

해체 방사성금속폐기물량 감소를 위한 제염기술 조사 및 위해도 평가 연구

김동민, 이상헌, 신승수, 송종순*

조선대학교, 광주광역시 동구 필문대로 309

*mfest@naver.com

1. 서론

원자력발전소가 운영되는 동안 필연적으로 방사성폐기물이 발생되고, 영구정지에 따른 해체 시에는 방대한 양의 방사성폐기물이 발생한다. 발생한 방사성폐기물은 임시저장소에 저장되며 저준위와 극저준위 방사성폐기물은 관리절차에 따라 영구 처분장에 처분된다. 이러한 일련의 절차를 통해 발생하는 모든 방사성폐기물을 처리/처분하기 위해서는 많은 인력과 높은 처분장 수용력을 필요로 하며 이는 결과적으로 경제적 문제를 야기시킨다. 이와 같이 원전해체 시 발생하는 방사성폐기물은 제염을 통해 자체처분을 수행한다면 발생량을 상당히 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 이에 따라 본 논문에서는 원전해체 시 제염을 통한 방사성폐기물량 감소를 목표로 실제 적용 가능한 제염기술에 대해 해외사례를 기반으로 제염계수(DF)를 분석하였으며 RESRAD-RECYCLE 전산코드를 활용하여 위해도 평가를 수행하였다.

2. 본론

2.1 물리적 제염기술 및 화학적 제염기술 소개

제염은 원전 해체를 위한 가장 중요한 절차이다. 제염을 통해 해체 작업자의 피폭선량을 감소시키고, 잠재적인 방사성물질의 누설과 이를 작업자가 흡입하는 것을 방지하고, 발전소 일부 부품을 재활용 할 수 있게 하고, 폐기물의 관리를 용이하게 해주는 목적을 달성할 수 있다. 원전 해체 시 제염방법은 화학적 제염과 물리적 제염 방법으로 나눌 수 있다.

2.1.1 화학적 제염기술

화학적 제염은 주로 표면에 고착화된 오염물질을 제거하기 위해 사용하는 제염방법으로 다음과 같은 기술들이 있다.

- 킬레이트 유기산(Chelation and organic acids)
- 무기산 및 관련 화학작용제(Strong mineral acids and related materials)
- 화학포말 및 화학 겔(Cheical foams and gels)
- 산화제 및 환원제(Oxidizing and reducing agents)

- 화학정화기술(TechXtract)

2.1.2 물리적 제염기술

물리적 제염은 기계적 제염이라고 불리기도 하며 Grinding, Blasting, Scabbling, Shaving, 코팅제거 등의 과정을 통해 오염된 표면에서 방사성오염물질을 제거하기 위해 사용하는 제염방법으로 다음과 같은 기술들이 있다[1].

- 드라이아이스 블라스팅(Dry ice blasting)
- 건조 진공 세척(Dry vacuum cleaning)
- 전기 유체식 스캐블링(Electro-hydraulic scabbling)
- EN-VAC 로봇 벽 스캐블러(En-vac robotic wall scabber)
- 그릿 블라스팅(Grit blasting)
- 고압수(High pressure water)
- 소프트 미디어 블라스트 세척(Soft media blast cleaning)
- 스팀 진공 세척(Steam vacuum cleaning)

2.2 해외사례에 따른 제염기술 분석

원전해체 시 제염을 통한 자체처분을 수행하기 위해서는 적절한 제염기술을 선정해야 한다. 해체 시에는 매우 낮은 수준의 방사능 준위를 얻기 위해서 강도 높은 방법을 사용하여 제염을 수행하는 것이 일반적이다. 또한 제염과정에서 2차 폐기물 발생량과 해체 설비의 재활용 여부에 따라 적용되는 제염 방법들이 달라질 수 있다[1].

해외사례에 따르면 독일 KWB-B(Biblis B)에서 Chelation&Organic Acids 제염법을 이용하여 원자로 냉각재 펌프 Inlet nozzle을 13 시간 동안 제염한 결과 제염계수(DF)는 100(제염율 99%)까지 가능한 것으로 제시되었다[2]. Chelation&Organic Acids 제염법은 유기화합제를 금속 이온에 결합시키는 것으로 화학제와 결합된 금속 이온은 불용 상태의 금속으로부터 분리되어 용액으로 이동되고 제거된다[3]. Chelation&Organic Acids 제염법을 이용하여 제염을 수행할 경우 2차 폐기물인 방사성화학폐액이 발생한다. 2차 폐액을 저감시키기 위한 방법으로는 중화, 침전 기술을 접목시킨 폐기물 처리 공정 등이 있다. 이러한 처리 공정은 용액 내 금속 이온을 제거하며, 제염 후 발생한 용액을 재생시켜 재사용한다면 화학 제염 후 발생하는 2차 폐액을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다[4].

2.3 선량평가를 위한 코드선정 및 평가조건

본 논문에서는 자체처분 시 선량평가를 수행하기 위해 RESRAD-RECYCLE 전산코드를 선정하였다. 국내에서는 ICRP60의 평가체계를 적용하기 때문에 코드 내에 입력되어 있는 내부피폭 선량환산인자(Dose Conversion Factor)를 ICRP26에서 ICRP60으로 수정하였다. 호흡에 대한 작업자의 AMAD(Active Median Aerodynamic Diameter)는 ICRP 68에 근거하여 5 μ 의 AMAD를 적용하였다. 또한 국내의 경우 자체처분 시 작업자에 대한 규정 외 명확한 규정이 정해지지 않았기 때문에 코드 내 41개 시나리오 중 무제한 재활용(소비재, 공공재, 재이용) 시나리오 15개를 제외하고 작업자와 제한적 재활용 시나리오 26개를 대상으로 평가를 수행하였다. 평가 대상은 냉각재 계통의 기동, 정지, 봉산희석운전 동안에 체적제어탱크로부터 나오는 유출 유량 및 각종 기기들의 누설수로 구성되는 원자로배수 탱크(RDT) 및 기기배수탱크(EDT) 내용물을 처리하는 설비인 BRS(Boron Recovery System)의 BRT(Boron Recovery System) 배관을 선정하였다. ISOCS 검출기를 이용하여 BRT배관을 계측한 결과 Co-60과 Ag-110m이 검출되었고 본 논문에서는 작업자 시나리오를 대상으로 평가를 수행하기 때문에 작업자에 많은 영향을 미치는 Co-60을 평가대상 핵종으로 선정하였다. BRT 배관의 처리량은 0.024 t이고 평가에 이용된 핵종의 방사능 농도는 핵종특성과 함께 Table 1에 제시하였다. 또한 시나리오 별로 입력되는 입력인자의 민감도 분석을 수행하였고 노출시간을 주요 입력인자로 선정하였다. 노출시간은 처리량에 비례하는데 평가에 적용된 처리량은 0.024 t으로 극 미량이기 때문에 평균 85초이다. 이에 따라 본 논문에서는 노출시간을 보수적인 값으로 수정하여 평가를 수행하였다. 방사성폐기물의 자체처분을 위해서는 국내 원자력법에서 정하고 있는 “방사성폐기물 자체처분에 관한 규정” 개인에 대한 연간 피폭방사선량 10 μ Sv/y 미만, 집단에 대한 총 피폭방사선량이 1 man·Sv/y 미만을 만족해야한다.

Table 1. Nuclides input value of RESRAD-RECYCLE code

Concentration of Nuclides		
(Unit : Bq/g)		
Nuclide	Half-Life	Activity Concentration
Co-60	5.27y	1.66 × 10 ¹

2.4 선량평가결과

국내 체계에 맞게 입력인자를 수정하여 작업자에 대한 선량평가를 수행한 결과 BRT 배관은 “방사성폐기물 자체

처분에 관한 규정” 개인에 대한 연간 피폭방사선량 10 μ Sv/y 미만, 집단에 대한 총 피폭방사선량이 1 man·Sv/y 미만을 만족하는 것을 알 수 있었다. 또한 BRT 배관이 1차계통 내에 있지만 실제 원전해체 시에는 1차계통에서 더 높은 준위의 방사성폐기물이 발생할 것이다. 이러한 경우, 앞에서 설명한 Chelation&Organic Acids 제염법과 같은 제염기술들을 고려한다면 자체처분 허용선량을 만족할 수 있을 것으로 판단된다. 평가 결과는 Fig. 1에 제시하였다.

Scenario	Scenario Ranking (uSv 4 person-yr)					
	Individual		Collective		Cumulative	
	Dose	Rank	Dose	Rank	Dose	Rank
Scrap Delivery: Scrap Cutter	3.97E-02	23	1.19E-07	23	1.19E-07	24
Scrap Delivery: Scrap Loader	1.71E-01	14	3.43E-07	19	3.43E-07	20
Scrap Delivery: Scrap Truck Driver	7.54E-01	5	3.77E-06	3	3.77E-06	4
Scrap Smelting: Scrap Processor	4.06E-02	22	1.22E-07	22	1.22E-07	23
Scrap Smelting: Smelter Yard Worker	5.52E-02	21	5.52E-07	17	5.52E-07	18
Scrap Smelting: Smelter Loader	2.06E-01	13	1.03E-06	13	1.03E-06	13
Scrap Smelting: Furnace Operator	5.90E-01	8	1.79E-06	9	1.79E-06	10
Scrap Smelting: Baghouse Processor	1.31E-01	15	1.31E-07	21	1.31E-07	22
Scrap Smelting: Refinery Worker	6.49E-01	6	1.35E-06	8	1.35E-06	9
Scrap Smelting: Ingot Caster	6.47E-01	7	1.29E-06	11	1.29E-06	12
Scrap Smelting: Small Objects Caster	1.49E+00	3	2.98E-06	4	2.98E-06	5
Scrap Smelting: Ingot Worker	0.00E+00	25	0.00E+00	26	0.00E+00	26
Ingot Delivery: Ingot Loader	4.36E-01	11	8.73E-07	14	8.73E-07	14
Ingot Delivery: Ingot Truck Driver	1.93E+00	1	9.67E-06	1	9.67E-06	1
Initial Fabrication: Storage Yard Worker	7.94E-02	20	7.94E-07	16	7.94E-07	16
Initial Fabrication: Sheet Baker	1.10E-01	16	1.66E-06	10	1.66E-06	11
Initial Fabrication: Coil Baker	5.42E-01	9	5.42E-07	18	5.42E-07	19
Final Fabrication: Sheet Handler	1.10E-01	17	2.20E-06	6	2.20E-06	7
Final Fabrication: Coil Handler	5.42E-01	10	2.71E-06	5	2.71E-06	6
Product Distribution: Product Loader	4.36E-01	11	8.73E-07	14	8.73E-07	14
Product Distribution: Product Truck Driver	1.93E+00	1	9.67E-06	1	9.67E-06	1
Product Distribution: Sheet Assembler	1.10E-01	17	2.20E-06	6	2.20E-06	7
Product Distribution: Warehouse Worker	2.91E-02	24	1.45E-07	20	1.45E-07	21
Controlled Products: Shield Block	1.97E+00	4	1.27E-06	12	7.51E-06	3
Controlled Products: Radwaste Container	9.41E-02	19	9.41E-08	24	5.58E-07	17
Scrap Transportation: Public Exposure	0.00E+00	25	1.70E-10	25	1.70E-10	25

Fig. 1. Exposure Dose of the Worker by Evaluation.

3. 결론

본 논문에서는 원전 영구정지 후 자체처분을 대비해서 해외사례를 기반으로 제염기술을 분석하였고 이에 따른 시나리오를 적용하여 RESRAD-RECYCLE 전산코드로 작업자에 대한 위해도 평가를 수행하였다. 향후 실제 발생한 원전 해체폐기물을 자체처분하기 위한 평가에 도움이 될 것으로 판단된다. 또한 국내의 경우 방사성폐기물의 자체처분 시 무제한 재활용을 위한 명확한 규정이 정해지지 않았기 때문에 추후 추가적으로 연구할 필요가 있다.

4. 참고문헌

- [1] 한국원자력연구원 “원전 해체 제염기술동향 조사 보고서” (2014).
- [2] Horst-Otto. Bertholdt., “Method for the chemical decontamination of nuclear reactor components,” U.S.Patent, 4,226,640 A (1978).
- [3] 송중순, 정민영, 이상헌, “원전 제염기술 및 해외 경험 분석을 통한 1차 계통 제염 적용 연구”, 한국방사성폐기물학회, 14(1), 45-55 (2016).
- [4] 권미경, 최왕규, 이근우, “화학제염 시 발생하는 2차 폐액 처리 연구”, 한국방사성폐기물학회, 8(2), 65-66 (2010).