

## 후쿠시마 원전 사고와 방사능 제염 기술의 개발



임병우

원자력환경기술개발(주) 대표이사

- 한양대학교 원자력공학 학사
- 서울대학교 원자력공학 석사
- 한국전력기술(주) 원자력기술그룹 그룹장/상무

### 후쿠시마 원전 사고와 처리 대상 방사능 오염물질

금년 3월 11일은, 후쿠시마 원전 사고가 발생한 지 10주년이 되는 날이다. 1979년 미국의 TMI 원전 사고, 1986년 구소련의 체르노빌 원전 사고에 이은, 가장 규모가 큰 원자력발전소 사고였으며, 인구가 밀집된 생활환경권에서의 대형 방사능 누출 사고라는 점에서 특기할 만한 국가적 재난이 되었다.

후쿠시마 원전 사고 이후 일본 정부는 방사능물질에 의한 환경오염에 대응하기 위해 환경성을 중심으로, 「방사성물질에 의한 환경오염에 대한 대처에 관한 특별조치법」에 따라 제염, 오염 폐기물의 처리, 중간 저장 시설의 정비 등의 각종 노력을 펼치고 있다. 특히 환경성의 '감용·재생이용 기술 개발 전략 검토회'를 중심으로, 제거 토양 등(오염 소각재 포함)의 감용·재생이용에 관한 기술 개발, 감용 처리 후 토양 등의

재생 이용, 최종 처분의 방향성 검토, 국민적 이해의 양성 등의 활동에 따른 중장기적인 정책의 수립 등을 추진하고 있다.

환경성의 재생이용전략 대상인 10만Bq/kg를 초과하는 세습 오염 토양 등의 총 발생 예상량은 약 1,330만 $m^3$ 이며, 여기에는 2018년 10월 시점에서 정량적 추정이 어려운 귀환곤란 지역의 제염 등으로 발생할 것으로 예상되는 제거 토양 등은 포함되어 있지 않다. 제거 토양 등은 토양이 약 1,300만 $m^3$ , 소각재가 약 30만 $m^3$ 로 대별되며, 토양은 사질토가 약 700만 $m^3$ , 점성토가 약 600만 $m^3$ 로 추정되고 있다(환경성, “중간 저장 제거 토양 등의 감용·재생이용 기술 개발 전략”, 2019년 3월).

그리고 후쿠시마현 등에 소재하는 일반폐기물(도시 쓰레기) 소각시설에서, 방사성물질 농도가 지정폐기물 기준인 8,000Bq/kg을 초과하는 소각재는 현재, 29만 톤으로 집계되었다(환

경성, 방사성물질 오염폐기물 처리 정보 사이트, 2020년 12월 말). 또한 지정 농도 이하라도, 개별 처분장의 기준에 따라서는 처분할 수 없는 것도 있어, 이들을 포함하여 방사성세슘으로 오염된 소각재는, 각지의 클린센터 등에 보관되어 있지만, 보관 공간에 한계가 있어서 포화 상태가 되어 있는 곳도 적지 않다. 8,000Bq/kg 이상은 중간 저장 시설로 이송하여 장기간 보관할 예정으로 진행하고 있지만, 30년 이내에 후쿠시마현 밖으로 처분하기 위해서는 반드시 소각재를 감용화해야 한다고 생각한다.

한편, 후쿠시마 원전에서는 빗물과 지하수 등에서의 유입수가 원자로건물과 터빈건물을 거치면서 방사능이 포함된 오염수가 발생하고 있으며, 발생량은 2015년도 약 490m<sup>3</sup>/일에서 2018년도에는 약 170m<sup>3</sup>/일로 감소하고 있다. 이 오염수에는 세슘과 스트론튬 등을 포함한 62개 방사성핵종이 포함되어 있으며, 방사능 제거 장치(ALPS, KURION, SARRY)로 트리튬을 제외한 방사능을 제거한 처리수를 원전 부지 내의 대형 저장 탱크에 보관하고 있다. 보관 중인 약 130만 톤의 처리수에는 트리튬이 포함되어 있으나 분리제거가 곤란하여 희석한 후 바다로 방출할 방침이다(동경전력, 후쿠시마 제1원전의 오염수 처리 대책 상황, 2019년 5월 14일).

이러한 상황에서 원자력환경기술개발(주)(NEED, Nuclear Environment Engineering Development)은 오염 소각재 제염 기술을 개발하여 일본 현지에서 제염설비성능 실증시험

을 실시하고, 일본의 제염 해체 전문 기관인 공익재단 원자력백엔드추진센터(RANDEC)가 제염 설비의 성능을 평가하였다. 본고에서는 자체 개발한 제염의 핵심소재인 고효율 세슘 흡착재와 이를 기반으로 하는 소각재 제염 설비를 소개하고자 한다.

### 제염의 핵심 소재, 고효율 세슘 흡착재 (HECA, High efficiency cesium adsorbent)

후쿠시마 원전 사고로 환경에 누출된 방사능들 중에서 가장 문제가 되는 것은 방사성세슘(Cs-137)인데, 이것이 넓은 범위로 확산되어 국토가 오염되었다. 방사능은 삼림, 토양, 호수, 강을 비롯해 생활환경을 오염시켜, 일본 정부 차원의 방사능 제염을 추진하고 있으나, 수십 년간 방사선 피해를 입을 것으로 예상되고 있다.

세슘은 수용성이면서, 또한 650℃ 이상의 고온에서 휘발하는 성질을 갖고 있어서 오염물에서 세슘을 분리 회수하기 위해서는, 통상적으로 세정법과 용융법을 이용한 제염 방법을 이용하고 있다. 그러나 용융법을 이용한 제염 기술은, 많은 에너지가 투입되고 반응촉진제가 첨가되며, 분리한 세슘을 고정하기 위하여 고농도 폐기물을 소결 고화하는 프로세스를 적용하기 때문에, 제염 설비의 대형 복잡화에 따른 고비용과 폐기물의 감용이 불리하여 실용화에 한계가 있다.

또한 통상의 세정법을 이용한 제염 기술은, 세

습 흡착재로서 제올라이트나 세습 흡착능이 우수한 프루시안 블루(prussian blue)를 사용하고 있으나, 세습을 흡착한 프루시안 블루 나노입자를 회수하기 위하여 응집침전법을 사용하는 프로세스에 곤란한 문제가 있기 때문에 이 방법은 실용적인 제염 기술로서 성공하지 못하였다(환경성, 감용·재생이용 기술 실증의 현상과 향후 예정, 2019.12.19).

따라서 방사능세습 오염수에서 세습을 효과적으로 회수하기 위해서는 오염수에 혼재한 다양한 경쟁 이온 중에서도 선택적으로 세습을 흡착 고정해야 하고, 세습을 흡착고정한 흡착재 자체의 회수가 용이해야 한다. 또한 방사성폐기물로 취급해야 할 세습이 농축된 흡착재는 처리 처분의 관점에서 부피 감용성이 우수해야 하고, 장기적인 안전관리가 가능하여야 한다.

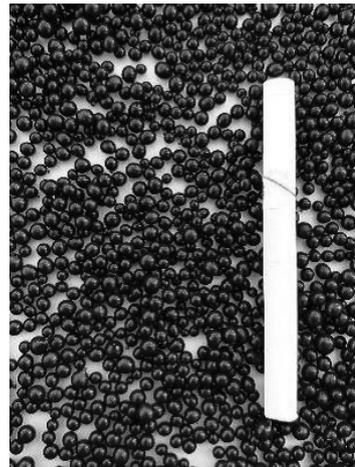
이러한 문제점들을 해결하기 위하여 원자력 환경기술개발(주)은 프루시안 블루를 기반으로 하는 비즈 형태의 고효율 세습 흡착재(HECA, High Efficiency Cesium Adsorbent)를 대량 생산하는 제조 기술을 개발하였다.

고효율 세습 흡착재는 세습에 대한 고선택적 흡착 성능(99% 이상), 세습 고정화의 안정성, 폐기물량 고감용률(90%), 폐기물관리의 장기 안전성의 메리트를 갖고 있으며, 따라서 HECA를 사용하는 제염 기술은 제염 설비의 간결한 운전 프로세스가 가능하여 저비용으로 방사능오염수, 오염소각비산재, 오염 토양 등에서의 세습 제거에 효과적으로 사용할 수 있다.

- 프루시안 블루 기반의 고효율 세습 흡착재(HECA)

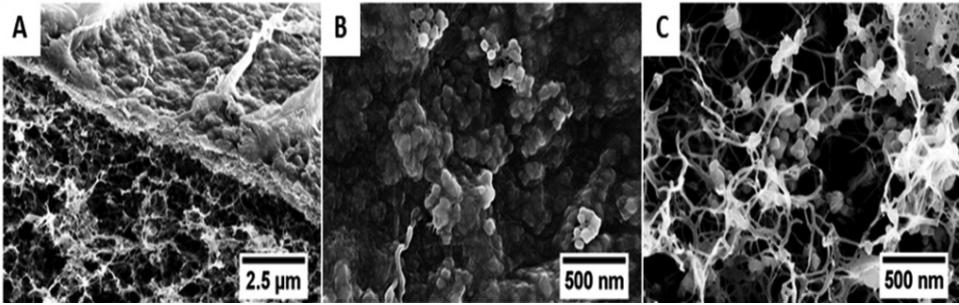
프루시안 블루(prussian blue)는 감청색의 안료로서, 균일한 격자 구조를 갖는 페로시아화철의 수화물이다. 프루시안 블루의 격자 한 변의 길이는 약 0.5nm로서, 水和세습의 크기와 비슷하므로 방사성세습이온 흡착에 선택성이 특히 우수하다.

원자력환경기술개발(주)은 프루시안블루를 담지한 셀룰로오스 하이드로겔이 수용액 중에서 세습을 고효율적, 고선택적으로 제거할 수 있음을 확인하고, 간단하고 경제적인 제조가 가능한 고효율 세습 흡착재(HECA)의 대량생산 기술을 개발하였다.

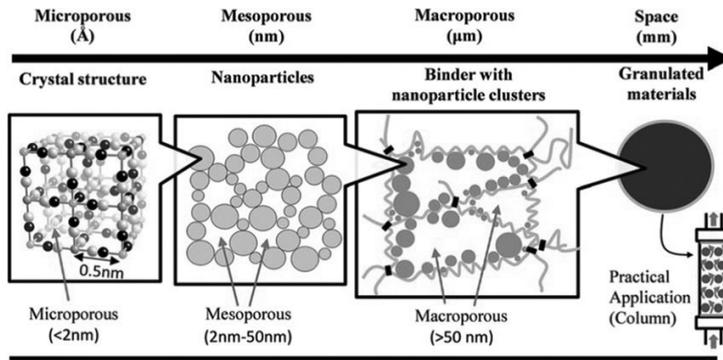


[그림 1] HECA 실물 사진

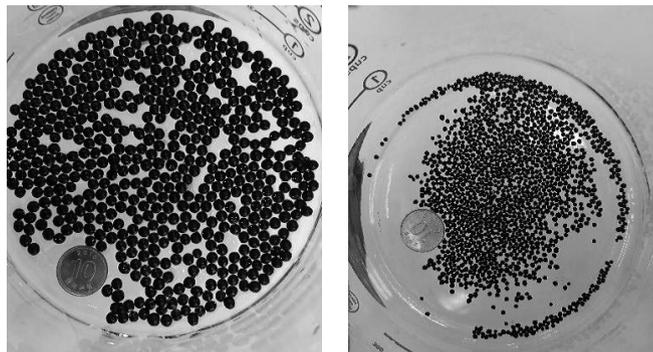
[그림 1]은 프루시안 블루를 담지한 구슬 형태의 고효율 세습 흡착재 실물 사진이며, [그림 2]는 3D 망상 구조로 흡착반응 면적을 극대화한 HECA의 SEM 이미지다.



[그림 2] HECA의 SEM 이미지 (A) 단면 (B) 표면 (C) 내부



[그림 3] PB를 담지한 고효율 세습 흡착재의 3D 망상 구조와 HECA를 충전한 카트리지가 이미지



[그림 4] 습윤 상태의 흡착재와 건조 상태의 흡착재(체적이 1/10로 감용)

[그림 3]은 HECA의 다중 다공성과 카트리지에 충전한 모습을 나타내는 이미지이며, 프루시안블루 결정 구조의 공극(Microporous)과 나노입자의 공극(Mesoporous) 및 바인더의 공극(Macroporous)을 통해 오염수의 유로가 형성되는 구조다.

[그림 4]는 습윤 상태와 건조 상태의 흡착재 사진이며, 세습 오염수에서 세습을 흡착한 후에 건조하면 체적이 대폭 감소되므로 폐기물의 저장이나 처분 관점에서의 관리가 유리하다.

구분		1일차					2일차				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
흡착율(%)	Prussian blue	99.99	99.98	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99	99.98
	Zeolite	99.80	97	96	94	90	87	83	78	73	66

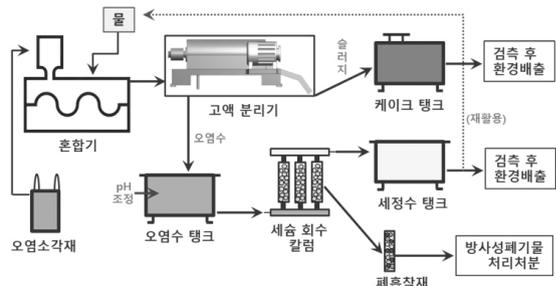
구분		3일차					4일차				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
흡착율(%)	Prussian blue	99.99	99.99	99.99	99.97	99.99	99.99	99.98	99.99	99.98	99.99
	Zeolite	73	66	57	53	48	55	41	40	35	27

- 고효율 세슘 흡착재(HECA)와 제올라이트 흡착재의 성능 비교

프루시안 블루 기반의 고효율 세슘 흡착재(HECA)와 제올라이트 기반의 흡착재에 대한 세슘의 흡착 능력을 비교하였다. 실험에 사용한 흡착재는 고효율 세슘 흡착재(HECA)와, 일본 (주) 카사이 제품인 제올라이트 기반의 섬유형 방사성 세슘 흡착재를 대상으로 하였으며, HECA와 제올라이트 흡착재의 흡착률을 비교하기 위해 1시간 간격으로 하루 5회 4일간 총 20회에 걸쳐 시료를 채취하여 분석하는 등 동일한 방법으로 시험을 하였다. 이들을 사용하여 경쟁이온이 다량 함유된 소각재 세정수를 시료로 비교·분석한 결과, HECA는 세슘 선택성 흡착재로서 뛰어난 성능을 보였다. 프루시안 블루 기반의 고효율 세슘 흡착재(HECA)는 평균 99.99%의 일정한 흡착 성능을 유지한 반면, 제올라이트 기반의 섬유형 세슘 흡착재는 통수량이 증가할수록(시간이 갈수록) 흡착률이 저하되는 현상(평균 약

52%)을 볼 수 있었다.

- 세정법에 의한 오염 소각재 제염 설비와 실증시험 [그림 5]는 고효율 세슘 흡착재를 사용하여 오염 소각재를 제염하는 프로세스 흐름도이며, [그림 6]은 이동형 소각재 제염 설비의 성능실증시험 현장 모습이다.

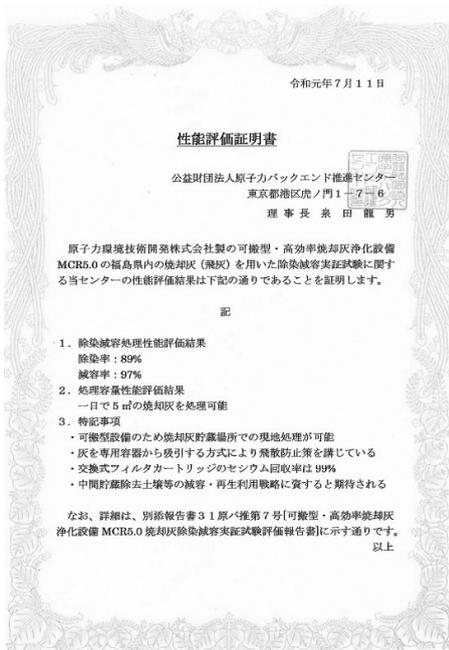


[그림 5] 소각재 제염 프로세스

실증시험을 한 결과, 일본의 제염 해체 전문 기관인 원자력백엔드추진센터(RANDEC)가 발급한 성능평가증명서는 제염률 89%, 감용률 97%, 흡착재 필터의 세슘회수율 99%의 성능을 평가하였다.



[그림 6] 이동형 소각재 제염 설비 실증시험 현장(일본 후쿠시마현)과 흡착재 카트리지 모듈



### 맺음말

원자력환경기술개발(주)은 세슘 흡착능이 우수한 프루시안 블루를 기본 소재로 사용하여 고효율 세슘 흡착재(HECA)를 대량생산할 수 있는 제조 기술을 개발하였다.

흡착재의 회수 간편성을 고려하여 비즈 형태로 제조하였으며, 세슘흡착반응 면적을 최대화하기 위하여 흡착재의 내부는 다중의 미세공극을 극대화한 흡착재다.

세슘을 흡착한 흡착재를 100℃이하의 낮은 온도에서 건조하면 흡착재의 고형물이 약 10%이므로 부피가 1/10로 축소되어 세슘을 고정된 상태에서 폐기물이 감용되므로 방사성폐기물의 저장 및 최종 처분 관점에서 대단히 유용하다.

고효율 세슘 흡착재를 기반으로 하는 세정법에 의한 제염 기술은 프로세스가 간결해지므로, 제염작업 피폭선량이 최소화되며 흡착재 건조시 감용률이 높아서 처분 비용이 저감되는 등 종합적인 제염 비용을 최소화할 수 있다.

이러한 세슘 흡착재를 사용하는 제염 프로세스에 의해 방사성세슘 오염수, 세슘오염소각비 산재, 세슘 오염 토양 등 환경 중의 방사성세슘의 제거에 효과적으로 대응할 수 있을 것으로 기대된다. **KMIF**