



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0088367
(43) 공개일자 2024년06월20일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G21C 17/06 (2006.01) G01T 3/00 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G21C 17/063 (2013.01)
G01T 3/00 (2021.01)
(21) 출원번호 10-2022-0174010
(22) 출원일자 2022년12월13일
심사청구일자 2022년12월13일

(71) 출원인
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
(주) 코네스코퍼레이션
대전광역시 유성구 계룡로 55,414호,415호,416호 (봉명동, 유성자이)
(72) 발명자
박광현
경기도 용인시 처인구 모현읍 자작나무로 26-16, 503동
성진현
경기도 시흥시 군자로335번길 11, 106동 1201호(거모동, 동보아파트)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
리엔목특허법인

전체 청구항 수 : 총 16 항

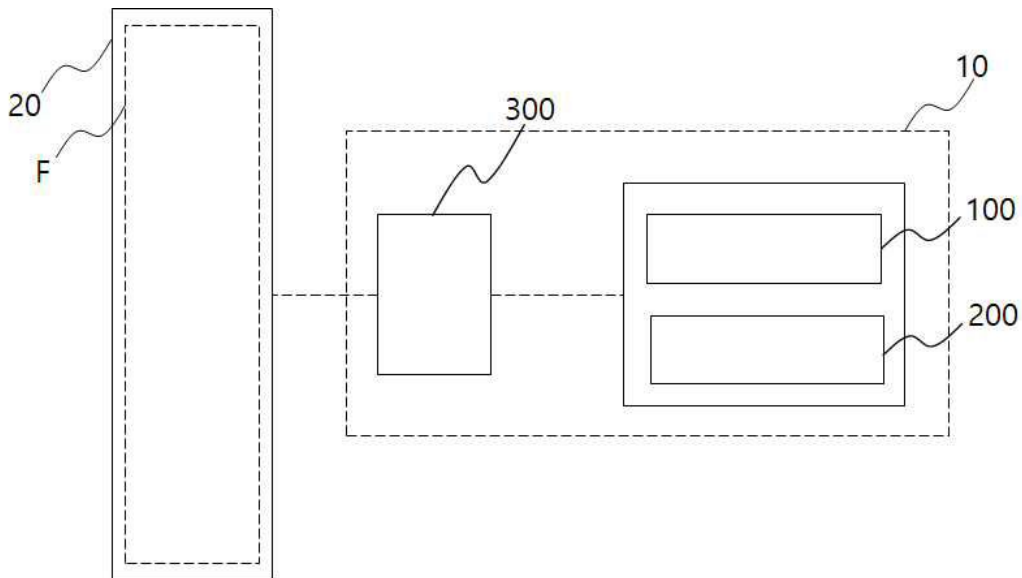
(54) 발명의 명칭 총 중성자 발생률을 이용한 사용후핵연료의 연소도 측정 방법 및 장치

(57) 요약

본 발명은 연소도 측정 방법 및 연소도 측정 장치에 관한 발명이다.

본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 방법은 연소도 측정 장치가 사용후핵연료의 초기 농축도, 냉각 기간 및 총 중성자발생률의 함수로 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 단계를 포함한다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

Y02E 30/30 (2020.08)

(72) 발명자

하승일

경기도 고양시 일산서구 일산로 612, 605동 201호
(일산동, 후곡마을6단지아파트)

차소희

경기도 수원시 영통구 반달로 84, 303호(영통동)

김문오

경기도 성남시 수정구 모란로 65, 104동 603호(수
진동, 삼부아파트)

고재훈

세종특별자치시 남세종로 441, 502동 1001호(보람
동, 호려울마을5단지)

이운장

서울특별시 송파구 송파대로 567, 504동 407호(잠
실동, 잠실주공아파트)

송양수

경기도 용인시 수지구 신수로683번길 19, 102동
1901호(풍덕천동, 래미안수지이스트파크)

박호진

권선구 삼천병마로1566번길 17, 110동 2006호(오목
천동)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1415182145
과제번호	20222B10100060
부처명	산업통상자원부
과제관리(전문)기관명	한국에너지기술평가원
연구사업명	원전안전운영을위한핵심소재부품장비국산화기술개발(R&D)
연구과제명	현장형 사용후핵연료 연소도 측정설비 개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	(주)오리온이엔씨
연구기간	2022.04.01 ~ 2027.03.30

명세서

청구범위

청구항 1

연소도 측정 장치가 사용후핵연료의 초기 농축도, 냉각 기간 및 총 중성자발생률의 함수로 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 단계를 포함하는, 연소도 측정 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 단계는 이하의 식 (1)로 사용후핵연료의 연소도를 측정하는, 연소도 측정 방법.

$$BU = a(S_N)^b (IE)^c e^{dt} \text{ --- 식 (1)}$$

여기서 BU는 사용후핵연료의 연소도(GWD/MTU)이고, S_N 은 총 중성자발생률(n/s/MTU)이고, IE는 초기 농축도(%)이고, t는 냉각 기간(년)이다.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 식 (1)에서, a는 0.7 이상 1 이하, b는 0.05 이상 0.1 이하, c는 0.3 이상 0.6 이하, d는 0.005 이상 0.01 이하인, 연소도 측정 방법.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 식 (1)에서, a = 0.883, b = 0.0788, c = 0.4648, d = 0.008236인, 연소도 측정 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 단계 전에, 상기 연소도 측정 장치가 사용후핵연료의 총 중성자 발생률을 측정하는 단계를 더 포함하는, 연소도 측정 방법.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 사용후핵연료의 총 중성자 발생률을 측정하는 단계는 상기 연소도 측정 장치에 포함된 중성자 계측 모듈이 상기 사용후핵연료에 인접한 위치에서 상기 사용후핵연료의 총 중성자 발생률을 측정하는, 연소도 측정 방법.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 단계는 전체 냉각 기간 중 Cm-244가 주요 중성자 발생 핵종인 냉각 기간에 대해 측정하는, 연소도 측정 방법.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 식 (1)에서, $5 \leq t \leq 60$ 인, 연소도 측정 방법.

청구항 9

연산 모듈 및 사용후핵연료의 초기 농축도, 냉각 기간을 포함하는 연소 이력에 관한 정보를 저장하는 저장 모듈을 포함하고,

상기 연산 모듈이 사용후핵연료의 초기 농축도, 냉각 기간 및 총 중성자발생률의 함수로 사용후핵연료의 연소도를 측정하는, 연소도 측정 장치.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 연산 모듈은 이하의 식 (1)로 사용후핵연료의 연소도를 측정하는, 연소도 측정 장치.

$$BU = a(S_N)^b (IE)^c e^{dt} \text{ --- 식 (1)}$$

여기서 BU는 사용후핵연료의 연소도(GWD/MTU)이고, S_N 은 총 중성자발생률(n/s/MTU)이고, IE는 초기 농축도(%)이고, t는 냉각 기간(년)이다.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 식 (1)에서, a는 0.7 이상 1 이하, b는 0.05 이상 0.1 이하, c는 0.3 이상 0.6 이하, d는 0.005 이상 0.01 이하인, 연소도 측정 장치.

청구항 12

제11항에 있어서,

상기 식 (1)에서, $a = 0.883$, $b = 0.0788$, $c = 0.4648$, $d = 0.008236$ 인, 연소도 측정 장치.

청구항 13

제9항에 있어서,

상기 연소도 측정 장치는 상기 사용후핵연료의 총 중성자 발생률을 측정하는 중성자 계측 모듈을 더 포함하는, 연소도 측정 장치.

청구항 14

제13항에 있어서,

상기 중성자 계측 모듈은 상기 사용후핵연료에 인접한 위치에서 상기 사용후핵연료의 총 중성자 발생률을 측정하는, 연소도 측정 방법.

청구항 15

제9항에 있어서,

상기 연산 모듈은 전체 냉각 기간 중 Cm-244가 주요 중성자 발생 핵종인 냉각 기간에 대해 측정하는, 연소도 측정 장치.

청구항 16

제15항에 있어서,

상기 식 (1)에서, $5 \leq t \leq 60$ 인, 연소도 측정 장치.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 사용후핵연료의 연소도를 측정하기 위한 방법 및 장치에 관한 발명으로, 보다 상세하게는 총 중성자 발생률을 이용한 사용후핵연료의 연소도 측정 방법 및 장치에 관한 발명이다.

배경 기술

[0002] 사용후핵연료의 연소도(burn-up)는 저장 용기와 수송 용기를 운영할 때 안전성을 확보하기 위해 정확히 알고 있어야 하며 또한 이를 검증할 방안이 필요하다.

[0003] 현재 사용후핵연료의 연소도는 핵연료의 제조사와 핵연료를 이용한 발전회사에서 핵연료 연소 이력을 근거로 추정하고 있다. 그러나 사용후핵연료를 발전소 내에서 이동하거나 발전소 외부로 이동할 때 또는 저장조 외부로 이동시킨 후 다시 저장하는 등의 작업을 할 때 안전성을 위해 추정된 연소도를 검증할 필요가 있다.

[0004] 종래에는 사용후핵연료에 남아있는 액티나이드(actinide)와 핵분열생성물에서 발생하는 중성자 및 감마선을 측정하여 사용후핵연료의 연소도를 측정하고 있다. 감마선 측정은 Cs-137, Cs-134, Eu-154 등 주요 감마선원의 감마선을 측정하여 핵분열생성물의 생성량을 추정해 연소도를 측정하고 있다. 반면 중성자 측정을 이용한 연소도 측정은 액티나이드 생성량과 연관되어 있어 감마선 측정에 의한 연소도 추정 방식에 비해 복잡하며, 정확한 추정 방식이 공개되어 있지 않다.

[0005] 따라서 사용후핵연료의 연소도를 측정하여 정확한 연소 이력을 파악함으로써 원자력발전소 내 사용후핵연료의 운반 및 저장과 관리의 안정성과 경제성을 높일 필요가 있다. 또한 종래의 사용후핵연료 관리는 연소도를 무시한 새로운 연료로 가정하여 작업을 수행하고 있는데, 정확한 연소도를 측정함으로써 관리 비용을 절감할 수 있다.

[0006] 이와 같은 선행기술은 발명자가 본 발명의 도출을 위해 보유하고 있었거나, 본 발명의 도출 과정에서 습득한 기술 정보로서, 반드시 본 발명의 출원 전에 일반 공중에게 공개된 공지 기술이라 할 수는 없다.

선행기술문헌

특허문헌

[0007] (특허문헌 0001) 한국등록특허공보 10-1659985

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 본 발명은 전술한 문제점을 해결하기 위한 발명으로서, 종래 사용후핵연료의 연소도 측정 방식에 비해 총 중성자 발생률을 이용하여 용이하게 연소도를 측정할 수 있는 방법 및 장치를 제공한다.

[0009] 다만 이러한 과제는 예시적이며 본 발명에서 해결하고자 하는 과제는 이에 한정되지 않는다.

과제의 해결 수단

[0010] 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 방법은 연소도 측정 장치가 사용후핵연료의 초기 농축도, 냉각 기간 및 총 중성자발생률의 함수로 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 단계를 포함한다.

[0011] 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 방법에 있어서, 상기 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 단계는 이하의 식 (1)로 사용후핵연료의 연소도를 측정할 수 있다.

$$[0012] \text{BU} = a(S_N)^b (IE)^c e^{dt} \text{ --- 식 (1)}$$

[0013] 여기서 BU는 사용후핵연료의 연소도(GWD/MTU)이고, S_N 은 총 중성자발생률(n/s/MTU)이고, IE는 초기 농축도(%)이고, t는 냉각 기간(년)이다.

[0014] 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 방법에 있어서, 상기 식 (1)에서, a는 0.7 이상 1 이하, b는 0.05 이상 0.1 이하, c는 0.3 이상 0.6 이하, d는 0.005 이상 0.01 이하일 수 있다.

[0015] 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 방법에 있어서, 상기 식 (1)에서, a = 0.883, b = 0.0788, c =

0.4648, $d = 0.008236$ 일 수 있다.

- [0016] 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 방법에 있어서, 상기 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 단계 전에, 상기 연소도 측정 장치가 사용후핵연료의 총 중성자 발생률을 측정하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [0017] 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 방법에 있어서, 상기 사용후핵연료의 총 중성자 발생률을 측정하는 단계는 상기 연소도 측정 장치에 포함된 중성자 계측 모듈이 상기 사용후핵연료에 인접한 위치에서 상기 사용후핵연료의 총 중성자 발생률을 측정할 수 있다.
- [0018] 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 방법에 있어서, 상기 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 단계는 전체 냉각 기간 중 Cm-244가 주요 중성자 발생 핵종인 냉각 기간에 대해 측정할 수 있다.
- [0019] 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 방법에 있어서, 상기 식 (1)에서, $5 \leq t \leq 60$ 일 수 있다.
- [0020] 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 장치는 연산 모듈 및 사용후핵연료의 초기 농축도, 냉각 기간을 포함하는 연소 이력에 관한 정보를 저장하는 저장 모듈을 포함하고, 상기 연산 모듈이 사용후핵연료의 초기 농축도, 냉각 기간 및 총 중성자발생률의 함수로 사용후핵연료의 연소도를 측정한다.
- [0021] 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 장치에 있어서, 상기 연산 모듈은 이하의 식 (1)로 사용후핵연료의 연소도를 측정할 수 있다.
- [0022]
$$BU = a(S_N)^b(IE)^c e^{dt} \text{ --- 식 (1)}$$
- [0023] 여기서 BU는 사용후핵연료의 연소도(GWD/MTU)이고, S_N 은 총 중성자발생률(n/s/MTU)이고, IE는 초기 농축도(%)이고, t는 냉각 기간(년)이다.
- [0024] 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 장치에 있어서, 상기 식 (1)에서, a는 0.7 이상 1 이하, b는 0.05 이상 0.1 이하, c는 0.3 이상 0.6 이하, d는 0.005 이상 0.01 이하일 수 있다.
- [0025] 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 장치에 있어서, 상기 식 (1)에서, $a = 0.883$, $b = 0.0788$, $c = 0.4648$, $d = 0.008236$ 일 수 있다.
- [0026] 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 장치에 있어서, 상기 연소도 측정 장치는 상기 사용후핵연료의 총 중성자 발생률을 측정하는 중성자 계측 모듈을 더 포함할 수 있다.
- [0027] 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 장치에 있어서, 상기 중성자 계측 모듈은 상기 사용후핵연료에 인접한 위치에서 상기 사용후핵연료의 총 중성자 발생률을 측정할 수 있다.
- [0028] 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 장치에 있어서, 상기 연산 모듈은 전체 냉각 기간 중 Cm-244가 주요 중성자 발생 핵종인 냉각 기간에 대해 측정할 수 있다.
- [0029] 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 장치에 있어서, 상기 식 (1)에서, $5 \leq t \leq 60$ 일 수 있다.
- [0030] 전술한 것 외의 다른 측면, 특징, 이점이 이하의 도면, 청구범위 및 발명의 상세한 설명으로부터 명확해질 것이다.

발명의 효과

- [0031] 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 장치 및 연소도 측정 방법은 감마선 발생률에 관한 정보나 복잡한 연산식을 이용하지 않고도, 사용후핵연료의 초기 농축도, 냉각 기간 및 총 중성자 발생률만으로 사용후핵연료의 연소도를 용이하게 측정할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0032] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 장치를 나타낸다.
- 도 2는 냉각 기간에 따른 방사성 핵종별 총 중성자 발생률을 나타낸다.
- 도 3은 실험예에 따른 초기 농축도와 연소도의 관계를 나타낸다.
- 도 4 내지 도 8은 본 발명의 일 실시예에 따라 계산한 연소도와 실제 연소도의 차이를 나타낸다.

도 9는 본 발명의 일 실시예에 따라 계산한 연소도를 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0033] 본 발명은 다양한 변환을 가할 수 있고 여러 가지 실시예를 가질 수 있는 바, 특정 실시예들을 도면에 예시하고 발명의 설명에 상세하게 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명을 특정한 실시예로 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변환, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다. 본 발명을 설명함에 있어서 일 실시예에 도시되어 있다 하더라도, 동일한 구성요소에 대하여서는 동일한 식별부호를 사용한다.
- [0034] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 실시예들을 상세히 설명하기로 하며, 도면을 참조하여 설명할 때 동일하거나 대응하는 구성 요소는 동일한 도면부호를 부여하고 이에 대한 중복되는 설명은 생략하기로 한다.
- [0035] 이하의 실시예에서, 제1, 제2 등의 용어는 한정적인 의미가 아니라 하나의 구성 요소를 다른 구성 요소와 구별하는 목적으로 사용되었다.
- [0036] 이하의 실시예에서, 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다.
- [0037] 이하의 실시예에서, 포함하다 또는 가지다 등의 용어는 명세서상에 기재된 특징, 또는 구성요소가 존재함을 의미하는 것이고, 하나 이상의 다른 특징들 또는 구성요소가 부가될 가능성을 미리 배제하는 것은 아니다.
- [0038] 도면에서는 설명의 편의를 위하여 구성 요소들이 그 크기가 과장 또는 축소될 수 있다. 예컨대, 도면에서 나타난 각 구성의 크기 및 두께는 설명의 편의를 위해 임의로 나타내었으므로, 본 발명이 반드시 도시된 바에 한정되지 않는다.
- [0039] 이하의 실시예에서, x축, y축 및 z축은 직교 좌표계 상의 세 축으로 한정되지 않고, 이를 포함하는 넓은 의미로 해석될 수 있다. 예를 들어, x축, y축 및 z축은 서로 직교할 수도 있지만, 서로 직교하지 않는 서로 다른 방향을 지칭할 수도 있다.
- [0040] 어떤 실시예가 달리 구현 가능한 경우에 특정한 공정 순서는 설명되는 순서와 다르게 수행될 수도 있다. 예를 들어, 연속하여 설명되는 두 공정이 실질적으로 동시에 수행될 수도 있고, 설명되는 순서와 반대의 순서로 진행될 수 있다.
- [0041] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 장치(10)를 나타내고, 도 2는 냉각 기간에 따른 방사성 핵종별 총 중성자 발생률을 나타낸다.
- [0042] 도 1을 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 장치(10)는 사용후핵연료(Spent Fuel, F)의 연소도를 측정하기 위한 장치로서, ORIGIN CODE를 이용하지 않고 사용후핵연료의 연소도를 용이하게 측정할 수 있다. 예를 들어 연소도 측정 장치(10)는 사용후핵연료(F)의 총 중성자 발생률(total neutron source intensity), 냉각 기간(cooling time) 및 초기 농축도(initial enrichment)를 이용해 사용후핵연료(F)의 연소도를 측정할 수 있다.
- [0043] 일 실시예로 연소도 측정 장치(10)는 연산 모듈(100), 저장 모듈(200) 및 중성자 계측 모듈(300)을 포함할 수 있다.
- [0044] 연산 모듈(100)은 연소도 측정 장치(10)에 미리 저장된 사용후핵연료(F)에 관한 정보 또는 측정으로 획득한 사용후핵연료(F)에 관한 정보에 기초하여, 사용후핵연료(F)의 연소도를 계산한다. 예를 들어 연산 모듈(100)은 사용후핵연료(F)의 총 중성자 발생률, 냉각 기간 및 초기 농축도를 이용해 사용후핵연료(F)의 연소도를 계산할 수 있다.
- [0045] 일 실시예로 연산 모듈(100)은 사용후핵연료(F)의 총 중성자 발생률, 냉각 기간 및 초기 농축도를 이용해 사용후핵연료(F)의 연소도를 계산하며, 이때 아래의 식 (1)을 이용할 수 있다.
- [0046]
$$BU = a(S_N)^b (IE)^c e^{dt} \text{ --- 식 (1)}$$
- [0047] 여기서 BU는 사용후핵연료의 연소도(GWD/MTU)이고, S_N 은 총 중성자발생률(n/s/MTU)이고, IE는 초기 농축도(%)이고, t는 냉각 기간(년)이다. 또한 a, b, c 및 d는 상수이다. 다시 말해 연산 모듈(100)은 사용후핵연료(F)의 연소도를 연산 모듈(100)은 사용후핵연료(F)의 총 중성자 발생률, 냉각 기간 및 초기 농축도의 함수로 나타내고, 이에 기초하여 사용후핵연료(F)의 연소도를 측정할 수 있다. 이를 통해 연소도 측정 장치(10)는 미리 알고 있는

사용후핵연료(F)의 냉각 기간 및 초기 농축도와, 후술하는 중성자 계측 모듈(300)을 통해 측정된 사용후핵연료(F)의 총 중성자 발생률에 기초하여, 사용후핵연료(F)의 연소도를 용이하게 측정할 수 있다.

[0048] 일 실시예로 식 (1)에서 a는 0.7 이상 1 이하, b는 0.05 이상 0.1 이하, c는 0.3 이상 0.6 이하, d는 0.005 이상 0.01 이하일 수 있다. 바람직하게는 a는 0.8 이상 0.9 이하, b는 0.06 이상 0.9 이하, c는 0.4 이상 0.5 이하, d는 0.006 이상 0.08 이하일 수 있다. 보다 바람직하게는 식 (1)에서, $a = 0.883$, $b = 0.0788$, $c = 0.4648$, $d = 0.008236$ 일 수 있다.

[0049] 일 실시예로 연산 모듈(100)은 소정의 범위를 만족하는 냉각 기간에 대해 사용후핵연료(F)의 연소도를 측정할 수 있다. 예를 들어 연산 모듈(100)은 냉각 기간이 Cm-244가 주요 중성자 발생 핵종인 냉각 기간을 만족하는 사용후핵연료(F)에 대해 연소도를 측정할 수 있다.

[0050] 예를 들어 핵연료로 U-238을 이용하는 경우, U-238은 원자로 내에서 중성자를 흡수하여 Pu-239로 바뀌고, Pu-239가 핵분열을 일으키는 핵연료가 된다. 이후 Pu-239는 Am-241 또는 Am-243으로 바뀐 후 Cm-244로 바뀌는 연소 사슬을 거친다. 따라서 일정 냉각 기간이 지나면 Cm-244에서 발생하는 중성자가 지배적(dominant)이 되며, 본 발명에서는 이와 같이 Cm-244가 주요 중성자 발생 핵종인 냉각 기간을 이용해 사용후핵연료(F)의 연소도를 측정할 수 있다.

[0051] 도 2에 나타난 바와 같이, Cm-244가 주요 중성자 발생 핵종으로서 역할을 하는 냉각 기간은 5년에서 60년에 해당함을 알 수 있다. 이에 따라 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 장치(10) 또는 연소 모듈(100)은 냉각 기간이 5년 이상 60년 이하에 해당하는 사용후핵연료(F)에 대해 연소도를 측정할 수 있다.

[0052] 저장 모듈(200)은 사용후핵연료(F)의 연소도를 측정하기 위한 정보를 미리 저장할 수 있다. 예를 들어 저장 모듈(200)은 사용후핵연료(F)의 냉각 기간과 초기 농축도에 관한 정보를 미리 저장할 수 있다. 연산 모듈(100)은 저장 모듈(200)에 저장되어 있는 냉각 기간과 초기 농축도에 관한 정보와 중성자 계측 모듈(300)이 계측한 사용후핵연료(F)의 총 중성자 발생률에 기초하여 사용후핵연료(F)의 연소도를 측정할 수 있다.

[0053] 중성자 계측 모듈(300)은 사용후핵연료(F)에서 방출되는 중성자를 계측하여 이를 연산 모듈(100)로 전달한다. 예를 들어 도 1에 나타난 바와 같이, 중성자 계측 모듈(300)은 연산 모듈(100) 및 저장 모듈(200)과 물리적으로 이격되어 사용후핵연료(F)에 인접하게 배치될 수 있다. 중성자 계측 모듈(300)은 사용후핵연료(F)와 근접한 위치 또는 사용후핵연료(F)의 일측에 배치되어 사용후핵연료(F)에서 방출되는 중성자를 계측하여 이를 총 중성자 발생률로 나타낸다. 여기서 총 중성자 발생률은 n/s/MTU로 나타낼 수 있다.

[0054] 사용후핵연료(F)는 지지체(20)에 의해 지지될 수 있다. 사용후핵연료(F)는 복수 개의 연료봉 및 독물질봉을 포함하는 사용후핵연료 집합체일 수 있다.

[0055] 다음 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 방법을 설명한다. 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 방법은 전술한 연소도 측정 장치(10)를 이용할 수 있다. 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 방법(10)은 사용후핵연료(F)의 초기 농축도, 냉각 기간 및 총 중성자 발생률의 함수로 사용후핵연료(F)의 연소도를 측정하는 단계를 포함할 수 있다.

[0056] 먼저 연소도 측정 장치(10)가 사용후핵연료(F)의 연소 이력에 관한 정보를 획득한다. 예를 들어 연소도 측정 장치(10)는 저장 모듈(200)에 사용후핵연료(F)의 초기 농축도와 냉각 기간에 관한 정보를 저장할 수 있다. 또한 연소도 측정 장치(10)는 사용후핵연료(F)의 총 중성자 발생률에 관한 정보를 측정하여 획득할 수 있다. 보다 구체적으로 중성자 계측 모듈(300)이 사용후핵연료(F)에서 발생하는 중성자를 측정하여, 사용후핵연료(F)의 총 중성자 발생률을 측정할 수 있다.

[0057] 다음 연소도 측정 장치(10)는 사용후핵연료(F)의 연소 이력에 관한 정보에 기초하여 사용후핵연료(F)의 연소도를 측정한다. 예를 들어 연소도 측정 장치(10)의 연산 모듈(100)은 사용후핵연료(F)의 초기 농축도, 냉각 기간 및 총 중성자 발생률의 함수로 사용후핵연료(F)의 연소도를 측정할 수 있다.

[0058] 일 실시예로 연소도 측정 장치(10)는 식 (1)로 사용후핵연료(F)의 연소도를 측정할 수 있다.

[0059]
$$BU = a(S_N)^b (IE)^c e^{dt} \text{ --- 식 (1)}$$

[0060] 여기서 BU는 사용후핵연료의 연소도(GWD/MTU)이고, S_N 는 총 중성자발생률(n/s/MTU)이고, IE는 초기 농축도(%)이고, t는 냉각 기간(년)이다.

- [0061] 일 실시예로 식 (1)에서 a는 0.7 이상 1 이하, b는 0.05 이상 0.1 이하, c는 0.3 이상 0.6 이하, d는 0.005 이상 0.01 이하일 수 있다. 바람직하게는 a는 0.8 이상 0.9 이하, b는 0.06 이상 0.9 이하, c는 0.4 이상 0.5 이하, d는 0.006 이상 0.08 이하일 수 있다. 보다 바람직하게는 식 (1)에서, $a = 0.883$, $b = 0.0788$, $c = 0.4648$, $d = 0.008236$ 일 수 있다. 식 (1)을 통해 연산 모듈(100)은 사용후핵연료(F)의 연소도를 측정할 수 있다.
- [0062] 일 실시예로 연소도 측정 장치(10)가 사용후핵연료(F)의 연소도를 측정하는 단계에서, 연소도 측정 장치(10)는 전체 냉각 기간 중 Cm-244가 주요 중성자 발생 핵종인 냉각 기간에 대해 측정할 수 있다. 예를 들어 연산 모듈(100)은 Cm-244가 주요 중성자 발생 핵종으로 기여하는 냉각 기간인 5년 이상 60년 이하의 냉각 기간을 만족하는 사용후핵연료(F)에 대해 연소도를 측정할 수 있다.
- [0063] 이와 같은 구성을 통해 본 발명의 일 실시예에 따른 연소도 측정 장치(10) 및 연소도 측정 방법은 감마선 발생률에 관한 정보나 복잡한 연산식을 이용하지 않고도, 사용후핵연료(F)의 초기 농축도, 냉각 기간 및 총 중성자 발생률만으로 사용후핵연료(F)의 연소도를 용이하게 측정할 수 있다.
- [0065] **실험예**
- [0066] 국내에서 연소된 사용후핵연료 집합체의 초기 농축도와 연소도의 현황을 조사한 후 이를 도 3에 나타낸 바와 같이 그래프에 나타냈다. 구체적으로 초기 농축도를 2.4% 내지 4.8%로 설정한 후 평균 연소도의 $\pm 30\%$ 범위의 경우를 설정하여, 상용 연소도 계산 프로그램인 ORIGEN을 이용해 연소도에 따른 총 중성자 발생률을 계산했다.
- [0067] 이들 중 16개의 초기 농축도 및 각각의 초기 농축도별로 $\pm 30\%$ 범위 안에 있는 5개의 연소도를 설정하여, 총 80개의 모델을 선정했다. 그리고 각각의 경우에 대해, 대상 원자로와 핵연료 집합체를 CE형 16*16 핵연료, WH형 14*14 핵연료 및 WH형 17*17 핵연료 3개의 형태로 계산하여, 총 240개의 모델을 계산했다.
- [0068] 그리고 이들 240개의 모델 중 일반화할 수 있는 초기 농축도와 평균 연소도의 관계를 아래와 같이 설정했다.
- [0069]
$$BU = 10 * IE + 2$$
- [0070] 여기서 BU는 연소도이며 단위는 GWD(Giga Watt Day)/MTU(Metric Ton Uranium)이고, IE는 초기 농축도로서 단위는 %이다.
- [0071] 다음 계산 결과를 바탕으로 연소도를 초기 농축도 IE, 냉각 기간 CT 및 총 중성자 발생률 S_N 의 함수로 나타낼 수 있음을 확인했고, 최종 식은 아래와 같이 얻었다.
- [0072]
$$BU = a(S_N)^b(IE)^c e^{dt}$$
- [0073] 여기서 a, b, c 및 d는 상수이며, a는 0.883, b는 0.0788, c는 0.4648, d는 0.008236이다. 또한 BU의 단위는 GWD/MTU이고, S_N 의 단위는 n/s/MTU이며 여기서 n은 개수, s는 second이다. 또한 IE의 단위는 %이고, t의 단위는 year이다.
- [0074] 얻은 위 식을 검증하기 위해, 해당 식을 이용해 얻은 연소도를 ORIGEN 결과값과 비교했으며, 이를 도 4 내지 도 8과, 아래의 표 1 내지 표 15에 나타냈다.
- [0075] 도 4는 사용후핵연료의 초기 농축도가 2.4%일 때, 냉각 기간에 따른 총 중성자 발생률의 그래프 상에 연소도를 나타낸 것이다(도 4의 검정색 선). 또한 사용후핵연료의 집합체는 CE 16*16(사각형), WH 14*14(원형), WH 17*17(삼각형) 3가지 형태를 가지며, 실제 사용후핵연료의 연소도를 그래프 상에 함께 나타냈다.
- [0076] 도 4에 나타낸 바와 같이, 실제 연소도 값은 상기 식을 이용해 계산한 연소도를 나타내는 검정색 선 근방에 모두 표시됨을 알 수 있다.
- [0077] 보다 구체적으로 실제 연소도 값과 상기 식을 이용해 계산한 연소도의 차이를 아래 표 1 내지 표 3에 나타냈다. 표 1 내지 표 3은 각각 CE 16*16, WH 14*14, WH 17*17 형태의 사용후핵연료 집합체를 나타낸다. 또한 표에서 가로축은 냉각 기간(년), 세로축은 상기 식을 통해 계산한 연소도를 나타낸다.

표 1

	5	10	20	30	50	60
33.8	-0.1%	-0.4%	-1.0%	-1.4%	-1.8%	-1.6%
29.9	0.3%	0.0%	-0.5%	-0.8%	-0.9%	-0.4%
26	0.2%	0.0%	-0.4%	-0.5%	0.1%	1.0%
22.1	-0.3%	-0.4%	-0.5%	-0.3%	1.4%	3.1%
18.2	-1.3%	-1.2%	-0.7%	0.3%	4.1%	7.3%

[0078]

표 2

	5	10	20	30	50	60
33.8	0.0%	-0.3%	-0.9%	-1.3%	-1.7%	-1.5%
29.9	0.4%	0.1%	-0.4%	-0.7%	-0.8%	-0.3%
26	0.4%	0.2%	-0.2%	-0.4%	0.2%	1.1%
22.1	-0.1%	-0.2%	-0.3%	-0.1%	1.6%	3.2%
18.2	-1.1%	-1.0%	-0.5%	0.4%	4.2%	7.3%

[0079]

표 3

	5	10	20	30	50	60
33.8	-0.7%	-1.0%	-1.5%	-2.0%	-2.3%	-2.1%
29.9	-0.4%	-0.7%	-1.1%	-1.5%	-1.5%	-1.0%
26	-0.5%	-0.8%	-1.1%	-1.2%	-0.6%	0.3%
22.1	-1.2%	-1.3%	-1.3%	-1.1%	0.7%	3.1%
18.2	-2.3%	-2.2%	-1.6%	-0.6%	3.3%	6.5%

[0080]

[0081] 위 표 1 내지 표 3에 나타난 바와 같이, 실제 연소도 값과 상기 식을 이용해 계산한 연소도 값의 차이는 연소 기간 5년 이상 60년 이하에서 모두 작은 차이를 나타냈다.

[0082] 도 5는 사용후핵연료의 초기 농축도가 2.9%일 때, 냉각 기간에 따른 총 중성자 발생률의 그래프 상에 연소도를 나타낸 것이다(도 5의 검정색 선). 또한 사용후핵연료의 집합체는 CE 16*16(사각형), WH 14*14(원형), WH 17*17(삼각형) 3가지 형태를 가지며, 실제 사용후핵연료의 연소도를 그래프 상에 함께 나타냈다.

[0083] 도 5에 나타난 바와 같이, 실제 연소도 값은 상기 식을 이용해 계산한 연소도를 나타내는 검정색 선 근방에 모두 표시됨을 알 수 있다.

[0084] 보다 구체적으로 실제 연소도 값과 상기 식을 이용해 계산한 연소도의 차이를 아래 표 4 내지 표 6에 나타냈다. 표 4 내지 표 6은 각각 CE 16*16, WH 14*14, WH 17*17 형태의 사용후핵연료 집합체를 나타낸다. 또한 표에서 가로축은 냉각 기간(년), 세로축은 상기 식을 통해 계산한 연소도를 나타낸다.

표 4

	5	10	20	30	50	60
40.3	0.5%	0.2%	-0.4%	-0.9%	-1.4%	-1.3%
35.65	0.9%	0.6%	0.1%	-0.3%	-0.6%	-0.3%
31	0.9%	0.6%	0.2%	-0.1%	0.1%	0.7%
26.35	0.3%	0.1%	-0.1%	-0.1%	0.9%	2.2%
21.7	-0.9%	-0.9%	-0.7%	-0.1%	2.7%	5.2%

[0085]

표 5

	5	10	20	30	50	60
40.3	0.7%	0.4%	-0.2%	-0.7%	-1.2%	-1.1%
35.65	1.2%	0.9%	0.3%	-0.1%	-0.4%	-0.1%
31	1.2%	0.9%	0.5%	0.2%	0.3%	0.9%
26.35	0.7%	0.5%	0.2%	0.2%	1.2%	2.5%
21.7	-0.5%	-0.5%	-0.3%	0.3%	3.0%	5.4%

[0086]

표 6

	5	10	20	30	50	60
40.3	0.0%	-0.3%	-0.9%	-1.4%	-1.9%	-1.8%
35.65	0.3%	0.0%	-0.5%	-0.9%	-1.2%	-0.9%
31	0.2%	-0.1%	-0.5%	-0.8%	-0.6%	0.0%
26.35	-0.5%	-0.7%	-0.9%	-0.9%	0.2%	1.5%
21.7	-1.8%	-1.8%	-1.6%	-0.9%	1.9%	4.4%

[0087]

[0088] 위 표 4 내지 표 6에 나타난 바와 같이, 실제 연소도 값과 상기 식을 이용해 계산한 연소도 값의 차이는 연소 기간 5년 이상 60년 이하에서 모두 작은 차이를 나타냈다.

[0089] 도 6은 사용후핵연료의 초기 농축도가 3.5%일 때, 냉각 기간에 따른 총 중성자 발생률의 그래프 상에 연소도를 나타낸 것이다(도 6의 검정색 선). 또한 사용후핵연료의 집합체는 CE 16*16(사각형), WH 14*14(원형), WH 17*17(삼각형) 3가지 형태를 가지며, 실제 사용후핵연료의 연소도를 그래프 상에 함께 나타냈다.

[0090] 도 6에 나타난 바와 같이, 실제 연소도 값은 상기 식을 이용해 계산한 연소도를 나타내는 검정색 선 근방에 모두 표시됨을 알 수 있다.

[0091] 보다 구체적으로 실제 연소도 값과 상기 식을 이용해 계산한 연소도의 차이를 아래 표 7 내지 표 9에 나타냈다. 표 7 내지 표 9은 각각 CE 16*16, WH 14*14, WH 17*17 형태의 사용후핵연료 집합체를 나타낸다. 또한 표에서 가로축은 냉각 기간(년), 세로축은 상기 식을 통해 계산한 연소도를 나타낸다.

표 7

	5	10	20	30	50	60
48.1	0.8%	0.5%	-0.1%	-0.6%	-1.2%	-1.2%
42.55	1.3%	1.0%	0.4%	0.0%	-0.5%	-0.4%
37	1.3%	1.0%	0.5%	0.2%	0.0%	0.4%
31.45	0.7%	0.5%	0.2%	0.0%	0.5%	1.4%
25.9	-0.6%	-0.7%	-0.7%	-0.4%	1.6%	3.5%

[0092]

표 8

	5	10	20	30	50	60
48.1	1.0%	0.6%	0.0%	-0.5%	-1.0%	-1.0%
42.55	1.6%	1.2%	0.7%	0.2%	-0.3%	-0.1%
37	1.6%	1.3%	0.8%	0.5%	0.3%	0.7%
31.45	1.1%	0.9%	0.5%	0.4%	0.9%	1.7%
25.9	-0.1%	-0.2%	-0.2%	0.0%	1.9%	3.8%

[0093]

표 9

	5	10	20	30	50	60
48.1	0.3%	0.0%	-0.6%	-1.1%	-1.7%	-1.6%
42.55	0.8%	0.4%	-0.1%	-0.6%	-1.0%	-0.9%
37	0.7%	0.4%	-0.1%	-0.5%	-0.6%	-0.2%
31.45	0.0%	-0.3%	-0.6%	-0.8%	-0.2%	0.7%
25.9	-1.5%	-1.6%	-1.5%	-1.2%	0.8%	2.7%

[0094]

[0095] 위 표 7 내지 표 9에 나타난 바와 같이, 실제 연소도 값과 상기 식을 이용해 계산한 연소도 값의 차이는 연소 기간 5년 이상 60년 이하에서 모두 작은 차이를 나타냈다.

[0096] 도 7은 사용후핵연료의 초기 농축도가 4.1%일 때, 냉각 기간에 따른 총 중성자 발생률의 그래프 상에 연소도를 나타낸 것이다(도 7의 검정색 선). 또한 사용후핵연료의 집합체는 CE 16*16(사각형), WH 14*14(원형), WH 17*17(삼각형) 3가지 형태를 가지며, 실제 사용후핵연료의 연소도를 그래프 상에 함께 나타냈다.

[0097] 도 7에 나타난 바와 같이, 실제 연소도 값은 상기 식을 이용해 계산한 연소도를 나타내는 검정색 선 근방에 모두 표시됨을 알 수 있다.

[0098] 보다 구체적으로 실제 연소도 값과 상기 식을 이용해 계산한 연소도의 차이를 아래 표 10 내지 표 12에 나타냈다. 표 10 내지 표 12는 각각 CE 16*16, WH 14*14, WH 17*17 형태의 사용후핵연료 집합체를 나타낸다. 또한 표에서 가로축은 냉각 기간(년), 세로축은 상기 식을 통해 계산한 연소도를 나타낸다.

표 10

	5	10	20	30	50	60
55.9	0.8%	0.5%	-0.2%	-0.7%	-1.3%	-1.2%
49.45	1.4%	1.1%	0.5%	0.0%	-0.6%	-0.5%
43	1.5%	1.2%	0.6%	0.2%	-0.1%	0.1%
36.55	0.9%	0.7%	0.3%	0.0%	0.2%	0.8%
30.1	-0.4%	-0.6%	-0.7%	-0.6%	0.8%	2.3%

[0099]

표 11

	5	10	20	30	50	60
55.9	0.9%	0.6%	-0.1%	-0.6%	-1.1%	-1.1%
49.45	1.6%	1.3%	0.7%	0.2%	-0.4%	-0.3%
43	1.8%	1.4%	0.9%	0.5%	0.1%	0.4%
36.55	1.3%	1.0%	0.6%	0.3%	0.5%	1.1%
30.1	0.0%	-0.1%	-0.3%	-0.2%	1.1%	2.6%

[0100]

표 12

	5	10	20	30	50	60
55.9	0.4%	0.0%	-0.6%	-1.1%	-1.7%	-1.7%
49.45	0.9%	0.5%	-0.1%	-0.5%	-1.1%	-1.0%
43	0.9%	0.5%	0.0%	-0.4%	-0.7%	-0.5%
36.55	0.2%	-0.1%	-0.5%	-0.7%	-0.5%	0.2%
30.1	-1.3%	-1.4%	-1.5%	-1.4%	0.0%	1.5%

[0101]

[0102] 위 표 10 내지 표 12에 나타낸 바와 같이, 실제 연소도 값과 상기 식을 이용해 계산한 연소도 값의 차이는 연소 기간 5년 이상 60년 이하에서 모두 작은 차이를 나타냈다.

[0103] 도 8은 사용후핵연료의 초기 농축도가 4.65%일 때, 냉각 기간에 따른 총 중성자 발생률의 그래프 상에 연소도를 나타낸 것이다(도 8의 검정색 선). 또한 사용후핵연료의 집합체는 CE 16*16(사각형), WH 14*14(원형), WH 17*17(삼각형) 3가지 형태를 가지며, 실제 사용후핵연료의 연소도를 그래프 상에 함께 나타냈다.

[0104] 도 8에 나타낸 바와 같이, 실제 연소도 값은 상기 식을 이용해 계산한 연소도를 나타내는 검정색 선 근방에 모두 표시됨을 알 수 있다.

[0105] 보다 구체적으로 실제 연소도 값과 상기 식을 이용해 계산한 연소도의 차이를 아래 표 13 내지 표 15에 나타냈다. 표 13 내지 표 15는 각각 CE 16*16, WH 14*14, WH 17*17 형태의 사용후핵연료 집합체를 나타낸다. 또한 표에서 가로축은 냉각 기간(년), 세로축은 상기 식을 통해 계산한 연소도를 나타낸다.

표 13

	5	10	20	30	50	60
63.05	0.6%	0.2%	-0.4%	-0.9%	-1.5%	-1.4%
55.775	1.3%	0.9%	0.3%	-0.2%	-0.8%	-0.7%
48.5	1.4%	1.1%	0.6%	0.1%	-0.3%	-0.2%
41.225	1.0%	0.7%	0.2%	-0.1%	-0.1%	0.4%
33.95	-0.4%	-0.6%	-0.8%	-0.8%	0.2%	1.4%

[0106]

표 14

	5	10	20	30	50	60
63.05	0.7%	0.3%	-0.3%	-0.8%	-1.4%	-1.3%
55.775	1.4%	1.1%	0.5%	0.0%	-0.6%	-0.5%
48.5	1.7%	1.4%	0.8%	0.3%	-0.1%	0.1%
41.225	1.3%	1.0%	0.5%	0.2%	0.2%	0.6%
33.95	0.0%	-0.2%	-0.4%	-0.4%	0.5%	1.7%

[0107]

표 15

	5	10	20	30	50	60
63.05	0.2%	-0.2%	-0.8%	-1.3%	-1.9%	-1.8%
55.775	0.8%	0.4%	-0.2%	-0.7%	-1.2%	-1.2%
48.5	0.8%	0.5%	0.0%	-0.5%	-0.9%	-0.7%
41.225	0.2%	0.0%	-0.5%	-0.8%	-0.8%	-0.3%
33.95	-1.2%	-1.4%	-1.6%	-1.6%	-0.6%	0.7%

[0108]

[0109] 위 표 13 내지 표 15에 나타낸 바와 같이, 실제 연소도 값과 상기 식을 이용해 계산한 연소도 값의 차이는 연소 기간 5년 이상 60년 이하에서 모두 작은 차이를 나타냈다.

[0110] 도 9는 상기 식을 적용해 사용후핵연료의 초기 농축도, 냉각 기간 및 총 중성자 발생률에 따른 사용후핵연료의 연소도를 나타낸다. 도 9에 나타낸 바와 같이, 사용후핵연료의 초기 농축도, 냉각 기간 및 총 중성자 발생률을 알고 있을 경우, 사용후핵연료의 연소도를 용이하게 계산할 수 있다.

[0111] 이와 같이 도면에 도시된 실시예를 참고로 본 발명을 설명하였으나, 이는 예시에 불과하다. 해당 기술 분야에서 통상의 지식을 갖는 자라면 실시예로부터 다양한 변형 및 균등한 일 실시예가 가능하다는 점을 충분히 이해할 수 있다. 따라서 본 발명의 진정한 기술적 보호 범위는 첨부된 청구범위에 기초하여 정해져야 한다.

[0112] 실시예에서 설명하는 특정 기술 내용은 일 실시예들로서, 실시예의 기술 범위를 한정하는 것은 아니다. 발명의 설명을 간결하고 명확하게 기재하기 위해, 종래의 일반적인 기술과 구성에 대한 기재는 생략될 수 있다. 또한, 도면에 도시된 구성 요소들 간의 선들의 연결 또는 연결 부재는 기능적인 연결 및/또는 물리적 또는 회로적 연결들을 예시적으로 나타낸 것으로서, 실제 장치에서는 대체 가능하거나 추가의 다양한 기능적인 연결, 물리적인 연결, 또는 회로 연결들로 표현될 수 있다. 또한, "필수적인", "중요하게" 등과 같이 구체적인 언급이 없다면

본 발명의 적용을 위하여 반드시 필요한 구성 요소가 아닐 수 있다.

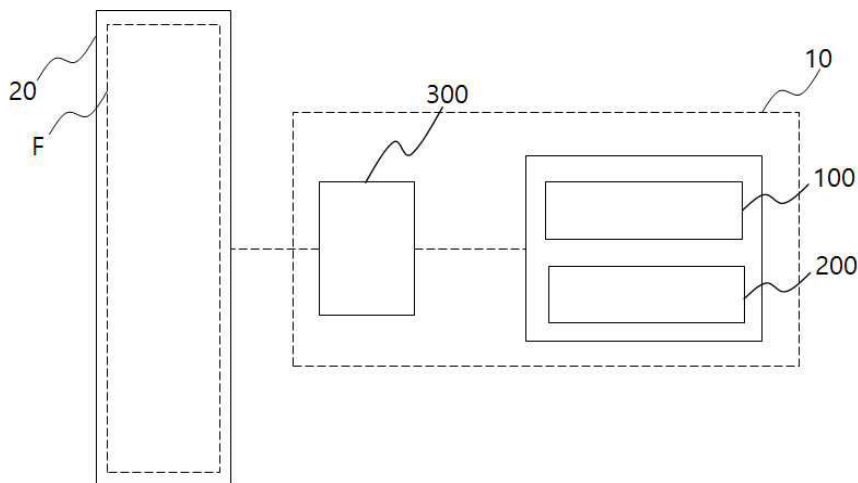
[0113] 발명의 설명 및 청구범위에 기재된 "상기" 또는 이와 유사한 지시어는 특별히 한정하지 않는 한, 단수 및 복수 모두를 지칭할 수 있다. 또한, 실시 예에서 범위(range)를 기재한 경우 상기 범위에 속하는 개별적인 값을 적용한 발명을 포함하는 것으로서(이에 반하는 기재가 없다면), 발명의 설명에 상기 범위를 구성하는 각 개별적인 값을 기재한 것과 같다. 또한, 실시예에 따른 방법을 구성하는 단계들에 대하여 명백하게 순서를 기재하거나 반하는 기재가 없다면, 상기 단계들은 적당한 순서로 행해질 수 있다. 반드시 상기 단계들의 기재 순서에 따라 실시예들이 한정되는 것은 아니다. 실시예에서 모든 예들 또는 예시적인 용어(예들 들어, 등등)의 사용은 단순히 실시예를 상세히 설명하기 위한 것으로서 청구범위에 의해 한정되지 않는 이상, 상기 예들 또는 예시적인 용어로 인해 실시예의 범위가 한정되는 것은 아니다. 또한, 통상의 기술자는 다양한 수정, 조합 및 변경이 부가된 청구범위 또는 그 균등물의 범주 내에서 설계 조건 및 팩터에 따라 구성될 수 있음을 알 수 있다.

부호의 설명

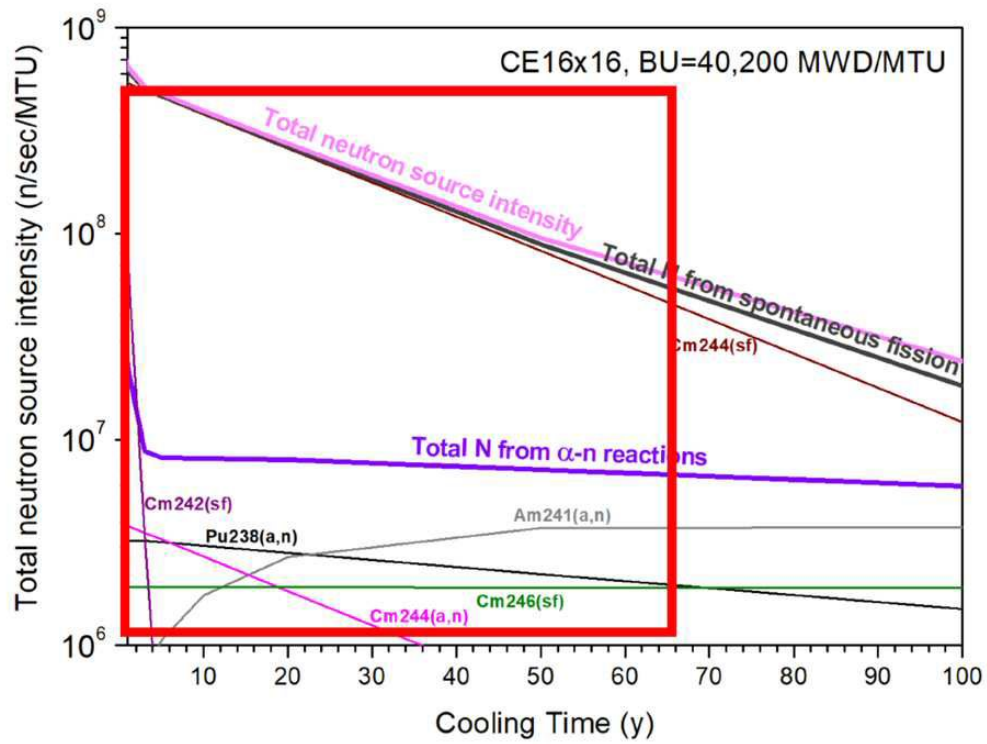
[0114] 10: 연소도 측정 장치
100: 연산 모듈
200: 저장 모듈
300: 중성자 계측 모듈
20: 지지체
F: 사용후핵연료

도면

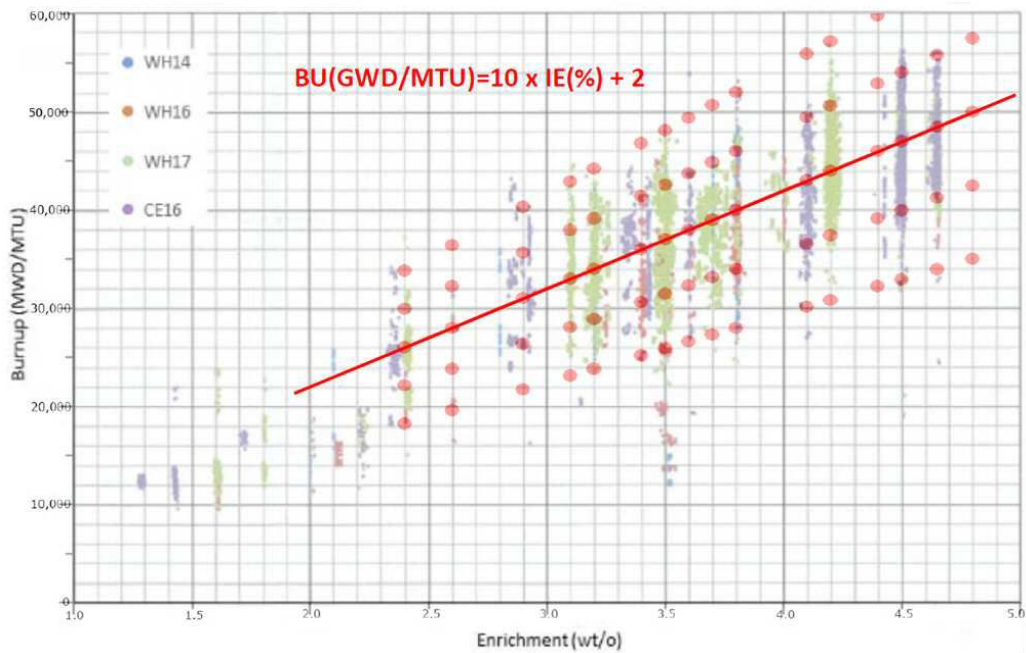
도면1



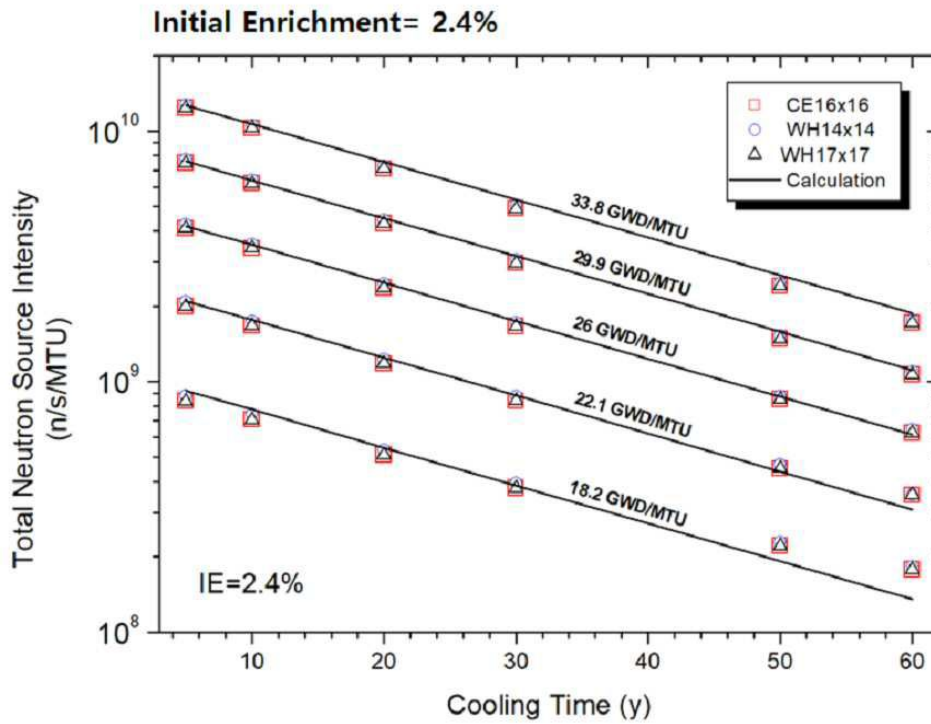
도면2



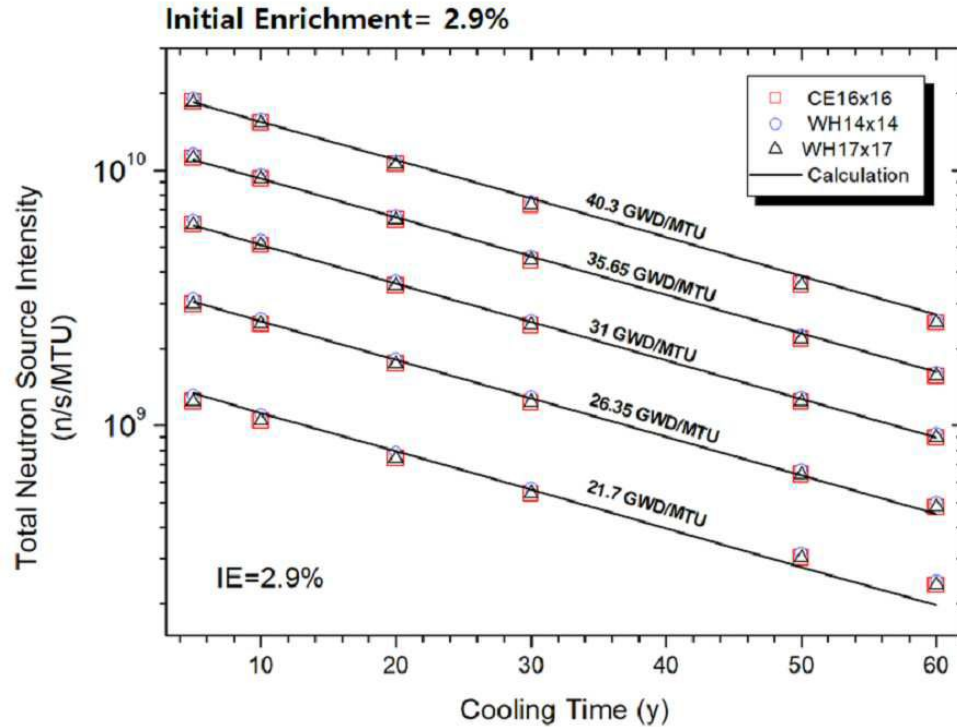
도면3



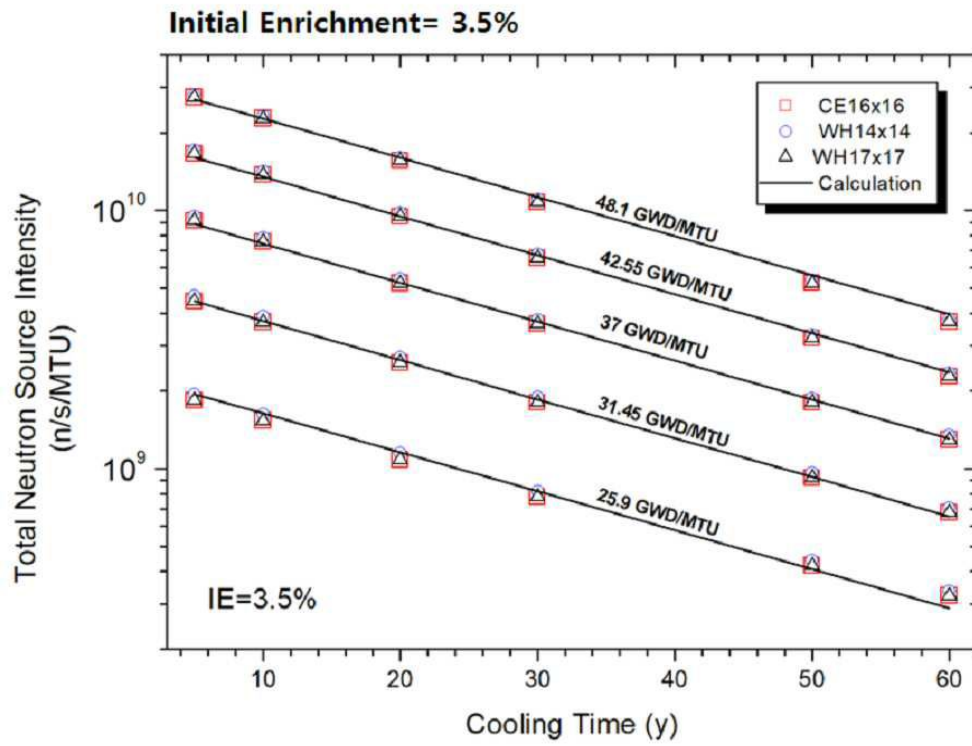
도면4



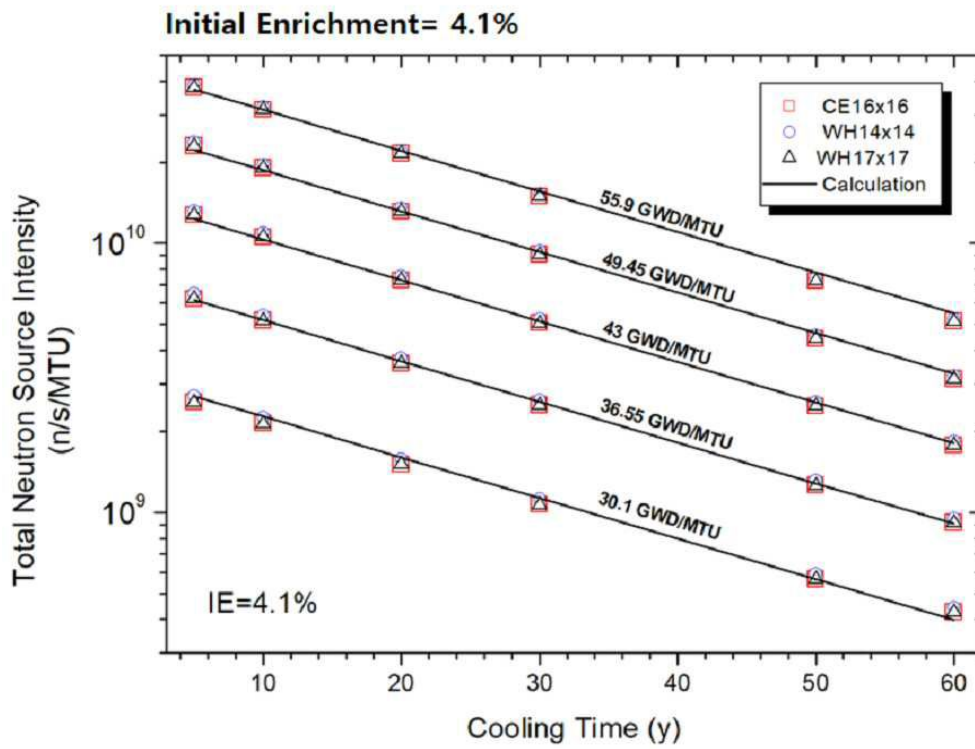
도면5



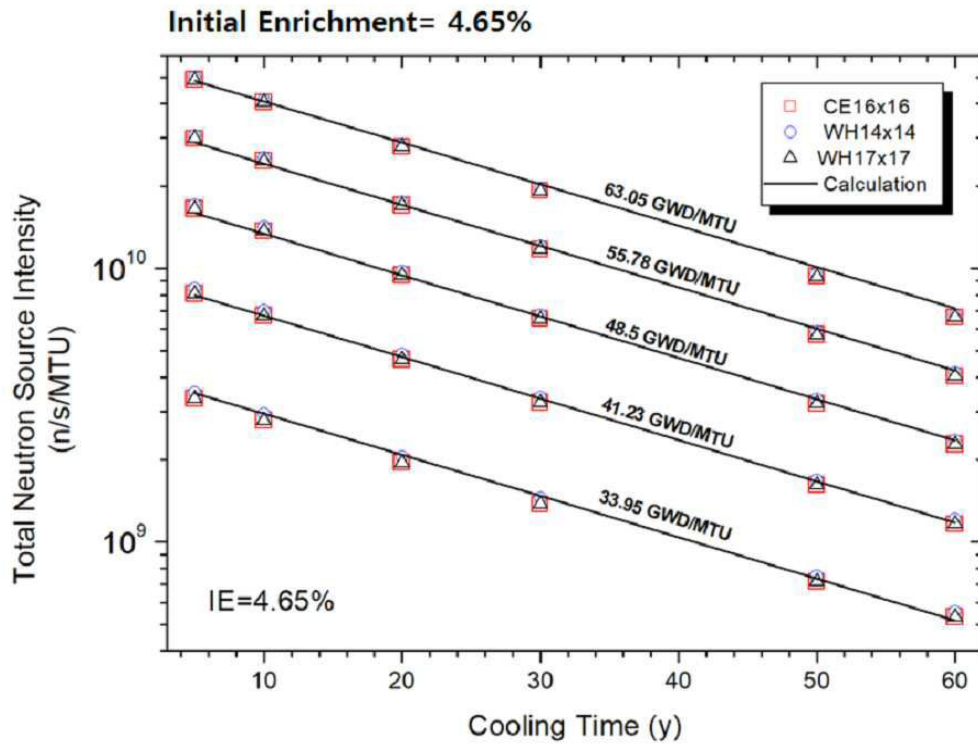
도면6



도면7



도면8



도면9

$$BU = func(S_N, IE, t)$$

