

CZT 반도체 검출기를 이용한 국내 원전 내 선원항 분석

강서곤, 강화운, 이병일, 김정인
한국수력원자력(주) 방사선보건연구원

2013년 12월 10일 접수 / 2014년 1월 3일 1차 수정 / 2014년 2월 6일 2차 수정 / 2014년 2월 7일 채택

원전 내 방사선작업종사자 피폭량의 대부분은 계획예방정비기간 중 냉각재계에 존재하는 ^{58}Co , ^{60}Co 등과 같은 CRUD에 의하여 일어난다. 따라서 원전 내 방사선작업종사자의 피폭 최적관리를 위해서는 냉각재계의 선원항을 사전에 파악할 필요가 있다. 이 연구는 원전 내 선원항을 알아보기 위해 국내 최초로 계획예방정비 기간 중 증기발생기 부근에서 CZT 반도체 검출기를 이용한 배관 직접 측정법을 사용하였다. 또한 신규원전과 노후원전에서 선원항의 차이를 알아보기 위해 두 원전에서 측정된 결과를 비교 하였고 노후원전에 대하여는 정치화학처리에 따른 선원항의 변화를 측정하였다. 노후원전에서 정치화학처리에 따른 선원항 변화는 발견되지 않았으며, 신규원전 및 노후원전의 주요 선원항은 ^{58}Co 와 ^{60}Co 였고, ^{59}Fe 는 신규원전에서만 ^{137}Cs 와 ^{95}Zr 는 노후원전에서만 보였다. $^{58}\text{Co}/^{60}\text{Co}$ 의 비율은 노후원전보다 신규원전에서 크게 나타났으며 운전연한이 증가 할수록 반감기가 긴 ^{60}Co 의 비방사능이 커지기 때문이다.

중심어: 계획예방정비, 방호최적화, CZT, 선원항, 증기발생기, 신규원전, 노후원전, 가압경수로형

1. 서론

국제방사선방호위원회는 지난 2007년 권고에서 정당화, 방호최적화, 선량한도 적용의 3대 방호 기본원칙을 도출 하였다. 특히, 방호최적화를 위해 선원, 피폭상황 또는 피폭자 유형에 관계없이 선원중심의 개념을 사용하였다[1]. 또한 보다 적극적인 방호최적화를 위해서 선량제약치(Dose Constraint)와 참조준위(Reference Level) 개념을 연계해서 사용하기를 권고하고 있다[2]. 이러한 변화는 계획피폭상황(특히, 방사선작업종사의 직무피폭)에서 더 엄격한 관리를 의미한다.

한편 원자력발전소에서 방사선작업종사자 대부분의 피폭은 계획예방정비기간에 일어난다. 일반적으로 원전에서 작업하는 종사자들에게 피폭을 유발하는 물질(이하 선원항: Source Terms)원인은 CRUD (Chalk River Unidentified Deposit)로 잘 알려져 있다. CRUD는 원전 내 1차 냉각계통(RCS: Reactor Coolant System)에서 생성된 부식물이 냉각수를 따라 원자로에 유입이 되고, 고온의 원자로에서 중성자 또는 감마와 반응하여 방사화 된 것이다. 이렇게 생성된 CRUD는 1차 냉각계통 내 냉각수를 따라 이동하다 증기발생기(S/G: Steam Generator)나 기타 배관 내 침착이 된다. CRUD의 종류는 배관, 펌프, 밸브, 핵 연료봉 재료, 제어봉, 증기발생기 등의 재료와 매우 깊은 관계가 있으며 ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{59}Fe 등이 있다. 특히 계획예방정비 기간 중 정화운전을 하거나

원자로를 개방하면 원전 내 선량률이 증가하는 “CRUD burst” 현상이 발생하기도 한다[3]. 따라서 원전 내 방사선 작업종사자들의 방호최적화를 위해서는 선원항인 CRUD의 평가가 중요하다. 그러나 CRUD의 분포 및 그 양은 발전소의 운전상태, 운전기간(장주기 또는 단주기 운전), 발전소의 노후 정도, 정치화학처리 방법 등 많은 요인에 의해 변화하므로 평가하기가 쉽지 않다.

프랑스전력공사(EDF: Electricite De France)는 원전 내 선원항 평가의 중요성을 인식하고 지난 20여년 동안 “Source Term Reduction” 프로젝트를 수행하고 있으며, 프로젝트 내 EMECC (Ensemble de Mesure et d'Etude de la Contamination des Circuits, HPGe 검출기) 및 CZT (Cadmium Zinc Telluride)검출기를 이용한 선원항 분석을 실시하고 있다[4-8]. CZT는 Cadmium Zinc Telluride ($\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$, 일반적으로 $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$)로 구성된 반도체 검출기로 다른 방사선 검출기 소자에 비하여 비교적 최근에 개발된 반도체 검출기에 속한다[9]. 개발 역사가 길지 않지만 지난 20년 동안 꾸준히 진보를 거듭하여 의료영상진단기기, 포터블 센서, 액체 수위 측정, 감마선 분광기, X-ray 이미지, Homeland security 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 복합적 반도체 소자인 CZT는 원자량이 커 광전효과가 잘 일어나고 밀도 및 에너지 밴드 갭이 넓어 엑스선이나 감마선을 검출하기에 좋은 물리적 특징을 가진다[10]. 원전 내 선원항 분석용 검출기로는 이미 언급한 EDF의 EMECC나 국내의 ISOCS (In-Situ Object Counting System)가 있다. 두 검출기 모두 고순도 게르마늄(HPGe) 검출기로 좋은 에너지 분해능이 장점이지만

교신저자: 김정인, neogen21@khnpp.co.kr
서울시 도봉구 우이천로 308(쌍문동 388-1)

상온에서 냉각장치가 필요하고 주변 방사선장의 영향을 최소화 하기위한 콜리메이터 등의 운용 장비로 인한 무게 및 부피의 증가로 원전 내 사용상 많은 제약이 따른다. 이에 반하여 최근 원전 선원량 분석에 도입된 CZT검출기는 HPGe검출기에 비하여 다소 에너지 분해능이 떨어지지만, 원전 내 주요 선원량들을 구분하기에 충분 하다. 특히 상온에서 냉각장치 없이 사용 할 수 있어 HPGe보다 휴대성이 크게 향상된 장점이 있다. 또한 CZT검출기는 하나의 검출기에 여러 개의 CZT소자를 적절히 배열함으로써 감마 선원량에 대한 영상을 획득 할 수 있는 매우 큰 장점이 있다[11,12]. AEP (American Electric Power) 도 최근 CZT를 이용한 선원량 분석을 시도하고 있다[13]. 본 연구는 보다 강화된 방호최적화를 위한 ICRP 103

권고 및 원전 내 선원량 분석의 해외 사례와 CZT 반도체 검출기의 발전에 힘입어 CZT 반도체 검출기를 이용하여 국내 최초 원전 내 배관직접측정법(In-Vivo)으로 신규원전(상업운전 5년 이하) 및 노후원전(상업운전 20년 이상)에 대한 선원량 분석을 실시하였다.

2. 재료 및 방법

EDF는 자국 원전(가압경수로형: PWRs) 내에서 측정된 선원량의 분포가 측정 지점에 따라 다르며, 신규원전 및 노후원전의 증기발생기(S/G)에서 검출된 핵종별 선량률 기여도가 차이를 보였다(Fig. 1)[8].

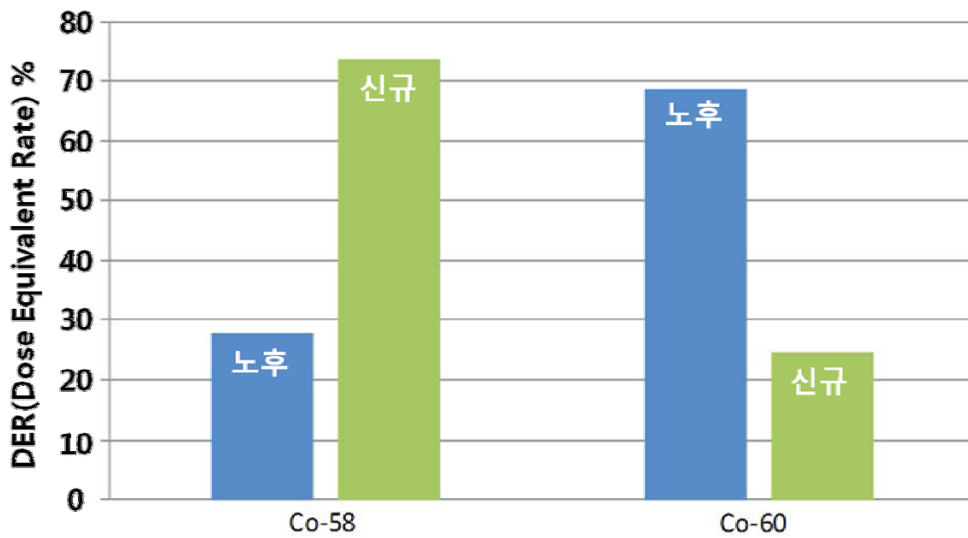


Fig. 1. Comparison between old and new S/G for the main contributor to dose rate. Blue: over 5 years, Green: less than 5 years.

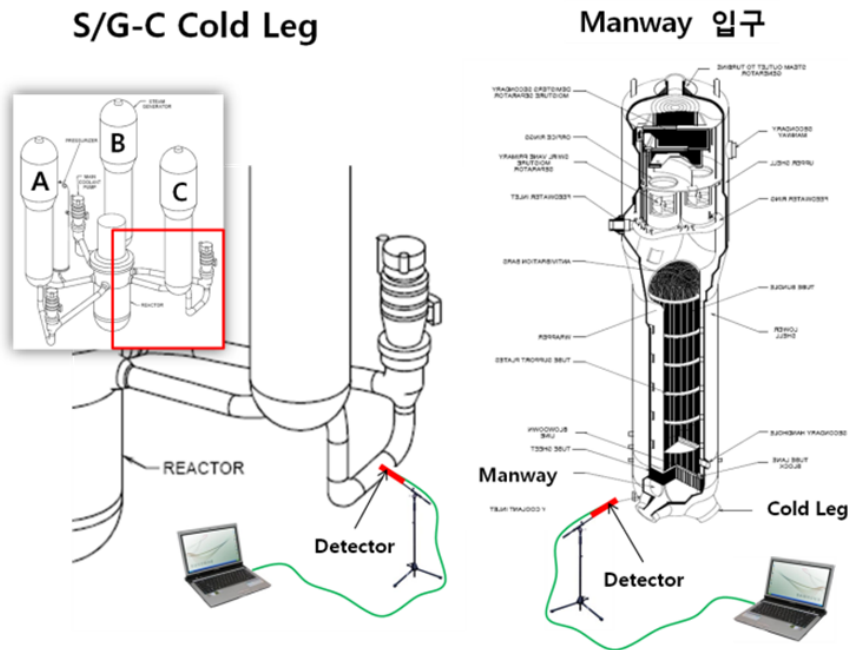


Fig. 2. Measurement point (old NPP S/G, 3-Loop type).

본 연구는 CZT 반도체 검출기(Ritec SDP310/Z/20, FWHM ≤ 22 keV @662 keV, Riga, Latvia)과 다채널분석기(GBS Elektronik GmbH MCA-166모델, Radeberg, Germany)을 사용하여 계획예방정비 기간 중 신규원전 및 노후원전의 증기발생기 부근에서 감마스펙트럼을 배관직접측정법으로 측정하였다.

2.1. 측정위치

노후원전의 측정위치(Fig. 2)는 증기발생기 C(3-loop type S/G)의 Cold Leg과 Hot Leg쪽 Inlet Manway 입구(덮개가 제거된 상태) 두 곳이었고, 신규원전(OPR-1000)의 측정위치(Fig. 3) 또한 Cold Leg과 Inlet Manway 입구(덮개가 제거된 상태)로 같은 위치에서 측정 하였다(신규원전의 경우 Cold Leg이 두 개인 관계로, 원자로에서 S/G를 바라볼 때 왼쪽 편 Cold Leg를 측정 함).

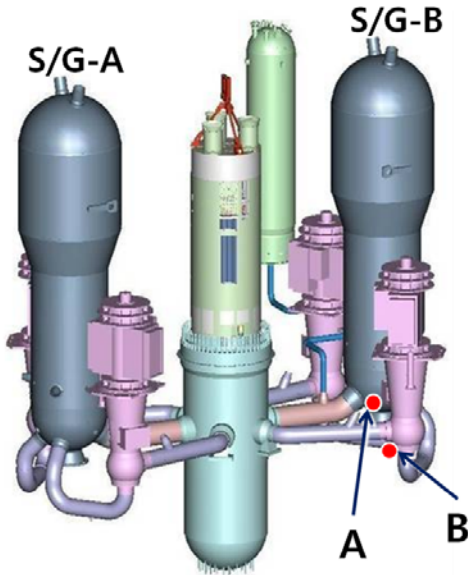


Fig. 3. Measurement point (new NPP S/G, OPR1000). A) Inlet manway, B) Cold leg.

2.2. 측정조건

노후원전에서는 정지화학처리(화학적 방법으로 배관 내 CRUD를 제거하는 기술) 과정에 따른 핵종 변화도 같이 보기위하여 정지화학처리 과정인 과산화수소처리 전과 정지화학처리 후 두 가지 상황에 대하여 측정을 하였다(Table. 1). 과산화수소 처리 전 과정은 노후원전 증기발생기의 Cold Leg에서만 측정을 수행 하였고, 측정시간은 28,600초, 측정시 선량률은 약 450±50 μSv⁻¹였다. 정지화학처리 후 노후원전의 Cold Leg에서 측정은 3600초 동안 450±50 μSv⁻¹에서 수행 되었으며, Inlet Manway에서는 1200초 동안 8 mSv⁻¹에서 수행 되었다(계획예방정비기간 중 원전 사정으로 인하여 정지화학처리 후 측정 시간이 길지 못하였음). 신규원전의 경우 Inlet Manway에서 5,500초 동안 2.5 mSv⁻¹에서 측정 하였고, Cold Leg에서는 20,000초 동안 350±50 μSv⁻¹에서 측정 하였다(Table. 2).

Table. 1. Measurement Conditions of The Old NPP (3-Loop Type).

	Cold Leg		Inlet Manway
	Before H ₂ O ₂	After Clean-Up	After Clean-Up
Time(Sec)	28600	3600	1200
Dose Rate	450±50 μSv ⁻¹	450±50 μSv ⁻¹	8 mSv ⁻¹

Table. 2. Measurement Conditions of The New NPP (OPR1000 Type).

	Measurement Points			
	S/G	Inlet Manway	S/G	Cold Leg
Time(Sec)	5,500		20,000	
Dose Rate		2.5 mSv ⁻¹		350±50 μSv ⁻¹

Table. 3. Nuclide List of Korean PWRs for The CZT Measurement (KHNP CZT Lib v1.0).

	KHNP CZT Lib v1.0	Remark
⁵¹ Cr	320.1 keV	
¹³⁷ Cs	661.6 keV	Fission product
⁹⁵ Zr	724.2(756.7) keV	
⁹⁵ Nb	765.8 keV	
⁵⁸ Co	810.8 keV	
⁵⁴ Mn	834.8 keV	
⁵⁹ Fe	1099.3, 1291.6 keV	
⁶⁵ Zn	1115.5 keV	Zinc injection
⁶⁰ Co	1173.2, 1332.5 keV	
¹²⁴ Sb	602.7, 1691 keV	

2.3. 분석핵종

다채널분석기를 통하여 스펙트럼을 측정 한 경우, 통계적 요동 및 검출기(MCA 특성 포함)특성으로 인하여 검출된 모든 핵종에 대하여 깨끗한 Peak를 얻을 수 없다. 특히 원전 내 상황은 매우 다양한 선원향이 분포하고, 선원향에서 나온 감마선은 배관 및 원전 내 각종 기기들과 많은 산란을 하므로, 검출기에는 매우 다양한 에너지 분포가 나타난다. 따라서 측정 대상에 대한 사전 정보가 있어야 정확한 핵종 판별이 가능하다. 본 연구에서는 같은 가압경수로형 원전에서 선원향 분석을 했던 해외 원전의 결과[8,13,14]와 국내 원전의 1차 냉각수를 샘플링하여 직접 분석한 핵종들을 근거로 검출예상 핵종표를 만들었다(Table. 3).

3. 결과 및 논의

3.1. 노후원전의 검출핵종 분석

노후원전에서 검출된 핵종(Fig. 4)은 ⁵¹Cr, ¹³⁷Cs, ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb, ⁵⁸Co, ⁵⁴Mn, ⁶⁰Co, ¹²⁴Sb 였다. 주요 핵종은 ⁵⁸Co, ⁶⁰Co 였고, ⁵¹Cr은 강한 노이즈 때문에, ¹²⁴Sb은 검출된 신호 개수가 작아 검출되었다고 단정하기 어렵다. ⁵¹Cr은 1차 냉각수를 샘플링하여 측정한 결과에서 나타났고, ¹²⁴Sb은 EDF의 가압경수로형에서 발견되었다고 보고된 핵종이다[8]. 특히, 1690 keV에서 ¹²⁴Sb peak가 있지만 ⁵⁸Co 또한 1674.7 keV에서 peak가 있어 검출여부를 판단

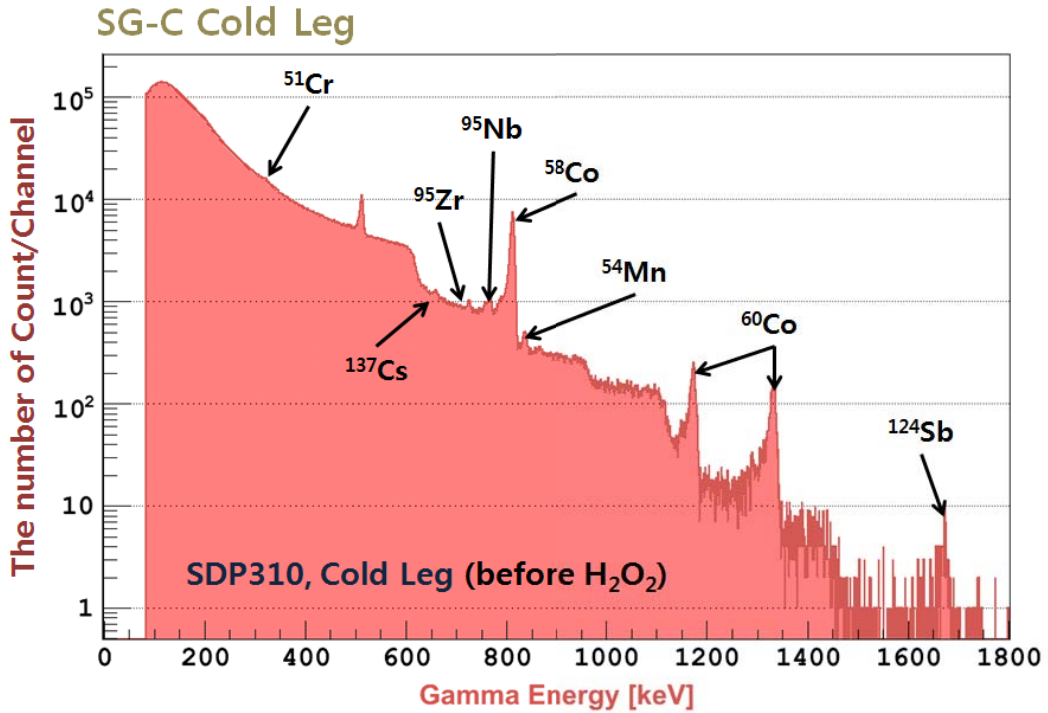


Fig. 4. Detected nuclides at old NPP's S/G-C cold leg before H₂O₂.

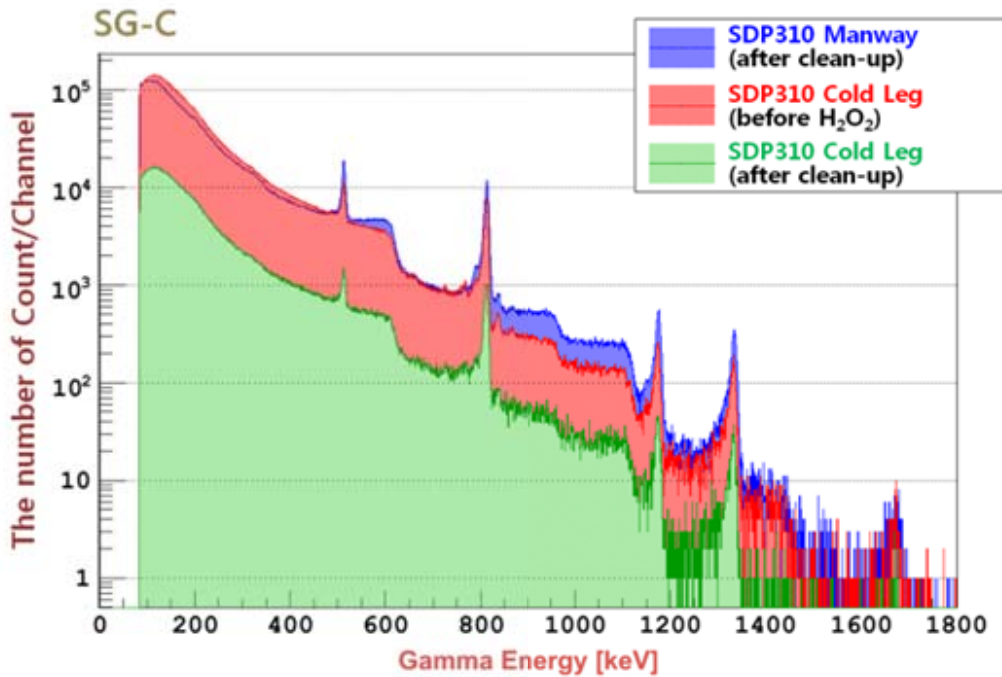


Fig. 5. Measured gamma spectra at old NPP's S/G-C.

하기 위해서는 더 많은 데이터가 필요하다.

3.2. 노후원전에서 정지화학처리에 따른 핵종 변화

정지화학처리 과정 중 과산화수소 주입 전의 Cold Leg 감마스펙트럼 측정 결과와 정지화학 처리가 완료된 후의 Cold Leg 및 Inlet Manway에서의 감마스펙트럼의 측정 결과는 Fig. 5와 같다. 전체적인 Peak의 위치 및 스펙트럼의 형태는 일치 했지만(검출된 핵종이 같음), 선량률이

큰 Inlet Manway에서 보다 명확한 Compton Edge를 보여 주었다. 측정 위치에 따른 핵종 간 정량적 분포는 얻지 못하였다. 이것을 위해서는 선원항의 분포 및 배관 등의 Geometry 보정이 우리 원전의 실정에 맞게 되어야 한다. 측정에 사용된 시스템은 우리 실정에 맞게 개발중인 검출시스템지만 아직 선원항의 분포 및 배관 등의 Geometry 정보가 반영이 되지 않아 검출 핵종의 정성적 분석만 수행하였다.

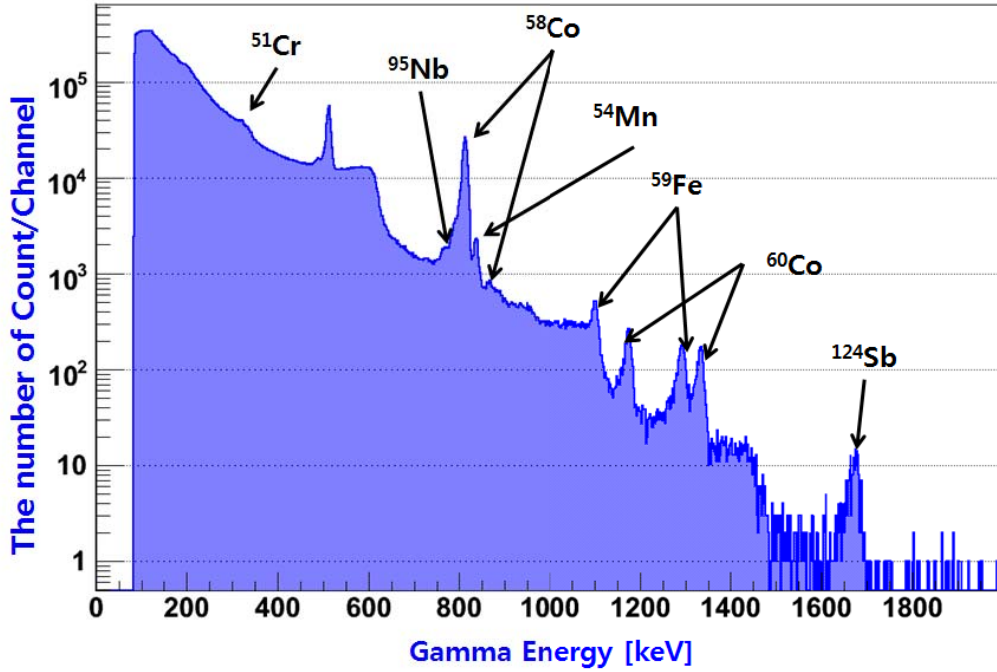


Fig. 6. Detected nuclides at new NPP's S/G-C inlet manway.

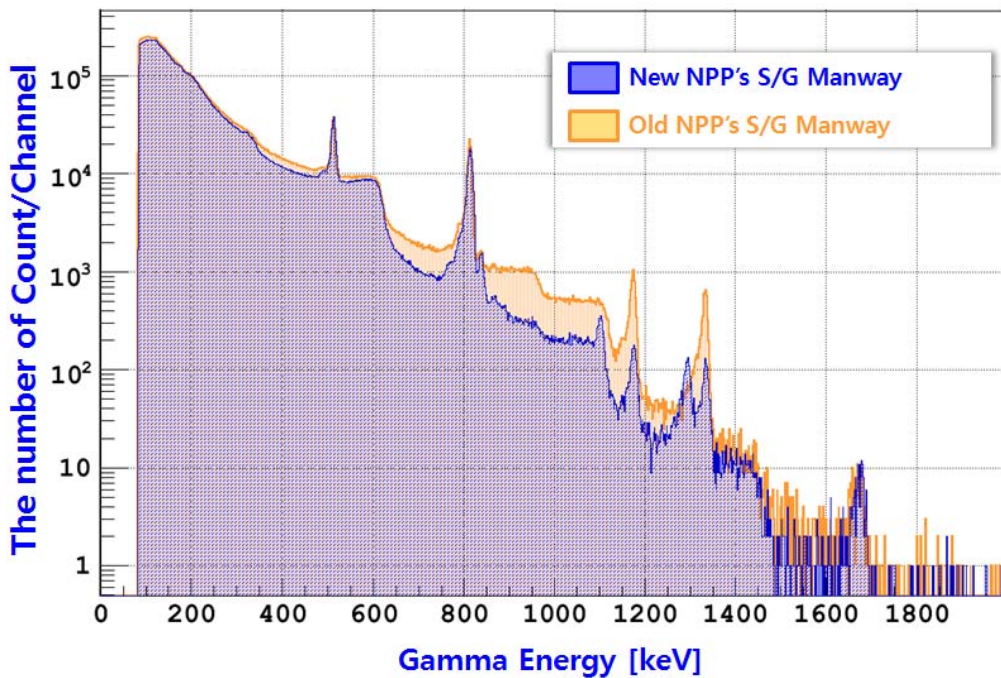


Fig. 7. Comparison between old (orange) and new (blue) NPP's spectrum at inlet manway.

3.3. 신규원전의 검출핵종 분석

신규원전에서 검출된 핵종(Fig. 6)은 ^{51}Cr , ^{95}Nb , ^{58}Co , ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{124}Sb 였다. 주요 핵종 역시 ^{58}Co , ^{60}Co 였고, ^{51}Cr 와 ^{124}Sb 의 신호는 노후원전과 같이 명확하지 않으나, ^{51}Cr 는 노후원전 보다 더 두드러지게 나타났다. 그리고 노후원전에서는 ^{59}Fe 가 보이지 않았으나 신규원전에서는 나타났다.

3.4. 신규원전과 노후원전에서 검출된 핵종비교

신규원전과 노후원전 모두 주요 핵종은 ^{58}Co , ^{60}Co 였고, 이것은 EDF의 측정 결과와 일치한다. 신규원전에서만 보이는 핵종은 ^{59}Fe 였으며 ^{95}Zr 는 노후원전에서만 보였다. 신규원전과 노후원전에서 검출된 감마스펙트럼을 비교해 보면(Fig. 7) ^{59}Fe 의 peak가 두드러지게 차이가 났다. 또한, 신규원전에 대하여는 ^{58}Co 의 Compton edge (616.7 keV)가, 노후원전에 대해서는 ^{60}Co 의 Compton

edge (963.4 & 1118.1 keV)가 두드러지게 나타났다. 두 측정 모두 전체 받은 신호의 개수가 비슷하므로 $^{58}\text{Co}/^{60}\text{Co}$ 가 신규원전에서는 크다고 할 수 있으나 정량적 분석이 수행되지 못하여 EDF와 같이 주요 피폭 선원항이 신규원전에서는 ^{58}Co , 노후원전에서는 ^{60}Co 라고 말 할 수 없다. 신규원전이 노후원전보다 $^{58}\text{Co}/^{60}\text{Co}$ 이 큰 이유는 ^{58}Co 의 반감기가 70.83일로 ^{60}Co 의 5.27년에 비해 더 짧고(운전 연한이 길수록 반감기가 긴 핵종의 비방사능이 커짐), 주요생성모드 또한 $^{58}\text{Co}(^{58}\text{Fe}(n,p), ^{55}\text{Mn}(\alpha,n), ^{59}\text{Co}(n,2n))$ 가 $^{60}\text{Co}(^{59}\text{Co}(n,\gamma))$ 보다 많기 때문이다. 더욱이 원전 내 배관 및 원자로, 증기발생기 등 대부분이 스테인리스스틸 또는 니켈 합금인 Alloy600(또는 Alloy680)으로 되어 있어 니켈이나 크롬 등의 원소가 코발트보다 많이 함유되어 있다. 즉, ^{58}Co 는 ^{60}Co 에 비하여 생성이 잘 되나 반감기가 짧아 소실이 빠르고, ^{60}Co 는 더디게 생성되지만 반감기가 길어 축적이 일어나기 때문으로 추정 할 수 있다.

4. 결론

CZT 반도체 검출기를 사용하여 국내 원전 중 신규 및 노후 원전의 증기발생기 주변 Cold Leg와 Inlet Manway 두 지점에 대해 배관직접측정법으로 선원항 분석을 수행하였다. 또한 노후원전에서는 정지화학처리 전후 선원항 분석을 추가로 수행 하였다. 측정시스템을 통해 검출된 핵종의 정량적 분석을 위해서는 추출된 냉각재의 실측을 통한 핵종분석 결과와 전산모사를 통한 Geometry 해석 등의 일련의 과정을 통한 사전 교정이 수행되어야 하나, 핵종별 검출 비율은 동일 측정에 대한 핵종별 검출신호의 크기를 비교하는 것으로 평가가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 신규원전과 노후원전에 대해 검출된 핵종의 종류와 상대검출 비율을 정성적으로 평가하였으며, 평가결과 향후 정량적 분석을 위해서는 Geometry 해석 이외에 추가적으로 계통 내 CRUD 침적과 정지화학처리 시 시간에 따른 냉각재 내 핵종분포 추이에 대한 분석이 필요함을 확인하였다.

분석 결과로는 정지화학처리에 따른 검출핵종의 유의미한 변화는 볼 수 없었으며, 검출 위치에 따른 핵종의 변화 또한 볼 수 없었다. 신규원전에서 검출된 선원항은 ^{51}Cr , ^{95}Nb , ^{58}Co , ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{124}Sb 이었으며 노후원전은 ^{51}Cr , ^{137}Cs , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{58}Co , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{124}Sb 였다. 주요 핵종은 신규 및 노후원전 모두 ^{58}Co 과 ^{60}Co 였고, 신규원전에서는 ^{59}Fe 가 노후원전에서는 ^{137}Cs 와 ^{95}Zr 가 검출되었다. 600 keV 이하 저에너지 영역에서는 노이즈가 심하여 ^{51}Cr 검출 관정이 어려웠지만, 노후원전보다 신규원전의 ^{51}Cr peak가 크게 나타났다. 1500 keV 이상 고에너지 영역에서는 1690 keV(^{124}Sb) 근처에서 약하게 peak를 볼 수 있었지만 검출된 신호의 개수가 작아 통계적으로 유의미한 peak로 보기 어렵다. 검출된 $^{58}\text{Co}/^{60}\text{Co}$ 비는 신규원전의 값이 노후원전 보다 컸다. 비록 본 연구

가 정량적 측정이 이루어지지 않아 신규원전과 노후원전에 대한 검출된 핵종 수와 ^{58}Co 와 ^{60}Co 만을 정성적으로 논의 했으나, 원전 내 1차 냉각수 속의 CRUD 분포와 배관 내 침착된 CRUD의 분포가 다르기 때문에 1차 계통에 대한 직접 측정은 의미가 있다. 특히 처음으로 국내 원전 격납용기 내 배관을 직접 측정함으로써 원전 내 선원항 분석의 초석을 마련했다 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 CZT를 이용한 선원항 모니터링 및 피폭선량 예측기술 개발 과제의 일환으로 수행되었다. 또한 현장 측정에 도움을 주신 고리, 한빛, 한울, 월성발전소의 많은 관계자분들께 지면을 통해 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

1. ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. 2007:43-44.
2. ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. 2007:93-98.
3. Anastasion Deligiannis. The degree of Master of Science in Nuclear Engineering; Comparative Analysis of Source Term Removal at Cook Nuclear Plant. University of Illinois at Urbana-Champaign. Urbana, Illinois. 2009.
4. Guinard L, Cattant F, Taunier S, Bretelle JL, Rocher A, Jeannin B. Review of the evolution of international collective radiation exposure and associated good practices with special focus on Source Term Reduction strategies for EDF PWRs. ISOE European ALARA Symposium. Turku, Finland. 2008.
5. Ranchoux G, Taunier S, Gressier F, Leclercq S, Carrette F, Guinard L, Jeannin B. Source Term Reduction Strategies for EDF PWRs. ISOE International ALARA Symposium. Vienna, Austria. 2009.
6. Rocher A, Longeot M, Ranchoux G, Pietrowski L, Jeannin B. New CZT Measurement Device Comparison with EMECC Measurements in EDF PWRs. ISOE European ALARA Symposium. Vienna, Austria. 2009.
7. Garcier Y. Radiation protection challenges at EDF. ISOE International ALARA Symposium. Tsuruga, Japan. 2008.
8. Bonnefon J, Ranchoux G, Guinard L, Rocher A, Piotrowski L, Blond S, Cordier G. CZT technology application at EDF. ISOE European ALARA Symposium. Prague, Czech Republic. 2012.
9. Peurrung A. Materials science for nuclear detection, Materials Today. 2008; 11(3):50-54.

10. Sordo SD, Abbene L, Caroli E, Mancini AM, Zappettini A, Ubertini P. Progress in the development of CdTe and CdZnTe semiconductor radiation detectors for astrophysical and medical applications. *Sensors*. 2009;9:3491-3526.
11. He Z, Li W, Knoll GF, Wehe DK, Berry J, Stahle CM. 3-D position sensitive CdZnTe gamma-ray spectrometers. *Nucl. Instrum. & Meth. A*. 1999;422: 173-178.
12. Zhang F, He Z, Seifert CE. A Prototype three-dimensional position sensitive CdZnTe detector array. *IEEE Tran. On Nucl. Sci.* 2007;54 (4): 843-848.
13. David WM, He Z. Field Application of CZT Detector for Evaluation of Radiation Source Term. 2012 Asian ISOE ALARA Symposium, Tokyo, Japan, 2012.
14. Kohlmann R, Cook DC. Nuclear Power Plant Unit-1 Primary Piping Radiation Level Assessment Following Fuel Cycle 23. Radiological Solutions, Inc, 2010: 5-1 to 5-11

Analysis of Source Terms at Domestic Nuclear Power Plant with CZT Semiconductor Detector

Seo Kon Kang*, Hwayoon Kang*, Byoung-II Lee*, and Jeong-In Kim*

*Korea Hydro & Nuclear Power Co., LTD, Radiation Health Research Institute

Abstract - A lot of radiation exposure for radiation workers who are engaged in Nuclear Power Plants, especially PWRs, have been caused during the outage by CRUD, such as ^{58}Co , ^{60}Co , in Reactor Coolant System. And therefore we need to know source terms to achieve optimization of protection for the radiation workers from radiation exposure at Nuclear Power Plants efficiently. This study analyzed source terms at domestic NPPs (PWRs) nearby Steam Generator with CZT semiconductor detector using by IN-VIVO method during the outage for the first time in the country. We checked difference for the detected source terms between old and new NPP. It was performed especially to see a change of source terms by water chemistry process as well. There was not any difference by water chemistry process both NPPs. The main source terms are ^{58}Co and ^{60}Co at all NPPs. ^{59}Fe only appears in the new NPP. ^{137}Cs and ^{95}Zr are shown in the old NPP. The fraction of $^{58}\text{Co}/^{60}\text{Co}$ in the new NPP is higher than the old NPP for increasing the specific activity of ^{60}Co .

Keywords : Outage, Optimization of protection, CZT, Source terms, Steam generator, Old and new NPP, PWRs