



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2019년05월09일
 (11) 등록번호 10-1976972
 (24) 등록일자 2019년05월02일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H05H 13/00 (2006.01) *A61N 5/10* (2006.01)
H01F 6/06 (2006.01)
- (52) CPC특허분류
H05H 13/005 (2013.01)
A61N 5/1043 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2017-7036505
- (22) 출원일자(국제) 2016년05월26일
 심사청구일자 2017년12월19일
- (85) 번역문제출일자 2017년12월19일
- (65) 공개번호 10-2018-0013977
- (43) 공개일자 2018년02월07일
- (86) 국제출원번호 PCT/US2016/034408
- (87) 국제공개번호 WO 2016/191592
 국제공개일자 2016년12월01일
- (30) 우선권주장
 62/166,148 2015년05월26일 미국(US)
- (56) 선행기술조사문헌
 JP2015507332 A
 JP5682903 B2
 JP6021232 B2
 US08975836 B2

- (73) 특허권자
안타야 사이언스 앤 테크놀로지
 미국 뉴 햄프셔 03842, 7에이 메릴 인터스트리얼
 드라이브 햄튼
- (72) 발명자
안타야, 티모시
 미국 뉴 햄프셔 03842, 7에이 메릴 인터스트리얼
 드라이브 햄튼 안타야 사이언스 앤 테크놀로지
- (74) 대리인
허용록

전체 청구항 수 : 총 28 항

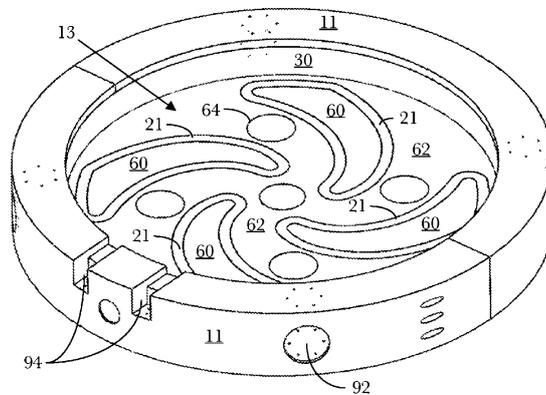
심사관 : 이민형

(54) 발명의 명칭 초전도성 플러터 코일 및 비자성 강화물을 구비하는 등시성 사이클로트론

(57) 요약

등시성 사이클로트론이 2개 이상의 초전도성 코일, 빔 챔버의 적어도 일부를 수용하고 상기 코일을 둘러싸는 자기 요크, 중앙 가속 평면의 각 측면 상의 복수의 초전도성 플러터 코일, 초전도성 플러터 코일의 위치를 유지시키기 위해 초전도성 플러터 코일 사이의 공간을 채우는 비자성 보강 구조물, 초전도성 플러터 코일 내부에 장착되는 내부 보강 구조물, 및 초전도성 코일 및 자기 요크와 열적으로 결합되는 극저온 냉동기를 구비한다.

대표도 - 도9



(52) CPC특허분류

A61N 5/1077 (2013.01)

H01F 6/06 (2013.01)

A61N 2005/1087 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

등시성 사이클로트론으로서,

중심축에 대해 대칭인 2 개 이상의 초전도성 1차 코일로서, 상기 초전도성 1차 코일은 중앙 가속 평면의 대향 측면 상에 위치하는, 2개 이상의 초전도성 1차 코일;

상기 초전도성 1차 코일을 둘러싸며 빔 챔버의 적어도 일부를 수용하는 자기 요크로서, 상기 중앙 가속 평면이 상기 빔 챔버를 통해 연장되는, 자기 요크;

상기 중앙 가속 평면의 각각의 측면 상의 복수의 초전도성 플러터 코일로서, 각각의 초전도성 플러터 코일 또는 초전도성 플러터 코일 쌍이 섹터 폴 팁으로서 작용하며, 상기 섹터 폴 팁은 중앙 가속 평면의 각 측면상의 섹터 폴 팁 사이에 골(valleys)을 구비하며, 상기 섹터 폴 팁은 껍에 의해 중앙 가속 평면을 가로 질러 분리되는, 복수의 초전도성 플러터 코일;

상기 초전도성 플러터 코일의 위치를 유지하도록 상기 초전도성 플러터 코일 사이의 골을 채우는 비자성 외부 보강 구조물;

상기 초전도성 플러터 코일 내부에 장착된 내부 보강 구조물; 과

상기 초전도성 1차 코일, 상기 초전도성 플러터 코일, 및 상기 자기 요크와 열적으로 결합된 하나 이상의 극저온 냉동기;를 포함하는,

등시성 사이클로트론.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 비자성 외부 보강 구조물이 알루미늄을 포함하는,

등시성 사이클로트론.

청구항 3

제 1항에 있어서,

제 1 크라이오스탯이 제 1 초전도성 1차 코일, 제 1 초전도성 플러터 코일, 및 제 1 비자성 외부 보강 구조물을 포함하고, 제 2 크라이오스탯이 제 2 초전도성 1차 코일, 제 2 초전도성 플러터 코일, 및 제 2 비자성 외부 보강 구조물을 포함하는,

등시성 사이클로트론.

청구항 4

제 3항에 있어서,

일체형 유지 보수 부트 조립체를 더 포함하고,

상기 일체형 유지 보수 부트 조립체는 열적으로 결합된 상기 제 1 초전도성 1차 코일 및 제 2 초전도성 1차 코일 중 적어도 하나로부터 상기 극저온 냉동기를 분리시키며, 상기 극저온 냉동기가 제거되면 상기 크라이오스탯 내의 진공을 보존하도록 구성되는,

등시성 사이클로트론.

청구항 5

제 1항에 있어서,
 상기 비자성 외부 보강 구조물은 전극 디로의 전류 리드가 통과할 수 있는 복수의 개구를 형성하는,
 등시성 사이클로트론.

청구항 6

제 1항에 있어서,
 상기 초전도성 플러터 코일이 상기 중앙 가속 평면에 평행한 평면에서 나선 형상을 가지는,
 등시성 사이클로트론.

청구항 7

제 1항에 있어서,
 상기 내부 보강 구조물은 상기 초전도성 플러터 코일보다 온도가 감소함에 따라 더 적게 수축하고, 상기 초전도성 플러터 코일은 상기 비자성 외부 보강 구조물보다 온도가 감소함에 따라 더 적게 수축하는,
 등시성 사이클로트론.

청구항 8

제 1항에 있어서,
 상기 초전도성 플러터 코일 각각의 내부 표면과 그 각각의 내부 보강 구조물 사이에, 그리고 상기 초전도성 플러터 코일 각각의 외부 표면과 200-300K 사이의 온도에 있는 상기 비자성 외부 보강 구조물 사이에 갭이 존재하는,
 등시성 사이클로트론.

청구항 9

제 1항에 있어서,
 상기 내부 보강 구조물이 구리 및 스테인리스 강으로부터 선택된 하나 이상의 금속을 포함하는,
 등시성 사이클로트론.

청구항 10

제 1항에 있어서,
 상기 초전도성 플러터 코일이 상기 중심축 주변의 3-섹터 구성 내에만 있는,
 등시성 사이클로트론.

청구항 11

제 10항에 있어서,
 단지 3 또는 6 개의 초전도성 플러터 코일이 상기 등시성 사이클로트론 내에 구비되는,
 등시성 사이클로트론.

청구항 12

제 1항에 있어서,
 상기 초전도성 플러터 코일이 상기 중심축 주변의 4 또는 그보다 많은-섹터 구성 내에 있는,
 등시성 사이클로트론.

청구항 13

제 1항에 있어서,
 상기 등시성 사이클로트론이 35톤 미만의 질량을 가지는,
 등시성 사이클로트론.

청구항 14

제 1항에 있어서,
 각각의 극저온 냉동기가 헤드를 구비하고, 각각의 극저온 냉동기의 헤드는 상기 중앙 가속 평면으로부터 이격되어 상기 자기 요크 너머에 배치되는,
 등시성 사이클로트론.

청구항 15

제 1항에 있어서,
 상기 등시성 사이클로트론이 3개 또는 4개의 초전도성 플러터 코일을 구비하고, 각각의 초전도성 플러터 코일은 섹터 폴 팁으로서 작용하는,
 등시성 사이클로트론.

청구항 16

제 1항에 있어서,
 상기 등시성 사이클로트론이 6개 또는 8개의 초전도성 플러터 코일을 구비하고, 초전도성 플러터 코일의 각각의 쌍이 섹터 폴 팁으로서 작용하며, 초전도성 플러터 코일의 각각의 쌍의 각각의 초전도성 플러터 코일에서 교변하는 전류 흐름 방향을 생성하도록, 상기 초전도성 플러터 코일이 전압 소스에 결합되는,
 등시성 사이클로트론.

청구항 17

등시성 이온 가속 방법으로서,

- a) 중심축에 대해 대칭인 2 개 이상의 초전도성 1차 코일로서, 상기 초전도성 1차 코일은 중앙 가속 평면의 대향 측면 상에 위치하는, 2개 이상의 초전도성 1차 코일;
- b) 상기 초전도성 1차 코일을 둘러싸며 빔 챔버의 적어도 일부를 수용하는 자기 요크로서, 상기 중앙 가속 평면이 상기 빔 챔버를 통해 연장되는, 자기 요크;
- c) 상기 중앙 가속 평면의 각각의 측면 상의 복수의 초전도성 플러터 코일로서, 각각의 초전도성 플러터 코일 또는 초전도성 플러터 코일 쌍이 섹터 폴 팁으로서 작용하며, 상기 섹터 폴 팁은 중앙 가속 평면의 각 측면상의 섹터 폴 팁 사이에 골(valleys)을 구비하며, 상기 섹터 폴 팁은 겹에 의해 중앙 가속 평면을 가로 질러 분리되는, 복수의 초전도성 플러터 코일;
- d) 상기 초전도성 플러터 코일의 위치를 유지하도록 상기 골을 채우는 외부 보강 구조물;
- e) 상기 초전도성 플러터 코일 내부에 장착된 내부 보강 구조물;
- f) 상기 초전도성 1차 코일 및 플러터 코일, 및 상기 자기 요크와 열적으로 결합된 하나 이상의 극저온 냉동기; 및
- g) 상기 빔 챔버 내에 장착되고 무선주파수 전압 소스와 결합되는 복수의 전극;

을 포함하는 등시성 사이클로트론을 사용하는 단계;

내부 반경에 있는 상기 중앙 가속 평면 내부로 이온을 유입시키는 단계;

상기 중앙 가속 평면을 가로질러 팽창하는 궤도로 고정된 주파수에서 상기 이온을 가속시키기 위하여, 상기 무선주파수 전압 소스로부터 상기 전극으로 전압을 제공하는 단계;

상기 극저온 냉동기로 상기 초전도성 1차 코일 및 상기 초전도성 플러터 코일을 냉각시키는 단계로서, 상기 초전도성 1차 코일 및 플러터 코일이 그 초전도성 변이 온도 이하의 온도까지 냉각되는, 초전도성 1차 코일 및 초전도성 플러터 코일 냉각 단계;

상기 초전도성 1차 코일 및 상기 자기 요크로부터 상기 중앙 가속 평면 내의 자기장을 반경 방향으로 증가시키는 초전도성 전류를 상기 초전도성 1차 코일 내에 생성시키기 위하여, 냉각된 상기 초전도성 1차 코일에 전압을 제공하는 단계;

상기 초전도성 플러터 코일 내에 초전도성 전류를 생성시키기 위해, 냉각된 상기 초전도성 플러터 코일에 전압을 제공하는 단계; 및

외부 반경에서 빔 챔버로부터 가속된 이온을 추출하는 단계;를 포함하는,

동시성 이온 가속 방법.

청구항 18

제 17항에 있어서,

가속된 이온이 10-250 MeV의 에너지에 도달하는,

동시성 이온 가속 방법.

청구항 19

제 17항에 있어서,

상기 자기 요크는 이온이 가속될 때 200K를 넘는 온도에서 유지되는,

동시성 이온 가속 방법.

청구항 20

제 17항에 있어서,

상기 동시성 사이클로트론이 초전도성 플러터 코일과 동일한 개수의 전극을 구비하고, 상기 전극은 상기 중심축 주위에서 상기 초전도성 플러터 코일 사이에서 각을 두고 배치되는,

동시성 이온 가속 방법.

청구항 21

제 17항에 있어서,

추출된 상기 이온을 인간 환자의 종양에 지향시키는 단계를 더 포함하는,

동시성 이온 가속 방법.

청구항 22

제 21항에 있어서,

추출된 이온의 빔이 펜슬 빔 스캐닝을 통해서 상기 종양을 가로질러 스캔되는,

동시성 이온 가속 방법.

청구항 23

제 22항에 있어서,

상기 펜슬 빔 스캐닝 프로세스가 10초 이내에 완료되는,

동시성 이온 가속 방법.

청구항 24

제 22항에 있어서,
 상기 펜슬 빔 스캐닝 프로세스가 5초 이내에 완료되는,
 등시성 이온 가속 방법.

청구항 25

제 17항에 있어서,
 외부 전자 사이클로트론 공명 이온 소스로부터 상기 이온을 주입함으로써, 상기 이온이 상기 중앙 가속 평면으로 유입되는,
 등시성 이온 가속 방법.

청구항 26

제 17항에 있어서,
 추출된 상기 이온이 220 MeV 이상의 에너지를 가지는 양성자인,
 등시성 이온 가속 방법.

청구항 27

제 17항에 있어서,
 상기 등시성 사이클로트론이 상기 중앙 가속 평면 내에 3.5 T 보다 큰 중심 자기장을 생성시키는,
 등시성 이온 가속 방법.

청구항 28

제 17항에 있어서,
 상기 등시성 사이클로트론이 6개 또는 8개의 초전도성 플러터 코일을 구비하고, 초전도성 플러터 코일의 각각의 쌍이 섹터 폴 팁으로서 작용하며, 상기 초전도성 플러터 코일에 제공된 전압이, 각각의 쌍의 각각의 초전도성 플러터 코일에서 교번하는 전류 흐름 방향을 생성하는,
 등시성 이온 가속 방법.

발명의 설명

기술 분야

배경 기술

[0001] 한 쌍의 전극 및 자석 구조물로부터 전기장 임펄스를 사용하여 바깥쪽으로 나가는 나선형(outward spiral)으로 이온(하전 입자)을 가속시키는 사이클로트론이 미국 특허 제 1,948,384 호 (발명자 : 어니스터 오. 로렌스 (Ernest O. Lawrence), 특허 공개 연도 : 1934년)에 개시되어 있다. 로렌스의 가속기 설계는 이제 일반적으로 "고전적" 사이클로트론으로 불리는데, 여기서는 전극이 고정 가속 주파수를 제공하고 반경이 증가함에 따라 자기장이 감소하여 궤도 이온의 수직 위상 안정성을 유지하기 위한 "약한 포커싱(weak focusing)"을 제공한다.

[0002] 현대의 사이클로트론 중에서 한 종류는 "등시성(isochronous)"으로 특징지어지는 부류인데, 여기서는 고전적인 사이클로트론과 같이 전극에 의해 제공되는 가속 주파수는 고정되어 있지만 상대성을 보상하기 위해 반경이 증가함에 따라 자기장이 증가하며; 섹터 주기성을 갖는 콘투어드(contoured) 철주(iron pole) 피스로부터 유도된 방위적으로 변하는 자기장 성분을 통해 이온 가속 중에 축 방향 복원력이 가해진다. 대부분의 등시성 사이클로트론은 저항성 자석 기술을 사용하고 1-3 테슬라의 자기장 레벨에서 작동한다. 일부 등시성 사이클로트론은 초전도성 자석 기술을 사용하는데, 여기서는 초전도성 코일이 이온 가속을 위한 가이드 및 포커싱 자기장들을 제공하는 고온 철주(iron pole)를 자화시킨다. 이러한 초전도성 등시성 사이클로트론은 양성자에 대해서는 3 테슬

라 미만의 자기장 레벨에서 작동할 수 있으며, 더 무거운 이온을 가속시키기 위해 설계된 경우에는 3-5 테슬라 이하의 자기장 레벨에서 작동할 수 있다. 본 발명자는 1980 년대 초 미시건 주립대학(Michigan State University)에서의 첫번째 초전도성 사이클로트론 프로젝트에서 일했다.

[0003] 본 발명자에 의한 등시성 사이클로트론에 대한 또 다른 최근의 설계는 미국 특허 제 8,558,495 B2에 기술되어 있다. 이 특허에서는 요크와 열 접촉하는 초전도성 주 코일을 구비하는 소형 저온 초전도성 등시성 사이클로트론을 기술하는데, 여기서는 주 코일 및 요크 모두가 극저온에서 유지된다.

[0004] 사이클로트론의 또 다른 부류는 싱크로사이클로트론(synchrocyclotron)이다. 고전적인 사이클로트론 또는 등시성 사이클로트론과는 달리, 싱크로사이클로트론에서의 가속 주파수는 이온이 바깥쪽으로 나선형으로 움직일수록 감소한다. 또한 등시성 사이클로트론과는 달리 - 하지만 고전적인 사이클로트론과 마찬가지로 - 싱크로 사이클로트론의 자기장은 반경이 증가함에 따라 감소한다. 싱크로사이클로트론은, 기존의 초전도성 등시성 사이클로트론과 마찬가지로, 고온 철주와 저온 초전도성 코일을 사전에 가지고 있지만, 가속 중에는 더 높은 자기장으로 조정된 다른 방식으로 빔 포커싱을 유지하고, 이에 따라, 예를 들어 약 9 테슬라의 자기장으로 작동할 수 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

과제의 해결 수단

[0005] 등시성 사이클로트론 및 등시성 사이클로트론을 사용하여 이온을 가속시키는 방법이 본원에 설명되며, 여기서 장치 및 방법의 다양한 실시예는 이하에 설명되는 요소, 특징 및 단계의 일부 또는 전부를 포함할 수 있다.

[0006] 본원에 기술된 등시성 사이클로트론은 중심축에 대해 실질적으로 대칭인 2 개 이상의 초전도성 코일을 포함하며, 상기 코일은 중앙 가속 평면의 대향 측면 상에 있다. 자기 요크는 코일을 둘러싸고 빔 챔버의 적어도 일부를 수용하며, 중앙 가속 평면은 빔 챔버를 통해 연장한다. 복수의 초전도성 플러터 코일이 중앙 가속 평면의 각 측면 상에 있다. 각각의 초전도성 플러터 코일 또는 초전도성 플러터 코일의 쌍은 섹터 폴 팁(sector pole tip)으로서 작용하며, 상기 섹터 폴 팁은 중앙 가속 평면의 각 측면상의 섹터 폴 팁 사이에 골(valleys)을 구비하며, 상기 섹터 폴 팁은 중앙 가속 평면을 가로 질러 상기 골을 분리하는 비자성 갭(빈 공간 또는 비자성 물질의 형태)보다 더 좁은 갭에 의해 중앙 가속 평면을 가로 질러 반경 방향으로 분리된다. 초전도성 플러터 코일의 위치를 유지하기 위해 비자성 보강 구조물이 플러터 코일 사이의 골을 채운다. 내부 보강 구조물이 플러터 코일 내부에 장착되며; 극저온 냉동기(극저온 냉각기(cryocooler))가 초전도성 코일 및 자기 요크와 열적으로 결합된다.

도면의 간단한 설명

[0007] 도 1은 각각의 크라이오스탯 내의 비자성 보강 구조물(62) 내에 매설된 초전도성 플러터 코일(21)을 구비하는 이중 크라이오스탯 및 베이스 플레이트를 갖는 등시성 사이클로트론의 부분적인 측 단면도이다.

도 2는 도 1의 등시성 사이클로트론으로부터의 크라이오스탯(56), 베이스 플레이트(13) 및 빔 챔버(24)의 확대도이다.

도 3은 도 1의 등시성 사이클로트론에서의 요크 (10) 및 1차 코일 (30, 32)의 측 단면도이며, 여기서 표시된 측정값은 mm 단위이다.

도 4는 등시성 사이클로트론의 중심축(28)을 따라 장착된 고강도 외부 이온 주입기의 측 단면도의 스케치이다.

도 5는 등시성 사이클로트론 내부의 이온 궤도에 대한 기준 측 프레임의 스케치이다.

도 6은 등시성 사이클로트론의 이중-크라이오스탯 구조의 사시도로서, 각각의 크라이오스탯(56)은 알루미늄 지지 구조물에 수용된 초전도성 플러터 코일을 수용하는 베이스 플레이트를 수용하는 보빈을 구비한다.

도 7은 도 6의 크라이오스탯(56)의 상부 섹션(90)의 평면도로서, 도 8에 도시된 단면 평면을 도시한다.

도 8은 도 7에 도시된 단면 8-8을 따라 취해진 측 단면도로서, 초전도성 코일 및 보빈(11)과 (초전도성 플러터 코일(21) 및 정합성(conforming) 알루미늄지지 구조물을 구비하는) 베이스 플레이트(13)를 수용하는 이중 크라

이오스텟(56)을 도시한다.

도 9는 크라이오스텟 내부에 수용된 베이스 플레이트 어셈블리의 사시도로서, 베이스 플레이트 조립체는 베이스 플레이트(13), 1차 코일(30) 및 보빈(11)을 포함한다.

도 10은 도 9에 도시된 베이스 플레이트 조립체의 평면도이다.

도 11은 초전도성 1차 코일(30)과 플러터 코일(21) 및 보빈(11)을 구비한 베이스 플레이트(13)의 측 단면도이며, 표시된 측정치는 mm 단위이다.

도 12는 초전도성 코일(21, 30)과 보빈(11)을 구비한 베이스 플레이트(13)의 평면도이며, 도 11의 단면도가 취해진 섹션(A-A)를 도시한다.

도 13은 1차 코일(30/32)의 단면도이다.

도 14는 도 13의 코일(30/32)의 확대 단면도이다.

도 15는 등시성 사이클로트론(85)의 일 실시예의 단면도이다 (여기에서 그리고 다른 도면에서, 표시된 치수는 mm 단위이다).

도 16은 도 15의 원형 부분의 확대도이다.

도 17은 등시성 사이클로트론의 일 실시예의 측면도이다.

도 18은 도 17의 등시성 사이클로트론의 평면도이다.

도 19는 등시성 사이클로트론의 일 실시예의 (6 개의 플러터 코일(21)을 포함하는) 냉각체의 구성 요소의 사시도 및 분해도를 포함한다.

도 20은 축 방향 지지부를 구비하는 도 19의 냉각체의 구성 요소의 사시도 및 분해도를 포함한다.

도 21은 등시성 사이클로트론의 일 실시예의 크라이오스텟 열 차폐부(55)의 사시도 및 부분적인 분해도를 포함한다.

도 22는 등시성 사이클로트론의 일 실시예의 크라이오스텟 조립체의 사시도 및 분해도를 포함한다.

도 23은 등시성 사이클로트론의 일 실시예의 상부 반부(80)의 사시도 및 분해도를 포함한다.

도 24는 등시성 사이클로트론의 일 실시예의 사시도 및 이 등시성 사이클로트론의 분리된 상부 반부(80) 및 하부 반부(81)를 도시하는 분해도를 포함한다.

도 25는 채킹 시스템(87)을 구비하는 사이클로트론의 상부 및 하부 반부를 도시한다.

도 26은 등시성 사이클로트론의 일 실시예의 단면을 도시한다.

도 27은 등시성 사이클로트론의 일 실시예의 자석 철심 요크(10)의 단면도를 도시한다.

도 28 및 도 29는 등시성 사이클로트론의 일 실시예에 대한 3-섹터, 6-플러터 코일 구성을 도시한다.

도 30은 등시성 사이클로트론의 일 실시예에서 사용하기 위한 6 개의 무선 주파수 (RF) 전극 디스크 하나를 도시한다.

도 31은 등시성 사이클로트론에 사용하기 위한 디스크 조립체의 일 실시예에 대한 제조 및 조립 공정을 도시한다.

도 32는 등시성 사이클로트론의 일 실시예의 제조 및 조립의 추가적인 단면도를 도시한다.

도 33은 등시성 사이클로트론의 일 실시예에 사용되는 플러터 코일(21)을 도시한다.

도 34는 도 33의 플러터 코일(21)의 단면도를 도시하여, 플러터 코일(21)을 형성하는 와이어 권선의 원형 단면을 도시한다.

도 35는 등시성 사이클로트론의 일 실시예에서의 플러터 코일(21) 위의 RF 디스크의 오버레이를 도시한다

도 36은 외부 ECR 이온 주입기의 일 실시예의 단면도를 도시한다.

도 37은 ECR 이온 소스(82)의 일 실시예의 스케치이다.

도 38은 ECR 이온 소스(82)로부터 빔 챔버로 향하는 도중의 이온 빔(77)을 포커싱하기 위해 사용되는 아인젤 렌

즈(75)의 3 개의 전극 주변의 전압 등전위 등고선(97) 및 이온 빔 추출 구조를 도시한 도면이다.

도 39는 3-플러터-코일 구성의 평면도이다.

도 40은 6-플러터-코일 구성의 평면도이다.

도 41은 수평으로 장착된 극저온 냉각기(38)의 평면도이다.

도 42는 수직으로 장착된 극저온 냉각기(38)의 측면도이다.

첨부된 도면에서, 동일한 참조 부호는 다른 도면 전반에 걸쳐 동일하거나 유사한 부분을 나타내며; 아포스트로피(apostrophes)는 동일한 참조 번호를 공유하는 동일하거나 유사한 항목의 여러 예를 구별하는 데 사용된다. 도면은 반드시 축척이 맞지는 않으며; 그 대신, 아래에 논의된 예시에서의 특정 원리를 설명하는 데 중점을 두었다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0008] 본 발명(들)의 다양한 태양의 전술한 특징 및 이점과 다른 특징 및 이점은 본 발명(들)의 더 넓은 범위 내의 다양한 개념 및 구체적인 실시예에 대한 이하의 보다 상세한 설명으로부터 명백해질 것이다. 위에서 소개되고 아래에서 더욱 상세하게 논의되는 주제의 다양한 태양은, 상기 주제가 임의의 특정 구현 방식에 제한되지 않기 때문에 다양한 방식 중 임의의 방식으로 구현 될 수 있다. 구체적인 구현 및 응용의 예는 주로 예시를 위해 제공된다.
- [0009] 본원에서 정의되거나 사용되거나 특성화되지 않는 한, 본원에 사용된 용어 (기술 및 과학 용어 포함)는 관련 기술의 맥락에서 해당 용어의 허용된 의미와 일치하는 의미를 갖는 것으로 해석되어야 하며, 본원에서 명시적으로 그렇게 정의되지 않는 한, 이상적이거나 지나치게 형식적인 의미로 해석되지 않아야 한다. 예를 들어, 특정 조성이 참조되는 경우, 실제적이고 불완전한 현실이 적용될 수 있기 때문에, 이러한 구성은, 완전히 순수하지는 않지만, 실질적으로 순수할 수 있다; 예를 들어, 적어도 미량의 불순물 (예를 들어, 1 또는 2 % 미만)의 존재 가능성은 설명의 범위 내에 있는 것으로 이해 될 수 있으며; 마찬가지로, 특정 형상이 참조되는 경우, 이러한 형상은, 예를 들어 제조 공차 때문에, 이상적인 형상으로부터의 불완전한 변화를 포함하는 것으로 의도된다. 본원에 표현된 백분율 또는 농도는 무게에 의한 것 또는 부피에 의한 것 중 하나를 나타낼 수 있다. 아래에서 설명하는 공정, 절차 및 현상은, 달리 특정되지 않는 한, 주변 압력 (예를 들어, 약 50-120 kPa - 예를 들어, 약 90-110 kPa) 및 온도 (예를 들어, -20 ~ 50 °C - 예를 들어, 약 10 ~ 35 °C)에서 발생할 수 있다.
- [0010] 제 1, 제 2, 제 3 등의 용어는 다양한 요소를 설명하기 위해 본원에서 사용될 수 있지만, 이들 요소는 이들 용어에 의해 제한되지 않는다. 이들 용어는 단순히 하나의 요소를 다른 요소와 구별하기 위해 사용된다. 따라서, 이하에서 논의되는 제 1 요소는 예시적인 실시예의 교시(teaching)를 벗어나지 않고 제 2 요소로 지칭될 수 있다.
- [0011] "위", "아래", "왼쪽", "오른쪽", "앞에서", "뒤에서" 등과 같은 공간적으로 상대적인 용어는, 도면에 도시된 바와 같이, 한 요소의 다른 요소에 대한 관계를 설명하기 위한 설명의 편의로 본원에 사용될 수 있다. 도시된 구성 뿐만 아니라 공간적으로 상대적인 용어는, 도면에 도시된 그리고 본원에 기술된 방위에 부가하여 사용 또는 작동시 장치의 상이한 방위를 포함하도록 의도된 것으로 이해될 것이다. 예를 들어, 도면의 장치가 뒤집힌다면, 다른 요소 또는 특징의 "아래에(below)"또는 "밑에(beneath)"로 기술된 요소는 다른 요소 또는 특징의 "위에" 배향될 것이다. 따라서, 예시적인 용어 "위에"는 위와 아래의 방향 모두를 포함할 수 있다. 장치는 다른 방향으로 배향될 수 있고 (예를 들어, 90도 또는 다른 배향으로 회전될 수 있음), 본원에서 사용된 공간적으로 상대적인 기술용어는 이에 따라 해석될 수 있다.
- [0012] 또한, 본 명세서에서, 한 요소가 다른 요소 "상에(on)", "에 연결된(connected to)", "에 결합된(coupled to)", "와 접촉한(in contact with)" 등의 상태로 언급되는 경우에, 달리 특정되지 않는 한, 상기 한 요소는 직접적으로 상기 다른 요소 상에 있을 수 있거나, 직접적으로 상기 다른 요소에 연결될 수 있거나, 직접적으로 상기 다른 요소에 결합될 수 있거나, 직접적으로 다른 요소와 접촉할 수 있거나, 또는 매개하는 요소(intervening element)가 존재할 수 있다.
- [0013] 본원에서 사용되는 용어는 특정 실시예를 설명하기 위한 것이며 예시적인 실시예를 제한하려는 것이 아니다. 본원에서 사용될 때, "a" 및 "an"과 같은 단수 형태는 문맥이 달리 나타내지 않는 한, 복수 형태 또한 포함하고자 한다. 또한, 용어 "구비하다(includes)", "구비하는(including)", "포함하다(comprises)" 및 "포함하는

(comprising)"은 명시된 요소 또는 단계의 존재를 나타내지만 하나 또는 그보다 많은 다른 요소 또는 단계의 존재 또는 추가를 배제하지는 않는다.

[0014] 또한, 본원에서 확인된 다양한 구성 요소는 조립 및 완성된 형태로 제공 될 수 있다; 또는 구성 요소의 일부 또는 전부가 함께 패키징되어 완성된 제품을 생산하기 위해 고객이 변경 및/또는 조립할 수 있도록 (예를 들어, 서면, 비디오 또는 오디오 형태의) 설명과 함께 키트로서 판매 될 수 있다.

[0015] ● 용어 색인:

[0016] 등시성 이온 가속의 맥락에서 사용되는 다음 변수가 후속하는 본문에서 참조될 수 있다.

[0017] B_z = 중앙 가속 평면(26)에 수직인 자기장;

[0018] E_0 = 이온의 정지 질량 에너지;

[0019] f = 자기 플러터 폴 팁에 의해 제공되는 자기 플러터;

[0020] f_{rms} = 플러터 장의 평균평방근;

[0021] F_z = 중앙 가속 평면(26)에 수직인 자기력;

[0022] m = 이온 질량;

[0023] m_0 = 이온의 정지 질량;

$$n = -\frac{r}{B} \left(\frac{dB}{dr} \right) < 0$$

[0024] n = 자기장 색인 파라미터; 등시성 사이클로트론에서,

[0025] p = 이온 모멘텀;

[0026] q = 이온 전하;

[0027] r = 중심축(28)로부터의 반경;

[0028] t = 시간;

[0029] T = 가속 이온의 운동 에너지;

[0030] V_0 = 고정 가속 전압;

[0031] V_e = 전극 전압;

[0032] a = 이온의 모멘텀 컴팩션 (반경의 함수로서 모멘텀이 변하는 정도);

[0033] $\chi(r)$ = 반경의 함수로서 가속에 따른 입자-질량 이득에 대한 상대론적 인자;

[0034] ζ = 나선형 예지 각도;

[0035] θ = 중심축(28)에 대한 이온의 각 좌표;

[0036] v_z = 중앙 가속 평면(28)에 수직인 가속 이온의 진동 주파수;

[0037] v_r = 가속 이온의 반경 방향 진동 주파수;

[0038] τ = 가속 이온의 회전 주기;

[0039] $\sin \phi$ = 이온이 가속 갭을 넘을 때의 사인파 전압 (= $\omega t - \theta$);

[0040] ω = 이온의 각속도.

[0041] N = 자기 극 당 동일한 각 자기 플러터 섹터의 개수인 등시성 사이클로트론 섹터 수.

[0042] ● 양성자 요법에 대한 등시성 사이클로트론의 응용

[0043] 본원에 설명된 사이클로트론 및 방법이 적용될 수 있는 한 가지 중요한 응용 분야는 암 환자에게 제공되는 양성

자 요법을 위한 것이다.

- [0044] 양성자는 X-선보다 더 정확한 종양 치료를 제공할 수 있어 환자에게 전반적인 방사선 선량을 감소시킬 수 있다. 특히, 종양을 넘어 뒤의 정상적인 건강한 조직 안으로 확장되는 출구 선량이 없고; 종양 앞의 정상적인 건강한 조직에는 상당히 낮은 선량이 침전된다.
- [0045] 양성자 요법의 바람직한 현재 모드는 작은 직경의 양성자 빔이 종양의 후방(가장 높은 에너지가 요구 됨)으로부터 종양의 전방(더 낮은 에너지)까지 층 단위로(layer by layer) 종양을 가로질러 래스터(raster) 스캔되는 펜슬-빔(pencil-beam) 스캐닝이다. 양성자 빔 강도는 빔이 낮은 에너지로 열화되어 레이어 위로 올라갈 때 손실된다. 큰 종양의 경우, 이러한 손실은 천배 단위(a factor of a thousand)일 수 있다. 이러한 강도 손실 때문에, 전체 치료는 더 오래 걸린다 (예를 들어, 수십 초에서 2 분). 치료 중 환자가 움직이면 종양도 움직여서 고 정밀도의 양성자 치료의 긍정적인 효과를 감소시킨다.
- [0046] 종양을 추적하고 양성자 빔 경로를 조정하여 종양의 움직임을 추적하기 위한 노력이 진행되고 있지만, 이 방법은 많은 기술 개발을 필요로 할 것이며 매우 비쌀 것으로 예상된다. 종양이 완전히 정지 상태에 있을 때 (예를 들어, 약 3-4 초 내에) 초고속 펜슬 빔 스캐닝을 통해 환자의 한 번 호흡 참기 동안 안에 전체 치료를 완료하는 것이 더 유리할 것이다. 이 속도를 달성하는 것은 공지된 현재의 양성자 요법 가속기의 능력을 증가하는 양성자 빔 강도를 필요로 한다고 믿어진다.
- [0047] 현재-기술의 연속파(continuous-wave; CW) 사이클론은 양성자-빔 생성 기술 [즉, 사이클로트론의 중심에 있는 내부 페닝(Penning) (또는 PIG) 이온 소스]을 사용하는데, 이는 초고속 펜슬-빔 스캐닝에 불충분하다. 내부 페닝 이온 소스는 며칠 간의 사용 후에 마모되는 다루기 힘든(refractory) 음극을 가지고 있어서, 사용된 음극을 교체하고 양성자 요법에 필요한 높은 품질과 안정성으로 양성자 빔을 복원하기 위해 사이클로트론을 재조정하기 위한 사이클로트론 정지시간을 필요로 한다. 내부 페닝은 사이클로트론 중심부에서의 가스 부하를 또한 제공하는데, 이러한 가스 부하로 인해서 RF 가속 시스템이 불규칙한 간격으로 스파크 및 섯다운을 일으킬 수 있기 때문에, 이러한 가스 부하는 사이클로트론의 작동 및 안정성에 악영향을 미치게 된다 - [티.에이. 안타야(T.A. Antaya) 등, "NSCL K-500 초전도성사이클로트론을 위한 중이온 PIG 소스 개발", 제10회 국제 컨퍼런스 사이클로트론과 그 응용분야, 이. 랜싱(E. Lansing) 126-129 (1984)에 설명 된 바와 같이] 특히 높게 대전된 중이온 빔에 사용된 RF 가속 시스템에 영향을 미치게 된다. 또한, PIG 이온 소스는 초고속 펜슬 빔 스캐닝에 충분한 양성자 강도의 양성자 빔을 만들 수 없다.
- [0048] 본원에 기술된 사이클로트론 설계는 사이클로트론(85)에 주입된 초기 양성자 빔을 생성하기 위해 전자 사이클로트론 공명 (ECR) 이온 소스(82)로 지칭되는 진보된 무-음극(cathode-free) 제한적 플라즈마 빔 기술을 이용하여 보다 높은 강도의 양성자 소스를 제공할 수 있다. ECR 이온 소스(82)는 매우 작은 단면을 갖는 빔에서 주로 양성자 형태로 이온을 생성할 수 있다. 공지된 현재 기술의 사이클로트론 중 어떤 것도 이 진보된 이온 발생 기술을 이용하여 양성자 빔을 생성하지 않는데, 그 이유는 소스가 반드시 사이클로트론 (85)의 외부에 있어야 해서, 가속이 시작되는 사이클로트론(85)의 중심으로 양성자 빔을 전달하기 위한 주입 체계가 필요하기 때문이다. ECR 이온 소스(82)를 사용하면 펜슬-빔 스캐닝에 사용할 수 있는 강도를 크게 높일 수 있어, 치료 중 사이클로트론의 불안정성, RF 스파크 및 음극 교체 유지 보수로 인한 정지시간, 그리고 양성자 요법 치료를 위한 고품질 양성자 빔을 생산하기 위한 후속적인 사이클로트론 재조정을 없애면서도, 처음으로 초고속 펜슬-빔 스캐닝을 가능하게 한다.
- [0049] 현재 기술의 CW 등시성 사이클로트론은, 저항성 자석을 포함하건 초전도성 자석을 포함하건 간에, 3 테슬라 미만의 자기장으로 제한될 수 있다. 이 비교적 낮은 자기장 크기는 사이클로트론을 크고 비싸게 만든다. 결과적으로 필요에 비해 완전한 시스템(total systems)은 거의 없으며; 암 환자의 5% 미만이 이에 접근할 수 있다.
- [0050] CW 등시성 사이클로트론은 매 RF 사이클마다 (초당 수백만 번) 사이클로트론을 빠져 나오는 양성자를 가지고 있어서, 사이클로트론으로부터 1,000 개보다 많은 저-강도 펄스로 층을 다시 칠할 수 밀리 초의 층 스캔을 제공한다. 이러한 반복은 종양이 빔으로 여러 번 다시 칠해지도록 보장하여 이 층 스캔 중에 이 층 상에 있는 어떠한 종양 부분도 놓치지 않도록 보장한다.
- [0051] 일반적으로, 펜슬-빔 스캐닝은 고자장(high-field) 소형 초전도성 사이클로트론을 사용하는 경우에도 저-강도, 저-듀티 팩트(duty fact) 싱크로사이클로트론으로 쉽게 수행할 수 없다. 이러한 장치에서는 초고속 펜슬 빔 스캐닝을 전혀 하지 못하게 된다. 기존의 싱크로사이클로트론은 또한, 모든 관련 부작용을 가지면서, 내부 페닝 이온 소스를 사용하여 초기 양성자 빔을 생성한다.

- [0052] CW 등시성 사이클로트론은 더 작고 더 저렴하게 제조될 수 있다. 작동 자기장 레벨을 2 테슬라에서 4 테슬라로 두 배로 늘리면 비용을 1/3 로 줄이고, 이러한 비용 절감은 더 많은 암 환자에게 이러한 인명 구조용 정밀 치료법의 유용성을 크게 향상시킬 것이다.
- [0053] CW 등시성 사이클로트론은 다음 세 가지를 달성함으로써 더욱 컴팩트하게 제조될 수 있다: (1) 중심에서 최종 에너지가 달성될 반경까지 등시성 가속을 달성하기 위해 정확한 반경 프로파일을 자기장에 제공함; (2) 전체 가속에 대해 축 방향 빔 안정성을 제공하기 위해 빔 챔버(24)에서, 자기장의 방위각 변화 인 "플러터(flutter)"로 지칭되는 정확한 축 방향 분포를 자기장에 제공함; (3) 양성자를 사이클로트론 중심에서의 낮은 에너지로부터 최종 반경에서의 최대 에너지로 가속시키기에 충분한 시변(time-varying) 전압 및 주파수의 RF 가속 구조 세트의 설치 및 작동을 허용하기에 충분한 빔 챔버(24) 내의 갭을 제공함. 또한 양성자 요법은, 대부분 물을 포함하는 평균 인간의 내부의 종양에 도달하기에 필요하다고 여겨지는 깊이인, 물에서 20 cm의 양성자 범위에 해당하는 최소 230 MeV의 최종 양성자 에너지를 사용하며, 차세대 초고속 펜슬 빔 스캐닝에 필요한 강도 수준을 달성하고, 다중 주사 층으로 큰 종양 전체를 거꾸로(back to front) 치료하기 위해, 고강도 양성자 빔이 외부 ECR 이온 소스(82)로부터 사이클로트론(85)으로 주입된다.
- [0054] 공지된 현-세대 사이클로트론에서, 양성자 요법에 필요한 최종 에너지에 더하여, 이러한 3개의 기본적인 등시적인 사이클로트론 요건 세트는 약 2.5T보다 큰 중심 자기장을 갖는 CW 등시성 양성자 사이클로트론에 대해서는 달성되지 않았다. 결과적으로, 이들 사이클로트론은 크기가 커서 조립된 상태에서는 사실상 운송될 수 없으며; 또한 이들 사이클로트론은 무겁다 (예컨대, 100 톤 내지 250 톤 또는 90,700 kg 내지 226,800 kg). 이러한 사이클로트론은 또한, 현재의 (열등한) X-선 치료 시스템과 달리, 사실상 모든 커뮤니티(community)에 광범위하게 배포하기에는 너무 비싸다.
- [0055] 공지된 현재-기술의 양성자 요법용 CW 등시성 사이클로트론 중 어떠한 것도 무-음극 외부 ECR 이온 소스(82)로부터의 고강도 양성자 빔 주입을 허용하도록 구성되어 있지 않다.
- [0056] 본원에 기술된 등시성 사이클로트론(85)은 4T보다 큰 중심 자기장 및 35 톤 미만의 질량을 갖는 230 MeV CW 등시성 사이클로트론(85)에서의 초고속 펜슬 빔 스캐닝에 대한 이들 5개 요건 모두를 동시에 해결할 수 있어서, 기존의 X-ray 치료 시스템의 배치와 유사하게, 사실상 모든 커뮤니티에 배치될 수 있으며 본질적으로 어디에서도 완전히 조립되어 운송될 수 있을 만큼 전체 엔빌로프(envelope)가 충분히 작은, 소형의 저렴한 시스템을 얻을 수 있게 한다. 치료가 필요한 사람들은 매우 아프기 때문에 가장 커뮤니티에서 빠르고 정확하며 저렴한 비용으로 우수한 치료를 제공하는 것이 매우 유용할 수 있다.
- [0057] ● 등시성 사이클로트론의 설계
- [0058] 등시성 사이클로트론(85)의 실시예가 다양한 사시도 및 단면도로서 도1-3 및 도6-12에 도시되어 있다. 도 3 및 도 8 내지 도 10에 도시된 바와 같이, 등시성 사이클로트론(85)은 초전도성 1차 코일(30, 32); 한 쌍의 극(12, 14) 및 리턴 요크(22)를 구비하는 자기 요크(10); (예를 들어, 2의 나선 상수를 갖는 아르키메데스 나선의 경로를 따르는 에지를 갖는) 복수의 초전도성 나선형 플러터 코일(21)을 구비하는 베이스 플레이트(13); 상기 플러터 코일(21)을 둘러싸는 비자 성 외부 보강 구조물(62); 및 상기 플러터 코일(21) 내부의 내부 보강 구조물(60)을 구비한다. 요크(10)는 이온 가속을 위한 중앙 가속 평면(26)이 통과하는 빔 챔버(24)의 적어도 일부를 포함한다. 극(12, 14)은 중앙 가속 평면(26)을 가로 질러 대략 거울 대칭을 나타내고, 복귀 요크(22)에 의해 자기 요크(10)의 둘레부에 결합된다. 중심축(28) 주변에 있는 요크(10)의 절개부(cutouts)(96)는 사이클로트론(85)에서 등시성 이온 가속에 필요한 자기장 프로파일에 대한 자기장 형태를 제공한다.
- [0059] 한 쌍의 초전도성 1차 코일(30, 32)은 빔 챔버(24) 내에 자기장을 발생시키고, 중앙 가속 평면(26)의 대향 측면 상에 위치되고, 그 중심에 있는 중심축(28)을 둘러싼다. 초전도성 1차 코일 (30, 32)의 단면도가 도 13 및 도 14에 도시되어 있으며, 도 14는 도 13의 표시된 부분의 확대도이다. 도 14에 도시된 바와 같이, 1차 코일 (30/32)의 권선(31)은 S2 유리 절연체에 의해 분리되어 있고; 초전도체 선의 외부 권선(31)은 권선 공정에 의해 생성된 주변부의 갭을 채우는 스페이서(35)에 의해 둘러싸여 있으며; 그라운드 랩(ground wrap)(37)은 주변부에서 스페이서(35)를 둘러싸고 있다. 각 초전도체 선은 초전도체가 (예를 들어 크라이오스탯(cryostat)(56)에서의 진공 손실로 인해서) 작동 중 정상 (비-초전도성) 온도에 흡사라도 도달하면 전류를 전달할 수 있는 U형 전도성 (예를 들어, 구리) 채널로 싸여 있다. 1차 코일 (30, 32)은 높은 인덕턴스를 갖도록 설계된다 (예를 들어, 코일의 인덕턴스, L_{coil} 은 30H보다 클 수 있다). 특정 실시예에서, 1차 코일 (30 및 32)은 각각 (도 13의 이미지에서 수평적으로 카운트 된) 27 개의 열의 권선(31) 및 (도 13의 이미지에서 수직적으로 카운트 된) 71 개 행의 권선

(31)을 가질 수 있으며; 각각의 1 차 코일 (30/32)은 중앙 가속 평면(26)으로부터 57 mm 이격될 수 있다.

[0060] 초전도성 1 차 코일(30, 32)에는 후술하는 바와 같이 전압 소스와 결합된 저온 도전성 전류 리드를 통해 전류가 공급된다. 한편, 극저온 냉각은, 예를 들어 도 9 및 10에 도시된 바와 같이, 극저온 냉각기(38)의 제 2 단(52)의 단부에서 보빈(11)에 볼트로 결합되고 보빈(11)을 덮는 크라이오스탯(56)의 섹션(88)에 있는 절개부(cutouts) (94)을 통해 공급된 극저온 냉각기(38)를 통해 제공되고, 또한, 1차 코일(30, 32)에 전달되어 코일(30, 32)을 그 임계 온도 아래까지 극저온으로 냉각하고, 마찬가지로 초전도성 플러터 코일(21)을 포함하여 보빈(11)과 베이스 플레이트(13)를 냉각시킨다. 도 8 내지 도 12에 도시된 바와 같이, 보빈(11)은 1 차 코일(30/32)과 비자성 외부 보강 구조물(62) 모두를 둘러싸고 이들과 수평을 이루어 기계적 지지 및 봉쇄(containment)를 제공한다. 보빈(11)은 예를 들어 알루미늄으로 형성될 수 있다. 베이스 플레이트(13), 초전도성 1 차 코일(30) 및 보빈(11)의 예시적인 치수가 도 11에 (밀리미터 단위로) 도시되어 있으며, 도 11은 도 12에 도시된 A-A 단면을 따라 취한 단면도이다.

[0061] 1 차 코일(30, 32)의 개략적인 부분 단면도가 도 13 및 도 14에 제공되어 있다. 일 실시예에서, 단일-스트랜드 케이블은 100-400 암페어를 송전할 수 있고 약 백만 암페어-턴을 제공할 수 있다. 일반적으로, 코일은 초전도성 스트랜드의 임계 전류 송전 용량을 초과하지 않으면서 원하는 자기장 레벨에 필요한 암페어-턴의 수를 생성하는데 필요한 만큼의 권선(31) (예를 들어, 3,816 개의 권선)으로 설계될 수 있다. 초전도성 물질은 니오븀 티타늄(NbTi), 니오븀 주석(Nb₃Sn) 또는 니오븀 알루미늄(Nb₃Al)과 같은 저온 초전도체일 수 있으며; 특정 실시예에서, 초전도성 재료는 타입 II 초전도체 - 특히 유형 A15 결정 구조를 갖는 Nb₃Sn이다. Ba₂Sr₂Ca₁Cu₂O₈, Ba₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀, MgB₂ 또는 YBa₂Cu₃O_{7-x}와 같은 고온 초전도체도 또한 사용될 수 있다.

[0062] 1차 코일(30, 32)은 초전도성 와이어 또는 초전도성-와이어-인-채널 도체(superconducting-wire-in-channel conductor)로부터 직접 형성될 수 있다. 니오븀 주석(Nb₃Sn)의 경우 (3:1 몰비의) 니오븀과 주석의 미반응 스트랜드(unreacted strands)도 또한 케이블로 감길 수 있다. 이후 케이블은 Nb₃Sn을 형성하도록 니오븀과 주석을 반응시키기 위해 약 650 의 온도로 가열된다. 그런 다음 Nb₃Sn 케이블은 U-자형 구리 채널에 납땜되어 복합 도체(composite conductor)를 형성한다. 구리 채널은 초전도성 재료가 정상일 때 (즉, 초전도성이 아닐 때) 전류에 대한 도전 경로, 퀴치(quench) 동안의 열적 안정성 및 기계적 지지를 제공한다. 복합 도체는 그 다음 유리 섬유로 감긴 다음 외측 오버레이로 감긴다. 코일을 손상시킬 수 있는 열적 및 기계적 응력을 최소화하기 위해, 자석이 퀴치될 때 급속 가열을 제공하도록 그리고 또한 퀴치가 이루어진 이후에 코일의 반경 방향 단면에 걸쳐 온도 평형을 제공하기 위해, 예를 들어 스테인리스 스틸로 형성된 스트립 히터가 복합 전도체의 권취 층 사이에 또한 삽입될 수 있다. 권취 후, 진공이 가해지고, 권취된 복합 전도체 구조체는 최종 코일 구조에서 섬유/에폭시 복합 충전제를 형성하기 위해 에폭시로 함침된다. 감겨진 복합 도체가 내장된 결과적인 에폭시-유리 복합체는 전기 절연성 및 기계적 강성을 제공한다. 1차 코일(30, 32)의 실시예의 특징 및 그 구조는 미국 특허 제 7,696,847 B2호 및 미국 특허 제 7,920,040 B2호에 더 기술되고 도시되어 있다.

[0063] 다른 실시예에서, 1 차 코일(30, 32)은 개별 스트랜드 (작은 원형 와이어)로 형성될 수 있으며, 에폭시로 습식 권취되어 경화되거나, 건식 권취되어 권취 이후에 함침되어 복합 코일을 형성할 수 있다.

[0064] 각각의 1차 코일(30/32)은 미국 특허 제 8,525,447 B2호에 기재된 바와 같이 에폭시-유리 복합재의 그라운드-랩(ground wrap) 부가 외층 및 예를 들어 구리 또는 알루미늄으로 형성된 테이프-박지(tape-foil sheet)의 열간 오버랩(thermal overlap)으로 덮일 수 있으며; 각각의 1차 코일 (30/32)은 적어도 하나의 극저온 냉각기(38)의 제 2단(52)과 열적으로 그리고 물리적으로 결합된다.

[0065] 초전도성 1차 코일 (30, 32)은 중앙 가속 평면(26)의 대향 측면상에서, 이온이 가속되는 빔 챔버(24)의 영역을 제한하며 중앙 가속 평면(26)에서 극도로 높은 자기장을 직접 발생시키는 역할을 한다. 가해진 전압에 의해 활성화될 때, 초전도성 1차 코일(30,32)은, 초전도성 1차 코일(30, 32)에 의해 직접 생성된 자기장과 구별되는 것으로 보일 수 있는 자기장을 요크(10)가 또한 생성하도록, 요크(10)를 추가로 자화시킨다.

[0066] 초전도성 1차 코일(30, 32)은 이를 가로질러 이온이 가속되는 중앙 가속 평면(26)의 위와 아래에서 등거리로 중심축(28) 주변에 실질적으로 (방위각 적으로) 대칭되게 배열된다. 초전도성 1차 코일(30, 32)은 무선 주파수(RF) 가속 전극 디(dee)(40)가 빔 챔버(24) 내의 그 사이에서 연장할 수 있도록 하기에 충분한 거리만큼 분리되어 있으며, 빔 챔버 내부에는 실온 또는 그 근처의 온도 (예를 들어 약 10 내지 약 30)가 유지될 수 있다.

[0067] 1차 코일(30, 32)은 도 6 내지 도 8에 도시된 바와 같이 (섹션 (88, 90)을 포함하는) 별도의 크라이오스탯(56)

에 수용될 수 있거나; 또는 단일 크라이오스탯(56)이 전극 및 빔 챔버(24) 용으로 설계된 고온의(warm) 절연된 관통 인클로저(enclosure)로 전체 자석 구조물을 에워쌀 수 있다. 초전도성 1차 코일 (30, 32) 각각은 설계된 작동 온도에서 초전도성인 도체 물질의 연속 경로를 구비하며, 설계된 작동 온도는 일반적으로 4 - 40K의 온도 범위이지만 2K 아래에서도 작동할 수도 있고, 이 경우에는 추가적인 초전도성 성능 및 마진을 얻을 수 있다. 사이클로트론(85)이 더 높은 온도에서 작동될 경우, 비스무스 스트론튬 칼슘 구리 산화물 (BSCCO), 이트륨 바륨 구리 산화물 (YBCO) 또는 MgB_2 와 같은 초전도체가 사용될 수 있다.

[0068] 비자성 외부 보강 구조물(62)은 플러터 코일(21)과 실질적으로 동일한 형상을 갖는 나선형 구멍을 생성하기 위해, 예를 들어 알루미늄의, 단단한 플레이트로부터 기계 절단(machine cut)될 수 있으며, 다만 실온에서 비자성 외부 보강 구조물(62)과 플러터 코일(21) 사이에 공극/갭을 생성하기 위해 비자성 외부 보강 구조물(62)의 나선형 개구는 실온(예를 들어, 약 25)에서 플러터 코일(21)의 둘레보다 약간 크다. 유사하게, (예컨대, 구리 또는 스테인리스 강으로 형성된) 내부 보강 구조물(60)은 플러터 코일(21)과 실질적으로 동일한 형상을 갖고, 다만 마찬가지로 실온에서 수용되는 각각의 내부 보강 구조물(60)과 플러터 코일(21) 사이에 갭을 남기기 위하여 실온에서 나선형 내부 보강 구조물(60)은 플러터 코일(21)의 내부 표면보다 약간 작다. 상온 갭의 크기는 플러터 코일 (21)의 응력 상태를 제어하고 초전도성 플러터 코일(21)이 의도한대로 동작하는 것을 보장하도록 설정된다.

[0069] 극저온 냉각기(38)가 활성화 될 때, 비자성 외부 보강 구조물(62)을 통해 그리고 보빈(11)을 통해 플러터 코일 (21)로부터 극저온 냉각기(38)로 열이 추출되고, 이로써 플러터 코일(21)의 온도는 플러터 코일이 초전도성이 되는 그 임계 온도 아래로 떨어지게 된다. 비자성 외부 보강 구조물(62) 및 내부 보강 구조물(60)은 플러터 코일(21)과 동시에 냉각되며; 비자성 외부 보강 구조물(62)은 온도가 감소함에 따라 플러터 코일(21)보다 더 수축하도록 구성되는 반면, 플러터 코일(21)은 온도가 감소함에 따라 내부 보강 구조물(60)보다 더 수축하도록 구성된다. 결과적으로, 이들 구성 요소가 임계 온도 (예를 들어, 4k) 아래로 떨어지면, 각각의 플러터 코일(21)은 그 외부 둘레부 주변에서 비자성 외부 보강 구조물(62)과 수평을 이루는 접촉(flush contact)을 하게 되며 그 내부 둘레부를 따라서는 내부 보강 구조물(60)과 수평을 이루는 접촉을 하게 되고, 이로써 요크(10) 내부에서 플러터 코일(21)의 위치 및 구조적 완전성을 유지하도록 플러터 코일(21)을 고정, 수용 및 지지한다.

[0070] 등시성 사이클로트론(85)의 단면도가 도 15 및 도 16에 도시되어, 보빈(11) 및 크라이오스탯(56) 안으로의 고온 리드(lead)(23), 콜드-헤드 포트(cold-head port)(44), 열 차폐부(55), 및 1차 코일(30, 32) 주위의 베이스 플레이트(13)를 도시한다. 요크(10), RF 리드 채널(64) 및 반경 방향 지지 링크(68)도 또한 도시되어 있다. 3-섹터 플러터 코일 구조물의 강화된 냉각을 위한 3 개의 극저온 냉각기(38)의 구성 및 잭킹(jacking) 시스템(87)을 갖는 사이클로트론(85)의 측면도 및 평면도가 각각 도 17 및 도 18에 도시되어 있다.

[0071] 도 19, 28, 29 및 35의 실시예에 도시된 바와 같이, 6 개의 (또는 3 개의) 플러터 코일 (21)이 등시성 사이클로 트론(85)의 3 섹터 구성에 제공될 수 있다. 도 39에는 균일하게 이격된 3개의 플러터 코일(21)을 가진 설계가 도시되어 있는 반면, 도 40에는 6개의 플러터 코일(21)을 갖는 설계가 도시되어 있다. 도 28 및 도 29는 6- 코일 구성의 2 세트의 플러터 코일(21', 21'')을 도시한다. 전류가 제 1 세트의 코일 (21')을 통해 시계 방향으로 흐르게 되면, 전류는 제 2세트의 코일 (21'')을 통해 반 시계 방향으로 흐른다. 각각의 플러터 코일(21)은 15 x 80 mm의 단면을 가질 수 있고 $J_{e/MP}$ 의 전류 밀도가 $263 A/mm^2$ 인 초전도체 와이어의 640 회전(권선)으로 형성될 수 있다. 각 플러터 코일은 4.80 K의 최대 온도, T_{max} , 에서 작동할 수 있으며 10.3 T의 최대 자기장, B_{max} , 를 생성 할 수 있다. 모든 기존 구성의 공지된 등시성 사이클로트론 중 어떠한 것도 이 10.3T 값의 2 팩터 내의(within a factor of two) 최대 자기장을 갖지 않는다.

[0072] 도 19는 등시성 사이클로트론(85)의 일 실시예의 냉각체(cold mass) 내의 구성 요소에 대한 분해도이다. 이 실 시예는 내부 보강 구조(60)(AISI3016 스테인리스 강으로 형성됨) 주위에, 그리고 베이스 플레이트(13) (A16061-T6 알루미늄 합금으로 형성됨)의 나머지 부분에 볼트(41)를 통해 고정된 베이스 플레이트 커버(15) (또한 A16061-T6 알루미늄 합금으로 형성됨) 아래에 있는 6개의 플러터 코일(21) (Nb_3Sn 으로 형성됨)을 구비한다. 중 심지지 링크(43)는 베이스 플레이트 커버(15)를 통과한다. 초전도성 1차 코일(32) 및 1차 코일(32) 둘레의 구리 랩 (copper wrap)(29)이 또한 도시되어 있다. 보조 코일(19)은 최대 에너지에 도달하도록 에지 반경방향 자기장 을 수정한다.

[0073] 6개의 플러터-코일 구성에 대한 6 개의 무선 주파수 (RF) 전극 디(dee)(40) 중 하나의 실시예가 도 30에 도시된 다. 디(40)는 전극 플레이트(67)와 스템(46)을 포함한다. 6 개의 디(40)를 장착하기 위한 상부/하부 플레이트

(63)가 도 31에 도시되는데, 여기서 디(40)의 스템(46)은 플레이트(63)의 각 슬롯 내로 납땜(braze)된다. 도 31의 마지막 그림 및 도 32에 도시된 바와 같이, 각 전극 디(40)의 전극 플레이트(67)는 서로의 맞은 편에 포개져서, 하나는 상부 플레이트(63')에 납땜되고 나머지는 하부 플레이트(63'')에 납땜되며, 중앙 가속 평면(26)이 전극 플레이트(67)의 각각의 쌍 사이에서 연장된다.

[0074] 플러터 코일(21)은 단일 스트랜드 저온 초전도성 와이어 (예를 들어, 0.5mm 내지 2.0mm 와 같은 직경의 원형 단면을 갖는 NbTi, Nb₃Sn, Nb₃Al)으로 형성될 수 있다. 와이어는 초기에 반응물 (예를 들어, 니오븀 및 주석) 분말로 형성되고 맨드릴 둘레에서 외측으로 다수 회 (예를 들어, 도 34에 도시된 바와 같이 100 회 이상의 개별 턴) 감겨진다. 이어서, 권취 후, 분말을 (예를 들어, 600k에서 200 시간 동안) 반응시켜 초전도체 (예를 들어, Nb₃Sn)를 제조한다. 그 후, 반응된 와이어 권선은, 도 33에 도시된 바와 같이, 결과적인 플러터 코일에서의 열 수축 및 자기 응력으로부터의 기계적 지지를 제공하고 전체 형상을 설정하는 섬유-유리/에폭시 매트릭스로 침투된다. 복합 플러터 코일(21)은 이후 예를 들어 에폭시-유리 복합체로 형성된 그라운드 랩으로 덮힌다. 플러터 코일(21)은 낮은 인덕턴스 (1 차 코일 (30, 32)의 것보다 낮다)를 갖도록 설계된다. 복합 플러터 코일(21)은 20 cm 미만의 단면 높이 및 10 cm 미만의 폭을 가질 수 있다. 플러터 코일(21) 및 RF 전극이 모두 도 35에 도시되어 있지만, 이들은 조립된 등시성 사이클로트론(85) 내에서 크라이오스탯(56)에 의해 분리되어 있어서 - RF 전극이 크라이오스탯(56) 사이에 위치하는 반면, 플러터 코일(21)은 상부 및 하부 크라이오스탯(56) 내에 수용된다. 다른 실시예에서는, RF 전극이 나선 형상을 가질 수 있다.

[0075] 도 12에 도시된 바와 같이, 비자성 외부 보강 지지 구조물(62)은 알루미늄과 같은 금속으로 형성될 수 있고, 내부 보강 구조물(60)은 스테인리스 강 또는 구리와 같은 금속으로 형성될 수 있으며; 이들 성분은 극저온 작동 온도에서 이들 구조체 사이의 수평을 이루는 접촉을 생성하도록 온도 감소에 따른 각각의 수축 속도를 제공할 수 있다. 특정 실시예에서, 내부 보강 구조(60) 성분의 열팽창 계수(CTE)는 플러터 코일(21) 성분의 열팽창 계수보다 작으며; 플러터 코일(21) 성분의 열팽창 계수는 비자성 외부 보강 구조물(62)의 열팽창 계수보다 작다. 즉, 플러터 코일(21)은 내부 보강 구조물(60)보다 더 많이 수축되며; 외부 보강 구조물(62)은 플러터 코일(21)보다 더 많이 수축되어 전체 구조물이 냉각에 따라 압축을 받게 한다. 외부 보강 구조물(62) 및 내부 보강 구조물(60)의 성분은 또한 비자성일 수 있고 높은 열전도율을 가질 수 있다.

[0076] 도 19의 냉각체에 대한 지지 구성 요소의 분해도가, 1차 코일(32)에 대한 커버(16), 커버 마운트(17), 및 축방향 지지 링(18)을 포함하여, 도 20에 도시된다. 커버(16) 및 커버 마운트(17) 모두는 오스테나이트 니켈-크롬-계 초합금 (예를 들어, 인코넬 718 합금)으로 형성될 수 있다. 열 차폐부 베이스(57), 베이스(57)에 대한 마운트(59) 및 열-차폐부 중심 세그먼트(61)를 포함하여, 크라이오스탯 열 차폐부(55)의 사시도 (및 부분적인 분해도)가 도 21에 도시되어 있으며, 이들 모두는 구리 합금 (예컨대, CU10100)으로 형성될 수 있다. 또한, 크라이오스탯 진공 커버(53) 및 중심 지지 마운트(45) [오스테나이트 니켈-크롬-계 초합금 (예를 들어, 인코넬 718 합금)으로 형성됨]와 함께, 크라이오스탯 진공 챔버 베이스(47)에 결합된 극저온 냉각기 박스(49)(이를 통해 극저온 냉각기(38)가 통과함)를 포함하여, 크라이오스탯 조립체의 사시도 및 분해도가 도 22에 도시되어 있다. 극저온 냉각기 박스(49) 또한 오스테나이트 니켈-크롬-계 초합금 (예를 들어 인코넬 718 합금)으로 형성될 수 있는 반면, 크라이오스탯 진공 커버(53) 및 크라이오스탯 진공 챔버 베이스(47)는 316 스테인리스 강으로 형성될 수 있다.

[0077] 철(예를 들어 1010 강)로 형성된 요크(10)가 크라이오스탯(56)을 둘러싸고, 크라이오스탯으로부터 반경방향 지지 링크(68) (예를 들어, 316 스테인리스 강으로 형성됨) 및 극저온 냉각기(38)가 연장되는, 사이클로트론(85)의 상부 반부(80)의 사시도 및 분해도가 도 23에 도시된다. 각각이 각각의 크라이오스탯(56)을 포함하는, 사이클로트론의 상부 반부(80)와 하부 반부(81)가 도 25의 분해 사시도에 도시되어 있으며, 진공 링(83)이 이들 사이에 위치되어 있다. 도 25는 사이클로트론(85)과 결합된 재킹 시스템(87)을 도시한다.

[0078] 등시성 사이클로트론(85)의 일 실시예의 또 다른 단면도가 도 26에 제공되어, 이온 소스(82), 축방향 지지부(66), 반경방향 지지부(68), 극저온 냉각기(38), 플러터-코일 조립체(20), 1차 코일(30, 32), 및 보빈(11)을 도시한다. 사이클로트론(85)에 대한 요크(10)의 상부 반부의 단면도가 도 27에 제공된다. 요크(10)는 190 GPa의 탄성률 및 305 MPa의 항복 강도를 갖는 AISI 1010 강으로 형성될 수 있고, 요크(10) 전체는 약 14 톤 (12,700 kg)의 무게일 수 있다.

[0079] 등시성 사이클로트론(85)의 요크(10)는, 도 1에 도시된 바와 같이, 100-300-MeV 빔을 생성하도록 설계될 수 있으며, (도시된 방위에서) 그 베이스 및 상부 표면에 걸쳐 2미터의 직경을 가질 수 있으며 및 약 1.4m의 높이 (도 5에 제공된 좌표계에 따라 도시된 방위에서 z 축을 따라 수직으로 측정됨)를 가질 수 있다. 이온 주입을 위

한 150mm 직경의 중앙 원통형 채널(65)은 극(12, 14)에 의해 형성된다. 최상부의 원통형 절개 섹션(96')은 높이가 90mm이고 직경이 340mm이고, 상부 표면의 297.5 mm의 거리까지 연장한다. 중간 원통형 절개 섹션(96")는 최상부 절개 섹션(96')의 높이와 유사한 높이 및 540 mm의 직경을 갖는다. 하부의 원통형 절개 섹션은 60mm의 높이와 740mm의 직경을 갖는다. 빔 챔버(24)는 37 mm의 높이를 갖는다. 요크(10) 및 사이클로트론(85)의 다른 구성 요소의 다양한 치수(mm 단위)가 또한 도 3에 도시되어 있다. (도 8에 도시된 바와 같은) 베이스 플레이트(13)는 중앙 가속 평면(26)으로부터 36.5mm 거리에 있을 수 있고, 외부 보강 구조물(62)의 비자성 성분의 0.6mm 두께 벽이 (a) 플러터 코일(21) (이 내부에는 내부 보강 구조물(60)이 수용됨)과 (b) 크라이오스택(56)의 베이스-플레이트 섹션(90)의 내부 벽 (빔 챔버(24)와 대향함) 사이에서 연장한다. 초전도성 1차 코일(30, 32)은 중앙 가속 평면(26)의 대향 측면상에서 약 114 mm의 거리만큼 분리될 수 있다.

[0080] [복귀 요크(22), 극(12, 14), 및 나선형 플러터 코일(21)을 포함하여] 초전도성 1차 코일(30, 32)과 요크(10)는 함께 중앙 가속 평면(26)에서 (반지름이 증가할수록 자기장이 증가하는), 예를 들어 4-6 테슬라의, 피크 결합 자기장(peak combined field)를 생성한다. 초전도성 1차 코일(30, 32)은 초전도성 1차 코일 (30, 32)을 통한 연속적인 초전도성 전류 흐름을 개시하고 유지하기 위해 전압이 초전도성 1차 코일에 인가될 때, 중앙 가속 평면(26)에서 예를 들어 3.6 테슬라 이상의 자기장을 직접 생성할 수 있다. 요크(10)는 초전도성 1차 코일(30, 32)에 의해 발생된 자기장에 의해 자화되고, 이온 가속을 위해 챔버(14)에서 생성된 자기장에 기여한다.

[0081] 자기장 성분 모두 (즉, 초전도성 1차 코일(30, 32)로부터 직접 생성된 자기장 성분 및 자화된 요크(10)에 의해 생성된 자기장 성분 모두)는 중앙 가속 평면(26)에 대략 직교하면서 중앙 가속 평면(26)을 통과한다. 가속 중에 상대론적 입자 질량 이득을 보상하기 위해 중심 축(28)으로부터 빔 챔버(24) 내에서 이온이 추출되는 반경까지 반경이 증가함에 따라 자기장이 증가하도록, (극(12, 14) 사이의 갭이 증가되는 극 절개부(96)를 포함하여) 요크(10)는 중앙 가속 평면(26)을 따라 자기장을 형성하도록 구성된다.

[0082] 이온 가속을 유지하기 위한 전압은 언제나 전류 리드를 통해 빔 챔버(24) 내부의 중앙 가속 평면(26)에 평행하게 위와 아래에 배향된 고-전압 전극 디의 쌍(40)에 제공된다. 자석 구조물에서 진공 피드 스루(feed-through)를 통해 연장되는, 전극 디(40)를 위한 적절한 공간을 제공하도록 요크(10)가 구성된다. 전극 장치는 도전성 금속으로 형성되고, 전극 디(40)의 개수는 플러터 코일(21)의 개수에 매칭될 수 있어서, 각각의 전극 디(40)가 중심 축(28)을 중심으로 한 링 내에서 인접한 플러터 코일(21) 사이에 (그렇지만 플러터 코일(21) 보다는 중앙 가속 평면(26)에 더 가깝게) 각도를 두며 위치한다.

[0083] 사이클로트론 주파수에서 또는 사이클로트론 주파수의 정수배에서 진동 전압을 가지도록 디(40)를 여기시키기 위해, 전극 디(40)는 RF 전류 리드에 의해 RF 전압 (예를 들어, 제 3 고조파 솔루션에 대해 205.7MHz)을 공급 받는데, 이는 비자성 외부 보강 구조물(62)을 통해서 RF- 리드 개구부(64)를 수직(z) 축에 평행하게 공급된다. 각 코일(21)에 전달된 전압의 주파수는 가속 이온의 궤도 주파수의 4 배가 될 수 있으며 (예를 들어, 이온이 68MHz의 주파수로 빔 챔버(24)에서 공전하는 272MHz의 전압 주파수); 각각의 플러터 코일(21)에 전달된 RF 전압은, 각 디(40) 사이 및 각 디(40)를 가로 지르는 전압 사인파에서 180도 스패(span)으로 코일 에지 각각과 정렬될 때 가속 이온이 피크 전압을 받도록, 시퀀스될 수 있다.

[0084] 작동 중에, 초전도성 1차 코일(30, 32)은 "건조한(dry)" 상태 (즉, 액체 냉매에 잠기지 않음)로 유지될 수 있으며; 오히려, 초전도성 1차 코일 (30, 32)은 하나 이상의 극저온 냉동기 (극저온 냉각기)에 의해 초전도체의 임계 온도 아래의 온도 (예를 들어, 임계 온도보다 5K만큼 아래의 온도, 또는 몇몇 경우에는 임계 온도 아래로 1K 미만까지의 온도)까지 냉각될 수 있다. 다른 실시예에서, 초전도성 1차 코일 (30, 32)은 초전도성 1차 코일 (30, 32)로부터 극저온 냉동기(38)로의 열전달을 위해 액체 한계(cryogen)와 접촉할 수 있다. 초전도성 1차 코일(30, 32)이 극저온 온도(cryogenic temperatures) (예를 들어, 성분에 따라 4K 내지 30K의 범위)로 냉각되면, 베이스 플레이트(13)는 극저온 냉각기(38), 보빈(11), 초전도성 1차 코일(30, 32), 비자성 외부 보강 구조물(62), 플러터 코일(21) 및 내부 보강 구조물(60) 사이의 열적 접촉으로 인해서 대략 동일한 온도까지 마찬가지로 냉각된다.

[0085] 극저온 냉각기 (38)는 기포드-맥마혼(Gifford-McMahon) 냉각 사이클의 압축 헬륨을 이용할 수 있거나, 고온 제 1단(50) 및 저온 제 2단(52) (도 1 및 도 2에 도시됨)을 갖는 펄스-튜브 극저온 냉각기 설계일 수 있다. 극저온 냉각기(38)의 저온 제 2단(52)은 약 4.5K에서 작동할 수 있으며, 베이스 플레이트(13) 및 초전도성 1차 코일 (30, 32)과 밀접한 열 접촉을 하는 보빈(11)과 (예를 들어 볼트를 통해) 기계적 및 열적으로 결합될 수 있다. 극저온 냉각기(38)는 각각의 코일(30/32/21)의 도체가 초전도성 상태인 온도 (예를 들어, 약 4.5 K)로 각각의 초전도성 1차 코일(30/32) 및 각각의 초전도성 플러터 코일(21)을 상응하게 냉각시킬 수 있다. 대안적으로, 더

고온의 초전도체가 사용되는 경우, 극저온 냉각기(38)의 제 2단(52)은 예를 들어 4-30 K에서 작동될 수 있다.

[0086] 극저온 냉각기(38)의 더 따뜻한 제 1단(50)은 예를 들어 40-80 K의 온도에서 작동될 수 있고 중간 열 차폐부(54)와 열적으로 결합될 수 있으며, 그에 따라 예를 들어 약 40-80 K로 냉각되어, 실온에 (예를 들어, 약 300 K에) 있을 수 있는 자석 구조물 (요크(10) 및 그 안에 포함된 다른 구성 요소를 포함 함)과 크라이오스탯(56)(도 8에 도시됨) 사이의 중간-온도 장벽을 제공한다. 크라이오스탯(56)은 진공 포트(58)를 포함하고, 이 진공 포트에는 크라이오스탯(56) 내부에 고 진공을 제공하도록 진공 펌프가 결합될 수 있어서 크라이오스탯(56), 중간 열 차폐부(54) 및 자석 구조물(10) 사이의 대류성 열 전달을 제한한다. 크라이오스탯(56), 열 차폐부(54) 및 요크(10)는 각각 전도성 열 전달을 최소화하는 양만큼 서로 이격될 수 있으며; 이들 구조체는 절연 스페이서에 의해 구조적으로 지지될 수 있다.

[0087] 자기 요크(10)는 초전도성 1차 코일(30, 32)에 의해 발생된 자속을 빔 챔버(24)로 운반하는 자기 회로를 제공한다. 자기 요크(10)를 통한 자기 회로 (특히, 플러터 코일(21)에 의해 제공되는 방위각 가변 자기장)는 빔 챔버(24)에서 이온의 강한 포커싱을 위한 자기장 형성을 또한 제공한다. 자기 회로는 자기 회로의 외부 부분에 자속의 대부분을 포함함으로써 이온을 가속시키는 빔 챔버(24) 부분의 자기장 레벨을 또한 향상시킨다. 특정 실시예에서, (플러터 코일(21)을 제외하고) 자기 요크(10)는 저-탄소 강으로 형성되어, 초전도성 1차 코일(30, 32)을 둘러싼다. 순수한 철은 너무 약할 수 있고 너무 낮은 탄성 계수를 가질 수 있으며; 결과적으로, 철은 원하는 자기 레벨을 유지하면서도 적절한 강도를 제공하거나 더 단단하게(stiff) 만들도록 하기에 충분한 양의 탄소 및 다른 원소로 도핑될 수 있다.

[0088] 도 9 및 도 10에 도시된 실시예는 중앙 가속 평면(26)의 각각의 측면 상에 4 개의 나선형 초전도성 플러터 코일(21)을 구비하지만, 다른 실시예는 중앙 가속 평면(26)의 각각의 측면 상에 예를 들어 3 개, 6 개 또는 8 개의 균일하게 이격된 플러터 코일(21)을 구비할 수 있다. 3 개 및 6 개의 플러터-코일 구성이 각각 도 39 및 도 40에 도시되어 있는데, 여기서 섹터의 개수 N은 3개 및 6개- 코일 구성의 각각에 대해 3이다. 플러터 코일 섹터 I, II 및 III은 도 39 및 도 40에 도시되어 있으며, 각각의 플러터 코일(21)을 통한 전류 흐름의 방향은 화살표로 표시되어 있다 (도 39는 각각의 플러터 코일(21)에서 전류 흐름, I_2 , 가 시계방향인 것으로 도시하지만, 전류, I_2 , 는 대안적으로 각각의 플러터 코일(21)에서 반-시계 방향일 수 있다. 도시된 바와 같이, 3 코일 구성의 플러터 코일(21)은 (코일(21) 당 더 많은 암페어-턴 포함하여) 4 코일 구성보다 더 넓을 수 있다. 따라서, 3 코일 구성의 전류, I_2 , 는 6 코일 구성의 전류, I_1 보다 더 강하다. 예를 들어 I_2 는 대략 $2 \times I_1$ 과 같을 수 있으며; 이는 4 및 8 코일 구성에 대해서도 마찬가지이다.

[0089] 플러터 코일(21)의 3 개 또는 6 개의 코일 구성은 극 면 당 3 개의 동일한 120° 각도 폭 자기 섹터를 갖는 N = 3 섹터의 등시성 사이클로트론으로 간주된다. 3 개의 코일 실시예에서, 플러터 코일 전류 방향은 3 개의 모든 코일(21)에서 동일하다. 6-플러터 코일 실시예에서, 플러터 코일 전류 방향은 위에서 바라볼 때 하나의 코일(21)로부터 다음 코일(21)로 시계 방향과 반 시계 방향이 번갈아 나타난다. 플러터 코일(21)의 4- 또는 8-코일 구성은 극 면 당 4 개의 동일한 90° 각도 폭 자기 섹터를 갖는 N = 4 섹터의 등시성 사이클로트론으로 간주된다. 4-코일 실시예에서, 플러터 코일 전류 방향은 4 개의 모든 코일(21)에서 동일하다. 8-코일 실시예에서, 플러터 코일 전류 방향은 위에서 바라볼 때 하나의 코일(21)로부터 다음 코일(21)로 (순차적으로) 시계 방향과 반 시계 방향이 번갈아 나타난다.

[0090] 방사형 궤도 안정성 논쟁 [존 제이. 리빙우드(John J. Livingood), "순환 입자 가속기의 원리(Principle of Cyclic Particle Accelerators)", 반 노스트란드 회사(Van Nostrand Co.), 프린스턴(Princeton), 뉴저지(NJ), 239-240 (1961)]은 최종 에너지 빔이 200MeV 를 초과하는 양성자에 대해, 최소 섹터 수는 N = 4 섹터여야만 하며, 200MeV 를 넘는 최종 에너지를 갖는 N = 3 섹터 양성자 사이클로트론은 금지될 것을 제안한다. 특히, 이 방사형 안정성 논쟁은 $v_r < N/2$ 이면 등시성 사이클로트론의 방사형 궤도 진동이 안정하다는 것을 가정(posit)한다. N = 3 섹터 사이클로트론의 경우 $v_r < 1.5$ 가 참이어야 한다. γ 이 가속에 의한 입자-질량 이득의 상대론적 인자일 때 등시성 사이클로트론에서 $v_r \sim \gamma$ 이므로, 이는 최종 $\gamma < 1.5$ 로 제한하거나, 또는 최종 에너지를 $0.5 \times$ 양성자 잔여 질량 - 약 450 MeV로 제한할 것이다. 실제로, 다른 인자들은 v_r 의 최종 값에 0.3을 더하여 $\gamma < 1.2$ 로 제한하거나, 또는 최종 에너지를 200 MeV로 제한한다. 본 발명으로, 200 MeV 보다 큰 최종 에너지를 갖는 N = 3 섹터 양성자 사이클로트론이 허용된다는 것을 처음으로 입증했다. N = 3 섹터 등시성 사이클로트론은 더 많은 플러터를 가지고 있으며 본질적으로 저렴한 비용으로 쉽게 구성할 수 있는데, 이는 플러터 극 복잡성이 감소하기 때문이다.

- [0091] 상술한 바와 같이, 나선형 플러터 코일(21)은 자기장의 방위각 변화를 제공하기 위해 섹터 자석으로서 작용하며, 여기서 나선형 형상은 자기장 (즉, "플러터")에서의 변화를 향상시킨다. 초전도성 플러터 코일(21)은 1 차 코일(30, 32) 과 동일한 성분으로 형성될 수 있으며[예를 들어, 니오븀 티타늄 (NbTi), 니오븀 주석 (Nb₃Sn) 또는 니오븀 알루미늄 (Nb₃Al)과 같은 저온 초전도체; 또는 Ba₂Sr₂Ca₁Cu₂O₈, Ba₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀, MgB₂ 또는 YBa₂Cu₃O_{7-x}와 같은 고온 초전도체], 전술한 바와 같이 둥근 단면을 가지며 감겨질 수 있다. 여섯 개 이상의 플러터 코일(21)이 사용되는 경우, RF 전압은, 인접한 플러터 코일(21)에서 전류가 흐르는 방향과 반대 방향으로 각각의 코일(21)에서 전류가 흐르도록, 각 플러터 코일(21)에 상이하게 인가될 수 있다.
- [0092] 도 9 및 도 10에 도시된 바와 같이, 각각의 보빈(11) 및 1차 코일(30/32)을 갖는 한 쌍의 베이스 플레이트(13)는 각각의 크라이오스탯(56) (각각은 도 6에 도시된 바와 같이 섹션(88, 90)을 가짐) 내에 수용된다. 도 8에 도시된 바와 같이, 크라이오스탯(56)의 섹션(88)은 플러터 코일(21) 및 주위의 비자성 외부 보강 구조물(62)을 구비하는 베이스 플레이트(13) 주위를 감싼다. 극저온 냉각기(38)는 대향 측면으로부터 크라이오스탯(56)을 관통하여 그 안에 수용된 보강 자석 구조에 극저온 냉각을 제공한다.
- [0093] 극저온 냉각기(38)가 여기서 설명되며 도 41에 수평 배향으로 도시되어 있다. 각각의 극저온 냉각기(38)는 진공 플랜지를 통해 크라이오스탯(56)의 극저온 냉각기 박스(49)에 결합된다. 도 41에 도시된 바와 같이, 극저온 냉각기(38)는 1차 초전도성 코일(30/32)과 접촉하는 (그리고 열적으로 밀접하게 접촉하는) 저온 풋 앵커(cold foot anchor) (100) (3-5 K에 있음)를 포함한다. 일체형 유지 보수 부트 조립체(101)는 저온 풋 앵커(100) 상에 장착되고 (그리고 저온 풋 앵커(100)와 밀접한 열 접촉을 하고), 극저온 냉각기(38)의 제 1 단(109)까지 연장한다. 일체형 유지 보수 부트 조립체(101)는 극저온 냉각기(38)의 제 2단(110)으로 이어지는 저온 풋 확장부(112)와 저온 풋 앵커(100) 사이의 링크를 형성한다. 일체형 유지 보수 부트 조립체(101)는 낮은 열 전도율을 가지는 복합 물질로 형성될 수 있고, 따라서 저온 풋 앵커(100) 주변에 절연 부트를 형성하고, 극저온 냉각기(38)가 크라이오스탯 내의 진공을 파괴하지 않으면서 그리고 사이클로트론(85) 내의 자석 구조를 워밍업시킬 필요 없이 (예를 들어 유지 보수 또는 교체를 위하여) 그 안으로 교환 가능하게 삽입 및 제거될 수 있다. 이러한 구성은, 극저온 냉각기가 통상적으로 제 1단에 있는 쉴드와 제 2단에 있는 사이클로트론 내의 냉각체에 "단단하게 연결되는(hard connected)," 극저온 냉각기를 장착하기 위한 전통적인 수단과는 대조적이다. (제 1단(109)의 말단부에 있는) 극저온 냉각기(38)의 제 1단 접촉부(106)는 30-70 K로 유지될 수 있는 반면, (제 2단(110)의 말단부에 있는) 극저온 냉각기(38)의 제 2단 접촉부(103)는 3-5K로 유지될 수 있다. 진공은 극저온 냉각기(38)의 제 1 및 제 2단 주변의 용적(102) 내에는 진공이 유지된다.
- [0094] 크라이오 펌프(38)의 각 측면 상에는 전류-리드-및-진공 피드스루(105)가있는데, 이를 통해서 전류가 (거의 진공 환경에서 유지되는) 전기 버스에 의해 1차 코일(30/32)로 공급된다. 전기 버스는 고온 (상온) 전류 리드로부터 (저온 저항성 전류 리드(107)과 결합되는 곳에서 30-70K 에 있는) 고온 초전도체 리드 (104)에 전류를 공급하는 저온 저항성 전류 리드(107) (예를 들어, 구리로 형성됨)를 구비한다. 고온 전류 리드(104)는, 그 말단부에서, (고온 전류 리드(104)와 결합된 곳에서 3-5 K에 있는) 1차 초전도성 코일(30/32)과 열 접촉한다. 한편 주변의 크라이오스탯은 실온 (예를 들어 293 K)에 있다.
- [0095] 대안적인 실시예에서, 도 42에 도시된 바와 같이, 극저온 냉각기(38)는 사이클로트론(85)에 의해 생성된 자기장에 잠재적으로 손상을 주는 노출을 감소시키기 위해 수직으로 접힐 수 있다. 이 특정 실시예에서, 저온 풋 앵커(100)는 다시 냉각체(108) 및 1차 코일(32)로부터 수평 방향으로 (중앙 가속 평면에 평행하게) 연장된다. 그러나, 여기서, 일체형 유지 보수 부트 조립체는 저온 풋 앵커(100)로부터 직각 상향으로 배향된다 (그리고 중앙 가속 평면에 직각으로 배향 된다). 극저온 냉각기(38)의 제 1 및 제 2단(109, 110)도 또한 수직으로 배향되어, 극저온 냉각기의 헤드(111)를 1차 코일(32) 위에 그리고 사이클로트론의 요크 위에 배치시킨다.
- [0096] 도 7 및 도 9 내지 도 10에 도시된 바와 같이, 개구(64)는 또한 크라이오스탯(56)을 통과하여 그리고 비자성 외부 보강 구조물(62)을 통과하여 형성되어, 이를 통한 각각의 RF 공진기의 통로를 제공하여, 등시성 사이클로트론(85) 내의 플러터 코일(21) 각각에 RF 전압을 제공한다. 이온 주입 또는 이온 주입 장치의 삽입을 위한, 크라이오스탯(56) 및 비자성 외부 보강 구조물(62)을 통한 추가 개구(65)가 도시되어 있다.
- [0097] 등시성 사이클로트론(85)의 빔 챔버(24)로 이온을 주입하기 위한 외부 고강도 이온 주입기(82)의 실시예가 도 4 및 도 37에 도시되는데, 여기서의 주입기 컬럼(84)이 이온 주입기(82) 내의 ECR 이온 소스(82)로부터 빔 챔버(24)로의 통로를 제공한다. 사이클로트론(85) 외부에서, 가스 소스(69)로부터의 가스[(예를 들어 수소(H₂)]의 흐름 및 (106 Hz의 주파수에 있는) 마이크로파 소스(70)로부터의 마이크로파가 플라즈마 챔버(71) 내로 지향되

어, 사이클로트론(85)의 가속 챔버 내로 이온(77)의 스트림을 방출하는 플라즈마를 형성하도록 한다. 플라즈마 챔버 내부에서, 양성자가 생성되면, 전압 소스(93)로부터의 전자는 수소 소스(69)로부터의 H_2 분자와 충돌하여 (대개) 2 개의 수소(H) 이온 및 자유 전자를 생성한다. 전자가 수소(H) 이온과 충돌하면 생성물은 H^+ 와 두 개의 전자이다. H_2 /전자 상호 작용의 나머지 절반에서는 전자와 H_2 분자의 충돌이 H_2^+ 와 두 개의 전자를 생성한다. H^+ 이온 (즉, 양성자)은 플라즈마 챔버(71)의 베이스에서 개구(79)를 통해 빠져 나갈 수 있다.

[0098] 양이온(77)(예를 들어, 양성자)은 이 개구(79)를 통과하여 주입기 컬럼(84)로 들어가며, 여기서 양성자는 먼저 이온 포커스(73), 급속 편향 플레이트(fast deflection plate)(74), 매칭/스톱핑 아인젤 렌즈 트리플렛(matching/stopping einzel lens triplet)(75)를 통과하고 마지막으로 제한 개구(76)을 통과하여 빔 챔버(24)로 들어간다.

[0099] ECR 이온 소스(82) 및 아인젤 렌즈 트리플렛(75)의 실시예의 부가적인 도면이 도 36 내지 도 38에 제공된다. 도 38에 도시된 바와 같이, 이온은 ECR 이온 소스(82)로부터 이온 포커스(73) 내의 추출 개구를 통해 추출 갭을 가로질러 아인젤 렌즈 트리플렛 렌즈(75)를 통과한다. 전형적 아인젤 렌즈(75)의 전극 시퀀스는 (1) 음전하 (2) 양전하, (3) 음전하 시퀀스를 가지는 반면, 도 38에 도시된 바와 같이, 본원에서 사용된 아인젤 렌즈(75)는 (1) 양전하, (2) 음전하, (3) 양전하의 시퀀스를 갖는 3 개의 링형 전극의 시퀀스를 갖는다. 따라서, ECR 이온 소스(82)로부터의 양이온들의 흐름을 차단시키기 위하여 제 1 전극 상의 양전하를 증가시킬 수 있다. 도 37의 아인젤 렌즈 트리플렛(75)의 제 1 전극의 구부러진 턱은 제 1 전극 이온 빔을 수렴시킨다. 도 38에 도시된 바와 같이, 전기장은 전극을 가로 지르는 전압 등고선(97)에 수직이다. 이온(77)은 전극들 사이의 제 1 갭을 가로 지를 때 감속되고, 다음 갭을 가로지를 때 가속된다. 도 36 및 도 37에 도시된 주기적 포커싱 구조(89)는 이온 빔의 균일한 프로파일을 유지하는 영구적인 4 극 자석으로 형성된다.

[0100] 또한 도 36에는, 중앙 자기장 형성을 위한 한 편의(a section of) 철(113) 및 사이클로트론에 주입되는 이온 빔 전류를 모니터링하고 조정하기 위해 이온 (예를 들어, H^+) 빔의 내부 및 외부로 빗치지는 차단 빔 수집기(114)가 도시되어 있다. 도 36의 도면은, 마이크로파 소스(70)의 마이크로파 주입 도파관도 또한 도시하지만 마이크로파 전력 공급기는 도시하지 않는다. 또한, 도 36은 수소 가스 소스(69)의 수소 가스 공급관을 도시하지만 수소 가스의 탱크 또는 다른 저장조는 도시하지 않는다.

[0101] 대안적인 실시예에서, 플라즈마 챔버 베이스 부근에서 플라즈마 챔버(71)를 가로 질러 급속 스크린이 제공될 수 있다. 급속 스크린은 마이크로파를 차단하여 스크린 아래에 플라즈마가 형성되는 것을 방지한다. 이 실시예에서, 음이온은 중심축(28)을 따라 z-축 방향으로 주입기 컬럼(84)을 통과하여 등시성 가속을 위해 빔 챔버(24)로 들어갈 수 있다. 빔 챔버(24)의 중심에서, 중앙 가속 평면(26)을 가로질러 외향으로 팽창하는 나선형으로 가속하기 위해 (예를 들어, 각각에 결합되는 각각의 전압원에 의해서) 반대 전하가 제공된 한 쌍의 나선형 인플렉터(inflector)(78)에 의해서 이온을 x-y 평면을 따른 궤적 안으로 재 지향시킨다.

[0102] 반경 방향 지지 링크(68) 및 축 방향 지지 링크(66)는 크라이오스탯(56)의 외부 섹션(88)을 통과하여 보빈(11)의 마운트(92)(도 9에 도시됨)에 결합되어서, 보빈(11) 및 수용된 자석 구조물을 고정된 위치에 유지시킨다. 지지 링크(66, 68)는 (지지 링크(66/68)의 장축을 따라) 길이방향으로 장력을 받고 반경 방향으로 압축을 받는 복합재(예를 들어, 유리 섬유/에폭시 복합재 또는 탄소-섬유/에폭시 복합재)로 형성될 수 있다. 지지 링크 (66, 68)는 시아노아크릴레이트(cyanoacrylate) 접착제 (캐나다 온타리오 소재의 슈퍼 글루 코포레이션(Super Glue Corp.)로부터 SUPER GLUE 접착제로서 상업적으로 입수 가능함)로 각각의 단부 상에서 장착 컵(92) 내로 동일 평면에 놓이는 방식(flushly)으로 고정된다. 보빈(11)을 반경 방향 외측 장력을 받도록 위치시키고 1차 코일(30,32)을 중심축(28) 주변에 중심 맞추도록 (즉, 실질적으로 대칭되도록) 유지시키기 위해 반경 방향지지 링크(68)가 복수의 지점에서 (x/y 평면에서) 보빈(11) 상에 외측 후프 력(hoop force)을 제공할 수 있는 구성으로, 반경 방향 지지 링크(68)가 1차 코일(30,32) 및 보빈(11)과 결합된다. 이와 같이, 반경 방향 지지 링크(68)는 자기적 분산력(magnetic de-centering forces)에 대한 반경 방향 지지를 제공하여서, 한쪽 측면 상에서 철에 접근하는 냉각재는 기하 급수적으로 증가하는 힘을 겪게 되고 철에 더 가깝게 움직이게 된다. 반경 방향 지지 링크(68)는 (예를 들어, 종래의 레이스 또는 주행 트랙의 대략적인 형상인) 선형 세그먼트에 의해 결합된 둥근 단부를 가지며 정(right) 원형 단면을 갖는, 2 개 이상의 탄성 인장 밴드를 포함할 수 있다. 밴드는 예컨대, 에폭시로 함침된, 나선형으로 감겨진 유리 또는 탄소 테이프 형태로 형성되고, 사이클로트론(85)의 고온 외부 프레임으로부터 저온 1차 코일(30, 32)로의 열전달을 최소화하도록 설계된다. 다양한 분산력이 1 차 코일(30, 32)에 작용할 때 센터링을 유지하기 위해서, 임의의 반경 방향 지지 링크(68)에 추가적인 장력을 가하도록 바깥

으로 향하는 힘이 반경 방향 지지 링크(68)에 가해질 수 있다. 적절한 지지 링크는 US 7,656,258 B1호에 기재되어 있으며 상기 특허문헌에서는 "인장 링크(tension links)"로서 표시되어 있다.

- [0103] 유사하게, 축 방향 지지 링크(66)는 z-축에 평행한 축을 따라 보빈(11)에 부착되어, 중앙 가속 평면(26)을 중심으로 대칭되게 1차 코일(30, 32)의 위치를 유지시키기 위해 축 방향 자기 분산력에 대항하며, 1차 코일(30, 32) 사이의 인력을 균형잡는다. 축 방향 및 반경 방향 지지 링크(66, 68)의 세트는 요구되는 중심맞춤 력(centering force)을 제공하는 것에 추가하여, 1차 코일(30, 32)과 보빈(11)의 질량을 중력에 대해 지지한다. 도 8 내지 도 12에 도시된 바와 같이, 보빈(11)은 1차 코일(30/32) 및 비자성 외부 보강 구조물(62)과 수평을 이루면서 이들을 둘러싸서, 기계적 지지 및 봉쇄(containment)를 제공한다.
- [0104] 작동에 있어서, 전자 사이클로트론 공명(ECR) 이온 소스(82)는, 양성자를 생성하기 위해 챔버의 외측 주위에 양 전하를 갖는 플라즈마를 생성하도록, 가스 (예를 들어, 수소) 소스(69) 및 마이크로파 소스(70)로부터 (예를 들어, 10 GHz의 주파수에 있는) 마이크로파 에너지를 챔버 내부로 도입함으로써 이온(예를 들어, 양성자)을 생성한다. 챔버는 그 베이스에 양성자가 빠져 나갈 수 있는 개구(79)를 포함한다. 탈출된 이온은 추출 갭을 가로 질러 중심축(28)을 따라 ECR 이온 소스(82)로부터 주입되고, 이후 아인젤 렌즈 트리플렛(75)에 의해 포커싱된다. 아인젤 렌즈 트리플렛(75)을 통과한 후, 이온은 제한 개구(76)를 통과하며, 이후 이온 경로는, 도 4에 도시된 바와 같이, 중앙 가속 평면(26) 안으로 나선형 인플렉터 전극(78)에 의해 가속 평면 안으로 수직하게 구부러진다. 이후 이온은 빔 챔버(24) 내의 전극 디(42)에 인가된 RF 전압에 의해 가속된다. 전압이 1차 코일(30, 32) 및 플러터 코일(21)에 전달되어, 이온이 챔버(24)로부터 추출되는 외부 반경까지 빔 챔버(24)를 가로지르는 외측 나선형으로 이온을 등시성 가속시키기 위한 자기장을 생성시킨다. 도 10에 도시된 바와 같이, 전압은 전압 소스의 애노드 및 캐소드와 각각 전기적으로 연결된 전류 리드(34)를 통해 플러터 코일(21)에 전달된다. 전압은 플러터 코일(21) 사이의 전기 경로를 형성하는 초전도성 냉각 버스(36)를 통해 직렬로 플러터 코일(21)을 통해 순환된다.
- [0105] 전류 리드(34)는 크라이오스탯(56) 내의 전기적으로 절연된 시일을 통해 전압 소스로부터 (예컨대, 구리 와이어로서) 연장되고, (예를 들어 ~40K 에 있는) 극저온 냉각기(38)의 제 1단(50)과 열적으로 결합되는 중간 열 차폐부(54)를 통해 크라이오스탯(56) 내의 진공 챔버를 통과하며, 이후 예를 들어 비스무트 스트론튬 칼슘 구리 산화물(BSCCO), 이트륨 바륨 구리 산화물(YBCO) 또는 MgB₂로 형성된 고온 초전도성 리드의 형태로 플러터 코일(21)로 이어진다. 추가적인 전류 리드(34)는 마찬가지로 전압 소스를 초전도성 1차 코일(30, 32)과 결합시킨다. 전류 리드(34)는 요크(10)를 통해 극저온 냉각기(38)와 나란히 연장될 수 있다.
- [0106] 본 교시내용에 일치하는 추가적인 예가 아래 번호가 붙은 조항으로서 제시된다.
- [0107] 1. 등시성 사이클로트론으로서,
- [0108] 중심축에 대해 실질적으로 대칭인 2 개 이상의 초전도성 1차 코일로서, 상기 초전도성 1차 코일은 중앙 가속 평면의 대향 측면 상에 위치하는, 2개 이상의 초전도성 1차 코일;
- [0109] 상기 초전도성 1차 코일을 둘러싸며 빔 챔버의 적어도 일부를 수용하는 자기 요크로서, 상기 중앙 가속 평면이 상기 빔 챔버를 통해 연장되는, 자기 요크;
- [0110] 상기 중앙 가속 평면의 각각의 측면 상의 복수의 초전도성 플러터 코일로서, 각각의 초전도성 플러터 코일 또는 플러터 코일 쌍이 섹터 폴 팁으로서 작용하며, 상기 섹터 폴 팁은 중앙 가속 평면의 각 측면상의 섹터 폴 팁 사이에 골(valleys)을 구비하며, 상기 섹터 폴 팁은 중앙 가속 평면을 가로 질러 상기 골을 분리하는 비자성 갭보다 더 좁은 갭에 의해 중앙 가속 평면을 가로 질러 반경 방향으로 분리되는, 복수의 초전도성 플러터 코일;
- [0111] 상기 초전도성 플러터 코일의 위치를 유지하도록 상기 플러터 코일 사이의 골을 채우는 비자성 외부 보강 구조물;
- [0112] 상기 초전도성 플러터 코일 내부에 장착된 내부 보강 구조물; 과
- [0113] 상기 초전도성 1차 코일, 상기 초전도성 플러터 코일, 및 상기 자기 요크와 열적으로 결합된 하나 이상의 극저온 냉동기;를 포함하는,
- [0114] 등시성 사이클로트론.
- [0115] 2. 제 1조에 있어서,

- [0116] 상기 비자성 외부 보강 구조물이 알루미늄을 포함하는,
- [0117] 등시성 사이클로트론.
- [0118] 3. 제 1조 또는 제 2조에 있어서,
- [0119] 제 1 크라이오스탯이 제 1 초전도성 1차 코일, 제 1 초전도성 플러터 코일, 및 제 1 비자성 외부 보강 구조물을 포함하고, 제 2 크라이오스탯이 제 2 초전도성 1차 코일, 제 2 초전도성 플러터 코일, 및 제 2 비자성 외부 보강 구조물을 포함하는,
- [0120] 등시성 사이클로트론.
- [0121] 4. 제 3조에 있어서,
- [0122] 일체형 유지 보수 부트 조립체를 더 포함하고,
- [0123] 상기 일체형 유지 보수 부트 조립체는 열적으로 결합된 1차 코일(들)로부터 상기 극저온 냉동기를 분리시키며, 상기 극저온 냉동기가 제거되면 상기 크라이오스탯 내의 진공을 보존하도록 구성되는,
- [0124] 등시성 사이클로트론.
- [0125] 5. 제 1조 내지 제 4조 중 어느 한 조에 있어서,
- [0126] 상기 비자성 외부 보강 구조물은 전극 디로의 전류 리드가 통과할 수 있는 복수의 개구를 형성하는,
- [0127] 등시성 사이클로트론.
- [0128] 6. 제 1조 내지 제 5조 중 어느 한 조에 있어서,
- [0129] 상기 초전도성 플러터 코일이 상기 중앙 가속 평면에 평행한 평면에서 나선 형상을 가지는,
- [0130] 등시성 사이클로트론.
- [0131] 7. 제 1조 내지 제 6조 중 어느 한 조에 있어서,
- [0132] 상기 내부 보강 구조물은 상기 초전도성 플러터 코일보다 온도가 감소함에 따라 더 적게 수축하고, 상기 초전도성 플러터 코일은 상기 비자성 외부 보강 구조물보다 온도가 감소함에 따라 더 적게 수축하는,
- [0133] 등시성 사이클로트론.
- [0134] 8. 제 1조 내지 제 7조 중 어느 한 조에 있어서,
- [0135] 상기 플러터 코일 각각의 내부 표면과 그 각각의 내부 보강 구조물 사이에, 그리고 상기 플러터 코일 각각의 외부 표면과 200-300K 사이의 온도에 있는 상기 비자성 외부 보강 구조물 사이에 갭이 존재하는,
- [0136] 등시성 사이클로트론.
- [0137] 9. 제 1조 내지 제 8조 중 어느 한 조에 있어서,
- [0138] 상기 내부 보강 구조물이 구리 및 스테인리스 강으로부터 선택된 하나 이상의 금속을 포함하는,
- [0139] 등시성 사이클로트론.
- [0140] 10. 제 1조 내지 제 9조 중 어느 한 조에 있어서,
- [0141] 상기 초전도성 플러터 코일이 상기 중심축 주변의 3-섹터 구성 내에만 있는,
- [0142] 등시성 사이클로트론.
- [0143] 11. 제 10조에 있어서,
- [0144] 단지 3 또는 6 개의 초전도성 플러터 코일이 상기 등시성 사이클로트론 내에 구비되는,
- [0145] 등시성 사이클로트론.
- [0146] 12. 제 1조 내지 제 9조 중 어느 한 조에 있어서,
- [0147] 상기 초전도성 플러터 코일이 상기 중심축 주변의 4 또는 그보다 많은-섹터 구성 내에 있는,

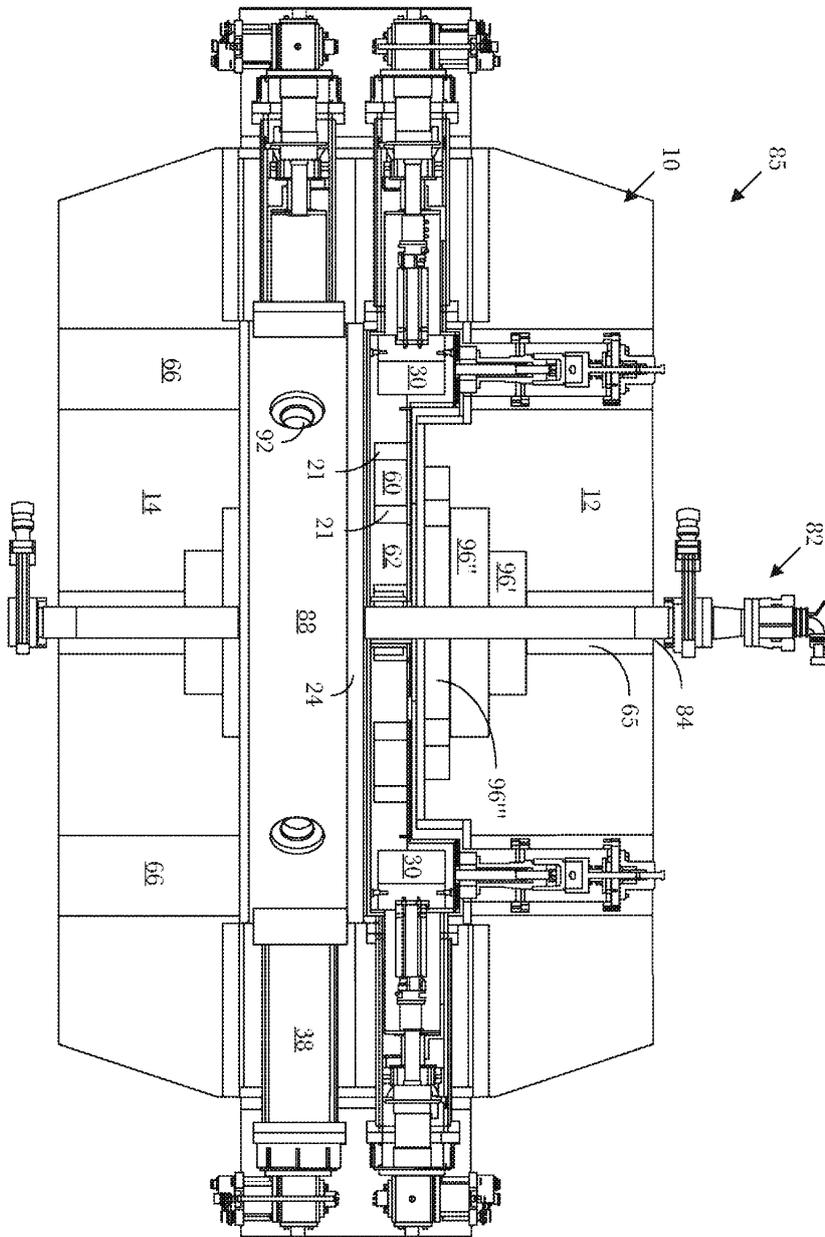
- [0148] 등시성 사이클로트론.
- [0149] 13. 제 1조 내지 제 12조 중 어느 한 조에 있어서,
- [0150] 상기 등시성 사이클로트론이 35톤 미만의 질량을 가지는,
- [0151] 등시성 사이클로트론.
- [0152] 14. 제 1조 내지 제 13조 중 어느 한 조에 있어서,
- [0153] 각각의 극저온 냉동기가 헤드를 구비하고, 각각의 극저온 냉동기와 상기 1차 코일(들)과의 결합은, 각각의 극저온 냉동기의 헤드를 상기 자기 요크 너머에 있는 상기 중앙 가속 평면으로부터의 거리에 배치시키도록 구성되고 배향되는,
- [0154] 등시성 사이클로트론.
- [0155] 15. 등시성 이온 가속 방법으로서,
- [0156] a) 중심축에 대해 실질적으로 대칭인 2 개 이상의 초전도성 1차 코일로서, 상기 초전도성 1차 코일은 중앙 가속 평면의 대향 측면 상에 위치하는, 2개 이상의 초전도성 1차 코일;
- [0157] b) 상기 초전도성 1차 코일을 둘러싸며 빔 챔버의 적어도 일부를 수용하는 자기 요크로서, 상기 중앙 가속 평면이 상기 빔 챔버를 통해 연장되는, 자기 요크;
- [0158] c) 상기 중앙 가속 평면의 각각의 측면 상의 복수의 초전도성 플러터 코일로서, 각각의 초전도성 플러터 코일 또는 플러터 코일 쌍이 섹터 폴 팁으로서 작용하며, 상기 섹터 폴 팁은 중앙 가속 평면의 각 측면상의 섹터 폴 팁 사이에 골(valleys)을 구비하며, 상기 섹터 폴 팁은 중앙 가속 평면을 가로 질러 상기 골을 분리하는 비자성 갭보다 더 좁은 갭에 의해 중앙 가속 평면을 가로 질러 반경 방향으로 분리되는, 복수의 초전도성 플러터 코일;
- [0159] d) 상기 초전도성 플러터 코일의 위치를 유지하도록 상기 골을 채우는 외부 보강 구조물;
- [0160] e) 상기 플러터 코일 내부에 장착된 내부 보강 구조물;
- [0161] f) 상기 초전도성 코일 및 상기 자기 요크와 열적으로 결합된 극저온 냉동기; 및
- [0162] g) 상기 빔 챔버 내에 장착되고 무선주파수 전압 소스와 결합되는 복수의 전극;
- [0163] 을 포함하는 등시성 사이클로트론을 사용하는 단계;
- [0164] 내부 반경에 있는 상기 중앙 가속 평면 내부로 이온을 유입시키는 단계;
- [0165] 상기 중앙 가속 평면을 가로질러 팽창하는 궤도로 고정된 주파수에서 상기 이온을 가속시키기 위하여, 상기 무선주파수 전압 소스로부터 상기 전극으로 전류를 제공하는 단계;
- [0166] 상기 극저온 냉동기로 상기 초전도성 1차 코일 및 상기 초전도성 플러터 코일을 냉각시키는 단계로서, 상기 초전도성 1차 코일 및 플러터 코일이 그 초전도성 변이 온도 이하의 온도까지 냉각되는, 초전도성 1차 코일 및 초전도성 플러터 코일 냉각 단계;
- [0167] 상기 초전도성 1차 코일 및 상기 자기 요크로부터 상기 중앙 가속 평면 내의 자기장을 반경 방향으로 증가시키는 초전도성 전류를 상기 초전도성 1차 코일 내에 생성시키기 위하여, 냉각된 상기 초전도성 1차 코일에 전압을 제공하는 단계;
- [0168] 상기 초전도성 플러터 코일 내에 초전도성 전류를 생성시키기 위해, 냉각된 상기 초전도성 플러터 코일에 전압을 제공하는 단계; 및
- [0169] 외부 반경에서 빔 챔버로부터 가속된 이온을 추출하는 단계;를 포함하는,
- [0170] 등시성 이온 가속 방법.
- [0171] 16. 제 15조에 있어서,
- [0172] 가속된 이온이 10-250 MeV의 에너지에 도달하는,
- [0173] 등시성 이온 가속 방법.

- [0174] 17. 제 15조 또는 제 16조에 있어서,
- [0175] 상기 자기 요크는 이온이 가속될 때 200K를 넘는 온도에서 유지되는,
- [0176] 등시성 이온 가속 방법.
- [0177] 18. 제 15조 내지 제 17조 중 어느 한 조에 있어서,
- [0178] 상기 등시성 사이클로트론이 플러터 코일과 동일한 개수의 전극을 구비하고, 상기 전극은 상기 중심축 주위에서 상기 플러터 코일 사이에서 각을 두고 배치되는,
- [0179] 등시성 이온 가속 방법.
- [0180] 19. 제 15조 내지 제 18조 중 어느 한 조에 있어서,
- [0181] 추출된 상기 이온을 인간 환자의 종양에 지향시키는 단계를 더 포함하는,
- [0182] 등시성 이온 가속 방법.
- [0183] 20. 제 19조에 있어서,
- [0184] 추출된 이온의 빔이 펜슬 빔 스캐닝을 통해서 상기 종양을 가로질러 스캔되는,
- [0185] 등시성 이온 가속 방법.
- [0186] 21. 제 20조에 있어서,
- [0187] 상기 펜슬 빔 스캐닝 프로세스가 10초 이내에 완료되는,
- [0188] 등시성 이온 가속 방법.
- [0189] 22. 제 20조에 있어서,
- [0190] 상기 펜슬 빔 스캐닝 프로세스가 5초 이내에 완료되는,
- [0191] 등시성 이온 가속 방법.
- [0192] 23. 제 15조 내지 제 22조 중 어느 한 조에 있어서,
- [0193] 외부 전자 사이클로트론 공명 이온 소스로부터 상기 이온을 주입함으로써, 상기 이온이 상기 중앙 가속 평면으로 유입되는,
- [0194] 등시성 이온 가속 방법.
- [0195] 24. 제 15조 내지 제 23조 중 어느 한 조에 있어서,
- [0196] 추출된 상기 이온이 220 MeV 이상의 에너지를 가지는 양성자인,
- [0197] 등시성 이온 가속 방법.
- [0198] 25. 제 15조 내지 제 24조 중 어느 한 조에 있어서,
- [0199] 상기 등시성 사이클로트론이 상기 중앙 가속 평면 내에 3.5 T 보다 큰 중심 자기장을 생성시키는,
- [0200] 등시성 이온 가속 방법.
- [0201] 26. 제 15조 내지 제 25조 중 어느 한 조에 있어서,
- [0202] 제 1조 내지 제 14조 중 어느 한 조에 따른 등시성 사이클로트론을 이용하여 수행되는,
- [0203] 등시성 이온 가속 방법.
- [0204] 본 발명의 실시예를 설명할 때, 명확한 설명을 위해 특정 용어가 사용된다. 설명의 목적을 위해, 특정 용어는 유사한 결과를 달성하기 위해 유사한 방식으로 동작하는 기술적 및 기능적 동가물을 적어도 포함하도록 의도된다. 또한, 본 발명의 특정 실시예가 복수의 시스템 요소 또는 방법 단계를 포함하는 일부 예에서, 이들 요소 또는 단계는 단일 요소 또는 단계로 대체 될 수 있으며; 마찬가지로, 단일 요소 또는 단계는 동일한 목적을 달성하는 복수의 요소 또는 단계로 대체 될 수 있다. 또한, 다양한 특성 또는 다른 값에 대한 파라미터가 본 발명의 실시예에 대해 본원에서 지정되는 경우, 달리 명시되지 않는 한, 이들 파라미터 또는 값은 1/100, 1/50, 1/20,

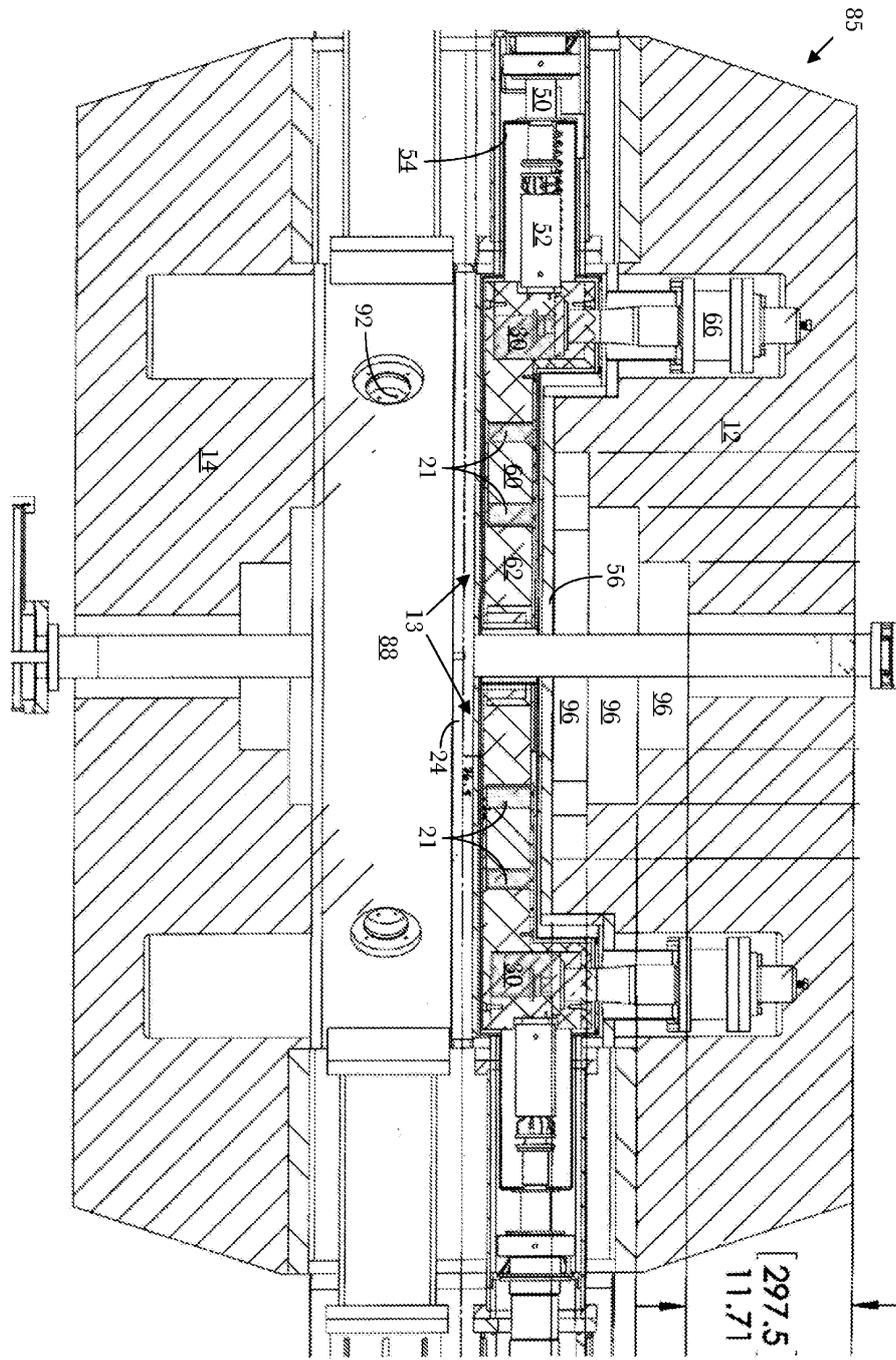
1/10, 1/5, 1/3, 1/2, 2/3, 3/4, 4/5, 9/10, 19/20, 49/50, 99/100 등의 분율로 (또는 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 20, 50, 100 등의 배수로) 감소 또는 증가되게 조정될 수 있거나, 또는 이들을 반올림한 근사치에 의해 감소 또는 증가되게 조정될 수 있다. 또한, 본 발명은 특정 실시예를 참조하여 도시되고 설명되었지만, 당업자는 본 발명의 범위를 벗어나지 않으면서 형태 및 세부 사항에서 다양한 치환 및 변경이 이루어질 수 있음을 이해할 것이다. 또한, 다른 양상, 기능 및 이점 또한 본 발명의 범위 내에 있으며; 본 발명의 모든 실시예가 반드시 상술한 모든 특성을 가지거나 모든 이점을 달성할 필요는 없다. 또한, 일 실시예와 관련하여 본원에서 논의된 단계, 요소 및 특징은 다른 실시예와 관련하여 유사하게 사용될 수 있다. 본문 전체에 걸쳐 인용된 참고 문헌, 저널 기사, 특허, 특허 출원 등을 포함하는 참조 문헌의 내용은 참조에 의해 그 전체가 본 명세서에 병합되며; 이들 참조 문헌으로부터의 적절한 구성 요소, 단계 및 특성화는 본 발명의 실시예에 포함되거나 포함되지 않을 수 있다. 또한, 배경 기술 분야에서 확인된 구성 요소 및 단계는 본 개시내용에 포함되는 것이며 본 발명의 범위 내에서 본 개시내용의 다른 곳에서 기술된 구성 요소 및 단계와 함께 사용되거나 또는 이들로 대체될 수 있다. 참조를 용이하게 하기 위해 병렬형 번호 매김 문자가 추가되었거나 추가되지 않은 채 -단계가 특정 순서로 열거되는 방법 청구항에서, 단계는 용어와 표현에 의해 달리 명시되거나 암시되지 않는 한 열거된 순서로 시간적으로 제한되는 것으로 해석되어서는 안 된다.

도면

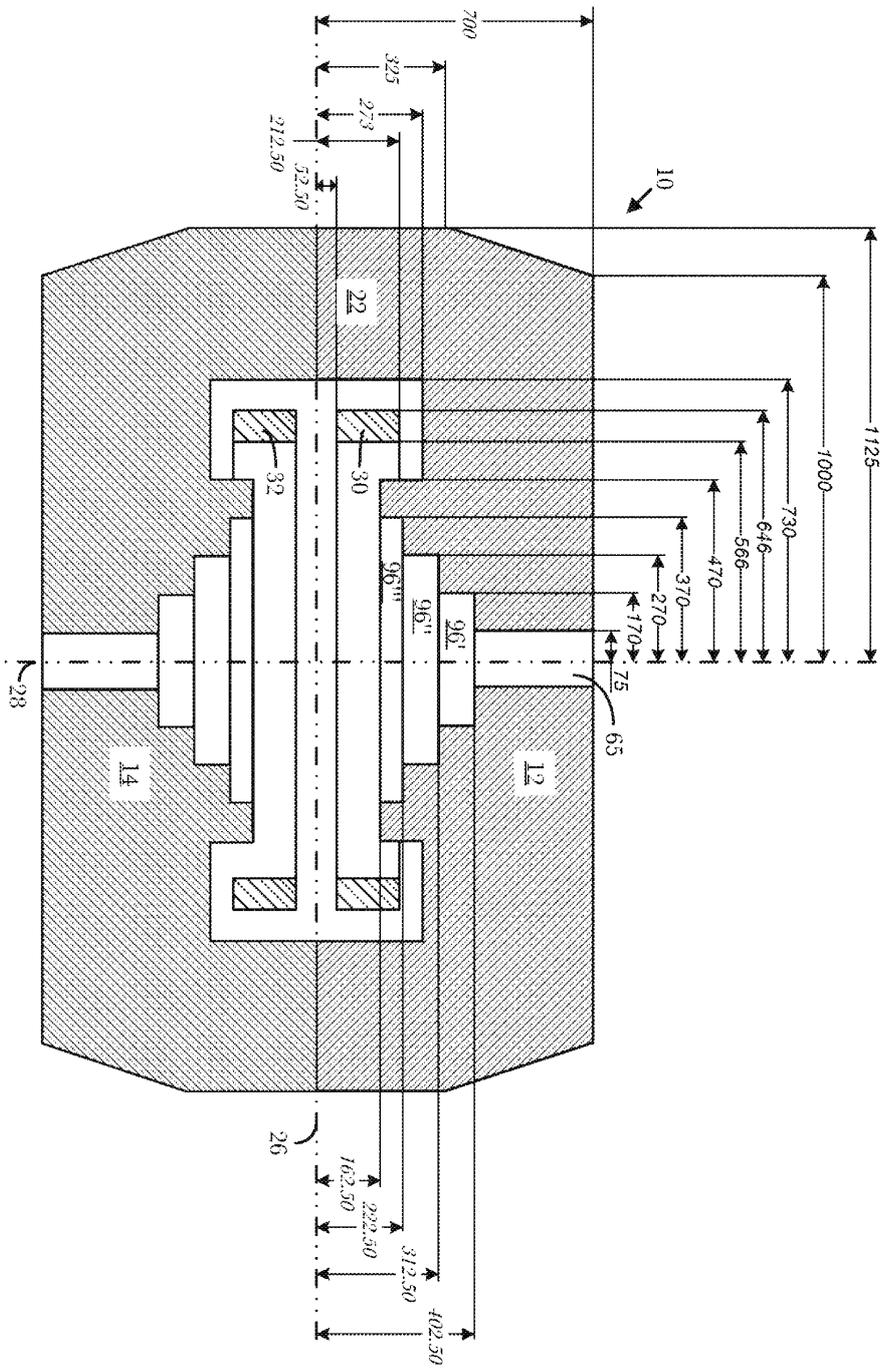
도면1



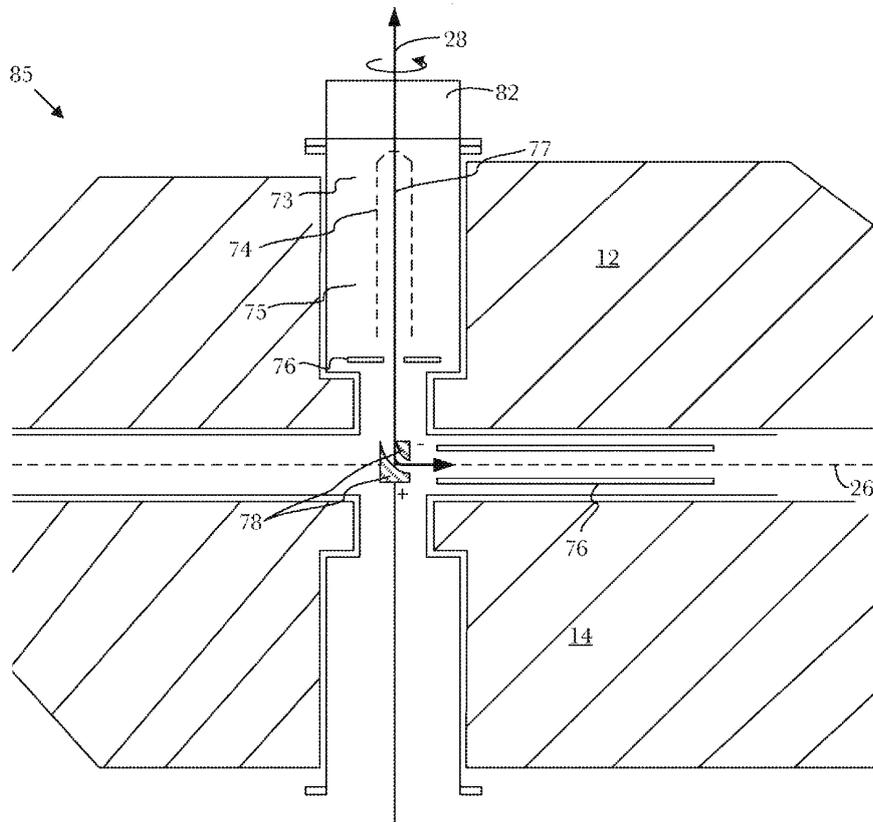
도면2



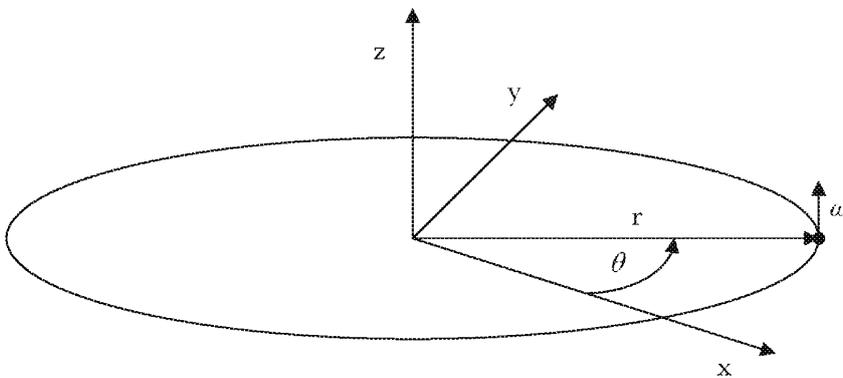
도면3



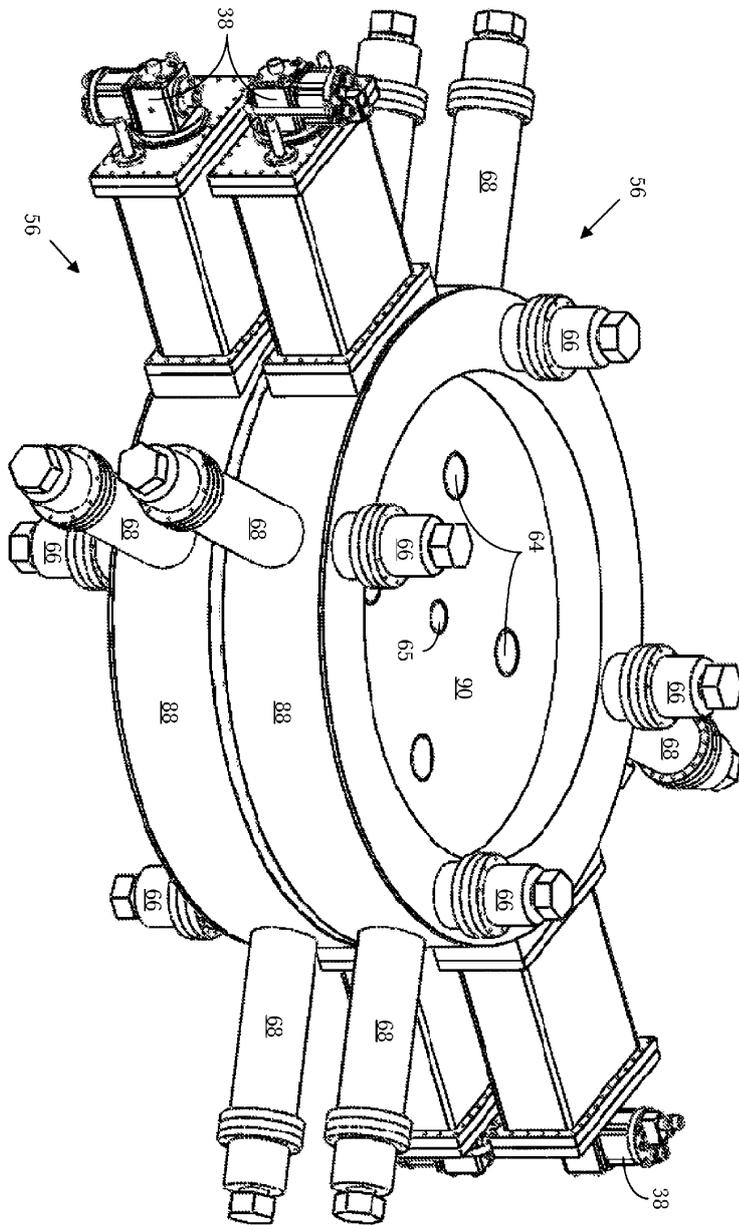
도면4



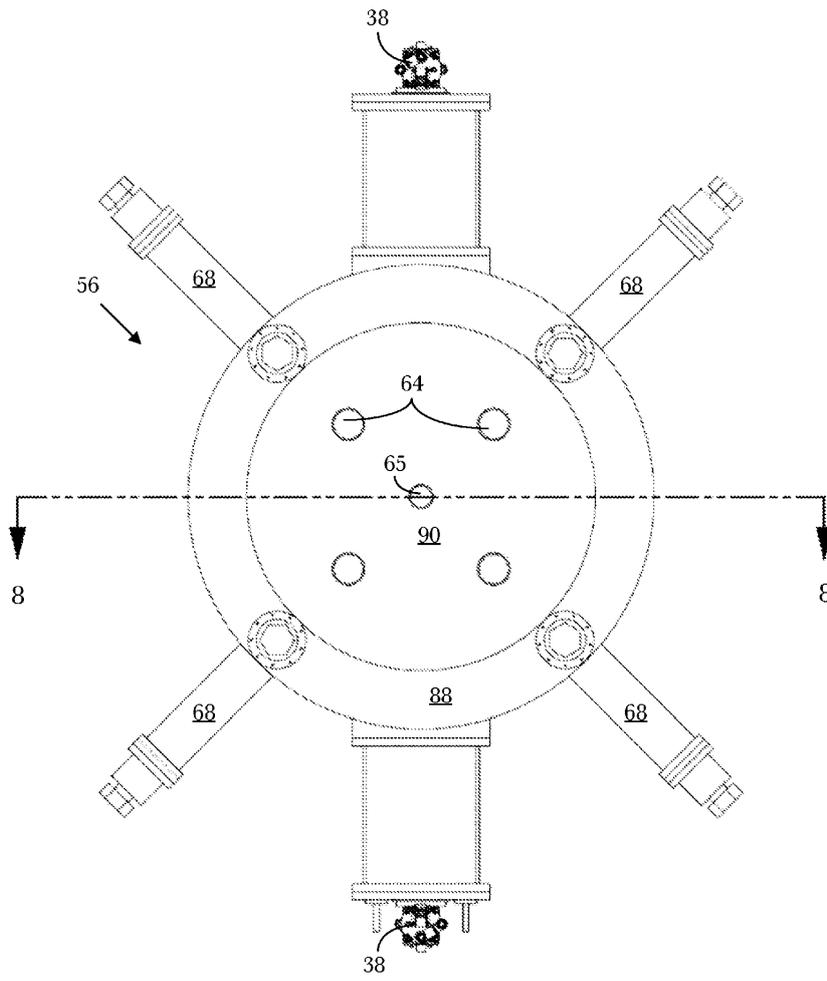
도면5



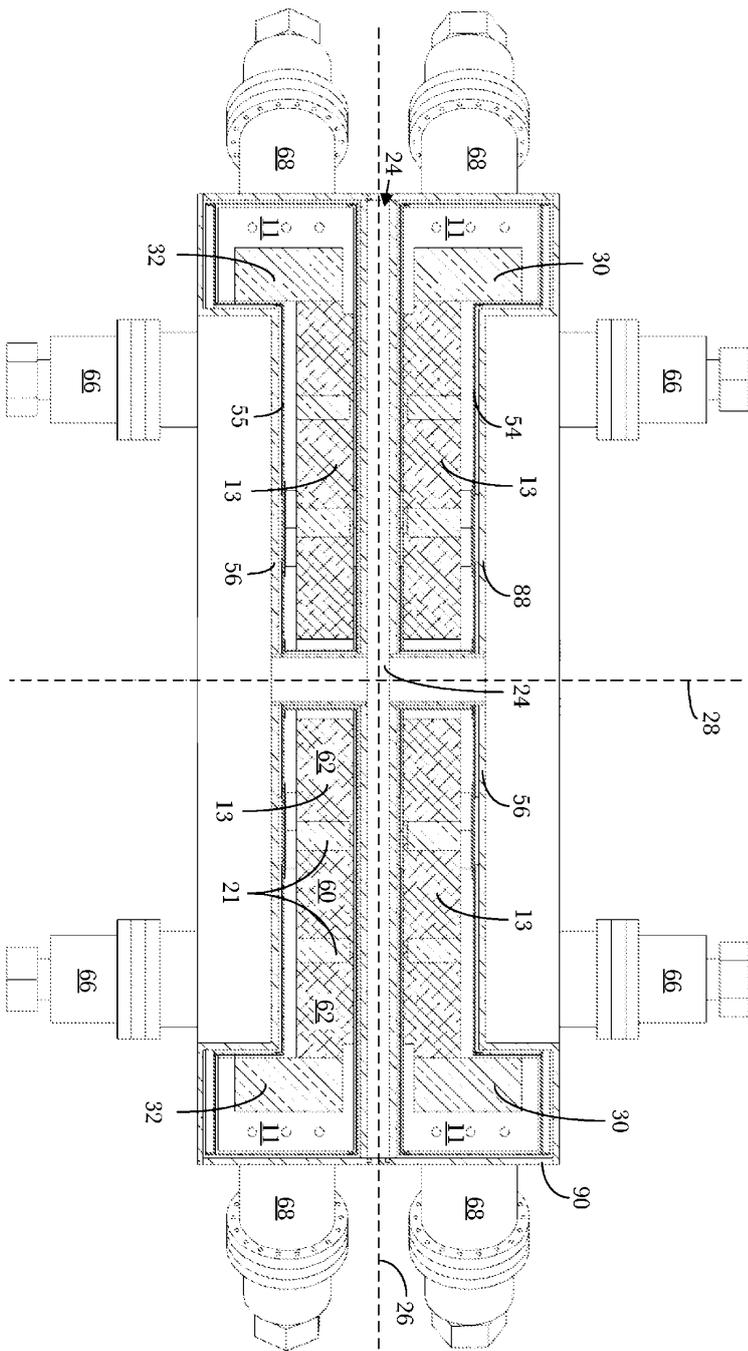
도면6



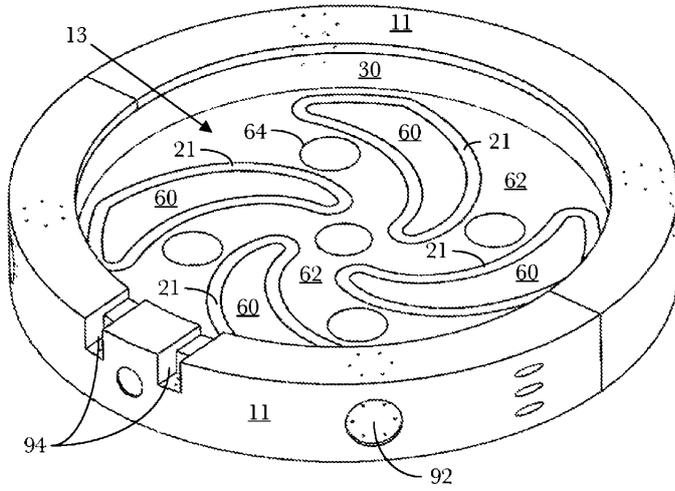
도면7



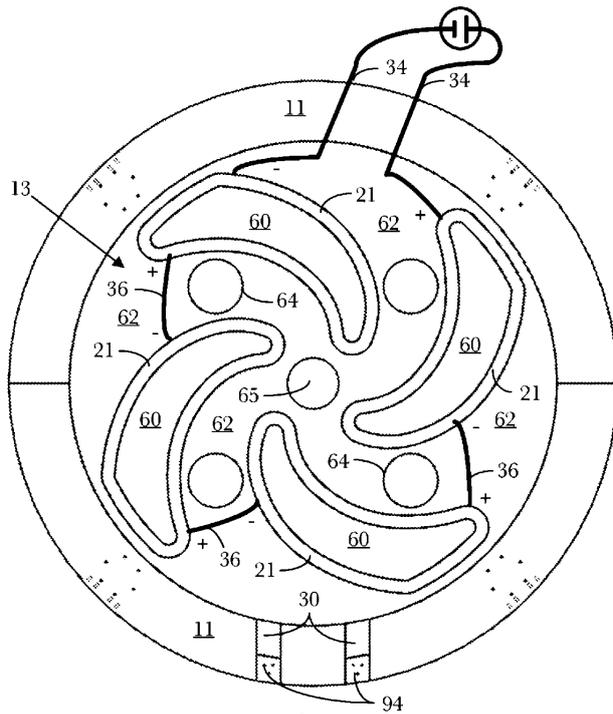
도면8



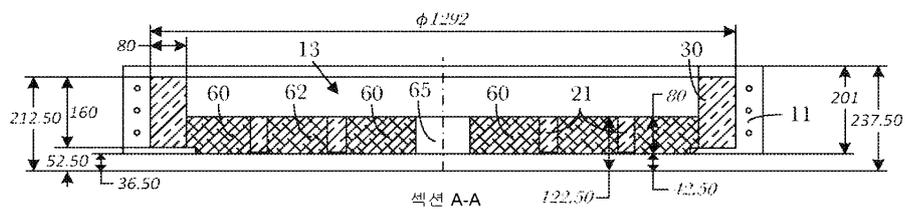
도면9



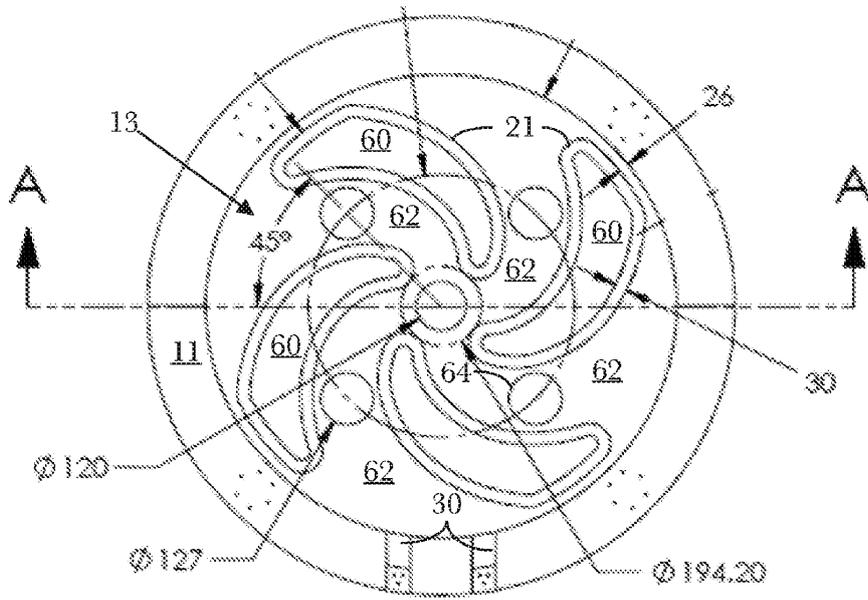
도면10



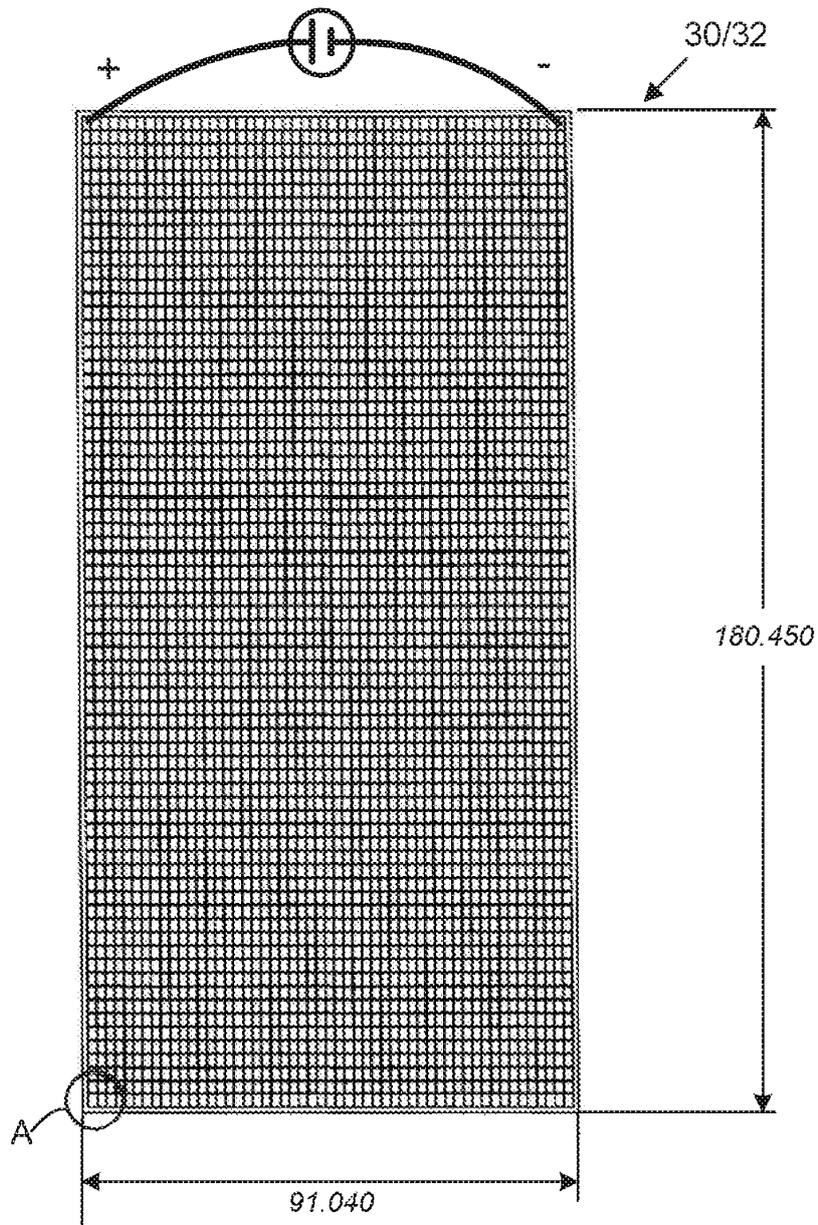
도면11



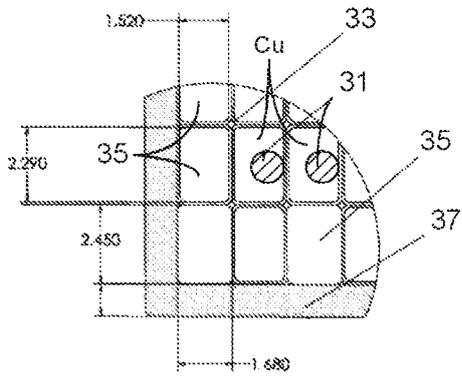
도면12



도면13

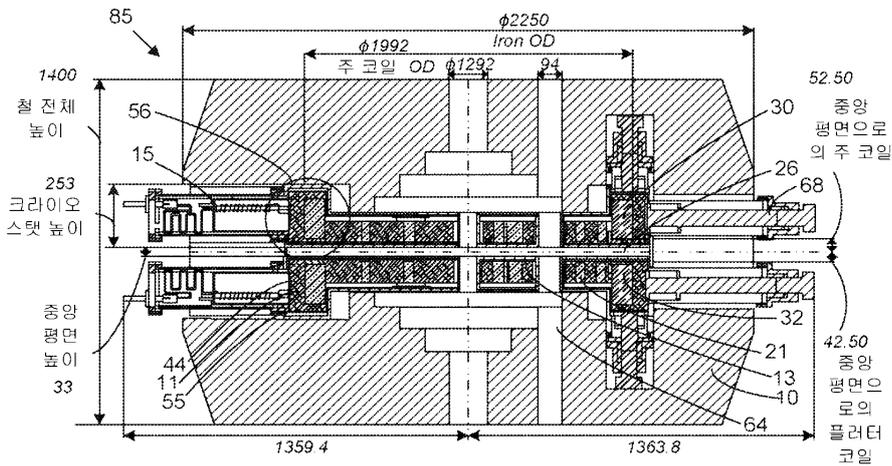


도면14

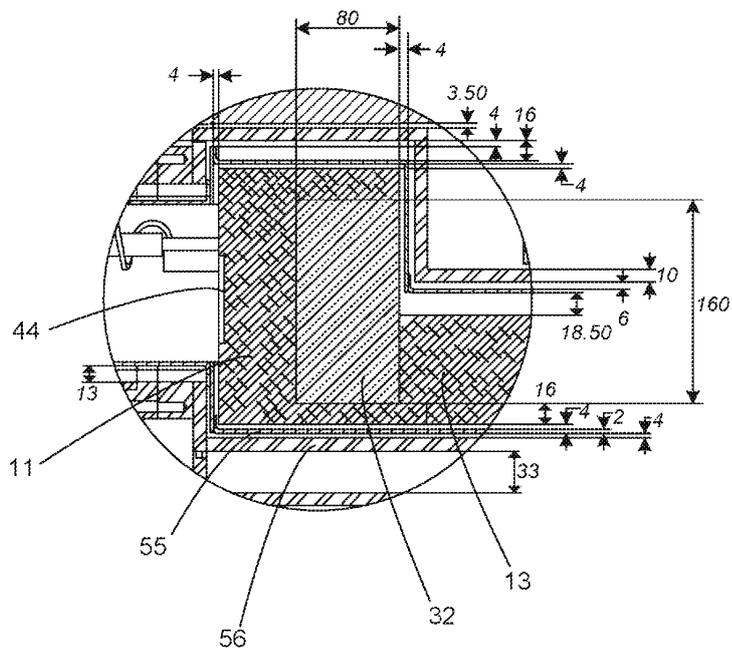


상세도 A

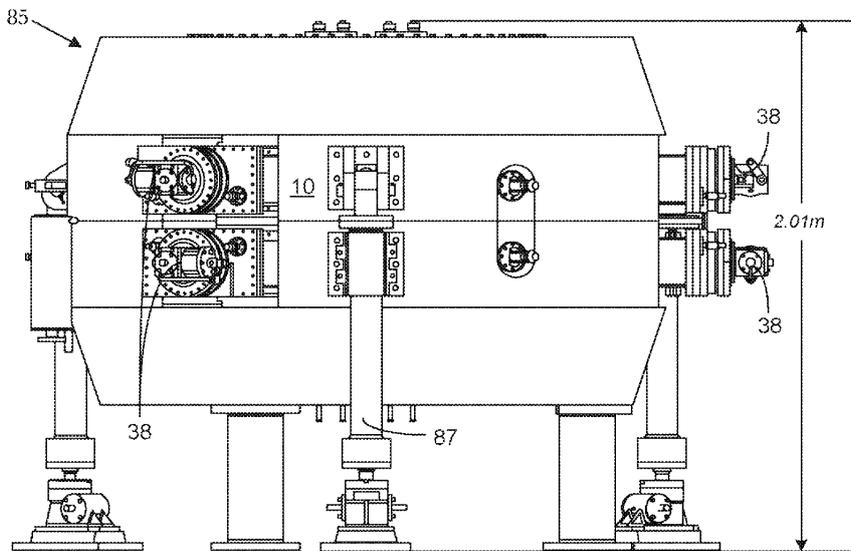
도면15



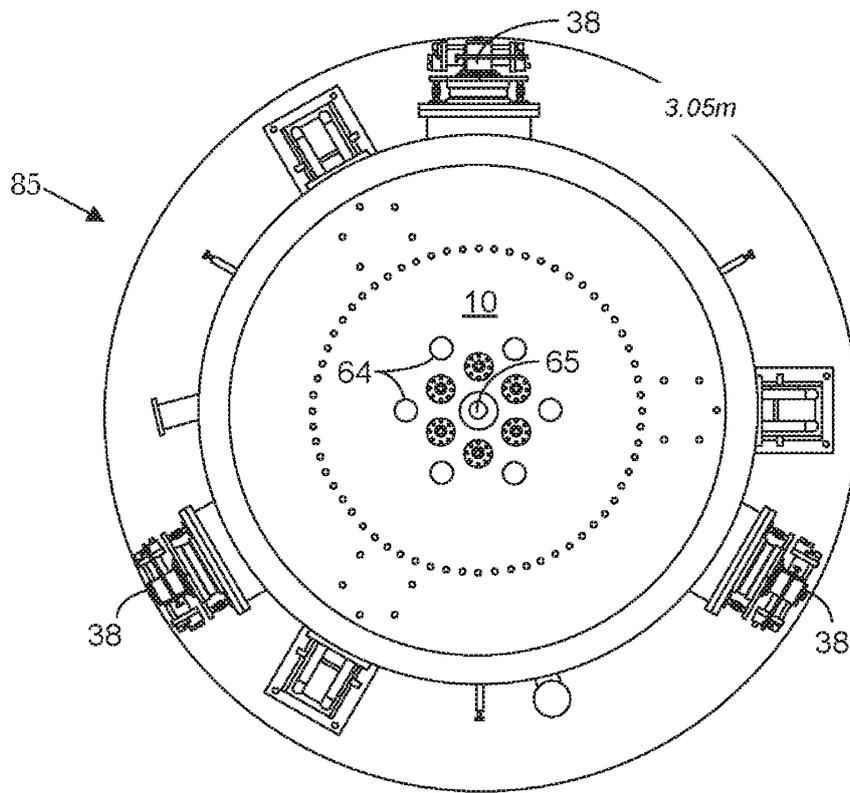
도면16



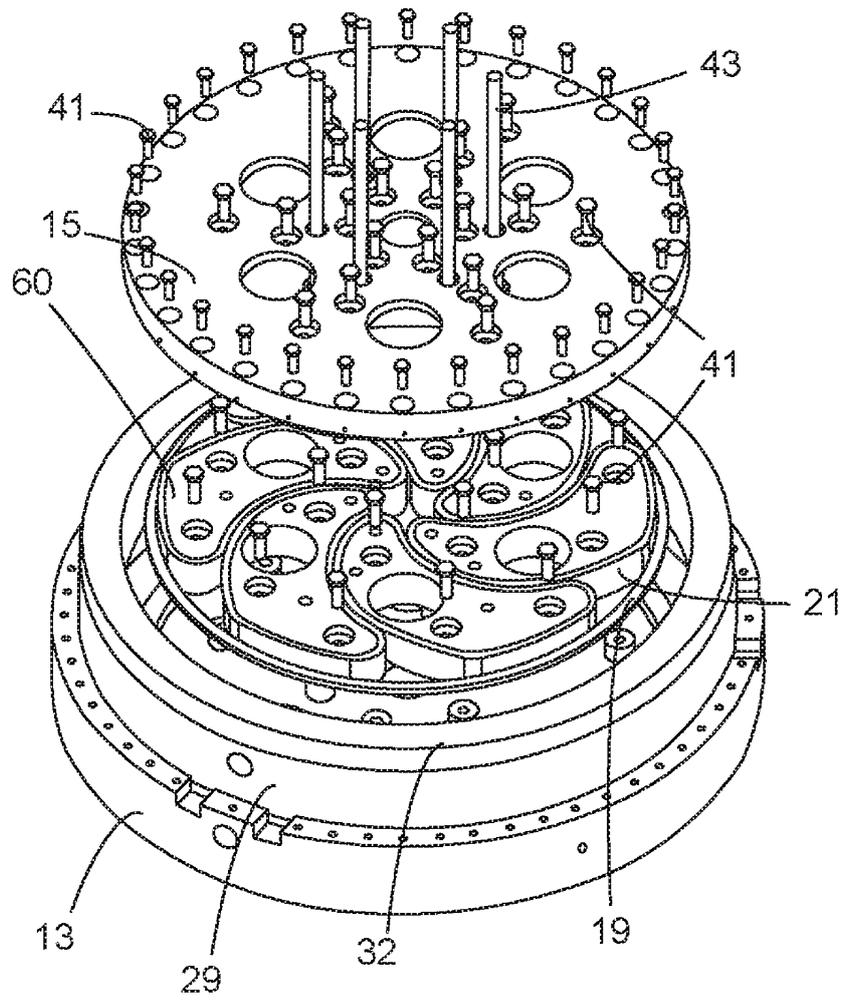
도면17



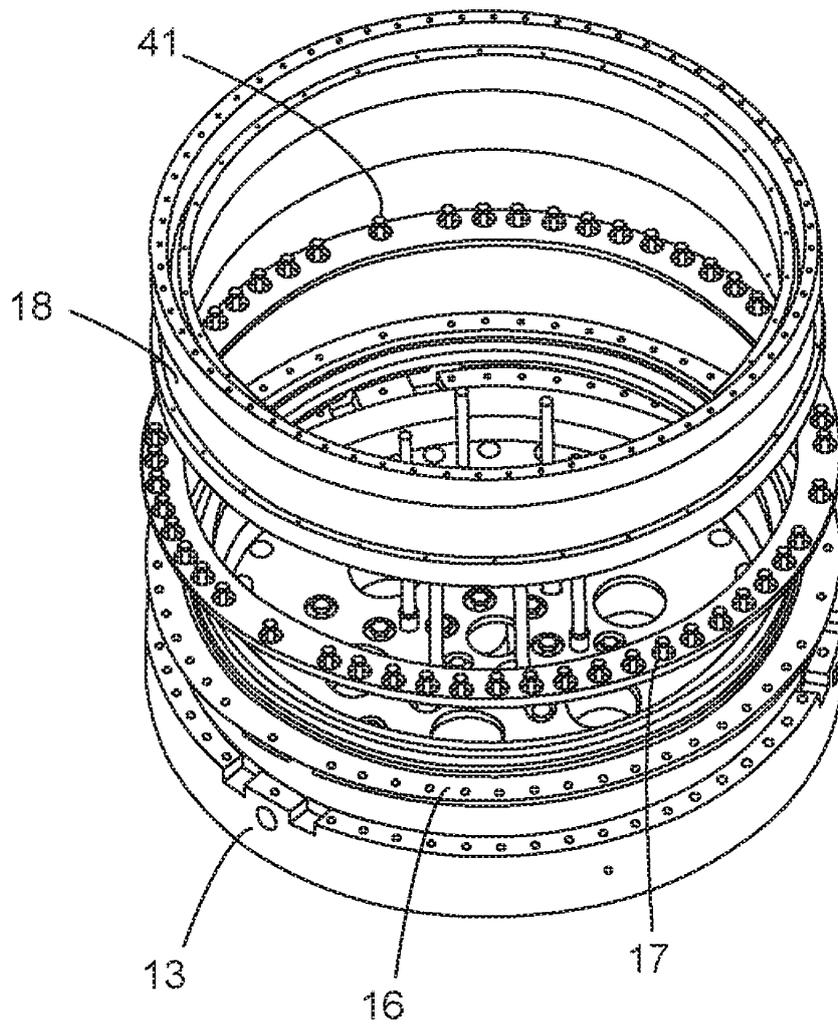
도면18



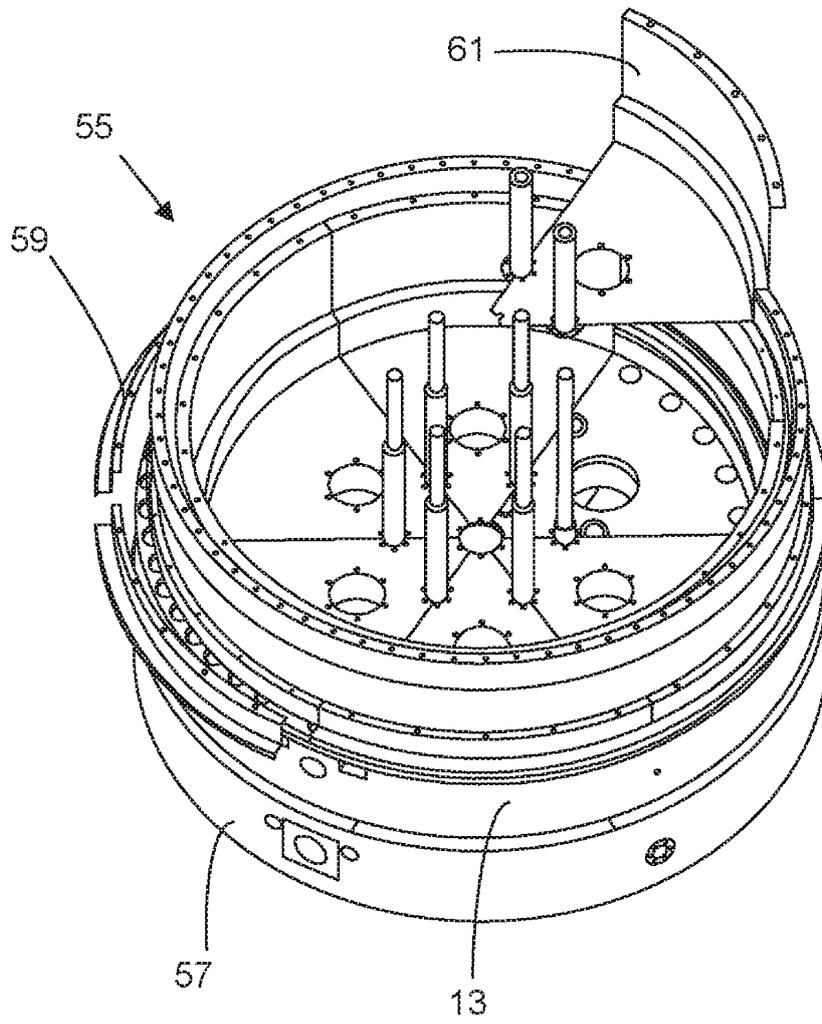
도면19



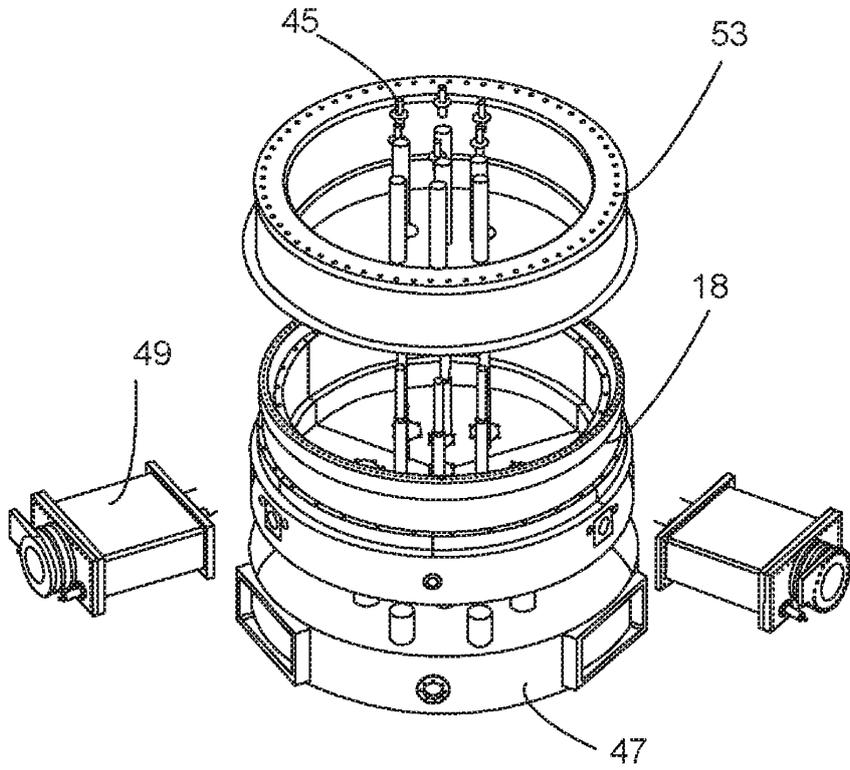
도면20



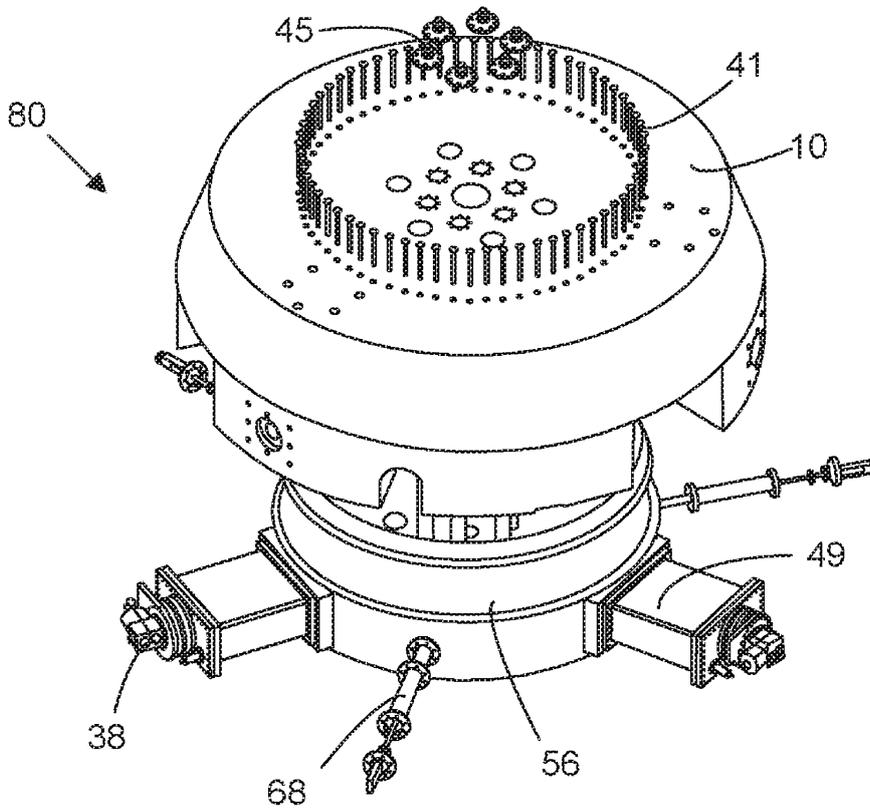
도면21



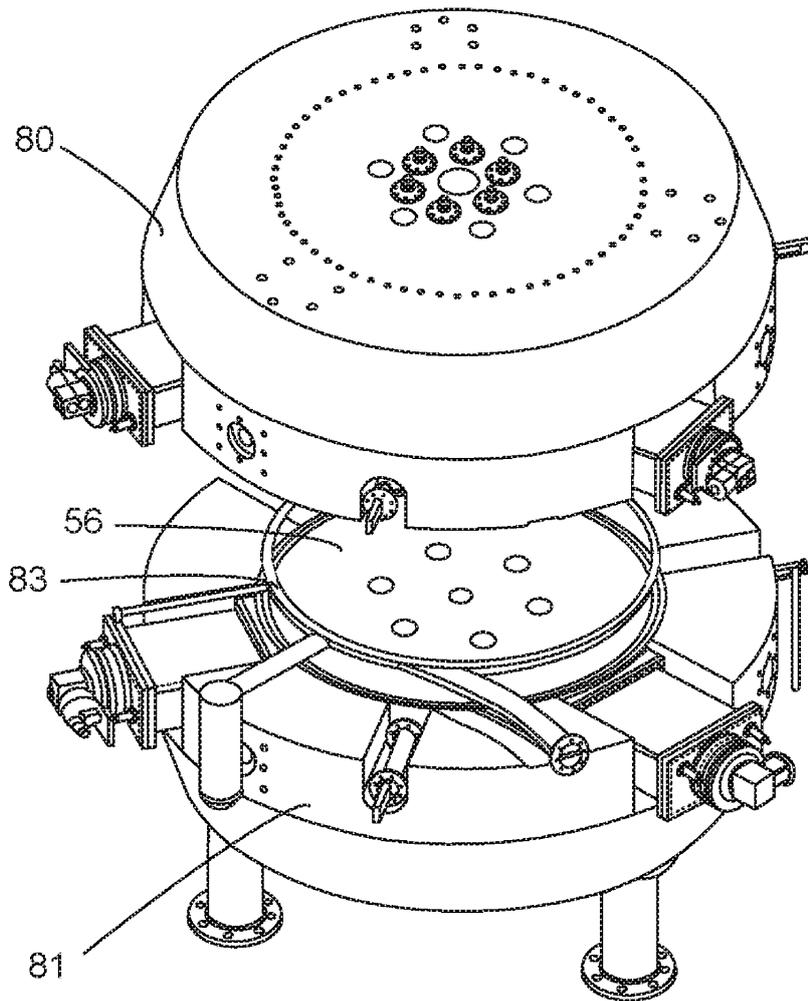
도면22



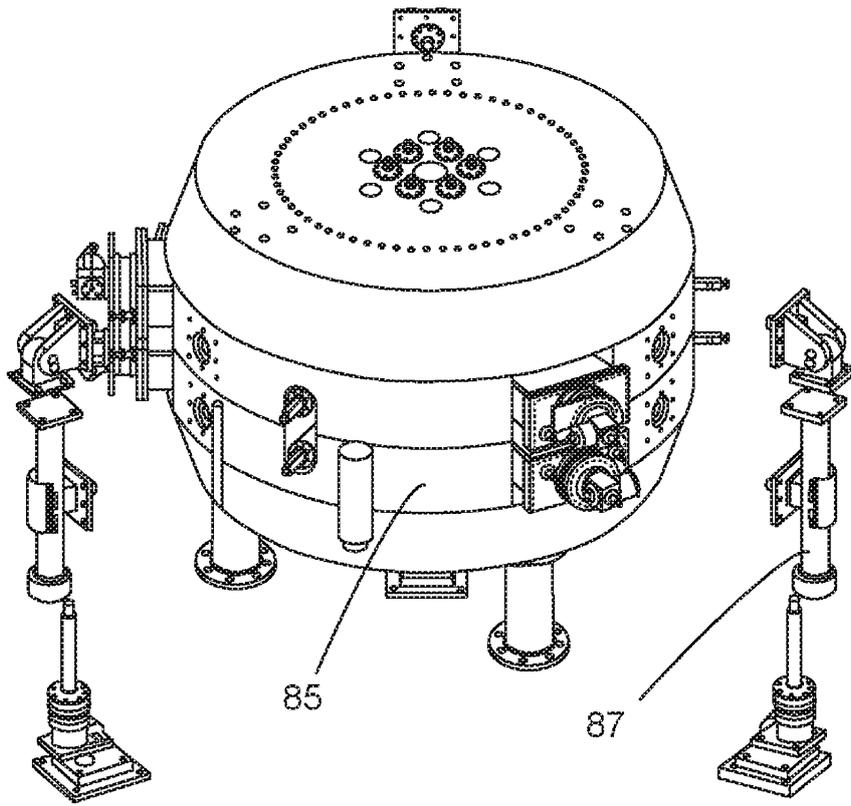
도면23



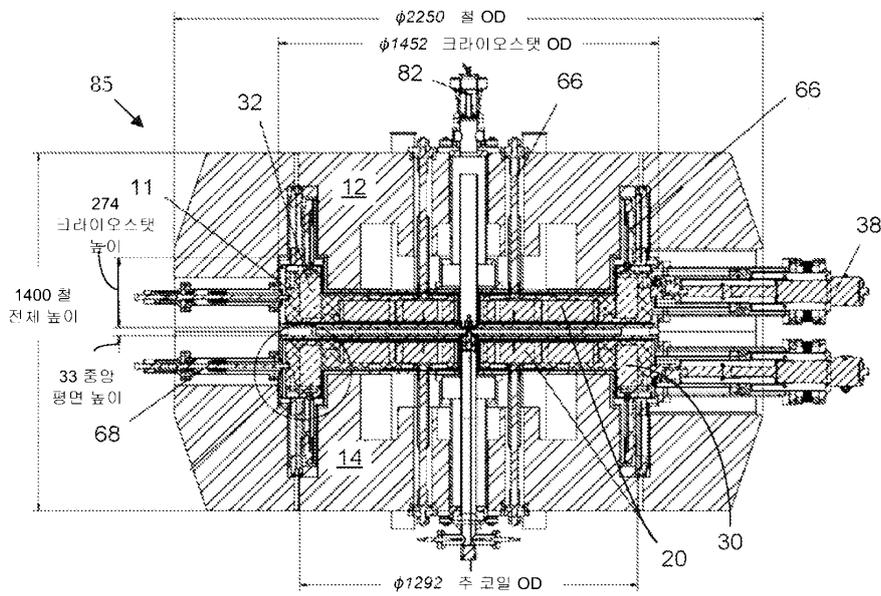
도면24



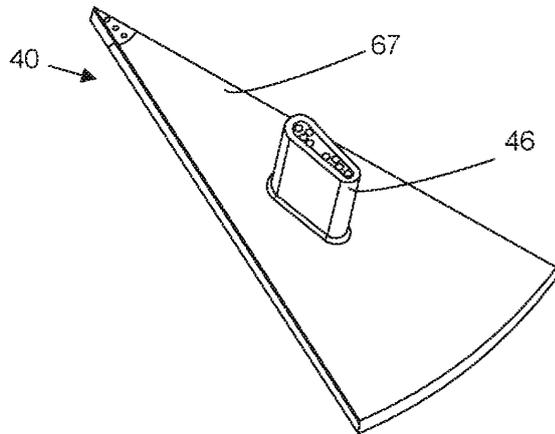
도면25



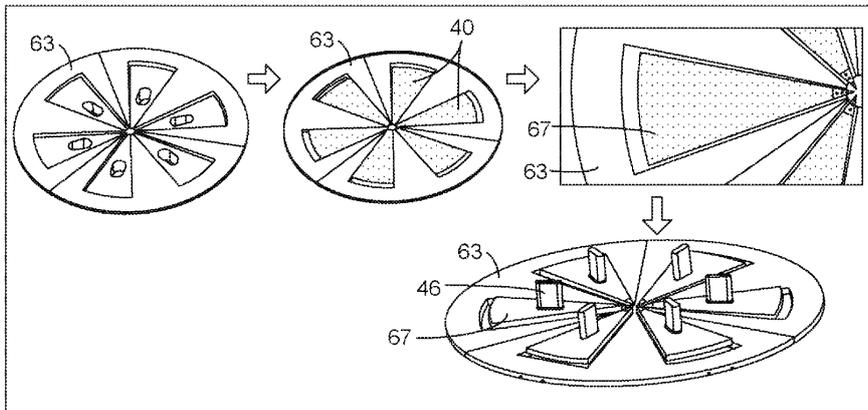
도면26



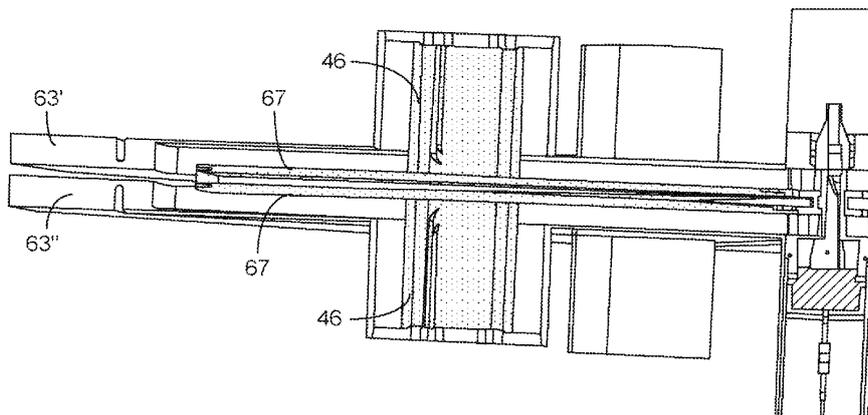
도면30



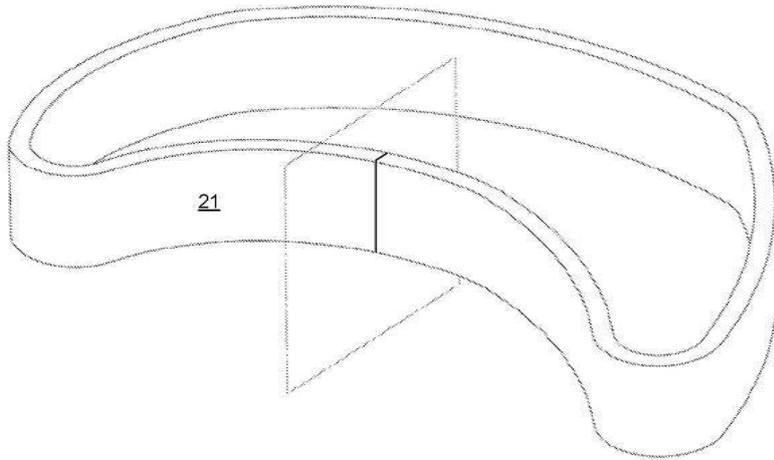
도면31



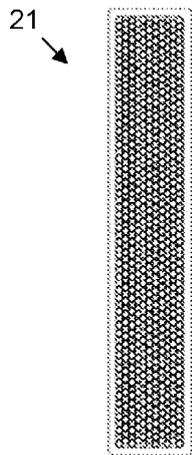
도면32



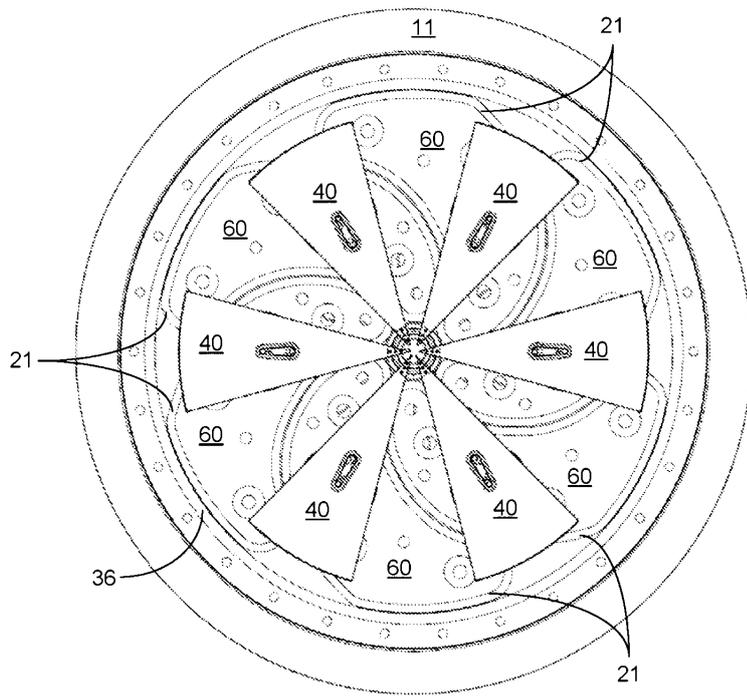
도면33



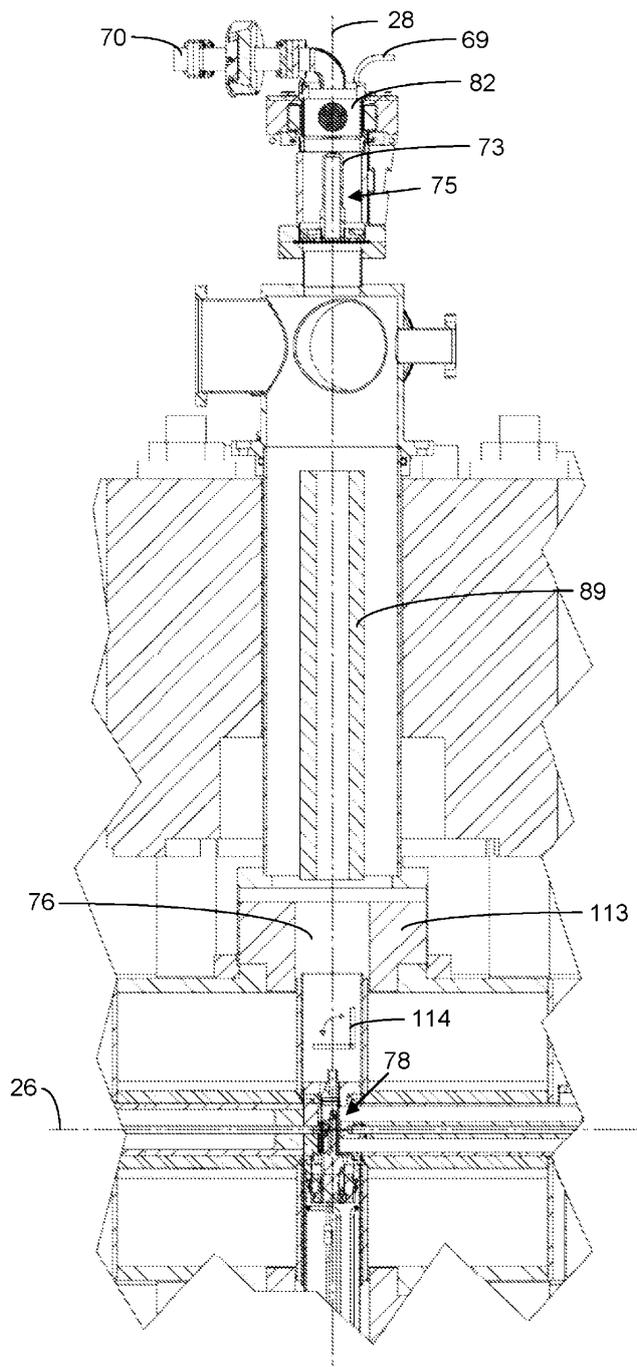
도면34



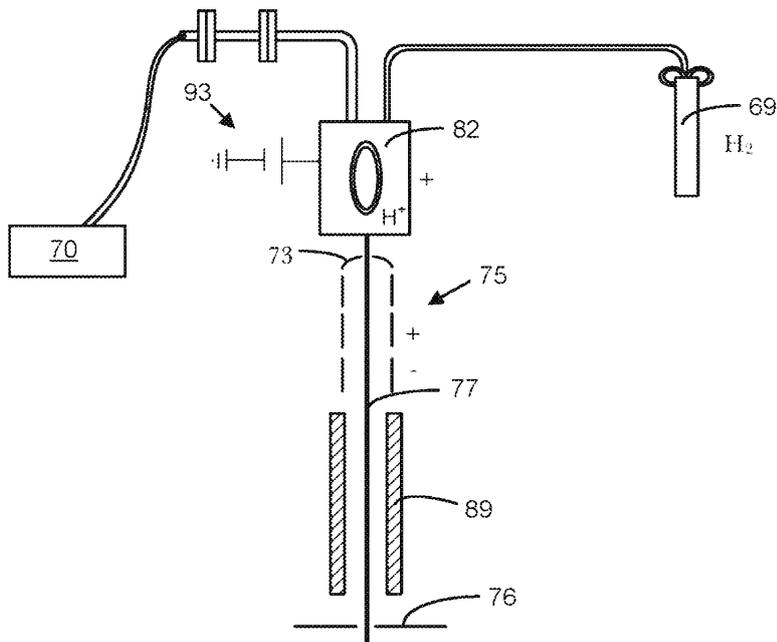
도면35



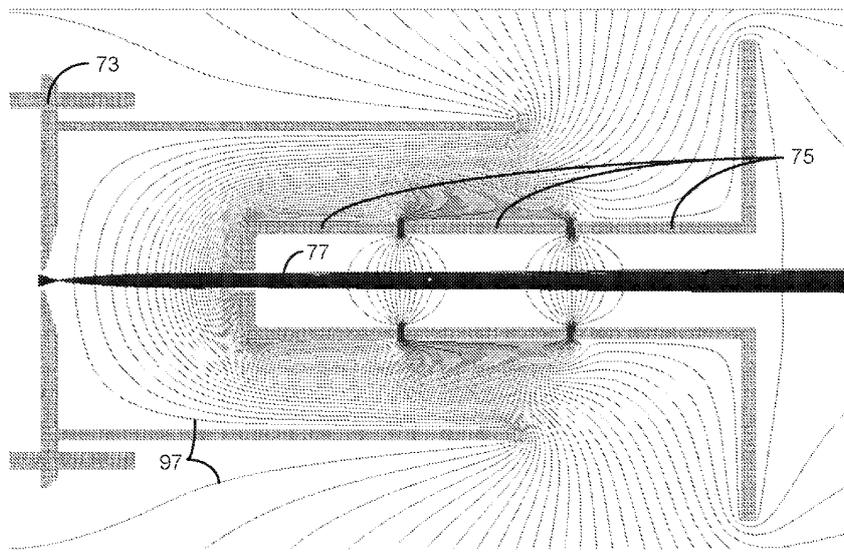
도면36



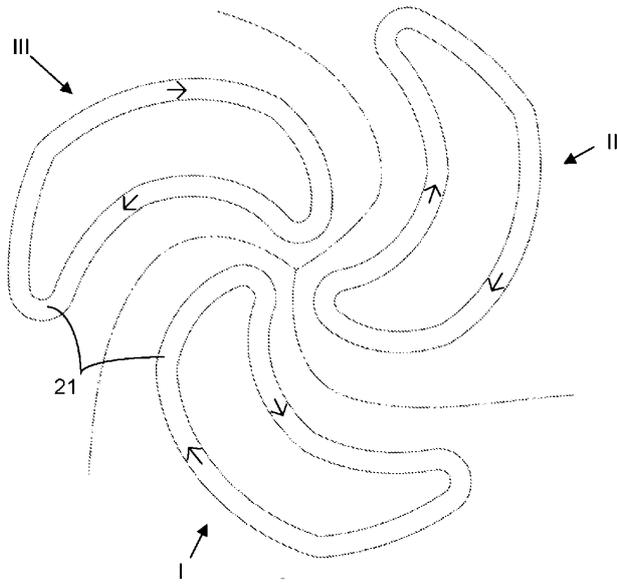
도면37



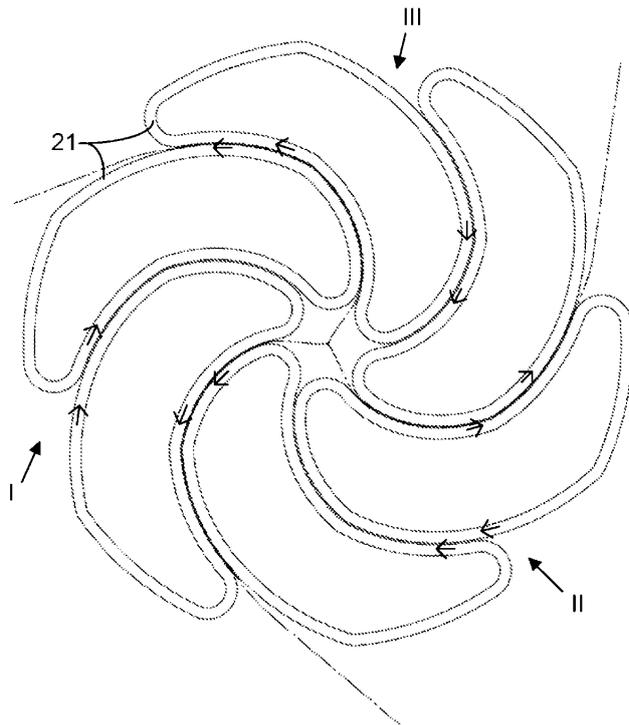
도면38



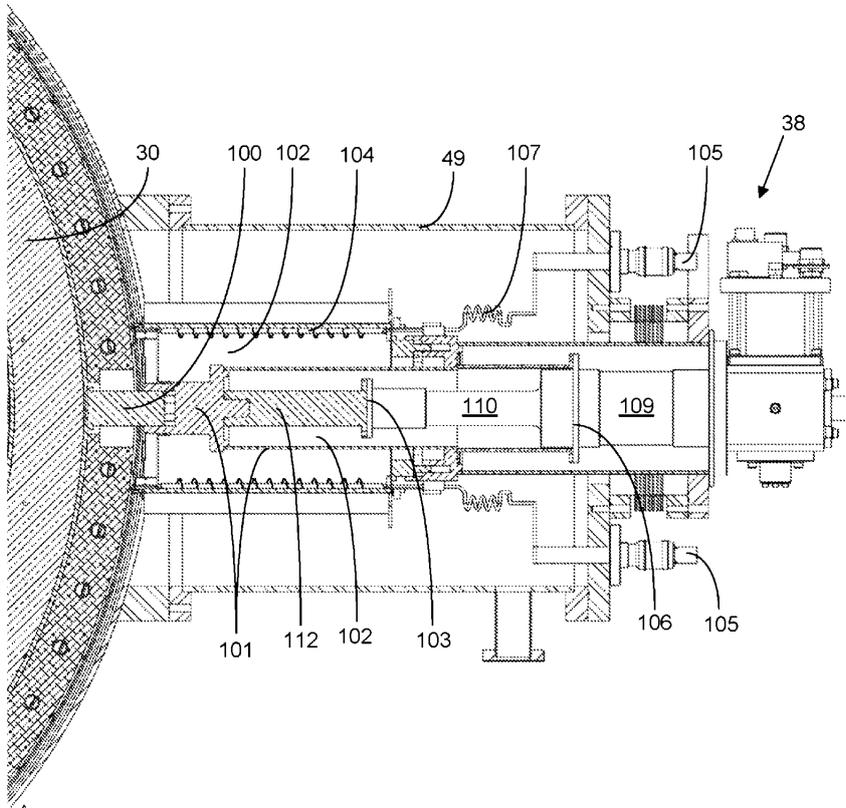
도면39



도면40



도면41



도면42

