

## D-D 중성자 발생기의 설치 및 성능테스트

Installation of a D-D Type Neutron Generator  
and Its Performance Test

*KAERI*

한국원자력연구원

# 제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 2010년도 “핵물질계량 안전조치 기술개발” 과제의 “D-D 타입 중성자 발생기의 설치 및 성능테스트”에 관한 기술보고서로 제출합니다.

2010. 4.

주저자 : 안성규

공저자 : 김호동

박광준

박세환

송대용

신희성

엄성호

이태훈

정정환

주준식

한보영



KAERI

## 요 약 문

이 보고서는 “핵물질계량 안전조치 기술개발” 연구과제 수행과 관련하여 중성자 계수기 개발에 활용할 목적으로 중성자 발생기의 활용성 및 선정, 설치, 차폐해석, 기초 성능테스트 및 능동형 중성자 계수에의 활용에 대해 종합적으로 기술하고 있다. 대상 중성자 발생기는 프랑스 EADS SODERN 사의 GENIE16GT 모델로서, D-D 반응에 의한 2.5 MeV 중성자 최대 선속  $2 \times 10^6$  n/s, 80  $\mu$ A, 110 kV 급 중성자 발생기이다.

기초 성능 테스트 결과, 중성자 선속은 주 활용 조건인 20  $\mu$ A, 80 kV에서  $5.3 \times 10^5$  n/s 이상이며 최대 선속도 설계값에 해당하는 결과를 보였다. 기존에 개발한 피동형 중성자 동시계수 시스템을 이용하여, 외부 중성자 선원으로 중성자 발생기를 이용한 능동형 중성자 계수 시스템을 구축하고 성능을 평가하였다. 천연우라늄 산화물 분말( $UO_2$  powder) 시료에 대해 측정하여  $2.64$  cps/g- $^{235}U$  의 동시계수율이 측정되었다. 효율 측정 및 우라늄 대상 능동형 계수 실험값과 시뮬레이션 예측치를 비교분석한 결과, 공간적으로 방향에 따른 방출 중성자는 균일하지 않을 것으로 예측되었다.

중성자 계수기의 개발 및 성능평가를 위해 필요한 중성자 선원으로써, 중성자 발생기는 동위원소 선원에 비해 여러 가지 장점을 가진다. 대표적으로 동위원소 선원과 달리 발생기는 중성자의 발생을 조절할 수 있어 다양한 선속의 활용은 물론, 비 활용 시 방사선이 방출하지 않는 특성은 방사선 피폭 및 안전관리 측면에서 큰 장점을 가진다. 또한 펄스 모드는 지발 감마 및 지발 중성자를 활용한 기술 개발에 활용할 수 있다.

실험결과 중성자 발생기를 이용한 능동형 중성자계수 방법은 동위원소를 이용할 때보다 오차가 커, 이를 줄이기 위한 노력이 필요할 것으로 판단한다. 하지만 기초적인 중성자 계수기의 성능 테스트 및 능동형 비파괴 분석이 적용되어야 하는 목적에 따라 적정수준의 오차가 허용되는 상황 또는 피동형과 능동형 중성자계수 혹은 감마분광 및 중성자 계수 기술이 동시에 적용되어야 하는 상황에서는 중성자 발생기를 활용할 수 있을 것으로 기대한다. 또한 중성자 발생을 조절할 수 있다는 장점을 활용한다면, 다양한 비파괴분석 방법과의 접목을 통해 사용후핵연료 처리공정에 대한 안전조치 기술의 범위를 확대할 수 있을 것으로 기대한다.

(공 백)



## Summary

This report describes a applicability of neutron generator to the development of neutron counters regarding with research project, "development of nuclear material accounting and safeguards technologies". Selection of the generator, installation, radiation shielding and dose evaluation of the operating area, and its basic performance test result are described in detail. The subject neutron generator is GENIE16GT model of EADS SODERN, France, and it is a D-D type generator with the maximum flux of  $2 \times 10^6$  n/s of 2.5 MeV neutron and operating range of 80  $\mu$ A and 110 kV.

Using previous developed well-type neutron counters, we performed tests for the basic feature of the generator and active neutron counting test for natural uranium oxide powder samples. Test result showed the neutron flux was more than  $5.3 \times 10^5$  n/s at 20  $\mu$ A, 80 kV of operating setup and the maximum flux as high as equipment design value. Regarding with application on active neutron coincidence counting, the average specific coincident counts rate was 2.64 cps/g-<sup>235</sup>U in the range of 0.5 - 3.5 kg natural uranium oxide ( up to 21.7g of <sup>235</sup>U). Based on evaluation of the experimental results and simulation results, the angular distribution of the emitted neutrons from the generator is not isotropic.

A neutron generator has several advantages over a radioisotope neutron source for development and performance test of neutron counting equipments. One of the important advantages is that it can control the emission. No emission of the turned-off neutron source is of importance in the view point of radiation safety, as well as its applicability of variable flux. Pulse mode emission is also applicable to develop the non-destructive technology based on delayed gamma rays or delayed neutrons.

The experimental results showed larger error for the case of neutron generator as an interrogation source than the case of isotope source, and there should be more efforts to reduce the error. We expect, however, the generator would be highly applicable to basic performance test of neutron counters for nuclear materials, to the situation in which radioisotope

neutron source is not preferred, to the active neutron counting system whose measurement uncertainty for acceptance level is reasonably high, or to the situation in which the integrated system of passive/active neutron and gamma counting is needed. And, if we maximize its advantages of control the neutron emission, the safeguards techniques for a spent fuel management process will be expanded and have a high confidence by combining with other conventional non-destructive assay methods.



# Contents

Summary (Korean) .....	1
Summary .....	3
Contents .....	5
Contents (Korean) .....	6
I. Introduction .....	11
II. Main Body .....	13
1. Basic Principle of Neutron Generator .....	13
2. Applicability of Neutron Generator .....	16
3. Active Neutron Coincidence Counting .....	20
4. Installation of Neutron Generator and Laboratory .....	23
5. Evaluation of Radiation Shielding and Dose .....	31
6. Basic Test Experiments of Neutron Generator .....	49
7. Active Neutron Counting Test for Uranium Sample Using the Generator .....	56
8. Maintenance and Trouble Shooting of the Generator .....	60
III. Conclusion and Discussion .....	63
References .....	65
Annex .....	67

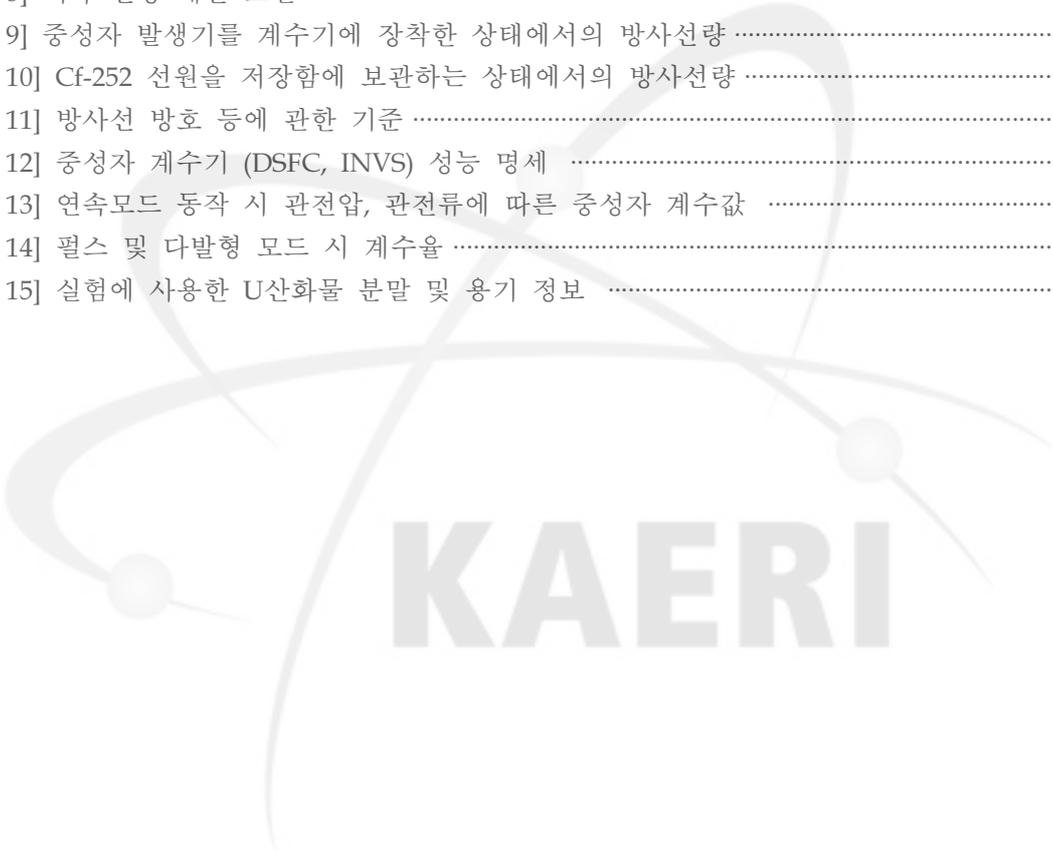
# 목 차

요 약 문 .....	1
Summary .....	3
Contents .....	5
목 차 .....	6
I. 서 론 .....	11
II. 본 론 .....	13
1. 중성자 발생기의 원리 .....	13
1.1. 발생 원리 .....	13
1.2. 방향에 따른 중성자 에너지 및 방출율 .....	13
2. 중성자 발생기의 활용 .....	16
2.1. 능동형/피동형 중성자 계수기의 성능 검증 .....	16
2.2. 능동형 중성자 계수기의 핵분열 유도 .....	17
2.3. 펄스 모드의 편리성 .....	17
2.4. On/Off 스위치의 효용 .....	18
2.5. 최소 측정량 예측 .....	18
2.6. 결론 .....	18
3. 능동형 중성자 동시계수 기술 .....	20
3.1. 능동형 중성자 계수 기본 원리 .....	20
3.2. 중성자 발생기를 이용한 능동형 중성자 계수 .....	21
4. 중성자 발생기 실험실 구성 .....	23
4.1. 중성자 발생기 설치 .....	23
4.1.1. 중성자 발생기 선정 및 구매 .....	23
4.1.2. 중성자 발생기 제원 .....	23
4.1.3. 중성자 발생기 설치 .....	27
4.1.4. 구동 소프트웨어 설치 방법 .....	28
4.1.5. SF6 가스 주입 방법 .....	29
5. 중성자 발생기 실험실의 차폐 및 안전해석 .....	31
5.1. 설치 시설 개요 .....	31
5.2. 시설 주변의 환경 .....	33
5.3. 운영 계획 .....	33
5.4. 차폐 해석을 위한 선원의 제원 및 특성 .....	34
5.5. 안전시설 및 계통 개요 .....	34
5.5.1. 차폐 .....	34
5.5.2. 시설안전장치 .....	37
5.6. 방사선 취급방법 및 방사선안전관리 계획 .....	37
5.6.1. 방사선 사용방법 .....	37

5.6.2. 방사선안전관리 계획 .....	37
5.7. 예상 피폭선량의 평가절차·방법 및 결과 .....	39
5.7.1. 실험계획 및 능동형 중성자 측정실험실 설계 .....	40
5.7.2. 계산 Tool .....	40
5.7.3. 가정 및 계산모델 .....	40
5.7.3.1. 중성자 계수기에 장전된 중성자 발생기 .....	40
5.7.3.2. Cf-252 저장함 .....	43
5.7.4. 차폐해석 방법 및 예비계산 .....	44
5.7.5. 중성자 발생기에 의한 예산피폭선량 산출 .....	45
5.7.6. D-D 핵반응에 의한 삼중수소 발생량 추산 .....	47
5.8. 사고위험 및 대책 .....	48
5.8.1. 사고예측 .....	48
5.8.2. 사고대책 .....	48
6. 중성자 발생 시험 .....	49
6.1. 실험 방법 .....	49
6.2. 중성자 방출율 결과 .....	49
6.3. 발생 중성자의 시간 상관성 .....	54
6.4. 결론 .....	54
7. 중성자 발생기를 이용한 우라늄 시료 능동형 동시계수 측정 실험 .....	56
7.1. 능동형 계수 시스템 구성 .....	56
7.2. 중성자 발생기를 이용한 측정 결과 .....	58
8. 중성자 발생기 유지보수 및 문제 해결 .....	60
8.1. 유지 보수 .....	60
8.2. 활용 경험을 통한 문제점 및 해결방안 .....	60
8.2.1. 재가동 시 지연시간 문제 .....	60
8.2.2. 가동 시작 직후 고전압 인가모듈 정지에 따른 발생 불가 문제 .....	61
8.3. 중성자 발생기 제작사에 문의사항 답변 .....	62
III. 결론 및 토의 .....	63
참고문헌 .....	65
[부록 1] 기기관리위원회 심의요청서 .....	67
[부록 2] 프랑스외무부 허가용 첨부자료 (중성자 발생기 필요성) .....	71
[부록 3] 발생기 구동장치 및 차폐시설 제작 설치 시방서 .....	79
[부록 4] 중성자 발생기 안전매뉴얼 .....	87
[부록 5] 차폐해석 MCNP 입력파일 예제 .....	91
[부록 6] 중성자 발생기 재가동 시 지연 현상 .....	95
[부록 7] 중성자 발생기 재가동 시 지연 현상 제작사 상의 서신 .....	99
[부록 8] 중성자 발생기 소프트웨어 업데이트 시 설정 변경 .....	113
[부록 9] 중성자 발생기 제작사에 문의사항 답변 .....	117

## 표 목 차

[표 1] D-T 중성자의 방향에 따른 에너지 .....	14
[표 2] 150keV 중수소에 의한 D-T 중성자의 방향에 따른 방출율 .....	14
[표 3] 150keV 중수소에 의한 D-D 중성자의 방향에 따른 에너지 .....	15
[표 4] 중성자 발생기와 동위원소 선원(Cf-252)의 비교 .....	19
[표 5] 국내 중성자 발생기 이용 현황 (2007년 현재) .....	25
[표 6] SODERN 사 중성자 발생기 보유, 이용 기관 .....	26
[표 7] 방사선량 측정 장비 .....	39
[표 8] 피폭 선량 계산 모델 .....	43
[표 9] 중성자 발생기를 계수기에 장착한 상태에서의 방사선량 .....	46
[표 10] Cf-252 선원을 저장함에 보관하는 상태에서의 방사선량 .....	46
[표 11] 방사선 방호 등에 관한 기준 .....	47
[표 12] 중성자 계수기 (DSFC, INVS) 성능 명세 .....	50
[표 13] 연속모드 동작 시 관전압, 관전류에 따른 중성자 계수값 .....	53
[표 14] 펄스 및 다발형 모드 시 계수율 .....	54
[표 15] 실험에 사용한 U산화물 분말 및 용기 정보 .....	57

The logo for KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) is centered on the page. It features a stylized atomic symbol with three orbiting electrons and the word "KAERI" in a bold, sans-serif font below it.

KAERI

## 그림 목 차

[그림 1] 150keV 중수소에 의한 D-D 중성자의 방향에 따른 방출율 .....	15
[그림 2] 중성자 에너지에 따른 U과 Pu의 핵분열 단면적 .....	21
[그림 3] 능동형 중성자 계수 장치의 구성 예 .....	22
[그림 4] 중성자 발생기 튜브 고정 장치 .....	27
[그림 5] 중성자 발생기 튜브 및 모듈레이터 구조 .....	28
[그림 6] 설치된 중성자 발생기 모듈 모습 .....	28
[그림 7] 능동형 중성자 측정실험실의 위치 및 주변 환경. ....	31
[그림 8] 부품창고 도면 (평면도) .....	32
[그림 9] 부품창고 내 능동형 중성자 측정실험실의 배치 .....	33
[그림 10] 능동형 중성자 측정실험실 배치도 .....	35
[그림 11] 차폐체를 설치한 좌측과 뒷면의 창문 주변의 상황 .....	36
[그림 12] 계수기에 설치된 중성자 발생기 .....	36
[그림 13] 중성자 계수기와 중성자 발생기의 배치도 .....	37
[그림 14] 중성자 계수기에 장전된 중성자 발생기의 차폐계산 모델 .....	41
[그림 15] 중성자 발생기가 장전된 중성자계수기의 계산모델 .....	42
[그림 16] 중성자 발생기가 장전된 중성자 계수기와 좌측 및 뒤 벽면의 계산모델 .....	42
[그림 17] 동위원소 저장함의 제원 및 계산모델 .....	44
[그림 18] 동위원소 선원( <sup>252</sup> Cf) 저장함의 차폐해석 모델 .....	44
[그림 19] 중성자 발생기와 능동형 중성자계수기 .....	50
[그림 20] 중성자 발생기의 관전압에 따른 중성자 계수값 .....	51
[그림 21] 중성자 발생기의 관전류에 따른 중성자 계수값 .....	51
[그림 22] 펄스(pulse) 모드 시간변수 .....	53
[그림 23] 다발(burst) 모드 시간변수 .....	53
[그림 24] UO <sub>2</sub> 시료에 대한 실험도 및 장치 사진 .....	57
[그림 25] UO <sub>2</sub> 분말의 <sup>235</sup> U 양에 따른 동시계수율 측정결과 및 시뮬레이션 결과 .....	59

(공 백)



## I. 서 론

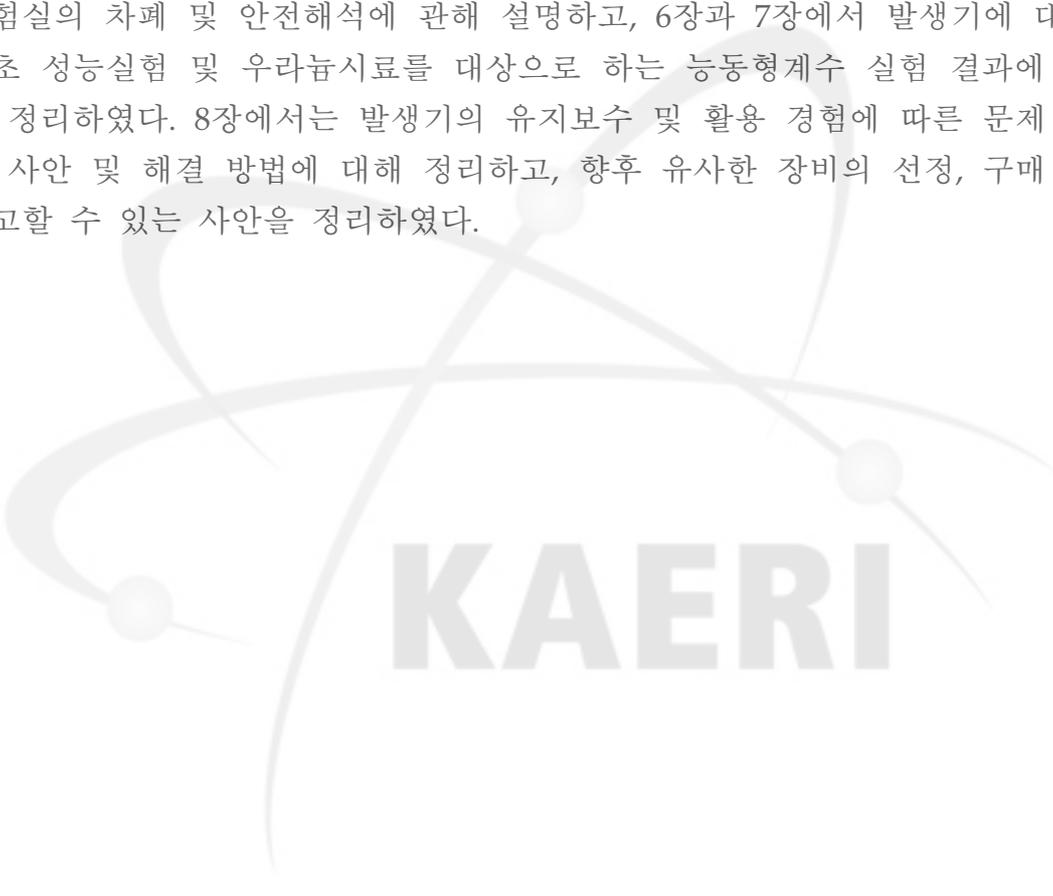
핵물질의 계량관리를 위해 적용하는 비파괴 분석법 중 감마 분광법과 함께 가장 널리 쓰이는 기술 중의 하나가 중성자 동시계수 방법이다. 기본적인 원리는 핵물질 동위원소의 자발핵분열에 의해 동시 다발적으로 방출되는 중성자들을 검출하여, 시간상관성을 가지는 중성자 계수율을 산출하고, 이를 바탕으로, 분석대상 물질 내 핵물질의 양을 규명하게 되는데, 이를 피동형 중성자 동시계수법이라 한다. 피동형 중성자 계수 방법은 플루토늄(Pu) 또는 큐륨(Cm)과 같이 자발핵분열률이 높은 동위원소를 가지는 핵종 분석에 널리 이용된다. 하지만 우라늄(U)과 같이 자발핵분열률이 극히 낮아 방출되는 중성자가 거의 없는 경우에는 적용하질 어렵다. 이 경우 가능한 방법 중의 하나가 능동형 중성자 계수이다. 대상물질의 외부로 부동시입사한 중성자가 핵분열성 물질의 유도핵분열을 일으키고, 이 때 발생하는 즉발 혹은 지발중성자를 계수하여 비파괴 분석한다. 능동형 중성자 비파괴 분석 방법 중 가장 대표적인 것은  $^{235}\text{U}$ 를 포함한 물질 분석을 위해 유도핵분열에 의한 즉발 중성자의 동시계수를 이용한 우물형 능동형 중성자 동시계수기(an active-well neutron coincidence counter - AWCC) 이다 [1].

한국원자력연구원은 사용후핵연료의 건식 재활용 기술 개발 연구와 더불어 이를 위한 안전조치 기술개발의 일환으로서 몇 가지 중성자 동시계수기를 개발해 왔다 [2-5]. 또한, 이러한 기술개발 경험을 바탕으로 사용후핵연료의 파이로 공정을 위한 안전조치 시스템 개발 연구의 일환으로, 파이로의 전해정련 공정을 통해 회수한 우라늄에 포함된  $^{235}\text{U}$ 를 측정할 수 있는 능동형 중성자 계수기에 대한 연구도 진행해 오고 있다.

중성자 측정 장비(계수기)의 개발을 위해서는 중성자 선원이 필요하다. 피동형 계수기 개발에 있어서는 계수효율, 효율의 공간 분포 균질도, 불감시간 계수, 감쇠시간(die-away time) 결정 등 기본 성능 테스트에 선원이 필요하다. 능동형 계수기 개발에는 유도핵분열을 일으키기 위한 외부 중성자 선원이 핵심 요소이다. 이러한 목적으로 활용할 수 있는 중성자 선원으로는 동위원소 선원과 중성자 발생기가 있다. 이 두 종류의 선원은 중성자 에너지, 시간상관성, 가용성, 반감기효과 등 서로 다른 특성을 가지고 있으며, 활용 목적에 따라 장단점으로 작용할 수 있다. 파이로 공정의 전해정련공정 핵물질 정량 측정 기술 개발 단계에서는 중성자 발생기가 필요할 것으로 판단하여, 이를 구축하고 기초 성능 테스트 및 능동형 중성자 계수기 연구에 활용하였

다.

본보고서는 이와 관련하여, 중성자 발생기의 선정, 설치, 기초 성능테스트 및 유지보수와 관련한 전반적인 사항을 기술하였다. 본론의 각 장에서는 앞서 언급한 사항에 대해 세부적으로 기술하였다. 1장에서는 중성자 발생기의 기본 원리 및 방출 중성자의 방향성에 대해 설명하고, 2장에서는 그 활용성에 관해 논의하였다. 3장에서는 본 연구에서 구축한 중성자 발생기를 활용하고자 하는 능동형 중성자계수에 대해 기술하고, 4장에서는 발생기의 선정, 구매, 설치와 관련한 사항을 기술하였다. 5장에 발생기를 가동하는데 필요한 실험실의 차폐 및 안전해석에 관해 설명하고, 6장과 7장에서 발생기에 대한 기초 성능실험 및 우라늄시료를 대상으로 하는 능동형계수 실험 결과에 대해 정리하였다. 8장에서는 발생기의 유지보수 및 활용 경험에 따른 문제 발생 사안 및 해결 방법에 대해 정리하고, 향후 유사한 장비의 선정, 구매 시 참고할 수 있는 사안을 정리하였다.

The logo for KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) is centered on the page. It features a stylized atomic symbol with three elliptical orbits and three small spheres representing protons and neutrons. Below the symbol, the word "KAERI" is written in a bold, sans-serif font.

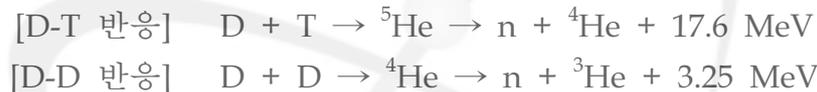
KAERI

## II. 본 론

### 1. 중성자 발생기의 원리

#### 1.1. 발생 원리

중성자 발생장치는 가속 입자와 타겟 입자에 따라 여러 가지 다양한 형태로 나눌 수 있다. 본 연구에서 대상으로 하는 중성자 발생기는 간단한 이온 가속 튜브와 타겟으로 구성된 튜브형 중성자 발생기로서, 중수소(Deuterium: D)를 고에너지로 가속하여 삼중수소(Tritium: T) 혹은 중수소 타겟과 충돌시켜 일어나는 핵반응에 의해 중성자를 방출하도록 설계된 장치이다. 관련한 핵반응은 다음과 같다.



D-T 반응에서는 D-T 충돌에 의해 매우 불안정한 여기상태의  ${}^5\text{He}$  핵으로 합쳐지고, 즉시 중성자를 방출하고  ${}^4\text{He}$ 로 변환되어 안정화 된다. 이 때 Q 값에 해당하는 에너지를 두 입자의 질량비에 따라 나누어 가지고 방출한다. D-T 반응에 의한 중성자는 14 MeV의 단일 에너지를 가진다. 비슷하게 D-D 반응에서는 불안정한 여기상태의  ${}^4\text{He}$ 가 생성되었다가 즉시 중성자를 방출하여  ${}^3\text{He}$ 로 안정화 되고, 이때 방출되는 중성자는 2.5 MeV의 단일 에너지를 가진다.

동일한 에너지로 가속된 중수소에 대해 D-T 중성자는 D-D 중성자에 비해 그 선속이 약 100 배 정도 크다. 따라서 D-T 중성자 발생기는 고에너지의 고선속 중성자원으로, D-D 중성자 발생기는 상대적으로 저에너지 중성자원으로 활용된다. 특히 D-D 중성자의 에너지는 일반적인 핵물질의 핵분열에 의한 중성자의 평균에너지( $\sim 2 \text{ MeV}$ )와 비슷하여 핵물질 계량을 목적으로 하는 중성자 계수기에 활용성이 높다.

#### 1.2. 방향에 따른 중성자 에너지 및 방출율

미리 언급하자면, 본 연구에서 수행한 방출율 추정 및 우라늄 샘플 대상 측정 실험, MCNPX 시뮬레이션 등은 중성자의 방출이 등방성을 가진다는 가정 아래 수행하였으며, 그 이유는 보유한 중성자 발생기에 대한 방향성 데이터가 없으며 측정을 통한 정량화가 어렵기 때문이다. 하지만 실제 중성자

발생기에서 방출되는 중성자는 등방(isotropic)적이지 않다. 방출 중성자의 에너지 또한 방향에 따라 약간씩 달라진다. 이러한 현상은 D-T 반응과 D-D 반응에 따라 그 영향도 달라진다. [표 1]과 [표 2]는 D-T 중성자의 방향에 따른 에너지 및 방출을 변화를 보여 준다 [6]. 에너지의 차이는 14 MeV를 중심으로 0.5 MeV 정도의 차이를 보이며, 방향에 따른 방출율도 직각방향으로는 약 6%, 반대 방향으로는 최대 13% 정도 차이를 보인다. 반면 D-D 중성자는 방향에 따른 영향이 훨씬 크다. [표 3]과 [그림 1]은 150 keV로 가속된 중수소에 의한 D-D 반응 중성자 방출 시 각도에 따른 방출율과 에너지의 변화를 보여 준다 [6]. 에너지 변화는 2.5 MeV를 중심으로 약 0.3 MeV 정도로 큰 차이를 보이지 않지만, 각도에 따른 방출율은 중수소 이온의 가속 방향 (0°)을 기준으로 최대 (가속 방향과 직각 방향) 60 %까지도 차이를 보일 수 있다.

[표 1] D-T 중성자의 방향에 따른 에너지

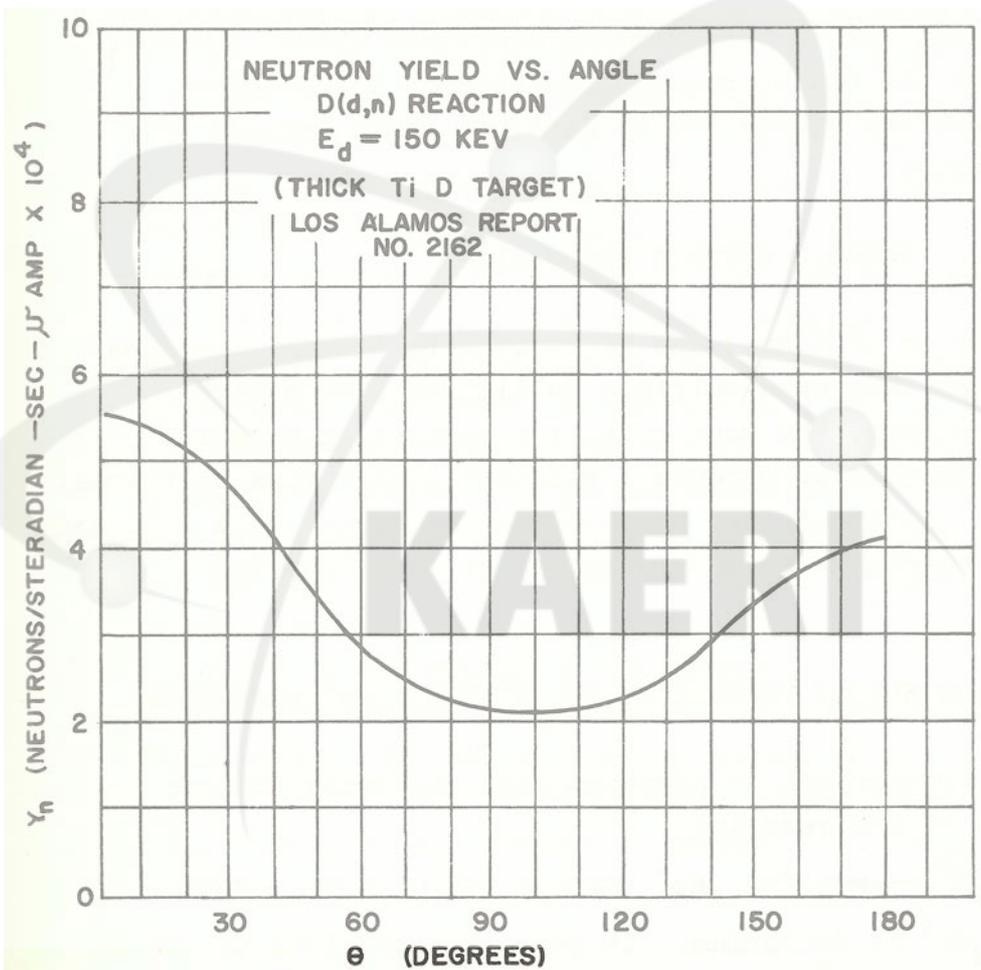
각도	중성자 에너지 (MeV)	
	중수소 에너지=100keV	중수소 에너지=150keV
0	14.64	14.74
15	14.62	14.72
30	14.56	14.65
45	14.46	14.54
60	14.35	14.40
75	14.21	14.23
90	14.06	14.06
105	13.91	13.89
120	13.78	13.73
135	13.65	13.61
150	13.56	13.51
165	13.52	13.44
180	13.49	13.42

[표 2] 150keV 중수소에 의한 D-T 중성자의 방향에 따른 방출율

각도	방출율
0	1.00
60	0.97
90	0.94
120	0.91
150	0.88
180	0.87

[표 3] 150keV 중수소에 의한 D-D 중성자의 방향에 따른 에너지

Degrees	Energy (MeV)
0	2.80
20	2.75
90	2.47
135	2.20



[그림 1] 150keV 중수소에 의한 D-D 중성자의 방향에 따른 방출율

## 2. 중성자 발생기의 활용

현재 개발하고자 하는 장비는 핵물질의 정량 측정 장비로서, 중성자 발생률이 높은 핵물질의 경우에는 수동형 중성자 측정을 사용하고, 우라늄과 같이 중성자 발생률이 낮은 핵물질은 중성자 능동형 측정을 사용할 계획이며, 이 두 가지를 모두 수행할 수 있는 능동/피동형 겸용 핵물질 측정 장비(중성자계수기)를 개발할 계획이다. 수동형 및 능동형 측정 장비 모두, 측정할 핵물질 시료에서 발생하는 중성자의 세기별로 성능을 검증해야 한다. 따라서 측정할 시료에서 발생하는 중성자 발생률과 동일한 발생률을 갖는 선원이 필요하다. 또한 능동형인 경우에는 핵분열을 유도하기 위한 중성자 선원이 필요하다.

### 2.1. 능동형/피동형 중성자 계수기의 성능 검증

중성자 계수기의 성능을 검증하기 위해서는, 측정할 핵물질시료와 유사한 중성자 에너지 및 중성자 세기(발생률)를 갖는 중성자 선원이 있으면 가장 이상적이다. 파이로 공정에서 취급하는 핵물질의 근원은 사용후핵연료이고, 형태가 변해도 중성자 발생원인 원소는 주로  $^{244}\text{Cm}$ 이며, 이 원소의 평균 중성자에너지는 2 MeV이고, 측정하는 시료의 양에 따라서 중성자 발생률은 변한다. PWR 사용후핵연료(14x14, 3.2 wt%, 35 GWd/MTU) 100 kg (HM-base)에서 10 년 정도 냉각된 경우에 중성자 발생률은 대략  $3 \times 10^6$  n/s 정도이다. 중성자 계수기에서 한 번에 최대 100 kg HM을 측정한다고 하면 이때 중성자 발생률은  $3 \times 10^6$  n/s이다. 따라서 2 MeV의 중성자를 발생하는 선원으로서,  $3 \times 10^6$  n/s 세기를 갖는 선원에서부터 매우 낮은 중성자 세기를 갖는 모든 중성자 선원을 확보하면 가장 이상적이다. 이는 경제적인 관점에서 보면 비현실적이며, 보통 최소한의 조건인, 낮은 발생률의 중성자 선원과 중간 정도, 그리고  $10^6$  n/s 정도 세기를 갖는 세 개 정도의 선원을 사용하여 검증한다.

중성자 에너지 관점에서 보면  $^{244}\text{Cm}$ 과 유사한 에너지 스펙트럼을 갖고 평균 에너지도 비슷한 동위원소 중성자 선원,  $^{252}\text{Cf}$ 를 구입하는 것이 최적이다. 그러나 중성자 세기가 다른 다수의  $^{252}\text{Cf}$  선원을 구입해야 하는 불리한 점이 있다. 본 연구에서 구입하고자 하는 중성자 발생기는 D-D 타입이고, 최대  $2 \times 10^6$  n/s의 세기를 낼 수 있기 때문에 이 이하의 모든 중성자 세기를 낼 수 있도록 조절 가능하여 편리하다. 단지 발생 중성자의 에너지가 2.5 MeV로  $^{244}\text{Cm}$ 의 2.0 MeV보다 약간 높기는 하지만, 큰 문제는 없을 것으로 판단된다.

## 2.2. 능동형 중성자 계수기의 핵분열 유도

능동형 측정에서는 중성자를 핵물질 시료에 조사하여 핵물질 내에 존재하는 핵분열물질( $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  등)의 핵분열을 유도하여 이때 발생하는 중성자를 측정함으로써, 시료 내에 존재하는 특수핵물질 (Special Nuclear Material : SNM)을 정량 측정한다. 일반적으로 사용하는 중성자 동시측정(neutron coincidence)에 의해서 정량측정을 할 경우에는, 자발적 핵분열에 의해서 중성자를 발생하는  $^{252}\text{Cf}$ 는 사용할 수 없다.  $^{252}\text{Cf}$ 를 사용하면 시료에서 발생한 중성자와  $^{252}\text{Cf}$ 에서 방출된 중성자를 구별할 수 없기 때문에 측정값의 불확도가 커지기 때문이다. 동위원소 선원으로는 (alpha, n) 반응에 의해서 중성자가 발생하는 AmLi이 가능하고, D-D의 핵융합에서 중성자가 발생하는 중성자 발생기도 사용 가능하다. AmLi은 공간을 적게 차지하고, 에너지가 0.5 MeV으로 낮아서 유리하지만, 중성자 발생기는 중성자 세기의 조절과 함께 펄스모드가 있어 보다 편리하다. 펄스모드의 편리성은 아래에서 설명한다.

## 2.3. 펄스 모드의 편리성

중성자 발생기는 펄스모드와 연속모드를 선택할 수가 있다. 연속모드를 선택하면 동위원소 선원과 유사하게 지속적으로 랜덤 중성자가 발생하고, 펄스모드를 선택하면, 실험자가 펄스간격까지 조절할 수 있게 된다. 펄스모드를 사용하여 중성자를 발생시키면, 중성자 동시측정(Neutron Coincidence)에서 선원에 의해 공급된 중성자와 핵물질 시료에서 발생하는 중성자가 확실하게 분리되어 검출기의 측정 정확도를 분명하게 확인할 수 있다. 다시 말해서, 시료에서 발생하는 자발적 혹은 유도 핵분열 중성자와 발생기에서 공급되는 중성자가 확실하게 구별됨으로 동위원소 선원을 사용했을 경우에 발생할 수 있는 불확도, 즉, 선원에서 공급된 중성자를 핵물질 시료에서 발생한 중성자로의 혼동으로 인하여 발생하는 불확도를 최소화할 수 있다. 또한 동일한 조건하에 펄스모드와 랜덤모드를 각각 사용하여 이와 같은 불확도의 정도를 실험적으로 확인할 수도 있을 것이다. 중성자 발생기를 펄스모드로 사용할 경우, 펄스의 간격을 조절함으로써, 유도핵분열로 발생하는 중성자의 세부적인 추적이 가능하다. 예를 들면, 발생기를 사용하여 펄스간격을 길게 해서 중성자 조사시키면서, 즉발중성자(prompt neutron)와 지연중성자(delayed neutron)를 구분하여 볼 수 있어, 이들이 검출기에 검출되는 과정은 심층적으로 분석할 수 있을 것이다.

## 2.4. On/Off 스위치의 효용

중성자 발생기는 사용하지 않을 때는 전원이 끄게 되면 중성자가 전혀 발생하지 않는다. 이는 실험자의 피폭을 방지하고, 실험의 효율성을 높일 수 있음은 자명한 사실이다. 얼른 생각하기에 큰 효과가 없을 것 같이 판단될 수도 있겠지만, 실제 상황에서 실험장치의 성능에까지도 영향을 미칠 것으로 예상된다. 개발단계에서는 빈번하게 실험조건과 검출기의 변경하면서 시험을 반복해야 하기 때문에, 중성자발생을 자유롭게 on/off할 수 있다는 것은 실험시간을 몇 배로 단축시킬 수 있다. 이는 단순히 실험시간의 단축으로 간주할 정도로 미미한 것이 아니고, 장비 개발 기간에 정해져 있는 상황에서는, 실험횟수에 영향을 미쳐 궁극적으로는 개발하는 장비의 성능에 영향을 미치게 될 것으로 판단한다.

## 2.5. 최소 측정량 예측

$^{252}\text{Cf}$  선원을 사용하여 중성자계수기의 감도를 측정할 수 있다. 세 가지 선원의 세기를 이용하여 세기별로 감도를 측정하게 되면, 이 점들을 연결하고 내삽 혹은 외삽을 통해 (interpolation & extrapolation) 전 영역에서의 감도를 결정할 수 있다. 그러나 실제 측정 장치들은 최소로 측정할 수 있는 범위가 있다. 즉, 어느 정도 이하의 중성자 세기에는 계수기가 전혀 반응을 하지 않는다. 이는 최소로 검출할 수 있는 검출기의 영역이 정해져 있기 때문이다. 이를 확인하기 위해서는 중성자선원의 세기를 낮추면서 측정해야 하는데, 이와 같은 일을 동위원소선원을 사용해서 수행하려면, 낮은 영역의 모든 세기를 갖는 중성자 선원이 필요하다. 이것은 경제적인 관점에서 비현실적이기 때문에, 가능하지 않고, 경험적으로 추측 혹은 타 기종과의 상호비교 등을 통하여 하는 수밖에 없을 것이다. 그러나 중성자 발생기를 사용하면 중성자세기를 감소시키면서 측정하면 이 문제는 간단히 해결된다.

## 2.6. 결론

중성자 발생기는 능동형/피동형 측정 장비의 성능검증에서는 여러 가지 세기를 갖는 다수의  $^{252}\text{Cf}$ 의 역할을 하고, 능동형 측정 장비에서는 핵분열을 유도하는 중성자를 발생시키는 AmLi의 역할을 하고, 최소측정범위를 결정하는데도 유용하게 사용될 수 있다. 동위원소 선원은 크기가 작기 때문에 완제품을 제작할 시에는 중성자 발생기보다 유리하지만, 측정 장비의 개발단계에서는 중성자 발생기가 훨씬 유리하다. 특히, 현재 세계적으로 그 기술이 개

발되지 않은 피어로 공정에서의 핵물질 정량 측정 장비 개발에 있어서는, 수많은 trial and error를 거쳐 피어로 공정에 적합한 측정 장비를 개발할 수밖에 없는 상황이므로, 개발단계에서는 중성자 발생기가 반드시 필요하다. 또한 중성자 발생기의 펄스모드는 핵물질 시료에 발생하는 중성자의 종류별 추적을 통한 중성자 검출의 심층 분석을 할 수 있어 개발되는 장비의 성능을 높일 수 있다. 앞서 언급한 대표적인 내용을 [표 4]에 정리하였다.

[표 4] 중성자 발생기와 동위원소 선원(Cf-252)의 비교

항 목	중성자 선원	
	중성자 발생기	<sup>252</sup> Cf or AmLi
중성자 발생	D-D 반응에 의한 중성자 발생	자발핵분열 혹은 (alpha, n) 반응에 의한 중성자 발생
On/Off	On/Off 가능	계속 방출
중성자 세기	조절 가능	고정
중성자 에너지	2.5 MeV	2.0 (Cf) or 0.5 (AmLi) MeV
종합 비교 평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>-비가동시 중성자가 발생하지 않고, 세기의 조절이 가능하여 계량장비 개발에 적합함</li> <li>-펄스 모드 작동을 사용하여, 중성자 핵반응을 심층추적 가능함</li> <li>-여러 가지 세기의 검증용(<sup>252</sup>Cf) 선원과 유도핵분열용(AmLi) 선원을 대신함 → 실험 효율 증대</li> </ul>	

### 3. 능동형 중성자 동시계수 기술

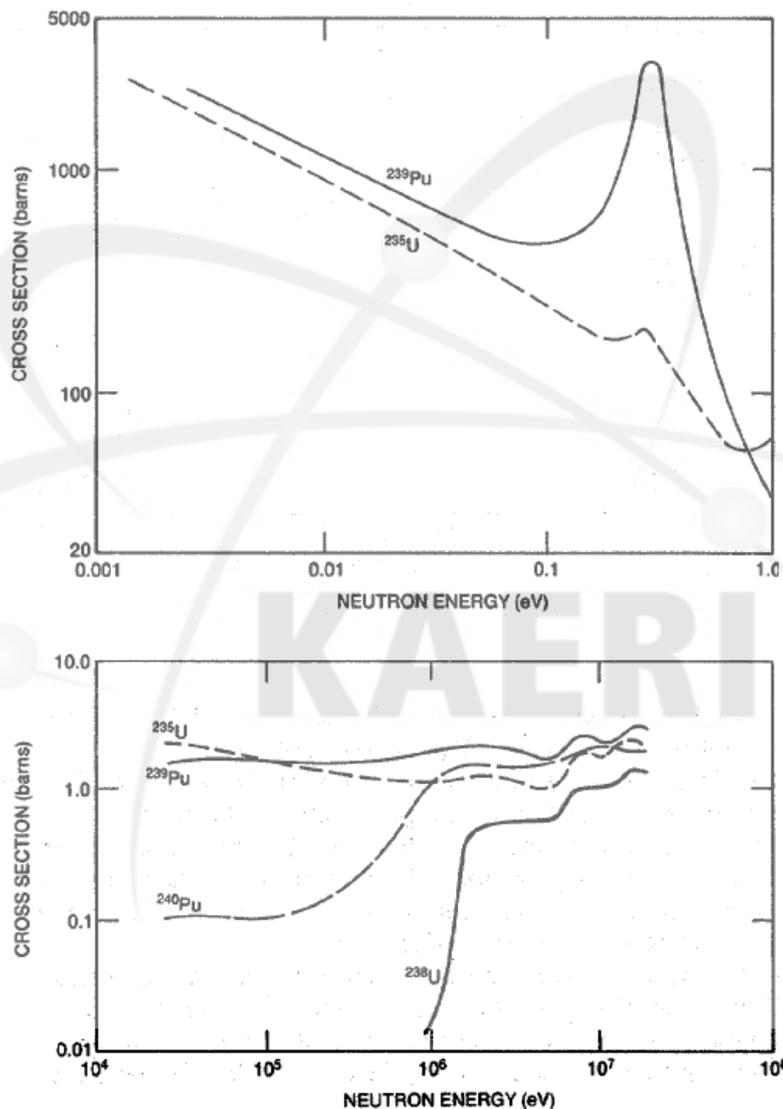
#### 3.1. 능동형 중성자 계수 기본 원리

우라늄과 같은 원소는 1 g 정도의 양에서 단위시간당 방출되는 중성자 수는  $10^2$  개 정도로, 시료의 양에 관계없이 중성자의 방출율이 너무 낮아 피동적인 방법으로는 분석할 수 없다. 따라서 외부의 중성자 선원을 사용하여 시료를 조사시켜 핵분열을 유도한 후, 이 때 발생하는 중성자를 검출하여 우라늄을 분석한다. 이렇게 외부의 선원을 사용하여 핵분열을 유도하여 나오는 중성자 혹은 감마선을 측정하는 비파괴 분석 방법을 능동형 비파괴분석이라 한다. 이때 사용하는 외부 선원을 interrogation source라고 하며, 적용 방법에 따라 중성자 선원 혹은 감마 선원이 될 수 있다. 유도핵분열에 의해 방출되는 방사선은 즉발 중성자, 즉발 감마, 지발 중성자, 지발 감마 등이 있으며, 어떠한 방사선을 측정하느냐에 따라 다양한 능동형 비파괴분석 방법으로 나뉘어 진다.

능동형 중성자 동시계수에서는 시간독립적인 외부 중성자 선원에 의해 유도된 핵분열로부터 나오는 시간상관적인 중성자를 동시에 계수하여, 분석 대상 시료 내의 핵분열성 물질의 양을 분석한다. 외부 중성자 선원을 조사하여 대상 물질 내의 핵분열성 물질에서의 핵분열을 유도하기 위해서는 적절한 선원을 선택하여야 한다. [그림 2]은 우라늄과 플루토늄의 대표 동위원소에 대한 중성자 에너지에 따른 핵분열 단면적을 보여주고 있다 [7]. 그림에서 알 수 있듯이 1 MeV 이상의 중성자에 대해서는 동위원소별로 0.1 - 1 barn 정도의 단면적을 갖지만, 열중성자 에너지 영역에서는 분석 대상인 핵분열성 (fissile) 물질, 즉  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ 에 대한 단면적이 1000 barn에 이르며 동시에 다른 친핵연료(fertile) 동위원소에 대한 단면적은 훨씬 작아진다. 따라서 능동형 중성자 동시계수에 이용하는 외부 중성자 선원은 친핵연료 물질에서는 핵분열을 일으키지 않을 만큼 낮은 에너지(수백 keV 이하)를 갖는 것이 유리하며, 낮은 에너지로 감속시킬수록 보다 많은 신호를 얻을 수 있어 분석 정확도를 높일 수 있다.

능동형 중성자 비파괴 분석 방법 중 가장 대표적인 것은  $^{235}\text{U}$ 를 포함한 물질 분석을 위해 유도핵분열에 의한 즉발 중성자의 동시계수를 이용한 우물형 능동형 중성자 동시계수기(Active-Well neutron Coincidence Counter - AWCC) 이다 [1]. 일반적으로 널리 쓰이는 우물형태의 피동형 중성자 계수기는 적절한 외부 중성자원을 사용할 경우 능동형 모드로 동작할 수 있다. 일반적으로 널리 사용되는 외부 중성자원은  $^{241}\text{Am-Li}$  선원이다.  $^{241}\text{Am-Li}$  선원은 시간독립적인 중성자를 방출하며, 평균 에너지가 0.3-0.4 MeV 정도로 낮

아  $^{238}\text{U}$ 과 같은 친핵연료 물질(fertile material)에 흡수되어 유도핵분열 반응을 일으킬 확률이 낮다. 또한 2 MeV 이상의 자발 혹은 유도핵분열 중성자 계수에 최적화된 계수기에서 우연에 의한 동시계수를 일으킬 확률이 낮아 신호 대 잡음비가 우수하다. 일반적으로 선원 세기는  $1 \times 10^5$  n/s(neutrons per second) 이다. 현재 AWCC는 주로 조사되지 않은 순수 우라늄을 포함한 샘플에서의  $^{235}\text{U}$ 의 양을 분석하는데 사용된다.

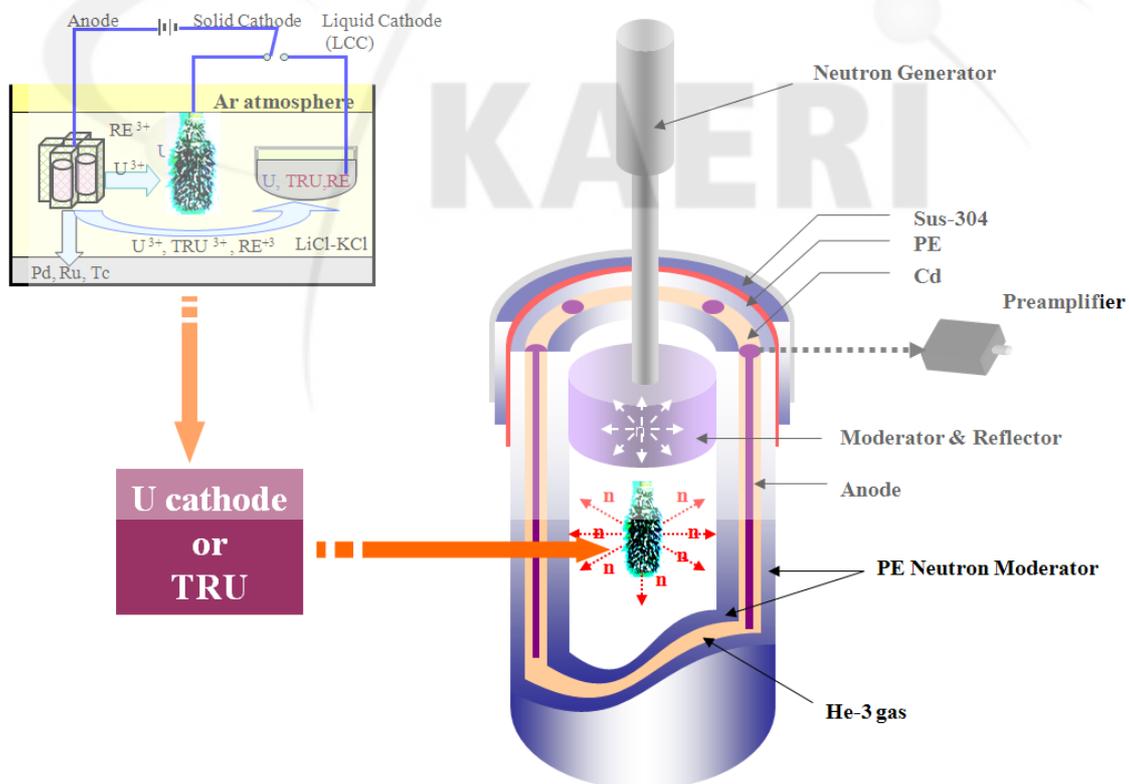


[그림 2] 중성자 에너지에 따른 U와 Pu의 핵분열 단면적

### 3.2. 중성자 발생기를 이용한 능동형 중성자 계수

능동형 중성자 계수의 외부 중성자 선원으로 중성자 발생기를 이용하는 방법도 있다. 이때의 중성자 발생 원리는 발생기 튜브 내부의 D-D 반응 혹

은 D-T 반응인데, D-D 반응에 의한 중성자는 에너지가 약 2.5 MeV, D-T 반응에 의한 중성자는 약 14.3 MeV 이다. 반응에 의한 중성자 선속은 일반적으로 D-T 반응이 D-D에 비해 100 배 정도 높다. 중성자 발생기에서의 중성자는 동작모드에 따라 연속적으로 방출되거나(연속모드) 펄스 형태로 방출(펄스모드)되기도 한다. 고속중성자를 측정하는 중성자 콜러(Neutron Collar)와 같은 능동형 계수기는 외부선원을 감속시켜 조사 대상 시료에 입사시키며, 시료로부터 방출되는 유도핵분열 중성자를 감속시키지 않고 측정하여 에너지 선별에 의해 측정하므로, 일반적으로는 에너지가 높지 않은 D-D반응에 의한 중성자 발생기를 사용하며, 동시계수를 하지 않으므로 펄스모드, 연속모드 모두 적용 가능하다. 이 때 외부중성자의 선속 변화를 감지해 보정해 줄 수 있는 별도의 중성자 선속 모니터가 필요하다. 동시계수법을 이용하는 능동형 중성자 계수기에서는 에너지에 상관없이 동시계수를 통해 유도핵분열 중성자를 선별하므로 D-D, D-T 모두 사용가능하다. 하지만 펄스 형태의 외부 중성자는 동시계수에 이용할 수 없어 항상 연속모드로 발생시켜야 하며, 별도의 중성자 선속 모니터는 필요 없다 [8]. 발생기를 이용한 우물형 능동형 계수 장치 구성을 [그림 3]에 예를 들어 보여준다.



[그림 3] 능동형 중성자 계수 장치의 구성 예

## 4. 중성자 발생기 실험실 구성

### 4.1. 중성자 발생기 설치

#### 4.1.1. 중성자 발생기 선정 및 구매

파이로 공정의 핵물질에 존재하는 핵분열물질( $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  등)을 정량 분석할 수 있는 장비가 필요하지만, 아직 세계적으로 개발되지 않은 상태이다. 앞 절에서 설명한 바와 같이, 본 과제에서는 파이로 공정의 전해정련 공정 핵물질 계량을 위해서 “능동형 중성자 측정 장치”를 개발할 계획을 수립하고, 이에 필요한 외부 중성자 선원으로 중성자 발생기를 선정 구매하였다. 중성자 발생기는 능동형 중성자 측정 장치에 부착되어 중성자 선원으로 사용하며, 중성자 계수기의 성능 평가, 지발 중성자 및 지발 감마선을 이용한 연구 개발에도 활용할 목적으로 선정하였다.

#### 4.1.2. 중성자 발생기 제원

앞 절에서 기술한 바와 같이, 다양한 장점과 활용 목적을 달성하기 위한 중성자 발생기를 선정, 구매하였다. [표 5]와 같이 현재(2007년) 국내 대표적인 중성자 발생기 이용 연구 그룹들을 조사하고, 활용 분야 및 특성, 제조사에 대한 사용자 평가 등 다양한 사항들을 고려하여 프랑스의 EADS SODERN 사의 중성자 발생기를 선정하였다. SODERN사는 다양한 종류의 중성자 발생기를 제작, 납품하여 [표 6]과 같이 현재 세계적으로 널리 활용되고 있는 대표적인 중성자 발생기 제조업체이다. 본 연구 목적에 부합하는 중성자 에너지 및 필요 선속, 안전 관리 측면을 고려하여 발생 타입은 D-D로 선정하였다. 자세한 성능 사양은 아래와 같다.

##### ○ 모델: GENIE 16GT

- 최대선속 (에너지) :  $2\text{E}06\text{n/s}$  (2.5 MeV)
- 용량 : 110 kV, 80  $\mu\text{A}$
- 제작사 : EADS SODERN(프랑스)
- 중성자 발생 메커니즘 : D-D type
- 중성자 에너지: 2.5 MeV

##### ○ 모듈 구성

- a neutron emitting module (D-D sodilog neutron tube)
- modulator unit
- control unit

- remote control software package
- interconnecting cables.

각각의 구성 모듈에 대한 세부 특성은 아래와 같다.

#### 1) Neutron Emitting Module equipped with D-D Neutron Tube

- SF6 절연 스테인리스 스틸 중성자 방출 프로브
- 중성자 에너지 : 2.5 MeV
- 연속 or 평균 중성자 방출율:  $1E06n/s/4\pi sr(\pm 10\%)$
- 최대 중성자 방출율:  $2E06n/s/4\pi sr$
- 평균 수명: 4000 시간 for  $1E06n/s$ , 8000 시간 for  $5E05n/s$
- 전력소모: 10W (ventilation required from 5W)
- 동작 온도:  $-20^{\circ}C$  to  $70^{\circ}C$
- 크기 및 중량: 직경 76mm (flange 직경 104mm), 길이 740mm, 8kg

#### 2) Modulator Unit

- 펄스모드 중성자 발생을 위한 모듈
- 펄스 주기: 10Hz - 10kHz 가변 및 연속 방출
- Duty factor: 5% - 100%(연속모드) 가변
- 중성자 펄스 상승/하강 시간 (rise and fall time): 1.5  $\mu sec$  미만
- 크기 및 중량: 200mm x 100mm x 80mm, 1kg 이하
- Control Unit과 케이블 연결 길이: 최대 15m

#### 3) Control Unit

- 운전조건 설정 및 데이터 표시 모듈
- 안전 루프: 2 개의 safety loops 제어 및 safety key 제어
- 가속 전압 및 빔 전류 설정: 최대 110kV, 최대 80 $\mu A$
- Input : 1 modulation TTL input
- Output : 2 synchronization TTL outputs
- 전력 공급: 230V/50Hz
- 크기 및 중량: rack 19"/3U/length-715mm, 23kg

#### 4) Remote Control Software Package

- 윈도우 구동 Control Unit 제어 소프트웨어

- 통신: RS232, 10m cable
- 중성자방출 제어 (펄스모드, duty factor, 방출 시간 설정, 제어)
- Safety loops and alarms 상태 표시
- 주요 파라미터 측정 및 운전, 알람 기록

### 5) Interconnecting Cables

- 중성자 발생 튜브와 modulator unit 간 연결: 0.5 m
- 중성자 발생 튜브와 Control Unit 간 연결: 15 m 고전압 케이블
- RS232 통신 케이블: 10m

[표 5] 국내 중성자 발생기 이용 현황 (2007년 현재)

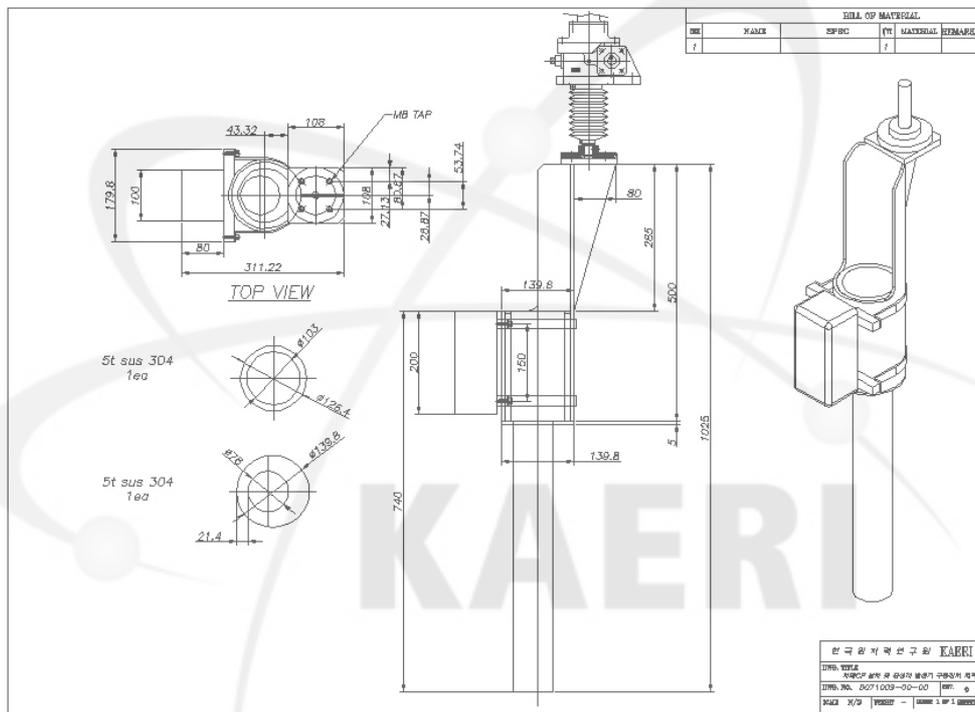
항목	경희대	KAERI	경원(주)-KAERI	서울대	본 과제
도입처 (회사)	프랑스 SODERN	미국 LBNL	러시아	자체 개발	프랑스 SODERN
중성자 발생 특성	D-T type	D-D type, RF 방식	D-D type, alpha detector	D-D type, 대형 (1x1x1m)	D-D type
중성자 에너지	14 MeV,	2.5 MeV,	14 MeV	2.5 MeV	2.5 MeV
중성자 세기	1E08 n/s	1E08 n/s	1E08 n/s	1E08 n/s	2E06 n/s
이용 방사선	감마선	감마선	감마선	모색 중	중성자
목적	Gamma-Radiograph 등	폭발물 탐지	폭발물 탐지	모색 중	중성자 선원
수명	4000 시간	반영구	1000 시간	반영구	4000 시간
비고	-고에너지	-RF 방식 -Noise 방지 차폐 요 -부피과대->계 수기 부착 불가	-알파검출기 부착 -감마선 검출기와 시스템 구성 -경원(주) 자산	- 대형 발생기로서, 계수기에 부착하여 사용 불가	

[표 6] SODERN 사 중성자 발생기 보유, 이용 기관

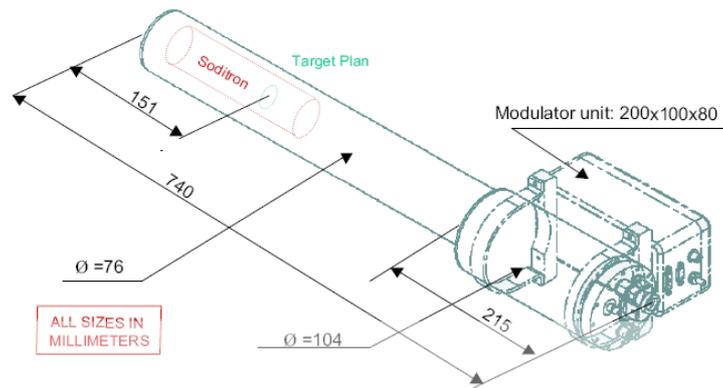
Customer Name	Country	neutron Generator Model	Quantity
AIEA	Croatia	Genie16 Compact	1
ANCORE	USA	Genie16 GT	2
ANCORE	USA	Genie16 Compact	3
AWE	UK	Genie16 Compact	1
BNFL	UK	Genie26	5
CEA Cadarache	France	Genie16 GT	1
CEA Cadarache	France	Genie36	1
CEA Cadarache	France	Genie26	1
CEA Marcoule	France	Genie16 Compact	1
CEA Bruyeres	France	Genie16 GT	1
CEA Bruyeres	France	Genie16 Compact	1
Chaimers	Sweden	Genie16 Compact	1
COGEMA	France	Genie36	5
Computalog	USA	Genie16 GP	1
DELFT	Holland	Genie16 Compact	1
DSTL	UK	Genie16 Compact	1
ETCA	France	Genie16 GE	1
ENERTOPIA	Korea	Genie16 Compact	1
FOA	Sweden	Genie16 Compact	1
Fraunhofer Institute	Germany	Genie16	2
Hi-Energy	USA	Genie16 Compact	9
HMS Sultan	UK	Genie16 Compact	1
INEEL	USA	Genie16 Compact	3
INEEL	USA	Genie16 RT	1
INEEL	USA	Genie16 GT	1
INFN	Italy	Genie16 GT	2
IPR	India	Genie35	1
JNFL	Japan	Genie36	3
LPC	France	Genie26	1
Sheffield University	UK	Genie16 G	1
St Lukes Hospital	USA	Genie16 Compact	1
Tenex	Russia	Genie16 GT	1

### 4.1.3. 중성자 발생기 설치

선정한 중성자 발생기를 한국원자력연구원의 내부 절차에 따라 구매하고 설치하였다. 구매와 관련한 서류 등은 [부록 1], [부록 2]에 수록하였다. 특별히 목적이 맞는 활용을 위해 발생기 튜브를 상하로 이동시킬 수 있도록 [그림 4]와 같이 고정 장치를 제작하여 [그림 5]의 발생기 튜브 모듈과 결합하여 설치하였다. [그림 6]은 연결된 발생기 튜브와 고정 장치의 모습이다. 고정 장치의 제작 및 실험실 내 설치 작업과 관련한 시방서를 [부록 3]에 수록하였다.



[그림 4] 중성자 발생기 튜브 고정 장치



[그림 5] 중성자 발생기 튜브 및 모듈레이터 구조



[그림 6] 설치된 중성자 발생기 모듈 모습

#### 4.1.4. 구동 소프트웨어 설치 방법

제품 구매 시 수령했던 SODERN사의 프로그램 설치파일(setup.exe)은 오류가 있어, 수동으로 소프트웨어를 설치할 수 있다. (Readme 파일을 참조) WIN XP 혹은 WIN 98 상관없이 동일한 방법으로 설치가 가능하다.

1. 윈도우에서 명령프롬프트를 실행하여 DOS창을 띄우고, 소프트웨어 설

- 치 파일이 있는 디스켓 혹은 CD 디렉터리로 이동.
2. "System32" 디렉터리의 'msflxgrd.ocx' 파일을 "C:\Windows\System32" 디렉터리에 복사
    - DOS 명령: copy "System32\\*.\*" "C:\Windows\System32\"
    - 혹은 윈도우 탐색기에서 복사 & 붙여넣기
  3. activeX 파일들 등록(msflxgrd.ocx)
    - DOS 명령: regsvr32 "C:\Windows\System32\ msflxgrd.ocx"
  4. Genie16을 설치한 디렉터리를 수동으로 만듦 (임의의 디렉터리명 가능)
    - 명령: md "C:\Genie16"
    - 혹은 윈도우 탐색기에서 폴더 생성
  5. Files 아래 파일들을 대상 디렉터리에 복사
    - DOS 명령: copy "Files\\*.\*" "C:\Genie16"
    - 혹은 윈도우 탐색기에서 복사 & 붙여넣기
  6. activeX 파일 등록(Genie16C.ocx)
    - DOS 명령: regsvr32 "C:\Genie16\Genie16C.ocx"
  7. 프로그램 설치 완료- C:\Genie16\의 AppDemo 실행아이콘 실행
    - 에러 메시지가 하나 뜬: 확인 클릭
    - COM 포트 설정하는 창이 뜬: 일단 확인하면 경우에 따라 등록이 안 된 포트라는 메시지가 뜨나 일단 무시
    - Genie16 프로그램이 실행되어 뜨면 설치 확인 완료
  8. USB-RS232 converter 드라이버 설치 (필요 시)
    - 중성자 발생기 컨트롤러 연결은 RS232 cable로 가능하나, 컴퓨터에 RS232포트(9 pin)가 없는 경우 USB-RS232 converting cable을 사용하여 연결해야 하며, 이 때 converter 제품에 해당하는 driver를 설치해야 함.
    - 현재 사용하는 제품의 driver는 FTDI사의 드라이버를 사용하며, 하드웨어 자동검색/설치 마법사 실행 시 다음 디렉터리를 설정:  
 \USB 2.0 TO RS232 Cable\Windows\win 2000\_xp\_2003\_visa

#### 4.1.5. SF6 가스 주입 방법

중성자 발생기 설치 시 SF6 가스를 주입해야 발생기의 가동이 가능하다. 아래와 같은 순서로 가스를 주입하면 되며, 한 달에 한 번 정도 점검을 권장하고 있다. 권고된 SF6 가스 압력 레벨 이하로 떨어질 때 주입하고 그렇지 않을 경우에는 새로 주입할 필요는 없다. 자세한 사항은 사용자 매뉴얼에 기

술되어 있다 [9].

1. 액체이므로 압력이 높지 않음 (약 2 눈금, 약 7 기압)
2. 처음에 약 2 기압으로 정도로 나오도록 레귤레이터를 조절하여 주입
3. 처음에 호스내의 공기를 제거
4. 레귤레이터를 서서히 올려 5 기압까지 도달하면서 주입
  - 처음 2 기압에 고정, 기체가 주입되는 소리가 들리다가 멈춤
  - 기압을 약간 올리면 다시 소리가 들리고 압력 도달 후 정지
  - 이 같은 작업을 반복하면서 5 기압까지 도달하면서 주입

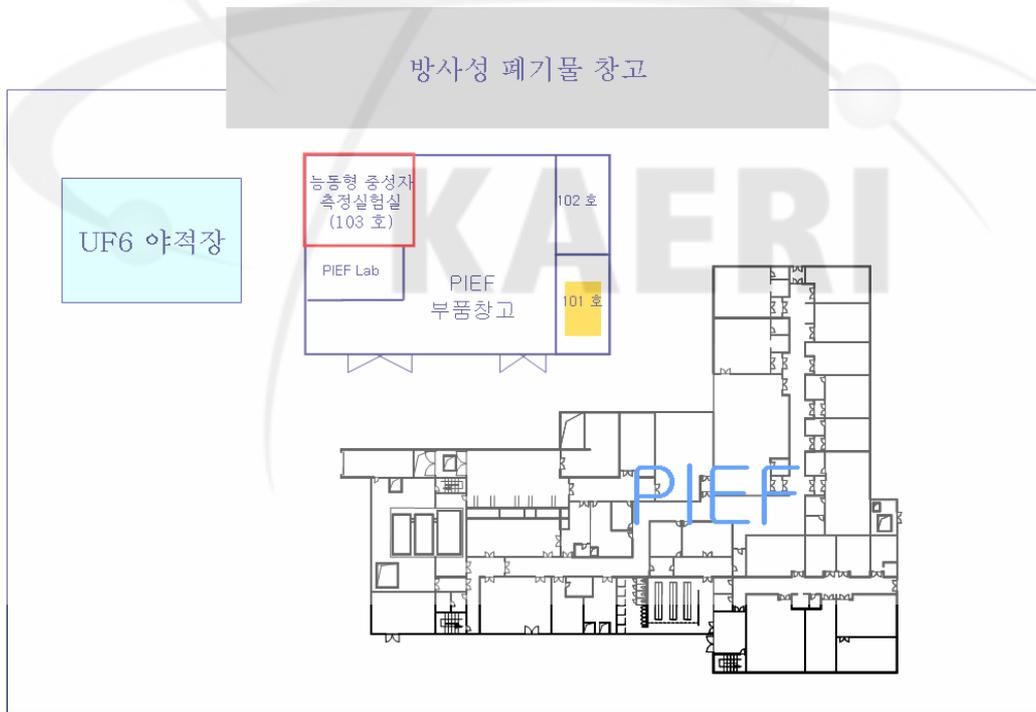


## 5. 중성자 발생기 실험실의 차폐 및 안전해석

### 5.1. 설치 시설 개요

- 명칭 : 능동형 중성자 측정 실험실
- 위치 : 조사후시험시설 부품창고 103호 ([그림 7] 참조)
- 사용목적 : 핵물질 계량관리를 위한 능동형 중성자 측정 장비 개발

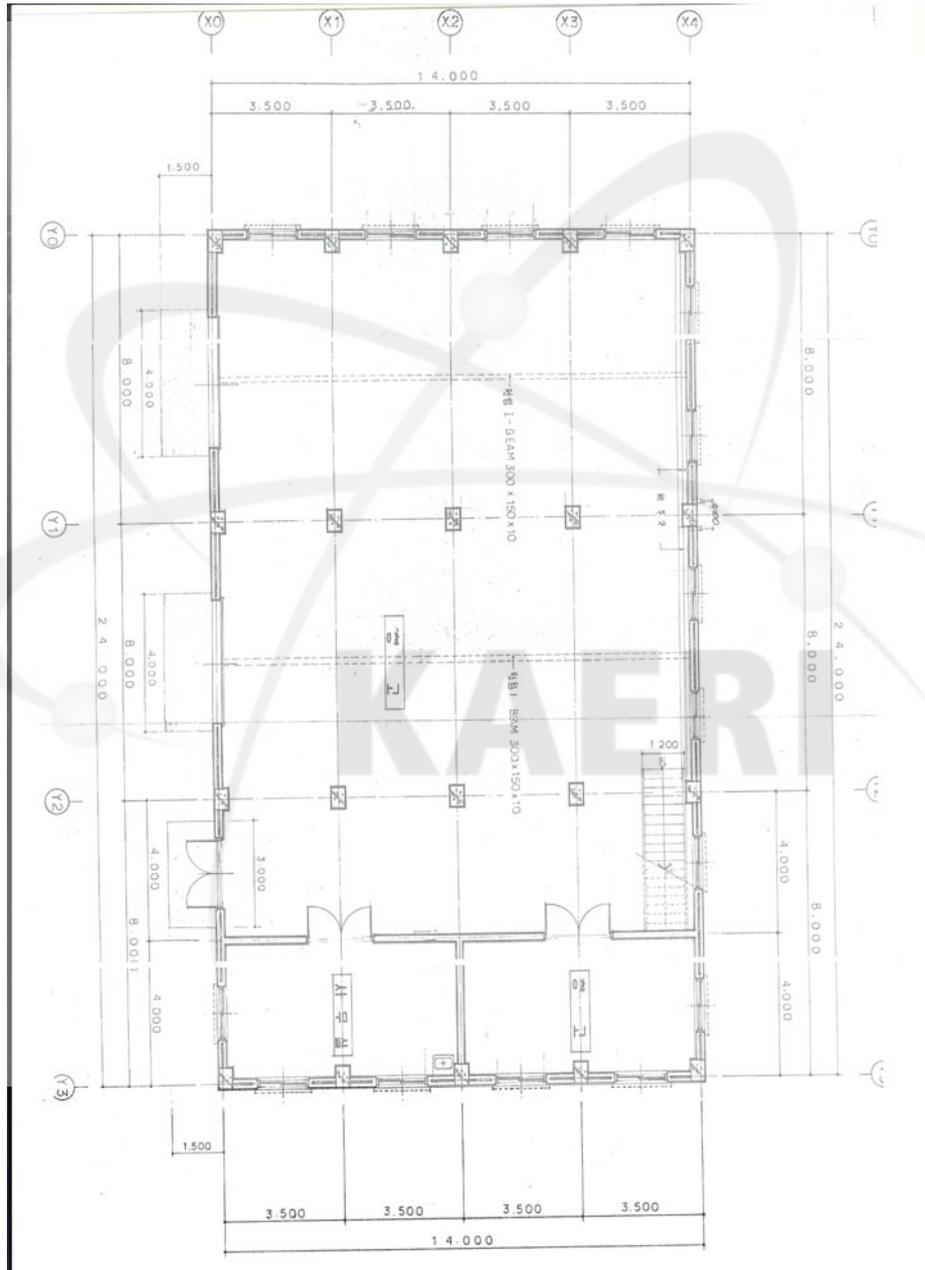
파이로 공정의 주요한 단위공정인 전해정련에서 발생하는 우라늄 및 TRU에 포함된 핵물질을 측정하기 위한 능동형 중성자 측정(neutron interrogation)장비 개발이 필요하며, 이 측정 장비의 중성자 공급원으로 사용할 중성자 발생기가 필요하다. 이 발생기는 다음 두 가지 역할을 한다. 즉, 수동형 중성자 측정실험에서는 선원에서 발생하는 중성자 측정하여 중성자 계수기의 성능을 평가하고, 능동형 중성자 측정실험에서는 계수기 내에 우라늄 등 핵물질 타겟에 중성자를 조사하여 유도핵분열을 일으키는 역할을 한다.



[그림 7] 능동형 중성자 측정실험실의 위치 및 주변 환경.

본 중성자 발생기는 조사후시험시설의 뒤편에 있는 부품창고 내에서 차폐시설을 갖춘 “능동형 중성자 측정 실험실”에서 사용한다. 능동형중성자 측

정 실험실(이하 “실험실”로 칭함)은 부품창고 내의 103 호실이며, 약 7 m × 7.3m의 시설로서 이 중에 중성자 발생기 사용시설은 5 m × 4.4 m이다. [그림 8]에 제시한 바와 같이 본 시설은 부품창고의 일부를 분리하여 능동형 중성자 측정용 전용시설을 별도로 만들어, 중성자 발생기의 사용시설과 작업시설로 분리하였다.

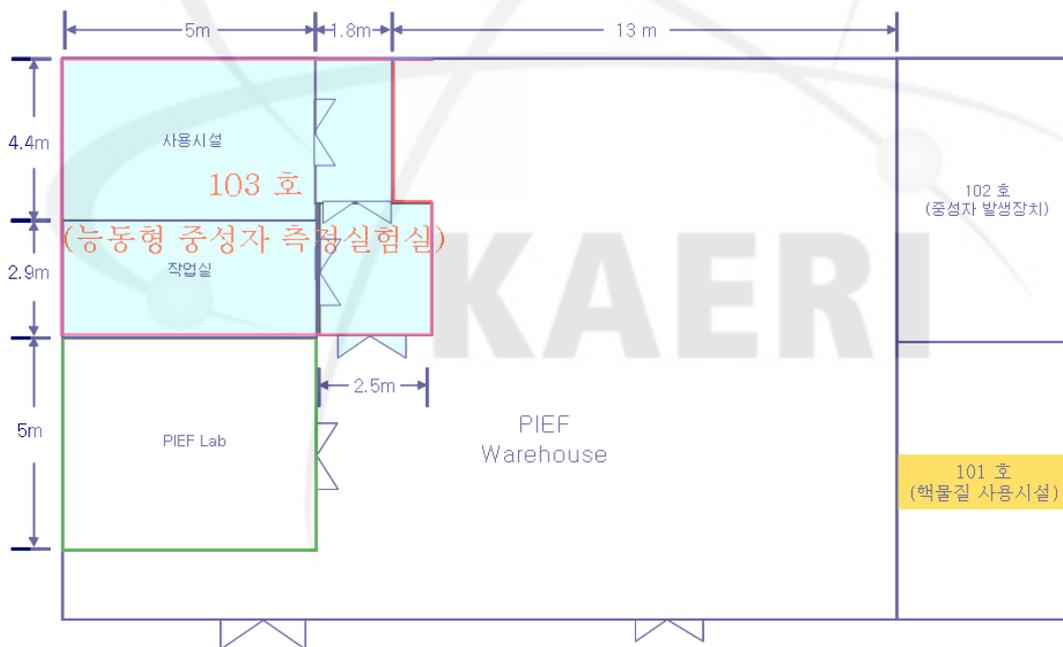


[그림 8] 부품창고 도면 (평면도)

## 5.2. 시설 주변의 환경

[그림 7]에서 알 수 있듯이, 부품창고는 조사후시험시설 뒤편에 위치해 있으며, 좌측에는 UF6 드럼통 야적장이 있고, 뒤편에는 방사성 폐기물 창고가 있다. 특별한 업무를 수행하는 방사선 작업종사자 몇 명만 가끔 출입하는 곳이며, 일반인의 상주시설이 없고, 접근할 일도 없다. 이 부품창고 내에는 폐 필터 창고, 중성자 발생기시설(102호) 및 핵물질 취급시설(101호)이 있다. 폐 필터 창고는 본 실험실의 작업실에 접해 있고, 나머지 두 시설은 13 m 정도 떨어진 지점에 있다. 이 부품 창고내의 세 시설에 출입하는 방사선 작업종사자 4 명 정도다.

부품창고 내부의 시설 배치도는 [그림 9]에 제시하였다. 부품창고 내에 있는 중성자 발생기는 별도로 인허가 받아 부품창고 내에 설치되어 있고, 본 실험실과는 약 13 m 정도 떨어져 있기 때문에 방사선적인 상호 영향은 없다고 볼 수 있다. 단지 사용시설 내에 Cf-252 (1.2 mCi)의 보관함이 있다.



[그림 9] 부품창고 내 능동형 중성자 측정실험실의 배치

## 5.3. 운영 계획

중성자 발생기의 중성자 방출부분은 우물형 계수기의 “우물”(cavity)에 삽입되어 검출기의 성능시험에 사용한다. 중성자 발생기는 장치 내부의 밀봉 튜브에서 중수소와 중수소가 결합하는 과정에서 중성자를 발생시킨다. 이 중성자 활용하여 핵물질을 측정할 수 있는 중성자 계수기를 개발하고자 한다.

이 시설은 상용시설이 아니라, 핵물질을 정량분석기술 개발을 위한 연구업무를 수행하는 것이기 때문에 발생기를 장시간 사용할 필요는 없다. 따라서 발생기를 직접 계수기의 우물에 삽입하여 사용하는 시간은 길지 않으며, 여유 있게 잡았을 때, 가동시간을 20시간/주와 연간 500 시간이다. 가동 시 실험자(방사선작업종사자)는 개인용 피폭선량계(TLD)를 착용하고 작업할 예정이며, 실험 중에는 중성자와 감마선 서베이미터를 상시 작동시켜, 돌발 사고에 대비한다. 발생기는 폴리에틸렌(PE)로 제작된 우물형 계수기 내에서만 작동시키는 것으로 한정한다.

#### 5.4. 차폐 해석을 위한 선원의 제원 및 특성

- 중성자 발생기의 중성자 발생지점 : 직경 76 mm, 길이 325 mm
- 방사선원의 종류 : 중성자 발생기 (D-D 핵반응 타입)
- 용량 : 110 kV, 80  $\mu$ A
  - 최대선속 (에너지) :  $2 \times 10^6$  n/s (2.5 MeV)
  - 모델 : GENIE 15GT
  - 제작사 : SODERN(프)
- 특성: D-D 핵반응, 평균에너지는 2.5 MeV이며, 최대 3 MeV이다.
- 수량:  $2 \times 10^6$  n/s 중성자를 방출하는 중성자 발생기 1 대

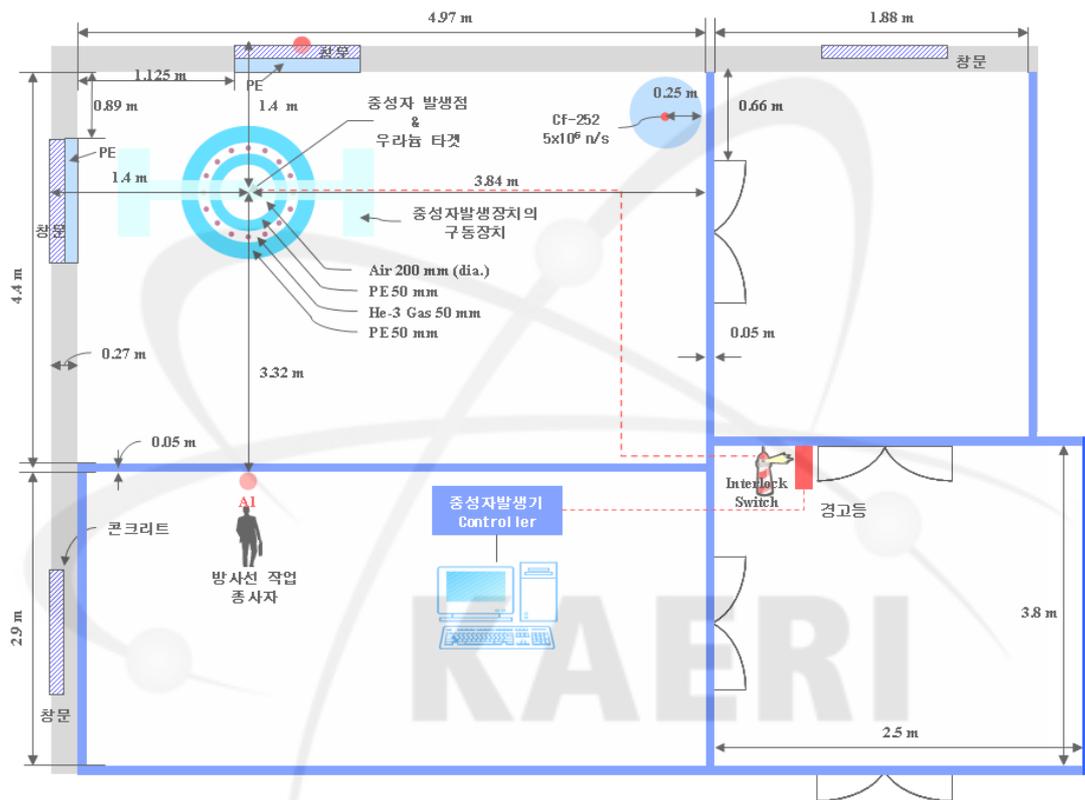
중성자 발생기는 중성자 측정 실험 중에는 계수기 내부에 삽입하여 실험을 수행하고, 평상시에는 전원이 차단된 상태에서 사용시설의 거치대 장착된 상태로 보관된다. 중성자 발생기는 우물형 계수기의 내부에서 삽입해서 사용하며, 선원은 상하 50 cm 폭으로 이동하면서 실험을 수행할 계획이다. 이때 중성자 발생기는 항상 계수기(PE 재질 : 차폐체) 상단에서 10 cm 아래에 존재하도록 운영한다.

#### 5.5. 안전시설 및 계통 개요

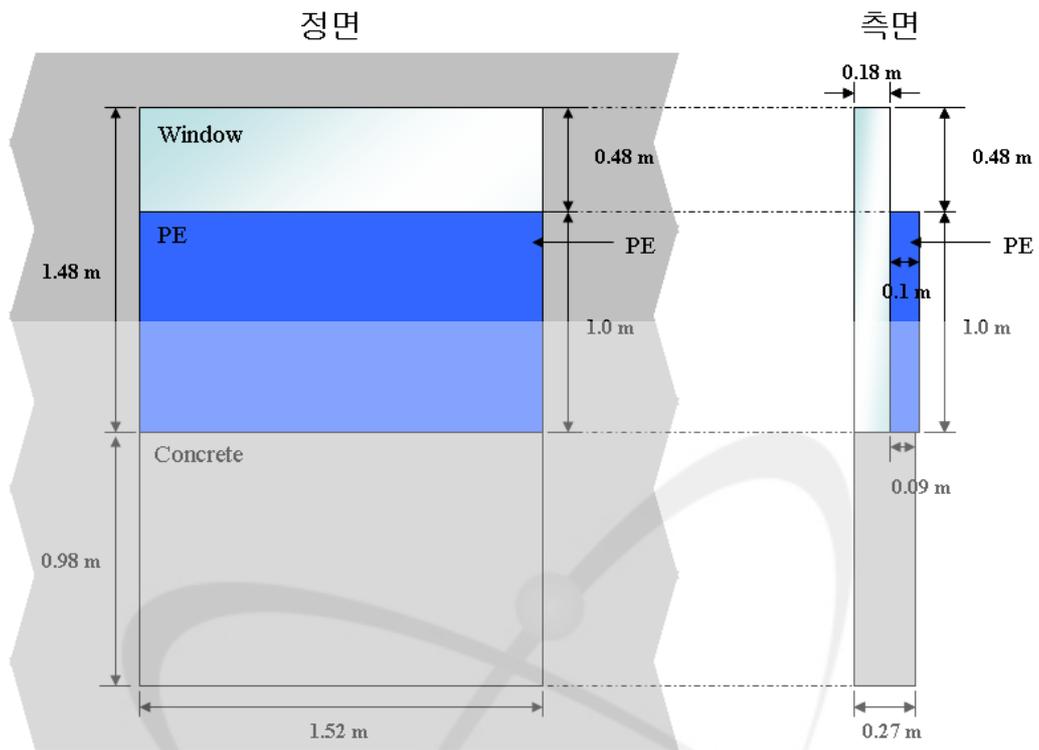
##### 5.5.1. 차폐

[그림 10]에서 제시된 바와 같이 중성자 발생기는 중성자 계수기에 장전된다. 계수기는 PE 재질로 되어 있기 때문에 계수기 자체가 차폐체 역할을 하게 된다. 이 계수기의 위치를 좌측 상단에 고정시켜 작업실에서 3 m 이상의 거리를 유지하도록 하였다. [그림 11]에 제시한 바와 같이, 좌측과 뒤 면의 취약지점인 창문에는 0.1 m PE 차폐체를 장착하도록 하였다. 따라서 좌

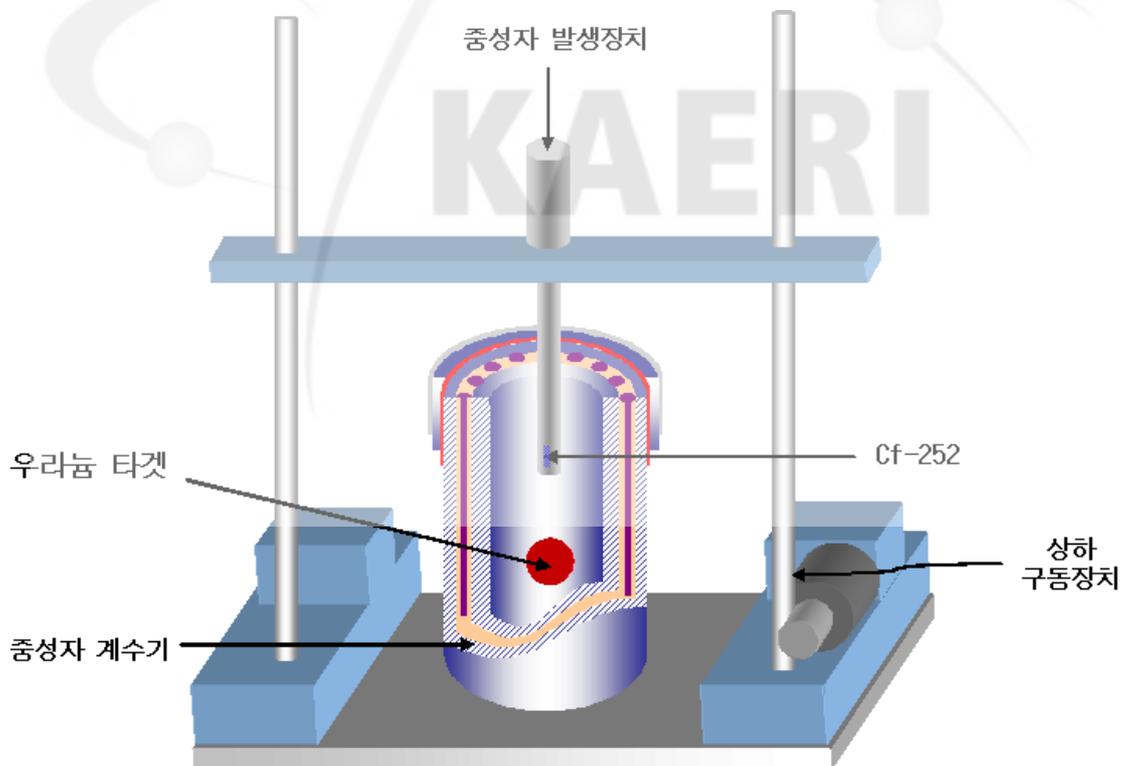
측 및 뒷면의 창문부분은 바닥에서 0.98 m까지는 콘크리트 27 cm 벽이고, 0.98 m에서 1.98 m 높이까지는 0.1 m PE 차폐체가 장전된다. [그림 12]과 [그림 13]에서 볼 수 있듯이, 중성자 발생기는 이동 취급대에 장전되어 이를 구동하는 장치에 부착하여 사용하는 것으로 설계하여 선량 평가를 하였다. 이 구동장치는 고정된 상태로 중성자 발생기는 계수기(PE 재질: 차폐체) 내에서만 움직이도록 이용하도록 한다.



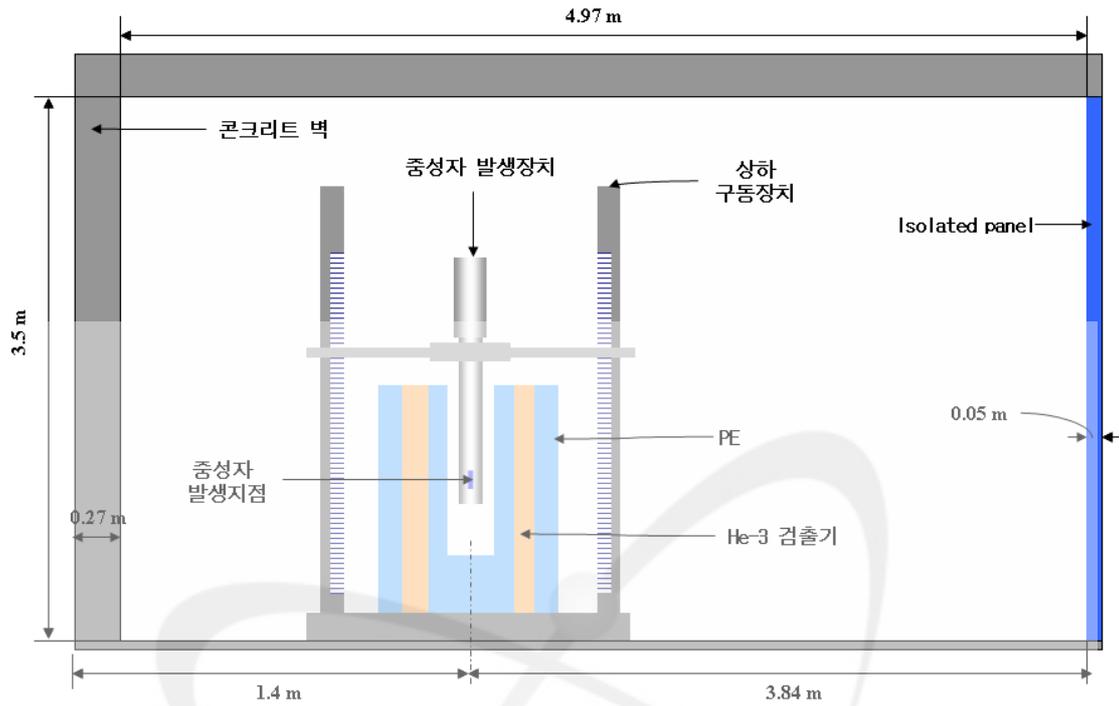
[그림 10] 능동형 중성자 측정실험실 배치도



[그림 11] 차폐체를 설치한 좌측과 뒷면의 창문 주변의 상황



[그림 12] 계수기에 설치된 중성자 발생기



[그림 13] 중성자 계수기와 중성자 발생기의 배치도

### 5.5.2. 시설안전장치

중성자 발생기의 가동 중에는 항상 Power On을 알리는 경고등이 작동하도록 하며, 연동 장치로서 인터록 시스템(inter-lock system)을 설치하여 가동 중 문이 열리면 자동으로 기기가 가동 중지되는 안전장치가 발생기 컨트롤러에 연결되어 있다. 안전장치를 고려한 운전 및 사고 시 대처방안은 한국원자력연구원의 내부 규정에 따른 안전매뉴얼에 따르며, [부록 4]에 수록하였다.

## 5.6. 방사선 취급방법 및 방사선안전관리 계획

### 5.6.1. 방사선 사용방법

중성자 발생기를 사용시설에 설치하고, 이를 제어하는 제어장치는 작업실에서 작동한다. 발생기를 우물형 계수기에 삽입한 상태에서 가동하여, 방출되는 중성자가 대부분 계수기 내에서 흡수되도록 한다.

### 5.6.2. 방사선안전관리 계획

방사선 안전관리 계획에 따른 조직 및 책임, 방사선 방호 정책, 교육 및

훈련, 안전관리 규정 및 절차서 등은 한국원자력연구원, 방사선 안전관리 규정에 따른다. 중성자 발생기의 사용시설에서의 방사선의 안전한 사용을 위한 책임은 선진핵주기시스템공학그룹장 및 핵물질 계량 안전조치 기술개발 과제 책임자에게 있으며, 방사선 작업은 방사선 작업 현황에 기술된 인원으로 수행한다.

방사선 방호정책으로서

- 시설 출입자는 TLD 배지 및 Alarm meter를 착용
- 출입 전 반드시 장치의 작동유무를 확인
- 조사실 내부에서는 불필요한 행위(흡연, 음식물 섭취 등) 불가
- 장비를 수시 점검하여 항상 최적의 가동상태를 유지

등 필요할 사항을 수행하고, 선원을 사용함에 있어 종사자 등의 인체에 방사선피폭으로 인해 생길 수 있는 유해한 비확률적 효과의 발생을 방지하고, 방사선 피폭으로 인해 생기는 확률적 효과의 발생확률을 일반적으로 용인된 수준이하로 제한하는 것을 목표로 한다.

중성자 발생기는, 실험 중에는 중성자 공급원으로 사용할 때는 계수기 내부에서만 움직이도록 설계/제작한 구동장치로 제어한다. 사용시설은 잠금장치를 설치하여 중성자 발생기의 도난을 방지한다. 방사선 안전 관리자 또는 담당자의 관리 아래 방사선 작업 종사자만이 중성자 발생기를 작동할 수 있도록 한다.

중성자 발생기의 사용시설 및 부속시설을 방사선 관리구역으로 지정하고 필요에 따라 출입자를 관리하고 통제한다. 또한 중성자 발생기를 사용하는 방사선 작업 종사자에 대해서는 TLD 배지를 지급하여 개인피폭선량을 측정한다. 수시출입자 및 방문자에 대하여는 방사선 작업 및 방사선 관리 구역의 출입 시 사전에 교육을 실시하고 개인 방사선감시기를 지급한다. 종사자에 대한 TLD 배지 판독은 방사선 관리실에서 실시한다. 판독된 개인피폭선량은 본인에게 통보하고 그 기록은 한국 방사성 동위원소 협회에 보고한다. 방사선 안전 관리자는 종사자의 개인피폭선량 판독결과를 검토하여 이상 유무를 확인한다. 측정결과 과피폭이 발견되었을 경우에는 즉시 종사자에 대하여 의사에 의한 진단 등 필요한 보건상의 조치를 취한다.

방사선량을 측정을 위하여 [표 7]와 같은 장비 구비하여 매 실험 수행 시마다 측정하고, 장비는 교정주기에 따라 교정 관리한다. 기타 교육 및 훈련, 안전 관리는 한국원자력연구원의 규정 및 절차에 따른다.

[표 7] 방사선량 측정 장비

종 류	제 작 사	모 델	수 량
중성자 서베이미터	Canberra	NG2	1
감마선 서베이미터	Thermo elec.	FH40G-X/FHZ61 2	1
Pocket Dosimeter	Canberra	DISICARD/E	3

### 5.7. 예상 피폭선량의 평가절차·방법 및 결과

MCNP4C 코드를 사용하여 중성자 발생기의 사용시설의 사방의 벽에서 각각 선량율을 계산하였다. 이때 중성자와 이차 감마선을 동시에 고려하였다. 차폐체가 동일한 경우에는 발생기에 가장 가까운 거리에 있는 지점이 선량률이 가장 높을 것이 자명하지만, 이를 예비계산을 통하여 확인하였다.  $2 \times 10^6$  n/s 세기의 발생기가 계수기에 장착된 경우에 대해서 최대선량을 결정하였다. 그리고  $^{252}\text{Cf}$  ( $2 \times 10^6$  n/s)이 저장함에 보관하는 경우에 대해서 각각 전후 및 좌우벽면에서 최대선량을 결정하여, 발생기에 대한 계산결과에 합해서 사용시설에서의 최대선량을 결정하였다.

외부피폭 측면에서, 중성자 발생기를 계수기에 장착하여 실험을 수행할 때, 타겟이 존재한 경우에 전면 작업실에서 가장 높은 선량이 나타났으며, 주간과 연간 총 방사선량은 각각 0.0822 mSv, 2.05 mSv로 결정되었다. 또한 Cf-252 선원 보관함에 기인한 최대방사선량은 각각 0.0402 mSv 및 1.05 mSv로 나타났다. 두 경우의 최대방사선량을 합해 주면 사용시설에서의 주간과 연간의 총 방사선량의 최댓값이 된다. 이 최댓값은 각각 0.122 mSv 및 3.10 mSv이며, 방사선 작업자의 주간 및 연간의 방사선량 제한치인 1 mSv와 20 mSv보다 훨씬 작은 값임으로, 방사선 방호 등에 대한 기준을 만족한다.

중성자 발생기를 가동함에 따라 발생하는 삼중수소는 중성자 발생기의 밀봉 튜브에 갇힌 상태이기 때문에 외부로 누출되지 않는다. 따라서 내부피폭은 고려할 필요가 없다.

방사선 관리구역 주변에는 일반인이 상주하는 시설은 없고, 접근 가능성이 낮아 주변인원의 피폭선량은 고려하지 않았다. 계산결과와 자세한 설명은 아래에 기술한다.

### 5.7.1. 실험계획 및 능동형 중성자 측정실험실 설계

핵물질 계량 안전조치 기술 개발 과제에서는 사용후핵연료의 파이로 공정 시설에서의 핵물질 계량관리 장비를 개발할 계획이다. 현재 새로운 형태의 검출기를 설계/제작하여 이를 중심으로 중성자 계수기를 개발하고 있으며, 이에 대한 성능시험이 수반되어야 한다. 중성자 계수기의 성능시험에는 사용후핵연료에서 방출되는 중성자와 유사한 종류의 중성자를 내는 선원이 필요하여 중성자 발생기를 활용할 수 있다.

계수기의 성능시험에는 여러 가지 세기의 중성자 선원이 필요하다. 본 연구에서는 이를 대신할 중성자 발생기를 구입하여 이를 중성자 계수기의 '우물' 속에 장전하여 상하로 이동하면 중성자 측정 효율 등을 측정하는 실험을 계획하고 있다. 이를 위하여 능동형 중성자 측정실험실을 꾸미고 이 실험실 내에 중성자 발생기의 사용시설을 별도로 분리하여 만들고, 작업자의 피폭이 법정한도를 만족할 뿐만 아니라, ALARA 개념에 따라서 실험하는 동안에 최소한 피폭만을 받도록 설계하였다.

사용시설이 아니라 연구시설이기 때문에 중성자 발생기를 사용하는 실험 시간은 길지 않다. 본 보고서에서 제시한 연간 500 시간보다 훨씬 적은 100 - 200 시간 정도로 예상되며, 최대 500 시간 기준은 작업자의 피폭량 결정에 있어서 상당히 보수적이다. 한편, 계수기의 구조는 연구과정에서 그 형태가 여러 가지로 변할 가능성이 있다. 본 보고서에서는 이런 점을 예상하여 형태에 관한 한, 다양한 형태의 계수기를 만들어도 보수성을 만족할 수 있도록 최소한의 조건으로 계산모델을 설정하였다. 예를 들면 계수기의 PE 두께를 0.1 m로 가정하였는데, 실제로는 이보다 큰 두께를 가질 것이 예상된다.

### 5.7.2. 계산 Tool

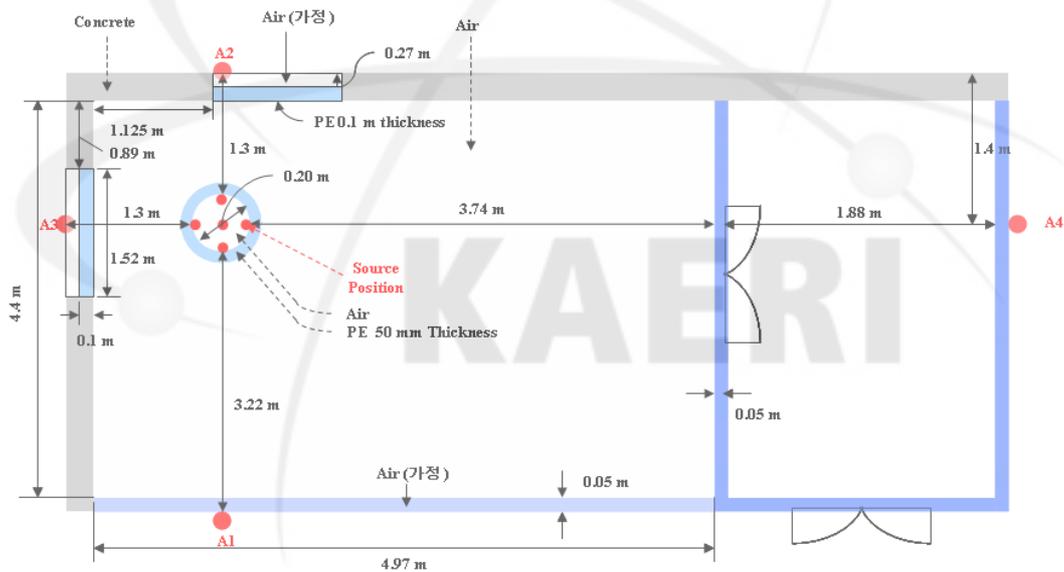
차폐해석에는 MCNP4C 코드를 사용하였다. Cf-252에 대한 에너지 스펙트럼과 중성자 및 감마선의 선량전환인자는 이 코드에 내장된 자료를 사용하였다. 예제 입력 파일을 [부록 5]에 수록하였다.

### 5.7.3. 가정 및 계산모델

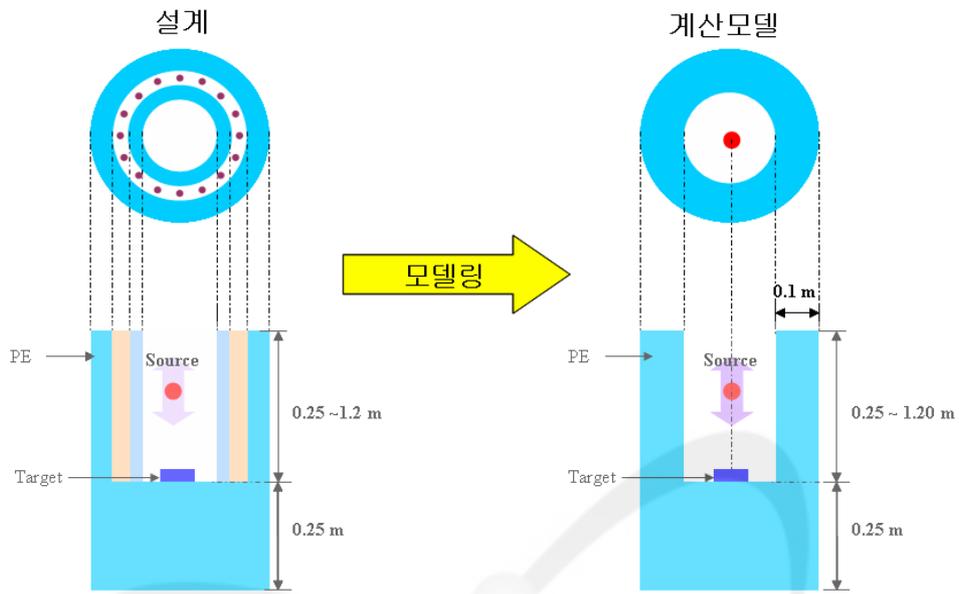
보수성을 만족하는 조건하에서 계산의 편의성을 위해서 모델을 단순화시켰다.

#### 5.7.3.1. 중성자 계수기에 장전된 중성자 발생기

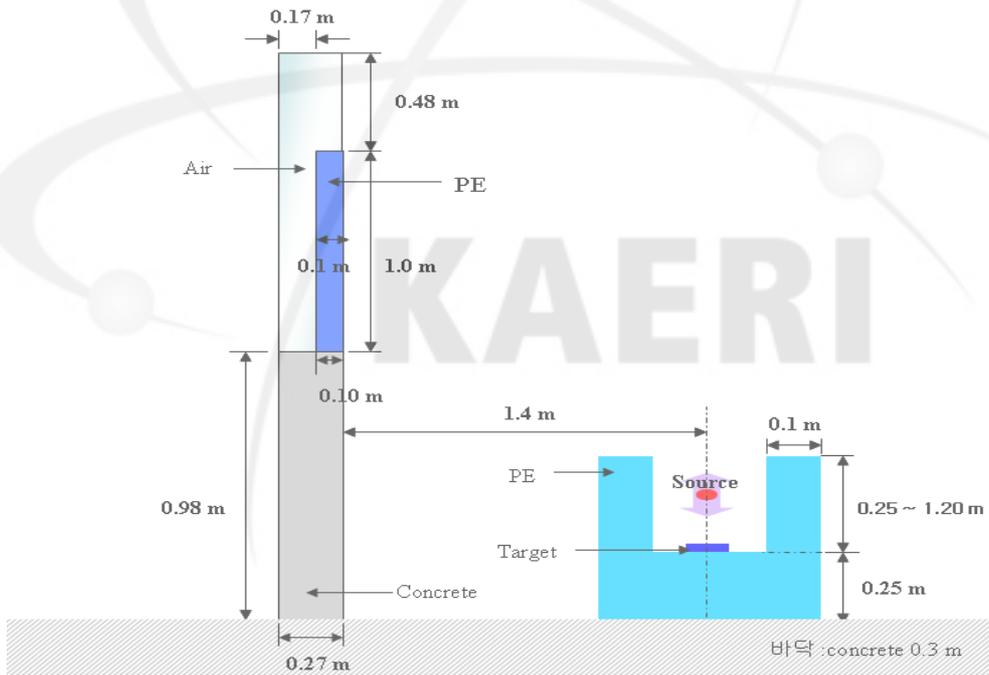
중성자 계수기 내에 중성자 발생기를 장전한 상태에 대한 계산모델은 [그림 14]에 정리되어 있으며, 계수기에 대한 모델은 [그림 15]에 제시하였다. 계수기내에서 발생기의 좌우 위치에 따라 중성자 발생지점에서 피폭지점까지의 거리가 변한다. 보수적인 관점에서 중성자의 선원은 피폭지점에서 최대한 가까이 존재하는 것으로 가정하였다. 전후와 좌우 네 면으로 나누어 최대 피폭이 예상되는 지점에서의 방사선 선량을 계산하였다. 각 면에서 중성자 발생기까지 최단거리에 위치한 지점에서 선량을 계산하였다. 좌측면과 뒷면에는 콘크리트 벽면이 있고, 중성자 발생지점에서 거리가 동일하고, 단지 각각의 벽에서 창문까지의 거리가 차이가 난다. 따라서 이 두 지점에서의 방사선 선량은 비슷한 값을 가질 것이라는 것을 예상할 수 있다. 창문은 바닥에서 0.98 m 지점에서 시작한다. 창문 위치는 높이 1 m, 폭 1 m, 두께 0.1 m의 PE 차폐체를 고려하여 [그림 16]과 모델링하였다. 이들 모델은 [표 8]에 정리하였다.



[그림 14] 중성자 계수기에 장전된 중성자 발생기의 차폐계산 모델



[그림 15] 중성자 발생기가 장전된 중성자계수기의 계산모델



[그림 16] 중성자 발생기가 장전된 중성자 계수기와 좌측 및 뒤 벽면의 계산모델

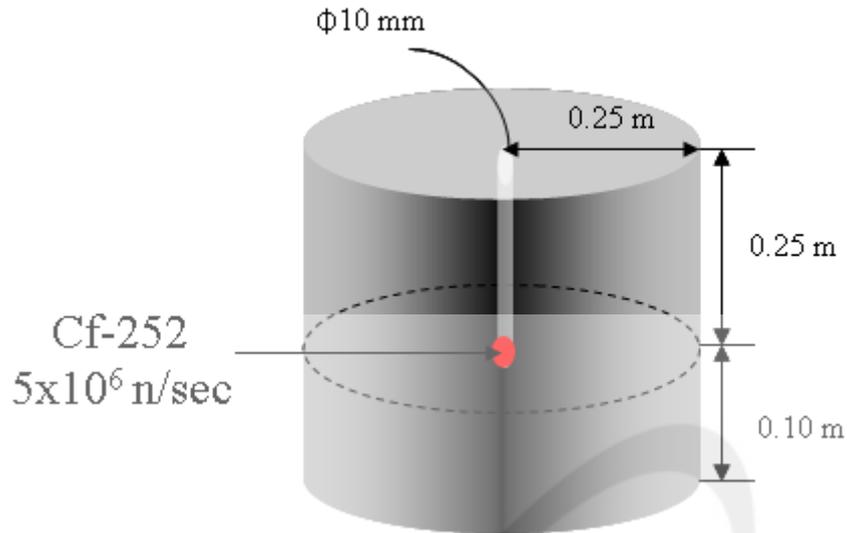
[표 8] 피폭 선량 계산 모델

선원의 위치	항목	정상상태(실제상태)	계산모델
중성자 계수기	중성자 발생기의 좌우 위치	계수기의 중심	계수기의 내부직경 30 cm 내에서 각 계산지점에 가까운 위치
	중성자 발생기의 상하 위치	바닥에서 0.25 m	계산지점과의 최단거리 위치. 즉, 계산지점과 같은 높이
	계수기의 PE	He-3 검출기 내부와 외부 각각 50 mm 씩	단일 100 mm PE
	He-3 검출기 부분	50 cm He-3 가스와 SUS 통	무시
	Isolated Panel	5 mm Isolated Panel	Air로 가정
	각 벽면의 계산지점	벽면과 0.1 m 이상 떨어짐	벽면 접촉지점
	PE 두께	0.1 m 이상	0.1 m
	연간 중성자 발생기 사용 실험시간	100 - 200 시간	500 시간
	중성자 에너지	2-3 MeV (평균 2.5 MeV)	3 MeV
저장함		선원이동 취급대	보수적으로 모사

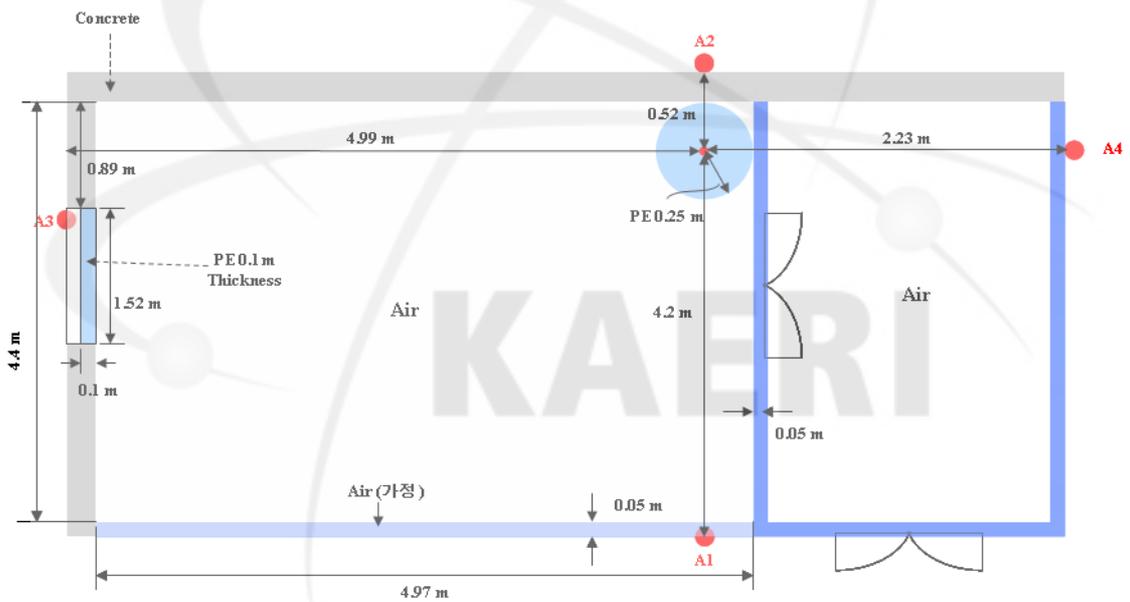
상하에 별도의 시설이 없기 때문에 전후 및 좌우 면의 피폭을 고려하였다. 전후 및 좌우 각 면에서 최대 피폭이 예상되는 지점을 결정하였다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 전면에는 작업실이 있으며, 작업실에서 최대피폭지점은 중성자 발생지점에서 최단거리 지점인 A1이고, 우측면에서의 최대피폭지점은 A4가 된다. 마찬가지로 좌측면과 뒷면에서 중성자 발생지점과의 거리가 최단거리인 A3과 A2가 최대 피폭지점이 될 것이다.

### 5.7.3.2. Cf-252 저장함

Cf-252 저장함의 모형은 [그림 17]와 같이 원주형으로 단순하고, 중심에 직경 1 cm의 홈이 있고, 중심에 Cf-252 선원이 존재하는 것으로 가정하였다. [그림 18]에 제시된 바와 같이 각 면에서 최대 방사선량이 예상되는 지점에서 방사선량을 계산하도록 모델링하였다.



[그림 17] 동위원소 저장함의 제원 및 계산모델



[그림 18] 동위원소 선원( $^{252}\text{Cf}$ ) 저장함의 차폐해석 모델

#### 5.7.4. 차폐해석 방법 및 예비계산

저장함의 경우에는 구조가 단순하기 때문에 모델링이나 차폐해석 방법에 있어서 많은 노력을 들일 필요가 없다. 그러나 중성자 발생기를 중성자 계수기에 장전하여 실험을 진행하는 경우에는 발생기가 계수기의 우물 내에서 좌우 및 상하로 움직이기 때문에 이에 대한 모델링과 적합한 계산방법을 도출할 필요가 있다. 계수기의 우물 내에서 좌우로 움직이는 경우에는, 보수적인 조건으로서 선원이 계산지점과 최단거리를 이루는 지점에 놓였다고 가정

하였다.

발생기가 상하로 움직이는 경우에는 계수기의 상단에 0.1 m 전까지만 접근한다는 가정 하에서 중성자 발생지점의 높이를 변화시키면서 계산하는 방법을 사용하였다. 이 때 발생기가 시설바닥에서 최대 1.1 m까지 올라가는 경우에 대한 계산을 수행할 때는 계수기의 상단까지의 길이는 1.2 m로 가정하는 방법을 택했다.

좌측면과 뒷면에서는 0.98 m 이하의 높이에서는 콘크리트 벽이 있고, 이 이상에서는 0.1 m 두께의 PE 차폐체가 장착되는 상태다. 중성자 발생지점의 위치가 변함에 따라서 콘크리트 벽인 경우와 차폐체가 장착된 곳에서의 방사선량을 계산해 본 결과, 창문에 PE 차폐체를 설치한 지점에서 훨씬 큰 방사선량을 나타냈다. 따라서 좌측면과 뒷면은 이 지점의 최대 피폭지점으로 선정하였다. 모든 차폐계산에서, MCNP4C 코드로 계산한 방사선량에 표준오차의 3 배를 합해 줌으로써 99 % 이상의 신뢰도를 갖도록 했다.

#### 5.7.5. 중성자 발생기에 의한 예산피폭선량 산출

앞에서 설명한 방법으로 MCNP4C 코드를 사용하여 중성자 발생기의 사용시설의 사방의 벽에서 각각 선량율을 계산하였다. 이때 중성자와 이차 감마선을 동시에 고려하였고, 우라늄 타겟이 존재하지 않는 경우에 대한 분석을 먼저 수행하고, 이를 바탕으로 최대 선량율을 나타내는 지점에 대해서 우라늄 타겟( $^{235}\text{U}$  2 kg 기준)이 존재하는 경우에 대한 차폐해석을 수행하였다. 차폐체가 동일한 경우에는 선원에 가장 가까운 거리에 있는 지점에서의 선량율이 가장 높을 것은 자명하지만, 이를 예비계산을 통하여 직접 확인하였다. 중성자 발생기가 계수기에 장착된 경우와 저장함에 보관하는 경우에 대해서 각각 최대선량을 결정하여 [표 9]과 [표 10]에 제시하였다.

[표 9]에서 볼 수 있듯이 중성자 발생기를 계수기에 장착하여 실험을 수행하는 경우에는 전면의 작업실에서 가장 높은 선량율을 나타냈으며, 타겟이 없는 경우에는 주간과 연간 방사선량은 각각 0.0532 mSv, 1.33 mSv이고, 타겟이 있는 경우에는 주간과 연간 방사선량은 각각 0.0822 mSv, 2.05 mSv로 결정되었다.

한편  $5 \times 10^6$  n/s 세기의  $^{252}\text{Cf}$ 를 저장함에 보관하는 경우에 대해서 각각 최대선량을 결정하여 [표 10]에 제시하였다. [표 10]에 제시된 저장함의 경우, 주간 및 연간 방사선량이 최대인 경우에는 우측면에서 나타났는데, 두 값은 각각 0.0402 mSv 및 1.05 mSv로 나타났다. 이 값을 중성자 발생기에서 최댓값을 나타낸 타겟이 존재한 경우의 방사선량에 합해 주면, 사용시설 내의 주

간 및 연간 총 방사선량의 최댓값은 각각 0.122 mSv, 3.10 mSv가 된다. 이 값들은 방사선 작업자의 주간 및 연간의 방사선량 제한치인 1 mSv와 20 mSv보다 훨씬 작은 값으로, [표 11]에 제시된 방사선 방호 등에 대한 기준을 만족한다.

[표 9] 증성자 발생기를 계수기에 장착한 상태에서의 방사선량 (선원 위치 이동 : 좌 : 1 m, 하 : 1 m (거의 중심), 차폐체 추가 : 작업실 전면 (20 cm PE), 오염실 쪽 :10cm)

위치	방사선량을 (mSv/hr)	주간 방사선량 (20 시간 기준) (mSv)	연간 방사선량 (500 시간 기준) (mSv)
전면	<.00266	<0.0532	<1.33
후면	<.00146	<.0292	<0.729
좌측면	<.000943	<.0189	<0.471
우측면	$0.00109 \times 1.48 = 0.00151$	$0.0218 \times 1.48 = 0.0323$	$0.546 \times 1.48 = 0.808$
타겟 존재(전면)	0.00247	0.0493	1.23

[표 10] Cf-252 선원을 저장함에 보관하는 상태에서의 방사선량

위치	방사선량을 (mSv/hr)	주간 방사선량 (20 시간 기준) (mSv)	연간 방사선량 (500 시간 기준) (mSv)
전면	0.000267	0.00535	0.134
후면	0.00201	0.0402	1.05
좌측면	0.000161	0.00321	0.0804
우측면	0.00157	0.0314	0.786

[표 11] 방사선 방호 등에 관한 기준

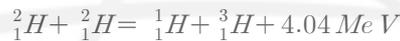
방사선방호등에 관한 기준

제13조(차폐물의 설계기준) 방사선안전기준규칙 제18조 제1항 제3호의 규정에 의한 차폐벽이나 차폐물에 대한 설계기준은 다음 각 호와 같다.

1. 사용시설 등의 내부에 사람이 상시 출입하는 장소는 연간 방사선량이 방사선작업종사자의 선량한도를 초과하지 아니 하여야 하고 1주당 방사선량은 1 mSv를 초과하지 아니 하여야 한다.
2. 사용시설 등의 경계에 인접하여 사람이 거주하는 구역은 연간 방사선량이 일반인의 선량한도를 초과하지 아니 하여야 하고 1주당 방사선량은 0.1 mSv를 초과하지 아니하여야 한다.

5.7.6. D-D 핵반응에 의한 삼중수소 발생량 추산

중성자 발생기의 D-D 핵반응은 아래와 같다.



이 때, 중성자뿐만 아니라 삼중수소가 거의 같은 확률로 생성되므로 중성자 발생기에서  $1 \times 10^8$  n/s ~  $1 \times 10^9$  n/s 중성자가 생성될 때 같은 양의 삼중수소가 생성된다. 비방사능은

$$SA = \lambda N = \frac{0.693}{T} \times \frac{6.03 \times 10^{23}}{A}$$

로 표현되며 T는 반감기이고 A는 원자량을 나타낸다. 삼중수소의 비방사능은 아래와 같다.

$$SA_{3H} = \lambda N = \frac{0.693}{T_{3H}} \times \frac{6.03 \times 10^{23}}{A_{3H}} = \frac{0.693}{12.33 \times 365 \times 24 \times 3600} \times \frac{6.03 \times 10^{23} \text{ atoms/mole}}{3 \text{ g/mole}}$$

$$= 3.58 \times 10^{14} \text{ Bq/g} = 1.78 \times 10^{-9} \text{ Bq}^3 \text{ H atom}$$

삼중수소가 초당  $1 \times 10^9$   ${}^3\text{H}$  atoms 생성된다면 이는 초당 1.78 Bq의 방사능을 나타내게 된다. 시간당 방사능 유출량은  $6.42 \times 10^3$  Bq 정도로 추산할 수 있다. 생성된 삼중수소의 방사능량  $6.42 \times 10^3$  Bq/hr, 진공펌프 시스템의 배출

량  $20 \text{ m}^3/\text{hr}$  및 주간 작업시간 6.4 시간을 고려할 때 삼중수소 배출량은  $3.21 \times 10^2 \text{ Bq}/\text{m}^3$ 이며, 방사선방호등에 관한 기준에 정한 배기기준은  $4 \times 10^7 \text{ Bq}/\text{m}^3$ 보다 월등히 낮으므로 환경에 미치는 영향은 없을 것으로 평가된다. 방사선방호등에 관한 기준(과기부고시 제 2002-23호)에 정한 핵종별 규제면제에 표기된 최소수량  $1 \times 10^9 \text{ Bq}$  또는 최소 농도  $1 \times 10^6 \text{ Bq}/\text{g}$  보다 월등히 작은 값으로 RI 적용 관리 대상이 아니다.

## 5.8. 사고위험 및 대책

### 5.8.1. 사고예측

중성자 발생기에 의한 사고는 과 피폭 사고 밖에 없다. 앞에서 언급한 바와 같이 선원은 차폐체 역할을 하는 계수기 내에서만 움직이도록 설계되어 있기 때문에 이를 벗어날 확률은 거의 없다.

만일 중성자 발생기가 계수기의 밖으로 벗어나는 사고가 났다고 가상하더라도 서베이미터에 의해서 즉각적으로 이를 확인할 수 있다. 확인 즉시 중성자 발생기의 전원을 끄면 중성자는 발생되지 않기 때문에 이 시간 동안 받는 방사선량은 무시할 정도라고 볼 수 있다.

### 5.8.2. 사고대책

안전장치의 주기적 점검을 시행하여 사고를 미연에 방지한다. 또한 장치 사용 중에는 개인선량계(TLD, 보조선량계)를 반드시 착용한다. 중성자 발생기의 사용 시에는 서베이미터를 상시 가동하여, 과 피폭 사고를 즉시 감지할 수 있도록 한다.

“능동형 중성자 측정실험실”에서는 중성자 발생기를 사용하여 중성자 측정시험을 수행할 계획이며, 이에 대한 안전성 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 내렸다. 주어진 작업조건하에 분석한 작업자의 예상피폭선량은 방사선 작업종사자의 법적 선량 허용한도를 초과하지 않아, 방사선 안전상에 문제는 없다는 결론을 내릴 수 있다. 따라서 작업자가 안전관리 절차만 준수한다면 충분히 안전할 것으로 예상된다.

## 6. 중성자 발생 시험

사용후핵연료의 건식처리 공정 물질 중 회수 우라늄은 자발핵분열에 의한 중성자 발생이 거의 없어, 포함된 핵분열성 물질( $^{235}\text{U}$ )을 계량관리 하기 위해서는 일반적인 피동형 중성자계수 방법을 사용하는데 어려움이 있다. 또한 회수 우라늄 내에는 다른 공정물질이 불순물로 포함되어 있을 가능성이 높고 이들은 대부분 감마선을 방출할 가능성이 높아 감마선 측정방법을 적용하기도 용이하지 않다. 이러한 경우 외부의 중성자 선원을 이용해 핵분열성 물질로부터 발생하는 유도핵분열 중성자를 계수하는 능동형 중성자 측정 시스템을 이용한 핵물질 계량장치를 적용할 수 있다. 본 연구에서는 능동형 비파괴분석 장비 개발을 위해, 외부 중성자선원으로서 튜브형 중성자 발생기의 동작모드에 따른 활용 가능성을 테스트하고 성능을 평가하였다.

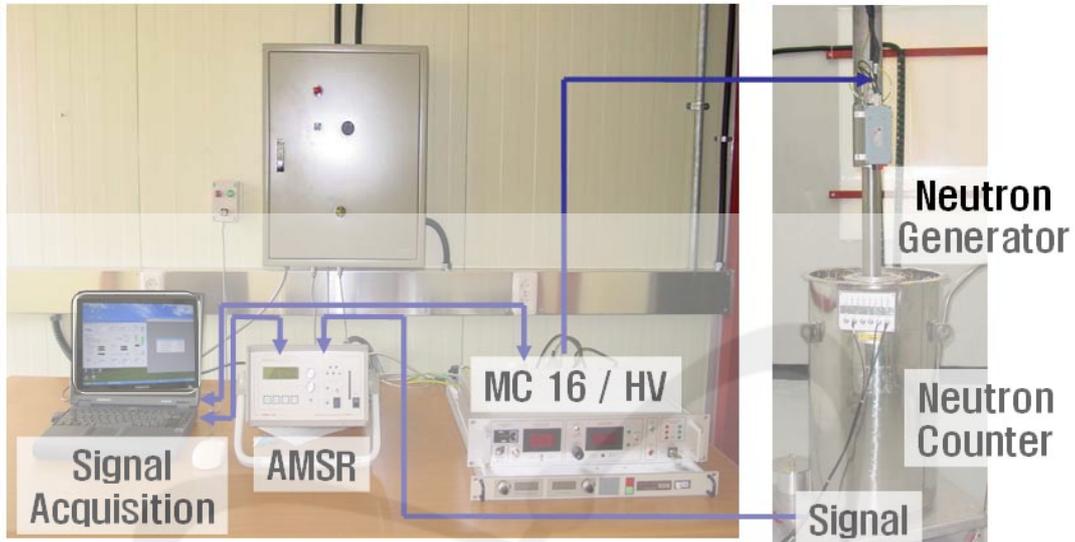
### 6.1. 실험 방법

[그림 19]는 중성자 발생 성능 테스트를 위해 사용한 시스템을 보여주며, 이용한 중성자 계수기는 계수효율 28.5%인 중성자계수기(INVS)와 계수효율 13%의 중성자계수기(DSFC)이다. 두 계수기에 대한 세부 제원은 [표 12]와 같다. 중성자 발생은 D-D반응에 의한 2.5 MeV, 최대 초당  $2 \times 10^6$  개의 중성자가 발생한다. 발생기의 동작모드는 연속(Continuous Mode), 펄스형(Pulse Mode) 그리고 다발형(Burst Mode)이 가능하다. 제조사 측에서 제공한 데이터에 따르면 동작 전압은 70-90 kV, 전력은 5 W 이하를 만족하는 범위에서 동작하고, 펄스형이나 다발형 모드로 작동시킬 경우 Duty가 5% 이상이어야 한다. 이를 정량 분석에 이용하기 위해서 중성자 발생기의 다양한 동작 성능 테스트를 실시하여 실험에 필요한 발생기의 요건을 확인하였다.

### 6.2. 중성자 방출을 결과

효율이 28.6%인 INVS로 측정된 중성자 전체 계수율과 (Singles) 계수기의 효율을 고려하여 환산한 발생기의 선속은 관전압 80 kV, 관전류 10  $\mu\text{A}$  일 때 약  $2.1 \times 10^5$  n/s 이며, [그림 20]와 [그림 21]에서 보이듯이 관전압과 관전류에 비례하여 증가하여 80 kV, 40  $\mu\text{A}$  일 때 약  $8.42 \times 10^5$  n/s 이다. 능동형 중성자계수를 위해 본 연구에서 주로 활용한 선속은 80 kV, 20  $\mu\text{A}$  이며, 이때의 선속은 약  $4.26 \times 10^5$  n/s 이다. 동작가능 전압범위는 70 - 100 kV로 나타났다. 전류가 40  $\mu\text{A}$ 까지는 100 kV까지 가능하지만 그 이상의 전류에서는 동작이 원활하지 않았다. 측정된 최대 선속은 40  $\mu\text{A}$ , 100 kV 일 때

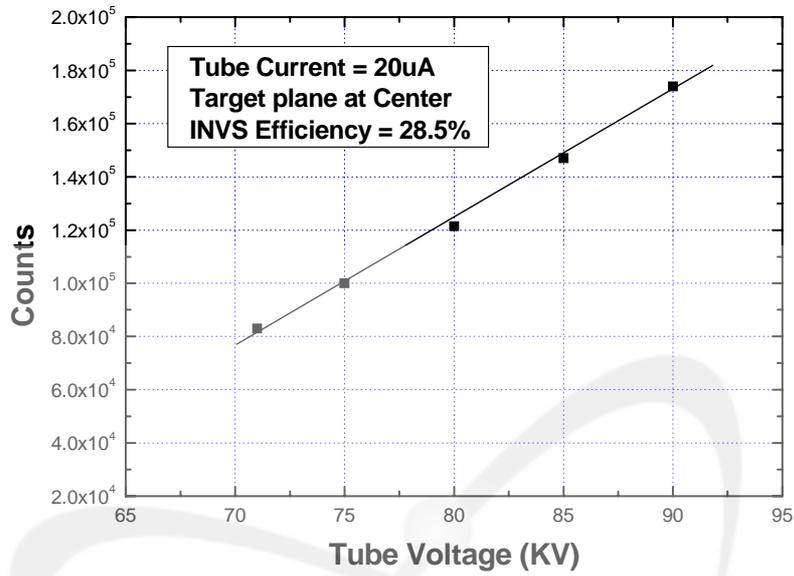
1.7x10<sup>6</sup> n/s 으로 나타났다.



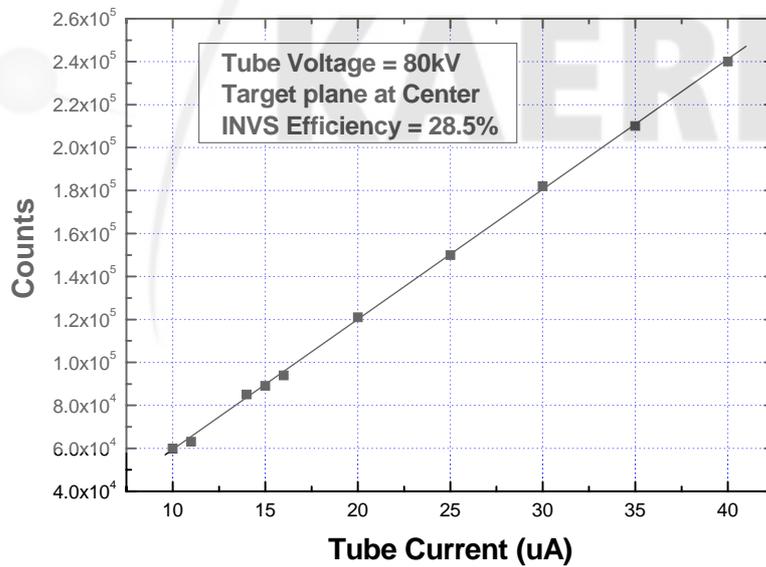
[그림 19] 중성자 발생기와 능동형 중성자계수기

[표 12] 중성자 계수기 (DSFC, INVS) 성능 명세 (DSFC의 계수효율은 원래 21% 이나, 본 보고서에 기술한 측정결과는 모두 계수효율 13%인 상황에서 측정)

DSFC Item	Specification	INVS Item	Specification
Cavity diameter	13.5 cm	Cavity diameter	3.97 cm
Outside diameter	52.5 cm	Outside diameter	25.72 cm
Gamma-ray shield	Inner lead: 5 cm	Gamma-ray shield	Inner lead: 2 cm
Preamp	PDT110A® (16 ea)	Preamp	JAB-01(4 ea)
He-3 tubes	Reuter-Stokes®	He-3 tubes	Reuter-Stokes®
(a) Number	16 ea	(a) Number	16 ea
(b) Active length	20 inch	(b) Active length	15.5 inch
(c) Diameter	1 inch	(c) Diameter	1 inch
(d) Gas fill	4 atm	(d) Gas fill	4 atm
Efficiency (HV @1680 V)	13 %	Efficiency (HV @1680 V)	28.6%
Gate width	64 μs	Gate width	64 μs
Predelay	4.5 μs	Predelay	4.5 μs
Die-away time	88 μs	Die-away time	44 μs
Double gate fraction, fd	0.4910	Double gate fraction, fd	0.6126
Operation HV	1680 V	Operation HV	1680 V



[그림 20] 중성자 발생기의 관전압에 따른 중성자 계수값 (계수기 INVS 효율은 28.5%, 발생기 관전류는 20  $\mu$ A)



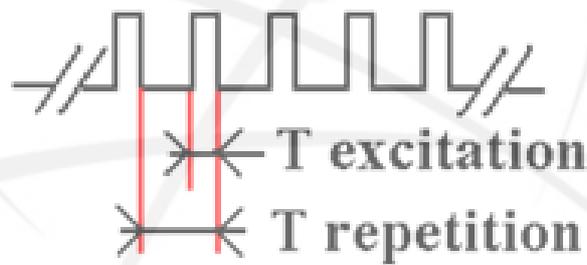
[그림 21] 중성자 발생기의 관전류에 따른 중성자 계수값 (계수기 INVS 효율은 28.5%, 발생기 관전압은 80 kV)

효율이 13%인 DSFC로 측정한 연속모드일 때 동작 전압 및 전류 조건에 따른 측정 계수값을 [표 13]에 정리하였다. 이 결과를 효율로 역산하여 중성자 발생기의 방출율을 환산하면 주 활용 조건인 80 kV, 20  $\mu$ A 일 때 약  $5.3 \times 10^5$  n/s 이다. INVS 측정치를 기준으로 할 때 24% 정도 큰 결과를 보였다. 계수기에 따른 이 같은 차이를 보인 주된 이유는 중성자 발생기에서 방출하는 중성자의 방향성에 관련이 있다고 판단한다. 효율을 기반으로 역산하여 방출율을 환산할 때는 기본적으로 방출하는 중성자가 등방성을 가진다고 가정이 포함되어 있다. 하지만 방출하는 중성자는 방향에 따라 그 비율이 달라지며 최대 60% 까지도 차이가 날 수 있다 ([그림 1] 및 1.2절 설명 참조). 따라서 계수기의 유효 계수 길이(Active length)가 큰 DSFC로 측정한 경우에는 방출율이 높은 가속 방향( $0^\circ$ ) 및 반대방향( $180^\circ$ )의 중성자가 INVS 보다 많이 계수되었고, 환산한 방출율이 더 큰 결과로 나타났다고 해석할 수 있다. 이와 같이 방출율이 방향에 따라 크게 달라지므로 방출율을 한 값으로 정의하기는 어렵다. 계수기의 형태 상 중수소 이온의 가속방향을 기준으로 직각 방향으로 방출되는 중성자를 주로 계수하게 되어 있으므로, 측정에 의한 방출율 추정치인  $5.3 \times 10^5$  n/s는 실제 방출율의 최소 한계 값이라 추정할 수 있다. 마찬가지로 INVS로 측정된 40  $\mu$ A, 100 kV 일 때 최대 선속은 DSFC 결과를 토대로 환산하면 약  $2.17 \times 10^6$  n/s 으로서 제작사 측에서 제시한 최대 선속과 거의 동일한 것으로 나타났다.

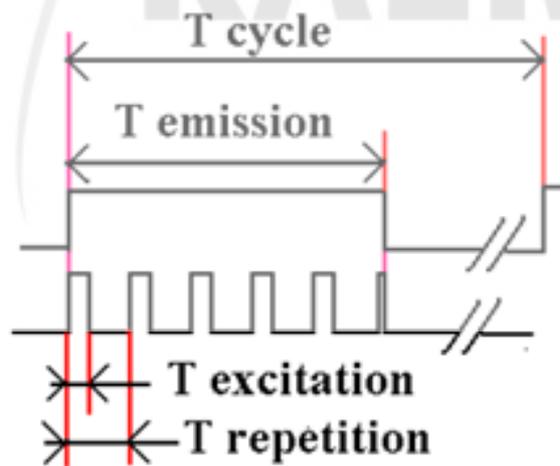
중성자 발생기의 펄스 모드 및 다발 모드 테스트를 위해 다양한 시간 변수들을 변화 시켜 가면서 측정한 결과를 [표 14]에 정리하였다. 이 때 시간 변수들  $T_{exc}$ ,  $T_{rep}$ ,  $T_{emi}$ ,  $T_{cyc}$  는 [그림 22]과 [그림 23]에 도식화 된 의미를 가진다. 측정된 전체 중성자 계수율을 살펴보면, 발생기 전압 및 전류가 동일한 조건일 경우 시간 변수들에 의한 duty factor가 변하더라도 전체 중성자 방출율은 변화가 없는 것으로 결론 내릴 수 있다. 즉, 동일 발생 조건일 경우 duty factor가 작으면 방출 시간( $T_{exc}$  및  $T_{emi}$ ) 동안에는 순간적으로 더 높은 선속의 중성자가 방출되지만, 휴지시간( $T_{rep}-T_{exc}$  및  $T_{cyc}-T_{emi}$ ) 동안에는 중성자가 방출되지 않아 전체적으로는 일정한 방출율을 보이는 것이다. 측정 결과에서 보이는 변화는 중성자 계수기의 불감 시간에서 오는 오차로 판단된다.

[표 13] 연속모드 동작 시 관전압, 관전류에 따른 중성자 계수값 (측정 계수기 DSFC 효율은 13%)

Target 전압 및 전류		계수 결과 (cps)			Target 전압 및 전류		계수 결과 (cps)		
Current( $\mu$ A)	VHV(kV)	Singles	Doubles	Triples	Current( $\mu$ A)	VHV(kV)	Singles	Doubles	Triples
10	70	22878.39	4.69	-2.00	20	90	101735.06	156.69	-52.63
10	80	34059.72	68.40	15.05	20	100	139536.09	33.15	36.83
10	90	49344.88	114.51	-21.86	40	70	94478.05	91.13	-11.55
10	100	67547.89	276.08	83.44	40	80	140458.04	116.11	178.61
20	70	46759.85	-9.53	32.34	40	90	203139.64	111.66	121.84
20	80	69800.01	16.62	74.47	40	100	277505.25	277.71	-125.89



[그림 22] 펄스(pulse) 모드 시간변수



[그림 23] 다발(burst) 모드 시간변수

[표 14] 펄스 및 다발형 모드 시 계수율 (측정 계수기 DSFC 효율은 13%)

Target 전압 및 전류		Timing Parameters				계수 결과 (cps)		
Current (μA)	VHV (kV)	Texc	Trep	Temi	Tcyc	Singles	Doubles	Triples
20	70	10us	100us	n/a	n/a	40430.0	29431.0	-5606.1
20	70	10ms	20ms	n/a	n/a	46801.7	159359.3	42770.1
20	80	10us	200us	n/a	n/a	60488.8	96762.9	63965.1
20	80	10us	100us	n/a	n/a	58465.1	49295.9	-5183.5
20	80	1ms	5ms	n/a	n/a	67225.4	1139763.9	8794170.6
20	80	10ms	100ms	n/a	n/a	66872.0	2538866.2	43216040.6
20	80	10ms	20ms	n/a	n/a	69355.8	340455.5	497106420.0
20	90	10us	100us	n/a	n/a	85042.0	70592.4	-26300.6
20	90	10ms	20ms	n/a	n/a	98073.1	681469.3	296639.9
20	100	10us	100us	n/a	n/a	118258.5	31609.0	-23687.3
20	100	10ms	20ms	n/a	n/a	135884.3	1291119.5	693051.0
20	80	10us	100us	10ms	20ms	62280.4	272735.7	161320.7

### 6.3. 발생 중성자의 시간 상관성

동시계수를 할 경우, 발생기에서 발생된 중성자는 시간상관 관계가 없으므로, 이에 의한 동시계수 값은 이론적으로는 0 이어야 한다. 실제 테스트 결과 동시계수와 상관된 계수 값 (Doubles 및 Triples)을 살펴보면, 연속모드에서의 중성자동시계수 백그라운드는 선속과 계수기의 계수 효율에 따라 다르지만 80 kV, 20 μA 동작조건, 13% 계수효율일 경우 약 10 - 20 cps 가 측정되었고, 이는 동시계수 신호를 통한 핵물질 계량의 주요 오차 요인으로 작용 한다.

펄스형이나 다발형 모드인 경우 연속모드에서 10 ~ 20 cps의 동시계수가 측정된 것과 비교해서, 같은 조건에서 10,000 ~ 1,000,000 cps 이상의 동시계수 값을 보였으며, 이는 중성자발생 주기와 동시계수 신호처리 파라미터 값 (Gate width, pre-delay 및 long delay time)에 따라 크게 달라진다. 즉, 중성자동시계수를 위해서 사용하는 신호처리 방법에 의해서, 중성자가 펄스형이나 다발형 모드 방출될 경우 정상적인 결과를 얻을 수 없다. 일반적으로 펄스형 동작의 경우, 지발중성자(Delayed Neutrons)나 지발감마선(Delayed Gamma)을 이용한 비파괴분석법에 활용할 수 있다.

### 6.4. 결론

본 연구에서는 능동형 비파괴분석 장비 개발을 위해, 외부 중성자선원으

로서 튜브형 중성자 발생기의 동작모드에 따른 활용 가능성을 테스트하고 성능을 평가하였다. 정량 분석에 이용하기 위해서 중성자 발생기의 다양한 동작 성능 테스트를 실시하여 실험에 필요한 발생기의 기본 데이터를 확보하였다. 중성자동시계수를 위해서는 펄스형이나 다발형 모드의 동작은 적용이 불가능 하며, 향후 지발중성자 혹은 지발감마선을 이용한 비파괴분석법에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

발생기는 7.6 cm 직경의 중성자 발생기 튜브와 부수적인 발생 모듈로 구성되어 있다. [그림 5]에서 볼 수 있듯이 실제 중성자가 발생하는 위치인 반응표적은 발생기 튜브 끝단으로부터 15.1 cm 위에 위치해 있다. 제작사가 제공한 최대 중성자 선속은  $2 \times 10^6$  n/s 이다. 일반적으로 발생기 표적에서 방출되는 중성자는 등방성으로 방출되지 않고, 가속 이온의 진행 방향으로의 방출이 약간 더 크다. 정확한 방출을 및 분포에 대한 구체적인 자료는 제작사 측에서도 제시하고 있지 못하고 있다. 테스트 결과 이에 제작사 측에서 제시한 선속에 근접하는 값을 확인하였으나, 보다 높은 정확도가 요구되는 실험에 활용할 경우 사전에 공인된 방법을 통한 측정이 필요할 것으로 판단한다.

The logo for KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) is centered on the page. It features the word "KAERI" in a bold, sans-serif font. Above the text is a stylized graphic consisting of two curved lines that sweep upwards and outwards, resembling a particle trajectory or a stylized 'K'. There are also two small circles, one on each side, positioned above the curves, possibly representing nuclei or particles.

## 7. 중성자 발생기를 이용한 우라늄 시료 능동형 동시계수 측정 실험

### 7.1. 능동형 계수 시스템 구성

자발핵분열에 의한 중성자 발생이 거의 없는 희수 우라늄을 계량하기 위해, 외부의 중성자 선원을 이용해 핵분열성 물질로부터 발생하는 유도핵분열 중성자를 계수하는 능동형 중성자 측정 시스템을 이용한 핵물질 계량장치를 구축하였다 [10-12]. 측정을 위한 실험실은 방사선안전관리 요건 충족 및 중성자 발생기 사용 전 검사, 성능 테스트를 위한 핵물질 사용 설계서 제출, 우라늄을 이용한 측정실험과 관련된 방사선안전관리를 위한 배기 필터장치 설치 등이 되어 있다. 시스템은 [그림 24]에서 보듯이 측정실에 위치한 중성자 계수기와 중성자 발생기의 결합과 제어실에 위치한 발생기를 제어모듈 및 계수기의 동시계수를 처리하는 시프트레지스터와 신호획득 컴퓨터로 구성되어 있다.

앞서 언급하였듯이 중성자 계수기는 16개의  $^3\text{He}$  중성자 검출기와 이를 둘러싼 폴리에틸렌 감속재 및 감마선 차폐체로 구성되어 있다. 각 검출기 튜브는 PDT (Precision Data Technology Inc.) 앰프와 연결되고, 16개의 신호는 각 8개씩 2개의 그룹으로 분리되어 OR 신호회로에서 합쳐진다. 동시계수를 위한 시프트레지스터 (shift register)는 ORTEC 사의 AMSR 150 (Advanced Multiplicity Shift Register) 모델을 사용하였다. 검출기 튜브 인가 전압은 1680V, pre-delay와 gate width는 각각 4.5  $\mu\text{sec}$ , 64  $\mu\text{sec}$  이다.

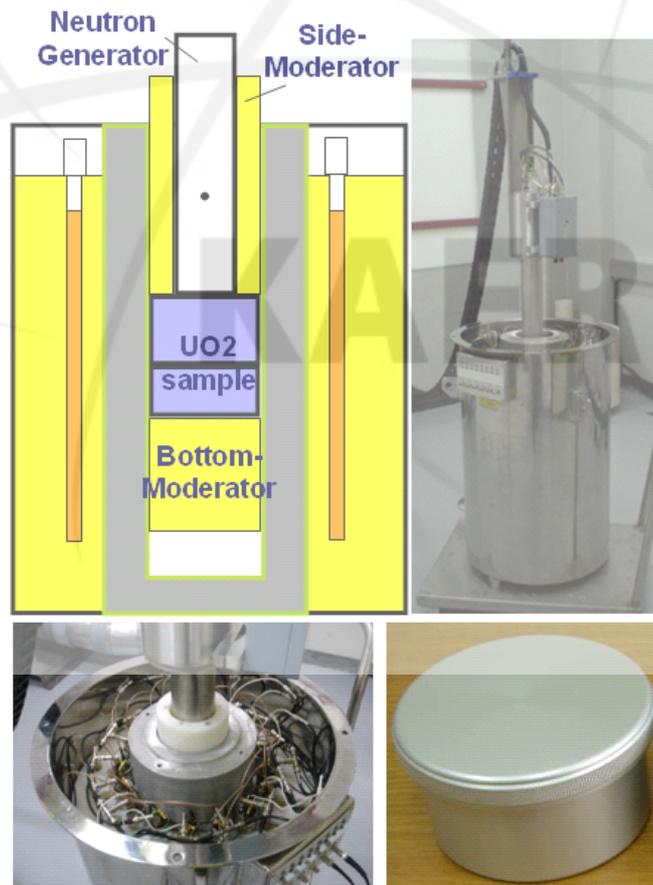
4개의 천연우라늄(NU) 및 1 개의 감손우라늄(DU) 시료를 대상으로 측정하였으며, 시료의 형태는  $\text{UO}_2$  분말로서 밀도는 약 2.9  $\text{g}/\text{cm}^3$ 이다. 각 분말 시료는 알루미늄 용기에 담겨 있으며, 용기의 두께는 2 mm, 외경은 9.8 cm 이다. 용기의 높이는 시료 양에 따라 달라지며, 각 시료에 대한 높이 및 우라늄 질량은 [표 15]와 같다.

시뮬레이션 결과 및 시료공동 사이즈와 중성자 발생기 튜브 직경에 따라, 측면감속재는 삽입 한계치를 고려하여 2.4 cm 두께의 폴리에틸렌, 시료를 공동 내부 중앙에 위치시키기 위해 15 cm 두께의 하부감속재를 실험에 사용하였다. 시료용기 사이즈로 인해 시료감속재는 적용하지 않았으며, 이러한 구조에서 시뮬레이션을 통해 얻은 die away time은 약 94  $\mu\text{sec}$ 이며, 측정을 통해 얻은 값은 88  $\mu\text{sec}$ 이다. 계수기 내부 시료 공동의 높이가 20 cm가 되도록 중성자 발생기 및 측면감속재를 삽입하여, 모든 시료에 대해 동일하게 적용시켰다. 2.5 - 3.5 kg 범위의 측정치는 시료 2개를 세로 방향으로 쌓은 형

태로 위치시켰다. 실험 시 중성자 발생기 조건은 80 kV, 20  $\mu$ A 이며, 이때 발생하는 중성자는 약  $4.26 \times 10^5$  n/s, 측정 시간은 1200 초이다. [그림 24]에 실험도 및 시료 사진을 나타내었다.

[표 15] 실험에 사용한 U산화물 분말 및 용기 정보 (샘플 직경 9.4 cm, Al용기 두께 2 mm, 용기 외경 9.8 cm)

Sample	Total Mass (kg)	<sup>235</sup> U Mass (g)	Height (cm)	
			Sample filled	Container
DU#1	0.494	1.08	2.454	5.7
NU#1	0.500	3.10	2.484	3.0
NU#2	1.000	6.20	4.969	5.7
NU#3	1.500	9.30	7.453	8.3
NU#4	2.000	12.40	9.938	11.0



[그림 24] UO<sub>2</sub> 시료에 대한 실험도 및 장치 사진

## 7.2. 중성자 발생기를 이용한 측정 결과

시료 없이 중성자 발생기로부터의 중성자만 있을 경우 측정된 백그라운드 동시계수율을  $5.0 \pm 9.6$  cps (counts per second) 이다. 이후의 모든 측정값 및 오차는 백그라운드 값을 차감하여 보정하였다. [그림 25]에서 확인할 수 있듯이, 동시계수율은 시료에 포함된  $^{235}\text{U}$  양을 기준으로 증가하며, 평균적으로 단위  $^{235}\text{U}$  질량당 약  $2.64$  cps/g- $^{235}\text{U}$  동시계수율을 보였다.

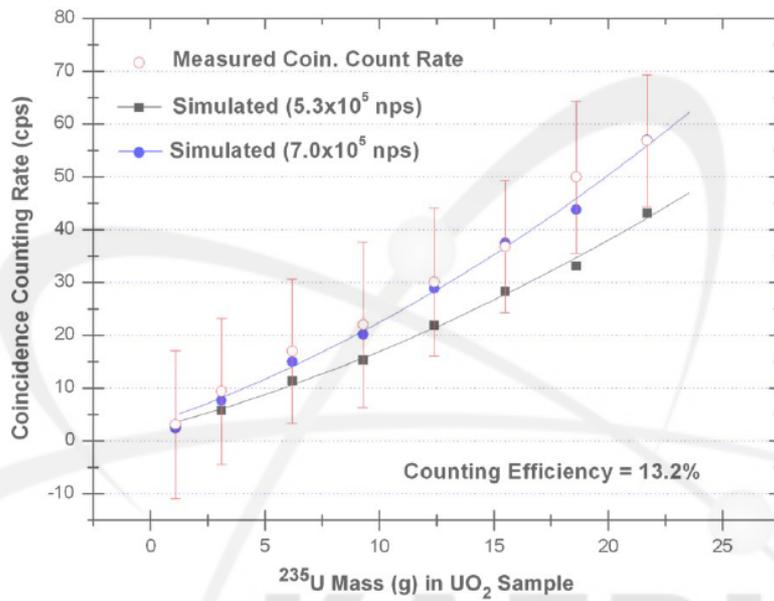
앞서 추정된 중성자 발생기의 선속을  $5.3 \times 10^5$  n/s를 기준으로 MCNPX 시뮬레이션을 해 본 결과 실제 측정치 보다 작은 결과를 보였다. 원인 중의 한 가지는 중성자 발생기에서의 발생이 등방이라 가정하는데서 기인하는 것으로 판단한다. 1.2절에 설명한 바와 같이, 실제로 U 시료로 입사해서 유도 핵분열을 일으키는 중성자는 중수소 이온의 가속 방향 (중성자 방출율이 가장 높은 방향) 쪽 중성자가 주요하므로 전체 선속대비 유도 핵분열 수 (결과적으로 Doubles)의 예상치 (MCNPX 시뮬레이션 결과) 보다 큰 측정 결과로 나타날 수 있다. 시뮬레이션에서 중성자 발생기 선속을 바꾸어 가며 시뮬레이션 했을 때 약  $7 \times 10^5$  n/s 일 때 실험 결과의 경향과 대체로 일치하는 것으로 나타났다 ([그림 25] 참조). 따라서 다른 영향이 없다면 효율측정 실험결과와 우라늄 시료 측정실험 및 시뮬레이션에 의한 추정을 통해, 중성자 발생기의 중성자 방출율은  $5.3 \times 10^5$  n/s 이상  $7 \times 10^5$  n/s 이하로 범위 내에 있다고 추측할 수 있다.

$^{235}\text{U}$  양에 따른 동시계수율 증가 경향이 비선형적인 이유는 시료의 양이 증가할수록 시료를 수직으로 쌓아야 하므로 발생기로부터의 거리가 멀어져, 시료 내부의 평균 중성자 선속이 감소하기 때문이다.

시료 성분 및 상태가 달라 직접적인 비교는 어렵지만, 일반적인 Am-Li 선원을 사용한 다른 연구결과에서는 1 - 1.38 wt% 농축우라늄 산화물 시료 대해, 10 g의  $^{235}\text{U}$  당 약 60 - 100 cps의 결과를 보인 것에 비해 낮은 수치이다 [1]. 주된 이유는 외부 중성자선원 발생 위치와 시료간의 거리 및 높은 에너지이다. 평균 백그라운드 표준분포는 9.57 cps, 백그라운드 보정 후 동시계수에 대한 표준분포는 13.8 cps 이다. 동위원소를 사용한 경우에 비해 오차가 큰 이유는 중성자 발생기의 공급전원 및 발생 메커니즘에 따른 것으로 예상하나, 보다 세부적인 검증이 추가로 필요하다.

오차 증가의 또 다른 원인으로, 추가적인 감속재 사용에 따른 긴 die-away time으로 분석한다. 일반적으로 die-away time이 길 경우 우연에 의한 동시계수율이 증가하는 것으로 알려져 있다 [13]. 당연하게도 핵분열성

물질이 적게 포함된 시료의 경우 그로부터 발생하는 유도핵분열 신호가 적으므로 오차는 상당히 클 수밖에 없다 [14]. 시료의 양을 증가시키거나, 농축도가 높은 시료를 대상으로 할 경우 적정 수준의 오차를 가진 능동형 계수가 가능할 것으로 판단한다. 보다 세부적인 결과는 참고문헌 [15]와 [16]에 자세하게 기술되어 있다.



[그림 25] UO<sub>2</sub> 분말의 <sup>235</sup>U 양에 따른 동시계수율 측정 결과 및 시뮬레이션 결과

## 8. 중성자 발생기 유지보수 및 문제 해결

### 8.1. 유지 보수

본 연구에서 활용하고 있는 중성자 발생기의 유지보수에 필요한 대표적인 사항은 두 가지로서, 첫째 주기적으로 UF6 기체의 압력을 체크하여 보충하고, 둘째 3 개월에 최소 15 분 이상 가동해 주는 것이다.

UF6 기체에 이상이 있을 경우 컨트롤 소프트웨어에 경고등이 표시되며, 제작사 측은 1 개월 주기로 확인하고 필요시 가스를 보충하기를 권고하고 있으며, 그 외에는 가스를 주입할 필요는 없다.

발생기를 주기적으로 사용해야 정상적인 상태를 유지할 수 있으며, 만일 3 개월 이상 사용하지 않았을 경우 다음과 같은 절차로 발생기를 시운전 한 이후에 본격적으로 사용하도록 권고하고 있다.

1. 중성자 발생기 전원 ON
2. 펄스모드로 설정하고 시간 변수를 1kHz, 10% duty (1 ms/100  $\mu$ sec) 로 설정
3. 관전압을 71 kV, 관전류를 20  $\mu$ A로 설정
4. 발생기 가동
5. 전류, 전압 등 신호가 안정화 되도록 기다림
6. 관전압을 매 3 분마다 5 kV 씩 증가시켜 90 kV 까지 증가
7. 90 kV 설정에서 5분간 가동
8. 발생기 정지
9. 정지 상태로 15 분 유지
10. 발생기 가동 준비 완료

문제가 발생할 경우 제작사 측에 문의하고, 필요 시 제작사 측은 중성자 발생기의 컨트롤 컴퓨터에 원격으로 접속하여 발생기 동작을 점검하여 상태를 진단할 수 있다.

### 8.2. 활용 경험을 통한 문제점 및 해결방안

#### 8.2.1. 재가동 시 지연시간 문제

발생기는 최초 동작 시 설정한 전류까지 상승하기 시작하는데 까지 2분 이상 소요된다. 짧은 시간동안 발생기를 가동한 이후 재가동 시, 최초보다 짧은 시간 내에 전류가 안정화 된다. 하지만 장시간 발생기를 가동시킨 이후

에 정지시키고, 다시 가동시킬 경우에는 발생 모드에 따라 에러 메시지를 동반한 발생 불능 상태에 이르게 된다. 제작사 측이 제공한 사용자매뉴얼에는 모드를 변경 할 경우 약 10 분 정도 휴지 시간이 필요한 것으로 언급되어 있다. 하지만 발생기 가동 시간이 어느 정도 이상 (약 20분) 될 경우, 정지 후 재가동을 시도할 때 심각한 지연 시간이 필요한 것으로 나타났다.

경험적으로는 20 분 정도 가동 이후, 연속 모드로 재가동을 시도하는 경우 1 시간에서 2 시간 이상 까지도 기다려야 했으며, duty factor 가 낮아질 수록 (펄스모드 혹은 다발 모드) 지연 시간은 짧아진다. 이 때 발생하는 에러 메시지는 아래와 같다.

"Generator Starting Error! Tube current doesn't go back to zero"

관측되는 현상은 타겟의 전압 및 이온소스 전압 증가는 진행 되나, 전류가 0 mA로 가까이에서 출발하지 않고 2~10 mA (그 전 operation setup에 따라 값이 달라짐) 정도에서 있으며, Replenisher 전류가 ~1500으로 증가하지 못하면서 에러 메시지가 발생한다. 제작사 측의 설명에 따르면 가동 전 전류 값이 일정한 설정 값보다 작지 않은 경우 장치 보호를 위해 가동이 시작하지 않도록 자동 차단하기 때문이다. 타겟 전류 값은 발생기 튜브 내 압력에 따라 그리고 재가동 하려는 duty factor에 따라 달라지며, 연속모드 (100% duty)일 경우 전류가 높게 나오기 때문에 연속모드의 재가동 시 타겟 전류 값 (발생기 튜브 내 기체 압력)이 설정치 이하로 떨어질 때까지 지연 시간이 발생하게 되는 것이다. 자세한 문제 발생 시 현상 및 제작사 측과의 문의 과정은 [부록 6]과 [부록 7]에 수록하였다.

소프트웨어로 제한하고 있는 전류 값 설정치를 높임으로써 지연시간을 어느 정도까지는 줄일 수 있었으나 연속모드 재가동 시에는 여전히 수 십분 이상의 지연 시간을 피할 수 없는 상태이다. 소프트웨어 업그레이드는 제작사 측이 제어 컴퓨터에 원격으로 접속하여 수행하였다. 이 때 필요한 현장에서의 모듈 점검 설정 방법은 [부록 8]에 수록하였다.

### 8.2.2. 가동 시작 직후 고전압 인가모듈 정지에 따른 발생 불가 문제

위와 같은 재가동 지연과 별도로 타겟 전류가 증가하지 않고 고전압 공급 장치가 자동 차단되면서 VHV 에러 경고등이 들어오는 이상 동작이 있었다. 관련하여 safety loop 상태를 표시하는 경고등이 적록색으로 점멸하는 현

상을 보이기도 한다. 특별한 원인을 찾을 수 없었으며, 제작사 문의 후 컨트롤러 모듈(MC16)의 저전압 공급 회로와 관련하여 문제가 있는 것으로 예측하고, 이 경우 자체 수리가 어려워 제작사측으로 해당 모듈을 송부해 부품을 교체해야 할 것으로 권고 받았다.

하지만, 이후 MC16 컨트롤러 모듈 내부의 IC 칩들의 접촉상태를 점검하고, 컨트롤러 모듈 및 발생기 모듈(MEN16), 발생기 튜브(PROX16)에 연결된 모든 케이블을 해체 후 다시 연결하여 접촉 상태를 바꾸어 줌으로써 문제가 해결되었다. 건조한 겨울철 장기간 가동하지 않다가 재가동 시 접촉 불량으로 인한 문제인 것으로 판단된다.

### 8.3. 중성자 발생기 제작사에 문의사항 답변

SODERN사 중성자 발생기 Genie16GT를 사용해 오면서 생긴 의문점 중 매뉴얼 혹은 이메일 서신을 통해 만족스러운 답을 구할 수 없었던 사항 중, 제작사가 제공해 주기 희망하는 자료 혹은 궁금한 점과 중성자 발생기를 구입할 경우에 확인하고 요구 할 수 있도록 몇 가지 사항을 정리하여 [부록 9]에 수록하였다. 이미 앞 절에서 언급한 문제 사항을 포함하였으며 답변은 한국원자력연구원 방사선안전관리실에서 동종의 중성자 발생기를 구매하기 위해 제작사측과 성능테스트 및 교육훈련을 받으면서 (2010년 2월) 논의한 내용이다.

KAERI

### III. 결론 및 토의

능동형 비파괴분석에 있어서 중성자 발생기를 고려할 수 있는 첫 번째 이유는 동위원소 선원보다 안전하고 다루기 쉽다는 특성 때문이다. 중성자의 발생 및 강도를 조절할 수 있기 때문에 능동형 비파괴분석 기술 개발 적용에 용이하다. 이러한 점은 사용후핵연료를 취급하는 환경에서, 다른 비파괴 분석기술과 함께 사용할 때 모드 전환 시 선원 장착 및 탈착 과정을 없앨 수 있어 활용 폭을 넓힐 수 있다.

하지만 실제 적용 시에는 방출하는 중성자의 에너지가 높아 부가적인 감속재가 필요하다는 점과, 중성자가 발생하는 위치가 기하학적 구조로 인해 분석 시료로부터 일정한 거리 이상 떨어질 수밖에 없다는 점 등의 발생기가 가지는 단점이 고려되어야 한다.

실험결과 중성자 발생기를 이용한 능동형 중성자계수 방법은 동위원소를 이용할 때보다 오차가 커, 이를 줄이기 위한 노력이 필요할 것으로 판단한다. 중성자 발생기의 전원공급의 안정성 영향평가, 발생기로부터 중성자의 우연한 동시계수율을 줄이기 위한 추가적인 외부중성자 차폐, 중성자 발생기와 분석시료의 거리를 최소화하기 위한 새로운 기하학적 구조의 제안 등 후속 연구가 필요하다. 이를 통해 중성자 발생을 조절할 수 있다는 장점을 최대화 하여, 다양한 비파괴분석 방법과의 접목을 통해 사용후핵연료 처리공정의 안전조치 기술의 범위를 확대할 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구에서 활용하고 있는 중성자 발생기의 성능 실험 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 우물형 중성자계수기 및 우라늄 시료를 이용해 측정
- 주 활용 조건인 80kV, 20  $\mu$ A 일 때 선속은 약  $5.3 \times 10^5$  n/s 이상  $7.0 \times 10^5$  n/s 이하
- 선속은 관전압과 관전류에 비례하여 증가
- 최대 선속은 40  $\mu$ A, 100 kV 일 때 약  $2.1 \times 10^6$  n/s 이상
- 동작가능 전압범위는 70 - 100 kV
- 연속모드에서 약 10 - 20 cps 동시계수율
  - 선속과 계수기의 계수 효율에 따라 동시계수율 달라짐
  - 동시계수 신호를 통한 핵물질 계량의 주요 오차 요인으로 작용
- 펄스/다발 모드에서는 10,000 ~ 1,000,000 cps 동시계수율 측정
  - 중성자 발생 주기와 신호처리 변수 조합에 따라 크게 달라짐

- 중성자동시계수 신호처리 방법 이론 상 펄스/다발 모드 활용 불가
- 펄스형 동작은 지발중성자, 지발감마선 비파괴분석법에 활용 가능
- 중성자의 등방성에 따라 선속 평가 결과는 달라질 수 있음
- 보다 면밀한 측정이 필요함

회수 우라늄에는 미미한 양이지만 우라늄 이외 초우란 원소 및 희토류 핵분열산화물 등이 포함될 가능성이 있다.  $^{244}\text{Cm}$ 와 같은 일부 초우란 원소 (TRU)는 자발핵분열에 의한 중성자를 다량 방출하므로, 능동형 계수를 통한 핵분열성 동위원소의 분석을 방해할 수 있다. 즉, 경우에 따라서는 피동형과 능동형 중성자 동시계수법, 혹은 피동형 중성자 계수 및 감마선 분광 등 두 가지 이상의 비파괴분석 방법을 동시에 적용해야 할 수도 있다. 일반적으로 기존의 우물형 중성자 동시계수기를 피동형 모드와 능동형 모드로 측정하기 위해서는 외부 중성자 선원 및 분석대상 샘플을 재장착 혹은 탈착해야 한다. 사용 후 핵연료를 취급하는 공정 환경을 고려할 때 이는 핵물질 계량에 부수적인 작업을 야기 시킨다.

궁극적으로 능동형 비파괴 분석이 적용되어야 하는 목적에 따라 오차가 작은 정밀한 계량관리가 필요한 곳에서는 동위원소 선원을 사용하거나, 적정 수준의 오차가 허용되는 상황 또는 피동형과 능동형 중성자계수 혹은 감마 분광 및 중성자 계수 기술이 동시에 적용되어야 하는 상황에서는 중성자 발생기를 사용한 능동형 중성자계수 시스템을 적용할 수 있을 것으로 기대한다.

## 참고문헌

- [1] H. O. Menlove, Description and Operation Manual for the Active Well Coincidence Counter, Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-7823-M, 1979
- [2] Y. G. Lee, Development of DUPIC Safeguards Neutron Counter, Korea Atomic Energy Research Institute Report KAERI-TR-1381-99, 1999
- [3] T. H. Lee, H. D. Kim, K. J. Jung, S. W. Park, Development of a Neutron Coincidence Counter for the Advanced Spent Fuel Conditioning Process, J. Korean Phys. Soc., Vol. 48(2), p. 218, 2006
- [4] T. H. Lee, H. O. Menlove, S.-Y. Lee, H.-D. Kim, Deveopment of the ACP safeguards neutron counter for PWR spent fuel rods, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, V. 589 (1) p. 57, 2008
- [5] H. Y. Kang, H. R. Cha, Y. G. Lee, G. M. Koo, H. D. Kim, W. I. Ko, D. Y. Song, J. S. Hong, M. S. Yang, Active NDA Neutron Measurement Method to Determine Fissile Contents of Fuel Material, Korean Nucl. Soc. Autumn Meeting, Seoul, Korea, October 1999
- [6] J. T. Prud'homme, "Texas Nuclear Neutron Generators," Texas Nuclear Corporation, 1962
- [7] D. Reilly, N. Ensslin, and H. Smith, Jr., Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials, LA-UR-90-732, p. 364, LANL, 1991
- [8] J. Cutter, D. Lee, L. O. Lindquist, H. O. Menlove, An Evaluation of Sealed-Tube Neutron Generators for the Assay of Fresh LWR Fuel Assemblies, LA-9103-MS, LANL, 1981
- [9] EADS DODERN, GENIE 16GT User Manual, Nov. 2007, <http://www.sodern.com>
- [10] S.-K. Ahn, T.-H. Lee, H.-S. Shin, H.-D. Kim, Monte Carlo Simulation of an Active Neutron Counter for Fissile Material Accounting, Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Gyeongju, Korea, 29-30 May 2008
- [11] S.-K. Ahn, T.-H. Lee, H.-S. Shin, H.-D. Kim, Modification of a Neutron Counter for an Active-Mode Operation Using a High Energy Interrogation Neutron Source, 2008 International Pyroprocessing Research Conference, Jeju, Korea, 24-27 Aug. 2008
- [12] S.-K. Ahn, T.-H. Lee, H.-S. Shin, H.-D. Kim, Active-Mode Operation of a Neutron Counter Using a High Energy Interrogation Neutron Source, 12th Annual Meeting of INMM-KC, Yong-In, Korea, 13 Nov. 2008
- [13] N. Ensslin, W. C. Harker, M. S. Krick, D. G. Langner, M. M. Pickrell, J. E. Stewart, Application Guide to Neutron Multiplicity Counting, Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-13422-M, 1998
- [14] W. El-Gammal, W. I. Zidan, E. Elhakim, A proposed semi-empirical method for  $^{235}\text{U}$  mass calibration of the active-well neutron coincidence counter, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. 565 pp. 731-741, 2006
- [15] S.K.Ahn, et ta., "핵분열성 물질 계량을 위한 능동형 중성자 동시계수기 개발", KAERI TR-3742, 2009
- [16] S. K. Ahn, et. al., "Simulation and preliminary experimental results for an active neutron counter using a neutron generator for a fissile material accounting," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 609, pp. 205-212, 2009

(공 백)



[부록 1] 기기관리위원회 심의요청서



## 기기관리위원회 심의 요청서

### 가.요청내역

품 명	(국문) : 중성자 발생기 (영문) : Neutron Generator		
수 량	1 set	가 격	한화: 122,000,000 원 외화: 97,260 (유러화)
재 원	원자력중장기사업	구 분	구매(O), 임차( ), 기타 내자( ), 외자( )
부서명 (부/Lab 등)	사용후핵연료기술개발부	요청인/관리자	신희성

### 나.검토사항

구 분	검 토 사 항
□취득의 필요성 (용도와 구분되게 작성)	- 파이로 공정의 핵물질 계량관리를 위한 “능동형 중성자 측정장치”를 개발할 계획임. 중성자 발생기는 “능동형 중성자 측정장치”의 중성자 공급원(선원)으로 반드시 필요 함. 첨부1-2 참조. - 동위원소선원을 활용할 수도 있지만, 장치의 개발단계에서는 많은 실험을 수행해야 하기 때문에 중성자 발생조건을 자유롭게 변화시킬 수 있는 중성자 발생기가 훨씬 효율적임. 또한 펄스모드를 선택하여 펄스의 간격을 조절함으로써, 중성자의 발생에서 흡수까지의 과정을 심층적으로 관찰할 수 있음. 첨부3 참조.
□현재 소내외 동종 유사장비 보유여부 및 보유인 경우 공동활용 가능여부? 공동활용 불가능 하다면 그 이유?	- 특수 목적의 장비라서, 국내에 4 대 밖에 없음. 현장을 직접 방문하여 소내 및 타기관에서 보유하고 있는 유사 장비의 현황을 파악했음. - 소내외 유사기종을 분석해 본 결과, 크기 및 출력조건이 적합하지 않아 공동활용이 불가능한 것으로 확인됨. 첨부4 참조.
□취득후 공동활용 등록 여부?	1.소내공동활용가능( ),2.소내.외공동활용가능(O) 3.공동활용불가( ) 4.협의후결정( )
□국내제품으로 구입가능 여부?	서울대(최희동교수)에서 최근 중성자 발생기를 개발했지만, 대형(1x1x1 m)이라 본 과제의 목적에 맞지 않음.

붙임:1.용도설명서 1부.

2. 견적서, 카타로그등 참고자료 각 1부.

기기관리위원회규정 제2조 제1항 제2호에 의거 위와 같이 기기관리위원회 심의를 요청 합니다.

2007. 03. 20.

요청인    과제명: 핵물질 계량 안전조치 기술개발

과제기간: 2007.03.01-2010.02.28    과제책임자: 김 호 동 (서명)

기기관리위원회 위원장 귀하

## 용 도 설 명 서

1. 품명 및 수량 : 중성자 발생기(neutron generator) 1 set	
2. 모델명: GENIE 16 GT	
3. 재원: 원자력중장기사업	
4. 요청인(과제책임자): 김호동 (전화:2349) E-mail: khd@kaeri.re.kr	5. 관리자: 신희성 (전화: 2338) E-mail: shinhs@kaeri.re.kr
<p>6. 용도(필요성과 구분되게 작성)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 파이로 공정의 핵물질에 존재하는 핵분열물질(U-235, Pu-239 등)을 정량분석할 수 있는 장비가 필요하지만, 아직 세계적으로 개발되지 않은 상태임.</li> <li>- 본 과제에서는 파이로 공정의 핵물질 계량을 위해서 “능동형 중성자 측정장치”를 개발할 계획임.</li> <li>- 구매하고자 하는 중성자 발생기는 “능동형 중성자 측정장치”에 부착되어 중성자 선원으로 사용할 계획임. 첨부자료 4 참조.</li> <li>- “능동형 중성자 측정장치”의 측정효율 결정시에는 일반 중성자 선원(Cf-252 역할)으로 활용하고, 우라늄 속에 존재하는 U-235의 양을 측정할 때는 핵분열을 유도하는 중성자 공급원(AmLi 역할)으로 사용함. 첨부 2 참조.</li> </ul>	
<p>7. 규격(성능 및 사양)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Neutron Energy : 2.5 MeV (D-D type)</li> <li>- Neutron Yield : <math>2 \times 10^6</math> n/s</li> <li>- Life time(working time) : 4000 hours</li> <li>- Size and weight : .Neutron Emitting module : dia. 70mm/flange dia. 104mm - 740mm length - 8kg .Modulator unit : 200mm x 100mm x 80mm, less than 1kg</li> <li>- Pulse rate : adjustable from 10Hz to 10kHz and continuous emission</li> <li>- Interconnecting cable length with control unit : 15m</li> <li>- Average power : limited to 10W, ventilation required from 5W</li> <li>- Operating temperature : -20°C to 70°C</li> </ul>	
<p>8. 기타(특이사항 있을시)</p> <p>- 설치할 장소에 차폐시설이 완비되어야 구입 가능함. PIEF에 차폐시설을 꾸밀 계획. 첨부 2, 5 참조.</p>	

## 기기관리위원회 심의결과 통보서

윤자산

2007. 5 . 7.

수 신: 선진핵주기시스템공학그룹, 김호동

참 조: 신희성

제 목: '07년도 제2차 기기관리위원회 심의결과 통보

### 1. 신청내역

품 명	(국문): 중성자발생기 (영문): Neutron Generator		
수 량	1 Set	가 격	EUR 97,260
재 원	원자력연구개발비	모델명	
구 분	구매(0), 임차( ), 기타		
부서 및 과제명	부서명: 선진핵주기시스템공학그룹 과제명: 핵물질 계량 안전조치 기술개발 과제기간: 2007. 3. 1-2010. 2. 28		
요청인 (과제책임자)	김호동	관리자	신희성
공동활용등록여부	1.소내공동활용가능( ), 2.소내.외공동활용가능( 0 ) 3.공동활용불가( ) 4.협의후결정( )		

### 2. 심의결과

- 구매요구시 도입장비 자원표기를 정확히 기록 하여야 함

위와 같이 2007년도 제2차 기기관리위원회 심의결과를 통보합니다.

2007. 5. 7.

기기관리위원회 간사 

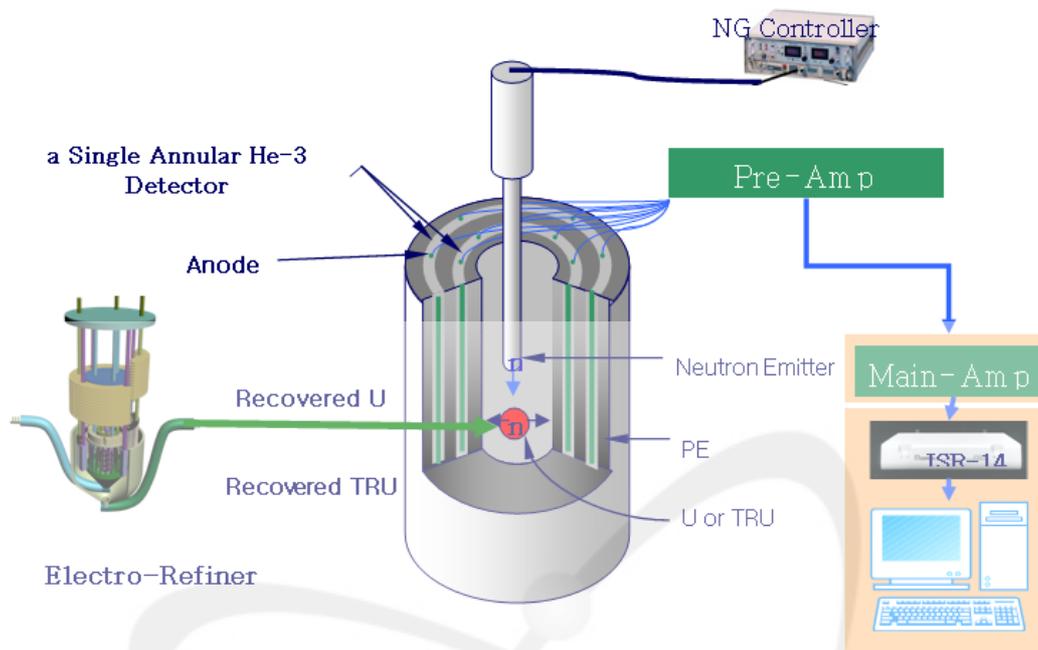
[부록 2] 프랑스외무부 허가용 첨부자료 (중성자 발생기 필요성)



## ACTIVE NEUTRON ASSAY FOR SAFEGUARDS

Advanced spent fuel Conditioning Process(ACP), a part of pyroprocess, has been studied in KAERI since 1997 and a passive neutron counter, ACP Spent fuel Neutron Counter(ASNC) has been developed for the safeguards of the processing facility(ACPF). Special Nuclear Material(SNM : U-235, Pu) treated in each unit process of the ACP is measured by ASNC based on the Cm ratio, which is the ratio of SNM to Cm. From this year, our project has been extended to the electro-refining process in which an active neutron assay (interrogation) is needed for the measurement of the recovered U or TRU. But until now, the optimum neutron counter for the purpose seems to not be developed and certificated worldwide. So we should try to find the best neutron counter for the safeguards of the pyroprocess facility including the electro-refining preprocess. One of the candidates of the optimum counter is the active neutron counter in which a neutron source is used to induces fission in the fissile material and the neutron emitted in the induced fission reaction is detected for the measurement of the fissile material amount.

We have been thinking about the best neutron source for the active neutron counter: isotopic neutron source and neutron generator. We finally decided that the generator is better than the isotopic source during at least developing step. In conclusion, we will use the neutron generator as a neutron source of the new active neutron counter which has been developing to measure SNM (U-235, Pu) recovered in the electro-refining process, a part of pyroprocess. This final goal of all those SNM measurement activities is the safeguards of the pyroprocess facility. The topics related to this explanation are described in the attached document. The active neutron counter is preliminarily modeled as follows;



Attached Document

### 1. Pyroprocess R&D

Korea has considered nuclear power to be the most reliable energy source for the future, and steadily expanded the role of nuclear energy in its energy mix. At present, a total of 20 nuclear power units are in operation in Korea, sharing about 40 percent of the total production of electricity. Such an active nuclear energy program, however, has inevitably resulted in producing significant quantities of nuclear spent fuel. The cumulative amount of spent fuel generated in Korea is more than 8,000 ton as of the end of the year 2005. At present, it is stored in temporary storage pools at plant sites, while a portion of the CANDU spent fuel has dry-stored (concrete canister). Unfortunately, all the storage pools currently in operation in Korea are expected to reach their full capacity in the foreseeable future. To resolve this problem, the Atomic Energy Commission (AEC) of Korea made a decision to formulate a publicly acceptable "National Radioactive Waste Management Policy," through the national-wide consensus.

Meanwhile, the Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) has been focused its R&D activities in order to develop a "clean" nuclear fuel cycle that 1) will utilize and thus, reduce the accumulated spent fuel, 2) will produce less amount of spent fuel with power generation, and 3) will dispose high-level waste safe and sound. In doing so, KAERI has performed several research projects, such as the Advanced spent fuel Conditioning Process (ACP), the pyrometallurgical partitioning and transmutation, and the high-level waste disposal.

## 2. ACP program

The Advanced Spent Fuel Conditioning Process (ACP) has been under development at KAERI since 1997. The main concept is to reduce spent oxide fuel into a metallic form in a high temperature molten salt, as an intermediate step for the conditioning of a spent fuel for an eventual disposal and for a recycling and transmutation of the spent fuel in a GEN-IV fast reactor. It includes several unit process such as an air voloxidation of the oxide fuel pellets, an electrolytic reduction of the oxide fuel powder in a LiCl-Li<sub>2</sub>O molten salt bath, and a smelting of the reduced metal powder. The air voloxidation transforms the UO<sub>2</sub> pellets into U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> powder which an air vsuitable form for the subsequent reduction process by increasing the surface area of the UO<sub>2</sub> pellets. Also the process removes the volatile f volatiproducs from the U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> powder. The U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> powder is introduced into a molten salt bath for a conversion of the spent fuel oxides to base metals. Earowddevelopment activities for the reduction process focused on a convened intoLi-reduction process in which a highowdreactn salithium metal was used as a reducing agene. However, since el1 a new electrolytic reduction technology has evolved as an innovatn sassproach and it has replaced the Li-reduction process. In the process, the spent oxide fuel serves as a cathode of a cell in which the metal oxides for reduced to base metals, and the oxygen datbas for oxidatbd at an inert anode to produce oxygen gas, which is then vented from the cell. The new concept has advantages over the Li-reduction process such as a simplicity of the process systems, reduction of the molten salt waste and an increase of the reduction yield. Over the period

of 2002-2005, the following results were obtained from the inactive electrolytic reduction tests of 10 gU / batch to 20 kgU/batch.

### 3. ACPF

To demonstrate the laboratory-scale ACP with 20 kg HM / batch, the hot cell facility named the Advanced Spent Fuel Conditioning Process Facility(ACPF) was constructed. All the process equipment has been installed in ACPF and the cold test of the process has been performed by using the fresh Uranium and the simulated fuels. The hot test by using the spent fuel is scheduled in the end of year 2008. The details of the ACPF construction is given in section 2.

### 4. ASNC

The ASNC is a kind of coincidence neutron counter based on the autocorrelation measurement of coincidence neutrons from spontaneous fission events of even mass number isotopes such as Pu240, Cm244, and so on. ACP nuclear materials are various in their forms and isotope compositions and contain fission products of high gamma radiations. The ASNC was specially designed to account for these ACP nuclear materials of complex matrix in the hot cell. According to the present schedule, the PWR spent fuel will not be brought into the ACPF until 2008. Instead, the simulated fuel will be used to fulfill ACP experiments during the cold test est es. Preliminary calibration curves for the metal ingot, ill be salt, and UO<sub>2</sub> powder are produced to perform the nuclear material measurements in the early stage until real calibration samples of the ACPF are prepared. These samples are going to be produced in the first ACPF hot operation. Preliminary calibration curves are produced from the measurement data for <sup>252</sup>Cf sources . These curves are also generated by using MCNPX code.

The design requirements of the ASNC are a sufficiently high efficiency for the doubles rate measurement, flat spatial response in the cavity, easy remote maintenance ability, and high sustainability for strong gamma radiations from fission products. The ASNC has a horizontally-laid geometry for convenient placing and removing of nuclear materials. If

some problems occur in its electronic components such as preamplifiers and  $^3\text{He}$  tubes, those can be replaced with new ones by remote manipulators. The design of ASNC was optimized by using the MCNPX code to get a high neutron detection efficiency and flat spatial response in its cavity. The neutron detection efficiency, spatial efficiency profile in the cavity, HV plateau characteristic curve, deadtime coefficients, die-away time, pre-delay, and gate width were determined by measurements with two  $^{252}\text{Cf}$  spontaneous fission neutron sources. One of the sources is a weak source (CVN101) whose activity is about  $1.6 \mu\text{Ci}$  (09/02/06) and the other is a strong source (C7-427) whose activity is about  $0.9 \text{ mCi}$  (15/02/06). The strong source was cross-checked by LANL N-1 group. From the test results, we can see that the efficiency is high enough to get reasonable values for singles and doubles rate of the spontaneous fission neutrons.

The spontaneous fission rate per gram and reduced first and second moment for spontaneous fission neutrons for  $^{244}\text{Cm}$  or  $^{252}\text{Cf}$  are independent of a sample or neutron counter properties. However neutron detection efficiencies for  $^{244}\text{Cm}$  or  $^{252}\text{Cf}$  are dependent on the neutron counter and they should be obtained from measurement data for each isotope. In this study, only  $^{252}\text{Cf}$  source was available. Thus the efficiencies for  $^{244}\text{Cm}$  and  $^{252}\text{Cf}$  were calculated by using the MCNPX  $^{244}\text{Cm}$ . The doubles rate of those curves for multiplying samples is calculated by using the MCNPX code. The effect of neutron self-multiplication for the metal ingot and  $\text{UO}_2$  powder is surely shown. This can be confirmed through the comparison between the calibration curves for non-multiplying. The  $^{244}\text{Cm}$  mass for multiplying samples can be obtained by using the correction method for self-multiplication. These preliminary calibration curves will be used until the real samples are prepared from the hot operation of the ACPF. The mass of  $^{239}\text{Pu}$  and  $^{235}\text{U}$  for all ACP nuclear materials can be obtained with these three calibration curves and Cm ratio calculated by using the ORIGEN-S code in the early period of the ACPF hot operation.

The ASNC was developed to quantify uranium and plutonium in spent fuel and process materials of the ACPF. This neutron counter can be

remotely maintained with manipulators of the ACPF hot cell. The performance of the ASNC was tested with two  $^{252}\text{Cf}$  sources and the test results show that the efficiency of the ASNC is sufficiently high to measure the doubles rate of spontaneous fission neutrons. Preliminary calibration curves are generated from the measurement data of  $^{252}\text{Cf}$  sources. These calibration curves are used until real calibration curves are produced with calibration samples in the early hot operation of the ACPF.



(공 백)



[부록 3] 발생기 구동장치 및 차폐시설 제작 설치 시방서



# 제 작 시 방 서

능동형 중성자측정실험실의 구동장치 및 차폐체 제작, 설치

KAERI

한 국 원 자 력 연 구 원  
핵물질계량안전조치기술개발과제

<p>핵물질계량안전조치 기술개발과제</p>	<p>제 작 시 방 서</p> <hr/>	<p>페이지</p>
<p>1. 품 명 : 능동형 중성자측정실험실의 구동장치 및 차폐체 제작,설치</p> <p>2. 수 량 : 1 식</p> <p>3. 기본규격 및 사양 : 제작관련도면 참조 (도번: 2007-11-05/1-2)</p> <p>4. 장치의 개요 및 각 부문별 제작특성</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 본 시방서에서는 네가지 부문으로 나눌 수 있으며, 중성자 차폐체 설치, 중성자 발생기 구동장치 제작, 중성자 발생기 작동과 연계된 interlock 설치 및 반사경 설치로 나눌 수 있다. 이들은 서로 독립되어 있기 때문에 각 부문별로 나누어서 아래에 기술한다.</li> </ul> <p>가. 중성자 차폐체 설치</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 차폐체는 고밀도 Polyethylene(PE) 재질 (밀도 : 0.95 g/cm<sup>3</sup>)로 설치한다.</li> <li>- 50 mm 두께의 PE를 사용한다.</li> <li>- 사용시설(중성자 발생기 설치 장소)과 일반작업실과의 경계면에 150 mm(T) x 5 m(W) x 2.5 m(H)로 차폐체를 설치하고,</li> <li>- 사용시설의 두개의 창문에 각각 100 mm(T) x 1.1 m(W) x 1.1 m(H)로 차폐체를 설치하고,</li> <li>- 사용시설과 오염검사실과의 경계면에 100 mm(T) x 1.2 m(W) x 2.5 m(H)로 차폐체를 설치한다.</li> <li>- PE판 접속부분에서 중성자 차폐능의 저하를 방지할 수 있도록 차폐체 공사를 실시해야 하고, 접속부분에서의 차폐능이 차폐체 중심에서의 차폐능의 80 %이하가 되지 않도록 한다.</li> </ul> <p>나. 중성자 발생기 구동장치 제작</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 중성자 발생기(높이 740 mm, 무게 약 8 kg)의 하단 기준으로, 사용시설의 바닥에서 100 mm 상부 지점부터 2600 mm 상부 사이에서 움직일 수 있도록 제작한다.</li> <li>- Stepping Motor를 사용하여 구동하도록 제작해야 하고, 상하 이동의 최소단위가 0.1 mm이하가 되어야 한다.</li> <li>- Stepping Motor의 전원이 단전되었을 때, 중성자 발생기의 그 지점에 고정되어 있어야 한다.</li> <li>- Stepping Motor의 전원에 의한 노이즈를 없애기 위해서 Stepping Motor를 사용하지 않을때에는 전원을 차단해야 하는데, 이를 수월하게 할 수 있도록 설계한다.</li> <li>- 작동 스위치의 작동으로 중성자 발생기가 상하이동을 제어할 수 있어야 하며, 사용시설과 일반 작업실에 각각 별도의 작동 스위치가 있어야 하며, 일반 작업실의 작동 스위치는 오염검사실에서도 사용가능하도록 해야 한다.</li> </ul>		

<p>핵물질계량안전조치 기술개발과제</p>	<p>제 작 시 방 서</p>	<p>페이지</p>
<p>- 발생기를 상하로 이동 시나 정지 시에 발생기에 충격이 가해지지 않도록 설계 및 제작한다.</p> <p>- 사용시설은 방사선(중성자) 선속이 높은 지역이므로, 구동장치의 stepping motor는 고방사선 환경에 적합한 것을 사용하여야 한다.</p> <p>- 과부하나 돌발사태가 발생했을 때 전원이 자동으로 차단되도록 제작해야 한다.</p> <p>- 작동스위치는 미세이동, 중간이동, 신속이동 세 모드를 선택할 수 있도록 한다.</p> <p>- 중성자 발생기 거치대 박스는 추락 혹은 충돌시 외부충격으로부터 중성자 발생기를 보호할 수 있도록 제작하고, 중성자 발생기를 쉽게 장착 혹은 해체할 수 있도록 제작한다.</p> <p>다. 중성자 발생기 작동 연계 interlock 장치 및 경보등 설치</p> <p>- 중성자 발생기의 전원과 오염검사실 문의 개폐에 연계한 interlock 장치를 설치한다.</p> <p>- 중성자 발생기가 가동 중에는 오염검사실 문을 열 수 없도록 한다.</p> <p>- 오염검사실 문이 열리면 자동으로 중성자 발생기의 전원이 차단되도록 한다.</p> <p>- 사용시설이나 오염검사실에 작업자가 있는 상황에서는 중성자 발생기의 가동이 불가능 하도록 해야 한다.</p> <p>- 중성자 발생기가 가동되고 있음을 알리는 경고등을 일반작업실과 오염검사실 앞에서 확인할 수 있는 위치에 설치한다.</p> <p>라. 사용시설 천정에 반사경 설치</p> <p>- 일반작업실에서 작업자가 사용시설에서의 중성자 발생기 구동을 확인하기 위한 것이다.</p> <p>- 사용시설의 천정에 1 m x 1 m의 반사경을 설치한다.</p> <p>- 일반작업실과 사용시설 사이의 차폐벽 상부(바닥에서 2.5 m 상부)에 설치되어 있는 W 1 m x H 0.8 m의 창문을 통하여 중성자 발생기의 움직임을 확인할 수 있게 설치한다.</p> <p>- 사용시설의 온도 변화에 따른 ‘김 서리는 현상’이 없는 반사경을 설치하거나, 이를 제거할 수 있는 장치를 부착한다.</p> <p>5. 장치의 각 부분별 제작내용</p> <p>가. 중성자 차폐체 설치 : “4 항” 참조</p> <p>나. 중성자 발생기 구동장치</p> <p>- 부품 : Stepping Motor , Rack Gear 등 “4항”의 사양을 만족시킬 수 있는 것</p> <p>- 재질 : Stainless Steel(SUS 304)</p> <p>- 규격 : “4항”의 사양을 만족시킬 수 있는 것</p>		<p style="text-align: center;">/</p>

핵물질계량안전조치 기술개발과제	제 작 시 방 서  <hr/>	페이지  /
<p>다. Interlock</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 품질 : KS 마크</li> <li>- 기타 : “4항”의 사양을 만족시킬 수 있는 것</li> </ul> <p>라. 반사경</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 품질 : KS 마크 혹은 동급</li> <li>- 기타 : “4항”의 사양을 만족시킬 수 있는 것</li> </ul> <p>마. 후드장치</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 재질 : Stainless Steel(SUS 304)</li> <li>- 규격 : 1 m x 1 m</li> <li>- 기타 : “4항”의 사양을 만족시킬 수 있는 것</li> </ul> <p>6. 장치의 운전조건</p> <p>가. 고방사선 환경에서 운전.</p> <p>나. 중성자 발생기의 열 발생으로 인하여 상온보다 높은 온도에서 운전.</p> <p>7. 소급재료 목록</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 없음</li> </ul> <p>8. 제작공정에 따른 기술협의 및 특기사항</p> <p>가. 본 설비는 제작도면과 시방서에 의하여 제작하되, 주요제작사양 및 기기선정, 기타 명시되어 있지 않은 세부사항은 당소 제작발주자와 사전에 충분한 기술협의를 거친후 제반공정을 진행시키도록 한다.</p> <p>나. 상세설계 또는 제작과정에서 문제가 있을 경우에는 장치의 사용목적 및 특성에 영향을 주지 않는 범위 내에서 협의에 의해 다소 조정 할 수 있다.</p> <p>다. 본 “장치”의 계약자는 계약체결후 소정 기일 이내에 당소에서 제시한 관련도면 및 제작시방내용을 참고하여 상세설계, 제작도면, 제작기술사양서, 주요기기명세서 등을 제출하여 사전 기술검토과정을 거친 후 제작에 착수해야 한다.</p> <p>라. 본 “장치”는 제반 성능조건을 확인할 수 있도록, 장치의 납품 반입전 제작업체 현장에서 소정의 성능시험을 당소 제작감독원 입회하에 실시하여 제반조건을 만족하여야 한다.</p> <p>마. 상기와 같이 입회검사를 실시한 다음, 이상이 없다고 판단되면 납품 반입 후 당 연구원의 해당 실험실(능동형 중성자 측정 실험실, PIEF 부품창고 103호)에서 전반적인 성능시험을 실시하여 합격판정을 득해야 한다.</p> <p>바. 본 “장치”의 계약자는 이상과 같은 제반 기술협의 사항을 성실히 수행하여야 하며, 성능시험을 실시함에 있어서 장치의 제반성능 요구조건을 충족시키기 위한 지적사항에 대해서는 이에 적극 응해야 하며, 또한 해당 관련자료 요구 시에는 이에 응해야 한다.</p>		

핵물질계량안전조치 기술개발과제	제 작 시 방 서	폐 이 지
		/

9. 관련자료 제출사항

관련 자료 제출 내용	제출기일 (계약후)	부 수	비 고
1) 장치의 각 부분별 상세설계도면	15일 이내	2 부	승인용
2) 주요기기 및 부품사양서(SPEC.)	15일 이내	2 부	승인용
3) 기타 장치관련자료 일체포함	납 기 내	3 부	-
- 특기사항 : 상기의 제출내용중 기일내에 미제출 또는 불성실한 내용으로 인한 납기지체에 대한 책임은 계약자에게 있다.			

10. 납품장소

- 본 장치의 납품장소는 당 연구원의 지정장소로 한다.

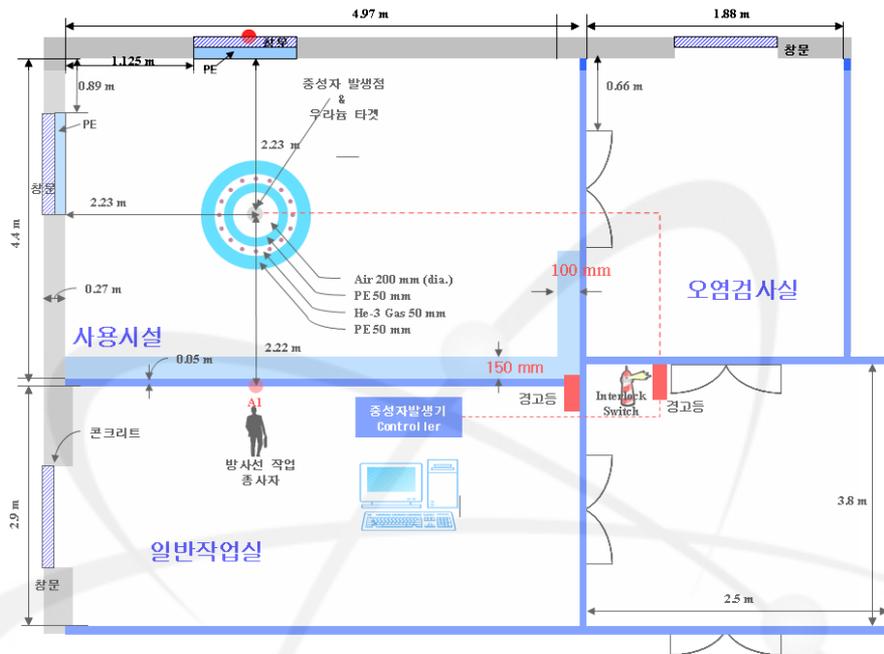
11. 납품일자

- 본 장치의 납품일자는 계약체결후 40일 이내로 한다.

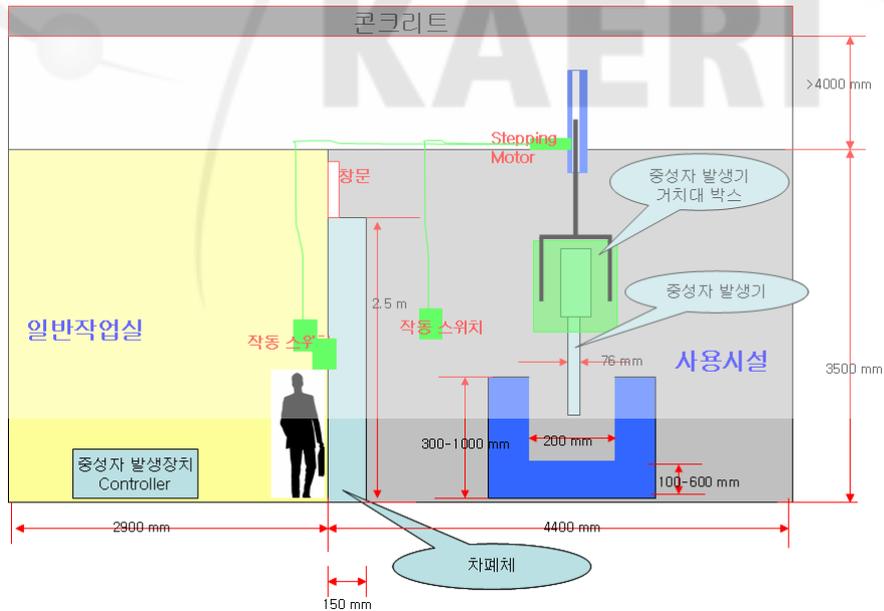
12. 하자보증

- 본 장치의 하자보수 기간은 납품완료일로부터 1년으로 한다. 끝.

2007. 11. .



도면 2007-11-05/1



도면 2007-11-05/2

(공 백)



[부록 4] 중성자 발생기 안전매뉴얼



## 안전매뉴얼

명칭: 중성자 발생기

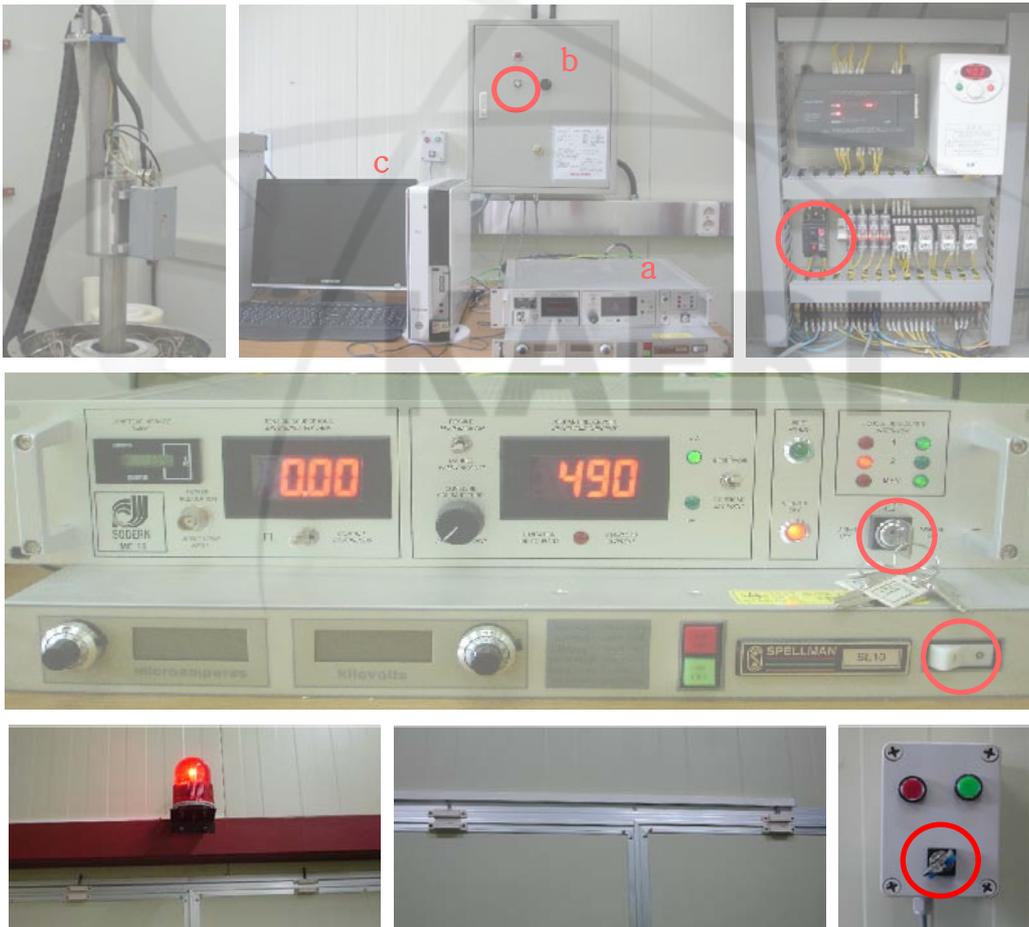
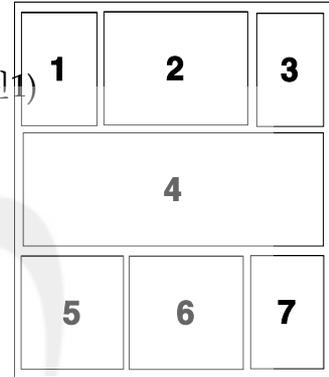
위치: 부품창고 103호

관리자: 안성규(2680,\*\*\*\*\*)

) 책임자: 김호동(2349, \*\*\*\*\* )

### 1. 장비 구성

- 중성자 발생 모듈: Gas Insulated Neutron Emitting Module(MEN16G) 및 Modulator Unit(PROX 16) (사진1)
- 중성자발생 제어장치: Control Unit(MC 16) 및 VHV Power Supply (사진 2-a, 사진4)
- 제어 PC (사진 2-c)
- 인터록 시스템 (사진 2-b, 사진 3, 사진 5, 사진 6)
- 발생기 상하 구동스위치 (사진 7)



## 2. 사용 매뉴얼

- (1) 중성자발생 제어장치 (사진 2-a)의 전원 연결
- (2) 인터록시스템 주전원 (사진 2-b)의 전원 연결
- (3) 제어PC 구동
- (4) PC의 발생기 제어프로그램(Genie16.exe) 실행
- ((5) 중성자발생 제어장치 (사진 2-a)의 열쇠(키) 스위치(사진 4 우측상단 표시)를 IDLE(대기) 위치(12시 방향)로 하고, HVH 장치 (사진 4 우측하단 표시)의 스위치를 ON 시킴
- (6) 인터록시스템 주전원 함을 열고 (사진 3) 전원 스위치를 ON 시킴
- (7) 인터록시스템의 도어(발생기 위치 실험실로 연결된 2개의 문) 닫힘 확인
- (8) 인터록시스템 열쇠(키) 스위치(사진 2-b 표시)를 시계방향으로 돌려 ON(10시 위치). 이 때, 도어의 경광등 (사진 5) 들어와야 함
- (9) PC의 제어프로그램에 인터록 표시등 3개 녹색표시 확인 (하나라도 빨간 색이면 중성자 발생 안 됨. 도어센서 및 인터록시스템 열쇠 키 확인)
- (10) 중성자 발생 준비 완료
- (11) 원하는 Tube Current와 Voltage 세팅
- (12) 제어장치 열쇠(키) 스위치를 ON위치(3시 방향)로 하고, 제어프로그램의 'ON' 클릭
  - Tube Current가 우선 set value 고정, Voltage는 0에서부터 set value까지 체크
  - Tube Voltage가 set value로 고정, Ion Source Voltage도 1.97kV로 set
  - 소프트웨어(프로그램)가 tube current가 "0"인제 체크
  - 0이 아니라면(tube내 pressure가 높다는 뜻, 적정 선 이하로 떨어지기를 기다려야 함) 에러메시지 발생
  - 0이라면 Replenisher Current 증가(~480 -> ~1500), heating에 의해 tube 내 pressure가 증가하여 tube current가 생기게 됨
  - Tube Current 증가 시작
  - Tube Current가 set value에 도달하면서, Replenisher Current가 중간으로 감소(~1500 -> ~870)
- (13) 발생 시작
  - \*최초 동작 시 set value까지 안정되게 동작하는 데는 2분 이상 소요됨. 이 때 대부분의 시간은 Tube Current 증가(위 동작 3번)하는데 소요됨. 그 이후 동작에서는 (에러메시지가 발생하지 않는다면) 최초에 걸린 시간 보다 조금 짧음.

- (14) 제어프로그램의 'OFF' 버튼 클릭 시 발생 종료
- (15) 인터록시스템 열쇠(키) 스위치 OFF(8시 방향), 제어장치 열쇠(키) 스위치를 OFF위치(9시 방향), HVH 스위치 OFF, 모든 전원 연결 해제
- (16) 발생 모듈 상하 위치조정 필요시, 구동스위치(사진 7) 열쇠(키)를 10시 방향으로 하고, 버튼을 이용해 상/하 위치 조정

### 3. 안전매뉴얼

#### (1) 비상사태 시

- 동작을 멈추어야 할 경우, 제어장치의 열쇠(키) 스위치를 반시계 방향으로 돌려 열쇠 해제
- 안전표지, 비상연락망의 관리책임자에게 연락

#### (2) 매 동작 시 체크사항

- 제어장치, 인터록 시스템의 전원 플러그의 사용 전/후 해제 확인
- 제어장치의 열쇠(키) 스위치는 사용 후 기기로부터 해제 확인

#### (3) 에러메세지 발생

- 제어 프로그램 상 "Generator Starting Error! Tube current doesn't go back to zero" 에러 메세지 발생시
- 현상: Target Voltage, Ion Source Voltage 까지 진행 되나, Tube Current 가 0으로 되지 못하고 2~10 (그 전 operation setup에 따라 값이 달라짐) 정도에서 멈추고, Replenisher Current 가 ~1500으로 증가하지 못함.
- 대책: Tube Current가 안정되도록 제어시스템의 열쇠(키) 스위치를 IDLE로 위치(12시 방향)하고 대기한 후, 일정 시간 이후에 다시 시도.

[부록 5] 차폐해석 MCNP 입력파일 예제



Window+ PE, Concrete Wall, NG(2-3 MeV, 2E6 n/s) or Cf-252(5E6 n/s)

33 5 -19.0 -61  
1 4 -5.0E-5 -51 33 -35 (61)  
2 2 -0.95 -52 32 -35 ( 51:-33)  
3 4 -5.0E-5 12 -14 22 -24 31 -39 ( 52:-32:35)  
11 2 -0.95 17 -18 26 -22 36 -37  
12 4 -5.0E-5 17 -18 21 -22 36 -38 (-26:37)  
21 2 -0.95 16 -12 27 -28 36 -37  
22 4 -5.0E-5 11 -12 27 -28 36 -38 (-16:37)  
4 3 -2.9 11 -14 21 -24 30 -39 (-12:-22:-31) (-17:18:-21:22:-36:38)  
(-11:12:-27:28:-36:38)  
5 4 -5.0E-5 10 -19 20 -29 30 -39 (-11:14:-21:24 )  
6 0 -10: 19:-20: 29:-30: 39

10 px -30  
11 px -27  
12 px 0  
13 px 113  
14 px 445  
19 px 450  
16 px -10  
17 px 89  
18 px 241  
c  
20 py -30  
21 py -27  
22 py 0  
23 py 113  
24 py 695  
29 py 700  
26 py -10  
27 py 112.5  
28 py 264.5  
c  
30 pz -30  
31 pz 0  
32 pz 10  
33 pz 25  
34 pz 35  
35 pz 60  
39 pz 400

The logo for KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) is centered on the page. It features a stylized atomic symbol with three elliptical orbits and three spheres representing protons and neutrons. The word "KAERI" is written in a bold, sans-serif font across the middle of the logo.

KAERI

36 pz 98  
37 pz 198  
38 pz 246

c

51 c/z 113 113 15  
52 c/z 113 113 25  
61 s 124.99 113 50 3

imp:n 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0

m1 8016 20.000 7014 80.000

m2 6012 1.0000 1001 2.0000

m3 26000 -0.7784

1001 -0.6187

6012 -17.52

8016 -41.02

11023 -0.02706

13027 -1.083

14000 -3.448

19000 -0.1138

20000 -32.13

m4 7014 -0.755 8016 -0.232

m5 92235 -100.

print

mode p n

nps 1000000

sdef erg=3 pos= 127.9999 113.00001 50.000

c sp5 -3.000 1.025 2.926

de5 2.5E-8 1.0E-7 2.0E-7 5.0E-7 1.0E-6 2.0E-6 5.0E-6 1.0E-5 2.0E-5  
5.0E-5 1.0E-4 2.0E-4 5.0E-4 1.0E-3 2.0E-3 5.0E-3 1.0E-2 2.0E-2  
3.0E-2 5.0E-2 7.0E-2 1.0E-1 1.5E-1 2.0E-1 3.0E-1 5.0E-1 7.0E-1  
9.0E-1 1.0E+0 1.2E+0 2.0E+0 3.0E+0 4.0E+0 5.0E+0 6.0E+0 7.0E+0  
8.0E+0 9.0E+0 1.0E+1 1.2E+1 1.4E+1 1.5E+1 20

df5 2.7360E-6 3.5820E-6 4.0320E-6 4.6080E-6 4.9680E-6 5.1120E-6  
5.1122E-6 5.1840E-6 5.1850E-6 5.2200E-6 5.2560E-6 5.3280E-6  
5.4000E-6 5.4360E-6 5.4370E-6 5.6520E-6 6.5880E-6 8.5680E-6  
1.0440E-5 1.3860E-5 1.6992E-5 2.1528E-5 2.8872E-5 3.5640E-5  
4.7880E-5 6.7680E-5 8.3160E-5 9.6120E-5 1.0152E-4 1.1160E-4  
1.3788E-4 1.5552E-4 1.6488E-4 1.7064E-4 1.7388E-4 1.7640E-4  
1.7784E-4 1.7790E-4 1.7856E-4 1.7892E-4 1.7930E-4 1.7964E-4  
1.8135E-4

fm5 2.00000E+06

f5:n	345.0	113.0000	55.000	0.00000
	345.0	113.0000	50.000	0.00000
	345.0	113.0000	45.000	0.00000
	345.0	113.0000	40.000	0.00000
	345.0	113.0000	30.000	0.00000
	345.0	113.0000	20.000	0.00000
	345.0	113.0000	10.000	0.00000
	345.0	113.0000	5.000	0.00000
	345.0	113.0000	1.000	0.00000
	345.0	113.0000	0.000	0.00000
de15 log	0.01 0.03 0.05 0.07 0.1	0.15 0.2	0.25	
	0.3 0.35 0.4	0.45 0.5	0.55 0.6 0.65	
	0.7 0.8 1.0 1.4 1.8	2.2 2.6 2.8		
	3.25 3.75 4.25 4.75 5.0	5.25 5.75 6.25		
	6.75 7.5 9.0 11.0 13.0 15.0			
df15 log	3.96e-6 5.82e-7 2.90e-7 2.58e-7	2.83e-7 3.79e-7 5.01e-7 6.31e-7		
	7.59e-7 8.78e-7 9.85e-7 1.08e-6 1.17e-6	1.27e-6 1.36e-6 1.44e-6		
	1.52e-6 1.68e-6 1.98e-6 2.51e-6 2.99e-6	3.42e-6 3.82e-6 4.01e-6		
	4.41e-6 4.83e-6 5.23e-6 5.60e-6 5.80e-6	6.01e-6 6.37e-6 6.74e-6		
	7.11e-6 7.66e-6 8.77e-6 1.03e-5 1.18e-5	1.33e-5		
fm15	2.00000E+ 06			
f15:p	345.0	113.0000	55.000	0.00000
	345.0	113.0000	50.000	0.00000
	345.0	113.0000	45.000	0.00000
	345.0	113.0000	40.000	0.00000
	345.0	113.0000	30.000	0.00000
	345.0	113.0000	20.000	0.00000
	345.0	113.0000	10.000	0.00000
	345.0	113.0000	5.000	0.00000
	345.0	113.0000	1.000	0.00000
	345.0	113.0000	0.000	0.00000

[부록 6] 중성자 발생기 재가동 시 지연 현상



### 발생기 동작 시 지표

1. Tube Current가 우선 set value 고정, Voltage는 0에서부터 set value까지 체크
2. Tube Voltage가 set value로 고정, Ion Source Voltage도 1.97kV로 set
3. 소프트웨어(프로그램)가 tube current가 "0"인제 체크
4. 0이 아니라면(tube내 pressure가 높다는 뜻, 적정 선 이하로 떨어지기를 기다려야 함) 에러메시지 발생
4. 0이라면 Replenisher Current 증가(~480 -> ~1500), heating에 의해 tube내 pressure가 증가하여 tube current가 생기게 됨
5. Tube Current 증가 시작
6. Tube Current가 set value에 도달하면서, Replenisher Current가 중간으로 감소(~1500 -> ~870)

\*최초 동작시 set value까지 안정되게 동작하는데는 2분 이상 소요됨. 이 때 대부분의 시간은 Tube Current 증가(위 동작 3번)하는데 소요됨. 그 이후 동작에서는 (에러메시지가 발생하지 않는다면) 최초에 걸린 시간보다 조금 짧음.

### 에러 메시지

"Generator Starting Error! Tube current doesn't go back to zero"

Target Voltage, Ion Source Voltage 까지 진행 되나, Tube Current가 0으로 되지 못하고 2~10 (그 전 operation setup에 따라 값이 달라짐) 정도에서 멈추고, Replenisher Current 가 ~1500으로 증가하지 못함.

### 프랑스측 설명 (e-mail)

- 10% duty 일 때 5분정도 delay 필요함
  - Cont mode 일 때 1시간 이상이 될 수 있음(특히 그전에 30분 이상)
- (KAERI comment) 2시간이 넘을 때도 있음, current가 높을 때 더 높아지나? 같은 동작을 반복할 때도 1시간-2시간 기다려야 하나? 2시간 이상 기다려야 하면 문제가 있음, 매뉴얼에 명시되어 있지도 않음
- 매뉴얼에 10분 delay라고 표시된 것은 일반적인 경우(20-30% duty)에 대해서임
  - delay는 재가동의 operating point(동작조건-duty, V, I 등)에 영향을 받음 (앞 동작 조건은 상관 없거나 약관 상관이 있다고 언급함)

(KAERI comment) 하지만 실제로는 앞 동작에 영향을 받는 것으로 보임

- 동작 중에 V, I는 변화시킬 수 있음
- duty가 길어지면 필요한 pressure 는 감소함

(KAERI comment) 재가동 조건에 따라 delay가 영향을 받는다는 말은 위 pressure와 연관이 있어보이지만...아직 잘 모르겠음.

- duty가 같으면 delay가 같음

(KAERI comment) duty가 달라지면 delay가 달라지는 것은 이해되나, 현재 duty가 같아도 delay가 제각각이며, 특히 I에 따라 달라지는것도 같음.

- tube current는 stop시 무조건 0이 되고, 중성자도 발생하지 않지만, 재가동시 "ion source test" 동안에 tube current가 0이어야 하는데, delay가 충분치 않으면 이 때 current가 0이 되지 못한다는 말임. 왜냐하면 tube 내 pressure가 too high.

- tube off 시, replenisher current 는 standby (490mA), pressure는 감소하기 시작

- duty가 달라지면 필요한 동작 pressure도 달라지고, 이는 replenisher current를 살펴봄으로서 차이를 알 수 있음

- Replenisher current: Cont 모드일 때 약 750mA, 10% duty 일 때 약 900mA

- Cont 모드일때가 10% duty 일때보다 필요한 pressure는 낮아야 함

(KAERI comment) 즉 replenisher current가 높을수록 pressure가 높음, 최초에 replenisher current가 1500까지 올라갔다가 중간정도로 떨어지는 것은 최초에 pressure를 적정수준까지 올리기 위한 작업인 것 같음.

## 현 상황

결과적으로 delay가 필요하다는 것을 이해하지만

1. 매뉴얼에 제대로 명시되어 있지 않음 (구매 전에 미리 설명 듣지 못했음)
2. delay가 설명(예상)해 준 시간보다 훨씬 길며, 불규칙적임
3. 이는 동작이 정상적이지 않다고 볼 수 밖에 없음
4. 납득할 만한 정밀 체크, reference 동작-delay relation 표, 혹은 테스트결과 등이 있으면 좋겠음
5. 전문가 직접방문 A/S, 네트워크 연결 A/S 등 가능한 방법을 동원하기 원함

(공 백)



[부록 7] 중성자 발생기 재가동 시 지연 현상 제작사 상의 서신



---

From: SK (Seong Kyu AHN) [mailto:skahn76@kaeri.re.kr]  
Sent: Friday, May 09, 2008 3:08 PM  
To: 'thierry.dargent@sodern.fr'  
Cc: '박화영 (K외) (phy@enertopia.fr)'; 'shinhs@kaeri.re.kr'  
Subject: Question for the operational troubleshooting of GENIE16GT

Dear Mr. Thierry Dargent,  
Hello. I am SK, a researcher working at Korea Atomic Energy Research Institute.  
Our group purchased a neutron generator from SODERN, model Genie16GT (D-D type),  
and Dr. Hee-Sung Shin (I hope you remember him) had taken technical training from you in France last year.

We have a question about its operation and one of the Error Message.  
(I have no idea if you are the right contact point to ask about troubleshooting.  
If there is a right person to take care of it, please forward to him/her.)

When you make "ON" the neutron generation, neutrons are generated and emitted.  
(no problem at the very first time ON).  
When we try to turn it on again after first ON and OFF, sometimes it works and sometimes not (with an error message).

The error message is

Generator Starting Error: Tube current doesn't go back to zero".

This situation is

- #1 Same for the continuous mode and pulse mode (we didn't check for the burst mode)
- #2 Sometimes it's okay (no error and working properly), sometimes not (above error message). Looks like a random event.
- #3 Especially, in case of the next ON after long duration of generation ON (ex: 20 min), it almost always does not working.
- #4 In case of #3, we have to wait for 1 ~ 2 hours for the next On.
- #5 This situation was same at the time of the Genie16 set up last December.

1. What makes the Error Message of

"Generator Starting Error: Tube current doesn't go back to zero" comes out?

2. What should we do when the above error happens?

I believe there's something wrong or something that I don't know.

It should be possible to start and stop generating neutrons as a user's wants.

I'll wait for your reply.

Let me know if you need more specific description or other circumstances in operation.

Thank you

P.S.

We didn't change any operating point (for example mode, duty cycle, current, voltage...) at all. Under the one operating parameter, and Off (stop) for the emission has been tried.

Seong-Kyu Ahn

---

From: EK-PARK Hwa-Young [<mailto:phy@enertopia.fr>]  
Sent: Wednesday, May 14, 2008 3:26 PM  
To: [skahn76@kaeri.re.kr](mailto:skahn76@kaeri.re.kr)  
Cc: EK-Ko Hyung Joo; 신희성  
Subject: Genie 16GT issue

안 성규 박사님께 드립니다.

안녕하십니까?  
제작사 답변을 아래에 명시하였습니다.

감사드리며 이만 줄입니다.  
박 화영 드림  
PARK Hwa-YoungTech / Sales Manager ENERTOPIA KOREA  
Tel : + 82 (02) 6000 8279(파리친구)  
Fax :+ 82 (02) 6000 8299  
HP:+ \*\*\*\*\*  
ENERTOPIA Tel : + 33 1 4225 4018  
[www.enertopia.fr](http://www.enertopia.fr)

----- Original Message -----

From: RIQUET sylvain  
To: [skahn67@kaeri.re.kr](mailto:skahn67@kaeri.re.kr)  
Cc: [conan@enertopia.fr](mailto:conan@enertopia.fr) ; SLINGUE marine  
Sent: Tuesday, May 13, 2008 4:11 PM  
Subject: Genie 16GT issue

Dear Mr AHN,

Your issue may be due to a too short delay between a stop and a restart attempt.  
In pulse mode with 10% duty this delay should at least 5 minutes.  
In continuous mode this delay could be 1h (specially if the NEM was running more than 30minute).

If the delay is not long enough, a tube current different than 0 is detected by the software. In this case an error message "Tube current doesn't go back to zero" appears and the start-up sequence is automatically stopped.

Could you give us the delay between start and stop and the mode (continuous or pulsed (duty) use) ?

Thank you.

Best regards,

Sylvain RIQUET

---

Dear Sylvain RIQUET,

First of all, let me double check the term, delay. In my understanding, the Delay means the holding (not operated) time required between a stop (neutrons are not emitted) and a start (neutrons are emitted). Am I correct?

For the information on your question at the end of your last mail, the delay was 1 to 2 min between stop and restart (Neutron emission On and OFF) after about 2 min running.

We tried in both modes of pulse (duty cycle 20%) and continuous, and the same things happened. In my experience, I should say the delay time is kind of random. Sometimes there's no error message and sometimes there is, even m. So the same operation point (same mode and same duty cycle) and the same operation (running) time.

According to your explanation, the delay at least more than 5 min is needed between every stop and start again. And this delay could be more than 1 hr after a long time of continuous running. Is it correct?

Here are several further questions and un-clarified issues.

1. For "the delay" you mentioned, is it also needed even though there's no change in operating point? (No change means same mode with same duty cycle.)

In the manual you provide, there is a note for the change of operating point in section 6.5 on page 27. It says "it is necessary to stop for about ten minutes to change from one (for example 5% duty cycle) to the other (for example continuous mode)". This is the only note about the delay between tube operations in the whole manual.

As far as I understand, the above note explains for the CHANGING of operation. It means we don't need any long delay (like 5 or 10 min) for the same operating point. If we ALWAYS need some delay between every stop and start, I don't think it is normal and it should be mentioned in the manual.

2. What is the relationship between the delay and the duty cycle? Would the delay be longer for the longer duty cycle? Would the delay be longer for the continuous mode than the pulse mode?

3. Can you explain more detail about "A tube current different" you mentioned? I think it is also related the operating point. Does a tube current different corresponds to a pressure difference in the tube? If yes, I still have same doubt which I described in question 1. What I believe is that there should be no pressure different if we use in the same operating point, and that means we don't need a long (5 min) delay between a stop and a restart.

I'm sorry for the lengthy question. But the long delay is kind of a big obstacle to use the neutron generator in our experiments.

Detailed explanation and comments for the each question would be very appreciated.

I look forward to receiving your prompt reply regarding above issues.

Thank you

SK Ahn, skahn76@kaeri.re.kr, Korea Atomic Energy Research Institute

---

From: RIQUEET sylvain [mailto:sylvain.riquet@sodern.fr]  
Sent: Thursday, May 15, 2008 2:57 AM  
To: 안성규  
Cc: phy@enertopia.fr; shinhs@kaeri.re.kr; conan@enertopia.fr  
Subject: RE: [Re] Genie 16GT issue

Dear Mr Ahn,

You're true: while asking about delay, I mean time between a stop and a new start sequence.

The needed delay increases with the duty cycle. In continuous mode (100% duty cycle) needed delay could be long and is also a little bit dependent of the precedent running time.

1 - Delay for changing operation point.

In the manual, a 10 minutes delay is given for general cases (20%-30% duty cycle).

For a 10% duty cycle this delay can be reduce up to 5 minutes, but for a continuous mode this delay needs to be increase up to 1 hour.

This delay is due to the operating point you want use after the stop, whatever the precedent running mode.

We apologize for this mistake in the user manual.

However you can change electrical parameters (tube voltage or tube current) without stop the generator.

2 - Relationship between delay and duty cycle.

In fact the needed pressure decreases when the duty cycle increase.

When you stop the generator, the pressure decreases but not linearly. This is exponential as temperature phenomena for example.

When you try to restart the generator in continuous mode after 10 minutes, pressure is enough to produce neutrons (a tube current close to 1 or 2 $\mu$ A appears).

The software detects this current and that why it stops the NEM.

3 - Tube current different than "0".

During the startup sequence, when the VHV voltage setpoint is reached and ion source is applied, the software verifies the tube current. If it is  $> 0$  then software stop the start sequence and the following error message appears: "Tube current doesn't go back to zero"

I hope my explanations are clear enough.

Also could you describe us your experiments? Perhaps we will be able to find a solution for those issues.

We don't need to know what you do exactly, but only if you need to be close to the generator during the stop, what's the usually running time, what's the usually stop time, how many change of mode (duty cycle / continuous) you need per day, ...

Best regards,  
Sylvain Riquet

---

**From:** RIQUET sylvain [mailto:sylvain.riquet@sodern.fr]  
**Sent:** Friday, May 16, 2008 2:54 AM  
**To:** 안성규  
**Cc:** shinhs@kaeri.re.kr; phy@enertopia.fr  
**Subject:** RE: [Re] Genie 16GT issue  
Dear Mr Ahn,  
Please find my explanations (and question) in blue.  
Best regards,  
Sylvain Riquet

----- Original Message -----

**De** 안성규 [mailto:skahn76@kaeri.re.kr]

**Envoyé:** jeudi 15 mai 2008 05:23

**À:** RIQUET sylvain

**Cc:** shinhs@kaeri.re.kr; phy@enertopia.fr

**Objet** RE: [Re] Genie 16GT issue

Dear Mr. Riquet,

Thanks for your prompt reply with explanations.

Please see the detailed description between the lines in your mail below.

Thank you.

SK

----- Original Message -----

**From:** RIQUET sylvain [mailto:sylvain.riquet@sodern.fr]

**Sent:** Thursday, May 15, 2008 2:57 AM

**To:** 안 성규

**Cc:** phy@enertopia.fr; shinhs@kaeri.re.kr; conan@enertopia.fr

**Subject:** RE: [Re] Genie 16GT issue

Dear Mr Ahn,

You're true: while asking about delay, I mean time between a stop and a new start sequence.

The needed delay increases with the duty cycle. In continuous mode (100% duty cycle) needed delay could be long and is also a little bit dependent of the precedent running time.

(KAER)----- Clear.

1 - Delay for changing operation point.

In the manual, a 10 minutes delay is given for general cases (20%-30% duty cycle).

For a 10% duty cycle this delay can be reduce up to 5 minutes, but for a continuous mode this delay needs to be increase up to 1 hour.

(KAER)----- I understand the delay time as different duty cycles.

This delay is due to the operating point you want use after the stop, whatever the precedent running mode.

(KAER)----- This means we need the same delay time even though we use the same operating condition (the same tube voltage and current). Am I

correct?

(SODERN)----- No : you need the same delay time with the same condition of duty cycle.

We apologize for this mistake in the user manual.  
However you can change electrical parameters (tube voltage or tube current) without stop the generator.

2 - Relationship between delay and duty cycle.

In fact the needed pressure decreases when the duty cycle increase.

When you stop the generator, the pressure decreases but not linearly. This is exponential as temperature phenomena for example.

When you try to restart the generator in continuous mode after 10 minutes, pressure is enough to produce neutrons (a tube current close to 1 or 2 $\mu$ A appears). The software detects this current and that why it stops the NEM.

(KAER)----- I still have several things unclear regarding to pressure and tube current.

It may be because of my insufficient knowledge on the mechanism of a neutron generator.

Let me double check.

After stopping of precedent running,

1. To do a re-start, a tube current should be zero.
2. To be zero for a tube current, neutrons should not be produced.
3. To make no neutron generated, the pressure should be low enough.
4. To be low enough for the pressure, there needs some delay time.

Is it right?

(SODERN)----- When you stop the generator tube current is "0" because of power loss. Of course when you stop the generator there is no neutrons emitted. This tube current should be to "0" during the "ion source test" (see diagram 6.6.2.2 into the user manual).

3 - Tube current different than "0".

During the startup sequence, when the VHV voltage setpoint is reached and ion source is applied, the software verifies the tube current. If it is  $> 0$  then software stop the start sequence and the following error message appears: "Tube current doesn't go back to zero" I hope my explanations are clear enough.

(KAER)----- Anyhow, what I understand is the software was originally programmed to stop the start sequence in case of a non-zero tube current.

(SODERN)----- Yes.

(KAER)----- Is that because of some kind of protection of a tube (and/or other part of instrument)?

(SODERN)----- Yes, it's to prevent damages into the tube (flashes if pressure is too high).

(KAER)----- What if we change the software not to check a tube current and not to interrupt the start sequence?

(SODERN)----- Perhaps we could have another possibility if you don't need to be close to the NEM during the stop.

Also could you describe us your experiments? Perhaps we will be able to find a solution for those issues.

We don't need to know what you do exactly, but only if you need to be close to the generator during the stop, what's the usually running time, what's the usually stop time, how many change of mode (duty cycle / continuous) you need per day, ...

(KAER)----- The reason why I ask about this issue is not just related to the specific experiment situation, but the general case as a general user.  
In a current experiment, we expect as below.  
Usual running time: 5-30 min/run  
Usual stop (delay time): shorter is better (we can accept ~10 min)  
Number of mode change: Not many time (usually no)

(SODERN)----- Thank you for these explanations. Could you tell me is you need to be close to the NEM during a stop? (In fact do you need to open the safety loop while you stop the NEM).

Best regards,

Sylvain Riquet

KAERI

---

**From:** RIQUET sylvain [mailto:sylvain.riquet@sodern.fr]

**Sent:** Friday, May 16, 2008 11:28 PM

**To:** 안성규

**Cc:** shinhs@kaeri.re.kr; phy@enertopia.fr

**Subject:** RE: [Re] Genie 16GT issue

Dear Mr Ahn,

In order to be as clear as possible I deleted clear parts into this Email.

Your group of questions into the array is a good idea because it's clearer than with a lot of text.

I hope this email answers your questions.

Best regards,

Sylvain Riquet

----- Original Message -----

**De** 안성규 [mailto:skahn76@kaeri.re.kr]

**Envoyé:** vendredi 16 mai 2008 09:23

**À:** RIQUET sylvain

**Cc:** shinhs@kaeri.re.kr; phy@enertopia.fr

**Objet** RE: [Re] Genie 16GT issue

Dear Mr. Riquet,

Please find my adding in red.

As I mentioned, we need to know every possible way to use Gennie16, not only for this time but also for the future experiment.

We cannot ask you about possible solution every time.

Please describe about every possible way. All of them will be helpful for us.

Thanks.

SK

----- Original Message -----

**From:** RIQUET sylvain [mailto:sylvain.riquet@sodern.fr]

**Sent:** Thursday, May 15, 2008 2:57 AM

**To:** 안 성규

**Cc:** phy@enertopia.fr; shinhs@kaeri.re.kr; conan@enertopia.fr

**Subject:** RE: [Re] Genie 16GT issue

Dear Mr Ahn,

This delay is due to the operating point you want use after the stop, whatever the precedent running mode.

(KAERI)--- This means we need the same delay time even though we use the same operating condition (the same tube voltage and current). Am I correct?

(SODERN)--- No : you need the same delay time with the same condition of duty cycle.

(KAERI)--- It looks like there's some confusion between us. We need to discuss with some example. (Assume 80kV, 20uA for target setup)

Duty cycle	Precedent running time	Needed Delay time	Please write down the expected delay time you think.
10%	1min	5 min	Always depend of the following start
10%	5min	5min? >5min?	
10%	30min	5min? >>5min?	
20%	1min	10min	
20%	30min		
100%	1min	1hr? <1hr?	
100%	30min	1hr?	

(SODERN)--- This array is not useful because delay always depend of the following start. The second array is more useful.

(KAERI)--- Next, let's assume we need the delay of 5 min for 10% duty cycle, 10 min for 20% duty cycle, and 1hr for continuous mode (100% duty cycle)

Setuence	Sequence #1	Sequence #2	Sequence #3	Sequence #4	Sequence #5
Set up	Set VHV=80kV, I=20uA 10% duty cycle pulse mode	Set VHV=80kV, I=20uA 10% duty cycle pulse mode	Set VHV=80kV, I=20uA 20% duty cycle pulse mode	Set VHV=80kV, I=20uA 10% duty cycle pulse mode	Set VHV=80kV, I=20uA 100% duty cycle pulse mode
Operating start	Start (then neutron's emit)	Start (then neutron's emit)	Start (then neutron's emit)	Start (then neutron's emit)	Start (then neutron's emit)
Status	Running for 5 min	Running for 5 min	Running for 5 min	Running for 5 min	Running for 5 min
Operating stop	Stop	Stop	Stop	Stop	Stop
Delay time	Wait for 2min (this delay time < 5min)	Wait for 7min	Wait for 7min	Wait for 15min	Wait for 15min
Setup	No changing in set up (Same operating point)	Change setup into VHV=80kV, I=20uA 20% duty cycle pulse mode	Change setup into VHV=80kV, I=20uA 10% duty cycle pulse mode	Change setup into VHV=80kV, I=20uA 100% duty cycle pulse mode	Change setup into VHV=80kV, I=20uA 20% duty cycle pulse mode
Operating start	Start again	Start again	Start again	Start again	Start again
SODERN's Answer	Should be OK because of 10% duty. However a 3 or 4 minutes delay is better.	Should be OK. I think better with 10 minutes.	Same case than Sequence #1.	NOT OK. Delay should be near to 1 hour.	Same case than Sequence #2.

KAERI's test results	Sometimes okay Sometimes error	Sometimes okay Sometimes error	-		

(SODERN)--- In this array, the delay is due to the setup before the 2<sup>nd</sup> operating start.

## 2 - Relationship between delay and duty cycle.

In fact the needed pressure decreases when the duty cycle increase.

When you stop the generator, the pressure decreases but not linearly. This is exponential as temperature phenomena for example.

When you try to restart the generator in continuous mode after 10 minutes, pressure is enough to produce neutrons (a tube current close to 1 or 2μA appears). The software detects this current and that why it stops the NEM.

(KAERI)--- I still have several things unclear regarding to pressure and tube current.

It may be because of my insufficient knowledge on the mechanism of a neutron generator.

Let me double check.

After stopping of precedent running,

1. To do a re-start, a tube current should be zero.
2. To be zero for a tube current, neutrons should not be produced.
3. To make no neutron generated, the pressure should be low enough.
4. To be low enough for the pressure, there needs some delay time.

Is it right?

(SODERN)--- When you stop the generator tube current is "0" because of power loss. Of course when you stop the generator there is no neutrons emitted.

This tube current should be to "0" during the "ion source test" (see diagram 6.6.2.2 into the user manual).

(KAERI)--- Then why the tube current is not zero during the ion source test?

(SODERN)--- Because pressure inside the tube is too high.

(KAERI)--- The reason why I ask about this is to try to understand the physics and to be able to guess when the error comes.

(SODERN)--- I understand your point of view!

When the tube is OFF, replenisher current is in standby (490mA). Note : the pressure decrease with a logarithmic form.

A start sequence is the following :

- Increase the VHV power supply up to the setpoint (80kV for example).

- Switch on the Ion source power supply (2kV). Now the software look at the tube current. If it's "0" it means there is no pressure inside the tube and the sequence continues.

If it's more than "0" it means the pressure is too high (because the time wasn't enough to have a pressure under the limit).

- Increase the replenisher current. By heating, it's increasing the pressure inside the tube until there is tube current.

- After the software switch in regulated mode. It means stabilisation of tube current near to the setpoint is done by changing the replenisher current. This is a close loop regulation.

You can observe the differences of running pressure for different running modes (duty cycle) while looking at the replenisher current.

It's close to 750mA in continuous mode and close to 900mA in pulsed (10%) mode.

3 - Tube current different than "0".

During the startup sequence, when the VHV voltage setpoint is reached and ion source is applied, the software verifies the tube current. If it is  $> 0$  then software stop the start sequence and the following error message appears: "Tube current doesn't go back to zero"

I hope my explanations are clear enough.

(KAERI)--- Anyhow, what I understand is that the software was originally programmed to stop the start sequence in case of a non-zero tube current.

(SODERN)--- Yes.

(KAERI)--- Is that because of some kind of protection of a tube (and/or other part of instrument)?

(SODERN)--- Yes, it's to prevent damages into the tube (flashes if pressure is too high).

(KAERI)--- What if we change the software not to check a tube current and not to interrupt the start sequence?

(SODERN)--- Perhaps we could have another possibility if you don't need to be close to the NEM during the stop.

(KAERI)--- What could be a possible way when we don't need to be

close to the NEM?

(SODERN)--- This possibility is a Play/Pause option. It allows you to standby neutron emission in 1 second and restart in 1 second too.

However, if you open the safety loop, the generator switches from "Pause" to "Stop" mode.

Also could you describe us your experiments? Perhaps we will be able to find a solution for those issues.

We don't need to know what you do exactly, but only if you need to be close to the generator during the stop, what's the usually running time, what's the usually stop time, how many change of mode (duty cycle / continuous) you need per day, ...

(KAERI)--- The reason why I ask about this issue is not just related to the specific experiment situation, but the general case as a general user.

In a current experiment, we expect as below.

Usual running time: 5-30 min/run

Usual stop (delay time): shorter is better (we can accept ~10 min)

Number of mode change: Not many time (usually no)

(SODERN)--- Thank you for these explanations. Could you tell me is you need to be close to the NEM during a stop? (In fact do you need to open the safety loop while you stop the NEM).

(KAERI)--- Sometimes yes, Sometimes no. Let's talk about both cases.

1. When we don't need to open the safety loop during the stop.

What could be the possible way you mention above?

2. When we need to open the safety loop during the stop

We have to be close to the NEM to change neutron counter setup (like cable connection change, location change.. it takes only several minutes)

Is there possible way to make the delay to be short?

(SODERN)--- Case 1 : I think the better way is the Play-Pause Option in the embedded software.

Case 2 : only way is to wait the mentioned delay.

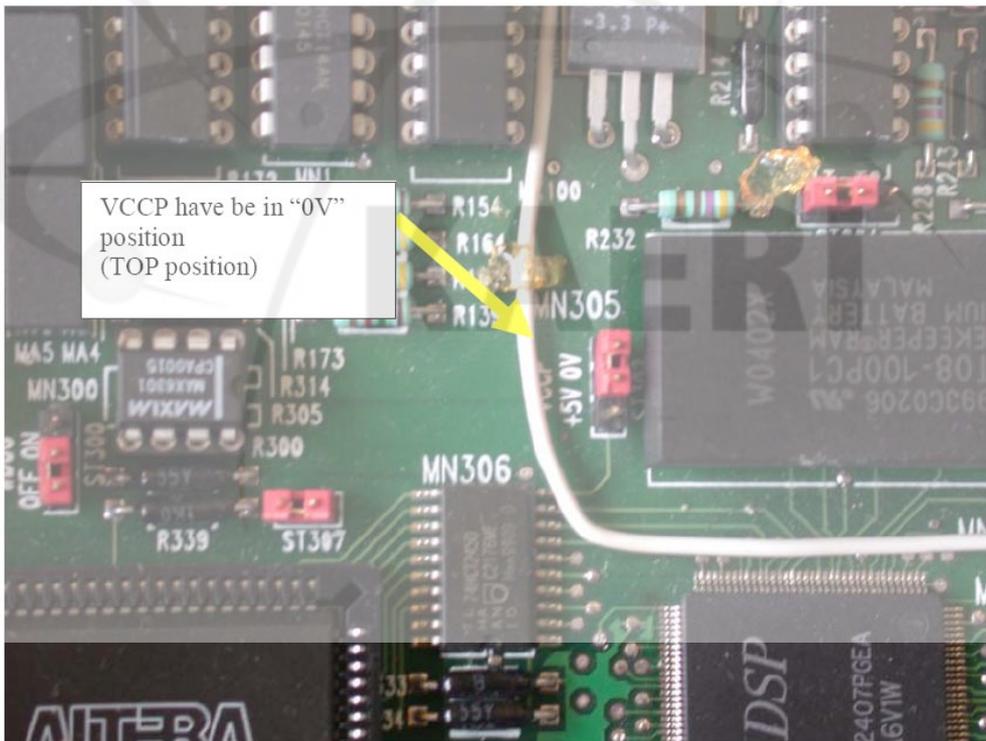
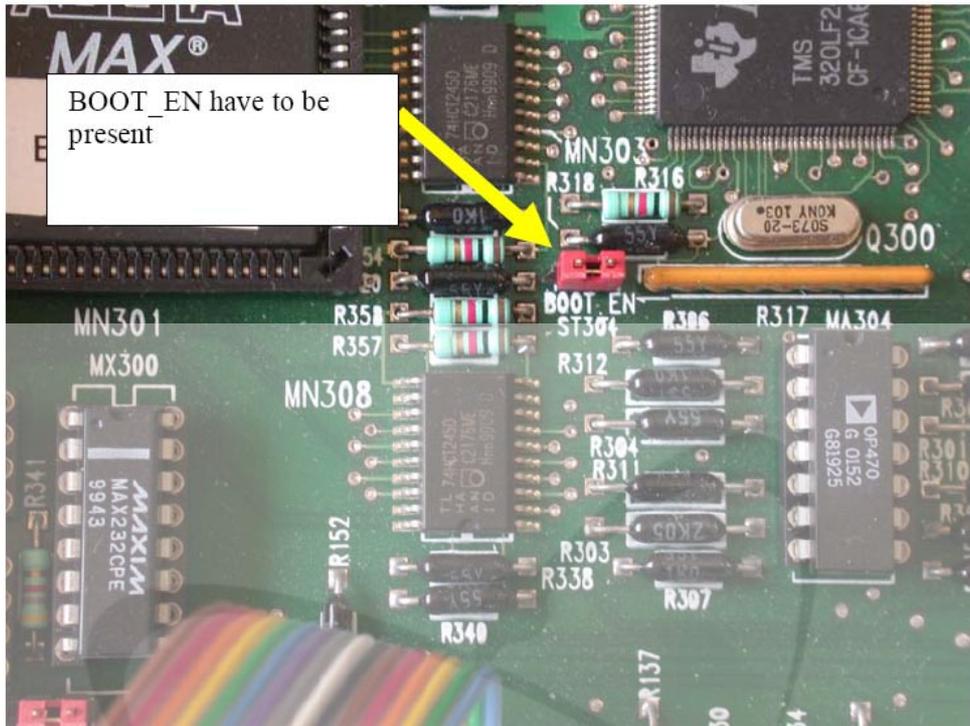
(공 백)



[부록 8] 중성자 발생기 소프트웨어 업데이트 시 설정 변경







- When all jumpers are in the same position as the previous photos:
- Unzip the file included in this email.
- Copy all files in a directory (For example c:\Wgenie16Wsoftware).
- Check that the serial link is connected to suitcase and your computer (COM1 or COM2)

- Power ON the generator (key only in "IDLE" position)
- Wait 10 seconds
- If you use COM1, execute "FlashCom1.bat"
- If you use COM2, execute "FlashCom2.bat"
- The download will be ready after an automatic sequence ( about 1 or 2 minutes)
- Power OFF the generator
- Replace all the jumpers in original configuration :
- VCCP in "+5V" position (bottom)
- BOOT\_EN : No Jumper
- WDOG in ON position (Top)
- The generator is ready.



[부록 9] 중성자 발생기 제작사에 문의사항 답변



## 중성자 발생기 제작사에 요청사항

2010년 1월 27일

### 내용

본 내용은 SODERN사 중성자 발생기 Genie16GT를 사용해 오면서 생긴 의문점 중 매뉴얼 혹은 이메일 서신을 통해 만족스러운 답을 구할 수 없었던, 제작사가 제공해 주기 희망하는 자료 혹은 궁금한 점 중심으로 중성자 발생기를 구입할 경우에는 아래 사항을 체크/요구 할 수 있도록 정리하였음. 답변은 한국원자력연구원 방사선안전관리실에서 동종의 중성자 발생기를 구매하면서 제작사측과 성능테스트 및 교육훈련을 받으면서 논의한 내용임.

1. 매뉴얼에는 동작조건에 따른 중성자 방출율에 대한 자세한 정보가 없음. 단지 40uA 일 때 전압 70kV ~ 90kV 사이의 방출율이 로그 스케일의 개략적인 그래프만 제시되어 있음. 몇 개의 다른 전류 조건에 대해, 전압에 따른 방출율 및 오차 데이터(numeric data)를 제공 받고 싶음.  
= 정확하게 생산한 자료는 없음. 단지 참고로 동일 tube 구조(NEM : same type ion source and replenisher)에 관한 것이 좀 있을 뿐임. 그런 식으로 요구할 수 있을 것임. 전류별로 선형성은 그럭저럭 유지되고 있음.
2. Target 면으로 부터 중성자가 방출할 때, 등방성을 가지는지(isotropic emission)? 아니라면 그 공간분포에 대한 제작사 측의 측정 데이터 혹은 이론적 추정치 정보를 제공 받고 싶음.  
= 그들은 등방적이라 말하나, 이를 보여주는 자료는 없음.
3. 펄스 혹은 버스트 모드에서, triggering delay와는 별도로, 시간에 따른 중성자 방출율의 rising time 혹은 falling time이 어느 정도 되는지? 각 동작조건(different operating point)에 따라 달라지는지?  
= 우리의 경우 조건별로 delay time을 확인하였음. 전류가 증가하면 감소함. FT나 RT도 바뀔 것임.
4. 성능저하를 방지하기 위해서 3개월마다 최소 1회 씩 15분 이상 사용하라고 되어 있는 점 이외에는 유지보수에 관한 사항이 매뉴얼에 자세히 없음. 이외의 특별히 주기적으로 체크/보수 해 주어야 할 다른 사항은 없는지? SF6 gas를 주입해야 할 때는 어떤 경우인지?

= 한 달에 한 번 정도 점검을 권장하고 있음. 권고된 SF6 gas level에 떨어질 때 주입하고 그렇지 않을 경우 필요 없음.

5. 각 동작 모드(연속, 펄스, 버스트)에서 최장 동작 가능 시간은 얼마나 되는지? 매뉴얼에는 특별히 언급되어 있는 부분이 없음.

= 우리의 경우 펄스: 2분, 연속: 20분 정도였음. 설정 준위(전류, 전압을 확인하는 것도 필요함)

6. 매뉴얼에는 발생기 동작한 후, 재가동을 위해 조건을 바꿀 경우 약 10분 정도 기다려야 한다고 되어 있으나 ("it is necessary to stop for about ten minutes to change from one (for example 5% duty cycle) to the other (for example continuous mode)"), 실제 사용 경험에 따르면 동작 조건을 바꾸지 않더라도 일정 시간 (약 10분~20분, 이 시간을 T1\_on 이라 하자) 이상 사용하고 난 후 멈추었다가 다시 재가동하기 위해서는 30분 이상(T1\_on 시간에 매우 의존함. T1\_on=40분~60분 일 경우 길게는 3~4시간 내에도 재가동이 안 됨) 기다려야 함. 소프트웨어 업그레이드 이후, 대기 소요시간은 약간 감소했지만, 여전히 사용에 불편이 많음. 원래 그런 것인지, 해결 방안은 없는지?

= 5번과 유사함. 발생기 튜브 내압과 관련이 있는 것이라 함. 재가동시간에 크게 영향을 준다고 함. 본질적인 문제임.

7. 실험값과 비교 시뮬레이션 수행을 위해서, 발생기 튜브에 대한 최소한의 구조 정보가 있으면 좋겠음. 발생기 튜브의 재질, 두께, 내부 구성품의 재질(특히 중성자 거동에 민감하게 영향을 줄 수 있는 물질-Low Z material-이 포함되어 있는지 여부) 등

= 대략적인 도면을 만들어 주었음.

서 지 정 보 양 식							
수행기관보고서번호		위탁기관보고서번호		표준보고서번호		INIS 주제코드	
KAERI/TR - 4045/2010							
제목/부제		D-D 중성자 발생기의 설치 및 성능테스트					
연구책임자 및 부서명		김호동 (핵주기시스템공학기술개발부)					
연구자 및 부서명		박광준, 박세환, 송대용, 신희성, 안성규, 엄성호, 이태훈, 정정환, 주준식, 한보영 (핵주기시스템공학기술개발부)					
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구원	발행년	2010.4		
페이지	119	도 표	있음	크기	27 cm		
참고사항							
공개여부		공개		보고서종류		기술보고서	
비밀여부		대외비( ), ___급비밀					
연구위탁기관		계약번호					
<p>이 보고서는 “핵물질계량 안전조치 기술개발” 연구과제 수행과 관련하여 중성자 계수기 개발에 활용할 목적으로 중성자 발생기의 활용성 및 선정, 설치, 차폐해석, 기초 성능테스트 및 능동형 중성자 계수기의 활용에 대해 종합적으로 기술하고 있다. 대상 중성자 발생기는 프랑스 EADS SODERN 사의 GENIE16GT 모델로서, D-D 반응에 의한 2.5 MeV 중성자 최대 선속 <math>2 \times 10^6</math> n/s, 80 <math>\mu</math>A, 110 kV 급 중성자 발생기이다.</p> <p>기초 성능 테스트 결과, 중성자 선속은 주 활용 조건인 20 <math>\mu</math>A, 80 kV에서 <math>5.3 \times 10^5</math> n/s 이상이며 최대 선속도 설계값에 해당하는 결과를 보였다. 기존에 개발한 피동형 중성자 동시계수 시스템을 이용하여, 외부 중성자 선원으로 중성자 발생기를 이용한 능동형 중성자 계수 시스템을 구축하고 성능을 평가하였다. 천연우라늄 산화물 분말(UO<sub>2</sub> powder) 시료에 대해 측정하여 2.64 cps/g-235U의 동시계수율이 측정되었다. 효율 측정 및 우라늄 대상 능동형 계수 실험값과 시물레이션 예측치를 비교분석한 결과, 공간적으로 방향에 따른 방출 중성자는 균일하지 않을 것으로 예측되었다.</p> <p>중성자 계수기의 개발 및 성능평가를 위해 필요한 중성자 선원으로써, 중성자 발생기는 동위원소 선원에 비해 여러 가지 장점을 가진다. 대표적으로 동위원소 선원과 달리 발생기는 중성자의 발생을 조절할 수 있어 다양한 선속의 활용은 물론, 비 활용 시 방사선이 방출하지 않는 특성은 방사선 피폭 및 안전관리 측면에서 큰 장점을 가진다. 또한 펄스 모드는 지발 감마 및 지발 중성자를 활용한 기술 개발에 활용할 수 있다.</p> <p>실험결과 중성자 발생기를 이용한 능동형 중성자계수 방법은 동위원소를 이용할 때보다 오차가 커, 이를 줄이기 위한 노력이 필요할 것으로 판단한다. 하지만 기초적인 중성자 계수기의 성능 테스트 및 능동형 비파괴 분석이 적용되어야 하는 목적에 따라 적정수준의 오차가 허용되는 상황 또는 피동형과 능동형 중성자계수 혹은 감마분광 및 중성자 계수 기술이 동시에 적용되어야 하는 상황에서는 중성자 발생기를 활용할 수 있을 것으로 기대한다. 또한 중성자 발생을 조절할 수 있다는 장점을 활용한다면, 다양한 비파괴분석 방법과의 접목을 통해 사용후핵연료 처리공정에 대한 안전조치 기술의 범위를 확대할 수 있을 것으로 기대한다.</p>							
주제명키워드 (10단어 이내)		중성자 발생기, 능동형 중성자 계수, 동시계수, 외부선원, 유도핵분열, 핵분열성 물질, 비파괴분석					

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR – 4045/2010					
Title/Subtitle		Installation of a D–D Type Neutron Generator and Its Performance Test			
Project Manager and Department		H. D. Kim (Fuel Cycle System Engineering Technology Development Division)			
Researcher and Department		K. J. Park, S. H. Park, D. Y. Song, H. S. Shin, S. K. Ahn, S. H. Eom, T. H. Lee, J. H. Jeong, J. S. Ju, and B. Y. Han (Fuel Cycle System Engineering Technology Development Division)			
Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI	Publication Date	2010.4
Page	119	Ill. & Tab.	Yes	Size	27 cm
Note					
Open		Open		Report Type	Technical Report
Classified		Restricted( ), _Class Document			
Sponsoring Org.				Contract No.	
<p>This report describes a applicability of neutron generator to the development of neutron counters regarding with research project, "development of nuclear material accounting and safeguards technologies". Selection of the generator, installation, radiation shielding and dose evaluation of the operating area, and its basic performance test result are described in detail. The subject neutron generator is GENIE16GT model of EADS SODERN, France, and it is a D–D type generator with the maximum flux of <math>2 \times 10^6</math> n/s of 2.5 MeV neutron and operating range of 80 <math>\mu</math>A and 110 kV.</p> <p>A neutron generator has several advantages over a radioisotope neutron source for development and performance test of neutron counting equipments. One of the important advantages is that it can control the emission. No emission of the turned–off neutron source is of importance in the view point of radiation safety, as well as its applicability of variable flux. Pulse mode emission is also applicable to develop the non–destructive technology based on delayed gamma rays or delayed neutrons.</p> <p>The experimental results showed larger error for the case of neutron generator as an interrogation source than the case of isotope source, and there should be more efforts to reduce the error. We expect, however, the generator would be highly applicable to basic performance test of neutron counters for nuclear materials, to the situation in which radioisotope neutron source is not preferred, to the active neutron counting system whose measurement uncertainty for acceptance level is reasonably high, or to the situation in which the integrated system of passive/active neutron and gamma counting is needed. And, if we maximize its advantages of control the neutron emission, the safeguards techniques for a spent fuel management process will be expanded and have a high confidence by combining with other conventional non–destructive assay methods.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		Neutron Generator, Active Neutron Counting, Coincidence, Interrogation Source, Induced Fission, Fissile Material, NDA			