



(19) 대한민국특허청(KR)
 (12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2018년01월25일
 (11) 등록번호 10-1811504
 (24) 등록일자 2017년12월15일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H05H 1/54 (2006.01) *G21B 3/00* (2006.01)
- (52) CPC특허분류
H05H 1/54 (2013.01)
G21B 3/00 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2015-7007991
- (22) 출원일자(국제) 2013년08월29일
 심사청구일자 2017년02월02일
- (85) 번역문제출일자 2015년03월27일
- (65) 공개번호 10-2015-0048229
- (43) 공개일자 2015년05월06일
- (86) 국제출원번호 PCT/CA2013/050670
- (87) 국제공개번호 WO 2014/032186
 국제공개일자 2014년03월06일
- (30) 우선권주장
 61/694,550 2012년08월29일 미국(US)
- (56) 선행기술조사문헌
 US07679025 B1*
 저널 'FUSION TECHNOLOGY', Vol. 27, pp. 107 - 114 (1995. 03. 31.)*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

전체 청구항 수 : 총 13 항

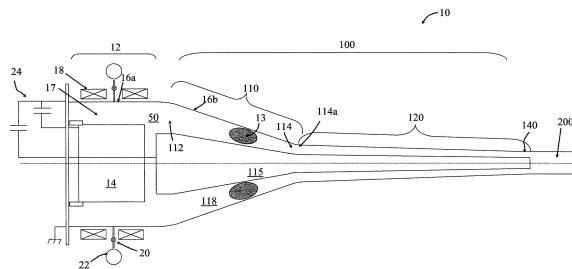
심사관 : 이민형

(54) 발명의 명칭 **플라스마를 가속 및 압축하기 위한 장치**

(57) 요약

플라스마 가속 및 압축 장치의 예시가 기재된다. 상기 장치는 가속기의 입구에서부터 뻗어 있는 고 압축률 깔때기 섹션 및 상기 깔때기 섹션의 단부에서 가속기의 출구까지 뻗어 있을 수 있는 상기 고 압축률 깔때기 섹션으로 연결된 기다란 섹션을 갖는 플라스마 가속기를 포함한다. 상기 깔때기 섹션은 가파른 테이퍼 정도를 갖는 원추형 일 수 있으며, 기다란 섹션은 출구까지 이의 길이 방향을 따라 완만한 테이퍼 정도를 가질 수 있다. 상기 장치는 가속기로 플라스마 토러스를 가속기를 통해 가속 및 압축시키기 위한 푸싱 플러스를 발생시키기 위한 전류 펄스를 제공하기 위한 전력원을 더 포함한다. 상기 전류 펄스는, 기다란 섹션의 출구에서 플라스마 토러스 이후의 전류 펄스가 기다란 섹션의 제 1 단부에서의 전류 펄스보다 상당히 작으며, 상기 기다란 섹션의 출구에서의 플라스마 토러스의 압력은 기다란 섹션의 시작 부분에서의 플라스마 토러스의 압력보다 크도록, 성형될 수 있다.

대 표 도



(52) CPC특허분류
Y02B 30/18 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

플라스마를 가속 및 압축하기 위한 장치로서, 상기 장치는:

관형 외부 전극 및 외부 전극 내부에 뻗어 있는 관형 내부 전극을 포함하여, 플라스마 토러스(plasma torus)를 가속 및 압축하기 위해 외부 전극과 내부 전극 사이에 환형 플라스마 전파 채널이 형성되도록 하는 플라스마 가속기 - 상기 가속기는 플라스마 발생기로부터의 플라스마 토러스를 수신하기 위한 입구와 가속 및 압축된 플라스마 토러스를 방전시키기 위한 출구를 가지며, 상기 플라스마 전파 채널은 상기 입구와 유체 연통(fluid communication)하는 업스트림 단부와 상기 출구와 유체 연통하는 다운스트림 단부를 갖는 길이방향으로 기다란 섹션(elongated section)을 갖고, 내부 전극과 외부 전극 사이의 방사방향 간격(radial distance)으로서 형성된 횡단면 환형 캡(cross-sectional annular gap)이 상기 기다란 섹션의 길이방향을 따라 다운스트림 방향으로 비선형적으로 감소함 - , 및

상기 가속기로 전기 연결된 전력원 - 상기 전력원은 가속기 내에서 흐르고 상기 플라스마 토러스 뒤에서 상기 플라스마 토러스를 상기 업스트림 단부에서 상기 기다란 섹션을 통해 상기 다운스트림 단부와 상기 가속기의 출구까지 푸싱(push)하기 위한 자기 푸싱 플럭스(magnetic pushing flux)를 발생시키는 전류를 생성하는 전기 가속 펄스를 제공하도록 구성됨 -

을 포함하며, 상기 장치는 상기 기다란 섹션 전에서 상기 플라스마 토러스가 자기 푸싱 플럭스의 팽창에 의해 상기 기다란 섹션을 통해 가속 및 압축되도록 하기에 충분한 인덕턴스를 갖도록 구성되며, 상기 기다란 섹션의 선택된 인덕턴스 및 상기 기다란 섹션 전의 선택된 인덕턴스에 대해, 흐르는 전류가 상기 기다란 섹션의 업스트림 단부에서보다 상기 기다란 섹션의 다운스트림 단부에서 더 작고 플라스마 토러스 압력은 상기 기다란 섹션의 업스트림 단부에서보다 상기 기다란 섹션의 다운스트림 단부에서 더 크도록, 플라스마 전파 채널의 치수가 선택되는, 플라스마를 가속 및 압축하기 위한 장치.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 기다란 섹션은 1 내지 2의 플라스마 토러스 방사방향 압축 비를 갖는, 플라스마를 가속 및 압축하기 위한 장치.

청구항 3

제1항에 있어서, 상기 전력원은 가속기의 입구에서 가속기의 출구로의 플라스마 토러스의 동시 가속 및 압축을 제공하는 가속 펄스를 생성하도록 구성되는, 플라스마를 가속 및 압축하기 위한 장치.

청구항 4

제1항에 있어서, 플라스마 전파 채널은 입구와 기다란 섹션의 업스트림 단부 사이에 고 압축률 깔때기 섹션을 더 포함하고, 상기 깔때기 섹션은 상기 입구와 유체 연통하는 업스트림 단부 및 상기 기다란 섹션의 업스트림 단부와 유체 연통하는 다운스트림 단부를 포함하고, 상기 깔때기 섹션 내 횡단면 환형 캡은 깔때기 섹션의 길이 방향을 따르는 다운스트림 방향으로의 내부 전극과 외부 전극 사이의 방사방향 간격으로서 형성되는, 플라스마를 가속 및 압축하기 위한 장치.

청구항 5

제4항에 있어서, 상기 깔때기 섹션은 3 내지 10의 방사방향 압축 비를 갖는, 플라스마를 가속 및 압축하기 위한 장치.

청구항 6

제1항에 있어서, 상기 기다란 섹션은 내부 전극 반지름과 외부 전극 반지름의 고정 비를 가지며, 상기 기다란 섹션의 축 길이방향 위치 z 를 따르는 내부 전극 또는 외부 전극의 반지름 $r(z)$,

$$\frac{1}{r(z)} = a - \frac{b}{1 + c(z - z_0)}$$

에 의해 정의되며, z_0 은 업스트림 단부(114a, 1114a)에서의 기다란 섹션의 축 길이방향 위치이고, c 는 상기 기다란 섹션 전의 인덕턴스 L_0 에 대한 상기 기다란 섹션의 단위 길이당 인덕턴스 L' 의 비이고,

$$a = b + 1/r_0 \text{이며,}$$

여기서, r_0 은 업스트림 단부(114a, 1114a)에서의 내부 전극 또는 외부 전극의 반지름이고,

$$b = \frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0}}{1 - \frac{1}{1 + c(z_1 - z_0)}} \text{이며,}$$

여기서, r_1 은 다운스트림 단부(140, 1140)에서의 내부 전극 또는 외부 전극의 반지름이고, z_1 은 다운스트림 단부(140, 1140)에서의 기다란 섹션의 축 길이방향 위치인, 플라스마를 가속 및 압축하기 위한 장치.

청구항 7

제1항에 있어서, 상기 기다란 섹션의 길이방향 위치 z 에 따른 내부 전극 및 외부 전극 각각의 반지름 $r(z)$ 은

$$\frac{1}{r(z)} = a - \frac{b}{1 + c(z - z_0)}$$

에 의해 별도로 정의되며, 여기서 z_0 은 업스트림 단부(114a, 1114a)에서의 기다란 섹션의 축 길이방향 위치이고, c 는 상기 기다란 섹션 전의 인덕턴스 L_0 에 대한 상기 기다란 섹션의 단위 길이당 인덕턴스 L' 의 비이며,

$$a = b + 1/r_0 \text{이고,}$$

여기서 r_0 은 업스트림 단부(114a, 1114a)에서의 내부 전극 또는 외부 전극의 각각의 반지름이며,

$$b = \frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0}}{1 - \frac{1}{1 + c(z_1 - z_0)}}$$

여기서 r_1 은 다운스트림 단부(140, 1140)에서의 내부 전극 또는 외부 전극의 반지름이고, z_1 은 다운스트림 단부(140, 1140)에서의 기다란 섹션의 축 길이방향 위치인, 플라스마를 가속 및 압축하기 위한 장치.

청구항 8

제1항에 있어서, 상기 전력원은 전기 가속 펄스를 생성하도록 구성되어서, 전력원에서 가속기까지 흐르는 생성된 전류는 플라스마 토러스가 상기 기다란 섹션에 들어가면 멈추는, 플라스마를 가속 및 압축하기 위한 장치.

청구항 9

제8항에 있어서, 상기 전기 가속 펄스는, 플라스마 토러스가 기다란 섹션을 따라 이동할 때 일정한 푸성 풀러스를 도출하는 타이밍, 지속시간 및 전류 진폭을 가지는, 플라스마를 가속 및 압축하기 위한 장치.

청구항 10

시스템으로서, 상기 시스템은

청구항 제1항에 따르는 플라스마를 가속 및 압축하기 위한 장치, 및

관형 외부 전극 및 상기 외부 전극 내부에 뻗어 있는 관형 내부 전극을 포함하여 상기 외부 전극과 상기 내부 전극 사이에 환형 플라스마 형성 채널을 형성하는 플라스마 발생기

를 포함하며, 상기 가속기의 외부 전극은 상기 플라스마 발생기의 외부 전극으로 전기적으로 연결되고, 상기 환형 플라스마 형성 채널은 환형 플라스마 전파 채널과 정렬되고 상기 환형 플라스마 전파 채널과 유체 연통하는, 시스템.

청구항 11

제10항에 있어서, 상기 외부 전극의 내부 벽과 가속기 내부 전극의 업스트림 단부와 플라스마 발생기 내부 전극의 다운스트림 단부 사이의 공간에 의해 형성되는 플라스마 토러스 이완 영역(relaxation region)을 더 포함하며, 상기 이완 영역은 상기 플라스마 형성 채널 및 플라스마 전파 채널과 유체 연통하는, 시스템.

청구항 12

제11항에 있어서, 상기 이완 영역은 가속기 내부 전극의 업스트림 단부에서 형성되는 내향 팽창 구역(inward expansion zone)을 포함하는, 시스템.

청구항 13

제11항에 있어서, 상기 이완 영역은 외부 전극에서의 가속기의 업스트림 단부에서 형성되는 외향 팽창 구역(outward expansion zone)을 포함하는, 시스템.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 관련 출원의 상호 참조

본 출원은 본 명세서에서 참조로서 전체가 포함되는 2012년 08월 29일에 출원된 미국 특허 출원 번호 61/694,550 "HIGH EFFICIENCY PLASMA ACCELERATOR"를 기초로 우선권을 주장한다.

[0003] 기술분야

본 발명은 일반적으로 플라스마 가속을 위한 방법 및 시스템에 관한 것이며 더 구체적으로 플라스마를 가속하기 위한 고효율 플라스마 가속기 및 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0005] 플라스마는 입자들의 적어도 일부가 이온화되는 기체와 유사한 물질의 상태이다. 대전된 입자의 존재(가령, 양이온 및 음 전자)에 의해 플라스마가 전기적으로 전도성을 띠게 된다. 플라스마 토러스(plasma torus)가 연결된 폴로이달 및 토로이달 (일부 경우) 폐쇄형 자기 플럭스를 가지며 환형 구성의 형태를 갖는 자기 유지형 자화 플라스마이다. 폴로이달 및 토로이달 자기 플럭스의 연결 범위는 플라스마 토러스의 헬리시티(helicity)를 정의한다. 단순하게 연결된 볼륨에 포함된 플라스마 토러스가 컴팩트 토로이드(compact toroid)(CT)라고 지칭된다. 상기 CT 구성은, 예를 들어, (i) 내부 자기장이 토로이달 및 폴로이달 성분을 모두 갖는 안정한 자기유체역학적 평형상태에 가깝게 존재하는 스페로막(spheromak) 구성, 또는 (ii) 역시 토로이달 자기 토클로지를 갖지만 축방향으로 더 길며 편장형 타원(prolate ellipsoid)과 유사한 외부 표면을 갖고, 주로 폴로이달 자기장을 갖고 토로이달 자기장 성분은 갖지 않는 FRC(Field Reversed Configuration)를 포함할 수 있다. CT 플라스마는 다양한 자기 구성, 가령, 스페로막과 FRC 상태 사이에 있는 상태로 존재하는 것들로 형성될 수 있다. 초기 플라스마 토러스가 시간의 흐름에 따라 이의 자기 구성을 진화시키고 변경시키는 것이 또한 가능하다.

발명의 내용

과제의 해결 수단

[0006] 하나의 양태에 따라, 플라스마 가속 및 압축 장치가 제공된다. 상기 장치는 플라스마 토러스를 가속 및 압축하기 위한 플라스마 가속기와, 상기 가속기로, 가속기 내에서 흐르고 상기 플라스마 토러스 뒤에서 상기 가속기를

통해 플라스마 토러스를 가속 및 압축시키기에 충분한 자기 푸싱 풀러스를 생성하는 전류를 생성하는 전기 가속 펠스를 제공하기 위한 전력원을 포함한다.

[0007] 상기 가속기는 관형 외부 전극 및 상기 외부 전극 내부에 위치하는 관형 내부 전극을 가지며, 여기서, 상기 외부 전극 및 내부 전극은 플라스마 토러스를 가속 및 압축하기 위한 환형 플라스마 전파 채널을 형성한다. 상기 플라스마 전파 채널은 플라스마 발생기로부터 플라스마 토러스를 수신하기 위한 입구단과 환형 채널 내부에서 가속 및 압축된 상기 플라스마 토러스를 방전하기 위한 출구단을 가진다. 상기 플라스마 전파 채널은 입구와 유체 연통하는 업스트림 단부와 출구와 유체 연통하는 다운스트림 단부를 갖는 길이방향 기다란 섹션을 가진다. 내부 전극과 외부 전극 사이의 방사방향 간격으로서 정의된 횡단면 환형 캡이 기다란 섹션의 길이방향을 따라 다운스트림 방향으로 비선형적으로 감소한다. 상기 장치는 자기 푸싱 풀러스의 팽창에 의해 플라스마 토러스가 가속 및 압축되기에 충분한 인덕턴스를 기다란 섹션 앞에서 갖도록 구성된다. 기다란 섹션의 선택된 인덕턴스 및 상기 기다란 섹션 앞에서의 선택된 인덕턴스에 대해, 상기 기다란 섹션에 흐르는 전류는 상기 기다란 섹션의 업스트림 단부에서보다 다운스트림 단부에서 더 작고, 플라스마 토러스 압력은 기다란 섹션의 업스트림 단부에서보다 기다란 섹션의 다운스트림 단부에서 더 크도록 플라스마 전파 채널의 치수가 선택된다. 상기 기다란 섹션은 1 내지 2의 플라스마 토러스 방사방향 압축 비를 갖도록 구성될 수 있다.

[0008] 플라스마 전파 채널은 입구와 기다란 섹션의 업스트림 단부 사이에서 고 압축률 깔때기 섹션을 더 포함할 수 있다. 상기 깔때기 섹션은 입구와 유체 연통하는 업스트림 단부 및 상기 기다란 섹션의 업스트림 단부와 유체 연통하는 다운스트림 단부를 포함한다. 내부 전극과 외부 전극 사이에 방사방향 간격으로서 형성된 깔때기 섹션 내 횡단면 환형 캡이 깔때기 섹션의 길이 방향을 따라 다운스트림 방향으로 감소한다. 덧붙여, 깔때기 섹션은 3 내지 10의 방사방향 압축 비를 갖도록 구성될 수 있다.

[0009] 상기 기다란 섹션은 내부 전극 반지름과 외부 전극 반지름의 고정 비를 가질 수 있다. 상기 기다란 섹션의 길이 방향 위치 z 를 따르는 내부 전극과 외부 전극 중 하나의 반지름 $r(z)$ 이 수학식

$$\frac{1}{r(z)} = a - \frac{b}{1 + c(z - z_0)}$$

[0010] [0011]에 의해 정의될 수 있고, 여기서 z_0 은 업스트림 단부에서의 기다란 섹션의 길이방향 위치이고, c 는 상기 기다란 섹션 앞에서의 인덕턴스 L_0 에 대한 상기 기다란 섹션의 단위 길이당 인덕턴스 L' 의 비이며, a 와 b 는

$$a = b + 1/r_0$$

[0012] [0013]에 의해 정의되는 상수이며, 여기서 r_0 는 업스트림 단부에서의 내부 전극 또는 외부 전극의 반지름이고,

$$b = \frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0}}{1 - \frac{1}{1 + c(z_1 - z_0)}} \text{이며,}$$

[0014] [0015]여기서, r_1 및 z_1 은 각각 내부 전극 또는 외부 전극의 반지름, 및 다운스트림 단부에서의 기다란 섹션의 길이방향 위치이다.

[0016] 또는, 내부 전극 및 외부 전극의 반지름은 서로에 대해 고정된 비가 아니다. 이러한 경우, 기다란 섹션의 길이 방향 위치 z 를 따르는 내부 전극 및 외부 전극의 반지름 $r(z)$ 은 수학식

$$\frac{1}{r(z)} = a - \frac{b}{1 + c(z - z_0)}$$

[0017] [0018]에 의해 개별적으로 정의되며, 여기서 z_0 은 업스트림 단부에서의 기다란 섹션의 길이방향 위치이고, c 는 상기 기다란 섹션 앞에서의 인덕턴스 L_0 에 대한 상기 기다란 섹션의 단위 길이당 인덕턴스 L' 의 비이며, a 와 b 는

$$a = b + 1/r_0 \text{에 의해 정의되고,}$$

[0020]

여기서 r_0 은 업스트림 단부에서의 내부 또는 외부 전극의 반지름이여,

$$b = \frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0}}{1 - \frac{1}{1 + c(z_1 - z_0)}}$$

[0021]

이고,

[0022]

여기서 r_1 및 z_1 은 내부 전극 또는 외부 전극의 반지를 및 다운스트림 단부에서의 기다란 섹션의 길이방향 위치이다.

[0023]

상기 전력원은 플라스마 토러스가 기다란 섹션에 들어가면 멈추는 전기 가속 펄스를 생성하도록 구성될 수 있다. 상기 전력원은 또한 플라스마 토러스가 기다란 섹션을 따라 이동할 때 일정한 푸싱 힘을 도출하는 타이밍, 지속시간, 및 전류 진폭을 갖고 전기 가속 펄스를 생성하도록 더 구성될 수 있다.

[0024]

또 다른 양태에 따르면, 앞서 언급된 플라스마 가속 및 압축 장치와, 관형 외부 전극 및 상기 외부 전극 내부에 뻗어 있는 관형 내부 전극을 포함하여 환형 플라스마 형성 채널을 형성하는 플라스마 발생기를 포함하는 시스템이 제공된다. 가속기의 외부 전극은 플라스마 발생기의 외부 전극에 물리적으로 연결되고, 환형 플라스마 형성 채널은 상기 환형 플라스마 전파 채널과 정렬 및 유체 연통한다. 상기 시스템은 외부 전극의 내부 벽과 가속기 내부 전극의 업스트림 단부와 플라스마 발생기 내부 전극의 다운스트림 단부 사이의 공간에 의해 형성되는 플라스마 토러스 이완 영역을 더 포함할 수 있다. 상기 이완 영역은 플라스마 형성 채널 및 플라스마 전파 채널과 유체 연통한다. 상기 이완 영역은 가속기 내부 전극의 업스트림 단부에서 형성되는 내향 팽창 구역을 포함할 수 있다. 또는, 이완 영역은 웹 전극에서의 가속기의 업스트림 단부에 형성되는 외향 팽창 구역을 포함할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0025]

도면의 요소들의 크기 및 상태 위치는 반드시 실제 비율로 그려진 것이 아니다. 예를 들어, 다양한 요소들의 형태 및 각도가 실제 비율로 그려지지 않았으며, 이를 요소 중 일부가 도면 가독성을 개선하기 위해 임의적으로 확대되고 배치된다.

도 1a(종래 기술)는 일정한 테이퍼 지오메트리를 갖는 플라스마 전파 채널을 갖는 플라스마 가속 및 압축을 위한 종래의 시스템의 시뮬레이션된 실시예의 그래프이다. 상부 그래프는 환형의 축방향으로 뻗어 있는 가속기의 플라스마 전파 채널의 지오메트리(반지름 대(vs.) 축 길이)를 보여주며, 여기서, 상부 곡선은 외부 전극의 지오메트리를 보여주고 하부 곡선은 내부 전극의 지오메트리를 보여준다. 하부 그래프는 가속기에서의 플라스마 전파 채널의 길이 방향을 따르는 평형 전류 I_{bal} (실선) 및 전류 임계치 I_{lift} (점선)을 보여준다.

도 1b(종래 기술)는 도 1a의 가속기의 환형 채널의 길이방향을 따르는 플라스마 토러스의 λ (최저 에너지 상태)의 함수로서의 푸싱 전류(메가 암페어 MA 단위)의 그래프이며, 여기서 실선은 평형 전류이고 점선은 임계 전류이다.

도 2는 전력원, 플라스마 발생기, 비-선형적으로 감소하는 환형 캡을 갖는 기다란 섹션 및 내향 팽창 구역을 갖는 이완 영역을 포함하는 환형 플라스마 전파 채널을 갖는 가속기를 포함하는 플라스마 가속 및 압축 시스템의 비-제한적 실시예의 개략적 종단면도이다.

도 3a는 도 2의 플라스마 발생기 및 가속기로 전력원에 의해 인가되는 예시적 전압(kV 단위)의 그래프이며, 여기서 시간(μ s 단위)의 함수로서 실선은 플라스마 발생기 내 형성 영역에 인가되는 플라스마 형성 펄스의 전압을 보여주고 점선은 가속기에 인가되는 가속 펄스의 전압을 보여준다.

도 3b는 도 3a에 도시된 플라스마 발생기(실선) 및 가속기(점선)에 인가되는 전류(MA 단위)를 나타내는 그래프이다.

도 4a는 도 2의 가속기의 플라스마 전파 채널의 하나의 적합한 지오메트리의 개략적 종방향 단면도이다.

도 4b는 도 4a에 도시된 가속기 내 축상 길이 방향 위치의 함수로서의 임계 전류, 평형 전류, 및 동적 전류의 그래프이며, 여기서 실선은 평형 전류 I_{bal} 을 나타내고, 점선은 전류 임계치 I_{lift} 를 나타내며 파선은 동적 전류를 나타낸다.

도 5는 도 4a에서 나타난 가속기 내 플라스마 토러스의 λ (최저 에너지 상태)의 함수로서 임계 전류, 평형 전류, 및 동적 전류의 그래프이며, 여기서 실선은 평형 전류를 나타내고, 점선은 임계 전류를 나타내며, 파선은 동적 전류를 나타낸다.

도 6a는 도 4a에 도시된 가속기에서 $t = 62\mu s$ 에서 시뮬레이트된 폴로이달 플럭스의 윤곽선의 종단면도이다.

도 6b는 도 4a에 도시된 가속기에서 $t = 70\mu s$ 에서 시뮬레이트된 폴로이달 플럭스의 윤곽선의 종단면도이다.

도 7은 또 다른 실시예에 따르는 지오메트리 프로파일을 갖는 가속기 내 시뮬레이트된 폴로이달 플럭스의 윤곽선의 종단면도이다.

도 8은 전력원, 플라스마 발생기, 및 비선형적 감소 환형 캡을 갖고 어떠한 이완 영역도 갖지 않는 기다란 섹션을 포함하는 환형 플라스마 전파 채널을 갖는 가속기를 갖는 플라스마 가속 및 압축 시스템의 또 다른 비제한적 실시예의 개략적 종단면도이다.

도 9a는 도 8에 도시된 가속기의 $t = 35\mu s$ 에서 시뮬레이션되는 동작에서의 폴로이달 플럭스의 윤곽의 종단면도이다.

도 9b는 도 8의 플라스마 발생기 및 가속기에 전력원에 의해 인가되는 예시적 전압(kV 단위) 및 전류(MA 단위)의 그래프이며, 여기서 실선은 시간(μs) 함수로서, 플라스마 발생기의 형성 영역에 인가되는 플라스마 형성 펄스의 전압(상부 그래프) 및 전류(하부 그래프)를 나타내고, 점선은 가속기에 인가되는 가속 펄스의 전압(상부 그래프) 및 전류(하부 그래프)를 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0026]

플라스마 가속 및 압축을 위한 알려진 시스템의 한 가지 예로는 2-스테이지 자화 마샬 건(two-stage magnetized Marshall gun)이 있다. 제 1 스테이지에서, 플라스마의 초기 자화를 제공하는 방사형 자기장에 의해, 동축 전극 쌍 양단의 커페시터 뱅크를 방전시킴으로써 플라스마 토러스(plasma torus)가 형성될 수 있다. 제 2 스테이지에서, 아마추어(armature)로서 플라스마 토러스를 이용해 커페시터 뱅크가 테이퍼(taper)형 동축 가속기에서 방전되며, 여기서 가속도계가 일정한 테이퍼 형태를 갖는 환형 채널, 즉, 채널의 길이를 따라 선형으로 감소하는 환형 캡(내부 전극과 외부 전극의 반지를 간 간격)을 갖는 채널을 형성하는 한 쌍의 동축으로 정렬된 관형 내부 및 외부 전극을 가진다. 전류 J 가 전류에 의해 발생되는 자기장 B 와 상호작용하고, 자기(로렌츠) 힘 $J \times B$ 가 플라스마 토러스를 가속하고 가속 환형 채널을 따라 압축한다.

[0027]

알려진 가속 및 압축 시스템의 또 다른 예시가 일정한 환형 캡(압축 없음)을 갖는 긴 동축 원통형 가속 영역 다음에, 플라스마가 압축되는 일정한 테이퍼 지오메트리를 갖는 수렴하고 포커싱되는 섹션이 뒤 따르는 건 지오메트리(gun geometry)를 이용하는 RACE 시스템(로렌스 리브모어(Lawrence Livermore) 국립 연구소에서의 Ring Accelerator Experiment)이다. 이 유형의 장치의 대부분의 적용예에서, 플라스마 토러스가 최종 충돌 영역에 놓이게 될 때 플라스마 토러스의 최종 운동 에너지가 복사의 펄스로 빠르게 벼려진다.

[0028]

알려진 가속 및 압축 시스템의 또 다른 예로는 MARAUDER 시스템(뉴 멕시코, 앨버커키에 소재하는 Air Force Phillips 연구소의 Magnetically Accelerated Rings to Achieve Ultrahigh Directed Energy and Radiation)이다. 상기 MARAUDER 장치는 일정한 테이퍼 지오메트리를 갖는 사전-압축 원뿔 뒤에 따르는 긴 일정한 캡 가속기를 포함한다.

[0029]

일정한 테이퍼 지오메트리를 갖는 환형 채널을 갖는 동축 가속기를 이용해 플라스마가 가속되고 동시에 압축될 수 있는 특정 실시예에서, 전력원으로부터 가속기에 인가되는 가속 펄스가, 채널의 길이를 따라 증가하고 플라스마 토러스가 플라스마 가속기의 다운스트림 끝 부분에 도달할 때 가장 높은 푸싱 전력(push current)을 가속기 내에서 생성하도록 구성되어야 하는데, 채널의 선형으로 감소하는 환형 캡을 통해 플라스마 토러스를 밀어내고 압축하기 위해, 푸싱 전류가 토러스의 증가하는 자기 압력(역방향 힘)을 극복해야만 하기 때문이다. 플라스마 토러스가 가속기를 떠나 플럭스 보존 챔버(가령, 타깃 챔버)에 들어갈 때, 상당한 양의 전류가 가속기에서의 순환을 유지할 수 있다.

[0030]

제너럴 퓨전 인코포레이티드(General Fusion, Inc.)(캐나다, 버나비)에서 수행된 플라스마 가속기의 특정 프로토타입을 이용한 실험이 이 순환 전류가 탁시 챔버 내 플라스마 토러스의 수명에 영향을 미칠 수 있음을 보였다. 이 순환 전류의 일부 조각(fraction)이 플라스마 토러스의 중앙을 통해 뻗어 있을 수 있는 개방 필드 라인(open field line) 상에서 흐를 수 있다. 가속기에서 타깃 챔버로의 자기 에너지의 유입(influx)이 비교적

고온의 플라스마 토러스를 냉각시키도록 기능하는 비교적 저온의 플라스마 입자의 유입이 동반될 수 있는 것이 일반적이다. 연결된 전류와 플라스마 토러스 간 이러한 상호작용의 역학이 R. C. Duck의 저 "Structure of the $n = 1$ mode responsible for relaxation and current drive during sustainment of the SPHEX spheromak", Plasma Phys. Control. Fusion, vol. 39, pp. 715-736, May 1997에 기술되었다.

[0031] 제너럴 퓨전 인코포레이티드에서의 실험이 일부 경우 플라스마 가속기로 주입되면 자기 푸싱 플럭스를 제거하는 것이 어려울 수 있음을 보였다. 인가된 전압은 가속기에서의 총 자기 플럭스의 변화율이라고 알려져 있지만, 역방향 전압의 인가가 플럭스의 흐름을 반전시키지 않고 음의 플럭스가 양의 플럭스를 즉시 상쇄시키지 않을 수 있음이 관측됐다. 대신, 전류 시트(current sheet)가 내부 플라스마에서 형성되어 개별적인 양의 플럭스 영역과 음의 플럭스 영역을 도출할 수 있다. 따라서, 순 플럭스(net flux)가 약화되지만, 실제로 푸싱 전류는 증가한다.

[0032] 따라서 가속기의 출구단에서 적은 양의 푸싱 전류, 구체적으로 가속기의 입구단에서보다 출구단에서 더 적은 푸싱 전류를 이용해 가속기 외부에서 플라스마 토러스를 압축 및 가속시키는 시스템을 동작시키기 위한 시스템 및 /또는 방법을 제공하는 것이 바람직하다.

[0033] 이러한 개선된 시스템 및/또는 방법의 특정 실시예를 언급하기 전에, 플라스마 토러스의 압축 및 가속을 제어하는 다음의 원리를 고려하는 것이 유용하다. 가속기에서의 압축의 단순 모델이 플라스마 토러스의 에너지가 테일러 상태(Taylor state)의 에너지와 유사하게 거동한다는 가정을 기초로 한다. 테일러 상태는 다음에 의한 무힘 플라스마 구성이다:

$$\nabla \times \underline{B} = \lambda \underline{B} \quad (1)$$

[0035] 여기서, \underline{B} 는 플라스마 토러스의 자기장이고 λ 는 플라스마 토러스를 이의 가장 낮은 에너지 상태로 기술하는 고유치(eigenvalue)이다. 동축 레일 건에서 가속된 플라스마 토러스의 경우, λ 는 레일 건의 플라스마 전파 채널에서 플라스마 토러스의 길이 방향 위치 z 의 함수이다.

[0036] 테일러 상태의 에너지 U 는 다음과 같다:

$$U = \frac{K\lambda}{2\mu_0} \quad (2)$$

[0038] 여기서, μ_0 는 진공의 투자율 ($4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$)이고 K는 플라스마 토러스의 자기 헬리시티(magnetic helicity)이며 여기서 K는 다음과 같다:

$$K \equiv \int dV \underline{A} \cdot \underline{B} \quad (3)$$

[0040] 여기서 \underline{A} 는 플라스마 토러스의 위치의 함수인 자기 벡터 페텐셜(magnetic vector potential)이고 V는 플라스마 토러스의 부피이다.

[0041] 테일러 상태로부터 플라스마 토러스의 에너지가 위치 z 에서의 플라스마 토러스에 대한 λ 에 비례한다고 가정될 수 있다:

$$U \propto \lambda(z) \quad (4)$$

[0043] 여기서, $\lambda = \frac{\pi}{\Delta r(z)}$ 및 플라스마 토러스의 헬리시티는 보존되는 물리량이다.

[0044] 한 쌍의 동축 정렬된 관형 전극(tubular electrode)에 의해 형성되는 환형 플라스마 전파 채널을 갖는 동축 가속기, 즉, 외부 반지름 r_{outer} 를 갖는 외부 전극 및 내부 반지름 r_{inner} 을 갖는 내부 전극에 대해, 플라스마 전파 채널을 따르는 축 위치 z 의 함수로서의 환형 전파 채널에서의 환형 캡의 변화 Δr 가

$\Delta r(z) = r_{outer} - r_{inner}$ 로 정의될 수 있다. 특정 축상 길이 방향 위치에서의 플라스마 토러스의 균형을 잡는 힘이 $d\lambda/dz$ 에 비례하고, 여기서 $\lambda(z)$ 는 채널에서 축상 길이 방향 위치 z 에 있을 때의 플라스마 토러스를 기술하는 고유치이다.

[0045] 가속기로 전기적으로 연결된 전원이 전기 필스를 가속기에 인가할 때, 푸성 전류가 가속기의 전극을 가로질러, 즉, 전극들 중 하나를 가로지르고, 플라스마 토러스를 통해 환형 캡을 가로지르며, 나머지 전극을 가로질러 다시 전원으로 흐른다. 플라스마 토러스를 가속기를 따라 이동시키기 위해 필요한 인가되는 푸성 힘(F_{push})이 플라스마 토러스의 후면(업스트림) 위에서 푸성 전류로 인한 자기 압력(magnetic pressure)을 적분함으로써 결정될 수 있고, 다음 수학식에 의해 표현될 수 있다:

$$F_{push} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL(z)}{dz} \quad (5)$$

[0047] 여기서, I 는 (토러스의 후면에서의) 푸성 전류이고, $L(z)$ 는 플라스마 토러스가 채널을 따르는 길이 방향 위치 z 에 있을 때의 푸성 전류 루프(전극을 따르고 캡을 가로지르는 전류 경로)의 인덕턴스이다. 테이퍼 지오메트리에 대한 플라스마 토러스의 위치 z 의 함수인 외부 반지름 r_{outer} 및 내부 반지름 r_{inner} 를 갖는 동축 가속기에 대해, 채널의 단위 길이당 인덕턴스 $L' \equiv dL(z)/dz$ 는 따라서 다음과 같이 주어진다:

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_{outer}}{r_{inner}} \quad (6)$$

[0049] "테이퍼 지오메트리(taper geometry)"는 채널의 길이를 따르는 다운스트림 방향으로 감소하는 환형 캡을 갖는 환형 플라스마 전파 채널을 갖는 동축 가속기를 지칭한다. 내부 반지름 r_{inner} 에 대한 외부 반지름 r_{outer} 의 일정한비를 갖는 환형 플라스마 전파 채널의 경우, 단위 길이당 인덕턴스 L' 는 상수이다.

[0050] 플라스마 토러스를 전진시키기 위해, 푸성 힘이 가속기 플라스마 전파 채널의 테이퍼형 벽에 의해 플라스마 토러스에 가해지는 역방향 힘을 극복해야 한다. 역방향 힘의 값은 다음과 같이 정의되는 가상 일의 원리로부터 발견될 수 있다:

$$F_{wall}(z) = -\frac{dU(z)}{dz} \quad (7)$$

[0052] 플라스마 토러스의 에너지가 상수 K 를 갖는 $U = \frac{K\lambda}{2\mu_0}$ 라고 가정했기 때문에 역방향 힘 $F_{wall}(z)$ 은 $d\lambda/dz$ 에 비례한다.

[0053] 평형 전류 I_{bal} 는 순 힘이 0이도록($F_{push}+F_{wall}=0$) 역방향 힘 F_{wall} 과 동일한 푸성 힘 F_{push} 를 생성하는 가속기 내 전류로서 정의되며, 다음과 같다:

$$I_{bal}(z) = \frac{1}{\mu_0} \sqrt{\frac{2\pi K}{\ln\left(\frac{r_{outer}}{r_{inner}}\right)}} \frac{d\lambda}{dz} \quad (8)$$

[0055] 따라서, 플라스마 토러스가 가속기의 플라스마 전파 채널을 따라 전방으로 가속되도록, 가속 필스로부터의 인가된 전류가 평형 전류보다 커야 한다($I > I_{bal}$).

[0056] 덧붙여, 전력원은 플라스마 전파 채널에서의 "블로-바이(blow-by)" 효과의 가능성을 감소 또는 피하는 가속 필스를 생성하기 위한 파라미터로 설정될 수 있다. 블로-바이는 푸성 전류의 자기 압력이 내부 전극으로부터의 플라스마 토러스를 상승시켜 풀렉스가 토러스에 앞서 확장하게 할 때, 발생할 수 있다. 이 효과는 "정적 블로-바이"라고 지칭되며 플라스마 토러스를 지나치게 가속시킬 때 발생할 수 있는 레일리-테일러 블로-바이(Rayleigh-Taylor blow-by)와 상이하다. 플라스마 토러스가 가속 중이 아닐 때, $\frac{B_{push}^2}{2\mu_0} > \frac{B_{max}^2}{2\mu_0}$ 인 경우 내부 전극으로부터

$$\frac{B_{push}^2}{2\mu_0} > \frac{B_{max}^2}{2\mu_0}$$

상승될 것이며,

[0057] 여기서 B_{push} 는 내부 전도체(가속기의 내부 전극)에서의 푸싱 전류의 자기장이며 B_{max} 는 내부 전도체에서의 플라스마 토러스의 최대 자기장이다.

[0058] B_{push} 는 채널 내 플라스마 토러스의 길이 방향 위치 z 와 인가된 전류의 함수인 내부 전극의 반지름의 함수이다.

$$B_{push(z)} = \frac{\mu_0}{2\pi r_{inner}(z)} I \quad (9)$$

[0059] 내부 전극에서의 플라스마 토러스의 최대 자기장은 다음과 같이 주어진다:

$$B_{max}(r_{inner}) = \frac{\psi}{\mu_0(\bar{r}^2 - r_{inner}^2)} \quad (10)$$

[0060] 여기서 ψ 는 폴로이달 플럭스(polloidal flux)이고 $\bar{r} = \frac{(r_{outer} + r_{inner})}{2}$ 이다.

[0061] 푸싱 필드(pushing field)는 내부 전도체에서 최대이며 $2\pi r_{inner} B_{push} = \mu_0 I$ 에 의해 주어지고 따라서 블로-바이에 대한 임계 전류는 $I_{lift} = 2\pi r_{inner} B_{push}/\mu_0$ 이다. 블로-바이에 대한 임계 전류 I_{lift} 는 $B_{push}=B_{max}$ 일 때의 전류로서 정의되면, 다음과 같다:

$$I_{lift} = \frac{2\pi\psi r_{inner}}{\mu_0^2(\bar{r}^2 - r_{inner}^2)} \quad (11)$$

[0062] 따라서 정적 경우에서, 블로-바이의 가능성을 낮추거나 회피하기 위해, 푸싱 전류는 임계 전류보다 낮아야 한다 ($I < I_{lift}$).

[0063] 도 1a에서의 상부 플롯이 일정한 테이퍼 지오메트리를 갖는 플라스마 전파 채널(즉, 채널의 길이를 따라 다운스트림 방향으로 선형으로 감소하는 환형 캡을 갖는 채널)을 갖는 알려진 플라스마 가속 및 압축 시스템의 하나의 예시를 도시하며, 이 플롯 내 상부 곡선이 외부 전극의 지오메트리를 나타내고 하부 곡선이 내부 전극의 지오메트리를 나타낸다. 도 1a에서 나타난 하부 플롯이 도 1a의 시스템에서 흐르는 전류의 하나의 예시를 도시하며 더 구체적으로 가속기에서의 평형 전류 I_{bal} 을 플라스마 전파 채널 내에서의 토러스의 축상 길이 방향 위치의 함수로서 나타내고(실선), 가속기의 정적 블로-바이 I_{lift} 에 대한 전류 임계치를 플라스마 전파 채널 내에서의 플라스마 토러스의 축상 길이 방향 위치의 함수로서 나타낸다(점선). 일정한 테이퍼 지오메트리를 갖는 종래의 시스템에서 나타날 수 있는 바와 같이, 플라스마 토러스를 전방으로 이동시키기 위해 필요한 전류는 플라스마 토러스가 시스템의 다운스트림 단부에 있을 때 최대이다.

[0064] 도 1b는 도 1a에 나타난 가속기의 플라스마 토러스의 λ 의 함수(여기서, $\lambda = 2\pi/\Delta r(z)$)로서의 평형 전류(실선) 및 임계 전류(점선)의 예시를 도시한다. 일정한 테이퍼 지오메트리를 갖는 가속기에서 보여질 수 있듯이, 플라스마 토러스가 가속기의 플라스마 전파 채널을 따라 가속될 때, 플라스마 토러스를 푸시하기 위해 필요한 최소 전류(I_{bal})가 채널의 길이 방향을 따라 증가하여, 플라스마 토러스가 최대 압축상태일 때(가장 높은 λ 를 가질 때) 푸싱 전류가 가속기의 다운스트림 단부에서 가장 높도록 한다.

[0065] 플라스마 압축 및 가속 시스템의 이 실시예는, 비교적 작은 푸싱 전류 및 최대 압축된 플라스마 토러스를 이용해 플라스마 토러스가 가속기의 출구에 도달할 수 있도록 설계된다. 푸싱 전류는 가속기의 입구에서보다 가속기의 출구에서 더 작지만 여전히 가속기를 통한 플라스마 토러스의 가속 및 압축을 제공해야 한다.

[0066] 이제 개선된 플라스마 압축 시스템의 실시예가 도 2 내지 9를 참조하여 기재될 것이다. 이들 실시예는 환형 플라스마 전파 채널을 형성하는 동축으로 정렬된 관형 내부 및 외부 전극을 갖는 가속기를 포함하며 상기 가속기는 고 압축률 색션 및 고 압축률 색션의 다운스트림에 위치하는 중 압축률의 기다란 색션(elongated section)을 포함하고, 가속기를 통한 플라스마 토러스의 가속 및 압축을 완료하기 위해 필요한 푸싱 전류의 양을 감소시키는 지오메트리를 가진다. 더 구체적으로, 기다란 색션에서의 환형 전파 채널이 채널의 길이 방향을 따라 다운스트림

트립 방향으로 비선형적으로 감소하는 횡단면 환형 갭을 가진다. 시스템은 또한 플라스마 발생기 및 상기 플라스마 발생기 및 가속기로 전기적으로 연결된 전력원을 포함하고 상기 전력원은 전기 플라스마 형성 펠스를 플라스마 발생기로 제공하고 전기 가속 펠스를 가속기로 제공한다. 상기 전력원은 푸싱 전류가 중 압축률의 기다란 섹션의 다운스트림 단부에서 기다란 섹션의 업스트림 단부에서 더 작도록 플라스마 토러스를 중 압축률의 기다란 섹션의 단부로 푸싱할 가속 펠스를 생성하도록 구성된다. 예를 들어, 일부 구현예에서, 전력원은 플라스마 토러스가 기다란 섹션에 들어올 때 상기 플라스마 토러스가 상기 기다란 섹션의 특정 지점을 통과하면 시스템에 어떠한 추가 푸싱 힘도 추가되지 않도록 구성된다. 또 다른 구현예에서, 상기 전력원은 플라스마 토러스의 가속 및 압축을 완료하기 위해 추가 푸싱 힘도 제공하는 가속 펠스를 생성하도록 구성되며, 이 푸싱 힘은, 다양한 구현예에서 예를 들어, 플라스마 토러스를 초기에 가속 및 압축하기 위해 사용된 푸싱 힘의 5% 미만, 10% 미만, 15% 미만, 또는 25% 미만일 수 있다. 추가 푸싱 힘은, 인가되는 경우, 이러한 일부 구현예에서 항력을 극복하도록 사용될 수 있다.

[0070] 도 2를 참조하며 그리고 하나의 비-제한적 실시예에서, 플라스마 가속 및 압축 시스템(10)은 입구(112)와 상기 입구(112)의 다운스트림에 위치하는 출구(140)를 갖는 가속기(100), 및 입구(112)와 출구(140) 사이에 뻗어 있는 환형 플라스마 전파 채널(118)을 포함한다. 상기 플라스마 전파 채널(118)은 입구(112)와 유체 연통(fluid communication)하는 업스트림 단부를 갖는 고 압축률 깔때기 섹션(high compression funnel section)(110) 및 중 깔때기 섹션(110)의 다운스트림 단부(114)와 유체 연통하는 업스트림 단부(114a) 및 출구(140)와 유체 연통하는 다운스트림 단부를 갖는 중 압축률 기다란 섹션(mild compression elongated section)(120)을 포함한다. 상기 깔때기 섹션(110)은 입구(112)로부터 다운스트림 방향으로 뻗어 있는 원추형이며 비교적 급격한 테이퍼형 지오메트리를 가지며 이를 통과하는 자화된 플라스마 토러스(13)에 비교적 높은 압축률을 제공한다. 이 실시예에서, 상기 깔때기 섹션(110)은 일정한 테이퍼 지오메트리를 갖는데, 즉, 깔때기 섹션의 길이 방향을 따라 다운스트림으로 선형으로 감소하는 환형 갭(annular gap)을 갖지만, 대안적으로 깔때기 섹션은 가변 테이퍼 지오메트리도 가질 수 있다. 상기 기다란 섹션(120)은 깔때기 섹션(110)보다 비교적 완만한 테이퍼형을 갖도록 성형된다. 깔때기 섹션(110)에 비교할 때 상기 기다란 섹션(120)에서 테이퍼형은 비교적 점진적이어서 가속기(100)의 비교적 더 긴 섹션에 걸쳐 플라스마 토러스의 비교적 작은 압축률이 얻어질 수 있다. 상기 기다란 섹션(120)은 깔때기 섹션(110)의 급격한 테이퍼형으로부터 점진적인 전환을 제공하도록 성형된다. 상기 기다란 섹션(120)의 업스트림 단부(114a)는 급격한 전환에서 발생할 수 있는 플라스마 토러스의 비-단열적(non-adiabatic) 가열을 감소시키도록 점진적인 모서리 지오메트리를 가질 수 있다. 추가로, 상기 기다란 섹션(120)은 가변 테이퍼 지오메트리를 가지는데, 즉, 기다란 섹션(120) 내 채널의 횡단면 환형 갭이 상기 기다란 섹션(120)의 길이 방향을 따라 다운스트림 방향으로 비-선형적으로 감소함을 의미한다. 이 지오메트리는, 기다란 섹션의 특정 인덕턴스 및 기다란 섹션 전의 인덕턴스("프리-인덕턴스(pre-inductance)")에 대해, 가속으로부터의 푸싱 전류가 기다란 섹션(120)의 입구(114a)에서보다 출구(140)에서 더 작도록 한다.

[0071] 상기 시스템(10)은 플라스마 발생기(12) 및 힘 보존 시스템(200)(가령, 타깃 챔버)을 더 포함한다. 상기 발생기(12)는 자화된 토로이달 플라스마(13)를 발생시키도록 구성되며 관형의 내부 형성 전극(14)과, 상기 내부 형성 전극(14)에 동축이면서 이를 둘러싸는 관형 외부 전극(16a)을 포함하여, 이들 사이에 환형 플라스마 형성 채널(17)을 형성할 수 있다.

[0072] 상기 발생기(12)는 외부 전극(16a)의 외부 주변에 위치하는 일련의 자기 코일(18)을 더 포함한다. 가스 주입기(gas injector)가 환형 플라스마 형성 채널(17)과 기체 연통하며, 챔버 주변에 뻗어 있는 주입기의 일련의 고속 퍼프 밸브(fast puff valve)(20)(도 2에 단 2개의 밸브만 도시되어 있음)를 통해 정확한 양의 가스를 채널(17)로 주입하도록 동작한다. 각각의 고속 퍼프 밸브(20)는 가스 저장소(gas reservoir)(22)와 유체 연통되며 플라스마 발생기(12)로의 가스의 질질적으로 대칭인 도입을 제공하도록 동작한다. 상기 시스템(10)은 적어도 하나의 커패시터 뱅크 및 바람직하게는 둘 이상의 커패시터 뱅크를 포함하는 전력원(24)을 더 포함하며, 플라스마 발생기(12)와 가속기(100)로 전류를 제공하도록 동작한다. 상기 코일(18)은 플라스마의 폴로이달 자기장을 형성하기 위해 방사 충전 자기장(radial stuffing magnetic field)을 제공하도록 구성된다. 상기 시스템(10)은 펌핑 시스템(도시되지 않음)을 이용해 적어도 부분적으로 더 배기될 수 있다.

[0073] 환형 플라스마 전파 채널(118) 및 이의 깔때기 및 기다란 섹션(110, 120)의 형태는 일반적으로 관형인 내부 전극(115) 및 상기 내부 전극(115)과 동축이며 이를 둘러싸는 일반적으로 관형인 외부 전극(16b)에 의해 형성된다. 상기 발생기(12)의 다운스트림 단부가 가속기 입구(112), 즉, 깔때기 섹션(110)의 업스트림 단부와 유체 결합된다. 발생기와 가속기의 외부 전극(16a, 16b)의 계면(interface) 및 플라스마 발생기 내부 전극(14)의 다운스트림 단부 및 가속기 내부 전극(115)의 업스트림 단부가 함께, 플라스마 토러스의 이완 영역

(relaxation region)(50)으로서 기능하는 개방 볼륨(open volume)을 형성한다. 도 2의 도시된 예시에서, 발생기의 내부 전극의 지름은 입구(112)에서 가속기의 내부 전극의 지름보다 커서, 이완 영역(50)의 내향 팽창 구역(inward expansion zone)을 만들 수 있다. 발생기(12)에서 형성된 플라스마 토러스(13)가 형성 채널(17)을 떠나 이완 영역(50)에 들어갈 때 상기 토러스는 약간 팽창하고 자기장 라인들이 재연결되어, 전력원(24)의 커패시터 밸크가 가속기(100)로 펄스를 제공하여 가속기 입구(112)로부터 가속기(100)를 따라 가속기 출구(140)를 향해 플라스마 토러스(13)를 가속 및 압축하기 전에, 플라스마 토러스가 안정화될 수 있다. 또는, 도 7에 도시된 바와 같이, 이하에서 더 상세히 설명되겠지만, 이완 영역이 외향 팽창 구역(outward expansion zone)을 갖도록 구성될 수 있다.

[0074] 앞서 언급되고 이하에서 더 상세히 설명될 바와 같이, 플라스마 토러스가 최대 에너지(최대 압축율) 및 플라스마 토러스 후에도 최소 푸싱 전류를 갖고 출구(140)에 도달하도록 가속기(100)는 플라스마 토러스(13)의 동시 가속 및 압축을 제공한다.

[0075] 하나의 구현예에서, 전력원(24)이 가속기로 전기 가속 펄스를 제공하도록 트리거될 때, 푸싱 전류가 전력원(24)에서 가속기의 내부 전극(115)("가속 전극")으로, 전극(115 및 16b) 사이의 화형 캡을 가로질러 플라스마 토러스(13)를 통해 흘러, 외부 전극(16b, 16a)을 통해 전력원(24)으로 복귀한다. 이 푸싱 전류는 전극(115, 16b) 사이의 영역에서 방위각 자기장(azimuthal magnetic field)을 발생시킨다. 상기 자기장은 전류에 작용하여 전자기 $J \times B$ (로렌츠) 푸싱 힘을 생성하여, 원추 깔때기 섹션(110)을 따라 플라스마 토러스(13)를 가속시킬 수 있다.

[0076] 플라스마 토러스(13)가 가속기(100)를 따라 가속화되고 출구(140)에 도달하도록 플라스마 전파 채널(118)의 저오메트리에 의해 형성되는 역방향 힘(배압)보다 큰 푸싱 힘을 발생시키도록 푸싱 전류가 선택된다. 플라스마 전파 채널의 가파른 테이퍼가 깔때기 섹션(110)에 있기 때문에, 가장 높은 배압이 가속기(100)의 이 부분에 존재하며, 따라서 전력원(24)이 깔때기 섹션뿐 아니라 기다란 섹션(120)에서의 배압을 극복하기에 충분히 높은 푸싱 힘을 깔때기 섹션(110)에서 발생시키는 푸싱 전류를 갖는 가속 펄스를 발생시키도록 구성된다. 플라스마 전파 채널(118)의 테이퍼 정도가 기다란 섹션(120)에서 상당히 감소하기 때문에, 전력원(24)은 플라스마 토러스(13)가 기다란 섹션(120)에 들어갈 때 최대 푸싱 전류 $I_{critical}$ 을 발생시키도록 구성된다. 기다란 섹션(120)의 업스트림 단부(114a)에서, 발생된 푸싱 풀렉스 Φ 가 기다란 섹션(120) 전(업스트림 단부(114a)에서) 시스템(10)의 $I_{critical}$ 및 인덕턴스 L_0 에 의해 규정된다. 따라서 피크 푸싱 전류가 원추형 깔때기 섹션(110)의 다운스트림 단부(114) 및 기다란 섹션(120)의 업스트림 단부(114a)에서 발생한다. 플라스마 토러스(13)가 기다란 섹션(120)에 들어가고 이를 따라 이동하기 시작하면, 추가 푸싱 풀렉스가 가속기로 전혀 또는 거의 주입될 필요가 없다. 전력원(24)이 방전되면, 전력원은 시스템(10)으로부터 분리될 수 있고(내부 아크(internal arc)에 의한 단락되거나 절연체가 전도성이 됨으로써), 전류가 시스템(10)에서 루프로 흐를 수 있다.

[0077] 기다란 섹션(120)의 환형 채널 지오메트리가 다음의 원리를 기초로 수학적으로 정의될 수 있다. 가속기(100)의 기다란 섹션(120)에서, 플라스마 토러스(13)가 푸싱 풀렉스의 팽창에 의해 압축된다. 플라스마 토러스가 가속기(100)의 출구단(140)에 접근할 때 기다란 섹션(120)에서의 증가하는 인덕턴스의 결과로서, 가속기(100)에서 흐르는 푸싱 전류가 감소한다. 그러나 플라스마 토러스(13) 후의 푸싱 전류가 여전히 플라스마 전파 채널(118)의 감소하는 환형 단면에서의 플라스마 토러스 압축으로 인해 증가하는 배압(역방향 힘)을 극복하기에 충분히 커야 하다.

[0078] 플라스마 전파 채널(118)의 플라스마 토러스의 길이 방향 위치 z 에 독립적으로 플라스마 토러스(13)가 힘 평형 상태(force balance)에 있는 동안 푸싱 풀렉스 Φ 에 의해 플라스마 토러스(13)를 가속하기 위해, 함수 $\lambda(z)$ 가 $1/L(z)$ 의 선형 함수로서 정의될 수 있다:

$$\frac{d\lambda}{dz} \propto \frac{dL^{-1}}{dz} \quad (12)$$

[0080] 선형 조건에 의해 일부 헬리시티 값 $K=K_0$ 에 대해 총 에너지 $K\lambda(z)/2\mu_0 + \Phi^2/2L(z)$ 가 플라스마 토러스의 위치(z)에 독립적이 될 수 있다. K_0 는 헬리시티의 임계 값이며, $K < K_0$ 인 경우 전방으로 가속될 휴지 중인 플라스마 토러스와 $K > K_0$ 인 경우 후방으로 가속될 플라스마 토러스를 구별할 수 있다.

[0081] 길이 방향 채널 위치 z 에서의 인가된 전류 $I(z)$ 를 $I(z) = \Phi/L(z)$ 로 규정함으로써(여기서 Φ 는 플라스마 토러스 후의 푸싱 플럭스이며 L 은 채널(118)의 기다란 섹션(120) 내 인덕턴스임), 가속기(100)로 추가 플러스를 전혀 또는 거의 추가하지 않으면서 플라스마 토러스(13)가 기다란 섹션의 다운스트림 단부(출구(140)에서)로 항상 가속 및 압축될 수 있는 기다란 섹션(120)의 형태(곡선)을 규정하기 위한 수학식이 도출될 수 있다.

[0082] 섹션(120)에서의 가속 전극의 단위 길이당 인덕턴스 L' 가 일정할 때(즉, 길이방향 채널 위치 z 에 독립적일 때), 가속기(100)의 인덕턴스는 다음과 같다:

$$L(z) = L_0 + (z - z_0)L' \quad (13)$$

[0083] 여기서, L_0 는 기다란 섹션(120) 전(플라스마 토러스가 기다란 섹션(120)의 제 1 단부(114a)에 있을 때)의 푸싱 전류 루프의 인덕턴스(프리-인덕턴스(pre-inductance))이다. L_0 는 선행하는 원추형 깔때기 섹션(110)의 인덕턴스 및 기다란 섹션(120) 전의 푸싱 전류 루프의 일부로서 포함되어야 할 임의의 추가 인덕터스를 포함할 수 있다.

[0084] 가속기(100)의 내부 및 외부 전극 반지름 r_{inner} 및 r_{outer} 의 비가 일정한 경우, 기다란 섹션(120)에서의 단위 길이당 인덕턴스 L' 가 또한 일정하고, 일정한 푸싱 플럭스 $\Phi = I(z)L(z)$ 를 이용해 섹션(120)에 들어가는 플라스마 토러스가 가속기(100)의 출구(140)로 이동할 수 있다. 기다란 섹션(120)의 업스트림 단부(114a)(r_0, z_0)에서 내부 또는 외부 전극(115, 16b)의 반지름, 출구(140)(r_1, z_1)에서의 내부 및 외부 전극(115, 16b)의 반지름, 기다란 섹션(120)의 단위 길이당 인덕턴스 L' , 및 기다란 섹션(120) 전의 인덕턴스 L_0 에 의해, 그리고 다음의 수학식에 의해 기다란 섹션(120)의 형태가 결정될 수 있다:

$$\frac{1}{r(z)} = a - \frac{b}{1+c(z-z_0)} \quad (14)$$

[0085] 여기서, $c = L'/L_0$, $r(z)$ 는 기다란 섹션(120)을 따라 축상 길이 방향 위치 z 에서의 내부 또는 외부 전극의 반지름이며, z_0 는 기다란 섹션(120)의 업스트림 단부(114a)에서의 기다란 섹션(120)의 축상 위치며, a 및 b 는 업스트림 및 다운스트림 단부 $z=z_0$ 및 $z=z_1$ 에서의 수학식(14)의 해법을 구함으로써 결정될 수 있는 상수이다(여기서, 다음의 수학식에서 r_0 및 r_1 는 각각 업스트림 및 다운스트림 단부에서의 내부 또는 외부 전극의 반지름을 지칭한다).

$$\frac{1}{r_0} = a - b ; \quad a = b + \frac{1}{r_0} ; \quad b = a - \frac{1}{r_0} \quad (15)$$

$$\frac{1}{r_1} = b + \frac{1}{r_0} - \frac{b}{1+c(z_1-z_0)} \quad (16)$$

$$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0} = b \left[1 - \frac{1}{1+c(z_1-z_0)} \right] \Rightarrow b = \frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0}}{1 - \frac{1}{1+c(z_1-z_0)}} \quad (17)$$

[0090] 수학식 14-17 및 Versatile Advection Code 자기-유체역학(magneto-hydrodynamic) 시뮬레이션 소프트웨어(미시간 대학의 VAC)를 이용해 가속기의 기다란 섹션(120)의 서로 다른 가능한 지오메트리 구성이 계산될 수 있다. 예를 들어, 시스템(10)은 다음의 파라미터와 함께 내부 전극 반지름에 대한 외부 전극 반지름의 일정한 비를 갖는 기다란 섹션 지오메트리를 갖도록 선택될 수 있다: 외부 전극(16)의 반지름이 입구(112)에서 약 1m이고, 접합부(114/114a)(즉, 깔때기 섹션(110)의 다운스트림 단부와 기다란 섹션(120)의 업스트림 단부의 접합부)에서 약 0.3m이며, 출구(140)에서 약 0.2m임; 가속(내부) 전극(115)의 반지름은 입구(112)에서 약 0.5m이고, 접합부(114/114a)에서 약 0.15m이며, 출구(140)에서 약 0.1m임; 원추형 깔때기 섹션(110)의 길이는 약 1.5m이고, 기

다란 섹션(120)의 길이는 약 2.5m임. (특정 파라미터에 대한) 섹션(120)에서 계산된 단위 길이당 인덕턴스 L' 는 약 $L' \cong 128 \text{ nH/m}$ 이고, 계산된 프리-인덕턴스 L_0 가 약 200nH이다. 앞서 언급된 파라미터에 의한 시스템(10)의 시뮬레이션에서, 기생(parasitic) 프리-인덕턴스가 약 50nH이고 이의 프리-인덕턴스(기다란 섹션 전의 인덕턴스)가 151nH인데, 이는 시뮬레이션되는 시스템(10)에서의 총 프리-인덕턴스가 약 201nH이며 계산된 프리-인덕턴스보다 약간 큼을 의미한다. 상기 파라미터를 기초로 하여, 플라스마 토러스가 항상 출구(140)로 가속 및 압축되고 출구(140)에서의 푸싱 전류가 기다란 섹션(120)의 제 1 단부(114a)에서의 푸싱 전류보다 작도록, 기다란 섹션(120)의 가변 테이퍼 곡선이 $a = 11.1045\text{m}^{-1}$, $b = 4.2174\text{m}^{-1}$ 및 $c = 0.64\text{m}^{-1}$ 에 대해 수학식(14)으로부터 정의될 수 있음을 발견했다. 앞서 언급된 파라미터를 갖는 시스템이 예를 들어 다음의 파라미터를 갖는 플라스마 토러스를 가속 및 압축할 수 있다: 약 10^{-6}kg 의 플라스마 토러스의 질량(가령, 세제곱 미터당 3×10^{20} 개의 이온을 갖는 중양성자 플라스마(deuteron plasma)), 약 0.18Wb의 플라스마 토러스의 폴로이달 플럭스, 약 0.0324Wb의 토로이달 플럭스 및 0.0117Wb^2 의 헬리시티. 앞서 언급된 가속기 및 플라스마 토러스의 치수와 파라미터는 단지 예시이며 상이한 치수/파라미터를 갖는 시스템이 플라스마 에너지는 최대(플라스마 토러스의 최대 압축율)이면서 가속기의 단부에서 푸싱 전류가 최소화되도록 플라스마 토러스의 다양한 구성을 효율적으로 가속 및 압축하도록 설계될 수 있다.

[0092]

또 다른 실시예에서, 기다란 섹션(120) 내 인덕턴스가 기다란 섹션의 길이를 따라 변하며, 이 경우, 기다란 섹션(120)을 따르는 각각의 길이 방향 위치를 따르는 내부 전극과 외부 전극의 반지름 $r(z)_{\text{inner}}$ 및 $r(z)_{\text{outer}}$ 에 대해 해를 구함으로써, 수학식 14-17을 이용해 (기다란 섹션(120)을 따르는) 외부 전극(16)과 가속 전극(115) 모두의 지오메트리가 개별적으로 결정된다. 상기 전력원(24)은 플라스마 토러스를 생성하는 플라스마 발생기로 플라스마 형성 펄스를 발생시키고, 가속기(100)를 통해 입구(112)에서 출구(140)로 상기 플라스마 토러스를 푸싱 하는 푸싱 전류 및 푸싱 플럭스를 생성하는 가속기(100)로 전기 가속 펄스를 발생시키도록 구성된다. 도 3a 및 3b는 적합한 형성 펄스(실선) 및 가속 펄스(점선)의 전압 및 전류 프로파일을 도시한다. 구체적으로, 도 3a는 전력원(24)에 의해 플라스마 발생기(12)(실선) 및 가속기(100)(점선)로 인가되는 전압의 예를 시간의 함수로서 도시한다. 이를 도면에서 나타나다시피, 가속 펄스는 약 16kV의 전압, 약 $20\mu\text{s}$ 의 지속시간을 가지며 플라스마 토러스가 입구(112)에서 이완 영역(50)에 있을 때(약 $50\mu\text{s}$) 펄스를 인가하고 플라스마 토러스(13)가 기다란 섹션에 들어갈 때(약 $70\mu\text{s}$) 끝내도록 타이밍이 정해진다. 도 3b는 전력원(24)에 의해 플라스마 발생기(12)(실선) 및 가속기(100)(점선)로 인가되는 전류의 하나의 예를 시간의 함수로서 도시한다. 가속 펄스 동안($50\mu\text{s} < t < 70\mu\text{s}$ 의 타이밍에서), 전류는 자신의 최대 레벨 I_{critical} 까지 증가(ramp up)하기 때문에, 플라스마 토러스(13)는 원추형 깔때기 섹션(110)을 따라 이동하기 시작하고, 이때 플라스마 토러스(13)가 압축된다. 따라서 플라스마 토러스(13)는, 플라스마의 자기장 압력을 증가시킴으로써 푸싱 자기장이 플라스마 토러스(13)가 내부 전극(115)으로부터 이격되지 못하게 막는(블로-바이가 발생하지 못하게 막는) 정도까지로 압축된다. 가속 펄스는 항상 기다란 섹션(120)의 시작부분으로 플라스마 토러스(13)를 계속 푸싱하면서 역방향 힘을 상쇄시키는 푸싱 전류를 제공하도록 구성된다. 깔때기와 기다란 섹션(110, 120)의 접합(114/114a)에서 전류가 피크이며, 일정한 테이퍼 지오메트리를 갖는 종래의 플라스마 가속기(도 1a 참조)에서처럼 가속기의 끝 부분(출구단(140))에서가 아니다. 플라스마 토러스(13)가 기다란 섹션(120)에 도착하고 기다란 섹션을 따라 이동하기 시작하면, 이 실시예에서 어떠한 추가 힘도 가속기(100)로 주입될 필요가 없다. 기다란 섹션(120)은 더 긴 기다란 섹션(120)에 걸친 수록 푸싱 전류가 더 가벼운 압축을 제공하도록 성형될 수 있다. 플라스마 토러스(13)가 기다란 섹션(120)을 통해 다운스트림으로 이동할 때 상기 기다란 섹션에서의 인덕턴스(L)가 증가하고, 푸싱 전류(I)는 감소할 것이다. 도 3b에 도시된 바와 같이 피크 전류가 약 1.44MA일 수 있고, 기다란 섹션(120)에서의 증가된 인덕턴스 때문에 기다란 섹션(120)의 단부(출구(140))에서 플라스마 토러스 이후에 흐르는 푸싱 전류가 약 0.5MA 까지 감소했다. 따라서 이 실시예에서, 플라스마 토러스(13)가 가속기(100)의 원추형 깔때기 압축 섹션(110)의 다운스트림(114)에 있을 때 푸싱 전류가 가장 높다.

[0093]

출원인은 플라스마 가속 및 압축 시스템(10)의 서로 다른 설계 및 구체적으로 원추형 깔때기 섹션(110)과 기다란 섹션(120)의 서로 다른 지오메트리의 성능을 평가하도록 VAC 코드를 이용하는 MHD(magneto hydrodynamics, 자기 유체역학) 모델링을 이용해, 플라스마 토러스(13)를 고에너지 상태로 가속 및 압축하기 위한 가속기(100)의 효율을 예측할 수 있다. 도 4a는 가속기(100)의 압축 깔때기 섹션(110) 및 기다란 섹션(120)을 보여주는 도 2의 플라스마 가속 및 압축 시스템(10)의 시뮬레이션된 동작의 하나의 예시를 도시한다. 길이 방향 채널 위치 $z \approx 2.5\text{m}$ 에서의 점선 수직선(500)이 깔때기 섹션(110)과 기다란 섹션(120)의 접합부(114/114a)를 가리킨다.

깔때기 섹션(110)의 길이는 1,5m로 설정되고 기다란 섹션의 길이는 2,5m로 설정되었다.

[0094] 도 4b는 도 4a의 시뮬레이션된 시스템(10)의 임계 전류, 평형 전류 및 동적 전류(dynamic current)를 보여주며, 여기서 평형 전류 I_{bal} 는 실선으로 나타나며, 정적 블로-바이가 발생하기 위한 전류 임계치 I_{lift} 가 점선으로 나타나며, 플라스마 토러스 이후의 동적 전류(dynamic current)는 점선으로 나타난다. 모든 전류가 플라스마 전파 채널의 길이 방향을 따르는 플라스마 토러스의 위치의 함수로서 나타난다. 상기 동적 전류 곡선은 가속기 전체를 통과하도록 플라스마 토러스를 푸싱하기 위해 전력원에 의해 발생되는 목표 푸싱 전류를 나타낸다. 도 4b는 기다란 섹션 전에 존재하는(깔때기 섹션에 존재하는) 동적 전류가 명확성을 위해 생략된 때의 기다란 섹션에서의 동적 곡선만 도시한다. 상기 동적 전류는 블로-바이를 피하기 위해 임계 전류보다 더 작고, 다양한 손실, 가령, 힘터 손실, 마찰력 등을 고려하기 위해 평행 전류보다 크도록 설계된다. 도 4b에 나타난 동적(푸싱) 전류를 도 1a(하부 풀롯)에 나타난 동적(푸싱) 전류와 비교함으로써, 시스템(10)의 출구에서의 동적 전류가 일정한 테이퍼 지오메트리를 갖는 가속기의 단부에서의 푸싱 전류보다 훨씬 더 낮음을 알 수 있다.

[0095] 도 5는 도 4a에 나타난 파라미터를 갖는 시스템에서의 임계 전류, 평형 전류, 및 동적 전류의 하나의 예시를 λ 의 함수로서 도시한다. 알 수 있듯이, 깔때기와 기다란 섹션의 접합부(114/144a)에서의 λ 는 24m^{-1} 이고 상기 포인트에서의 평형 전류는 최대 약 1.2MA이고, 기다란 섹션의 단부에서 λ 는 33m^{-1} 의 최대 값까지 상당히 증가하며, 반면에 평형 전류 값이 깔때기 섹션(110)의 단부에서보다 상당히 더 낮은 약 0.4MA이다. 이 도면은 플라스마 토러스 이후의 최소 푸싱 전류를 갖고 최대 압축된 플라스마 토러스가 가속기(100)의 출구(140)로 푸싱됨을 보여준다.

[0096] 도 6a 및 6b는 도 4a에서 나타난 파라미터를 갖는 시스템(10)의 시뮬레이션된 동작을 도시하고, 구체적으로, $t = 62\mu\text{s}$ (도 6a) 및 $t = 70\mu\text{s}$ (도 6b)에서의 플라스마 전파 채널(118) 내 폴로이달 힘터의 윤곽선을 도시한다. 도 6a는 플라스마 토러스의 앞부분이 깔때기 섹션(114)의 다운스트림 단부에 도달할 때 플라스마 토러스(13)가 깔때기 섹션(110)에서 압축되고 있는 것을 도시한다. 도 6b는 기다란 섹션(120)에 들어갈 때의 플라스마 토러스(13)를 도시한다. 상기 플라스마 토러스(13)는 압축 깔때기 섹션(110)을 따라 약 130km/s로 $z = 2.5\text{m}$ 인 이의 단부까지 푸싱될 수 있으며, 그 후 플라스마 토러스(13)가 $z \approx 2.5\text{m}$ 인 기다란 섹션의 시작 부분에서 30km/s로 기다란 섹션에 들어갈 때 전력원(24)의 가속 회로가 0 전압으로 설정된다. 시뮬레이션은 플라스마 토러스(13)가 $t \approx 90\mu\text{s}$ 에서 시스템(10)의 단부(출구단(140))에 약 118km/s의 속력으로 도착할 수 있음을 보여줬다. 또 다른 실시예에 따라 도 7을 참조하면, 시스템(10)에 외향 팽창 구역을 갖는 이완 영역이 제공된다. 도 7은 2.5m 길이의 깔때기 섹션과 4.5m 길이의 기다란 섹션을 갖는 이 시스템(10)의 시뮬레이션된 동작을 도시한다. 외향 팽창(outward expansion)과 이에 뒤 따르는 내향 압축(inward compression)이 압축 깔때기 섹션(110)에서 매우 급격한 테이퍼를 이용할 수 있으며, 따라서 이 구성이 블로-바이 발생에 더 취약할 수 있다.

[0097] 또 다른 실시예에 따르고 도 8을 참조하면, 플라스마 압축 및 가속 시스템(1000)에 어떠한 이완 영역도 제공되지 않는다. 상기 시스템(1000)은 2-섹션 가속기(1100)와 전력원(1024)을 포함한다. 상기 시스템은 플라스마 발생기(1012) 및 힘터 보존 영역(1200)(가령, 목표 챔버)을 더 포함한다. 상기 발생기(1012)는 관형 외부 전극(1016) 내부에 삽입되는 관형 내부(형상) 전극(1014)을 포함하여, 정확한 양의 가스가 주입될 수 있는 환형 플라스마 형성 채널을 형성할 수 있다. 가스가 전극(1014과 1016) 사이의 플라스마 형성 채널을 채우면, 전력원(1024)이 플라스마 형성 펄스를 가스를 이온화하는 전극들 사이에서 방전된 전류를 포함하는 플라스마 발생기로 제공하고 자화된 플라스마 토러스(1013)를 형성할 수 있다.

[0098] 가속기(1100)는 내부 전극(1014)이 삽입되는 외부(가속) 전극(1015)을 포함하여 이들 사이에 환형 플라스마 전파 채널(1118)을 생성하고 상기 환형 플라스마 전파 채널을 통해 플라스마 토러스(1013)가 목표 챔버(1200)로 전파된다. 상기 가속기(1100)는 압축 깔때기 섹션(1110) 및 상기 깔때기 섹션(1110)의 다운스트림에서 이와 유체 연통하여 기다란 섹션(1120)을 포함한다. 압축 깔때기 섹션(1110)은 원추형 테이퍼 섹션이고 가속기의 입구(1112)와 유체 연통하는 업스트림 단부를 가지며 기다란 섹션(1120)의 업스트림 단부(1114a)와 유체 연통하는 다운스트림 단부(1114)를 가진다.

[0099] 깔때기 섹션(1110)에서, 테이퍼 정도가 비교적 급격할 수 있으며 약 3-10의 배율로의 플라스마 토러스의 방사방향 압축을 제공할 수 있다. 기다란 섹션(1120)은 원추형 깔때기 섹션(1110)보다 비교적 완만한 테이퍼 정도를 갖고 깔때기 섹션(1110)보다 길어서, 길이 방향이 긴 섹션을 통할수록 더 적은 압축율을 제공할 수 있다. 예를 들어, 섹션(1120)의 길이 방향을 따르는 플라스마 토러스의 방사방향 압축이 약 1-2배율만큼 이뤄질 수 있다.

- [0100] 상기 기다란 섹션(1120)은 깔때기 섹션(1110)의 다운스트림 단부(1114)로 연결 및 유체 연통하는 업스트림 단부(1114a) 및 가속기(1100)의 출구(1140)와 유체 연통하는 다운스트림 단부를 가진다. 도 2에 도시된 실시예처럼, 기다란 섹션은 가변 테이퍼 지오메트리를 가지는데, 즉, 기다란 섹션(1120) 내 환형 전파 채널(1118)의 환형 캡이 기다란 섹션(1120)의 길이 방향을 따라 다운스트림 방향으로 비선형적으로 감소한다. 상기 기다란 섹션(1120)은 섹션(1120)의 길이 방향을 따라 깔때기 섹션(1110)의 더 급격한 테이퍼에서 더 완만한 테이퍼로의 비교적 점진적인 전환을 제공하도록 구성될 수 있다. 예를 들어, 섹션(1120)은 섹션의 업스트림 단부가 큰 곡률 반경을 포함하도록 구성되어 급격한 깔때기 섹션(1110)으로부터 매끄러운 변화를 제공할 수 있다.
- [0101] 시스템(1000)은 외부 드라이브(outer drive)를 포함한다, 즉, 전력원이 가속기(1100)로 전기적으로 연결되어, 전력원(1024)으로부터 전류가 외부 전극(1015)을 가로질러, 플라스마 토러스를 통해 환형 캡을 가로질러, 내부 전극(1014)을 가로질러 다시 전력원으로 흐르게 할 수 있다. 전력원(1024)이 방전되면, 전력원이 시스템(1000)으로부터 분리(단락)될 수 있고 전류가 시스템(1000)에서 루프로 흐를 수 있다.
- [0102] 도 2에 도시된 시스템(10)과 달리, 시스템(1000)은 이완 영역 또는 그 밖의 다른 임의의 유형의 팽창 영역을 포함하지 않는다. 상기 전력원은 플라스마가 여전히 발생기(1012)로부터 베를 아웃 중일 때 가속 필스를 발생시키도록 구성되어 플라스마 토러스를 형성하기 위해 팽창된 자기장선을 절단하고 동시에 가속기(1100)를 따라 플라스마 토러스를 푸싱하면서, 푸싱 풀럭스의 자기장선 장력(field-line tension)이 자력선의 재연결을 구동할 수 있다.
- [0103] 또 다른 실시예에서, 시스템(1000)은 도 2의 시스템에 나타난 유형 같은 내부 드라이버를 포함한다.
- [0104] 도 9a를 참조하면, 도 8에 도시된 시스템(1000)의 시뮬레이션된 동작이 $t = 35\mu s$ 에서의 폴로이달 풀럭스의 윤곽을 도시한다. 알다시피, 푸싱 풀럭스는 가속기(1100)의 압축 깔때기 섹션(1110)을 따라 이의 다운스트림 단부(1114)를 향해 플라스마 토러스를 가속하고 압축한다. 전력원으로부터의 가속 필스가 방전될 때, 플라스마 토러스가 기다란 섹션(1120)에 들어가고, 여기서 추가 풀럭스가 가속기(1100) 내로 주입되지 않고 목표 챔버(1200)를 향해 추가로 가속 및 압축된다.
- [0105] 전력원에 의해 생성되는 플라스마 형성 필스 및 가속 필스의 전압 및 전류 프로파일이 도 9b에 도시된다. 전압 프로파일이 상부 플롯(plot)에 나타나고 전류 프로파일이 하부 플롯에 나타나며 플라스마 형성 필스가 실선으로 나타나고 가속 필스가 점선으로 나타나며 둘 모두 시간의 함수로서 나타난다. 이 도면에서 나타날 수 있는 바와 같이, 플라스마 형성 필스로부터의 전압/전류가 아직 방전되지 않는 한 가속 필스가 트리거된다. 가속기(1100)에서의 가속 필스의 인가된 전압이 약 11kV이다. 발생기(1012)에서 형성되는 플라스마가 발생기로부터 베를 아웃되어 플라스마 토러스를 형성할 때, 가속 필스는 플라스마 토러스를 형성하고, 즉시 플라스마 토러스를 가속 기를 따라 가속시키기 위해 가속(푸싱) 전류가 자력선의 재연결을 구동할 수 있도록 트리거된다. 푸싱 전류가 확립될 때, 상기 플라스마 토러스가 깔때기 섹션(1110)을 따라 깔때기와 기다란 섹션(1110, 1120)의 접합부(1114/1114a)를 향해 압축되어, 플라스마 토러스가 기다란 섹션(1120)에 들어가고 이를 따라 이동하기 시작할 때, 어떠한 추가 풀럭스도 주입될 필요가 없다. 시뮬레이션되는 동작에서, 플라스마 토러스가 목표 챔버(1200)에 도달할 때 가속기에서 흐르는 푸싱 전류가, 기다란 섹션(1120)에서의 증가된 인더턴스로 인해 약 0.25MA로 감소됐다. 2개의 섹션을 포함하는 가속기의 특정 구현예가 기재되었지만, 이는 설명을 위한 것에 불과하며, 한정이나 필수요건이 아니고, 특히, 시스템(10, 1000)의 가속기에 가변 테이퍼 지오메트리, 가령, 수학식 14에서 정의된 것을 갖는 하나의 기다란 섹션만 제공될 수 있으며, 여기서, 가속기에 충분한 인더턴스 및 프리-인더턴스가 제공되어, 기다란 섹션의 입구에서 출구에서보다 더 낮은 푸싱 전류를 이용해, 가속 필스가 플라스마 토러스를 출구로 푸싱하는 푸싱 풀럭스를 발생시킬 수 있게 한다. 대안적으로, 다른 실시예는 3개, 4개, 5개, 또는 그 이상의 기다란 섹션을 포함할 수 있으며, 여기서 이를 섹션 중 적어도 하나가 가변 테이퍼 지오메트리를 가진다. 예를 들어, 테이퍼는 일부 실시예에서 "트럼펫 형상(trumpet-shaped)"일 수 있다. 이러한 구현예 각각에서 본 명세서에 기재된 MHD 모델링 기법을 이용해 설계 파라미터(가령, 테이퍼 정도, 내부/외부 반지름, 섹션의 길이, 푸싱 전류 등)가 결정될 수 있다.
- [0106] 개시된 실시예들 중 임의의 실시예에서 획득된 플라스마 토러스는 고 에너지 플라스마일 수 있고 가령 의료용 동위원소의 생산, 중성자원, x-선 방사원, 핵융합 장치 등의 적용예에 적합할 수 있다. 앞서 기재된 시스템 및 방법의 실시예가 핵융합 물질을 포함하는 플라스마를 압축하도록 사용될 수 있다. 예를 들어, 핵융합 물질은 경원소, 가령, 듀테륨, 트리튬, 헬륨-3, 리튬-6, 리튬-7 등의 하나 이상의 동위원소를 포함할 수 있다. 따라서 시스템의 특정 실시예는 중성자 발생기 또는 중성자원으로서 역할하도록 구성 및 동작할 수 있다. 이렇게 생성된 중성자는 연구 및 산업 분야에서 다양한 실제 용도를 가진다. 예를 들어, 중성자원은 다양한 물질(가령,

폭발물, 약물, 핵분열성 물질, 독극물 등)에서 다량원소, 미량원소, 혼적원소, 및 희귀원소의 다중-원소 분석을 제공할 수 있는 중성자 활성화 분석(neutron activation analysis)(NAA)을 위해 사용될 수 있고, 다양한 적용 예(가령, 폭발물 검출 및 식별, 환경 또는 핵폐기물의 생태학적 모니터링 등)에서 사용될 수 있다. 중성자원으로서 구성된 시스템의 실시예는 물질 연구(가령, 물질의 구조, 역학, 조성, 및 화학적 균일도)를 위해, 산업 목 적의 비파괴적 시험을 위해, 그리고 그 밖의 다른 많은 산업 및 기술적 적용예에 대해 사용될 수도 있다. 플라스마 압축을 위한 앞서 기재된 시스템 및 방법의 실시예가 고 에너지 밀도 플라스마의 연구에서 적용되기에 적합한데, 가령, 천체물리학 및 핵물리학에서 적용되기 적합하다.

[0107] 본 발명의 구체적 요소, 실시예 및 적용예가 도시되고 기재되었지만, 본 발명의 범위 내에서 해당 분야의 통상의 기술자에 의해 수정이 이뤄질 수 있기 때문에, 본 발명의 범위가 여기에 한정되는 것은 아님이 이해될 것이다. 따라서 예를 들어, 본 명세서에 개시된 임의의 방법 또는 프로세스에서, 방법/프로세스를 구성하는 동작이 임의의 적합한 순서로 수행될 수 있으며, 임의의 특정한 개시된 순서에 반드시 한정되지는 않는다. 다양한 실시 예에서 요소 및 구성요소가 서로 다르게 구성 또는 배열되거나, 조합되거나 및/또는 제거될 수 있다. 앞서 기재된 다양한 특징 및 프로세스가 서로에 대해 독립적으로 사용될 수 있거나, 다양한 방식으로 조합될 수 있다. 모든 가능한 조합 및 부분조합이 본 발명의 범위 내에 속하도록 의도된다. 본 발명 전체에서, "일부 실시예", "하나의 실시예" 등에 대한 언급은 특정 특징, 구조물, 단계, 프로세스, 또는 실시예와 관련하여 기재된 특성이 적어도 하나의 실시예에 포함됨을 의미한다. 따라서 본 명세서 전체에서의 "일부 실시예에서", "하나의 실시예에서" 등의 구문의 등장이 반드시 모두 동일한 실시예를 지칭하는 것은 아니며 동일하거나 상이한 실시예 중 하나 이상을 지칭할 수 있다. 실제로, 본 명세서에 기재된 신규한 방법 및 시스템이 다양한 다른 형태로 구현될 수 있다: 덧붙여, 본 명세서에 기재된 실시예의 다양한 생략, 추가, 치환, 균등물, 재배열, 및 변경이 본 명세서에 기재된 본 발명의 사상의 범위 내에서 이뤄질 수 있다.

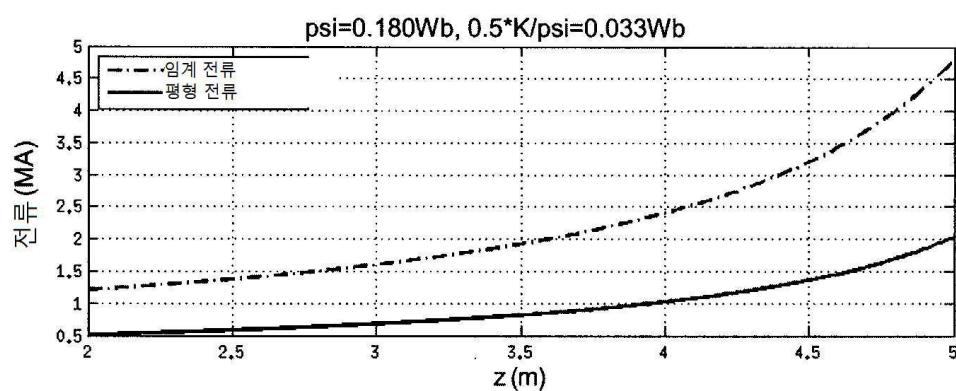
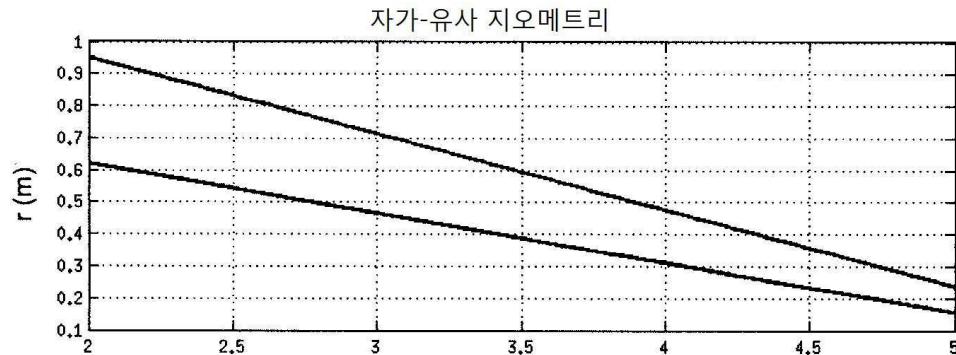
[0108] 실시예의 다양한 양태 및 이점이 적절하게 기재되었다. 임의의 구체적 실시예에 따라 이러한 모든 양태 또는 이점이 얻어질 수 있음이 이해되어야 한다. 따라서 예를 들어 본 명세서에 설명된 바와 같이 하나의 이점 또는 다양한 이점을 얻거나 최적화하는 방식으로 다양한 실시예가 수행될 수 있음을 알아야 한다.

[0109] 본 명세서에서 사용되는 조건 표현, 가령, "can", "could", "might", "may"(~할 수 있다), "e.g."(예를 들어) 등은, 달리 구체적으로 언급하지 않는 한, 또는 사용된 맥락 내에서 달리 이해되지 않는 한, 일반적으로 다른 실시예는 포함하지 않더라도 특정 실시예가 특정 특징부, 요소 및/또는 단계를 포함함을 전달하도록 의도된다. 따라서 이러한 조건 표현은 일반적으로 특징부, 요소 및/또는 단계가 어떠한 방식으로도 하나 이상의 실시예에 대해 필수임을 의미하거나 하나 이상의 실시예가 운영자 입력 또는 프롬프팅을 이용한 또는 이용하지 않고 이들 특징부, 요소 및/또는 단계들이 임의의 특정 실시예에 포함되거나 수행될 것인지에 무관하게 결정 로직을 반드시 포함하는 것을 의미하지 않는다. 어떠한 단일 특징부 또는 특징부 그룹도 임의의 특정 실시예에서 필수적인 것은 아니다. 용어 "comprising", "including", "having"(포함하는) 등은 동의어이며 개방형 방식으로 포괄적으로 사용되고, 추가 요소, 특징부, 동작, 등을 배제하지 않는다. 또한, 용어 "or"(또는)은 포괄적 의미(베타적 의미가 아니라)로 사용되어, 예를 들어, 요소들의 리스트를 연결하기 위해 사용될 때, 용어 "또는"은 상기 리스트 내 요소들 중 하나, 일부, 또는 전부를 의미한다.

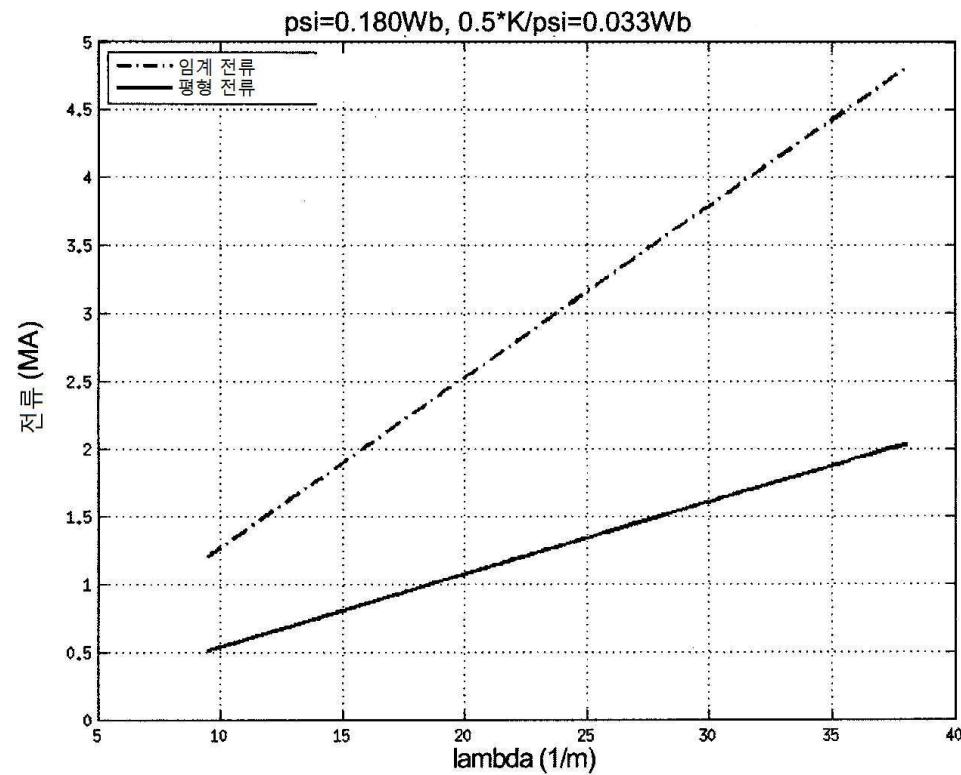
[0110] 본 명세서에 기재된 실시예의 예시적 계산, 시뮬레이션, 결과, 그래프, 값, 및 파라미터가 개시된 실시예를 설명하고 한정하도록 의도된다. 그 밖의 다른 실시예가 본 명세서에 기재된 설명적 예시와 다르게 구성 및/또는 동작할 수 있다.

도면

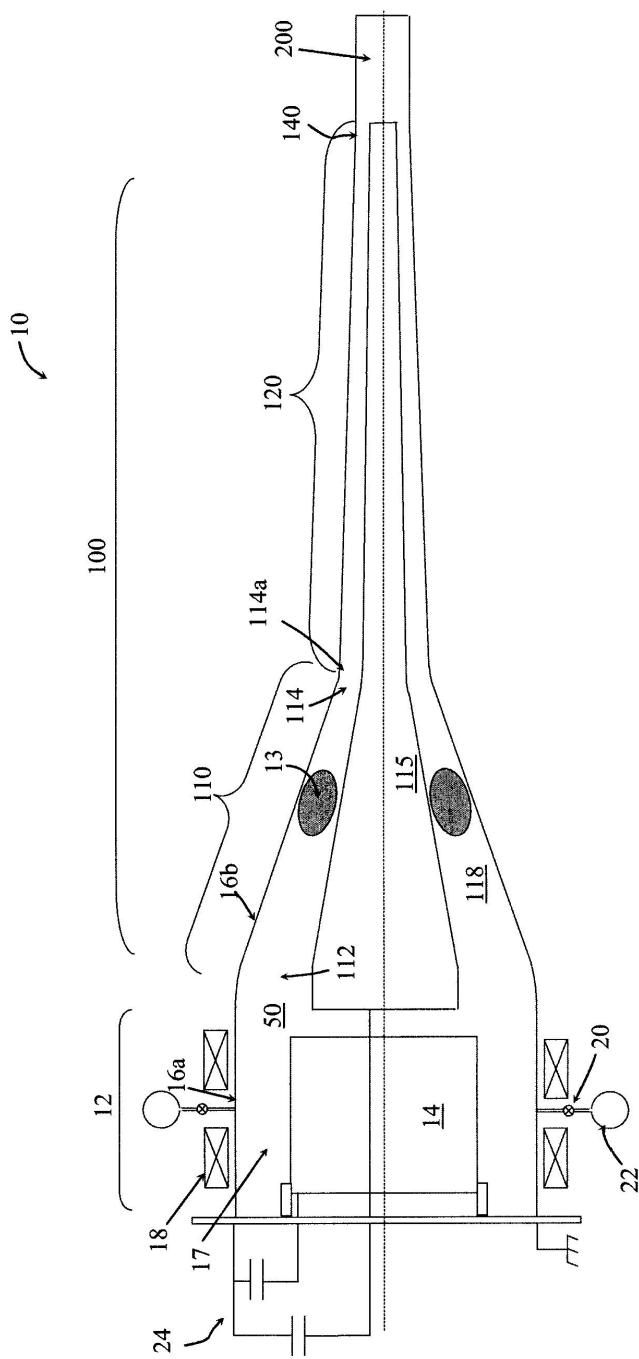
도면1a



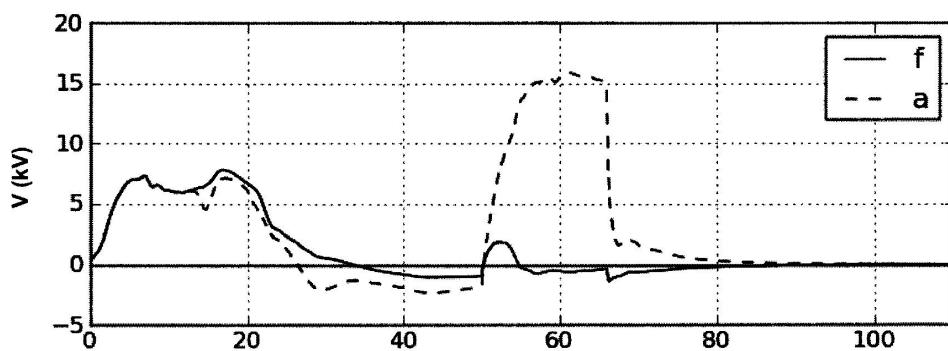
도면1b



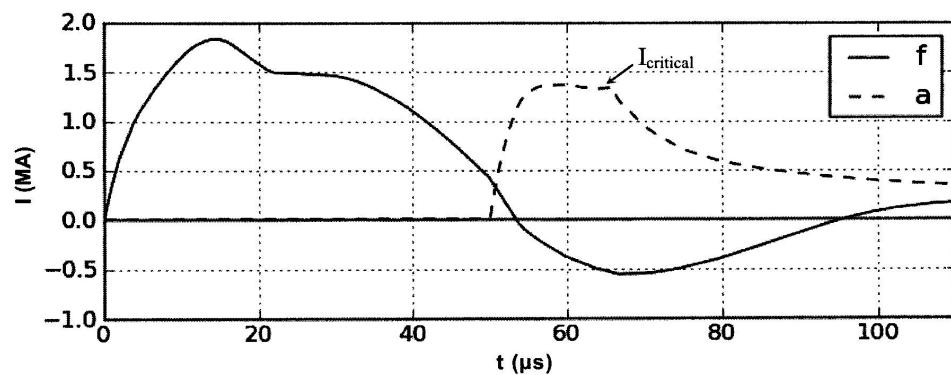
도면2



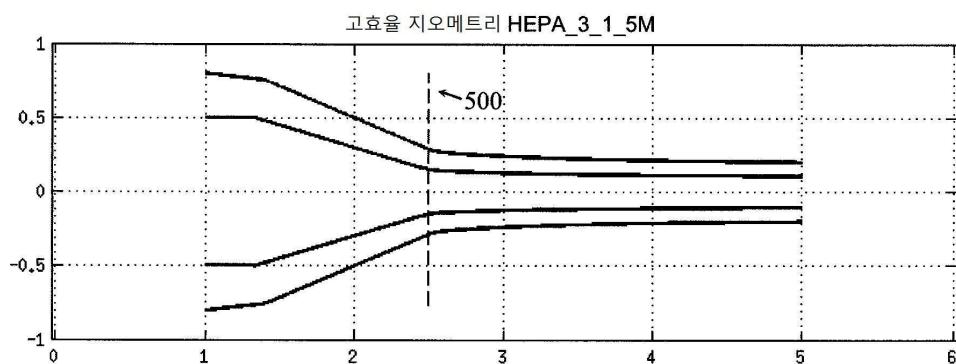
도면3a



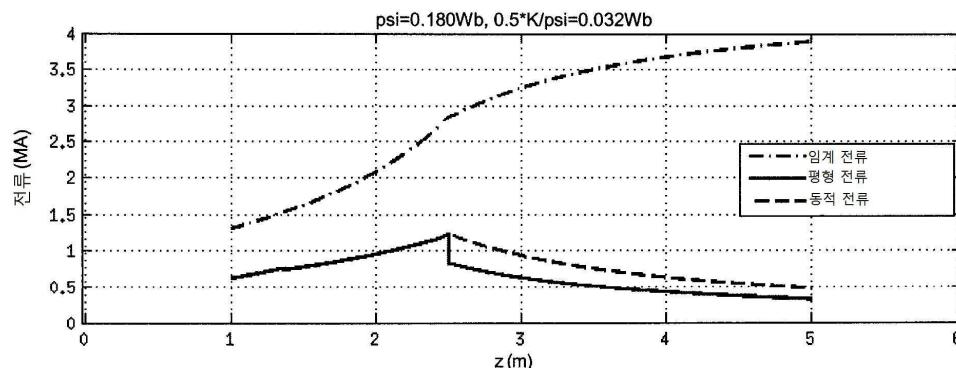
도면3b



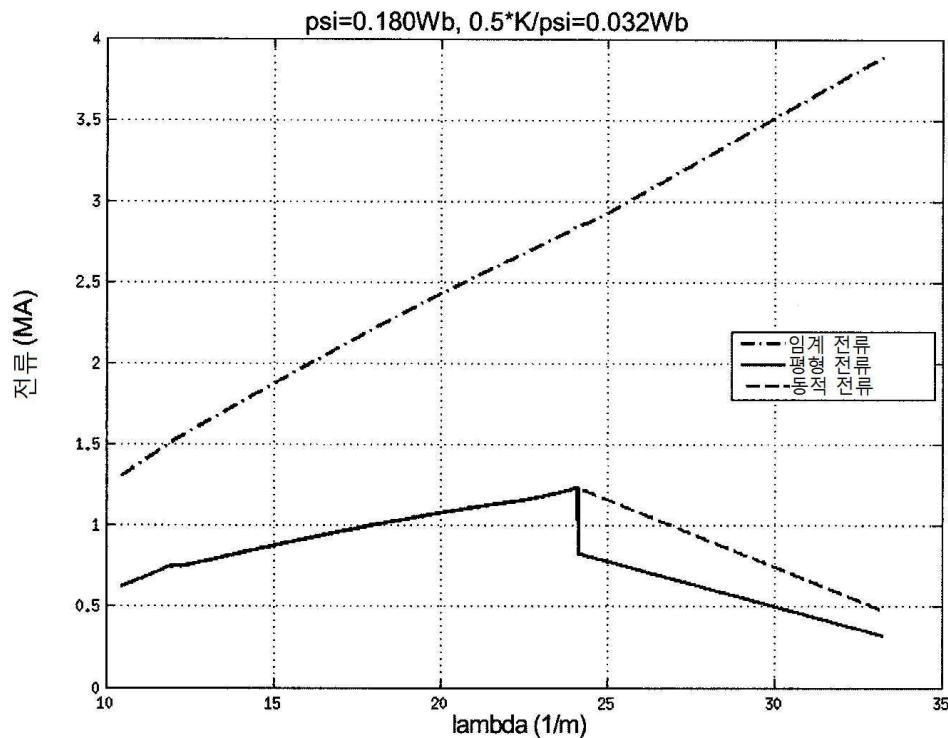
도면4a



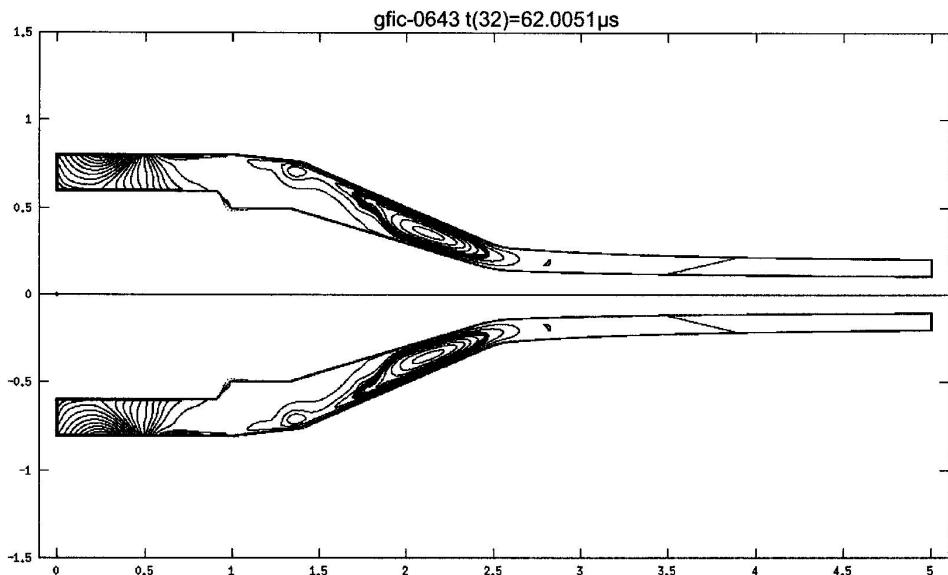
도면4b



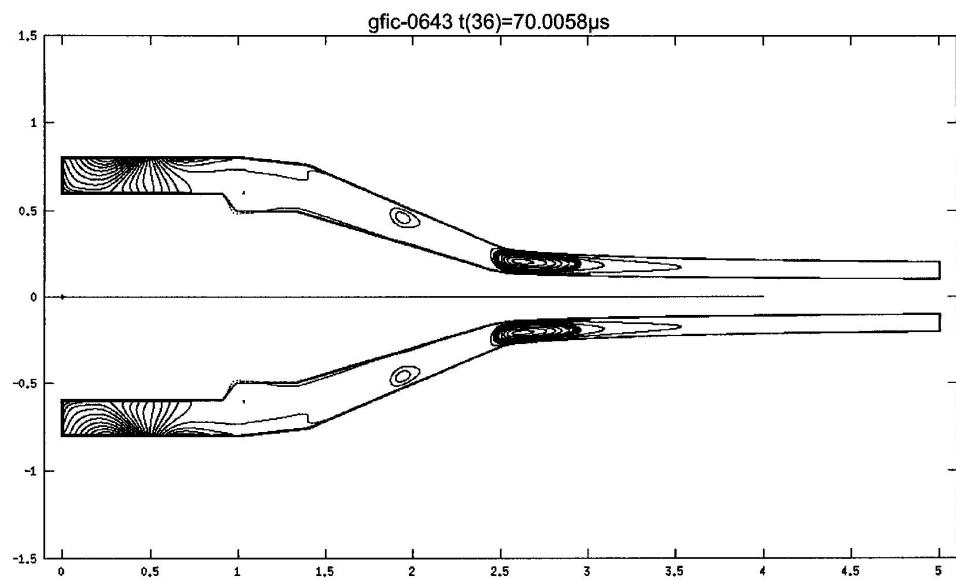
도면5



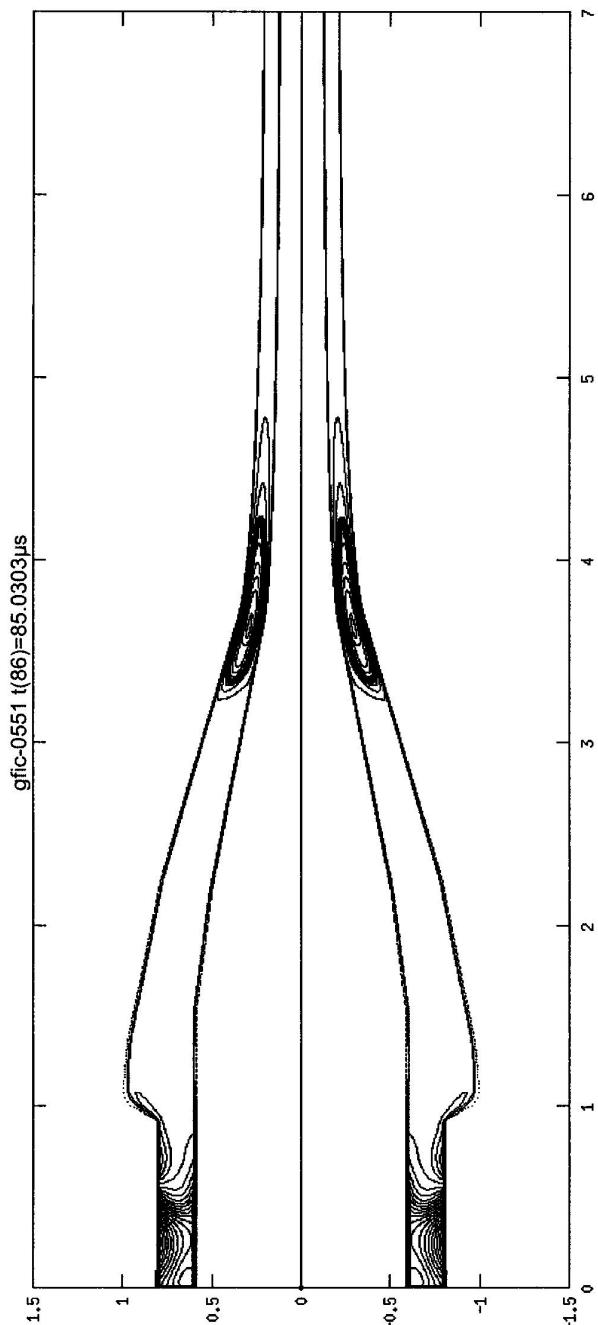
도면6a



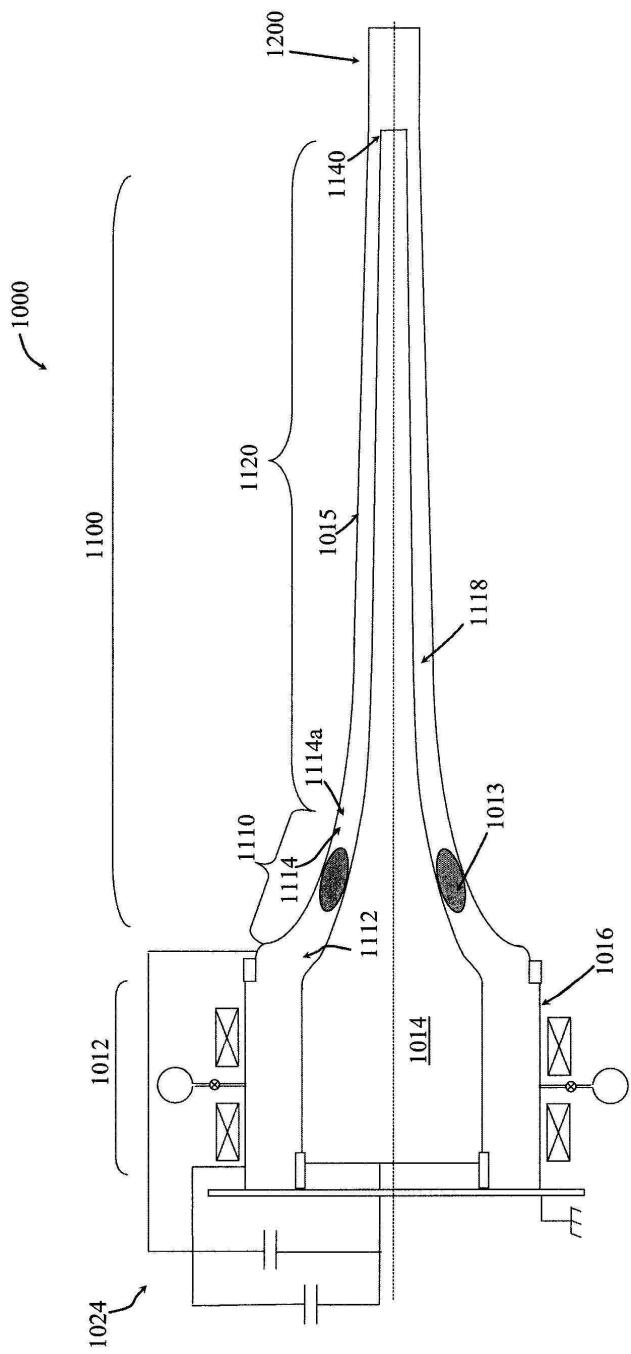
도면6b



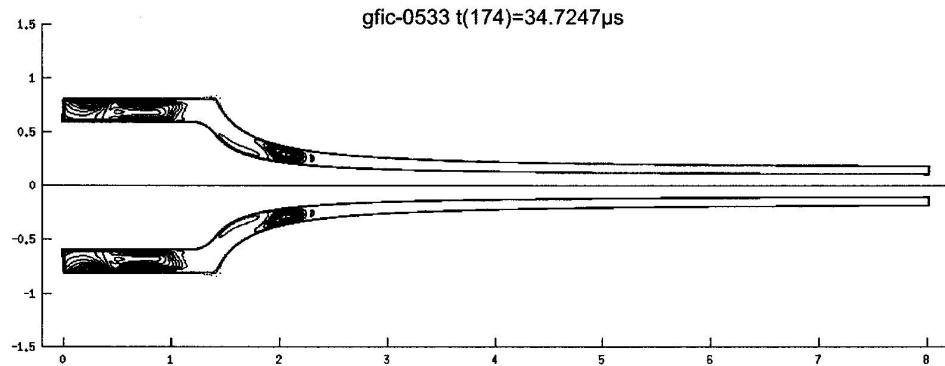
도면7



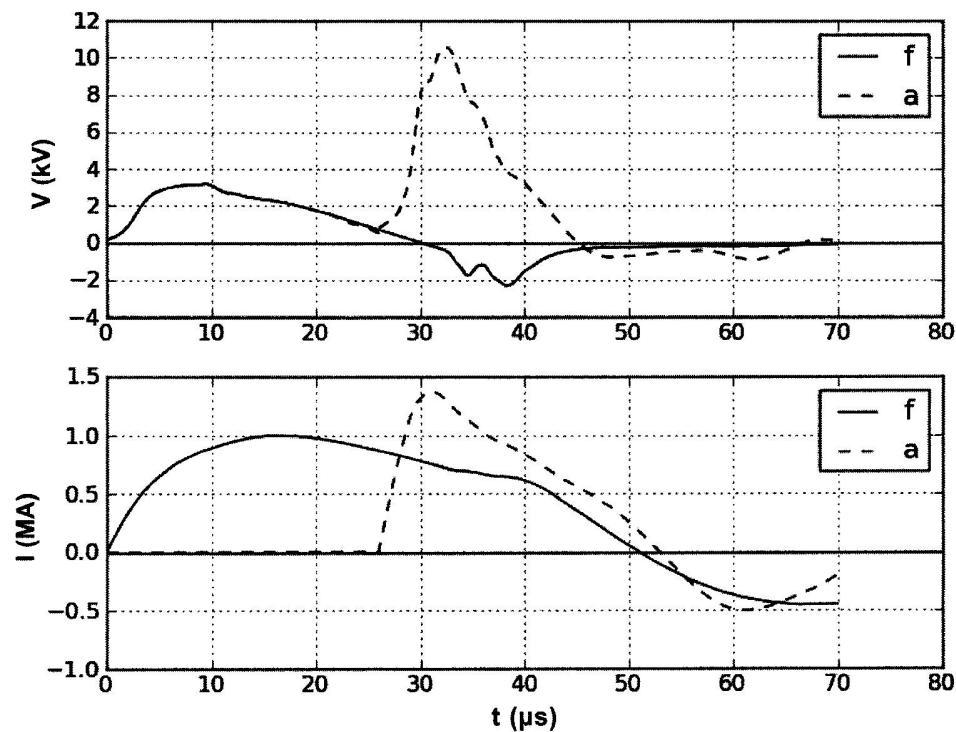
도면8



도면9a



도면9b



【심사관 직권보정사항】

【직권보정 1】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 청구항 1

【변경전】

내부 전극과 외부 전극 사이의 방사방향 간격(radial distance)로서 형성된 횡단면 환형 캡

【변경후】

내부 전극과 외부 전극 사이의 방사방향 간격(radial distance)으로서 형성된 횡단면 환형 캡