



低放射化시멘트의 개발과 응용

이 중 열 (쌍용양회 기술연구소 연구자문역)

1. 서 론

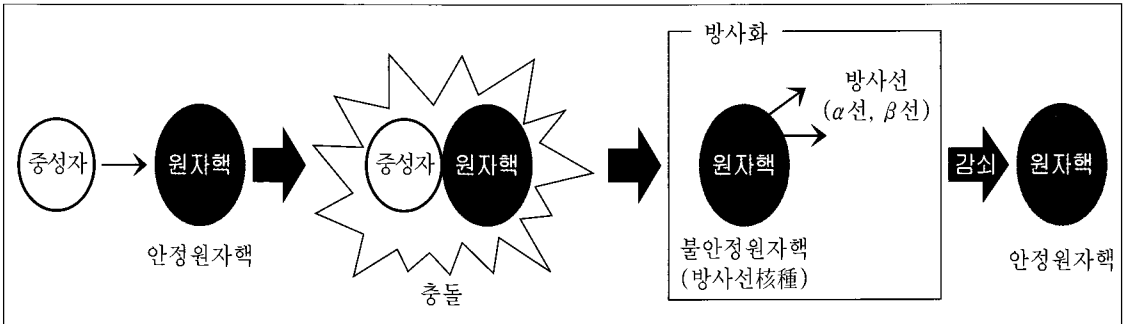
인간 활동 증대에 의한 이산화탄소의 대량배출 결과로 생긴 지구온난화는, 인류의 생존기반마저도 위협받는 상황이며, 그 대책에 초점이 모아지고 있고 큰 과제로 되어 있다. 최근 지구온난화 대책의 하나로, 전력발전 과정에서 이산화탄소의 배출이 없는 원자력발전을 재평가하는 원자력 르네상스가 구미를 중심으로 널리 확산되는 기미를 보이고 있어, 일본에서도 기간전원으로서 원자력발전의 일층 활용이 기대되고 있다.

일본 국내에는 현재 약 55기의 원자력 발전소가 있지만, 이 중 가동개시부터 30년 전후 경과한 발전용 원자로는 20기에 가깝고, 가까운 장래 일본은 가동을 종료한 원자로의 해체 러시를 맞이한다. 원자로는 폐지 조치단계를 경과해서 해체 철거되지만, 이때 콘크리트를 포함하여 대량의 폐재가 발생한다. 폐재의 일부는 방사성 폐기물로 이중 69%를 콘크리트가 점하고 있다. 이 방사성 폐콘크리트의 처리·

처분에 걸리는 비용은 매설(埋設) 코스트만으로 건설시의 재료가격의 65~2,800배로 계산된 것이기 때문에, 금후의 새로운 원자로의 건설에서는 이같은 방사성 폐기물을 극히 발생시키지 않도록 방사화하기 어려운 건설재료(低放射化 재료)를 사용하는 것이 바람직하다고 생각된다. 또한 건설재료를 저방사화하는 것은 시설보수 시에 작업자의 피폭선량의 저감, 시설의 가동을 향상에도 기여 가능하며 또한 메리트도 크다. 이같은 메리트는 원자력에 국한하지 않고 방사선의 누출방지를 목적으로 한 차폐콘크리트를 사용하는 가속기시설, 우라늄처리시설, 동위원소 저장시설 등에도 적용된다.

이같은 시대적 배경으로부터 방사화하기 어려운 건설재료 「저방사화시멘트」의 개발에 착수하기에 이르렀다. 또한 태평양시멘트에서는 이미 저열포틀랜드시멘트와 엄선한 석회석골재 등을 배합한 「저방사화콘크리트」를 개발하여 이바라기(茨城)현 동해촌의 大强度 양자가속기 시설에 납품한 실적도 갖고 있지만 금번 새롭게 개발한 「저방사화시멘트」

번역자註 : UAE가 2009년 12월 원자력발전소 사업자로 “한전전소시움”을 최종 선정함으로써 우리나라는 원전역사 30여년 만에 한국원전을 수출하는 쾌거를 이루었다는 이야기가 바로 엊그제 일로 기억되는데 벌써 1년이 되어간다. 지구의 환경은 세계적인 이슈가 된지도 오래됐고, 지구온난화 문제는 특히 인류의 생존을 위협하는 발등의 불로 인식되고 있다. 이런 환경문제는 이산화탄소를 다량으로 배출하는 화석연료의 과다사용이 주원인 이어서, 이에 따라 국제적으로 감축의무에 대한 움직임이 매우 활발하다. 그리고 대체 전력원으로 원자력이 금부상하고 있는데, 세계적으로 보면 436기가 운영중이고, 약 50기가 건설 중에 있어 원자력 르네상스를 예고하고 있다. 우리나라도 2010년 1월 현재 20기가 운영 중에 있고, 8기가 건설 중, 4기가 추가건설 준비 중이다. 따라서 원전건설과 폐지 등이 계속될 전망이므로, 이런 구조물에 적합한 시멘트(저방사화시멘트)의 개발이 절실히 필요한 실정이다. 마침 평소에 관심을 갖고 있었던 기사가 시멘트·콘크리트지 2008년 11월호에 실려 있어서 번역을 하게 되었다. 향후에 막대한 시장규모가 예상될 때를 대비하여 한번정도 관심을 가져보는 것도 좋을 것 같다.



〈그림-1〉 방사화 메커니즘

는 이것을 더욱 더 저방사화 한 재료이므로 소개하고자 한다.

2. 방사화란?

방사화란, 원자핵에 높은 에너지의 입자(중성자 등)로 충격을 가하면 핵반응을 일으켜 방사성 핵종(核種)이 생성되는 것이다. 바꾸어 말하면 원래는 방사선을 방출하는 성질을 가지지 않는 물질에 에너지가 높은 중성자를 맞는 것으로, 그 물질이 방사선을 방출하는 성질을 갖는 물질로 변화하는 것을 의미한다.〈그림-1〉 방사선은 인간의 신체나 유전정보에 심각한 영향을 주는 것이 알려져 있고 원자력 발전소나 의료용, 연구용 가속기 등의 방사선을 이용하는 시설에서는 방사화하기 어려운 건설재료의 적용이 필요하다.

3. 저방사화의 방책

시멘트를 저방사화하는 것은 기본적으로는 이들 재료 중에서 생성하는 방사성 핵종의 양을 낮게 억제하는 것이나 최악을 기다리는 수밖에 없기 때문에 중성자에 의한 핵반응을 일으키지 않도록 하는 사전 대책이 특히 중요하게 된다. 구체적으로는

① 재료 중에 중성자 흡수체로서 붕소(원소기호 B) 등을 첨가하는 방법,

② 재료에 함유되어 있는 방사성 핵종의 원소가

되는 친원소(親元素)의 양을 저감하는 방법 등이 거론되고 있지만, ①은 재료 코스트가 높다는 것과, 페콘크리트로부터 붕소 용출의 우려가 있어, 주의 깊게 검토하지 않으면 안 되기 때문에 저방사화시멘트의 개발에서는 ②의 방법으로 저방사화를 도모하는 것이다.

시멘트에 대해서 저감해야 할 방사성 핵종은 저방사화의 목적에 따라 〈표-1〉과 같이 알려져 있다. 즉 시설보수시의 작업자의 피폭대책에는 시멘트 중의 Na 원소의 함유량을 저감하는 것과, 시설해체시에 있어서 방사성 폐기물의 발생량 저감대책에는 Eu 원소, Co 원소 함유량을 저감하는 것이 유효하다. 태평양시멘트에서 개발한 「저방사화페콘크리트」는 ²⁴Na 생성량을 제한하여, 시설보수시의 피폭량을 1/10 이하로 하는 재료이지만 새롭게 개발한 「저방사화시멘트」는 이 성능을 더욱 더 높였고, 특히 Eu, Co 원소의 함유량을 저감하는 것으로 방사성 폐기물의 발생량을 저감 가능토록 한 고기능성 재료이다.

4. 저방사화시멘트에 요구되는 성능

저방사화시멘트에 요구되는 성능과 그 이유를 〈표-2〉에 나타내었다. ①, ②는 원료선택과 제조공정의 최적화에 따라 각 원소 함유량의 최소화를 도모할 필요가 있다. ③은 클링커광물 비율의 최적화가 필요하다. 요구 성능 ①, ②를 만족하기 위하여 구체적 방안들을 아래에서 설명하고자 한다.

〈표-1〉 시멘트의 방사화 제어를 위하여 저감이 필요한 방사선 핵종

목 적	대상이 되는 방사선 핵종	친 원 소	비 고
시설보수시 작업자의 피폭대책 (콘크리트로부터 방사선량의 저감)	^{24}Na (반감기 15시간)	Na, Mg, Al, Si	각 친원소의 단위질량당의 ^{24}Na 생성비는, $\text{Na}:\text{Mg}:\text{Al}=1:0.02:0.01$ 이며, 재료 중 Na 원소의 저감이 가장 저방사화에 유효하다.
시설해체시의 방사선 폐기물의 발생량 저감대책 (콘크리트 중 잔류 방사능량의 저감)	^{152}Eu (반감기 13.54년) ^{154}Eu (반감기 8.59년) ^{60}Co (반감기 5.27년)	Eu, Co	원자로 중에 보통콘크리트를 조사한 경우, ^{152}Eu , ^{154}Eu 와 ^{60}Co 에서 γ -선 방출 핵종의 거의 전부를 차지하는 것이 알려져 있다.

5. 시멘트의 Na, Eu, Co 원소의 저감방법

시멘트의 Na, Eu, Co 원소의 함유량 저감은 원료 선택이 가장 중요하다. Na는 시멘트원료 중 대부분이 점토에서 유래한 것이기 때문에 세정·Na 점토를 사용하는 것이다. 그리고 점토 대체제로서 Na가 적은 원료들인 고로슬래그, 규석, 석탄회 등을 사용하는 방법도 있다. 점토에 Na가 많이 함유된 이유는 점토의 실리케이트 구조에 Al나 Ca가 치환하여 전하 균형을 조정하기 때문에 Na가 받아들여지기 때문이다.

한편, Eu, Co는 〈그림-2〉에 나타난 바와 같이 시멘트 원료 중에서 볼 때 석회석, 규석에서 매우 적고, 보오크사이트, 천연 철원료(적철광)에서 비교적 적고, 점토, 리사이클 철원료, 석탄회, 고로슬래그에서는 많이 함유되어 있다. 따라서 Eu, Co를 저감하기 위해서는 기본적으로는 석회석, 규석, 보오크사이트, 천연 철원료 등, 천연으로 산출하는 원료의 사용이 바람직하다. 리사이클 철원료에 Co가 많이 함유

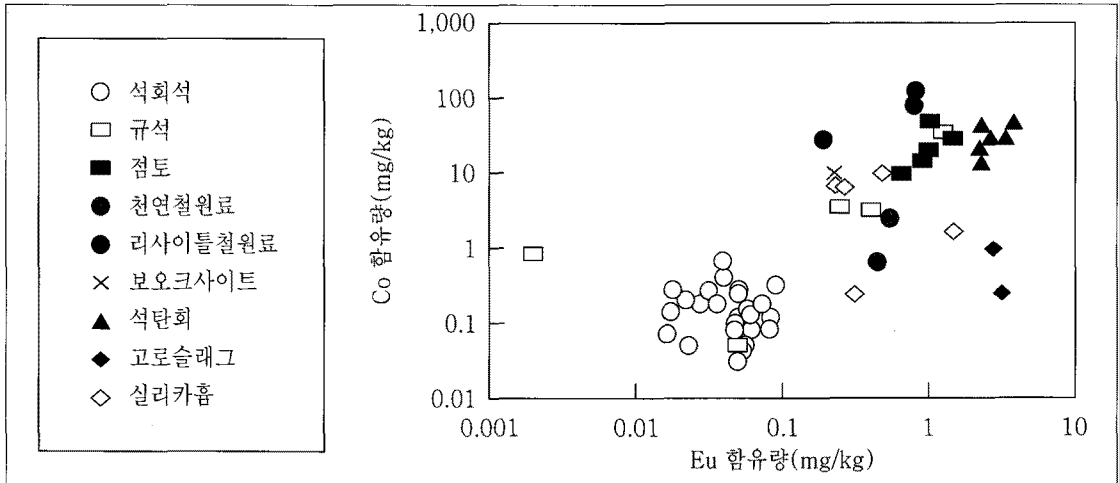
되어 있는 이유는 Fe^{2+} 와 Co^{2+} 의 이온반경이 가깝기 때문으로 생각된다. 고로슬래그나 석탄회에 Eu가 많이 함유되어 있는 것은, 석탄 중에 함유되어 있는 알루미늄실리케이트의 회분이 원인이라고 생각된다. Eu^{2+} 는 Ca^{2+} 와 이온반경이 가깝기 때문에 사장석 등의 알루미늄실리케이트에 많이 함유되어 있는 것이 알려져 있다. 또한 시멘트의 Eu, Co 함유량의 저감을 위해서는, 시멘트의 제조공정으로부터 이들의 원소의 혼입을 방지하지 않으면 안 된다.

원료 및 클링커를 분쇄할 때 분쇄매체로서 철제 볼을 사용하면 그것이 원인이 되어 Co가 시멘트에 혼입할 수 있다. 이것을 방지하기 위해서는, Co를 함유치 않은 알루미늄 볼 등을 사용할 필요가 있다. 또한 시멘트제조시의 열에너지원으로서 석탄을 사용하면 Eu, Co가 많이 함유된 석탄회가 시멘트에 혼입한다. 이것을 방지하기 위해서는 에너지원으로 회분이 적은 중유나 가스 등을 사용할 필요가 있다.

〈그림-3〉에 시판 시멘트의 Na 함유량을, 〈그림-4〉에 Eu, Co 함유량을 나타내었다.

〈표-2〉 저방사화시멘트의 요구 성능

요 구 성 능	이 유
① Na 함유량 저감	시설 보수시 작업자의 피폭을 방지하기 위하여
② Eu, Co 함유량 저감	시설 해체 시에 방사성 폐기물의 발생량을 저감하기 위하여
③ 수화발열 저감	방사선을 이용하는 시설에서는, 관리구역 외에 방사선이 누출되지 않도록 차폐 콘크리트가 사용되기 때문에, 수화발열이 적은 시멘트를 사용해서 콘크리트의 온도균열을 방지할 필요가 있다.



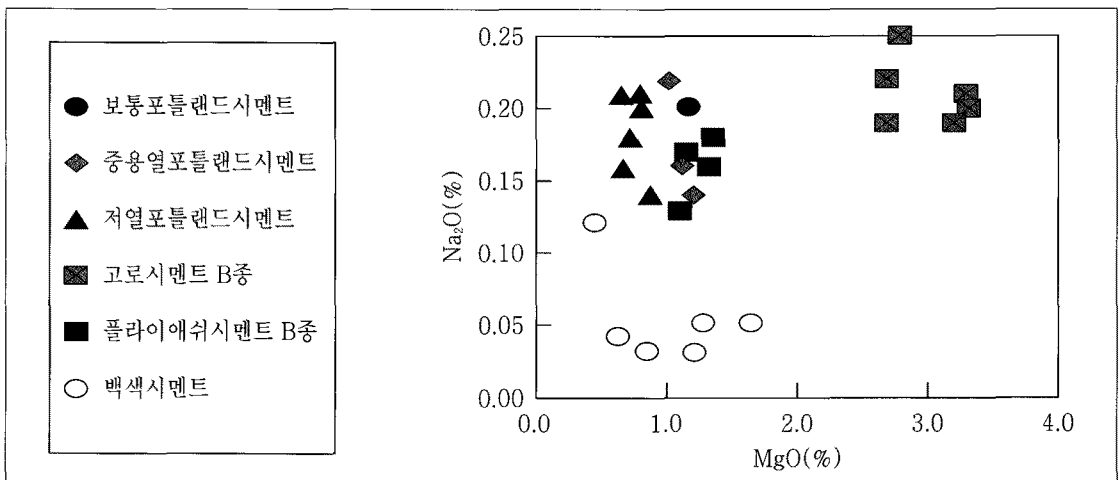
〈그림-2〉 시멘트 원료의 Eu, Co 함유량

열거된 원소들은 백색시멘트에 적은 것이 알려져 있다. 백색시멘트는 백색도를 유지하기 위하여 원료 및 제조공정으로부터 불순물(Fe, Mn, Cr 등)의 혼입을 매우 억제해서 제조되고 있다. 즉, 지금까지 기술해온 Na, Eu, Co 원소의 저감방법은 대체로 백색시멘트의 제조방법과 일치한다. 따라서 시멘트의 Na, Eu, Co 원소의 저감방법은 「원료에 석회석, 규석 등의 천연원료를 사용하고 Fe 원료 및 Al 원료를 최소화 한 백색시멘트와 마찬가지로의 제조방법을

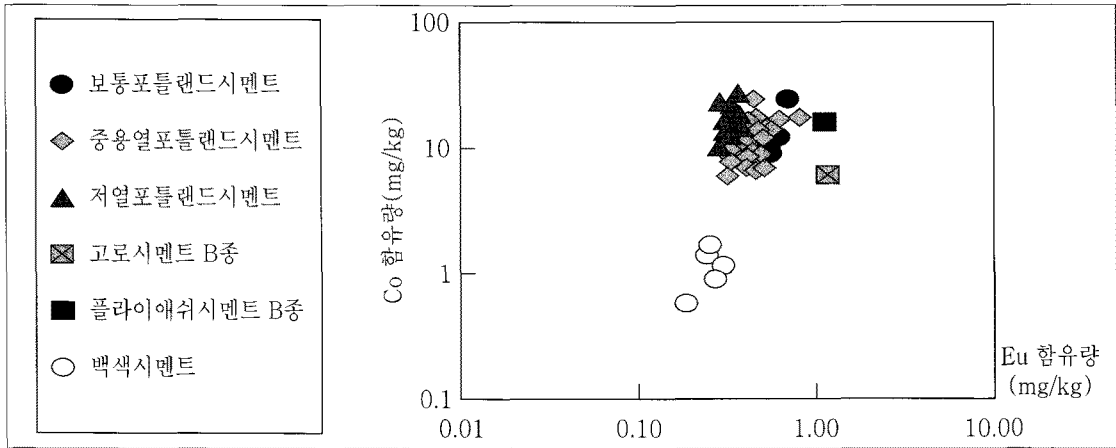
적용한다」고 결론지을 수 있다.

6. 저방사화시멘트의 설계

앞서 이야기한 바와 같이 시멘트를 저방사화를 하기 위해서는 기본적으로 백색시멘트의 제조방법을 답습하는 것이 가능하다. 그러나 〈표-2〉에 나타난 바와 같이, 저방사화시멘트는 차폐콘크리트에 적용을 가정하고 있기 때문에, 수화발열을 저열포틀랜드



〈그림-3〉 시판 시멘트의 Na, Mg 함유량



〈그림-4〉 시판 시멘트의 Eu, Co 함유량

시멘트보다 적게 할 필요가 있다. 혼화제를 사용해서 수화발열을 저감하는 것도 가능하지만 고로슬래그, 플라이애쉬, 실리카흙 어느 경우도 Eu 원소가 많이 함유되어 방사화의 관점에서는 바람직하지 않다. 또한 석회석 미분말도 〈표-3〉에 나타낸 바와 같이 수화발열을 저감하면서 압축강도를 동시에 유지하는 것은 어렵다. 따라서 저방사화시멘트는 백색시멘트의 클링커 광물의 비율을 변경해서 클링커 자체를 저발열로 설계 할 필요가 있다.

〈표-4〉에 저방사화시멘트 설계를 나타내었다. 저방사화시멘트는, C₂S를 40% 이상, C₃A를 6% 이하로 하는 것으로, JIS의 저열포틀랜드시멘트 규격에 수용토록 설계하였다. 또한 C₄AF는 Fe 원료에 Eu, Co 원소의 혼입을 억제하기 위하여 백색시멘트 보다 1% 이하로 설계하였다. 이와 같이 저방사화시멘트는 원료중의 Fe, Al 원소(소위 간극질 액상량)를

최소화하는 것으로 시멘트 중의 Na, Eu, Co 원소의 함유량은 이론상 시판 백색시멘트 이하로 된다.

7. 실기 킬른에서 제조검토

〈표-5〉에 각종 시멘트의 간극질 액상량을 나타내었다. 저방사화시멘트는 9.9%이며 보통포틀랜드시멘트의 반이하로 매우 적다. 간극질 액상은 공업적으로 시멘트를 제조할 때 불가피한 성분이다.

간극질 액상은 C₂S의 석출생성을 비약적으로 가속시켜 클링커의 조립이나 그 자신이 결정화해서 중요한 경화성분이 되는 등, 클링커 형성에 중심적인 반면 다면적인 역할을 다 하기 때문이다. 이것이 작은 저방사화시멘트는 일반적인 시멘트와 비교해서 제조가 곤란하게 된다. 그래서 클링커소성의 이론소요열량(원료의 분해에 필요한 열량부터 클링커광물

〈표-3〉 백색시멘트의 수화열·모르타르 압축강도

백색시멘트 (wt%)	석회석 미분말 (wt%, 4700g/cm ²)	수화열 (J/g)		모르타르 압축강도 (N/mm ²)			
		7일	28일	3일	7일	28일	91일
95	5	337	388	32.9	45.8	64.2	-
85	15	323	370	26.0	36.2	51.4	-
70	30	301	349	19.6	27.2	41.2	-
참고: 저열포틀랜드시멘트		192	258	-	16.9	44.6	68.0

〈표-4〉 저방사화 시멘트의 설계

시멘트	광물조성(%, Bogue식)				수화열(J/g)	
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	7일	28일
JIS 저열포틀랜드시멘트규격	-	≥ 40.0	≤ 6.0	-	≤ 250	≤ 290
저방사화시멘트	30.0 ± 5.0	61.0 ± 5.0	≤ 6.0	≤ 1.0	189 ± 9* ²	263 ± 14* ²
시판 저열포틀랜드시멘트	29.2	56.6	1.7	9.4	192* ¹	258* ¹
시판 백색시멘트	56.5	26.8	12.5	0.9	350* ¹	391* ¹

의 생성에 따른 발열량을 차감한 량)을 계산하는 것으로, 열량적으로 저방사화클링커 제조가능성을 검토했다. 제도가부의 판단기준은, 백색클링커의 이론소요열량으로 했다. 계산결과를 〈그림-5〉에 나타내었다.

저방사화클링커는 백색클링커보다도 이론소요열량이 적게 되었다. 이것은 저방사화클링커가 백색클링커보다도 C₂S가 리치(C₂S의 생성 발열량은 C₃S의 약 1.5배)하기 때문이다. 실제로 전기로에서 백색클링커와 저방사화클링커를 동일한 원료로부터 동일한 히트바란으로 시제품을 만들었는데, f-CaO량은 거의 동등하였다. 그 결과로부터 열량적으로는 저방사화클링커가 제조 가능하다고 판단하였다. 열량적으로 제조 가능하다고 판단한 저방사화시멘트이지만 실제의 키른에서 제조를 전제한 경우 간극질 액상량이 적기 때문에 키른 내에서 클링커 덩어리형성이 충분치 않고, 분상화가 생겨 양호한 품질의 제품을 안정적으로 제조하는 것이 곤란하게 된다고 예상된다. 이것은 이론 소요열량으로는 고려치 않은 「키른의 전동, 액상을 동반한 결정화반응, 미량성분,

원료의 입도분포·입자직경·접촉면적, 원료의 광물종류, 결정성, 열이력, 소성분위기」 등의 영향이 있기 때문이다. 저방사화시멘트의 실기제조에 있어서 이들의 영향인자를 최적화 하는 것으로 상술한 열량 이외의 문제를 극복하고 실기에서 저방사화시멘트의 양산기술을 확립하는 것이 가능하였다.

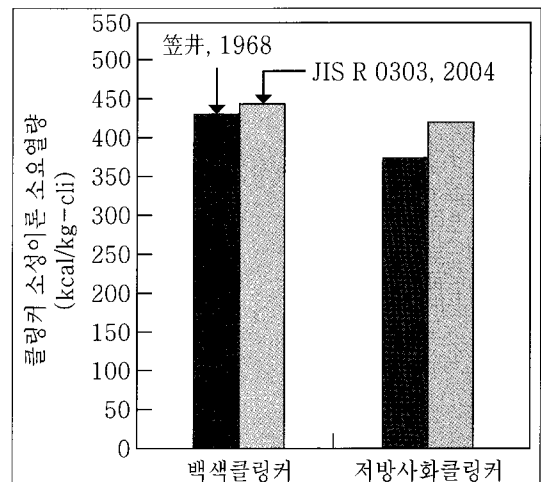
8. 저방사화시멘트의 품질평가

NSP타입의 로타리킬른(40t/hr)에서 제조한 저방사화시멘트의 특성을 〈표-6〉에, 물리시험결과를 〈표-7〉에 나타내었다. 저방사화시멘트 A의 Bogue식의 클링커 광물 비율은 C₃A=4.9%, C₄AF=1.1%, C₃S=26.9%, C₂S=61.0%이며, JIS에서의 저열포틀랜드시멘트 규격에 부합되는 것이 확인되었다.

〈표-5〉 각종 시멘트의 간극질 액상량의 일례(1,450°C)

품종	간극질 액상량(%)*
보통포틀랜드시멘트	24.2
중용열포틀랜드시멘트	22.3
저열포틀랜드시멘트	20.1
백색시멘트	15.9
저방사화시멘트	9.9

* 3.00Al₂O₃+2.25Fe₂O₃+MgO+K₂O+Na₂O



〈그림-5〉 저방사화클링커의 소성이론 소요열량

〈표-6〉 저방사화시멘트의 특성의 일례

시멘트	화 학 조 성 (%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
저방사화시멘트 A	23.82	2.06	0.35	64.74	0.92	2.46	0.01	0.02
저방사화시멘트 B	28.19	1.73	0.31	65.30	1.01	2.50	0.02	0.09
시판 저열포틀랜드 시멘트	26.41	2.54	2.99	63.09	0.68	2.30	0.15	0.31
JIS 저열포틀랜드 시멘트 규격	-	-	-	-	≤5.0	≤3.0	R2O% ≤ 0.75	

시멘트	광 물 조 성 (%)							
	Bogue 식				XRD/리트발트 해석			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
저방사화시멘트 A	26.9	61.0	4.9	1.1	33.5	61.9	1.7	1.0
저방사화시멘트 B	32.3	56.5	4.0	1.0	36.2	60.6	0.9	0.8
시판 저열포틀랜드 시멘트	28.2	54.6	1.7	9.1	27.3	58.6	1.8	10.5
JIS 저열포틀랜드 시멘트 규격	-	≥ 40.0	6.0	-	-	-	-	-

시멘트	비표면적 (cm ² /g)	밀도 (g/cm ³)	강열감량 (%)	f-CaO (%)	Eu (mg/kg)	Co (mg/kg)	간극질 액상량 (%)
저방사화시멘트 A	3,740	3.18	1.03	0.46	0.11	0.34	7.9
저방사화시멘트 B	3,560	3.19	0.93	0.29	0.24	0.25	7.1
시판 저열포틀랜드 시멘트	3,170	3.21	1.02	1.02	-	-	-
JIS 저열포틀랜드 시멘트 규격	≥ 2,500	-	≤ 3.0	-	-	-	-

압축강도(특히 초기)는 저열포틀랜드시멘트 보다도 우수한 물성을 나타내었다. 이것은 저방사화시멘트가 저열포틀랜드시멘트보다 실리케이트상(C₃S + C₂S)와 C₃A가 리치했기 때문이라고 생각된다. 저방사화시멘트 B의 Bogue 식의 클링카광물 비율은 C₃A = 4.0%, C₄AF = 1.0%, C₃S = 32.3%, C₂S = 56.5%이며, JIS에서의 내황산염포틀랜드시멘트 규격 레벨까지 C₃A량을 저감할 수 있었다. 간극질 액상량(1,450°C)은 7.1%로 매우 적었다. 28일 수화열만 JIS의 저열포틀랜드시멘트 규격을 초과하였다. 이것은 시멘트의 비표면적이나 석고첨가량의 최적화로

저감 가능하다고 생각된다. 그리고 저방사화시멘트의 Na 함유량을 〈그림-6〉에 Eu, Co 함유량을 〈그림-7〉에 나타내었다.

저방사화시멘트의 Na₂O 함유량은 <0.02%, Eu 함유량은 0.11mg/kg, Co 함유량은 0.34mg/kg로 되고, 어느 경우의 원소도 매우 함유량이 적었다. 이것은 시판의 보통포틀랜드시멘트의 평균값(n=50)비로 Na₂O가 1/30, Eu가 1/4, Co가 1/50에 상당한다. 이상 결과로부터 저방사화시멘트는 실기의 킬른에서도 제조가 가능하고 JIS의 저열포틀랜드시멘트 규격에 부합하고 저방사화성능은 백색포틀랜드시멘

〈표-7〉 지방사화시멘트의 물리시험 결과의 일례

시멘트	모르타르압축강도(N/mm ²)			응결시간(분)			수화열(J/g)	
	7일	28일	91일	W/C(%)	초결	종결	7일	28일
지방사시멘트 A	23.7	52.4	69.7	22.9	155	225	222	289
지방사시멘트 B	27.2	53.4	69.0	23.2	160	205	245	298
시판 저열포틀랜드 시멘트	16.9	44.6	68.0	23.5	185	300	192	258
JIS저열포틀랜드 시멘트 규격	≥ 7.5	≥ 22.5	≥ 42.5	-	≥ 60	≤ 600	≤ 250	≤ 290

* JIS R 5201-1997, JCAS-I-01-1997

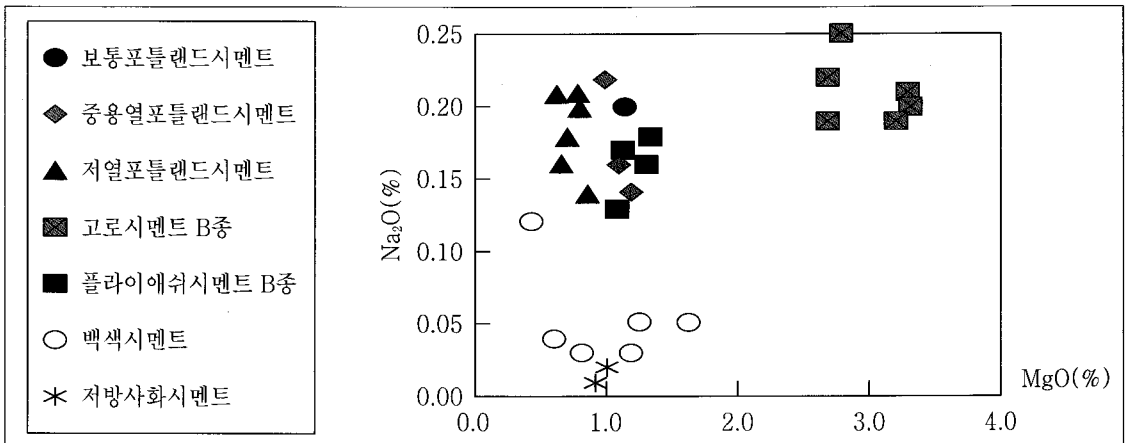
트 이상이 되는 것이 확인되었다.

9. 지방사화클링커의 해석

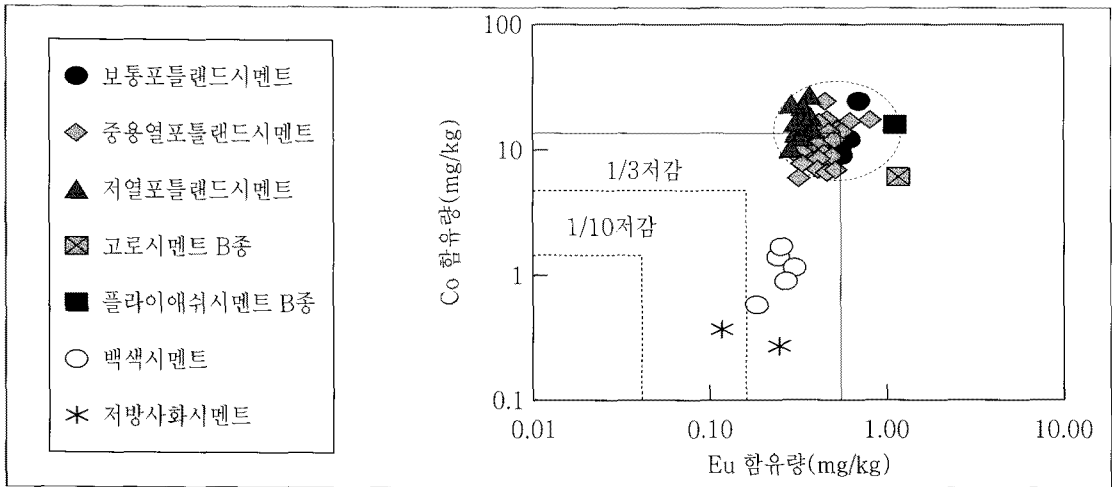
실기 킬른에서 제조한 각종 클링커의 특성을 〈표-8〉에 나타내었다. 지방사화클링커는 지방사화시멘트와 마찬가지로 C₃A, C₄AF가 현저히 적다. 사실 살리실산메타놀 처리에 의한 잔분(간극질액상량)은 불과 3.5%이었다. 〈그림-8〉에 나타낸 지방사화클링커의 분말 X-선 분석 회절도에서도 C₃A, C₄AF의 피크는 백색클링커나 보통클링커와 비교해서 매우 적은 것이 확인되었다. 지방사화클링커와 같은 간극질 액상량은 저감한 클링커가 어떠한 결정형태로 생

성된 것을 확인하기 위하여 〈표-8〉의 클링커에 대해서 반사현미경 관찰을 하였다. 〈사진-1〉에 지방사화클링커와 비교용 백색클링커의 관찰상을 나타내었다. C₂S는, 어느 경우의 클링커도 I형(일부 Ia형도 존재)이 했지만 지방사화클링커는 아래와 같은 특징이 확인되었다.

- ① 포러스하다.
- ② C₂S의 파키트가 불명료하여 형태가 불규칙하다.
- ③ 간극질 액상은 C₂S입자 간에 존재하는(C₂S와 C₂S는 접촉해서 존재한다) 이들의 특징은 아래 생과정을 경과했다고 추측된다.
- ④ 간극질 액상량이 작기 때문에, 킬른 전동에 의한 압밀효과가 얻기 어렵고, 공공(空孔)이 많게 된다.



〈그림-6〉 지방사화시멘트의 Na, Mg 함유량



〈그림-7〉 지방산화콘크리트의 Eu, Co 함유량

② Fe 양이 부족하고, 한편 소량의 간극질 액상은 점성이 높고, CaO 확산속도의 저하를 가져와 C₃S의 핵 발생률을 저하시킨 결과, C₃S가 M₁상으로서 불안정 성장하였다.

③ C₃S가 간극질 액체를 수중에 넣으면서 불안정 성장하여, 간극질 액상이 존재하고 있었던 C₃S와 C₂S의 공간을 메웠다. C₃S의 일부가 C₂S와 CaO와의 고상반응에서 생성할 가능성도 있다. 이와 같은 지방산화클링커의 생성메커니즘은 현시점에서 불명한 점도 아직 많고, 추측의 영역을 벗어 날 수가 없었다. 금후 편광현미경이나 EPMA 등을 활용한 심도 있는 해석이 필요하다. 지방산화클링커는 특징적인 결정의 미세구조를 갖고 있지만 적어도 시멘트의 물성측면(〈표-7〉)으로 볼 때는 현저한 품질저하는

보이지 않았고, 클링커의 품질은 문제가 없는 범위라고 생각된다.

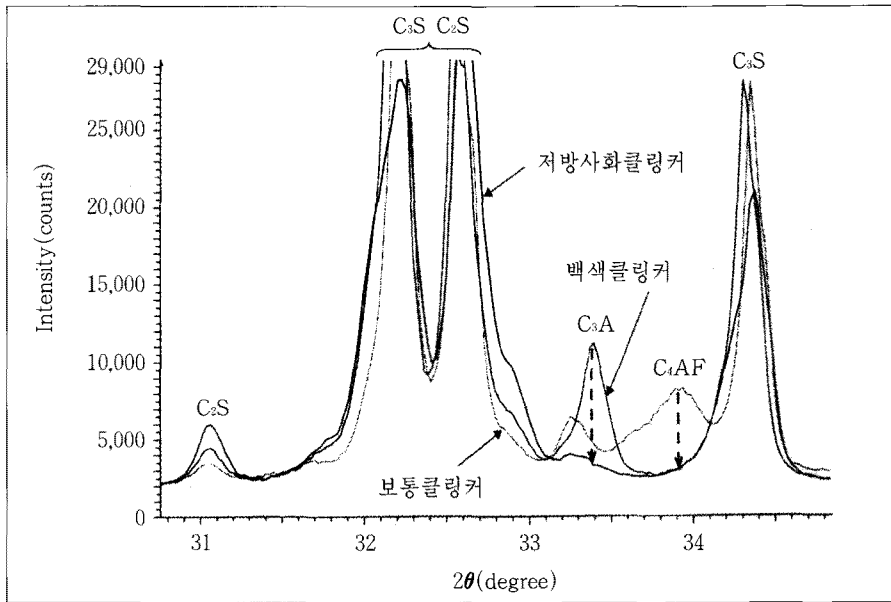
10. 지방산화시멘트의 적용에 의한 방사성 폐기물의 저감효과

장기 운전한 원자력발전소의 해체 시에 발생하는 폐재는 「저준위 방사성 폐기물」, 「산업폐기물」로 나누어진다. 이 때 문제가 되는 것이 저준위 방사성 폐기물과 산업폐기물의 경계를 규정하는 기준값-클리어런스 레벨이다. 폐콘크리트가 일단 저레벨 방사성 폐기물로 분류되면 넓은 매립처분장이 필요하고, 그 관리에 많은 금액의 비용이 소요되기 때문에 이 클

〈표-8〉 지방산화클링커의 특성의 일례

클링커	광 물 조 성(%)								f-CaO (%)	간극질 액상량* (%)
	Bogue 식				XRD/리트발트 해석					
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF		
저방사클링커	36.2	55.0	4.5	0.8	36.6	61.6	0.6	1.0	0.2	3.5
백색클링커	47.5	35.2	13.6	0.6	50.1	41.8	7.2	0.6	0.6	11.1
보통클링커	59.4	15.9	8.4	9.9	61.2	22.2	3.1	12.7	0.8	19.7

* 살리실산메칠 처리에 의한 처리잔분(JCAS-I-01-1997)

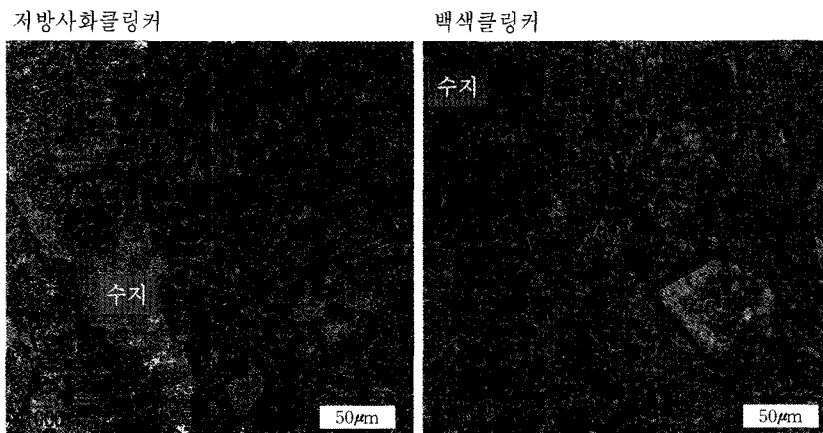


〈그림-8〉 저방사화클링커의 X-선 회절도

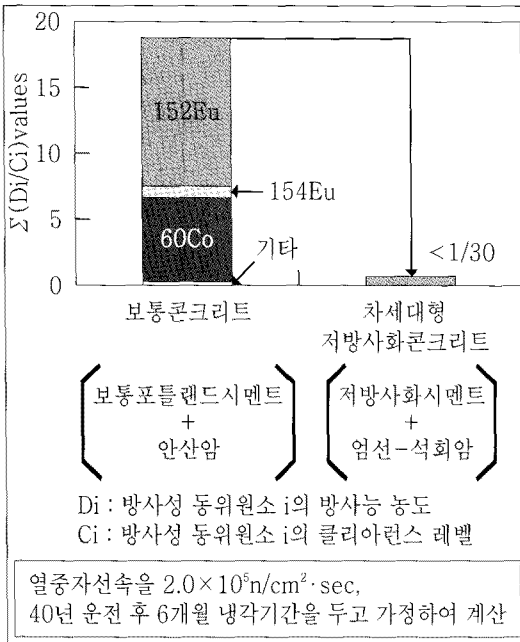
리어런스 레벨의 설정이 대단히 중요하다. 2005년 12월 1일 일본에서도 이 클리어런스 레벨이 시행되어 산업폐기물로 분류된 폐콘크리트는 특단의 조치를 하는 것이 아니고 재생이용·처분하는 것이 가능하게 되었다. 이 클리어런스 레벨은 방사성 핵종마다 정해지고 어떤 방사성 폐기물중에 함유되어 있는 핵종마다의 방사선밀도를 그 클리어런스 레벨 값으

로 나눈 값의 적산치 $\sum Di/Ci$ (Di : 핵종마다의 방사능밀도, Ci : 그 핵종의 클리어런스 레벨)에 의해 저레벨 방사성 폐기물의 가부가 판단된다.

〈그림-9〉에 보통콘크리트 차세대형 저방사화콘크리트의 $\sum Di/Ci$ 의 계산결과를 나타내었다. 보통콘크리트비로 차세대형 저방사화콘크리트는 1/30 미만이다. 비등수형원자로(BWR)의 생체 차폐체에 보



〈사진-1〉 반사현미경 사진



〈그림-9〉 저방사화콘크리트의 $\Sigma(Di/Ci)$

통콘크리트 $\Sigma(Di/Ci)$ 비로 1/30의 콘크리트를 적용한 경우에 리플레이스시에 그 거의 전부가 클리어런스 레벨 이하로 된다고 지적된 바와 같이, 금후의 원자로 건설시에 저방사화시멘트를 적용하게 되면 원자로 해체시의 폐콘크리트의 처분비용을 대폭적으로 저감하는 것이 가능하게 된다. 또한 차세대형 저방사화콘크리트는 방사성 폐기물의 저감만이 아니고 시설보수시의 작업자의 피폭선량의 저감에도 효과가 있다. 정량평가는 하지 않았지만 적어도 大强度 양자가속기 시설에 사용한 종래의 저방사화콘크리트와 동등 이상의 효과가 보이고 있다. 원자력발전소라면 정기검사에서 작업시간 연장이 가능하고 정기검사의 기간단축에도 연결될 가능성이 있다.

11. 결 론

저방사화시멘트 개발에서 얻은 결론은 아래와 같이 요약된다.

① 시멘트를 저방사화하려면 시멘트중의 Na, Eu,

Co 원소의 함유량을 저감할 필요가 있다.

② 이들 원소를 저감하기 위해서는 원료에 석회석, 규석 등의 천연원료를 사용하고, Fe 원료 및 Al 원료를 사용할 것 없이 백색시멘트와 동일 제조방법을 채택하는 것이 유효하다.

③ 저방사화시멘트는 차폐콘크리트의 사용을 가정하여 JIS의 저열포틀랜드시멘트 규격을 만족하는 것으로 설계하였다.

④ 실기의 로타리킬른에서 제조한 저방사화시멘트는 $C_3A=4.9\%$, $C_4AF=1.1\%$, $C_2S=26.9\%$, $C_3S=61.0\%$ 로 되며, JIS 저열포틀랜드시멘트 규격에 부합하는 것이 확인되었다. 압축강도(특히 초기)에 대해서는 저열포틀랜드시멘트 보다 우수한 물성을 나타내었다.

⑤ 간극질 액상량을 특히 저감한 저방사화시멘트는, $C_3A=4.0\%$, $C_4AF=1.0\%$, $C_2S=32.3\%$, $C_3S=56.5\%$ 로 되며, JIS의 내황산염저항성시멘트 규격수준까지 C_3A 량을 저감할 수 있다. 사실, 저방사화콘크리트의 살리실산메타놀 처리에 의한 잔분(간극질 액상량)은 3.5%이었다.

⑥ 저방사화시멘트의 저방사화성능은 시판 백색시멘트 이상이었다.

⑦ 저방사화콘크리트는 특정한 결정의 미세조직을 갖지만, 이것을 이용한 시멘트의 품질저하는 확인되지 않았고 클링커의 품질은 문제없는 범위로 생각된다.

⑧ 저방사화시멘트를 이용한 차세대형 저방사화콘크리트를 원자로에 적용한 경우 원자로 해체시의 콘크리트 거의 전부가 클리어런스 레벨 이하이며, 이것의 처분비용을 대폭적으로 저감하는 것이 가능하다고 계산되었다. 시설보수시 작업자의 피폭선량의 저감에도 효과가 있고, 정기검사의 기간 단축에도 연결될 가능성이 있다. 금후는 저방사화시멘트의 콘크리트시험, 내구성시험 등을 진행하면서 새로운 품질개량과 아울러 간극질 액상량이 적은 시멘트의 이점을 활용한 새로운 용도개발에도 주력할 예정이다. ▲