

# 감마선 선량을 제한조건에 따른 원자력 비상대응로봇의 대응시간

조재완, 최영수, 김태원, 정경민  
 한국원자력연구원 원자력융합기술개발부  
 e-mail : [jwcho@kaeri.re.kr](mailto:jwcho@kaeri.re.kr)

## A Response Time of the Nuclear Emergency Preparedness Robot based on the Gamma Ray Dose-Rate Constraints

JaiWan Cho, Young Soo Choi, TaeWon Kim, and KyungMin Jeong

\*Division of Nuclear Convergence Technology Development, Korea Atomic Energy Research Institute

### 요 약

로봇 시스템의 제어 및 이를 이용한 환경 인식에는 많은 전자 광학 소자들이 사용되고 있다. 로봇 제어회로에 사용되고 있는 Si CMOS 공정의 CPU, ASIC, FPGA 소자는 고 선량의 감마선에 취약하다. 환경정보 수집용으로 로봇에 탑재되는 CMOS/CCD 카메라의 관측영상에는 고선량 감마선으로 인한 speckle (백색잡음, white noise) 들이 나타나며, 이들이 카메라의 관측성능을 저하시킨다. 후쿠시마 원자력발전소 사고와 같이 원자력시설에서 제어불능의 심각한 사고가 발생되면 고선량 감마선이 방출된다. 이러한 고선량 감마선방출은 사람에 의한 사고수습을 불가능하게 하며, 사고수습을 위해서는 로봇의 활용이 불가피하다. 그러나, 방출되는 고선량 감마선의 세기(선량을)가 지나치게 높을 경우, 로봇 전자회로가 장애를 일으키기 때문에 로봇의 적절한 임무수행이 가능한 감마선 세기에 대한 고려가 필요하다. 본 논문에서는 고선량 감마선 환경하에서의 로봇 탑재 CCD/CMOS 카메라의 관측 성능을 고려하여 100 Gy/h 를 감마선 선량을 제한조건으로 설정한다. 그리고, 재 가동 승인심사를 받기 위해 일본의 원전 운영자들이 제시한 PWR (가압경수로) 원전의 중대사고 대책 적합성 평가문서에 나타난 노심용융개시 시점의 원자로 격납건물내 감마선 선량을 추이 계산결과를 활용하여 로봇의 대응시간을 계산하였다. 문서 (PDF) 에 표현된 감마선 선량을 추이 그래프를 영상 판독하여, 격납건물내 감마선 선량이 100 Gy/h 제한조건에 도달하는 시간을 계산하였다. 이를 로봇의 대응시간으로 설정한다.

### 1. 서론

후쿠시마 제일 원자력발전소 사고를 계기로 일본의 원자력규제위원회 (NRA, nuclear regulation authority) 는 일본 내 원자력발전소의 신규건설 및 재가동 승인 요건으로 신안전기준을 마련하였다[1]. 이러한 신안전기준에는 강화된 중대사고 (SA, severe accident) 대책들이 포함되어 있다. 일본에서는 국내의 원전과 동일한 유형인 PWR (pressurized water reactor) 모델의 6 개 원자력 발전소가 재가동 승인을 획득하기 위해 신안전 규제기준을 만족하는 적합성 평가보고서들을 원자력 규제위원회에 제출하여 심의를 받고 있다. 표 1 에는 2013 년 7 월부터 시작하여 현재에 이르기 까지 신안전 기준에 입각하여 재가동 승인 심사를 받고 있는 원자력발전소를 나타낸다. 원자로는 전체 10 호기이며 정격(전기)출력은 대략 1,004 만 kW 에 이른다. 국내 원자력발전소 (증기 발생기 2 개)와 달리 일본의 원자력발전소는 3~4 개의 증기발생기를 갖고 있다.

<표 1> 재가동 승인 심사중에 있는 일본 원자력발전소

원자력 발전소	Sendai 1&2	Genkai 3&4	Ohui 3&4	Takahama 3&4	Ikat a 3	Tomar i 3
정격 출력 (전기)	89 만 kW	118 만 kW	118 만 kW	87 만 kW	89 만 kW	91.2 만 kW
형식	PWR	PWR	PWR	PWR	PWR	PWR
증기 발생기	3 개	4 개	4 개	3 개	3 개	3 개
핵연료 집합체 (17x17)	157	193	193	157	157	157
상업 운전 시작일	1984.7 & 1985.11	1994.3 & 1997.7	1991.12 & 1993.2	1985.1 & 1985.7	1994.12	2009.12

본 논문에서는 재 가동 승인심사를 받기 위해 일본의 원전 운영자들이 제시한 PWR (가압경수로) 원전의 중대사고 대책 적합성 평가문서에 나타난 노심용융개시 시점의 원자로 격납건물내 감마선 선량을 추이 계산결과를 활용하여 원자력 비상대응로봇의 대응(임무가능) 시간을 계산한다.

**2. 감마선 선량을 제한조건**

Si CMOS 공정의 CPU, ASIC, FPGA 소자는 고 선량의 감마선에 취약하다. 환경정보 수집용으로 로봇에 탑재되는 CMOS/CCD 카메라의 관측영상에는 고선량 감마선으로 인한 speckle (백색잡음, white noise) 들이 나타나며, 이들이 카메라의 관측성능을 저하시킨다.

그림 1, 2 는 저가 CMOS 카메라 (플라스틱 렌즈 부착) 의 고 선량을 (95 Gy/h) 감마선 조사실험 영상을 나타낸다. 그림 1 은 감마선 조사직전의 영상이고, 그림 2 는 고선량 감마선 조사중인 관측 영상을 나타낸다.



(그림 1) 감마선 조사직전의 카메라 관측영상



(그림 2) 고선량을 (95 Gy/h) 감마선 조사중인 저가 CMOS 카메라 관측영상

그림 1 의 관측영상에서는 좌측 중앙하단에 보이는 체스패턴의 격자무늬 우측의 문자 정보를 식별할 수 있다. 그러나 그림 2 에 나타낸 바와 같이 CMOS 카메라가 고선량 (95 Gy/h) 감마선에 노출되면 관측영상에 나타나는 Speckle 때문에 체스패턴 우측의 문자를

식별할 수 없다. 이는 원자로 격납건물 내에 위치한 안전계통 계기판 (수위계, 압력계 및 밸브 개폐정도 지시계) 을 영상 판독할 수 없음을 의미한다. 그림 3 은 저가모델인 CCD 카메라 (플라스틱 렌즈부착)의 고선량을 (118Gy/h) 감마선 조사실험 영상을 나타낸다.



(그림 3) 고선량을 (118 Gy/h) 감마선 조사중인 저가 CCD 카메라 관측영상

CCD 카메라 (그림 3)는 CMOS 카메라 (그림 2) 에 비해 상대적으로 높은 고선량을 (118 Gy/h) 감마선 조사환경에 노출되고 있음에도 불구하고 관측성능은 양호함을 알 수 있다. 후쿠시마 원자력발전소 사고 수습을 위해 투입되었던 로봇 시스템들은 원자로 건물내부의 환경관측을 위해서는 고성능 CCD (고배율 ZOOM 렌즈 및 고해상도 광학계 장착) 카메라를 탑재하고, 로봇 플랫폼 자체의 진단 (구동 바퀴, 케이블 드럼 동작상태 등의 영상 감시)에는 저가의 상용 CCD/CMOS 카메라를 사용하였다[2]. 따라서, 이와 같은 사례에 근거하여 원자력 비상대응 로봇의 감마선 선량을 제한 조건을 100 Gy/h 로 설정한다. 100 Gy/h 이상의 감마선 선량을 환경에서는 저가의 CMOS 카메라 (플라스틱 렌즈 부착) 로는 로봇 플랫폼의 구동 상태를 정확히 판단하는 것이 어려울 것으로 예측되기 때문에, 로봇 조작의 신뢰성을 담보할 수 없다. 향후, CMOS 공정 기술이 발전하여 IT 소자들의 내방사선(감마선) 특성이 개선되면 감마선 선량을 제한치를 상향 조정할 수 있다.

**3. 원자로 노심용융 시작시점의 감마선 선량을**

원자력 신안전 규제기준에 입각하여 재 가동 승인 심사를 받기 위해 일본의 원자력 사업자는 일본 원자력 규제위원회에 중대사고 대처능력에 대한 적합성 심의보고서를 제출하였다. 심의 보고서에는 17 개 이상의 가상 중대사고 시나리오들에 대한 대응 수단 (절차 포함)들이 제시되었으며, 원자력 규제위원회는 이들 대응수단들의 적합성을 평가하여, 제시된 규제 (안전) 기준을 만족하면 재 가동을 허가한다. 또한, 원자력발전소 운영자는 4 개의 중대사고 발생 시나리오에 따라 원자로 노심 용융시점의 원자로 격납건물 내 감마선 선량을 추이를 계산하였다. 표 2 에 이를 나타

낸다[3]-[8]. 표 2로부터, 후쿠시마 원전사고 사례와 같은 4 번째의 중대사고 시나리오 (SBO 에 이은 터빈구동 보조급수 실패) 경우를 제외하고는, 노심이 용융되기 시작하면 중대사고 완화를 위한 안전계통 조작용을 위해 원자로 격납건물내부로 로봇이 진입할 수 없음을 알 수 있다. 이는 노심 용융개시시점의 원자로 격납건물내부의 감마선 선량을 로봇 탑재 카메라의 감마선 선량을 제한치 (100 Gy/h) 를 크게 초과하기 때문이다.

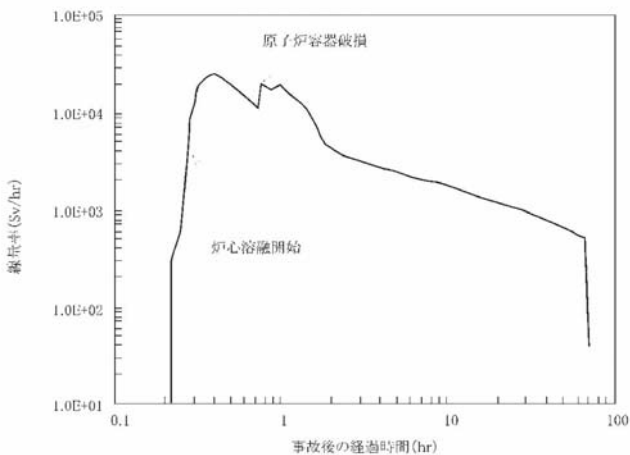
<표 2> 노심용융 개시시점의 원자로 격납건물 내부 감마선 선량율 (Sy/h)

중대 사고 시나리오	Sendai 1&2	Genkai 3&4	Ohui 3&4	Takahama 3&4	Ikata 3	Tomari 3
1	1,900	2,200	4,900	190	2900	1,400
2	680	3,300*	11,000*	270*	1200	1,100
3	240	260	1,400	3,400	690	94
4	49	61	120	140	110	38

1: 대형 LOCA + ECCS 재순환계통/원자로 격납건물 살수 실패  
 2: 소형 LOCA + ECCS 주입계통/원자로격납건물 살수 실패  
 2\*:중형 LOCA + ECCS 주입계통/원자로격납건물 살수 실패  
 3: 소형 LOCA + ECCS 재순환계통/원자로 격납건물 살수 실패  
 4: SBO + 터빈구동 보조급수 실패

LOCA : Loss of Coolant Accident, 원자로 냉각재 상실사고  
 ECCS : Emergency Core Cooling System, 비상 노심냉각 계통  
 SBO : Station Black Out, 전 교류동력전원 상실

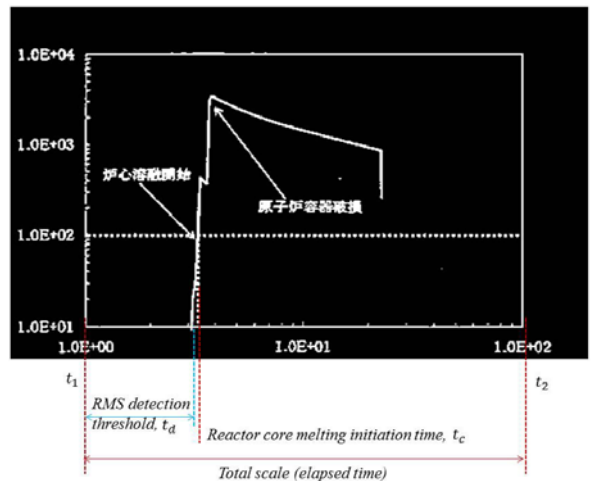
그림 4 는 일본 玄海(Genkai) 3&4 호기 (118 만 kW) 의 가상 중대사고 시나리오 (중형 LOCA + ECCS 주입계통 및 원자로격납건물 살수 실패) 하에서의 원자로 격납건물내부의 감마선 선량을 추이를 나타낸 것이다.



(그림 4) Genkai 3&4 호기의 중대사고 발생시 원자로 격납건물내부의 감마선 선량을 추이

그림 4 에서 X 축은 중대사고 발생시점 부터의 경과시간을 나타내고, Y 축은 원자로 격납건물 상부에 위치한 고 선량 대역 (high range, 1Sv/h ~ 100 kSv/h) 방

사선 감시계통에 의해 검출되는 감마선 선량을 나타낸 것이다. 그림 4로부터 표 2 에 나타난 2 번째 중대사고 시나리오의 경우, 사고 발생후 13 분 경에 고선량 대역 방사선감시계통에 의해 감마선이 검출되기 시작해서 3 분 후인 16 분 경에 노심용융개시시점의 선량율인 3.3 kSv/h 에 도달함을 알 수 있다. 이와 같은 중대사고 시나리오하에서는 원자로 격납건물내에서 로봇에 의한 중대사고 완화를 위한 안전계통기기의 대응조작 (계기판 판독 및 밸브 개방/폐쇄) 시간으로 로봇탑재 CMOS/CCD 카메라의 감마선 선량을 제한치를 고려할 경우 13 분에 지나지 않음을 알 수 있다. 본 논문에서는 여러가지 중대사고 시나리오 조건하에서의 로봇 대응시간을 계산하기 위해 영상판독기법을 이용하였다. 사업자가 제출한 심의 문서 (PDF 파일) 중에서 원자로 격납건물내부의 선량을 추이를 나타낸 페이지 들을 개별 파일로 추출하고, 이를 영상처리하기 위해 이미지 (JPG) 파일로 변환하였다. 그림 5 는 후쿠시마 원자력발전소 사고와 비슷한 중대사고 시나리오 (SBO + 터빈구동 보조급수실패) 하에서의 일본 Ikata (伊方) 3 호기 (89 만 kW) 의 원자로격납건물내 선량을 추이를 영상 변환한 것이다.



(그림 5) Ikata 3 호기의 중대사고 발생시 원자로격납 건물내부의 감마선 선량을 추이

그림 5 의 X 축에서 고선량 대역 방사선감시계통 감지기의 검출가능시점을  $t_d$ , 노심용융시점을  $t_c$  로 정의한다. 그리고  $T_{ls}$  를 X 축상의 경과시간 log scale 의 크기를 나타낸다. 그림 5 에서  $T_{ls}$  는 2 이다. 영상처리에 의하여  $t_c$  는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_c = t_1 \cdot 10^{T_{ls} \cdot t_{c\_pxl}} \quad (1)$$

$$t_{c\_pxl} = \frac{l_{c\_x\_coord} - l_{1\_x\_coord}}{l_{2\_x\_coord} - l_{1\_x\_coord}} \quad (2)$$

식 (2) 에서  $l_{c\_x\_coord}$  는 그림 5 의 영상에서 노심용융시작 시점의 X 축 영상좌표를 나타낸다. 식 (1)과 마찬가지로  $t_d$  도 아래와 같이 계산된다.

$$t_d = t_1 \cdot 10^{T_{1s} \cdot t_d \cdot \rho_{xl}} \quad (3)$$

$$t_{d\_pxl} = \frac{l_{d\_x\_coord} - l_{1\_x\_coord}}{l_{2\_x\_coord} - l_{1\_x\_coord}} \quad (4)$$

표 3에 Ikata 3 호기 원자력발전소 운영자가 제시한 중대사고 시나리오상의 원자로격납건물내부의 감마선 선량을 추이 그래프를 영상판독한 결과를 나타내었다.

<표 3> Ikata 3 호기의 중대사고 시나리오에 따른 노심용융 개시시점의 감마선 선량을 도달시간

중대 사고 시나리오	Dose rate (Sv/h)	$t_d$	$t_c$	선량을 증가율 (Sv/h/m in)	Response Time
1	2,900	58.60 min	66.62 Min	361.4	58 min.
2	1,200	59.92 min	67.71 min	153.97	59 min.
3	690	5.94 hour	6.3 Hour	31.16	5.9 hour
4	110	3.07 hour	3.31 hour	7.76	3.3 hour

1: 대형 LOCA + ECCS 계순환계통/원자로 격납건물 살수 실패  
 2: 소형 LOCA + ECCS 주입계통/원자로격납건물 살수 실패  
 3: 소형 LOCA + ECCS 계순환계통/원자로 격납건물 살수 실패  
 4: SBO + 터빈구동 보조급수 실패  
 $t_d$  : 고선량 대역 방사선감지계통 감지기의 초기 검출시간  
 $t_c$  : 노심 용융개시시점의 감마선 선량에 도달하는 경과시간

LOCA : Loss of Coolant Accident, 원자로 냉각재 상실사고  
 ECCS : Emergency Core Cooling System, 비상 노심냉각 계통  
 SBO : Station Black Out, 전 교류동력전원 상실

표 3에서 선량을 증가율은  $t_d$  (고선량 대역 방사선 감지기 초기 검출시간) 에서의 감마선 선량으로부터  $t_c$  (노심용융 시점) 의 감마선 선량의 증가율을 나타낸 것이다.

$$Rate_{Doserate} = \frac{Doserate_{t_c} - Doserate_{t_d}}{t_c - t_d} \quad (5)$$

표 3에 나타낸 바와 같이 1 번 시나리오의 경우, 원자로 격납건물내의 고선량 방사선 감지기가 감마선 선량율(10Sv/h) 을 감지한 시점 (58.6 분) 부터 노심용융시점(2,900 Sv/h, 66.62 분) 까지 8 분 정도밖에 소요되지 않으며, 이때의 감마선 선량을 증가율은 분당 361 Sv/h 비율로 증가하는 것을 나타낸다. 표 3에 나타낸 1 번 시나리오의 경우, 중대사고를 완화하기 위해 로봇이 원자로 격납건물내부로 진입하여 원자로 안전계통의 주요 기기를 조작하여 사고를 완화할 수 있는 시간 (대응시간, response time) 은 58 분임을 의미하고, 4 번 시나리오의 경우 3.3 시간 정도 대처할 수 있는 시간이 확보됨을 나타낸다. 표 3의 계산결과로부터 중대사고가 발생되어, 노심용융이 개시되면, 로봇이 원자로 격납건물내부에서 사고 완화를 방지하기 위해 수행할 수 있는 역할이 제한됨을 의미한다. 따라서, 중대사고를 완화하기 위해서는 노심용융이 일어나기 전에 로봇이 신속하게 투입되어

사고완화를 위한 응급조치들이 취해져야 함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 고선량 감마선 환경하에서의 로봇 탑재 CCD/CMOS 카메라의 관측 성능을 고려하여 100 Gy/h 를 감마선 선량을 제한조건으로 설정하였다. 그리고, 재 가동 승인심사를 받기 위해 일본의 원전 운영자들이 제시한 PWR (가압경수로) 원전의 중대사고 대책 적합성 평가문서에 나타난 노심용융개시 시점의 원자로 격납건물내 감마선 선량을 추이 계산결과를 영상판독하여 로봇의 대응시간을 계산하였다. 계산결과로부터 중대사고가 발생되어, 노심용융이 개시되면, 로봇이 원자로 격납건물 내부에서 사고완화를 방지하기 위해 수행할 수 있는 역할이 제한됨을 알 수 있었다. 따라서, 중대사고를 완화하기 위해서는 노심용융이 일어나기 전에 로봇이 신속하게 투입되어 사고완화를 위한 응급조치 (안전계통의 현장 계기 판독 및 주요기기 현장조작) 들이 수행되어야 한다.

참고문헌

[1] Nuclear Regulation Authority, “New Regulatory Requirements for Light-Water Nuclear Power Plants”, 2013, <http://www.nsr.go.jp/>

[2] K. Nagatani, S. Kiribayashi, Y. Okada et al., “Redesign of rescue mobile robot Quince—toward emergency response to the nuclear accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station on March 2011,” in Proceedings of the 9th IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR '11), pp. 13–18, Kyoto, Japan, November 2011.

[3] (주)四国電力, “伊方発電所 3号炉 重大事故等対策の有効性評価に係る成立性確認”, 2013. 8.29

[4] (주)北海道電力, “泊発電所 3号機 重大事故等対策の有効性評価 成立性確認”, 2013. 8.20

[5] (주)九州電力, “玄海原子力発電所 3号炉及び 4号炉 重大事故等対策の有効性評価 成立性確認”, 2013. 8.15

[6] (주)九州電力, “川内原子力発電所 1号炉及び 2号炉 重大事故等対策の有効性評価 成立性確認”, 2013. 8.20

[7] (주)関西電力, “大飯 3号炉及び 4号炉 重大事故等に対する対策の有効性評価の補足説明”, 2013.10.01

[8] (주)関西電力, “高浜 3号炉及び 4号炉 重大事故等に対する対策の有効性評価の補足説明”, 2013. 10.24