

中性子遮蔽コンクリートの技術改良

普通コンクリートの1.7倍の中性子の遮蔽性能を有するコンクリートの生産性を向上

奥野 功一・鈴木 好幸・田中 聖一朗

中性子は放射線の一種である。中性子の利用範囲はがん治療であるホウ素中性子捕捉療法や燃料電池の開発、材料ナノ解析、非破壊検査等、非常に幅広い。しかし、中性子は放射線の一種であるため十分に遮蔽した施設の中で用いる必要がある。一般的に遮蔽は厚い壁で構成されるが、遮蔽をコンパクトにすることにより狭い敷地にも施設が建設できる可能性が出てくる。このような背景のもと、中性子遮蔽性能を高めた中性子遮蔽コンクリートが開発された。しかし、このコンクリートは骨材の影響によるコンクリートの硬化遅延があった。そこで製造に係る技術改良を実施して遅延を改善し、従来品と比べて約5%のコストダウンを実現した。

キーワード：建築, コンクリート, 中性子, 放射線, 遮蔽

1. はじめに

中性子とは放射線のうちの一つである。医療分野や検査分野に代表されるように放射線の利用は多様化しているが、中性子の利用範囲は特に幅広い。例えば、ホウ素中性子捕捉療法（BNCT）と呼ばれる癌の治療に用いられ、また水素の可視化や分析ができるという中性子の特徴を利用し、近年話題となっている燃料電池や水素吸蔵合金の開発にも用いられている。さらには材料の結晶構造解析や応力解析等を行う材料ナノ解析、自動車のエンジン等の透過画像を非破壊で撮影する中性子ラジオグラフィ等、中性子は様々な分野で用いられている。

このように便利な中性子であるが、中性子は放射線のうちの一つであるため十分に遮蔽した施設の中で用いる必要がある。放射線の遮蔽方法は、放射線の発生源近くで遮蔽する局所的な遮蔽方法と、壁など発生源から離れた場所で遮蔽する方法の大きく2つに分けられる。局所遮蔽では、主に高性能な遮蔽材料が用いられ、放射線の種類によりその材料を使い分ける。放射線の発生源から離れた場所で遮蔽する場合、大面積を必要とすることやコスト等の観点からコンクリートが使用されることが多い。しかしコンクリートの遮蔽性能は高くなく、分厚いコンクリート壁が必要となる。その結果、施設建設において大きな敷地を必要とし、また室内空間も手狭になってしまう事が多い。そのため、従来から遮蔽をコンパクトしたい、というニーズ

が多くあった。コンパクトにすることにより狭い敷地にも施設が建設できる可能性が出てくる他、室内空間が広くなり施設の設計に余裕が生まれてくる。さらには建物重量が軽減される可能性も出てくるため、基礎工事が簡素化できることが期待される。このような背景のもと、コンクリートとしての力学的特性や施工性は生かしたまま、中性子遮蔽性能を高めた中性子遮蔽コンクリートが開発された。

2. 放射線とその遮蔽の基礎

放射線とはイメージで言うと超高速で飛ぶ粒子である。その速度は、光速から低速と言われる放射線でも秒速数 km で飛ぶ。放射線の挙動を考える場合、原子レベルで物事を考える必要がある。放射線には、大まかに分けてアルファ線、ベータ線、ガンマ線、中性子、重粒子がある。これらのうち、中性子は原子核に存在する陽子と同程度の質量を持つ電氣的に中性の粒子である。原子核から放出された中性子は電荷を持っていないので電氣的な反発力を受けず、他の原子核内に入りやすい。このことは、放射線の中でも電荷を持つ粒子（荷電粒子）であるアルファ線、ベータ線、重粒子より物質を通過する能力が非常に高いことを意味している。

放射線遮蔽の基本的なメカニズムは、遮蔽材料を構成する原子と放射線が、相互作用を繰り返す事によりエネルギーが次第に減衰し、最終的には熱等になっ

て消滅してしまうという原理である。ガンマ線は原子核の中に殆ど入り込まないため、多くの場合減衰のみ考慮すれば良いが、中性子は原子核の中に容易に入り込み原子核と直接相互作用を起こすため、ガンマ線に比べ物理現象が遥かに複雑となる。複雑になる要因として、中性子のエネルギーや遮蔽材料の種類によって相互作用の内容や物理過程が複雑に変化することや、中性子が原子核と相互作用した結果、2次放射線と呼ばれる新たな放射線が生成し、この放射線も遮蔽対象として考慮しなければならないこと等がある。

3. 中性子の遮蔽

前述の通り、中性子の遮蔽で重要なことは、元素ごとエネルギーごとに遮蔽のために考慮しなければならない物理現象が変化するという点である。そのため中性子の遮蔽は極めて複雑なメカニズムとなり、表計算ソフト等で可能な簡易計算式を用いた遮蔽設計法は一部しかない。よって、遮蔽設計はシミュレーション解析を用いて行われることが多い。

中性子の効果的な遮蔽方法は遮蔽の対象とする中性子エネルギーによって異なるが、一般的にコンクリートが遮蔽材料として用いられる。コンクリートには中性子の遮蔽に有効な水分や鉄分が含まれているが、通常その含有量は数%程度でありコンクリートの中性子遮蔽性能は良いとは言い難く、結果として重厚長大な遮蔽となる。それでも、コンクリートが中性子遮蔽に多く用いられる理由は、コンクリートが一般に広く流通している極めて安価な材料であり、かつ施工が容易で力学的にも安定しているためと考えられる。

中性子を遮蔽するには、まず初めにエネルギーを落とす必要がある。中性子のエネルギーを落とすために効果的な材料は中性子のエネルギーにより異なるが、代表的な材料として高エネルギー中性子に対しては鉄、中高エネルギー中性子に対しては水素がある。しかし、中性子と水素が相互作用すると、中性子のエネルギーは落ちるが2次放射線として中高エネルギーのガンマ線が生成される。そのため単純に水素を増やただけではガンマ線が増える事となり、遮蔽が不十分になってしまうためガンマ線の遮蔽も別途考える必要がある。鉄や水素等と相互作用を繰返してエネルギーの落ちた低エネルギーの中性子に対しては、今度は鉄や水素は効かず、ホウ素、カドミニウム、リチウム、ガドリニウム等が効果的となる。ホウ素との相互作用でも2次放射線としてガンマ線が生成されるが、そのエネルギーは水素の場合に比べて低くその遮蔽は容易

となる。

4. 中性子遮蔽コンクリートの原料選定

中性子遮蔽材料の研究は原子力の黎明期であった1940～1950年代から行われており、様々な研究がなされていた¹⁾。しかし60年代以降、その数は極めて少なくなる。その理由の1つは、普通コンクリートより安価な材料を開発するのは極めて困難であるためと考えられる。しかし、コンクリートは安価で建設材料として最も一般的で広く使用されている材料であり、他の材料をベースに中性子遮蔽材料を開発した場合よりコスト増加量は抑えられると考えられる事から、我々はコンクリートをベースにした遮蔽材料を開発することとした(図-1)。

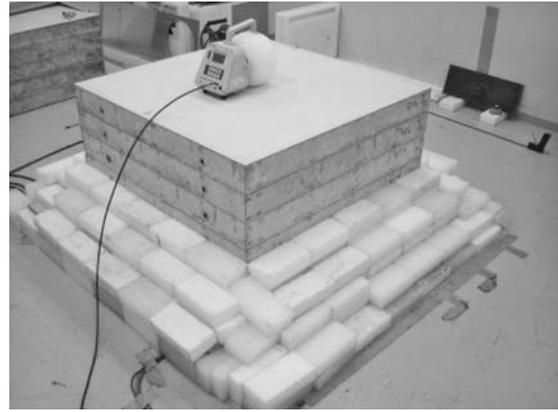
遮蔽のコンパクト化を実現するには、コンクリートの遮蔽性能の高性能化が必要である。よって、高いエネルギーから低いエネルギーまで満遍なく遮蔽性能のあるコンクリートを開発するには、各エネルギー領域に応じた素材を満遍なく混ぜれば良いが、そうすると当然コストは跳ね上がり、コンクリートの施工性も悪化する。以前からガンマ線遮蔽のために鉄鉱石などを骨材に用いた重コンクリートが存在するが、コストや施工性が良いとは言い難い。そこで、我々は高エネルギー中性子に有効な鉄については、開発するコンクリートに混ぜるのではなく、鉄板等の形で別途必要な時に使用した方が有利と判断し、新たに開発するコンクリートには混ぜないこととした。また、コンクリートに混ぜる素材は工業品を混ぜない方がコスト的に有利であるため、全て天然の素材を使用することとした。以前からコンクリートに工業製品である炭化ホウ素を混ぜたコンクリートが作られているが、遮蔽性能は上がるが施工性が悪化すると共にコンクリートのコストも跳ね上がる²⁾。

5. 中性子遮蔽コンクリートの製作

コンクリート内で多くの体積を占めるのは粗骨材と細骨材である。そのため過去の研究では骨材全てにホウ素含有の岩石を用いたコンクリートの研究がなされていた^{3), 4)}。しかし、ホウ素含有の岩石は強度にバラつきがあり、水に若干溶ける等の性質があるためかコンクリート硬化に遅延が生じ、硬化しても強度がポロポロのコンクリートしかできなかった。そのためか、当時はアルミナセメントを用いて小型ブロックを製作するに留まっていた⁵⁾。



図一 1950年代当時の製法で再現したコンクリート

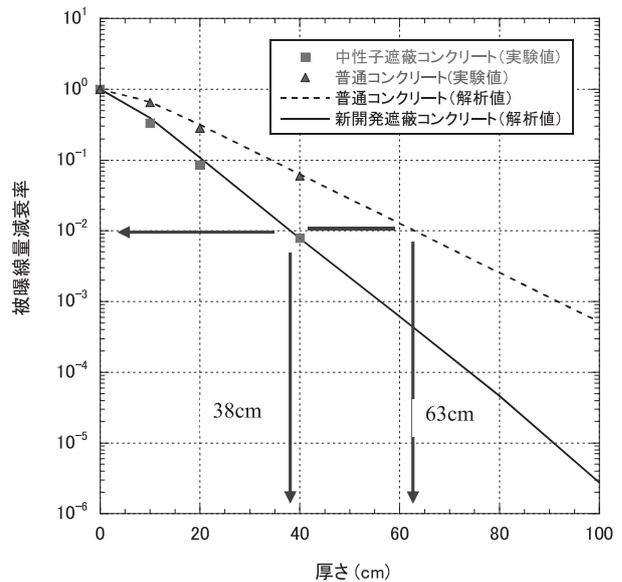


図一 3 中性子遮蔽性能実験の様子

そこで、我々は別のアプローチを考えた。ホウ素は低エネルギーの中性子しか効かないため、ホウ素だけでは遮蔽性能の高性能化は限定的となる。そこで、コンクリート内の水素含有量を多くして低エネルギーから中高エネルギーまでの中性子に対する遮蔽性能を高めることを考えた。この方針に従い、粗骨材に水素原子を多く含む骨材と細骨材にホウ素含有岩石の砂と水素原子を多く含む砂を使用することとした。また、セメントについては容易に入手可能な普通セメントを用いることとした。調合は、放射線挙動シミュレーション解析を行って各骨材の適正な調合を設計し、水素及びホウ素量の最適値を決定した。これらの検討により、普通コンクリートの力学的特性や施工性を生かしたまま、中性子遮蔽性能を向上させたコンクリート「中性子遮蔽コンクリート」の開発に成功した⁶⁾。開発した中性子遮蔽コンクリートを図一 2 に示す。



図一 2 開発した中性子遮蔽コンクリート



図一 4 中性子遮蔽性能実験結果

実験結果と放射線挙動シミュレーション解析結果を図一 4 に示す。

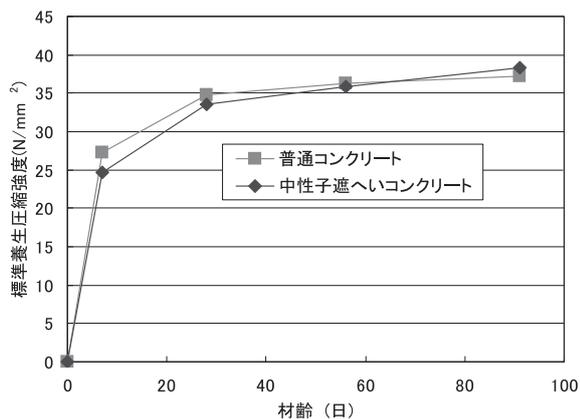
図一 4 の横軸はコンクリートの厚さを示し、縦軸は中性子による人体への被曝量の減衰率を示している。図一 4 より、放射線挙動シミュレーション解析は実験値を良く再現していることが判る。これらの結果より、例えば被曝量を 1/100 に落としたい場合、普通コンクリートでは 63 cm 必要であるところを、開発した中性子遮蔽コンクリートを用いると 38 cm で済むことが判る。つまり倍率にすると、普通コンクリートに比べ約 1.7 倍の遮蔽性能を持つことが実験と解析で確認できた。

6. 中性子遮蔽性能実験

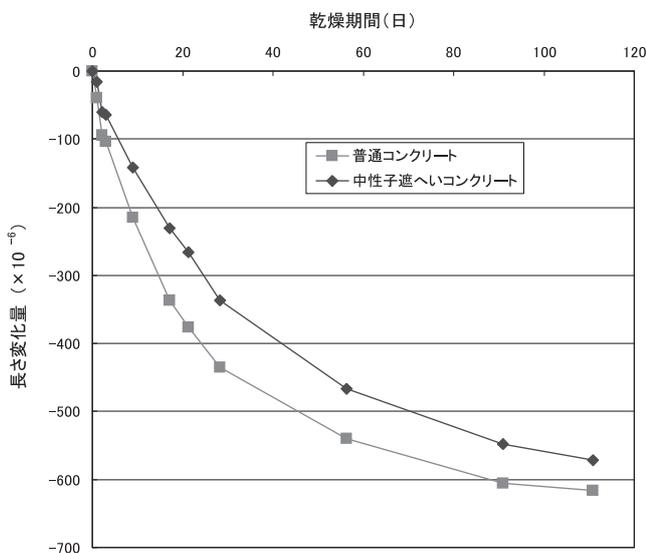
安藤ハザマ技術研究所にある放射線実験室で、²⁵²Cf 中性子源（カリフォルニウム 252）に対する遮蔽性能を調べた。中性子遮蔽性能実験の様子を図一 3 に、

7. コンクリートの基本特性

いくら遮蔽性能が良くても、コンクリートとしての基本特性が悪ければ実際に使用することはできない。そこで、中性子遮蔽コンクリートに対しコンクリート



図—5 圧縮強度試験結果



図—6 乾燥収縮試験結果

表—1 促進中性化深さ試験結果 (単位: mm)

	水セメント比	水セメント比
	50 %	60 %
普通コンクリート	3.0	4.5
中性子遮へいコンクリート	2.0	3.5

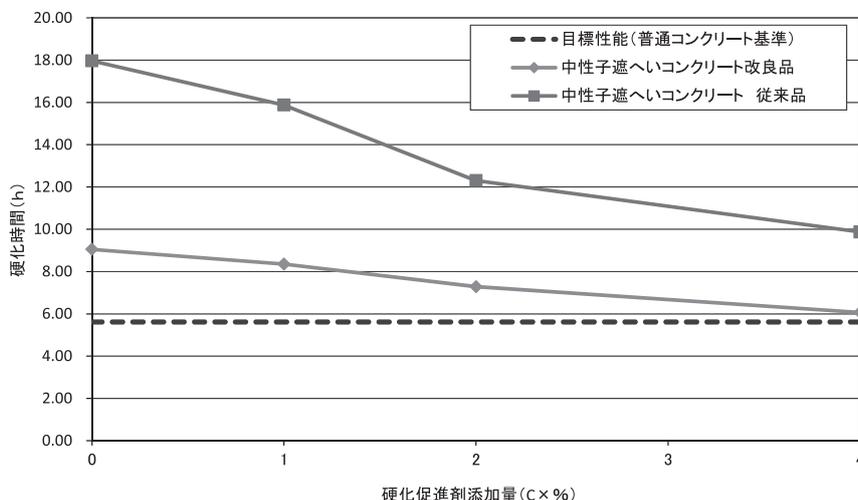
の基本特性試験である圧縮強度試験, 乾燥収縮試験, 促進中性化深さ試験を実施した。試験結果を図—5, 図—6, 表—1に示す。図には比較用として, 同一水セメント比の普通コンクリートの試験結果も併せて示している。

図—5, 6, 表—1より, 圧縮強度は普通コンクリートと同等で, 長さ変化量が少なく, 中性化深さも小さい事が判った。これら試験により, 中性子遮蔽コンクリートは普通コンクリートと同等以上の強度を持ち, 耐久性に富むことが判った。

8. 中性子遮蔽コンクリートの技術改良

5章で述べたように, 中性子遮蔽コンクリートの調合は, 放射線挙動シミュレーション解析を行って各骨材の適正な調合を設計し, 水素及びホウ素量の最適値を決定している。しかし, 製造過程での生産性の課題として, ホウ素を含んだ特殊骨材の影響によるコンクリートの硬化遅延があった。そこで, 開発した中性子遮蔽コンクリートに対して, 硬化遅延の改善と骨材量の最適化に関する技術改良を実施した。

硬化遅延の改善にあたっては, 中性子遮蔽コンクリートと相性がよい硬化促進剤を選定し, 適切な添加量を凝結試験により確認した。図—7に中性子遮蔽コンクリート従来品と改良品の硬化促進剤添加量による硬化時間の変化を示す。ここで, 従来品は骨材量の最適化を図る前の調合で, 改良品は骨材料の最適化を図った後の調合を示している。図—7には, 目標値として同一水セメント比の普通コンクリートの硬化時間を示すが, 改良品では一定の硬化促進剤添加量によって目標性能を満足できることが確認された。これより, 例えばプレキャストコンクリート工場での製造



図—7 各種コンクリートと硬化時間の関係

にあたっては、型枠転用回数を従来の2倍以上にすることができ、従来品と比べて約5%のコストダウンが可能となる。

図-8には6章と同様の方法にて行った、中性子遮へいコンクリート従来品と改良品の中性子遮蔽性能実験の結果を示す。骨材量の最適化により、中性子による被ばく量を100分の1に減衰させるために必要な中性子遮へいコンクリートの厚さは、従来品では38cm、改良品で41.5cmとなり、遮へいに必要なコンクリート厚さが増加するが、その幅は従来品と比べ最大でプラス3.5cmにとどまるため、実際の施設設計において計画に対する影響はほとんど無い。

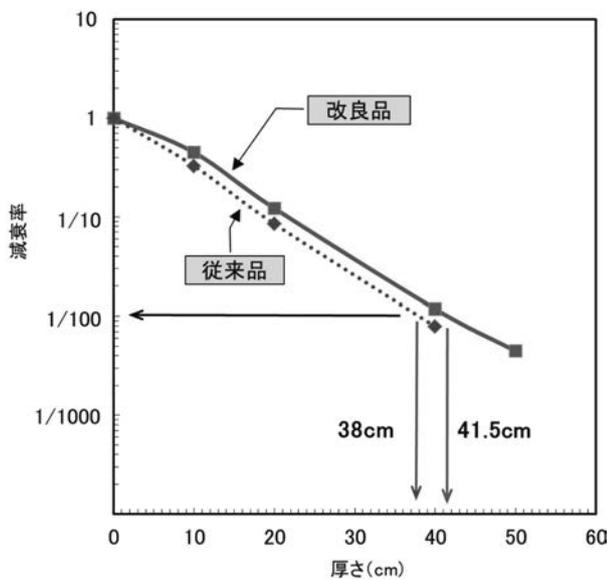


図-8 中性子遮蔽性能実験結果

9. おわりに

初めに述べたとおり、中性子はその特徴（水素の可視化や分析を可能にする）を生かし、燃料電池や水素吸蔵合金の開発等に用いられており、医療分野でもがん治療に用いられる。このように、高度医療や水素社

会の実現に向けて中性子の利用拡大が期待されるが、利用施設に要求される遮蔽性能は、施設の利用目的ごとに異なる。

今回実施した技術改良により、各施設のニーズに合った遮蔽のコンパクト化が可能となった。今後も中性子が問題となる様々な施設に、本技術の導入を積極的に提案していきたいと考えている。

JCMA

《参考文献》

- 1) A. N. Komarovskii, Shielding Materials for Nuclear Reactors, Pergamon Press (1961).
- 2) 奥野功一, 山田人司, 薬研寺彰, 放射線遮蔽用ホウ素混入コンクリートに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2000.9.
- 3) R.G. Jaeger et al, Engineering Compendium on Radiation Shielding, pp. 336-345, 1975.
- 4) Kiyoshi Okada et al, A few experiment for Shielding Concrete (in Japanese), Technical Annual Report for Cement, pp. 452-459 (1957).
- 5) Harold S. Davis, High Density Concrete for Shielding Atomic Energy Plants, Journal of the American Concrete Institute, pp. 965-977 (1958).
- 6) Koichi Okuno et al, Development of novel neutron shielding concrete, Nuclear Thechnology, Vol. 168, pp. 545-552 (2009).

【筆者紹介】



奥野 功一 (おくの こういち)
安藤ハザマ
技術本部 原子力部



鈴木 好幸 (すずき よしゆき)
安藤ハザマ
技術研究所 建築研究第二部



田中 聖一郎 (たなか せいいちろう)
安藤ハザマ
技術本部 原子力部