

# Analysis of Air Activation in PET Cyclotron Facility

Dong-Gun Jang<sup>1</sup>, Sesik Kang<sup>2</sup>, Changsoo Kim<sup>2</sup>, Junghoon Kim<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Nuclear Medicine, Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences Cancer center

<sup>2</sup>Department of Radiological Science, College of Health Sciences, Catholic University of Pusan

Received: September 202016. Revised: October 30, 2016. Accepted: November 30, 2016

## ABSTRACT

Nuclear reaction which occurs in the cyclotron generate unnecessary neutrons. The results of this happening can radioactivate surrounding materials and radioactive materials cause radiation exposure. When people take radioactive air, it makes internal exposure. The purpose of this study was to analyze the radioactive air inside of the ultra-compact 16.5 MeV cyclotron in operation. As a result of study, the radio activation occurred by compact cyclotron generates a very low internal exposure to workers. Comparing the radioactivity from radioactive nuclide with legal standard, that was under reference value. However, it could be at risk for internal exposure in case of higher energy cyclotron. Therefore, legal standard is needed for ventilation equipment of radiation facilities.

Keyword : Activation, Cyclotron, Air

## I. INTRODUCTION

사이클로트론은 가속되는 에너지에 따라 15 MeV 전후의 초소형 사이클로트론부터 70 MeV 이상의 대형 사이클로트론까지 사용목적에 따라 다양하게 이용되고 있다. 이 중에서 15 MeV 전후의 초소형 사이클로트론은 양전자방출단층촬영장치(PET; Positron Emission Tomography)에 사용되는 양전자방출 핵종(<sup>11</sup>C, <sup>13</sup>N, <sup>15</sup>O, <sup>18</sup>F)을 생산하는 목적으로 이용되며 PET 사이클로트론으로 불리고 있다. PET 사이클로트론은 양자 또는 중양자를 가속하여 Target에 핵반응(p, n)을 통해 방사성 핵종을 생산하며,<sup>[1]</sup> 이러한 핵반응 과정에서 필연적으로 불필요한 중성자가 발생하게 된다.<sup>[2]</sup> 핵반응으로 인해 발생된 중성자는 공기의 구성성분과 반응하여 방사화를 일으켜 방사성가스를 생성하게 되며, 사이클로트론에 근무하는 종사자 및 환기설비를 통해 인근 주민들에게 내부피폭을 발생시킬 우려가 있다.<sup>[3,4]</sup>

방사선 피폭은 인체외부에 있는 방사선원에 의한 외부피폭과 인체내부에 섭취된 방사성물질에 의한 내부

피폭으로 구분할 수 있으며, 외부피폭은 계측기 및 선량계를 인체에 직접 착용하거나 측정하여 인체에 대한 상대적 위치나 방사선량을 비교적 정확히 판단할 수 있다. 하지만 내부피폭은 방사성핵종이 인체의 내부로 흡수되어 발생되며, 개개인의 특성에 따라 방사성 핵종의 흡수 및 분포가 달라 흡수선량평가를 하는데 있어 정확한 파악이 어렵다.<sup>[5]</sup> 이에 본 연구에서는 몬테카를로 모의 모사를 이용한 PET 사이클로트론 운영 시 발생하는 공기의 방사화 정도와 이를 흡입하였을 때, 받게 되는 내부피폭을 국제방어위원회(ICRP)에서 개발한 인체호흡기모델<sup>[6]</sup>을 통하여 표준 선량을 알아보고자 하였다. 단, 미세먼지의 방사화와 고효율필터의 설치를 고려하지 않은 보수적인 방법으로 실험을 진행하였다.

## II. MATERIAL AND METHOD

### 1. 방사화 평가

방사화 평가는 몬테카를로 모사 코드의 한 종류인 F LUKA code<sup>[7]</sup>(FLUktuierende KAskade)를 이용하였으

며, RESNUCLEI를 통해 방사화 정도를 파악하였으며, RESNUCLEI란 중하전입자의 상호작용 후 발생하는 핵종을 파악하는 FLUKA code의 input option 이다.

사이클로트론의 기하학적 구조는 16.5 MeV, 60μA 사양의 PETtrace 800 series(GE Healthcare, USA) 모델<sup>[8]</sup>을 참고하여 H<sub>2</sub><sup>18</sup>O Target을 제작하였으며 Fig. 1 은 FLUKA 모의 모사를 통해 제작된 Targetry의 기하학적 구조이다. 방사화 측정은 양성자 조사 1 시간 후, 4시간 후로 설정하였으며, 사이클로트론 내부의 공기는 ICRU Report 44<sup>[9]</sup>에서 권고하는 물성을 이용하였으며, Table 1 은 공기의 구성성분의 성분을 나타낸다.

FLUKA code를 통해 발생된 방사화된 핵종의 방사능을 국내 법적 규제치<sup>[10,11]</sup> 비교 분석하였으며, Table 2 는 연간섭취한도, 유도공기중농도, 배출관리기준을 나타낸다.

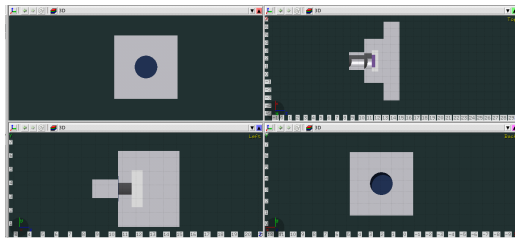


Fig. 1. Geometry using Monte Carlo Simulation.

Table 1. Chemical composition of Air.

Material	Chemical composition (Weight fractions)
Air	<sup>12</sup> C: 0.000124, <sup>14</sup> N: 0.755268
	<sup>16</sup> O: 0.231781, <sup>40</sup> Ar: 0.012827

Table 2. Annual Limit of Intake, Derived Air Concentrations and Effluent Control Limit.

Nuclide	Chemical form	Inhalation		
		ALI Bq	DAC Bq/m <sup>3</sup>	ECL Bq/m <sup>3</sup>
<b>Carbon</b>				
<sup>11</sup> C	Vapour	6E+9	3E+6	2E+4
	Dioxide	9E+9	4E+6	3E+4
	Monoxide	2E+10	7E+6	6E+4
<sup>14</sup> C	Vapour	3E+7	1E+4	1E+2
	Dioxide	3E+9	1E+6	1E+4
	Monoxide	3E+10	1E+7	9E+4
<b>Argon</b>				
<sup>41</sup> Ar	Inert gas		5E+4	5E+2

## 2. 인체호흡기모델

ICRP 에서는 작업종사자에 대한 내부피폭 선량평가에 대해 ICRP Report 66<sup>[5]</sup>을 통해 호흡기모델을 발표하였다. ICRP 66의 호흡기 모델은 해부학적 영역을 ET1(코 앞 부분)와 ET2(비강 후 통로, 인두, 후두, 입)로 구성되는 비흉부영역(ET) 영역과 BB(기관지), bb(세기관지), AI(폐포)로 구분되는 흉부영역으로 구성하였으며, 임파절은 비흉부영역(LNET) 및 흉부영역(LNTH) 별로 각 1개씩 구성되어 있으며, Fig. 2는 ICRP 66 호흡기모델의 구조를 나타낸다.

본 연구에서는 영국 국립방사선방호위원회(NRPB; National Radiological Protection Board)에서 ICRP 66 호흡기모델을 바탕으로 개발한 LUDEP (LUng Doses Evaluation Program)<sup>[12]</sup>을 이용하여 종사자의 내부피폭을 측정하였으며, 공기역학적직경(AMAD; activity median aerodynamic diameter)은 작업자의 흡입에 대해서는 5 μm를, 일반인의 경우에는 1 μm를 적용하였다<sup>[6]</sup>. 흡수형태는 일반인에 대해서는 Type M을 적용하였고, 작업자에 대하여 권고하는 Type F를 적용하였으며,<sup>[13]</sup> 흡입된 방사능은 약한 노동에 종사하는 경우의 호흡량인 25 L/min(light working)값<sup>[14]</sup>을 적용하였다. 내부피폭에 대한 선량단위는 50년간의 예탁유효선량으로 표기하였다.

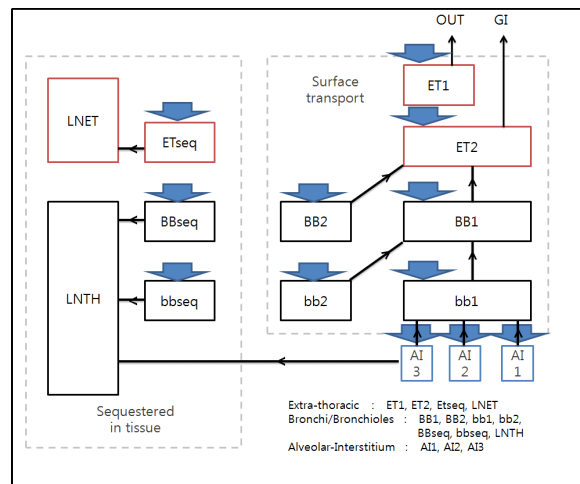


Fig. 2. Structure of the respiratory tract of the ICRP 66 model.

### III. RESULT

#### 1. 방사화 평가

FLUKA 모의 모사를 이용한 방사화 평가 결과 조사 시간에 따른 공기의 방사화 핵종은  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{11}\text{C}$ 로 나타났으며, 조사시간이 1시간에서 4시간으로 증가함에 따라  $^{41}\text{Ar}$ 의 경우 약 2.47배 증가 하였으며,  $^{14}\text{C}$ 의 경우 4.00배,  $^{11}\text{C}$ 의 경우 약 1.15배 증가 한 것으로 나타났다. Table 3 은 조사시간에 따른 공기에서의 단위면적당 방사화 핵종의 방사능을 나타낸다.

Table 3. Air activation according to the irradiation time.

Nuclide	Irradiation		
	1 hrs (A)	4 hrs (B)	(B)/(A)
$^{41}\text{Ar}$	1.56E-09	3.86E-09	2.47
$^{14}\text{C}$	2.67E-13	1.07E-12	4.00
$^{11}\text{C}$	7.82E-09	8.99E-09	1.15

\*unit: Bq/m<sup>3</sup>

#### 2. 내부피폭선량

인체의 평균 호흡량을 기초로 사이클로트론실 내부에서 생성된 방사능을 이용하여 LUDEP 을 통해 예탁유효선량으로 산출하였다. 산출한 결과 1 시간 조사 후 측정된 방사화를 토대로 종사자의 경우 5.28E-18 Sv, 일반인의 경우 1.98E-17 Sv로 나타났으며, 4시간 조사 후 측정 된 방사화를 토대로 하였을 때, 종사자의 경우 7.74E-18 Sv, 일반인의 경우 3.63E-17 Sv로 나타났다.

종사자의 경우 1시간 조사 후 측정된 방사화는 평균적으로  $^{41}\text{Ar}$ (23.86%),  $^{14}\text{C}$ (0.00%),  $^{11}\text{C}$ (76.14%)로 나타났으며, 4시간 조사 후 측정된 방사화는 평균적으로  $^{41}\text{Ar}$ (40.05%),  $^{14}\text{C}$ (0.00%),  $^{11}\text{C}$ (59.95%)로 나타났으며, 일반인의 경우 1시간 조사 후 측정된 방사화는 평균적으로  $^{41}\text{Ar}$ (49.70%),  $^{14}\text{C}$ (0.60%),  $^{11}\text{C}$ (49.70%)로 나타났으며, 4시간 조사 후 측정된 방사화는 평균적으로  $^{41}\text{Ar}$ (67.26%),  $^{14}\text{C}$ (1.31%),  $^{11}\text{C}$ (31.43%)로 나타났다. Table 4는 종사자가 방사화된 공기를 1분간 흡입하였을 때의 예탁유효선량이며, Table 5 는 일반인이 방사화된 공기를 1분간 흡입하였을 때의 예

탁유효선량이다.

Table 4. Committed effective dose to the worker when the inhalation 1 minutes.

Nuclide	Irradiation			
	1 hrs	%	4 hrs	%
$^{41}\text{Ar}$	1.26E-18	23.86	3.10E-18	40.05
$^{14}\text{C}$	7.56E-23	0.00	3.02E-22	0.00
$^{11}\text{C}$	4.02E-18	76.14	4.64E-18	59.95
Total	5.28E-18	100.0	7.74E-18	100.0

\*AMAD = 5  $\mu\text{m}$ , Unit: Sv

Table 5. Committed effective dose to the public when the inhalation 1 minutes.

Nuclide	Irradiation			
	1 hrs	%	4 hrs	%
$^{41}\text{Ar}$	9.86E-18	49.70	2.44E-17	67.29
$^{14}\text{C}$	1.19E-19	0.60	4.76E-19	1.31
$^{11}\text{C}$	9.86E-18	49.70	1.14E-17	31.43
Total	1.98E-17	100.0	3.63E-17	100.0

\*AMAD = 1  $\mu\text{m}$ , Unit: Sv

### IV. DISCUSSION

사이클로트론은 하전입자를 가속하는 장치로써, 국내에서는 15 MeV 이하의 초소형 사이클로트론이 주를 이루고 있으며,<sup>[16]</sup> 방사성의약품 생산하는 목적으로 이용된다.

하지만, 방사성의약품을 생산하는 과정에서 불필요한 중성자가 발생되고, 발생된 중성자는 주변 물질을 방사화시킨다. 중성자에 의하여 방사화된 물질은 방사선평폭에 원인으로 알려져 있으며,<sup>[17]</sup> McGinley P. H. *et. al.*<sup>[3]</sup>는 25 MeV와 45 MeV를 이용한 의료용 가속기시설에서 내부의 공기가 방사화되는 것을 확인하였고, C. Birattari *et. al.*<sup>[4]</sup>는 20 MeV의 중양자를 가속하는 시설에서 방사화된 공기가 환기시설을 통하여 지역주민에게 영향을 미칠 가능성이 있다고 주장하였다. 심지어 방사선평폭에 이용되는 18 MV 선형가속기에서도 광핵반응으로 인하여 공기가 방사화되는 것

으로 알려져 있다.<sup>[18]</sup> 이에 본 연구에서는 국내에 가장 많이 설치되어 있는 가속기인 PET 사이클로트론 운영에 따른 공기의 방사화 정도와 이를 통해 종사자가 받게 되는 내부피폭에 대해 평가하고자 하였다.

실험결과 16.5 MeV의 사이클로트론에서 운영에 따른 공기의 방사화 핵종은  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{11}\text{C}$ 로 나타났으며, 조사시간이 1시간에서 4시간으로 증가함에 따라 방사능은  $^{41}\text{Ar}$ (반감기: 110분)이 약 2.47배 증가하였으며,  $^{14}\text{C}$ (반감기: 5740년)은 4배,  $^{11}\text{C}$ (반감기: 20분)은 1.15배로 반감기가 높은 핵종 일수록 증가되는 비율이 높게 나타났다.

종사자 및 일반인이 방사화된 공기를 1분간 흡입하였을 경우 조사시간에 따라 종사자의 예탁유효선량은  $5.28\text{E}-18$  Sv/1hr irradiation,  $7.74\text{E}-18$  Sv/4hr irradiation, 일반인의 경우  $1.98\text{E}-17$  Sv/1hr irradiation,  $3.63\text{E}-17$  Sv/4hr irradiation 으로 나타났다. 방사선 사용시설에서 발생하는 공기 중 부유입자의 AMAD는  $0.12\sim 25$   $\mu\text{m}$ 로 광범위하게 분포하고 있으며,<sup>[19]</sup>  $0.4\sim 2.1$   $\mu\text{m}$ 의 입자가 폐포까지 침착되는 것으로 알려져 있다.<sup>[20]</sup> 방사성핵종의 화학적 형태 및 입자의 크기에 따라 내부피폭량은 크게 달라질 수 있으며,<sup>[6]</sup> 본 연구에서는 ICRP 66의 권고에 따라 종사자의 경우 입자의 크기 5  $\mu\text{m}$ , 흡수형태 F를 적용하였으며, 일반인의 경우 1  $\mu\text{m}$ , 흡수형태 M을 적용하였다. 그 결과 일반인이 받게 되는 피폭이 종사자의 피폭보다 약 4~5배 높게 나타났으며, 종사자와 일반인의 조건을 다르게 적용시킨 이유는 일반인의 경우 성인을 포함한 모든 연령을 적용하기 위해서이다.

각 핵종별 내부피폭의 비중을 살펴보면 조사시간이 증가함에 따라 반감기가 110분인  $^{41}\text{Ar}$ 은 비중은 증가하였으며, 반감기가 20분인  $^{11}\text{C}$ 의 비중은 낮아졌다. 이는 반감기에가 짧을수록 평형상태에 도달하는 시간이 짧기 때문이며, 방사선의 조사시간이 증가할수록 내부피폭에 영향을 미치는 핵종은  $^{41}\text{Ar}$ 임을 알 수 있었다.  $^{14}\text{C}$ 는 반감기가 5740년으로 가장 길지만 방사화되는 방사능 자체가 낮아 인체에 주는 피폭량은 매우 낮은 것으로 나타났다.

방사화된 핵종의 방사능을 국내 법적 규제치인 연간섭취한도, 유도공기중농도 및 배출관리기준과 비교하였을 때, 방사능이 규제치에 비해 현저히 낮아 법적

인 관리는 필요치 않는 것으로 나타났다. 하지만 사이클로트론에 사용 에너지가 높아짐에 따라 공기의 방사화 정도는 더욱 증가될 것이며, 사용목적에 따라 시설 내부의 출입을 잦은 경우 종사자의 피폭에 대한 위험성은 증가될 것으로 사료되었다.

외국의 경우 시설물에 대한 환기설비에 대한 기준이 마련되어 있고 방사선시설에 대한 환기율의 기준<sup>[21]</sup>이 제시되고 있으며, 심지어 방사화된 공기를 저장할 수 있는 시설이 설치되어 잠재적인 위험까지 방지하는 연구소도 있다.<sup>[22]</sup> 반면, 국내에서는 원자력안전법 시행령 제2조 제12호 등에서 배기설비를 통한 배출 제한값을 통해 외부로의 유출은 제한하고 있지만, 실제 안에서 근무하는 종사자의 내부피폭에 대한 방어설비 및 기준은 매우 미흡한 것으로 사료되었다.

## V. CONCLUSION

사이클로트론 운영으로 인하여 사이클로트론실 내부의 공기는 방사화되고 이로 인하여 종사자들은 내부피폭의 위험을 갖고 있다. 본 연구 결과 16.5 MeV의 초소형 사이클로트론에서 발생된 공기는 방사화로 인체에 내부피폭을 발생시키지만 법적 기준치 이하로 관리의 대상에서 제외 될 수 있는 것으로 나타났다. 하지만, 사이클로트론의 에너지가 높아짐에 따라 공기의 방사화로 인한 내부피폭의 위험성이 높아질 것이며, 이에 따라 방사선 관련 시설에 대한 환기설비의 기준이 정립되어야 할 것이다.

## Reference

- [1] S. M. Qaim, J. C. Clark, C. Crouzel, "Radiopharmaceuticals for Positron Emission Tomography" pp.1-43, 1993.
- [2] N. E. Hertel, M. P. Shannon, Z. L. Wang, et al. "Neutron measurements in the vicinity of a self-shielded pet cyclotron", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 108, No. 3, pp.255-261, 2004.
- [3] McGinley P. H., White TA Jr., "Air activation produced by high-energy medical accelerators", Medical Physics, Vol. 10, No. 6, pp.796-800, 1983.
- [4] C. Birattari, M. Bonardi, A. Ferrari, et al, "Neutron Activation of Air by a Biomedical Cyclotron and an Assessment of Dose to Neighbourhood Populations",

- Radiation Protection Dosimetry, Vol. 14, No. 4, pp.311-319, 1986.
- [5] Junghoon Kim, Hee Geun Kim, JooHo Whang, "Measurement of Uptake Rates of Internal Organs Including Thyroid Gland and Daily Urinary Excretion Rates for Adult Korean Males", Journal of Radiation Protection, Vol. 32, No. 2, pp.45-50, 2007.
- [6] ICRP, "Human respiratory tract model for radiological protection", Report 66 ICRP Publications, 1994.
- [7] A. Ferrari, P. Sala, A. Fasso, J. Ranft, "FLUKA: A Multi-Particle Transport Code", CERN-2005-10, INFN/TC\_05/11, SLAC-R-773, 2005.
- [8] GE Healthcare, "PETtracer 800 series Service Manual -Accelerator", Direction 2169047-100, Rev. 22, 2015.
- [9] ICRU, "Tissue substitutes in radiation dosimetry and measurement", Report 44 ICRU Publications, 1989.
- [10] ENFORCEMENT DECREE OF THE NUCLEAR SAFETY ACT, Korea, 2016
- [11] Nuclear Safety And Security Commission: notification 2013-49, 2013
- [12] N. S. Jarvis, A. Birchall, A. C. James, et al., "LUD EP2.0. Personal Computer Program for Calculating Internal Doses Using the ICRP Publication 66 Respiratory Tract Model", NRPB-SR287, 1996.
- [13] Si Young Kim, Cheol Kyu Choi, Il Park, et al., "Assessment of Inhalation Dose Sensitivity by Physicochemical Properties of Airborne Particulates Containing Naturally Occurring Radioactive Materials", Journal of Radiation protection and Research, Vol. 40, No. 4, pp.216-222, 2015.
- [14] M. J. Hurley, D. T. Gottuk, J. R. Hall Jr., et al., "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", pp.2416, 2016.
- [15] Sung Ok Park, Sung-Min Ahn, Han-Jun Yang, et al., "Nuclear Medicine Science", pp.28-29, 2006.
- [16] Jong-Seo Choi, "Recent Status of Commercial PET Cyclotron and KOTRON-13", Korean journal of nuclear medicine, Vol. 39, No. 1, 2005.
- [17] P. Zanzonico, L. Dauer, J. S. Germain, "Operational radiation safety for PET-CT, SPECT-CT, and cyclotron facilities", Health Physics, Vol. 95, No. 5, pp.554-570, 2008.
- [18] H. R. Vega-Carrillo, Hernandez-Almaraz, B. Hernandez-Davila, et al, "Neutron spectrum and doses in a 18 MV LINAC", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 283, No. 1, pp.261~265, 2010.
- [19] M. D. Dorrian, M. R. Bailey, "Particle size distributions of radioactive aerosols measured in work places", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 60, No. 2, pp.119-133, 1995.
- [20] Gong-Unn Kang, Sang-Bok Lee, "Daily Concentration Measurements of Water-soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Fine Particulate for Respiratory Deposition Region", Korean Journal of Environmental Health, Vol. 31, No. 5, pp.387~397, 2005.
- [21] ASHRAE, "ASHRAE Handbook HVAC Applications", Health Care Facilities Chapter, 2015.
- [22] R. Calandrino, A. D. Vecchio, S. Todde, et al., "Measurement and Control of the Air Contamination Generated in a Medical Cyclotron Facility for PET Radiopharmaceuticals", Health Physics, Vol. 92, No. 5, pp.S70-S77, 2007.

## PET 사이클로트론 시설의 공기 방사화 분석

장동근,<sup>1</sup> 강세식,<sup>2</sup> 김창수,<sup>2</sup> 김정훈<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>동남권 원자력의학원 핵의학과

<sup>2</sup>부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과

### 요 약

사이클로트론에서 발생하는 핵반응은 불필요한 중성자를 발생시키며, 이로 인해 주변 물질들이 방사화 되게 된다. 방사화된 물질은 방사선피폭의 원인으로, 공기가 방사화 되었을 경우 인체에 흡입되어 내부피폭을 발생 시킨다. 이에 본 연구에서는 16.5 MeV의 초소형 사이클로트론의 운영에 따른 내부 공기의 방사화를 분석하고자 하였다. 실험결과 초소형 사이클로트론의 핵반응으로 발생하는 방사화는 종사자에게 매우 낮은 내부피폭을 발생시키는 것을 확인할 수 있었으며, 방사화로 인하여 발생된 방사능을 법적 기준치와 비교하여 보았을 때 기준치 이하로 법적 관리의 대상에서 제외 될 수 있음을 알 수 있었다. 하지만, 사이클로트론의 에너지가 높아짐에 따라 내부피폭의 위험성은 더욱 높아질 우려가 있으며, 이에 따라 국내에 정립 되어 있지 않는 방사선 관련 시설의 환기설비에 대한 기준이 필요할 것으로 사료되었다.

중심단어: 방사화, 사이클로트론, 공기