

반도체 제조 이온주입 공정의 이온 임플란타 장치에서 엑스레이 발생 특성

박동욱^{1*} · 조경이^{2,3} · 김소연⁴ · 이승희¹ · 정은교⁵

¹한국방송대학교 보건환경학과, ²서울대학교 보건대학원 환경보건학과,
³국립암센터 암예방사업부, ⁴창원파티마병원, ⁵오산대학교 산업안전보건과

Characterization of X-ray Emitted in the Ion Implantation Process of Semiconductor Operations

Dong-Uk Park^{1*} · Kyung Ehi Zoh^{2,3} · Soyeon Kim⁴ · Seunghee Lee¹ · Eun Kyo Jeong⁵

¹Department of Environmental Health, Korea National Open University

²Department of Environmental Health, Graduate School of Public Health, Seoul National University

³National Cancer Control Institute, National Cancer Center

⁴Changwon Fatima Hospital, Changwon, Republic of Korea

⁵Department of Industrial Safety and Health, Osan University

ABSTRACT

Objectives: The aims of this study are to investigate how X-rays are emitted to surrounding parts during the ion implantation process, to analyze these emissions in relation to the properties of the ion implanter equipment, and to estimate the resulting exposure dose. Eight ion implanters equipped with high-voltage electrical systems were selected for this study.


Methods: We monitored X-ray emissions at three locations outside of the ion implanters: the accelerator equipped with a high-voltage energy generator, the impurity ion source, and the beam line. We used a Personal Portable Dose Rate and Survey Meter to monitor real-time X-ray levels. The SX-2R probe, an X-ray Features probe designed for use with the Radiagem™ meter, was also utilized to monitor lower ranges of X-ray emissions. The counts per second (CPS) measured by the meter were estimated and then converted to a radiation dose ($\mu\text{Sv/hr}$) based on a validated calibration graph between CPS and $\mu\text{Gy/hr}$.


Results: X-rays from seven ion implanters were consistently detected in high-voltage accelerator gaps, regardless of their proximity. X-rays specifically emanated from three ion implanters situated in the ion box gap and were also found in the beam lines of two ion implanters. The intensity of these X-rays did not show a clear pattern relative to the devices' age and electric properties, and notably, it decreased as the distance from the device increased.


Conclusions: In conclusion, every gap, in which three components of the ion implanter devices were divided, was found to be insufficiently shielded against X-ray emissions, even though the exposure levels were not estimated to be higher than the threshold.


Key words: ion implanter, ion implantation process, X-ray

*Corresponding author: Dong-Uk Park, Tel: +82-2-3668-4707, E-mail: pdw45@gmail.com
Department of Environmental Health, Korea National University, 86 Daehak-ro, Jongnogu, Seoul, 03087, Republic of Korea
Received: October 6, 2023, Revised: November 10, 2023, Accepted: December 14, 2023

 Dong-Uk Park <https://orcid.org/0000-0003-3847-7392>

 Kyung Ehi Zoh <https://orcid.org/0000-0002-2821-070X>

 Soyeon Kim <https://orcid.org/0000-0001-8080-3126>

 Seunghee Lee <https://orcid.org/0000-0003-4693-811X>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

반도체 제조 공장에서 부도체인 실리콘 웨이퍼 기판(이하 웨이퍼 기판)에 전기적 특성을 부여하는 불순물(dopants 또는 impurities) 이온을 주입하는 공정에는 확산(diffusion)과 이온주입(ion implantation)이 있다. 이 중 이온주입 공정은 임플란타(implanta)를 사용하여 고진공 상태에서 주입하고자 하는 불순물 원소(예, 보론, 인, 비소)가 포함된 가스(예, BF_3 , PH_3 , AsH_3 등을 이온화하고 높은 전압의 전기로 가속하여 적절한 양의 불순물 이온(dopants ion)을 기판에 원하는 깊이로 넣는 공정이다.

이온주입 공정에서는 이온이 가속하거나 충돌하는 과정에서 엑스레이가 발생한다. 불순물 이온을 웨이퍼 기판에 주입하기 위해서는 높은 전압의 이온가속기를 사용하여 이온을 높은 에너지로 가속한다. 가속된 불순물 이온은 웨이퍼 기판을 투과할 때 기판 표적 물질의 전자(electron)와 충돌하여 에너지를 잃게 된다. 기판 표적 물질의 전자는 높은 에너지를 받아 여기되고(excited), 다시 정상상태 또는 기저상태(ground or normal state)로 돌아갈 때 여분의 엑스레이 에너지 범위의 광자(photon)를 방출한다. 이는 전자 같은 하전입자가 다른 하전입자(일반적으로 원자핵)에 의해 감속 또는 편향될 때 발생하는 일종의 브렘스트랄룽(Bremsstrahlung) 방사선이다(Britannica, 2023). 불순물 이온은 웨이퍼에 삽입되기 전에 일련의 가속기와 빔 튜브, 벽면 등 컴포넌트를 통과하며 에너지를 손실하게 되고 이온은 빠른

속도로 움직이는 동안 주변 물질과 상호 작용하면서 브렘스트랄룽이 발생하여 의도하지 않은 외부 방사선이 상당량 방출된다.(Maletskos & Hanley, 1983) 반도체 제조의 이온주입 공정 중 엑스레이 방출은 공정의 일부가 아니라 이온과 반도체 재료 간의 고에너지 상호작용과 관련된 여러 물리적 기전으로 생성된다(Crowder, 2013).

엑스레이의 강도 등 특성은 주입한 불순물 이온의 에너지, 웨이퍼 기판의 특성, 차폐 정도와 같은 요인에 따라 달라진다. 이온주입 공정에서 사용하는 임플란타는 고전압 에너지(9만 V 이상), 중전류 에너지, 고전류 에너지 등 종류에 따라 다양한 전기적 특성이 있다.

본 연구에서는 이온주입 공정에서 사용되는 임플란타의 전기적 특성, 제조년도 등 사양에 따른 엑스레이 발생 특성을 규명하고 노출선량을 추정하였다.

II. 연구 방법

1. 엑스레이 측정 대상과 위치

엑스레이 측정 대상 기기는 고전압 전기 시스템을 사용하여 가동 중인 이온 임플란타 8대였다. 이온 임플란타의 내부는 보통 3개 부분으로 나뉘는데, 불순물 이온 발생 박스(ion source, 이하 이온 발생 박스), 고전압 에너지 발생장치가 있는 가속기(accelerator)로 이온을 가속하는 빔 라인(beam line), 웨이퍼 기판의 표면에 이온을 도핑하는 엔드 스테이션(end station, process chamber라고도 함)으로 구성된다. 이온 발생 박스는

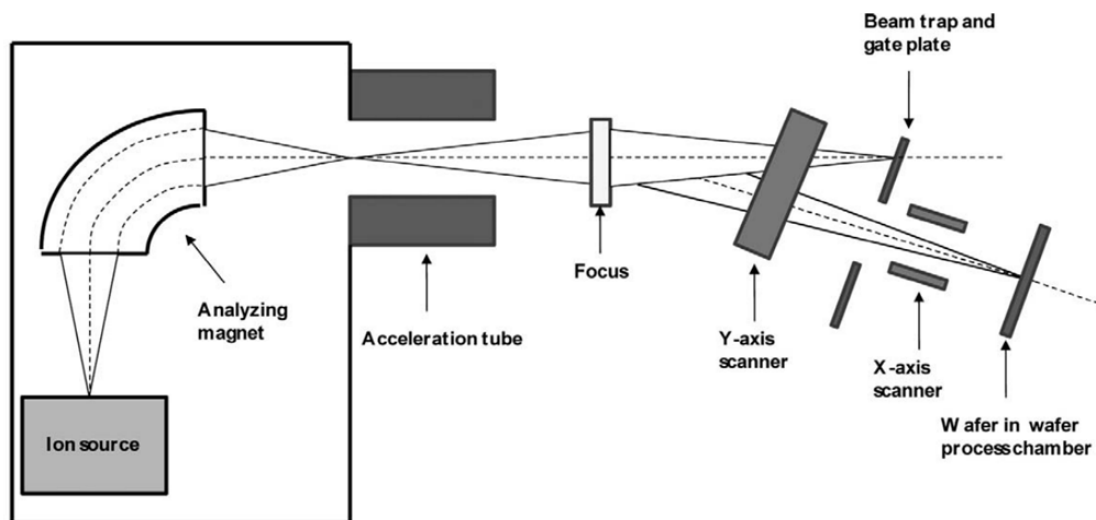


Figure 1. Typical ion implantation equipment (cited from Cox, 1984; Park et al. 2011)

불순물 원자가 이온화되는 장치이고, 높은 에너지의 고전압을 받은 가속기를 통해 불순물 이온이 웨이퍼 기판 재료를 투과하도록 설계되어 있다. 빔 라인은 이온이 생성되고 가속되어 생긴 이온빔이 표적인 웨이퍼 기판으로 정확하고 효과적으로 향하도록 초점을 맞추는 장치이다 (Figure 1)(Cox, 1984; Park et al., 2011). 발생한 엑스레이가 외부로 방출되지 않도록 이온주입 공정 챔버는 보통 납으로 차폐되어 있다.

본 연구에서 엑스레이 모니터링 지점은 밀폐된 이온 임플란타 3개 장치(이온 발생 박스, 가속기, 빔 라인)별 패널 박스 틈새 부분이다. 패널 틈새 표면에서 10 cm와 30 cm 떨어진 곳에서 바닥으로부터 50~150 cm 사이 근로자 가슴 높이에서 측정했다(Figure 2). 측정 위치와 거리는 이온 임플란타에서 엑스레이가 누출될 가능성이 있는 설비 표면 및 공간을 감안하여 선정하였다. 지점마다 5~15분 정도 모니터링한 후 일관성 있게 검지된 가장 높은 피크값(peak value)들을 선택하였고, 이 값을 측정 위치별 엑스레이의 대표 강도로 간주하였다.

2. 엑스레이 모니터링

산업안전보건법(산업안전보건기준에 관한 규칙 「제7

장 방사선에 의한 건강장해의 예방」)(EROSHS, 2023)에서 규정하는 방사선(radiation)의 범위는 방사선 발생장치의 경우 5keV 이상이지만, 원자력안전법(NSA, 2023)에서는 50 keV 이상이다.

일반적으로 반도체 공정 등에서 부산물로 발생하는 엑스레이는 에너지가 낮다. 판매 중인 대부분의 측정기가 40 keV 이상의 방사선을 측정하는 것으로, 이보다 에너지가 낮은 영역은 측정이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 에너지가 5 keV 이상인 엑스레이를 검출할 수 있는 휴대용 방사선 측정기(Radiagem™ 2000 Personal Portable Dose Rate and SX-2R, X-ray Features probe for Radiagem™, Canberra Industries, Inc., USA, 이하 Radiagem™)를 사용하여 측정하였다 (Canberra, 2000; Chung et al., 2015). 모니터링에 사용된 측정 장비에 대한 정도관리는 국가 공인기관으로부터 매년 검교정을 받고 있다.

3. 엑스레이 노출선량 추정

엑스레이 노출선량은 본 연구에서 측정한 1 CPS당 $133 \mu\text{Sv/h} + 34.6$ 으로 환산하여 추정하였다. 이는 측정기기 매뉴얼에 있는 환산인자 Gamma sensitivity

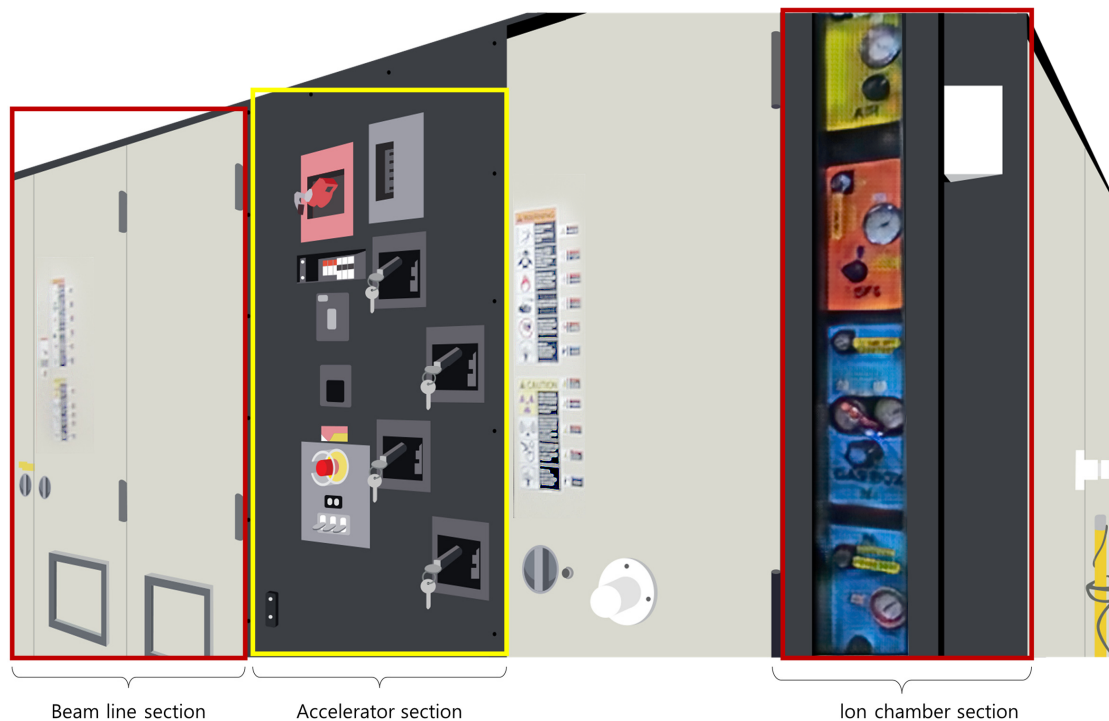


Figure 2. Three points where X-ray was monitored in ion implantation process (beam line, panel behind high voltage electric system, and ion source chamber)

137 Cs, 160 CPS per $\mu\text{Gy/h}$ 또는 96 kcpm per mR/h에 따른 것이다. 실제 계산에서는 Table 1의 국가 검교정기관인 KORASOL(코라솔) 검교정 값에 근거하여 비례식으로 변환하였고(KORASOL, 2017), 검교정 결과도 제시하였다(Table 1).

CPS를 $\mu\text{Sv/h}$ 로 변환할 때 사용되는 변환계수는 감지되는 방사선의 유형, 방사선의 에너지, 방사선원으로부터의 거리 등 여러 요인에 따라 달라진다. 변환계수는 CPS 단위당 선량률(Sv)을 측정하는 척도를 제공한다. 이 변환계수는 대략적인 값이며, 모든 유형의 방사선에 적용되지 않을 수 있다는 점에 유의하여야 한다. 또한 엑스레이 방사선 노출로 인해 개인이 받는 실제 선량은 노출 기간과 빈도, 특정 유형의 엑스레이 시술, 개인의 연령, 성별, 건강 상태 등 여러 요인에 따라 달라질 수 있다.

Table 1. Relationship between CPS(count per second) measured by radiation instrument equipped with X-ray detector and μSv based on calibration graph (KORASOL, 2017)

μSv	CPS
5	687.2
10	1,362.4
15	2,036.4
30	4,035.4
40	5,373.4
50	6,662.4

III. 결 과

이온주입 공정(ion implanta) 장치별, 설치 시기별, 3개 장치 패널 부분별 엑스레이 측정 결과는 Table 2와 같다. 이온 임플란타 7대의 고전압 가속기 튜브에서는 엑스레이가 거리 구분 없이 모두 검출되었다. 이온 임플란타 3대(XX8-IHE 203, XX8-IHE 204, XX8-IHE 301)의 이온 발생 박스 튜브에서도 엑스레이가 거리 구분 없이 검출되었다. 이온 임플란타 2대(XX8-IHE 204, XX8-IHE 301)에서는 빔 라인튜브에서도 엑스레이가 거리 구분 없이 검출되었다. 즉, 이온 임플란타 2대(XX8-IHE 204, XX8-IHE 301)에서는 3개 장치 튜브에서 거리 구분 없이 엑스레이가 방출되는 것을 확인하였다. 장치에서의 거리(10 cm, 30 cm)가 멀어짐에 따라 엑스레이 검출량은 줄어들었다(Table 3-4). 한편 엑스레이 노출선량(μSv) 추정과 실제 측정 수준과의 차이는 XX8-IHE 203 장치를 제외하고는 크지 않았다(Table 3-4). 이러한 차이도 노출선량의 직업적 기준에 영향을 미칠 정도는 아니었다.

본 연구 결과로 이온 임플란타의 장치 패널 보드 등의 공간에서 엑스레이가 완전히 차폐되지 않았음을 확인하였다(ACGIH, 1987). 엑스레이 측정 강도를 비교할 때 장치 구입 연도에 따라 경향성이 보이지는 않았다.

IV. 고 찰

본 연구에서는 이온주입 공정에서 사용되는 이온 임

Table 2. Estimated absorbed dose($\mu\text{Sv/hr}$) and monitored X-ray peak levels from the surface of three sections of a high-energy ion implanter

Equipment No.	Manufactured year	High-voltage accelerator part		Ion source box part		Beam line part	
		CPS*	$\mu\text{Sv/hr}$	CPS	$\mu\text{Sv/hr}$	CPS	$\mu\text{Sv/hr}$
XX8 IHE 201	2000	386	2.10	ND [†]	NA [‡]	ND	NA
XX8 IHE 202	2002	187	1.02	ND	NA	ND	NA
XX8 IHE 203	2002	2140	11.64	176	0.96	1280	6.96
XX8 IHE 204	2007	830	4.51	ND	NA	285	1.55
XX8 IHE 301	2000	410	2.23	ND	NA	ND	NA
XX9 IHE 201	2001	319	1.73	ND	NA	ND	NA
XX9 IHE 301	2011	151	0.82	ND	NA	ND	NA

*CPS: count per second; [†]ND: not detected; [‡]NA: not applicable.

Table 3. Estimated absorbed dose($\mu\text{Sv/hr}$) and monitored X-ray peak levels 10 cm from the surface of three sections of a high-energy ion implanter

Equipment No.	Manufactured year	High-voltage accelerator part			Ion source box part			Beam line part		
		CPS*	$\mu\text{Sv/hr}^\dagger$	$\mu\text{Sv/hr}^\ddagger$	CPS	$\mu\text{Sv/hr}^\dagger$	$\mu\text{Sv/hr}^\ddagger$	CPS	$\mu\text{Sv/hr}^\dagger$	$\mu\text{Sv/hr}^\ddagger$
XX8 IHE 201	2000	186	1.01	1.49	ND [‡]	NA	ND	ND	NA	ND
XX8 IHE 202	2002	913	4.96	2.25	ND	NA	ND	ND	NA	ND
XX8 IHE 203	2002	5750	31.27	2.75	1700	9.24	2.43	ND	NA	ND
XX8 IHE 204	2007	536	2.91	1.29	1070	5.82	2.30	2040	11.09	1.26
XX8 IHE 301	2000	521	2.83	2.12	675	3.67	1.40	Exceeding detection range		2.47
XX9 IHE 201	2001	463	2.51	2.57	ND	NA	ND	ND	NA	ND
XX9 IHE 301	2011	195	1.06	1.95	178	0.97	1.23	ND	NA	ND

*CPS: count per second; [†]: Estimated based on the relationship in Table 1; [‡]: Measured directly by ion chamber; [§]ND: Not Detected; [§]NA: Not applicable; Background radiation: 10~15 CPS, ^{||}Detection limit: 10,000 CPS

Table 4. Estimated absorbed dose($\mu\text{Sv/hr}$) and monitored X-ray peak levels 30 cm from the surface of three sections of a high-energy ion implanter

Equipment No.	Manufactured year	High-voltage accelerator part			Ion source box part			Beam line part		
		CPS*	$\mu\text{Sv/hr}^\dagger$	$\mu\text{Sv/hr}^\ddagger$	CPS	$\mu\text{Sv/hr}^\dagger$	$\mu\text{Sv/hr}^\ddagger$	CPS	$\mu\text{Sv/hr}^\dagger$	$\mu\text{Sv/hr}^\ddagger$
XX8 IHE 201	2000	159	0.86	1.06	ND [‡]	ND	ND	ND	ND	ND
XX8 IHE 202	2002	547	2.97	2.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
XX8 IHE 203	2002	2320	12.62	1.95	313	1.70	1.16	ND	ND	ND
XX8 IHE 204	2007	221	1.20	0.86	5800	31.54	1.58	998	5.43	1.32
XX8 IHE 301	2000	201	1.09	1.70	1810	9.84	1.32	201	1.09	1.55
XX9 IHE 201	2001	263	1.43	1.78	ND	NA	ND	ND	NA	Not operated
XX9 IHE 301	2011	105	0.57	1.12	ND	ND	ND	ND	NA	Not operated

*CPS: count per second; [†]: Estimated based on the relationship in Table 1; [‡]: Measured directly by ion chamber; [§]ND: Not Detected; [§]NA: Not applicable.

플란타 뒷면의 밀폐된 3개 패널 틈새(이온 발생 박스, 가속기, 이온빔 라인)에서 방출되는 노출선량을 추정하고 비교하였다. 그 결과 일부 이온 임플란타에서 엑스레이가 누출되는 것을 확인하였다. 엑스레이는 대부분 설치된 지 오래된 이온 임플란타에서 발생하였고, 최근 설치된 장치도 특정 지점에서 발생하였다(Table 2-4). 다만 주입하는 이온의 종류와 전하수에 따라 발생하는 이온빔 에너지는 최저 90 KeV에서 최고 4,900 KeV까지이므로 이온 임플란타에 따라 엑스레이 발생 정도에 차이가 있을 수는 있지만, 본 연구에서는 확인하지 못하였다.

이온 임플란타 주변 엑스레이 검출은 Chung et al. (2015)이 반도체 공장에서 수행한 연구 결과와 비슷하

였다. 이 연구에서 반도체 공장 Fab 라인의 이온 임플란타에서 측정한 지역 노출선량률(50~100 cm 거리에서)은 $1.07 \pm 2.53 \mu\text{Sv/h}$ (범위: 0.01~13.32 $\mu\text{Sv/h}$) [HE 임플란타: $2.17 \pm 3.48 \mu\text{Sv/h}$]였고, 반도체 조립 라인에서는 $0.03 \pm 1.02 \mu\text{Sv/h}$ (범위: 0.01~0.05 $\mu\text{Sv/h}$)였다(Chung et al., 2015). 전반적으로 반도체 이온주입 공정에서 발생한 엑스레이 수준은 국내에서 보고된 비파괴검사 등의 수준(산술평균 $17.5 \pm 24.8 \mu\text{Sv/h}$, 범위: 1.10~112.0 $\mu\text{Sv/h}$)보다 훨씬 낮았다.

이온 임플란타에서 엑스레이는 이온주입 공정에서 비소 등 불순물을 웨이퍼 기판에 주입하는 과정에서 부산물로 발생하므로, 공학적으로 차폐해야 한다는 사항은

잘 알려져 있다. 이온 임플란타는 주로 진공펌프, 이온 발생 박스, 전자기장 형성 장치, 가속기, 빔 라인 등으로 구성된다. 이온 발생 박스에서 발생한 다양한 형태의 이온들은 전자기장을 통과하는 동안 특정한 이온만 전자기장에 걸려져 고에너지(200~400 keV)의 전기장으로 들어가게 되고, 여기에서 빔 라인을 따라 가속하여 목표물인 웨이퍼 기판에 주입된다. 최근에는 10 MeV 이상의 이온 임플란타도 사용되는 것으로 알려져 있다. 모든 이온 임플란타는 이온빔의 하전된 입자를 가속하기 위하여 고압 전류를 사용하기 때문에 엑스레이가 부산물로 발생하고, 엑스레이 노출 위험 외에 기타 불순물 가스 노출, 고전압에 의한 감전 사고 위험 등이 존재한다. 정상 작업 시 이온 임플란타는 밀폐되어 있고, 장치 간 이음 부분을 제외하고 납으로 차폐되어 있다. 그러나 가동 중인 고에너지 이온 임플란타 전부에서 엑스레이가 공통으로 누출되었기 때문에 해당 부분의 엑스레이 차폐막에 대한 구조, 설계적 고려와 보강이 필요하다. 특히 정비 작업 후에 재조립 등의 과정에서 틈새 등이 발생하지 않도록 주의해야 한다. 그 밖에 이온 발생 박스 주변부는 주로 도어 틈새에서 높은 값(최고 5,800 CPS)이 검출되며, 빔 라인 부분은 주로 하단부에 알루미늄으로 덧대어진 부분에서 심한 경우 방사선 측정기기의 최고 검출한계(10,000 CPS)를 초과하기도 하였다. 이온 임플란타에서 엑스레이 발생을 줄이려면 임플란타 설계, 전자가 충돌할 수 있는 원자번호가 낮은 재료, 조립 시 청결, 전자 수를 줄이기 위한 억제 필드(suppression fields) 사용, 차폐, 인터록 및 작동 등이 고려되어야 한다(Maletskos & Hanley, 1983).

정비 및 정기 정비를 마무리한 후, 방사선 차폐가 원활하게 이루어지도록 장치 도어 부분 밀폐 확인이 필요하며, 높은 측정 수치가 나온 빔 라인의 알루미늄 부분은 방사선 흡수계수가 높은 납으로 외부를 덧대는 것이 엑스레이 차폐에 더 효율적이다. 최근에는 장치 이음 부분을 겹치게 교차로 차폐하여 이음 부분 틈새로 엑스레이가 누출되지 않도록 하는 방법도 있는 것으로 알려져 있지만, 장치 설치부터 일반적인지는 추가 조사가 필요하다.

본 연구 결과에서 검출된 엑스레이는 이온주입 공정 운전자나 정비 작업자가 상시 노출되는 수준이 아니다. 기기로부터 10 cm와 30 cm 떨어진 지점에서 순간 피크를 측정한 값으로, 실제 노출수준으로 단정할 수 없다.

그러나 정비 작업자들이 가동 중인 이온 임플란타 근처에서 정비 작업할 경우 틈새 부분의 엑스레이에 간헐적으로 노출될 가능성이 있다(Ungers & Jones, 1986). 예를 들면, 1 $\mu\text{Sv/hr}$ 를 발생하는 고전압 에너지 이온 임플란타 근처에서 하루 평균 4시간 정비 작업을 하는 근로자의 연간 누적 엑스레이 노출선량을 추정하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} & 4 \text{ 시간/일} \times 1 \mu\text{Sv/시간} \times 5 \text{ 일/주} \times 50 \text{ 주/년} \\ & = 1,000 \mu\text{Sv/yr} = 1 \text{ mSv/yr} \end{aligned}$$

원자력 안전법상 방사선량의 노출 한도는 일반인의 경우 자연방사선과 의료 방사선 선량을 제외하고 연간 내부와 외부 피폭의 합계가 1 mSv를 초과하지 않도록 규정하고 있다(NSA, 2023). 국제방사선방호위원회(ICRP)는 직업적 방사선 노출에 대한 제한을 규정된 5년 동안 평균 연간 유효 선량 20 mSv, 매년 50 mSv를 초과하지 않도록 권고하고 있다(ICRP, 2007).

그러나 역학연구에서 보고된 저선량 방사선 노출에 의한 위험도는 대체로 문턱 없는 선형 모델(linear no-threshold model)에 부합한다는 근거에 따르면, 이온주입 공정에서 발생하는 적은 선량이라도 노출되면 그 선량에 비례하는 만큼의 위험도가 존재한다고 할 수 있다(NCRP, 2018). 엑스레이와 같은 방사선의 확률론적 건강 영향은 문턱 없는 선형 모델에 근거하고 있으므로 합리적으로 가능한 범위에서 최소한의 노출(As Low As Reasonably Achievable, ALARA)을 통해 예방하는 것을 원칙으로 한다(Protection, 2007). 물론 합리적으로 낮출 수 있는 수준이 어디까지인지에 관한 판단은 모호하고 상황마다 다를 수 있지만, 가능한 한 최소한으로 낮추고자 하는 방향성이 중요하다. 방사선량의 설정 기준은 안전과 안전하지 않음의 판단 기준이 아니며, 단지 사회에서 허용할 수 있는 범위에서 최저 관리 기준을 의미한다.

방사선에 대한 전반적인 안전 규제를 총괄하는 원자력안전위원회의 고시에 따르면 “방사선기기의 외부에 형성되는 방사선장에 의한 피폭(노출)방사선량이 최대가 되는 가동 조건에서 모든 접촉 부위의 표면 방사선량은 시간당 10 μSv 를 초과하지 않아야 한다.”라고 규정하고 있다. 그러나 방사선 발생장치인 이온 임플란타의 일부 표면에서 최대 표면방사선량률이 규제 기준인 10 $\mu\text{Sv/hr}$ 를 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 이

온주입 과정에서 엑스레이 발생 위험을 최소화하려면 적절한 차폐 등 안전 조치를 시행해야 한다. 여기에서 표면방사선량률이란 방사성물질, 방사성물질을 내장한 용기 또는 장치, 방사선 발생장치, 방사선 차폐체 등 방사선이 나오는 물체의 표면으로부터 10 cm 거리에서 측정된 방사선량률을 말한다.

이온주입 공정에서 이온 발생 박스 등 전기 시스템을 밀폐한 공간의 틈새에서 엑스레이가 발생하는지 정기적으로 모니터링해서 잠재적인 엑스레이 발생원을 파악하고 적절한 차폐 등의 조치를 취해야 한다. 또한 안전보건 부서는 공정 운전이나 정비 작업 시 엑스레이 노출과 관련된 잠재적 위험 장소나 공간에 대한 접근 제한 등의 조치를 취해, 근로자가 이 공간에서 작업을 되도록 피하며 거리를 두고 작업하도록 노출을 줄여야 한다. 특히, 고전압 에너지 이온 임플란타 주변 1 m 이내에서의 작업을 피하는 것이 바람직하다. 정비 작업자는 이온 임플란타 정비 작업을 하는 경우 근처의 엑스레이를 발생시키는 영역을 표시하며, 이 근처의 작업공간이 들어가지 않도록 「방사선 엑스레이 관리 구역」을 설정하고 관계자 외 출입을 금하는 조치가 필요하다.

V. 결 론

가동 중인 고전압 이온 임플란타 7대의 가속기 틈새에서 모두 엑스레이가 검출되었다. 3대(XX8-IHE 203, XX8-IHE 204, XX8-IHE 301)에서는 이온 발생 박스 틈새에서 거리 구분 없이, 그리고 2대(XX8-IHE 204, XX8-IHE 301)에서는 빔 라인에서도 거리 구분 없이 엑스레이가 검출되었다. 이온 임플란타 2대(XX8-IHE 204, XX8-IHE 301)는 3개 장치 틈새에서 거리 구분 없이 엑스레이가 누출되는 것을 확인하였다. 장치에서 떨어진 거리(10 cm, 30 cm)에 따라 엑스레이 검출량이 줄어들었다. 이온주입 과정에서 엑스레이 발생의 위험은 존재한다. 이는 적절한 안전 작업 프로토콜과 적절한 장치 설계를 통해 효과적으로 관리될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2023년도 한국방송통신대학교 지원을 받아 작성된 것으로 이에 감사를 드립니다.

References

- ACGIH. Hazard assessment and control technology in semiconductor manufacturing. Lewis Publishers, Inc.: Ohio. 1987
- Britannica. Bremsstrahlung, Accessed Dec. 22. <https://www.britannica.com/science/bremsstrahlung>. 2023
- Canberra. SX-2R X-Ray Probe Manual: Radiagem TM. 2000(dose rate and survey meter), Canberra industries, Inc., USA 2000
- Chung EK, Kim KB, Song SW. Exposure assessment and management of ionizing radiation. Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene 2015;25: 27-35. (<https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2015.25.1.27>)
- Cox JRD. LSI semiconductor manufacturing, John Wiley and Sons. Ltd.: New York. 1984
- Crowder B. Ion implantation in semiconductors and other materials. Springer Science & Business Media. 2013
- EROSHS. Enforcement Rules on Occupational Safety and Health Standards, Part 3. Health Standards. Chapter7. Prevention of Health Disorders of Radiation. 2023[Enforcement Date: Jul.1, 2023]
- Herrick RF, Stewart JH, Blicharz D, Beall C, Bender T et al. Exposure assessment for retrospective followup studies of semiconductor-and storage devicemanufacturing workers. Journal of occupational and environmental medicine 2005; 983-95. (<https://doi.org/10.1097/01.jom.0000177128.50822.01>)
- ICPR. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. Ann ICRP 2007;37: 2-4
- KORASOL. Calibration Report For Verification Certificate of RadiagemTM 2000, KORASOL Co.. 2017
- Maletskos CJ, Hanley PR. Radiation protection considerations of ion implantation systems. IEEE Transactions on Nuclear Science 1983;30: 1592-96. (<https://doi.org/10.1109/TNS.1983.4332592>)
- NCRP. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Implications of recent epidemiologic Studies for the linear-nonthreshold model and radiation protection. Bethesda: National Council on Radiation Protection and Measurements. 2018
- NSA. Enforced Decree of the Nuclear Safety Act [Enforcement Date: Aug.1, 2023], [the attaced Table

- 1] Radiation Dose Limits [Amendment Date: Apr.12, 2016] 2023
- Park DU, Byun HJ, Choi SJ, Jeong JY, Yoon CS et al. Review on potential risk factors in wafer fabrication process of semiconductor industry. Korean Journal of Occupational and Environmental Medicine 2011;23: 333-42. (<https://doi.org/10.35371/kjoem.2011.23.3.333>)
- Protection, Radiological. 2007. 'ICRP publication 103', Ann ICRP, 37: 2

Ungers LJ, Jones JH. Industrial hygiene and control technology assessment of ion implantation operations. American Industrial Hygiene Association Journal 1986;47: 607-14. (<https://doi.org/10.1080/15298668691390322>)

<저자정보>

박동욱(교수), 조경이(박사수료), 김소연(석사), 이승희(석사수료), 정은교(교수)