

## SMART 노심에 대한 에너지 재분포 인자 예비 평가

### Preliminary Evaluation of Energy Redistribution Factors for SMART Core

김교윤, 지성균

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요약

SMART 노심에 대한 에너지 재분포 인자를 예비 평가하였다. 에너지 재분포 인자는 핵연료 집합체에서 hot rod의 핵연료 및 피복재에 흡수된 핵분열 에너지의 상대적인 양을 결정하는데 이용되며, 또한 저밀도의 감속재 조건에서의 LOCA에 대한 안전 해석용 입력자료로 이용된다. SMART 노심에 대한 에너지 재분포 인자의 예비 평가는 ORIGEN2와 MCNP4B 코드를 이용하여 수행하였다. 운전 정지 후의 감마 스펙트럼은 ORIGEN2 코드를 이용하여 생산하였다. 핵연료봉 출력 분포와 감마 에너지 흡수 분포는 모두 MCNP4B 코드를 이용하여 평가하였다. P/B 비율이 1.0일 때 SMART 노심의 에너지 재분포 인자는 0.98로 나타났다. 통상적으로 사용하는 해석 방법은 핵연료봉 출력분포를 노심 해석 결과로부터 취한다. 이것은 핵연료봉 출력 분포와 감마 에너지 흡수 분포 사이의 비 일관성을 유발한다. 반면에 본 연구에서 도입된 분석 방법은 그런 비 일관성을 제거하고 전체적인 해석 절차를 단순하게 한다.

#### Abstract

Energy redistribution factor(ERF) of SMART core was preliminarily evaluated. The ERFs are used to determine the relative amount of fission energy deposited in the fuel and cladding of the hot rod in a fuel assembly. The ERFs are also used in the post LOCA analysis under the low moderator density, such as voided moderator condition. In evaluating ERFs of SMART core, ORIGEN2 and MCNP4B codes are utilized. Shutdown gamma spectrum was generated by ORIGEN2 code. Both pin power distribution and gamma energy deposition distribution are then evaluated by MCNP4B code. ERF of SMART core is 0.98 at 1.0 of P/B ratio. Conventional analysis method usually takes pin power distribution from the core analysis results. This causes inconsistency between pin power distribution and gamma energy deposition distribution. In contrast, the analysis method introduced in this study eliminates the inconsistency and simplifies the entire analysis procedure.

## 1. 서론

SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)<sup>1</sup>는 전기 생산뿐만 아니라 해수의 담수화를 위한 에너지의 공급에 이용되는 열출력이 330MW급인 다목적 일체형 신형 원자로이다. SMART 노심에 대한 에너지 재분포 인자는 LOCA 해석용 입력 자료로써 이용되며, 또한 핵연료 집합체에서 hot rod의 핵연료 및 피복재의 흡수된 핵분열 에너지의 상대적인 양을 결정하는데 이용되는데, 에너지 재분포 인자는 핵연료 집합체 내의 hot pin의 생성 에너지에 대한 흡수되는 에너지의 비로 정의된다. 본 연구에서는 ORIGEN2<sup>2</sup> 코드를 이용하여 SMART 노심에 대한 운전 정지후의 감마 스펙트럼을 평가하고, 이를 MCNP4B<sup>3</sup> 코드의 입력자료로 이용하여 4가지 종류의 SMART 핵연료 집합체에 대한 핵연료 봉별 출력 분포 및 감마 에너지 흡수율 분포를 평가하였다. 그리고 이런 핵연료 봉별 출력 분포 및 감마 에너지 흡수율 분포를 이용하여 SMART 노심에 대한 에너지 재분포 인자를 예비 평가하였다.

## 2. 분석 방법

SMART의 예비 장전 노심 모형은 그림 1과 같다. 대상이 된 핵연료는 21개의 안내관과 4개의 계측관이 있는 17x17 KOFA 핵연료에 기초한 4가지 대표적인 유형으로 TYPE-A, TYPE-B, TYPE-C, TYPE-D 핵연료집합체이다. TYPE-A 핵연료집합체는 240개의 일반 연료봉(4.95 w/o U<sup>235</sup>)과 4개의 계측관, 21개의 지지관, 그리고 24개의 B<sub>4</sub>C Shim을 포함하고 있다. TYPE-B 핵연료집합체는 244개의 일반 연료봉(4.95 w/o U<sup>235</sup>)과 4개의 계측관, 21개의 지지관, 그리고 20개의 B<sub>4</sub>C Shim을 포함하고 있다. TYPE-C 핵연료집합체는 236개의 일반 연료봉(4.95 w/o U<sup>235</sup>)과 4개의 가돌리니아 독봉(12 w/o Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1.8 w/o U<sup>235</sup> w/o), 4개의 계측관, 21개의 지지관, 그리고 24개의 B<sub>4</sub>C Shim을 포함하고 있다. TYPE-D 핵연료집합체는 228개의 일반 연료봉(4.95 w/o U<sup>235</sup>)과 12개의 가돌리니아 독봉(12 w/o Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1.8 w/o U<sup>235</sup> w/o), 4개의 계측관, 21개의 지지관, 그리고 24개의 B<sub>4</sub>C Shim을 포함하고 있다. 그리고 Type-D의 경우는 AgInCd의 제어봉이 삽입된 경우(Type-Di)와 제거된 경우(Type-Do)로 나누었다. 여기서 LOCA 기포 감속재 조건(voided moderator condition)에서 감속재의 밀도는 0.05 g/cc로 가정<sup>4</sup>하였다. 본 연구에서는 축 방향 출력 분포로 표 1에 보여주는 바와 같이 SMART 안전 해석을 위해 생산된 자료<sup>5</sup>를 이용하였다.

### 2.1 핵연료봉 출력 분포 평가

Type A의 핵연료 집합체에 대한 MCNP 모델링은 개별적인 핵연료봉의 모사에서 범할 수 있는 모델링시의 실수를 배제하기 위하여 4각 구조를 갖는 lattice 반복 구조의 사양을 선택하였다. 따라서, 입력문의 길이를 매우 작게 작성할 수 있다. 같은 방법을 이용하여 Type-B, Type-C, Type-Di 및 Type-Do에 대하여 모델링을 하였다.

핵연료집합체의 유형별로 핵연료봉 출력분포를 평가하기 위하여 핵연료, 핵연료 피복재, 그리고 기타 물질의 온도에 알맞는 핵 단면적 자료를 이용하였다. 상온의 경우는 MCNP4B에 수록된 300 °K에 대한 핵 단면적 자료로 rmccs1자료를 이용하였는데 이것은 NJOY<sup>6</sup>를 이용하여 ENDF/B-V<sup>7</sup>로부터 유도된 것이다. 그리고 고온의 경우는 핵연료(973 °K)와 핵연료 피복재(593 °K)와 기타 물질(563 °K)의 온도에 알맞은 핵단면적 자료<sup>8</sup>를 이용하였다. 고온에서의 핵단면적 자료는 NJOY를 이용하여 ENDF/ B-VI<sup>9</sup>로부터 유도된 것이다.

핵분열에 의한 핵연료 집합체 별 연료봉 출력 분포를 평가하기 위하여 MCNP의 임계도 평가용 KCODE를 이용하였는데 주기당 입자 이력수는 2000으로 하였으며 계산에 이용된 주기수는 2000으로 하여 결과의 불확실도가 충분히 낮도록 하였다. 그리고, 핵연료봉의 출력분포를 평가하기 위하여 핵분열 반응율을 유출할 수 있는 (-6)의 fm tally를 이용하였다. 이러한 MCNP 계산 결과로부터의 핵연료 집합체별 핵연료봉 출력분포는 표 2 ~ 표 6과 같다.

## 2.2 감마 에너지 흡수율 분포 평가

SMART의 노심은 1035일의 유효 전출력 운전 기간으로 원자로를 운전하고, 운전 정지 후 100초가 경과한 후 18 에너지 그룹에 대하여 ORIGEN2 코드를 이용하여 감마 에너지 스펙트럼을 평가하였는데, 그 결과는 표 7에 제시하였다.

핵연료집합체의 유형별로 상온에서의 감마 에너지 흡수 분포를 평가하기 위하여 mcplib photon 단면적 자료를 이용하였다.

MCNP를 이용한 SMART의 핵연료 집합체 별 연료봉 출력 분포를 각 집합체 별 고정 선원으로 이용하였고, 출발 입자수, 즉 NPS(No. of Particles Started)를  $1 \times 10^7$ 로 하여 결과의 불확실도가 충분히 낮도록 하였다. 그리고, 감마 에너지 흡수율을 평가하기 위하여 f116;p와 같은 감마 방사선 열 평가 tally를 이용하였다. 이러한 MCNP 계산 결과로부터의 핵연료 집합체별 감마 에너지 흡수율 분포는 표 8 ~ 표 12와 같다.

## 3. 에너지 재분포 인자 평가

각 핵연료 집합체별 hot rod에 대한 피복재를 포함한 연료봉의 감마 에너지 흡수율 분포를 취하여 감마에 대한 에너지 흡수 인자( $EDF_\gamma$ )를 다음 식 (1)에 의해 유도할 수 있다.

$$EDF_\gamma = (\text{hot pin의 감마에너지 흡수율})/(\text{hot pin의 출력}) \quad (1)$$

이렇게 구한 값을 최소자승법(Least Square Method)에 의해 재배치하면 식(2)와 같은 P/B에 대한 1차 함수를 유도 할 수 있다.

$$EDF_\gamma = 1.129 - 0.170 \times (P/B) \quad (2)$$

MCNP를 이용한 감마 에너지 흡수 분포의 계산에 수반된 통계학적 불확실도(표준 편차)는 최대

값이 0.2% 이내이다. 이런 결과는  $1 \times 10^7$  이력수에 기인하기 때문에 무한 이력에 대한 95/95 신뢰도 구간에서의 증배 인자를 고려하면, 감마 함수에 대한 불확실도는

$$1.645 \times 0.2\% = 0.33\%$$

이다. 기하구조나 계산 과정의 모델링 등에서 무리한 가정이 없었기 때문에 더 이상 영향을 주는 인자는 없을 것으로 판단된다. 따라서 본 평가에는 감마 함수에 대한 불확실도로서 0.5%를 보수적으로 가정하였으며 이 값은 감마 에너지 함수 인자의 MCNP 계산 값에서 불확실도의 상한 경계치로 이용된다.

식 (2)에 의해 구한  $EDF_\gamma$ 에 감마 기여도<sup>10</sup>를 고려하면 전체 에너지 재분포 인자(ERF)는

$$ERF = (EDF_\gamma - 1) \times 0.55 + 1 \quad (3)$$

과 같이 표현 할 수 있다. 여기서 식 (2)를 식 (3)에 삽입하면

$$ERF = 1.071 - 0.094 (P/B) \quad (4)$$

과 같이 된다. 여기서  $EDF_\gamma$ 의 0.5% 불확실도를 고려하면  $ERF_{(0.5)}$ 는

$$\begin{aligned} ERF_{(0.5\%)} &= ((1.000 + 0.005) EDF_\gamma - 1) \times 0.55 + 1 \\ &= (1.005 EDF_\gamma - 1) \times 0.55 + 1 \end{aligned} \quad (5)$$

로 되고, 식 (5)에 식 (2)를 삽입하면

$$ERF_{(0.5\%)} = 1.074 - 0.094 (P/B) \quad (6)$$

로 된다. 식 (6)을 이용하면 0.5%의 불확실도를 갖는 에너지 재분포 인자를 구할 수 있다.

#### 4. 결과 및 토의

식 (4)와 식 (6)을 이용하여 MCNP 계산 값을 근거로 한 에너지 재분포 인자와 0.5%의 보수성을 고려한 에너지 재분포 인자를 유도할 수 있다. 같은 방법을 이용하면 1.0%, 1.5%, 2.0%의 보수성에 대한 ERF값도 평가할 수 있다. 이렇게 산출한 에너지 재분포 인자는 P/B의 변화에 대하여 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

그림 2에 0.5% ~ 2.0%의 보수성을 갖는 에너지 재분포 인자를 제시하였으나, MCNP 계산 결과에 수반된 통계학적 불확실도는 최고 0.2%이므로 0.5%의 보수성을 고려한  $ERF_{(0.5\%)}$ 의 값을 최종 에너지 재분포 인자로 이용할 수 있다. 0.5%의 불확실도를 고려한다면, P/B 비율이 1.0일 때 ERF 값은 약 0.98 정도로 기존의 16x16 핵연료 집합체에 대한 평가<sup>10</sup>와 유사한 것으로 나타났다. 아울러 추가의 보수성이 요구될 경우에는 그림 2에 제시된 ERF 값들을 이용할 수 있을 것이다. 이러한 ERF를 이용하면 hot pin의 핵연료와 피복재에 흡수되는 상대적인 핵분열 에너지의 양을 결정할 수 있다.

본 연구에서는 개념 설계 단계인 SMART에 대한 가용 자료만을 이용하였으므로 자료의 변화에 따라 SMART의 에너지 재분포 인자는 재평가될 예정이다.

## 5. 결론

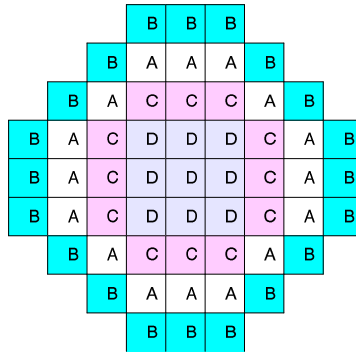
평가 결과에 의하면 P/B 비율이 1.0일 때 SMART 노심의 에너지 재분포 인자는 0.98로 나타났다. 통상적으로 사용하는 해석 방법은 핵연료봉 출력분포를 노심 해석 결과로부터 취한다. 이것은 핵연료봉 출력 분포와 감마 에너지 흡수 분포 사이의 비 일관성을 유발한다. 반면에 본 연구에서 도입된 분석 방법은 그런 비 일관성을 제거하고 전체적인 해석 절차를 단순화하여 효율적으로 활용할 수 있다. 또한 본 연구 과정 중에 평가된 핵연료 집합체별 핵연료봉 출력 분포 및 감마 에너지 흡수율 분포는 노심 해석 및 물리 분야의 참조 자료로 이용될 수 있다.

## 6. 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음을 감사드린다.

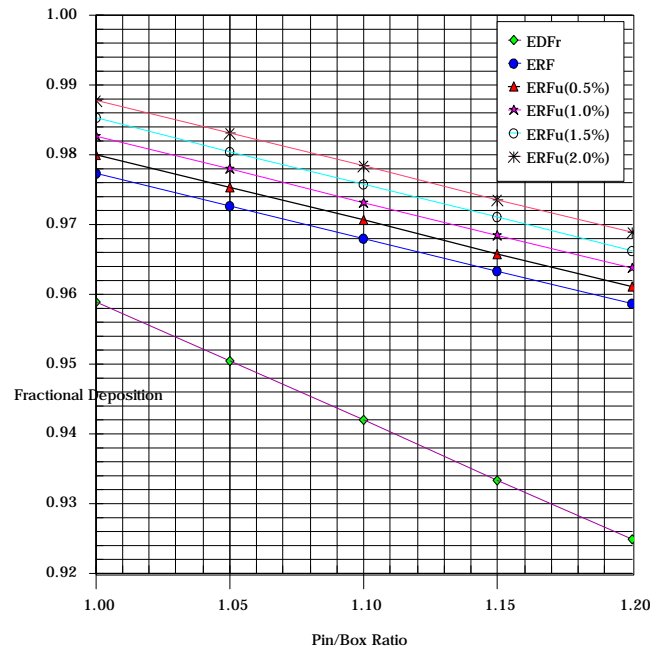
### 참고문헌

1. J. K. Seo et al., "Advanced Integral Reactor(SMART) for Nuclear Desalination,"IAEA-SM-347/40, Proceedings of Symposium on Desalination of Seawater with Nuclear Energy, Taejon, Korea, May 1997.
2. A. G. Croff, "ORIGEN2.1: Istope Generation and Depletion Code-Matrix Exponential Method," CCC-371, Radiation Safety Information Computational Center, Oak Ridge National Laboratory, 1991.
3. J. F. Briesmeister, "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code," Version 4B, LA-12625-M, LANL, March 1997.
4. J. A. Brown,"Energy Redistribution Factors for LOCA Voided Conditions,"A-GM-FE-0080, ABB-CE, Sep. 15, 1997.
5. 송재승, "SMART 안전해석을 위한 축방향 출력분포 자료 생산," SMART-CA-CA110-15, 1998.6.15.
6. R. E. MacFarlane and D. W. Muir, "The NJOY Nuclear Data Processing System, Ver. 91," LA-12740 -M, LANL, 1994.
7. R. Kinsey, "Data Formats and Procedures for Evaluated Nuclear Data File, ENDF," BNL-NCS-50496(ENDF102) 2nd Edition(ENDF/B-V), 1979.
8. 길충섭, "MCNP-4B용 핵자료," 한국원자력연구소, 1998-2-16.
9. P. F. Rose and C. L. Dunford, "ENDF-102, Data Formats and Procedures for Evaluated Nuclear Data File, ENDF-6," BNL-NCS-44945, 1990.
10. D. W. Stephen, "Energy Redistribution in 16x16 Fuel Assemblies," PE & D TASK-209070, PHD-75-62, Feb. 12, 1975.



A	4.95w/o U-235 24 $Al_2O_3$ - $B_4C$ Shim Rods
B	4.95w/o U-235 20 $Al_2O_3$ - $B_4C$ Shim Rods
C	4.95w/o U-235 24 $Al_2O_3$ - $B_4C$ Shim Rods + 4 $Gd_2O_3/UO_2$ (12w/o / 1.8w/o)
D	4.95w/o U-235 24 $Al_2O_3$ - $B_4C$ Shim Rods + 12 $Gd_2O_3/UO_2$ (12w/o / 1.8w/o)

그림 1. SMART OUT-IN 예비 노심 장전 모형



- [주] 1. EDFr : MCNP 계산에 의한 감마에너지 흡수율  
 2. ERF : MCNP 계산에 의한 에너지 재분포 인자  
 3. ERF<sub>(0.5%)</sub> : 0.5%의 보수성을 갖는 에너지 재분포 인자.

그림 2. LOCA시 기포 감속제 조건에서의 에너지 재분포 인자

표 1. LOCA 해석용 단기 축방향 출력분포

노심 높이(cm)	출력 분포
10	0.119
30	0.255
50	0.371
70	0.459
90	0.544
110	0.775
130	2.066
150	2.349
170	1.939
190	1.123

표 4. Type-C 핵연료 집합체의 정규화된 핵연료봉 출력 분포

0.000  
 0.954 0.947  
 0.332 0.938 0.981  
 0.000 1.005 0.996 0.000  
 1.044 0.976 0.000 1.044 1.071  
 1.084 1.026 0.991 1.082 1.119 0.000  
 0.000 1.066 1.025 0.000 1.078 1.025 0.988  
 1.063 0.987 0.000 1.010 0.978 0.000 0.946 0.993  
 1.039 1.008 0.957 0.992 0.995 0.951 0.990 1.034 1.070

표 2. Type-A 핵연료 집합체의 정규화된 핵연료봉 출력 분포

0.000  
 1.132 1.099  
 1.128 1.084 1.052  
 0.000 1.082 1.035 0.000  
 1.079 0.992 0.000 1.015 1.046  
 1.070 1.009 0.964 1.049 1.085 0.000  
 0.000 1.037 0.992 0.000 1.037 0.989 0.946  
 1.024 0.953 0.000 0.963 0.925 0.000 0.905 0.956  
 0.992 0.967 0.918 0.950 0.945 0.902 0.945 0.986 1.018

표 5. Type-Do 핵연료 집합체의 정규화된 핵연료봉 출력 분포

0.000  
 1.038 1.020  
 0.360 1.002 1.050  
 0.000 1.076 1.073 0.000  
 1.129 1.037 0.000 1.098 1.121  
 1.157 1.091 1.042 1.132 1.153 0.000  
 0.000 1.125 1.071 0.000 1.053 1.033 0.909  
 1.126 1.045 0.000 0.966 0.347 0.883 0.000 0.884  
 1.103 1.054 0.989 0.981 0.929 0.949 0.931 0.976 1.032

표 3. Type-B 핵연료 집합체의 정규화된 핵연료봉 출력 분포

0.000  
 1.124 1.077  
 1.102 1.054 1.025  
 0.000 1.054 1.011 0.000  
 1.050 0.965 0.000 1.006 1.044  
 1.043 0.986 0.948 1.045 1.097 0.000  
 0.000 1.015 0.981 0.000 1.084 1.067 0.985  
 1.018 0.940 0.000 0.988 1.012 0.986 0.916 0.000  
 0.979 0.951 0.910 0.968 0.999 0.987 0.941 0.898 0.937

표 6. Type-Di 핵연료 집합체의 정규화된 핵연료봉 출력 분포

0.000  
 0.860 0.916  
 0.393 0.896 0.933  
 0.000 0.877 0.868 0.000  
 0.922 0.934 0.000 0.919 1.059  
 0.950 0.982 0.955 0.969 1.133 0.000  
 0.000 0.955 0.903 0.000 0.998 1.167 1.082  
 1.034 1.035 0.000 0.914 0.427 1.064 0.000 1.139  
 1.172 1.153 1.112 1.102 1.102 1.170 1.185 1.271 1.361

표 7. 원자로 운전 정지후 100초 경과시 붕괴 에너지 감마 스펙트럼

Group No.	평균에너지 (MeV)	photons/s-watt
1	9.50E+00	3.46E-09
2	7.00E+00	5.71E+01
3	5.00E+00	1.52E+08
4	3.50E+00	4.50E+08
5	2.75E+00	9.71E+08
6	2.25E+00	2.43E+09
7	1.75E+00	4.63E+09
8	1.25E+00	1.19E+10
9	8.50E-01	2.21E+10
10	5.75E-01	2.01E+10
11	3.75E-01	1.14E+10
12	2.25E-01	1.42E+10
13	1.25E-01	7.01E+09
14	8.50E-02	6.08E+09
15	5.75E-02	7.92E+09
16	3.75E-02	8.95E+09
17	2.50E-02	1.02E+10
18	1.00E-02	3.80E+10
TOTAL		1.67E+11

표 8. Type-A 핵연료 집합체의 정규화된 감마 에너지 흡수율 분포

0.000  
**1.084** 1.058  
 1.074 1.046 1.030  
 0.000 1.043 1.023 0.000  
 1.042 1.007 0.000 1.018 0.999  
 1.028 1.003 0.990 1.024 1.039 0.000  
 0.000 1.010 0.998 0.000 1.016 0.996 0.966  
 1.002 0.976 0.000 0.984 0.967 0.000 0.954 0.972  
 0.992 0.982 0.962 0.965 0.964 0.955 0.968 0.988 0.999

표 9. Type-B 핵연료 집합체의 정규화된 감마 에너지 흡수율 분포

0.000  
 1.063 1.043  
 1.054 1.028 1.011  
 0.000 1.024 1.011 0.000  
 1.021 0.992 0.000 1.010 0.992  
 1.015 0.991 0.984 1.026 1.050 0.000  
 0.000 1.001 0.996 0.000 1.034 1.033 0.992  
 0.991 0.969 0.000 0.998 1.002 0.993 0.964 0.000  
 0.986 0.979 0.964 0.981 0.995 0.985 0.971 0.952 0.964

표 10. Type-C 핵연료 집합체의 정규화된 감마 에너지 흡수율 분포

0.000  
 0.934 0.933  
 1.356 0.931 0.964  
 0.000 0.974 0.982 0.000  
 0.992 0.970 0.000 1.007 0.997  
 1.017 0.991 0.986 1.027 **1.051** 0.000  
 0.000 1.015 1.010 0.000 1.031 1.019 0.991  
 1.018 0.988 0.000 1.003 0.990 0.000 0.977 0.996  
 1.004 0.995 0.978 0.988 0.986 0.979 0.993 1.012 1.030

표 11. Type-Do 핵연료 집합체의 정규화된 감마 에너지 흡수율 분포

0.000  
 0.967 0.961  
 1.393 0.960 0.992  
 0.000 1.001 1.007 0.000  
 1.023 0.996 0.000 1.020 1.004  
 1.042 1.008 0.993 1.027 1.038 0.000  
 0.000 1.025 1.005 0.000 0.986 0.977 0.924  
 1.032 0.996 0.000 0.951 1.360 0.911 0.000 0.920  
 1.012 0.998 0.965 0.944 0.918 0.917 0.923 0.950 0.972

표 12. Type-Di 핵연료 집합체의 정규화된 감마 에너지 흡수율 분포

0.000  
 0.846 0.841  
 1.232 0.841 0.864  
 0.000 0.853 0.855 0.000  
 0.884 0.891 0.000 0.903 0.954  
 0.906 0.918 0.915 0.938 1.027 0.000  
 0.000 0.924 0.915 0.000 0.976 1.079 1.070  
 0.982 0.981 0.000 0.944 1.457 1.043 0.000 1.126  
 1.056 1.042 1.023 1.031 1.040 1.092 1.131 1.186 1.228