(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0071105
(43) 공개일자 2024년05월22일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G21C 17/108 (2006.01) *G01T 3/08* (2006.01)
G01T 7/00 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G21C 17/108 (2013.01)
G01T 3/08 (2021.01)
(21) 출원번호 10-2022-0152837
(22) 출원일자 2022년11월15일
심사청구일자 2022년11월15일

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
이덕중
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
윤동민
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(74) 대리인
특허법인 무한

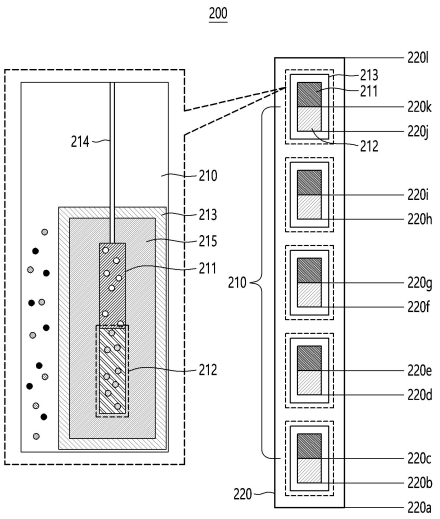
전체 청구항 수 : 총 21 항

(54) 발명의 명칭 **다중 에미터 노내계측기 신호 계산 장치 및 방법**

(57) 요 약

일 실시예에 노달코드에서의 다중 에미터 노내계측기 신호 계산 장치는 제1 물질의 제1 에미터 및 제1 물질과 다른 제2 물질의 제2 에미터를 포함하는 복수의 에미터들을 가지는 자발 중성자 계측기(self-powered neutron detector, SPND) 및 자발 중성자 계측기의 계측에 기초하여 계측 값들을 추출하고, 계측 값들을 통해 복수의 에미터들에 대해 반응률들(reaction rates)을 산출하며, 반응률들 및 복수의 에미터들의 부피 비율에 기초하여, 자발 중성자 계측기에 대한 총 반응률을 계산하는 프로세서를 포함할 수 있다.

대 표 도 - 도2



(52) CPC특허분류
G01T 7/005 (2013.01)
Y02E 30/30 (2020.08)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1415180707
과제번호	20206510100040
부처명	산업통상자원부
과제관리(전문)기관명	한국에너지기술평가원
연구사업명	원전안전부품경쟁력강화기술개발
연구과제명	고성능 노내핵계측기 신호측정계통 국산화 및 즉발응답계측 기반기술 개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	유저스(주)
연구기간	2022.01.01 ~ 2022.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

다중 에미터(emitter) 노내 계측기 신호 계산 장치에 있어서,

제1 물질의 제1 에미터 및 상기 제1 물질과 다른 제2 물질의 제2 에미터를 포함하는 복수의 에미터들을 가지는 자발 중성자 계측기(self-powered neutron detector, SPND); 및

상기 자발 중성자 계측기의 계측에 기초하여 계측 값들을 추출하고, 상기 계측 값들을 통해 상기 복수의 에미터들에 대해 반응률들(reaction rates)을 산출하며, 상기 반응률들 및 상기 복수의 에미터들의 부피 비율에 기초하여, 상기 자발 중성자 계측기에 대한 총 반응률을 계산하는 프로세서

를 포함하는 장치.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 프로세서는,

상기 부피 비율에 따른 상기 반응률들의 가중합(weighted sum)을 상기 총 반응률로 결정하는

장치.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 복수의 에미터들 중 적어도 하나는 즉발 응답형 물질을 사용하고

상기 복수의 에미터들 중 적어도 다른 하나는 지발 응답형 물질을 사용하며,

상기 프로세서는, 상기 계측 값 추출 시 상기 지발 응답형 물질의 계측 값보다 상기 즉발 응답형 물질의 계측 값을 먼저 추출하는

장치.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 즉발 응답형 물질은 백금, 하프늄 또는 코발트이고,

상기 지발 응답형 물질은 로듐 또는 바나듐인

장치.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 프로세서는,

상기 계측 값들을 추출하기 전에 사용자에 의해 생성되는 상기 에미터의 개수, 종류, 길이, 위치 및 계산수식에 대한 정보가 포함되는 입력문의 입력여부를 확인하는

장치.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 프로세서는, 상기 입력문에 기초하여 복수개의 상기 자발 중성자 계측기 위치에서 상기 계측 값들을 추출하는

장치.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 자발 중성자 계측기 내 상기 복수의 에미터들은 계측기 집합체의 몸체(body)의 축방향으로 각각 배치되고,

상기 프로세서는 상기 몸체 위치를 기준으로 상기 복수의 에미터들의 각각의 위치가 입력된 입력문에 기초하여 상기 계측 값들을 추출하는

장치.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 계측 값은 고속중성자의 흡수핵단면적 및 중성자속과 열중성자의 흡수핵단면적 및 중성자속을 포함하고,

상기 프로세서는 미리 결정된 추출 간격에 기초하여 상기 계측 값을 추출하는

장치.

청구항 9

제1항에 있어서,

상기 프로세서는, 추출된 상기 계측 값에 기초하여 상기 반응률 산출에 이용되는 수밀도를 산출하는

장치.

청구항 10

제1항에 있어서,

상기 자발 중성자 계측기는,

계측용 지발 응답형 중성자 계측기(Delayed-Response neutron detector) 및 보정용 즉발 응답형 중성자 계측기(Prompt-Response neutron detector)를 포함하는

장치.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 프로세서는, 상기 계측용 지발 응답형 중성자 계측기에서 중성자 반응률 산출 시 발생하는 신호 지연을, 상기 보정용 즉발 응답형 중성자 계측기의 계측 결과를 이용하여 보정하는

장치.

청구항 12

제10항에 있어서,

상기 지발 응답형 중성자 계측기는, 로듐 에미터 또는 바나듐 에미터를 포함하고,

상기 즉발 응답형 중성자 계측기는, 코발트 에미터를 포함하는

장치.

청구항 13

프로세서에 의해 수행되는 다중 에미터의 노내 계측기 신호를 계산하는 방법에 있어서,

제1 물질의 제1 에미터 및 상기 제1 물질과 다른 제2 물질의 제2 에미터를 포함하는 복수의 에미터들을 가지는 자발 중성자 계측기의 계측에 기초하여 계측 값들을 추출하는 단계;

상기 계측 값들을 통해 상기 복수의 에미터들에 대해 반응률들을 산출하는 단계; 및

상기 반응률들 및 상기 복수의 에미터들의 부피 비율에 기초하여, 상기 자발 중성자 계측기에 대한 총 반응률을 계산하는 단계

를 포함하는 방법.

청구항 14

제13항에 있어서,

상기 총 반응률을 계산하는 단계는,

상기 부피 비율에 따른 상기 반응률들의 가중합(weighted sum)을 상기 총 반응률로 결정하는 단계

를 포함하는 방법.

청구항 15

제13항에 있어서,

상기 계측 값들을 추출하기 전, 사용자에 의해 생성되는 에미터의 개수, 종류, 길이, 위치 및 계산수식에 대한 정보가 포함되는 입력문의 입력여부를 확인하는 단계

를 더 포함하는 방법.

청구항 16

제15항에 있어서,

상기 입력문의 입력여부 확인 후, 상기 입력문의 정보에 기초하여 복수개의 상기 자발 중성자 계측기 위치에서 상기 계측 값들을 추출하는 단계를 수행하는 방법.

청구항 17

제16항에 있어서,

상기 자발 중성자 계측기 내 상기 복수의 에미터들은 계측기 집합체의 몸체(body)의 축방향으로 각각 배치되고,

상기 몸체 위치를 기준으로 상기 복수의 에미터들의 각각의 위치가 입력된 입력문에 기초하여 상기 계측 값들을 추출하는 방법.

청구항 18

제13항에 있어서,

상기 복수의 에미터들 중 적어도 하나는 즉발 응답형 물질을 사용하고, 상기 복수의 에미터들 중 적어도 다른 하나는 지발 응답형 물질을 사용하여

상기 계측 값 추출 시 상기 지발 응답형 물질의 계측 값보다 상기 즉발 응답형 물질의 계측 값을 먼저 추출하는 단계

를 더 포함하는 방법.

청구항 19

제13항에 있어서,

상기 계측 값은

고속중성자의 흡수핵단면적 및 중성자속과 열중성자의 흡수핵단면적 및 중성자속을 포함하고,

미리 결정된 추출 간격에 기초하여 상기 계측 값을 추출하는 방법.

청구항 20

제13항에 있어서,

추출된 상기 계측 값에 기초하여 상기 반응률 산출에 이용되는 수밀도를 산출하는 단계;

를 더 포함하는 방법.

청구항 21

제13항 내지 제20항 중 어느 한 항의 방법을 수행하기 위한 명령어를 포함하는 하나 이상의 컴퓨터 프로그램을 저장한 컴퓨터 판독 가능 기록 매체.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 다중 에미터 노내계측기 신호 계산 장치 및 방법이 제공된다.

배 경 기 술

[0003] 원자로 노심의 출력은 원자로 안전에 가장 중요한 요소로서 설계과정에서 결정한 특정 출력 이상으로 출력이 상승하는 것은 엄격히 금하고 있다. 출력이 설계출력 이상으로 상승하는 경우 핵연료의 손상을 초래할 수 있다. 또한, 냉각재의 냉각 능력 이상으로 출력이 상승하는 경우, 원자로 내 냉각재가 끓어 기포가 발생할 수 있다. 이 또한 핵연료의 손상뿐만 아니라 원자로 내부 압력을 상승시켜 매우 위험한 상태에 도달할 수 있다. 이러한 원자로 노심의 출력은 노심 내에 존재하는 중성자의 수에 따라 결정되므로 중성자를 계측하면 원자로 노심의 출력 정도를 판단할 수 있다.

[0004] 가압 경수형 상용원자로에서 고정형 로듐 노내 중성자 계측기(rhodium detector)는 노심 내부의 중성자속 밀도(neutron flux density, Φ) 측정에 사용할 수 있다. 로듐 검출기는 축방향으로 5개씩 노내계측기(In-Core Instrument, ICI) 집합체를 구성하고 일부 핵연료집합체의 계측튜브(Instrumentation tube)에 설치하여 사용될 수 있다. 검출기 내부의 로듐 에미터는 노내 중성자를 흡수한 후 열중성자속에 정비례하는 자유전자를 생성함에 따라 전기적 신호를 발생시킬 수 있다. 전기적 신호는 증폭 회로를 거쳐 증폭될 수 있다. 증폭된 전기적 신호는 주전산 계통의 전산을 통해 노내 출력 분포 및 노내 중성자속 분포를 주제어실의 운전원들에게 제공할 수 있다. 주제어실의 운전원들은 노내 출력 분포 및 노내 중성자속 분포를 분석하여 원자로내의 모니터링 및 제어를 할 수 있다.

[0005] 위에서 설명한 배경기술은 발명자가 본원의 개시 내용을 도출하는 과정에서 보유하거나 습득한 것으로서, 반드시 본 출원 전에 일반 공중에 공개된 공지기술이라고 할 수는 없다.

선행기술문헌

특허문헌

[0007] (특허문헌 0001) 대한민국 등록 특허공보 10-0301297(2001년 06월 23일 공고)에는 노심내 고정형 검출기 및 원자로 내의 출력분포 결정방법이 제시된다.

(특허문헌 0002) 일본 등록 특허공보 P6522926(2019년 05월 10일 공고)에는 중성자 측정 장치 및 중성자 측정 방법이 제시된다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 일 실시예에 따른 다중 에미터 노내계측기 신호 계산 장치 및 방법은 하나의 알고리즘으로 다중 에미터의 신호 값을 용이하게 산출할 수 있으며, 각 산출된 다중 에미터의 신호 값에 각 에미터의 부피 값에 근거한 가중치를 부여함에 따라 운전원에게 정확한 신호 값을 제공할 수 있다.

[0009] 다만, 기술적 과제는 상술한 기술적 과제들로 한정되는 것은 아니며, 또 다른 기술적 과제들이 존재할 수 있다.

과제의 해결 수단

[0011] 일 실시예에 따른 다중 에미터(emitter) 노내계측기 신호 계산 장치는 제1 물질의 제1 에미터 및 상기 제1 물질과 다른 제2 물질의 제2 에미터를 포함하는 복수의 에미터들을 가지는 자발 중성자 계측기(self-powered neutron detector, SPND) 및 상기 자발 중성자 계측기의 계측에 기초하여 계측 값들을 추출하고, 상기 계측 값들을 통해 상기 복수의 에미터들에 대해 반응률들(reaction rates)을 산출하며, 상기 반응률들 및 상기 복수의 에미터들의 부피 비율에 기초하여, 상기 자발 중성자 계측기에 대한 총 반응률을 계산하는 프로세서를 포함할 수 있다.

[0012] 상기 프로세서는, 상기 부피 비율에 따른 상기 반응률들의 가중합(weighted sum)을 상기 총 반응률로 결정할 수 있다.

[0013] 상기 복수의 에미터들 중 적어도 하나는 즉발 응답형 물질을 사용하고 상기 복수의 에미터들 중 적어도 다른 하나는 지발 응답형 물질을 사용하며, 상기 프로세서는, 상기 계측 값 추출 시 상기 지발 응답형 물질의 계측 값

보다 상기 즉발 응답형 물질의 계측 값을 먼저 추출할 수 있다.

[0014] 상기 즉발 응답형 물질은 백금, 하프늄 또는 코발트이고, 상기 지발 응답형 물질은 로듐 또는 바나듐일 수 있다.

[0015] 상기 프로세서는, 상기 계측 값들을 추출하기 전에 사용자에 의해 생성되는 상기 에미터의 개수, 종류, 길이, 위치 및 계산수식에 대한 정보가 포함되는 입력문의 입력여부를 확인할 수 있다.

[0016] 상기 프로세서는, 상기 입력문에 기초하여 복수개의 상기 자발 중성자 계측기 위치에서 상기 계측 값들을 추출할 수 있다.

[0017] 상기 자발 중성자 계측기 내 상기 복수의 에미터들은 계측기 집합체의 몸체(body)의 축방향으로 각각 배치되고, 상기 프로세서는 상기 몸체 위치를 기준으로 상기 복수의 에미터들의 각각의 위치가 입력된 입력문에 기초하여 상기 계측 값들을 추출할 수 있다.

[0018] 상기 계측 값은 고속중성자의 흡수핵단면적 및 중성자속과 열중성자의 흡수핵단면적 및 중성자속을 포함하고, 상기 프로세서는 미리 결정된 추출 간격에 기초하여 상기 계측 값을 추출할 수 있다.

[0019] 상기 프로세서는, 계측기 에미터 물질의 붕괴 사슬 및 노심 연소 계산에 기초하여 상기 반응률 산출에 이용되는 수밀도를 산출할 수 있다.

[0020] 상기 자발 중성자 계측기는, 계측용 지발 응답형 중성자 계측기(Delayed-Response neutron detector) 및 보정용 즉발 응답형 중성자 계측기(Prompt-Response neutron detector)를 포함할 수 있다.

[0021] 상기 프로세서는, 상기 계측용 지발 응답형 중성자 계측기에서 중성자 계측 시 발생하는 신호 지연을, 상기 보정용 즉발 응답형 중성자 계측기의 계측 결과를 이용하여 보정할 수 있다.

[0022] 상기 지발 응답형 중성자 계측기는, 로듐 에미터 또는 바나듐 에미터를 포함하고, 상기 즉발 응답형 중성자 계측기는, 코발트 에미터를 포함할 수 있다.

[0023] 일 실시예에 따른 다중 에미터 노내계측기 신호 계산 방법은 제1 물질의 제1 에미터 및 상기 제1 물질과 다른 제2 물질의 제2 에미터를 포함하는 복수의 에미터들을 가지는 자발 중성자 계측기의 계측에 기초하여 계측 값들을 추출하는 단계, 상기 계측 값들을 통해 상기 복수의 에미터들에 대해 반응률들을 산출하는 단계 및 상기 반응률들 및 상기 복수의 에미터들의 부피 비율에 기초하여, 상기 자발 중성자 계측기에 대한 총 반응률을 계산하는 단계를 포함할 수 있다.

[0024] 상기 총 반응률을 계산하는 단계는, 상기 부피 비율에 따른 상기 반응률들의 가중합(weighted sum)을 상기 총 반응률로 결정하는 단계를 포함할 수 있다.

[0025] 상기 계측 값들을 추출하기 전, 사용자에 의해 생성되는 에미터의 개수, 종류, 길이, 위치 및 계산수식에 대한 정보가 포함되는 입력문의 입력여부를 확인하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0026] 상기 입력문의 입력여부 확인 후, 상기 입력문의 정보에 기초하여 복수개의 상기 자발 중성자 계측기 위치에서 상기 계측 값들을 추출하는 단계를 수행할 수 있다.

[0027] 상기 자발 중성자 계측기 내 상기 복수의 에미터들은 계측기 집합체의 몸체(body)의 축방향으로 각각 배치되고, 상기 몸체 위치를 기준으로 상기 복수의 에미터들의 각각의 위치가 입력된 입력문에 기초하여 상기 계측 값들을 추출할 수 있다.

[0028] 상기 복수의 에미터들 중 적어도 하나는 즉발 응답형 물질을 사용하고, 상기 복수의 에미터들 중 적어도 다른 하나는 지발 응답형 물질을 사용하여 상기 계측 값 추출 시 상기 지발 응답형 물질의 계측 값보다 상기 즉발 응답형 물질의 계측 값을 먼저 추출하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0029] 상기 계측 값은 고속중성자의 흡수핵단면적 및 중성자속과 열중성자의 흡수핵단면적 및 중성자속을 포함하고, 미리 결정된 추출 간격에 기초하여 상기 계측 값을 추출할 수 있다.

[0030] 추출된 상기 계측 값에 기초하여 상기 반응률 산출에 이용되는 수밀도를 산출하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0031] 일 실시예에 따른 하나 이상의 컴퓨터 프로그램을 저장한 컴퓨터 판독 가능 기록 매체는, 방법을 수행하기 위한 명령어를 포함할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0033] 도 1은 일 실시예에 따른 다중 에미터 노내계측기 신호 계산 장치의 블록도를 도시한다.

도 2는 일 실시예에 따른 계측기 집합체의 예시적인 구조도를 도시한다.

도 3은 단일의 로듐 물질로 구성된 예시적인 에미터의 구조도 및 코발트-바나듐 물질로 구성된 예시적인 에미터의 구조도를 도시한다.

도 4는 일 실시예에 따른 단일 물질로 구성된 에미터의 반응률을 산출하는 입력문의 예시도를 도시한다.

도 5는 일 실시예에 따른 상이한 물질로 구성된 에미터들의 총 반응률을 산출하는 입력문의 예시도를 도시한다.

도 6은 일 실시예에 따른 원자로 노심 내 계측기 집합체가 배치된 일부 위치에서 상용원자로 주기 초의 반응률 차를 나타내는 예시도를 도시한다.

도 7은 일 실시예에 따른 원자로 노심 내 계측기 집합체가 배치된 일부 위치에서 상용원자로 주기 말의 반응률 차를 나타내는 예시도를 도시한다.

도 8은 일 실시예에 따른 다중 에미터 노내계측기 신호 계산 방법의 흐름도를 도시한다.

도 9는 바나듐 물질의 붕괴 사슬을 나타내는 붕괴도를 도시한다.

도 10은 코발트 물질의 붕괴 사슬을 나타내는 붕괴도를 도시한다.

도 11은 여러 종류 물질 에미터의 연소 시간에 따른 중성자 계측민감도를 나타내는 그래프를 도시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0034] 실시예들에 대한 특정한 구조적 또는 기능적 설명들은 단지 예시를 위한 목적으로 개시된 것으로서, 다양한 형태로 변경되어 구현될 수 있다. 따라서, 실제 구현되는 형태는 개시된 특정 실시예로만 한정되는 것이 아니며, 본 명세서의 범위는 실시예들로 설명한 기술적 사상에 포함되는 변경, 균등물, 또는 대체물을 포함한다.

[0035] 제1 또는 제2 등의 용어를 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 이런 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만 해석되어야 한다. 예를 들어, 제1 구성요소는 제2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성요소는 제1 구성요소로도 명명될 수 있다.

[0036] 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "연결되어" 있다고 언급된 때에는, 그 다른 구성요소에 직접적으로 연결되어 있거나 또는 접속되어 있을 수도 있지만, 중간에 다른 구성요소가 존재할 수도 있다고 이해되어야 할 것이다.

[0037] 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 명세서에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 설명된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것이 존재함으로 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

[0038] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가진다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥상 가지는 의미와 일치하는 의미를 갖는 것으로 해석되어야 하며, 본 명세서에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.

[0039] 이하, 실시예들을 첨부된 도면들을 참조하여 상세하게 설명한다. 첨부 도면을 참조하여 설명함에 있어, 도면부호에 관계없이 동일한 구성 요소는 동일한 참조 부호를 부여하고, 이에 대한 중복되는 설명은 생략하기로 한다.

[0040] 자기출력형 중성자 계측기(Self-Powered Neutron Detector, SPND)는 즉발응답 또는 지연응답의 두 가지 방사성 포획반응 방법을 이용하여 중성자를 계측하고 있다. 즉발응답 SPND는 즉발 감마 방사선과 계측기 물질인 에미터(Emitter)와의 상호작용을 이용하여 출력발생 당시의 중성자속을 측정할 수 있다. 지연응답 SPND는 방사화된 핵종의 베타붕괴 과정에서 나오는 전자들이 계측대상이 된다. 일반적으로 SPND에서는 두 메커니즘이 함께 발생되므로 두 성분 중의 하나가 특히 우세하도록 계측기 재질을 선정할 수 있다. 대표적인 지연 SPND의 예로는 로듐이나 바나듐 계측기가 있으며 즉발 SPND의 예로는 백금, 하프늄, 코발트 계측기가 있다.

[0041] 로듐 계측기의 경우, 흡수단면적이 바나듐과 백금보다 커서 동일한 규격 대비 계측기 신호가 크게 나타나는 장점이 있다. 이러한 장점에 의해 로듐 계측기는 가압경수형 상용원자로의 노내계측기(In-Core Detector)로 사용하였다. 그러나 로듐 계측기는 수 초단위 신호 지연이 발생하는 지발 중성자(delayed neutron)를 계측할 수 있다. 이에 사고 등의 상황 시 로듐 계측기는 밀리초 단위의 반응도 및 중성자속 변화를 정밀하게 계측하지 못하는 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 보안하기 위해서 원자력발전소에서는 즉발 중성자(prompt neutron)를 계측할 수 있는 노외계측기(Ex-Core Detector)를 운용하고 있다. 그러나 노외계측기는 노심 외부에 설치되어 계측 정확도가 떨어질 수 있다. 노외계측기는 노심 상부 중부 하부에서 즉각적으로 신호를 취득할 수는 있으나 노심 외부에서 취득한 신호로 노내 출력분포를 유추하는 데 어려움이 있을 수 있다.

[0042] 한편, 노심보호연산기계통(CPCS; Core Protection Calculator System)은 원자로심의 상태를 감시하고 이상 발생시 원자로를 정지시키는 기능을 수행할 수 있다. 노심보호연산기계통(CPCS)은 원자로를 보호하기 위한 계통으로 노심보호연산기(CPC; Core Protection Calculator)를 포함하여 구성될 수 있다. 노심보호연산기(CPC)는 계측기, 계측신호 처리장치 및 연산기 등을 포함하는 하드웨어와 소프트웨어로 구성될 수 있다. 노심보호연산기(CPC)는 노외핵계측기의 신호를 이용하여 노심의 주요 운전인자를 실시간으로 계산하고, 계산된 운전인자를 제한 값과 비교하는 작업을 수행할 수 있다. 그러나 노외핵계측기는 전술한 바와 같이 계측 정확도가 떨어지는 문제점이 있으므로, 노내핵계측기를 이용한 노심보호연산기계통(CPCS)의 개발을 필요로 한다. 노심보호연산기계통(CPCS)의 계측기로 로듐을 사용하는 경우, 로듐 물질은 전술한 바와 같이 계측 시 지연 시간이 발생함에 따라 실시간으로 감시하는 노심보호연산기계통(CPCS)에 적절하지 않을 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 노심보호연산기계통(CPCS)의 계측기로 코발트를 사용하는 경우, 코발트 물질은 즉발 응답하여 지연 시간이 발생하지 않는다. 그러나, 코발트 물질은 질량수가 59인 코발트 물질로부터 방사성동위원소인 코발트-60(질량수 60)이 축적됨에 따라 계측 신호에 물리적 노이즈가 발생하는 단점이 있다.

[0043] 도 1은 일 실시예에 따른 다중 에미터 노내계측기 신호 계산 장치의 블록도를 도시한다.

[0044] 전술한 문제를 해결하기 위하여 본 발명의 다중 에미터 노내 계측기 신호 계산 장치(예: 장치(100))는 지발 중성자와 즉발 중성자를 계측할 수 있는 계측기(110)를 포함할 수 있다. 또한, 본 발명의 장치(100)는 지발 중성자의 계측에 기초한 계측 값과 즉발 중성자의 계측에 기초한 계측 값을 이용하여 하나의 중성자 반응률(예: 노내계측기 신호)을 산출하는 프로세서(120)를 포함할 수 있다.

[0045] 계측기(110)는 원자로 노심 내에 배치되는 노내 계측기로 자발 중성자 계측기(self-powered neutron detector, SPND)일 수 있다. 또한, 계측기(110)는 제1 물질의 제1 에미터 및 상기 제1 물질과 다른 제2 물질의 제2 에미터를 포함하는 복수의 에미터들을 가질 수 있다. 본 명세서에서 계측기(110)에 포함되는 복수의 에미터들은 두 개로 구성되어 주로 설명하나, 이로 한정하는 것은 아니며, 설계에 따라 세 개 이상의 에미터로도 구성될 수 있다. 또한, 복수의 에미터들 중 적어도 한 에미터의 물질은 다른 에미터의 물질과 다를 수 있다. 계측기(110)에 대한 설명은 도2 및 도3에서 후술한다.

[0046] 프로세서(120)는 계측기(110)의 계측에 기초하여 계측 값들을 추출할 수 있다. 프로세서(120)는 미리 결정된 추출 간격에 기초하여 계측 값을 추출할 수 있다. 노심보호연산기계통(CPCS)에서는 실시간으로 계측 값들을 추출해야하므로, 미리 결정된 추출 간격은, 예를 들어, 1초 간격으로 설정될 수 있다. 프로세서(120)는 계측 값 추출 전 입력문의 입력여부를 확인할 수 있다. 입력문은 도4 및 도5에서 후술한다. 프로세서(120)는 원자로 노심 내에 있는 계측기(110)와 분리되어 별도로 구성될 수 있다. 이에 프로세서(120)는 계측기(110)와 물리적으로 및/또는 전기적으로 연결될 수 있다. 프로세서(120)는 추출된 계측 값들을 통해 복수의 에미터들에 대해 반응률들(reaction rates)을 산출할 수 있다. 프로세서(120)는 노달 확산 코드(nodal diffusion code)를 이용하여 반응률(예: 중성자 반응률)을 산출할 수 있다. 프로세서(120)는 반응률들 및 복수의 에미터들의 부피 비율에 기초하여, 계측기(110)에 대한 총 반응률을 계산할 수 있다.

[0047] 노달 확산 코드는 원자로 노심의 분석 및 설계를 위하여 계산 모델 및 엔지니어링 기능 등을 구현할 수 있다. 노달 확산 코드는 RAST-K, SIMULATE, PARCS, MASTER 및 ANC 등이 있으며, 본 발명은 RAST-K를 주로 사용하나 이에 한정되지 않는다. 노달 확산 코드는 중성자 확산방정식을 이용하여 노심 내 각 위치의 중성자속 및 중성자 거동을 계산 및 묘사할 수 있다. 본 발명의 노달 확산 코드는 2군 에너지를 갖는 2군 중성자속(예: 고속중성자와 열중성자의 중성자속)을 주로 계산하나, 이에 한정되지 않는다.

[0048] 노달 확산 코드는 하기 수학식1의 계산을 구현하여 반응률을 산출할 수 있다.

수학식 1

[0049] $$R^{det}(r) = N^{det}[\sigma_{a1}^{det}\emptyset_1^{det}(r) + \sigma_{a2}^{det}\emptyset_2^{det}(r)]$$

[0050] 전술한 수학식 1에서 $R^{det}(r)$는 각 에미터에 대한 위치변수 r(계측기 위치)에서의 반응률, det는 에미터의 인덱스(index), N^{det} 은 계측기의 수밀도, σ_{a1}^{det}는 고속 중성자의 흡수핵단면적(fast-group absorption cross-section), $\emptyset_1^{det}$는 고속 중성자의 중성자속, σ_{a2}^{det}는 열중성자의 흡수핵단면적(hermal-group absorption cross-section), $\emptyset_2^{det}$는 열중성자의 중성자속을 나타낼 수 있다. 전술한 수학식 1에서의 위치변수 r은 노내 계측기에서 검출되는 신호들 중 어느 한 신호를 지시하는 값일 수 있다. 예를 들어, 노내 계측기에서 계측되는 신호들의 개수가 원자로 노심 내 계측기 집합체 개수 45 X 계측기 개수 5 = 225인 경우, r은 1이상 225이하의 정수일 수 있다.

[0051] 프로세서(120)는 고속중성자의 흡수핵단면적 및 중성자속과 열중성자의 흡수핵단면적 및 중성자속을 계측 값으로 추출할 수 있다. 또한, 고속중성자의 흡수핵단면적 및 중성자속과 열중성자의 흡수핵단면적 및 중성자속은 계측기(110)에서 계측된 신호에 기초하여 별도의 수학식을 이용하여 산출된 값일 수 있다.

[0052] 노달 확산 코드는 하기 수학식2 계산을 구현하여 수학식1의 N^{det}를 미리 결정된 산출시간마다 산출하여 갱신할 수 있다. 사용자는 프로세서(120)가 계측 값을 추출하는 미리 결정된 추출 간격과 미리 결정된 산출시간을 동일하게 설정할 수 있다.

수학식 2

[0053] $$N^{det}(r,t_n) = N^{det}(r,t_{n-1})c^{-(\sigma_{a1}^{det}(r,t_n)\emptyset_1^{det}(r,t_n)+\sigma_{a2}^{det}(r,t_n)\emptyset_2^{det}(r,t_n))\Delta t}$$

[0054] 전술한 수학식 2에서 $\sigma_{a1}^{det}(r,t_n)$, $\emptyset_1^{det}(r,t_n)$, $\sigma_{a2}^{det}(r,t_n)$, $\emptyset_2^{det}(r,t_n)$은 현재 산출시간에서의 고속중성자의 흡수핵단면적 및 중성자속과 열중성자의 흡수핵단면적 및 중성자속을 나타낼 수 있다. $\sigma_{a1}^{det}(r,t_n)$, $\emptyset_1^{det}(r,t_n)$, $\sigma_{a2}^{det}(r,t_n)$, $\emptyset_2^{det}(r,t_n)$은 계측기에 의해 계측된 계측 신호를 이용하여 프로세서(120)에 의해 추출된 계측 값일 수 있다. 또한, $\sigma_{a1}^{det}(r,t_n)$, $\emptyset_1^{det}(r,t_n)$, $\sigma_{a2}^{det}(r,t_n)$, $\emptyset_2^{det}(r,t_n)$은 수학식1에서 사용되는 값과 동일할 수 있다. $N^{det}(r,t_{n-1})$은 시간 t_{n-1}(이전 산출시간)에서의 계측기 수밀도일 수 있다.

[0055] 프로세서(120)는 부피 비율에 따른 반응률들의 가중합(weighted sum)을 총 반응률로 결정할 수 있다. 노달 확산 코드는 하기 수학식3 계산을 구현하여 총 반응률을 산출할 수 있다.

수학식 3

[0056] $$\mathrm{R(r)} = \frac{1}{V^{SPND}}\sum_{det=1}^{n} R^{det}(r) * V^{det}$$

[0057] 전술한 수학식 3에서 R(r)는 위치변수 r에서의 계측기 총 반응률, V^{SPND}는 계측기 전체의 부피(예: 각 에미터 부피의 합), $R^{det}(r)$은 전술한 수학식1에 의해 산출된 각 에미터에 대한 위치변수 r에서의 반응률, n은 에미터 종류에 따른 개수, V^{det}는 각 에미터의 부피를 나타낼 수 있다.

[0058] 도 2는 일 실시예에 따른 계측기 집합체의 예시적인 구조도를 도시한다.

[0059] 하나의 계측기 집합체(200)는, 예를 들면, 다섯개의 계측기(210)(예: 계측기(110))로 구성될 수 있다. 다섯개

의 계측기(210)는 계측기 집합체(200)의 몸체(body)(220)의 축방향으로 각각 배치될 수 있다. 예시적으로, 축방향은 기준면(예: 지면)에 수직한 방향(예: z축 방향)을 나타낼 수 있다. 계측기 집합체(200)의 몸체(220)의 길이는 노심의 길이와 동일하게 형성될 수 있다. 사용자(예: 운전자)는 노내 계측기의 최하단인 220a 위치의 좌표 값을 기준점인 0으로 지정할 수 있다. 또한, 사용자는 노내 계측기의 최상단인 220l 위치의 좌표 값을 계측기 집합체(200)의 몸체 길이 값으로 지정할 수 있다. 예시적으로, 다섯개의 계측기(210)는 계측기 집합체(200)의 몸체(220) 길이의 10%, 30%, 50%, 70%, 90% 위치에 고정형으로 설치될 수 있다. 예를 들어, 220l의 좌표 값을 383.3이라고 지정한다면, 220b의 좌표 값은 18.33, 220c의 좌표 값은 38.33일 수 있다. 220d의 좌표 값은 95.0, 220e의 좌표 값은 115.0, 220f의 좌표 값은 171.6, 220g의 좌표 값은 191.6, 220h의 좌표 값은 248.3, 220i의 좌표 값은 268.3, 220j의 좌표 값은 325.0 및 220k의 좌표 값은 345.0일 수 있다. 이에 프로세서(120)는 각 에미터의 좌표 값(예: 220b 내지 220k의 좌표 값)을 통해 각 계측기(210) 내 에미터의 위치를 식별할 수 있다.

[0060] 계측기(210)는 제1 에미터(211), 제2 에미터(212), 콜렉터(213), 신호선(214) 및 절연체(215)를 포함할 수 있다. 제1 에미터(211)와 제2 에미터(212) 중 하나는 즉발 응답형 물질을 사용하고, 다른 하나는 지발 응답형 물질을 사용할 수 있다. 예를 들어, 즉발 응답형 물질은 백금, 하프늄 또는 코발트일 수 있고, 지발 응답형 물질은 로듐 또는 바나듐일 수 있다. 프로세서(120)는, 계측 값 추출 시 지발 응답형 물질의 계측 값보다 즉발 응답형 물질의 계측 값을 먼저 추출할 수 있다. 콜렉터(Collector)(213)는 제1 에미터(211)와 제2 에미터(212)가 중성자와 반응하여 연소되면서 방출하는 전자를 수집할 수 있다. 계측기(210) 내 제1 에미터(211) 및 제2 에미터(212)는 계측기 집합체(200)의 몸체(220)의 축방향으로 각각 배치될 수 있다. 신호선(214)은 제1 에미터(211) 및 제2 에미터(212)와 콜렉터(213)를 연결시켜 전기 신호를 발생시킬 수 있다. 절연체(215)는 알루미나와 같은 물질로 이루어져 제1 에미터(211) 및 제2 에미터(212)와 콜렉터(213) 사이를 충진할 수 있다.

[0061] 도 3은 단일의 로듐 물질로 구성된 예시적인 에미터의 구조도 및 코발트-바나듐 물질로 구성된 예시적인 에미터의 구조도를 도시한다.

[0062] 계측기(110)의 코발트-바나듐 에미터(320)는 로듐 에미터(310)와 같은 직경 및 높이로 구현될 수 있다. 예를 들어, 로듐 에미터(310)의 상부 및 하부는 단일한 로듐(Rh-103) 물질로 구성될 수 있다. 로듐 에미터(310)와 달리 코발트-바나듐 에미터(320)의 상부(321)는 코발트-60(Co-60) 물질로 구성될 수 있다. 또한, 에미터(320)의 하부(322)는 코발트 물질과는 다른 바나듐-51(V-51) 물질로 구성될 수 있다. 따라서, 코발트-바나듐 에미터(320)는 상하부에 구성된 상이한 계측기 물질에 의해 각각 다른 계측 값을 계측할 수 있다. 코발트 물질 및 바나듐 물질에 대한 설명은 도 9 내지 도 11에서 후술한다 코발트-바나듐 에미터(320)를 포함하는 장치(100)는, 프로세서(120)에 의해 에미터의 상부(321) 및 하부(322)를 각각 따로 계측할 수 있다. 에미터의 상부(321) 및 하부(322)를 따로 계측하기 위하여 입력문을 수정하는 것은 도4 및 도5에서 후술한다.

[0063] 사용자는 노달 확산 코드에 사용되는 입력문을 생성하여 프로세서(120)를 통해 실행시킴에 따라 원자로 노심의 거동을 분석할 수 있다. 입력문은 에미터의 개수, 종류, 길이, 위치 및 계산수식에 대한 정보를 포함할 수 있다.

[0064] 도 4는 일 실시예에 따른 단일 물질의 에미터의 반응률을 산출하는 입력문의 예시도를 도시한다.

[0065] 도4에서 도시하는 #DET_SIG는 RAST-K 입력의 입력 CARD를 나타낼 수 있다. ALL은 모든 핵연료 집합체에서의 전체 계측기 집합체의 신호(예: 노내계측신호)를 계산한다는 옵션 및 RR은 계측기(예: 노내계측기)의 종류를 의미하는 단일 계측기를 나타낼 수 있다. AXIAL 5는 다섯개의 계측기의 위치를 지정해주는 입력을 나타낼 수 있다. 이러한 다섯개의 계측기의 위치 정보에 기초하여 프로세서(120)는 각 계측기 위치에서 계측 값들을 추출할 수 있다. OPT_PRT는 전체 계측기 집합체의 신호 계산 수식을 결정하는 옵션을 나타낼 수 있다. 여기서 40을 입력하면, 전술한 수학식2를 포함한 수학식1을 사용하는 것을 의미할 수 있다. PRT_DETPOW는 계측기 위치의 열출력을 계산할지 여부를 결정하는 옵션을 나타낼 수 있다.

[0066] 그러나 본 발명의 계측기(110)와 같이 이종의 에미터들을 사용하는 경우, 전술한 입력문을 적용하여 이종의 에미터들에 대한 계측 값을 추출하기에는 어려움이 있을 수 있다. 프로세서(120)는 전술한 입력문을 통해서 하나의 물질로 구성된 에미터의 흡수핵단면적 및 중성자속만을 추출할 수 있다. 예시적으로, 즉발 응답형 계측기를 사용하는 경우에는 지발 응답형 계측기를 이용하여 보정 상수를 획득해야 한다. 그러나 전술한 입력문을 통해 하나의 에미터의 흡수핵단면적 및 중성자속을 추출하는 것은 보정 상수를 통해 즉발 응답형 계측기의 계측 신호를 보정하는데 어려움이 있을 수 있다.

[0067] 이를 해결하기 위하여 사용자는 후술하는 도5와 같이 입력문을 수정할 수 있다. 노달 확산 코드에 적용되는 입력문의 수정은 노내계측기 물질의 흡수핵단면적 데이터 형식이 변경되는 것을 의미할 수 있다.

[0068] 도 5는 일 실시예에 따른 상이한 물질로 구성된 에미터들의 총 반응률을 산출하는 입력문의 예시도를 도시한다.

[0069] MIXED는 다중 에미터 종류에 따른 개수이고, 예를 들어, 2로 기재되면 두 종류의 물질을 가진 에미터를 나타낸 것일 수 있다. MIXED 하단에 기재된 2, 3은 다중 에미터의 인덱스를 나타낸 것일 수 있다. 예를 들면, 1은 로듐, 2는 바나듐, 3은 코발트, 4는 백금일 수 있다. 이에 2, 3은 바나듐 에미터와 코발트 에미터로 구성된 것을 의미할 수 있다. 2, 3 하단에 기재된 20, 20은 각 에미터 별 길이를 나타낸 것일 수 있다. 따라서, 바나듐 에미터의 길이는 20cm이고, 코발트 에미터의 길이는 20cm일 수 있다. M_AXIAL 5는 도4를 들어 전술한 AXIAL 5와 동일하게 계측기의 위치를 지정해주는 입력을 나타낼 수 있다. M_AXIAL 5 하단에 기재된 첫번째 다섯개의 숫자는 도2에서 전술한 220b, 220d, 220f, 220h, 220j의 위치 좌표를 나타낼 수 있다. 이는 다섯개의 계측기의 하부 바나듐 에미터의 위치를 나타낼 수 있다. M_AXIAL 5 하단에 기재된 두번째 다섯개의 숫자는 도2에서 전술한 220c, 220e, 220g, 220i, 220k의 위치 좌표를 나타낼 수 있다. 이는 다섯개의 계측기의 상부 코발트 에미터의 위치를 나타낼 수 있다. 이에 프로세서(120)는 각 220b 내지 220k의 위치에 기초하여 하나의 계측기에서 동일한 형식의 계측 값을 두개로 추출할 수 있다. OPT_PRT와 PRT_DETPOW는 도4를 들어 전술한 입력문과 동일하게 기재되었으나, OPT_PRT 40에는 전술한 수학식1 뿐만 아니라 수학식 3또한 사용하는 것을 의미할 수 있다. 이러한 입력문을 통해 사용자는 에미터 별 입력문을 따로 작성하는 것이 아닌 하나의 입력문으로 용이하게 반응률을 산출할 수 있다. 또한, 사용자는 상이한 물질로 구성된 에미터들을 사용함에 따라 노내계측기의 불확실도를 낮추고 신뢰도를 높여 높은 정확도로 원전 노심 계측제어를 수행할 수 있다.

[0070] 노심보호연산기계통(CPCS)에 적용되는 계측기를 노외계측기가 아닌 노내계측기로 사용하는 경우, 계측기(110, 210)는 계측용 지발 응답형 중성자 계측기(Delayed-Response neutron detector)와 보정용 즉발 응답형 중성자 계측기(Prompt-Response neutron detector)가 구성될 수 있다. 예를 들면, 프로세서(120)는 계측용 지발 응답형 중성자 계측기에서 중성자 계측 시 발생하는 신호 지연을 즉발 응답형 중성자 계측기의 계측 결과를 이용하여 보정할 수 있다. 프로세서(120)는 보정용 즉발 응답형 중성자 계측기에서 측정한 계측 신호를 기초로 하여 산출한 보정상수를 계측용 지발 응답형 중성자 계측기에서 측정한 계측신호에 부가하여 최종적으로 보정된 계측신호를 산출할 수 있다. 이와 같이 프로세서(120)는 보정상수를 신호 보정, 신호 증폭, 신호 동적 및 정적 보상 필터 적용에 사용할 수 있다. 또한, 보정 상수는 노내계측기의 신규 모델을 적용한 기술을 상업화 및 실제화할때 신호 변환 및 전처리 과정에 사용될 수 있다. 지발 응답형 중성자 계측기는, 로듐 에미터 또는 바나듐 에미터를 포함할 수 있다. 즉발 응답형 중성자 계측기는, 코발트 에미터를 포함할 수 있다.

[0071] 도 6은 일 실시예에 따른 원자로 노심 내 계측기 집합체가 배치된 일부 위치에서 상용원자로 주기 초의 반응률 차를 나타내는 예시도를 도시한다. 도 7은 일 실시예에 따른 원자로 노심 내 계측기 집합체가 배치된 일부 위치에서 상용원자로 주기 말의 반응률 차를 나타내는 예시도를 도시한다.

[0072] 도 6 및 도7에는 각 노심 위치에 보정상수를 생산하기 위한 상하부 반응률 계산결과를 나타낼 수 있다. 도 6 및 도7에서 ^{59}Co로 표기된 계측기의 각 에미터 중 상부는 코발트 물질로 이루어지고, 하부 에미터는 바나듐으로 이루어질 수 있다. 도 6 및 도7에는 각 에미터가 각 위치(예: 다섯 개 위치)에서의 반응률을 그래프 형태로 나타낼 수 있다. 도 6 및 도7에는 각 계측기 집합체를 노심의 한 사분면에 모아 평균값을 나타낼 수 있다. 도 6 및 도7에서 ^{103}Rh로 표기된 계측기는 반응률 계산결과의 참조로 로듐 물질로 이루어진 에미터를 사용할 수 있다. 바나듐 계측신호로 보정된 코발트 계측신호와 로듐 계측신호를 비교하여 오차를 나타내면, 상용원자로 주기 초와 말에서 2D RMS는 6.43%에서 4.53%로, 3D RMS는 14.77%에서 11.73%로 감소한 것을 볼 수 있다. 그러나 본 발명의 장치(100)를 이용하여 산출된 각 위치에서의 반응률 간의 차는 연소도와 관계없이 상용원자로 주기 초와 말에 일관되게 산출되는 것을 볼 수 있다. 또한, 상용 원자로는 18개월을 하나로 주기로 핵연료를 재배치하여 운전할 수 있다. 이에 주기 초의 경우는 초기 1개월 정도를 의미할 수 있고, 주기 말의 경우는 말기 1개월 정도를 의미할 수 있다. 이에 수학식 4를 이용하여, 주기연소도를 산출할 수 있다.

수학식 4

[0073] $$\text{Cycle burnup} = \frac{\text{출력(GW)}}{\text{핵연료 질량(MT)}} \times \text{운전일수(Day)}$$

[0074] 전술한 수학식 4를 이용하여 주기 초와 주기 말 연소도를 산출한다면, 주기 초의 연소도는 0 GWD/MT이고, 주기 말의 연소도는 13.987 GWD/MT일 수 있다.

[0075] 도 8은 일 실시예에 따른 다중 에미터 노내계측기 신호 계산 방법의 흐름도를 도시한다.

[0076] 단계(810)에서 프로세서는 복수의 에미터들을 가지는 자발 중성자 계측기의 계측에 기초하여 계측 값들을 추출할 수 있다. 예를 들면, 프로세서는 복수의 에미터들 중 제1 물질의 제1 에미터 및 제1 물질과 다른 제2 물질의 제2 에미터와 관련된 계측 값들을 추출할 수 있다.

[0077] 단계(820)에서 프로세서는 계측 값들을 통해 복수의 에미터들에 대해 반응률들을 산출할 수 있다. 예를 들면, 프로세서는 제1 에미터에 대한 반응률 및 제2 에미터에 대한 반응률을 산출할 수 있다.

[0078] 단계(830)에서 프로세서는 반응률들 및 복수의 에미터들의 부피 비율에 기초하여, 자발 중성자 계측기에 대한 총 반응률을 계산할 수 있다. 프로세서는 부피 비율에 따른 반응률들의 가중합(weighted sum)을 총 반응률로 결정할 수 있다.

[0079] 프로세서는 단계(810)을 수행하기 전, 사용자에 의해 입력되는 에미터의 개수, 종류, 길이, 위치 및 계산수식에 대한 정보가 포함되는 입력문의 입력여부를 확인할 수 있다. 입력문의 입력여부 확인한 후, 프로세서는 입력문의 정보에 기초하여 복수개의 자발 중성자 계측기 위치에서 계측 값들을 추출할 수 있다(단계(810)). 프로세서는 계측기 집합체의 몸체의 축방향 위치를 기준으로 복수의 에미터들의 각각의 위치가 입력된 입력문에 기초하여 계측 값들을 추출할 수 있다. 프로세서는 단계(810) 수행 시 복수의 에미터들 중 지발 응답형 물질의 계측 값보다 즉발 응답형 물질의 계측 값을 먼저 추출할 수 있다. 또한, 프로세서는 단계(810) 수행 시 미리 결정된 추출 간격에 기초하여 계측 값을 추출할 수 있다. 프로세서는 단계(820) 수행 전, 추출된 계측 값에 기초하여 반응률 산출에 이용되는 수밀도를 산출할 수 있다.

[0080] 도 9는 바나듐 물질의 붕괴 사슬을 나타내는 붕괴도를 도시한다. 도 10은 코발트 물질의 붕괴 사슬을 나타내는 붕괴도를 도시한다. 도 11은 여러 종류 물질 에미터의 연소 시간에 따른 중성자 계측민감도를 나타내는 그래프를 도시한다. 계측민감도는 count per second per neutron volt (cps/nv)의 단위를 가지며, 실제 노심 내 중성자속에 대한 계측되는 신호의 양을 나타낸다. 대부분의 에미터 물질은 중성자 포획반응 후 질량수가 1 증가한 방사성동위원소로 변환되었다가, 수 분 이내의 짧은 반감기를 거쳐 더이상 핵반응을 일으키지 않는 안정한 핵종으로 바로 자연붕괴한다. 그러나 코발트 물질은 다른 에미터 예시물질과는 달리 변환된 방사성동위원소 코발트-60의 반감기가 5.26년으로 매우 길어, 긴 기간동안 지속적으로 자연 베타붕괴를 일으킨다. 따라서 코발트-59의 중성자 포획반응으로 인한 전자발생 이외에도 코발트-60의 베타붕괴로 인한 베타입자가 계측 신호에 더해지는 노이즈 현상이 발생한다. 한편, 바나듐 물질은 붕괴 사슬이 간단하여 계측 민감도가 시간에 따라 변하지 않는 특성을 가지고 있다. 이에 코발트 물질의 계측 신호는 전술한 바나듐 물질의 특성에 기초하여 바나듐 물질로 계측한 계측신호로 보정하는 것이 필요하다.

[0081] 이상에서 설명된 실시예들은 하드웨어 구성요소, 소프트웨어 구성요소, 및/또는 하드웨어 구성요소 및 소프트웨어 구성요소의 조합으로 구현될 수 있다. 예를 들어, 실시예들에서 설명된 장치, 방법 및 구성요소는, 예를 들어, 프로세서, 콘트롤러, ALU(arithmetic logic unit), 디지털 신호 프로세서(digital signal processor), 마이크로컴퓨터, FPGA(field programmable gate array), PLU(programmable logic unit), 마이크로프로세서, 또는 명령(instruction)을 실행하고 응답할 수 있는 다른 어떠한 장치와 같이, 범용 컴퓨터 또는 특수 목적 컴퓨터를 이용하여 구현될 수 있다. 처리 장치는 운영 체제(OS) 및 상기 운영 체제 상에서 수행되는 소프트웨어 애플리케이션을 수행할 수 있다. 또한, 처리 장치는 소프트웨어의 실행에 응답하여, 데이터를 접근, 저장, 조작, 처리 및 생성할 수도 있다. 이해의 편의를 위하여, 처리 장치는 하나가 사용되는 것으로 설명된 경우도 있지만, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자는, 처리 장치가 복수 개의 처리 요소(processing element) 및/또는 복수 유형의 처리 요소를 포함할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어, 처리 장치는 복수 개의 프로세서 또는 하나의 프로세서 및 하나의 컨트롤러를 포함할 수 있다. 또한, 병렬 프로세서(parallel processor)와 같은, 다른

처리 구성(processing configuration)도 가능하다.

[0082] 소프트웨어는 컴퓨터 프로그램(computer program), 코드(code), 명령(instruction), 또는 이들 중 하나 이상의 조합을 포함할 수 있으며, 원하는 대로 동작하도록 처리 장치를 구성하거나 독립적으로 또는 결합적으로(collectively) 처리 장치를 명령할 수 있다. 소프트웨어 및/또는 데이터는, 처리 장치에 의하여 해석되거나 처리 장치에 명령 또는 데이터를 제공하기 위하여, 어떤 유형의 기계, 구성요소(component), 물리적 장치, 가상 장치(virtual equipment), 컴퓨터 저장 매체 또는 장치, 또는 전송되는 신호 파(signal wave)에 영구적으로, 또는 일시적으로 구체화(embody)될 수 있다. 소프트웨어는 네트워크로 연결된 컴퓨터 시스템 상에 분산되어서, 분산된 방법으로 저장되거나 실행될 수도 있다. 소프트웨어 및 데이터는 컴퓨터 판독 가능 기록 매체에 저장될 수 있다.

[0083] 실시예에 따른 방법은 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록될 수 있다. 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있으며 매체에 기록되는 프로그램 명령은 실시예를 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체의 예에는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체(magnetic media), CD-ROM, DVD와 같은 광기록 매체(optical media), 플롭티컬 디스크(floptical disk)와 같은 자기-광 매체(magneto-optical media), 및 롬(ROM), 램(RAM), 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령을 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함된다. 프로그램 명령의 예에는 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 컴퓨터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어 코드를 포함한다.

[0084] 위에서 설명한 하드웨어 장치는 실시예의 동작을 수행하기 위해 하나 또는 복수의 소프트웨어 모듈로서 작동하도록 구성될 수 있으며, 그 역도 마찬가지이다.

[0085] 이상과 같이 실시예들이 비록 한정된 도면에 의해 설명되었으나, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이를 기초로 다양한 기술적 수정 및 변형을 적용할 수 있다. 예를 들어, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 및/또는 설명된 시스템, 구조, 장치, 회로 등의 구성요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나, 다른 구성요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 치환되더라도 적절한 결과가 달성될 수 있다.

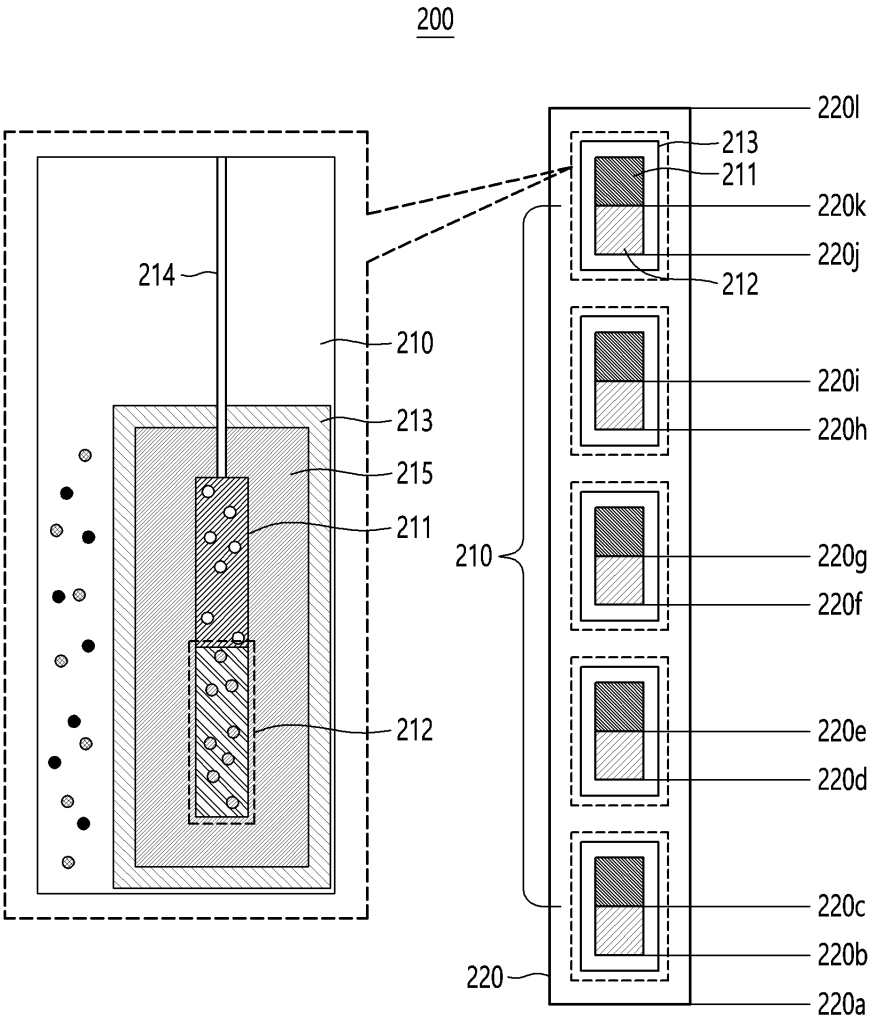
[0086] 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 특허청구범위의 범위에 속한다.

도면

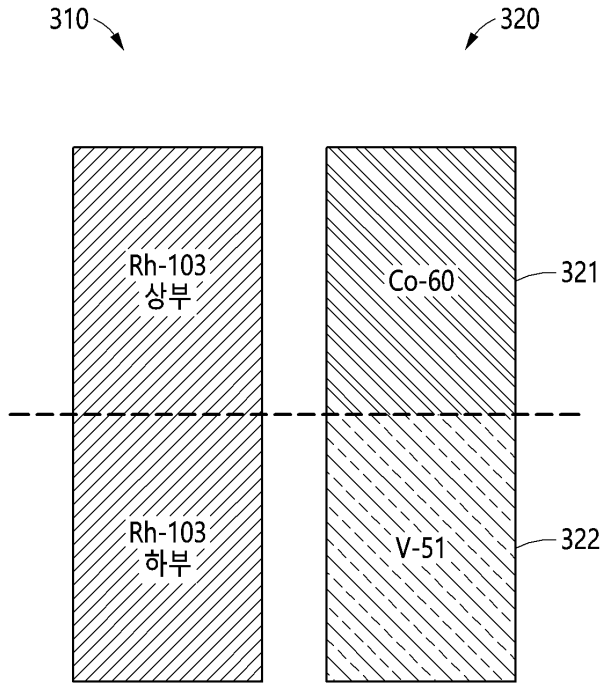
도면1



도면2


200
214
210
213
215
211
212
210
220
220l
213
211
220k
220j
212
220i
220h
220g
220f
220e
220d
220c
220b
220a

도면3



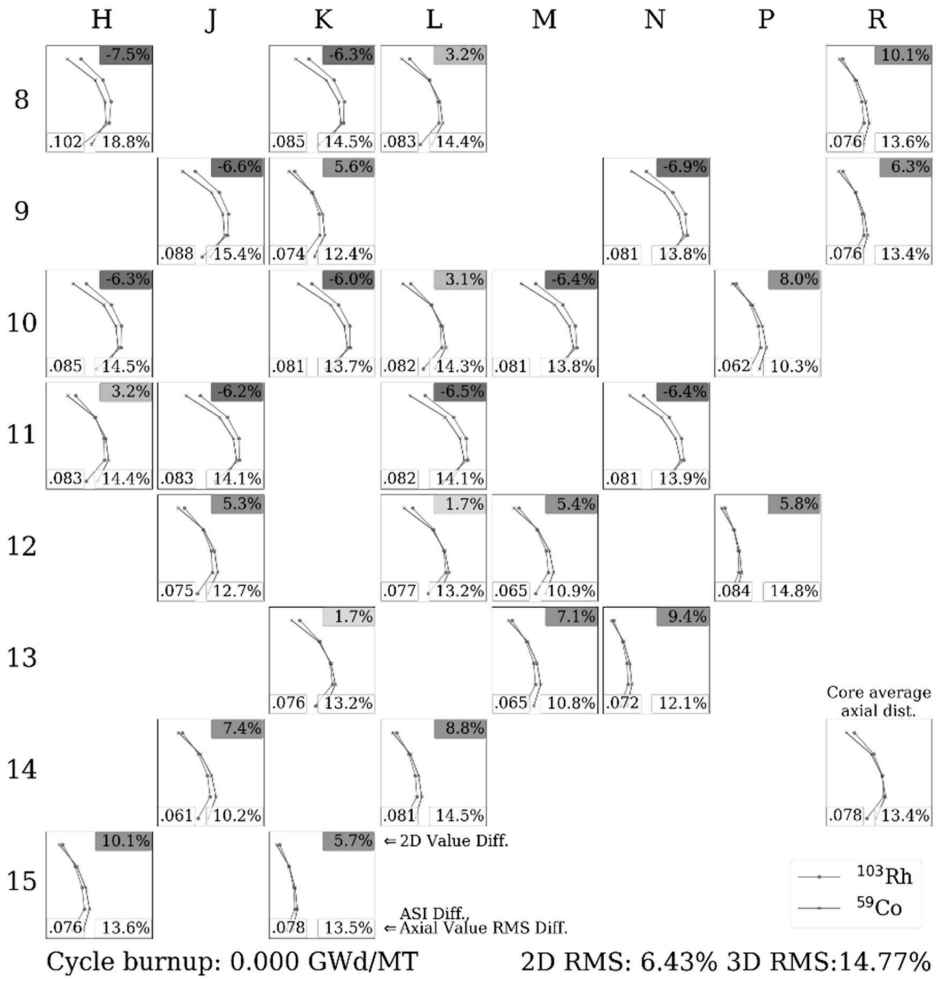
도면4

```
=============================================================
#DET_SIG
    ALL
    RR     3
    AXIAL 5     18.333  95.0 171.667 248.334 325.0
    OPT_PRT      40
    PRT_DETPOW    T
=============================================================
```

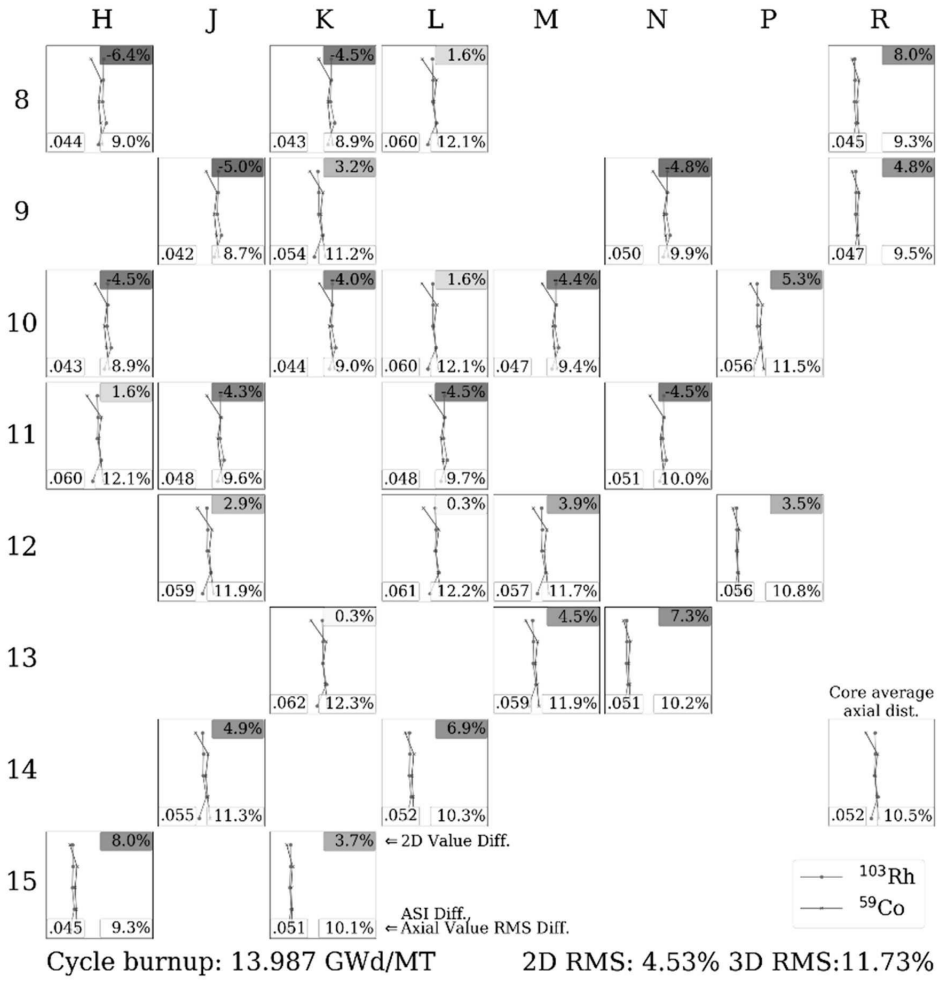
도면5

```
=============================================================
#DET_SIG
    ALL
    MIXED   2
        2  3
        20 20
    M_AXIAL     5
        18.333  95.0 171.667 248.334 325.0
        38.333 115.0 191.667 268.334 345.0
    OPT_PRT      40
    PRT_DETPOW    T
=============================================================
```

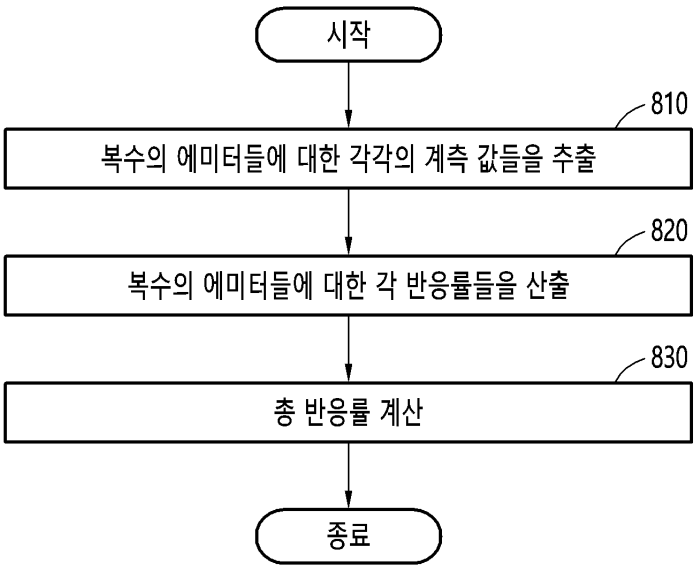
도면6


H
J
K
L
M
N
P
R
8
9
10
11
12
13
14
15
-7.5%
.102
18.8%
-6.3%
.085
14.5%
3.2%
.083
14.4%
10.1%
.076
13.6%
-6.6%
.088
15.4%
5.6%
.074
12.4%
-6.9%
.081
13.8%
6.3%
.076
13.4%
-6.3%
.085
14.5%
-6.0%
.081
13.7%
3.1%
.082
14.3%
-6.4%
.081
13.8%
8.0%
.062
10.3%
3.2%
.083
14.4%
-6.2%
.083
14.1%
-6.5%
.082
14.1%
-6.4%
.081
13.9%
5.3%
.075
12.7%
1.7%
.077
13.2%
5.4%
.065
10.9%
5.8%
.084
14.8%
1.7%
.076
13.2%
7.1%
.065
10.8%
9.4%
.072
12.1%
Core average axial dist.
7.4%
.061
10.2%
8.8%
.081
14.5%
.078
13.4%
10.1%
.076
13.6%
5.7%
.078
13.5%
⇐2D Value Diff.
ASI Diff.
⇐Axial Value RMS Diff.
103Rh
59Co
Cycle burnup: 0.000 GWd/MT
2D RMS: 6.43% 3D RMS:14.77%

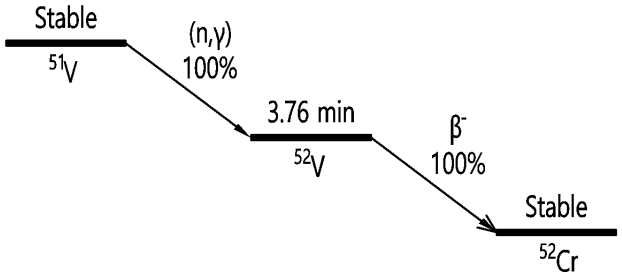
도면7


H
J
K
L
M
N
P
R
8
9
10
11
12
13
14
15
-6.4%
.044
9.0%
-4.5%
.043
8.9%
1.6%
.060
12.1%
8.0%
.045
9.3%
-5.0%
.042
8.7%
3.2%
.054
11.2%
-4.8%
.050
9.9%
4.8%
.047
9.5%
-4.5%
.043
8.9%
-4.0%
.044
9.0%
1.6%
.060
12.1%
-4.4%
.047
9.4%
5.3%
.056
11.5%
1.6%
.060
12.1%
-4.3%
.048
9.6%
-4.5%
.048
9.7%
-4.5%
.051
10.0%
2.9%
.059
11.9%
0.3%
.061
12.2%
3.9%
.057
11.7%
3.5%
.056
10.8%
0.3%
.062
12.3%
4.5%
.059
11.9%
7.3%
.051
10.2%
Core average axial dist.
4.9%
.055
11.3%
6.9%
.052
10.3%
.052
10.5%
8.0%
.045
9.3%
3.7%
.051
10.1%
⇐2D Value Diff.
ASI Diff.
⇐Axial Value RMS Diff.
103Rh
59Co
Cycle burnup: 13.987 GWd/MT
2D RMS: 4.53% 3D RMS:11.73%

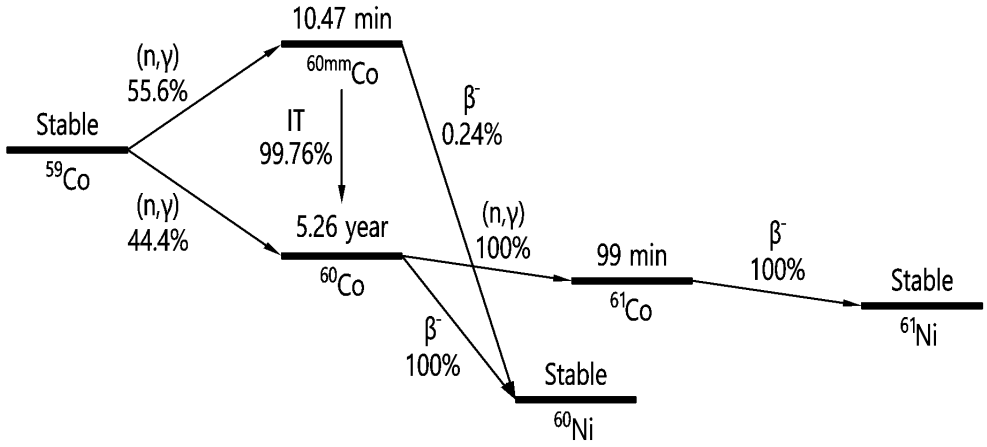
도면8


시작
810
복수의 에미터들에 대한 각각의 계측 값들을 추출
820
복수의 에미터들에 대한 각 반응률들을 산출
830
총 반응률 계산
종료

도면9



도면10



도면11

