



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2020년03월09일
(11) 등록번호 10-2086453
(24) 등록일자 2020년03월03일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G21C 1/02 (2006.01) G21C 1/22 (2006.01)
G21C 1/32 (2006.01) G21C 15/02 (2006.01)
G21C 15/28 (2006.01) G21C 19/307 (2006.01)
G21C 3/44 (2006.01) G21C 3/54 (2006.01)
G21D 5/08 (2006.01)
- (21) 출원번호 10-2014-7010593
- (22) 출원일자(국제) 2012년09월21일
심사청구일자 2017년09월20일
- (85) 번역문제출일자 2014년04월21일
- (65) 공개번호 10-2014-0074355
- (43) 공개일자 2014년06월17일
- (86) 국제출원번호 PCT/DE2012/000957
- (87) 국제공개번호 WO 2013/041085
국제공개일자 2013년03월28일
- (30) 우선권주장
10 2011 114 342.8 2011년09월21일 독일(DE)
10 2012 007 933.8 2012년04월17일 독일(DE)
- (56) 선행기술조사문헌
JP2001133572 A*
US03251745 A1*
US03730266 A1*
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

- (73) 특허권자
후케 아민
독일 베를린 13469 테제나우어 제일 1
- (72) 발명자
후케 아민
독일 베를린 13469 테제나우어 제일 1
루프레츠 피츠
독일 베를린 14050 레이스티코우스트라쎄 2
(뒷면에 계속)
- (74) 대리인
김선민

전체 청구항 수 : 총 11 항

심사관 : 이용호

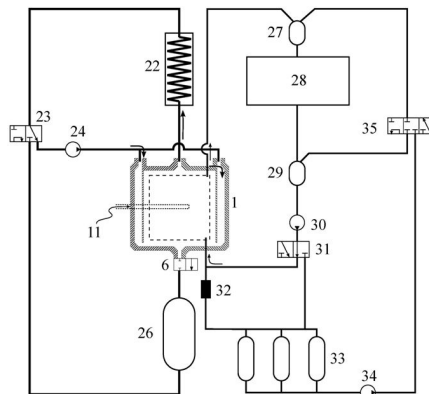
(54) 발명의 명칭 이중 유체 반응기

(57) 요약

본 발명은 액체 핵연료용 회로가 있는 원자로를 나타내며, 이 원자로는 4세대 용융염로와 같은 유사 시스템과는 달리, 연료 사이클을 방열과 동시에 사용하지 않습니다. 액체 연료의 라인과 긴밀한 열접촉 시 분리된 냉각 회로를 통해 냉각이 더 많이 이루어집니다. 이러한 방식으로 냉각 회로가 동시에 최적화되는 동안 액체 연료의 장점

(뒷면에 계속)

대표도 - 도3



을 완전히 활용할 수 있습니다. 이로써 안전 장치가 훨씬 단순화되었습니다. 또한 이 원자로는 최적화된 중성자 절감을 지니고 있어 수명이 짧은 독성 방사성 폐기물만 저장해야 하도록 자체의 수명이 긴 핵분열 생성물을 비활성화할 수 있습니다. 뿐만 아니라 중성자 과잉수를 이용해 현대식 경수로 원자로에서 폐연료로부터 수명이 긴 독성 방사성 성분을 비활성화하거나 의료용 방사성 동위 원소를 생산할 수 있습니다.

(72) 발명자

후세인 아메드

캐나다 밴쿠버 8635 헤더 스트리트 V6P 3S6

체스키 콘라드

독일 베를린 10719 우렌드스트라쎄 46

고트리에브 스테판

독일 헤데케 58313 웨스텐데르weg 110

명세서

청구범위

청구항 1

원자로 용기의 노심 용적으로 및 그로부터 액체 연료를 지속적으로 공급 및 배출하기 위한 첫 번째 라인을 포함하고, 상기 첫 번째 라인은 입구를 통해 상기 원자로 용기에 진입하여 상기 노심 용적을 거쳐 출구를 통해 상기 원자로 용기를 빠져 나오고,

액체 냉각수용 두 번째 라인을 포함하고, 액체 냉각수는 흡입구를 통해 상기 원자로 용기로 유입되며, 상기 첫 번째 라인을 씻어내면서 흐르다가 출구를 통해 상기 원자로 용기를 떠나는,

원자로.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 첫 번째 라인에는 액체 연료 이동을 위한 최소 하나의 펌프, 최소 하나의 고온 화학 처리장치, 최소 하나의 버퍼 용적, 냉각된 퓨즈, 액체 연료 저장 및 제공을 위한 최소 하나의 용적, 액체 연료 제어를 위한 최소 하나의 밸브가 구비되고,

상기 두 번째 라인에는, 액체 냉각수 이동을 위한 최소 하나의 펌프, 액체 냉각수 제어를 위한 최소 하나의 밸브, 액체 냉각수 저장, 제공 또는 용량 보정을 위한 최소 하나의 용적이 구비되고,

상기 원자로는 미입계 시스템으로 선택적으로 가동될 수 있고, 상기 원자로의 배치를 통해 MHD 발전기 사용을 가능하게 하는,

원자로.

청구항 3

제1항 또는 제2항에 있어서,

액체염이 액체 연료로 사용되는,

원자로.

청구항 4

제1항 또는 제2항에 있어서,

할로겐화물이 액체 연료로 사용되는,

원자로.

청구항 5

제1항 또는 제2항에 있어서,

염화물이 액체 연료로 사용되는,

원자로.

청구항 6

제1항 또는 2항에 있어서,

악티늄과 함께 용융 금속이 액체 연료로 사용되는,

원자로.

청구항 7

제6항에 있어서,

용점이 낮은 원소 금속이 상기 용융 금속에 일부 혼합되어 있어 용융물이 펌프를 통해 충분히 공급되도록 상기 용융 금속의 고상선 온도가 작동 온도 이하로 낮아지는,

원자로.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 원소 금속은, 납, 비스무트 및 주석으로 이루어진 집단에서 선택되는,

원자로.

청구항 9

제1항 또는 제2항에 있어서,

액체 냉각수는, 액체 금속인,

원자로.

청구항 10

제1항 또는 제2항에 있어서,

액체 냉각수는, 액체 납인,

원자로.

청구항 11

삭제

청구항 12

삭제

청구항 13

삭제

청구항 14

삭제

청구항 15

원자로 내 공급 및 배출된 액체 핵연료의 처리 방법으로서,

첫 번째 라인 내에서 액체 핵연료가 입구를 통해 원자로 용기에 진입하여 상기 원자로 용기 내부의 노심 용적을 거쳐 출구를 통해 상기 원자로 용기를 빠져 나오고, 핵 연쇄 반응이 임계 또는 미임계 상태로 진행되며 발생한 열이 상기 첫 번째 라인의 벽을 통해 냉각수로 전달되고, 두 번째 라인 내에서 상기 냉각수는 상기 원자로 용기 내부의 상기 첫 번째 라인을 씻어내면서 흐르고, 상기 첫 번째 라인 내의 액체 핵연료는 고온 화학 처리장치로 운반되고 이 고온 화학 처리장치에서 처리되는,

방법.

청구항 16

삭제

청구항 17

삭제

청구항 18

삭제

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 액체 연료 회로가 있는 원자로에 관한 것입니다.

배경 기술

[0002] 기술 상태

[0003] 오늘날 상용되는 대부분의 반응기는 열, 냉각수, 중수/경수 감속형, 고체 연료로 작동합니다. 이 같은 반응기는 천연 우라늄의 연소가 1% 미만이며 농축뿐만 아니라 외부 처리 과정도 필요합니다. 4세대 컨셉트 또한 연료를 소비하므로 여전히 연료 사이클 시설이 필요합니다. 연료가 액체 형태로 순환하고 주기적으로 처리되는 용융염로(*Molten-Salt Reactor, MSR*)만이 유일하게 예외입니다. MSR의 경우, 액체 연료가 동시에 냉각수로도 사용되어 원칙적으로 다음과 같은 장점이 제공됩니다.

[0004] A. 액체로 순환되는 용융염 또는 다른 형태의 핵연료의 장점은 노심에서 직접 실시간 처리가 지속적으로 가능하여 다운타임이 현저히 단축된다는 점입니다. 방사성 핵분열 생성물은 잔류 붕괴열 사고의 위험으로부터 안전한 장소에서 지속적으로 추출할 수 있습니다. 노심이 이미 용융된 상태이므로 노심 용융 사고의 위험도 없습니다. 뿐만 아니라 수동 퓨즈를 통해 과열 또는 정비 시 노심을 배출할 수 있습니다. 높은 전력 밀도와 효율적 처리를 위해 액체 연료의 온도를 최대한 높이는 것이 좋습니다.

[0005] B. 용융염 또는 다른 액체 냉각수의 높은 비등점을 이용한 냉각 시 장점은 노심 내 압력이 정상인 상태에서 작동이 가능하다는 점입니다. 또한 컴팩트한 디자인으로 고가의 원자로 압력용기가 필요하지 않습니다. 이러한 높은 비등점 컨셉트는 납냉각 고속증식로 LFR(*lead cooled fast reactor*) 및 소듐냉각 고속로 SFR(*sodium cooled fast reactor*)의 4세대 컨셉트에도 구현되었습니다.

[0006] 액체 연료를 냉각수로도 동시 사용할 경우 (A), (B)와 같은 일부 장점이 있긴 하지만, 예를 들어 두 가지 조건을 동시에 충족하는 최적의 재료를 찾을 수 없는 등의 문제가 발생하여 이러한 장점을 모두 활용하지 못할 수 있습니다. 순환 물질은 기본적으로 높은 연료 온도, 우수한 냉각력, 적당한 열용량을 어느 정도 갖추고 있는 용융염으로 제한되어 있습니다. 이로부터 고안된 결과물이 바로 MSR입니다. MSR은 열 변형이나 고속 중성자 스펙트럼을 이용한 최신 변형 상태로 예를 들어 수소 생산 또는 전기 효율을 높이기 위한 화학 공정과 같은 고온에서도 작동합니다.

[0007] 연료 처리 방법의 컨셉트는 다음과 같습니다.

[0008] C. 현장 외 처리

[0009] PUREX와 같은 통상적인 습식 화학 공정 기술 및 파생 기술은 현장 외에서 처리합니다. 위 기술은 다음과 같은 특성을 지닙니다.

- [0010] ? 수년간 잠정 저장하거나 방사선 분해 속도를 높이기 위한 고가의 용액을 사용해야 합니다.
- [0011] ? 여러 요소에 대한 분리 정확도가 낮습니다.
- [0012] ? 정상 온도에서 반응이 느리게 진행됩니다.
- [0013] ? 사용 후 폐기해야 할 중/저준위 방사능을 지닌 부차적 화학물질이 대량 발생합니다.

- [0014] 따라서 위 절차는 온라인 처리에 적합하지 않습니다.

- [0015] D. 현장 처리
- [0016] 일체형 고속로(IFR)는 핵연료로부터 요소 분리 없이 핵분열 생성물 일부를 제거하기 위해 전해 프로세스를 사용하였으며, 고속로에서 금속 연료가 다시 중요한 위치를 차지하게 되었습니다. 위 절차는 원자로 부지 내에서 실행되지만, 온라인 처리에는 적합하지 않습니다.

- [0017] E. 온라인 처리
- [0018] 4세대 컨셉트에도 나타나 있듯이 MSR의 처리는 실질적으로 일괄 작업 모드에서만 가능합니다. 처리를 위해 반응기를 종료하고 연료를 처리 시스템에 나누어야 합니다. 지속적인 처리 기능은 동시 냉각 기능과 통합할 수 없습니다. 짧은 다운타임을 유지하기 위해서는 처리 시스템 또한 대용량이어야 합니다. 하지만 이러한 고온 화학 처리 시설은 상대적으로 규모가 작습니다. 주요 구성품은 불소염 증류 시설이며, 여기서 금속염이 각각의 비등점에 따라 분리됩니다. 불소 화합물이 많을 경우 비등점이 매우 높아 추가 불소화가 필요하며, 불소 화합물 생성 후에도 여전히 슬러지로 남아 추후에 이를 처리해야 합니다.
- [0019] 하지만 처리 시스템 앞 및/또는 뒤에 다른 부품이 처리되는 동안 연료를 일부 저장하는 소형 버퍼가 있는 경우, 원칙적으로 일괄 작업 모드에서의 처리를 지속적인 연료 순환과 통합할 수 있습니다.
- [0020] 4세대 컨셉트 중 원자로 가동을 중단하지 않고 온라인 처리가 가능한 것은 없으므로 (A)에 제시된 장점을 모두 활용할 수는 없습니다.
- [0021] 온라인 처리 장소에서 멀어질수록 안정적인 장기 작동을 위해 필요한 반응성 매장량도 높아집니다. 추가로 중성자 절감을 일정하게 유지하기 위해 깨끗한 연료에 흡수재(연소 가능한 중성자 독)를 첨가해야 합니다. 단, 이로 인해 상태가 현저히 악화될 수도 있습니다. 이는 가속기 구동 미임계 시스템(ADS)의 경우 특히 중요합니다. 반응성 매장량이 높을수록 누락된 중성자 생산을 위해 가속기가 대형이어야 합니다. 따라서 소형 가속기가 장착된 ADS 시스템 또한 존재하지 않습니다.
- [0022] 더 높아진 전력 밀도와 관련하여 작동 가스에 열 전달 시에도 기존 부품에서 새로운 문제가 발생합니다. 종래의 원자력 발전소의 경우 증기 터빈 사이클에서 일반 증기 발전기의 형태로 간접 열교환기가 사용되며, 여기서 1차 냉각수의 열이 발산됩니다. 4세대 발전소에도 마찬가지로 초임계 이산화탄소가 2차 냉각수로 사용됩니다. 문제는 대부분의 원자로 열교환기가 공간을 많이 차지한다는 점입니다. 종래의 가압수형 원자로의 경우 열교환기가 원자로와 비슷한 규모인 반면, 고성능 원자로의 경우 열 배 정도 큰 간접 열교환기가 필요합니다. 따라서 생산 비용이 높아져 해당 원자로의 비용 효율이 감소합니다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0023] 그러므로 이러한 방식으로 냉각되는 액체 연료 기반의 원자로를 찾아 (A), (B)에 제시된 장점을 활용하는 것이

1차 과제입니다. 또한 (D)에 제시된 것처럼 원자로 가동 중단 없이 실시간 온라인 처리를 구현하는 것도 2차 과제입니다. 3차 과제는 소형 외부 중성자 소스를 이용하여 ADS 모드를 가능하게 만드는 일입니다. 추가로 화학 공정 및 전기 효율을 높이기 위한 고온 실현도 이루어져야 합니다. 마지막 과제는 생산 비용 절감을 위해 열교환을 최적화하는 일입니다.

과제의 해결 수단

[0024] 두 개의 회로로 해결

[0025] 본 발명은 연료와 냉각수를 분리된 회로에 배치하여 위 과제를 해결하였습니다. 이는 이하 “이중 유체반응기” 또는 줄여서 DFR로 칭합니다. DFR은 고온 연료 사이클에서 온라인으로 작동하는 화학 처리 시설을 통해 구동됩니다. 또한 DFR은 소형 가속기를 이용해 미입계 구동도 가능합니다.

[0026] 연료의 냉각 기능을 분리함으로써 원자로의 여러 가지 제한이 사라지게 되었습니다. 이제 고온 연료 (A)와 비등점이 높은 냉각수 (B)의 모든 장점을 활용할 수 있습니다. 냉각수에 더 이상 연료 기능의 재료 제한이 없으므로 금속 냉각을 사용하여 높은 전력 밀도로 고온에서 DFR을 구동할 수 있습니다. 이로써 원자로의 다운타임 없이 실시간 온라인 처리를 위한 새로운 효과적 방법이 나타난 것입니다. 다른 고온 원자로와 같이 고효율로 전기를 생성할 수 있으며 공정열을 수소 생산 등과 같이 효과적으로 활용할 수 있게 되었습니다. 액체 금속 냉각재의 높은 전하 캐리어 밀도로 1차 회로에서 직접 또는 2차 회로에서 전력 생산을 위한 자기 유체 역학 발전기의 효과적인 활용이 가능해졌습니다. 자기 유체 역학 펌프는 냉각수 순환용으로도 사용할 수 있습니다.

[0027] 액체 연료의 유속은 핵 용도에 맞게 임의로 조절할 수 있습니다(예: 최대 연소, 초우라늄 원소 소각, (의료) 동위 원소 생산, 핵분열 물질 증식 또는 핵분열 생성물의 특수 비활성화(변이) 용도).

[0028] 액체 금속 냉각을 이용한 DFR 구동으로 인해 중성자 스펙트럼이 빨라져(하드) 낮은 단면에서 모든 중성자에 의한 핵반응이 유발됩니다. 이를 위해 농축(원액) 연료가 긴밀하게 구성되어 높은 전력 밀도를 유발해야 합니다. 용융염 연료뿐만 아니라 액체 금속 냉각재 또한 열전달 특성이 뛰어나므로 전력 밀도가 높은 노심에서 사용하기에 특히 적합합니다. 두 액체를 분리하는 물질은 열전도율이 충분하고 용융염 및 액체 금속으로부터의 내식성이 있어야 합니다. 고속 중성자에 대한 포획 단면적이 낮으므로 열 반응기의 조건에 비해 벽 구조 재료의 동위 원소 선택의 폭이 다양합니다. 벽 구조 재료로서 적합한 물질은 이미 수십 년 전에 개발되었으나 희귀하며 고가의 요소가 포함되어 있습니다. 하지만 정기적으로 교체되는 고체 연료와 달리 벽 재료는 DFR에 영구적으로 남아 있으므로 시설 비용에 막대한 영향을 주지 않으면서 희귀 귀금속을 합금 성분으로 사용할 수 있습니다.

[0029] DFR을 오크리지 국립 연구소에서 용융염 반응기 실험 MSRE를 진행하는 동안 고려된 “두 개의 유체 반응기”와 혼동해서는 안 됩니다. 이 곳에서는 핵분열에 의해 생성된 토륨염과 란타늄의 비슷한 비등점 문제를 해결하기 위해 희석된 233U 염 순환 외에도 토륨 증식을 위한 노심 내부의 다른 파이프 가이드가 고려되었습니다. 하지만 당시 열 중성자 스펙트럼에 적합한 원재료가 발견되지 않아 실제로 구현되지는 않았습니다.

[0030] DFR의 실시간 온라인 처리

[0031] 본 발명을 통해 특히 연료 사이클과 효과적으로 결합 가능한 고온 건조 처리를 위해 향상된 방법을 사용할 수 있었습니다. 이를 위해 화학 공학의 모든 분리 공정, 특히 열 특성(증류, 정류), 농도 차(원심 분리), 화학 구조, 전기 이동성(전기 체련)으로 인한 분리 공정이 숙고되었습니다.

[0032] 폐연료는 고유의 이온 결합 특성으로 인해 고온에서 방사선 분해 및 물리화학적 분리 공정에 의한 직접적인 영향을 받지 않습니다. 두 가지 방법, 즉 IFR(D 참조)의 용융염 전해 방법 및 MSR(E 참조)의 고온 증류는 과거에 입증된 바 있습니다. 두 가지 방법 모두 DFR에서 사용됩니다. 지속적인 온라인 처리를 위해 DFR에서 이 같은 고온 화학 시스템을 소용량 전용으로도 설계할 필요가 있습니다. 간단한 변형 시에는 핵분열 생성물 혼합물이

침적되어 생성된 연료염 세척에 전기 분해를 적용할 수 있습니다. 특수 변형 용도로 사용하기 위해서는 MSR 방법을 넘어 분리 증류/정류 작업을 통해 이루어지는 정확한 분리 절차가 필요합니다.

[0033] 불소 화합물은 여전히 상당한 중성자 감속제 특성을 지니고 있어 중성자 스펙트럼이 연화되고 중성자 절감이 저하됩니다. 이 같은 특성과 다량 함유된 금속염의 높은 비등점으로 인해 불소 화합물은 적합하지 않습니다. 할로젠을 높이면 위의 두 특성의 측면을 감안할 때 더 적합합니다. 폐연료의 혼합물에는 금속에 대해 비등점이 충분히 낮은 염화물이 함유되어 분리 증류를 통해 상이한 비등점을 이용한 분리만 가능합니다.

[0034] **이중 유체 ADS 시스템**

[0035] DFR은 실시간 온라인 처리 기능으로 가속기 구동 미입계 시스템(ADS)에 적합한 대안입니다. 원자로가 임계 0.1% 미만까지 구동할 수 있도록 중성자 독이 지속적으로 배출됩니다. 소형 이온 가속기의 빔이 노심의 대상을 목표로 시스템을 초임계 상태로 만들기 위해 중성자 속도를 충분히 높일 수 있습니다. 긴급 차단 방법과 더불어 이 방법으로 가속기가 DFR을 완전히 제어할 수 있습니다.

[0036] **직접 접촉 열교환기**

[0037] 전력 밀도와 작동 온도가 높은 원자로의 열 추출 시 특이한 문제가 발생하였는데, 이는 바로 작동 온도가 높아 가스 터빈 사용이 유익할지라도 증기 터빈 사용으로 초임계 수력 잠재력이 낭비될 수 있다는 점입니다. 또한 이중 유체 반응기(DFR)의 전력 밀도가 높아 터빈 사이클의 매개 가스가 최저의 열 전달력을 지닌 반면, 액체 금속은 1차 냉각수로서 최대의 열 전달력을 지니고 있습니다. 결과적으로 간접 열교환기의 용량이 노심의 용량보다 더 큰 규모를 지니게 되어 열교환기의 비용이 설치 비용 면에서 막대한 부분을 차지하게 될 수 있습니다. 따라서 생산 비용을 대폭 절감하기 위해서는 직접 접촉 열교환기를 사용하는 것이 좋습니다. 직접 접촉 열교환기는 지금까지 주로 에어컨 장치나 습식 냉각 탑에 사용되어 왔습니다. 즉, 직접 접촉 시 첫 번째와 두 번째 열 매개체 사이에 벽이 없는 것입니다. 이때 주로 물방울과 공기 사이에서 열이 전달되어, 공기가 실제로 정상 상태에 가깝습니다.

[0038] 직접 접촉 열교환기의 기능 지침

[0039] 직접 접촉 열교환기에서는 본 발명에 따라 터보 압축기의 고압 가스 기류에 혼용 챔버의 액체 금속 냉각재가 액적 분사되어 결과적으로 넓은 직접 접촉면을 통해 소량의 가스가 가열됩니다. 터빈 앞에는 고압 가스 기류로부터 원심력 원리로 액체 금속을 분리하기 위한 분리기가 배치되어 있습니다.

[0040] 이중 유체 반응기(DFR)에서 직접 접촉 열교환기를 사용하면 반응기 효율이 크게 상승하여 많은 이점이 있습니다. 기술된 직접 접촉 열교환기는 위 목적으로 4세대의 다른 반응기 모델에서도 사용할 수 있습니다. 원칙적으로는 작동 온도가 상승하게 되면, LFR에서 사용 시 이점이 많습니다. 하지만 비용상의 이유로 구조재 및 연료로 강철을 사용해야 하므로 현재 기술 상태에서 LFR의 작동 온도는 700° C 미만으로 제한되어 있습니다. 용융염을 냉각수로 사용할 경우, VHTR(*very high temperature reactor*)에서의 사용도 가능하며, 이 또한 생각해 볼 만합니다. 하지만 나트륨 냉각 원자로(SFR)는 나트륨의 비등점이 낮아 저온에서 작동하므로 가스 터빈을 사용할 수 없습니다.

도면의 간단한 설명

[0041] **도면 1:** DFR의 노심

도면 2: 연료 라인의 가능한 형태

도면 3: DFR의 전체 도면

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0042] 실시 예

[0043] 도면 1은 도식적으로 노심의 표준 구현 상태를, 도면 2는 연료 라인의 다양한 형태를, 도면 3은 냉각 및 연료 사이클이 포함된 전체 시스템을 보여줍니다.

[0044] 노심

[0045] 도면 1에 나타난 노심은 냉각수가 주입된 원자로 용기(1)와 연료 라인(7)으로 이루어져 있으며, 이 노심을 통해 액체 연료가 펌핑됩니다. 연료 라인(7)의 형태는 노심 용적(4)에 최대한 빈틈없이 주입되지만, 동시에 냉각수가 충분하고 일정한 열을 수용할 수 있도록 이루어져 있습니다.

[0046] 도면 2에는 연료 라인(7)의 평면도가 여러 가지 사양으로 나타나 있습니다. 가장 간단히 생산할 수 있는 라인(7a)에 표시된 것과 같은 라인입니다. ADS 시스템의 경우, 중간 레벨에 다른 모양(7b)이 있어서 빔 가이드(11)를 통해 외부 가속기의 입자 빔(10)을 노심 중앙의 중성자 생산 대상(12)으로 조절할 수 있습니다. 이는 외부 가속기 없이도 작동하는 중성자 소스를 대상(12) 대신 사용할 수 있습니다. 연료 라인이 (7c)에 나타난 것처럼 나선형일 수도 있어 용기를 원통형으로 설계할 수 있습니다.

[0047] 이 표준 사양에서는 정상 압력 하에 온도 1000° C에서 순환되는 액체 납이 냉각수로 사용됩니다. 열교환기(22)로부터 유입되는 납은 저온 상태입니다. 따라서 노심 용적(4)은 열 전도율이 좋은 파티션(3a)으로 둘러 싸여 있습니다. 이 파티션(3a)과 원자로 용기(1)의 외벽 사이에 반사체 용적(3)이 추가 용적으로 형성됩니다. 지점(2)로 유입되는 “차가운” 납이 반사체 용적(3)에서 우선 아래로 흘러서 열 전도에 의해 파티션(3a)이 데워집니다. 이 곳에서 중성자 손실을 줄이기 위해 중성자 반사체의 역할도 실행됩니다. 이제 납이 예열된 상태로 아래에서 노심 용적(4)으로 이동합니다. 여기서 상향 이동하는 동안 연료 라인(7)의 벽에서 열을 수용하여 온도가 높아진 상태로 상단(5)의 원자로 용기를 빠져나옵니다.

[0048] 이 표준 사양에서는 정상 압력 하에 1000° C에서 순환되는 용융염이 연료로 사용됩니다. 액체 연료는 라인을 통과하여 아래(8)에서 곧장 노심 용적(4)으로 흐릅니다. 노심 용적의 높은 중성자 선속으로 인해 연료에 함유된 악티늄의 핵 분열 과정이 적합한 횡수로 유발됩니다. 핵분열 에너지로 연료가 가열되고, 연료의 열이 관벽을 거쳐 냉각수로 전달됩니다. 핵분열 과정에서 다른 고속 중성자가 신속히 방출되어 노심 용적 내부의 핵 연쇄 반응이 유지됩니다. 액체 연료가 긴 라인을 통과하며 천천히 이동하는 동안 악티늄이 점점 더 많이 분열되어 상단 출구(9)의 노심 용적(4)을 빠져나올 때에는 화학 조성이 변경되어 고온 화학 처리장치(pyrochemical processing unit, PPU)(28)로 전달됩니다.

[0049] 냉각 및 연료 사이클

[0050] 도면 3은 외부 구조, 냉각 및 연료 사이클을 나타냅니다.

[0051] 원자로에는 연료 라인 또는 연료 사이클로도 지칭되는 첫 번째 라인, 두 개의 펌프(30, 34), 고온 화학 처리장치(28), 사전 버퍼 용적(27), 사후 버퍼 용적(29), 냉각된 퓨즈(32), 세 개의 미임계 액체 핵연료용 저장탱크(33), 두 개의 멀티포트 밸브(31, 35)가 있으며, 여기서 언급한 첫 번째 라인이 입구(8)를 통해 원자로 용기(1)에 진입하여 원자로 연료 라인(7)에서 노심 용적(4)을 거쳐 다시 출구(9)를 통해 원자로 용기를 빠져나오게 되어 있습니다. 냉매 라인 또는 냉각 회로라고도 지칭되는 두 번째 라인에는 펌프(24), 멀티 포트 밸브(23), 임시 냉각수 저장소(26), 열교환기(22)가 있으며, 여기서 언급한 두 번째 라인이 최소 하나 이상의 흡입구(2)를 통해 원자로 용기(1)에 진입하여 열이 전달되는 파티션(3a)과 원자로 용기(1)의 외벽 사이에 있는 반사체 용적(3)을 거친 후 노심 용적(4)을 통과하여 원자로 연료 라인을 둘러싸고(7) 다시 출구(5)를 통해 원자로 용기(1)를 빠져나오게 되어 있습니다.

- [0052] 데워진 액체 납은 원자로를 빠져나온 후 열교환기(22)로 이동합니다. 열교환기에서 에너지 수요에 따라 열의 일부가 전력 생산이나 공정 열로 사용됩니다. 납은 저온 상태로 열교환기를 떠나 멀티 포트 밸브(23)를 통과한 후 다시 노심으로 펌핑됩니다(24). 유지 보수용으로 반응기 용기의 하단에서도 임시 냉각수 저장소(26)의 밸브(6)를 통해 액체 납을 배출할 수 있습니다.

- [0053] 열교환기(22)로는 직접 접촉 열교환기가 본 발명의 표준 사양으로 사용됩니다. 이때 가스 터빈의 직접 접촉 열교환기가 연소실 위치를 전달받아 액체 냉각수, 특히 액체 금속 및 납이 분사되어 열이 유동형 챔버 내 터보 압축기의 가스 기류로 전달된 후 터빈에 가열된 가스가 유입되기 전에 연결된 원심 분리기에서 액적이 분리됩니다.

- [0054] 표준 사양에서는 혼용 챔버로 균일하게 전달하기 위해 반응기로부터 흘러 나온 용기 내 액체 금속 흐름의 속도가 지연됨으로써 분사 펌프의 구동 속도에 맞게 조절됩니다. 혼용 챔버에는 노즐이 배열되어 있으며, 이 노즐은 분사 펌프에 의해 고압 상태인 액체 금속을 필요한 크기의 액적 분사로 고압 가스 기류에 분사합니다. 부분 부하 모드를 위해 노즐의 일반 하위 배열을 차단할 수 있으며 노즐 내 원추형 굴대를 이용하여 액적 크기를 변경할 수 있습니다. 이로써 가스 유량이 감소한 상태에서 액적 질량도 증가하므로 원심 분리기의 분리 효율을 유지할 수 있습니다. 혼용 챔버는 단면 형상에 일치하며 다음 분리기의 입구 근처에 위치해 있습니다. 액체 금속, 특히 납도 분사 펌프의 윤활유로 사용할 수 있습니다. 납은 본 발명에 적합한 표준 냉각수입니다.

- [0055] 혼용 챔버에 분리기가 연결되어 데워진 가스가 금속 액적으로부터 분리됩니다. 고압 상태인 가스가 높은 유속으로 이동하므로, 집진 장치나 와류관과 같은 원심력 원리의 분리기가 제공됩니다. 분리 속도를 높이기 위해 분리기틀 엇갈리게 설계하거나 여러 개의 유닛으로 설계할 수 있습니다. 정화가 끝난 가스는 내부 에너지를 재생 에너지로 변환하기 위해 노즐을 통해 터빈으로 유입됩니다.

- [0056] 사이클론의 단계별 산정은 직경이 더 큰 이전 단계의 사이클론에 직경이 작은 여러 개의 사이클론이 이어져 더 큰 원심력을 발생시키는 방식으로 이루어지며, 이로써 가스 유량이 더 작은 사이클론에 적합한 양으로 분배됩니다. 이 같은 방식으로 더 작은 액적 크기를 언제든지 분리할 수 있습니다.

- [0057] 사이클론으로부터 분리된 액체 금속은 로터리 밸브를 통해 수집 용기로 배출되며, 동시에 로터리 밸브는 가스 터빈 영역의 고압을 정상 압력으로 변경하는 역할도 합니다. 액체 금속은 펌프를 통해 수집 용기로부터 노심으로 전달됩니다. 긴밀한 배치가 가능하여 수집 용기를 분사 펌프의 추출 용기에 바로 인접하게 배치할 수 있으며 비상 시(정전) 파티션이 자동 해제되고 회수된 액체 금속 회로의 자연적 대류가 허용되도록 기계적 이동식 파티션이 있는 용기를 설치할 수도 있습니다.

- [0058] 앞서 설명된 액적 열교환기, 분리, 수집 용기로의 금속 배출 공정은 액적이 금속의 응점 미만으로 냉각된 후 굳어진 경우라도 여전히 실행할 수 있습니다. 그런 후에는 금속 입자를 녹이기 위해 뜨거운 단류선을 이용한 후면 가열로 수집 용기에서만 예열을 실행해야 합니다.

- [0059] 두 물질간의 안정적 화학 결합이 발생하지 않도록 가스가 액체 금속에 대해 화학적으로 충분히 불활성 상태에 있어야 합니다. 질소는 여러 금속에 대해 가스로 사용하기에 충분합니다. 하지만 가스 터빈이 줄-브레이튼 열역학 사이클에 따라 작동하며, 여기서 기체 분자 에너지의 내부 자유도가 흡수되지 않으므로 단원자 가스 사용으로 인해 등엔트로피 효율이 현저히 증가합니다. 따라서 고온 원자로에는 고유의 중성자 특성 때문에 헬륨을 사용하는 것이 바람직합니다. 게다가 헬륨은 열전도율 또한 두 배로 높아 필요한 열교환 면적이 절반인 아르곤과 비슷합니다. 기술된 큰 규모의 관련 재료 소비량이 많은 간접 열교환기의 경우 헬륨을 사용하는 것이 아르곤보다 비용면에서 효율적입니다. 단, 본 발명에 따라 사용된 직접 열교환기용으로는 부적합합니다. 이 경우 아르곤이 헬륨에 비해 상당히 저렴합니다. 이로써 재료 수요와 이에 따른 설치 비용을 대폭 절감할 뿐 아니라 저렴한

아르곤 사용을 통해 전체 비용 절감에 상당한 효과를 가져옵니다. 납을 냉각수로 사용하는 DFR 사양에서는 납과 아르곤을 함께 사용하는 것이 바람직합니다.

[0060] 일반적으로 분리가 터빈 앞에서 완전히 이루어지지 않는 않습니다. 최신식 가스 터빈은 내구성이 매우 뛰어난 재료로 이루어져 있으며, 황산과 먼지 입자에 대비하여 안전한 위치에 장착되어 있습니다. 최근에는 효율성을 높이기 위해 직접 미분탄으로 발전소 터빈을 가동하는 추세이므로 터빈이 대량의 재를 처리해야 합니다. 이 경우 상대적으로 납 액적이 좀 더 양호합니다. 특히 터빈 뒤의 가스 온도도 납의 용융 온도를 넘습니다. 하지만 납도 회전자와 고정자의 블레이드에 침전되어 불균형을 발생시켜, 가스 흐름에 대해 에어 포일의 진동 운동을 유발하여 납 흔들림의 원인이 됩니다. 이 현상은 특히 터보 압축기의 측면에도 마찬가지입니다. 가스 흐름에 남아 있는 납 액적은 늦어도 작동 가스가 열을 배출하는 열교환기에서 동결됩니다. 납의 열전도율이 뛰어나므로 납으로 인한 점차적인 막힘이 발생하는 경우 외에는 열교환기의 기능에 영향을 주지 않으며, 막힘을 방지하기 위해 정기적 유지 보수가 필요합니다. 이 주기를 늘리기 위해서는 열교환기 바로 앞에 또는 열교환기와 구조적으로 결합된 분리기(디스크 분리기, 충격 분리기, 챔버 분리기, 데미스터)를 설치하여 이미 심하게 지연된 가스 흐름에 영향을 가하는 것이 좋습니다.

[0061] 노심을 떠난(9) 액체 연료는 먼저 사전 버퍼(27)에 수집됩니다. 여기서 처리될 양이 PPU(28)로 전달됩니다. 사전 버퍼에서 처리된 양은 사후 버퍼(29)에 수집된 후 멀티포트 밸브(31) 및 노심(8) 바닥면의 흡입구를 통해 노심 용적(4)으로 재펌핑됩니다(30). 버퍼(27), (29)는 원자로와 PPU(28)의 일시적 처리 속도 편차를 보정하는 역할을 합니다. 또한 같은 목적으로 미임계 저장탱크(33)도 사이클에 연결할 수 있습니다. 이는 특히 전기 제련과 같은 일괄 작업 기술을 사용할 경우에 꼭 필요합니다. 사전 버퍼(27)는 비활성 기체에서 연료를 정화하기 위한 목적으로도 사용할 수 있습니다.

[0062] ADS 모드에서는 PPU(28)의 연료 혼합물이 임계치의 바로 아래로 유지되어 노심이 다시 임계치에 도달하려면 가속기 중성자 소스로부터 전체 중성자 선속의 천분의 몇만이 제공되어야 합니다. 이 같은 방법을 이용하면 분열 소스가 있는 고에너지 가속기 대신 소형 가속기를 사용하여도 충분합니다.

[0063] 유지 보수 또는 비상 시를 위해 미임계 연료 저장소(33)가 마련되어 있습니다. 저장소는 여러 개의 탱크로 구성되어 있으며, 각 탱크는 임계치보다 한참 이하인 액체 연료의 용량만 지니고 있습니다. 탱크 내 주입은 반응기 용기(32)의 바닥에 있는 열린 퓨즈를 통해 또는 사후 버퍼(29)의 멀티 포트 밸브(31)를 거쳐 펌프(30)를 통해 이루어집니다.

[0064] 활성 냉각된 퓨즈(32)는 오크리지 국립 연구소에서 MSRE 실험 시와 마찬가지로 여기에서 시스템의 정기적 종료 시에도 사용할 수 있습니다. 퓨즈는 기본적으로 하나의 파이프이며, 일정한 방열을 통해 냉각됩니다. 용융염 연료의 열전도율 때문에 노심 용적(4)에서 생산된 열이 퓨즈(32)까지 확산됩니다. 일정한 방열은 노심 용적(4)의 온도가 1000° C일 경우, 용융염이 곧바로 녹지 않도록 설정되어 있습니다. 고온이나 정전 시 용융염을 통해 전달된 열이 퓨즈 내 소금을 녹여 퓨즈가 열리고 연료가 미임계 탱크(33)로 유입됩니다. 여기에서 다른 멀티 포트 밸브(35)를 통해 사전 버퍼(27) 또는 사후 버퍼(29)로 재펌핑될 수 있습니다(34). 용융염 연료는 증식 및 분열 가능한 악티늄과 소금의 혼합물입니다. 이는 238U/239Pu 또는 232Th/233U 조합일 수 있습니다. 우라늄/플루토늄 주기를 위해 최소량의 플루토늄(Pu를 사용할 수 없는 경우, 고농축 235U도 대체 사용 가능)이 필요합니다. 표면에서의 중성자 손실이 서로 다르므로 플루토늄 함량은 노심의 크기에 따라 다릅니다. 더 큰 사양이 더 적은 함량의 플루토늄을 건디는 반면, 사용 가능한 최소형 구조에 필요한 플루토늄 함량은 최대 35%입니다. 나머지는 238U 염으로 이루어져 있습니다. 이때 소금은 적합한 온도 범위에서 액체 상태를 유지하는 3염화물, 즉 UC13과 PuCl3을 사용하는 것이 바람직합니다. 중성자 손실을 방지하기 위해서는 수명이 긴 방사선 동위 원소 36Cl를 생산하도록 가장 일반적인 동위 원소 35Cl에서 포획하여 고순도 37Cl를 사용하는 것이 좋습니다.

[0065] **마이너스 온도 계수**

[0066] PPU(28)는 반응기 내부 목표 온도인 1000° C에서 임계 상태인 연료 혼합물을 제조합니다. 주로 다음과 같은 세 가지 효과가 있어, 온도가 상승하면 중성자 선속을 약화시켜 핵분열 속도에 부정적(negative) 커플링 반응을 보입니다.

[0067] ? 중성자 포획 단면에서 공명의 도플러 선폭 증대로 인해 육안으로 보이는 포획 단면이 확장됩니다.

[0068] ? 용융염 연료의 밀도가 감소하여 분열 가능한 핵종의 농도가 약해집니다.

[0069] ? 액체 납의 밀도가 감소하여 중성자를 반사하는 리드 핵의 농도가 약해집니다.

[0070] 폐각으로 인한 많은 안정적 동위 원소와 높은 원자 질량 덕분에 납은 중성자 감속재 기능 및 중성자 포획 단면이 낮아 우수한 중성자 반사체 역할을 합니다. 이 같은 효과로 고속 중성자 스펙트럼에 낮은 마이너스 온도 계수가 제공됩니다. 이는 액체 나트륨을 사용한 냉각과는 정반대인데, 액체 나트륨은 훨씬 더 높은 중성자 포획 단면을 지녀 감속이 심하고 반사도가 낮기 때문에 온도가 상승하고 중성자 선속이 더 높아져 결과적으로 플러스 온도 계수를 가지게 됩니다. 또한 나트륨 냉각과는 대조적으로 납이 약간만 활성화되어도 중간 냉각 회로가 불필요하게 됩니다.

[0071] **반응기 시동**

[0072] 시동을 위해 연료와 납이 액체 상태가 될 때까지 시스템이 예열됩니다. 동시에 퓨즈(32) 냉각이 활성화됩니다. 미임계 저장 탱크(33)로부터 연료염이 노심 용적(4)으로 펌핑됩니다. 액체 연료의 일부가 반응기 하부 말단의 T자형 부품을 통해 퓨즈(32)로 나누어져 동결되면 퓨즈가 닫힙니다. 노심 용적(4)에서 연료가 임계 상태가 됩니다.

[0073] 그러고서 기술된 물리적 제어 루프를 통해 반응기가 제어됩니다. 초반에는 분열 속도와 이에 따른 에너지 생산이 최저입니다. 냉각수 펌프(24)를 활성화하면 납 순환이 진행됩니다. 열교환기(22)(차레로 열이 방출되도록 위치해야 함)의 방열로 인해 노심의 온도가 낮아집니다. 제어 루프는 공칭 온도에 도달하여 균형이 잡힐 때까지 반응기를 임계치 이상으로 만듭니다. 이 절차는 반응기의 정격 전력에 도달할 때까지 계속될 수 있습니다. 반대의 경우, 납 순환 속도가 느려지면(오작동 시에도) 노심의 온도가 상승하여 다시 정격 전력에 도달할 때까지 미임계 상태가 되며 열이 적게 발생됩니다. 이러한 방식으로 반응기의 분열 속도가 항상 에너지를 소비하게 됩니다.

[0074] 평형 온도(공칭 온도)는 연료염 내 분열 가능한 물질(여기서는Pu 함량) 함량에 따라 결정됩니다. 이를 위해 PPU(28)가 연료를 적합하게 혼합합니다.

[0075] **반응기 종료**

[0076] 정기적 종료를 위해 용융염 연료가 미임계 탱크로 흘러 들어가도록(33) 납 순환과 퓨즈(32) 냉각이 정지됩니다. 전체 시스템의 정전 시에도 마찬가지입니다. PPU 오작동이나 파손과 같은 이유로 연료 내 분열 가능한 물질 함량이 너무 높으면, 퓨즈가 다시 작동하도록 공칭 온도도 상승합니다.

[0077] 결과적으로 정기적 종료와 비상 차단 시 사이에 큰 차이가 없습니다.

[0078] **가능한 사고**

- [0079] PPU(28)는 연료염으로부터 분열 물질을 지속적으로 제거하고 이를 238U와 같이 증식 가능한 물질로 대체합니다. 노심에 있는 약간의 잔여 붕괴열은 새로 생성된 분열 물질이 순환하는 동안 미임계 저장탱크(33)로부터 간단히 수동으로 방출할 수 있습니다. 요약: 정전, 임계 사고, 부패열 사고 등의 모든 유형의 위험한 원자로 사고에 대비하여 DFR은 정기적 종료 시와 같이 원칙적으로 대응합니다.
- [0080] **중성자 과잉수 사용**
- [0081] 우라늄/플루토늄 주기 사용 시 플루토늄 분열로 높은 중성자 과잉수가 생산됩니다. 239Pu 재생 후에도 238U 증식으로 인해 여전히 높은 중성자 과잉수가 남습니다. 연료에 238U만 혼합되면, 이 중성자 과잉수가 추가 플루토늄으로 종료됩니다. 변환율이 1을 넘습니다(원자로는 증식 모드로 작동).
- [0082] 중성자 과잉수는 예를 들어 PPU(28)의 수명이 긴 핵분열 생성물을 연료에 혼합하는 등 다른 변이 과정에도 사용 가능합니다. 이는 자체적으로 생성된 수명이 긴 핵분열 생성물의 변이 후에도 여전히 중성자 과잉수가 높으며, 이를 다른(현대식) 원자로에서 폐연료로부터 수명이 긴 핵분열 생성물의 변이를 위해 사용할 수 있기 때문입니다. 중성자 과잉수가 다른 방식으로 사용될 경우에만 원자로가 자체 연료로 가동되므로 변환율이 1입니다.
- [0083] 중성자 과잉수를 조정하기 위한 대체 방법으로 PPU(28)를 토륨이나 비활성 물질에 혼합해도 됩니다.
- [0084] 토륨-우라늄 연료 사이클에서 233U 분열 시 중성자 수량은 우라늄-플루토늄 사이클에서의 239Pu 분열 시보다 현저히 낮습니다. Th-U 증식로서 DFR을 빠른 중성자를 이용해 1을 약간 넘는 변환율로 가동할 수 있습니다. 자체 생산된 수명이 긴 핵분열 생성물의 변이도 가능합니다. 이를 위해 PPU(28)가 233Pa를 233U로 분열될 때까지 분리하여 임시 저장해야 합니다. PPU는 U-Pu에서 Th-U 사이클로의 변환을 지속적으로 진행시킬 수 있습니다.
- [0085] 연료염 내 분열 가능한 물질에 폐연료의 초 우라늄 원소도 혼합할 수 있습니다. 핵분열 생성물의 변이 시와 같이 PPU(28)가 폐연료의 팔레트에서 염화염을 처리하여 각 비등점에 따라 화학 성분이 분리됩니다. 이어서 PPU(28)가 노심의 임계 조건이 충족되도록 목표 약티늄의 연료염을 혼합합니다. 이러한 방식으로 천연 우라늄, 열화 우라늄, 이른바 핵 폐기물과 토륨을 연료원으로 사용할 수 있습니다.
- [0086] **다른 실시 예**
- [0087] 납을 냉각수로 선택하는 이유는 감속이 약한 상태에서 낮은 중성자 흡수력과 뛰어난 중성자 반사성 및 열 특성 때문입니다. 주석 또는 복합 합금과 같은 다른 물질은 구조 재료의 부식을 줄일 수는 있으나 열 특성과 중성자 특성이 불량할 수 있습니다. 여기서 최적의 물질을 찾아야 합니다.
- [0088] 리튬과 같은 노심 질량이 낮고 반사체가 감속된 냉각수를 선택하면 중성자 스펙트럼이 연화되고 DFR이 열성 또는 천연수성이 됩니다. 따라서 이동식 사용에 적합한 매우 작고 성능이 낮은 DFR이 설치됩니다. 하지만 이 결과로 중성자 절감도 나빠져 변환율이 1 미만이고 변이 기능이 손실됩니다.
- [0089] 하위 회로에는 개방된 회로의 의미도 있으며, 여기서 연료가 노심 영역(4)을 1회 순환한 후 미임계 탱크(33)로 유입됩니다. 이 경우 연료 처리는 오프라인이나 현장 외에서 실행하십시오. 이 버전에도 이동식 사용 시 장점이 있는데, 바로 PPU가 누락되어 진동에 덜 민감하게 반응한다는 점입니다. 중성자 스펙트럼이 연화된 반사체 용적(3)에 변이를 위해 다른 라인을 배선할 수 있으나 분열을 위해 특정 물질을 운반할 수는 없습니다. 이러한 물질은 PPU(28)로부터 분리된 제품으로 유입되거나 완전히 분리되어 유입될 수 있습니다. 일부 물질의 변이 속도는 여기서 공명 포획을 통해 노심 용적(4)에서의 속도보다 훨씬 높일 수 있습니다.
- [0090] 액체 연료는 작동 온도에서 액체 상태인 금속 합금의 형태로도 나타날 수 있습니다. 용융염에 비해 훨씬 우수한

열전도율과 낮은 부식성으로 전력 밀도뿐만 아니라 작동 온도도 계속해서 상승하여 DFR 컨셉트의 한계를 최대로 끌어올립니다. 연료 혼합물 내 일부 악티늄의 용융 온도가 너무 높으므로 용점 및 중성자 특성이 충분히 낮은 적합한 금속을 혼합하여 적어도 고상선 온도를 대폭 낮추어야 합니다. 생성된 다성분 합금이 반드시 공용이 아니어도 됩니다. 액상선 온도가 작동 온도를 넘은 경우에도 이 점성 단계의 혼합물을 충분히 펌핑 가능합니다. 연납 시 적합한 혼합 금속은 납, 비스무트로 경우에 따라 주석도 해당되며, 연료 합금의 최대 약 75mol-%까지 구성할 수 있습니다. 이러한 이점이 있는 대신 PPU에서 연료 처리 시 비용이 증가합니다. 여기에 금속 합금의 용융염으로의 변환과 분리된 소금의 금속으로의 재변환(예: 전기 분해) 등 이 두 가지 처리 단계가 추가됩니다. 고온 화학 분리 공정은 연료 합금에도 적용할 수 있으며 용융염으로 더 이상 분리할 수 없는 나머지만 추가 처리를 위해 이송해야 합니다. 납, 비스무트, 비등점이 낮은 핵분열 생성물은 용탕 증류를 통해 분리할 수 있으며 남아 있는 선타만 소금으로 계속 처리해야 합니다.

부호의 설명

[0091]

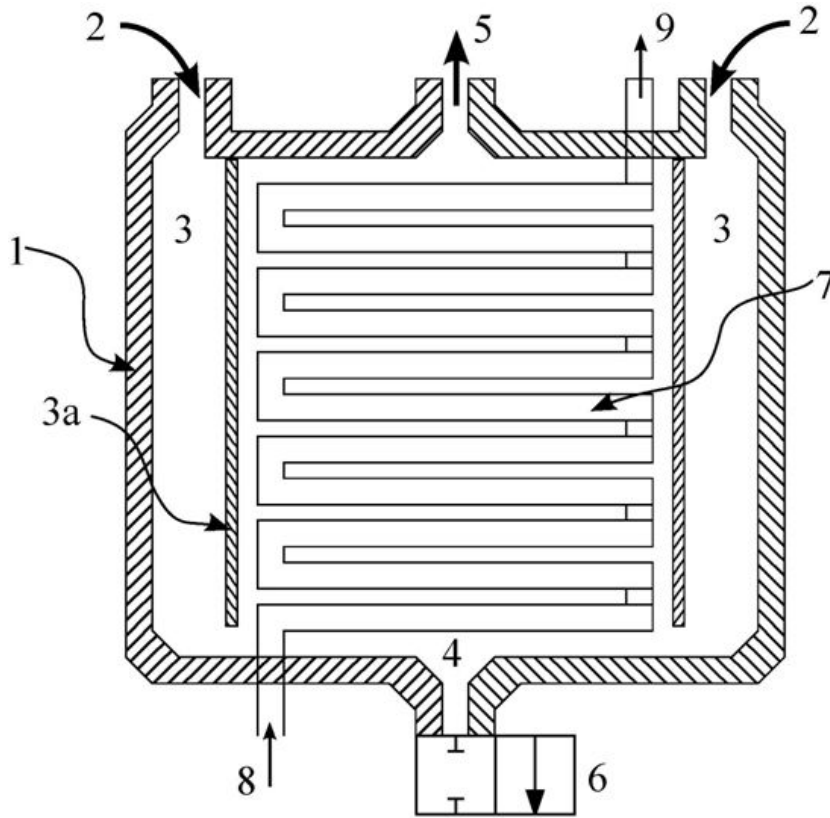
- (1) 반응기 용기
- (2) 납 유입구
- (3) 반사체 용적
- (3a) 파티션
- (4) 노심 용적
- (5) 납 배출구
- (6) 납 배출 밸브
- (7) 연료 라인
- (7a) 연료 라인의 정상 레벨
- (7b) 연료 라인의 빔 레벨
- (7c) 연료 라인의 나선형 버전
- (8) 연료 유입구
- (9) 연료 배출구
- (10) 입자 빔
- (11) 입자 빔 가이드
- (12) 중성자를 생산하는 대상 또는 소스
- (22) 열교환기
- (23) 납 밸브
- (24) 납 펌프
- (26) 납 저장탱크
- (27) 연료 사전 버퍼
- (28) 고온 화학 처리장치(PPU)
- (29) 연료 사후 버퍼
- (30) 연료 펌프
- (31) 연료 분사 밸브
- (32) 퓨즈
- (33) 미임계 연료 탱크

(34) 연료 공급용 펌프

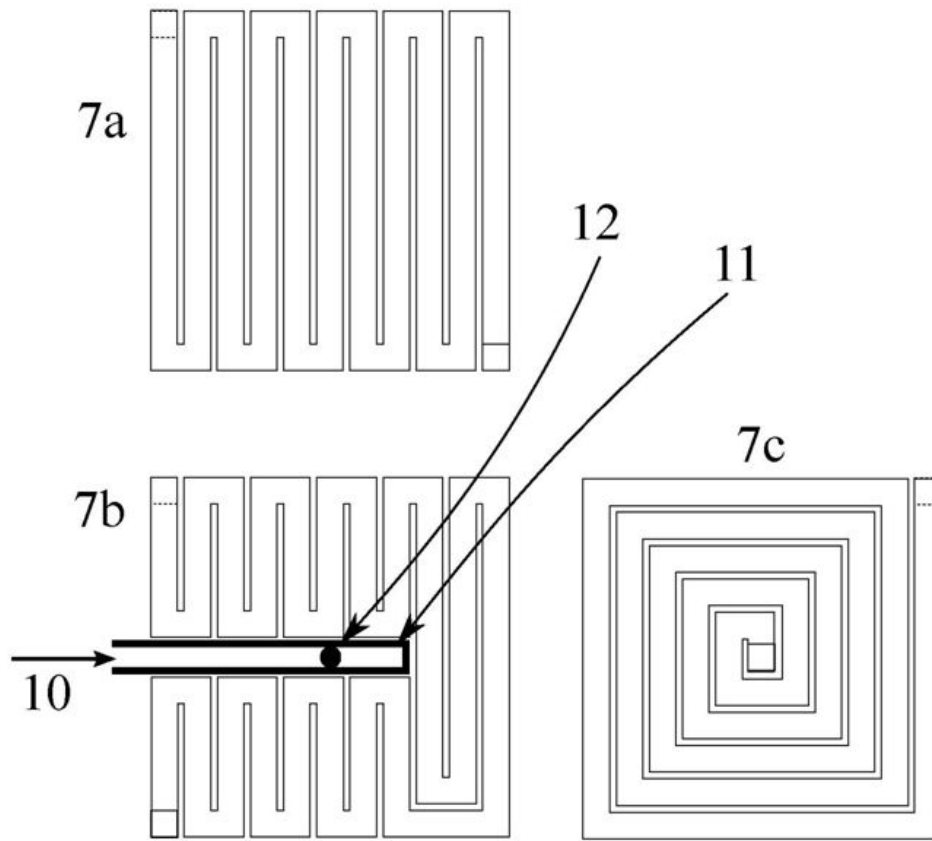
(35) 연료 공급용 밸브

도면

도면1



도면2



도면3

