

論文 コンクリート系低放射化材料の開発

田野崎 隆雄^{*1}・一坪 幸輝^{*2}・三浦 啓一^{*3}・瀧本 雅樹^{*4}

要旨：放射線の遮蔽用コンクリートに，新たにコンクリート自身の放射化を低く抑えることが求められている。報告者らはクリアランスレベル以下のコンクリート材料を提供するために，低放射化性能の高いポルトランドセメントを開発中である。原料選択と製造工程に留意してセメントを試製したところ，ユウロピウムとコバルト含有量を大幅に低減でき，予想される放射化量を従来の1/3以下とする低放射化材料が開発できた。

キーワード：クリアランスレベル，セメント，低放射化，ユウロピウム，コバルト

1. はじめに

原子炉・核融合炉等の核燃料使用施設や，医療用・研究用加速器等の放射線を利用する施設では，一般環境への放射線漏洩防止を目的として，施工性・経済性に優れた遮蔽用のコンクリートを多用してきた。しかし遮蔽効果が高ければ高いほど放射線を被ばくすることになり，コンクリート自身が放射線により「放射化」してしまい作業をする人の被ばくがあったり，施設の耐用年数が過ぎた後には，コンクリートが放射性廃棄物として排出されることとなる。

報告者は，以前にメンテナンス時の作業者の被ばく対策（²⁴Naなどの短寿命核種が主原因である）を行った「低放射化コンクリート」の開発を報告した¹⁾。そのなかで放射化する可能性のある元素の含有量の少ない原材料を選択することにより，低放射化コンクリートが製造できるとしている。しかしどのようにその原材料を見出したらよいか，各材料の管理基準はどうしたらよいかなど実際の適用に当たっての研究はまだ行われていなかった。このたび「革新的実用原子力技術開発（経済産業省：代表東北大）クリアランスレベル以下にするための低放射化設計法に関する技術開発」²⁾の補助を受け，放射性廃棄物の発生量を少なくする研究にとり組む機会を得たので成果の一部を報告する。このプロジェクトは，原子炉施設の高レベル放射性廃棄物（L1），低レベル放射性廃棄物（L2），極低レベル放射性廃棄物（L3）の各ク

リアランスの区分判断用の広範な材料データベースおよびマップを作成し，低放射化材料の置換で有益になる範囲を明確にし，それらの部位に適用するコンクリート系低放射化材料および低放射化鉄筋を開発することが目的である。

原子力施設等の解体時に発生する放射性廃棄物の削減を目的とした場合，コンクリートの低放射化には長寿命核種（¹⁵²Eu, ⁶⁰Co）の親元素であるユウロピウム（以下Euと記載），コバルト（以下Coと記載）の含有量低減が有効であり，既に石灰石骨材の使用による低放射化の提案がなされている¹⁾。しかしながら，これまでセメントの低放射化を検討した例は少なく，セメントの低放射化の可能性については明らかでなかった。本研究は，セメント原材料成分及び製造工程等を調査・検討した結果である。

2. 材料開発の概要

2.1 セメント原材料成分の調査

石灰石はセメント原料のみならず，混和材・骨材として低放射化コンクリートの主材料となるため，重点的に国内外30ヶ国300以上の地点から採集の上評価した。また国内市販のセメント及びセメント原材料（セメント48点，珪石5点，粘土5点，鉄原料5点，石炭灰6点，混和材10点）の分析結果をもとに調合計算をした。

セメントおよびセメント原料に含まれる成分分析は，はじめに縮分により100g程度の分析試料を採取し，アルミナ・メノウ乳鉢で100 μm

- * 1 太平洋セメント(株) 中央研究所 研究開発部 環境プロセスチーム 理博（正会員）
- * 2 太平洋セメント(株) 中央研究所 研究開発部 環境プロセスチーム 工修
- * 3 太平洋セメント(株) 中央研究所 研究開発部 環境プロセスチームリーダー 工博
- * 4 太平洋セメント(株) セメントカンパニ 品質技術部 技術グループ

以下の粒度に粉砕した後に，熱中性子線を照射（束密度 $4.7113 \times 10^{13} (n/cm^2 \cdot sec)$ ）した。20分の照射時間の後，短時間（5日）/長時間（61日）冷却し，線スペクトロメーターを用いて，試料中の分析対象元素の濃度を算出した。あわせて蛍光X線装置で主要成分の分析をした。

2.2 粉砕時のコンタミネーション確認試験

Coを使用した合金が，粉砕機に利用される場合がある。そこでディスク型振動ミルで試薬炭酸カルシウム粉末を0～180秒間粉砕し，Coの混入について確認した。Coの定量は放射化分析にて行った。

2.3 焼成時のコンタミネーション確認試験

セメントの焼成工程では，石炭が使用されるのが通常であるが^{3) 4)}，これによってEu,Coが混入する可能性がある。そこで工場製クリンカと，電気炉にて試験焼成したクリンカ（クリンカの原料はともに同一）のEu,Co含有量の比較を行った。電気炉での焼成では，SiC発熱体を用いた。焼成パターンを図1に示す。

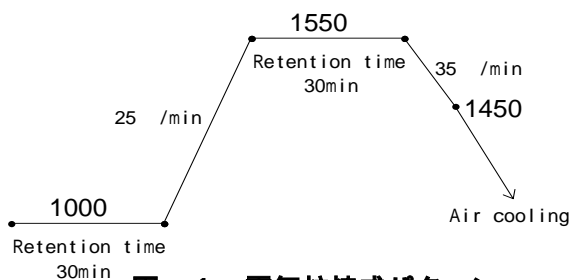


図1 電気炉焼成パターン

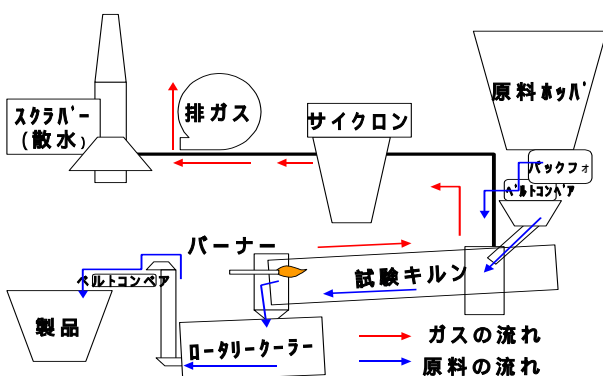


図2 ミニキルン概要

2.4 低放射化セメントの試製

含有量の少ないと考えられる原材料を乾燥した後，これを $90 \mu m$ ふるいを全通するまで乳鉢で粉砕した。粉砕原料を電気炉にて焼成し，得られたクリンカに石膏を加えて試製した。

原子炉等の遮蔽壁はマスコンクリートとなる

ために，低熱セメントの組成になるように原料調合し，図2のミニキルンで焼成した。本試験で使用したキルンは，サイズ：450mm × (L) 8340mm, L/D：18.5, 焼成量：100kg-セメント原料/hr, クリンカークーラー：ロータリー式である。最高焼成温度は，1450とした。

焼成したクリンカに，天然石膏をセメント中の SO_3 量で2.3%となるように配合し，小型ボールミルで粉砕した。

3. 試験結果及び考察

3.1 セメント原材料成分の調査

セメント原材料の分析結果を図3に示す。原料としての石灰石は，他の原料に比べEu,Coの含有量が極めて少ない。一方，副産物である石炭灰，リサイクル鉄原料，高炉スラグは，いずれもEu,Coの含有量が多い結果であった。また珪石，ボーキサイト，天然鉄原料は，Eu,Coの含有量が少ないものであった。

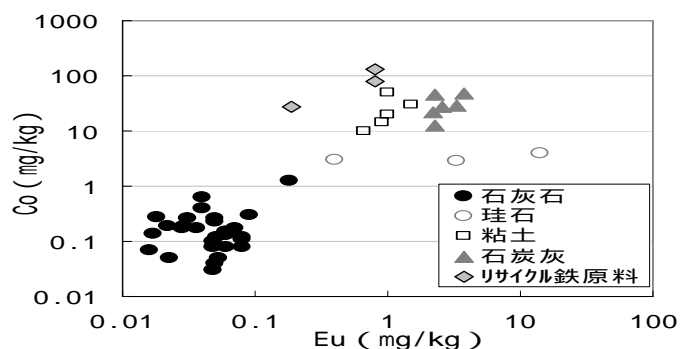


図3 セメント原料のEu/Co含有量

表1にセメント原料用の石灰石の分析結果の一部を示す。石灰石は低放射化コンクリートの骨材部分としても多用されるので，そのキャラクター化は極めて重要である¹⁾。表

1から，日本産のものが，Eu,Co含有量が海外産よりも概して低いことがわかる。これは日本産石灰石が石炭紀 ジュラ紀に大陸から孤立した大洋域で生成したためと考えられた⁵⁾。しかしNo25やNo26のように，Eu,Co含有量が高いものもあり，石灰石ならばどのようなものでもいいわけではなかった。CaO以外の成分が多い石灰石は，概して不溶残分（Insol）が高いので，不溶残分値<5%以下の石灰石が低放射化セメント原料の対象となった。不溶残分は石灰石鉱床周囲に共存する輝緑凝灰岩やチャートの化学組成に近いものであった。

更に地質的条件を加味して鉱床調査すると，

表 1 セメント用石灰石原料の分析値 1-26は日本産、A-Hは海外産

	母岩年代	火成岩貫入・色	地質区分	Insol(%)	Igloss(%)	Na2O(%)	MgO(%)	Al2O3(%)	SiO2(%)	P2O5(%)	SO3(%)	Cl(%)	K2O(%)	CaO(%)	Fe2O3(%)	Eu(ng/kg)	Co(ng/kg)	
1	ジュラ紀	有	黒	Iz	0.0	44.1	0.00	3.22	0.10	0.24	0.05	0.02	0.00	0.01	52.0	0.08	12	42
2	二疊紀	有	白	Ak	0.0	42.3	0.02	0.25	0.11	1.78	0.00	0.00	0.01	0.02	54.6	0.12	15	103
3	三疊紀	無	灰	Ch	0.0	42.8	0.00	0.67	0.25	0.38	0.02	0.04	0.03	0.02	55.5	0.09	15	211
4	ジュラ紀	無	灰	Iz	0.0	43.6	0.00	0.21	0.03	0.09	0.01	0.00	0.00	0.01	55.1	0.03	19	40
5	石炭紀	有	白	Ak	0.0	45.0	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.00	54.8	0.01	20	254
6	石炭紀	無	灰	Ki	0.0	44.4	0.00	0.45	0.11	0.91	0.02	0.02	0.03	0.00	53.9	0.08	23	281
7	二疊紀	有	白	Ak	0.0	43.5	0.01	0.22	0.03	0.16	0.01	0.00	0.00	0.01	55.2	0.07	23	50
8	二疊紀	無	白	Ch	0.0	43.2	0.00	0.38	0.04	0.64	0.00	0.02	0.00	0.01	55.4	0.02	25	115
9	二疊紀	無	白	Ak	0.0	43.7	0.00	0.50	0.04	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	55.4	0.02	33	101
10	二疊紀	有	白	Ak	0.0	42.8	0.00	0.30	0.05	0.12	0.01	0.07	0.03	0.00	56.6	0.03	34	44
11	二疊紀	無	白	Ch	0.2	42.7	0.06	1.03	0.28	0.32	0.07	0.00	0.00	0.01	55.4	0.01	36	170
12	ジュラ紀	有	灰	Iz	0.4	42.8	0.00	3.25	0.27	2.40	0.07	0.02	0.00	0.05	50.7	0.28	39	700
13	二疊紀	有	白	Hi	0.1	41.6	0.05	0.34	0.50	1.16	0.06	0.08	0.05	0.06	55.9	0.03	47	93
14	二疊紀	有	灰	As	0.1	43.6	0.00	0.36	0.03	0.26	0.01	0.01	0.00	0.01	54.9	0.06	47	38
15	二疊紀	無	白	Ak	0.0	43.3	0.00	0.34	0.01	0.15	0.01	0.01	0.00	0.00	55.6	0.08	49	100
16	三疊紀	無	灰	Ch	0.2	43.0	0.02	0.46	0.07	1.13	0.01	0.01	0.00	0.01	54.3	0.24	50	480
17	石炭紀	無	白	Ak	0.0	43.7	0.01	0.42	0.06	0.15	0.01	0.01	0.00	0.01	54.4	0.09	52	15
18	二疊紀	有	白	Ab	0.6	43.8	0.02	1.11	0.57	1.84	0.01	0.03	0.03	0.01	52.3	0.26	53	75
19	二疊紀	有	灰	Ak	0.0	43.3	0.00	0.38	0.04	0.21	0.01	0.00	0.00	0.01	55.5	0.02	53	23
20	三疊紀	無	灰	Ch	0.1	43.1	0.01	0.28	0.07	0.76	0.02	0.00	0.00	0.02	55.0	0.09	58	230
21	石炭紀	無	灰	Ak	0.1	43.6	0.00	0.38	0.09	0.15	0.02	0.01	0.00	0.01	55.4	0.04	72	200
22	二疊紀	有	灰	Mi	0.2	46.1	0.00	1.38	0.04	0.28	0.05	0.02	0.00	0.01	52.0	0.06	80	300
23	二疊紀	無	灰	Mi	0.2	44.5	0.00	0.41	0.09	0.25	0.01	0.01	0.02	0.01	54.5	0.12	82	93
24	二疊紀	無	灰	Ak	0.7	42.6	0.01	0.29	0.53	1.64	0.03	0.03	0.00	0.12	53.7	0.31	91	69
25	二疊紀	有	灰	Ch	7.4	35.6	0.07	0.48	3.17	5.72	0.12	0.01	0.00	0.52	51.1	2.20	180	1260
26	二疊紀	無	黒	Ki	13.1	41.1	0.05	2.10	0.85	4.39	0.02	0.59	0.00	0.03	50.1	0.67	280	1820
	n=26	日本産試料の	平均	0.9	43.1	0.01	0.74	0.29	0.97	0.03	0.04	0.01	0.04	54.2	0.20	57	266	
				2.9	1.8	0.02	0.85	0.63	1.38	0.03	0.11	0.01	0.10	1.7	0.43	57	413	
				最大	13.1	46.1	0.07	3.25	3.17	5.72	0.12	0.59	0.05	0.52	56.6	2.20	280	1820
				最小	0.0	35.6	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.11	0.01	12	15
A	第四紀	未	黄	フィリピン	0.3	43.1	0.02	0.31	0.61	0.94	0.04	0.01	0.01	0.06	53.6	0.30	71	690
B	カンブリア紀	中	黒	韓国	12.2	41.8	0.01	3.53	1.34	3.67	0.05	0.05	0.02	0.45	47.6	1.11	80	1863
C	シルル紀	未	灰	中国	32.1	31.7	0.40	0.84	2.40	13.62	0.09	0.18	0.01	0.59	47.0	1.96	370	3000
D	三疊紀	大	白	アメリカ	21.4	40.5	0.05	1.66	0.41	1.59	0.25	0.01	0.00	0.04	54.6	0.31	400	150
E	白亜紀	未	白	イギリス	5.5	43.6	0.01	0.17	0.17	0.45	0.14	0.03	0.00	0.03	54.5	0.13	141	980
F	三疊紀	中	灰	スイス	1.5	43.7	0.01	0.18	0.31	0.84	0.02	0.03	0.00	0.05	54.0	0.16	150	150
G	ジュラ紀	大	黄	フランス	5.9	43.7	0.01	0.32	0.12	0.63	0.60	0.03	0.00	0.04	53.8	0.59	980	120
H	ジュラ紀	中	黄	フランス	1.1	31.4	0.05	0.92	3.33	20.00	0.05	0.49	0.03	0.35	41.7	1.06	100	1234

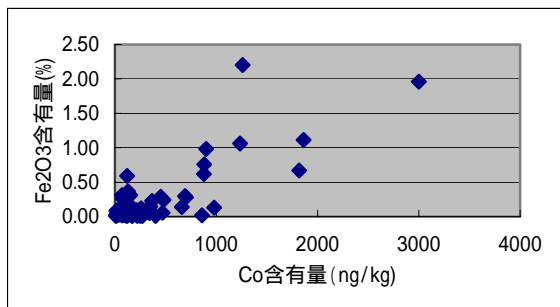


図 - 4 石灰石中のCoと Fe₂O₃ の含有量の関係

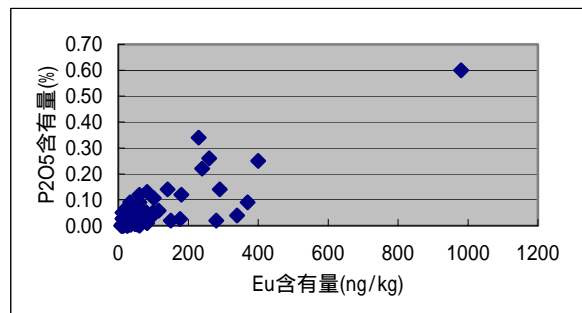


図 - 5 石灰石中のEuと P₂O₅ の含有量の関係

変成作用を受けていない石灰石のうち Eu 含有量が低いものは、径 5km 以上の大鉱床で得られた。また近くに火成岩が存在し、石灰石が大理石化した場合、表 1 の No2 試料のように SiO₂, Al₂O₃, MgO のマグマ成分があまり注入されない試料と、No25 のようにマグマ成分が大幅に注入されている試料があった。No26 試料は大量の碎屑性物質を挟雑する為に、Si, Al 成分が増加したものと考えられる。この場合ある程度粉碎選鉱により対処することが可能であり、その結果、放射化成分の混入が低減した。

石灰石中の Co と Fe₂O₃ 含有量の間には、図 4 のような相関があり、Eu と P₂O₅ 含有量の間には図 5 のように相関があった。この結果、Eu の石灰石中における存在形態が、リン酸塩である可能性が示唆された。セメント中の Eu 含有量についてはある程度原材料に起因する傾向が認められたため、この Fe₂O₃ と P₂O₅ 含有量をもとに低放射化材料用原料の予備選定を行った。

3.2 粉碎時のコンタミネーション確認試験

Co 含有量については、同じ種類のセメント間でもばらつき幅が大きく、原材料以外の要因も予想された。粉碎時の影響を図 6 に示す。粉碎機の材質によっては、短時間の粉碎でも Co が容易に混入することが確認された。このように粉碎機の材質によって、セメントへの Co のコンタミネーションが生じることに配慮すると、粉碎時のこれら粉碎媒体の磨耗量も考慮する必要がある。たとえば Co を含まないアルミナボールを粉碎媒体として使用すれば、粉碎時のコンタミネーションは防止可能と予想された。

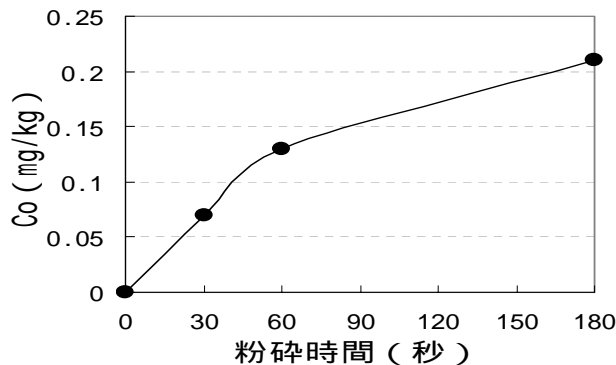


図 6 超鋼による粉碎時間と Co 汚染の関係

3.3 焼成時のコンタミネーション確認試験

セメント中の Eu 含有量がばらつく要因として石炭灰中に Eu が多く含まれることがある。クリンカの焼成工程で使用する石炭に含まれる灰分

の影響が大きいものと予想された。そこで石炭を燃料とする工場製のクリンカと、電気炉試製クリンカ (クリンカの原料はともに同じ) を比較した。各クリンカ中の Eu, Co 含有量の差を図

7 に示す。電気炉製クリンカでは、Eu と Co の含有量はいずれも少ないことが確認された。ちなみにクリンカの焼成工程で灰分 15% の石炭燃料を使用し、生産されたクリンカのうち約 1.5% は灰分から成る³⁾と仮定し、またこの灰分の Eu, Co 含有量を図 3 記載の石炭灰の平均値と仮定した場合、図 7 に示した焼成工程の違いによる Eu, Co 含有量の差は概ね妥当な値と計算された。この結果から、ほとんど灰分のない石油やガス⁶⁾を燃料として使用すれば、燃焼時のコンタミネーションは防止可能と予想された。

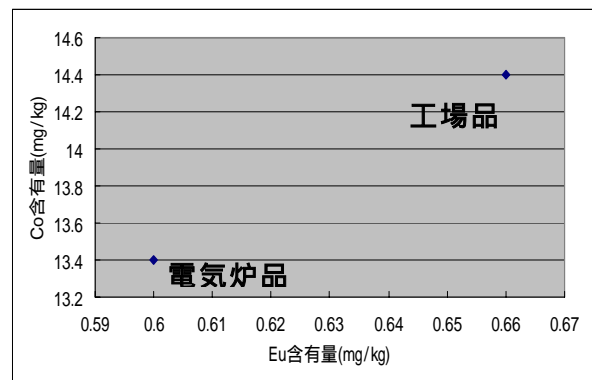


図 - 7 工場品と電気炉品の Eu, Co 含有量比較

3.4 低放射化セメントの試製

市販セメントの Eu, Co 含有量を、図 8 に示す。低熱セメントは、普通セメントに比べ Co が多くなる傾向にあった。これはリサイクル鉄原料、あるいは微粉碎するためのコンタミネーションに起因するためと考えられる。表 2 に示すように、低熱セメントは普通セメントに比べフェライト相 (C₄AF) が多く、鉄原料の使用原単位が大きい。低放射化セメント (低熱型) を試製するに当たり、Co 含有量低減のために鉄原料の種類に留意した。一方 Eu について低熱セメントは、普通セメントよりも少ない含有量となる傾向にあった。これは低熱セメントは普通セメントに比べ、アルミナ相 (C₃A) が少なく、Al₂O₃ 源となる石炭灰・粘土の使用原単位が小さいためと考えられた。従って低放射化セメント (低熱型) を試製する場合、Eu 含有量低減のために石炭灰・粘土の使用量を減らす必要があった。

以上の結果から、低放射化セメント試製に

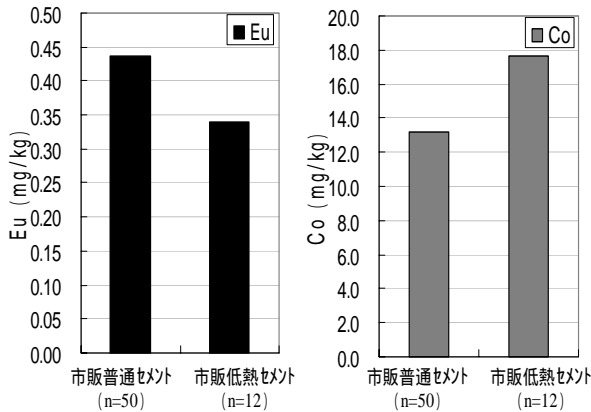


図 - 8 (a) (b)
市販セメントのEu含有量 (a) とCo含有量 (b)

当たり鉱物構成を，表 - 2の「低熱セメント」のように設計し，表 - 3の原料を選択した。石灰灰・粘土・珪石は蛭石に代替した。リサイクル鉄原料は赤鉄鉱に代替した。火成岩中に0.001%程度のCoが含まれることから，磁鉄鉱ではなく赤鉄鉱を使用することとなった。

表 - 2 セメント鉱物構成割合 (ポグ (%))

	C3S	C2S	C3A	C4AF
普通セメントの鉱物組成 (%)	55.5	20.0	9.0	9.0
低熱セメントの鉱物組成 (%)	26.5	53.0	3.5	11.0

表 - 3 低放射化のための原料変更

	従来の日本のセメント	開発中の 低放射化セメント	
	石灰石	例えば	石灰石
含有量	粘土	Insok<5%	
の検討	珪石	Eu<150ng/kg	ろう石
なし	石灰灰	Co<150ng/kg	
	リサイクル鉄原料	等の基準で	天然赤鉄鉱
	副産石膏	管理された	天然石膏

試製した低放射化セメント (低熱型) の化学成分分析結果と，セメント鉱物分析・水和熱・強度測定結果を表 - 4，5に示す。いずれもJIS R 5210の低熱セメントの規格を満足していた。ICP質量分析法でEu,Coを迅速分析した結果を図 - 9に示す。市販低熱セメントと比べた結果では，Eu,Coともに低減できていた。特にCoについては大幅に低減することができていた。

しかしEuに関しては，石灰石以外の最適化が図られていないため，なお削減の余地が大きいことがわかった。一例を挙げれば，表 - 6に珪素源候補のEu,Co含有量を示すが，Eu,Coの両方とも含有量の少ない原料は少ない。珪砂の中には低含有量のものがあるが，硬度が高いため

粉砕時に粉砕媒体からのコンタミネーションがあり，今後の解決すべく検討課題として残されている。

表 - 4 試製低放射化セメントの化学成分%

遊離石灰分	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
0.54	0.02	1.42	2.51	26.5	0.00	2.33	0.00	0.01	63.6	3.03

表 - 5 試製低放射化セメントの物理特性

C3S	C2S	C3A	C3AF	7d水和熱	28d水和熱	7d圧縮強さ	28d圧縮強さ
27.2%	55.7%	1.5%	9.2%	210J/g	280J/g	11N/mm ²	35N/mm ²

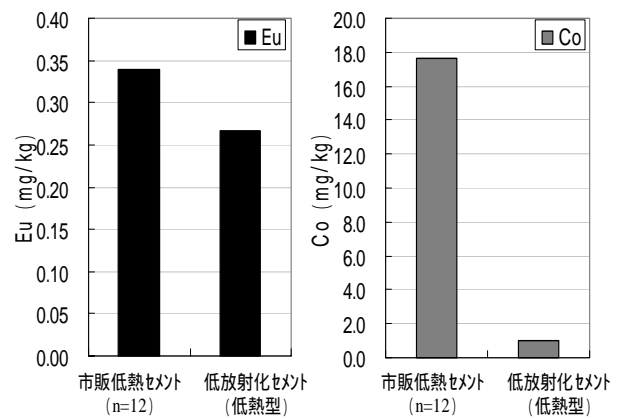


図 - 9 (a) (b)
低放射化セメントのEu(a) とCo含有量 (b)

表 - 6 珪素源候補のEu,Co分析結果

産地・形態	Eu (ng/kg)	Co (ng/kg)
豪州・珪砂	< 1	6
インド・珪砂	45	50
日本・流紋岩	500	2300
日本・チャート	52	4400
韓国・蛭石	1210	170
日本・蛭石	400	190
カナダ・シリカフェウム	24	1180
中国・シリカフェウム	1900	4700

3.5 低放射化コンクリート適用への効果

図 9に示すように本研究の結果では，Euが27%，Coが95%の低減されていた。このセメントを結合材として用い，石灰石骨材 (表 1記載のNo19石灰石を利用) をもとに低放射化コンクリートを製造したと仮定すると，計算方法にもよるが，非石灰石コンクリート (普通セメント + 安山岩骨材利用⁸⁾) と比較して，D/C < 1/3が実現されることが判明した。これは低レベル放射性廃棄物 (L2) で処理すべきものが，極低レベル放射性廃棄物 (L3) の処理でよいこ

とになる⁹⁾。なおクリアランスレベルの判断基準は、対象核種濃度 (D) とクリアランスレベル (C) を比較して低いことを実証することであり、¹⁵²Eu<0.1(Bq/g), ⁶⁰Co <0.1(Bq/g) をいくつかの被ばくシナリオに沿って計算した結果からクリアランスが認可される²⁾。

更に原材料の低放射化に取り組み、この D/C < 1/10となるならば、BWR 原子炉の生体遮蔽壁の40年運転停止後(6年冷却)の中性子線束が<1n_{th}cm⁻²s⁻¹となり、L3(極低レベル放射性廃棄物)レベルを、クリアランスとして放射性廃棄物の区分からはずすことが可能となる⁹⁾。表-7に110万kW級の原子力発電所の解体に伴い発生する放射性廃棄物発生量の試算結果を示す。なお鉄筋を主とする金属が放射性廃棄物として発生する可能性があるが²⁾「革新的実用原子力技術開発(経済産業省:代表東北大):クリアランスレベル以下にするための低放射化設計法に関する技術開発」²⁾では総合的に原子力施設からの発生物全体の低放射化にも取り組んでおり、鉄筋の低放射化も課題である。

表 - 7 110万kW級 BWR 原子力発電所の解体時に発生する放射性廃棄物発生量の計算結果

レベル区分 m3単位	金属	コンクリート	二次廃棄物	合計
L1高 低レベル放射性廃棄物	90	0	10	100
L2低レベル放射性廃棄物	400	400	800	1600
L3極低レベル放射性廃棄物	6600	600	0	7200

4. まとめ

原子力施設等の解体時に発生する放射性廃コンクリート量の削減を目的に、セメントの低放射化(Eu,Co含有量低減)の可能性を検討した。その結果、

- 1) 現状の普通ポルトランドセメントの1/3以下のEu,Co含有量に低減することが可能であることが実証された。

その方策は、以下の通りであった。

- 2) 石灰灰と粘土と珪石を蛸石等に代替する。
- 3) リサイクル鉄原料を天然原料に代替する。
- 4) 元来EuとCoの含有量の少ないと見られていた石灰石についても、セメント製造の使用原単位が大きいことから、更に原料を厳選する。その際の石灰石品質は、Insol<5%に留意することとし、P₂O₅, Fe₂O₃含有量の高いものは選択しない。
- 5) 粉砕機の材質に注意し、原料およびクリンカの粉砕時のコンタミネーションを防止す

る。たとえば粉砕媒体を、Co含有量の少ない材質とする。

- 6) クリンカー焼成時の燃料を石炭以外に切替える。たとえば灰分の少ない石油・ガスを使用する。

電気炉及びミニキルンで低熱セメントとして焼成実験を行った結果、JIS規格を満足するセメントにおいて、Eu,Coともに低減できたセメントを製造できた。

原燃料と製造工程の調査を、より広範囲にかつ詳細に実施すれば、さらなるセメントの低放射化も期待できることも判明した。その場合、D/C < 1/10となるならば、L3(極低レベル放射性廃棄物)レベルとなるコンクリートを、放射性廃棄物の区分からはずすことが可能となることが計算された。

放射線利用施設の管理に当たり、L3部分の廃棄物が発生しないとすると、大きな経済効果が期待されるため、今後も更なる低放射化セメントの開発を続けていく予定である。

参考文献:

- 1) 田野崎隆雄ほか:低放射化コンクリート, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1847-1852(2003)
- 2) 東北大学ほか:クリアランスレベル以下にするための低放射化設計法に関する技術開発, 革新的実用原子力技術開発費補助事業公募提案書, pp.10-11(2005)
- 3) OECD/IEA石炭産業諮問委員会[CIAB]日本委員会:産業用燃料-石炭の可能性, p.287(1982)
- 4) 舟阪渡、横川親雄:石炭化学, p.26(1960)
- 5) 石灰石鉱業協会編:石灰石骨材とコンクリート増補改定版, p69(2005)
- 6) 日本化学会:石炭と石油, 化学ライブラリー-9, pp.8-11(1958)
- 7) 社団法人セメント協会:セメントハンドブック 2005年度版, p.6(2005)
- 8) 東北大学ほか:クリアランスレベル以下にするための低放射化設計法に関する技術開発, 革新的実用原子力技術開発費補助事業平成17年度成果報告書概要版, p.31(2007)
- 9) 木村健一ほか:クリアランスレベル以下にするための低放射化設計法に関する技術開発(5)各種低放射化コンクリート, D28, 日本原子力学会2006春大会要旨集, (2006)
- 10) 総合エネルギー調査会:原子力部会公開資料, 原産マンスリー, No34,1998.