



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2017-0078794  
(43) 공개일자 2017년07월07일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
H05H 1/08 (2006.01) G21B 1/05 (2006.01)  
H05H 1/14 (2006.01) H05H 3/00 (2006.01)
- (52) CPC특허분류  
H05H 1/08 (2013.01)  
G21B 1/052 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2017-7014776
- (22) 출원일자(국제) 2015년10월30일  
심사청구일자 없음
- (85) 번역문제출일자 2017년05월30일
- (86) 국제출원번호 PCT/US2015/058473
- (87) 국제공개번호 WO 2016/070126  
국제공개일자 2016년05월06일
- (30) 우선권주장  
62/072,611 2014년10월30일 미국(US)

- (71) 출원인  
트라이 알파 에너지, 인크.  
미국 92688-7010 캘리포니아주 랜초 산타 마가리타 피.오.박스 7010
- (72) 발명자  
빈더바우어 미힐  
미국 캘리포니아주 92694 라데라 랜치 크리스피 씨칼 10  
가라테 에우제비오  
미국 캘리포니아주 92612 어바인 휘트만 코트 56  
(뒷면에 계속)
- (74) 대리인  
김태홍, 김진희

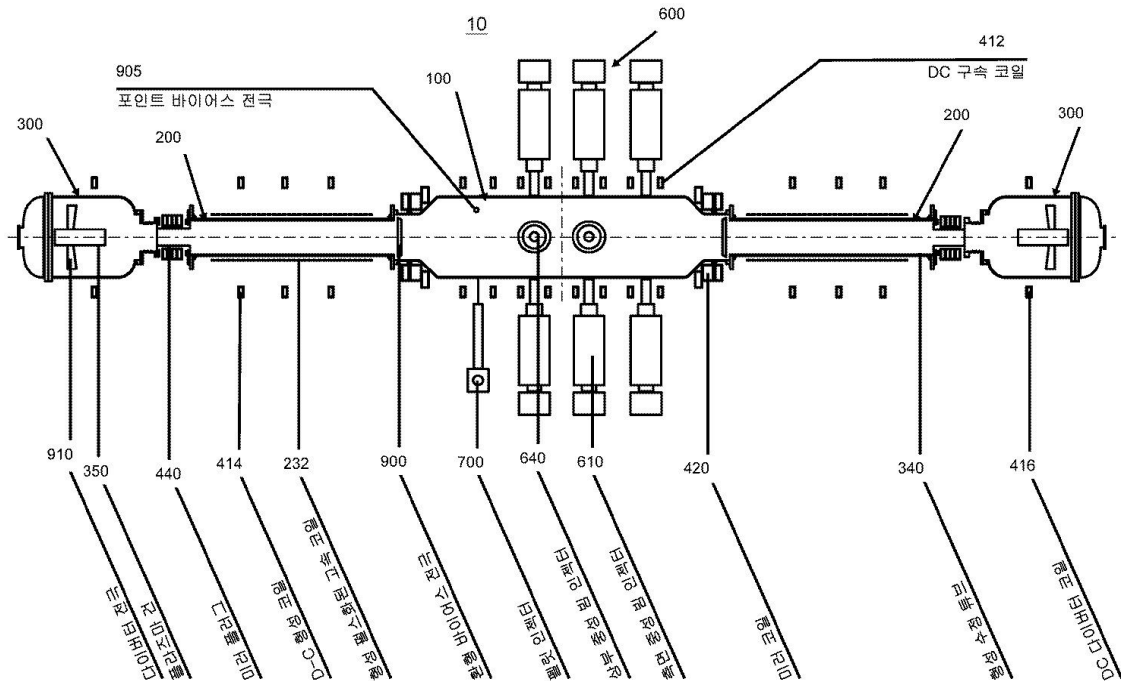
전체 청구항 수 : 총 39 항

(54) 발명의 명칭 고성능 FRC를 형성하고 유지하는 시스템 및 방법

(57) 요약

고성능 필드 역전된 구성 시스템은, 중심 구속 용기, 상기 용기에 연결된 2개의 정반대로 대향된 역전된 필드-쉐타-핀치 형성 부분, 및 상기 형성 부분에 연결된 2개의 다이버터 챔버를 포함한다. 자성 시스템은 상기 FRC 시스템 컴포넌트를 따라 축방향으로 위치된 준-dc 코일, 상기 구속 챔버와 상기 형성 부분 사이의 준-dc 미러 코일, (뒷면에 계속)

대표도



및 상기 형성 부분과 상기 다이버터 사이의 미러 플러그를 포함한다. 상기 형성 부분은 상기 FRC의 정적인 형성과 동적인 형성 및 가속을 가능하게 하는 모듈식 펄스 전력 형성 시스템을 포함한다. 상기 FRC 시스템은 중성자 원자빔 인젝터, 펄릿 또는 CT 인젝터, 게더링 시스템, 축방향 플라즈마 건, 및 플러스 표면 바이어싱 전극을 더 포함한다. 상기 빔 인젝터는 상기 챔버의 중간평면을 향하여 적절하게 기울어진다. 동작시, 플라즈마 열 에너지, 전체 입자 수, 반경, 및 트래핑된 자성 플럭스를 포함하는 FRC 플라즈마 파라미터는 중성자 빔 주입 중에 쇠퇴없이 일정 값으로 또는 거의 일정 값으로 유지 가능하다.

(52) CPC특허분류

*H05H 1/14* (2013.01)

*H05H 3/00* (2013.01)

(72) 발명자

**푸트빈스키 세르게이**

미국 캘리포니아주 92630 레이크 포레스트 #132 뒤  
어랜즈 블러바드 24921

**고타 히로시**

미국 캘리포니아주 92620 어바인 룡 매도우 91

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

필드 역전된 구성(field reversed configuration: FRC)을 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 방법에 있어서,

구속 챔버(confinement chamber) 내의 플라즈마 주위에 FRC를 형성하는 단계; 및

고속 중성자 원자의 빔을 중성자 빔 인젝터로부터 상기 FRC 플라즈마로 상기 구속 챔버의 중간평면을 향하여 각을 이루어 주입하고 상기 FRC로 컴팩트한 토로이드(CT: compact toroid) 플라즈마를 주입함으로써 쇠퇴(decay) 없이 일정 값(constant value)으로 또는 거의 일정값으로 상기 FRC를 유지하는 단계

를 포함하는, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 방법.

#### 청구항 2

제1항에 있어서,

상기 챔버 주위로 연장되는 준(quasi)-dc 코일로 상기 챔버 내에 자기장을 생성하는 단계를 더 포함하는, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 방법.

#### 청구항 3

제1항 및 제2항에 있어서,

상기 챔버의 대향 단부 주위로 연장되는 준-dc 미러 코일로 상기 챔버의 상기 대향 단부 내에 미러 자기장을 생성하는 단계를 더 포함하는, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 방법.

#### 청구항 4

제1항 내지 제3항에 있어서,

상기 FRC를 형성하는 단계는, 상기 구속 챔버의 단부에 연결되는 형성 부분 내에 형성 FRC를 형성하는 단계 및 상기 FRC를 형성하기 위해 상기 챔버의 상기 중간평면을 향하여 형성 FRC를 가속하는 단계를 포함하는 것인, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 방법.

#### 청구항 5

제4항에 있어서,

상기 FRC를 형성하는 단계는, 상기 구속 챔버의 제2 단부에 연결되는 제2 형성 부분 내에 제2 형성 FRC를 형성하는 단계 및 상기 FRC를 형성하기 위해 상기 2개의 형성 FRC를 병합하는, 상기 챔버의 상기 중간평면을 향하여 상기 제2 형성 FRC를 가속하는 단계를 포함하는 것인, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 방법.

#### 청구항 6

제4항 및 제5항에 있어서,

상기 FRC를 형성하는 단계는, 상기 챔버의 상기 중간평면을 향하여 형성 FRC를 가속하면서 상기 형성 FRC를 형성하는 단계와, 형성 FRC를 형성한 후에 상기 챔버의 상기 중간평면을 향하여 상기 형성 FRC를 가속하는 단계 중 하나를 포함하는 것인, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 방법.

#### 청구항 7

제5항에 있어서,

상기 형성 부분의 단부에 연결되는 다이버터(diverter)로 상기 FRC의 자성 플럭스 표면을 가이드하는 단계를 더 포함하는, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 방법.

**청구항 8**

제4항에 있어서,

상기 형성 부분의 단부에 연결되는 다이버터로 상기 FRC의 자성 플럭스 표면을 가이드하는 단계를 더 포함하는, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 방법.

**청구항 9**

제8항에 있어서,

상기 형성 부분의 대향하는 상기 챔버의 단부에 연결되는 제2 다이버터로 상기 FRC의 자성 플럭스 표면을 가이드하는 단계를 더 포함하는, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 방법.

**청구항 10**

제7항 내지 제9항에 있어서,

상기 형성 부분과 다이버터 주위로 연장되는 준-dc 코일로 상기 형성 부분과 다이버터 내에 자기장을 생성하는 단계를 더 포함하는, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 방법.

**청구항 11**

제7항 및 제10항에 있어서,

준-dc 미러 코일로 상기 형성 부분과 상기 다이버터 사이에 미러 자기장을 생성하는 단계를 더 포함하는, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 방법.

**청구항 12**

제11항에 있어서,

상기 형성 부분과 상기 다이버터 사이의 수축부(constriction) 주위로 연장되는 준-dc 미러 플러그 코일로 상기 형성 부분과 상기 다이버터 사이의 수축부 내에 미러 플러그 자기장을 생성하는 단계를 더 포함하는, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 방법.

**청구항 13**

제1항 내지 제12항에 있어서,

상기 챔버에 연결되는 안장 코일(saddle coil)로 상기 챔버 내의 자기 쌍극자 장(magnetic dipole field)와 자기 사중극자 장(magnetic quadrupole field) 중 하나를 생성하는 단계를 더 포함하는, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 방법.

**청구항 14**

제1항 내지 제13항에 있어서,

게터링 시스템(gettering system)으로 상기 챔버의 내부 표면, 형성 부분 및 다이버터를 처리하는(conditioning) 단계를 더 포함하는, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 방법.

**청구항 15**

제14항에 있어서,

상기 게터링 시스템은 티타늄 증착 시스템과 리튬 증착 시스템 중 하나를 포함하는 것인, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 방법.

**청구항 16**

제1항 내지 제15항에 있어서,

축방향 장착된 플라즈마 건으로부터 상기 FRC로 플라즈마를 축방향 주입하는(axially injecting) 단계를 더 포

함하는, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 방법.

**청구항 17**

제1항 내지 제16항에 있어서,

상기 FRC의 에지 층에서의 방사방향 전기장 프로파일을 제어하는 단계를 더 포함하는, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 방법.

**청구항 18**

제17항에 있어서,

상기 FRC의 에지 층에서의 방사방향 전기장 프로파일을 제어하는 단계는, 바이어싱 전극으로 상기 FRC의 개방된 플럭스 표면의 그룹에 전기 전위의 분배를 적용하는 단계를 포함하는 것인, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 방법.

**청구항 19**

필드 역전된 구성(field reversed configuration: FRC)을 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템에 있어서, 구속 챔버,

상기 구속 챔버에 연결된 제1 및 제2 정반대로(diametrically) 대향된 FRC 형성 부분으로서, 상기 형성 부분은, FRC를 생성하고 상기 FRC를 상기 구속 챔버의 중간평면 쪽으로 병진이동시키는(translating) 모듈화된 형성 시스템을 포함하는 것인, 상기 FRC 형성 부분,

상기 제1 및 제2 형성 부분에 연결된 제1 및 제2 다이버터,

상기 제1 및 제2 다이버터, 상기 제1 및 제2 형성 부분 및 상기 구속 챔버에 동작가능하게 연결된 제1 및 제2 축방향 플라즈마 건,

상기 구속 챔버에 연결되고 상기 구속 챔버의 종축에 직각보다 작은 각도로 상기 구속 챔버의 중간평면으로 중성 원자빔을 주입하도록 배향되는 복수의 중성 원자빔 인젝터,

상기 구속 챔버, 상기 제1 및 제2 형성 부분, 및 상기 제1 및 제2 다이버터 주위에 위치한 복수의 준(quasi)-dc 코일; 상기 구속 챔버와 상기 제1 및 제2 형성 부분 사이에 위치한 준(quasi)-dc 미러 코일의 제1 및 제2 세트; 및 상기 제1 및 제2 형성 부분과 상기 제1 및 제2 다이버터 사이에 위치한 제1 및 제2 미러 플러그를 포함하는 자성 시스템,

상기 구속 챔버 및 상기 제1 및 제2 다이버터에 연결된 게더링 시스템,

생성된 FRC의 개방된 플럭스 표면을 전기적으로 바이어싱하기 위한 하나 이상의 바이어싱 전극으로서, 상기 하나 이상의 바이어싱 전극은 상기 구속 챔버, 상기 제1 및 제2 형성 부분, 및 상기 제1 및 제2 다이버터 중 하나 이상 내에 위치한 것인, 하나 이상의 바이어싱 전극,

상기 구속 챔버에 연결된 2개 이상의 안장 코일, 및

상기 구속 챔버에 연결된 CT(compact toroid) 인젝터

를 포함하는, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템.

**청구항 20**

제19항에 있어서,

FRC를 생성하고, 상기 FRC에 중성 원자빔이 주입되는 동안 쇠퇴없이 일정 값으로 또는 거의 일정 값으로 상기 FRC를 유지하도록 구성되는, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템.

**청구항 21**

제19항에 있어서,

상기 미러 플러그는, 상기 제1 및 제2 형성 부분과 상기 제1 및 제2 다이버터 각각의 사이에 미러 코일의 제3

및 제4 세트를 포함하는 것인, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템.

**청구항 22**

제19항 및 제20항에 있어서,

상기 미리 플러그는, 상기 제1 및 제2 형성 부분과 상기 제1 및 제2 다이버터 각각의 사이의 통로(passageway)에서 수축부 주위를 둘러싼 미리 플러그 코일의 세트를 더 포함하는 것인, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템.

**청구항 23**

제19항 내지 제22항에 있어서,

상기 세장형(elongate) 튜브는 수정 라이너를 갖는 수정 튜브인 것인, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템.

**청구항 24**

제19항 내지 제23항에 있어서,

상기 형성 시스템은 펄스화된 전력 형성 시스템인 것인, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템.

**청구항 25**

제19항 내지 제24항에 있어서,

상기 형성 시스템은, 복수의 스트랩 조립체 중 개별 조립체에 연결되어 상기 제1 및 제2 형성 부분의 세장형 튜브 주위를 둘러싼 복수의 스트랩 조립체 중 개별 조립체의 코일 세트에 에너지를 공급하는 복수의 전력 및 제어 유닛을 포함하는 것인, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템.

**청구항 26**

제25항에 있어서,

상기 복수의 전력 및 제어 유닛 중 개별 유닛은 트리거 및 제어 시스템을 포함하는 것인, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템.

**청구항 27**

제26항에 있어서,

상기 복수의 전력 및 제어 유닛 중 개별 유닛의 상기 트리거 및 제어 시스템은, 동기화가능하여 상기 FRC가 형성되고 나서 주입되는 정적인 FRC의 형성을 가능하게 하거나, 또는 FRC가 형성됨과 동시에 병진이동되는 동적인 FRC의 형성을 가능하게 하는 것인, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템.

**청구항 28**

제19항 내지 제27항에 있어서,

상기 복수의 중성 원자빔 인젝터는 하나 이상의 RF 플라즈마 소스 중성 원자빔 인젝터 및 하나 이상의 아크 소스 중성 원자빔 인젝터를 포함하는 것인, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템.

**청구항 29**

제19항 내지 제28항에 있어서,

상기 복수의 중성 원자빔 인젝터는 상기 FRC의 분리자(separatrix) 내에 타깃 트랩핑 존을 갖는 FRC에 접선방향의 주입 경로로 배향된 것인, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템.

**청구항 30**

제19항 내지 제29항에 있어서,

상기 케더링 시스템은 상기 구속 챔버의 플라즈마를 향하는 표면과 상기 제1 및 제2 다이버터를 코팅하는, 티타늄 증착 시스템 및 리튬 증착 시스템 중 하나 이상을 포함하는 것인, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템.

**청구항 31**

제19항 내지 제30항에 있어서,

바이어싱 전극은, 상기 격납 챔버(containment chamber) 내에 위치되어 개방된 필드 라인과 접촉하는 하나 이상의 포인트 전극, 상기 구속 챔버와 상기 제1 및 제2 형성 부분 사이에서 방위각으로 대칭적인 방식으로 원위-에지 플럭스(far-edge flux) 층을 충전하는 환형 전극의 세트, 상기 제1 및 제2 다이버터에 위치되어 다수의 동심의 플럭스 층을 충전하는 복수의 동심으로 적층된(stacked) 전극, 및 개방된 플럭스를 차단하는 플라즈마 건의 애노드 중 하나 이상을 포함하는 것인, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템.

**청구항 32**

필드 역전된 구성(field reversed configuration: FRC)을 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템에 있어서, 구속 챔버,

상기 구속 챔버에 연결된 제1 및 제2 정반대로 대향된 FRC 형성 부분,

상기 제1 및 제2 형성 부분에 연결된 제1 및 제2 다이버터,

상기 복수의 플라즈마 건, 상기 하나 이상의 바이어싱 전극 및 상기 제1 및 제2 미러 플러그 중 하나 이상으로서, 상기 복수의 플라즈마 건은 상기 제1 및 제2 다이버터, 상기 제1 및 제2 형성 부분 및 상기 구속 챔버에 동작가능하게 연결된 제1 및 제2 축방향 플라즈마 건을 포함하고, 상기 하나 이상의 바이어싱 전극은 상기 구속 챔버, 상기 제1 및 제2 형성 부분, 및 상기 제1 및 제2 다이버터 중 하나 이상의 내에 위치되고, 상기 제1 및 제2 미러 플러그는, 상기 제1 및 제2 형성 부분과 상기 제1 및 제2 다이버터 사이의 위치에 있는 것인, 상기 복수의 플라즈마 건, 상기 하나 이상의 바이어싱 전극 및 상기 제1 및 제2 미러 플러그 중 하나 이상,

상기 구속 챔버와 상기 제1 및 제2 다이버터에 연결된 케더링 시스템,

상기 구속 챔버에 연결되고 상기 구속 챔버의 축에 수직으로 배향된 복수의 중성 원자빔 인젝터,

상기 구속 챔버, 상기 제1 및 제2 형성 부분, 및 상기 제1 및 제2 다이버터의 주위에 위치한 복수의 준(quasi)-dc 코일과, 상기 구속 챔버와 상기 제1 및 제2 형성 부분 사이에 위치한 준-dc 미러 코일의 제1 및 제2 세트를 포함하는 자성 시스템, 및

상기 구속 용기에 연결된 CT(compact toroid) 인젝터

를 포함하고,

FRC를 생성하고, 상기 중성자 빔이 상기 플라즈마로 주입되는 동안 쇠퇴없이 상기 FRC를 유지하도록 구성되는 것인,

FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템.

**청구항 33**

제32항에 있어서,

FRC를 생성하고, 중성 원자빔이 상기 FRC에 주입되는 동안 쇠퇴없이 일정 값으로 또는 거의 일정값으로 상기 FRC를 유지하도록 구성되는, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템.

**청구항 34**

제32항 및 제33항에 있어서,

상기 미러 플러그는 각 상기 제1 및 제2 형성 부분과 상기 제1 및 제2 다이버터 사이에 미러 코일의 제3 및 제4 세트를 포함하는 것인, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템.

**청구항 35**

제32항 내지 제34항에 있어서,

상기 미러 플러그는 각 상기 제1 및 제2 형성 부분과 상기 제1 및 제2 다이버터 사이의 통로에서 수축부를 둘러싼 미러 플러그 코일의 세트를 더 포함하는 것인, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템.

**청구항 36**

제32항 내지 제35항에 있어서,

상기 제1 및 제2 다이버터, 상기 제1 및 제2 형성 부분 및 상기 구속 챔버에 동작가능하게 연결된 제1 및 제2 축방향 플라즈마 건을 더 포함하는, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템.

**청구항 37**

제32항 내지 제36항에 있어서,

상기 구속 챔버에 연결된 2개 이상의 안장 코일을 더 포함하는, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템.

**청구항 38**

제32항 내지 제37항에 있어서,

상기 형성 부분은, FRC를 생성하고 이 FRC를 상기 구속 챔버의 중간평면 쪽으로 병진이동시키는 모듈화된 형성 시스템을 포함하는 것인, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템.

**청구항 39**

제32항 내지 제38항에 있어서,

바이어싱 전극은, 상기 격납 챔버 내에 위치되어 개방된 필드 라인과 접촉하는 하나 이상의 포인트 전극, 상기 구속 챔버와 상기 제1 및 제2 형성 부분 사이에서 방위각으로 대칭적인 방식으로 원위-에지 플렉스 층을 충전하는 환형 전극의 세트, 상기 제1 및 제2 다이버터에 위치되어 다수의 동심의 플렉스 층을 충전하는 복수의 동심으로 적층된(stacked) 전극, 및 개방된 플렉스를 차단하는 플라즈마 건의 애노드 중 하나 이상을 포함하는 것인, FRC를 갖는 자기장을 생성하고 유지하는 시스템.

**발명의 설명**

**기술분야**

[0001] 본 명세서에 설명된 실시예는 일반적으로 자성 플라즈마 구속 시스템(magnetic plasma confinement system)에 관한 것으로, 보다 상세하게는, 입자, 에너지 및 플렉스의 구속뿐만 아니라 우수한 안정성을 갖는 필드 역전된 구성(Field Reversed Configuration)을 형성하고 유지할 수 있는 시스템 및 방법에 관한 것이다.

**배경기술**

[0002] 필드 역전된 구성(FRC)은 컴팩트한 토로이드(compact toroid: CT)로 알려져 있는 자성 플라즈마 구속 토폴로지의 부류에 속한다. 이 구성은 현저히 포로이달한 자기장(poloidal magnetic field)을 나타내고 제로(zero)이거나 작은 자체-생성된 토로이달 필드(toroidal field)를 보유한다(M. Tuszewski, Nucl. Fusion **28**, 2033 (1988) 참조). 이러한 구성의 매력은 건설(construction)과 유지를 용이하게 하는 간단한 기하학적 형상, 에너지의 추출과 애쉬(ash)의 제거를 용이하게 하는 자연적으로 제한되지 않은 다이버터(divertor), 및 매우 높은  $\beta$  ( $\beta$ 는 FRC 내 평균 자기장 압력에 대한 평균 플라즈마 압력의 비율이다), 즉, 높은 전력 밀도이다. 높은  $\beta$ 의 특성은 경제적인 동작과, D-He<sup>3</sup> 및 p-B<sup>11</sup>와 같은 개선된 무중성자 연료(advanced, aneutronic fuel)를 사용하는데 유리하다.

[0003] FRC를 형성하는 전통적인 방법은 고온 고밀도 플라즈마를 생성하는 필드 역전된  $\theta$ -핀치 기술을 사용한다(A. L. Hoffman and J. T. Slough, Nucl. Fusion **33**, 27 (1993) 참조). 이에 대한 변형은 제타-핀치(theta-pinch) "



소스"에서 생성된 플라즈마가 일 단부에서 거의 바로 배출(ejected out)되어 구속 챔버(confinement chamber)로 들어가는 병진이동-트랩핑(translation-trapping) 방법이다. 병진이동하는 플라즈마모이드(plasmoid)는 이후 챔버의 단부들에 있는 2개의 강한 미러(mirror)들 사이에 트랩된다(예를 들어, H. Himura, S. Okada, S. Sugimoto, and S. Goto, Phys. Plasmas **2**, 191 (1995) 참조). 구속 챔버에 들어가면, 빔 주입(injection)(중성 또는 중성화된), 자기장 회전, RF 또는 옴 가열(ohmic heating) 등과 같은 여러 가열 및 전류 구동 방법이 적용된다. 소스 및 구속 기능을 이렇게 분리하면 잠재적인 미래의 융합 리액터(fusion reactor)에 주요 엔지니어링 장점(key engineering advantage)을 제공한다. FRC는 극히 로버스트(robust)하고, 동적인 형성, 병진이동, 및 격렬한 캡처 이벤트(violent capture event)에 탄성적인 것으로 입증되었다. 더욱이, 이들은 바람직한 플라즈마 상태를 취하는 경향을 보여준다(예를 들어 H. Y. Guo, A. L. Hoffman, K. E. Miller, and L. C. Steinhauer, Phys. Rev. Lett. **92**, 245001 (2004) 참조). 과거 십 년에 상당한 진보(progress)가 이루어져 다른 FRC 형성 방법, 즉 정반대 쪽을 향하는 헬리시티(helicities)에서 스페로막(spheromaks)을 병합(merging)하는 방법(예를 들어 Y. Ono, M. Inomoto, Y. Ueda, T. Matsuyama, 및 T. Okazaki, Nucl. Fusion **39**, 2001 (1999) 참조)과, 회전하는 자기장(rotating magnetic field: RMF)으로 전류를 구동하여(예를 들어 I. R. Jones, Phys. Plasmas **6**, 1950 (1999) 참조) 추가적인 안정성을 더 제공하는 방법이 개발(develop)되었다.

[0004] 최근에, 오래 전에 제안된 충돌-병합 기술(예를 들어 D. R. Wells, Phys. Fluids **9**, 1010 (1966) 참조)이 상당히 더 개발되었는데, 예를 들어, 구속 챔버의 대향하는 단부들에서 2개의 별개의 제타-핀치는 2개의 플라즈마모이드를 동시에 생성하고 이 플라즈마모이드를 고속으로 서로를 향해 가속시키며; 이들은 이후 구속 챔버의 중심에서 충돌하고 병합하여 화합물 FRC를 형성한다. 최근까지 최대 FRC 실험 중 하나를 건설해서 성공적으로 동작시킬 때, 안정적이고, 수명이 길고, 고프럭스, 고온의 FRC를 생성하는 종래의 충돌 병합 방법이 제시되었다(예를 들어 M. Binderbauer, H.Y. Guo, M. Tuszewski *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 045003 (2010) 참조).

[0005] FRC는 분리자(separatrix) 내 폐쇄된 필드 라인(closed field line)의 토러스(torus)와, 이 분리자 바로 외부에 개방된 필드 라인에 있는 환형 에지 층(annular edge layer)으로 구성된다. 에지 층은 FRC 길이를 넘어 제트(jet)로 집결(coalesce)하여, 중성 다이버터를 제공한다. FRC 토폴로지는 필드 역전된 미러 플라즈마의 토폴로지와 일치한다. 그러나, 상당한 차이는 FRC 플라즈마가 약 10의  $\beta$ 를 가진다는 것이다. 본래(inherent) 낮은 내부 자기장은 특정 고유(indigenous) 운동 입자 개체군(population)에, 즉 FRC 마이너(minor) 반경에 비해 큰 라모르(larmor) 반경을 갖는 입자를 제공한다. 이것은 강한 운동 효과가 있어서, 충돌 병합 실험에서 생성된 것과 같은 과거 및 현재 FRC의 총 안정성에 적어도 부분적으로 기여하는 것으로 보인다.

[0006] 일반적인 과거 FRC 실험은 입자 운반(transport)에 의해 주로 결정된 에너지 구속에 따라 대류 손실(convective loss)에 의해 지배되었다. 입자는 분리자 볼륨에서 기본적으로 방사방향 외부로 확산한 후, 에지 층에서 축방향으로 손실된다. 따라서, FRC 구속은 폐쇄된 및 개방된 필드 라인 구역의 특성에 좌우된다. 분리자에서 외부로 입자 확산 시간은  $\tau_{\perp} \sim a^2/D_{\perp}$ 으로 스케일링되고 ( $a \sim r_s/4$ , 여기서  $r_s$ 는 중심 분리자 반경임), 및  $D_{\perp}$ 는  $D_{\perp} \sim 12.5 \rho_{ie}$ 와 같은 특성 FRC 확산성이며,  $\rho_{ie}$ 는 외부에서 가해지는 자기장에서 평가된 이온 자이로반경(ion gyroradius)을 나타낸다. 에지 층 입자 구속 시간  $\tau_{\parallel}$ 은 과거 FRC 실험에서 본질적으로 축방향 통행(transit) 시간이다. 안정 상태에서, 방사방향 및 축방향 입자 손실 사이의 밸런스는 분리자 밀도 구배 길이  $\delta \sim (D_{\perp} \tau_{\parallel})^{1/2}$ 를 양산한다. FRC 입자 구속 시간은 분리자에 상당한 밀도를 가지는 과거 FRC에 대해  $(\tau_{\perp} \tau_{\parallel})^{1/2}$ 로 스케일링된다(예를 들어 M. TUSZEWSKI, "Field Reversed Configurations," Nucl. Fusion **28**, 2033 (1988) 참조).

[0007] 종래의 FRC 시스템 설계의 다른 단점은 외부 다극자(multipole)를 사용하여 고속으로 성장하는 n=2 상호 교환 불안정성(interchange instability)과 같은 회전 불안정성을 제어할 필요성이 있었다는 것이다. 이런 방식으로 일반적으로 외부에서 가해지는 4극자(quadrupole) 필드는 필요한 자성을 회복(restoring)시키는 압력을 제공하여 불안정한 모드의 성장을 댐핑시킨다. 이 기술이 열적 벌크(thermal bulk) 플라즈마의 안정성을 제어하는데 적합하지만, 이 기술은 더 많은 운동 FRC 또는 개선된 하이브리드 FRC에서 높은 운동성의 큰 궤도 입자 개체군이 통상적인 열적 플라즈마와 결합하는 심각한 문제를 야기한다. 이들 시스템에서, 이 다극자 필드로 인해 축대칭 자기장이 왜곡되면 충돌없는 통계적 확산을 통해 고속 입자 손실이 막대하고, 이에 정규 각도 모멘텀(canonical angular momentum)의 보존 손실이 초래된다. 이에 따라, 임의의 입자의 확산을 상승시킴이 없이 안정성을 제어하는 신규한 해법은 지금까지 개발(explored)되지 않은 개선된 FRC 개념의 더 높은 성능 가능성을 이용하는데 중요하다.

[0008] 그리하여, 전술한 것을 고려하여, (의료용 동위원소 생산, 핵 폐기물 재생, 물질 연구, 중성자 방사선 및 단층 촬영을 위한) 컴팩트한 중성자(neutron) 소스, (화학적 생성 및 프로세싱을 위한) 컴팩트한 광자(photon) 소스, 대량 분리 및 농축 시스템, 및 에너지의 미래의 생성에 경량의 원자핵을 융합시키기 위한 코어(core)를 포함하는 전체 여러 응용으로의 통로로서 안정 상태의 FRC를 사용하기 위하여 FRC의 구속 및 안정성을 개선하는 것이 바람직하다.

**발명의 내용**

[0009] 본 명세서에 제공된 본 실시예는 새로운 고성능 필드 역전된 구성(FRC)을 형성하고 유지할 수 있는 시스템 및 방법에 관한 것이다. 이 새로운 고성능 FRC 패러다임에 따라, 본 시스템은 부작용 없이 안정성을 제어할 뿐만 아니라 입자, 에너지 및 플럭스의 FRC 구속을 획기적으로 개선시키는 수단과 신규한 아이디어의 호스트를 결합한다.

[0010] 본 명세서에 제공된 FRC 시스템은 2개의 정반대로 대향된 역전된 필드의 쉘타-핀치 형성 부분에 의해 둘러싸인 중심 구속 용기와, 이 형성 부분을 넘어, 중성 밀도 및 불순물 오염을 제어하는 2개의 다이버터 챔버를 포함한다. 자성 시스템은 FRC 시스템의 컴포넌트를 따라 축방향 위치에 위치한 준(quasi)-dc 코일의 시리즈, 구속 챔버의 단부와 인접한 형성 부분 사이에 있는 준-dc 미러 코일, 및 각 형성 부분과 다이버터 사이에서, 자성 플럭스 표면을 다이버터 쪽으로 포커싱하는 추가적인 가이드 필드를 생성하는 컴팩트한 준-dc 미러 코일을 포함하는 미러 플러그를 포함한다. 이 형성 부분은, FRC가 제 자리에 형성되고 나서 가속되어 주입(=정적인 형성)되거나 또는 형성됨과 동시에 가속(=동적인 형성)될 수 있게 하는 모듈식 펄스 전력 형성 시스템을 포함한다.

[0011] FRC 시스템은 중성 원자빔 인젝터 및 펠릿 인젝터를 포함한다. 일 실시형태에서, 빔 인젝터는 중간평면을 향하여 중성자 입자를 주입하기 위해 기울어진다(angled). 중간평면을 향하여 기울어진 빔 인젝터와 중간평면에 가까운 축 빔 포지션(axial beam position)을 갖는 것은, FRC 플라즈마가 주입 기간 중에 수축(shrink)하거나 축소(contract)되더라도, 빔-플라즈마 결합을 향상시킨다. 게더링 시스템이 또한 축방향 플라즈마 건(gun)과 함께 포함된다. 개방된 플럭스 표면의 전기적 바이어싱을 위해 바이어싱 전극이 더 제공된다.

[0012] 동작에서, 자성 플럭스뿐만 아니라 플라즈마 열 에너지, 전체 입자 수, 플라즈마 변경 및 길이를 포함하는 FRC 글로벌 플라즈마 파라미터는, 중성자 빔이 플라즈마에 주입되고 펠릿이 적절한 입자 재보급(particle refueling)을 제공하는 동안, 쇠퇴(decay)없이 실질적으로 지속가능하다.

[0013] 대체 실시형태에서, 스페로막형 플라즈마(Spheromak-like plasma)를 주입함으로써 적절한 입자 재보급을 제공하기 위해 펠릿 인젝터 대신 CT(compact toroid) 인젝터가 제공된다.

[0014] 본 발명의 시스템, 방법, 특징 및 장점은 이하 도면과 상세한 설명을 참조하면 이 기술 분야에 통상의 지식을 가진 자에게는 명백해질 것이다. 모든 추가적인 방법, 특징 및 장점은 본 상세한 설명 내에 포함되고, 본 발명의 범위 내에 있고, 첨부된 청구범위에 의해 보호되는 것으로 의도된다. 본 발명은 예시적인 실시예의 상세사항을 요구하는 것으로 제한되지 않는 것으로 더 의도된다.

**도면의 간단한 설명**

[0015] 본 명세서의 일부로 포함된 첨부 도면은, 현재 바람직한 실시예를 도시하며, 위에 주어진 일반적인 상세한 설명과 아래에 주어진 바람직한 실시예의 상세한 설명과 함께, 본 발명의 원리를 설명하고 개시하는 기능을 한다.

**도 1**은 고성능 FRC 체제(HPF)에서 이루어진 경우, 종래의 FRC 체제(CR)에서 이루어진 경우, 및 다른 종래의 FRC 실험에서 이루어진 경우 본 FRC 시스템의 입자 구속을 도시하는 도면.

**도 2**는 본 FRC 시스템의 컴포넌트 및 본 FRC 시스템에서 생성가능한 FRC의 자성 토폴로지를 도시하는 도면.

**도 3a**는, 중성 빔, 전극, 플라즈마 건, 미러 플러그 및 펠릿 인젝터의 바람직한 배열을 포함하는 본 FRC 시스템의 기본 레이아웃을 위에서 본 것을 도시하는 도면.

**도 3b**는 상부로부터 본 중심 구속 용기를 도시하고, 중심 구속 용기 내의 메이저 대칭 축(major axis of symmetry)에 수직인 각도로 배열되는 중성자 빔을 나타내는 도면.

**도 3c**는 상부로부터 본 중심 구속 용기를 도시하고, 중심 구속 용기 내의 메이저 대칭 축에 수직보다 작은 각도로 배열되고 중심 구속 용기의 중간평면을 향하여 입자를 주입하도록 지향되는 중성자 빔을 나타내는 도면.

- 도 4는 형성 부분을 위한 펄스화된 전력 시스템의 컴포넌트의 개략을 도시하는 도면.
- 도 5는 개별 펄스화된 전력 형성 스킴(skid)의 사시도.
- 도 6은 형성 튜브 조립체의 사시도.
- 도 7은 중성 빔 시스템 및 주요(key) 컴포넌트의 부분 단면 사시도.
- 도 8은 구속 챔버에 있는 중성 빔 배열의 사시도.
- 도 9는 Ti 및 Li 게터링 시스템(gettering system)의 바람직한 배열의 부분 단면 사시도.
- 도 10은 다이버터 챔버에 설치된 플라즈마 건의 부분 단면 사시도. 연관된 자성 미러 플러그 및 다이버터 전극 조립체가 더 도시된다.
- 도 11은 구속 챔버의 축방향 단부에서 환형 바이어스 전극의 바람직한 레이아웃을 도시하는 도면.
- 도 12는 2개의 필드 역전된 세타 편치 형성 부분에서 외부 반자성 루프(diamagnetic loop) 시리즈 및 중심 금속 구속 챔버 내에 매립된 자성 프로브로부터 획득된 FRC 시스템에서 배제된 플럭스 반경의 전개(evolution)를 도시하는 도면. 시간은 형성 소스에서 동기화된 필드 역전의 순간에서부터 측정되고, 거리  $z$ 는 기계의 축방향 중간평면(midplane)에 대해 주어진다.
- 도 13(a) 내지 도 13(d)는 본 FRC 시스템에서 대표적인 비-HPF, 비-서스테인된 방전으로부터 데이터를 도시하는 도면. 시간의 함수로서 (a) 중간평면에서 배제된 플럭스 반경, (b) 중간평면 CO<sub>2</sub> 간섭계로부터 선 적분된 밀도의 6개의 코드(chord), (c) CO<sub>2</sub> 간섭계 데이터로부터 아벨 반전된(Abel-inverted) 밀도 방사방향 프로파일, 및 (d) 압력 밸런스로부터 총 플라즈마 온도가 도시된다.
- 도 14는 도 13에 도시된 본 FRC 시스템의 동일한 방전을 위해 선택된 시간에 배제된 플럭스 축방향 프로파일을 도시한다.
- 도 15는 구속 챔버의 외부에 장착된 안장 코일의 사시도.
- 도 16은 주입된 중성 빔의 펄스 길이 및 FRC 수명의 상관성을 도시하는 도면. 도시된 바와 같이, 더 긴 빔 펄스는 더 오래 생존하는 FRC를 생성한다.
- 도 17은 FRC 성능과 HPF 체제의 달성에 대한 FRC 시스템의 여러 컴포넌트의 개별적 및 조합적 효과를 도시하는 도면.
- 도 18(a) 내지 도 18(d)는 본 FRC 시스템에서 대표적인 HPF, 비-서스테인된 방전으로부터 데이터를 도시하는 도면. 시간의 함수로서 (a) 중간평면에서 배제된 플럭스 반경, (b) 중간평면 CO<sub>2</sub> 간섭계로부터 선 적분된 밀도의 6개의 코드(chord), (c) CO<sub>2</sub> 간섭계 데이터로부터 아벨 반전된(Abel-inverted) 밀도 방사방향 프로파일, 및 (d) 압력 밸런스로부터 총 플라즈마 온도가 도시된다.
- 도 19는 전자(electron) 온도( $T_e$ )의 함수로서 플럭스 구속을 도시하는 도면. 이것은 HPF 방전을 위해 새로이 수립된 우수한 스케일링 체제의 그래픽 표현을 나타낸다.
- 도 20은 기울어지지 않은 그리고 기울어진 주입된 중성자 빔의 펄스 길이에 대응하는 FRC 수명을 나타내는 도면.
- 도 21(a) 및 도 21(b)는 CT(compact toroid) 인젝터의 기본 레이아웃을 도시하는 도면.
- 도 22(a) 및 도 22(b)는 CT 인젝터가 장착된 것을 나타내는 중심 구속 용기를 나타내는 도면.
- 도 23(a) 및 도 23(b)는 드리프트 튜브(drift tube)가 연결된 CT 인젝터의 대체 실시형태의 기본 레이아웃을 나타내는 도면.
- 본 도면은 스케일에 맞게 그려진 것은 아니며 유사한 구조나 기능을 갖는 요소는 일반적으로 도면 전체에 걸쳐 예시적인 목적을 위하여 동일한 참조 부호로 표시된 것으로 이해된다. 본 도면은 본 명세서에 설명된 여러 실시예의 상세한 설명을 용이하게 하기 위해 제공된 것으로 이해된다. 본 도면은 본 명세서에 개시된 내용의 모든 측면을 기술하는 것이 아니고 본 청구범위를 제한하는 것도 아니다.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

- [0016] 본 명세서에 제공된 본 실시예는 종래의 FRC에 비해 우수한 입자, 에너지 및 플럭스 구속뿐만 아니라 우수한 안정성을 갖는 고성능 필드 역전된 구성(FRC)을 형성하고 유지할 수 있는 시스템 및 방법에 관한 것이다. 이러한 고성능 FRC는, (의료용 동위원소 생산, 핵 폐기물 재생, 물질 연구, 중성자 방사선 및 단층 촬영을 위한) 컴팩트한 중성자(neutron) 소스, (화학적 생성 및 프로세싱을 위한) 컴팩트한 광자(photon) 소스, 대량 분리 및 농축 시스템, 및 에너지의 미래의 생성에 경량의 원자핵을 융합시키기 위한 코어(core)를 포함하는 전체 여러 응용으로의 통로를 제공한다.
- [0017] 여러 보조 시스템 및 동작 모드들이 FRC에 우수한 구속 체제가 있는지 여부를 평가하기 위해 개발되었다. 이런 노력으로 본 명세서에 설명된 고성능 FRC 패러다임의 발견과 개발이 이루어졌다. 이 새로운 패러다임에 따라, 본 시스템 및 방법은 부작용 없이 안정성을 제어할 뿐만 아니라 도 1에 도시된 FRC 구속을 획기적으로 개선하는 수단과 신규한 아이디어의 호스트를 결합한다. 아래에 보다 상세히 설명된 바와 같이, 도 1은, FRC를 형성하고 유지하는 고성능 FRC 체제(HPF)에 따라 동작하는 경우와, FRC를 형성하고 유지하는 종래의 체제 CR에 따라 동작하는 경우 아래에 설명된 FRC 시스템(10)(도 2 및 도 3 참조)에서의 입자 구속, 및 다른 실험에서 사용되는 FRC를 형성하고 유지하는 종래의 체제에 따라 동작하는 경우의 입자 구속을 도시한다. 본 발명은 FRC 시스템(10)의 본 발명의 개별 컴포넌트 및 방법뿐만 아니라 집합적 효과를 상세히 약술한다.
- [0018] FRC 시스템의 설명
- [0019] 진공 시스템
- [0020] 도 2 및 도 3은 본 FRC 시스템(10)의 개략도를 도시한다. FRC 시스템(10)은 2개의 정반대로 대향된 역전된 필드-셰타-핀치 형성 부분(200)에 의해 둘러싸인 중심 구속 용기(100) 및, 이 형성 부분(200)을 넘어, 중성 밀도 및 불순물 오염을 제어하는 2개의 다이버터 챔버(300)를 포함한다. 본 FRC 시스템(10)은 초고진공을 수용하도록 형성되었고 10<sup>-8</sup> 토르(torr)의 일반적인 베이스 압력에서 동작한다. 이러한 진공 압력은, 결합 컴포넌트들 사이에 이중 펌핑된 결합 플랜지, 금속 O-링, 고순도의 내부벽을 사용할 것과, 및 물리적 및 화학적 클리닝 후에 24 시간 250℃ 진공에서 베이킹과 수소 글로우(Hydrogen glow) 방전 클리닝이 후속하는 것과 같은, 조립 전 모든 부분에 주의깊은 초기 표면 처리를 요구한다.
- [0021] 역전된 필드-셰타-핀치 형성 부분(200)은 (도 4 내지 도 6 참조) 아래에 상세히 설명된 개선된 펄스화된 전력 형성 시스템을 통한 표준 필드 역전된-셰타-핀치(field-reversed-theta-pinch: FRTP)이다. 각 형성 부분(200)은 초순수 수정(ultrapure quartz)의 2밀리미터의 내부 라이닝(lining)을 특징으로 하는 표준 불투명한 산업 등급 수정 튜브로 만들어진다. 구속 챔버(100)는 스테인리스 스틸로 만들어져서 다수의 방사방향 및 접선방향 포트(port)를 가능하게 하고; 이것은 아래에 설명된 실험의 시간스케일에서 플럭스 보존기(flux conserver)로도 기능하며 고속 자성 과도 현상(transient)을 제한한다. 진공은 드라이 스크롤 러핑 펌프(dry scroll roughing pump), 터보 분자 펌프 및 극저온 펌프(cryo pump)의 세트를 갖는 FRC 시스템(10)에서 생성되고 유지된다.
- [0022] 자성 시스템
- [0023] 자성 시스템 400은 도 2 및 도 3에 도시된다. 도 2는, 특히, FRC 시스템(10)에서 생성가능한 FRC(450)에 속하는 FRC 자성 플럭스 및 밀도 윤곽을 (방사방향과 축방향 좌표의 함수로서) 도시한다. 이들 윤곽은 FRC 시스템(10)에 대응하는 시스템과 방법을 시뮬레이션하고, 측정된 실험적 데이터와 잘 일치하도록 생성된 코드를 사용하여 2-D 저항성 홀-MHD 수치 시뮬레이션에 의해 획득되었다. 도 2에 도시된 바와 같이, FRC(450)는 분리자(451) 내 FRC(450)의 내부(453)에서 폐쇄된 필드 라인의, 및 이 분리자(451)의 바로 외부에 개방된 필드 라인(452)에 있는 환형 에지 층(456)의 토러스로 구성된다. 에지 층(456)은, FRC 길이를 넘는 제트(454)로 집결하여 중성 다이버터를 제공한다.
- [0024] 메인 자성 시스템(410)은, 컴포넌트를 따라, 즉, FRC 시스템(10)의 구속 챔버(100), 형성 부분(200) 및 다이버터(300)를 따라 특정 축방향 위치에 위치한 준-dc 코일(412, 414, 및 416)의 시리즈를 포함한다. 준-dc 코일(412, 414 및 416)은 준-dc 스위칭 전원에 의해 전력 공급되어 구속 챔버(100), 형성 부분(200) 및 다이버터(300)에 약 0.1 T의 기본 자성 바이어스 필드를 생성한다. 준-dc 코일(412, 414 및 416)에 더하여, 메인 자성 시스템(410)은 구속 챔버(100)의 단부와 인접한 형성 부분(200) 사이에 (스위칭 전원에 의하여 전력 공급되는) 준-dc 미러 코일(420)을 포함한다. 준-dc 미러 코일(420)은 최대 5의 자성 미러 비율을 제공하고 평형 형상을 제어하기 위해 독립적으로 에너지 공급될 수 있다. 나아가, 미러 플러그(440)는 각 형성 부분(200) 및 다이버터(300) 사이에 위치된다. 미러 플러그(440)는 컴팩트한 준-dc 미러 코일(430) 및 미러 플러그 코일(444)을 포

함한다. 준-dc 미러 코일(430)은, 추가적인 가이드 필드를 생성하여 자성 플럭스 표면(455)을, 미러 플러그 코일(444)을 통과하는 작은 직경의 통로(442) 쪽으로 포커싱하는 (스위칭 전원에 의해 전력 공급되는) 3개의 코일(432, 434 및 436)을 포함한다. 작은 직경의 통로(442) 주위를 둘러싸고 LC 펄스화된 전력 회로에 의해 전력 공급되는 미러 플러그 코일(444)은 최대 4 T의 강한 자성 미러 필드를 생성한다. 이 전체 코일 배열의 목적은 자성 플럭스 표면(455) 및 단부-스트리밍 플라즈마 세트(454)를 다이버터(300)의 원격 챔버(310)로 타이트하게 묶어서 가이드하는 것이다. 마지막으로, 안장-코일(saddle-coil) "안테나"(460)의 세트(도 15 참조)는 구속 챔버(100)의 외부에, 중간-평면의 각 측면에 2개 위치되어, dc 전원에 의해 전력 공급된다. 안장-코일 안테나(460)는 회전 불안정성을 제어하고 및/또는 전자 전류를 제어하기 위해 약 0.01 T의 준-정적인 자성 쌍극자 또는 4극자 필드를 제공하도록 구성될 수 있다. 안장-코일 안테나(460)는 가해지는 전류의 방향에 따라 기계의 중간평면에 대해 대칭이거나 반대칭인 자기장을 유연하게 제공할 수 있다.

[0025] 펄스화된 전력 형성 시스템

[0026] 펄스화된 전력 형성 시스템(210)은 변형된 쉐타-핀치 원리에서 동작한다. 각 형성 부분(200)에 전력을 공급하는 2개의 시스템이 있다. 도 4 내지 도 6은 형성 시스템(210)의 메인 구성(building) 블록 및 배열을 도시한다. 형성 시스템(210)은 형성 수정 튜브(240)를 둘러싸는 스트랩 조립체(230)(=스트랩)의 코일(232)의 서브-세트에 각각 에너지를 공급하는 개별 유닛(=스키드)(220)으로 구성된 모듈식 펄스화된 전력 배열로 구성된다. 각 스키드(220)는 커패시터(221), 인덕터(223), 고속 고전류 스위치(225) 및 연관된 트리거(222) 및 덤프(dump) 회로(224)로 구성된다. 전체적으로, 각 형성 시스템(210)은 350-400 kJ의 용량성 에너지를 저장하며, 이는 FRC를 형성하고 가속시키는 최대 35GW의 전력을 제공한다. 이들 컴포넌트의 조정된(coordinated) 동작은 각 형성 부분(200)에서 형성 시스템(210)들 사이에 타이밍을 동기화하고 스위칭 지터를 수십 나노초로 최소화하는 최신의 트리거 및 제어 시스템(222 및 224)을 통해 달성된다. 이 모듈식 설계의 장점은 유연한 동작에 있다: FRC는 제 자리에서 형성된 후 가속되어 주입(=정적인 형성)되거나 또는 형성됨과 동시에 가속(=동적인 형성)될 수 있다.

[0027] 중성 빔 인젝터

[0028] 중성 원자빔(600)은 FRC 시스템(10)에서 전개되어 고속 입자 압력을 생성할 뿐만 아니라 가열과 전류 구동을 제공한다. 도 3a, 도 3b 및 도 8에 도시된 바와 같이, 중성 원자빔 인젝터 시스템(610 및 640)을 포함하는 개별 빔 라인인 중심 구속 챔버(100) 주위에 위치되고, 타겟 트랩핑 존(zone)이 분리자(451)(도 2 참조) 내에 잘 놓이도록 충격 파라미터를 통해 FRC 플라즈마에 접선방향으로 (및 중심 구속 용기(100)의 메이저 대칭 축에 직각인 각도로 또는 수직으로) 고속 입자를 주입한다. 각 인젝터 시스템(610 및 640)은 최대 1 MW의 중성 빔 전력을 20 내지 40 keV의 입자 에너지를 갖는 FRC 플라즈마로 주입(injecting)할 수 있다. 시스템(610 및 640)은 양이온의 다중 개구 추출 소스에 기초하고, 기하학적 포커싱, 이온 추출 그리드의 관성 냉각 및 차동 펌핑을 사용한다. 상이한 플라즈마 소스를 사용하는 것은 별도로 하고, 시스템(610 및 640)은 각 장착 위치를 충족하여 측면과 상부 주입 능력을 양산하도록 기본적으로 물리적 설계에 의해 차별화된다. 이 중성 빔 인젝터의 일반적인 컴포넌트는 구체적으로 측면 인젝터 시스템(610)을 위해 도 7에 도시되어 있다. 도 7에 도시된 바와 같이, 각 개별 중성 빔 시스템(610)은 단부를 커버하는 자성 스크린(614)을 갖는 입력 단부(이것은 시스템(640)에서 아크 소스로 대체된다)에서 RF 플라즈마 소스(612)를 포함한다. 이온 광학 소스 및 가속 그리드(616)는 플라즈마 소스(612)에 연결되고 게이트 밸브(620)는 이온 광학 소스 및 가속 그리드(616) 및 중성화기(622) 사이에 위치된다. 편향 자석(624) 및 이온 덤프(dump)(628)는 중성화기(622) 및 출력 단부에 있는 표적 디바이스(630) 사이에 위치된다. 냉각 시스템은 2개의 극저온-냉동기(634), 2개의 극저온패널(636) 및 LN2 슈라우드(shroud)(638)를 포함한다. 이 유연한 설계는 FRC 파라미터의 넓은 범위에 걸쳐 동작할 수 있다.

[0029] 중성 원자빔 인젝터(600)에 대한 대체 구성은, 중심 구속 용기(100) 내의 메이저 대칭 축에 대하여 90° 보다 작은 각도(A)를 갖지만, FRC 플라즈마에 접선으로 고속 입자를 주입하는 것이다. 도 3c에 빔 인젝터(615)의 이러한 타입의 배향이 도시되어 있다. 또한, 중심 구속 용기(100)의 중간평면의 측면 상의 빔 인젝터(615)가 중간평면을 향하여 입자를 주입하도록, 빔 인젝터(615)가 배향될 수 있다. 결국, 빔 시스템(600)의 축 포지션은 중간평면에 더 가깝게 선택될 수 있다. 대체 주입 실시형태는, 주입된 고속 입자의 더 높은 트랩핑 효율과 빔의 더 좋은 연결을 위해 제공하는, 더 많은 중심 연료공급 옵션을 용이하게 한다. 또한, 각도와 축 포지션에 의존하여, 빔 인젝터(615)의 이러한 배열은 FRC(450)의 축 신장(axial elongation)과 다른 특성의 더 직접적이고 독립적인 제어를 가능하게 한다. 예컨대, 수직 각도(A)가 많을수록 플라즈마가 축방향으로 더 짧지만 더 뜨거워질 것이지만, 용기의 메이저 대칭 축에 비해 더 작은 각도(A)로의 빔의 주입은 더 긴 축 신장 및 더 낮은 온도를 가진 FRC 플라즈마를 생성할 것이다. 이러한 방식으로, 빔 인젝터(615)의 주입 각도(A)와 위치는 상이한

목적에 대해 최적화될 수 있다. 빔 인젝터(615)의 이러한 앵글과 포지셔닝은, (일반적으로 더 적은 빔 발산을 갖는 더 많은 파워를 증착하기 위해 더 유리할 수 있는) 더 높은 에너지의 빔이, 이러한 빔을 트랩(trap)하기 위해 요구되는 것보다 더 낮은 자기장(magnetic field)로 주입되게 할 수 있다. 이것은, 에너지의 방위각 성분이 (용기의 메이저 대칭 축에 대한 축입 각도가 일정 빔 에너지에서 감소됨에 따라 점차적으로 작아지는) 고속 이온 궤도 스케일을 결정하는 것이라는 사실에 기인한다. 또한, FRC 플라즈마가 수축되거나 주입 기간 중에 축 방향 축소되더라도, 중간평면에 가까운 축 빔 포지션을 갖고 중간평면을 향하여 기울어진 주입은 빔 플라즈마 연결을 향상시킨다.

[0030] 펠릿 인젝터

[0031] 새로운 입자를 주입하고 FRC 입자 목록(inventory)을 더 잘 제어하는 수단을 제공하기 위하여, 12-배럴(barrel) 펠릿 인젝터(700) (예를 들어 I. Vinyar et al., "Pellet Injectors Developed at PELIN for JET, TAE, and HL-2A," Proceedings of the 26<sup>th</sup> Fusion Science and Technology Symposium, 09/27 to 10/01 (2010) 참조)가 FRC 시스템(10)에 사용된다. 도 3은 FRC 시스템(10)에서 펠릿 인젝터(700)의 레이아웃을 도시한다. 원통형 펠릿(D ~ 1 mm, L ~ 1 -2 mm)은 150 - 250 km/s의 범위의 속도로 FRC에 주입된다. 각 개별 펠릿은 FRC 입자 목록에 비해 약  $5 \times 10^{19}$ 의 수소 원자를 포함한다.

[0032] 게더링 시스템

[0033] 중성 할로(halo) 가스는 모든 구속 시스템에서 심각한 문제인 것으로 잘 알려져 있다. 충전물의 교환 및 재충용(charge exchange and recycling) (벽으로부터 차가운 불순물의 방출) 처리는 에너지 및 입자 구속에 파괴적 효과를 가질 수 있다. 나아가, 예지에서 또는 예지 부근에서 중성 가스의 밀도가 상당하면 주입된 큰 궤도(고 에너지) 입자(큰 궤도는 FRC 토폴로지의 스케일에 있는 궤도 또는 적어도 특정 자기장 구배 길이 스케일보다 훨씬 더 큰 궤도 반경을 가지는 입자를 말한다)의 수명을 손상시키거나 적어도 심각하게 삭감시켜 보조 빔 가열을 통한 융합을 포함하는 모든 에너지 플라즈마 응용에 유해하다.

[0034] 표면 처리는 중성 가스 및 불순물의 유해한 효과가 구속 시스템에서 제어되거나 감소될 수 있는 수단이다. 이를 위해 본 명세서에 제공된 FRC 시스템(10)은 구속 챔버(또는 용기)(100)의 플라즈마를 향하는 표면과, Ti 및/또는 Li의 필름(수 십 마이크로미터 두께)을 갖는 다이버터(300)를 코팅하는 티타늄 및 리튬 증착 시스템(810 및 820)을 사용한다. 코팅은 증기 증착 기술을 통해 달성된다. 고체(solid) Li 및/또는 Ti는 증발되거나 및/또는 승화되어 표면 부근으로 스프레이되어 코팅을 형성한다. 소스는 가이드 노즐(Li의 경우에)(822)을 갖는 원자 오븐이거나 또는 가이드 슈라우드(Ti의 경우에)(812)를 갖는 고체의 가열된 구체이다. Li 증발기 시스템은 일반적으로 연속적인 모드에서 동작하지만 Ti 승화기는 대부분 플라즈마 동작 사이에 간헐적으로 동작된다. 이들 시스템의 동작 온도는 600°C를 초과하여 고속 증착 속도를 획득한다. 우수한 벽 커버리지를 달성하기 위해, 다수의 전략적으로 위치된 증발기/승화기 시스템이 필요하다. 도 9는 FRC 시스템(10)에서 게더링 증착 시스템(810 및 820)의 바람직한 배열을 상술한다. 코팅은 게더링 표면으로 작용하고 펌프 원자 및 분자 수소 중(H 및 D)을 효과적으로 펌핑한다. 코팅은 탄소와 산소와 같은 다른 일반적인 불순물을 무시가능한 레벨로 더 감소시킨다.

[0035] 미러 플러그

[0036] 전술한 바와 같이, FRC 시스템(10)은 도 2 및 도 3에 도시된 바와 같이 미러 코일(420, 430, 및 444)의 세트를 사용한다. 미러 코일(420)의 제1 세트는 구속 챔버(100)의 2개의 축방향 단부에 위치되고, 메인 자성 시스템(410)의 구속 코일(412, 414 및 416)로부터 독립적으로 에너지 공급된다. 미러 코일(420)의 제1 세트는 병합 동안 FRC(450)을 조향하고 축방향으로 포함하는 것을 기본적으로 도와주고 서스테인 동안 평형 형성을 제어한다. 제1 미러 코일 세트(420)는 중심 구속 코일(412)에 의해 생성된 중심 구속 필드보다 명목상 더 높은 자기장(약 0.4 내지 0.5 T)을 생성한다. 3개의 컴팩트한 준-dc 미러 코일(432, 434 및 436)을 포함하는 미러 코일(430)의 제2 세트는 형성 부분(200)과 다이버터(300) 사이에 위치되고 공통 스위칭 전원에 의해 구동된다. 미러 코일(432, 434 및 436)은, (용량성 전원에 의해 전력 공급되는) 더 컴팩트한 펄스화된 미러 플러그 코일(444) 및 물리적 수축부(442)와 함께 미러 플러그(440)를 형성하여 매우 높은 자기장(약 10 내지 20 ms의 상승 시간에 2 내지 4T)을 갖는 좁고 낮은 가스 전도성 경로를 제공한다. 가장 컴팩트한 펄스화된 미러 코일(444)은, 구속 코일(412, 414 및 416)의 미터-플러스-스케일 보어 및 팬케이크 설계에 비해 20cm 및 유사한 길이의 컴팩트한 방사방향 치수의 보어이다. 미러 플러그(440)의 목적은 매니폴드(multifold)이다: (1) 코일(432, 434, 436 및 444)은 자성 플럭스 표면(452) 및 단부-스트리밍 플라즈마 세트(454)를 타이트하게 묶어서

원격 다이버터 챔버(300)로 가이드한다. 이것은 배기(exhaust) 입자가 다이버터(300)에 적절히 도달하는 것과 다이버터(300)로 가는 내내 중심 FRC(450)의 개방된 필드 라인(452) 구역으로부터 트레이스하는 연속적인 플럭스 표면(455)이 있는 것을 보장한다. (2) 코일(432, 434, 436 및 444)이 자성 플럭스 표면(452) 및 플라즈마 제트(454)의 통과를 허용할 수 있는 FRC 시스템(10)에서 물리적 수축부(442)는, 다이버터(300)에 놓여있는 플라즈마 건(350)으로부터 중성 가스 흐름에 방해물 제공한다. 동일한 베인(vein)에서, 수축부(442)는 형성 부분(200)으로부터 다이버터(300)로 가스의 역-스트리밍을 방지하여 FRC의 사타트업(start up)을 시작할 때 전체 FRC 시스템(10)에 도입되어야 하는 중성 입자의 수를 감소시킨다. (3) 코일(432, 434, 436 및 444)에 의해 생성된 강한 축방향 미러는 축방향 입자 손실을 감소시켜 개방된 필드 라인에 대한 병렬 입자 확산성을 감소시킨다.

[0037] *축방향 플라즈마 건*

[0038] 다이버터(300)의 다이버터 챔버(310)에 장착된 건(350)으로부터 플라즈마 스트림은 안정성 및 중성 빔 성능을 개선시키도록 의도된다. 건(350)은 도 3 및 도 10에 도시된 바와 같이 다이버터(300)의 챔버(310) 내 축에 장착되어 다이버터(300)의 개방된 플럭스 라인(452)을 따라 구속 챔버(100)의 중심 쪽으로 흐르는 플라즈마를 생성한다. 건(350)은 와셔-스택 채널(washer-stack channel)에서 높은 밀도 가스 방전에서 동작하며, 5 내지 10 ms 동안 수 킬로암페어의 완전히 이온화된 플라즈마를 생성하도록 설계된다. 건(350)은 구속 챔버(100)에서 플라즈마의 원하는 사이즈를 갖는 출력 플라즈마 스트림과 일치하는 펄스화된 자성 코일을 포함한다. 건(350)의 기술적 파라미터는 5 내지 13 cm의 외부 직경 및 최대 약 10 cm의 내부 직경을 가지는 채널을 특징으로 하고, 0.5 내지 2.3 T의 건-내부 자기장을 갖는 400-600 V에서 10-15 kA의 방전 전류를 제공한다.

[0039] 건 플라즈마 스트림은 미러 플러그(440)의 자기장을 관통하여 형성 부분(200) 및 구속 챔버(100)로 흐를 수 있다. 미러 플러그(440)를 통한 플라즈마의 전달 효율은 건(350)과 플러그(440) 사이의 거리의 감소에 따라 증가하고 플러그(440)를 더 넓게 더 짧게 하는 것에 의해 증가한다. 적절한 조건 하에서, 건(350)은 약 150 내지 300 eV 및 약 40 내지 50 eV의 높은 이온 및 전자 온도를 각각 갖는 2 내지 4 T 미러 플러그(440)를 통해 대략  $10^{22}$  양성자(proton)/s를 각각 전달할 수 있다. 건(350)은 FRC 예지 층(456)의 상당한 연료 보급, 및 개선된 전체적인 FRC 입자 구속을 제공한다.

[0040] 플라즈마 밀도를 더 증가시키기 위하여, 가스 박스는 추가적인 가스를 건(350)으로부터 플라즈마 스트림으로 펄핑(puff)하는데 사용될 수 있다. 이 기술은 주입된 플라즈마 밀도를 수 배 증가시킬 수 있다. FRC 시스템(10)에서, 미러 플러그(440)의 다이버터(300) 측에 설치된 가스 박스는 FRC 예지 층(456)의 연료 보급, FRC(450)의 형성, 및 플라즈마 라인 매듭(line-tying)을 개선시킨다.

[0041] 전술한 모든 조절 파라미터가 주어지고 단 하나 또는 둘 모두의 건에서 동작이 가능한 것을 고려하면, 동작 모드의 넓은 스펙트럼이 접근가능하다는 것은 용이하게 명백하다.

[0042] *바이어싱 전극*

[0043] 개방된 플럭스 표면의 전기적 바이어싱은 노브를 회전시키는 것과 유사한 제어 메커니즘을 제공하는 방위각의  $E \times B$  운동을 야기하는 방사방향 전위를 제공하여, 개방된 필드 라인 플라즈마의 회전뿐만 아니라 속도 전단(velocity shear)을 통해 실제 FRC 코어(450)를 제어할 수 있다. 이 제어를 달성하기 위하여, FRC 시스템(10)은 기계의 여러 부분에 전략적으로 배치된 여러 전극을 사용한다. 도 3은 FRC 시스템(10) 내 바람직한 위치에 위치한 바이어싱 전극을 도시한다.

[0044] 대체로, 4개의 부류의 전극: (1) FRC(450)의 예지에 특정 개방된 필드 라인(452)과 접촉하여 국부적 충전을 제공하는 구속 챔버(100) 내 포인트 전극(905), (2) 구속 챔버(100)와 형성 부분(200) 사이에서 방위각으로 대칭적인 방식으로 원위-예지 플럭스 층(456)을 충전하는 환형 전극(900), (3) 다수의 동심의 플럭스 층(455)을 충전하는 다이버터(300)에서 동심의 전극(910)의 스택(여기서, 층을 선택하는 것은 조절 코일(416)에 의하여 제어 가능하여 다이버터 자기장을 조절하여 적절한 전극(910)에 있는 원하는 플럭스 층(456)을 종료시킨다), 및 마지막으로 (4) (FRC(450)의 분리자 부근에 내부 개방된 플럭스 표면(455)을 차단하는) 플라즈마 건(350) 자체의 애노드(920)(도 10 참조)가 있다. 도 10 및 도 11은 이들 중 일부에 대한 일부 일반적인 설계를 도시한다.

[0045] 모든 경우에 이들 전극은 최대 약 800 V의 전압의 펄스화된 또는 dc 전력 소스에 의해 구동된다. 전극 사이즈 및 어느 플럭스 표면이 교차되는지 여부에 따라, 전류는 킬로 암페어 범위에서 인출될 수 있다.

[0046] *FRC 시스템의 비 서스테인된 동작 - 종래의 체제*

- [0047] FRC 시스템(10)에서 표준 플라즈마 형성은 잘 생성된 역전된 필드-썬타-핀치 기술을 따른다. FRC를 사타트업하는 일반적인 공정은 준-dc 코일(412, 414, 416, 420, 432, 434 및 436)을 안정 상태 동작으로 구동하는 것에 의해 시작한다. 펄스화된 전력 형성 시스템(210)의 RFTP 펄스화된 전력 회로는 펄스화된 고속 역전된 자기장 코일(232)을 구동하여 형성 부분(200)에 약 -0.05 T의 일시적으로 역전된 바이어스를 생성한다. 이 점에서 9-20 psi의 미리 결정된 양의 중성 가스가 형성 부분(200)의 외부 단부에 위치한 플랜지에서 방위각으로 배향된 퍼프 계곡(puff-valve)의 세트를 통해 (북극 및 남극) 형성 부분(200)의 수정-튜브 챔버(240)에 의해 한정된 2개의 형성 볼륨으로 주입된다. 다음으로, 작은 RF (~ 수 백 킬로헤르쯔) 필드가 수정 튜브(240)의 표면에 있는 안테나 세트로부터 생성되어 중성 가스 컬럼 내 국부 시드(seed) 이온화 구역의 형태에서 미리 선 이온화를 생성한다. 이 후에 펄스화된 고속 역전된 자기장 코일(232)을 구동하는 전류에 썬타-링잉(ringing) 변조를 적용하여, 가스 컬럼의 보다 전체적인 선 이온화를 초래한다. 마지막으로, 펄스화된 전력 형성 시스템(210)의 메인 펄스화된 전력 बैं크는 펄스화된 고속 역전된 자기장 코일(232)을 구동하여 최대 0.4 T의 순방향 바이어스된 필드를 생성하도록 발사된다. 이 단계는 순방향으로 바이어스된 필드가 형성 튜브(240)의 길이 전체에 걸쳐 균일하게 생성(정적인 형성)되거나 또는 연속적으로 연동하는 필드 변조가 형성 튜브(240)의 축을 따라 달성(동적인 형성)되는 방식으로 시간 순차적일 수 있다.
- [0048] 이 전체 형성 공정에서, 플라즈마의 실제 필드 역전은 약 5  $\mu$ s 내에서 신속하게 발생한다. 형성 플라즈마로 전달되는 다중-기가와트 펄스화된 전력은 용이하게 고온의 FRC를 생성하고 이는 순방향 자기장의 시간 순차 변조(자성 연동) 또는 형성 튜브(210)의 축방향 외부 단부 부근에 코일 세트(232)의 마지막 코일에서 일시적으로 증가된 전류(구속 챔버(100) 쪽 축방향을 향하는 축방향 자기장 구배를 형성하는)를 적용하는 것을 통해 형성 부분(200)으로부터 배출된다. 이렇게 형성되고 나서 가속된 2개의 (북극 및 남극) 형성 FRC는 큰 직경의 구속 챔버(100)로 팽창하고, 여기서 준-dc 코일(412)은 순방향 바이어스된 필드를 생성하여 방사방향 팽창을 제어하고 평형 외부 자성 플럭스를 제공한다.
- [0049] 북극 및 남극 형성 FRC가 구속 챔버(100)의 중간평면 부근에 도달하면, FRC는 충돌한다. 충돌 동안 북극 및 남극 형성 FRC의 축방향 운동 에너지는 FRC가 궁극적으로 단일 FRC(450)로 병합될 때 주로 열성화(thermalized)된다. 플라즈마 진단의 큰 세트가 구속 챔버(100)에 이용가능하여 FRC(450)의 평형을 연구할 수 있다. FRC 시스템(10)에서 일반적인 동작 조건은 약 0.4 m의 분리자 반경을 갖는 화합물 FRC를 생성하고 약 3 m 축방향으로 팽창한다. 추가적인 특성은 약 0.1 T의 외부 자기장,  $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 의 플라즈마 밀도 및 최대 1 keV의 총 플라즈마 온도이다. 서스테인 없이, 즉, 중성 빔 주입이나 다른 보조 수단을 통한 가열 및/또는 전류 구동 없이, FRC의 수명은 고유 특성 구성 감쇠 시간, 약 1 ms로 제한된다.
- [0050] 비 서스테인된 동작의 실험적 데이터 - 종래의 체제
- [0051] 도 12는 FRC(450)의 썬타-핀치 병합 공정의 동역학을 보여주는, 분리자 반경,  $r_s$ 을 근사화한 배제된 플럭스 반경,  $r_{\Delta\phi}$ 의 일반적인 시간 전개를 도시한다. 2개의 (북극 및 남극) 개별 플라즈마이드가 동시에 생성되고 나서 각 형성 부분(200)으로부터 초음파 속도,  $v_z \sim 250 \text{ km/s}$ 로 가속되어,  $z = 0$ 에서 중간평면 부근에서 충돌한다. 충돌 동안 플라즈마이드는 축방향으로 압축되고 나서, 신속한 방사방향 및 축방향 팽창이 일어난 후에, 종국적으로 병합되어 FRC(450)를 형성한다. 병합 FRC(450)의 방사방향 및 축방향 동역학은 상술된 밀도 프로파일 측정 및 볼로미터 기반 토모그래프(bolometer-based tomography)에 의해 입증된다.
- [0052] FRC 시스템(10)의 대표적인 비 서스테인된 방전으로부터의 데이터는 도 13에서 시간의 함수로 도시된다. FRC는  $t = 0$ 에서 개시된다. 기계의 축방향 중간-평면에서 배제된 플럭스 반경은 도 13(a)에 도시된다. 이 데이터는 축방향 자기장을 측정하는 구속 챔버의 스테인리스 스틸 벽 바로 내부에 위치한 자성 프로브의 어레이로부터 획득된다. 강철 벽은 이 방전의 시간 스케일에 우수한 플럭스 보존기이다.
- [0053] 선 적분된 밀도는  $z = 0$ 에 위치한 6-코드 CO<sub>2</sub>/He-Ne 간섭계로부터 도 13(b)에 도시된다. 볼로미터 토모그래프에 의하여 측정된 수직 (y) FRC 변위를 고려하면, 아벨 반전(Abel inversion)이 도 13(c)의 밀도 윤곽을 양산한다. 처음 0.1 ms 동안 일부 축방향 및 방사방향으로 돌출된 후에, FRC는 중공 밀도 프로파일에서 안정된다. 이 프로파일은 일반적인 2-D FRC 평형이 요구될 때 축에 상당한 밀도를 가지고 상당히 편평하다.
- [0054] 압력 밸런스로부터 유도되고 톰슨 산란 및 분광 측정(Thomson scattering and spectroscopy)과 완전히 일치하는 총 플라즈마 온도가 도 13(d)에 도시된다.
- [0055] 전체 배제된 플럭스 어레이를 분석하면 (대략 배제된 플럭스 축방향 프로파일에 의해) FRC 분리자의 형상이 레



이스트랙(racetrack)으로부터 타원형으로 점차적으로 전개되는 것을 볼 수 있다. 도 14에 도시된 이 전개는, 2 개로부터 단일 FRC로 점차적인 자성 재연결과 일치한다. 사실, 대략적으로 추정하면 이 특정 순간에 2개의 초기 FRC 자성 플럭스의 약 10%는 충돌 동안 재연결되는 것을 제안(suggest)한다.

[0056] FRC 길이는 FRC 수명 동안 3으로부터 약 1m로 꾸준히 수축한다. 도 14에서 볼 수 있는 이 수축은, 가장 대류적인 에너지 손실이 FRC 구속을 지배하는 것을 제안(suggest)한다. 분리자 내 플라즈마 압력이 외부 자성 압력보다 더 고속으로 감소하므로, 단부 구역에서 자기장 라인(line)의 텐션(tension)은 FRC를 축방향으로 압축하고, 축방향 및 방사방향 평형을 회복한다. 도 13 및 도 14에 설명된 방전에서, FRC 자성 플럭스, 입자 목록, 및 열 에너지 (각각 약 10 mWb,  $7 \times 10^{19}$  개의 입자, 및 7 kJ)는 FRC 평형이 침강(subside)하는 것으로 보일 때 처음 밀리초에서 대략 한 자리수만큼 감소한다.

[0057] 서스테인된 동작 - HPF 체제

[0058] 도 12 내지 도 14에 있는 예는 서스테인 없이 FRC를 감쇠시키는 것이 특성이다. 그러나, HPF 체제에 대한 FRC 구속(내부 코어 및 에지 층)을 더 개선하고 구성을 서스테인하는 여러 기술이 FRC 시스템(10)에서 전개된다.

[0059] 중성 빔

[0060] 먼저, 고속(H) 중성(neutral)이 8개의 중성 빔 인젝터(600)로부터 빔의 B<sub>2</sub>에 수직으로 주입된다. 고속 중성의 빔은 모멘트로부터 주입되고 북극 및 남극 형성 FRC는 구속 챔버(100)에서 하나의 FRC(450)로 병합된다. 기본적으로 충전물 교환에 의해 생성된 고속 이온은 FRC(450)의 방위각 전류에 더해지는 베타트론(betatron) 궤도(FRC 토폴로지의 스케일의 기본 반경을 가지거나 또는 특성 자기장 구배 길이 스케일보다 적어도 훨씬 더 큰 반경을 가지는 것)를 구비한다. 방전의 일정 비율 후에 (샷(shot)에서 0.5 내지 0.8 ms 후), 충분히 큰 고속 이온 개체군은 내부 FRC의 안정성 및 구속 특성을 상당히 개선한다(예를 들어 *M.W. Binderbauer* 및 *N. Rostoker, Plasma Phys. 56, part 3, 451 (1996)*). 나아가, 서스테인 관점에서 보면, 중성 빔 인젝터(600)로부터 빔은 전류를 구동하여 FRC 플라즈마를 가열하는 1차적 수단이다.

[0061] FRC 시스템(10)의 플라즈마 체제에서, 고속 이온은 기본적으로 플라즈마 전자에서 느려진다. 방전의 초기 부분 동안, 고속 이온, 기본적으로 전자의 일반적으로 궤도-평균낸 느려짐 시간은 0.3 - 0.5 ms이고, 이는 상당한 FRC 가열을 초래한다. 고속 이온은 내부 FRC 자기장이 본래(inherently) 낮은 (0.1 T 외부 축방향 필드에 대해 평균적으로 약 0.03 T) 것으로 인해 분리자 외부에서 큰 방사방향 왕복운동(excursion)을 한다. 고속 이온은 중성 가스 밀도가 분리자 외부에서 너무 높은 경우 충전물 교환 손실에 취약할 수 있다. 그리하여, FRC 시스템(10)에서 전개되는 벽 게더링 및 다른 기술(특히, 가스 제어에 기여하는 예를 들어 플라즈마 건(350) 및 미러 플러그(440))은 에지 중성을 최소화하고 고속 이온 전류의 축적을 요구하는 경향이 있다.

[0062] 펠릿 주입

[0063] 상당한 고속 이온 개체군이 FRC(450) 내에 축적될 때, 전자 온도는 더 높아지고 FRC 수명은 더 길어지며, 냉동된 H 또는 D 펠릿이 펠릿 인젝터(700)로부터 FRC(450)로 주입되어 FRC(450)의 FRC 입자 목록을 서스테인(sustain)한다. 예상된 식각 시간스케일은 상당한 FRC 입자 소스를 제공하기에는 너무 짧다. 이 속도는 펠릿 인젝터(700)의 배럴이나 주입 튜브에 있는 동안 및 구속 챔버(100)에 들어가기 전에 개별 펠릿을 더 작은 단편으로 파쇄되는 것에 의해 주입된 부분의 표면 영역을 확대하는 것에 의해 증가될 수 있는데, 이는 구속 챔버(100)로 진입하기 바로 전에 주입 튜브의 마지막 세그먼트의 벤딩 반경을 조이는 것에 의해 주입 튜브의 벽과 펠릿 사이에 마찰을 증가시키는 것에 의해 달성될 수 있다. 발사 시퀀스 및 12개의 배럴(주입 튜브)뿐만 아니라 단편화의 속도를 변경시키는 것에 의해, 펠릿 주입 시스템(700)을 튜닝하여 입자 목록 서스테인의 원하는 레벨만을 제공하는 것이 가능하다. 이어서, 이것은 FRC(450)의 내부 운동 압력과 FRC(450)의 서스테인된 동작 및 수명을 유지하는 것을 도와준다.

[0064] 식각된 원자가 FRC(450)에서 상당한 플라즈마와 만나는 경우, 이들 원자는 완전히 이온화된다. 최종적으로 차가운 플라즈마 컴포넌트는 고유 FRC 플라즈마에 의해 충돌에 의해 가열된다. 원하는 FRC 온도를 유지하는데 필요한 에너지는 궁극적으로 빔 인젝터(600)에 의해 공급된다. 이 의미에서 펠릿 인젝터(700)는 중성 빔 인젝터(600)와 함께 안정 상태를 유지하고 FRC(450)를 서스테인하는 시스템을 형성한다.

[0065] CT 인젝터

[0066] 펠릿 인젝터에 대한 대체 구성으로서, 주로 FRC(field-reversed configuration) 플라즈마를 보급하기 위한 CT(compact toroid) 인젝터가 제공된다. CT 인젝터(720)는, 도 21에 도시된 바와 같이, 동축 실린더형 내부 및

외부 전극(722 및 724), 내부 전극의 내부에 배치된 바이어스 코일(726), 및 CT 인젝터(720)의 방전부(discharge)에 대항하는 단부 상의 전기적 브레이크(electrical break)(728)를 포함하는 MCPG(magnetized coaxial plasma-gun)를 포함한다. 가스는 내부 전극(722)과 외부 전극(724) 사이의 공간으로 가스 주입 포트(730)를 통해 주입되고, 스펀형 플라즈마는 로렌츠 힘에 의해 건으로부터 방전 및 가압됨으로써 생성된다. 도 22(a) 및 도 22(b)에 도시된 바와 같이, CT 인젝터(720)의 쌍은 구속 용기(100) 내의 중심 FRC 플라즈마로 CT를 주입하기 위해 용기(100)의 중간평면의 대향 측면 근방 및 대향 측면 상의 구속 용기(100)에 연결된다. CT 인젝터(720)의 방전 단부는 중성 빔 인젝터(615)와 유사한 구속 용기(100)의 종축에 대하여 각을 이루어 구속 용기(100)의 중간평면을 향해 지향된다.

[0067] 대체 실시형태에서, CT 인젝터(720)는, 도 23(a) 및 도 23(b)에 도시된 바와 같이, CT 인젝터(720)의 방전 단부에 연결된 세장 실린더형 튜브(elongate cylindrical tube)를 포함하는 드리프트 튜브(740)를 포함한다. 도시된 바와 같이, 드리프트 튜브(740)는 튜브를 따라 축 방향으로 간격을 두고 배치된 드리프트 튜브 코일(742)을 포함한다. 복수의 진단 포트(744)가 튜브의 길이를 따라 도시되어 있다.

[0068] CT 인젝터(720)의 장점은 다음과 같다: (1) 주입된 CT 당 입자 목록의 제어 및 조절성; (2) (극저온 펄스)때뜻한 플라즈마가 증착됨; (3) 시스템은 연속 보급을 허용하기 위해 반복-비율 모드(rep-rate mode)로 동작될 수 있음; (4) 주입된 CT가 매립된 자기장을 전달할 때 시스템은 또한 약간의 자속을 복원할 수 있음. 실험용 실시형태에서, 외부 전극의 내부 직경은 83.1 mm이고, 내부 전극의 외부 직경은 54.0 mm이다. 내부 전극(722)의 표면은 전극(722)으로부터 나오는 불순물을 감소시키기 위해 텅스텐으로 코팅되는 것이 바람직하다. 도시된 바와 같이, 바이어스 코일(726)은 내부 전극(722)의 내부에 장착된다.

[0069] 최근 실험에서 ~ 100 km/s까지의 초음속 CT 변환 속도가 달성되었다. 다른 통상의 플라즈마 파라미터는 다음과 같다: 전자 밀도  $\sim 5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ , 전자 온도  $\sim 30\text{-}50 \text{ eV}$ , 및 입자 목록  $\sim 0.5\text{-}1.0 \times 10^{19}$ . CT의 높은 운동 압력은 주입된 플라즈마가 FRC 안으로 깊게 침투하여 분리막 내부에 입자를 증착하게 한다. 최근의 실험에서 FRC 입자 보급으로 인해 CT 주입기에 의해 제공되는 FRC 입자 목록의 ~ 10-20%가 FRC 플라즈마를 방해하지 않고 성공적으로 연료 공급이 쉽게 수행될 수 있음을 보여준다.

[0070] *안장 코일*

[0071] 안정 상태의 전류 구동을 달성하고 필요한 이온 전류를 유지하기 위해 (충돌 이온 전자 모멘텀 전달로부터 초래되는) 전자-이온 마찰력으로 인해 전자 스핀업(spin up)을 방지하거나 상당히 감소시키는 것이 바람직하다. FRC 시스템(10)은 외부에 가해지는 정적인 자성 쌍극자 또는 4극자 필드를 통해 전자를 파괴하는 본 발명의 기술을 사용한다. 이것은 도 15에 도시된 외부 안장 코일(460)을 통해 달성된다. 안장 코일(460)로부터 횡방향으로 가해지는 방사방향 자기장은 회전하는 FRC 플라즈마에서 축방향 전기장을 유도한다. 최종적으로 축방향

$$F_{\theta} = -\sigma V_{e\theta} \langle |B_r|^2 \rangle$$

전자 전류는 방사방향 자기장과 상호작용하여 전자에 방위각 파괴 힘, 을 생성한다. FRC 시스템(10)에서 일반적인 조건에서, 플라즈마 내 필요한 가해지는 자성 쌍극자(또는 4극자) 필드는 충분한 전자 파괴를 제공하는데 0.001 T 정도만이 필요하다. 약 0.015 T의 대응하는 외부 필드는 상당한 고속 입자 손실 또는 구속에 부작용을 미치지 않을 만큼 충분히 작다. 사실, 가해지는 자성 쌍극자(또는 4극자) 필드는 불안정성을 억제하는데 기여한다. 접선방향 중성 빔 주입 및 축방향 플라즈마 주입과 조합하여, 안장 코일(460)은 전류 유지 및 안정성에 추가적인 제어 레벨을 제공한다.

[0072] *미러 플러그*

[0073] 미러 플러그(440) 내 필드화된 코일(444)의 설계는 적절한 (약 100 kJ) 용량성 에너지를 갖는 높은 자기장(2 내지 4 T)을 국부적으로 생성할 수 있게 한다. FRC 시스템(10)의 본 동작을 나타내는 자기장을 형성하기 위하여, 형성 볼륨 내 모든 필드 라인은 도 2에서 자기장 라인에 의해 제한된 바와 같이 미러 플러그(440)에서 수축부(442)를 통과하고 플라즈마 벽과의 접촉은 일어나지 않는다. 나아가, 준-dc 다이버터 자석(416)과 협력하여 미러 플러그(440)는 필드 라인을 다이버터 전극(910)으로 가이드하거나, 필드 라인을 단부 첨단 구성(미도시)으로 플래어(flare)하도록 조절될 수 있다. 나중 것은 안정성을 개선시키고 병렬 전자 열 전도를 억제한다.

[0074] 미러 플러그(440)는 자체적으로 중성 가스를 제어하는데 기여한다. 미러 플러그(440)는 다이버터(300)으로 역 스트리밍하는 가스가 플러그의 작은 가스 전도성에 의해 상당히 감소(불충분한 500 L/s)되므로 FRC 형성 동안 수정 튜브로 퍼핑된 중수소 가스를 더 잘 이용할 수 있게 한다. 형성 튜브(210) 내 잔류 퍼핑 가스의 대부분은 신속히 이온화된다. 나아가, 미러 플러그(440)를 통해 흐르는 고밀도 플라즈마는 효율적인 중성 이온화를 제공

하여 효과적인 가스 배리어를 제공한다. 그 결과, FRC 예지 층(456)으로부터 다이버터(300)에서 재활용된 중성의 대부분은 구속 챔버(100)로 리턴하지 않는다. 나아가, 플라즈마 건(350)(후술하는 바와 같이)의 동작과 연관된 중성은 대부분 다이버터(300)로 구속된다.

[0075] 마지막으로, 미러 플러그(440)는 FRC 예지 층 구속을 개선시키는 경향이 있다. 미러 비율(플러그/구속 자기장)이 20 내지 40 범위이고 북극 및 남극 미러 플러그(440) 사이에 길이가 15m 인 경우, 예지 층 입자 구속 시간  $\tau_{\parallel}$ 은 최대 한 자리수만큼 증가한다.  $\tau_{\parallel}$ 를 개선시키면 FRC 입자 구속을 용이하게 증가시킬 수 있다.

[0076] 예지 층(456)으로부터 축방향 손실( $\tau_{\parallel}$ )에 의해 밸런싱된 분리자 볼륨(453)으로부터 방사방향 확산성(D) 입자 손실을 가정하면,  $(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta) = (2\pi r_s L_s \delta)(n_s/\tau_{\parallel})$ 을 얻을 수 있고, 이로부터 분리자 밀도 구배 길이는  $\delta = (D\tau_{\parallel})^{1/2}$ 로 다시 쓸 수 있다. 여기서  $r_s, L_s$  및  $n_s$ 는 각각 분리자 반경, 분리자 길이 및 분리자 밀도이다. FRC 입자 구속 시간은  $t_N = [\pi r_s^2 L_s \langle n \rangle] / [(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta)] = (\langle n \rangle / n_s)(\tau_{\perp} \tau_{\parallel})^{1/2}$ 이고, 여기서  $\tau_{\perp} = a^2/D$ 이고  $a=r_s/4$ 이다. 물리적으로,  $\tau_{\parallel}$ 을 개선시키면  $\delta$ (감소된 분리자 밀도 구배 및 드리프트 파라미터)를 증가시켜, FRC 입자 손실을 감소시킬 수 있다. FRC 입자 구속의 전체적인 개선은  $n_s$ 이  $\tau_{\parallel}$ 에 따라 증가하므로 일반적으로 다소 2차 방정식 미만이다.

[0077]  $\tau_{\parallel}$ 의 상당한 개선은 예지 층(456)이 전체적으로 안정적으로 유지될 것(즉,  $n = 1$ 인 플루트(flute), 소방 호스(firehose), 또는 개방된 시스템을 나타내는 다른 MHD 불안정성이 없는 것)을 더 요구한다. 플라즈마 건(350)을 사용하면 이 바람직한 예지 안정성을 제공한다. 이런 의미에서, 미러 플러그(440) 및 플라즈마 건(350)은 효과적인 예지 제어 시스템을 형성한다.

[0078] 플라즈마 건

[0079] 플라즈마 건(350)은 선 매듭에 의하여 FRC 배기 제트(454)의 안정성을 개선시킨다. 플라즈마 건(350)으로부터 건 플라즈마는 방위각의 각도 모멘텀 없이 생성되고, 이는 FRC 회전 불안정성을 제어할 때 유용한 것으로 밝혀졌다. 그리하여 건(350)은 더 오래된 4극자 안정화 기술을 필요로 하지 않고 FRC 안정성을 제어하는 효과적인 수단이다. 그 결과, 플라즈마 건(350)은 고속 입자의 유리한 효과를 이용하거나 본 발명에서 약속된 개선된 하이브리드 운동 FRC 체제에 액세스하는 것을 가능하게 한다. 그리하여, 플라즈마 건(350)은 FRC 시스템(10)이 FRC 불안정을 야기하거나 및/또는 획기적인 고속 입자 확산을 야기할 수 있는 임계값 미만이지만 전자를 파괴하는데는 적절한 안장 코일 전류에서 동작할 수 있게 한다.

[0080] 전술한 미러 플러그에 언급된 바와 같이,  $\tau_{\parallel}$ 이 상당히 개선될 수 있다면, 공급되는 건 플라즈마는 예지 층 입자 손실율( $\sim 10^{22}$  /s)에 필적할 수 있다. FRC 시스템(10)에서 건-생성된 플라즈마의 수명은 밀리초 범위에 있다. 사실, 밀도  $n_e \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 이고 단부 미러 플러그(440)들 사이에 구속된 약 200 eV의 이온 온도를 갖는 건 플라즈마를 고려해 보자. 트랩 길이 L 및 미러 비율 R은 각각 약 15 m 및 20이다. 쿨롱 충돌로 인해 이온 평균 자유 경로는  $\lambda_{ii} \sim 6 \times 10^3 \text{ cm}$ 이고,  $\lambda_{ii} \ln R / R < L$ 이므로, 이온은 가스-동적인 체제에 구속된다. 이 체제에서 플라즈마 구속 시간은  $\tau_{gd} \sim RL/2V_s \sim 2 \text{ ms}$ 이고, 여기서  $V_s$ 는 이온 음속(ion sound speed)이다. 비교를 위해, 이 플라즈마 파라미터에 대한 전통적인 이온 구속 시간은  $\tau_c \sim 0.5 \tau_{ii}(\ln R + (\ln R)^{0.5}) \sim 0.7 \text{ ms}$ 이다. 이례적인 횡방향 확산은 대체로 플라즈마 구속 시간을 단축시킬 수 있다. 그러나, FRC 시스템(10)에서, Bohm 확산 속도를 취하면, 건 플라즈마에 대해 추정된 횡방향 구속 시간은  $\tau_{\perp} > t_{gd} \sim 2 \text{ ms}$ 이다. 그리하여, 건은 FRC 예지 층(456)의 상당한 연료의 재보급, 및 개선된 전체적인 FRC 입자 구속을 제공한다.

[0081] 나아가, 건 플라즈마 스트림은 약 150 내지 200 마이크로초에서 턴온될 수 있고, 이는 FRC 스타트업, 병진이동, 및 구속 챔버(100)로의 병합에 사용할 수 있다. 약  $t \sim 0$  (FRC 메인 बैं크 개시)에서 턴온되면, 건 플라즈마는 현재 동적으로 형성되어 병합된 FRC(450)을 서스테인하는 것을 도와준다. 형성 FRC로부터 및 건으로부터 조합된 입자 목록은 중성 빔 캡처, 플라즈마 가열, 및 건 서스테인을 하는데 충분하다. -1 내지 0 ms 범위의 t에서 턴온되면, 건 플라즈마는 플라즈마로 수정 튜브(210)를 충전하거나 또는 수정 튜브로 퍼핑된 가스를 이온화시켜서, 감소되거나 심지어 아마도 제로 퍼핑된 가스로 FRC를 형성할 수 있게 할 수 있다. 나중 것은 역전된 바이어스 자기장을 고속으로 확산시키기 위해 충분히 차가운 형성 플라즈마를 요구할 수 있다.  $t < -2 \text{ ms}$ 에서 턴온되면,

플라즈마 스트림은 형성 부분(200) 및 구속 챔버(100)의 형성 및 구속 구역의 약 1 내지 3 m<sup>3</sup> 필드 라인 볼륨을, FRC 도달 전에 중성 빔을 축적하는데 충분한 수 10<sup>13</sup> cm<sup>-3</sup>의 타깃 플라즈마 밀도로 충전할 수 있다. 형성 FRC는 이후 형성되고 나서 최종 구속 용기 플라즈마로 병진이동될 수 있다. 이런 방식으로 플라즈마 건(350)은 여러 다양한 동작 조건 및 파라미터 체제를 가능하게 한다.

[0082] 전기적인 바이어싱

[0083] 예지 층(456)에서 방사방향 전기장 프로파일을 제어하는 것은 FRC 안정성 및 구속에 여러 방식으로 유리하다. FRC 시스템(10)에서 전개되는 본 발명의 바이어싱 컴포넌트에 의하여 구속 챔버(100)의 중심 구속 구역에서 충분히 외부 영역으로부터 기계 전체에 걸쳐 개방된 플럭스 표면 그룹에 전기 전위의 다양한 섬세한 분배를 적용하는 것이 가능하다. 이런 방식으로 방사방향 전기장은 FRC(450)의 바로 외부 예지 층(456)에 걸쳐 생성될 수 있다. 이들 방사방향 전기장은 예지 층(456)의 방위각 회전을 변경하고 E×B 속도 전단을 통해 그 구속을 수행한다. 예지 층(456)과 FRC 코어(453) 사이에 차동 회전은 전단에 의하여 FRC 플라즈마의 내부로 송신될 수 있다. 그 결과, 예지 층(456)을 제어하면 FRC 코어(453)에 직접 영향을 미친다. 나아가, 플라즈마 회전에서 자유 에너지는 불안정성을 야기할 수 있으므로, 이 기술은 불안정성의 발생(onset)과 성장을 제어하는 직접적인 수단을 제공한다. FRC 시스템(10)에서, 적절한 예지 바이어싱은 FRC 코어 회전뿐만 아니라 개방된 필드 라인의 운반 및 회전을 효과적으로 제어한다. 여러 제공된 전극(900, 905, 910 및 920)의 위치와 형상은 상이한 그룹의 플럭스 표면(455)을 여러 독립적인 전위에서 제어할 수 있게 한다. 이런 방식으로 플라즈마 성능에 상이한 특성의 충격을 각각 갖는 상이한 전기장 구성 및 강도를 갖는 넓은 어레이가 실현될 수 있다.

[0084] 본 발명의 모든 이들 바이어싱 기술의 주요(key) 장점은 코어 및 예지 플라즈마 거동이 FRC 플라즈마로부터 충분히 외부에서 수행될 수 있다는 것, 즉 (에너지, 플럭스 및 입자 손실에 엄격한 의미를 가질 수 있는) 중심 고온 플라즈마와 물리적 컴포넌트를 터치하게 할 필요가 없다는 것이다. 이것은 HPF 개념의 성능 및 모든 잠재적인 응용에 주요 유리한 영향을 가진다.

[0085] 실험적 데이터 - HPF 동작

[0086] 중성 빔 건(600)으로부터의 빔을 통해 고속 입자를 주입하면 HPF 체제를 인에이블하는데 중요한 역할을 할 수 있다. 도 16은 이 사실을 도시한다. FRC 수명이 빔 펄스의 길이와 상관되는 방법을 보여주는 곡선 세트가 도시된다. 모든 다른 동작 조건이 이 연구를 포함하는 모든 방전에서 일정하게 유지된다. 데이터는 많은 샷에 걸쳐 평균되어 일반적인 거동을 나타낸다. 빔 지속시간이 더 길면 FRC의 수명이 더 길어진다는 것이 명확히 입증된다. 이 연구 동안 다른 진단뿐만 아니라 이 입증사항을 보면, 빔은 안정성을 증가시키고 손실을 감소시키는 것을 볼 수 있다. 빔 펄스 길이와 FRC 수명 사이에 상관성은 빔 트래핑이 특정 플라즈마 사이즈 미만으로 불충분할 때에는 완전하지 않는데, 즉, FRC(450)가 물리적 사이즈가 수축될 때에는 주입된 빔이 모두 차단되거나 트랩되는 것이 아니다. FRC의 수축은 기본적으로 방전 동안 FRC 플라즈마로부터 순 에너지 손실(방전을 통한 대략 중간인 ~ 4 MW)이 특정 실험적 설정에서 중성 빔(~2.5 MW)을 통해 FRC에 공급되는 총 전력보다 약간 더 크다는 것으로 인한 것이다. 용기(100)의 중간-평면에 더 가까운 위치에 빔을 위치시키면 이 손실을 감소시키고 FRC 수명을 연장시킬 수 있다.

[0087] 도 17은 HPF 체제를 달성하는 여러 컴포넌트의 효과를 도시한다. 이것은 시간의 함수로서 FRC(450)의 수명을 도시하는 일반적인 곡선 군을 도시한다. 모든 경우에 일정하고 적절한 양의 빔 전력(약 2.5 MW)이 각 방전의 최대 지속시간 동안 주입된다. 각 곡선은 컴포넌트의 상이한 조합을 나타낸다. 예를 들어, 미러 플러그(440), 플라즈마 건(350) 또는 게더링 시스템(800)으로부터 게더링 없이 FRC 시스템(10)을 동작시키면 회전 불안정성이 신속히 발생하고 FRC 토폴로지의 손실이 발생할 수 있다. 미러 플러그(440)만을 추가하면 불안정성의 발생이 지연되고 구속이 증가된다. 미러 플러그(440)와 플라즈마 건(350)의 조합을 사용하면 불안정성이 더 감소되고 FRC 수명이 증가된다. 마지막으로 건(350)과 플러그(440)의 상부에 게더링(이 경우에 Ti)을 추가하면 최상의 결과가 양산되는데 최종 FRC에는 불안정성이 없어서 최장 수명이 나타난다. 이 실험적 설명으로부터 컴포넌트의 완전한 조합이 최상의 효과를 생성하고 최상의 타깃 조건을 갖는 빔을 제공하는 것은 명백하다.

[0088] 도 1에 도시된 바와 같이, 새로이 발견된 HPF 체제는 크게 개선된 운반 거동을 나타낸다. 도 1은 종래의 체제와 HPF 체제 사이에 FRC 시스템(10)에서 입자 구속 시간의 변화를 도시한다. 볼 수 있는 바와 같이, 이것은 HPF 체제에서 5 를 초과하는 인수만큼 개선된다. 나아가, 도 1은 이전의 종래의 FRC 실험에서 입자 구속 시간에 대해 FRC 시스템(10)에서 입자 구속 시간을 상술한다. 다른 기계에 대해, FRC 시스템(10)의 HPF 체제는 5 내지 근 20의 인수만큼 개선된 구속을 가진다. 마지막으로 그리고 가장 중요한 것으로, HPF 체제에서 FRC 시스

템(10)의 구속 스케일링의 특성은 모든 이전의 측정과는 크게 상이하다. FRC 시스템(10)에서 HPF 체제를 구축하기 전에, 데이터로부터 여러 경험적 스케일링 법칙을 유도하여 이전의 FRC 실험에서 구속 시간이 예측된다. 모든 이들 스케일링 규칙은 비율  $R^2/\rho_i$ 에 따라 주로 좌우되는데, 여기서 R은 자기장이 널(null)인 반경(기계의 물리적 스케일을 느슨하게 측정한 것)이고,  $\rho_i$ 는 외부에서 가해지는 필드에서 평가된 이온 라모어 반경(가해지는 자기장을 느슨하게 측정한 것)이다. 도 1로부터 종래의 FRC에서 긴 구속은 큰 기계 사이즈 및/또는 높은 자기장에서만 가능한 것이 명백하다. 종래의 FRC 체제에서 FRC 시스템(10)을 동작시키면 CR은 도 1에 도시된 바와 같이 이 스케일링 규칙을 따르는 경향이 있다. 그러나, HPF 체제는 매우 우수하고, 큰 기계 사이즈 또는 높은 자기장 없이 훨씬 더 우수한 구속이 달성가능한 것을 보여준다. 보다 중요하게는, 도 1로부터 HPF 체제는 CR 체제에 비해 감소된 플라즈마 사이즈로 개선된 구속 시간을 초래하는 것이 명백하다. 유사한 트렌드는, 후술하는 바와 같이, FRC 시스템(10)에서 3-8의 인수만큼 증가된 플럭스 및 에너지 구속 시간에서도 볼 수 있다. 그리하여, HPF 체제가 이루어지면 적절한 빔 전력, 더 낮은 자기장 및 더 작은 사이즈를 사용하여 FRC 시스템(10) 및 미래의 더 높은 에너지 기계에서 FRC 평형을 서스테인하고 유지할 수 있다. 이들 개선에 따라 엔지니어링 복잡성이 감소하고 동작 비용과 건설 비용이 더 낮아질 수 있다.

[0089] 추가적인 비교를 위해, 도 18은 시간의 함수로서 FRC 시스템(10)에서 대표적인 HPF 체제 방전으로부터 데이터를 도시한다. 도 18(a)은 중간-평면에서 배제된 플럭스 반경을 도시한다. 이들 더 긴 시간스케일에서 전도성 강철 벽은 더 이상 우수한 플럭스 보존기가 아니며 벽 내부 자성 프로브는 벽 외부 프로브로 증강되어 강철을 통해 자성 플럭스를 적절히 확산시킨다. 종래의 체제 CR에서의 일반적인 성능에 비해, 도 13에 도시된 바와 같이, HPF 체제 동작 모드는 400% 더 긴 수명을 나타낸다.

[0090] 선 적분된 밀도 트레이스의 대표적인 코드는 그 아벨 반전된 보수(complement)와 함께 도 18(b)에 도시되어 있고, 밀도 윤곽은 도 18(c)에 도시되어 있다. 종래의 FRC 체제 CR에 비해, 도 13에 도시된 바와 같이, 플라즈마는 펄스 전체에 걸쳐 더 정적이어서, 매우 안정적인 동작을 나타낸다. 피크 밀도는 HPF 샷에서 약간 더 낮고 - 이것은 도 18(d)에 도시된 바와 같이 더 고온의 총 플라즈마 온도(최대 2의 인수)의 결과이다.

[0091] 도 18에 도시된 각 방전에서, 에너지, 입자 및 플럭스 구속 시간은 각각 0.5 ms, 1 ms 및 1 ms이다. 방전하고 1ms의 기준 시간에서, 저장된 플라즈마 에너지는 2 kJ이고 손실은 약 4 MW이어서, 이 타깃을 중성 빔을 서스테인하는데 매우 적절하게 한다.

[0092] 도 19는 새로이 수립된 실험적 HPF 플럭스 구속 스케일링의 형태로 HPF 체제의 모든 장점을 요약한다. 도 19에서 볼 수 있는 바와 같이,  $t = 0.5$  ms 전후, 즉,  $t \leq 0.5$  ms 및  $t > 0.5$  ms에서 취한 측정에 기초하여, 플럭스 구속(그리고 마찬가지로, 입자 구속 및 에너지 구속)은 소정의 분할 반경( $r_s$ )에 대한 전자(electron) 온도( $T_e$ )의 대략 제곱으로 스케일링된다.  $T_e$ 의 양(positive)의 전력을 갖는 (및 부의 전력은 없이) 이 강한 스케일링은 종래의 토코막(tokomaks)에 의해 나타난 것과는 완전히 정반대이고, 여기서 구속은 전자 온도의 일부 전력에 일반적으로 반비례한다. 이 스케일링이 나타나는 것은 HPF 상태와 큰 궤도(즉, FRC 토폴로지의 스케일 및/또는 적어도 특성 자기장 구배 길이 스케일에 있는 궤도) 이온 개체군의 직접적인 결과이다. 기본적으로, 이 새로운 스케일링은 실질적으로 높은 동작 온도를 지원하고 상대적으로 적절한 사이즈를 갖는 리액터를 가능하게 한다.

[0093] HPF 체제의 장점에 의해, 중성자 빔에 의해 구동되고, 적절할 펄스 주입을 사용하는 FRC 서스테인먼트(sustainment) 또는 안정 상태가 달성되고, 자성 플럭스뿐만 아니라 플라즈마 열 에너지, 전체 입자 수, 플라즈마 반경 및 길이와 같은 평균 글로벌 플라즈마 파라미터는 실질적인 쇠퇴(decay) 없이 적절한 레벨에서 지속될 수 있다. 비교를 위해, 도 20은 시간의 함수로서 FRC 시스템(10) 내의 대표적인 HPF 체제 방전으로부터의 플롯(plot) A에서의 데이터와, 시간의 함수로서 FRC 시스템(10) 내의 프로젝트된(projected) 대표적인 HPF 체제 방전을 위한 플롯 B에서의 데이터를 나타내고, FRC(450)는 중성자 빔 펄스의 기간을 통해 쇠퇴 없이 지속된다. 플롯 A에 대하여, 약 2.5~2.9 MW의 범위 내의 전체 파워를 갖는 중성자 빔은 약 6 ms의 액티브 빔 펄스 길이를 위한 FRC(450)로 주입되었다. 플롯 A에 도시된 플라즈마 반자성 수명은 약 5.2 ms였다. 더 최근 데이터는, 약 7.2 ms의 플라즈마 반자성 수명이 약 7 ms의 액티브 빔 펄스 길이에 의해 달성 가능하다는 것을 나타낸다.

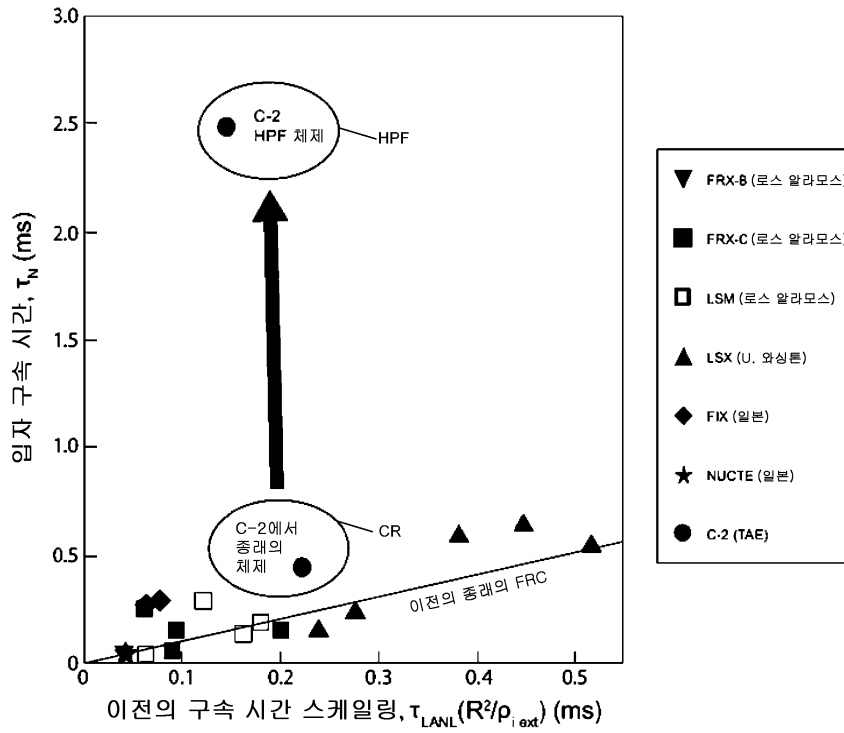
[0094] 도 16에 관하여 위에서 설명한 바와 같이, 빔 트래핑(trapping)이 비효율적으로 소정의 플라즈마 사이즈보다 작아지게 됨에 따라, 즉 주입된 빔의 전체가 인터셉트되고 트래핑되지 않는 물리적 사이즈로 FRC(450)가 수축됨에 따라, 빔 펄스 길이와 FRC 수명 사이의 상관성은 완벽하지 않다. FRC의 수축 또는 쇠퇴는, 방전 중에 FRC 플라즈마로부터의 넷 에너지 손실(방전을 통한 대략 중간인 - 4 MW)이 특정 실험적 설정을 위한 중성자 빔(- 2.5 MW)을 통해 FRC로 공급되는 전체 파워보다 다소 크다는 사실에 주로 기인하는 것이다. 도 3c에 관하여 설명한

바와 같이, 중성자 빔 건(600)으로부터 중간평면을 향한 기울어진 빔 주입은, FRC 플라즈마가 수축되거나 주입 기간 동안 축방향으로 축소되더라도, 빔 플라즈마 연결을 향상시킨다. 또한, 적절한 펄스 연료공급이 필요한 플라즈마 밀도를 유지할 것이다.

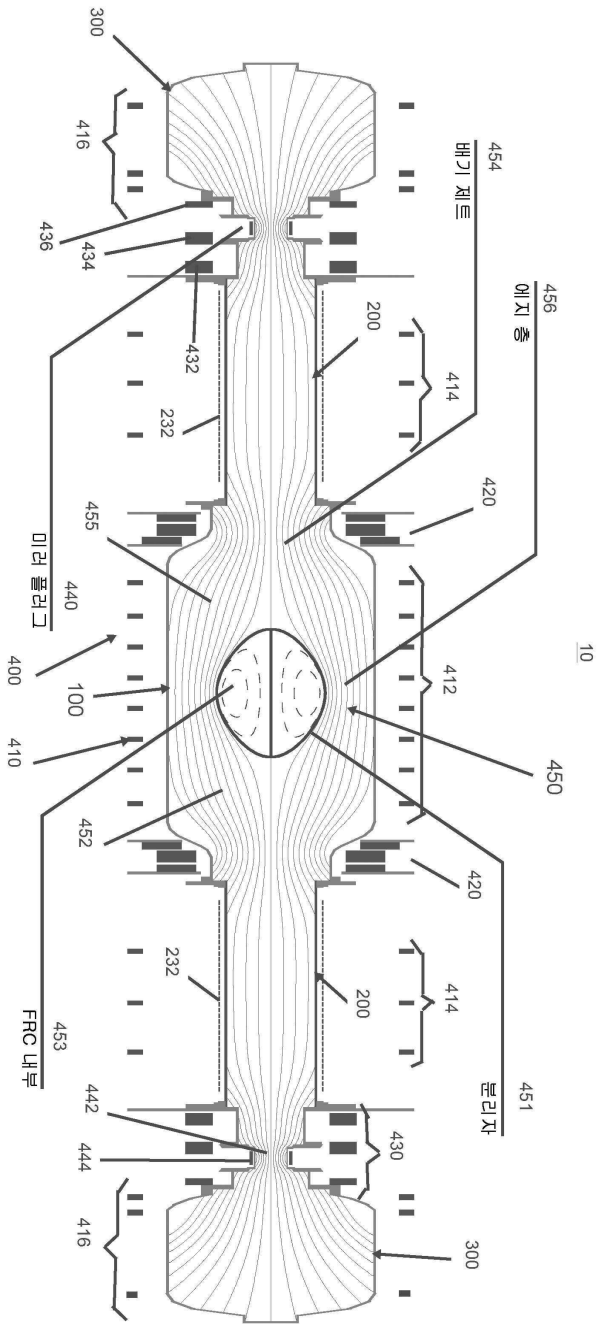
- [0095] 플롯 B는, 약 6 ms의 액티브 빔 펄스 길이와 약 10 MW보다 약간 더 많은 중성자 빔 건(600)으로부터의 전체 빔 파워를 사용하여 실행한 시뮬레이션의 결과이고, 중성자 빔은 약 15 keV의 입자 에너지를 갖는 H(또는 D) 중성자를 주입해야 한다. 각 빔에 의해 주입되는 등가 전류는 약 110 A이다. 플롯 B에 대하여, 디바이스 축에 대한 빔 주입 각도는 약 20°, 타겟 반경은 0.19 m이었다. 주입 각도는 15° ~ 25° 범위 내에서 변경될 수 있다. 방위각으로 동일 전류 방향으로 빔이 주입될 것이다. 중성자 빔 모멘텀 주입으로부터의 넷 축 힘(net axial force)뿐만 아니라 넷 사이드 힘(net side force)이 최소화되어야 한다. 플롯 A에서와 같이, 고속 (H) 중성자는 구속 챔버(100) 내에서의 북극 및 남극 포메이션 FRC 머지(merge)의 모멘트로부터, 중성자 빔 인젝터(600)로부터 하나의 FRC(450)로 주입된다.
- [0096] 본 시뮬레이션은, 플롯 B에 대한 기초(foundation)가, 상호작용 손실 프로세스를 모델링하기 위해, 모든 플라즈마 종(species)을 위한 연결된 수송 방정식(coupled transport equation)의 호스트(host)뿐만 아니라, 백그라운드 플라즈마 및 균형(equilibrium)을 위한 다차원 홀-MHD 솔버(multi-dimensional hall-MHD solver), 고에너지 빔 컴포넌트(energetic beam component) 및 모든 스캐터링 프로세스를 위한 완전한 kinetic Monte-Carlo-기반 솔버를 사용하는 것이다. 수송 컴포넌트는 경험적으로 측정되고(calibrated) 실험적 데이터베이스에 대하여 광범위하게 벤치마킹된다(benchmarked).
- [0097] 플롯 B에 의해 도시된 바와 같이, FRC(450)의 안정 상태 반자성 수명은 빔 펄스의 길이가 될 것이다. 그러나, 키 상관성 플롯 B는, 빔이 플라즈마를 턴오프하거나 FRC가 그 이전이 아닌 그 시간에 쇠퇴되기 시작할 때를 나타내는 것을 주목하는 것이 중요하다. 쇠퇴는, - 빔 턴오프 시간 이상의 대개 1 ms의 오더로 - 빔 어시스트되지 않고, 단순히 고유 손실 프로세스에 의해 구동되는 플라즈마의 특유의 쇠퇴 시간의 반영(reflection)인 방전에서 관찰되는 것과 유사하게 될 것이다.
- [0098] 본 발명은 여러 방식으로 변형될 수 있고, 본 발명의 대안적인 형태, 특정 예들은 도면에 도시되어 있고 본 명세서에 상세히 설명되어 있다. 그러나, 본 발명은 개시된 특정 형태나 방법으로 제한되는 것이 아니며, 오히려, 본 발명은 첨부된 청구범위의 사상과 범위 내에 있는 모든 변형, 균등물 및 대안을 커버하는 것으로 이해된다.
- [0099] 진술한 설명에서, 단지 예시를 위하여, 특정 용어는 본 발명의 보다 철저한 이해를 제공하기 위해 제시된 것이다. 그러나, 이 기술 분야에 통상의 지식을 가진 자에게는 본 발명의 개시 내용을 실시하는데 이 특정 상세들이 요구되지 않는 것이 명백하다.
- [0100] 대표적인 예들과 종속 청구항의 여러 특징은 본 발명의 내용의 추가적인 유용한 실시예를 제공하기 위하여 구체적으로 및 명시적으로 나열되지 않은 방식으로 조합될 수 있다. 개체의 그룹의 모든 값의 범위나 지시는 청구된 주제를 제한하기 위한 목적뿐만 아니라 원래의 개시 내용을 위하여 모든 가능한 중간 값이나 중간 개체를 개시하는 것으로 명시적으로 더 이해된다.
- [0101] HPF 체제 FRC를 생성하고 유지하는 시스템 및 방법이 개시되었다. 본 명세서에 설명된 실시예는 설명을 명료하게 하기 위한 것이므로 본 발명의 주제를 제한하는 것으로 해석되어서는 안 되는 것으로 이해된다. 본 발명의 범위나 사상을 벗어남이 없이 본 설명의 여러 변형, 사용, 대체, 조합, 개선, 방법은 이 기술 분야에 통상의 지식을 가진 자에게는 명백할 것이다. 예를 들어, 본 명세서에 설명된 공정 단계의 특정 순서와 조합은 달리 언급되지 않는 한, 단지 예시를 위한 것으로 이해되고, 본 발명은 상이하거나 추가적인 공정 단계를 사용하거나, 또는 공정 단계의 상이한 조합이나 순서를 사용하여 수행될 수 있는 것으로 이해된다. 다른 예로서, 일 실시예의 각 특징은 다른 실시예에 있는 다른 특징과 조합되거나 매칭될 수 있다. 통상의 지식을 가진 자에게 알려진 특징과 공정은 원하는 대로 병합될 수 있다. 추가적으로 및 명백히, 특징은 원하는 대로 추가되거나 삭감될 수 있다. 따라서, 본 발명은 첨부된 청구범위 및 그 균등 범위를 제외하고는 제한되어서는 안된다.

도면

도면1

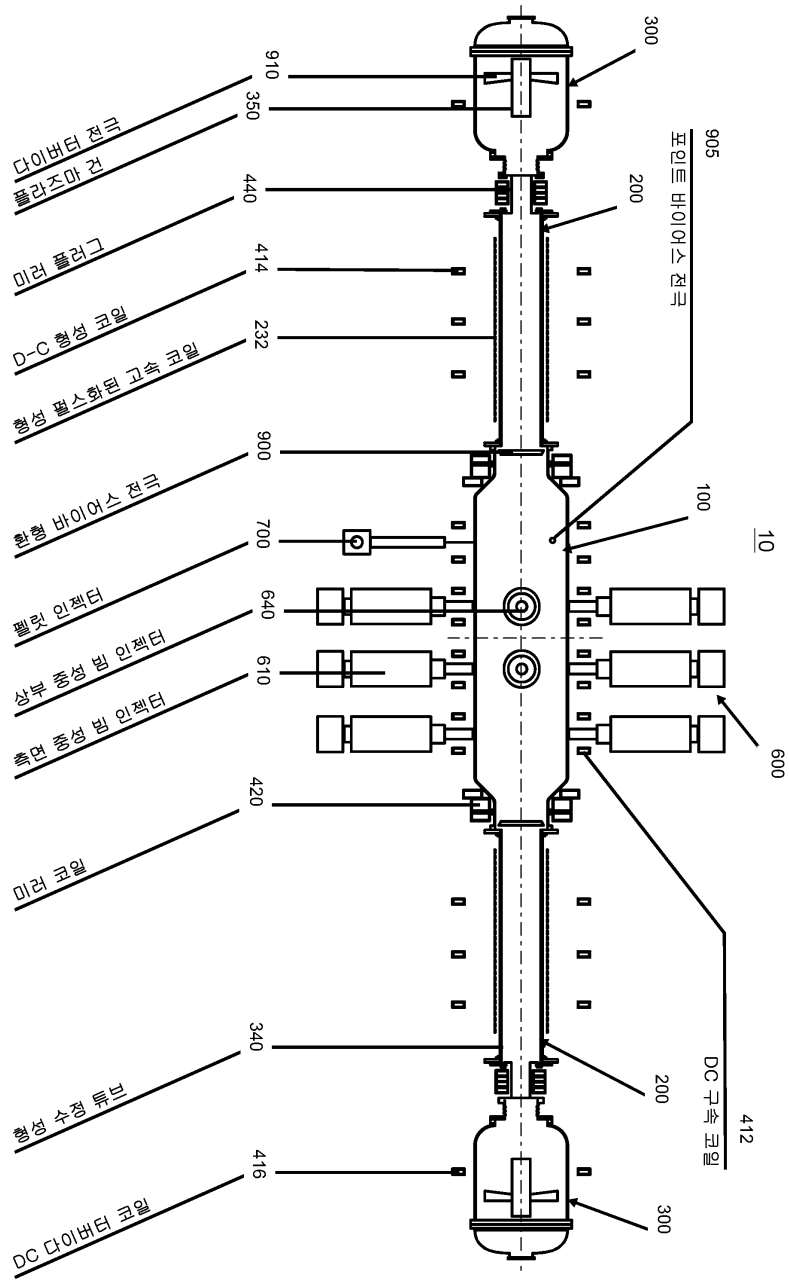


도면2

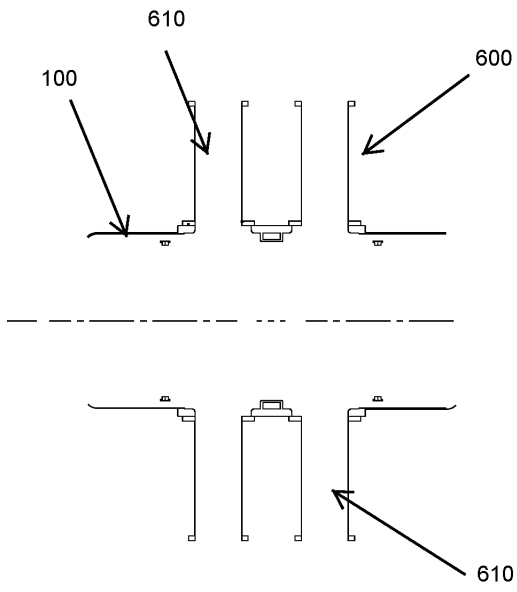




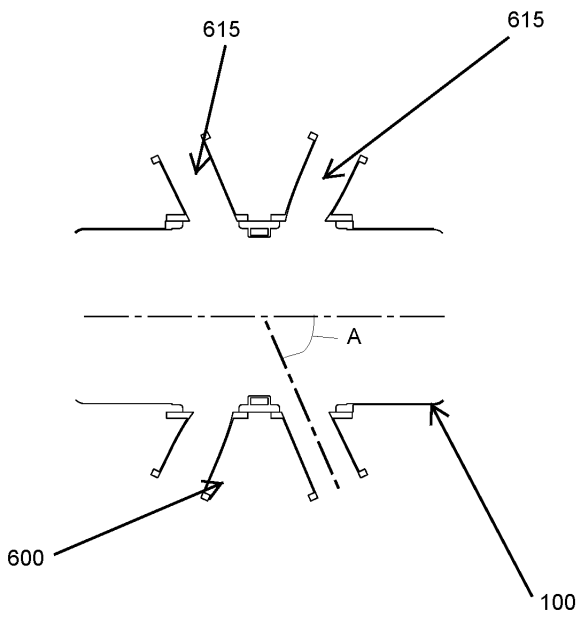
도면3a



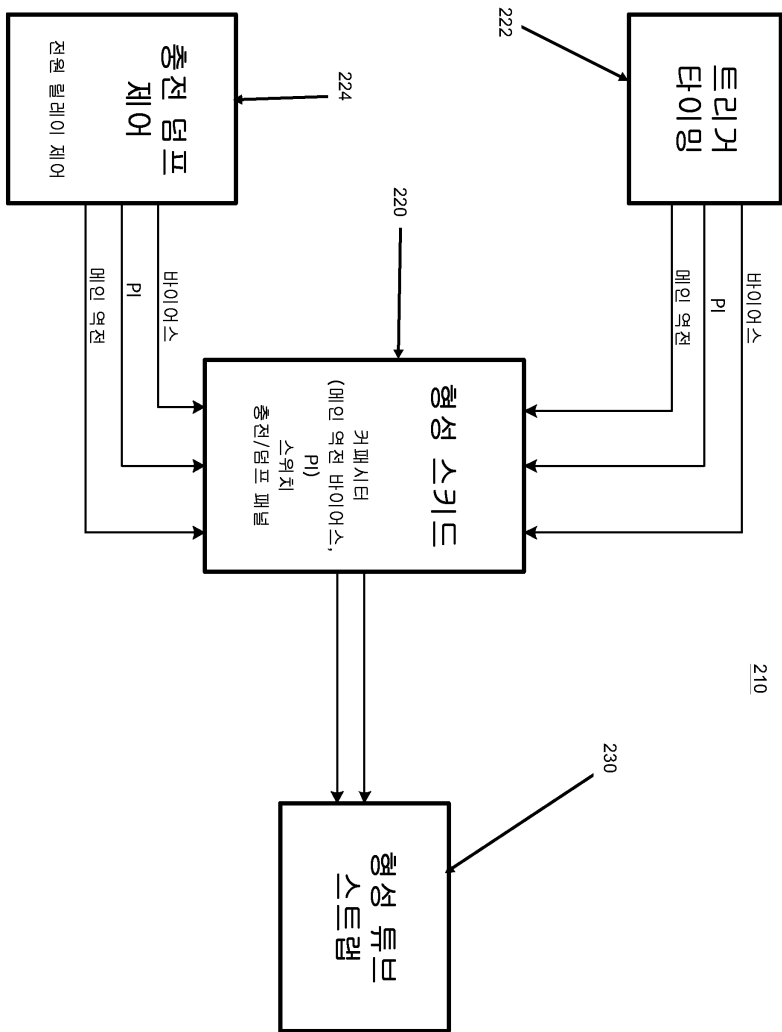
도면3b



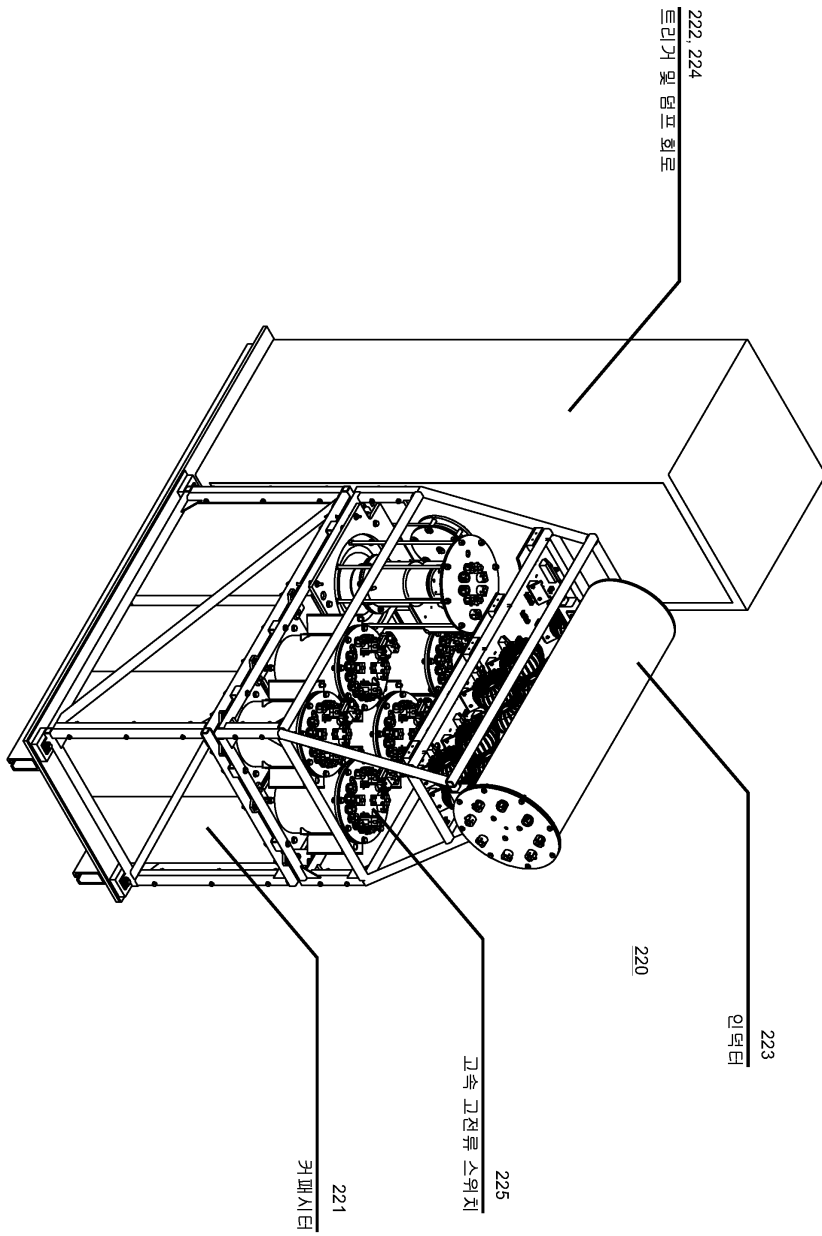
도면3c



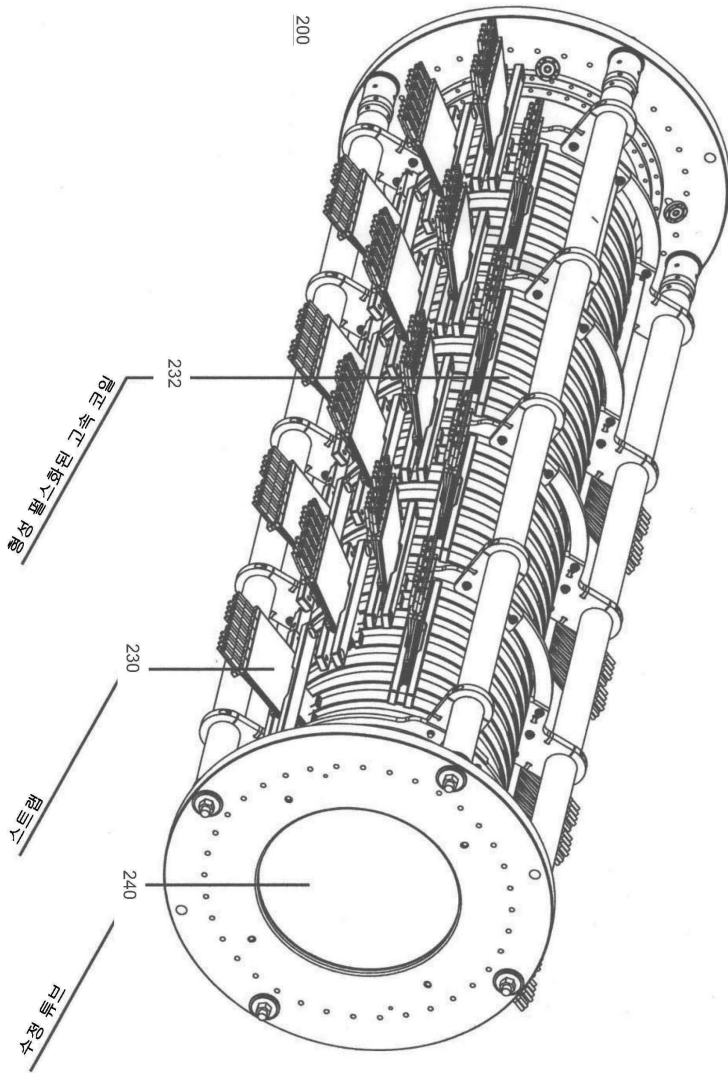
도면4



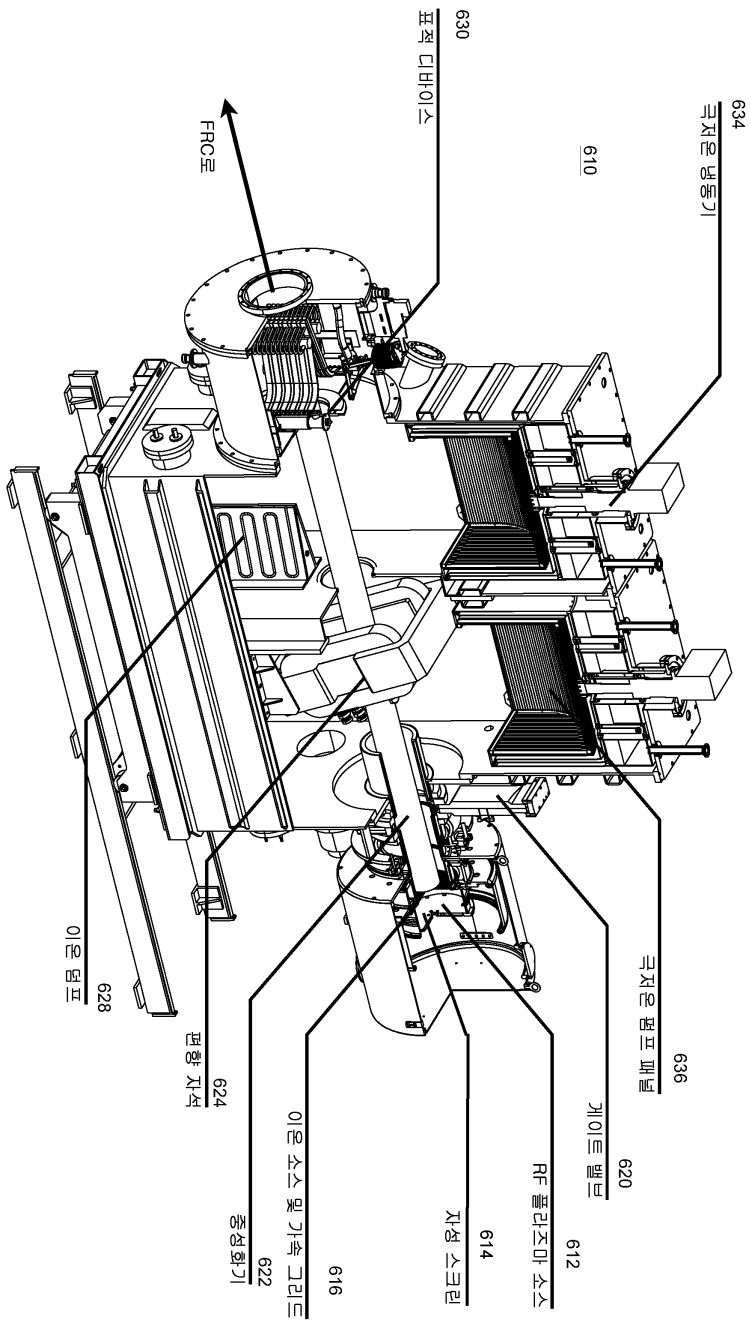
도면5



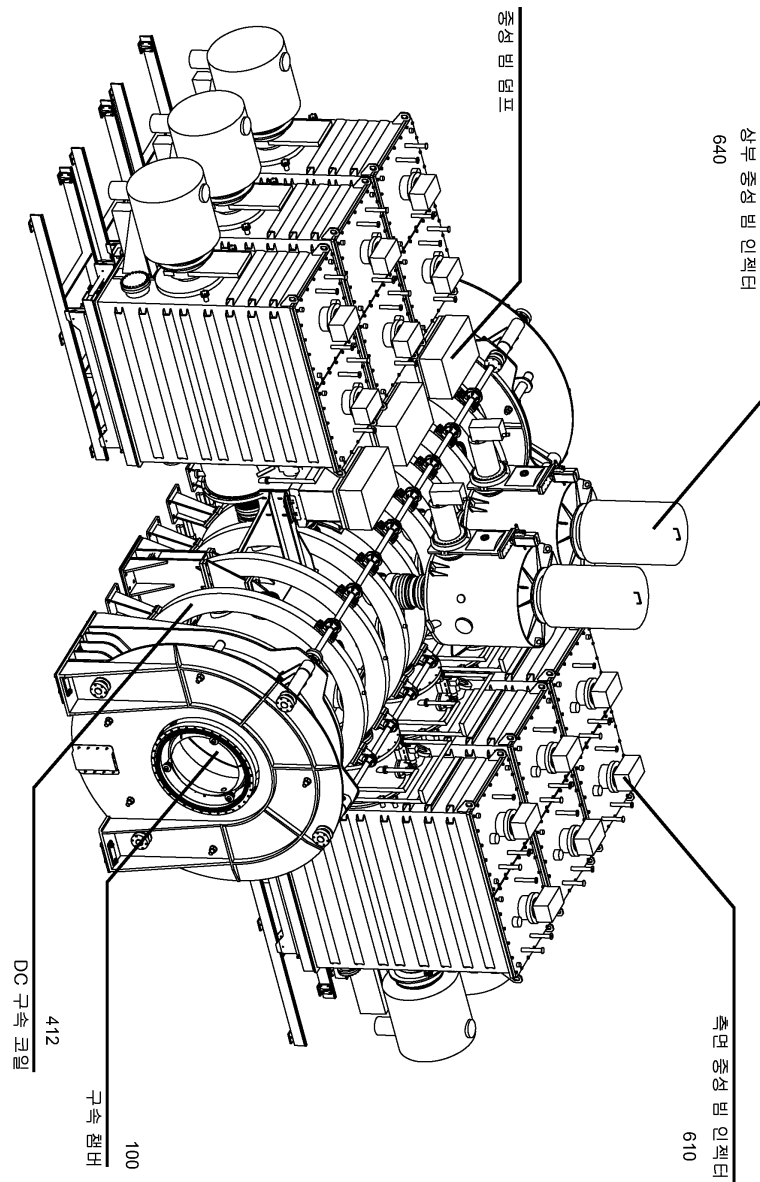
도면6



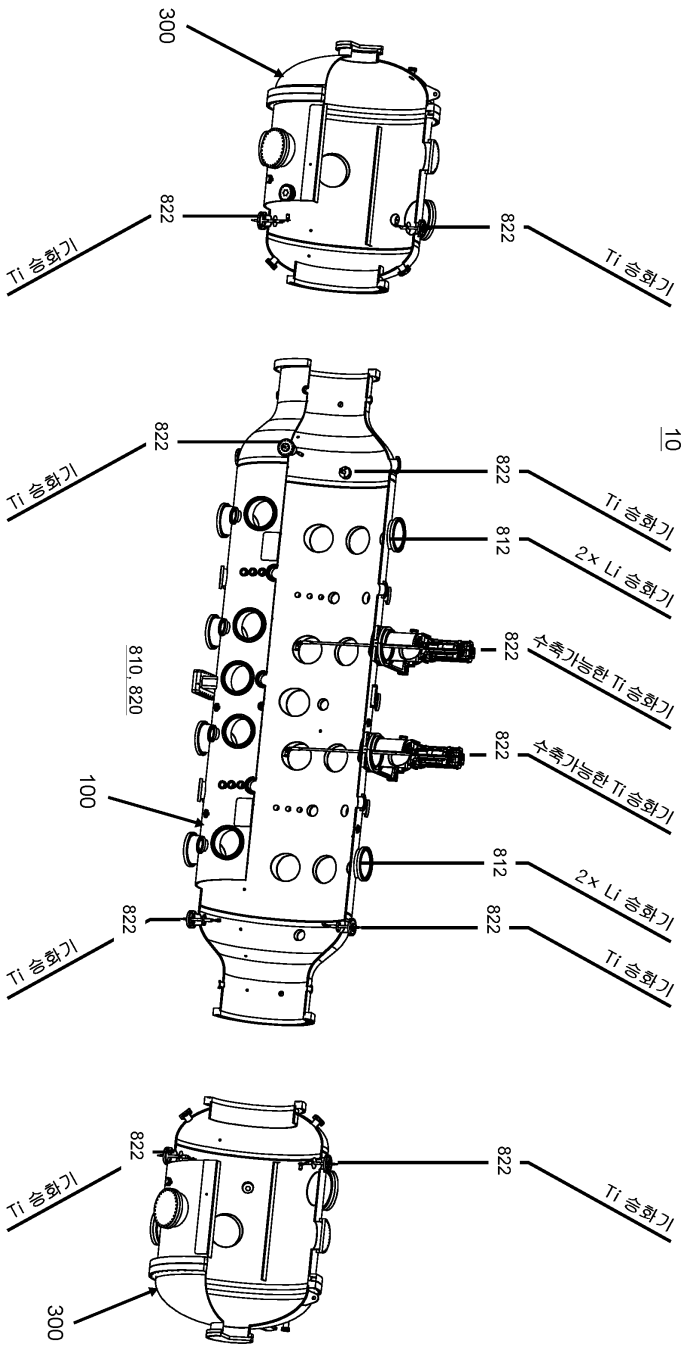
도면7



도면8

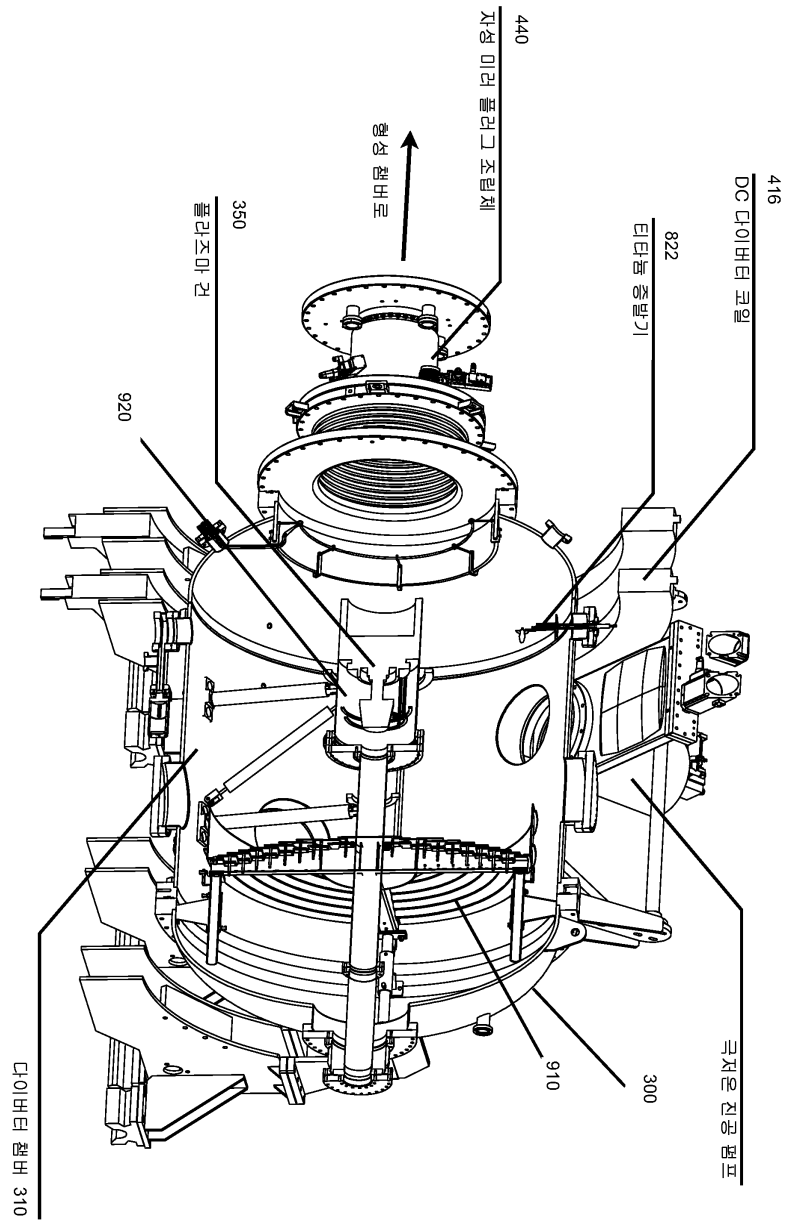


도면9

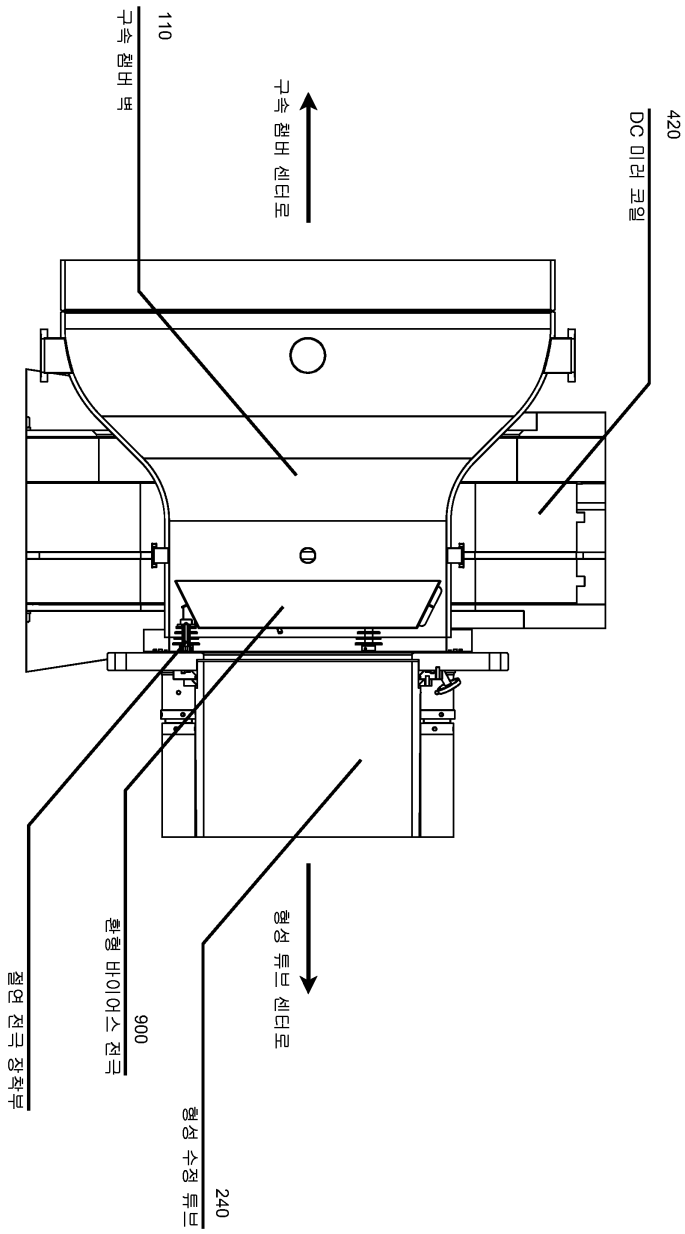




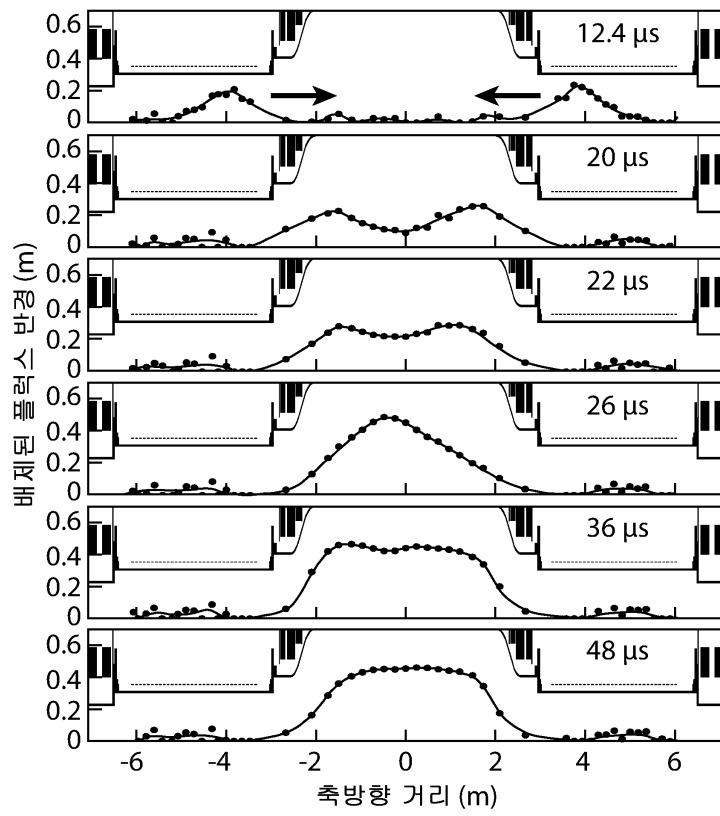
도면10



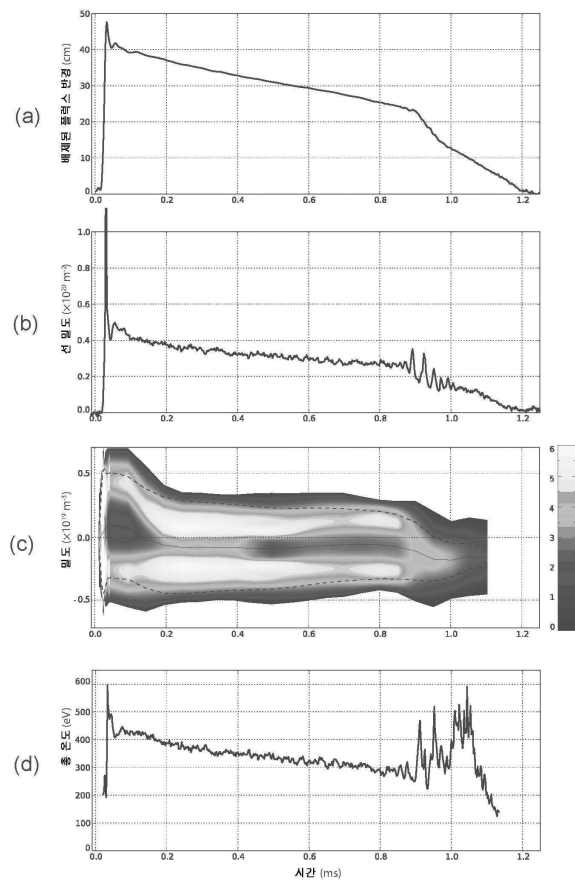
도면11



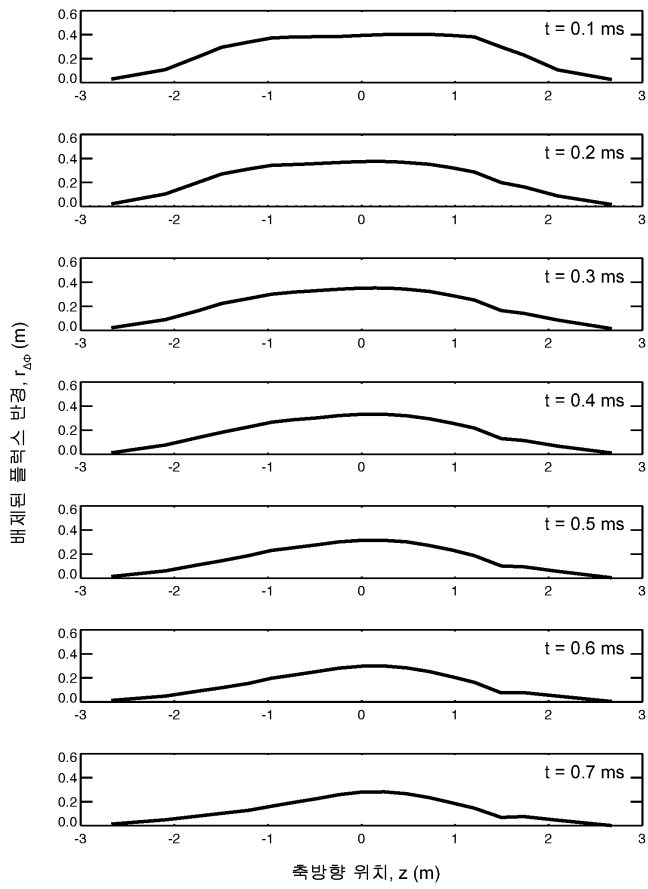
도면12



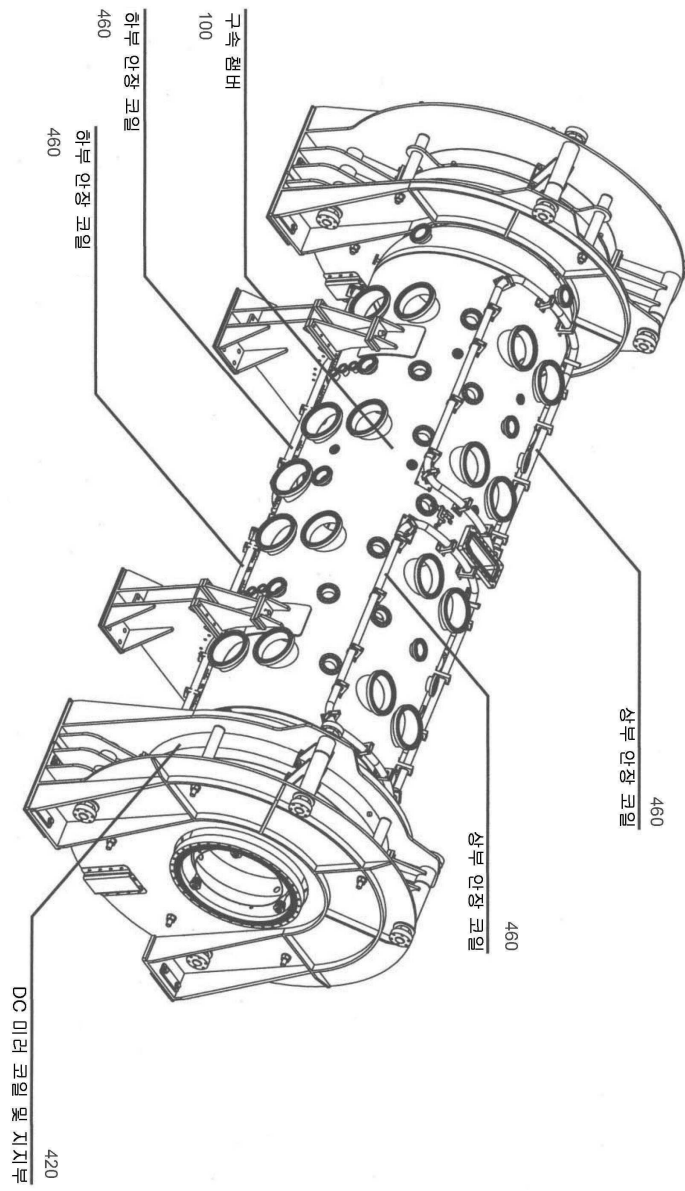
도면13



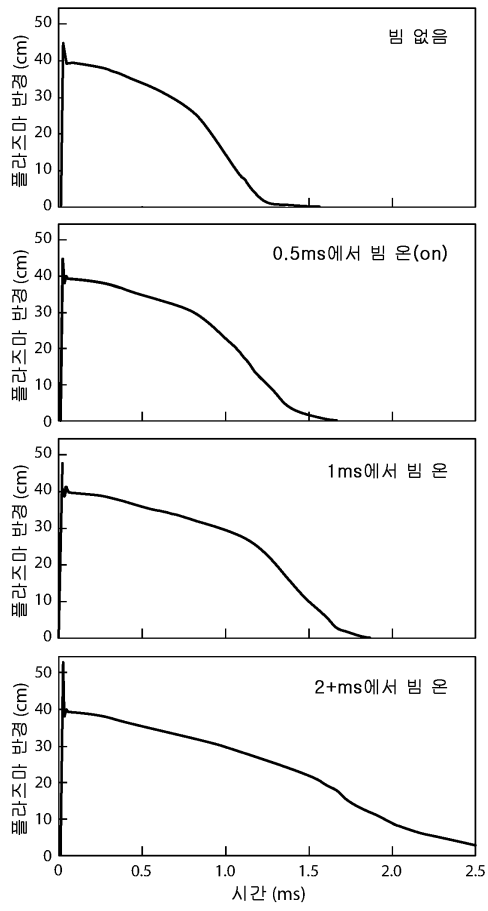
도면14



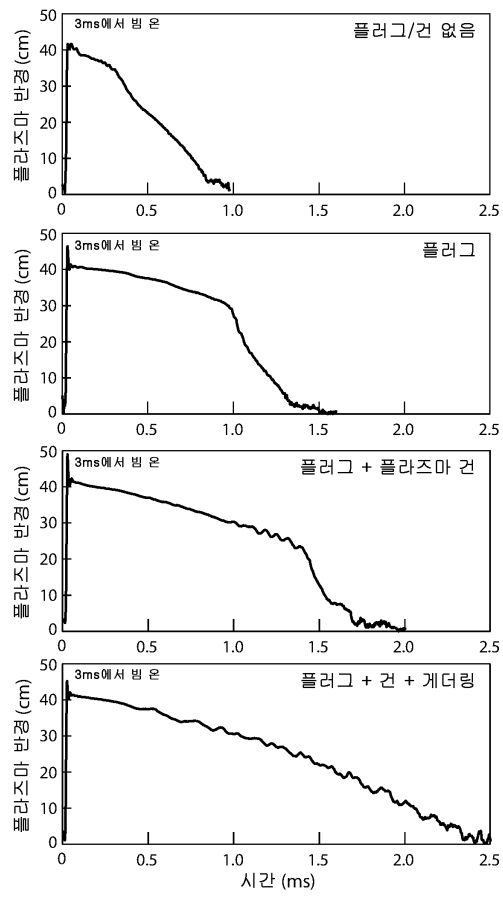
도면15



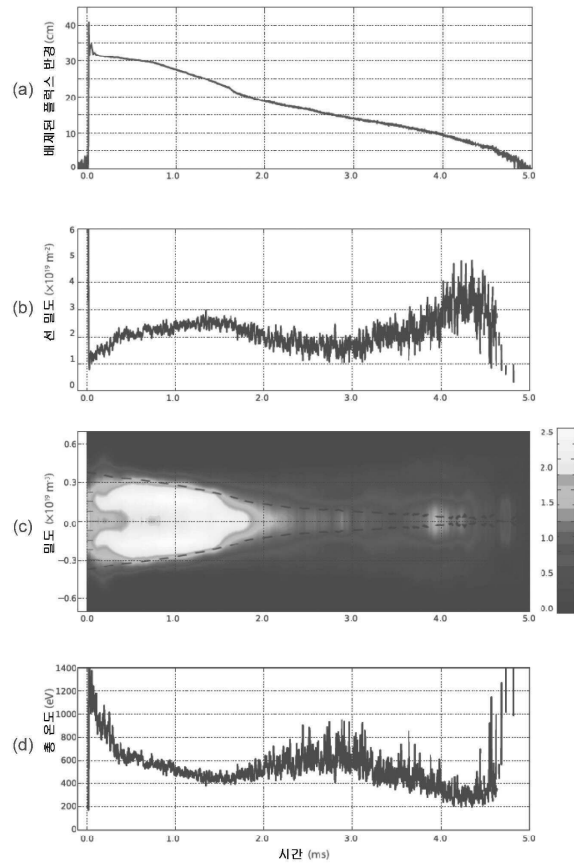
도면16



도면17

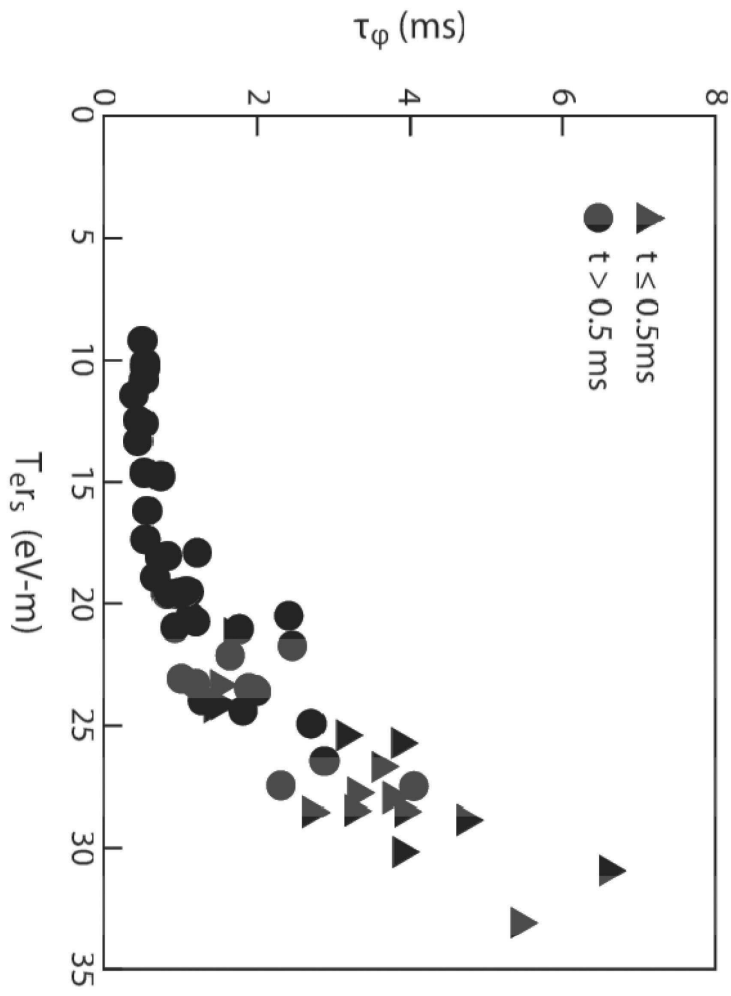


도면18

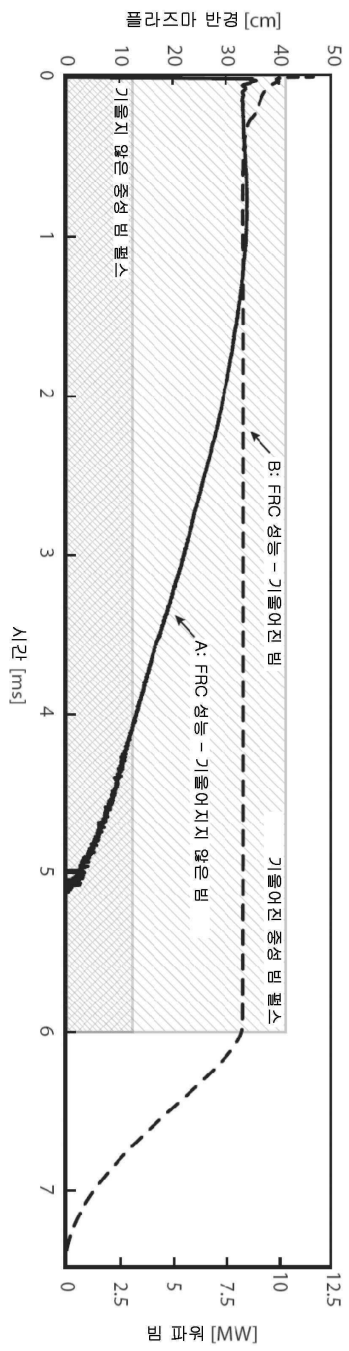




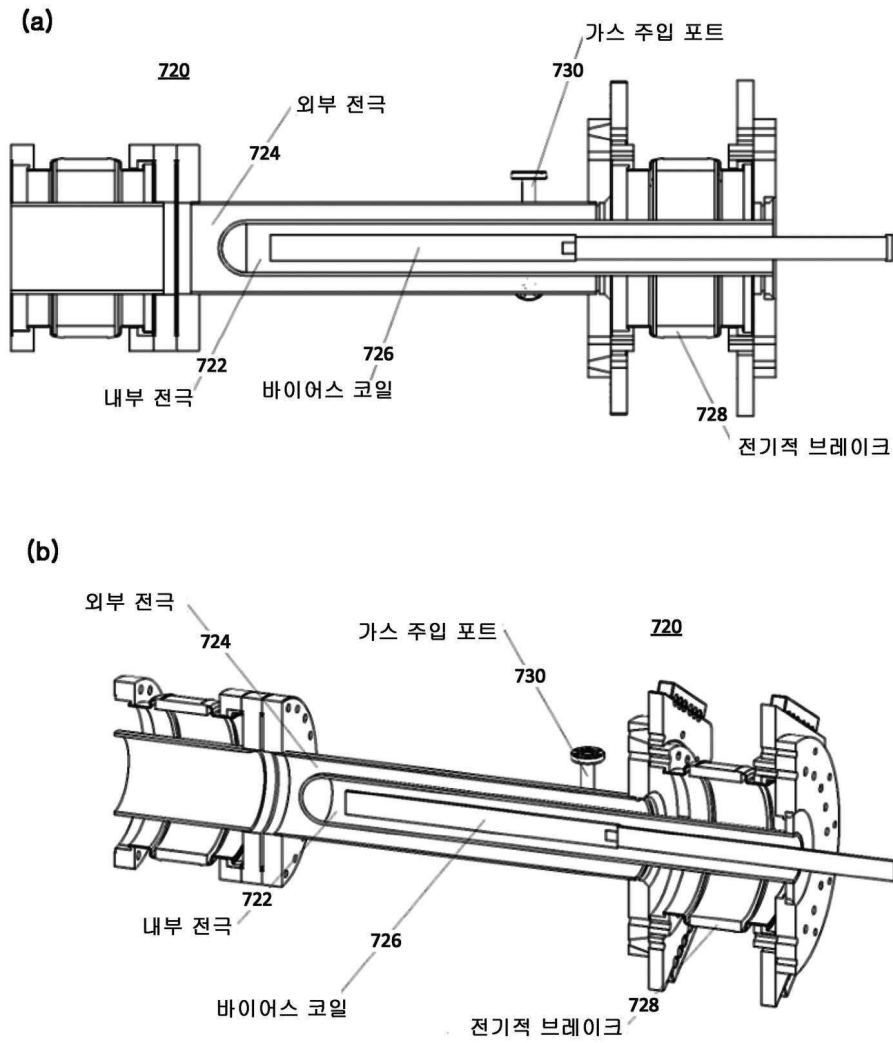
도면19



도면20

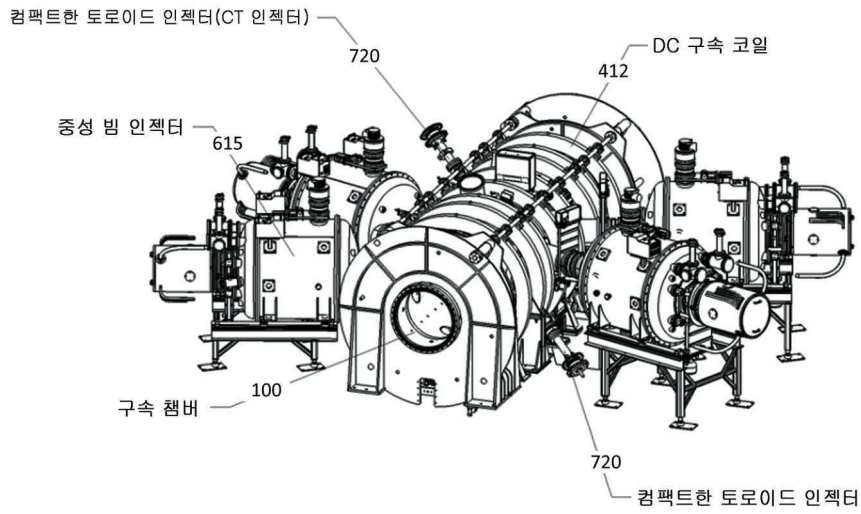


도면21

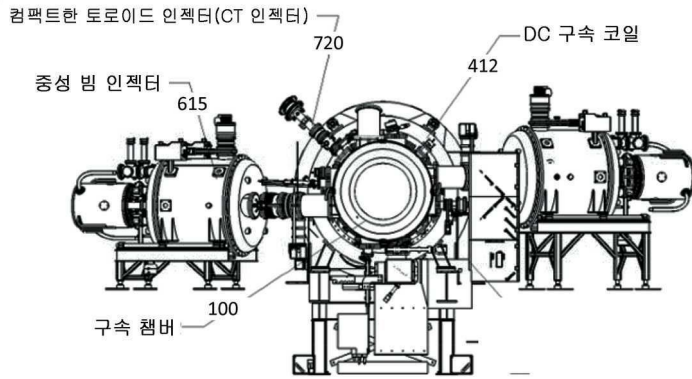


도면22

(a)



(b)



도면23

