2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

핵연료 계장캡슐의 제어계통 개념설계

Conceptual Design of the Control and Instrumentation System for an Instrumented Fuel Capsule

안도희, 박승재, 김봉구, 송기찬, 강영환

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로에서 핵연료의 조사시험을 위한 핵연료 계장캡슐이 개발중이다. 핵연료 계장캡슐의 제어계통의 목적은 조사시험시 핵연료의 표면온도를 일정하게 유지하고, 방사성 핵분열 기체의 방출을 제어하는 것이다. 본 연구에서는 핵연료 계장캡슐 내에 설치되는 조사 핵연료 표면온도 제어를 위한 제어계통의 설계요건을 확립하고, 제어방법을 선정하였으며 계통의 개략도를 작성하여 개념설계를 완성하였다.

Abstract

An instrumented fuel capsule is being developed for irradiation testing of promising reactor fuels loaded in the HANARO reactor. The purpose of the control and instrumentation system for the instrumented fuel capsule is to control the fuel temperature and emission of the radioactive fission gas product during irradiation testing. In order to control the surface temperature during irradiation in the present work, conceptual design for the control and instrumentation system has been preformed; design requirements are established, control methods are determined and finally a schematic diagram for the system is prepared.

1. 서 론

국내에서 개발중인 핵연료(경수로용 신형핵연료, DUPIC핵연료, 금속핵연료, 미래형핵연료 등)의 인허가를 위해서는 노내성능 코드 검증을 위한 핵연료 조사 거동자료의 확보가 필요하다. 국내 개발 핵연료의 해외조사 시험시 핵연료의 수송문제와 자료 확보의 한계성 등의 어려움이 예상되고 있으므로 하나로에서의 핵연료 조사시험을 위한 핵연료 계장캡슐의 개발이 활발히 진행중이다.

하나로 OR 조사공에 장전되는 핵연료 조사시험용 계장캡슐(open basket type)의 개념설계는 그림 1과 같으며, 크게 최외각 basket, 시험용 핵연료 핀을 포함한 미니캡슐, 미니캡슐과 basket와의 연결부, 캡슐제어계통과의 연결부로 구성된다. 현재 고려중인 basket 내부에는 적게는 3개의 핵연료 핀을 수용할 수 있으며, 조사중 핵연료의 온도측정을 위한 열전대, 핵연료봉 내압측정 또는 핵연료 변형측정을 위한

LVDT, 조사량 측정을 위한 SPND 등이 설치될 수 있다. 이러한 2중 피복구조를 갖는 핵연료봉이 설치된 이유는 조사중 핵연료의 표면 온도를 조절하기 위함이다. 이에 따라 조사중 핵연료 표면온도를 조절하기 위한 기체 공급 및 배출관 등이 계장캡슐에 추가되며, 기체공급 제어를 위한 제어계통이 설치된다. 한편 하나로 OR 조사공을 이용한 핵연료 조사시험에 사용할 계장캡슐은 하나로 OR 조사공에 장전되기 때문에 핵적, 열적, 규격적인 제한을 받고, 부대설비는 하나로의 운전계통, 안전계통 등과도 관련이 있다.

본 연구에서는 핵연료 계장캡슐 내에 설치되는 2중 피복구조 핵연료의 조사중 표면 온도제어를 위한 제어계통의 개념설계를 수행하였다. 제어계통은 조사시험시 핵연료의 표면온도를 일정하게 유지하고, 방사성 핵분열 기체의 방출을 제어하는 기능을 가진다.

2. 본 론

2-1. 설계요건

핵연료 계장캡슐 내에 설치되는 2중 피복구조를 갖는 조사 핵연료의 표면온도를 제어하기 위한 제어계통 설계요건을 표 1에 나타내었다. 핵연료 계장캡슐을 이용한 핵연료 조사시험은 현재 경수로용 신형핵연료와 DUPIC 핵연료를 대상으로 하는데, 표 1에 나타난 바와 같이 이용자의 요구 핵연료 표면온도는 800℃ 이하이다.

핵연료계장캡슐에 설치되는 조사 핵연료에서 2중 피복관 사이를 흐르는 기체는 RCI stack으로 연결되는 수조상부의 배기덕트에 연결될 예정이다. RCI stack에서 Kr과 Xe 등의 방사성 핵분열 기체에 대한 의 유도방출한도는 2.14×10^{-3} Ci/㎥ 이다[1]. 사고시 비상환기계통을 자동으로 작동시키기 위해 방사선감지기가 RCI 배기 duct에 설치되어 있는데, 설정치는 유도방출한도인 2.14×10^{-3} Ci/㎥ 이며, 경고치는 설정치인 1/10인 2.14×10^{-4} Ci/㎥이다. 하나로에서 원활한 운전을 위해 경고치를 기준으로 유출기체의 최대 방사능 유출량을 다음과 같이 산출하였다. 이 때 RCI room 등 다른 계통에서 유출되는 방사능 유출량은 무시하였다.

핵연료 2중 피복관에서의 유출기체 유량 : 50cc/min = 3×10^{-3} ㎥/h
RCI stack의 배기유량 : 6,600 ㎥/h
최대 방사능 유출량 : 2.14×10^{-4} Ci/㎥ × 6,600 ㎥/h = 1.41 Ci/h
최대 방사능 농도 : 1.41 Ci/h ÷ 3×10^{-3} ㎥/h = 470 Ci/㎥

2-2. 제어방법

핵연료의 표면온도는 발열량과 관련된 핵연료의 U-235 농축도와 dimension, 원자로의 열중성자속과 열손실량과 관련된 캡슐 내부구조물의 dimension과 재질, 캡슐 외통과 핵연료의 피복관 사이의 gap을 흐르는 기체의 종류 등에 좌우된다. 핵연료 표면온도를 제어하는 방법은 연료의 발열량이 적고 조사기간이 짧은 경우 보조히터를 채용하는 방법, 캡슐의 이동공간이 확보되는 경우 열중성자속 변화를 위해 캡슐을 원자로내에서 수직으로 이동시키는 방법과 캡슐 외통과 핵연료의 피복관 사이의 gap에 흐르는 기체의 열전도도를 조절하는 방법이 있다[2].

본 연구에서는 제약조건이 없고 운전이 간편한 2중 피복 핵연료의 피복관 사이를 흐르는 기체의 열전도도를 조절하는 방법을 선정하였다. 이 때 사용되는 기체는 불활성이고 열전도도의 차이가 큰 He와 Ne의 혼합기체를 사용하였다. He/Ne의 혼합기체의 조성에 따른 열전도도는 그림 2에 도시하였다[2]. 그림 2에 나타난 바와 같이 He의 몰분율이 높을수록 열전도도가 커져 열손실이 커지므로 핵연료의 표면온도가 낮아짐을 알 수 있다. 예비계산 결과 DUPIC 핵연료에서는 2중 피복관 사이의 gap을 흐르는 He/Ne 혼합기체의 조성을 변화시키는 경우 핵연료의 표면온도를 70

0~1,100℃ 사이로 조절할 수 있을 것으로 예측되었다[3]. 그림 2에 핵연료표면온도 제어계통의 개략도를 나타내었는데, He와 Ne 실린더, mass flow controller (MFC), mixing chamber, 열전대 및 PLC 등으로 구성되어 있다. 열전대로 측정된 핵연료 표면온도에 따라 He/Ne 혼합기체의 조성을 MFC로 조절함으로써 표면온도를 제어하도록 설계되어 있다. 이 때 혼합기체의 유량은 50 cc/min로 일정하다.

본 제어계통의 다른 기능은 조사시험중 핵연료의 내부 피복관이 파손될 경우 이를 신속하게 감지하며, 하나로의 안전을 위해 조사시험을 중지시키고, RCI 배기 duct로 유출되는 He/Ne 기체중에 방사성 핵분열 생성물이 방출될 경우 이를 제거하는 것이다.

핵연료봉의 내부 피복관이 파손되는 경우 유출될 수 있는 핵분열 생성물의 양을 ORIGEN2 code로 분석하였다. U-235의 농축도가 4%인 3개의 핵연료봉을 대상으로 핵연료봉 안에 축적되는 핵분열 기체 생성물의 양과 방사능을 계산하였는데, 이를 그림 4와 5에 도시하였다. 핵분열 생성기체인 Kr과 Xe의 양은 그림 4에 나타난 바와 같이 조사기간에 따라 계속 증가하는데, 1,050일 후 Kr은 0.049g (표준상태에서 13 cc) 그리고 Xe는 0.81g (표준상태에서 140 cc)이 생성된다. 반면에 Kr과 Xe의 누적 방사능은 조사기간 30일 정도까지 급격히 증가하다가 완만하게 감소함을 알 수 있는데, 이는 Kr과 Xe의 방사성 핵종들의 붕괴속도가 생성속도보다 크기 때문이다. U-235의 농축도가 4%인 3개의 핵연료봉이 동시에 파손되는 경우 유출될 수 있는 핵분열 기체의 방사능은 조사시험 후 30일 정도에서 약 2,000 Ci 임을 알 수 있다. 따라서 핵연료계장캡슐의 제어계통에는 방사능의 유출을 제어하는 기능이 필수적이다.

선진국의 핵연료 조사시험 시설, gas cooled reactor 및 방사선 계측장비 등에 관한 문헌 분석을 통하여 핵연료봉 파손감지계통의 개략도를 그림 6과 같이 작성하였다[4,5,6]. 이 계통은 그림 6에 나타난 바와 같이, He/Ne 기체중에 포함된 방사성 핵분열기체의 방출 속도를 연속적으로 측정할 수 있는 fission gas monitor, 필요시 방사성 핵분열기체 등을 제거할 수 있는 charcoal trap, RCI 배기 duct로 배출되는 기체중의 방사능 농도를 감시할 수 있는 activity monitor와 이 monitor들로부터 감지되는 농도 또는 농도 변화율에 의해 계통의 밸브들을 적절히 제어할 수 있는 제어기로 구성되어 있다.

조사시험용 핵연료 캡슐은 물론, 상용의 원자로에서도 핵연료봉의 파손은 주로 핵연료 피복관 밖으로 유출되어 냉각재(He 또는 경수) 중에 포함된 방사성의 핵분열 생성물의 종류와 그 농도를 측정함으로써 감지되고 있다. 본 연구의 핵연료 계장캡슐용 제어계통은 핵연료 표면온도 조절을 위해 핵연료의 2중 피복관사이로 He/Ne 기체혼합물이 흐르게 되어 있으므로 핵연료봉 파손시 He/Ne 기체중에 핵분열 생성물 중 방사성 기체의 농도가 급격히 증가하게 될 것이다. 따라서 핵연료봉 파손감지를 위하여 fission gas monitor를 채용하였다. Kr과 Xe의 동위원소들로 구성되어 있는 방사성 핵분열 기체의 방출속도는 gamma spectroscopy에 의해 측정되는데, Ge 단결정 detector를 사용하며, 크게 on-line flow, decay spectrum과 cold trap 방법으로 나눌 수 있다. 이중에서 신속하게 핵연료봉의 파손을 감지하기 위해서는 측정시간이 가장 짧은 on-line flow 방법이 본 계통에 적절할 것으로 판단된다. 이 방법은 일정한 길이의 튜브로부터 방사되는 감마선의 세기를 감지하는 것으로 튜브 내에 흐르는 유체의 유속이 일정해야 한다. 계통내 He/Ne 유량과 감마선의 세기에 따라서 기체의 일부만이 일정한 유속으로 sampling tube를 통해 흐르게 하는 유량제어장치가 필요할 수도 있다.

Fission gas monitor에 의해 핵연료봉의 파손이 감지된 경우의 대응방안은 다음과 같다.

① He/Ne 혼합기체 입출구 밸브의 자동 작동에 의한 캡슐의 유로 차단

② 하나로의 운전 정지
③ 핵연료 계장캡슐 기체관련 계통내 잔류 핵분열 기체의 trapping
④ 핵연료 계장캡슐의 인출 및 처리

방사성 핵분열 기체는 핵연료봉의 파손은 물론 정상 운전중에서도 확산 등에 의해 He/Ne 기체중에 포함될 수 있다. 방사성 핵분열 기체의 방출속도가 목표치를 초과하는 경우 이를 제거한 후 방출해야 한다. Kr과 Xe의 동위원소들로 구성되어 있는 방사성 핵분열 기체는 붕괴탱크 또는 활성탄 층을 이용하여 제거하고 있다[7]. 본 연구에서는 부피가 작은 charcoal 층을 이용할 예정인데 이는 핵분열 기체가 charcoal에 선택적으로 charcoal 표면에 흡착하는 성질을 이용하는 것이다. 흡착제로서 여러 종류의 charcoal 또는 silver 등의 금속이 담지된 charcoal이 사용하고 있으며, 흡착 효율을 높이기 위해 저온에서 운전하기도 한다.

본 계통으로부터 유출되는 방사성 핵분열 생성물의 방출속도는 기체 배출부의 activity monitor에서 연속적으로 감시될 것이다.

3. 결 론

핵연료 계장캡슐의 부대설비인 핵연료 표면온도 제어계통은 하나로에서 조사시험시 핵연료의 표면온도를 일정하게 유지하고, 방사성 핵분열 기체의 방출을 제어하는 기능을 갖도록 하였다. 핵연료 계장캡슐 개발과 함께 조사 핵연료의 표면온도 제어계통의 개발을 위하여 제어계통의 설계요건인 핵연료표면온도와 핵분열 기체 생성물의 방출한도를 확립하였다. 핵연료 표면온도는 2중 피복 핵연료의 피복관 사이의 gap을 흐르는 He/Ne 기체의 조성에 따른 열전도도 차이로 제어하며, 핵연료봉의 파손은 유출 배관에 설치된 fission gas monitor로 감지하고, 방출한계치를 초과하는 핵분열 기체는 charcoal 층을 이용하여 제거하도록 하였다. 이러한 개념설계의 결과들은 상세설계를 통해 핵연료계장캡슐 내에 설치되는 2중 피복 구조를 갖는 조사 핵연료의 표면온도 제어와 핵연료 파손 감시를 위한 제어계통의 설계자료로 활용될 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력 중장기 사업중 조사시험용 캡슐개발 및 활용 연구과제의 일환으로 수행한 연구 결과입니다.

참고문헌

[1] “하나로 안전성분석보고서”, KAERI/TR-710/96, p. 17-75 (1996)
[2] W.W. Godsin, *Nucl. Sci & Eng.*, **8**, 340-345 (1960)
[3] 강영환 외, “핵연료 조사시험용 계장캡슐에 대한 열적특성연구”, 2001 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회 (2001)
[4] K. Fukuda, et. al., "Irradiation Experiment of Coated Particle Fuels by Sweep Gas Capsule", JAERI-M 84-054, p. 3 (1984)
[5] R. M. Watkins, et. al., "High Temperature Fission Product Trap Study for Gas-cooled Reactors", GA-1990 (1961)
[6] S. Kitani and J. Takada, *J. of Nucl. Sci & Tech.*, **2**, 51-56 (1965)
[7] W.R.A. Goossens, et. al., "Treatment of Gaseous Effluents Nuclear Facilities", Harwood Academic Publishers, p. 256 (1991)

Table 1. Design requirements of the control and Instrumentation system of an Instrumented Fuel Capsule

항목	설계치	비고
핵연료표면온도	<800℃	이용자 요구조건
최대 방사능 유출량	1.41 Ci/h	RCI stack 유도방출한계의 1/10
최대 방사능 농도	470 Ci/㎥	유출유량 : 50cc/min

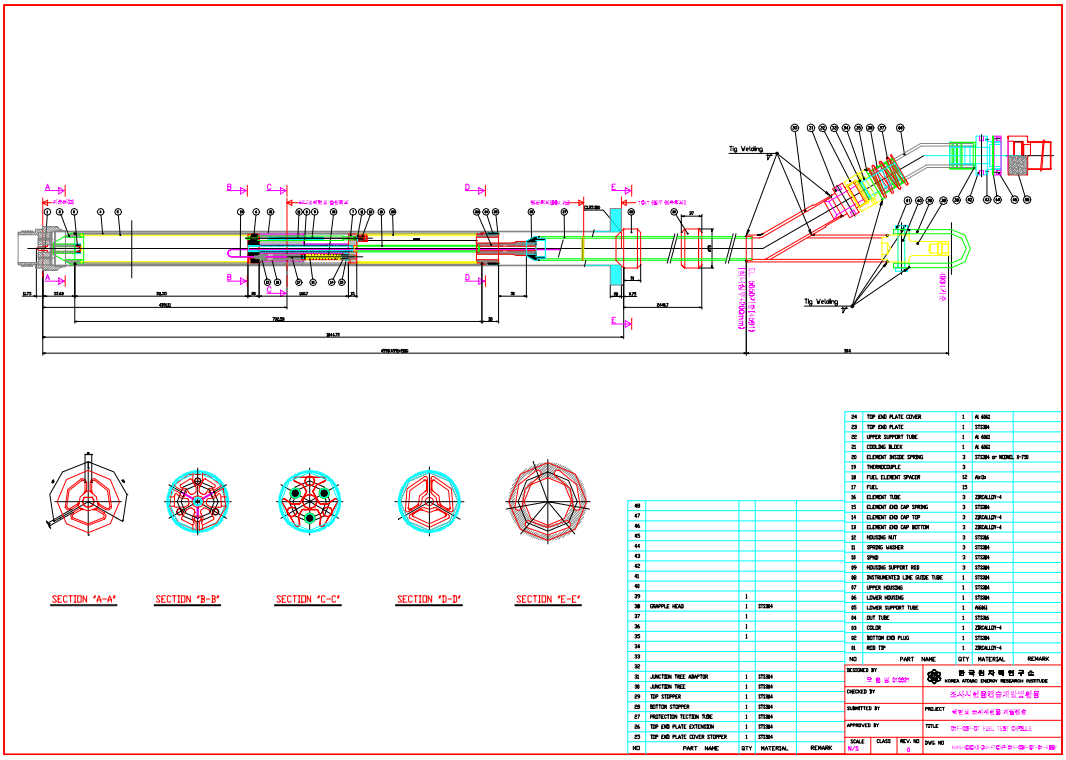

Fig. 1. A conceptual design of an instrumented fuel capsule

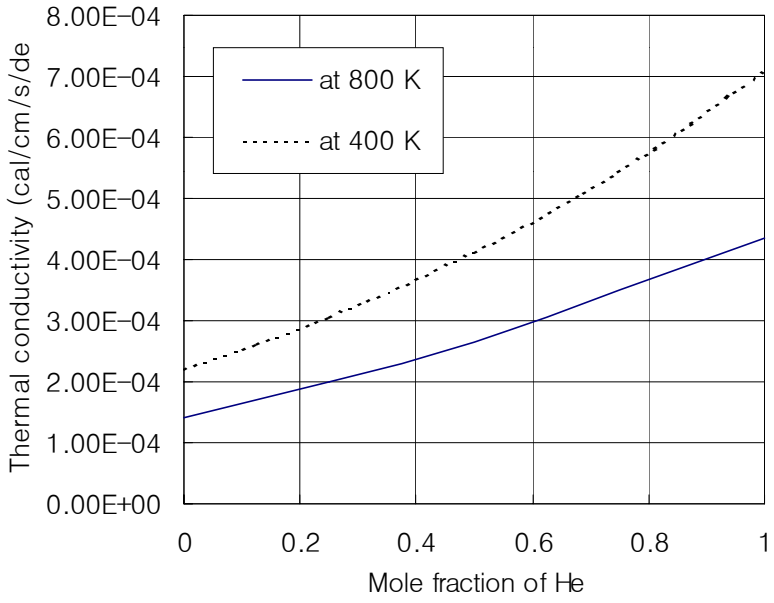

Fig. 2. Variation in thermal conductivity of a binary gas mixture (He-Ne)

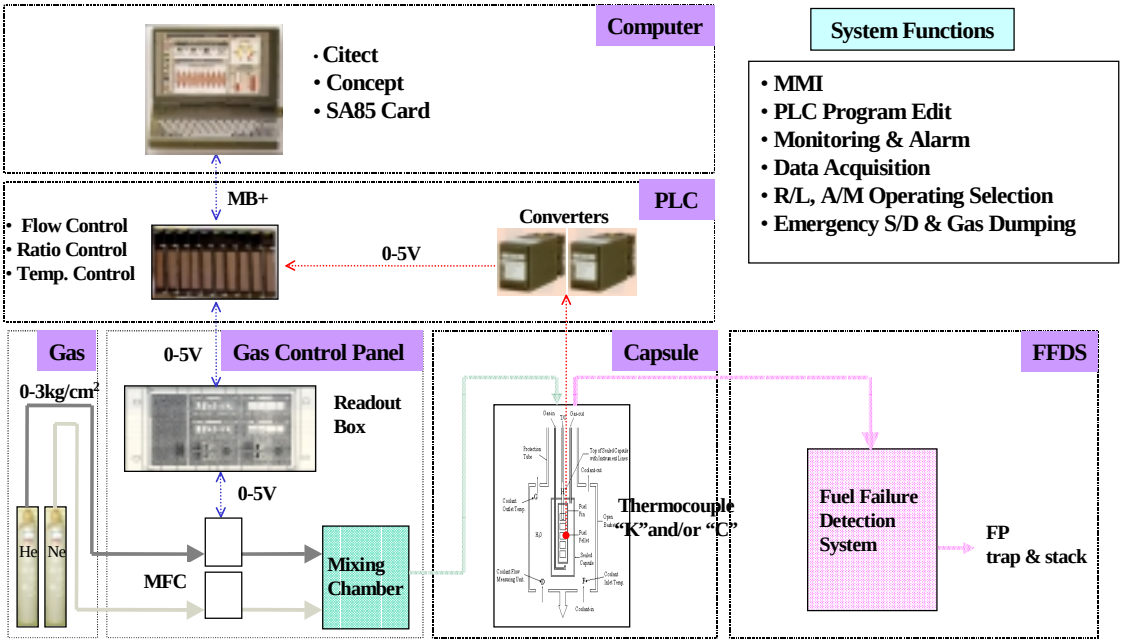

Fig. 3. A schematic diagram of the fuel surface temperature control system

Irradiation of 3 fuel rods
U-235 enrichment : 4 w/o
Total power : 311.4 W/cm x 5cm x 3ea = 4.671E-3 MW
15 Day operation : 1 MWD/kg-U

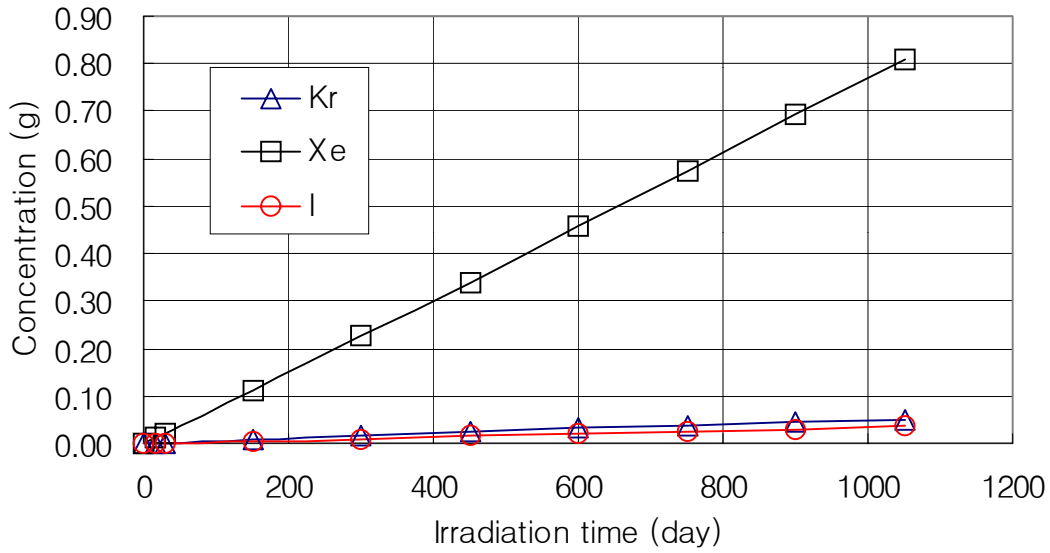

Fig. 4. Cumulative fission gas yields by ORIGEN2
(after 1050 days, 13㎤ of Kr, 138㎤ of Xe, 3.2㎤ of I_2)

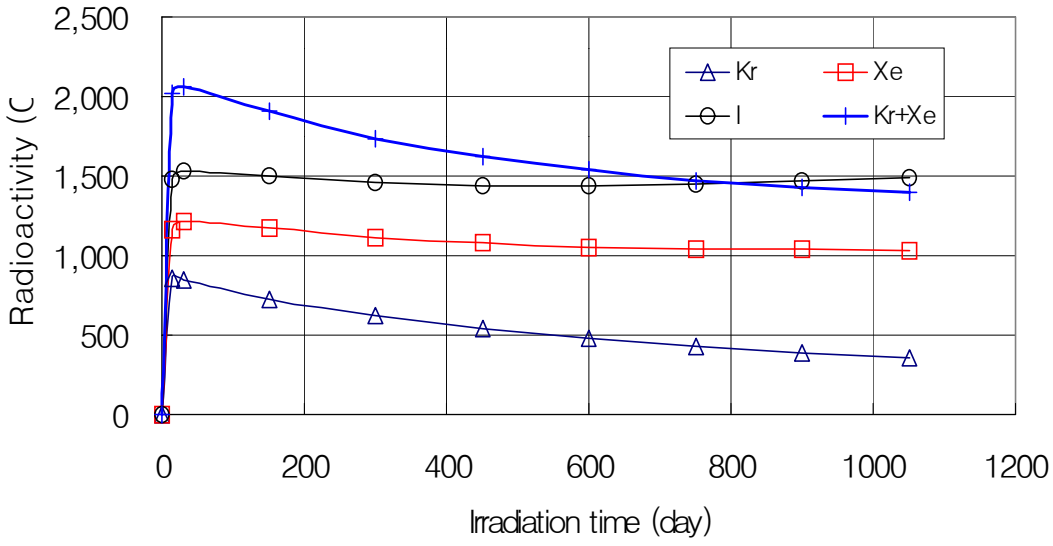

Fig. 5. Cumulative radioactive fission gas yields by ORIGEN2

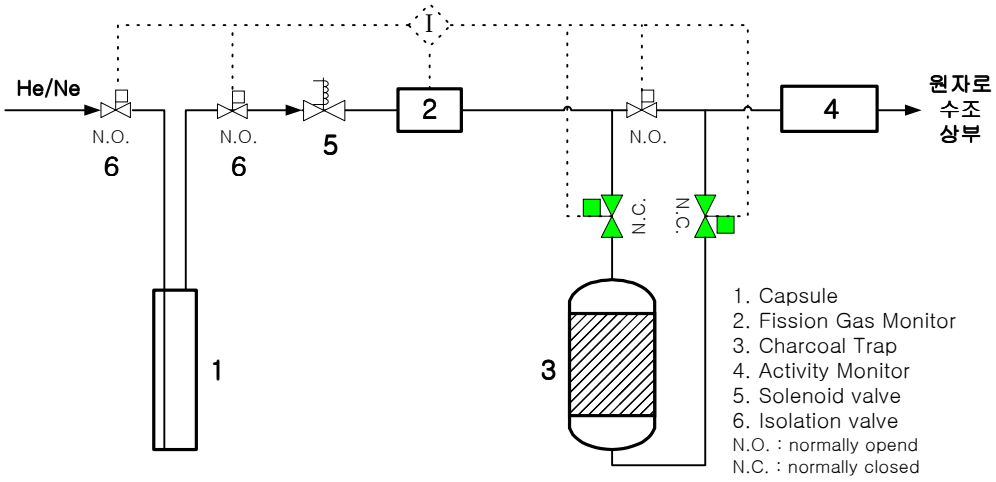

Fig. 6. A schematic diagram of the fuel failure detection system