

## 원자로 출력 감시용 감마 이온 챔버의 하나로 적용 타당성 연구

### A Feasibility Study on Application of Gamma Ionization Chamber to HANARO As a Reactor Power Monitor

김영기, 전병진, 최영산, 박주문, 우종섭

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요약

1995년 첫 임계 이후 하나로 열출력 신호의 불안정과 응답시간 지연으로 인한 원자로 불시정지가 빈번하게 발생하였다. 설계 변경과 신중한 운전절차의 구현 등으로 열출력 신호 비정상적으로 인한 불필요한 원자로 정지는 현저하게 줄어들었으나, 근본적인 해결책이 요구되고 있다. 빠른 응답특성과 냉각계통 외란에도 안정성을 유지하면서 원자로 출력을 대표할 수 있는 대체 신호의 필요성이 여전히 요구되고 있다. 해결 방안으로써, 감마 이온 챔버를 이용하여 1차냉각배관으로부터의 감마선을 측정하는 개념이 제시되었다. 현장시험을 통하여, 감마 이온 챔버는 응답시간이 빠르고 안정성이 양호하면서 원자로 출력과의 선형성이 매우 우수한 출력신호를 생산한다는 것을 확인하였다. 새로이 제안된 감마 이온 챔버 신호는 원자로의 안전성 향상과 안정적인 운전에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

#### Abstract

The HANARO has been frequently shutdown due to instability as well as response time delay of the reactor thermal power, since the first criticality on 1995. Although the unwanted shutdown was apparently reduced by implementation of design change and prudent operating procedures, a fundamental solution has been required. As a possible way of solution, the gamma ionization chamber(GIC) to see the gamma radiation signal from the primary cooling pipes has been suggested. The field application tests indicate that the GIC signal well represents the reactor power in good linearity with a fast response and stability. It is hopefully expected that the new signal contributes to the enhancement of reactor safety and stable operation.

#### 1.0 서론

1995년 한자로의 출력 운전이 시작된 이후 지금까지, 원자로 기동 시나 운전 중, 실제 원자로의 출력에는 이상이 없으나 열출력 계산값의 일시적인 비정상적 상승으로 중성자출력과 열출력의 편차에 의해 원자로가 불시 정지되는 사례가 여러 차례 발생하였다. 또한, 냉각펌프 또는 냉각팬의

기동으로 인하여 실제 원자로 출력과 무관하게 열출력 계산값이 고출력 정지 제한값 이상으로 상승하여 원자로가 일시 정지되기도 하였다.<sup>1)</sup> 열출력 비정상에 의한 원자로 정지 즉, 중성자출력/열출력 불일치 정지변수는 열출력 신호의 응답시간 지연과 외기온도 조건의 변화에 따른 열출력의 불안정성 때문이다. 열출력 신호는 2차냉각계통 열교환기 양단의 냉각수 온도와 유량을 이용하여 계산하는데 온도계측기의 응답시간이 수초에서 수십초 정도이기 때문에 중성자 출력에 비하여 열출력은 느리게 변화한다.

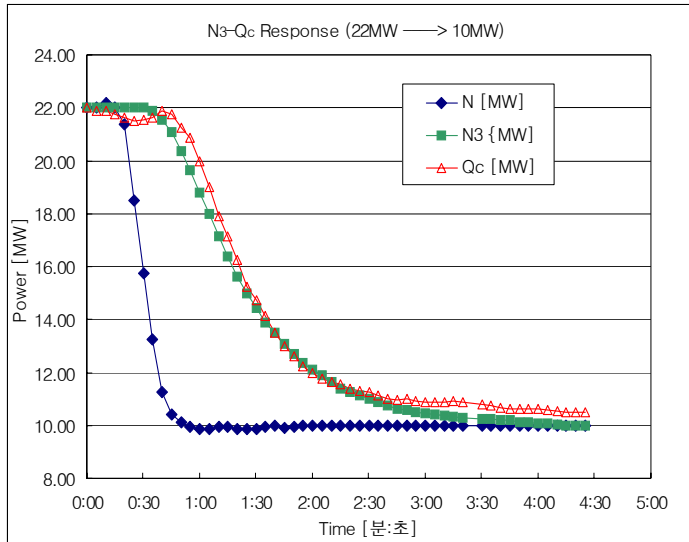


그림 1. 열출력과 중성자출력의 응답시간 특성

그림 1은 열출력과 중성자출력의 응답시간 특성을 보여주고 있다. 그림에서 N은 중성자출력이고 N3는 열출력과 동기시키기 위하여 해석적으로 지연시킨 지연 중성자출력이며, Qc는 2차냉각계통에서 측정된 열출력이다. 제어알고리즘에서 중성자출력/열출력 불일치에 의한 불필요한 원자로 정지를 방지하기 위하여 해석적으로 반영하였으나 냉각탑을 이용하는 하나로의 특성상 외기온도 또는 계절적 요인 등과 같은 여러 가지 상황에 따라 실제 운전에서는 많은 변수가 있다.

특히 겨울철에는 냉각수의 온도가 낮아 중성자 출력과의 평형을 유지하면서 전출력으로 상승시키기 위해서는 여러 단계로 나누어 오랜 시간에 걸쳐 출력을 상승하여야 하는 등 열출력의 응답 특성으로 인한 여러 가지 문제점들이 제기되어 왔다. 원자로 출력에 비례하는 안정된 신호를 얻기 위한 방안으로써, 원자로 출력과의 선형성이 좋을 것으로 예상되는 1차냉각배관의 감마선을 측정하여 이를 열출력 대신 사용하자는 의견이 제기되었다. 2003년 초부터 감마선 측정용 이온 전리함 (Gamma Ionization Chamber : GIC)을 하나로 1차냉각배관 상에 설치하고 원자로 출력에 따른 감마선신호의 특성시험을 착수하였다.

## 2.0 GIC 적용의 기술적 배경

하나로의 원자로 제어계통은 원자로 고 출력뿐만 아니라 중성자출력과 열출력의 편차가 3 MW 이상 되는 경우에 원자로를 자동 정지시키도록 논리가 구성되어 있다. 중성자출력과 열출력의 편차를 정지변수로 사용한 근본적인 이유는 원자로 수조 내 중수계통에 누설이 발생하였을 때 원자로 출력이 비정상적으로 상승하는 것을 방지하기 위한 것이다. 수조 내 중수 계통에 누설이 발생하면 중수계통에 경수가 유입되어 노심을 둘러싸고 있는 중수 반사체의 질이 저하된다. 이로 인하여 반사체에서의 중성자속이 낮아지고 반사체 탱크 바깥에 설치되어 있는 중성자 계측기의 신호가 낮아져서 원자로의 출력이 낮아지는 것으로 나타난다. 제어컴퓨터에 의하여 자동으로 수행되는 하나로의 출력제어 알고리즘은 요구 출력을 유지하기 위하여 제어봉을 인출하도록 되어 있다. 결과적으로, 원자로 중성자출력은 요구출력에 일치하고 있는 것으로 나타나지만 실제 원자로 출력 즉, 원자로 열출력은 중성자 계측기가 나타내는 중성자 출력보다 높게 유지된다. 이러한 상황이 발생하는 것을 방지하기 위하여 중성자출력과 열출력의 편차를 원자로 제어계통의 정지변수로 사

용하고 있다. 캐나다의 MAPLE 원자로에서는 중수 반사체 탱크 바깥에 GIC도 설치하여 이러한 사고에 대비하고 있다. 그러나 이미 운전하고 있는 하나로에서는 중수 반사체 탱크 바깥에 GIC를 추가로 설치하는 것이 사실상 불가능하므로 1차냉각계통의 출구관 부근에 GIC를 설치하여 같은 기능을 가질 수 있는지 시험하였다.

노심을 거쳐 나온 1차 냉각수의 방사능은 대부분 N-16이 차지하는데, 반감기가 7.13초로 짧기 때문에 포화 상태에 빨리 도달한다. 이는 O-16(n,p)N-16 반응으로 생기며, 특정 에너지 이상의 고속중성자에 의해 생기는 문턱 반응(threshold reaction)이다. 따라서 N-16의 준위는 원자로 노심에서 고속중성자와 냉각수의 산소가 반응하는 전체 반응물을 나타내는데, 노심 냉각수의 부피가 일정하고 고속중성자속도 열중성자속과 달리 핵연료의 연소도 등에 별로 민감하지 않으므로 거의 출력에 비례하는 값을 나타낸다. 또한 중성자 계측기는 계측기 위치에서의 열중성자속에 거의 비례하는 값을 나타내지만 1차냉각계통 출구에서의 N-16의 준위는 노심의 전체 N-16 생성 반응을 대표하므로 열출력과 비슷한 특성을 가지고 있다. 다만 열출력의 대부분은 열중성자와 핵연료의 반응으로 생기는데 반하여 N-16은 고속중성자와 냉각수의 반응으로 생기고, 1차냉각수에는 이외의 다른 방사성 핵종도 많으므로 이의 영향이 무시할 수 있는 수준이어야 한다. 또한 GIC의 신호가 충분히 안정된 값을 낼 수 있어야 한다.

### 3.0 GIC 채널의 구성

GIC는 이온화 방사선이 전극 사이에 채워져 있는 질소 가스 속을 통과하면서 가스분자와 상호 작용하여 이온화(positive ion + negative free electron)되면서 에너지를 소진하는 원리를 이용한다. 그림 2에서 보는 바와 같이, 음극(-)과 양극(+)에 걸어준 고전압에 따라 양이온은 음극, 음이온은 양극으로 각각 이동하면서 전류를 발생시킨다. 인가된 고전압이 일정하다고 가정하면 발생된 전류는 검출기 내의 이온쌍 생성률에 비례하고 이는 곧 방사선의 세기를 의미한다.<sup>2)</sup>

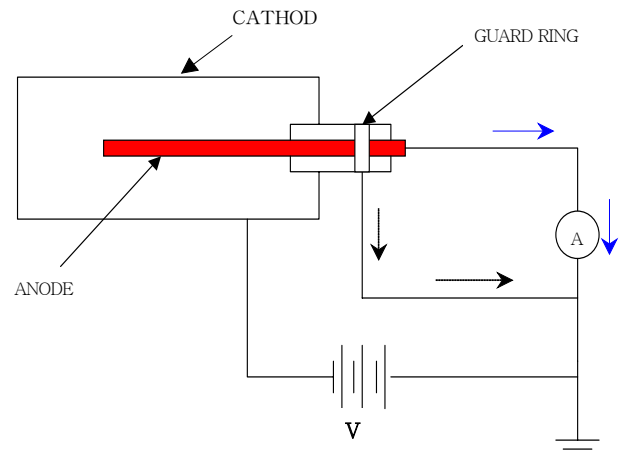


그림 2 감마 이온 챔버의 동작회로

하나로 1차냉각배관의 감마선 준위를 효과적으로 측정, 분석하기 위하여 2종류 3개의 GIC를 그림 3과 같이 설치하였다. GIC#1과 GIC#2 (Model No.52113)는 동일한 모델로서 출구배관에 설치하였고 감도가 다른 GIC #3(Model No.52138)은 입구배관에 각각 설치하였다. 표 1은 2개 종류 GIC의 사양을 요약하였다.

표 1. 실험에 사용한 감마 이온 챔버의 사양

항 목	Model No. 52138	Model No. 52113
<input type="checkbox"/> Gas Filling	<b>Nitrogen</b>	<b>Nitrogen</b>
<input type="checkbox"/> Gas Pressure	<b>760 torr</b>	<b>7600 torr</b>
<input type="checkbox"/> Operating Voltage	<b>-500V DC</b>	<b>-500V DC</b>
<input type="checkbox"/> Operating Voltage Range	<b>-200 ~ -800 V DC</b>	<b>-200 ~ -800 V DC</b>
<input type="checkbox"/> Plateau Slope(%/100V)	<b>≤ 1%</b>	<b>≤ 1%</b>
<input type="checkbox"/> Sensitivity(A/R/Hr)	<b>4.0 x 10<sup>-12</sup></b>	<b>3.0 x 10<sup>-11</sup></b>
<input type="checkbox"/> Physical Dimension	<b>43.5mm(L) x 19.1mm(D)</b>	<b>127.3mm(L) x 16.0mm(D)</b>

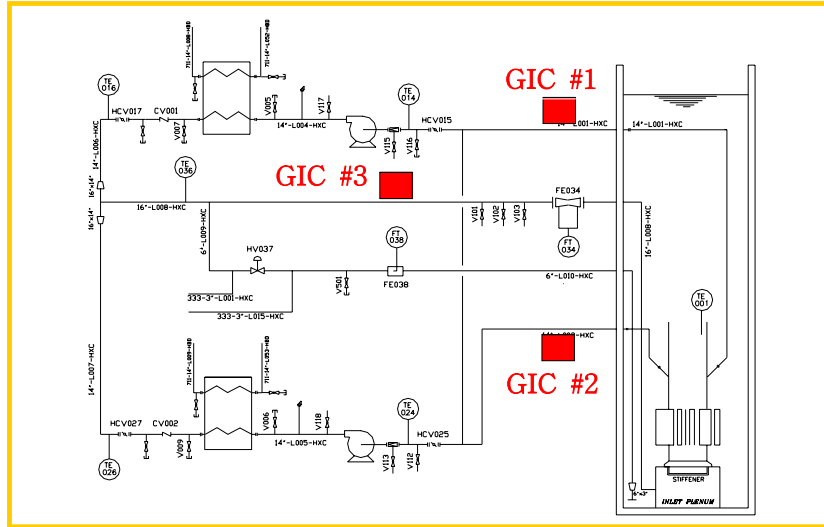


그림 3. 하나로 1차냉각배관의 감마 이온 챔버 설치 위치

#### 4.0 GIC 신호의 선형성 특성

3개의 GIC를 그림 3과 같이 1차냉각배관에 각각 설치하고 각 GIC로부터 신호를 데이터 기록용 컴퓨터에 저장하면서 원자로 출력 변화에 따른 GIC 신호의 선형성과 반복성 그리고 24MW 정상 운전상태에서의 신호 안정성 등을 분석하였다. 원자로 출력상승 시점부터 원자로 출력이 24MW에 도달한 후 수 시간 동안의 데이터를 5초 간격으로 컴퓨터에 기록하였다. 그림 4는 원자로 기동 시점부터 24MW 도착 시점까지의 감마선 신호를 표시한 것이고 그림 5는 원자로 출력이 24MW에 도달한 후 12시간 이상 유지되는 시간 동안의 GIC 출력신호를 나타내었다.

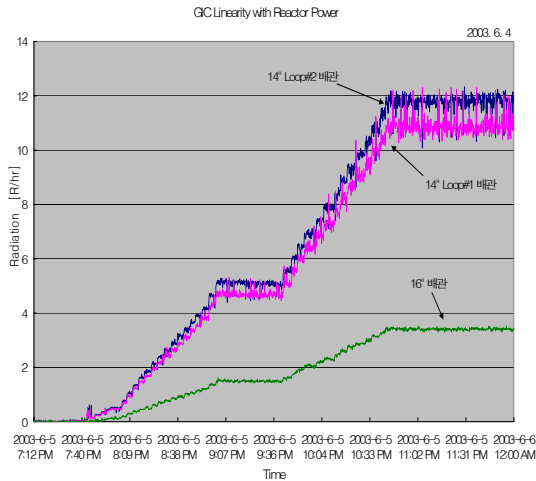


그림 4. 출력변화에 따른 GIC 신호 특성

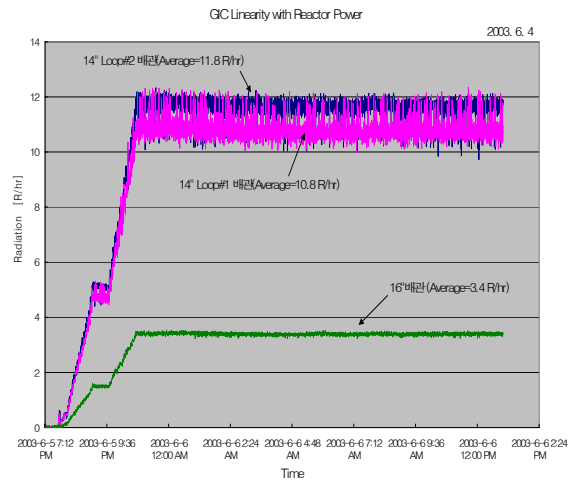


그림 5. 24MW 출력에서의 GIC 신호 안정성

3개 GIC의 신호는 단계별로 상승하고 있는 원자로 출력을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. GIC#1과 GIC#2를 1대의 고전압 장치와 1대의 전류계를 사용하여 공통회로로 구성하고 원자로 출력과 출력전류와의 관계를 분석한 결과 원자로출력에 대한 선형성이 매우 양호하다는 것을 재확인할 수 있었다. 현재 구성되어 있는 채널들이 실험용으로 임시 설치되어 있어 외부 신호잡음에

민감할 수 있다고 하더라도 24MW 출력 안전상태에서의 신호 흔들림이 10% 이상인 것은 바람직하지 않다. 정상적인 계통으로 구성될 경우 신호 흔들림 현상은 어느 정도 감소될 것으로 예상되며 정상상태에서의 신호 흔들림은 최소한 5% 이내이어야 한다. Loop#2 배관의 방사선은 Loop#1에 비하여 약 10% 정도 높다. 이는 Loop#2 배관 직하단에 평행하게 지나가고 있는 반사체 출구배관으로부터의 감마선이 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 원자로 출력이 목표 출력에 도달하고 난 후 약 30-40분에 걸쳐 GIC 출력신호는 약 5% 정도 감소한 다음 안정되고 있는데 이에 대한 원인은 좀 더 검토하여야 한다.

## 5.0 GIC 신호의 응답특성

1차냉각배관의 GIC 출력신호를 하나로 출력 대체신호로서 사용할 수 있는지를 조사하게 된 근본원인은 서론에서 이미 언급한 바와 같이 열출력 신호와 중성자출력 신호와의 응답특성 차이 때문이다. 그림 1에서와 같이 중성자 출력은 요구출력 입력 후 수십초 내에 목표출력에 안정되고 있지만 열출력은 수분이 지난 후에 비로써 안정되고 있다. 이와 같은 응답시간의 차이는 원자로 제어논리뿐만 아니라 원자로 운전 측면에서 큰 문제점을 야기시키고 있다. 열출력과 중성자출력의 불일치에 의한 원자로 불시 정지를 방지하기 위하여 단계별로 출력을 상승시키는 과정에서 열출력이 중성자 출력을 따라잡을 때까지 수십분 이상 기다려야 한다. 또한 운전 중 2차냉각펌프 또는 냉각팬의 기동 정지 시 2차 냉각수 온도 변화에 따른 열출력 값의 요동으로 인하여 불필요한 원자로 정지를 야기하기도 한다. 이러한 비정상 현상은 겨울철에 더욱 심하게 나타나기 때문에 원자로 운전원들에게 큰 부담이 되고 있는 실정이다.

이미 앞서의 GIC 신호 특성에서 느낀 바와 같이 GIC 신호는 열출력과 달리 중성자출력의 응답특성과 매우 유사함을 알 수 있다. 그림 6과 그림 7은 GIC 신호와 중성자 출력신호의 응답특성을 함께 표시하였다.

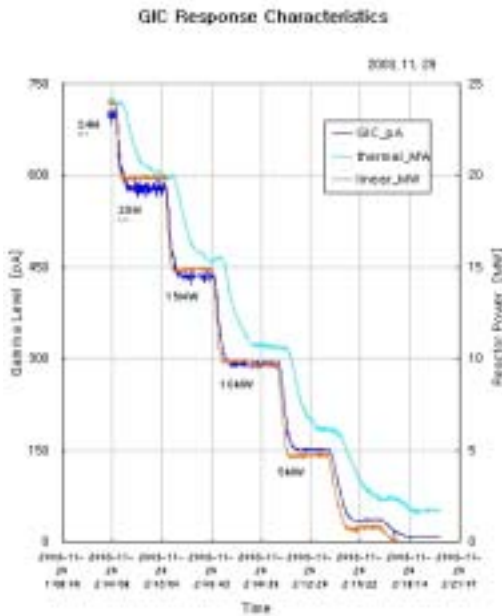


그림 6. 출력 하강 시 GIC 응답 특성

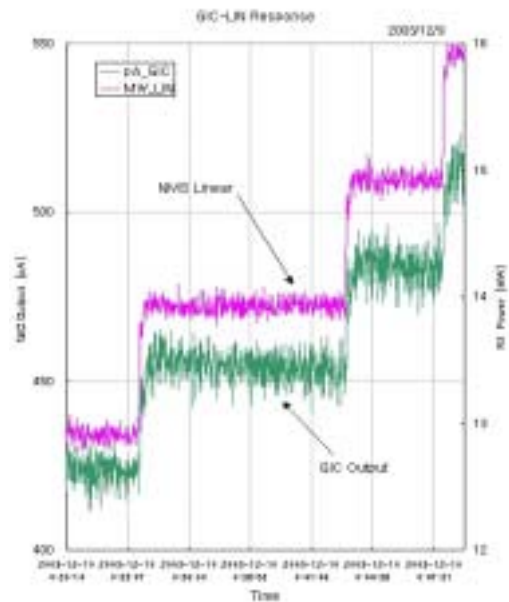


그림 7. 출력 상승 시 GIC 응답 특성

그림 6에서 보는 바와 같이, 열출력은 중성자출력에 비하여 매우 느리게 반응하고 있는데 반하여 GIC 신호는 중성자 출력신호와 거의 비슷한 응답특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 출력이 낮아짐에 따라 GIC 신호가 상대적으로 높은 값을 보이는 경향은 반감기가 긴 방사성물질이 출력감발 속도에 비하여 느리게 줄어들기 때문이다. 출력상승 시 GIC 응답특성 역시 그림 7에서와 같이 중성자출력과 거의 동일한 특성을 보이고 있다.

## 6.0 설계 변경

하나로의 열출력은 원자로 제어계에 포함되므로 열출력 대신 사용할 예정인 GIC 신호 역시 원자로 제어계통으로 분류하는 것이 설계원칙의 일관성 측면에서 바람직하다. 하드웨어 및 소프트웨어 설계변경 내용은 다음과 같다.<sup>3)</sup>

- 6개의 GIC를 그림 8과 같이 1차냉각배관에 설치
- 원자로 제어실에 3채널의 신호처리기 패널(고전압 및 전류계 기능 포함) 설치
- 3개 채널로부터의 전류신호를 원자로 제어컴퓨터로 입력
- 제어컴퓨터는 3개의 채널 신호 중 중간값을 대푯값으로 선택하여 사용함.
- 중성자출력/열출력 불일치 논리에서 열출력 신호를 GIC 신호로 대체
- 고출력 정지논리에서 열출력 신호를 GIC 신호로 대체

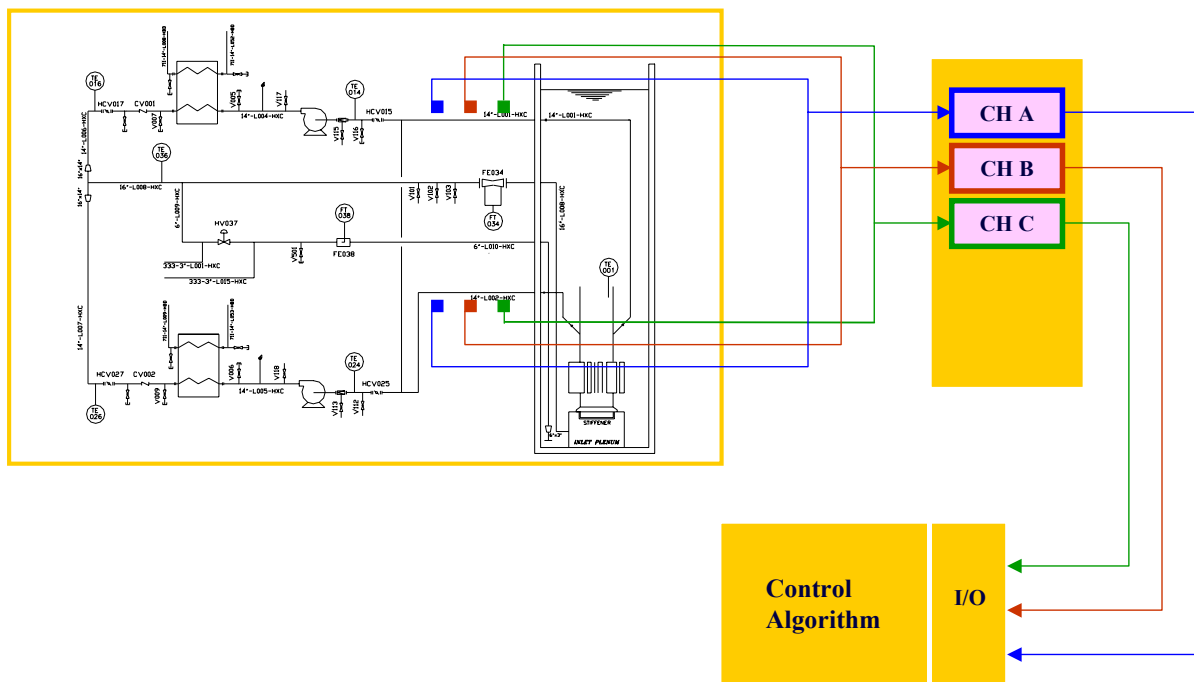


그림 8. GIC 신호를 구현하기 위한 설계변경 방안

## 7.0 결론

하나로의 실제 출력운전 상태에서 GIC를 이용하여 1년 이상 현장시험을 수행한 결과, 1차냉각 배관의 감마선 신호는 훌륭한 원자로 출력과의 선형성을 보여주었고, 중성자 출력과 거의 동일한 빠른 응답시간 특성을 가지고 있음이 확인되었다. 원자로 운전의 큰 애로사항으로 남아있는 열출력 신호의 불안정성과 응답 지연시간으로 인한 불필요한 원자로 정지는 GIC 신호를 열출력 대신 사용함으로써 더 이상 발생하지 않을 것으로 기대된다. 현재 원자로 제어시스템의 제어 알고리즘에서 중성자출력과 열출력의 3MW 불일치 및 원자로 고출력 정지변수로서 사용되고 있는 열출력 신호는 새로운 개념의 GIC 신호로 대체될 예정이지만 중성자 출력교정을 위한 기준신호로서의 열출력은 계속 사용될 것이다.

인허가 및 현장 시운전 등을 포함하는 GIC 시스템의 현장 구현을 2005년 말까지 완료하는 목표를 세우고 현재 구매시방서 작성과 인허가를 진행하고 있다. 하나로 노심의 출력은 실제 약 5~7% 정도의 요동이 있는 것으로 추정되고 있으므로 특정 원자로 출력제어 신호로 사용하기 위해서는 신호 반복성과 정상상태 흔들림 현상을 포함한 총 오차가 5% 이내를 유지할 수 있도록 신호처리회로를 적절하게 설계, 제작하여야 한다.

## 참고 문헌

- [1] 최호영 외, "하나로에서의 원자로 열출력 이상 상승 방지에 대한 연구", 2002 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 2002. 4.
- [2] G.F Knoll, "Radiation Detection and Measurement", Jonh Wiley & Sons, 1989
- [3] C. Pappas, "Design Manual - Reactor Regulating System", Rev. 03, AECL/KAERI, 1993. 7. 29