

갑상선 진료환자 관련 방사성폐기물의 처분을 위한 방사능 측정 및 평가

Measurement and Estimation for the Clearance of Radioactive Waste with Patients of Thyroid Treatment

김창범, 장성주
동신대학교 방사선학과

Chang-Bum Kim(k107kcb@kins.re.kr), Seong-Joo Jang(sjjang@dsu.ac.kr)

요약

의료현장에서의 방사성폐기물은 방사성동위원소의 사용량의 증가와 더불어 급격히 늘어나고 있다. 특히, 갑상선 질병의 진단 및 치료용으로 사용량이 증가하고 있는 I-131 핵종의 경우 8.02 일의 짧은 반감기를 가지고 있으며, 관련 폐기물은 모두 자체처분 방법으로 처분하고 있다.

이와 관련하여 국제원자력기구(IAEA)는 개인선량($10 \mu\text{Sv/y}$) 및 집단선량(1 man-Sv/y)과 핵종별 농도에 근거하여 각각 폐기물의 규제해제기준을 제시(IAEA Safety Series No 111-P-1.1, 1992 및 IAEA RS-G-1.7, 2004)하였다. 이 연구에서는 의료현장에서 발생하는 I-131 핵종 관련 폐기물을 사용상 종류별로 수집 및 측정하여 방사능농도의 측정 방법 및 절차를 수립한다. 또한, 측정 결과를 바탕으로 핵종의 감쇠 유도식을 산출하고, 이것을 바탕으로 자체처분 가능일자를 산출하여 이론식의 경우와 대비하여 고찰하였다. 측정 결과를 바탕으로 유도 감쇠식을 신장하여 이론적 반감기와 유효 반감기를 비교해 본 결과, I-131 핵종의 이론적 반감기가 유효반감기(7.72일)에 비해 긴 반감기를 가지고 있음을 확인하였다.

측정결과를 바탕으로 한 유효 반감기를 적용한다면, 현재보다 더 짧은 기간 동안 I-131 핵종 폐기물을 보관하였다가 자체처분을 할 수 있다. 이 연구 결과는 ISO 표준으로 추진할 예정이다.

■ 중심어 : | 방사성폐기물 | 갑상선 | 방사능 측정 |

Abstract

The generation amount of radioactive waste has been rapidly increased by increase of the usage of radioisotope source in medical field. Especially, the use of the radioactive source of I-131 with short half-life of 8.02 days used in treatment of thyroid has been increased, and all of the wastes concerned have been disposed by means of the self-disposal method. IAEA proposed criteria for clearance level of waste which depends on the individual ($10 \mu\text{Sv/y}$) and collective dose (1 man-Sv/y), and concentration of each nuclide (IAEA Safety Series No 111-P-1.1, 1992 and IAEA RS-G-1.7, 2004). In this study, various radioactive wastes in medical fields are collected and measured for establishing the disposal methods and procedures of radioactive wastes. In addition, comparison evaluation of decay storage period between the half-life which was calculated by attenuation curve based on real measurement and analytical half-life is considered. With comparing the theoretical half-life and the effective half life(7.72 days) which was based on the decay equation of measured data, it is resulted in the theoretical half-life is longer than effective half-life. The storage period of radioactive waste for self-disposal may be curtailed. The result of this study will be proposed as ISO standard.

■ keyword : | Radioactive Waste | Thyroid | Clearance level | Measurement of Radioactivity |

I. 서론

최근 국내·외를 막론하고 갑상선 질환, 특히 갑상선암 환자가 급속히 증가하고 있다. 국내의 경우에는 10년 전에 비해 갑상선암 환자수가 약 10 배 증가한 것으로 보고되고 있으며, 2011년도 기준으로 국내 암 발생 환자 중 16.6%를 차지할 정도로 높은 발병률을 보이고 있어 이에 대한 시급한 대책이 요구되고 있다[1][2] 이와 같은 갑상선 질환의 급속한 증가 원인으로, 방사선이나 유해물질에 노출될 기회가 많아지고 있으며 기본적으로 갑상선 질환 검진기술의 발전에 기인한다는 데 별다른 이의가 없어 보인다.

갑상선 질환에 대해서는 환자의 생체 내(*in-vivo*)에 방사성 옥소(I-131)를 투여하는 방법으로 진단을 하고 있으며, 이로 인해 각 병원 핵의학과에서는 진단 및 치료 목적의 방사성의약품 관련 방사성폐기물의 발생이 무시할 수 없을 정도로 증가하고 있다[3][4]. 방사성옥소는 승화성(sublimate) 물질이어서 투여 받은 환자로부터 호흡, 땀, 대소변 등에 의하여 배기되는 방사성 오염의 정도가 매우 크다. 다만, I-131 비밀봉선원을 이용한 방사성 옥소치료의 경우, 과거의 용액 형태에서 현재는 캡슐형태로 환자에게 경구 투여되고 있어 선원으로 인한 오염이 줄어들고 있기는 하다. 방사성폐기물로 인한 오염은 공공환경 및 인체에 해로운 영향을 줄 수 있기 때문에 폐기물의 발생, 보관 및 처분에 이르기까지의 안전관리가 매우 중요해지고 있다[5][6]. 또한, 의료 방사성폐기물의 경우 인체 내·외 진단을 위하여 환자의 혈액과 섞거나 검사용 시료와 결합시켜 사용하는 경우가 대부분이기 때문에 감염성 폐기물로도 분류되므로 관련 폐기물의 안전관리에 어려움을 겪고 있다 [7-9].

갑상선 진료용으로 사용하는 I-131의 반감기는 8.02일로, 의료용으로 사용되는 여타 방사성동위원소와 비교할 때 상대적으로 반감기가 짧고 방사성독성이 없다는 측면에서, 단기간 경과하면 관련 폐기물을 자체처분의 방법으로 쉽게 처리할 수 있다는 장점이 있다. 대부분의 선진국에서는 방사성폐기물을 자체 처분하는 방법으로, 즉 반감기가 짧은 개방선원과 관련된 방사성폐

기물을 대상으로 방사능 농도가 일정 수준 이하로 감쇠될 때 까지 격리보관한 후 소각 등의 방법으로 처리하고 있다. 이러한 자체처분은 IAEA 규정[10]을 바탕으로 개인선량과 집단선량을 평가하여 적용하고 있으며, 국내의 경우에는 1997년부터 이 규정을 적용하고 있다. 최근에는 핵종별 방사능 농도에 근거한 새로운 IAEA 규정[11]이 발간되면서 250 여종의 방사성핵종에 대한 규제해제의 기준을 정량적으로 제시하였는데, 해당 방사성핵종의 위해도 및 독성에 따라 0.1, 1, 10, 100, 그리고, 1,000 Bq/g 등 5개 군으로 분류하고 있다. 따라서 자체처분이 가능한 일자를 명확하게 평가하여 시행할 수 있다는 장점이 있으나, 방사능농도를 측정하는 장비를 별도로 구비하여야 하는 비용적인 부담이 제기되어 경제적으로 넉넉지 않은 개개의 사업소에서 시행하기에는 어려움이 있다. 방사성폐기물 자체처분 관련 규정의 시행과 관련하여, 현재는 방사성폐기물 발생시점에서의 방사능 농도를 보수적으로 평가하여 이론적인 핵종 감쇠식에 따라 폐기물을 보관·관리하고 있다. 하지만, 직접적인 측정방법이 아닌 보수적 농도평가와 이론식을 적용함에 따라 다소 긴 기간 동안 폐기물을 보관하게 되어, 불필요하게 장기간 적체되는 폐기물이 발생하고 있다. 이러한 현상은 곧 방사성폐기물 보관시설의 공간 부족을 초래할 수 있어 의료기관의 방사선안전관리 현장에서는 관련 어려움을 겪고 있다.

이 연구에서는 갑상선 환자의 진료용으로 사용하는 I-131 관련 방사성폐기물에 대하여 방사능 측정방법 및 절차를 개발하고 그에 따라 측정하여 감쇠식을 유도하는 한편, 측정에 영향을 미치는 인자 등을 고찰하여 자체처분을 위한 적정 보관기간을 평가하고 이를 이론식과 비교·고찰하고자 한다.

II. 재료 및 방법

방사성폐기물의 방사능농도 측정대상으로 핵의학과에서 갑상선 질환 환자의 진료용으로 사용하는 I-131의 방사성핵종이 묻어있거나 남아있는 형태로 방사능에 오염된 의료용 방사성폐기물에 대한 최적의 방사능 측

정방법 및 절차를 고찰하고, 자체처분을 위한 합리적인 보관기간을 산정한다.

1. 방사성폐기물의 수집 및 측정 용기

의료현장에서 개봉선원의 사용빈도가 가장 높은 핵의학검사실 및 방사성옥소 치료병실에서 발생하는 I-131 관련 방사성폐기물을 2012년 8월에서 2013년 2월 사이에 한국원자력연구원 핵의학과 및 I-131 치료병실에서 수집하였다. 발생한 방사성 폐기물로는 진단용의 유리용기(vial), 치료용의 캡슐(capsule), 그리고 의료진이 사용한 일회용 비닐장갑(poly glove) 및 팔토시(arm sleeve)가 있었다. 수집한 방사성 폐기물들은 각각 다른 기하학적 구조를 지니고 있으므로 일관적으로 표준 용기에 담아 측정할 필요가 있다.

이 연구에서는 1ℓ 마리넬리(Marinelli) 비커, 20ml 및 90ml 플라스틱 비커를 사용하여 다중과고분석기(MCA: Multichannel Analyzer)를 이용하여 각 시료의 방사능을 측정하였다. 측정 용기에는 증류수를 채워 동일한 측정 부피를 갖게 하여 측정을 실시하였다.

2. 방사능 측정 방법 및 절차

본 연구에서는 방사성폐기물에 섞여있는 핵종 및 방사능을 정밀 측정하기 위하여 MCA (HPGe Detector, DSA1000, Canberra, USA)를 사용하였다. MCA의 효율은 기본적으로 2012년 7월 6일, 한국원자력연구원 에서 교정한 데이터를 적용하였다. 앞에서 수집한 시료를 각각의 측정 용기에 담아 측정하며, 각각의 용기에 따른 기하학적 효율교정을 실시한 후 측정을 실시한다. 기하학적 효율교정은 측정값의 정확성을 높이기 위하여 실시하며, 이 연구에서 사용되는 1ℓ 마리넬리 비커, 20ml 그리고 90ml 플라스틱 비커와 같은 기하학적 구조를 가진 인증표준물질(CRM: Certified Reference Materials)을 이용하여 이루어진다. 측정은 아래와 같은 과정을 통하여 이루어지며, 수집된 방사성폐기물의 I-131 핵종을 대상으로 폐기물의 잔존 방사능량 범위를 고찰하였으며, 또한 이를 이용하여 이론적 및 실험적으로 자체처분을 위한 최적의 보관 시기를 추정한다.

2.1 방사성폐기물의 잔존방사능 측정절차[12]

- 1) 핵의학과 검사 및 I-131 치료병실의 진료일정을 확인하여 폐기물 발생 직후 바로 수거한다.
- 2) 수거된 방사성폐기물은 전자저울(Model AJH-2200 E-D, Vibra, Japan)을 이용하여 무게를 3회 측정 하고 고유코드를 할당하였다(핵종 - 발생일자 - 순서).
- 3) 방사능이 높은 방사성폐기물은 차폐 가능한 용기에서 1 ~ 3일 보관한 후, 2)에서와 같이 수행하였다.
- 4) 주사용 솜은 20 ml 유리용기로 수거하였다(20 ml 용기 측정 효율 적용).
- 5) 20 ml 유리용기와 동일한 크기의 유리용기와 플라스틱 병은 전처리하지 않고 측정하였다(효율 적용: 20 ml 용기).
- 6) 종이컵, 비닐장갑 등은 90 ml U8 플라스틱 용기에 수거하였다(90 ml U8용기 측정 효율 적용).
- 7) 각종 크기의 주사기, 유리용기, 플라스틱 병은 1ℓ 마리넬리 용기로 수거하고 다음과 같이 전처리 후 측정하였다(1ℓ 마리넬리 용기 측정 효율 적용).
- 7.1) 마리넬리 용기에 증류수를 1,000 g 넣고, 2)에서와 같이 무게를 측정하였다.
- 7.2) 반감기에 따라 보관기간이 다르지만, 최소 2 시간 후 수거된 폐기물을 넣은 1ℓ 마리넬리 용기를 방사능이 균질하게 섞이도록 교반기(Sseriker: Vision scientific Co. Ltd, Korea) 65 RPM으로 6 시간 교반하였다.
- 7.3) 교반기에서 균일하게 섞인 시료를 1 ~ 2 시간 경과 후 MCA를 이용하여 계측기의 불감시간(dead time)이 3% 이하인 경우에 측정하였다.

2.2 베타입자 방출 방사성폐기물의 방사능 측정

유리용기, 주사기 또는 주사바늘 등에 남아 있는 베타입자 방출 핵종은 짧은 비정(range)을 지니고 있어 폐기물 용기 자체에 흡수되기 때문에 방사능 측정이 매우 어렵다. 따라서 이러한 경우에는 사용한 방사능량을 고려하고 남은 양을 추정하여 보관기간을 산정한다. 보관기간 산정은 “방사성폐기물의 자체 처분에 관한 규

정”(원자력안전위원회 고시 제2012-59호)에 따라 계산하며 이때 계산결과에 가중치 (safety factor) 1.2를 곱하여 보관기간으로 정한다[13].

3. 방사성폐기물의 자체처분 보관기간 산출

방사성폐기물의 자체처분을 위한 보관기간은 “방사성폐기물의 자체처분에 관한 규정”(원자력안전위원회 고시 제2012-59호)에 따라 산출하였으며 아래의 식과 같다[13].

$$\text{보관기간(일)} = -1.443 \times \ln(\text{제한농도/오염농도}) \times \text{반감기(일)} \times \text{가중계수}$$

방사성폐기물의 방사능 농도는 MCA로 측정된 값을 적용하며 제한농도는 원자력안전위원회고시의 값을 인용한다. 이 연구에서 고려한 방사성폐기물의 핵종 I-131의 제한농도는 규정에 따라 100 Bq/g이며 반감기는 8.02일 이다. 가중계수는 1.45를 적용하여 산출한다 [13].

III. 결과 및 고찰

의료현장에서 갑상선 질병 환자의 진료와 관련하여 발생하는 방사성폐기물의 방사능을 측정하였다. 각 방사성폐기물에 대한 방사능측정은 방사성폐기물이 발생한 시점과 자체처분을 위하여 인출하는 시점, 그리고 그 중간에 해당하는 시점 등 총 3번 실시하였다. 각각의 폐기물 시료의 측정결과를 바탕으로 자체처분 가능 일

을 산출하였고 이를 평균하여 나타내었다. 시료의 측정 과정에서 방사성폐기물을 임의로 희석하거나 혹은 혼합하는 등의 인위적인 처리과정은 배제하였다.

[Table 1]은 I-131 핵종의 방사성폐기물에 대한 측정 평균 비방사능을 나타낸다. I-131 핵종의 경우, 핵의학 영상촬영을 위해 사용되는 경우와 갑상선암 치료를 위해 사용되는 경우로 나눌 수 있다. I-131 핵종은 베타-붕괴를 통해서 Xe-131m을 발생시키는데, Xe-131m 핵종은 반감기가 11.9 일로 I-131의 8.02 일 보다 다소 길므로 I-131 핵종의 자체폐기가능일 산출에서 Xe-131m 핵종의 방사능을 고려해 주어야 한다. 폐기물의 측정결과에서 치료용으로 사용되는 캡슐케이스, 비닐장갑, 그리고 팔 토시의 경우 진단용으로 사용되는 유리병에 비해 낮은 측정결과를 보였다. 진단용의 경우 자체처분 가능일이 109 일이 소요되며, 치료용의 경우 자체처분 가능일이 103 일이 소요됨을 알 수 있다. 비닐장갑 및 팔 토시는 즉시 처분이 가능한 것으로 나타났다.

다른 방사성핵종의 종류 및 발생유형별 자체처분 가능일을 고려할 때, I-131 핵종 관련 폐기물은 긴 반감기로 인하여 자체처분에 다소 긴 시간이 소요됨을 확인할 수 있었다. 그리하여 시간경과 별로 방사능농도를 측정하여, 측정값을 바탕으로 한 실무적 처분을 가능하게 하기 위하여, I-131 방사성폐기물의 방사능 유도 감쇠식을 구하여 나타내었다. [Fig. 1]은 I-131 방사성폐기물을 시간경과별로 측정된 데이터를 바탕으로 감쇠 그래프를 구한 것이다.

측정한 방사성폐기물의 방사능은 대체로 시간경과에 따라 이론에 따른 지수 함수적으로 감쇠되어 감을 알 수 있었고, I-131 핵종의 방사능 측정값을 바탕으로 곡

Table 1. Radioactivity measurement according to the incident types of I-131 radioactive waste

Radionuclide	I-131				Xe-131m			
	Vial (Diagnostic)	Capsule Case (Therapy)	Poly Grave	Arm Sleeve	Vial (Diagnostic)	Capsule Case (Therapy)	Poly Grave	Arm Sleeve
No. of sample	20	27	3	6	20	27	3	6
Specific radioactivity (Bq/g): $m \pm \sigma$	$1.30 \times 10^7 \pm 6.19 \times 10^6$	8.62 ± 9.98	0.39 ± 0.03	0.35 ± 0.20	$3.05 \times 10^5 \pm 1.61 \times 10^5$	$2.08 \times 10^4 \pm 1.74 \times 10^4$	Not Available	Not Available
Mean storage period to clearance level	161	0	0	0	109	103	-	-

선 맞추기(curve fitting)에 의하여 구한 감쇠식은 아래 식과 같다.

$$y = 4.713e^{-0.089x}$$

위 감쇠식의 상관계수: R² 값은 0.997 이었으며, 유효 반감기(effective half-life)는 7.72 일로 나타났다.

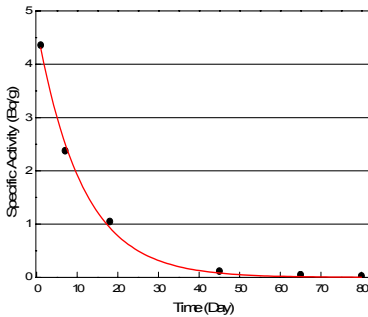


Fig. 1 Radioactivity reduction according to the elapsed time of I-131 radioactive waste

이론적인 반감기인 8.02일과 비교하였을 경우 큰 차이는 나타나지 않으며 다소 짧은 반감기로 방사성폐기물이 붕괴함을 확인 할 수 있다.

I-131 핵종의 경우 자체처분가능일 산출에서 확인하였듯이 Xe-131m 핵종의 발생으로 단순히 I-131 핵종의 방사능농도로만 평가하기는 어려움이 있어 [Fig. 2]에 Xe-131m의 시간경과에 따른 감쇠그래프 및 감쇠식을 나타내었다.

Xe-131 핵종의 시간경과에 따라 측정된 방사능 값의 감쇠를 바탕으로 곡선 맞추기(curve fitting)에 의하여 구한 감쇠식은 아래 식과 같다.

$$y = 10847.74e^{-0.067x}$$

위 감쇠식의 상관계수(R²)값은 0.997이며, 유효반감기는 10.31 일로 나타났다. 이론적 반감기인 11.9 일과 비교했을 때 다소 짧은 반감기를 나타냄을 알 수 있었다. 위의 결과를 바탕으로 했을 때 I-131 방사성폐기물의 감쇠는 이론적인 데이터보다 다소 짧은 주기로 일어나며, 측정값을 바탕으로 보다 효율적인 방사성폐기물의 관리가 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

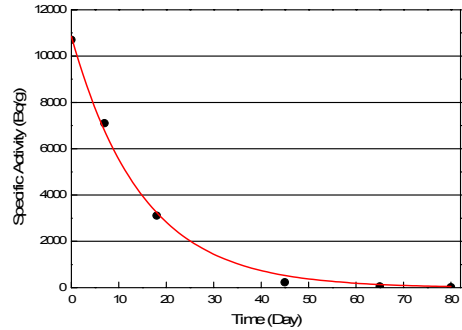


Fig. 2 Radioactivity reduction according to the elapsed time of Xe-131m radioactive waste

다음의 [Table 2]는 I-131 캡슐케이스의 폐기물을 측정하여 구한 유효반감기를 바탕으로 산정한 자체처분 가능일을 기존 이론적 반감기에 근거한 자체처분가능일과 비교한 것이다. 이론적 반감기에 비해 실측치를 바탕으로 한 경우가 비교적 짧은 자체처분 가능일로 산출되었고, 그 결과는 약 14 일 정도의 차이가 있었다. 기존 처분에 비해 0.86의 비율로 감소함을 확인 할 수 있었다.

실측치를 바탕으로 한 경우, 폐기물 보관시설 내에 불필요한 공간 적체를 제한 할 수 있으며, 따라서 장반감기 핵종의 경우에는 기존의 처리일 보다 더 빠르게 처분할 수 있는 것으로 나타나 효율적인 폐기물관리가 가능함을 확인할 수 있다.

Table 2. Radioactive waste storage periods compared with the theoretical half-life and effective half-life based on measured radioactivities

sample	Possibility periods for self-disposal (day)		
	A Theoretical half-life (11.9 d)	B Effective half-life (10.31 d)	Difference between A and B
1	102.4	88.7	13.7
2	140.3	121.6	18.7
3	98.6	85.5	13.1
4	111.8	96.9	14.9
5	126.0	109.2	16.8
6	114.9	99.5	15.4
7	125.0	108.3	16.7
8	43.3	37.5	5.8

V. 결론

본 연구를 통하여 국내는 물론 전 세계적으로도 의료용 I-131 관련 방사성폐기물에 대해 처음으로 자체처분을 위한 측정방법을 설정하고 시도되었다는 점에서 향후 유사 연구에 큰 도움이 될 것으로 보인다. I-131 핵종을 포함하여 의료현장에서 발생하는 다양한 핵종, 종류 그리고 사용 형태 등과 관련한 방사성폐기물의 방사능 농도측정 방법 및 절차에 대해서는 앞으로 보다 많은 관심과 노력을 기울여야 할 것이다. 또한, 방사성폐기물의 자체처분에 대해 과학적 근거를 기반으로 보관 기간 산출 방법에 대한 연구 또한 병행되어야 할 것이다. 특히, 이 연구에서 시도한 측정방법 및 절차와 이를 적용한 측정결과는 조만간 ISO (International Organization for Standardization) 표준으로 제안하고자 한다.

참고 문헌

- [1] J. S. Ryu, "Diagnostic and Therapeutic Approaches to Radioactive Iodine Refractory Differentiated Thyroid Cancer," Korean J Otorhinolaryngol- Head Neck Surg, Vol.55, pp.403-409 2012.
- [2] National Cancer Center, Ministry of Health & Welfare. Cancer Facts & Figures 2011 in the Republic of Korea. Seoul, Republic of Korea; pp.6-21, 2011.
- [3] ICRP Publication 94: Release of Patients after therapy with unsealed radionuclides, 2004.
- [4] M. J. Park, J. H. Kim, J. C. Jang, C. H. Kim, J. M. Jeong, and D. S. Lee, "Optimization of Inpatient Management of Radioiodine Treatment in Korea," Nucl Med Mol Imaging, Vol.42, No.4, pp.261-266, 2008.
- [5] Shapito J: Radiation Protection: A guide for scientists, regulators and Physicians, 4th ed,

Harvard University Press, pp.359-371, 2002.

- [6] IAEA Safety Series No.40: Applying Radiation Safety Standards in Nuclear Medicine, 2005.
- [7] R. Ravichandran, J. P. Binukumar, R. Sreeram, and L. S. Arunkumar, "An overview of radioactive waste disposal procedures of a nuclear medicine," J Med Phys, Vol.36, No.2, pp.95-99, 2011.
- [8] IAEA Safety Series No.111: Classification of Radioactive Waste, 1994.
- [9] IAEA TECDOC-1183: Management of radioactive waste from the use of radionuclides in medicine, 2000.
- [10] IAEA Safety Series No.111-P-1.1: Application of exemption principles to the recycle and reuse of materials from nuclear facilities, 1992.
- [11] IAEA S/S No. RS-G-1.7: Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, 2004.
- [12] 한국원자력의학원, 한국원자력안전기술원 위탁 과제보고서: Measurement of Radioactive waste contaminated with Radioisotopes for medical application, 2013.
- [13] 원자력안전위원회고시 제2012-59호: 방사성폐기물의 자체처분에 관한 규정, 2012.

저자 소개

김창범(Chang-Bum Kim)

정회원



- 2014년 2월 : 동신대학교 대학원 방사선물리학과 박사과정 수료
- 1992년 2월 : 충남대학교 기계공학과(공학석사)
- 1978년 2월 : 한양대학교 원자력공학과(공학사)

<관심분야> : 방사선장해방어, 방사선 관련 표준

장 성 주(Seong-Joo Jang)

정회원



- 1981년 2월 : 전남대학교 물리학
과(이학사)
- 1988년 2월 : 전남대학교 대학원
물리학과(이학박사)
- 1988년 ~ 현재 : 동신대학교 방
사선학과 교수

<관심분야> : 방사선계측, 방사선물리