

# A Study on the Measurement of Half-life for the $^{179}\text{Re}$ Isotope Produced by a 100 MeV Proton Nuclear Reaction

Samyol Lee

Department of Radiological Science, Dongseo University  
Center for Radiological Environment & Health Science, Dongseo University

Received: June 24, 2020. Revised: August 01, 2020. Accepted: August 31, 2020.

## ABSTRACT

This study accurately measured the half-life of the  $^{179}\text{Re}$  radioactive isotope using the 100 MeV proton and high-purity HPGe gamma ray measurement system generated from a high-energy proton linear accelerator at the Korea Atomic Energy Research Institute. The result obtained is  $19.64 \pm 0.26$  min. Compared with the past results of the half-life of the  $^{179}\text{Re}$  radioisotope known to date, the results of B. Harmatz published in 1960 and B. J. Meijer published in 1975 measured the median value higher than the results obtained in this study. In the case of K. J. Hofstetter, published in 1966, a very large error is also characteristic. This result showed a tendency that the center value was very consistent with the result of this study. The results of Coral M. Baglin's 19.5 min published in 2009 are very consistent with the error range. The obtained measured result was compared with the result of ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File). Through this study, more reliable values were measured for the results of the half-life of the  $^{179}\text{Re}$ , which was previously incorrect, and the validity of the recently published results of Coral M. Baglin was confirmed.

Keywords:  $^{179}\text{Re}$ , Half-life, Proton energy, Nuclear reaction, Gamma-ray spectrum, Proton beam, KAERI

## I. INTRODUCTION

핵 반응데이터는 다양한 분야의 기초데이터로써 사용되어지고 있다. 특히 양성자와 관련된 핵 데이터개발에 관한 연구들은 최근 우주항공분야의 재료개발, 우주의 고방사선 환경연구, 나노/재료, 에너지/환경, 생명공학, 정보통신, 의료 보건 등 다양한 분야의 발달과 함께 활발하게 연구가 진행되고 있다.<sup>[1]</sup> 특히 반감기 측정에 관한 연구 결과들은 과거부터 많이 알려져 왔으며 다양한 핵종들에 대하여 연구되어 왔다. 그러나 일반적으로 안정한 핵종 근처의 핵종보다 양성자 과잉이거나 중성자 과잉인 핵종들은 낮은 에너지의 핵반응을 통해서 쉽게 만들어지기 어렵다. 또한 이들 방사성 핵종들은 고에너지 가속기의 핵반응을 통해서 만이 만들 수

있는 핵종들이 대부분이다. 따라서 고에너지 가속기가 있는 연구 환경에서만 그 결과들을 얻을 수 있다는 특징이 있어 충분히 만족할 만한 결과들을 얻기가 어렵다. 뿐만 아니라, 이때 생성되는 핵종들은 일반적으로 반감기가 짧은 것이 특징이다. 본 연구에서는 안정한 동위원소인  $^{185}\text{Re}$ 보다 중성자가 6개 부족한  $^{179}\text{Re}$  방사성동위원소의 반감기를 측정하였다. 이 핵종은 중성자의 수가 상대적으로 부족한 양성자과잉핵종으로서 전자포획과  $\beta^+$ 붕괴를 통하여 또 다른 방사성동위원소인  $^{179}\text{W}$ 로 붕괴한다.

$^{179}\text{Re}$  방사성동위원소의 반감기에 대한 측정 결과들은 과거 1960년대부터 발표되어 왔으며 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 그러나 그 결과들의 정확도는 매우 낮을 뿐만 아니라, 1960년도 발표한 B. Harmatz와 1975년도에 발표한 B. J. Meijer의 결

\* Corresponding Author: Samyol Lee

E-mail: samuel@gdsu.dongseo.ac.kr

Tel: +82-51-320-2728

과들은 오차가 평가되어 있지 않아 정확도를 평가할 수도 없는 것이 현실이다.<sup>[2,3]</sup> 1966년에 발표된 K. J. Hofstetter의 경우 오차가 매우 큰 것이 특징이라고 할 수 있다.<sup>[4]</sup> 가장 최근 2009년도에 발표된 Coral M. Baglin의 경우 비교적 작은 오차로 결과를 발표하였으나 기존의 값들과는 약 30초 정도 짧은 반감기를 보였다.<sup>[5]</sup> 따라서 본 연구에서는 측정 결과 중에서 가장 최근에 발표된 Coral M. Baglin의 결과의 타당성 확인 및  $^{179}\text{Re}$  방사성동위원소의 반감기의 정확한 측정을 위하여 시도하였다.

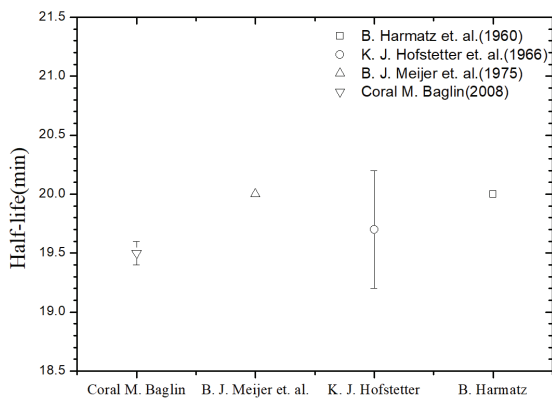


Fig. 1. The previous measurement of the half-life for  $^{179}\text{Re}$  isotope sample.

본 연구에서는 우리나라의 한국원자력연구원에 있는 고에너지 양성자 선형가속기에서 발생된 100 MeV 양성자와 고순도 게르마늄(HPGe: High Purity Germanium) 감마선 측정시스템을 이용하여 수행되었다. 측정된 결과는 ENSDF(Evaluated Nuclear Structure Data File)의 결과와 비교하였다.<sup>[6]</sup>

## II. MATERIAL AND METHODS

### 1. 100 MeV 고에너지 양성자 빔을 이용한 $^{179}\text{Re}$ 동위원소의 생성

$^{179}\text{Re}$  동위원소를 얻기 위하여  $^{nat}\text{W}$ 의 양성자 핵반응을 이용하였다.  $^{nat}\text{W}$ 의 경우 Table 1에 나타낸 것과 같이 5가지 안정한 동위원소로 구성되어 있다. 본 연구에서는  $^{nat}\text{W}$ 에 100 MeV 양성자를 조사시켜  $^{179}\text{Re}$  동위원소를 생성시켰다.  $^{179}\text{Re}$  동위원소의 생성은 양성자과잉 핵종인 방사성동위원소이므

로 양성자가속기를 통해 양성자가 하나 증가하고 다양한 수의 중성자를 감소시키는  $^{nat}\text{W}(p,nx)^{179}\text{Re}$  양성자 핵반응을 통해 생성된다. 생성된  $^{179}\text{Re}$ 은  $^{179}\text{W}$ 로 다시 붕괴된다. 이때  $^{179}\text{W}$  핵은 여기된 상태에 있게 되므로 핵으로부터 발생하는 감마선을 측정하게 된다.<sup>[7]</sup> 중요 붕괴감마선의 붕괴도를 Fig. 2에 나타내었다. 본 연구에서는  $^{179}\text{Re}$  방사성 동위원소를 얻기 위하여 한국원자력연구원의 100 MeV의 양성자 에너지를 발생시킬 수 있는 선형가속기를 이용하였다. 양성자빔 조사실 TR 103에서 표적시료에 양성자를 조사하여 방사화 방법을 통하여  $^{179}\text{Re}$  방사성 동위원소 시료를 얻었다. 시료의 물리적인 크기와 화학적인 성분비는 Table 1에 나타내었고 시료의 크기는 감마선의 기하학적 검출효율의 오차, 양성자 조사 후 감마선의 방사능 감쇄를 고려하여 제작하였다.

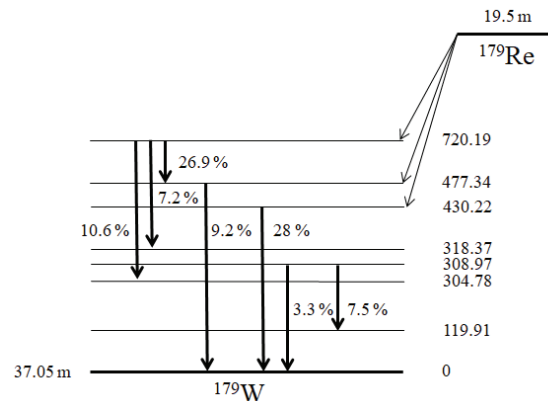


Fig. 2. The decay scheme of  $^{179}\text{Re}$  isotope for main gamma-rays.

Table 1. Specifications of the sample for  $^{nat}\text{W}$

Sample	$^{nat}\text{W}$
Chemical form	Metal
Chemical purity (%)	$^{180}\text{W}$ (0.120)
	$^{182}\text{W}$ (26.498)
	$^{183}\text{W}$ (14.314)
	$^{184}\text{W}$ (30.642)
	$^{186}\text{W}$ (28.426)
Size (mm <sup>2</sup> )	10.0 × 10.0
Thickness (mm)	0.1

가장 최근에 발표된  $^{179}\text{Re}$ 의 반감기는 19.5분으로

비교적 짧은 반감기를 가지고 있으며 측정에 충분한 감마선의 방사능을 얻기 위한 양성자속을 필요로 하였으며 양성자 빔 조사 조건을 Table 2에 표시하였다.<sup>[2-5]</sup> 또한 비교적 짧은 반감기로 인하여 양성자 조사 후 감쇠되는 감마선의 세기를 고려하여 결정하였다.

Table 2. Specifications of the proton beam condition parameters in the present measurement

Proton beam energy (MeV)	100
Average current (mA)	0.1
Repetition rate (Hz)	1
Beam size (mm dia)	300
proton number	$1.89 \times 10^{12}$

## 2. HPGe 감마선 측정 시스템

고에너지 양성자와 천연 텅스텐과의 핵반응에 의해서 생성된 <sup>179</sup>Re 동위원소는 β<sup>+</sup>붕괴와 전자포획을 통하여 <sup>179</sup>W 동위원소로 붕괴되면서 <sup>179</sup>W의 여기상태로 만들어진다. 감마선은 여기상태의 준안정 상태의 핵으로부터 발생된다. 본 연구에서는 감마선 측정에 매우 우수한 성능을 가지고 있는 HPGe 검출기시스템을 이용하여 감마선을 측정하였고 측정 시스템과 그 특징을 Fig. 3과 Table 3에 나타내었다. 두께 10 cm의 납을 이용하여 자연방사선의 영향을 줄였고, 검출기 주위에는 하전입자에 의한 제동복사 효과를 줄이기 위하여 구리로 차폐를 하였다. 본 감마선 측정시스템의 에너지 교정을 위하여 표준선원(<sup>137</sup>Cs, <sup>22</sup>Na, <sup>60</sup>Co, <sup>133</sup>Ba, <sup>54</sup>Mn)들을 사용하여 에너지교정을 시행하였다.

Table 3. Specifications of the HPGe detector system

Unit	Characteristic
Size (mm dia × mm)	47.5 × 46
Applied voltage (Volt)	-3,500
Energy resolution (keV)	1.8 at 1.333 MeV
Relative efficiency (%)	15
Thickness of lead (cm)	10

HPGe 검출기에 입사된 감마선은 잡음이 포함된

전기적인 신호를 만들어 내고 이것은 전치증폭기를 통하여 전기적 잡음이 적은 신호들로 나타나며 신호들을 선형증폭기인 Fast spectroscopy Amplifier에 입력하여 선형증폭 신호를 얻었다. 본 연구에서는 측정하고자 하는 방사선 에너지의 경우 주로 1 MeV이하의 감마선들이므로 검출기의 불감시간을 고려하여 10 V 최고 전압이 약 1.5 MeV가 되도록 설정하였다. MCA(Multi-Channel Analyser)의 입력 채널도 4096 Channel이 되도록 설정해 에너지 분석을 용이하도록 결정하였다.



Fig. 3. Gamma-ray measurement spectrometer system (HPGe detector) of gamma-ray from the <sup>179</sup>Re sample.

## III. DATA ANALYSIS

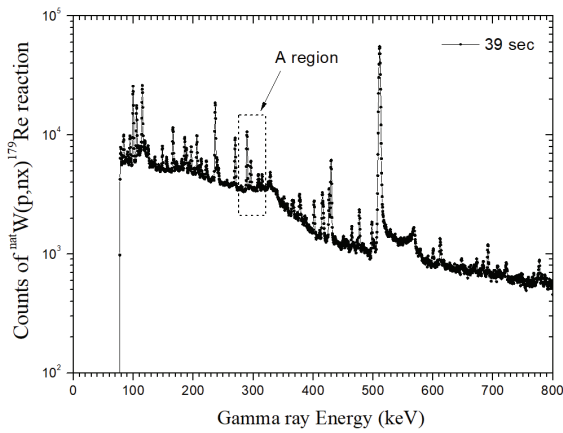
### 1. 감마선 스펙트럼의 분석

<sup>nat</sup>W(p,xn)<sup>179</sup>Re 반응을 통하여 측정 시점이 다른 7개의 감마선 에너지 스펙트럼을 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. 측정시간에 대한 평균수명을 계산하여 Fig. 4(b)의 오른쪽위에 표시하였다. 측정되어진 감마선 에너지 스펙트럼은 100 MeV 양성자 빔을 이용하여 <sup>nat</sup>W(p,xn)<sup>179</sup>Re 반응에 의해 생성된 <sup>179</sup>Re 방사성동위원소의 붕괴에 의한 것으로 시간이 경과됨에 따라서 감마선의 강도가 달라짐을 스펙트럼 피크 크기 변화를 통하여 알 수 있으며, 반감기 측정에 충분한 데이터 수를 얻기 위하여 감마선 스펙트럼은 7회 측정하였고 각각의 측정에서 발생한 불감시간을 스펙트럼의 강도에 시간적인 보정을 해 주었다. 일반적으로 방사화 직후 비교적 큰 강도의 방사선에 의해 가장 긴 불감시간을 보였으며 시간이 경과될수록 불감시간은 줄어드는 것을 알 수 있었다. 측정된 불감시간의 비율의 변화는 31.1%, 21.8%, 17.7%, 14.4% 12.3%, 10.8% 및 9.6%로 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 4의 (a)는

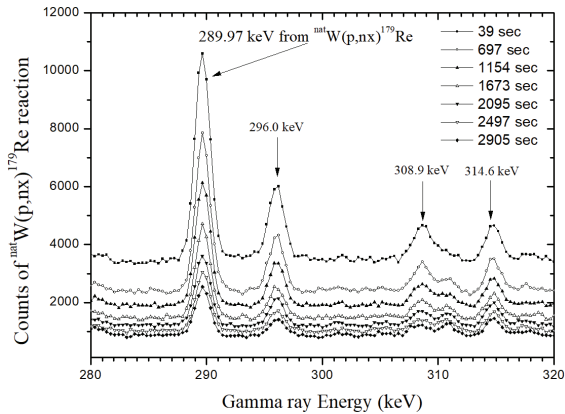
발생된 감마선의 전체 에너지영역(0 ~ 800 keV)에 대하여 표현하였고, (b)는 본 연구에서 반감기를 측정하기 위하여 선택한 영역의 스펙트럼을 보여주고 있다. 측정하고자 하는  $^{179}\text{Re}$  방사성동위원소로부터 발생하는 감마선은 Table 4에 나타낸 것과 같이  $^{179}\text{W}$  동위원소로 붕괴하면서 다양한 감마선이 방출된다. 이들 감마선 중에서 정확한 반감기를 측정하기 위해서 다른 감마선의 영향이 적으면서 단독으로 존재하고 감마선의 강도가 비교적 높은 289.97 keV의 감마선을 분석에 사용하였다.

Table 4. List of gamma-rays from excited  $^{197}\text{Re}$

Energy Level (keV)	Energy(keV)	%
308.97 → 119.91	189.05	7.5
720.19 → 430.22	289.97	26.9
308.97 → 0	308.97	3.3
720.19 → 318.37	401.82	7.2
720.19 → 304.78	415.41	10.6
430.22 → 0	430.22	28
477.34 → 0	477.34	9.2



(a) Gamma-ray energy spectrum from the  $^{179}\text{Re}$  sample. Region A was shown in enlarged spectrum in below.



(b) Enlarged gamma-ray energy spectrum from the  $^{179}\text{Re}$  sample in interesting region.

Fig. 4. Gamma-ray energy spectrum from the  $^{179}\text{Re}$  sample.

## 2. $^{179}\text{Re}$ 동위원소의 반감기 계산

### 2.1 측정시간의 결정

반감기가 비교적 짧은 방사성동위원소를 측정할 경우에는 측정을 시작할 때의 방사능과 측정을 마칠 때의 방사능의 차이가 발생하게 되어 감마선 측정에서 시간에 따른 방사능 값을 설정하는데 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 감마선측정 시간 동안의 평균붕괴시간을 계산하여 측정시간의 대표값으로 아래의 식(1)을 통하여 결정하였으며 이 값을 Fig. 4(b)와 Table 5에 나타내었다.<sup>[7]</sup>

$$\tau = [-t \cdot \exp(-\lambda t)] - \left[ \frac{1}{\lambda} \cdot \exp(-\lambda t) \right] + \frac{1}{\lambda} \quad (1)$$

여기에서  $\tau$ 는 평균반감기,  $t$ 는 측정을 마치는 시간,  $\lambda$ 는 붕괴상수이다. 시간  $t$ 는 불감시간을 고려한 시간으로 측정시간이 경과됨에 따라서 줄어드는 것을 알 수 있다.

Table 5. List of average decay and elapsed time

	Average decay time(sec)	Elapsed time(sec)
1	39.3	39.3
2	34.3	697.3
3	32.2	1154.2
4	30.5	1673.5
5	39.5	2095.5
6	28.7	2496.7
7	28.2	2905.2

### 2.2 반감기의 계산

반감기를 측정하기 위해서 289.97 keV 감마선에 대하여 7회에 걸쳐 측정된 감마선의 강도의 변화를 Fig 5.에 나타내었다. 나머지 한 점은 반감기 보다 충분히 긴 시간이 경과되었을 경우 방사능이 0이 됨을 가정하여 시간에 따른 방사능의 변화를 fitting을 통하여 붕괴상수( $\lambda$ )를 얻게 된다. 얻어진  $\lambda$ 값은  $5.88 \times 10^{-4} \pm 7.96 \times 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$  이며, 붕괴상수와 반감기와의 관계를 통하여 얻어진 반감기는  $19.64 \pm 0.26 \text{ min}$ 이다.

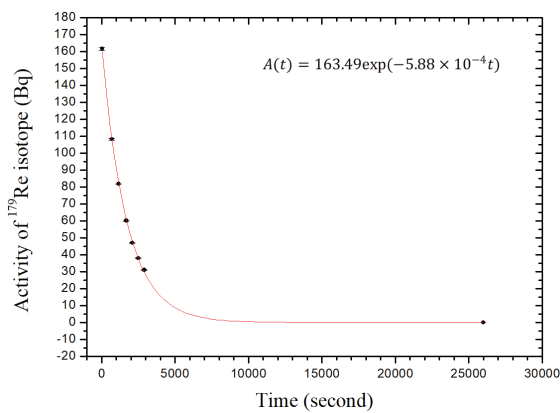


Fig. 5. The attenuation of radioactivity over time for the  $^{179}\text{Re}$  sample is exponentially expressed.

## IV. RESULT

본 연구를 얻어진 결과는  $19.64 \pm 0.26 \text{ min}$ 으로 2009년도에 발표된 Coral M. Baglin의 19.5 min의 값과 오차범위 내에서 매우 일치하는 결과로 나타났으며, 그 결과치는 Fig. 6과와 Table 6과 같다.

$^{179}\text{Re}$  방사성동위원소의 반감기에 대한 과거의 결과들과 비교했을 때 1960년도 발표한 B. Harmatz와 1975년도에 발표한 B. J. Meijer의 결과들은 중심값 자체가 본 연구에서 얻어진 결과보다 높게 보고되었으며, 1966년에 발표된 K. J. Hofstetter의 경우 오차가 매우 큰 것이 특징이라고 할 수 있는데 본 연구의 평균 표준편차 값은 매우 일치하는 것으로 나타났다. 2009년도에 발표된 Coral M. Baglin의 경우 비교적 작은 오차로 결과를 발표하였으나 오차범위 내에서는 일치하는 결과를 보였고 중심값은 본 결과보다 낮은 경향을 보였다.

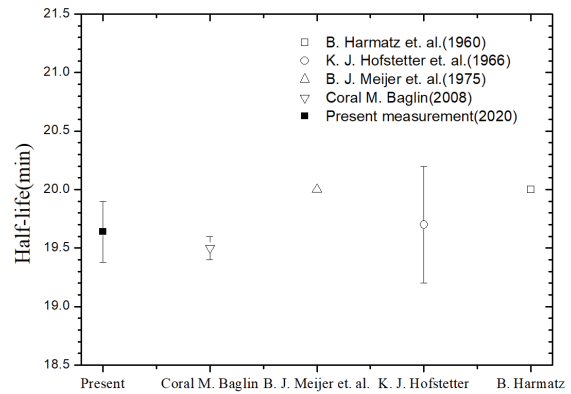


Fig. 6. The previous measurement and the present measurement of the half-life for  $^{179}\text{Re}$  isotope sample.

Table 6. Half-life of the present measurement and previous measurement

	Half-life(min)	Authors	Year
1	$19.64 \pm 0.26$	Present	2020
2	$19.5 \pm 0.1$	Coral M. Baglin*	2008
3	20	B. J. Meijer et. al.	1975
4	$19.7 \pm 0.5$	K. J. Hofstetter et. al.	1966
5	~ 20	B. Harmatz et. al.	1960

\* is ENSDF(Evaluated Nuclear Structure Data File)\*

## V. CONCLUSION

본 연구를 통하여 기존에 부정확했던  $^{179}\text{Re}$ 의 반감기의 결과를 보다 신뢰성 있는 값으로 측정하게 되었고 최근에 발표된 Coral M. Baglin의 결과의 타당성을 확인했다. 또한  $^{179}\text{Re}$  방사성동위원소의 반감기의 정확한 측정기술을 통하여  $^{nat}\text{W}(p,nx)^{179}\text{Re}$  반응에서 발생하는 다양한 동위원소들의 반감기 측정을 위한 기술을 확보 할 수 있게 되었다. 이것은 정확한 반감기를 결정하는데 중요한 역할을 할 것으로 사료되어진다.

### Acknowledgement

이 논문은 2020년도 동서대학교 'Dongseo Cluster Project' 지원에 의하여 이루어진 것임 (DSU-20200002). 이 연구를 위하여 양질의 양성자 빔을 제공해 주신 한국원자력연구원 양성자가속기

와 관련된 분들에게 감사를 포함니다.

## Reference

- [1] Y. H. Jung, Y. S. Choi, K. S. Chung, "Development of a Beam Current and Position Measurement System for the Korea Multipurpose Accelerator(KOMAC)", *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 44, No. 5, pp. 1067-1070, 2004.
- [2] B. Harmatz, T. H. Handley, J. W. Mihelich, "Nuclear Spectroscopy of Neutron-Deficient Lu, Ta, and Re Isotopes", *Physical Review*, Vol. 119, No. 4, pp. 1345, 1960.  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.119.1345>
- [3] B. J. Meijer, J. Konijn, B. Klank, J. H. Jett, R. A. Ristinen, "Levels in  $^{179}\text{W}$  studied in the  $^{181}\text{Ta}(p, 3n)$  reaction by on-line electron and gamma ray spectroscopy", *Zeitschrift für Physik. A, Hadrons and nuclei*, Vol. 275, No. 1, pp. 79-93, 1975.  
<http://dx.doi.org/10.1007/BF01409502>
- [4] K. J. Hofstetter, P. J. Daly, "Decay Properties of Neutron Deficient Osmium and Rhenium Isotopes. I. Decay Modes of  $^{179}\text{Re}$ ,  $^{180}\text{Re}$ ,  $^{180}\text{Os}$ , and  $^{181}\text{Os}$ ", *Physical Review*, Vol. 152, pp. 1050, 1966.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.152.1050>
- [5] Coral M. Baglin, "15-Nov-2008 ENSDF insertion: 2009-02 Publication: Nuclear Data Sheets", IAEA Nuclear Data Section, 110, pp. 265, 2009.
- [6] <https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>
- [7] A. S. Barabash, "Average (Recommended) Half-Life Values for Two-Neutrino Double-Beta Decay", *Czechoslovak Journal of Physics*, Vol. 52, No. 4, pp. 567, 2002. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1015369612904>

# 100 MeV 양성자 핵반응에 의해 생성된 $^{179}\text{Re}$ 동위원소의 반감기 측정에 관한 연구

이삼열

동서대학교 방사선학과

## 요 약

본 연구는 한국원자력연구원에 있는 고에너지 양성자 선형가속기에서 발생된 100 MeV 양성자와 HPGe 감마선 측정시스템을 이용하여  $^{179}\text{Re}$  방사성동위원소의 반감기를 정확하게 측정하였다. 결과적으로 얻어진 반감기는  $19.64 \pm 0.26$  min이다. 현재까지 알려진  $^{179}\text{Re}$  방사성동위원소의 반감기에 대한 과거 결과들과 비교했을 때 1960년도 발표한 B. Harmatz와 1975년도에 발표한 B. J. Meijer의 결과들은 중심값 자체가 본 연구에서 얻어진 결과보다 높게 측정되었다. 1966년에 발표된 K. J. Hofstetter의 경우 오차가 매우 큰이 특징이라고 할 수 있다. 이 결과는 본 연구의 결과와 오차범위 내에서 중심값은 매우 일치하는 경향을 보였다. 2009년도에 발표된 Coral M. Baglin의 19.5 min의 값과 오차범위 내에서 매우 일치하는 결과를 보여주고 있다. 얻어진 측정된 결과는 ENSDF(Evaluated Nuclear Structure Data File)의 결과와 비교하였다. 본 연구를 통하여 기존에 부정확했던  $^{179}\text{Re}$ 의 반감기의 결과를 보다 신뢰성 있게 나타냈고 비교적 최근에 발표된 Coral M. Baglin의 결과의 타당성을 확인 할 수 있었다.

중심단어: 텅스텐, 레늄, 반감기, 핵반응, 감마선스펙트럼, 양성자빔, 한국원자력연구원

## 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(단독저자)	이삼열	동서대학교 방사선학과	교수