



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2017년07월07일
(11) 등록번호 10-1754754
(24) 등록일자 2017년06월30일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

G21F 5/008 (2006.01)

(52) CPC특허분류

G21F 5/008 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2016-0077351

(22) 출원일자 2016년06월21일

심사청구일자 2016년06월21일

(56) 선행기술조사문헌

EP01096507 B1*

JP4461080 B2*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

한국원자력연구원

대전광역시 유성구 대덕대로989번길 111(덕진동)

(72) 발명자

이찬복

대전광역시 유성구 갑동로25번길 24-17 (갑동)

김준환

대전광역시 유성구 은구비남로 34 801동 1501호

(노은동, 열매마을8단지)

천진식

대전광역시 유성구 배울2로 19 906동 1304호 (관평동, 대덕테크노밸리9단지아파트)

(74) 대리인

이원희

전체 청구항 수 : 총 14 항

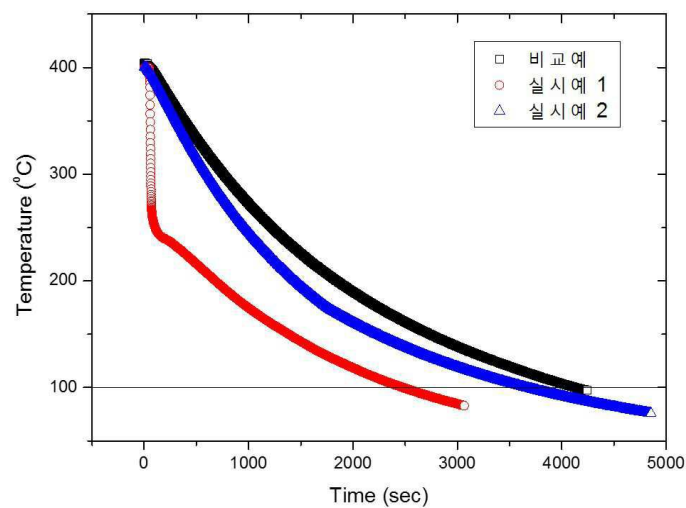
심사관 : 윤연숙

(54) 발명의 명칭 **사용후 핵연료 건식 저장 용기**

(57) 요약

본 발명은 사용후 핵연료를 장전하여 중간 저장하기 위한 사용후 핵연료 중간 저장 용기이되, 상기 사용후 핵연료가 장전되는 장전 공간에 충전되는 금속 분말을 포함하는 사용후 핵연료 중간 저장 용기를 제공한다. 본 발명에 따른 사용후 핵연료 건식 저장 용기는 사용후 핵연료 저장시 빈 공간에 분말을 충전하여, 중래의 기체를 사용하여 보관하는 방식보다 높은 냉각 효율 및 낮은 유지 비용을 달성할 수 있다.

대표도 - 도5



이 발명을 지원한 국가연구개발사업
 과제고유번호 53113-16
 부처명 미래창조과학부
 연구관리전문기관 한국연구재단
 연구사업명 원자력연구개발사업
 연구과제명 SFR 원형로 핵연료설계
 기 여 율 1/1
 주관기관 한국원자력연구원
 연구기간 2016.03.01 ~ 2018.02.28

명세서

청구범위

청구항 1

사용후 핵연료를 장전하여 중간 저장하기 위한 사용후 핵연료 중간 저장 용기이되,
상기 사용후 핵연료가 장전되는 장전 공간에 사용후 핵연료가 장전된 후, 장전 공간 내 공극에 충전되는 금속 분말을 포함하는 사용후 핵연료 중간 저장 용기에 있어서,
사용후 핵연료에서 발생하는 붕괴열이 상기 금속 분말을 통해 외부로 전달되는 것을 특징으로 하는 사용후 핵연료 중간 저장 용기.

청구항 2

제1항에 있어서,
상기 금속 분말은 구리(Cu), 알루미늄(Al), 마그네슘(Mg), 몰리브덴(Mo), 실리콘(Si), 탄소(C) 및 이들의 합금으로 이루어지는 군으로부터 선택된 1 종 이상인 것을 특징으로 하는 사용후 핵연료 중간 저장 용기.

청구항 3

제1항에 있어서,
상기 금속 분말의 입도는 0.1 mm 내지 10 mm인 것을 특징으로 하는 사용후 핵연료 중간 저장 용기.

청구항 4

제1항에 있어서,
상기 금속 분말은 구형 또는 다면체 형상인 것을 특징으로 하는 사용후 핵연료 중간 저장 용기.

청구항 5

제1항에 있어서,
상기 금속 분말의 중성자 흡수율은 10^{-4} neutron/cm 내지 2 neutron/cm인 것을 특징으로 하는 사용후 핵연료 중간 저장 용기.

청구항 6

제1항에 있어서,
상기 금속 분말의 열 전도도는 1.0 W/cm · K 내지 4.2 W/cm · K인 것을 특징으로 하는 사용후 핵연료 중간 저장 용기.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 금속 분말의 용융점은 500 ℃ 내지 4000 ℃인 것을 특징으로 하는 사용후 핵연료 중간 저장 용기.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 금속 분말은 0.1 % 내지 99.9 %의 확률로 존재하는 동위원소의 원자량이, 존재비율이 높은 원소의 원자량보다 0 내지 3 높은 것을 특징으로 하는 사용후 핵연료 중간 저장 용기.

청구항 9

원통 형상인 본체;

상기 본체 내측에 위치하며, 내부에 사용후 핵연료를 장전하는 다수개의 장전 공간이 형성된 내부 용기;

상기 본체의 외측에 설치된 원통 형상의 외통;

상기 본체와 상기 외통 사이에 위치하며 중성자를 차단하기 위한 중성자 차폐체; 및

상기 본체 상부에 결합되는 덮개;를 포함하고,

상기 사용후 핵연료가 장전되는 장전 공간에 사용후 핵연료가 장전된 후, 장전 공간 내 공극에 충전되는 금속 분말을 포함하는 사용후 핵연료 중간 저장 용기에 있어서,

사용후 핵연료에서 발생하는 붕괴열이 상기 금속 분말을 통해 외부로 전달되는 것을 특징으로 하는 사용후 핵연료 중간 저장 용기.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 금속 분말은 사용후 핵연료와 접촉하는 것을 특징으로 하는 사용후 핵연료 중간 저장 용기.

청구항 11

제9항에 있어서,

상기 사용후 핵연료는 경수로 또는 중수로에서 발생하는 것을 특징으로 하는 사용후 핵연료 중간 저장 용기.

청구항 12

원통 형상인 본체; 상기 본체 내측에 위치하며, 내부에 사용후 핵연료를 장전하는 다수개의 장전 공간이 형성된 내부 용기; 상기 본체의 외측에 설치된 원통 형상의 외통; 상기 본체와 상기 외통 사이에 위치하며 중성자를 차단하기 위한 중성자 차폐체; 및 상기 본체 상부에 결합되는 덮개;를 포함하는 사용후 핵연료 중간 저장 용기를 준비하는 단계(단계 1); 및

상기 단계 1에서 준비된 중간 저장 용기의 장전 공간에 사용후 핵연료를 장전한 후, 장전 공간 내 공극에 금속 분말을 충전시키는 단계(단계 2);를 포함하는 사용후 핵연료 중간 저장 시 사용후 핵연료의 냉각방법에 있어서, 사용후 핵연료에서 발생하는 붕괴열이 상기 금속 분말을 통해 외부로 전달되는 것을 특징으로 하는 사용후 핵연료 중간 저장 시 사용후 핵연료의 냉각방법.

청구항 13

제12항에 있어서,

상기 장전된 사용후 핵연료에서 발생하는 열은 금속 분말을 통해 중간 저장 용기의 본체로 직접 전달되는 것을 특징으로 하는 사용후 핵연료 중간 저장 시 사용후 핵연료의 냉각방법.

청구항 14

제12항에 있어서,

상기 금속 분말은 0.1 mm 이상 1 mm 미만인 입도의 금속 분말과, 1 mm 초과 10 mm 이하인 입도의 금속 분말의 혼합 분말인 것을 특징으로 하는 사용후 핵연료 중간 저장 시 사용후 핵연료의 냉각방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 사용후 핵연료 건식 저장 용기에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 경수로 및 중수로에서 발생하는 사용후 핵연료는 영구 처분하기 이전에 중간 저장소에 보관된다. 사용후 핵연료는 불안정한 핵분열 생성물이 시간에 따라 방사선 붕괴하여 높은 방사선 및 열을 발생시킨다. 연소를 마치고 발전소에서 인출한 사용후 핵연료는 원자력발전소 부지 내에서 일정기간 보관되며 중성자 차폐 및 붕괴열을 냉각시키기 위하여 수조에 장입하여 일정기간 보관한다. 일정기간 보관하여 방사선량과 온도가 일정 이하로 감소한 핵연료는 밖으로 인출하여 콘크리트 또는 금속 저장용기에서 건식 저장된다.

[0004] 부지 내 임시저장의 경우, 약 30 년 ~ 50 년 동안 보관하며 중간저장소에서 보관시 100 년 ~ 300 년간 장기 보관한다. 따라서, 보관하는 사용후 핵연료의 장기 건전성의 확보가 무엇보다도 필요하며 붕괴열의 발생으로 자연 발열하는 사용후 핵연료의 열을 효율적으로 외부에 전달하는 것이 필요하다.

[0006] 사용후 핵연료를 저장하는 캐스크의 종래 기술로, 대한민국 등록특허 제10-0727092호는 방사성 폐기물 또는 사용후 핵연료를 담은 용기 내에 은 또는 은 화합물을 투입하는 사용후 핵연료 처분 용기를 제공하는 기술을 제공하고 있고, 사용후 핵연료를 담은 용기의 손상 시, 유출되는 방사성 요오드의 양을 감소시키는 효과를 지니고 있다.

[0008] 다만, 종래 기술들은 건식저장시 냉각 매개체로 저장용기 내에 불활성 기체인 헬륨(He)을 장입하며 약 4기압으로 충전하여 핵연료를 보관한다. 불활성 기체를 장입하여 보관하는 경우, 기체의 누설을 방지하고 그 상태를 유지하기 위한 별도의 관리 비용이 필요하며 열전도도가 낮은 기체를 냉각 매개체로 사용함에 따라 핵연료봉이 충분히 냉각하기까지에 도달하는 시간이 길어져 핵연료의 장기 건전성을 담보하기 어려운 단점이 존재한다.

[0010] 이에, 본 발명자들은 종래의 기술에서 제기된 문제점을 극복하고자 사용후 핵연료가 장전되는 장전 공간에 사용후 핵연료 및 장전 공간의 외벽이 접촉하도록 열전도도가 높은 금속 분말을 충전시켜 사용후 핵연료에서 발생하는 붕괴열을 효과적으로 제거할 수 있는 중간 저장 용기를 개발하고, 본 발명을 완성하였다.

선행기술문헌

특허문헌

[0012] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허 제10-0727092호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0013] 본 발명의 목적은 사용후 핵연료의 붕괴열을 효과적으로 전달하고, 낮은 유지비용 및 장기 건전성을 만족하는 사용후 핵연료 저장 용기를 제공하는 데 있다.

과제의 해결 수단

- [0015] 상기 목적을 달성하기 위하여, 본 발명은
- [0016] 사용후 핵연료를 장전하여 중간 저장하기 위한 사용후 핵연료 중간 저장 용기이되,
- [0017] 상기 사용후 핵연료가 장전되는 장전 공간에 충전되는 금속 분말을 포함하는 사용후 핵연료 중간 저장 용기를 제공한다.
- [0019] 또한, 본 발명은
- [0020] 원통 형상인 본체;
- [0021] 상기 본체 내측에 위치하며, 내부에 사용후 핵연료를 장전하는 다수개의 장전 공간이 형성된 내부 용기;
- [0022] 상기 본체의 외측에 설치된 원통 형상의 외통;
- [0023] 상기 본체와 상기 외통 사이에 위치하며 중성자를 차단하기 위한 중성자 차폐체; 및
- [0024] 상기 본체 상부에 결합되는 덮개;를 포함하고,
- [0025] 상기 사용후 핵연료가 장전되는 장전 공간에 충전되는 금속 분말을 포함하는 사용후 핵연료 중간 저장 용기를 제공한다.
- [0027] 나아가, 본 발명은
- [0028] 원통 형상인 본체; 상기 본체 내측에 위치하며, 내부에 사용후 핵연료를 장전하는 다수개의 장전 공간이 형성된 내부 용기; 상기 본체의 외측에 설치된 원통 형상의 외통; 상기 본체와 상기 외통 사이에 위치하며 중성자를 차단하기 위한 중성자 차폐체; 및 상기 본체 상부에 결합되는 덮개;를 포함하는 사용후 핵연료 중간 저장 용기를 준비하는 단계(단계 1); 및
- [0029] 상기 단계 1에서 준비된 중간 저장 용기의 장전 공간에 사용후 핵연료를 장전한 후, 장전 공간 내 공극에 금속 분말을 충전시키는 단계(단계 2);를 포함하는 사용후 핵연료 중간 저장 시 사용후 핵연료의 냉각방법을 제공한다.

발명의 효과

- [0031] 본 발명에 따른 사용후 핵연료 건식 저장 용기는 사용후 핵연료 저장시 빈 공간에 분말을 충전하여, 종래의 기체를 사용하여 보관하는 방식보다 높은 냉각 효율 및 낮은 유지 비용을 달성할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0033] 도 1은 금속 분말의 열 전도도 및 용융점을 분석한 결과 그래프이고;
- 도 2는 금속 분말의 중성자 흡수성을 분석한 결과 그래프이고;
- 도 3은 금속 분말의 원자량에 따른 원소별 구성비 및 방사화 거동을 나타낸 결과 그래프이고;
- 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 사용후 핵연료 중간 저장 용기를 나타낸 모식도이고;
- 도 5는 본 발명에 따른 실시예 1, 실시예 2 및 비교예를 수행하여 측정된 중간 저장 용기 외면의 냉각 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0034] 본 발명은
- [0035] 사용후 핵연료를 장전하여 중간 저장하기 위한 사용후 핵연료 중간 저장 용기이되,
- [0036] 상기 사용후 핵연료가 장전되는 장전 공간에 충전되는 금속 분말을 포함하는 사용후 핵연료 중간 저장 용기를 제공한다.
- [0038] 이하, 본 발명에 따른 사용후 핵연료 중간 저장 용기에 대하여 상세히 설명한다.
- [0040] 본 발명에 따른 사용후 핵연료 중간 저장 용기는 사용후 핵연료 또는 사용후 핵연료 집합체가 장전되는 장전 공

간에 금속 분말이 충전된 것을 특징으로 한다.

- [0041] 일반적으로 사용되는 사용후 핵연료의 중간 저장소인 사용후 핵연료 건식 저장 용기는, 사용후 핵연료를 장전하는 다수개의 장전 공간을 포함하는 내부 용기; 상기 내부 용기를 감싸는 외부 용기;를 포함할 수 있는데, 본 발명에서는 상기와 같은 저장 용기에서 사용후 핵연료가 장전되는 장전 공간에 금속 분말을 충전한다.
- [0042] 상기 금속 분말은 사용후 핵연료가 장전된 장전 공간의 공극에 충전되며, 특히 사용후 핵연료 외면과 접촉되어 충전되는 것이 바람직하다.
- [0044] 본 발명에 따른 사용후 핵연료 중간 저장 용기에 있어서, 상기 금속 분말은 붕소(B), 탄소(C), 마그네슘(Mg), 알루미늄(Al), 실리콘(Si), 티타늄(Ti), 바나듐(V), 크롬(Cr), 망간(Mn), 철(Fe), 니켈(Ni), 구리(Cu), 이트륨(Y), 지르코늄(Zr), 나이오븀(Nb), 몰리브덴(Mo), 하프늄(Hf), 탄탈륨(Ta), 금(Au), 은(Ag), 백금(Pt) 등의 1 종 이상의 금속 또는 이들의 합금을 사용할 수 있으며, 바람직하게 상기 금속 분말은 구리(Cu), 알루미늄(Al), 마그네슘(Mg), 몰리브덴(Mo), 실리콘(Si), 탄소(C) 및 이들의 합금 등을 사용할 수 있다.
- [0046] 또한, 상기 금속 분말의 입도는 0.1 mm 내지 10 mm인 것이 바람직하고, 0.5 mm 내지 5 mm인 것이 더욱 바람직하며, 1 mm 내지 3 mm인 것이 가장 바람직하다. 만약, 상기 금속 분말의 입도가 0.1 mm 미만일 경우에는 분말 가공에 따른 추가 비용의 소요로 경제성이 떨어지는 문제가 있으며, 10 mm를 초과하는 경우에는 성긴 분말로 인하여 냉각 효율이 떨어지는 문제가 있다.
- [0047] 보다 효율적인 냉각을 위하여 입도가 균일한 분말을 충전할 수 있으나, 더욱 바람직하게는 서로 다른 입도를 가지는 금속 분말을 혼합하여 충전할 수 있다. 구체적으로는 입도가 0.1 mm 이상 1 mm 미만인 금속 분말과 입도가 1 mm 초과 10 mm 이하인 금속 분말을 혼합하여 사용할 수 있다. 이 경우, 큰 입도를 가지는 금속 분말의 공극 사이로 작은 입도의 금속 분말이 위치함으로써 보다 효율적인 냉각을 달성할 수 있다.
- [0049] 또한, 상기 금속 분말은 구형 또는 다면체 형상일 수 있다. 상기 금속 분말이 충전됨에 있어서 열전도도를 떨어뜨릴 수 있는 공극 크기를 줄이고 보다 효율적인 냉각을 달성하기 위하여, 상기 금속 분말은 구형 또는 다면체 형상일 수 있다.
- [0051] 나아가, 상기 금속 분말의 열 전도도는 1.0 W/cm·K 이상인 것이 바람직하며, 1.0 W/cm·K 내지 10.0 W/cm·K인 것이 더욱 바람직하고, 1.2 W/cm·K 내지 4.2 W/cm·K인 것이 가장 바람직하다. 사용후 핵연료가 장전된 장전 공간의 공극으로 충전되어 사용후 핵연료에서 발생하는 붕괴열을 효율적으로 냉각시키기 위해서는 열 전도도가 고려되어야 한다. 만약, 상기 금속 분말의 열 전도도가 1.0 W/cm·K 미만일 경우에는 사용후 핵연료의 붕괴열을 효과적으로 냉각시킬 수 없는 문제가 있다.
- [0052] 또한, 사용후 핵연료를 고온에서 장기 보관함에 따라 충전되는 금속 분말의 열적 안정성도 중요한 고려사항이 된다. 이를 대표할 수 있는 인자로서 용융점이 있으며, 상기 금속 분말의 용융점은 500 ℃ 이상인 것이 바람직하고, 500 ℃ 내지 4000 ℃인 것이 더욱 바람직하며, 1000 ℃ 내지 4000 ℃인 것이 가장 바람직하다. 이와 더불어, 용융점 이하에서 상변태 없이 모두 단상을 가지는 금속일 수 있다. 용융점 이하에서 상변태 없이 모두 단상을 가지는 금속 분말을 사용하는 경우 장기 보관시 상변태에 의한 물성변화 없이 균일한 냉각성능을 나타낸다.
- [0054] 나아가, 상기 금속 분말의 중성자 흡수율은 10^{-4} neutron/cm 내지 2 neutron/cm인 것이 바람직하고, 2×10^{-4} neutron/cm 내지 1 neutron/cm인 것이 더욱 바람직하다. 중성자 및 방사선을 방출하는 사용후 핵연료의 특성상 금속 분말의 방사화 정도도 중요한 요인이 된다. 중성자 조사에 의한 방사화가 과도한 경우, 충전되는 금속 분말이 별도의 방사성 폐기물로 취급되게 되며, 이것이 폐기물의 양을 증가시키는 요인으로 작용한다.
- [0055] 또한, 금속 재료가 중성자를 흡수하면 원자량이 증가하여 불안정하게 되고, 이에 방사선을 방출하며 붕괴하는 과정을 겪는다. 방사화의 가능성일 줄이기 위하여 각 금속 분말에 대하여 안정한 동위원소가 기준 원자량(존재 비율이 높은 원자량) 보다 높은 것이 바람직하다. 구체적으로, 상기 금속 분말은 0.1 % 내지 99.9 %의 확률로 존재하는 동위원소 원자량이 기준 원자량보다 0 내지 3 높은 것이 바람직하다.
- [0057] 나아가, 본 발명은 구체적인 일실시예로서,
- [0058] 원통 형상인 본체;
- [0059] 상기 본체 내측에 위치하며, 내부에 사용후 핵연료를 장전하는 다수개의 장전 공간이 형성된 내부 용기;
- [0060] 상기 본체의 외측에 설치된 원통 형상의 외통;

- [0061] 상기 본체와 상기 외통 사이에 위치하며 중성자를 차단하기 위한 중성자 차폐체; 및
- [0062] 상기 본체 상부에 결합되는 덮개;를 포함하고,
- [0063] 상기 사용후 핵연료가 장전되는 장전 공간에 충전되는 금속 분말을 포함하는 사용후 핵연료 중간 저장 용기를 제공한다.
- [0065] 이하, 본 발명에 따른 사용후 핵연료 중간 저장 용기의 일 실시예를 상세히 설명한다.
- [0067] 본 발명에 따른 사용후 핵연료 중간 저장 용기는, 원통 형상인 본체; 상기 본체 내측에 위치하며, 내부에 사용후 핵연료를 장전하는 다수개의 장전 공간이 형성된 내부 용기; 상기 본체의 외측에 설치된 원통 형상의 외통; 상기 본체와 상기 외통 사이에 위치하며 중성자를 차단하기 위한 중성자 차폐체; 및 상기 본체 상부에 결합되는 덮개;를 포함하며, 특히 상기 사용후 핵연료가 장전되는 장전 공간에 충전되는 금속 분말을 포함하는 것을 특징으로 한다.
- [0068] 상기 금속 분말은 사용후 핵연료가 장전된 장전 공간의 공극에 충전되며, 특히 사용후 핵연료 외면과 접촉되어 충전되는 것이 바람직하다.
- [0070] 본 발명에 따른 사용후 핵연료 중간 저장 용기에 있어서, 상기 본체는 원통 형상으로서, 사용후 핵연료 중간 저장 용기를 지지하고, 장전 공간을 확보하는 본체 역할을 한다.
- [0071] 또한, 상기 덮개는 상기 본체 상부에 결합되어 사용후 핵연료를 밀봉하는 역할을 한다.
- [0073] 본 발명에 따른 사용후 핵연료 중간 저장 용기에 있어서, 상기 외통은 본체 외측에 설치되고, 원통 형상을 가지며, 상기 본체와 상기 외통 사이에는 중성자를 차단하기 위한 중성자 차폐체가 위치한다.
- [0075] 본 발명에 따른 사용후 핵연료 중간 저장 용기에 있어서, 상기 내부 용기는 상기 본체 내측에 위치하게 되며, 내부에는 사용후 핵연료를 장전할 수 있는 다수개의 장전 공간이 형성된다.
- [0076] 상기 사용후 핵연료는 경수로 또는 중수로에서 발생하는 것일 수 있으며, 상기 사용후 핵연료는 집합체로 존재할 수 있다.
- [0078] 또한, 상기 사용후 핵연료가 장전되는 장전 공간에는 금속 분말이 충전되며, 상기 충전된 금속 분말을 통해 우수한 냉각 성능을 나타낸다.
- [0080] 구체적으로, 상기 금속 분말은 붕소(B), 탄소(C), 마그네슘(Mg), 알루미늄(Al), 실리콘(Si), 티타늄(Ti), 바나듐(V), 크롬(Cr), 망간(Mn), 철(Fe), 니켈(Ni), 구리(Cu), 이트륨(Y), 지르코늄(Zr), 나이오븀(Nb), 몰리브덴(Mo), 하프늄(Hf), 탄탈륨(Ta), 금(Au), 은(Ag), 백금(Pt) 등의 1 종 이상의 금속 또는 이들의 합금을 사용할 수 있으며, 바람직하게 상기 금속 분말은 구리(Cu), 알루미늄(Al), 마그네슘(Mg), 몰리브덴(Mo), 실리콘(Si), 탄소(C) 및 이들의 합금 등을 사용할 수 있다.
- [0082] 또한, 상기 금속 분말의 입도는 0.1 mm 내지 10 mm인 것이 바람직하고, 0.5 mm 내지 5 mm인 것이 더욱 바람직하며, 1 mm 내지 3 mm인 것이 가장 바람직하다. 만약, 상기 금속 분말의 입도가 0.1 mm 미만일 경우에는 분말 가공에 따른 추가 비용의 소요로 경제성이 떨어지는 문제가 있으며, 10 mm를 초과하는 경우에는 성긴 분말로 인하여 냉각 효율이 떨어지는 문제가 있다.
- [0083] 보다 효율적인 냉각을 위하여 입도가 균일한 분말을 충전할 수 있으나, 더욱 바람직하게는 서로 다른 입도를 가지는 금속 분말을 혼합하여 충전할 수 있다. 구체적으로는 입도가 0.1 mm 이상 1 mm 미만인 금속 분말과 입도가 1 mm 초과 10 mm 이하인 금속 분말을 혼합하여 사용할 수 있다. 이 경우, 큰 입도를 가지는 금속 분말의 공극 사이로 작은 입도의 금속 분말이 위치함으로써 보다 효율적인 냉각을 달성할 수 있다.
- [0085] 또한, 상기 금속 분말은 구형 또는 다면체 형상일 수 있다. 상기 금속 분말이 충전됨에 있어서 열전도도를 떨어뜨릴 수 있는 공극 크기를 줄이고 보다 효율적인 냉각을 달성하기 위하여, 상기 금속 분말은 구형 또는 다면체 형상일 수 있다.
- [0087] 나아가, 상기 금속 분말의 열 전도도는 1.0 W/cm·K 이상인 것이 바람직하며, 1.0 W/cm·K 내지 10.0 W/cm·K인 것이 더욱 바람직하고, 1.2 W/cm·K 내지 4.2 W/cm·K인 것이 가장 바람직하다. 사용후 핵연료가 장전된 장전 공간의 공극으로 충전되어 사용후 핵연료에서 발생하는 붕괴열을 효율적으로 냉각시키기 위해서는 열 전도도가 고려되어야 한다. 만약, 상기 금속 분말의 열 전도도가 1.0 W/cm·K 미만일 경우에는 사용후 핵연료의 붕괴열을 효과적으로 냉각시킬 수 없는 문제가 있다.

- [0088] 또한, 사용후 핵연료를 고온에서 장기 보관함에 따라 충전되는 금속 분말의 열적 안정성도 중요한 고려사항이 된다. 이를 대표할 수 있는 인자로서 용융점이 있으며, 상기 금속 분말의 용융점은 500 ℃ 이상인 것이 바람직하고, 500 ℃ 내지 4000 ℃인 것이 더욱 바람직하며, 1000 ℃ 내지 4000 ℃인 것이 가장 바람직하다. 이와 더불어, 용융점 이하에서 상변태 없이 모두 단상을 가지는 금속일 수 있다. 용융점 이하에서 상변태 없이 모두 단상을 가지는 금속 분말을 사용하는 경우 장기 보관시 상변태에 의한 물성변화 없이 균일한 냉각성능을 나타낸다.
- [0090] 나아가, 상기 금속 분말의 중성자 흡수율은 10^{-4} neutron/cm 내지 2 neutron/cm인 것이 바람직하고, 2×10^{-4} neutron/cm 내지 1 neutron/cm인 것이 더욱 바람직하다. 중성자 및 방사선을 방출하는 사용후 핵연료의 특성상 금속 분말의 방사화 정도도 중요한 요인이 된다. 중성자 조사에 의한 방사화가 과도한 경우, 충전되는 금속 분말이 별도의 방사성 폐기물로 취급되게 되며, 이것이 폐기물의 양을 증가시키는 요인으로 작용한다.
- [0091] 또한, 금속 재료가 중성자를 흡수하면 원자량이 증가하여 불안정하게 되고, 이에 방사선을 방출하며 붕괴하는 과정을 겪는다. 방사화의 가능성일 줄이기 위하여 각 금속 분말에 대하여 안정한 동위원소가 기준 원자량(존재 비율이 높은 원자량) 보다 높은 것이 바람직하다. 구체적으로, 상기 금속 분말은 0.1 % 내지 99.9 %의 확률로 존재하는 동위원소 원자량이 기준 원자량보다 0 내지 3 높은 것이 바람직하다.
- [0093] 나아가, 본 발명은
- [0094] 원통 형상인 본체; 상기 본체 내측에 위치하며, 내부에 사용후 핵연료를 장전하는 다수개의 장전 공간이 형성된 내부 용기; 상기 본체의 외측에 설치된 원통 형상의 외통; 상기 본체와 상기 외통 사이에 위치하며 중성자를 차단하기 위한 중성자 차폐체; 및 상기 본체 상부에 결합되는 덮개;를 포함하는 사용후 핵연료 중간 저장 용기를 준비하는 단계(단계 1); 및
- [0095] 상기 단계 1에서 준비된 중간 저장 용기의 장전 공간에 사용후 핵연료를 장전한 후, 장전 공간 내 공극에 금속 분말을 충전시키는 단계(단계 2);를 포함하는 사용후 핵연료 중간 저장 시 사용후 핵연료의 냉각방법을 제공한다.
- [0097] 이하, 본 발명에 따른 사용후 핵연료 중간 저장 시 사용후 핵연료의 냉각방법에 대하여 각 단계별로 상세히 설명한다.
- [0099] 먼저, 본 발명에 따른 사용후 핵연료 중간 저장 시 사용후 핵연료의 냉각방법에 있어서, 단계 1은 원통 형상인 본체; 상기 본체 내측에 위치하며, 내부에 사용후 핵연료를 장전하는 다수개의 장전 공간이 형성된 내부 용기; 상기 본체의 외측에 설치된 원통 형상의 외통; 상기 본체와 상기 외통 사이에 위치하며 중성자를 차단하기 위한 중성자 차폐체; 및 상기 본체 상부에 결합되는 덮개;를 포함하는 사용후 핵연료 중간 저장 용기를 준비하는 단계이다.
- [0100] 본 발명에서 사용되는 사용후 핵연료 중간 저장 용기는 전술한 바와 같으므로 이하 자세한 설명은 생략한다.
- [0102] 다음으로, 본 발명에 따른 사용후 핵연료 중간 저장 시 사용후 핵연료의 냉각방법에 있어서, 단계 2는 상기 단계 1에서 준비된 중간 저장 용기의 장전 공간에 사용후 핵연료를 장전한 후, 장전 공간 내 공극에 금속 분말을 충전시키는 단계이다.
- [0103] 본 발명에 따른 사용후 핵연료의 냉각방법은 상기 장전된 사용후 핵연료에서 발생하는 열은 금속 분말을 통해 중간 저장 용기의 본체로 직접 전달되며, 이에 따라 종래의 기체를 사용하여 보관하는 방식보다 높은 냉각 효율 및 낮은 유지 비용을 달성할 수 있다.
- [0105] 구체적으로, 상기 금속 분말은 0.1 mm 이상 1 mm 미만인 입도의 금속 분말과, 1 mm 초과 10 mm 이하인 입도의 금속 분말의 혼합 분말일 수 있다.
- [0107] 이하, 본 발명의 실시예 및 실험예를 통해 더욱 상세히 설명한다.
- [0109] 단, 하기 실시예 및 실험예는 본 발명을 예시하는 것일 뿐 본 발명의 내용이 하기 실시예 및 실험예에 의해 한정되는 것은 아니다.
- [0111] <실험예 1> 금속 분말의 특성 분석
- [0112] 본 발명에 따른 사용후 핵연료 중간 저장 용기의 적용하기 위한 금속 분말의 특성을 다음과 같이 분석하였다.
- [0113] 금속 분말을 선정함에 있어서 고려해야할 사항으로 첫 번째, 높은 열전도도를 가져야하며, 두 번째, 높은 용융

점을 나타내야 하며, 세 번째, 낮은 중성자 흡수성을 나타내어야 한다.

[0115] (1) 금속 분말의 열 전도도 및 용융점 분석

[0116] 붕소(B), 탄소(C), 마그네슘(Mg), 알루미늄(Al), 실리콘(Si), 티타늄(Ti), 바나듐(V), 크롬(Cr), 망간(Mn), 철(Fe), 니켈(Ni), 구리(Cu), 이트륨(Y), 지르코늄(Zr), 나이오븀(Nb), 몰리브덴(Mo), 하프늄(Hf), 탄탈륨(Ta), 금(Au), 은(Ag), 백금(Pt)을 사용하여 열 전도도와 용융점을 분석하였으며, 그 결과를 도 1에 나타내었다.

[0118] 도 1에 나타난 바와 같이, 모든 금속 분말이 헬륨의 열전도도보다 높았으며 특히, 구리(Cu), 알루미늄(Al), 마그네슘(Mg), 실리콘(Si), 몰리브덴(Mo), 탄소(C)의 경우, 우수한 열전도도를 나타내고 있다.

[0119] 또한, 도 1에 나타난 바와 같이, 구리(Cu), 알루미늄(Al), 마그네슘(Mg), 실리콘(Si), 몰리브덴(Mo), 탄소(C)의 경우 사용후 핵연료에서 발생하는 최대 피복관 온도인 400 °C 보다 높은 용점을 지니고 있음을 확인할 수 있다. 알루미늄(Al)과 마그네슘(Mg)의 경우, 다른 재료에 비하여 비교적 낮은 용점을 보이고 있으나 이들 재료는 용점 이하에서 상변태 없이 모두 단상을 가지는 재료로 장기 보관시 상변태에 의한 물성변화 없이 균일한 냉각성능을 나타낼 수 있다.

[0121] (2) 금속 분말의 중성자 흡수성 분석

[0122] 붕소(B), 탄소(C), 마그네슘(Mg), 알루미늄(Al), 실리콘(Si), 티타늄(Ti), 바나듐(V), 크롬(Cr), 망간(Mn), 철(Fe), 니켈(Ni), 구리(Cu), 이트륨(Y), 지르코늄(Zr), 나이오븀(Nb), 몰리브덴(Mo), 하프늄(Hf), 탄탈륨(Ta), 금(Au), 은(Ag), 백금(Pt)을 사용하여 중성자 흡수성을 분석하였으며, 그 결과를 도 2에 나타내었다.

[0124] 중성자 및 방사선을 방출하는 사용후 핵연료의 특성상 분말 재료의 방사화 정도도 중요한 고려요인 중에 하나이다. 중성자 조사에 의한 방사화가 과도한 경우, 사용한 분말이 별도의 방사성 폐기물로 취급되며 이것이 폐기물 양을 증가시키는 요인으로 작용한다.

[0125] 도 2에 나타난 바와 같이, 구리(Cu), 알루미늄(Al), 마그네슘(Mg), 실리콘(Si), 몰리브덴(Mo), 탄소(C)는 낮은 중성자 흡수율을 보임을 확인할 수 있다.

[0127] (3) 금속 분말의 원자량에 따른 원소별 구성비 및 방사화 거동 분석

[0128] 붕소(B), 탄소(C), 마그네슘(Mg), 알루미늄(Al), 실리콘(Si), 티타늄(Ti), 바나듐(V), 크롬(Cr), 망간(Mn), 철(Fe), 니켈(Ni), 구리(Cu), 이트륨(Y), 지르코늄(Zr), 나이오븀(Nb), 몰리브덴(Mo), 하프늄(Hf), 탄탈륨(Ta), 금(Au), 은(Ag), 백금(Pt)을 사용하여 원자량에 따른 원소별 구성비 및 방사화 거동을 분석하였으며, 그 결과를 도 3에 나타내었다.

[0130] 중성자 흡수율과 함께 원소에 따른 방사화도 고려 요인 중에 하나이다. 일반적으로 재료가 중성자를 흡수하면 원자량이 증가하여 불안정하게 되고 이에 방사선을 방출하며 붕괴하는 과정을 겪는다. 방사화의 가능성을 줄이기 위하여 각 재료에 대하여 안정한 동위원소가 기준 원자량(준제비율이 높은 원자량)보다 위에 분포하는 것이 바람직하다.

[0131] 도 3에 나타난 바와 같이 구리(Cu), 알루미늄(Al), 마그네슘(Mg), 실리콘(Si), 탄소(C)의 경우 안정한 동위원소가 기준 원자량 보다 위에 분포하였다. 몰리브덴(Mo)의 경우, 동위원소의 분포가 기준원자량보다 아래에 있으나 동위원소의 분포가 비교적 균일하여 원자량 증가에 따른 방사화의 정도가 낮을 것을 알 수 있다.

[0133] <실험예 2>

[0134] 본 발명의 효과를 실증하기 위해 다음의 시험을 실시하였다.

[0136] 핵연료 집합체를 모사하는 스테인리스 구조물인 건식 저장 용기를 도 4와 같이 제작하였으며 냉각 중 핵연료 표면의 온도를 평가하기 위하여 스테인리스봉 외면에 열전대를 설치하였다. 시험에 사용된 분말은 순수한 구리 재질로 약 1.18 mm 내지 2.36 mm의 입도를 갖는다.

[0138] 상기 건식 저장 용기를 400 °C 가열로에 장입하여 열평형이 이루어지도록 한 후, 건식 저장 용기를 꺼내어 구리 분말을 건식 저장 용기 내에 부어 충전시켜, 공기 중에서 냉각하는 경우를 실시예 1로서 시험하였으며, 상기 건식 저장 용기에 구리 분말을 미리 충전 한 채로 400 °C 가열로에 장입하여 열평형이 이루어지도록 한 후, 건식 저장 용기를 꺼내어 공기 중에서 냉각하는 경우를 실시예 2로서 시험하였다.

[0139] 구리 분말 충전 없이 건식 저장 용기를 400 °C 가열로에 장입하여 열평형이 이루어지도록 한 후, 공기 중에서

냉각하는 경우를 비교예로 실시하였다.

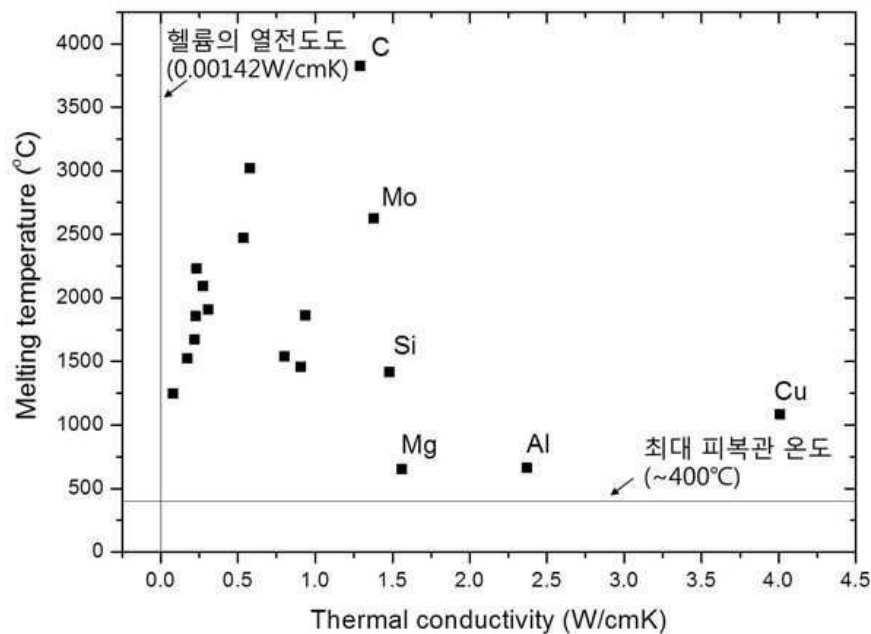
[0141] 각각의 실시예 및 비교예에 따른 스테인리스봉 외면의 냉각 곡선은 도 5에 나타내었다. 실시예 1의 경우, 구리 분말 없이 냉각하는 경우와 비교하여 시간에 따른 냉각성능이 향상하는 것을 관찰할 수 있었다.

[0142] 400 °C의 온도에서 100 °C의 온도로 냉각하는데 걸린 시간이 실시예 1의 경우 3649 초 소요되었으며, 실시예 2의 경우 2475 초가 소요되었고, 비교예의 경우 4127 초가 소요됨으로써, 비교예에 비해 최대 40% 향상된 냉각효율을 보임을 확인할 수 있다.

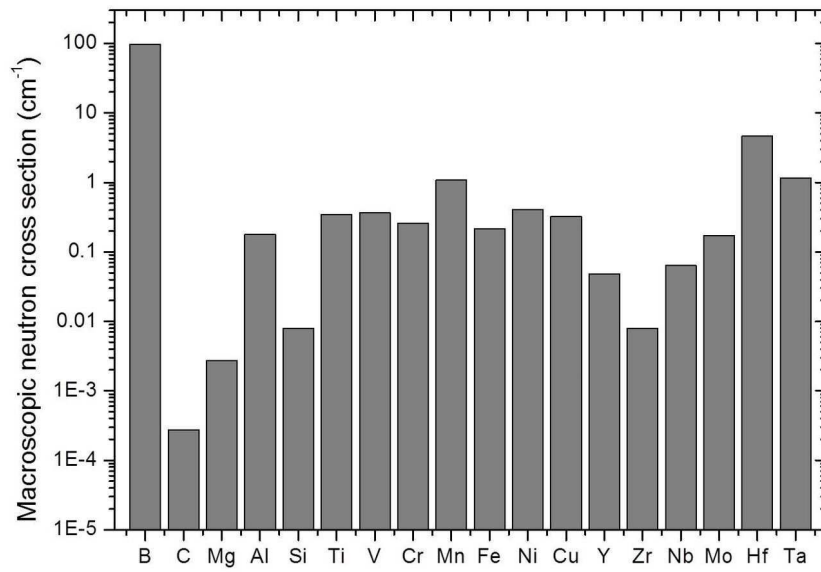
[0144] 본 발명은 상술한 실시 형태 및 첨부된 도면에 의해 한정되는 것이 아니며 첨부된 청구범위에 의해 한정하고자 한다. 따라서, 청구범위에 기재된 본 발명의 기술적 사상을 벗어나지 않는 범위 내에서 당 기술분야의 통상의 지식을 가진 자에 의해 다양한 형태의 치환, 변형 및 변경이 가능할 것이며, 이 또한 본 발명의 범위에 속한다고 할 것이다.

도면

도면1



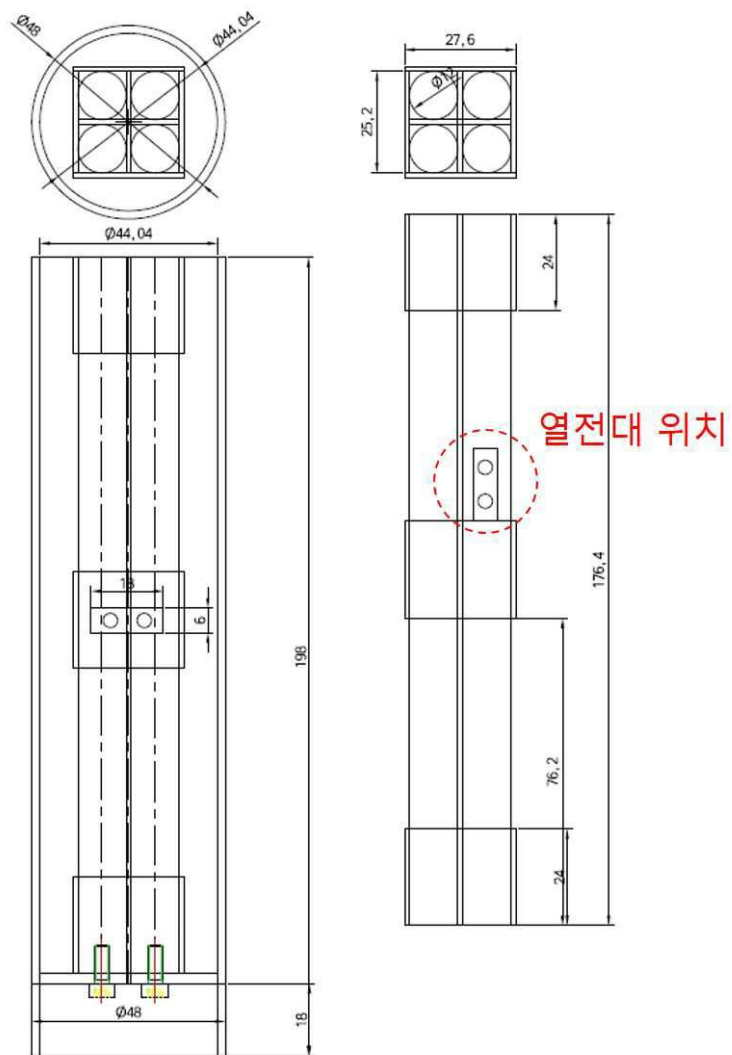
도면2



도면3

원소	원자량 변화 (원소별 존재비율이 높은 원자량이 0에 위치)						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
<u>B</u>			19.9%	80.1%	β-붕괴 (20.2msec)		
<u>C</u>				98.9%	1.07%	β-붕괴 (5.71e3년)	
<u>Mg</u>				78.9%	10%	11.1%	β-붕괴 (9.5분)
<u>Al</u>				100.0%	β-붕괴 (2.24분)		
<u>Si</u>				92.2%	4.7%	3.1%	β-붕괴 (2.62시간)
Ti		8.3%	7.4%	73.7%	5.4%	5.2%	β-붕괴 (5.76분)
V				99.7%	β-붕괴 (3.7분)		
Cr		4.3%	전자포획	83.7%	9.5%	2.4%	β-붕괴 (3.49일)
Mn				100.0%	β-붕괴 (2.57시간)		
Fe		5.8%	전자포획	91.7%	2.1%	0.3%	β-붕괴 (44.5일)
Ni				68.1%	β+붕괴 (1.01e5년)	26.2%	1.1%
<u>Cu</u>				69.2%	β-,+붕괴 (12.7시간)	30.8%	β-붕괴 (5.1분)
Y				100.0%	β-붕괴 (2.66일)		
Zr				51.5%	11.2%	17.2%	β-붕괴 (1.53e6년)
Nb				100.0%	β-붕괴 (2.03e4년)		
Mo	15.9%	16.7%	9.6%	24.1%	β-붕괴 (2.7일)		
Hf	18.6%	27.3%	18.6%	35.1%	β-붕괴 (42.4일)		
Ta				100.0%	α,β-붕괴 (114.4일)		

도면4



도면5

