

	(19) 대한민국특허청(KR) (12) 공개특허공보(A)	(11) 공개번호 10-2012-0123098 (43) 공개일자 2012년11월07일
(51) 국제특허분류(Int. Cl.) G21C 3/00 (2006.01) G21C 3/58 (2006.01) G21C 3/62 (2006.01) (21) 출원번호 10-2012-7021946 (22) 출원일자(국제) 2011년01월25일 심사청구일자 없음 (85) 번역문제출일자 2012년08월22일 (86) 국제출원번호 PCT/EP2011/050983 (87) 국제공개번호 WO 2011/101208 국제공개일자 2011년08월25일 (30) 우선권주장 12/709,708 2010년02월22일 미국(US)		(71) 출원인 웨스팅하우스 일렉트릭 스웨덴 아베 스웨덴 에스-721 63 뵈스테라스 (72) 발명자 할스타디우스 라르스 스웨덴 에스-725 92 베스테로스 파산베엔 15 라호다 에드워드 제이 미국 15218-1352 펜실베이니아주 피츠버그 워싱턴 스트리트 116 (뒷면에 계속) (74) 대리인 특허법인코리아나

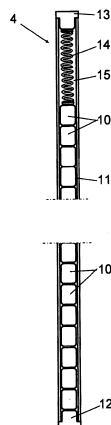
전체 청구항 수 : 총 15 항

(54) 발명의 명칭 핵연료, 핵연료 요소, 핵연료 어셈블리 및 핵연료의 제조 방법

(57) 요약

본 발명은 핵연료 (10), 연료 요소 (4), 연료 어셈블리 (1) 및 핵연료 제조 방법에 관한 것이다. 핵연료는 비등수형 원자로 (BWR) 및 가압수형 원자로 (PWR) 와 같은 경수로 (LWR) 를 포함한 수냉식 원자로에서 사용하도록 되어 있다. 핵연료는 UN 으로 이루어진 우라늄 함유 화합물을 포함한다. 우라늄 함유 화합물의 우라늄 함량은 10 중량% 미만의 동위원소 ²³⁵U 를 포함한다. 핵연료는 Zr, Mo, Si, Al, Nb 및 U 로 이루어진 그룹에서 선택된 적어도 하나의 원소로, 원소 형태로 또는 화합물로서, 실질적으로 이루어진 첨가제를 포함한다.

대표도 - 도3



(72) 발명자

발레니우스 안네

스웨덴 에스-195 47 메르스타 달가탄 3 씨

올코넨 미카엘

스웨덴 에스-752 17 읍살라 링가탄 19 이

포멀아누 라두

미국 15143 펜실베이니아주 슈위클리 리플링 브룩
드라이브 120

레이 서밋

미국 29212 사우스 캐롤라이나주 컬럼비아 레이크
프론트 코트 3

특허청구의 범위

청구항 1

비등수형 원자로 (BWR) 와 가압수형 원자로 (PWR) 와 같은, 경수로 (LWR) 를 포함한, 수냉식 원자로에서 사용하도록 된 핵연료로서,

상기 핵연료는 UN 으로 이루어진 우라늄 함유 화합물을 포함하고, 상기 우라늄 함유 화합물의 우라늄 함량이 10 중량% 미만의 동위원소 ^{235}U 를 포함하는 핵연료에 있어서,

상기 핵연료는 Zr, Mo, Si, Al, Nb 및 U 로 이루어진 그룹에서 선택된 적어도 하나의 원소로, 원소 형태로 또는 화합물로서, 이루어지거나 실질적으로 이루어진 첨가제를 포함하는 것을 특징으로 하는 핵연료.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 우라늄 함유 화합물의 질소 함량이 적어도 60 중량% 의 동위원소 ^{15}N 을 포함하는 핵연료.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 우라늄 함유 화합물의 질소 함량이 적어도 70 중량% 의 동위원소 ^{15}N 을 포함하는 핵연료.

청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 우라늄 함유 화합물의 질소 함량이 적어도 80 중량% 의 동위원소 ^{15}N 을 포함하는 핵연료.

청구항 5

제 1 항 내지 제 4 항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 첨가제는 ZrN, ZrH₂, Si₃N₄, Al₂O₃, ZrO₂, Mo_yO_x, SiO₂, AlN, ZrO₂, ZrH₃, SiO₂, U, Zr, Mo, Si, U₃Si₂, ZrUAl, ZrUSi, ZrUH, UAl₂, U₃Si, U-5Nb-5Zr, U-3Nb-1.5Zr, U-9Mo, U-6Mo, U-1.5Mo-1.0Zr, U-10Zr, 및 U₃SiAl 중 적어도 하나를 포함하는 핵연료.

청구항 6

제 5 항에 있어서,

상기 첨가제는 ZrN, ZrH₂, Si₃N₄, Al₂O₃, ZrO₂, Mo_yO_x, SiO₂, AlN, ZrO₂, ZrH₃, SiO₂, Zr, Mo, 및 Si 중 적어도 하나를 포함하고, 상기 첨가제의 양은 핵연료의 30 체적% 이하인 핵연료.

청구항 7

제 5 항에 있어서,

상기 첨가제는 U, U₃Si₂, ZrUAl, ZrUSi, ZrUH, UAl₂, U₃Si, U-5Nb-5Zr, U-3Nb-1.5Zr, U-9Mo, U-6Mo, U-1.5Mo-1.0Zr, U-10Zr, 및 U₃SiAl 중 적어도 하나를 포함하고, 상기 첨가제의 양은 핵연료의 80 체적% 이하인 핵연료.

청구항 8

제 1 항 내지 제 7 항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 핵연료는 핵연료 펠릿 (10) 의 형태로 제공되는 핵연료.

청구항 9

제 8 항에 있어서,

상기 핵연료 펠릿은 상기 적어도 하나의 첨가제와 우라늄 함유 화합물의 분말의 소결을 통하여 형성되는 핵연료.

청구항 10

피복 및 제 1 항 내지 제 9 항 중 어느 한 항에 따른 핵연료를 포함하는 연료 요소.

청구항 11

제 10 항에 있어서,

상기 연료 요소는 기다란 연료봉 (4) 으로서 설계되는 연료 요소.

청구항 12

제 10 항 또는 제 11 항에 따른 복수의 연료 요소들을 포함하는 연료 어셈블리 (1).

청구항 13

제 1 항 내지 제 9 항 중 어느 한 항에 따른 핵연료의 제조 방법으로서,

UN 으로 이루어진 우라늄 함유 화합물을 제공하는 단계로서, 상기 우라늄 함유 화합물의 우라늄 함량이 10 중량 % 미만의 동위원소 ^{235}U 를 포함하는 단계; 및

Zr, Mo, Si, Al, Nb 및 U 로 이루어진 그룹에서 선택된 적어도 하나의 원소로, 원소 형태로 또는 화합물로서, 이루어지거나 실질적으로 이루어진 첨가제를 우라늄 함유 화합물에 첨가하는 단계를 포함하는 핵연료의 제조 방법.

청구항 14

제 13 항에 있어서,

상기 우라늄 함유 화합물의 분말을 제공하는 단계;

상기 첨가제의 분말을 제공하는 단계;

상기 우라늄 함유 화합물과 상기 첨가제를 분말 혼합물로 혼합하는 단계; 및

소결 압력과 소결 온도에서 상기 분말 혼합물을 핵연료 펠릿으로 소결하는 단계를 포함하는 핵연료의 제조 방법.

청구항 15

제 14 항에 있어서,

상기 소결 온도는 적어도 1,800 °C, 적어도 2,000 °C, 바람직하게 적어도 2,100 °C, 가장 바람직하게 적어도 2,200 °C 인 핵연료의 제조 방법.

명세서

기술 분야

[0001] 본 발명은 비등수형 원자로 (BWR) 및 가압수형 원자로 (PWR) 와 같은 경수로 (LWR) 를 포함한 수냉식 원자로에서 사용하도록 된 핵연료 펠릿 (pellet) 에 관한 것으로, 핵연료 펠릿은 UN 으로 이루어진 우라늄 함유 화합물을 포함하고, 우라늄 함유 화합물의 우라늄 함량은 10 중량% 미만의 동위원소 ^{235}U 를 포함한다.

[0002] 본 발명은 또한 연료 요소, 연료 어셈블리 및, 비등수형 원자로 (BWR) 와 가압수형 원자로 (PWR) 와 같은 경수로 (LWR) 를 포함한 수냉식 원자로에서 사용하도록 된 핵연료의 제조 방법에 관한 것이다.

배경 기술

- [0003] 경수로 (LWR) 와 중수로 (HWR) 를 포함한 수냉식 원자로에서, UO_2 를 포함한 핵연료가 보통 사용된다. UO_2 는 이것이 물에서 용해에 대해 높은 저항을 가진다는 사실 때문에 유리하다.
- [0004] JP-11202072 는 초기에 정의된 종류의 핵연료를 개시한다. 핵연료는 수냉식 원자로에서 사용하기 위한 것이다. 핵연료는 산화물 또는 질화물 입자들을 포함하고 연료 펠릿에 함유된다. 연료는 예를 들어 알루미늄 산화물, 그래파이트, 실리콘 카바이드 또는 금속으로 된 보호 필름 또는 커버에 봉입된다. 보호 필름의 용도는 물이 연료 펠릿에 침투하여 우라늄 질화물에 닿는 것을 방지하는 것이다.
- [0005] WO 2007/011382 는 개질 UN 또는 개질 PuN 으로 된 핵연료를 개시한다. 핵연료는 지르코늄 질화물, 토륨 질화물, 하프늄 질화물, 티타늄 질화물, 또는 희토류 질화물 또는 그 밖의 악티니드 질화물 중 적어도 하나와 같은 추가의 질화물 첨가제를 가진다. 이 핵연료는 수냉식 원자로를 위한 것이 아니라, 소형의 폐쇄형 수송 가능 자율 원자로 (SSTAR) 로 불리는 특정한 종류의 원자로를 위한 것으로, 이것은 증식로이므로, UN 으로 된 핵연료가 매우 높은 함량의 동위원소 ^{235}U 를 가진다.
- [0006] US 4,059,539 는 (U, Zr)N 으로 이루어진 핵연료를 개시하는데 여기에서 ZrN 은 UN 매트릭스에 용해된다. 이 연료는 증식로를 위한 것이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0007] 따라서, 수냉식이 아닌 증식로에서 우라늄 질화물을 기반으로 한 핵연료를 사용하는 것은 알려져 있다. UN 은 UO_2 에 비하여 기술적, 경제적 장점을 가진다. 따라서, 본 발명의 목적은 UN 을 기반으로 하고 수냉식 원자로를 위한 핵연료를 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

- [0008] 이 목적은 초기 정의된 핵연료로서, Zr, Mo, Si, Al, Nb 및 U 로 구성된 그룹에서 선택된 적어도 하나의 원소를, 원소 형태로 또는 화합물 형태로, 포함하는 첨가제를 포함하는 것을 특징으로 하는 핵연료에 의해 달성된다.
- [0009] 순수한 UN 은 UO_2 보다 대략 40 % 초과하는 우라늄 원자를 함유한다. 따라서, UN 을 기반으로 한 핵연료는 작동 비용 및 따라서 전기 발생 비용을 상당히 개선시킬 것이다. 또한, UN 은 UO_2 에 대조적으로 온도에 따라 증가하는 보다 높은 열 전도성을 가진다. 열 전도성은 온도에 따라 UO_2 에서보다 UN 에서 대략 3 ~ 8 더 높다. 결과적으로, UN 을 기반으로 한 핵연료는 원자로의 작동 중 UO_2 와 동일한 정도로 가열되지 않을 것이고, 이것은, 여러 가지 이유 때문에, 예를 들어 더 적은 열 팽창, 더 적은 핵분열 가스의 방출 및 더 적은 저장 에너지 때문에 유리하고, 더 적은 저장 에너지는 냉각제 상실 사고 (LOCA) 의 경우 중요하다.
- [0010] UN 은 UO_2 보다 물과 더 잘 반응하므로 UN 은 UO_2 에 비하여 불리하다. 이것은 수냉식 원자로, 예컨대, LWR 에서 사용하는데 잠재적 제약으로, 연료 피복의 누설을 배제할 수 없다. UO_2 가 LWR 조건 ($250\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$) 에서 물과 천천히 반응하는 반면, UN 의 반응 속도는 생성된 가스가 팽창하여 피복을 파열시킬 정도이다. 결과적으로, 물이 연료 피복에 침투하여 핵연료와 접촉할 위험이 있는 수냉식 원자로에서 지금까지 UN 을 사용할 수 없었는데, 이것은 S. Sunder 와 N. H. Miller 에 의한 합금 및 화합물의 저널 (1998 년) 271 ~ 273 쪽에서 물에 의한 우라늄 질화물 부식에 대한 XPS 와 XRD 연구라는 글에서 알 수 있다. 저자는 UN 이 수냉식 원자로에서 사용될 수 없다고 결론 내린다.
- [0011] 본 발명에 따른 첨가제를 도입함으로써, UN 과 물의 반응 속도는 받아들일 수 있는 레벨로 감소될 수 있다. 정의된 첨가제(들)를 가지는 UN 은 물을 함유한 환경에서도 안정적일 것이다. 우라늄 함유 화합물에 첨가될 첨가제들은 균열면들을 포함한 모든 면들에서 UN 함량에 대해 밀착 (tight) 되고, 물에 녹지 않는 보호층을 형성하도록 물과 반응할 것이다.
- [0012] 정의된 첨가제는 다음과 같은 중요한 기준을 만족한다. 첨가제는 지르칼로이-2 및 지르칼로이-4 와 같은 지

르코늄-기반 합금으로 만들어진 통상적으로 사용되는 피복과 반응하지 않는다. 첨가제는 모두 비교적 낮은 중성자 흡수 단면적을 가진다. 바람직한 본원에서 예시된 첨가제는 모두 Zr 과 동일한 범위의 중성자 단면적을 가진다. 더구나, 첨가제는 모두 방사성 환경에서 안정적이다. 첨가제는 원소 형태로 또는 산화물, 질화물, 수소화물과 같은 화합물로서 첨가될 수 있다. 첨가제는 또한 원소 형태로 또는 ZrN, Si₃N₄, Al₂O₃, ZrO₂, Mo₃O_x, SiO₂, AlN 등과 같은 예를 들어 산화물, 질화물, 수소화물의 화합물로서 완성된 핵연료에 존재할 수도 있다. 첨가제는 입계에 축적될 것이고, 첨가제는 균열면을 포함한 모든 노출면에서 UN 으로 물의 침투를 방지한다.

[0013] 정의된 첨가제는 물에서 매우 낮은 부식 속도를 가진다. ZrN 형태의 Zr 은 70 원자% 레벨에서 물로부터 PuN 연료를 보호하는데 효과적인 것으로 이전 작업에서 알려졌다. U 금속으로 Mo 금속의 첨가는 5 ~ 19 체적% 레벨에서 U 금속 부식을 제거하는 것으로 알려졌다. 따라서, Zr, Al, Mo, Si 및 U 의 질화물, 산화물, 또는 수소화물 화합물의 UN 에의 첨가는 연료 매트릭스에서 UN 의 대부분을 보호하는 것으로 믿고 있다. UN 을 보호하는 U 또는 우라늄 화합물을 포함하는 첨가제에 대해, 예를 들어, U 금속이 UN 에 첨가된다면, 물에 노출 시, U 금속은 내재하는 UN 을 보호할 UO₂ 로 산화될 것이라는 데 주목해야 한다.

[0014] 본 발명의 일 실시형태에 따르면, 우라늄 함유 화합물의 질소 함량은 적어도 60 중량% 의 동위원소 ¹⁵N, 바람직하게 적어도 80 중량% 의 동위원소 ¹⁵N, 그리고 가장 바람직하게 적어도 90 중량% 의 동위원소 ¹⁵N 을 포함한다. 천연적으로 질소는 99.634 % ¹⁴N (7 개의 중성자를 가지고 안정적) 과 0.366 % ¹⁵N (8 개의 중성자를 가지고 안정적) 으로 존재한다. ¹⁴N 은 높은 흡수 단면적을 가진다. ¹⁵N 으로 천연 질소를 풍부하게 함으로써, ¹⁴N 에 의한 기생적 중성자 흡수가 방지되거나 최소화될 수 있다.

[0015] 본 발명의 일 실시형태에 따르면, 첨가제는 ZrN, ZrH₂, Si₃N₄, Al₂O₃, ZrO₂, Mo₃O_x, SiO₂, AlN, ZrO₂, ZrH₃, SiO₂, U, Zr, Mo, Si, U₃Si₂, ZrUAl, ZrUSi, ZrUH, UAl₂, U₃Si, U-5Nb-5Zr, U-3Nb-1.5Zr, U-9Mo, U-6Mo, U-1.5Mo-1.0Zr, U-10Zr, 및 U₃SiAl 중 적어도 하나를 포함한다.

[0016] 본 발명의 일 실시형태에 따르면, 첨가제는 ZrN, ZrH₂, Si₃N₄, Al₂O₃, ZrO₂, Mo₃O_x, SiO₂, AlN, ZrO₂, ZrH₃, SiO₂, Zr, Mo, 및 Si 중 적어도 하나를 포함하고, 첨가제의 양은 핵연료의 30 체적% 이하이다. 결과적으로, 고 체적 우라늄 밀도를 유지하기 위해서, 비우라늄 함유 첨가제의 양은 30 체적% 미만이어야 한다. 이 레벨에서, 전체 우라늄 밀도는 UO₂ 에 대해서보다 높을 것이고, 즉 우수한 우라늄 체적 밀도가 핵연료에서 유지될 것이다.

[0017] 본 발명의 일 실시형태에 따르면, 첨가제는 U, U₃Si₂, ZrUAl, ZrUSi, ZrUH, UAl₂, U₃Si, U-5Nb-5Zr, U-3Nb-1.5Zr, U-9Mo, U-6Mo, U-1.5Mo-1.0Zr, U-10Zr, 및 U₃SiAl 중 적어도 하나를 포함하고, 첨가제의 양은 핵연료의 80 체적% 이하이다. 결과적으로, 고 체적 우라늄 밀도를 유지하기 위해서, 우라늄 함유 첨가제의 양은 최대 대략 80 체적% 일 수 있다. 이 레벨에서, 전체 우라늄 밀도는 UO₂ 에 대해서보다 높을 것이고, 즉 우수한 우라늄 체적 밀도가 핵연료에서 유지될 것이다.

[0018] 본 발명의 일 실시형태에 따르면, 핵연료는 핵연료 펠릿의 형태로 제공된다. 유리하게도, 핵연료 펠릿은 상기 적어도 하나의 첨가제와 우라늄 함유 화합물의 분말의 소결을 통하여 형성될 수도 있다.

[0019] 본원의 목적은 또한 청구항 10 에 정의된 연료 요소 및 청구항 12 에 정의된 연료 어셈블리에 의해 달성된다.

[0020] 또한, 본원의 목적은 초기 정의된 방법에 의해 달성되는데, 이 방법은 UN 으로 이루어진 우라늄 함유 화합물을 제공하는 단계를 포함하는데, 우라늄 함유 화합물의 우라늄 함량은 10 중량% 미만의 동위원소 ²³⁵U 를 포함하고, Zr, Mo, Si, Al, Nb 및 U 로 이루어진 그룹에서 선택된 적어도 하나의 원소를, 원소 형태로 또는 화합물로, (실질적으로) 이루어진 첨가제를 우라늄 함유 화합물에 첨가하는 단계를 포함한다.

[0021] 일 실시형태에 따른 방법은, 우라늄 함유 화합물의 분말을 제공하는 단계, 첨가제의 분말을 제공하는 단계, 우라늄 함유 화합물과 첨가제를 분말 혼합물로 혼합하는 단계, 및 소결 압력과 소결 온도에서 혼합물을 핵연료 펠릿으로 소결하는 단계를 더 포함한다. 유리하게도, 소결 온도는 적어도 1,800 °C, 적어도 2,000 °C, 바람직하게 적어도 2,100 °C, 가장 바람직하게 적어도 2,200 °C 일 수도 있다.

[0022] 본 발명은 이제 첨부 도면을 참조하여 다양한 실시형태들과 실시예들에 대한 기술에 의해 보다 자세히 설명될 것이다.

도면의 간단한 설명

[0023] 도 1 은 BWR 용 연료 어셈블리의 부분 단면 측면도를 개략적으로 나타낸다.

도 2 는 PWR 용 연료 어셈블리의 측면도를 개략적으로 나타낸다.

도 3 은 도 1 또는 도 2 의 연료 어셈블리의 연료 요소의 종단면도를 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0024] 도 1 은 수냉식 경수로 (LWR), 보다 정확하게 비등수형 원자로 (BWR) 에서 사용하기 위한 연료 어셈블리 (1) 를 보여준다. 연료 어셈블리 (1) 는 바닥 부재 (2), 상부 부재 (3), 및 바닥 부재 (2) 와 상부 부재 (3) 사이에서 연장되는 기다란 연료봉들 (4) 형태의 복수의 연료 요소들을 비롯한 공지된 부품들을 포함한다. 연료봉들 (4) 은 복수의 스페이서들 (5) 에 의해 제자리에 유지되고, 이 스페이서들 중 하나는 도 1 에 나타나 있다. 또한, 연료 어셈블리는 연료봉들 (4) 을 둘러싸고 봉입하는 유동 채널 (6) 또는 연료 상자를 포함한다.

[0025] 도 2 는 수냉식 경수로 (LWR), 보다 정확하게 가압수형 원자로 (PWR) 에서 사용하기 위한 연료 어셈블리 (1) 를 보여준다. 연료 어셈블리 (1) 는 바닥 부재 (2), 상부 부재 (3), 및 바닥 부재 (2) 와 상부 부재 (3) 사이에서 연장되는 기다란 연료봉들 (4) 형태의 복수의 연료 요소들을 비롯한 공지된 부품들을 포함한다. 연료봉들 (4) 은 복수의 스페이서들 (5) 에 의해 제자리에 유지된다.

[0026] 도 3 은 도 1 과 도 2 의 연료 어셈블리들 (1) 에서 사용되는 종류의 연료봉 (4) 으로 설계된 단일 연료 요소를 보여준다. 연료봉 (4) 은 복수의 연료 펠릿 (10) 형태의 핵연료 및 피복 튜브 (11) 형태의 피복, 바닥 마개 (12) 및 상부 마개 (13) 를 포함한다. 연료 펠릿들 (10) 은 피복 튜브 (11) 에 구비된 파일 (pile) 에 배치된다. 따라서, 피복 튜브 (11) 는 연료 펠릿들 (10) 과 가스를 봉입한다. 스프링 (14) 은 상부 플리넘 (plenum) (15) 에 배치되고 연료 펠릿들을 바닥 마개 (12) 를 향하여 가압한다.

[0027] 전술한 연료 요소들의 핵연료는 UN 으로 이루어진 우라늄 함유 화합물을 포함한다. 우라늄 함유 화합물의 우라늄 함량은 적어도 동위원소들 ^{238}U 및 ^{235}U 를 포함한다. 우라늄 함량은 우라늄의 천연 조성과 비교해 ^{235}U 가 풍부하지만, 우라늄 함량은 10, 9, 8, 7, 6 또는 5 중량% 미만의 동위원소 ^{235}U 를 가진다.

[0028] 핵연료는, 우라늄 및 질소와 더불어, 첨가제를 포함한다. 첨가제의 용도는 주로 UN 과 물의 반응 속도를 감소시키는 것이다. 첨가제는, Zr, Mo, Si, Al, Nb 및 U 로 이루어진 그룹에서 선택된 적어도 하나의 원소로, 원소 형태로 또는 화합물로서, 이루어지거나 실질적으로 이루어진다. 첨가제를 형성하는 원소(들) 또는 화합물(들)은 연료 요소에 균질하게 분포된다.

[0029] 천연 질소는 99.634 % ^{14}N (7 개의 중성자를 가지고 안정적) 및 0.366 % ^{15}N (8 개의 중성자를 가지고 안정적) 으로 구성된다. ^{15}N 은 비교적 높은 흡수 단면적을 가지는 ^{14}N 보다 상당히 낮은 중성자 흡수 단면적을 가진다. 기생적 중성자 흡수를 최소화하거나 감소시키기 위해서, 따라서 우라늄 함유 화합물의 질소 함량은 ^{15}N 이 풍부하다. 따라서, 우라늄 함유 화합물의 질소 함량은 적어도 60, 적어도 70, 적어도 80, 적어도 90, 적어도 95 또는 적어도 98 중량% 의 동위원소 ^{15}N 을 포함할 수도 있다.

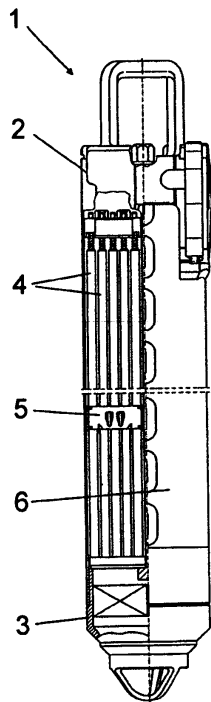
[0030] 따라서, 첨가제는 원소 형태로 또는 화합물로 전술한 원소들 중 하나 또는 여러 원소들을 포함하거나 이들로 이루어질 수 있다. 화합물은 예를 들어 산화물, 질화물, 수소화물 등일 수도 있다. 알맞은 첨가제의 예들은 ZrN, ZrH₂, Si₃N₄, Al₂O₃, ZrO₂, Mo_yO_x, SiO₂, AlN, ZrO₂, ZrH₃, SiO₂, U, Zr, Mo, Si, U₃Si₂, ZrUAl, ZrUSi, ZrUH, UAl₂, U₃Si, U-5Nb-5Zr, U-3Nb-1.5Zr, U-9Mo, U-6Mo, U-1.5Mo-1.0Zr, U-10Zr, 및 U₃SiAl 중 적어도 하나를 포함한다.

[0031] 첨가제는 이 원소들 또는 화합물들 중 임의의 단 하나를 포함할 (이루어질) 수도 있음에 주목해야 한다. 첨가제는 또한 이 원소들 또는 화합물들 중 임의의 둘 이상의 임의의 조합을 포함할 (이루어질) 수도 있다.

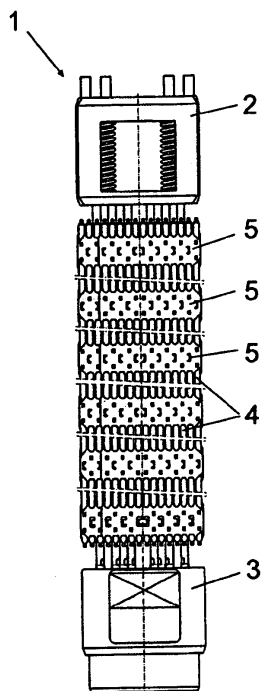
- [0032] 이 첨가제들의 제 1 그룹은 원소들 Zr, Mo 및 Si 중 적어도 하나 및/또는 ZrN, ZrH₂, Si₃N₄, Al₂O₃, ZrO₂, Mo_yO_x, SiO₂, AlN, ZrO₂, ZrH₃ 및 SiO₂ 중 적어도 하나를 포함한다.
- [0033] 이 제 1 그룹에서, 원소들 또는 화합물들은, 핵연료에서 고 체적 우라늄 밀도를 유지하기 위한 첨가제의 양을 제한하는, 우라늄 또는 그 밖의 핵분열 원소를 포함하지 않는다. 결과적으로, 제 1 그룹을 위한 첨가제의 양은 핵연료의 30 체적% 이하이어야 한다. 유리하게도, 이 그룹을 위한 첨가제의 양은 핵연료의 25, 20, 15, 또는 10 체적% 이하일 수도 있다. 이 그룹을 위한 첨가제의 양은 핵연료의 2, 5, 7, 또는 10 체적% 이상이다. 제 1 그룹의 첨가제들은 UN 함량에 대해 밀착되고, 물에 녹지 않는 보호층을 형성하도록 물과 반응할 것이다.
- [0034] 첨가제의 양 또는 보다 정확하게 첨가제의 중량% 는 화합물 형태의 첨가제에 대해서보다 원소 형태의 첨가제에 대해 더 적을 수도 있다.
- [0035] 첨가제들의 제 2 그룹은 원소 U 및/또는 화합물들 U₃Si₂, ZrUAl, ZrUSi, ZrUH, UA₁₂, U₃Si, U-5Nb-5Zr, U-3Nb-1.5Zr, U-9Mo, U-6Mo, U-1.5Mo-1.0Zr, U-10Zr, 및 U₃SiAl 중 적어도 하나를 포함한다.
- [0036] 이 제 2 그룹의 첨가제들은 우라늄을 포함하는데, 이것은 첨가제의 양이 핵연료에서 고 체적 우라늄 밀도를 유지하기 위한 제 1 그룹에 대해서보다 높을 수도 있음을 의미한다. 결과적으로, 제 2 그룹에 대한 첨가제의 양은 핵연료의 80 체적% 이하이어야 한다. 유리하게도, 제 2 그룹에 대한 첨가제의 양은 핵연료의 70, 60, 50, 40, 30, 20 또는 10 체적% 이하일 수도 있다. 이 그룹에 대한 첨가제의 양은 핵연료의 2, 5, 7 또는 10 체적% 이상이다. 제 2 그룹의 우라늄 함유 화합물들은 UN 함량에 대해 밀착되고, 물에 녹지 않는 보호층을 형성하도록 물과 반응할 것이다. 원소 (U) 를 포함하는 첨가제는, 물에 노출되었을 때, 내재하는 UN 을 보호할 UO₂ 로 산화될 것이다.
- [0037] 전술한 대로, 핵연료는 상기 핵연료 펠릿 (10) 과 같은 소결된 고형체로서 실현될 수도 있다. 연료 펠릿 (10) 은 실린더 형상, 바람직하게 원형 실린더 형상을 가질 수도 있고, 환형일 수도 있다.
- [0038] 핵연료는 다음과 같은 단계들을 포함하는 알맞은 방법을 통하여 제조될 수도 있다:
- [0039] ²³⁵U 가 풍부한, 예를 들어 분말 형태의 우라늄이 제공된다.
- [0040] ¹⁵N 이 풍부한, 예를 들어 분말 형태의 질소가 제공된다.
- [0041] 우라늄과 질소는 UN 으로 이루어진 균질한 우라늄 함유 화합물을 형성하도록 혼합된다. 반응은 금속 우라늄의 직접 질화 또는 우라늄 산화물의 탄소열 (carbo-thermic) 질화로 이루어질 수도 있지만, 이것에 제한되지 않는다.
- [0042] Zr, Mo, Si, Al, Nb 및 U 로 이루어진 그룹에서 선택된 적어도 하나의 원소로, 원소 형태로 또는 화합물로서, 이루어지거나 실질적으로 이루어진, 예를 들어 분말 형태의 첨가제가, 우라늄 함유 화합물에 첨가된다.
- [0043] 우라늄 함유 화합물과 첨가제는 예를 들어 분말 형태의 균질한 혼합물을 형성하도록 혼합된다. 대안 실시형태로서, 첨가제가 개별 우라늄 함유 분말 입자들을 커버하여 보호하도록 도입될 수도 있다.
- [0044] 혼합물은 또한 소결 압력과 소결 온도에서 알맞은 소결 프로세스에 의해 소결된 고형체, 예를 들어 실린더형 핵연료 펠릿으로 소결될 수도 있다. 소결 온도는 적어도 1,800℃, 적어도 2,000℃, 바람직하게 적어도 2,100℃, 가장 바람직하게 적어도 2,200℃ 이다.
- [0045] 본 발명은 전술한 실시형태들과 실시예들에 제한되지 않고, 하기 청구범위 내에서 변경 및 수정될 수도 있다.

도면

도면1



도면2



도면3

