



일본에서의 개인선량 측정기술의 변천과 현황

1. 머리말

일본에서는 1955년 초부터 필름선량계를 사용한 개인선량 측정 서비스가 개시되었다. 그 이래, 방사선 업무 종사자로서는 매우 친숙한 이 필름선량계(필름배지)는 2000년부터 유리선량계나 OSL선량계로 대체되어 「유리배지」, 「록셀배지」라는 이름으로 개인선량 측정 서비스에 쓰이게 되었다. 이에 대하여 원자력 발전소에서는 개인선량 등록용 선량계로써 2000년부터 전자식 개인 선량계를 이용하기 시작하였다.

필름선량계는 실로 46년동안 장기간 이용되어, 일본의 방사선 업무종사자의 개인피폭 선량 측정에 많이 공헌하였다. 본문에는 한 시대를 구축하여 역할을 끝낸 이 필름선량계의 개발과 개인 선량 측정 서비스의 성장 및 측정기술의 변천과 현황에 대하여 기술한다. 개인선량 측정 서비스는 이하 필름배지 서비스로 부르기로 한다.

2. 필름배지 등의 성장

세계제2차대전후 불황이 한창일 때, 1950년에 한

국동란이 일어나서, 해운수요가 확대하여 해운·조선업계가 호황을 맞게되어 1956년에는 일본국의 조선업은 세계 제1위로 되었다. 수주한 선박의 용접부분은 고압X선장치를 사용하여 비파괴검사를 하였다. 따라서 검사에 관련된 X선 작업종사자의 피폭선량을 측정하기 위해서 가볍고 간편한 개인선량측정기가 요망되었다.

또한, 의료분야에서는 이미 전쟁전부터 의사, 기사에게 X선 장애가 발생하고 있고 28명의 희생자가 있었다. 그리고 전쟁후의 식량난 등에 기인하는 결핵의 유행박멸을 위한 X선 검진이 증가하는 등, 의료분야에서도 방사선 장애 방지를 위하여 가볍고 간편한 개인선량측정기에 의한 의사, 기사의 피폭선량의 측정이 요망되었다.

1) 일본 최초의 필름배지

1953년은 필름배지가 탄생한 해이다. 小川利治씨가 고안한 일본 최초의 필름배지는, 선량이 다른 각각 미리 알고 있는 선량을 표준 조사시킨 표준 필름과, 이것과 동일한 유레번호의 필름배지를 이용자가 몸에 장착하여 방사선 작업을 한 후, 양쪽 필



를 현상하여 그 흑화도를 비교하여 피폭선량을 판단하는 방식이었다. 이것은 이용자의 부담이 커서 별로 이용되지 않는 것 같다. 이 방식은 手塚敬三씨가 미국에서 가지고 온 폴라로이드 필름배지와 같은 원리에 의한 것이다. 폴라로이드 필름배지는 현상액도 함께 포장되어 있고, 그 자리에서 피폭을 알 수 있는 편리성은 있었지만, 방사선 방호 준위의 선량 측정을 목적으로 한 선량계가 아니고, 고선량 피폭의 측정을 목적으로 한 것이었다.

2) 원자력시대의 여명과 필름배지 서비스

1954년은 원자력 예산이 성립하여 원자력시대의 막이 열리고, 동시에 미국의 수폭실험이 개시되어 제5福龍丸(선박)이 피염되고, 방사능 오염이 태평양 전역에 확대되었다. 이와 같은 상황 중 연말에 小野鎮馬씨가 일본 최초의 필름배지 서비스를 개시하였다.

3) 필름배지의 JIS규격

일본국의 필름배지 연구도 진전하여, 1956년에는 주로 의료 분야의 개인선량측정에 사용되는 JIS Z4301「X선용 필름배지 케이스」의 규격이 제정되었다. 이것은 원자력 분야에서 최초의 JIS규격으로 되었다. JIS Z4302「 γ 선 및 연X선용 필름배지 케이스」의 규격 원안도 작성되어 있었지만, 초고압 X선 장치를 사용하고 있는 조선공업회에서 규격의 유효성 확인 때문에, 제정은 다소 늦어지고 1958년으로 되었다. 참고로, 일본 최초의 원자로 JRR-1의 임계 실험 및 운전에서는, 이 JIS Z4302규격에 준거하여 만든 국산 필름배지 케이스와 필름을 사용하여 개인 선량을 측정하였다.

4) 필름배지 서비스와 측정치의 공인

필름선량계나 필름배지 서비스는 조선업계나 의료

업계 등의 사회적 요청에 따라 생겼다. 1956년에 측정치의 신뢰성을 평가하는 방식이 도입됨으로써, 이용자의 측정치에 대한 신뢰감을 얻은 동시에 피폭선량의 공적 판독치로 인정되고 보급되었다. 따라서 일본에서의 필름배지 서비스의 실질적인 개시는 1956년부터이다.

5) 연구기관의 동향

일본 원자력연구소(원연)와 핵연료사이클기구는 취급하는 방사선의 종류와 에너지가 광범위하기 때문에 각 연구소의 목적에 맞는 개인선량계를 개발하여 사용하였다. 그 결과, 원연은 필름배지를 채용하고 2000년 4월부터 유리(RPL)선량계를, 핵연료사이클기구는 필름배지를 채용하여 1974년부터 열형광선량계(TLD)를 사용하였다. 이와 같이 각각 독자적으로 개인모니터링을 실시하고 있다.

6) 필름배지의 선량평가기술

일본 최초의 필름배지에 의한 선량 평가 방법은, 진술한 바와 같이 흑화도를 육안으로 비교하여 선량을 구하는 간단한 방법이었다. 이 방법으로는 피폭하는 현장의 X선 스펙트럼이 표준 조사시킨 X선 스펙트럼에 근사되어 있지 않으면 선량 평가는 곤란하다.

JIS Z4301은 에너지 판정 선량 평가방식으로 저에너지 영역 전용이다. 선량평가법은 OP(필터 없음), Al, Cu+Al의 각 필터 밑의 필터에너지 특성을 근거로 각 필터 간의 농도비 그래프를 만들어, X선 에너지 판정도로 한다. 또 각 필터 밑의 선량-농도 교정도를 만들어, 이들 그림을 사용하여 피폭선량을 평가하는 방법이다.

JIS Z4302는 120keV이상의 고에너지 X선 및 γ 선 전용이다. 선량평가방법은 OP, PI(플라스틱) 및 Sn, Cd 필터를 사용하여 120keV이상의 에너지 특



성을 평탄화시켜 선량을 평가하는 방법이다.

JIS Z4301 및 4302의 방법에는 에너지가 120keV 이하와 이상에서 필름배지를 나눠서 선량을 평가해야 한다. 따라서 원자력연구소처럼 광범위한 에너지를 이용하는 사업소의 피폭선량측정에는 매우 부적합하였다. 그래서 원연에서는 각 필터 밑의 X·γ선 에너지에 대한 감도(에너지 특성)의 선형결합으로 에너지 특성을 평탄화시켜 선량을 측정하는 방법을 채용하였다. 1962년부터 이 방법이 일반으로 보급하기 시작하였다. 또한 이 기술은 기본적인 것으로 지금도 새로운 개인선량계에 이용되고 있다.

3. X·γ·β 선용 개인선량계의 발전

개인선량계는 작업장의 방사선에너지, 장기작업인지 단기작업인지 등의 점을 고려하여 선택된다. 선량의 관리기간은 1~3개월이다. 필름배지 서비스가 개시되었을 때, 필름의 회수는 2주間に 한번이며, 따라서 개인선량 관리 기간도 2주간이었다.

필름선량계의 약점은 습도에 의한 페이딩(잠상퇴행)이다. 초기 때, 후기 필름에서 출하된 개인모니터링용 필름은 모두 종이 포장이었다. 1968년에 흰 비닐로 포장되었지만 완전 방습 포장은 아니었다. 1976년 초 이것이 두꺼운 흑색비닐 완전방습 포장으로 변경되어, 필름은 1개월 교환으로 되고 개인선량 관리기간도 2주간에서 1개월로 되었다.

필름선량계는 사진 기술을 응용한 선량계이며, 필름의 음영에서 피폭의 상황을 판단할 수 있는 등 좋은 면도 있지만, 현상해야 하기 때문에 간단하게 선량을 판독할 수 없었다. 1965년대에 안정한 성능을 가진 형광체 재료가 마츠시타(松下)산업기기, 네모토(根本)특수과학, 카세이(化成)옵토닉스에 의하여 개발되어, 열형광선량계(TLD)로써 제품화되었다. 따라서 대기업의 방사선 사업소에서는 필

름배지는 사용하지 않고, 1974~82년에 거쳐서 황산갈슌이나 붕산리튬 TLD선량계 ($Li_3^{10}B_4O_7(Cu)\gamma$ 선용) 등을 개인모니터링에 사용하게 되었다.

이 시대는, 영업운전에 들어간 원자력발전소에 문제가 많이 생겼다. 즉 PWR에서는 증기발생기의 보수작업, BWR에서는 SCC(응력부식균열)대책이 필요하여, 배관의 교환 등 피폭이 따르는 작업이 증가하였다. 기술자가 원자력발전소를 떠돌아 다니며 피폭하기 때문에, 개인을 특정한 피폭의 일원적인 관리의 필요성이 거론되어 「방사선종사자중앙등록센터」가 발족하였다. 또 「원전 집시」나 「원자로 피폭일기」가 출판되어 원자력발전소에서의 피폭선량이나 방사능에 관심을 나타나게 되었다. 이와 같은 사정에서 선량을 곧바로 판독할 수 있는 신뢰성 높은 전자식 개인선량계의 개발이 요구되었다.

1951년경에 미국의 Schulman 등이 은활성인산유리선량계를 개발하였다. 1963년 경에 토시바(東芝)종합연구소의 横田良助씨가 은활성인산유리의 개량을 거듭하여, 프리도즈가 적은 고감도의 형광유리선량계를 만들었다. 이 선량계의 초기 선량판독장치는 수은램프의 연속적인 자외선으로 형광중심을 여기시켜 유리고유의 프리도즈와 RPL(radiophotoluminescent)을 분리하여 선량을 측정하는 방법이기 때문에, 분리가 잘 안되고 유리를 세척해야 하는 번거로움으로 보급되지 않았다. 1984년경에 질소가스 펄스레이저를 선량판독장치에 채용함으로써 프리도즈와 RPL의 감쇠시간차를 이용, 양쪽을 분리하여 선량을 좋게 판독할 수 있게 되어, 필름배지 대신에 2001년부터 「유리배지」의 이름으로 개인선량측정 서비스에 이용할 수 있게 되었다.

탄소를 첨가한 α산화 알루미늄($\alpha-Al_2O_3:C$)은, 고감도의 열형광선량계(TLD)이지만 가시광에 의한 페이딩 현상이나 열소광현상 (thermal quen



ching)이 있기 때문에 환경측정용 TLD로서 연구에 이용된 정도이며 일반에는 보급되지 않았다. 이 α 산화알루미늄과 광자극형광측정법 (OSL: Optically Stimulation Luminescence)을 이용함으로써, 상기의 페이딩현상이나 열소광현상 문제를 해결한 선량계를 OSL선량계라 부른다. 이 선량계는 「룩셀배지」라는 이름으로 2001년부터 필름배지 대신에 개인선량측정 서비스에 사용하게 되었다. OSL선량계의 특징은, 유리선량계와 마찬가지로 광학적인 판독법이며 고속으로 선량을 측정할 수 있다. 여기에 더하여, 선량의 재판독도 가능하고, 빛으로 어닐링하기 때문에 선량계 디자인에 자유도가 있다.

OSL선량계는 방사선에 의하여 금지대의 F센터에 트랩된 전자를 532nm(녹색)의 빛으로 해방시키고, 이 전자가 마찬가지로 금지대에 트랩된 홀(정공)과 재결합할 때 420nm(청색)의 빛을 낸다. 이것을 측정하면 선량을 구할 수 있다. 이 발광을 회전발광(輝盡發光)이라 부르고, 이걸로 화상을 얻은 경우는 PSL, 선량측정의 경우는 OSL이라 한다. 이것은 이미징 플레이트에 사용되고 있는 발광이다. 본 선량계에는 이미징필터로서 편칭 동판이 들어있고, 피폭 방사선의 이미징 화상을 얻을 수 있는 특징을 가지고 있다.

4. 중성자용 개인선량계의 변천

1959년경부터 γ 선 필름배지에 Col필터를 붙여, 열중성자 포획 γ 선으로 필터를 흑화시켜 열중성자 선량을 측정하였다. 속중성자는 원자핵 유체를 두 겹께 바른 고당의 NTA필름을 사용하여, 현미경으로 되튐 양자의 비적을 세어 선량을 측정하였다. NTA필름은 습도 등에 의한 잠상퇴행이 커서, 랩필름으로 간이포장하여 2주간으로 교환하였다.

NTA필름은 잠상퇴행이 크다는 이용자의 고충이 있어서, 치요다(千代田) 테크놀은 1984년부터 알루미늄과 플라스틱을 박판으로(laminate)한 포장재로 건조질소와 함께 NTA필름을 봉입하여 완전방습 포장하였다.

이 포장으로 NTA필름은 1개월 교환으로 되었다. 현미경으로 보는 NTA필름의 비적은 3차원적이며 비적의 관찰도 어려워져서, 비적의 자동 판독장치의 개발은 성공하지 못하였다.

TLD에서는 붕산리튬 TLD의 Li과 B로 열중성자에 의한 (n, α)반응을 발생하는 ^6Li , ^{10}B 과 열중성자에 반응하지 않는 ^7Li , ^{11}B 을 포함한 붕산리튬 TLD를 조합시켜, 속중성자를 albedo법으로 측정하는 검출기가 개발되어 현재도 사용되고 있다.

1978년, B.G.Cartwright와 E.K.Shirk가 ADC판(Allyl Diglycol Carbonate, 통칭명 CR-39)을 발표하였다. ADC판에 속중성자가 입사하면 되튐양자가 발생하여 ADC판에 상처가 생긴다. 이 상처를 고농도의 수산화나트륨으로 에칭시키면 ADC판 표면의 상처가 확대되어 에치핏트로 된다. 이 에치핏트는 현미경으로 쉽게 관찰할 수 있고, 화상처리장치로 계속할 수 있기 때문에, 속중성자 폴루언스와 에치핏트수의 관계에서 속중성자선량을 평가할 수 있다. ADC판은 잠상퇴행은 없고, γ 선에 불감하며 검출하한은 0.1~0.2mSv이므로, 매우 획기적인 선량계이다.

1987년부터 NTA필름 대신에 속중성자 선량측정에 이용되었다. 현재는 유리배지, 룩셀배지와 ADC판을 조합시켜 속중성자 선량 측정서비스를 하고 있다.

5. 전자식 개인선량계의 변천

방사선 작업 현장에서는, 피폭 선량을 직독할 수



있고 피폭상황을 간단히 알 수 있는 개인선량계가 필요하다. 선량등록에 사용하지 않는 이러한 선량계를 부측정기라 부르고 있다. 1957년 경부터 부측정기로서 전리함 검출기를 이용하는 직독식 포켓 선량계가 사용되었다. 1970년 경에 원자력발전소가 운전을 개시하면 정기점검이나 보수 작업에 따르는 과잉피폭을 피하기 위하여, 직독식 포켓 선량계는 매우 중요한 측정기로 되고 고장이 적은 피치오테크닉사나 스테판사의 제품이 사용되었다.

정기점검이나 보수작업의 경우, 직독식 포켓선량계로서는 피폭을 간단히 제어할 수 없기 때문에, GM관 표시기능 부착 경보선량계(APD)가 1974년부터 원자력발전소 등에서 사용하게 되었다. 그러나 GM관의 고장이 많아서 후지전기는 이것을 개선하기 위하여 고장이 매우 적은 반도체 표시기능 부착 선량계(X·γ선용)를 개발하였다. 이것이 1982년경부터 원자력발전소 등에서 널리 사용하게 되었다.

그러나 원자력발전소에서는 지금까지의 필름 배지와 표시기능 부착 경보선량계의 두가지를 몸에 장착하여 작업을 해야 하기 때문에, 선량계 및 선량관리가 번잡하게 되었다. 그래서 한 개의 선량계 장착만으로도 발전소의 어느 구역에서 어떠한 작업을 하고 얼마만큼 피폭하였는가 등의 정보를 얻어서, 피폭선량 저감에 도움이 되어야 한다는 요망이 생겼다.

1988년경에, 개인선량계에 관련된 주변 기술의 진보와 함께 반도체 표시기능 부착 경보선량계는 더욱 발전하였다. X·γ선, 열중성자 및 속중성자선을 측정할 수 있는 동시에 상기의 요망을 만족시키고, 선량 및 선량 트렌드 등의 측정정보를 게이트 통과시에 데이터 송신할 수 있는 반도체 표시기능 부착 선량계가 후지전기, 마츠시타기에서 개발되었다. 그리하여 2000년부터 반도체 표시기능 부

착선량계(불휘발성 메모리사용)가 원자력발전소에서 필름배지 대신에 주 측정기로서 사용되기 시작하였다.

원자력의 여명시대로부터 사용되어온 직독식 포켓 선량계의 또 하나의 발전은, 피폭 상황을 간단히 알 수 있는 개인선량계로서의 특징을 우선으로 한 포켓 선량계로 변했다는 점이다. 이것은 반도체 검출기, 전원으로는 소형Li전지 및 액정 표시판으로 구성되고, 표시판에 선량 및 동작기능을 표시하는 반도체 포켓 선량계이다. 이 선량계는 알로카사에서 개발되었고, 전원스위치의 ON, OFF만으로 간단하게 조작할 수 있고 값이 싸다. 부측정기로서 1990년경부터 방사선 사업소에 급속히 보급되었다.

6. 새로운 DIS선량계

DIS(Direct Ion Storage)선량계는, 불휘발성 메모리소자로서 컴퓨터 등에 쓰이고 있는 금속산화물반도체전계효과트랜지스터(MOSFET)를 이용하고 있다. MOSFET와 전리가스를 소형전리함 속에 봉입하여 선량계를 만들고 있다. 이 전리함은 도전성의 벽재와 MOSFET의 고절연체상의 게이트 전극간으로 전리함이 구성되어 있다.

MOSFET는 기반인 P형 반도체의 양끝에 N형 반도체(각각 소스전극 및 드레인 전극이라 부른다)를 짜넣은 것인데, 양쪽 N형 반도체로 끼운 부분 위에 절연체를 끼운 게이트 전극이 있다. P형 반도체와 전리함 벽에 전리 전압을 걸고 기반의 P형 반도체를 그라운드로 하면, 이 상태에 방사선이 전리함에 입사하면 벽재에서 발생한 전자가 가스를 전리시키고, 발생된 +이온이 게이트 전극에 모이고 게이트에 +전하가 축적된다.

게이트가 +전위로 되면 P형 반도체 기본 내의 자유전자(소수캐리어)가 정전유도로 절연체 하부로,



끌어당기므로 P형 반도체 상부는 N형 반도체처럼 된다.(전계효과로 반전층이 생긴다) 이 결과 소스, 드레인 전극 사이에 전류가 흐르게 된다. 이 전류는 방사선으로 전리함 내에 생긴 이온이 게이트 전극에 축적한 양에 비례하기 때문에, 선량을 측정할 수 있다. 또 전리함 벽의 재질과 봉입가스를 바꾸므로써 선량계의 에너지 특성을 조정할 수 있다. 이것은 반도체 기술의 진보로 새롭게 전리함식 개인선량계가 되살아난 예이다.

7. 맺음말

전후의 1953년경부터 조선, 의료분야에서 방사선

업무종사자가 증가하기 시작하고, 이것과 원자력 시대의 시작이 중첩되어, 1955년에 필름배지의 개발과 필름배지 서비스가 시작되었다. 「유해물질을 취급하는 안전관리에서 피폭선량을 측정하고 있는 것은 방사선 업무 종사자 뿐이다.」라는 말과 같이, 필름배지는 방사선 업무 종사자의 안전에 대한 자부로서 가슴에 달고, 피폭선량 저감에 기여하여 왔다.

이 기사는 2001년 9월, 원자력 안전기술센터의 전기간담회에서 보고된 내용을 정리한 것이다.

KRIA

〈南賢太郎, Isotope News, 2002년 5월호〉

