(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0106870
(43) 공개일자 2024년07월08일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G21C 17/10 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G21C 17/10 (2013.01)
Y02E 30/30 (2020.08)
(21) 출원번호 10-2022-0189967
(22) 출원일자 2022년12월29일
심사청구일자 2022년12월29일

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
이덕중
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 울산과학기술원
이웅희
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 울산과학기술원
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인지원

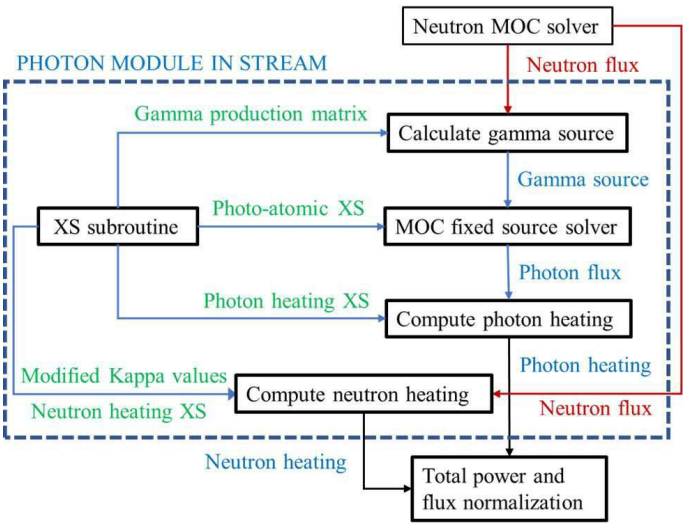
전체 청구항 수 : 총 7 항

(54) 발명의 명칭 **광자 에너지를 고려한 핵분열 반응의 방출 에너지 및 노심 출력 산출방법**

(57) 요 약

본 발명은 핵분열 반응에서의 방출되는 에너지를 계산하기 위한 것으로, 광자 에너지에 대한 명시적 분포 계산을 사용한 광자 수송 모듈을 통하여 핵분열 노심의 전력 분포 정확도를 향상시킬 수 있는 효과가 있다.

대 표 도 - 도1



(72) 발명자

마이 응우옌 트롱 난

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 울산과학기술원

김경원

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 울산과학기술원

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711154972
과제번호	2019M2D2A1A03058371
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	원자력기초연구지원사업
연구과제명	원전실설계 적용 가능한 세계 선도형 전노심 수송해석 수치원자로 개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	울산과학기술원
연구기간	2022.01.01 ~ 2022.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

핵분열 반응의 출력에너지; 중성자 열 에너지; 및 광자 열 에너지를 이용하는 것을 특징으로 하는,

원자로 노심의 전체 출력을 산출하는 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

핵분열 반응의 출력에너지 는 핵분열 당 방출되는 평균에너지로부터 계산되는 것이며,

상기 핵분열 당 방출되는 평균에너지는 핵분열 생성물(핵분열 파편)의 운동에너지; 및 지발 베타선 에너지를 이용하여 계산되는 것인,

원자로 노심의 전체 출력을 산출하는 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 중성자 열 에너지는 중성자 열 단면적; 및 중성자 플럭스(neutron flux)를 이용하여 계산되는 것인,

원자로 노심의 전체 출력을 산출하는 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 광자 열 에너지는 광자자 열 단면적; 및 광자 플럭스(photon flux)를 이용하여 계산되는 것인,

원자로 노심의 전체 출력을 산출하는 방법.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 광자 플럭스(photon flux)는 감마 소스(gamma source)를 이용하여 계산되는 것인,

원자로 노심의 전체 출력을 산출하는 방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 원자로 노심의 전체 출력(P_m)은 하기 식 A에 의하여 산출되는 것인,

[식 A]

$$P_m = \sum_n \kappa \Sigma_{f,m}^n \phi_m^n V_m + \sum_n k \Sigma_{heat}^n \phi_m^n V_m + \sum_p \Sigma_{heat}^p \phi_m^p V_m$$

상기 식 A에서, m은 영역이며, P_m은 영역별 출력(원자로 노심의 전체 출력)이며, κ 는 핵분열 당 방출되는 평균 에너지이며, $\Sigma_{f,m}^n$는 영역별 중성자 핵분열 단면적이며, ϕ_m^n는 영역별 중성자 플럭스이며, V_m는 영역별 부피이며, k는 증배계수이며, Σ_{heat}^n는 중성자 열 단면적이며, Σ_{heat}^p는 광자 열 단면적이며, ϕ_m^p는 영역별 광자 플럭스 인 것인,

원자로 노심의 전체 출력을 산출하는 방법.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 식 A에서, 상기 κ는 하기 식 B에 의하여 산출되는 것인,

[식 B]

$$\kappa = ER^*(0) - 0.075E + k\frac{R_c}{R_f}\overline{Q_c^*}$$

상기 식 B에서, E는 입사 중성자의 에너지이며, $ER^*(0)$은 $ER(0)$ 값으로부터 광자 에너지와 중성자 에너지를 제외한 값이며, $k\frac{R_c}{R_f}\overline{Q_c^*}$는 핵분열 당 중성자 포획 반응으로부터 방출되는 평균 에너지이며, k는 증배계수이며, R_c는 포획 반응률이며, R_f는 핵분열 반응률이며, $\overline{Q_c^*}$는 $\overline{Q_c}$ 값으로부터 광자 에너지와 하전 입자 에너지를 제외한 값인 것이며,

상기 $ER(0)$는 미리 계산된 핵분열 당 방출되는 평균 에너지에서 중성미자(neutrino) 에너지를 제외한 값이며,

상기 $\overline{Q_c}$ 값은 하기 식 (2)를 사용하여 계산되는 것이며,

[식 (2)]

$$\overline{Q_c} = \frac{\sum_m \sum_i \sum_n q_{c,i} N_{m,i} \sigma_{c,m,i}^n \phi_m^n V_m}{\sum_m \sum_i \sum_n N_{m,i} \sigma_{c,m,i}^n \phi_m^n V_m}$$

상기 식 (2)에서, m은 영역이며, $q_{c,i}$는 핵종i의 포획 감마와 포획된 생성물의 에너지이며, $N_{m,i}$는 m영역에 있는 핵종i의 수밀도(number density), $\sigma_{c,m,i}^n$은 포획 단면, ϕ_m^n은 m영역에서의 중성자 플럭스(neutron flux), V_m은 m영역에서의 부피인 것인,

원자로 노심의 전체 출력을 산출하는 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 핵분열 반응에서의 방출되는 에너지를 계산하기 위한 것으로, 보다 상세하게는 핵분열 반응의 연소계산 중에 카파 값을 지속적으로 업데이트하기 위해 핵분열당 즉각적인 에너지 방출 모델을 울산과학기술원(UNIST)에서 개발한 STREAM 코드에 구현한 것이다.

배 경 기 술

[0003] 핵반응에서 방출되는 에너지에 대한 근사치는 원자로 노심 분석의 복잡성과 계산 부담(computational burden)을 줄이기 위해 오랫동안 사용되어 왔다. 핵분열성 핵종에서 방출되는 에너지, 즉 카파 값(Kappa values)은 핵분열 감마 에너지가 국부적으로 축적되거나 문제에 노출된다고 가정하는 전력 계산에 사용된다. 핵분열 생성물과 악티늄족(actinides)의 중성자 포획 반응, 특히 강한 흡수체(보론 또는 가돌리늄)의 중성자 포획 반응에서 방출되는 추가 에너지의 기여는 종종 무시되거나 원자로 작동 데이터에서 추론되고 재료 구성과 무관한 단순 평균 상수로 취급된다. 그러나 이러한 근사치는 오류를 유발하고 계산 정확도를 저하시킬 수 있다는 것이 관찰되었다. 핵분열 및 중성자 포획 반응에서 방출되는 부적절한 에너지로 인한 출력 계산의 부정확성은 핵분열당 에너지 방출 모델을 도입함으로써 CASMO5[J. Rhodes, K Smith, D Lee, CASMO-5 development and applications, in Proceedings of the PHYSOR-2006 conference, ANS Topical Meeting on Reactor Physics, Vancouver, BC, Canada, 2006]에서 해결되었다. 특정 핵종의 중성자 포획(즉, 수소, 붕소, 가돌리늄, 악티늄족, 핵분열 생성물의 포획에서) 반응당 방출되는 에너지에 대한 고정된 값이 모든 핵종의 평균 상수 대신 사용된다. 또한, 핵분열 생성물의 운동 에너지, 광자 에너지, 베타 에너지 등은 이러한 모델에서 평가된 핵 데이터 파일[M.B. Chadwick, M. Herman, P. Oblož insk ý, et. al., ENDF/B-VII. 1 nuclear data for science and technology: cross sections, covariances, fission product yields and decay data, Nuclear Data Sheets, 112 (12) (2011) 2887-2996.]에서 직접 추출된다.

[0004] 강력한 흡수체(Absorbers)/에미터(emitters) 또는 누출을 특징으로 하는 노심 기하학에서 중성자/광자 플럭스 분포의 큰 기울기는 이러한 가정의 정확도를 저하시킬 수 있다. 이는 중성자/광자가 이러한 문제에서 균일하게 분포할 가능성이 낮기 때문이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명의 목적은 원자로 노심해석 전용 STREAM 전산코드에 광자 에너지의 분포 등 광자의 물리적 거동을 정확하게 계산하여 원자로가 연소(핵분열)하는 동안 카파 값(Kappa value)의 지속적인 업데이트를 통해 원자로 분석에서 보다 현실적인 원자로 분석 결과를 제공하고자 하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0008] 상기 목적을 달성하기 위하여, 본 발명의 일 형태에 따른 원자로 노심의 전체 출력을 산출하는 방법은 핵분열 반응의 출력에너지; 중성자 열 에너지; 및 광자 열 에너지를 이용하는 것일 수 있다.

[0009] 상기 핵분열 반응의 출력에너지는 핵분열 당 방출되는 평균에너지로부터 계산되는 것이며, 상기 핵분열 당 방출되는 평균에너지는 핵분열 생성물(핵분열 파편)의 운동에너지; 및 지발 베타선 에너지을 이용하여 계산되는 것일 수 있다.

[0010] 상기 중성자 열 에너지는 중성자 열 단면적; 및 중성자 플럭스(neutron flux)를 이용하여 계산되는 것일 수 있다.

[0011] 상기 광자 열 에너지는 광자자 열 단면적; 및 광자 플럭스(photon flux)를 이용하여 계산되는 것일 수 있다.

[0012] 상기 광자 플럭스(photon flux)는 감마 소스(gamma source)를 이용하여 계산되는 것일 수 있다.

[0013] 상기 원자로 노심의 전체 출력은 하기 식 A에 의하여 산출되는 것일 수 있다.

[0014] [식 A]

[0015] $$P_m = \sum_n \kappa \Sigma^n_{f,m} \phi^n_m V_m + \sum_n k \Sigma^n_{heat} \phi^n_m V_m + \sum_p \Sigma^p_{heat} \phi^p_m V_m$$

[0016] 상기 식 A에서, m은 영역이며, P_m은 영역별 출력(원자로 노심의 전체 출력)이며, κ는 핵분열 당 방출되는 평균에너지이며, $\Sigma_{f,m}^{n}$는 영역별 중성자 핵분열 단면적이며, ϕ_m^n는 영역별 중성자 플럭스이며, V_m는 영역별 부피이며, k는 증배계수이며, Σ_{heat}^{n}는 중성자 열 단면적이며, Σ_{heat}^{p}는 광자 열 단면적이며, ϕ_m^p는 영역별 광자 플럭스일 수 있다.

[0017] 상기 식 A에서, 상기 κ는 하기 식 B에 의하여 산출되는 것일 수 있다.

[0018] [식 B]

[0019] $$\kappa = ER^*(0) - 0.075E + k\frac{R_c}{R_f}\overline{Q_c^*}$$

[0021] 상기 식 B에서, E는 입사 중성자의 에너지이며, $ER^*(0)$은 $ER(0)$ 값으로부터 광자 에너지와 중성자 에너지를 제외한 값이며, $k\frac{R_c}{R_f}\overline{Q_c^*}$는 핵분열 당 중성자 포획 반응으로부터 방출되는 평균에너지이며, k는 증배계수이며, R_c는 포획 반응률이며, R_f는 핵분열 반응률이며, $\overline{Q_c^*}$는 $\overline{Q_c}$ 값으로부터 광자 에너지와 하전 입자 에너지를 제외한 값인 것이며,

[0022] 상기 $ER(0)$는 미리 계산된 핵분열 당 방출되는 평균 에너지에서 중성미자(neutrino) 에너지를 제외한 값이며,

[0023] 상기 $\overline{Q_c}$ 값은 하기 식 (2)를 사용하여 계산되는 것이며,

[0024] [식 (2)]

[0025] $$\overline{Q_c} = \frac{\sum_m \sum_i \sum_n q_{c,i} N_{m,i} \sigma_{c,m,i}^{n} \phi_m^n V_m}{\sum_m \sum_i \sum_n N_{m,i} \sigma_{c,m,i}^{n} \phi_m^n V_m}$$

[0026] 상기 식 (2)에서, m은 영역이며, $q_{c,i}$는 핵종 i의 포획 감마와 포획된 생성물의 에너지이며, $N_{m,i}$는 m영역에 있는 핵종 i의 수밀도(number density), $\sigma_{c,m,i}^{n}$은 포획 단면, ϕ_m^n은 m영역에서의 중성자 플럭스(neutron flux), V_m은 m영역에서의 부피인 것일 수 있다.

발명의 효과

[0028] 본 발명은 광자 에너지에 대한 명시적 분포 계산을 사용한 광자 수송 모듈을 통하여 핵분열 노심의 전력 분포 정확도를 향상시킬 수 있는 효과가 있다.

[0029] 또한, 본 발명은 핵분열 반응시 중성자 포획 반응에서 방출되는 에너지와 연소 동안 카파 값(Kappa value)의 변화를 고려할 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0031] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 핵분열 반응에서의 총 에너지를 산출하는 과정을 도시한 것이다.

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 VERA 격자 문제의 레이아웃을 도시한 것이다.

도 3a는 본 발명의 일 실시예에 따른 BOC 단계에서 VERA 2B 문제에 대한 몬테카를로 시뮬레이션(MCS) 대비 OTFK method와 OTFKVQ method의 비교결과를 도시한 것이다.

도 3b는 본 발명의 일 실시예에 따른 BOC 단계에서 VERA 2P 문제에 대한 몬테카를로 시뮬레이션(MCS) 대비 OTFK method와 OTFKVQ method의 비교결과를 도시한 것이다.

도 4a는 본 발명의 일 실시예에 따른 MOC 단계에서 VERA 2B 문제에 대한 몬테카를로 시뮬레이션(MCS) 대비 OTFK method와 OTFKVQ method의 비교결과를 도시한 것이다.

도 4b는 본 발명의 일 실시예에 따른 MOC 단계에서 VERA 2P 문제에 대한 몬테카를로 시뮬레이션(MCS) 대비 OTFK method와 OTFKVQ method의 비교결과를 도시한 것이다.

도 5a는 본 발명의 일 실시예에 따른 EOC 단계에서 VERA 2B 문제에 대한 몬테카를로 시뮬레이션(MCS) 대비 OTFK method와 OTFKVQ method의 비교결과를 도시한 것이다.

도 5b는 본 발명의 일 실시예에 따른 EOC 단계에서 VERA 2P 문제에 대한 몬테카를로 시뮬레이션(MCS) 대비 OTFK method와 OTFKVQ method의 비교결과를 도시한 것이다.

도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 OTFKVQ method에 따른 획득된 정규화된 핀-별 출력(pin-wise power)을 MCNP와 비교한 결과를 도시한 것이다.

도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 OTFKVQ method에 따른 획득된 정규화된 핀-별 출력(pin-wise power)을 MPACT와 비교한 결과를 도시한 것이다.

도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 STREAM에서의 3가지 모델(DEFAULT, OTFK, WP)에서의 핵분열 반응 에너지 방출 및 증배계수 차이를 도시한 것이다.

도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 OTFK method 및 DEFAULT와 대비한 OTFKVQ method로부터의 핵종 총 수밀도에서의 상대적 차이를 도시한 것이다.

도 10은 본 발명의 일 실시예에 따른 VERA5, NuScale 및 영광 3호기(YGN3) 노심에 대하여 OTFKVQ method와 OTFK method에 따른 핀 출력(pin power) 차이를 도시한 것이다.

도 11은 본 발명의 일 실시예에 따른 세가지의 VERA5, NuScale 및 영광 3호기(YGN3) 노심에 대한 연료 핀 위치를 도시한 것이다.

도 12는 본 발명의 일 실시예에 따른 세가지의 VERA5, NuScale 및 영광 3호기(YGN3) 노심에 대하여 OTFKVQ method와 OTFK method로부터 획득된 피크 출력 인자(Fq)와 연료 중심선 온도(Tf_max)의 차이를 도시한 것이다.

도 13은 본 발명의 일 실시예에 따른 세가지의 VERA5, NuSclae 및 영광 3호기(YGN3) 노심에 대하여 광자 에너지의 방출 비율 및 냉각재에 축적된 광자 에너지의 비율을 도시한 것이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0032] 이하, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 본 발명의 실시예에 대하여 상세히 설명한다. 그러나 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며 여기에서 설명하는 실시예에 한정되지 않는다.

[0034] 본 발명의 일 실시예에 따른 원자로 노심의 전체 출력을 산출하는 방법은 핵분열 반응의 출력에너지; 중성자 열에너지; 및 광자 열 에너지를 이용하는 것으로, 핵분열 반응의 출력에너지; 중성자 열 에너지; 및 광자 열 에너지를 계산하는 단계를 포함하는 것일 수 있으며, 보다 구체적으로 핵분열 반응의 출력에너지를 계산하는 단계; 중성자 열 에너지를 계산하는 단계; 광자 열 에너지를 계산하는 단계; 및 상기 핵분열 당 방출에너지, 상기 중성자 열 에너지 및 상기 광자 열 에너지의 총합을 산출하는 단계를 포함하는 것일 수 있다.

[0036] 상기 핵분열 반응의 출력에너지는 핵분열 당 방출되는 평균에너지(κ , kappa) 값으로부터 계산되는 것일 수 있으며, 하기 식 A-1에 의하여 계산되는 것일 수 있다.

[0037] [식 A-1]

[0038] $$\text{핵분열 반응의 출력에너지} = \sum_{n} \kappa \Sigma_{f,m}^{n} \phi_{m}^{n} V_{m}$$

[0039] 상기 식 A-1에서, m은 영역(region)(영역의 지수(region's index))이며, K는 핵분열 당 방출되는 평균 에너지이며, $\Sigma_{f,m}^{n}$는 영역별 중성자 핵분열 단면적이며, ϕ_{m}^{n}는 영역별 중성자 플럭스이며, V_m는 영역별 부피이다.

[0040] 상기 핵분열 당 방출되는 평균에너지는 핵분열 생성물(핵분열 파편)의 운동에너지; 및 지발 베타선 에너지를 이용하여 계산되는 것일 수 있다.

[0042] 상기 중성자 열 에너지는 중성자 열 단면적; 및 중성자 플럭스(neutron flux)를 이용하여 계산되는 것일 수 있으며, 하기 식 A-2에 의하여 계산되는 것일 수 있다.

[0043] [식 A-2]

[0044] $$\text{중성자 열 에너지} = \sum_{n} k \Sigma_{heat}^{n} \phi_{m}^{n} V_{m}$$

[0045] 상기 식 A-2에서, m은 영역이며, k는 증배계수이며, Σ_{heat}^{n}는 중성자 열 단면적이며, ϕ_{m}^{n}는 영역별 중성자 플럭스이며, V_m는 영역별 부피이다.

[0047] 상기 광자 열 에너지는 광자 열 단면적; 및 광자 플럭스(photon flux)를 이용하여 계산되는 것일 수 있다.

[0048] 상기 광자 플럭스(photon flux)는 감마 소스(gamma source)를 이용하여 계산되는 것일 수 있다.

[0049] 상기 광자 열 에너지는 하기 식 A-3에 의하여 계산되는 것일 수 있다.

[0050] [식 A-3]

[0051] $$\text{광자 열 에너지} = \sum_{p} \Sigma_{heat}^{p} \phi_{m}^{p} V_{m}$$

[0052] 상기 식 A-3에서, m은 영역이며, Σ_{heat}^{p}는 광자 열 단면적이며, ϕ_{m}^{p}는 영역별 광자 플럭스이며, V_m는 영역별 부피이다.

[0054] 본 발명의 일 실시예에 따른 상기 원자로 노심의 전체 출력(P_m)을 산출하는 방법은 하기 식 A에 의하여 산출되는 것일 수 있다.

[0055] [식 A]

[0056] $$P_m = \sum_{n} \kappa \Sigma_{f,m}^{n} \phi_{m}^{n} V_{m} + \sum_{n} k \Sigma_{heat}^{n} \phi_{m}^{n} V_{m} + \sum_{p} \Sigma_{heat}^{p} \phi_{m}^{p} V_{m}$$

[0057] 상기 식 A에서, m은 영역이며, P_m은 영역별 출력(원자로 노심의 전체 출력)이며, K는 핵분열 당 방출되는 평균 에너지이며, $\Sigma_{f,m}^{n}$는 영역별 중성자 핵분열 단면적이며, ϕ_{m}^{n}는 영역별 중성자 플럭스이며, V_m는 영역별 부피이며, k는 증배계수이며, Σ_{heat}^{n}는 중성자 열 단면적이며, Σ_{heat}^{p}는 광자 열 단면적이며, ϕ_{m}^{p}는 영역별 광자 플

럭스인 것일 수 있다.

[0059] 상기 식 A에서, 상기 K는 하기 식 B에 의하여 산출되는 것일 수 있다.

[0060] [식 B]

[0061] $$\kappa = ER^*(0) - 0.075E + k\frac{R_c}{R_f}\overline{Q_c^*}$$

[0062] 상기 식 B에서, E는 입사 중성자의 에너지이며, $ER^*(0)$은 $ER(0)$ 값으로부터 광자 에너지와 중성자 에너지를 제외한 값이며, $k\frac{R_c}{R_f}\overline{Q_c^*}$는 핵분열 당 중성자 포획 반응으로부터 방출되는 평균에너지이며, k는 증배계수이며, R_c는 포획 반응률이며, R_f는 핵분열 반응률이며, $\overline{Q_c^*}$는 $\overline{Q_c}$ 값으로부터 광자 에너지와 하전 입자 에너지를 제외한 값인 것일 수 있다.

[0063] 상기 $ER(0)$은 미리 계산된 핵분열 당 방출되는 평균 에너지에서 중성미자(neutrino) 에너지를 제외한 값일 수 있으며, 상기 미리 계산된 핵분열 당 방출되는 평균 에너지는 핵분열 반응 전산모사를 통하여 기평가된 핵 데이터 파일(evaluated nuclear data file)로부터 제공되는 것일 수 있다. 상기 핵 데이터 파일을 NJOY코드를 사용한 ENDF/B-VII, ENDF/B-VI.8 또는 JENDL-3.3의 평가핵 자료집일 수 있다.

[0065] 상기 $\overline{Q_c}$ 값은 식 (2)를 사용하여 계산되는 것일 수 있다.

[0066] [식 (2)]

[0067] $$\overline{Q}_c = \frac{\sum_m \sum_i \sum_n q_{c,i} N_{m,i} \sigma^n_{c,m,i} \phi^n_m V_m}{\sum_m \sum_i \sum_n N_{m,i} \sigma^n_{c,m,i} \phi^n_m V_m}$$

[0069] 상기 식 (2)에서, m은 영역이며, $q_{c,i}$는 핵종 i의 포획 감마와 포획된 생성물의 에너지이다. $N_{m,i}$는 m영역에 있는 핵종 i의 수밀도(number density), $\sigma^n_{c,m,i}$은 포획 단면, ϕ^n_m은 m영역에서의 중성자 플럭스(neutron flux), V_m은 m영역에서의 부피이다.

[0071] 증배계수(Multiplication Factor)(k)는 원자로에서 어떤 한 세대의 총 중성자 수와 바로 그 다음세대의 총중성자 수의 비 또는 한번의 핵분열로 생성된 중성자들 중 다시 핵분열을 일으키는 평균 중성자의 수로 정의되는 것이며, 일례로서, 중성자가 핵연료와 반응하여 한번 핵분열을 하게 되면 보통 2~3개의 새로운 중성자가 생성되는데 이중 한개가 다시 핵분열을 일으킨다면 이때의 증배계수는 '1' 로 정의되는 것이다. 이에 따라, 증배계수(k)가 $k < 1$ 인 경우(미임계)에는 시간이 지남에 따라 중성자의 수가 줄어들어 핵분열이 줄고 따라서 출력이 감소하는 것이며, $k = 1$ 인 경우(임계)에는 시간이 지나도 중성자의 수는 변화가 없으며 출력이 일정하게 유지되는 것이며, $k > 1$ 인 경우(초임계)에는 시간이 지남에 따라 중성자의 수가 증가하고 출력도 증가하는 것이다.

[0073] **<u>핵분열 방출 에너지 해석 모델</u>**

[0074] ***1. STREAM 코드(DEFAULT)***

[0075] 본 명세서 있어서, STREAM(Steady state and Transient Reactor Analysis core with Methome of characteristics)은 울산과학기술원(UNIST) 전산원자로물리실험실(CORE; Computational Reactor Physics and Experiment Laboratory)이 개발한 2차원(2D) 및 3차원(3D) 원자로 코어 분석에 특화된 결정론적 중성자 수송 코

드다. STREAM의 기본 에너지 방출 모델은 핵분열성 핵종에 대해 일정한 카파 값을 사용할 뿐이며 연소 계산(depletion calculation) 동안 변경되지 않는다.

[0077] *2. OTFK(On-The-Flye Kappa) Method(광자 수송 없이 핵분열 모델당 즉각적인 에너지 방출 모델)*

[0078] STREAM에서 OTFK 모델(OTFK method)의 개념은 동위원소 i에 대한 STREAM의 카파 값(kappa value)은 하기 식 (1)을 사용하여 계산된다.

[0079] STREAM에서 OTFK 모델(OTFK method)의 개념은 동위원소 i에 대한 STREAM의 카파 값(kappa value)은 하기 식 (1)을 사용하여 계산된다.

[0080] [식 (1)]

[0081] $$\kappa_i^n \approx ER_i(0) + 1.157E^n - 8.07[\nu_i^n - \nu_i(0)] + k\frac{R_c}{R_f}\overline{Q}_c = \kappa_i'^n + k\frac{R_c}{R_f}\overline{Q}_c$$

[0082] 식 (1)에서 n은 중성자 그룹 지수(group index)이고 $ER_i(0)$는 기평가된 핵 데이터 파일(evaluated nuclear data file)(ENDF의 MT458)[M.B. Chadwick, M. Herman, P. Oblozinsk$\acute{y}$, et. al., ENDF/B-VII. 1 nuclear data for science and technology: cross sections, covariances, fission product yields and decay data, Nuclear Data Sheets, 112 (12) (2011) 2887-2996.]의 핵종 i의 핵분열 당 방출되는 평균 에너지에서 중성미자(neutrino) 에너지를 뺀 값이다. 핵분열 단편(EFR)의 운동에너지, 지발 베타선 에너지(EB), 즉발 핵분열 중성자(ENP) 운동에너지, 지발 핵분열 중성자(ENP) 운동에너지, 즉발 핵분열 감마(EGP) 운동에너지 및 지연 핵분열 감마(END) 운동 에너지는 $ER_i(0)$에 저장된다. 두 번째 항($1.157E^n$)과 세 번째 항($8.07[\nu_i^n - \nu_i(0)]$)은 그룹 n의 핵분열에서 생성된 중성자 에너지 E와 중성자 수 ν에 의해 유도된 지발 광자, 지발 베타 및 즉각적인 중성자 방출의 기여에 대한 보정 용어이다. 가장 낮은 에너지 그룹에서 핵분열에 의해 생성된 중성자의 수는 $\nu(0)$로 표시된다. 마지막 용어 $k\frac{R_c}{R_f}\overline{Q}_c$는 핵분열당 중성자 포획 반응에서 방출되는 평균 에너지이며, 여기서 $\frac{R_c}{R_f}$는 증배계수 k에 의해 조정된 핵분열에 대한 포획 비율을 나타낸다. $\overline{Q}_c$의 값은 식 (2)를 사용하여 계산된다.

[0083] [식 (2)]

[0084] $$\overline{Q}_c = \frac{\sum_m \sum_i \sum_n q_{c,i} N_{m,i} \sigma_{c,m,i}^n \phi_m^n V_m}{\sum_m \sum_i \sum_n N_{m,i} \sigma_{c,m,i}^n \phi_m^n V_m}$$

[0085] 상기 식 (2)에서, m은 영역이며, $q_{c,i}$는 핵종 i의 포획 감마와 포획된 생성물의 에너지이다. $N_{m,i}$는 m영역에 있는 핵종 i의 수밀도(number density), $\sigma_{c,m,i}^n$은 포획 단면, ϕ_m^n은 m영역에서의 중성자 플럭스(neutron flux), V_m은 m영역에서의 부피이다.

[0087] 이때, 상기 식 (2)은 하기 식 (2-1)로 다시 정리될 수 있다.

[0088] [식 (2-1)]

[0089] $$\overline{Q}_c = \frac{\sum_m \sum_n q \Sigma_{c,m}^n \phi_m^n V_m}{\sum_m \sum_n \Sigma_{c,m}^n \phi_m^n V_m}$$

[0090] 상기 식 (2-1)에서 $\Sigma_{c,m}^n$은 m 영역에 대한 중성자 흡수 단면적이다.

[0092] 중요하지 않은 문제에 대한 플럭스 값의 기하급수적인 변화를 피하기 위해 STREAM의 핵분열 소스가 각 반복에서 *1/k*로 곱되기 때문에 *k*를 사용하면 중성자 플럭스의 크기를 적절한 수준으로 되돌릴 수 있다. 각 핵분열에서 직접 방출되기 때문에 k에 의한 조정은 식 (1)의 $ER_i(0)$에서 핵분열 감마 및 핵분열 중성자 에너지에는 적용되지 않는다.

[0093] 식 (1)의 항 $\kappa_i'^n$ 에 대한 거시적 단면은 하기 식 (3)에서와 같이 정의된다.

[0094] [식 (3)]

[0095] $$\kappa'\Sigma_{f,m}^n = \sum_i N_{m,i}\kappa_i'^n\sigma_{f,m,i}^n$$

[0096] 상기 식 (3)에서 $\sigma_{f,m,i}^n$은 미시적 핵분열 단면이다. 거시적 단면 $\Sigma_{c,m}^n$, $q\Sigma_{c,m}^n$, $\Sigma_{f,m}^n$, 및 $\kappa'\Sigma_{f,m}^n$ 은 OTFK 모델에서 사용하기 위해 계산되고 저장된다. m 영역 에서 방출되는 에너지는 하기 식(4)에서와 같이 계산된다.

[0097] [식 (4)]

[0098] $$P_m = \sum_n \kappa\Sigma_{f,m}^n\phi_m^n V_m = \sum_n \left[\kappa'\Sigma_{f,m}^n + k\frac{R_c}{R_f}\overline{Q}_c\Sigma_{f,m}^n\right]\phi_m^n V_m$$

[0099] 상기 식 (4)에서, 중성자 포획에 의해 방출된 에너지는 핵분열 사건의 수에 의해 평균화되었고 $k\frac{R_c}{R_f}\overline{Q}_c$라는 용어를 사용하여 카파 값(Kappa value)에 통합되었다. 즉, 중성자 포획 반응에서 나오는 에너지는 모든 연료 영역에 뿌려지고 해당 영역의 핵분열 속도에 비례한다. 열유압 계산을 위한 냉각재 내 에너지 축적분율(냉각재에 축적된 에너지의 양을 문제에서 방출된 총 에너지로 나눈 값)은 사용자 경험에 의해 정의된다. 이는 핵분열 중성자, 핵분열 감마 및 포획 감마선에 의한 냉각재 가열은 국소 증착 가정 때문에 고려되지 않기 때문이다.

[0101] ***3. OTFKVQ(On-The-Fly Kappa with Varied Q) method(본 발명)_광자 수송을 통한 핵분열 모델당 즉각적인 에너지 방출(수정된 OTFK 모델)***

[0102] 광자 수송(photon transport)를 STREAM에 반영하면, 식 (1)의 $ER_i(0)$값과 식 (2)의 $q_{c,i}$ 값을 변경하여 카파 값(Kappa value)을 수정한다. $ER_i(0)$에서 즉발 핵분열 감마선 및 지발 핵분열 감마선의 기여도(EGP+EGD)가 제거되고, $q_{c,i}$에서 중성자 포획에서 발생하는 즉발 광자 에너지가 0으로 설정된다. 이후, 감마 소스(gamma source)를 계산하고 광자 수송을 수행하여 각 영역의 광자 열을 계산한다. STREAM에서 광자 수송 모듈 및 광자 라이브러리의 구현은 하기 참고자료에 제시되어 있다.

[0103] [참고자료]

[0104] - F.B. Brown, R.D. Mosteller, W.R. Martin, Monte Carlo-advances and challenges. Los Alamos National Lab (LANL), 2008, Los Alamos, NM (United States), LA-UR-08-05891

[0105] - K. Kim, M. Lemaire, N.N.T. Mai, et al., Generation of a multigroup gamma production and photon transport library for STREAM, in: Transactions of the Korean Nuclear Society Virtual Spring Meeting, July 09-10, 2020.

[0107] 중성자 감속(slowing down)으로부터의 에너지 축적과 중성자 포획 생성물의 에너지도 수정된 OTFK 모델에서 명확하게 고려된다. 식 (1)에서의 $ER_i(0)$에 저장된 핵분열 중성자(ENP+END)의 운동 에너지가 제거되고 $q_{c,i}$에서 포획된 생성물의 에너지도 제거된다. 명확한 광자/중성자 계산을 사용하면 포획 생성물의 붕괴 과정에서 일부 딸 핵종(daughter nuclides)의 에너지만 $q_{c,i}$로 남는다. 또한 $ER_i(0)$에서 광자와 중성자 에너지의 제거를 설명하기 위해 식 (1)의 두 번째 및 세 번째 보정 용어가 조정되어 $-0.075E^n$이 된다(지발 베타선 에너지(beta

energy)에 대한 보정 용어만 남아 있음). 식 (1)은 하기 식 (5)와 같이 수정할 수 있다;

[0108] [식 (5)]

[0109] $$\kappa^{*n}_i \approx ER^*_i(0) - 0.075E^n + k\frac{R_c}{R_f}\overline{Q^*_c}$$

[0110] 상기 식 (5)에서, 위첨자 *는 상술한 바와 같이 광자 에너지 및 중성자 에너지 제거 후 수정된 값을 나타낸다. 상기 식(5)를 상기 식(4)에 반영함으로써, 중성자 열 에너지 및 광자 열 에너지가 반영된 수정된 영역 m에서 방출되는 에너지(원자로 노심의 전체 출력: P_m)는 하기 식 (6)에서와 같이 계산된다.

[0111] [식 (6)]

[0112] $$P_m = \sum_n \left[\kappa^{*\prime}\Sigma^n_{f,m} + k\frac{R_c}{R_f}\overline{Q^*}_c\Sigma^n_{f,m}\right]\phi^n_m V_m + \sum_n k\Sigma^n_{heat}\phi^n_m V_m + \sum_p \Sigma^p_{heat}\phi^p_m V_m$$

[0113] 상기 식 (6)에서 ϕ는 중성자(n) 또는 광자(p)의 플럭스이고, Σ^n_{heat} 및 Σ^p_{heat}는 각각 NJOY 결과 파일[A.C. Kahler III, R. Macfarlane, NJOY2016, Los Alamos National Lab (LANL), 2016, Los Alamos, NM (United States), No. NJOY, NJOY16; 005075MLTPL00.]에 의해 계산된 중성자 열 단면적 및 광자 열 단면적이다. 핵분열 파편의 운동 에너지가 이미 $ER^*_i(0)$항에 존재하기 때문에 중성자 가열 단면적은 총 가열 단면적(NJOY 결과파일에서의 MT301)에서 핵분열 가열 단면적(NJOY 결과 파일에서의 MT318)을 제외한 값과 같다. 중성자 포획 반응의 감마 소스는 광자 수송 계산 전에 증배계수 k에 의해 조정된다. 핵분열 중성자의 운동 에너지는 더 이상 $ER_i(0)$에 저장되지 않고 중성자 플럭스를 기반으로 별도로 계산된다. 따라서 중성자 열의 양에도 k가 적용되며, 이는 감마 에너지를 포획하기 위해 적용되는 것과 동일한 이유 때문이다. 연료, 피복재 및 냉각재와 같은 각 재료의 에너지 축적이 이러한 접근방식으로 이용 가능하기 때문에 냉각재의 에너지 축적 비율은 더 이상 요구되지 않는다.

[0115] 다시, 상기 식 (6)은 하기 식 A로 표현될 수 있으며,

[0116] [식 A]

[0117] $$P_m = \sum_n \kappa\,\Sigma^n_{f,m}\phi^n_m V_m + \sum_n k\Sigma^n_{heat}\phi^n_m V_m + \sum_p \Sigma^p_{heat}\phi^p_m V_m$$

[0118] 상기 식 A에서, m은 영역이며, P_m은 영역별 출력이며, κ 는 핵분열 당 방출되는 평균에너지이며, $\Sigma^n_{f,m}$는 영역별 중성자 핵분열 단면적이며, ϕ^n_m는 영역별 중성자 플럭스이며, V_m는 영역별 부피이며, k는 증배계수이며, Σ^n_{heat}는 중성자 열 단면적이며, Σ^p_{heat}는 광자 열 단면적이며, ϕ^p_m는 영역별 광자 플럭스인 것일 수 있다.

[0119] 상기 식 A에서, 상기 κ는 하기 식 B에 의하여 산출되는 것일 수 있다.

[0120] [식 B]

[0121] $$\kappa = ER^*(0) - 0.075E + k\frac{R_c}{R_f}\overline{Q^*_c}$$

[0122] 상기 식 B에서, E는 입사 중성자의 에너지이며, $ER^*(0)$은 $ER(0)$ 값으로부터 광자 에너지와 중성자 에너지를 제외한 값이며, $k\frac{R_c}{R_f}\overline{Q^*_c}$는 핵분열 당 중성자 포획 반응으로부터 방출되는 평균에너지이며, k는 증배계수이며, R_c는 포획 반응률이며, R_f는 핵분열 반응률이며, $\overline{Q^*_c}$는 $\overline{Q_c}$ 값으로부터 광자 에너지와 중성자 에너지를 제외한 값인 것일 수 있다.

[0123] 상기 $ER(0)$는 미리 계산된 핵분열 당 방출되는 평균 에너지에서 중성미자(neutrino) 에너지를 제외한 값일 수

있으며, 상기 미리 계산된 핵분열 당 방출되는 평균 에너지는 핵분열 반응 전산모사를 통하여 기평가된 핵 데이터 파일(evaluated nuclear data file)(ENDF(NJOY)의 MT458)로부터 제공되는 것일 수 있다.

[0124] 상기 $\overline{Q_c}$ 값은 상기 식 (2)를 사용하여 계산되는 것일 수 있다.

[0125] 상기 식 B는 하기 식 C로 표시될 수 있다.

[0126] [식 C]

$$\kappa = \kappa' + k\frac{R_c}{R_f}\overline{Q_c}$$

[0127]

[0128] 상기 식 C는 상기 식 A에 반영함으로써, 하기 식 D로 표시될 수 있다.

[0129] [식 D]

[0130]
$$P_m = \sum_n \left[\kappa' \Sigma_{f,m}^n + k\frac{R_c}{R_f}\overline{Q_c}\Sigma_{f,m}^n\right]\phi_m^n V_m + \sum_n k\Sigma_{heat}^n \phi_m^n V_m + \sum_p \Sigma_{heat}^p \phi_m^p V_m$$

[0132] 상기 식 A에 따른 핵분열 반응에 따른 영역 m에서 방출되는 에너지는 도 1의 OTFKVQ method 계산 흐름도에 따라 계산되는 것일 수 있다.

[0134] 도 1을 참조하면, "XS subroutine"은 NJOY 결과파일에서 STRAEM이 필요한 정보를 추출 및 저장하는 것으로, 중성자 열 에너지(Neutron heating) 계산시 필요로 하는 중성자 열 XS(Nuetron heating XS)를 제공하며, 광자 열 에너지(Photon heating) 계산시 필요로 하는 감마생성물 단면적 행렬 라이브러리(Gamma production matrix), 광-원자 XS(photo-atomic XS), 광 열 XS(Photon heating XS)를 제공한다.

[0136] 도 1을 참조하면, 핵분열 반응의 출력에너지는 상기 식 A를 구성하는 하기 식 A-1을 이용하여 계산한다.

[0137] [식 A-1]

[0138]
$$\text{핵분열 반응의 출력에너지} = \sum_n \kappa \Sigma_{f,m}^n \phi_m^n V_m$$

[0139] 상기 식 A-1의 κ는 상기 식 B에 의하여 계산되는 것이다.

[0140] 도 1을 참조하면, 중성자 열 에너지(Nutron heating)은 (1) 중성자 MOC 계산기(neutron MOC solver)에 의하여 중성자 플럭스(flux)가 제공되며, (2) 식 A를 구성하는 하기 식 A-2을 이용하여 중성자 열 에너지(Neutron heating)을 계산(Compute neutron heating)한다.

[0141] [식 A-2]

$$\text{중성자 열 에너지} = \sum_n k\Sigma_{heat}^n \phi_m^n V_m$$

[0142]

[0143] 도 1을 참조하면, 광자 열 에너지(Photon heating)은 (1) 중성자 MOC 계산기(neutron MOC solver)에 의하여 중성자 플럭스(Neutron flux)를 계산하고, (2) 중성자 플럭스와 감마생성물 단면적 행렬 라이브러리(Gamma production matrix)를 이용하여 감마 소스(Gamma source)를 계산하며(Calculate gamma source), (3) 광-원자 XS(Photo-atomic XS)와 감마 소스로부터 MOC fixed source solver를 이용하여 광자 플럭스(Photon flux)를 계산하며, (4) 광 열 XS(Photon heating XS)와 광자 플럭스를 식 A를 구성하는 하기 식 A-3을 이용하여 광자 열 에너지(Photon heating)을 계산(Compute photon heating)한다

[0144] [식 A-3]

$$\text{광자 열 에너지} = \sum_{p} \Sigma_{heat}^{p} \phi_{m}^{p} V_{m}$$

[0145]

[0146] **검증예.**

[0147] *1. VERA lattice problems*

[0148] VERA 벤치마크 [A.T. Godfrey, VERA Core Physics Benchmark Progression Problem Specifications, CASL Technical Report: CASL-U-2012-0131-004 (2014).]으로부터 경수로 원자로(LWR; Light-Water Reactor)에 대한 계산의 일반적인 문제를 나타내는 VERA 2B, 2F, 2G, 2H, 2M 및 2P는 선택하였다. VERA 격자 문제(1.VERA lattice problems)는 17 X 17 집합체이다. 이러한 문제의 구성은 도 2와 같으며, 모든 계산은 ENDF/B-VII.1 라이브러리[M.B. Chadwick, M. Herman, P. Oblozinsk$\acute{y}$, et. al., ENDF/B-VII. 1 nuclear data for science and technology: cross sections, covariances, fission product yields and decay data, Nuclear Data Sheets, 112 (12) (2011) 2887-2996.]로 수행되었다.

[0150] 울산과학기술원(UNIST)에서 개발한 몬테카를로 코드 MCS[M. Lemaire, H. Lee, P. Zhang, D. Lee, Interpretation of two SINBAD photon-leakage benchmarks with nuclear library ENDF/B-VIII. 0 and Monte Carlo code MCS, Nucl. Eng. Tech., 52 (7) (2020) 1355-1366.; H. Lee, W. Kim, P. Zhang, M. Lemaire, et al., MCS - A Monte Carlo Particle Transport Code for Large-Scale Power Reactor Analysis, Ann. Nucl. Energy, 139 (2020) 107276.]는 STREAM의 에너지 모델을 검증하는 데 사용되었다. 중성자와 광자 가열은 MCS의 결합 중성자/광자 모드에서 임계 주행 중에 계산되었지만, 적절한 중성자/광자 에너지 성분을 얻기 위해 추가적인 후처리 단계가 필요했다. *k(증배계수)* 보정 방법으로 알려진 후처리 단계에 대한 자세한 내용은 참고문헌[R. Tuominen, V. Valtavirta, J. Leppδnen, New energy deposition treatment in the Serpent 2 Monte Carlo transport code. Ann. Nucl. Energy, 129 (2019) 224-232.]에 잘 설명되어 있다. 먼저 MCS에 의해 계산된 VERA 2B 문제에 대해 방출되는 에너지를 참고문헌[] R. Tuominen, V. Valtavirta, J. Leppδnen, New energy deposition treatment in the Serpent 2 Monte Carlo transport code. Ann. Nucl. Energy, 129 (2019) 224-232.)에 보고된 MCNP(Monte Carlo N-Particle Transport) 및 SERPENT의 에너지와 비교하여 MCS 계산을 검증한다. MCS 결과에 대한 비교는 표 1에 나와 있다. MCS의 통계적 오차는 0.05% 미만이므로 표시되지 않는다.

표 1

[0151]

Component	MCS (MeV)	MCS-MCNP (keV)	MCS-SERPENT (keV)
Fission products + neutrons	173.428	-72.2	+61.8
Beta	6.611	-31.0	+1.0
Prompt fission gamma	6.568	-8.4	-0.4
Delayed fission gamma	6.399	-23.5	+27.5
Capture gamma	6.311	+11.7	+1.7
Total	199.317	-123.3	+91.7

[0153] MCS 결과는 reference values(MCNP 및 SERPENT)과 잘 일치한다. 이후, VERA 2B와 VERA 2P의 에너지 축적(energies deposition)을 계산하여 STREAM의 에너지 모델을 검증했다. STREAM의 첫 번째 계산은 기본 모델(DEFAULT)을 사용했고, 두 번째 계산은 광자 전송이 포함되지 않은 기존 OTFK method 모델을 사용했으며, 세 번째 계산은 광자 전송(WP)을 사용한 수정된 OTFK 모델(OTFKVQ method 모델: 본 발명)을 포함했다. 본 명세서에서 약어 DEFAULT, OTFK 및 WP가 STREAM에서 사용 가능한 세 가지 모델을 나타내는 데 사용된다. 또한 STREAM은 DEFAULT, OTFK 및 WP 에너지 모델을 각각 사용할 때 DEFAULT 모드, OTFK 모드 및 WP 모드로 지칭한다. WP 모드(본 발명: OTFKVQ method)에 대해 식 (6)에 표시된 세 가지 개별 구성요소가 계산되고 MCS와 비교된다.

[0154] - 핵분열 파편 에너지와 지연 베타 에너지(EFR+EB로 표시됨).

[0155] - 중성자로부터의 에너지(EN으로 표시됨).

[0156] - 감마로부터의 에너지(EG로 표시됨).

[0158] 이 두 문제(VERA 2B와 VERA 2P)의 오차(error)(keV에서 STREAM-MCS로 정의)는 0 MWd/kg(사이클 시작; BOC), 30 MWd/kg(사이클 중간; MOC) 및 60 MWd/kg(사이클 종료; EOC)의 세 가지 연소 단계에서 조사되었다. BOC에서 VERA 2B와 VERA 2P의 세 가지 에너지 성분에 대한 비교는 각각 도 3a 및 도 3b에 도시하였으며, MOC에서 VERA 2B와 VERA 2P의 세 가지 에너지 성분에 대한 비교는 각각 도 4a 및 도 4b에 도시하였으며, EOC에서 VERA 2B와 VERA 2P의 세 가지 에너지 성분에 대한 비교는 각각 도 5a 및 도 5b에 도시하였다.

[0160] OTFK 모드는 $ER_i(0)$에 핵분열 생성물(핵분열 파편), 베타, 핵분열 중성자 및 핵분열 감마의 에너지를 포함한다. 따라서 도 3와 도 4의 OTFK 모드에 대한 비교는 전체 오차에 대한 것이다.

표 2

[0162]

Problem	Burnup	STREAM	STREAM-MCS (pcm)
VERA 2B	BOC	1.18204	-93
	MOC	0.90087	+86
	EOC	0.77438	+110
VERA 2P	BOC	0.92707	+31
	MOC	0.87953	+70
	EOC	0.74406	+68
*Standard deviation from MCS is less than 7 pcm.			

[0163] WP 모드(본 발명: OTFKVQ method)는 MCS와 비교하여 오차가 ±2.6 keV 이내로 양호한 일치를 보였다. 그러나 OTFK 모드는 두 VERA 문제 모두에서 불일치를 야기했다. 가돌리니아 핀(Gadolinia pins)의 감마 기여도는 OTFK 모드에서 ~ 75keV 감소했다. 가돌리늄(Gd)은 중성자 포획 반응당 8 MeV의 매우 강한 감마선을 방출한다. OTFK 모드에서 이러한 감마 에너지는 "*2. OTFK(On-The-Flye Kappa) Method*"에서 설명한 바와 같이 각 핀의 핵분열 속도에 비례하여 모든 연료 핀으로 분할된다. 결과적으로 일반 연료 핀은 추가 에너지를 받은 반면 Gd 핀은 감마 파워의 일부를 상실한다. 나중에 연소될 때, WP 모드(본 발명: OTFKVQ method)는 MCS와 잘 일치했고(EG와 EN 기간에 ±0.8keV 이내), OTFK는 여전히 방출된 총 에너지를 약간 과대평가했다. 이러한 두 가지 VERA 문제에 대해 STREAM에서 서로 다른 모델에 의해 계산된 평균 에너지는 표 3의 MCS와 비교된다.

표 3

[0164]

VERA	Burnup	MCS	DEFAULT	OTFK	WP
2B	BOC	199.317	202.991 (+3674.5)	199.505 (+188.6)	199.291 (-25.9)
	MOC	206.480	208.644 (+2163.2)	206.895 (+414.8)	206.405 (-75.2)
	EOC	209.462	210.966(+1053.4)	209.939 (+477.1)	209.388 (-74.7)
2P	BOC	201.912	203.116 (+1203.7)	202.141 (+229.2)	201.888 (-24.4)
	MOC	206.520	208.660 (+2140.1)	206.865 (+345.4)	206.421 (-98.8)
	EOC	209.588	211.067(+1479.1)	210.005 (+416.2)	209.490 (-98.7)

[0165] DEFAULT 모드는 모든 경우(BOC, MOC, EOC)에 방출되는 에너지를 과대 예측했다. WP 모드(본 발명: OTFKVQ method)에서 방출된 에너지는 나중에 연소 단계에서 MCS에 비해 약간 낮지만 양호한 결과를 나타내었다. OTFK 모드는 MCS와 비교하여 핵분열당 수백 keV의 차이를 유도했다. MCS와 OTFK 모드 사이에서 관찰된 불일치는 몇몇의 복잡한 요소(tangled factors)의 순 결과(net result)이다. 첫째, OTFK 모드의 중성자 에너지는 각 핵종에 대해 방출되는 일정한 중성자 에너지, 즉, 핵분열 중성자의특발 운동에너지 및 핵분열 중성자의 지발 운동에너지(ENP+END)에 기초하여 계산되며, 식 (1)과 같이 서로 다른 입사 중성자 에너지를 설명하기 위해 보정 조건으로 조정된다. 둘째로, OTFK 모드에서 중성자 포획의 감마 에너지는 입사 중성자 에너지와 무관하며 열 중성자 포획에서 방출되는 에너지와 동일하다고 가정했다. 셋째, ENDF/B-VII.1 라이브러리[M.B. Chadwick, M. Herman, P. Oblozinsk$\acute{y}$, et. al., ENDF/B-VII. 1 nuclear data for science and technology: cross sections, covariances, fission product yields and decay data, Nuclear Data Sheets, 112 (12) (2011) 2887-2996.]의 ^{235}U와 ^{238}U에 대한 즉각적인 핵분열 감마 스펙트럼과 신속한 핵분열 감마 다중성이 핵분열당 생성되는 감마 에너지와 일치하지 않는다는 것이 참고문헌[R. Tuominen, V. Valtavirta, J. Leppδnen, New energy deposition treatment in the Serpent 2 Monte Carlo transport code. Ann. Nucl. Energy, 129 (2019) 224-232.]에서 지적되었다. 1.09 MeV 입사 중성자 에너지를 초과하는 235U의 핵분열 감마는 ENDF/B-VII.1의 다른 반응에서 발생한 감마와 함께 분류된다. 따라서 OTFK 모드는 MT458 데이터를 기반으로 감마 에너지를 계산하고 총 핵분열 감마 에너지를 정확하게 보존하는 반면, 특히 k 값이 통일성에서 벗어날 때 WP 모드(본 발명: OTFKVQ method)와 MCS에서 불일치가 발생한다. 대조적으로, WP 모드(본 발명: OTFKVQ method)와 MCS의 중성자 에너지는 근사치 없이 계산된다. 따라서 정확한 비교를 위해 OTFK와 MCS에서 중성자 또는 감마 에너지의 각 구성요소를 분리하는 것은 사실상 불가능하다. MCS와 비교하여 OTFK 모드에 의해 계산된 중성자 에너지(Neutron) 및 감마 에너지(Gamma)에 대한 일괄 오차는 VERA 2B에 대한 표 4에 제공된다.

표 4

[0166]

Component	BOC	MOC	EOC
Neutron	+306.7	+418.8	+408.4
Gamma	-116.9	+25.7	+145.7
Neutron + Gamma	+189.7	+444.5	+554.1

[0167] ^{235}U와 ^{238}U에 대한 즉각적인 핵분열 감마 스펙트럼과 즉각적인 핵분열 감마 다중성이 핵분열당 생성되는 감마에너지와 일치하도록 수정되었기 때문에 감마 에너지의 불일치는 ENDF/B-VIII.0 라이브러리를 통해 완화될 것이다. 그럼에도 불구하고, 핵분열 중성자의 운동 에너지에서 발생한 오차는 남아있을 것이다. 몬테카를로 코드를 사용한 에너지 구성요소의 계산은 합리적인 통계적 오류를 달성하기 위해 엄청난 수의 이력을 필요로 한다. 따라서, 나머지 VERA 문제에 대한 WP 모드(본 발명: OTFKVQ method)에 의한 정규화된 핀 출력(pin-power) 분포는 MNCP 및 MPACT 코드에 의해 참조문헌[Y. Liu, R. Salko, K.S. Kim, et al., Improved MPACT energy deposition and explicit heat generation coupling with CTF. Ann. Nucl. Energy, 152 (2021) 107999.]에 이미 보고된 것과 비교되었다.

[0168] 몬테카를로 방법 기반의 전산코드 MCNP와 MPACT의 상대 오차((WP/MCNP-1) in %, (WP/MPACT-1) in %)는 각각 도 6와 도 7에 제시되어 있다(도 6 및 도 7에서, IFBA 또는 Gd 핀(pins)은 밑줄로 표시하였다). 도 6 및 도 7을 참조하면, 본 발명인 WP 모드(OTFKVQ method)가 몬테카를로 방법 기반의 전산코드와 대비하여 일정한 오차 범위 내에서 일치하는 결과를 보이고 있는 것을 확인할 수 있는 바, 핵분열 반응에서의 방출되는 에너지를 계산함에 있어 높은 정확도를 보이는 것을 확인할 수 있다.

[0169] AIC 제어봉(Ag-In-Cd control rod)의 VERA 2G 문제를 제외하고는 WP 모드(본 발명: OTFKVQ method), MCNP, MPACT 간에 양호하게 일치하는 것이 도출되었다. 종래문헌에서는 AIC 물질에서 생성된 감마 소스(gamma source)의 상당한 불일치가 AIC의 ^{109}Ag와 같은 핵종에 대한 STREAM의 부적절한 공명 처리에 기인한다고 설명하고 있다. 공명 처리를 위한 STREAM의 핀 기반 포인트 별(point-wise) 에너지 감속 방법은 연료 영역에만 적용되며, 이 방법을 등가 이론(the equivalent theory) 대신 비연료 영역으로 확장하면 향후 이러한 문제가 완화될 것이다. 그러나, STREAM의 WP 모드(본 발명: OTFKVQ method)는 VERA 2P의 경우 MPACT보다 더 나은 정확도를 보여준

다. MPACT는 스미어 방식만 적용했기 때문에 Gd에서 방출되는 고에너지 감마 분포가 적절하게 설명되지 않으며 MPACT와 MCNP 결과를 비교할 때 Gad pin에 대해 -2%의 과소평가가 발생한다. WP 모드(본 발명: OTFKVQ method)로 얻은 각 재료 영역의 VERA 2B에 대한 에너지 축적 분율도 OpenMC가 계산하고 참고문헌[S. Kinast, D. Tomatis, Energy deposition in coolant of PWR under normal operation and accident conditions. Nucl. Eng. Des., 384 (2021) 111479.]에서 보고한 값과 잘 일치했다. 여기서 전체 에너지의 약 2.5%가 냉각수에 축적된다.

[0171] 다양한 에너지 방출 모델에 의해 유도된 영향을 분석하기 위해 STREAM의 연소 계산 중에 VERA 2B와 VERA 2P를 추가 검토하였다. 이 섹션부터 $q_{c,i}$의 지발 에너지 기여는 0이 아니었고 고갈된 수 밀도는 각 모델이 제공하는 예측 전력 수준에 해당하는 STREAM에서 계산되었다. 도 8과 같이, Gd의 중성자 포획으로 인한 감마 에너지의 영향은 핵분열당 방출되는 평균 에너지와 증배계수(multiplication factor)의 변화를 비교함으로써, 업데이트된 카파 값과 비교하여 DEFAULT 모드에서 Gd의 중성자 포획으로 인한 감마 에너지의 방치와 일정한 카파 값의 영향은 연소 동안 관찰할 수 있다.

[0172] 도 8과 같이 OTFK 모드에 대한 에너지 방출 및 증배계수는 각각 최대 차이가 0.7 MeV 및 66 pcm으로 WP 모드(본 발명: OTFKVQ method)보다 약간 높다. DEFAULT 모드에 대한 증배계수는 OTFK 모드와 WP 모드에서 각각 128과 174pcm의 최대 차이로 더 높은 차이를 나타낸다. VERA 2P에서 방출되는 평균 에너지는 10 MWd/kg 이전의 평탄준위를 나타내며, 이는 Gd의 연소점에 해당한다. Gd에서 생성된 감마선은 EG 용어(EG term)(~8 MeV/capture)에서 상당한 부분을 기여한다. 가돌리늄의 연소는 이러한 기여를 감소시키는 반면, 핵분열 생성물의 축적에서 방출되는 증가하는 감마 에너지는 이러한 손실의 균형을 유지한다. 이 연소점 이후 DEFAULT 모드와 다른 두 모드(OTFK, WP)의 차이는 VERA 2B 케이스의 차이와 비슷했다. 일반적으로 DEFAULT 모드에서 더 높은 에너지 방출이 얻어지는데, 이는 증배계수 값에 과대평가를 초래한다(핵분열당 방출되는 출력이 높을수록 특정 출력 레벨을 생성하기 위해 연료가 더 적게 연소되므로 더 높은 증배계수로 이어진다). 증배계수의 차이는 MOC를 중심으로 가장 높다. 따라서 WP 모드(본 발명: OTFKVQ method)에서 얻은 이 연소 단계에서 VERA 2B 및 VERA 2P 문제에서 일부 핵종의 총 수 밀도의 상대적 차이를 OTFK 및 DEFAULT 모드에서 얻은 것과 비교했다. 이러한 차이는 도 9에 설명되어 있다.

[0174] DEFAUT 모드는 두 VERA 문제(VERA 2B, VERA 2P)(+1.1% ~ +1.3%) 모두에 대해 WP 모드보다 ^{235}U가 더 높게 나타났다. 따라서 DEFAULT 모드를 사용할 때 악티나이드(actinides)와 핵분열 생성물의 생성은 더 낮다. 즉, 연료가 덜 연소된다. WP 모드(본 발명: OTFKVQ method)에서 핵분열당 방출되는 평균 에너지는 OTFK 모드에서 보다 수백 keV 낮기 때문에 연료는 OTFK 모드에서 보다 약간 더 연소된다. WP 모드(본 발명: OTFKVQ method)와 다른 모드로부터 얻은 결과들 사이의 가장 높은 차이는 Cm 계열(Cm family)에서 발생하며, DEFAULT 모드의 경우 최대 +7.2%, OTFK 모드의 경우 +2.2%이다. 그러나 Cm 원자의 수는 다른 악티늄족 원소들에 비해 밀도가 약 10~100배 낮기 때문에 미미하다.

[0176] ***2. STREAM에서 광자수송을 이용한 OTFK 모델을 이용한 2차원 코어의 해석***

[0177] 2D VERA5 노심(core), 2D NuScale 노심(core) 및 2D 영광 3호기(YGN3) 노심(core)에 대한 분석이 수행되었다. 2D VERA5는 A.T. Godfrey, VERA Core Physics Benchmark Progression Problem Specifications, CASL Technical Report: CASL-U-2012-0131-004 (2014)에 따른 것이며, 2D NuScale는 NuScale Plant Design Overview, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2012, NP-ER-0000-1198에 따른 것이며, 2D 영광 3호기(YGN 3)는 S.K. Lee, et. al., Nuclear Design Report for Yonggwang Unit 3, Cycle 1, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), September, 1995.]에 따른 것이다.

[0178] Pyrex가 사용되는 VERA5 노심와 비교하여 NuScale 노심 및 YGN3 노심은 각각 Gd 함량이 3 및 4 중량%인 Gd 핀을 사용한다. 또한, NuScale 노심은 무거운 스테인리스강 반사체(heavy stainless-steel reflector)를 사용하는 소형 모듈식 원자로이다. 이러한 노심에 대한 BOC의 OTFK 모드 및 WP 모드(본 발명: OTFKVQ method)에서 얻은 핀 출력(pin power)의 차이("WP-OTFK"로 표시됨)(단위: watts)는 도 10(left: 2D VERA5, center: 2D NuScale, right: 2D 영광 3호기(YGN3))와 같다.

[0179] 도 10을 참조하면, 각 노심에서의 핀 출력(pin power)의 차이("WP-OTFK")를 확인할 수 있으며, Gd와 같은 가연성 독물질을 많이 사용하는 영광 3호기(YGN3)의 출력 분포(도 10의 오른쪽(right))가 크게 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. WP 모드(본 발명: OTFKWQ method)는 카파 값(Kappa value)에 포함된 광자 에너지를 광자 수송계산을 통하여 정확한 물리적 모사가 가능함에 따라 광자 에너지의 분포까지 고려할 수 있다. 이에 반하여, OTFK 모드는 카파 값(Kappa value)에 포함된 광자 에너지를 계산하기 위하여, 상수 값을 사용하는 것이므로 광자 에너지의 분포를 고려하지 못한다.

[0181] 출력 맵(power map)에서 광자 수송의 중요성은 사례에 따라 다르다. 일반적으로 일반 연료 핀이, 고농축 연료 핀인 Gd와 같은 강한 감마 방출기에 인접하지 않거나 내부 노심 영역보다 누출이 더 심각한 노심 주변에 위치하는 경우 정상 연료 핀의 차이는 작다. 도 11에 도시한 선택된 집합체(assemblies)의 연료 핀 출력은 표 5에 제시되어 있다. 표 5와 도 11에 표시된 핀(pin) ID(예: H11_P08)는 집합체(assemblies) H11의 연료 핀 P08을 나타낸다.

표 5

[0182]

Pin ID	WP			WP-OTFK
	Water	Cladding	Fuel	
H11_P08	4.2	1.7	138.3	+4.0
H11_K08	4.0	1.6	156.0	+0.7
J11_A08	4.4	1.9	229.7	-5.2
J11_E08	4.6	2.0	218.9	-2.6
H13_N14	4.8	2.1	227.9	-2.1
H13_O15	4.8	2.6	47.0	+24.4
H13_P16	4.7	2.1	135.4	+8.6
H08_J09	4.5	1.7	206.1	-2.0
D04_J09	4.9	1.9	208.6	-0.4
H15_I16	2.1	1.0	113.5	-2.0
G15_I17	2.0	0.8	99.3	-1.6
E07_I17	2.1	0.8	106.2	-2.0

[0183] OTFK 모델에서 중성자 포획에서 모든 연료 핀으로의 감마 에너지의 평균화는 H13_O15의 경우와 같이 Gd 핀의 출력에서 큰 감소를 초래했다. 또한 핵분열 중성자와 핵분열 감마의 에너지가 국부적으로 축적된다고 가정할 때 연료 구역 설정은 OTFK 모드의 정확도에 영향을 미칠 수 있다. 실제로 이러한 중성자/광자는 낮은 광자/중성자 소스 강도를 갖는 인접 집합체(assemblies)로 이동할 수 있다. 인접한 두 집합체에 위치한 핀 H11_P08(저농축 연료)과 J11_A08(고농축 연료)의 차이가 이러한 효과의 예이다. VERA, NuScale 및 YGN3 2D 코어의 첨두 출력 계수(peaking power factor)(Fq)와 연료 중심선 온도(fuel centerline temperature)(Tf_max)의 비교는 도 12과 같다. 도 12를 참조하면, 영광3호기(YGN3)에서의 첨두 출력 계수(Fq)(도 12의 left)는 약 -0.5% 내지 -1.3% 차이를 보이고 있으며, 최고 핵연료 온도(도 12의 right)는 약 -16% 내지 -25% 차이를 보이고 있다. 이는 기존에 사용하였던 OTFK 방법은 광자 에너지를 정확하게 모사하지 못하였기 때문에 발생하는 차이이며, 본 발명인 WP 모드(OTFKVQ method)를 이용하여 광자 에너지를 정확하기 모사하는 경우 도 10에서의 핀 출력 분포 뿐만 아니라, 인접한 두 집합체에 위치한 핀에 대하여 첨두 출력 계수(Fq), 최고 핵연료 온도 차이를 확인할 수 있다.

[0185] 원자로 설계시 고려사항 중에는 출력의 평탄화, 첨두 출력 계수(Fq), 최고 핵연료 온도 등이 있으며, 원자로 출력이 특정 위치에서 높아지면 핵연료 손상, 피복재 손상 등으로 인해 사고로 이어질 수 있으므로 출력이 고르게 분포되는 것이 가장 이상적이다. 이때, 첨두 출력 계수(Fq)는 가장 높은 핵연료 집합체의 출력/평균 핵연료 집합체 출력으로 계산하는데, 이 값이 높을수록 어느 특정 위치에서 출력이 높다는 것을 의미하며, 따라서, Fq값은 작을수록 좋은 것이다. 또한, 핵연료 온도가 높으면 핵연료 용융, 핵연료를 감싸고 있는 피복재 손상 등의 사고가 날 수 있으므로 최고 핵연료 온도(TF-max)는 낮을수록 좋은 것이다. 이에, 본 발명의 OTFKVQ method를 통하여 원자로 설계시 핀 출력 분포, 첨두 출력 계수(Fq), 최고 핵연료 온도 등을 정확하게 계산할 수 있다.

[0187] WP 모드(본 발명: OTFKVQ method)에서 출력 피크 계수(power peaking factor; Fq)는 OTFK 모드에서 얻은 것보다 대부분 낮으며, NuScale 및 YGN3 코어에서 각각 -0.9% 및 -1.3% 감소한다. 중성자/광자 계산에서 Fq의 감소는 안전성 분석 중에 더 많은 하중 패턴을 고려할 수 있게 할 수 있다. 최고 핵연료 온도의 변화는 VERA 및 NuScale 코어의 경우 12K에서 16K정도 감소하는 반면 YGN3의 Gd 핀의 경우 평균 20K 이상의 감소가 발생한다. 냉각재에서 방출되고 축적된 감마 에너지의 분율은 도 13와 같다.

[0188] NuScale 노심의 방출되는 감마 에너지의 분율과 냉각재에 축적된 에너지의 분율은 다른 두 노심(VERA5, 영광 3호기(YGN3))의 분율보다 약간 낮다. 일반적으로 방출되는 감마 에너지의 분율은 방출되는 전체 에너지의 약 9.5% 내지 10.5%이며, LWR의 냉각수에 축적되는 에너지의 분율은 도 13에서 추론한 바와 같이 2.5% 내지 2.6%로 설정할 수 있다.

[0190] **결론.**

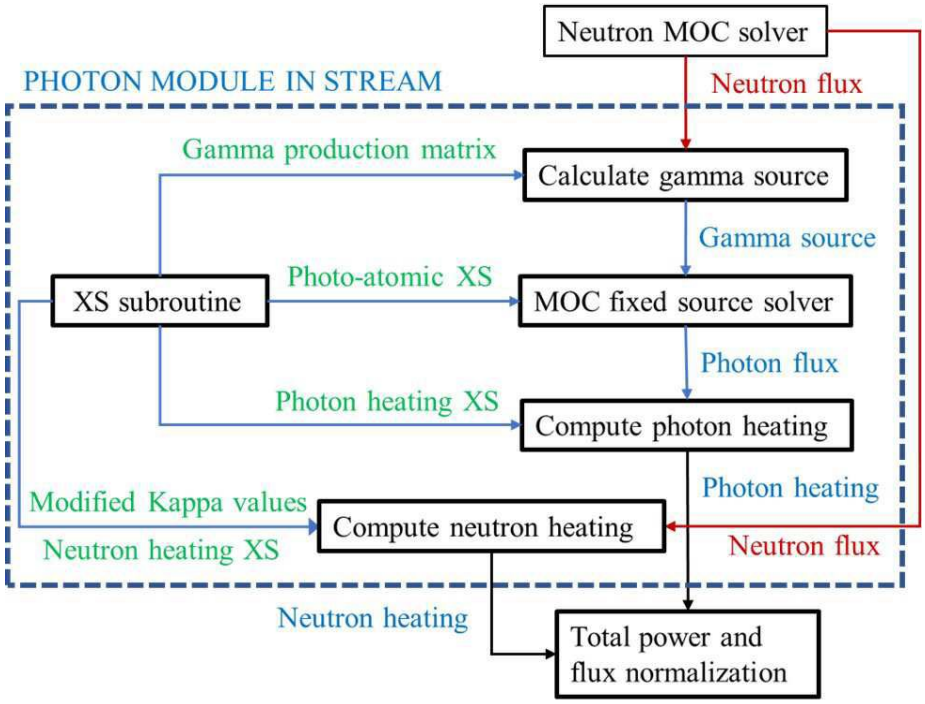
[0191] 중성자 포획 반응에서 방출되는 에너지와 연소 동안 카파 값(Kappa values)의 변화를 고려하기 위해 STREAM에서 즉시 에너지 방출 모델(OTFK 모델)이 구현되었다. 광자 수송이 도입될 때 이 에너지 방출 모델의 영향은 일부 VERA 2D 벤치마크 문제에서 연구되었으며 일반적인 LWR에서 집합체(assemblies)의 붕괴 열 측정에 대해 검증되었다. STREAM에서 광자 전송을 사용한 OTFK 모델로 얻은 결과는 기준 값과 잘 일치했다.

[0192] 광자 수송의 경우 출력 피크 인자는 BOC에서 YGN3 코어와 NuScale 코어에 대해 각각 1.3%와 0.9%의 상대적 차이를 보였고, 이러한 차이는 나중에 연소할 때 감소한다. 원자로 분석에 대한 광자 수송의 영향은 중성자/광자 플럭스 분포의 큰 구배가 발생할 때 더 명확하다. 광자 수송을 이용한 2D 코어 연구에서 감마 에너지는 방출되는 총 에너지의 9.5%에서 10%를 차지하며, STREAM을 이용한 계산은 전형적인 LWR의 냉각수에 축적된 에너지의 분율로 지정된 ~2.6%의 사용을 확인한다. 이 새로운 에너지 방출 모델은 특히 가돌리늄과 같은 강한 감마 방출체가 존재할 때 TH 계산을 위한 더 나은 출력 맵을 도입한다.

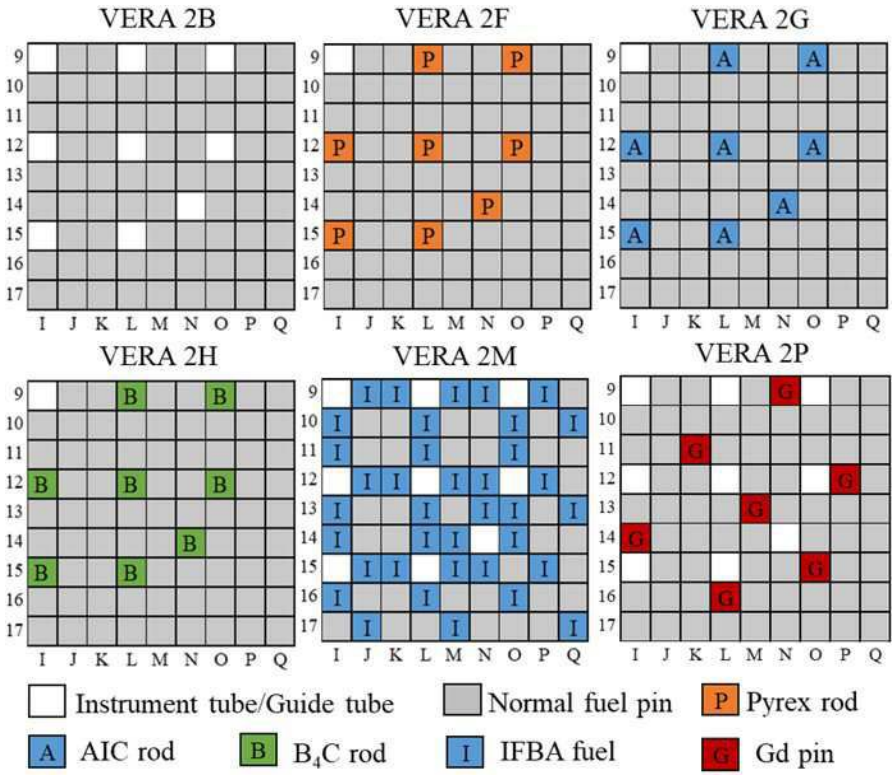
[0193] 이상에서 본 발명의 바람직한 실시예에 대하여 상세하게 설명하였지만 본 발명의 권리범위는 이에 한정되는 것은 아니고 다음의 청구범위에서 정의하고 있는 본 발명의 기본 개념을 이용한 당업자의 여러 변형 및 개량 형태 또한 본 발명의 권리범위에 속하는 것이다.

도면

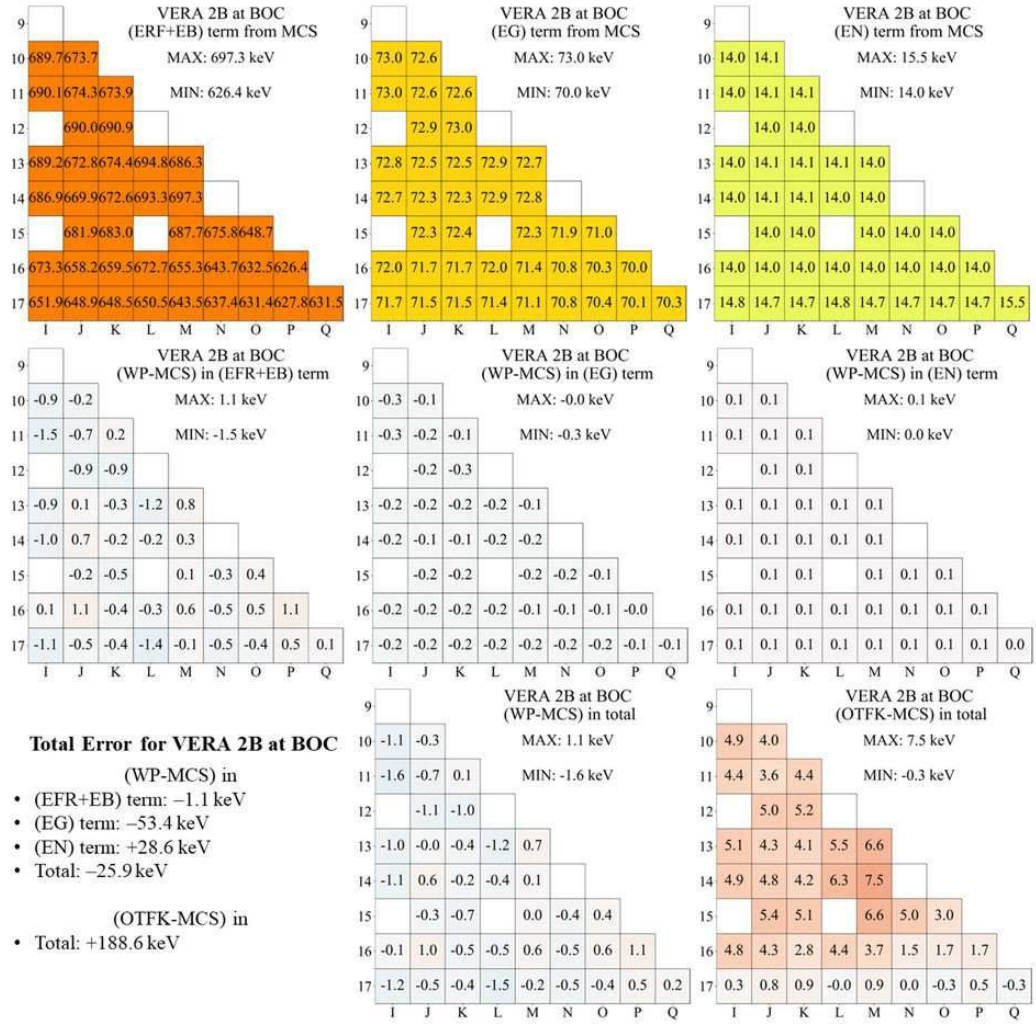
도면1


Neutron MOC solver
PHOTON MODULE IN STREAM
Neutron flux
Gamma production matrix
Calculate gamma source
Gamma source
Photo-atomic XS
XS subroutine
MOC fixed source solver
Photon flux
Photon heating XS
Compute photon heating
Photon heating
Modified Kappa values
Compute neutron heating
Neutron heating XS
Neutron flux
Neutron heating
Total power and
flux normalization

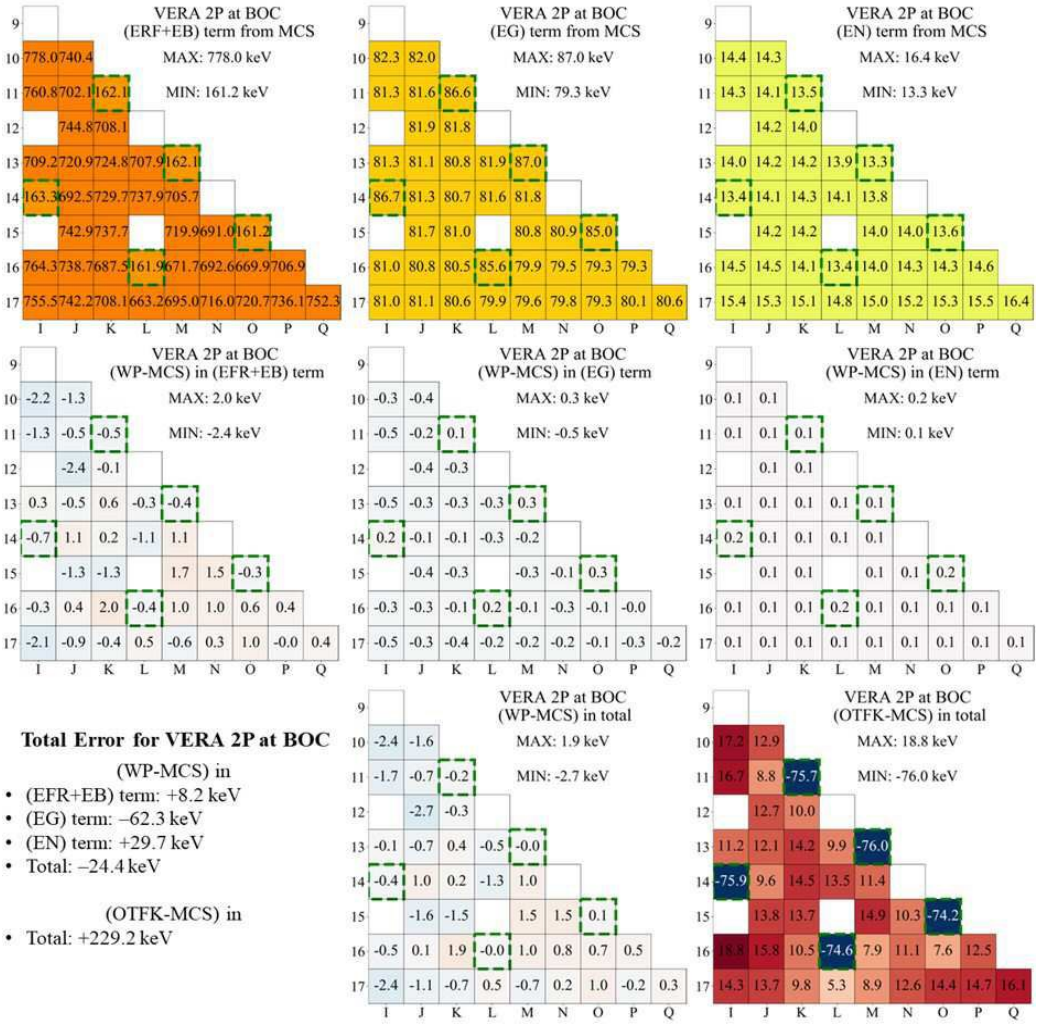
도면2


VERA 2B
VERA 2F
VERA 2G
VERA 2H
VERA 2M
VERA 2P
Instrument tube/Guide tube
Normal fuel pin
Pyrex rod
AIC rod
B4C rod
IFBA fuel
Gd pin

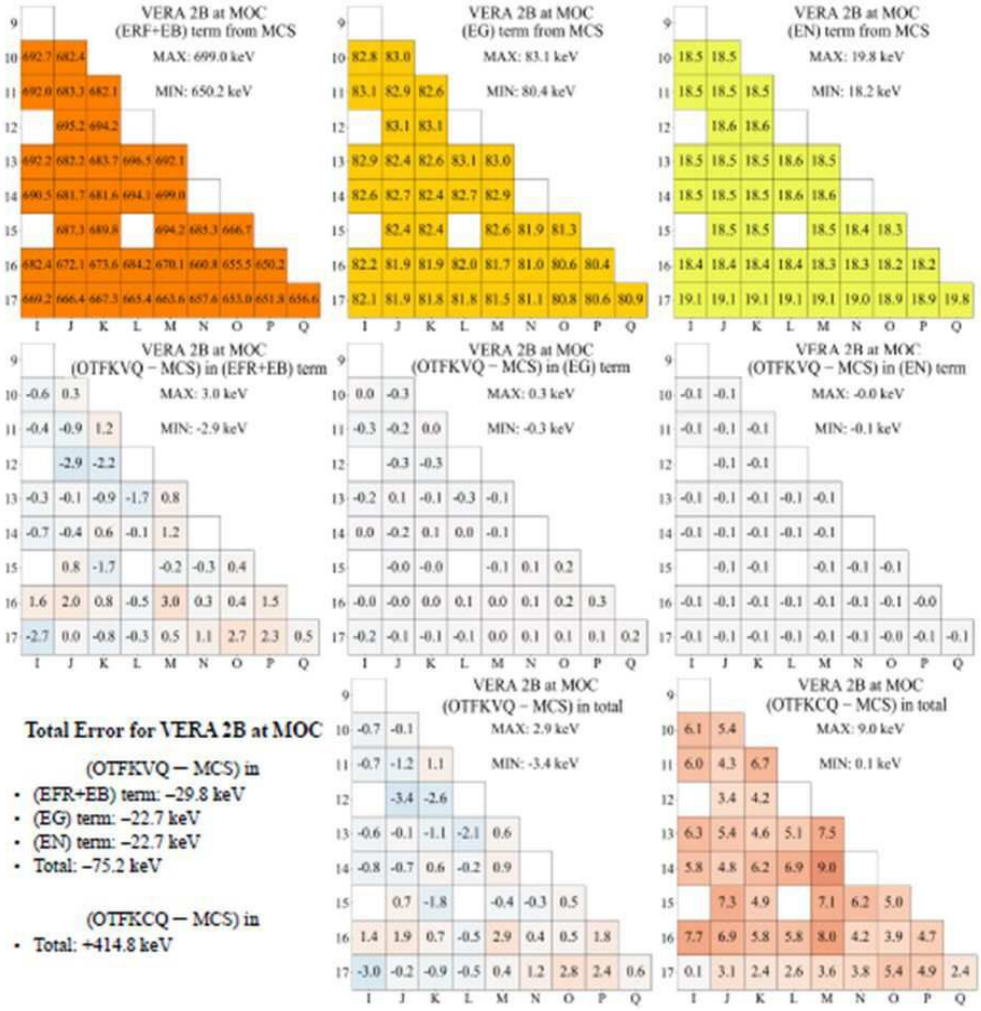
도면3a


VERA 2B at BOC
(ERF+EB) term from MCS
MAX: 697.3 keV
MIN: 626.4 keV
VERA 2B at BOC
(EG) term from MCS
MAX: 73.0 keV
MIN: 70.0 keV
VERA 2B at BOC
(EN) term from MCS
MAX: 15.5 keV
MIN: 14.0 keV
VERA 2B at BOC
(WP-MCS) in (EFR+EB) term
MAX: 1.1 keV
MIN: -1.5 keV
VERA 2B at BOC
(WP-MCS) in (EG) term
MAX: -0.0 keV
MIN: -0.3 keV
VERA 2B at BOC
(WP-MCS) in (EN) term
MAX: 0.1 keV
MIN: 0.0 keV
Total Error for VERA 2B at BOC
(WP-MCS) in
• (EFR+EB) term: −1.1 keV
• (EG) term: −53.4 keV
• (EN) term: +28.6 keV
• Total: −25.9 keV
(OTFK-MCS) in
• Total: +188.6 keV
VERA 2B at BOC
(WP-MCS) in total
MAX: 1.1 keV
MIN: -1.6 keV
VERA 2B at BOC
(OTFK-MCS) in total
MAX: 7.5 keV
MIN: -0.3 keV

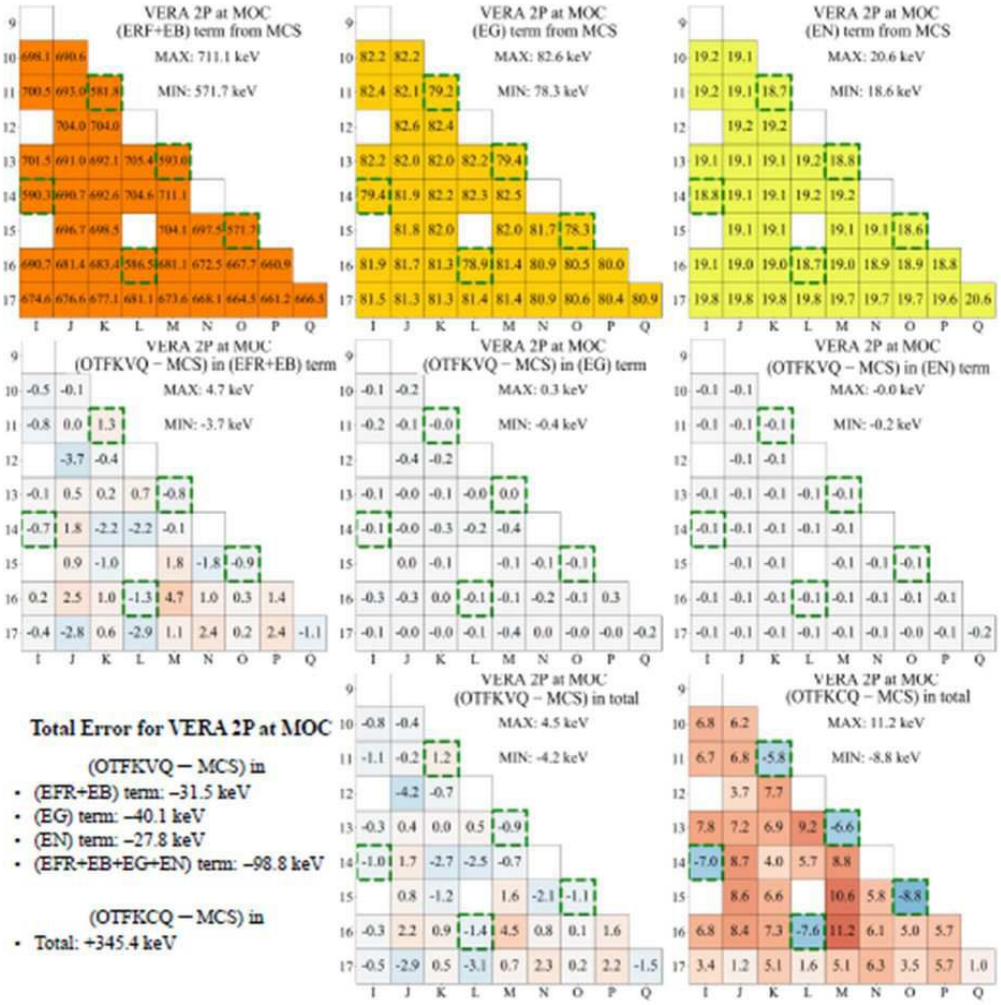
도면3b


VERA 2P at BOC
(ERF+EB) term from MCS
MAX: 778.0 keV
MIN: 161.2 keV
VERA 2P at BOC
(EG) term from MCS
MAX: 87.0 keV
MIN: 79.3 keV
VERA 2P at BOC
(EN) term from MCS
MAX: 16.4 keV
MIN: 13.3 keV
VERA 2P at BOC
(WP-MCS) in (EFR+EB) term
MAX: 2.0 keV
MIN: -2.4 keV
VERA 2P at BOC
(WP-MCS) in (EG) term
MAX: 0.3 keV
MIN: -0.5 keV
VERA 2P at BOC
(WP-MCS) in (EN) term
MAX: 0.2 keV
MIN: 0.1 keV
Total Error for VERA 2P at BOC
(WP-MCS) in
• (EFR+EB) term: +8.2 keV
• (EG) term: −62.3 keV
• (EN) term: +29.7 keV
• Total: −24.4 keV
(OTFK-MCS) in
• Total: +229.2 keV
VERA 2P at BOC
(WP-MCS) in total
MAX: 1.9 keV
MIN: -2.7 keV
VERA 2P at BOC
(OTFK-MCS) in total
MAX: 18.8 keV
MIN: -76.0 keV

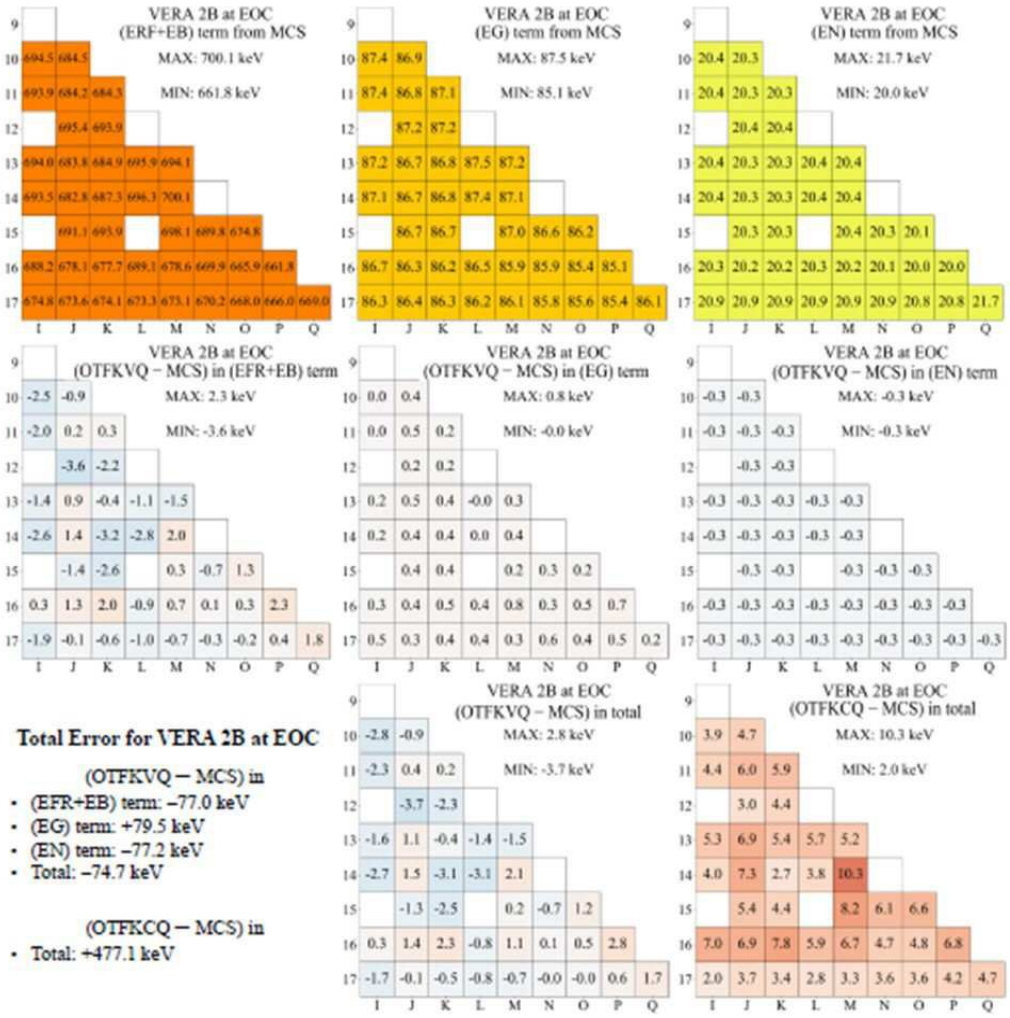
도면4a


VERA 2B at MOC
(ERF+EB) term from MCS
MAX: 699.0 keV
MIN: 650.2 keV
VERA 2B at MOC
(EG) term from MCS
MAX: 83.1 keV
MIN: 80.4 keV
VERA 2B at MOC
(EN) term from MCS
MAX: 19.8 keV
MIN: 18.2 keV
VERA 2B at MOC
(OTFKVQ − MCS) in (EFR+EB) term
MAX: 3.0 keV
MIN: -2.9 keV
VERA 2B at MOC
(OTFKVQ − MCS) in (EG) term
MAX: 0.3 keV
MIN: -0.3 keV
VERA 2B at MOC
(OTFKVQ − MCS) in (EN) term
MAX: -0.0 keV
MIN: -0.1 keV
Total Error for VERA 2B at MOC
(OTFKVQ − MCS) in
• (EFR+EB) term: −29.8 keV
• (EG) term: −22.7 keV
• (EN) term: −22.7 keV
• Total: −75.2 keV
(OTFKCQ − MCS) in
• Total: +414.8 keV
VERA 2B at MOC
(OTFKVQ − MCS) in total
MAX: 2.9 keV
MIN: -3.4 keV
VERA 2B at MOC
(OTFKCQ − MCS) in total
MAX: 9.0 keV
MIN: 0.1 keV

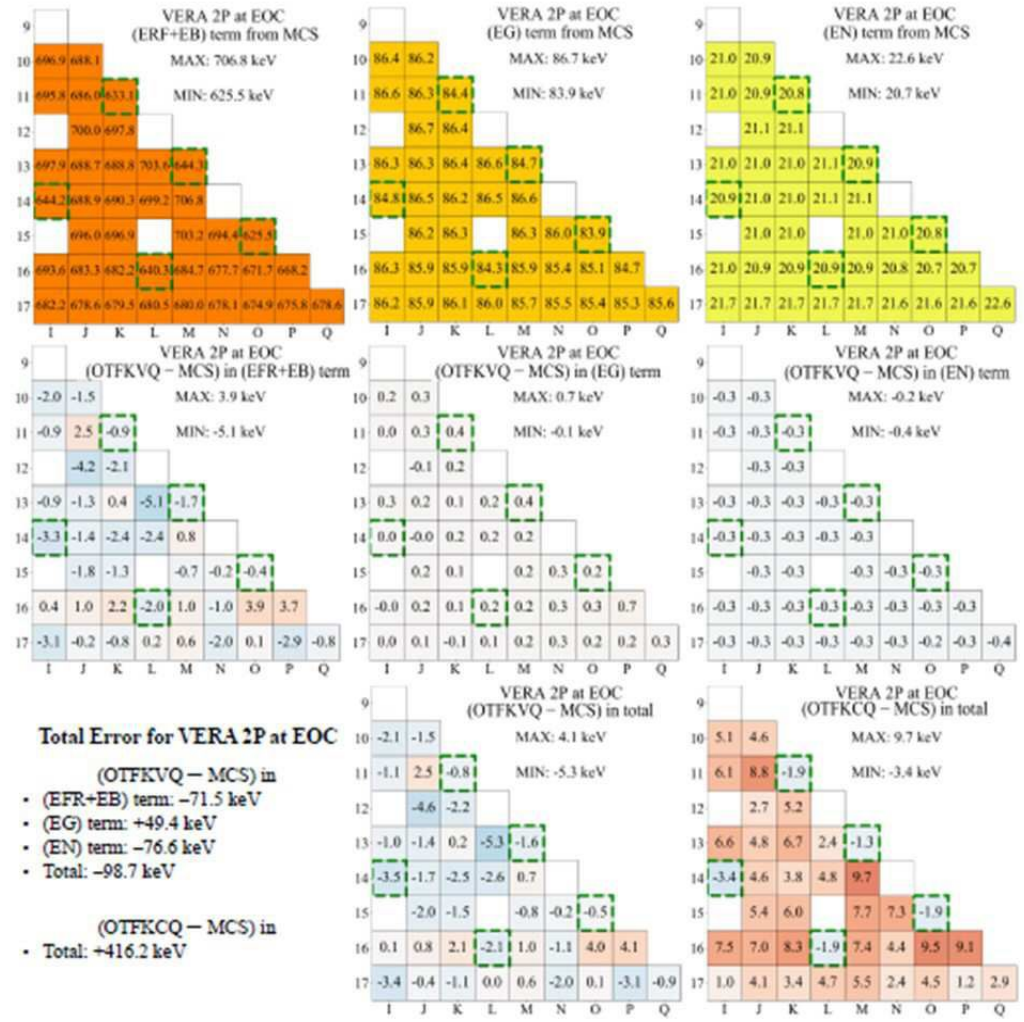
도면4b


VERA 2P at MOC
(ERF+EB) term from MCS
MAX: 711.1 keV
MIN: 571.7 keV
VERA 2P at MOC
(EG) term from MCS
MAX: 82.6 keV
MIN: 78.3 keV
VERA 2P at MOC
(EN) term from MCS
MAX: 20.6 keV
MIN: 18.6 keV
VERA 2P at MOC
(OTFKVQ − MCS) in (EFR+EB) term
MAX: 4.7 keV
MIN: -3.7 keV
VERA 2P at MOC
(OTFKVQ − MCS) in (EG) term
MAX: 0.3 keV
MIN: -0.4 keV
VERA 2P at MOC
(OTFKVQ − MCS) in (EN) term
MAX: -0.0 keV
MIN: -0.2 keV
Total Error for VERA 2P at MOC
(OTFKVQ − MCS) in
• (EFR+EB) term: −31.5 keV
• (EG) term: −40.1 keV
• (EN) term: −27.8 keV
• (EFR+EB+EG+EN) term: −98.8 keV
(OTFKCQ − MCS) in
• Total: +345.4 keV
VERA 2P at MOC
(OTFKVQ − MCS) in total
MAX: 4.5 keV
MIN: -4.2 keV
VERA 2P at MOC
(OTFKCQ − MCS) in total
MAX: 11.2 keV
MIN: -8.8 keV

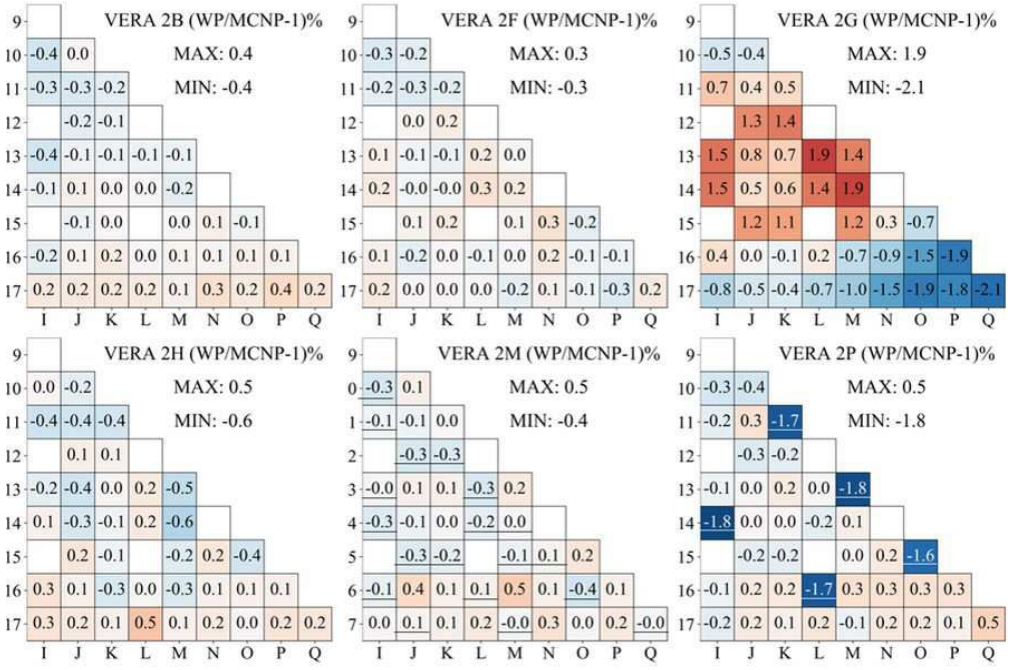
도면5a


VERA 2B at EOC
(ERF+EB) term from MCS
MAX: 700.1 keV
MIN: 661.8 keV
VERA 2B at EOC
(EG) term from MCS
MAX: 87.5 keV
MIN: 85.1 keV
VERA 2B at EOC
(EN) term from MCS
MAX: 21.7 keV
MIN: 20.0 keV
VERA 2B at EOC
(OTFKVQ − MCS) in (EFR+EB) term
MAX: 2.3 keV
MIN: -3.6 keV
VERA 2B at EOC
(OTFKVQ − MCS) in (EG) term
MAX: 0.8 keV
MIN: -0.0 keV
VERA 2B at EOC
(OTFKVQ − MCS) in (EN) term
MAX: -0.3 keV
MIN: -0.3 keV
Total Error for VERA 2B at EOC
(OTFKVQ − MCS) in
(EFR+EB) term: −77.0 keV
(EG) term: +79.5 keV
(EN) term: −77.2 keV
Total: −74.7 keV
(OTFKCQ − MCS) in
Total: +477.1 keV
VERA 2B at EOC
(OTFKVQ − MCS) in total
MAX: 2.8 keV
MIN: -3.7 keV
VERA 2B at EOC
(OTFKCQ − MCS) in total
MAX: 10.3 keV
MIN: 2.0 keV

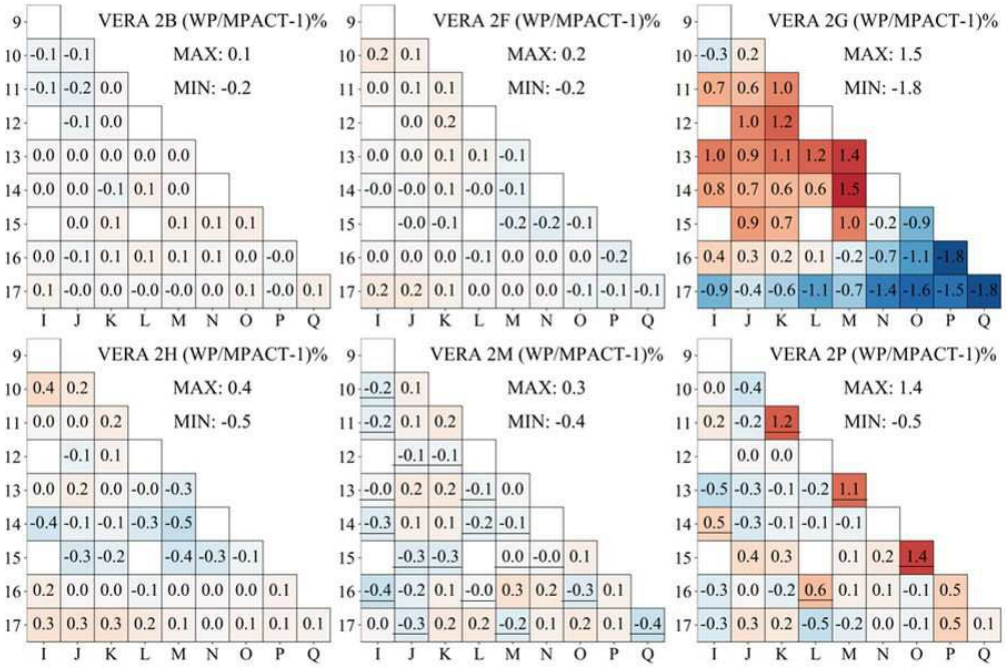
도면5b


VERA 2P at EOC (ERF+EB) term from MCS
MAX: 706.8 keV
MIN: 625.5 keV
VERA 2P at EOC (EG) term from MCS
MAX: 86.7 keV
MIN: 83.9 keV
VERA 2P at EOC (EN) term from MCS
MAX: 22.6 keV
MIN: 20.7 keV
VERA 2P at EOC (OTFKVQ − MCS) in (EFR+EB) term
MAX: 3.9 keV
MIN: -5.1 keV
VERA 2P at EOC (OTFKVQ − MCS) in (EG) term
MAX: 0.7 keV
MIN: -0.1 keV
VERA 2P at EOC (OTFKVQ − MCS) in (EN) term
MAX: -0.2 keV
MIN: -0.4 keV
Total Error for VERA 2P at EOC
(OTFKVQ − MCS) in
(EFR+EB) term: −71.5 keV
(EG) term: +49.4 keV
(EN) term: −76.6 keV
Total: −98.7 keV
(OTFKCQ − MCS) in
Total: +416.2 keV
VERA 2P at EOC (OTFKVQ − MCS) in total
MAX: 4.1 keV
MIN: -5.3 keV
VERA 2P at EOC (OTFKCQ − MCS) in total
MAX: 9.7 keV
MIN: -3.4 keV

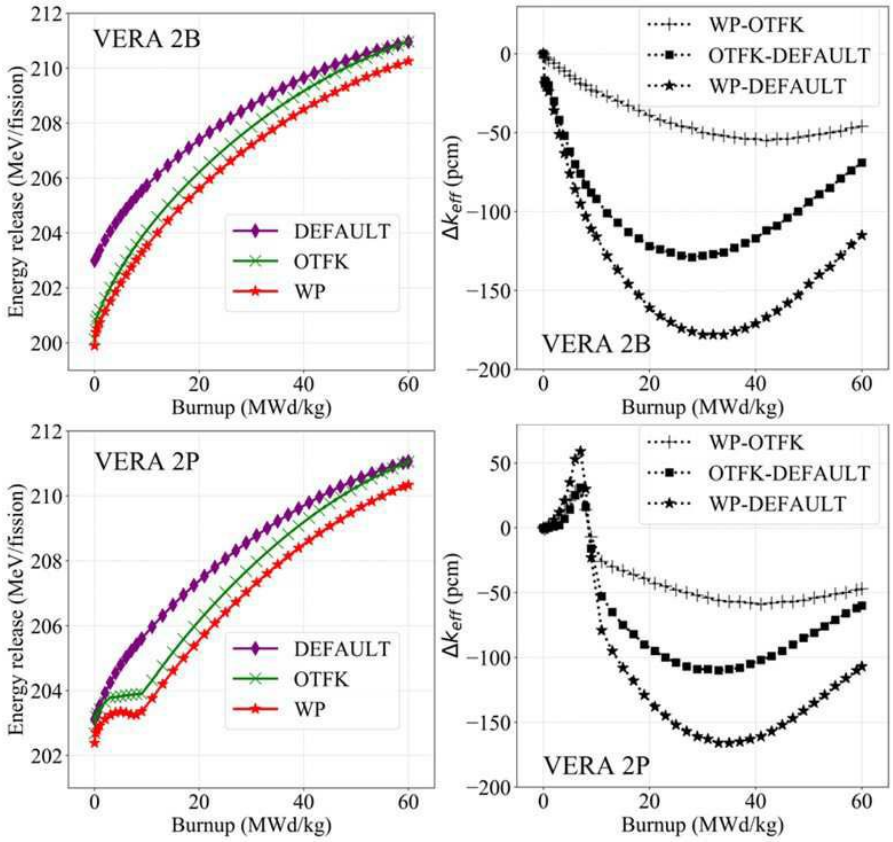
도면6


VERA 2B (WP/MCNP-1)%
MAX: 0.4
MIN: -0.4
VERA 2F (WP/MCNP-1)%
MAX: 0.3
MIN: -0.3
VERA 2G (WP/MCNP-1)%
MAX: 1.9
MIN: -2.1
VERA 2H (WP/MCNP-1)%
MAX: 0.5
MIN: -0.6
VERA 2M (WP/MCNP-1)%
MAX: 0.5
MIN: -0.4
VERA 2P (WP/MCNP-1)%
MAX: 0.5
MIN: -1.8

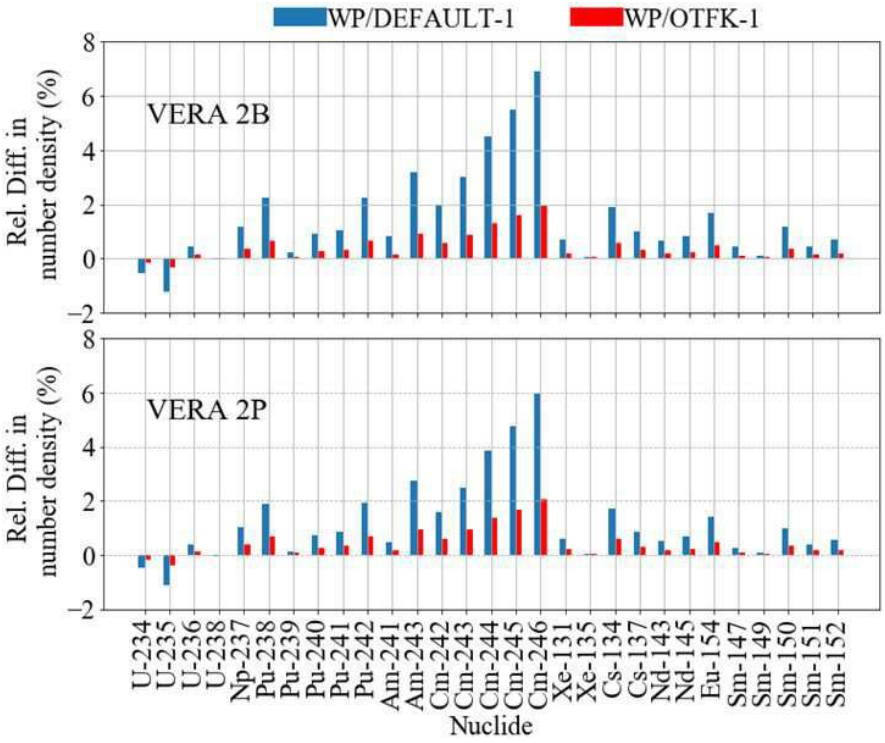
도면7


VERA 2B (WP/MPACT-1)%
MAX: 0.1
MIN: -0.2
VERA 2F (WP/MPACT-1)%
MAX: 0.2
MIN: -0.2
VERA 2G (WP/MPACT-1)%
MAX: 1.5
MIN: -1.8
VERA 2H (WP/MPACT-1)%
MAX: 0.4
MIN: -0.5
VERA 2M (WP/MPACT-1)%
MAX: 0.3
MIN: -0.4
VERA 2P (WP/MPACT-1)%
MAX: 1.4
MIN: -0.5
I J K L M N O P Q

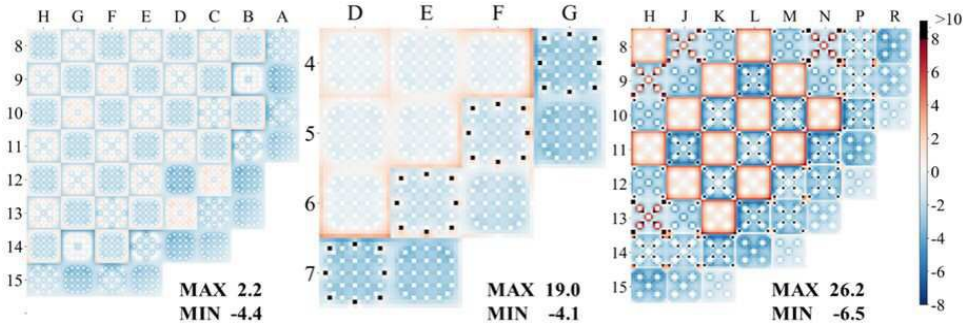
도면8


VERA 2B
Energy release (MeV/fission)
Burnup (MWd/kg)
DEFAULT
OTFK
WP
WP-OTFK
OTFK-DEFAULT
WP-DEFAULT
Δk_eff (pcm)
VERA 2P

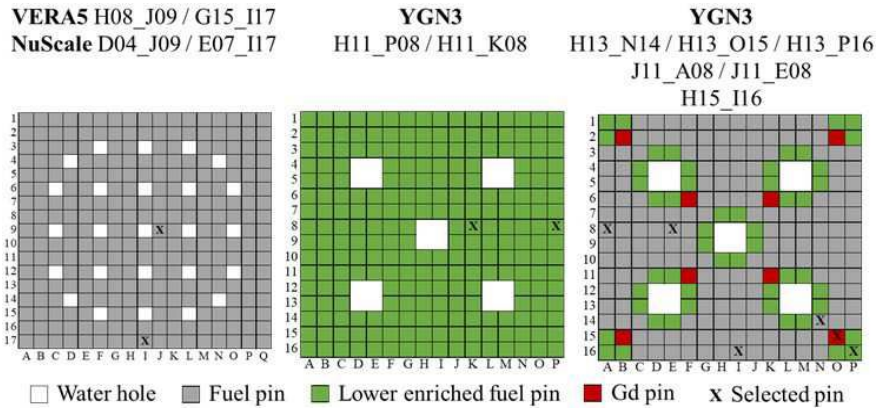
도면9



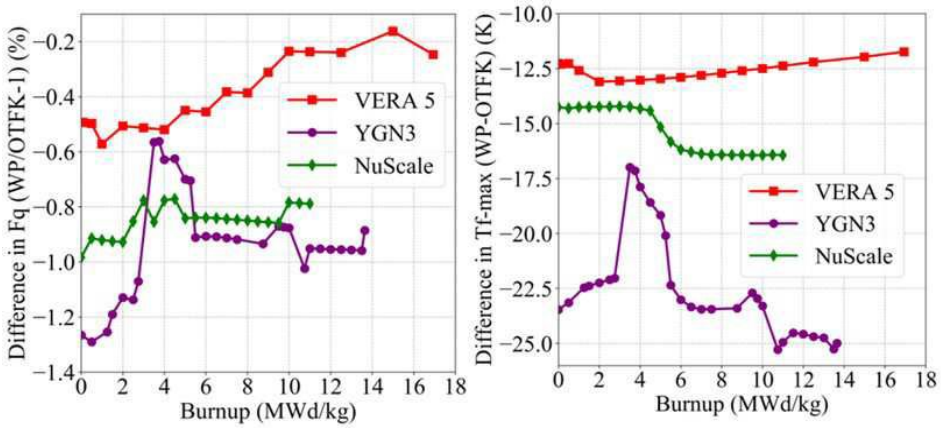
도면10



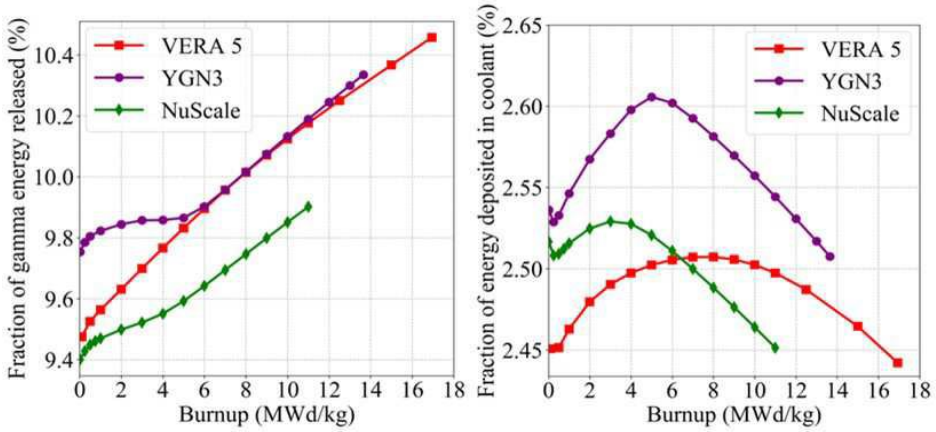
도면11



도면12


Difference in Fq (WP/OTFK-1) (%)
−0.2
−0.4
−0.6
−0.8
−1.0
−1.2
−1.4
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18
Burnup (MWd/kg)
VERA 5
YGN3
NuScale
Difference in Tf-max (WP-OTFK) (K)
−10.0
−12.5
−15.0
−17.5
−20.0
−22.5
−25.0
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18
Burnup (MWd/kg)
VERA 5
YGN3
NuScale

도면13


Fraction of gamma energy released (%)
10.4
10.2
10.0
9.8
9.6
9.4
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18
Burnup (MWd/kg)
VERA 5
YGN3
NuScale
Fraction of energy deposited in coolant (%)
2.65
2.60
2.55
2.50
2.45
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18
Burnup (MWd/kg)
VERA 5
YGN3
NuScale