



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2023년07월27일
(11) 등록번호 10-2561185
(24) 등록일자 2023년07월25일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G21C 3/06 (2006.01) G21C 1/20 (2006.01)
G21C 1/26 (2006.01) G21C 1/28 (2006.01)
G21C 5/20 (2006.01) G21C 5/22 (2006.01)
- (52) CPC특허분류
G21C 3/06 (2013.01)
G21C 1/20 (2018.01)
- (21) 출원번호 10-2020-7024224
- (22) 출원일자(국제) 2019년01월22일
심사청구일자 2021년12월23일
- (85) 번역문제출일자 2020년08월21일
- (65) 공개번호 10-2020-0106551
- (43) 공개일자 2020년09월14일
- (86) 국제출원번호 PCT/US2019/014606
- (87) 국제공개번호 WO 2019/164617
국제공개일자 2019년08월29일
- (30) 우선권주장
62/619,925 2018년01월22일 미국(US)
16/254,019 2019년01월22일 미국(US)
- (56) 선행기술조사문헌
JP2009036606 A
JP2016118484 A
US02816068 A1
US03081247 A1

- (73) 특허권자
울트라 세이프 뉴클리어 코퍼레이션
미국 워싱턴 시애틀 웨스트 코모도어 웨이 2288
스위트 300 (우: 98199-1465)
- (72) 발명자
베네리, 프란시스코
미국 98199-1465 워싱턴 시애틀 웨스트 코모도어
웨이 2288 스위트 300
베네리, 파올로, 프란시스코
미국 98199-1465 워싱턴 시애틀 웨스트 코모도어
웨이 2288 스위트 300
스니드, 랜스, 루이스
미국 11713 뉴욕 벨포트 사우스 컨트리 로드 206
- (74) 대리인
특허법인 남앤남

전체 청구항 수 : 총 19 항

심사관 : 윤연숙

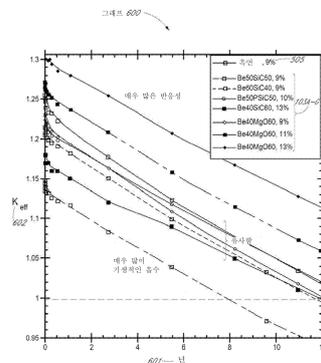
(54) 발명의 명칭 원자로 시스템용 복합 감속재

(57) 요약

원자로 시스템용 복합 감속재 매질 및 복합 감속재 매질로 형성된 복합 감속재 블록을 제조하는 방법. 복합 감속재 매질은 저 감속 물질 및 고 감속 물질과 같은 2개 이상의 감속재를 포함한다. 고 감속 물질은 저 감속 물질과 비교하여 더 높은 중성자 감속력을 갖는다. 저 감속 물질은 실리콘 카바이드 또는 마그네슘 옥사이드의 감속 매

(뒷면에 계속)

대표도 - 도6



트릭스를 포함한다. 고 감속 물질은 감속 매트릭스 내에 분산되며, 베릴륨, 붕소 또는 이들의 화합물을 포함한다. 고 감속 물질은 고 감속 물질이 저 감속 물질의 외부에 노출되지 않도록 저 감속 물질 내에 캡슐화된다. 방법은 저 감속 물질에 기초하여 복합 감속재 혼합물 중 소결 보조제 및 소결 보조제의 중량 퍼센트(w/w %)를 선택하고, 스파크 플라즈마 소결하는 것을 포함할 수 있다.

(52) CPC특허분류

- G21C 1/26* (2013.01)
 - G21C 1/28* (2013.01)
 - G21C 5/20* (2013.01)
 - G21C 5/22* (2013.01)
 - Y02E 30/30* (2020.08)
-

명세서

청구범위

청구항 1

연료 요소의 어레이; 및

2개 이상의 감속재로 형성된 복합 감속재 매질을

포함하는 원자로 노심을 포함하는 원자로 시스템으로서,

2개 이상의 감속재는 저 감속 물질 및 고 감속 물질을 포함하며;

고 감속 물질은 저 감속 물질과 비교하여 더 높은 중성자 감속력을 갖고;

저 감속 물질이 실리콘 카바이드(SiC) 또는 마그네슘 옥사이드(MgO)의 감속 매트릭스를 포함하며;

고 감속 물질은 감속 매트릭스 내에 분산되며, 베릴륨(Be), 붕소(B) 또는 이들의 화합물을 포함하는, 원자로 시스템.

청구항 2

삭제

청구항 3

제1항에 있어서, 고 감속 물질이 베릴륨 보라이드(Be₂B, Be₄B, BeB₂ 또는 BeB₆), 베릴륨 카바이드(Be₂C), 지르코늄 베릴라이드(ZrBe₁₃), 티타늄 베릴라이드(TiBe₁₂), 베릴륨 옥사이드(BeO) 또는 보론 카바이드(B₄C) 중 적어도 하나를 포함하는, 원자로 시스템.

청구항 4

제1항에 있어서, 고 감속 물질이 저 감속 물질의 외부에 노출되지 않도록 고 감속 물질이 저 감속 물질 내에 캡슐화되는, 원자로 시스템.

청구항 5

제1항에 있어서,

연료 요소 각각이 복합 감속재 매질 및 핵 연료로 형성된 연료 복합 감속재 블록을 포함하며;

연료 복합 감속재 블록이 연료 개구를 포함하고;

핵 연료가 복합 감속재 매질에 의해 둘러싸이도록 핵 연료가 연료 개구 안쪽에 배치되는, 원자로 시스템.

청구항 6

제5항에 있어서,

연료 복합 감속재 블록이 냉각제 통로를 추가로 포함하여 냉각제 가스 또는 액체가 흐르게 하는, 원자로 시스템.

청구항 7

제5항에 있어서, 핵 연료가

실리콘 카바이드 매트릭스 내부에 내장된 삼중구조-등방성(TRISO) 연료 입자; 또는

흑연 매트릭스 내부에 내장된 삼중구조-등방성(TRISO) 연료 입자를 포함하는 연료 콤팩트를 포함하는, 원자로 시스템.

청구항 8

제1항에 있어서, 원자로 노심이 복합 감속재 매질로 형성된 반사체 복합 감속재 블록을 포함하는 적어도 하나의 반사체 영역을 추가로 포함하는, 원자로 시스템.

청구항 9

제5항에 있어서,

원자로 노심이 내부 반사체 영역 및 외부 반사체 영역을 포함하며;

내부 반사체 영역은 내부 반사체 복합 감속재 블록을 포함하며;

외부 반사체 영역은 외부 반사체 복합 감속재 블록을 포함하며;

내부 반사체 복합 감속재 블록 및 외부 반사체 복합 감속재 블록은 복합 감속재 매질로 형성되는, 원자로 시스템.

청구항 10

제9항에 있어서,

연료 요소의 어레이가 내부 반사체 영역을 둘러싸고;

외부 반사체 영역이 연료 요소의 어레이를 둘러싸는, 원자로 시스템.

청구항 11

저 감속 물질 및 고 감속 물질을 포함하는 2개 이상의 감속재를 선택하여 복합 감속재 매질을 형성하는 단계;

저 감속 물질에 기초하여 복합 감속재 혼합물 중 소결 보조제 및 소결 보조제의 중량 퍼센트(w/w %)를 선택하는 단계;

2개 이상의 감속재를 선택된 중량 퍼센트(w/w %)의 선택된 소결 보조제와 혼합하여 복합 감속재 혼합물을 생성하는 단계; 및

복합 감속재 혼합물을 스파크 플라즈마 소결하여 복합 감속재 매질로 형성된 복합 감속재 블록을 제조하는 단계를 포함하는 방법.

청구항 12

제11항에 있어서, 복합 감속재 혼합물을 스파크 플라즈마 소결하는 단계가

복합 감속재 혼합물을 맨드릴에 붓는 단계; 및

복합 감속재 혼합물에 처리 온도 및 압력을 가하기 위해 맨드릴 내로 다이를 압박(pressing)하여 복합 감속재 매질로 형성된 복합 감속재 블록을 제조하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 13

제12항에 있어서,

저 감속 물질이 실리콘 카바이드(SiC) 또는 마그네슘 옥사이드(MgO)를 포함하고;

고 감속 물질이 베릴륨(Be), 붕소(B) 또는 이들의 화합물을 포함하는, 방법.

청구항 14

제13항에 있어서, 고 감속 물질이 베릴륨 보라이드(Be₂B, Be₄B, BeB₂ 또는 BeB₆), 베릴륨 카바이드(Be₂C), 지르코늄 베릴라이드(ZrBe₁₃), 티타늄 베릴라이드(TiBe₁₂), 베릴륨 옥사이드(BeO) 또는 보론 카바이드(B₄C) 중 적어도 하나를 포함하는, 방법.

청구항 15

제13항에 있어서,

저 감속 물질이 실리콘 카바이드(SiC)를 포함하고;

소결 보조제는 이트리아(Y_2O_3) 또는 알루미나(Al_2O_3)를 포함하는, 방법.

청구항 16

제15항에 있어서, 복합 감속재 혼합물 중 선택된 중량 퍼센트(w/w %)의 소결 보조제가 4 내지 10 중량 퍼센트(w/w %)의 이트리아 또는 알루미나인, 방법.

청구항 17

제15항에 있어서, 처리 온도가 섭씨 1,400° (C) 내지 섭씨 1,800° (C)의 범위인, 방법.

청구항 18

제13항에 있어서,

저 감속 물질이 마그네슘 옥사이드(MgO)를 포함하고;

소결 보조제는 리튬을 포함하는, 방법.

청구항 19

제18항에 있어서, 복합 감속재 혼합물 중 선택된 중량 퍼센트(w/w %)의 소결 보조제가 3 내지 10 중량 퍼센트(w/w %)의 리튬인, 방법.

청구항 20

제19항에 있어서, 처리 온도가 섭씨 1,300° (C) 내지 섭씨 1,600° (C)의 범위인, 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] **관련 출원에 대한 상호 참조**

[0002] 본 출원은 "원자력 시스템용 복합 감속재"라는 제목으로 2018년 1월 22일에 출원된 미국 특허 가출원 번호 62/619,925; 및 "원자로 시스템용 복합 감속재"라는 제목으로 2019년 1월 22일에 출원된 미국 실용 특허 출원 번호 16/254,019에 대한 우선권을 주장하며, 이의 전체 개시 내용은 본원에 참조로 포함된다.

[0003] **기술 분야**

[0004] 본 주제는 복합 감속재를 포함하는 핵 시스템 및 원자로 시스템의 예에 관한 것이다. 본 주제는 또한 복합 감속재를 제조하기 위한 방법을 포함한다.

배경 기술

[0005] **배경**

[0006] 핵분열로는 열 또는 고속 타입 원자로를 포함한다. 현재 거의 모든 작동 원자로는 열 원자로이며, 따라서 핵분열이 계속될 수 있도록 고속 중성자를 감속시키기 위한 감속재가 필요하다. 감속에 사용되는 물질은 매우 특정한 일련의 특성을 가져야 한다. 먼저, 감속재는 중성자 자체를 흡수할 수 없다. 통상적으로, 이는 감속재의 중성자 흡수 단면이 낮아야 함을 의미한다. 그러나, 감속재는 중성자를 허용가능한 속도로 감속시킬 수 있어야 한다. 따라서, 이상적인 감속재에서 중성자 산란 단면은 높다. 이러한 중성자 산란은 중성자가 감속재의 원자와 상호작용할 가능성의 척도이다. 중성자와 핵 간의 충돌이 탄성 충돌인 경우, 이는 원자의 핵 크기가 중성자에 가까울수록, 중성자가 더욱 느려질 것임을 시사한다. 이러한 이유로, 더 가벼운 원소가 더욱 효율적인 감속제인 경향이 있다.

[0007] 일반적으로 사용되는 감속재, 예컨대 경수(H_2O), 중수(D_2O) 및 흑연(C)은 낮은 중성자 흡수 단면을 갖지만, 비교

적 큰 중성자 산란 단면을 갖는다. 경수, 중수 및 흑연에 있어서 중성자 산란 단면(σ_s)은 다음과 같다: 각각 49, 10.6 및 4.7 barn. 경수, 중수 및 흑연에 있어서 중성자 흡수 단면(σ_a)은 다음과 같다: 각각 0.66, 0.0013 및 0.0035 barn. 감속재는 이들의 비용뿐만 아니라 이들의 감속 능력에 있어서도 다양하다.

[0008] 현재, 열 원자로 작동은 중성자 감속재로서 단일체인 단일 감속재 물질을 사용한다. 단일체 감속재 물질은 전형적으로 토양으로부터 추출된다. 원자로 노심에 가장 적합한 단일체 감속재 물질을 결정하기 위해, 엔지니어는 단일체 감속재 물질의 중성자 특성이 원자로에 적합한지를 분석하고, 비교적 오랜 시간 동안 지속한 후 최적화를 수행한다. 흑연은 원자로에서 일반적으로 사용되는 중성자 감속재의 한 유형이다. 흑연은 자연적으로 발생하는 육각형 구조로 배열된 원자를 갖는 탄소 원소의 결정질 형태이다. 흑연은 표준 조건에서 가장 안정적인 형태의 탄소이다.

[0009] 그러나, 단일 단일체 감속 물질은 한계를 가지며, 그 중 하나는 단일 단일체 감속 물질이 원자로 노심 내부에서 핵 방사를 겪을 때 단일체 감속 물질의 결정의 물리적 한계인 감속재 수명이다. 또한, 흑연과 같은 고 감속 물질은 핵 방사하에 불안정하며, 이는 핵 연료가 연료 수명 한계에 도달하기 전에 고 감속 물질로 하여금 결국 구조적으로 열화되게 한다.

[0010] 핵 흑연은 처음에 Chicago Pile 원자로(즉, 세계 최초의 원자로)를 위한 감속재로서 개발되었으며, 최초이자 거의 틀림없이 가장 많이 연구된 핵 물질이다. 오늘 날, 많은 가스-냉각 시스템(예를 들어, 각기둥(prismatic) 또는 펠블-베드(pebble-bed)) 및 액-냉각 시스템은 매우 큰 흑연 원자로 노심 로딩을 담당한다. 단일 감속 물질로서 흑연을 처리하여 더욱 높은 순도 및 더욱 우수한 - 더욱 등방성 형태의 흑연- 둘 모두를 제공하는 방법이 지속적으로 개선되어 왔지만, 흑연에 있어서 엄격한 감속재 수명 한계는 여전히 남아 있다. 본질적으로, 조사-유도된 이방성 결정 팽창의 물리학은 흑연 감속재 물질의 총 치수 변화, 미세균열 및 흑연 감속재 물질의 완전성 손실로 이어진다.

[0011] 대략 200 메가와트 전기(MWe)의 전형적인 고온 가스-냉각 원자로(HTGR)에는 대략 600 톤의 관련 흑연이 로딩된다. 새로 예상되는 액-냉각 시스템은 유사하게 큰 흑연 폐기물 스트림을 가질 것이다. 불행하게도, 오염된 흑연은 현재 폐기된 약 250,000 톤의 흑연 폐기물에 의해 입증되는 바와 같이 이들 원자로 시스템에 심각한 폐기물 문제를 제기한다. 오염 수준은 원자로 시스템, 핵 연료 및 핵 연료 품질에 의존적이지만, 탄소-14(^{14}C) 및 ^3T 오염은 피할 수 없다. 이러한 핵 폐기물 문제는 고전력(높은 중성자 영향) 시스템용의 흑연 감속재 수명이 원자로 노심의 가동중 현저한 부피 변경을 요구한다는 점에 의해 악화된다.

발명의 내용

[0012] 개요

[0013] 본원에 개시된 다양한 예는 복합 감속재를 포함하는 원자로 노심을 포함하는 원자로 시스템에 대한 복합 감속재 기술 및 복합 감속재를 제조하는 방법에 관한 것이다. 흑연, 물 및 용융 염과 같은 개별 감속재 물질에 비해 복합 감속재(예를 들어, 리튬 플루오라이드와 베릴륨 플루오라이드를 조합시킨 FLiBE)로 여러 가지 이점이 달성된다. 첫 번째, 복합 감속재는 원자로 노심의 변경을 요구하지 않고도 핵 연료의 연료 수명에 맞춤으로써 개별 감속재 물질에 비해 핵 폐기물을 감소시킨다. 두 번째, 복합 감속재는 치수적으로 조사 안정적이다(즉, 구조적 열화를 덜 겪는다). 세 번째, 복합 감속재는 현재 흑연 산화 문제를 제거함으로써 안전성 특징을 향상시킨다.

[0014] 제1 예에서, 원자로 시스템은 원자로 노심을 포함한다. 원자로 노심은 2개 이상의 감속재로 형성된 복합 감속재 매질 및 연료 요소의 어레이를 포함한다. 2개 이상의 감속재는 저 감속 물질 및 고 감속 물질을 포함한다. 고 감속 물질은 저 감속 물질 대비 더 높은 중성자 감속력을 갖는다.

[0015] 제2 예에서, 방법은 저 감속 물질 및 고 감속 물질을 포함하는 2개 이상의 감속재를 선택하여 복합 감속재 매질을 형성하는 단계를 포함한다. 방법은 저 감속 물질을 기반으로 하여 복합 감속재 혼합물 중 소결 보조제 및 이러한 소결 보조제의 중량 퍼센트(w/w %)를 선택하는 단계를 추가로 포함한다. 방법은 선택된 중량 퍼센트(w/w %)의 선택된 소결 보조제와 2개 이상의 감속재를 혼합하여 복합 감속재 혼합물을 생성하는 단계를 추가로 포함한다. 방법은 복합 감속재 혼합물을 스파크 플라즈마 소결하여 복합 감속재 매질로 형성된 복합 감속재 블록을 제조하는 단계를 추가로 포함한다.

[0016] 상기 예의 추가적인 목적, 장점 및 신규한 특징은 부분적으로 하기의 설명에 제시될 것이며, 부분적으로는 하기 및 첨부 도면의 검토시 당업자에게 자명해질 것이거나 실례의 생성 또는 작업에 의해 학습될 수 있다. 본 주제

의 목적 및 이점은 특히 첨부된 청구 범위에서 지적된 방법론, 수단 및 조합에 의해 실현되고 달성될 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0017]

도면의 간단한 설명

도면은 제한이 아니라 단지 예로서 본 개념에 따른 하나 이상의 구현을 도시한다. 도면에서, 동일한 참조 번호는 동일하거나 유사한 요소를 지칭한다.

도 1은 원자로 노심, 제어 봉 및 어셈블리의 다른 구성 요소를 도시하는 원자로 시스템의 예시이다.

도 2a는 도 1의 원자로 노심에서 사용되는 핵 연료의 연료 입자 및 연료 콤팩트의 예시이다.

도 2b는 도 1의 원자로 노심의 연료 복합 감속재 블록의 예시이며, 이는 도 2a의 핵 연료를 포함하며, 복합 감속재 매질로 형성된다.

도 2c는 원자로 노심 및 구성 요소의 단면도이며, 이는 연료 요소의 어레이 및 복합 감속재 매질로 형성된 반사체 복합 감속재 블록을 포함한다.

도 3은 복합 감속재 매질에 의해 밀폐된 핵 연료를 도시하는 도 2b의 연료 복합 감속재 블록의 일부의 확대 평면도이다.

도 4는 원자로 노심에 있는 동안 시간에 따른 흑연 감속재 물질의 치수 변화를 나타내는 그래프이다.

도 5는 복합 감속재 매질의 2가지 유형의 저 감속 물질 및 복합 감속재 매질의 8가지 유형의 고 감속 물질과 비교한 흑연 감속재 물질의, 중성자 감속력을 포함하는 특성을 묘사한 표이다.

도 6은 7가지의 상이한 유형의 복합 감속재 매질과 비교하여 도 5의 흑연 감속재 물질을 포함하는 원자로 노심의 시간에 따른 반응성을 예시하는 그래프이다.

도 7은 복합 감속재 매질의 복합 감속재 블록을 제조하기 위해 구현될 수 있는 방법의 흐름도이다.

도 8a는 도 7의 방법의 처리 사진이며, 여기에서 스파크 플라즈마 소결(SPS)이 복합 감속재 블록을 제조하는데 이용된다.

도 8b는 도 7의 방법의 스파크 플라즈마 소결 동안 시간에 따른 처리 온도 및 압력(다이 변위)을 나타내는 그래프이다.

도 8c는 고 감속 물질을 캡슐화하는 저 감속 물질을 보여주는 복합 감속재 매질의 마이크론 수준의 사진이다.

부품 목록

- 100 원자로 시스템
- 101 원자로 노심
- 102A-N 연료 요소
- 103 복합 감속재 매질
- 104 저 감속 물질
- 105 고 감속 물질
- 110 격납 구조물
- 115A-N 제어 봉
- 120 스팀 발생기
- 125 스팀 라인
- 130 스팀 터빈
- 135 발전기
- 140 전기

145	콘텐츠
150	스프레이
155	수증기
160	냉각 탑
200	핵 연료
201A-N	핵 연료 봉
205	연료 콤팩트
206A-N	연료 입자
207	실리콘 카바이드 매트릭스
208	흑연 매트릭스
220	복합 감속재 블록
225	연료 복합 감속재 블록
226A-N	연료 개구
227A-B	냉각제 통로
228	냉각제
230	반사체 영역
235A-N	반사체 복합 감속재 블록
240	내부 반사체 영역
245A-N	내부 반사체 복합 감속재 블록
250	외부 반사체 영역
255A-N	외부 반사체 복합 감속재 블록
260	배럴
265	영구 외부 반사체
270A-N	작동 제어 봉
275A-N	시동 제어 봉
280A-N	예비 중지 채널

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0018]

상세한 설명

[0019]

하기 상세한 설명에서, 관련 교시의 철저한 이해를 제공하기 위해 수 많은 특정 세부 사항이 예를 통해 제시된다. 그러나, 본 교시가 이러한 세부 사항 없이 실시될 수 있음이 당업자에게는 자명할 것이다. 다른 경우에는, 잘 알려진 방법, 절차, 구성 요소 및/또는 회로는 본 교시의 불필요하게 모호한 양태를 피하기 위해 세부 사항 없이 비교적 높은 수준으로 설명되었다.

[0020]

핵 방사선을 다루기 위해, 단일 감속재 물질보다 전체적으로 더 오래 지속되는 방향으로 변화하는 여러 감속 물질을 포함하는 복합 감속재 매질(예를 들어, 고체 물질)이 설계된다. 복합 감속재 매질은 원자로 노심이 감속재 물질의 교체 없이 연장된 수명을 가지게 하고, 예를 들어, 흑연 감속재 물질과 비교하여 더욱 콤팩트하게 할 수 있다. 또한, 복합 감속재 매질은 발전(electricity generation)을 위한 지상 육상 원자로(terrestrial land reactor) 또는 고온 핵 열 추진(NTP) 시스템(예를 들어, 소형 원자로(compact space nuclear reactor))과 같은 다양한 원자로 시스템 구현에 효율적으로 사용될 수 있다.

- [0021] 이제 첨부 도면에 예시되고 하기 논의되는 예를 상세히 참조한다.
- [0022] 도 1은 어셈블리의 원자로 노심(101), 제어 봉(115A-N) 및 다른 구성 요소를 도시하는 원자로 시스템(100)의 예시이다. 이 예에서, 원자로 시스템(100)은 제어된 핵 연쇄 반응이 일어나고 에너지가 방출되는 원자로(101)를 포함한다. 이러한 예에서, 원자로 시스템(100)은 지상 육상 적용 분야의 원자력 발전소이다. 그러나, 원자로 및 복합 감속재 기술은 핵 열 추진(NTP) 시스템과 같은 우주 환경에 활용될 수 있다. 이러한 NTP 시스템에서, 생성된 추력은 원자로 노심(101)에 수용되거나, 이와 일체로 형성되거나, 연결되거나 부착되는 비히클 예컨대, 로켓, 드론, 무인 항공기(UAV), 항공기, 우주선, 미사일 등을 추진한다. 또한, NTP 시스템은 잠수함 또는 선박의 추진에 사용될 수 있다.
- [0023] 원자로 노심(101)은 연료 요소(102A-N)의 어레이 및 복합 감속재 매질(103)을 포함한다. 원자로 노심(101)은 핵 연료를 포함하여 메가와트 이상의 화력(MWt)을 발생시키는 핵 분열 원자로 노심이다. 복수의 원주방향 제어 봉(115A-N)은 연료 요소(102A-N)의 어레이를 둘러싸서 제어 봉(115A-N)을 회전시킴으로써 원자로 노심(101)의 반응성을 변화시킬 수 있다. 격납 구조물(110)은 원자로 노심(101), 제어 봉(115A-N) 및 스팀 발생기(120)를 수용한다. 제어 봉(115A-N)은 원자로 노심(101)의 반사체 영역(240, 250)(도 2c 참조)의 지역에 위치하여 원자로 노심(101)의 반응성을 변화시킴으로써 작동 동안 중성자 집단 및 원자로 파워 수준을 조절할 수 있다.
- [0024] 제어 봉(115A-N)은 핵분열 없이 많은 중성자를 흡수할 수 있는 붕소, 은, 인듐 및 카드뮴과 같은 화학 원소로 구성된다. 원자로 노심(101)은 열로 방출되는 열 에너지를 생성한다. 원자로 시스템(100)의 다른 구성 요소는 열 에너지를 전기(140)와 같은 유용한 형태의 에너지로 변환한다. 예에서, 원자로 노심(101)은 열 에너지를 스팀 발생기(120)에 제공하며, 이는 열 에너지를 스팀 라인(125) 내로 추출시키며, 이는 스팀 터빈(130)을 회전시킨다. 스팀 터빈(130)은 발전기(135)를 구동하고, 그 후 이는 열 에너지를 전기(140)로 변환시킨다. 후속하여, 열 팽창 주기가 반복된다.
- [0025] 예시적인 원자로 시스템(100)에서, 콘덴서(145)는 원자로 노심(101)에 공급하고 원자로 시스템(100)의 구성 요소를 냉각시키기 위한 고압 액체 또는 가스와 같은 냉각제를 생성한다. 예를 들어, 팽창 사이클 동안, 냉각 탭(160)에 저장된 냉각제는 원자로 노심(101)을 통해 인출되어 원자로 노심(101)을 냉각시킬 수 있다. 냉각제로부터의 열은 스프레이(150)로서 냉각 탭(160) 내로 추출되고 냉각 탭(160)으로부터 수증기(155)로서 방출될 수 있다. 참고로, 냉각제 중 일부는 바이패스를 통해 원자로 노심(101)으로부터 돌아와서 예를 들어, 빼내서 스팀 터빈(130)을 회전시킬 수 있다. 일부 예에서, 원자로 시스템(100)은 용융 염 루프 적용에 사용될 수 있다.
- [0026] 원자로 노심(101)에서 중성자 연쇄 반응은 매우 중요하며 - 각 핵분열로부터의 단일 중성자는 다른 핵의 핵분열을 초래함 - 연쇄 반응은 제어되어야 한다. 복합 감속재 매질(103)은 2개 이상의 감속재로 형성되며, 이는 임계성을 효과적으로 조절하고 핵 연료 수명과 일치할 수 있는 연장된 감속재 수명을 제공한다. 2개 이상의 감속재는 저 감속 물질(104) 및 고 감속 물질(105)을 포함한다. 고 감속 물질(105)은 저 감속 물질(104)과 비교하여 더 높은 중성자 감속력을 지니며, 이는 중성자 흡수 단면 및 중성자 산란 단면과 상호연관될 수 있다. 원자로 노심(101)에서 복합 감속재 매질(103)은 빠른 중성자(우라늄-235와 같은 핵분열성 화합물에서 원자를 분할하여 생성됨)를 감속시켜 이들을 핵분열 연쇄 반응에서 더욱 효과적이게 한다. 중성자의 이러한 슬로우잉(slowing) 또는 감속은 중성자가 핵분열성 핵에 의해 더욱 용이하게 흡수되게 하여 더 많은 핵분열 이벤트를 생성한다. 2개 이상의 감속재는 원자로 노심(101)의 구형 환경(예를 들어, 발전 또는 NTP)에 따라 매우 특정한 특성 세트에 적합화될 수 있다.
- [0027] 도 5-6에서 추가로 설명되는 바와 같이, 저 감속 물질(104)은 실리콘 카바이드(SiC)(104A) 또는 마그네슘 옥사이드(MgO)(104B)의 감속 매트릭스를 포함한다. 고 감속 물질(105)은 감속 매트릭스 내에 분산되고, 베릴륨(Be)(105H), 붕소(B) 또는 이들의 화합물을 포함한다. 더욱 특히, 고 감속 물질(105)은 베릴륨 보라이드(Be₂B(105A), Be₄B(105B), BeB₂ 또는 BeB₆), 베릴륨 카바이드(Be₂C)(105C), 지르코늄 베릴라이드(ZrBe₁₃)(105D), 티타늄 베릴라이드(TiBe₁₂)(105E), 베릴륨 옥사이드(BeO)(105F), 또는 보론 카바이드(¹¹B₄C)(105G) 중 적어도 하나를 포함한다. 고 감속 물질(105)은 고 감속 물질(105)이 저 감속 물질(104)의 외부에 노출되지 않도록 저 감속 물질(104) 내에 캡슐화된다.
- [0028] 도 2a는 도 1의 원자로 노심(101)에 사용되는 핵 연료(200)의 연료 입자(206A-N) 및 연료 콤팩트(205)(예를 들어, 연료 펠렛)의 예시이다. 한 예에서, 핵 연료(200)는 실리콘 카바이드 매트릭스(207) 내부에 매립된 삼중구조-동방성(TRISO) 연료 입자(206A-N)를 포함하는 연료 콤팩트(205)를 포함한다. 또 다른 예에서, 핵 연료(200)는 연료 펠렛을 생성하기 위해 흑연 매트릭스(208) 내부에 매립된 삼중구조-동방성(TRISO) 연료 입자(206A-N)를

포함한다. TRISO 연료 입자(206A-N)는 중앙에 UC 또는 우라늄 옥시카바이드(UCO)로 구성된 연료 커널을 포함하고, 이는 하나 이상의 등방성 물질을 둘러싸는 하나 이상의 층으로 코팅된다. 도 2a에 도시된 바와 같이, TRISO 연료 입자(206A-N)는 3개의 등방성 물질의 4개의 층을 포함한다. 그러한 예에서, 4개 층은 다음과 같다: (1) 탄소로 제조된 다공성 버퍼 층, 이어서 (2) 열분해 탄소(PyC)의 조밀한 내부 층, 이어서 (3) 증가된 온도에서 핵분열 생성물을 유지하고 TRISO 연료 입자(206A)에 강력한 구조적 무결성을 제공하기 위한 SiC의 세라믹 층, 이어서 (4) PyC의 조밀한 외부 층.

[0029] TRISO 연료 입자(206A-N)는 1,600°C 초과 온도에서 응력 또는 핵분열 가스 압력으로 인한 균열이 발생하지 않도록 설계되었으며, 따라서, 최악의 사고 시나리오에서 연료를 함유할 수 있다. TRISO 연료 입자(206A-N)는 도 2c에 도시된 원자로 노심(101)의 예시적인 단면과 같은 고온 가스-냉각 원자로(HTGR)에 사용되어 LWR의 온도보다 훨씬 높은 온도에서 작동되도록 설계되었다. 연료 콤팩트(205)는 연료 핀 또는 봉에 적재되고, 클래딩(clad)되고, 연료 요소(102A-N)의 수 많은 칼럼 내부에 적층될 수 있다. TRISO 연료 입자(206A-N)에 대한 가능한 매트릭스(207, 208) 물질 중에서, 실리콘 카바이드(SiC)는 우수한 조사 거동 및 제조를 제공한다. SiC는 상승된 온도에서 공기에 노출시 조밀한 부착성 실리콘 디옥사이드(SiO₂) 표면 스케일이 신속하게 형성되어 추가 산화를 방지하기 때문에 탁월한 산화 내성을 갖는다.

[0030] 코팅된 연료 입자(206A-N)의 사용은 핵 연료(200)의 높은 증금속 밀도를 달성하는 것을 더욱 어렵게 하는데, 연료 입자(206) 내의 순 증금속 밀도가 코팅 두께가 증가함에 따라 급격히 감소하기 때문이다. 이러한 점은 핵분열 생성물 배리어로서 유용성을 유지하면서 코팅 두께 대 커널 직경 비율이 가능한 한 작게 유지해야 함을 필요로 한다. 그러나, LWR에서 분산 연료의 사용은 더 높은 농축 및 더 낮은 전력 밀도를 요구할 것이 분명하다. 복합 핵 연료를 위한 가장 가능성이 높은 핵분열 유형은 높은 용융 온도 및 높은 액티나이드 밀도의 조합으로 인한 우라늄/플루토늄 카바이드(UC 또는 PuC) 및 우라늄/플루토늄 니트라이드(UN 또는 PuN)이다. 우라늄 실리사이드는 더 높은 밀도의 핵분열 우라늄을 제공할 수 있으나, 예측되는 제조 및 작동 조건 하에서는 불안정할 수 있다. 파인 반응성을 더욱 잘 관리하기 위해 TRISO 입자 예컨대, 에르븀 옥사이드의 연료 커널을 둘러싸는 하나 이상의 가연성 중성자 독물을 포함하는 QUADRISO 연료, 뿐만 아니라 CerMet 연료(예를 들어, 세라믹 연료 입자(206A-N) 예컨대, 우라늄 옥사이드), 금속 매트릭스에 매립됨, 등등을 포함하는 다른 유형의 연료 입자(206A-N)가 사용될 수 있다.

[0031] 핵 연료(200)의 일부 예에서, 우라늄 디옥사이드(UO₂) 분말은 압축되어 원통형 연료 콤팩트(205)를 생성하며 고온에서 소결되어 고밀도 및 잘 규정된 물리적 특성 및 화학적 조성을 갖는 세라믹 핵 연료 펠렛을 생성한다. 연삭 공정은 좁은 공차의 균일한 원통형 형상을 얻기 위해 사용된다.

[0032] 도 2b는 도 1의 원자로 노심(101)의 연료 복합 감속재 블록(225)의 예시이며, 이는 도 2a의 핵 연료(200)를 포함하며, 복합 감속재 매질(103)로 형성된다. 각각의 연료 요소(102A-N)(도 2c에 도시된 바와 같음)는 복합 감속재 매질(103) 및 핵 연료(200)로 형성된 복합 감속재 블록(220)을 포함한다. 연료 복합 감속재 블록(225)은 연료 개구(226A-N)를 포함한다. 핵 연료(200)는 핵 연료(200)가 복합 감속재 매질(103)에 의해 둘러싸이도록 연료 개구(226A-N) 안쪽에 배치된다. 연료 복합 감속재 블록(225)은 냉각제 통로(227A-B)를 추가로 포함하여 가스 또는 액체와 같은 냉각제(228)를 유동시킨다.

[0033] 많은 이러한 연료 콤팩트(205)(도 2a에 도시된 바와 같음)는 적층되고 도시된 핵 연료 봉(201A-N)(예를 들어, 밀봉된 튜브)내에 충전된다. 클래딩은 방사성 핵분열 단편이 핵 연료(200)로부터 냉각제(228) 내로 빠져나가 냉각제(228)를 오염시키는 것을 방지하는 핵 연료 봉(201A-N)의 외층이다. 핵 연료 봉(201A-N)의 클래딩에 사용되는 금속은 원자로 노심(101)의 설계에 의존적이지만 내식성이 높은 것에 더하여 중성자 흡수가 낮은, 스테인리스 강, 알루미늄과 마그네슘, 또는 지르코늄 합금을 포함할 수 있다. 완성된 핵 연료 봉(201A-N)은 도 2c에 설명된 바와 같이 원자로 노심(101)을 구축하는데 사용되는 연료 어셈블리로 그룹화된다.

[0034] 도 2c는 복합 감속재 매질(103)로 형성된, 연료 요소(102A-N)의 어레이 및 다양한 반사체 복합 감속재 블록(245A-N, 255A-N)을 포함하는 원자로 노심(101) 및 구성 요소의 단면도이다. 전형적으로, 원자로 노심(101)은 복합 감속재 매질(103)로 형성된 반사체 복합 감속재 블록(235A-N)을 포함하는 적어도 하나의 반사체 영역(230)(내부 반사체 영역(240) 및 외부 반사체 영역(250)으로 도시됨)을 포함한다. 도 2c의 예시적인 배열에서, 원자로 노심(101)은 내부 반사체 영역(240) 및 외부 반사체 영역(250)을 포함한다. 내부 반사체 영역(240)은 내부 반사체 복합 감속재 블록(245A-N)을 포함한다. 외부 반사체 영역(250)은 외부 반사체 복합 감속재 블록(255A-N)을 포함한다. 내부 반사체 복합 감속재 블록(245A-N) 및 외부 반사체 복합 감속재 블록(255A-N)은 합성 감속재 매질(103)로 형성된다. 육각형 형상의 연료 블록 영역을 형성하는 연료 요소(102A-N)의 어레이는 내부

반사체 영역(240)을 둘러싼다. 외부 반사체 영역(250)은 연료 요소(102A-N)의 어레이를 둘러싼다. 따라서, 연료 요소(102A-N)는 내부 반사체 영역(240)과 외부 반사체 영역(250) 사이에 산재되어 있다.

[0035] 도 2c에서, 원자로 노심(101)은 각기둥 고온 가스 원자로 노심(101)이다. 물론, 복합 감속재 기술은 가스 기반이 아닌 임의의 원자로 노심(101) 내에서 이용될 수 있다. 예시적인 가스 원자로 노심(101)에서, 복합 감속재 블록(220)은 복합 감속재 매질(103)의 블록이며, 이는 저 감속 물질(104) 및 고 감속 물질(105) 둘 모두로 형성된 고체 물질이다. 복합 감속재 블록(220)은 각기둥 형상(예를 들어, 육각형 형상)일 수 있으며, 냉각제(228)를 유동시키기 위한 냉각제 통로(227A-B) 및 핵 연료(200)를 내부에 넣기 위한 연료 개구(226A-N)와 같이 뚫린 다양한 개구(구멍)를 포함할 수 있다. 핵 연료(200)의 많은 핵 연료 봉(201A-N)은 각각의 복합 감속재 블록(220) 내에 드롭되어 각각의 연료 복합 감속재 블록(225)(예를 들어, 연료 다발)을 생성한다. 그 후, 연료 복합 감속재 블록(225A-N)(예를 들어, 연료 다발)은 원자로 노심(101)에 로딩된다.

[0036] 많은 복합 감속재 블록(220)에 연료가 공급되며, 이는 연료 복합 감속재 블록(225A-N)으로 도시된다. 복합 감속재 블록(220)의 대부분에는 연료가 공급되지 않으며(즉, 핵 연료(200)가 존재하지 않음), 따라서 연료 개구(226A-N)를 포함하지 않는다. 이들 반사체 복합 감속재 블록(235A-N)(내부 반사체 복합 감속재 블록(245A-N) 및 외부 반사체 복합 감속재 블록(255A-N)으로 도시됨)은 냉각제(228)를 유동시키는 냉각제 통로(227A-B)를 포함한다.

[0037] 연료 요소(102A-N)의 어레이는 수백 개의 육각형 형상의 연료 복합 감속재 블록(225A-N)을 포함하고, 이 중에는 본 예에서 102개의 연료 칼럼이 있으며, 각각의 연료 칼럼은 열(10)개의 연료 복합 감속재 블록(225A-J) 높이이다. 원자로 노심(101)의 단면은 약 6 미터 폭이며, 각 복합 감속재 블록(220)은 약 30 cm 폭이다. 원자로 노심(101)의 단면의 중앙에는 내부 반사체 복합 감속재 블록(245A-N)이 있으며, 이는 칼럼 당 10개 적층된 내부 반사체 복합 감속재 블록(245A)의 많은 칼럼을 포함한다. 원자로 노심(101)의 단면의 외부에는 외부 반사체 복합 감속재 블록(255A-N)이 있으며, 이는 칼럼 당 10개 적층된 외부 반사체 복합 감속재 블록(255A-N)의 많은 칼럼을 포함한다. 전형적으로 제어 봉(115A-N), 연료 복합 감속재 블록(225A-N)의 칼럼, 내부 반사체 복합 감속재 블록(245A-N) 및 외부 반사체 복합 감속재 블록(255A-N)은 동일한 길이이고; 그러나, 길이는 구현에 따라 다를 수 있음을 이해해야 한다.

[0038] 도 1에 도시된 바와 같이 제어 봉(115A-N)은 작동 제어 봉(270A-N) 및 시동 제어 봉(275A-N) 모두를 포함하며, 이는 원자로 노심(101)의 상단을 통해 삽입되고 복합 감속재 블록(220)의 서브세트를 통과한다. 서른 여섯(36)개의 작동 제어 봉(270A-N)은 외부 반사체 복합 감속재 블록(255A-N)의 서브세트를 통과한다. 열두(12)개의 시동 제어 봉(275A-N)은 연료 복합 감속재 블록(225A-N)의 서브세트를 통과한다. 제어 봉(270A-N, 275A-N)은 중성자를 흡수한다. 강철로 형성된 금속 노심 지지체와 같은 배럴(260)은 원자로 노심(101) 주변에서 원자로 노심(101)의 연료 요소(102A-N)의 어레이, 내부 반사체 영역(240) 및 외부 반사체 영역(250)의 다발 콜렉션을 둘러싼다. 복합 감속재 매질(103)로 형성될 수 있는 영구 외부 반사체(265)는 외부 반사체 영역(250)과 배럴(260) 사이에 배치된다. 영구 외부 반사체(265)는 원자로 노심(101)을 구성하는 외부 반사체 영역(250)의 주변을 둘러싸는 부분적으로 육각형 형상의 충전제 요소를 포함한다. 열 여덟(18)개의 예비 중지 채널(280A-N)은 연료 요소(102A-N)의 어레이 내의 지역에 위치한다.

[0039] 일반적으로, 연료 복합 감속재 블록(225A-N), 내부 반사체 복합 감속재 블록(245A-N) 및 외부 반사체 복합 감속재 블록(255A-N)에서 사용되는 복합 감속재 블록(220A-N)은 모두 동일한 복합 감속재 매질(103)로 형성되며, 동일한 프로파일 형상(예를 들어, 나선형)을 가지며, 냉각제(228)를 유동시키기 위한 냉각제 통로(227A-B)를 갖는다. 그러나, 내부 반사체 복합 감속재 블록(245A-N) 및 외부 반사체 복합 감속재 블록(255A-N)을 위한 복합 감속재 블록(220)은 뚫린 연료 개구(226A-N)를 포함하지 않는다. 따라서, 100 피트 떨어진 곳에서 원자로 노심(101)은 거의 동일해 보이는 많은 큰 육각형 복합 감속재 블록(220A-N)을 갖는 것으로 보이며, 그러나, 연료 요소(102A-N)의 어레이를 함유하는 연료 블록 영역(예를 들어, 원자로 노심(101)의 중앙 육각형 형상 부분)은 복합 감속재 블록(220A-N) 내부에 배치된 핵 연료(200)를 포함하게 된다.

[0040] 도 3은 복합 감속재 매질(103)에 의해 밀폐된 핵 연료(200)를 도시하는 도 2b의 연료 복합 감속재 블록(225)의 일부의 확대 평면도이다. 2개의 핵 연료 봉(201A-B)의 핵분열성 물질의 블록 사이에서, 단일 제어 봉(115A)은 303개의 중성자를 강하게 흡수한다. 제어 봉(115A)이 핵 연료 봉(201A-B)의 핵분열성 물질 사이에 더 깊게 삽입될수록 핵분열(301)로부터 생성된 중성자가 충돌하기가 더욱 어려워져서 연쇄 반응이 더 제한되고 열 에너지 생성이 감소된다. 도시된 바와 같이, 복합 감속재 매질(103)은 연료 봉(201A-B) 사이의 공간을 채우며, 이는 중성자를 느리게(감속(302))함으로써 중성자 에너지를 감소시킨다. 복합 감속재 매질(103)이 없으면, 중성자는 너무

빠르게 움직여 ²³⁵U의 핵분열(301)을 유발할 가능성이 매우 낮으므로 이러한 중성자는 흡수되어 핵분열을 유도하기 전에 많은 핵을 지나칠 것이다.

- [0041] 도 4는 원자로 노심(101)에 있는 동안 시간에 따른 흑연 감속재 물질(505)의 치수 변화를 나타내는 그래프(400)이다. 그래프(400)에서 원자 당 변위(dpa)(401)는 원자로 노심의 수명에 걸쳐 x 축에 표시되고, 델타 Δ V/V(%) (402)는 흑연 감속재 물질(505)의 치수 변화이다. 10-20 dpa(원자 당 변위)에서 시사된 수명을 갖는 중성자 조사로 인해 핵 흑연 감속재 물질(505)에서 큰 치수 변화가 발생한다. 일반적으로, 고출력 고온 가스-냉각 원자로(HTGR)는 발전소 수명 동안 원자로 노심 흑연을 1회 또는 2회 교체해야 한다.
- [0042] 4개의 상이한 유형의 흑연 감속재 물질(505)이 섭씨 750° (C) 및 섭씨 900° (C) 모두에서 그래프(400)에 플로팅된다. 원자로 노심 내의 흑연 감속재 물질(505)의 온도는 위치의 함수이며, 이는 큰 변동성을 갖는다. 흑연 감속재 물질(505)은 원자로 노심의 바닥 또는 그 근처에서 섭씨 750° (C) 및 원자로 노심의 상단에서 또는 그 근처에서 섭씨 900° (C)일 수 있다. 따라서, 흑연 감속재 물질(505)은 원자로 노심의 특정 위치 또는 배치에 따라 상이한 수명을 갖는다.
- [0043] 그래프(400)에 도시된 바와 같이, 원자로 노심에 있는 동안 흑연 감속재 물질은 큰 치수 변화를 겪다가 붕괴되며, 이는 "감속재 수명"이라고 불린다. 이러한 팽창 메커니즘은 핵 흑연 고유의 다공성(본질적으로 모든 핵 흑연 물질은 약 18% 다공성임)에 의해 다소 보상되지만, 감속재 수명은 흑연이 이의 원래의 무-팽창 값으로 돌아가는 지점, 또는 핵 흑연 감속재 물질(505)의 4개의 플로팅된 유형 범위에 있어서 도 4의 그래프 내에 삽입된 2개의 트레이스에 대한 영점과 관련이 있다. 따라서, 흑연 감속재 물질(505)의 문제는 원자로 노심에서 작동 시간 동안 방사선 손상으로 인한 매우 제한적이고 한정된 감속재 수명이다.
- [0044] 도 5는 복합 감속재 매질(103)의 2가지 유형의 저 감속 물질(104A-B) 및 복합 감속재 매질(103)의 8가지 유형的高 감속 물질(105A-H)과 비교한 흑연 감속재 물질(505)의, 중성자 감속력을 포함한 특성을 묘사한 표(500)이다. 알 수 있는 바와 같이, 목표는 우수한 복사 성능을 갖는 저 감속 물질(104A-B) 내부에 불량한 복사 성능을 갖는 고 감속 물질(105A-H)을 배치하는 것이며, 따라서, 복합 감속재 매질(103)의 감속재 수명은 흑연 감속재 물질(505)에 비해 상당히 연장된다. 표(500)에서 알 수 있는 바와 같이, 저 감속 물질(104A-B)의 감속력(510)은 고 감속 물질(105A-H)보다 상대적으로 낮다. 표(500)에 포함된 다른 비교 특성은 용융 온도(T_{용융})(515), 밀도(520), 화학 반응성(525), 결정(530), 조사 성능(535) 및 열 전도성(540)이다.
- [0045] 복합 감속재 매질(103)은 교체할 필요 없이 실질적으로 더 낮은 치수 변화를 갖는다. 복합 감속재 매질(103)은 원자로 노심(101)의 연료 수명 동안 지속될 수 있는 물질이다. 이는 SiC(104A) 또는 MgO(104B)와 같은 저 감속 물질(104)을 위한 탁월한 감속 매트릭스 물질의 사용을 통해 조사 안정성을 증가시키면서 2-상 구조를 통한 중성자 감속을 일치시킴으로써 달성된다.
- [0046] 저 감속 물질(104)의 감속 매트릭스 상 중의 캡슐화된 또는 수반된 상을 위한 제2 고 감속 물질(105)의 선택은 도 5의 표(500)의 검토에 의해 이해되는 바와 같이 감속을 향상시킬 필요성에 의해 결정된다. 감속의 간단한 측정법은 평균 로그 감소 $\bar{\Sigma}$ 와 그 상호작용이 발생할 확률(거시적 횡단면 Σ)의 곱이며, 감속력(510)으로서 알려져 있다. 따라서, 복합 감속재 매질(103)은 저 감속 물질(104A-B)(예를 들어, 고 감속 물질(105A-H)을 수반하기 위한 감속 매트릭스) 내부에 포획된 고 감속 물질(105A-H)을 포함한다. 저 감속 물질(104A-B)은 실제로 방사선 하에서 상대적으로 안정하다. 표에서의 제1의 예시적 저 감속 물질은 실리콘 카바이드(SiC)(104A)이며, 이는 예를 들어, 화학 기상 증착(CVD) SiC일 수 있다.
- [0047] 고 감속 물질(105A-H)은 저 감속 물질(104A-B)의 감속 매트릭스 내부에 놓인다. 저 감속 물질(104A-B)의 감속재 매트릭스는 약하게 감속되거나(실리콘 카바이드 또는 마그네슘 옥사이드), 고 감속 물질(105A-H)은 큰 감속 능력을 갖는다. 고 감속 물질(105A-H) 모두는 전력(510)을 감속시키는데 있어서 흑연보다 우수하고, 저 감속 물질(104A-B) 모두는 전력(510)을 감속시키는데 있어서 흑연 감속재 물질(505)만큼 우수하지 않다. 목표는 평균적으로 저 감속 물질(104A-B)과 고 감속 물질(105A-H)의 감속 능력(감속력(510))이 함께 더해져 방사선 하에 더욱 안정적이고 흑연 감속재 물질(505)보다 원자로 노심(101) 내부에서 더 오래 지속되는 복합 감속재 매질(103)을 생성하는 것이다. 복합 감속재 매질(103)의 일부 예에서, 저 감속 물질(104A-B)의 감속 매트릭스는 베릴륨(Be) 또는 붕소(B) 화합물인 고 감속 물질(105A-H)과 매칭된다.
- [0048] 핵 흑연 감속재 물질(505)을 성공적으로 대체하기 위해, 복합 감속재 매질(103)은 유사한 감속 능력을 가지며, 핵 흑연 감속재 물질(505)보다 더 긴 감속재 수명을 달성한다. 복합 감속재 매질(103)은 2-상 이상의 구조(예를

들어, 구성 요소), 섬유성 구조 또는 합금으로 여겨질 수 있다. 저 감속 물질(104A)로서의 실리콘 카바이드(SiC)는 도 4에 도시된 흑연 감속재 물질(505)과 달리 공칭 "포화된" 체적 변화로 100 초과의 원자 당 변위(dpa)로 생존하는 것으로 입증되었다. 여기에 제시된 그러한 구조의 예는 도 7 및 8a-c에 설명된 바와 같이 스파크 플라즈마 소결(SPS) 처리를 통한 SiC 호스트 감속 매트릭스 내의 45% 부피 분율의 고 감속 물질(105A-H)이다. 제2의 호스트 감속 매트릭스는 유사하게 처리된 마그네슘 옥사이드(MgO)이다. 조작된 복합 감속재 매질(103)을 이러한 신속하고 진보된 제조 SPS 기법에 의해 제조하는 것은 경제적인 제조법을 시사한다. 유사한 제조 기술은 고온 압축 및 소결일 수 있다.

[0049] 도 6은 7가지의 상이한 유형의 복합 감속재 매질(103A-G)과 비교하여 도 5의 흑연 감속재 물질(505)을 포함하는 원자로 노심의 시간에 따른 반응성을 나타내는 그래프(600)이다. 그래프(600)는 반응성 계수 - Y축에 표시된 K_{eff} (602) -에 의해 측정된 바와 같이 시간의 함수 - X 축에 표시된 년(601) -로서 복합 감속재 매질(103A-G) 중 일부가 첫날에 더욱 우수하며, 일부는 더 나빠짐을 입증한다. 복합 감속재 매질(103A-G)은 저 감속 물질(104A-B) 및 고 감속 물질(105A-H)의 선택에 따라 흑연(505)보다 더욱 우수하거나 더 나빠질 수 있다. 2가지 버전의 수명이 존재한다: (1) 연료 수명 - 핵 연료(200)는 분해되고 연소되고, 원자로가 중지됨; 및 (2) 감속재 수명 - 감속재가 붕괴되고 핵 규제 당국은 원자로가 너무 위험하므로 꺼야하는 것으로 결정함.

[0050] K_{eff} (602)가 1아래로 떨어지는 경우, 핵 연료(200)의 초기 로딩이 연료 수명에 도달한 것이다. 그래프(600)는 복합 감속재 매질(103A-G)의 감속재 수명을 나타내지 않고, 오히려 그래프(600)는 연료 수명을 나타내며, 복합 감속재 매질(103A-G)이 흑연 감속재 물질(505)과 똑같이 효과적이라는 것을 나타낸다. 그래프(600)는 또한 선택된 복합 감속재 매질(103A-G)에 기초하여 감속이 조정(즉, 증가 또는 감소)될 수 있음을 보여준다.

[0051] 도 6에 도시되어 있지 않지만, 모든 복합 감속재 매질(103A-G)에 대한 감속재 수명은 예를 들어, 교체 없이 연료 수명과 일치시키기 위해 흑연 감속재 물질(505)을 넘어 상당히 연장된다. 흑연 감속재 물질(505)의 문제점은 흑연 감속재 물질을 대체하기 위해 원자로 노심(101)을 개방하는데 드는 극단적인 비용이며, 이는 약 1억 달러가 될 수 있다. 복합 감속재 매질(103A-G)은 더 큰 선행 투자일 수 있지만, 도로 아래의 원자로 노심(101) 중의 흑연 감속재 물질(505)을 교체하는데 필요한 비용을 절감할 것이다. 첫날에는 더욱 비싸더라도, 복합 감속재 매질(103A-G)은 흑연 감속재 물질(505)이 요구하는 감속재 요소의 교체를 필요로 하지 않음으로써 향후에 덜 비싸질 것이다. 전형적으로, 흑연 감속재 물질(505)을 갖는 원자로 노심의 적은 용적의 영구적 외부 반사체(265)(도 2c 참조)를 제외한 모든 것은 흑연 감속재 물질(505)이 손상되기 때문에 대체된다. 흑연 감속재 물질(505)이 고성능 복합 감속재 매질(103)로 대체되지 않는 한 이러한 변경은 불가피하다.

[0052] 그래프(600)는 대표적인 원자로 유형에 대한 대표적인 계산을 나타낸다: 소형 모듈식 각기동 고온 가스-냉각 원자로(HTR)의 35% SiC 매트릭스 연료(FCM® 핵 연료). 그래프(600)에서, 흑연 감속재 물질(505)은 9% 농축 UO_2 TRISO FCM® 핵 연료에 의해 연료가 공급되는 흑연 감속된 원자로에서 구현된다. 도시된 바와 같이, 실리콘 카바이드(SiC)의 더 큰 흡수로 인해, 각기동 HTR 원자로 노심에 구현된 일부 BeSiC 유형의 복합 감속재 매질(103A, 103D)은 원자로 노심 수명에 허용할 수 없을 정도로 큰 영향을 미칠 수 있다. 한편, SiC의 감속 매트릭스 분획을 감소시키거나 복합 감속재 매질(103B-C)의 다공성을 증가시키거나 TRISO 연료 입자 농축을 증가시키면 각기동 HTR에서 흑연 감속재 물질(505)과 유사한 수명을 제공한다. 또한, MgO-기반 복합 감속재 매질(103E-G)은 매우 우수한 중성자 성능을 갖는 것으로 보인다.

[0053] 그래프(600)는 전형적인 소형 모듈식 고온 가스-냉각 반응기(HTR)에서 복합 감속재 사용의 중성자 영향을 보여준다. 특히 K_{eff} (602)는 년(601)의 함수로 예측되고 표준 핵 흑연 감속재 물질(505)과 비교되는 노심 반응성의 척도이다. 많은 경우에 저 감속 물질(104)의 감속 매트릭스의 다양한 유형(100% 밀도 SiC, 100% 밀도 MgO 및 20% 다공성 SiC) 및 핵 연료(200)의 다양한 농축의 변수가 제공된다. 도 6의 예에서, 핵 연료(200)는 실리콘 카바이드 매트릭스(207) 내부에 매립된 삼중구조-등방성(TRISO) 연료 입자(206A-N)의 연료 콤팩트(205)를 포함한다. 감속 매트릭스와 베릴륨 상의 부피 분율 또한 가변적이다. 과도하게 기생적인 감속재, 너무 많은 감속 및 풍부 연료(너무 많은 반응성)를 가진 용액, 및 핵 흑연 감속재 물질(505)과 유사한 옵션 모음에 대한 곡선이 표시된다.

[0054] 도 7은 복합 감속재 매질(103)의 복합 감속재 블록(220)을 제조하기 위해 구현될 수 있는 방법의 흐름도이다. 단계(700)의 시작시, 방법은 저 감속 물질(104) 및 고 감속 물질(105)을 포함하는 2개 이상의 감속재를 선택하여 복합 감속재 매질(103)을 형성하는 단계를 포함한다. 이는 저 감속 물질(104) 및 고 감속 물질(105)을 위한 분말을 선택하는 것을 포함한다. 일반적으로 설명하면, 저 감속 물질(104)은 실리콘 카바이드(SiC)(104A) 또는

마그네슘 옥사이드(MgO)(104B)를 포함한다. 고 감속 물질(105)은 베릴륨(Be)(105H)), 붕소(B) 또는 이들의 화합물을 포함한다. 더욱 특히, 고 감속 물질(105)은 베릴륨 보라이드(Be₂B(105A), Be₄B(105B), BeB₂ 또는 BeB₆), 베릴륨 카바이드(Be₂C)(105C), 지르코늄 베릴라이드(ZrBe₁₃)(105D), 티타늄 베릴라이드(TiBe₁₂)(105E), 베릴륨 옥사이드(BeO(105F), 또는 보론 카바이드(¹¹B₄C)(105G) 중 적어도 하나를 포함한다.

[0055] 단계(710)로 계속되어, 방법은 저 감속 물질(104)에 기초하여 복합 감속재 혼합물 중의 소결 보조제 및 소결 보조제의 중량 퍼센트(w/w% 또는 wt%) 또는 중량 분율을 선택하는 단계를 추가로 포함한다. 이는 저 감속 물질(104) 및 고 감속 물질(105)에 대한 분말의 조합물에 따라 하나 이상의 적절한 소결 보조제 및 중량 퍼센트 또는 분율을 선택하는 것을 포함한다. 소결 보조제는 실리콘 카바이드의 경우 옥사이드(예를 들어, 이트리아 및 알루미늄) 및 마그네슘 옥사이드의 경우 리튬과 같은 공유력(eutectic power)이다. 복합 감속재 혼합물의 혼합 비율을 표현하기 위해 중량 퍼센트 또는 중량 분율 대신 질량 퍼센트 또는 질량 분율이 사용될 수 있다.

[0056] 소결 보조제는 예를 들어, 저 감속 물질(104)에 따라 달라진다. 소결 보조제는 다양한 옥사이드, 예컨대, 이트륨 옥사이드로 알려진 이트리아(Y₂O₃) 또는 알루미늄 옥사이드로 알려진 알루미늄(Al₂O₃); 및 리튬을 포함한다. 저 감속 물질(104)이 실리콘 카바이드(SiC)(104A)를 포함하는 제1 예에서, 소결 보조제는 이트리아(Y₂O₃) 또는 알루미늄(Al₂O₃)를 포함한다. 이러한 제1 예에서, 복합 감속재 혼합물 중 선택된 중량 퍼센트(w/w%)의 소결 보조제는 3 내지 10 중량 퍼센트(w/w%) 및 더욱 바람직하게는, 4 내지 10 w/w%의 이트리아 또는 알루미늄이다. 저 감속 물질(104)이 마그네슘 옥사이드(MgO)(104B)를 포함하는 제2 예에서, 소결 보조제는 리튬을 포함한다. 이러한 제2 예에서, 복합 감속재 혼합물 중 선택된 중량 퍼센트(w/w %)의 소결 보조제는 3 내지 10 중량 퍼센트(w/w %)의 리튬이다.

[0057] 단계(720)으로 이어져서, 방법은 선택된 중량 퍼센트(w/w %)의 선택된 소결 보조제와 2개 이상의 감속재를 혼합하여 복합 감속재 혼합물을 생성하는 단계를 추가로 포함한다. 이제 단계(730)에서 완료되는데, 방법은 복합 감속재 혼합물을 스파크 플라즈마 소결(SPS)하여 복합 감속재 매질(103)로 형성된 복합 감속재 블록(220)을 제조하는 단계를 추가로 포함한다. SPS는 첨가제(예를 들어, 소결 보조제)를 사용하여 소결 온도를 억제하며, 이는 공정 실행을 수행하는데 필요한 처리 온도와 압력을 낮춘다. 소결 보조제는 공정을 수행하기 위한 온도 및 시간을 감소시키며, 이는 유리하게는 복합 감속재 매질(103)의 고 감속 물질(105)(예를 들어, 베릴륨 및 붕소 화합물)의 증발 손실을 최소화한다.

[0058] 복합 감속재 혼합물을 스파크 플라즈마 소결하는 단계는 복합 감속재 혼합물을 맨드릴에 붓는 단계; 및 복합 감속재 혼합물에 처리 온도 및 압력을 가하기 위해 맨드릴 내로 다이를 압박하여 복합 감속재 매질(103)로 형성된 복합 감속재 블록(220)을 제조하는 단계를 포함한다. 다이는 복합 감속재 혼합물에 처리 온도와 압력을 가하는 피스톤과 같다. 처리 온도는 예를 들어, 저 감속 물질(104)에 따라 달라진다.

[0059] 저 감속 물질(104)이 실리콘 카바이드(SiC)(104A)를 포함하고/거나 소결 보조제가 이트리아(Y₂O₃) 또는 알루미늄(Al₂O₃)를 포함하는 제1의 예로 돌아가서, 처리 온도는 섭씨 1,400° (C) 내지 섭씨 1,800° (C)의 범위이다. 실리콘 카바이드 저 감속 매트릭스(104A)의 SPS 처리 말기에, 이트리아 또는 알루미늄은 부분적으로 기화된다. 따라서, 이트리아 또는 알루미늄은 복합 감속재 블록(220)에 부분적으로 존재할 수 있으며, 복합 감속재 매질(103)에서 SPS 처리 후에 미량으로 검출될 수 있다.

[0060] 저 감속 물질(104)이 마그네슘 옥사이드(MgO)(104B)를 포함하고/거나 소결 보조제가 리튬을 포함하는 제2의 예로 돌아가서, 처리 온도는 섭씨 1,300° (C) 내지 섭씨 1,600° (C)의 범위이다. 리튬 소결 보조제는 마그네슘 옥사이드 저 감속 물질(104B)의 SPS 처리의 말기에 완전히 기화된다. 따라서, 리튬은 복합 감속재 블록(220)에 존재하지 않으며, 전형적으로 검출 가능하지 않다(즉, 리튬이 비산 첨가제처럼 남아있음).

[0061] 현장 지원 소결 기술(FAST) 또는 펄스 전류 소결(PECS)로도 공지된 스파크 플라즈마 소결(SPS)은 소결 기술이다. SPS의 주요 특징은 전도성 샘플의 경우 펄스된 또는 비펄스된 DC 또는 AC 전류가 흑연 다이는 물론 분말 콤팩트를 직접 통과한다는 점이다. 줄 발열(Joule heating)은 분말 콤팩트의 고밀화에서 우세한 역할을 하는 것으로 밝혀졌으며, 이는 통상적인 소결 기술과 비교하여 더 낮은 소결 온도에서 거의 이론적 밀도 달성을 발생시킨다. 열 생성은 외부 가열 요소에 의해 열이 제공되는 통상적인 핫 프레싱과 달리 내부적이다. 이는 매우 높은 가열 또는 냉각 속도(분당 최대 1,000 Kelvin)를 가능하게 하므로 소결 공정이 매우 빨라진다(몇 분 이내). SPS 공정의 일반적인 속도는 표준 고밀화 경로에 수반되는 조대화(coarsening)를 피하면서 나노크기 또는

나노구조로 분말을 고밀화할 가능성을 보장한다. SPS는 자기, 자기전기, 압전, 열전, 광학 또는 생물의학 특성이 강화된 나노입자를 기반으로 한 세라믹의 제조를 위한 우수한 방법이다.

- [0062] 도 8a는 도 7의 방법의 처리 사진(800)이며, 여기에서 스파크 플라즈마 소결(SPS)은 복합 감속재 블록(220)을 제조하는데 사용된다. SPS 처리 사진(800)은 복합 감속재 블록(220)을 생성하기 위해 스파크 플라즈마 소결(SPS) 물질에서 직류 소결(DCS) 창을 통해 보는 SPS 절차를 보여준다. 이 경우, 분말을 함유하는 흑연 다이 내의 흑연 펀치(광택)는 도 8a의 DCS 창을 통해 보여진다. SPS는 복합 감속재 블록(220)을 신속하게 생성하기 위해 훨씬 더 낮은 처리 온도에서 제조를 가능하게 하는 고급 제조 기술이다. 저 감속 물질(104) 분말 및 고 감속 물질(105) 분말은 혼합되고 소결 보조제가 첨가된다. SPS를 사용하면 분말을 빠르게 가열할 수 있다. 고 감속 물질(105)을 캡슐화하기 위해, 고 감속 물질(105)(예를 들어, 베릴륨 화합물)이 SPS 동안 증발하기 전에 저 감속 물질(104)을 고형화시켜 복합 감속재 매질(103)의 복합 감속재 블록(220)을 형성한다.
- [0063] 복합 감속재 매질(103) 처리는 비교적 순수한 SiC 분말의 고진공 직류 소결(Sinterland LABOX 3010KF)을 사용하여 수행될 수 있다. 고밀도로 통합되는 현재 분말은 35-100 나노미터(nm) 범위의 나노-SiC 분말과 0.2-2 마이크로미터(μm) 범위의 Acheson-유래된 SiC 분말을 포함한다. 모든 물질은 동역학적으로 안정되어, 스파크 플라즈마 소결 장치에서 철저히 불순물이 없는 분산의 냉각 압축 소결을 보장한다.
- [0064] 도 8b는 도 7의 방법의 스파크 플라즈마 소결(SPS) 동안 시간(825)에 따른 처리 온도(815) 및 압력(다이 변위)(820)을 나타내는 그래프(810)이다. 그래프(810)은 복합 감속재 블록(220)을 제조하기 위해 SPS로 실행 프로세스를 수행하기 위한 온도(815), 압력(820)(예를 들어, 다이 변위) 및 시간(825)을 보여준다. 그래프(810)은 SPS 절차에 대한 상대적 시간-온도 트레이스를 제공하며, 이는 저 감속 물질(104A)로서 SiC에 대해 1,500°C 범위의 처리 온도를 나타낸다. 저 감속 물질(104B)로서 MgO에 대한 처리 온도는 1,300-1,600°C 범위일 수 있다. 실리콘 카바이드(SiC)와 같은 저 감속 물질(104)의 분쇄 처리의 실행은 복합 감속재 블록(220)을 제조하기 위해 용광로가 2,000°C를 훨씬 초과하는 필요한 온도에 도달하는데 수 시간 걸릴 것이다. SPS 처리로 1,600°C - 1,800°C의 처리 온도에서 10분은 복합 감속재 매질(103)의 복합 감속재 블록(220)을 제조할 수 있게 한다.
- [0065] 소결 첨가제의 임의의 흡습성 경향을 최소화하기 위해 지르코늄 또는 지르코니아가 첨가될 수 있다. 저 감속 물질(104A)로서 SiC에 대한 처리 온도는 고밀화를 향상시키기 위해 알루미늄 또는 이트리아의 소결 첨가제를 사용하여 1,400-1,800°C 범위일 수 있다.
- [0066] 도 8c는 고 감속 물질(105C)(Be₂C)을 캡슐화하는 저 감속 물질(104A)(SiC)을 보여주는 복합 감속재 매질(103)의 연마된 단면의 미크론 수준 사진(830)이다. 미크론 수준 사진(830)은 생성된 복합 감속재 블록(220)의 복합 감속재 매질(103)의 현미경 사진이며, 고 감속 물질(105C)의 계면 근처에 저 감속 물질(104A) 결정 미세구조를 보여준다. 저 감속 물질(104A)의 실리콘 카바이드 감속 매트릭스는 고 감속 물질(105C)(Be₂C)의 베릴륨 물질의 다공성 탄소 코팅을 완전히 캡슐화한다(덮는다). 베릴륨은 독성이기 때문에, 무독성 실리콘 카바이드 저 감속 물질(104A)에 의한 베릴륨 주위의 캡슐화는 독성 고 감속 물질(105C)에 대한 노출이 제거되기 때문에 유리하다. 다공성 탄소 중간층은 고 감속 물질(105C)의 베릴륨 상에 코팅되어 실리콘 카바이드 저 감속 물질(104A) 사이에 위치한다. 저 감속 물질(104A)의 실리콘 카바이드 감속 매트릭스(SiC)는 고 감속 물질(105C) 주위에서 완전히 조밀화된다.
- [0067] 도 8c의 미크론 수준 사진(830)은 2-상 SiC 매트릭스 복합체의 이미지를 제시한다(감속재 제2 상 부피 분율 약 35%). 도 8b에 도시된 바와 같이, 1500°C를 초과하는 소결이 약 10분의 유지 시간으로 적용되어, 상대적으로 작은(직경 8 mm) 부품에 대해 거의 전-밀도 SiC 감속 매트릭스 밀도를 달성하였다.
- [0068] 첨단 핵분열 원자로 적용분야를 포함하여 원자로에 사용하기 위한 다양한 복합 감속재가 개시되었다. 복합 감속재는 예를 들어, 저 감속 물질(104)(예를 들어, 연속체 또는 SiC 또는 MgO의 방사선-안정 매트릭스 상)에 함유된 고 감속 물질(105)(예를 들어, 베릴륨 함유 상)이다. 핵 흑연 감속재 물질(505)과 유사한 중성자 감속이 고 감속 물질(105)의 사용을 통해 제공될 수 있는 한편, 저 감속 물질(104)의 사용에 의해 전달되는 많은 안전, 경제적 및 폐기물 감소 이점을 제공할 수 있다. 따라서, 복합 감속재는 핵 흑연 감속재 물질(505)을 대체할 수 있으며, 우수한 감속재 수명파 증가된 안전성 및 폐기물 처리 속성을 갖는다. 예시적인 제조 공정은 저 감속 물질(104)(예를 들어, 실리콘 카바이드 및 마그네슘 옥사이드의 방사선-안정 매트릭스) 및 고 감속 물질(105)의 스파크 플라즈마 소결(SPS) 동안 공용 분말의 사용을 포함한다.
- [0069] 진술한 바와 같이, 원자로 노심(101)을 위한 복합 감속재 매질(103)로 형성된 복합 감속재(예를 들어, 복합 감속재 블록(220))를 제조하기 위한 방법이 개시된다. 방법은 저 감속 물질(104)(예를 들어, 제1 매트릭스 상)의

연속체 내에 고 감속 물질(105)(예를 들어, 제2 포획 상)을 포함하는 복합 감속재 매질(103)(2-상 복합 감속재)를 생성하는 것을 포함한다. 저 감속 물질(104)은 SiC 또는 MgO이다. 고 감속 물질(105)은 Be₂C, BeO, 또는 Be₂C 또는 BeO의 셀을 갖는 베릴륨 금속과 같은 베릴륨 함유 화합물이다. 저 감속 물질(104)과 고 감속 물질(105) 사이의 인터페이스는 n-알과 반응을 통해 생성된 헬륨을 흡수할 수 있는 다공성 순응 구조이다. 복합 감속재 매질(103)은 원자로 노심(101)의 수명 구성 요소이다.

[0070] 본원에 사용된 용어 및 표현은 특정 의미가 본원에서 달리 제시된 경우를 제외하고는 이들의 각각의 해당 탐구 및 연구 영역과 관련하여 그러한 용어 및 표현에 부여되는 일반적인 의미를 갖는 것으로 이해될 것이다. 제1 및 제2, 등등과 같은 및 두 번째 등등과 같은 관계 용어는 그러한 실체 또는 조치 간의 임의의 실체의 그러한 관계 또는 순서를 반드시 요구하거나 암시하지 않고 하나의 실체 또는 조치를 다른 실체 또는 조치와 구별하기 위해 단독으로 사용될 수 있다. 용어 "포함하다(comprises)", "포함하는(comprising)", "포함한다(includes)", "포함한(including)" 또는 이들의 임의의 다른 변형은 비-배타적 포함을 포괄하는 것으로 의도되어, 요소 또는 단계 목록을 포함하거나 포함한 공정, 방법, 물품 또는 장치는 이들 요소 또는 단계를 포함할 뿐만 아니라, 명시적으로 나열되지 않았거나 그러한 공정, 방법, 물품 또는 장치에 고유하지 않은 다른 요소 또는 단계를 포함할 수 있다. 단수 형태("a" 또는 "an")가 앞에 있는 요소는 추가의 제약 없이 요소를 포함하는 공정, 방법, 물품 또는 장치에서 추가적인 동일한 요소의 존재를 배제하지 않는다.

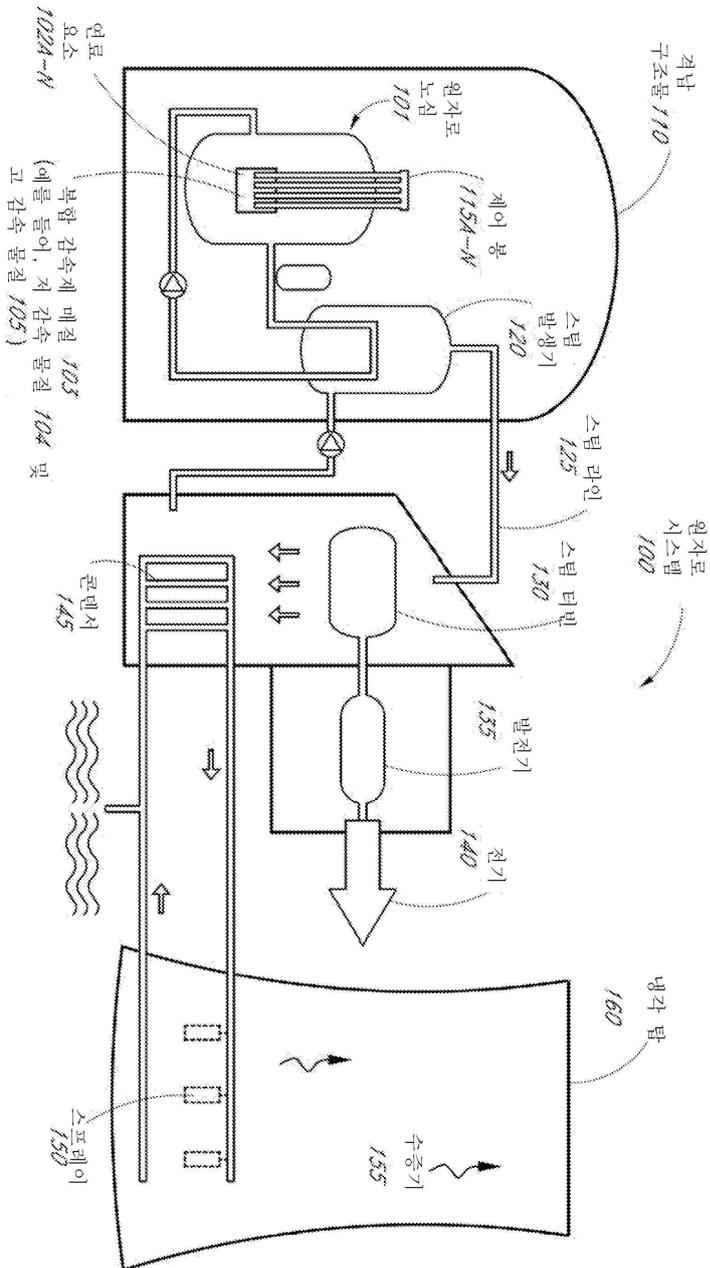
[0071] 달리 명시되지 않는 한, 하기 청구 범위를 포함하여 본 명세서에 기재된 임의의 및 모든 측정치, 값, 등급, 위치, 규모, 크기 및 기타 사양은 정확하지 않은 근사치이다. 이러한 양은 관련 기능 및 이들이 속한 기술에서 관례적인 것과 일관되는 합리적인 범위를 갖는 것으로 의도된다. 예를 들어, 달리 명시되지 않는 한, 파라미터 값 등은 명시된 양에서 ±10%만큼 달라질 수 있다.

[0072] 또한, 전술한 상세한 설명에서, 본 개시 내용을 간소화하기 위해 다양한 예에서 다양한 특징이 함께 그룹화되어 있음을 알 수 있다. 이러한 개시 방법은 청구된 예가 각 청구범위에 명시적으로 언급된 것보다 더 많은 특징을 필요로 한다는 의도를 반영하는 것으로 해석되어서는 안된다. 오히려, 하기의 청구 범위가 반영하는 바와 같이, 보호되어야 할 주제는 임의의 단일의 개시된 예의 모든 특징보다 적다. 따라서, 하기 청구 범위는 상세한 설명에 통합되며, 각각의 청구 범위는 별도로 청구된 주제로서 그 자체로 존재하다.

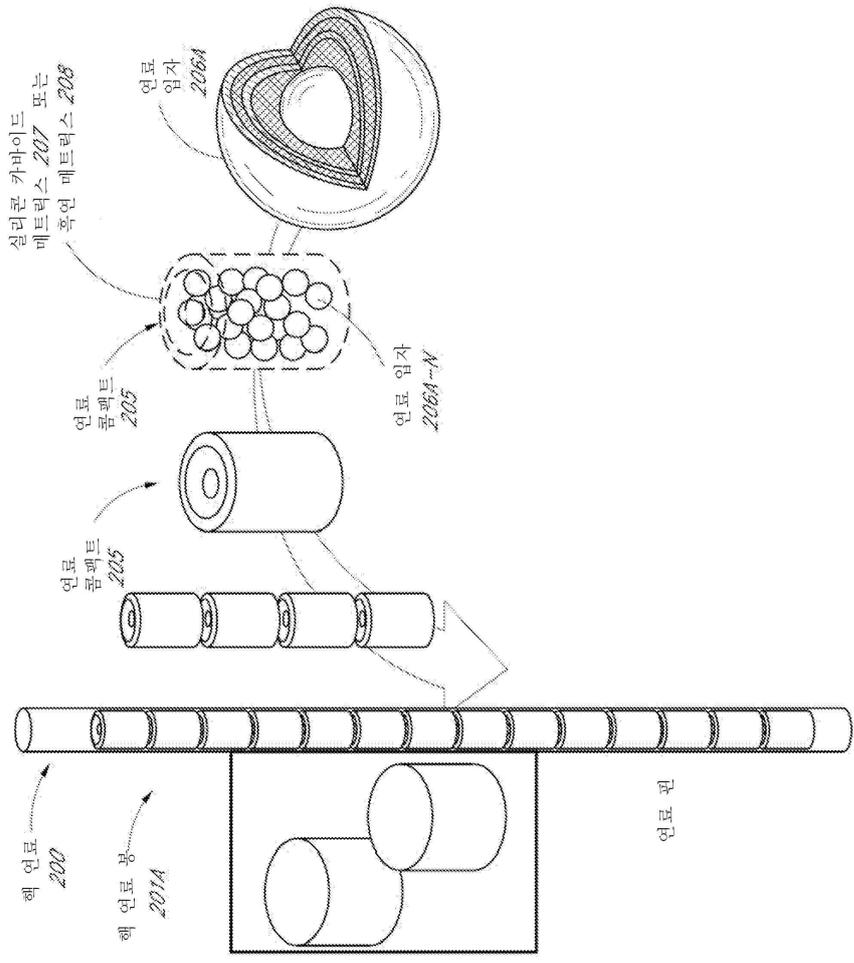
[0073] 전술한 바가 최선의 모드 및/또는 다른 예로 간주되는 것을 설명하지만, 그 안에서 다양한 수정이 이루어질 수 있고 본원에 개시된 주제는 다양한 형태와 예로 구현될 수 있으며, 많은 적용 분야에 적용되며, 그 중 일부만 본원에 설명되어 있음이 이해된다. 하기의 청구 범위는 본 개념의 진정한 범위에 속하는 임의의 그리고 모든 수정 및 변경을 주장하도록 의도된다.

도면

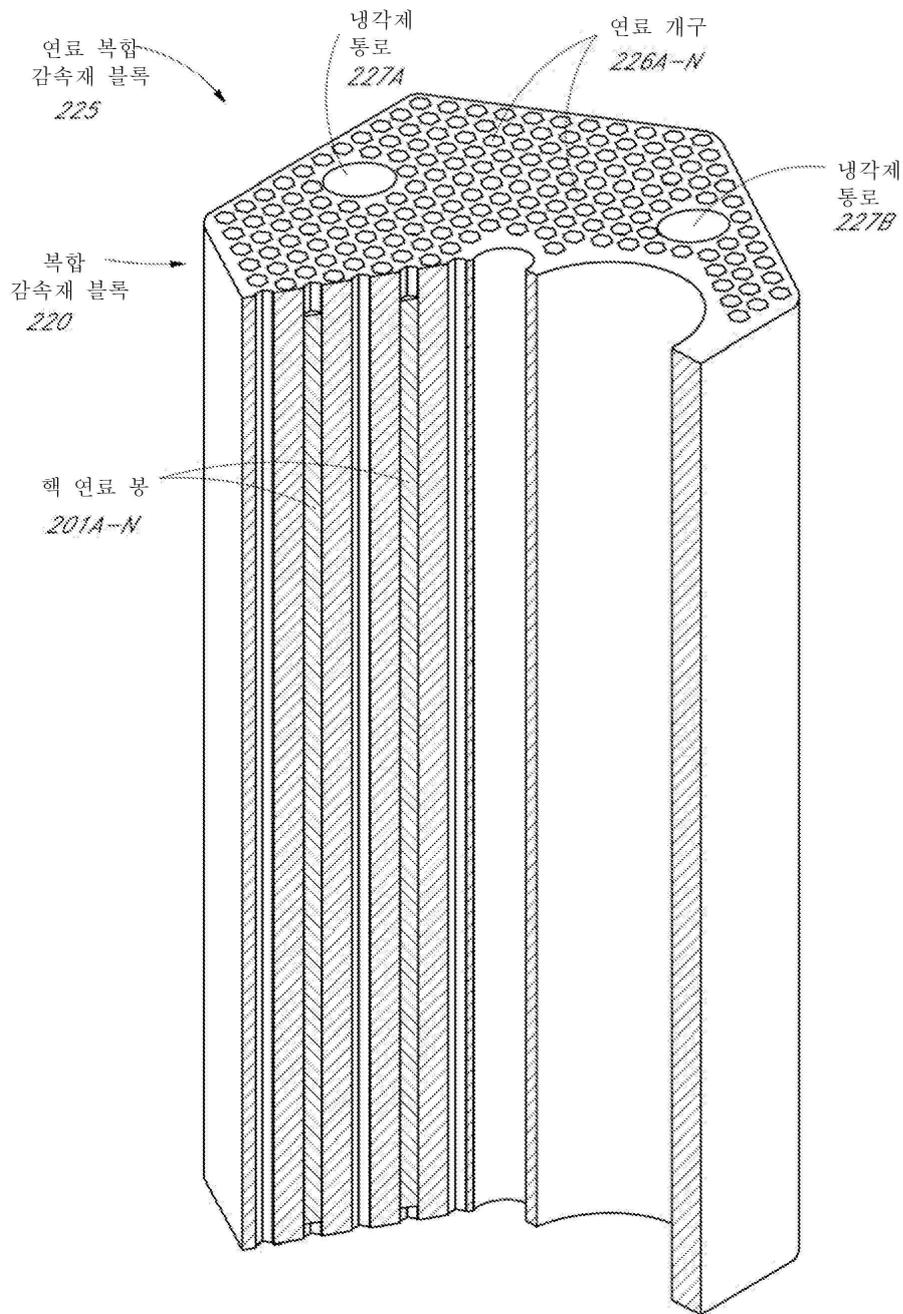
도면1



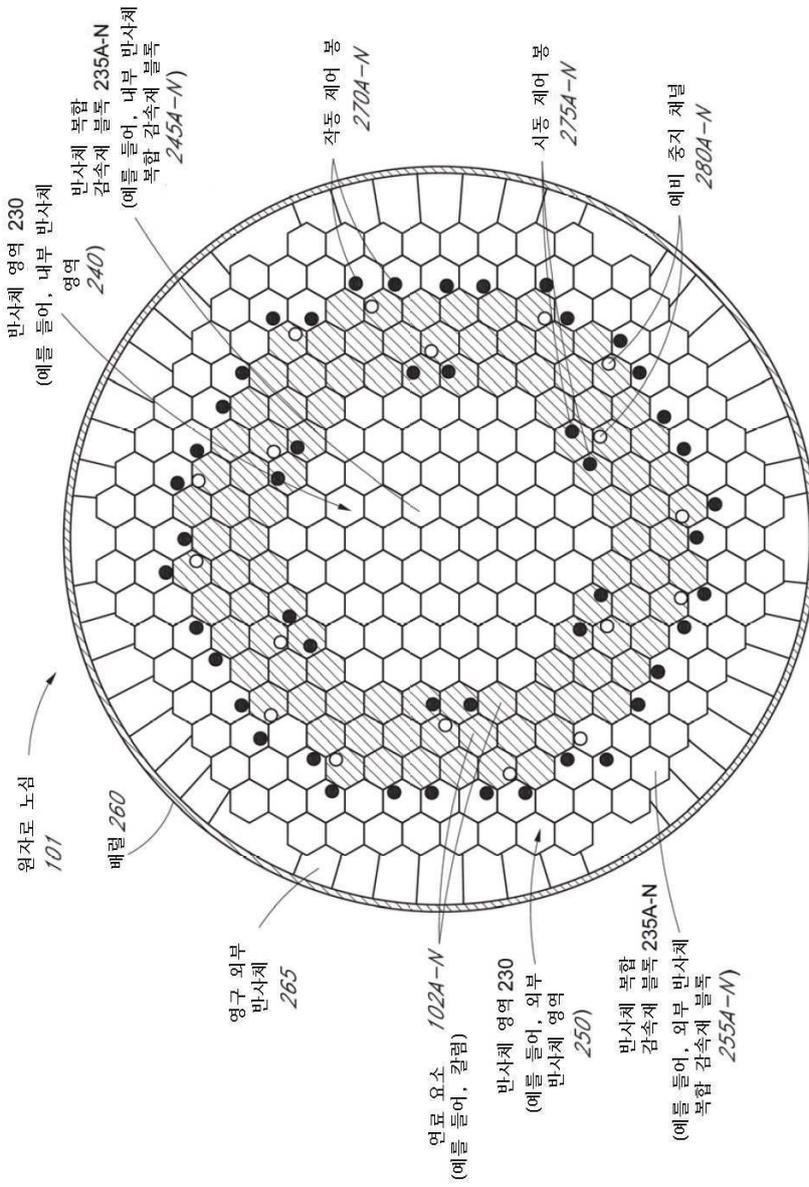
도면2a



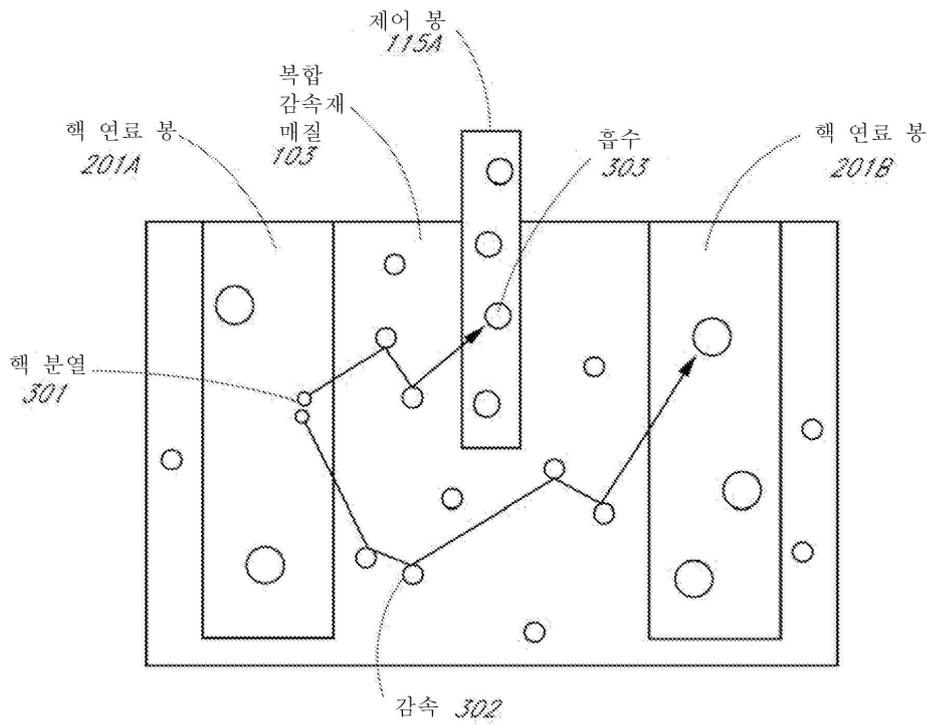
도면2b



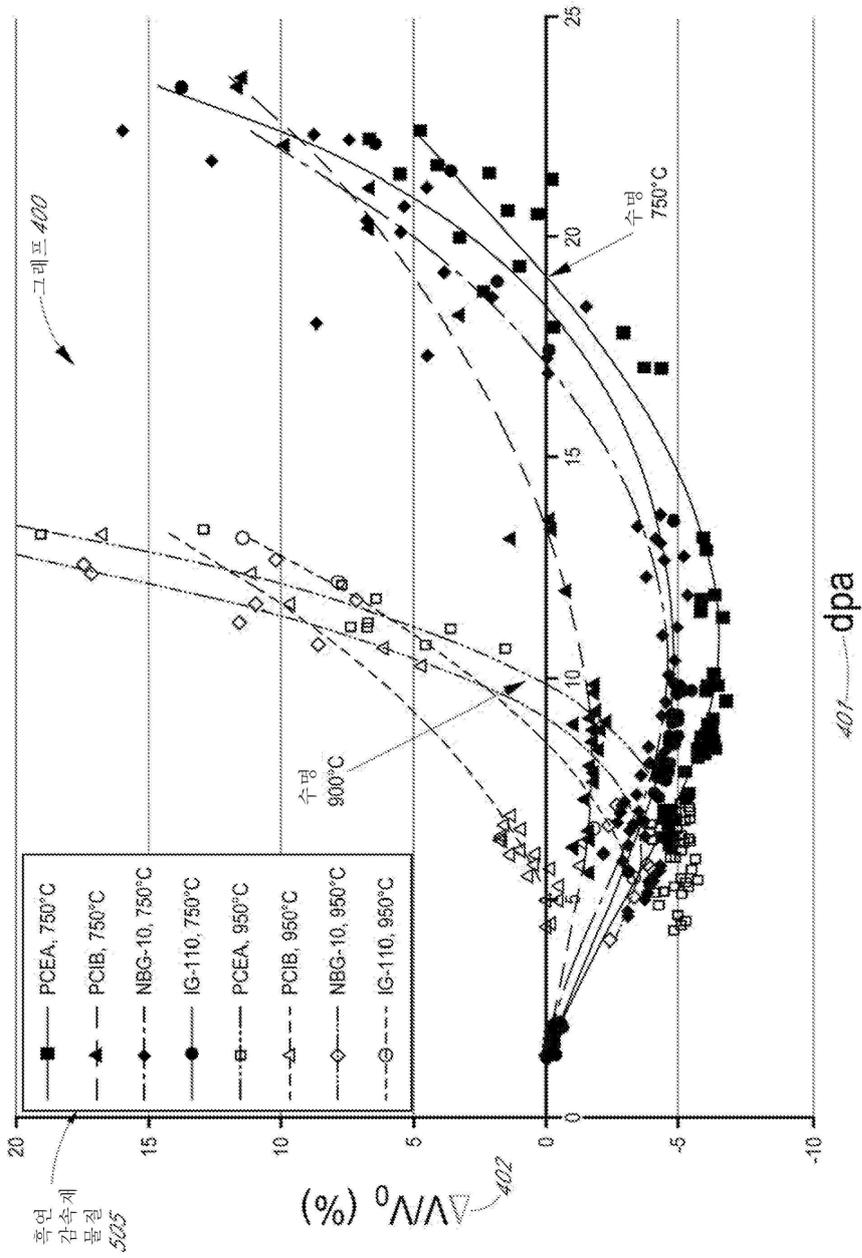
도면2c



도면3



도면4

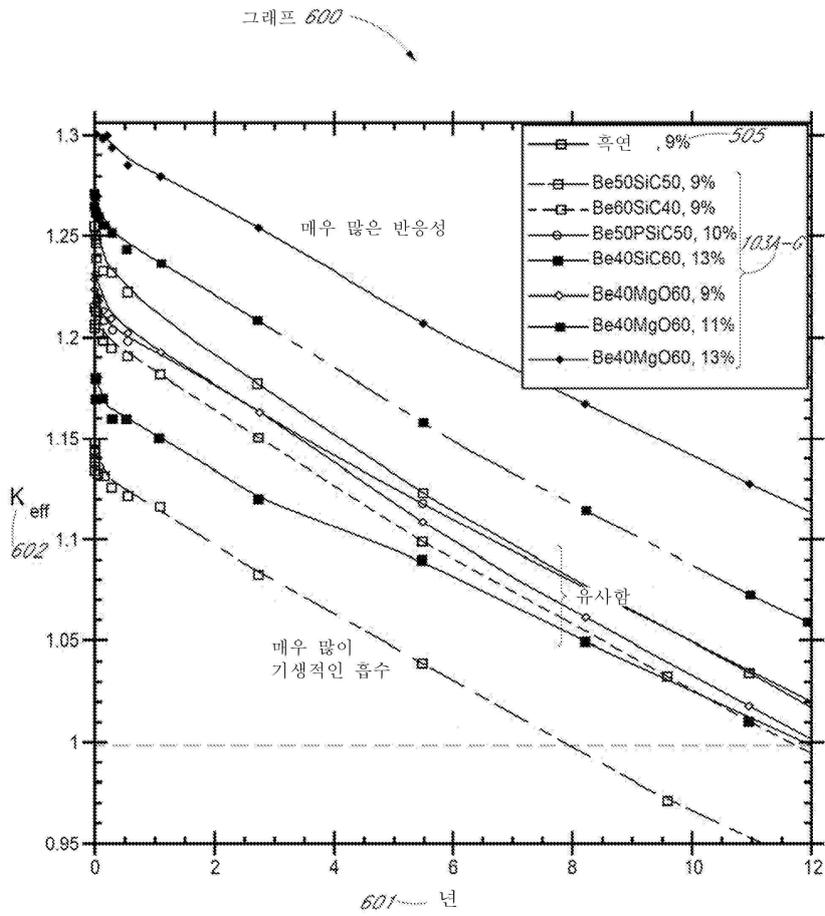


도면5

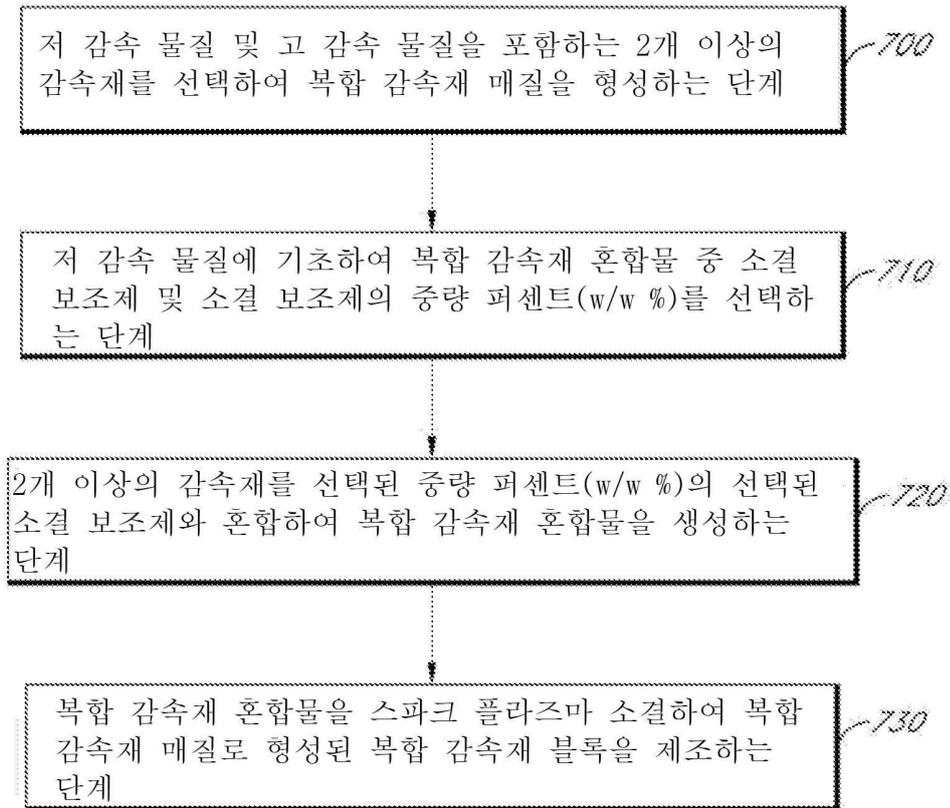
표 500

	510 감속력 (%)	515 $T_{\text{분해}}$ (°C)	520 밀도 (g/cc)	525 화학 반응성 (O_2, N_2, H_2O)	530 결정	535 조사 성능 (~500 °C, >20 dpa)	540 온도 조건 (@~650 °C) W/m-K
104A	0.077	>(3000)	1.8	O2:Rx@>800C	육각형	불량	~20
104B	0.044	(2860)	3.2	매우 낮음	입방체	탁월	~80
105A	0.060	2853	3.58	약간 Hg.	입방체	탁월	~50
105B	0.120	1504	1.89		입방체	미지	미지
105C	0.136	1160	1.94		사각형	미지	미지
105D	0.125	(~2100)	1.9	NRx@>1100C O2:Rx@>800C	입방체	미지	~22
105E	0.129	1525	2.72		입방체	미지	~40
105F	0.138	1925	2.26		육각형	미지	
105G	0.124	2507	3.015	매우 낮음	육각형	매우 나쁨, 이방성	~30
105H	0.087	2350	2.52		마름모	미지	~12-15
105I	0.16	1287	1.85	O2:Rx@>500C	육각형	나쁨	~60

도면6

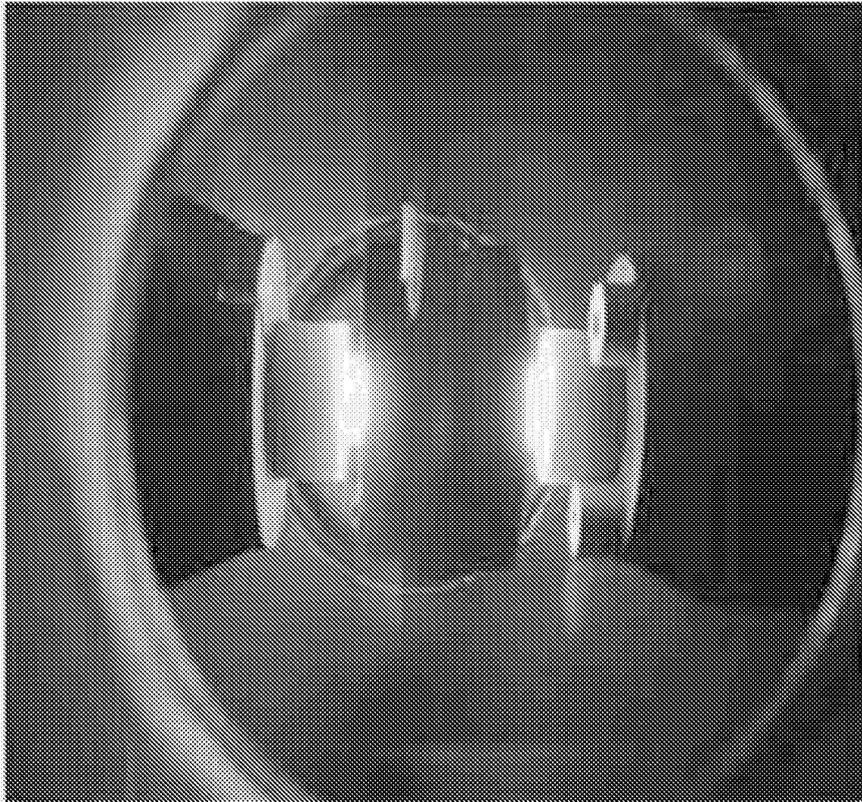


도면7

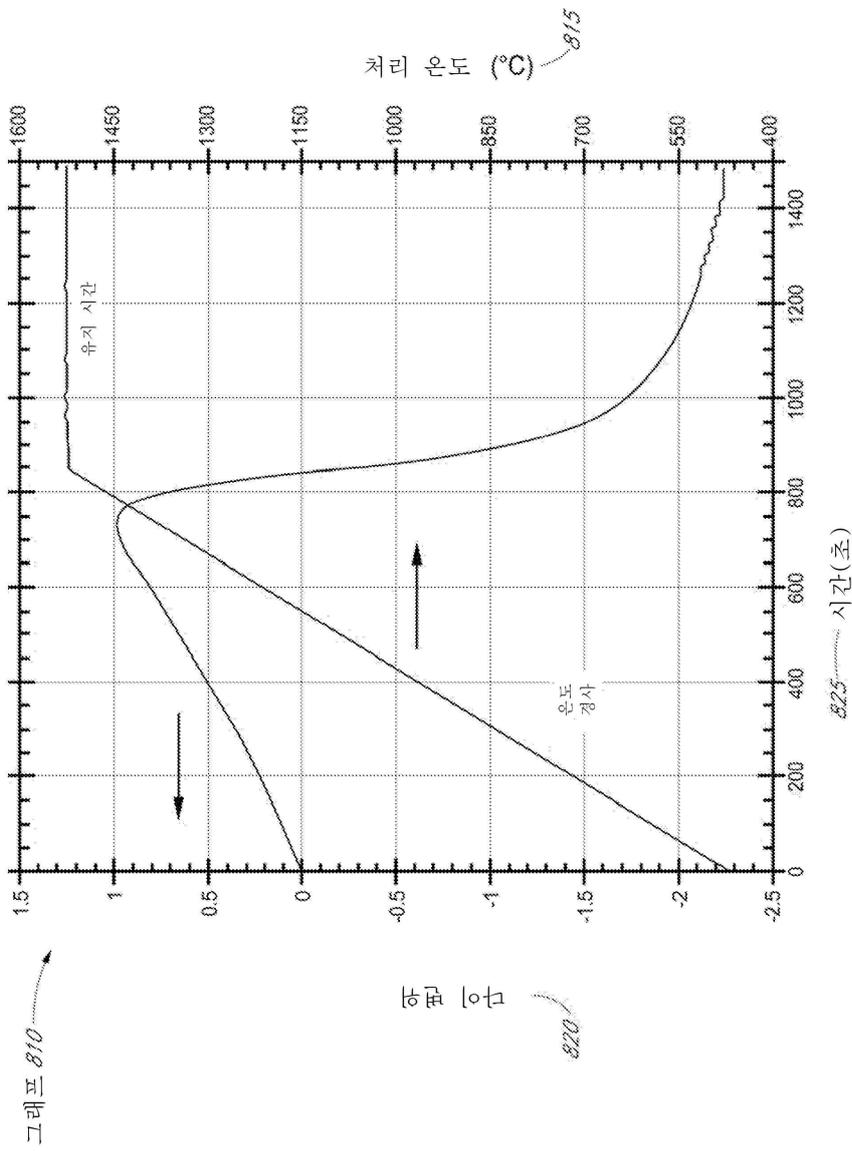


도면8a

스파크 플라즈마
소결(SPS) 사진
800



도면 8b



도면8c

