

## バックエンド対策

## 放射性廃棄物の処理、処分

## 放射性廃棄物処理、処分の技術開発

## 原子力設備のコンクリート放射化低減技術

## &lt;概要&gt;

原子炉や加速器の放射線遮蔽はコンクリートで行われることが多いが、コンクリート放射化低減技術とは、中性子などの照射によってコンクリート中に放射化反応により生成する残留放射能を少なくする技術をいう。原子炉や加速器の周りには生体遮蔽体として多量のコンクリートと鉄筋が使用され、これらが放射化されると多量の放射性廃棄物になってしまうことが懸念されている。一旦放射性廃棄物として分類されると、その管理に多額の費用がかかり、広大な埋設処分地が必要となる。そのため原子力発電所のリプレースに向けて、今後建設するものについては放射性廃棄物にならないようにすること、クリアランスレベル以下にして再利用できるようにすることが喫緊の課題になっている。また、低放射化コンクリートはメンテナンス時の作業員被ばく低減化という観点からも有用で、特に大型陽子加速器施設において実用化されている。低放射化コンクリートの適用は、開発当初においては少し建設コストが嵩むという難点があるが、ライフサイクルコストまでを考慮すれば経済的にも見合うものとなる。

## &lt;更新年月&gt;

2007年08月

## &lt;本文&gt;

## 1. コンクリート放射化低減技術の必要性

## 1) 原子力発電所

沸騰水型原子力発電施設（BWR）の廃止措置に伴い発生する廃棄物の区分例を図1に示す。110万kWクラスでは約50万トンのコンクリートが廃棄物として発生し、大部分は一般廃棄物であるが、この内、例えば低レベル放射性廃棄物に分類されるものは0.4万トン存在する（1）。現在解体が進められている日本原子力発電（株）東海1号炉の場合、その解体届によれば、クリアランスレベル（2）以上の放射性廃棄物は、放射化コンクリートで1.1万トン、汚染コンクリートで0.23万トン、放射化した金属類で0.23万トン、汚染金属類で0.04万トンとなり、放射化したコンクリートは全ての放射性廃棄物の69%を占めている。コンクリートが放射化されて放射性廃棄物になると、その埋設コストだけで、建設時の材料費に比べ、低レベル放射性廃棄物（L2区分、コンクリートピット埋設処分相当）で約460倍、極低レベル放射性廃棄物（L3区分、トレンチ埋設処分相当）で約65倍になると試算されている（表1）。今後の新たな建設においては、これを可能な限り少なくすることが望ましい。

## 2) 加速器施設

大型の陽子加速器施設では、運転停止後、空气中に生成された放射性ガスが減衰した後に加速器が設置された部屋に入り修理などを行っている。修理に時間的な制限（2～3日以内）があり、減衰時間がとれない場合は放射化した機器からの被ばく線量よりも、むしろ床、天井、壁など周りのコンクリート中に生成する残留放射能（主な線源は $^{24}\text{Na}$ ）からの線量を考慮する必要がある。放射化した機器からの放射線は可動型の局所遮蔽体で遮蔽することが可能であるが、壁、床、天井全面の放射化したコンクリートからの放射線は遮蔽することができない。そのため部屋内に作業員の退避場所が確保できない可能性がある。この対策として $^{24}\text{Na}$ 生成を抑制した低放射化コンクリートが効果的である。図2に $^{24}\text{Na}$ 生成を抑制した低放射化コンクリートを適用したときの線量率の低減効果を示す。加速管近傍は一次粒子および二次粒子で放射化した電磁石などの機器からの放射線で線量率はかなり高いが、少し離れると急激に減少する。他方、放射化したコ

ンクリートからの線量率は部屋内ほぼ均一であり、コンクリート壁表面では機器からの線量よりも放射化したコンクリートからの線量率の方が高くなる場合がある。このような場所に $^{24}\text{Na}$ 生成を抑制した低放射化コンクリート（図2中の破線）を適用すると、普通コンクリートと比較して線量率を数十分の一から数分の一まで低減可能となり、部屋内に作業員の待機場所が確保できるようになる。

他方、中小出力の陽子加速器施設や電子加速器施設では、一般に、放射化したコンクリートからの被ばく線量は無視できる。しかしながら、施設廃止時には、内側部のコンクリートおよび鉄筋中の残留放射能がクリアランスレベル以上になり放射性廃棄物として区分される可能性があるため、対策が必要である。国内加速器施設のコンクリート部位の残留放射能を調べた例

(3)を表2に示す。コンクリートの放射化によりクリアランスレベルを超える範囲は（平成17年12月1日に施行された原子炉におけるクリアランスレベルを準用）、大型粒子加速器（サイクロトロンおよびシンクロトロン）で約110cm、大型電子加速器で約110cm、PET（Positron Emission Tomography）に使用するポジトロン核種製造用サイクロトロンで約15cmである。そのため今後建設するものについては、床、天井、壁の内側に低放射化コンクリート板などを設置し、建物の主要部が放射化しない方策を講じることが望ましい。

## 2. 低放射化にする方法

原子炉や加速器の遮蔽体コンクリートには約10数ppmのCoや約1ppmのEuが含まれている。中性子がこれらの元素に吸収されると長半減期の放射性核種である $^{60}\text{Co}$ （半減期5.27年）、 $^{152}\text{Eu}$ （半減期13.54年）、 $^{154}\text{Eu}$ （半減期8.59年）が生成される。例えば $^{59}\text{Co}$ （n,  $\gamma$ ） $^{60}\text{Co}$ 反応の場合は、図3のように $^{59}\text{Co}$ に中性子nが吸収されると励起されて $^{60}\text{Co}$ になり、最終的には半減期5.27年で $\gamma$ 線と電子を放出して安定原子核の $^{60}\text{Ni}$ になる。原子炉の中で普通コンクリートを照射した場合、 $^{60}\text{Co}$ と $^{152}\text{Eu}$ および $^{154}\text{Eu}$ で $\gamma$ 線放出核種のほぼ全てを占めることが知られている（4）。コンクリートを低放射化にするためにはこれらの放射性核種の標的要素であるCoやEuを可能な限り含まない砂利やセメントを使用することになる。鉄筋の場合は $^{60}\text{Co}$ が残留放射性核種のほぼ全てを占めているので、低放射化するにはCo元素の含有量の少ない鉄筋を選ぶことになる。大型陽子加速器施設におけるメンテナンス時の $^{24}\text{Na}$ 対策には、 $^{24}\text{Na}$ 生成核反応の標的要素が少ないものをつくることが重要である。 $^{24}\text{Na}$ は $^{23}\text{Na}$ （n,  $\gamma$ ） $^{24}\text{Na}$ の他に $^{24}\text{Mg}$ （n, p） $^{24}\text{Na}$ 、 $^{27}\text{Al}$ （n,  $\alpha$ ） $^{24}\text{Na}$ 、 $^{28}\text{Si}$ （n, sp） $^{24}\text{Na}$ の各反応で生成する。その生成率は、LRL6.2GeV Bevatron施設における測定例（5）によれば、普通コンクリート壁の表面から深さ34cmまでは、それぞれ1.0、0.02、0.01、0.002である。つまり、Na含有量が非常に少なく、かつMgやAlの含有量も適度に少ない原料を選ぶことになる。

低放射化にするもう1つの有力な方法は中性子を遮蔽することである。ボロンなどの中性子吸収物質で構成されるパネルなどをコンクリート壁の前に設置することやコンクリートそのものに中性子吸収物質を添加して熱中性子束を下げるといった方策がとられる。

以上が低放射化にする代表的な方法であるが、実際の低放射化設計はかなり複雑で、低放射化にする目的、機器性能、運転期間、製造コストとライフサイクルコストとのバランスをとりながら低放射化材料の適用と中性子束の低減方法を考えなくてはならない。低放射化設計は、図4に示すように、これら3つの輪の中心部分に位置し、特にコストと機能を睨みながら放射化量を可能な限り低減させる作業になる（6）。これまで局所遮蔽用としてはブロック形状（図5、写真1）や充填コンクリートがある。その他にもプレキャストパネル形状や現場打設のマスキングコンクリートとして適用されている。

## 3. 低放射化コンクリートの開発

### 1) 原子力発電所

原子炉遮蔽コンクリート用の低放射化コンクリートは現在開発段階（7）であり、原料である骨材、セメント、混和材など1,000種類以上の材料について、原子炉などで標的元素の化学分析が行われている。図6に各種骨材のEu-Co分布の例を示す（8）。低放射化の骨材として挙げられている主なものは、電融アルミナ、珪石・珪砂、石灰岩などである。これらの低放射化の程度は、 $\Sigma D/C$ （ $\Sigma D_i/C_i$ 、 $D_i$ ：核種iの放射能濃度、 $C_i$ ：核種iのクリアランスレベル）換算で、通常使用されている安山岩の骨材と比較すると、電融アルミナは1/1,500程度、珪砂は1/150程度、高純度石灰岩は1/100程度である。これとともに低放射化セメントの開発、低放射化鉄筋の開発、放射化予測マップシステムの開発（図7）、放射化区分判定のための計算ツールの開発、低放射化設計基礎データの取得が行われている。セメントについてのEu-Co分布を図8に示す。低放射化の程度は、通常使用されている普通ポルトランドセメントと比較して、 $\Sigma D/C$ 換算でハイアルミナセメントは1/30程度、シリカフェームは1/10程度、白色セメントは1/3程度である。これらの低放射化原料を使って開発された低放射化コンクリートを表3に示す。現在まで、普通コンクリートと比較して $\Sigma D/C$ 換算で1/10から1/300程度の低放射化コンクリートやモルタルが開発されている。さ

らに、ボロン添加の併用で普通コンクリートと比較して1/10,000程度まで下げられると試算されている(9)。

## 2) 加速器施設

大型陽子加速器施設ではメンテナンス時の被ばくを低減するために、 $^{24}\text{Na}$ 生成抑制型の低放射化コンクリートが有力である。骨材における $^{24}\text{Na}$ 生成の主な標的要素であるNa、Mg、Alの含有量分布を図9に示す。石灰石のNa含有量は普通骨材の1/300程度で、低放射化原料として非常に優れていることがわかる。最近、日本原子力研究開発機構と高エネルギー加速器研究機構が共同で建設を進めている大強度陽子加速器施設(J-PARC)では、この $^{24}\text{Na}$ 生成量を制限するために、ナトリウム総量( $^{24}\text{Na}$ 生成標的核種の各質量に、各 $^{24}\text{Na}$ 生成比を乗じて算出した単位体積当たりの総量で(Na含有量 $\times 1.0$ ) + (Mg含有量 $\times 0.02$ ) + (Al含有量 $\times 0.01$ ) + (Si含有量 $\times 0.002$ ) )という指標を導入し、普通コンクリートに比べ被ばく線量が1/10以下になるような低放射化コンクリートを適用している(10)、(11)。J-PARC(図10)の各施設ではビームロスが大きいと想定される出射部(図5、写真2)や入射部に、普通コンクリートを使った場合の被ばく線量を1/10以下に低減する目的で、 $^{24}\text{Na}$ 生成を抑制した低放射化コンクリートが適用されている。これによりメンテナンス時の許容作業時間が約2倍に増加すると試算されている。

他方、ポジトロン核種製造用サイクロトロンなど中小出力の陽子加速器施設では、放射化したコンクリートからの被ばく線量は無視できる。しかし、廃止の際、コンクリートの内壁部や鉄筋部に放射性核種が蓄積し、これらの部位が放射性廃棄物に区分される可能性がある。そのためこれに対応した低放射化コンクリートの開発が行われている(図11)。現在ではさらにボロン添加型の低放射化コンクリートも開発されている。現在のポジトロン核種製造用サイクロトロンの遮蔽体の形状には、オープン型と自己遮蔽型があり、それぞれ放射化領域が異なる(図12)。オープン型では床、壁、天井の内側部分が放射化し、自己遮蔽型ではサイクロトロンの周りを自己遮蔽体で覆っているため、この部分とコンクリート床部が放射化する。そのためオープン型については内側部の全て(図5、写真3)に自己遮蔽型については床部分に低放射化コンクリートプレキャストパネルが採用されている。

---

## <関連タイトル>

[原子炉・核融合炉材料の照射損傷 \(03-06-01-05\)](#)

[放射性廃棄物の処理処分についての総括的シナリオ \(05-01-01-02\)](#)

---

## <参考文献>

(1) 総合エネルギー調査会原子力部会中間報告：商業用原子力発電施設解体廃棄物の処理処分に  
向けて、資料5(平成11年5月18日)

(2) 経済産業省令：平成17年11月22日経済産業省令第112号

(3) 文部科学省、原子力・放射線の安全確保HP：クリアランス技術検討WG、資料4-2(2006年  
3月)

(4) M.Kinno, et al. : Raw Materials for Low-Activation Concrete Neutron Shields, Journal of  
Nuclear Science and Technology, Vol.39, No.12, 1275-1280 (2002)

(5) W.S. Gilbert, et al. : Concrete Activation Experiment at the BEVATRON, UCRL-19368  
(1969)

(6) 林克己、金野正晴：原子力設備のコンクリート放射化低減技術、月刊 技術士(2006年9  
月)、p.8-11

(7) 長谷川晃、金野正晴、林克己：コンクリートの放射化低減技術開発の現状、原子力eye、  
Vol.53、No.6、60-63(2007年6月)

(8) 金野正晴：低放射化コンクリートの開発の現況、コンクリート工学、Vol.42、No.6、3-10  
(2004年6月)

(9) M.Kinno, et al. : Low-Activation Reinforced Concrete Design Methodology (10) -Low-  
Activation Concrete Based on Fused Alumina Aggregates and High Alumina Cement-, 19th  
International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Tront, Canada, Aug.  
12-17 (2007)

(10) N.Matsuda, et al. : A Study on Induced Activity in the Low-activationized Concrete for J-  
PARC, Journal of Nuclear Science and Technology, Supplement 4 (Mar.2004), p.74-77

(11) 田野崎隆雄、他：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、

1847-1852 (2003)

(12) 経済産業省総合エネルギー調査会原子力部会廃止措置対策小委員会公開資料

(13) J-PARCセンター: <http://j-parc.jp/>

(14) 金野正晴: 土木技術、62巻、8号 (2007.8) 、 p.47

---



**表1 コンクリートが放射性廃棄物になった場合の費用概算(建設時材料費に対する放射性廃棄物になった場合の埋設費の比)**

埋設区分 <sup>*1</sup>	埋設費／建設時材料費 <sup>*2</sup>
L1区分(1,725万円/m <sup>3</sup> )	2,800
L2区分(280万円/m <sup>3</sup> )	460
L3区分(40万円/m <sup>3</sup> )	65

(注)解体費、測定比、詰替費、管理費を含まず。

\*1 経済産業省総合エネルギー調査会原子力部会廃止措置対策小委員会公開資料(1997)による平均値。

\*2 充填率51%(JPDR実績)、1.2万円/m<sup>3</sup>と仮定。

下記の出典をもとに作成した。

[出典]経済産業省総合エネルギー調査会原子力部会廃止措置対策小委員会公開資料(1997)

## 表2 加速器施設のコンクリートの放射化

加速器施設のタイプ	建屋コンクリートが放射性廃棄物となる範囲*
・大型粒子加速器(サイクロトロン及びシンクロトロン)	表面から約110 cm
・大型電子加速器	表面から約110 cm
・ポジトロン核種製造用サイクロトロン	表面から約15 cm

注＊文部科学省放射線安全規制検討会クリアランス技術検討WG:資料4-2(2006年3月)を基にして、平成17年12月1日施行の原子炉におけるクリアランスレベルを適用した場合の放射化範囲。

下記の出所をもとに作成した。

[出所]文部科学省、原子力・放射線の安全確保HP:クリアランス技術検討WG、資料4-2(2006年3月)、  
[http://www.anzenkakuho.mext.go.jp/news/siryou/clear04/20060307\\_02.html](http://www.anzenkakuho.mext.go.jp/news/siryou/clear04/20060307_02.html)

# 表3 各種低放射化コンクリート(例)

No.	名 称	ボロン添加型の有無
1	低発熱1/10 <sup>*1</sup> 低放射化コンクリート	無
2	低発熱1/20低放射化コンクリート	無
3	低発熱1/30低放射化コンクリート <sup>*2</sup>	有
4	低発熱1/50低放射化コンクリート <sup>*2</sup>	有
5	1/100低放射化コンクリート <sup>*2</sup>	有
6	1/300低放射化コンクリート <sup>*2</sup>	有
7	1/300低放射化重量モルタル <sup>*2</sup>	有
8	L2→L3型 <sup>*3</sup> 低放射化コンクリート	有
9	L2→L3型低放射化重量モルタル	有

注 \*1  $\Sigma D/C$ が普通コンクリート比で1/10を示す。

\*2 一部は開発中の低放射化セメントの実用化を前提にしている。

\*3 低レベル放射性廃棄物の埋設区分のレベル2からレベル3に下げるタイプをいう。

[出典]長谷川晃、金野正晴、林克己:コンクリートの放射化低減技術開発の現状、  
原子力eye、Vol.53、No.6、62(2007年6月)

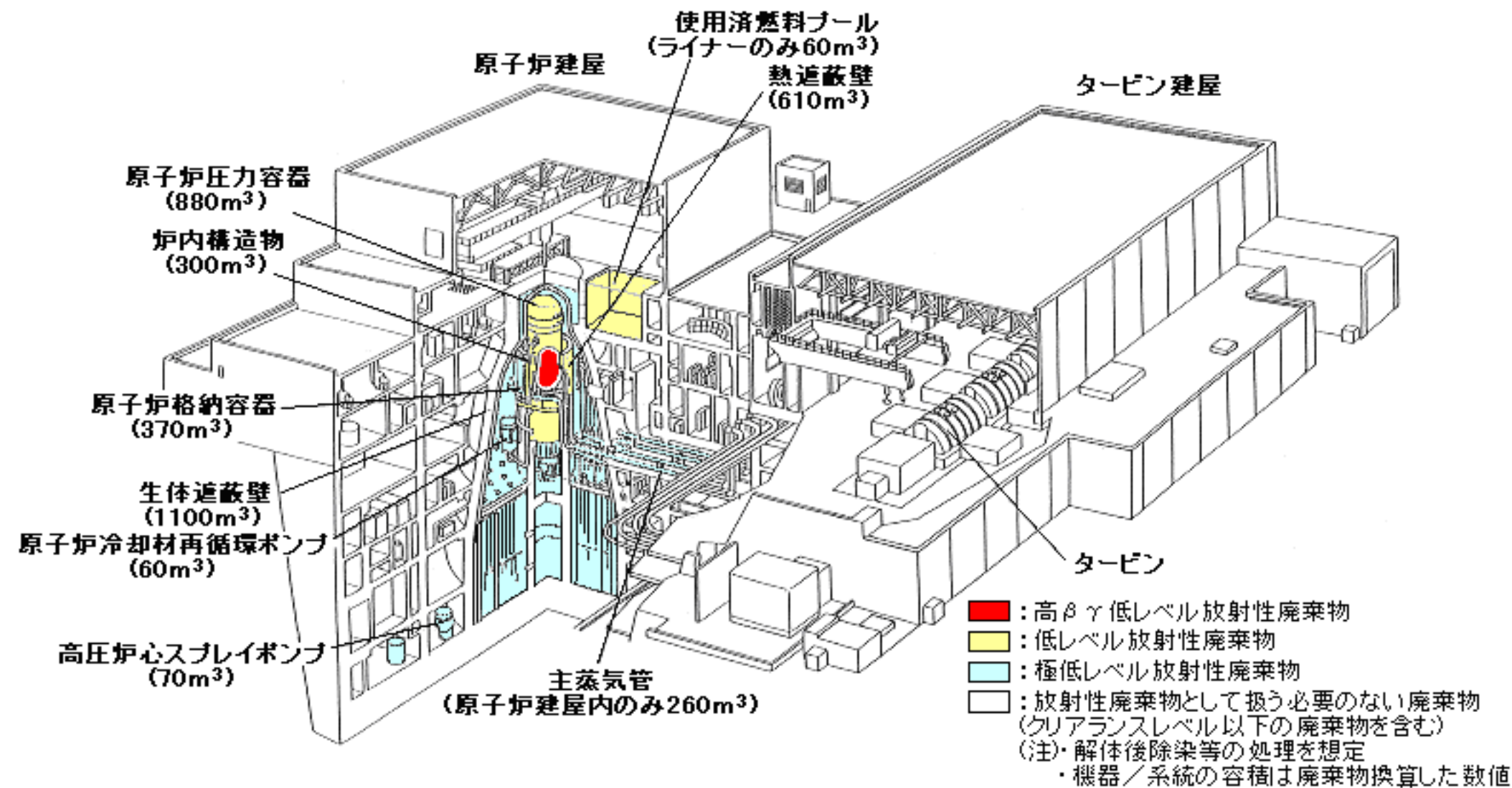


図1 BWR原子力発電施設の解体廃棄物

[出所]総合エネルギー調査会原子力部会中間報告:商業用原子力発電施設解体廃棄物の処理処分に向けて、  
資料5(平成11年5月18日)、<http://www.meti.go.jp/report/data/ggebcsoj.html>



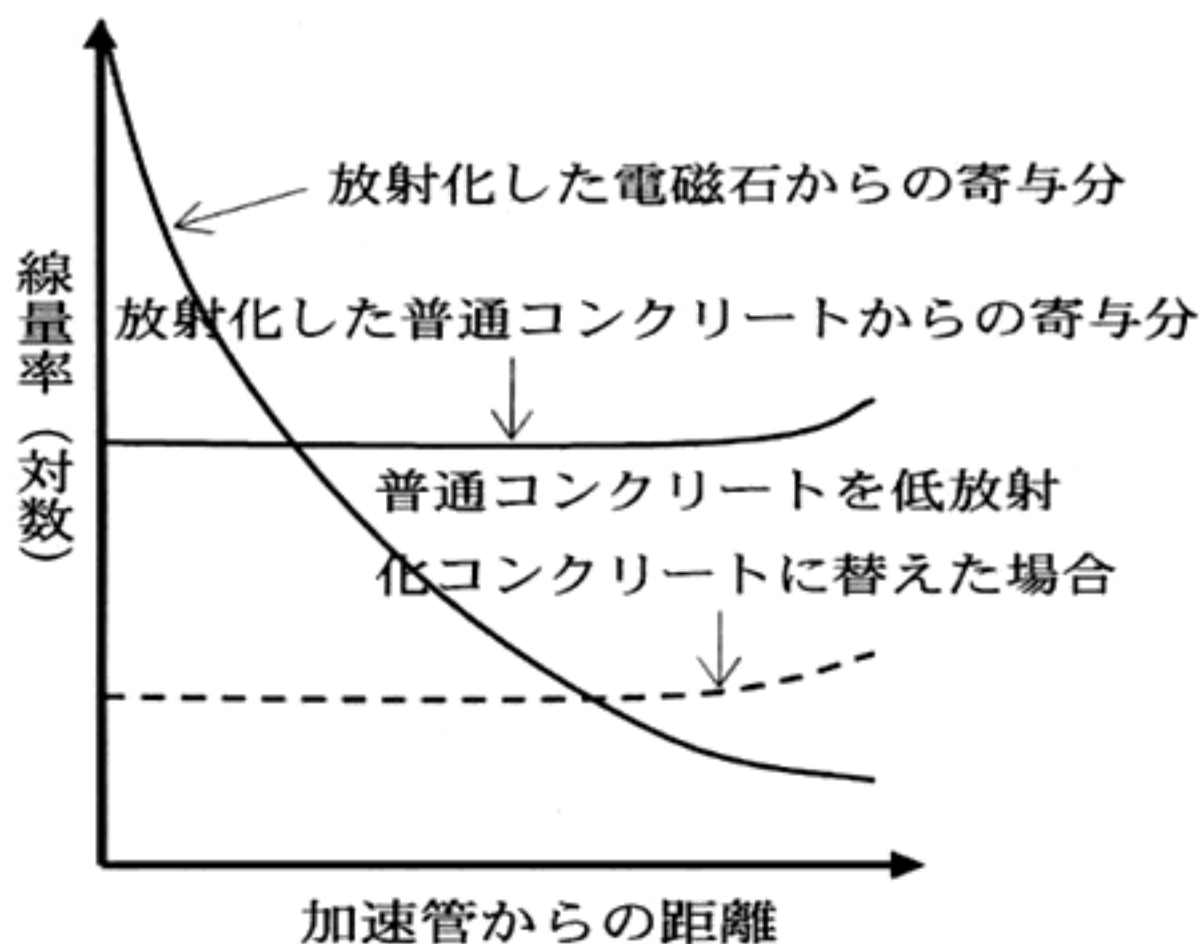
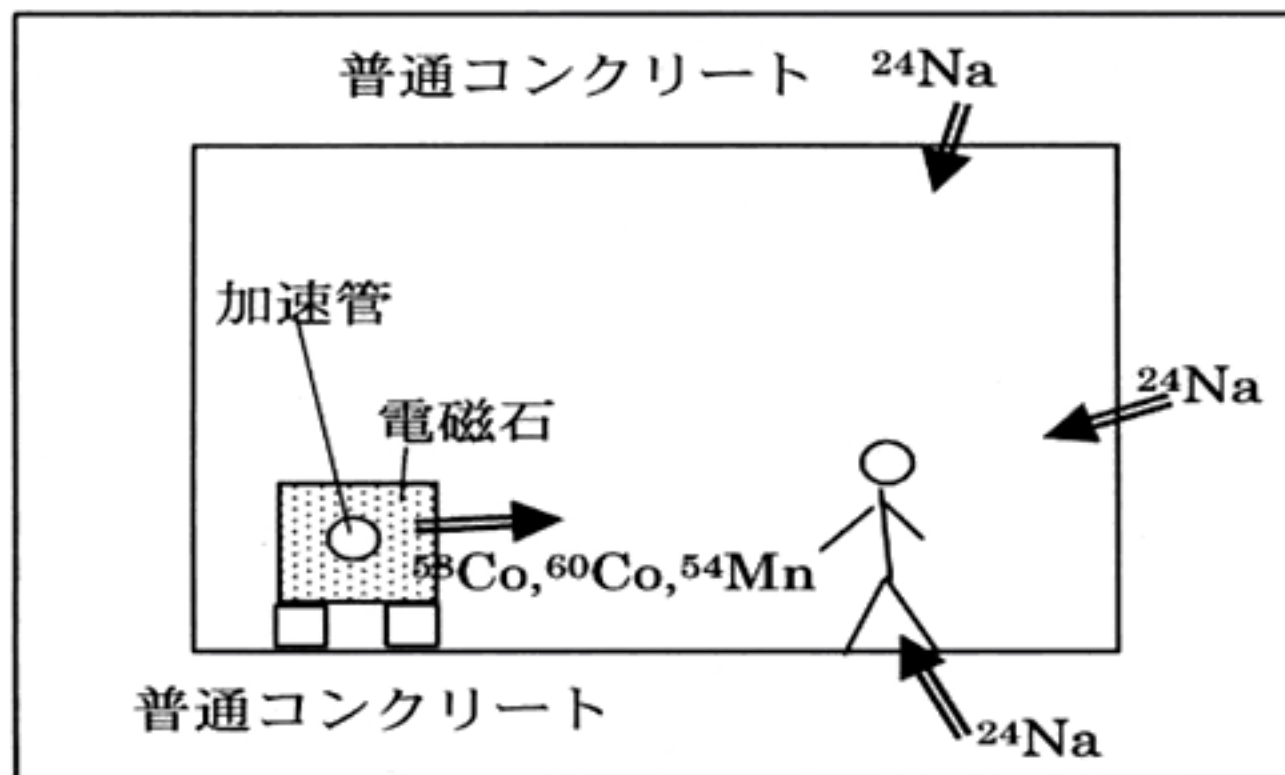


図2  $^{24}\text{Na}$ 生成を抑制した低放射化コンクリートによる被ばく線量の低減効果

[出典]金野正晴: 低放射化コンクリートの開発の現況、コンクリート工学、Vol.42、No.6、4(2004年6月)

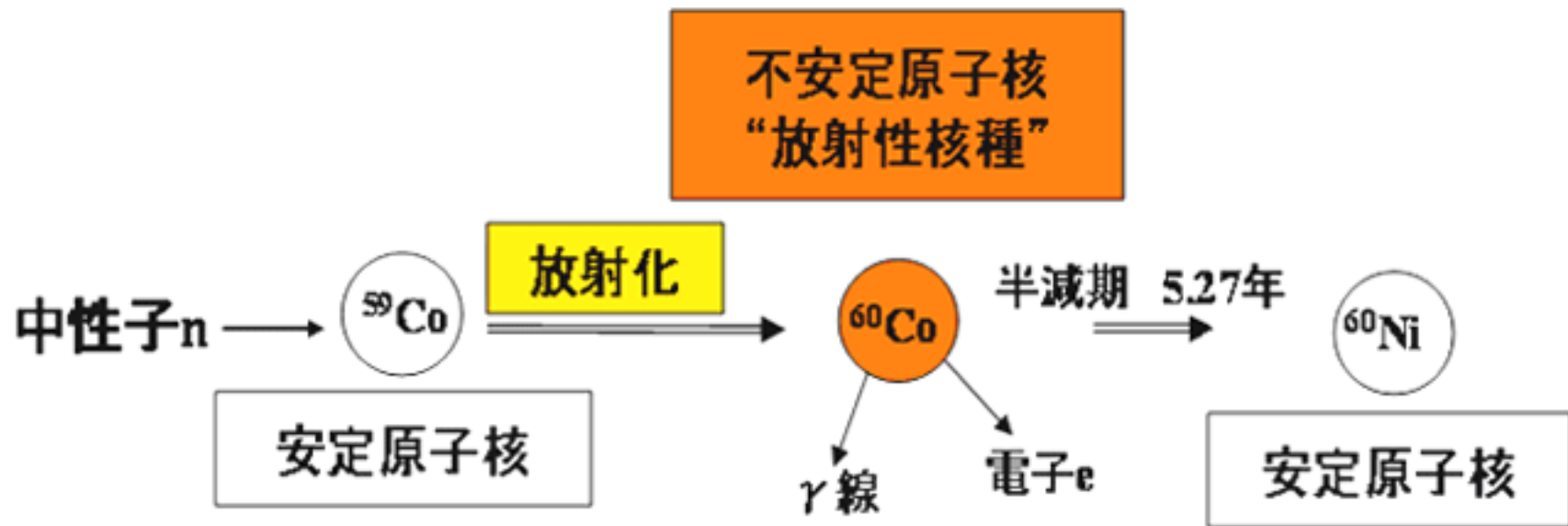


図3  $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$  反応

[出典]長谷川晃、金野正晴、林克己:コンクリートの放射化低減技術開発の現状、  
原子力eye、Vol.53、No.6、61(2007年6月)

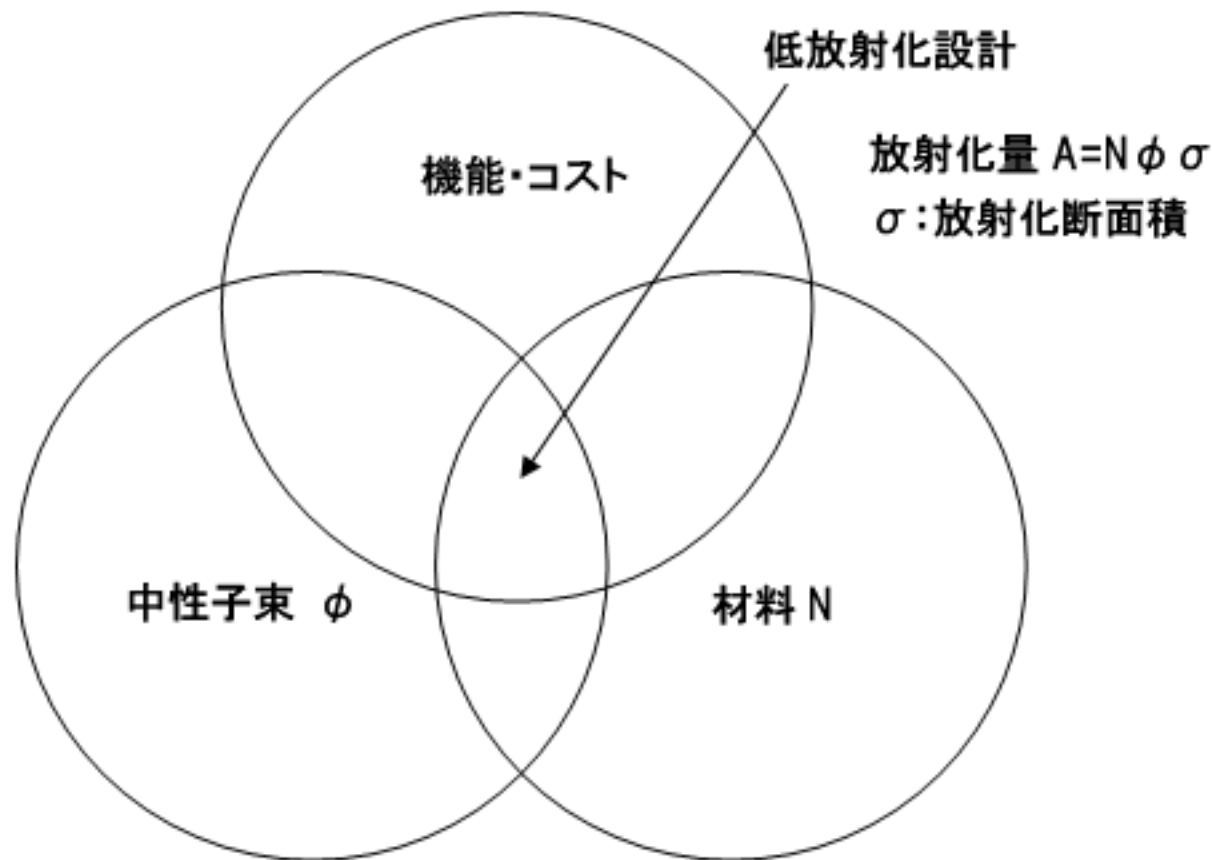


図 4 低放射化設計

[出典]林克己、金野正晴:原子力設備のコンクリート放射化低減技術、  
月刊 技術士(2006年9月)、p.10

写真1: 低放射化コンクリートブロック



写真2:  $^{24}\text{Na}$ 生成抑制型低放射化コンクリート



写真3: 低放射化コンクリートプレキャストパネルの適用例



低放射化コンクリートを  
打設したトンネル部  
(厚み2~2.4m)

3GeVシンクロトロン $\gamma$ -線出射部

## 図5 低放射化コンクリートの例

[出典] 写真1) 金野正晴: 低放射化コンクリートの開発の現況、コンクリート工学、Vol.42、No.6、9(2004年6月)

写真2) J-PARCセンター: <http://j-parc.jp/ja/news/2004/04/tunnel.jpg>

写真3) 金野正晴: 低放射化コンクリートの開発の現況、コンクリート工学、Vol.42、No.6、7(2004年6月)



( )内数値は試料数

$\Sigma D_i/C_i$  は熱中性子束  $2 \times 10^5 \text{ ncm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 40年運転, 6年冷却と仮定。

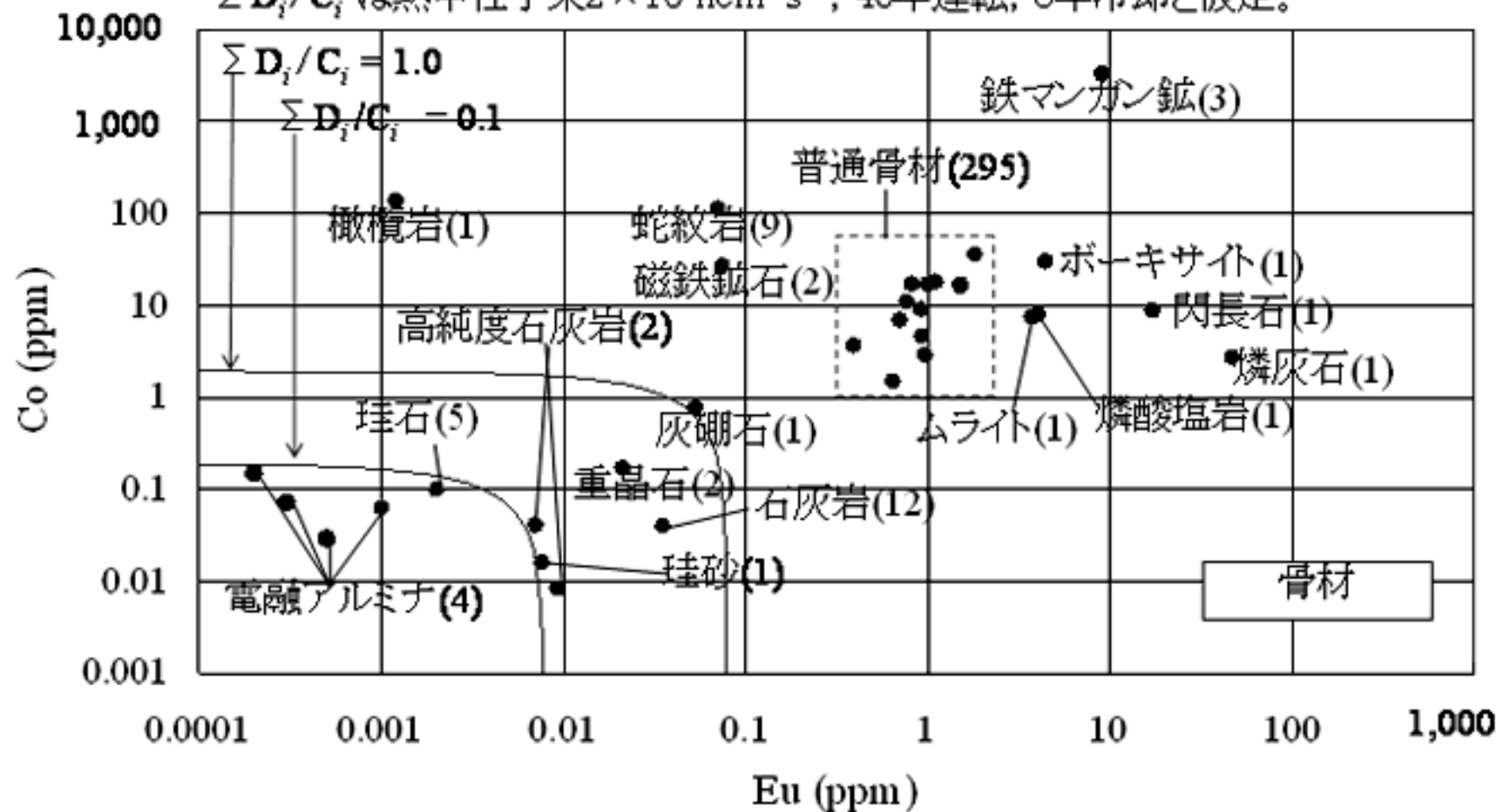


図6 各種骨材中のEu-Co含有量

[出典]長谷川晃、金野正晴、林克己:コンクリートの放射化低減技術開発の現状、  
原子力eye、Vol.53、No.6、61(2007年6月)



原子炉

生体遮へい壁

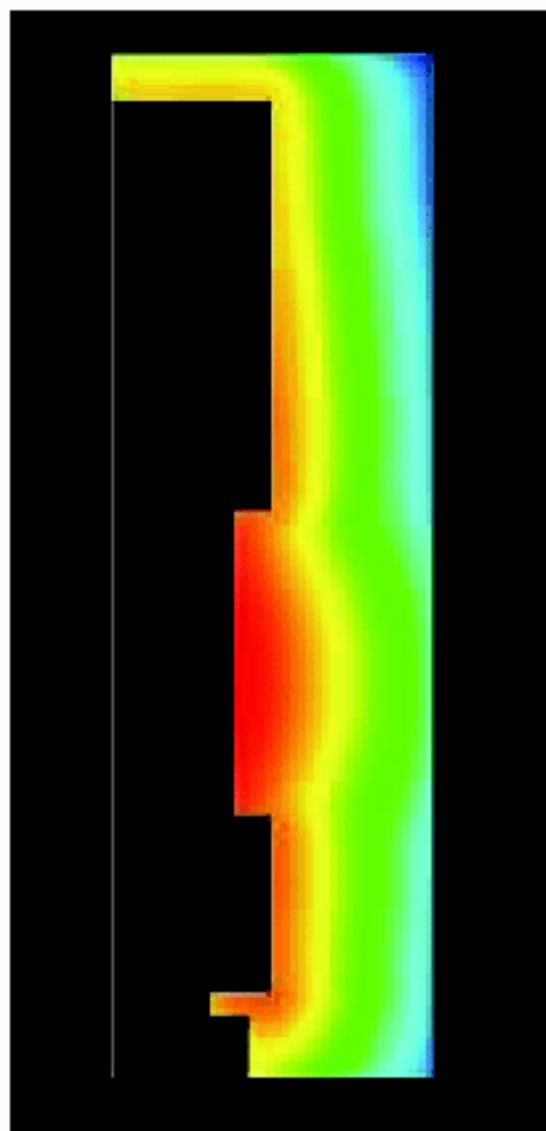


図7 コンクリート部位の放射化マップ

[出典]長谷川晃、金野正晴、林克己:コンクリートの放射化低減技術  
開発の現状、原子力eye、Vol.53、No.6、63(2007年6月)

( )内数値は試料数, av.は平均

$\Sigma D_i/C_i$  は熱中性子束  $2 \times 10^5 \text{ ncm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 40年運転, 6年冷却と仮定。

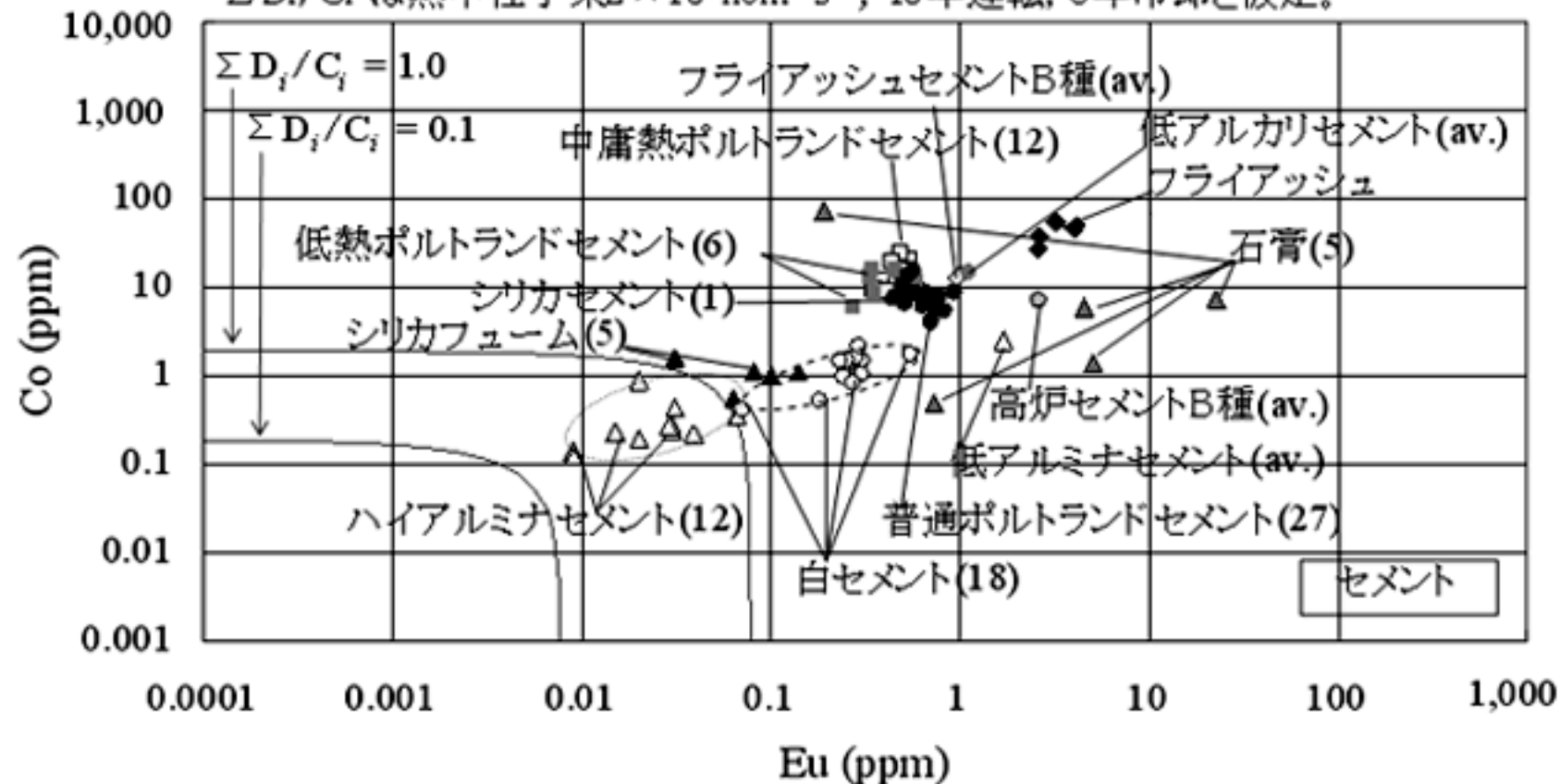


図8 各種セメント中のEu-Co含有量

[出典] M. Kinno, et al.: Raw Materials for Low-Activation Concrete Neutron Shields, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.39, No.12, 1277(2002)

( )内数字は試料数、注<sup>(1)</sup>日本の石灰石、石灰石鉱業協会(1983)

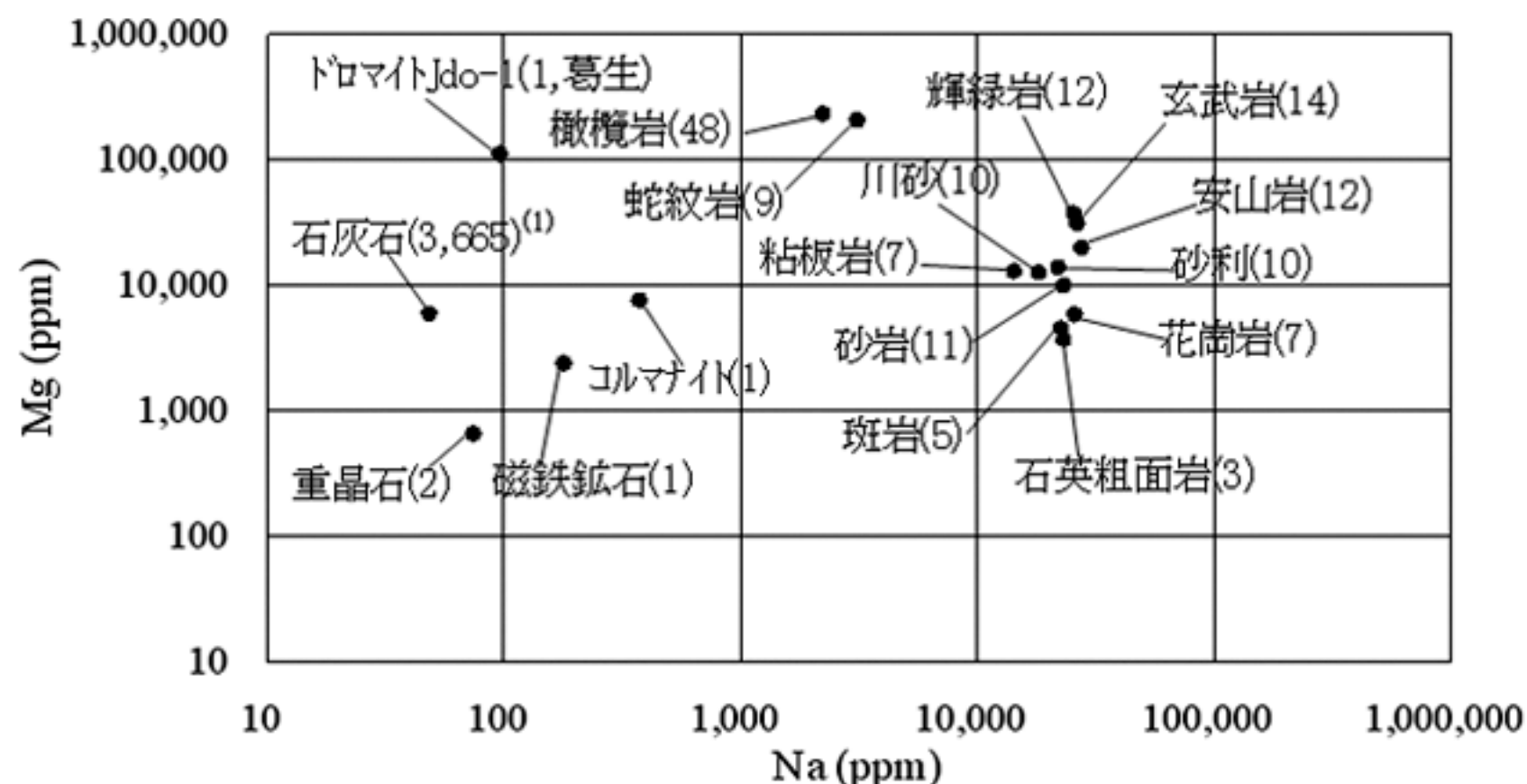
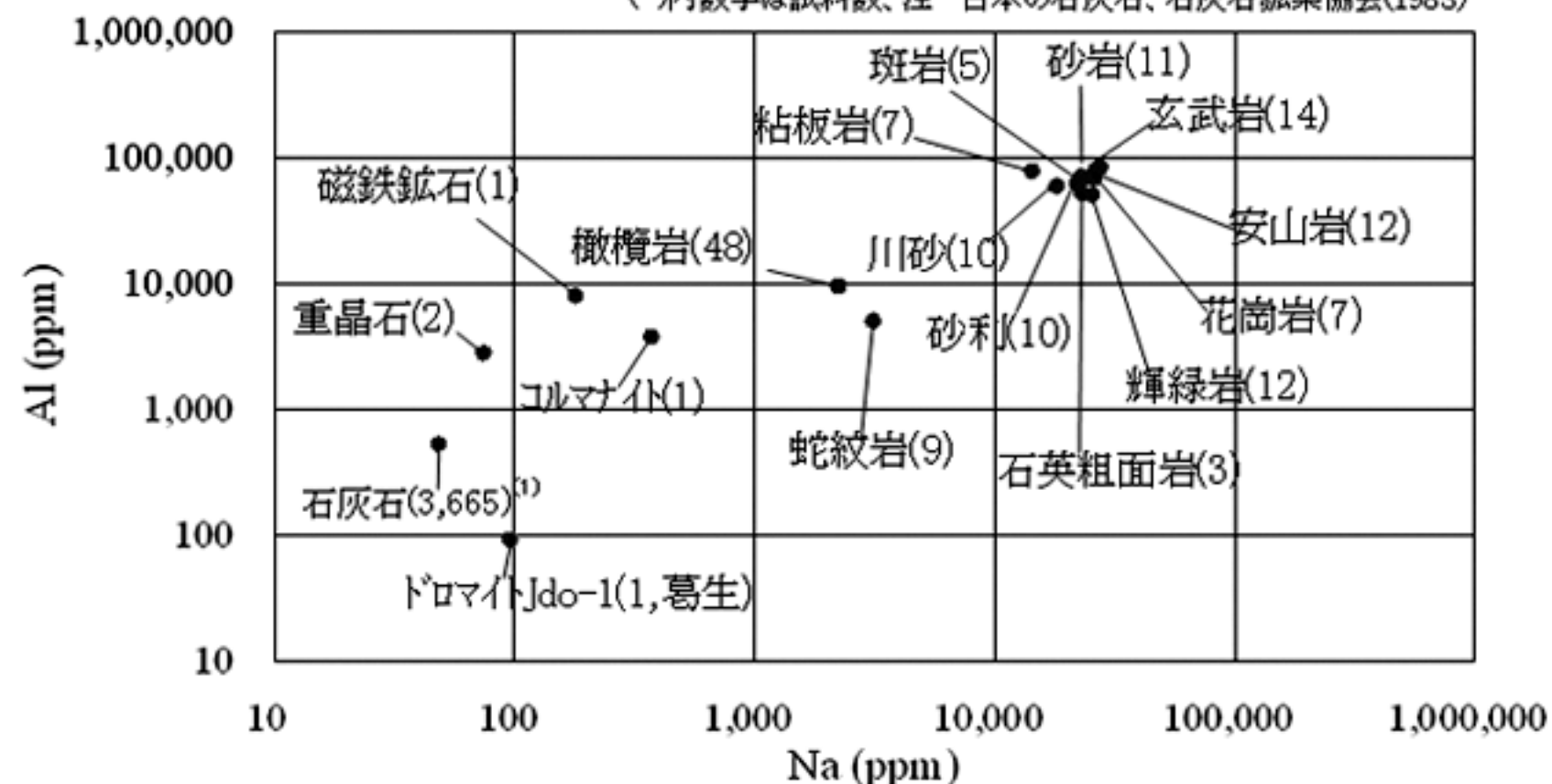


図9 各種骨材中のNa、Mg、Alの含有量

[出典]金野正晴:低放射化コンクリートの開発の現況、コンクリート工学、Vol.42、No.6、5(2004年6月)





図10 J-PARC全景

[出所]J-PARCセンター:<http://j-parc.jp/>

18MeV, 50  $\mu$ A, 48h/w, Target shield 1/10, 20年運転を仮定

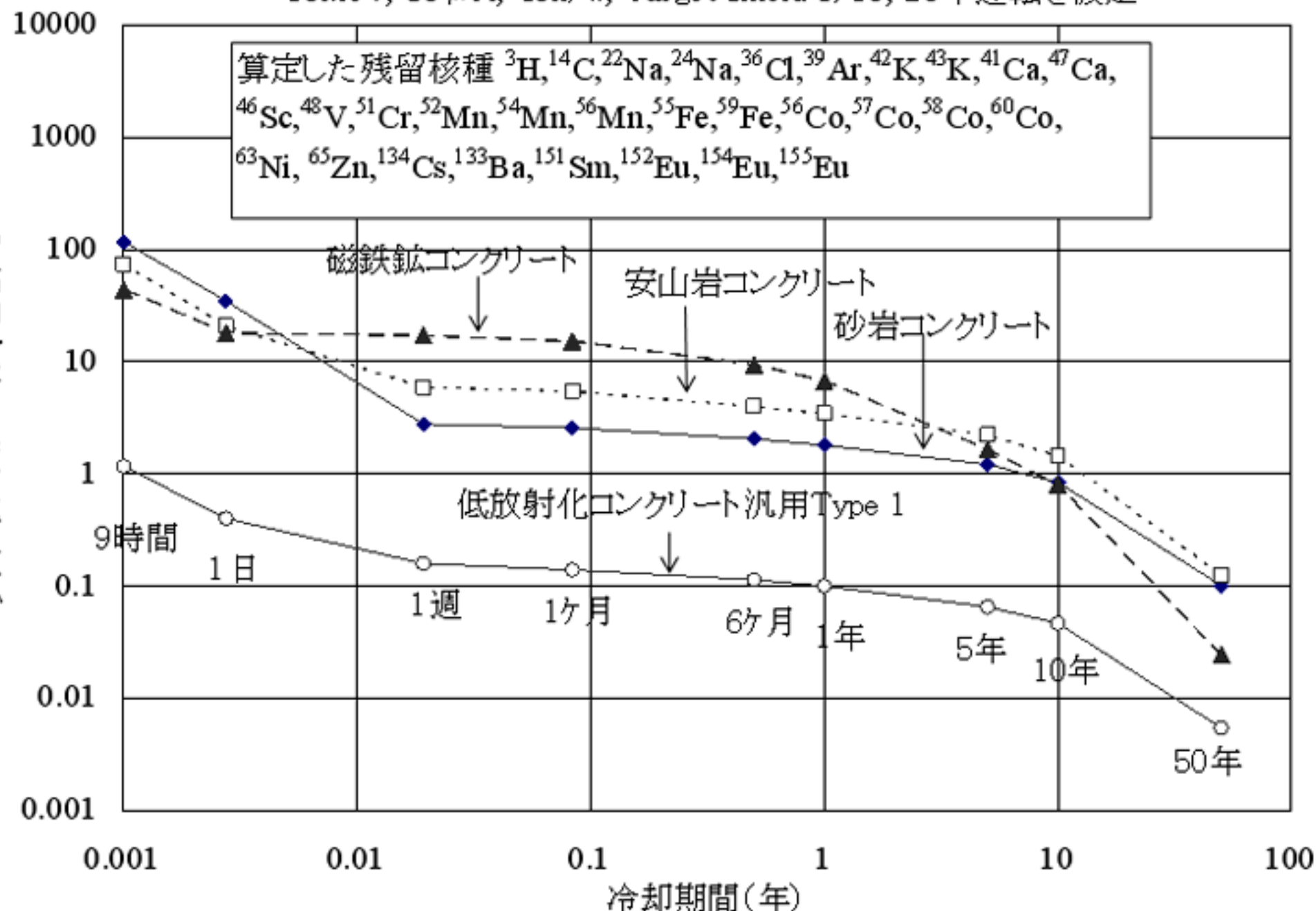


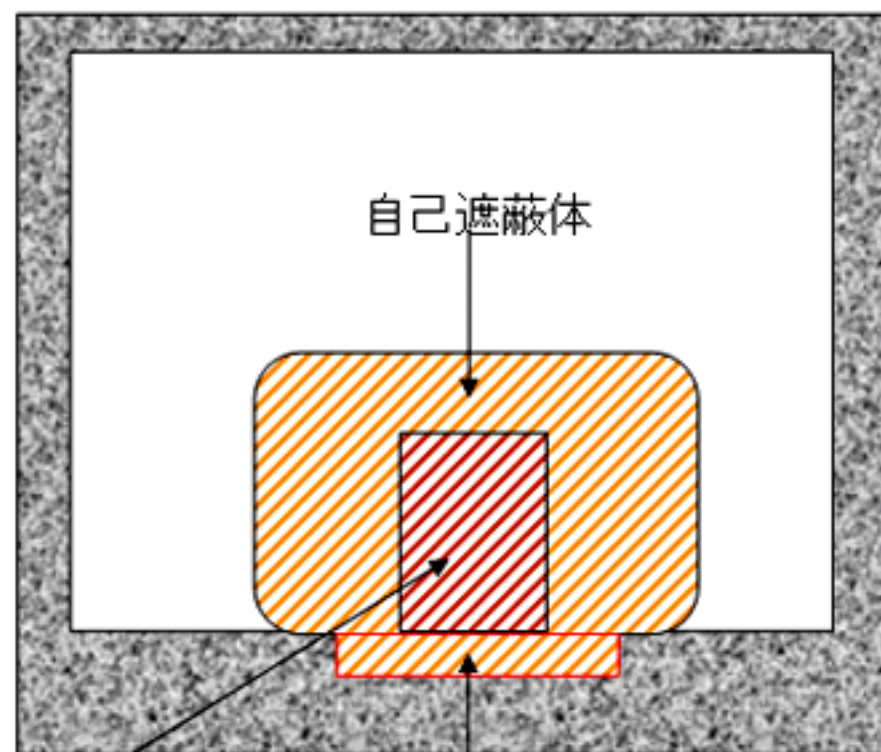
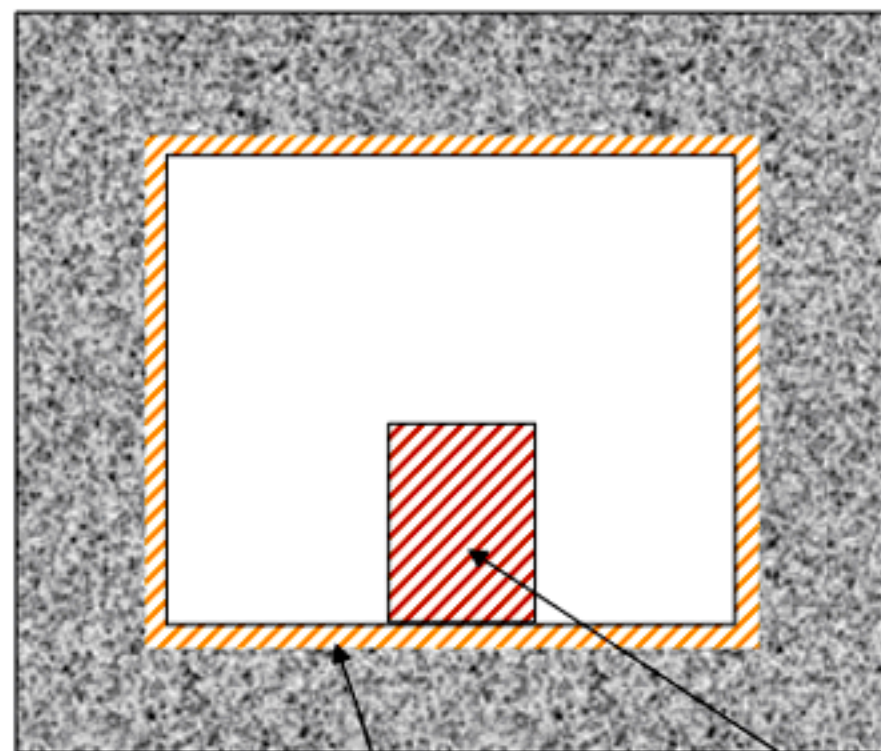
図11 ポジトロン核種製造用サイクロトロンでの低放射化コンクリートの  $\Sigma D/C$  (普通コンクリートとの比較)

[出典] 金野正晴: 低放射化コンクリートの開発の現況、コンクリート工学、Vol.42、No.6、8(2004年6月)



オープン型

自己遮蔽型



コンクリート部内側

サイクロトロン

コンクリート床部内側

図12 ポジترون核種製造用サイクロトロン放射化範囲(斜線部分)

[出典]金野正晴:土木技術、62巻、8号(2007.8)、p.47