

주요 핵분열 생성물의 중성자 공명상수 평가 (I)

Neutron Resonance Parameter Evaluation for Major Fission Product Nuclides (I)

장종화, 오수열
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

Said F. Mughabghab
Brookhaven National Laboratory
Upton, New York 11973, U.S.A.

요 약

사용후 핵연료 관련 임계도 분석에 중요한 핵분열 생성물중 19개 핵종을 선정하고, 이중 ^{99}Tc , ^{103}Rh , ^{143}Nd , ^{146}Nd , ^{149}Sm , ^{155}Gd 등 6 개 핵종의 공명상수를 평가하였다. 이를 위해 1981, 1984년도의 Mughabghab 중성자 핵자료집을 기본 자료로 하고 그 이후의 실측자료를 입수하여 사용하였다. 열중성자 영역에 대해서는 포획단면적과 간섭산란거리를 잘 재현할 수 있도록 구속공명을 설정하였다. 분리영역에 대한 공명상수로서, 공명폭의 경우 ^{99}Tc 를 제외하고는 최근 실측이 없으나 이전 측정 결과를 재평가하였고, 공명스핀에 대해서는 최근 측정 결과를 반영하였다. 한편 자유도 1인 Porter-Thomas 분포를 사용하여 분리영역의 공명상수를 분석하고 그 결과를 비분리 영역의 공명상수를 결정하는 데 사용하였다. 새로 평가한 공명자료 파일은 200 keV까지 유효하며, 열중성자 포획단면적, 산란특성, 공명적분을 다른 실측자료집과 비교하여 실측의 표준편차 이내에서 일치됨을 확인하였다.

Abstract

The neutron resonance parameters of the fission products are important for the criticality analysis dealing with spent fuel. We have selected major 19 nuclides among fission products and are presenting the interim result for 6 nuclides (^{99}Tc , ^{103}Rh , ^{143}Nd , ^{146}Nd , ^{149}Sm , and ^{155}Gd) for which the evaluation has been finished. The neutron cross section compilation by Mughabghab published in 1981 and 1984 was adopted as the reference data in this evaluation. Then we collected and reviewed recent measurements and reflected those in this evaluation. Also we redetermined the bound resonance parameters to reproduce the reference thermal absorption cross section and the bound coherent scattering length. There was no new measurement of resonance width except for ^{99}Tc . However we re-evaluated old resonance width data and used recent resonance spin data. For determining unresolved resonance parameters, the resonances in the resolved region were analysed by applying the Porter-Thomas distribution with degree of freedom 1. Newly evaluated data files are effective up to 200 keV and have been verified against the measured data compilation of the neutron capture cross section, the bound scattering length, and the capture resonance integral.

1. 서론

중성자 핵반응자료는 원자로의 설계와 안전성 해석에서 중요한 역할을 한다. 사용후 핵연료의 수송과 저장, 고 연소도 핵연료 노심설계, 장수명 핵종소멸 처리 등에 사용하는 핵분열 생성물의 핵자료의 정밀성은 근래에 더욱 중요하게 되었다.[1-6]

현재 ENDF/B-VI 평가핵자료집에 [7] 포함된 핵분열 생성물자료는 경수로와 고속로의 노심 설계 관점에서 중요한 핵종에 중점을 두고 평가 및 검증한 것이다. 한편, 노심 설계에서는 비교적 중요성이 떨어지지만 장기간의 핵연료 저장의 임계도와 선량 분석에 중요한 초우란원소와 장수명 핵분열 생성물 중에서 핵분열 생성물은 1973 년도에서 1984 년도 사이에 평가된 것이다. 그 이후 새로운 실측자료가 공개되었지만 이를 평가에 반영하지 않고 1980 년 초의 평가 결과를 지금까지 사용하고 있다.

본 연구에서는 사용후 핵연료의 임계도 분석에 중요한 장수명 핵분열생성물중 19개 핵종을 선정하여 공명상수를 평가한다. 이를 위해 주로 사용한 자료는 Mughabghab의 중성자 핵자료집이며 (이하 BNL-325로 통칭하겠음.) [8] 여기에는 H - Nd까지는 1981 년도, Pm - Fm 까지는 1984 년도 까지의 실측자료와 그 평균치가 잘 정리되어 있다. 1980 년도 이후의 실측자료는 별도로 조사하였으며 재 평가하였다. 또한 CRC handbook에는[9] 1996 년도까지의 실측 열단면적 및 산란진폭이 정리되어 있으므로 참고자료로 사용하였다.

2. 방법

공명 에너지의 간격이 충분히 넓어서 개별적인 공명으로 구별이 가능한 분리공명 영역의 단면적은 각각의 단위공명에 대해 Breit-Wigner 식을 따른다.

$$\begin{aligned}\sigma_{\gamma}(E) &= g\pi\lambda^2 \frac{\Gamma_n\Gamma_{\gamma}}{(E-E_0)^2 + \frac{1}{4}\Gamma^2} \\ &= 4\pi\lambda_0^2 \frac{g\Gamma_n\Gamma_{\gamma}}{\Gamma^2} \left(\frac{E_0}{E}\right)^{1/2} \frac{1}{1 + \left(\frac{2(E-E_0)}{\Gamma}\right)^2}\end{aligned} \quad (1)$$

여기서, 통계상수 g 는 포획핵의 기저스핀 I 와 공명스핀 J 에 의해 다음 식으로 결정된다.

$$g = \frac{2J+1}{2(2I+1)} \quad (2)$$

2.1. 열영역 단면적

열영역에서의 포획단면적의 변화는 (1) 식에서 처럼 중성자 속도(입사에너지의 제곱근)에 반비례한다. 포획단면적의 $1/v$ 법칙은 첫번째 공명의 에너지가 1 eV보다 충분히 높은 경우 성립한다.

또한, 중성자에너지 분포가 Maxwellian 일때의 평균 포획 단면적은 해당 Maxwellian 분포의 중성자에너지에서의 포획단면적과 같으므로 [10] 0.0253 eV 중성자에 대한 Maxwell 평균 포획단면적은 매우 잘 측정되어 있다. 그러나 중성자에너지가 1 eV 이하인 경우에는 열에너지에서의 $1/v$ 특성은 작아진다.

또한 (1)식의 누적 합계에 가장 큰 영향을 주는 낮은 에너지의 중성자상수는 실험적으로 상당한 신뢰도로 결정되어 있다. 이로부터 열에너지 단면적과 산란특성을 기술할 수 있어야 하나, 몇몇 핵종의 경우에는 옴의 에너지를 갖는 구속준위공명을 도입하여야 한다. 구속준위는 복합핵의 에너지 준위중 중성자 분리에너지이하에 존재하는 핵준위이다. 그러나 분리에너지를 기준으로 옴의 에너지를 가진 준위가 충분히 떨어져 있다면 열에너지 중성자에 미치는 영향은 매우 적으므로 무시할 수 있다. 그러나 구속준위가 약간 옴이거나 강도가 큰 경우에는 영향을 무시할 수 없으므로 구속준위공명을 도입한다. 구속준위공명상수는 실측된 포획단면적과 산란단면적을 잘 재현하도록 설정한다.

산란단면적 또는 간섭산란거리에 큰 영향을 미치는 핵의 포텐셜산란반경은 일반적으로 중성자 에너지 영역에 대한 투과실험을 분석하여 결정할 수 있다. 그러나 실측치가 없는 경우에는 유사 질량을 가진 핵종들의 추이(systematics)에 의해 설정한다.

^{143}Nd , ^{145}Nd 의 경우, 양의 중성자상수로 부터 결정된 포획단면적은 실측치보다 작으므로 구속준위의 도입이 필요하다. 기준이 되는 포획단면적과 산란단면적은 BNL-325 또는 Vertebyj의 [11] 실측치를 사용했으며 구속공명의 스펙은 열에너지에서의 포획감마선 강도분석에서 실험적으로 결정된 값을 사용했다.

^{99}Tc 과 ^{103}Rh 의 경우, 양의 중성자상수로 결정된 열중성자 포획단면적은 BNL-325와 근접하나 중성자 산란실험에 의해 결정된 간섭산란거리를 각각 BNL-325 또는 Koester의 [12] 실측치와 비교할 때 상당한 차이가 난다. 또 산란 단면적의 실측치가 있는 ^{145}Nd 의 경우 Vertebyj [11] 실측치와 비교할 때 차이가 난다. 산란특성의 차이를 줄이기 위하여 구속공명을 도입하였다. 핵의 포텐셜 산란반경은 ^{99}Tc , ^{145}Nd 의 경우에는 광학모형에서 결정하였으며, ^{103}Rh 의 경우에는 Ribon [13]의 산란 측정 결과를 사용하였다. 이러한 설정은 포획단면적의 $1/v$ 성질에 큰 영향없이 간섭산란거리를 증가시킬 수 있다.

^{149}Sm , ^{165}Gd 은 양의 중성자상수로 결정되는 포획단면적은 매우 작으므로 구속공명의 설정이 필수적이다. ^{149}Sm 구속공명의 스펙은 Dakowski의 [14] (n, α) 실측에서 결정한 값을 사용하였다. 또한 ^{149}Sm 의 첫번째 공명이 0.0923 eV에 있고 ^{165}Gd 의 첫 공명은 0.0268 eV에 있으므로 간섭산란진폭은 에너지에 따라 많이 변화한다. ^{149}Sm 의 경우, 29.45 - 92.74 meV구간에 대한 Word [15], ^{165}Gd 의 경우 Moeller [16]의 간섭산란거리 측정치와 비교할 때 본 연구에서 설정한 포텐셜산란반경, 구속공명상수는 적절한 것으로 판단된다.

2.2. 분리 공명상수

공명상수는 공명에너지 E_0 , 통계상수 g , 중성자폭 Γ_n , 방사폭 Γ_γ 와 전공명폭 Γ 에 의해 결정된다. 이중 통계상수의 결정을 위해서는 표적핵의 기저 준위 스핀 I 와 공명에서의 스핀 J 를 알아야 한다. 핵분열 생성물 대역의 핵종에서는 수십 keV 이하의 중성자에 의한 반응은 탄성 산란과 포획반응이고 극히 작은 α 방출 반응이 있다. 따라서 α 방출폭을 무시하면 전공명폭은 $\Gamma = \Gamma_n + \Gamma_\gamma$ 로 나타낼 수 있다.

핵분열 생성물의 핵자로 실측은 TOF 방법에 의한 포획 단면적 측정이 대부분이다. 이 방법은 포획면적 A (Capture Area)를 결정하게 된다.[17]

$$A = g \frac{\Gamma_\gamma \Gamma_n}{\Gamma}$$

이 식에는 3 개의 미지수가 나타나며 이 값을 결정하려면 식 (1)로 측정치를 fitting하여 값을 구할 수 있다. 그러나 이러한 방법은 에너지 해상도가 좋은 낮은 에너지에서만 가능하며 이 경우에도 여러 두께의 시료로 투과단면적을 동시에 측정하여야 Γ_n 과 Γ_γ 를 동시에 결정할 수 있다.

포획단면적의 에너지변화는 공명에너지 근처에서 거의 대칭적이므로 공명의 준위(s-wave or p-wave)를 결정할 수 없다. 산란단면적의 에너지변화는 s-wave 공명인 경우에 공명에너지를 중심으로 낮은 에너지에서의 단면적이 매우 작아지므로 공명의 준위를 결정하려면 여러 두께의 시료에 의한 투과단면적을 측정하고 그 모양을 분석하여야 한다.

포획단면적을 측정하기 위해 스핀이 편광된 중성자빔에 의한 포획감마선의 에너지를 분석한다면 공명의 스핀 J 를 직접 결정할 수 있다. 이러한 실험은 주로 러시아의 Dubna에서 행해 졌다.

공명의 스핀 J 가 실측에 의하여 알려지지 않은 높은 에너지 영역에서는 그 확률이 $2J + 1$ (또는 통계상수 g) 에 비례하도록 스핀 J 를 지정하였다.

^{149}Sm 에 대해서는 Georgiev[18], ^{155}Sm 에 대해서는 Belyaev[19]가 산란 및 포획감마 다중성에 의해 각각 16 - 273 eV 구간, 6 - 183 eV 구간에서의 포획폭과 스핀 결정 실측을 하였다. 이 구간에 대해서는 BNL-325의 권고값에 스핀값과 포획폭을 반영하였다.

^{99}Tc 에 대해 Saclay의 Raepsaet와[20] Gunsing은[21] Geel의 GELINA를 사용한 측정을 하여 포획 실험으로 33 개의 공명과 투과 실험으로 69 개의 공명을 측정하였다. 또한 같은 그룹에서 Petten의 High Flux Reactor를 이용하여 열 단면적을 5 % 이내의 오차로 측정하고 있으나[22] 3 가지의 결과를 종합한 최종 결과는 아직 발표되지 않았다. 본 연구에서는 우선 BNL-325와 Saclay의 값을 가중 평균하여 사용하였다.

Macklin과[23] Allen에[24] 의하면 1981 년 이전에 ORELA를 이용한 공명상수 실측결과는 처리

소프트웨어의 오류때문에 보정을 하여야한다. ^{143}Nd , ^{146}Nd 의 경우 BNL-325에 수록된 Musgrove의 [25] 포획면적은 ORELA의 장치를 사용한 것이므로 Allen의 보정인자 0.9507을 사용하여 capture area를 줄인 후 포획폭 Γ_c 를 재계산하였다. ^{146}Nd 에 사용한 Rohr[26]의 포획면적은 다른 측정결과와[27, 28, 29] 비교할 때 20 % 낮게 측정되었다. 따라서, Rohr가 보고한 포획면적을 20 % 증가시켜서 포획폭을 재 계산하였다. ^{143}Nd 에서는 Cauvin과[30] Rohr[26], ^{145}Nd 는 Cauvin과[30] Stolovy의[31] 포획감마 측정에 의한 스펙 실측치를 사용하였다.

^{103}Rh 의 경우, 4140 eV 까지의 Ribon[13]의 투과실험을 2644 - 4163 eV 구간의 Macklin[32]의 포획실험과 비교해 보면 에너지 scale이 잘못되어 있음을 알수 있다. 에너지를 교정한 Ribon의 자료와 989 eV 이하에 대한 Carlson의[33] 포획자료를 사용하여 분리 공명상수를 결정하였다.

2.3. 비분리 공명 영역

비분리 공명 영역은 분리공명영역의 평균 상수를 사용하여 기술하며, 이러한 평균 상수는 분리 공명 영역의 상수로부터 구할 수 있다. Reduced neutron width는 자유도 1인 Porter-Thomas 모형에 따른다는 가정아래 평균 공명간격과 공명강도(strength function)를 추정한다.[34]

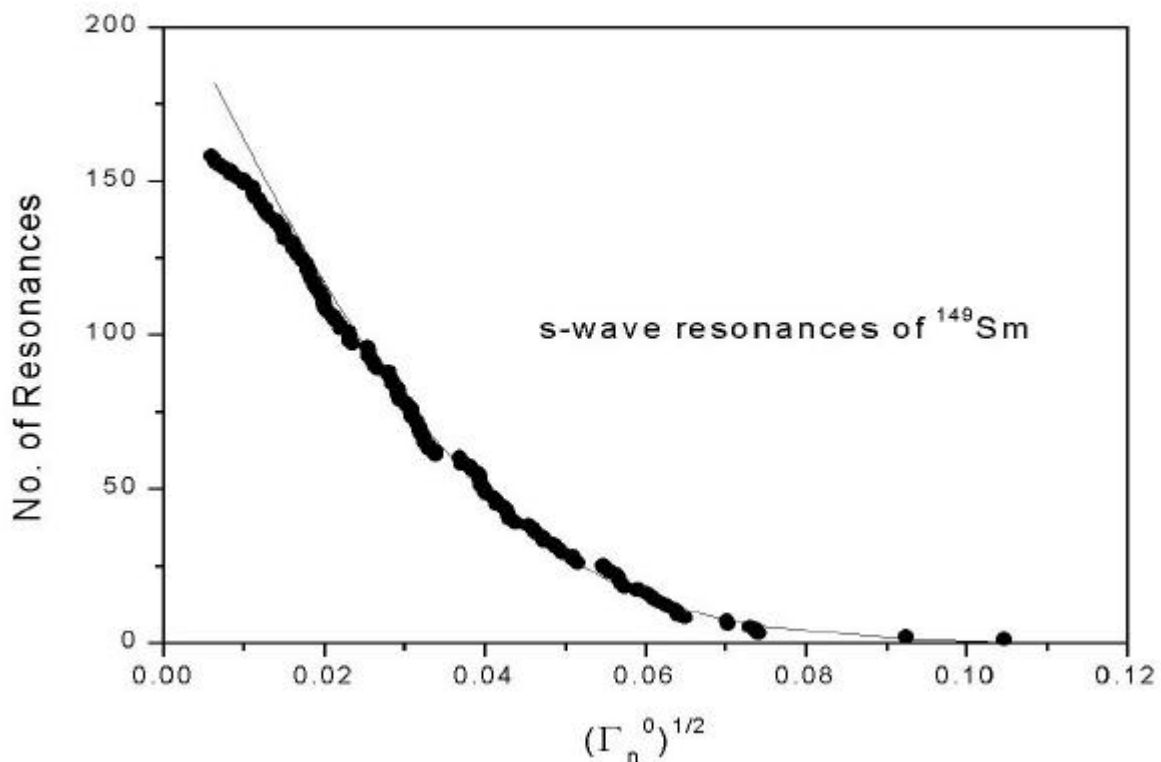


그림 1. ^{149}Sm 의 s-wave 공명 분포와 Porter-Thomas fitting.

$$P(x)dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} x^{-1/2} e^{-x/2} dx$$

$$\text{여기서, } x = \frac{gI_{\#}^0}{\langle gI_{\#}^0 \rangle}$$

그림 1은 ^{149}Sm 의 축소중성자폭(reduced neutron width)을 x-축의 값보다 큰 값을 갖는 s-wave 공명의 개수를 보인 것이다. 이 그림에서 실선은 Porter-Thomas 함수로 최적 근사한 곡선이다. 중성자폭이 작은 공명은 실측되기 어려우므로 어느 정도 이상의 중성자폭에 대한 자료만으로 최적의 상수를 구한다. (그림의 예에서는 0.4 meV 이상) 이 상수는 분리공명영역내의 공명의 개수와 평균 축소중성자폭이다. 표 1에는 이와 같은 방법으로 구한 s-wave의 평균공명간격(분리공명구간 / 공명의 개수)과 s-wave 공명강도(평균축소중성자폭 / 평균공명폭)를 보여준다.

표 1 핵종별 평균 s-wave 공명상수

핵종	평균공명간격 (eV)				평균공명강도 ($\times 10^{-4}$)			
	BNL-325 ^{a)}	ENDF/B-6	JENDL-3	Present	BNL-325	ENDF/B-6	JENDL-3	Present
^{99}Tc	10.7 ± 1.8	12.1	20.6	16.6 ± 1.1	0.45 ± 0.05	0.43	0.54	0.42 ± 0.02
^{103}Rh	16 ± 1	10.1	32.1	27.7 ± 0.8	0.53 ± 0.05	0.43	0.445	0.57 ± 0.01
^{143}Nd	45 ± 4	32.5	36.4	39.9 ± 0.7	3.2 ± 0.3	3.5	3.4	3.62 ± 0.05
^{146}Nd	22 ± 2	17.3	17.2	17.8 ± 0.4	4.4 ± 0.4	4.0	5.2	4.16 ± 0.04
^{149}Sm	2.2 ± 2	3.46	1.54	2.43 ± 0.08	4.6 ± 0.6	3.2	4.6	4.53 ± 0.07
^{166}Gd	1.8 ± 0.2	1.27	0.86	1.45 ± 0.04	2.0 ± 0.2	3.08	2.0	2.13 ± 0.04

*) 참고문헌 8

표 1에서 ENDF/B-VI는 본 연구결과, BNL-325, JENDL-3.2에 비하여 상당히 차이가 난다. ENDF/B-6의 평가가 오래된 것임을 고려하면, JENDL-3.2에서는 ^{99}Tc 과 ^{146}Nd , 본 연구결과에서는 ^{103}Rh 의 차이가 심함을 알 수 있다. 분리공명영역에서 결정된 s-wave 평균 상수는 비 분리공명영역에 그대로 적용하였다.

같은 방법으로 관측된 p-wave 공명이 있을 경우 p-wave 평균 상수도 구할 수 있으며, 구해진 평균 공명간격은 p-wave 공명강도가 충분히 큰 ^{99}Tc , ^{103}Rh 의 경우에 Porter-Thomas 분석을 하여 구하면 s-wave 평균공명간격의 1/3 정도의 값을 얻게 된다.

KFK의 42개의 결정을 사용한 $4\pi \text{BaF}_2$ 계측기를 이용한 포획단면적 측정장치는 1990 년에 제작되어 3 - 225 keV 에너지 영역에서 1-2 % 정도의 측정 오차를 가지고 있다고 한다.[35] 따라서 이번 평가에서 비분리 공명영역의 포획단면적 실측치로는 대부분 KFK 결과를 이용하였다.

^{103}Rh , ^{146}Nd , ^{149}Sm 에 대해서는 Porter-Thomas 분석에서 결정한 s-wave, p-wave strength function 을 사용하였으며 Wisshak의[36, 37, 38] 실측치와 비교하여 만족스러운 일치를 얻었다.

^{166}Gd 의 경우에는 측정된 p-wave 공명이 없으므로 Wisshak[39]의 실측치를 가장 잘 재현할 수 있도록 p-wave strength function을 조정하였다.

^{99}Tc 에 대해서 3 - 800 keV 구간의 Macklin[40] 포획단면적 실측치를 재현하기 위하여 비분리 공명영역의 평균 p-wave strength function은 분리공명영역에서 Porter-Thomas 모형으로 구한 값 $8.25(\pm 0.86) \times 10^{-4}$ 보다 줄인 5.0×10^{-4} 으로 결정했다.

^{143}Nd 의 경우에는 3 - 225 keV 구간의 Wisshak[37] 포획단면적 실측치를 재현하기 위하여 비분리 공명영역의 평균 p-wave strength function을 Porter-Thomas 모형으로 구한 값 $0.45(\pm 0.8) \times 10^{-4}$ 보다 높은 0.8×10^{-4} 으로 결정했다.

3. 결과

표 2 핵종별 단면적 요약

핵종	Thermal Cross Section(barns)			Coherent Bound Scattering Length (fm)			Capture Resonance Integral (barns)		
	CRC98[9]	ENDF/B-6	Present	CRC98	ENDF/B-6	Present	CRC98	ENDF/B-6	Present
^{99}Tc	20 ± 1^j	19.5	20.0	6.8 ± 0.3	7.38	6.75	340 ± 20^j	351	312
^{103}Rh	145 ± 2^j	146	145	5.88 ± 0.04	6.13	5.88	1100 ± 50	1035	1037
^{143}Nd	330 ± 10	323	325	-	16.7	16.7	128 ± 30	131	131
^{146}Nd	47 ± 6	42	50	-	9.9	8.85	260 ± 40	231	246
^{149}Sm	40100 ± 600	39291	40140	19.08^{*j}	24.2^{*j}	19.08^{*j}	3310 ± 500	3265	3424
^{166}Gd	61000 ± 1000	60892	60882	13.8^{*j}	12.7^{*j}	14.0^{*j}	1540 ± 100	1559	1557

* Mughabghab[8]

+ Value at 0.08 eV

Lynn and Seeger[41]

본 연구에서 재평가한 핵종의 자료를 사용하여 열중성자 포획단면적, 열중성자 산란특성, 포획 공명적분을 계산하여 표 2에 보여준다. 비교자료로는 실측치를 주로 편집한 Holden의[9] 자료를 사용하였다.(표의 CRC98) 열중성자 포획단면적은 0.0253 eV에서의 값이며 ENDF/B-VI와 본 연구 결과 모두 기준치와 표준편차내로 일치하며 본 결과가 약간 개선되었다. 그러나 산란단면적과 관련있는 간섭산란거리는 본 연구결과가 실험치와 더 가깝다. 이러한 경향은 구속공명상수를 설정할 때, 전통적인 방법에서는 단지 열중성자 단면적을 재현하도록 설정하였는데 비해 본 연구에서는 실측된 간섭산란거리도 재현되도록 하였기 때문이다. 이 결과는 산란 단면적과 전 단면적의 정확성에 기여한다. 포획공명적분은 ^{99}Tc 와 ^{103}Rh 의 경우에는 실험치와의 편차가 크다. 다른 핵종의 경우에는 ENDF/B-VI 보다 약간 개선된 결과를 보인다.

본 연구결과 저에너지 영역의 산란단면적을 상당히 개선하였으므로 고에너지 영역에 대한 평가가 완료되는 대로 기존 ENDF/B-VI를 대체할 예정이다. 그러나, ^{99}Tc 은 Saclay의 실험결과의 최종 분석을 입수하는대로 재평가할 것이다.

알 림

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업에 의한 지원으로 BNL과 공동연구로 수행되었음.

참고 문헌

1. Koh, D.J. et al., "Analysis of the Nuclear Subcriticality for the High Density Spent Fuel Storage at PWR Plants," *Proc. Korean Nucl. Soc. Spring Mtg.*, Suwon, Korea, May 1998, p.470.
2. Koh, D.J. et al., "Parameter Study for Optimal PWR Spent Fuel Shipping Cask," *Proc. Korean Nucl. Soc. Autumn Mtg.*, Seoul, Korea, Oct. 1998, p.308.
3. Kim, J.S. et al., "Correlations between Zirconium Isotopes and Burnup Parameters in PWR Spent Nuclear Fuels," *ibid.* 1, p.551.
4. Kim, Jung Suk, "Analysis of the Irradiated Nuclear Fuel Using the Heavy Atom and Neodymium Isotope Correlations with Burnup," *J. Korean Nucl. Soc.* 29(4), 327, 1997.
5. 박형종 등, "감마선 방출 핵종비를 이용한 PWR 사용후핵연료의 연소도, 냉각시간 및 초기 농축도 동시 결정," '98 추계 학술발표회 논문집, 한국원자력학회, p.312.
6. Lee, H.J. et al., "Development of Evaluation Code for Source Term at RCS of Nuclear Power Plant in Korea," *ibid.* 2, p.334.
7. Cross Section Evaluation Working Group, "ENDF/B-VI Summary Documentation," BNL-NCS-17541 (ENDF-201), edited by P.F. Rose, National Nuclear Data Center, BNL, Upton, NY, USA (1991)
8. Mughabghab, S.F. et al., "Neutron Cross Sections, Volume 1 Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Sections," Part A (Z=1-60), 1981, and Part B (Z=61-100), 1984, Academic Press.
9. Holden, N.E., "Neutron Scattering and Absorption Properties," in "CRC Handbook of Chemistry and Physics," 78th Ed., D.R. Lide and H.P.R. Frederikse Ed., CRC Press, 1998.
10. 예를 들어, Larmarsh, J.R., "Introduction to Nuclear Engineering," Addison-Wesley Pub., 1975.
11. Vertebnyj, V.P. et al., "The Neutron Cross Sections of Isotopes of Neodymium," *Yad. Fysik* 17, 37, 1974.
12. Koester, L. et al., "Neutron Scattering Lengths: A Survey of Experimental Data and Methods," *Atomic Data and Nucl. Data Tables* 49, 65, 1991.
13. Ribon, P. et al., "Proprietes Statistiques des Parametres des Niveaux de ^{104}Rh ," *Nucl. Phys. A*143, 130, 1970.
14. Dakowski, M. et al., "On the Spin Assignment of Neutron Resonances in ^{149}Sm Using (n, α) Reaction," *Nucl. Phys. A*97, 187, 1967.
15. Word, E. and Werner, S.A., "Phonon density-of-states effect in resonant neutron interferometry: Theory and measurement for isotropically pure ^{149}Sm ," *Phys. Rev. B* 26, 4190, 1982.
16. Moeller, H.J. et al., "Low-Energy Neutron Resonances in Erbium and Gadolinium," *Nucl. Sci. Eng.* 8, 183, 1960.

17. Harvey, J.A. (ed.), "Experimental Neutron Resonance Spectroscopy," Academic Press, 1970.
18. Georgiev, G.P. et al., "Determination of Neutron Resonance Parameters in ^{149}Sm by the γ -Multiplicity Spectrometry Method," JINR-P3-92-346, 1992.
19. Belyaev, F.N. et al., "Study of $^{146,147}\text{Gd}$ resonances by γ ray multiplicity," Sov. J. Nucl. Phys. **52**, 401, 1990.
20. Raepsaet, C. et al., "Measurement of the Neutron Capture Cross Section of ^{99}Tc in the Energy Range from 3 to 400 eV," *Proc. Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, Italy, May 19-24, 1997*, p.1289.
21. Gunsing, F. et al., "Measurement of the Neutron Total Cross Section of ^{99}Tc in the Energy Range from 3 to 600 eV," *ibid.* **20**, p.1293.
22. Stecher-Rasmussen, F. et al., "The Thermal Neutron Capture Cross Section of ^{99}Tc ," *ibid.* **20**, p.1297.
23. Macklin, R.L. and Winters, R.R., "Stable Isotope Capture Cross Sections from the Oak Ridge Electron Linear Accelerator," Nucl. Sci. Eng. **78**, 110, 1981.
24. Allen, B.J. et al., "Stable Isotope Capture Cross Sections from the Oak Ridge Electron Linear Accelerator- Part II," Nucl. Sci. Eng. **82**, 230, 1982.
25. Musgrove, A.R. de L. et al., "Non-statistical Effects in the Radiative Capture Cross Sections of the Neodymium Isotopes," AAEC/E401, 1977.
26. Rohr, G. et al., "Neutron Capture and γ -Ray Spectra Measurements in Resolved Resonances for the Odd Nd-isotopes," *Proc. 3rd Conf. Neutron Cross Sections and Technology, March 15-17, Knoxville, 1971*, p.743.
27. Tellier, H., "Proprietes des Niveaux Induits par les Neutrons de Resonance dans les Isotopes Stables du Neodyme," CEA-N-1459, 1971.
28. Karzhavina, E.N. et al., "Neutron Resonances of Nd Isotopes," Sov. J. Nucl. Phys. **8**, 371, 1969.
29. Anufriev, V.A. et al., "Measurement of the Total Neutron Cross Section of ^{146}Nd ," Atom. Energiya **47**, 269, 1979.
30. Cauvin, B. et al., "Spin Assignments from Capture Gamma-Rays and Scattering Measurements," *ibid.* **26**, p.785.
31. Stolovy, A. et al., "Neutron-Resonance Spin Determination in Nd^{143} and Nd^{146} from Capture Gamma-Ray Measurements," Phys. Rev. C **5**, 2030, 1972.
32. Macklin, R.L. and Halperin, J., " $^{100,101,102,104}\text{Ru}(n,\gamma)$ and $^{103}\text{Rh}(n,\gamma)$ Cross Sections Above 2.6 keV," Nucl. Sci. Eng. **73**, 174, 1980.
33. Carlson, A.D. and Fricke, M.P., "Neutron Cross-Section Research: Final Report," UC-34, Gulf Radiation Tech., 1971.
34. Pandita, A. and Agrawal, H.M., "Statistical Analysis of s -Wave Neutron Reduced Widths," J. Phy. Soc. Japan, **61**(10), 3524, 1992.
35. Wisshak, K. et al., "The Karlsruhe 4π Barium Fluoride Detector," Nucl. Instr. Meth. **A292**, 595, 1990.
36. Wisshak, K. et al., "Measurements of keV neutron capture cross sections with a 4π barium fluoride detector: Examples of ^{93}Nb , ^{103}Rh , and ^{181}Ta ," Phys. Rev. C **42**, 1731, 1990.
37. Wisshak, K. et al., "Stellar neutron capture cross sections of the Nd isotopes," Phys. Rev. C **57**, 391, 1998.
38. Wisshak, K. et al., "Neutron capture in $^{148,150}\text{Sm}$: A sensitive probe of the s -process neutron density," Phys. Rev. C **48**, 1401, 1993.
39. Wisshak, K. et al., "Stellar neutron capture cross sections of the Gd isotopes," Phys. Rev. C **52**, 2762, 1995.
40. Macklin, R.L., "Technetium-99 Neutron Capture Cross Section," Nucl. Sci. Eng. **81**, 520,

1982.

41. Lynn, J.E. and Seeger, P.A., "Resonance Effects in Neutron Scattering Lengths of Rare-Earth Nuclides," *Atomic Data and Nucl. Data Tables* 44, 191, 1990.