

## 노외중성자속감시계통 개선 Ex-core Neutron Flux Monitoring System Improvement

김우균, 백광일, 백승민, 김항배  
한국전력기술(주)  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요약

노외중성자속감시계통은 원자로 보호, 제어 및 정보 지시를 위하여 원자로용기에서 유출된 중성자속을 감시함으로써 원자로출력을 측정하는 계통이다. 개선된 노외중성자속감시계통은 광대역측정용 핵분열함만을 사용하며, 관련기기인 전치증폭기 및 고전압전원 등도 한 종류만을 사용하여 기기의 종류를 표준화하고, 비용절감 및 작업자들의 피폭량을 저감하고자 하였다. 또한 신호대 잡음비를 개선하고 기기 배치등을 새로 구성하여 시운전 등의 운전성 및 가용성을 향상하고자 하였다. 본 논문은 노외중성자속감시계통의 설계개선내용을 설명하고, 이에 따른 설계개선효과를 기술한다.

### Abstract

The Ex-core Neutron Flux Monitoring System (ENFMS) provides a means to measure reactor power level by monitoring the neutron flux leaked from the reactor vessel for reactor protection, control and information display. The improved ENFMS uses only wide range fission chamber, and only one kind of pre-amplifier and high voltage power are adopted. This will standardize the equipment and reduce the cost and personnel radiation exposure. Also, the improved signal-to-noise ratio and the new arrangement of equipment will improve the operability and availability. The improved features of ENFMS and their improvement effect are described in this paper.

### 1. 서론

기존 원전에서의 노외중성자속감시계통은 기동, 제어 및 안전영역을 감시하기 위하여 각각 BF<sub>3</sub> 비례계수기, 비보상용 이온전리함 및 핵분열함의 세 종류의 검출기를 사용하고 있다. 이 중에서 BF<sub>3</sub> 비례계수기 및 비보상용 이온전리함은 설계수명이 짧아 발전소 수명기간중 빈번히 교체하여야 하고, 이로 인한 경제적 손실 및 유지/보수 요원들의 방사선피폭 등의 문제점을 갖고 있으며, 세 종류의 검출기 유형을 사용함으로써 과도한 재고확보가 필요하다. 또한 신호처리함은 설계가 노후화되어 교체부품 확보의 어려움과 외부잡음에 민감하여 설치 및 시운전이 용이하지 않다. 따라서 본 논문에서는 설계수명이 긴 핵분열함만을 사용하여 이러한 문제점을 개선하고, 또한 기기배치 유연성, 시운전 등 운전성을 용이하게 할 수 있도록 노외중성자속감시계통을 개선하고자 하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 노외중성자속감시계통 기능

기존 원전의 노외중성자속감시계통은 여덟 개의 분리된 채널로 구성되어 있다. 이 중 두 개의 기동채널은 원자로기동시 사용되고, 두 개의 제어채널은 원자로출력용이며, 네 개의 안전채널은 원자로보호용으로 사용된다. 각 채널은 원자로용기 주위에 일정한 간격으로 배치된 검출기와 이와 관련된 신호처리장치로 구성되어 있다[1]. 각 채널들의 기능은 다음과 같으며, 그림 1은 각 채널별 동작영역을 보여주고 있다.

#### 1) 기동채널

두 개의 기동채널들은 운전원에게 선원영역인  $1 \sim 10^5$  Count Per Second (CPS)의 중성자속 정보를 제공하며, 이 정보는 장기간 원자로정지중, 초기 원자로기동시, 장기간 원자로정지후 및 원자로핵연료 재장전후 기동시에 사용된다.

#### 2) 제어채널

두 개의 제어채널들은 1~125%까지의 출력 운전영역에서의 선형출력 정보를 원자로제어계통에 제공한다. 또한 자동 터빈부하 추중운전중에 사용된다.

#### 3) 안전채널

네 개의 안전채널들은 두 가지 범위의 출력을 감시할 수 있다. 첫 번째 범위는 1~200%까지의 선형출력이고, 두 번째 범위는 광대역으로 알려진 약  $1 \times 10^{-7}$ %에서 200%까지의 대수출력의 중성자속 정보이다. 이 정보들은 원자로보호계통의 핵비등이탈률, 국부출력밀도 및 과출력보호 등에 사용된다.

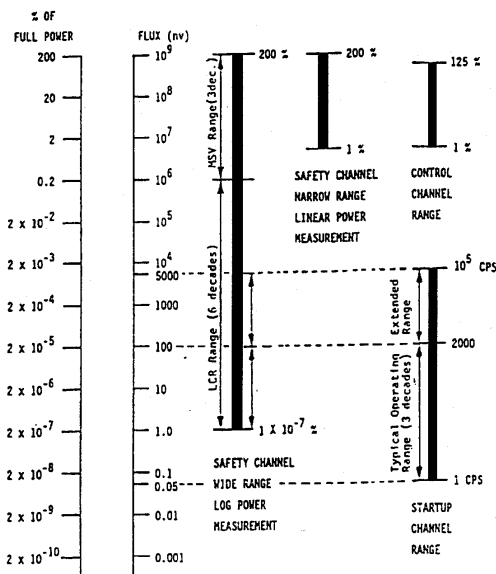


그림 1 기존 원전의 ENFMS 동작영역

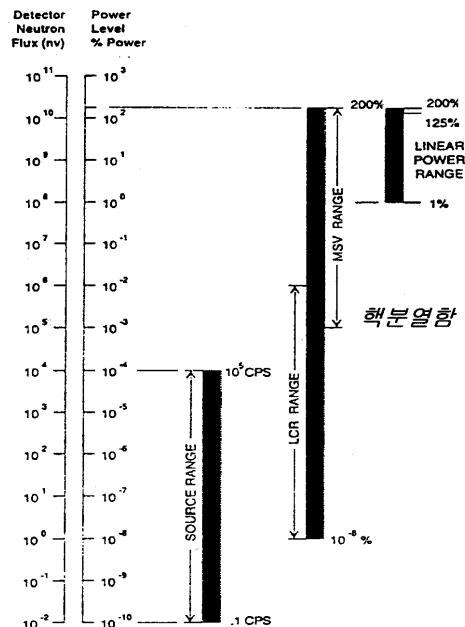


그림 2 개선된 ENFMS 동작영역

## 2.2 설계개선 내용

개선된 노외중성자속감시계통은 기존 원전에서의 기능을 유지하고, 연계되는 계통에의 영향을 최소화하면서 유지/보수, 설치, 시운전 및 잡음 문제 등을 개선하였다. 또한 기동 및 제어채널용 신호는 안전채널로부터 검증된 격리소자를 통하여 제공받게 하여 인허가기관에서 요구하고 있는 독립성요건을 만족하고자 하였다. 다음은 검출기, 전치증폭기, 신호처리함, 전용캐비닛 및 격리기로 구성된 노외중성자속감시계통의 설계개선내용을 설명한다.

### 1) 검출기

개선된 노외중성자속감시계통의 검출기는 수직으로 설치된 세 개의 핵분열함으로 구성되어 있으며, 그 내부의 벽면에 U-235를 피복하고 그 내부에 N<sub>2</sub>와 Ar으로 구성된 혼합기체를 채운 것이다. 이 검출기의 동작원리는 원자로용기에서 빠져 나온 속중성자가 감속재(Thimble 주위에 형성되어 있음)에 의하여 열중성자가 된 후에 핵분열함 내의 U-235에 흡수되어 에너지를 방출하고 핵분열과편과 2개 또는 3개의 중성자를 생성한다. 높은 에너지로 이온화된 핵분열과편들이 핵분열함 내를 지나면서 내부기체를 이온화시켜 운동에너지 만큼의 전자를 이탈시킨다. 이와 같이 이온화된 양이온과 이탈된 전자는 고전압전원에 의하여 형성된 전기장에 의하여 반대 극성의 전극으로 각각 이동하여 전하 펄스 및 전류를 형성한다.

핵분열함을 사용하는 경우 펄스의 크기가 크기 때문에 불필요한 증폭이 필요 없으며, 또한 고전압전원에도 민감하지 않기 때문에 선원영역 감시에도 유용하게 사용될 수 있다. 뿐만 아니라 기존 원전인 경우 세 개의 핵분열함 중 중앙에 설치된 핵분열함만을 사용하여 펄스 신호를 감시하는데 반하여, 개선된 노외중성자속감시계통에서는 세 개의 핵분열함 모두를 이용하므로 감도를 향상시킬 수 있으며, 또한 감속재의 효능 및 잡음제거능력을 향상시켜 0.1 CPS 정도까지 중성자속을 감시할 수 있다. 그림 2는 핵분열함만을 사용하여 설계 개선된 노외중성자속감시계통의 동작영역을 보여주고 있으며, 그림 3 및 표 1은 검출기의 교체에 따른 기능의 호환성 및 검출기 종류

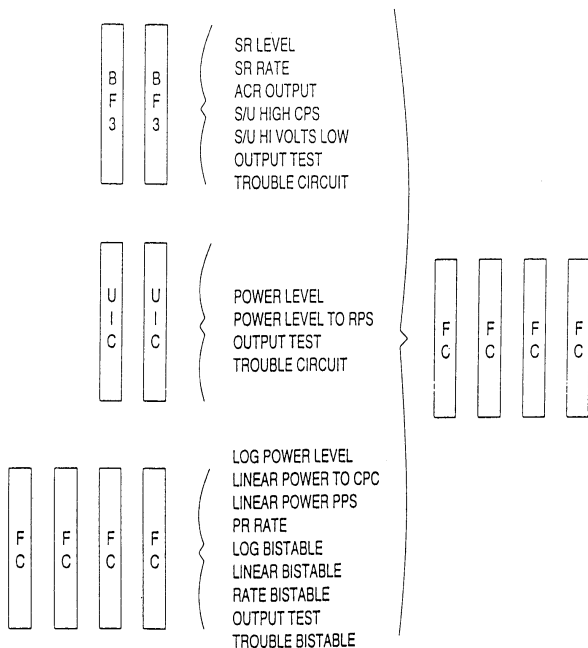


표 1 검출기의 종류 및 수량

| 검출기 채널 | 설계개선 |    | 기존 원전      |    |
|--------|------|----|------------|----|
|        | 종류   | 수량 | 종류         | 수량 |
| 안전채널   | 핵분열함 | 4  | 핵분열함       | 4  |
| 기동채널   | -    | -  | 비례계수기      | 2  |
| 제어채널   | -    | -  | 비보상용 이온전리함 | 2  |

그림 3 검출기의 교체에 따른 기능의 호환성

및 수량을 보여준다.

그림 3 및 표 1에서 보듯이 세 종류의 검출기 중 광대역측정용 핵분열함만을 사용하므로 유지/보수 비용의 최소화 및 기기 표준화를 구현하였다.

## 2) 전치증폭기

전치증폭기는 신호처리를 할 수 있도록 검출기로부터의 전하입력을 전압출력으로 변환하는 기능을 수행한다.

검출기의 신호는 매우 작기 때문에 외부로부터의 잡음에 민감할 뿐만 아니라 실제 측정시 많은 장애요인이 되고 있으며, 계통의 설치 및 시운전시 잡음감소를 위한 교정작업에 많은 시간이 소모되고 있다. 따라서 전치증폭기의 입력부에 내잡음특성을 갖는 증폭기를 설계하여 외부에서 발생된 잡음을 제거하고 신호대 잡음비를 개선함으로써 시운전 등의 운전을 용이하게 할 수 있다 [2]. 특히 기기간 설치거리 한도를 크게 확장시킬 수 있으므로 기존 원전에서 격납건물내에 있었던 일부 전치증폭기를 전기기기실로 이설하여 기기성능을 보증하고, 기기배치시 유연성을 확보하였다.

이 외에도 네 개의 안전채널용 전치증폭기만 설치하여 비용절감을 도모하고, 기존 원전과 달리 전치증폭기에서 검출기용 고전압을 공급하도록 설계하여 주제어실내 전기적잡음을 감소시켰다. 표 2는 전치증폭기 수량 및 설치위치를 보여준다.

표 2 전치증폭기 수량 및 설치위치 비교

|        | 설계개선 |       | 기존 원전 |      |
|--------|------|-------|-------|------|
|        | 격납건물 | 전기기기실 | 격납건물  | 보조건물 |
| 기동 채널  | -    | -     | 2     | -    |
| 제어 채널* | -    | -     | -     | -    |
| 안전 채널  | -    | 4     | 2     | 2    |
| 전체 갯수  | 4    |       | 6     |      |

\* 제어채널의 경우 전치증폭기는 사용하지 않는다.

## 3) 신호처리함

신호처리함은 안전채널용 신호처리함과 기동 및 제어용 신호처리함 두 종류로 분류된다. 그림 4는 개선된 노외중성자속감시계통의 구성도를 보여준다.

### a) 안전채널용 신호처리함

안전채널용 신호처리함은 전치증폭기로부터 전압신호(대수출력용)와 검출기로부터 전류신호(선형출력용)를 입력받아 신호를 처리하여 원자로보호계통 및 노심보호연산기 등 연계되는 계통이 요구하는 정보를 제공한다. 신호처리함은 핵분열함을 광대역 측정용으로 사용하기 위하여 다음과 같은 세가지 동작모드를 가진다.

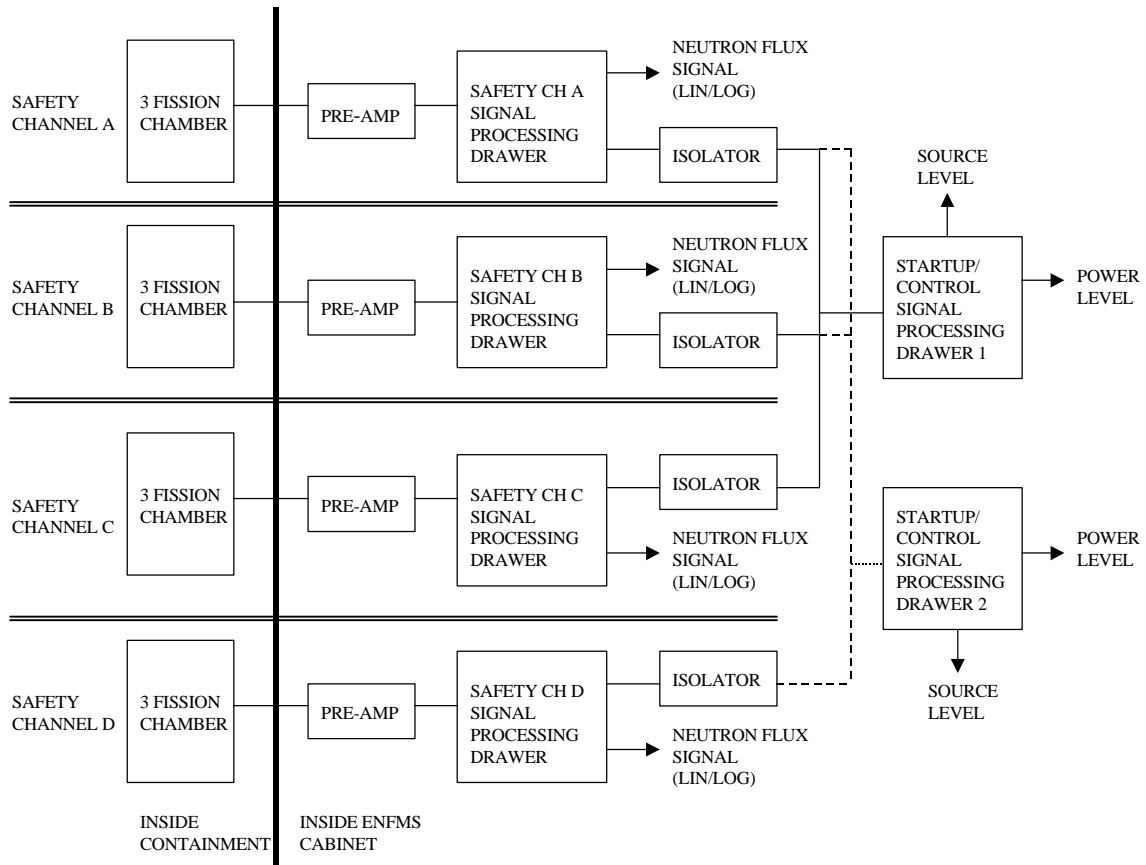


그림 4 개선된 노외중성자속감시계통 구성도

- 펄스 계수모드(대수출력) : 원자로출력이 낮은 경우, 중성자에 의하여 생성된 펄스는 서로 중첩되지 않으므로 이를 계수할 수 있으며, 이를 활용하는 동작모드이다. 세 개의 핵분열함으로부터의 펄스는 전치증폭기를 통하여 통합 및 증폭된 후 신호처리함의 계수회로에 공급된다. 이 계수회로는 선별기를 포함하고 있어 감마선에 의해서 생성된 신호나 잡음을 차단하고, 중성자에 의해 생성된 펄스만 통과시키며, 이 펄스는 다시 계수율 증폭기에 의해 펄스율에 비례하는 전압신호로 변환된다. 또한 이 펄스는 기동용 신호를 위하여 격리기를 거쳐 기동 및 제어용 신호처리함에 공급된다. 그림 2의 LCR Range와 Source Range가 이에 해당된다.

- MSV (Mean Square Voltage) 모드(대수출력) : 출력이 약  $2 \times 10^{-2}\%$ 에 도달하면 펄스가 중첩되어 펄스를 식별할 수 없게된다. Campbelling theorem에 의하면 펄스출력은 교류 파형의 제곱근에 비례하므로 이를 이용하여 원자로출력을 측정할 수 있다[3]. 그림 2의 MSV Range가 이에 해당된다.

- 선형출력 : 세 개의 핵분열함으로부터의 전류신호는 신호처리함의 선형증폭기에서 각각 증폭되어 전압신호로 변환된 후 노심보호연산기로 보내져 국부출력밀도와 핵비등이탈률을 계산하는데 사용되고, 제어용 신호를 위하여 격리기를 거쳐 기동 및 제어용 신호처리함에 공급된다. 또한 이 신호는 합산증폭기에서 합산, 평균 및 교정된다. 교정된 평균 선형출력신호는 발전소보호계통에 공급되어 가변과출력보호를 위한 중성자속 정보를 제공한다. 그림 2의 Linear Power Range가 이에 해당된다.

b) 기동 및 제어용 신호처리함

두 개의 기동 및 제어용 신호처리함은 안전채널로부터 검증된 격리소자를 통하여 입력신호를 받으며, 신호처리함의 고장이 안전채널에 영향을 주지 않도록 설계하였다[4]. 뿐만 아니라, 각각의 신호처리함은 세 개의 안전채널로부터 한 개의 채널 신호를 선택할 수 있도록 하여 기동 및 제어신호에 대한 가용성을 증대시켰다.

신호처리함 내에는 기동용 신호장치와 제어용 신호장치가 함께 설치되며 각각의 기능은 다음과 같다.

- 기동용 신호장치 : 격리소자를 거쳐 입력되는 중성자 펄스는 증폭되어 대수계수율 회로와 외부 가정스피커로 보내진다. 대수계수율 회로는 운전원과 연계계통을 위해서 1~10<sup>5</sup> CPS까지의 펄스입력에 대해 0~10 Vdc 출력 신호를 제공한다.

- 제어용 신호장치 : 격리소자를 거쳐 입력되는 전압 신호들은 평균 증폭기에서 세 신호를 평균하여 출력 1~125%에 해당하는 전압신호 0~10 Vdc 출력 신호를 제공한다. 이 신호는 원자로제어계통과 소내전산기 및 기타 연계계통이 요구하는 정보를 제공한다.

4) 캐비닛의 구성 및 기기 배치

개선된 노외중성자속감시계통에서는 표 3 에서 보듯이 새로운 전용캐비닛 네 개(A, B, C, D 채널)를 새로 설계하였고, 화재시 원자로안전정지 기능을 수행하기 위하여 네 개의 캐비닛 중 두 개(A 와 C 채널)의 캐비닛은 전기기기실 "A"에 설치하며, 나머지 두 개의 캐비닛(B 와 D 채널)은 전기기기실 "B"에 설치 하였다. 또한 각각의 전용캐비닛 내에는 신호처리함, 전치증폭기 및 격리기를 배치하여 시운전 등의 운전성을 개선하였다.

표 3 캐비닛 설치위치 및 기기 배치비교

|              | 설계개선  | 기존 원전  |
|--------------|---|--|
| ENFMS 캐비닛    | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 전기기기실 "A" : 캐비닛 채널 A 와 C</li> <li>· 전기기기실 "B" : 캐비닛 채널 B 와 D</li> <li>· 총 4 개의 전용캐비닛 설치</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 없음</li> </ul>                                   |
| 기동/제어용 신호처리함 | <ul style="list-style-type: none"> <li>· ENFMS 전용 캐비닛 채널 A 와 B 내에 각각 구성</li> <li>· 방사선감시캐비닛에서 신호처리함 제거</li> </ul>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 두 개의 신호처리함이 방사선감시캐비닛 내에 설치</li> </ul>           |
| 안전채널용 신호처리함  | <ul style="list-style-type: none"> <li>· ENFMS 전용 캐비닛 채널 A, B, C 및 D 내에 각각 구성</li> <li>· 발전소보호계통 캐비닛에서 신호처리함 제거</li> </ul>                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 발전소보호계통 캐비닛 채널 A, B, C 및 D 내에 각각 설치.</li> </ul> |
| 전치증폭기        | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 총 네 개의 전치증폭기가 설치되며, ENFMS 전용 캐비닛 채널 A, B, C 및 D 내에 각각 구성</li> </ul>                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 보조건물(2개) 및 격납건물(4개) 내에 총 6개 설치</li> </ul>       |
| 격리소자         | <ul style="list-style-type: none"> <li>· ENFMS 전용 캐비닛내에 각각 설치</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 없음</li> </ul>                                   |

모든 신호는 전용캐비닛을 통하여 연계계통과 연계되며, 그림 5는 기존 원전과 개선된 노외 중성자속감시계통의 호환성을 보여준다.

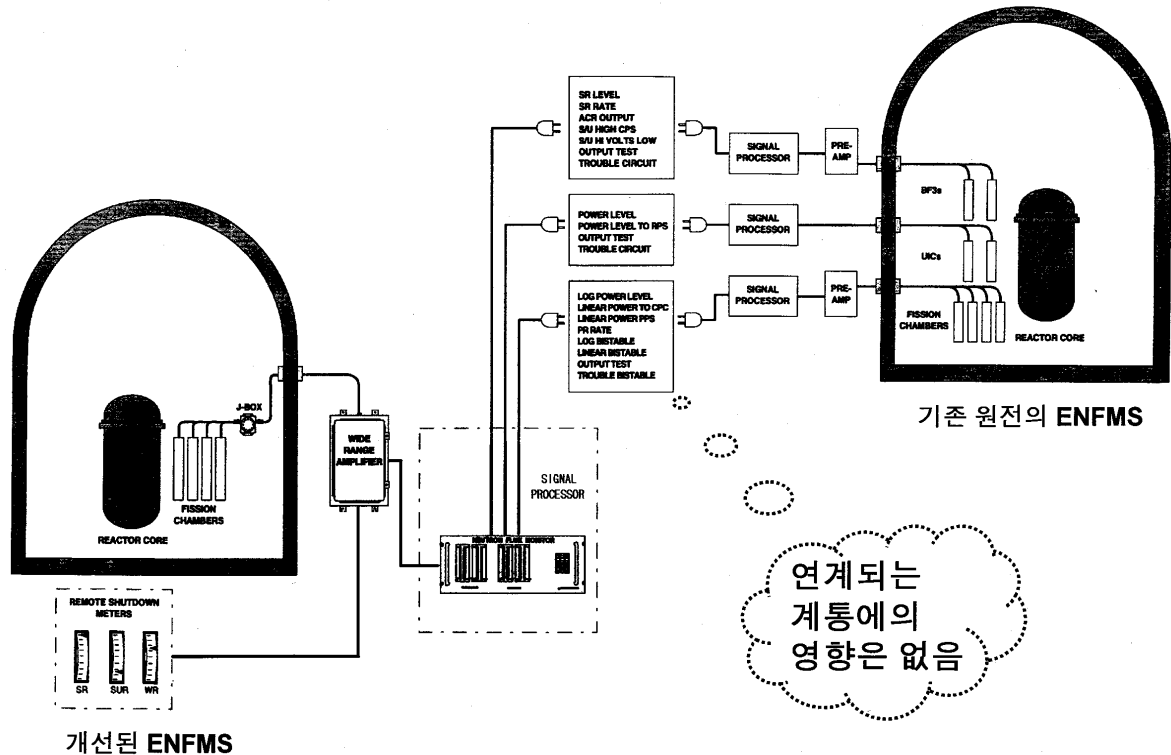


그림 5 기존 원전과 개선된 ENFMS의 호환성

### 2.3 설계개선 효과

- 1) 검출기의 설계수명 연장
- 2) 계통구조의 단순화와 전치증폭기의 위치 변경으로 계통의 신뢰성 제고 및 설치/시운전의 용이성 확보
- 3) 신호대 잡음비의 개선으로 전반적인 내전자파장애특성 향상
- 4) 기기 설치 및 교체시 작업자 피폭량 감소
- 5) 설계 노후화에 따른 예비부품의 확보 및 부품 단종의 문제점 해소
- 6) 독자적인 계통설계기술 확보로 원전설계기술의 자립기반 구축 및 원전기술 수출시 경쟁력 확보

### 3. 결론

노외중성자속감시계통은 원자로용기에서 유출된 중성자속을 감시함으로써 원자로 보호, 제어 및 정보 지시를 가능케 한다. 본 논문에서는 기존원전에서의 문제점을 개선하고, 정보의 가용성 및 운전성 등을 향상시킬 수 있도록 설계개선을 수행하였다.

개선된 노외중성자속감시계통은 기존원전과는 달리 검출기로서 핵분열함만을 사용하며, 관련 기기인 전치증폭기 및 고전압전원 등도 한 종류만을 사용하였다. 따라서 계측기의 빈번한 교체를 예방하여 작업자들의 방사선 피폭량 저감을 도모하였으며, 예비품의 물량을 감소시켜 비용절감을

구현할 수 있었다. 또한 신호대 잡음비를 극대화하여 기기 배치시 유연성을 확보하였으며, 이를 토대로 시운전 등 운전성이 크게 향상될 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

- [1] 한국원자력연구소, “한국형표준원전 계통실무”, 1996.
- [2] 백광일 외, “광대역측정을 위한 노외중성자속감시계통에 관한 연구”, 1994.
- [3] R.A Dubridge, “Campbell Theorem-System Concept”, IEEE Trans. on NS, Feb. 1967.
- [4] IEEE Std 384, “Standard Criteria for Independence of Class 1E Equipment and Circuits”, 1992.