

SFR 파손핵연료 감시계통 설계개념

Design Concept of Failed Fuel Monitoring  
System for SFR

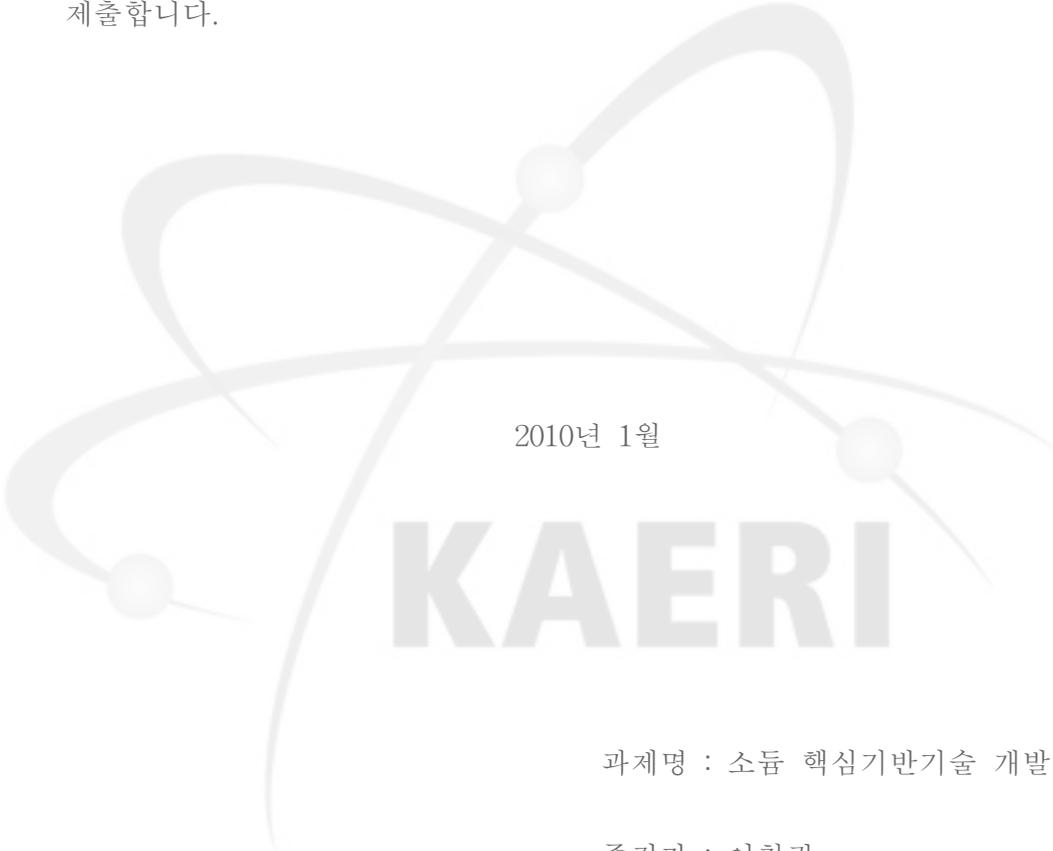
*KAERI*

## 제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 2009년도 “소듐 핵심기반기술 개발”과제의 기술보고서로 제출합니다.

2010년 1월



KAERI

과제명 : 소듐 핵심기반기술 개발

주저자 : 이철권

공저자 : 성승환

김병호

## 요 약 문

소듐냉각 고속로(SFR)에서는 노심 건전성 감시의 일환으로 핵연료의 건전성을 감시한다. 이를 위하여 핵연료의 파손여부를 실시간 감시하고, 파손정도를 파악하여 원자로 운전의 계속여부를 결정하게 된다. 또한 노심내에서 파손 핵연료의 위치를 파악하여 교체를 위한 운전정보로 사용한다. 핵연료 피복관에 구멍이나 파손이 생기면 핵분열물이 노심내로 유출되어 일체형원자로 전체로 확산되는데, 이때 파손핵연료 감시계통은 핵연료에서 유출되는 핵분열가스 및 지발중성자를 검출하여 핵연료의 건전성을 파악하게 된다.

핵연료 건전성 즉, 핵연료의 파손유무를 검출하기 위하여 이 계통은 HP-Ge gamma detector를 사용하여 원자로상부 커버가스 내에 존재하는 핵분열가스의 감마선을 검출하고, 핵분열함을 이용하여 중간열교환기(IHX) 내에서 지발중성자를 검출하는 두 가지 방법을 사용한다. 또한 파손핵연료의 정확한 위치를 파악하기 위하여 핵연료봉에 주입된 태그가스의 유출여부를 가스분석기로 분석한다.

이 보고서는 파손핵연료 감시계통에 사용되는 세 가지 기술에 관하여 설명하고, 이들을 기반으로 구성된 통합감시계통의 구성 개념을 설명하였다. 연구결과는 향후 추진될 SFR 파손핵연료 감시계통의 예비 및 상세설계 단계에서 활용될 수 있을 것이다.

## Abstract

In the design of sodium-cooled fast reactor (SFR), the integrity of fuel is monitored as part of core monitoring. To perform this function, the fuel failure is real-time monitored and the continuous operation of reactor is determined by the severity of fuel failure. As any fuel failure is detected, then the failed fuel is located and the results are henceforth provided for the operation of failed fuel replacement.

Any pin-hole or failure on the fuel clad makes cause of transferring a fission product into the core and then contaminates whole integrated reactor. When a fuel failure occurs, the system designed in this study monitors the integrity of fuel through detecting the fission gases and the delayed neutron radiated from failed fuel.

To perform system functions, the system applies two types of detectors. One is a high purity germanium detector (HP-Ge) for monitoring the gamma-ray of fission gases existing in the reactor head and the other is a fission chamber for detecting the delayed neutron within the intermediate heat-exchanger (IHX). In addition a gas analyzer is used to detect and sort the tag gases leaked from each fuel so as to locate the failed fuel.

This study describes three methods applied to the design of failed fuel monitoring system and the design concept of an integrated monitoring system based on them. Accordingly this report can be applied to the conceptual and basic design of SFR failed fuel monitoring system to be performed in the near future.

# 목 차

요약문 .....	i
Abstract .....	ii
제 1 장 서론 .....	1
제 2 장 SFR 파손핵연료 감시개념 .....	2
1. 파손핵연료 감시 개요 .....	2
2. 파손핵연료 건전성 감시 .....	4
2.1 핵분열개스의 감마선 측정 .....	4
2.2 지발중성자 측정 .....	12
3. 파손핵연료 위치 감시 .....	20
3.1 태그가스 선정 .....	20
3.2 태그가스 설치 방안 .....	21
3.3 태그가스 회수 .....	22
제 3 장 SFR 파손핵연료 감시계통 구성 .....	24
1. 개요 .....	24
1.1 설계요건 .....	24
2. 계통 설명 .....	25
2.1 핵분열개스 감시계통 .....	26
2.2 지발중성자 계측시스템 .....	29
2.3 태그가스 분석시스템 .....	30
3 SFR 파손핵연료 통합감시계통 .....	32
3.1 통신망을 이용한 타계통 연계 .....	32
참고문헌 .....	35

## 표 목 차

표 1	대표적인 방사화 개스 .....	5
표 2	저 에너지 감마선 검출기 해상도 및 측정 에너지 영역 비교 .....	9
표 3	감마선 검출기에 적합한 반도체 물질의 변수 .....	10
표 4	지발중성자 전달시간 .....	19



## 그림 목 차

그림 1	파손핵연료 감시방법 .....	3
그림 2	SFR 주요 기기 .....	3
그림 3	HPGe 계측기와 NaI(Tl) 계측기의 에너지 분해능 차이 .....	9
그림 4	HPGe 반도체 계측기의 종류 .....	11
그림 5	ORTEC 사의 GEM/GMX Coaxial HPGe Detector .....	12
그림 6	BRUKER BAL TIC HPGe Coaxial Detector .....	12
그림 7	핵연료봉 파손에 의한 지발중성자 거동 .....	14
그림 8	IHX Shell Side Design Data .....	18
그림 9	지발중성자원 전달경로 .....	19
그림 10	노내 지발중성자 전달경로 분석결과 .....	20
그림 11	태그가스 회수 및 분석시스템 개요도 .....	23
그림 12	반도체 감마선 검출시스템의 기본구성 .....	26
그림 13	지발중성자 감시시스템 구성도 .....	30
그림 14	태그가스 분석시스템 구성도 .....	31
그림 15	파손핵연료 통합감시계통 구성도(개념) .....	33

## 제 1 장 서 론

소듐냉각 고속로(SFR)에서는 노심 건전성 감시의 일환으로 핵연료의 건전성을 감시한다. 이를 위하여 핵연료의 파손여부를 실시간 감시하고, 파손정도를 파악하여 원자로 운전의 계속여부를 결정하게 된다. 또한 노심내에서 파손 핵연료의 위치를 파악하여 교체를 위한 운전정보로 사용한다. 핵연료 피복관에 구멍이나 파손이 생기면 핵분열물이 노심내로 유출되어 일체형원자로 전체로 확산되는데, 이때 파손핵연료 감시계통은 핵연료에서 유출되는 핵분열가스 및 지발중성자를 검출하여 핵연료의 건전성을 파악하게 된다.

핵연료 건전성 즉, 핵연료의 파손유무를 검출하기 위하여 이 계통은 HP-Ge gamma detector를 사용하여 커버가스 내에 존재하는 핵분열가스를 검출하고, 핵분열함을 이용하여 중간열교환기(IHX) 내에서 지발중성자를 검출하는 두 가지 방법을 사용한다. 그리고 파손핵연료의 정확한 위치를 파악하기 위하여 핵연료봉에 주입된 태그가스의 유출여부를 개스분석기로 분석한다. 또한 이 연구에서는 지발중성자를 검출하기 위하여 설치되는 핵분열함의 최적의 설치위치를 찾기 위하여 파손핵연료로부터 지발중성자의 원자로 용기 내에서의 전달경로를 분석하였다.

마지막으로 파손핵연료 감시계통에 사용되는 세 가지 기술을 기반으로 구성된 통합감시계통의 구성개념을 개발하였다. SFR 상위설계요건이 제시되지 않아 이 계통에 대한 계통설계요건을 확정할 수 없는 부분은 이 계통의 감시결과가 SFR의 보호기능으로 채택되느냐이다. 현재까지 개념개발 또는 건설된 원자로설계의 예에서 이 계통과 유사하거나 동일한 계통에 대한 설계결과를 참고하면 일관된 설계개념이 아닌 각 원자로마다 고유의 설계개념을 제시하고 있다. 어떤 계통이 보호기능을 수행한다면 이는 곧 이 계통의 설계안전등급을 결정하게 되는 주요 요인이 되고, 이후 개념설계부터 계통설계 내용이 확연히 달라질 것이다. 따라서 향후 SFR 설계에서도 이 계통에 관한 기능을 먼저 설정하여야 할 것이다.

## 제 2 장 SFR 파손핵연료 감시개념

본 장은 SFR의 파손 핵연료의 존재를 검출하고, 파손핵연료의 위치를 파악하기 위하여 설치되는 파손핵연료 감시시스템의 검출기에 대한 주요 설계사양을 선정하고, 선정된 사양에 대한 검토 및 분석 내용을 기술한다. 이 시스템은 크게 파손핵연료의 존재를 감시하는 가스 핵분열생성물 검출계통과 지발중성자 검출계통, 파손핵연료의 위치를 감시하는 태그가스 검출계통으로 구성된다.

### 1. 파손핵연료 감시 개요

핵연료 파손을 탐지하기 위하여, 파손된 핵연료에서 누출되는 가스 핵분열 생성물 (fission product gases)의 존재를 탐지한다. 가스 핵분열 생성물은 특정한 에너지를 가지는 감마선 및 지발중성자를 방출함으로써 안정화 원소로 전이한다. 따라서 이들이 방출하는 특정 에너지 밴드의 감마선 및 지발중성자 특성을 분석하면, 파손 핵연료를 탐지할 수 있다. 파손핵연료의 위치를 파악하기 위하여 핵연료봉에 태그가스를 주입하여 핵연료 손상시 누출되는 태그가스를 검출하는 방법을 검토하였다. 따라서 현재 검토된 감시방법은 다음의 세 가지이다.

- 핵분열가스 감시
- 지발중성자속 감시
- 태그가스 감시

이들 세가지 감시방법은 상호 독립적인 기능을 수행한다. 각각의 감시 정보는 독립적으로 수집되어 운전원에게 제공됨과 동시에 이들 세가지 정보를 이용하여 핵연료파손 종합정보를 구축하여 운전원에게 운전정보로 제공한다.

이 정보는 핵연료 건전성 감시수단, 운전원 정보 및 경보제공 수단으로 이용된다. 현재의 설계개념으로는 SFR 제어 또는 원자로보호 정보로 사

용하지 않지만, 향후 SFR 제어나 보호계통 설계에서 이들 변수가 요구되었을 때 이들을 감시하는 계통의 신뢰도와 응답시간이 향상된다면, 제어 및 보호계통에 적용도 고려할 수 있을 것이다.

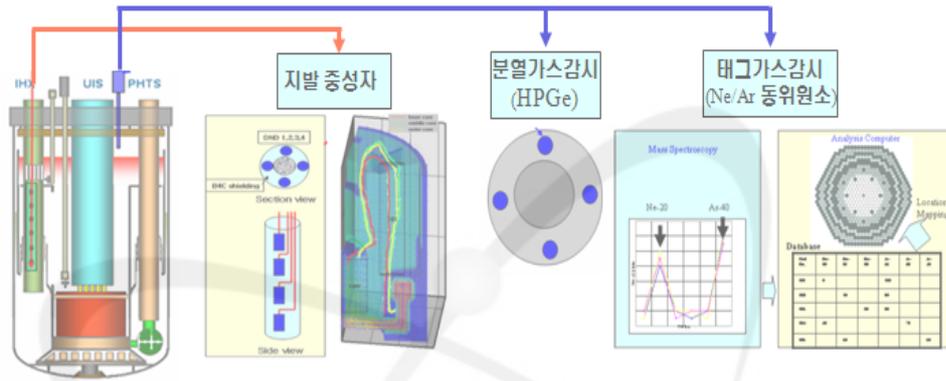


그림 2 파손핵연료 감시방법

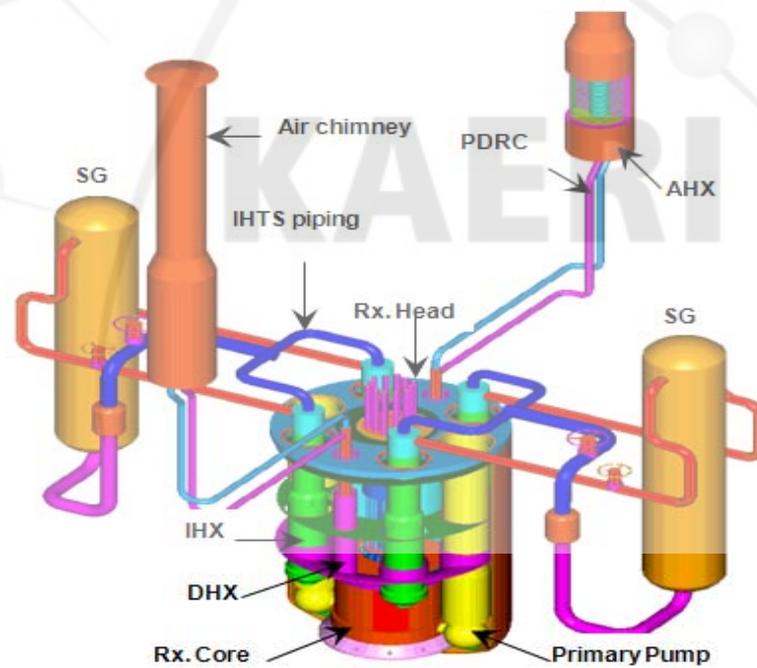


그림 3 SFR 주요 기기

## 2. 파손핵연료 건전성 감시

### 2.1 핵분열개스의 감마선 측정

#### 2.1.1 개요

대표적인 핵분열 개스 및 그 외 방사화된 개스의 반감기와 신형 액체금속로(ALMR)에서 제시된 농도에 대하여 표 1에 나타내었으며, 농도의 시간적 변화는 튜브의 직경 및 길이에 따라 달라진다.

표 1에 있는 핵분열 개스 또는 방사화 핵종은 분열개스 탐지를 위한 측정변수 후보들이며, 이들을 측정하기 위한 계측기 설계시 가장 먼저 고려해야 할 사항은 응답시간과 정확도/해상도이므로 이들 핵종 중에서 가장 기저가 되는 요건을 찾는 것이 중요하다. 첫째 계측기의 응답시간은 핵분열 개스 또는 방사화 핵종의 반감기와 관련된다. 반감기가 가장 짧은 핵종으로는 Ne-23으로 약 38 초의 반감기를 가지며, 반감기가 가장 긴 핵종으로는Xe-133으로 약 5.3 일의 반감기를 가짐을 알 수 있다. 두번째로 고려해야 할 사항은 측정정확도 또는 해상도로서 이와 직접적으로 관련되는 사항은 핵분열 개스 또는 방사화 핵종의 농도이다. 표 1에 나타난 바와 같이 가장 농도가 낮은 방사화 핵종은 Na-24로서 약 0.0025 uCi/cm<sup>3</sup>의 농도를 가진다.

다음으로 고려해야 할 사항은 핵분열 개스 또는 방사화 핵종의 에너지로서 이는 계측기의 상세설계시 고려된다. 표 1에 제시된 핵분열 개스 또는 방사화 핵종에 대해 대표적인 몇 개의 핵분열 개스 또는 방사화 핵종에만 국한하여 검출할 것인지 아니면 모든 핵분열 개스 또는 방사화 핵종에 대해 검출한 것인지에 따라 검출기의 사양이 결정될 것이지만, 현재는 표1에 제시된 모든 핵분열 개스 또는 방사화 핵종을 검출한다는 가정하에 검출기를 검토하였다.

표 1 대표적인 방사화 가스

종류	핵종	반감기	농도 (uCi/cm <sup>3</sup> )
핵분열 가스	Xe-133	5.30day	30
	Xe-135	9.14Hr	8
	Kr-85m	4.48Hr	0.8
	Kr-88	2.8Hr	0.5
	Xe-138	14.2Min	0.05
방사화 핵종	Ne-23	38sec	3000
	Ar-41	1.83Hr	0.4
	Na-24(vapor)	15Hr	0.0025

### 2.1.2 검출기 선정 고려사항

#### 1) 검출기 응답시간

o 파손핵연료 감시를 위한 핵분열가스 검출기의 응답시간은 표 1에서 제시된 각종 핵분열 가스 또는 방사화 핵종의 반감기가 기저요건이 된다.

o 모든 핵종을 검출한다고 가정하였을 경우 검출기는 최소한 38 초 이내에 감마선 특성에 대한 분석을 완료해야 한다.

o 여기에는 핵종의 운반시간과 검출기 응답시간, 그리고 신호처리시간 모두가 포함되어야 한다.

#### 2) 검출기 측정 민감도

o 핵분열가스 검출기의 측정 민감도는 표 1에서 제시된 각종 핵분열 가스 또는 방사화 핵종의 농도가 기저요건이 된다.

o 모든 핵종을 검출한다고 가정하였을 경우 검출기는 가장 낮은 농도를 가지는 Na-24를 측정할 수 있는 측정 민감도를 지녀야 한다.

o 핵종의 운반중 손실되는 농도를 고려하여 보수적으로 선정되어야 한다.

### 3) 검출기 선정 고려사항

상기에서 고려된 응답시간과 측정 민감도를 충족하기 위해서는 각종 감마선 검출기가 검토되어야 한다. 기존의 섬광형 검출기는 본 문서에서 제외되며, 여기서 고려해야 할 검출기는 반도체형 검출기이다. 감마선 검출기 고려시 검토되어야 할 사항은 다음과 같다.

- 큰 흡수계수를 지님.
- 단위 에너지당 다량의 전자-전공 쌍을 제공함.
- 전자 및 정공의 이동도가 좋음
- 완전 단결정에 근접할 정도의 고순도 특성을 가짐.
- 경제성이 좋음

#### 2.1.3 검출기 평가 및 선정

원자로 헤드 상부공간에 존재하는 분열개스 분석을 통하여 핵연료의 손상을 탐지하는 방법은 여러 가지가 있으나, 특정 방사선 존재를 검출하여 핵연료의 손상을 탐지하는데 이용한 검출기로는 가스봉입형 검출기, 섬광검출기 및 반도체검출기가 있다. 참고문헌 "커버개스 내의 감마선 및 태그개스 측정을 통한 핵연료과손 방안 설정" (LMR/IC200-ER-01 Rev.0/06)에 따르면 이들 중 반도체 검출기가 SFR 핵연료 손상 탐지에 적합한 것으로 권고하고 있다.

#### 1) 반도체 검출기와 타 검출기 비교

감마선 계측기는 크게 기체형 계측기와 NaI(Tl)을 이용한 섬광(scintillation) 계측기 그리고 높은 해상도를 가지는 고순도 Ge (High purity Germanium) 계측기로 크게 나누어진다.

일반적으로 많이 사용되는 기체형 계측기는 하전 입자가 개스를 통과할 때 발생하는 효과에 기초를 둔 것으로 방사선 준위에 따라 검출기에 많은 전류가 흐르는 형태이다. 정확한 구성 기체에 따라 다르기는 하지만, 대부분 기체형 계측기의 경우에 감마선의 에너지 스펙트럼 분해능은

수 keV 이상으로 나온다. 따라서 노심 내의 핵연료 파손에 의한 감마선의 에너지 스펙트럼에서 특정 피크가 보이지 않으므로 전체적인 감마선의 총량에 의해서 핵연료 파손 부분을 파악할 수 있다. 이러한 경우에 핵연료 파손 추정에 있어 원자로 운전 조건에 따라 많은 불확실성을 가지게 된다. 그러므로 기체형 계측기를 사용하는 경우에 핵연료 파손을 판정하기 위하여 잡음감쇠 및 원자로 조건에 따른 감마선 총량 분석에 많은 알고리즘 분석이 필요할 뿐만 아니라 원자로 가용성에 나쁜 영향을 주게 된다. 상세한 내용은 다음에 설명되는 섬광 계측기와 유사하다. 일반적으로 기체형 계측기의 불확실성은 섬광 계측기보다 더 큰 것으로 알려져 있으므로 더 큰 불확실성으로 인하여 더 나쁜 가용성을 가지게 된다.

두 번째로 많이 사용되는 섬광형 계측기는 측정 물질에서 발생하는 섬광(scintillation light)에 의해서 이온화 방사선을 검출하는 측정 방식이다. 방사선의 에너지를 흡수하여 원자가 전자대에 있던 전자가 전도대로 여기되었다가 다시 천이( $\sim 10E^{-8}$  초 내에)하면서 가시광선을 방출하는 물질을 섬광 물질이라고 한다. 입사되는 방사선의 세기와 가시광선의 방출량의 비례성을 이용하는 섬광 계측기는 사용하는 섬광 물질에 따라 종류가 나누어지며 대표적인 것으로 무기결정형인 Na(Tl) 계측기가 있다. 국내에서 핵연료 파손을 탐지하기 위하여 감마선 측정 방식에 이전에 하나로에서 사용된 적이 있는데, 이때 사용한 감마선 계측기가 냉각재 루프에 설치된 Na(Tl) 계측기가 있었다. 위에서 언급한 바와 같이 기체형과 섬광형 계측기는 분해능이 수에서 수십 keV 정도로서 특정 핵종의 감마선을 분해하기 어렵다.

국내의 대표적 연구로인 하나로에서 이전에 감마선의 총량을 대비하여 원자로 정지 신호를 사용한 적이 있으나 에너지 분해능이 낮으므로 실제적인 핵종의 감마선을 탐지하기 못하고 전체 총량 대비에 의해 핵연료 파손을 탐지한 적이 있다. 이러한 경우에 N-16의 6 MeV 감마선이 콤프턴 산란 등에 의해 2 MeV 이하의 이차 방사선을 생산하게 되므로 더욱 오차가 커지게 된다. 따라서 하나로에서 사용했던 방법은 6 MeV 이상의 에너지를 가지는 감마선과 0.6 - 2 MeV 이하의 감마선의 비율 계산을 통하여 N-16에 의한 감마선을 보정하는 방식으로 핵연료 파손을 탐지하였

다. 하지만 하나로에서도 운전 정지 중이나 원자로 출력 변동시에 N-16의 짧은 반감기로 인하여 보정율에 많은 차이를 보여서 원하지 않는 원자로 정지 현상이 많이 발생하여 지발중성자를 이용하는 방식으로 원자로 정지 계통의 설계를 현재는 변경하였다.

SFR에서는 냉각재를 Na으로 사용하게 되므로 다른 감마선 에너지 스펙트럼 특성을 보이게 된다. Na는 중성자 조사에 의해 많이 방사화되지 않는다. 하지만, 섬광 계측기의 경우에 핵종에 따른 감마선 에너지 스펙트럼의 분해능이 낮으므로 특정 핵종에 의한 피크가 보이지 않아서 섬광형 혹은 기체형 감마선 계측기를 이용한 감마선 스펙트럼으로부터 핵연료 파손을 탐지하기는 매우 어렵다.

표 2는 현재까지 실용화 가능한 감마선 검출기 중 해상도가 좋은 검출기의 해상도와 측정 에너지 준위를 나타낸다. 그림 3과 같이 세 종류의 고 해상도 반도체형 검출기와 섬광형 검출기 (NaI) 비교결과는 다음과 같다.

- o Ge 반도체형 검출기의 해상도가 가장 우수한 것으로 나타났으며 최적 측정 에너지 영역은 2-100 KeV로 나타났다.
- o 반면에 NaI(Tl)의 경우 122 KeV에서의 해상도는 Ge 검출기에 비해 약 60 배 정도 낮은 것으로 나타났다.

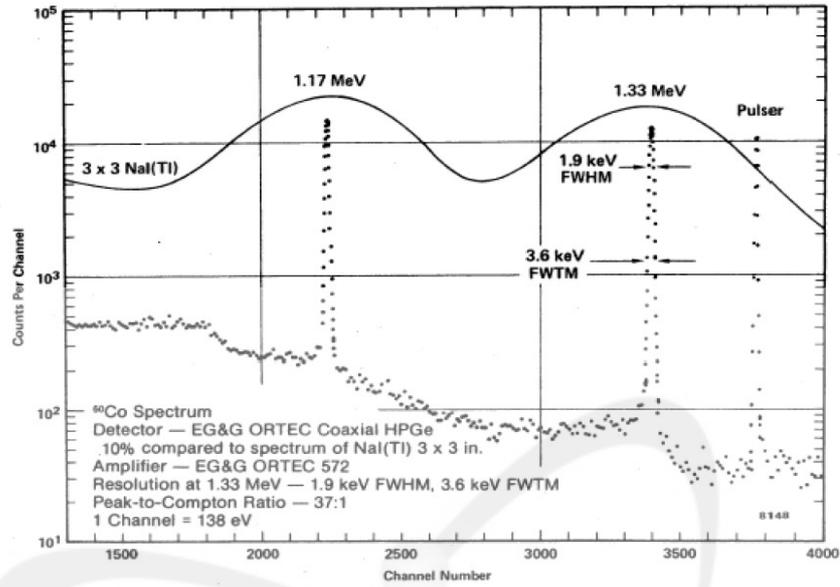


그림 3. HPGe 계측기와 NaI(Tl) 계측기의 에너지 분해능 차이

표 2. 저 에너지 감마선 검출기 해상도 및 측정에너지 영역 비교

검출기 물질	검출기 크기	해상도(KeV) @		최적 에너지 영역 (KeV)
		5.9 KeV	122 KeV	
Ge	50 mm <sup>2</sup> X 5 mm planar	0.145	0.5	2-100
CdTe	25 mm <sup>2</sup> X 2 mm	1.5	10-12	6-350
HgI <sub>2</sub>	100 mm <sup>2</sup> X 1 mm	1.5	-	2-60
NaI(Tl)	51 mm diam. X 2.5 mm	2.9	-	2-70
NaI(Tl)	51 mm diam. X 25 mm	-	31	20-200

## 2) 반도체 검출기 비교 및 예비 선정

표 3은 반도체형 감마선 검출기를 설계함에 있어 현재까지 제시된 반도체의 종류별로 운전온도, 에너지 갭, 전자 및 정공의 이동도 등에 관해 제시하고 있다.

표 3에 나타난 바와 같이 단위 에너지당 (eV) 다량의 전자-전공이 존재하는 경우 (Low electron-hole creation energy) 는 Ge 의 경우가 가장 우수하며, 전자 또는 전공의 이동도도 타 물질에 비해 Ge 이 월등히 높은 것을 알 수 있다. 이는 측정 해상도에 직접적인 영향을 주는 인자이다. 그러나 타 물질의 운전온도가 상온인데 반해 Ge 의 경우 약 77K (질소 액화온도) 근방에서 운전해야 하는 것으로 나타나 경제성 측면에서는 불리한 것으로 검토되었다.

표 3. 감마선 검출기에 적합한 반도체 물질의 변수

물질	원자수	운전온도	Band gap (eV)	Electron-hole creation energy (eV)	Density (gcm <sup>-3</sup> )	이동도 (cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	
						Electron	hole
Si	14	Room Temp.	1.106	3.62	2.33	1350	480
Ge	32	Liquid N2	0.67	2.96	5.32	36000	42000
CdTe	48, 52	Room Temp.	1.47	4.43	6.06	1000	80
HgI2	80, 53	Room Temp.	2.13	4.22	6.30	100	4
GaAs	21, 33	Room Temp.	1.45	4.51	5.35		
Bi2S3	31, 33		1.3	?	6.73		
PbI2	82, 53		2.6	7.68	6.16		
GaSe	31, 34		2.03	6.3	4.55		
AlSb	13, 51		1.62	5.05	4.26		
CdSe	48, 34		1.75	?	5.74		

ALMR 등에서는 가장 높은 분해능을 가지는 반도체형 계측기를 사용하는 것으로 나타나며, 이 중 반도체 물질은 Ge이고 고순도를 유지할 수 있도록 HPGe (High Purity Germanium) 감마선 계측기를 사용한다. HPGe는 반도체형 계측기로써 이론적으로 수 eV 까지 감마선 에너지 스펙트럼의 분해가 가능하다. 또한 검출기의 밀도가 기체형에 비하여 1,000

배 이상 큰 고체이므로 방사선의 검출 효율도 매우 우수하다. 다만 표 3에 나타난 바와 같이 Ge 반도체형 계측기는 그 동작 특성상 (내부 전자의 자유 이동 최소화) 항상 액체 질소를 이용하여 극저온으로 유지하여야 하는 문제점이 있다. 하지만, 현대의 HPGe 계측기는 동작 시에만 액체 질소에 의해 냉각되고 보관중에는 상온으로 유지하여도 되므로 상대적으로 장점이 있다. 운영 비용이 많이 들어가기는 하나 (액체 질소 가격은 500원/liter 이고 일주일 운전으로 위하여 30 liter 정도 소요) 에너지 분해능 및 검출 효율이 매우 좋으므로 상업적으로 운영이 가능하다.

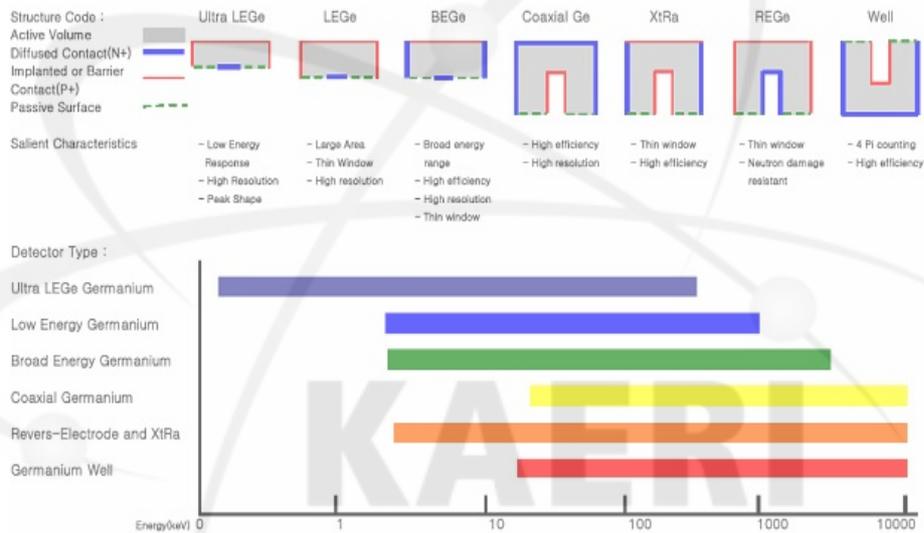


그림 4. HPGe 반도체 계측기의 종류



그림 5. ORTEC사의 GEM/GMX Coaxial HPGe Detector



그림 6. BRUKER BALTIC HPGe Coaxial Detector

## 2.2 지발중성자 측정

### 2.2.1 지발중성자 생성 및 거동

원자로 운전시 노심내 핵연료봉 내부에서는 핵분열에 의한 많은 다양한 종류의 핵분열 생성물이 연속적으로 생성되고, 이러한 핵분열 생성

물의 일부 핵종은 지속적으로 지발중성자를 방출하면서 붕괴하게 된다.

이들의 대표적인 핵종으로는 Br-87, Br-88, I-137, I-138, Rb-93, Rb-94 등이 있다. 지발중성자를 반감기에 따라 6개 그룹으로 분류하면 1 그룹은 반감기가 51초 이상이고, 2그룹은 약 22초, 나머지 그룹들은 6초 이하이다. 지발중성자 생성 분율은 소듐냉각고속로에서 주로 사용되는 Pu-239가 U-235에 비해 약 절반의 값을 갖는다. U-235는 핵분열 당 약 200 MeV의 에너지가 발생하게 되는데, 각 그룹별 yield fraction이 정의되어 있으므로 원자로의 출력이 정해지면 쉽게 그룹별 지발중성자 생성량을 알 수 있을 것으로 판단된다. U-235와 Pu-239가 혼재되어 분열을 일으키는 소듐냉각고속로의 경우 거의 동일한 200 MeV를 가지게 되므로 같은 값을 가질 것으로 생각된다. KALIMER-600을 기준으로 계산을 수행하면, KALIMER-600의 열출력은 약 1500 MWth이므로, 핵분열을 (fissions/sec)은 약  $4.7 \times 10^{19}$  fissions/sec이다. 핵연료 설계가 진행 중인 단계이므로, 전체 동위원소의 평균 지발중성자 생성율과 핵분열율을 이용하여 다음과 같은 개략적인 계산이 가능하다.

$$4.7 \times 10^{19} \text{ fissions/sec} * 0.02 \text{ delayed neutrons/fission} = 9.4 \times 10^{17} \text{ delayed neutrons/sec}$$

위의 지발중성자 양은 노심 전체의 핵연료봉에서 생성된 총량이다. 핵연료봉 내에 갇혀 있던 지발중성자는 핵연료봉 파손 발생 시에 1차 냉각재로 누출되게 되는데, 누출이 지속적으로 발생하는 경우 핵연료봉 내의 개스 압력은 시간에 따라 감소하게 되어 최종적으로는 일차냉각재의 압력과 같아지게 된다. 따라서 가압을 해주는 경수로와는 다르게 일차냉각재의 압력이 거의 대기압으로 유지되는 소듐냉각고속로에서 소규모 파손 발생 시에도 지발중성자는 상대적으로 많이 누출되게 되므로 지발중성자를 이용한 파손 핵연료 탐지가 조금 더 용이하게 될 것으로 예상된다. 누출되는 메커니즘은 크게 핵연료봉의 용접부의 파손으로 인하여 매우 소량의 지발중성자가 누출되는 소량 누출의 경우와 핵연료봉 피복관에 구멍이 뚫림으로 인해 발생하는 소량 이상의 누출을 가정할 수 있다. 즉, 파손 부위의 크기와 위치에 따라 다음과 같은 누출 거동의 특성을 보이

게 된다. 첫 번째로 소량 누출의 경우에는 누출되는 지발중성자의 양이 미미하므로 지발중성자 거동을 살펴보기 어렵고, 파키스탄의 연구용 원자로인 PARR-1에서 입증된 자료에 의하면 원자로 정지 시에는 더 이상 누출이 발생하지 않는 것으로 보인다. 이러한 자료는 현재 발전용 경수로 혹은 하나로와 유사한 연구용 원자로에서 수집된 자료로써, 추후 소듐냉각고속로 설계 진행에 따라 구체적인 분석이 수행되어야 한다.

위와 같이 누출된 지발중성자는 일차냉각재와 같이 루프를 돌아다니는데, 개스 형태의 동위원소들은 커버 개스 영역으로 빠져나가게 된다. 커버 개스 영역에서는 감마선 계측을 이용한 파손 핵연료 탐지 계통 개념이 설정이 되어 있기 때문에, 일차냉각재 내의 지발중성자 성분에 대한 검출 방안을 도출하여 일정 규모 이상의 누출이 발생하는 경우에 냉각재 루프 내에서 지발중성자의 거동을 탐지할 수 있을 것으로 예상된다.

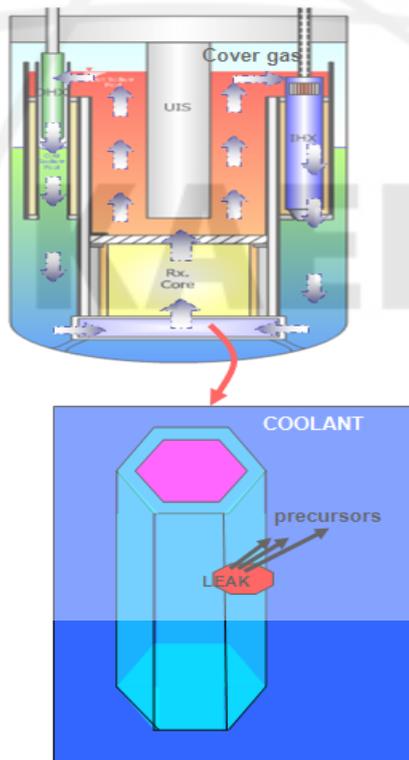


그림 7. 핵연료봉 파손에 의한 지발중성자 거동

## 2.2.2 지발중성자 계측기

누출된 지발중성자의 탐지를 위해서는 중성자 계측기가 요구된다. 일반적으로 중성자 계측기는 BF-3 검출기와 핵분열함(fission chamber)이 많이 사용되고 있다.

BF-3 검출기는 계측기 내부의 B-10과 중성자의 반응을 이용하여 중성자를 계측하는 계측기이다. BF-3 검출기 내부의 B-10은 중성자와  $B^{10}(n,\alpha)Li^7$ 의 핵분열 반응을 일으키며, 반응의 결과로  $\alpha$ 입자와 Li 원자핵 두 개의 하전 입자가 생긴다. 이 하전 입자들의 에너지 합은 2.31 MeV(94%) 또는 2.79 MeV(6%)에 입사 중성자의 에너지를 더한 값이며, 입사 중성자가 열중성자인 경우에는 에너지를 무시할 수 있고, 반응계의 선형 운동량이 매우 작기 때문에 생성된 두 하전 입자는 완전히 반대 방향으로 이동한다. 운동량과 에너지 보존에 의해 무거운 Li-7은 0.84 MeV,  $\alpha$ 입자는 1.47 MeV를 가지게 되고, 두 하전 입자가 검출기 내부의 기체를 이온화하여 완전히 에너지를 잃게 되면 검출기 스펙트럼에 2.31 MeV 또는 2.79 MeV 에너지에 해당하는 피크가 나올 것으로 기대할 수 있다. 그런데 반응이 계측기의 벽 근처에서 생기면 한 개는 벽에 부딪쳐 전리에 충분히 기여하지 못하여 전체 에너지에 미치지 못하는 펄스가 발생하는데 이를 wall effect라 한다. 보론을 함유하는 여러 가지 충전 가스 중에서 BF-3 계측기를 사용하는 이유는 계측의 선형성이 우수할 뿐만 아니라 보론의 고 농축이 가능하기 때문이다. 보론의 농축도를 높임으로써 그렇지 않은 것에 비해 5배 이상의 효율을 높일 수 있다. BF-3은 충전 압력이 높으면 proportional gas로서의 성능이 저하되기 때문에 일반적으로 많이 사용되는 BF-3의 충전 압력은 0.5기압 근처이다.

두 번째로 중성자 측정을 위한 계측기로써 핵분열함(fission chamber)이 있다. 핵분열함은 중성자와 초우라늄 원소들 사이의 핵분열 반응에서 생성되는 핵분열 생성물들의 에너지를 측정하여 중성자를 측정하는 계측기이다. 즉, U-235와 Pu-239와 같은 핵분열성 물질을 계측기 내부에 코팅하고 핵분열 반응을 이용하여 입사되는 중성자를 측정하는 방식이다. 핵분열 반응 이후의 계측 원리는 높은 에너지를 가지는 핵분열 생성물에

의해서 계측기 내의 가스들이 이온화하므로, 기존의 전리함(ionization chamber) 원리와 동일하다. 대표적으로 U-235를 사용하는 경우에 다음의 핵분열 반응을 이용하여 중성자를 계측한다. 중성자 에너지에 따라 U-235, Pu-239 등이 선택적으로 사용가능하다.



소듐냉각고속로의 중성자는 수 MeV 이상의 고에너지이지만, 핵연료 파손으로 일차냉각재에 누출되는 지발중성자의 에너지는 수백 KeV이므로 일반적인 핵분열함을 사용하여 측정이 가능하다. 핵분열 생성물에 의한 전리 에너지는 다른 감마선 혹은  $\alpha$ 선 에너지(보통 수 MeV 이내)보다 매우 높으므로 감마선이 매우 강한 원자로 내에서도 중성자만을 계측하는 것이 가능하기 때문에 KALIMER-600과 같은 풀(pool)형 일차냉각재 내의 지발중성자 측정에는 BF-3 계측기보다 핵분열함이 적합함을 알 수 있다. 또한 핵분열 생성물의 질량수가 매우 크므로 거의 모든 입자가 계측기 내부에서 모두 포집되고, 핵분열성 물질의 코팅 두께, 계측기 크기에 따라 에너지 펄스 형태가 다르기는 하지만, 기본적으로 핵분열 생성물의 에너지 스펙트럼을 유지하고 있으므로 중성자 계측효율이 매우 좋을 수 있다.

결론적으로 핵분열함이 원자로 일차냉각재 내의 지발중성자를 측정하기 때문에 고에너지 감마선 및  $\alpha$ 입자로 인한 배경잡음 제거가 용이하고, 사용이 용이한 장점이 있다. 그러나 핵분열함은 계측 효율을 위하여 코팅을 두껍게 하면 핵분열 생성물이 내부에서 포집되기 때문에, 핵분열성 물질의 두께가 얇게 할 수 밖에 없어 계측기 사용수명에 제한 사항이 있으며, 고농축의 핵분열성 물질의 취급에 대한 주의가 요구되는 단점이 있다.

### 2.2.3 핵연료 파손으로 누출된 지발중성자 탐지

핵연료 파손부위가 충분히 커지면 지발중성자 모핵(precursor)인 핵분열 생성물이 냉각재로 누출되어 핵분열 생성물이 일차냉각재로 누출되

어 PHTS 루프를 따라 순환하게 된다. 일차냉각재 내로 누출된 핵분열 생성물의 존재는 일차냉각재 내 지발중성자를 감시하므로써 핵연료 파손을 탐지할 수 있다. 즉, 일차냉각재 내로 누출된 핵분열 생성물 중의 지발중성자 모핵(precursors)의 붕괴에 의해 지발중성자가 발생하고, 많은 양이 붕괴되기 이전에 계측하여 핵연료 파손 여부를 탐지한다. 지발중성자 탐지를 위한 핵분열함은 설치의 용이성과 계측의 효율(지발중성자만을 측정)을 제고하기 위하여 IHX window 영역에 설치한다.

IHX에서 지발중성자를 측정하는 방안의 기본 가정으로는, 노심 내에 존재하는 소듐이 잘 혼합되어 각 IHX window 영역으로 들어오며, 모든 핵분열 생성물이 IHX window 영역의 계측기로 탐지 가능하다고 설정한다. 즉, 누출된 핵분열 생성물의 지발중성자를 계측할 수 없는 노심 내의 위치가 없다는 가정에 근거한다. 또한 원자로 노심으로부터의 중성자 측정 신호가 상당히 클 것으로 예측되기 때문에, IHX window 영역내 혹은 노심 방향으로 적절한 위치에 중성자 차폐체가 설치되어야 할 것이다.

각 지발중성자 계측시 핵분열성 생성물이 핵연료봉으로부터 일차냉각재로 누출되기까지의 시간인 isotope holding time (압력에 대한 함수 및 피복관 내부의 형상 그리고 파손 부위의 조건에 따라 달라짐) 그리고 누출 부위의 크기와 조건, 계측기의 특성에 따른 Equivalent Recoil Area(ERA)를 고려해야 한다. 또한, KALIMER-600의 PHTS 루프 냉각재 순환시간은 대략 30초 정도로 알려져 있는데 경수로에서의 순환시간인 7~8초와 비교하여 지발중성자가 핵연료봉에서 계측기로 전달되는 시간이 길어서 지발중성자의 상당수가 감쇠되어 버린다. 그러나 지발중성자 그룹 1 (약51초) 및 그룹 2(약22초)의 반감기에 비추어 추론하면, 파손 핵연료에서 누출되는 그룹 1, 2의 지발중성자는 IHX window 영역의 핵분열함에서 계측이 가능하다고 판단된다.

이외에도 고 에너지 감마선으로부터 파생되는 광중성자 등에 의한 배경잡음이나 핵연료봉의 표면 오염, 그리고 일차냉각재 성분 중의 Na-24에 의한 감마 배경잡음이 계측기 설계 및 운전 시에 일반적으로 존재한다. 핵분열함의 설계가 적절한 경우에 (그룹 1,2의 중성자 특성을 고려한

경우) 모두 에너지 스펙트럼의 차이로 구별이 가능할 것이라고 본다.

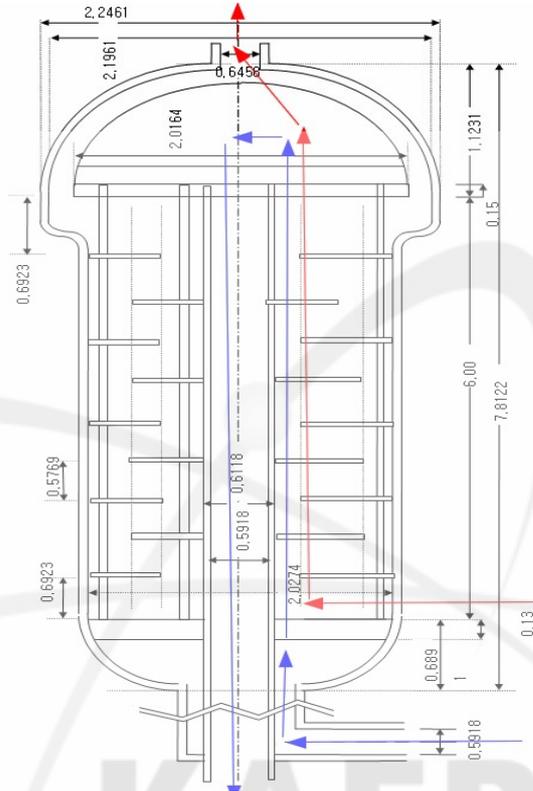


그림 8. IHX Shell Side Design Data

#### 2.2.4 지발중성자 전달경로 해석

그림 9와 그림 10에 COMMIX 열유동 해석 결과로부터 유추된 지발중성자원의 대표적인 이동경로를 나타내었다. 그림에서와 같이 노심의 inner/middle/outer 영역의 핵연료 집합체 위치에 따라 약간 다른 전달 경로를 보이며, 모든 지발중성자원은 IHX를 통하여 다시 저온 풀로 순환한다. 한번 순환된 지발중성자원은 방사선 붕괴시간이 매우 길게 되므로, 측정이 어렵다고 판단되어, 초기순환에 따른 전달모델을 개발하였다. Inner/middle/outer 영역의 핵연료 집합체 위치에 따라 전달경로는 상이

하다. 즉, inner 영역의 지발중성자원이 가장 멀리 이동하지만, 노심 출구 냉각재 유속이 빠르므로 모든 핵연료 집합체로부터 IHX까지 도달시간은 표 4에서 처럼 거의 같음을 확인하였다. 전달경로를 추적하여 전달 시간을 확인하여 보면, 약 20초 가량이 소요된다. 따라서 평균적인 지발중성자원의 반감기를 고려할 때 초기누출 양의 약 1/8이 IHX 주변부 핵분열 함으로 전달된다.

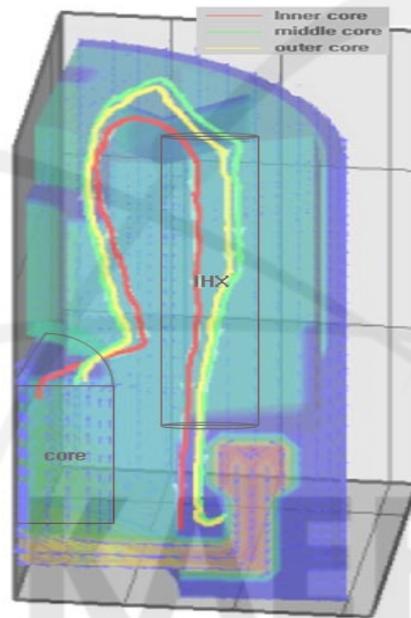


그림 9. 지발중성자원 전달경로

표 4 지발중성자 전달시간

stream no.	location	time(sec)
1	Inner core	6.86
3	Inner core	12.68
5	middle core	7.82
6	middle core	15.29
10	outer core	10.33

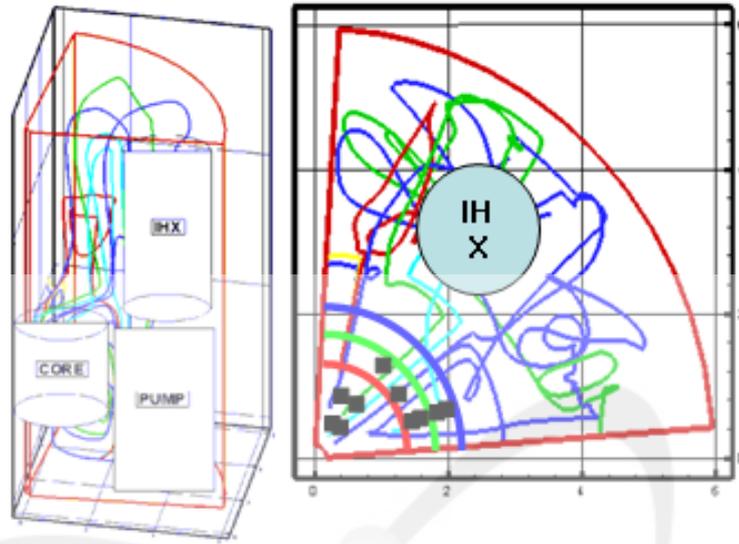


그림 10. 노내 지발중성자 전달경로 분석결과

### 3. 파손핵연료 위치 감시

이 절에서는 SFR의 파손 핵연료를 탐지하기 위한 태그가스 분석방안을 설명한다. 커버 개스내에 존재하는 태그가스의 성분 비율 분석을 통하여 파손된 어셈블리의 위치를 파악할 수 있다. 아직 구체적인 상세 설계가 진행되지 않아서 미비한 점이 있으나, 연구를 통하여 태그가스 탐지방안에 대한 개념 설정을 완료하였다. 상세한 시스템 사양과 더불어 그에 따른 구체적인 제한치나 운전모드는 추후 상세설계 진행에 따라 보완할 예정이다.

#### 3.1 태그가스 선정

태그(tag) 가스는 Xenon, Krypton, Argon and Neon의 동위원소 중의 하나가 사용 가능한 것으로 알려져 있다. 여기서 Xenon 과 krypton 태그가스는 커버 개스로 Argon이나 Helium을 사용하는 경우에 모두 유용하다. 만약 커버 개스로 Argon을 사용하는 경우에 Argon/Neon 동위원소는 Argon 배경잡음 때문에 그 성분비를 정확히 측정하는 것이 매우

어렵다. 따라서 Argon/Neon 개스 태그는 오로지 Helium 커버개스에서만 유용하며, 현재 SFR에서는 원자로 내부의 커버개스로 Helium을 사용할 예정이므로 Argon/Neon 개스 태그에 대해 기술한다. 또한 Xenon/Krypton을 이용하는 경우에, 이는 핵분열개스 생성물이므로 특히 개스 태그의 비율분석 시에 원자로 운전기간 및 그 반감기에 대한 고려가 필요하게 되어 성분분석에 어려움이 많이 있다. 이러한 Argon/Neon 개스 태그시스템이 ALMR에서도 사용되므로, 그 특성을 유추할 수 있다.

Argon/Neon 개스태그 시스템을 사용하는 경우 Xenon/Krypton 개스 태그에 비교하여 가격 면에서 30% 정도 낮고, 원자로 물질구성의 변화가 적고, 원자로 커버개스의 밀봉 운전이 더욱 쉽게 조화롭기 때문이다. 또한 가장 주요한 특성은 아르곤 및 네온 동위원소가 중성자 흡수 단면적이 매우 적고, 우라늄 혹은 플루토늄의 핵분열 생성물(fission yield)에서 Argon 및 Neon이 생성되지 않아서 성분 분석이 용이한 장점도 있다.

개스 태그를 사용하는 방안으로 모든 어셈블리 각각에 다른 성분 비율을 가지는 태그개스를 충전함으로써 시작된다. 개스를 충전하는 방법은 배출 및 충전 (evacuate-and-backfill) 방법이 효율적인 것으로 알려져 있으나, 본 연구의 범위를 벗어나므로 기술하지 않는다.

### 3.2 태그개스 설치 방안

태그개스는 손상된 연료의 위치를 알아내기 위해 사용된다. 태그개스는 각 연료의 다발에 방사성 동위원소가 조합된 적은양의 개스를 연료다발의 연료봉에 주입하여, 연료피복재에 손상이 생기면, 그 연료로부터 방출된 태그개스는 원자로 상부의 커버개스에 모이게 된다. 이 개스를 질량분량계로 분석하면 손상된 연료의 위치를 알 수 있다. 여기에 사용되는 방사성 동위원소는 Ar 및 Ne개스로 가격이 저렴하고, 헬륨 커버개스와 같이 사용할 수 있다. ALMR-150 MWe의 태그개스는 노심 연료설계가 끝나면 설계된 연료다발 개수만큼의 태그개스를 만들어야 하며, 같은 연료다발의 연료봉에는 같은 태그개스를 주입한다. 태그개스의 동위원소는 Ne-20, Ne-21, Ne-22, Ar-36, Ar-38, Ar-40이다. 이 동위원소들을 여러

가지 양으로 혼합하여 연료다발 수만큼의 태그개스를 만든다.

동위원소 혼합만으로 만들 수 있는 태그개스는 27개이며, 질량분광계의 분석능을 고려하여, 동위원소의 혼합비를 다르게 하여 필요만큼의 태그개스를 만들 수 있다. 다음은 동위원소로만 구성한 태그개스이다.

Ne-20, Ar-36	Ne-20, Ar-38	Ne-20, Ar-40
Ne-21, Ar-36	Ne-21, Ar-38	Ne-21, Ar-40
Ne-22, Ar-36	Ne-22, Ar-38	Ne-22, Ar-40

Ne-20, Ar-36, Ar-38	Ne-20, Ar-38, Ar-40	Ne-20, Ar-36, Ar-40
Ne-21, Ar-36, Ar-38	Ne-21, Ar-38, Ar-40	Ne-21, Ar-36, Ar-40
Ne-22, Ar-36, Ar-38	Ne-22, Ar-38, Ar-40	Ne-22, Ar-36, Ar-40

Ar-36, Ne-20, Ne-21	Ar-36, Ne-21, Ne-22	Ar-36, Ne-20, Ne-22
Ar-38, Ne-20, Ne-21	Ar-38, Ne-21, Ne-22	Ar-38, Ne-20, Ne-22
Ar-40, Ne-20, Ne-21	Ar-40, Ne-21, Ne-22	Ar-40, Ne-20, Ne-22

### 3.3 태그개스 회수

현재까지 SFR에서 커버개스 회수 및 정화 과정이 설계되어 있지 않으므로, ALMR에서 제시한 방법을 참조로 태그개스 회수 및 분석 방안을 설정한다. 태그개스 회수 및 분석은 다음의 세 단계로 이루어진다.

첫 번째, 커버 개스를 원자로 헤드에서 추출하여 커버개스 이동장치 헬륨 저장 및 이송 탱크 (helium storage and transfer tank on the cover gas vehicle )로 보내고, 방사선 폐기물처리시설(radwaste facility)로 전송된다. 두 번째로 태그개스 (tag gas) 농도 및 분석에 방해가 될 수 있는 원하지 않는 성분을 제거하기 위한 태그개스를 포함한 커버개스의 정화(pre-tag cleanup) 단계를 거친다. 마지막 세 번째로, 태그개스만이 회수되고 질량 분석을 통하여 태그개스의 성분 비율을 분석한다. 방사성 폐기물 처리시설로 이송되는 과정은 커버개스 정화 시스템의 일부이며, 아

직 설계가 진행되지 않았고 또한 태그가스 회수 및 분석과는 직접적으로 관련이 없으므로 본 연구에서는 다루지 않는다. 그림 11에 개략적인 시스템의 구성을 나타내었다. 이 역시 ALMR에서 추구하고 있는 방안으로써, SFR에 적용이 가능한 것으로 판단된다.

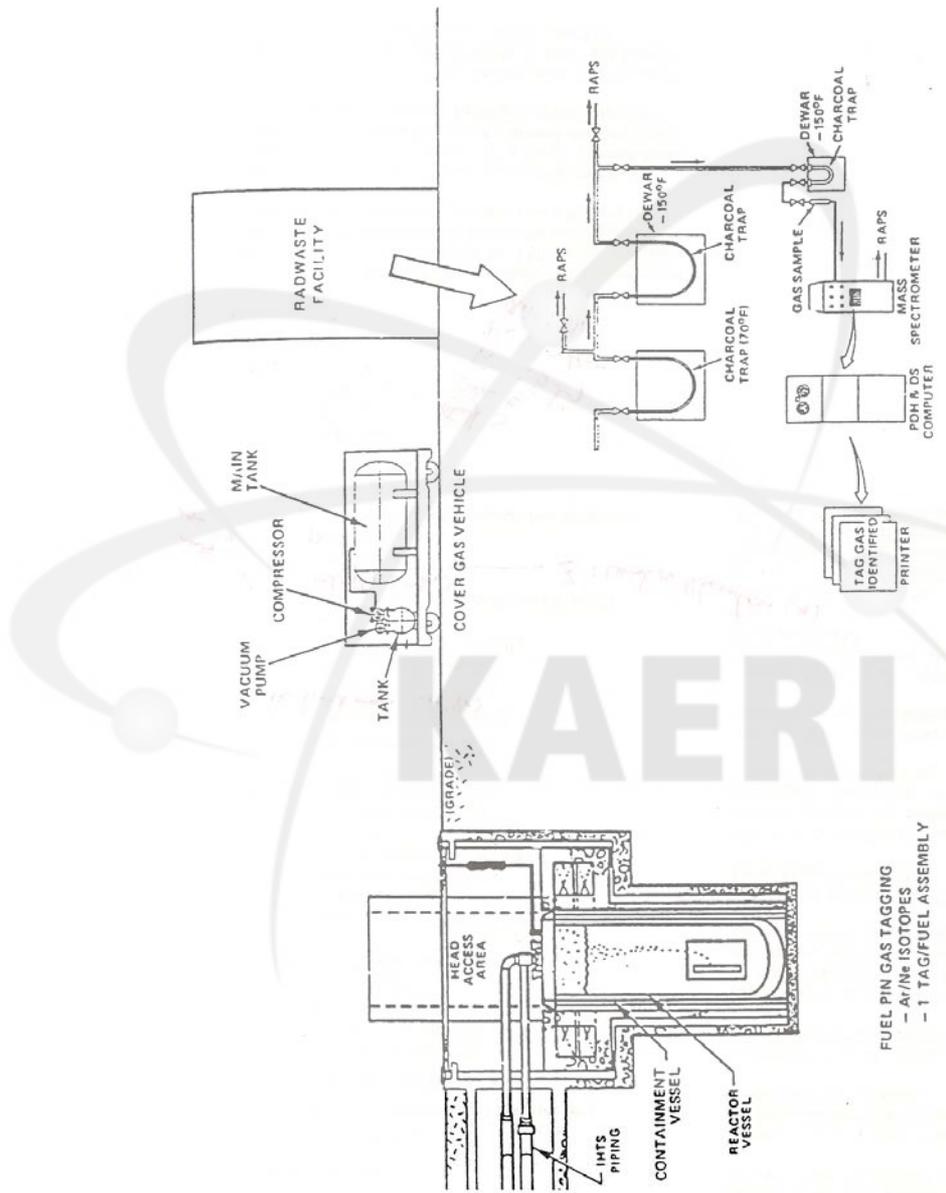


그림 11. 태그가스 회수 및 분석시스템 개요도

## 제 3 장 SFR 파손핵연료 감시계통 구성

### 1. 개요

파손핵연료 감시계통은 핵연료집합체의 파손여부를 검출하여, 이를 운전원에게 알려 제한된 출력운전이나 수동 원자로정지를 가능하게 하며, 나아가 운전원이 시정조치를 취하도록 한다. 핵연료 피복관에 구멍이나 파손이 생기면 핵분열물이 노심내로 유출되어 SFR 원자로 전체로 확산되며, 이 때 이 계통은 핵분열 유출물인 핵분열가스 및 지발중성자를 검출한다. 핵분열가스를 검출하기 위하여 이 계통은 HP-Ge gamma detector를 사용하여 커버가스 내에 존재하는 핵분열가스를 검출하고, IHX 내에서 지발중성자를 검출하기 위하여 핵분열함을 설치하며, 파손핵연료 위치검출을 위한 태그가스를 분석하기 위하여 가스분석기를 사용한다. 핵분열가스 검출기와 지발중성자 검출기는 원자로 용기내에 설치되며, 태그가스 검출기 및 분석기는 (원자로 용기 및 원자로 건물 외부인) 방사성폐기물 건물에 설치된다. 핵연료에 봉입되는 태그가스는 운전이 필요시 Off-line으로 감시되고, 측정을 위하여 취득된 커버가스는 회수처리 과정을 거친다.

파손핵연료 감시계통은 비안전관련 계통으로 설계되지만, SFR 계통설계에 따라서는 프랑스에서 개발한 EFR(European Fast Reactor)에서와 같이 지발중성자 검출을 이용한 파손핵연료 감시계통을 원자로 보호를 위한 안전등급으로 설계할 수도 있다.

#### 1.1 설계요건

이 절에서 기술되는 설계요건은 계통설계에 따라 달라질 수 있다.

##### 1) 지발중성자 감시

- 핵연료 피복재 파손은 설계기준 및 설계기준초과 상태에서도 검

출가능해야 한다.

- 설계기준 사고시 노심용융을 방지할 수 있어야 하며, 설계기준초과 사고시는 노심용융으로 사고가 전파되는 것을 방지할 수 있어야 한다. 핵연료 피복재 파손시 파손핵연료의 위치를 파악한 후 debugging을 위하여 원자료를 정지하여야 한다.

- 시스템의 설정치를 결정할 때 부분부하운전상태(partial load operating conditions)가 고려되어야 한다.

- 계통기능에 영향을 미치는 고장발생시 해당 시스템 및 기기는 고장안전(fail safe) 상태가 되어야 한다.

- 적어도 IHX 2군데에서 신호가 검출되었을 때 핵연료 피복재 파손으로 취급한다.

- 시스템 전원은 안전기능에 해당하는 신뢰도를 가져야 한다.

## 2) 핵분열개스 감시

- 기능은 지발중성자 감시와 동일하지만 비안전관련 계통으로 설계된다.

- 정확한 측정을 위하여 HP-Ge 검출기는 액체질소로 냉각되어야 한다.

## 3) 태그개스 감시

- 파손핵연료의 존재가 경보되었을 때 파손핵연료의 정확한 위치를 파악하기 위하여 운전되는 off-line 시스템이며, 비안전관련 계통으로 설계된다.

- 이 시스템은 방사성폐기물 건물에 설치되며, 커버개스는 회수처리 과정을 거친다.

## 2. 계통설명

현재까지 다른 원자로 설계에서 파손핵연료 감시계통은 각 기능별로 단독시스템으로 운영되어 왔지만, SFR 설계에서는 컴퓨터 및 데이터통신망 기술을 도입하여 이들을 통합감시시스템으로 설계, 운영하고자 한다.

## 2.1 핵분열개스 감시계통

반도체 검출기의 장점은 반도체 전자 및 전공을 만드는데 필요한 에너지가 Ge이 2.96 eV, Si가 3.62 eV로 기체(30 eV)보다 상당히 작다. 이로 인해 동일한 에너지 입사 방사선에 대하여 생성되는 정보전달자의 수가 많기 때문에 출력펄스가 커진다. 따라서 입사방사선의 에너지를 구분하는 에너지 분해능이 좋고, 또한 검출기가 기체보다 밀도가 1000배 정도 큰 고체이므로 방사선의 검출효율이 우수하다. 그러나 상온에서도 열적여기에 의해 반도체 검출기에는 항상 미량의 전류가 흐르기 때문에 사용시에는 반드시 냉각해야 하는 번거로움이 있다.

반도체 감마선 검출기시스템의 기본구성은 그림 12와 같다.

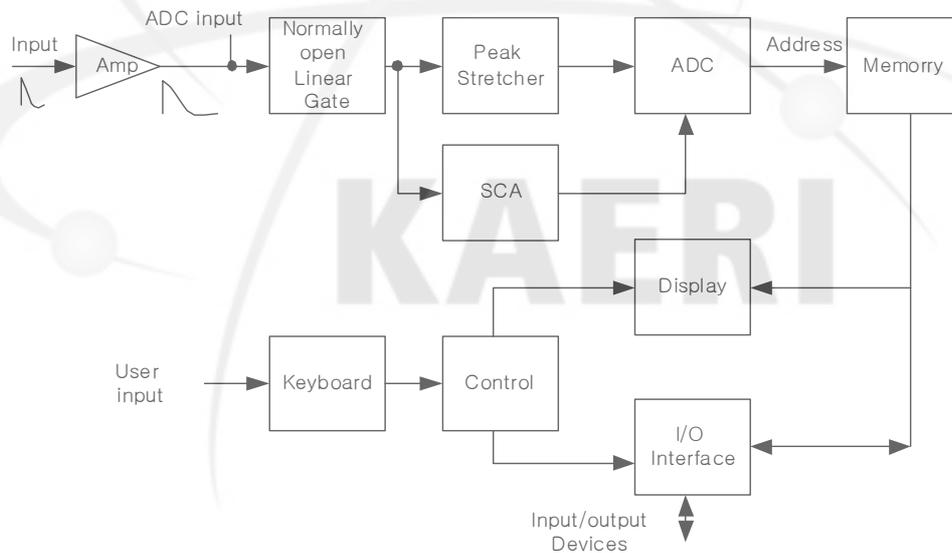


그림 12. 반도체 감마선 검출기시스템의 기본구성

### 1) 전치증폭기

전치증폭기는 입력전하에 비례하는 파고의 펄스를 얻는 전하형 (charge sensitive preamplifier)을 사용한다. 전하형 전치 증폭기의 입력 전하 ( $Q=qE/\epsilon$ )와 출력파고의 관계는 다음과 같다.

$$V_{op} = 1/(C_f + C_t/A_0)Q_i$$

전하 증폭단의 개방이득 ( $A_0$ )이 충분히 높은 경우, 전하이득 ( $V_{op}/Q_i$ )은  $1/C_f$ 가 된다. 여기서  $q$ 는 전자의 전하량,  $E$ 는 방사선의 에너지,  $\varepsilon$ 는 검출기 내에서의 전자-전공 쌍 생성에 필요한 평균에너지,  $C_f$ 는 음 회기 전기용량(negative feedback capacitance),  $C_t$ 는 검출기를 포함한 전 입력 전기용량(total input capacitance)이다.

또한 잡음특성은 외부입력용량( $C_{ex}$ )이 0일 때 입력등가 잡음전하( $E_{no}$ )와 외부 입력용량의 증가에 대한 입력 등가잡음의 증가분 ( $\Delta E_n/\Delta C_{ex}$ )으로 나타낼 수 있다. Cd의 정전용량을 가진 이상적인 검출기인 경우 저에너지 피크에 대한 에너지 분해능은( $E_n$ ) 다음과 같다.

$$E_n = E_{no} + C_d \cdot \Delta E_n / \Delta C_{ex}$$

전치증폭기의 잡음은 입력단 소자의 상호 컨덕턴스(gm), 입력전기용량( $C_{iss}$ ), 입력누설전류( $I_{gss}$ )입력회로에 접속된 소자의 전기용량, 누설전류 등에 의존한다.

## 2) 선형비례증폭기(Linear Amplifier)

비례증폭기의 기본기능은 S/N 비를 좋게 해서 입력신호를 증폭하는 것으로, 전치증폭기의 출력 펄스를 파고가 입력신호의 파고에 정확히 비례하는 것이 중요하다. 그 비례성을 나타내는 적분형 비직선성이 사용된다. 특히 반도체 스펙트럼 분석용 비례증폭기 이득 안정도가 높은 것이 좋으며, 여러 가지 측정조건에 대해서 최적화 할 수 있도록 gain이나 filter 시정수가 넓은 범위에 걸쳐서 미세하게 조정할 수 있는 것을 써야 한다.

고 에너지  $\gamma$ -선 측정에는 증폭기의 이득 안정도가 에너지의 분해능을 좌우하기 때문에 음회귀량을 크게 해서 단 사이에 삽입된 소자나 음회귀 소자의 온도특성 좋은 것을 사용하여  $\pm 0.005 \text{ }^\circ\text{C}$  정도의 안정도가

되어야 한다.

### 3) 아날로그- 디지털 변환기(ADC)

일반적으로 ADC는 변환속도, 정밀도, 직선성으로 평가되지만 다 채널 분석기(Multi-channel Analyzer; MCA) 용의 ADC는 에너지 스펙트럼을 얻고자 하므로 미분 직선성이 좋아야 한다. ADC는 주로 wilkinson-형을 사용하는데 입력펄스의 파고가 stretcher의 콘덴서에 유지된 후 정전류로 방전을 시작하여 clock gate를 개방한다. 그 방전 파형이 zero level에 이르면 clock gate는 닫히고 이 사이에 출력된 clock pulse의 수가 ADC의 출력데이터(채널수)가 된다. 이방전파형의 경사와 clock 주파수로 변환 gain(출력 채널수/입력파고)이 결정된다. 고정처리 시간을  $T_c(\mu s)$ , clock 주파수를  $F_c(MHz)$ , 채널수를  $N_c$ , 디지털 offset를  $N_d$ 라 하고 입력 펄스의 변환시간( $T_c$ )는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_c = T_s + (N_c + N_d) / F_c (\mu s)$$

ADC의 직선성은 적분 비직선성과 미분 비직선성으로 나타내고 있다. 적분 비직선성은 0-10 V의 입력펄스 파고와 채널수의 비례관계의 편차로서 표현되고, 미분 비직선성은 각 채널사이 폭의 요동으로 표현된다. 일반적으로  $\pm 0.025\%$  정도이고, 미분 비직선성은  $\pm 1\%$  정도이다. 적분 비직선성은 핵종판정에 중요하며, 에너지를 알고 있는 다수의 피크를 가진 선원으로 에너지 교정을 하여 보정한다. 미분 비직선성은 스펙트럼의 모양에 기여하기 때문에 중요하고, 보정이 곤란하므로 그 값이 적은 ADC를 선택할 필요가 있다.

### 4) 신호처리 Unit

비례증폭기는 선형적인 처리에 의해서 넓은 주파수 영역에서 잡음을 줄이고 신호를 필요한 수준까지 증폭하는 것이다. 따라서 입력신호가 가진 파고, 파형, 시간 등의 정보로부터 불필요한 정보를 제거하고, 스펙트럼의 일그러짐을 개선하기 위해 비례증폭기 후단에 신호처리 unit을 설치하게 된다.

신호처리 unit는 baseline의 재생, 바이어스 증폭, pulse stretcher, linear gate, pile-up rejector 등 비선형 처리회로나 과형 처리회로로 구성된다. 여기에서 비선형 처리회로를 시스템에 부가하므로 서 전 시스템의 이득이나 baseline의 안정도와 직선성의 저하가 문제가 된다. 고계수율에서 가장 큰 영향을 주는 에너지 분해능 저하요소로서 baseline의 변동은 증폭기 시스템의 교류결합회로에 의해 입력신호의 직류성분이 없어지게 되어 출력 baseline이 계수율에 따라서 변동하는 원인이다. baseline restorer는 입력신호의 undershoot 부분을 비선형 처리회로의해서 baseline을 기준준위까지 복귀시키는 것이다.

파고분석기는 입력펄스의 과형의 준성이 있기 때문에 펄스폭이 좁은 펄스나 끝이 뾰족한 피크를 가진 펄스 파고를 분석할 경우에는 pulse stretcher나 linear gate를 이용하여 처리한다.

#### 5) Multichannel Analyzer(MCA)의 구성

에너지 분석에서 가장 중요한 전자회로는 MCA이다. MCA는 각각의 입력 펄스의 피크값(파고)의 histogram를 만드는 것으로서  $\gamma$ -선이나 X-선의 에너지 스펙트럼을 얻고, 그것을 나타내고 도식화하기 위한 아날로그-디지털 변환기, 메모리, 표시장치, 입출력제어장치로 구성되어 있다. MCA의 최대 채널수는 ADC의 분해능에 의존하는 것으로 16384 정도이다. 채널수는 측정 검출기나, 목적에 맞도록 입력펄스 파고의 full scale에 대응하는 채널수, 즉 256에서부터 16384까지 설정하도록 되어 있다. Ge 검출기는 2048에서 16384채널까지로 설정한다.

### 2.2 지발증성자 계측시스템

계측기 후단의 신호처리는 일반적인 전리함 계측기와 유사하게 다음과 같이 진행된다. 모든 계측기 신호는 전치증폭기(preamplifier)의 입력 신호로 전송되고, 각 전치증폭기는 계측되는 신호 크기를 후에 처리하기 위하여 적절한 수준으로 증폭한다. 즉, 증폭된 신호를 이용하여 감마선에 의해서 유발되는 카운터(counter)에 대한 각각 전기적 구별이 가능하도록 한다. 구별된 신호는 모두 합해져서 하나의 신호로 만들어지고, 제어반에 입력된다. 입력된 신호는 대수준위 회로, 선형회로, 미분회로 등을 통하여

지발중성자 속의 세기를 측정할 수 있도록 한다. 그 외 제어반에서는 전치중폭기의 원격 교정 및 저전압 전원 공급 경보 등을 포함한 계측기 운전과 유지 보수에 필요한 기능을 제공해야 한다. 또한 측정된 지발중성자 신호는 플랜트 감시 및 표시 계통에서 저장 및 표시되며, 각종 경보기(고준위 경보, 저 전압 경보 등) 제어실에 일반적으로 제공되어야 하며, 플랜트 정보계통에도 독립적으로 제공되어야 한다.

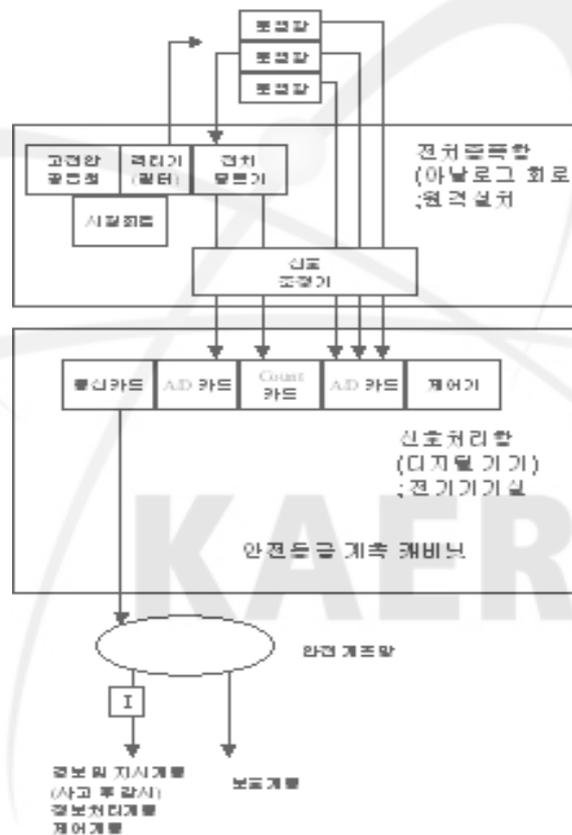


그림 13. 지발중성자 감시시스템 구성도

### 2.3 태그가스 분석시스템

태그가스 분석시스템은 커버 가스 내에 존재하는 태그가스 동위원소(tag isotope)를 농축하고 분석한다. 태그가스 회수 및 분석(tag gas

recovery and analysis) 시스템의 한 예는 그림 15에 나타난 바와 같이 하나 이상의 태그가스 획득장치, 진공탱크, 냉각펌프, 샘플 저장용기 및 질량분석기로 구성되어 있다.

헬륨 커버개스는 먼저 농축의 초기 단계를 제공하기 위하여 직렬로 연결된 하나 이상의 일차 획득장치(tag bed)를 통과한다. 획득장치의 구체적인 수량이나, 사양은 추후 설계 진행에 따라 결정한다. 획득장치를 통하여 획득된 태그개스는 다시 농축되고 농축된 태그개스는 질량분석기를 통하여 그 성분 비율을 분석하게 된다. 따라서 어셈블리 제작 시에 태그개스의 성분 비율을 각 어셈블리마다 모두 다르게 충전하여 두었으므로, 획득한 태그개스의 성분 비율 검사결과에 따라 파손된 어셈블리의 위치를 알 수 있다. 파손된 어셈블리의 취급 및 회수 과정은 본 문서의 범위를 벗어나므로 기술하지 않는다.

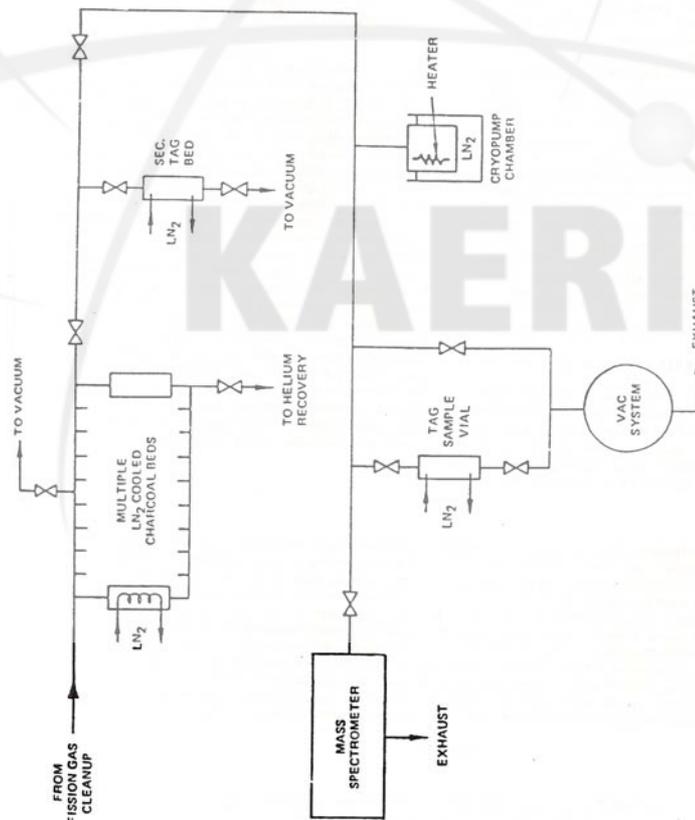


그림 14. 태그가스 분석시스템 구성도

### 3. SFR 파손핵연료 통합감시계통

현재까지 파손핵연료 감시를 위하여 사용되는 기술들은 원자로설계에  
서 각각 단독시스템으로 설치 운영되어 왔다. 그러나 SFR 설계에서는 이  
들을 하나의 통합된 시스템으로 설계하여 운전을 위한 신호처리와 분석  
기능을 고도화하여 계통의 운전성을 제고한다.

통합 감시시스템 설계를 위하여 소프트웨어 기반의 디지털기술과 신호  
연계를 위한 통신망 기술의 접목이 필수적이다. 원전에서의 사용경험이  
많은 아날로그 회로는 기술 및 기기검증이 완료되고 실시간 응답이 보장  
되는 등의 장점을 지니고 있지만, 반면 아날로그 기기들이 공통적으로 갖  
는 부품단종에 따른 보수유지의 어려움, 열화 및 온도 등의 환경변화에  
따른 정확도 및 드리프트 문제, 선형성 및 히스테리시스 문제, 신호왜곡  
에 따른 전송오차, 디지털화 시스템에 대한 호환성 및 융통성, 복잡한 시  
험회로 및 절차 등을 지니고 있다. 따라서 이러한 단점을 개선하기 위해  
디지털 신호처리 기술 및 부품을 사용하며, 이 외에도 시스템을 소형화할  
수 있다는 점에서 또 다른 장점을 제공한다.

그림 15는 통합 파손핵연료감시시스템 구성도이다. 여러 검출기에서 출  
력되는 계측신호는 전치증폭기를 거친 후 신호처리 및 파손핵연료 검출  
시 경고신호를 발생하는 경고캐비닛으로 입력된다. 각 기능에 따라 증폭  
되고 conditioning된 결과는 분석업무를 수행하는 분석용컴퓨터로 입력되  
어 분석알고리즘을 통하여 분석된 결과는 운전원 표시장치를 통하여 출  
력되고, 주제어실 표시 등 타 계통과의 연계를 위하여 통신망을 통해 전  
송된다.

#### 3.1 통신망을 이용한 타계통 연계

원전산업에서 계측제어계통은 안전등급 PLC와 비안전등급의 DCS를  
반으로 계통간 연계에 통신망을 사용하는 디지털기술 기반의 계측제어계  
통으로 바뀌어 적용되고 있다. 따라서 디지털 기술기반으로 설계되는 보  
호계통 등 타 계통과 연계를 갖는 파손핵연료 감시계통의 연계방식이 통

신망 기반으로 설계되어야 한다.

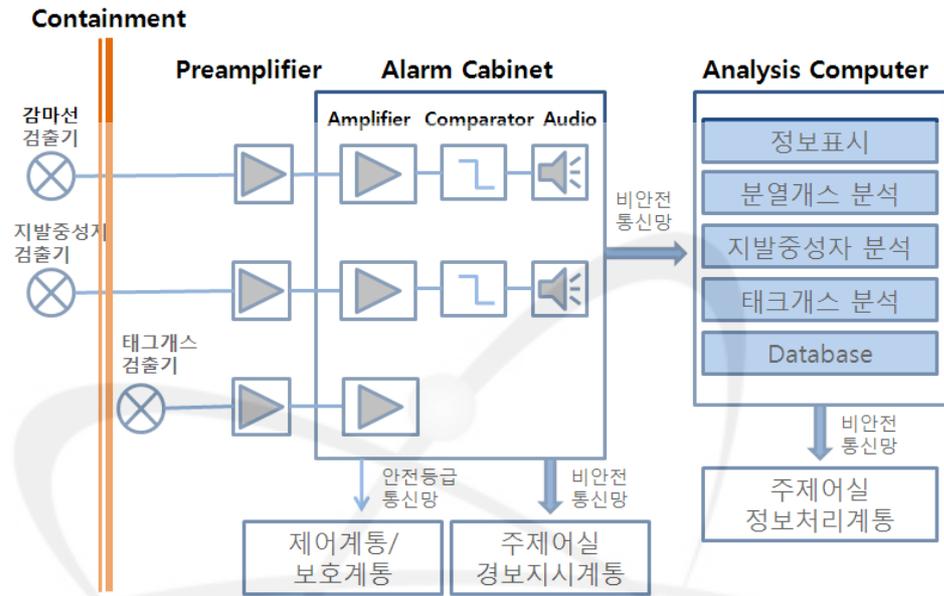


그림 15. 파손핵연료 통합감시계통 구성도(개념)

중성자속 감시계통에서 요구되는 통신망은 종류는 다음과 같다

1) 보호계통 연계

빠른 응답시간이 요구되는 원자로보호계통 입력을 위하여 I/O 입출력 카드를 통한 안전등급 통신망 또는 Hardwired를 사용한다.

2) 제어계통 연계

빠른 응답시간이 요구되므로 I/O 입출력을 통한 Hardwired를 사용하거나, 또는 제어계통에서 적용된 PLC나 DCS의 입력처리 방식에 따라 통신망을 사용한다.

3) 제어실 경보계통 및 지시계통 연계

해당 계통에서 입력으로 요구하는 통신망으로 Field 통신망 또

는 TCP/IP 기반의 Ethernet을 사용한다.

4) 제어실 정보표시계통 연계

해당 계통에서 입력으로 요구하는 통신망으로 주로 원전 비안전통신망에서 주로 사용되는 TCP/IP 기반의 Ethernet을 사용한다.



## 참 고 문 헌

- [1] DoHee Hahn, Yeong-II Kim, Chan-Bock Lee, Seong-O Kim, Jae-Han Lee, Yong-Bum Lee, Byung-Ho Kim, Hae-Yong Jeong, "Conceptual Design of the Sodium-Cooled Fast Reactor KALIMER-600, Korea Atomic Energy Research Institute
- [2] 성승환 외, "고유개념 액체고속로 설계기준서", LMR/FS700-DO-02 Rev.0/08 (FS3110000), 2008. 5
- [3] CRBRP Preliminary Safety Evaluation Report
- [4] GEFR-00793, UC-87Ta, PRISM Preliminary Safety Information Document, Chapter 7
- [5] 성승환, "커버 가스 내의 감마선 및 표식 가스 측정을 통한 핵연료 파손 탐지 방안 설정", 한국원자력연구원, LMR/IC200-ER-01 Rev.0/06.
- [6] 성승환, "일차냉각재 내의 지발중성자 측정을 통한 핵연료 파손 탐지 방안 설정", 한국원자력연구원, LMR/IC500-ER-01 Rev.0/06.
- [7] G. Gilmore, J.D, Heminway, "Practical Gamma-ray Spectrometry, John Wiley & Sons, 1995.
- [8] G.F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, 2nd edition, John Wiley & Sons, 1989.
- [9] 이태호, 김성오, 한도희, "소듐냉각 고속로의 커버가스 영역에서 열유동 해석", 한국원자력연구원, 한국전산유체공학회지 제13권 제3호 (2008)
- [10] 이재한, 박창규, 김종범, 구경희, "소듐냉각고속로 KALIMER-600 원자로 구조 개념설계"
- [11] Sikander M. Mirza, M. Javed Iqbal, Nasir M. Mirza, "Effect of flow rate transients on fission product activity in primary coolant of PWRs, Department of Physics & Applied Mathematics, Pakistan Institute of Engineering & Applied Sciences, Progress in Nuclear

Energy 49 (2007) 120–129

- [12] K. Natesan, K. Velusamy, P. Selvaraj, P. Chellapandi, S.C. Chetal, “Thermal hydraulic study on detection of random failure of fuel by delayed neutron detection system, Mechanics and Hydraulics Division, Indira Gandhi Centre for Atomic Research, Nuclear Engineering and Design 237 (2007) 2219–2231
- [13] [www.centronic.co.uk](http://www.centronic.co.uk)
- [14] [www.ortec-online.com](http://www.ortec-online.com)
- [15] [www.canberra.com](http://www.canberra.com)
- [16] 10CFR50 Appendix A, “General Design Criteria for Nuclear Power Plants”
- [17] IEEE Std. 603–1998 “IEEE Standard Criteria for Safety Systems for Nuclear Power Generating Stations”
- [18] IEEE Std. 1012–1998 “IEEE Standard for Software Verification and Validation”
- [19] IEEE 7–4.3.2 (2003) “Standard Criteria for Digital Computer in Safety Systems of Nuclear Power Generating Stations”

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-4001/2010					
제목/부제	SFR 파손핵연료 감시계통 설계개념				
주저자 (부서명)	이철권 (계측제어.인간공학연구부)				
연구자 및 부서명	성승환, 김병호 (고속로기술개발부)				
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2010
페이지	41 p.	도표	있음( V ), 없음( )	크기	21 X 29.7 Cm
참고사항					
비밀여부	공개( V ), 대외비( ), ___ 급비밀		보고서종류	기술보고서	
연구위탁기관			계약번호		
초록 (15-20줄내외)	<p>소듐냉각 고속로(SFR)에서는 노심 건전성 감시의 일환으로 핵연료의 건전성을 감시한다. 이를 위하여 핵연료의 파손여부를 실시간 감시하고, 파손정도를 파악하여 원자로 운전의 계속여부를 결정하게 된다. 또한 노심내에서 파손 핵연료의 위치를 파악하여 교체를 위한 운전정보로 사용한다. 핵연료 피복관에 구멍이나 파손이 생기면 핵분열물이 노심내로 유출되어 일체형원자로 전체로 확산되는데, 이때 파손핵연료 감시계통은 핵연료에서 유출되는 핵분열가스 및 지발중성자를 검출하여 핵연료의 건전성을 파악하게 된다.</p> <p>핵연료 건전성 즉, 핵연료의 파손유무를 검출하기 위하여 이 계통은 HP-Ge gamma detector를 사용하여 원자로상부 커버가스 내에 존재하는 핵분열가스의 감마선을 검출하고, 핵분열합을 이용하여 중간열교환기(IHX) 내에서 지발중성자를 검출하는 두 가지 방법을 사용한다. 또한 파손핵연료의 정확한 위치를 파악하기 위하여 핵연료봉에 주입된 태그가스의 유출여부를 가스분석기로 분석한다.</p> <p>이 보고서는 파손핵연료 감시계통에 사용되는 세 가지 기술에 관하여 설명하고, 이들을 기반으로 구성된 통합감시계통의 구성 개념을 설명하였다. 연구결과는 향후 추진될 SFR 파손핵연료 감시계통의 예비 및 상세설계 단계에서 활용될 수 있을 것이다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	파손핵연료감시, 파손핵연료위치감시, 핵분열가스감마선검출, 지발중성자 검출, 태그가스검출, 파손핵연료 통합감시				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	
KAERI/TR-4001/2010				INIS Subject Code	
Title/Subtitle		Design Concept of Failed Fuel Monitoring System for SFR			
Main Author		Cheol Kwon Lee (I&C/Human Factors)			
Researcher and Department		S.H. Seong, B.H. Kim (Fast Reactor Development)			
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI	Publication Date	2010.01
Page	41 p.	Ill. & Tab.	Yes(V), No ( )	Size	21 X 29.7Cm.
Note					
Classified	Open( V ), Restricted( ), ___ Class Document		Report Type	Technical Report	
Sponsoring Org.			Contract No.		
Abstract (15-20 Lines)					
<p>In the design of sodium-cooled fast reactor (SFR), the integrity of fuel is monitored as part of core monitoring. To perform this function, the fuel failure is real-time monitored and the continuous operation of reactor is determined by the severity of fuel failure. As any fuel failure is detected, then the failed fuel is located and the results are henceforth provided for the operation of failed fuel replacement.</p> <p>Any pin-hole or failure on the fuel clad makes cause of transferring a fission product into the core and then contaminates whole integrated reactor. When a fuel failure occurs, the system designed in this study monitors the integrity of fuel through detecting the fission gases and the delayed neutron radiated from failed fuel.</p> <p>To perform system functions, the system applies two types of detectors. One is a high purity germanium detector (HP-Ge) for monitoring the gamma-ray of fission gases existing in the reactor head and the other is a fission chamber for detecting the delayed neutron within the intermediate heat-exchanger (IHX). In addition a gas analyzer is used to detect and sort the tag gases leaked from each fuel so as to locate the failed fuel.</p> <p>This study describes three methods applied to the design of failed fuel monitoring system and the design concept of an integrated monitoring system based on them. Accordingly this report can be applied to the conceptual and basic design of SFR failed fuel monitoring system to be performed in the near future.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		Failed fuel monitoring, Failed fuel location, Gamma-ray detection of fission gases, Detection of delayed neutron, Detection of tag gas, Integrated monitoring of failed fuel			