



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0006248
(43) 공개일자 2023년01월10일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G21C 17/10 (2006.01) G06F 17/17 (2006.01)
G21C 17/112 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G21C 17/102 (2013.01)
G06F 17/17 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2021-0087205
(22) 출원일자 2021년07월02일
심사청구일자 2021년07월02일

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
이덕중
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
장재림
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(74) 대리인
제일특허법인(유)

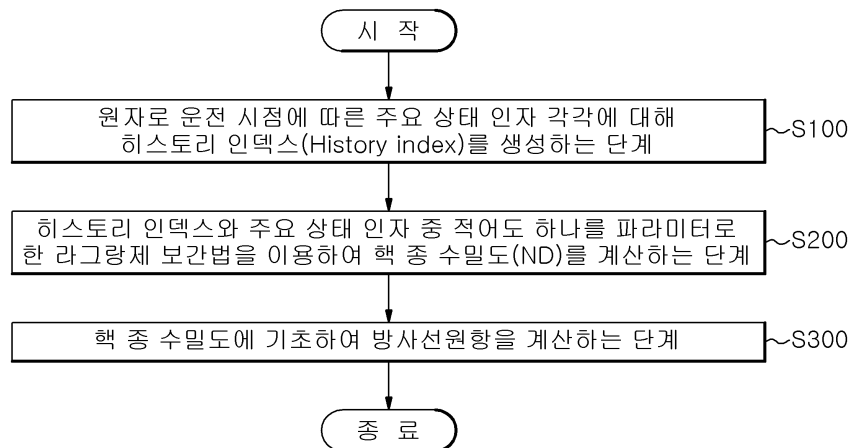
전체 청구항 수 : 총 15 항

(54) 발명의 명칭 방사선원항 계산 방법 및 방사선원항 계산 장치

(57) 요약

본 발명에 따르면, 원자로 운전 시점에 따른 주요 상태 인자 각각에 대해 히스토리 인덱스(History index)를 생성하고, 상기 히스토리 인덱스와 상기 주요 상태 인자 중 적어도 하나를 파라미터로 한 라그랑제 보간법을 이용하여 핵 종 수밀도(ND)를 계산하여, 상기 핵 종 수밀도에 기초하여 방사선원항을 계산하는 방사선원항 계산 방법 및 방사선원항 계산 장치가 개시된다.

대표도 - 도2



(52) CPC특허분류

G21C 17/112 (2013.01)

Y02E 30/30 (2020.08)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1415168084
과제번호	20171510102040
부처명	산업통상자원부
과제관리(전문)기관명	한국에너지기술평가원
연구사업명	원자력핵심기술개발(R&D)
연구과제명	인공지능 기반 원전 기동 및 정지 운전지원 기술개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	한국수력원자력(주) 중앙연구원
연구기간	2020.03.01 ~ 2020.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

방사선원형 계산 장치에 의해 수행되는 방사선원형 계산 방법에 있어서,

원자로 운전 시점에 따른 주요 상태 인자 각각에 대해 히스토리 인덱스(History index)를 생성하는 단계;

상기 히스토리 인덱스와 상기 주요 상태 인자 중 적어도 하나를 파라미터로 한 라그랑제 보간법을 이용하여 핵 중 수밀도(ND)를 계산하는 단계; 및

상기 핵 중 수밀도에 기초하여 방사선원형을 계산하는 단계;를 포함하는 방사선원형 계산 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 주요 상태 인자는,

감속재 온도, 핵 연료 온도 및 붕소 농도 중 적어도 하나를 포함하는 방사선원형 계산 방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 히스토리 인덱스(History index)를 생성하는 단계는,

상기 원자로 운전 기간에 따른 상기 주요 상태 인자의 누적 값을 이용하여 상기 히스토리 인덱스를 산출하는 단계를 포함하는 방사선원형 계산 방법.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 핵 중 수밀도(ND)를 계산하는 단계는,

상기 감속재 온도의 히스토리 인덱스와 핵 연료 집합체 조건에 따라 선택된 감속재 온도에 기초하여, 감속재 온도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{MO})를 계산하는 단계를 포함하는 방사선원형 계산 방법.

청구항 5

제3항에 있어서,

상기 핵 중 수밀도(ND)를 계산하는 단계는,

상기 핵 연료 온도의 히스토리 인덱스와 핵 연료 집합체 조건에 따라 선택된 핵 연료 온도에 기초하여, 핵 연료 온도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{TFU})를 계산하는 단계를 포함하는 방사선원형 계산 방법.

청구항 6

제3항에 있어서,

상기 핵 중 수밀도(ND)를 계산하는 단계는,

상기 붕소 농도의 히스토리 인덱스와 핵 연료 집합체 조건에 따라 선택된 붕소 농도에 기초하여, 붕소 농도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{BOR})를 계산하는 단계를 포함하는 방사선원형 계산 방법.

청구항 7

제3항에 있어서,

상기 핵 중 수밀도(ND)를 계산하는 단계는,

상기 감속재 온도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{TMO}), 상기 핵 연료 온도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{TFU}) 및 상기 붕소 농도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{BOR})와 노심이력을 반영하여 핵 중 수밀도(ND)를 계산하는 단계를 포함하는 방사선원향 계산 방법.

청구항 8

제3항에 있어서,

상기 핵 중 수밀도에 기초하여 방사선원향을 계산하는 단계는,

상기 핵 중 수밀도, 붕괴 상수(decay constant) 및 붕괴 당 전체 회수 에너지에 기초하여 방사선원향을 계산하는 단계를 포함하는 방사선원향 계산 방법.

청구항 9

방사선원향 계산 장치에 의해 수행되는 방사선원향 계산 방법에 있어서,

3차원 중성자 수송해석 코드를 통해, 핵 중 수밀도 파일 및 핵단면적 파일을 생성하는 단계;

원자로 운전 시 상기 핵단면적 파일을 기반으로 3차원 노심해석 시뮬레이션을 수행하는 단계;

상기 원자로 운전 시점에 따른 주요 상태 인자 각각에 대해 히스토리 인덱스(History index)를 생성하는 단계;

상기 히스토리 인덱스와 상기 주요 상태 인자 중 적어도 하나를 파라미터로 한 라그랑제 보간법을 이용하여 핵 중 수밀도(ND)를 계산하는 단계; 및

상기 핵 중 수밀도에 기초하여 방사선원향을 계산하는 단계;를 포함하는 방사선원향 계산 방법.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 주요 상태 인자는,

감속재 온도, 핵 연료 온도 및 붕소 농도 중 적어도 하나를 포함하는 방사선원향 계산 방법.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 히스토리 인덱스(History index)를 생성하는 단계는,

상기 원자로 운전 기간에 대한 상기 주요 상태 인자의 누적 값을 이용하여 상기 히스토리 인덱스를 산출하는 단계를 포함하는 방사선원향 계산 방법.

청구항 12

제10항에 있어서,

상기 핵 중 수밀도(ND)를 계산하는 단계는,

상기 감속재 온도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{TMO}), 상기 핵 연료 온도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{TFU}) 및 상기 붕소 농도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{BOR})와 노심이력을 반영하여 핵 중 수밀도(ND)를 계산하는 단계를 포함하는 방사선원향 계산 방법.

청구항 13

원자로 운전 이력에 따른 주요 상태 인자를 저장하는 메모리;

상기 원자로 운전 시점에 따른 주요 상태 인자 각각에 대해 히스토리 인덱스(History index)를 생성하고, 상기 히스토리 인덱스와 상기 주요 상태 인자 중 적어도 하나를 파라미터로 한 라그랑제 보간법을 이용하여 핵 중 수

밀도(ND)를 계산하여, 상기 핵 중 수밀도에 기초하여 방사선원향을 계산하는 프로세서;를 포함하는 방사선원향 계산 장치.

청구항 14

제13항에 있어서,

상기 주요 상태 인자는,

감속제 온도, 핵 연료 온도 및 붕소 농도 중 적어도 하나를 포함하는 방사선원향 계산 장치.

청구항 15

제13항에 있어서,

상기 프로세서는,

상기 원자로 운전 기간에 대한 상기 주요 상태 인자의 누적 값을 이용하여 상기 히스토리 인덱스를 산출하는 방사선원향 계산 장치.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 방사선원향을 계산하기 위한 방법 및 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 핵종 조성 계산에 사용되는 ORIGEN코드의 경우 미리 특정 노심에 대해 생산해 놓은 1군 핵단면적(내장 라이브러리)과 NEWT나 KENO와 같은 다른 코드와의 연계로 출력 및 고정 중성자속을 입력으로 받아 연소 계산을 수행함으로써, 노심 추적 계산 이력(감속제 온도, 핵연료 온도, 붕소 농도, 집합체 경계면의 중성자 누설 조건) 반영에 한계점이 있다.

[0003] 또한, 방사선원향 계산 코드인 STREAM-SNF의 경우 노심 추적 계산 조건을 이용하기 위해 2단계 노심 추적 계산 후 연소 계산을 다시 수행해야 되며, 각 집합체 경계면에서의 중성자 누설 조건을 반영하지 못한다는 단점이 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0004] 본 발명의 일 실시예에 따른 해결하고자 하는 과제는, 노심 추적 계산 이력(감속제 온도, 연료 온도 및 붕소 농도)반영을 위해 각 운전시점에 따른 주요 상태 인자의 평균값을 이용한 라그랑제(Lagrange) 보간 방법으로 방사선원향을 산출하는 것을 포함한다.

[0005] 본 명세서에 명시되지 않은 또 다른 목적들은 하기의 상세한 설명 및 그 효과로부터 용이하게 추론할 수 있는 범위 내에서 추가적으로 고려될 수 있다.

과제의 해결 수단

[0006] 상기 과제를 해결하기 위해, 본 발명의 일 측면에 따른 방사선원향 계산 장치에 의해 수행되는 방사선원향 계산 방법은, 원자로 운전 시점에 따른 주요 상태 인자 각각에 대해 히스토리 인덱스(History index)를 생성하는 단계, 상기 히스토리 인덱스와 상기 주요 상태 인자 중 적어도 하나를 파라미터로 한 라그랑제 보간법을 이용하여 핵 중 수밀도(Number Density (ND))를 계산하는 단계 및 상기 핵 중 수밀도에 기초하여 방사선원향을 계산하는 단계를 포함한다.

[0007] 여기서, 상기 주요 상태 인자는, 감속제 온도, 핵 연료 온도 및 붕소 농도 중 적어도 하나를 포함할 수 있다.

[0008] 여기서, 상기 히스토리 인덱스(History index)를 생성하는 단계는, 상기 원자로 운전 기간에 따른 상기 주요 상태 인자의 누적 값을 이용하여 상기 히스토리 인덱스를 산출하는 단계를 포함할 수 있다.

- [0009] 여기서, 상기 핵 중 수밀도(ND)를 계산하는 단계는, 상기 감속재 온도의 히스토리 인덱스와 핵 연료 집합체 조건에 따라 선택된 감속재 온도에 기초하여, 감속재 온도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{TMO})를 계산하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0010] 여기서, 상기 핵 중 수밀도(ND)를 계산하는 단계는, 상기 핵 연료 온도의 히스토리 인덱스와 핵 연료 집합체 조건에 따라 선택된 핵 연료 온도에 기초하여, 핵 연료 온도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{TFU})를 계산하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0011] 여기서, 상기 핵 중 수밀도(ND)를 계산하는 단계는, 상기 붕소 농도의 히스토리 인덱스와 핵 연료 집합체 조건에 따라 선택된 붕소 농도에 기초하여, 붕소 농도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{BOR})를 계산하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0012] 여기서, 상기 핵 중 수밀도(ND)를 계산하는 단계는, 상기 감속재 온도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{TMO}), 상기 핵 연료 온도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{TFU}) 및 상기 붕소 농도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{BOR})와 노심이력을 반영하여 핵 중 수밀도(ND)를 계산하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0013] 여기서, 상기 핵 중 수밀도에 기초하여 방사선원향을 계산하는 단계는, 상기 핵 중 수밀도, 붕괴 상수(decay constant) 및 붕괴 당 전체 회수 에너지에 기초하여 방사선원향을 계산하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0014] 본 발명의 또 다른 측면에 따른 방사선원향 계산 장치에 의해 수행되는 방사선원향 계산 방법은, 3차원 중성자 수송해석 코드를 통해, 핵 중 수밀도 파일 및 핵단면적 파일을 생성하는 단계, 원자로 운전 시 상기 핵단면적 파일을 기반으로 3차원 노심해석 시뮬레이션을 수행하는 단계, 상기 원자로 운전 시점에 따른 주요 상태 인자 각각에 대해 히스토리 인덱스(History index)를 생성하는 단계, 상기 히스토리 인덱스와 상기 주요 상태 인자 중 적어도 하나를 파라미터로 한 라그랑제 보간법을 이용하여 핵 중 수밀도(ND)를 계산하는 단계 및 상기 핵 중 수밀도에 기초하여 방사선원향을 계산하는 단계를 포함한다.
- [0015] 여기서, 상기 주요 상태 인자는, 감속재 온도, 핵 연료 온도 및 붕소 농도 중 적어도 하나를 포함할 수 있다.
- [0016] 여기서, 상기 히스토리 인덱스(History index)를 생성하는 단계는, 상기 원자로 운전 기간에 대한 상기 주요 상태 인자의 누적 값을 이용하여 상기 히스토리 인덱스를 산출하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0017] 여기서, 상기 핵 중 수밀도(ND)를 계산하는 단계는, 상기 감속재 온도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{TMO}), 상기 핵 연료 온도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{TFU}) 및 상기 붕소 농도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{BOR})와 노심이력을 반영하여 핵 중 수밀도(ND)를 계산하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0018] 본 발명의 또 다른 측면에 따른 방사선원향 계산 장치는, 원자로 운전 이력에 따른 주요 상태 인자를 저장하는 메모리 및 상기 원자로 운전 시점에 따른 주요 상태 인자 각각에 대해 히스토리 인덱스(History index)를 생성하고, 상기 히스토리 인덱스와 상기 주요 상태 인자 중 적어도 하나를 파라미터로 한 라그랑제 보간법을 이용하여 핵 중 수밀도(ND)를 계산하여, 상기 핵 중 수밀도에 기초하여 방사선원향을 계산하는 프로세서를 포함한다.
- [0019] 여기서, 상기 주요 상태 인자는, 감속재 온도, 핵 연료 온도 및 붕소 농도 중 적어도 하나를 포함할 수 있다.
- [0020] 여기서, 상기 프로세서는, 상기 원자로 운전 기간에 대한 상기 주요 상태 인자의 누적 값을 이용하여 상기 히스토리 인덱스를 산출할 수 있다.

발명의 효과

- [0021] 이상에서 설명한 바와 같이 본 발명의 실시예들에 의하면, 감속재 온도, 연료 온도 및 붕소 농도를 이용한 라그랑제(Lagrange) 보간 방법으로 방사선원향을 산출함으로써 방사선원향 계산 소요 시간을 단축시킬 수 있다.
- [0022] 또한, 히스토리 인덱스(history index)를 이용하여 노심 추적 계산 이력을 반영하여 값을 제공함으로써 보다 정확도 높은 결과값을 제공할 수 있다.
- [0023] 여기에서 명시적으로 언급되지 않은 효과라 하더라도, 본 발명의 기술적 특징에 의해 기대되는 이하의 명세서에서 기재된 효과 및 그 잠정적인 효과는 본 발명의 명세서에 기재된 것과 같이 취급된다.

도면의 간단한 설명

- [0024] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 방사선원향 계산 장치를 나타낸 블록도이다.
- 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 방사선원향 계산 방법을 나타낸 흐름도이다.
- 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 방사선원향 평가 코드 체계 순서도를 나타낸 것이다.
- 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 핵 중 수밀도 계산 순서도를 나타낸 것이다.
- 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 라그랑제 보간 법에 사용되는 주요 상태 인자를 나타낸 것이다.
- 도 6 내지 도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 핵 중 수밀도 계산으로 생성되는 파일을 예로 들어 나타낸 것이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0025] 이하, 본 발명에 관련된 방사선원향 계산 방법 및 방사선원향 계산 장치에 대하여 도면을 참조하여 보다 상세하게 설명한다. 그러나, 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며, 설명하는 실시예에 한정되는 것이 아니다. 그리고, 본 발명을 명확하게 설명하기 위하여 설명과 관계없는 부분은 생략되며, 도면의 동일한 참조부호는 동일한 부재임을 나타낸다.
- [0026] 이하의 설명에서 사용되는 구성요소에 대한 접미사 "모듈" 및 "부"는 명세서 작성의 용이함만이 고려되어 부여되거나 혼용되는 것으로서, 그 자체로 서로 구별되는 의미 또는 역할을 갖는 것은 아니다.
- [0027] 본 발명의 일 실시예는 방사선원향 계산 방법 및 방사선원향 계산 장치에 관한 것이다.
- [0028] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 방사선원향 계산 장치를 나타낸 블록도이다.
- [0029] 도 1을 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 방사선원향 계산 장치(10)는 프로세서(11) 및 메모리(12)를 포함한다.
- [0030] 본 발명의 일 실시예에 따른 방사선원향 계산 장치(10)는 원자로에서의 방사성폐기물에 대한 방사선원향을 산출하기 위한 장치이다.
- [0031] 본 발명의 일 실시예에 따른 방사선원향 계산 장치(10)는 감속제 온도, 연료 온도 및 붕소 농도를 이용한 라그랑제(Lagrange) 보간 방법으로 방사선원향을 산출할 수 있다.
- [0032] 구체적으로, 3차원 중성자 수송해석 코드를 통해, 라그랑제 비선형 보간법에 이용되는 핵 중 수밀도 파일 및 3차원 노심해석 수행을 위해 핵단면적 파일을 생산하고, 생산된 핵단면적 파일을 기반으로 3차원 노심해석 시뮬레이션을 수행한다.
- [0033] 이후, 동위원소 제고 예측 단계에서, 원자로 운전 이력 반영을 위해 시간에 따른 주요 상태 인자 평균 값을 기초로 라그랑제 비선형 보간법을 수행하여, 핵 중 수밀도를 계산한다.
- [0034] 본 발명의 일 실시예에 따른 방사선원향 계산 장치에서 수행되는 방사선원향 계산 방법의 경우 기존 방법과 비교하여 계산 단계를 줄일 수 있으며, 계산 시간을 단축할 수 있다. 종래의 연소 계산의 경우 한 주기 핵연료 집합체 하나당 계산 시간이 15분 정도 소요되며, 본 발명의 일 실시예에서는 이 부분을 라그랑제 비선형 보간법으로 변경함에 따라 30초 내외로 계산 시간을 단축할 수 있다.
- [0035] 본 발명의 일 실시예에 따른 방사선원향 계산 장치(10)에 포함되는 메모리(12)는 프로세서(11)의 처리 및 제어를 위한 프로그램들(하나 이상의 인스트럭션들)을 저장할 수 있고, 원자로 운전 이력에 따른 주요 상태 인자가 저장되며, 플래시 메모리 타입(flash memory type), 하드디스크 타입(hard disk type), 멀티미디어 카드 마이크로 타입(multimedia card micro type), 카드 타입의 메모리(예를 들어, SD 또는 XD 메모리 등), 램(Random Access Memory, RAM), SRAM(Static Random Access Memory), 롬(Read-Only Memory, ROM), EEPROM(Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory), PROM(Programmable Read-Only Memory), 자기 메모리, 자기 디스크, 광디스크 중 적어도 하나의 타입의 컴퓨터 판독 가능한 저장매체를 포함할 수 있다.
- [0036] 메모리(12)에 저장된 프로그램들은 기능에 따라 복수 개의 모듈들로 구분될 수 있다.
- [0037] 프로세서(11)는 메모리(12)에 저장된 하나 이상의 인스트럭션을 실행하며, 구체적으로, 원자로 운전 시점에 따른 주요 상태 인자 각각에 대해 히스토리 인덱스(History index)를 생성하고, 히스토리 인덱스와 주요 상태 인자 중 적어도 하나를 파라미터로 한 라그랑제 보간법을 이용하여 핵 중 수밀도(ND)를 계산하여, 핵 중 수밀도에

기초하여 방사선원향을 계산한다.

- [0038] 여기서, 주요 상태 인자는, 감속재 온도, 핵 연료 온도 및 붕소 농도 중 적어도 하나를 포함할 수 있다.
- [0039] 여기서, 프로세서(11)는 기능에 따라 복수 개의 모듈들로 구분될 수도 있고, 하나의 프로세서에서 기능들을 수행할 수도 있다. 프로세서는 중앙처리장치(central processing unit(CPU)), 어플리케이션 프로세서(application processor(AP)), 마이크로 컨트롤러 유닛(micro controller unit(MCU)) 또는 커뮤니케이션 프로세서(communication processor(CP)) 중 하나 또는 그 이상을 포함할 수 있다.
- [0040] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 방사선원향 계산 방법을 나타낸 흐름도이다.
- [0041] 도 2를 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 방사선원향 계산 방법은, 방사선원향 계산 장치에 의해 수행되며, 단계 S100에서 원자로 운전 시점에 따른 주요 상태 인자 각각에 대해 히스토리 인덱스(History index)를 생성한다.
- [0042] 여기서, 주요 상태 인자는, 감속재 온도, 핵 연료 온도 및 붕소 농도 중 적어도 하나를 포함한다.
- [0043] 히스토리 인덱스(History index)를 생성하는 단계(S100)는 원자로 운전 기간에 따른 주요 상태 인자의 누적 값을 이용하여 히스토리 인덱스를 산출하는 단계를 포함한다.
- [0044] 이후, 단계 S200에서 히스토리 인덱스와 주요 상태 인자 중 적어도 하나를 파라미터로 한 라그랑제 보간법을 이용하여 핵 중 수밀도(ND)를 계산한다.
- [0045] 핵 중 수밀도(ND)를 계산하는 단계(S200)에서, 감속재 온도의 히스토리 인덱스와 핵 연료 집합체 조건에 따라 선택된 감속재 온도에 기초하여, 감속재 온도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{TMO})를 계산한다.
- [0046] 또한, 핵 연료 온도의 히스토리 인덱스와 핵 연료 집합체 조건에 따라 선택된 핵 연료 온도에 기초하여, 핵 연료 온도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{TFU})를 계산한다.
- [0047] 또한, 붕소 농도의 히스토리 인덱스와 핵 연료 집합체 조건에 따라 선택된 붕소 농도에 기초하여, 붕소 농도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{BOR})를 계산한다.
- [0048] 이후, 감속재 온도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{TMO}), 핵 연료 온도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{TFU}) 및 붕소 농도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{BOR})와 노심이력을 반영하여 핵 중 수밀도(ND)를 계산한다.
- [0049] 이후, 단계 S300에서 핵 중 수밀도에 기초하여 방사선원향을 계산한다.
- [0050] 핵 중 수밀도에 기초하여 방사선원향을 계산하는 단계(S300)에서, 핵 중 수밀도, 붕괴 상수(decay constant) 및 붕괴 당 전체 회수 에너지에 기초하여 방사선원향을 계산할 수 있다.
- [0051] 본 발명의 일 실시예에 따른 구체적인 핵 중 수밀도(ND)를 계산과정과 방사선원향 계산 과정은 하기 도 3 내지 도 5에서 상세히 설명한다.
- [0052] 또한, 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 방사선원향 계산 방법에 따르면, 원자로 운전 시점에 따른 주요 상태 인자 각각에 대해 히스토리 인덱스(History index)를 생성하는 단계 이전에, 3차원 중성자 수송해석 코드를 통해, 핵 중 수밀도 파일 및 핵단면적 파일을 생성하는 단계와 원자로 운전 시 핵단면적 파일을 기반으로 3차원 노심해석 시뮬레이션을 수행하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [0053] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 방사선원향 평가 코드 체계 순서도를 나타낸 것이다.
- [0054] 도 3을 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 방사선원향 계산 방법은, 붕소 농도(boron concentration(BOR)) 히스토리 인덱스(history index), 핵 연료 온도(fuel temperature(TFU)) 히스토리 인덱스(history index), 감속재 온도(moderator temperature(TMO)) 히스토리 인덱스(history index)를 생성하는 단계, 동위 원소(isotope) 재고 예측(inventory prediction) 단계를 포함한다.
- [0055] 여기서, 동위 원소(isotope) 재고 예측(inventory prediction) 단계는, 라그랑제 비선형 보간(Lagrange non-linear interpolation)을 수행하는 단계와 서로 다른 전력 레벨로 인한 붕괴 효과와 핵분열 생성물의 양을 수정하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0056] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 핵 중 수밀도 계산 순서도를 나타낸 것이다.

- [0057] 도 4의 경우, 결정론적 방법론에서 RAST-K 3차원 시물레이션을 위해 핵단면적 및 핵 중 수밀도를 계산하는데 이용되는 상태 함수를 나타낸다.
- [0058] 핵 중 수밀도의 경우, 기본 상태에서 운전 이력에서 중요한 주요 운전 인자에 해당하는 값을 변경하여 라그랑제 보간법에 이용할 수 있도록 핵 중 수밀도 파일을 생산 및 3차원 노심 해석 계산에 제공한다. 도 4의 (A)와 같은 5개의 동그라미 가지가 총 10쌍 생성되며, 각 가지를 생산할 때는 하기 도 5의 주요 운전 상태 인자를 사용한다.
- [0059] 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 라그랑제 보간 법에 사용되는 주요 상태 인자를 나타낸 것이다.
- [0060] 도 5에 나타난 바와 같이, 본 발명의 일 실시예에 따른 라그랑제 보간 법에 사용되는 주요 상태 인자는, 감속재 온도, 핵 연료 온도 및 붕소 농도를 포함할 수 있다. 도 5에 나타난 주요 상태 인자들을 바탕으로 결정론적 방법을 통해 핵 중 수밀도를 계산한다.
- [0061] 본 발명의 일 실시예에 따르면 원자로 운전이 끝나는 시점에서 라그랑제 보간법을 이용하여 핵 중 수 밀도를 계산하게 된다.
- [0062] 본 발명의 일 실시예에 따른 방사선원항 계산 장치는, 히스토리 인덱스(History index)를 생성하는 단계(S100)에서 원자로 운전 기간에 따른 주요 상태 인자의 누적 값을 이용하여 수학적 식 1에 따라 히스토리 인덱스를 산출한다.
- [0063] 구체적으로, 원자로 운전 이력을 반영하기 위해 각 운전 시점에 따른 주요 상태 인자의 평균 값 (history index)을 라그랑제 보간법에 사용한다.

수학적 식 1

$$h = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}$$

- [0064]
- [0065] 상기 수학적 식 1은 방사선원항 산출을 위해 라그랑제 방법론을 이용할 때 사용하게 되는 히스토리 인덱스(history index)이다. 히스토리 인덱스는 전체 운전 기간에 대한 변수의 평균으로 나타내어진다. 수학적 식 1에서 h는 히스토리 인덱스를 의미하고, t는 시간을 의미하고, x값은 변수를 의미한다. 원자로 계산에 큰 영향을 미치는 세 개의 변수들이 (감속재 온도, 연료 온도, 붕소 농도) 라그랑제 보간법에 이용된다.
- [0066] 주요 상태 인자의 평균 값은 시간에 따른 각 상태 인자의 합을 전체 시간에 대해 나눈 값을 의미하며, 상기 수학적 식 1에서 분자의 경우 시간에 따른 각 주요 상태 인자의 누적 값을 의미하며, 분모의 경우 전체 운전 시간을 의미한다.
- [0067] 이후, 방사선원항 계산 장치는, 단계 S200에서 히스토리 인덱스와 주요 상태 인자 중 적어도 하나를 파라미터로 한 라그랑제 보간법을 이용하여 핵 중 수밀도(ND)를 계산한다.
- [0068] 구체적으로, 수학적 식 2, 수학적 식 3, 수학적 식 4를 이용하여 감속재 온도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{TMO}), 핵 연료 온도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{TFU}), 붕소 농도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{BOR})를 각각 계산할 수 있다.

수학적 식 2

$$ND_{TMO} = \sum_{i=1}^5 \left(\prod_{j=1, j \neq i}^5 \frac{(h_{TMO} - TMO_j)}{(TMO_i - TMO_j)} \right) (ND_i)$$

- [0069]
- [0070] 핵 중 수밀도(ND)를 계산하는 단계(S200)에서, 감속재 온도의 히스토리 인덱스와 핵 연료 집합체 조건에 따라 선택된 감속재 온도에 기초하여, 감속재 온도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{TMO})를 계산한다.

수학식 3

$$ND_{TFU} = \sum_{i=1}^7 \left(\prod_{j=1, j \neq i, (j < 2 \text{ and } j > 5)}^7 \frac{(h_{TFU} - TFU_j)}{(TFU_i - TFU_j)} \right) (ND_i)$$

[0071]

[0072] 또한, 핵 연료 온도의 히스토리 인덱스와 핵 연료 집합체 조건에 따라 선택된 핵 연료 온도에 기초하여, 핵 연료 온도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{TFU})를 계산한다.

수학식 4

$$ND_{BOR} = \sum_{i=1}^{10} \left(\prod_{j=1, j \neq i, (j < 2 \text{ and } j > 7)}^{10} \frac{(h_{BOR} - BOR_j)}{(BOR_i - BOR_j)} \right) (ND_i)$$

[0073]

[0074] 또한, 붕소 농도의 히스토리 인덱스와 핵 연료 집합체 조건에 따라 선택된 붕소 농도에 기초하여, 붕소 농도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{BOR})를 계산한다. 수학식 2, 수학식 3, 수학식 4의 인덱스 i 와 j 는 도 5의 순번을 의미한다. ND 의 경우 도 5의 각 순번에 해당하는 조건을 사용하여 결정론적 방법론을 통해 계산된 수밀도를 나타낸다.

[0075] 이후, 수학식 5에 따라, 감속재 온도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{TMO}), 핵 연료 온도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{TFU}) 및 붕소 농도에 대한 핵 중 수밀도(ND_{BOR})와 노심이력을 반영하여 핵 중 수밀도($ND_{calculated}$)를 계산한다.

수학식 5

$$\begin{aligned} ND_{calculated} &= ND_1 + \Delta ND_{TMO} + \Delta ND_{TFU} + \Delta ND_{BOR} \\ &= ND_1 + ND_{TMO} - ND_1 + ND_{TFU} - ND_1 + ND_{BOR} - ND_1 \\ &= ND_{TMO} + ND_{TFU} + ND_{BOR} - 2 * ND_1 \end{aligned}$$

[0076]

[0077] 라그랑제 보간법은 상기 수학식 2 내지 수학식 5에 이용되며, h 는 수학식 1에서 계산된 시간에 따른 변수의 평균 값인 history index를 의미한다. $ND_{calculated}$ 은 history index를 이용한 라그랑제 보간법으로 계산된 결과인 핵중 수밀도를 나타낸다. 수학식 2, 수학식 3, 수학식 4 각각은 감속재 온도, 핵연료 온도, 붕소 농도에 대해 라그랑제 보간법을 이용한 핵중수밀도 계산 식이다. ND_1 은 도 5의 순번 1의 상태를 통해 계산된 핵 중 수밀도를 의미한다.

[0078] 각각에 해당하는 식의 경우, 상기 도 5에 나타난 표의 조건을 사용한 핵연료 수밀도(결정론적 방법으로부터 계산된 수밀도)를 바탕으로 라그랑제 방법을 취하게 된다.

[0079] 구체적으로, 감속재 온도의 경우 도 5의 순번 1, 2, 3, 4, 5의 상태를 통해 계산된 핵중수밀도를 바탕으로 라그랑제 보간법을 시행한다.

[0080] 핵연료 온도의 경우 도 5의 순번 1, 6, 7의 상태를 통해 계산된 핵중수밀도를 바탕으로 라그랑제 보간법을 시행한다.

[0081] 붕소 농도의 경우 도 5의 순번 1, 8, 9, 10의 상태를 통해 계산된 핵중수밀도를 바탕으로 라그랑제 보간법을 시행한다.

[0082] 이를 바탕으로 수학식 5와 같이 전체적인 노심이력을 반영하여 핵중수밀도를 계산한다.

[0083] 이후, 단계 S300에서 핵 중 수밀도에 기초하여 방사선원향을 계산한다.

[0084] 핵 중 수밀도에 기초하여 방사선원향을 계산하는 단계(S300)에서, 핵 중 수밀도, 붕괴 상수(decay constant) 및 붕괴 당 전체 회수 에너지에 기초하여 방사선원향을 계산할 수 있다.

[0085] 수학적 5를 통해 구해진 핵중수밀도를 바탕으로 수학적 6을 통해 최종적으로 핵연료 집합체의 방사선원향을 계산한다.

수학적 6

[0086]
$$H = \sum N_i \lambda_i Q_i$$

[0087] 수학적 6에서 H값은 방사선원향의 일종인 붕괴열을 나타내며, i는 핵종 번호, N은 핵종수밀도, λ 는 붕괴 상수, 그리고 Q는 붕괴 당 전체 회수 에너지를 나타낸다.

[0088] 도 6 내지 도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 핵 중 수밀도 계산으로 생성되는 파일을 예로 들어 나타낸 것이다.

[0089] 상기 도 4의 (A)와 같은 5개의 동그라미 가지의 계산을 수행 할 경우, 도 6과 같은 형식의 파일 D를 얻을 수 있다. 도 6에서 A는 핵 중 번호 곱하기 1000 더하기 원자량 값을 의미하며, B는 핵 중 수밀도를 의미한다. A의 경우 동위 원소 간의 정보를 구분하기 위해 핵 중 번호 및 원자량으로 이루어진 값을 사용한다.

[0090] 각 연소 계산 시간에서 총 1,640개의 핵 종이 계산된다. 상기 도 5에서의 각 주요 운전 상태 인자를 사용하면 도 7과 같은 파일을 얻을 수 있다.

[0091] 도 7을 참조하면, 상기 도 5의 각 계산 요건마다 각 핵 중 수밀도가 계산되며 상기 도 5의 순번 1의 주요 계산 인자를 사용하여 계산되는 핵 중 수밀도(ND1)와 상기 도 5의 순번 2의 주요 계산 인자를 사용하여 계산되는 핵 중 수밀도(ND2)를 확인할 수 있다.

[0092] 만일 원자로 운전을 시행한다고 했을 때, 도 8의 (b)에 나타난 파일 C를 이용하여 도 8의 (a)에 나타난 E의 원자로 운전 시간에서의 핵 중 수밀도를 계산하게 되면, 1001와 1002는 $4 \times 10^{24} / \text{cm}^3$ 라고 볼 수 있다.

[0093] 도 8의 (b)에 나타난 파일 C를 이용하여 도 8의 (a)에 나타난 C의 원자로 운전 시간에서의 핵 중 수밀도를 계산할 시, (A)와 (B)를 이용하여 계산을 수행하게 된다.

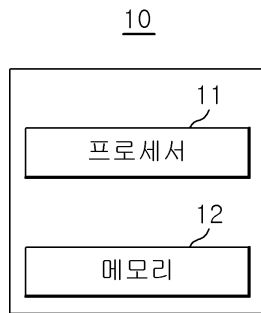
[0094] 본 발명의 일 실시예에 따른 방사선원향 계산 방법 및 방사선원향 계산 장치는 원자로 운전이력 및 중성자 누설 효과를 반영한 핵연료 집합체 단위 및 핵연료 봉 단위 핵연료 조성 계산 모듈에 적용될 수 있는 것으로, 임시저장과 장치설계 및 작업 종사자의 방사선적 안전성 분석 (방사선 차폐)을 위한 방사선원향 자료를 제공할 수 있다.

[0095] 또한, 상용로 해석을 위한 핵종 조성 및 방사선원향 계산에서의 1/30배의 시간 단축이 가능하며, 32개 주기 상용로 계산의 경우, 기존 방법의 경우 968일 소요가 예상되나 본 발명에 따르면 32일 소요가 예상된다.

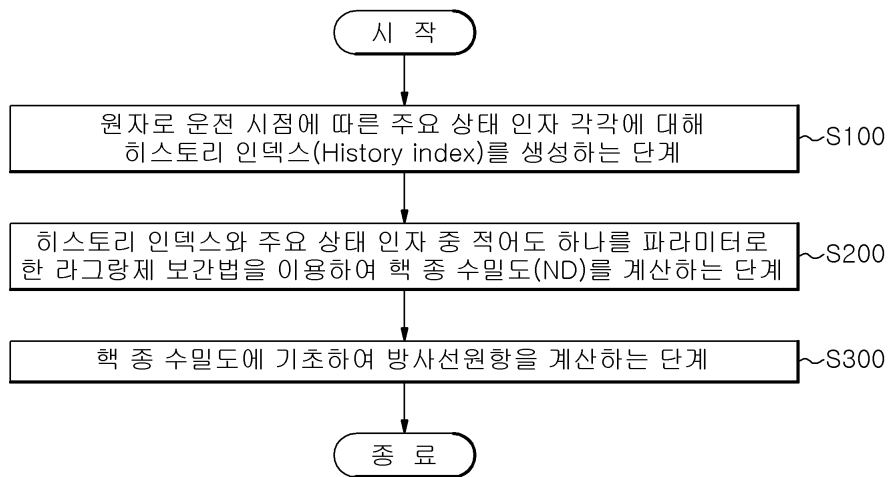
[0096] 이상의 설명은 본 발명의 일 실시예에 불과할 뿐, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자는 본 발명의 본질적 특성에서 벗어나지 않는 범위에서 변형된 형태로 구현할 수 있을 것이다. 따라서 본 발명의 범위는 전술한 실시예에 한정되지 않고 특허 청구 범위에 기재된 내용과 동등한 범위 내에 있는 다양한 실시 형태가 포함되도록 해석되어야 할 것이다.

도면

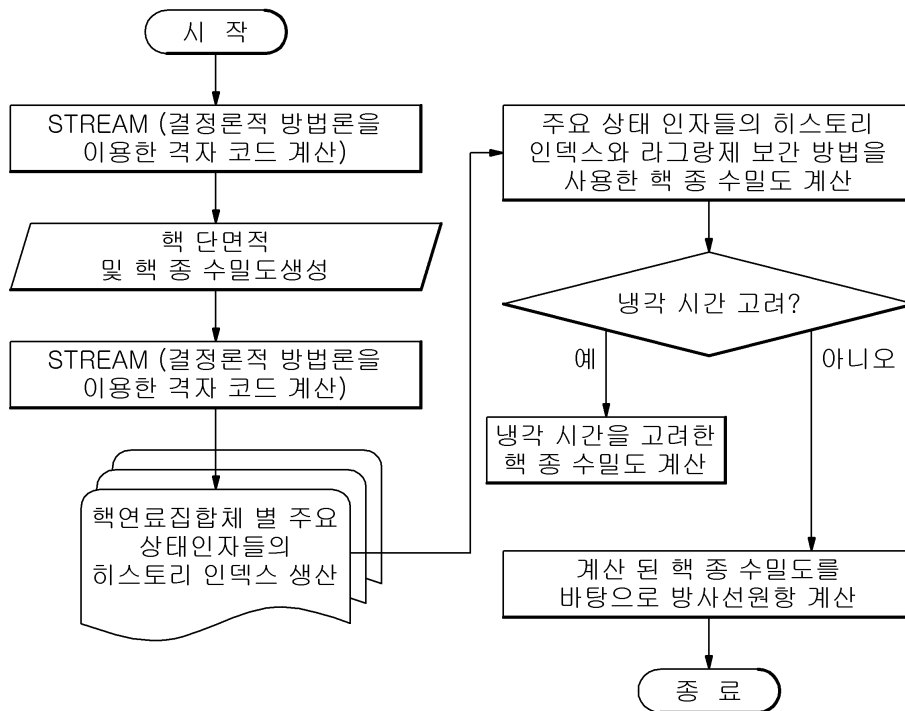
도면1



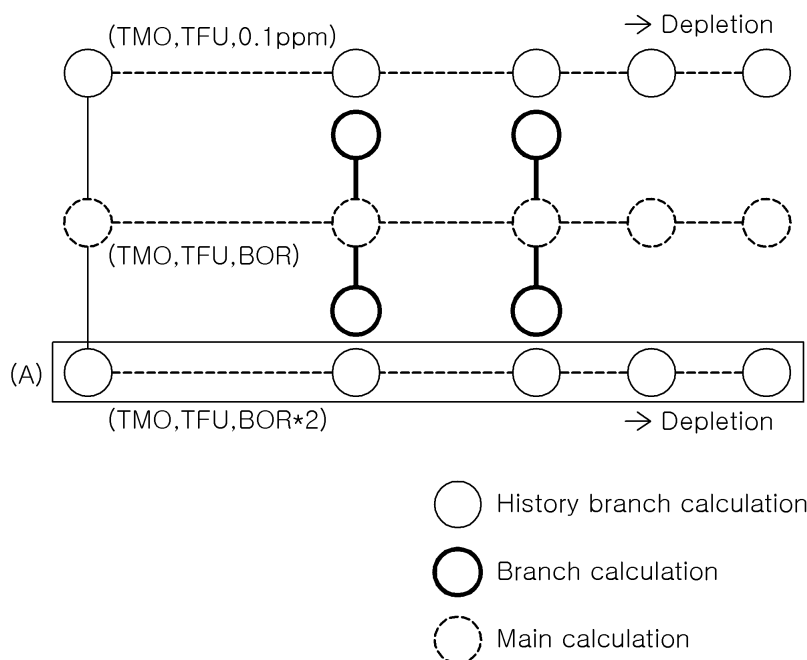
도면2



도면3



도면4



도면5

순번	감속재 온도	핵연료 온도	붕소 농도
1	TMO_{ref}	TFU_{ref}	BOR_{ref}
2	$TMO_{ref} - 40K$	TFU_{ref}	BOR_{ref}
3	$TMO_{ref} - 20K$	TFU_{ref}	BOR_{ref}
4	$TMO_{ref} + 20K$	TFU_{ref}	BOR_{ref}
5	$TMO_{ref} + 40K$	TFU_{ref}	BOR_{ref}
6	TMO_{ref}	$TMO_{ref} - 20K^b$	BOR_{ref}
7	TMO_{ref}	1500K	BOR_{ref}
8	TMO_{ref}	TFU_{ref}	0.1ppm
9	TMO_{ref}	TFU_{ref}	$2 \cdot BOR_{ref}$
10	TMO_{ref}	TFU_{ref}	2400ppm

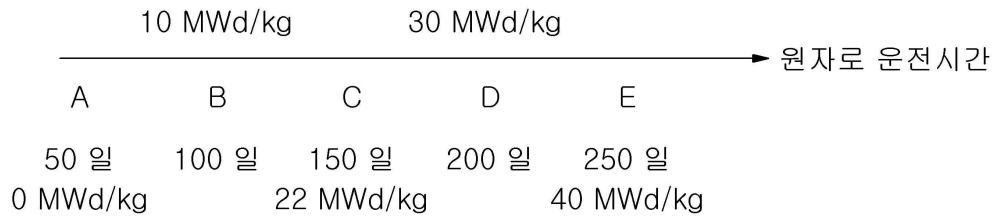
도면6

A	0 MWd/kg		B
	1001	$1 \cdot 10^{24}$	
	1002	$1 \cdot 10^{24}$	
10 MWd/kg			
	1001	$1 \cdot 10^{24}$	
	1002	$1 \cdot 10^{24}$	
20 MWd/kg			
	1001	$1 \cdot 10^{24}$	
	1002	$1 \cdot 10^{24}$	
30 MWd/kg			
	1001	$1 \cdot 10^{24}$	
	1002	$1 \cdot 10^{24}$	
40 MWd/kg			
	1001	$1 \cdot 10^{24}$	
	1002	$1 \cdot 10^{24}$	
파일 D			

도면7

ND1	0 MWd/kg	
	1001	1×10^{24}
	1002	1×10^{24}
	10 MWd/kg	
	1001	1×10^{24}
	1002	1×10^{24}
	20 MWd/kg	
	1001	1×10^{24}
	1002	1×10^{24}
	30 MWd/kg	
	1001	1×10^{24}
	1002	1×10^{24}
ND2	40 MWd/kg	
	1001	1×10^{24}
	1002	1×10^{24}
	0 MWd/kg	
	1001	2×10^{24}
	1002	2×10^{24}
	10 MWd/kg	
	1001	2×10^{24}
	1002	2×10^{24}
	20 MWd/kg	
	1001	2×10^{24}
	1002	2×10^{24}
	30 MWd/kg	
	1001	2×10^{24}
	1002	2×10^{24}
	40 MWd/kg	
	1001	2×10^{24}
	1002	2×10^{24}

도면8



(a)

0 MWd/kg	
1001	1×10^{24}
1002	1×10^{24}
10 MWd/kg	
1001	1×10^{24}
1002	1×10^{24}
20 MWd/kg	
1001	2×10^{24}
1002	2×10^{24}
30 MWd/kg	
1001	3×10^{24}
1002	3×10^{24}
40 MWd/kg	
1001	4×10^{24}
1002	4×10^{24}

(A)

(B)

파일 C

(b)