

치료용 동위원소 P-32 생산을 위한 핵자료 Library 비교 평가

Comparison and Evaluation of Nuclear Data Library for Production of Therapeutic Radioisotope P-32

김석권, 최희동

서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

요 약

최근 의료 분야의 진단과 치료 영역에서 방사성동위원소 활용이 증대되고 있다. 또한, 기존의 진단용 RI 생산 위주에서 치료용 생산으로 그 영역이 확대되고 있는 추세에 있다. 따라서, 본 연구에서는 치료용 RI 최적 생산에 필요한 핵자료의 정확도와 완전성을 향상시키는 작업을 수행하고 있다. 여기에서는 $P-31(n,\gamma)P-32$ 단면적을 중심으로 각 단면적 library를 비교하고, 또한 decay library의 현황을 확인하는 연구를 수행하였다.

Abstract

Recently, the diagnostic and therapeutic applications of radioisotopes have been increased, and the production of therapeutic RI grows largely. The works for improving of the accuracy and completeness of the data are performed for the optimum production of therapeutic RI. In this study, the nuclear data are compared and reviewed for the decay data and production cross sections of P-32.

1. 서 론

최근, 핵의학의 치료 응용 분야에서 방사성동위원소의 이용 수요가 늘어나고 있으며, 핵의학의 여타 분야로도 이용이 확대되고 있다. 그러나, 기존의 의료용 응용이 진단 분야에 집중되어 왔기 때문에 치료용 핵종 생산을 위한 핵자료 확보가 아직은 소규모이고, 핵자료 분석에 있어서도 상대적으로 부족한 실정이다.

치료용 RI 핵종 생산을 위한 다양한 연구를 수행중인 연구 그룹은 독일 Forschungszentrum, 미국 LANL의 Isotope Production Facility, 헝가리 ATOMKI의 Charged Particle Nuclear Data Group 등이 있다. 하전입자를 이용한 진단용 RI 핵종 생산에 필요한 단면적에 대한 연구는

IAEA-CRP의 일환으로 수행된 바 있다[1]. 현재는 핵의학에서의 치료용 핵종 생산에 필요한 핵자료 관련 연구가 본 연구진이 참여하는 IAEA-CRP로 수행되고 있다[2]. 이 논문에서는 P-32 생산과 관련된 핵자료 연구로서 P-32 decay data 및 P-31(n,ψ)P-32 단면적 확보와 관련된 연구를 수행하였다.

2. 단면적 Library

단면적 library를 상호 평가하기 위해서 ENDF/B-VI, JEF-2, JENDL-3, BROND-2, CENDL-2 등의 핵자료 library로부터 P-31(n,ψ)P-32 단면적을 추출하였다[3]. Resonance parameter는 Mughabghab[4]과 Macklin[5]의 표를 참조하였다. 이 parameter는 실험적으로 측정된 단면적을 비선형 최소자승법으로 fitting한 것이다. JEF와 JENDL library에서는 단면적 결정에 이 parameter를 사용하였다. 각 library에서 추출한 열중성자 포획 단면적 값과 resonance integral 자료를 표 1에 나타내었으며, 일부 resonance integral 값은 JEF 보고서[6]에서 인용하였다. 여기서 resonance integral 값은 0.5 eV에서 500 keV 영역까지 계산하였다. 각 library들의 resonance integral 값은 Mughabghab의 0.085 ± 0.010 b에 근사한 값을 제시하고 있다. 이것은 각 library에서 채택한 Mughabghab의 parameter가 같기 때문이다.

그림 1은 중성자 포획 단면적을 각 library와 EXFOR[7]에서 추출해서 비교한 것이다. EXFOR 단면적 값을 variance-weighting 방법으로 평균한 값은 0.172 ± 0.004 b이고, Mughabghab 등이 제시한 값과 잘 일치한다. 최근의 단면적 값으로는 PGAA database [8]에서 제시하는 0.167 ± 0.005 b이고, Mughabghab의 결과와는 오차 범위 내에서 잘 일치하는 경향을 보인다. 본 연구진[9]에 의해서 구한 단면적 값 0.166 ± 0.002 b도 그림에 표시하였다.

그림 2는 단면적 값을 에너지 영역 10^{-4} eV ~ 20 MeV에서 나타낸 것이다. JENDL library는 Mughabghab[4]과 Macklin[5]의 parameter를 이용하여 resonance 영역의 단면적을 모두 제시하였다. 그러나, ENDF에서는 resonance 구조를 제시하지 않았다. resonance 이상의 고에너지 영역에서는 실험 data의 부족으로 정확한 단면적 결정에 어려움이 있다. 현재 핵자료 평가 및 계산 code인 EMPIRE[10]를 이용하여 이론적인 단면적 계산을 수행 중이며, 이를 바탕으로 전체 에너지 영역에서의 단면적 값을 제시할 것이다.

3. Decay Data Library

각 핵종의 decay data library로는 ENSDF(Evaluated Nuclear Structure Data File, IAEA), MIRD(Medical Internal Radiation Dose, IAEA), NuDat(Nuclear Data, IAEA), Table of Isotopes[11] 등을 들 수 있다. 표 2에서는 위의 각 library에서 추출한 자료 중에서 P-32의 반감기, Q-value, β -평균에너지 등을 제시하였다. 표에서 알 수 있듯이 각 library에서 얻은 자료들이 대부분 일치하고 있다. 이것은 모든 library가 기본적으로 ENSDF의 자료를 기반으로 해서 각 library의 특성에 맞는 database를 만들었기 때문이다. 그러나, 기본적으로 각 library의 특성이 다

르기 때문에 원하는 자료를 얻기 위해서 개별 library의 분석이 필요하다.

의료용의 RI 이용에 필수적인 선량률 계산을 위해서 decay β -스펙트럼 분석이 필요하다. ENSDF library에서 반감기, 붕괴 형식, 붕괴률, 방출 에너지 등의 기본 parameter를 추출하여 RADLST[12], RADAR[13] 등의 code를 이용하여 스펙트럼을 계산한다. RADAR는 선량 평가를 위한 database로서 BNL의 핵자료를 사용하였고, 선량변환인자(dose conversion factors) 계산을 위해서 만들어진 것이다. RADLST는 기본적으로 ENSDF에서 decay data를 추출하고, β -스펙트럼 및 Bremsstrahlung 스펙트럼을 계산하는 code이다. 그림 3에 각각의 code를 이용한 스펙트럼 계산 결과이다. 실선은 RADLST를 이용한 결과이고, 점선은 RADAR를 이용한 것이다. RADLST의 경우 에너지 구간을 log-scale로 나누었고, RADAR는 linear-scale로 계산하였다. 그림에서 파선은 RADAR의 결과를 scale을 바꾸어 두 결과를 비교한 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 두 code가 ENSDF library를 공유함으로써 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 각각의 code에서는 스펙트럼 계산 결과를 이용하여 최종적으로 선량변환인자를 계산하고 있다. RADLST에서 계산한 연조직(tissue)에서의 흡수선량인자는 $1.48 [g \cdot \text{rad}/\mu\text{Ci} \cdot \text{h}]$ 이다.

4. 결 론

핵의학에서 치료용 핵종으로 사용되는 P-32의 생산과 관련된 핵자료의 현황을 살펴보았다. 열중성자 포획단면적의 경우 Mughabghab의 자료와 최근의 여러 연구들이 잘 일치하는 값을 보인다. 또한 resonance 영역의 경우에서도 JENDL 등의 library가 실험을 바탕으로한 resonance parameter를 잘 반영하고 있다. 현재 고에너지 영역에서의 단면적을 기존의 값을 평가하기 위해 계산을 수행중이며, 이를 바탕으로 전체 에너지 영역에서의 P-31(n, γ)P-32 단면적을 최종적으로 확증할 수 있을 것이다. P-32의 decay data의 경우에는 각 library들의 상호 의존성을 확인하였고, 핵의학 적용시의 선량률 계산에 필수적인 β -decay 스펙트럼 계산 방법을 제시하였다.

참고문헌

1. IAEA Nuclear Data Centre, "Charged-particle cross section database for medical radioisotope production : Diagnostic radioisotopes and monitor reactions", IAEA-TECDOC-1211, IAEA NDS, 2001.
2. IAEA Nuclear Data Centre, "1st IAEA Research Co-ordination Meeting on Nuclear Data for the Production of Therapeutic Radionuclides", INDC(NDS)-444, IAEA NDS, 2003.
3. IAEA Evaluated nuclear data files W3 retrieval system, "http://www-nds.iaea.or.at/endl/endfframe.html"
4. S.F. Mughabghab, M. Divadeenam and N.E. Holden, "Neutron Cross Sections, Vol. 1: Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Sections, Part A", Academic Press, New York, 1981.

5. R.L. Macklin and S.F. Mughabghab, "Neutron capture by ^{31}P ", Phys. Rev. C32 (1985) 379.
6. OECD Nuclear Energy Agency, "Table of Simple Integral Neutron Cross Section Data from JEF-2.2, ENDF/B-VI, JENDL-3.2, BROND-2 and CENDL-2", JEF Report 14, OECD NEA, Paris, 1994.
7. IAEA Nuclear Data Centre, "EXFOR+CINDA Database and Retrieval System, Version 1.10, March 2003 [CD-ROM]", IAEA NDS, Vienna, 2003.
8. IAEA coordinated research project for development of a database for prompt gamma-ray neutron activation analysis: Index to PGAA data, "<http://ie.lbl.gov/pgaadatabase/pgaa.htm>"
9. 서울대학교 원자핵공학과 응용핵물리연구실, 2003 연례보고서, (2004) 3.
10. M. Herman, "EMPIRE-II: statistical model code for nuclear reaction calculations(2.18 Mondovi)", IAEA, Vienna, Austria, 2002.
11. R.B. Firestone, V.S. Shirley (Eds.), "Table of Isotopes", 8th ed., John Wiley & Sons, New York, 1996.
12. T.W. Burrows, "The Program RADLST", BNL-NCS-52142, BNL, 1988.
13. M.G. Stabin and L. da Luz, "Decay Data for Internal and External Dose Assessment", Health Phys. 83 (2002) 471.

Table 1. P-31(n, ν)P-32 cross section and resonance integral.

Library	σ_r (2200 m/s) [b]	Resonance integral [b]	Resonance region ^b	Fast cross section ^a [b]	
				14 MeV	Fission average ^c
Mughabghab[4] and Macklin[5]	0.172(6)	0.085(10)	Exp.	–	–
ENDF/B-VI	0.1991	0.1452 ^a	–	0.3000×10^{-3}	0.1473×10^{-2}
JEF-2	0.1664 ^a	0.07569 ^a	Eval.	0.9895×10^{-5}	0.1012×10^{-2}
JENDL-3	0.166	0.081	Eval.	0.9895×10^{-5}	0.1012×10^{-2}
BROND-2	0.181	0.087	Eval.	0.3000×10^{-3}	0.1205×10^{-2}
CENDL-2	0.1741	0.06071 ^a	Eval.	0.1849×10^{-3}	0.1423×10^{-2}

^a JEF Report 14[6].

^b Exp. : experimental data parameterized,
Eval. : evaluated cross sections in resonance region.

^c Fission spectrum from Cf-252.

Table 2. Decay data library and β^- -decay data of P-32.

Library	$T_{1/2}$ [days]	Q_{β^-} [keV]	E_{ave} [keV]	Yield [(100 Bq · s) ⁻¹]	Update
MIRD	14.262()	1710.6()	694.9()	100()	2001. 3.
ENSDF	14.262(14)	1710.66(21)	694.9(3)	100()	2001. 3.
NuDat	14.262(14)	1710.63(21)	694.9(3)	100()	
EAF ^a (UKPADD) ^b	14.270(40)	–	692.92()	100()	
TOI	14.262()	1710.6()	–	100()	

^a European Activation File : EAF-2003 decay data library

^b United Kingdom for the production of the Activation Product Data Library

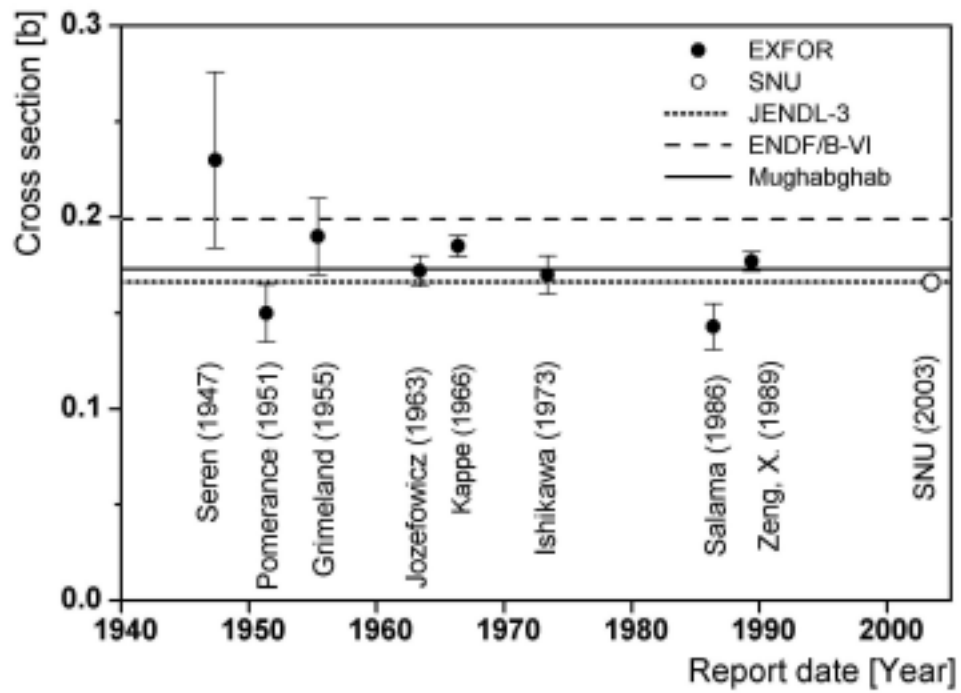


Fig. 1. Thermal neutron capture cross sections of P-31. Solid circles are EXFOR[7] data and open circle is SNU cross section[9].

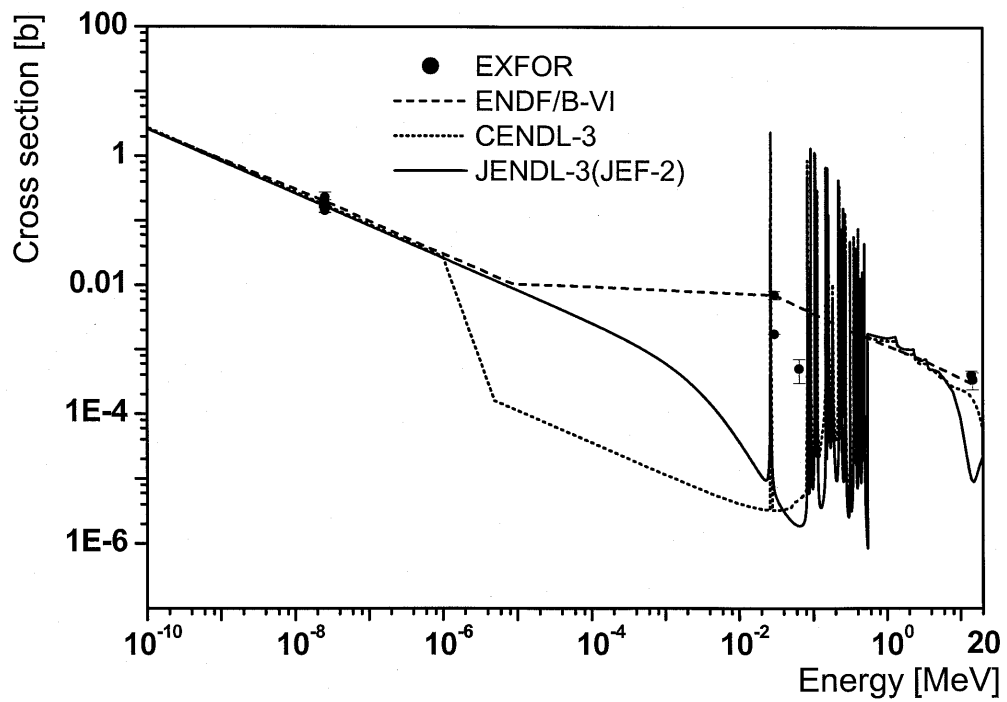


Fig. 2. Neutron capture cross sections of P-31. Solid circles are EXFOR data[7] and lines are taken from the evaluated data libraries [3].

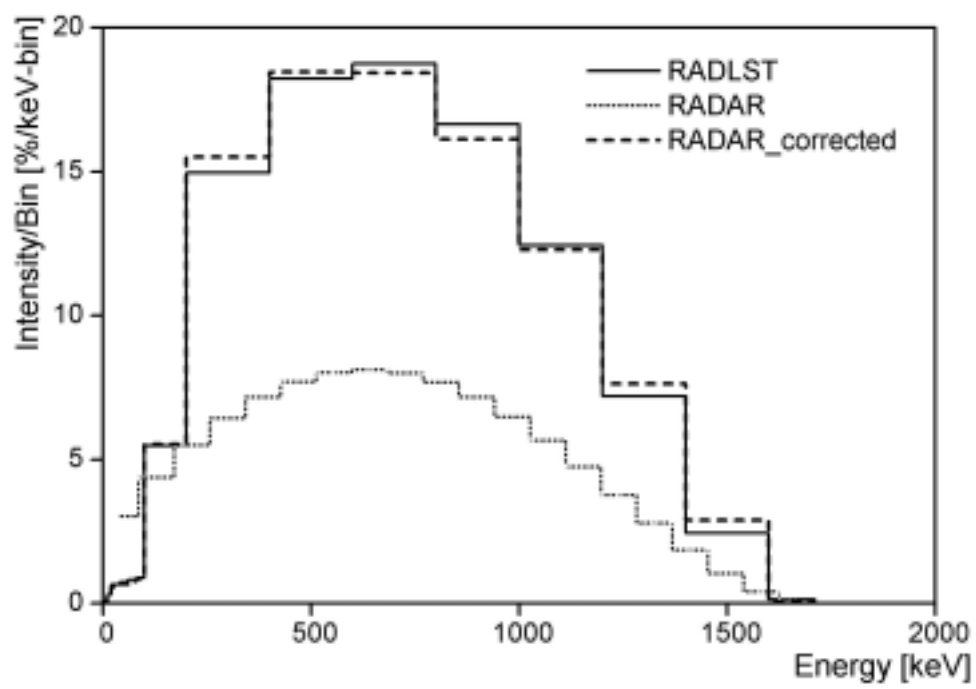


Fig. 3. decay β -spectrum of P-32 calculated with RADLST and RADAR.