



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2017년 8월
석사학위 논문

원전 1차계통 내 방사능 평가를 위한 ISOCS와 몬테칼로 코드 비교 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

신 승 수

원전 1차계통 내 방사능 평가를 위한 ISOCS와 몬테칼로 코드 비교 연구

A Study on Comparison of ISOCS and MonteCarlo Code for
Assessment of Radioactivity in Primary System of NPP

2017년 8월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

신 승 수

원전 1차계통 내 방사능 평가를 위한
ISOCS와 몬테칼로 코드 비교 연구

지도교수 송 종 순

이 논문을 공학 석사학위 신청 논문으로 제출함

2017년 4월

조선대학교 대학원

원자력공학과

신 승 수

신승수의 석사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	교수	김진원 (인)
위원	조선대학교	교수	나만균 (인)
위원	조선대학교	교수	송종순 (인)

2017년 5월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	i
제1장 서론	1
제1절 연구 배경	1
제2절 연구 목적	3
제2장 방사능 측정 기술 분석	4
제1절 방사선 측정 기술	4
제2절 CZT	14
제3절 Gamma Camera	15
제4절 ISOCS	18
제5절 방사능 측정 기술 분석	20
제3장 몬테칼로 코드 분석	21
제1절 몬테칼로 방법 소개	21
제2절 EGS5	23
제3절 ITS	26
제4절 MCNP	27
제5절 GEANT4	29
제6절 몬테칼로 코드 비교	32
제4장 방사능 측정기술을 이용한 코드 비교 분석	33

제1절 방사능 측정 위치 선정	33
제2절 GEANT4 모델링을 통한 측정값 분석	37
제5장 결론 및 제안	44
참고문헌	45

그림 목차

그림 1. Nuclear Decommissioning Process	1
그림 2. 가스형 검출기의 검출원리	4
그림 3. GM 검출기의 원리 및 등가회로	7
그림 4. GEM 검출기 도식화	8
그림 5. 섬광검출기의 검출시스템	10
그림 6. 반도체 검출기의 원리	12
그림 7. Small Gamma Camera의 구조	16
그림 8. ISOCS의 측정 구조	18
그림 9. 결정론적/해석적 MonteCarlo 방법	22
그림 10. EGS5 코드의 계산 흐름도	24
그림 11. Simple Geometry of MCNP	27
그림 12. GEANT4 전산모사 클래스 구조	30
그림 13. Kori #1 Plant Decontamination Loops	33
그림 14. 고리 1호기 원자로냉각재계통 Loop 개략도	34
그림 15. 원자로 냉각재계통 Loop의 방사선량률 측정 지점	34
그림 16. ISOCS를 이용한 기기 측정 장면	35
그림 17. S/G 수실 모델링	37
그림 18. U-tube 모델링	38
그림 19. RCP Seal 모델링	38
그림 20. S/G 수실 선원 측정을 위한 Collimator 설정	39
그림 21. U-tube 선원 측정을 위한 Collimator 모사(확대)	39
그림 22. RCP Seal 선원 측정을 위한 Collimator 모사	39
그림 23. 선원을 발생시킨 시뮬레이션 결과(S/G 수실)	40

그림 24. 선원을 발생시킨 시뮬레이션 결과(U-tube)	40
그림 25. 선원을 발생시킨 시뮬레이션 결과(RCP Seal)	41
그림 26. S/G 수실 결과 값 비교	41
그림 27. U-tube 결과 값 비교	42
그림 28. RCP Seal 결과 값 비교	42

표 목차

표 1. Properties of Semiconductor Materials	14
표 2. ISOCS를 이용한 적용 분야	19
표 3. In-Situ 측정 기술 분석	20
표 4. ITS 코드 개발 연도	26
표 5. MonteCarlo 코드 분석	32
표 6. S/G 수실 및 U-tube의 방사능 농도	35
표 7. RCP Seal 및 RHR 배관 방사능 농도	36

ABSTRACT

A Study on Comparison of ISOCS and MonteCarlo Code for Assessment of Radioactivity in Primary System of NPP

Shin SeungSu

Advisor : Prof. Song Jongsoon, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

Kori Unit 1 is scheduled to shut down in June 2017, and the interest for the decommissioning technology has risen. However, Korea has been experienced at decommissioning for research reactor, and is inexperienced in decommissioning commercial nuclear power plants and lacks the decommissioning technology. The nuclear decommissioning process consists of 5 steps: preparing for decommissioning, decontamination, cutting and demolition, waste treatment, and restoration of the environment. In this process, decontamination is the most important procedure for nuclear decommissioning, and decontamination reduces the exposure doses of decommissioning workers, and prevents the leakage of potential radioactive matters and the workers from inhaling them, and enables the recycling of the parts of NPPs. Also, nuclear decommissioning can be most efficient when the safety of workers related to nuclear decommissioning is secured.

Corrosion products are activated through system of circulation, and deposited in the NPP system and causes the radiation level to increase. As

the probability of workers being exposed to a high-level of radioactivity during nuclear decommissioning than during the period of NPP construction and operation due to these characteristics, exposure to radiation must be minimized for safety.

This study analyzed the characteristics of various detectors and measuring instruments in relation to the radiation and radioactivity measurement technologies that are currently used, and compared and analyzed the direct measurement methods(CZT, Gamma Camera and ISOCS). Also, this study examined the characteristics of MonteCarlo codes(EGS, ITS, MCNP and GEANT4), and analyzed them so that they can be applied according to the characteristics of the codes.

Through comparison and analysis, the radioactivity of the key devices of Kori Unit 1 will be compared, and ISOCS was used for measurement. ISOCS can correct efficiency without standard radioactive materials, and can directly measure devices and pipes due to its portability. To compare measurement values, GEANT4 was used for modeling, and GEANT4 can simulate complex structures. It can be applied to physical processes, and a wide variety of areas, such as astrophysics, medical treatment and radiation protection. On this basis, this study uses GEANT4 for modeling, compare measurement values with ISOCS, and present accuracy and applicability data to evaluate reliability, and resultingly enhance the accuracy of radioactivity prediction.

제1장 서론

제1절 연구 배경

고리 원전 1호기가 2017년 6월 가동 정지를 앞두고 있으며 해체를 위한 기술에 국내 관심이 높아지고 있다. 하지만 연구용 원자로 해체 경험이 전무이고 상업용 원전에 대한 해체 경험이 부족하며, 원전 해체에 관한 기술력이 부족한 편이다. 따라서 원전 해체와 관련한 기술이 필요한 실정이다. 원전 해체란 영구 정지된 원전 안에 있는 설비와 발전소 건물을 없애는 것이며 해체의 일반적인 과정은 준비, 제염, 절단 및 철거, 폐기물 처리, 환경 복원 5단계로 진행된다.

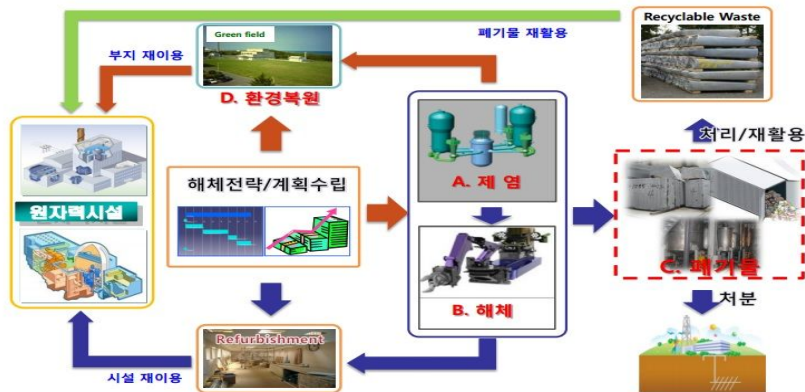


그림 1. Nuclear Decommissioning Process

5단계 과정에서 제염은 원전 해체를 위한 가장 중요한 절차이며, 제염을 통해 해체 작업자의 피폭선량을 감소시키고, 잠재적인 방사성물질의 누설과 이를 작업자가 흡입하는 것을 방지하며 시설의 부품을 재활용 할 수 있게 한다. 특히, 원전 구조물 해체에서 고려해야 하는 항목 중에서 우선순위는 안전이며, 방사능에 대한 피폭을 감소시키는 것을 고려해야 한다.

원전 계통 내 재질의 부식으로 생성되는 부식 생성물은 원자로 냉각재 계통의 전면부식결과 생성되는 부식 생성물(Corrosion Products)과 마모에 의해 생성되

는 마모 생성물(Metallic Wear Products)이 있다. 이들은 계통 순환을 통해 방사화되고, 원전의 계통에 침적되어 방사선의 준위를 증가시키는 가장 큰 요인이 된다. 이러한 특성 때문에 원전 해체 시, 건설 및 가동 중의 기간과 비교하여 작업자가 고방사능에 노출될 확률이 높아지기 때문에 안전을 위해 피폭을 최소화해야 한다.

제2절 연구 목적

SCK·CEN에 의하면 원전 해체에서 고려해야 하는 항목으로는 안전, 효율, 비용 대비 효과, 폐기물 최소화, 재사용 가능성을 제시하고 있다[1]. 원전 해체는 작업자의 안전이 확보 되어야 원전 해체 작업의 최적 효율을 이뤄낼 수 있다.

본 논문에서는 현재 사용되는 방사선·능 측정에 대한 다양한 검출기와 계측기들의 특성을 분석하였으며, 특히 직접 측정 방식인 In-Situ 방법을 이용한 방사능 측정을 수행할 수 있는 CZT, Gamma Camera, ISOCS(In-Situ Objective Counting System)에 대하여 비교 분석을 수행하였다. 그리고 In-Situ 방법을 이용해 발전소 1차계통 내 방사선량 비교 분석을 수행하기 위해 현재 사용 가능한 MonteCarlo 코드인 EGS5, ITS, MCNP, GEANT4 코드의 특성을 분석하였다. 또한 코드를 선정하여 결과 값을 비교 분석함으로써 직접 측정 방법의 정확도 및 신뢰도를 평가하고 이를 바탕으로 향후 원전 해체의 효율성을 높이고자 한다.

제2장 방사능 측정 기술 분석

제1절 방사선 측정 기술

1. 가스형 검출기

가스형 검출기는 가장 오래 사용되었고, 또 지금도 가장 광범위하게 사용되고 있는 방사선 검출기 유형중 하나로서, 하전 입자가 가스를 통과할 때 발생하는 효과에 기초를 둔 것이다. 실린더 형태로 중앙 전극이 양극으로 실린더 벽이 음극으로 구성된다. 검출기의 양극과 음극 사이는 높은 전위차(HV)가 걸려 있어 전자는 양극으로 양이온은 음극으로 이동하게 되고, 전자와 양이온이 전극에 포집되어 전류가 흐르고 후위에 위치한 정밀한 전류 측정 장치를 통해 신호를 표시한다. 검출기에 입사되는 방사선 준위가 높을수록 검출기에는 더 많은 전류가 흐른다[2].

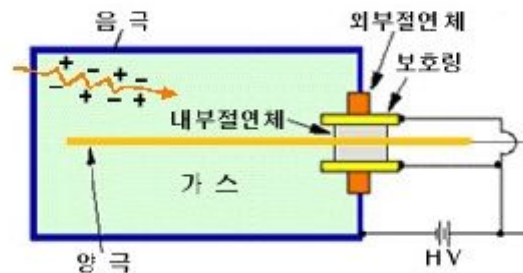


그림 2. 가스형 검출기의 검출원리

한편 전자와 양이온의 질량 차로 인해 양이온이 음극에 도달하는 시간은 전자가 양극에 도달하는 시간보다 약 1000배 이상 오랜 시간이 걸린다. 펄스 모드로 작동하는 여러 가지 유형의 가스형 검출기는 차이를 나타낸다.

아주 낮은 전압에 대해서 전기장은 최초의 이온쌍의 재결합을 방지하기에는 불충분하므로 수집 전하는 최초의 이온쌍의 전하보다 적게 된다. 전압을 올리면 재결합이 억제되고 이온 포화 영역(Region of Ion Saturation)에 도달한다. 다시

전압을 증가시키면 가스 증배가 시작되는 문턱 전기장에 도달한다. 이 때 수집전하는 입사방사선에 의해서 생성된 최초의 이온쌍에 비례하다. 이것이 비례영역(Proportionality Region)이고, 비례 계수기의 작동모드의 영역이다. 인가전압이나 전기장을 더욱더 증가시키면 비선형 효과가 일어나기 시작한다. 그리고 인가전압을 아주 높게 하면 양이온에 의해서 생긴 공간전하가 완전하게 지배적이 되어 그 후의 펄스의 거동을 결정한다. 이런 조건하에서는 양이온의 수가 증가하고 가스증배가 발생케 하는 값 이하로 전기장이 강화될 때 까지 전자 사태가 진행된다. 이것이 GM 영역(Geiger Mueller Region)이다.

가. 전리함

원리적으로 전리함은 가스형 검출기 중에서 가장 단순한 것이다. 전리함에 흐르는 전류는 기체의 증폭 없이 순수하게 초기 이온쌍의 수에 기인하며 출력신호는 방사선장의 강도에 비례한다.

초기 이온쌍의 수는 검출기에 흡수된 입사방사선의 에너지에 비례하므로 선량을 측정이 가능하고 공기로 채워진 전리함을 이용할 경우 조사선량을 측정할 수 있다. 그러나 방사선과 검출가스와의 상호작용으로 생성된 초기 이온쌍만이 포집되어 출력전류를 형성함으로 전리함에는 아주 작은 양의 전류가 흐른다. 따라서 정밀한 전류 측정 장치가 필요하다. Fission Chamber도 전리함의 한 종류이다.

나. 비례계수기

비례계수기는 가스형 검출기의 한 유형이고 1940년대 후반에 도입되었다. 전리함이 사용되는 전압 영역보다 더 높은 전위차를 검출기에 인가하면 입사방사선이 검출기 가스를 전리하여 생성된 초기전자는 양극으로 포집되는 과정에서 가속되어 2차 전리를 일으킬 수 있는 충분한 에너지를 얻게 되고 다시 2차 전자는 또 다른 전리를 야기한다. 이러한 현상을 “전자사태”라고 부르고 비례계수관의 출력은 검출기에서 생성된 총 이온쌍의 수에 비례한다.

비례계수기는 방사능측정뿐만 아니라 출력 펄스가 입사방사선의 에너지에 비례하므로 방사선의 에너지 측정이 가능하며 방사선의 종류에 따른 전리밀도의 차를 이용하여 알파선과 베타선을 동시에 측정할 수 있다. 방사선이 검출기에 입

사되어 전자사태가 발생하고 전자와 양이온이 전극으로 포집되어 출력펄스를 형성하는 동안에 또 다른 방사선이 입사되면 검출기는 잇따른 방사선을 이전 방사선과 구분할 수 없다. 이와 같이 방사선에 의한 출력펄스를 구분하는데 걸리는 시간을 불감시간 또는 회복시간(Dead Time 또는 Recovery Time)이라고 부른다. 비례계수기의 불감시간은 수 nsec정도이며 계수율이 낮을 경우에는 문제되지 않지만 계수율이 높은 선원인 경우에는 이에 대한 보정이 이루어져야 한다.

비례계수기에 주로 사용되는 기체는 90%의 아르곤과 10%의 메탄으로 구성된 P-10 가스이며 10% 메탄은 방사선과 검출가스와의 반응과정 동안에 여기 되었던 원자에서 방출되는 자외선에 의한 부가적인 전리를 방지하기 위해 첨가되는 “소멸기체(Quench Gas)”이다. 만약 비례 계수기에서 자외선 의한 전리현상을 허용한다면 검출기의 출력펄스의 에너지 비례성이 상실된다.

비례계수기의 기체는 밀봉형으로 봉입할 수도 있으나 기체 유입형으로 계측 중에 연속적으로 주입할 수도 있다. 기체 유입형 검출기는 기체의 성능저하가 없는 장점과 시료와 검출기 사이의 창(Window)을 없앨 수 있어 계수효율을 2 계수기의 경우에는 50%, 4 계수기의 경우에는 100%까지 높일 수 있는 이점이 있다. ³He Counter도 비례수기의 한 종류로서 원자력 분야에 많이 이용되고 있다.

다. GM 검출기(Geiger-Mueller Detector)

GM 검출기는 가장 오랜 형태의 방사선 검출기 중 하나로 1928년에 Geiger와 Mueller에 의해서 도입되었다. 간단하고 가격이 저렴하며 조작이 쉽기 때문에 현재에도 사용되고 있다. GM관에는 일반적으로 비례계수기가 사용되는 전압영역보다 높은 전압이 인가되고 비례 계수기에서는 허용하지 않았던 자외선에 의한 부가적인 전리현상을 용인하므로 방사선이 입사되면 양극을 중심으로 GM관의 모든 영역에서 전자사태가 발생한다. 따라서 GM관의 기체증배인자는 $\sim 10^8$ 에 이르므로 펄스를 증폭시키기 위한 부가적인 전자장치가 필요 없을 만큼 충분한 크기의 출력펄스를 형성한다. 그러나 GM관에서 생성되는 총 이온쌍의 수는 초기 이온쌍의 수와 관계없이 동일하기 때문에 출력펄스의 크기는 입사되는 방사선의 종류와 에너지에 무관하게 동일하다. 따라서 GM 검출기는 입사방사선의 종류와 에너지를 구분할 수 없고 단지 계수되는 방사선의 개수, 방사능만 측정 가능하

다.

이와 같이 GM검출기는 입사방사선의 성질에 대한 정보를 상실하고 단지 그 수만을 나타내므로 원칙적으로 방사선의 에너지에 종속적인 방사선량을 측정할 수 없다. 이러한 GM검출기의 최대 약점을 보완하기 위해 검출기의 외벽을 적절한 물질(Cu, Sn, Pb 등)로 차폐하여 저 에너지 영역의 광자에 대한 감응도를 낮춰 100KeV에서 수 MeV까지의 영역에서 감응도를 일정하게 조정한다. 이렇게 하면 에너지와 선량과의 관계가 균일해지므로 에너지에 관계없이 입사방사선의 수만을 계수하여 근사적인 방사선량을 얻을 수 있다. 이와 같은 GM관을 “보상형 GM”이라 부르고 주로 선량율을 측정하는 서베이 미터(Survey Meter)로 사용된다.

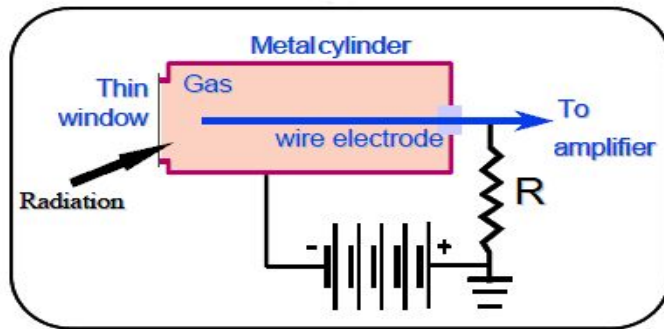


그림 3. GM 검출기의 원리 및 등가회로

GM 검출기에 주로 사용되는 기체는 He과 Ar이며 전리를 통해 생성된 양이온이 벽물질과 충돌하여 2차 전자를 방출하는 것을 방지하기 위한 소멸기체로 할로젠기체(Cl_2 , Br_2 등)나 유기기체(에틸알콜, 에틸포메이드)가 5~10%가 첨가된다. 일반적으로 GM검출기의 불감시간은 100~400us이다.

라. MSGC(Microstrip Gas Chamber)

1988년 A. Oed가 최초로 반도체 공정을 이용하여 기체형 방사선 위치 센서인 MSGC를 개발하였다. MSGC는 빠르고, 좋은 에너지 분해능과 좋은 시간 분해능(15nsec)을 가진 다중 전극 비례계수기이며, 그것은 단일 센서 평판의 Drift

Chamber와 유사하다. MSGC에 외이어(Wires)는 적당한 전도성을 가지고 있는 지지층에 평행의 스트립(Strip)이 위치하게 된다. 이 전극들의 스트립은 일정하게 양극과 음극들로 구성된다. 평평한 MSGC의 센서 평판은 세밀하게 증착된 회로 기판과 비슷하며 Photo Lithographic 방법을 사용하여 만든다.

마. 기체전자 증폭기(GEM, Gas Electron Multiplier)검출기

기체전자 증폭기(GEM)는 고에너지 분야의 입자검출기로 가장 최근에 개발되었다. GEM형 기체 검출기를 이용한 방사선 영상장치는 우수한 해상도를 구현할 수 있으면서도 내방사성이 좋고 감마선 뿐 아니라 중성자를 이용한 Radiography에도 적용할 수 있는 장점이 있다. 또한 GEM 방식의 기체검출기는 MSGC나 MDOT에 비하여 고전압에 강한 특성을 가지므로 차세대 Digital Radiography System의 영상 센서로 활용 가능성이 매우 높다.

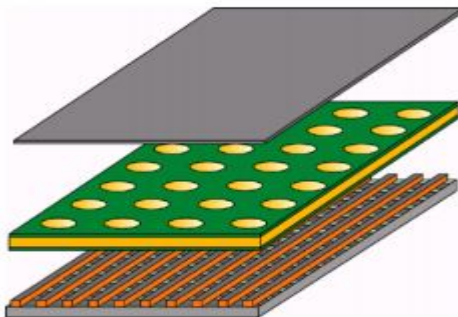


그림 4. GEM 검출기 도식화

기체전자 증폭기는 기존의 다른 기체검출기들에 비해 공간 및 시간 분해능, 검출효율 등 여러 면에서 훨씬 우수한 동작특성을 지니고 있는 것으로 알려져 있다. 또한 기체전자 증폭기의 기체 이득(Gas Gain)이 충분히 높을 경우, Readout 회로로부터 제거될 수 있다. 이럴 경우 기체전자 증폭기 자신은 Readout 회로와는 분리된 방사선 검출기로서 동작하며, Readout 회로의 구조도 간단해진다. 또한 그 구조도 단순하여 제작의 용이함도 지니고 있다. 하지만, 이러한 장점에도

불구하고 기체전자 증폭기는 개발된 후 얼마 되지 않아 아직도 이해하고 개선해야 할 동작특성들이 몇몇 남아 있다. 예를 들면, 입사 방사선이 검출기체와 상호 작용하여 생성된 일차전자들 중 일부가 기체전자 증폭기의 미소구멍을 관통하면서 증폭되는 전자들 중 일부가 Readout 전극에 도달하지 못하고 기체전자 증폭기의 하위전극에 포획됨으로써 발생하는 기체이득의 손실이다. 또한 기체전자 증폭기 자신이 직접 기체검출기로서 역할을 하고 그리고 Readout 회로가 방사선 센서로부터 분리될 수 있기 위해서는 기체전자 증폭기의 기체이득을 충분히 높여야 한다. 정성적으로 말해서, 기체전자 증폭기의 기체 이득은 주로 기체전자 증폭기의 기하학적 요소(미소구멍의 두께, 크기, 모양, 간격) 및 동작요소(증폭기 주변에서의 전장의 방향 및 상대적 크기, 검출기체의 종류 및 압력 등)에 의해서 좌우된다.

기체형 위치검출기는 반도체 검출기에 비교해서 구조가 간단하여 제작이 용이하고, 대형 검출기 제작이 가능하며, 방사선에 의한 손상이 거의 없다는 장점을 가지고 있다. 최근에는 GEM형 기체검출기와 바늘형상의 CsI(Tl)를 결합시키고, 기체 검출기의 표류 전극면으로 CsI, K-Cs-Sb 등의 광전자 방출체를 이용함으로써 50um 내외의 고위치 분해능을 얻을 수 있게 되어. 비파괴검사, 결정구조분석, 유방암진단, DNA의 방사선손상연구, 천문학, 고에너지 입자검출 등 다양한 분야에서 디지털 방사선 영상을 구현하는데 크게 이바지 할 것으로 기대되고 있다.

2. 섬광체 검출기

어떤 종류의 물질 중에서 발생하는 섬광(Scintillation Light)에 의해서 이온화 방사선을 검출하는 일은 예전부터 행하여 온 방사선 측정법의 하나이다. 방사선의 에너지를 흡수하였을 때 원자가전자대에 있던 전자가 전도대로 여기되었다가 다시 천이($\sim 10^{-8}$ 초 내)하면서 가시광선을 방출하는 물질을 섬광물질이라 한다. 입사되는 방사선장의 세기와 가시광선 방출량의 비례성을 이용하는 섬광검출기는 사용하는 섬광물질에 따라 고체, 액체, 기체 또는 유기질, 무기질의 형태가 있다.

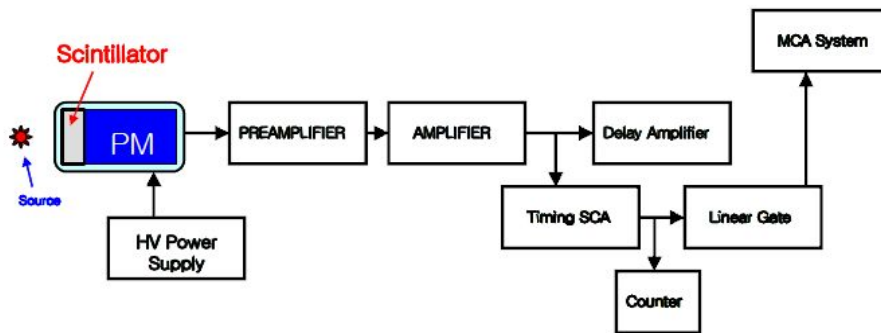


그림 5. 섬광검출기의 검출시스템

$CdWO_4$ 는 BGO보다 밀도가 크고, 유효 원자 번호도 커서 검출효율이 매우 우수하다. 그러나 섬광의 Decay Constant가 20us로 매우 길어 Pulse Mode의 계수 장치에는 사용하기 어렵지만, Current Mode에서는 적합한 섬광체로 사용할 수 있다. GSO는 감마선의 측정 시 Resolution이 매우 우수한 장점을 지니므로 감마선 분광학에 사용하기 적합하다.

BGO는 PET장치의 섬광체로 사용하는 등 소형의 Array Detector에 사용하기 적합하지만 Resolution은 NaI(Tl)에 비하여 떨어지는 단점이 있다. 그러나 대용량의 결정을 성장하기가 용이하고 고에너지의 감마선 검출 효율이 높은 특징이 있다. Radiation Length는 $CdWO_4$ 가 가장 짧고, Energy Resolution은 CsI(Tl)이 가장 우수하다.

가. 무기 섬광검출기(Inorganic Scintillation Detector)

NaI(Tl) 검출기는 밀도가 $3.67g/cm^3$ 으로 상당히 높고 원자번호가 높은 I(53)을 함유하고 있으므로 감마선에 대한 검출효율이 높다. 그러나 기계적, 열적 충격에 약하고 조해성이 있으므로 알루미늄 등으로 밀폐하여 공기와의 접촉을 차단한다. 밀폐로 인해 투과력이 약한 알파, 베타 또는 연질 X-선 측정에는 적절하지 않으며 통상 감마선이나 중·경질의 X-선 측정에 이용한다.

CsI는 섬광물질로써 유용한 또 하나의 할로젠화 알칼리이고, 섬광체 중에서 단위 길이 당 감마선의 흡수가 최대가 된다. 이 특성은 크기나 중량 등이 문제가

되는 우주에서의 계측장치와 같은 응용에 대해서 매우 중요하다. CsI(Tl) 밀도가 4.51g/cm^3 으로 상당히 높고 원자번호가 높은 요오드 물질(원자번호 : 53)을 함유하므로 감마선에 대한 검출효율이 높다. 방출 스펙트럼은 NaI(Tl)의 방출 스펙트럼보다 훨씬 더 파장이 길게 정점화 되는데, 이는 빛의 출력이 CsI(Tl)에서 실제적으로 더 낮을 때임이 인용된다. CsI(Na)의 밀도는 CsI(Tl)와 같고, 단위 에너지당 광출력이 상당히 높게 NaI(Tl)의 값에 근접한다. CsI(Na)도 흡습성이 있기 때문에 공기와의 접촉을 차단한다.

1970년대의 후반에 섬광물질, $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ 는 상업적으로 이용할 수 있게 되었고, 이 물질의 결정은 급속도로 증가되어 왔다. BGO의 중요한 장점은 고밀도 (7.13g/cm^3)와 비스무스(Bi) 성분의 큰 원자번호(83)이다. 이들 성질은 감마선의 광전흡수에 관한 어느 일반적인 이용이 가능한 섬광물질의 단위 체적 당 최대의 확률로 나타난다. 그러나 BGO는 광수율(Light Yield)은 비교적 낮은데, NaI(Tl)의 것보다 10~20%로 보고되고 있다.

BaF_2 는 최근에 고속 타이밍 측정에서 그 자체의 퍼텐셜 적용 때문에 주목을 끌고 있다. 현재 BaF_2 는 1nsec보다 더 짧은 감쇠시간을 갖는다. 이런 특성의 결합은 단위 체적당 높은 검출효율과 고속반응이 요구되는 섬광검출기에 사용되어 진다.

나. 유기 섬광검출기(Organic Scintillation Detector)

순수 유기결정으로 섬광특성이 양호한 재료는 안트라센(Anthracene)과 스틸벤(Stilbene)을 들 수 있다. 안트라센은 가장 오래 전부터 섬광체의 목적으로 이용되어 온 유기물질이고, 다른 어떤 유기 섬광체보다 높은 섬광 효율을 가지고 있다. 스틸벤은 섬광효율은 낮지만 하전입자와 전자에 의해서 생성된 섬광을 구별하는데 자주 이용되고 있다. 이들은 큰 결정을 얻기 어렵고 또 기계적 강도가 매우 약하여 결정형태로 사용되기보다 이들 섬광물질을 유기용매에 녹인 액체섬광물질 또는 중합한 플라스틱형태로 사용된다. 액체섬광물질의 특성은 임의의 크기와 임의의 형태로 검출기를 제작할 수 있다는 점과 측정 시료를 직접 섬광체와 혼합하여 사용할 수 있으므로 액체섬광검출기는 투과력이 약한 알파, 저에너지

베타선을 내는 핵종(^3H 와 ^{14}C) 계측에 매우 효과적이다. 유기섬광물질은 원자번호가 낮은 탄화수소로 구성되고 밀도가 낮으므로 감마선 측정용으로 사용되지 않는다.

3. 반도체 검출기

방사선을 검출 및 측정할 경우 고체의 검출매질을 이용하는 것이 유리한 경우가 많다. 고체의 밀도가 기체의 밀도에 비해 약 1000배 정도 크고 고에너지 전자와 감마선을 측정하는 경우로 볼 때 고체검출기의 크기는 이것과 같은 가스형 검출기에 비해 작게 할 수 있다. 섬광체 검출기는 고체검출 매질을 마련하는 가능성을 제시해 주고 각종 방사선 계측의 응용에 대해서는 앞에서 설명되었다. 섬광체 검출기의 중요한 문제점의 하나는 에너지의 분해능이 나쁘다는 것이다. 에너지 분해능의 통계적 한계를 개선하는 유일한 방법은 펄스 당 정보운반자의 수를 증가시키는 것이다. 방사선 검출기로서 반도체 물질을 사용함으로써 해서 다른 종류의 검출기보다 훨씬 많은 수의 운반자를 얻을 수 있다.

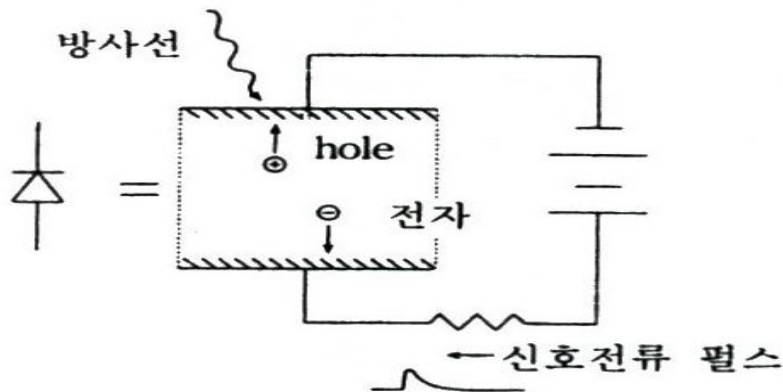


그림 6. 반도체 검출기의 원리

결정체 물질에서는 격자에 주기성이 있기 때문에 그 고체내의 전자에 허용되는 에너지는 띠(Band)모양이 된다. 원자가 전자대(Valence Band)와 전도대(Conduction Band) 사이의 에너지 갭(Gap)이 작아서 상온에서도 열적 여기에 의

해 원자가전자대에 있던 전자가 전도대로 이동할 수 있는 물질을 반도체라고 부른다. 이와 같이 방사선의 에너지 흡수에 의해서 뿐만 아니라 상온에서도 열적 여기에 의해 반도체 검출기에는 항상 미량의 전류가 흐르기 때문에 사용 시에는 반드시 액체질소로 냉각시켜 주어야 한다.

원자가전자대에 있던 전자가 전도대로 이동하면 원자가전자대에는 정공(Hole)이라 부르는 전자의 빈자리(Vacancy)가 만들어지고 이는 양전자 효과를 낸다. 반도체에서 전자, 정공쌍을 만드는데 필요한 에너지는 Ge이 2.9eV 이고 Si이 3.6eV로 기체(30eV)에서 보다 상당히 작으므로 동일한 에너지의 입사방사선에 대하여 생성되는 정보전달자의 수가 많아서 출력 펄스가 커진다. 따라서 입사방사선의 에너지를 구분하는 에너지 분해능이 우수하다. 또한 검출기가 기체보다 밀도가 1,000배 정도 큰 고체이므로 방사선의 검출효율이 우수하다.

제2절 CZT

CZT는 Cadmium, Zinc, Telluride($Cd_{0.8}Zn_{0.2}Te$)로 구성된 반도체 검출기로 다른 방사선 검출기 소자에 비해 최근에 개발된 반도체 검출기에 속한다[3]. 개발 역사가 길지 않지만 꾸준히 진보를 통하여 의료영상진단기기, 포터블 센서, 액체 수위 측정, 감마선 분광기, X-RAY 이미지, Homeland Security 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 복합적 반도체 소자인 CZT는 원자량이 커서 광전효과가 잘 일어나고 밀도 및 에너지 밴드 갭이 넓어 엑스선이나 감마선을 검출하기에 좋은 물리적 특징을 가지고 있다.

표 1. Properties of Semiconductor Materials

Material	Z	Density (g cm ⁻³)	Bandgap (eV)
Si	14	2.33	1.12
Ge	32	5.33	0.72
CdTe	48/52	6.06	1.52
Cd _{0.8} Zn _{0.2} Te	48/30/52	6	1.64

CZT검출기는 HPGe 검출기에 비해 다소 에너지 분해능이 떨어지지만, 원전 내 주요 선원 향들을 구분하기에 충분하며, 특히 상온에서 냉각장치 없이 사용할 수 있어 HPGe보다 휴대성이 크게 향상된 장점이 있다. 또한 CZT 검출기는 하나의 검출기에 여러 개의 CZT 소자를 적절히 배열하여 감마 선원 향에 대한 영상을 획득할 수 있는 매우 큰 장점이 있다.

제3절 Gamma Camera

동위원소의 의학적으로 이용하기 위하여 동위원소의 세기를 알아내거나 동위원소의 분포도를 영상화할 필요가 있다. 검출기 Scan형 영상에 대하여 검출기를 움직이게 하지 않고 영상화할 수 있는 장치로 X-선 영상관을 이용한 각종 카메라가 연구개발 되었다[4]. 1950년 전까지는 주로 동위원소의 세기를 계수하는 계수기나 프로브 등에 이용하였다. 동위원소 분포도의 영상화는 1951년 Benedict 등이 개발한 갑상선의 요오드 분포를 검사하는 섬광 검출기를 자동화하면서 부터였으며, 그 후 1958년 Hal O. Anger에 의해 섬광카메라가 탄생되었고, 그 기본 개념은 오늘날까지 널리 사용되고 있다.

감마카메라는 생체 내 생물학적 현상을 나타내는 방사성 의약품 분포를 영상으로 표현할 수 있어 생체현상 규명이나 질병진단 목적으로 많이 사용되고 있다. 감마카메라 영상은 방사성 동위원소에서 방출되는 감마선과 섬광결정[일반적으로 NaI(Tl)섬광결정]과의 상호작용, 즉 광전효과와 콤프턴 산란 등에 의해 발생된 신호를 적절한 전자회로를 사용하여 처리한 후 컴퓨터를 통해 감마선 검출 위치를 영상으로 표현하여 얻어진다.

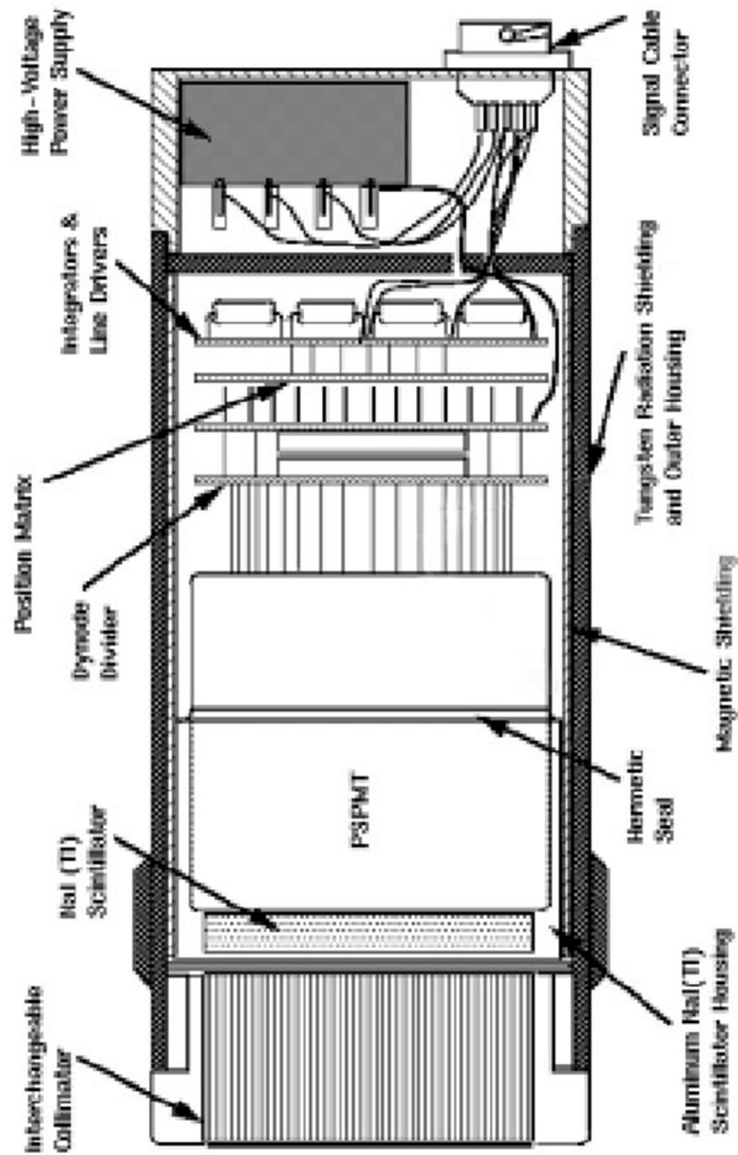


그림 7. Small Gamma Camera의 구조

현재 사용되고 있는 일반 감마카메라는 검출기 크기가 전신 영상획득에 적합하도록 설계되어 있다. 하지만 커다란 검출기를 구성하는 섬광결정과 여러 개의 광전자 증배관, 복잡한 전자회로는 제작하는데 많은 비용이 필요하여 생산가를 높이는 원인이 된다. Small Gamma Camera는 이러한 물리적 효과와 경제성을 고려한 높은 공간 분해능을 가지는 유방암 진단 전문 카메라 시스템이 NaI(Tl)섬광 결정과 위치 민감형 광전자 증배관, 적절하게 구성된 여러 가지 전자회로, Analog to Digital 변환기, 그리고 개인용 컴퓨터를 이용하여 개발되었다.

제4절 ISOCS

1. ISOCS 분석기

ISOCS(In-Situ Objective Counting System)는 측정 대상물이 대형이거나 매우 복잡하여 표준선원 제작이 불가능한 이유로 직접 교정을 수행할 수 없는 경우 이용할 수 있는 측정 방법이다. 하지만 신뢰성 있는 분석을 위해서는 반드시 측정하고자 하는 기하학적 구조를 정확히 알고 있어야 한다. 특히, 검출기와 대상체의 기하학적 구조뿐만 아니라, 내부의 구성 물질, 선원의 분포 등이 매우 중요하다. 따라서 ISOCS의 활용은 내부구조가 정확히 알려진 경우, 특히 선원 및 매질이 균질하며, 그 구성 물질이 알려진 경우에 대하여 최적의 결과를 얻을 수 있다. 따라서 Resin과 같이 포장제의 구성 및 매질이 잘 알려져 있고 선원의 분포가 매우 균일할 것으로 예상되는 드럼에 적합하다. 또한 비균질 하더라도 선원의 위치와 매질의 기하학적 구조를 잘 알고 있는 경우라면 분석이 가능하다.

ISOCS는 대부분 제공되는 기본 Template으로 모델링이 가능하며 20개의 표준 Template으로 대상체와 가장 유사한 모델을 선택하면 된다. 적절한 Template Worksheet를 선택하여 대상체의 모든 치수를 확보하고 모든 샘플 구성물질의 적절한 정의의 2가지 형태 정보는 정확한 ISOCS Efficiency 계산에서 매우 중요하다[5].

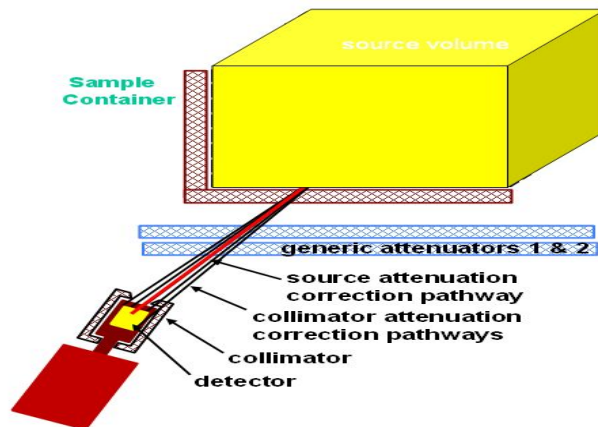


그림 8. ISOCS의 측정 구조

2. ISOCS 분야 적용

ISOCS는 다양한 분야에 적용되어 사용될 수 있다. 토양 표면, 대형 평면 표면 오염, 방사능 물질을 포함한 박스 형태의 용기 등에 사용될 수 있으며 긴급한 상황에 사람을 박스나 실린더 형태로 단순화하여 체내 피폭을 측정할 수 있다. 다음 표 2는 ISOCS를 이용한 적용 분야에 대하여 나타낸 것이다.

표 2. ISOCS를 이용한 적용 분야

토양 표면	<ul style="list-style-type: none"> - 원자력 시설에서의 운전시작전의 기준선량 감시 - 제염작업 이전 및 이후의 부지의 특성화 작업 - 부지내의 최종 검사용 - 토양 깊이에 따른 다양한 방사능의 모델링
대형 평면 표면 오염	<ul style="list-style-type: none"> - 벽면, 바닥, 천정 및 컨테이너, 장비의 사각면 - 페인트, 타일 등에 분포된 방사능을 모델링 - Efficiency Area Factor를 이용하여 단위 면적당 방사능 평가
방사능 물질을 포함한 Boxes 형태의 용기	<ul style="list-style-type: none"> - 정사각형 혹은 직사각형의 면을 갖는 컨테이너 - 컨테이너 외부에 1또는 2개의 외부 차폐체
복잡한 표면과 대상체에 대한 측정	<ul style="list-style-type: none"> - 복잡한 대상체를 모델링으로 단순화 이후 총 방사능량 추정가능 - 오염물질의 총 표면적수 계산을 통한 단위면적당 평균 방사능 계산
실린더 형태의 방사능을 포함하는 용기	<ul style="list-style-type: none"> - Process tanks & Storage drums - 실린더 형태의 컨테이너 모델링 가능
파이프 형태의 방사능을 포함하는 용기	<ul style="list-style-type: none"> - 직경과 길이의 다른 모든 파이프 측정 가능 - 파이프 내부에 파이프 구조를 같은 다른 구성물질 및 별도의 Solid 실린더 모델링 가능 - 드럼과 실린더 형태의 탱크를 파이프의 형태로 모델링
체내 피폭 측정	<ul style="list-style-type: none"> - 대상체를 박스 혹은 실린더 형태로 단순화함 - 전신에 균일한 방사능 분포로 모델링 - 오염확산 방지 및 시간 절약을 위한 현장 측정
공기 중 방사능 측정	<ul style="list-style-type: none"> - 공기 중으로 방출되는 방출량 감시 - 검출기로부터 500m 떨어진 곳까지의 대규모 부피 모델링 가능 - 공기 중 실시간 방사능 농도 및 규제준수 여부 결정

제5절 방사능 측정기술 분석

위에서 조사한 측정 기술 중, 직접 측정(In-Situ)이 가능한 CZT, Gamma Camera, ISOCS에 대한 방사능 측정기술을 비교 분석하였다.

표 3. In-Situ 측정 기술 분석

	CZT	Gamma Camera	ISOCS
Measurement Object	Small Detector Minimal Parts	Small Components (Pipe, Wall, etc)	All Components (Any Size and Shape)
Measurement Range (Dose Rate)	Adjustable (Replace the probe)	Available(Picture)	Adjustable (Distance Control, Shielding)
Nuclide Identification	Available (Spectrum, Software)	Unavailable	Available (Spectrum, Software)
Contaminated Area Discrimination	Available(Internal GM Detector)	Available(Picture)	Unavailable
Quantitative Analysis	Relative Ratio of Radionuclides	Unavailable	Available

제3장 몬테칼로 코드 분석

제1절 몬테칼로 방법 소개

몬테칼로(MonteCarlo) 방법은 1940년대 후반에 Stanislaw Ulam에 의해 처음 명명되었다. Stanislaw Ulam이 로스 앨러모스 국립연구소(Los Alamos National Laboratory)에서 핵무기 개발 프로젝트에 참여하는 동안 모나코의 유명한 도박 도시 몬테칼로의 이름을 본떠서 명명하였다. 몬테칼로 방법은 난수(Random Number)를 반복적으로 사용하여 특정 변수의 값을 확률적으로 계산하는 알고리즘이다. 수학이나 물리학 등에 자주 사용되며, 계산 하려는 값이 닫힌 형식으로 표현되거나 복잡한 경우에 근사적으로 계산할 때 사용된다.

확정모형은 특정 변수를 예측할 때 상호 영향을 주는 변수들간의 관계가 확실하여 분석적 해를 정확하게 찾을 수 있다. 몬테칼로 시뮬레이션과 같은 확률모형에서는 이러한 분석적인 방법으로 해를 찾는 것이 거의 불가능하다. 확률적 과정을 따른다는 가정 하에 확률적 추정치와 그 표준편차에 관심을 가진다. 물리적 문제 해결에 있어서 복잡성(Complexity)은 측정 가능하다. 즉, 차원(Dimension)이 곧 복잡성의 척도가 된다. 몬테칼로 방법은 문제의 복잡성이 커질수록 확정모형에 비해 효율적으로 문제해결이 가능하다고 알려져 있으며 문제 해결 시간과 복잡성의 관계를 그림 9에 나타냈다[6].

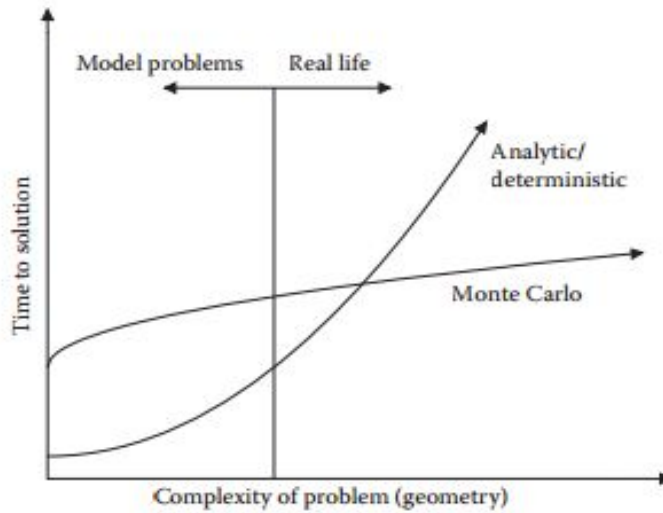


그림 9. 결정론적/해석적 MonteCarlo 방법[7]

몬테칼로 알고리즘은 방정식을 풀거나 난수 발생에 기반 하여 적분 계산을 하는 수치적 방법이다. 일반적으로 컴퓨터 프로그램에서 발생시키는 난수는 엄밀하게는 난수가 아닌 의사 난수(Pseudo Random Number)이고 대부분의 난수 발생기는 특정 구간에서 균일하게 분포된 난수를 발생시킨다.

제2절 EGS5

EGS5 코드는 수 KeV에서 수백GeV 영역의 전자와 감마선의 복합적인 수송에 관한 몬테칼로 모사로 Stanford Linear Accelerator Center(SLAC)를 중심으로 개발된 Electron Gamma Shower(EGS) 코드이다. 1974년 최초 버전이 개발된 이후 지속적으로 다양한 에너지 영역에서의 전자와 감마선의 입자 수송 모사에 널리 쓰이고 있으며, 2005년에 Hideo Hirayama, Yoshihito Namito, Alex F.Bielajew 등에 의해 EGS5 로의 업그레이드가 이루어졌다[8]. 양자-전자 충돌의 고에너지 실험물리학에 이용되고 있지만 저에너지의 전자-광자 수송에 적합하게 보완되어 의학물리 및 보건물리에도 널리 사용되고 있다.

EGS5에서 사용자가 작성해야 할 파일은 크게 사용자 코드와 기하구조 입력파일(Geometry Input File), 물질 데이터 입력 파일(Material Input File)의 세 부분이 있으며, 코드는 FORTRAN 언어로 작성되어 있다. 코드는 사용자 코드와 EGS 코드로 분류되는데 사용자 코드는 사용자가 편집하여 실험환경에 맞게 수정이 가능한 부분이며, EGS 코드는 계산에 필요한 물질 데이터 및 반응 단면적 등을 불러들이는 부분이다. 다음 그림 10은 EGS5 코드 체계의 계산 흐름도를 나타낸 것이다.

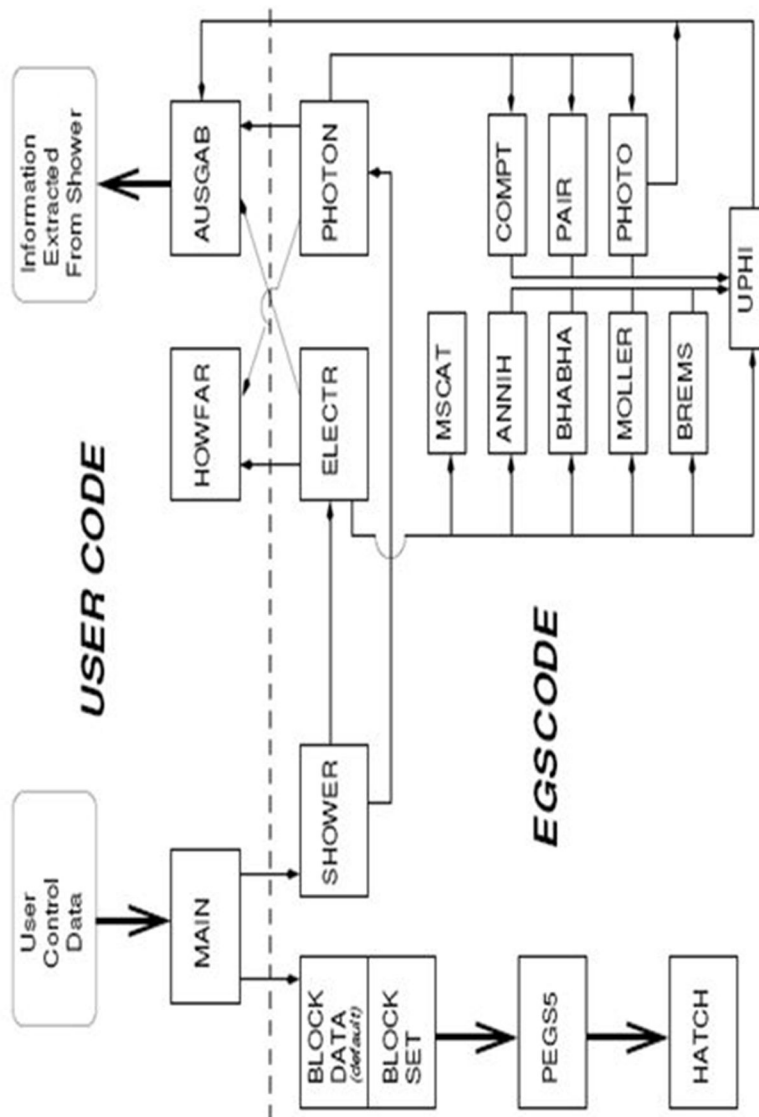


그림 10. EGS5 코드의 계산 흐름도

MAIN에서는 BLOCK DATA와 BLOCK SET의 서브루틴을 통하여 EGS5에서 사용되는 일반적인 변수를 초기화한다. PEGS5는 매질의 데이터를 생성하고 HATCH는 PEGS5에서 만든 매질의 데이터를 읽어 들이는 역할을 한다. SHOWER는 입자 수송에 입구 역할을 하며 HOWFAR는 생성된 기하구조의 여러 지역에서 입자의 수송을 묘사한다. AUSGAB은 계산을 통하여 생성된 입자의 종류, 에너지, 위치 등의 사용자가 원하는 정보를 기록해 사용할 수 있게끔 해주는 역할을 한다. 그리고 MSCAT ANNIH, BHABHA, MOLLER, BREMS는 전자가 물질에서 반응하는 현상들이고 COMPT, PAIR, PHOTO는 광자가 물질에서 반응하는 현상으로 입자가 에너지를 잃는 과정을 묘사하는 서브루틴이다[9].

제3절 ITS

ITS 코드는 다양한 형태, 다양한 물질 내에서 전자·광자의 거동에 대해 시간을 고려하여 모사할 수 있는 코드이며, ETRAN 모델을 기반으로 한다. 매우 복잡한 방사선 수송방정식을 풀 수 있는 소스코드 라이브러리를 공유하는 여러 프로그램들의 집합이다. ITS는 물리적 모델을 개선하고 사용자 편의성을 높이며 사용할 수 있는 옵션을 증가시키기 위해 1980년대에 전반적으로 향상되었다.

표 4. ITS 개발 연도[10]

Code	M / Y	Released	Dimension
EZTRAN	Sep / 71	Yes	1D
EZTRAN2	Oct / 73	Yes	2D / 3Da
TIGER	Mar / 74	Yes	1D
CYLTRAN	Mar / 75	Yes	2D / 3Da
CYLTRANM	Jun / 77	No	2D / 3Da
TIGERP	May / 78	Yes	1D
SPHERE	Jun / 78	Yes	1D
ACCEPT	May / 79	Yes	3D
SHPHEM	Jul / 79	No	1D / 3Da
CYLTRANP	Late / 81	No	2D / 3Da
ACCEPTM	Late / 81	No	3D

다음의 6개 코드, TIGER 코드(1D Slab Geometries), CYLTRAN 코드(2D Cylindrical Geometries), ACCEPT 코드(Arbitrary 3D Geometries), standard 코드(Normal Applications), P 코드(Enhanced Ionization Relaxation Procedures), M 코드(Macroscopic Electromagnetic Fields)로 이루어져 있다. 사용자는 적당한 코드를 라이브러리로부터 선택하여 사용할 수 있다. 코드 사용 시 매우 많은 양의 FORTRAN 언어를 이용한 프로그래밍이 필요하다[11].

제4절 MCNP

MCNP는 중성자, 광자, 전자 또는 중성자가 방출되어 생성된 광자와 같이 연결된 형태의 중성자·광자·전자의 수송을 위해 사용되는 다용도의 MonteCarlo N-Particle 코드이다. 주로 방사선 방호, 선량 측정, 방사선 차폐, 원자력 설계를 위한 핵 임계 안정성 등 방사성 동위원소를 사용하는 장소에서 이들의 거동을 연구하기 위해 사용되고 있다.

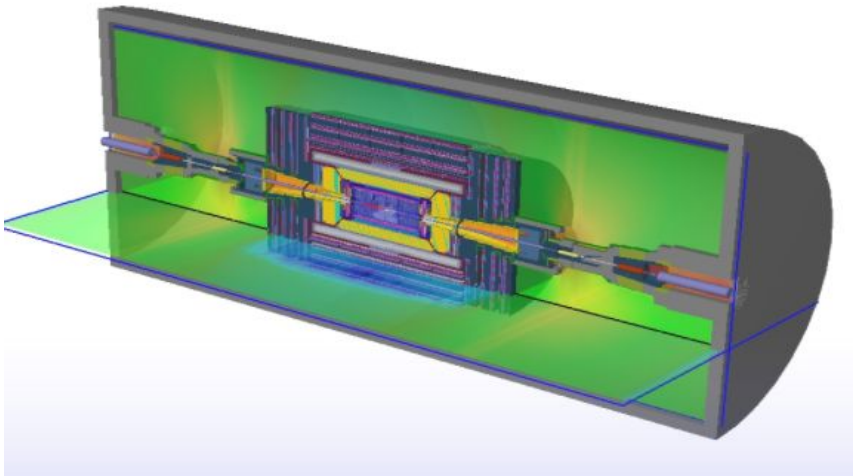


그림 11. Simple Geometry of MCNP

MCNP 코드에 포함되는 정보로는 문제 해결 대상과 동일한 형태의 기하학적 구조(Geometry Structure), 매질의 정보, 중성자·광자·전자 소스의 정보 및 위치, 탈리(Tally)의 종류, 효율성을 높이기 위해 사용되는 분산감소기법 등에 대한 정보가 Input 파일 안에 입력된다.

코드에 포함되는 정보는 크게 Cell Card, Surface Card, Data Card 영역으로 나눌 수 있다. Cell Card에는 셀의 밀도, Data Card에 입력된 원자번호(Atomic Number)와 비(Rate)를 지정한 번호, Cell 구성할 Surface의 조합이 입력된다. 밀도를 입력할 경우, 전자밀도를 입력할 시에는 양부호(+) 및 체적밀도를 입력할 시에는 음부호(-)를 사용한다. Cell Card의 조합이 잘못될 경우, 코딩실행이 안되

거나 계산도중 입자들이 사라지게 되어 올바른 Output Data를 얻을 수 없다. Surface Card에는 조합할 2차원의 면 또는 3차원 형태의 기하메트리를 제작한다. 실린더, 구, 정사각형, 직사각형 형태의 3차원을 비롯한 다양한 형태의 2차원 면들을 구현할 수 있다. 마지막으로 Data Card에는 계산할 입자의 타입(중성자, 광자, 전자)을 단일 또는 복수로 지정가능 하며 소스의 위치, 에너지, 크기 등을 비롯한 소스의 특징을 입력한다. 셀을 구성하는 원자번호와 셀을 구성하는 원자들의 비가 각 재질마다 번호를 부여하여 입력되고, 계산될 탈리(Tally) 번호와 계산 시간 또는 반복될 횟수 등이 입력된다. 그 외에 계산시간 감축을 위한 분산감소 기법, 셀의 가중치, 에너지 범위 등 소스에 관련된 여러 변수 및 출력에 관여된 명령어들이 입력된다[12].

제5절 GEANT4

1. GEANT4 특징

GEANT4(GEometry ANd Tracking)는 C++를 기반으로 만들어진 범용적으로 사용 가능한 핵 및 입자 물리 전산모사를 수행하기 위한 툴킷이다. GEANT4는 1993년 CERN과 KEK에서 동시다발적으로 촉발된 Fortran을 기반으로 한 GEANT3의 후계 프로그램에 대한 요구를 받아 CERN DRDC(Detector Research and Development Committee)가 구성한 RD 프로젝트인 RD44에 의해 개발되기 시작했다. RD44는 유럽, 러시아, 일본, 캐나다, 미국을 아우르는 10여개의 실험에서 100여명의 과학자, 기술자들의 협업으로 이루어졌다. 여기에 참여하는 모든 팀은 CB(Collaboration Board)와 TSB(Technical Steering Board)로 이루어진 MoU(Memorandum of Understanding)을 구성하였으며, 이 MoU는 협업에 필요한 각종 리소스를 CU(Contribution Unit)라는 새로운 단위에 맞춰 계산했다. CB는 이렇게 계산된 리소스를 분배하는 역할을 했으며, TSB에서는 소프트웨어 개발 및 물리적 모형의 적용의 우선순위를 정하는 역할을 했으며, 이러한 개발의 감독 및 사용자 지원하고, 각종 개발팀의 관리자 및 전체 관리자를 임명했다. TSB의 대표는 2년마다 선거에 의해 CB에 의해 임명되었으며, 이 대표자는 CB에 개발 상황에 대해 보고하도록 했다. 이러한 구성을 통해 소프트웨어의 개발이 세계적인 협업을 통해 평행 진행될 수 있었으며, 1998년 12월 GEANT4의 첫 버전을 발표할 수 있게 됐다.

GEANT4의 가장 큰 특징은 C++의 객체지향 철학을 잘 따른 설계이며, 이를 위하여 각각의 기능별로 코드를 구현하여 각각의 필요한 기능만을 이용할 수 있게 했고, 이를 상속받아 필요한 다른 기능을 추가할 수 있는 확장성을 가질 수 있게 되었다. 구현된 기능들은 전산모사를 위한 구조체를 관리하는 기하 및 물질, 물체와 입자의 상호작용, 입자의 추적, 수치화 및 상호작용한 점의 관리, 사건과 경로의 관리, 시각화 및 유저 인터페이스로 입자 물리학의 전산모사를 위해 필요한 대부분의 기능을 구현했다. 물리적인 계산은 대부분의 물리 모델을 이용할 수 있도록 만들어졌으며, 실제 실험에서 얻은 데이터 결과를 통하여 그 정확도를 높일 수 있게 만들어졌다.

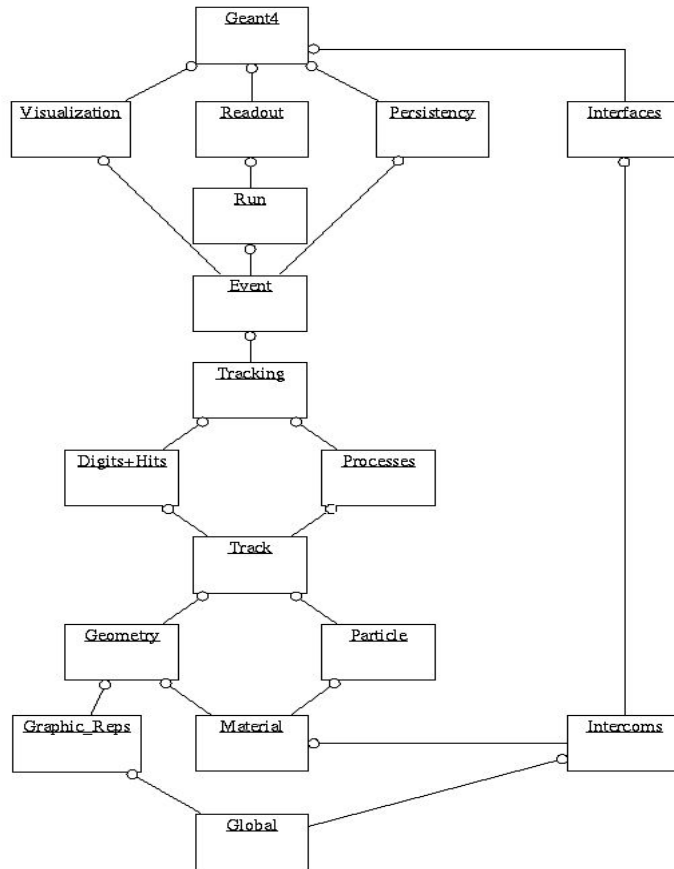


그림 12. GEANT4 전산모사 클래스 구조[13]

GEANT4의 기본적인 전산모사 구조는 위와 같다. GEANT4는 기본적으로 Main 함수에서 G4RunManager를 호출하여 프로그램의 모체로써 사용하게 된다. G4RunManager는 하나의 프로그램 당 하나가 실행되고 프로그램이 끝날 때까지 유지되는 싱글톤 패턴으로 불려나오게 되며, 그 안에 전산모사의 각 단계를 나타내는 상수화 된 클래스들인 G4Run, G4Event, G4Step을 생성하여 사용하게 된다.

2. GEANT4 전산모사 단계

Run은 프로그램 내에서 하나의 명령을 내린 후 그것이 끝날 때까지의 시점을

말하며, 한번의 Run에서 10번의 시뮬레이션을 돌렸다면 10개의 Event가 생성되었다고 말한다. 한 Event에서 몇 개의 입자를 시뮬레이션 할지는 사용자가 어떻게 프로그램을 만드는지에 따라 다르다. 한 Event에 하나의 초기 입자만 시뮬레이션 할 수도 있고 여러 개의 초기 입자를 시뮬레이션 할 수도 있다.

Event는 트랙 시뮬레이션의 묶음이다. 사용자가 여러 개의 초기 입자로 시뮬레이션을 했다고 해서 그 입자들을 동시에 시뮬레이션을 하는 것이 아니다. GEANT4에서 서로 다른 입자에 대한 시뮬레이션은 서로 독립적이다. 여기서 서로 다른 입자란 물리적으로 다른 입자가 아니라 사용자가 생성하거나 시뮬레이션 상에서 만들어진 모든 입자를 말한다. 따라서 하나의 Event에서 두개의 초기 입자를 시뮬레이션을 수행한 결과와 두개의 Event에서 각각 하나의 초기 입자를 시뮬레이션을 수행한 결과는 다르지 않다. 하나의 Event에 정의한 초기 입자의 개수는 편의상의 문제일 뿐이다.

Track이란 입자의 궤적을 의미한다. 시뮬레이션을 시작하면 입자에서 마지막 입자를 가져와서 Track을 시작하고 입자가 사라지거나 세계 밖으로 나가면 Track이 끝난다. 이렇게 Track이 시작되고 끝나는 작업을 Tracking이라고 한다.

Tracking은 컴퓨터로 계산하는 과정의 일부이기 때문에 그 과정이 불연속적이다. 따라서 시뮬레이션을 설계할 때 Track을 어느 정도로 세밀하게 보고 싶은지 정하는 것이 매우 중요하다. Tracking이란 세밀해 질수록 계산은 오래 걸리지만 더 많고 자세하게 결과를 볼 수 있다.

Step은 Track의 하위 개념이다. 하나의 Step은 3차원 상의 두개의 점으로 이루어지며 그 두 점 사이에서 어떤 일이 일어났는지, 얼마만큼의 에너지를 잃었는지, 어느 방향으로 바뀌었는지 등의 정보를 가지고 있다. 또한 스텝은 두개의 점, Pre Step Point와 Post Step Point로 이루어진다.

제6절 몬테칼로 코드 비교

다음 표 5는 주요 MonteCarlo인 EGS, ITS, MCNP, GEANT4 코드들의 특성을 나타내는 인자들을 항목별로 분석한 결과이다.

표 5. MonteCarlo 코드 분석

Parameters	General Purpose Codes			
	EGS4	MCNP	ITS	GEANT4
Accuracy Interactions:				
-Photoelectric	Yes	Yes	Yes	Yes
-Compton scatter	Yes	Yes	Yes	Yes
-Coherent scatter	Yes	Yes	Yes	Yes
-Non-collinearity	Yes	Yes	Yes	Yes
-Positron range	Yes	Yes	Yes	Yes
Components:				
-Crystal	Yes	Yes	Yes	Yes
-Collimator	Yes	Yes	Yes	Yes
-Septa	Yes	Yes	Yes	Yes
Validation:				
-Geometry based	Yes	Yes	Yes	Yes
-Voxel based	No	Not directly	?	No
Detectors:				
-Plane	Yes	Yes	Yes	Yes
-Ring	Yes	Yes	Yes	Yes
-Single-unit	Yes	Yes	Yes	Yes
Configuration:				
-2D emission	No	Yes	Yes	No
-3D emission	No	Yes	Yes	No
-Transmission	No	Yes	Yes	No
Data:				
-Energy spectra	Yes	Yes	Yes	Yes
-Unscattered	Yes	Yes	Yes	Yes
-Scattered	Yes	Yes	Yes	Yes
-Singles	Yes	Yes	Yes	Yes
Efficiency:				
-Variance reduction	No	Yes	?	No
-Parallelization	No	Yes	?	No
Easy of use:				
-Familiar language	Fortran	Fortran 77+C	Fortran	C and C++
-Public domain	Yes	Yes	Yes	Not ally

제4장 방사능 측정기술을 이용한 코드 비교 분석

제1절 방사능 측정 위치 선정

고리 1호기 1차 계통제염 대상은 다음과 같이 원자로 용기, 증기 발생기, 가압기, 화학 및 체적 제어 계통 및 주요 배관 등으로 예상하고 있으나, 제염 공정 또는 유량 형성 등 조건에 따라 변경될 수 있다[14].

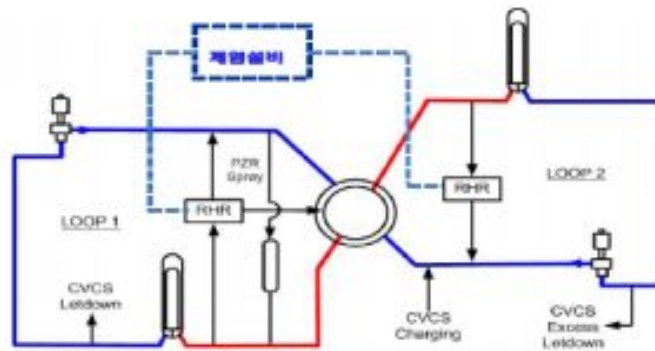


그림 13. Kori #1 Plant Decontamination Loops

측정 지점의 우선순위 선정과 관련하여, EPRI 발행한 보고서에서 권고하는 측정 지점을 바탕으로 선정 하였으며, 권고하는 측정지점은 세가지로 나뉜다[15]. 필수 측정 지점은 계통제염 성능을 확인하기 위해 데이터를 확인해야 하는 지점이며, 추천 측정 지점은 필수는 아니지만, 작업자 안전과 접근성 등에 영향을 미칠 경우에 측정을 수행한다. 그리고 선택적 측정 지점은 측정 정보의 이용 필요성에 따라 선택적으로 측정하는 지점이다. 측정 지점은 작업자에 대한 안전과 ALARA 이행 등 여러 측면을 고려하여 정할 수 있다.

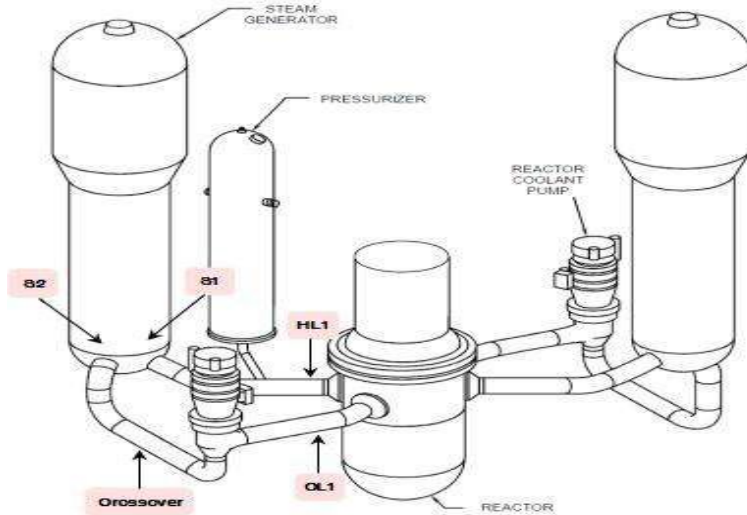


그림 14. 고리 1호기 원자로 냉각재계통 Loop 개략도

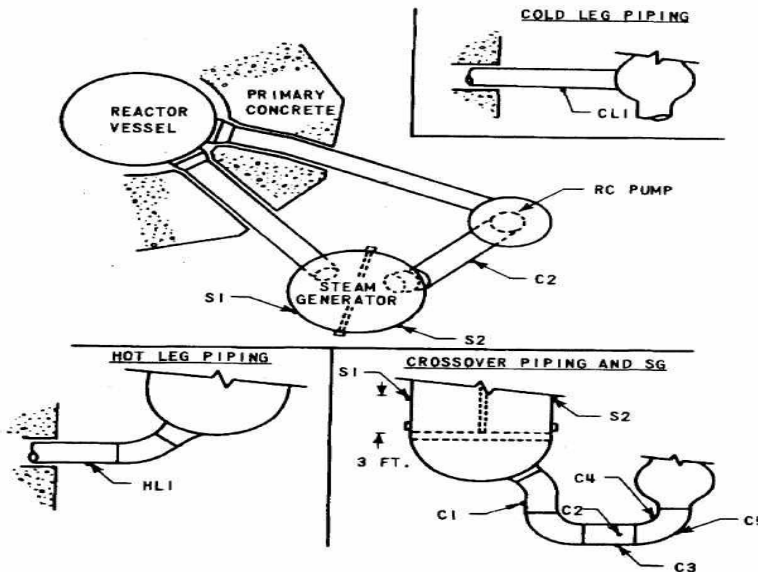


그림 15. 원자로 냉각재계통 Loop의 방사선량률 측정 지점

2016년 6월 계획예방정비기간에 원자로 냉각재계통의 주요 기기에 대한 방사선원 분포도를 분석하기 위하여 7월 5일부터 7일까지 ISOCS로 직접 측정 방법으로 원자로 냉각재 계통의 주요 기기인 S/G 수실, U-tube, RCP Seal에 대한 방

사능 측정을 수행하였다.



그림 16. ISOCS를 이용한 기기 측정 장면

다음 표 6, 7은 1차계통 주요 기기의 방사능 측정을 수행한 값을 나타낸 것이다.

표 6. S/G 수실 및 U-tube의 방사능 농도[Bq/m³]

검출핵종	S/G A 수실	S/G B 수실	S/G A U-tube	S/G B U-tube
Cr-51	N/D	-	N/D	N/D
Mn-54	7.13E+10	-	6.70E+09	2.52E+10
Co-58	9.90E+11	-	1.71E+11	4.99E+11
Fe-59	1.33E+10	-	1.95E+09	5.82E+09
Co-60	5.20E+11	-	1.82E+11	2.67E+11
Zn-65	7.05E+10	-	9.47E+10	1.63E+10
Nb-95	3.37E+10	-	2.38E+10	3.50E+10
Zr-95	N/D	-	N/D	N/D
Ag-110m	N/D	-	N/D	N/D
Sb-124	8.54E+10	-	7.98E+08	8.52E+08
Sb-125	N/D	-	N/D	N/D

표 7. RCP Seal 및 RHR 배관 방사능 농도[Bq/m³]

검출핵종	RCP A Seal	RCP B Seal	RHR A 배관	RHR B 배관
Cr-51	N/D	N/D	1.35E+08	1.36E+08
Mn-54	2.37E+09	2.33E+09	1.34E+07	1.24E+07
Co-58	4.15E+10	3.40E+10	1.71E+08	2.22E+08
Fe-59	8.45E+08	7.74E+08	3.76E+07	4.76E+07
Co-60	2.46E+10	2.72E+10	1.13E+09	8.23E+08
Zn-65	2.35E+09	3.62E+09	1.84E+07	2.09E+07
Nb-95	1.30E+09	1.04E+09	2.92E+07	2.97E+07
Zr-95	N/D	N/D	6.28E+06	N/D
Ag-110m	N/D	1.86E+10	2.11E+08	6.69E+07
Sb-124	N/D	4.62E+09	1.23E+08	3.59E+08
Sb-125	N/D	N/D	1.32E+08	1.61E+08

제2절 GEANT4 모델링을 통한 측정값 분석

ISOCS와 측정값 비교를 위해 GEANT4 코드를 선정하여 모델링 통한 비교를 수행하였다. GEANT4는 복잡한 구조의 시뮬레이션 능력과 정밀한 물리과정의 적용, 민감성을 가진 검출 영역의 적용에 용이성을 가지고 있다. 또한 오픈 소스로 폭넓은 사용자를 확보하여 처음 활용 목적이었던 고에너지 물리 연구 분야에서 천체물리, 의료, 핵물리, 방사선 방호 등의 영역에서 사용되고 있다. GEANT4는 Linux에서 개발이 이루어지고, Windows에서 사용할 경우 사용자가 원치 않는 방향으로 계산될 가능성이 있다. 이러한 이유로 CERN, SLAC 등 개발자 그룹에서도 Linux 사용을 권장한다.

World Volume의 크기는 S/G 수실 및 RCP Seal은 20m^3 의 정육면체를 만들었고, U-tube는 한 개의 크기가 작아 5m^3 의 정육면체를 만들었으며, World Volume의 내부는 Air로 설정해주었다. 실린더 모양의 배관 내부에서의 선원을 발생시키고 추적하고 World Volume을 벗어나면 추적을 종료하게 된다. 본 논문에서는 고리 1호기 내 측정값을 비교하기 위해 RHR배관을 제외한 RCP Seal과 U-tube를 실린더 형태, S/G 수실은 구 형태로 모델링을 수행하였다. S/G 수실은 SA508 Gr.2, U-tube는 I-690, RCP Seal은 STS304의 재질을 각각 설정해 주었다.

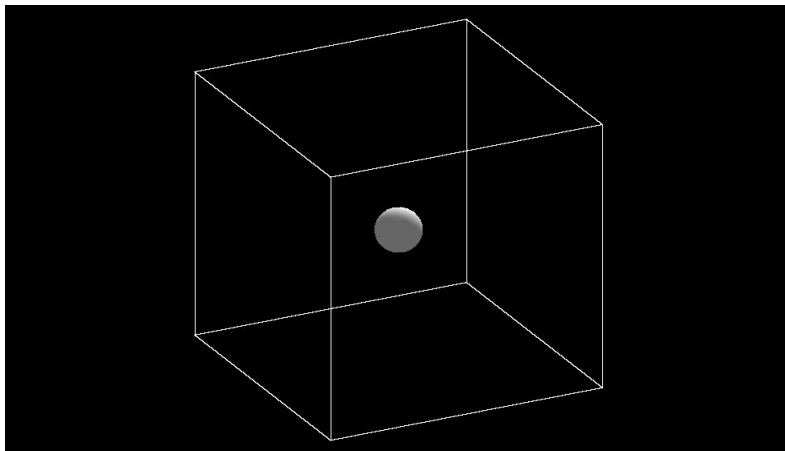


그림 17. S/G 수실 모델링

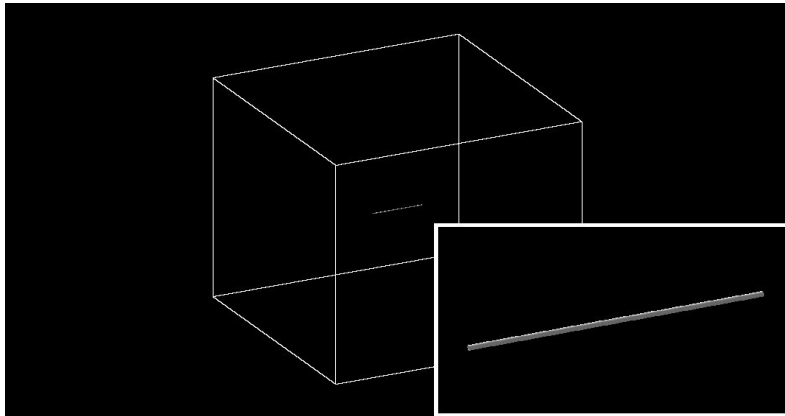


그림 18. U-tube 모델링

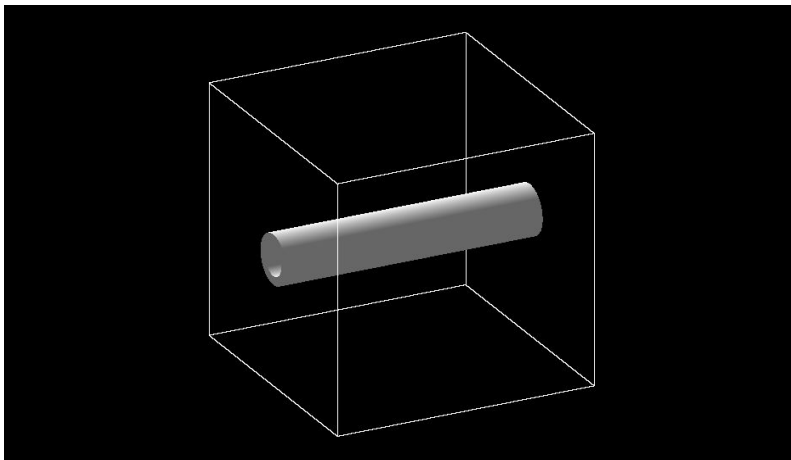


그림 19. RCP Seal 모델링

그리고 ISOCS의 Collimator를 모사하기 위해 GEANT4에서 20cm^2 의 면을 갖는 정육면체를 만들어 주었다. 그리고 ISOCS의 배관 측정 시 거리만큼 배관에서 거리를 설정해 주었으며, 각각 S/G 수실은 563cm, U-tube는 36cm, RCP 밀봉장치는 130cm 떨어진 곳에 각각의 Collimator를 설정해주었다.

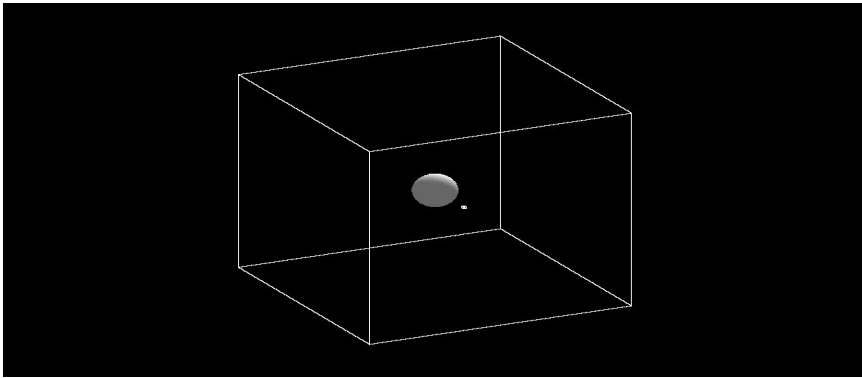


그림 20. S/G 수실 선원 측정을 위한 Collimator 설정

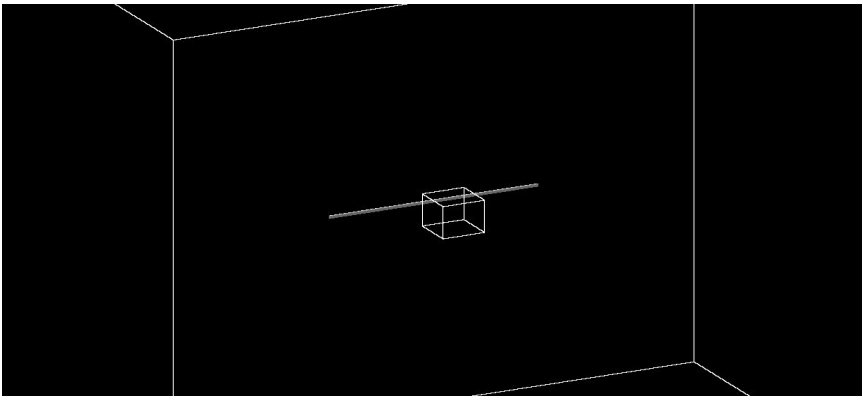


그림 21. U-tube 선원 측정을 위한 Collimator 모사(확대)

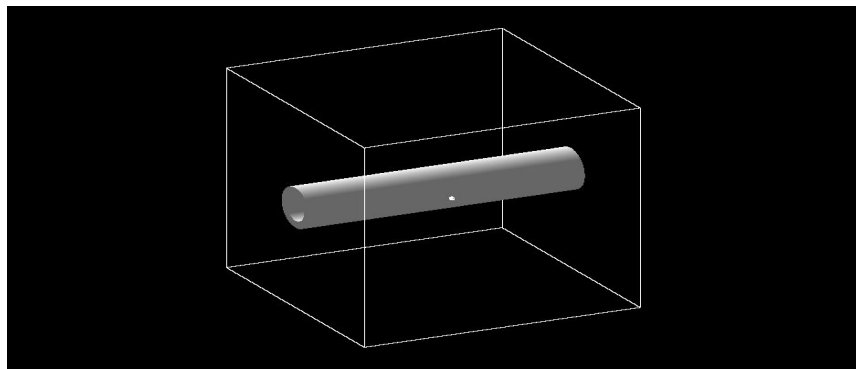


그림 22. RCP Seal 선원 측정을 위한 Collimator 모사

이후 측정된 검출 핵종들을 발생시키기 위하여 Macro 파일에 원자번호, 발생 지점, 진행 방향 및 선원 발생량 등을 설정해주었다. 시뮬레이션은 Co-58, Co-60, Mn-54, Zn-65, Nb-95, Sb-124의 선원을 선정하여 각각의 측정 결과 값을 비교 하였으며, 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해 선원 발생량을 50000개를 발생시켰다.

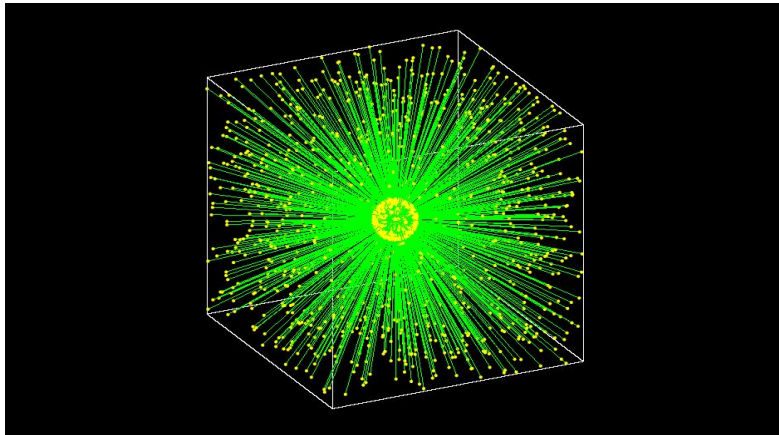


그림 23. 선원을 발생시킨 시뮬레이션 결과(S/G 수실)

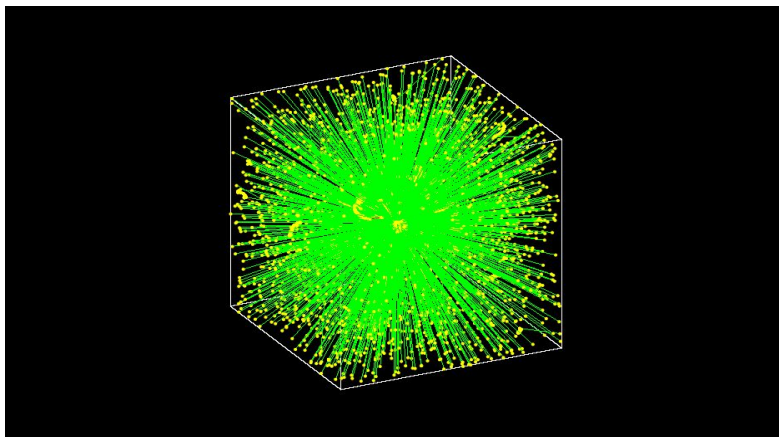


그림 24. 선원을 발생시킨 시뮬레이션 결과(U-tube)

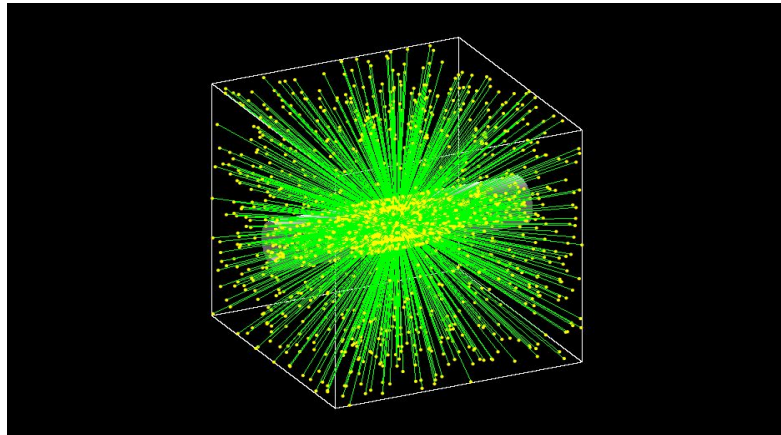


그림 25. 선원을 발생시킨 시뮬레이션 결과(RCP Seal)

위와 같이 선원 50000개를 발생시켰으며, 그림 26, 27, 28은 GEANT4로 모델링한 Collimator에 측정된 값과 ISOCS로 측정된 값을 각각 비교한 그래프이다.

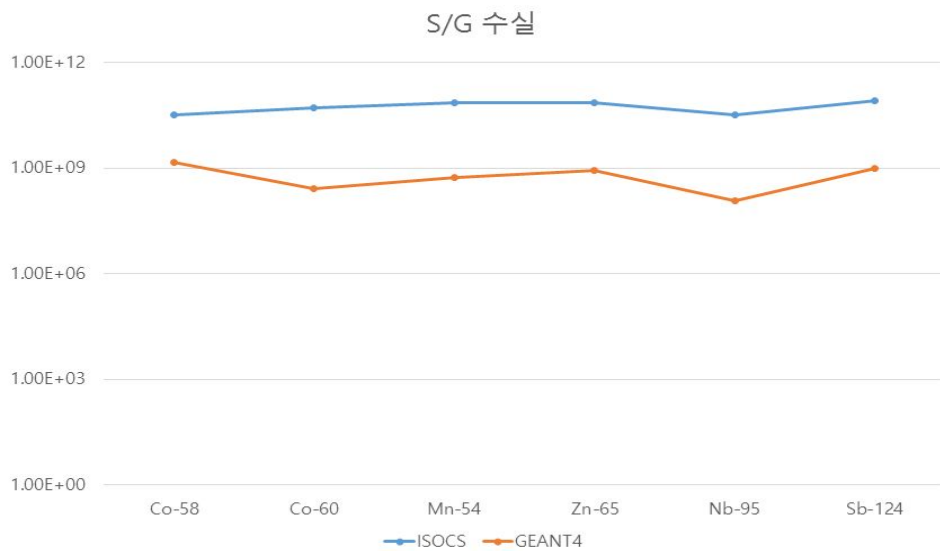


그림 26. S/G 수실 결과 값 비교

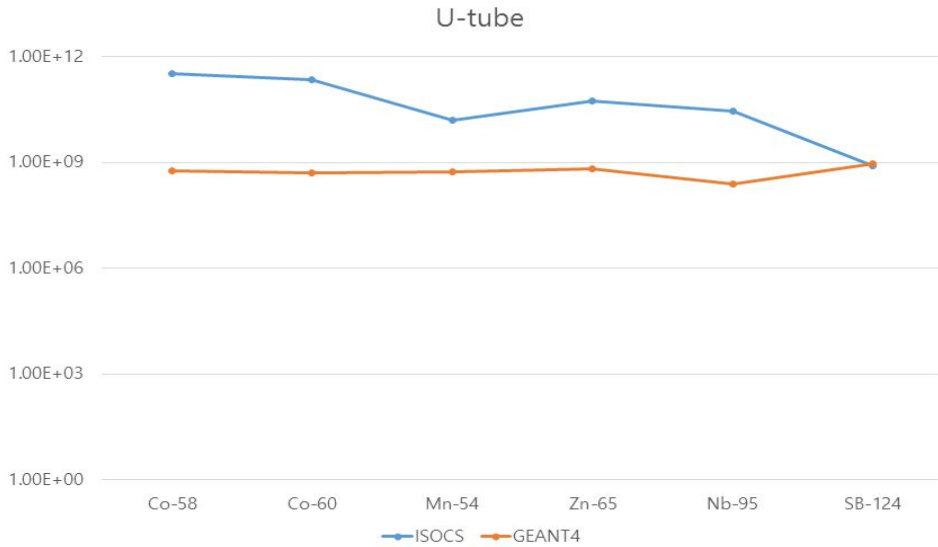


그림 27. U-tube 결과 값 비교

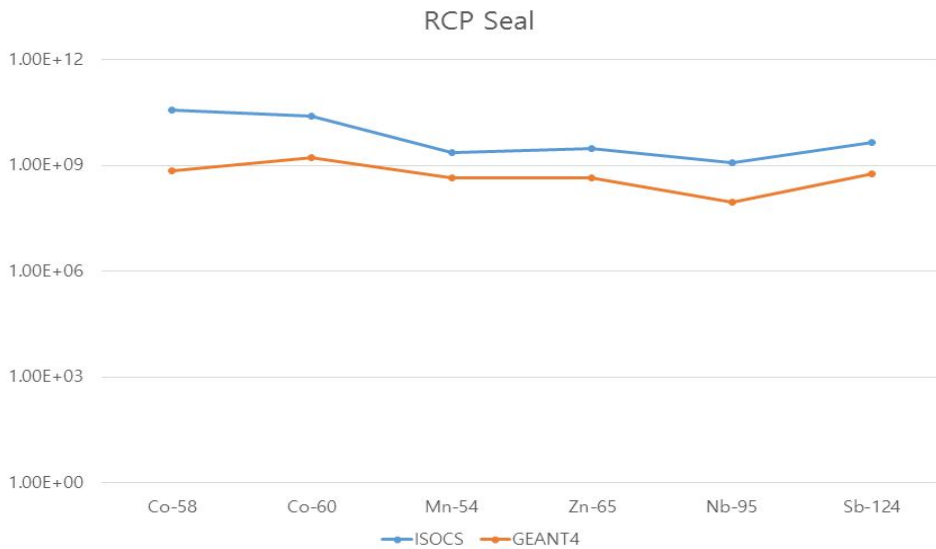


그림 28. RCP Seal 결과 값 비교

그래프는 비슷하거나 약 $1.0E^{+1} \sim 10^{+2} Bq$ 정도의 차이를 보였다. 오차에 대한 고려사항으로는 모델링하는 대상의 정밀화 정도, GEANT4 모델링을 통한 기기 모

텔링은 재질의 열처리 및 배관 성분비의 정확도, 그리고 배관 측정 시 거리의 오차 등이 있을 수 있다. 향후 모델링의 정밀화 및 배관의 성분비의 정확한 모델링을 통한 평가를 수행한다면 더 신뢰성 있는 결과 값을 얻을 수 있을 것으로 보인다.

제5장 결론 및 제안

2017년 고리 원전 1호기가 영구 정지되기 때문에, 상업용 원전 해체에 관한 기술력이 부족한 국내에서는 관련 기술 연구가 필요한 실정이다. 원전 해체 작업은 작업자의 안전과 고 방사능 지역의 평가가 확보 되어야 원전 해체 작업의 최적 효율을 이뤄낼 수 있다.

본 논문에서는 현재 사용되는 방사선·능 측정 기술에 대한 다양한 계측기들의 특성을 분석하였다. 또한 기기 및 배관을 직접 측정 하는 CZT, Gamma Camera, ISOCS에 대하여 알아보았으며 특징에 대하여 분석하였다. 그리고 현재 사용 가능한 MonteCarlo 코드인 EGS5, ITS, MCNP, GEANT4 코드의 특징을 파악하여 ISOCS를 통해 얻은 방사능 분포에 대한 사전 조사를 바탕으로 GEANT4와 결과 값 비교를 수행하였다. 고리 1호기의 S/G 수실, RCP Seal, U-tube를 모델링하여 측정값을 비교하였으며, Co-58, Co-60, Mn-54, Zn-65, Nb-95, Sb-124의 선원을 발생시켜 시뮬레이션을 진행하였다. 그 결과 비슷하거나 $1.0E^{+1} \sim 10^{+2} \text{Bq}$ 오차가 발생하였는데 오차를 줄이기 위한 고려사항으로는 모델링하는 대상의 정밀화 정도, 배관 성분비의 정확도, 그리고 배관 측정 시 거리 등을 고려할 수 있을 것으로 생각된다. 이를 바탕으로, 향후 정확도 및 적용성에 대하여 신뢰도를 높일 수 있고 이를 바탕으로 방사능 예측을 통해 원전 해체의 효율적인 작업을 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Massaut Vincent, Decontamination for Decommissioning Decontamination of Building and Nuclear Research Centre, SCK·CEN.
- [2] 김용균, 『방사선 계측기술 및 중성자 계측기 기술 개발 현황』, KAERI, 2002.
- [3] 강서곤, 강화운, 이병일, 김정인, 『ZT반도체 검출기를 이용한 국내 원전 내 선원량 분석』, Journal of Radiation Protection, Vol.39, No.1, March 2014.
- [4] 강제식 외, 『방사선 진단기기학』, 청구문화사, 2000.
- [5] 최진규, 『ISOCS V4.2 Calibration Software User Interface』, 2015.
- [6] 김형동, 『GEANT4 MonteCarlo 시뮬레이션을 이용한 환자 선량분포의 예측』, 2015.
- [7] Joao Seco Frank Verhaegen, 『Monte Carlo Techniques in Radiation Therapy』.
- [8] H. Hirayama, Y. Namito, A. F. Bielajew, S. J. Wilderman, W. R. Nelson, 『The EGS5 code system』, SLAC Report No. 730. 2005.
- [9] 채진영, 『고순도게르마늄 검출장치의 특성과 EGS4 계산 결과의 비교』, 충북대학교, 1999.
- [10] 『ITS Version 6: The Integrated TIGER Series of Coupled Electron/Photon Monte Carlo Transport Codes.』, 2008.
- [11] Halblenib JA, Kensek RP, Valdez GD, Seltzer SM, Berger MJ, 『ITS : The Integrated TIGER Series of electron/photon transport codes-version 3.0』, 1992.
- [12] 원병호, 『MCNP를 이용한 밀도검층과 스펙트랄감마검층 수치모델링』, 2014.
- [13] 『Introduction to GEANT4, Geant4 Collaboration』, 2015.
- [14] 김종화, 이종철, 김상익, 서장수, 한경호, 전호민, 『1차계통 제염성능 검증을 위한 측정지점 선정 분석』, KRS, Vol.14, No.1, 2016.
- [15] EPRI, 『Application of the EPRI Standard Radiation Monitoring Program for PWR Radiation Field Reduction』, 1015119, 2007.