

내부피폭선량 측정 및 평가  
Measurement and Evaluation of  
Internal Dose

*KAERI*

한 국 원 자 력 연 구 소

# 제 출 문

한전원자력연료주식회사 사 장 귀하

본 보고서를 2005년도 “내부피폭선량 측정 및 평가” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2006. 1

과 제 명 : 내부피폭선량 측정 및 평가

과제책임자 : 이 태 영

참 여 자 : 장 시 영

이 종 일

송 민 영

## 요 약 문

본 사업의 목적은 한전원자력연료주식회사 방사선작업종사자에 대해 내부피폭 선량을 평가함으로써 개인에게 결정적 영향이 발생하는 것을 방지하고, 확률적 영향이 발생하는 것을 용인할 수 있는 수준으로 제한하는데 있다. 이를 위해 본 사업에서는 내부피폭관리 프로그램을 계획 및 수립함은 물론, 폐 카운터에 의한 우라늄의 폐 방사능을 측정하고, 섭취량 및 예탁유효선량을 평가하였다.

한전원자력연료주식회사에서는 폐 방사능 측정이 요구되는 방사선작업종사자의 명단과 작업환경 등에 관한 정보를 한국원자력연구소에 제공하였으며, 한국원자력연구소에서는 이들의 폐 방사능을 폐 카운터를 사용하여 측정하였다.

본 사업기간동안 측정건수는 총 688건이었으며, 분기별로 보면 1/4분기에 141건, 2/4분기에 210건, 3/4분기에 195건, 4/4분기에 142건이었다. 2005년도 측정결과 수검자 중에서 우라늄이 체내오염된 것으로 확인된 방사선작업종사자는 총 22명으로 1/4분기에 9명, 2/4분기에 13명, 3/4분기에 10명, 4/4분기에 7명으로 나타났다. 그러나 체내오염된 것으로 확인된 작업자 중에서 19명은 이전년도 섭취에 의한 잔류량이 검출된 것으로 평가되었고, 3명만 금년도에 섭취된 것으로 평가되었다. 따라서 이들의 예탁유효선량을 ICRP 60 권고, ICRP 66의 호흡기 모델, ICRP 30의 소화기 모델 그리고 ICRP 78의 생체동역학적 모델 등에 근거한 방법을 사용하여 평가하였다. 평가결과 체내오염 작업자들의 연간 우라늄 섭취량에 의한 예탁유효선량은 3.53 ~ 10.09 mSv이었으며 모든 방사선작업종사자의 선량이 연간 유효선량한도 20 mSv 이하인 것으로 나타났다.

# 목 차

요 약 문 .....	ii
목 차 .....	iii
표 목 차 .....	iv
그림목차 .....	v
1. 서 론 .....	1
2. 폐 방사능 측정 .....	2
3. 섭취량 평가 .....	12
가. 섭취량 평가를 위해 사용한 조건 .....	12
(1) 섭취경로 및 섭취형태 .....	12
(2) 폐 방사능 측정자료 .....	12
(3) 방사능 입자크기 .....	12
(4) 흡수형 .....	12
나. 섭취량 평가 방법 .....	13
다. 섭취량 평가의 예 .....	17
(1) 금년도 섭취량에 의해 폐 방사능이 검출된 경우 .....	17
(2) 금년도 이전 섭취잔류량에 의해 폐 방사능이 검출된 경우 .....	18
라. 섭취량 평가 결과 .....	21
4. 예탁유효선량 평가 .....	24
5. 결 론 .....	25
참 고 문 헌 .....	26

## 표 목 차

표 1. LLNL 몸통에 몸통 판 및 덮개를 배열시킬 경우 가슴벽에서 지방질량분율과 가슴벽 두께 .....	2
표 2. $^{235}\text{U}$ 의 폐 방사능 측정결과(2005년도) .....	4
표 3. $^{235}\text{U}$ 의 폐 방사능 측정결과(2004년도) .....	5
표 4. $^{235}\text{U}$ 의 폐 방사능 측정결과(2003년도) .....	6
표 5. $^{235}\text{U}$ 의 폐 방사능 측정결과(2002년도) .....	7
표 6. $^{235}\text{U}$ 의 폐 방사능 측정결과(2001년도) .....	8
표 7. $^{235}\text{U}$ 의 폐 방사능 측정결과(2000년도) .....	9
표 8. $^{235}\text{U}$ 의 폐 방사능 측정결과(1999년도) .....	10
표 9. $^{235}\text{U}$ 의 폐 방사능 측정결과(1998년도) .....	11
표 10. 섭취율 계산시 설정된 연속섭취기간 .....	14
표 11. $^{235}\text{U}$ 의 농축도에 따른 우리나라의 전방사능에 대한 $^{234}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$ 및 $^{238}\text{U}$ 의 방사능 분율 $f_{234}$ , $f_{235}$ , $f_{238}$ .....	16
표 12. $^{235}\text{U}$ 섭취율 및 섭취량 평가결과(2005년도) .....	22
표 13. 우리나라 연간 섭취량 평가결과(2005년도) .....	23
표 14. 우리나라 연간 섭취량에 의한 예탁유효선량 평가결과(2005년도) .....	24

## 그림 목 차

그림 1. 금년도에 우라늄을 섭취한 경우 BiDAS 코드에 의한 섭취율 평가의 예 .....	17
그림 2. 폐 방사능이 금년도 이전 섭취잔류량인 경우 BiDAS 코드 해석의 예 (금년도 이전 연속섭취기간이 1개(1998~2002년도)인 경우) .....	18
그림 3. 폐 방사능이 금년도 이전 섭취잔류량인 경우 BiDAS 코드 해석의 예 (금년도 이전 연속섭취기간이 2개(1998~2002, 2004년도)인 경우) .....	19
그림 4. 폐 방사능이 금년도 이전 섭취잔류량인 경우 BiDAS 코드 해석의 예 (금년도 이전 연속섭취기간이 3개(1998~2002, 2003, 2004년도)인 경우) .....	20



# 1. 서론

핵연료 제조와 관련된 일련의 작업에서는 작업장소의 오염이 빈번하게 발생하기 때문에 체내오염의 발생과 이의 우려가 상당히 높다. 따라서 내부피폭선량이 경영관리 및 규제기관 요건에 부합함을 입증하고, 방사선 작업방법 및 작업환경의 개선방안 수립을 위한 자료를 확보하며, 사고피폭의 경우 적절한 보건상의 검사와 치료를 시작하는데 가치 있는 정보를 제공하기 위해 내부피폭관리 프로그램이 계획되고 시행되어야 한다[1]. 이에 따라 내부피폭관리 프로그램의 계획 및 수립, 폐 카운터에 의한 폐 내에 존재하는 우라늄의 정량적 분석 및 평가, 섭취량 및 예탁유효선량의 평가 등을 본 사업에서 수행하였다. 이의 효율적 추진을 위해 한전원자력연료주식회사에서는 방사선작업종사자의 폐 방사능 측정계획, 작업환경정보 등을 한국원자력연구소에 제공하였으며, 한국원자력연구소에서는 폐 카운터를 활용하여 폐 내에 존재하는 우라늄을 측정 및 평가하였고, 또한 이를 기초로 섭취량과 예탁유효선량을 평가하였다.

한전원자력연료주식회사(KNFC) 방사선작업종사자에 대한 섭취량 및 예탁유효선량은 ICRP 60 권고[2], ICRP 66에 주어진 호흡기 모델[3] 및 ICRP 78의 생체동역학적 모델[4] 등 최근 이론에 근거한 BiDAS 코드[5]를 사용하여 계산하였다. 섭취량 평가에서 중요한 요소 중 하나인 섭취형태는 체내오염 작업자의 폐 방사능 측정이력 및 작업환경정보 등을 검토하여 적합한 것으로 판단되는 만성섭취로 가정하였다. 또한 정확한 연간 섭취량을 평가하기 위하여 체내오염 작업자의 금년도 이전 섭취량에 의한 폐 잔류방사능을 금년도 측정결과에서 차감하였고, 이로부터 새로 도출된 섭취율로 금년도에 연속섭취한 것으로 가정하였다. 단, 금년도 측정값이 금년도 이전 섭취량에 의한 폐 잔류방사능과 측정오차 범위 내에 있을 경우에는 금년도 섭취량 평가에서 제외하였다.

## 2. 폐 방사능 측정

우라늄의 폐 방사능은 한국원자력연구소의 폐 카운터를 사용하여 측정하였다. 이 카운터는 2대의 BEGe(Broad Energy Ge) 검출기, 검출기 위치조절메커니즘, 피검사자의 침대, 전자회로계 및 데이터 시스템 등으로 구성되어 있다. 검출기의 면적은 50 cm<sup>2</sup>, 두께는 25 mm, 상대효율은 37%, 입사창의 두께는 6 mm이며, 피검사자가 함유하고 있는 <sup>40</sup>K의 콤프턴 산란에 의한 백그라운드를 줄이기 위한 차폐물(구리 5 mm, 납 5 mm)이 각 검출기에 부착되어 있다. 카운터의 구성요소 중에서 검출기, 위치조절메커니즘 및 침대는 137 cm(높이) x 213 cm(폭) x 91 cm(깊이)의 실내 공간을 갖는 모니터링 실내에 있으며, 모니터링실의 모든 면은 검출기의 자연계수치를 낮추기 위해 10 cm의 철벽으로 되어 있다. 전자회로계는 전치증폭기, 주 증폭기 및 다중과고분석기로 구성되어 있으며, 데이터 시스템의 운영 소프트웨어는 Canberra사의 Abacos 2000 V1.3C[6]이다.

폐 카운터의 교정에는 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory) 팬텀과 <sup>241</sup>Am/<sup>152</sup>Eu 선원을 사용하였다. 이 팬텀은 가슴벽두께(Chest Wall Thickness, CWT)의 함수로 주어지는 계측효율을 얻도록 하기 위하여 몸통, 몸통 판 및 크기가 서로 다른 4개의 덮개(B series) 등으로 구성되어 있으며, 이의 사양은 표 1과 같다.

표 1. LLNL 몸통에 몸통 판 및 덮개를 배열시킬 경우 가슴벽에서 지방질량 분율과 가슴벽 두께

Configuration	Adipose Mass Fraction(%)	Chest Wall Thickness(cm)
Torso Plate	0	1.77
Torso Plate + B1	12.8	2.40
Torso Plate + B2	20.4	3.05
Torso Plate + B3	24.3	3.53
Torso Plate + B4	27.4	4.05

작업자의 일상측정을 위한 계측시간은 1800초로 하였고, 우라늄의 검출 대상 감마 에너지는 <sup>235</sup>U의 185.7 keV(방출률 : 0.54)로 하였다. 측정으로부터 작업자의 폐 방사능은 다음 식을 사용하여 계산하였다.



$$Q_L = \frac{A - BKG}{EF \times Y \times t} \quad (1)$$

여기서  $Q_L$ 은 폐에 존재하고 있는  $^{235}\text{U}$ 의 방사능(Bq), A는 185.7 keV의 관심 채널의 피크 면적(counts), EF는 검출효율(counts/photon), Y는 185.7 keV의 감마선 방출분율, t는 계측시간, BKG는 185.7 keV의 관심 채널의 백그라운드 피크 면적(counts)이다. EF는 가슴벽 두께에 따라 달라지므로, 이를 고려하기 위하여 각 피검자의 가슴벽 두께를 Abacos 2000 V1.3C에서 사용하는 다음의 실험식에 의해 계산하였다.

$$CWT = 60 \frac{W}{H} - 1 \quad (2)$$

여기서 CWT는 가슴벽두께(mm), W는 몸무게(kg), H는 신장(cm)이다.

본 사업기간동안 측정건수는 총 688건이었으며, 분기별로 보면 1/4분기에 141건, 2/4분기에 210건, 3/4분기에 195건, 4/4분기에 142건이었다. 측정결과 수검자 중에서  $^{235}\text{U}$ 가 검출된 방사선작업종사자는 총 22명으로 1/4분기에 9명, 2/4분기에 13명, 3/4분기에 10명, 4/4분기에 7명으로 나타났다. 이들에 대한  $^{235}\text{U}$ 의 분기별 측정결과를 표 2에 나타내었으며, 금년도 이전(1998년 ~ 2004년)의  $^{235}\text{U}$ 의 분기별 측정결과를 표 3 ~ 표 9에 나타내었다. 단, 2003년도부터 측정은 되었으나, 신뢰성이 부족한 자료에 대해서는 미 검출된 것으로 간주하였다. 또한 작업자가 우라늄 작업 직후 폐 계측을 할 경우에 폐 영역 외에 잠시 존재하는 우라늄이 계측될 수 있다. 따라서 보다 신뢰성 있는 측정 자료를 얻기 위해  $^{235}\text{U}$ 가 검출된 작업자에 대해 우라늄 작업이 없는 날에 폐 계측을 재 실시하였다. 그 결과 재 실시된 폐 계측에서  $^{235}\text{U}$ 이 검출되지 않을 경우 1차 측정에서 검출된  $^{235}\text{U}$ 은 폐 영역 외에 잠시 존재하는 우라늄으로 간주하여 선량평가에서 제외시켰으며, 측정결과에도 미 검출로 표시하였다.

표 2.  $^{235}\text{U}$ 의 폐 방사능 측정결과(2005년도)

단위: Bq

작업자	1/4분기			2/4분기			3/4분기			4/4분기		
	측정일	측정값 (Bq)	오차 (%)	측정일	측정값 (Bq)	오차 (%)	측정일	측정값 (Bq)	오차 (%)	측정일	측정값 (Bq)	오차 (%)
A	3/25	-	-	6/29	-	-	9/23	-	-	12/9	3.28	65.20
B	3/15	-	-	6/2	3.65	60.06	9/7	-	-	11/29	-	-
C	3/8	-	-	6/7	-	-	9/2	4.49	52.17	12/5	-	-
D	3/9	4.22	59.36	6/2	-	-	9/15	4.54	53.11	12/2	-	-
E	3/8	-	-	5/31	-	-	9/2	-	-	12/7	3.46	68.97
F	3/7	-	-	6/13	-	-	9/5	3.34	68.58	12/8	3.96	61.47
G	3/15	-	-	5/30	3.66	59.93	9/1	3.60	57.45	12/1	-	-
H	3/8	-	-	6/7	-	-	9/7	3.47	65.90	12/5	-	-
I	3/7	3.33	66.15	6/3	4.17	57.61	9/5	-	-	11/28	-	-
J	3/21	-	-	6/9	4.50	52.62	9/9	-	-	12/7	-	-
K	3/8	3.73	55.44	6/2	4.23	50.93	9/5	-	-	12/2	-	-
L	3/9	-	-	5/31	3.82	67.42	9/12	-	-	12/8	-	-
M	3/9	-	-	6/2	-	-	9/13	3.74	66.38	12/2	6.16	47.84
N	3/16	-	-	6/15	5.07	43.00	9/2	-	-	11/29	3.81	63.01
O	3/18	5.36	50.22	6/3	3.74	65.06	8/30	-	-	11/29	-	-
P	3/7	-	-	6/22	3.66	63.51	9/5	5.22	46.27	12/8	3.59	62.65
Q	3/14	4.14	54.71	5/30	3.33	61.15	9/12	4.74	46.58	12/1	-	-
R	3/14	5.48	45.50	6/13	3.48	63.81	8/31	-	-	11/28	-	-
S	×	×	×	5/31	-	-	9/5	-	-	12/2	3.93	57.30
T	3/24	4.19	49.37	6/7	-	-	8/30	-	-	12/6	-	-
U	4/1	5.63	41.30	6/20	3.79	58.05	9/8	3.68	61.11	11/29	-	-
V	3/28	4.00	57.64	6/8	4.31	52.52	9/1	4.75	52.53	12/15	-	-

(주) - : 미검출, × : 미측정

표 3.  $^{235}\text{U}$ 의 폐 방사능 측정결과(2004년도)

단위: Bq

작업자	1/4분기			2/4분기			3/4분기			4/4분기		
	측정일	측정값 (Bq)	오차 (%)	측정일	측정값 (Bq)	오차 (%)	측정일	측정값 (Bq)	오차 (%)	측정일	측정값 (Bq)	오차 (%)
A	3/22	-	-	6/11	-	-	9/21	-	-	12/10	-	-
B	3/11	-	-	6/1	-	-	8/30	-	-	12/8	-	-
C	3/24	-	-	6/1	-	-	8/31	-	-	12/1	3.99	61.44
D	3/18	-	-	6/1	4.79	51.09	9/8	-	-	12/7	5.80	48.16
E	3/10	-	-	6/1	-	-	9/6	-	-	12/1	-	-
F	×	×	×	6/4	-	-	9/10	-	-	12/14	-	-
G	3/15	-	-	6/24	-	-	9/8	-	-	12/2	-	-
H	3/16	-	-	6/7	-	-	8/30	-	-	12/1	-	-
I	3/8	-	-	6/24	-	-	9/1	-	-	12/9	-	-
J	3/22	-	-	6/22	-	-	9/7	-	-	12/10	-	-
K	3/11	-	-	6/1	-	-	8/30	-	-	12/6	-	-
L	3/10	-	-	6/2	-	-	9/6	-	-	12/6	-	-
M	3/15	-	-	6/7	4.91	46.20	8/30	-	-	12/2	-	-
N	3/16	-	-	6/7	-	-	8/30	-	-	12/1	-	-
O	3/19	-	-	6/10	-	-	9/1	-	-	12/3	-	-
P	3/16	-	-	6/24	5.70	34.50	9/10	-	-	12/7	-	-
Q	3/10	4.47	47.30	6/1	5.56	38.34	9/8	2.95	67.90	12/1	5.76	41.44
R	3/8	-	-	6/4	-	-	9/1	-	-	11/29	3.20	70.39
S	×	×	×	×	×	×	9/16	-	-	×	×	×
T	3/15	-	-	6/9	-	-	9/8	3.53	58.73	12/14	-	-
U	3/8	4.96	43.62	6/21	4.83	38.85	9/20	4.97	45.80	12/15	5.78	43.23
V	3/22	-	-	6/2	5.70	37.14	9/6	-	-	12/2	4.21	55.02

(주) - : 미검출, × : 미측정

표 4.  $^{235}\text{U}$ 의 폐 방사능 측정결과(2003년도)

단위: Bq

작업자	1/4분기			2/4분기			3/4분기			4/4분기		
	측정일	측정값 (Bq)	오차 (%)	측정일	측정값 (Bq)	오차 (%)	측정일	측정값 (Bq)	오차 (%)	측정일	측정값 (Bq)	오차 (%)
A	3/13	-	-	6/19	-	-	9/22	-	-	12/15	-	-
B	3/6	-	-	6/17	-	-	9/15	3.05	58.08	12/4	-	-
C	3/12	-	-	6/11	-	-	9/16	-	-	12/8	-	-
D	3/13	8.35	34.90	6/12	5.15	45.19	9/16	4.76	45.98	12/5	6.36	38.15
E	3/6	-	-	6/12	-	-	9/24	-	-	12/4	-	-
F	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
G	3/5	5.42	40.18	6/13	-	-	9/15	-	-	12/8	-	-
H	3/6	-	-	6/26	-	-	9/16	-	-	12/3	-	-
I	3/3	4.10	58.41	6/23	-	-	9/23	-	-	12/2	-	-
J	3/13	-	-	6/19	3.74	57.65	9/26	-	-	12/15	5.65	35.73
K	3/10	-	-	6/17	-	-	9/15	-	-	12/4	-	-
L	3/12	-	-	6/12	-	-	9/16	-	-	12/9	-	-
M	3/6	-	-	6/12	-	-	9/24	-	-	12/4	-	-
N	3/12	-	-	6/11	5.67	39.57	9/16	-	-	12/9	-	-
O	3/10	-	-	6/9	-	-	9/4	-	-	12/2	-	-
P	3/3	-	-	6/9	7.11	34.92	9/4	5.04	43.59	12/1	-	-
Q	3/6	7.97	30.38	6/17	6.13	36.79	9/16	4.67	40.16	12/3	5.42	39.89
R	3/3	-	-	6/9	5.84	33.97	9/4	4.96	39.80	12/1	-	-
S	×	×	×	6/9	-	-	×	×	×	×	×	×
T	3/13	-	-	6/16	-	-	9/23	-	-	12/9	-	-
U	3/10	8.98	27.80	6/9	-	-	9/4	4.81	44.12	12/2	4.76	39.97
V	3/12	5.23	45.96	6/17	5.50	43.57	9/26	-	-	12/9	4.09	49.38

(주) - : 미검출, × : 미측정

표 5.  $^{235}\text{U}$ 의 폐 방사능 측정결과(2002년도)

단위: Bq

작업자	1/4분기		2/4분기		3/4분기		4/4분기	
	측정일	측정값	측정일	측정값	측정일	측정값	측정일	측정값
A	3/20	-	6/17	-	9/13	-	12/6	-
B	3/7	5.54	6/17	5.71	9/11	-	12/16	-
C	3/6	-	6/10	-	9/12	-	12/3	4.43
D	3/8	8.59	6/12	8.74	9/19	6.47	12/3	5.33
E	3/12	-	6/12	-	9/17	-	12/12	-
F	×	×	×	×	×	×	×	×
G	3/7	4.65	6/12	3.85	9/16	-	12/11	7.23
H	3/12	-	6/12	-	9/17	4.46	12/12	-
I	3/13	-	6/11	5.32	9/9	-	12/5	-
J	3/19	5.03	6/14	-	9/12	-	12/6	-
K	3/12	-	6/24	-	9/17	-	12/12	5.46
L	3/12	-	6/24	-	9/17	-	12/12	-
M	3/12	-	6/12	-	9/17	6.36	12/9	-
N	3/8	-	6/18	-	9/11	-	12/3	-
O	3/5	-	6/7	5.32	9/18	4.78	12/4	-
P	3/5	8.02	6/4	3.54	9/18	-	12/9	-
Q	3/8	10.97	6/18	5.85	9/11	7.18	12/3	7.12
R	3/5	-	6/4	5.35	9/9	5.67	12/4	6.61
S	3/19	8.85	6/19	6.97	×	×	12/4	7.59
T	3/14	-	6/5	-	9/17	-	12/11	-
U	3/5	7.42	6/4	4.54	9/18	6.09	12/5	4.14
V	3/12	5.45	6/14	5.38	9/18	5.79	12/11	4.42

(주) - : 미검출, × : 미측정

표 6.  $^{235}\text{U}$ 의 폐 방사능 측정결과(2001년도)

단위: Bq

작업자	1/4분기		2/4분기		3/4분기		4/4분기	
	측정일	측정값	측정일	측정값	측정일	측정값	측정일	측정값
A	3/12	-	7/9	-	9/6	-	12/5	-
B	3/7	-	7/5	-	9/11	-	12/7	-
C	3/16	-	6/27	-	9/19	5.75	12/10	-
D	3/16	9.49	6/27	5.47	9/21	-	12/11	-
E	3/6	-	7/6	-	9/12	-	12/7	-
F	×	×	×	×	×	×	×	×
G	3/6	4.24	6/26	4.72	9/18	-	12/10	-
H	3/7	-	7/5	4.86	9/11	-	11/30	4.95
I	3/2	-	6/29	3.67	9/14	-	12/6	-
J	3/12	-	6/29	-	9/5	-	12/19	5.28
K	×	×	×	×	×	×	×	×
L	3/7	-	6/27	-	9/12	-	12/7	-
M	3/16	-	6/27	6.24	9/19	-	11/10	3.77
N	3/7	-	6/26	-	9/12	-	12/7	-
O	3/9	3.62	6/29	-	9/20	-	12/3	-
P	3/2	5.60	6/22	7.15	9/10	-	11/29	-
Q	3/16	7.40	6/27	12.13	9/19	10.50	12/11	12.56
R	3/2	-	6/22	5.17	9/3	-	11/29	-
S	3/16	9.05	7/10	6.13	9/5	-	12/4	-
T	3/6	-	6/26	-	9/21	-	12/6	4.94
U	3/9	8.60	6/22	6.44	9/3	-	11/30	5.55
V	3/14	8.42	6/27	8.81	9/28	6.22	12/19	-

(주) - : 미검출, × : 미측정

표 7.  $^{235}\text{U}$ 의 폐 방사능 측정결과(2000년도)

단위: Bq

작업자	1/4분기		2/4분기		3/4분기		4/4분기	
	측정일	측정값	측정일	측정값	측정일	측정값	측정일	측정값
A	3/28	-	6/16	-	10/2	-	12/11	-
B	3/15	-	6/1	5.97	9/14	-	12/6	3.51
C	3/22	-	6/1	4.10	9/14	-	11/29	3.09
D	3/14	11.47	6/5	12.03	9/7	12.87	11/29	8.88
E	3/1	5.23	6/1	6.50	9/15	-	12/6	-
F	×	×	×	×	×	×	×	×
G	3/15	-	6/2	-	9/7	3.83	12/7	-
H	3/14	-	6/1	-	9/14	-	12/4	-
I	3/17	-	6/8	-	8/31	-	12/5	4.20
J	3/27	-	6/12	-	9/19	-	12/11	-
K	×	×	×	×	×	×	×	×
L	3/14	-	6/5	-	9/7	-	11/30	-
M	3/22	-	6/2	-	9/6	-	11/30	-
N	3/14	-	6/5	-	9/6	-	11/30	-
O	3/24	6.12	5/29	-	8/31	-	12/5	-
P	3/16	-	6/8	-	8/31	4.59	12/5	-
Q	3/15	4.61	6/5	7.20	9/26	6.01	11/29	4.12
R	3/17	5.53	5/29	-	8/31	-	11/28	-
S	3/22	4.16	6/5	7.95	9/6	3.24	12/5	3.87
T	3/23	-	6/2	-	9/6	-	11/29	-
U	3/17	4.81	6/8	6.47	9/8	2.92	11/27	4.58
V	3/22	9.72	6/7	4.52	9/14	6.04	11/30	-

(주) - : 미검출, × : 미측정

표 8.  $^{235}\text{U}$ 의 폐 방사능 측정결과(1999년도)

단위: Bq

작업자	1/4분기		2/4분기		3/4분기		4/4분기	
	측정일	측정값	측정일	측정값	측정일	측정값	측정일	측정값
A	3/17	-	×	×	9/15	-	12/15	-
B	3/10	-	×	×	9/7	6.25	12/1	4.30
C	3/10	-	×	×	8/31	4.27	12/13	-
D	3/10	4.97	×	×	9/6	9.58	12/1	-
E	×	×	×	×	×	×	×	×
F	×	×	×	×	×	×	×	×
G	3/10	-	×	×	8/30	7.80	12/8	5.90
H	3/10	-	×	×	9/6	4.50	12/9	-
I	3/5	-	×	×	8/27	6.74	11/29	-
J	3/17	-	×	×	9/10	-	12/17	-
K	×	×	×	×	×	×	×	×
L	×	×	×	×	×	×	×	×
M	3/3	5.92	×	×	8/31	-	12/1	4.99
N	×	×	×	×	×	×	×	×
O	3/5	6.82	×	×	9/2	-	12/7	4.22
P	3/9	-	×	×	9/2	6.31	12/13	-
Q	3/3	6.95	×	×	9/6	7.09	12/1	-
R	3/9	-	×	×	9/2	9.20	11/29	-
S	×	×	×	×	9/3	13.36	×	×
T	3/11	-	×	×	9/6	3.37	12/22	-
U	3/5	-	×	×	9/2	4.86	12/7	-
V	3/11	5.34	×	×	9/7	6.98	12/1	6.16

(주) - : 미검출, × : 미측정



표 9.  $^{235}\text{U}$ 의 폐 방사능 측정결과(1998년도)

단위: Bq

작업자	1/4분기		2/4분기		3/4분기		4/4분기	
	측정일	측정값	측정일	측정값	측정일	측정값	측정일	측정값
A	3/30	-	7/2	-	9/21	-	12/4	-
B	3/17	28.31	6/12	4.51	9/7	7.73	11/30	-
C	3/11	7.98	6/11	-	9/1	4.45	11/30	-
D	3/17	42.38	6/18	5.02	9/8	6.36	12/15	7.46
E	×	×	×	×	×	×	×	×
F	×	×	×	×	×	×	×	×
G	3/11	19.10	6/11	3.68	9/7	5.48	12/15	-
H	3/17	-	6/18	-	9/1	-	12/8	8.72
I	3/10	-	6/15	-	9/3	-	12/10	-
J	3/24	-	7/2	-	9/17	4.30	12/16	5.84
K	×	×	×	×	×	×	×	×
L	×	×	×	×	×	×	×	×
M	3/17	20.93	6/19	-	8/31	4.52	11/30	-
N	×	×	×	×	×	×	×	×
O	3/16	-	6/15	-	9/2	-	12/11	9.03
P	3/10	5.60	6/15	-	9/2	-	12/14	-
Q	3/18	34.80	7/18	-	9/7	6.20	12/8	7.37
R	3/9	-	6/23	-	9/3	4.04	12/21	-
S	3/11	-	6/18	-	8/31	-	12/14	3.63
T	3/18	10.41	6/12	4.49	9/9	-	12/7	-
U	3/16	5.69	6/16	-	9/2	-	12/10	-
V	3/13	42.67	6/11	5.29	9/8	-	12/15	5.32

(주) - : 미검출, × : 미측정

### 3. 섭취량 평가

폐 방사능 측정 결과로부터 섭취량과 예탁유효선량을 평가하기 위해서는 섭취 일시, 섭취기간, 섭취경로, 섭취형태, 섭취핵종의 화학형태에 따른 흡수형 및 입자크기 등에 관한 정보가 필요하다. 이에 관한 정보는 작업환경을 조사해 관련자료를 입수하였고, 특별한 자료가 없는 경우에는 ICRP 참고값(default value)을 사용하였다.

#### 가. 섭취량 평가를 위해 사용한 조건

##### (1) 섭취경로 및 섭취형태

방사성핵종의 섭취는 흡입섭취, 경구섭취 및 혈액섭취 등을 통하여 이루어진다. 본 평가에서 방사선작업종사자의 체내오염은 흡입섭취로 인하여 발생한 것으로 가정하였다. 또한 섭취형태는 체내오염 작업자의 측정이력 및 작업환경정보 등을 검토하여 만성섭취로 가정하였다.

##### (2) 폐 방사능 측정자료

섭취량 평가를 위하여 금년도 분기별 폐 방사능 측정값을 사용하였으며, 또한 금년도 측정값에서 금년도 이전 섭취에 의한 폐 잔류량을 배제하기 위하여 금년도 이전(1998년 ~ 2004년)의 분기별 폐 방사능 측정값도 사용하였다. 단, 금년도 측정값이 금년도 이전 섭취량에 의한 폐 잔류방사능과 측정오차 범위 내에 있을 경우에는 금년도 섭취량 평가 자료로 사용하지 않았다.

##### (3) 방사능 입자크기

방사능 입자크기는 작업공정마다 차이가 있을 수 있고, 한 공정을 대상으로 하여 이를 측정한다 할지라도 입자크기는 하나의 값을 갖는 것이 아니고 분포를 이루므로 중앙값을 입자크기로 한다. 일반적으로 방사선 작업장내의 방사능 입자크기에 대한 측정값이 없을 경우에는 5  $\mu\text{m}$ 를 기본값으로 본다[4]. 특히 한전원자력연료주식회사에 의해 측정된 실제 작업장 우라늄 입자크기도 5  $\mu\text{m}$ 로 나타났다.

##### (4) 흡수형

ICRP 30[7]에서 정의된 우라늄 화합물에 대한 흡입등급에 따르면,  $\text{UF}_6$ ,  $\text{UO}_2\text{F}_2$  및  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 는 D등급(폐에서의 잔류반감기가 10일 미만),  $\text{UO}_3$ ,  $\text{UF}_4$  및  $\text{UCl}_4$ 는 W등급(폐에서의 잔류반감기가 10일에서 100일 미만),  $\text{UO}_2$ 와  $\text{U}_3\text{O}_8$ 는 Y등급(폐에서의 잔류반감기가 100일 이상)으로 분류하고 있다. 이러한 D, W, Y 흡입등급은 새로 발표된 ICRP 66 호흡기모델에서 사용되는 흡수형, 다시 말해서 호흡기 각 영역에 침착된 화합물이 체액으로 흡수되는 유형을 나타내는 F(빠름), M(중간),

S(느림)와 각각 일치한다. 여기서 F는 용해 반감기가 10분인 물질이 100%인 경우이고, M은 용해 반감기가 10분인 물질 10%와 140일인 물질 90%가 혼합된 물질을 뜻하며, S는 용해 반감기가 10분인 물질 0.1%와 7000일인 물질 99.9%가 혼합된 물질을 말한다. KNFC의 경우 핵연료 공정에서 작업자가 주로 취급하는 화합물은  $UO_2$ 와  $U_3O_8$  이므로 흡수형태를 Type S로 간주하였다.

## 나. 섭취량 평가방법

방사능을 연속 섭취할 경우, n 번째 연속섭취기간동안 임의의 시간  $t_k$ 에서 생체동역학적 모델에 의한 예측량  $F_n(t_k)$ 은 식 (3), n번째 연속 섭취기간 동안의 섭취율을  $\dot{I}_n$ 과 섭취량  $I_n$ 은 각각 식 (4) 및 식 (5)와 같이 주어진다[8].

$$F_n(t_k) = \sum_{i=1}^n I_i m(T_i - T_{i-1}, t_k - T_{i-1}) \quad (3)$$

$$\dot{I}_n = \frac{\sum_{k=1}^L w(t_k) \left\{ m(T_n - T_{n-1}, t_k - T_{n-1}) \times \left[ M(t_k) - \sum_{i=1}^{n-1} I_i m(T_i - T_{i-1}, t_k - T_{i-1}) \right] \right\}}{\sum_{k=1}^L w(t_k) [m(T_n - T_{n-1}, t_k - T_{n-1})]^2} \quad (4)$$

$$I_n = \dot{I}_n \times (T_n - T_{n-1}) \quad (5)$$

여기서  $I_i$ 는 i번째 연속섭취기간 동안의 섭취량,  $M(t_k)$ 는 k번째 측정량,  $T_n$ 은 n번째 섭취기간의 종료시점,  $T_{n-1}$ 은 n-1번째 섭취기간의 종료시점 또는 n번째 섭취기간의 개시시점,  $t_k$ 는 k번째 측정시점이다. 그리고  $T_i$ 는 i번째 섭취기간의 종료시점,  $T_{i-1}$ 는 i-1번째 섭취기간의 종료시점 또는 i번째 섭취기간의 개시시점이다. 또한  $m(T_i - T_{i-1}, t_k - T_{i-1})$ 은  $T_{i-1}$  시점부터  $T_i$  시점까지 연속 섭취할 경우 섭취개시 후  $(t_k - T_{i-1})$  시간 경과한 시점에서의 폐에 대한 우라늄의 연속 섭취량분율이고,  $m(T_n - T_{n-1}, t_k - T_{n-1})$ 은  $T_{n-1}$  시점부터  $T_n$  시점까지 연속 섭취할 경우 섭취개시 후  $(t_k - T_{n-1})$  시간 경과한 시점에서의 폐에 대한 우라늄의 연속 섭취량분율이다. 또한 L은 섭취 후 마지막 측정시점의 index이고,  $w(t_k)$ 는 시간  $t_k$ 에서 측정된 값에 대한 가중치[9]이다.

우라늄 일일 섭취율은 한국원자력연구소에서 개발한 내부피폭선량 계산 코드 BiDAS (Bioassay Data Analysis Software)[5]를 사용하여 계산하였다. 본 계산에서는 기본적으로 모두 4개의 연속섭취기간을 설정하였고, 해당 연속섭취기간에는 동일한 섭취율로 연속섭취 되는 것으로 가정하였다. 즉, 내부피폭선량평가 법규 시행년도 이전인 1998~2002년 기간을 하나의 연속섭취기간으로 정하고, 2003년부터는 매년을 각각의 연속섭취기간으로 정하였다. 그러나 해당기간에 섭취량 평가에 사용된 측정값이 없을 경우에는 1 ~ 3개의 연속섭취기간을 설정하였다. 섭취량 평가를 위한 연속섭취기간은 표 10과 같이 설정할 수 있다.

표 10. 섭취율 계산시 설정된 연속섭취기간

해당연도별 섭취량 평가용 측정자료 존재여부				연속섭취기간
1998~2002 (T <sub>1</sub> )	2003 (T <sub>2</sub> )	2004 (T <sub>3</sub> )	2005 (T <sub>4</sub> )	
×	×	×	○	1개 ( T <sub>0</sub> ~T <sub>4</sub> )
×	○	×	○	2개 ( T <sub>0</sub> ~T <sub>2</sub> , T <sub>2</sub> ~T <sub>4</sub> )
×	×	○	○	2개 ( T <sub>0</sub> ~T <sub>3</sub> , T <sub>3</sub> ~T <sub>4</sub> )
○	×	×	○	2개 ( T <sub>0</sub> ~T <sub>1</sub> , T <sub>1</sub> ~T <sub>4</sub> )
×	○	○	○	3개 ( T <sub>0</sub> ~T <sub>2</sub> , T <sub>2</sub> ~T <sub>3</sub> , T <sub>3</sub> ~T <sub>4</sub> )
○	○	×	○	3개 ( T <sub>0</sub> ~T <sub>1</sub> , T <sub>1</sub> ~T <sub>2</sub> , T <sub>2</sub> ~T <sub>4</sub> )
○	×	○	○	3개 ( T <sub>0</sub> ~T <sub>1</sub> , T <sub>1</sub> ~T <sub>3</sub> , T <sub>3</sub> ~T <sub>4</sub> )
○	○	○	○	4개 (T <sub>0</sub> ~T <sub>1</sub> , T <sub>1</sub> ~T <sub>2</sub> , T <sub>2</sub> ~T <sub>3</sub> , T <sub>3</sub> ~T <sub>4</sub> )

(주) T<sub>0</sub>는 최초 작업개시일, T<sub>1</sub>는 1998~2002년 기간 중 최종 폐 방사능 검출일  
T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub>는 각 해당년도 섭취량평가에 사용된 최종 폐 방사능 검출일을 뜻함

표 10에서 보는 바와 같이 작업자의 폐 방사능 검출자료가 2005년도에만 있는 경우에는 작업자의 최초 작업개시일 T<sub>0</sub>부터 2005년도 섭취량 평가에 사용된 최종 폐 방사능 검출일 T<sub>4</sub>까지를 하나의 연속섭취기간으로 설정하였다. 또한 섭취량 평가에 사용된 폐 방사능 검출자료가 2004년도와 2005년도에만 있는 경우에는 작업자의 최초 작업개시일 T<sub>0</sub>부터 2004년도 섭취량 평가에 사용된 최종 폐 방사능 검출일 T<sub>3</sub>까지를 하나의 연속섭취기간으로 설정하고, T<sub>3</sub>부터 2005년도 섭취량 평가에 사용된 최종 폐 방사능 검출일 T<sub>4</sub>까지를 또 하나의 연속섭취기간으로 설정할 수 있다. 기타의 경우에 있어서도 마찬가지로 최초 작업개시일 및 당해 연도 섭취량 평가에 사용된 최종 폐 방사능 검출일을 기준으로 연속섭취기간을 설정할 수 있을 것이다.

체내오염이 확인된 작업자에 대해서 각 작업자별로 해당 연속섭취기간동안에 측정된 값(표 2 ~ 표 9 참조)과 식 (4)를 사용하여 해당 연속섭취기간의 섭취율을 계산하였다. 이 과정에서 측정값에 대한 가중치 w(t<sub>k</sub>)의 값은 1998~2002년도 측정 자료의 경우 균일절대오차를 사용하였고, 2003년~2005년도 측정 자료의 경우 실제 측정오차를 사용하였다. 그리고 섭취량은 식 (5)와 같이 계산할 수 있다. 다만 금년도 섭취량은 금년도 측정 자료로부터 구한 섭취율에 금년도 해당 섭취기간을 곱하여 구하였다.

금년도 폐 방사능 측정결과 우라늄이 검출된 22명의 작업자 중에서 19명은 이전년도에 섭취된 우라늄의 잔류량이 검출된 것으로 평가되었다. 즉 작업자 19명은 비록 금년도 체내피폭검사에서 폐 방사능이 검출 되었으나, 그 검출값이 금년도 이전에 섭취된 우라늄의 폐 잔류량 예측값보다 작거나 측정오차 범위 내에 있으므로 금년도 이전의 섭취잔류량으로 판단되어 금년도 섭취량 평가 대상에서 제외시켰다. 나머지 3명 A, F, L 작업자의 경우에는 모두 최초 작업개시 이후 처음으로 폐 방사능이 검출되었으므로 최초 작업개시일부터 금년도 폐 방사능 최종 검출일까지 일정한 섭취율로 연속 섭취한 것으로 가정하였다. A 작업자의 경우 섭취율 계산에 사용된 연속섭취기간은 1998년 1월 1일부터 2005년 12월 9일까지로 하였고, 금년도 섭취기간은 365일로 하였다. 또한 F 작업자의 경우 섭취율 계산에 사용된 연속섭취기간은 2004년 4월 1일부터 2005년 9월 5일까지로 하였고, 금년도 섭취기간은 270일로 하였다. 이 경우 2005년 12월 8일에도 폐 방사능이 검출은 되었으나 이전 섭취 잔류량으로 분석되어 섭취율 및 섭취량 평가 자료에서 제외시켰다. 그리고 L 작업자의 경우 섭취율 계산에 사용된 연속섭취기간은 2000년 1월 1일부터 2005년 5월 31일까지로 하였고, 금년도 섭취기간은 180일로 하였다.

우라늄은  $^{235}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  및  $^{238}\text{U}$ 로 혼합되어 있다. 따라서  $^{234}\text{U}$  및  $^{238}\text{U}$ 의 섭취량은 다음 식을 사용하여 계산하였다.

$$I_{234} = \frac{I_{235} \times f_{234}}{f_{235}} \quad (6)$$

$$I_{238} = \frac{I_{235} \times f_{238}}{f_{235}} \quad (7)$$

여기서  $I_{234}$ ,  $I_{235}$  및  $I_{238}$ 은 각각  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  및  $^{238}\text{U}$ 의 섭취량(Bq)이다. 그리고  $f_{234}$ ,  $f_{235}$ ,  $f_{238}$ 은 각각  $^{235}\text{U}$ 의 농축도(질량 퍼센트)에 따른 우라늄의 전 방사능에 대한  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  및  $^{238}\text{U}$ 의 방사능 비율이며, 이의 값은 표 11에 주어졌다.  $^{235}\text{U}$ 의 농축도는 경수로 핵연료 제조 관련 작업자의 경우 3.5 %, 중수로 핵연료 제조 관련 작업자의 경우 0.72 %로 가정하였다. 또한 전 시설에서 작업하는 방사선작업종사자의 경우에는 보수적인 관점에서  $^{235}\text{U}$ 의 농축도를 0.72%로 가정하였다.

표 11.  $^{235}\text{U}$ 의 농축도에 따른 우라늄의 전방사능에 대한  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  및  $^{238}\text{U}$ 의 방사능 분율  $f_{234}$ ,  $f_{235}$ ,  $f_{238}$

Weight percent of $^{235}\text{U}$	$f_{234}$	$f_{235}$	$f_{238}$
0.2	0.1848	0.0102	0.8050
0.72	0.4680	0.0234	0.5085
1.28	0.6142	0.0293	0.3565
3.0	0.7862	0.0351	0.1787
3.5	0.8094	0.0357	0.1549
3.7	0.8172	0.0359	0.1470
3.8	0.8208	0.0359	0.1433
20.0	0.9412	0.0361	0.0227
93.0	0.9669	0.0328	0.0003

## 다. 섭취량 평가의 예

금년도 측정결과 폐 우라늄 방사능이 확인된 작업자 중 3명은 금년도에 우라늄을 섭취한 것으로 평가되었고, 19명은 이전년도에 섭취한 우라늄의 잔류량으로 분석되어 금년도에는 우라늄을 섭취하지 않은 것으로 평가되었다. 따라서 BiDAS 코드에 의한  $^{235}\text{U}$  섭취율 평가의 예를 여러 유형별로 나타내었고, 이에 따른 섭취량 평가의 예도 나타내었다.

### (1) 금년도 섭취량에 의해 폐 방사능이 검출된 경우

F 작업자의 경우 2004년 4월 최초 작업개시 이후 폐 방사능이 금년도에 처음 검출되었다. 2005년도 3/4분기 및 4/4분기에 폐 방사능이 검출되었으나, 4/4분기에 검출된 폐 방사능은 3/4분기까지 연속섭취된 우라늄의 잔류량으로 분석됨에 따라 2004년 4월 1일부터 2005년 9월 5일까지 일정한 섭취율로 연속섭취하였다고 가정하여 BiDAS 코드에 의해  $^{235}\text{U}$  섭취율을 평가하였으며, 그 결과를 그림 1에 나타내었다. 또한 금년도의  $^{235}\text{U}$  섭취량은 섭취율 0.202 Bq/d에 금년도 섭취기간 270일을 곱한 값 54.54 Bq로 평가되었고,  $^{238}\text{U}$  및  $^{234}\text{U}$ 의 섭취량은 식 (6) 및 식 (7)에 의해 계산한 결과 각각 236.64 Bq 및 1236.55 Bq로 평가되었다.

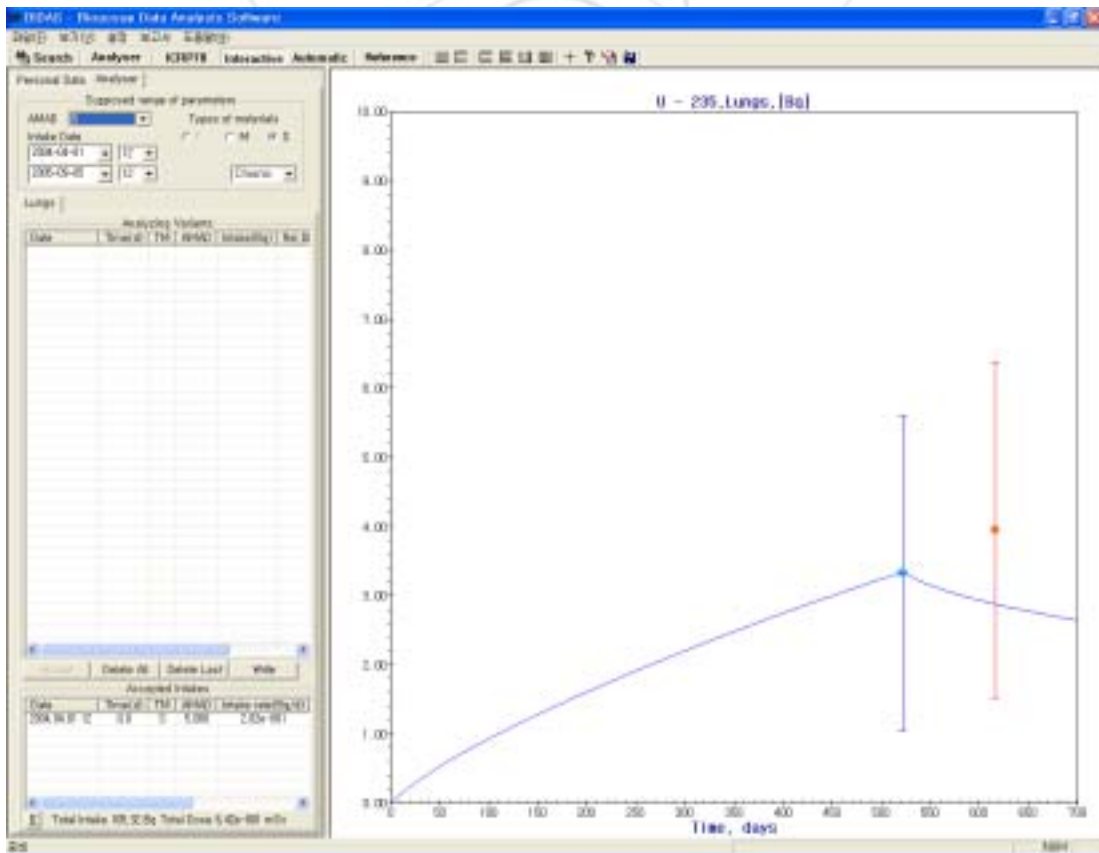


그림 1. 금년도에 우라늄을 섭취한 경우 BiDAS 코드에 의한 섭취율 평가의 예.

(2) 금년도 이전 섭취잔류량에 의해 폐 방사능이 검출된 경우

가) 금년도 이전 연속섭취기간이 1개(1998~2002년도)인 경우

S 작업자의 경우 폐 방사능이 1998~2002년도에 매년 검출되었고 2003~2004년도에는 검출되지 않다가 2005년도 4/4분기에 다시 검출되었다. 그러나 1998~2002년도를 하나의 연속섭취기간으로 하여 폐 잔류방사능을 평가한 결과 2005년도 4/4분기에 검출된 폐 방사능은 비록 1998~2002년도에 섭취한 우라늄의 잔류량 보다 약간 높긴 하지만 측정오차 범위 안에 있으므로 1998~2002년도에 섭취한 우라늄의 잔류량으로 해석할 수 있다. 따라서 이 작업자의 경우에는 금년도의  $^{235}\text{U}$  섭취율이 0 Bq/d이 되며, 금년도에는 우라늄을 섭취하지 않은 것으로 평가하였다.

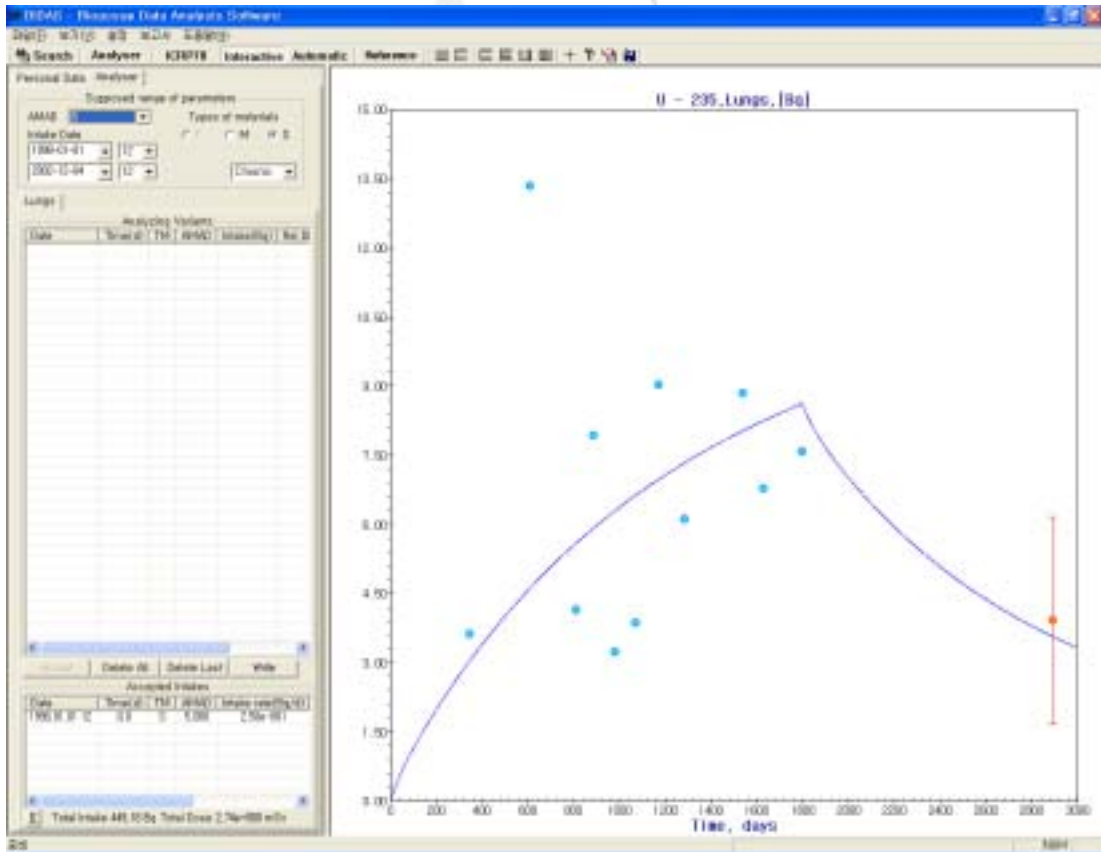


그림 2. 폐 방사능이 금년도 이전 섭취잔류량인 경우 BiDAS 코드 해석의 예 (금년도 이전 연속섭취기간이 1개(1998~2002년도)인 경우).



나) 금년도 이전 연속섭취기간이 2개(1998~2002, 2004년도)인 경우

M 작업자의 경우 폐 방사능이 1998~2002년도 및 2004년도에 검출되었고, 2005년도에는 3/4분기 및 4/4분기에 검출되었다. 그러나 1998~2002년도 및 2004년도를 각각의 연속섭취기간으로 하여 폐 잔류방사능을 평가한 결과 2005년도 3/4분기 및 4/4분기에 검출된 폐 방사능은 2005년도 이전 섭취에 의한 폐 잔류방사능으로 분석되었다. 따라서 금년도에는 우라늄을 섭취하지 않은 것으로 평가하였다. 참고로 2004년도에 검출된 폐 방사능은 2004년도 이전 섭취에 의한 폐 잔류방사능과 측정오차 범위 안에 있으므로 2004년도 이전에 섭취한 우라늄의 잔류량으로 해석해야 하나 2004년도 섭취량 평가시 폐 방사능 측정값이 이전년도 섭취잔류량보다 크면 보수적인 관점에서 측정오차를 고려하지 않고 당해 연도에도 섭취한 것으로 간주하였다. 따라서 금년도 평가 원칙에 따라 2004년도에 섭취하지 않은 것으로 재평가할 경우 폐 잔류방사능이 금년도 폐 방사능의 측정오차범위보다 낮아져 금년도 섭취량을 평가해야 한다. 그러나 섭취량이 이중으로 평가 보고되는 것을 방지하기 위해 2004년도에 수행한 평가결과를 수용하였다.

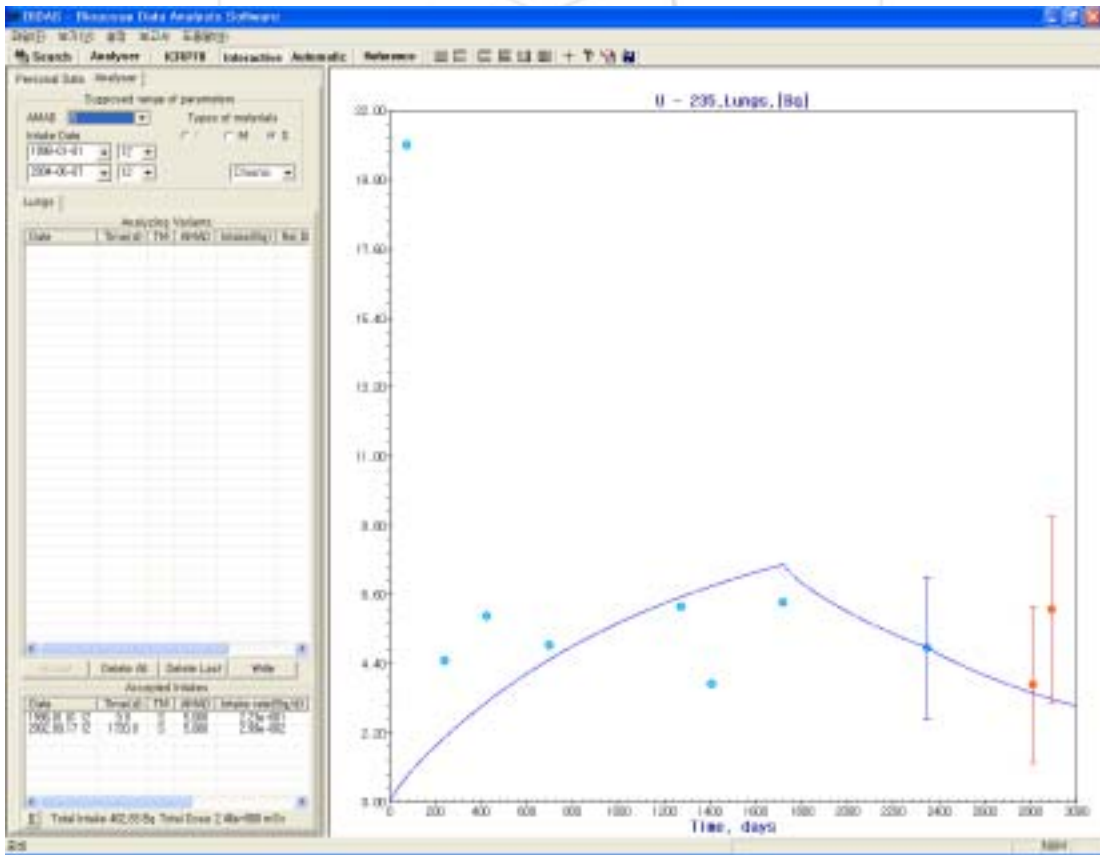


그림 3. 폐 방사능이 금년도 이전 섭취잔류량인 경우 BiDAS 코드 해석의 예 (금년도 이전 연속섭취기간이 2개(1998~2002, 2004년도)인 경우).

다) 금년도 이전 연속섭취기간이 3개(1998~2002, 2003, 2004년도)인 경우  
 P 작업자의 경우 폐 방사능이 1998~2002, 2003, 2004년도에서 모두 검출되었고, 2005년도에는 2/4분기, 3/4분기, 4/4분기에 검출되었다. 그러나 1998~2002, 2003, 2004년도를 각각의 연속섭취기간으로 하여 폐 잔류방사능을 평가한 결과 2005년도에 검출된 폐 방사능은 모두 2005년도 이전 섭취에 의한 폐 잔류방사능으로 분석되었다. 따라서 금년도에는 우라늄을 섭취하지 않은 것으로 평가하였다. 참고로 측정오차를 고려한 금년도 평가원칙에 따르면 2003년도에 검출된 폐 방사능은 2003년도 이전 섭취에 의한 폐 잔류방사능과 측정오차 범위 안에 있으므로 2003년도에는 우라늄이 섭취되지 않은 것으로 해야 한다. 그러나 2003년도에 섭취되지 않은 것으로 재평가 하더라도 2005년도에 검출된 폐 방사능은 2005년도 이전 섭취에 의한 폐 잔류방사능과 측정오차 범위 안에 있으므로 여전히 2005년도 이전에 섭취한 우라늄의 잔류량으로 해석해야 한다. 따라서 이 작업자의 경우에는 2003년도 섭취량 평가 결과에 관계없이 2005년도에 우라늄을 섭취하지 않은 것으로 평가할 수 있다.

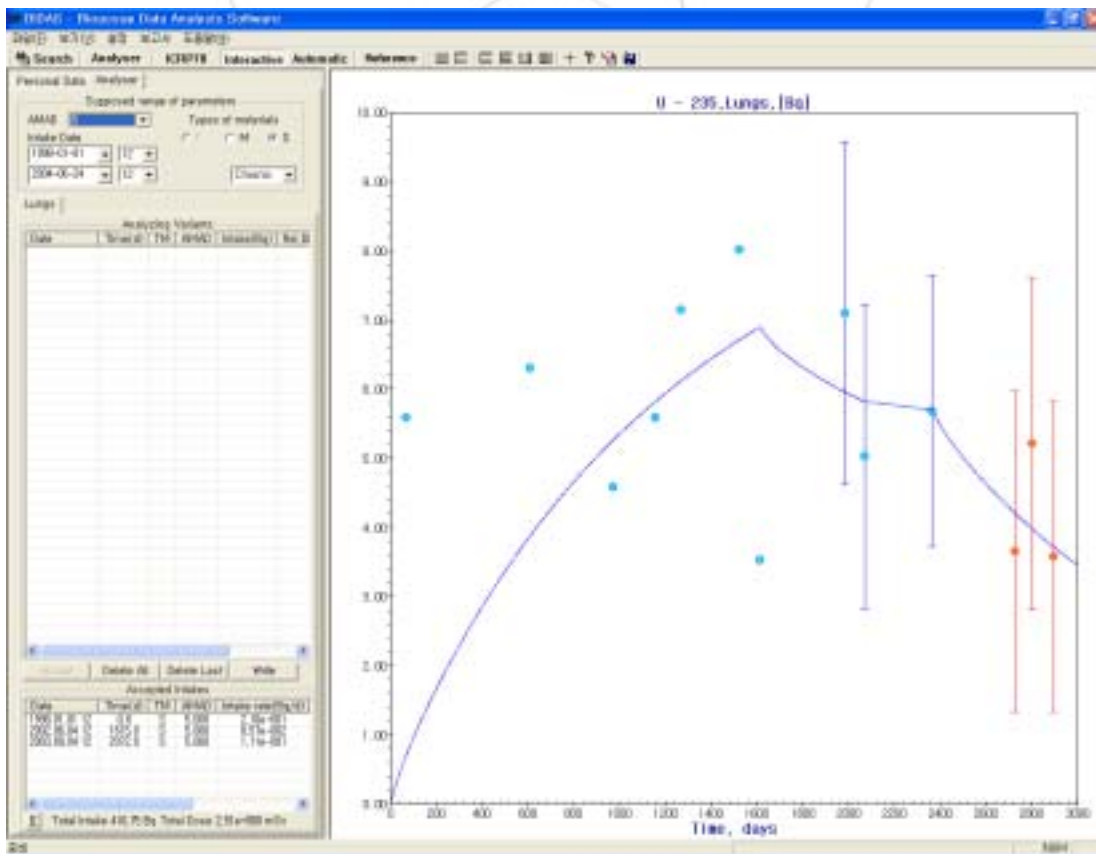


그림 4. 폐 방사능이 금년도 이전 섭취잔류량인 경우 BiDAS 코드 해석의 예 (금년도 이전 연속섭취기간이 3개(1998~2002, 2003, 2004년도)인 경우).

## 라. 섭취량 평가 결과

앞서 기술한 섭취량 평가조건 및 평가방법을 사용하여 계산한 금년도  $^{235}\text{U}$ 의 섭취율 및 섭취량은 표 12와 같다. 또한 식 (6) 및 식 (7)을 사용하여 계산한  $^{238}\text{U}$  및  $^{234}\text{U}$  섭취량은 표 13과 같이 나타났다. 섭취량 평가 결과 금년도에 우라늄을 섭취한 작업자는 총 3명이었으며, 연간 섭취량의 분포는  $^{235}\text{U}$ 가 19.08 ~ 54.54 Bq,  $^{238}\text{U}$ 이 82.79 ~ 632.14 Bq,  $^{234}\text{U}$ 가 432.59 ~ 1236.55 Bq로 나타났다. 또한 금년도에  $^{235}\text{U}$  폐 방사능이 검출되었으나 이전년도 섭취잔류량으로 분석되어, 금년도 섭취량이 0으로 평가된 작업자는 19명으로 나타났다.

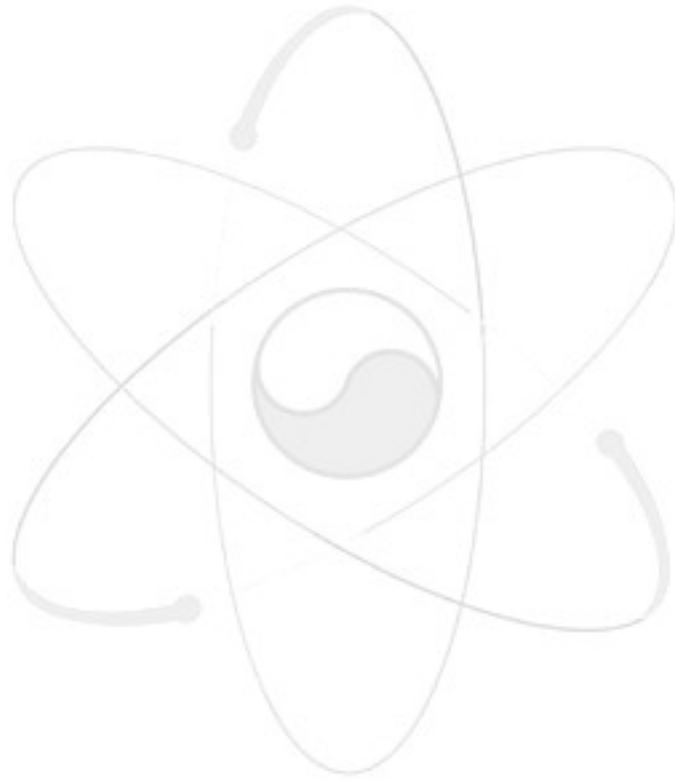


표 12.  $^{235}\text{U}$  섭취율 및 섭취량 평가결과(2005년도)

작업자	섭취율 (Bq/d)	섭취기간 (일)	섭취량 (Bq)
A	0.080	365	29.09
B	0	0	0
C	0	0	0
D	0	0	0
E	0	0	0
F	0.202	270	54.54
G	0	0	0
H	0	0	0
I	0	0	0
J	0	0	0
K	0	0	0
L	0.106	180	19.08
M	0	0	0
N	0	0	0
O	0	0	0
P	0	0	0
Q	0	0	0
R	0	0	0
S	0	0	0
T	0	0	0
U	0	0	0
V	0	0	0

표 13. 우라늄 연간 섭취량 평가결과(2005년도)

작업자	중/경수로 구분	섭취량 (Bq)		
		$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{234}\text{U}$
A	전시설	29.09	632.14	581.81
B	경수로	0	0	0
C	경수로	0	0	0
D	경수로	0	0	0
E	경수로	0	0	0
F	경수로	54.54	236.64	1236.55
G	중수로	0	0	0
H	중수로	0	0	0
I	경수로	0	0	0
J	전시설	0	0	0
K	경수로	0	0	0
L	경수로	19.08	82.79	432.59
M	경수로	0	0	0
N	경수로	0	0	0
O	경수로	0	0	0
P	경수로	0	0	0
Q	중수로	0	0	0
R	경수로	0	0	0
S	경수로	0	0	0
T	중수로	0	0	0
U	전시설	0	0	0
V	중수로	0	0	0

(주) 경수로는  $^{235}\text{U}$  농축도 3.5%, 중수로 및 전시설은  $^{235}\text{U}$  농축도 0.72% 적용

## 4. 예탁유효선량 평가

우라늄을 흡입 섭취한 경우 예탁유효선량,  $H_{50,E}$ 는 다음 식과 같이 주어진다.

$$H_{50,E} = I_{234} \times e_{inh}(50)_{234} + I_{235} \times e_{inh}(50)_{235} + I_{238} \times e_{inh}(50)_{238} \quad (8)$$

여기서  $I_{234}$ ,  $I_{235}$  및  $I_{238}$ 은 각각  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  및  $^{238}\text{U}$ 의 섭취량(Bq)이고,  $e_{inh}(50)_{234}$ ,  $e_{inh}(50)_{235}$  및  $e_{inh}(50)_{238}$ 은 각각  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  및  $^{238}\text{U}$ 에 대한 예탁유효선량 환산계수(Sv/Bq)이다. 예탁유효선량 계산에서  $I_{234}$ ,  $I_{235}$  및  $I_{238}$ 의 값은 표 13에 주어진 값을 사용하였다. 그리고 예탁유효선량 환산계수는 섭취량 평가에서 사용한 조건에 따라 우라늄의 입자크기가  $5 \mu\text{m}$ 이고 흡수형이 Type S에 해당하는 예탁유효선량 환산계수[10]를 사용하였다.  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  및  $^{238}\text{U}$ 의 예탁유효선량 환산계수는  $6.8 \times 10^{-6}$  Sv/Bq,  $6.1 \times 10^{-6}$  Sv/Bq 및  $5.7 \times 10^{-6}$  Sv/Bq이다.

계산결과 예탁유효선량은 표 14와 같이 나타났다. 표 14에서 보듯이 금년도에 우라늄을 섭취한 것으로 평가된 작업자는 총 3명이었으며, 이들의 예탁유효선량은 3.53 ~ 10.09 mSv의 분포를 보였다. 그리고 금년도에 우라늄 섭취 작업자의 개인 평균 선량은 7.12 mSv, 집단선량은 21.36 man-mSv로 나타났다.

표 14. 우라늄 연간 섭취량에 의한 예탁유효선량 평가결과(2005년도)

작업자	선량 (mSv)			
	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{234}\text{U}$	total
A	0.18	3.60	3.96	7.74
F	0.33	1.35	8.41	10.09
L	0.12	0.47	2.94	3.53

## 5. 결 론

본 사업에서는 작업자의 유효선량을 원자력 관계법령 등에서 권고하고 있는 선량한도 이하로 유지 및 관리하고, 원자력 관계법령 등에서 규정한 기술기준의 준수 및 법적 요구사항의 철저한 이행을 위해 폐 방사능을 측정하였으며, 이를 기초로 ICRP 60 권고, ICRP 66의 호흡기 모델, ICRP 30의 소화기 모델 그리고 ICRP 78의 생체동역학적 모델 등 최근 이론에 근거한 방법을 사용하여 섭취량과 예탁유효선량을 평가하였다.

본 사업기간동안 측정건수는 총 688건이었으며, 분기별로 보면 1/4분기에 141건, 2/4분기에 210건, 3/4분기에 195건, 4/4분기에 142건이었다. 2005년도 측정결과 수검자 중에서 우라늄이 체내오염된 것으로 확인된 방사선작업종사자는 총 22명으로 1/4분기에 9명, 2/4분기에 13명, 3/4분기에 10명, 4/4분기에 7명으로 나타났다. 그러나 체내오염된 것으로 확인된 작업자 중에서 19명은 이전년도 섭취에 의한 잔류량이 검출된 것으로 평가되었고, 3명만 금년도에 섭취된 것으로 평가되었다. 따라서 이들의 예탁유효선량을 ICRP 60 권고, ICRP 66의 호흡기 모델, ICRP 30의 소화기 모델 그리고 ICRP 78의 생체동역학적 모델 등에 근거한 방법을 사용하여 평가하였다. 평가결과 체내오염 작업자들의 연간 우라늄 섭취량에 의한 예탁유효선량은 3.53 ~ 10.09 mSv이었으며 모든 방사선작업종사자의 선량이 연간 유효선량한도 20 mSv 이하인 것으로 나타났다.

## 참 고 문 헌

1. 이재기, 종사자의 방사선방호에 대한 일반원칙, 한양대학교 부설 방사선종합연구소, RRL/TR/97-1(1997).
2. International Commission on Radiological Protection, 1990 Recommendation of the International Commission Radiological Protection, ICRP Publication 60(1990).
3. International Commission on Radiological Protection, Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection, ICRP Publication 66(1993).
4. International Commission on Radiological Protection, Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers Replacement of ICRP Publication 54, Publication 78(1997).
5. Tae Young Lee, Jong Il Lee, Si Young Chang, The BiDAS: Bioassay Data Analysis Software for Evaluating Radionuclide Intake and Dose, 2003 International Symposium on Radiation Safety Management(2003).
6. Canberra, Abacos 2000 User's Manual, Version V1.3C, Canberra(2003).
7. International Commission on Radiological Protection, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Publication 30(1978).
8. 장시영 외, 방사선환경방호기술개발 최종연구보고서, 한국원자력연구소, KAERI/RR-2358/2002(2003).
9. A. Birchall, N.S. Jarvis, M.S. Peace, A.E. Riddell and W.P. Battersby, The IMBA Suite: Integrated Modules for Bioassay Analysis, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 79, Nos 1-4, pp. 107-110, 1998.
10. International Commission on Radiological Protection, Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Publication 68(1994).



서 지 정 보 양 식

서 지 정 보 양 식					
<b>수행기관보고서번호</b>		위탁기관보고서번호		표준보고서번호	
KAERI/CR-227/2005					
<b>제목 / 부제</b>		내부피폭선량 측정 및 평가			
<b>연구책임자 및 부서명</b>		이 태 영 (방사선관리실)			
<b>연구자 및 부서명</b>		장시영, 이종일, 송민영 (방사선관리실)			
<b>출판지</b>	대전	<b>발행기관</b>	한국원자력연구소	<b>발행년</b>	2006. 1
<b>페이지</b>	p.	<b>도표</b>	있음( • ), 없음( )	<b>크기</b>	Cm.
<b>참고사항</b>					
<b>비밀여부</b>	공개( • ), 대외비( ), — 급비밀		<b>보고서종류</b>	수탁보고서	
<b>연구위탁기관</b>	한전원자력연료주식회사		<b>계약번호</b>	제 2485 호	
<b>초록 (15-20줄내외)</b>		<p>본 보고서는 2005년도 한전원자력연료주식회사 방사선작업종사자에 대한 내부피폭관리 프로그램의 계획 및 수립, 폐 카운터에 의한 우라늄의 폐 방사능 측정 및 평가, 예탁유효선량의 평가 등에 관한 내용과 결과를 기술하고 있다.</p> <p>본 용역사업을 통해 내부피폭선량을 평가함으로써 작업자의 유효선량을 원자력 관계법령 등에서 권고하고 있는 선량한도 이하로 유지 및 관리할 수 있도록 하였고, 원자력 관계법령 등에서 규정한 기술기준의 준수 및 법적 요구사항의 철저한 이행을 통해 핵연료가공사업을 제도적·안정적으로 지원하였다.</p>			
<b>주제명키워드 (10단어내외)</b>		한전원자력연료주식회사, 내부피폭관리 프로그램, 폐 카운터, 우라늄, 폐 방사능, 섭취량, 예탁유효선량			

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/CR-227/2005			
Title / Subtitle	Measurement and Evaluation of Internal Dose		
Project Manager and Department	Tae-Young Lee(Health Physics Dept.)		
Researcher and Department	Health Physics Department : S. Y. Chang, J. I. Lee, M. Y. Song		
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI
			Publication Date
			2006. 1
Page	p.	Ill. & Tab.	Yes(•), No ( )
			Size
			Cm.
Note			
Classified	Open(•), Restricted( ), ___ Class Document	Report Type	Service Report
Sponsoring Org.	KNFC	Contract No.	No. 2485
Abstract (15-20 Lines)	<p>This report describes the contents and results for implementation of internal radiation monitoring programme, measurement of uranium present in lung by lung counter and assessment of committed effective dose for radiation workers of the KNFC.</p> <p>The aim of radiation protection was achieved by implementing this activity.</p>		
Subject Keywords (About 10 words)	KNFC, Internal radiation monitoring programme, Lung counter, Uranium, Intake, Committed effective dose		