(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0096372
(43) 공개일자 2025년06월27일

(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 10-2023-0187561
(22) 출원일자 2023년12월20일
심사청구일자 2023년12월20일

(71) 출원인
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
(주) 코네스코퍼레이션
대전광역시 유성구 계룡로 55,414호,415호,416호 (봉명동, 유성자이)
주식회사 오리온이엔씨
서울특별시 성동구 성수이로22길 37, 1306호(성수동2가, 아크밸리)
(72) 발명자
박광헌
경기도 용인시 처인구 모현읍 자작나무로 26-15, 죽전더힐럭스 503동
송양수
경기도 용인시 수지구 신수로683번길 19, 102동 1901호 (풍덕천동, 래미안수지이스트파크)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
리앤목특허법인

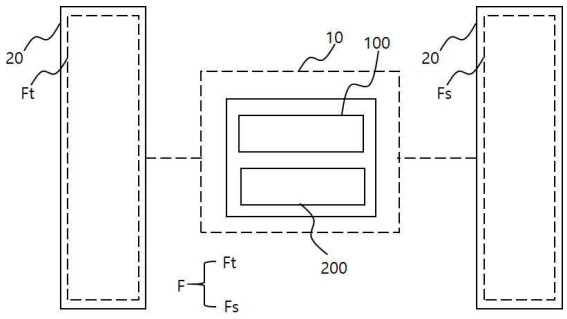
전체 청구항 수 : 총 20 항

(54) 발명의 명칭 **중성자 검출기의 총 중성자 반응률을 이용한 사용후핵연료의 연소도 측정 장치 및 방법**

(57) 요 약

연소도 측정 방법은 연소도 측정 장치가, 중성자 검출기의 사용후핵연료에 대한 총 중성자 반응률 및 측정 거리, 사용후핵연료의 초기 농축도 및 냉각 기간의 관계식으로 대상 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 단계를 포함할 수 있다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
Y02E 30/30 (2020.08)
(72) 발명자
이운장
서울특별시 성동구 성수이로22길 37, 성수동 1307호 (성수동2가)
김윤식
대전광역시 유성구 봉명로 94, 714동 1801호 (봉명동, 도안신도시7단지예미지백조의호수)
최영환
대전광역시 유성구 지족로148번길 40, 405동 505호 (지족동, 노은4단지)
김문오
경기도 성남시 수정구 모란로 65, 104동 405호 (수진동, 삼부아파트)
차소희
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
성진현
경기도 시흥시 군자로335번길 11, 106동 1201호 (거모동, 동보아파트)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1415186446
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	2023.01.01 ~ 2023.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

연소도 측정 장치가, 중성자 검출기의 사용후핵연료에 대한 총 중성자 반응률 및 측정 거리, 사용후핵연료의 초기 농축도 및 냉각 기간의 관계식으로 대상 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 단계를 포함하는, 연소도 측정 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

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

$$BU = a1(RR)^{b1}(IE)^{c1}e^{d1t}e^{f1x} \text{ --- 식 (1)}$$

여기서 BU는 대상 사용후핵연료의 연소도(GWD/MTU)이고, RR은 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료에 대한 총 중성자 반응률(reaction rate, Reaction Rates/sec·MTU)이고, IE는 대상 사용후핵연료의 초기 농축도(%)이고, t는 대상 사용후핵연료의 냉각 기간(년)이고, x는 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료에 대한 측정 거리(cm)이고, a1, b1, c1, d1, f1는 상수이다.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 식 (1)에서, a1는 0.462±0.03, b1는 0.28±0.005, c1는 0.325±0.02, d1는 0.0103±0.000125, f1는 0.0527±0.001인, 연소도 측정 방법.

청구항 4

제2항에 있어서,

대상 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 단계에서, 대상 사용후핵연료의 냉각수에 중성자 흡수재가 포함되어 있는지 여부에 따라 서로 다른 관계식으로 대상 사용후핵연료의 연소도를 측정하는, 연소도 측정 방법.

청구항 5

제4항에 있어서,

대상 사용후핵연료의 냉각수에 중성자 흡수재가 포함되어 있지 않은 경우, 대상 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 단계는 상기 식 (1)로 사용후핵연료의 연소도를 측정하고,

대상 사용후핵연료의 냉각수에 중성자 흡수재가 포함되어 있는 경우, 대상 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 단계는 이하의 식 (2)로 사용후핵연료의 연소도를 측정하는, 연소도 측정 방법.

$$BU = a1'(RR)^{b1'}(IE)^{c1'}e^{d1't}e^{f1'x} \text{ --- 식 (2)}$$

여기서 BU는 대상 사용후핵연료의 연소도(GWD/MTU)이고, RR은 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료에 대한 총 중성자 반응률(reaction rate, Reaction Rates/sec·MTU)이고, IE는 대상 사용후핵연료의 초기 농축도(%)이고, t는 대상 사용후핵연료의 냉각 기간(년)이고, x는 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료에 대한 측정 거리(cm)이고, a1', b1', c1', d1', f1'는 상수이다. 또한 중성자 흡수재는 2000ppm 농도의 보론이다.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 식 (2)에서 a1'는 0.7315±0.032, b1'는 0.2558±0.0035, c1'는 0.404±0.015, d1'는 0.00905±0.0002, f1'는 0.0514±0.001인, 연소도 측정 방법.

청구항 7

제2항에 있어서,

대상 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 단계 전에,

상기 연소도 측정 장치가 샘플 사용후핵연료에 관한 정보를 획득하는 단계; 및

샘플 사용후핵연료에 관한 정보로부터 상기 식 (1)을 도출하는 단계;를 더 포함하는, 연소도 측정 방법.

청구항 8

제7항에 있어서,

샘플 사용후핵연료에 관한 정보를 획득하는 단계는

상기 연소도 측정 장치가 ORIGEN을 이용해 액티나이드(Actinide), 자발핵분열(Spontaneous fission) 핵종과 샘플 사용후핵연료(Fs)의 중성자 발생률(S_N)을 계산하고, 자발핵분열 핵종을 MCNP의 중성자 선원으로 이용하여 중성자 검출기의 중성자 1개당 반응률(R_N)을 계산하고, 계산된 중성자 발생률(S_N)과 중성자 검출기의 중성자 1개당 반응률(R_N)의 곱으로 중성자 검출기의 총 중성자 반응률(Reaction Rates, RR)을 계산하는 단계를 포함하는, 연소도 측정 방법.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 샘플 사용후핵연료에 관한 정보로부터 상기 식 (1)을 도출하는 단계는

상기 연소도 측정 장치가 상기 샘플 사용후핵연료로부터 미리 정해진 거리만큼 중성자 검출기를 이격시킨 상태를 시뮬레이션한 MCNP 결과로부터 상기 식 (1)을 도출하는, 연소도 측정 방법.

청구항 10

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 11

중성자 검출기의 사용후핵연료에 대한 총 중성자 반응률 및 측정 거리, 사용후핵연료의 초기 농축도 및 냉각 기간의 관계식으로 대상 사용후핵연료의 연소도를 측정하는, 연소도 측정 장치.

청구항 12

제11항에 있어서,

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

$$BU = a1(RR)^{b1}(IE)^{c1}e^{d1t}e^{f1x} \text{ --- 식 (1)}$$

여기서 BU는 대상 사용후핵연료의 연소도(GWD/MTU)이고, RR은 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료에 대한 총 중성자 반응률(reaction rate, Reaction Rates/sec·MTU)이고, IE는 대상 사용후핵연료의 초기 농축도(%)이고, t는 대상 사용후핵연료의 냉각 기간(년)이고, x는 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료에 대한 측정 거리(cm)이고, a1, b1, c1, d1, f1는 상수이다.

청구항 13

제12항에 있어서,

상기 식 (1)에서, a1는 0.462±0.03, b1는 0.28±0.005, c1는 0.325±0.02, d1는 0.0103±0.000125, f1는 0.0527±0.001인, 연소도 측정 장치.

청구항 14

제12항에 있어서,

상기 연소도 측정 장치는 대상 사용후핵연료의 냉각수에 중성자 흡수재가 포함되어 있는지 여부에 따라 서로 다른 관계식으로 대상 사용후핵연료의 연소도를 측정하는, 연소도 측정 장치.

청구항 15

제14항에 있어서,

대상 사용후핵연료의 냉각수에 중성자 흡수재가 포함되어 있지 않은 경우, 상기 연소도 측정 장치는 상기 식 (1)로 사용후핵연료의 연소도를 측정하고,

대상 사용후핵연료의 냉각수에 중성자 흡수재가 포함되어 있는 경우, 상기 연소도 측정 장치는 이하의 식 (2)로 사용후핵연료의 연소도를 측정하는, 연소도 측정 장치.

$$BU = a1'(RR)^{b1'}(IE)^{c1'}e^{d1't}e^{f1'x} \text{ --- 식 (2)}$$

여기서 BU는 대상 사용후핵연료의 연소도(GWD/MTU)이고, RR은 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료에 대한 총 중성자 반응률(reaction rate, Reaction Rates/sec·MTU)이고, IE는 대상 사용후핵연료의 초기 농축도(%)이고, t는 대상 사용후핵연료의 냉각 기간(년)이고, x는 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료에 대한 측정 거리(cm)이고, a1', b1', c1', d1', f1'는 상수이다. 또한 중성자 흡수재는 2000ppm 농도의 보론이다.

청구항 16

제15항에 있어서,

상기 식 (2)에서 a1’는 0.7315±0.032, b1’는 0.2558±0.0035, c1’는 0.404±0.015, d1’는 0.00905±0.0002, f1’는 0.0514±0.001인, 연소도 측정 장치.

청구항 17

제12항에 있어서,

상기 연소도 측정 장치는 샘플 사용후핵연료에 관한 정보를 획득하고, 샘플 사용후핵연료에 관한 정보로부터 상기 식 (1)을 도출하는, 연소도 측정 장치.

청구항 18

제17항에 있어서,

상기 연소도 측정 장치는 ORIGEN을 이용해 액티나이드(Actinide), 자발핵분열(Spontaneous fission) 핵종과 샘플 사용후핵연료(Fs)의 중성자 발생률(S_N)을 계산하고, 자발핵분열 핵종을 MCNP의 중성자 선원으로 이용하여 중성자 검출기의 중성자 1개당 반응률(R_N)을 계산하고, 계산된 중성자 발생률(S_N)과 중성자 검출기의 중성자 1개당 반응률(R_N)의 곱으로 중성자 검출기의 총 중성자 반응률(Reaction Rates, RR)을 계산하여 샘플 사용후핵연료에 관한 정보를 획득하는, 연소도 측정 장치.

청구항 19

제18항에 있어서,

상기 연소도 측정 장치는 샘플 사용후핵연료로부터 미리 정해진 거리만큼 중성자 검출기를 이격시킨 상태를 시뮬레이션한 MCNP 결과로부터 상기 식 (1)을 도출하는, 연소도 측정 장치.

청구항 20

제11항에 있어서,

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

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 중성자 검출기의 총 중성자 반응률을 이용한 사용후핵연료의 연소도 측정 장치 및 방법에 관한 발명이다.

배 경 기 술

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

[0003] 현재 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 방식은 사용후핵연료에 남아있는 액티나이드(actinide)와 핵분열생성물에서 발생하는 중성자 및 감마선을 측정하는 방식이다. 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 방식도 연소도 측정 장비 제조사에서 기밀로 유지하고 있어 공개되어 있지 않다.

[0004] 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.

선행기술문헌

특허문헌

[0005] (특허문헌 0001) 한국등록특허공보 KR 1406881 B1

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명은 종래 사용후핵연료의 연소도 측정 방식에 비해 총 중성자 반응률(reaction rate)을 이용하여 용이하게 연소도를 측정할 수 있는 방법 및 장치를 제공한다.

과제의 해결 수단

[0007] 연소도 측정 방법은 연소도 측정 장치가, 중성자 검출기의 사용후핵연료에 대한 총 중성자 반응률 및 측정 거리, 사용후핵연료의 초기 농축도 및 냉각 기간의 관계식으로 대상 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 단계를 포함할 수 있다.

[0008] 대상 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 단계는 이하의 식 (1)로 사용후핵연료의 연소도를 측정할 수 있다.

[0009] $BU = a1(RR)^{b1}(IE)^{c1}e^{d1t}e^{f1x}$ --- 식 (1)

[0010] 여기서 BU는 대상 사용후핵연료의 연소도(GWD/MTU)이고, RR은 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료에 대한 총 중성자 반응률(reaction rate, Reaction Rates/sec·MTU)이고, IE는 대상 사용후핵연료의 초기 농축도(%)이고, t는 대상 사용후핵연료의 냉각 기간(년)이고, x는 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료에 대한 측정 거리(cm)이고, a1, b1, c1, d1, f1는 상수이다.

[0011] 상기 식 (1)에서, a1는 0.462±0.03, b1는 0.28±0.005, c1는 0.325±0.02, d1는 0.0103±0.000125, f1는 0.0527±0.001일 수 있다.

[0012] 대상 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 단계에서, 대상 사용후핵연료의 냉각수에 중성자 흡수재가 포함되어 있는지 여부에 따라 서로 다른 관계식으로 대상 사용후핵연료의 연소도를 측정할 수 있다.

[0013] 대상 사용후핵연료의 냉각수에 중성자 흡수재가 포함되어 있지 않은 경우, 대상 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 단계는 상기 식 (1)로 사용후핵연료의 연소도를 측정하고, 대상 사용후핵연료의 냉각수에 중성자 흡수재가 포함되어 있는 경우, 대상 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 단계는 이하의 식 (2)로 사용후핵연료의 연소도를 측정할 수 있다.

[0014] $BU = a1'(RR)^{b1'}(IE)^{c1'}e^{d1't}e^{f1'x}$ --- 식 (2)

[0015] 여기서 BU는 대상 사용후핵연료의 연소도(GWD/MTU)이고, RR은 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료에 대한 총 중성자 반응률(reaction rate, Reaction Rates/sec·MTU)이고, IE는 대상 사용후핵연료의 초기 농축도(%)이고, t는 대상 사용후핵연료의 냉각 기간(년)이고, x는 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료에 대한 측정 거리(cm)이고, a1', b1', c1', d1', f1'는 상수이다. 또한 중성자 흡수재는 2000ppm 농도의 보론이다.

[0016] 상기 식 (2)에서 a1’는 0.7315±0.032, b1’는 0.2558±0.0035, c1’는 0.404±0.015, d1’는 0.00905±0.0002, f1’는 0.0514±0.001일 수 있다.

[0017] 대상 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 단계 전에, 상기 연소도 측정 장치가 샘플 사용후핵연료에 관한 정보를 획득하는 단계 및 샘플 사용후핵연료에 관한 정보로부터 상기 식 (1)을 도출하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0018] 샘플 사용후핵연료에 관한 정보를 획득하는 단계는 상기 연소도 측정 장치가 ORIGEN을 이용해 액티나이드(Actinide), 자발핵분열(Spontaneous fission) 핵종과 샘플 사용후핵연료(Fs)의 중성자 발생률(S_N)을 계산하고, 자발핵분열 핵종을 MCNP의 중성자 선원으로 이용하여 중성자 검출기의 중성자 1개당 반응률(R_N)을 계산하고, 계산된 중성자 발생률(S_N)과 중성자 검출기의 중성자 1개당 반응률(R_N)의 곱으로 중성자 검출기의 총 중성자 반응률(Reaction Rates, RR)을 계산하는 단계를 포함할 수 있다.

[0019] 상기 샘플 사용후핵연료에 관한 정보로부터 상기 식 (1)을 도출하는 단계는 상기 연소도 측정 장치가 상기 샘플 사용후핵연료로부터 미리 정해진 거리만큼 중성자 검출기를 이격시킨 상태를 시뮬레이션한 MCNP 결과로부터 상기 식 (1)을 도출할 수 있다.

[0020] 상기 사용후핵연료의 연소도를 측정하는 단계는 전체 냉각 기간 중 Cm-244가 주요 중성자 발생 핵종인 냉각 기간에 대해 측정할 수 있다.

[0021] 연소도 측정 장치는 중성자 검출기의 사용후핵연료에 대한 총 중성자 반응률 및 측정 거리, 사용후핵연료의 초기 농축도 및 냉각 기간의 관계식으로 대상 사용후핵연료의 연소도를 측정할 수 있다.

[0022] 상기 연소도 측정 장치는 이하의 식 (1)로 사용후핵연료의 연소도를 측정할 수 있다.

[0023] $BU = a1(RR)^{b1}(IE)^{c1}e^{d1t}e^{f1x}$ --- 식 (1)

[0024] 여기서 BU는 대상 사용후핵연료의 연소도(GWD/MTU)이고, RR은 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료에 대한 총 중성자 반응률(reaction rate, Reaction Rates/sec·MTU)이고, IE는 대상 사용후핵연료의 초기 농축도(%)이고, t는 대상 사용후핵연료의 냉각 기간(년)이고, x는 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료에 대한 측정 거리(cm)이고, a1, b1, c1, d1, f1는 상수이다.

[0025] 상기 식 (1)에서, a1는 0.462±0.03, b1는 0.28±0.005, c1는 0.325±0.02, d1는 0.0103±0.000125, f1는 0.0527±0.001일 수 있다.

[0026] 상기 연소도 측정 장치는 대상 사용후핵연료의 냉각수에 중성자 흡수재가 포함되어 있는지 여부에 따라 서로 다른 관계식으로 대상 사용후핵연료의 연소도를 측정할 수 있다.

[0027] 대상 사용후핵연료의 냉각수에 중성자 흡수재가 포함되어 있지 않은 경우, 상기 연소도 측정 장치는 상기 식 (1)로 사용후핵연료의 연소도를 측정하고, 대상 사용후핵연료의 냉각수에 중성자 흡수재가 포함되어 있는 경우, 상기 연소도 측정 장치는 이하의 식 (2)로 사용후핵연료의 연소도를 측정할 수 있다.

[0028] $BU = a1'(RR)^{b1'}(IE)^{c1'}e^{d1't}e^{f1'x}$ --- 식 (2)

[0029] 여기서 BU는 대상 사용후핵연료의 연소도(GWD/MTU)이고, RR은 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료에 대한 총 중성자 반응률(reaction rate, Reaction Rates/sec·MTU)이고, IE는 대상 사용후핵연료의 초기 농축도(%)이고, t는 대상 사용후핵연료의 냉각 기간(년)이고, x는 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료에 대한 측정 거리(cm)이고, a1', b1', c1', d1', f1'는 상수이다. 또한 중성자 흡수재는 2000ppm 농도의 보론이다.

[0030] 상기 식 (2)에서 a1'는 0.7315±0.032, b1'는 0.2558±0.0035, c1'는 0.404±0.015, d1'는 0.00905±0.0002, f1'는 0.0514±0.001일 수 있다.

[0031] 상기 연소도 측정 장치는 샘플 사용후핵연료에 관한 정보를 획득하고, 샘플 사용후핵연료에 관한 정보로부터 상기 식 (1)을 도출할 수 있다.

[0032] 상기 연소도 측정 장치는 ORIGEN을 이용해 액티나이드(Actinide), 자발핵분열(Spontaneous fission) 핵종과 샘플 사용후핵연료(Fs)의 중성자 발생률(S_N)을 계산하고, 자발핵분열 핵종을 MCNP의 중성자 선원으로 이용하여 중성자 검출기의 중성자 1개당 반응률(R_N)을 계산하고, 계산된 중성자 발생률(S_N)과 중성자 검출기의 중성자 1개당 반응률(R_N)의 곱으로 중성자 검출기의 총 중성자 반응률(Reaction Rates, RR)을 계산하여 샘플 사용후핵연료에 관한 정보를 획득할 수 있다.

[0033] 상기 연소도 측정 장치는 샘플 사용후핵연료로부터 미리 정해진 거리만큼 중성자 검출기를 이격시킨 상태를 시뮬레이션한 MCNP 결과로부터 상기 식 (1)을 도출할 수 있다.

[0034] 상기 연소도 측정 장치는 전체 냉각 기간 중 Cm-244가 주요 중성자 발생 핵종인 냉각 기간에 대해 측정할 수 있다.

발명의 효과

[0035] 본 발명에 따른 사용후핵연료의 연소도 측정 장치 및 방법은 복잡한 계산식 없이, 사용후핵연료의 초기 농축도, 냉각 기간 및 중성자 검출기의 총 중성자 반응률 및 측정 거리로부터 사용후핵연료의 연소도를 용이하게 계산할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0036] 도 1은 연소도 측정 장치를 나타낸다.

도 2는 냉각 기간에 따른 방사성 핵종별 총 중성자 발생률을 나타낸다.

도 3은 사용후핵연료의 초기 농축도와 연소도의 현황을 나타낸다.

도 4는 본 발명에 의해 사용후핵연료의 초기 농축도, 냉각 기간 및 중성자 검출기의 총 중성자 반응률 및 측정 거리로 계산한 사용후핵연료의 연소도를 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0037] 이하, 첨부된 도면에 예시된 실시예를 참조하여 본 개시를 설명한다. 설명되는 실시예들은 본 명세서에서 설명되는 내용에 한정되지 않고 서로 다른 형태를 가질 수도 있다. 따라서 실시예는 본 발명의 측면 및 특징을 설명하기 위해 도면을 참조하여 이하에서 설명될 뿐이다.

[0038] 본 개시는 다양한 실시예 및 변형예를 포함하며, 특정 실시예들을 도면에 예시하고 아래의 설명에서 설명하고자 한다. 그러나 본 개시는 상술한 실시예에 한정되지 않고, 본 발명의 사상 및 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함한다.

[0039] 요소(element) 또는 층(layer)이 다른 요소 또는 층의 "위에" 있거나, 다른 요소 또는 층에 "연결"되거나 또는 "결합"된 것으로 지칭될 때, 해당 요소 또는 층이 다른 요소 또는 층 상에 직접, 연결 또는 결합될 수 있다. 또는 하나 이상의 요소 또는 층이 추가로 존재할 수 있다. 요소 또는 층이 다른 요소 또는 레이어에 "바로 위에" 있거나, "직접 연결"되거나 또는 "직접 결합"되는 것으로 지칭될 때는 그 사이에 다른 중간 요소 또는 중간 층이 존재하지 않을 수 있다. 예를 들어, 제1요소가 제2요소와 "결합" 또는 "연결"된다고 기재된 경우, 제1요소는 제2요소에 직접 결합 또는 연결될 수도 있고, 제1요소가 하나 이상의 중간 요소를 통해 제2요소에 간접적으로

결합 또는 연결될 수도 있다.

[0040] 도면에서 다양한 요소, 층 등의 치수는 예시의 명확성을 위해 과장될 수 있다. 동일한 도면부호는 동일한 요소를 나타낼 수 있다. 본 명세서에서 사용되는 바와 같이, "및/또는"이라는 용어는 연관된 나열된 항목 중 하나 이상의 임의의 및 모든 조합을 포함한다. 또한, 본 개시의 실시예를 설명할 때 "할 수 있다"의 사용은 "본 개시의 하나 이상의 실시예"와 관련이 있다. "적어도 하나" 및 "어떤 하나"와 같은 표현은 요소들의 리스트 앞에 올 때, 요소들의 전체 리스트를 변경하되 리스트의 개별 요소를 변경하지 않을 수 있다. 예를 들어, "a, b 또는 c 중 적어도 하나"라는 표현은 a만, b만, c만, a와 b 모두, a와 c 모두, b와 c 모두, a, b, c 모두 또는 그 변형을 나타낼 수 있다. 본 명세서에서 사용되는 바와 같이, "사용하다", "사용하는" 및 "사용되는"이라는 용어는 각각 "활용하다", "활용하는" 및 "활용되는"이라는 용어와 동의어로 간주될 수 있다. 본 명세서에 사용된 용어 "실질적으로", "약" 및 유사한 용어는 정도의 용어가 아닌 근사치의 용어로 사용되며, 통상의 기술자가 인식할 수 있는 측정 또는 계산된 값의 내재적 변동을 설명하기 위한 것이다.

[0041] 제1, 제2, 제3 등의 용어가 본 명세서에서 다양한 요소, 구성요소(component), 영역(region), 층 및/또는 단면(section)을 설명하기 위해 사용될 수 있지만, 이들 요소, 구성요소, 영역, 층 및/또는 단면이 이러한 용어로 제한되지 않는다. 이러한 용어는 하나의 요소, 구성요소, 영역, 층 또는 단면을 다른 요소, 구성요소, 영역, 층 또는 단면과 구별하는 데 사용된다. 따라서 아래에서 논의되는 제1요소, 제1구성요소, 제1영역, 제1층 또는 제1단면은 예시적인 실시예의 개시로부터 벗어나지 않고 제2요소, 제2구성요소, 제2영역, 제2층 또는 제2단면으로 명명될 수 있다.

[0042] "아래", "하부", "위", "상부" 등과 같은 공간적으로 상대적인 용어는 다른 요소(들)에 대한 하나의 요소 또는 다른 요소와 특징의 관계 또는 그림에 설명된 기능(들)을 설명하기 위해 설명의 편의를 목적으로 본 명세서에서 사용될 수 있다. 공간적으로 상대적인 용어는 도면에 묘사된 방향에 더하여 사용 또는 작동 중인 장치의 다른 방향을 포함할 수 있다. 예를 들어, 도면의 장치가 뒤집힌 경우, 다른 요소 또는 특징의 “아래” 또는 “하부"로 설명된 요소는 다른 요소 또는 특징의 “위" 또는 “상부"로 배향될 수 있다. 따라서, "아래"라는 용어는 위 및 아래의 방향을 모두 포함할 수 있다. 장치는 다른 방향(90도 회전 또는 다른 방향으로)으로 향할 수 있으며 본 명세서에서 사용된 공간적으로 상대적인 설명어는 이에 따라 해석되어야 한다.

[0043] 본 명세서에서 사용한 용어는 본 발명의 실시예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 본 명세서에서 사용되는 단수형은 문맥상 명백하게 다르게 나타내지 않는 한 복수형도 포함할 수 있다. "포함하다", "구비하다", "구성하다"라는 용어는 본 명세서에서 사용될 때 명시된 특징, 정수, 단계, 동작, 요소 및/또는 구성요소를 특정하나, 하나 이상의 다른 기능, 정수, 단계, 동작, 요소, 구성요소 및/또는 이들의 그룹의 존재 또는 추가를 배제하지 않는다.

[0044] 실시예가 프로세스로 구현될 수 있는 경우, 특정 프로세스 순서는 설명된 순서와 다르게 수행될 수 있다. 예를 들어, 연속하여 설명되는 두 개의 프로세스는 동시에 또는 실질적으로 동시에 수행될 수도 있고, 설명된 순서와 역순으로 수행될 수도 있다.

[0045] 도 1은 연소도 측정 장치(10)를 나타내고, 도 2는 냉각 기간에 따른 방사성 핵종별 총 중성자 발생률을 나타내고, 도 3은 사용후핵연료의 초기 농축도와 연소도의 현황을 나타내고, 도 4는 본 발명에 의해 사용후핵연료의 초기 농축도, 냉각 기간 및 중성자 검출기의 총 중성자 반응률 및 측정 거리로 계산한 사용후핵연료의 연소도를 나타낸다.

[0046] 연소도 측정 장치(10)는 사용후핵연료(Spent Fuel, F)의 연소도를 측정하기 위한 장치일 수 있다. 사용후핵연료(F)는 연소도 측정 장치(10)가 연소도를 측정하고자 하는 대상 사용후핵연료(Ft)를 포함할 수 있다. 또한 사용후핵연료(F)는 대상 사용후핵연료(Ft)의 연소도를 측정하기 위한 사전 데이터로 이용되며 연소 이력을 미리 알고 있는 샘플 사용후핵연료(Fs)를 포함할 수 있다. 본 명세서에서 사용후핵연료(F)는 대상 사용후핵연료(Ft)와 연소 이력을 미리 알고 있는 샘플 사용후핵연료(Fs)는 구분될 수 있으며, 첨자 없이 사용후핵연료(F)로 표기하더라도 문맥에 따라 대상 사용후핵연료(Ft)와 샘플 사용후핵연료(Fs)로 구분되어 이해될 수 있다.

[0047] 연소도 측정 장치(10)는 중성자 검출기(예를 들어 He-3 검출기)의 총 중성자 반응률(total neutron reaction rates), 사용후핵연료(F)의 냉각 기간(cooling time), 초기 농축도(initial enrichment) 및 중성자 검출기의 측정 거리(중성자 검출기와 사용후핵연료(Ft)의 거리)를 이용해 대상 사용후핵연료(Ft)의 연소도를 측정할 수 있다. 중성자 검출기는 대상 사용후핵연료(Ft)에서 방출되는 중성자가 중성자 검출기에 포함된 헬륨 원자와 충돌하면서 방출되는 양성자 수를 측정해 대상 사용후핵연료(Ft)에서 방출되는 중성자 수를 측정할 수 있다.

[0048] $1n + {}^{3}He \rightarrow {}^{3}H + {}^{1}H$, 0.764 MeV

[0049] 연소도 측정 장치(10)는 대상 사용후핵연료(Ft)의 연소도를 측정하기 위한 정보를 포함할 수 있다. 예를 들어 연소도 측정 장치(10)는 서로 다른 샘플 사용후핵연료(Fs)의 냉각 기간, 초기 농축도 및 중성자 검출기의 총 중성자 반응률 및 측정 거리에 따른 샘플 사용후핵연료(Fs)의 연소도에 관한 정보를 포함할 수 있다. 즉, 연소도 측정 장치(10)는 중성자 검출기의 총 중성자 반응률, 측정 거리, 사용후핵연료의 냉각 기간 및 초기 농축도의 관계식을 도출하기 위한 데이터베이스를 구축하기 위해, 여러 종류의 샘플 사용후핵연료(Fs)의 정보를 포함할 수 있다. 연소도 측정 장치(10)는 해당 정보를 계산 알고리즘(예를 들어 ORIGEN 또는 MCNP)에 입력해 데이터베이스를 구축할 수 있다. ORIGEN과 MCNP는 상용 계산 알고리즘으로서, 이를 이용해 관련 정보를 도출하는 알고리즘은 공지된 방법을 이용할 수 있다.

[0050] 연소도 측정 장치(10)는 상기 정보에 기반해 샘플 사용후핵연료(Fs)의 연소도에 따른 중성자 검출기의 총 중성자 반응률을 계산하고, 샘플 사용후핵연료(Fs)의 연소도와 중성자 검출기의 총 중성자 반응률의 상관 관계에 관한 관계식을 도출할 수 있다. 즉, 연소도 측정 장치(10)는 계산 알고리즘에 미리 입력된 서로 다른 샘플 사용후핵연료(Fs)의 냉각 기간, 초기 농축도 및 중성자 검출기의 총 중성자 반응률 및 측정 거리에 따른 샘플 사용후핵연료(Fs)의 연소도에 관한 정보에 기반하여, 중성자 검출기의 총 중성자 반응률과 샘플 사용후핵연료(Fs)의 연소도의 관계식을 도출할 수 있다. 그리고 대상 사용후핵연료(Ft)의 냉각 기간, 초기 농축도를 알고 있는 상태에서, 계산 알고리즘을 이용해 총 중성자 반응률을 계산하고, 중성자 검출기의 임의의 측정 거리를 도출된 관계식에 대입해 대상 사용후핵연료(Ft)의 연소도를 측정할 수 있다. 여기서 대상 사용후핵연료(Ft)의 냉각 기간, 초기 농축도는 대상 사용후핵연료(Ft)의 관리 이력, 연소 이력 등으로부터 알 수 있고, 중성자 검출기의 측정 거리는 임의의 값으로 정할 수 있으며, 중성자 검출기의 총 중성자 반응률은 계산 알고리즘(예를 들어 ORIGEN 또는 MCNP)을 이용해 계산할 수 있다.

[0051] 예를 들어 연소도 측정 장치(10)는 여러 종류의 샘플 사용후핵연료(Fs)의 연소 이력에 관한 정보(예를 들어 샘플 사용후핵연료(Fs)의 초기 농축도, 연소도, 냉각 기간, 샘플 사용후핵연료(Fs)의 형태, 냉각수 등에 관한 정보)를 포함할 수 있다. 연소도 측정 장치(10)는 상기 정보로부터 샘플 사용후핵연료(Fs)의 초기 농축도와 연소도(평균 연소도)의 관계식을 설정할 수 있다. 그리고 연소도 측정 장치(10)는 미리 정해진 범위의 샘플 사용후핵연료(Fs)의 초기 농축도(예를 들어 2.4% 이상 4.8% 이하) 및 미리 정해진 범위의 샘플 사용후핵연료(Fs)의 연소도(평균 연소도)의 범위(예를 들어 샘플 사용후핵연료(Fs)의 연소 이력에 포함된 연소도의 ±30% 범위)를 설정한 후, 계산 알고리즘을 이용해 샘플 사용후핵연료(Fs)의 연소도에 따른 중성자 검출기의 총 중성자 반응률에 관한 정보를 획득할 수 있다. 그리고 연소도 측정 장치(10)는 샘플 사용후핵연료(Fs)로부터 미리 정해진 거리 범위만큼 중성자 검출기를 이격시킨 상태를 시뮬레이션한 계산 알고리즘(예를 들어 MCNP) 결과로부터, 샘플 사용후핵연료(Fs)의 연소도를 사용후핵연료(F)의 초기 농축도 및 냉각 기간, 중성자 검출기의 총 중성자 반응률의 관계식으로 나타낼 수 있다.

[0052] 연소도 측정 장치(10)는 계산 알고리즘을 이용해 다양한 경우에 대해 샘플 사용후핵연료(Fs)의 연소도에 따른 중성자 검출기의 총 중성자 반응률을 연산한 후, 샘플 사용후핵연료(Fs)의 연소도와 중성자 검출기의 총 중성자 반응률의 상관 관계를 수식으로 도출하고, 연소도를 측정하고자 하는 대상 사용후핵연료(Ft)에 대한 중성자 검출기의 총 중성자 반응률로부터 대상 사용후핵연료(Ft)의 연소도를 측정할 수 있다.

[0053] 연소도 측정 장치(10)는 메모리, 프로세서, 논리 회로, 룩업(look-up) 테이블 등 하나 이상의 마이크로프로세서 또는 다른 제어 장치를 통해 각각의 제어 기능을 실행하는 직접 회로 구조를 이용할 수 있다. 연소도 측정 장치(10)는 특정 논리 기능을 실행하기 위한 하나 이상의 실행 가능한 지시를 포함하는 모듈, 프로그램 또는 코드의 일부로 구현될 수 있다. 연소도 측정 장치(10)는 각각의 기능이나 마이크로프로세서 등을 실행하는 중앙 처리 장치와 같은 프로세서를 포함하거나 이에 의해 구현될 수 있다. 연소도 측정 장치(10)는 외부 장치 등과 데이터를 송수신할 수 있는 통신 장치를 포함할 수 있다. 통신 장치는 디지털 모뎀, RF 모뎀, 안테나 회로, 와이파이 칩 및 관련 소프트웨어 및/또는 펌웨어의 하나 이상의 조합을 포함할 수 있다.

[0054] 연소도 측정 장치(10)는 연산부(100) 및 메모리부(200)를 포함할 수 있다.

[0055] 연산부(100)는 연소도 측정 장치(10)(예를 들어 메모리부(200))에 미리 저장된 샘플 사용후핵연료(Fs)에 관한 정보에 기반하여, 대상 사용후핵연료(Ft)의 연소도를 계산할 수 있다. 예를 들어 연산부(100)은 중성자 검출기의 사용후핵연료(F)에 대한 총 중성자 반응률 및 측정 거리, 샘플 사용후핵연료(Fs)의 냉각 기간 및 초기 농축도를 이용해 대상 사용후핵연료(Ft)의 연소도를 계산할 수 있다. 즉, 연산부(100)는 미리 저장된 샘플 사용후핵연료(Fs)의 연소도, 중성자 검출기의 샘플 사용후핵연료(Fs)에 대한 총 중성자 반응률 및 측정 거리, 샘플 사용

후핵연료(Fs)의 냉각 기간 및 초기 농축도에 관한 데이터로부터 샘플 사용후핵연료(Fs)의 연소도, 중성자 검출기의 사용후핵연료(F)에 대한 총 중성자 반응률 및 측정 거리, 사용후핵연료(F)의 냉각 기간 및 초기 농축도의 관계식을 도출할 수 있다. 그리고 연산부(100)는 상기 관계식에 대상 사용후핵연료(Ft)의 총 중성자 반응률을 대입하여, 역으로 대상 사용후핵연료(Ft)의 연소도를 측정할 수 있다.

[0056] 연산부(100)는 미리 저장된 샘플 사용후핵연료(Fs)에 관한 정보로부터 샘플 사용후핵연료(Fs)의 초기 농축도와 연소도(평균 연소도)의 관계식을 도출할 수 있다. 예를 들어 연산부(100)는 아래의 식과 같이 샘플 사용후핵연료(Fs)의 초기 농축도와 연소도를 도출할 수 있다.

[0057] BU = 10*IE+2

[0058] 여기서 BU는 연소도이며 단위는 GWD(Giga Watt Day)/MTU(Metric Ton Uranium)이고, IE는 샘플 사용후핵연료(Fs)의 초기 농축도로서 단위는 %이다.

[0059] 연산부(100)는 미리 정해진 범위의 샘플 사용후핵연료(Fs)의 초기 농축도(예를 들어 2.4% 이상 4.8% 이하) 및 미리 정해진 범위의 샘플 사용후핵연료(Fs)의 연소도(평균 연소도)의 범위(예를 들어 샘플 사용후핵연료(Fs)의 연소 이력에 포함된 연소도의 ±30% 범위)를 설정한 후, 계산 알고리즘(예를 들어 ORIGEN 및 MCNP)을 이용해 샘플 사용후핵연료(Fs)의 연소도에 따른 중성자 검출기의 총 중성자 반응률에 관한 정보를 획득할 수 있다. 예를 들어 연산부(100)는 계산 알고리즘(예를 들어 ORIGEN)을 이용해 액티나이드(Actinide), 자발핵분열(Spontaneous fission) 핵종과 샘플 사용후핵연료(Fs)의 중성자 발생률(S_N)을 계산할 수 있다. 그리고 연산부(100)는 계산 알고리즘을 이용하여 계산된 주요 액티나이드, 자발핵분열 핵종을 계산 알고리즘(예를 들어 MCNP)의 중성자 선원으로 이용하여 중성자 검출기의 중성자 1개당 반응률(R_N)을 계산하며, 계산된 중성자 발생률(S_N)과 중성자 검출기의 중성자 1개당 반응률(R_N)의 곱으로 중성자 검출기의 총 중성자 반응률(Reaction Rates, RR)을 계산할 수 있다. 여기서 연산부(100)는 그 자체에 ORIGEN 및 MCNP를 포함하거나, 외부 서버 또는 외부 사용자 단말에 포함된 ORIGEN 및 MCNP를 이용할 수 있다.

[0060] 중성자 검출기의 RR = S_N X R_N

[0061] 여기서 RR=Reaction Rates/sec · MTU, S_N=Neutrons/sec · MTU, R_N=Reaction rate/neutron일 수 있다.

[0062] 그리고 연산부(100)는 샘플 사용후핵연료(Fs)로부터 미리 정해진 거리 범위만큼 중성자 검출기를 이격시킨 상태를 시뮬레이션한 계산 알고리즘(예를 들어 MCNP) 결과로부터, 샘플 사용후핵연료(Fs)의 연소도를 샘플 사용후핵연료(Fs)의 초기 농축도 및 냉각 기간, 중성자 검출기의 총 중성자 반응률의 관계식으로 나타낼 수 있다.

[0063] 연산부(100)은 중성자 검출기의 총 중성자 반응률 및 측정 거리, 샘플 사용후핵연료(Fs)의 냉각 기간 및 초기 농축도를 이용해 측정하고자 하는 대상 사용후핵연료(Ft)의 연소도를 계산하며, 이때 아래의 식 (1)을 이용할 수 있다.

[0064] $BU = a1(RR)^{b1}(IE)^{c1}e^{d1t}e^{f1x}$ - 식 (1)

[0065] 여기서 BU는 사용후핵연료의 연소도(GWD/MTU)이고, RR은 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료(Ft)에 대한 총 중성자 반응률(reaction rate, Reaction Rates/sec · MTU)이고, IE는 사용후핵연료의 초기 농축도(%)이고, t는 냉각 기간(년)이고, x는 중성자 검출기(중성자 검출기)의 사용후핵연료에 대한 측정 거리(cm)이고, a1, b1, c1, d1, f1는 상수이며, a1는 0.462±0.03, b1는 0.28±0.005, c1는 0.325±0.02, d1는 0.0103±0.000125, f1는 0.0527±0.001이다. 여기서 대상 사용후핵연료(Ft)의 냉각 기간, 초기 농축도는 대상 사용후핵연료(Ft)의 관리 이력, 연소 이력 등으로부터 알 수 있고, 중성자 검출기의 측정 거리는 임의의 값으로 정할 수 있으며, 중성자 검출기의 총 중성자 반응률은 계산 알고리즘(예를 들어 ORIGEN 또는 MCNP)을 이용해 계산할 수 있다. 중성자 검출기의 RR = S_N X R_N.

[0066] 연산부(100)는 측정하고자 하는 대상 사용후핵연료(Ft)가 순수한 냉각수에 저장된 경우와 대상 사용후핵연료(Ft)가 보론(붕소)을 포함하는 냉각수에 저장된 경우, 서로 다른 식으로 대상 사용후핵연료(Ft)의 연소도를 계산할 수 있다. 예를 들어 측정하고자 하는 대상 사용후핵연료(Ft)가 순수한 냉각수에 저장된 경우, 연산부(100)는 식 (1)을 이용해 대상 사용후핵연료(Ft)의 연소도를 계산할 수 있다. 반면 대상 사용후핵연료(Ft)가 보론을 포함하는 냉각수에 저장된 경우, 연산부(100)는 아래의 식 (2)을 이용해 대상 사용후핵연료(Ft)의 연소도를 계산할 수 있다.

[0067] $BU = a1'(RR)^{b1'}(IE)^{c1'}e^{d1't}e^{f1'x}$ - 식 (2)

[0068] 여기서 BU는 사용후핵연료의 연소도(GWD/MTU)이고, RR은 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료(Ft)에 대한 총 중성자 반응률(reaction rate, Reaction Rates/sec·MTU)이고, IE는 사용후핵연료의 초기 농축도(%)이고, t는 냉각 기간(년)이고, x는 중성자 검출기(중성자 검출기)의 사용후핵연료에 대한 측정 거리(cm)이고, a1', b1', c1', d1', f1'는 상수이며, a1’는 0.7315±0.032, b1’는 0.2558±0.0035, c1’는 0.404±0.015, d1’는 0.00905±0.0002, f1’는 0.0514±0.001이다.

[0069] 연산부(100)는 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료(Ft)에 대한 총 중성자 반응률을 중성자 검출기의 측정 거리, 샘플 사용후핵연료(Fs)의 냉각 기간, 초기 농축도, 연소도의 관계식으로 나타낼 수 있다. 예를 들어 연산부(100)는 중성자 검출기의 측정 거리, 샘플 사용후핵연료(Fs)의 냉각 기간, 초기 농축도, 연소도를 이용해 측정하고자 하는 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료(Ft)에 대한 총 중성자 반응률을 아래의 식 (3)으로 계산할 수도 있다.

[0070] $RR = a2(BU)^{b2}(IE)^{c2}e^{d2t}e^{f2x}$ - 식 (3)

[0071] 여기서 BU는 사용후핵연료의 연소도(GWD/MTU)이고, RR은 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료(Ft)에 대한 총 중성자 반응률(reaction rate, Reaction Rates/sec·MTU)이고, IE는 사용후핵연료의 초기 농축도(%)이고, t는 냉각 기간(년)이고, x는 중성자 검출기(중성자 검출기)의 사용후핵연료에 대한 측정 거리(cm)이고, a2, b2, c2, d2, f2는 상수이며, a2는 17.4±3.0, b2는 3.534±0.06 c2는 -1.124±0.1, d2는 -0.037±0.0005, f2는 -0.18845±0.00165이다.

[0072] 연산부(100)는 대상 사용후핵연료(Ft)가 보론을 포함하는 냉각수에 저장된 경우에도, 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료(Ft)에 대한 총 중성자 반응률을 중성자 검출기의 측정 거리, 샘플 사용후핵연료(Fs)의 냉각 기간, 초기 농축도, 연소도의 관계식으로 나타낼 수 있다. 예를 들어 연산부(100)는 중성자 검출기의 측정 거리, 샘플 사용후핵연료(Fs)의 냉각 기간, 초기 농축도, 연소도를 이용해 측정하고자 하는 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료(Ft)에 대한 총 중성자 반응률을 아래의 식 (4)로 계산할 수도 있다.

[0073] $RR = a2'(BU)^{b2'}(IE)^{c2'}e^{d2't}e^{f2'x}$ - 식 (4)

[0074] 여기서 BU는 사용후핵연료의 연소도(GWD/MTU)이고, RR은 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료(Ft)에 대한 총 중성자 반응률(reaction rate, Reaction Rates/sec·MTU)이고, IE는 사용후핵연료의 초기 농축도(%)이고, t는 냉각 기간(년)이고, x는 중성자 검출기(중성자 검출기)의 사용후핵연료에 대한 측정 거리(cm)이고, a2', b2', c2', d2', f2'는 상수이며, a2’는 3.64±0.55, b2’는 3.88±0.05, c2’는 -1.554±0.08, d2’는 -0.0354±0.0005, f2’는 -0.2009±0.0015이다. 즉, 대상 사용후핵연료(Ft)가 보론을 포함하는 냉각수에 저장된 경우, 연산부(100)는 보론의 중성자 흡수 효과를 고려해 보정된 식으로 중성자 검출기의 대상 사용후핵연료(Ft)에 대한 총 중성자 반응률을 계산할 수 있다.

[0075] 연산부(100)은 소정의 범위를 만족하는 냉각 기간에 대해 측정하고자 하는 대상 사용후핵연료(Ft)의 연소도를 측정할 수 있다. 예를 들어 연산부(100)은 냉각 기간이 Cm-244가 주요 중성자 발생 핵종인 냉각 기간을 만족하는 대상 사용후핵연료(Ft)에 대해 연소도를 측정할 수 있다.

[0076] 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 대상 사용후핵연료(Ft)의 연소도를 측정할 수 있다.

[0077] 도 2에 나타낸 바와 같이, Cm-244가 주요 중성자 발생 핵종으로서 역할을 하는 냉각 기간은 5년에서 60년에 해당함을 알 수 있다. 이에 따라 연소도 측정 장치(10) 또는 연산부(100)는 냉각 기간이 5년 이상 60년 이하에 해당하는 대상 사용후핵연료(Ft)에 대해 연소도를 측정할 수 있다.

[0078] 메모리부(200)는 대상 사용후핵연료(Ft)의 연소도를 측정하기 위한 정보를 미리 저장할 수 있다. 예를 들어 메모리부(200)는 미리 저장된 샘플 사용후핵연료(Fs)에 관한 정보를 저장할 수 있다. 미리 저장된 샘플 사용후핵연료(Fs)에 관한 정보는 샘플 사용후핵연료(Fs)의 연소 이력에 관한 정보로서, 냉각 기간, 초기 농축도, 연소도, 냉각수의 흡수재 등을 포함할 수 있다. 메모리부(200)는 계산 알고리즘(예를 들어 ORIGEN 또는 MCNP)에

포함될 수 있다. 연산부(100)는 메모리부(200)에 저장되어 있는 관련 정보에 기반하여 대상 사용후핵연료(Ft)의 연소도를 측정할 수 있다.

[0079] 사용후핵연료(F)는 지지체(20)에 의해 지지될 수 있다. 사용후핵연료(F)는 복수 개의 연료봉 및 독물질봉을 포함하는 사용후핵연료일 수 있다.

[0080] 다음 연소도 측정 방법을 설명한다. 연소도 측정 방법은 전술한 연소도 측정 장치(10)를 이용할 수 있다. 연소도 측정 방법은 연소도 측정 장치(10)가 샘플 사용후핵연료(Fs)의 초기 농축도, 냉각 기간 및 중성자 검출기의 총 중성자 반응률 및 측정 거리의 관계식으로 대상 사용후핵연료(Ft)의 연소도를 측정하는 단계를 포함할 수 있다.

[0081] 먼저 연소도 측정 장치(10)가 샘플 사용후핵연료(Fs)에 관한 정보를 획득한다. 예를 들어 연소도 측정 장치(10)의 메모리부(200)가 샘플 사용후핵연료(Fs)의 연소 이력에 관한 정보(예를 들어 초기 농축도와 냉각 기간 및 연소도, 냉각수 등에 관한 정보)를 저장할 수 있다. 저장된 정보는 계산 알고리즘에 입력될 수 있다.

[0082] 예를 들어 연소도 측정 장치(10)의 연산부(100)가 샘플 사용후핵연료(Fs)에 관한 정보로부터 샘플 사용후핵연료(Fs)의 액티나이드(Actinide), 자발핵분열(Spontaneous fission) 핵종과 샘플 사용후핵연료(Fs)의 중성자 발생률(S_N)을 계산할 수 있다. 그리고 연산부(100)는 계산 알고리즘을 이용하여 계산된 주요 액티나이드, 자발핵분열 핵종을 계산 알고리즘(예를 들어 MCNP)의 중성자 선원으로 사용하여 중성자 검출기의 중성자 1개당 반응률(R_N)을 계산하며, 계산된 중성자 발생률(S_N)과 중성자 검출기의 중성자 1개당 반응률(R_N)의 곱으로 중성자 검출기의 총 중성자 반응률(Reaction Rates, RR)을 계산할 수 있다.

[0083] 다음 연소도 측정 장치(10)는 샘플 사용후핵연료(Fs)의 초기 농축도, 냉각 기간 및 중성자 검출기의 총 중성자 반응률 및 측정 거리의 관계식으로 대상 사용후핵연료(Ft)의 연소도를 측정할 수 있다. 예를 들어 연소도 측정 장치(10)는 식 (1)로 대상 사용후핵연료(Ft)의 연소도를 측정할 수 있다.

[0084] $BU = a1(RR)^{b1}(IE)^{c1}e^{d1t}e^{f1x}$ - 식 (1)

[0085] 여기서 BU는 사용후핵연료의 연소도(GWD/MTU)이고, RR은 중성자 검출기의 사용후핵연료에 대한 총 중성자 반응률(reaction rate, Reaction Rates/sec·MTU)이고, IE는 사용후핵연료의 초기 농축도(%)이고, t는 냉각 기간(년)이고, x는 중성자 검출기(중성자 검출기)의 사용후핵연료에 대한 측정 거리(cm)이고, a1, b1, c1, d1, f1는 상수이며, a1는 0.462±0.03, b1는 0.28±0.005, c1는 0.325±0.02, d1는 0.0103±0.000125, f1는 0.0527±0.001이다.

[0086] 연소도 측정 장치(10)가 대상 사용후핵연료(Ft)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 연산부(100)는 Cm-244가 주요 중성자 발생 핵종으로 기여하는 냉각 기간인 5년 이상 60년 이하의 냉각 기간을 만족하는 대상 사용후핵연료(Ft)에 대해 연소도를 측정할 수 있다.

[0087] 연소도 측정 장치(10) 및 연소도 측정 방법은 감마선 발생률에 관한 정보나 복잡한 연산식을 이용하지 않고도, 샘플 사용후핵연료(Fs)의 초기 농축도, 냉각 기간 및 중성자 검출기의 총 중성자 발생률 및 측정거리의 관계식으로 대상 사용후핵연료(Ft)의 연소도를 용이하게 측정할 수 있다. 또한 연소도 측정 장치(10) 및 연소도 측정 방법은 대상 사용후핵연료(Ft)의 총 중성자 반응률을 직접 계측하지 않고도, 계산된 총 중성자 반응률을 관계식에 대입해 용이하게 대상 사용후핵연료(Ft)의 연소도를 측정할 수 있다.

[0089] **실험예**

[0090] 먼저 중성자 검출기의 총 중성자 반응률, 측정 거리, 사용후핵연료의 초기 농축도 및 냉각 기간의 관계식을 도출하기 위한 데이터베이스를 구축하기 위해, 국내에서 연소된 사용후핵연료의 초기 농축도와 연소도의 현황을 조사해 정보를 수집했다. 사용후핵연료의 정보는 중성자 검출기의 총 중성자 반응률, 측정 거리, 사용후핵연료의 초기 농축도 및 냉각 기간을 포함하며, 입력된 정보를 ORIGEN에 입력했다. 수집한 정보를 도 3에 나타낸 바와 같이 그래프에 나타냈다. 초기 농축도를 2.4% 내지 4.8%로 설정한 후 평균 연소도의 ±30% 범위의 경우를 설정했다. 그리고 16개의 초기 농축도 및 각각의 초기 농축도별로 ±30% 범위 안에 있는 5개의 연소도를 설정하여, 총 80개의 모델을 선정했다. 80개의 모델의 대상 원자로와 핵연료 집합체는 WH형 17*17 핵연료를 선택했다. 그리고 80개의 모델 중 일반화할 수 있는 초기 농축도와 평균 연소도의 관계를 아래와 같이 설정했다.

[0091] BU = 10*IE+2

[0092] 여기서 BU는 연소도이며 단위는 GWD(Giga Watt Day)/MTU(Metric Ton Uranium)이고, IE는 초기 농축도로서 단위는 %이다.

[0093] 다음 ORIGEN과 MCNP를 이용해 연소도에 따른 He-3 검출기(중성자 검출기)의 총 중성자 반응률을 계산했다. 총 중성자 반응률은 80개의 모델에 대해 ORIGEN을 이용해 액티나이드(Actinide), 자발핵분열(Spontaneous fission) 핵종과 총 중성자 발생률 S_N을 계산했다. 그리고 ORIGEN을 이용해 계산된 주요 액티나이드, 자발핵분열 핵종을 MCNP의 중성자 선원으로 이용하여, He-3 검출기의 중성자 1개당 반응률 R_N을 계산했다. 그리고 계산된 중성자 발생률 S_N과 He-3 검출기의 중성자 반응률 R_N의 곱으로 아래와 같이 He-3 검출기의 총 중성자 반응률 RR을 계산했다.

[0094] RR in He-3 detector = S_N X R_N

[0095] 위 식에서, RR=Reaction Rates/sec · MTU, S_N=Neutrons/sec · MTU, R_N=Reaction rate/neutron이다.

[0096] 다음 사용후핵연료로부터 He-3 검출기를 이격시킨 위치를 시뮬레이션한 MCNP 계산 결과로부터, 사용후핵연료의 연소도를 중성자 검출기의 사용후핵연료에 대한 총 중성자 반응률 및 측정 거리, 사용후핵연료의 초기 농축도 및 냉각 기간의 관계식으로 나타낼 수 있음을 확인했고, 최종 식은 아래와 같이 얻었다.

[0097] $BU = a1(RR)^{b1}(IE)^{c1}e^{d1t}e^{f1x}$ - 식 (1)

[0098] 여기서 BU는 사용후핵연료의 연소도(GWD/MTU)이고, RR은 중성자 검출기의 사용후핵연료에 대한 총 중성자 반응률(reaction rate, Reaction Rates/sec · MTU)이고, IE는 사용후핵연료의 초기 농축도(%)이고, t는 냉각 기간(년)이고, x는 중성자 검출기(중성자 검출기)의 사용후핵연료에 대한 측정 거리(cm)이고, a1, b1, c1, d1, f1는 상수이며, a1는 0.462±0.03, b1는 0.28±0.005, c1는 0.325±0.02, d1는 0.0103±0.000125, f1는 0.0527±0.001이다. 식 (1)에서 RR은 MCNP와 ORIGEN으로 계산한 RR 값이다(RR in He-3 detector = S_N X R_N).

[0099] 얻은 위 식을 검증하기 위해, 해당 식을 이용해 얻은 연소도를 ORIGEN과 MCNP 결과값과 비교했으며, 아래의 표 1 내지 표 5에 나타냈다. 표 1 내지 표 5에서 1행은 각각 냉각 기간(년)을 나타내며 사용후핵연료는 서로 다른 초기 농축도(표 1은 2.4%, 표 2는 2.9%, 표 3은 3.5%, 표 4는 4.1%, 표 5는 4.65%)를 가지며, 각각의 표에서 사용후핵연료는 서로 다른 연소 이력(연소도)를 갖는다.. 또한 표 1 내지 표 5에서 하이라이트된 부분은 사용후핵연료의 실제 연소도를 나타내고, 하이라이트된 부분을 기준으로 좌측은 식으로부터 도출한 측정값, 우측은 실제 연소도와 측정 연소도의 오차를 나타낸다. 표 1 내지 표 5에서 사용한 식의 상수값은 a1는 0.462, b1는 0.28, c1는 0.325, d1는 0.0103, f1는 0.0527이다.

표 1

[0100]

5	10	20	30	50	60		5	10	20	30	50	60
33.8	33.6	33.4	33.2	33.1	33.1	33.8	-0.1%	-0.5%	-1.2%	-1.7%	-2.2%	-1.9%
29.9	29.8	29.6	29.5	29.5	29.7	29.9	0.0%	-0.4%	-0.9%	-1.3%	-1.3%	-0.7%
25.9	25.8	25.7	25.7	25.9	26.2	26	-0.4%	-0.6%	-1.0%	-1.1%	-0.3%	0.9%
21.8	21.8	21.8	21.9	22.4	22.9	22.1	-1.2%	-1.3%	-1.3%	-0.9%	1.4%	3.6%
17.7	17.8	17.9	18.2	19.1	19.8	18.2	-2.5%	-2.3%	-1.5%	-0.1%	4.8%	8.7%

표 2

[0101]

5	10	20	30	50	60		5	10	20	30	50	60
40.6	40.4	40.1	39.9	39.6	39.6	40.3	0.7%	0.3%	-0.4%	-1.1%	-1.7%	-1.6%
36.0	35.8	35.6	35.4	35.3	35.4	35.65	0.9%	0.5%	-0.2%	-0.7%	-1.0%	-0.7%
31.2	31.1	30.9	30.8	30.9	31.2	31	0.5%	0.2%	-0.3%	-0.6%	-0.3%	0.5%
26.2	26.2	26.1	26.2	26.6	27.0	26.35	-0.4%	-0.6%	-0.8%	-0.7%	0.8%	2.4%
21.3	21.3	21.4	21.6	22.4	23.1	21.7	-1.9%	-1.9%	-1.4%	-0.5%	3.2%	6.3%

표 3

[0102]

5.0	10.0	20.0	30.0	50.0	60.0		5	10	20	30	50	60
48.7	48.5	48.1	47.8	47.4	47.4	48.1	1.2%	0.8%	0.0%	-0.6%	-1.4%	-1.4%
43.2	43.0	42.7	42.4	42.2	42.3	42.55	1.5%	1.1%	0.3%	-0.2%	-0.8%	-0.7%
37.4	37.3	37.1	36.9	36.9	37.1	37	1.1%	0.8%	0.2%	-0.2%	-0.3%	0.2%
31.5	31.4	31.3	31.3	31.5	31.9	31.45	0.2%	-0.1%	-0.4%	-0.5%	0.3%	1.5%
25.3	25.2	25.1	25.0	25.0	25.2	25.9	-2.4%	-2.7%	-3.3%	-3.6%	-3.4%	-2.7%

표 4

[0103]

5.0	10.0	20.0	30.0	50.0	60.0		5	10	20	30	50	60
56.7	56.4	56.0	55.6	55.1	55.1	55.9	1.4%	0.9%	0.2%	-0.5%	-1.4%	-1.4%
50.3	50.1	49.7	49.4	49.1	49.1	49.45	1.7%	1.3%	0.5%	-0.1%	-0.8%	-0.7%
43.6	43.5	43.2	43.0	42.8	43.0	43	1.5%	1.1%	0.4%	-0.1%	-0.4%	-0.1%
36.8	36.6	36.5	36.4	36.5	36.9	36.55	0.6%	0.3%	-0.2%	-0.5%	-0.1%	0.8%
29.8	29.7	29.7	29.8	30.4	31.0	30.1	-1.1%	-1.3%	-1.3%	-1.1%	0.9%	2.9%

표 5

[0104]

5.0	10.0	20.0	30.0	50.0	60.0		5	10	20	30	50	60
63.9	63.6	63.1	62.7	62.1	62.1	63.05	1.4%	0.9%	0.1%	-0.6%	-1.4%	-1.5%
56.7	56.5	56.1	55.7	55.3	55.3	55.775	1.7%	1.3%	0.5%	-0.1%	-0.9%	-0.9%
49.3	49.1	48.7	48.5	48.2	48.3	48.5	1.6%	1.2%	0.5%	-0.1%	-0.6%	-0.4%
41.5	41.4	41.2	41.0	41.1	41.4	41.225	0.7%	0.4%	-0.2%	-0.5%	-0.4%	0.3%
33.6	33.5	33.5	33.5	34.0	34.6	33.95	-1.0%	-1.2%	-1.4%	-1.2%	0.3%	1.9%

[0105] 표 1 내지 표 5에 나타낸 바와 같이, 실제 연소도 값과 상기 식을 이용해 계산한 연소도 값의 차이는 연소 기간 5년 이상 60년 이하에서 모두 작은 차이를 나타냈다.

[0106] 도 4는 상기 식 (1)을 적용해 사용후핵연료의 초기 농축도, 냉각 기간 및 중성자 검출기의 총 중성자 반응률 및 측정 거리에 따른 사용후핵연료의 연소도를 나타낸다. 도 4에 나타낸 바와 같이, 사용후핵연료의 초기 농축도, 냉각 기간 및 중성자 검출기의 총 중성자 반응률 및 측정 거리를 알고 있을 경우, 사용후핵연료의 연소도를 용이하게 계산할 수 있다.

[0107] 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.

부호의 설명

[0108] 10: 연소도 측정 장치

100: 연산부

200: 메모리부

20: 지지체

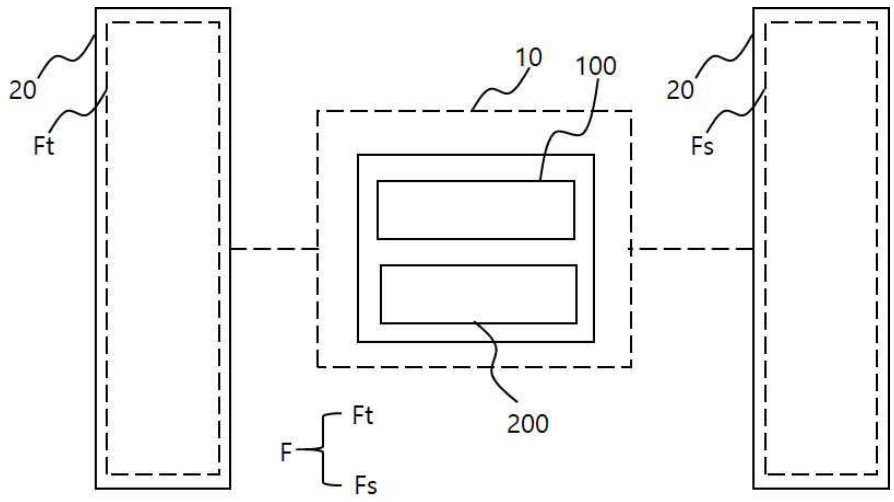
F: 사용후핵연료

Fs: 샘플 사용후핵연료

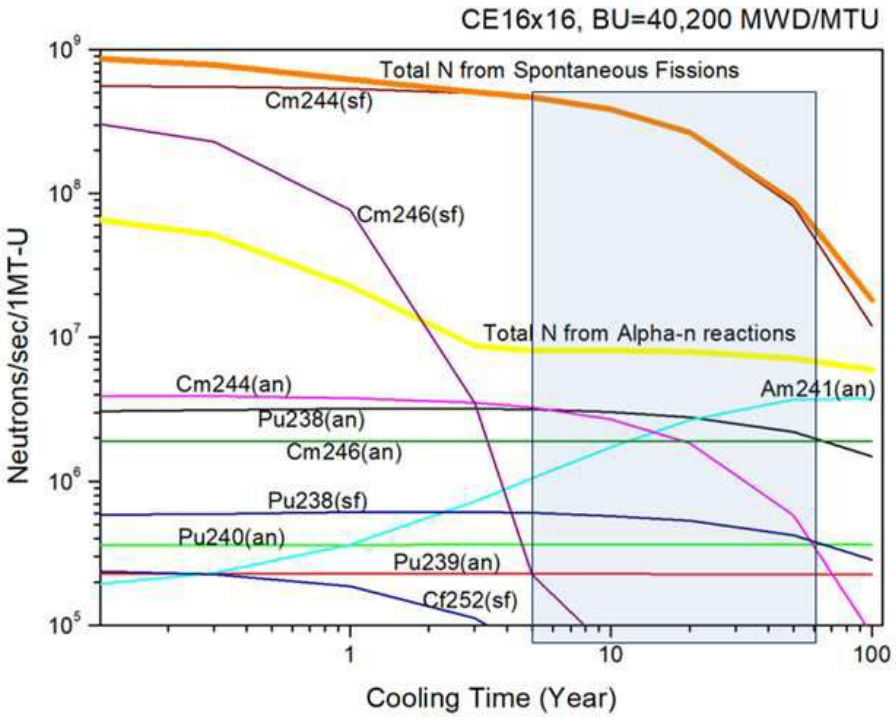
Ft: 대상 사용후핵연료

도면

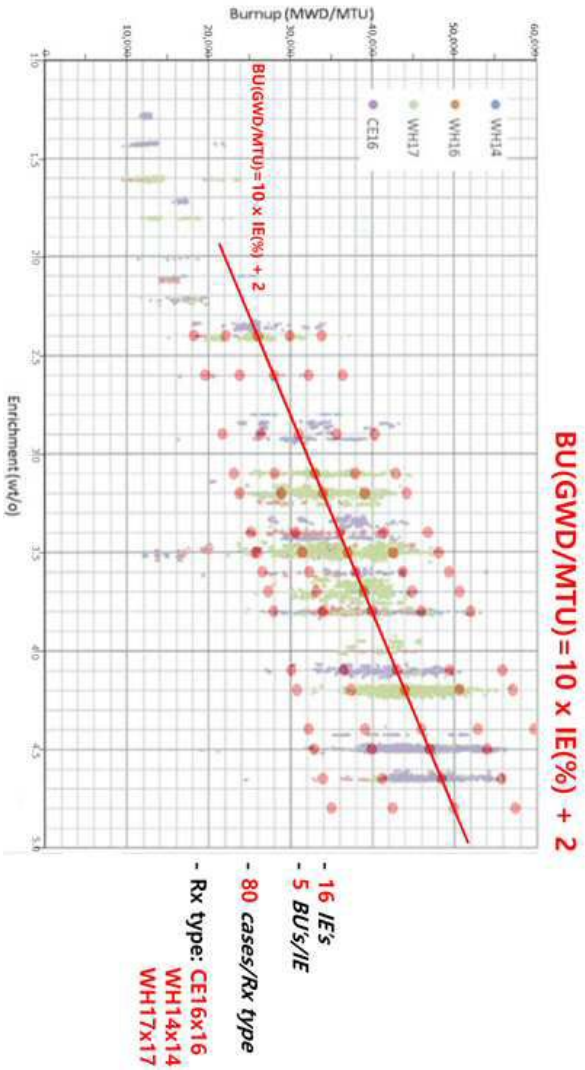
도면1


20
Ft
10
100
20
Fs
200
F
Ft
Fs

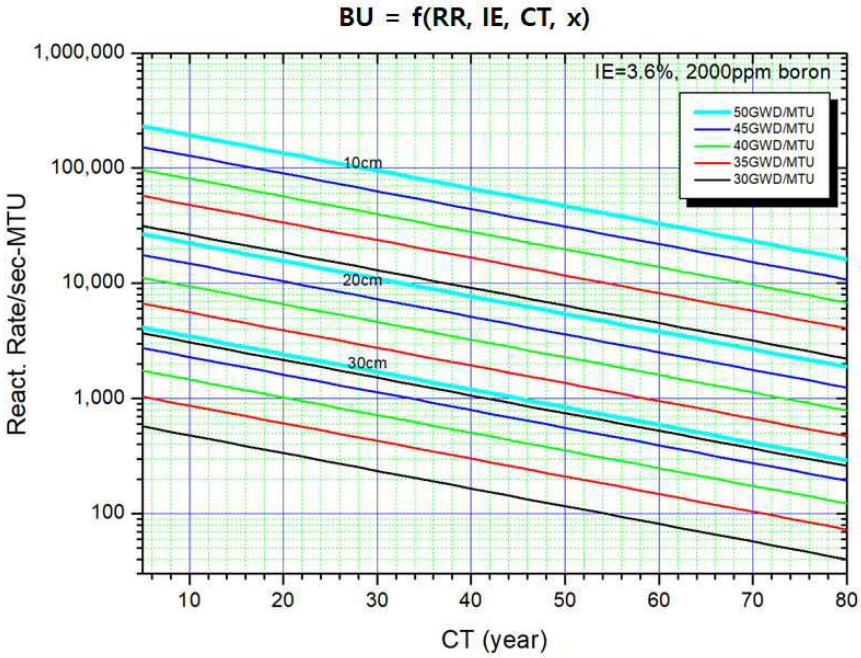
도면2


CE16x16, BU=40,200 MWD/MTU
Total N from Spontaneous Fissions
Cm244(sf)
Cm246(sf)
Total N from Alpha-n reactions
Cm244(an)
Am241(an)
Pu238(an)
Cm246(an)
Pu238(sf)
Pu240(an)
Pu239(an)
Cf252(sf)
Neutrons/sec/1MT-U
Cooling Time (Year)

도면3


Burnup (MWD/MTU)
Enrichment (wt/o)
BU(GWD/MTU)=10 x IE(%) + 2
CE16
WH17
WH16
WH14
BU(GWD/MTU)=10 x IE(%) + 2
- 16 IE's
- 5 BU's/IE
- 80 cases/Rx type
- Rx type: CE16x16
WH14x14
WH17x17

도면4


BU = f(RR, IE, CT, x)
IE=3.6%, 2000ppm boron
50GWD/MTU
45GWD/MTU
40GWD/MTU
35GWD/MTU
30GWD/MTU
10cm
20cm
30cm
React. Rate/sec-MTU
1,000,000
100,000
10,000
1,000
100
10
20
30
40
50
60
70
80
CT (year)