

원전해체 콘크리트 폐기물 처분 현황 및 연구 사례

Status and Research Progress of Nuclear Decommissioning Concrete Waste Disposal



배성철 Sung-Chul Bae
 한양대학교 건축공학부
 조교수
 E-mail : sbae@hanyang.ac.kr



박재연 Jaeyeon Park
 한양대학교 건축공학부
 석박통합과정
 E-mail : p9206@hanyang.ac.kr

1. 머리말

국제원자력기구 IAEA의 원전 정보 시스템(IAEA PRIS, International Atomic Energy Agency The Power Reactor Information System)에 따르면¹⁾, 2020년 5월 기준 전 세계에서 운영 정지된 원자력발전시설은 188기로 대부분이 수명에 도달하거나 경제성 측면으로 해체가 진행되었으며, 이들 중 현재 약 20기 정도만이 해체가 완료되었다. 한편 전 세계 가동 중인 원전 441기 중 평균 수명이 30년을 넘은 노후 원전의 비율은 68.0%, 40년 이상 된 원전은 24.5% <그림 1>로 향후 전 세계 원전 해체 시장은 2110년까지 약 368조, 연평균 약 3.9조 원의 가치를 창출할 것으로 추정됨에 따라 국내 원전 해체 산업 역시 해외 시장 경쟁력 확보 방안을 조속히 수립할 필요가 있다. 2011년 3월에 발생한 후쿠시마 원자력발전소 사고 이후 예상치 못한 원전의 조기해체에 대한 사전

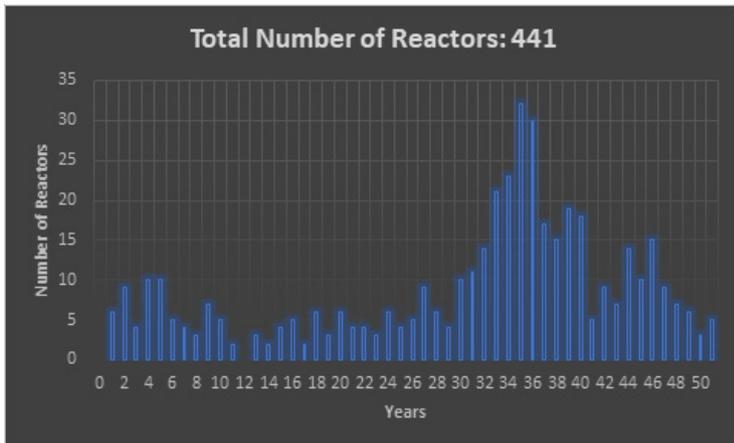


그림 1. 가동 원전의 연령 (IAEA PRIS)

대비 필요성이 강조되고 있으며 우리나라 역시 고리 1호기의 해체가 결정되었고, 월성 1호기 또한 2019년 12월 영구정지가 확정되었다. 국내에는 현재 24기의 원전이 가동 중이며 7기의 원전(고리2, 3, 4, 한빛1, 2, 한울1, 2)이 30년 이상 운행되어 이들은 국가 정책의 큰 변화가 없을 시 10년 이내에 모두 해체가 결정될 예정이다. 지난 30년 동안 원자력 발전이 효율적인 에너지원 역할을 잘 해주었지만 노후 원전의 발전 수명을 다한 후 해체될 때 발생하는 금속 폐기물과, 콘크리트 폐기물, 액체 폐기물 등 종류도 다양하며 발생량 또한 방대하다. 여기에

서는 원전 해체 시 발생하는 각종 폐기물중 콘크리트 폐기물의 처분 현황 및 폐기물 제염, 부피감용 및 안정화 방안에 관한 연구 사례에 대하여 간략하게 소개하고자 한다.

2. 해체 콘크리트 폐기물 처분 현황

2.1 방사성 폐기물의 분류 기준 및 처분 방식

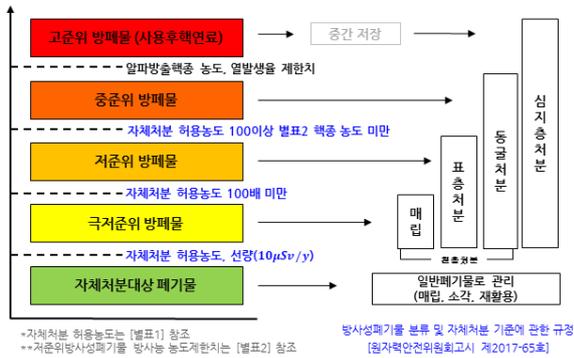


그림 2. 방사성 폐기물 분류 및 처분 방식

원전해체 완료국들의 선례를 비교해 보면 전체 해체 비용의 상당량을 차지하는 것이 방사성 폐기물 처분 비용이다. 국내 방사성 폐기물의 분류기준 및 처분 방식은 그림 2에 나타내었다. 또한 [표1, 2]에 원자력안전위원회에서 정한 방사성 핵종 허용농도 (Bq/g)를 정리하여 나타내었다. 한국원자력환경공단에서 발표한 200 L 드럼 당 중 저준위 방사성 폐기물 관리 비용 <그림 3>은 해마다 증가하는 추세이며 이는 세계 최고 비용에 준한다. 해체 시 발생하는 방사성 폐기물은 대부분이 극저준위 및 저준위 폐기물이며 오염도가 매우 낮기 때문에 분류와 제염작업을 통해 자체처분대상 폐기물로 허용농도를 감소시켜 매립, 소각, 재활용하여 폐기물 처리비용을 절감할 수 있다.

2.2 IAEA의 방사성 폐기물 처분 가이드라인

원자력 시설 해체로 인해 발생하는 대부분의 콘크리트는 비활성 상태이며, 이는 규제해제 되어 일반적인 방법을 사용하여 폐기될 수 있다. 적절한 분리 및 제염 기술을 적용한다

[표 1] 원자력안전위원회 고시 제2017-65호 별표 1

방사성핵종	허용농도 (Bq/g)
I-129	0.01
Na-22, Sc-46, Mn-54, Co-56, Co-60, Zn-65, Nb-94, Ru-106, Ag-110m, Sb-125, Cs-134, Cs-137, Eu-152, Eu-154, Ta-182, Bi-207, Th-229, U-232, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-242, Pu-244, Am-241, Am-242m, Am-243, Cm-245, Cm-246, Cm-247, Cm-248, Cf-249, Cf-251, Es-254	0.1
C-14, Na-24, Cl-36, Sc-48, V-48, Mn-52, Fe-59, Co-57, Co-58, Se-75, Br-82, Sr-85, Sr-90, Zr-95, Nb-95, Tc-96, Tc-99, Ru-103, Ag-105, Cd-109, Sn-113, Sb-124, Te-123m, Te-132, Cs-136, Ba-140, La-140, Ce-139, Eu-155, Tb-160, Hf-181, Os-185, Ir-190, Ir-192, Tl-204, Bi-206, U-233, Np-237, Pu-236, Cm-243, Cm-244, Cf-248, Cf-250, Cf-252, Cf-254	1
Be-7, F-18, Cl-38, K-43, Ca-47, Mn-51, Mn-52m, Mn-56, Fe-52, Co-55, Co-62m, Ni-65, Zn-69m, Ga-72, As-74, As-76, Sr-91, Sr-92, Zr-93, Zr-97, Nb-93m, Nb-97, Nb-98, Mo-90, Mo-93, Mo-99, Mo-101, Tc-97, Ru-97, Ru-105, Cd-115, In-111, In-114m, Sn-125, Sb-122, Te-127m, Te-129m, Te-131m, Te-133, Te-133m, Te-134, I-126, I-130, I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, Cs-129, Cs-132, Cs-138, Ba-131, Ce-143, Ce-144, Gd-153, W-181, W-187, Pt-191, Au-198, Hg-203, Tl-200, Tl-202, Pb-203, Po-203, Po-205, Po-207, Ra-225, Pa-230, Pa-233, U-230b, U-236, Np-240, U-241, Cm-242, Es-254m	10
H-3, S-35, K-42, Ca-45, Sc-47, Cr-51, Mn-53, Co-61, Ni-63, Cu-64, Rb-86, Sr-85m, Sr-87m, Y-91, Y-91m, Y-92, Y-93, Tc-97m, Tc-99m, Rh-105, Pd-109, Ag-111, Cd-115m, In-113m, In-115m, Te-129, Te-131, I-123, I-125, Cs-135, Ce-141, Pr-142, Nd-147, Nd-149, Sm-153, Eu-152m, Gd-159, Dy-166, Ho-166, Er-171, Tm-170, Yb-175, Lu-177, Re-188, Os-191, Os-193, Ir-194, Pt-197m, Au-199, Hg-197, Hg-197m, Tl-201, Ra-227, U-231, U-237, U-239, U-240, Np-239, Pu-234, Pu-235, Pu-237, Bk-249, Cf-253, Es-253, Fm-255	100
Si-31, P-32, P-33, Fe-55, Co-60m, Zn-69, As-73, As-77, Sr-89, Y-90, Tc-96m, Pd-103, Te-125m, Te-127, Cs-131, Cs-134m, Pr-143, Pm-147, Pm-149, Sm-151, Dy-165, Er-169, Tm-171, W-185, Re-186, Os-191m, Pt-193m, Pt-197, At-211, Th-226, Pu-243, Am-242, Cf-246	1,000
Co-58m, Ge-71, Rh-103m, Fm-254	10,000

[표 2] 원자력안전위원회 고시 제2017-65호 별표 2

방사성 핵종	방사능 농도 (Bq/g)
³ H	1.11E+6
¹⁴ C	2.22E+5
⁶⁰ Co	3.70E+7
⁵⁹ Ni	7.40E+4
⁶³ Ni	1.11E+7
⁹⁰ Sr	7.40E+4
⁹⁴ Nb	1.11E+2
⁹⁹ Tc	1.11E+3
¹²⁹ I	3.70E+1
¹³⁷ Cs	1.11E+6
전알파	3.70E+3



그림 3. 저준위 방사성 폐기물 관리 비용 (200L 드럼 당)

[표 3] IAEA의 PWR(900-1300 MWe 출력) 해체 시 폐기물 발생량 예측

방사성 폐기물	중량(ton)	200L 드럼(개)
방사화 금속	650	546
흑연	-	-
방사화 콘크리트	300	882
오염 금속	3,500	2,941
오염 콘크리트	600	1,765
오염 마감재 (금속판)	1,500	126
해체 잡고체	100	4,353
폐기물 합계	6,200	13,613

면, 처분이 필요한 방사성 물질의 양을 크게 줄일 수 있다. 방사성 폐기물의 최소화를 위하여 IAEA에서는 Technical reports series No.401 (Methods for the minimization of radioactive waste from decontamination and decommissioning of nuclear facilities)에서 1) Source

reduction 2) Prevention of contamination spread 3) Recycle and reuse 4) Waste management optimization의 4가지 영역으로 분류하여 제시하고 있다²⁾. 이는 폐기물 관리 프로그램을 계획하고 이행할 때에 방사성 폐기물의 발생을 가능한 범위에서 최소화하기 위해 노력해야 하며(As low as reasonably achievable, ALARA 원칙), 방사성 핵종의 확산을 최소화해야 하고, 폐기물의 재활용 및 재사용 가능성을 최적화시키기 위해 노력하며, 적절한 처리 기술의 적용을 통해 발생된 방사성 폐기물의 양을 최소화해야함을 뜻한다. 또한, IAEA에서는 900 - 1300 MWe 출력의 PWR 노형의 원전 해체 폐기물 발생량 가이드라인을 약 13,613 드럼으로 제시하였고, 폐기물 종류와 양은 [표 3]에 나타내었다.

2.3 해외 처분 사례

Connecticut Yankee[표 4]와 Maine Yankee 원전[표 5]의 전체 폐기물 발생량 중, Connecticut Yankee에서는 전체의 83.5%, Maine Yankee의 경우 전체의 52%가 콘크리트 폐기물이 차지하는 것으로 조사되었다. 각각의 원전은 운전기간 및 규제기관의 선량 기준치 (국내 0.1 mSv/y)에 따라 콘크리트 폐기물의 발생량의 차이가 있지만 출력과 노형이 비슷하며 고리 1호기 해체폐기물 발생량에 대하여 미국 원전 사례들을 바탕으로 비유적으로 예측 가능하다. 고리 1호기와 유사한 노형과 출력을 지닌 해체 완료된 미국 원전 사례들의 콘크리트 폐기물 발생량을 [표6]에 정리하였다. 이를 통해 같은 PWR(Pressurized water reactor, 가압경수로) 노형의 출력이 비슷한 모델임에도 콘크리트 폐기물 발생량의 상당한 차이를 보인다는 것을 알 수 있다. 이는 운전 중 발생한 다양한 원인과 각 국가 규제기관의 선량 기준치, 해체 과정 중 오염 확산 등의 이유로 차이가 발생하기 때문이며, 창의적인 기술 적용을 통한 폐기물의 제어 및 부피감소에 따른 차이이다.

2.4 국내 콘크리트 폐기물량 예측

2016년도 선원항 평가를 통해 예측된 고리 1호기의 감용 전 해체 방사성 폐기물량은 오염 토양을 제외하고도 약 8만

[표 4] Connecticut Yankee 해체 시 방사성 폐기물 발생량

방사성 폐기물	발생량 (lb)
아스팔트	701,036
1차측 기기 및 저준위 방사성폐기물	2,899,299
건물 철거 후 잔해 및 콘크리트 폐기물	221,650,366
수로에 매설된 폐석	5,927,454
혼합폐기물	132,075
토양	34,100,434
폐기물합계	265,410,664

[표 5] Maine Yankee 해체 시 폐기물 발생량

방사성 폐기물	발생량 (lb)
콘크리트	139,961,469
토양	49,534,624
Commodities	19,316,093
Distributables	2,993,601
대형 기기	5,550,298
폐기물합계	271,306,085

[표 6] 해체 완료 원전 콘크리트 폐기물 발생량 비교

원전 이름	출력 (MWe)	운전기간 (년)	해체 완료	방사능 농도 (Bq/g)
Connecticut Yankee	560	28	2007	221,650,554
Maine Yankee	860	24	2005	139,960,467
Rancho Seco	873	14	2008	60,318,475
Yankee Rowe	167	30	2007	1,382,298
Trojan	1095	16	2006	626,113

[표 7] 고리 1호기 해체 폐기물 예측 발생량

극저준위 폐기물	드럼 수량 (200L)	저준위 폐기물	드럼 수량 (200L)
케이블류	119	케이블류	457
콘크리트 조각	1,488	폐수지 및 폐필터	85
스캐블링 콘크리트	189	콘크리트 조각	1,218
잡고체	2,456	스캐블링 콘크리트	551
유해성 폐기물	65	유해성 폐기물	132
석면	65	석면	712
대형기기	5,408	소형 금속류	41,004
원자로 압력용기	1,293	사용후 저장조 랙	0
소형 금속류	22,207	계	44,158
사용후 저장조 랙	3,188	중준위 폐기물	드럼 수량 (200L)
폐수지 및 폐필터	103	소형 금속류	54
계	36,579	총계	80,791

드럼으로 계산되었다. [표 7] 이 중 콘크리트 폐기물은 극저준위에서 1,677 드럼, 저준위 폐기물에서 1,769 드럼이 발생할 것으로 예측되었다. 하지만 생체 차폐 콘크리트의 Co 및 Eu 불순물 함량에 따라 중준위 폐기물의 발생가능성 또한 존재한다. 우리나라의 고리 1호기 해체 폐기물 처분 목표치인 14,500 드럼을 충족시키기 위해서는 각 폐기물의 종류에 따른 적절한 제염 및 감용 기술이 적용되어야 할 것이며 추가적으로 2차 폐기물을 줄이면서 제염 효율이 높은 신 제염 기술이 필요하다. 특히 금속 다음으로 부피를 많이 차지하는 콘크리트 폐기물의 제염 및 부피감용 신기술이 국내에서 개발된다면, 세계 해체 시장에서 높은 우위를 점할 수 있게 될 것이다.

3. 해체 콘크리트 폐기물 제염, 부피감용 및 안정화 방안 및 연구 동향

3.1 콘크리트 폐기물의 특성

원전용 콘크리트 배합용 바인더로서 콘크리트의 장기 강도 발현 및 균열 감소를 위해 우리나라와 일본에서는 일반적으로 I종 시멘트에 5~30% 수준으로 플라이애쉬를 혼합한 시멘트를 주로 사용하며, 미국에서는 II종 중용열 포틀랜드 시멘트를 사용한다. 또한, 구조물의 역할에 따라 방사선 차폐성능 향상을 위해 자철석, 중정석 등의 중량 골재를 사용하는 경우도 존

재한다. 발전소 설계 특성에 따라 콘크리트 사용량은 매우 다르며, 출력에 따라 원자로 외부의 생체 차폐 콘크리트의 특성도 다르다. 일반적으로 1,000MWe 출력의 PWR의 총 콘크리트 양은 75,000m³으로 알려져 있다. 하지만 실제 원전해체 시 방사성 오염 콘크리트가 예상보다 많은데 이는 대부분이 운영 중 혹은 해체 과정에서 건물 내 누설에 의한 것이다.

방사성 콘크리트 폐기물은 방사화 콘크리트와 표면 오염 콘크리트로 구분된다. 먼저 방사화 콘크리트는 생체 차폐 콘크리트에 존재하며, 시멘트의 불순물인 Co, Eu, Cs 등의 원소가 강한 방사선에 의해 방사화 되어 발생한다. 깊이에 따라 방사능 분포가 지수 함수적으로 감소하며, 노형과 운전기간에 따라 깊이가 10-100mm까지 오염된다. 주요 방사화 핵종으로는 ⁶⁰Co, ¹⁵²Eu, ¹⁵⁴Eu, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs 등이 존재한다. 시멘트 불순물의 방사화 메커니즘은 <그림 4>와 같다. 이를 제외한 나머지 콘크리트 폐기물은 모두 표면 오염 콘크리트로 전체 방사능의 99% 이상이 표면 1mm 이내에 존재하며 주요 핵종은 ⁶⁰Co, ⁶³Ni, ¹³⁷Cs 등이 있다. 다양한 연구들을 통해 콘크리트의 공극을 통해 오염원이 이동하고, 대부분의 핵종은 다공성의 시멘트 페이스트에 흡착된다는 사실이 밝혀졌다⁴⁾. <그림 5>

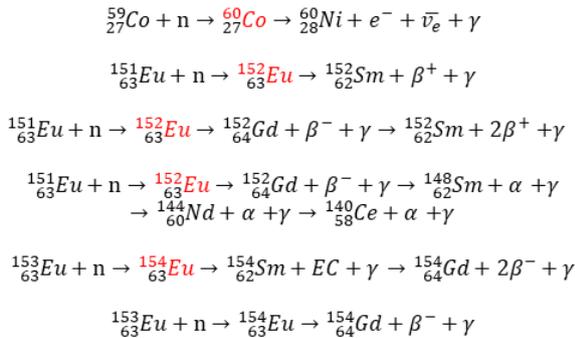


그림 4. 시멘트 불순물의 방사화 메커니즘

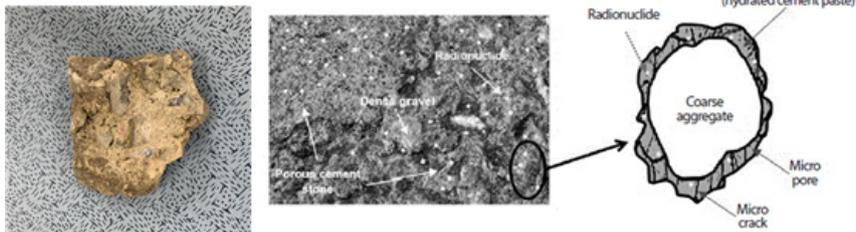


그림 5. 콘크리트 폐기물 미세구조 및 오염⁴⁾

3.2 방사성 콘크리트 폐기물의 제염

[표 8]에 콘크리트 표면 제염 및 절단 기술의 종류와 각각의 장단점이 요약되어 있다. 대표적인 콘크리트 표면 제염 방법은 기계적 제염방법(Scabbling, Milling 등)을 이용하여 오염 부위를 물리적으로 타격하거나 식각하여 제염하는 것이다. 원자력 산업 뿐만 아니라 다양한 현장에서 적용된 경험이 많아 보편적으로 사용되지만 작업자의 숙련도, 기기에서 발생하는 진동, 방사성 핵종과 함께 섞여 발생하는 분진들에 대한 주의가 필요하다. 그리고 기타 제염 방법에는 Foam, Gel 등의 화학 작용제를 통한 화학적 제염 방법과 Laser, Plasma, Microwave 등의 고에너지를 조사하여 콘크리트 폭발 현상의 발생을 통한 열적 제염 방법이 존재한다. 그러나 이는 실용화 사례가 적고, 고가의 장비로 인한 제염 단가 상의 문제로 인해 기계적 제염에 비해 선호도가 높지 않다. 이에 기계적 제염 시 발생하는 문제들을 보완할 수 있는 4차 산업 혁명 기술을 이용한 원격화, 자동화 등의 신기술의 연구개발이 수행되고 있다³⁾.

방사화 콘크리트는 표면 오염 콘크리트와 다르게 내부 깊은 곳까지 핵종이 퍼져있기 때문에 단순한 표면 제염이 아닌 Wire saw, Hammer, Drill 등을 이용한 절단 기술이 사용된다 [표 8]. 방사화 콘크리트 절단 시 대량의 방사화 콘크리트 파편이 발생되는데 부피감용을 위해 오염도가 높은 시멘트 페이스트와 오염도가 낮은 골재를 분리하는 기술이 연구되고 있다. 다양한 국가에서 가열 온도에 따라 시멘트 페이스트의 주요 수화물들이 각각 분해되며 가열온도에 따라 시멘트 페이스트의 구조적 성질을 상실하는 특징을 이용하여 가열 분쇄를 통한 부피감용 기술이 주로 연구되었다. 한국원자력연구원에서는 <그림 6>과 같은 과정을 통해 가열 분쇄 기술을 통한 실증 실험을

[표 8] 콘크리트 표면 제염 및 절단 기술의 종류와 장·단점³⁾

표면제염기술	Advantages	Disadvantages
Needle scaling	<ul style="list-style-type: none"> - Flexible handling - Suitable for hard to reach areas - Insensitive for metal inserts - Light weight tool - No secondary waste 	<ul style="list-style-type: none"> - High vibration level - Low yield (limited surface area coverage)
Scabbling	<ul style="list-style-type: none"> - Flexible handling - Suitable for hard to reach areas - No secondary waste 	<ul style="list-style-type: none"> - High vibration level - Rough finishing - Low yield (limited surface area coverage)
Shaving (Grinding)	<ul style="list-style-type: none"> - Very good finishing - High yield - High performance - Moderate weight - Low vibration level - Collection of dust and debris by default - No secondary waste 	<ul style="list-style-type: none"> - Fine dust - Not suitable for rough surfaces - Sensitive to metal inserts - High consumable cost (disks)
Shaving (Milling)	<ul style="list-style-type: none"> - High yield - High performance - Collection of dust and debris by default - Insensitive for metal inserts - Moderate vibration level - Low consumable cost 	<ul style="list-style-type: none"> - Requires tailored interface with heavy duty carrier or engineered guiding system (vertical surfaces) - Fine dust
CO ₂ Ice Blasting	<ul style="list-style-type: none"> - Suitable to remove smearable contamination - Preserve substrate - No secondary waste 	<ul style="list-style-type: none"> - Not aggressive enough to strip coating or fixed contamination - High safety requirements - Risk of anoxia - Ventilation requirements
Laser Ablation	<ul style="list-style-type: none"> - Low safety requirements - Low weight tool - Automation through low cost carrier - Suitable for large surfaces - Suitable for rough surfaces - Insensitive for metal inserts - Selective removal of coating - No secondary waste 	<ul style="list-style-type: none"> - Low yield (very small surface area coverage) - No feedback yet available on long term reliability and maintenance requirements
절단기술	Advantages	Disadvantages
Diamond wire sawing	<ul style="list-style-type: none"> - Highly versatile technique - No limit on structure size - No vibration - Accurate cuts - Can be operated in dry conditions 	<ul style="list-style-type: none"> - Hazards related to rupture and locking of the wire - Generation of dust/slurry - Risk of cross contamination of hidden surface (wet conditions)
Hammering	<ul style="list-style-type: none"> - High yield - Very reliable - Insensitive to surface state - Insensitive to metal inserts 	<ul style="list-style-type: none"> - Heavy equipment - Generation of dust - High vibration level - Reinforcement requires additional cutting technique - Needs additional treatment(s) to reach adequate surface finishing
Drilling and spalling	<ul style="list-style-type: none"> - No dust/slurry generation (besides drilling operations) - Applicable in hard to reach areas - Ease further hammering operations - Simple to use 	<ul style="list-style-type: none"> - Pre-treatment - Need for further handling (hammering) - Reinforcement mostly requires additional cutting technique - Control of cracks spreading - Hazards related to damage to load-bearing structures
Explosives	<ul style="list-style-type: none"> - High performance - Uncovers reinforcement 	<ul style="list-style-type: none"> - Agitations and blast waves - High generation of dust - Extensive preparation - Safety issues concerning unexploded loads - Regulatory aspects
Abrasive water jet	<ul style="list-style-type: none"> - Low guiding and reset forces - Individual cutting forms - No vibrations 	<ul style="list-style-type: none"> - Demand of water - Aerosols emissions - Very large amount of secondary waste - Requires water/sludge treatment installation - Risks of cross contamination

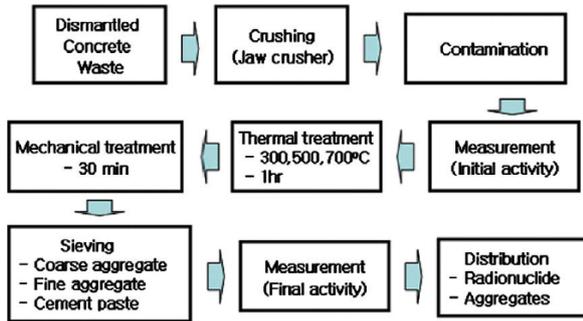


그림 6. 가열분쇄 과정⁵⁾

수행하였고, 약 80%의 감용 효과를 확인하였다. 또한 가열 분쇄 과정에서 발생하는 시멘트 페이스트 미분말의 안정화를 위해 화학적 핵종 용출 실험, 무수규산, MgO 등의 첨가를 통한 미분말 고화체 제조 및 슬래깅 기술 개발 등이 수행되었다^{4,5)}. 그러나 개발 연구 내용의 실제 해체 시 적용을 위해서는 보완된 성능의 실증 설비의 개발 또한 필요하며, 규제해제 및 원자력계 제한적 재활용을 위한 규제기관과의 면밀한 협의가 필요하다.

4. 맺음말

방사성 콘크리트 폐기물의 발생량은 발전소별 노형, 운전

기간, 용량, 해체 공법, 감용 처리, 국가별 정책 등에 따라 큰 차이를 보였으며, 실제 발생량과 예측한 발생량이 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

향후 고리 1호기와 월성 1호기를 해체할 시 발생하는 콘크리트 폐기물의 오염도는 미약할 것으로 예상되지만, 불확실성에 대해서 철저한 대비가 필요하다. 이미 해외 선진국에서는 원자력 시설로부터 발생하는 다량의 극저준위 콘크리트 폐기물을 처분하기 위한 조사와 논의가 활발하게 이루어졌으며, 규제 해제 기술과 기준이 확립되어 매립, 소각, 재활용 등 규제 해제 폐기물과 같은 방식으로 처리하기도 한다. 우리나라에서도 원자력 시설 해체를 통해 발생할 막대한 양의 방사성 콘크리트 폐기물에 대비하기 위해 기존 기술들에 대한 검토와 향후 기술 개발 방향에 대한 고찰, 정부의 정책에 대한 규제기관의 정확한 가이드라인이 반드시 필요하다.

또한, 폐기물 종류 및 발생 시나리오에 따른 기계적 제염기술, 화학적 제염기술, 부피 감용 기술, 재활용 및 고형화 기술의 적용 타당성을 검토하고 실용화 연구를 통해 평가되어야 한다. 그리고 국내의 원전의 해체 시 발생하는 콘크리트 폐기물 제염기술이 현재 국내의 매우 엄격한 자체 처분 기준치를 만족시키기에는 한계가 있으므로 지속적인 복합 기술 연구 등을 통해 제염 성능의 효율을 향상시키는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

1. IAEA PRIS, <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>

2. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Methods for the Minimization of Radioactive Waste from Decontamination and Decommissioning of Nuclear Facilities, Technical Reports Series No. 401, IAEA, Vienna (2001).

3. Berton, Marie-Anne, et al. The NEA co-operative programme on decommissioning decontamination and demolition of concrete structures. No. NEA-RWM-R-2011-1. Radioactive Waste Management Committee-RWMC, 2011.

4. Keun-Young Lee, et al. "Trends in technology development for the treatment of radioactive concrete waste." Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology 16.1 (2018): 93-105.

5. Min, Byung-Youn, Wang-Kyu Choi, and Kune-Woo Lee. "Separation of clean aggregates from contaminated concrete waste by thermal and mechanical treatment." Annals of Nuclear Energy 37.1 (2010): 16-21.