원자로도 작은 무게와 작은 부지면적을 가질 수 있다.

[0052] 원자로 내 종의 회전 운동은 많은 메커니즘에 의해 부여될 수 있다. 하나의 메커니즘은 상호작용하는 전기장과 자기장의 인가를 통해 회전을 부여한다. 상호작용은 원자로 중 대전입자에 작용하는 로렌츠 힘으로 표현된다. 도 1a 내지 도 1c와 도 6에서 로렌츠 힘을 생성하여 대전입자에 작용하는 원자로 설계의 사례를 도시한다. 도 1a 내지 도 1c는 로렌츠에 의해 구동되는 원자로를 도시하며, 원자로는 내부 전극(120)을 구비하고, 보호덮개(가둠 벽)는 외부 전극(110)이다. 수직 성분을 가지고 있는 인가된 자기장(146)이 있는 상태에서, 전극 사이의 전기장(144)은 전극 사이에서 이동하는 전하 입자 또는 대전종에 대해 로렌츠 힘을 발생시킨다. 도 1c에 도시된 바와 같이, 이 힘은 이들을 방위각에 따라 구동시켜 회전시킨다. 다른 종류의 원자로 설계에서, 전위 또는 전위

변화 순서를 원자로 벽 주위에 방위적으로 배열된 복수의 전극에 순차적으로 인가하여, 대전종에 회전 운동을 부여한다. 적합한 원자로 설계의 예는 도 7과 같다.

- [0053] 많은 실시형태에서, 원자로는 이런 형태로 운전하여, 회전하는 대전종과 중성종이 상호작용하고 이런 중성종에 각운동량을 부여함으로써, 중성종 및 대전종이 원자로 내의 회전운동을 형성한다. 많은 구현에서, 회전하는 종의 대부분은 중성종이고, 대전종은 양성자(p^+)와 같은 이온화된 입자들이다. 본 문서에서 설명한 바와 같이, 당해 방법은 이온-중성종 결합이라고 할 수 있다. 도 2a는 이온-중성종 결합 과정을 예시적으로 설명하며, 소수의 대전된 입자(204)는 주변 중성 입자(206)에 운동을 부여한다.
- [0054] 일부 실시형태에서, 원자로 내에서 회전하는 종을 구속하는 벽 또는 벽과 인접한 곳에서 전자 방출이 발생한다. 일 사례에서는, 전자 방출은 원자로의 가둠 벽에 삽입 또는 부착된 봉소 함유 쿠폰이나 스트립과 같은 수동 구조물(passive structure)에 의해 제공된다. 원자로 운전 중 국부적인 온도가 상승할 때 이런 수동 구조물은 전자를 방출한다. 다른 실시형태에서는 원자로의 정상 운전 중 발생하는 가열과 별도로 제어되는 능동 구조물(active structure)을 이용하여 전자 방출을 구현한다. 전자 방출에 사용되는 능동 구조물의 예시는 도 21a와 도 21b에 도시되었으며, 개별 전자 방출체를 가열하기 위해 별도로 제어되는 저항 부품을 포함한다.
- [0055] 본 개시의 다른 일 측면은 원자로 내 융합 반응에 의해 생성되는 에너지를 포획 및 전환하기 위한 구조 또는 시스템에 관한 것이다. 한 유형의 에너지 포획 시스템은 융합 반응에 의해 생성된 이동 종의 알파 입자에 의해 생성되는 전기 에너지를 직접 포획하여 제공한다. 이는 방출되는 알파 입자의 경로에 전기장을 인가하는 것을 통하여 실현될 수 있으며, 이 전기장은 입자를 감속시키고, 전기장을 생성하는 전극과 연결된 전기회로에서 전류를 생성한다. 다른 한 유형의 에너지 포획 시스템은 터빈, 열교환기 또는 융합 반응에서 생성된 열 에너지를 기계적 에너지로 전환하기 위한 다른 재래식 구조물을 포함하는 열기관을 이용한 에너지 포획을 제공한다. 이런 에너지 포획 메커니즘과 다른 에너지 포획 메커니즘은 본 개시의 뒷부분에서 논의된다.
- [0056] 중성종과 벽의 상호작용
- [0057] 중래의 융합 연구와 달리 원자로 벽과 상호작용하는 중성종은 부동한 유형의 상호작용을 제공한다. 반복적인 상호작용은 상대적으로 큰 체적의 공간에서 발생하며, 이 상대적으로 큰 체적의 공간은 가둠 벽의 안쪽 벽 또는 내부 표면 바로 옆에 있는 환상공간일 수 있다.
- [0058] 도 3a 내지 도 3d에서는 융합을 일으키지 않는 일부 입자-벽 상호작용을 도시한다. 이 도면들이 봉소¹¹ 및 티타늄 중 적어도 하나의 상호작용을 설명하지만, 가둠 벽에서 다른 반응물 재료를 이용할 때 역시 이런 상호작용이 일어난다. 도 3a에서 설명한 바와 같이, 일부 부분의 중성종-벽 상호작용에서, 중성 입자는 벽의 원자핵(이 경우, 봉소¹¹ 원자)과의 탄성적인 충돌을 경험하고, 튀어 돌아오는 중성종은 상호작용에 들어갈 때의 대부분 에너지를 유지한다. 모든 중성종-벽 상호작용에서, 탄성적인 충돌의 발생률이 가장 높다. 도 3b에 도시된 훨씬 작은 부분의 충돌에서, 중성종의 원자핵이 벽의 원자의 핵에 충분히 가깝게 다가오므로 두 개의 핵이 매우 근접할 때 발생하는 터널링의 결과로 충돌이 비탄성적이 된다. 도 3c는 발생 가능한 또 한 가지 상호작용을 도시하며, 이 경우 중성종이 벽으로 침투한다. 가둠 표면에 티타늄이나 팔라듐과 같은 수소 분자를 흡수할 수 있는 재료가 포함되어 있을 때 이러한 유형의 충돌이 다소 빈번하게 발생할 수 있다.
- [0059] 도 3d는 대전입자(예로 양성자)와 가둠 벽의 비탄성 충돌을 도시한다. 이 경우는 원자 수소와 같은 중성종이 가둠 벽과의 잦은 탄성 충돌(앞서 도 3a에서 도시함)과 대조된다. 대전입자가 구속 벽에 접근할 때와 멀어질 때, 입자는 제동복사 에너지 손실을 겪을 수 있다. 이런 에너지 손실은 대전입자와 전자가 풍부한 영역의 전자 사이 정전기적 상호작용으로 인해 발생한다. 정전기력으로 인해, 일부 운동 에너지가 손실되고, X선과 같은 고에너지 전자기 복사가 방출된다. 이온화 입자를 융합하는데 초점을 맞춘 기존의 융합 원자로에서, 제동복사는 상당한 에너지 손실을 초래할 수 있다. 이온에 대한 중성자의 비율이 높은 중성종인 약한 이온화 플라즈마를 사용하여 이러한 손실의 상당한 부분을 피면할 수 있다.
- [0060] 운동 중인 중성 원자핵과 벽에 있는 원자의 핵 사이 터널링 상호작용의 어느 한 부분에서 융합이 일어날 수 있다. 도 4a는 수소 원자 또는 양성자가 봉소 11 원자와 융합할 때 발생하는 무중성자 융합 반응의 각 단계를 도시한다. 먼저, 482에서, 고속으로 이동하는 양성자는 봉소 11 원자와 충돌하고, 이 두 원자는 융합하여 483에 도시된 바와 같이 활발한 탄소 핵을 형성한다. 그러나, 484에 도시된 바와 같이, 들뜬 탄소 핵의 수명은 짧고, 베릴륨 원자핵, 그리고 방출될 때 3.76MeV의 운동 에너지를 갖는 알파 입자로 분해된다. 마지막으로, 485에서, 새로 형성된 베릴륨 원자핵은 거의 즉시 두 개의 알파 입자로 분해되며, 각각 2.46MeV의 운동 에너지를 갖는다. 도 4b-e는 가둠 벽(412) 표면에 상대해, 도 4a에 도시된 동일한 양성자-봉소 11 융합 반응의 각 단계를

도시한다. 도 4a는 고속으로 가둠 벽 상의 붕소 11 원자 표면을 향해 이동하는 양성자를 도시한다. 중성수소 원자가 가둠 벽에 접근할 때, 이는 전자가 풍부한 영역(432)을 통과하고, 양전하를 띤 두 핵 사이의 반발력을 부분적으로 차폐한다. 도 4c는 중성수소가 붕소 원자와 융합하여 탄소 핵을 형성한 단계를 도시한다. 도 4d에서, 탄소 핵은 베릴륨 원자핵과 하나의 알파 입자로 분해되었다. 마지막에, 도 4e에서, 베릴륨 원자핵은 분해되고, 두 개의 별도의 알파 입자를 방출한다. 잠재하는 반응물이 이온이 아닌 중성물이기에, 이들과 가둠 벽 표면 원자와의 대부분 상호작용은 탄성적인 충돌이다. 이와 대조되게, 벽에 유입되는 양전하를 띤 입자는 벽의 다른 원자핵과 거리를 두도록 정전기 반발력에 의해 편향된다. 이런 정전기적 상호작용은 대전입자가 에너지를 잃도록 하는데, 즉 충돌은 비탄성적이다. 중성 입자(양전기를 띤 핵, 상기 핵은 일정한 정도에서 궤도 전자에 의해 차폐됨)는 동일한 반발력을 겪지 않는다. 따라서, 중성물은 벽의 다른 한 원자를 바로 충돌할 가능성이 더 크다. 따라서, 이온이 아닌 중성물을 이용하여 융합 반응의 가능성을 높이고, 융합 반응이 발생하지 않을 경우, 중성물은 대응하는 이온보다 더욱 높은 에너지로 탄력 반등할 수 있다.

[0061] 전체적으로, 회전하는 중성 입자는 벽과의 수많은 반복적인 상호작용을 겪고, 융합 반응을 생성하는 과정에서 생산성이 없는 입자들은 탄성적으로 반등하며, 에너지 손실은 상대적으로 적다. 전술한 바와 같이, 중성물은 내부 표면 또는 환상공간의 안쪽 벽에서 다시 나타나 가둠 벽에 들어가서 반응에 계속 참여할 수 있으며, 다시 나타난 중성물은 벽과 다시 상호작용할 수 있는데, 이로 인해 융합 반응이 더 용이하게 일어날 수 있다. 중성물과 벽과의 모든 상호작용은 중성물의 중성핵과 벽에 있는 원자의 핵 간의 융합 반응을 일으킬 수 있다.

[0062] 반응물이 서로 다른 중(예로 ^{11}B 및 P^+)일 때 각 단위 체적의 융합률은 다음 식과 같다.

[0063]
$$dN/dT = n_1 n_2 \sigma v$$

[0064] 여기서, n_1 과 n_2 는 각 반응물의 밀도이고, σ 는 특정 에너지에서의 융합 횡단면이며, v 는 두 개의 상호작용하는 종 사이의 상대적 속도이다. 적어도 하나의 종이 가둠 영역에서 회전하고 두 번째 종이 함유된 가둠 벽을 반복적으로 충돌하는 한 시스템에 있어서, 회전하는 종의 밀도 값은 10^{20} cm^{-3} 수량급이고, 붕소와 같이 정지해 있는 종의 밀도 값은 10^{23} cm^{-3} 수량급이며, 융합 횡단면 값은 10^{-32} cm^2 수량급이고, 상호작용하는 종의 상대적 속도는 10^3 m/s 수량급이다. 이에 비해 토카막 원자로의 경우, 종별 밀도 값은 10^{14} cm^{-3} 수량급이고, 융합 횡단면 값은 10^{-28} cm^2 수량급이며, 상호작용하는 종의 상대적 속도는 10^6 m/s 수량급(2015년 1월 14일 M. Ragheb에 기재된 "Inertial Confinement Fusion.pdf"에서 제공한 정보를 근거로 함)이다. 본 문서에서 설명한 바와 같이, 중성 종의 시스템을 사용하는 것은 그 높은 밀도로 인해 매우 강한 우세를 가지고 있는 것이 분명하다. 이 시스템의 단위당 체적의 에너지 융합률은 토카막과 관성 가둠 시스템의 속도보다 적어도 약 8개의 수량급을 초과한다. 따라서, 본 문서에서 개시하는 시스템은 토카막 또는 내부 가둠 시스템의 약 역분의 일 되는 체적에서 한정된 에너지 생성률을 달성할 수 있다.

[0065] 쿨롱 장벽의 감소

[0066] 앞에서 설명한 바와 같이, 신뢰성 있는 기존의 핵융합 방법은 에너지화한 융합 반응물과 적어도 150000000K(13000eV) 수량급인 극한 고온에 달하는 지원 환경을 구비한다. 이렇게 함은 융합 반응물에 충분한 운동 에너지를 부여하여 그들의 자연 정전기적 반발력을 극복하기 위해서이다. 이 환경에서, 각 반응물은 반드시 먼저 고유한 양전하를 극복하여 융합 반응의 어떤 가능성을 허용해야 하는 고유한 양전하를 띤 원자핵이다.

[0067] 본 개시의 일부 실시형태는 융합 반응에서 2000K(0.17eV) 수량급과 같이 훨씬 낮은 온도를 사용한다. 이런 실시형태는 중성종을 하나 또는 다양한 반응물로 사용하는 것과 반응 환경을 개변하여 반응물 원자핵 간 강한 쿨롱 반발력을 감소하는 것 중 적어도 하나를 채택한다. 쿨롱힘의 감소는, (i) 반응 영역에서 풍부한 전기를 제공하고 (ii) 반응물 원자핵에 대한 양자 역학적 스핀을 정렬하는 것을 포함하여 다양한 방식으로 이루어질 수 있다. 원자로의 구조에 따라 쿨롱 반발력을 감소하는 장치와 방법은 다양한 형식을 채택할 수 있다. 이하 설명은 원자로에 외부 가둠 벽이나 보호덮개가 있는 환상공간이 포함되어 있다고 가정한다. 다른 원자로의 구조도 융합을 지원하는 감소된 쿨롱 반발력 환경을 만들 수 있지만, 그러한 환경들은 아래 설명과는 다른 방식으로 이를 달성할 수 있다.

[0068] 이하 사항은 전극을 가두는 내부 표면 근처의 환경에 대한 가능한 해석으로 제공되며, 개시되는 실시형태의 실시예에 대한 한정으로 해석되어서는 아니된다. 이 해석에서, 반응물, 특히 중성물은 고속으로 회전하여 전극의 내부 표면을 충돌한다. 이와 동시에 가둠 벽 또는 가둠 벽 근처에서 전자를 방출한다. 빠르게 회전하는 중성물은

각속도가 높아 관련 원심력을 통해 가둠 벽 내부 표면에 극대한 압력을 가한다. 벽의 내부 표면에서 방출되는 전자는 이런 힘에 저항한다.

[0069] 방출된 전자는 벽에서 멀리 떨어져 내부 공간으로 향하는 것과 같이 방출 위치에서 멀리 확산된다. 그러나 중성물의 원심력은 전자를 외부 전극의 내부 표면에 가까운 영역에 구속한다. 이로부터 생성된 전극의 내부 표면과 인접한 얇은 평형력 영역에는 반응물 핵 사이의 쿨롱 반발력을 감소시키는 강한 장이 있다.

[0070] 힘의 균형은 (i) 온도와 전자 및 중성물의 밀도의 승적의 경사도(전자가 방출되는 벽 표면에서 떨어진 방향), 그리고 (ii) 내부 표면을 향하여 가해지는 원심력의 평형으로서 수학적으로 표현될 수 있다. 원심력은 중성물의 밀도, 반경 방향의 위치 및 각속도의 승적에 비례한다.

[0071]
$$\frac{\partial}{\partial r}(n_e K T_e + n_o K T_o) = n_o m_o \omega^2 r$$

[0072] 이 표현식에서, r은 구속 전극의 내부 표면에서 떨어진 반경 방향이고, K는 볼츠만상수이며, T_e 및 T_o는 켈빈을 단위로 하는 전자와 중성물의 온도이고, n_e 및 n_o는 전자와 중성물의 밀도이며, n_o는 중성종의 밀도이고, m_o은 회전하는 중성종(예로, 수소원자)의 질량이며, ω²는 회전하는 중성종의 각속도의 제곱이다.

[0073] 전자가 방출되는 표면 옆의 얇은 영역(예로, 가둠 벽의 내부 표면)에서, 자유 전자는 강한 전기장(도 2a 내지 도 2b의 가둠 벽(210)에 인접한 전자가 풍부한 영역(232)의 설명적 표시 참조)을 생성한다. 농도가 높은 중성물은 전자의 평균 자유 경로를 제한하여, 전자가 탄도케적을 따르는 것을 막고, 따라서 중성물을 뚜렷하게 이온화할 수 있는 충분한 운동 에너지를 얻는다. 또한, 중성물은 이온보다 훨씬 높은 밀도를 가지기에 재결합에 사용할 수 있는 양이온은 상대적으로 적다. 예를 들어, 이온과 중성물의 비례는 약 1:10, 약 1:100, 약 1:1000 또는 약 1:10000 미만 범위일 수 있다. 따라서, 중성물은 흔히 전자와 양이온 사이에 있다. 이 조건은 가둠 벽의 내부 표면 부근에 농도가 높은 과잉 전자를 생성하여 강한 전기장을 생성한다.

[0074] 아주 얇은 영역(예를 들어, 전극에 가까운 내부 표면)에 과잉전자(이온에 비해)와 높은 중성물 농도가 존재하는 조합이 아주 강한 전기장을 생성한다. 이 영역에서 강한 장은 상호작용하는 양전하를 띤 원자핵의 쿨롱 반발력이 감소한다. 따라서, 두 개의 양전하를 띤 원자핵이 접근할 확률이 뚜렷이 증가된다.

[0075] 또한 전술한 바와 같이, 가둠 벽의 내부 표면에 충돌하는 회전 입자는 상호작용하는 핵융합 반응물에 반복할 수 있는 기회를 만들어 준다. 중성물은 반복적으로 전자가 풍부한 층을 통과하여 가둠 벽이나 보호덮개의 내부 표면을 충돌하고 원자로의 내부 공간에 다시 들어간다. 벽에 대한 이런 충격은 제한된 환경(예를 들어, 가둠 벽의 내부 표면)에서 회전하는 입자에 의해 발생하는 원심력의 반경방향 분량을 나타낸다. 반복적인 충돌, 접촉 또는 충격은 지정된 영역에서 주어진 시간 내 융합 반응의 확률을 높인다. 이러한 반복은 장기간의 구속 시간에 대한 필요성을 대체하며, 융합 반응에 대한 이전의 접근방식을 특징짓는 로슨의 조건에 대한 우려를 해소한다. 간단히 말하면 융합 반응의 총 확률은 뚜렷이 증가하였다.

[0076] 예를 들어 전자가 풍부한 영역은 이하 매개변수 값(parameter values)의 임의의 조합을 특징으로 할 수 있다.

[0077] 자유전자의 밀도: 약 10²³/cm³

[0078] 중성물의 밀도: 약 10²⁰/cm³

[0079] 양이온의 밀도: 약 10¹⁵ 내지 10¹⁶/cm³ (중성물의 10⁻⁵ 내지 0.01%)

[0080] 전자와 양이온의 밀도 차이: 약 10⁶ 내지 10⁸/cm³

[0081] 자유전자가 풍부한 영역(대다수 전자 밀도 경사도가 존재하는 영역)의 두께(반경방향): 약 1마이크로미터

[0082] 전자가 풍부한 영역의 전기장 강도: 약 10⁶ 내지 10⁸ V/m

[0083] 전자 온도: 약 1800-2000K (약 0.15-0.17 eV)

[0084] 구심 가속도: 약 10⁹ g' s (여기서, g는 중력 가속도=9.8 ms⁻²)

[0085] 이런 시스템의 자유전자는 공동으로 두 원자핵의 융합 반응을 촉진하는 것으로 볼 수 있다. 유추에 의해, 양성자 및 중수소 원자핵과 결합하는 하나 또는 복수의 묶음은 때로 수소 및 중수소 원자의 융합을 촉진하는 것으로

기술된다. 뮤온이 두 개의 융합 핵이 서로 접근할 수 있도록 함으로써 융합을 촉진시킨 것처럼 융합 핵 부근의 자유전자가 본 문서에서 설명한 융합 반응을 촉진시킨다. 효과적으로, 전자는 두 반응물이 반응할 수 있을 정도로 접근하는 것을 막는 에너지 장벽을 감소시킨다. 이는 화학적 또는 물리적 환경에서의 모든 촉매제의 작용과 아주 유사하다. 뮤온과 전자는 모두 반응속도를 높이지만 실제로는 반응에 참여하지 않고, 반응물이 반응할 수 있게 충분히 접근할 수 있도록 간단히 에너지 장벽을 감소하였다.

[0086] 그러나 뮤온과 전자의 촉매화는 다른 유사점이 거의 없다. 다양한 원인으로 인해, 뮤온 촉매 융합은 상업적으로 불가능하다. 특히, 뮤온은 전자보다 훨씬 큰 질량을 가지고 있기에 뮤온의 생산원가는 훨씬 비싸다. 또한, 그중 비교적 적은 수만이 언제라도 즉시 생산될 수 있으며, 이는 융합의 임계조건에 도달할 수 없다는 것을 의미한다. 양성자-붕소 11 반응의 경우, 임계조건 융합은 입방센티미터 당 초당 약 10^{17} 개의 성공적인 융합 상호작용을 필요로 할 수 있다. 큰 폴에 있는 몇 개의 원자핵만이 뮤온 촉매 융합으로부터 이익을 얻을 수 있을 것이며, 융합을 지원하는데 필요한 수준에는 도달하지 못할 것이다.

[0087] 이에 비해 전자는 쉽게 생산될 수 있고 밀도가 높다. 예를 들어, 여기에서 공개되는 기술에 따라 입방센티미터 당 약 10^{20} 또는 그 이상의 밀도로 전자를 생성할 수 있다. 이렇게 밀도가 높은 상태에서 전자는 집단적으로 작용하여 높은 전기장을 생성하며, 상기 높은 전기장은 상대적으로 큰 체적 범위에서 접근하는 핵 사이 상호작용의 쿨롱 장벽을 감소시킨다. 이렇게 상대적으로 큰 체적은 필요한 상호작용이 임계조건에 도달하도록 허용한다. 즉, 입방센티미터 당 초당 약 10^{17} 개의 성공적인 융합 상호작용을 허용한다.

[0088] 용어

[0089] "원자로"는 하나 또는 복수의 반응물이 반응하여 하나 또는 복수의 생성물을 생성하는 장치로서, 흔히 에너지 방출을 수반한다. 하나 또는 복수의 반응물은 연속적인 전달, 간헐적인 전달 및 일회적인 전달 중 적어도 하나에 의해 원자로에 공급되며 기체, 액체 또는 고체의 형태로 제공될 수 있다. 반응물은 반응의 구성요소로 제공되는 경우도 있는데, 예를 들어 반응물은 벽과 같은 원자로의 구조에 포함될 수 있다. 붕소 11, 리튬 6, 탄소 12 등은 원자로의 가동 벽에서 제공될 수 있다. 어떤 경우, 가스 공급 탱크와 같은 외부 공급원에서 반응물이 제공된다. 일부 실시형태에서, 원자로는 $Q>1$ 인 핵융합 반응을 촉진시키기 위해 구성된다. 원자로는 반응 기간에 생성되는 생성물 및 에너지 중 적어도 하나를 제거하기 위한 부품을 구비할 수 있다. 생성물 제거 부품은 포트, 통로, 게터 등이 될 수 있다. 에너지 제거 부품은 열 에너지를 제거하는 열교환기 등으로, 전기 에너지를 직접 제거하는 인덕터 및 유사한 구조 등이 될 수 있다. 원자로 부품은 생성물과 에너지를 연속적으로 또는 간헐적으로 제거할 수 있다. 일부 실시형태에서, 원자로는 반응물을 포함하는 하나 또는 복수의 가동 벽을 구비하며, 어떤 경우 반응물 원천, 전기장 등을 제공한다. 본 개시에 일관된 것처럼, 지속적인 융합 반응을 제공하는데 적합한 원자로에는 다양한 설계가 있을 수 있다.

[0090] "회전자"는 하나 또는 복수의 반응물 또는 생성물(입자)이 공간에서 회전하는 원자로 또는 원자로 부품이다. 공간은 적어도 부분적으로 본 문서에서 설명하는 바와 같이 가동 벽으로 정의될 수 있다. 어떤 경우, 로렌츠 힘과 같은 자력, 전력 및 양자의 조합 중 적어도 하나에 의해 회전한다. 일부 실시형태에서, 대전입자가 가동 영역에서 회전하는 방식으로 대전입자에 전력 및/혹은 자력을 인가하여 회전을 유도한다. 회전하는 대전입자는 중성물과 충돌하여 중성물이 마찬가지로 가동 영역 내에서 회전하게 하는데 이런 현상을 때로는 이온-분자 결합이라고 한다. 중성물은 전력 및 자력 중 적어도 하나의 영향을 받지 않기에, 대전입자와의 상호작용이 없이 가동 영역에서 회전하지 않는다. 회전자의 가동 벽 또는 다른 외부 구조는 본 문서에서 설명한 많은 밀폐 형상을 구비할 수 있다. 일부 실시형태에서, 외부 구조는 대체적으로 또는 기본적으로 원형 또는 원기둥 형상이다. 이 경우, 형상은 기하적으로 정확할 필요가 없지만, 회전 축선을 에워싼 편심도, 정점과 같은 비연속 곡률 등 일부 변화를 나타낼 수 있다.

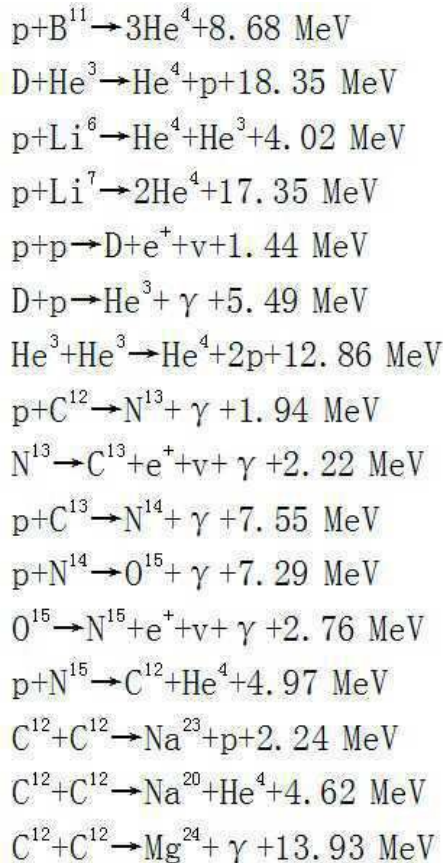
[0091] 회전자의 가동 영역에는 내부 막대 또는 다른 구조물이 가동 벽과 관련하여 동심원으로 배열된다. 이 경우, 회전자는 입자가 회전하는 "환상공간"을 갖는다. 본 문서에서 사용될 때, "환상공간"은 그중 이 영역이 기본적으로 환상의 가동 영역임을 말한다. 일부 회전자는 환상공간을 한정하는 내부 막대 또는 다른 구조물을 구비하지 않음을 이해해야 한다. 이 경우, 회전자의 가동 영역은 단지 중공 구조이다. 환상공간은 흔히 원기둥 형상이지만, 이런 형상은 회전 축선을 에워싼 편심도, 정점과 같은 비연속 곡률 등 일부 변화를 나타낼 수 있다.

[0092] 생성된 전자기장은 전하에 있는 전력과 자력의 조합에 의해 "로렌츠 힘"을 제공한다. 힘의 크기와 방향은 전기장과 자기장의 외적(cross product)에 의해 결정되기에, 힘을 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 라고 부르기도 한다. 전기장과 자기장이 직각

방향을 가질 때, 대전입자에 인가하는 힘은 오른손법칙 니모닉으로 나타낼 수 있는 회전 방향을 가진다.

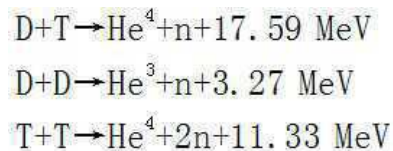
[0093] 융합 반응에서, 양성자, 알파 입자, 붕소(^{11}B)를 포함할 수 있는 반응에 참여하는 반응물과 생성물은 반드시 백 퍼센트의 순도로 존재하는 것은 아니다. 본 문서에서 이러한 반응물, 생성물 또는 반응의 다른 구성 요소를 제공하는 범위 내에서, 이 구성 요소는 실질적으로 존재하는 것으로 이해된다. 다시 말하면, 구성 요소는 100%의 수준으로 존재할 필요가 없지만, 약 질량의 95% 또는 약 질량의 99%와 같이 약간 낮은 수준으로 존재할 수 있다.

[0094] 무중성자 반응은 일반적으로 중성자가 휴대한 에너지가 방출된 총 에너지의 1%를 초과하지 않는 융합 반응으로 이해된다. 본 문서에서 사용된 바와 같이, 무중성자 반응 또는 기본적으로 무중성자 반응은 이 기준을 만족시키는 반응이다. 무중성자 반응의 예로는 다음과 같은 것들이 있다.



[0095]

중성자 반응의 예로는 다음과 같은 것들이 있다.



[0097]

[0098] 쿨롱 반발력은 같은 전하의 두 개 또는 그 이상의 입자가 겪는 정전력이다. 상호작용하는 두 입자에 있어서, 이는 분리거리 제곱의 역수에 비례한다(쿨롱 법칙). 따라서, 대전입자가 서로 접근 시, 반발력이 더욱 뚜렷하고 더욱 강하다. 복수의 대전입자가 생성하는 전기장에서, 대전입자가 겪는 반발력은 근처 모든 대전입자의 기여가 중첩되어 형성된 것이다.

[0099]

쿨롱 장벽의 감소는, 입자가 충분한 수량의 전자 또는 다른 대전입자에 접근할 때, 일반적으로 두 개의 독립된 입자 사이에서 계산되거나 경험한 알려지고 이해된 쿨롱 반발력이 계산 가능한 정도로 "낮아"지거나 감소됨으로써 독립된 입자가 다른 방식에 의해 경험할 수 있는 반발력을 줄일 수 있다는 것을 의미한다. 예를 들어, 밀도가 xx인 과일 전자의 존재는 전자 도메인의 두 양전하를 띤 YY 입자 사이 쿨롱 반발력을 zz% 감소시킨다.

[0100]

로렌츠 회전자 실시형태

- [0101] 제1 실시형태
- [0102] 도 1a 내지 도 1c는 원자로의 제1 실시형태를 도시하며, 그중 대전입자(charged particles), 대전종(charged species) 또는 이온은 로렌츠 힘에 의해 회전된다. 도 1a는 원자로의 횡단면 뷰이고, 도 1b는 도 1a의 단면 A-A를 따르는 동일한 원자로의 등거리 컷아웃 뷰(cutout view)를 제공한다. 달리 명시되지 않은 한, r , θ 및 z 좌표를 사용한 방향성은 도 1b에 도시된 바와 같이 원기둥형 좌표계에 관련된다. 설명된 실시형태에서, 로렌츠가 구동하는 회전자는 외부 전극으로도 사용되는 외벽(110)과, 방전봉이라 불리우기도 하는 동심 내부 전극(120)을 구비하며, 당해 내부 전극(120)은 환상공간(140)을 통해 외전극과 분리된다. 내부 전극(120)과 보호덮개(140) 사이에 전위를 인가함으로써 환상공간에 전기장을 형성한다. 전극 사이에 충분한 전압을 인가하면 환상공간 중의 일부 기체가 이온화되어 환상공간을 건너는 반경방향 플라즈마 전류를 생성한다. 다양한 실시형태에서, 내부 전극은 높은 양의 전위를 유지하고, 보호덮개는 전기장과 전류의 흐름이 실질적으로 양의 r 방향에 있도록 접지된다.
- [0103] 도 1c는 로렌츠 힘을 이용하여 가둠 벽(110)내에서 방위각을 따라 대전입자를 구동하는 방법을 도시한다. 도 1c에서, 방전봉을 제거하였고, 축은 z 방향으로 이동하여 해상도를 향상시킨다. 비록 표시되지 않았지만, 영구 자석이나 초전도 자석과 같은 자석은 환상공간에서 기본적으로 z 축(기본적으로 축방향)에 평행되는 인가되는 자기장을 생성하는데 사용된다. 자기장은 기본적으로 전류의 방향에 수직되어, 이동하는 대전입자, 대전종과 이온이 방위각(또는 θ)방향에서 로렌츠의 힘을 받게 한다. 예를 들어, 외부 전극과 비교하여 방전봉에 양 전위가 있는 경우(예를 들어, 방전봉에 인가된 양 전위가 있고, 동시에 외부 전극이 접지된 경우)를 고려하여 r 방향(144)에서 전기장을 생성한다. 이 구성에서 양전하를 띤 이온은 환상공간(140)을 통하여 외부 전극을 향해 r 방향으로 이동한다. 자기장이 z 방향(146)을 동시에 가리키는 경우, 도 1b와 도 1c에 도시된 투시도의 각도에서 볼 때, 이온은 $-\theta$ 방향 또는 시계 방향으로 로렌츠 힘을 겪는다. 어떤 경우, 전기장과 자기장은 수직 방향과 다르지만 평행되지도 않는 각도에 처할 수 있어, 수직 성분이 더욱 작거나 더욱 큰 정도의 충분한 강도로 존재하여 세기가 충분한 방위각 로렌츠 힘을 생성한다. 이 방위각 힘은 대전입자, 대전종과 이온에 작용하는데, 이런 대전입자, 대전종과 이온은 또 중성물과 결합되어 중심 방전봉과 외부 전극 사이의 환상공간에 있는 중성물도 높은 회전속도로 운동하게 한다. 움직이는 기계 부품이 없다는 것은 회전할 수 있는 속도에 거의 제한이 없다는 것을 의미하기에, 예를 들어 100000RPS가 넘는 중성물과 대전입자의 회전 속도를 제공한다.
- [0104] 역방향 전극 실시형태
- [0105] 도 5a 내지 도 5d는 원자로가 로렌츠 힘을 이용하여 이온-중성물 결합으로 이온과 중성물을 회전시킬 수 있는 다른 일 실시형태를 도시한다. 역방향 전극에 사용되도록 구성된 원자로는 전기장과 전류 흐름(관습상 양전하 이동 방향에 있음)이 음의 r 방향에 있다는 점에서 도 1a-c에 도시된 원자로와 다르다. 도 5a는 원자로의 횡단면 뷰이고, 도 5b는 도 5a의 단면 A-A를 따르는 동일한 원자로의 등거리 컷아웃 뷰를 제공한다. 역방향 전극 회전자는 외부 전극(510)과 동심 내부 전극(520)을 구비하며, 내부 전극(520)은 환상공간(540)을 통하여 외부 전극과 분리되고, 환상공간(540)은 본 문서에서 가둠 영역이라 불리우기도 한다. 내부 전극 및 외부 전극 중 적어도 하나에 전위를 인가하면, 환상공간에서 내부 전극을 향한 반경방향 전기장을 형성할 수 있다. 전극 사이에 충분한 전위를 인가하면 환상공간 중의 일부 기체가 이온화되고, 또한 환상공간을 건너는 반경방향 플라즈마 전류가 생성된다.
- [0106] 도 5c는 로렌츠 힘을 이용하여 원자로 내에서 방위각을 따라 대전입자를 구동하는 방법을 도시한다. 도 5c에서, 내부 전극을 뷰에서 제거하였고, 설명되었던 축은 z 방향으로 이동하여 해상도를 향상시켰다. 비록 표시되지 않았지만, 영구 자석이나 초전도 자석과 같은 자석은 환상공간에서 기본적으로 z 축(즉 기본적으로 축방향에 있음)에 평행되는 인가되는 자기장을 생성하는데 사용된다. 자기장은 기본적으로 전류의 방향에 수직되어, 이동하는 대전입자, 대전종과 이온이 방위각(또는 θ)방향에서 로렌츠의 힘을 받게 한다. 예를 들어, 내부 전극에 인가된 음 전위가 있고, 이와 동시에 외부 전극이 접지(또는 양 전위를 유지)된 경우를 고려하여 음의 r 방향(544)에서 전기장을 생성한다. 이 구성에서 양전기를 띤 이온은 환상공간(540)을 통하여 내부 전극을 향해 음의 r 방향으로 이동한다. 자기장이 z 방향(546)을 동시에 가리키는 경우, 도 5b와 도 5c에 도시된 투시도의 각도에서 볼 때, 이온은 $+\theta$ 방향 또는 시계 반대방향으로 로렌츠 힘을 겪는다. 어떤 경우, 전기장과 자기장은 수직과는 다르지만 평행되지도 않는 각도에 처할 수 있어, 수직 성분이 더욱 작거나 더욱 큰 정도의 충분한 강도로 존재하여 세기가 충분한 방위각 로렌츠 힘을 생성한다. 이 방위각 힘은 대전입자, 대전종과 이온에 작용하는데, 이런 대전입자, 대전종과 이온은 또 중성물과 결합되어 환상공간에 있는 중성물도 높은 회전속도로 운동하게 한다. 움직이는 기계 부품이 없다는 것은 회전할 수 있는 속도에 거의 제한이 없다는 것을 의미하기에, 예를 들어

100000RPS가 넘는 중성물과 대전입자의 회전 속도를 제공한다.

[0107] 역방향 필드(Field) 실시형태

[0108] 도 6a 내지 도 6d는 로렌츠 힘을 이용하여 이온-중성물 결합으로 이온과 중성물을 회전시킬 수 있는 다른 한 원자로 실시형태의 다양한 뷰를 도시한다. 이 실시형태의 원자로는 역방향 필드 구성을 이용하여 작동된다. 이 구성을 갖는 원자로는 가둠 영역 내의 전기장과 자기장의 방향이 반대된다는 점에서 도 1a 내지 도 1c와 도 5a 내지 도 5d에 도시된 원자로와 다르다. 이 구성에서, 자기장은 기본적으로 z 축에 평행되는 것이 아니라 양 또는 음의 r 방향 반경방향을 가리킨다. 마찬가지로, 전기장은 반경방향을 가리키지 않고 기본적으로 z 축에 평행된다. 도 6a는 원자로의 등거리 뷰이고, 도 6b는 원자로가 z 방향에서의 뷰이며, 도 6c는 원자로의 등거리 단면도(도 6b의 선 AA에 대응함)이고, 도 6d는 원자로의 측면도를 제공한다. 도시된 실시형태에는 내부 링 자석(626)과 가둠 벽으로도 사용되는 동심 외부 링 자석(616)이 포함된다. 링 자석은 내부 및 외부 링 자석의 대응하는 표면이 같도록 같은 방향을 향하는 자극을 갖는다. 이 경우, 외부 표면은 북극(658)이고 내부 표면은 남극(659)이다. 일부 실시형태에서, 자석(658)의 내부 표면에는 하나 또는 복수의 재료층이 추가되어 가둠 표면 재료가 자석 재료와 다르다. 동심 자석 사이 영역은 환상공간(640)을 형성하며, 환상공간(640)은 가둠 영역(660a) 일단부의 전극과 가둠 영역(660b) 타단부의 전극을 통해 z 방향에서 구속된다. 통상적으로, 가둠 영역의 어느 한 측에 있는 모든 전극(전극 660a 또는 전극 660b에 대응됨)에는 유사한 전위가 부여된다. 도시된 하이브리드 원자로와 달리 전극 660a(또는 전극 660b)는 링 또는 디스크 형상과 같은 단일 연속 전극을 형성할 수 있다. 전극 660a가 접지되고, 환상공간(660b)의 다른 일측에 있는 전극에 양 전위가 부여되면, 양의 z 방향을 따라 가둠 영역을 통해 전기장을 인가한다. 도시된 바와 같이, 자기장이 r 방향을 가리키면 직교 전기장과 자기장은 이온이 θ 방향에서 방향각으로 회전(예: 도 6c 참조)하도록 한다. 또는, 전극 660b를 접지하는 동안 전극 660a에 양의 전위를 가하여 전기장이 음의 z 방향을 가리키는 경우, 이온은 $-\theta$ 방향으로 회전할 것이다.

[0109] 파동-입자 실시형태

[0110] 도 7a와 도 7b는 이온이 정전기장의 진동으로 인해 회전하는 제어된 융합 장치의 제2 실시형태를 보여준다. 당해 실시형태에서, 외부 링에 위치하거나 외부 링을 형성하는 복수의 분리된 벽 전극(714)에 위치하고, 임의로 내부 링 또는 내부 링을 형성하는 내부 전극(724)과 조합하여 생성되며, 환상공간(740) 내에서 국부적이고 방위적으로 변화되는(azimuthally-varying) 전기장에 의해, 이온은 방위각으로 가속된다. 어떤 경우, 벽 전극은 함께 가둠 벽을 형성하고, 또 어떤 경우 벽 전극을 가둠 벽 일부 또는 비계 또는 그 내부에 설치할 수도 있다. 전기장은 제어된 순서에 따라 방위각으로 전진하여 이온에 인가하는 정전력으로 하여금 기본적으로 방위각 방향(θ 또는 $-\theta$ 방향)을 따라 차례대로 전진하게 한다. 이런 방식은 열차 궤도를 따라 자기장의 진동에 의해 달리는 자기 부상 열차와 비슷하게 대전종을 가속한다. 진동 전위를 전극에 인가할 수 있다. 한 전극에서 인접한 전극으로, 위상 또는 다른 파라미터에 따라 변화하는 진동은 이온의 회전 운동을 유도하거나 유지한다.

[0111] 환상공간에 존재하는 이온은 전기장으로 인해 정전력을 겪으며, 이온-중성물 결합의 원리를 통해 대량의 또는 백분율의 중성물을 구동하기 위해서는 상대적으로 적은 수량 또는 백분율의 이온 만이 필요하다. 중성물을 회전시키는데 사용되는 이온은 유도성 결합 또는 용량성 결합과 같은 적절한 메커니즘에 의해 생성될 수 있다. 일부 실시형태에서, RF 전하 시퀀스가 벽 및 내부 전극 중 적어도 하나에 인가될 때 이온이 생성된다. 일부 실시형태에서, 벽 및 내부 전극 중 적어도 어느 하나는 먼저 초기 전하 시퀀스를 경과하여 환상공간의 일부 중성 기체를 이온화하고 이온 회전을 구동하는 부동한 전하 시퀀스로 전환할 수 있다. 예를 들어, 가스를 이온화하는데 사용되는 전하 분포는 내부 전극(724)에 높은 전위를 인가하는 동안 단순히 가둠 벽 전극(714)의 접지를 포함할 수 있다. 일부 실시형태에서는 부분적으로 이온화된 가스를 환상공간(740)에 도입할 수 있다.

[0112] 도 7a와 도 7b는 환상공간에서 이온 회전을 구동하는데 사용될 수 있는 두 개의 2진법 전하 분포를 도시하지만, 많은 대체 전하 시퀀스도 가능하다. 일부 전하 시퀀스에서, 전극은 일정한 시간 동안 접지 전위로 유지되거나 비대칭적인 전하 시퀀스를 가질 수 있다(예를 들어, 양 전위가 음 전위 지속시간의 2배로 유지됨).

[0113] 일부 실시형태에서, 당해 시스템은 축향 정자기장과 같은 자기장을 필요로 하지 않는다. 도 7a는 전극에 제1 전위 분포가 제공되어, 이온 구름 또는 이온 그룹과 같은 이온(704)이 $-\theta$ 방향에서 힘을 경험할 때, 제1 시점에서 취득한 당해 실시형태의 예시를 나타낸다. 도 7b는 전극에 부동한 전위 분포가 제공되어, 이온(704)이 $-\theta$ 방향에서 방위각 힘을 겪을 때 잠시 후의 도 7a의 실시형태를 도시한다.

[0114] 하이브리드 실시형태

[0115] 일부 실시형태에서, 원자로는 이온-중성물 결합으로 이온과 중성물을 회전하기 위한 로렌츠 힘과 진동 정전기장

양자를 생성하는 특징을 포함한다. 원자로는 운전의 모든 단계에서 이 메커니즘 중 하나 또는 두 개를 사용할 수 있다. 도 6a 내지 도 6f는 이런 운전예에 적합한 예시적 원자로를 도시한다. 도 6a는 원자로의 등거리 뷰이고, 도 6b는 z 방향에서 원자로의 뷰이며, 도 6c는 원자로의 등거리 단면도(도 6b의 선 A-A에 대응함)이고, 도 6d는 원자로의 측면도를 제공하며, 도 6e와 도 6f는 부동한 시점의 단면도(도 6d의 선 B-B에 대응함)이다. 도시된 실시형태에는 내부 링 자석(626)과 가둠 벽으로도 사용되는 동심 외부 링 자석(616)이 포함된다. 링 자석은 내부 및 외부 링 자석의 대응하는 표면이 같도록 같은 방향을 향하는 자극을 갖는다. 이 경우, 외부 표면은 북극(658)이고 내부 표면은 남극(659)이다. 일부 실시형태에서, 자석(658)의 내부 표면에는 하나 또는 복수의 재료 층이 추가되어 가둠 표면 재료가 자석 재료와 다르다. 동심 자석 사이 영역은 환상공간(640)을 형성하며, 환상공간(640)은 한 쌍 또는 복수 쌍의 전극 660a와 660b를 통해 z 방향에서 구속된다. 전극 쌍 660a와 660b에 서로 다른 전위를 인가할 때, 예를 들어 전극 660a에 양 전위를 인가하고 이와 동시에 전극 660b를 접지시키면 환상공간에서 기본적으로 z 방향에 평행되는 전기장을 생성한다. 환상공간에서 이온 생성 시, 직교 전기장과 자기장은 이온이 $-\theta$ 방향에서 방향각으로 회전(예: 도 6c 참조)하도록 한다. 전극 660b에 양 전위를 인가하고, 동시에 전극 660a를 접지시키면, 이온은 θ 방향에서 회전한다.

[0116] 일부 실시형태에서, 도 6a 내지 도 6e에 도시된 바와 같이, 복수의 전극 660a와 전극 660b는 환상공간을 따라 반경 방향으로 분포된다. 이 경우 도 7a와 도 7b에서의 원자로와 유사한 방식으로 원자로를 구동할 수 있다. 운전 중, 인접한 전극 쌍의 전위와 다른 기본적으로 비슷한 전위에 의해 매개 전극을 구동하여, θ 방향에서 국부적인 전기장을 생성한다. 도 6d와 도 6e에 도시된 바와 같이, 전극 쌍에 인가되는 전압을 제어된 순서에 따라 변조하여, 이온에 가해지는 정전력이 기본적으로 연속적인 방위각(θ 또는 $-\theta$ 방향)에서 변화되는 분량을 나타낼 수 있다. 어떤 구성에서, 원자로를 처음에 로렌츠 힘에 의해 이온과 중성물을 구동하는 방식으로 운전하고, 뒤이어 방금 설명한 교류 정전기장(6)을 이용하여 이온과 중성물을 구동하도록 구성될 수 있다.

[0117] 원자로 유형(크기)

[0118] 일 측면에서, 원자로를 제공하는 출력 파워에 따라 그룹으로 분류할 수 있다. 이 방식을 채택하여 본 토론의 목적을 위해 본 개시의 원자로를 소형, 중형 및 대형 원자로로 나눈다. 소형 원자로를 일반적으로 약 1-10kW의 전력을 생산할 수 있다. 일부 실시형태에서, 이런 원자로를 자동차에 전력을 공급하거나 가정에 전력을 공급하는 것과 같은 개인 응용에 사용된다. 다음 분류는 일반적으로 약 10kW-50MW의 전력을 생산하는 중형 원자로이다. 중형 원자로를 서버 팜과 같은 비교적 큰 응용과, 기차 및 잠수함과 같은 대형 차량에 사용될 수 있다. 대형 원자로를 약 50MW-10GW의 전력을 출력할 수 있도록 설계된 원자로로, 전력망이나 산업용 발전소의 부분적인 전력 공급과 같은 대규모 운영에 사용될 수 있다. 이 세 가지 보편적인 분류는 본 개시에서 언급 가능한 실제 종류를 제공하지만 본 개시의 원자로를 이 종류 중 어느 하나에 한정되는 것은 아니다.

[0119] 보호덮개 또는 가둠 벽의 표면적(둘레 길이와 축방향의 승적)은 일반적으로 원자로에서 생산될 수 있는 최대 전력을 제한한다. 큰 표면적을 갖는 보호덮개는 대면적의 내부 표면(예로, 도 1a의 122)에 대해 융합 반응을 지원한다. 소형 원자로에 있어서, 보호덮개의 내부 표면의 반경은 일반적으로 약 1센티미터 내지 약 2미터이며, 내부 표면의 표면적은 일반적으로 약 5입방 센티미터 내지 20입방 센티미터 사이이다. 중형 원자로에 있어서, 보호덮개의 내부 표면의 반경은 일반적으로 약 2미터 내지 약 10미터이며, 내부 표면의 표면적은 일반적으로 약 25입방 미터 내지 150입방 미터 사이이다. 대형 원자로에 있어서, 보호덮개의 내부 표면의 반경은 일반적으로 약 10미터 내지 약 50미터이며, 내부 표면의 표면적은 일반적으로 약 125입방 미터 내지 628입방 미터 사이이다. 어떤 경우, 내부 표면의 반경은 몇 킬로미터 수량급일 수 있으며, 스위스의 CERN 실험실에서 운영하는 대형 강입자 충돌기(LHC)와 비슷한 부지면적을 갖는다. 상술한 각 값은 단일 원자로가 독립적 또는 연속 배열된 원자로의 일부(이하 설명)라고 가정한 것이다.

[0120] 제1 실시형태

[0121] 도 1a 내지 도 1c는 로렌츠 회전자를 이용하여 대전입자와 융합 반응물을 회전시키는 동심 전극을 갖는 원자로의 구조를 도시한다. 당해 실시형태는 내부 전극(120), 외부 전극(110) 및 두 개 전극 사이의 환상공간(140)을 갖는다. 운전 중, 이런 전극 사이에 인가되는 전위는 기본적으로 r 방향에 있는 전기장(144)을 생성한다. 비록 도시되지 않았지만, 당해 실시형태는 내부 전극과 외부 전극 사이 z 방향에서 자기장(146)을 생성하는 영구 자석 또는 초전도 자석과 같은 전자석을 더 포함한다. 도 1c에 도시된 바와 같이, 반경방향의 전기장과 축방향의 자기장으로 인해, 전극 사이에서 이동하는 대전입자는 방위각 방향 힘 또는 로렌츠 힘을 받는다.

[0122] 도 1a에 도시된 바와 같이, 원자로에는 내부 전극(112)의 외부 표면과 외부 전극(122)의 내부 표면을 반경방향으로 분리하는 간격(142)이 있다. 내부 전극과 외부 전극의 상대 표면의 표면적이 원자로 규모를 결정할 수 있

지만, 반경 방향의 간격은 광범위한 응용에서 상대적으로 일정하게 유지될 수 있다. 어떤 경우, 간격의 상한은 환상공간의 가스를 이온화하고 플라즈마 전류를 생성하는데 사용되는 전력의 제한을 받을 수 있지만, 간격의 하한은 제조 공차(manufacturing tolerances)의 제한을 받는다. 간격이 0.1밀리미터보다 작은 것과 같이 아주 작으면, 전극 사이의 정렬이 잘못될 경우 전극이 접촉하여 단락이 발생할 수 있다. 물론 제조 공차가 더욱 높은 정밀도를 허용하기에 작은 간격은 실행 가능하다. 일부 실시형태에서, 간격은 약 1밀리미터 내지 약 50센티미터 사이, 일부 실시형태에서 간격은 약 5센티미터 내지 약 20센티미터 사이일 수 있다. 어떤 경우, 간격은 원자로의 r방향 및 z 방향 중 적어도 하나의 변화를 따를 수 있다. 예를 들어, 내부 전극의 반경은 z축의 위치를 따르는 함수로서 변화할 수 있지만, 외부 전극의 내부 표면의 반경은 변하지 않는다.

[0123] 외부 전극에 의해 생성되는 가둠 벽의 z 방향 길이는 원자로의 반경 방향 치수와 발전 요구에 의해 결정될 수 있다. 일부 실시형태에서, 외부 전극의 z 방향 길이는 자기장을 생성하는 자석의 유형과 구성에 의해 제한될 수 있다. 예를 들어, 영구 자석을 z 방향에 따라 환상공간의 일단(도 11에 도시된 바와 같음)에 배치하면 외부 전극의 z 방향은 약 5 내지 10센티미터에 제한된다. 그러나 복수의 영구 링 자석(도 16 및 도 17에서와 같음) 또는 전자석 또는 초전도 자석(도 10에 도시된 바와 같음)을 이용하여 자기장을 생성하는 경우, Z 방향에서 외부 전극의 길이가 훨씬 더 길어질 수 있다. 예를 들어, 외부 전극은 약 1미터 내지 10미터 사이일 수 있다. 일반적으로, 외부 전극(110)의 길이는 내부 전극(120)의 길이와 비슷하나 항상 그런 것은 아니다. 일부 실시형태에서, 내부 전극은 한 방향 또는 두 방향에서 연장되어 외부 전극을 초과할 수 있다. 일부 실시형태에서, 외부 전극의 길이는 내부 전극의 길이를 초과하여, 외부 전극이 한 방향 또는 두 방향에서 연장되어 내부 전극을 초과할 수 있다.

[0124] 도 1a 내지 도 1b에서 고체 원형의 내부 전극과 원형의 외부 전극을 결합 사용하는 구성을 도시하지만, 이 구성에서 많은 전극 모양의 순열을 사용할 수 있다. 대체 실시형태의 몇 가지 비제한적인 사례는 당해 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 있어서 명백한 것으로, 도 8a 내지 도 8b와 도 9a 내지 도 9c를 참조하여 토론하기로 한다. 설명적 예시를 몇 개 제공하였지만, 얼마나 많은 추가 전극 형상이 가능한지를 독자들은 쉽게 이해할 수 있다.

[0125] 도 8a에 도시된바와 같이, 일부 실시형태에서, 내부 전극(820)은 시종일관 솔리드가 아닌 고리 모양 구조일 수 있다. 내부 전극 내에서 방열을 위해 캐비티 또는 개방된 공간을 제공할 수 있으며, 도 17a 내지 도 17c에 도시된 것과 같은 내부 자석 또는 원자로 내의 다른 부품을 이용할 수 있다. 어떤 경우, 내부 전극과 외부 전극의 반경은 원자로의 z 방향을 따라 변화할 수 있다. 예를 들어, 도 8a에 도시된 바와 같이, 내부 전극(820)은 z 방향을 따라 일부 위치에서 더 큰 원주를 가짐으로써, 해당 위치에서의 간격(842)을 줄일 수 있다. 반대로, 균일한 내부 전극은 z 방향을 따라 변화하거나 심지어 파동하는 내부 반경을 가지는 외부 전극과 함께 사용될 수 있다. 어떤 경우, 예를 들어 도 8b에 도시된 실시형태에서, 내부 전극(820)의 반경과 외부 전극(810)의 내부 표면의 반경은 모두 z 방향에서 변화하여 간격(842)이 원자로의 z 방향을 따라 유지하도록 한다.

[0126] 도 9a 내지 도 9c는 비 원형 횡단면을 갖는 원자로의 횡단면을 도시한다. 도시된 바와 같이, 일부 실시형태에서, 내부 전극(920)과 외부 전극(910)은 방위각(즉, θ 방향)에서 변화하는 반경을 가질 수 있다. 어떤 경우, 내부 전극과 외부 전극의 표면(912 및 922)은 도 9a에 도시된 것과 같은 타원형 단면을 가질 수 있다. 어떤 경우, 타원형 횡단면을 갖는 전극의 장축과 단축은 예를 들어 1% 미만과 같이 아주 작은 백분율의 차이가 난다. 일부 실시형태에서, 표면 912 및 표면 922 중 적어도 하나는 다변형 횡단면을 형성할 수 있다. 예를 들어, 도 9b에 도시된 원자로는 칠변형 횡단면을 갖는다. 일부 실시형태에서, 표면 912 및 표면 922는 4개 또는 그 이상의 변을 가질 수 있으며, 일부 실시형태에서 8개 변보다 많고, 일부 실시형태에서는 16개 변보다 더 많다. 어떤 경우, 표면 912에 각이 있는 것은 유리할 수도 있다. 예를 들어, 회전 입자는 모퉁이 위치에서 타겟 재료와 충돌하는 속도가 증가되어 융합 비율이 증가될 수 있다. 일부 실시형태에서, 도 9c에 도시된 원자로 구성에서 표면 912와 표면 922에 의해 제한되는 내부 전극 또는 외부 전극의 반경은 θ 방향에서 변화하여, 모든 표면의 횡단면이 사인, 거치문 모양 또는 방형과 모양과 같은 무늬의 가장자리를 갖도록 한다. 도시된 실시형태에서 내부 전극과 외부 전극은 동축이지만 일부 실시형태에서는 내부 전극과 외부 전극의 축선이 오프셋된다. 예를 들어, 환상공간이 편심되어 내부 전극과 외부 전극으로 하여금 기본적으로 평행되지만 동일 선상에 있지 않는 z 방향 축을 갖도록 한다.

[0127] 내부 전극과 외부 전극에 사용되는 재료는 원자로의 크기, 선정된 융합 반응물 및 융합 원자로의 운전을 제어하는 기타 매개 변수에 의해 결정될 수 있다. 일반적으로, 비용, 열성능과 전기성능 면에서 많이 절충해야 하는데 이는 어떤 재료를 선택하여 원자로에 사용하는가를 결정한다. 텅스텐, 탄탈륨과 같은 내화 금속은 극히 높은 용융온도와 고온에서 상대적으로 높은 전기전도성을 갖고 있기에, 소형 원자로로는 내화 금속을 사용할 수 있다. 그

러나 대형 원자로에서 이 재료를 사용하면 원자로의 비용이 크게 증가할 수 있다.

- [0128] 일부 실시형태에서, 전극 재료는 원자로 운전 기간에 방출하는 열 에너지를 견딜 수 있을 만큼 충분히 높은 용융온도를 갖는다. 외부 전극은 그 위에 융합 반응이 발생할 수 있는 가동 벽을 형성하며 열 에너지의 방출은 일반적으로 아주 크다. 규칙적인 사용을 위해, 외부 전극 재료의 용융온도는 원자로 운전 중 전극이 도달한 온도보다 높아야 한다. 어떤 경우, 전극에 사용되는 재료의 용융온도는 약 800℃보다 높으며, 어떤 경우, 전극의 용융온도는 약 1500℃보다 높고, 다른 경우, 용융온도는 약 2000℃보다 높다.
- [0129] 많은 실시형태에서, 전극 재료가 높은 열전도성을 갖는 것이 이롭다. 정상상태에서 열량이 전극으로 도입되는 동등한 속도로 전극(예를 들어, 열교환기 사용)에서 열량을 추출할 수 있는 경우 원자로의 연속적인 운전에 적합하다. 전극 재료가 높은 열전도성을 갖고 있을 때 열량이 추출되는 속도를 개선하고 과열에 대한 우려를 줄일 수 있다. 어떤 경우, 열전도율은 약 $10 \frac{W}{m^2K}$ 보다 크고, 어떤 경우, 열전도율은 약 $100 \frac{W}{m^2K}$ 보다 크며, 어떤 경우, 열전도율은 약 $200 \frac{W}{m^2K}$ 보다 크다.
- [0130] 어떤 경우, 예를 들어 원자로가 펄스 운전으로 구성될 때, 높은 열용량을 갖는 것이 전극 재료에 유리할 것이다. 전극은 높은 열용량을 가지므로, 원자로 운전 중 더 느린 속도로 온도가 증가한다. 펄스 운전에 이용될 때, 생성하는 열 에너지는 펄스 사이에서 계속하여 전극에 의해 흡수될 수 있어, 전극이 용융온도에 도달하는 것을 막는다. 어떤 경우, 전극의 비열은 약 0.25J/g/℃보다 높아야 하고, 어떤 경우, 비열은 약 0.37J/g/℃보다 높아야 하며, 어떤 경우, 비열은 약 0.45J/g/℃보다 높아야 한다.
- [0131] 일부 실시형태에서, 전극 재료는 상대적으로 열 팽창 계수가 낮다. 어떤 경우, 원자로의 낮은 열 팽창 계수에 의해 더 큰 온도 범위에서 성능이 향상될 수 있다. 예를 들어, 원자로가 실온에서 약 1밀리미터의 간격을 갖는 경우, 정상상태 운전 기간에 내부 전극 및 외부 전극 중 적어도 하나의 팽창으로 인하여 간격이 비례적으로 훨씬 작아질 수 있다. 열 팽창 계수가 너무 높으면 외부 전극과 내부 전극이 접촉하여 단락이 일어날 수 있다. 또는 원자로가 작동 온도에서 일정한 간격을 갖도록 설계된 경우, 처음 원자로를 켤 때 간격이 예상보다 클 수 있다. 어떤 경우, 전극 재료의 선 열 팽창 계수(linear coefficient of thermal expansion)는 약 $4.3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 보다 작고, 어떤 경우, 전극 재료의 선 열 팽창 계수는 약 $6.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 보다 작으며, 다른 경우, 전극 재료의 선 열 팽창 계수는 약 $17.3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 보다 작다.
- [0132] 원자로 운전을 편리하게 하기 위해, 전극은 열 순환 동안 열화 저항과 같은 기계적 특성을 갖도록 설계될 수 있다. 어떤 조건에서, 스테인리스강과 같은 일부 재료들은 열 순환으로 인해 취약해지고 나중에는 피로를 겪는다. 원자로가 펄스 작업으로 운전되고 전극이 급속하게 가열 및 냉각되면 내부 응력이 발생할 수 있다. 어떤 경우, 단일 본체 재료를 가진 전극을 이용하거나 비슷한 팽창 계수를 가진 두 가지 또는 여러 가지 재료를 이용하여 열부하 순환의 영향을 줄일 수 있다. 어떤 재료는 고온에서 크리프(creep)로 인해 변형을 겪을 수 있다. 따라서, 상승된 온도에서 강도를 유지할 수 있는 전극 재료를 선택할 수 있다.
- [0133] 전극 재료는 화학적으로 불활성일 수 있으며, 원자로의 수명 기간에 산화, 부식 또는 기타 화학 분해의 뚜렷한 영향을 받지 않을 수 있다. 전극 재료에 대한 다른 한 고려사항은 강자성(ferromagnetic) 여부이다. 어떤 경우, 강자성 재료를 사용하면 환상공간 내에서 예기한 자기장의 구축 또는 유지에 방해가 될 수 있는 내부 국소화된 자기장이 생성되는 경우가 있다.
- [0134] 동심 전극을 갖는 로렌츠 구동 원자로에서, 내부 전극과 외부 전극은 충분히 전기를 전도하는 재료로 제조되어, 운전 중 전위가 전극의 표면에 균일하게 인가될 수 있도록 한다. 일부 실시형태에서는, 실온에서 내부 전극 재료 또는 외부 전극 재료의 저항률은 약 $7 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ 보다 작으며, 어떤 경우 약 $1.68 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ 보다 작다. 실온에서 전기를 전도하는 외, 원자로가 작동하지 않을 때 내부 전극과 외부 전극은 더 높은 작업 온도에서 전기를 전도할 수 있다. 운전 중, 내부 전극 또는 외부 전극은 약 600℃ 내지 약 2000℃의 온도에 도달할 수 있다. 운전 중, 외부 전극 재료의 저항률은 약 1.7E-8Ωm보다 크지 말아야 하며, 어떤 경우, 약 1E-6Ωm보다 크지 않아야 한다.
- [0135] 반응물 또는 부산물에 수소 또는 헬륨이 포함되는 경우, 재료가 수소 취성에 대한 저항력을 고려해야 한다. 수소 취성은 스테인리스강과 같은 금속이 수소 원자 또는 수소 분자의 도입과 뒤따른 확산으로 인해 취약해지고 어떤 경우 끊어지는 과정을 말한다. 수소의 용해도는 비교적 높은 온도에서 증가되기에, 원자로 운전 중 수소가

전극 재료로의 확산이 증가할 수 있다. 농도 경사도가 보조할 때, 그중 금속 외부의 수소는 내부의 수소보다 훨씬 많다. 예를 들어, 가둠 벽에 부딪히는 수소 원자의 원심 치밀화로 인한 경우, 확산 속도는 한층 더 증가될 수 있다. 금속 내의 단일 수소 원자는 점차 재결합하여 수소 분자를 형성하고, 금속 내에서 내부 압력을 생성한다. 추가적으로, 또는 다른 방법으로, 혼입된 수소 분자 자체가 내부 압력을 생성한다. 이 압력은 금속의 연성, 인성, 인장강도의 수준이 하강될 정도로 증가하고, 균열이 형성되고 전극이 효력을 상실할 때까지 증가할 수 있다. 금속에 탄소(예를 들어, 탄화강)가 포함된 일부 상황에서, 전극은 수소 원자가 강철로 확산되고 탄소와 재결합되어 메탄 가스를 형성하는 수소침식 과정의 영향을 쉽게 받는다. 메탄 가스가 금속 내에 모이면 내부 압력이 생성되어 장치의 기계적 고장을 일으킬 수 있다. 본 문서의 다른 부분에서 수소 취화 현상의 영향을 줄이는 방법을 기술하지만, 통상적으로 전극 설계 시 재료가 취화 현상에 대한 민감성을 고려한다. 어떤 경우, 전극은 수소 취화 현상에 저항하는 백금, 백금 합금, 그리고 질화붕소와 같은 세라믹을 포함할 수 있다. 금속의 격자 속에 있는 수소의 영향이 덜 해롭도록 야금 구조를 수정하는 경우도 있다. 예를 들어, 어떤 경우 금속 또는 금속 합금은 열 처리를 거쳐 필요한 야금 구조를 얻을 수 있다.

[0136] 다양한 실시형태에서, 내부 전극과 외부 전극은 주로 금속과 금속 합금으로 구성된다. 일부 실시형태에서, 내부 전극 및/또는 외부 전극의 적어도 일부는 높은 용융온도를 갖는 내화 금속으로 제조된다. 내화 금속은 화학적으로 불활성적인 것으로 알려져 있으며, 분말 야금 제조에 적합하고, 아주 높은 온도에서 크리프에 대해 안정적이다. 적합한 내화 금속의 실례로는 니오븀, 몰리브덴, 탄탈륨, 텅스텐, 레늄, 티타늄, 바나듐, 크롬, 지르코늄, 하프늄, 루테튬, 로튬, 오스뮴과 이리듐이 있다. 일 예시에서 적어도 외부 전극은 탄탈륨을 포함한다.

[0137] 일부 실시형태에서, 스테인리스강을 이용하여 하나 또는 두 개이 전극을 제조한다. 스테인리스강의 장점은 피삭성과 내부식성을 포함한다. 어떤 경우, 전극은 적어도 부분적으로 인코로이(Incoloy)와 같은 비탄소계 스테인리스강으로 만들어지며, 이는 탄화 스테인리스강보다 수소 취성에 대한 내성이 강하다. 어떤 경우, 전극은 적어도 부분적으로 인코넬(Inconel), 모넬(Monel), 하스텔로이(Hastelloys), 니모닉(Nimonic)과 같은 매우 높은 온도에서 강도를 유지하는 니켈 합금으로 만들어질 수 있다. 어떤 경우, 전극은 적어도 부분적으로 구리나 구리 합금으로 만들어진다. 어떤 경우, 전극은 열량을 추출하기 위해 내부 냉각을 위한 하나 또는 복수의 채널을 갖도록 구성되어, 극한의 온도에 견딜 수 있는 정도가 낮은 재료를 사용할 수 있게 한다.

[0138] 비록 수소, 중수소 또는 헬륨과 같은 작은 원자 용합 반응물을 흡수하면 전극의 기계적 고장을 초래할 수 있지만, 일부 운전 조건에서 어떤 재료의 해로운 취화 효과를 감소하거나 제거할 수 있다. 예를 들어, 어떤 조건에서 팔라듐-은 합금과 같은 수소 흡수 재료는 수소의 취성에 민감하지 않은 것 같다(Jimenez, Gilberto 외 "A comparative assessment of hydrogen embrittlement: palladium and palladium-silver (25 weight% silver) subjected to hydrogen absorption/desorption cycling (수소의 취성 비교평가: 수소의 흡착/탈착 순환을 겪는 팔라듐과 팔라듐-은(무게25 % 은))"(2016), 문서 전체가 본 출원에 인용되어 병합됨). 어떤 경우, 용합 반응물의 흡수는 용합 반응 속도를 증가할 수 있다. 예를 들어, 수소의 회전하는 가스 반응물은 외부 전극(또는 가둠 벽)에 고정된 정지해 있는 수소 원자와 충돌할 수 있다. 어떤 경우, 반응물이 내부 전극 및 외부 전극 중 적어도 하나를 통해 확산되도록 하여 반응물을 원자로에 제공한다. 어떤 경우, 용합 반응물을 전달하거나 용합 반응물 사이의 충돌 속도를 증가시키기 위해, 전극은 티타늄, 팔라듐 또는 팔라듐 합금을 포함할 수 있다.

[0139] 어떤 경우, 본 문서의 다른 부분에서 논의된 바와 같이, 외부 전극 또는 내부 전극은 높은 전자 방출률을 갖는 전자 방출 재료를 포함할 수 있다. 어떤 경우, 외부 전극은 용합 반응물이 포함된 타겟 재료를 포함할 수 있다. 어떤 경우, 타겟 재료는 용합 반응으로 인해 운전 중 소모된다. 예를 들어, 어떤 경우 6붕화 란타넘이 타겟 재료로 사용되며, 붕소-11 원자는 양성자-붕소 반응 중에 소모된다.

[0140] 제1 실시형태-전극:

[0141] 제1 실시형태에서, 외부 전극은 단일 재료로 만들어진 일체화로 되어 있으며, 기타 실시형태에서 외부 전극은 두 가지 또는 그 이상의 재료를 포함하는 층 구조 또는 분절 구조를 갖는다. 일부 실시형태에서, 외부 전극의 내부 표면(가둠 벽)은 용합 반응물의 재료가 포함된 타겟 재료 또는 전자 방출 재료를 포함한다. 어떤 경우, 타겟 재료 또는 전자 방출체는 가둠 벽의 전체 표면적을 덮을 수 있으며, 타겟 재료 또는 전자 방출체가 가둠 벽을 따라 하나 또는 복수의 분리된 위치(예를 들어, 도 21a 내지 도 21b의 전자 방출체에 도시된 바와 같음)에 위치하는 경우도 있다.

[0142] 어떤 경우, 외부 전극의 내층은 하나의 특성을 제공하는 반면, 더 하나의 외층은 다른 특성을 제공한다. 예를 들어, 가둠 벽 표면을 형성하는 내층은 높은 용융온도를 가질 수 있는 반면, 외층은 우수한 열 전도성 또는 전기 전도성을 가질 수 있다.

- [0143] 어떤 경우, 전극은 가둠 벽을 형성하는 재료 층을 포함할 수 있으며, 이는 전극의 나머지 부분보다 내 수소 취성이 높다. 어떤 경우, 전극에는 세라믹 코팅이 포함되는데, 이 세라믹 코팅은 수소 원자가 외부 전극의 격자에 침투하거나 벌크(bulk) 전극 재료의 열 절연을 제공하는 것을 방지할 수 있다. 일부 실시형태에서, 외부 전극은 질화알루미늄, 산화알루미늄 또는 질화붕소 층을 가질 수 있다. 질화붕소와 같이 실온에서 낮은 전기 전도성을 갖는 일부 재료에 열 처리를 진행하여 전기 전도성을 개선할 수 있다. 어떤 경우, 전극 표면에 재료를 추가하고 수소 취화를 감소시키는 표면 처리를 할 수 있다. 예를 들어, 전극이 탄탈륨과 같이 수소 취화에 민감한 재료로 만들어 졌을 때, 전극 표면에 소량의 귀금속을 첨가하여 취화를 감소할 수 있다. 어떤 경우, 귀금속은 전극 표면의 소부분만 덮을 수 있다. 예를 들어, 귀금속은 전극 표면의 약 50%이하, 30%이하 또는 10% 이하로 덮여, 전극의 수소 취화를 뚜렷하게 감소시킬 수 있다. 어떤 경우, 전극 표면에 소량의 백금, 팔라듐, 금, 이리듐, 로듐, 오스뮴, 레늄과 루테튬을 첨가하여 수소 취화를 감소시킬 수 있다. 어떤 경우, 귀금속의 작은 반점(예를 들어, 직경이 약 0.5인치)을 전극 표면에 리벳하거나 용접할 수 있다. 어떤 경우, 귀금속 분말을 원자로에 첨가하여, 정상 운전 중에 분말이 전극 표면에 스퍼터 될 수 있다. 어떤 경우, 예를 들어 원자로가 예정 시간 운전한 후, 귀금속을 주기적으로 전극 표면에 첨가할 수 있다.
- [0144] 슬리브의 내부 표면이 가둠 벽을 형성하도록 외부 전극의 내부 표면에 슬리브를 부착하는 경우도 있다. 어떤 경우, 슬리브는 타겟 재료를 제공하고, 전자 방출기를 제공하며, 외부 전극에 수소가 침투할 수 있는 장벽을 제공하거나 또는 외부 전극에 대한 열 보호를 제공하는 것 중 적어도 하나에 사용될 수 있다. 어떤 경우, 슬리브를 소모 및 교체하는 것 중 적어도 하나가 가능하다. 예를 들어, 슬리브에 소모될 수 있는 타겟 재료가 포함되어 슬리브는 최종 교체될 수 있다. 다른 경우, 슬리브는 수소 취화로부터 외부 전극을 보호하는 희생층 역할을 한다. 슬리브 자체가 수소 취화로 인해 효력을 잃는 경우, 전체 외부 전극보다 훨씬 낮은 비용으로 슬리브를 교체할 수 있다.
- [0145] 일부 실시형태에서, 외부 전극은 고에너지 대전입자가 전극을 통과할 수 있는 동시에 회전하는 중성물을 환상공간 내에 제한할 수 있는 다공 구조 또는 망 같은 구조를 가질 수 있다. 외부 전극을 통과하는 대전입자는 외부 자석의 자기장에 의해 유도될 수 있다. 어떤 경우, 탈출한 알파 입자가 알파 입자의 운동 에너지를 전기 에너지로 전환할 수 있는 하드웨어(본 문서의 다른 부분에서 논의됨)로 방향을 바꾼다. 어떤 경우, 외부 전극의 공극 크기는 약 100미크론보다 작을 수 있고, 약 1미크론보다 작은 경우도 있을 수 있다. 일반적으로 내부 전극의 구조는 외부 전극의 구조와 비슷하다. 외부 전극과 마찬가지로, 내부 전극은 단일 재료로 만들어 지거나, 두 가지 또는 다양한 재료로 만들어진 층 구조 또는 분절 구조를 가질 수 있다. 일부 실시형태에서, 내부 전극은 솔리드 실체일 수 있으며, 다른 실시형태에서 내부 전극은 내부 공간을 갖는다. 어떤 경우, 내부 전극은 내부 냉각을 위한 하나 또는 복수의 채널을 포함할 수 있다. 다양한 실시형태에서, 내부 전극은 전류를 제공하는 전원과 연결되며, 이 전류는 내부 전극에서 접지된 외부 전극으로 출력된다. 일부 실시형태에서 내부 전극은 타겟 재료 또는 전자 방출 재료를 포함하지 않지만, 외부 전극의 재료는 일반적으로 내부 전극에도 적합하다.
- [0146] 제1 실시형태-자석
- [0147] 도 10a 내지 도 10d는 초전도 자석과 같은 전자석을 통해 축방향 자기장을 인가하는 제1 실시형태를 도시한다. 도 10a는 원자로의 외부 전극을 둘러싸는 초전도 자석의 등거리 뷰를 나타낸다. 도시된 바와 같이, 자석은 외함(1056)을 포함한다. 도 10b는 초전도 자석의 외함(1056)을 제거하고 초전도 코일 권선(1054)을 노출하는 도 10a와 같은 투시도를 제공한다. 도 10c는 z축을 따라 관찰한 원자로의 투시도이고, 도 10d는 도 10a에 도시된 단면 선 A-A에 대응하는 등거리 단면 뷰이다. 도시된 바와 같이, 원자로는 외부 전극(1010), 내부 전극(1020)과 두 전극 사이를 한정하는 환상공간(1040)의 간격(10)을 갖는다. 도 10a의 화살표에 의해 도시된 전류는 원자로를 감고 있는 원자로의 초전도 코일 권선(1054)을 통과하여, 환상공간을 통해 기본적으로 z 방향에서 인가하는 자기장을 생성한다. 일부 실시형태에서, 초전도 자석은 약 1-20 테슬라(Tesla) 사이의, 환상공간을 통과하는 인가된 자기장을 생성하는데 사용된다. 인가되는 자기장은 1-5 테슬라 사이에 있는 경우도 있다. 코일 권선을 원자로 주변의 절연 외함(1056)에 배치하면, 당해 원자로는 -180℃ 이하와 같은 저온과 저압을 유지한다. 외함(1056)은 예를 들어 가스(예: He)의 단일 팽창 또는 초전도성 코일의 온도가 임계 온도보다 낮게 유지되도록 저온성 액체에 의해 냉각될 수 있다. 어떤 경우, 외함을 기계 냉각하여 극저온 유체의 모든 수요를 피면할 수 있다. 코일 권선은 니오븀-티타늄 또는 니오븀-주석, 비스무트 스트론튬 칼슘 구리 산화물(BSCC) 또는 이트륨 바륨 구리 산화물(YBCO)과 같은 초전도 재료로 만들 수 있다. 코일 권선은 절연 재료에 감을 수 있는 와이어 또는 테이프 형태를 채택할 수 있다. 어떤 경우, 코일 권선은 기계 안정성을 제공하기 위해, 앞에서 언급한 구리 매트릭스에 배치되는 초전도 재료 중 어느 하나를 선택할 수 있다. 일부 실시형태에서, 상업적으로 판매되는 초전도 자석은 Cryomagnetics, Inc.사와 같은 공급업체 또는 자기 공명 영상 장치(Magnetic Resonance Imaging

device)의 제조업체에서 공급될 수 있다. 어떤 경우, 알파 자기 분광계 실험에 사용되는 AMS-02 초전도 자석과 같은 초전도 자석을 이용할 수 있다. 초전도 자석이 축방향 자기장을 제공하는데 사용되는 경우, 가둠 벽의 반경은 일반적으로 초전도 자석의 반경보다 작다. 예를 들어, 어떤 경우 반경은 약 20미터에 국한될 수 있다.

[0148] 전자석 또는 초전도 자석이 외부 전극 주변에 배치되는 경우, 외부 전극(1010)과 자석(1056) 외함 사이에는 간격이 있으며 이 간격을 이용하여 자석에로의 열 전달을 감소할 수 있다. 어떤 경우, 열교환기를 외부 전극(1010)과 자기 외함 사이에 배치할 수 있다. 외부 전극이 다공 구조 또는 망 같은 구조를 가지는 경우, 외부 전극과 자석 외함 사이에 간격이 존재할 수 있는데, 이 간격은 대전입자가 외부 전극을 통과할 수 있도록 한다. 외부 전극을 통과하는 알파 입자와 같은 대전입자는 이온의 회전 운동에 의해 r방향에 구속되어, 외함(1056)에 충돌하지 못하게 된다. 어떤 경우, 외부 전극 사이의 간격은 약 3센티미터 내지 6센티미터이며, 약 6센티미터 내지 10센티미터인 경우도 있다. 본 문서의 다른 부분에서 설명한 바와 같이, 대전입자는 뒤이어 z 방향에서 에너지 전환 장치를 향해 이동하여 전기 에너지 생성에 사용된다. 도 11a 내지 도 11b는 실질상 축방향으로 향해 인가하는 자기장(즉, z 방향 가리킴)을 생성하기 위해 디스크 형상 자석(1150)을 환상공간(1140)의 임의 일단부에 배치하는 원자료를 도시한다. 도 11a는 z 방향을 따라 관찰한 투시도이고, 도 11b는 도 11a에서 가리키는 단면선의 등거리 단면 뷰를 제공한다. 도 11b에 도시된 바와 같이, 원자료는 내부 전극(1120), 가둠 벽(1112)을 형성하는 외부 전극(1110) 및 내부 전극과 외부 전극 사이의 환상공간을 구비한다. 자석(1150)을 환상공간의 어느 한 측에 배치하고, 동일한 자성 방향을 갖도록 한다. 예를 들어, 두 자석은 양의 z 방향을 향하는 북극을 가질 수 있거나, 두 개 자석은 음의 z 방향을 향하는 북극을 가질 수 있다. 설명되지는 않았지만, 일부 실시형태에서, 자석(1150)은 링 형상으로 되어 있어, 자석을 환상공간(1140)에 접근시키고 외부 전극(1112)의 내부 표면을 따라 실질상 균일한 자기 영역을 제공할 수 있다. 링 자석은 도 11에 도시된 디스크 형상 자석과 같은 극 방향을 갖는다.

[0149] 도 12a 내지 도 12b는 외부 전극(1212)의 내부 표면을 따라 z 방향에서 인가하는 자기장을 생성하기 위해, z 방향에서 동일한 극성을 갖는 복수의 영구 자석(1250)(예를 들어, 도 11에 도시된 디스크 형상 자석과 같은 방향)을 환상공간(1240)의 어느 일단부에 배치하는 다른 일 실시형태를 도시한다. 도 12a는 z 방향에서의 투시도를 제공하고, 도 12b는 도 12a에서 가리키는 단면선에 대응하는 등거리 단면 뷰를 제공한다. 일부 특징은 확대도(1201)에 표시되며, 환상공간이 내부 전극(1220), 외부 전극(1210) 및 영구 자석(1250)의 제한을 받는 상황을 설명한다. 복수의 작은 자석을 이용하여 대형 원자료에서 큰 단일체 자석과 연관된 비용 및 물리적 제한을 낮추는데 유용할 수 있다. 도 12a와 도 12b에 도시된 자석(1250)의 배열을 두 개의 마주하는 링 자석을 효과적으로 생성하는 것으로 볼 수 있다. 도시되지 않았지만, 일부 실시형태에서, 서로 다른 자석 형상의 조합은 축방향 자기장을 생성하는데 사용된다. 예를 들어, 환상공간의 일측에 링 자석을 사용하고, 다른 일측에 복수의 막대 자석을 사용할 수 있다.

[0150] 도 13a 내지 도 13c는 단일 내부 전극(1320)을 갖는 원자료(1300)가 z 방향을 따라 배열된 영구 자석(1350)에 의해 분리된 복수의 환상공간(1340)을 갖는 일 실시형태를 도시한다. 도시된 바와 같이, 원자료는 내부 전극(1320), 가둠 벽(1312)을 형성하는 복수의 외부 전극(1310)(벽 세그먼트의 조합) 및 각각의 외부 전극과 내부 전극 사이의 환상공간(1340)을 구비한다. 도 13a는 z 방향을 따라 관찰한 투시도를 제공하고, 도 13b와 도 13c는 도 13a에서 가리키는 대응하는 단면선의 단면도와 등거리 단면도를 제공한다. 영구 자석이 환상공간의 임의 일단부에 배치될 때, z 방향의 환상공간의 길이는 영구 자석을 통해 생성되는 자기장 강도의 제한을 받는다. 어떤 경우, 환상공간은 예를 들어 약 5센티미터 또는 10센티미터에 한정될 수 있다. 복수의 환상공간(1340) 사이에 z 방향으로 자석(1350)을 배열함으로써, 외부 전극(1310)의 가둠 벽(1312) 상의 총 표면적을 증가할 수 있다. 이전 실시형태에서와 마찬가지로, 각각의 자석(1350)은 z축을 따라 동일한 방향을 갖는다. 이 설계는 각각의 자극이 인접한 환상공간에 인가하는 자기장을 형성하는데 유리하기에, 환상공간 사이의 영구 자석을 효과적으로 이용할 수 있다. 기술된 실시형태가 링 자석을 이용하는 것으로 나타나 있지만, 많은 다른 형상을 이용할 수도 있다. 예를 들어, 환상공간에 인접한 각각의 자석은 많은 작은 자석으로 구성되며, 이런 작은 자석들은 공동으로 환형 구조(도 12a 내지 도 12b 참조)를 형성한다. 일부 실시형태에서, 외부 전극(1310)을 전기적으로 절연된 물리적으로 구별되는 부분으로 나눌 수 있다. 일부 실시형태에서, 예를 들어, 외부 전극은 일체화되거나 또는 다른 방식에 의해 전기적으로 연결하여, 각각의 환상공간(1340)에 대응하는 각각의 외부 전극을 접지시키는 것이다.

[0151] 도 14a 내지 도 14c는 단일 원자료 구조(1400)가 z 방향을 따라 배열된 영구 자석(1450)에 의해 분리된 복수의 환상공간(1440)을 갖는 일 실시형태를 도시한다. 도시된 바와 같이, 원자료는 복수의 내부 전극(1420), 가둠 벽(1412)을 형성하는 복수의 외부 전극(1410)을 가지며, 가둠 벽(1412)은 각 세트 전극 사이의 환상공간(1440)에

사용된다. 도 14a는 z 방향의 투시도를 제공하고, 도 14b와 도 14c는 도 14a에서 가리키는 대응하는 단면선의 단면도와 등거리 단면도를 제공한다. 도 14a 내지 도 14c의 실시형태는 도 13a 내지 도 13c의 실시형태에서와 같이 링 자석과 단일 내부 전극을 사용하는 것이 아니라, 디스크 형상의 자석과 복수의 내부 전극 세그먼트를 사용한다. 도 13a 내지 도 13c의 대응하는 특징에 대한 설명은 도 14a 내지 도 14c의 실시형태에 적용된다. 일부 실시형태에서, 설명되는 원자로는 에너지 수요에 따라 환상공간의 부분집합만 사용하여 작동될 수 있다. 예를 들어, 일부 실시형태에서, 융합 반응물을 하나의 환상공간에만 도입하고, 전압 전위를 당해 환상공간에 인접한 내부 전극에만 인가한다. 이러한 방식으로 원자로의 에너지 출력은 에너지 수요를 충족시키기 위해 제어될 수 있으며, 심지어 필요하면 실시간 제어가 가능하다. 따라서, 일부 실시형태에서, 각각의 내부 전극(1420)과 외부 전극(1410) 중 적어도 하나는 독립적으로 제어 가능하다.

[0152] 도 15a 내지 도 15c는 일련의 링에 의해 생성되는 자기장을 설명하며, 자석(1550)은 실질상 같은 축에 있고 같은 방향을 갖는다. 도 15a는 세 개 자석의 등거리 뷰이고, 도 15b는 자석의 공유 축선을 따르는 뷰를 설명하고, 도 15c는 도 15b의 선A-A에 대응하는 단면 뷰이다. 이전 실시형태에서 z 방향에서 환상공간을 오프셋하는 자석을 사용하였지만, 자석은 r방향 반경방향에서 환상공간을 오프셋할 수도 있다. 도 15c의 점선에 표시된 것과 같이, 각각의 링 자석은 개별적으로 고려할 때, 북극에서 시작하여 남극에서 끝나는 자기장(1545)을 생성한다. 복수의 링 자석을 서로 인접하게 배치할 때, 순수 효과는 단일 자기장이 중첩되고 기본적으로 공유축을 따라 방향을 가리키는 조합된 자기장이며, 예를 들어 솔리드 자기력선(1546)으로 표시된 것과 같다. 이 자석 구성은 영구 자석을 사용하는 동시에 원자로 환상공간의 가능한 길이를 연장하는데 사용할 수 있다.

[0153] 도 16a 내지 도 16c는 반경방향으로 오프셋된 링 자석(1650)을 이용하여 환상공간을 통과하는 축 방향 자기장을 생성하는 실시형태를 도시한다. 도시된 바와 같이, 원자로는 단일 내부 전극(1620), 가둠 벽(1612)을 형성하는 단일 외부 전극(1610)을 가지며, 가둠 벽(1612)은 전극 사이의 환상공간(1640)에 사용된다. 도 16a는 z 방향을 따라 관찰한 투시도를 제공하고, 도 16b와 도 16c는 도 16a에서 가리키는 대응하는 단면선의 단면도와 등거리 단면도를 제공한다. 각 자석(1650)은 z 방향을 따라 같은 극성을 가진다. 예를 들어, 설명된 바와 같이, 각 자석(1650)은 양의 z 방향을 마주 향하는 남극을 갖는다. 이 실시형태는 z-방향에서 환상공간을 확장하여, 가둠 벽(1610)에서 더욱 큰 표면적을 만들고, 더욱 큰 전력 출력 전위를 허용한다. 도 13과 도 14의 대응되는 실시형태의 중첩 특징은 도 16a 내지 도 16c의 실시형태에 응용 가능하다.

[0154] 도 17a 내지 도 17c는 반경방향으로 오프셋된 자석(1750, 1752)을 이용하여 단일 환상공간을 통과하는 축 방향 자기장을 생성하는 실시형태를 도시한다. 도시된 바와 같이, 원자로는 단일 내부 전극(1720), 가둠 벽(1712)을 형성하는 단일 외부 전극(1710)을 가지며, 당해 가둠 벽(1712)은 전극 사이의 단일 환상공간(1740)에 사용된다. 도 17a는 z 방향을 따라 관찰한 원자로의 투시도를 제공하고, 도 17b와 도 17c는 도 17a에서 가리키는 대응하는 단면선의 단면도와 등거리 단면도를 제공한다. 도 17a 내지 도 17c의 실시형태는 내부 전극(1620)의 내부 영역에 추가 자석(1752)을 배치하기에 도 16a 내지 도 16c에서 설명한 실시형태를 초과한다. 설명된 바와 같이, 추가 자석(1752)은 z 방향을 따라 외부 자석(1750)과 같은 방향을 가진다. 일부 실시형태에서, 도 17b와 도 17c에 도시된 바와 같이, 내부 링 자석(1752)은 z 방향에서 외부 링 자석(1750)과 정렬된다. 일부 실시형태에서, 내부 링 자석은 외부 링 자석에 오프셋되거나, 자석 사이 간격이 외부 자석 간격과 다를 수 있다. 일부 실시형태에서, 내부 자석은 외부 자석과 다른 형상을 채택할 수 있다. 예를 들어, 내부 자석은 막대 자석일 수 있다.

[0155] 일부 실시형태에서, 영구 자석은 희토류 원소나 희토류 원소의 합금으로 만들어 진다. 적합한 자석의 사례에는 사마륨-코발트 자석과 네오디뮴 자석이 포함된다. 현재 알려진 또는 나중에 개발되는 다른 강한 자석은 사용에 적합할 수 있다. 일부 실시형태에서, 영구 자석은 환상공간에서 약 0.1 내지 1.5 테슬라의 자기장을 생성하는데 사용될 수 있으며, 영구 자석이 환상공간에서 약 0.1 내지 약 0.5 테슬라의 자기장을 생성하는 경우도 있다.

[0156] 모든 원자로는 영구 자석을 필요로 하는 것은 아니다. 도 10a 내지 도 10d에 해석된 바와 같이, 일부는 전자석 또는 초전도 자석을 사용한다. 일부 원자로는 영구 자석과 전자석 중 두 가지 또는 그 이상의 조합을 사용한다. 도 18a 내지 도 18d는 전자석을 통해 축방향 자기장을 인가하는 제1 실시형태를 도시한다. 도시된 바와 같이, 원자로는 내부 전극(1820), 가둠 벽(1812)을 형성하는 외부 전극(1810)을 가지며, 당해 가둠 벽(1812)은 전극 사이의 환상공간(1840)에 사용된다. 도 18a는 원자리에 배치된 전자석의 등거리 뷰를 도시한다. 도 18b는 z 방향을 따른 원자로의 투시도를 제공하고, 도 18c와 도 18d는 도 18b에서 가리키는 대응하는 단면선의 단면도와 등거리 단면도를 제공한다. 도 18c의 자기력선에 도시된 바와 같이, 전류는 z 방향에서 원자로를 감고 있는 코일 권선(1854)를 통과하여, 원자로를 통해 기본적으로 z 방향에서 인가하는 자기장을 생성한다. 전기 전도 코일의 전류는 AC전원 또는 DC전원에 의해 공급된다. 전기 전도 코일이 AC 전원으로 구동되는 경우, 내부 전극 및

외부 전극 중 적어도 하나도 같은 주파수의 AC 전원으로 구동될 수 있다. 이렇게 하면 대전입자의 회전이 자기장의 교번 극성과 전기장이 동기화되지 않은 경우에 발생하는 방향의 교대가 아닌 같은 방향을 유지하도록 한다. 코일은 구리, 알루미늄, 금 또는 은과 같은 전기 전도성 재료로 만들어질 수 있다. 일부 실시형태에서, 코일은 외부 전극을 감는 와이어 형태를 채택하며, 코일을 외부 전극 주변에 있는 단독적인 외함에 배치하는 경우도 있다.

[0157] 역방향 전극 실시형태

[0158] 앞에서 도 5a 내지 도 5c에서 역방향 전극 회전자에 대해 기술했다. 일반적으로, 별도의 설명이 있는 경우를 제외하고, 제1 실시형태에 대응하는 전극의 구조도 역방향 전극 회전자를 설명한다. 예를 들어, 내부 전극과 외부 전극에 사용되는 재료, 전극 사이의 간격(도 5a의 542)과 z 방향에서 자기장을 생성하기 위한 자석의 구성은 동심 전극 원자로에서 설명한 것과 같다. 그러나, 아래에서 해석하는 바와 같이, 일부 실시형태에서는 구조 구성과 재료 중 적어도 하나는 서로 다른 것을 사용한다(예를 들어, 내부 전극에 서로 다른 재료 사용).

[0159] 도 5d는 역방향 전극 회전자의 교차 선택을 도시한다. 내부 전극에 음전압을 인가하고 외부 전극을 접지시키며, 내부 전극을 접지시키고 외부 전극에 정전위를 인가하거나, 내부 전극에 외부 전극보다 음전위를 더 인가하여, 음의 r방향에서 전기장을 인가할 수 있다. 내부 전극과 외부 전극 중 적어도 하나를 통해 전위를 인가하여 전기장을 생성하는 경우, 환상공간(540)의 양전하를 띤 입자는 내부 전극(520)으로 끌려 당겨진다. 대전입자가 안으로 이동할 때, 로렌츠 힘은 방위각으로 입자를 가속하며, 이는 경로(503)에 표시된 나선선 흔적을 초래할 수 있다. 전반 이온-중성물 결합에서, 환상공간의 중성물은 양전하를 띤 입자와 함께 공동으로 회전한다. 내부 전극과 외부 전극 사이 전위 차로 인해, 내부 전극의 나머지 전자는 전극 표면에 근접하는 전자가 풍부한 영역(532)을 형성하며, 로렌츠 힘에 의해 양전하를 띤 입자와 같은 방향으로 회전한다. 다른 부분에서 논의되었던 바와 같이, 당해 전자가 풍부한 영역은 융합 핵 사이의 쿨롱 장벽을 감소할 수 있다. 어떤 경우, 당해 전자가 풍부한 영역은 내부 전극의 표면에서 약 100미크론 내지 약 3밀리미터 확장될 수 있다.

[0160] 어떤 경우, 양전하를 띤 입자가 안으로 이동할 때, 양전하를 띤 입자가 내부 전극과 접촉하거나 양전하를 띤 입자가 전자가 풍부한 영역에서 자유전자를 만나면, 대전종의 재결합이 일어난다. 어떤 경우, 양전하를 띤 입자는 라모(Larmor) 반경(502)에서 내부 전극 궤도를 에워 싸고 운행할 수 있다. 일부 실시형태에서, 양전하를 띤 입자의 농도는 반경방향에서 변화할 수 있다. 예를 들어, 외부 전극 근처보다, Larmor 반경에서 환상공간을 둘러싸는 양전하를 띤 입자의 농도가 더욱 높을 수 있다. 대전입자의 이러한 경사도는 원심력으로 인해 중성물의 농도가 더 높고 중성물을 운동으로 유도하는 양전하를 띤 입자가 더 적은 외벽 근처에서 더 느리게 움직이는 입자가 있는 환상공간 내의 속도 분포를 초래할 수 있다.

[0161] 일부 실시형태에서, 내부 전극은 탄탈륨, 텅스텐, 구리, 탄소 또는 6붕화 란탄과 같은 단일 재료로 구성될 수 있다. 어떤 경우, 내부 전극은 전자 방출 재료와 타겟 재료(520b) 중 적어도 하나가 도포된 전기 전도 코어(520a)를 갖는다. 예를 들어, 내부 전극은 전기 전도 재료와 내열 재료(예를 들어, 텅스텐)로 만들어진 코어를 가질 수 있으며, 이 코어에는 6붕화 란탄, 질화붕소 또는 다른 한 가지 붕소를 함유하는 재료가 도포되어 있다. 어떤 경우, 내부 전극의 직경은 약 1센티미터 내지 약 3센티미터 사이이며, 약 4센티미터 내지 약 6센티미터인 경우도 있다. 어떤 경우, 내부 전극은 미소한 횡단면을 갖는데, 이는 필라멘트 또는 와이어일 수 있다. 이런 실시형태에서, 내부 전극의 직경은 약 0.5밀리미터보다 작거나 0.1밀리미터보다 작거나 약 0.05밀리미터보다 작을 수 있다. 어떤 경우, 내부 전극은 z 방향에서의 길이가 약 3센티미터 내지 약 10센티미터 연장될 수 있다. 어떤 경우, 내부 전극은 z 방향에서 작을 수 있으며, 예를 들어, 약 3센티미터보다 작거나 약 1센티미터보다 작을 수 있다. 일부 실시형태에서, 전극은 z 방향에서 훨씬 더 길 수 있으며, 예를 들어 약 20센티미터 이상일 수 있다. 어떤 경우, 역방향 전극 원자로에 사용되는 z 방향의 가둠 영역(내부 전극과 외부 전극이 중첩되는 길이)은 내부 전극과 외부 전극 중 적어도 하나에 전하를 인가하는 전원에 의해 제한될 수 있다. 어떤 경우, z 방향의 길이는 가둠 영역 내의 가스 압력에 의해 결정될 수 있다. 어떤 경우, 가스 압력이 매우 낮은 압력으로 감소하여 z 방향에서 증가되는 길이를 허용하면 환상공간 내에서 플라스마를 생성하는데 필요한 전력을 낮출 수 있다.

[0162] 도 19a는 능동적으로 내부 전극을 냉각하는 몇 가지 방법을 보여준다. 어떤 경우, 내부 전극(1910)은 유체가 통과하면서 열을 제거하는 내부 통로(1928)를 가진다. 예를 들어, 내부 전극의 열을 제거하기 위해 물을 펌핑하여 내부 통로를 지나게 할 수 있다. 어떤 경우, 내부 전극을 열 전도성 그리고 전기 절연성이 있는 세라믹 블록(1923)에 연결할 수 있다. 세라믹 블록은 산화알루미늄과 같은 재료로 만들어질 수 있다. 세라믹 블록을 통해 방열되어, 이와 연결된 내부 전극의 말단에서 열이 제거된다. 어떤 경우, 세라믹 블록은 내부 전극을 지지하는 개구부 또는 구멍이 포함된다. 어떤 경우, 고정 나사를 이용하여 내부 전극을 세라믹에 고정한다. 어떤 경우,

세라믹 블록을 통해 전달되는 열은 세라믹 블록에 연결된 열전 발전기 또는 열교환기와 같은 전력을 생성하는데 사용된다.

- [0163] 어떤 경우, 타겟 재료가 소모되거나 전극이 손상되면 내부 전극을 교체할 수 있다. 예를 들어, 붕소 코팅이 소모되거나 필라멘트가 끊어지는 경우, 내부 전극으로 사용되는 붕소가 코팅된 필라멘트를 교체할 수 있다.
- [0164] 일부 실시형태에서, 내부 전극의 길이는 환상공간(외부 전극의 z 방향 가장자리에 의해 한정됨)을 초과한다. 어떤 경우, 예를 들어 리니어 액추에이터(linear actuator)를 통해 z 방향에서 내부 전극의 위치를 조정한다. 예를 들어, 내부 전극이 와이어인 경우, 원자로 운전 중 환상공간을 통해 와이어를 끌어 당겨 내부 전극이 녹지 않도록 하거나 타겟 재료(예를 들어, 붕소 코팅)의 소모된 와이어 부분을 교체할 수 있다.
- [0165] 어떤 경우, 내부 전극의 너비는 z 방향에서 변화할 수 있다. 도 19b는 내부 전극(1920)이 외부 전극(1910)을 초과하고, 내부 전극의 연장으로 사용 가능한 슬리브(1921)를 통해 적당한 위치에 유지되는 구성을 도시한다. 슬리브(1921)는 구리, 스테인리스강 및 탄탈륨과 같은 전기 전도성 재료로 만들어질 수 있다. 어떤 경우, 슬리브를 통해 내부 전극에 전위를 인가할 수 있는데, 이렇게 하면 작은 직경을 갖는 내부 전극의 전기저항 가열을 감소시킬 수 있다. 슬리브의 직경이 내부 전극의 직경보다 훨씬 큰 경우도 있다. 예를 들어, 슬리브의 직경이 약 10센티미터 이상인 반면, 내부 전극의 직경은 약 0.5밀리미터 미만이다. 일부 구성에서, 고정 나사를 이용하여 내부 전극을 슬리브에 고정시킬 수 있다. 일부 실시형태에서, 슬리브는 직접 나사산에 의해 슬리브에 연결될 수 있다. 이런 부속 장치와 다른 부속 장치는 내부 전극(1920)이 교체 가능하도록 허용할 수 있지만, 슬리브(1921)는 영구적이다. 어떤 경우, 슬리브는 붕소와 같은 타겟 재료를 도포할 수 있다. 도 19a에서 논의된 바와 같이, 슬리브를 내부 냉각하는 경우도 있다.
- [0166] 제1 실시형태의 원자로와 마찬가지로, 내부 전극과 외부 전극 사이의 간격은 전원이 가동 영역에서 플라스마를 생성하는 능력에 의해 제한될 수 있다. 어떤 경우, 외부 전극은 구조 상 제1 실시형태에서 설명한 외부 전극과 유사할 수 있다. 어떤 경우, 외부 전극은 외부 절연층을 가질 수 있다. 예를 들어, 원자로의 전극에 교번 신호(alternating signal)를 인가하거나, 또는 역방향 전극 원자로가 서로 전기적인 분리가 필요한 추가 원자로로 구성된 모듈 유닛의 일부인 경우, 이는 유용할 수 있다. 일반적으로, 내부 전극과 외부 전극 양자의 지지 구조는 전기 절연 재료를 포함하여, 전극과 원자로의 하우징이 절연되고, 전극 사이 교류 전류 경로를 방지할 수 있다. 어떤 경우, 외부 전극은 구리 시트와 같은 금속 시트이며, 석영관에 배치되어 원통형으로 구속된다. 어떤 경우, 외부 전극은 절연 구조 내에 배치되는 솔리드 판상 구조이다. 다른 일 실시형태에서, 금속 전기 전도 코팅을 석영관의 내부 표면에 도포하여 전극을 제작한다.
- [0167] 다른 부분에서 논의된 바와 같이, 단지 소량의 이온 또는 양전하를 띤 입자는 많은 중성 입자를 구동하여 회전시킬 수 있다. 외부 전극과 연관된 가동 벽으로 인해, 중성물의 농도는 반경 방향으로 증가된다. 그러나, 회전하는 중성물은 반경 방향 전기장 또는 축 방향 전기장의 영향을 받지 않는다. 외벽과 기타 입자의 무작위적 충돌로 인해, 중성물은 방향을 돌려 전자가 풍부한 영역으로 향하며, 또한 어떤 경우, 중성물은 내부 전극의 타겟 재료를 충돌하여 융합을 일으킨다. 마찬가지로, 어떤 경우, 양전하를 띤 입자는 융합 반응(예를 들어, 양성자-붕소 11 융합 반응)을 생성하는 내부 전극으로 방향을 돌릴 수 있다.
- [0168] 어떤 경우, 역방향 전극 원자로는 고정된 전압에서 운전된다. 예를 들어, 원자로 작동 중에 전극 간 정전위 또는 기본적으로 정전위를 유지할 수 있도록, 전압 공급이 내부 전극 및 외부 전극 중 적어도 하나에 전위를 인가할 수 있다. 다른 한 가지 운전 모드에서, 역방향 전극 원자로는 정전류에서 운전된다. 내부 전극이 작고, 저항 가열로 인해 고장나기 쉬울 때, 정전류로 운전하는 것이 유익할 수 있다. 처음에 정전압을 이용하여 원자로를 작동시킨 다음 정전류 운전 모드로 변환하는 경우도 있다.
- [0169] 일부 구성에서, 축전기 또는 전지와 같은 에너지 저장 장치는 융합 반응을 유도하기 위해 내부 전극 및 외부 전극 중 적어도 하나에 전위를 인가하는데 사용된다. 어떤 경우, 전기회로는 에너지 저장 장치가 제공하는 전류 및 전압 중 적어도 하나를 조절한다. 어떤 경우, 축전기와 같은 에너지 장치는 내부 전극 및 외부 전극 중 적어도 하나와 연결되고 방전되며, 에너지 저장 장치가 더 이상 충분한 전기장을 생성하여 융합 반응을 지원하지 못할 때까지 방전한다. 어떤 경우, 원자로는 융합 반응으로 생성되는 전기 에너지에 의해 충전되고 제1 에너지 저장 장치에 의해 방전되는 추가 에너지 저장 장치로 구성된다. 그 다음, 제어기는 에너지 저장 장치를 충전 모드와 방전 모드 사이에서 교체하는 스위치를 작동시켜 융합 반응을 유지할 수 있다.
- [0170] 어떤 경우, 전원은 내부 전극 및 외부 전극 중 적어도 하나와 접촉이 끊기며, 전극 사이의 전위차가 더 이상 융합 반응을 유지할 수 없을 때까지 융합 반응이 일정한 시간동안 지속된다(예를 들어, 약 10초). 전기장이 너무

작아서 융합 반응을 더 이상 유지하지 못할 경우, 전압원 또는 전류원은 다시 접속되어 내부 전극에 음전위를 인가할 수 있다.

[0171] 역방향 극성 원자로 운전 전에, 환상공간의 가스 압력은 약 1 atm이거나 이보다 더 높을 수 있다. 어떤 경우, 예를 들어 내부 전극이 z 방향에서 길 때, 내부 전극은 융합 반응에 필요한 공물을 낮추기 위해 낮은 압력을 가질 수 있다. 어떤 경우, 원자로 운전 전에, 환상공간 내의 압력은 약 1토르(Torr) 미만 또는 약 10밀리토르 미만으로 감소될 수 있다. 어떤 경우, 입구와 출구의 밸브를 통해 환상공간 내의 압력을 조절하여 융합 반응 속도를 제어할 수 있다.

[0172] 역방향 전극 원자로의 경우, 가둠 영역의 자기장은 때로는 약 0.5 테슬라보다 크고, 때로는 약 1테슬라보다 크며, 때로는 약 3테슬라보다 크다. 역방향 전극 원자로의 일 실시형태에서, 자기장은 내부 전극 및 외부 전극 사이의 전기장과 기본적으로 수직되지 않는다. 일부 실시형태에서, 전반 가둠 영역의 자기장은 불균일하다. 자석 및 전극 중 적어도 하나의 위치와 방향을 조절하여 가둠 영역의 자기장을 조절할 수 있다. 어떤 경우, 불균일한 자기장은 이온과 중성물이 내부 전극과 충돌하는 속도를 제고할 수 있다. 일반적으로, 인가하는 자기장 및 내부 전극에 인가하는 전위 중 적어도 하나는 원자로의 기하 형상, 반응물 가스의 구성 및 반응물 가스의 압력에 따라 변화한다.

[0173] 운전 과정에 원심력으로 인해, 외벽 근처 입자(특히 질량이 높은 입자)의 농도는 비교적 크다. 이는 환상공간에서 회전하는 반응물보다 더 높은 질량의 융합 생성물을 추출하는데 도움이 될 수 있다. 예를 들어, 회전하는 수소종과 관련된 융합 반응을 통해 알파 입자 생성 시, 알파 입자는 외벽 근처에 집중된 다음 출구 밸브를 통해 제거된다. 어떤 경우, 융합 생성물을 다른 한 원자로에 펌핑하여 반응물로 사용할 수 있다. 예를 들어, 역방향 전극 원자로에서 생성되는 알파 입자 또는 헬륨 원자를 헬륨-헬륨 융합 반응을 지지하도록 구성된 다른 한 원자로에 이동할 수 있다.

[0174] 역방향 필드 원자로 실시형태

[0175] 또 다른 원자로 실시형태는 앞에서 도 6a 내지 도 6d에 도시된 것과 같은 역방향 필드 구성을 갖는다. 이 구성은 환상공간에서 입자의 회전 운동을 부여하고 유지하기 위해 로렌즈 회전자를 사용한다. 일반적으로, 본 문서에 기술된 많은 원자로는 자기장과 전기장의 방향이 뒤바뀌더라도 역방향 필드를 인가할 수 있도록 재구성 가능하다.

[0176] 제1 실시형태에서 설명한 것과 같은 자성 재료로 만들어진 영구 자석(616 및 626)을 이용하여 반경방향으로 자기장을 인가할 수 있다. 어떤 경우, 영구 자석을 반경방향 축이 있는 복수의 방위각이 오프셋된 전자석으로 대체하여, 전반 환상공간에 기본적으로 r방향의 자기장을 인가할 수 있다. 어떤 경우, 가둠 벽의 표면은 한 층 또는 복수 층의 보호 자성재료층을 포함할 수 있다. 예를 들어, 알루미늄 또는 탄탈륨 층은 외부 자석 또는 내부 자석에 보호를 제공한다. 어떤 경우, 보호층은 융합 반응물 또는 전자 방출체를 함유한 타겟 재료를 포함할 수 있다. 어떤 경우, 가둠 벽은 재료가 그 용융온도보다 낮게 유지되고 자석의 소자(demagnetizing)를 방지하는 내부 냉각 시스템을 가질 수 있다.

[0177] 동심 전극 실시형태에서, 내부 전극과 외부 전극 사이 간격은 때로 환상공간에서 이온화된 가스의 유효 전력의 제약을 받는다. 마찬가지로, 역방향 필드의 구성에서, 전극 660a와 전극 660b를 분리하는 z 방향에서의 가둠 영역은 제약을 받을 수 있다. 예를 들어, 전극 사이 간격은 약 1밀리미터 내지 50센티미터 범위에 있으며, 전극 사이 간격이 약 5센티미터 내지 20센티미터 범위에 있는 경우도 있다.

[0178] 동심 전극 실시형태에서, z 방향에서 환상공간의 길이는 때로 영구 자석 강도의 제약을 받는다. 마찬가지로, 역방향 필드 구성에서, r방향의 간격은 때로 가둠 벽 표면 근처에서 강한 자기장을 생성할 필요가 있기에 제약을 받을 수 있다. 어떤 경우, 반경방향 간격은 예를 들어 약 10센티미터 또는 더 작거나, 약 5센티미터 또는 더 크게 제한될 수 있다. 어떤 경우, 자석(616) 자체가 가둠 표면 근처에서 충분한 자기장을 제공할 때 간격은 더 클 수 있다. 예를 들어, 어떤 경우, 간격은 약 10센티미터보다 크다. 어떤 경우, 내부 자석은 꼭 필요한 것이 아닐 수 있다.

[0179] 파동-입자 원자로 실시예

[0180] 앞에서 대체 원자로의 구성을 간략하게 설명하였는데, 파동-입자 실시예라고도 불리우며, 도 7a 및 도 7b에 도시되었다. 파동-입자 실시예에서, 진동 정전기장을 통해 대전입자를 구동하여 회전시킨다. 중성종은 대전입자에 의해 밀려 이동한다. 가둠 벽, 내벽 또는 가둠 영역과 연결된 다른 한 구조 상의 방위각으로 분리된 전극에 전하를 인가하여 전기장을 생성한다. 당해 실시형태는 자기장을 필요로 하지 않기 때문에 자석을 이용하여 강요하는 구

조적 제한은 적용되지 않는다. 예를 들어, 원자로의 반경은 링 자석 또는 디스크 형상 자석보다 클 수 있다. 또한, 당해 실시형태는 내부 전극과 외부 전극 사이 전류의 흐름을 필요로 하지 않기 때문에, 동심 전극이 강요하는 구조적 제한도 적용되지 않는다. 파동-입자 설계의 일부 실시형태에서, 가둠 벽의 반경은 약 2미터보다 클 수 있고, 일부 설계에서는 약 10미터보다 클 수 있으며, 약 50미터보다 큰 경우도 있다. 로렌츠 회전자의 일부 실시와는 반대로, 원자로가 z 방향에서의 길이는 동심 전극 실시형태에서도 때로 그러하듯이 영구 자석 강도의 제한을 받지 않는다. 일부 실시형태에서, 환상 영역과 같은 가둠 영역이 z 방향에서의 길이는 약 1미터보다 클 수 있고, 어떤 경우에는 약 10미터보다 클 수 있으며, 약 100미터보다 큰 경우도 있다. 일 실시형태에서, 원자로는 z 방향에서 곡률이 있어 가둠 벽이 토러스(torus) 또는 토러스 모양을 형성하도록 한다. 일반적으로, 원자로의 크기 제한은 원자로의 에너지 수요와 생산 관련 비용에 의해 통제된다. 파동-입자 실시형태에서, 가둠 영역을 영향하는 방위각이 오프셋된 전극의 수와 크기를 한정하여 회전 중에 대한 제어 정도를 설정할 수 있다. 가둠 벽을 따르는 상대적으로 큰 수량의 전극은 전기장 라인(electric field lines)이 더욱 정교하게 조절될 수 있도록 하는데, 이는 전기장이 대전입자를 이동하는데 사용하는 효율을 개선시킬 수 있다. 어떤 경우, 이는 동적으로 변화하는 전기장이 입자 포인트를 반경 방향보다는 방위각 방향으로 주로 이동시키기 때문이다. 일반적으로, 원자로는 적어도 세 개 방위각으로 분리된 전극을 갖고 있다. 일부 원자로는 적어도 다섯 개의 방위각으로 분리된 전극을 가질 수 있으며, 일부 원자로는 약 50개보다 많은 방위각으로 분리된 전극을 가질 수 있다. 어떤 경우, 전극의 수량은 원자로의 크기와 비례를 이룬다. 예를 들어, 약 1미터의 반경을 갖는 원자로는 가둠 벽을 따라 약 20 내지 약 40개의 방위각으로 분리된 전극을 가질 수 있으며, 약 2미터의 반경을 갖는 원자로는 약 40 내지 약 80개의 방위각으로 분리된 전극을 가질 수 있다. 어떤 경우, 원자로의 원주(단위: 미터)와 방위각으로 분리된 내부 전극 또는 외부 전극의 비율은 약 3 내지 150 사이에 있으며, 이 비율이 약 20 내지 100 사이인 경우도 있다.

[0181] 어떤 경우, 전극은 질화알루미늄 또는 질화붕소와 같은 전기 절연 재료에 의해 분리된다. 절연 재료는 충분히 두꺼워서 재료가 절연 파괴를 겪지 않도록 할 수 있다. 최소 두께는 절연 재료의 절연 내력과 전극에 인가되는 전압에 의해 결정될 수 있다. 어떤 경우, 절연 재료는 붕소-11의 융합 반응물과 같은 타겟 재료와 전자 방출체 중 적어도 하나를 함유할 수 있다.

[0182] 어떤 경우, 방위각 방향에서 전극의 너비는 약 10센티미터보다 작을 수 있고, 어떤 경우 약 5센티미터보다 작을 수 있으며, 약 2센티미터보다 작은 경우도 있다. 전극은 다양한 모양을 가질 수 있다. 예를 들어, 전극은 원형 또는 다변형일 수 있다. 어떤 경우, 전극은 직사각형이다. 일부 실시형태에서, 원자로는 가둠 벽을 따라 방위각으로 분리된 전극만 사용한다. 또는, 일부 실시형태에서, 원자로는 내벽을 따르는 전극만 사용하거나, z 방향에서 가둠 영역을 제약하는 전극(예를 들어, 전극 배치는 도 6c에 표시된 역방향 필드 실시형태의 전극 660a 및 660b에 대응됨)만 사용한다. 전극 자체가 가둠 벽을 제한하지 않는 경우, 가둠 벽의 표면은 타겟 재료와 같은 다른 재료나 전자 방출체로 만들어질 수 있다. 예를 들어, 전극은 6붕화 란탄으로 만들어진 쿠폰이 함유된 슬리브에 의해 가둠 영역과 분리될 수 있다.

[0183] 어떤 경우, 가둠 벽은 열 교환기(예를 들어, 냉각 자켓)와 같은 열 관리 부품으로 구성된다. 열교환기는 전극의 과열을 방지하고 가열된 유체를 열 엔진에 제공하여 전기 에너지 또는 열 에너지를 생성하는 것 중 적어도 하나에 사용될 수 있다. 어떤 경우, 물과 같은 유체가 가둠 벽에 있는 통로를 통과하게 함으로써 원자로의 열을 방출할 수 있다. 예를 들어, 방위각으로 분리된 전극을 분리하는 절연 재료는 유체가 통과하는 내부 통로를 가질 수 있다.

[0184] 동심 전극 실시형태에서, 가둠 영역에서 이온화된 가스에 사용 가능한 유효 전력으로 인해, 내부 전극과 외부 전극 사이 간격이 때로는 제한을 받는다. 파동-입자 구성에서, 전기적으로 분리된 전극의 인접된 위치 사이의 간격도 제한될 수 있다. 예를 들어, 전극 사이 간격은 평균 1밀리미터 내지 50센티미터 범위에 있으며, 전극 사이 간격이 평균 5센티미터 내지 20센티미터 범위에 있는 경우도 있다.

[0185] 어떤 경우, 파동-입자 원자로는 하나 이상의 운전 모드를 갖는다. 예를 들어, 제1 단계에서 플라즈마를 가동시키거나 충돌시키고, 이후 단계에서 회전 방향에서 이온을 구동할 수 있다(중성물 간접 구동). 예를 들어, 약한 이온화 플라즈마를 생성하기 위해 내부 전극과 외부 전극 사이 반경 방향에서 RF 전기장을 인가하여 운전에 필요한 원자로를 준비할 수 있다. 내부 전극과 외부 전극 사이에 플라즈마가 생성되지만 하면, 원자로는 구동 신호가 순서에 따라 방위각으로 분포된 전극에 인가되어 대전입자와 중성물을 구동하여 회전시키는 모드로 전환할 수 있다.

[0186] 이온과 중성물의 회전을 구동하기 위해 방위각으로 분포된 전극에 인가되는 진동 신호는, 원자로 구성과 원하는

회전 속도에 기초하여 선택한 광범위한 주파수에 걸쳐 제공될 수 있다. 예를 들어, 구동 신호는 약 60 kHz 내지 1 THz의 범위 내에서 인가될 수 있으며, 어떤 경우에는 약 60 kHz내지 1 GHz의 범위 내에서 인가될 수 있다. 구동 신호의 주파수는 처음에 낮고 점차 또는 갑자기 증가되는 경우도 있을 수 있다. 예를 들어, 구동 신호는 60 kHz와 같이 상대적으로 낮은 주파수에서 시작하여 100 MHz와 같이 훨씬 더 높은 주파수로 상승할 수 있다.

[0187] 어떤 경우, 구동 신호는 제어된 전압을 이용하여 전하를 인가한다. 전극 사이의 아크를 방지하기 위해, 저전압에서 고전류가 아니라 고전압과 저전류를 이용하여 전하를 인가하는 것이 이상적이다. 어떤 경우, 구동 신호는 약 1킬로볼트 내지 약 100킬로볼트 사이에서 방위적으로 분리된 전극에 인가된다. 어떤 경우, 구동 신호는 전극에 100킬로볼트 이상 인가할 수 있다.

[0188] 정전력을 사용하면 파동-입자 실시형태는 유사한 원자로 구성(예를 들어, 유사한 가둠 반경)을 갖는 로렌츠 구동 원자로에서 흔히 볼 수 있는 회전 속도를 초과하는 회전 속도를 생성할 수 있다. 어떤 경우, 정전기로 구동하는 원자로는 적어도 초당 약 1000RPS의 속도로 가스종을 회전시킬 수 있으며, 적어도 초당 약 100000RPS 회전시키는 경우도 있다. 파동-입자 실시형태에서, 제어시스템은 전하를 전극에 인가하는 방법을 유도하는데 사용될 수 있다. 어떤 경우, 제어시스템은 감지된 속도를 피드백으로 삼아, 전극에 인가되는 전하의 시퀀스를 조절하며, 당해 감지된 속도는 고속카메라 또는 다른 센서에 의해 결정된다. 일반적으로, 방위각으로 분리된 전극은 유사한 구조를 고려할 수 있으며, 자기장을 이용한 상기 실시형태에서 설명된 그런 유사한 재료로 만들어질 수 있다.

[0189] 하이브리드 설계 원자로

[0190] 도 6a 내지 도 6f는 하이브리드 원자로 구성이라고 할 수 있는 다른 한 가지 일반 원자로 구성을 간략하게 도시한다. 이 구성은 환상공간에서 입자의 회전 운동을 부여하고 유지하기 위해 로렌츠 회전자와 파동-입자 구동기를 사용한다. 하이브리드 원자로에서 로렌츠 회전자를 운전할 때, 위에서 설명한 역방향 필드 실시형태의 일부 측면은 적용 가능하다. 마찬가지로, 하이브리드 원자로의 방향각으로 구분된 전극을 사용하여 운전할 때, 위에서 설명한 파동-입자 실시형태의 일부 측면은 적용 가능하다.

[0191] 역방향 필드 실시형태와 마찬가지로, 제1 실시형태에서 설명한 것과 같은 자성재료로 만들어진 영구 자석(616 및 626)을 사용하여 반경 방향에서 자기장을 인가할 수 있다. 어떤 경우, 영구 자석을 반경방향 축이 있고 방위각이 오프셋된 복수의 전자석으로 대체하여, 전반 가둠 영역에 기본적으로 r 방향의 자기장을 인가할 수 있다. 어떤 경우, 가둠 벽의 표면은 한 층 또는 복수 층의 보호 자성재료층을 포함할 수 있다. 예를 들어, 알루미늄 또는 탄탈륨 층은 외부 자석 또는 내부 자석에 보호를 제공한다. 어떤 경우, 보호층은 융합 반응물 또는 전자 방출체를 함유한 타겟 재료를 포함할 수 있다. 어떤 경우, 가둠 벽은 재료가 그 용융온도보다 낮게 유지되고 자석의 소자를 방지하는 내부 냉각 시스템을 가질 수 있다.

[0192] 동심 전극 실시형태에서, 내부 전극과 외부 전극 사이 간격은 때로 환상공간에서 이온화된 가스의 유효 전력의 제한을 받는다. 마찬가지로, 하이브리드 원자로의 실시 구성에서, 전극 660a와 전극 660b를 분리하는 z 방향에서의 가둠 영역 또는 환상공간은 제한을 받을 수 있다. 예를 들어, 전극 사이 간격은 약 1밀리미터 내지 50센티미터 범위에 있으며, 전극 사이 간격이 약 5센티미터 내지 20센티미터 범위에 있는 경우도 있다.

[0193] 동심 전극 실시형태에서, z 방향에서 환상공간의 길이는 때로 영구 자석 강도의 제한을 받는다. 마찬가지로, 하이브리드 구성에서, r방향의 간격은 때로 가둠 벽 표면 근처에서 강한 자기장을 생성할 필요가 있기에 제한을 받을 수 있다. 어떤 경우, 반경방향 간격은 예를 들어 약 10센티미터 또는 더 작거나, 약 5센티미터 또는 더 크게 제한될 수 있다. 어떤 경우, 자석(616) 자체가 가둠 표면 근처에서 충분한 자기장을 제공할 때 간격은 더 클 수 있다. 예를 들어, 어떤 경우, 간격은 약 10센티미터보다 크다. 어떤 경우, 내부 자석을 필요로 하지 않을 수 있다.

[0194] 하이브리드 실시형태에서, 제어시스템은 제어 신호를 방향각으로 분리된 신호에 인가하는 방법을 유도하는데 사용될 수 있다. 어떤 경우, 전극에 인가하는 전하 시퀀스를 조절하기 위해, 제어시스템은 센서로부터 피드백을 수신할 수 있다. 일반적으로, 전극(660a 및 660b)은 유사한 구조를 고려할 수 있으며, 제1 실시형태에서 전극을 제조하기에 적합한 것으로 설명된 재료로 만들어질 수 있다.

[0195] 일부 구성에서, 융합 반응 진행 시 또는 융합 반응 바로 전에, 하이브리드 원자로는 운전 모드 사이에서 전환하도록 구성된다. 예를 들어, 원자로는 입자 회전을 유지하기 위해, 파동-입자 구동기로 전환하기 전에 로렌츠 회전자를 이용하여 운전을 시작할 수 있다. 일부 조건에서, 로렌츠 힘으로 구동되는 회전자는 환상공간의 입자를 가동함에 있어서 더욱 효과적일 수 있다. 환상공간 내의 입자가 원자로 내에서 임계 회전 속도에 도달하기만 하

면, 로렌츠 회전자를 사용하는 효과를 더는 볼 수 없으며, 원자로를 파동-입자 구동기 운전 모드로 전환할 수 있다. 어떤 경우, 파동-입자 구동 운전 모드로 전환하여 더욱 큰 입자 속도를 달성함으로써 더 많은 에너지가 생성될 수 있다. 어떤 경우, 파동-입자 구동 운전 모드로 전환하여, 방위각으로 분포된 전극(660a 및 660b)에 인가되는 구동 신호의 시퀀스를 조절함으로써, 에너지 생성을 보다 정밀하게 조절할 수 있다. 전자석을 이용하여 전기장을 생성하는 일부 실시형태에서, 원자로가 파동-입자 운전 모드에 들어갈 때, 자기장의 제어에 사용되는 전류 공급을 중지할 수 있다. 이는 로렌츠 힘이 z 방향에서 대전입자에 작용하는 것을 방지할 수 있다.

[0196] 전자 방출체

[0197] 본 문서의 다른 부분에서 설명된 바와 같이, 가둠 벽은 때로 적어도 일부가 전자 방출 재료로 만들어지며, 여기서 전자 방출체라고 한다. 이런 재료들은 어떤 온도를 초과할 때 열 이온을 통해 전자를 방출한다. 예를 들어, 일부 붕소계 전자 방출체의 방출 온도는 약 1500K 내지 약 2500K이다. 어떤 경우, 전자 방출체는 환상공간에 배치하기 적합한 형태로 압착, 소결 또는 다른 방식으로 변환되는 분말 형태일 수 있다. 어떤 경우, 물리 증착법을 이용하여 전자 방출 재료를 원자로의 가둠 벽에 소결하거나 증착할 수 있다. 어떤 경우, 전자 방출체는 연속적인 구조로 구축되어, 가둠벽의 일부를 형성하거나 가둠 벽에 부착될 수 있다.

[0198] 일부 전자 방출체는 낮은 일 함수를 갖는 재료로서, 원자로 내에서 열과 다른 환경 조건에 노출될 때 분해에 대해 저항성이 있다. 전자 방출체의 예시에는 산화바륨, 산화스트론튬, 산화칼슘, 산화알루미늄, 산화토륨, 6붕화 란탄, 6붕화 세륨, 6붕화 칼슘, 6붕화 스트론튬, 6붕화 바륨, 6붕화 이트륨, 6붕화 가돌리늄, 6붕화 사마륨, 6붕화 토륨과 같은 산화물과 붕소화물이 포함된다. 어떤 경우, 방출체는 탄화지르코늄, 탄화하프늄, 탄화탄탈륨과 하프늄 이붕소화물과 같은 전이 금속의 탄화물과 붕소화물일 수 있다. 어떤 경우, 방출체는 ${}^6\text{Li}$, ${}^{15}\text{N}$, ${}^3\text{He}$ 및 중수소와 같이 융합 반응의 반응물로 사용될 수 있다. 어떤 경우, 전자 방출체는 융합 반응물을 포함하는 화합물일 수 있다. 예를 들어, 6붕화 란탄은 전자 방출체, 그리고 양성자- ${}^{11}\text{B}$ 융합의 타겟 재료 양자로 사용될 수 있다. 어떤 경우, 융합 반응 생성물은 전자 방출체로 사용될 수 있다. 어떤 경우, 전자 방출체는 적어도 한 가지 재료가 낮은 일 함수를 가지며 운전 중 전자를 방출하는 두 가지 또는 그 이상 재료의 복합재료일 수 있다.

[0199] 어떤 경우, 전자 방출체는 실체 부품으로 원자로의 가둠 벽에 부착된다. 일부 실시형태에서, 전자 방출체(쿠펜 형태로 제공 가능)는 환상공간에 뚜렷하게 돌출되지 않고, 얇거나 납작한 구조를 가지며, 가둠 벽에 부착되어 있다. 도 20a는 전자 방출체의 몇 가지 예시적 횡단면을 도시한다. 일부 실시형태에서, 이러한 전자 방출체는 클립이나 나사와 같은 메커니컬 파스너를 사용하여 가둠 벽 표면에 부착될 수 있다. 어떤 경우, 전자 방출체는 가둠 벽 안의 슬롯으로 미끄러져 들어가도록 구성되고, 적어도 부분적으로는 마찰에 의해 제자리에 고정된다. 예를 들어, 슬롯은 그루브 또는 클램핑 메커니즘을 가질 수 있다. 어떤 경우, 열, 접착제 또는 다른 바인딩 기술을 이용하여 방출체를 가둠 벽에 부착시킨다. 어떤 경우, 방출체 구조의 두께는 약 1.2센티미터보다 작고, 어떤 경우 약 6센티미터보다 작으며, 3센티미터보다 작은 경우도 있다. 방위각 방향 또는 z 방향에서의 전자 방출체의 크기는 원자로의 물리적 크기의 제한을 받는다. 도 20b는 전자 방출체(2036)가 가둠 벽 (2010)의 표면을 따라 대칭적으로 분포되는 몇 가지 구성을 도시하며, 일부 구성에서는 전자 방출체가 몇 개 선정된 영역에만 배치될 수 있다.

[0200] 일부 실시형태에서, 방출체가 가둠 벽 표면에 배치될 때, 원자로 운전 전에 고유한 마찰과 플라즈마 열 중 적어도 하나에 의해 가열된다. 어떤 경우, 다른 방법으로 전자 방출체를 가열하여 전자 방출 속도를 증가할 수도 있다. 예를 들어, 원자로의 초기 운전 기간, 원자로가 상대적으로 찬 때, 다른 방법을 통해 방출체를 가열하여 전자 방출을 증가할 수 있다. 어떤 경우, 전자 방출체에 인가되는 에너지(예를 들어, 줄 가열(Joule heating))에 대한 제어를 통해 전자 방출 속도와 융합 반응 속도를 제어할 수 있다.

[0201] 일부 실시형태에서, 전원이 공급하는 전력을 사용하여 가둠 벽에 있는 전자 방출기에 에너지를 공급한다. 예를 들어, 전류를 전자 방출 재료 내에 있는 필라멘트에 통과시켜 줄 가열을 제공하고 전자 방출을 증가한다. 필라멘트가 텅스텐과 같은 내화 금속인 경우도 있다. 가둠 벽이 전기적으로 접지된 경우, 전자 방출체는 전기 절연 재료에 의해 가둠 벽으로부터 분리될 수 있다. 어떤 경우, 직류 전류를 필라멘트에 인가한다. 어떤 경우, 예를 들어 RF 또는 마이크로파 신호를 통해, 전자 방출체와 접촉하는 필라멘트에 교류 전류(AC)를 인가하여 전자 방출을 더 한층 개선하거나 제어한다.

[0202] 도 21a 내지 도 21b는 동심 전극을 갖는 원자로에서 줄 가열을 이용하여 전자 방출을 제어하는 일 예시를 도시한다. 도 21a는 내부 전극(2120), 가둠 영역(2140)(예를 들어, 환상공간)에 의해 내부 전극과 분리된 외부 전극(2110), 그리고 전원(2135)에 의해 전력을 공급받는 가둠 벽(2112)을 따라 배치된 전자 방출 모듈(2136)을 구비

하는 원자로의 z 방향에서의 뷰를 제공한다. 도 21b는 가둠 벽에 위치한 전자 방출 모듈의 확대도를 제공한다. 전자 방출 모듈은 6봉화 관탄과 같은 필라멘트(2134)를 통해 가열되는 전자 방출 재료(2130)를 포함한다. 어떤 경우, 모듈은 외부 전극 및 가둠 벽 중 적어도 하나와의 전기 절연 및 열 절연 중 적어도 하나를 제공하는 절연 층 2137 및 2138을 포함할 수 있다. 어떤 경우, 한 층(2137 또는 2138)은 전기 절연에 사용되고, 다른 한 층은 열 절연에 사용된다. 어떤 경우, 이런 절연층은 산화지르코늄, 산화알루미늄, 질화아연 및 산화마그네슘과 같은 세라믹 재료로 만들어질 수 있다. 일부 실시형태에서, 원자로 운전 중, 전자 방출 모듈의 위치를 조절할 수 있다. 예를 들어, 작동기를 사용하는 경우, 회전하는 종의 마찰 가열에 의한 전자 방출을 증가시키기 위해 모듈을 반경방향 안쪽으로 가둠 영역 내로 이동하거나, 전자가 방출되는 것을 제한하기 위해 모듈을 반경방향에서 가둠 영역 밖으로 이동시킬 수 있다.

[0203] 일부 실시형태에서, 전자 방출체는 일단부에 뾰족한 점이나 원추형 구조를 갖고 있어, 전기장 전자 방사를 개선할 수 있다. 예를 들어, 전자 방출체에 전위가 공급될 때, 좁아진 기하학적 형상으로 인해 점 부근에 존재하는 강한 전기장은 전기장 전자 방사가 당해 점의 위치에 집중되게 한다.

[0204] 일부 실시형태에서, 하나 또는 복수의 레이저를 이용하여 방출체의 전자 방출을 증가하거나 다른 방식으로 방출체의 전자 방출을 제어한다. 도 22에 도시된 바와 같이, 원자로(2200)는 가둠 영역(2240) 내의 빛을 전자 방출체(2230)로 유도하기 위해 레이저(2231)를 배치할 수 있다. 설명된 바와 같이, 레이저로부터 오는 빛은 절연된 광섬유(2239)를 경유하여 내부 전극(2220)을 통과하거나 따라 광학적으로 유도할 수 있다. 레이저는 열전자 방출에 사용되는 방출체를 가리키지만 (be directed at), 가둠 벽에서 광전 효과를 나타내는 티타늄과 같은 다른 재료를 가리키기도 한다. 예를 들어, 광자와 충돌할 때 광전 효과를 나타내는 금속과 도체는 전류에 중화되지 않고 전자 방출에 사용 가능한 전하 불균형을 생성한다. 도 22에서 제1 실시형태를 도시하지만, 역방향 전극 실시형태에서, 레이저는 내부의 음전하를 띤 전극으로 유도되어 전자 방출을 증가시킬 수 있다.

[0205] 가스 전달 시스템

[0206] 원자로는 융합 반응물을 도입하고 융합 생성물을 제거하기 위한 하나 또는 복수의 가스 밸브를 가질 수 있다. 어떤 경우, 표준화 가스 밸브를 사용할 수 있다. 예를 들어, 저압 증착 및 식각실(etching chambers)에 사용되는 가스 밸브는 원자로에 적용될 수 있다. 어떤 경우, 가스 반응물은 내부 위치에서 가둠 영역에 방출된다. 예를 들어, 반응물 종은 노선에 따라 내부 전극을 통과할 수 있다. 어떤 경우, 가스 밸브는 z 방향에서 가둠 영역 또는 환상공간의 일단부에 위치할 수 있으며, 다른 경우, 가스 반응물 종은 가둠 벽 내에 위치한 밸브를 통해 가둠 영역에 도입된다. 융합 생성물을 위한 출구 밸브는 입구 밸브와 비슷한 위치에 배치할 수 있다. 원자로 운전 중에 융합 생성물 제거 시, 출구 밸브는 가둠 벽 또는 가둠 벽과 인접한 위치에 있을 수 있지만, z 방향에서는 가둠 영역에서 오프셋된다. 어떤 경우, 입구 밸브와 출구 밸브는 접지하여 단락되지 않도록 전극과 전기적으로 절연되어야 할 것이다.

[0207] 입구 밸브와 출구 밸브는 가스종을 원자로로 수송하는데 도움이 되도록 진공 또는 펌프 시스템을 가질 수 있다. 어떤 경우, 밸브는 원자로에 추가되거나 원자로에서 제거되는 가스의 양을 제어하는 유량계를 포함할 수 있다. 어떤 경우, 유량계는 원자로의 제어시스템에 연결되어 챔버에 들어가는 수소 또는 반응물 종의 양을 제한할 수 있다. 어떤 경우, 가스 입구는 가둠 영역 근처에서 중성물을 도입하고, 가스 출구는 이동하여 원자로의 z 방향에서 융합이 발생하는 지점을 지난 중성물을 제거한다. 어떤 경우, 원자로 z 방향을 따르는 중성물의 분포를 제어하는 펌핑 시스템은 융합 생성물(예를 들어 알파 입자)의 운동 에너지를 전기 에너지로 전환하는 효율을 감소시키는 중성물을 제거한다.

[0208] 논의되는 실시형태가 가스종을 설명하지만, 기타 실시형태에서 융합 반응물은 액체 형태로 가둠 영역에 도입된다. 어떤 경우, 가스 형태의 융합 반응물로 가둠 영역을 충전하는 대신, 액체 연료로 가둠 영역을 충전하거나 부분적으로 충전한다. 예를 들어, 액체 수소, 암모니아, 부탄 또는 메탄과 같은 알칸, 액체 수소화물과 같이 사용 가능하거나 쉽게 방출될 수 있는 수소를 함유하는 액체를 가스 수소 대신 사용할 수 있다. 어떤 경우, 액체 연료가 챔버에 들어간 후 신속하게 증발되는 방식으로 제공된다. 어떤 경우, 원자로에 액체 연료를 추가하여 원자로 내의 압력을 제어한다. 예를 들어, 온도 차이 및 가둠 영역의 알려진 체적을 사용함으로써, 가둠 영역 내의 압력은 이상적인 기체 법칙을 사용하여 역계산할 수 있다. 어떤 경우, 중성물의 밀도가 높게 유지되고 원자로의 구조적 완전성이 훼손되지 않도록 원자로 내의 가스 반응물 압력을 주의하여 모니터링할 수 있다.

[0209] 원자로가 로렌츠 회전자인 경우, 액체가 가둠 영역에 들어갈 때 즉시 증발되지 않도록 액체 연료를 충분한 양으로 또는 열 조건에서 첨가할 수 있다. 이런 상황에서, 전류가 액체 연료를 통과할 수 있도록 전극 사이에 전위를 인가한다. 어떤 경우, 칼륨과 같은 대전입자로 액체를 집중한다. 자기장이 있는 경우, 로렌츠 힘은 액체 연

료의 대전 성분과 중성 성분을 회전시킨다. 회전 칼럼의 운동 에너지가 증가함에 따라, 가둠 벽을 따라 경계층 근처의 액체가 증발하여, 수소 가스나 가둠 벽의 타겟 재료와 융합될 수 있는 다른 반응물 가스가 방출할 수 있다. 예를 들어, 액체 연료가 수소 가스를 방출하고, 가둠 벽에 6붕화 란타넘이 함유된 경우, 양성자⁻¹¹B 융합이 일어날 수 있다. 어떤 경우, 회전하는 액체와 가둠 벽 사이에서 발달하는 가스층은 액체-벽 계면에 의해 가해지는 항력을 감소시켜 가둠 영역의 액체가 심지어 더 빨리 회전할 수 있는 슬립층을 생성할 수도 있다. 어떤 경우, 액체는 열을 흡수할 수 있고, 전극의 융해에 대한 우려를 줄일 수 있다. 가스와 비교하기에, 액체 융합 반응물은 높은 밀도를 가지며, 교체할 필요가 없이 긴시간 사용이 가능하다. 액체 연료의 실시형태를 사용하는데 한정되지 않지만, 어떤 경우, 압력이 임계값을 초과하면, 원자로를 가스를 방출하는 안전 밸브를 가질 수 있다. 어떤 경우, 예를 들어 운송 응용에서, 융합 반응물은 액체 형태로 저장이 가능하며, 액체로 원자로에 전송되거나 전송 전에 기화된다. 액체 형태의 융합 반응물을 저장함으로써 연료 공급이 소규모적이고 치밀하다.

[0210] 어떤 경우, 액체 연료는 가압 탱크를 통해 원자로에 공급될 수 있다. 어떤 경우, 수소와 같은 융합 반응물은 원자로에 공급되는 캡슐에 포함될 수 있다. 예를 들어, 수소는 유리 캡슐에 저장되어, 가둠 벽의 포트(port)를 통해 원자로에 제공될 수 있다. 어떤 경우, 수소 가스는 가압 형태(예를 들어 몇 개 대기압)로 제공되며, 액체 형태로 제공되는 경우도 있다. 원자로가 이미 작동한 경우, 원자로 내의 온도는 캡슐 저장 재료를 용해시켜 연료가 즉시 방출되거나 지연 시간(예를 들어 몇 분)을 거쳐 방출되게 할 수 있다. 일부 상황에서, 원자로가 냉각되어 작동하지 않는 경우, 도 22에 설명된 것과 같은 레이저를 연료 캡슐에서 유도하여, 캡슐 재료를 파괴하고 반응물 또는 연료를 방출할 수 있다. 자동차와 같은 응용에서, 반응물을 안전하게 저장하는데 필요한 가압 탱크 같은 하드웨어를 감소하거나 제거하여, 캡슐에 수소와 같은 소량의 융합 반응물을 저장하여 편리성을 향상시킨다.

[0211] 어떤 경우, 수소와 같은 융합 반응물을 고체 화합물로서 원자로에 도입할 수 있다. 예를 들어, 폴리에틸렌이나 폴리프로필렌으로 만들어진 중합체 연료 펠릿은 원자로에서 수소 연료가 소모됨에 따라 가둠 벽의 포트를 통해 원자로에 공급될 수 있다. 일단 원자로에 들어가면, 원자로 운전 또는 레이저의 에너지(예를 들어 도 22에 설명된 레이저)로 인한 고온은 중합체를 분해하고 수소 가스를 방출하기에 충분하다. 일부 실시형태에서, 암모니아 보란(ammonia borane)(보라잔(borazane)이라고도 함)은 수소 연료로 사용될 수 있다. 원자로의 온도가 약 100℃ 이상에 달하면 암모니아 보란은 분자 수소와 기체 상태의 붕소-질소 화합물을 방출한다. 어떤 경우, 암모니아 보란 또는 붕소-질소 화합물은 전자 방출체로 사용될 수 있으며, 원자로 운전 중 암모니아 보란의 붕소 원자가 수소 원자와 융합 반응을 일으키는 경우도 있다. 자동차 응용과 같은 많은 응용에서, 가스 연료 또는 액체 연료를 안전하게 저장하는데 필요한 하드웨어를 감소하거나 제거함으로써 고체 연료의 편리성을 향상시킬 수 있다.

[0212] 냉각 시스템

[0213] 어떤 경우, 원자로의 지속적인 운전을 유지하기 위해 원자로를 냉각하여 전극, 자석 및 다른 부품 중 적어도 하나가 과열되는 것을 방지해야 한다. 일부 실시형태에서, 액체 수조에 완전히 담그는 것으로 원자로를 냉각시킬 수 있다. 일부 실시형태에서, 원자로를 전도를 통해 열을 원자로에서 끌어내고 열을 공기나 액체 냉각제와 같은 유체 매체에 전달하는 방열기를 포함한다. 예를 들어, 열 교환기를 사용할 수 있다. 팬이나 펌프는 유속 상태를 제어하는데 사용될 수 있으며, 유체 매체에 전달된 열을 가져가는데 도움이 된다. 원자로 내에서 모니터링하는 온도에 따라, 유체 속도를 조절하여 층류와 난류 사이에서 유체의 유동이 조절되도록 할 수 있다. 일부 실시형태에서, 유체는 원자로 외부의 냉각 재킷을 통과하며, 냉각관이 원자로 내의 부품을 냉각하는데 사용되는 경우도 있다. 본 문서의 다른 부분에서 설명한 바와 같이, 방열기는 열 엔진이 전기 에너지를 생성하는 작업 유체에 열을 전달하는데 사용할 수 있다. 원자로를 냉각하기 위한 작업 유체로 사용 가능한 액체의 예로는 물, 액체 납, 액체 나트륨, 액체 비스무트, 용융염, 용융 금속, 그리고 알코올, 탄화수소, 할로겐화 탄화수소를 포함하는 다양한 유기 화합물이 있다.

[0214] 전원

[0215] 원자로를 전극, 전자석 및 원자로 운전에는 필요한 다른 전기 부품에 전류를 공급하는 하나 또는 복수의 전원을 포함할 수 있다. 전원은 두 단자(예를 들어, 동심 전극) 사이의 전류 및 전압 중 적어도 하나를 제어할 수 있다. 일부 실시형태에서, 전원은 약 200볼트 내지 약 1000볼트의 최대 전압을 공급할 수 있다. 예를 들어, 일부 실시형태에서, 전원은 전극에 최대 600볼트에 달하는 전압을 제공할 수 있다. 일부 실시형태에서, 소형 원자로로는 약 0.1암페어 내지 약 100암페어의 전류를 제공하는 것과 적어도 1킬로와트의 전력을 수송하는 것 중 적어도 하나를 달성할 수 있다. 일부 중형 실시형태에서, 원자로로는 약 1암페어 내지 약 1킬로암페어의 전류를 제공하는 것과 적어도 5킬로와트의 전력을 수송하는 것 중 적어도 하나를 달성할 수 있다. 일부 대형 실시형태에서,

원자로는 약 1암페어 내지 약 10킬로암페어의 전류를 제공하는 것과 적어도 수백 킬로와트의 전력을 수송하는 것 중 적어도 하나를 달성할 수 있다.

[0216] 전원은 원자로의 운전 모드에 따라 직류 전류 또는 교류 전류를 제공하는데 사용될 수 있다. 일부 실시형태에서, 직류 전류를 전극에 인가하여 플라스마를 충격한다. 어떤 경우, 직류 전류가 플라스마를 충격하는데 사용되는 것에 비해, 가둠 영역에서 플라스마를 충격하는데 필요한 전압은 약 10% 이상 감소될 수 있다. 교류 전류 신호를 이용하여 플라스마를 충격하는 경우, 전원은 약 1 kHz 이상이거나, 어떤 경우 약 1 MHz 이상의 주파수에서 교류 전류 또는 전압 신호를 제공한다.

[0217] 일부 구성에서, 예를 들어 전자석이 축 방향 자기장을 제공하는데 사용될 경우, 교류 전류를 전자석과 전극 양자에 인가할 수 있다. 어떤 경우, 교번 신호를 전극, 그리고 같은 주파수를 가지나 이상(out of phase)인 전자석에 인가할 수 있다. 어떤 경우, 전원은 약 500헤르츠보다 크거나, 약 1킬로헤르츠보다 크게 전극 또는 전자석에 전류 또는 전압 신호를 인가할 수 있다. 어떤 상황에서, 전자석은 전극이 인가된 교류 전류와 같은 주파수로 작동되어 입자의 회전을 유지한다. 어떤 경우, 시판되는 이용 가능한 전원은 원자로의 전극 또는 전자석에 전류 또는 전압 신호를 인가하는데 사용될 수 있다. 적합한 전원 공급업체의 예로는 Advanced Energy Industries와 TDK-Lambda American Inc.를 포함한다.

[0218] 센서

[0219] 원자로 운전 시, 다양한 매개 변수를 모니터링하여 에너지 출력 속도를 제어하고, 효율을 개선하며, 부품 고장을 방지할 수 있다. 예를 들어, 원자로의 온도를 모니터링하여 원자로의 부품이 한정된 최대 온도값을 초과하지 않도록 할 수 있다. 영구 자석이 너무 뜨거워지면 소자될 수 있고, 전극 또는 어떤 다른 부품이 너무 뜨거워지면 항복하거나 용해될 수 있다. 어떤 경우, 원자로의 운전은 아주 높은 온도를 필요로 한다. 예를 들어, 일부 전자 방출체는 전자를 가둠 영역에 방출하기 전에 충분한 열 에너지를 얻어야 한다. 열전대(thermocouples), 추정 화상(inferred imagery) 및 서미스터(thermistors)와 같은 센서를 이용하여 원자로 내의 온도를 모니터링할 수 있다. 어떤 경우, 원자로 내 기타 위치의 온도를 측정하여 원자로 내 어느 위치의 온도를 추정할 수 있다. 예를 들어, 외부 전극 외부 표면의 온도를 모니터링하여 외부 전극 내부 표면의 온도를 추정할 수 있다. 어떤 경우, 실리콘 밴드갭(silicon bandgap) 온도 센서와 같이 비용이 저렴한 온도 센서를 이용하여 외부 위치에서 간접적으로 온도를 측정할 수 있다.

[0220] 일부 실시형태에서, 원자로 내의 가스 압력을 모니터링 할 수 있다. 전자가 가둠 벽에 긴밀히 집중되기에 전자 방출체 앞의 압력을 모니터링함으로써 전자 밀도에 대한 정보를 얻을 수 있다. 제어기는 실내에서 오는 압력을 측정하여 가둠 영역으로 들어오고 나가는 가스종의 유속을 조절할 수 있다. 일부 실시형태에서, 초당 수백 또는 수천 장의 이미지를 캡처하는 카메라를 사용하여 가둠 영역 또는 환상공간 내에서의 회전 속도를 모니터링할 수 있다. 어떤 경우, 형광을 발사하거나 아르곤 또는 양자점과 같은 광학 특징을 검출할 수 있는 종을 도입하는 것은 원자로 내 종들의 회전을 측정하는데 도움이 될 수 있다. 일부 실시형태에서, 가둠 영역 내의 가스 구성은 ^4He 와 ^3He 와 같은 융합 생성물 또는 반응물 가스 중 소량 중수소를 모니터링 할 수 있다. 일부 실시형태에서, 원 위치 질량 분석계(예를 들어, 가스 샘플에서 소량 중수소를 검출할 수 있는 Hiden Analytical의 qRGA), 분광계 또는 NMR 센서를 사용하여 융합 생성물과 반응물을 검출할 수 있다. 일부 실시형태에서, 원자로를 게이거(Geiger) 계수기를 설치하여 복사 수준을 측정할 수 있다.

[0221] 도 23a 내지 도 23c는 핵자기 공명 센싱이 동심 전극 실시형태에서 가스 반응물의 구성을 확정하는데 사용되는 방법의 예를 도시한다. 도 23a는 내부 전극(2320), 외부 전극(2310), 그리고 z 방향에서 가둠 영역을 통과하는 기본적으로 균일하고 시불변적인 자기장(2391)을 갖는 원자로를 도시한다. 축 방향에서 인가되는 자기장은 회전하는 종의 핵 스핀을 정렬하는데 사용될 수 있으며, 본 문서의 다른 부분에서 설명한 바와 같이 초전도 자석에 의해 인가될 수 있다. 어떤 경우, 축 방향 자기장은 약 0.1테슬라보다 크고, 어떤 경우 축 방향 자기장은 약 0.5테슬라보다 크며, 가둠 영역을 통과하는 축 방향 자기장은 약 2테슬라보다 큰 경우도 있다.

[0222] 검출이 필요한 경우, 방위각 방향에서 RF 펄스를 인가하여 가둠 영역 내에서 회전하는 종의 핵 스핀을 교란한다. 도 23b는 내부 전극의 z 방향에서 교류 전류를 인가하여, 방위각 시변 자기장(2392)을 생성하는 방법을 도시한다. 일부 실시형태에서, 중심 전극을 통과하는 교류 전류의 주파수는 약 60Hz 내지 1MHz 사이이고, 약 1MHz 내지 약 1GHz인 경우도 있다. 시변 자기장으로 종의 배열을 교란한 다음 도 23c에 설명된 검출 코일을 이용하여 종의 원자 핵 스핀 재배열 속도를 모니터링한다. 검출 코일(2390)은 기본적으로 원자로의 장축(z축)에 수직되고, 회전하는 종에 의해 흡수되고 재 방출되는 전자기 복사에 의해 코일을 통과하는 전류를

모니터링한다. 어떤 경우, 의학 핵자기 공명 시스템에서 사용되는 것과 유사한 검출 코일을 사용할 수 있다.

[0223] 제어시스템

[0224] 모니터링되는 매개 변수는 시스템 부품의 완전성을 유지하고 융합을 지지하는 방식으로 원자로를 운전하는 제어 시스템의 입력으로 제공될 수 있다. 제어시스템은 융합 반응의 모든 매개 변수를 제어할 수 있으며, 어떤 경우에는 열 에너지 수집 또는 이용 과정, 그리고 전기 에너지 또는 기타 유용한 형태의 에너지로 전환하는 작업을 제어할 수 있다. 일부 실시형태에서, 제어시스템은 열 생성과 열 추출 사이 평형을 유지한다. 따라서, 예를 들어, 미리 설정되고 선택된 평형을 유지하기 위해, 제어시스템은 원자로에 인가되는 전극의 전기 에너지(예를 들어 각 펄스 사이 시간을 연장하거나 단축하고 플라스마 생성을 위한 전압을 개변하는 것 중 적어도 한 가지 방식의 전기 펄스 변조를 통해)를 제어하고, 자기장(예를 들어, 조절 가능한 자석과 초전도 자석을 결합하여 사용)을 개변하며, 반응물의 밀도를 개변할 수 있다.

[0225] 본 문서의 다른 부분에서 논의된 바와 같이, 일부 매개 변수를 정의된 프로세스 윈도우에 포함시켜 이 두 조건을 충족시킬 수 있어야 한다. 어떤 경우, 제어시스템은 에너지 수요를 식별하는 정보를 수신하고 그에 상응하게 기술 조건을 조정한다. 제어시스템은 또한 기준을 가질 수 있으며, 이 기준을 충족시킬 경우, 원자로나 인근 운전자에 대한 손상을 방지하기 위해 자동 정지 프로세스를 가동한다. 예를 들어, 가동 벽의 온도가 어느 임계값을 초과하거나 복사 임계값에 도달하면, 원자로를 융합 반응을 퀸칭(quench)할 수 있다. 제어시스템은 모든 전극을 접지시키고, 가스 입력 밸브를 닫거나 질소와 같은 불활성 가스종을 도입하는 것 중 적어도 한 가지 방식으로 원자로를 퀸칭할 수 있다.

[0226] 어떤 경우, 제어시스템은 도 24에 도시된 바와 같이 패쇄 루프 피드백을 제공할 수 있다. 센서(2460)에서 측정된 입력 매개 변수(parameters)와 원하는 에너지 출력 신호(2461)에 기초하여, 제어시스템(2462)은 필요에 따라 원자로(2464)의 다양한 매개 변수 설정을 조절하여 에너지 출력(2465)을 제어하거나 기타 사양에 맞게 제어신호(2463)를 발송할 수 있다. 제어기가 사용하는 입력 매개 변수는 온도, 압력, 유속, 가스 조성 분율(예를 들어, 부분 압력), 입자 속도, 전극 사이의 전류 방전 및 전압 등 다양한 매개 변수를 포함할 수 있다. 어떤 경우, 제어시스템은 하나 또는 복수의 매개 변수의 과거 데이터를 사용한다. 예를 들어, 특정적인 온도값이 중요할 수 있다는 것을 알고 있지만, 온도 변동의 속도 및 규모 중 적어도 하나를 이해하는 것도 중요할 것이다. 제어기에 의해 조절 가능한 원자로 설정의 예로는, 인가 전류, 인가 전압, 인가 자기장 강도(전자석의 경우) 및 가스 유속(예를 들어, 수소 유속)이 포함된다. 일반적으로, 제어기는 관련 설정을 담당하는 원자로 부품에 제어신호를 전달한다. 예를 들어, 전원에 지정된 전압을 인가하도록 제어 신호를 전원에 전달할 수 있다. 어떤 경우, 설정은 제어시스템의 입력 매개 변수일 수도 있다. 예를 들어, 제어기는 어떤 전압을 인가해야 할지 결정할 때 현재 전극에 인가된 전류 및 전압 중 적어도 하나를 해석한다. 어떤 경우, 제어기는 기계 학습을 사용하여 결정을 개선함으로써, 원자로가 시간에 따라 더 효과적이고, 장치에서 물리적 변화(예: 부품이 고장 나고 교체될 때)에 저항하거나 에너지 수요를 예측할 수 있도록 한다.

[0227] 원자로의 일부 운전 특징은 단독으로 제어 가능하다. 예를 들어, 냉각 유체의 유속은 원자로의 주요 운전 입력(예를 들어, 전류 및 가스 유속)을 조절하는 제어시스템과 독립된 시스템을 사용하여 제어할 수 있다. 다른 예에서, 도 21a에 도시된 것과 같은 전자 방출 모듈은 측정된 전자 방출체의 온도를 수신하고 필라멘트에 어떤 전류를 인가하여 줄 가열을 제공해야 하는지 결정하는 연관된 제어를 가질 수 있다.

[0228] 상술한 제어시스템은 모듈화 또는 통합 방식으로 컴퓨터 소프트웨어를 사용하는 제어 논리 형태로 구현될 수 있다. 운전을 제어할 수 있는 많은 가능한 방식이 있다. 본 문서에서 제공하는 개시 및 지침에 기초하여, 당해 분야에서 통상의 지식을 가진 자는 하드웨어 및 하드웨어와 소프트웨어의 조합 중 적어도 하나를 사용하여 제어 기능을 구현하는 방법을 이해할 것이다.

[0229] 어떤 경우, 제어시스템은 Java, Lab VIEW, MATLAB, C++ 또는 Python과 같은 일반적인 또는 객체 지향 기술(object-oriented technique)을 사용하는 적합한 컴퓨터 언어를 사용하여 프로세서에 의해 실행되는 소프트웨어 코드로 구현될 수 있다. 소프트웨어 코드는 무작위 접근 메모리(RAM), 읽기 전용 메모리(ROM), 하드 드라이브 또는 플로피 디스크와 같은 자기매체, 또는 CD-ROM과 같은 광학 매체와 같은 컴퓨터 판독 가능 매체에 일련의 지령 또는 명령으로 저장될 수 있다. 어떤 경우, FPGA(현장 프로그래머블 게이트 어레이)를 이용하여 제어시스템을 테스트하고 설계한 다음 ASIC 공정을 통해 제작할 수 있다. 어떤 경우, 제어기는 제어 논리를 안전하게 저장하고 실행할 수 있는 단일 칩이다. 이런 모든 컴퓨터 판독 가능 매체는 단일 계산 장치 상 또는 단일 계산 장치 내부에 있으며, 시스템 또는 네트워크 내의 서로 다른 계산 장치 상 또는 서로 다른 계산 장치 내부에 존재할 수 있다. 예를 들어, 제어시스템은 하나 또는 복수의 프로세서, PLC, 컴퓨터, 프로세서-메모리 조합 및 이들

의 변형과 조합으로 구현될 수 있다. 제어시스템은 분산 제어 네트워크, 제어 네트워크 또는 당해 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 알고 있는 대형 공장과 시설 및 단독 장치의 기타 유형에 사용되는 제어시스템 및 이들의 조합과 변형일 수 있다.

[0230] 복사 차폐

[0231] 일부 실시형태에서, 예를 들어 원자로가 무중성자 또는 실질적인 무중성자 반응을 지원할 때 원자로는 복사 노출을 줄이기 위해 아주 적은 차폐가 필요할 수 있다. 중성자 복사 우려가 있는 경우, 원자로는 적당한 차폐물을 설치할 수 있다. 중성자는 대다수 재료를 쉽게 통과하지만 생물학적 손상을 일으킬 정도로 상호작용한다. 어떤 경우, 원자로는 중성자를 흡수하는 외함에 배치된다. 어떤 경우, 원자로의 가동 벽은 중성자를 흡수하는 외층을 포함할 수 있다. 어떤 경우, 차폐층은 높은 수분 함량을 가진 콘크리트, 폴리에틸렌, 파라핀, 왁스, 물 또는 기타 탄화수소 재료로 만들어질 수 있다. 어떤 경우, 차폐층은 납 또는 붕소를 중성자 흡수제로 포함할 수 있다. 예를 들어, 탄화붕소는 콘크리트 원자가 높은 차폐층으로 사용될 수 있다. 일부 실시형태에서, 원자로가 z 방향에서의 단부는 중성자를 흡수할 뿐더러 열 절연 및 전기 절연하는 질화붕소와 같은 재료를 포함할 수 있다. 어떤 경우, 전자 방출체(예를 들어 6붕화 란탄)는 중성자 복사를 차단하는 부가 기능을 제공하는데 사용된다. 대형 원자로에서, 물, 기름 또는 자갈 탱크를 원자로 위에 배치하여 효과적인 차폐를 제공하는 경우도 있다. 차폐층의 두께는 부분적으로 사용되는 재료, 원자로의 위치, 융합 반응의 유형 및 원자로의 크기에 의해 결정된다. 일부 실시예에서, 차폐층은 약 10센티미터보다 크고, 어떤 경우 차폐층은 약 100센티미터보다 크며, 차폐층이 1미터보다 큰 경우도 있다.

[0232] 교체 가능한 부품

[0233] 원자로 내 플라스마와 융합 생성물의 공격적 특성으로 인해, 전극이 손상, 왜곡, 취화될 수 있다. 정상적인 운전 조건에서, 원자로의 일부 부품은 결국 고장날 수 있으며 교체해야 한다. 또한, 운전 조건이 일부 임계값(예를 들어, 고온, 압력, 플라스마 전위 또는 반응물 농도)을 초과할 경우, 부품은 더욱 빨리 손상되거나 마모될 수 있다. 수소를 반응물로 사용하는 경우, 전극은 시간에 따라 수소의 취화를 받게 된다. 취화된 전극을 교체하지 않으면 전극은 분말로 된다. 어떤 경우, 원자로는 의도하지 않게 정상적인 운전 조건 외에서 작동하게 되어, 하나 또는 복수의 전극 또는 다른 부품의 마모가 증가되거나 구조 손상을 초래하게 된다. 예를 들어, 냉각시스템이 고장날 경우, 전극의 온도는 용해 온도에 접근하여 전극의 변형을 일으킬 수 있다. 어떤 경우, 열응력은 전극 상 또는 전극 내부에서 미세한 균열을 일으킬 수 있다. 전극에 내부 냉각시스템이 있는 경우, 당해 내부 냉각시스템이 파괴되어 수증기가 가동 영역에 들어가도록 허용되면, 원자로는 압력 최고점을 경험하게 된다.

[0234] 본 문서에서 설명되는 융합 원자로는 고도로 구성 가능하고 모듈화될 수 있다. 일부 실시형태에서, 하나 또는 복수의 부품은 교체 및 교환 중 적어도 하나가 가능하다. 일부 부품은 영구적인 것으로, 원자로의 수명 기간에 마모되지 않게 설계되며, 일부 부품은 일정한 횟수의 운전 주기 또는 운전 시간 후 교체될 것으로 예상된다. 각각의 교체 가능한 부품에 대해, 부품의 제거, 취급, 개조 및 교체 중 적어도 하나를 위한 지정된 절차가 있을 수 있다. 또한, 부품의 성능 저하를 표시 및 예측하는 것 중 적어도 하나를 실행할 수 있는 하나 또는 복수의 표시기와 현장에서 실행 가능한 진단이 있을 수 있다.

[0235] 교체 가능한 부품의 예로는 원자로의 하나 또는 복수의 전극, 융합 반응물, 수소 가스통과 같은 용기 융합 반응물, 그리고 원자로와 연관된 에너지 전환 장치가 있다.

[0236] 부품을 교체해야 하는 표시기의 예로는 전극의 전기 전도율 저하, 부품이 이미 작동한 시간 및 부품의 광학적 성능(예를 들어 부품 표면의 변화는 광학적으로 측정 가능함)이 있다. 기계적 고장은 외관 검사를 통해 확정할 수 있거나, 온도, 압력 및 전극의 전기 전도율과 같은 매개 변수를 모니터링하여 측정하는 경우도 있다. 어떤 경우, 제어시스템은 전극 또는 다른 부품의 기계적 고장을 확정하기 위한 논리를 포함한다.

[0237] 어떤 경우, 전극의 전기 전도율 및 전도(conductance) 중 적어도 하나는 시간에 따라 낮아진다. 플라스마의 휘발성으로 인해 전극에 형성되는 전기 절연 유전 코팅(dielectric coating)이 있을 수 있다. 전극의 전기 전도율 및 전도 중 적어도 하나가 낮아지면, 원자로의 효율이 저하되고 과량의 전력을 필요로 하는 상황 중 적어도 하나가 나타나게 된다. 낮아지는 전도 및 전기 전도율을 완화시키기 위한 조치를 취하지 않으면 원자로는 전기 및 열 위험 중 적어도 하나로 변한다. 본 문서에서의 많은 토론은 전극의 전기 전도율 및 전도 중 적어도 하나를 확정하는 것과 관련되지만, 전기 전도율은 전극의 서로 다른 위치에서 변화할 수 있다는 것을 이해해야 한다. 예를 들어, 반응을 향한 전극 표면의 전기 전도율은 긴 시간 운전 후 전극 내부의 전기 전도율보다 훨씬 낮다. 또 다른 예로, 전극 원시 재료의 전기 전도율은 작동 중 크게 변하지 않을 수 있지만, 반응을 향한 전극 표면에

형성된 유전체 필름은 전극의 전반적인 전도를 현저히 저하시킬 수 있다. 저항률 및 저항 중 적어도 하나는 전도율 및 전도 중 적어도 하나 대신 결정될 수 있다.

[0238] 다양한 기술을 사용하여 전극 전도율 및 전도 중 적어도 하나를 모니터링하거나, 전극 전도율 또는 전도가 주의 또는 교체가 필요한 수준에 도달했는지 확인할 수 있다. 한 예시에서, 전극의 기하학적 모양을 사용하여, 원자 로가 작동하지 않을 경우 전극 표면의 두 점 사이의 저항을 측정하여 전극의 전도율을 확인할 수 있다. 정기 검사 기간에 예를 들어 멀티미터(multimeter)를 사용하여 수동으로 당해 측정을 수행할 수 있다. 어떤 경우, 원자로는 운전 주기 사이에 자동으로 전극 저항을 측정하는 전기회로로 구성된다. 어떤 경우, 원자로의 제어시스템은 측정된 저항에 의해 자동으로 전극의 전기 전도를 확정하도록 구성될 수 있다. 전극의 전기 전도를 확정하는 다른 한 방식은, 가둠 영역의 가스 반응물이 다른 가스로 대체되고 가둠 영역 내에서 플라즈마를 생성하는 진단 순환을 수행하는 것이다. 예를 들어, 수소 가스는 아르곤 가스, 네온 가스 또는 질소 가스로 대체될 수 있다. 제어시스템은 이어서 플라즈마의 전기적 특성을 모니터링하고, 전극의 전압과 전극을 통과하는 전류를 측정할 수 있다. 아르곤 플라즈마의 전기적 특성에 기초하여 전극의 전도율을 확인할 수 있다. 예를 들어, 아르곤 플라즈마(또는 다른 플라즈마)의 측정된 전기적 특성을 예상 전기적 특성과 비교하여 각 전극의 전도율을 결정할 수 있다. 어떤 경우, 플라즈마(예를 들어 아르곤 플라즈마)의 예상 전기적 특성은 시뮬레이션을 통해 확정하거나 유전 코팅이 없는 새 원자로의 전기적 특성을 측정하여 확인할 수 있다.

[0239] 원자로의 전극은 저 전기 전도율 또는 전도 값의 예정 임계값을 지정하여 전극의 보수 또는 교체를 트리거(trigger)할 수 있다. 예를 들어, 전극의 전도율이 떨어져 기대값의 약 80%보다 낮을 경우, 전극을 교체하거나 처리하여 전도율을 적합한 수준으로 복구할 수 있다.

[0240] 일부 실시형태에서, 전극의 전기 전도율 또는 전도가 접수 가능한 수준 이하로 떨어질 때 세정 사이클을 수행한다. 예를 들어, 세정 사이클은 아르곤 가스와 같은 세정 가스를 가둠 영역에 도입하고, 일부 또는 전부 유전 코팅을 제거하는 플라즈마를 생성하기 위해 원자로를 작동시키는 것을 포함한다. 어떤 경우, 약한 이온플라즈마는 유전 코팅을 제거하기에 충분하다. 어떤 경우, 아르곤 가스는 세정 사이클 기간 완전히 이온화될 수 있다. 분해의 화학적 성질에 따라, 화학적 복원 처리를 할 수 있다. 예를 들어, 전극의 열화가 수소화물의 형성 또는 기타 형태의 수소 매개된 환원으로 인한 경우, 산소 함유 플라즈마와 같은 산화제로 손상된 전극을 처리할 수 있다.

[0241] 어떤 경우, 전극의 전기 전도율 또는 전도가 지정된 수준(예를 들어, 기대값의 약 50%) 이하로 내려갈 경우, 원자로가 운전하기에 안전하지 않다고 판단할 수 있다. 이는 두꺼운 유전체 필름이 형성되었고, 원자로는 전원에서부터 위험한 수준의 전력을 필요로 한다는 것을 나타낼 수 있다. 어떤 경우, 제어시스템 또는 관련 안전시스템은 영향 받은 전극을 교체하거나 복구할 때까지 운전을 정지할 수 있다. 어떤 경우, 원자로의 제어시스템은 전극 또는 다른 부품의 기계적 고장을 판단하고 이어서 원자로의 경보 또는 자동 정지를 트리거하기 위한 논리를 포함한다.

[0242] 일부 실시형태에서, 원자로의 하나 또는 복수의 전극 또는 자석은 보호층 또는 희생층을 포함한다. 어떤 경우, 당해 희생층은 계획된 간격으로 교체 가능한 슬리브(예를 들어, 가둠 벽을 형성하는 내부 표면의 슬리브)이다. 일부 실시형태에서, 열 순환에 의해 이미 나타날 수 있는 내응력을 제거하기 위해, 전극이나 슬리브와 같은 금속 부품은 복구 공정, 예를 들어, 소둔 공정을 거치도록 제거될 수 있다. 어떤 경우, 예를 들어, 부품이 수소 취화를 겪을 때 부품은 제거되고, 부품의 재료는 새로운 부품으로 재가공될 수 있다. 어떤 경우, 취화된 부품은, 예를 들어 탄탈륨 전극은 진공 상태에서 소둔을 거쳐 연성 상태로 복구될 수 있다. 예를 들어, 어떤 경우, 취화된 부품은 약 1200→의 진공 상태에서 소둔을 거쳐 복구될 수 있다.

[0243] 타겟 재료(융합 반응물)는 최종 소모되고 교체되어야 한다. 예를 들어, 일부 실시형태에서 붕소-11이 함유된 6 붕화 란탄을 양성자-붕소-11 융합 반응에 필요한 반응물로 사용한다. 이런 재료는 일단 소모되면 교체해야 한다. 열순환으로 인해 6붕화 란탄도 취약해져 효력을 잃을 수 있다. 6붕화 란탄이 파괴되거나 분해되면 융합 반응 생산량이 감소된다. 어떤 경우, 제어시스템은 타겟 재료가 소모되고 있거나 가둠 영역에서 이출되는 것에 대응하는 전력 저하를 작업자에게 통지할 수 있다. 어떤 경우, 소모 재료(예를 들어, 6붕화 란탄)가 예정된 사용 한도에 도달하고 또한 교체되어야 할 경우, 제어시스템은 작업자에게 경고할 수 있다.

[0244] 실시예

[0245] 이하 비제한적 실시예는 본 문서에 기술된 것보다 더 광범위한 원리에 따라 실천할 수 있는 일부 실시형태를 대표한다.

[0246] 1.)음극(외부 전극)

- [0247] 외부 전극은 "보호덮개"라고도 불리우며, 6봉화 란탄 또는 기타 타겟 재료가 부착된 여러 개의 점을 갖는 원기둥 모양의 금속 고리를 포함한다. 내화 금속의 높은 열저항으로 인해 보호덮개는 일반적으로 탄탈륨(Ta) 또는 텅스텐(W)과 같은 내화 금속으로 구성된다. 그러나 원자로의 일부 실시형태에서는 합금 316 스테인리스강과 같은 낮은 온도의 금속을 사용한다. 이런 실시형태들은 보호덮개가 합성 금속의 임계 용해 온도에 달하는 것을 방지하는 액체 냉각 회로를 포함할 수 있다. 해석한 바와 같이, 외부 전극은 더 음의 전극 또는 더 양의 전극일 수 있다.
- [0248] 전도율
- [0249] 외부 전원으로부터 오는 전력을 사용해 양극과 음극 사이에서 원자로의 플라즈마를 충돌한다. 당해 사건은 두 전극의 전압과 전극 및 플라즈마를 통해 전달되는 전류에 의해 매개된다. 플라즈마를 충돌하고 융합 반응을 가동하는데 필요한 전압은 두 전극의 전도율과 직접 관련될 수 있다. 위에서 기술한 바와 같이, 음극에 누적된 유전(전기 절연) 코팅이 존재하여 전극의 전도율에 영향을 줄 수 있다.
- [0250] 외부 전극의 전도율을 확정하기 위한 현장에서 실행 가능한 진단은 디지털 멀티미터를 사용하여 두 점 사이의 저항을 측정하는 것이다. 일부 실시에서, 일단 저항이 측정되면 그 값이 QA 소프트웨어에 입력되며, QA 소프트웨어는 외부 전극의 전도율과 운전 상태를 표시한다.
- [0251] 전도율을 확정하기 위한 제2 진단은 원자로에서 글로우 방전 아르곤 플라즈마(glow discharge argon plasma)를 충돌하는 것과 관련된다. 이 작업은 제어소프트웨어에 의해 수행되며, 당해 제어소프트웨어는 이어서 아르곤 플라즈마의 전기적 특성(전압 및 전류)을 모니터링한다. 내부 교정과의 자동 비교에 의해, 제어 소프트웨어는 전극의 전도율을 확정하고 데이터를 QA 소프트웨어로 전송할 수 있다.
- [0252] QA 소프트웨어가 전도율이 합성 금속의 표준 전도율 정격치의 80% 이하로 저하됨을 표시하면, AR 유닛이 최적 운전 상태 외 비최적 운전 상태에 들어선 것으로 간주된다. 전도율이 표준 정격치 50% 이하로 저하되면, AR 유닛이 전원 공급 장치에서 너무 많은 전력을 끌어와 잠재적인 전기 및 열 위험을 제공하기 때문에 안전하지 않은 운전 상태로 간주된다. 전도율이 0%이면, 이는 음극에 완전한 절연층이 형성되었고, 시스템이 운전 불가임을 나타낸다.
- [0253] 운전: 정상적으로 운전을 계속한다.
- [0254] 비최적 운전: 제공된 제어소프트웨어를 이용하여 AR 유닛에서 아르곤 세정 사이클을 실행한다. 전도율이 "최적 운전"영역에 진입할 때까지 반복한다. 전도율이 개선되지 않으면 아래의 "안전하지 못한 운전"을 수행한다.
- [0255] 안전하지 못한 운전: 외부 전극을 세정해야 한다.
- [0256] 구조적 완전성
- [0257] 보호덮개의 기계적 구조는 손상, 왜곡 또는 취화될 수 있다. 이는 여러 가지 다른 원인으로 인해 발생할 수 있다.
- [0258] 냉각시스템의 고장 또는 냉각시스템의 부당한 운전은 안전 운전 매개 변수를 초과하는 원자로 내의 극단 온도를 초래할 수 있다. 이런 극단 온도는 열충격을 초래하여 보호덮개나 보호덮개 내에서 미세한 균열을 일으킬 수 있다. 또한 이런 극단온도가 보호덮개 합성 재료의 용융온도에 접근할 때, 보호덮개 자체는 변형되고 용해되기 시작한다.
- [0259] 구조적 완전성의 결함을 검출하기 위한 현장에서 실행 가능한 진단은 제어소프트웨어에서 오는 이상 온도 경보가 제시하는 외관 검사이다. 제어소프트웨어는 유닛의 복수의 서로 다른 부품 온도를 모니터링하고, 각 부품이 안전 운전 매개 변수 내에서 유지되는지 검사할 수 있다. 어떤 이런 부품의 온도가 안전 운전 매개 변수를 초과하면 온도 표시기 경보를 유발한다. 과열 부품의 지속 시간이 연장되는 것과 같은 극단 상황에서, 시스템은 자동으로 닫히고 보호덮개의 완전성에 대해 필수적인 외관 검사를 진행해야 한다. 보호덮개가 손상되면 QA팀에 보내 검사 및 분석할 수 있다.
- [0260] 2.)양극(내부 전극)
- [0261] 내부 전극에는 원기둥 모양의 금속판과 챔버 뒤면의 고전압 세라믹 피드스루(feedthrough)에 부착된 중공 금속 원통이 포함될 수 있다. 이 두 부품을 "헤드"와 "로드"라 한다. 내화 금속의 높은 열저항으로 인해 중심 전극 헤드는 일반적으로 탄탈륨(Ta) 또는 텅스텐(W)과 같은 내화 금속으로 구성된다. 그러나 원자로의 다른 실시형태에서는 합금 316 스테인리스강과 같은 낮은 온도의 금속을 사용한다. 고온 중심 헤드는 긴 시간 작동할 수 있기에

교체 빈도가 비교적 낮다. 중심 전극 로드는 헤드와 같은 극단 온도를 겪지 않기 때문에 일반적으로 합금 316 스테인리스강으로 만들어진다.

[0262] 일부 실시형태에서, 중심 전극 로드는 액체수로 냉각하여 과열을 방지한다. 고온 헤드를 사용하는 실시형태에서, 헤드는 몰리브덴(Mo) 고정 나사를 통해 로드(또는 헤드)에 부착된다. 저온 헤드를 사용하는 실시형태에서, 헤드도 수냉식으로, 냉각 회로가 연속적(또는 주기적)이도록 로드(또는 헤드)에 용접되거나 납땜된다.

[0263] 전도율

[0264] 외부 전극의 경우와 마찬가지로, 내부 전극의 전도율은 플라즈마의 전기적 특성을 조절한다. 전도율의 변화는 용합 반응에 사용되는 플라즈마를 충돌하고 유지하는데 필요한 전압의 변화를 일으킨다. 위에서 언급한 바와 같이, 원자로 내부에서 발생하는 플라즈마와 용합 반응의 휘발성은 내부 전극의 표면에 유전 코팅을 축적하여 전도율을 영향할 수 있다.

[0265] 중심 전극의 전도율(상술한 각 운전 상태에 대하여)을 확정하기 위한 표준적인 현장에서 실행 가능한 진단은 내부 전극에 사용되는 것과 같다.

[0266] 구조적 완전성

[0267] 부품의 구조적 완전성에 관하여, 내부 전극은 외부 전극(또는 보호덮개) 같은 운전 위험을 갖는다. 내부 전극은 손상, 왜곡 또는 취화될 수 있지만, 내부 전극의 내부에 액체 냉각 통로가 있기에, 제어시스템을 통해 특징적인 부품을 열 모니터링하는 것을 제외한 고장 검출을 위한 추가 방법이 더 있다.

[0268] 중심 전극 로드의 온도(또는 대체 실시형태로 상술한 액체 냉각을 거친 중심 전극 헤드의 온도)가 합성 재료의 용해 온도에 접근할 경우, 로드(또는 헤드)의 외부 표면이 과열되어 수증기와 액체상태 물의 조합이 진공 챔버에 들어갈 수 있다. 이는 냉각시스템의 고장 또는 부당한 사용, 그리고 중심 전극 로드(또는 헤드) 자체에 지속적인 플라즈마 아크가 나타나기 때문에 발생할 수 있다. 일단 이런 상황이 발생하면, 틸트를 통해 챔버로 유입된 수증기의 우세로 인해 순간적으로 압력이 상승하게 된다. 제어시스템은 이런 압력의 상승을 감지하고 즉시 시스템을 닫음과 동시에 오류 고장이 나타나서 즉각적이고 필요한 외관 검사를 보장한다.

[0269] 3.)6붕화 란탄 타겟

[0270] 흔히 LaB₆이라 불리우는 6붕화 란탄은 내화 세라믹 재료로서, 그의 낮은 일함수로 인해 과학 공업에서 전자 방출체로 사용된다. 원자로에서 LaB₆은 균일하게 분포된 부착점에 의해 내벽을 따라 음극에 부착된다. LaB₆은 용합 반응에 필요한 고체 붕소 연료를 함유하며, 연료가 다 소모되면 교체해야 한다.

[0271] 붕소 동위원소 조성

[0272] 자연계에서 발견한 붕소에는 두 가지 주요한 동위원소(양성자의 수가 같지만 중성자의 수가 다른 원자), ¹⁰B와 ¹¹B가 있다. 이 두 동위원소에서 가장 풍부한 것은 ¹¹B로서, 전체 붕소의 80%가 이 형태로 존재하기 때문이다. 이것은 또한 용합 반응이 일어나는데 필요한 동위원소이기 때문에, LaB₆ 연료에 존재하는 이 특징적인 동위원소의 상대적 농도를 알아야 할 수도 있다. 당해 농도를 검출하는 방법은 다양하며, 유도결합 플라즈마 방출 분광법(ICP-OES), 열 이온화 질량분석법(TIMS), 이차이온 질량분석법(SIMS), 유도결합 플라즈마 질량분석법(ICP-MS) 등이 있다.

[0273] 일부 실시형태에서, LaB₆의 붕소 동위원소의 조성을 측정할 수 있는 현장에서 실행 가능한 진단이 존재하지 않는다. 이는 샘플을 제3자 분석 진단 실험실에 보내야 하는 기술이기 때문이다.

[0274] 구조적 완전성

[0275] 당해 화합물은 세라믹 성질로 인해 아주 취약하며 열응력에 아주 민감하다. 원자로 내에서 발생하는 휘발성 반응, 그리고 중심 전극 및 보호덮개와 같은 여러 가지 부품에 존재하는 빠른 가열 및 냉각 속도는 LaB₆의 구조적 완전성이 파괴되도록 할 수 있다. 원자로의 몇 개 실시형태에서 관찰한데 의하면, LaB₆ 연료는 시간이 흐름에 따라 과열되는데 이는 교체의 수요를 보장해준다.

[0276] LaB₆ 연료의 구조적 완전성(및 그의 결핍)을 확정하기 위한 현장에서 실행 가능한 진단 중 하나는 육안 검사에 의해 수행된다. 제어소프트웨어가 제공하는 일부 표시기가 있어 LaB₆에 육안 검사의 필요성을 보장한다. 용합 반

음이 LaB_6 위치에서 발생하기에, 이 위치에서 모든 출력 전력(제어소프트웨어에 의해 측정된 것과 같음)을 추출한다. 원자로의 정상 전력 출력이 20% 이상 저하되면, 하나의 LaB_6 조각에 문제가 있음을 나타내고, 소프트웨어에서 전력 표시기 경보를 트리거한다. 이 유형의 경보는 LaB_6 조각에 육안 검사를 진행하는 것이 필요함을 보장한다.

[0277] 에너지 전환 하드웨어

[0278] 본 문서에서 기술되는 원자로는 하나 또는 복수의 형태로 에너지를 생성하며, 일반적으로 이들은 동시에 다양한 형태의 에너지를 생성한다. 대다수 원자로는 운전 시 열 에너지를 생성한다. 이들은 또한 광범위하거나 좁은 범위의 주파수에서 복사 에너지를 생성할 수 있다. 예를 들어, 원자로 내의 활발한 종(excited species)(예를 들어, 전자 활발한 수소원자)은 하나 또는 복수의 주파수 대역에서 복사를 방출한다. 일반적으로, 원자로는 플라스마가 필요한 및 플라스마를 생성하는 것 중 하나의 모드로 운전되며, 플라스마가 존재할 때 이는 복사 에너지를 생성한다. 더 나아가, 많은 반응은 높은 수준의 운동 에너지를 가진 대전종(예를 들어, 이온, 알파 입자)을 생성한다. 원자로도 압력 변화 또는 진동을 통해 기계 에너지를 생성한다.

[0279] 이런 에너지 형태에서 하나 이상이 특정 응용에 사용 가능한 다른 에너지 형태로 전환될 수 있다. 따라서, 일부 실시형태에서, 에너지 전환 장치 또는 부품은 관련된 원자로와 연결된다. 어떤 경우, 에너지 전환 장치는 원자로에서 오는 열 에너지를 전기 에너지(예를 들어, 열전 장치)로 전환한다. 어떤 경우, 에너지 전환 장치는 원자로에서 오는 열 에너지를 기계 에너지(예를 들어, 열 엔진)로 전환한다. 어떤 경우, 에너지 전환 장치는 원자로에서 오는 전자기 복사를 전기 에너지(예를 들어, 광전변환 소자(photovoltaic device))로 전환한다. 어떤 경우, 에너지 전환 장치는 대전 반응 생성물(예를 들어, 알파 입자) 또는 이온화 용합 반응물(예를 들어, 양성자)의 운동 에너지를 전기 에너지로 전환한다. 어떤 경우, 에너지 전환 장치는 원자로에서 오는 기계 에너지를 전기 에너지(예를 들어, 압전 소자)로 전환한다.

[0280] 다양한 에너지 전환 장치는 원자로를 통해 생성되는 열 에너지를 기계 에너지 및 전기 에너지 중 적어도 하나로 전환시키는데 사용된다. 예를 들어, 열전 발전기는 원자로와 열 연결되어 전기 에너지를 생성한다. 열전 발전기는 이하와 같이 원자로와 열 연결될 수 있다. 예를 들어, 원자로의 가동 벽에 놓이거나 열 파이프와 같은 열 전달 장치를 통해 원자로에서 오는 열 에너지를 전달한다. 또 다른 예에서, 원자로는 열 엔진을 통해 열 에너지를 기계 에너지로 전환할 수 있다(예를 들어, 이동 피스톤 또는 회전 크랭크축). 일부 실시형태에서, 원자로에는 스텔링 엔진이 장착된다. 일부 실시형태에서, 원자로에는 열 엔진이 장착될 수 있다. 예를 들어, 작업 유체가 주기적인 위상 변화를 겪는 랭킨 사이클을 사용하는 열 엔진을 사용한다. 전기 에너지가 필요한 경우, 예를 들어 회전 크랭크축이나 진동 피스톤을 전기 에너지로 전환하는 발전기로 열 엔진을 구성할 수 있다.

[0281] 일부 에너지 전환 장치는 원자로에서 생성하는 전자기 복사 또는 복사 에너지를 전기 에너지로 전환할 수 있다. 예를 들어, 원자로는 가동 영역의 임의 일단부에 광전지가 있어 복사 에너지를 전기 에너지로 전환할 수 있다. 어떤 경우, 원자로는 투명한 장벽층을 포함하여 열 보호 및 광학 소자 중 적어도 하나를 제공함으로써 복사 에너지를 광전지에 집중할 수 있다. 어떤 경우, 광전지는 원자로에서 방출되는 복사 에너지(예를 들어 수소에 대응함)에 대응하는 협대역 파장의 조정된 밴드갭을 가질 수 있다.

[0282] 원자로는 또한 원자로에서 방출되는 대전입자의 운동 에너지를 전기 에너지로 전환하는 부품으로 구성될 수 있다. 예를 들어, 양전하를 띤 입자(예를 들어 알파 입자)가 그 행진을 늦추는 하나 또는 복수의 전극에서 생성하는 역방향 전기장을 통과하도록 강요할 수 있다. 입자가 감속함에 따라 양전하를 띤 전극에 연결된 전기 회로에서 전류가 생성된다. 어떤 경우, 원자로에서 방출된 알파 입자는 인가된 자기장을 거쳐 이런 전극들로 유도될 수 있다. 어떤 경우, 원자로는 핵반응으로 인해 생성되는 플라스마의 운동 에너지를 전기 에너지로 전환하는 자기 유체역학 발전기(MHD발전기)로 구성될 수 있다.

[0283] 어떤 경우, 원자로는 단일 에너지 전환 장치(또는 에너지 전환 모듈)를 사용하여 원자로에서 생성하는 에너지를 기계 에너지 및 전기 에너지 중 적어도 하나로 전환할 수 있다. 일부 실시형태에서, 원자로는 복수의 에너지 전환 장치(또는 에너지 전환 모듈)를 사용하여 원자로에서 생성되는 에너지를 기계 에너지 및 전기 에너지 중 적어도 하나로 전환할 수 있다. 원자로가 다양한 형태의 에너지를 생성할 수 있기에 서로 다른 유형의 에너지 전환 장치를 조합하여 생성되는 총 기계 에너지 및 전기 에너지 중 적어도 하나를 증가할 수 있다. 어떤 경우, 제 2 에너지 전환 장치를 추가하면 제1 에너지 전환 장치의 에너지 출력을 저하시키지 않을 수 있는데, 이는 에너지 전환 장치가 원자로에 의해 생성되는 다른 형태의 에너지를 전환하기 때문이다. 예를 들어, 일부 실시형태에서, 원자로를 복사 에너지를 전환하는 광전지와 열 에너지를 전환하는 열전 발전기 양자에 의해 전기 에너지를

생성할 수 있다. 당해 실시예에서, 광전지의 존재는 열전 발전기가 생성하는 전기 에너지를 감소시키지 않을 수 있고, 그 반대로 마찬가지일 수 있다. 일부 실시형태에서, 원자로는 원자로에서 생성하는 같은 유형의 에너지를 전환하는 복수의 에너지 전환 장치로 구성될 수 있다. 예를 들어, 어떤 경우, 원자로는 스텔링 엔진 및 열전 발전기로 구성될 수 있는데, 양자 모두 열 에너지를 이용한다. 당해 실시예에서, 열전 발전기는 스텔링 엔진에 의해 기계 에너지 및 전기 에너지 중 적어도 하나로 전환되지 못한 열 에너지를 간단히 포획할 수 있다. 일반적으로, 본 문서에서 기술하는 에너지 전환 장치 또는 모듈의 어떠한 조합은 원자로에서 기계 에너지 및 전기 에너지 중 적어도 하나를 생성하는데 사용될 수 있다.

[0284] 외함

[0285] 비록 설명되지 않았지만, 원자로는 가둠 영역과 주변 환경을 분리하는 외함을 포함할 수 있다. 어떤 경우, 외함의 크기는 부분적으로 가둠 벽의 외부 크기에 의해 제한된다. 일부 실시형태에서, 가둠 벽은 r방향에서 외함의 변계에 한정되며, 가둠 영역은 z 방향에서 가둠 벽 양 끝의 플랜지를 사용하여 외부 환경과 격리된다. 일부 실시형태에서, 제어시스템, 전원, 자석 및 에너지 전환 장치를 포함하는 전체 시스템은 외함에 배치된다. 외함에 사용되는 재료의 선택은 의도된 목적에 의해 결정된다. 예를 들어, 외함을 이용하여 생물 차폐, 열 절연 및 저압 운전 조건 가능 중 적어도 하나를 제공할 것이 필요할 수 있다. 어떤 경우, 외함은 층마다 다른 기능을 제공하는 계층 구조를 가질 수 있다. 예를 들어, 외함은 생물 차폐에 사용되는 탄화수소 화합물 재료와 세라믹층을 포함하여 열 절연을 제공할 수 있다. 어떤 경우, 하나 이상의 외함을 사용할 수 있다. 예를 들어, 제1 외함은 z 방향에서 가둠 영역을 밀폐하는 플랜지를 포함하여 진공 챔버를 생성하고, 제2 외부 외함은 원자로 전체를 둘러싸게 된다. 본 문서에서 제공하는 개시와 지침을 기초로, 당해 분야에서 통상의 지식을 가진 자는 원자로 응용에 대한 필요 사항을 충족하는 외함을 구현하는 방식 및 방법 중 적어도 하나를 알고 이해할 것이다.

[0286] 프로세스 조건

[0287] 다단계 운전 및 반응 중 적어도 하나

[0288] 다단계 운전 시, 원자로의 에너지 출력 또는 효율이 향상되는 경우도 있다. 어떤 경우, 원자로는 원자로 내에서 융합 반응을 진행할 수 있는 조건을 준비하기 위한 하나 또는 복수의 준비 단계를 가질 수 있다. 예를 들어, 다단계 프로세스의 준비 단계는 전자 방출체의 온도를 높이고, 가둠 벽의 온도를 냉각하며, 가둠 영역에서 플라스마를 생성하거나 가둠 영역 내의 기압을 개변하는데 사용될 수 있다. 도 25는 원자로의 운전에서 사용 가능한 단계적인 프로세스 흐름의 예시를 도시한다. 제1 운전(2501)에서, 전자를 방출하는 규정된 온도에 도달할 때까지 전자 방출체를 가열한다. 2501에서 전자 방출체를 가열한 다음, 약한 이온화 플라스마를 충출할 수 있도록 원자로의 전극 사이에 교류 전류를 인가한다.

[0289] 가둠 영역에서 플라스마를 일으킨 다음, 원자로를 즉시 원자로의 대전입자를 회전시키고 융합 반응을 유지하는 단계로 이행한다. 일부 로렌츠 회전자에서, 이는 자기장을 균일하게 인가할 때 전극에 교류 전류를 인가함을 의미한다. 또는 원자로의 z 방향에서 교번 자기장을 인가하는 실시형태에서, 이는 자기장 진동과 같은 주파수로 전극에 교류 전류를 인가함을 의미한다. 어떤 경우, 전기 자석(예를 들어 초전도 자석) 또는 물리적으로 이동하는 영구 자석에 교류 전류를 인가하여, 예를 들어 회전자가 가둠 영역의 어느 한쪽에 교번 자기 방향이 있는 자석을 구비함으로써, 교번 자기장을 인가할 수 있다. 어떤 경우, 전기장과 자기장을 같은 주파수로 교대하여 중성물질과 대전입자의 회전이 같은 방향을 유지하도록 한다. 예를 들어, 어떤 경우, 전기장과 자기장은 모두 약 0.1 Hz 내지 10 Hz 사이의 주파수로 진동할 수 있고, 어떤 경우 약 10 Hz 내지 약 1 kHz로 진동할 수 있으며, 1 kHz 보다 큰 경우도 있다.

[0290] 파동-입자 실시형태에서, 전극 전하 시퀀스 또는 구동 신호를 가둠 영역과 접하는 전극에 인가하여 회전을 시작할 수 있다. 예를 들어, 구동 신호는 약 60 Hz와 같이 낮은 주파수에서 시작하여 10 Mhz와 같이 더욱 높은 주파수로 경사지게 올라가 수 있다. 어떤 경우, 원자로를 융합 반응을 종료하는데 사용되는 유사한 단계적 프로세스를 포함할 수 있다. 어떤 경우, 원자로를 융합 반응을 중지한 다음 재개하는 사이에 발생하는 유향 운전 단계를 가질 수 있다. 원자로 운전 기간 매개 변수를 면밀히 모니터링할 수 있다. 로렌츠 힘을 이용하여 전하 종을 회전시키는 원자로에서, 가둠 영역 또는 가둠 벽 근처의 환상공간에서 전류의 밀도는 약 150 A/m^2 내지 약 10 kA/m^2 범위에 있을 수 있으며, 예를 들어 약 150 A/m^2 내지 약 9 kA/m^2 이다. 어떤 경우, 가둠 벽 근처의 전류 밀도는 약 150 A/m^2 내지 약 700 kA/m^2 범위에 있을 수 있으며, 약 400 A/m^2 내지 약 6000 kA/m^2 범위에 있는 경우도 있다. 어떤 경우, 가둠 벽 근처에서 충족한 전기장을 유지하기 위해 원자로를 운전한다. 예를 들어, 어떤 경우 전기장

은 약 25 V/m 보다 크거나, 어떤 경우 약 40 V/m 보다 크며, 약 30 V/m 보다 큰 경우도 있다.

[0291] 일부 다단계적인 운전에서, 원자로는 대전입자의 회전 방향을 주기적으로 개변할 수 있다. 어떤 경우, 대전입자의 회전 방향을 개변함으로써 회전하는 두 융합 반응물 사이 충돌 속도를 증가할 수 있다. 어떤 경우, 회전 방향을 교체하여 원자로의 융합 속도를 증가하거나 제어할 수 있다. 일부 실시형태에서, 회전 방향을 교체함으로써, 가둠 표면이 아닌 환상공간에서 발생하는 융합 가능한 사건으로 인해, 가둠 벽의 융합 가능한 사건의 속도를 낮출 수 있다. 가둠 벽이 너무 뜨거워지면 가둠 벽에 전달하는 열을 줄이는데 도움이 될 수 있다. 로렌츠 회전자의 경우, 교대로 인가되는 전기장 및 자기장 중 적어도 하나를 통하여 회전 방향을 교체할 수 있다. 예를 들어, 자기장이 교체되고 전기장이 변하지 않으면 대전입자에 있는 로렌츠 힘도 방향을 교체하게 된다. 어떤 경우, 인가되는 전기장 및 자기장 중 적어도 하나는 약 0.1 Hz 내지 약 10 Hz 사이에서 교체되고, 어떤 경우 약 10 Hz 내지 1 kHz이며, 약 1 kHz 보다 큰 경우도 있다. 이는 전자가 풍부한 영역에 전자를 집중시키고, 인접한 곳에 회전 입자를 집중시키는 효과가 있으며, 어떤 경우 융합 반응의 수량을 증가시킬 수 있다.

[0292] 가스 조건

[0293] 가스(예를 들어, 수소 또는 헬륨 반응 가스)가 가둠 영역에 유입되는 경우, 반응 가스가 일정한 순도를 갖는 것이 유리할 수 있다. 어떤 경우, 반응 가스 체적 중의 불순물은 융합 속도와 총 에너지 출력을 낮출 수 있다. 반응 가스를 순수한 형태로 쉽게 구할 수 있는 경우, 반응 가스의 순도는 적어서 체적 기준 약 99.95% 또는 적어서 체적 기준 약 99.999%이다. 이는 실린더의 불순물이 10vpm(백만분의 체적)보다 적다는 것을 의미한다.

[0294] 어떤 경우, 수소 반응 가스에서 중수소를 발견할 수 있는데 이는 천연적으로 존재하는 수소 동위원소이다. 예를 들어, 중수소는 수소 탱크 내의 불순물에 존재할 수 있으며, 따라서 충족한 양으로 반응 가스 내에 존재할 경우 잠재적 위험이 있다. 연료에 중수소가 너무 많으면 원자로 내에서 양성자-붕소¹¹를 제외한 융합 반응이 발생할 수 있다. 어떤 경우, 이런 다른 반응은 방사성 부산물을 방출할 수 있다. 반응 기체 중 중수소의 양을 모니터링하기 위해, 원자로는 Hiden Analytical 질량 분석계의 qRGA와 같은 센서를 장착하여 수소 반응 가스 중 중수소의 양을 모니터링할 수 있다.

[0295] 점화하기 전에, 원자로는 0%에 가까운 이온과 중성물의 물 분율을 함유할 수 있다. 플라즈마를 충돌한 다음 원자로를 작동시켜 회전하는 가스 중에서 이온과 중성물의 물 분율이 약 1:1000 내지 약 1:1000000 이 되게 한다. 어떤 경우, 반응 가스에서 이온과 중성물의 물 분율은 다단계 프로세스 흐름의 특정 단계에 따라 변화할 수 있다. 예를 들어, 도 25의 프로세스 흐름에서, 단계 2502에서 플라즈마를 작동한 후 가스의 이온과 중성물의 물 분율은 단계 2503에서 원자로를 정상상태로 운전할 때보다 더 높을 수 있다.

[0296] 다른 부분에서 기술된 바와 같이, 원자로는 가스 입구 밸브와 출구 밸브를 장착할 수 있다. 원칙적으로, 원하는 가스 조성 또는 가스 압력을 가둠 영역 내에서 유지하기 위해, 가스 입구 밸브 및 가스 출구 밸브 중 적어도 하나를 통한 흐름을 제어할 수 있다. 어떤 경우, 약 분당 한 번 또는 약 시간당 한 번 보다 작은 속도로 가둠 영역의 가스 체적을 교체할 수 있다. 많은 실시형태에서, 가스 밸브를 밀봉하여 원자로 운전 기간 유체 흐름이 없도록 할 수 있다.

[0297] 어떤 경우, 당해 가둠 영역에서 플라즈마를 생성하기 전에 반응 가스는 표준 온도와 압력에서 유지된다. 진공 외함을 사용할 때와 같은 경우, 가둠 영역에서 플라즈마를 충돌하기 전에 진공 펌프를 사용하여 압력을 약 1×10^{-2} 토르(Torr) 이하로 낮출 수 있으며, 경우에 따라 약 1×10^{-6} 이하로 낮출 수 있다. 어떤 경우, 중성물의 밀도를 증가하기 위해, 가둠 영역에서 플라즈마를 충돌하기 전에 또는 원자로 운전 기간에 반응 가스 연료선은 원자로 내의 압력을 약 0.1토르 이상으로 증가할 수 있으며, 경우에 따라 약 10토르 이상으로 증가할 수 있다. 원자로 운전 기간, 입자는 지구 표면의 중력 가속도의 10억배에 달하는 구심 가속도를 경험할 수 있다. 어떤 경우, 원자로를 운전 기간에 가둠 벽을 따르는 가스 압력 및 밀도 중 적어도 하나를 모니터링할 수 있다. 가둠 벽 근처에서 회전 종이 유도하는 압력이 부족하면, 전자가 풍부한 영역은 가둠 영역에 더 멀리 확산될 수 있고 원하는 전자 차폐 효과가 제공되지 않는다. 어떤 경우, 가둠 벽 근처의 가스 압력을 실시간 모니터링 할 수 있다. 플라즈마를 일으키기 전에, 가스의 온도는 실온과 비슷할 수 있으며, 가스가 초기에 가열되는 경우도 있다. 어떤 경우, 가스를 약 1800℃ 이상 가열하고, 가스를 약 2200℃ 이상 가열하는 경우도 있다. 원자로가 정상상태로 운전하는 동안, 가둠 영역의 가스가 약 400℃ 내지 약 800℃ 범위가 되도록, 어떤 경우 약 900℃ 내지 1500℃ 범위가 되도록 가스 온도를 가열한다.

[0298] 다른 부분에 기술된 바와 같이, 다양한 메커니즘을 통해 반응 가스를 원자로에 전달할 수 있다. 입구 밸브를 이용하는 경우, 가스 반응물은 가스통 또는 가압 탱크에 의해 전달될 수 있다. 일부 실시형태에서, 수소와 같은

반응 가스는 가둠 벽 또는 수소 흡수 재료(티타늄 또는 팔라듐)를 통해 밖으로 확산되어 가둠 영역에 전달된다.

[0299]

쿨롱 장벽을 감소하는 운전 조건

[0300]

본 문서의 다른 부분에서 기술된 바와 같이, 단위 시간의 체적당 융합 속도는 $dN/dT=n_1n_2\sigma v$ 로 표시될 수 있다.

[0301]

여기서, n_1 과 n_2 는 각 반응물의 밀도이고, σ 는 특정 에너지에서의 융합 단면이며, v 는 두 가지 상호작용하는 종 사이의 상대적 속도이다. 쿨롱 장벽을 감소하면 승적(σv)을 증가할 수 있다. 어떤 경우, 융합 단면은 약 10^{-30} cm^2 내지 10^{-48} cm^2 사이일 수 있으며, 약 10^{-28} cm^2 내지 약 10^{-24} cm^2 사이인 경우도 있다. 어떤 경우, 상대 속도는 10^4 m/s 내지 10^6 m/s 사이이며, 약 10^3 m/s 내지 10^4 m/s 사이인 경우도 있다. 어떤 경우, 쿨롱 장벽을 감소하면 가둠 벽을 따라 반응 속도가 입방센티미터 당 초당 약 10^{17} 내지 약 10^{22} 회인 융합 반응이 발생할 수 있다.

[0302]

다른 부분에 기술된 바와 같이, 가둠 벽 근처에 충돌하는 핵 사이 차폐 효과를 제공하기 위해 전자가 풍부한 영역이 형성될 수 있다. 어떤 경우, 전자 방출체는 당해 영역에 자유 전자를 제공하는데 사용될 수 있다. 방출체는 광학적으로(예를 들어, 레이저 이용) 회전 입자의 마찰 가열 및 줄 가열 중 적어도 하나에 의해 에너지를 보낼 수 있다.

[0303]

전자가 풍부한 영역에서, 전자의 밀도는 약 10^{10} cm^{-3} 내지 약 10^{23} cm^{-3} 수량급일 수 있고, 당해 영역의 전자 밀도는 약 10^{23} cm^{-3} 수량급인 경우도 있다. 일부 실시형태에서, 전자가 풍부한 영역의 중성물 밀도는 약 10^{16} cm^{-3} 내지 약 10^{18} cm^{-3} 일 수 있고, 가둠 영역의 중성물 밀도는 약 10^{20} cm^{-3} 수량급인 경우도 있다. 전자가 풍부한 영역에서 양이온의 밀도가 중성물보다 훨씬 낮다는 것을 발견할 수 있다. 어떤 경우, 양이온의 밀도는 약 10^{15} cm^{-3} 내지 약 10^{16} cm^{-3} 이다. 어떤 경우, 전자가 풍부한 영역에서 전자와 양이온의 비율은 약 $10^6:1$ 내지 약 $10^8:1$ 의 범위에 있다.

[0304]

전자가 풍부한 영역의 반경 방향 두께는 대부분 전자 경사도가 존재하는 영역으로 표시될 수 있다. 어떤 경우, 전자가 풍부한 영역은 약 50 nm 내지 약 $50 \mu\text{m}$ 범위에 있으며, 전자가 풍부한 영역이 약 500 nm 내지 약 $1.5 \mu\text{m}$ 인 경우도 있다.

[0305]

예를 들어 가둠 벽에서 약 $1 \mu\text{m}$ 떨어진 전자가 풍부한 영역 내에 강한 전기장이 존재할 수 있다. 어떤 경우, 전자가 풍부한 영역(또는 가둠 영역)의 전기장은 10^6 V/m 보다 크며, 전기장이 약 10^8 V/m 보다 큰 경우도 있다. 어떤 경우, 당해 영역의 전자 온도는 약 10000K 내지 약 50000K 이며, 약 15000K 내지 약 40000K 인 경우도 있다.

[0306]

어떤 경우, 한 매개 변수가 물리적 제한에 의해 구속되는 경우, 그 매개 변수는 결국 전자가 풍부한 영역 내의 다른 매개 변수에 영향을 주는 구동 매개 변수가 될 수 있다. 예를 들어, 로슨(Lawson) 조건은 매개 변수들의 균형에 관련된다.

[0307]

어떤 경우, 전자가 풍부한 영역의 매개 변수는 목표로 하는 융합 반응에 따라 부분적으로 달라진다. 예를 들어, $p+^{11}\text{B}$ 반응은 $\alpha + \text{D} + \text{D}$ 반응에 상대해 매개 변수 범위가 다르다.

[0308]

일반적으로, 본 개시의 일부 실시형태는 음(흡인) 전위가 있는 효과를 생성, 수정 또는 이용하여 쿨롱 장벽을 낮추거나 감소한다. 일부 실시형태에서, 원자핵에 근접한 전위는 터널링(tunneling)에 의해 현저하게 낮아진 쿨롱 장벽을 갖는다.

[0309]

융합 사건의 확률을 높이는 또 다른 방법은 융합 반응물의 스핀을 정렬하는 것이다. 핵력은 스핀 의존도가 있다. 스핀이 두 원자핵(예를 들어 중수소와 중수소의 원자핵) 사이에 정렬되면 쿨롱 장벽이 감소된다. 핵자기 모멘트는 양자 터널링에서 작용을 한다. 구체적으로, 두 원자핵의 자기 모멘트가 평행될 때, 두 원자핵 사이에 흡인력이 생성된다. 그 결과, 평행되는 자기 모멘트를 갖는 두 원자핵 사이 총 장벽이 낮아지고 터널링 사건이 발생할 가능성이 더 높다. 두 원자핵이 역평행 자기 모멘트를 갖는 경우, 상황은 정반대로, 장벽이 증가되며 터널링이 잘 발생하지 않는다. 특정 유형 핵의 자기 모멘트가 정일 때, 핵은 인가된 자기장 방향으로 자기 모멘트를 정렬하는 경향이 있다. 반대로, 자기 모멘트가 부일 때, 핵은 인가된 장에 역평행되게 정렬하는 경향이 있다. 잠재적인 융합 반응물로 주목 받는 대부분 원자핵들을 포함한 대다수 원자핵들은 정 자기 모멘트를 갖는다(p , D , T , ^6Li , ^7Li 및 ^{11}B 는 모두 정 자기 모멘트를 가지며, ^3He 와 ^{15}N 은 부 자기 모멘트를 가짐). 일부 실시형태에

서, 자기장이 존재하는 장치 내의 각각의 점에서 대체적으로 같은 방향으로 자기 모멘트를 정렬하는 자기장이 제공된다. 제1 및 제2 작업 재료가 모두 정 핵자기 모멘트 또는 모두 부 핵자기 모멘트를 가지면, 원자핵 사이 총 전위 장벽의 감소를 초래한다. 이는 터널링 속도의 증가와 더 많은 융합 반응을 유발한다고 여겨진다. 이런 효과를 스핀 분극 또는 자기 쌍극자-쌍극자 상호작용이라고도 한다. 또한, 원자핵이 자기력선을 에워싸고 선회하는 것도 원자핵의 총 각운동량을 확정하는데 도움이 된다. 따라서, 원자핵의 사이클로트론 운동(cyclotron motion)이 핵 자기 모멘트의 분극과 같은 방향에서 추가 각운동량을 생성할 때, 쿨롱 장벽을 더 한층 감소시킨다.

[0310] 어떤 경우, 1-20T 범위 내의 자기장을 인가하여 가둠 영역과 가둠 벽을 따라 있는 융합 반응물((예를 들어 ^1H 와 ^{11}B)의 스핀 상태를 정렬할 수 있다. 자기장이 로렌츠 힘을 제공하는데 사용되는 경우, 자기장은 또한 융합 반응물의 스핀 상태를 정렬할 수 있다. 예를 들어 전자 차폐와 스핀 분극(반응물 핵에 작용하는 강자기장을 통해 구현됨)을 통해 감소된 쿨롱 장벽의 조합은 융합 속도를 뚜렷하게 향상시킬 수 있다. 두 원자핵 사이의 정전기 흡인에는 단거리(예를 들어 1fm보다 작음)에서 주도적 지위를 차지하는 스핀 의존향이 포함된다.

[0311] 응용

[0312] 본 문서에 기술된 바와 같은 원자로는 풍부한 응용을 갖고 있어, 화석 연료에 대한 의존과 같은 많은 사회적 문제들을 해결할 수 있다. 어떤 경우, 융합 원자로를 사용하면 일반적인 발전 방법으로 실행 불가능하거나 실용적이지 못한 에너지 집약적 응용이 실행 가능하거나 실용적이 되도록 할 수 있다. 이제 융합 원자로의 몇 가지 응용을 간단하게 논의하기로 한다.

[0313] 어떤 경우, 융합 원자로는 석탄, 천연 가스 또는 석유를 연소하여 전력을 생성하는 발전소를 개조하는데 사용될 수 있다. 어떤 경우, 본 문서에 기술된 원자로는 핵분열 발전소를 개조하는데 사용될 수 있다. 어떤 경우, 발전소를 개조할 때 발전소에서 에너지를 생성하는 부분만 교체하거나 갱신할 수 있다. 이는 터빈, 발전기, 냉각탑, 배전망 연결 및 기타 기초 시설을 재사용할 수 있기 때문에 발전소의 개조가 간단하고 비용 효율이 높다. 예를 들어, 본 문서에 기술된 원자로를 사용하는 융합 보일러로 석탄 연소 보일러를 대체하여 석탄 발전소를 개조할 수 있다. 마찬가지로, 본 문서에 기술된 융합 원자로로 제어봉과 우라늄 연료를 대체하여 핵분열 발전소를 개조할 수 있다.

[0314] 어떤 경우, 융합로는 복수의 작은 원자로를 사용하는 모듈식 설계를 갖는다. 복수의 원자로를 보유함으로써, 운전 중인 원자로의 수를 변화하여 에너지 수요를 충족시킬 수 있도록 장치의 전력 출력을 조절할 수 있다. 또한, 단일 원자로가 정비 또는 교체 가능하고 다른 원자로가 운전 가능한 상태를 유지할 수 있으면 장치의 전체 전력 출력은 뚜렷한 영향을 받지 않을 수 있다.

[0315] 어떤 경우, 융합 원자로는 유리섬유 제조의 가열 인터페이스와 같은 산업 공정에 사용될 수 있다. 어떤 경우, 원자로는 증기 세척이나 금속 절단에 사용되는 증기 발생기와 같은 증기 발생기의 열원으로 구성된다. 원자로는 융합 반응의 결과로 헬륨이 생성되는 헬륨원으로 사용되는 경우도 있다(예를 들어 원자로가 양성자-붕소-11 융합을 진행할 때). 어떤 경우, 원자로는 가정용 온수기와 같은 온수기의 일부로 사용될 수 있다. 예를 들어, 원자로 수조 내에 배치되거나 원자로에서 나오는 열이 물을 가열하는데 사용되도록 수조에 열적으로 결합될 수 있다. 어떤 경우, 융합을 기반으로 하는 온수기는 물 방열기와 결합하여 실내 난방을 제공할 수 있다.

[0316] 어떤 경우, 융합 원자로는 운송 응용에 사용될 수 있다. 예를 들어, 융합 원자로를 자동차, 비행기, 기차 및 선박에 동력을 제공할 수 있다. 예를 들어, 자동차에 전기 에너지 및 기계 에너지 중 적어도 하나를 생성하도록 구성되는 하나 또는 복수의 에너지 전환 모듈을 갖는 원자로를 장착할 수 있다. 전기 자동차에서, 원자로가 생산하는 전기 에너지는 전동기에 전력을 공급하기 위한 배터리나 축전기를 충전하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 배터리의 충전 상태가 임계값 이하로 떨어질 때마다 원자로를 작동시켜 자동차 배터리를 충전할 수 있다. 예를 들어 자동차에 구동력을 제공하기 위해 사용되는 스티어링 엔진에 의해 기계 에너지가 생성되는 경우도 있다. 어떤 경우, 융합 원자로를 우주선에 동력을 제공하는데 사용될 수 있다. 우주선을 위한 일부 설계는 방사성 동위원소 열전 발전기와 같은 핵분열 원자로를 사용한다. 이런 설계는 방사성 동위원소의 사용과 발생에 시달린다. 그들은 또한 상대적으로 대량의 방사성 연료를 휴대해야 한다. 본 문서에 기술된 원자로를 무중성자적 또는 기본적으로 무중성자적이기에, 이런 원자로를 유인 우주설비로 설계되는 것이 더욱 바람직할 것이다. 또한, 본 문서에 기술된 원자로에 사용되는 융합 반응물의 에너지 밀도는 핵분열 반응 또는 화학 반응에서 같은 에너지를 생성하는데 필요한 연료보다 훨씬 높다.

[0317] "장치" 또는 "단계"를 인용하지 않은 청구항 구성요소는 "장치에 기능을 더하"거나 "단계에 기능을 더하는" 형

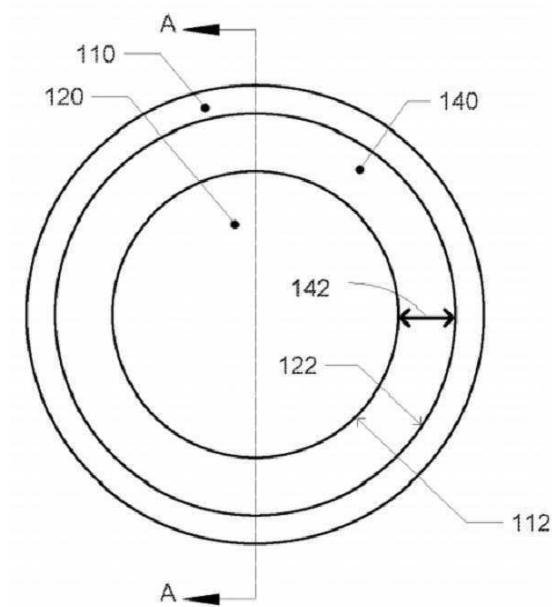
태가 아니다. (35 USC § 112 (f) 참조). 출원인이 "장치" 또는 "단계"를 인용하는 구성요소만 청구하려는 의도는 35 U.S.C. § 112 (f) 하에 또는 35 U.S.C. § 112 (f)에 의해 해석된다.

[0318]

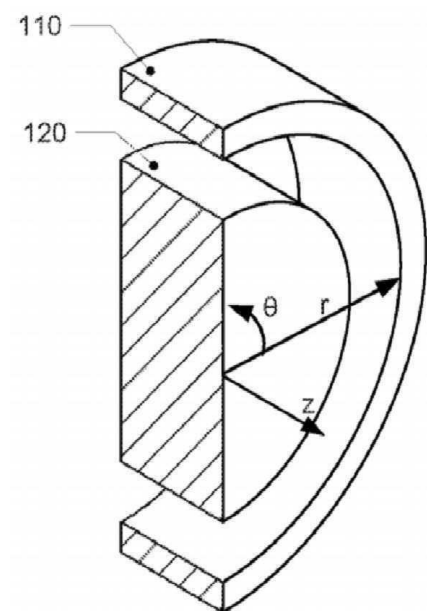
본 발명의 사상 또는 기본적인 특징을 벗어나지 않는 전제 하에, 본 개시는 다른 특정 형태로 구현될 수 있다. 기술된 실시형태는 모든 측면에서 비제한적이 아닌 단지 설명적인 것으로 간주되어야 한다. 따라서, 본 개시의 범위는 앞에서 설명된 것이 아닌 첨부된 청구범위에 의해 결정된다. 청구범위의 함의와 동등성 범위 내의 모든 변경은 그 범위에 포함되어야 할 것이다.

도면

도면1a

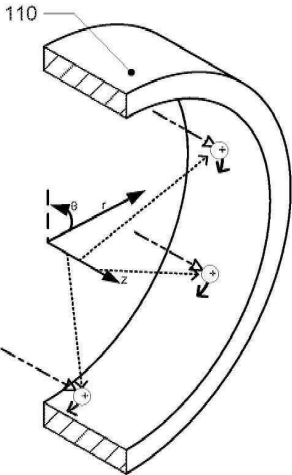


도면1b

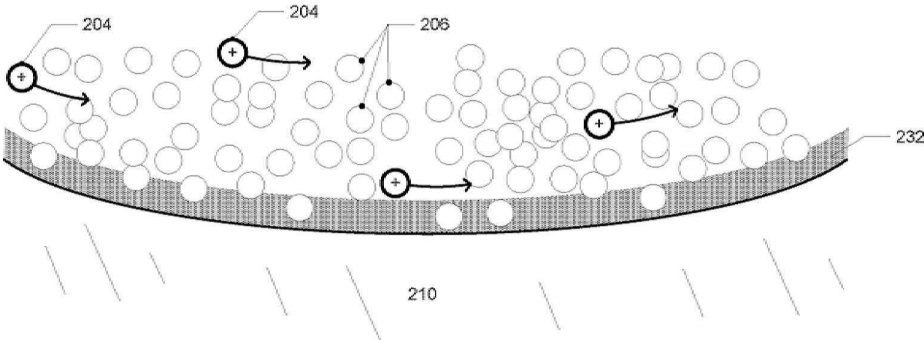


도면1c

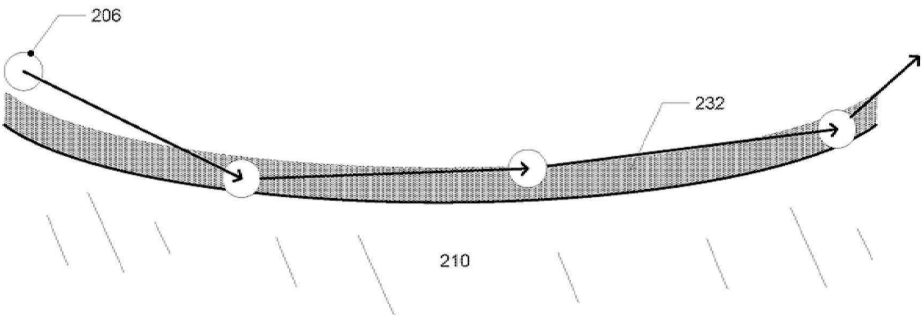
- 입자 로렌츠 힘 방향
- - - - -> 146, 입자 자기장 방향
-> 144, 입자 전기장 방향



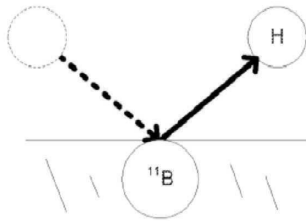
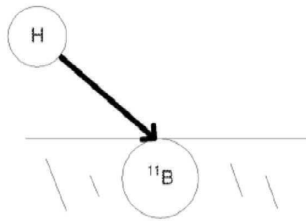
도면2a



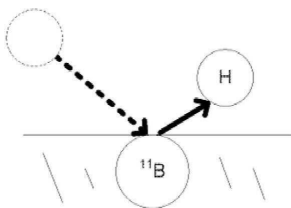
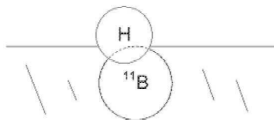
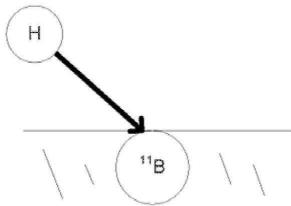
도면2b



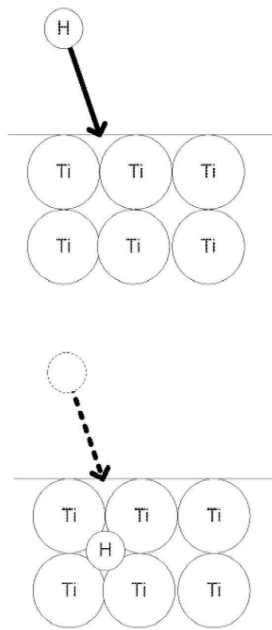
도면3a



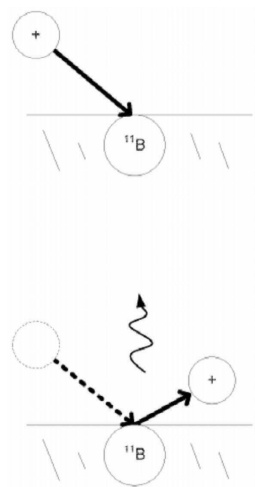
도면3b



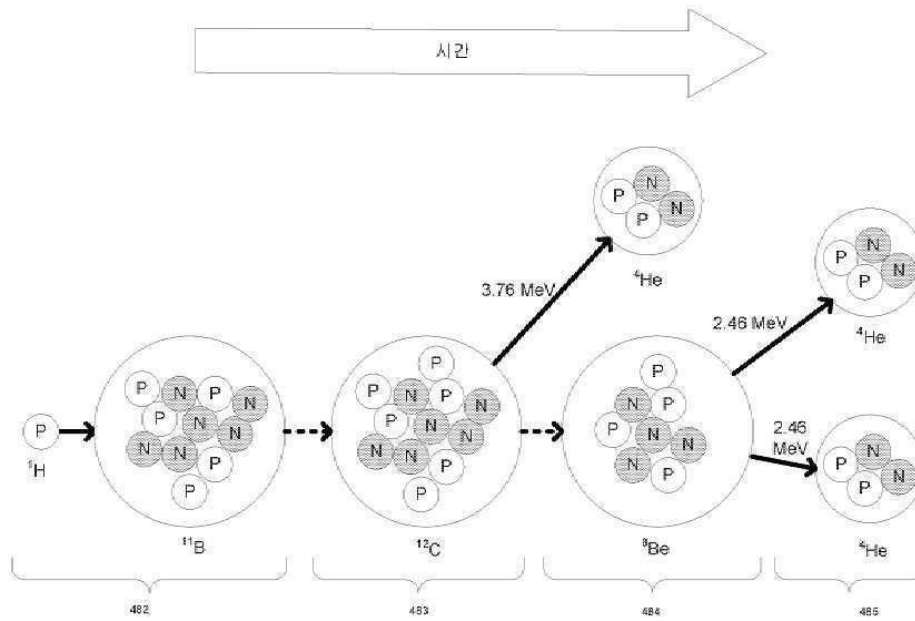
도면3c



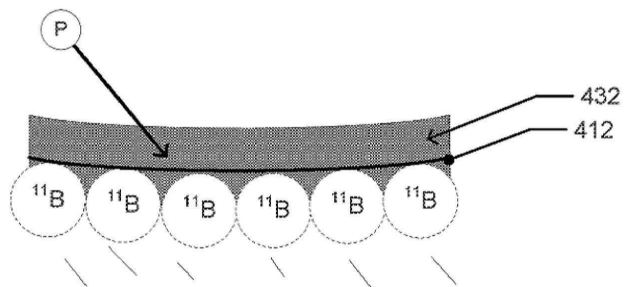
도면3d



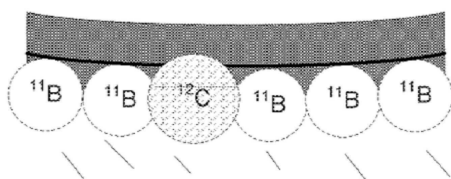
도면4a



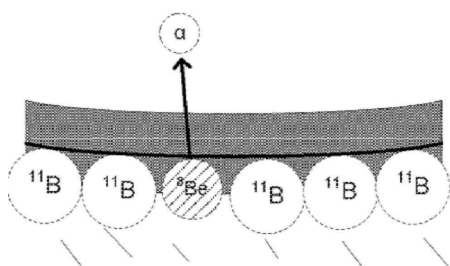
도면4b



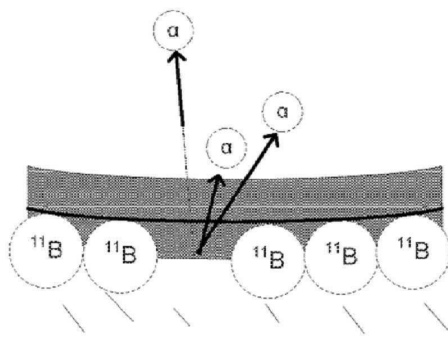
도면4c



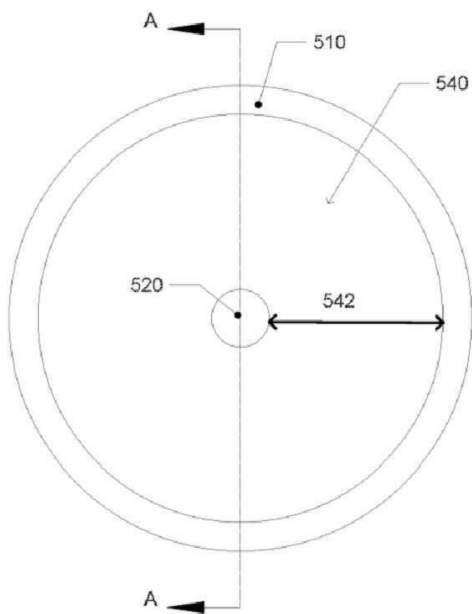
도면4d



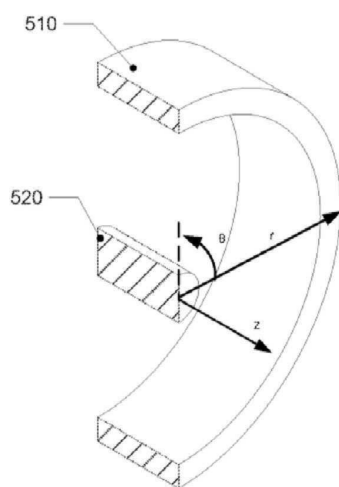
도면4e



도면5a

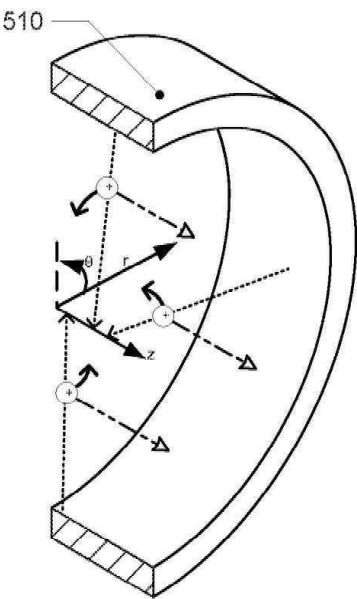


도면5b

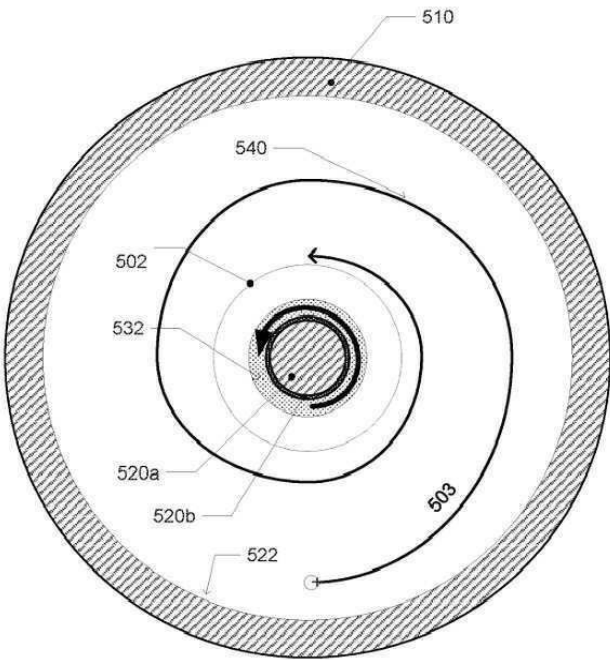


도면5c

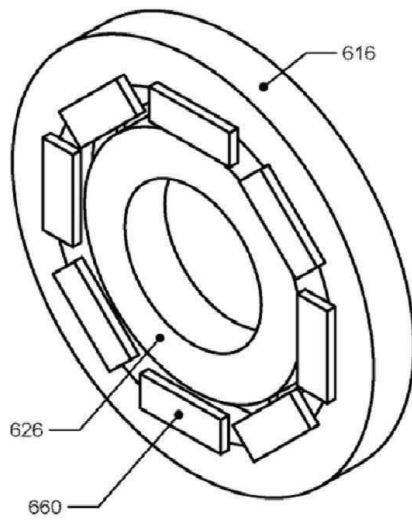
- 입자 로렌츠 힘 방향
- - - - -> 546, 입자 자기장 방향
-> 544, 입자 전기장 방향



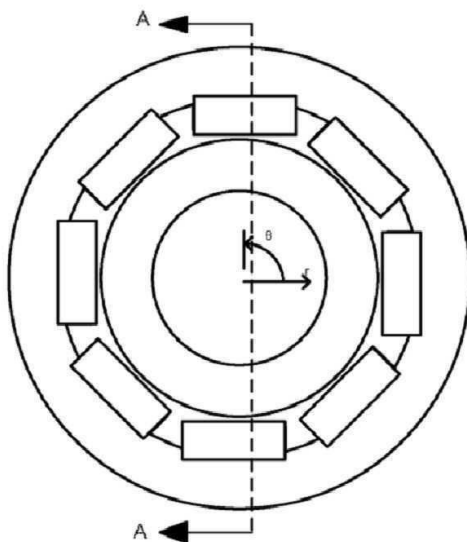
도면5d



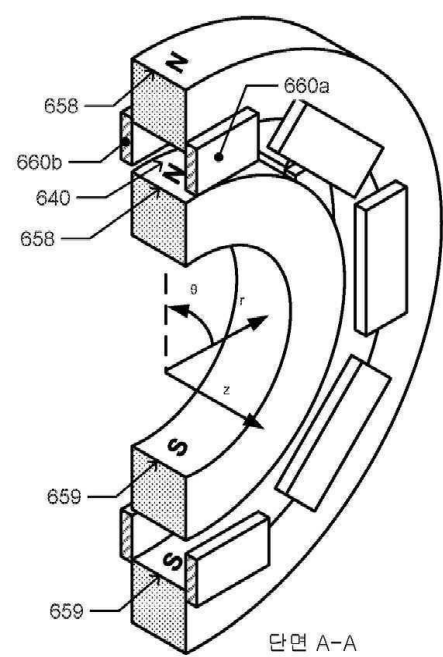
도면6a



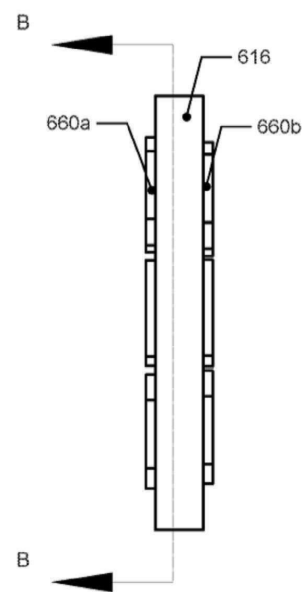
도면6b



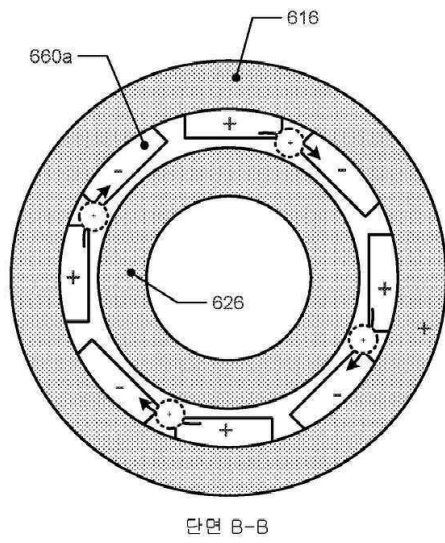
도면6c



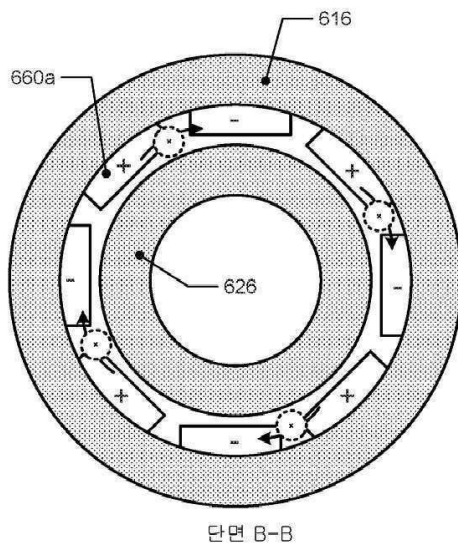
도면6d



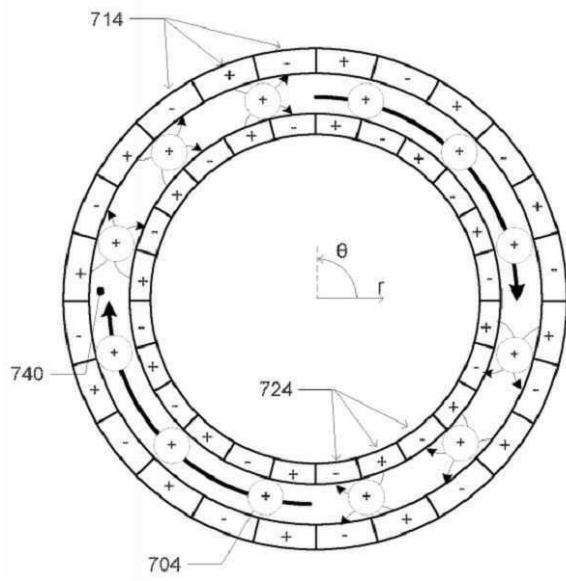
도면6e



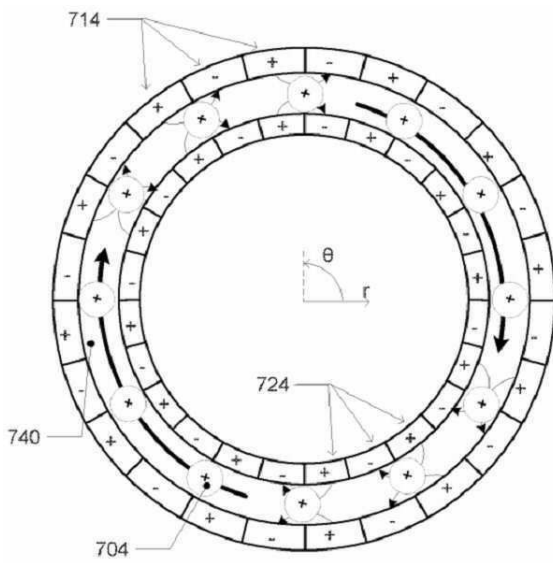
도면6f



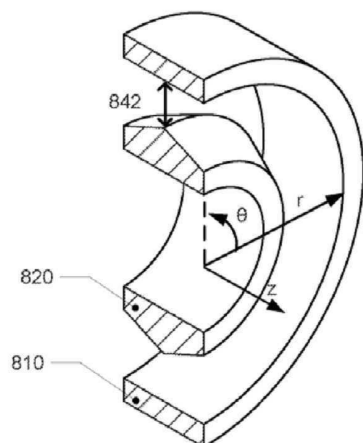
도면7a



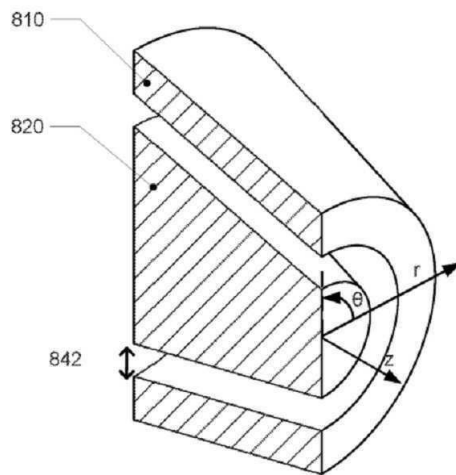
도면7b



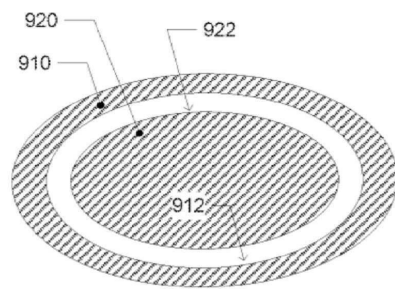
도면8a



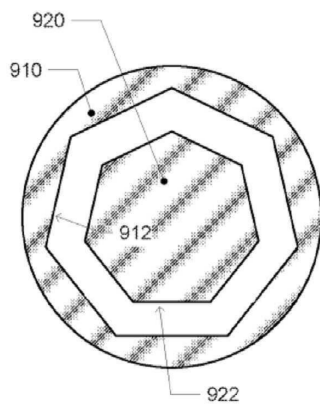
도면8b



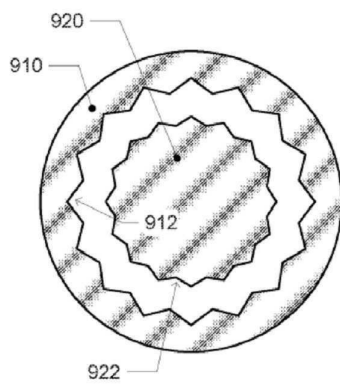
도면9a



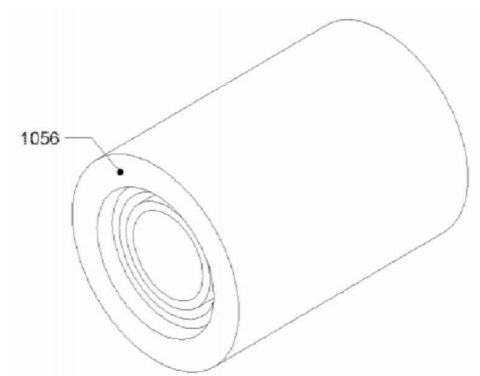
도면9b



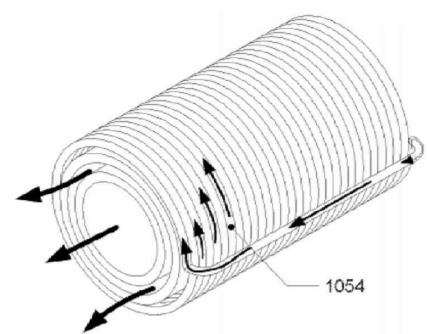
도면9c



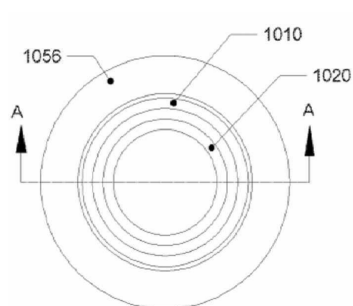
도면10a



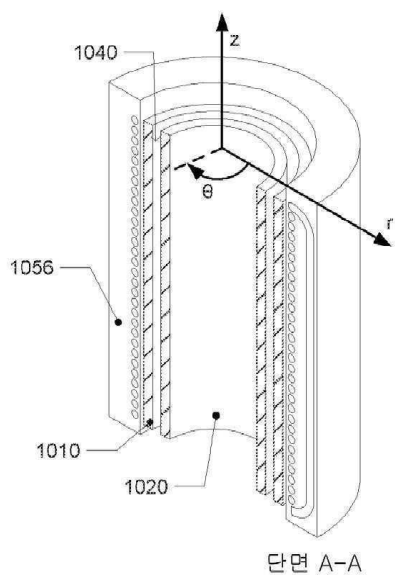
도면10b



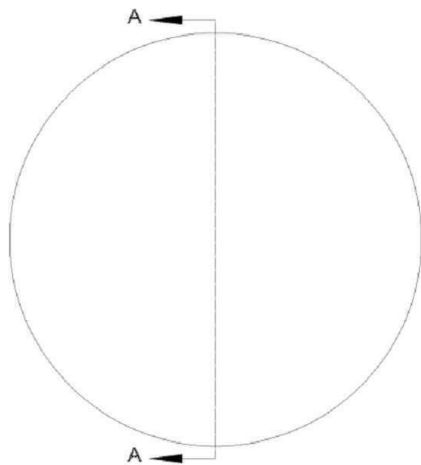
도면10c



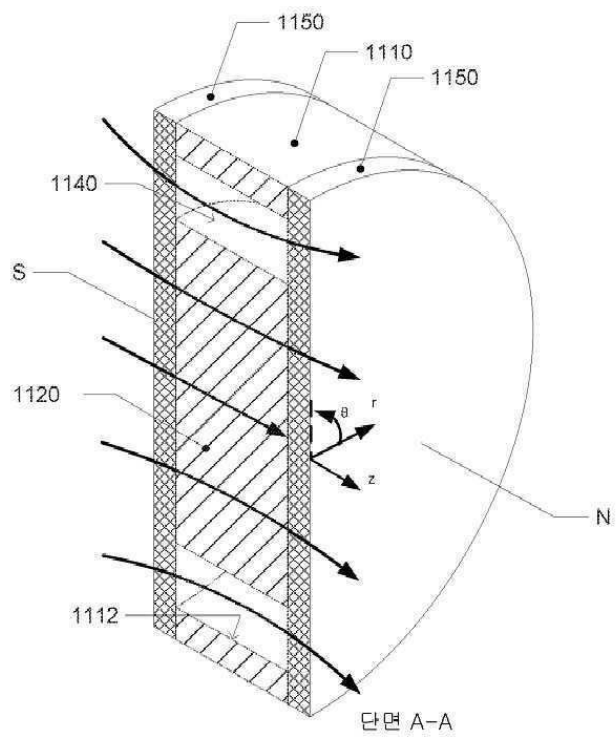
도면10d



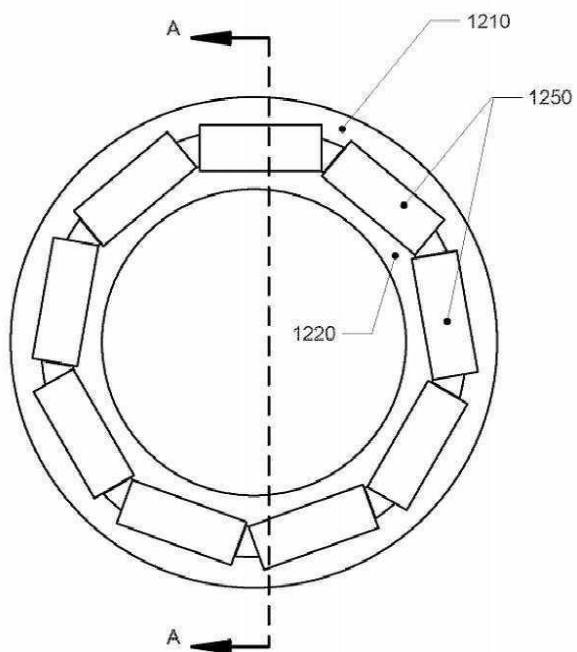
도면11a



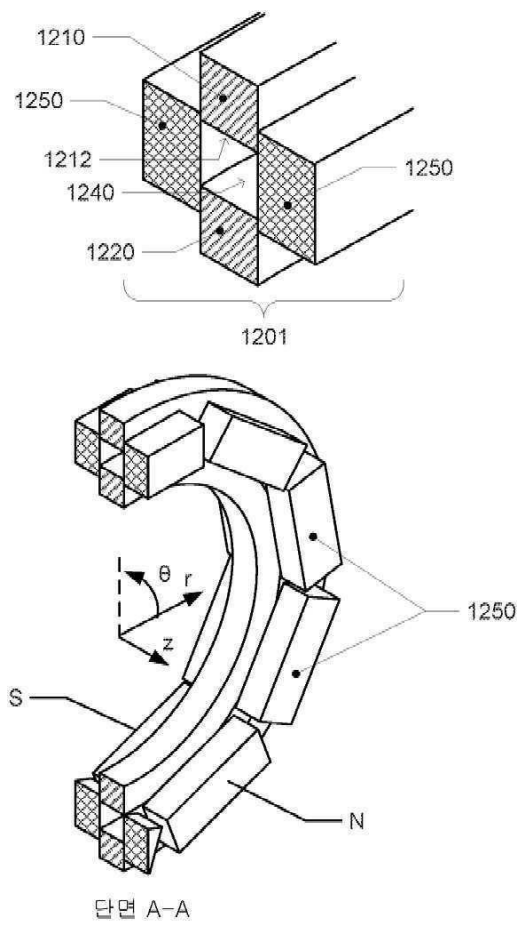
도면11b



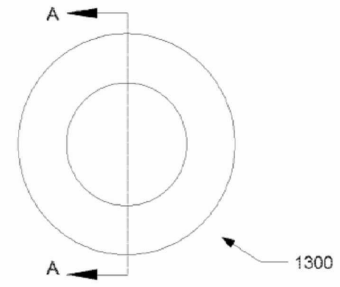
도면12a



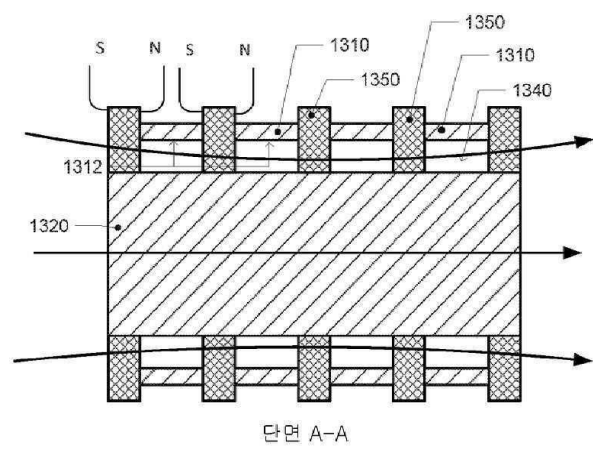
도면12b



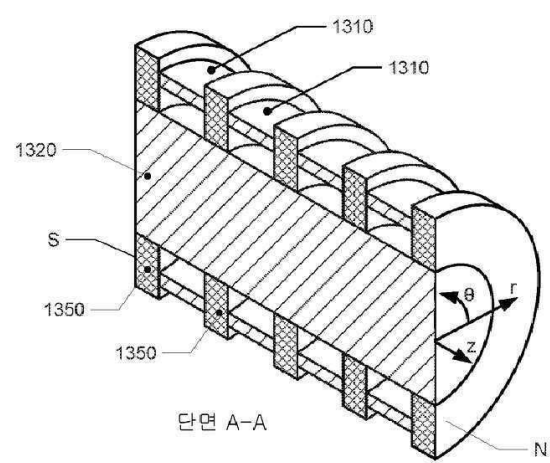
도면13a



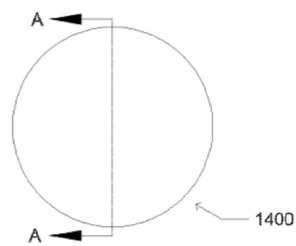
도면13b



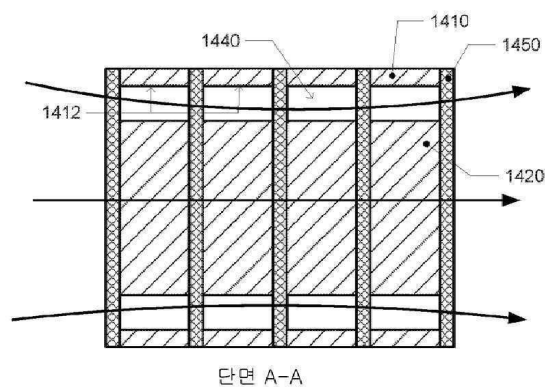
도면13c



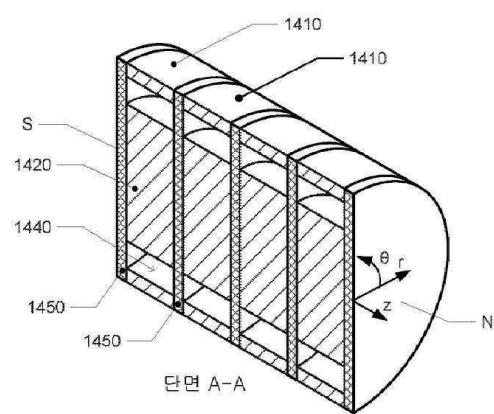
도면14a



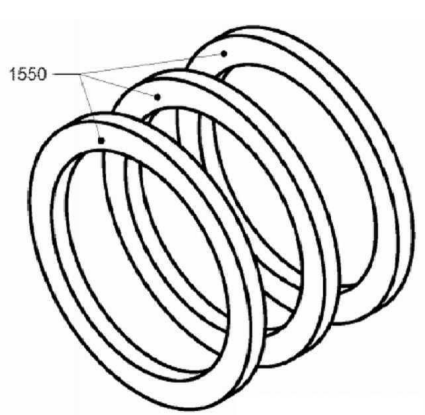
도면14b



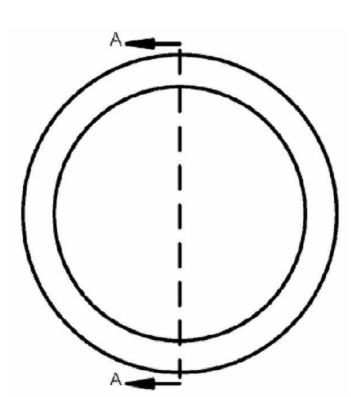
도면14c



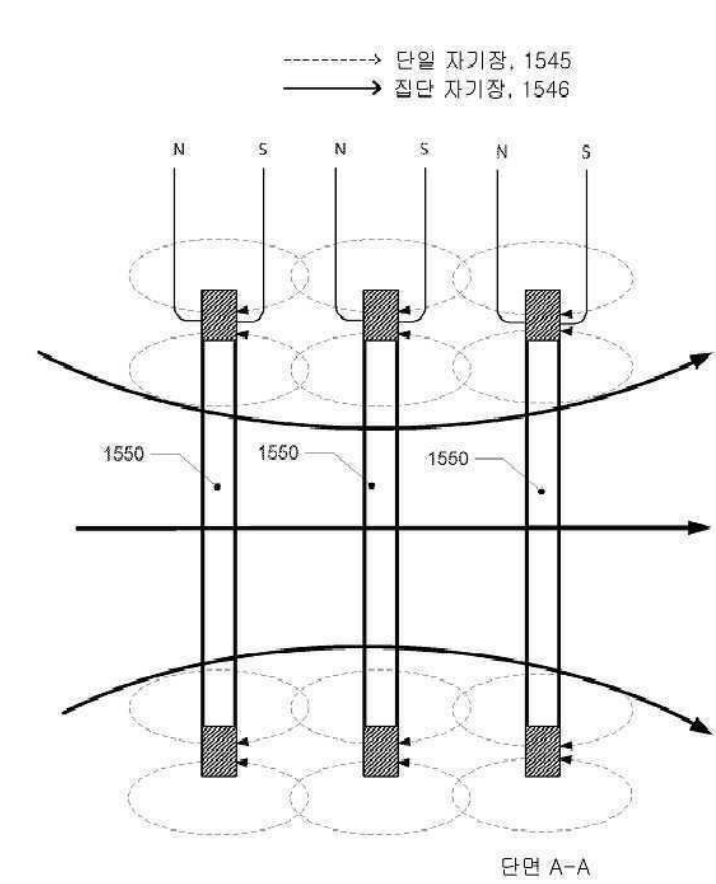
도면15a



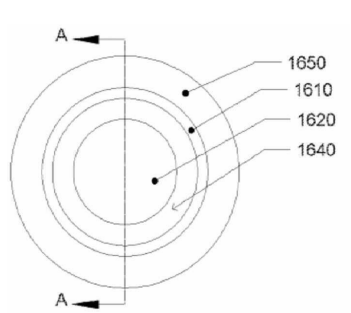
도면15b



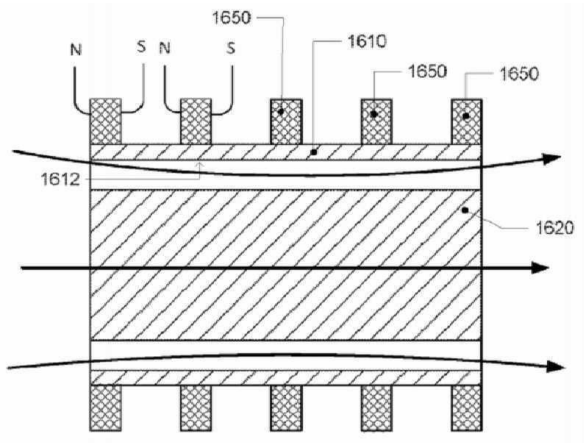
도면15c



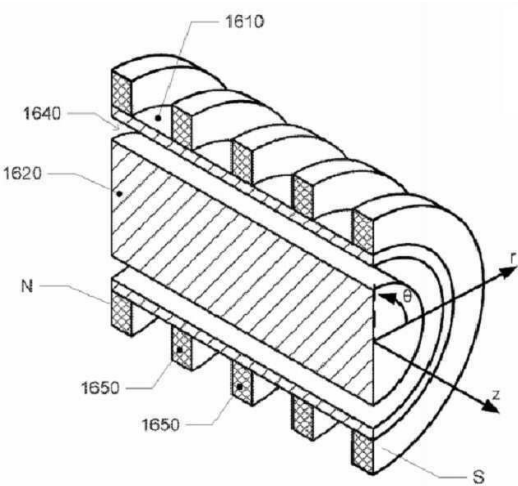
도면16a



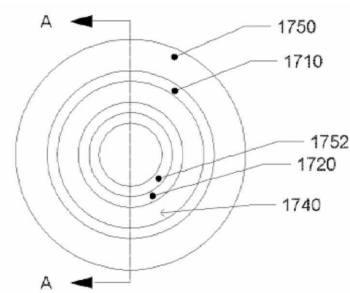
도면16b



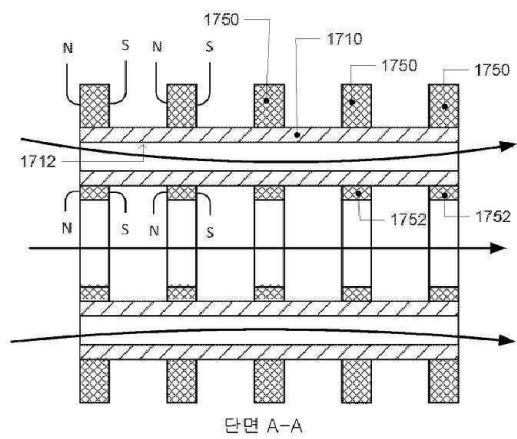
도면16c



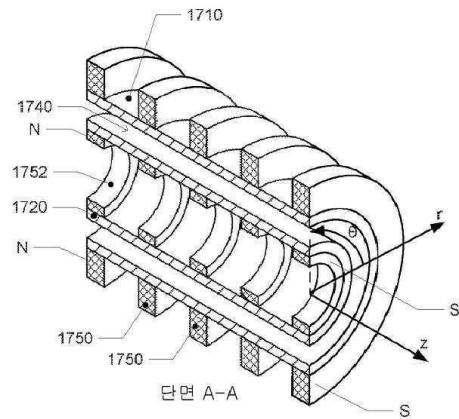
도면17a



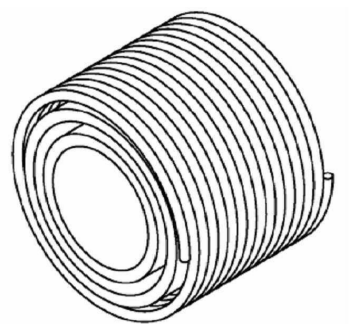
도면17b



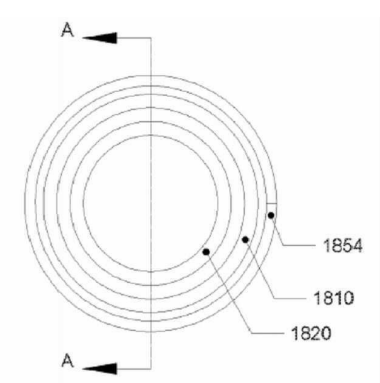
도면17c



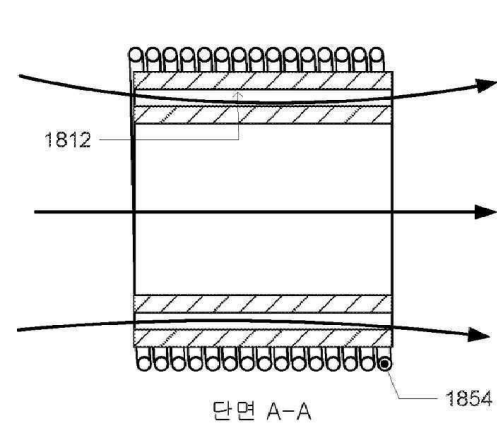
도면18a



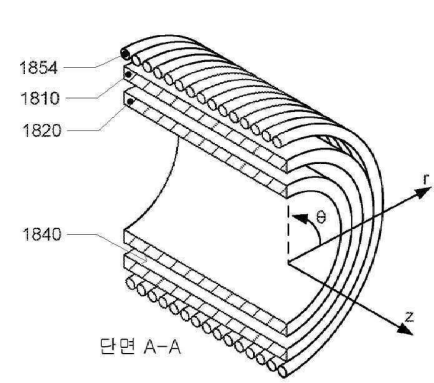
도면18b



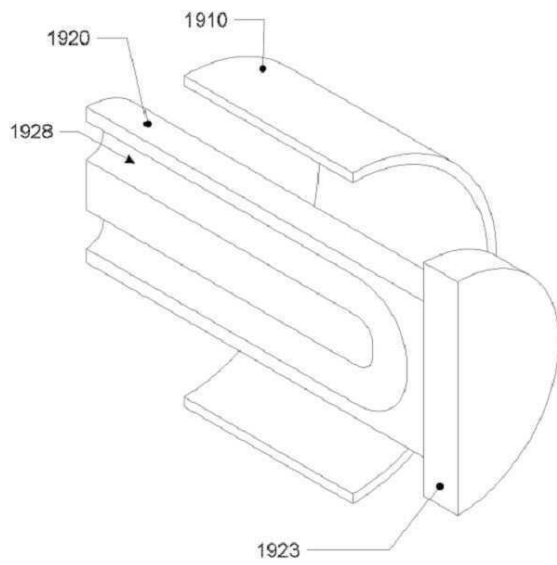
도면18c



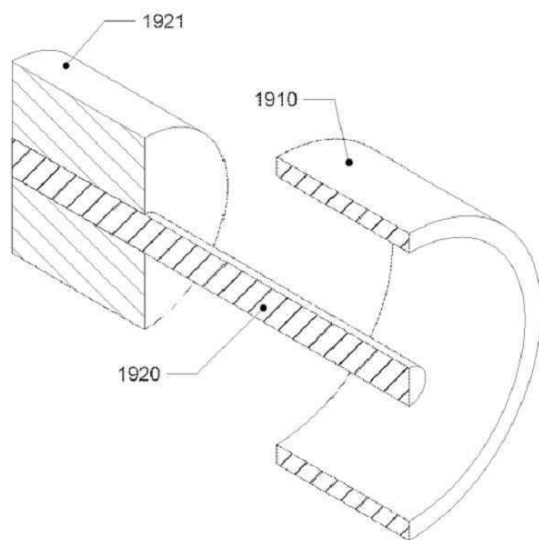
도면18d



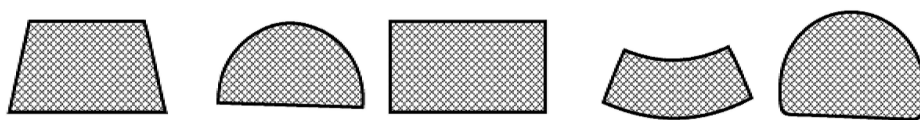
도면19a



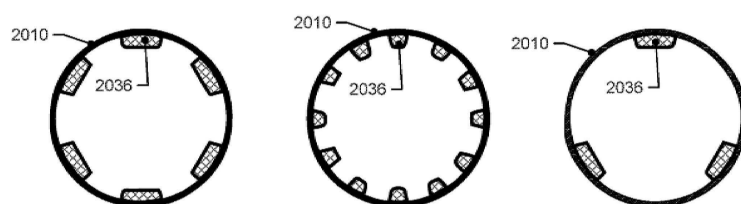
도면19b



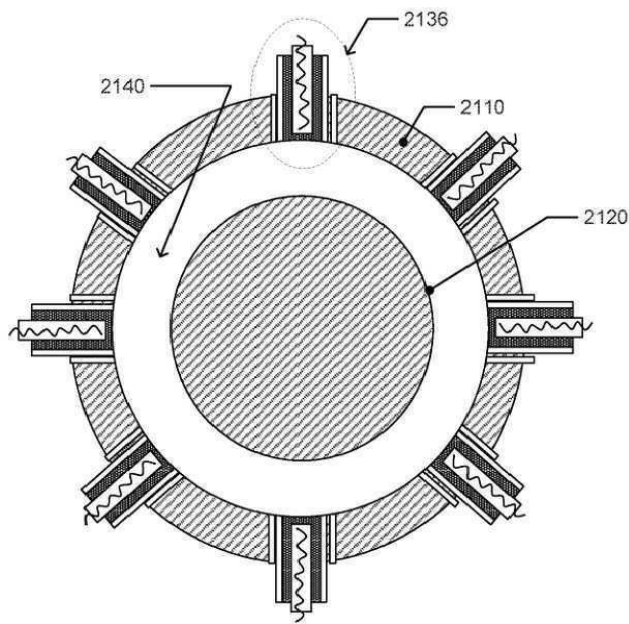
도면20a



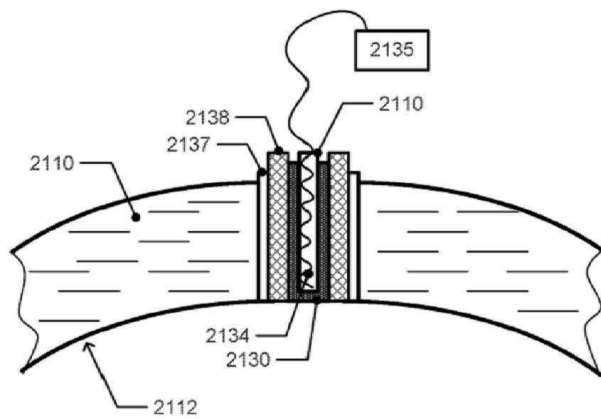
도면20b



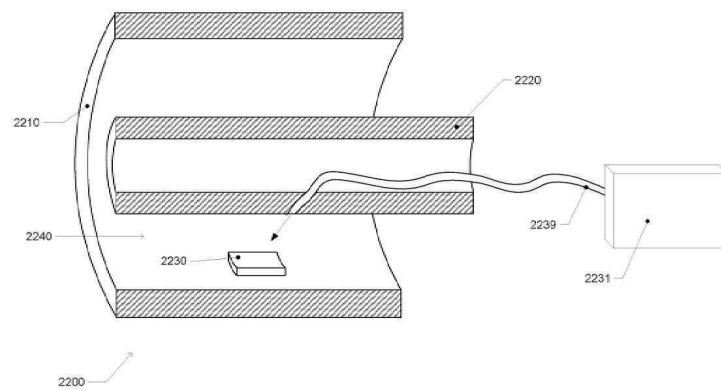
도면21a



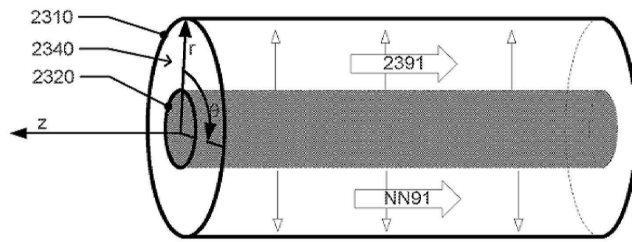
도면21b



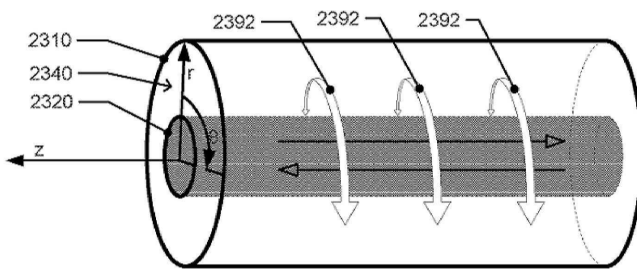
도면22



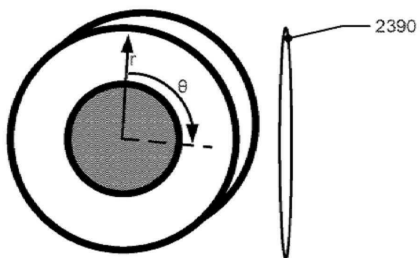
도면23a



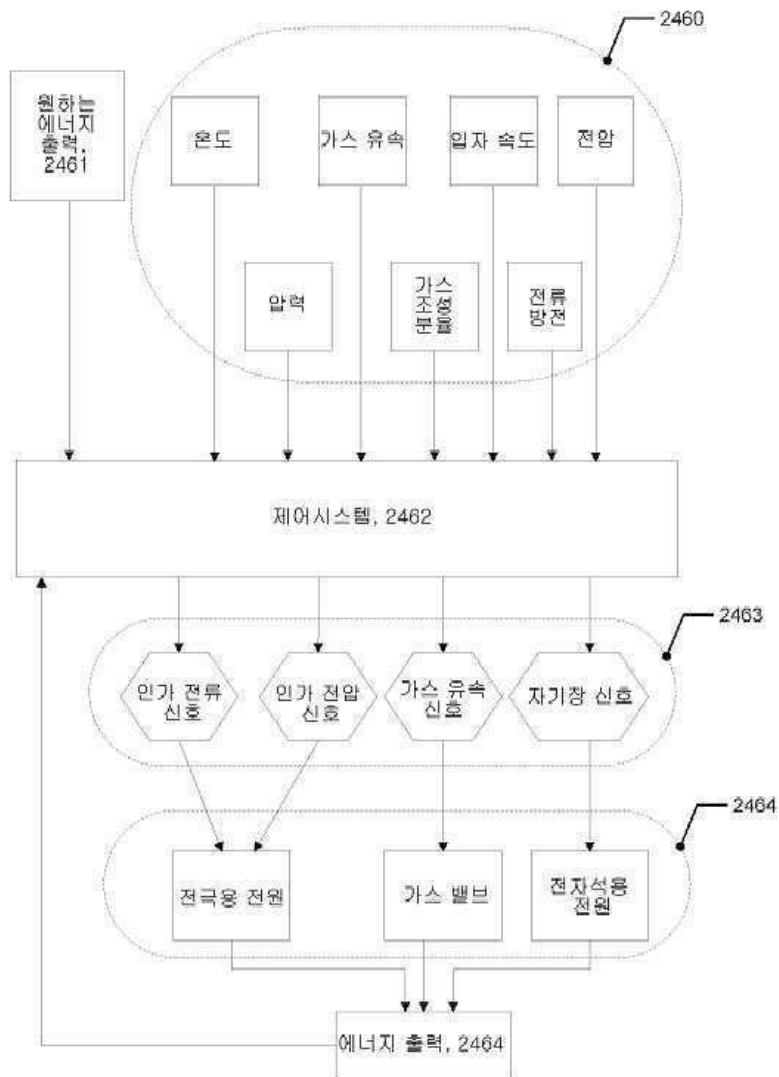
도면23b



도면23c



도면24



도면25

