



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2021-0049883
(43) 공개일자 2021년05월06일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G21G 1/08 (2006.01) G21F 9/06 (2006.01)
G21G 4/02 (2006.01)
- (52) CPC특허분류
G21G 1/08 (2013.01)
G21F 9/06 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2021-7009003
- (22) 출원일자(국제) 2019년09월05일
심사청구일자 없음
- (85) 번역문제출일자 2021년03월25일
- (86) 국제출원번호 PCT/US2019/049820
- (87) 국제공개번호 WO 2020/051376
국제공개일자 2020년03월12일
- (30) 우선권주장
62/727,413 2018년09월05일 미국(US)
(뒷면에 계속)

- (71) 출원인
티에이이 테크놀로지스, 인크.
미국 캘리포니아 (우편번호 92610) 풋힐 랜치 파
울링 19631
- (72) 발명자
다지마 도시키
미국 캘리포니아주 92610 풋힐 랜치 1이136 포틀
라 파크웨이 26741
네카스 알레스
미국 노스캐롤라이나주 27410 그린즈버러 브룩 웨
도우 드라이브 6207
- (74) 대리인
김태홍, 김진희

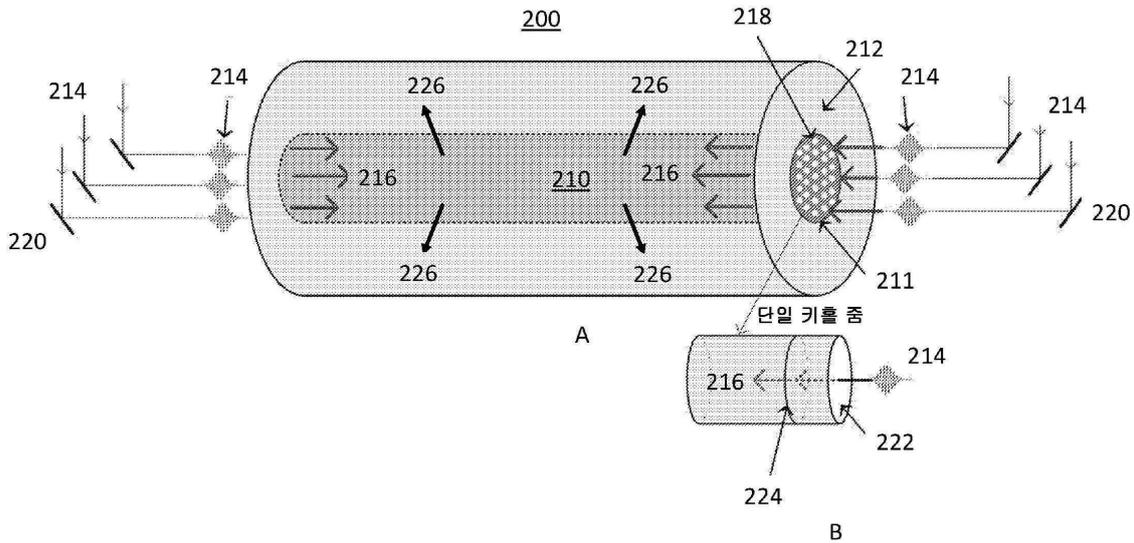
전체 청구항 수 : 총 21 항

(54) 발명의 명칭 액체상 기반 변환을 위한 레이저 구동 중성자 생성을 위한 시스템 및 방법들

(57) 요약

삼중수소로 포화된 CNT(carbon nanotube)들을 탄소 및 삼중수소의 이온화된 가스에 조사하기 위한 프리-펄스 레이저들 및 삼중수소와 융합되고 중성자들을 생성하기 위한 레이저-구동 입자 빔을 사용하여 짧게 지속되는 방사성 핵종 또는 안정적인 핵종으로의 오래 지속되는 방사성 초우라늄 폐기물의 변환을 용이하게 하는 시스템들 및 방법들.

대표도



(52) CPC특허분류
G21G 4/02 (2013.01)

(30) 우선권주장
62/774,427 2018년12월03일 미국(US)
62/876,999 2019년07월22일 미국(US)

명세서

청구범위

청구항 1

오래 지속되는 방사성 초우라늄 폐기물(long-lived radioactive transuranic waste)의 변환(transmutation)을 위한 변환기 시스템(transmutator system)으로서,

내부에 중성자원(neutron source)을 포함하는 중성자원 탱크 - 상기 중성자원은 삼중수소(tritium)로 포화된 복수의 CNT(carbon nanotube)들을 포함함 - ;

상기 CNT들 및 삼중수소를 이온화하기 위한 문턱값 이상 이온화 체제(Above-Threshold Ionization regime)에서 레이저 에너지로 상기 중성자원 탱크를 조사(irradiate)하고 침투(penetrates)하며 탄소 및 삼중수소의 이온화된 가스를 미리 결정된 기간(period of time) 동안 거의 고체 밀도로 유지하도록 구성된 복수의 프리-펄스 레이저(pre-pulse laser)들;

상기 중성자원 탱크 주위에 위치되며 FLiBe염(FLiBe salt)에 용해된 오래 지속되는 방사성 초우라늄 폐기물의 하나 이상의 혼합물을 포함하는 복수의 동심원 탱크(concentric tank)들;

복수의 레이저 펄스들을 상기 중성자원으로 축방향으로(axially) 전파(propagate)하도록 배향(orient)된 레이저 시스템; 및

상기 복수의 레이저 펄스들을 축방향으로 수신하도록 배향된 복수의 키홀(keyhole)들 - 상기 복수의 키홀들 각각은 중수소화된 물질(deuterated material)의 포일 부재(foil member)를 포함하고, 상기 복수의 레이저 펄스들 중 한 레이저 펄스에 의한 상기 포일 부재의 조사시, 상기 포일 부재는 상기 중성자원 탱크의 중앙을 향하는 방향으로 이온 빔으로서 가속가능한 복수의 중앙성자 이온(deuteron ion)들을 생성하고 중앙성자 빔이 이온화된 삼중수소 플라즈마와 거의 고체 밀도로 융합(fuse)됨 -

을 포함하는, 오래 지속되는 방사성 초우라늄 폐기물의 변환을 위한 변환기 시스템.

청구항 2

제 1 항에 있어서, 상기 포일 부재는 중수소화된 다이아몬드형 물질(deuterated diamond-like material)을 포함하고, 상기 복수의 이온들은 중앙성자 및 탄소 이온들을 포함하는 것인, 변환기 시스템.

청구항 3

제 1 항 및 제 2 항에 있어서, 상기 복수의 중수소 이온들은 CAIL(Coherent Acceleration of Ions by Laser) 가속에 의해 가속되는 것인, 변환기 시스템.

청구항 4

제 1 항 내지 제 3 항에 있어서, 상기 포일 부재는 하나 이상의 나노-미터 두께(nano-meters thick)인 것인, 변환기 시스템.

청구항 5

제 1 항 내지 제 4 항에 있어서, 레이저 및 상기 복수의 프리-펄스 레이저들로부터의 펄스는, 상기 중앙성자 빔이 상기 삼중수소의 이온화를 지연(lag)시키는 것을 가능하게 하도록 동기화되는 것인, 변환기 시스템.

청구항 6

제 1 항 내지 제 5 항에 있어서, 상기 복수의 프리-펄스 레이저들은 제 1 세트의 프리-펄스 레이저들 및 제 2 세트의 프리-펄스 레이저들을 포함하는 것인, 변환기 시스템.

청구항 7

제 6 항에 있어서, 상기 제 1 세트의 프리-펄스 레이저들은 상기 제 2 세트의 프리-펄스 레이저들 전에 발사

(fire)되도록 구성되는 것인, 변환기 시스템.

청구항 8

제 1 항 내지 제 7 항에 있어서, 상기 레이저 시스템은, 상기 복수의 레이저 펄스들 중 개별 레이저 펄스들을 상기 복수의 키홀들 중 개별 키홀들을 향해 그리고 상기 복수의 키홀들 중 개별 키홀들로 지향시키도록 배향된 복수의 미러들을 포함하는 것인, 변환기 시스템.

청구항 9

제 1 항 내지 제 8 항에 있어서, 상기 복수의 동심원 탱크들은 분할(segment)되는 것인, 변환기 시스템.

청구항 10

제 9 항에 있어서, 상기 복수의 동심원 탱크들은 축방향으로 분할되는 것인, 변환기 시스템.

청구항 11

제 9 항에 있어서, 상기 복수의 동심원 탱크들은 방위각으로(azimuthally) 분할되는 것인, 변환기 시스템.

청구항 12

제 1 항 내지 제 8 항에 있어서, 상기 복수의 분할된 동심원 탱크들은,

상기 중성자원 주위에 위치되며 FLiBe염에 용해된 오래 지속되는 방사성 초우라늄 폐기물의 제 1 혼합물을 포함하는 제 1 동심원 탱크;

상기 제 1 동심원 탱크 주위에 위치되며 FLiBe염에 용해된 오래 지속되는 방사성 초우라늄 폐기물의 제 2 혼합물을 포함하는 제 2 동심원 탱크;

상기 제 2 동심원 탱크 주위에 위치되며 FLiBe염에 용해된 오래 지속되는 방사성 초우라늄 폐기물의 제 3 혼합물을 포함하는 제 3 동심원 탱크; 및

상기 제 3 동심원 탱크 주위에 위치되며 물 또는 물과 중성자 반사 경계부(neutron reflecting boundary) 중 하나를 포함하는 제 4 동심원 탱크

를 포함하는 것인, 변환기 시스템.

청구항 13

제 12 항에 있어서, 상기 분할된 제 1 동심원 탱크, 제 2 동심원 탱크, 제 3 동심원 탱크 및 제 4 동심원 탱크는 축방향으로 분할되는 것인, 변환기 시스템.

청구항 14

제 12 항에 있어서, 상기 분할된 제 1 동심원 탱크, 제 2 동심원 탱크, 제 3 동심원 탱크 및 제 4 동심원 탱크는 방위각으로 분할되는 것인, 변환기 시스템.

청구항 15

제 1 항 내지 제 14 항에 있어서, 상기 레이저 시스템은 CAN(coherent amplification network) 레이저 또는 얇은 슬래브 증폭기(thin slab amplifier) 중 하나를 포함하는 것인, 변환기 시스템.

청구항 16

제 15 항에 있어서, 상기 레이저 시스템은 상기 CAN 레이저 또는 얇은 슬래브 증폭기에 커플링된 OPCPA(optical parametric chirped-pulse amplification), 및 상기 OPCPA에 커플링된 오실레이터를 더 포함하는 것인, 변환기 시스템.

청구항 17

제 16 항에 있어서, 상기 OPCPA는 극저온으로(cryogenically) 냉각되는 것인, 변환기 시스템.

청구항 18

제 1 항 내지 제 17 항에 있어서, 상기 복수의 동심원 탱크들은 제 1 세트의 탱크들을 형성하고, 상기 변환기 시스템은 Np(neptunium), Am(americium) 및 Cm(curium)을 포함하는 MA(minor actinides) 및 Pu의 혼합물을 포함하는 제 2 세트의 탱크들을 더 포함하는 것인, 변환기 시스템.

청구항 19

제 18 항에 있어서, 상기 제 2 세트의 탱크들은 위기시에(at critical) 동작하도록 구성되는 것인, 변환기 시스템.

청구항 20

제 18 항 및 제 19 항에 있어서, 상기 제 1 세트의 탱크들 또는 상기 제 2 세트의 탱크들 중 하나의 벽(wall)들은 탄소계 물질들로 제조되는 것인, 변환기 시스템.

청구항 21

제 20 항에 있어서, 상기 탄소계 물질들은 다이아몬드인 것인, 변환기 시스템.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본원에서 설명되는 발명내용은 일반적으로, 짧게 지속되는 방사성 핵종(short-lived radioactive nuclides) 또는 안정적인 핵종으로의 오래 지속되는 고레벨 방사성 폐기물(long-lived high-level radioactive waste)의 변환(transmutation)의 목적의 위해, 레이저 구동 빔에 의해 큰 레이트(rate)의 활성 중성자(energetic neutron)들의 생성을 용이하게 하는 시스템들 및 방법들, 및 더 구체적으로 방사성 폐기물의 임계이하 액체상 기반 변환(subcritical liquid phase-based transmutation)에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 핵분열 원자로(nuclear fission reactor)들은 소비된 연료의 방사성 핵종의 일정한 스트림(constant stream)을 생성한다: 미국에서만 90,000 미터 톤(metric tons)이 처분(disposal)을 요하고[Ref. 1], 2020년까지 전세계적으로 소비된 핵 폐기물 재고는 매년 8000 톤 추가되어 200,000 미터 톤에 도달할 것이다. 프랑스에서 원자력이 전기의 77%를 차지하여, 변환에 대한 필요성을 특히 절실하게 한다. 현재, 심토 매장(deep earth burial) 외에 이 동위원소 방사성 물질(isotopic radioactive material)들을 처리하기 위해 이용가능한 적절하고 적당한 수단이 없다. 동위원소 방사성 물질들을 처리하기 위한 그러한 수단의 개발은 2개의 테스크들의 완료를 요한다. 첫째, 변환을 통해 비방사성 물질을 활성화시키는 것을 회피하기 위해 나머지 물질들로부터 고방사성 동위원소들을 분리하기 위한 쉽고, 견고하고, 안전하며, 저렴한 방법들을 개발하는 것; 둘째, 안전하고, 저렴하고, 에너지 비소모적인(energy non-exhaustive) 다목적 변환 방법(versatile transmutation method)을 개발하는 것.

[0003] 방사성 핵의 변환에 대한 현재의 접근법들은 외부 수단에 의해 임계이하 분열 원자로를 유지하는 드라이버들을 포함한다: 하나는 ADS(accelerator driven system)에 기초하고[Ref. 2], 다른 하나는 토카막 구동 시스템(tokamak driven system)들에 기초함[Ref. 3]. ADS 시스템은 기관(예를 들어, Pb, W)에 충돌하고 중성자들을 방출하는(양성자 당 30+ 중성자들) 고에너지(~1 GeV) 양성자 빔에 의존한다. 이 중성자들이 이때 임계이하 원자로에서 분열을 유지한다. 토카막 기반 시스템은 중수소-삼중수소 반응(deuterium-tritium reaction)들로부터 중성자를 생성하고 임계이하 원자로를 구동하기 위해 이 중성자들을 사용하며, 분열-융합 하이브리드도 지칭된다.

[0004] Gen-IV 원자로들을 사용하는 다양한 접근법들 뿐만 아니라, 초임계 동작(supercritical operation)에 기반한 핵 폐기물을 변환하기 위한 다른 접근법들도 존재한다 - MOSART [Ref. 4].

[0005] 이러한 그리고 다른 이유들로, 방사성 폐기물의 임계이하 액체상 기반 변환의 목적들을 위해 레이저 구동 빔에 의해 큰 레이트의 활성 중성자들의 생성을 용이하게 하는 향상된 시스템들, 디바이스들, 및 방법들에 대한 필요

성이 존재한다.

발명의 내용

- [0006] 본원에서 제공되는 다양한 실시예들은 일반적으로, 짧게 지속되는 방사성 핵종 또는 안정적인 핵종으로의 융합 생성 중성자들에 의한 오래 지속되는 고레벨 방사성 폐기물의 변환을 용이하게 하는 시스템들 및 방법들에 관한 것이다. 중성자들이 중수소 빔과 삼중수소 또는 중수소 타겟들의 융합에 의해 생성되는 한편 중수소 빔은 CAIL(Coherent Acceleration of Ions by Laser)로 알려진 프로세스를 사용하는 메인 레이저에 의해 가속된다 [Ref. RAST, 6].
- [0007] 예시적인 실시예들에서, 변환 프로세스는, LiF-BeF₂(FLiBe)의 용융염 용액(molten salt solution) 내에 용해된 [FP(fission products) 및 MA(minor actinides)와 같은] 소비된 연료 폐기물 성분들의 혼합물의 액화된 용액을 포함하는 탱크에서 실행되는 방사성 동위원소들[주로 MA]을 변환하기 위해 컴팩트 디바이스를 이용하는 동작의 임계이하 방법을 활용한다. [Ref. 5] MA의 변환은 레이저에 의해 구동되는 융합 반응으로부터 기원하는 활성 중성자들로 수행됨. 변환기 내의 FLiBe, MA 및 FP 내용물(content)의 실시간으로의 모니터링 및 제어가 능동 레이저 분광법(active laser spectroscopy) 또는 레이저 구동 감마원(laser driven gamma source)으로 수행된다.
- [0008] 추가의 예시적인 실시예들에서 삼중수소 포화 탄소 나노튜브들로부터 타겟이 형성된다.
- [0009] 추가의 예시적인 실시예들에서 중수소 또는 삼중수소 타겟들은 거의 고체 밀도의 레이저로 이온화된 가스이다. 이 타겟들을 형성하기 위해, (메인 레이저 전에) 프리-펄스 레이저(pre-pulse laser)가 타겟을 이온화한다[Ref. 7 및 8]. 타겟이 고체 밀도로 유지되는 동안, CAIL 가속된 중양성자(deuteron)들이 삼중수소 또는 중수소와 융합된다.
- [0010] 추가의 예시적인 실시예들에서 변환 탱크는 항상 임계이하로 유지된다. 임계이하 동작이 중성자원(neutron source)들에 부담을 주는 한편 활성 중성자들이 친밀하게(intimately) 결합된 배열로 생성된다: (1) CAIL 프로세스에 의해 중수소 빔을 형성하기 위해 다이아몬드 및 중양성자로 구성된 나노메트릭 포일(nanometric foil)을 조사하는 것에 의함. (2) 가속된 중수소를 프리-펄스 레이저에 의해 동시에 그리고 동적으로 이온화된 나노메트릭으로(nanometrically) “거품이 있는(foamy)” 삼중수소-포화 타겟에 주입함.
- [0011] 레이저로 생성된 중성자들의 예시적인 실시예들의 이점들은,
- [0012] a) 작은 크기의 레이저-구동 이온 빔들 및 이들의 타겟들
- [0013] b) 미세 중성자 제어: 공간적 뿐만 아니라 시간적. 모든 연료(MA)가 중성자원의 하나의 분열 평균-자유-경로(fission mean-free-path) 내에 있음.
- [0014] c) 레이저의 높은 반복 레이트.
- [0015] d) 30%의 높은 레이저 벽 플러그 효율(laser wall plug efficiency).
- [0016] 예시적인 실시예들에서, 이전 문단에서 설명된 바와 같이, 레이저 아키텍처는 예를 들어, 20 μm 스팟 크기에 대해 10mJ의 <10fs 펄스 에너지를 갖는 펄스들을 제공하도록 구성되어, 최적 a₀=0.5으로 이끈다. 최대 100 kHz 까지 매우 높은 펌프 펄스 반복 레이트를 가능하게 하는 CAN(coherent amplification network)에 의해 “OPCPA” (optical parametric chirped-pulse amplification)를 위한 펌프 펄스가 제공될 것이다. 초 당 백만 펄스 이상 전달하는 펨토초 오실레이터에 의해 펨토초 펄스들이 생성된다. 오실레이터 이후, 펄스들은 몇 나노초로 스트레치(stretch)되기 전에 최대 100 kHz의 원하는 레이트로 픽업된다. 스트레치 이후, 펄스는 극저온 OPCPA에서 수십 메가 줄(Joules)의 레벨로 증폭된다. 극저온 OPCPA는 바람직하게, 구리에 비교할만한 매우 높은 열 전도율을 보이며, 이는 광학 파라메트릭 증폭 프로세스 동안 생성되는 수십 키로와트의 열 부하를 배출(evacuate)하는데 필요하다. 10 fs 펄스 미만에 대응하는 스펙트럼 대역폭으로, 펄스는 약 1 나노초까지 쉽게 스트레치될 수 있고 광학 파라메트릭 증폭에 의해 10 mJ까지 증폭될 수 있다. 이 프로세스에서 펄스는 약 ns 지속시간(duration) 및 >10mJ 에너지의 CAN 시스템에 의해 제공되는 펌프 펄스와 혼합된다. 증폭된 처프 펄스(amplified chirped pulse)가 이어서 <10fs의 자신의 초기 값으로 다시 압축된다.
- [0017] 본원에서 제공되는 다양한 실시예들에서, “LLRW” (low level radioactive waste)의 변환이 액체 상태에서 일어나는 한편 LLRW는 FLiBe(lithium fluoride beryllium fluoride)의 용융염에서 용해된다.
- [0018] 본원에서 제공되는 다양한 실시예들에서, 변환 기계가 임계이하 모드에서 동작하는 한편 변환을 구동하기 위해

중성자원이 항상 필요하다.

[0019] 특정 예시적인 실시예들에서, 레이저-분광법(laser-spectroscopy)을 통한 레이저 모니터링이 CAN 레이저에 의해 실행된다[Ref. 12].

[0020] 또한, 탱크들 내의 MA 및 FP의 동위원소들의 내용물 및 거동을 실시간으로 추적하기 위해 레이저-구동 감마원(laser-driven gamma source)[흔히 레이저 콤프턴 감마-광선(laser Compton gamma-ray)들로 지칭됨]이 제공된다.

[0021] 추가 실시예는 전체 중성자 비용을 감소시키기 위한 2-탱크 전략에 관한 것인 한편 1개의 탱크가 임계이고 다른 하나의 탱크가 임계이하이다. 2개의 탱크들은 2개의 상호연결된 세트들의 탱크들을 포함한다. 제 1 탱크 또는 세트의 탱크들은 바람직하게 Np(neptunium), Am(americiu) 및 Cm(curium)을 포함하는 MA(minor actinides) 및 PU의 혼합물을 포함하는 한편, 제 2 탱크 또는 세트의 탱크들은 MA(minor actinides)만의 혼합물을 포함한다. 제 1 탱크 또는 세트의 탱크들이 임계($k_{eff}=1$)이기 때문에, 중성자들의 외부 원(external source)이 불필요하다. 또한, 제 1 탱크 또는 세트의 탱크들은 분열 생성물들의 화학적 제거 이후 소비된 핵 연료(Pu 및 MA)를 사용하여 연료를 공급받는다. 제 1 탱크 또는 세트의 탱크들은 MA(minor actinides) 및 Pu(plutonium)를 변환하기 위해 고속 중성자들[에너지가 >1 MeV인 비감속 분열 중성자(unmoderated fission neutron)들에 추가한 융합 중성자들]을 이용하는 한편, Cm(curium)의 농도가 증가된다. 대안적으로, Pu의 소각(incineration)을 촉진(kick start)하기 위해 소량의 중성자들이 제 1 탱크 또는 세트의 탱크들에 주입될 수 있다.

[0022] 추가 실시예에서 제 1 및 제 2 탱크 또는 세트의 탱크들의 벽들이 예를 들어 다이아몬드와 같은 탄소계 물질들로 제조된다. 화학적 침식(erosion) 및 부식(corrosion)으로부터 벽들을 보호하기 위해, 벽에 인접한(융용염을 향함) 염이 응고되는 것이 허용되어 벽과의 융용염의 직접 접촉을 방지한다.

[0023] 추가 실시예에서, 위에서 설명된 변환기 실시예들은 냉각제로서의 사용과 같은 이산화탄소 감소의 방법들 및 프로세스들에 적용될 수 있고 전체적인 탄소 배출이 없게(carbon-negative) 되기 위한 합성 연료의 생성이 제안된다. 다음의 예시적인 실시예에서, 합성 연료(CH_4 -메탄)는 200 °C 내지 400 °C를 요하는 $CO_2+4H_2 \rightarrow CH_4+2H_2O$ 반응[사바티에 반응(Sabatier reaction)] 및 촉매(catalyst), 예를 들어 Ni, Cu, Ru의 존재를 통해 생성될 수 있다. CO_2 는 대기, 대양(ocean)으로부터, 또는 자동차, 주택, 굴뚝(chimneys) 및 화통(smokestacks)과 같은 배출원(source of emission)에서의 CO_2 의 직접 포착(direct capturing)에 의해 추출될 수 있다. 융용염 변환기 동작 온도 범위는 250 °C 내지 1200 °C이고, 따라서 사바티에 반응을 구동하여 메탄을 생성하기 위해 필요되는 필수 온도를 지속적으로 공급하고, 대기 및 대양에서의 CO_2 농도를 안정화시키고 감소시키기 위한 효율적인 경로를 제공하기에 이상적인 위치에 있다.

[0024] 본원에서 설명되는 발명내용의 다른 시스템들, 디바이스들, 방법들, 피처(feature)들 및 이점들은 다음의 도면들 및 상세한 설명의 검토 시에 당업자에게 명백할 것이거나 명백해질 것이다. 그러한 추가 시스템들, 방법들, 피처들 및 이점들이 이 설명 내에 포함되고, 본원에서 설명되는 발명내용의 범위 내에 있으며, 첨부한 청구범위에 의해 보호되는 것으로 의도된다. 어떠한 방식으로든 예시적인 실시예들의 피처들이 첨부된 청구범위를 제한하는 것으로서 해석되어서는 안되며, 청구범위에서의 그 피처들의 명시적 열거는 없다.

도면의 간단한 설명

[0025] 구조 및 동작을 포함한 예시적인 실시예들의 상세사항들이 동일한 참조 번호들이 동일한 부분들을 지칭하는 첨부한 도면들의 연구에 의해 부분적으로 수집될 수 있다. 도면들 내의 구성요소들이 반드시 축척대로일 필요는 없으며, 대신 본 개시의 원리들을 예시하는데 중점을 둔다. 또한, 모든 예시들은 개념들을 전달하기 위해 의도되며, 상대적인 크기들, 형태들 및 다른 상세한 속성들이 자구적으로(literally) 또는 정확하게 보다는 개략적으로 예시될 수 있다.

도 1의 A는 축방향으로 분할된 변환기 베셀(axially segmented transmutor vessel)의 사시도를 예시한다.

도 1의 B는 방위각으로 분할된 변환기 베셀(azimuthally segmented transmutor vessel)의 단면도를 예시한다.

도 2의 A는 중성자원 및 단일의 인접한 탱크의 사시도들을 예시하는 한편 중성자들이 DT 융합으로부터 생성된다. 삼중수소가 가스로서 존재하고 키홀 내의 레이저-포일 상호작용을 통해 중양성자가 생성된다. 입구

윈도우(entrance window) 상에 키흔들이 위치된다.

도 2의 B는 단일 키흔 어셈블리를 예시한다.

도 3의 A는 중성자원 및 단일의 인접한 탱크의 사시도들을 예시하는 한편 중성자들이 DT 융합으로부터 생성된다. 이 실시예에서 레이저-포일 상호작용을 통해 중앙성자가 생성되고 삼중수소가 키흔의 후측에 고체 타겟을 형성한다. 중성자들이 생성되는 한편 중앙성자들이 고체 타겟 내에서 삼중수소와 상호작용한다. 키흔들이 중성자원 탱크 내에 위치된다.

도 3의 B는 단일 키흔 어셈블리를 예시한다.

도 4는 중성자 생성을 위한 메인 레이저 및 프리-펄스 레이저에 의한 이온화 챔버에 의한 레이저 가속기 시스템의 개략도를 예시한다.

도 5는 레이저 가속기 시스템에 대한 레이저 생성의 개략도를 예시한다.

도 6은 레이저 지원 분리(laser assisted separation) 및 모니터링을 갖는 액체상 기반 변환 시스템의 측면도를 예시한다.

도 7은 도 6에 도시된 레이저 지원 분리 및 모니터링을 갖는 액체상 기반 변환 시스템의 중앙 용액 탱크의 부분적 상세도를 예시한다.

도 8은 레이저 지원 분리 및 모니터링을 갖는 2-단계 액체상 기반 분리 및 변환 시스템의 대안적인 실시예의 측면도를 예시한다.

도 9는 전체 중성자 비용을 감소시키기 위한 2-탱크 전략에 관한 실시예를 예시하는 한편 탱크(1)는 임계이며 탱크(2)는 임계이하이다.

도 10은 CO₂의 화학적 변환에 의한 합성 연료의 생성의 프로세스에 관한 실시예를 예시하는 한편 반응을 구동하기 위한 열이 분열에 의해 생성된다.

도 11은 CO₂의 화학적 변환에 의한 합성 연료의 생성의 프로세스에 관한 다른 실시예를 예시하는 한편 반응을 구동하기 위한 열이 분열에 의해 생성된다.

도 12는 CO₂의 화학적 변환에 의한 합성 연료의 생성의 프로세스에 관한 다른 실시예를 예시하는 한편 반응을 구동하기 위한 열이 분열에 의해 생성된다.

도 13은 CO₂의 화학적 변환에 의한 합성 연료의 생성의 프로세스에 관한 다른 실시예를 예시하는 한편 반응을 구동하기 위한 열이 분열에 의해 생성된다.

유사한 구조물들 또는 기능들의 요소들이 일반적으로 도면들 전반에 걸쳐 예시 목적을 위해 동일한 참조 번호들에 의해 나타내어진다. 이는 유념해야 한다. 도면들이 바람직한 실시예들의 설명을 용이하게 하기 위해서만 의도된다는 점에 또한 유념해야 한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0026] 아래에서 개시되는 추가 피쳐들 및 교시들 각각은, 중성자들의 생성을 위한 레이저-구동 융합 접근법을 이용하는 짧게 지속되는 방사성 핵종 또는 안정적인 핵종으로의 오래 지속되는 방사성 폐기물의 변환을 용이하게 하는 시스템들 및 방법들을 제공하기 위해 다른 피쳐들 및 교시들과 분리적으로 또는 다른 피쳐들 및 교시들과 함께 이용될 수 있다.

[0027] 또한, 대표적인 예시들 및 종속항들의 다양한 피쳐들이, 본 교시들의 추가적인 유용한 실시예들을 제공하기 위해 구체적으로 또한 명백하게 열거되지 않는 방식들로 조합될 수 있다. 또한, 설명 및/또는 청구범위에 개시되는 모든 피쳐들이 본래의 개시의 목적을 위해서 뿐만 아니라 실시예들 및/또는 청구된 발명내용을 청구범위에서의 피쳐들의 조성(composition)들과 독립적으로 제한하는 목적을 위해서 서로 분리적으로 그리고 독립적으로 개시되도록 의도된다는 점에 명백히 유념해야 한다. 엔티티(entity)들의 그룹들의 모든 값 범위들 또는 표시들이, 본래의 개시의 목적을 위해서 뿐만 아니라 청구된 발명내용을 한정하는 목적을 위해서, 모든 가능한 중간 값 또는 중간 엔티티를 개시한다는 점에 명확히 유념해야 한다.

[0028] 예시적인 실시예들에서, 변환 프로세스는, LiF-BeF₂(FLiBe)의 용융염 용액 내에 용해된 [FP(fission products)

및 MA(minor actinides)와 같은] 소비된 연료 폐기물 성분들의 혼합물의 액화된 용액을 포함하는 탱크에서 실행되는 방사성 동위원소들[주로 MA]을 변환하기 위해 콤팩트 디바이스를 이용하는 동작의 임계이하 방법을 활용한다. 그러한 프로세스는, 참조로서 본원에 포함되는 미국 특허 가출원 제 62/544,666 호[Ref. 5]에 설명된다. MA의 변환은 레이저에 의해 구동되는 융합 반응으로부터 기원하는 활성 중성자들로 수행된다. 변환기 내의 FLiBe, MA 및 FP 내용물의 실시간으로의 모니터링 및 제어가 능동 레이저 분광법 또는 레이저 구동 감마원으로 수행된다.

[0029] 본원에서 제공되는 예시적인 실시예들에서, 오래 지속되는 방사성 핵을 짧게 지속되는 또는 비방사성 핵종으로 변환하기 위해 레이저 구동 융합에 의해 중성자들이 생성된다.

[0030] 추가의 예시적인 실시예들에서 중수소 또는 삼중수소 타겟들은 거의 고체 밀도의 레이저로 이온화된 가스이다. 이 타겟들을 형성하기 위해, (메인 레이저 전에) 프리-펄스 레이저가 타겟을 이온화한다[Ref. 7 및 8]. 타겟이 고체 밀도로 유지되는 동안, CAIL 가속된 중양성자들이 삼중수소 또는 중수소와 융합된다.

[0031] 추가의 예시적인 실시예들에서 변환 탱크는 항상 임계이하로 유지된다. 임계이하 동작이 중성자원에 부담을 주는 한편 활성 중성자들이 친밀하게 결합된 배열로 생성된다: (1) CAIL(Coherent Acceleration of Ions by Laser)로 알려진 프로세스에 의해 중수소 빔을 형성하기 위해 다이아몬드 및 중양성자로 구성된 나노메트릭 포일을 조사하는 것에 의함. (2) 가속된 중수소를 프리-펄스 레이저에 의해 동시에 그리고 동적으로 이온화된 나노메트릭으로 “거품이 있는” 삼중수소-포화 타겟에 주입함.

[0032] 도면들로 돌아가면, 도 1의 A 및 도 1의 B는 분할된 변환기 베셀(100)을 도시한다. 도 1의 A는 3개의(3) 베셀 섹션들(100A, 100B 및 100C)로의 축방향 방사상 분할(axial radial segmentation)의 대표적인 경우를 도시한다. 도 1의 B는 베셀(100)의 방사상 및 방위각 분할(radial and azimuthal segmentation)의 대표적인 단면도를 도시한다. 본 실시예에서의 변환기 베셀(100)은 동심원 실린더형 챔버들 또는 탱크들(102, 104, 106, 108 및 110)로 방사상으로 분할된다. 방위각으로 분할된 챔버(107)는 진단(diagnostics)을 위해 또는 추가 중성자원을 위해 사용되는 대표적인 챔버를 보여준다. 베셀(100)을 분할함으로써, 다양한 파라미터들의 제어 및 로컬화(localization)가 더 쉽게 그리고/또는 더 정확하게 증가될 수 있을 뿐만 아니라, 값들을 제어하여 마이너 악티나이드 농도를 조정하기 위해 인공 뉴럴 네트워크를 통해 다양한 세그먼트들로부터의 데이터 피드백에 의해 전반적인 변환기 안전성을 증가시킬 수 있다. 그러한 정확한 제어는 연소(burn)되는 대부분의 마이너 악티나이드를 안전을 유지하면서 최적화한다.

[0033] 탱크 또는 챔버(110)는 중수소 또는 삼중수소로 구성된 가압 가스 챔버(pressurized gas chamber)이고 제 1 및 제 2 동심원 탱크들(108 및 106)에서의 자립 연쇄 반응(self-sustaining chain reaction)을 일으키기(ignite) 위한 중성자원으로서 기능한다. 제 1 및 제 2 탱크들(106 및 108)은 FLiBe 용융염 및 마이너 악티나이드들의 혼합물을 포함한다. 제 3 동심원 탱크(104)는 안정적이거나 짧게 지속되는 핵종으로 변환되는 분열 생성물들을 포함한다. 제 4 동심원 탱크(102)는 그래파이트 반사체(graphite reflector)이다.

[0034] 도 2의 A는 탱크(212) 및 탱크(212) 내에 위치한 중성자원 탱크(210)를 갖는 변환기(200)의 단일 어셈블리의 부분도를 도시한다. 도 1의 A 및 도 1의 B에 도시된 바와 같이, 추가 탱크들이 탱크(212)를 둘러쌀 수 있다. 이 실시예에서, 레이저 펄스(214)가 미러(220)에 투사되고 미러(220)에 의해 키홀(218)을 향해 그리고 키홀(218)로 지향된다. 예를 들어, 수천(1000s)의 레이저 펄스들 및 키홀 챔버들과 같은 복수의 개별 레이저 펄스들(214) 및 키홀 챔버들(218)이 제공된다. 개별 키홀 챔버(218)의 확대된 상세도가 도 2의 B에 도시된다. 키홀(218)은 진공으로 유지된다. 레이저 펄스(214)는 레이저 윈도우(laser window)(222)를 통과하고 나노메트릭 포일 부재(224)를 조사한다. 나노메트릭 포일 부재(224)는 중수소화된 다이아몬드로 제조되고 하나 이상의 나노-미터 두께, 바람직하게 약 1 나노-미터 내지 10 나노-미터 두께이다. CAIL(Coherent Acceleration of Ions by Laser)[예를 들어, Ref. 9 및 Ref. 24를 보라]로 알려진 물리적 프로세스가 중성자원 탱크(210)의 중양을 향하는 방향으로 중양성자 빔(216)으로서 나노메트릭 포일 부재(224)로부터 중양성자 및 탄소 이온들을 가속시킨다. 최대의 달성되는 에너지는 식(1.0)에 의해 주어진다[예를 들어, Ref. 10; Ref. 11을 보라]:

$$\epsilon_{max} = (2\alpha + 1)Qmc^2(\sqrt{a_0^2 + 1} - 1) \quad 1.0$$

[0036] 여기서 알파는 일반적으로 3이고, $mc^2 = 0.511 \text{ MeV}$, 다른 조건들에 따라 $a_0 \approx 0.5$ 이다. 따라서, 중수소에 대해 최대 에너지는 0.41 MeV이고 탄소 이온들에 대해 2.5 MeV이다. 중양성자 빔(216)은 중성자들(226)을 생성하는

중성자원 탱크(210)에서 삼중수소와 융합된다.

- [0037] 도 3의 A 및 도 3의 B는 중성자 생성의 대안적인 실시예를 도시한다. 도 2의 A 및 도 2의 B와 관련하여 위에서 논의된 바와 같이 중양성자 빔(216)으로서 중양성자를 가속하기 위한 CAIL의 물리적 프로세스가 여전히 사용된다. 도 3의 A에 도시된 바와 같이, 변환기(200)의 단일 어셈블리는 탱크(212) 및 탱크(212) 내에 위치한 중성자원 탱크(210)를 포함한다. 도 1의 A 및 도 1의 B에 도시된 바와 같이, 추가 탱크들이 탱크(212)를 둘러쌀 수 있다. 이 실시예에서, 이전의 실시예에서와 같이, 레이저 펄스(214)가 미러(220)에 투사되고 미러(220)에 의해 키홀(218)을 향해 그리고 키홀(218)로 지향된다. 예를 들어, 수천(1000s)의 레이저 펄스들 및 키홀 챔버들과 같은 복수의 개별 레이저 펄스들(214) 및 키홀 챔버들(218)이 제공된다. 개별 키홀 챔버(218)의 확대된 상세도 도 3의 B에 도시된다. 키홀(218)은 진공으로 유지된다. 레이저 펄스(214)는 레이저 윈도우(222)를 통과하고 나노메트릭 포일 부재(224)를 조사한다. 나노메트릭 포일 부재(224)는 중수소화된 다이아몬드로 제조되고 대략 하나 이상의 나노-미터 두께이다. CAIL 프로세스가 중양성자 빔(216)으로서 나노메트릭 포일 부재(224)로부터 중양성자 및 탄소 이온들을 가속시킨다. 중성자원 탱크(210)에 주입되는 대신, 중양성자 빔들(216)이 키홀(218)의 후단(back end)에서 고체 티타늄-삼중수소 타겟(228)에 주입되어 중성자들(226)이 방출되게 한다. 키홀들(218)은 입구 윈도우(211)에서 중성자원 탱크(210)에, 뿐만 아니라 중성자원 탱크(210) 내에 위치된다. 레이저 펄스(214)는 입구 윈도우(222)를 통해 키홀(214)에 들어가고 나노메트릭 포일(224)과 상호작용하여 중양성자 빔(216)을 생성한다.
- [0038] 도 4는 도 2의 B 및 도 3의 B에 도시된 바와 같은 단일 키홀(218)에서의 레이저-포일 상호작용을 상세히 예시한다. 도시된 바와 같이, 레이저 펄스(214)가 레이저 입구 윈도우(222)(도 2의 B 및 도 3의 B를 보라)를 이미 통과했다. 가령 예를 들어 CAN 레이저[Ref. 12]로부터의 레이저 펄스(214)가
- [0039] 나노메트릭 포일(224)을 조사하여 포일(224)의 정전기 풀백 힘(electrostatic pull-back force)을 넘어 주로 전방 방향으로 판드로모티브 힘(ponderomotive force)에 의해 CAIL을 초래한다. 길이방향 전기장(longitudinal electric field)(도시 생략)이 이어서 중양성자 및 탄소 빔(216)을 가압 가스 챔버(210)(예를 들어, 도 2의 A 및 도 3의 A를 보라)로 가속시킨다. 가속된 중수소 빔(216)이 챔버(210) 내에서 삼중수소 가스와 충돌하고 융합되어 예를 들어, 약 14 MeV의 에너지를 갖는 중성자들과 같은 활성 중성자들(226)을 생성한다. 중성자들(226)이 등방성으로(isotropically) 발산(emanate)하고 마이너 악티나이드들의 분열이 중성자원 탱크 [예를 들어, 탱크(110), 도 1의 A 및 도 1의 B; 탱크(210), 도 2의 A 및 도 3의 A를 보라]를 에워싼 탱크들 [예를 들어, 탱크들(108 및 106), 도 1의 A 및 도 1의 B; 탱크(212), 도 2의 A 및 도 3의 A]에서 일어난다.
- [0040] 대안적인 실시예에서, 중성자원 탱크(210)는 삼중수소로 포화된 CNT(carbon nanotube)들로 구성된다. 프리-펄스 레이저들(230 및 232)이 삼중수소로 포화된 CNT들을 이온화하는 문턱값 이상 이온화 체제에서 레이저 에너지로 탱크(210)를 조사하고 침투하며[Ref. 7; Ref. 8] 중양성자 빔이 이온화된 삼중수소 플라즈마와 거의 고체 밀도로 융합되도록 탄소 및 삼중수소의 이온화된 가스를 짧은 시간 동안 거의 고체 밀도로 유지한다. 레이저들(230 및 232)은 중양성자 가속을 위해 사용되는 메인 레이저(214)와 별개이다. (중양성자들을 가속시키는) 레이저 메인 펄스 및 (CNT들 + 삼중수소 이온화를 위한) 프리-펄스 레이저들은, 중양성자 빔이 프리-펄스를 지연시키고 이온화가 중양성자 빔 직전에 일어나도록 동기화되어야 한다. 이 동기화 체제(synchronization scheme)에서, 프리-펄스 레이저들(230)은 프리-펄스 레이저들(232) 전에 발사된다. 이 접근법은 중수소-삼중수소를 고속 중성자들로 변환하기 위한 매우 효율적인 방식을 제공한다. 프리-펄스 이온화 레이저에 대한 에너지 예시 수(energy exemplary number)들은 10^{22} 1/cc의 CNT 밀도에 대해 100 mJ 내지 300 mJ, 레이저 스팟 크기 10^{-7} cm², 및 100 cm의 조사 길이로 추정된다.
- [0041] 대안적인 실시예에서, 단일-사이클 레이저 가속[Ref. 13; Ref. 14]이 또한 사용될 수 있다.
- [0042] 대안적인 실시예에서, 도 2의 A 내의 가스 중성자원 탱크(210)가 중수소 가스로 대체된다.
- [0043] 대안적인 실시예에서, 도 3의 B 내의 고체 티타늄-삼중수소 타겟(228)이 티타늄-중수소 타겟으로 대체된다.
- [0044] 대안적인 실시예에서, 도 3의 B 내의 고체 티타늄-삼중수소 타겟(228)이 티타늄으로 대체된다. 중양성자 빔(216)이 티타늄 고체 타겟(228)과 상호작용하고 격자(lattice) 내에 매립(imbed)된 채로 남아있고, 빔(216) 내의 후속 중양성자들이 이미 매립된 중양성자와 충돌하고 융합하여 중성자들(226)을 생성한다.
- [0045] 예시적인 실시예들에서, 종래 기술[Ref. 15]로부터 추정된 레이저 설계 파라미터들은, 강도(intensity) $I=10^{17}$ W/cm²; 레이저 파장 = 1 μm; 펄스 지속시간 = 5 fs 내지 10 fs; 빔 폭 = 5 μm 내지 10 μm를 포함한다. 레이

저는 선형으로(Linearly) 편광된다. 추가적으로, 포일(224)(도 2의 B, 도 3의 B, 도 4를 보라)의 두께는 바람직하게 식(2.0)에 의해 제공된다:

$$d = \lambda a_0 \int \frac{n_{cr}(\lambda)}{n_e(x)} dx \quad 2.0$$

여기서, 임계 밀도, $n_{cr} = \pi / (r_e \lambda^2)$, $a_0 = \sqrt{\frac{I}{I_0}} (\mu m / \lambda)^2$, $r_e = e^2 / (m_e c^2)$, $I_0 = 1.37 \cdot 10^{18} \text{ W/cm}^2$, λ 는 레이저 파장이다[Ref. 16].

또한, 예시적인 실시예들에서, 가속된 중양성자 빔에 대한 설계 파라미터들은 30 keV 내지 200 keV의 범위에 있다. 이 범위에 대해 쿨롱 충돌 레이트(coulombic collision rate)는 융합 레이트보다 10배 높다. 한번의 쿨롱 충돌 동안 중양성자가 자신의 에너지의 평균 4%를 손실하는데, 즉 에너지가 삼중수소와 같은 타겟으로 전달된다. 따라서, 최적의 중양성자 에너지는 200 keV인 한편, 우리는 융합이 일어나기 전에 10 쿨롱 충돌을 가정했다. D-T 융합 단면(D-T fusion cross section)은 60 keV에서 최대 - 8 barns - 이다.

높은 반복 레이트, 고효율 CAN 레이저[Ref. 12]가 한 세트의 광학기(optics)[예를 들어, 미러들(220)(도 2의 A 및 도 3의 A)을 보라]에 의해 나노메트릭 포일 타겟(224)(도 2의 B, 도 3의 B 및 도 4)으로 안내된다. 강렬한 레이저 펄스들(intense laser pulse)의 반복 레이트는 50%의 고효율로 전달되는 100 kHz이다. 그러한 레이저는 진단 시스템으로 이전에 제안되었다[예를 들어, Ref. 17을 보라]. 200 kW의 일반적인 전력이 10^{17} neutrons/s를 전달할 것으로 예상된다. 그러한 중성자 플럭스가 10 MW 변환기를 구동하기에 충분하다[예를 들어, Ref. 17을 보라].

레이저 구동 중성자 효율이 표 1에 도시된다.

포일 두께 [nm]	펄스 [fs]	효율 [%]
10	100	1.6
10	45	3.6
10	20	7.5
10	15	9.7
10	8	18
5	45	1
5	20	2.2
5	15	3.2
5	5	10
3.5	2	50

표 1: 특정된 포일 두께 및 레이저 펄스 길이에 대한 중양성자 에너지로의 레이저 에너지의 변환에 대한 효율이 도시됨.

도 5는 변환기에 대한 레이저 시스템(500)의 상세사항을 예시한다. CPA[Ref. 18] 기반 XCAN 504[Ref. 12; Ref. 19]가 OPCPA(506)에 고에너지 고프렘 펄스를 제공할 것이다. [Ref. 20] 펄스가 XCAN 레이저에 의해 생성될 것이며 최대 100kHz의 매우 높은 펄스 반복 레이트를 가능하게 한다. 초 당 백만 펄스들 이상을 전달하는 펌프 오실레이터(502)에 의해 펌프 펄스들이 생성된다. 오실레이터 이후, 펄스들은 몇 나노초로 스트레치되기 전에 최대 100 kHz의 원하는 레이트로 픽업된다. 스트레치 이후, 펄스는 극저온 OPCPA에서 수십 메가 줄의 레벨로 증폭된다. 증폭된 초 펄스가 이어서 <10fs의 자신의 초기 값으로 다시 압축된다.

극저온 OPCPA는 바람직하게, 구리에 비교할만한 매우 높은 열 전도율을 보이며, 이는 광학 파라메트릭 증폭 프로세스 동안 생성되는 수십 키로와트의 열 부하를 배출하는데 필요하다. 10 fs 펄스 미만에 대응하는 스펙트럼 대역폭으로, 펄스는 약 1 나노초까지 쉽게 스트레치될 수 있고 광학 파라메트릭 증폭에 의해 10 mJ까지 증폭될

수 있다. 이 프로세스에서 펄스는 약 ns 지속시간 및 >10mJ 에너지의 CAN 시스템에 의해 제공되는 펌프 펄스와 혼합된다.

- [0055] 변환 레이저는 4개의(4) 레이저 기술들을 조합한다: CPA[Ref. 18], CAN[Ref. 12; Ref. 19], OPCPA[Ref. 20; Ref. 21], 및 극저온-냉각 비선형 결정(cryo-cooled nonlinear crystal)들[Ref. 22]. 도 5에 도시된 바와 같이, 대안적으로, 얇은 디스크 증폭기[Ref. 23]가 CAN(504)을 대체할 수 있다. 변환기를 위한 레이저 시스템은 바람직하게:
- [0056] a. $a_0=0.5$ 에 대응하는 피크 전력 또는 예를 들어, 5 μm 의 스팟 크기를 갖는 약 $5 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ 의 강도를 전달할 수 있음.
- [0057] b. 펄스들(예를 들어, <10 fs, 10 mJ, 10 kHz 내지 100 kHz의 범위에 있는 매우 높은 반복 레이트) 또는 100 kW에 도달할 수 있는 평균 전력을 생성할 수 있음.
- [0058] 변환기를 위한 레이저 시스템의 추가 피쳐들은:
- [0059] c. 평균 전력에 OPCPA가 적응(adapt)됨. 비선형 결정을 더 효율적으로 냉각시키기 위해 열 전도율을 증가시키기 위해, 결정이 극저온으로(cryogenically) 냉각된 열 흡수원(heat sink)에 마운팅됨. 앞서 언급된 바와 같이, 극저온에서 액체 질소 온도에서의 또는 액체 질소 온도 이하에서의 결정 열 전도율이 극적으로 증가하여, 구리의 열 전도율의 값에 도달함.
- [0060] d. OPCPA[Ref. 20; Ref. 21]가 10 fs 체제에서 펄스들의 생성을 가능하게 할 것임. CAN[Ref. 12; Ref. 19]에 의해 펌핑될 때, 코히어런트 네트워크 증폭기(Coherent Network Amplifier)가 예를 들어 10 kHz 내지 100 kHz에서 10mJ 레벨까지 시드 펄스(seed pulse)를 증폭시키기 위해 가능하게 이용될 수 있음.
- [0061] e. 예를 들어 100 kW 이상을 요하는 응용들에 대해, N개의 동일한 시스템들이 병렬로 구성가능함, 그러한 응용들은 그러나 레이저들이 위상화될 필요가 없음.
- [0062] f. CAN 시스템에 대한 대안으로서, 증폭기의 펌핑이 얇은 디스크 레이저 시스템[Ref. 23]에 의해 대체될 수 있음.
- [0063] 도 6은 분광법, 능동 모니터링 및 분열 생성 분리(fission product separation)의 목적들을 위한 레이저 동작 시스템(600)을 도시한다. 구성요소(A)는 [적절하게 번들(bundle)들로의] CAN 레이저이고; 구성요소(B)는 [전력 레벨, 진폭 형태, 주기(period)들 및 위상들, 관련 동작들, 방향 등과 같은 레이저 특성들을 제어하는] CAN 레이저의 변조기/제어기이고; 구성요소(C)는 모니터링 및 분리[또는 용매(solvent)들의 화학물(chemistry) 제어]들 다를 위해 중앙 탱크[구성요소(K)를 보라]에 용액 및 용매들을 조사하는 레이저 광선들이고; 구성요소(D)는 변환기(E)[Ref. 5]에 의해 분리되고 변환될 (A_m , C_m , N_p 와 같은) 초우라늄(transuraniums) 이온들을 포함하는 용매들을 포함하는 용액이고(발산하는 용합이 고에너지 중성자들을 생성함); 구성요소(F)는 용합원, 즉 변환기(E)로부터의 그리고 분열 생성물들로부터의 중성자들을 정지시키는 물이고; 구성요소(G)는 중앙 탱크의 바닥에 있는 제거될 퇴적물(deposit)인 침전물(precipitation)이고(용액이 포함된 중앙 탱크에서의 레이저 화학물에 의한 분리의 예); 구성요소(H)는 이 특정 탱크에서 이 시점에서 변환되지 않고 다른 탱크로 전달될 불필요한 퇴적된 요소들이고 - 이들은 또한 분리되고 변환될 이와 유사한 용액 내에 다시 있을 것임 - ; 구성요소(I)는 FP의 스펙트럼과 같은 모니터링되는 정보의 신호를 등록(register)하고 제어하는 피드백 ANN 회로 및 컴퓨터이고; 구성요소(J)는 전송된 CAN 레이저 신호들[진폭들, 위상들 및 주파수들, 및 편향(deflection)들 등]의 검출기이고; 구성요소(K)는 중앙 탱크에서 용합 또는 분열에 의해 생성되는 활성 중성자들의 거의 자유로운 전송을 가능하게 하는 중앙 탱크의 “얇은” 제 1 벽이며, 구성요소(L)는 전체 물질들 및 중성자들을 포함하는 충분히 두꺼운 벽을 갖는 외부 탱크이다. 중앙 탱크(K) 및 외부 탱크(L) 둘 다에는 모니터링을 위한 CAN 레이저 모니터링에 추가하여 온도, 압력, 및 일부 추가의 물리적 및 화학적 정보의 적절한 모니터들이 구비되고, 실시간 밸브들, 전기 스위치들 등과 같은 적절한 보호장치(safeguard)들로 탱크들이 [런어웨이 이벤트(runaway event)들과 같은] “보드(board)”를 넘어가지 못하도록 변환기의 상태에 관한 경고(alert)들을 제공한다. 구성요소(Q)는 열 교환기이고 구성요소(M)는 열을 전기로 변환한다.
- [0064] 동작이 시작되면, 중앙 및 외부 탱크들(K 및 L) 내의 가열된 용액 및 물이 원하는대로 모터들(또는 아마도 탱크들 내부의 적절한 채널들)에 의해 그 상태로 유지될 수 있고, 과도한 열은 구성요소(M)에 의해 제거되고 전기적(또는 화학적) 에너지로 변환된다.
- [0065] 도 8을 참조하면, 시스템(800)에서, 구성요소(P)는 분리된 분리 탱크와 변환기 탱크를 연결하는 파이프(및 탱

크들 간의 흐름을 제어하는 밸브)이다. 구성요소(O)는 변환기 탱크에의 주입되고 분리된 MA의 솔빙 영역(solvoling region)이다. 구성요소(D)에 남아있는 잔여 분열 생성물들은 파이프 구성요소(R)를 통해 저장 탱크 구성요소(S)로 운반된다.

[0066] 도 7을 참조하면, 시스템(700)에서, 중앙 탱크(K)는 [산(acids)과 같은] 적절한 용액들로 액화된 본래의 소비된 연료로부터 추출된 초우라늄의 용액(D)을 포함한다. 이 프로세스의 스테이지에서, 우리는 U 및 Pu가 (PUREX와 같은) 알려진 프로세스들에 의해 용액(D)으로부터 이미 추출되었다고 가정한다. 용액(D)은 따라서 분열 생성물들(Cs, Sr, I, Zr, Tc 등과 같은 FP들)과 같은 다른 요소들을 포함할 수 있다. 이 요소들은 중성자들을 흡수하는 경향이 있을 수 있지만, 초우라늄이 하는 경향이 있는 것과 같이 중성자들을 반드시 증식(proliferate)시키는 것은 아니다. 따라서, FP들은 CAN 레이저(A) 및 다른 화학적 수단의 도움으로 화학 반응들 및 레이저 화학물들에 의해 중앙 탱크(K)에서 용액(D)으로부터 제거될 필요가 있다. 이 엘리먼트들이 CAN 레이저로부터, 추가된 화학물질 및/또는 화학적 여기(chemical excitation) 등에 의해 침전되면, 침전된 화학물질들의 성분들이 분열 생성물들 등과 같은 요소들의 처리를 위해 이 중앙 탱크(K)로부터 다른 탱크로 제거될 수 있다.

[0067] 분리 프로세스의 완료시, 초우라늄(주로, Am, Cm, Np)이 변환기(E)로부터의 중성자들로 조사된다. 이 초우라늄은 상이한 동위원소들을 가질 수 있지만, 이들 모두는 이들이 이들의 원자 번호에서 우라늄을 넘으므로, 방사성 동위원소들이다. 변환기(E)로부터의 중성자들 또는 초우라늄의 분열로부터 발생하는 중성자들은, 중성자들이 이 핵에 의해 흡수되면 초우라늄의 변환에 기여할 것이다.

[0068] 도 8로 돌아가면, 변환기 및 레이저 모니터 및 분리기 시스템(800)은 분리 및 변환 프로세스들을 2개의 별개의 탱크들로 분리하는 2개의 분리된 탱크들을 포함한다. 예를 들어, (레이저 모니터가 부착된) 분리기는 오른쪽에 있는 한편, 변환기는 왼쪽에 있다. 2개의 시스템들은 전송 파이프 및 밸브, 오른쪽의 분리 탱크로부터의 퇴적된(또는 분리된) 초우라늄(MA)을 왼쪽의 변환 탱크로 전송하기 위해 사용되는 구성요소(P)에 의해 연결된다. 새로운 캐리어 액체[구성요소(O)]만이 바람직하게 TA를 포함(또는 주로 포함)하지만, 오른쪽의 분리기 탱크에서 분리된 분열 생성물들은 더 이상 없다. 분리는 종래의 화학적 방법에 의해 또는 화학적 분리의 목적을 위해 MA 원자 전자들을 (예를 들어) 여기시키도록 동작하는 (CAN 레이저에 기반한) 레이저에 의해 달성된다. 왼쪽의 중앙 탱크(D)가 주로(또는 유일하게) MA 용액을 갖는다. 액체의 남아있는 요소들은 주로 파이프[구성요소(R)]에서 저장 탱크[구성요소(S)]로 운반되는 FP들을 포함한다. 그러한 FP들은 매몰 처리(burial treatment)를 위한 고정된 물질들로 합쳐질 수 있다[Refs. 22 and 23].

[0069] 초우라늄에 의한 중성자 포착에 의해 분열이 일어날 때, (가령 분열 당 200 MeV의 범위 내의) 핵분열로부터 산출되는 고에너지가 일반적으로 예상된다. 다른 한편으로, 융합 중성자 에너지는 15 MeV를 초과하지 않는다. 중앙 탱크 내의 융합 중성자들 뿐만 아니라 분열 이벤트들 둘 다는 탱크 내에 열을 산출한다. 용액은 일반적으로 대류 흐름(convective flows)에 의해(자체적으로 또는, 필요하다면 외부 구동 모터에 의해) 열을 혼합한다. 추출된 열 운반자 및 추출기, 즉 구성요소(M)가 중앙 탱크 내의 생성된 열을 제거하고 이를 전기 에너지로 변환한다. 이 프로세스들은, 밸브들 및 다른 노브(knob)들 뿐만 아니라 CAN 동작을 제어함으로써 탱크 파라미터들에 의 피드백을 위한 제어 목적 및 모니터링을 위해 실시간으로 물리적으로(가령 탱크 내의 용액의 온도, 압력) 그리고 화학적으로(가령 CAN 레이저 모니터링을 통한 용액 내의 다양한 분자들, 원자들, 및 이온들의 화학적 상태들) 모니터링될 필요가 있다.

[0070] 일반적인 핵 원자로는 다음의 소비된 연료 핵 폐기물들을 생성한다. [Refs. 22 and 23] 50 GWd의 전력을 생성하는 1톤의 우라늄 당. 이 동작 동안 핵 폐기물들은, 약 2.5 kg의 초우라늄(Np, Am, Cm) 및 약 50 kg의 분열 생성물들이다. 2.5 kg의 MA(Minor Actinides, 즉 초우라늄)의 양은 약 100 mol, 대략 6×10^{25} atoms의 MA이다. 이는 초 당 약 7×10^{20} atoms의 MA, 대략 1초에 1021 MA atom에 달한다. 이는, 각각의 원자를 레이저 여기하기 위한 각각의 MA 원자에 의한 1개의 광자(eV)의 흡수가 필요되면, 약 1 kW의 레이저 전력으로 변환된다. η 를 레이저의 1개의 광자에 의한 MA 원자의 여기의 효율이라고 하자. 이때 초 당 위의 양의 모든 MA 원자들에 의해 흡수될 레이저의 전력(P)은,

[0071] $P \sim (1/\eta) \text{ kW}$ 이다.

[0072] $\eta \sim 0.01$ 이면, P는 약 100 kW이다. 이 양은 적지 않다. 다른 한편으로, 효율적이고 큰 플루언스(fluence) CAN 레이저 기술[Ref. 12]을 채용하면, 이는 기술이 도달하는 범위 내에 있다. 일반적인 화학적 유도(chemical inducement)들에서, 우리는, 광섬유 레이저 효율 및 플루언스가 자신의 최대이도록 레이저가 cw에 가깝거나 매우 긴 펄스일 수 있음을 계획(envison)한다. 적절한 공진(resonances) 또는 특정 주파수들을 만족시키기 위해, 광섬유 레이저 주파수들이 (동작 전에, 펄스) 특정 값들로 조정될 필요가 있다.

- [0073] 추가의 예시적인 실시예들로서, 고효율 중성자 생성 방법은, 예를 들어, BNCT(boron-neutron capture therapy) 및 방사성동위원소(radioisotope) 생성, 빌딩, 교량 등의 구조적 무결성 테스트, 재료 과학 및 칩 테스트, 유정 로깅(oil well logging) 등과 같은, 예를 들어 암 의료 응용들과 같은, 최대 14 MeV의 에너지를 갖는 중성자들을 요하는 분야들 및 프로세스들에 적용가능하다.
- [0074] 2개의 추가적인 실시예들이 제시된다: (1) 제 1 실시예는 전체 중성자 비용을 감소시키기 위한 2-탱크 전략에 관한 것인 한편 탱크(1)는 임계이고 탱크(2)는 임계이하이고, (2) 제 2 실시예는 CO₂의 화학적 변환에 의한 합성 연료의 생성을 통한 더 친환경적인, 탄소배출이 없는 변환기에 관한 것인 한편 반응을 구동하기 위한 열이 분열에 의해 생성된다.
- [0075] 도 9에 도시된 예시적인 실시예에서, 변환기(900)는 탱크(1) 및 탱크(2)로 지칭되는 2개의 상호연결된 세트들의 탱크들을 포함한다. 도 2의 A 및 도 3의 A에 도시된 탱크들과 실질적으로 유사한 탱크들(1 및 2)은 변환될 물질들을 포함하는 탱크 및 이 탱크 내에 위치한 중성자원 탱크를 포함할 수 있고, 도 1의 A 및 도 1의 B에 도시된 바와 같이, 이 탱크들은 추가적인 동심원 탱크들에 의해 둘러싸일 수 있다. 탱크(1)는 바람직하게 Np(neptunium), Am(americiuim) 및 Cm(curium)을 포함하는 MA(minor actinides) 및 PU의 혼합물을 포함하는 한편, 탱크(2)는 MA(minor actinides)만의 혼합물을 포함한다. 탱크(1)는 임계($k_{eff}=1$)이고, 따라서 탱크(1)는 외부 중성자들을 필요로 하지 않는다. 또한, 탱크(1)는 분열 생성물들의 화학적 제거 이후 소비된 핵 연료(Pu 및 MA)를 사용하여 연료를 공급받는다. 탱크(1)는 MA(minor actinides) 및 Pu(plutonium)를 변환하기 위해 고속 중성자들[에너지가 >1 MeV인 비감속 분열 중성자들에 추가한 융합 중성자들]을 이용하는 한편, Cm(curium)의 농도가 증가된다. 대안적으로, Pu의 소각을 촉진하기 위해 소량의 중성자들이 탱크(1)에 주입될 수 있다.
- [0076] 이제 더 높은 농도의 Cm(curium)을 갖는 탱크(1) 내의 MA(minor actinides)가 분리되고 탱크(2)에 공급될 수 있다. 연결된 탱크(2)는 위에서 설명된 바와 같이, 임계이하($k_{eff}<1$) 동작에서 증가된 농도의 Cm(curium)으로 MA(minor actinides)를 연소시키기 위해 병렬로 동작한다. 이 프로세스는 전체 초우라늄 소비 핵 연료를 안전하고 원활하게 연소시키기 위한 경로를 제공하는 한편, 이와 같이 하기 위해 필요되는 중성자들의 수를 약 100 배 감소시킨다.
- [0077] 추가 실시예에서, 탱크(1) 및 탱크(2)는 레이저 및 감마에 의해 실시간 모니터링된다. 레이저 유도 형광 및 산란(laser induced fluorescence and scattering)을 사용하여 탱크(1) 및 탱크(2)의 원소 조성(elemental composition)을 모니터링하기 위해 광대역 또는 스캐닝 레이저가 사용된다. 감마 모니터링은 능동적이거나 수동적일 수 있다. 수동 감마 모니터링은 핵 붕괴(decay) 또는 전이(transition)로부터 생성되는 감마를 이용한다. 능동 감마 모니터링은 수 MeV 위의 에너지를 갖는 외부 감마 빔을 이용하고 핵 공명 형광(nuclear resonance fluorescence)에 의존한다. 능동 및 수동 모니터링 둘 다는 변환기 연료의 동위원소 구성에 관한 정보를 제공한다. 레이저 및 감마 모니터링으로부터의 정보가 수집되고 탱크(1)의 연료교체(refueling)를 조정하거나 탱크(2) 내의 MA 농도를 조정함으로써 변환기의 미래 상태들을 예측하고/예측하거나 제어하도록 적응된 로직을 포함하는 컴퓨터에 공급된다. 상세한 레이저 및 감마 모니터링을 가능하게 하기 위해 탱크(1) 및 탱크(2) 내의 연료가 용융염에 용해되어 광 전파를 가능하게 한다. 실시간 모니터링은 변환기의 전체 능동적 안전 및 효율의 필수적인 부분인 한편, 변환기 조성의 상세한 지식이 제어 로드(control rod)들의 위치, 연료교체 및 분열 생성물 추출을 결정할 것이다. 수동 피쳐들은 온도가 증가함에 따라 팽창하여 변환기; 동결 플러그(freeze plug)에 의해 변환기로부터 분리된 덤프 탱크를 쉼트다운시키는 한편 임의의 비정상적 온도 스파이크가 플러그를 녹일 것이고 중력이 중성자 흡수기들로 구성된 덤프 탱크 내로 변환기의 전체 인벤토리를 흐르게 하는 용융염을 포함한다.
- [0078] 추가 실시예에서 탱크(1) 및 탱크(2)의 벽들이 탄소계 물질들, 예를 들어 다이아몬드로 제조된다. 화학적 침식 및 부식으로부터 벽들을 보호하기 위해, 벽에 인접한(용융염을 향함) 염이 응고되는 것이 허용되어 벽과의 용융염의 직접 접촉을 방지한다.
- [0079] 추가 실시예에서, 위에서 설명된 변환기 실시예들은 냉각제로서의 사용과 같은 이산화탄소 감소의 방법들 및 프로세스들에 적용될 수 있고 전체적인 탄소 배출이 없게 되기 위한 합성 연료의 생성이 제안된다. 다음의 예시적인 실시예에서, 합성 연료(CH₄-메탄)는 200 °C 내지 400 °C를 요하는 CO₂+4H₂→CH₄+2H₂O 반응[사바티에 반응] 및 촉매, 예를 들어 Ni, Cu, Ru의 존재를 통해 생성될 수 있다. CO₂는 대기, 대양으로부터, 또는 자동차, 주택, 굴뚝 및 화통과 같은 배출원에서의 CO₂의 직접 포착에 의해 추출될 수 있다. 용융염 변환기 동작 온도 범위는 250 °C 내지 1200 °C이고, 따라서 사바티에 반응을 구동하여 메탄을 생성하기 위해 필요되는 필수 온도

를 지속적으로 공급하고, 대기 및 대양에서의 CO₂ 농도를 안정화시키고 감소시키기 위한 효율적인 경로를 제공하기에 이상적인 위치에 있다.

[0080] 도 10을 참조하면, 합성 연료 생성 시스템(1000)의 부분도는 변환기 베셀(1005), 제 2 루프 파이프(loop pipe)(1001), 용융염 + TRU의 흐름의 방향(1002), 열 교환기(1003), 및 사바티에 반응을 위한 탱크(1004)를 포함하는 것으로 도시된다. 이 예시적인 실시예에서, 열 교환기 파이프 내의 열 전달 유체는 탱크(1004)에서 직접적으로 사용되는 CO₂이다. 도 11에 도시된 대안적인 실시예에서, 합성 연료 생성 시스템(2000)의 열 교환기(2003)의 열 교환 파이프는 폐쇄형이고 독립적인 시스템이며, 전달 유체가 용융염으로 대체될 수 있다. 합성 연료 생성 시스템(2000)은 변환기 베셀(2005), 제 2 루프 파이프(2001), 용융염 + TRU의 흐름의 방향(2002), 열 교환기(2003), 및 사바티에 반응을 위한 탱크(2004)를 포함하는 것으로 도시된다.

[0081] 추가의 대안적인 실시예에서, 도 13은 변환기(3005), 열 교환기(3001), 유체의 흐름의 방향(3002), 사바티에 반응을 위한 탱크(3003)를 갖는 합성 연료 생성 시스템(3000)의 부분도를 도시한다. 이 예시적인 실시예에서, 사바티에 반응으로부터의 반응물(reactant), CO₂가 전달 유체이다. 대안적인 실시예에서, 도 14는 예를 들어 용융염인 열 전달 유체를 갖는 폐쇄형이고 독립적인 루프로서 합성 연료 생성 시스템(4000)의 열 교환기 루프(4001)를 도시한다. 합성 연료 생성 시스템(4000)은 변환기(4005), 열 교환기(4001), 유체의 흐름의 방향(4002), 및 사바티에 반응을 위한 탱크(4003)를 포함하는 것으로 도시된다.

[0082] 추가적인 실시예에서, 변환기 내에서 기원하고 용융염에 의해 캐리(carry)되는 이온화 방사선(ionizing radiation)이 다양한 화학 반응들을 가능하게 하기 위한 1-10s eV 에너지원으로서 이용된다. 1-10 eV 에너지원은 예를 들어, 암모니아의 생성 및 CO₂+CH₄→CH₃ COOH의 변환을 가능하게 한다.

[0083] 본 개시의 실시예들과 함께 사용을 위한 프로세싱 회로부(processing circuitry)는 하나 이상의 컴퓨터, 프로세서, 마이크로프로세서, 제어기, 및/또는 마이크로제어기를 포함할 수 있고, 이들 각각은 개별 칩일 수 있거나 다수의 상이한 칩들 간에 (및 일부에) 분산될 수 있다. 본 개시의 실시예들과 함께 사용을 위한 프로세싱 회로부는 본 개시의 실시예들과의 사용을 위한 프로세싱 회로부의 하드웨어 및/또는 소프트웨어에서 구현될 수 있는 디지털 신호 프로세서를 포함할 수 있다. 일부 실시예들에서, DSP는 개별 반도체 칩이다. 본 개시의 실시예들과의 사용을 위한 프로세싱 회로부는 본원의 도면들의 다른 구성요소들과 통신가능하게(communicatively) 커플링될 수 있다. 본 개시의 실시예들과의 사용을 위한 프로세싱 회로부는, 프로세싱 회로부가 상이한 액션(action)들의 호스트(host)를 취하고 본원의 도면들 내의 다른 구성요소들을 제어하게 하는 메모리에 저장된 소프트웨어 명령어들을 실행할 수 있다.

[0084] 본 개시의 실시예들과의 사용을 위한 프로세싱 회로부는 또한 다른 소프트웨어 및/또는 하드웨어 루틴들을 수행할 수 있다. 예를 들어, 본 개시의 실시예들과의 사용을 위한 프로세싱 회로부는 통신 회로부와 인터페이싱될 수 있고 아날로그-디지털 변환들, 인코딩 및 디코딩, 다른 디지털 신호 프로세싱 및 통신 회로부와의 제공을 위해 적합한 포맷[예를 들어, 동위상(in-phase) 및 직교(quadrature)]으로의 음성, 비디오, 및 데이터 신호들의 변환을 용이하게 하고 통신 회로부가 RF 신호들을 링크들을 통해 무선으로 전송하게 할 수 있는 다른 기능들을 수행할 수 있다.

[0085] 본 개시의 실시예들과의 사용을 위한 통신 회로부는, 적절한 프로토콜[예를 들어, Wi-Fi, 블루투스, 저전력 블루투스(Bluetooth Low Energy), NFC(Near Field Communication), RFID(Radio Frequency Identification), 독점 프로토콜(proprietary protocol)들 등] 하에서 링크들을 통해 무선 통신들을 수행하는 하나 이상의 칩 및/또는 구성요소(예를 들어, 전송기, 수신기, 트랜시버, 및/또는 다른 통신 회로부)로서 구현될 수 있다. 다양한 프로토콜들 및 회로들과 동작시키기 위해 필요됨에 따라 하나 이상의 다른 안테나가 통신 회로부에 포함될 수 있다. 일부 실시예들에서, 본 개시의 실시예들과의 사용을 위한 통신 회로부는 링크들을 통한 전송을 위해 안테나를 공유할 수 있다. 본 개시의 실시예들과의 사용을 위한 프로세싱 회로부는 또한 무선 전송을 수신하고 이를 디지털 데이터, 음성, 및 비디오로 변환하기 위해 필요한 역기능(reverse function)들을 수행하도록 통신 회로부와 인터페이싱될 수 있다. RF 통신 회로부는 (예를 들어, 트랜시버로서 통합된) 전송기 및 수신기 및 연관된 인코더 로직을 포함할 수 있다. 판독기(reader)가 또한 유선 통신을 위한 통신 회로부 및 인터페이스들(예를 들어, USB 포트 등) 뿐만 아니라 판독기 디바이스의 지리적 위치를 결정하기 위한 회로부[예를 들어, GPS(global positioning system) 하드웨어]를 포함할 수 있다.

[0086] 본 개시의 실시예들과의 사용을 위한 프로세싱 회로부는 또한, 판독기 디바이스에 상주하는 임의의 소프트웨어 애플리케이션들 및 운영 체제를 실행하고, 비디오 및 그래픽들을 프로세싱하며, 전송되고 수신되는 통신들의 프

로세싱에 관련되지 않은 다른 기능들을 수행하도록 적응될 수 있다. 임의의 수의 애플리케이션들(“사용자 인터페이스 애플리케이션들로도 알려짐”)이 언제든지 전용 또는 모바일 폰 판독기 디바이스 상에서 프로세싱 회로부에 의해 실행될 수 있고, 이메일, 달력, 날씨, 스포츠, 게임 등과 같은 그러한 체제에 관련되지 않은 다른 통상적으로 사용되는 애플리케이션들, 예를 들어, 스마트 폰 앱들에 추가하여 당뇨병 모니터링 체제에 관련된 하나 이상의 애플리케이션을 포함할 수 있다.

[0087] 본 개시의 실시예들과의 사용을 위한 메모리이 판독기 디바이스 내에 존재하는 다양한 기능적 유닛들 중 하나 이상에 의해 공유될 수 있거나, 또는 (예를 들어, 상이한 칩들 내에 존재하는 분리된 메모리들로서) 그들 중 2 개 이상 간에 분산될 수 있다. 메모리는 또한 분리된 자체 칩일 수 있다. 메모리는 비일시적(non-transitory)일 수 있고, 휘발성(예를 들어, RAM 등) 및/또는 비휘발성 메모리(예를 들어, ROM, 플래시 메모리, F-RAM 등)일 수 있다.

[0088] 설명된 발명내용에 따라 동작들을 실행하기 위한 컴퓨터 프로그램 명령어들은, 자바, 자바스크립트, �몰토크(Smalltalk), C++, C#, 트랜잭트-SQL(Transact-SQL), XML, PHP 등과 같은 객체 지향 프로그래밍 언어 및 “C” 프로그래밍 언어 또는 유사한 프로그래밍 언어들과 같은 종래의 절차적 프로그래밍 언어들을 포함한 하나 이상의 프로그래밍 언어의 임의의 조합으로 작성될 수 있다. 프로그램 명령어들은 사용자의 컴퓨팅 디바이스(예를 들어, 판독기) 상에서 전체적으로 또는 사용자의 컴퓨팅 디바이스 상에서 부분적으로 실행될 수 있다. 프로그램 명령어들은 사용자의 컴퓨팅 디바이스 상에 부분적으로 그리고 원격 컴퓨팅 디바이스 상에 부분적으로 또는 예를 들어 식별된 주파수가 프로세싱을 위해 원격 위치에 업로드된 경우들에 대해 원격 컴퓨팅 디바이스 또는 서버 상에 전체적으로 상주할 수 있다. 후자의 시나리오에서, 원격 컴퓨팅 디바이스는 임의의 유형의 네트워크를 통해 사용자의 컴퓨팅 디바이스에 연결될 수 있거나, 또는 연결이 외부 컴퓨터로 이루어질 수 있다.

[0089] 본 발명내용의 다양한 양태들이 지금까지 설명된 실시예들의 리뷰로 그리고/또는 이 실시예들에 보충하여 아래에 제시되고, 다음 실시예들의 상호관계 및 상호교환성이 여기서 강조된다. 환언하면, 달리 명시적으로 언급되거나 논리적으로 불가능하지 않는 한, 실시예들의 각각의 피처가 각각의 그리고 모든 다른 피처와 결합될 수 있다는 사실이 강조된다.

[0090] 실시예들에 따르면, 오래 지속되는 방사성 초우라늄 폐기물의 변환을 위한 변환기 시스템은, 내부에 중성자원을 포함하는 중성자원 탱크 - 중성자원은 삼중수소로 포화된 복수의 CNT(carbon nanotube)들을 포함함 -, CNT들 및 삼중수소를 이온화하기 위한 문턱값 이상 이온화 체제에서 레이저 에너지로 중성자원 탱크를 조사하고 침투하며 탄소 및 삼중수소의 이온화된 가스를 미리 결정된 기간 동안 거의 고체 밀도로 유지하도록 구성된 복수의 프리-펄스 레이저들, 중성자원 탱크 주위에 위치되며 FLiBe염에 용해된 오래 지속되는 방사성 초우라늄 폐기물의 하나 이상의 혼합물을 포함하는 복수의 동심원 탱크들, 복수의 레이저 펄스들을 중성자원으로 축방향으로 전파하도록 배향된 레이저 시스템, 및 복수의 레이저 펄스들을 축방향으로 수신하도록 배향된 복수의 키홀들 - 복수의 키홀들 각각은 중수소화된 물질의 포일 부재를 포함하고, 복수의 레이저 펄스들 중 한 레이저 펄스에 의한 포일 부재의 조사시, 포일 부재는 중성자원 탱크의 중앙을 향하는 방향으로 이온 빔으로서 가속가능한 복수의 중앙성자 이온들을 생성하고 중앙성자 빔이 이온화된 삼중수소 플라즈마와 거의 고체 밀도로 융합됨 - 를 포함한다.

[0091] 실시예들에서, 포일 부재는 중수소화된 다이아몬드형 물질을 포함하고, 복수의 이온들은 중앙성자 및 탄소 이온들을 포함한다.

[0092] 실시예들에서, 복수의 중수소 이온들은 CAIL(Coherent Acceleration of Ions by Laser) 가속에 의해 가속된다.

[0093] 실시예들에서, 포일 부재는 하나 이상의 나노-미터 두께이다.

[0094] 실시예들에서, 레이저 및 복수의 프리-펄스 레이저들로부터의 펄스는, 중앙성자 빔이 삼중수소의 이온화를 지연시키는 것을 가능하게 하도록 동기화된다.

[0095] 실시예들에서, 복수의 프리-펄스 레이저들은 제 1 세트의 프리-펄스 레이저들 및 제 2 세트의 프리-펄스 레이저들을 포함한다.

[0096] 실시예들에서, 제 1 세트의 프리-펄스 레이저들은 제 2 세트의 프리-펄스 레이저들 전에 방사되도록 구성된다.

[0097] 실시예들에서, 레이저 시스템은, 복수의 레이저 펄스들 중 개별 레이저 펄스들을 복수의 키홀들 중 개별 키홀들을 향해 그리고 복수의 키홀들 중 개별 키홀들로 지향시키도록 배향된 복수의 미러들을 포함한다.

- [0098] 실시예들에서, 복수의 동심원 탱크들은 분할된다.
- [0099] 실시예들에서, 복수의 동심원 탱크들은 축방향으로 분할된다.
- [0100] 실시예들에서, 복수의 동심원 탱크들은 방위각으로 분할된다.
- [0101] 실시예들에서, 복수의 분할된 동심원 탱크들은, 중성자원 주위에 위치되며 FLiBe염에 용해된 오래 지속되는 방사성 초우라늄 폐기물의 제 1 혼합물을 포함하는 제 1 동심원 탱크; 제 1 동심원 탱크 주위에 위치되며 FLiBe염에 용해된 오래 지속되는 방사성 초우라늄 폐기물의 제 2 혼합물을 포함하는 제 2 동심원 탱크; 제 2 동심원 탱크 주위에 위치되며 FLiBe염에 용해된 오래 지속되는 방사성 초우라늄 폐기물의 제 3 혼합물을 포함하는 제 3 동심원 탱크; 및 제 3 동심원 탱크 주위에 위치되며 물 또는 물과 중성자 반사 경계부 중 하나를 포함하는 제 4 동심원 탱크를 포함한다.
- [0102] 실시예들에서, 분할된 제 1 동심원 탱크, 제 2 동심원 탱크, 제 3 동심원 탱크 및 제 4 동심원 탱크는 축방향으로 분할된다.
- [0103] 실시예들에서, 분할된 제 1 동심원 탱크, 제 2 동심원 탱크, 제 3 동심원 탱크 및 제 4 동심원 탱크는 방위각으로 분할된다.
- [0104] 실시예들에서, 레이저 시스템은 CAN 레이저 또는 얇은 슬래브 증폭기 중 하나를 포함한다.
- [0105] 실시예들에서, 레이저 시스템은 CAN 레이저 또는 얇은 슬래브 증폭기에 커플링된 OPCPA, 및 OPCPA에 커플링된 오실레이터를 더 포함한다.
- [0106] 실시예들에서, OPCPA는 극저온으로 냉각된다.
- [0107] 실시예들에서, 복수의 동심원 탱크들은 제 1 세트의 탱크들을 형성하고, 변환기 시스템은 Np(neptunium), Am(americium) 및 Cm(curium)을 포함하는 MA(minor actinides) 및 Pu의 혼합물을 포함하는 제 2 세트의 탱크들을 더 포함한다.
- [0108] 실시예들에서, 제 2 세트의 탱크들은 위기시에 동작하도록 구성된다.
- [0109] 실시예들에서, 제 1 세트의 탱크들 또는 제 2 세트의 탱크들 중 하나의 벽들은 탄소계 물질들로 제조된다.
- [0110] 실시예들에서, 탄소계 물질들은 다이아몬드이다.
- [0111] 본원에서 제공된 임의의 실시예에 대해 설명된 모든 피쳐들, 요소들, 구성요소들, 기능들, 및 단계들이 임의의 다른 실시예로부터의 피쳐들, 요소들, 구성요소들, 기능들, 및 단계들과 자유롭게 조합가능하고 이들과 대체가능하도록 의도된다는 점에 유념해야 한다. 특정 피쳐, 요소, 구성요소, 기능, 또는 단계가 하나의 실시예에만 대하여 설명되면, 그 피쳐, 요소, 구성요소, 기능, 또는 단계가 달리 명시적으로 언급되지 않는 한, 본원에서 설명된 모든 다른 실시예와 함께 사용될 수 있다는 점이 이해되어야 한다. 이 문단은 따라서, 다음의 설명이 그러한 조합들 또는 대체들이 가능함을 특정한 경우에 명시적으로 언급하지 않더라도, 언제든지 상이한 실시예들로부터의 피쳐들, 요소들, 구성요소들, 기능들, 및 단계들을 조합하거나, 하나의 실시예로부터의 피쳐들, 요소들, 구성요소들, 기능들, 및 단계들을 다른 실시예의 피쳐들, 요소들, 구성요소들, 기능들, 및 단계들로 대체하는 청구범위의 소개를 위한 선행 기반(antecedent basis) 및 서면 지원(written support)으로서 역할한다. 특히 각각의 그리고 모든 그러한 조합 및 대체의 허용가능성(permissibility)이 당업자에 의해 쉽게 인식될 것임을 고려하면, 모든 가능한 조합 및 대체의 명시적 열거(recitation)가 지나친 부담이라는 점이 명시적으로 인정된다.
- [0112] 본원에서 개시된 실시예들이 메모리, 스토리지, 및/또는 컴퓨터 판독가능 매체를 포함하거나 이들과 관련하여 동작하는 한, 그 메모리, 스토리지, 및/또는 컴퓨터 판독가능 매체는 비밀시적이다. 따라서, 메모리, 스토리지, 및/또는 컴퓨터 판독가능 매체가 하나 이상의 청구항에 의해 커버되는 한, 그 메모리, 스토리지, 및/또는 컴퓨터 판독가능 매체는 비밀시적일 뿐이다.
- [0113] 본원에서 그리고 첨부된 청구범위에서 사용되는 바와 같이, 단수 형태는 문맥이 달리 명백하게 지시하지 않는 한 복수 지시대상(referent)들을 포함한다.
- [0114] 실시예들이 다양한 변형들 및 대안적인 형태들에 대한 여지가 있는 한편, 그 특정 예시들이 도면들에 도시되어 있고 본원에서 상세히 설명된다. 그러나, 이 실시예들이 개시된 특정 형태들에 제한되는 것은 아니며, 반대로, 이 실시예들이 본 개시의 사상 내에 있는 모든 변형들, 등가물들, 및 대안들을 커버하는 것이라는 점이 이해되

어야 한다. 또한, 실시예들의 임의의 피처들, 기능들, 단계들, 또는 요소들이 청구범위 뿐만 아니라 이 범위 내에 있지 않은 피처들, 기능들, 단계들, 또는 요소들에 의해 청구범위의 발명적 범위를 규정하는 부정적인 제한들에 인용되거나 추가될 수 있다.

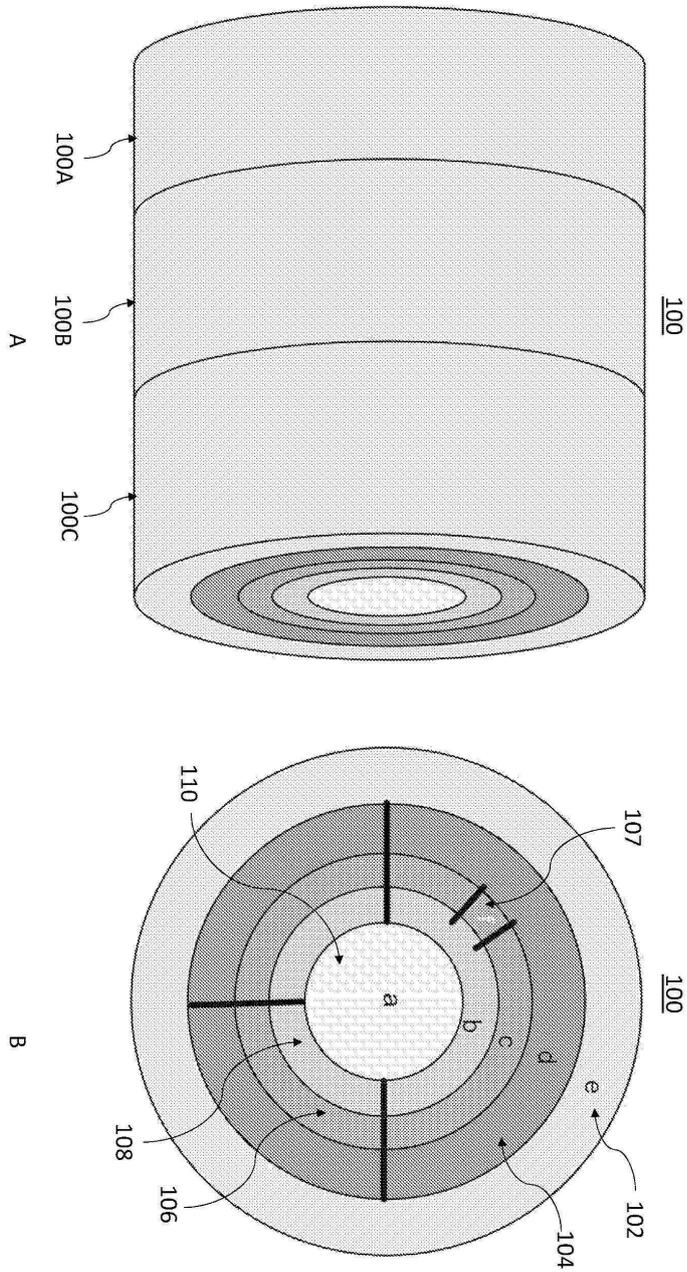
- [0115] 참조문헌:
- [0116] [Ref. 1]
- [0117] https://www.gao.gov/key_issues/disposal_of_highlevel_nuclear_waste/issue_summary Accessed Oct. 23, 2018.
- [0118] [Ref. 2] Gulik, V., & Tkaczyk, A. H., Cost optimization of ADS design: Comparative study of externally driven heterogeneous and homogeneous two-zone subcritical reactor systems. *Nuclear Engineering and Design*, 270, 133-142 (2014).
- [0119] [Ref. 3] Weston M. Stacey, Solving the Spent Nuclear Fuel Problem by Fissioning Transuranics in Subcritical Advanced Burner Reactors Driven by Tokamak Fusion Neutron Sources, *Nuclear Technology*, (2017). DOI: 10.1080/00295450.2017.1345585
- [0120] [Ref. 4] Sheu, R. J., et al. "Depletion analysis on long-term operation of the conceptual Molten Salt Actinide Recycler & Transmuter (MOSART) by using a special sequence based on SCALE6/TRITON." *Annals of Nuclear Energy* 53 (2013): 1-8.
- [0121] [Ref. 5] Tajima T. and Necas A., "Systems And Methods For Frc Based Transmutator And Radioisotope Generator," U.S. Patent Application No. 62/544,666, August 11, 2017.
- [0122] [Ref. 6] Tajima, Toshiki, Dietrich Habs, and Xueqing Yan. "Laser acceleration of ions for radiation therapy." *Reviews of Accelerator Science and Technology* 2.01 (2009): 201-228.
- [0123] [Ref. 7] Kishimoto, Y., and Tajima, T., Strong Coupling between Clusters and Radiation, *High Field Science*, eds. T. Tajima, K. Mima, and H. Baldis (Kluwer, NY, 2000).pp 83-96.
- [0124] [Ref. 8] Kishimoto, Y., Masaki, T., and Tajima, T., High energy ions and nuclear fusion in laser-cluster interaction, *Phys. of Plasmas* 9, 589-601(2002).
- [0125] [Ref. 9] Yan, X.Q., Tajima, T., Hegelich, B.M., Yin, L., and Habs, D., Theory of laser ion acceleration from a foil target of nanometer thickness, *Applied Phys. B* 98, 711 (2010).
- [0126] [Ref. 10] Mako, F., and T. Tajima. "Collective ion acceleration by a reflexing electron beam: Model and scaling." *The Physics of fluids* 27, no. 7: 1815-1820 (1984).
- [0127] [Ref. 11] Steinke, S., Henig, A., Schnurer, M., Sokollik, T., Nickles, P.V., Jung, D., Kiefer, D., Horlein, R., Schreiber, J., Tajima, T. and Yan, X.Q., Efficient ion acceleration by collective laser-driven electron dynamics with ultra-thin foil targets. *Laser and Particle Beams*, 28(1), pp.215-221 (2010).
- [0128] [Ref. 12] Mourou, G., Brocklesby, B., Tajima, T. and Limpert, J., The future is fibre accelerators. *Nature Photonics*, 7(4), p.258 (2013).
- [0129] [Ref. 13] Mourou, G., S. Mirnov, E. Khazanov, and A. Sergeev. "Single cycle thin film compressor opening the door to Zeptosecond-Exawatt physics." *The European Physical Journal Special Topics* 223, no. 6: 1181-1188 (2014).
- [0130] [Ref. 14] Zhou, M.L., Yan, X.Q., Mourou, G., Wheeler, J.A., Bin, J.H., Schreiber, J. and Tajima, T., 2016. Proton acceleration by single-cycle laser pulses offers a novel monoenergetic and stable operating regime. *Physics of Plasmas*, 23(4), p.043112 (2016).
- [0131] [Ref. 15] Tajima, T., "Laser driven compact ion accelerator," U.S. Patent 6,867,419, issued March 15, 2005.
- [0132] [Ref. 16] Esirkepov, T., M. Yamagiwa, and T. Tajima. "Laser ion-acceleration scaling laws seen in

multiparametric particle-in-cell simulations.” Physical review letters 96, no. 10 (2006): 105001.

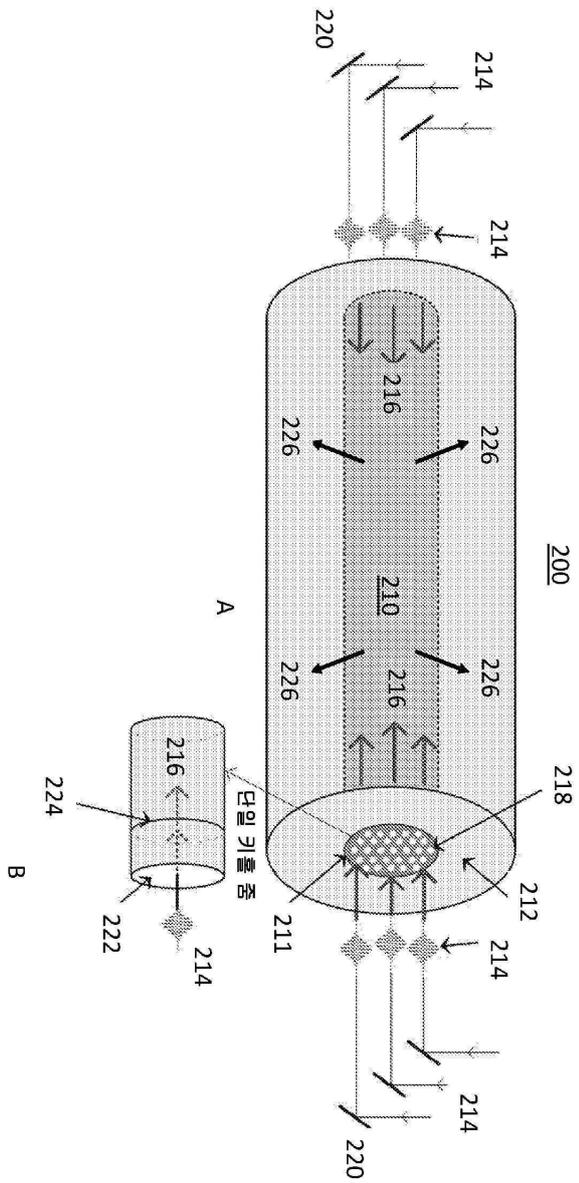
- [0133] [Ref. 17] Tajima T., Mourou G. and Nacas A., “Systems And Methods For Liquid Phase Based Transmutation With Can Laser Based Monitoring,” U.S. Patent Application No. 62/665,287, May 1, 2018.
- [0134] [Ref. 18] D. Strickland and G. Mourou, “Compression of Amplified Chirped Optical Pulses,” Opt. Commun. 56, 219-221 (December 1985).
- [0135] [Ref. 19] G. Mourou and J. Nees “Selectively Triggered High-Contrast Laser” , U.S. Patent No. 5,541,947, issued July 30, 1996.
- [0136] [Ref. 20] A. Dubietis, G. Jonusauskas, and A. Piskarskas, “Powerful femtosecond pulse generation by chirped and stretched pulse parametric amplification in BBO crystal,” Opt. Commun. 88(4-6), 437-440 (1992).
- [0137] [Ref. 21] R. Budrinuas, T. Stanislauskas, J. Adamonis, A. Alecknavicius, G. Veitas, G. Stanislovas-Balickas, A. Michailova, and A. Varanaci-Iusi, 53 W average power CEP-stabilized OPCPA, system delivering 5.5 TW few cycle pulses at 1 kHz repetition rate, Vol. 25, No. 5 | 6 Mar 2017 | OPTICS EXPRESS 5797
- [0138] [Ref. 22] S. Backus, C. Durfee, G. Mourou, H. C. Kapteyn, M. M. Murnane, 0.2 Terawatt laser system at 1 kHz, Opt. Lett. 22, 1256 (1997).
- [0139] [Ref. 23] A. Giesen and J. Speiser, “Fifteen years of work on thin-disk lasers: results and scaling laws” , IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 13 (3), 598 (2007).

도면

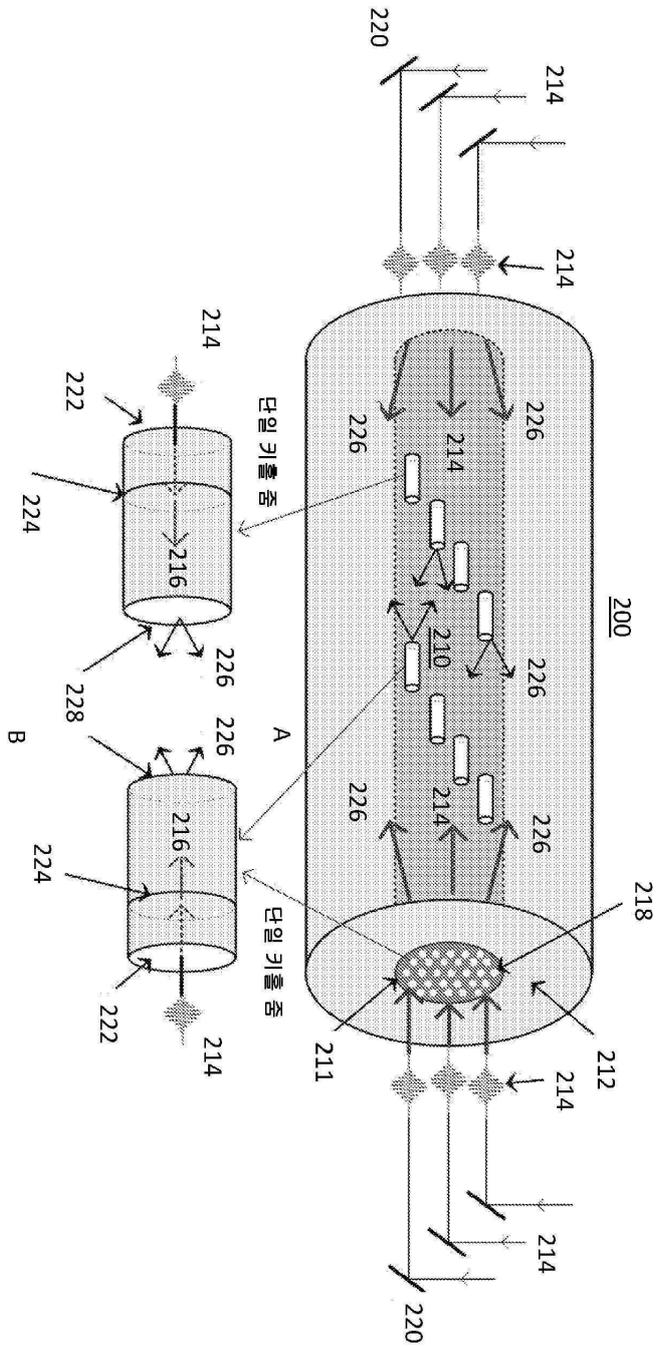
도면1



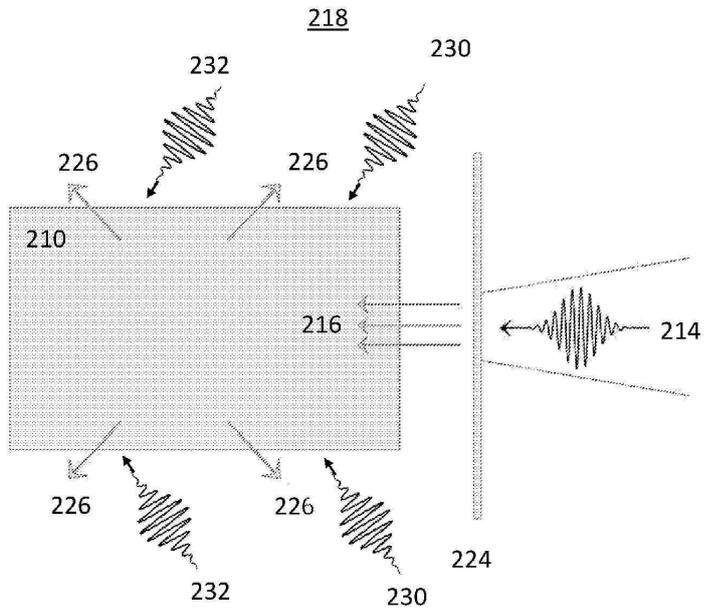
도면2



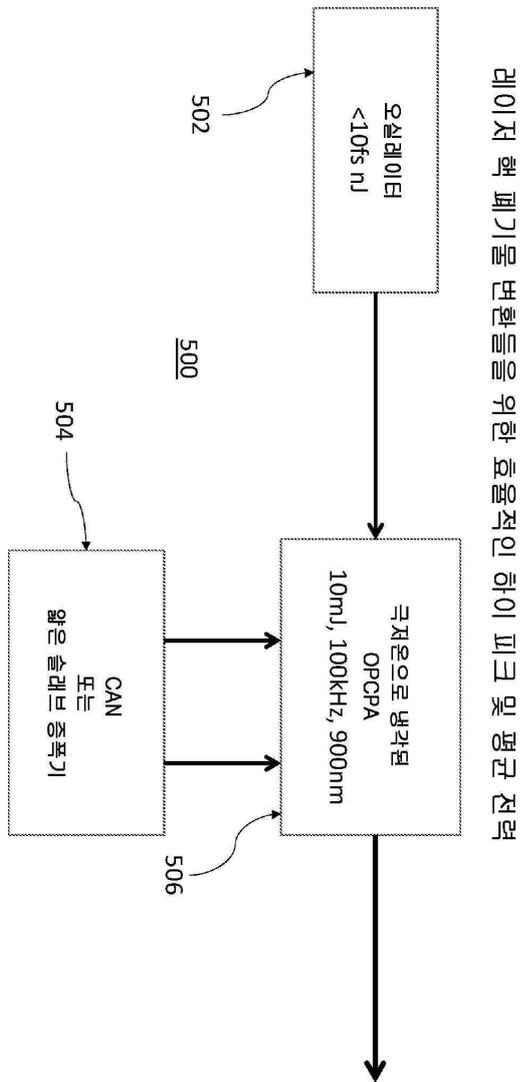
도면3



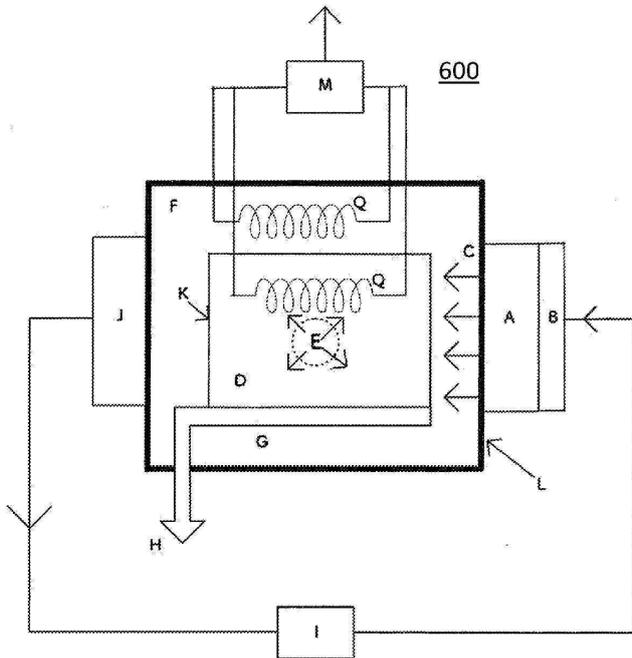
도면4



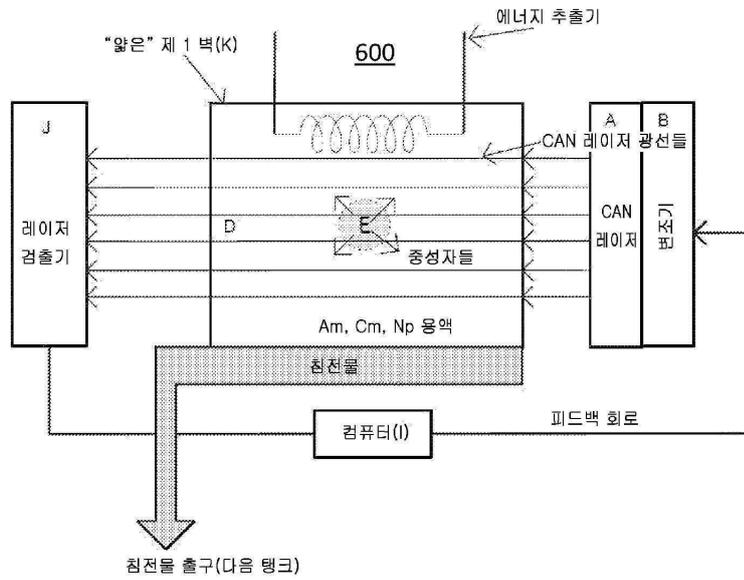
도면5



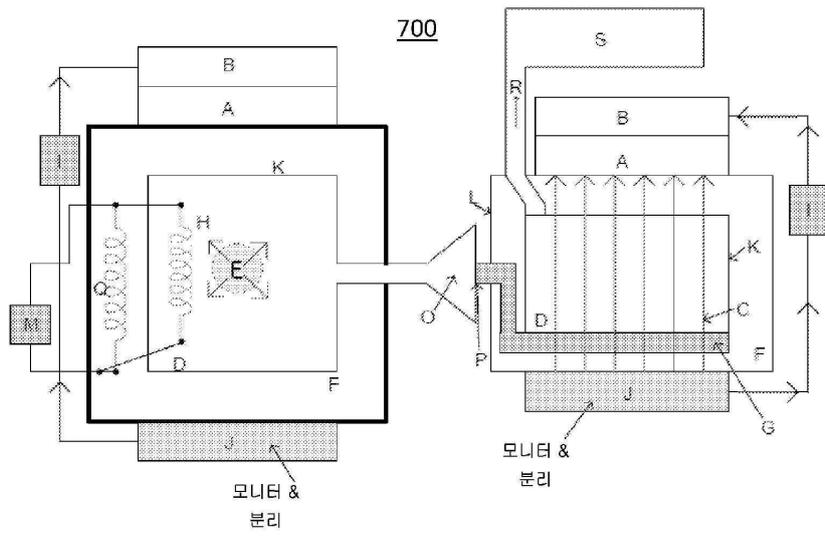
도면6



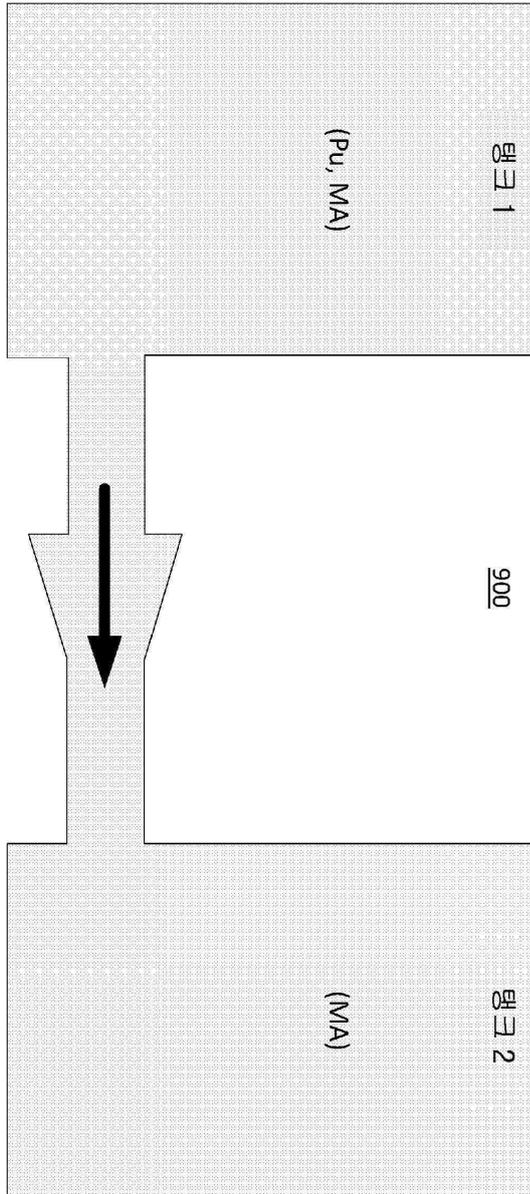
도면7



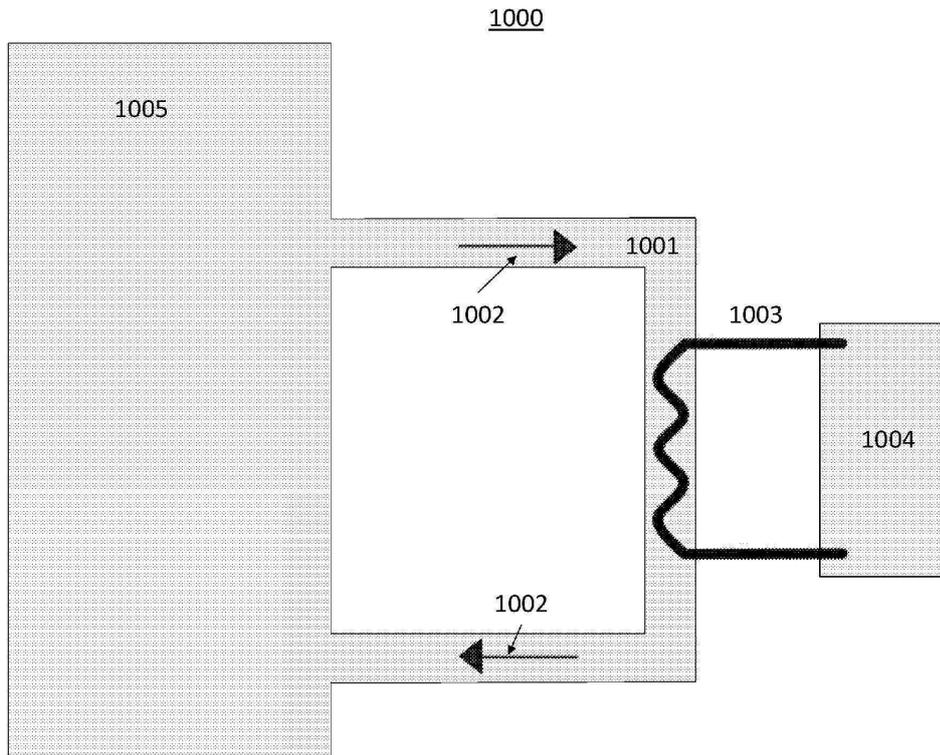
도면8



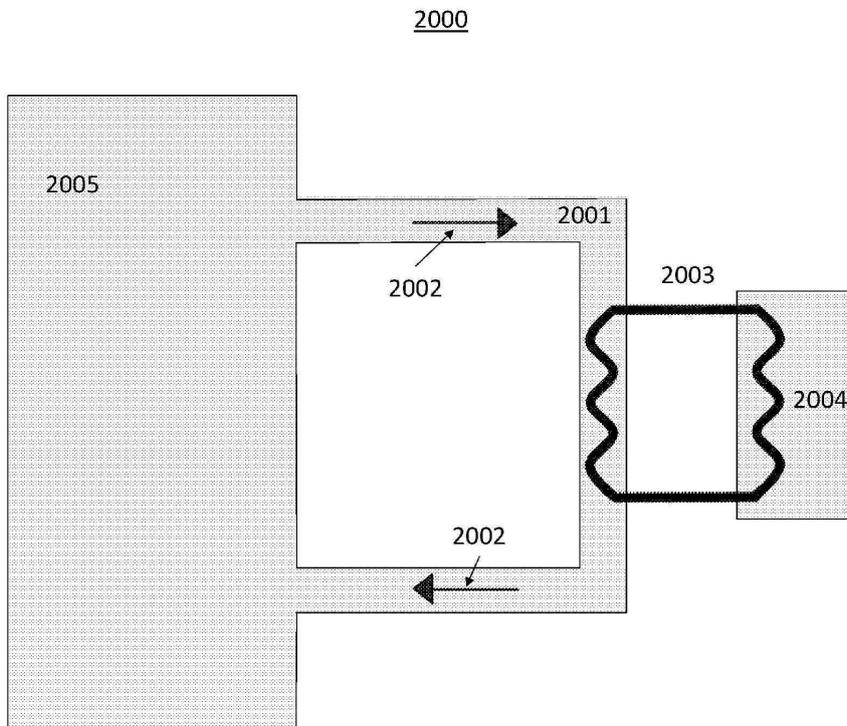
도면9



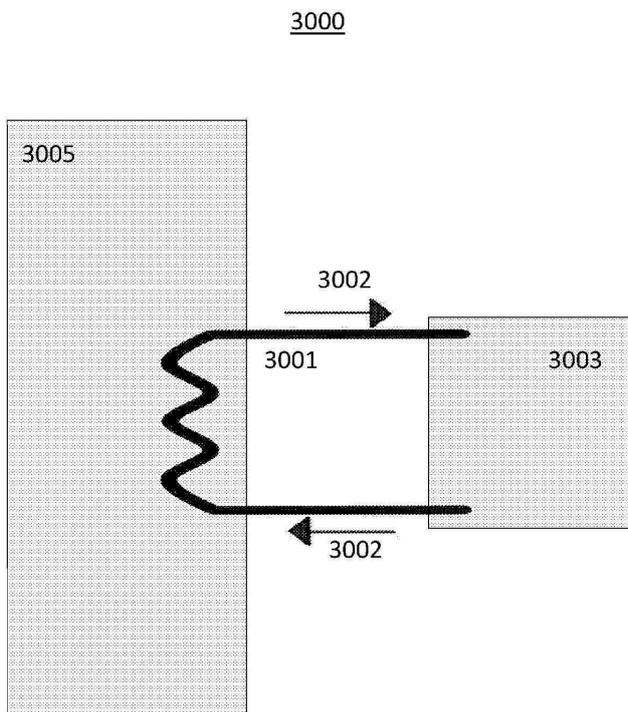
도면10



도면11



도면12



도면13

