



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2023년11월30일  
(11) 등록번호 10-2608320  
(24) 등록일자 2023년11월27일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
G21B 1/05 (2006.01) H01F 6/06 (2006.01)
- (52) CPC특허분류  
G21B 1/057 (2013.01)  
H01F 6/06 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2020-7019568
- (22) 출원일자(국제) 2018년12월07일  
심사청구일자 2021년12월06일
- (85) 번역문제출일자 2020년07월07일
- (65) 공개번호 10-2020-0138160
- (43) 공개일자 2020년12월09일
- (86) 국제출원번호 PCT/GB2018/053564
- (87) 국제공개번호 WO 2019/111019  
국제공개일자 2019년06월13일
- (30) 우선권주장  
1720518.8 2017년12월08일 영국(GB)
- (56) 선행기술조사문헌  
KR1020140074322 A\*  
US20110170649 A1\*  
\*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

- (73) 특허권자  
토카막 에너지 리미티드  
영국 옥스포드셔 오엑스14 4에스디 애빙던 밀턴  
브룩 드라이브 173
- (72) 발명자  
빅스턴 피터  
영국 애빙던 옥스포드셔 오엑스14 3디비 디5 컬럼  
사이언스 센터 컬럼 이노베이션 센터 토카막 에너  
지 리미티드
- (74) 대리인  
리앤목특허법인

전체 청구항 수 : 총 5 항

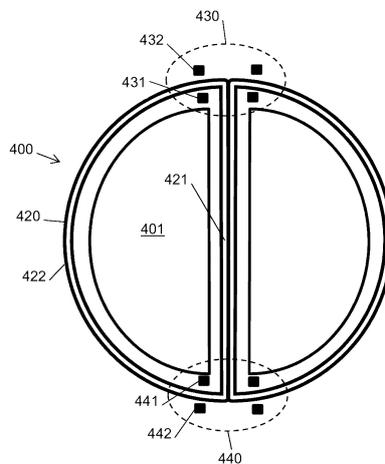
심사관 : 윤연숙

(54) 발명의 명칭 이중 폴로이달 필드 코일

(57) 요약

토카막에 사용하기 위한 폴로이달 필드 코일 조립체이다. 폴로이달 필드 코일 조립체는 내측 및 외측 폴로이달 필드 코일 및 제어기를 포함한다. 내측 폴로이달 필드 코일은 토카막의 토로이달 필드 코일 내부에 설치하도록 구성된다. 외측 폴로이달 필드 코일은 토로이달 필드 코일의 외부에 설치하도록 구성된다. 제어기는 내측 및 외측 폴로이달 필드 코일에 공급될 전류를 유발하여 내측 및 외측 폴로이달 필드 코일에 의해 생성된 조합된 자기장이 토로이달 필드 코일에서 널(null)이 되도록 한다.

대표도 - 도4



(52) CPC특허분류  
Y02E 30/10 (2020.08)

---

**명세서**

**청구범위**

**청구항 1**

토카막(tokamak)에 사용되는 자석 조립체로서, 상기 자석 조립체는:

내측 폴로이달 필드 코일 및 외측 폴로이달 필드 코일을 구비하는 폴로이달 필드 코일 조립체(poloidal field coil assembly);

초전도체 물질을 포함하는 토로이달 필드 코일(toroidal field coil); 및

제어기를 포함하고;

상기 내측 폴로이달 필드 코일은 상기 토로이달 필드 코일 내부에 설치되고;

상기 외측 폴로이달 필드 코일은 상기 토로이달 필드 코일 외부에 설치되고;

상기 제어기는 전류가 상기 내측 폴로이달 필드 코일 및 상기 외측 폴로이달 필드 코일에 공급되도록 하여 상기 내측 폴로이달 필드 코일 및 상기 외측 폴로이달 필드 코일에 의해 생성된 조합된 자기장이 상기 토로이달 필드 코일에서 널(null)이 되도록 구성되는, 자석 조립체.

**청구항 2**

제1항에 있어서,

각각의 폴로이달 필드 코일은 고온 초전도체를 포함하는, 자석 조립체.

**청구항 3**

제1항 또는 제2항에 있어서,

상기 토로이달 필드 코일은 연결점(joint)을 포함하고, 상기 내측 폴로이달 필드 코일 및 상기 외측 폴로이달 필드 코일은 상기 내측 폴로이달 필드 코일 및 상기 외측 폴로이달 필드 코일에 의해 생성되는 조합된 자기장이 상기 연결점에서 널(null)이 되는 것인, 자석 조립체.

**청구항 4**

제1항에 따른 자석 조립체와 토로이달 플라즈마 챔버(toroidal plasma chamber)를 포함하는 토카막.

**청구항 5**

제4항에 있어서,

상기 토카막은 구체형 토카막인, 토카막.

**청구항 6**

삭제

**발명의 설명**

**기술 분야**

본 발명은 토카막 플라즈마 챔버(tokamak plasma chamber)에 관한 것이다. 구체적으로는 본 발명은 토로이달 필드 코일에 대한 폴로이달 필드 코일의 포지셔닝에 관한 것이다.

**배경 기술**

[0001]

- [0002] 핵융합 전력 생산이 직면한 도전은 매우 복잡적이다. 토카막과는 다른 많은 대안적인 장치들이 제안되었으나, 그 중에 어느 것도 현재 운용 중인 JET와 같은 최고의 토카막과 비교할 만한 결과를 낸 것이 없다.
- [0003] 세계 핵융합 연구는 이제까지 지어진 가장 크고 비싼(약 150억 유로) 토카막인 ITER의 건설 시작과 함께 새로운 단계에 진입하였다. 성공적인 상업 핵융합 반응기가 되려면 긴 펄스, 경제적인 전기 생산을 하기 위해 요구되는 고효율과 함께 안정적인 동작을 하는 것이 필요하다. 이 세가지 조건은 동시에 달성하기가 특히 어려우며, 계획된 프로그램들은 ITER 및 다른 핵융합 시설들에서의 다년 간의 실험 연구 뿐만 아니라 이론적 기술적 연구를 요구한다. 이러한 경로로 개발되는 상업적 핵융합 반응기는 대체로 2050년 이전에는 건설되지 않을 것으로 예상된다.
- [0004] 경제적인 에너지 발전(즉, 들어가는 전력보다 출력되는 전력이 훨씬 많은)에 요구되는 핵융합 반응기를 얻기 위해서는, 종래의 토카막이 (ITER에서 예시된 것처럼) 거대하여 (플라즈마 체적에 대략적으로 비례하는) 에너지 제한 시간(energy confinement time)이 충분히 커서 플라즈마가 열융합이 발생할 만큼 충분히 뜨거울 수 있어야 한다.
- [0005] WO 2013/030554는 대안적인 접근을 설명하는데, 중성자원이나 에너지원으로서 사용하는 작은 구체형 토카막을 포함한다. 구체형 토카막에서의 낮은 중형비의 플라즈마 형상은 에너지 제한 시간을 향상시키고 훨씬 작은 기계에서 순 전력 생산(net power generation)이 가능하게 한다. 그러나, 작은 직경의 중앙 기둥이 필수적이어서, 플라즈마 안정성을 위해 요구되는 토로이드형(toroidal) 자석의 설계의 도전에 직면하게 된다. 요구되는 고자기장을 달성하기 위해 충분한 전류 밀도를 가능케 하기 위해서, 초전도 자석이 적어도 구체형 토카막의 토로이드형 필드(toroidal field, TF) 코일에 사용된다.
- [0006] 초전도 물질은 보통 "고온 초전도체(high temperature superconductors, HTS)"와 "저온 초전도체(low temperature superconductors, LTS)"로 구분된다. Nb이나 NbTi와 같은 LTS 물질은, 초전도성이 BCS 이론으로 설명될 수 있는 금속이나 금속 합금이다. 모든 저온 초전도체들은 약 30K 미만의 임계 온도(그 온도 이상에서는 자기장이 0일 때 초차도 물질이 초전도가 될 수 없는 온도)를 가진다. HTS 물질의 거동은 BCS 이론으로 설명되지 않으며, 그러한 물질들은 약 30K을 초과하는 임계 온도를 가진다(다만 HTS 물질을 정의하는 것은 임계 온도라기 보다는 초전도 동작과 조성의 물리적 차이이다). 가장 흔하게 사용되는 HTS는 "쿠퍼이트 초전도체(cuprate superconductor)" 인데 - BSCCO, 또는 ReBCO(Re이 희토류 원소이고 보통 Y이나 Gd이다)와 같은 (구리 산화물 그룹을 포함하는 조성물인) 쿠퍼이트에 기초한 세라믹이다. 다른 HTS 물질에는 철 프닉타이드(예컨대 FeAs 및 FeSe) 및 마그네슘 다이보레이트(MgB<sub>2</sub>) 등이 있다.
- [0007] ReBCO는 전형적으로 테이프(tape)로 제조되는데, 도 1에 도시된 것과 같은 구조를 갖는다. 일반적으로, 그러한 테이프(500)는 일반적으로 약 100 마이크로미터 두께이며, 기재(substrate)(501)(전형적으로 약 50 마이크로미터 두께의 전자연마된 하스텔로이(hastelloy))를 포함하고, 그 위에는 IBAD, 마그네트론 스퍼터링(magnetron sputtering) 또는 다른 적절한 기술로 버퍼 스택(502)으로 알려진 일련의 버퍼 레이어들이 약 0.2 마이크로미터 두께로 적층된다. 에피택셜(epitaxial) ReBCO-HTS 레이어(503)(MOCVD 또는 다른 적절한 기술에 의해 적층됨)이 버퍼 스택에 오버레이되며, 전형적으로 1 마이크로미터 두께이다. 한 개의 1~2 마이크로미터 두께의 레이어(504)가 스퍼터링 또는 다른 적절한 기술에 의해 HTS 레이어 상에 적층되며, 구리 스테빌라이저 레이어(copper stabilizer layer)(505)가 전자도금 또는 다른 적절한 기술에 의해 테이프 상에 적층되는데, 종종 테이프를 완전히 둘러싼다.
- [0008] 기재(501)는 제조 라인을 통해 공급되고 그 다음의 레이어들의 성장을 허용하는 기계적인 백본(backbone)을 제공한다. 버퍼 스택(502)은 그 위에 HTS 레이어를 성장시키기 위해 2축성의 텍스처된 결정 템플릿(textured crystalline template)을 제공하도록 요구되며, 초전도 특성에 손상을 주는 기체로부터 HTS로의 원소들의 화학적 확산(diffusion)을 예방한다. 은 레이어(504)는 ReBCO로부터 스테빌라이저 레이어로의 저저항 계면을 제공하며, 스테빌라이저 레이어(505)는 ReBCO의 임의의 부분이 초전도를 중단("보통" 상태로 진입)하는 경우에 대체 전류 경로를 제공한다.
- [0009] 고전류 용량의 전도체를 형성하기 위하여, HTS 테이프는 케이블을 형성하도록 배치될 수 있다. 각각의 케이블에는, 여러 테이프들이 있으며, 모든 테이프들의 구리 스테빌라이저 레이어들이 (일반적으로 추가적인 구리 클래딩(cladding)을 통해) 서로 연결된다. 케이블을 형성하는 방법에는 두가지 일반적인 접근법이 있다 - HTS 테이프는 치환되거나(transposed) 및/또는 비틀리거나(twisted) 또는 케이블들이 스택될 수 있다(stacked). 치환 또는 비틀린 케이블들은 종종 AC 또는 빠르게 램프(ramp)되는 자석들에 사용되는데, 이 구조가 자석의 결합 손

실(coupling loss)을 크게 감소시키기 때문이다. 스택된 케이블들은 종종 느리게 램프되는 자석들, 예컨대 토카막의 TF 코일들에 사용되는데, 이 구조가 테이프들로 하여금 임계 전류  $I_c$ 를 최대화하는 방향으로 국소 자기장에 대해 배치되기 때문이다.

[0010] HTS 테이프의 길이를 가로지르는 전압은 매우 비선형적인 방식으로 수송 전류  $I$ 에 의존하며, 전형적으로 다음과 같이 된다:

[0011]

$$V_{HTS} = E_0 \left( \frac{I}{I_c} \right)^n$$

[0012] 여기서  $E_0 = 100$  nV/m는 정의된 임계 전류 기준이며,  $n$ 은 초전도에서 보통 상태로의 전이의 선예도(sharpness)를 모델링하는 실험적인 매개변수이다;  $n$ 은 통상 ReBCO의 경우 20~50의 범위에 있다.  $n$  값에 따라, 전압은  $I/I_c < \sim 0.8$ 인 값에 대해 무시할 수 있다.

[0013] 테이프의 전류가 임계 전류에 접근하면, HTS 테이프는 초전도를 중단할 것이다. 이것은 수송 전류  $I$ 를 증가시키거나 또는 임계 전류  $I_c$ 가 낮아짐으로써 일어난다. 몇가지 요소들이 임계 전류를 줄일 수 있는데, 특히 온도, 외부 자기장, 그리고 응력이다. 이 요소들 중의 어느 것을 줄이면 HTS 테이프의 안정성을 향상시킬 것이다.

### 발명의 내용

#### 해결하려는 과제

[0014] 본 발명은 토카막에서 사용하기 위한 폴로이달 필드 코일 조립체, 토카막에서 사용하기 위한 자석 조립체, 자석 조립체와 토로이달 플라즈마 챔버를 포함하는 토카막을 제공하는 것을 목표로 한다.

#### 과제의 해결 수단

[0015] 발명의 일 측면에 의하면, 토카막에서 사용하기 위한 폴로이달 필드 코일 조립체가 제공된다. 폴로이달 필드 코일 조립체는 내측 및 외측 폴로이달 필드 코일과 제어를 포함한다. 내측 폴로이달 필드 코일은 토카막의 토로이달 필드 코일의 내부에 설치되도록 구성된다. 외측 폴로이달 필드 코일은 토로이달 필드 코일의 외측에 설치되도록 구성된다. 제어기는 내측 및 외측 폴로이달 필드 코일들에 공급될 전류를 야기하도록 구성되어 내측 및 외측 폴로이달 필드 코일들에 의해 생성된 조합된 자기장이 토로이달 필드 코일에서 널(null)이 되도록 한다.

[0016] 제2 측면에 의하면, 토카막에서 사용하기 위한 자석 조립체가 제공된다. 자석 조립체는 제1 측면에 따른 폴로이달 필드 코일 조립체를 포함하고 고온 초전도체를 포함하는 토로이달 필드 코일을 포함한다. 내측 및 외측 폴로이달 필드 코일들은 각각 토로이달 필드 코일의 내부 및 외부에 위치된다.

[0017] 제3 측면에 따르면, 제2측면에 따른 자석 조립체와 토로이달 플라즈마 챔버를 포함하는 토카막이 제공된다.

#### 발명의 효과

[0018] 본 발명에 따르면 토카막에서 사용하기 위한 폴로이달 필드 코일 조립체, 토카막에서 사용하기 위한 자석 조립체, 자석 조립체와 토로이달 플라즈마 챔버를 포함하는 토카막이 제공된다.

#### 도면의 간단한 설명

[0019] 도 1은 HTS 테이프의 개념적인 도시이다.

도 2는 폴로이달 평면에서 토카막의 단면이다.

도 3은 와이어 코일에 의해 생성된 자기장의 다이어그램이다.

도 4는 예시적인 토카막의 단면이다; 그리고

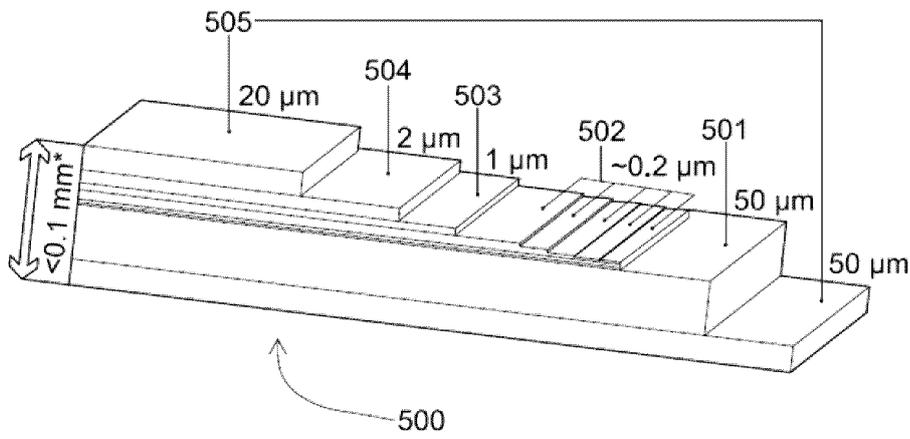
도 5는 도 4의 폴로이달 필드 코일 조립체들 중의 하나의 확대이다.

#### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

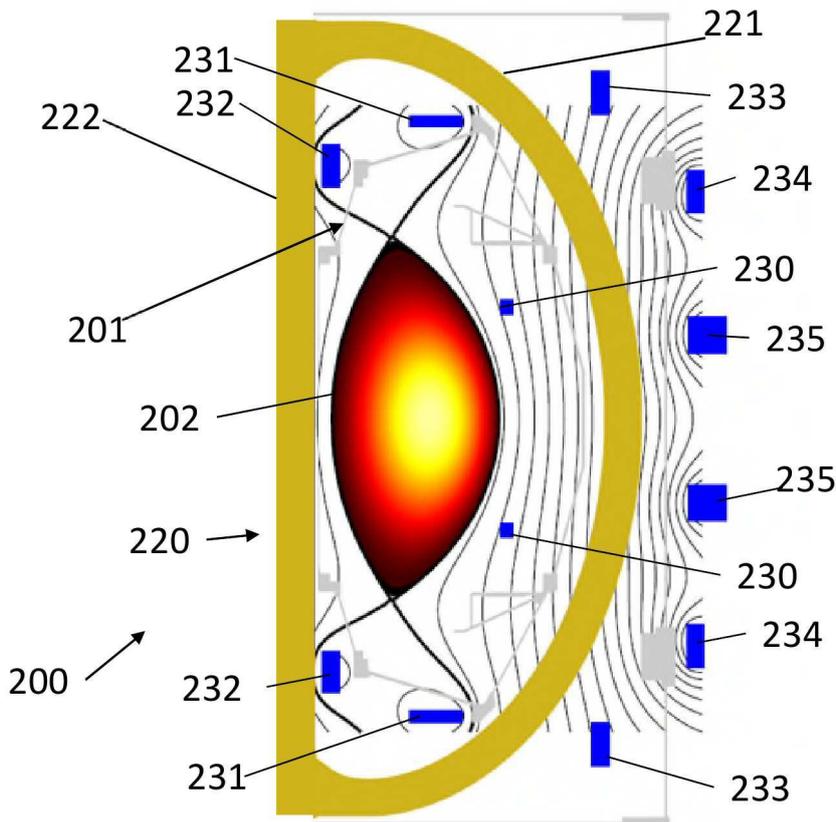
- [0020] 토카막의 한 쪽의 단면이 도 2에 도시된다. 토카막(200)은 토로이달 플라스마 챔버(201), 반환 림(return limb)(221) 및 중앙 기둥(222)을 가진 토로이달 필드(TF) 코일(220) 및 폴로이달 필드(PF) 코일들(230, 231, 232, 233, 234, 235)을 포함한다. TF 코일(220)은 플라스마 챔버(201) 내에 토로이달 자기장을 제공한다. PF 코일들은 다양한 기능, 예컨대 플라스마를 개시하기 위한 펄스를 제공하는 병합 압축(merging compression, MC) 코일들(230) 및 토카막이 작동하는 동안 플라스마 인벨로프(202)를 길게 늘이는 다이버터 코일(divertor coils)(231, 232)과 같은 것이다. 크게는, PF 코일들은 2개의 그룹으로 나뉜다 - 제1 그룹(MC 코일들(230)을 포함함)은 오직 짧은 주기, 전형적으로는 플라스마 초기화 동안에만 에너지를 받으며, 제2 그룹(다이버터 코일(231)을 포함함)은 토카막의 동작 동안의 긴 주기 동안 에너지를 받는다.
- [0021] 각각의 PF 코일은 전형적으로 전도체의 단일 링으로 만들어진다. 전도체는 초전도체나 일반적인 도체 중의 어느 하나일 수 있는데, 코일에 요구되는 성질에 따른다 - 예컨대 AC 전류를 전송하는 코일들은 초전도 물질로 만들어지면 전형적으로 높은 손실율을 경험하기 때문에, 일반적인 전도 물질이 선호된다. 도 3은 전도성 와이어(302)의 루프(loop)에 의해 생성된 자기장(301)의 (평면(300) 상에서의 단면)을 보여준다. 동일한 필드 패턴이 각각의 PF 코일에 의해 생성될 것이다. 볼 수 있듯이, PF 코일에 가까운 필드가 상대적으로 강하다.
- [0022] 도 2를 다시 참조하면, 토카막의 PF 코일들 중의 몇몇이 TF 코일에 가깝다는 것이 보여질 것이다. 이것은 PF 코일들이 TF 코일에 외부 자기장을 적용할 것임을 의미하며, TF 코일에서 초전도 물질의 임계 전류를 감소시킬 것이다.
- [0023] 이 효과를 회피하기 위하여, 대안적인 구조가 제안된다. 이것은 도 4에서 다이버터 코일 중의 한 셋트(도 2의 다이버터 코일(231)과 동등한)에 대해 보여지나 적절한 조정과 함께 임의의 PF 코일들로 확장될 수 있다. 도 4는 중앙 기둥(421)과 리턴 림(422)을 포함하는 TF 코일(420)과 토로이달 플라스마 챔버(401)를 포함하는 예시적인 토카막(400)을 보여준다. 토카막(400)은 또한 상부 및 하부 PF 코일 조립체(430, 440)를 포함하는데, 각각은 내측 PF 코일(431, 441) 및 외측 PF 코일(432, 442)을 포함한다. 도 4에 보여진 각각의 구성들은 중앙 기둥(421)에 대해 원통형 대칭(cylindrical symmetry)을 가진다. 각 조립체 내에는, 내측 PF 코일(431, 441)이 TF 코일(420) 내부에 위치하고, 외측 PF 코일(432, 442)이 TF 코일(420) 외측에 위치한다.
- [0024] 도 5는 상부 PF 코일 조립체(430)의 확대이며, 폴로이달 평면에서 동작 중의 내측 PF 코일(431) 및 외측 PF 코일(432)에 의해 생성된 자기장을 보여준다(도면을 단순화하기 위하여, 토카막의 다른 성분들로부터의 필드들은 무시되었다; 그러나 설계 과정 중에 그리고 동작할 때에 이 다른 필드들이 포함되고 계산될 수 있다). PF 코일 조립체(430)는 내측 및 외측 코일들에서의 전류가 동일한 방향으로 흐르도록(이 예시에서는 "지면으로") 구성된다. 2개의 코일들 사이의 자기장은 널(502)을 형성하며, 2개의 코일들 사이에 거리를 두고 위치하며 2개의 코일들의 상대적인 전류에 의존한다. 2개의 코일들 바깥에는, 원거리장(far-field) 영역(501)에서는, 각각의 코일에 의해 생성된 자기장들이 서로 간에 보강한다. 각 코일의 전류는 제어되어 PF 코일 조립체에 의해 생성된 원거리장이 도 2의 단일한 동등한 필드 코일과 실질적으로 동일해지며, 2개의 코일들의 상대적인 전류들이 TF 코일(420) 상에 형성될 널(502)을 야기한다. 이것은 TF 코일의 임계 전류에 대한 PF 코일 조립체의 자기장의 효과가 동등한 단일 PF 코일의 효과와 비교하여 상당히 감소함을 의미한다.
- [0025] TF 코일 상의 널의 정확한 위치는 TF 코일의 설계에 기초하여 선택될 수 있다. 예컨대, TF 코일 상에 널 안정적이거나 낮은  $I_c$ 를 가질 것으로 예상되는 "핫 스팟(hot spots)"(예컨대, 연결점들)이 있으며, 내측 PF 코일(431) 및 외측 PF 코일(432)은 널이 그 핫 스팟(예컨대 연결점)에 위치하도록 위치될 수 있다.
- [0026] 이 구성은 토카막이 작동하는 동안 연속적으로 활성화되고, 다이버터 코일들과 같은 TF 코일들에 가깝게 위치되는 PF 코일들을 대체하는데 가장 유리하다. 그러나, 이 구성은 다른 PF 코일들이나 자석을 대체하는데 사용될 수도 있다.
- [0027] 이 구성은 구체형 토카막이나, 또는 전통적인 큰 중형비의 토카막 중의 어느 하나에 사용될 수 있다.

도면

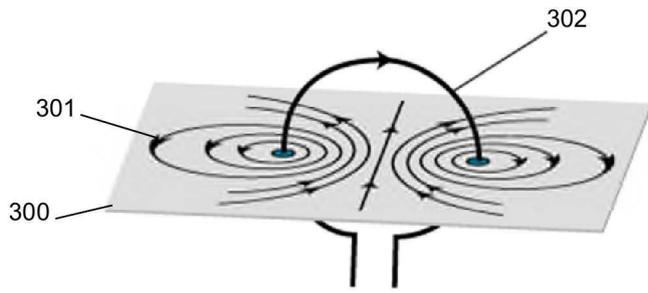
도면1



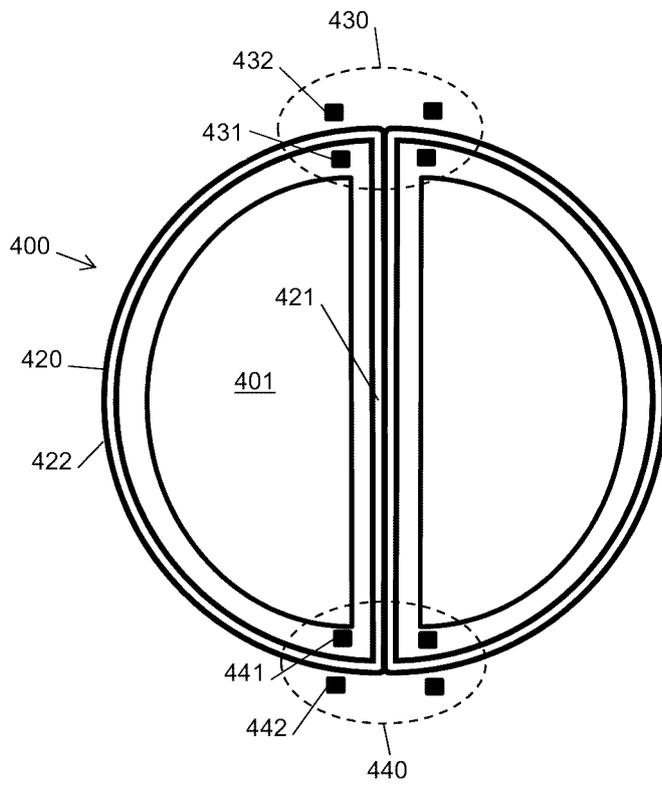
도면2



도면3



도면4



도면5

