



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2010년06월11일
(11) 등록번호 10-0962277
(24) 등록일자 2010년06월01일

(51) Int. Cl.

G21C 3/30 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2008-0127203

(22) 출원일자 2008년12월15일

심사청구일자 2008년12월15일

(56) 선행기술조사문헌

KR100332712 B1

KR100511560 B1

KR1019990075610 A

(73) 특허권자

한국원자력연구원

대전 유성구 덕진동 150-1

(72) 발명자

박광준

대전시 유성구 원촌동 싸이언스빌 3-104

주준식

대전시 유성구 용산동 우림필유아파트 1107동 1303호

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

신운철

전체 청구항 수 : 총 8 항

심사관 : 김용훈

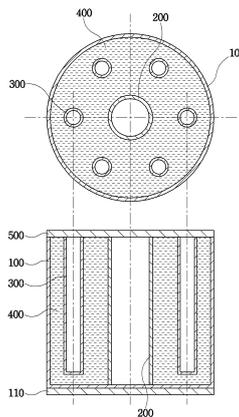
(54) 감마선 영향을 완화한 사용후핵연료 측정용 중성자 계수장치

(57) 요약

본 발명은 감마선 영향을 완화한 사용후핵연료 측정용 중성자 계수장치에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 고속 중성자를 감속시켜 낮은 에너지의 중성자로 변화시키는 중성자계수기의 중성자 감속재에 있어서, 비교적 우수한 감속능을 가지며, 핵분열성물질로부터 방출되는 감마선에 의한 영향을 감소시키거나 또는 감마선의 영향을 받더라도 교체가 용이한 순수(純水, pure water)를 중성자 감속재로 사용하여 감마선의 영향을 완화시킴으로써 다량의 핵분열성물질을 포함하고 있는 사용후핵연료를 보다 효율적으로 측정할 수 있는 감마선 영향을 완화한 사용후핵연료 측정용 중성자 계수장치에 관한 것이다.

본 발명에 따른 감마선 영향을 완화한 사용후핵연료 측정용 중성자 계수장치는, 상부에 개구부가 형성된 원통형의 몸체와; 상기 몸체 내부의 중앙부에 구비되어 사용후핵연료 시편을 수용하는 시편 홀더와; 상기 시편 홀더의 외경과 상기 몸체 내경 사이에 상기 시편 홀더를 가운데 두고 일정한 간격으로 구비되어, 내부에 상기 사용후핵연료로부터 방출되는 중성자량을 계수하는 중성자 계수기를 장착하기 위한 중성자 계수기 홀더와; 상기 중성자 계수기 홀더 내부에 장착되는 중성자 계수기와; 상기 몸체 내부에 충전되어 상기 사용후핵연료로부터 방출되는 중성자를 감속시키기 위한 중성자 감속재로 사용되는 순수(純水, pure water); 및 상기 몸체 상부에 구비되어 상기 사용후핵연료로부터 방출되는 중성자를 차폐하는 덮개;를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 한다.

대표도 - 도2



(72) 발명자

강희영

대전시 유성구 신성동 한울APT 109-401

신희성

대전시 서구 삼천동 국화한신아파트 602동 902호

김호동

대전시 유성구 전민동 464-1 엑스포아파트 109동
1601호

특허청구의 범위

청구항 1

사용후핵연료로부터 방출되는 중성자량을 계측하기 위한 중성자 계수장치에 있어서,
 상부에 개구부가 형성된 원통형의 몸체와;
 상기 몸체 내부의 중앙부에 구비되어 사용후핵연료 시편을 수용하는 시편 홀더와;
 상기 시편 홀더의 외경과 상기 몸체 내경 사이에 상기 시편 홀더를 가운데 두고 일정한 간격으로 구비되어, 내부에 상기 사용후핵연료로부터 방출되는 중성자량을 계측하는 중성자 계수기를 장착하기 위한 중성자 계수기 홀더와;
 상기 중성자 계수기 홀더 내부에 장착되는 중성자 계수기와;
 상기 몸체 내부에 충전되어 상기 사용후핵연료로부터 방출되는 중성자를 감속시키기 위한 중성자 감속제로 사용되는 순수(純水, pure water); 및
 상기 몸체 상부에 구비되어 상기 사용후핵연료로부터 방출되는 중성자를 차폐하는 덮개;
 를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 하는 감마선 영향을 완화한 사용후핵연료 측정용 중성자 계수장치.

청구항 2

제 1 항에 있어서,
 상기 몸체는,
 스테인레스 스틸로 구성된 것을 특징으로 하는 감마선 영향을 완화한 사용후핵연료 측정용 중성자 계수장치.

청구항 3

제 1 항에 있어서,
 상기 시편 홀더는,
 알루미늄으로 구성된 것을 특징으로 하는 감마선 영향을 완화한 사용후핵연료 측정용 중성자 계수장치.

청구항 4

제 1 항에 있어서,
 상기 중성자 계수기 홀더는,
 알루미늄으로 구성된 것을 특징으로 하는 감마선 영향을 완화한 사용후핵연료 측정용 중성자 계수장치.

청구항 5

제 1 항에 있어서,
 상기 몸체에는,
 상기 순수를 순환시키기 위한 순환시스템이 연결되는 것을 특징으로 하는 감마선 영향을 완화한 사용후핵연료 측정용 중성자 계수장치.

청구항 6

제 5 항에 있어서,
 상기 순환시스템은,
 상기 몸체 내부에 상기 순수를 공급하기 위한 공급관과;
 상기 몸체 내부에 공급된 상기 순수를 배출하기 위한 배수관과;

상기 몸체 내부에 공급된 순수를 순환시키기 위한 순환배관과;
 상기 순환배관 상에 연결되어 상기 몸체 내부에 공급된 순수를 순환시키기 위한 순환 펌프; 및
 상기 공급관, 배수관 및 순환배관에 각각 구비되어 상기 순수의 이동 경로를 조절하기 위한 다수 개의 밸브;
 를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 하는 감마선 영향을 완화한 사용후핵연료 측정용 중성자 계수장치.

청구항 7

제 6 항에 있어서,
 상기 순환배관에는,
 상기 몸체 내부에 생성되는 오염물질을 제거하기 위한 시약을 수용하는 시약 탱크가 연결되어 있으며,
 상기 시약 탱크와 상기 순환배관 사이에는 시약의 공급을 조절하기 위한 밸브가 구비되어 있는 것을 특징으로 하는 감마선 영향을 완화한 사용후핵연료 측정용 중성자 계수장치.

청구항 8

제 7 항에 있어서,
 상기 시약은,
 이끼제거제인 것을 특징으로 하는 감마선 영향을 완화한 사용후핵연료 측정용 중성자 계수장치.

명세서

발명의 상세한 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 감마선 영향을 완화한 사용후핵연료 측정용 중성자 계수장치에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 고속 중성자를 감속시켜 낮은 에너지의 중성자로 변화시키는 중성자계수기의 중성자 감속제에 있어서, 비교적 우수한 감속능을 가지며, 핵분열성물질로부터 방출되는 감마선에 의한 영향을 감소시키거나 또는 감마선의 영향을 받더라도 교체가 용이한 순수(純水, pure water)를 중성자 감속제로 사용하여 감마선의 영향을 완화시킴으로써 다량의 핵분열성물질을 포함하고 있는 사용후핵연료를 보다 효율적으로 측정할 수 있는 감마선 영향을 완화한 사용후핵연료 측정용 중성자 계수장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 통상적으로 핵연료는 우라늄 분말 소결체를 금속제의 피복관(cladding)에 장입한 후 양단을 밀봉한 수백 개의 연료봉으로 구성되며, 원자로 내에서 핵분열에 의해 발생하는 에너지를 냉각수에 전달하여 증기를 발생시켜 터빈을 구동시키는 열원으로 사용된다.

[0003] 이렇게 원자로에서 연소된 후 인출되는 핵연료를 사용후핵연료라 이르며, 사용후핵연료는 원자력법 제 2조 제18호에서는 사용후핵연료를 방사성폐기물의 일부로 정의하고 있다. 그러나, 사용후핵연료에는 연소되지 않고 남아 있는 대부분의 우라늄(235)과 핵분열과정에서 새롭게 생성된 플루토늄(Pu^{239})이 함유되어 있어, 이를 재처리하여 재활용하는 것이 에너지 자원의 효율적인 이용 측면에서나 방사성폐기물의 안전관리 측면에서 매우 중요하다.

[0004] 따라서, 재처리는 유용한 핵분열성물질과 핵분열물질을 회수하고 핵분열생성물을 제거하는데 있고, 이를 위해서는 사용후핵연료 내에 남아 있는 유용한 핵분열성물질과 핵분열물질의 양을 정확하게 측정하는 과정이 선행되어야 한다.

[0005] 특히 사용후핵연료에 포함된 핵분열성물질에 대해서는 중성자량을 계측함으로써 그 양을 측정하고 있는데, 이를 위해서는 고효율의 중성자 계수장치가 요구된다.

[0006] 도 1은 종래기술에 따른 중성자 계수장치의 구성을 보여주는 도면이다.

- [0007] 도 1을 참조하면, 종래기술에 따른 중성자 계수장치는, 상부에 개구부가 형성된 몸체(10)와, 몸체(10) 중앙부에 구비되어 내부에 사용후핵연료 시편을 장착하기 위한 시편 홀더(20)와, 시편 홀더(20) 외부에 소정 간격 이격되어 구비되는 차폐체 홀더(30)와, 시편 홀더(20)와 차폐체 홀더(30) 사이에 구비되어 시편 홀더(20)에 장착되는 사용후핵연료로부터 방출되는 감마선을 차폐하기 위한 차폐체(40)와, 차폐체 홀더(30) 외부에 일정한 간격을 가지며 구비되는 다수 개의 중성자 계수기 홀더(50)와, 다수 개의 중성자 계수기 홀더(50) 내에 장착되어 사용후핵연료로부터 방출되는 중성자량을 계측하는 중성자 계수기(미도시)와, 중성자 계수기 홀더(50)를 제외한 몸체(10) 내부에 충전되는 중성자 감속재(60) 및 몸체(10) 상부 및 하부에 각각 구비되는 덮개(70)와 지지대(12)를 포함하여 구성된다.
- [0008] 이러한 구성으로 이루어지는 중성자 계수장치는 보다 정확한 중성자량의 계측을 위해 중성자를 감속시키기 위한 중성자 감속재(60)가 사용되고 있으며, 주로 사용되고 있는 중성자 감속재(60)는 고밀도 폴리에틸렌(High Density PolyEthylene : HDPE)가 사용되고 있다.
- [0009] 그러나 사용후핵연료에서는 중성자 이외에도 다양한 종류의 방사선이 방출되고 있으며, 그 중에서도 감마선은 고밀도 폴리에틸렌의 성능을 열화시키기 때문에 납과 같은 차폐체(40)를 개재하여 감마선을 차폐하고 있다. 그럼에도 불구하고 미량의 감마선이 차폐체(40)를 투과하여 고밀도 폴리에틸렌을 피폭시키고, 이러한 현상이 지속되다보면 결과적으로는 고밀도 폴리에틸렌이 열화되어 중성자 계수장치의 기능을 저하시킨다는 문제점을 유발하게 된다.
- [0010] 다시 말해서, 고밀도 폴리에틸렌은 폴리머 재질로서 감마선에 피폭되는 경우 반응도가 높은 라디칼(radical)을 생성하게 되고, 이러한 라디칼은 공기 중의 산소와 반응하여 방사선 유도 산화(radiation-induced oxidation)를 일으켜 시간의 경과에 따라 방사선유도 열화(radiation-induced degradation)현상을 유발하게 된다.
- [0011] 이에 따라 고밀도 폴리에틸렌은 분자 구조가 바뀌거나 또는 일부 원소들이 생성 또는 증발하게 되어, 중성자의 에너지를 낮추는 감속능이 저하되어 측정값에 대한 신뢰성을 저하시키는 문제점이 있다.
- [0012] 또한, 고밀도 폴리에틸렌은 중성자 계수장치 내부에 고체 상태로 존재하기 때문에 장치의 구조적 특성상 열화된 고밀도 폴리에틸렌을 교체하기가 거의 불가능하고, 방사능 준위가 높은 핫셀(hot cell) 내부에 설치되는 장소의 특성상 원격으로 교체하는 것은 더욱 불가능하다는 문제점이 있다.

발명의 내용

해결 하고자하는 과제

- [0013] 본 발명은 상기한 종래기술에 따른 문제점을 해결하기 위하여, 고속의 중성자를 감속시켜 낮은 에너지의 중성자로 변화시키는 중성자 계수장치의 중성자 감속재에 있어서, 비교적 우수한 감속능을 가지며, 핵분열성물질로부터 방출되는 감마선에 의한 영향을 감소시키거나 또는 감마선의 영향을 받더라도 교체가 용이한 순수를 중성자 감속재로 사용함으로써 핵분열성물질과 핵분열물질로 구성된 사용후핵연료를 보다 효율적으로 측정할 수 있는 감마선 영향을 완화한 사용후핵연료 측정용 중성자 계수장치를 제공하는데 그 목적이 있다.

과제 해결수단

- [0014] 본 발명에 따른 감마선 영향을 완화한 사용후핵연료 측정용 중성자 계수장치는, 상부에 개구부가 형성된 원통형의 몸체와; 상기 몸체 내부의 중앙부에 구비되어 사용후핵연료 시편을 수용하는 시편 홀더와; 상기 시편 홀더의 외경과 상기 몸체 내경 사이에 상기 시편 홀더를 가운데 두고 일정한 간격으로 구비되어, 내부에 상기 사용후핵연료로부터 방출되는 중성자량을 계측하는 중성자 계수기를 장착하기 위한 중성자 계수기 홀더와; 상기 중성자 계수기 홀더 내부에 장착되는 중성자 계수기와; 상기 몸체 내부에 충전되어 상기 사용후핵연료로부터 방출되는 중성자를 감속시키기 위한 중성자 감속재로 사용되는 순수(純水, pure water); 및 상기 몸체 상부에 구비되어 상기 사용후핵연료로부터 방출되는 중성자를 차폐하는 덮개;를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 한다.

효 과

- [0015] 본 발명에 따른 감마선 영향완화 사용후핵연료 측정용 중성자 계수장치는, 고속중성자를 감속시켜 낮은 에너지의 중성자로 변화시키는 중성자 감속재로서 순수를 사용함으로써, 통상의 중성자 감속재인 폴리에틸렌의 감속능과 비교적 유사한 감속능을 가지면서 핵분열 생성물로부터 방출되는 감마선의 영향을 적게 받음으로써 사용후핵연료를 보다 정확하고 안정적으로 측정할 수 있는 효과가 있다.

[0016] 또한, 감마선의 영향으로부터 순수가 오염되더라도 순수의 오염을 방지하는 시약을 순수와 함께 중성자계수기 외부로 순환시키는 순환시스템을 통해 오염물을 제거함으로써 핫셀 외부에서 원격으로 중성자 감속재를 용이하게 교체할 수 있는 효과도 있다.

발명의 실시를 위한 구체적인 내용

- [0017] 이하, 본 발명의 바람직한 실시예를 첨부 도면에 의거하여 상세하게 설명하기로 한다.
- [0018] 도 2는 본 발명에 따른 감마선 영향을 완화한 사용후핵연료 측정용 중성자 계수기의 구성을 보여주는 도면이고, 도 3은 본 발명의 일실시예에 따른 감마선 영향을 완화한 사용후핵연료 측정용 중성자 계수기의 구성을 보여주는 도면이다.
- [0019] 도 2를 참조하면, 본 발명에 따른 감마선 영향을 완화한 사용후핵연료 측정용 중성자 계수장치는, 상부에 개구부가 형성된 원통형의 몸체(100)와, 몸체(100) 내부의 중앙부에 구비되어 사용후핵연료 시편을 수용하는 시편 홀더(200)와, 시편 홀더(200)의 외경과 몸체(100) 내경 사이에 시편 홀더(200)를 가운데 두고 일정한 간격으로 구비되어, 내부에 사용후핵연료로부터 방출되는 중성자량을 계수하는 중성자 계수기를 장착하기 위한 중성자 계수기 홀더(300)와, 중성자 계수기 홀더(300) 내부에 장착되는 중성자 계수기(미도시)와, 몸체(100) 내부에 충전되어 사용후핵연료로부터 방출되는 중성자를 감속시키기 위한 중성자 감속재(400) 및 몸체(100) 상부에 구비되어 사용후핵연료로부터 방출되는 중성자를 차폐하는 덮개(500)를 포함하여 구성된다.
- [0020] 몸체(100)는 원통형상으로 상단에 개구부가 형성되어, 몸체(100) 내부에 구비되는 시편 홀더(200) 및 중성자 계수기 홀더(300)로 사용후핵연료 및 중성자 계수기를 탈착 또는 장착할 수 있도록 구성된다.
- [0021] 몸체(100)의 상부 및 하부에는 덮개(500)와 지지대(110)가 각각 구비될 수 있으며, 몸체(100), 덮개(500) 및 지지대(110)는 통상적으로 스테인레스 스틸 재질로 형성된다.
- [0022] 시편 홀더(200)는 몸체(100) 내부의 중앙부에 위치되어, 내부에는 사용후핵연료 시편을 장착할 수 있도록 상부에 개구부가 형성된 중공의 원통형으로 이루어지며, 사용후핵연료로부터 방출되는 중성자의 투과율이 좋은 알루미늄(Al)을 이용하는 것이 바람직하다.
- [0023] 중성자 계수기 홀더(300)는 시편 홀더(200) 외부에 시편 홀더(200)를 가운데 두고 일정한 간격으로 다수 개가 구비되며, 시편 홀더(200)에 장착되는 사용후핵연료로부터 방출되는 중성자를 투과시켜 효율적으로 계측할 수 있도록 알루미늄을 이용하여 형성하는 것이 좋다.
- [0024] 시편 홀더(200)와 중성자 계수기 홀더(300)를 제외한 몸체(100) 내부에는 사용후핵연료로부터 방출되는 중성자를 감속시키기 위한 중성자 감속재(400)가 충전되는데, 중성자 감속재(400)는 중성자의 에너지를 낮추는 감속능이 우수하며 사용후핵연료로부터 방출되는 감마선을 차폐하는 성능이 우수한 순수(純水, pure water)가 사용된다. 중성자 감속재(600)로 사용되는 순수는 고밀도 폴리에틸렌에 상응하는 감마선 차폐 성능을 가지며, 감마선 피폭에 의해 라디칼 생성물이 적어 비교적 안정된 상태를 유지하기 때문에 중성자 감속능의 저하를 방지할 수 있다. 이러한 구성을 통해 종래에 사용후핵연료로부터 방출되는 감마선을 차폐하기 위한 차폐체의 구성을 제거할 수 있다.
- [0025] 또한, 순수는 액체 상태로서 유동성을 갖기 때문에 감마선 피폭에 의해 그 특성이 변하더라도 중성자 계수장치의 구조적 특성상 그리고 방사능 준위가 높은 설치 장소의 특성상 원격 교체가 가능하며, 이러한 구성은 다음과 같다.
- [0026] 도 3을 참조하면, 방사능 준위가 높은 핫셀 내부에 설치되는 중성자 계수장치에는, 몸체(100) 내부에 충전되는 중성자 감속재(600)의 공급, 배출 및 순환을 제어하는 순환시스템(700)이 연결되어 있다.
- [0027] 순환시스템(700)은 몸체(100) 내부에 중성자 감속재(600)를 공급하기 위한 공급관(720)과, 몸체(100) 내부에 공급된 중성자 감속재(600)를 배출하기 위한 배수관(740)과, 몸체(100) 내부에 충전된 중성자 감속재(600)를 순환시키기 위한 순환배관(730)과, 순환배관(730) 상에 연결되어 몸체(100) 내부에 공급된 중성자 감속재(600)를 순환시키기 위한 순환 펌프(750) 및 공급관(720), 배수관(740) 및 순환배관(730)에 각각 구비되어 중성자 감속재(600)의 이동 경로를 조절하기 위한 제1밸브(721), 제2밸브(741) 및 제3밸브(731)를 포함하여 구성된다. 또한, 순환시스템(700)에는 몸체(100) 내부에 충전되어 있는 중성자 감속재(600)에 생성되는 오염물질을 제거하기 위한 시약, 예를 들어 이끼제거제를 수용하는 시약 탱크(710)가 순환배관(740) 상에 제4밸브(711)를 개재하여 구비될 수도 있다.

[0028] 중성자 감속재(600)는 제1밸브(721)와 제2밸브(741)의 개폐 조절을 통해 몸체(100) 내부로 주입 또는 배출되고, 순환 펌프(750)의 제어를 통해 순환배관(730)을 따라 순환하게 된다. 여기에서 중성자 감속재(600)를 순환시키는 이유는 순수로 이루어진 중성자 감속재(600)가 고온의 몸체(100) 내부에 정지된 상태로 있게 되면 이끼 등의 오염물질이 생성되기 때문에 순환 펌프(750)를 이용하여 중성자 감속재(600)를 순환시킴으로써 이끼 등의 오염물질이 발생하는 속도를 늦추기 위함이다. 또한, 시료 탱크(710)로부터 이끼제거제 등의 시료를 순환배관(730)을 통해 몸체(100) 내부로 주입한 후 중성자 감속재(600)를 순환시킴으로써 몸체(600) 내부에 이끼 등의 오염물질이 생성되는 것을 방지함과 동시에 제거할 수 있다. 더불어 중성자 계측정치를 온도변화가 적은 장소에 설치하거나, 또는 중성자 계측장치의 온도를 일정하게 조절할 수 있는 항온장치를 이용함으로써 온도 변화에 따른 중성자 감속재(600)의 밀도 변화에 의해 중성자 감속능의 저하를 방지할 수도 있다.

[0029] 이러한 구성을 통해 본 발명에 따른 감마선 영향을 완화한 사용후핵연료 측정용 중성자 계수장치는, 감마선 피폭에 의해 중성자 감속재(600)가 오염되더라도 핫셀 외부에서 원격으로 중성자 감속재(600)를 용이하게 교체할 수 있음은 물론 몸체(100) 내부에 생성되는 오염물질을 제거할 수 있어 장치의 유지보수를 용이하게 하고, 내구성을 향상시킬 수 있는 이점이 있다.

[0030] 이하에서는 상술한 바와 같은 본 발명에 따른 중성자 계수장치의 성능을 실험한 결과에 대해서 설명한다.

[0031] 본 실험에 적용된 실시예 및 비교예에서는 직경 30cm이고 높이가 20cm인 몸체와 He-3 검출기 6개를 구비하는 중성자 계측장치를 이용하여 중성자 측정효율, 방사선 영향의 측면에 대해서 실험하였다. 이때, 실시예에서는 중성자 감속재로서 순수를 사용하였고, 비교예에서는 중성자 감속재로서 고밀도 폴리에틸렌을 사용하였다.

표 1

	중성자 측정효율	방사선 영향
실시예	10.3%	중성자 감속재 열화안됨
비교예	10.7%	중성자 감속재 열화됨

[0033] 먼저, 중성자 측정효율 측면을 비교해보면, [표 1]에서 보여지고 있는 바와 같이 몬테카를로 계산 코드인 NCNP-X 코드를 이용하여 계산된 중성자 측정효율은, 실시예에서 10.3%로 나타나고 비교예에서는 10.7%로 나타났다. 이는 고밀도 폴리에틸렌이 순수보다 중성자 감속재로서 우수한 특성을 나타내고 있음을 보여주고 있으나, 그 차이가 0.4% 정도로 매우 적기 때문에 중성자 감속재로서 순수한 물을 사용하더라도 중성자 측정에 큰 문제가 없다는 것을 의미하고 있음을 알 수 있다.

[0034] 또한, 중성자 감속능은 감속재의 구성에 따라 달라지게 되며, 단일 원소인 경우, [수학식 1]에서 보여지는 바와 같이 원자번호가 낮은 원소일수록 중성자 감속능이 커지게 된다.

수학식 1

$$\text{중성자 감속능} = \xi \Sigma_s = \left\{ \left(1 - \frac{(A-1)^2}{2A} \right) \ln \frac{(A+1)}{(A-1)} \right\} \Sigma_s$$

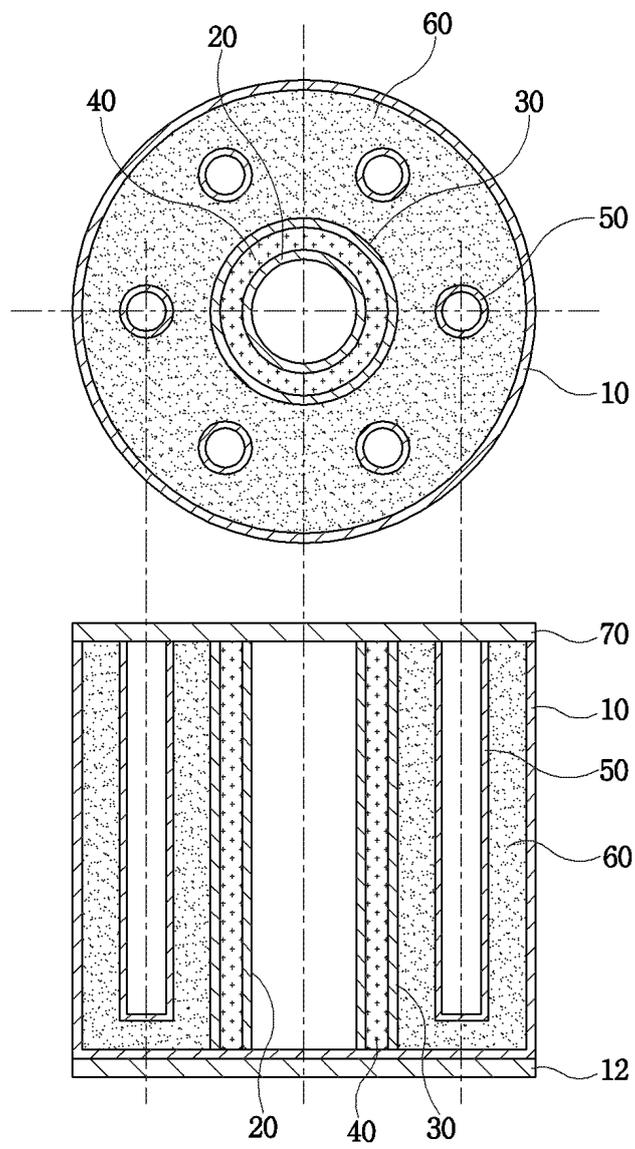
[0035] 여기서, ξ 는 중성자의 산란충돌 당 에너지 감소 Σ_s 는 거시적 산란 단면적, A는 질량수를 각각 나타낸다.

[0037] 고밀도 폴리에틸렌의 경우, $-CH_2-$ 의 분자구조가 연속적으로 연결된 구조를 가지며, 순수한 물은 H_2O 분자구조를 갖는다.

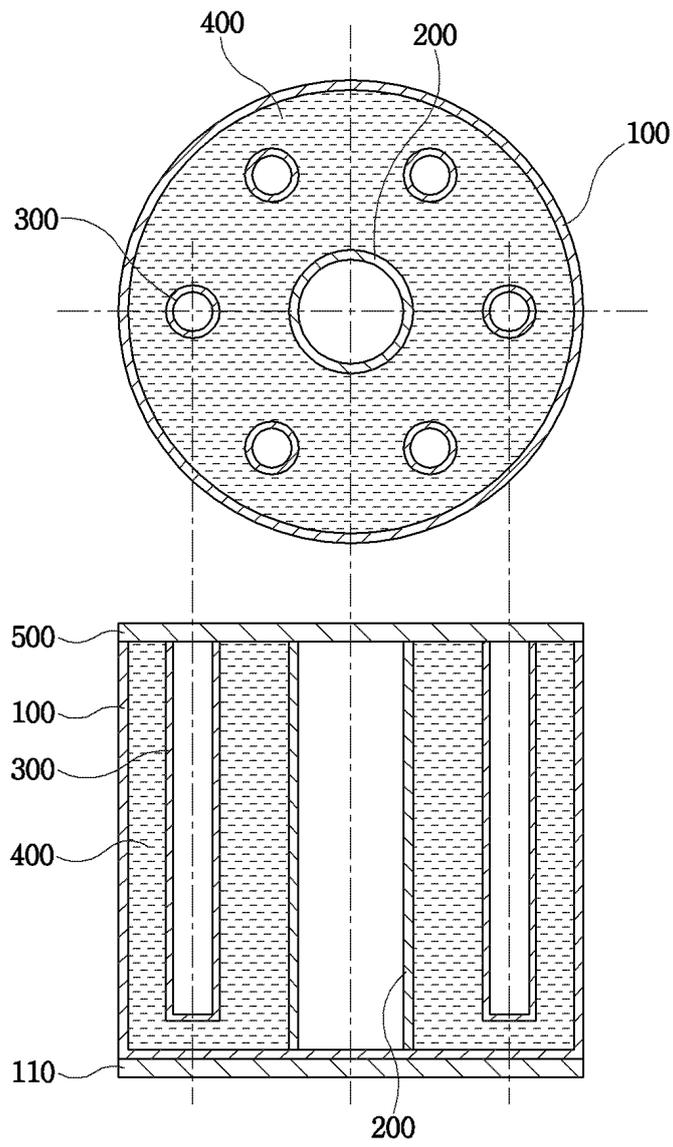
[0038] 이와 같이, 고밀도 폴리에틸렌과 순수한 물의 각 구조의 차이점은 탄소(C)와 산소(O)이기 때문에 공통으로 갖고 있는 수소(H_2)를 제외하고, 나머지탄소(C)와 산소(O)를 비교할 경우, 탄소(C)가 산소(O)보다 질량수가 약간 작아 [수학식 1]에 의해서 탄소(C)의 경우가 산소(O)에 비해 상대적으로 조금 큰 값을 갖게 된다. 그러나 그 차이가 매우 미세하기 때문에, 고밀도 폴리에틸렌 대신 순수를 중성자 감속재로 사용하더라도 중성자 감속능은 크게

도면

도면1



도면2



도면3

