

Development of the Measurement Method of Extremely Low Level Activity with Imaging Plate

Ji-Yeon Kwak · K. B. Lee · Jong-Man Lee · Tae-Soon Park
Pil-Jae Oh · Min-Kie Lee · Ji-Suk Seo and Han-Yull Hwang*
Korea Research Institute of Standards and Science, Mokwon University*

Imaging Plate를 이용한 극저준위 방사능 측정에 관한 연구

곽지연 · 이경범 · 이종만 · 박태순 · 오필제 · 이민기 · 서지숙 · 황한열*
한국표준과학연구원, 목원대학교*

(2004년 8월 13일 접수, 2004년 12월 7일 채택)

Abstract - An imaging plate(IP) detector, a two-dimensional digital radiation detector that can acquire image of radioactivity distribution in a sample, has been applied in many fields; for industrial radiography, medical diagnosis, X-ray diffraction test, etc. In this study, the possibility of IP detector to be used for measuring radioactivity of sample is explored using its high sensitivity, higher spatial resolution, wider dynamic range and screen uniformity for several kinds radiations. First, the IP detector is applied to measure the surface uniformity for area source. Surface uniformity is measured rapidly and nondestructively by measuring the radioactivity distribution of common standard area source(^{241}Am). Next, the IP is employed to study the possibility of measuring an extremely low-level activity of environmental sample. For this study the screen uniformity, shield effect of background radiation, linear dynamic range and fading effect of the IP detector is investigated.

The potato, banana, radish and carrot samples are chosen to measure ultra low-level activity of ^{40}K isotope. The efficiency calibration of IP detector is carried out using the standard source.
Key words : *Imaging Plate, ^{40}K , ^{241}Am , Area source uniformity, Extremely Low Level Activity*

요약 - 시료중의 방사능 분포를 영상으로 획득할 수 있는 2차원 디지털 방사선 검출기인 Imaging Plate(IP) 검출기는 주로 산업용 라디오그래피, 의료진단, X-선 회절실험 등에서도 광범위하게 사용되고 있다. 본 연구에서는 IP 검출기의 여러 종류의 방사선에 대한 높은 감도, 우수한 공간 분해능, 넓은 선형범위와 스크린의 높은 균질성을 이용하여 시료중의 방사능을 측정할 수 있는 가능성에 대해 조사하였다. 먼저 IP 검출기를 이용하여 면적선원의 표면균질도 측정에 적용하였다. 상용 기준 면적선원(^{241}Am)의 방사능 분포에 대한 영상을 얻어서 표면 균질도를 비파괴적이고 신속하게 측정하였다. 다음으로 IP 검출기를 극저준위 방사능 측정에 적용하여 방사능 측정가능성에 대해 연구하였다. 이를 위해 IP 검출기의 스크린 균질도, 배경방사선 차폐효과, 선형범위 조사, fading 시간을 조사하였다. 극저준위 방사능 측정을 위해 감자, 바나나, 무, 당근에 포함되어 있는 ^{40}K 자연방사능을 선택하여 측정하였다. 기준선원을 사용하여 IP 효율교정을 수행하였다.

중심어 : *Imaging Plate, ^{40}K , ^{241}Am , 면적선원 균질도, 극저준위 방사능*

서론

Imaging Plate(IP) 검출기는 동위원소 분석, 결정학, 전자현미경, 개인피폭선량 모니터링, 산업용 라디오그래피, 의료진단, X-선 회절실험 등의 분야에서 광범위하게 사용되고 있는 2차원 디지털 위치 감응형 검출기이다[1].

IP 검출기를 사용하면 시료중의 방사능을 구함과 동시에 획득한 영상을 통해서 시료중의 방사능 분포도 얻을 수 있다. 본 연구에서는 IP 검출기가 갖는 다양한 에너지의 알파와 베타선에 대한 높은 민감도와 공간분해능, 넓은 선형범위와 스크린의 높은 균질성을 이용하여 환경시료중의 방사능을 결정하는 방법에 대해 조사하였다. 부가적으로, 원자력 발전소 주변의 환경방사능 측정 및 모니터링, 폐로부지의 방사능 clearance level 측정에 사용하는 검출기들의 교정에 사용되는 면적선원의 표면 균질도를 조사하였다. 면적선원의 표면 균질도는 방사선 표면오염감시기의 교정결과에 중요한 영향을 미치는 요인이 될 수 있다. IP 검출기를 이용하여 상용의 교정용 ^{241}Am 면적선원의 방사능 분포 영상을 얻어서 표면 균질도를 신속하게 측정하였다. 또한 동 검출기로 극저준위 환경시료중의 방사능을 측정할 수 있는지 조사하기 위하여 감광도, 스크린균질도, 배경방사선 차폐효과, 선형범위, 퇴행 효과 등에 관한 특성 조사를 수행하였다.

Imaging Plate

IP 검출 기술은 시료 중에 분포한 방사성 핵종들을 이미지화하여 온라인으로 분석을 가능하게 하였다. 또한, X-선 필름에 비하여 감도가 100 배 이상 좋기 때문에 영상을 얻기 위하여 필요한 조사시간을 크게 단축시킬 수 있으며, 방사선의 조사량과 화상도의 관계가 선형적이므로 이를 이용하면 영상으로부터 측정대상 시료중의 방사능도 측정할 수 있다. 화상 데이터가 디지털이므로 각종 화상처리, 연산, 통신이 용이하며, 여러 장의 방사능 사진을 신속하고 편리하게 얻을 수 있고, 스크린을 재사용할 수 있는 등의 장점 때문에 산업과 학문적인 연구 목적을 위해서 광범위하게 활용되고 있는 상황이다[1-4].

IP 검출기의 검출 과정은 다음과 같다. 형광스�크린이 방사선에 조사되면, 조사된 부분의 감광물

질(emulsion; BaFBr:Eu^{2+})은 준안정 상태로 여기되어 정보를 저장하게 된다. 즉, 조사된 스크린에 레이저로 파장이 약 633 nm인 가시광선을 조사하게 되면, 이들 준안정 상태의 여기준위는 더욱 여기 되어 Eu^{2+} 는 Eu^{3+} 로 이온화 되어 약 390 nm의 섬광신호를 방출하며 Eu^{2+} 의 기저준위로 전이된다. 방출된 섬광신호는 광증배관에서 증폭되어 이미지로 나타나게 된다. 그림 1에 상기에 기술한 과정을 수록하였다.[3-7]

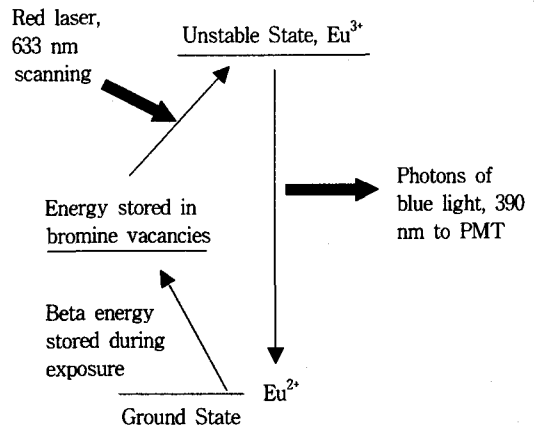


Fig. 1. Schematic representation of the storage phosphor process.

IP 검출기술을 이용한 면적선원의 표면균질도 측정

^{241}Am 면적 선원을 스크린 위에 접촉 시키고 조사용 상자에 넣어 빛을 차폐하였다. 조사용 상자 안에서 스크린을 ^{241}Am 면적 선원으로 10분간 조사 시켰다. 조사시켜 얻은 선원의 이미지를 5분 경과 후 싸이클론을 사용하여 판독하였다. 이 때 상자 안에서 얻은 이미지가 싸이클론으로 이동하는 동안 가시광선의 영향으로 이미지가 사라지질 수 있으므로 암실에서 수행하였다. 배경방사선의 영향은 전체 스크린 면적 중 조사선원이 위치하지 않은 곳을 판독하여 구하고 이를 측정값에서 빼주었다. 위와 같은 조건을 통하여 그림 2와 같은 이미지를 얻었으며, 그림 3은 이를 3차원적으로 나타낸 것이다. $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 의 면적으로 구획을 나누어 얻은 100 개의 측정값을 식 (1)로부터 ^{241}Am 면적 선원의 비균질도를 구한 결과 8.8 %가 됨을 알 수 있었다. 보편적으로 비균질도가 10 % 이하인 경우는 상태가 양호하기 때문에 ^{241}Am 는 균질하다고 표현할 수 있다. 방사선 세기는 DLU(Digital Light Unit) 단위로 나타낸다.

$$\text{비균질도} = \frac{\text{Standard Deviation (Net DLU)}}{\text{Average (Net DLU)}} \quad (1)$$

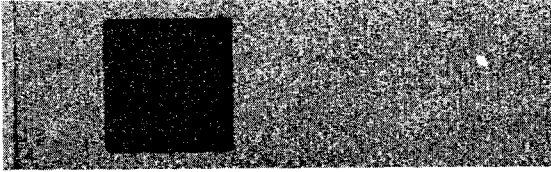


Fig. 2. IP Image of the ²⁴¹Am area source.

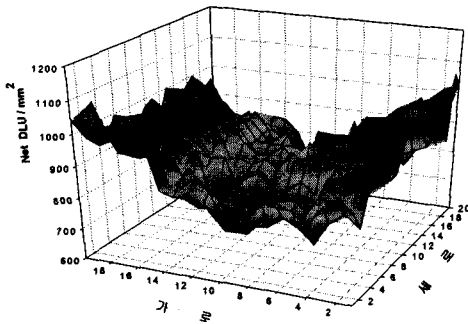


Fig. 3. DLU distribution of the ²⁴¹Am area source represented in a three-dimensional display.

IP 검출기의 특성 조사

감도(Sensitivity)

감도는 방사능이 최소한으로 검출될 수 있는 준위에 해당된다. 본 검출기에서는 방사능의 최소 검출 준위를 방사능 검출 준위와 방사성 동위원소 검출 효율을 비교하여 조사 시간에 대한 방사성 핵종의 이미지화 된 방사능을 고려하여 감도에 대해 조사하여야 한다.

본 연구에서 방사능의 최소 검출 한계 준위는 1시간동안 조사를 시킨 ³⁵S의 경우 2 DPM · mm⁻² · h⁻¹, ¹⁴C의 경우 2 DPM · mm⁻² · h⁻¹, ¹²⁵I의 경우 1 DPM · mm⁻² · h⁻¹ 그리고 ³²P의 경우 1 DPM · mm⁻² · h⁻¹로 보고된 값을 참고 하였다 [3,9,10].

스크린 균질도

시료 측정 시 스크린의 균질도가 불확도 유발의 가장 큰 요인이 될 수 있기 때문에 스크린 균질도 조사를 하였다. 그림 4는 스크린의 균질도 조사를 통해 얻은 그래프이다. 스크린의 균질도 조사를 위해 스크린을 면적선원 측정 시 사용하였던 조사용 상자 안에서 10분간 조사시켜 배경

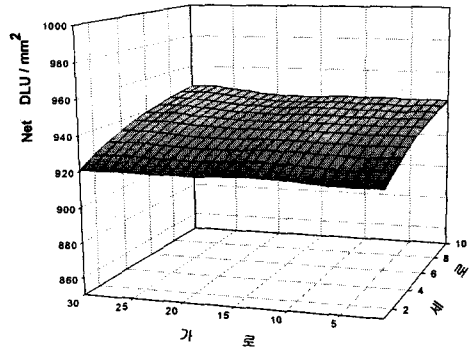
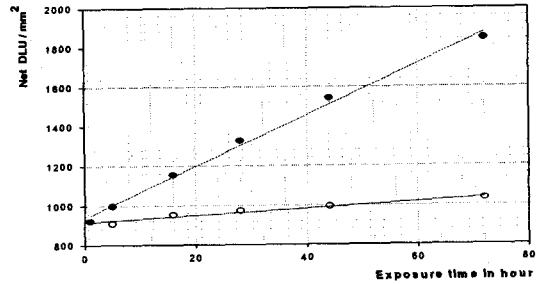


Fig. 4. Uniformity distribution of IP represented in three-dimensional display.



●	Exposure Cassette 에서의 Background
○	Shielding Box 에서의 Background

Fig. 5. Comparison of background evolutions measured in cassette and lead shield as a function of time.

방사능을 측정하였다. 그리고 측정을 위해 조사 후 5분이 지나 싸이클론 화상 저장 시스템을 사용하여 판독하였다. 그 결과 스크린의 비균질도 식 (1)을 통해 0.8 % 임을 알 수 있다. 이는 매우 균질한 스크린을 실험에 사용하였음을 보여준다.

배경방사선 차폐

IP에 영향을 주는 배경 방사선의 세기를 조사용 상자와 납 차폐체 안에서 측정하여 그 차이를 알아보았다.

IP를 조사용 상자 안에서 1, 5, 16, 28, 44, 72시간동안 조사시켰고, 10 cm의 납에 카드뮴 판과 구리판으로 덧대어 제작된 납 차폐체 안에서 5, 16, 28, 44, 72시간동안 조사시켜 두 곳에서의 배경 방사선 세기 변화를 알아보았다. 그림 5를 통해 납 차폐체 안에서 배경 방사선의 세기가 대략 10 ~ 50 % 까지 감소함을 볼 수 있다. 위의 결

과로 납 차폐체에서 배경 방사선의 차폐가 더 효과적임이 증명되어 극저준위 방사능 측정 실험 시 더 좋은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

퇴행 시간

퇴행 시간은 조사를 끝내고 스크린에서 시료를 제거한 시점부터 스캔하기 전까지의 시간을 말한다. 퇴행 시간의 변화에 따라 나타나는 특징들을 ³⁶Cl 선원을 사용하여 조사하였다.

조사 시간은 10분으로 동일 시 한 후 퇴행 시간을 1분, 10분, 2시간, 4시간, 5시간, 7시간, 13시간, 16시간, 21시간, 24시간, 25시간으로 하여 측정하였고, 조사용 상자에서 수행하였으며, 결과는 그림 6에 수록하였다. 1분의 측정값을 100 % 라고 놓았을 때 25시간의 값은 60 % 정도 까지 감소함을 보였다. 16시간까지는 큰 변화가 없지만 그 이후에는 급격한 변화를 보이고 있다. 되도록 정밀한 측정값을 산출하기 위해서는 퇴행 시간이 16시간 이전에 스캔을 해야 불확도를 줄일 수 있다. 본 연구에서는 퇴행 시간을 5분으로 일정하게 하여 실험하였다.

선형범위조사

³⁶Cl 선원을 사용하여 IP의 선형범위를 조사하였다. 이때 조사 시간은 변화를 주고 퇴행 시간 즉, 조사시킨 후 측정하기까지의 시간은 5분으로 동일하게 설정 하였으며, 조사용 상자 안에서 조사를 하였다. 그림 7은 1분에서 15일까지의 조사 시간에 따른 단위 면적당 Net DLU값을 보여준다. 그래프를 보면 10⁵ Net DLU/mm² 범위까지는 선형적으로 변화하지만 그 이후에는 포화되기 시작한다. 이 시스템의 선형범위는 10² ~ 10⁵ Net DLU/mm² 로 그 범위 내에서 실험을 하여야 한다.

자연방사능 측정 절차

클리너로 스크린의 먼지 또는 오염물질 등을 제거한 후에, 스크린 지우개를 이용하여 잔상을 완전히 지운다. 잔상이 제거된 스크린을 조사용 상자 안에 넣고 그 위에 조사 시킬 선원을 올려 놓은 후 암실 상태에서 10분 정도 조사시킨다. 스크린을 조사 시킨 후 암실 상태에서 싸이클론에 장착시킨다. 5분간의 퇴행 시간을 가진 후 스캐닝

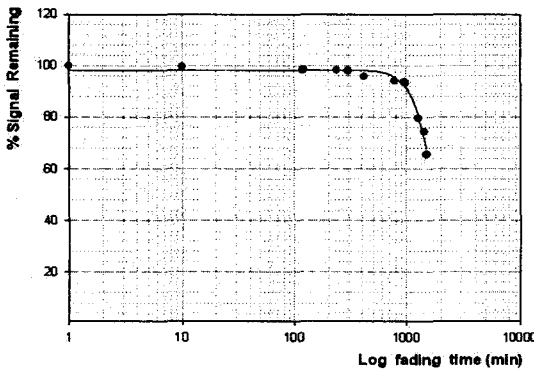


Fig. 6. Fading effect of IP.

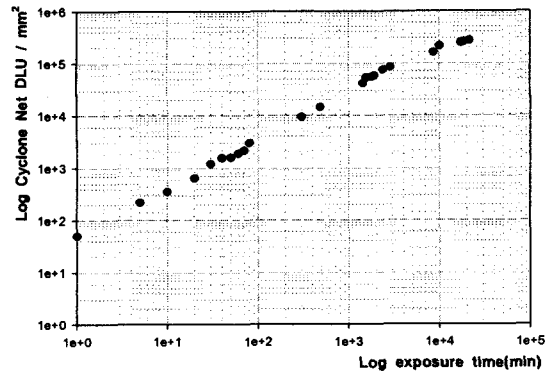


Fig. 7. Linear dynamic range of IP.

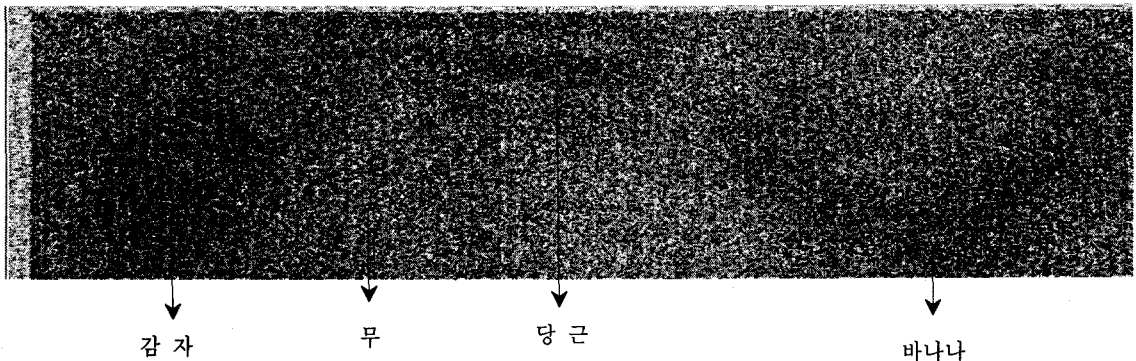


Fig. 8. Images of the natural radioactivity distribution of vegetable and fruit.

한다. 스캐닝을 끝마친 후 화면에 나타난 결과를 분석하였다. 그림 8은 극저준위 방사능 측정을 위해 감자, 무, 당근, 바나나의 자연 방사능 분포 이미지들을 보여준다. 이때 배경방사선에 의한 효과를 최소화시켜 더 나은 이미지를 얻기 위하여 10 cm 두께의 납 차폐체 안에서 7일 동안 조사시켜 얻었다. 위의 시료들에 가장 많이 함유되어 있는 ⁴⁰K 방사능의 분석을 위하여 본 실험에서는 ⁴⁰K와 베타붕괴 에너지가 유사한 ³⁶Cl 선원(방사능 $1.095 \times 10^4 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$)을 선택하여 2 π 다중선 비례계수기를 사용하여 얻은 계수값과 IP를 이용하여 ³⁶Cl 선원을 상자에 넣어 10분간 조사 시킨 후 퇴행 시간을 5분간 하여 얻은 이미지 분포 값을 비교하여 IP 교정을 수행하였고, 표 1에서와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

두 경우의 값을 비교하여 1 beta에 대응하는 DLU 값을 구할 수 있었고, ³⁶Cl 선원에서 얻은 값을 평균해서 1 beta가 8.4 DLU와 동일하다고 정의하였다. 이때 2 π 다중선 비례계수기의 계수 효율은 100% 라는 가정 하에 위와 같은 값을 정의하였다. 위에서 얻은 값을 이용하여 시료들의 방사능을 측정하였다. 스크린에 가장 선명하게 조

사된 면적을 선택하여 단위면적당 단위시간당 DLU를 측정 한 후, 표준선원을 이용하여 하나의 베타입자에 대응되는 DLU를 교정하여 단위면적당 방출베타입자의 개수를 계산한 후, 베타입자의 밀도에 대한 도달거리를 이용하여 단위질량당 방사능을 유추하였다.

표 2에서 감자, 당근, 바나나, 무의 ⁴⁰K 방사능을 보여주었다. 이때 1 beta = 8.4 DLU의 값과, ⁴⁰K 베타입자의 밀도에 대한 도달 거리 = $10^{-1} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{cm}$ 와 1 Bq = 0.89 Beta의 값을 사용하였다.

결 과

IP 검출기술을 이용하여 면적선원 균질도를 측정 한 결과 기존에 사용하고 있던 면적선원 균질도 측정 검출기 보다 정밀하고 빠른 시간 내에 균질도 측정을 할 수 있다. IP 검출기술을 사용하여 자연 시료의 면적에 대한 방출베타선의(⁴⁰K)의 개수를 측정하여 단위질량당 방사능을 산출한 값을 보면, 일본의 바나나에 대한 측정결과(0.2 Bq/g)[11]와 많은 차이를 보이지 않음을 알 수 있었다. 그 결과 IP 검출기술을 사용하여 극저준위 방사능의 측정 가능성을 알 수 있었다. 본 연구에서 사용한 시스템을 최근 문제가 되고 있는 방사능 폐기물들의 clearance level의 결정에 적용 가능한지 알아보기 위하여 원자로에서 방출되는 핵종들의 clearance level를 비교하였다. 물질들의 clearance level은 Table 3과 같이 나타난다[12]. 이 때 제시된 값을 보면 극저준위 방사능 측정 시 얻은 값과 비교하여 충분히 측정할 수 있는 값으로 보인다. 그 결과로 연구에서 사용한 시스템이 방사능 폐기물의 clearance level 결정에 유효한 대안이 될 수 있다.

Table 1. The efficiency calibration result of IP detector using the standard source(³⁶Cl).

³⁶ Cl 선원	mass (mg)	2 π MWPC (count · s ⁻¹)	IP 검출기 (DLU · s ⁻¹)	1 beta= 8.4 DLU
1	15.281	108.10	906.69	8.4
2	10.627	80.30	653.83	8.1
3	7.047	53.36	446.62	8.4
4	6.392	48.97	416.70	8.5

1 beta = 8.4 DLU : 4번 측정 한 값에 대한 평균값.

Table 2. Measured surface radioactivity and specific radioactivity of the ⁴⁰K radionuclide contained in vegetable and fruit.

시 료	Net DLU · mm ⁻²	Beta · mm ⁻² · s ⁻¹	Bq · cm ⁻²	Bq · g ⁻¹
감 자	273.74	5.35×10^{-5}	6.01×10^{-3}	0.06
당 근	218.37	4.26×10^{-5}	4.79×10^{-3}	0.05
바나나	388.84	7.59×10^{-5}	8.53×10^{-3}	0.09
무	67.09	1.31×10^{-5}	1.47×10^{-3}	0.01

Table 3. Clearance level for solid materials arising from nuclear reactors: (Bq/g).

Radionuclide	Derived value	Range in IAEA-TECDOC-855
H-3	200	1000 - 10000
Mn-54	1	0.1 - 1
Co-60	0.4	0.1 - 1
Sr-90	1	1 - 10
Cs-134	0.5	0.1 - 1
Cs-137	1	0.1 - 1
Eu-152	0.4	0.1 - 1
Eu-154	0.4	--
Total α emitters	0.2	0.1-1(Pu-239, Am-241)

참 고 문 헌

- Saze T., Etoh M., Mori C., Nishizawa K., "Automatic activity measurement and data processing system using an image analyzer." Nuclear instruments & methods in physics research. Section A, Accelerators, spectro-meters, detectors and associated equipment. v.443 no.2/3, pp.578-585(2000)
- Sonoda, M., Takano, M., Miyahara, j., and Kato, H. "Computed radiography utilizing scanning laser stimulated luminiscence." Radiology 148, 833-838(1983)
- V. Loraine and david F. Englert, *Radionuclide Imaging*, Packard Instrument Company(1998)
- <http://home.fujifilm.com/products/science/ip/index.html>
- Hareyama M., Tsuchiya N., Takebe M., Chida T., "Two-dimensional measurement of natural radioactivity of granitic rocks by photostimulated luminescent of natural radioactivity of granitic rocks by photostimulated luminescence technique." Geochemical journal, v.34 no.1, pp.1-10 (2000)
- Hamaoka, T., "Autoradiography of new ear replacing traditional X-ray film." Cell technol. 9, 456-462(1990)
- Chantu, G., Rubin, J., Gelder, E., Steinberg, D., and Hueton, I.U.S. Patent V5,635,728 (1997)
- A Packard BioScience Company. Cyclone Storage Phosphor System operation manual
- Mori C, Suzuki T., Koido S., Uritani A., Miyaghra H., Yanagida K., Miyahara J., Takah, "Effect of background radiation shielding on natural radioactivity distribution measurement with imaging plate." Nuclear instruments & methods in physics research. Section A, Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment, v.369 no.2/3, pp.544-546(1996)
- C. Mori et.al., "Effect of background radiation shielding on natural radioactivity distribution measurement with imaging plate." Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A369, 544-546(1996)
- Japan Science and Technology corporation, "Food composition data base"(2001)
- www.irpa.net/irpa10/cdrom/01108.pdf