2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

CANDU 원자로 결함연료 탐지방법 개선을 위한 대처방안

A Preliminary Plan for Improvement of Failed Fuel Monitoring system in CANDU Reactor

박광준, 석호천
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

오영민, 이청구
한국수력원자력㈜
경북 경주시 양남면 나아리 260

요 약

CANDU 원자로 열전달 시스템내 결함연료 탐지계통의 개선을 위하여 기존의 탐지방법을 검토하였다. 현재 CANDU-6에서 채택하고 있는 결함연료 탐지방법은 전체 노심내 결함 유무를 감마선 검출방법으로 찾아내고, 또한 어느 연료채널에서 결함이 발생하였는가는 지발중성자 측정방법을 사용하고 있다. 그러나 노심내 결함이 발생한 것으로 나타남에도 불구하고, 결함 발생 위치를 찾지 못하는 경우도 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하고, 보다 신속히 결함을 탐지하기 위한 방법을 마련하기 위해서 검출기 대체방안을 모색하게 되었다.

Abstract

Failed fuel monitoring system was reviewed for improving the existing monitoring system in the heat transport system of CANDU reactor. The monitoring system employed in CANDU-6 is using gamma-ray detection method for finding out the failed fuels in the whole reactor core, and also using delayed-neutron measuring method for identifying the position of failed fuel channels. But it was known that the delayed neutron signal have not obtained in the failed fuel channels in spite of the fact that the failed fuels have occurred in the reactor core by gross gamma detection. For that reason, a plan is drawing up for solving this problem and providing a speedy monitoring on the failed fuels.

I. 서 론

20세기 말 미국 및 러시아에서 일어난 원자력발전소 사고를 계기로 원자력 발전소의 안전성 문제는 사회적으로 큰 관심사가 되고 있다. 사고 당사국뿐만 아니라 전 세계 인류가 2차 세계대전 이후 다시 한번 핵에 대한 두려움을 느끼게 한 사건이었다. 이와 관련하여 최근 발전소 인근 주민들은 더욱 더 방사성 물질

누출사고에 대해 민감한 반응을 보이고 있다. 따라서 이들에게 그러한 핵 공포심으로부터 해방시키는 일이 최우선적으로 이루어져야 하며, 이를 위해서 사고발생 확률이 거의 영에 가깝게 안전성을 향상시켜야 한다.

가동원전 안전성은 어느 특정 시스템에 국한되는 것이 아니라 발전소내 모든 시스템에서 이루어져야 한다. 왜냐하면 모든 시스템이 각각 독립적으로 가동되는 것이 아니고 서로 연결되어 가동되기 때문이다. 그러므로 전체 시스템 중 어느 한 시스템에 이상 이 발생하더라도 모든 시스템에 영향을 미치게 된다. 각 시스템의 중요도를 우선 순위로 나열한다는 것은 쉬운 일이 아니지만, 그래도 핵물질이 직접 취급되는 원자로심과 열전달 계통의 안전성이 최 우선시 되어야 할 것이다. 가압경수로(PWR)에서는 핵연료집합체가 노심내에 서로 밀착하는 형태로 배열되지만, CANDU 원자로에서는 핵연료다발이 각 채널에 장전되어 노심을 이루며, 각 채널이 독립적으로 운영된다. 따라서 안전성 확보 차원에서 CANDU-6 원자로에서는 가동 중 전체 노심을 2개의 루프(loop)로 구분하여 핵연료의 결함발생 여부를 감마선 측정 방법으로 탐지하고 있으며, 어느 채널에서 결함연료가 발생하였는가를 찾아내기 위해서 각 채널의 시료채취라인에 중성자 검출기를 설치하여 탐지하고 있다.

결함 핵연료 발생에는 설계, 제조, 운전미숙 등 여러 가지 원인이 있겠지만, 핵연료다발이 장전된 압력관 내부를 냉각재가 이동하면서 발생하는 핵연료다발의 진동이 주요 원인중의 하나일 수도 있다. 이러한 진동으로 인하여 핵연료 다발과 압력관 내벽 사이에 충격과 마찰이 일어나게 되며, 이러한 거동이 장기간 계속되면서 핵연료다발의 베어링 패드와 압력관 내벽에 마모가 일어나게 된다. 마모 정도가 심할 경우 핵연료 다발과 압력관 내벽 사이의 갭이 증가하게 되며, 충격은 더욱 커질 것이다. 또한 이러한 것은 냉각재의 유동속도에 따라 달라지게 된다.

핵연료 피복관에 크랙이 발생한 경우, 펠렛에서 발생된 핵분열 생성물들이 압력관내 냉각재로 누출되어 열전달 시스템을 순환하게 된다. 그러나 미세한 크랙일 경우, 그리고 압력관 내부 압력과 핵연료 피복관 내부 압력이 평형을 이룰 경우, 핵분열 생성물들이 냉각재로 누출되지 않는다. 이러한 경우, 핵연료 감시계통에는 결함핵연료가 없는 것으로 나타나게 된다. 그러나 핵연료 교체시 대기압 상태에 노출되면서 피복관 내부압력과의 평형이 깨지게 된다. 이때 핵분열 생성기체가 피복관 밖으로 누출되며, 그 시점에 가서야 비로써 결함핵연료로 판명될 수 있다.

현재 월성발전소의 핵연료 감시계통의 경우, 전체 노심을 대상으로 한 총 방사능 감시계통에서는 노심내에 결함핵연료가 발생한 것으로 나타남에도 불구하고, 각 채널을 대상으로 한 결함핵연료 위치탐지 계통에서는 탐지되지 않는 경우가 발생하는 것으로 알려져 있다. 이러한 것은 냉각재로 누출된 핵분열 생성물에 대한 측정에서 측정방법에 따라 측정가능 최소 농도가 적용되어야 한다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 측정가능 최소농도에서 측정감도가 높은 방법을 찾아 결함핵연료 위치탐지 계통의 성능을 개선하고자 한다.

II. GFP/DN 감시계통

핵연료 감시계통은 그림1과 같이 기체 핵분열 생성물 감시계통(gaseous fission product monitoring system: GFP)과 그림2와 같은 결함연료 위치탐지 계통(failed fuel location system)으로 구성되어 있다. 기체 핵분열 생성물 감시계통인 총 방사능 감시계통에서는 표1에서와 같이 원자로 가동중 노심내 핵연료에서 생성되는 핵분열 생성물 중 피복관 결함으로 누출되는 기체상태의 감마방출 핵종(Xe-133, Kr-88, I-131, Xe-135)을 고순도 감마선 검출기(HPGe detector)를 사용하여 총 방사능(gross activity)을 측정함으로써 노심내 결함핵연료 발생유무를 알 수 있게 한다. 그리고 결함연료 위치탐지 계통, 즉 지발 중성자(delayed neutron: DN) 감시계통에서는 총 방사능 감시계통에서의 탐지결과를 바탕으로 어느 연료 채널(fuel channel)에서 결함이 발생하였는가를 핵분열 기체 생성물 중 표2에서와 같이 지발 중성자를 방출하는 I-137, Br-87 등을 BF_3 중성자 검출기로 측정함으로써 결함발생 채널을 찾아내게 된다.

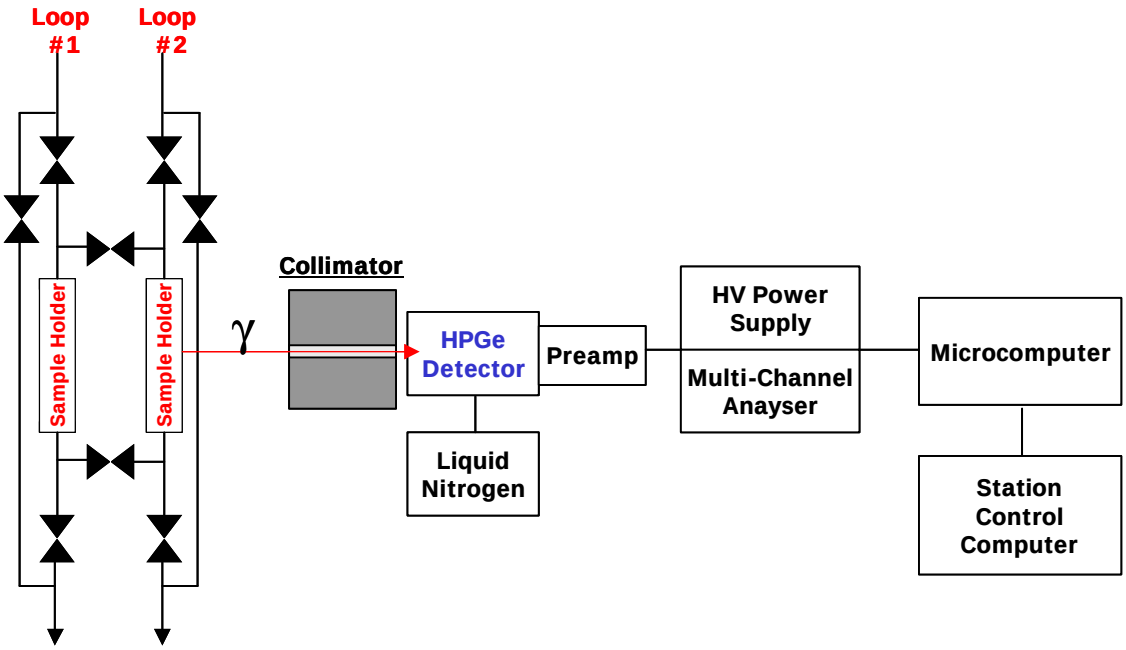

그림1. 기체 핵분열 생성물(GFP) 감시계통의 개요도.

III. 결함연료 위치탐지계통의 개선방안

기체 핵분열 생성물에 대한 현 DN 측정계통은 그 계통의 노화, 이물질의 축적 등으로 인하여 냉각재의 유동속가 낮아질 수도 있다. 이러한 경우 이물질의 축적 정도에 따라 다르겠지만 중성자 검출 감도는 떨어지게 된다. 특히 미세한 연료결함인 경우 총 방사능 감시계통에서는 노심내에 연료결함이 발생한 것으로 나타남에도 불구하고 각 채널별 DN 측정에서는 결함이 탐지되지 않는 경우도 발생할 수 있다.

이러한 것은 위에서와 같은 원인으로 인하여 열전달계통(heat transport system: HTS) DN 시료 코일(sampling coil) 냉각재내 기체 핵분열 생성물의 농도가 이전보다 낮아졌기 때문이다. 따라서 이러한 문제점을 조기에 발견하지 못하고 원자로

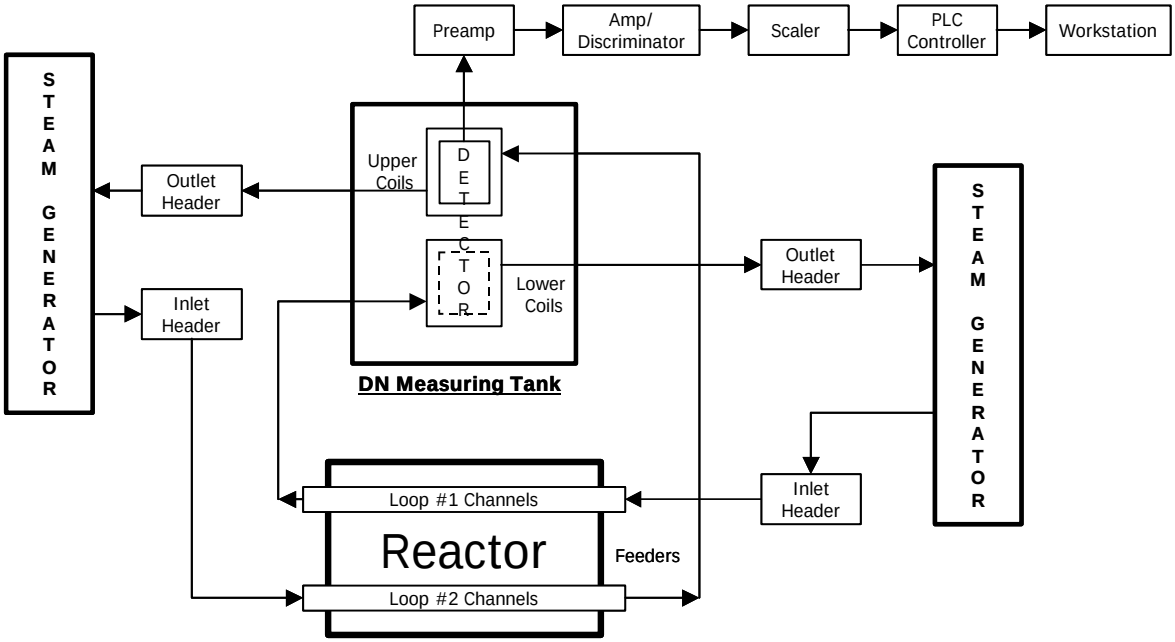

그림2. 열전달계통(HTS)내 DN 감시계통의 개요도.

표1. 노심내 결함연료 탐지에 사용되는 감마선 방출 지표핵종

Isotope	Energy	Remarks
Xe-133	81 keV	Long-lived fission gas with a high release rate
Kr-88	191 keV	Relatively short-lived fission gas that gives prompt response
I-131	364 keV	Most interest to the regulatory bodies
Xe-135	250 keV	Give information about radio-Iodine release rate

표2. 위치탐지계통 DN 측정을 위한 지표핵종

Isotope	Half Life	Energy
N-17	4.14 s	0.94 MeV
N-16*	7.13 s	1-2 MeV
I-137	22.30 s	0.46 MeV
Br-87	56.60 s	0.25 MeV

를 운전한다는 것은 핵연료뿐만 아니라 핵연료관의 건전성에도 영향을 미치게 됨으로 평가방법의 개선이 요구된다. 그러나 결함연료 위치탐지 계통의 개선에 앞서 다음과 같은 몇 가지 제약조건, 대체요건 및 대체가능 탐지방법의 검증이 선행되어야 한다.

-제약조건 :

①기존의 시료채취 라인을 변경시킬 경우, 냉각재(D_2O)가 누출될 수 있으므로 시료채취 라인을 원형 그대로 유지하여야 함

②현재 DN 측정계통이 설치된 공간 이외의 여분의 공간이 없기 때문에 측정계통 개조시 추가 공간을 확보하는 것이 불가능 함

③현재 활용하고 있는 DN 측정장치도 필요할 시 다시 사용할 수 있도록 원형 그대로 유지되어야 함.

-대체요건 : 기존 탐지계통을 개선할 경우, 결함탐지 감도와 경제성 모두를 만족시켜야 함

-대체가능 탐지방법 검토

①감마선 검출기의 활용 가능성 여부 검토

일반적으로 널리 사용되는 감마선 검출기로서는 반도체검출기, Gas-Filled 검출기, Scintillation 검출기 등이 있지만, 각각의 검출기 특성이 서로 다르기 때문에 결함연료 위치탐지 계통에 활용할 수 있는지 그 가능성 여부를 검토하였다.

ⓐ반도체 검출기 중 HPGe검출기는 에너지 분해능이 높아 핵종판별 능력이 뛰어나다는 장점이 있지만 냉각장치가 필요하기 때문에 넓은 공간을 점유하게 된다. 따라서 이러한 것은 앞에서 언급한 제약조건에 위배되므로 현재 결함핵연료 위치탐지 계통을 대체할 수 없다. 반도체 검출기 중 냉각을 하지 않는 CdZnTe 검출기는 앞으로 더 세밀한 검토가 이루어진 후 그 활용가능성 여부를 판단할 수 있을 것이다.

ⓑGas-Filled 및 Scintillation 검출기는 에너지 분해능이 낮은 반면 검출효율은 HPGe 검출기보다 상대적으로 높다. 일차적으로 노심내 결함핵연료 발생 유무 및 누출 핵종을 HPGe 검출기를 사용하여 판별하기 때문에 핵종 판별을 또 다시 현재의 DN 측정 계통에서 할 필요는 없으며, 단지 누출 핵분열 기체에서 방출하는 감마광자를 얼마만큼 검출해 내느냐가 중요하게 된다. 그 대신 현재 DN 측정 계통에서 사용하고 있는 BF_3 검출기 보다 Gas-Filled 및 Scintillation 검출기의 검출감도가 높아야 한다. 이러한 검출감도는 검출되는 선원이 하나는

중성자이고, 또 다른 하나는 감마선으로서 서로 다르기 때문에 직접 비교할 수는 없다. 따라서 동일한 선원과 동일한 실험조건 하에서 실험을 통하여 검증하는 것이 필요하다. 특히 Gas-Filled 검출기 중 GM 검출기는 상대적으로 다른 검출기에 비해 가격도 저렴할 뿐만 아니라 검출감도도 표3과 같이 종류에 따라 높은 것도 있다. 감마선 검출감도는 단위 선량당 계수(cps/mR/hr)로 나타내며, 어느 감마선 에너지의 선원을 사용하였느냐에 따라 다르겠지만 큰 차이는 나지 않는다.

표3. 감마선 검출 감도가 비교적 높은 GM 검출기의 특성

GM Tube / 특 성	LND 7808	LND78014	LND78017	LND7802
Sensitivity (Co-60 cps/mR/hr)	180	120	160	180
Max. Diameter (inch/mm))	0.81/20.6	0.81/20.6	0.81/20.6	0.81/20.6
Max. Length (inch/mm)	13.59/345.2	9.79/248.7	10.62/269.7	13.79/350.3
Operating Temp.(°C)	-40 to +100	-40 to +100	-40 to +75	-55 to +100

②중성자검출 방법

노심 밖 중성자 측정에 가장 많이 사용되는 검출기로는 BF_3와 He-3 검출기가 있으며, 검출기 특성과 사용용도를 감안하여 선택하게 된다.

ⓐBF_3 검출기는 현재 DN 측정에 사용되고 있으나, 결함연료로부터 방출되는 기체 핵분열 생성물의 농도가 낮아지거나 또는 시료채취 라인의 유속이 느려질 때, 노심내 결함핵연료 탐지 계통의 HPGe 검출기에서는 감마선 탐지가 되는 데에도 불구하고 각 채널에 대한 DN이 측정되지 않는 경우가 발생하는 것으로 알려져 있다. 이러한 것은 상대적으로 지발 중성자를 방출하는 핵종 I-137(반감기: 22.3초), Br-87(반감기: 56.6초)의 농도가 낮아지거나 또는 이러한 핵종의 짧은 반감기에 비해 냉각재의 유속이 늦어져 중성자 검출감도가 떨어지기 때문이다. 따라서 검출감도가 더 높은 다른 모델의 BF_3로 교체하던가 그렇지 않으면 표4에서와 같이 더 검출감도가 높은 중성자 검출기로 대체하는 방법도 고려할 수 있다. 여기서 중성자 검출 감도는 단위 중성자속 당 계수(cps/nv)로 나타내며, 앞에서 언급된 감마선 검출 감도 cps/mR/hr와는 다르다. 따라서 중성자 검출감도와 감마선 검출감도를 직접 비교한다는 것은 무의미한 일이며, 두 가지 측정 방법의 감도는 원자로 가동 중 발생되는 핵분열 기체와 동일한 선원을 가지고 실험을 통하여서만

결정될 수 있다.

ⓑHe-3 검출기도 제작사의 모델에 따라 검출감도가 다르지만 유사한 크기인 경우 상대적으로 BF_3 검출기 보다 높은 것으로 알려져 있다. 그러나 이들 검출기에 대한 좀 더 정확한 자료분석 및 실험이 이루어진 후에나 교체가능성 여부를 판단할 수 있을 것이다.

표4. 현재 사용중인 BF3(203) 중성자 검출기와 일부 중성자 검출기의 특성 비교

특 성 / 검출기	Max. Length (inches)	Max. Diameter (inches)	Sensitivity (cps/nv)	Voltage Range (volts)
BF_3 (203)	15.88	2.0	10.6	1,900-2,400
BF_3 (20354)	16.88	2.0	25.0	2,000-2,700
He-3 (2531)	11.63	2.0	133.7	1,700-2,200
He-3 (2533)	21.34	2.0	296.2	1,500-1,850

IV. 검증시험 방안

서로 다른 방사선에 대하여 검출기 감도를 시험한다는 것은 쉬운 일이 아니다. 검출기 특성상 감마선 검출기를 가지고 중성자를 측정할 수 없는 것과 마찬가지로 중성자 검출기로 감마선을 측정할 수 없다. 따라서 중성자 검출기는 중성자 검출기끼리 중성자 선원을 사용하여 검출 감도를 비교할 수 밖에 없으며, 또한 감마선 검출기는 감마선 방출 선원을 사용해서 검출감도를 비교 평가할 수 밖에 없다. 그러므로 원자로 운전 중 동시에 생성되는 감마 및 중성자 방출 핵분열 생성 기체 선원을 사용하여 검출감도 검증시험을 수행할 수 밖에 없다. 비방사능 구역의 검증시험 한계점은 반감기가 짧은 핵분열 생성 기체를 사용할 수 없다는 것이다. 따라서 다음과 같은 두 가지 검증 방안을 제시하게 되었다.

①GFP 감시계통 연료결함 확인 시점의 활용

GFP 감시계통에서 연료결함이 발생된 것으로 나타난 시점에서 각 연료채널에 해당하는 DN 측정공(detection hole)을 기존의 BF_3 검출기 보다 검출감도가 더 큰

중성자 검출기나 또는 감마선 검출기로 측정하는 방법이다. 이러한 방법의 단점은 결함연료가 언제 발생할지 모르기 때문에 시간적으로 즉각 대처하기가 쉽지 않고, 모든 채널을 시험하여야 함으로 많은 시간이 소요되며, 또한 결함이 발생한 상태에서 시험을 수행하기 때문에 냉각재 정화시간이 지연된다는 것이다.

②인공결함 연료 특정 채널 장진 후 시험

연료 교체시 인공적으로 결함을 낸 연료를 특정 채널에 장전하여 그 채널에 해당하는 DN 측정공에서 기존의 BF_3 검출기 보다 검출감도가 더 큰 중성자 검출기나 또는 감마선 검출기로 측정하는 방법이다. 이 방법의 장점은 결함연료 채널이 알려지므로 시험이 용이하고, 한 개의 채널에서만 측정을 하기 때문에 시험시간을 단축시킬 수 있다는 것이다. 반면에 결함연료를 장전함으로써 원자로 안전성에 문제가 야기될 수 있으며, 냉각재를 오염시킬 수 있다는 것이 단점이다.