



(案)

日本原子力学会標準

放射線遮蔽計算に用いる遮蔽材料組成
(コンクリート編) : 202X

202 x 年 x 月

一般社団法人 日本原子力学会

(余白)

民権保障会

まえがき

放射線遮蔽計算に用いる遮蔽材料組成（コンクリート編）：202X は，（社）日本原子力学会が標準委員会基盤応用・廃炉技術専門部会遮蔽材料標準作業会，放射線遮蔽分科会，同専門部会，同委員会での審議を経て策定・発行したもので，原子力施設及び放射線施設の放射線遮蔽計算で使用する遮蔽材料のうち，コンクリート組成並びにそれを指定した壁厚又は密度に対して補正する方法を規定するものである。

附属書として，この標準のコンクリート組成を策定した手順及び放射線遮蔽計算で使用する場合の考慮事項，この標準の原子力施設及び放射線施設における位置付け及び適用方法，国内で一般に使用されてきたコンクリート組成と比べて，この標準のコンクリート組成の違いが放射線の透過線量率減衰に与える影響，及びこの標準のコンクリート組成を指定した壁厚又は密度に対して補正する方法の説明及び補正の例を添付する。

AESJ-SC-A000：202X には，次の附属書があります。ただし，附属書（参考）は規定の一部ではありません。

- 附属書 A（参考） この標準のコンクリート組成を策定した手順及び遮蔽計算で使用する
場合の考慮事項
- 附属書 B（参考） この標準の対象施設における位置付け及び適用条件
- 附属書 C（参考） この標準組成の変動が放射線の透過線量率減衰に与える影響
- 附属書 D（参考） この標準のコンクリート組成を指定した密度又は壁厚に対して補正する
方法及び補正の例

Foreword

“Shielding Material Composition for Radiation Shielding Calculations (Concrete): 202X” provides the standard composition of concrete, one of the shielding materials used in shielding calculations for nuclear and radiation facilities, and how to correct the standard composition for specified wall thickness or density. This standard has been approved by the Atomic Energy Society of Japan upon deliberation by the Shielding Materials Standard Working Group of the Radiation Shielding Subcommittee, the Advanced and Fundamental Systems Technical Committee.

The appendices include: the procedure for developing the standard composition and considerations when using it in radiation shielding calculations; the positioning and application of the standard composition in nuclear and radiation facilities; the effect of differences in the standard composition compared to the compositions commonly used in Japan on calculated attenuation of dose rate through concrete; the description of the correction method of the standard composition for specified wall thickness or density, and examples of correction. The appendices are not part of this standard.

制定：20xx 年 x 月 x 日

この標準についてのご意見又はご質問は、一般社団法人日本原子力学会事務局標準委員会担当（〒105-0004 東京都港区新橋 2-3-7 TEL 03-3508-1263）にご連絡ください。

免責条項

この標準は、審議の公平性、公正性、公開性を確保することを基本方針として定められた標準委員会の規則類に従って、所属業種のバランスに配慮して選出された委員で構成された委員会にて、専門知識及び関心を持つ人々が参加できるように配慮しながら審議され、さらにその草案に対して産業界、学界、規制当局を含め広く社会から意見を求める公衆審査の手続きを経て制定されました。

一般社団法人日本原子力学会は、この標準に関する説明責任を有しますが、この標準に基づく設備の建設、維持、廃止などの活動に起因する損害に対しては責任を有しません。また、この標準に関連して主張される特許権及び著作権の有効性を判断する責任もそれらの利用によって生じた特許権及び著作権の侵害に係る損害賠償請求に応じる責任もありません。そうした責任は全てこの標準の利用者にあります。

なお、この標準の審議に規制当局、産業界の委員が参加している場合においても、この標準が規制当局及び産業界によって承認されたことを意味するものではありません。

Disclaimer

This standard was developed and approved by the Standards Committee of AESJ in accordance with the Standards Committee Rules, which assure Balance, Due process, and Openness in the process of deliberating on a standard. The Committee is composed of individuals who are competent or interested in the subject and elected, keeping the balance of organizations, they belong in the subject, with their professional affiliations well-balanced as specified in the Rules. Furthermore, the standard proposed by the Committee was made available for public review and comment, providing an opportunity for additional input from industry, academia, regulatory agencies and the public-at-large.

AESJ accepts the responsibility for interpreting this standard, but no responsibility is assumed for any detriment caused by the actions based on this standard during construction, operation, or decommissioning of facilities. AESJ does not endorse or approve any item, construction, device or activity based on this standard.

AESJ does not take any position with respect to the validity of any patent rights or copyrights claimed in relation to any items mentioned in this document, nor assume any liability for the infringement of patent rights or copyrights as a result of using this standard. The risk of infringement of such rights shall be assumed entirely by the users.

The Committee acknowledges with appreciation the participation by regulatory agency representatives and industry-affiliated representatives, whose contribution is not to be interpreted that the government or industry has endorsed this standard.

全民健康保障基金

著作権

文書による出版者の事前了解なしに、この標準のいかなる形の複写・転載も行ってはなりません。

この標準の著作権は、全て一般社団法人日本原子力学会に帰属します。

Copyright

No part of this publication may be reproduced in any form without the prior written permission of the AESJ.

Copyright © 20?? Atomic Energy Society of Japan

All Rights Reserved.

日本原子力学会における原子力標準の策定について

原子力標準の位置付けについて

基盤応用・廃炉技術専門部会の活動について

標準委員会，専門部会，作業会 委員名簿

標準委員会

(順不同，敬称略)

(20XX 年 X 月 XX 日現在)

基盤応用・廃炉技術専門部会

遮蔽材料標準作業会

主査 中田 幹裕 MH I 原子力研究開発(株)
副主査 平尾 好弘 (国研)海上・港湾・航空技術研究所
幹事 天野 俊雄 伊藤忠テクノソリューションズ(株)
委員 石川 智之 伊藤忠テクノソリューションズ(株)
委員 大石 晃嗣 (株)日本環境調査研究所
委員 大沢 竜也 三菱重工業(株)
委員 奥野 功一 (株)安藤・間
委員 木村 健一 (株)フジタ
委員 小迫 和明 清水建設(株)
委員 坂本 幸夫 (株)アトックス
委員 竹生 諭司 日立GEニュークリア・エナジー(株)
委員 田中 健一 KNE 技術士事務所
委員 谷口 雅弘 大成建設(株)
委員 前中 敏伸 (株)竹中工務店
委員 松山 恵璃 東芝エネルギーシステムズ(株)
委員 吉田 昌弘 (公財)原子力安全技術センター

常時参加者 河野 秀紀 (株)アトックス
常時参加者 鈴木 正樹 (株)竹中工務店
常時参加者 月山 俊尚 (株)アトックス
常時参加者 中島 宏 北海道大学

標準の利用に当たって

標準は対象とする技術，活動又は結果の仕様についての関係者のコンセンサスを規定しているものです。標準にはこうあるべきという義務的事項のほか，こうあってもよいとして合意された非義務的な事項も含まれています。しかし，標準は，対象としている技術，活動又は結果の仕様について，規定している以外のものを排除するものではありません。

また，標準が規定のために引用しているほかの規格・標準は，記載された年度版のものに限定されます。標準は全体として利用されることを前提に作成されており，公式な解釈は標準委員会が行います。標準委員会はそれ以外の解釈については責任を持ちません。標準を利用するに当たってはこれらの事を踏まえてください。

なお，標準委員会では，技術の進歩に対応するため，定期的に標準を見直しています。利用に当たっては，標準が最新版であることを確認してください。

全民健康保障基金

目 次

序文	1
1 適用範囲	1
2 引用規格	1
3 用語及び定義	1
4 放射線の遮蔽計算に用いるコンクリート組成	4
4.1 ケイ素系コンクリート及びカルシウム系コンクリート組成	4
4.2 この標準のコンクリート組成を指定した密度に対して補正する方法	4
4.3 この標準のコンクリート組成を指定した壁厚に対して補正する方法	5
附属書 A (参考) この標準のコンクリート組成を策定した手順及び遮蔽計算で使用する 場合の考慮事項	8
附属書 B (参考) この標準の対象施設における位置付け及び適用条件	21
附属書 C (参考) この標準組成の変動が放射線の透過線量率減衰に与える影響	23
附属書 D (参考) この標準のコンクリート組成を指定した密度又は壁厚に対して補正す る方法及び補正の例	70
解説	
1 放射線遮蔽計算に用いる遮蔽材料組成	76
2 組成の変動が放射線の透過線量率減衰に与える影響の事前検討について	79

全民健康保障基金

日本原子力学会標準

放射線遮蔽計算に用いる遮蔽材料組成

(コンクリート編) : 202X

Shielding Material Composition for Radiation Shielding Calculations (Concrete): 202X

序文

この標準は、原子力施設及び放射線施設の設計段階で、放射線遮蔽計算（以下、“遮蔽計算”という。）に用いる遮蔽材料のうち、普通コンクリート（以下、“コンクリート”という。）の組成を規定することを目的としている。

1. 適用範囲

この標準は、原子力施設及び放射線施設で、中性子及び光子のエネルギーが 20MeV 以下の遮蔽計算に用いるコンクリートの組成（以下、“コンクリート組成”という。）を規定するものである。コンクリートの主成分の違いによって、ケイ素系とカルシウム系の 2 種類を規定する。また、コンクリートの壁厚又は密度を指定する場合を考慮して、この標準のコンクリート組成を指定した壁厚又は密度に対して補正する方法を規定する。

2. 引用規格

次に掲げる規格、指針及び標準は、この標準に引用されることによって、この標準の規定の一部を構成する。これらの引用規格は、記載の年の版だけがこの規格を構成するものであって、その後の改訂（改正、改定）版・追補には適用しない。

なお、引用規格とこの標準の規定に相違がある場合は、この標準の規定を優先する。

- a) **JIS Z 4001** :1999 日本産業標準調査会 原子力用語
- b) **JIS Z 4005** :2012 日本産業標準調査会 医用放射線機器—定義した用語
- c) **JIS A 0203** :**2025** 日本産業標準調査会 コンクリート用語
- d) **JASS 5** :2022 建築工事標準仕様書・同解説 鉄筋コンクリート工事
- e) **JASS 5N** :2013 建築工事標準仕様書・同解説 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事

f) **AESJ-SC-A005 :2013** γ 線ビルドアップ係数 : 2013

3. 用語及び定義

この標準で用いる主な用語及び定義は、**JIS Z 4001 :1999**[1]、**AESJ-SC-TR014 :2019** 標準委員会用語辞典:2019[2]、**JIS Z 4005 :2012**[3]、**JIS A 0203 :2025**[4]、**JASS 5 :2022**[5]、**JASS 5N :2013**[6]及び**AESJ-SC-A005 :2013**[7]に規定されている定義に従う。その他、この標準に関連する主な用語の定義は、次による。

3.1

普通コンクリート (normal concrete, ordinary concrete)

主として普通骨材を使用し、気乾単位容積質量がおおむね $2.1 \sim 2.5 \text{ t/m}^3$ の範囲のコンクリート

3.2

乾燥単位容積質量 (dry unit volume mass)

コンクリートの遮蔽上の要求性能である密度を規定する値

注釈 **JASS 5N T-601**、**JASS 5N T-602** によって求める。

3.3

生比重 (raw specific gravity)

コンクリートの場合、調合（配合）直後の流動性のある状態での比重

3.4

比重 (specific gravity)

ある物質の密度（単位体積あたり質量）と、基準となる標準物質の密度との比

3.5

絶乾 (absolutely dry condition, oven-dry condition)

“絶対乾燥状態（骨材の）”の略称

（出典：**JIS A 0203 :2025** の 3103）

3.6

表乾 (saturated and surface-dry condition)

“表面乾燥飽水状態（骨材の）”の略称

（出典：**JIS A 0203 :2025** の 3104）

3.7

自由水 (free water)

コンクリートの場合、コンクリート中の細孔内に存在する水分

3.8

結合水 (bound water)

コンクリートの場合，コンクリート中の水和生成物に吸着している水分（ゲル水）

3.9

結晶水 (crystal water)

コンクリートの場合，セメントと水の水和反応によって析出した水和生成物に含まれる水分，又は骨材に化合して含まれる水分

3.10

普通骨材 (natural aggregate)

自然作用によって岩石からできた砂・砂利又は砕砂・砕石・高炉スラグ粗骨材・高炉スラグ細骨材などで，絶乾密度がおおむね $2.5 \sim 2.8 \text{ g/cm}^3$ の範囲の骨材

3.11

ケイ素系コンクリート (silicon-based concrete)

ケイ素を主成分とするコンクリート

注釈 コンクリートの骨材として，主に安山岩又は砂岩を用いる。

3.12

カルシウム系コンクリート (calcium-based concrete)

カルシウムを主成分とするコンクリート

注釈 コンクリートの骨材として，主に石灰岩（石灰石）を用いる。

3.13

遮蔽壁 (shielding wall) (以下，“壁”という。)

原子力施設及び放射線施設において放射線の遮蔽を目的として設計された壁・床・天井

注釈 一般に遮蔽ブロック，充填遮蔽体などで構成される。

3.14

組成 (material composition)

材料に含まれている元素又は化合物の存在割合

注釈 この標準で規定する組成は，遮蔽計算で使用することを踏まえて，材料の密度を考慮した元素毎の原子個数密度で表示する。

3.15

酸化物 (oxide)

酸素と，酸素より電気陰性度が小さい元素からなる化合物

3.16

原子個数密度 (atomic number density)

物質の単位体積あたりの原子数

3.17

平均自由行程 (mean free path) (以下, “mfp” という。)

与えられた媒質中において, 特定の種類の粒子がある種の相互作用を起こすまでに走行する平均距離

注釈 mfp は, 遮蔽体の厚さを表す単位記号としても用いる。

(出典 : AESJ-SC-A005 :2013 の 3.3)

3.18

[粒子]加速器 (particle accelerator)

電場又は磁場を用いて電子又は陽子などの荷電粒子を加速する装置の総称

注釈 法令で定める放射線発生装置とは一般に加速器の事を指す。ただし, その表面から 10 センチメートル離れた位置における最大線量当量率が原子力規制委員会の定める線量当量率以下であるものを除く。

(出典 : JIS Z 4001 :1999 の 25011 に注釈を追記)

3.19

RI (radioactive isotope, radioisotope)

“放射性同位体” の略称

(出典 : JIS Z 4001 :1999 の 13062)

3.20

PET (Positron Emission Tomography)

陽電子放出断層撮影

4. 遮蔽計算に用いるコンクリート組成

4.1 ケイ素系コンクリート及びカルシウム系コンクリート組成

この標準は、原子力施設及び放射線施設の設計段階で、コンクリート組成が決定していない場合に使用することを想定している。国内の骨材、セメント、混和材及びコンクリート調合を考慮して策定したケイ素系コンクリート及びカルシウム系コンクリート組成を**表 1**に示す。設計一般においてはケイ素系コンクリート組成を用いることとし、設計の主たる対象施設がカルシウム系コンクリートを用いて施工することが判明している場合にだけカルシウム系コンクリート組成を用いることができる。

表 1に示したケイ素系コンクリート及びカルシウム系コンクリート組成は、国内軽水炉の炉心周りに設置された壁厚 1500mm のコンクリートに対して、打設後 60 年の時点で推定される残存水分量を含む。**表 1**の組成を標準組成として規定する。

表 1 ケイ素系コンクリート及びカルシウム系コンクリート組成

(単位：atoms/(barn・cm))

元素	ケイ素系コンクリート	カルシウム系コンクリート
H (水素)	7.70×10^{-3}	7.70×10^{-3}
Si (ケイ素)	1.77×10^{-2}	9.97×10^{-4}
Fe (鉄)	1.39×10^{-4}	1.39×10^{-4}
Ca (カルシウム)	2.79×10^{-3}	1.65×10^{-2}
C (炭素)	0	5.30×10^{-3}
O (酸素)	4.22×10^{-2}	3.31×10^{-2}
密度 (単位：g/cm ³)	2.156	2.156

標準組成を策定した手順及び遮蔽計算で使用する場合の考慮事項を**附属書 A(参考)**に示す。標準組成の原子力施設及び放射線施設における位置付け及び適用条件を**附属書 B(参考)**に示す。また、国内で一般に使用されてきたコンクリート組成と比べて、標準組成の違いが放射線の透過線量率減衰に与える影響を**附属書 C(参考)**に示す。

4.2 標準組成を指定した密度に対して補正する方法[8]

対象施設において標準組成の密度を指定する場合は、**表 1**に示した各元素の原子個数密度を**式 1**で表される補正係数 $CF_{density}$ で乗じることによって、必要に応じ変更することができる。

$$CF_{density} = 1 + \frac{Density_{specified} - Density_{standard}}{Density_{exceptHandO}} \quad (1)$$

ここで、

- $CF_{density}$: 標準組成の密度に対する補正係数
 $Density_{specified}$: コンクリートに指定する密度 (g/cm³)
 $Density_{standard}$: 標準組成の密度 (g/cm³)
 $Density_{exceptHandO}$: 標準組成のうち、H 及び O を除いた元素の原子個数密度を g/cm³ の単位に変換して合計した値 (g/cm³)

標準組成を指定した密度に対して補正する方法の説明及び補正の例を**附属書 D（参考）の D.1 この標準のコンクリート組成を指定した密度に対して補正する方法**に示す。

4.3 標準組成を指定した壁厚に対して補正する方法[8]

コンクリートの壁厚を指定する場合は、**表 1**に示した H 及び O の原子個数密度、並びにコンクリート密度を**式 2**で表される線形回帰式に従って必要に応じ変更することができる。なお、この壁厚に対する補正は、対象施設において中性子の遮蔽を行う場合で、かつ既存の類似設計又は施工上の制約などから凡その壁厚が想定される場合に実施する。

$$\begin{aligned} AD_H &= 2 \times 10^{-6} \cdot T + 0.005 = 3 \times 10^{-3} \cdot (T/T_0) + 0.005 \\ AD_O &= 9 \times 10^{-7} \cdot T + 0.041 = 1.35 \times 10^{-3} \cdot (T/T_0) + 0.041 \\ Density_{standard} &= 3 \times 10^{-5} \cdot T + 2.116 = 4.5 \times 10^{-2} \cdot (T/T_0) + 2.116 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、

- T : コンクリートに指定する壁厚 (mm)
 T_0 : この標準のコンクリートの壁厚 1500 (mm)
 AD_H : コンクリートに含まれる H の原子個数密度 (atoms/(barn・cm))
 AD_O : コンクリートに含まれる O の原子個数密度 (atoms/(barn・cm))
 $Density_{standard}$: コンクリートの密度 (g/cm³)

標準組成を指定した壁厚に対して補正する方法の説明及び補正の例を**附属書 D（参考）の D.3 この標準のコンクリート組成を指定した壁厚に対して補正する方法**に示す。

参考文献

- [1] 日本産業標準調査会, JIS Z 4001 :1999, “原子力用語” (1999).
- [2] 日本原子力学会, AESJ-SC-TR014 :2024, “標準委員会用語辞典 : 2024” (2024).
- [3] 日本産業標準調査会, JIS Z 4005 :2012, “医用放射線機器一定義した用語” (2012).
- [4] 日本産業標準調査会, JIS A 0203 :2025, “コンクリート用語” (2025).
- [5] 日本建築学会, “建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2022” (2022).
- [6] 日本建築学会, “建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事” (2013).
- [7] 日本原子力学会, AESJ-SC-A005 :2013, “ γ 線ビルドアップ係数 : 2013” (2013).
- [8] 日本原子力学会, 2024 秋の年会, “遮蔽材料標準の策定について - (27) 標準で規定する組成及び、その補正方法と適用 -” (2024).

附属書 A

(参考)

この標準のコンクリート組成を策定した手順及び遮蔽計算で使用する 場合の考慮事項

序文

この**附属書 A (参考)**は、本体に関連する事項を説明するものであり、規定の一部ではない。

この附属書では、この標準のコンクリート組成を策定した手順及び遮蔽計算で使用する場合の考慮事項について説明する。この標準のコンクリート組成は、次に示す A.1 から A.5 の手順に従って決定された。

A.1 原材料の設定

A.2 調合の設定

A.3 水分量の設定

A.4 組成の単純化

A.5 密度の設定

各項の設定又は方法の検討は、建築学会の研究成果に基づき実施し、紺谷らによる文献[1] (URL 併記)、高橋らによる文献[2]、および前中らによる文献[3]の考え方をベースに、コンクリート中の空隙中に水分が存在する場合、及びカルシウム系骨材を用いる場合について追加検討を行った。

A.1 原材料の設定

コンクリートは建設材料として広く流通しており、原子力施設及び放射線施設において遮蔽材として一般的に使用される。原子力施設及び放射線施設の遮蔽要求部に用いるコンクリートは、一般的な建物に使用されるコンクリートと基本的に同等であり、(粗・細)骨材・セメント・水・混和剤を混練して製作される。このうち、骨材はコンクリート容積の約 70%を占めており、放射線遮蔽の性能を評価する上で重要である。骨材として、過去には川砂利・川砂が用いられていたが、近年は碎石・砕砂が用いられることが多い。

日本原子力学会刊行の”放射線遮蔽ハンドブック基礎編”[4]には、原子力発電所で実際に用いられた遮蔽用コンクリートの調合例及び岩種データが示されている。これらのデータから、骨材は砂岩又は安山岩のような二酸化ケイ素(SiO_2)を主成分

とする砂岩系骨材と、石灰岩のような炭酸カルシウム(CaCO_3)を主成分とする石灰岩系骨材に分けられる。混和剤とは、その界面活性作用によってスランプなどのコンクリートの諸性質を改善するために用いる薬剤を指す。

砂岩系骨材の酸化物組成について蛍光 X 線を用いて調査した結果を表 A.1 に示す。また石灰岩系骨材の酸化物組成は、参考文献[5]に記載されている表-4を用いた。各種セメントの酸化物組成分布を表 A.2 に示す。

表 A.1 砂岩系骨材の酸化物組成 [3]

骨材種類		砕石	砂利	砕石	砕石	砕石	山砂	山砂
		A(%)	B(%)	C(%)	D(%)	E(%)	S1(%)	S2(%)
酸化物組成	SiO_2	87.0	74.7	70.8	74.1	52.6	77.8	75.8
	Al_2O_3	5.09	11.9	12.5	12.8	13.1	11.0	11.4
	Fe_2O_3	2.25	3.11	2.76	2.58	4.82	2.59	3.01
	CaO	0.68	1.15	2.63	0.80	11.50	0.39	0.99
	MgO	0.98	1.04	0.94	0.70	2.03	0.67	0.98
	SO_3	0.69	0.37	1.45	0.05	0.04	0.00	0.27
	Na_2O	0.49	2.86	3.25	3.79	3.18	2.52	2.61
	K_2O	1.25	2.03	2.96	2.48	1.48	2.03	2.04
	TiO_2	0.24	0.37	0.34	0.35	0.62	0.31	0.36
	P_2O_5	0.10	0.05	0.04	0.03	0.11	0.01	0.04
	MnO	0.17	0.05	0.05	0.05	0.09	0.04	0.05
	ig.loss	0.93	2.19	3.24	1.63	10.25	2.15	2.12
合計		99.9	99.8	100.9	99.4	99.8	99.6	99.7

A.2 調合の設定

コンクリートの調合は、設計要求に基づく圧縮強度又は打設時期によって様々である。要求に応じたコンクリートの調合は、試し練りを行い、圧縮強度及び単位容積質量などコンクリートの基本特性試験を実施してから決められる。この試し練りの調合の目安として、使用する骨材及び混和剤の種類に応じた参考調合が日本建築学会刊行の”コンクリートの調合設計指針・同解説” [6]に纏められている。この標準のコンクリートの調合は、この参考調合に基づいて決定された。

表 A.2 各セメントの酸化物組成分布

セメントの 種類	化学成分(%)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
普通ポルトランド セメント	21.4～ 22.6	4.6～ 5.7	2.5～ 3.3	63.0～ 64.7	0.8～ 2.7	1.7～ 2.4
早強ポルトランド セメント	20.0～ 21.3	4.0～ 4.8	2.5～ 2.8	64.0～ 65.7	0.7～ 2.5	2.3～ 3.3
中庸熱ポルトラン ドセメント	23.0～ 23.6	3.8～ 4.2	3.5～ 4.1	62.8～ 63.6	1.0～ 1.4	1.9～ 2.1
耐硫酸塩ポルトラ ンドセメント	22.0～ 23.0	3.0～ 3.7	4.0～ 4.8	64.2～ 65.0	0.8～ 1.4	1.4～ 1.9

[出典：建設産業調査会，“土木・建築技術者のための最新コンクリート材料・工法ハンドブック”（1996）]

A.3 水分量の設定

日本建築学会刊行の”建築工事標準仕様書・同解説 JASS5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事”に試し練り等のデータがない場合にコンクリートの乾燥単位容積質量を予測する式として次の式 A.1 が示されている。

$$W = G_0 + S_0 + 1.2C_0 + w \quad (\text{A.1})$$

ここで、

W ：乾燥単位容積質量 (kg/m³)

G_0 ：計画調合における粗骨材量（絶乾）(kg/m³)

S_0 ：計画調合における細骨材量（絶乾）(kg/m³)

C_0 ：計画調合におけるセメント量（絶乾）(kg/m³)

w ：コンクリート中含水量 (kg/m³)

$w = 0$ は絶乾状態を指す。ただし、絶乾状態であっても水和反応で生じた化合物としてコンクリート内に水分は残存しており、その量はセメント重量比 20%と見積もられるため、式 A.1 の C_0 に係数として 1.2 が掛けられている。

コンクリート厚が薄い場合、経年によって絶乾状態に近くなることが考えられるが、通常遮蔽用コンクリートは厚いため絶乾状態になるとは考えにくく、自由水がコンクリート内部に存在すると考えるのが合理的である。コンクリート内の自由水

量は、水和反応の進行状況、及びコンクリートに接する外気などの環境に起因する乾燥によって経年変化することが知られている。

そこで、コンクリートの経年及び厚さによる水分量変化の特徴を明らかにするため、代表的な調合を用いて、原子炉建屋に打設されたコンクリート内の水分移行解析を実施した[7]。解析条件は次のとおりである。

- ・コンクリート厚：300mm，800mm，1200mm，1800mm，2500mm
- ・コンクリート表面（機器側の仮定）：気温 65℃，湿度 60%
- ・コンクリート表面（機器と反対側の仮定）：気温 40℃，湿度 50%
- ・解析期間：コンクリート打設後 0 年，1 年，10 年，25 年，40 年，60 年

図 A.1 に、厚さ 2500mm のコンクリート内の含水率分布を示す。各線に示す数値はコンクリート打設後の経過年数を表す。壁表面の水分は外気条件によって外部へ抜けていくが、壁中央部には比較的多くの水分が残存すること、また年数が経過するにつれてコンクリート全体の水分量は減っていくことが分かる。

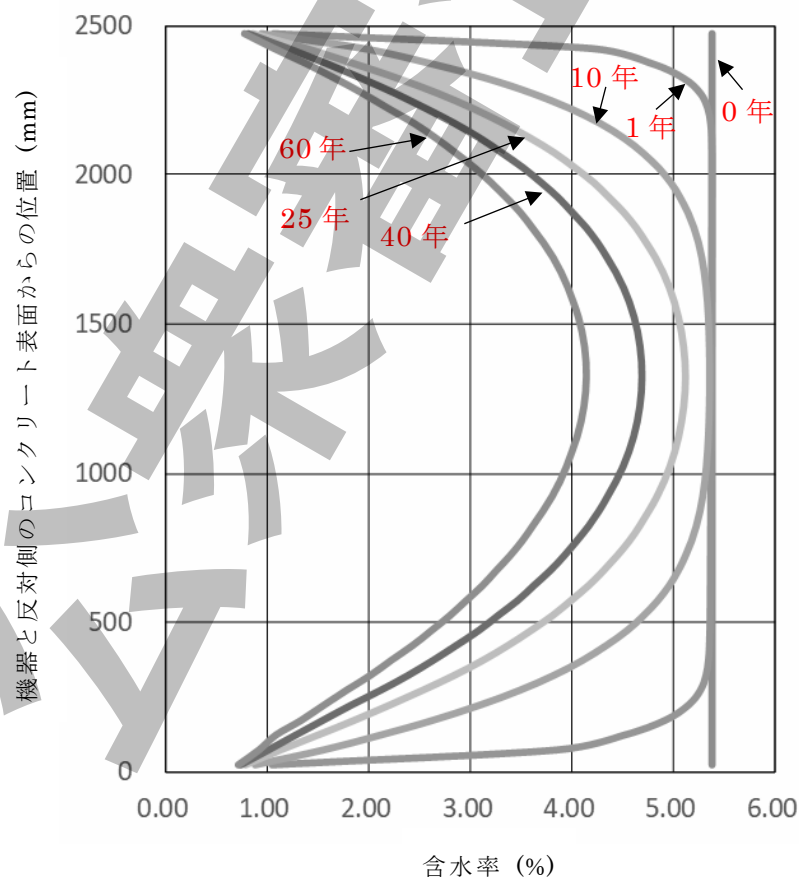


図 A.1 コンクリート内の水分移行解析による含水率分布の例
(コンクリート厚 2500mm，打設後 60 年)
各線に示す数値はコンクリート打設後の経過年数を表す

表 A.3 に水分移行解析で求めたコンクリート毎の残存水分量を水素及び酸素の原子個数密度で示す。コンクリートの厚さが厚くなるほど、水素及び酸素の原子個数密度が高くなることが分かる。一方、国内施設の遮蔽設計における典型的なコンクリート厚は、PWR で 3000mm 程度、BWR で 1800mm 程度、また PET 施設周辺で 1500mm 程度である。よって、標準組成のコンクリートの厚さに関して、国内施設の遮蔽設計例に基づき、中性子遮蔽性能の観点から水素の原子個数密度が最も少なくなる 1500mm 厚を採用した。標準組成の密度として、1500mm 厚に対する密度に相当する 2.156g/cm^3 を本文 4.1 に規定した。また、**A.6 この標準のコンクリート組成を遮蔽計算で使用する場合の考慮事項の d)**に示すとおりに特定の壁厚が想定される場合は、標準組成の原子個数密度を**附属書 D の D.3 この標準のコンクリート組成を指定した壁厚に対して補正する方法**に示す方法によって変更することができることを**本文 4.3** に規定した。

表 A.3 水分移行解析に基づくコンクリート厚毎の残存水分量及び密度

壁厚 (mm)	H (atoms/barn · cm)	O (atoms/barn · cm)	密度 (g/cm^3)
0	5.05×10^{-3}	4.09×10^{-2}	2.116
200	5.40×10^{-3}	4.10×10^{-2}	2.122
300	5.58×10^{-3}	4.11×10^{-2}	2.124
1000	6.81×10^{-3}	4.17×10^{-2}	2.143
1500	7.70×10^{-3}	4.22×10^{-2}	2.156
1800	8.23×10^{-3}	4.24×10^{-2}	2.164
2000	8.58×10^{-3}	4.26×10^{-2}	2.169
2500	9.46×10^{-3}	4.31×10^{-2}	2.182
3000	1.03×10^{-2}	4.35×10^{-2}	2.196

標準組成の水素の原子個数密度は、国内施設で従来用いられてきたコンクリート組成と比較して、1200mm 厚で ANL-6443 [8]，800mm 厚で ANL-5800 [9]に示されたコンクリート組成の水素の原子個数密度と同等になることが分かる。

A.4 組成の単純化

A.4.1 組成の単純化の考え方及び方針

コンクリートは主に建設現場周辺で採取される原料を用いた多種多様の材料であり、組成レベルで見た場合、同じものは存在しない。この標準のコンクリート組成の策定に当たっては、客観的な代表性を確保するため、組成を支配する要因を分析して構成元素の単純化を行った。

コンクリート組成を支配する要因は大きく分けて、使用する骨材、セメント、及びコンクリート調合である。コンクリートの骨材は、一般に建設現場近辺の砕石場で採取されるため、地域によって骨材の岩種が異なり、組成に地域性が見られる。骨材の岩種は安山岩、砂岩、石灰岩で全体の約 70%を占める。安山岩及び砂岩は Si が主成分であり、石灰岩は Ca が主成分である。骨材はコンクリート体積の約 70%を占めており、骨材の組成は遮蔽性能の評価にとって重要である。

セメントの組成は、表 A.2 の化学成分に示されるとおり、セメントメーカー間で若干の相違はあるものの主成分は Ca である。建物における使用量でみると、普通ポルトランドセメントが約 70%を占めており、セメントの組成の相違は骨材と比べて小さい。

コンクリート調合による違いは、建設現場ごとに異なる調合でコンクリートを製造するために生じる。ただし、A.2 調合の設定で示した参考調合のデータによれば、実際に使用される調合条件の範囲は限られており、組成に対する影響は元々小さい。

要因分析の結果、骨材及びセメントの構成元素を含有量及び遮蔽性能の観点から単純化することとし、含有量が比較的多い元素を維持して、少ない元素に対しては、附属書 C に示す線量影響評価の結果に基づき、次のとおり置換した。

- ・ コンクリートの透過線量に影響がある Fe 及び C を構成元素として維持
- ・ SiO_2 を主成分とする安山岩又は砂岩の場合、Al 及び Mg などの酸化物を SiO_2 に置換
- ・ CaCO_3 を主成分とする石灰岩の場合、Al 及び Mg などの酸化物を CaCO_3 に置換
- ・ セメントの場合、CaO を除く酸化物を SiO_2 に置換

結果的に、コンクリート組成を主成分の観点からケイ素系とカルシウム系の 2 種類に分け、各組成の構成元素を次のように定めた。

- ・ SiO_2 を主成分とする骨材を用いたケイ素系コンクリート組成：H, O, Si, Ca, Fe
- ・ CaCO_3 を主成分とする骨材を用いたカルシウム系コンクリート組成：H, O, Ca, C, Fe

元素の置換による含有量の調整は、コンクリートの調合に従って実施した。調合データとして、日本建築学会刊行の”コンクリートの調合設計指針・同解説”に示された国内で集計された実在するコンクリートの参考調合の6つのパラメータ（水セメント比、スランプ、水量、セメント量、骨材量、空気量）に対し、標準的な水セメント比 50%、スランプ 18cm、空気量 4.5%の場合の調合を設定し、これを「基本調合」とした。また遮蔽計算結果が保守的になるよう、水セメント比、スランプ、空気量は基本調合と同一で、使用する骨材の密度を JIS 規格の下限値として設定した調合を「標準調合」とした。

元素の置換は「標準調合」に対して行った。置換した酸化物量の合計が骨材の密度に合致するよう、「基本調合」の酸化物組成からコンクリートの空隙量(Void)と含有率を調整した。セメントに対しても骨材と同様な方法で構成元素を置換した。

以上、構成元素の置換によって、骨材種類の地域差が組成に与える影響を吸収するとともに、骨材及びセメントの量の違いが組成に与える影響を少なくした。

A.4.2 この標準のコンクリート組成の単純化手順

a) 検討に用いた骨材とセメント、調合

検討は実績に基づくコンクリートの調合「基本調合」、及び遮蔽計算向けに地域性等を排除するために組成を単純化した調合「標準調合」の2通りで実施した。骨材とセメントの仕様を表 A.4 に示す。表 A.4 において、標準調合は遮蔽計算が保守的になるよう規格の下限値の密度を採用した。使用する骨材はケイ素系骨材の一種である砂岩系骨材とし、粗骨材と細骨材は同一の材料（表 A.1 における骨材）とした。また使用するセメントは普通ポルトランドセメントとした。調合は、日本建築学会刊行の”コンクリートの調合設計指針・同解説”に基づき、スランプは 18 ± 2.5 cm、空気量 4.5 ± 1.5 %とし、水セメント比は 50%とした。検討に用いた調合を表 A.5 に示す。

表 A.4 骨材とセメントの仕様

分類	種類	密度 (g/cm ³)		吸水率(%)
		絶乾	表乾	
基本調合 [2]	セメント	3.15	-	-
	骨材	2.62	2.65	1.10
標準調合	セメント	3.10	-	-
	骨材	2.50	2.53	1.10

表A.5 検討に用いた調合

分類	水セメント比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				単位 容量 質量 (kg/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)
			水	セメント	細骨 材	粗骨 材			
基本 調 合 [2]	50	42	167	334	757	1051	2309	18±2.5	4.5±1.5
標 準 調 合	50	42	167	329	720	999	2215	18±2.5	4.5±1.5

b) 骨材の密度補正

基本調合において、表A.1に示した骨材の酸化物組成は表A.4に示した仕様と相違するため、酸化物の合計が使用材料の絶乾密度に合致するようコンクリートの空隙率を調整した。調整結果を表A.6に示す。標準調合は、骨材を構成する酸化物のうち密度が軽く、最も含有率が多い SiO₂ に置き換えた。酸化物の密度が SiO₂ よりも大きいものは SiO₂ に、SiO₂ よりも小さいものは密度が同じになるように含有率を調整した。また、表A.1の材料諸元と合致するように酸化物の含有量と空隙率を補正して骨材の酸化物組成を設定した。調整結果を表A.7に示す。

表A.6 基本調合における骨材の酸化物組成の調整結果 [2]

骨材		オリジナル			密度補正	
		密度 (g/cm ³)	含有率 (%)	酸化物量 (g/cm ³)	含有率 (%)	酸化物量 (g/cm ³)
酸化物組成	SiO ₂	2.70	74.68	2.02	72.76	1.96
	Al ₂ O ₃	3.95	11.86	0.47	11.56	0.46
	Fe ₂ O ₃	5.24	3.11	0.16	3.03	0.16
	CaO	3.35	1.15	0.04	1.12	0.04
	MgO	3.58	1.04	0.04	1.01	0.04
	SO ₃	1.92	0.37	0.01	0.36	0.01
	Na ₂ O	2.27	2.86	0.06	2.79	0.06
	K ₂ O	2.35	2.03	0.05	1.98	0.05
	Void	0.00	2.90	-	5.39	0.00
	合計	-	100	2.76	100	2.62

c) セメント

セメントの酸化物組成は表A.2の数値範囲の中間値とし、表A.8に示す。本検討では最も一般的に用いられる普通ポルトランドセメントを採用した。

セメントの組成は、骨材と同様に、使用材料の密度と同様になるように、酸化物の含有量と空隙量を調整した。調整結果を表A.9に示す。セメントの酸化物組成ではCaOの割合が大きいため、標準調合にSiO₂とCaOを考慮している。

表A.7 標準調合における骨材の酸化物組成の調整結果

骨材		オリジナル			密度補正	
		密度 (g/cm ³)	含有率 (%)	酸化物量 (g/cm ³)	含有率 (%)	酸化物量 (g/cm ³)
酸化物組成	SiO ₂	2.70	74.68	2.02	74.64	2.02
	SiO ₂	2.70	11.86	0.32	11.85	0.32
	SiO ₂	2.70	3.11	0.08	3.11	0.08
	SiO ₂	2.70	1.15	0.03	1.15	0.03
	SiO ₂	2.70	1.04	0.03	1.04	0.03
	SiO ₂	2.70	0.26	0.01	0.26	0.01
	SiO ₂	2.70	2.40	0.06	2.4	0.06
	SiO ₂	2.70	1.77	0.05	1.77	0.06
	Void	0.00	3.73	-	3.78	0.00
	合計	-	100	2.50	100	2.50

表A.8 セメントの酸化物組成 [2]

	普通 セメント (%)	早強 セメント (%)	中庸熱 セメント (%)	耐硫酸塩 セメント (%)
SiO ₂	22	20.65	23.3	22.5
Al ₂ O ₃	5.15	4.4	4	3.35
Fe ₂ O ₂	2.9	2.65	3.8	4.4
CaO	63.85	64.85	63.7	64.6
MgO	1.75	1.6	1.2	1.1
SO ₃	2.05	2.8	2	1.65
Void	2.3	3.05	2	2.4

d) 原子個数密度の算定

策定した調合と調整した酸化物組成を用いて、遮蔽計算に用いるコンクリートの原子個数密度を策定した。**表A.10**に原子個数密度を示す。**表A.10**において、Feは参考文献[4]に示されている骨材の元素組成及び**表A.5**の標準調合から含有量の範囲を求め、その最大量を追加した。

表A.9 セメントの酸化物組成の調整結果

			オリジナル			密度補正	
			密度 (g/cm ³)	含有率 (%)	酸化物量 (g/cm ³)	含有率 (%)	酸化物量 (g/cm ³)
基本調合	酸化物組成	SiO ₂	2.70	22.00	0.59	22.11	0.6
		Al ₂ O ₃	3.95	5.15	0.2	5.18	0.2
		Fe ₂ O ₃	5.24	2.90	0.15	2.92	0.15
		CaO	3.35	63.85	2.14	64.18	2.15
		MgO	3.58	1.75	0.06	1.76	0.06
		SO ₃	1.92	2.05	0.04	2.06	0.04
		Void	0.00	2.30	0	1.79	0.00
		合計	-	100	3.12	100	3.15
標準調合	酸化物組成	SiO ₂	2.70	22.00	0.59	22.56	0.61
		SiO ₂	2.70	5.15	0.14	5.28	0.14
		SiO ₂	2.70	2.90	0.08	2.97	0.08
		CaO	3.35	63.85	2.14	65.46	2.19
		SiO ₂	2.70	1.75	0.05	1.79	0.05
		SiO ₂	2.70	1.46	0.04	1.49	0.04
		Void	0.00	2.89	-	0.44	0.00
		合計	-	100	2.95	100	3.10

表A.10 原子個数密度の算定結果

水セメント比 (%)		50
原子個数密度 (atoms/(barn・cm))	H	7.70×10^{-3}
	Si	1.77×10^{-2}
	Fe	1.39×10^{-4}
	Ca	2.79×10^{-3}
	O	4.22×10^{-2}

e) 石灰岩の場合

骨材が石灰岩の場合 Si が少ないため、構成比率が多い Ca に置き換えて Si と同様の方法で標準コンクリートの原子個数密度を求める。また、石灰岩の場合の Fe 及び C も同様に含有量の幅を求め最大量を追加した。

A.5 密度の設定

この標準で規定したコンクリート組成の密度は 2.156g/cm^3 である。一方、遮蔽安全評価の慣例として、遮蔽計算で使用するコンクリートの密度として 2.1g/cm^3 を与えることが多い。また実際の遮蔽設計では、コンクリートの密度を外部から指定されたり、実際に打設されたコンクリートの密度を使用したりすることがある。A.6 の c) に示すとおりに特定の密度を指定する場合、この標準のコンクリート組成の原子個数密度を**附属書 D の D.1 この標準のコンクリート組成を指定した密度に対して補正する方法**に示す方法によって**変更することができることを本文 4.2 に規定した。**

A.6 この標準のコンクリート組成を遮蔽計算で使用する場合の考慮事項

この標準のコンクリート組成を対象施設の遮蔽計算で使用する場合の考慮事項は、次のとおりである。

a) 前提条件

この標準のコンクリート組成は、遮蔽計算の段階でコンクリート組成が確定していない場合に用いる。対象施設のコンクリート組成が既知、又は実測に基づくコンクリート組成のデータが存在する場合には、その組成を遮蔽計算に用いることができる。

b) コンクリートの骨材

コンクリートの製作に使用する骨材が確定していない場合、又は使用する骨材が確定し、かつ、主にケイ素系の骨材である場合は**本文表 1**のケイ素系コンクリート組成を用いる。一方、コンクリートの製作に使用する骨材が確定し、かつ、主にカルシウム系の骨材である場合は**本文表 1**のカルシウム系コンクリート組成を用いることができる。

c) コンクリートの密度による補正

対象施設において遮蔽用コンクリートの密度を特に指定する場合は、この標準のコンクリート組成の原子個数密度を**附属書 D の D.1 この標準のコンクリート組成を指定した密度に対して補正する方法**に示す方法によって必要に応じ変更することができる。

d) コンクリートの壁厚による補正

対象施設において中性子の遮蔽を行う場合で、かつ、既存の類似設計又は施工上の制約などから特定の壁厚が想定される場合は、この標準のコンクリート組成の原子個数密度を**附属書 D の D.3 この標準のコンクリート組成を指定した壁厚に対して補正する方法**に示す方法によって必要に応じ変更することができる。

参考文献

- [1] Osamu Kontani, Osamu Sato, Shohei Sawada, Takashi Igari, Keigo Fujikawa, Hisanobu Akatsuka, Ippei Maruyama, “Proposal for Standard Elemental Composition of Ordinary Concrete for Radiation Shielding Design,” *Nuclear Engineering and Design*, Preprint, URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5160133.
- [2] 高橋亮太，一谷匡陸，鈴木正樹，島本龍，北川高史，前中敏伸，松本哲郎：“既存コンクリート構造物の遮蔽性能の評価方法に関する検討（その 1：既往研究のレビュー）”，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）（2019）。
- [3] 前中敏伸，松本哲郎，一谷匡陸，島本龍，鈴木正樹，北川高史，高橋亮太：“既存コンクリート構造物の遮蔽性能の評価方法に関する検討（その 2：遮蔽計算による評価）”，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）（2019）。
- [4] 遮蔽ハンドブック研究専門委員会，“放射線遮蔽ハンドブック基礎編”，日本原子力学会（2015）。
- [5] 田野崎隆雄，三浦太一，佐藤究，藤井宏東，“放射化コンクリート”，コンクリート工学年次論文集，**25**[1]（2003）
- [6] “コンクリートの調合設計指針・同解説”，日本建築学会（2015）。
- [7] Y. Hirao, K. Okuno, K. Kimura, M. Nakata, T. Ogata, Y. Sakamoto, K. Tanaka, K. Oishi, S. Ishikawa, M. Yoshida, T. Amano, K. Kosako, T. Maenaka, “Current Progress in Standardization of Shielding Concrete Composition for Japanese Facility Design,” *Nucl. Sci. Eng.*, **198**, 185–192 (2024).
- [8] R.L. Walker and M. Grotenhuis, “A Summary of Shielding Constants for Concrete,” ANL-6443, Argonne National Laboratory (Nov. 1961).
- [9] L.J. Templin, Ed., “Reactor Physics Constants,” 2nd ed., ANL-5800, Argonne National Laboratory (Jul. 1963).

附属書 B

(参考)

この標準の対象施設における位置付け及び適用条件

序文

この**附属書 B (参考)**は、本体に関連する事項を説明するものであり、規定の一部ではない。

この附属書では、この標準の原子力施設及び放射線施設における位置付け及び適用条件について説明する。

B.1 この標準の標準組成の位置づけ

原子力施設及び放射線施設における設置許可・工事認可・使用許可など許認可申請時には、遮蔽計算が必要である。施工する施設がコンクリート造でそのコンクリート組成が未定の場合、遮蔽壁の厚さ・構造などを決めるために適切な遮蔽計算用コンクリート組成が必要である。

各対象施設で、許認可と遮蔽計算が必要となる時期を、次項に整理する。

B.2 許認可申請での遮蔽計算要求時期

- a) 発電用原子炉の設置，運転等に関する規制(炉規法第四十三条の三の五)
設置の前に設置の許可(設置許可申請)，工事計画(工事計画認可申請)
- b) 試験研究用等原子炉の設置，運転等に関する規制(炉規法第二十三条)
設置の前に設置の許可，工事計画(設工認申請)
- c) 貯蔵の事業に関する規制（使用済燃料）(炉規法第四十三条の四)
事業を行う前に，事業許可(事業許可申請)，工事計画(工事計画認可申請)
- d) 再処理の事業に関する規制(炉規法第四十四条)
事業を行う前に，事業許可(事業許可申請)，工事計画(工事計画認可申請)
- e) 使用の許可及び届出，販売及び賃貸の業の届出並びに廃棄の業の許可（加速器施設(放射線発生装置)）(RI 規制法第三条)
使用する前に，使用の許可(使用許可申請)

したがって，施設を施工するかなり前の時期に，許認可申請のための遮蔽計算でコンクリート組成を使用するのは，発電用原子炉，試験用原子炉，使用済燃料の貯蔵施設，再処理施設である。加速器施設においては，許認可申請は使用開始前に実施されるため，使用するコンクリートのテストピースの成分分析によってコンクリート組成を求め，その組成を用いた遮蔽計算による申請が可能である。そのため，加速器施設

に対しては、必ずしも許認可申請用には遮蔽計算用コンクリート組成が不可欠ではない。

B.3 各施設に対するこの標準の標準組成の位置付け

上記から、原子炉施設等では、許認可手続きのための遮蔽計算用コンクリート組成が必須である。一方、加速器施設では、許認可手続きに遮蔽計算用コンクリート組成は必須ではないが、施設設計時に実施する遮蔽計算で、施工するコンクリート組成が未定である場合にはこの標準は有用であり、許認可手続きにも使用可能である。

B.4 本文記載の標準組成の水分組成を与える壁厚

標準組成は、コンクリート中の水分移動解析に基づいて、壁厚に応じて施設建設から 60 年後のコンクリート内の平均的な自由水と結合水分量を含む組成として設定した。ここで、水分は主に中性子の遮蔽性能に対して影響が有り二次 γ 線の生成には影響するが、光子の遮蔽性能への影響は小さい。そこで、本文に記載する標準組成は、公開されている原子炉周辺遮蔽壁厚(BWR は約 2m[1], PWR は約 3m[2]), 又は中性子を発生する加速器施設の遮蔽壁厚の事例を参考に、コンクリート壁厚 1500mm に対する水分(自由水と結合水)を含む組成とし、壁厚に対する水分補正式と、密度に対する組成補正式を併せて規定することとした。

参考文献

[1] ATOMICA_02-03-02-02 「**BWR** の放射線遮へい」

[2] ATOMICA_02-04-02-02 「**PWR** の放射線遮へい」

附属書 C

(参考)

この標準組成の変動が放射線の透過線量率減衰に与える影響

序文

この**附属書 C (参考)**は、本体に関連する事項を説明するものであり、規定の一部ではない。

この附属書では、標準組成に対し、施工に使用するコンクリートとの間に想定される差異が生じた場合、その差異が遮蔽透過後の線量率に与える影響を示して、本標準を使用する際の参考情報とする。ここではケイ素系骨材とカルシウム系骨材での、調合変動、水分変動及び元素組成変動に着目する。また、元素組成変動の検討では、これまで国内で一般に使用されてきた ANL-5800[1]及び ANL-6443[2]との差異も考慮する。

なお、**附属書 C**における検討のための、事前検討については、**解説 2**に示す。

C.1 国内で一般に用いられてきたコンクリート組成

遮蔽設計は、基本設計段階で実施されるため、遮蔽計算用コンクリート組成は、従来は ANL-5800 又は ANL-6443 など、海外のコンクリート組成データを用いていた。この標準では、国内のコンクリート組成データ及び調合情報に基づいて、骨材の組成依存性が現れづらい国内仕様のコンクリート標準組成を提案した。

コンクリート標準組成を用いて遮蔽計算を行う場合、その組成は施工される実際のコンクリート組成とは必ずしも同一ではない。そのために、想定される組成変動の遮蔽性能への影響に関わる情報は、遮蔽設計上有効な参考データとなる。

ここでは、想定される組成変動が、遮蔽透過後の線量率に与える影響について、その前提条件、評価方法とともに示すものである。この情報は、遮蔽設計時の留意事項又は参照データとして活用することができる。

C.2 対象とする線源範囲

標準では、対象施設を原子炉施設及び放射線利用施設(20MeV 以下の中性子及び光子発生源)としており、それぞれに対して線量率影響評価を行う。各施設に対する線源の設定条件は、次の方針とする。

a) 原子炉施設

1) 中性子線源

炉心に対する中性子遮蔽を想定し、 ^{235}U の核分裂スペクトル[3]を対象とする。具体

的には表 C.1 に示す。ここで、本検討初期段階で、 ^{235}U 、 ^{239}Pu 、 ^{252}Cf の核分裂スペクトルと、原子炉容器透過スペクトルからのコンクリート深層透過後の中性子及び 2 次 γ 線の線量率を比較し、組成変動による線量率影響評価の観点では、有意な差はなかったため、附属書に掲載する原子炉施設の中性子線源は、 ^{235}U の核分裂スペクトルで代表した。各スペクトルに対する中性子及び 2 次 γ 線の線量率の比較を、解説 2 第 1 章に示す。

2) γ 線源

原子炉冷却系統又は補助系統の遮蔽を想定し、冷却水の放射化物(^{16}N)、腐食生成物(^{60}Co)、及び炉心の即発 γ 線の γ 線スペクトル[4, 5]を対象とする。具体的には表 C.2 に示す。本検討初期段階で、核分裂生成物(^{137}Cs)の γ 線スペクトルも対象としたが、コンクリート透過後の γ 線の線量率は、組成変動による線量率影響評価の観点では、腐食生成物(^{60}Co)と同程度であったため、附属書に掲載する線源からは除外した。各線源からの線量率計算の比較を、解説 2 第 1 章に示す。

b) 原子炉施設以外で 20MeV 以下の中性子発生源を持つ施設

原子炉施設以外にも、使用済燃料の一時保管・再処理を行う再処理工場、RI 中性子源取扱施設、医療用及び研究用の加速器施設等では 20MeV 以下の中性子発生源がある。原子炉施設の線源と有意に異なる条件での線量率影響を検討することが有効であるため、ここでは、PET 医療施設用の 18MeV 陽子加速器で発生する最大エネルギーが 18MeV の中性子源を対象とする。

c) 20MeV 以下の光子発生源

中性子捕獲反応などによる即発 γ 線の光子エネルギーが 10MeV 程度に及ぶ原子炉施設及び 10MeV を超える医療用電子線形加速器施設では、電子対生成による消滅 γ 線及び光核反応による光中性子が発生し 2 次 γ 線も生成する。そのため、高エネルギー光子に対する元素組成変動による線量率変動は、エネルギーが 7MeV 以下の壊変 γ 線とは異なる。ここでは、20MeV 以下の電子線形加速器で発生する光子の、典型的組成変動による線量率変動を検討対象とする。

C.3 遮蔽透過後の線量率影響で考慮する組成変動

a) 典型的元素成分の変動

標準組成コンクリートは Si 系骨材組成を主体としているが、典型的組成変動として Ca 系骨材組成コンクリートと、種々の元素を含む組成コンクリートとして、従来広く使用されている ANL-5800[1]、ANL-6443[2]の元素組成を設定する。Si 系骨材組成コンクリートと Ca 系骨材組成コンクリートは、標準組成検討の結果のうち、1,500mm 厚の水分を含む組成とする。ここで、組成の差異の影響だけを評価するために、それ

ぞれのコンクリート組成について、水分組成を変えずに、水分以外の組成を比例補正し、密度を 2.1g/cm^3 に統一した。

典型的変動のコンクリート組成条件を、表 C.3 に示す。

b) 水分量の変動

コンクリート中の水分は壁厚に依存し変動することとするが、本文で 1,500mm に対して規定し、さらに壁厚に対する補正式を規定した。

したがって、設計時に想定した壁厚に対する水分を用いることで、適切な設計条件を与えることができ、設計時の想定壁厚が、施工される壁厚より薄い場合、遮蔽性能としては保守的な設計となる。ここでは、設計時に想定した壁厚と施工厚とが異なる場合など、壁厚の変動が考えられる場合に、壁厚変動によって生ずる水分変動が、コンクリート透過後の線量率にあたえる影響を示す。

ケーススタディでは、Si 系骨材コンクリートと Ca 系骨材コンクリートそれぞれに対して、壁厚が 300, 1,000, 1,500, 2,000, 3,000mm に対する水分条件を設定する。

ここで、水分の差異の影響だけを評価するために、それぞれのコンクリート組成について、水分組成を変えずに、水分以外の組成を比例補正し、密度を 2.1g/cm^3 に統一した。

水分変動のコンクリート組成条件を、表 C.4 に示す。

c) コンクリート調合時の調合変動（参考ケース）

標準コンクリート組成検討で整理した調合情報に基づいて、各材料の想定される変動を設定し、調合時の組成及び密度の変動に起因するコンクリート透過後の線量率への影響を検討する。

調合変動条件は、壁厚(mm)、水セメント比(%),スランプ(cm),最大骨材寸法(mm),混和剤種類,セメント種類及び骨材種類の変動を考慮し,Si 系骨材コンクリート(6,480 ケース)と Ca 系骨材コンクリート(12,960 ケース)検討し、最終的に 1,500mm 厚の水分に対する次頁の計算条件とした。

ここで、変動条件のうち、水セメント比は、組成の変動による線量率の変動が考えられ、中性子又は高エネルギー光子に対して 1,000mm を超える厚い遮蔽では、強度確保の観点から 50%程度を用いることが主体である。ここでは、参考ケースとして、水セメント比を、一般のコンクリートに適用する 40~60%に変動させてケーススタディを行った。

調合変動の組成条件の設定においては、全ての元素が同時に最大値・最小値をとることは現実的にあり得ないため、H, C(Ca 系骨材だけ), O, Si, Fe, Ca それぞれが最大値・最小値となる調合の場合の、各元素の原子個数密度を設定した。結果として、1,500mm 厚に対する標準組成を基準値ケースとし、Si 系骨材組成コンクリートで 10

ケース，Ca系骨材組成コンクリートで12ケース設定した。

解析ケースとして、H, O, Si, Fe, Ca の原子個数密度の変動とコンクリート密度の変動が、Si 系コンクリートと Ca 系コンクリートで同程度であったため、標準組成コンクリートでデフォルト値としている Si 系骨材組成コンクリートで 10 ケースだけケーススタディを実施した。

調合変動のコンクリート組成条件を、表 C.5 に示す。

表 C.1 ^{235}U の核分裂スペクトル (1/6)

No.	下限エネルギー (MeV)	上限エネルギー (MeV)	核分裂スペクトル[3] (n/fission)
1	1.7333×10^1	1.9640×10^1	3.069×10^{-6}
2	1.6905×10^1	1.7333×10^1	1.478×10^{-6}
3	1.6487×10^1	1.6905×10^1	2.079×10^{-6}
4	1.5683×10^1	1.6487×10^1	6.680×10^{-6}
5	1.4918×10^1	1.5683×10^1	1.177×10^{-5}
6	1.4550×10^1	1.4918×10^1	8.911×10^{-6}
7	1.4191×10^1	1.4550×10^1	1.161×10^{-5}
8	1.3840×10^1	1.4191×10^1	1.497×10^{-5}
9	1.3499×10^1	1.3840×10^1	1.913×10^{-5}
10	1.2840×10^1	1.3499×10^1	5.566×10^{-5}
11	1.2523×10^1	1.2840×10^1	3.939×10^{-5}
12	1.2214×10^1	1.2523×10^1	4.888×10^{-5}
13	1.1618×10^1	1.2214×10^1	1.332×10^{-4}
14	1.1052×10^1	1.1618×10^1	2.021×10^{-4}
15	1.0513×10^1	1.1052×10^1	2.941×10^{-4}
16	1.0000×10^1	1.0513×10^1	4.158×10^{-4}
17	9.5123×10^0	1.0000×10^1	5.824×10^{-4}
18	9.0484×10^0	9.5123×10^0	7.946×10^{-4}
19	8.6071×10^0	9.0484×10^0	1.062×10^{-3}
20	8.1873×10^0	8.6071×10^0	1.396×10^{-3}
21	7.7880×10^0	8.1873×10^0	1.797×10^{-3}
22	7.4082×10^0	7.7880×10^0	2.281×10^{-3}
23	7.0469×10^0	7.4082×10^0	2.841×10^{-3}
24	6.7032×10^0	7.0469×10^0	3.496×10^{-3}
25	6.5924×10^0	6.7032×10^0	1.326×10^{-3}
26	6.3763×10^0	6.5924×10^0	2.904×10^{-3}
27	6.0653×10^0	6.3763×10^0	5.050×10^{-3}
28	5.7695×10^0	6.0653×10^0	5.933×10^{-3}
29	5.4881×10^0	5.7695×10^0	6.940×10^{-3}
30	5.2205×10^0	5.4881×10^0	7.947×10^{-3}
31	4.9659×10^0	5.2205×10^0	9.077×10^{-3}
32	4.7237×10^0	4.9659×10^0	1.020×10^{-2}
33	4.4933×10^0	4.7237×10^0	1.141×10^{-2}

表 C.1 ^{235}U の核分裂スペクトル (2/6)

No.	下限エネルギー (MeV)	上限エネルギー (MeV)	核分裂スペクトル[3] (n/fission)
34	4.0657×10^0	4.4933×10^0	2.626×10^{-2}
35	3.6788×10^0	4.0657×10^0	3.096×10^{-2}
36	3.3287×10^0	3.6788×10^0	3.529×10^{-2}
37	3.1664×10^0	3.3287×10^0	1.921×10^{-2}
38	3.0119×10^0	3.1664×10^0	1.996×10^{-2}
39	2.8650×10^0	3.0119×10^0	2.082×10^{-2}
40	2.7253×10^0	2.8650×10^0	2.155×10^{-2}
41	2.5924×10^0	2.7253×10^0	2.213×10^{-2}
42	2.4660×10^0	2.5924×10^0	2.253×10^{-2}
43	2.3852×10^0	2.4660×10^0	1.533×10^{-2}
44	2.3653×10^0	2.3852×10^0	3.889×10^{-3}
45	2.3457×10^0	2.3653×10^0	3.734×10^{-3}
46	2.3069×10^0	2.3457×10^0	7.783×10^{-3}
47	2.2313×10^0	2.3069×10^0	1.564×10^{-2}
48	2.1225×10^0	2.2313×10^0	2.331×10^{-2}
49	2.0190×10^0	2.1225×10^0	2.368×10^{-2}
50	1.9205×10^0	2.0190×10^0	2.346×10^{-2}
51	1.8268×10^0	1.9205×10^0	2.356×10^{-2}
52	1.7377×10^0	1.8268×10^0	2.328×10^{-2}
53	1.6530×10^0	1.7377×10^0	2.312×10^{-2}
54	1.5724×10^0	1.6530×10^0	2.283×10^{-2}
55	1.4957×10^0	1.5724×10^0	2.213×10^{-2}
56	1.4227×10^0	1.4957×10^0	2.190×10^{-2}
57	1.3534×10^0	1.4227×10^0	2.158×10^{-2}
58	1.2873×10^0	1.3534×10^0	2.085×10^{-2}
59	1.2246×10^0	1.2873×10^0	2.001×10^{-2}
60	1.1648×10^0	1.2246×10^0	1.975×10^{-2}
61	1.1080×10^0	1.1648×10^0	1.909×10^{-2}
62	1.0026×10^0	1.1080×10^0	3.592×10^{-2}
63	9.6164×10^{-1}	1.0026×10^0	1.441×10^{-2}
64	9.0718×10^{-1}	9.6164×10^{-1}	1.911×10^{-2}
65	8.6294×10^{-1}	9.0718×10^{-1}	1.570×10^{-2}
66	8.2085×10^{-1}	8.6294×10^{-1}	1.497×10^{-2}
67	7.8082×10^{-1}	8.2085×10^{-1}	1.436×10^{-2}

表 C.1 ^{235}U の核分裂スペクトル (3/6)

No.	下限エネルギー (MeV)	上限エネルギー (MeV)	核分裂スペクトル[3] (n/fission)
68	7.4274×10^{-1}	7.8082×10^{-1}	1.368×10^{-2}
69	7.0651×10^{-1}	7.4274×10^{-1}	1.302×10^{-2}
70	6.7206×10^{-1}	7.0651×10^{-1}	1.238×10^{-2}
71	6.3928×10^{-1}	6.7206×10^{-1}	1.179×10^{-2}
72	6.0810×10^{-1}	6.3928×10^{-1}	1.119×10^{-2}
73	5.7844×10^{-1}	6.0810×10^{-1}	1.062×10^{-2}
74	5.5023×10^{-1}	5.7844×10^{-1}	1.004×10^{-2}
75	5.2340×10^{-1}	5.5023×10^{-1}	9.485×10^{-3}
76	4.9787×10^{-1}	5.2340×10^{-1}	8.968×10^{-3}
77	4.5049×10^{-1}	4.9787×10^{-1}	1.648×10^{-2}
78	4.0762×10^{-1}	4.5049×10^{-1}	1.465×10^{-2}
79	3.8774×10^{-1}	4.0762×10^{-1}	6.691×10^{-3}
80	3.6883×10^{-1}	3.8774×10^{-1}	6.283×10^{-3}
81	3.3373×10^{-1}	3.6883×10^{-1}	1.146×10^{-2}
82	3.0197×10^{-1}	3.3373×10^{-1}	1.008×10^{-2}
83	2.9850×10^{-1}	3.0197×10^{-1}	1.095×10^{-3}
84	2.9720×10^{-1}	2.9850×10^{-1}	4.059×10^{-4}
85	2.9452×10^{-1}	2.9720×10^{-1}	8.414×10^{-4}
86	2.8725×10^{-1}	2.9452×10^{-1}	2.233×10^{-3}
87	2.7324×10^{-1}	2.8725×10^{-1}	4.323×10^{-3}
88	2.4724×10^{-1}	2.7324×10^{-1}	7.790×10^{-3}
89	2.3518×10^{-1}	2.4724×10^{-1}	3.509×10^{-3}
90	2.2371×10^{-1}	2.3518×10^{-1}	3.307×10^{-3}
91	2.1280×10^{-1}	2.2371×10^{-1}	3.081×10^{-3}
92	2.0242×10^{-1}	2.1280×10^{-1}	2.889×10^{-3}
93	1.9255×10^{-1}	2.0242×10^{-1}	2.674×10^{-3}
94	1.8316×10^{-1}	1.9255×10^{-1}	2.518×10^{-3}
95	1.7422×10^{-1}	1.8316×10^{-1}	2.367×10^{-3}
96	1.6573×10^{-1}	1.7422×10^{-1}	2.193×10^{-3}
97	1.5764×10^{-1}	1.6573×10^{-1}	2.050×10^{-3}
98	1.4996×10^{-1}	1.5764×10^{-1}	1.887×10^{-3}
99	1.4264×10^{-1}	1.4996×10^{-1}	1.801×10^{-3}
100	1.3569×10^{-1}	1.4264×10^{-1}	1.646×10^{-3}

表 C.1 ^{235}U の核分裂スペクトル (4/6)

No.	下限エネルギー (MeV)	上限エネルギー (MeV)	核分裂スペクトル[3] (n/fission)
101	1.2907×10^{-1}	1.3569×10^{-1}	1.543×10^{-3}
102	1.2277×10^{-1}	1.2907×10^{-1}	1.443×10^{-3}
103	1.1679×10^{-1}	1.2277×10^{-1}	1.346×10^{-3}
104	1.1109×10^{-1}	1.1679×10^{-1}	1.252×10^{-3}
105	9.8037×10^{-2}	1.1109×10^{-1}	2.767×10^{-3}
106	8.6517×10^{-2}	9.8037×10^{-2}	2.312×10^{-3}
107	8.2500×10^{-2}	8.6517×10^{-2}	7.765×10^{-4}
108	7.9500×10^{-2}	8.2500×10^{-2}	5.687×10^{-4}
109	7.2000×10^{-2}	7.9500×10^{-2}	1.380×10^{-3}
110	6.7379×10^{-2}	7.2000×10^{-2}	8.188×10^{-4}
111	5.6562×10^{-2}	6.7379×10^{-2}	1.818×10^{-3}
112	5.2475×10^{-2}	5.6562×10^{-2}	6.464×10^{-4}
113	4.6309×10^{-2}	5.2475×10^{-2}	9.336×10^{-4}
114	4.0868×10^{-2}	4.6309×10^{-2}	7.764×10^{-4}
115	3.4307×10^{-2}	4.0868×10^{-2}	8.730×10^{-4}
116	3.1828×10^{-2}	3.4307×10^{-2}	3.106×10^{-4}
117	2.8500×10^{-2}	3.1828×10^{-2}	3.991×10^{-4}
118	2.7000×10^{-2}	2.8500×10^{-2}	1.727×10^{-4}
119	2.6058×10^{-2}	2.7000×10^{-2}	1.059×10^{-4}
120	2.4788×10^{-2}	2.6058×10^{-2}	1.402×10^{-4}
121	2.4176×10^{-2}	2.4788×10^{-2}	6.614×10^{-4}
122	2.3579×10^{-2}	2.4176×10^{-2}	6.427×10^{-5}
123	2.1875×10^{-2}	2.3579×10^{-2}	1.778×10^{-4}
124	1.9305×10^{-2}	2.1875×10^{-2}	2.562×10^{-4}
125	1.5034×10^{-2}	1.9305×10^{-2}	3.903×10^{-4}
126	1.1709×10^{-2}	1.5034×10^{-2}	2.679×10^{-4}
127	1.0595×10^{-2}	1.1709×10^{-2}	8.198×10^{-5}
128	9.1188×10^{-3}	1.0595×10^{-2}	1.029×10^{-4}
129	7.1017×10^{-3}	9.1188×10^{-3}	1.272×10^{-4}
130	5.5308×10^{-3}	7.1017×10^{-3}	8.756×10^{-5}
131	4.3074×10^{-3}	5.5308×10^{-3}	6.026×10^{-5}
132	3.7074×10^{-3}	4.3074×10^{-3}	2.669×10^{-5}
133	3.3546×10^{-3}	3.7074×10^{-3}	1.470×10^{-5}
134	3.0354×10^{-3}	3.3546×10^{-3}	1.272×10^{-5}

表 C.1 ^{235}U の核分裂スペクトル (5/6)

No.	下限エネルギー (MeV)	上限エネルギー (MeV)	核分裂スペクトル[3] (n/fission)
135	2.7465×10^{-3}	3.0354×10^{-3}	1.089×10^{-5}
136	2.6126×10^{-3}	2.7465×10^{-3}	4.880×10^{-6}
137	2.4852×10^{-3}	2.6126×10^{-3}	4.547×10^{-6}
138	2.2487×10^{-3}	2.4852×10^{-3}	8.079×10^{-6}
139	2.0347×10^{-3}	2.2487×10^{-3}	6.970×10^{-6}
140	1.5846×10^{-3}	2.0347×10^{-3}	1.347×10^{-5}
141	1.2341×10^{-3}	1.5846×10^{-3}	9.273×10^{-6}
142	9.6112×10^{-4}	1.2341×10^{-3}	6.363×10^{-6}
143	7.4852×10^{-4}	9.6112×10^{-4}	4.376×10^{-6}
144	5.8295×10^{-4}	7.4852×10^{-4}	3.006×10^{-6}
145	4.5400×10^{-4}	5.8295×10^{-4}	2.068×10^{-6}
146	3.5358×10^{-4}	4.5400×10^{-4}	1.421×10^{-6}
147	2.7536×10^{-4}	3.5358×10^{-4}	9.766×10^{-7}
148	2.1445×10^{-4}	2.7536×10^{-4}	6.713×10^{-7}
149	1.6702×10^{-4}	2.1445×10^{-4}	4.620×10^{-7}
150	1.3007×10^{-4}	1.6702×10^{-4}	3.168×10^{-7}
151	1.0130×10^{-4}	1.3007×10^{-4}	2.182×10^{-7}
152	7.8893×10^{-5}	1.0130×10^{-4}	1.498×10^{-7}
153	6.1442×10^{-5}	7.8893×10^{-5}	1.030×10^{-7}
154	4.7851×10^{-5}	6.1442×10^{-5}	7.076×10^{-8}
155	3.7267×10^{-5}	4.7851×10^{-5}	4.862×10^{-8}
156	2.9023×10^{-5}	3.7267×10^{-5}	3.345×10^{-8}
157	2.2603×10^{-5}	2.9023×10^{-5}	2.297×10^{-8}
158	1.7603×10^{-5}	2.2603×10^{-5}	1.579×10^{-8}
159	1.3710×10^{-5}	1.7603×10^{-5}	1.084×10^{-8}
160	1.0677×10^{-6}	1.3710×10^{-5}	7.453×10^{-9}
161	8.3153×10^{-6}	1.0677×10^{-5}	5.134×10^{-9}
162	6.4760×10^{-6}	8.3153×10^{-6}	3.523×10^{-9}
163	5.0435×10^{-6}	6.4760×10^{-6}	2.421×10^{-9}
164	3.9279×10^{-6}	5.0435×10^{-6}	1.665×10^{-9}
165	3.0590×10^{-6}	3.9279×10^{-6}	1.144×10^{-9}
166	2.3824×10^{-6}	3.0590×10^{-6}	7.865×10^{-10}
167	1.8554×10^{-6}	2.3824×10^{-6}	5.403×10^{-10}

表 C.1 ^{235}U の核分裂スペクトル (6/6)

No.	下限エネルギー (MeV)	上限エネルギー (MeV)	核分裂スペクトル ^[3] (n/fission)
168	1.4450×10^{-6}	1.8554×10^{-6}	3.710×10^{-10}
169	1.1254×10^{-6}	1.4450×10^{-6}	2.555×10^{-10}
170	8.7642×10^{-7}	1.1254×10^{-6}	1.752×10^{-10}
171	6.8256×10^{-7}	8.7642×10^{-7}	1.205×10^{-10}
172	5.3158×10^{-7}	6.8256×10^{-7}	8.287×10^{-11}
173	4.1399×10^{-7}	5.3158×10^{-7}	5.696×10^{-11}
174	1.0000×10^{-7}	4.1399×10^{-7}	1.103×10^{-10}
175	1.0000×10^{-11}	1.0000×10^{-7}	1.486×10^{-11}
TOTAL			1.000×10^0

表 C.2 原子炉施設の γ 線源の γ 線スペクトル (1/2)

No	下限 エネルギー (MeV)	上限 エネルギー (MeV)	^{60}Co [5] (photons /decay)	^{16}N [5] (photons /decay)	核分裂即発 γ 線 [4] (photons /fission)
1	3.00×10^1	5.00×10^1			—
2	2.00×10^1	3.00×10^1	—	—	—
3	1.40×10^1	2.00×10^1	—	—	—
4	1.20×10^1	1.40×10^1	—	—	—
5	1.00×10^1	1.20×10^1	—	—	6.651×10^{-6}
6	8.00×10^1	1.00×10^1	—	—	1.242×10^{-4}
7	7.50×10^0	8.00×10^0	—	—	1.015×10^{-4}
8	7.00×10^0	7.50×10^0	—	4.900×10^{-2}	1.750×10^{-4}
9	6.50×10^0	7.00×10^0	—	—	3.018×10^{-4}
10	6.00×10^0	6.50×10^0	—	6.700×10^{-1}	5.205×10^{-4}
11	5.50×10^0	6.00×10^0	—	—	8.977×10^{-4}
12	5.00×10^0	5.50×10^0	—	—	1.548×10^{-3}
13	4.50×10^0	5.00×10^0	—	—	2.670×10^{-3}
14	4.00×10^0	4.50×10^0	—	—	4.605×10^{-3}
15	3.50×10^0	4.00×10^0	—	—	7.941×10^{-3}
16	3.00×10^0	3.50×10^0	—	—	1.370×10^{-2}
17	2.50×10^0	3.00×10^0	—	—	2.362×10^{-2}
18	2.00×10^0	2.50×10^0	—	—	4.073×10^{-2}
19	1.66×10^0	2.00×10^0	—	—	4.349×10^{-2}
20	1.50×10^0	1.66×10^0	—	—	2.676×10^{-2}
21	1.34×10^0	1.50×10^0	—	—	3.362×10^{-2}
22	1.33×10^0	1.34×10^0	1.000	—	2.436×10^{-3}
23	1.00×10^0	1.33×10^0	1.000	—	1.104×10^{-1}
24	8.00×10^{-1}	1.00×10^0	—	—	1.062×10^{-1}
25	7.00×10^{-1}	8.00×10^0	—	—	6.911×10^{-2}
26	6.00×10^{-1}	7.00×10^{-1}	—	—	8.257×10^{-2}

表 C.2 原子炉施設の γ 線源の γ 線スペクトル (2/2)

No.	下限 エネルギー (MeV)	上限 エネルギー (MeV)	^{60}Co [5] (photons /decay)	^{16}N [5] (photons /decay)	核分裂即発 γ 線 [4] (photons /fission)
27	5.12×10^{-1}	6.00×10^{-1}	—	—	7.541×10^{-2}
28	5.10×10^{-1}	5.12×10^{-1}	—	—	1.714×10^{-3}
29	4.50×10^{-1}	5.10×10^{-1}	—	—	5.141×10^{-2}
30	4.00×10^{-1}	4.50×10^{-1}	—	—	4.285×10^{-2}
31	3.00×10^{-1}	4.00×10^{-1}	—	—	8.569×10^{-2}
32	2.00×10^{-1}	3.00×10^{-1}	—	—	8.569×10^{-2}
33	1.50×10^{-1}	2.00×10^{-1}	—	—	4.285×10^{-2}
34	1.00×10^{-1}	1.50×10^{-1}	—	—	4.285×10^{-2}
35	7.50×10^{-2}	1.00×10^{-1}	—	—	—
36	7.00×10^{-2}	7.50×10^{-2}	—	—	—
37	6.00×10^{-2}	7.00×10^{-2}	—	—	—
38	4.50×10^{-2}	6.00×10^{-2}	—	—	—
39	3.00×10^{-2}	4.50×10^{-2}	—	—	—
40	2.00×10^{-2}	3.00×10^{-2}	—	—	—
41	1.00×10^{-2}	2.00×10^{-2}	—	—	—
42	1.00×10^{-3}	1.00×10^{-2}	—	—	—
TOTAL			2.000×10^0	7.190×10^{-1}	1.000×10^0

表 C.3 典型的変動のコンクリート組成条件

(単位 : atoms/(barn・cm))

名称	質量数 [6]	Si 系組成 1500mm	Ca 系組成 1500mm	ANL-5800 Type O2-b	ANL-6443 Type O2-b
H	1.00784	7.70×10^{-3}	7.70×10^{-3}	8.56×10^{-3}	6.91×10^{-3}
Si	28.084	1.67×10^{-2}	9.53×10^{-4}	1.48×10^{-2}	1.50×10^{-2}
Al	26.9715385	—	—	1.55×10^{-3}	1.57×10^{-3}
Fe	55.845	1.32×10^{-4}	1.33×10^{-4}	3.07×10^{-4}	3.11×10^{-4}
Ca	40.078	2.64×10^{-3}	1.58×10^{-2}	1.33×10^{-3}	1.35×10^{-3}
Mg	24.304	—	—	1.10×10^{-4}	1.12×10^{-4}
S	32.059	—	—	—	—
Na	22.9897693	—	—	8.58×10^{-4}	8.69×10^{-4}
K	39.0983	—	—	4.10×10^{-4}	4.15×10^{-4}
C	12.0096	—	5.07×10^{-3}	1.03×10^{-4}	1.04×10^{-4}
O	15.99903	4.22×10^{-2}	3.31×10^{-2}	4.31×10^{-2}	4.27×10^{-2}
P	30.973762	—	—	—	—
Ti	47.867	—	—	—	—
Mn	54.938	—	—	—	—
密度 (g/cm ³)		2.100	2.100	2.100	2.100

(註) ここで、組成の差異の影響だけを評価するために、それぞれのコンクリート組成について、水分組成を変えずに、水分以外の組成を比例補正し、密度を 2.1g/cm³ に統一した。

表 C.4 水分変動のコンクリート組成条件 (1/2)

【Si 系骨材】

(単位: atoms/(barn・cm))

名称	質量数 [6]	単純化組成／壁厚(mm)				
		300	1000	1500	2000	3000
H	1.00784	5.58×10^{-3}	6.81×10^{-3}	7.70×10^{-3}	8.58×10^{-3}	1.03×10^{-2}
Si	28.084	1.73×10^{-2}	1.69×10^{-2}	1.67×10^{-2}	1.65×10^{-2}	1.60×10^{-2}
Al	26.9715385	—	—	—	—	—
Fe	55.845	1.36×10^{-4}	1.33×10^{-4}	1.32×10^{-4}	1.30×10^{-4}	1.26×10^{-4}
Ca	40.078	2.72×10^{-3}	2.67×10^{-3}	2.64×10^{-3}	2.60×10^{-3}	2.53×10^{-3}
Mg	24.304	—	—	—	—	—
S	32.059	—	—	—	—	—
Na	22.9897693	—	—	—	—	—
K	39.0983	—	—	—	—	—
C	12.0096	—	—	—	—	—
O	15.99903	4.11×10^{-2}	4.17×10^{-2}	4.22×10^{-2}	4.26×10^{-2}	4.35×10^{-2}
P	30.973762	—	—	—	—	—
Ti	47.867	—	—	—	—	—
Mn	54.938	—	—	—	—	—
密度 (g/cm ³)		2.100	2.100	2.100	2.100	2.100

(註) ここで、水分の差異の影響だけを評価するために、それぞれのコンクリート組成について、水分組成を変えずに、水分以外の組成を比例補正し、密度を 2.1g/cm³ に統一した。

表 C.4 水分変動のコンクリート組成条件 (2/2)

【Ca 系骨材】

(単位: atoms/(barn・cm))

名称	質量数 [6]	単純化組成／壁厚(mm)				
		300	1000	1500	2000	3000
H	1.00784	5.58×10^{-3}	6.81×10^{-3}	7.70×10^{-3}	8.58×10^{-3}	1.03×10^{-2}
Si	28.084	9.78×10^{-4}	9.63×10^{-4}	9.53×10^{-4}	9.42×10^{-4}	9.22×10^{-4}
Al	26.9715385	—	—	—	—	—
Fe	55.845	1.36×10^{-4}	1.34×10^{-4}	1.33×10^{-4}	1.31×10^{-4}	1.29×10^{-4}
Ca	40.078	1.62×10^{-2}	1.59×10^{-2}	1.58×10^{-2}	1.56×10^{-2}	1.52×10^{-2}
Mg	24.304	—	—	—	—	—
S	32.059	—	—	—	—	—
Na	22.9897693	—	—	—	—	—
K	39.0983	—	—	—	—	—
C	12.0096	5.20×10^{-3}	5.12×10^{-3}	5.07×10^{-3}	5.01×10^{-3}	4.90×10^{-3}
O	15.99903	3.21×10^{-2}	3.27×10^{-2}	3.31×10^{-2}	3.36×10^{-2}	3.45×10^{-2}
P	30.973762	—	—	—	—	—
Ti	47.867	—	—	—	—	—
Mn	54.938	—	—	—	—	—
密度 (g/cm ³)		2.100	2.100	2.100	2.100	2.100

(註) ここで、水分の差異の影響だけを評価するために、それぞれのコンクリート組成について、水分組成を変えずに、水分以外の組成を比例補正し、密度を 2.1g/cm³ に統一した。

表 C.5 調合変動のコンクリート組成条件 (1/3)

名称	質量数 [6]	壁厚 1500mm 水分に対する組成(atoms/(barn・cm))				
		基準値 (標準組成)	H		Si	
			最小値	最大値	最小値	最大値
H	1.00784	7.70×10^{-3}	4.85×10^{-3}	1.06×10^{-2}	1.06×10^{-2}	4.85×10^{-3}
Si	28.084	1.77×10^{-2}	1.96×10^{-2}	1.63×10^{-2}	1.63×10^{-2}	1.96×10^{-2}
Al	26.9715385	—	—	—	—	—
Fe	55.845	1.39×10^{-4}	1.14×10^{-4}	2.49×10^{-4}	1.77×10^{-4}	8.76×10^{-5}
Ca	40.078	2.79×10^{-3}	1.73×10^{-3}	3.80×10^{-3}	3.94×10^{-3}	1.76×10^{-3}
Mg	24.304	—	—	—	—	—
S	32.059	—	—	—	—	—
Na	22.9897693	—	—	—	—	—
K	39.0983	—	—	—	—	—
C	12.0096	—	—	—	—	—
O	15.99903	4.22×10^{-2}	4.36×10^{-2}	4.22×10^{-2}	4.21×10^{-2}	4.36×10^{-2}
P	30.973762	—	—	—	—	—
Ti	47.867	—	—	—	—	—
Mn	54.938	—	—	—	—	—
密度 (g/cm ³)		2.158	2.206	2.175	2.175	2.206

表 C.5 調合変動のコンクリート組成条件 (2/3)

名称	質量数 [6]	壁厚 1500mm 水分に対する組成(atoms/(barn・cm))				
		基準値 (標準組成)	Fe		Ca	
			最小値	最大値	最小値	最大値
H	1.00784	7.70×10^{-3}	4.85×10^{-3}	1.06×10^{-2}	4.85×10^{-3}	1.06×10^{-2}
Si	28.084	1.77×10^{-2}	1.96×10^{-2}	1.63×10^{-2}	1.96×10^{-2}	1.63×10^{-2}
Al	26.9715385	—	—	—	—	—
Fe	55.845	1.39×10^{-4}	8.07×10^{-5}	2.49×10^{-4}	1.14×10^{-4}	1.77×10^{-4}
Ca	40.078	2.79×10^{-3}	1.80×10^{-3}	3.80×10^{-3}	1.73×10^{-3}	3.94×10^{-3}
Mg	24.304	—	—	—	—	—
S	32.059	—	—	—	—	—
Na	22.9897693	—	—	—	—	—
K	39.0983	—	—	—	—	—
C	12.0096	—	—	—	—	—
O	15.99903	4.22×10^{-2}	4.35×10^{-2}	4.22×10^{-2}	4.36×10^{-2}	4.21×10^{-2}
P	30.973762	—	—	—	—	—
Ti	47.867	—	—	—	—	—
Mn	54.938	—	—	—	—	—
密度 (g/cm ³)		2.158	2.205	2.175	2.206	2.175

表 C.5 調合変動のコンクリート組成条件 (3/3)

名称	質量数 [6]	壁厚 1500mm 水分に対する組成 (atoms/(barn · cm))		
		基準値 (標準組成)	O	
			最小値	最大値
H	1.00784	7.70×10^{-3}	6.51×10^{-3}	7.94×10^{-3}
Si	28.084	1.77×10^{-2}	1.79×10^{-2}	1.85×10^{-2}
Al	26.9715385	—	—	—
Fe	55.845	1.39×10^{-4}	1.08×10^{-4}	1.43×10^{-4}
Ca	40.078	2.79×10^{-3}	2.41×10^{-3}	2.88×10^{-3}
Mg	24.304	—	—	—
S	32.059	—	—	—
Na	22.9897693	—	—	—
K	39.0983	—	—	—
C	12.0096	—	—	—
O	15.99903	4.22×10^{-2}	4.16×10^{-2}	4.40×10^{-2}
P	30.973762	—	—	—
Ti	47.867	—	—	—
Mn	54.938	—	—	—
密度 (g/cm ³)		2.158	2.121	2.250

C.4 線量率解析条件

本節では、原子炉施設、放射線利用施設のうち 20MeV 以下の中性子発生源と 20MeV 以下の光子発生源の解析条件を示す。解析モデルは、各線源の体系及び発生する反応等を考慮して設定した。また、コンクリート組成の差異による影響が顕著となるように、可能な限り線源とコンクリートだけの単純化モデルとした。

a) 原子炉施設

原子炉施設の線源に対す解析では、コンクリート組成による差異以外の外乱を排除するために、単純な ANISN の球形モデル、線源は点線源とし、線源から 5m のボイド層を設定して、コンクリートを配置した。現実の原子炉施設では、放射線はコンクリートに平行ビームに近い状態で入射するため、線源とコンクリート内面の間のボイドを設定した。中性子の断面積データは、事前検討との継続性を考慮し、JENDL-3.3 を用いた。

原子炉施設の解析条件を、図 C.1 に示す。

b) 20MeV 以下の中性子発生源

20MeV 以下の中性子発生源では、18MeV の PET 施設のサイクロトロン陽子加速器を対象とした。解析では、 H_2^{18}O ターゲット(4mm 厚)への陽子入射による中性子発生と、その中性子の平板コンクリートへの入射をモデル化し、PHITS3.27 で実施した。中性子断面積データは、JENDL-5 を用いた。

20MeV 以下の中性子発生源の解析条件を、図 C.2 に示す。

c) 20MeV 以下の光子発生源

20MeV 以下の光子発生源では、20MeV 以下の電子線形加速器を対象とした。線源は点線源とし、その周辺に球形のコンクリートを配置した。線源はタングステンターゲットに 10, 12, 15, 17, 18, 20MeV の電子が入射した際の光子連続スペクトルを設定し、MCNP6.2 で計算した。断面積データは、JENDL-5 を用いた。

20MeV 以下の光子発生源の解析条件を、図 C.3 に示す。

d) 付加的前提事項

これまでの事前検討で、下記事項確認済である。

- ・熱中性子に対する散乱則は、コンクリートでは過大側に評価しても 1%未満で有り、この検討では考慮しない。事前検討内容を、解説 2 第 2 章に示す。
- ・Sn 法による γ 線源からの γ 線線量率計算では、前方への方向性が強いいため、Sn 分点を大きくする必要が有ることが、コード間の解析結果比較で判明し、この検討では γ 線源からの γ 線線量率解析では S32 としている。
- ・計算コードによる解析結果の差異について、原子炉施設の中性子源及び γ 線源を対象として検討した結果、100cm 透過で 10%程度以下の差異は生ずるが、コンクリート

組成変動に対する線量率影響の結果には影響しないと判断した。

No.	項 目	条 件
1	遮蔽計算コード	ANISN（中性子線源， γ 線源）
2	評価核データライブラリ	JENDL-3.3
3	ライブラリ	MATXSLIB-J33
4	評価体系	内半径 500cm, 外半径 800cm の 1 次元球殻モデル
5	ANISN メッシュ	基本的にはコンクリート部分を 1 メッシュ 1cm で分割
6	ANISN ルジャンドル展開次数	P3
7	ANISN S_n 分点数	中性子源：S8， γ 線源：S32
8	ANISN 境界条件	左側：反射，右側：真空（外挿距離考慮）
9	ANISN 収束条件	0.001
10	中性子スペクトル*1	^{235}U
11	γ 線スペクトル*2	^{60}Co , ^{16}N , ^{235}U 核分裂スペクトル

*1：別途 ^{239}Pu , ^{252}Cf , BSW 透過スペクトルも実施し， ^{235}U と有意な差を生じないことを確認。

*2：別途 ^{137}Cs も実施し， ^{60}Co と同傾向であることを確認。

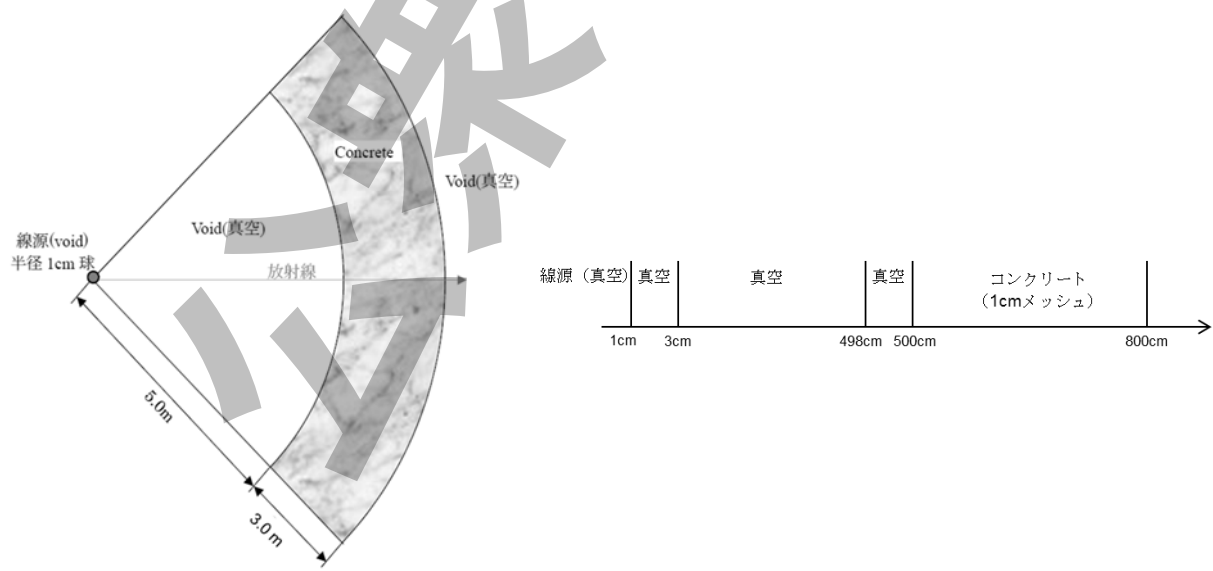


図 C.1 原子炉施設の線量率解析条件

No.	項 目	条 件
1	遮蔽計算コード	3次元モンテカルロ計算コード PHITS3.27 を使用。
2	評価核データライブラリ	JENDL-5
3	評価体系	・サイクロトロン本体（容器，マグネット，コイルなど）は含めない。 ・FDG 用の ^{18}O 水ターゲット（4 mm 厚）だけとし，ターゲット構造物は含めない。 ・コンクリート壁は，200cm 厚の平板モデルであり，面サイズは $400 \times 400 \text{ cm}^2$ 程度とする。
4	入射陽子エネルギー	18 MeV 単色のペンシルビームとする。
5	タリー	タリー粒子は，中性子と光子とする。ビームライン上の半径 5 cm の円柱領域を 5 cm 厚刻みでタリーする。

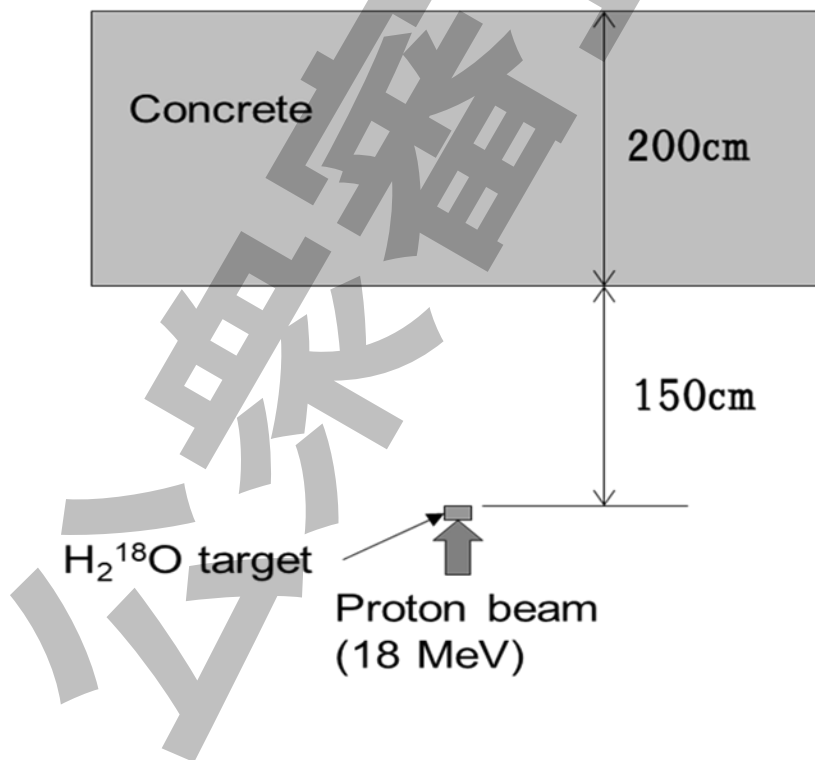


図 C.2 20MeV 以下の中性子発生源の線量率解析条件

No.	項 目	条 件
1	遮蔽計算コード	3次元モンテカルロ計算コード MCNP を使用。
2	ライブラリ	電子: el03 光子: mcplib84 中性子: JENDL-5 光核反応: JENDL-5
3	評価体系	無限均質媒質（半径 5cm～120 cm 球体系） 中心に等方点線源を設定。
4	光子エネルギー	10MeV, 12MeV, 15MeV, 17MeV, 18MeV, 20MeV の電子がタングステンターゲットに入射した際に発生する光子の連続エネルギースペクトル。
5	タリー	半径 5cm から 120cm の範囲で 5cm 厚の球殻を設定し、各球殻の面に面タリーを設定。

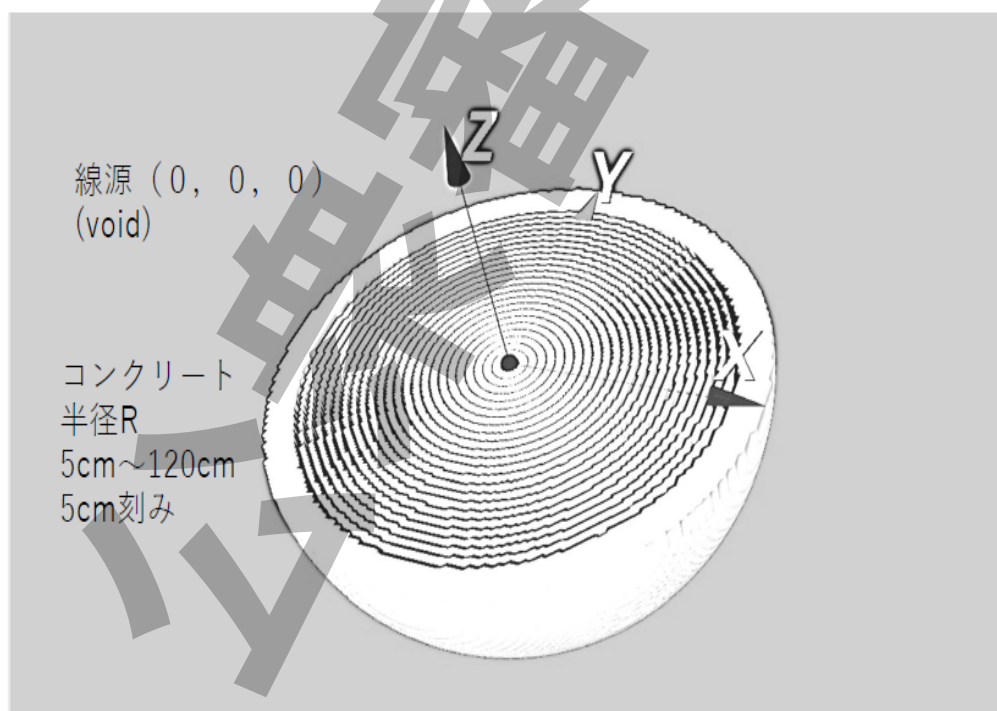


図 C.3 20MeV 以下の光子発生源の線量率解析条件

C.5 線量率影響検討

ここでは、コンクリート組成変動に起因する遮蔽透過後の線量率影響評価について、典型的組成変動、水分変動及び調合変動のケーススタディ結果について紹介する。結果の紹介は、線量率の減衰率の比較で実施する。

a) 典型的組成変動

典型的組成変動による線量率影響評価は、コンクリート密度を一定にした条件で、元素組成の差異による線量率への影響を比較した。元素組成の差異は、中性子挙動、2 次 γ 線挙動及びエネルギーの高い光子で、線量率の減衰率に影響が現れると考えられるので、原子炉施設の中性子源及び γ 線源、20MeV 以下の中性子発生源及び 20MeV 以下の光子発生源の全ての線源に対して比較検討を実施した。

C.3 項に示したとおり、元素組成条件は、Si 系骨材組成コンクリート、Ca 系骨材組成コンクリート（標準組成の 1,500mm 厚の水分を含む組成）と、従来広く使用されている ANL-5800、ANL-6443 の元素組成コンクリートの 4 種類を設定した。

その結果、原子炉施設及び 20MeV 以下の中性子発生源の中性子と 2 次 γ 線の合計線量率では、元素組成の違いによる線量率挙動の差異が現れた。原子炉施設の γ 線源で 6MeV 以上の γ 線に、元素組成の違いによる電子対生成挙動の差異が現れた。20MeV 以下の光子発生源では、元素組成の違いによる電子対生成、消滅 X 線、光核反応の挙動の差異が有意に現れた。

以下に、各線源別に元素組成の違いによる比較検討の結果を示す。

ここで、本項の検討を行うにあたり、事前検討として実施した、Si 系骨材組成での Fe と Ca 系骨材組成での C の変動による減衰率への影響検討を解説 2 第 3 章に、Si 系骨材組成及び Ca 系骨材組成それぞれの絶乾組成と気乾組成と ANL-5800 及び 6443 組成の減衰率比較検討を解説 2 第 4 章に示す。

1) 原子炉施設の中性子源

中性子と 2 次 γ 線の合計線量率と、2 次 γ 線だけの線量率の減衰率を、線減衰率で比較した。中性子と 2 次 γ 線の合計線量率について図 C.4 に、2 次 γ 線だけの線量率について図 C.5 に示す。

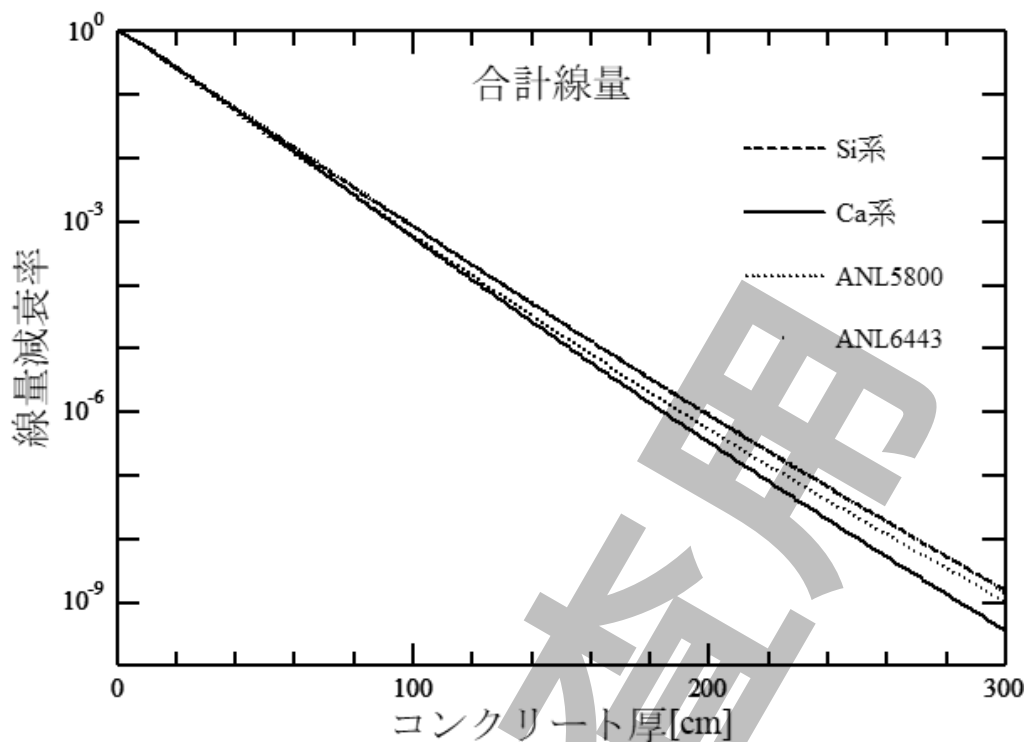


図 C.4 原子炉施設の中性子源の線減衰率の比較(合計線量率)

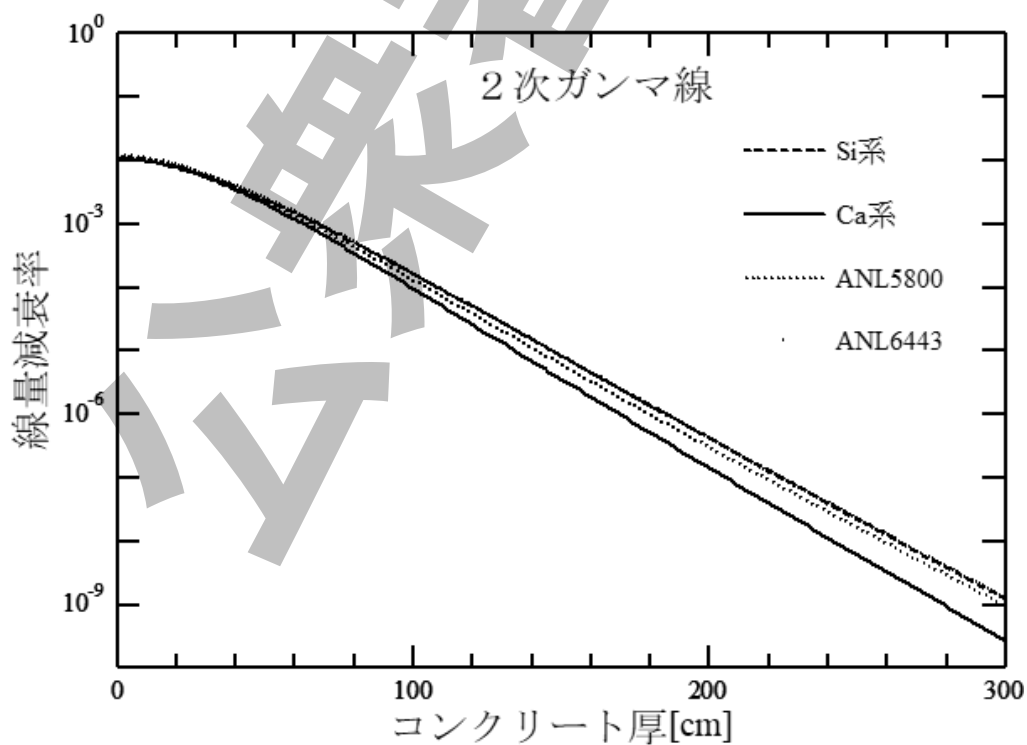


図 C.5 原子炉施設の中性子源の線減衰率の比較(2次 γ 線量率)

原子炉施設の中性子+2次 γ 線では、Si及びCa系骨材組成のコンクリート200cm位置での減衰率は、Ca系骨材コンクリートで 3.18×10^{-7} 、Si系骨材コンクリートで 8.73×10^{-7} である。また、ANL-6443コンクリートの減衰率は 8.55×10^{-7} でSi系骨材コンクリートとほぼ同程度であるが、Si系骨材コンクリートのうちANL-5800コンクリートは 5.17×10^{-7} である。Si及びCa系骨材コンクリートの差異（200cm位置の減衰率の比は0.36程度）については、Si及びCaの熱エネルギー領域(0.1eV)の(n, γ)断面積が、Caの方が2倍程度大きく、この効果が現れているものと考えられる。

一方、水分に着目するとH原子個数密度で、Si系及びCa系骨材組成コンクリートの 7.70×10^{-3} (n/(b $\cdot$ cm))は、ANL-6443組成コンクリートの 6.91×10^{-3} と、ANL-5800組成コンクリートは 8.56×10^{-3} (n/(b $\cdot$ cm))中間程度で、ANL-6443組成コンクリートに近い値となっている。ANL-6443組成コンクリート及びANL-5800組成コンクリートは共にSiが多い組成であるため、Si系骨材組成コンクリート及びANL-6443組成コンクリートに対するANL-5800組成コンクリートの200cm位置の減衰率の比1.7は、水分の差による影響が大きいと考えられ、次のb)項に示す水分変動検討では、同様のH原子個数密度差異で、ファクタ1.9の差異が有り同様である。ただしANL-5800組成コンクリートではFe成分が多いことも考慮される。

Si系骨材組成コンクリートに対するCa系骨材組成コンクリートの減衰率変動は、200cm位置で-16cm程度である。全体として、標準組成コンクリートのうち、Si系骨材組成コンクリートを用いた場合、適度に保守的な遮蔽計算となることが分かる。

2) 原子炉施設の γ 線源

原子炉施設の γ 線源は、エネルギーの差異を考慮して ^{60}Co 線源、 ^{16}N 線源及び核分裂即発 γ 線源を対象とし、 γ 線量率を線減衰率で比較検討した。

^{60}Co 線源についての結果を図C.6、 ^{16}N 線源についての結果を図C.7、核分裂即発 γ 線源についての結果を図C.8に示す。

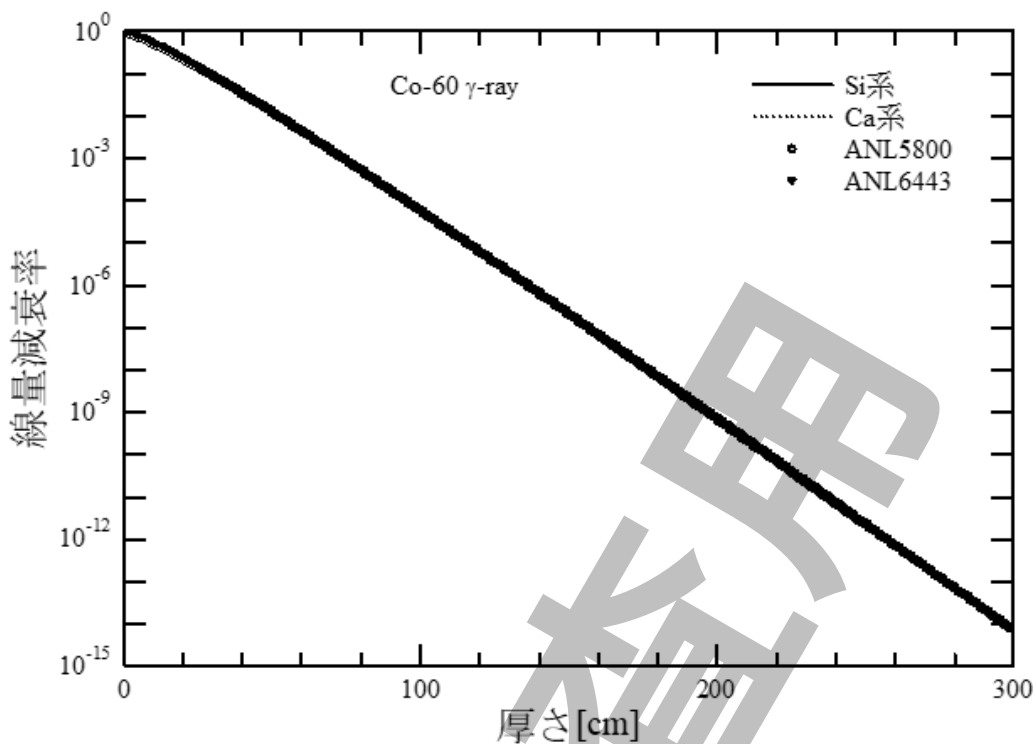


図 C.6 原子炉施設の γ 線源の線減衰率の比較(^{60}Co 線源)

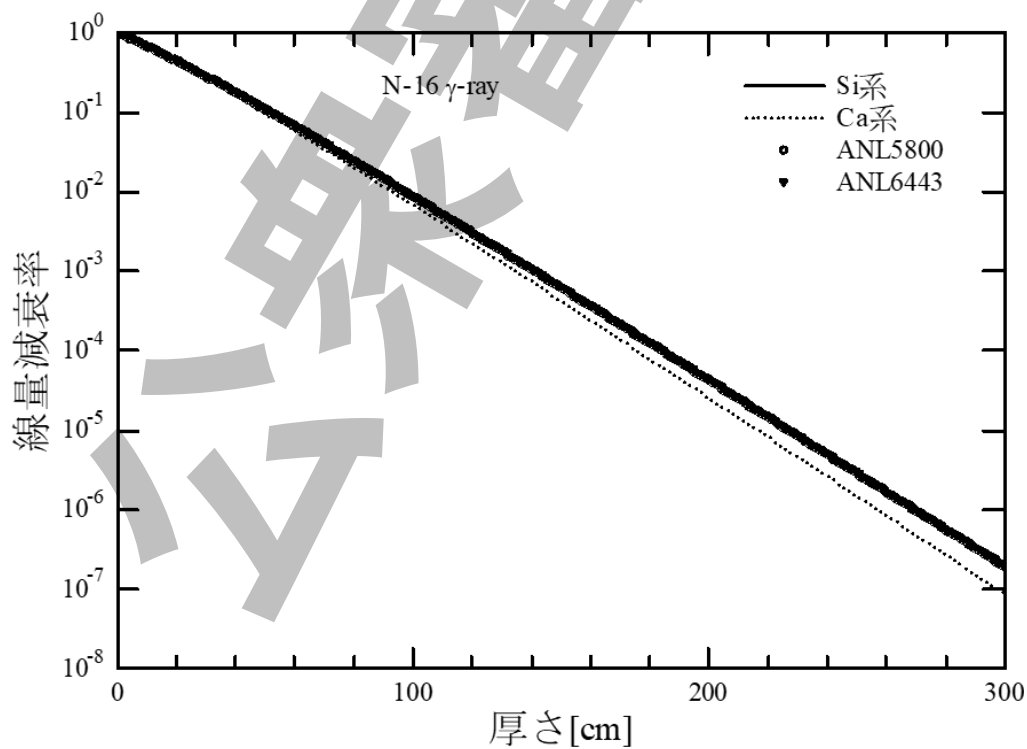


図 C.7 原子炉施設の γ 線源の線減衰率の比較(^{16}N 線源)

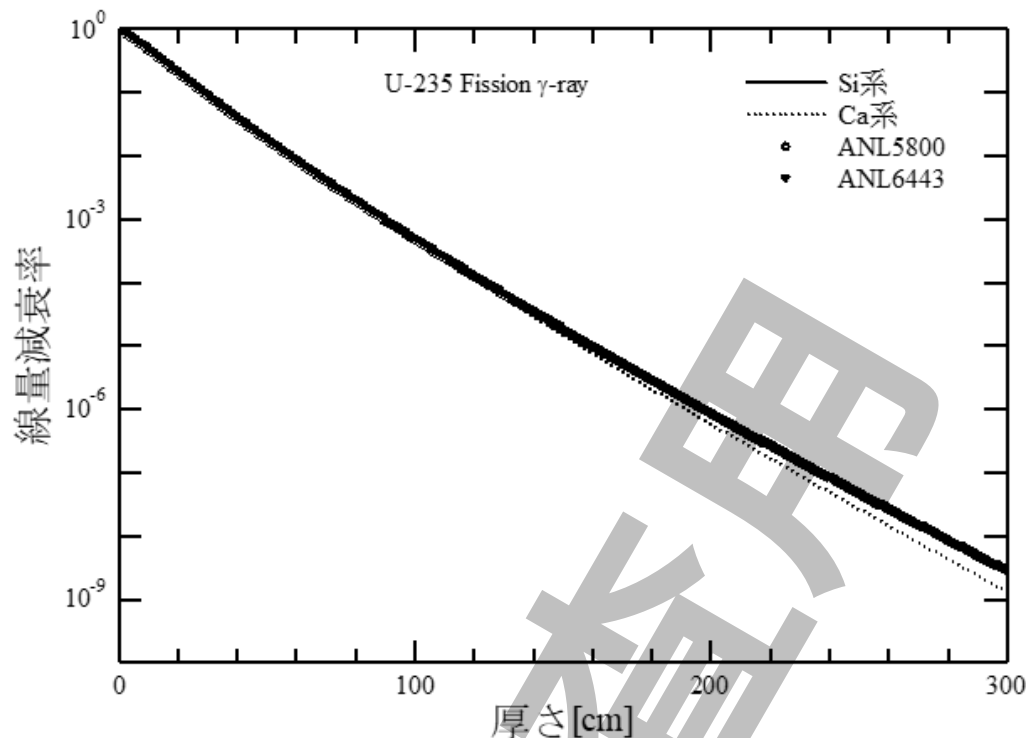


図 C.8 原子炉施設の γ 線源の線減衰率の比較(核分裂即発 γ 線源)

原子炉施設の γ 線源では、 ^{16}N と核分裂即発 γ 線源で Ca 系骨材組成コンクリートだけ減衰が大きくなっており、 ^{16}N 線源に対してコンクリート 100cm 位置で、ANL-6443 組成コンクリートに対する Ca 系骨材組成コンクリートの減衰率の比は 0.767 である。

これは、 γ 線エネルギーが 4MeV 以上で電子対生成の割合が大きくなり、電子対生成の断面積は原子番号の二乗に比例するため、原子番号 14 の Si に比べて原子番号 20 の Ca は電子対生成が多く発生する。そのため、放出 γ 線エネルギーが 6MeV と 7MeV の ^{16}N と、4MeV 以上の γ 線成分を含む核分裂即発 γ 線源では、Ca での減衰が大きくなっている。

ANL-5800 と ANL-6443 の組成コンクリートは、Si が主要組成であるため、Si 系骨材組成コンクリートと同程度の減衰率となっている。また、Ca 系骨材組成コンクリートとその他の組成コンクリートの違いについては、C は組成の比率が一桁大きく、Fe は一桁小さいが、コンクリート密度が同一であれば、光子の減衰には影響がないと考えられる。

3) 20MeV 以下の中性子発生源

中性子と 2 次 γ 線の合計線量率と、2 次 γ 線だけの線量率の減衰率を、線減衰率で比較した。中性子と 2 次 γ 線の合計線量率について図 C.9 に、2 次 γ 線だけの線量率について図 C.10 に示す。

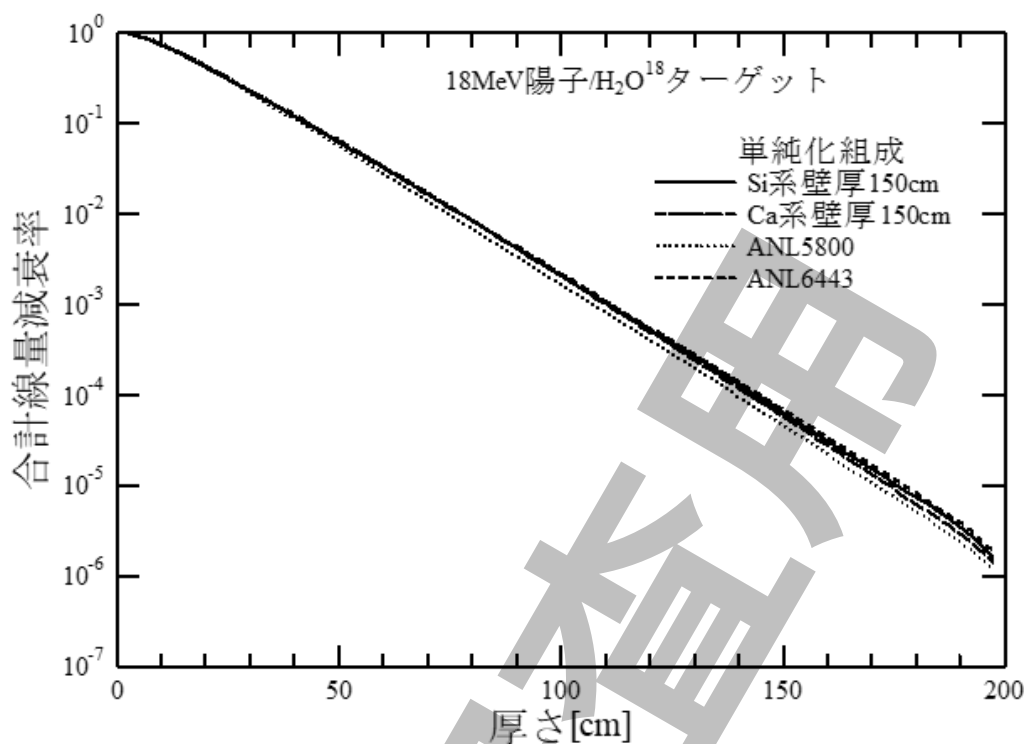


図 C.9 20MeV 以下の中性子発生源の線減衰率の比較(合計線量率)

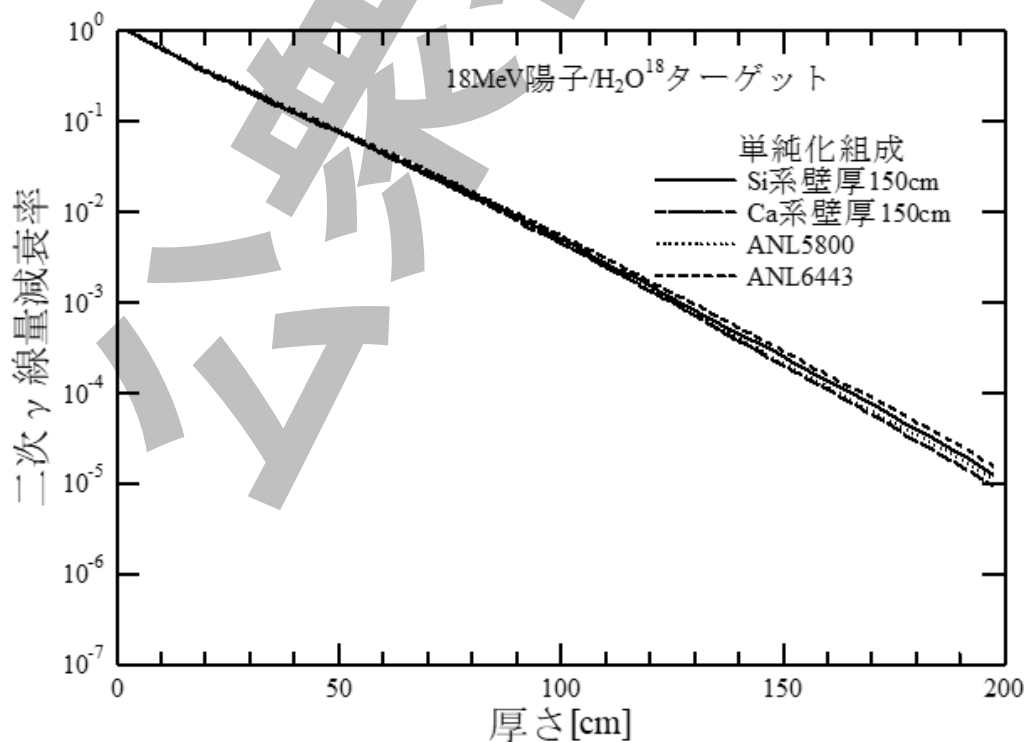


図 C.10 20MeV 以下の中性子発生源の線減衰率の比較(2次γ線量率)

20MeV 以下の中性子発生源の中性子及び 2 次 γ 線の合計線量率では、Si 及び Ca 系骨材組成のコンクリート 150cm 位置での減衰率は、Si 系骨材組成コンクリートで 5.45×10^{-5} 、Ca 系骨材組成コンクリートで 4.43×10^{-5} である。また、ANL-6443 の元素組成コンクリートによる減衰率は 5.85×10^{-5} であるため Si 系骨材組成コンクリートとほぼ同程度である。しかし、ANL-5800 組成コンクリートは 3.94×10^{-5} であり、150cm 位置での ANL-6443 組成コンクリートに対する ANL-5800 組成コンクリートの減衰率の比は、0.67 である。(原子炉施設での合計線量率の比は、200cm 位置で 0.59 のため同程度と考えられる。)

原子炉施設では、Si 及び Ca 系骨材組成コンクリートで有意な差異が生じたが、20MeV 以下の中性子が発生する陽子加速器では、大きな違いは現れなかった。これは、 $^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$ 反応で生成する中性子のエネルギー分布が高エネルギー側に広がっているため (^{235}U 核分裂中性子のスペクトルと比べて、2MeV 付近にピークがあることは同じであるが、高エネルギー側のテールが高くなっている)、水素の原子個数密度が高い ANL-5800 組成コンクリートでは数 MeV より高いエネルギーの中性子の透過率が、H との弾性散乱の増加によって小さくなり、ANL-5800 組成コンクリートとの差異がより顕在化するが、Si と Ca による差異が現れにくくなっていると考えられる。

4) 20MeV 以下の光子発生源

20MeV 以下の光子発生源では、電子の加速電圧が 10MV と 20MV の条件で、線減衰率を比較した。電子の加速電圧 10MV の場合の光子線量率の減衰率比較を図 C.11 に、加速電圧 20MV の場合の光子線量率の減衰率比較を図 C.12 に示す。

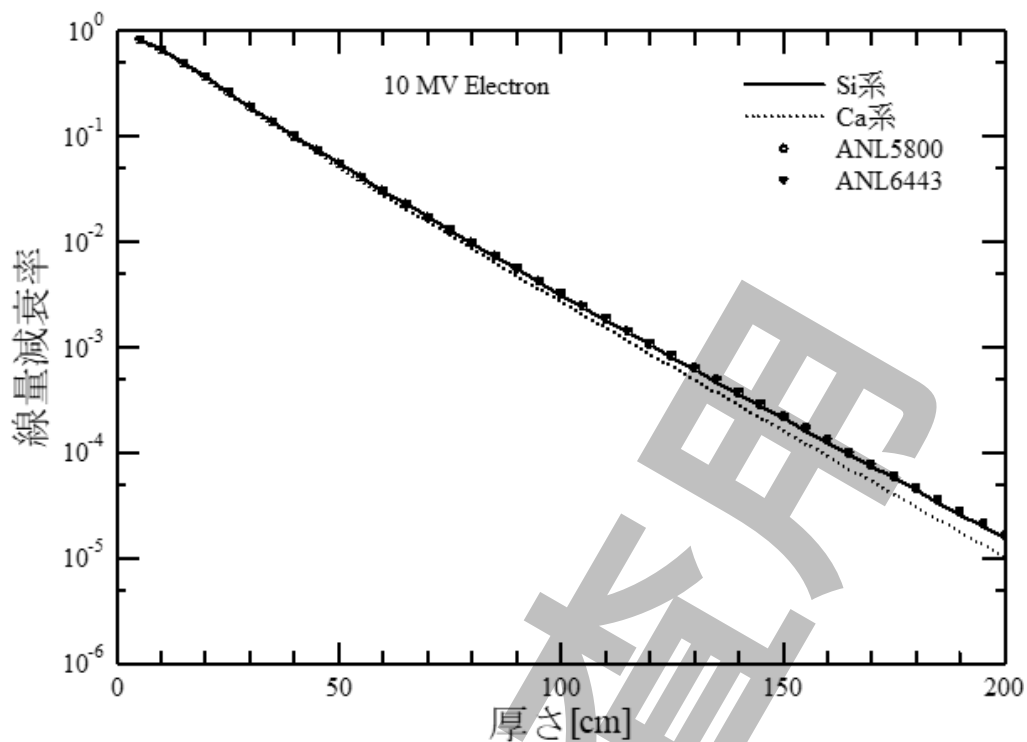


図 C.11 20MeV 以下の光子発生源の光子の線減衰率の比較(電子の加速電圧 10MV)

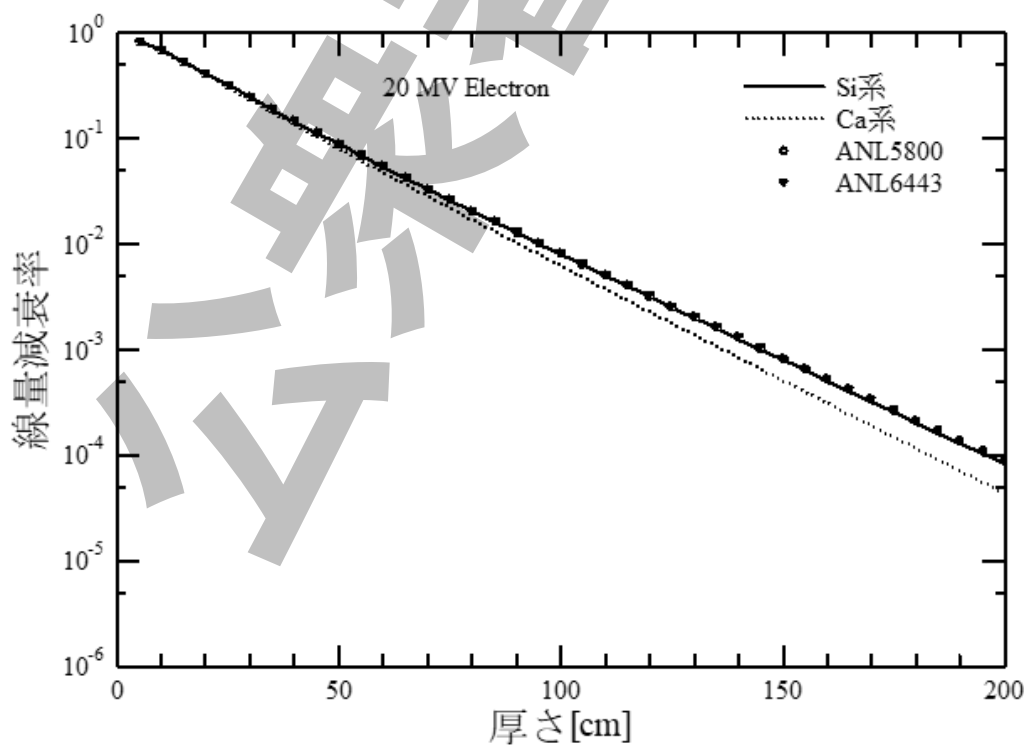


図 C.12 20MeV 以下の光子発生源の光子の線減衰率の比較(電子の加速電圧 20MV)

20MeV 以下の光子発生源では、Si 系骨材組成コンクリート、ANL-6443 組成コンクリート、ANL-5800 組成コンクリートの元素組成の減衰率グラフは、同程度の曲線となっているが、Ca 系骨材組成コンクリートだけ減衰が大きい結果となっている。コンクリート 150cm 位置での ANL-6443 組成コンクリートに対する Ca 系骨材組成コンクリートの減衰率の比は、10MeV で 0.712、20MeV で 0.608 である。

原子炉施設の γ 線源と同様に、4MeV 以上では電子対生成による減衰と、発生した陽電子・電子に起因する制動 X 線と消滅 X 線による線量率ビルドアップが生ずる。総合的な Si 系及び Ca 系骨材組成コンクリート間の減衰率の差は、原子炉施設の ^{16}N の γ 線(6 と 7MeV)での電子対生成効果(100cm 位置で減衰率比 0.767)と同程度の差異となっている。

電子対生成による減衰係数は、光子エネルギーが大きいほど、Si に比べ Ca の方が大きくなるため、10MeV に比べ 20MeV で Ca での減衰が大きくなると考えられる。

よりエネルギーが高くなると、17MeV 付近に巨大共鳴ピークを持つ光核反応が生じるため、光核反応による吸収と、発生する光中性子及び 2 次 γ 線・捕獲 γ 線(共鳴領域での Fe による中性子吸収など)による線量率ビルドアップが生ずる。

Ca と Si の主成分である ^{40}Ca と ^{28}Si の光核反応断面積には大きな差は無く、解析結果からコンクリートの元素組成による光中性子発生の影響は数%程度であるため、減衰率に対する光核反応の影響は小さいと考えられる。

ここで、高エネルギー光子の減衰率に対する電子対生成と光核反応の影響に係る事前検討を、解説 2 第 5 章に示す。

b) 水分変動

水分は中性子挙動に主に影響するため、中性子+2 次 γ 線のケースを主体に比較を実施した。また、水分増加による 2 次 γ 線の増加を確認するために、2 次 γ 線だけの比較も実施した。線源は、原子炉施設の中性子源と、20MeV 以下の中性子発生源とした。

原子炉施設からの線量率の減衰率について、Si 系骨材組成コンクリートに対しては、合計線量率について線減衰率を図 C.13 に、質量減衰率を図 C.14 に、2 次 γ 線線量率について線減衰率を図 C.15 に示す。Ca 系骨材組成コンクリートに対しては、合計線量率について線減衰率を図 C.16 に、質量減衰率を図 C.17 に、2 次 γ 線線量率について線減衰率を図 C.18 に示す。

20MeV 以下の中性子発生源からの線量率の減衰率について Si 系骨材組成コンクリートに対しては、合計線量率について線減衰率を図 C.19 に、質量減衰率を図 C.20 に、2 次 γ 線線量率について線減衰率を図 C.21 に示す。Ca 系骨材組成コンクリートに対しては、合計線量率について線減衰率を図 C.22 に、質量減衰率を図 C.23 に、2 次 γ 線線量率について線減衰率を図 C.24 に示す。

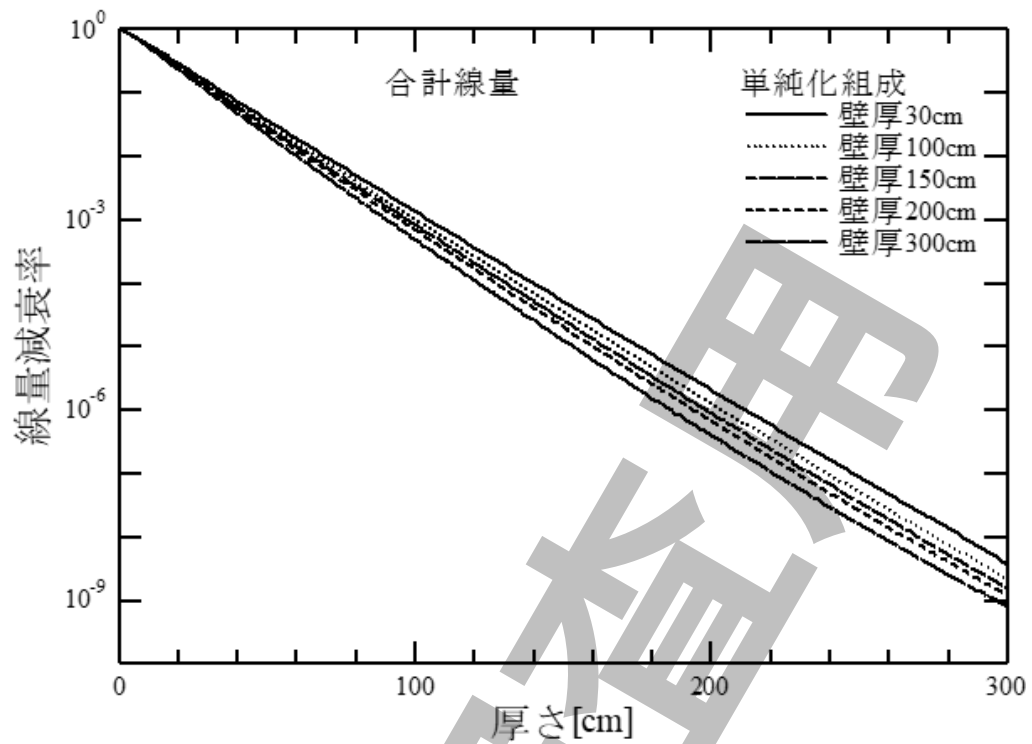


図 C.13 Si 系骨材組成に対する原子炉施設の線減衰率の比較 (合計線量率)

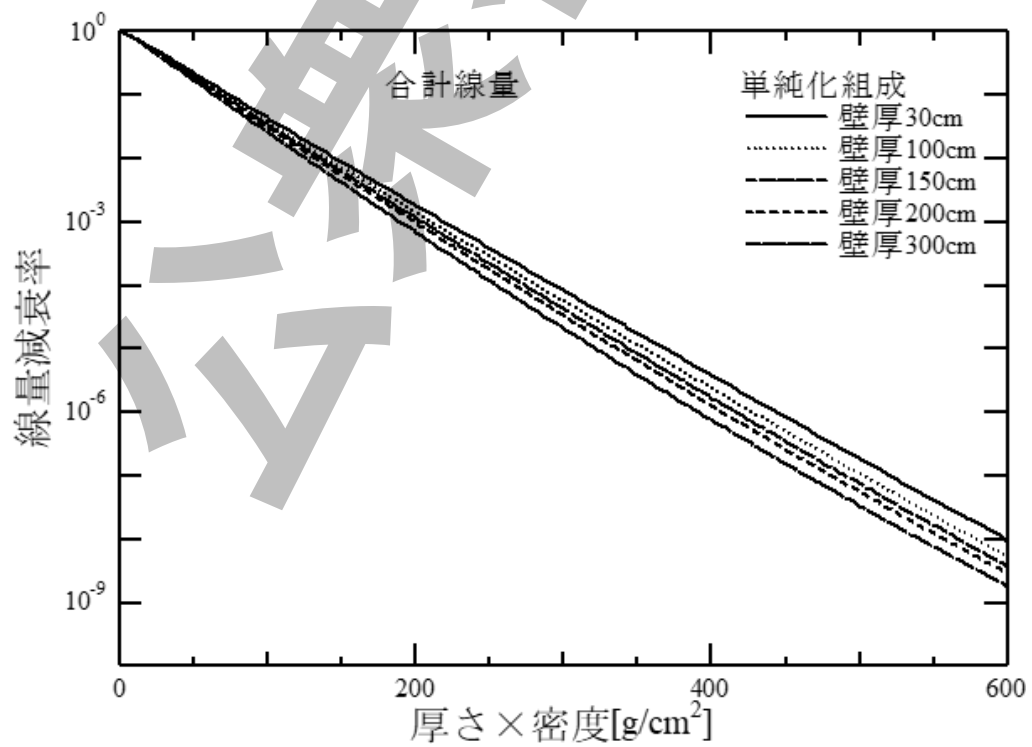


図 C.14 Si 系骨材組成に対する原子炉施設の質量減衰率の比較 (合計線量率)

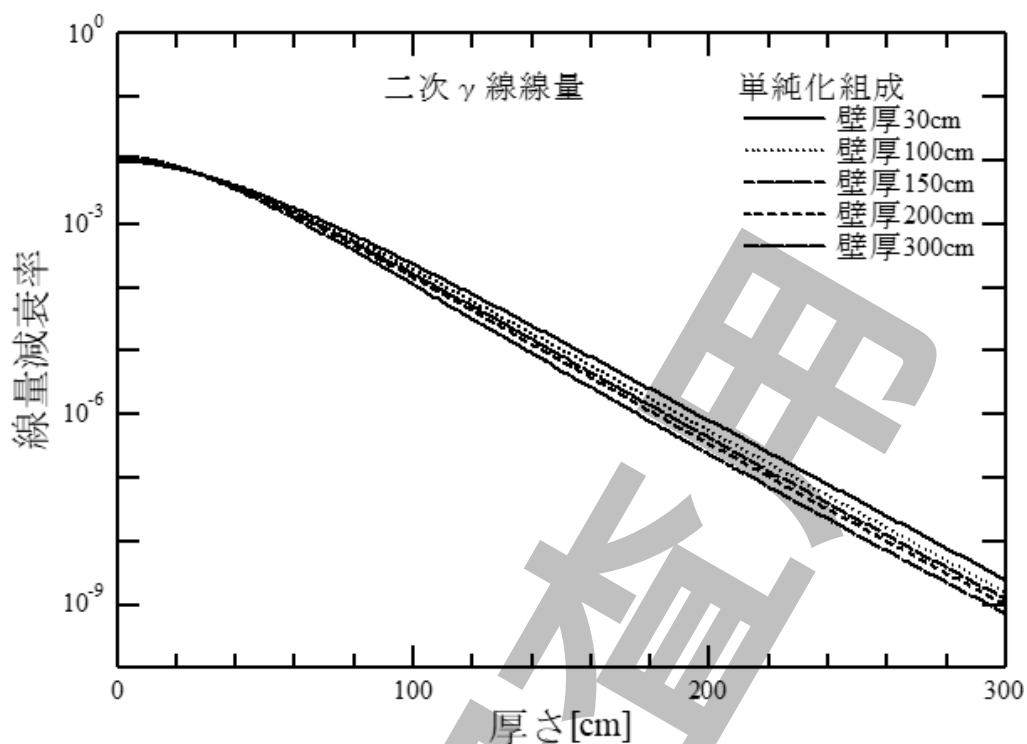


図 C.15 Si 系骨材組成に対する原子炉施設の線減衰率の比較 (2 次 γ 線量率)

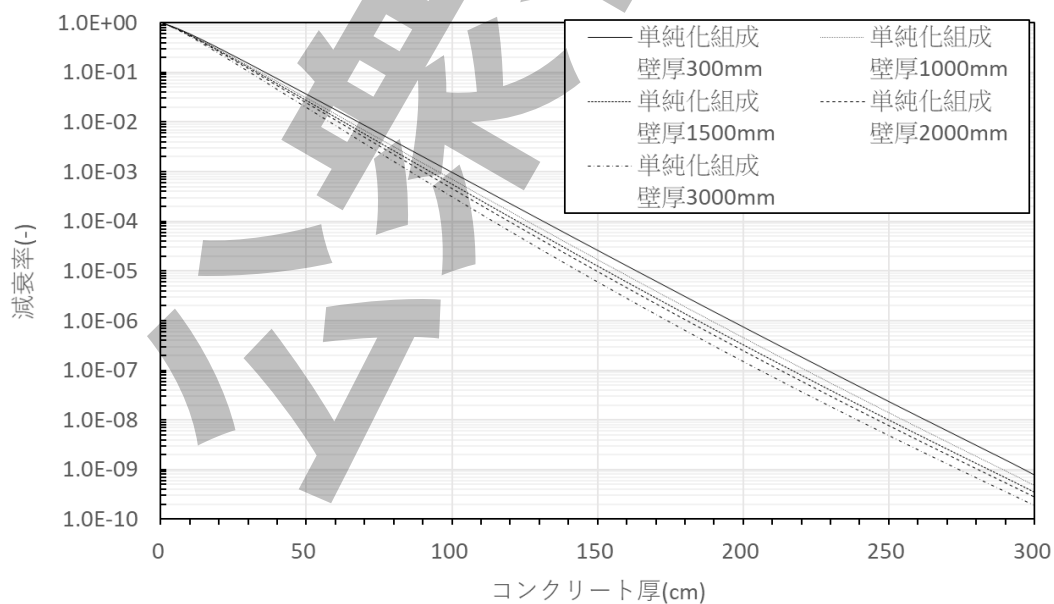


図 C.16 Ca 系骨材組成に対する原子炉施設の線減衰率の比較 (合計線量率)

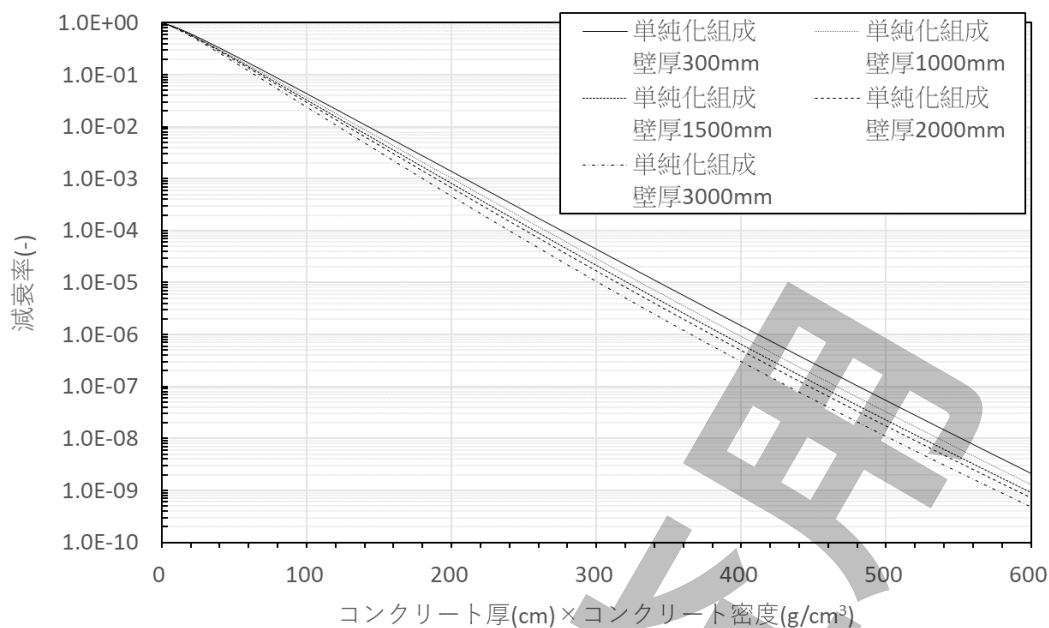


図 C.17 Ca 系骨材組成に対する原子炉施設の質量減衰率の比較(合計線量率)

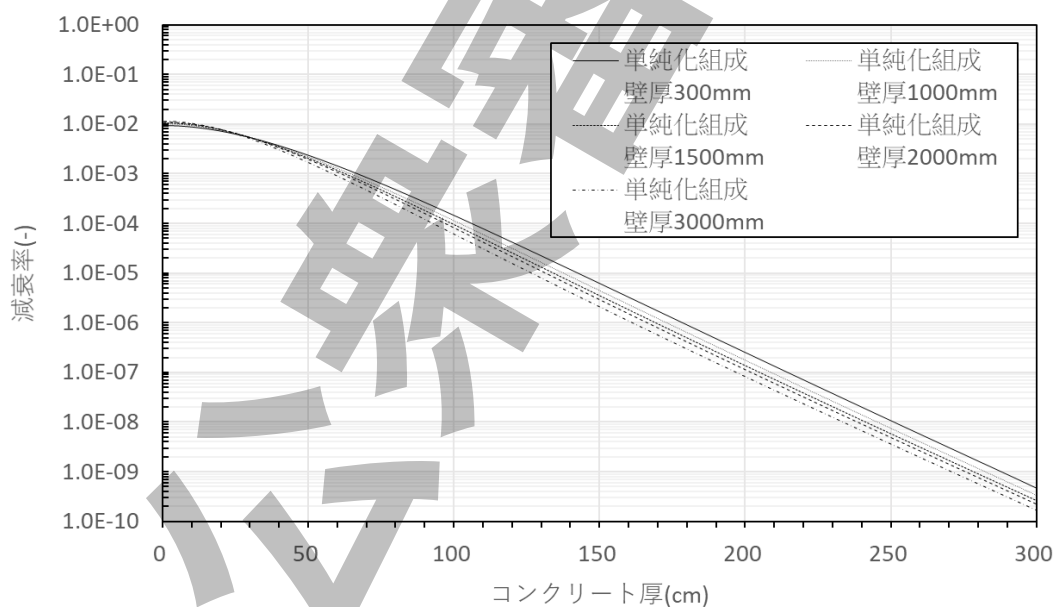


図 C.18 Ca 系骨材組成に対する原子炉施設の線減衰率の比較(2 次 γ 線量率)

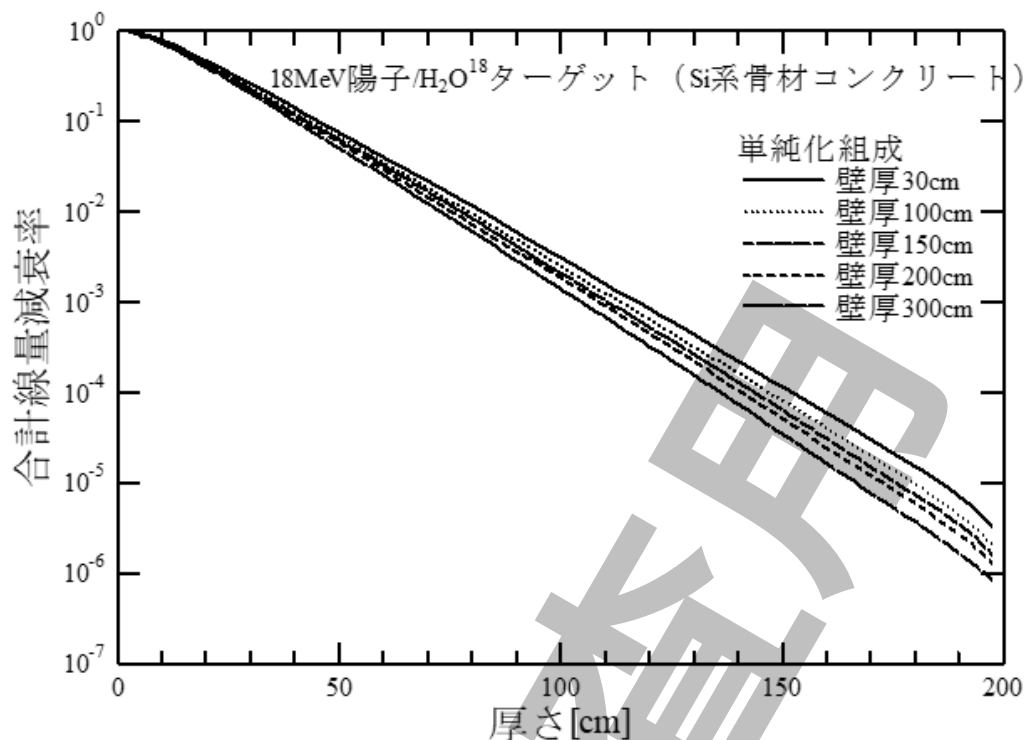


図 C.19 Si 系骨材組成に対する 20MeV 以下の中性子発生源の線減衰率の比較
(合計線量率)

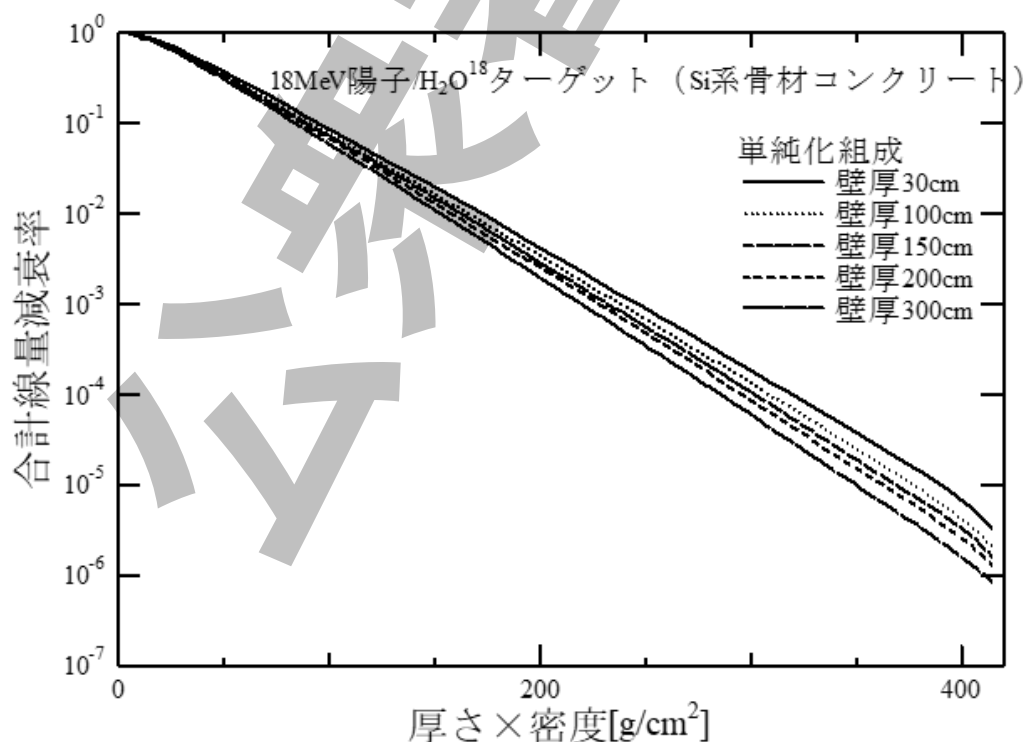


図 C.20 Si 系骨材組成に対する 20MeV 以下の中性子発生源の質量減衰率の比較
(合計線量率)

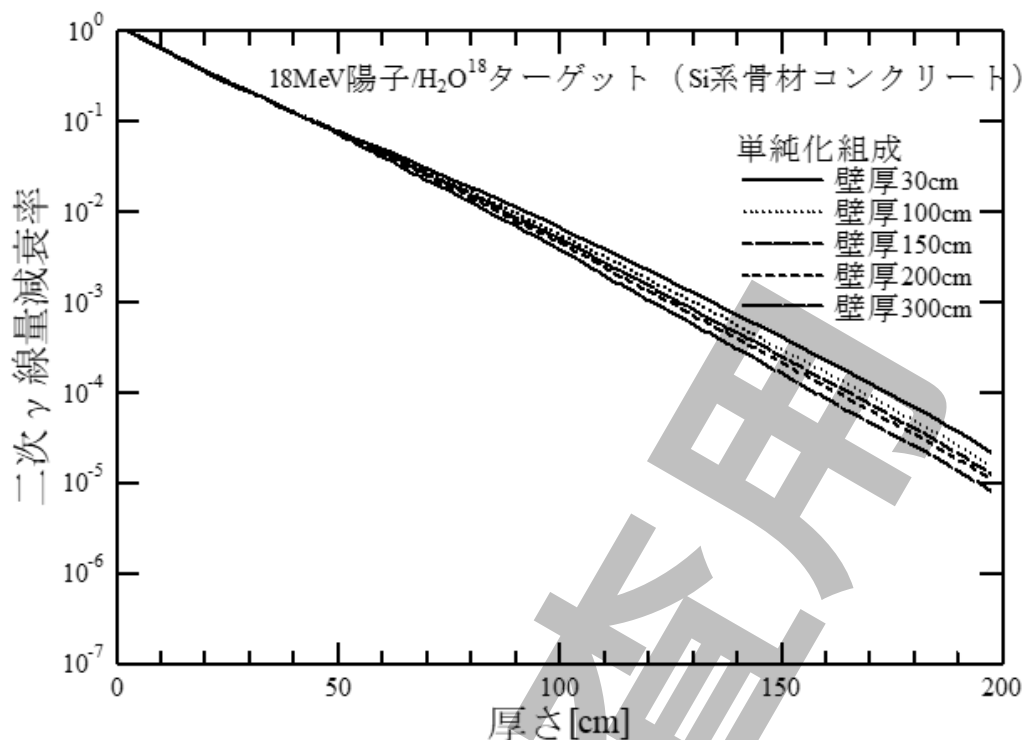


図 C.21 Si 系骨材組成に対する 20MeV 以下の中性子発生源の線減衰率の比較
(2 次 γ 線量率)

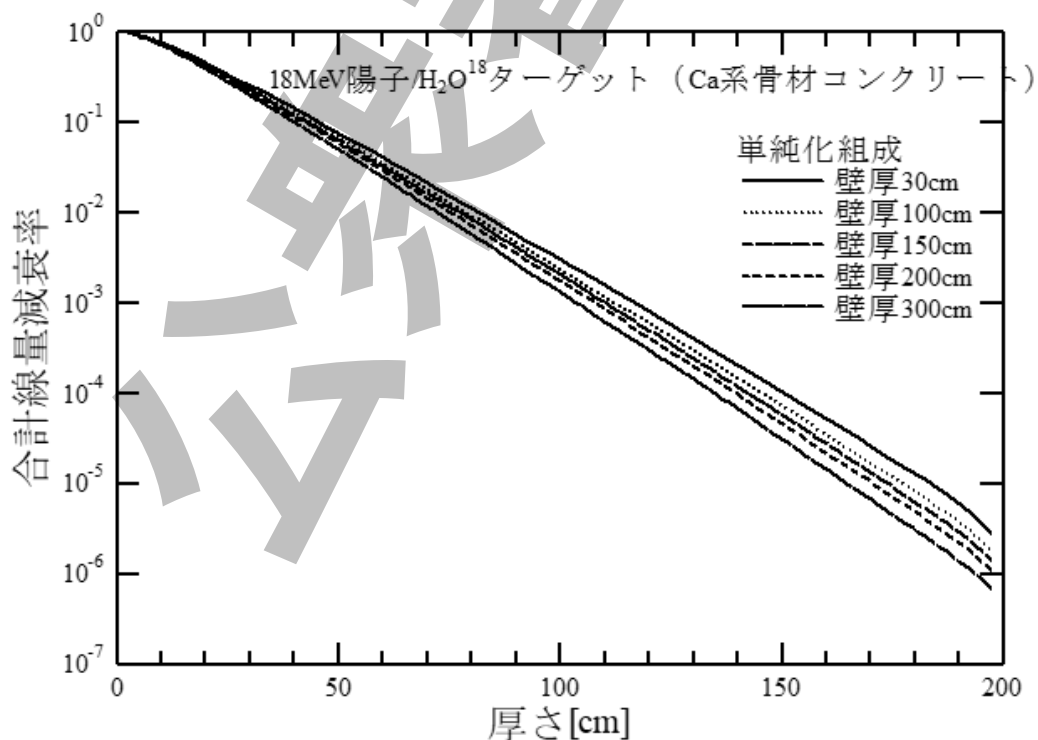


図 C.22 Ca 系骨材組成に対する 20MeV 以下の中性子発生源の線減衰率の比較
(合計線量率)

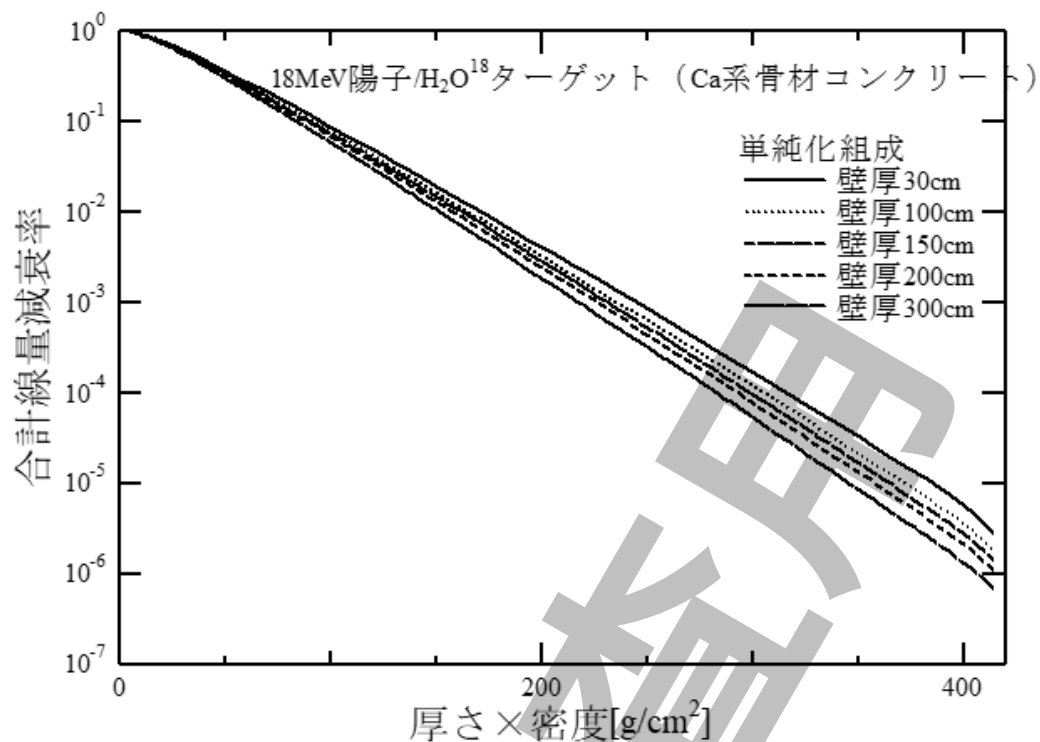


図 C.23 Ca 系骨材組成に対する 20MeV 以下の中性子発生源の質量減衰率の比較
(合計線量率)

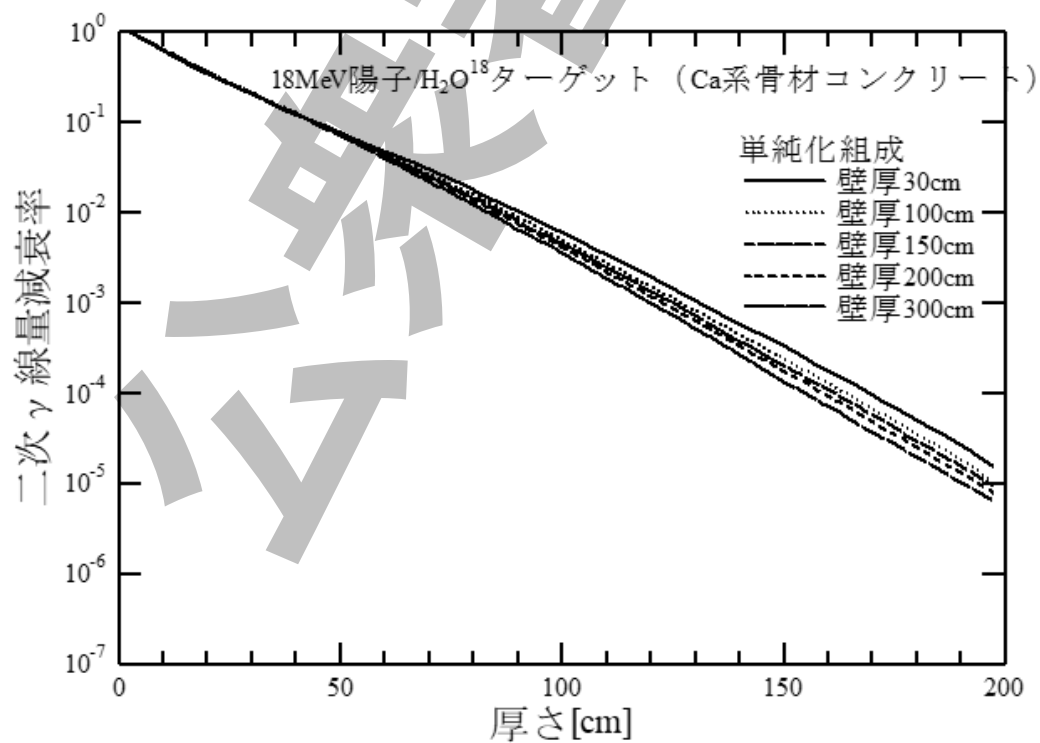


図 C.24 Ca 系骨材組成に対する 20MeV 以下の中性子発生源の線減衰率の比較
(2 次 γ 線量率)

水分変動は、遮蔽計算時に想定したおおよその壁厚が、標準組成条件としている1,500mmより有意に薄く、想定する水分が小さくなる場合は、水分補正式で水分量を補正するよう規定している。そのため、水分変動は適切に遮蔽計算に反映することができる。したがって、水分変動検討結果は、線量率への影響を示す参考値であり、遮蔽計算結果に基づく遮蔽厚が、想定したおおよその壁厚と異なる場合は、線量率の補正データとして活用することができる。

想定壁厚に対する水分変動による線量率影響のおおよそ評価結果として、中性子+2次 γ 線線量率の線減衰率は、次のとおりとなった。

自由水の含有量変動の最大値と最小値の比は、 0.00693g/cm^3 (300mm 厚相当)／ 0.0693g/cm^3 (3,000mm 厚相当)で 5.3 倍である。これに対し、参考値としての減衰率の比は次のとおりである。

【原子炉施設；約 6 桁減衰している 200cm での減衰率比】

Si 系骨材コンクリート：2.33(300mm 厚相当)／0.44(3000mm 厚相当)。これは、コンクリート壁厚で約+15cm／-10cm 程度に相当。

Ca 系骨材コンクリート：2.27(300mm 厚相当)／0.46(3000mm 厚相当)。これは、コンクリート壁厚で約+14cm／-10cm 程度に相当。

【20MeV 以下の医療用加速器(陽子加速器)；約 5 桁減衰している 150cm での減衰率比】

Si 系骨材コンクリート：1.83(300mm 厚相当)／0.54(3000mm 厚相当)。これは、コンクリート壁厚で約+6cm／-7cm 程度に相当。

Ca 系骨材コンクリート：1.83(300mm 厚相当)／0.53(3000mm 厚相当)。これは、コンクリート壁厚で約+7cm／-7cm 程度に相当。

また、水分が増加することによる、2 次 γ 線線量率の増加に起因する、減衰傾向の逆転現象は発生しなかった。

c) 調合変動（参考値）

調合変動条件の差異は、コンクリートの密度と元素組成の双方に影響する。そこで、これらの因子双方で変動する中性子に着目し、中性子とコンクリート(主に H 元素)との相互作用で発生する 2 次 γ 線にも着目する。したがって、対象線源は、原子炉施設の中性子源と、20MeV 以下の中性子発生源とした。原子炉施設の γ 線源からの γ 線線量率は、密度依存が支配的(解説 2 第 4 章に示す。)であり、ここでは対象としない。

水分組成変動が線量率に影響する中性子遮蔽では、壁厚が 1m を越える遮蔽厚が対象となる。このような厚い壁に対しては、コンクリートが硬化する時発生する水和熱による影響を回避することを目的に、セメント量を少なくする調合が用いられることが多い。また、一般の建築物では、40%～60%程度の水セメント比(W/C)が用いら

れる場合が多い。上記状況に鑑み、標準組成の W/C の代表値は 50%とした。公開されている実績データでも、原子炉容器などの中性子に対する遮蔽では、W/C を 50%とすることが主流である。

したがって、調合変動の影響を確認するためのケーススタディは、W/C (%), スランプ (cm), 最大骨材寸法 (mm), 混和剤種類, セメント種類及び骨材種類の変動を考慮し、W/C については「一般のコンクリートの調合で使用する W/C の範囲で変化させた場合の線量率変動の参考値」として実施する。

線量率の減衰率の比較は、中性子と 2 次 γ 線の合計線量率と、2 次 γ 線線量率だけで実施する。2 次 γ 線だけの比較は、H を主体とする組成変動による 2 次 γ 線の発生の影響を確認するために実施する。また、密度依存性を排除し、組成変動影響だけ観察するために、線減衰率と質量減衰率の双方を比較する。

原子炉施設からの線量率の減衰率について、合計線量率について線減衰率を図 C.25, 質量減衰率を図 C.26, 2 次 γ 線量率について線減衰率を図 C.27 に示す。20MeV 以下の中性子発生源からの線量率の減衰率について、合計線量率について線減衰率を図 C.28, 質量減衰率を図 C.29, 2 次 γ 線量率について線減衰率を図 C.30 に示す。

調合変動のケーススタディの結果、スランプ (cm), 最大骨材寸法 (mm), 混和剤種類, セメント種類及び骨材種類の変動は、減衰率に有意な影響はなく、W/C を変動させた場合だけ、セメント水和反応でコンクリート内に包含される自由水変動が減衰率に影響することが分かった。この結果は、水分変動のケーススタディと同様の結果となった。

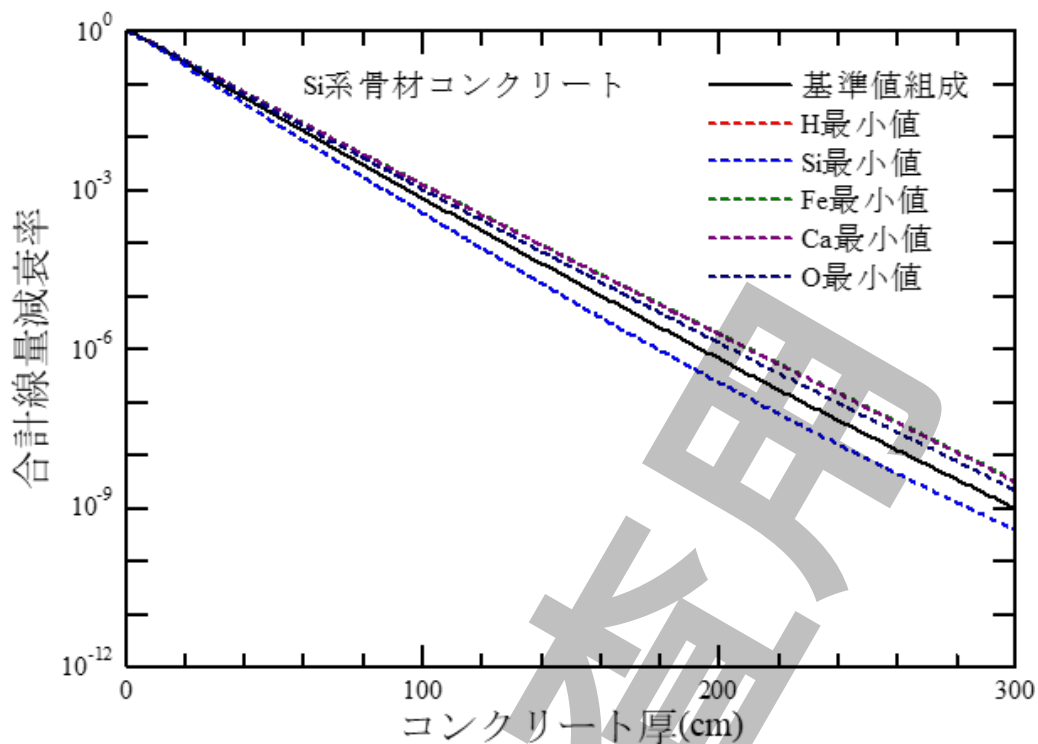


図 C-25 原子炉施設の線減衰率の比較(合計線量率) (1/2)

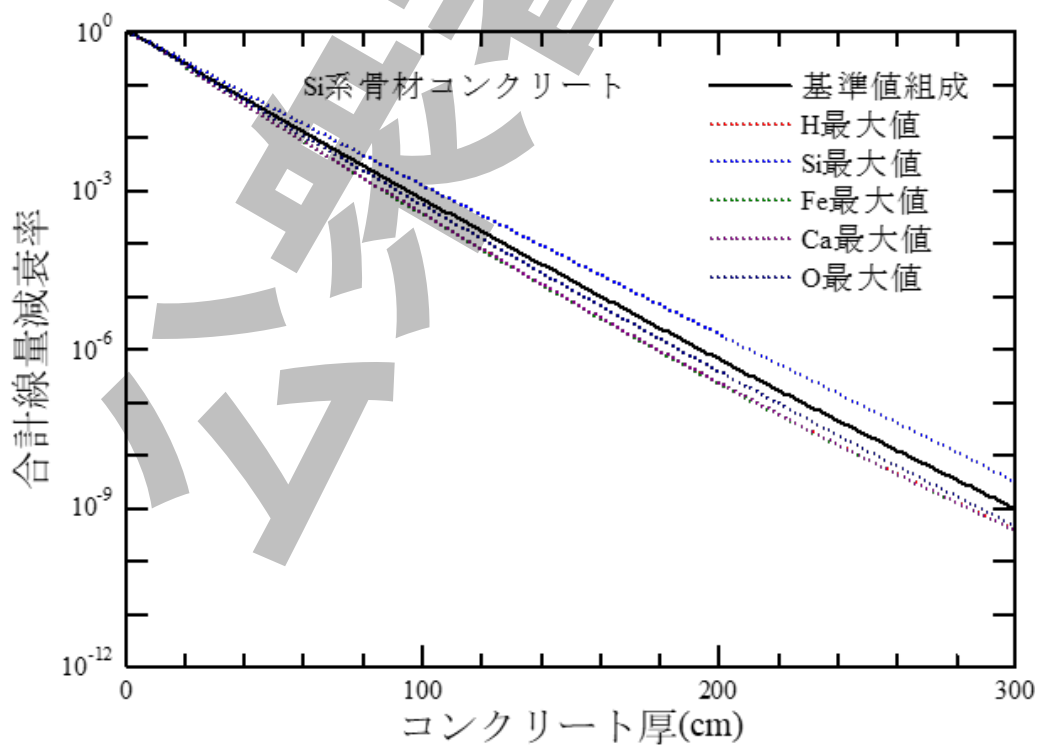


図 C.25 原子炉施設の線減衰率の比較(合計線量率) (2/2)

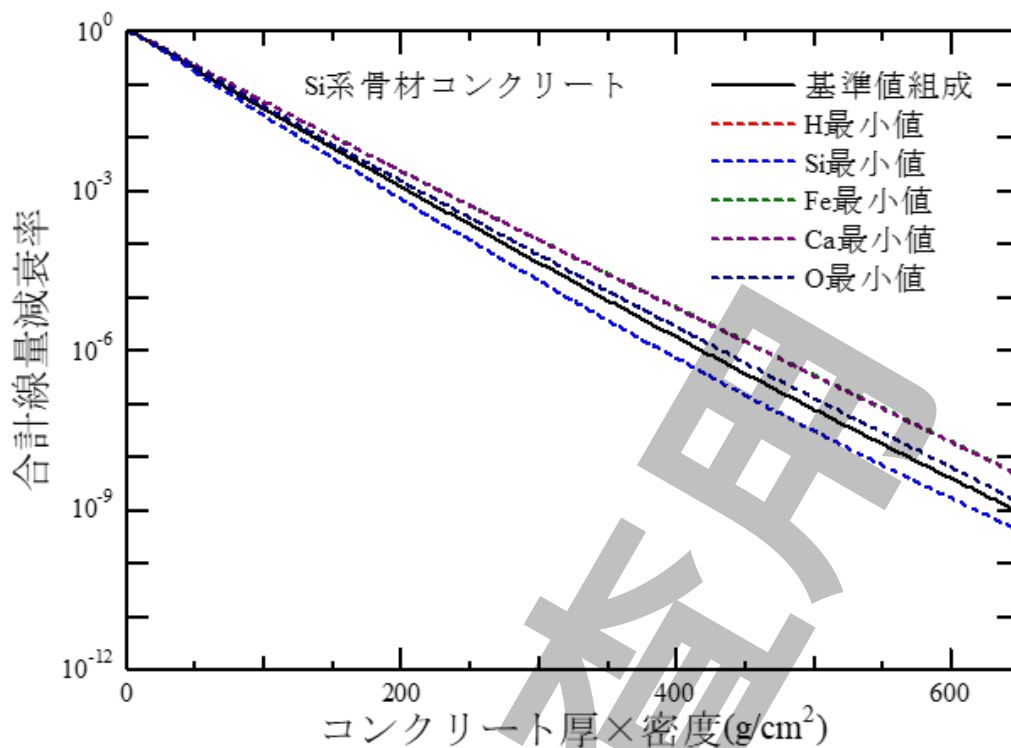


図 C.26 原子炉施設の質量減衰率の比較(合計線量率) (1/2)

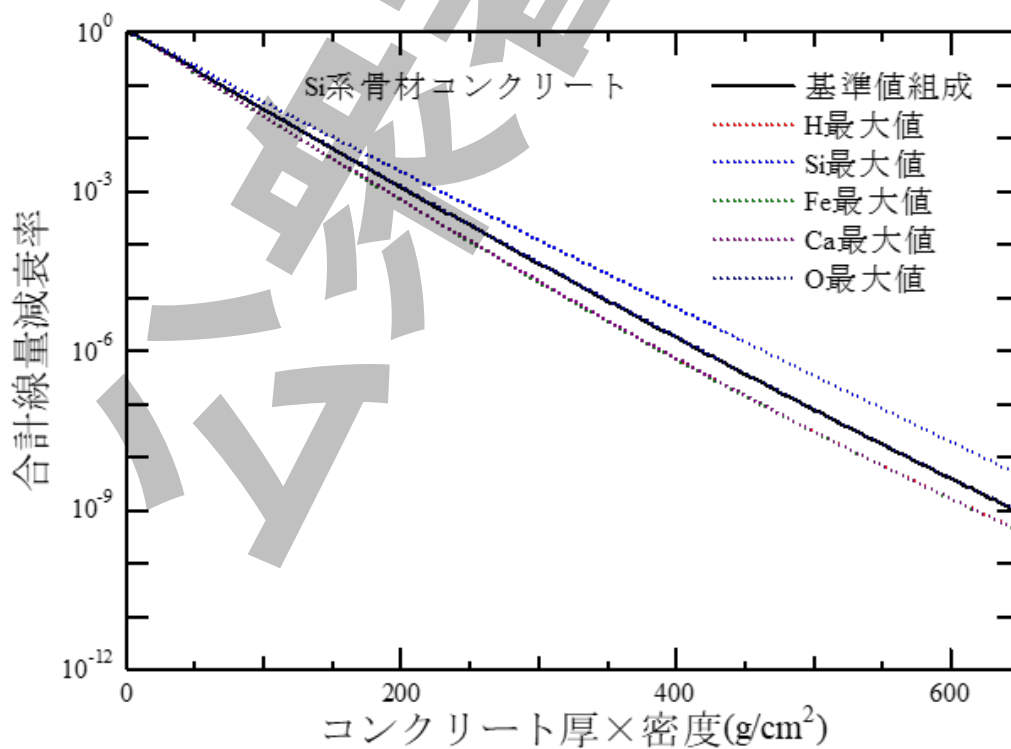


図 C.26 原子炉施設の質量減衰率の比較(合計線量率) (2/2)

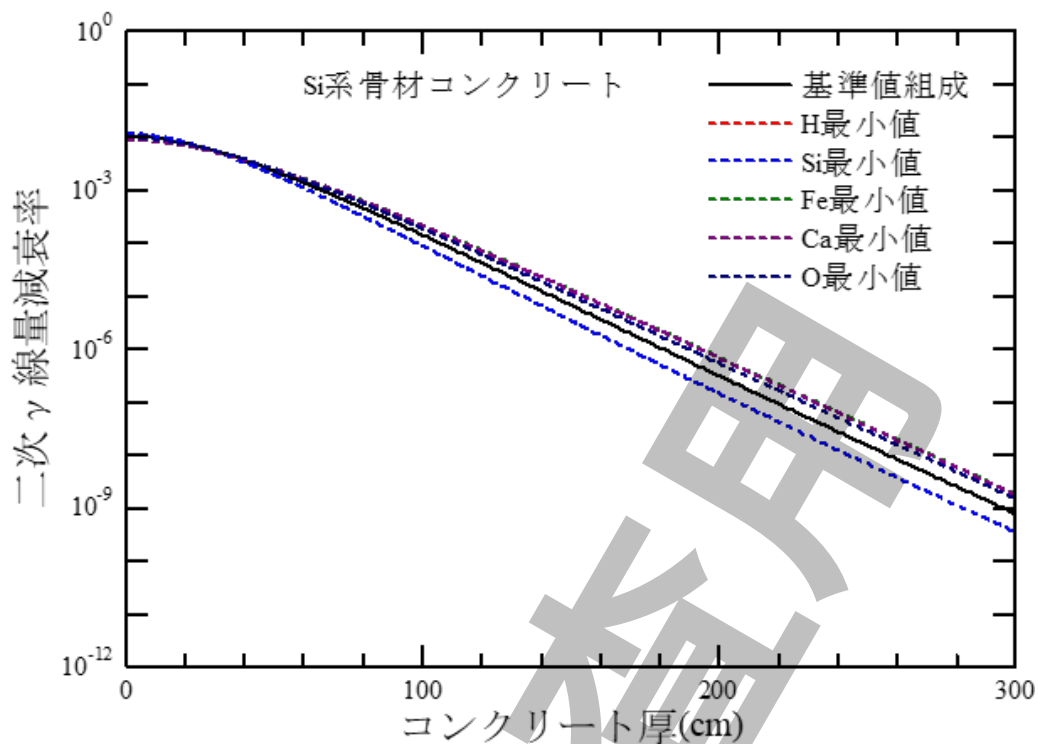


図 C.27 原子炉施設の線減衰率の比較(2次γ線量率) (1/2)

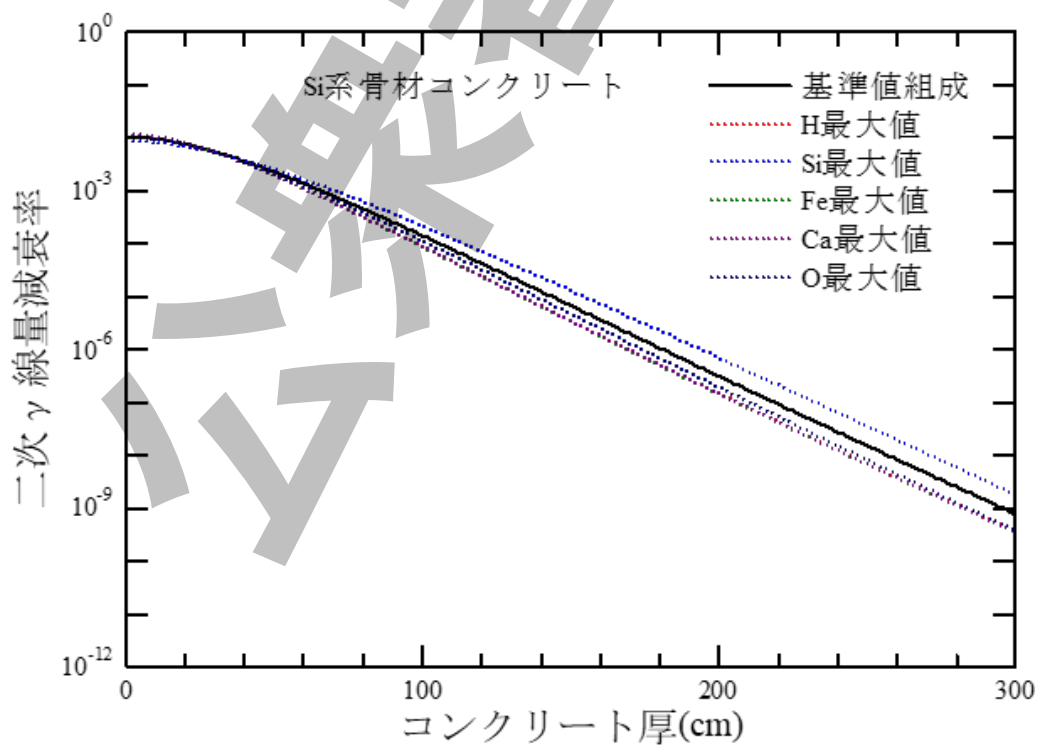


図 C.27 原子炉施設の線減衰率の比較(2次γ線量率) (2/2)

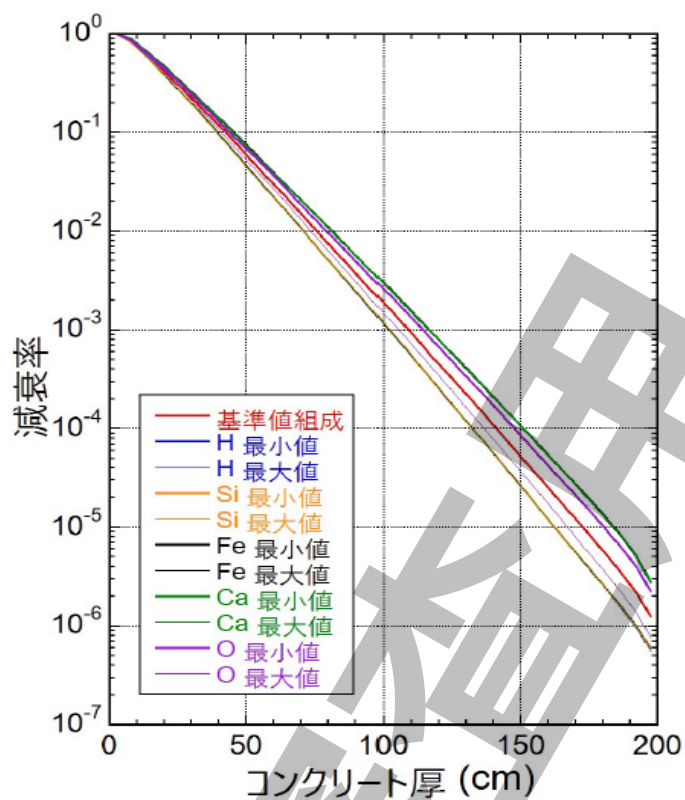


図 C.28 20MeV 以下の中性子発生源の線減衰率の比較 (合計線量率)

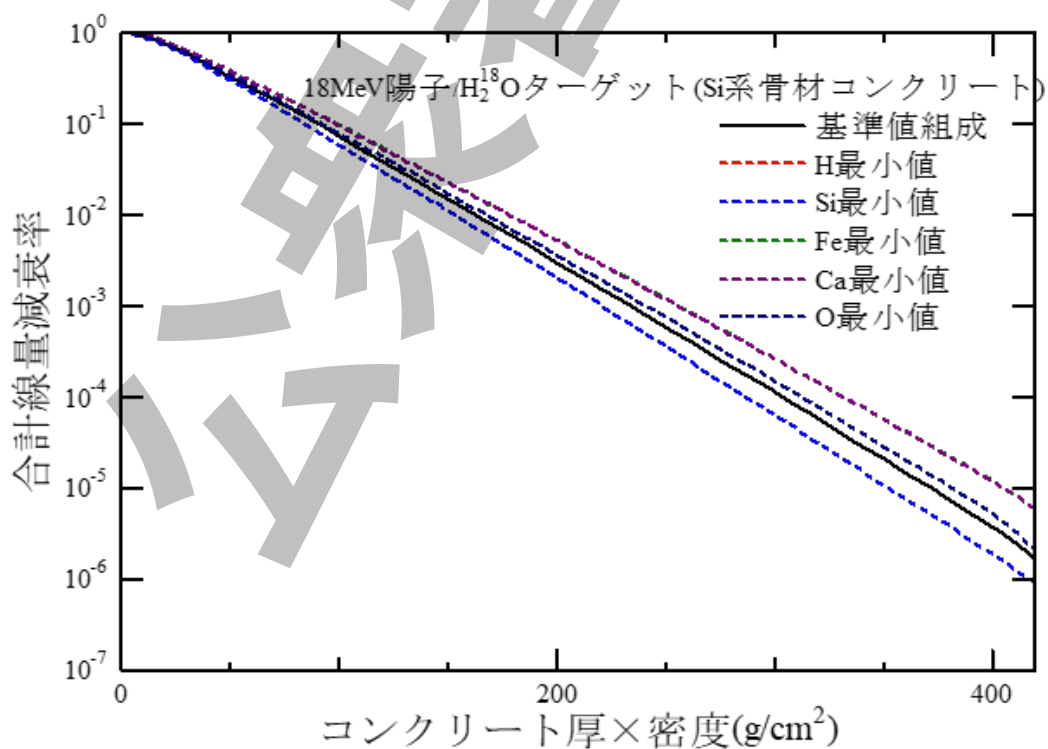


図 C.29 20MeV 以下の中性子発生源の質量減衰率の比較 (合計線量率) (1/2)

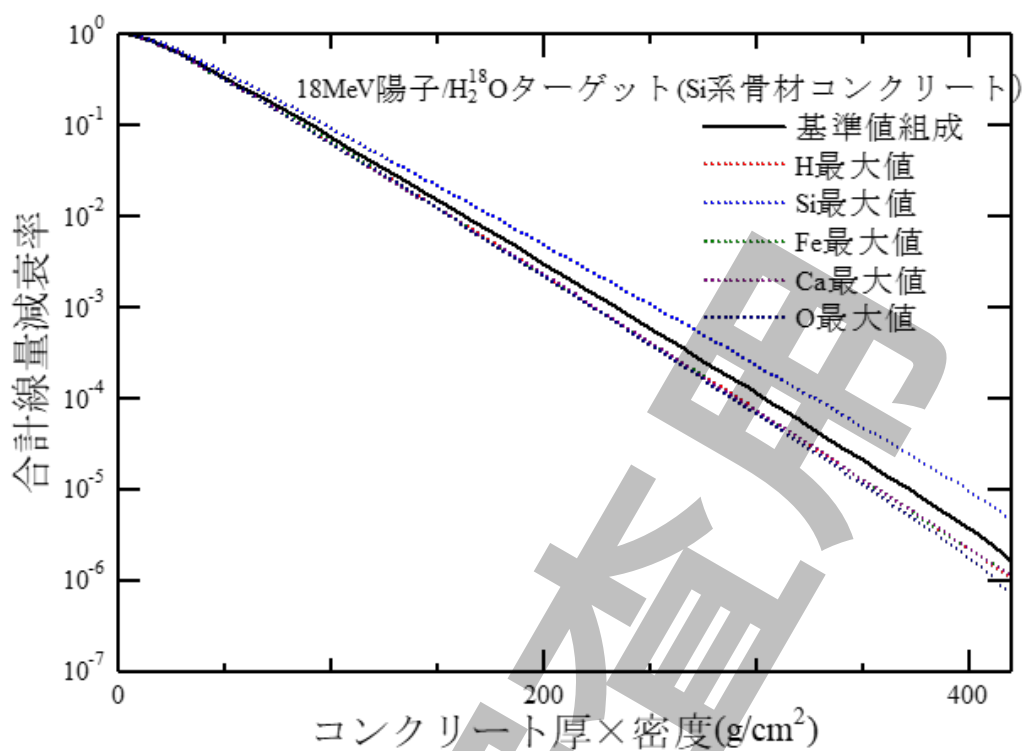


図 C.29 20MeV 以下の中性子発生源の質量減衰率の比較 (合計線量率) (2/2)

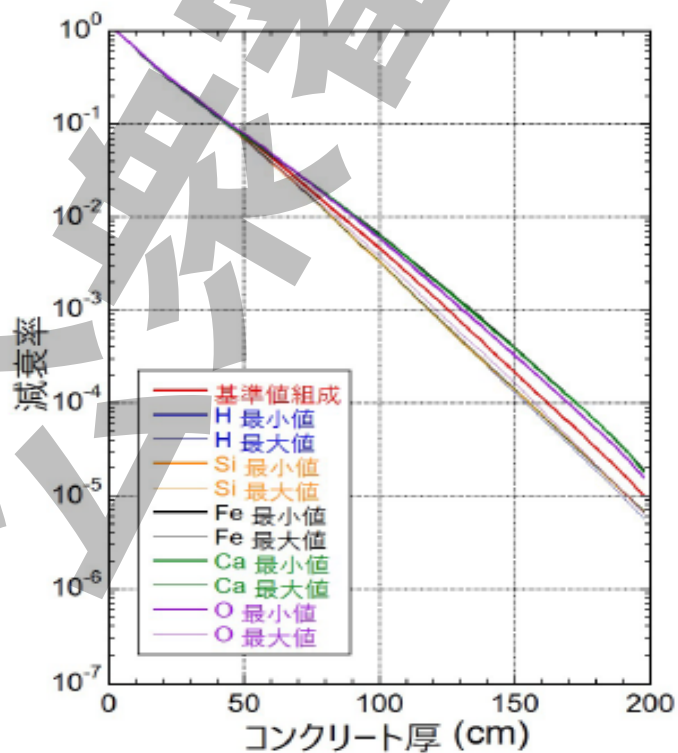


図 C.30 20MeV 以下の中性子発生源の線減衰率の比較 (2 次 γ 線量率)

調合変動は、1,500mm 厚の自由水含有量に対し、水セメント比(%), スランプ(cm), 最大骨材寸法 (mm), 混和剤種類, セメント種類及び骨材種類の変動を考慮して条件を設定した。

条件設定で述べたとおり, 解析条件は 1,500mm 厚に対する標準組成を基準組成ケースとし, 全ての元素が同時に最大値・最小値を取ることは現実的にあり得ないため, 1,500mm 厚さで, H, C(Ca 系骨材だけ), O, Si, Fe, Ca それぞれが最大値・最小値となる調合の場合の各元素の原子個数密度に対し実施した。

解析は, 前述のとおり, 標準組成としてデフォルトとしている Si 系骨材組成コンクリートで 10 ケースだけで, ケーススタディを実施した。

ケーススタディ結果から, 線減衰率曲線は, 下記のグループに集約された。

- ・ H 最小値調合, Si 最大値調合, Fe 最小値調合, Ca 最小値調合
- ・ H 最大値調合, Si 最小値調合, Fe 最大値調合, Cs 最大値調合
- ・ O 最小値調合
- ・ O 最大値調合

これらの結果から, 線量率の変動は, スランプ (cm), 最大骨材寸法 (mm), 混和剤種類, セメント種類及び骨材種類の変動に対しては有意な影響がなく, 参考ケースとして一般のコンクリートを参照して設定した水セメント比 (%) (40%~60%) の変動による H の原子個数密度が支配的因子となり, 水分変動ケーススタディと同様の結果となった。

以下に, 水セメント比の変動による線量率変動を, 参考データとして整理する。

原子炉施設では, 約 6 桁減衰している 200cm 位置で, 線減衰率の, 減衰の最小値(減衰率最大値)/基準と最大値(減衰率最小値)/基準に対する比は下記のとおりである。 減衰率の比較は, 減衰が最小・最大となる上記 2 グループに対して実施し, 代表値として H 最小値調合と最大値調合の値を用いた。

- ・ 合計線量率の最大値(減衰率最大値)/基準値(200cm)= 2.86 倍
- ・ 合計線量率の最小値(減衰率最小値)/基準値(200cm)= 0.350 倍(1/2.86)
- ・ 2 次 γ 線線量率の最大値(減衰率最大値)/基準値(200cm)= 2.17 倍
- ・ 2 次 γ 線線量率の最小値(減衰率最小値)/基準値(200cm)= 0.466 倍(1/2.15)

20MeV 以下の医療用加速器では, 約 5 桁減衰している 150cm 位置で, 線減衰率の, 減衰の最小値(減衰率最大値)/基準と最大値(減衰率最小値)/基準に対する比は下記のとおりである。

- ・ 合計線量率の最大値(減衰率最大値)/基準値(150cm)= 2.07 倍
- ・ 合計線量率の最小値(減衰率最小値)/基準値(150cm)= 0.493 倍(1/2.03)

- ・ 2 次 γ 線線量率の最大値(減衰率最大値)/基準値(150cm)= 1.83 倍
- ・ 2 次 γ 線線量率の最小値(減衰率最小値)/基準値(150cm)= 0.605 倍(1/1.65)

C.6 コンクリート組成変動に対する線量率影響に係る留意事項

典型的組成変動のケーススタディで、国内施工実績に基づきデフォルト組成として設定した Si 系骨材組成コンクリートは、従来国内の原子炉施設などの遮蔽設計に使用されてきた ANL-5800 組成コンクリート、ANL-6443 組成コンクリートに比べ、適度に保守的な減衰率を示した。併せて、骨材等の元素組成を、調合条件を考慮し、遮蔽性能に影響の大きい鉄と炭素以外の元素を主要元素へ置き換え単純化したことによる線量率への影響は、有意ではないことを確認した。

また、水分は標準組成への水分補正式を用いて設定することによって適切に設定できるが、水分変動ケーススタディ結果から、遮蔽計算時の想定壁厚と計算結果から導かれる壁厚が異なるい場合に線量率補正が可能な参照データを整備した。参考ケースとして実施した調合変動ケーススタディでは、水分以外のスランプ (cm)、最大骨材寸法 (mm)、混和剤種類、セメント種類及び骨材種類の変動は、線量率に有意な影響を与えないことを確認した。

これまでの経験で、ANL-5800 組成コンクリート及び ANL-6443 組成コンクリートを用いた遮蔽計算による国内原子炉施設等の中性子遮蔽計算で、計算結果は保守的となっており、結果として線量率の実測値は当該エリアでの基準線量率又は設計目標線量率を上回ったことはない。

したがって、今後の許認可申請時の遮蔽計算で、Si 系骨材標準組成コンクリートを用いることは、従来と同等に適切な保守性を持つ遮蔽計算結果を与えることができると考えられる。

一方、Ca 系骨材組成コンクリートは、遮蔽計算において Si 系骨材組成コンクリート、ANL-5800 組成コンクリート及び ANL-6443 組成コンクリートに比べて線量率の減衰が大きく小さめの線量率を与えるが、Ca と Si に対する中性子挙動の観点から妥当なものであり、プラント計画時に建設側でコンクリート施工時の骨材として Ca 系骨材を使用することが明らかな場合は、使用することができる。

参考文献

- [1] L.J. Templin, Ed., "Reactor Physics Constants," 2nd ed., ANL-5800, Argonne National Laboratory (Jul. 1963).
- [2] R.L. Walker and M. Grotenhuis, "A Summary of Shielding Constants for Concrete," ANL-6443, Argonne National Laboratory (Nov. 1961).

- [3] REACTOR HANDBOOK SECOND EDITION Volume III, Interscience Publishers (1962).
- [4] Radiation Shielding, American Nuclear Society (2000).
- [5] Table of Isotopes 8th edition, Wiley-Interscience (1996).
- [6] 「原子量表 (2015)」について,
Web:<https://www.chemistry.or.jp/activity/doc/atomictable2015.pdf>.

民間
権益
共有

附属書 D

(参考)

この標準のコンクリート組成を指定した密度又は壁厚に対して補正する方法及び補正の例

序文

この**附属書 D (参考)**は、本体に関連する事項を説明するものであり、規定の一部ではない。

この附属書では、この標準のコンクリート組成を指定した密度又は壁厚に対して補正する方法を説明するとともに補正の例を挙げる。

D.1 この標準のコンクリート組成を指定した密度に対して補正する方法

この標準のコンクリートの密度は、**附属書 A の A.3 水分量の設定**に示したとおり、原子炉建屋に打設されたコンクリートが 60 年間暴露された時の残存水分量の解析、及び国内施設の典型的なコンクリート壁厚に基づき、 2.156g/cm^3 と規定した。一方、国内施設の遮蔽計算でよく使用される密度の範囲は $2.1\sim 2.2\text{g/cm}^3$ であり、この標準のコンクリートの密度に対して 2%程度の変動幅がある。また、施設設計においてコンクリートの密度が特に要求される場合もある。そこで、この標準のコンクリート組成を指定した密度に対して補正する方法を検討した。

施設で実際に使用するコンクリート密度は、水セメント比、スランプ、最大骨材寸法、混和剤などの調合条件によって変動する。コンクリートの密度変動の主因は、コンクリートを構成する材料の中で最も容積の多い粗骨材の性状である。**表 D.1** 及び **表 D.2** に、粗骨材の最大骨材寸法の変動がコンクリートの水分以外の組成に与える影響を示す。施設で使用される粗骨材の寸法は規格に基づき 20mm もしくは 25mm である。最大骨材寸法を 20mm から 25mm に変化させたときの各元素の原子個数密度の変動幅は 1~7%であることが分かる。よって、中性子の遮蔽性能に影響を及ぼす水分の元素 H 及び O の含有量を変えずに、ほかの元素の含有量を補正してもコンクリート工学的に齟齬はない。厳密には骨材に酸化物として O が含まれるため、水分以外の元素の含有量を補正すると O の含有量も変動することになるが、水分の O と比べて極めて微量のため無視できる。

表 D.1 最大骨材寸法を変動させた場合のコンクリート組成の原子個数密度の変化
(ケイ素系コンクリート)

最大骨材寸法 (mm)	ケイ素系コンクリート (単位: atoms/(barn・cm))		
	Si	Fe	Ca
20	1.77×10^{-2}	1.39×10^{-4}	2.79×10^{-3}
25	1.82×10^{-2}	1.29×10^{-4}	2.58×10^{-3}

表 D.2 最大骨材寸法を変動させた場合のコンクリート組成の原子個数密度の変化
(カルシウム系コンクリート)

最大骨材寸法 (mm)	カルシウム系コンクリート (単位: atoms/(barn・cm))			
	Si	Fe	Ca	C
20	9.97×10^{-4}	1.39×10^{-4}	1.65×10^{-2}	5.30×10^{-3}
25	9.24×10^{-4}	1.29×10^{-4}	1.68×10^{-2}	5.48×10^{-3}

以上の検討に基づき、対象施設において遮蔽用コンクリートの密度を特に指定する場合は、この標準のコンクリート組成の各元素の原子個数密度に対して、次に示す式 D.1 で求めた補正係数 $CF_{density}$ を乗じて変更できるものとする。

$$CF_{density} = 1 + \frac{Density_{specified} - Density_{standard}}{Density_{exceptH\&O}} \quad (D.1)$$

ここで、

- $CF_{density}$: この標準のコンクリート組成の密度に対する補正係数
 $Density_{specified}$: コンクリートに指定する密度 (g/cm³)
 $Density_{standard}$: この標準のコンクリートの密度 (g/cm³)
 $Density_{exceptH\&O}$: この標準のコンクリート組成のうち、H と O を除いた元素の原子個数密度を g/cm³ の単位に変換して合計した値 (g/cm³)

D.2 この標準のコンクリート組成を指定した密度に対して補正する例

この標準のコンクリート組成を指定した密度 2.1 g/cm³ に対して補正する例を示す。この標準のコンクリート組成の各元素の原子個数密度を (atoms/(barn・cm)) から (g/cm³) の単位に変換した値を表 D.3 に示す。

表 D.3 この標準のコンクリート組成の原子個数密度を g/cm³ の単位に変換した値

元素	ケイ素系骨材 (g/cm ³)	カルシウム系骨材 (g/cm ³)
H	1.29×10^{-2}	1.29×10^{-2}
O	$1.12 \times 10^{+0}$	8.81×10^{-1}
Si	8.24×10^{-1}	$1.10 \times 10^{+0}$
Ca	1.86×10^{-1}	4.65×10^{-2}
Fe	1.29×10^{-2}	1.29×10^{-2}
C	-	1.06×10^{-1}
合計	2.156	2.156

指定する密度を 2.1 g/cm³ とした場合、式 D.1 に基づき次のようになる。

$$\text{ケイ素系} \quad CF_{\text{density}} = 1 + \frac{2.1 - 2.156}{1.022} = 0.945$$

$$\text{カルシウム系} \quad CF_{\text{density}} = 1 + \frac{2.1 - 2.156}{1.026} = 0.945$$

よって、この標準のコンクリート組成の値に 0.945 を乗じて密度 2.1 g/cm³ に補正した原子個数密度は表 D.4 となる。

表 D.4 密度 2.1 g/cm³ 補正されたこの標準のコンクリート組成

元素	ケイ素系骨材 (atoms/(barn · cm))	カルシウム系骨材 (atoms/(barn · cm))
H	7.70×10^{-3}	7.70×10^{-3}
Si	1.67×10^{-2}	9.53×10^{-4}
Fe	1.32×10^{-4}	1.33×10^{-4}
Ca	2.64×10^{-3}	1.58×10^{-2}
C	-	5.07×10^{-3}
O	4.22×10^{-2}	3.31×10^{-2}
密度(g/cm ³)	2.1	2.1

D.3 この標準のコンクリート組成を指定した壁厚に対して補正する方法

この標準のコンクリートの厚さ（壁厚）は、**附属書 A の A.3 水分量の設定**に示したとおり、原子炉建屋に打設されたコンクリートが 60 年間暴露された時の残存水分量の解析、及び国内施設の典型的なコンクリート壁厚に基づき、1500mm に決定した。遮蔽設計一般においては、この標準のコンクリート組成を用いて十分であるが、中性子遮蔽性能の評価精度向上を意図する場合は、壁厚による水分量の補正が必要になる。

異なる壁厚のコンクリートの残存水分量については、打設後 60 年の水分移行解析の結果を**附属書 A の表 A.4** に示したとおりである。**図 D.1** 及び**図 D.2** に、壁厚に対する H 及び O の原子個数密度の変動をそれぞれ示す。また、壁厚が変化すると水分量とともにコンクリートの密度も変化するため、コンクリートの密度も併せて補正する。**図 D.3** に壁厚に対するコンクリートの密度の変動を示す。

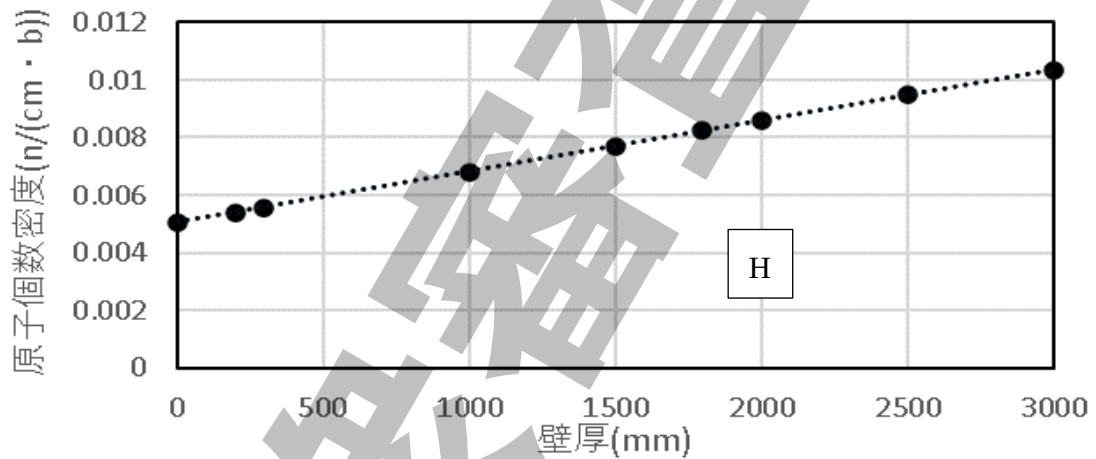


図 D.1 水分移行解析に基づくコンクリートの壁厚に対する H の原子個数密度の変動

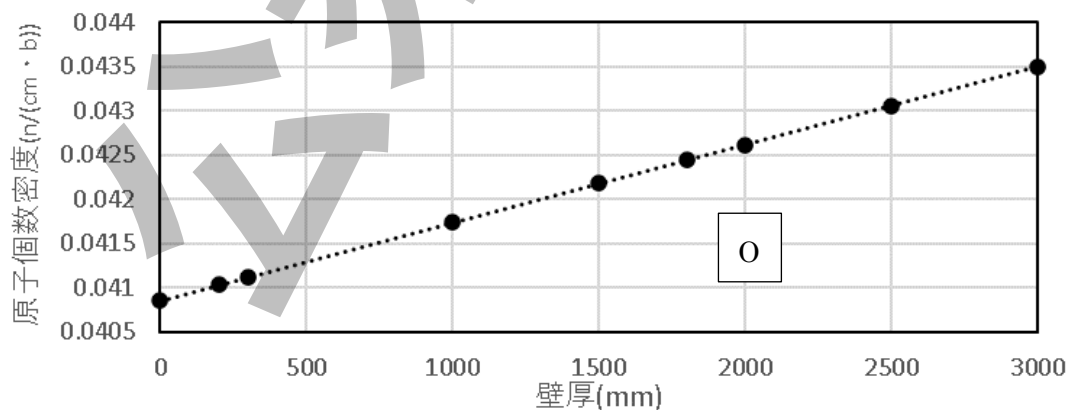


図 D.2 水分移行解析に基づくコンクリートの壁厚に対する O の原子個数密度の変動

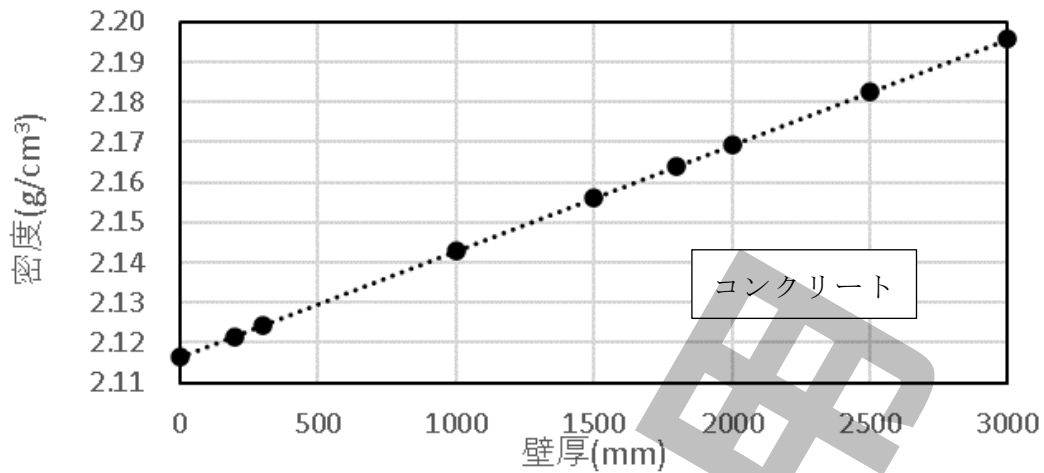


図 D.3 水分移行解析に基づくコンクリートの壁厚に対するコンクリート密度の変動

図 D.1, 図 D.2 及び図 D.3 から求めた H 及び O の原子個数密度, 並びにコンクリート密度の壁厚に対する線形回帰式を式 D.2 に示す。

$$\begin{aligned}
 AD_H &= 2 \times 10^{-6} \cdot T + 0.005 = 3 \times 10^{-3} \cdot (T/T_0) + 0.005 \\
 AD_O &= 9 \times 10^{-7} \cdot T + 0.041 = 1.35 \times 10^{-3} \cdot (T/T_0) + 0.041 \\
 Density_{standard} &= 3 \times 10^{-5} \cdot T + 2.116 = 4.5 \times 10^{-2} \cdot (T/T_0) + 2.116
 \end{aligned} \tag{D.2}$$

ここで,

- T : コンクリートに指定する壁厚 (mm)
- T_0 : この標準のコンクリートの壁厚 1500 (mm)
- AD_H : コンクリートに含まれる H の原子個数密度 (atoms/(barn · cm))
- AD_O : コンクリートに含まれる O の原子個数密度 (atoms/(barn · cm))
- $Density_{standard}$: コンクリートの密度 (g/cm³)

式 D.2 に従い, 指定した壁厚に対して, この標準のコンクリート組成の H 及び O の原子個数密度, 並びにコンクリート密度を変更する。コンクリートの密度を指定する場合は, D.1 で示した補正方法を用いて, この標準のコンクリート組成の H 及び O 以外の原子個数密度を変更する。

ここで, 壁厚に対する補正について制約を与える。コンクリートの壁厚は通例, 遮蔽計算の結果に基づいて決定される。一方, 上記の壁厚に対する補正を行うには, 遮蔽計算の段階で壁厚が予見されていなければならない。よって, 対象施設において中性子の遮蔽を行う場合で, かつ, 既存の類似設計又は施工上の制約などから凡その壁

厚が想定される場合にだけ、壁厚に対する補正はできるものとする。

D.4 この標準のコンクリート組成を指定した壁厚に対して補正する例

コンクリートの壁厚 1600mm に対する H 及び O の原子個数密度、並びにコンクリート密度は、式 D.2 に従って次のとおり導出される。

$$AD_H = 2 \times 10^{-6} \cdot 1600 + 0.005 = 3 \times 10^{-3} \cdot (1600/1500) + 0.005 = 8.20 \times 10^{-3}$$

$$AD_O = 9 \times 10^{-7} \cdot 1600 + 0.041 = 1.35 \times 10^{-3} \cdot (1600/1500) + 0.041 = 4.24 \times 10^{-2}$$

$$Density_{standard} = 3 \times 10^{-5} \cdot 1600 + 2.116 = 4.5 \times 10^{-2} \cdot (1600/1500) + 2.116 = 2.16$$

密度を変更する場合は、D.1 で示した補正方法を用いて H 及び O 以外の原子個数密度を変更する。

解説 1

放射線遮蔽計算に用いる遮蔽材料組成

序文

この解説は、本体及び附属書に関する事項を説明するものであり、規定の一部ではない。この標準を適切に使用するために参考となる事項について補足説明と解説を加えるものである。

1. 制定の背景

現状、原子力施設及び放射線施設を設計する際に行う遮蔽計算において、遮蔽コンクリート組成は 1960 年代に米国アルゴンヌ国立研究所から出版された「REACTOR PHYSICS CONSTANTS, ANL-5800」, 「A SUMMARY OF SHIELDING CONSTANTS FOR CONCRETE, ANL-6443」に掲載されている組成から設計者が適宜選択しているが、米国で製造されているコンクリート組成であり策定年代も古く、かつ組成がどのようにして作られたか根拠が不明である。

そのため、国内の原子力施設及び放射線施設に共通して用いることのできる遮蔽コンクリート組成が望まれていた。

2. 標準本体の解説

2.1 適用範囲

この標準の適用範囲は、原子力施設及び発生中性子及び光子のエネルギーが 20MeV 以下の RI 施設、放射線医療施設、研究用放射線施設とした。20MeV 以上は現状施設数が少なく核反応等も複雑になり、現状学会標準として策定するのは困難なためである。

2.2 この標準の位置づけ

この標準は施設設計時に実施する遮蔽厚を設定するための遮蔽計算の入力条件として用いる。コンクリート組成を使用する分野は遮蔽計算以外にもあるが、この標準の制定の背景が第 1 章に述べたことによるためである。

2.3 国内で使用されているコンクリート

国内で使用されているコンクリートの骨材は、砂岩系骨材と石灰岩系骨材に大別できる。砂岩系骨材がより多く用いられるが、石灰岩系骨材が採取される地域では石灰

岩系骨材が用いられる。

2.4 セメント

遮蔽コンクリートに用いられるセメントは、普通ポルトランドセメントと中熱ポルトランドセメントが多く用いられる。遮蔽コンクリートが硬化する時の発熱を抑え、温度応力に伴うひび割れを特に抑制したい場合は中熱ポルトランドセメントが用いられる。

2.5 コンクリート中の水分

コンクリートを製造する時に用いられる水は、セメントと化学反応を起こし水和物を生成する。しかし、水は用いた 100%の量が化学反応を起こすだけでなく、自由水として残る水がある。自由水なので様々な条件でコンクリート内を移動する。特に壁表面では外気に曝されるため、外気の温湿度によって壁表面近傍の水分は外気側に移動する。一方、奥深い部分に存在する水分は移動せず残る。この状況はダルシー則を基にした解析を用いて求める事ができる。

2.6 コンクリートに含まれる元素組成の単純化

コンクリートは天然の原材料を用いているため様々な元素で構成されている。元素は主に酸化物の形で存在しており、酸化物組成の集合体と水分でコンクリートは構成されている。

また建物用いられるコンクリートは、日本建築学会が発行している日本建築学会建築工事標準仕様書に基づいて施工される。同仕様書にはコンクリートに使用する骨材及びセメントに対する密度の下限値が定められている。

遮蔽の観点からは、特にガンマ線に対しては密度が重量なパラメータの一つである。よって骨材の酸化物毎の密度を求め、保守性の観点から含有量が 1%以上の酸化物のうち最も密度が小さい SiO_2 に各酸化物を置き換えた。その際、各酸化物の密度と SiO_2 の密度の比をとり、元々含有されている酸化物量(g/cm^3)にその比を乗じた。密度は、日本建築学会建築工事標準仕様書で規定されている骨材密度の下限値に合致するように調整した。

セメントについては、 SiO_2 と CaO の含有量が多いため、骨材と同様の考え方で各酸化物を置き換えた。

コンクリートの調合は、日本建築学会が発行しているコンクリートの調合設計指針・同解説に基づいて検討した。同指針は、原子力施設に特化したものではなく、一般建築においても使用される。

2.7 コンクリート中の鉄と炭素

鉄と炭素は線量評価に大きな影響を与える。そのため、公開データからコンクリート中の鉄と炭素の含有量を調査した。調査結果を以下に纏める。

解説 1 表 1 公開データの調査結果

【鉄】					(単位:wt%)
	ANL アルゴンヌ 国立研究所	NUREG	PNNL 米国 パシフィックノースウェスト 国立研究所	原子力学会 放射線遮蔽ハンドブック	統合結果
最大	1.454	4.38	5.74	4.8	5.74
最小	1.441	0.84	0.55	2.5	0.55

【炭素】					(単位:wt%)
	ANL アルゴンヌ 国立研究所	NUREG	PNNL 米国 パシフィックノースウェスト 国立研究所	原子力学会 放射線遮蔽ハンドブック	統合結果
最大	0.104	4.28	17.5	記載なし	17.5
最小	0.103	0.18	0.0909	記載なし	0.0909

また、想定した調合のコンクリートと公開データを統合した結果を次に示す。

解説 1 表 2 統合結果

【鉄】				(単位:wt%)
	想定調合 コンクリート	公開データ	統合結果	
最大	7.348	5.74	7.35	
最小	0.359	0.55	0.36	

【炭素】				(単位:wt%)
	想定調合 コンクリート	公開データ	統合結果	
最大	9.672	17.5	17.5	
最小	0	0.0909	0	

この解説 1 表 1 及び解説 1 表 2 から、炭素は 0～17.5(%)、鉄 0.36～7.35(%)に分布している。

解説 2

組成の変動が放射線の透過線量率減衰に与える影響の事前検討について

序文

解説 2 では、標準組成検討及び附属書 C この標準組成の変動が放射線の透過線量率減衰に与える影響の検討のために、事前に検討した事項の内容を整理した。事前検討として整理した内容は、下記の事項である。

- ① 代表線源の選択検討
- ② 熱中性子散乱則の影響の検討
- ③ ケイ素系とカルシウム系骨材中の鉄と炭素の遮蔽影響検討
- ④ 単純化した絶乾・気乾組成と ANL 組成の比較
- ⑤ 高エネルギー光子のコンクリート中の挙動調査

1. 代表線源の選択検討

1.1 中性子線源による差異

中性子と 2 次 γ 線のコンクリート中の減衰率に対し、中性子線源の差異による影響を、事前に把握するために、2016 年当時検討した暫定コンクリート組成に対し、中性子線源別に実効線量率の透過率のケーススタディを実施した。

その結果、中性子と 2 次 γ 線に対する ANISN の感度解析で、 ^{235}U 、 ^{239}Pu 、 ^{252}Cf 線源、核分裂スペクトル、遮蔽透過スペクトルで、線量率の減衰比率はほぼ同様の傾向であった。遮蔽コンクリート入射後は、減速効果の影響が大きいため、線源の差異によるピークエネルギーの差異は、線量率の減衰効果には影響しないことが分かった。そこで、中性子と 2 次 γ 線に係る本検討では、中性子源は ^{235}U で代表することとした。

2016 年当時の暫定コンクリート組成は、解説 2 表 1-1 の「標準値」を用い、減衰率結果の事例として、 ^{235}U 、 ^{239}Pu 、 ^{252}Cf 線源に対する計算結果を解説 2 図 1-1 に示す。

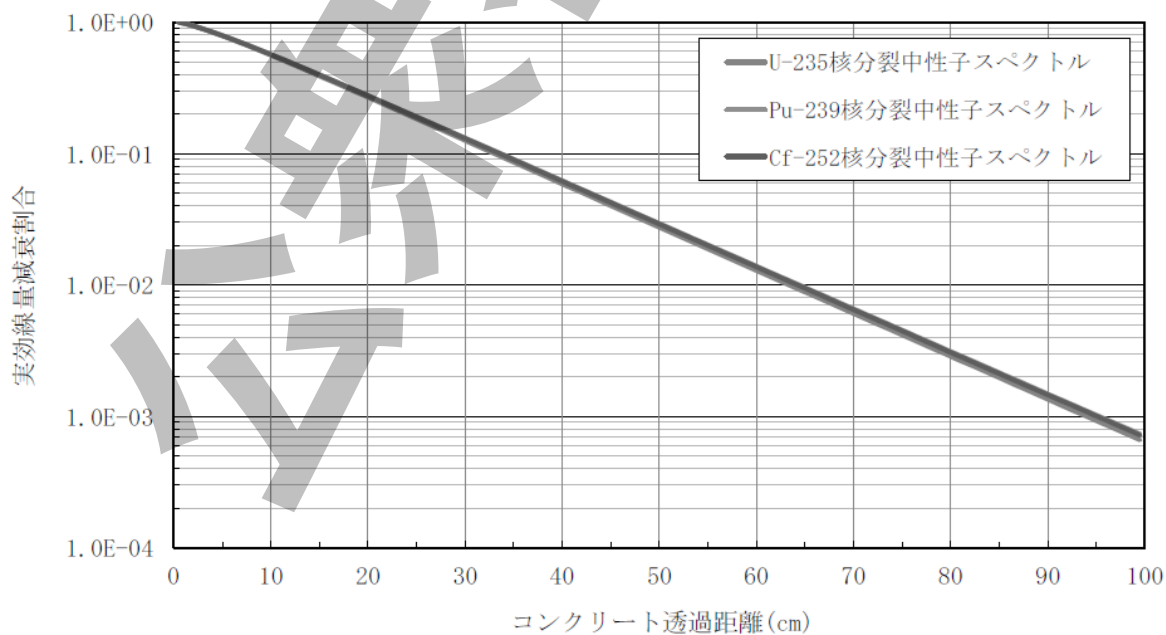
解説 2 表 1-1 2016 年当時の暫定コンクリート組成(F02HT)

(単位: 密度 g/cm^3 、原子個数密度 (atoms/(barn $\cdot$ cm)))アボガドロ数 0.602214×10^{24}

元素	原子量	下限値 (-3σ)	標準値 (6サンプル)	上限値 ($+3\sigma$)	σ		参考値 F02HT
					(%)		
H	1.008	6.31E-03	6.31E-03	6.31E-03			6.31E-03
C	12.01	5.89E-03	5.89E-03	5.89E-03			5.89E-03
O	16.00	3.93E-02	4.08E-02	4.23E-02	5.10E-04	1.25	4.03E-02
Na	22.99	3.81E-04	3.81E-04	3.81E-04			3.81E-04
Mg	24.31	2.93E-04	2.93E-04	2.93E-04			2.93E-04
Al	26.98	1.23E-03	1.34E-03	1.45E-03	3.82E-05	3.58	1.35E-03
Si	28.09	6.37E-03	7.50E-03	8.63E-03	3.78E-04	5.05	7.04E-03
P	30.97	1.17E-05	1.17E-05	1.17E-05			1.17E-05
K	39.10	3.80E-04	3.80E-04	3.80E-04			3.80E-04
Ca	40.08	6.89E-03	7.85E-03	8.81E-03	3.19E-04	4.06	8.30E-03
Ti	47.87	2.26E-05	2.26E-05	2.26E-05			2.26E-05
Mn	54.94	5.87E-06	5.87E-06	5.87E-06			5.87E-06
Fe	55.85	1.20E-04	1.44E-04	1.68E-04	7.98E-06	5.56	1.43E-04
密度(実測値)			2.22				2.25
密度(再計算)		2.05	2.21	2.38			2.21

標準値はSi, Ca, Al, Fe, Oについては6試料の平均値、それ以外の記載元素についてはF02HTの分析値

下限値及び上限値は上述5元素の6試料の偏差(σ)の3倍を平均値から加減した値で、それ以外の記載元素についてはF01HTの分析値



解説 2 図 1-1 中性子源を変化させた場合実効線量率減衰率の比較事例

(235U, 239Pu, 252Cf 線源の比較事例)

1.2 γ 線源からの γ 線による差異

原子炉施設等を想定した γ 線源に対して、コンクリートの密度変動及び水分量変動による線量率への影響を検討した。線源としては ^{16}N 、 ^{60}Co 及び ^{137}Cs からの γ 線、並びに ^{235}U の核分裂に伴う即発 γ 線の4種類を設定した。これらの γ 線エネルギースペクトルを**解説 2 表 1-2**に示す。

密度変動及び水分変動によるコンクリートの材料条件を**解説 2 表 1-3**に示す。本条件は分析された組成データのあるFT02HTに基づくものである。密度変動の条件としては、組成の平均値及びその値に偏差の3倍を加減した3種類の値を設定した。FT02HTの組成ではコンクリート内部の自由水が0（絶対乾燥状態）であるとしており、水分変動の条件としては、自由水の量を 0.04 及び 0.1g/cm^3 を加えたものとし、絶対乾燥状態を含めて3種類を設定した。

FT02HTの平均密度による各 γ 線源に対する線量減衰率を**解説 2 図 1-2**に示す。減衰率は4種類の γ 線に対し同等の傾向であった。密度変動に対しては平均値に $+3\sigma$ のときと -3σ のときで減衰率を比較すると、厚さ 200cm で4種類の γ 線源でどれも1桁程度の差異になった。

水分変動による各 γ 線源に対する線量減衰率を**解説 2 図 1-3～6**に示す。これらのグラフでは横軸をコンクリートの厚に密度を乗じた値としている。減衰率は、どの線源も水分量にかかわらず同等となり、元素組成の差に影響はなく、密度に依存するものと考えられる。

以上の結果から、元素組成の変動に対し4種類の γ 線は同等の挙動を示したため、標準コンクリートの評価では、高エネルギー γ 線が放出される ^{16}N と一般的な γ 線源である ^{60}Co を代表として解析することとした。

解説 2 表 1-2 γ 線エネルギースペクトル (1/2)

No.	下限 エネルギー (MeV)	上限 エネルギー (MeV)	^{16}N [2] (photons /decay)	^{60}Co [2] (photons /decay)	^{137}Cs [2] (photons /decay)	核分裂 即発 γ 線 [1] (photons /fission)
1	3.00E+01	5.00E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
2	2.00E+01	3.00E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	1.40E+01	2.00E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
4	1.20E+01	1.40E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
5	1.00E+01	1.20E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	6.651E-06
6	8.00E+00	1.00E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.242E-04
7	7.50E+00	8.00E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.015E-04
8	7.00E+00	7.50E+00	4.900E-02	0.000E+00	0.000E+00	1.750E-04
9	6.50E+00	7.00E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.018E-04
10	6.00E+00	6.50E+00	6.700E-01	0.000E+00	0.000E+00	5.205E-04
11	5.50E+00	6.00E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.977E-04
12	5.00E+00	5.50E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.548E-03
13	4.50E+00	5.00E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.670E-03
14	4.00E+00	4.50E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.605E-03
15	3.50E+00	4.00E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.941E-03
16	3.00E+00	3.50E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.370E-02
17	2.50E+00	3.00E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.362E-02
18	2.00E+00	2.50E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.073E-02
19	1.66E+00	2.00E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.349E-02
20	1.50E+00	1.66E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.676E-02
21	1.34E+00	1.50E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.362E-02
22	1.33E+00	1.34E+00	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	2.436E-03
23	1.00E+00	1.33E+00	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	1.104E-01
24	8.00E-01	1.00E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.062E-01
25	7.00E-01	8.00E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	6.911E-02
26	6.00E-01	7.00E-01	0.000E+00	0.000E+00	8.510E-01	8.257E-02

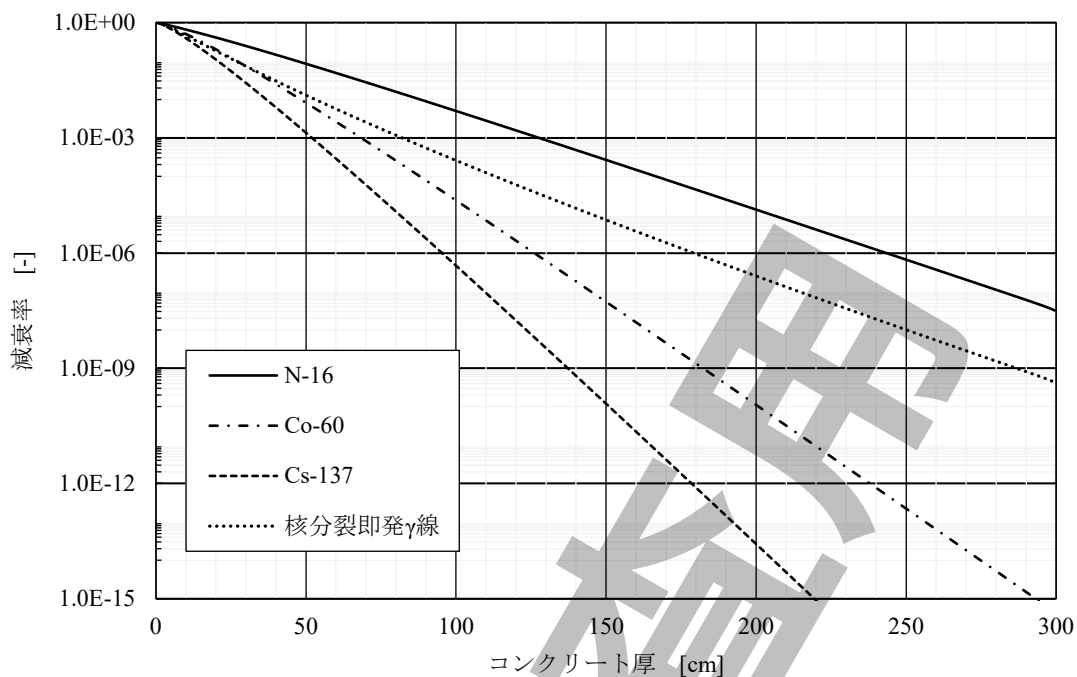
解説 2 表 1-2 γ 線エネルギースペクトル (2/2)

No.	下限 エネルギー (MeV)	上限 エネルギー (MeV)	^{16}N [2] (photons /decay)	^{60}Co [2] (photons /decay)	^{137}Cs [2] (photons /decay)	核分裂 即発 γ 線 [1] (photons /fission)
27	5.12E-01	6.00E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.541E-02
28	5.10E-01	5.12E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.714E-03
29	4.50E-01	5.10E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.141E-02
30	4.00E-01	4.50E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.285E-02
31	3.00E-01	4.00E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.569E-02
32	2.00E-01	3.00E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.569E-02
33	1.50E-01	2.00E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.285E-02
34	1.00E-01	1.50E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.285E-02
35	7.50E-02	1.00E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
36	7.00E-02	7.50E-02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
37	6.00E-02	7.00E-02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
38	4.50E-02	6.00E-02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
39	3.00E-02	4.50E-02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
40	2.00E-02	3.00E-02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
41	1.00E-02	2.00E-02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
42	1.00E-03	1.00E-02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
TOTAL	-	-	7.190E-01	2.000E+00	8.510E-01	1.000E+00

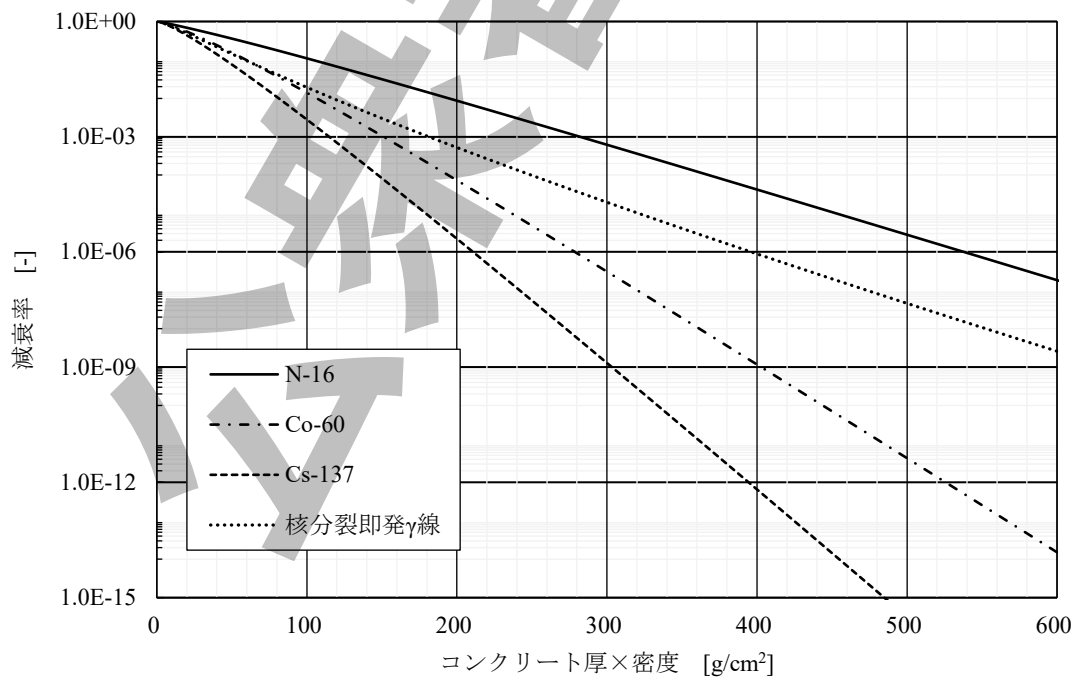
解説 2 表 1-3 FT02HT 材料組成

(atoms/(barn · cm))

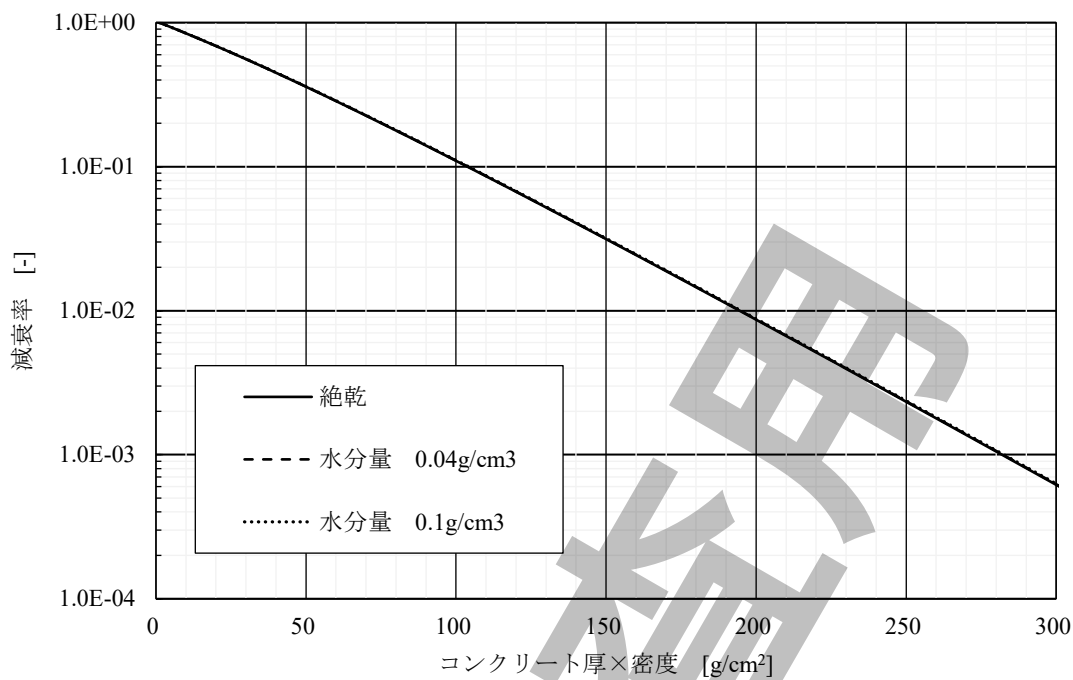
元素	密度変動			水分変動		
	下限値	平均値	上限値	絶乾	65℃	最大
	-3 σ	6 サンプル	+3 σ	0.0g/cm ³	0.04g/cm ³	0.1 g/cm ³
H	6.31E-03	6.31E-03	6.31E-03	6.31E-03	8.98E-03	1.30E-02
C	5.89E-03	5.89E-03	5.80E-03	5.89E-03	5.89E-03	5.89E-03
O	3.93E-02	4.08E-02	4.23E-02	4.08E-02	4.21E-02	4.41E-02
Na	3.81E-04	3.81E-04	3.81E-04	3.81E-04	3.81E-04	3.81E-04
Mg	2.93E-04	2.93E-04	2.93E-04	2.93E-04	2.93E-04	2.93E-04
Al	1.23E-03	1.34E-03	1.45E-03	1.34E-03	1.34E-03	1.34E-03
Si	6.37E-03	7.50E-03	8.63E-03	7.50E-03	7.50E-03	7.50E-03
P	1.17E-05	1.17E-05	1.17E-05	1.17E-05	1.17E-05	1.17E-05
K	3.80E-04	3.80E-04	3.80E-04	3.80E-04	3.80E-04	3.80E-04
Ca	6.89E-03	7.85E-03	8.81E-03	7.85E-03	7.85E-03	7.85E-03
Ti	2.26E-05	2.26E-05	2.26E-05	2.26E-05	2.26E-05	2.26E-05
Mn	5.87E-06	5.87E-06	5.87E-06	5.87E-06	5.87E-06	5.87E-06
Fe	1.20E-04	1.44E-04	1.68E-04	1.44E-04	1.44E-04	1.44E-04
密度 (g/cm ³)	2.05	2.21	2.37	2.21	2.25	2.31



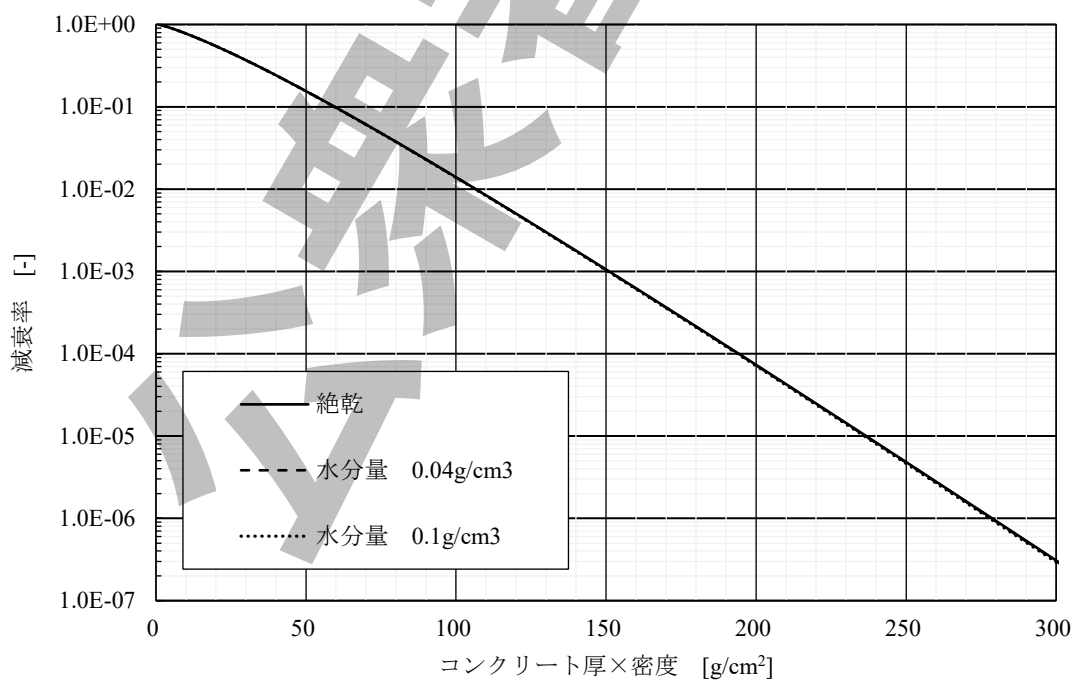
解説 2 図 1-2 4 種類の γ 線源に対する F02HT 平均密度の減衰率（線減衰率）



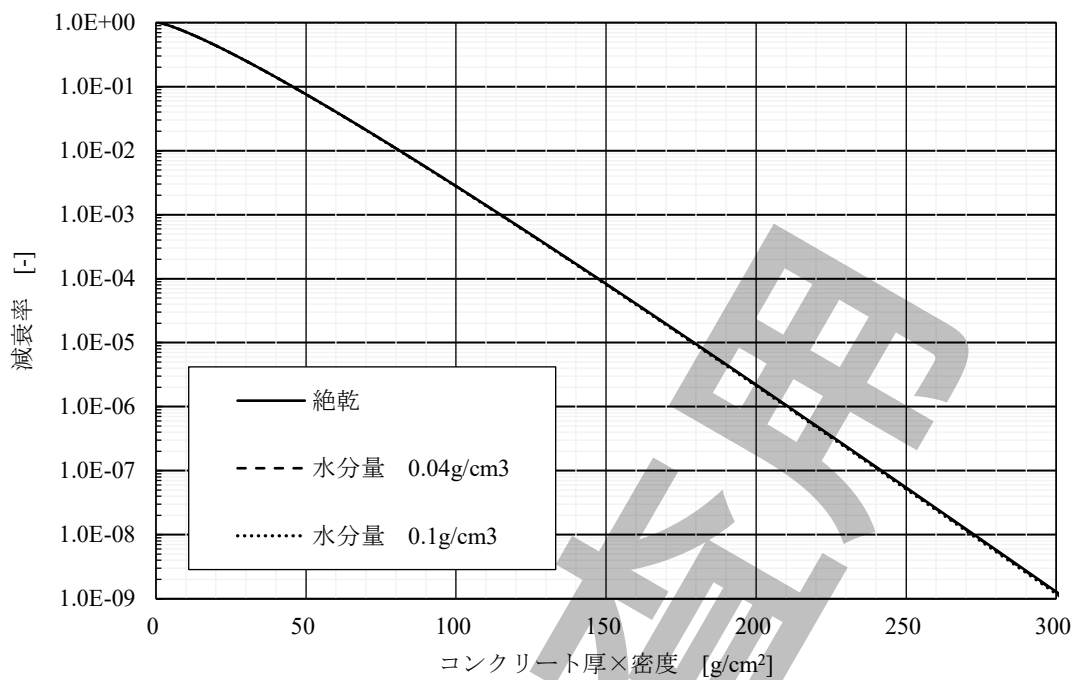
解説 2 図 1-2 4 種類の γ 線源に対する F02HT 平均密度の減衰率（質量減衰率）



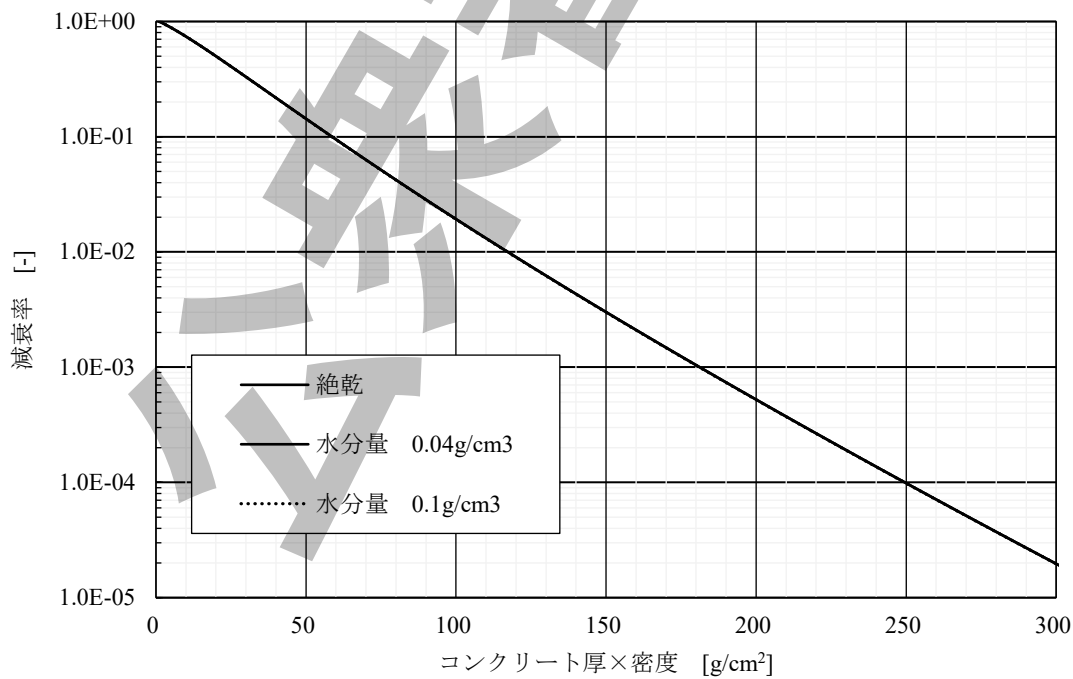
解説 2 図 1-3 ^{16}N 放出 γ 線に対する水分変動による減衰率



解説 2 図 1-4 ^{60}Co 放出 γ 線に対する水分変動による減衰率



解説 2 図 1-5 ^{137}Cs 放出 γ 線に対する水分変動による減衰率



解説 2 図 1-6 ^{235}U の核分裂に伴う即発 γ 線に対する水分変動による減衰率

2. 熱中性子散乱則の影響の検討

2.1 熱中性子散乱則とデータの現状

中性子エネルギーが減少してゆく減速過程は、中性子の持っているエネルギーがある程度以上に大きい場合には、物質中の原子核との核反応である弾性散乱又は非弾性散乱によるものである。中性子エネルギーが減少し物質の温度に近くなると、物質中の原子及び分子の運動による影響を受けるようになる。物質が水素だと中性子エネルギーが約 0.5 eV よりも低くなると、水素の運動モードによるエネルギーの一部を中性子が受け取ることによる中性子エネルギーが増加する散乱（上方散乱）の寄与が増加するようになる。また、低エネルギーの中性子散乱は、干渉性散乱（Coherent scattering）と非干渉性散乱（Incoherent scattering）の二面性を持つため取り扱いがとても複雑である。特に干渉性散乱が起こる液体・固体物質の散乱断面積は、材料の結晶組織構造、科学的純度及び温度などに依存するため更に複雑となる。軽水素は、非干渉性散乱が主体となる特殊な核種であり、ほかのものは干渉性散乱が主である。したがって、約 1 eV 以下の中性子エネルギー領域では、散乱断面積の評価を厳密に行う必要があり、そのために熱中性子散乱則（ $S(\alpha, \beta)$ ）データが必要とされている。

熱中性子のエネルギー領域は、回析現象（干渉性散乱）が起こる領域と重なっている。そのため厳密な散乱断面積の導出には、時間依存で標的核の位置座標が必要であり、中性子スピンとの関係によって干渉性散乱と非干渉性散乱の 2 つを取り扱う必要があるという困難が伴う。

最新の評価済み核データファイルに格納されている熱中性子散乱則データは、全体で 69 物質になる。1969 年頃に初めて ENDF/B-III へ 9 物質が格納されたが、1990 年代に冷中性子用データとして極低温の 6 物質が追加され ENDF/B-VI に格納されるまで更新等はなく利用も限定されていた。近年の大型核破砕中性子源などによる冷中性子ビーム利用の拡大に伴うニーズなどを受けて、2010 年代から新しい手法による熱中性子散乱則データの評価活動が活発化しており、その成果として 69 物質まで拡大した。最新の評価済み核データファイルである JENDL-5、JEFF-3.3 と ENDF/B-VIII に格納されている熱中性子散乱則データの評価状況を解説 2 表 2-1 に示す。最も多くの物質を評価しているのは JENDL-5 であり、63 物質を格納している（JEFF-3.3 は 20 物質、ENDF/B-VIII は 34 物質であり、ほかの評価済み核データファイルから引用されている物質もあるため重複がある）。評価されている物質は、水素と炭素と酸素を多く含む物質が主体である。解説 2 表 2.1 の右端の欄に JENDL-5 で評価された温度点を示しているが、評価は特定の温度に対してだけなされており、厳密にはその温度の物質へ熱中性子散乱則データを適用すべきであることに留意する必要がある。

2.2 コンクリートと熱中性子散乱則データ

非干渉性散乱が主体となる軽水素（H）が代表的な物質は軽水（ H_2O ）であり、軽水素の散乱断面積が酸素よりも非常に大きいので、熱中性子散乱則としては軽水素の散乱断面積が支配的となる。そのため、分子構造の影響を受け難い非干渉性散乱が主体となるので、軽水素 1 個の運動と見做せて簡略化できる。

軽水素とバナジウム以外は、干渉性散乱が主体となるため、物質の分子構造及び結晶構造などを考慮しなければならない。また、評価された物質は、均質かつ一様であり、結晶子サイズが小さくかつ結晶面も等方的に分布しているものである。

コンクリートの原料は、骨材の岩石成分、セメント成分（石灰岩の炭酸カルシウムと石膏の硫酸カルシウム）と水分に大別できる。これらの成分に対して熱中性子散乱則データが適用できるかを検討した。岩石成分は、化学組成及び結晶構造が多様な鉱物の不均質な結合体であるため一様性がなく、含まれる水素は個々の結晶構造内に取り込まれている。セメント成分は、焼結された粉体であり結晶構造及び配置に一様性がなく、含まれる水素は極微量であると考えられる。コンクリートは、コンクリート原料を特定の配合で混合し、製造される。コンクリートに含まれる岩石成分とセメント成分は、局所的な化学組成が一様ではなく、かつ結晶構造などが不均質なものであるため、物質として干渉性散乱の取り扱いができない。コンクリート中の水分（軽水）は、その存在状態に応じて結晶水、結合水と自由水に分けて考えられる。結晶水は、岩石などの結晶構造の中に化学結合によって組み込まれている軽水であり、水の分子運動ではなく岩石などの結晶構造による化学的束縛を受けている。結合水は、セメントと水が水和反応によって水和物になる過程で取り込まれた軽水であり、水和物として化学的結合状態にある。自由水は、結晶水及び結合水とは異なり化学的な束縛を受けていないものであり、セメントペースト中に存在する多数の小空隙に水分子が集団として存在し、水の分子運動をしていると考えられる。コンクリート中の水分に対する自由水の割合は、フレッシュコンクリート又は水セメント比の大きな特殊なコンクリートを除いて 50%を超えることはなく、コンクリートの乾燥状態にも依存するが 20～40%と考えられる。現在の中性子輸送計算において、1 個の物質中の 1 種類の原子核を複数の状態として定義できないため、自由水の軽水素に限定した熱中性子散乱則の適用は不可能である。

2.3 軽水の熱中性子上方散乱の影響

原子炉の生体遮蔽コンクリートに中性子が入射するような場合に、コンクリート中で熱中性子散乱則データによる上方散乱でどれだけの影響があるかを検討した。コンクリート中の自由水の軽水素による影響を最大化するために、厚さ 300 cm の軽水層

体系に ^{235}U の核分裂中性子が入射する条件で MCNP5 計算を実施し、軽水層内の中性子とガンマ線の実効線量分布を求めた。コンクリート中の水分量は 4~11 wt%程度であり、コンクリート中の水分に対する自由水の割合はその内の 20~40%と考えられるため、この軽水層の体系は極めて過大な条件設定である。

軽水層の MCNP5 計算で使用した断面積ライブラリは、中性子入射が FSXLIB-J33、光子相互作用が MCPLIB84、熱中性子散乱則データが ENDF70SAB (H^1 in H_2O) である。この計算で使用した軽水の密度は 20℃における 0.99822 g/cm^3 であり、その水素と酸素の原子個数密度はそれぞれ 6.67382×10^{-2} と $3.33698 \times 10^{-2} [10^{24}/\text{cm}^3]$ である。FSXLIB-J33 の断面積データは 293 K だけであるが、熱中性子散乱則による影響が過大になるように 550 K (277℃) の温度点のデータを使用した。解説 2 図 2-1 に ^{235}U 核分裂中性子源による軽水層内側 100 cm において、550 K の軽水素の熱中性子散乱則 ($S(\alpha, \beta)$) データを考慮した場合としない場合における中性子と二次ガンマ線の実効線量分布を示す。図の横軸は軽水層の厚さ、縦軸は軽水層表面の実効線量で規格化した減衰率である。図中の実線は熱中性子散乱則なしの場合、破線は熱中性子散乱則を取り入れた場合である。赤の線は中性子線量の減衰率、青の線は二次ガンマ線の線量の減衰率、黄の線は中性子と二次ガンマ線を合計した線量の減衰率である。この図から中性子と二次ガンマ線の線量の減衰率は、熱中性子散乱則の有無に拠らず一致しているため、軽水素による熱中性子散乱則の明確な影響は見られない。

^{235}U 核分裂中性子源によるコンクリート層内の実効線量率に対する熱中性子 (0.414 eV 以下) の寄与割合は約 20%である。また、解説 2 図 2-1 に示した軽水層 100 cm の位置において、熱中性子散乱則を取り入れた場合には中性子線量が最大で約 3%増加し、二次ガンマ線線量が最大で約 4%減少する。したがって、原子炉施設等で熱中性子散乱則がコンクリートから漏えいする実効線量に与える影響は、極めて過大に見積もった上限値であっても $20\% \times 3\% = 0.6\%$ となる。数%以上は存在する中性子と二次ガンマ線の計算精度よりも十分小さいため、コンクリートにおける熱中性子散乱則の影響は無視できると考えられる。

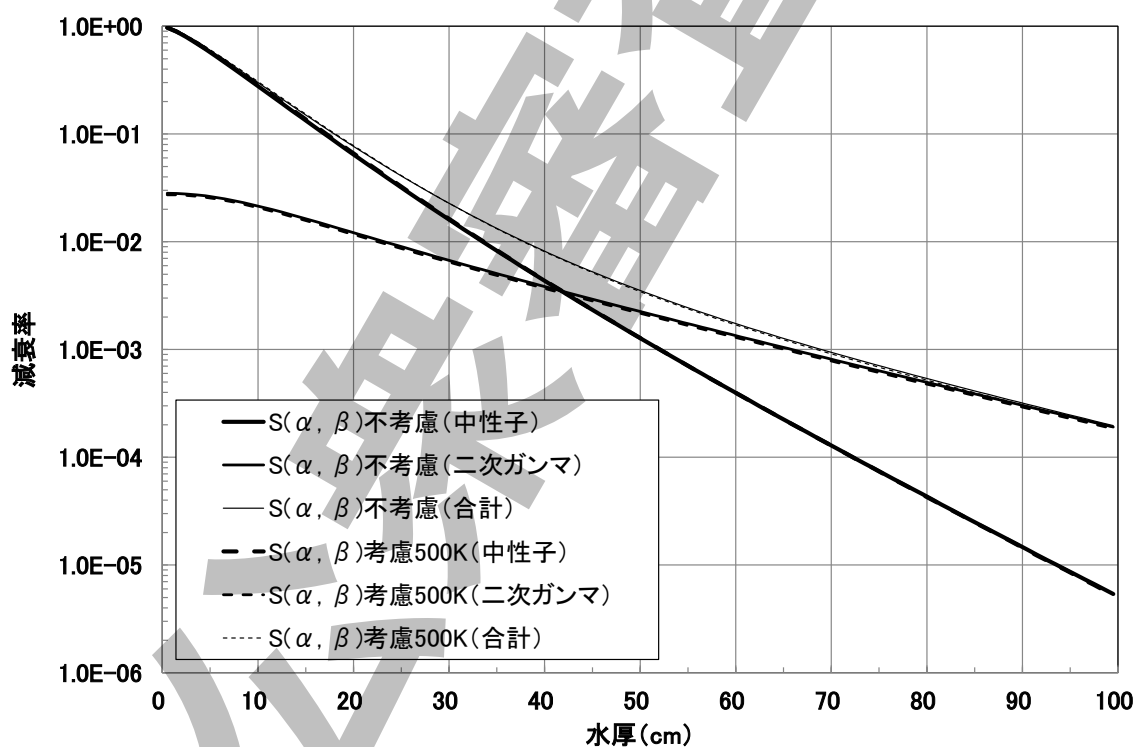
解説 2 表 2-1 熱中性子散乱則データの評価状況

物質名	MAT	核データファイル毎の評価状況			温度点 (deg.K) (JENDL-5)
		JENDL-5	JEFF-3.3	ENDF/B-VIII	
Al	53	B-VIII		2011	20, 80, 293.6, 400, 600, 800
Al in Al2O3	60		2017		
Be in BeO	27	B-VIII		2017	293.6, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200
Be-metal	26	B-VIII	JEFF22	2017	293.6, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200
C in Liquid Benzene	640	2021			200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 700, 800, 900, 1000
C in Liquid Ethanol	636	2021			200, 300
C in Liquid Mesitylene	632	2021			200, 250, 300
C in Liquid Methane	633	2021			110
C in Liquid M-Xylene	639	2021			200, 250, 300
C in Liquid Toluene	635	2021			200, 250, 300
C in Liquid Triphenylmethane	644	2021			450
C in SiC	44	B-VIII		2017	300, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200
C in Solid Benzene	641	2021			20, 50, 100, 150
C in Solid Ethanol	637	2021			20, 100
C in Solid Mesitylene	638	2021			20, 50, 100, 150
C in Solid Methane	634	2021			20
C in Solid M-Xylene	643	2021			20, 50, 100, 150
C in Solid Toluene	642	2021			20, 50, 100, 150
C in Solid Triphenylmethane	645	2021			20, 100, 300
Ca in CaH2	59		JEFF31		
crystalline-graphite	30	B-VIII		2017	296, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200, 1600, 2000
D in D2O	11	2021	2017	JEFF33	283.6, 293.6, 325, 350, 375, 400, 425, 450, 475, 500, 525, 550, 575, 600
D in Ortho-D	13	JEFF33	2017	B-VI	19, 20, 21, 22, 23
D in Para-D	12	JEFF33	2017	B-VI	19, 20, 21, 22, 23
Fe	56	B-VIII		2011	20, 80, 293.6, 400, 600, 800
H in CaH2	8		JEFF31		
H in Lucite (C5O2H8)	39	B-VIII		2017	300
H in Polyethylene (CH2)	37	B-VIII	JEFF22	2017	77, 196, 233, 293.6, 300, 303, 313, 323, 333, 343, 350
H in H2O	1	2020	JEFF31	JEFF33	270-370, 380-400, 410-470, 480-550, 560-600, 610-800
H in IceIh	10	B-VIII	2017	2017	115, 188.15, 208.15, 228.15, 233.15, 248.15, 253.15, 268.15, 273.15
H in Liquid Benzene	40	2021		B-III	200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 700, 800, 900, 1000
H in Liquid Ethanol	606	2021			200, 300
H in Liquid Mesitylene	602	2021			200, 250, 300
H in Liquid Methane	33	2021		B-VI	110
H in Liquid M-Xylene	609	2021			200, 250, 300
H in Liquid Toluene	605	2021			200, 250, 300
H in Liquid Triphenylmethane	614	2021			450
H in Ortho-H	3	JEFF33	2017	B-VI	14, 15, 16, 17, 18, 19, 20
H in Para-H	2	JEFF33	2017	B-VI	14, 15, 16, 17, 18, 19, 20
H in Solid Benzene	611	2021			20, 50, 100, 150
H in Solid Ethanol	607	2021			20, 100
H in Solid Mesitylene	38	2021	2017		20, 50, 100, 150
H in Solid Methane	34	2021		B-VI	20
H in Solid M-Xylene	613	2021			20, 50, 100, 150
H in Solid Toluene	42	2021	2017		20, 50, 100, 150
H in Solid Triphenylmethane	615	2021			20, 100, 300
H in YH2	5	B-VIII		2016	293.6, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200, 1400, 1600
H in ZrH	7	B-VIII	JEFF31	B-VI	296, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200
Mg	52		2017		
N in UN	71	B-VIII		2017	296, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200
O in Al2O3	48		2017		
O in BeO	46	B-VIII		2017	293.6, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200
O in D2O	51	2021	2017	JEFF33	283.6, 293.6, 325, 350, 375, 400, 425, 450, 475, 500, 525, 550, 575, 600
O in H2O	661	2020			270-370, 380-400, 410-470, 480-550, 560-600, 610-800
O in IceIh	50	B-VIII		2016	115, 168.15, 208.15, 228.15, 233.15, 248.15, 253.15, 268.15, 273.15

解説 2 表 2-1 熱中性子散乱則データの評価状況（続き）

物質名	MAT	核データファイル毎の評価状況			温度点 (deg.K) (JENDL-5)
		JENDL-5	JEFF-3.3	ENDF/B-VIII	
O in Liquid Ethanol	666	2021			200, 300
O in Solid Ethanol	667	2021			20, 100
O in UO ₂	75	B-VIII		2017	296, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200
reactor-graphite-10P	31	B-VIII		2017	296, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200, 1600, 2000
reactor-graphite-30P	32	B-VIII		2017	296, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200, 1600, 2000
graphite	31		JEFF31		
silicon	59		2017		
Si in SiC	43	B-VIII		2017	300, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200
SiO ₂ -alpha	47	B-VIII		2011	293.6, 350, 400, 500, 800
SiO ₂ -beta	49	B-VIII		2011	1000, 1100
U in UN	72	B-VIII		2017	296, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200
U in UO ₂	48	B-VIII		2017	296, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200
Y in YH ₂	55	B-VIII		2016	293.6, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200, 1400, 1600
Zr in ZrH	58	B-VIII		B-VI	296, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200

(注記) 「核データファイルの評価状況」：2021などの4桁の整数は評価された西暦、B-VIIIなどは引用元の核データファイル B-VIII (ENDF/B-VIII), B-VI (ENDF/B-VI), JEFF33 (JEFF-3.3), JEFF31 (JEFF-3.1), JEF22 (JEF-2.2)



解説 2 図 2-1 ²³⁵U 核分裂中性子源による軽水層内側 100 cm において、550 K の軽水素の熱中性子散乱則 ($S(\alpha, \beta)$) データを考慮した場合としない場合における中性子と二次ガンマ線の実効線量分布

3. ケイ素系とカルシウム系骨材中の鉄と炭素の遮蔽影響検討

事前に実施した、種々の組成を変動させたケーススタディの結果、鉄(後 Fe と称す)と炭素(以後 C と称す)は減衰率に影響が有意であり、標準組成を検討する際に留意すべき元素であることが分かった。そこで、本標準作業会で調査した元素組成データに基づき、Fe と C を変動させ減衰率への影響を検討した。

ここで、この検討の時点では、標準組成検討を、ケイ素系(以後 Si 系と称す)とカルシウム系(以後 Ca 系と称す)に分けて検討しており、Si 系骨材では Fe に、Ca 系骨材では C に注目して検討を実施した。

その結果、下記の結論となった。

- ① Fe 組成変動では、コンクリート 200cm 位置で 0.67 倍程度減衰率の変動しており、この変動はコンクリート厚で 4cm 程度の影響である。
- ② C 組成変動では、コンクリート 200cm 位置で 0.49 倍程度減衰率の変動しており、この変動はコンクリート厚で 7-8cm 程度の影響である。
- ③ Fe は、Si、Ca に比べ、吸収断面積が一桁程度大きいいため、Fe 成分が増加すると、この吸収効果が増大し、減衰が大きくなると考えられる。
- ④ C は、Si、Ca に比べ、吸収断面積が二桁程度小さいが、弾性散乱断面積が大きいため、中性子の減速効果が増大し、ほかの主要核種による吸収効果を増大させ、減衰が大きくなると考えられる。
- ⑤ Fe、C 共に、これらの現実的なコンクリート組成としての変動は、コンクリート中の総合的な減衰効果に有意に影響することが明確となった。
- ⑥ 特に、Ca 系骨材コンクリートでは、C 組成の変動による減速効果の増大が、かなり大きな減衰効果の増大に繋がることが分かった。
- ⑦ Fe 及び C は、組成検討では留意すべき元素であると認識できる。

以下に、Fe 及び Ca を変動させたケーススタディを示す

3.1 Fe ケーススタディ

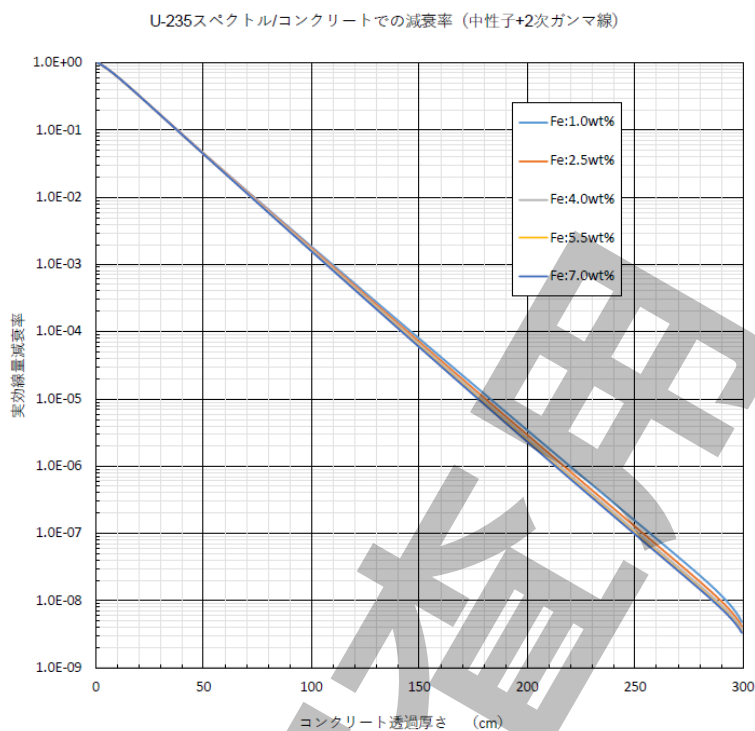
Fe 系骨材のコンクリートの主要元素は H, O, Si, Ca である。実際のコンクリートにおける組成変動を考慮して、2020 年度検討時点の Si 系骨材のコンクリート組成をベースに、Fe 含有量が 1%, 2.5%, 4%, 5.5%, 7% の 5 ケースについて、水分量は一定として組成変動の影響を確認した。Si 系骨材の Fe 含有量変動のコンクリート組成条件を解説 2 表 3-1 に示す。線量率解析条件は**附属書 C**の**図 C.1**のとおりである。

解説 2 表 3-1 Si 系骨材の Fe 含有量変動のコンクリート組成条件

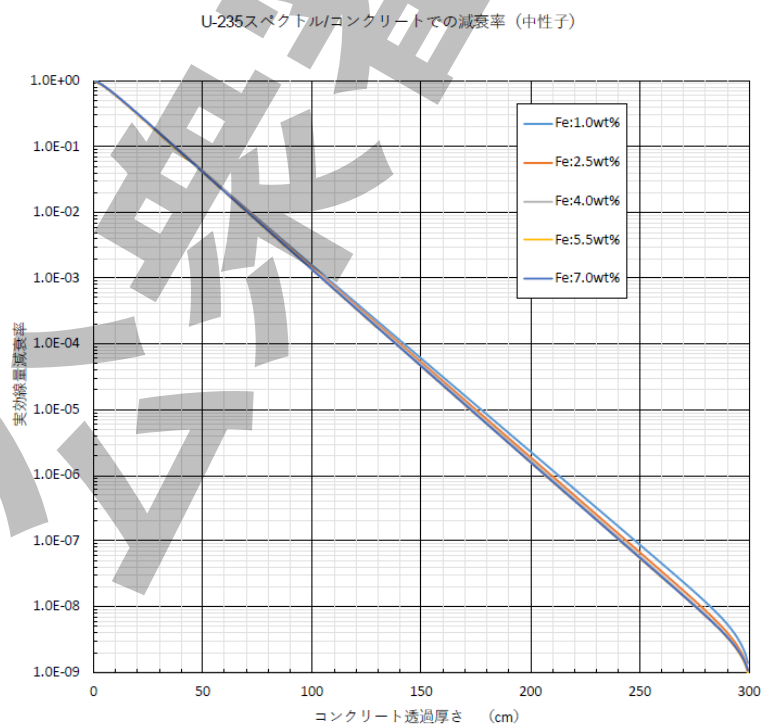
		鉄濃度第1値	鉄濃度第2値	鉄濃度第3値	鉄濃度第4値	鉄濃度第5値
		1%	2.5%	4%	5.5%	7%
元素	質量数	原子個数密度 ($\text{cm}^{-1} \cdot \text{b}^{-1}$)	原子個数密度 ($\text{cm}^{-1} \cdot \text{b}^{-1}$)	原子個数密度 ($\text{cm}^{-1} \cdot \text{b}^{-1}$)	原子個数密度 ($\text{cm}^{-1} \cdot \text{b}^{-1}$)	原子個数密度 ($\text{cm}^{-1} \cdot \text{b}^{-1}$)
H	1.00	4.40E-03	4.40E-03	4.40E-03	4.40E-03	4.40E-03
O	16.00	4.08E-02	4.08E-02	4.08E-02	4.08E-02	4.08E-02
C	12.00					
NA	22.99					
MG	24.305					
AL	26.98					
SI	28.09	1.76E-02	1.69E-02	1.62E-02	1.56E-02	1.49E-02
P	30.97					
S	32.06					
K	39.09					
CA	40.00	2.50E-03	2.50E-03	2.50E-03	2.50E-03	2.50E-03
TI	47.87					
MN	54.94					
FE	55.85	2.26E-04	5.65E-04	9.04E-04	1.24E-03	1.58E-03
密度(g/cm3)		2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
密度確認(g/cm3)						
		重さ換算(g/cm3)	重さ換算(g/cm3)	重さ換算(g/cm3)	重さ換算(g/cm3)	重さ換算(g/cm3)
H		7.31E-03	7.31E-03	7.31E-03	7.31E-03	7.31E-03
O		1.08E+00	1.08E+00	1.08E+00	1.08E+00	1.08E+00
SI		8.21E-01	7.88E-01	7.56E-01	7.28E-01	6.95E-01
CA		1.66E-01	1.66E-01	1.66E-01	1.66E-01	1.66E-01
FE		2.10E-02	5.24E-02	8.39E-02	1.15E-01	1.47E-01
合計		2.10E+00	2.10E+00	2.10E+00	2.10E+00	2.10E+00

Si 系骨材の Fe 含有量変動の各ケースにおける中性子と 2 次 γ の合計線量率，中性子だけの線量率，2 次 γ だけの線量率について，線減衰率を比較した。中性子と 2 次 γ の合計の線減衰率を**解説 2 図 3-1**，中性子の線減衰率を**解説 2 図 3-2**，2 次 γ の線減衰率を**解説 2 図 3-3**に示す。

Si 系骨材の Fe 含有量変動の比較結果に基づき，コンクリート厚 200cm 位置における中性子と 2 次 γ の合計の線減衰率は Fe1%に対して Fe7%が 0.67 倍程度変動することを確認でき，Fe はコンクリート組成で留意すべき元素であると結論づけた。

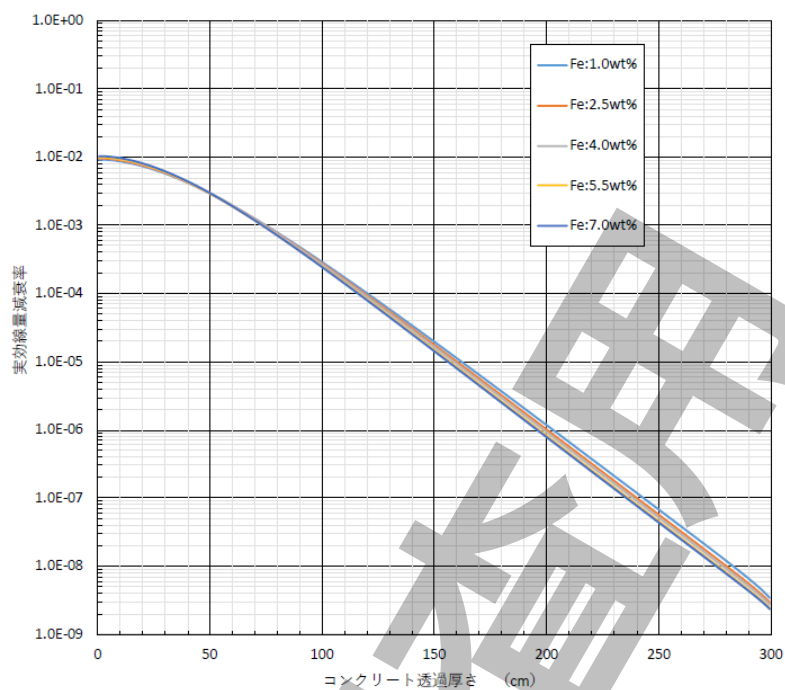


解説 2 図 3-1 Fe 系骨材組成変動の線減衰率の比較（合計）



解説 2 図 3-2 Fe 系骨材組成変動の線減衰率の比較（中性子）

U-235スペクトル/コンクリートでの減衰率（2次ガンマ線）



解説 2 図 3-3 Fe 系骨材組成変動の線減衰率の比較（2 次 γ ）

3.2 Ca ケーススタディ

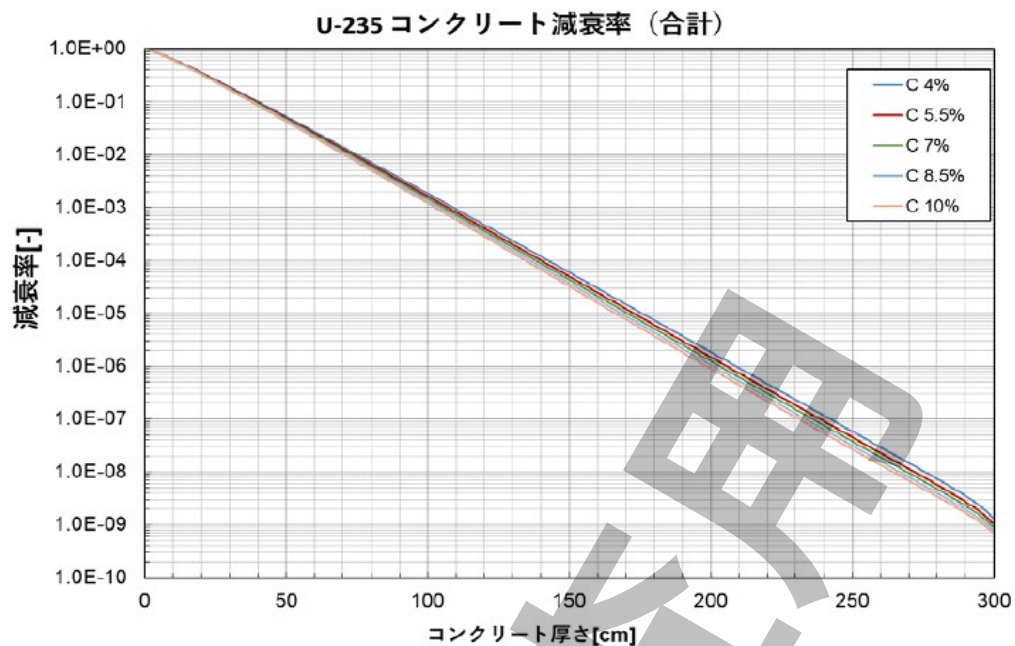
Ca 系骨材のコンクリートの主要元素は H, O, Ca, C である。実際のコンクリートにおける組成変動を考慮して、2020 年度検討時点の Ca 系骨材のコンクリート組成をベースに、C 含有量が 4%, 5.5%, 7%, 8.5%, 10% の 5 ケースについて、水分量は一定として組成変動の影響を確認した。Ca 系骨材の C 含有量変動のコンクリート組成条件を解説 2 表 3-2 に示す。線量率解析条件は附属書 C の図 C.1 のとおりである。

解説 2 表 3-2 Ca 系骨材の C 含有量変動のコンクリート組成条件

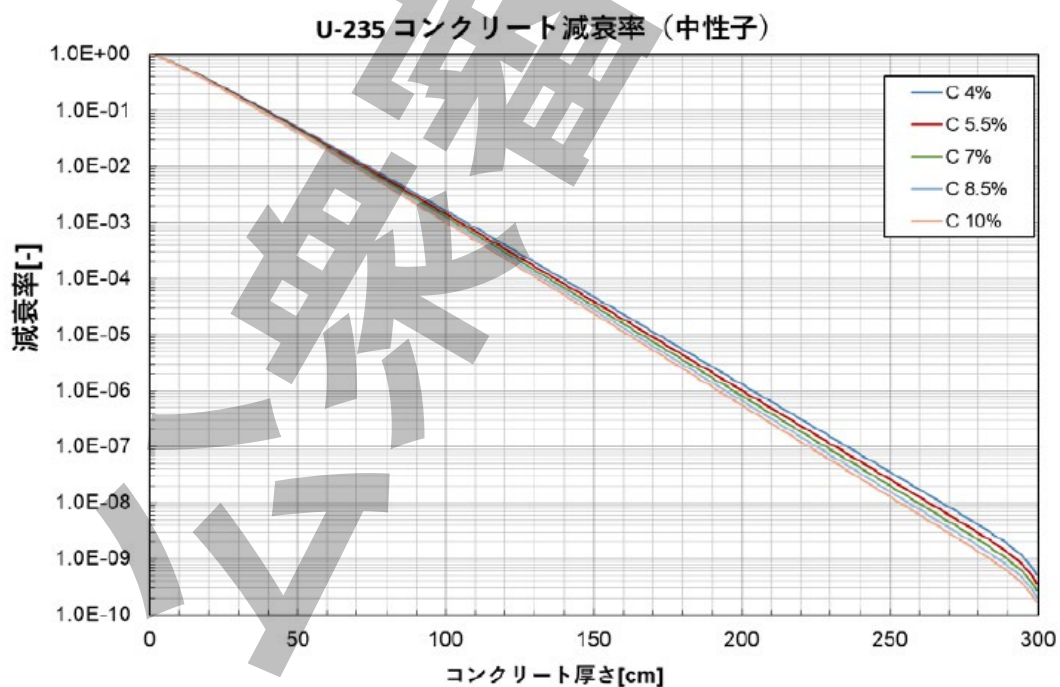
		炭素濃度第1値	炭素濃度第2値	炭素濃度第3値	炭素濃度第4値	炭素濃度第5値
		4%	5.5%	7%	8.5%	10%
元素	質量数	原子個数密度 ($\text{cm}^{-1} \cdot \text{b}^{-1}$)	原子個数密度 ($\text{cm}^{-1} \cdot \text{b}^{-1}$)	原子個数密度 ($\text{cm}^{-1} \cdot \text{b}^{-1}$)	原子個数密度 ($\text{cm}^{-1} \cdot \text{b}^{-1}$)	原子個数密度 ($\text{cm}^{-1} \cdot \text{b}^{-1}$)
H	1.00	4.40E-03	4.40E-03	4.40E-03	4.40E-03	4.40E-03
O	16.00	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02
C	12.00	4.21E-03	5.79E-03	7.37E-03	8.95E-03	1.05E-02
NA	22.99					
MG	24.305					
AL	26.98					
SI	28.09					
P	30.97					
S	32.06					
K	39.09					
CA	40.00	2.06E-02	2.02E-02	1.97E-02	1.92E-02	1.87E-02
TI	47.87					
MN	54.94					
FE	55.85					
密度 (g/cm3)		2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
密度確認 (g/cm3)		重さ換算 (g/cm3)	重さ換算 (g/cm3)	重さ換算 (g/cm3)	重さ換算 (g/cm3)	重さ換算 (g/cm3)
H		7.31E-03	7.31E-03	7.31E-03	7.31E-03	7.31E-03
O		6.38E-01	6.38E-01	6.38E-01	6.38E-01	6.38E-01
C		8.39E-02	1.16E-01	1.47E-01	1.78E-01	2.09E-01
CA		1.37E+00	1.34E+00	1.31E+00	1.28E+00	1.24E+00
合計		2.10E+00	2.10E+00	2.10E+00	2.10E+00	2.10E+00

Ca 系骨材の C 含有量変動の各ケースにおける中性子と 2 次 γ の合計線量率、中性子だけの線量率、2 次 γ だけの線量率について、線減衰率を比較した。中性子と 2 次 γ の合計の線減衰率を解説 2 図 3-4、中性子の線減衰率を解説 2 図 3-5、2 次 γ の線減衰率を解説 2 図 3-6 に示す。

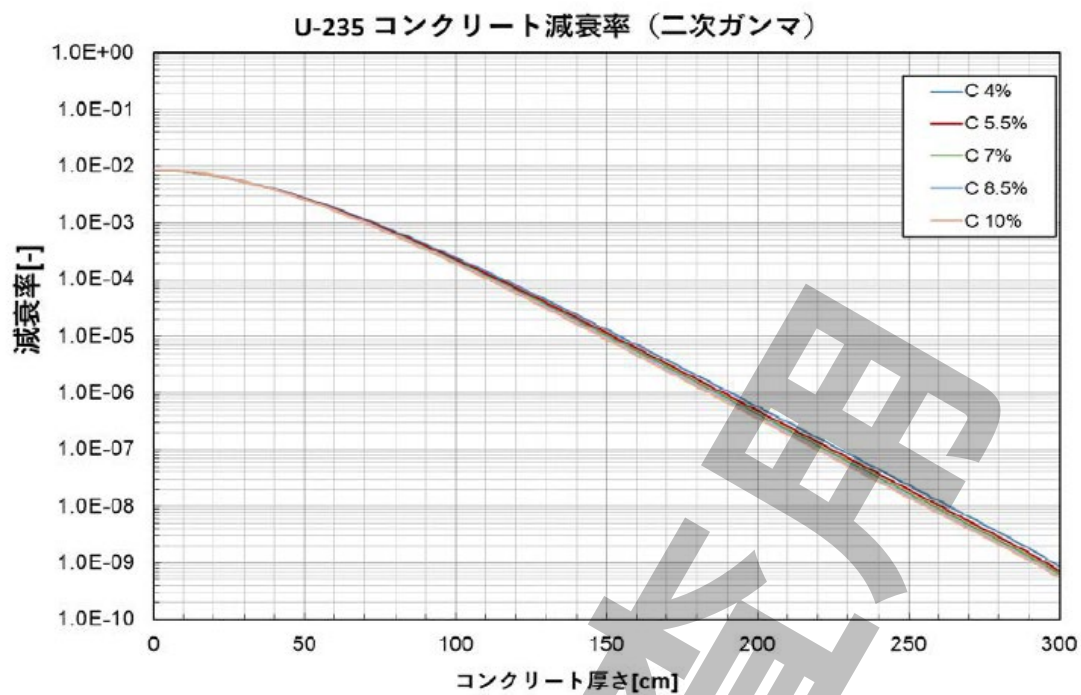
Ca 系骨材の C 含有量変動の比較結果に基づき、コンクリート厚 200cm 位置における中性子と 2 次 γ の合計の線減衰率は C4% に対して C10% が 0.49 倍程度変動することを確認でき、C はコンクリート組成で留意すべき元素であると結論づけた。



解説 2 図 3-4 Ca 系骨材組成変動の線減衰率の比較（合計）



解説 2 図 3-5 Ca 系骨材組成変動の線減衰率の比較（中性子）



解説 2 図 3-6 Ca 系骨材組成変動の線減衰率の比較（2 次 γ ）

4. 単純化した絶乾・気乾組成と ANL 組成の比較

4.1 はじめに

標準組成検討のケーススタディとして、Si 系骨材と Ca 系骨材のコンクリート組成を単純化したケーススタディ用組成を基準値とした場合における、絶乾組成、気乾組成での線量減衰率と、参考組成（ANL-5800, ANL-6443）での線量減衰率を比較検討した結果、気乾組成が ANL-5800, ANL-6443 での線量減衰率と同程度となることを確認した。検討内容、条件、結果の詳細を次に示す。

4.2 標準組成, ANL 組成の考え方

(1) コンクリート組成と乾燥状態

コンクリートは、骨材、セメント、混和剤などを、適量の水で混合したものであり、骨材の産地、セメント及び混和剤などの成分と、水分量でコンクリート組成は決定する。ここで、水分はコンクリート製造時に混合される自由水と、骨材中及びセメント化合物内に結合水として存在する。コンクリート打設時には、水分はコンクリート内の気泡を満たしており「飽和」状態となっている。

しかし、経年変化でコンクリート内から水分は蒸発するため、コンクリートの環境温度及び厚さによって、「飽和」状態を維持する範囲と、自由水含有率が 1～5%程度の「気乾」状態となる範囲が生ずる。また、高温状態で蒸発が継続する範囲は、自由水がない「絶乾」状態となる場合がある。また、密度は施設設置者の要求と、骨材等で達成できる密度によって、設計最小値が決定される。骨材、セメント、混和剤、水等の調合割合に応じて、コンクリートの元素組成は相違する。

コンクリートの元素組成は乾燥状態に応じて次の 3 区分に分類できる。それぞれの乾燥状態のイメージ図を解説 2 図 4-1 に示す。

<絶乾状態>

コンクリート中の気泡に水分がない状態。

骨材中及びセメント化合物内に水分は結合水として存在している。

<気乾状態>

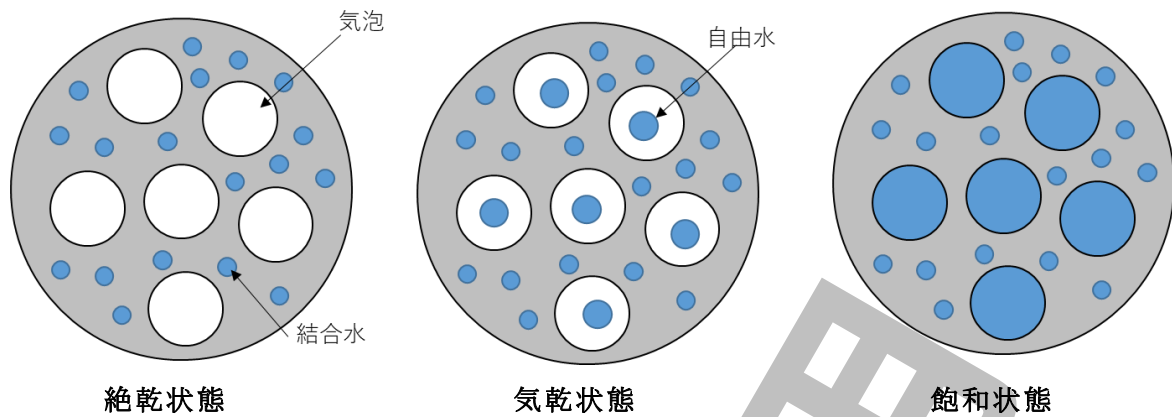
気泡の中に水分（自由水という）が適度に存在している状態。

自由水含有率は 1～5%程度で、平均的には 3%程度である。

<飽和状態>

気泡が水分（自由水）で満たされている状態。

自由水含有率は、調合などで変化するが、典型的な事例としては 6%程度である。



解説 2 図 4-1 コンクリートの乾燥状態

(2) ケーススタディ用組成と ANL 組成

遮蔽計算用コンクリート標準組成を，骨材の種類に依存しない単純化組成とするために，調合条件を変えずに，主要元素へ置き換え検討を行った。置き換えに当たっては，酸化物として置き換え，密度が一定となるように調整するとともに，置き換え前後で線量率への影響を確認し，有意な差が生じない場合，置き換えを実施した。また，骨材の種類(産地)によって，主成分が Si と Ca の 2 種あるため，Si 系骨材と Ca 系骨材の 2 種類の組成を作成した。

また，既設の原子炉施設の遮蔽計算に使用してきた米国組成（ANL-5800 及び 6443）との比較を実施した。

4.3 コンクリートの元素組成の検討

(1) 基本方針

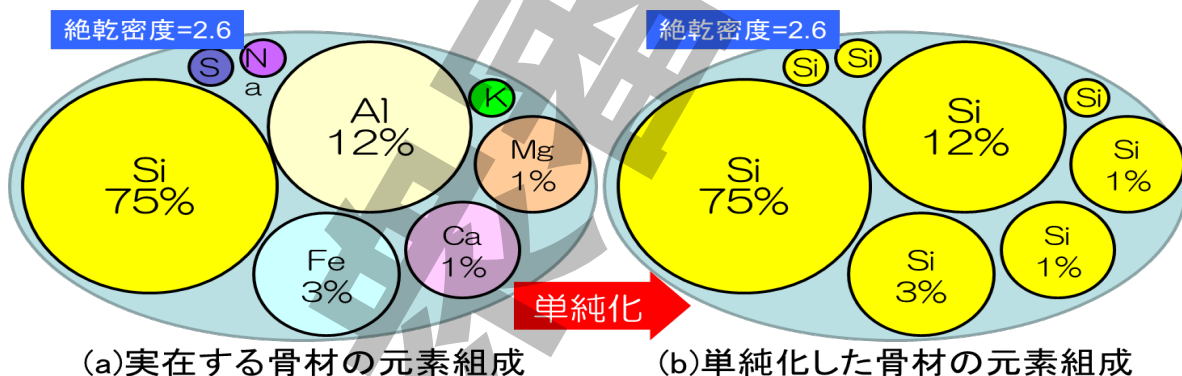
標準組成の検討に向けた基本方針は次のとおりとした。

解説 2 表 4-1 標準組成の検討に向けた基本方針

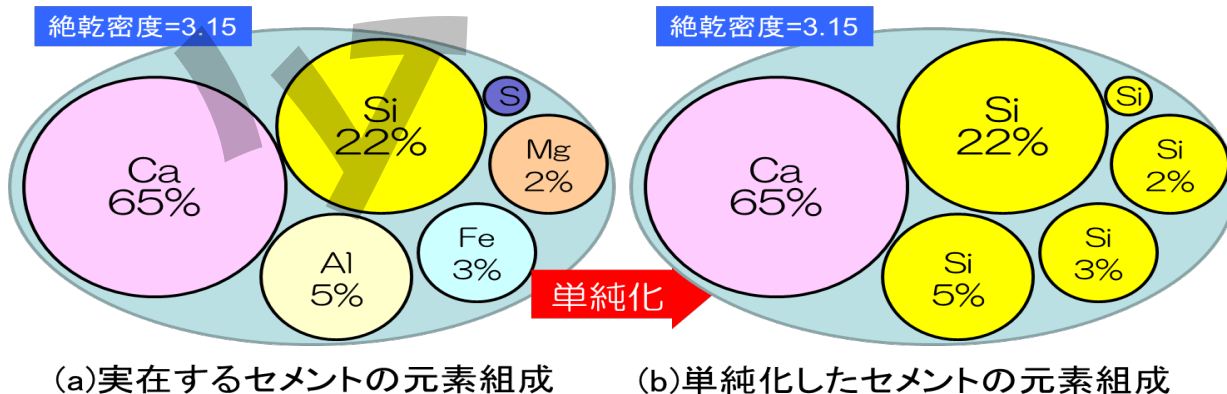
元素組成の差異要因	組成単純化に向けた方策
①コンクリートの調合 水セメント比 (W/C), スランプ, 混和剤種類等	実際のコンクリート組成を用い, 減衰率試算を実施し, 調合に伴う影響を把握する
②使用材料の種類 骨材 (砂岩, 安山岩, 石灰岩等) セメント (普通セメント, 中庸熱セメント, フライアッシュセメント等)	骨材種類及びセメント種類に影響しないものとするため, 使用材料の元素組成を単純化する → 単純化の条件: ①調合条件は維持する, ②遮蔽性能が適度に保守的となる

(2) 使用材料の単純化

骨材, セメントについて, 調合条件を変えずに, 使用材料の元素組成を単純化し, 使用材料の種類に影響しない元素組成を導出する。

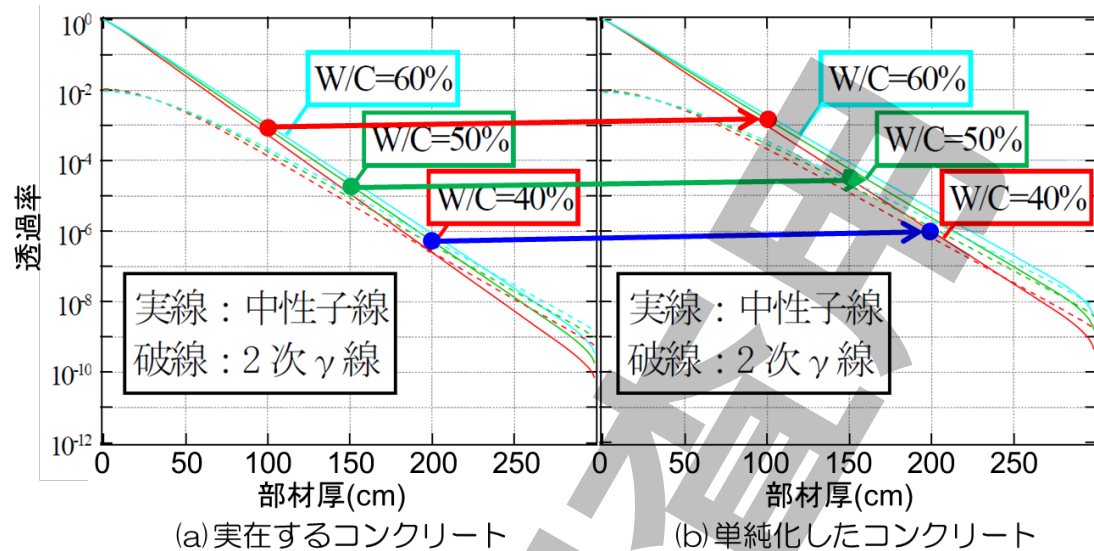


解説 2 図 4-2 骨材の単純化の例



解説 2 図 4-3 セメントの単純化の例

上記の単純化による透過率への影響を確認した結果、透過率は若干大きくなるが、その影響はほとんどないことを確認した。原子炉施設の線源スペクトルを想定した場合の影響を**解説 2 図 4-4**に示す。



解説 2 図 4-4 単純化の評価（原子炉施設：U-235）／Si へ単純化した場合

(3) ケーススタディ用組成

(1), (2)の検討の結果に基づいて暫定的に設定した遮蔽計算用組成は、次のとおり。

<元素組成>

単純化によって下記の元素で構成するものとする。

- ① Si系骨材コンクリート組成：H, O, Si, Ca, Fe（Caはセメント成分）
- ② Ca系骨材コンクリート組成：H, O, Ca, C,

<ケーススタディ用組成>

絶乾組成と気乾組成のケーススタディ用組成を**解説 2 表 4-2**に示す。水分は、絶乾組成は自由水ゼロ、気乾組成は3w%での値である。

解説 2 表 4-2 ケーススタディ用組成

(atoms/(barn・cm))

元素	原子量	標準検討での組成事例			
		Si系骨材組成		Ca系骨材組成	
		絶乾組成事例	気乾組成事例	絶乾組成事例	気乾組成事例
H	1.00	4.39E-03	8.79E-03	4.39E-03	8.79E-03
C	12.00			5.45E-03	5.17E-03
O	16.00	3.97E-02	4.19E-02	3.06E-02	3.28E-02
Na	22.99				
Mg	24.31				
Al	26.98				
Si	28.09	1.70E-02	1.59E-02		
K	39.09				
Ca	40.00	2.44E-03	2.29E-03	1.76E-02	1.67E-02
Fe	55.85	9.06E-04	8.49E-04		
密度(g/cm ³)		2.1	2.1	2.1	2.1

4.4 線量率影響検討

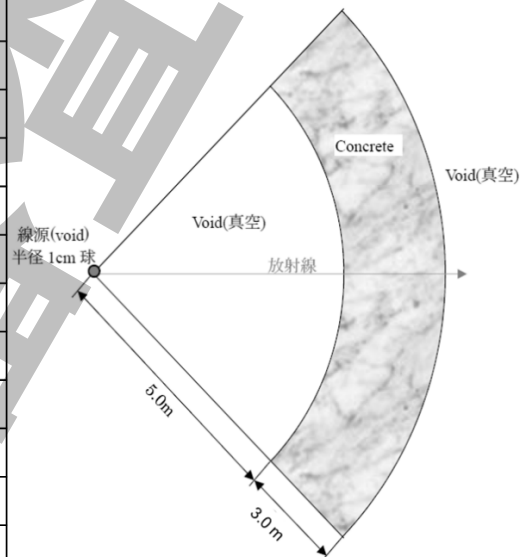
ケーススタディ用組成として作成した Si 系骨材と Ca 系骨材のコンクリートについて、Fe 及び C を平均的な含有率で加え、水分を変化させた組成変動に対する線量率影響を確認した。また、既設原子炉施設等で設計に使用している、ANL の組成データとの比較を実施した。

検討は、中性子線源 (^{235}U Fission, 医療用加速器), ガンマ線源 (^{60}Co 線源, ^{16}Co 線源, ^{235}U Fission) を対象として実施した。

(1) 計算体系

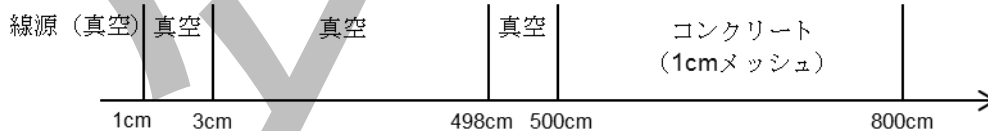
原子炉施設体系に対する計算条件は次のとおりである。

No.	項 目	条 件
1	遮蔽計算コード	ANISN (中性子線源、 γ 線源)
2	評価各データライブラリ	JENDL-3.3
3	ライブラリ	MATXSILB-J33
4	評価体系	内半径5m、外半径8mの1次元球殻モデル
5	ANISNメッシュ	基本的にはコンクリート部分を1メッシュ1cmで分割
6	ANISNルジャンドル展開次数	P3
7	ANISN Sn分点数	S8
8	ANISN境界条件	左側: 反射、右側: 真空
9	ANISN収束条件	0.001
10	中性子スペクトル	^{235}U (*)
11	γ 線スペクトル	^{60}Co 、 ^{16}N 、 ^{235}U 核分裂スペクトル(*)



*1 : ^{239}Pu , ^{252}Cf , BSW 透過スペクトルも ^{235}U と有意な差を生じないことを確認済。

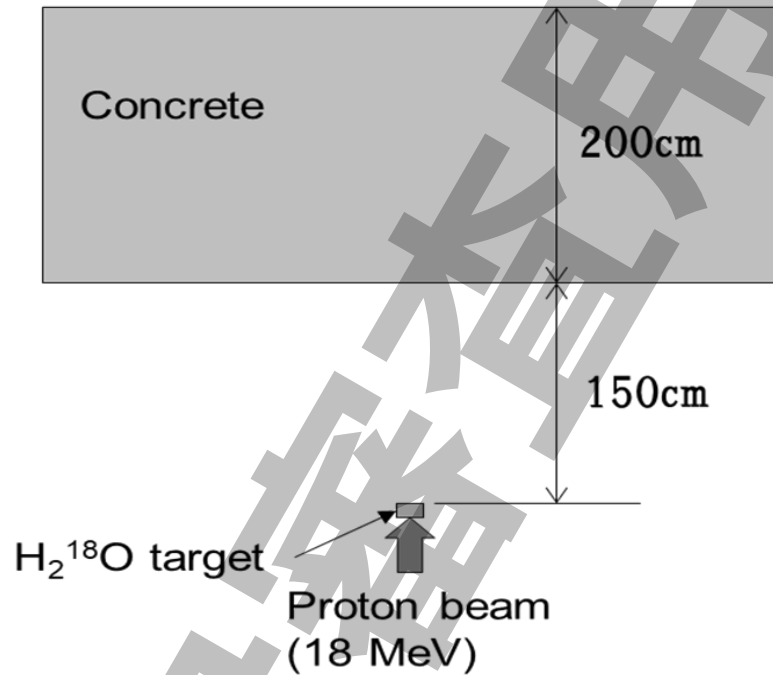
*2 : ^{137}Cs 線源も, ^{60}Co と同傾向であることを確認済。



解説 2 図 4-5 計算条件(原子炉施設体系)

中性子医療加速器に対する解析条件は次のとおりである。

- ・ 20MeV 以下の中性子に対する感度解析は，18MeV の PET 用サイクロトロン装置に対する遮蔽について，配合変動と水分変動による線量率影響検討を行った。
- ・ 解析は粒子入射を含めたモデル化，体系は参照する加速器施設の幾何学形状とし，遮蔽形状は平板遮蔽とする。（原子炉施設の球形状とは別のモデルとする。）



- ✓ サイクロトロン本体（マグネット及びコイルなど）は含めない。
- ✓ FDG 用の ^{18}O 水ターゲットだけとし，ターゲット構造物は含めない。
- ✓ 計算は，陽子入射が取り扱える 3 次元モンテカルロ計算コード PHITS3 を使用する。
- ✓ 入射陽子エネルギーは，18 MeV だけとする。
- ✓ コンクリート壁は，200cm 厚の平板モデルであり，面サイズは $400 \times 400 \text{ cm}^2$ 程度とする。
- ✓ タリオン粒子は，中性子と光子とする。

解説 2 図 4-6 計算条件(中性子医療加速器体系)

(2) 組成条件

ケーススタディ用組成，ANL 組成として用いた組成条件は次のとおりである。

解説 2 表 4-3 線量率影響検討に用いた組成条件

		(atoms/(barn・cm))					
元素	原子量	標準検討での組成事例					
		Si系骨材組成		Ca系骨材組成		ANL-5800 type O2-b	ANL-6443 type O2-b
		絶乾組成事例	気乾組成事例	絶乾組成事例	気乾組成事例		
H	1.00	4.39E-03	8.79E-03	4.39E-03	8.79E-03	8.56E-03	6.91E-03
C	12.00			5.45E-03	5.17E-03	1.03E-04	1.04E-04
O	16.00	3.97E-02	4.19E-02	3.06E-02	3.28E-02	4.31E-02	4.27E-02
Na	22.99					8.58E-04	8.69E-04
Mg	24.31					1.10E-04	1.12E-04
Al	26.98					1.55E-03	1.57E-03
Si	28.09	1.70E-02	1.59E-02			1.48E-02	1.50E-02
K	39.09					4.10E-04	4.15E-04
Ca	40.00	2.44E-03	2.29E-03	1.76E-02	1.67E-02	1.33E-03	1.35E-03
Fe	55.85	9.06E-04	8.49E-04			3.07E-04	3.11E-04
密度(g/cm ³)		2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1

(註) ここで，組成の差異の影響だけを評価するために，それぞれのコンクリート組成について，水分組成を変えずに，水分以外の組成を比例補正し，密度を 2.1g/cm³ に統一した。

(3) 線量率影響検討結果

a. 中性子線源の線量率影響検討結果

<原子炉施設>

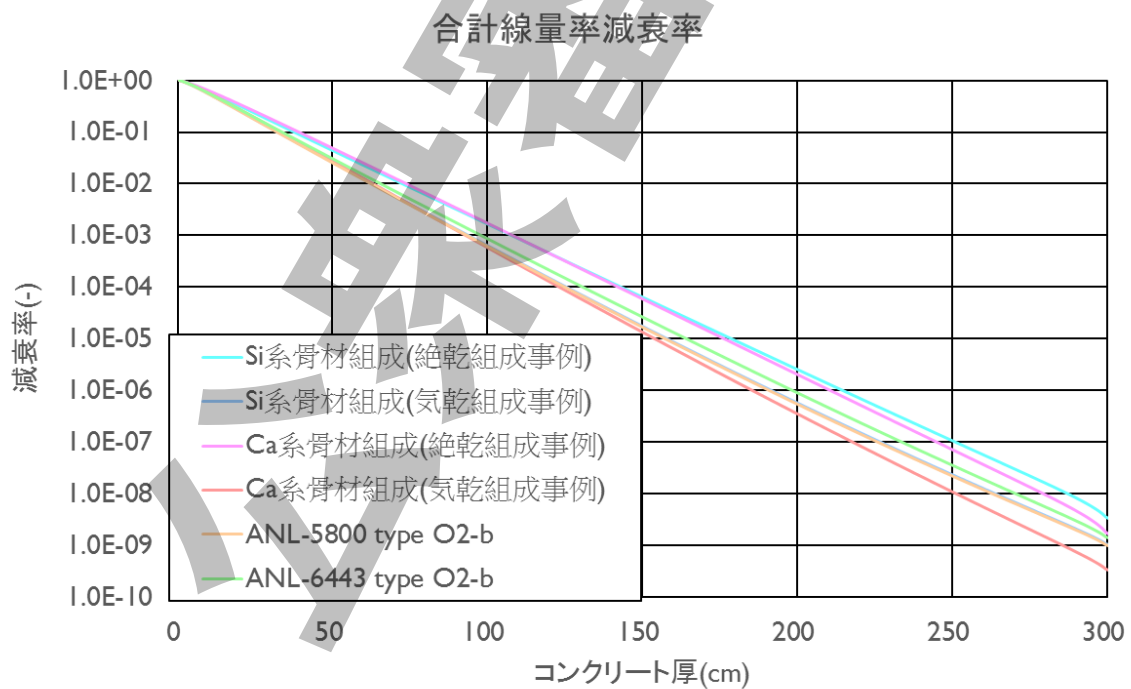
原子炉施設体系における ^{235}U Fission 中性子スペクトルでの線量率影響結果を解説 2 図 4-7 に示す。結果の概要は次のとおりである。

主要組成では、Ca の方が Si に比べ若干吸収断面積が大きいいため、絶乾組成での線量率の Si/Ca 比は 1.3 倍であり、コンクリート約 3.5cm 相当である。

絶乾組成と気乾組成を比較すると、気乾組成の方が、自由水が含まれるため、H の原子個数密度は 2 倍程度になっており、減衰率の絶乾／気乾の比は、200cm で、Si 系骨材で 5.3 倍、Ca 系骨材で 6.9 倍、気乾組成の方が減衰が大きくなっている。

ANL-5800 については、ANL-5800 は Si の気乾組成と同等の減衰率（Si 気乾／ANL-5800 の比は、200cm で 1.05 倍）。

ANL-6443 は Si 及び Ca の気乾組成と絶乾組成のほぼ中央の減衰率であった。絶乾組成/ANL-6443 の比は、Ca は 3.1 倍、Si は 2.4 倍の減衰率。



解説 2 図 4-7 原子炉施設の線量率影響結果（合計線量率の線減衰率）

<医療用加速器施設>

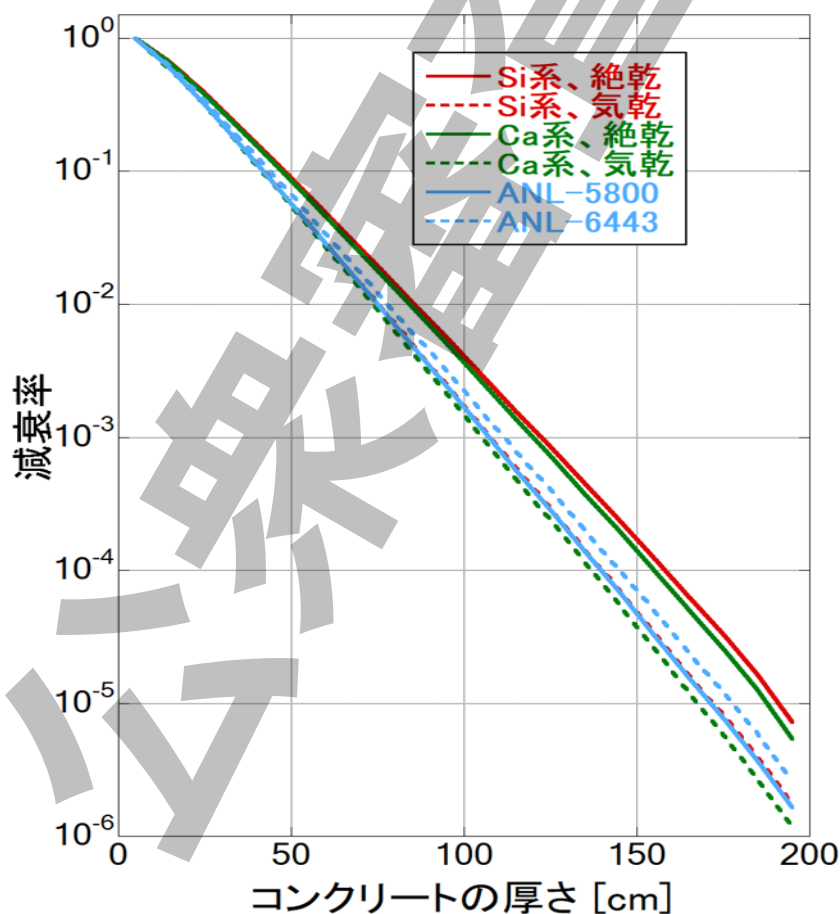
20MeV 以下の中性子医療加速器における線量率影響結果を解説 2 図 4-8 に示す。結果の概要は次のとおりである。

主要組成では、Ca の方が Si に比べ若干吸収断面積が大きいため、絶乾組成での線量率の Si/Ca 比は 1.3 倍であり、コンクリート約 4cm 相当である。

絶乾組成と気乾組成を比較すると、気乾組成の方が、自由水が含まれるため、H の原子個数密度は 2 倍程度になっており、減衰率の絶乾／気乾の比は、200cm で、Si 系骨材で 4.1 倍、Ca 系骨材で 4.6 倍、気乾組成の方が減衰が大きくなっている。

ANL-5800 については、ANL-5800 は Si の気乾組成と同等の減衰率（Si 気乾／ANL-5800 の比は、200cm で 1.1 倍）。

ANL-6443 は Si 及び Ca の気乾組成と絶乾組成のほぼ中央の減衰率であった。絶乾組成/ANL-6443 の比は、Ca は 2.1 倍、Si は 2.7 倍の減衰率。



18MeV陽子入射のPETサイクロトロンによる
密度2.1 g/cm³のコンクリート中の全線量の減衰率

解説 2 図 4-8 20MeV 以下の中性子医療加速器（合計線量率の線減衰率）

b. γ 線源の線量率影響検討結果

< ^{60}Co 線源, ^{16}N 線源, ^{235}U Fission 線源>

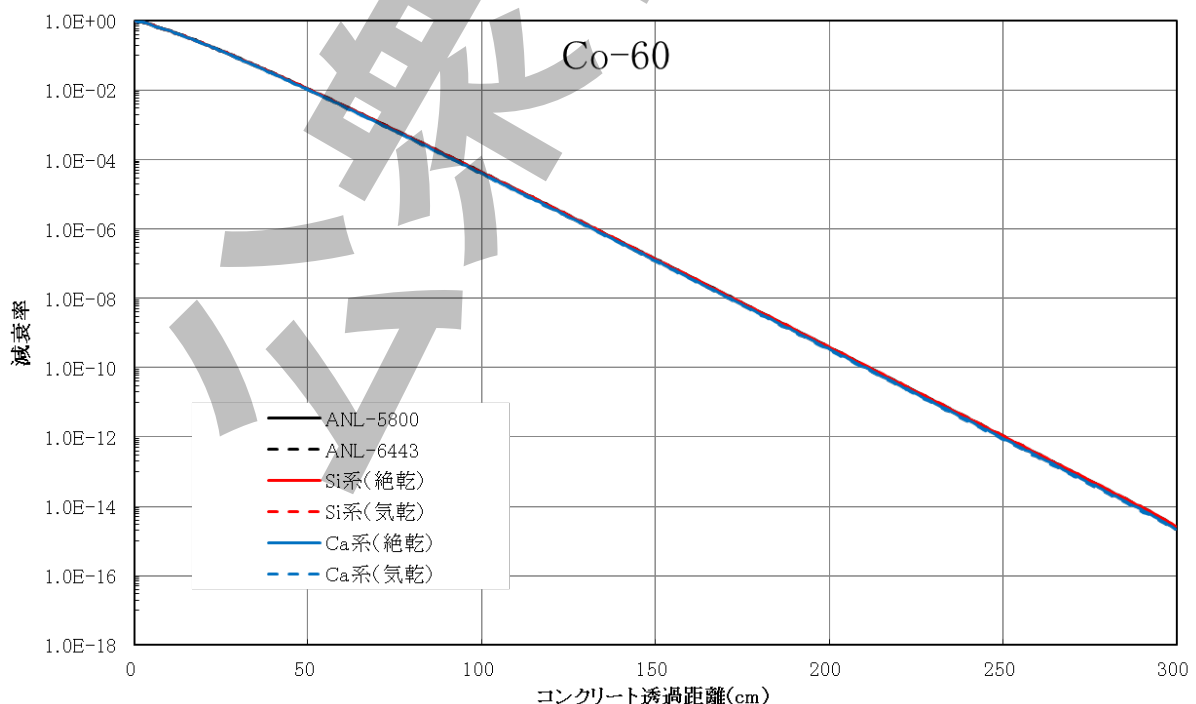
原子炉施設体系における ^{60}Co 線源, ^{16}N 線源, ^{235}U Fission 線源での線量率影響結果を解説 2 図 4-9, 解説 2 図 4-10, 解説 2 図 4-11 に示す。結果の概要は次のとおりである。

従前の検討の結果に基づき、配合変動と水分変動に対する γ 線源に対する線量率影響を実施し、ほぼ密度依存であることを確認。

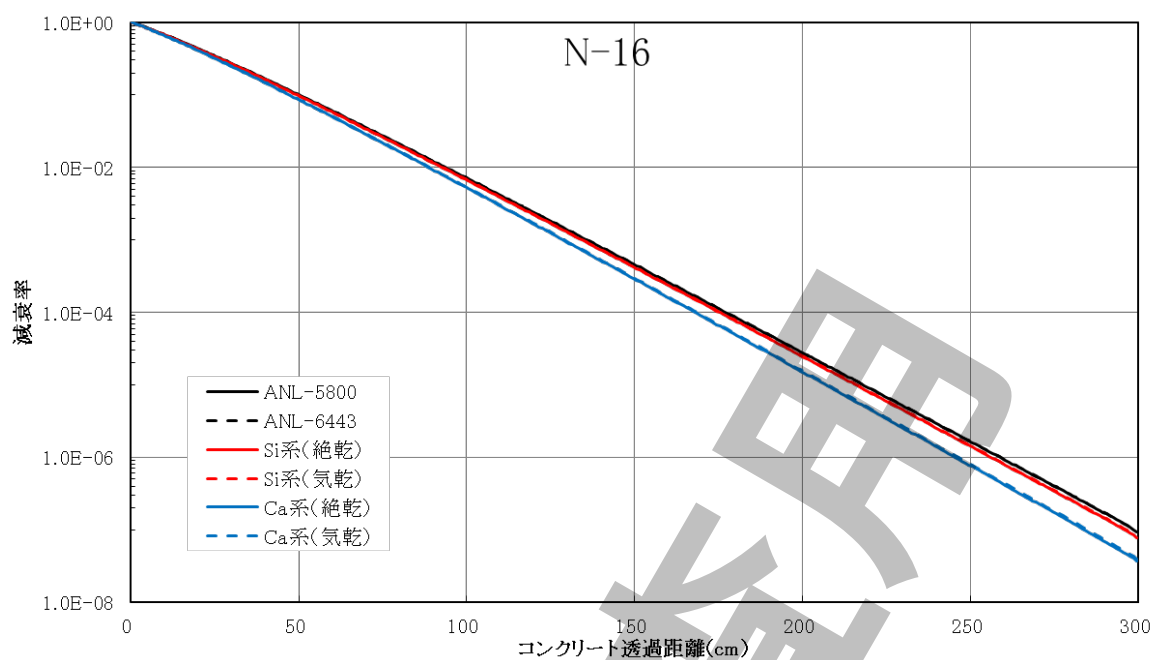
骨材主成分として Si 及び Ca 系骨材、水分を絶乾と気乾と変化させたところ、 ^{16}N と ^{235}U 核分裂スペクトルで、Ca 系骨材組成の、 γ 線減衰率が有意に大きい結果となった（最大 22%@100cm, 40%@200cm）。壁厚相当では、100cm で 2cm 程度, 200cm で 3.5cm 程度である。

この差異は、 γ 線の支配的な減衰反応であるコンプトン散乱は、Si と Ca で大きな差異はないが、電子対生成が 4MeV 以上で有意となり、Si に対し Ca で断面積が大きくなる効果と考えられる。例えば、解説 2 図 4-12 に示すとおり 6MeV では、電子対生成が Si に比べ、Ca は 30%以上高い値となる。

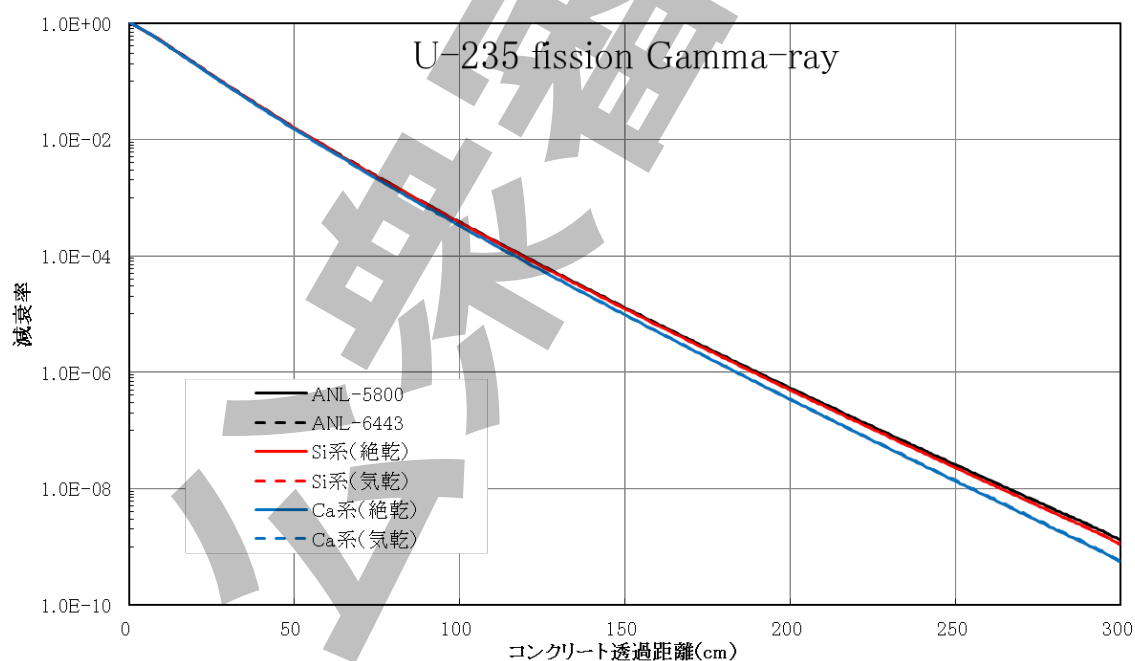
したがって、電子対生成の閾エネルギーである 1.022MeV 以上の γ 線エネルギーを持つ ^{235}U 核分裂スペクトルと、約 6.1MeV の γ 線を持つ ^{16}N の場合、Ca 系骨材コンクリート組成の方が減衰が大きくなると判断できる。



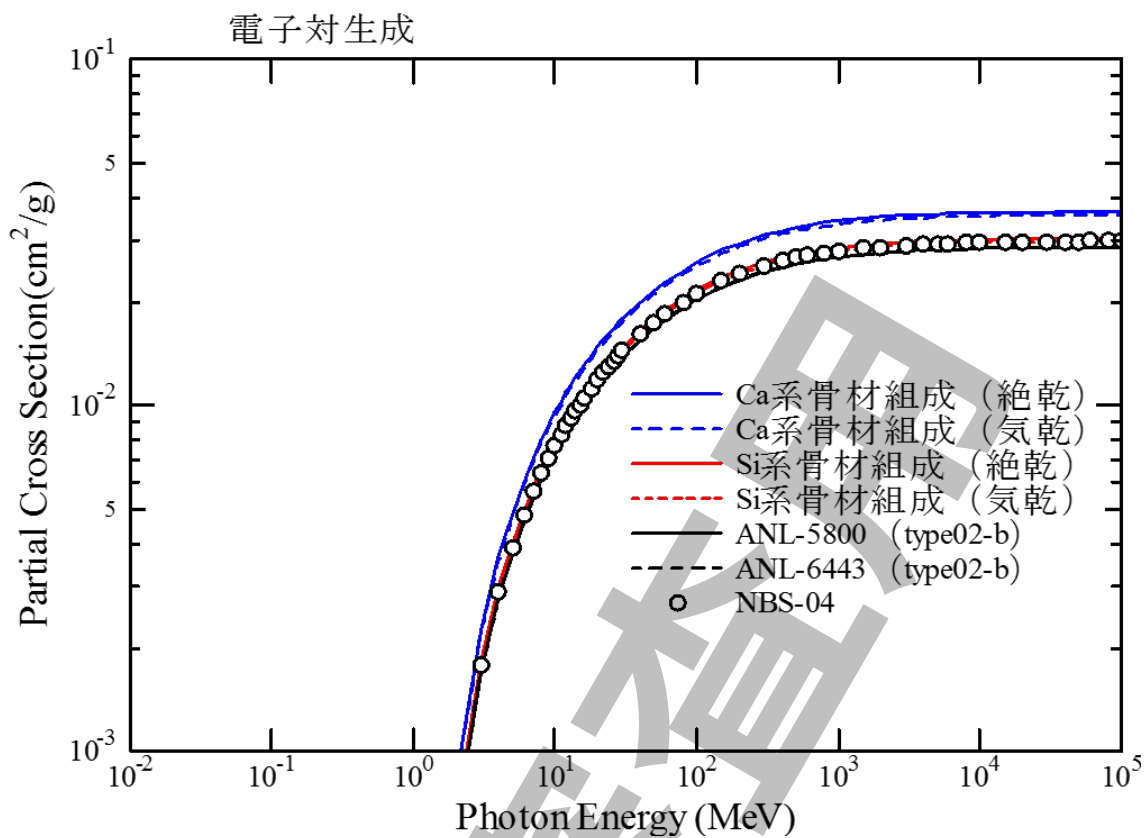
解説 2 図 4-9 γ 線源の線量率影響検討結果 (^{60}Co 線源 線減衰率)



解説 2 図 4-10 γ 線源の線量率影響検討結果 (^{16}N 線源 線減衰率)



解説 2 図 4-11 γ 線源の線量率影響検討結果 (^{235}U Fission γ 線源 線減衰率)



解説 2 図 4-12 電子対生成の反応断面積

4.5 検討のまとめ

Si 系骨材と Ca 系骨材のコンクリート組成を単純化したケーススタディ用組成を基準値とした場合における絶乾組成、気乾組成での線量減衰率を、ANL 組成（ANL-5800, ANL-6443）での線量減衰率と比較検討した結果は次のとおりである。

a. 中性子線源の検討結果（原子炉施設，中性子医療加速器）

ANL 組成での減衰率と，ケーススタディ用組成での減衰率を比較した結果，ANL-5800 については，Si の気乾組成と同等の減衰率となった。また，ANL-6443 と比較すると Si 及び Ca の気乾組成と絶乾組成のほぼ中央の減衰率であった。このことから，ケーススタディ用組成のうち気乾組成と絶乾組成を比較した場合には，気乾組成の方が ANL 組成に近いことを確認した。

b. γ 線源の検討結果（ ^{60}Co 線源， ^{16}Co 線源， ^{235}U Fission 線源）

ANL 組成（ANL-5800, ANL-6443）での減衰率と，ケーススタディ用組成での減衰率を比較した結果，Si 系骨材組成では絶乾・気乾共に減衰率はほぼ一致することを確認した。

なお Ca 系骨材組成においては， ^{16}N と ^{235}U 核分裂スペクトルで減衰率が有意に大きい結果となった。この差異は，Si 系骨材組成と Ca 系骨材組成では， γ 線と物質との相互作用のうち電子対生成の反応断面積が 4MeV 以上で差が生じ，Si に対し Ca で断面積が大きくなる効果が表れたものと考察した。

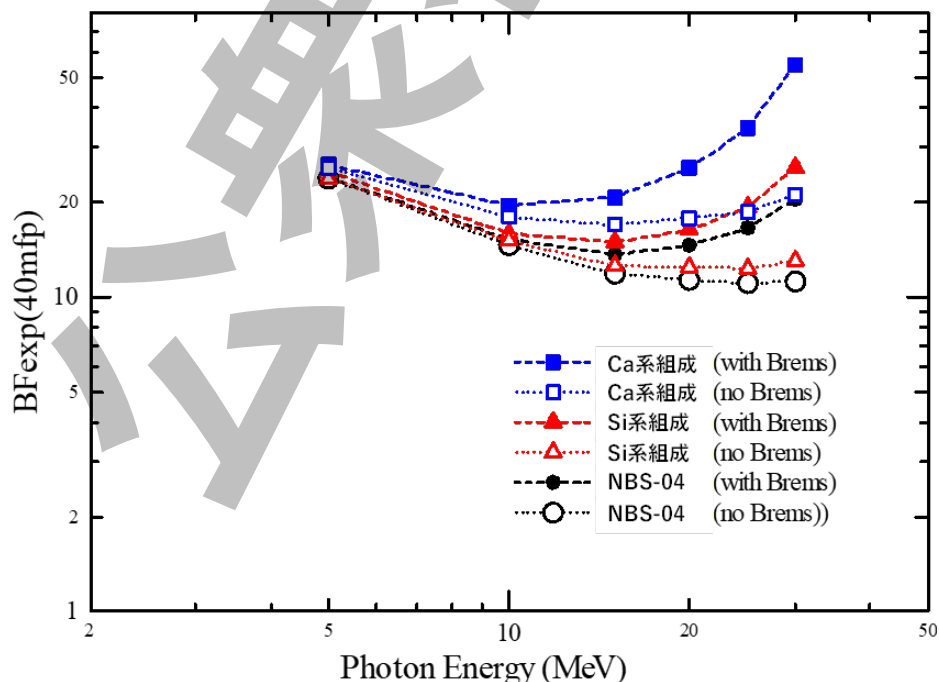
5. 高エネルギー光子のコンクリート中の挙動調査

高エネルギー光子がコンクリートに入射した場合、電子対生成による光子の吸収と、電子の制動 X 線及び陽電子の消滅 X 線による線量率のビルドアップが考えられる。さらに光核反応による光子の吸収と、発生した中性子などによる線量率ビルドアップが考えられる。この事前検討では、これらの高エネルギー光子挙動で、本計算で留意すべき事項を明確にした。

5.1 電子対生成影響検討

原子炉施設 γ 線源(^{60}Co , ^{16}N , Fission γ)に対する、Si 系と Ca 系骨材での単純化組成での γ 線挙動に対する電子対生成影響検討。

- ・ 電子対生成での光子減衰 $\Rightarrow$ 電子、電子の制動 X 線及び陽電子の消滅 X 線による電離
- ・ 制動 X 線を考慮した場合、単色の 20MeV 光子に対する Ca 系組成の 40mfp での線量率ビルドアップファクタ (以後「BF」と呼ぶ。) は、Si 系組成の 1.57 倍。
(制動 X 線なし場合は 1.44 倍)
- ・ 20MeV 単色光子入射のため、電子対生成と制動 X 線による BF の差異は顕著。



解説 2 図 5-1 高エネルギー光子の電子対生成によるビルドアップファクタ

5.2 電子対生成と光核反応を合わせた影響検討

高エネルギー光子の、Si 系と Ca 系骨材での単純化組成での、電子対生成(制動放射線、消滅 X 線含む)と光核反応を考慮した減衰挙動を、**解説 2 図 5-2** 及び **解説 2 図 5-2** に示す。

- ・ 10MeV では Ca 系組成は Si 系組成より 20%程度減衰効果が大きい。エネルギーが大きくなるほど差は小さくなり、20MeV では 12%程度の差となる。
- ・ エネルギーが低いほど、光核反応と電子対生成による減衰は小さくなるが、散乱成分が減少するので、減衰率は大きくなる。

① 電子対生成

- ・ 電子対生成は 4MeV 以上で有意となるため、20MeV 以下の単色光子線源に対しては、Si 系組成と Ca 系組成で、線量率減衰効果に有意な差が生ずる。また、発生電子とそれに伴う消滅 X 線及び制動 X 線による線量ビルドアップは、Si 系組成と Ca 系組成で 1.6 倍程度となり、有意な差を生じさせる。
- ・ したがって、線量率影響評価最終計算では、電子対生成は制動 X 線を含めて留意し、実施計画策定する必要がある。

② 光核反応+電子対生成

- ・ 20MeV 以下の連続エネルギー光子線源に対しては、15MeV 程度以上で Si 及び Ca で光核反応が有意となるが、光核反応と電子対生成の積分値として、Si 系と Ca 系組成の差異で、減衰率での差が、30%程度である。
- ・ これに基づき、コンクリートだけの光核反応は、光中性子及び 2 次 γ 線の線量ビルドアップに比べ減衰効果が有意となることが現れていると考えられる。この効果を、線量率影響評価最終計算で留意した。

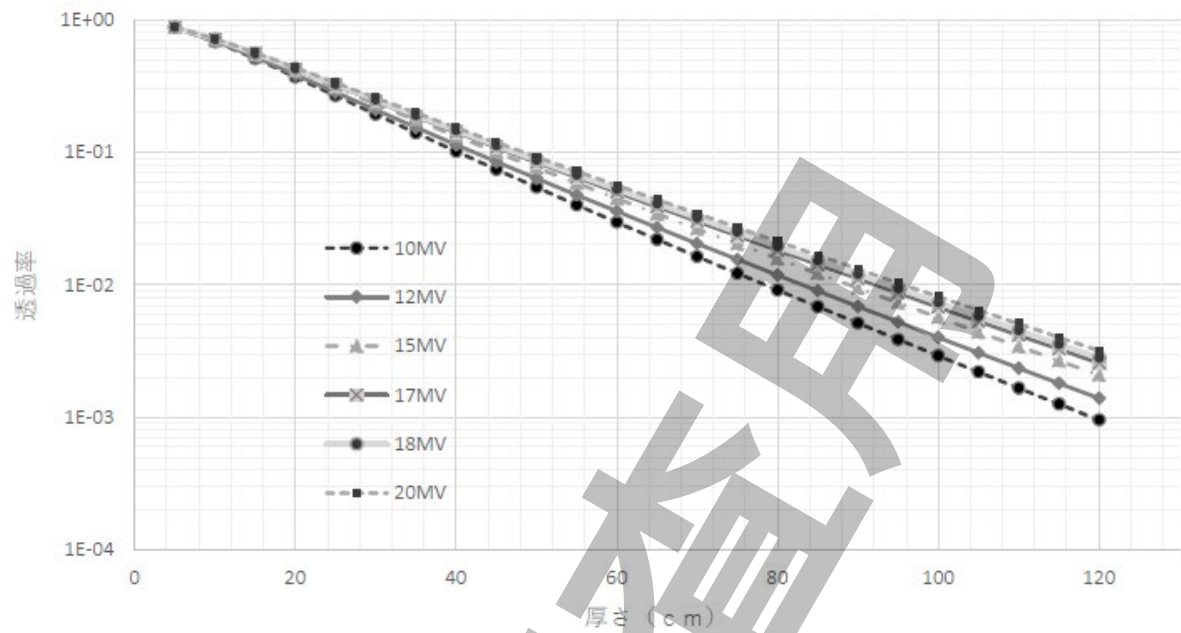
③ まとめ

- ・ 20MeV 以下の電子加速器では、Si 系骨材組成、ANL-6443、ANL-5800 の減衰率グラフは、同等の曲線となっているが、Ca 系骨材組成だけ減衰が大きい結果となっており、150cm 位置での ANL-6443 との比は、10MeV で 0.712、20MeV で 0.608 である。
- ・ 原子炉施設の γ 線源と同様に、4MeV 以上では電子対生成による減衰と、発生した陽電子・電子に起因する制動 X 線と消滅 X 線による線量率ビルドアップが生ずる。
- ・ 総合的な Si 系及び Ca 系骨材組成間の減衰率の差は、原子炉施設の 16N の γ

線(6, 7MeV)での電子対生成効果(100cm 位置で減衰率比 0.767)と同様の差異となっている。

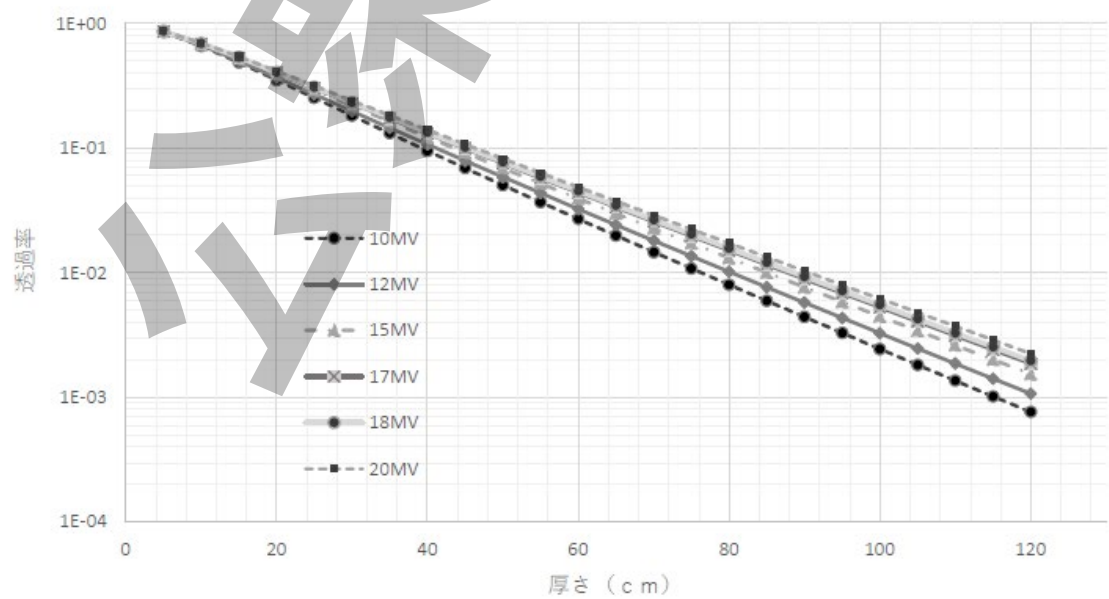
- ・ 電子対生成による減衰係数は、光子エネルギーが大きいほど Si に比べ Ca の方が大きくなる(次葉)ため、10MeV に比べ 20MeV で Ca での減衰が大きくなると考えられる。
- ・ よりエネルギーが高くなると、17MeV 付近にピークを持つ光核反応が生じ、光核反応による吸収と、発生する光中性子及び 2 次 γ 線・捕獲 γ 線(共鳴領域での Fe による中性子吸収など)による線量率ビルドアップが生ずる。なお、 (γ, α) 、 (γ, p) 反応は線量率に影響しなかった
- ・ Ca と Si の主成分である ^{40}Ca と ^{28}Si の光核反応断面積は、大きな差は無く、光核反応の考慮有無の 2 ケース実施した解析結果から、コンクリート元素での光中性子発生の影響は数%程度であるため、減衰率に対する光核反応の影響は小さいと考えられる。

Si_concrete 実効線量透過率



解説 2 図 5-2 Si 系骨材コンクリートでの高エネルギー光子の減衰率

Ca_concrete 実効線量透過率



解説 2 図 5-3 Ca 系骨材コンクリートでの高エネルギー光子の減衰率

参考文献

- [1] Radiation Shielding, American Nuclear Society (2000).
- [2] Table of Isotopes 8th edition, Wiley-Interscience (1996).

民用核安全设备监督管理条例