

図-31 鉄遮蔽体50cm透過位置での時間依存放射能

その後は半減期が約45日の ^{203}Hg が重要となる。放射能としては照射後1日位までは半減期3.2時間の ^{209}Pb を考慮せねばならないが、その後はガンマ線源の場合と同じく ^{203}Pb と ^{203}Hg が支配的となる。照射後一年以上となると ^{10}Be 、 ^{14}C の他に ^{205}Pb も考慮する必要があるが、 ^{205}Pb が特性X線を出すくらいでガンマ線源としては極めて弱い。これらの3つの核種の半減期はそれぞれ 2.5×10^6 年、 5.6×10^3 年、及び 5×10^7 年である。図-28のコンクリートの場合は放射能核種の数が多く複雑である。しかし、主な核種は ^{24}Na 、 ^{59}Fe 、 ^{55}Fe 、 ^{41}Ca 、 ^{39}Ar 、 ^{54}Mn 等である。このうち、主なガンマ線源は ^{24}Na 、 ^{59}Fe 、 ^{54}Mn である。照射後数日までは半減期が15時間の ^{24}Na と半減期が45.1日の ^{59}Fe が重要である。数日を過ぎると ^{59}Fe が優勢になり、その後1年ぐらいで半減期291日の ^{54}Mn がきいてくる。放射能としては数ヶ月後には ^{59}Fe が10年以降は ^{41}Ca と ^{39}Ar がきく。図-29と図-30のポリエチレンと水の場合は照射後しばらくするとベータ崩壊をする ^{14}C が主な放射能となる。水の場合は照射直後に半減期7.4秒で6.13MeVの高エネルギーガンマ線を出す ^{16}N が重要である。図-31の鉄の場合は半減期が約3年の ^{59}Fe 、約45日の ^{59}Fe 、及び ^{54}Mn が主なものである。 ^{59}Fe は放射能としては多いが崩壊の際には低エネルギーの特性X線のみを放出する。

次に、高性能遮蔽材E-01の放射能を他の物質と比較

する。ただし、放射能単位は省略する。まず、ガンマ線源として照射後1日で比較する。この場合、ポリエチレンと水はベータ崩壊核種のみでガンマ線源としての放射能は無視できるほど少ないので比較から除く。E-01、コンクリート、鉄の放射能はそれぞれ 1.0×10^{-20} 、 1.6×10^{-15} 、及び 1.0×10^{-15} であり、E-01の放射能はコンクリートの $1/1.6 \times 10^5$ 、鉄の $1/10^5$ である。さらに、放出されるガンマ線のエネルギーを考えると被曝量はこれらの比率より小さくなる。次に1年後の全放射能を比較する。この場合、E-01、コンクリート、ポリエチレン、水、鉄の放射能はそれぞれ 3.3×10^{-25} 、 2×10^{-17} 、 1×10^{-19} 、 2.5×10^{-23} 、 3.2×10^{-15} となりE-01が最も少ない。すなわち、E-01の放射能はコンクリートの $1/6 \times 10^7$ 、鉄の $1/10^{10}$ であり、ポリエチレンの $1/3 \times 10^5$ 、水の $1/75$ である。

以上のように高性能遮蔽材は一般的な遮蔽材と比較して放射化量が極めて少ないことが明らかとなった。この理由としては遮蔽材の構成元素の主なものが放射化しにくい水素、鉛、硼素であることと遮蔽材の中では中性子スペクトルの低エネルギー部が少ないことによる。このように本遮蔽材は放射化物による被曝の低減や廃棄処分の際の環境汚染の観点から極めて優れた遮蔽材であるといえる。

6. まとめ

高性能遮蔽材の開発に関する研究では中性子及びガンマ線双方に対して良い遮蔽性能を有する遮蔽材の開発を試みた。遮蔽材を構成する元素としては、高エネルギー中性子に対する非弾性散乱、中高エネルギー中性子に対する弾性散乱、低放射化及び二次ガンマ線発生量低減のための低エネルギー中性子の吸収、一次、二次ガンマ線の遮蔽、さらには価格を考慮した結果、鉛、水素、硼素を選択した。次にこれらの元素から液体遮蔽材の作成を試みたが良い結果は得られなかった。しかし、これに関しては今後さらに検討する価値があると考えられる。材料を固めて遮蔽材を作る方法としては紫外線硬化法を選んだ。高水素含有物である紫外線硬化モノマーと鉛及び硼素化合物を混合し、紫外線を照射することにより厚さ約1mmの中性子及びガンマ線の双方に対して良い遮蔽性能を持つ遮蔽材を作成することができた。紫外線硬化法では紫外線の透過厚さの関係から一度の照射により厚い遮蔽材を作成することは難しいが、いくつかの原材料の組合せにおいては照射方法を工夫し、厚さ1mmのものを積層化することにより約1cm程度の厚い遮蔽材を作成することができた。遮蔽性能は例えば一般的な普通コンクリートと比較すると核分裂線源に対し一次、二次ガンマ線及び中性子を含めて普通コンクリートの約半分の厚さで同じ遮蔽効果を示し、極めて優れていることが明らかとなった。また、放射化も極めて少なく核分裂線源で1年

間照射した場合、線源から50cm透過位置において普通コンクリートに比べ照射後1日で約 $1/10^5$ 、照射後1年で約 $1/10^8$ であった。また、これらの遮蔽材は室温から100度までは温度変化に伴う、重量及び外観変化がほとんど無いことを明らかとした。さらに、多官能基モノマーを用いた方が耐熱性が良いことも確かめた。本研究では水素の含有量及び硬化のしやすさから1官能基の紫外線硬化モノマーを中心に実験を行ったが、今後の研究では多官能基モノマーについて、さらに検討をする必要がある。また、温度特性については温度変化に伴う重量変化、発生ガスの種類と量、水素量の変化等について詳しく検討する必要がある。その他、機械的特性、耐放射線性等についても研究する必要がある。原材料に関して本研究では経験的に選択したが、最適元素選択を行うためのファジー理論による最適化計算プログラム⁽¹⁰⁾等により理論的に最適な原材料構成を決定する必要がある。

一方、高性能遮蔽材の利用の観点から、ここで作成した高性能遮蔽材の遮蔽性能を評価し、補償遮蔽設計への適用を試みた。すなわち、試作した材料の一つを用いて代表的な遮蔽欠損部である2回屈曲円筒ダクトとオフセット状円環ギャップに対して補償遮蔽設計を試み、その評価を二次元及び三次元放射線輸送計算により行った。その結果、本研究で開発した遮蔽材は補償遮蔽材として十分効果があることを明らかとした。しかしながら、補償遮蔽設計法の確立までは至らなかった。この点については今後さらに研究を続ける予定である。

参考文献

1. 日本造船研究協会 「実用原子力船の設計に係る検討(その1)」調査報告書、(1993)。
2. Hodge N. and Sowden R. G., "Neutron-Shield Materials," *Nucleonics* 19[11], 159 (1961).
3. 加藤 清視「紫外線硬化システム」(株)総合技術センター (1989)。
4. 日本原子力学会「ガンマ線遮蔽設計ハンドブック」(1988)。
5. Engle W. W. Jr., "A Users Manual for ANISN, A One Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering," K-1963, (1967).
6. Seki, Y., et al., "THIDA-2: An Advanced Code System for Calculation of Transmutation, Activation, Decay Heat and Dose Rate," JAERI 1301, (1986).
7. Seki Y. and Iida H., "Coupled 42-Group Neutron and 21-Group Gamma-Ray Cross Section Sets for Fusion Reactor Calculations," JAERI-M 8818, (1980).
8. 日本アイソトープ協会「体外放射線に対する防護

のためのデータ」(1987)。

9. Seki, Y., et al., "Graphical Representation of Transmutation and Decay Chain Data, Transmutation Cross Section and Delayed Gamma Emission Data," JAERI-M 1280, (1982).
10. Kanai, Y., et al., "Optimal Selection for Shielding Materials by Using Fuzzy Linear Programming Method," Second Int. FLINS Workshop on Intelligent Systems and Soft Computing for Nucl. Sci. and Industry (1996).

付録A 高分子系高性能遮蔽材の補償遮蔽設計への適用

高性能遮蔽材を遮蔽設計に自由に利用できればその効果は極めて大きいはずである。しかしながら、実際の遮蔽設計においては遮蔽材の耐熱性等の物性、放射線分解等の耐放射線性、構造材としての強度、経済性等を考慮しなければならないため必ずしも遮蔽性能や放射化の点でよい材料が使用されるとはいえない。ここで開発した高性能遮蔽材を実際に利用できるようにするには今後さらなる遮蔽性能の向上を図ると同時に物性や耐放射線性の向上及び定量的評価を行い、遮蔽材としての特性並びに適用限界を明らかにしていく必要がある。これまで行った物性評価などからは適用に関して次のことがいえる。すなわち、(1)あまり高温では使用できない。その限界は恐らく100~200℃の間にくることが予測される、(2)構造材としての強度は期待できない、(3)強度の極めて大きな放射線場では使用が難しい、等である。これらのことから高性能遮蔽材を適用できる対象は限られてくるが、その適用の代表的な例としては複雑形状遮蔽欠損部の補償遮蔽が考えられる。複雑形状部の補償遮蔽では上記(1)から(3)の制限は問題にならない場合が多いと考えられる。現状ではストリーミングに対する設計計算精度は悪く、その精度は遮蔽欠損部形状に依存する⁽¹⁾。遮蔽壁の中に欠損部が存在すると当然壁の外側での線量率は増大する。この原因は欠損部による実効的遮蔽厚の減少により透過線が増大すること及び欠損部に沿った放射線のストリーミングが発生することにある。欠損部による透過線の増大は、遮蔽厚の減少を補償する様な遮蔽効果の高い物質を遮蔽壁の中の透過経路に設けることができれば防ぐことができる。一方、ストリーミングは欠損部を屈曲させる等により減らすことができるが補償遮蔽を用いればより効果的に減少させることができる。ストリーミング放射線は欠損部に沿って飛行し欠損部を構成する壁に衝突する。ここで放射線はこの遮蔽壁の中へと透過し、壁の中で散乱されることにより欠損部の中へ反射される。ストリーミングではこのような現象が繰り返される。そこで欠損部を

取り巻くように一定の厚さの高性能遮蔽材を配置すればストリーミング放射線を低減させることができると考えられる。このように、欠損部補償遮蔽設計法によれば放射線の主要な漏洩経路に効果的な局所遮蔽を施すことにより欠損部が存在することによる線量率の増大を抑え、欠損部のある場合と無い場合で遮蔽壁外側での線量率を同程度にすることができる。放射線遮蔽設計において遮蔽体を貫通するダクト等の遮蔽欠損部からの放射線ストリーミングは、放射線作業従事者の被曝量の増大、及び放射線を減らすための追加遮蔽の設置に伴う遮蔽体の増加及び遮蔽構造の複雑化という2つの問題の原因となる。欠損部補償遮蔽設計法によりこの問題を解決することができれば被曝量の低減化、遮蔽の軽量・小型化、経済性の向上につながる。

ここでは補償遮蔽材として高性能遮蔽材E-01を用いた代表的な遮蔽欠損部である2回屈曲円筒ダクトと段付き円環ダクトに対して補償遮蔽設計を試み、その評価を二次元輸送計算コードDOT3.5⁽²⁾及びモンテカルロ計算コードMCNP4A⁽³⁾により行った。評価は一次、二次ガンマ線及び中性子全体に対し、配管等による遮蔽欠損効果及び配管に沿ったストリーミング効果を含めて行った。対象とする線源は核分裂線源で遮蔽壁の前面に一様に分布するとした。従って、核分裂中性子、核分裂ガンマ線及び二次ガンマ線を考慮する必要がある。補償遮蔽材としては中性子のみを考慮すればポリエチレンのような高含水素物質でもよく、またガンマ線のみを考えれば鉄や鉛のような重い物質でよい。しかし、中性子とガンマ線を同時に考慮し、さらに二次ガンマ線も含めれば本研究で開発中の高性能遮蔽材のようなものが適していることが明らかである。補償遮蔽設計を行う遮蔽欠損は密度2.2で厚さ1mの普通コンクリート製遮蔽壁に設けた。コンクリートの元素組成は表-19に示すものと同じとした。

A. 1 2回90度屈曲円筒ダクト

ここで扱う遮蔽欠損は換気ダクト等に代表される2回90度屈曲円筒ダクトである。ダクトの口径は20cm、第1脚部と第3脚部の長さはそれぞれ50cmで、第2脚部の長さは1mとした。図-A.1に屈曲円筒ダクトの体系を示す。

(1) 補償遮蔽材の配置

遮蔽欠損として重要なのは明らかに第1脚目と第3脚目である。そこでまず第1脚目を独立に取り出し、それに対する補償遮蔽を考える。補償遮蔽体を配置する位置はダクト周り及びダクトの後部遮蔽体中である。ダクト周りに補償遮蔽を施せばダクトを斜めによぎる放射線や後部の遮蔽を回り込んでくる放射線を減らせるので、かなりの効果が期待できる。しかし、ダクト周りの補償遮蔽の効果は推定しにくいので今回はこれを

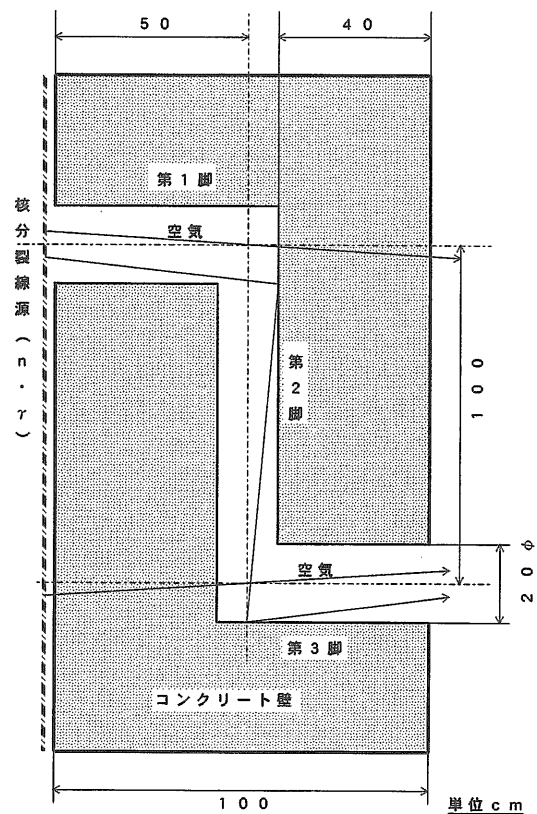


図-A.1 2回屈曲円筒ダクト体系

行わない。従って、補償遮蔽はダクト後部のみに置く。第1脚ダクトによる遮蔽欠損部の長さは60cmなので補償遮蔽材の最大の厚さは40cmとなる。しかし、高性能遮蔽材の遮蔽効果は約40cm厚でコンクリート80cm厚に相当すること、また、ダクト内で多少の減衰が見込めることから補償遮蔽材の厚さを最大の40cmとすれば十分な遮蔽を行える可能性がある。従って、補償遮蔽材の厚さは40cmとした。ダクト中心軸方向で補償遮蔽材の厚さが40cmで十分であると仮定すると、ダクト軸に対し斜めに入射しダクトの側壁を通る放射線に対しては補償遮蔽材とコンクリートを併せて実効的にコンクリートの厚さで80cmの遮蔽があればよいことになる。補償遮蔽材の半径を30cmとすれば、ダクトをよぎる放射線のほぼ全てのものが実効的に80cm以上のコンクリートを透過することになる。以上より補償遮蔽材の寸法は半径30cm、厚さ40cmとした。第3脚に対しても同様に考えた。第2脚に対しては補償遮蔽材を配置するための空間的な余裕があるので安全側にダクト前後に厚さ20cmの補償遮蔽材を施した。このようにすると補償遮蔽材を配置した体系は図-A.2、図-A.3のようになる。

(2) DOT3.5による解析

計算にはTHIDA-2コードシステムのDOT3.5コードを使用した。断面積ライブラリーはGICX40を用いた。

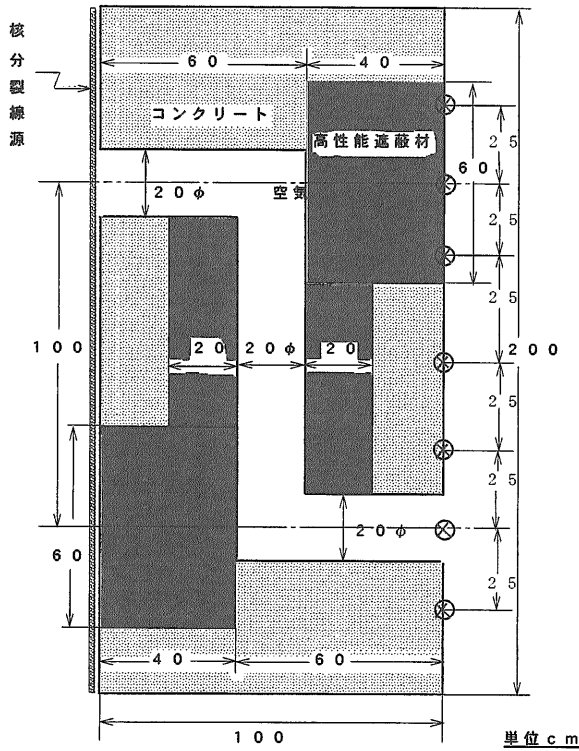


図-A.2 2回屈曲円筒ダクト補償遮蔽体配置と寸法及びMCNP計算点

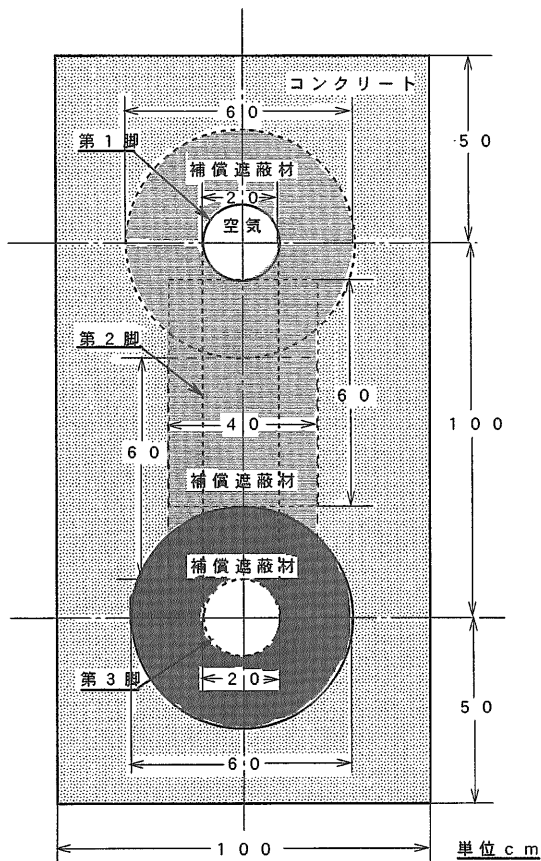


図-A.3 2回屈曲円筒ダクト補償遮蔽体配置と寸法

角度分点はS48、散乱断面積のルジャンドル展開項数はP5とした。空間メッシュは全体に1~2cmとした。エネルギー群数は中性子42群、ガンマ線21群である。線源における中性子及びガンマ線発生数は核分裂当たりそれぞれ2.5個及び7.5個とした。DOTは二次元輸送コードなので屈曲ダクト全体の効果を1度に計算することができない。しかし、すでに述べたように、2回屈曲ダクトの場合、遮蔽欠損効果は第1脚と第3脚が特に重要である。従って、DOTの計算ではこれらの部位に対してのみ、それぞれ独立に、計算を行った。DOTの計算では体系をR-Z座標系で表示し、コンクリート壁体系の全体の大きさはR方向に1m、Z方向に1mとした。R方向を有限にすることによる効果は少ないことが望ましいが計算時間の関係からこのようにした。そこで、体系のR方向に関する有限効果を見るため、まず、DOTによる二次元透過計算と無限体系に対応するANISNコードによる一次元透過計算を比較した。直径2m、長さ1mの円柱状コンクリート体系の中心軸上の中性子束分布をANISNの結果とともに図-A.4に示す。ただし、ANISNの計算はすでに高性能遮蔽材の遮蔽性能に関する比較計算として実施したもので遮蔽の厚さは2mである。透過距離が1mに近づくとDOTの結果がANISNの結果より低くなっているが、これはDOTの場合はANISNの場合に比べ1m後方の遮蔽体からの反射がないからである。この点を除くと両者は良く一致している。また、DOTの計算は、図-A.5に示したようにR=0cmとR=50.5cmのZ方向の中性子束分布は多少の差は見られるもののほぼ一致していること、及び図-

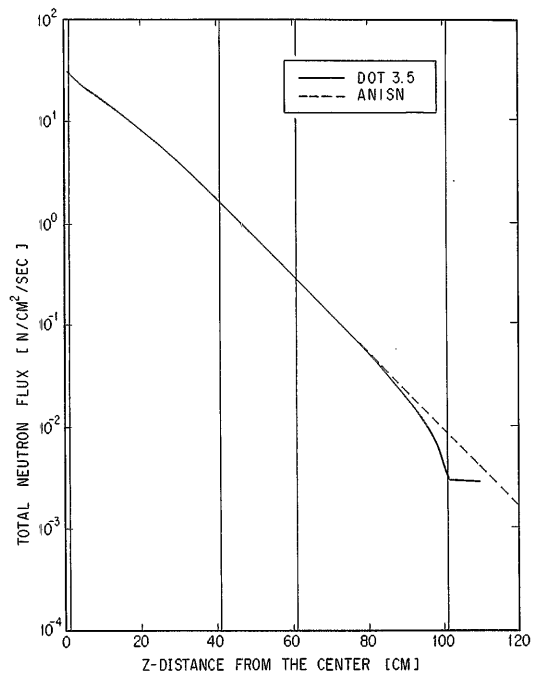


図-A.4 DOTとANISNによる透過計算結果の比較

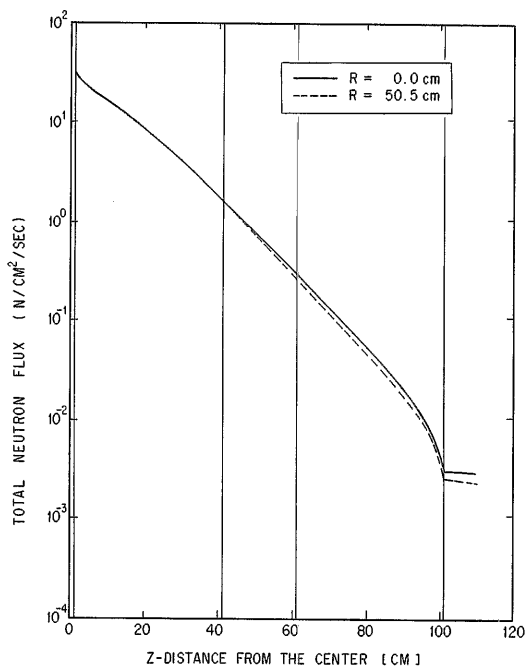


図-A.5 半径0cmと約50cmでのDOTによる軸方向中性子束分布の比較

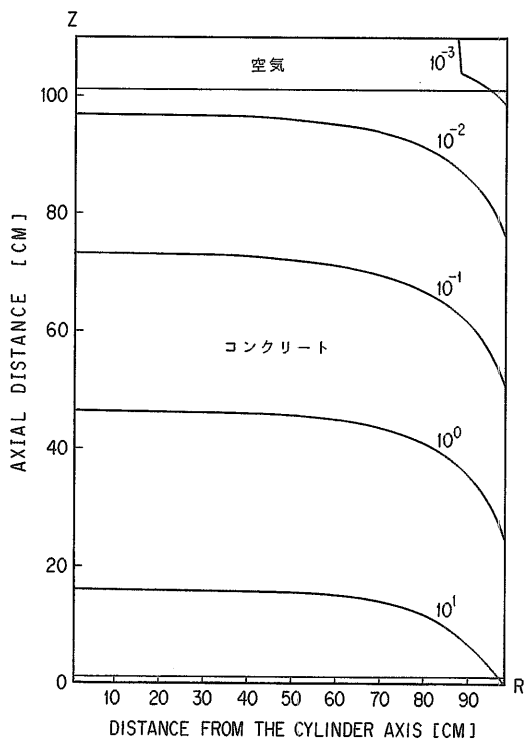


図-A.6 コンクリート遮蔽体内中性子束等高線図

A.6の中性子束の等高線図から見られるRが50cm以内の中心軸近辺での平坦な分布から、遮蔽壁が無限平板コンクリート中のダクトと等価な結果を与えるといえ

(104)

る。すなわち、DOTの計算ではR方向に有限の体系を解いたがストリーミングに関してはその効果は無視できるといえる。さらに、ANISN計算の信頼性は高いので、ここで行ったDOTの計算は体系選択のみならず他のパラメータの選択を含めて信頼できると考えられる。図-A.7及び図-A.8にそれぞれ補償遮蔽が無い場合とある場合の第1脚部の計算体系を示す。また、図-A.9及び図-A.10に第3脚部に対する同様の計算体系図を示す。

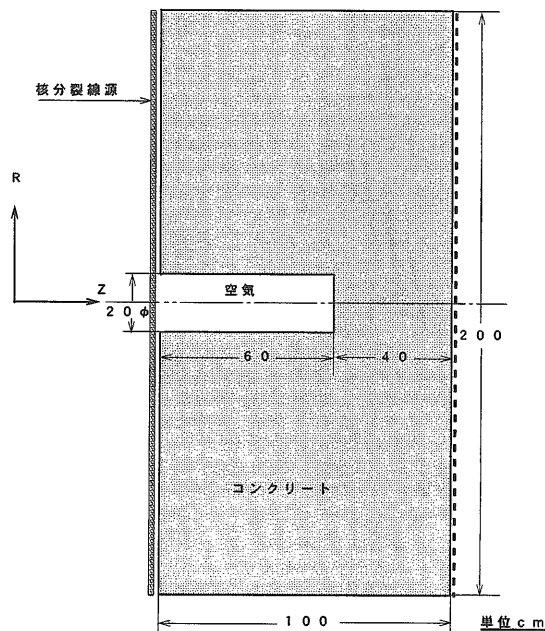


図-A.7 補償遮蔽体のない第1脚部のDOT計算体系

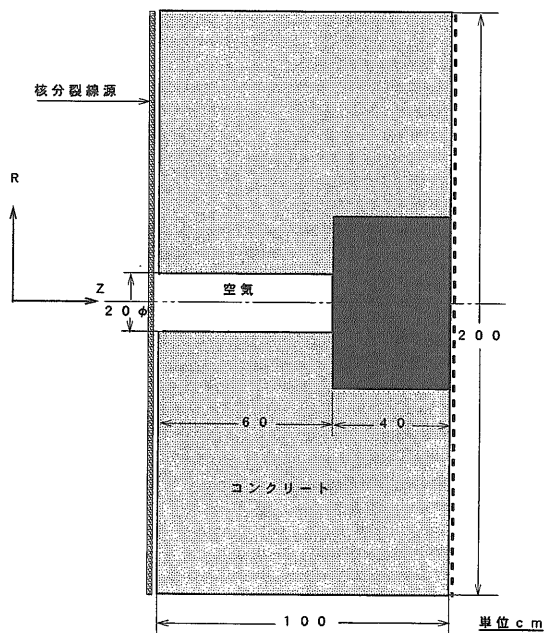


図-A.8 補償遮蔽体を配置した第1脚部のDOT計算体系

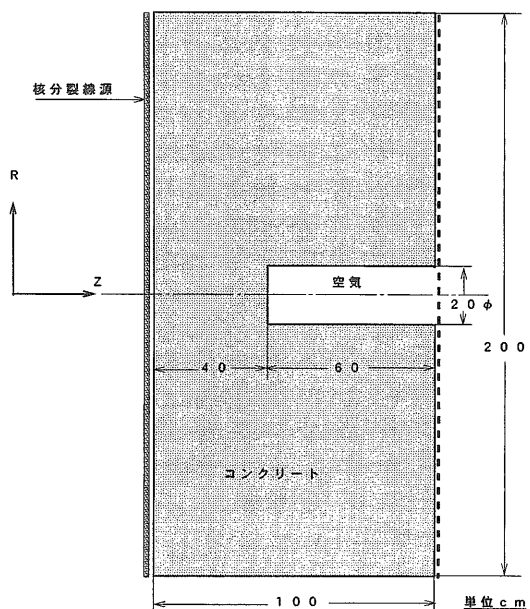


図-A.9 補償遮蔽体のない第3脚部のDOT計算体系

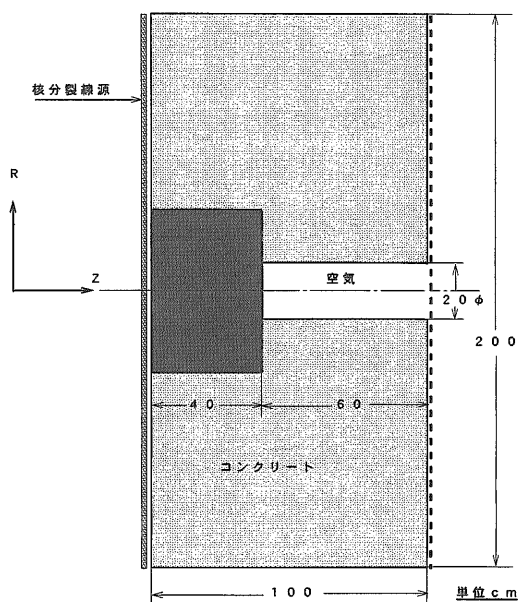


図-A.10 補償遮蔽体を配置した第3脚部のDOT計算体系

(3) MCNP4Aによる解析

図-A.2、図-A.11及び図-A.12に計算体系及び計算点を示す。図-A.2には体系全体の遮蔽体配置と遮蔽壁後部の計算点を示す。図-A.11は第2脚部の断面図である。この部分で補償遮蔽は配管直径方向へ40cm施した。計算点は配管の中心と両端部に対応する点とした。図-A.12はコンクリート壁後部から見た計算点の配置を示したものである。計算点は全部で9点で、そのうち第1脚と第3脚後部のものはそれぞれ配管の中心と中心より上下に25cmの点をとった。検出器の種類としてはポ

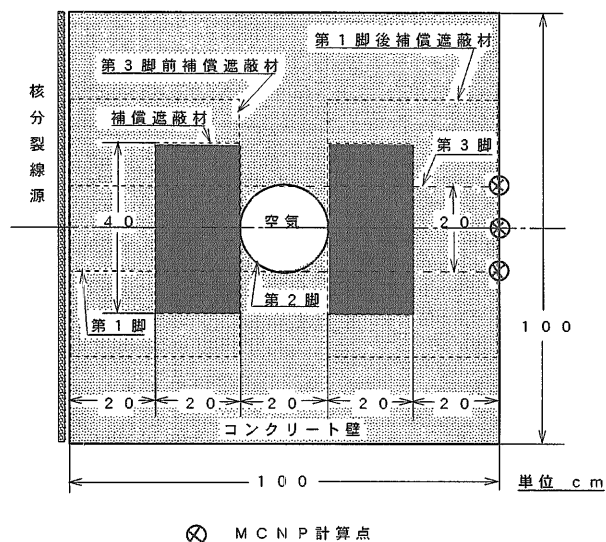


図-A.11 第2脚部補償遮蔽体の配置と寸法及びMCNP計算点

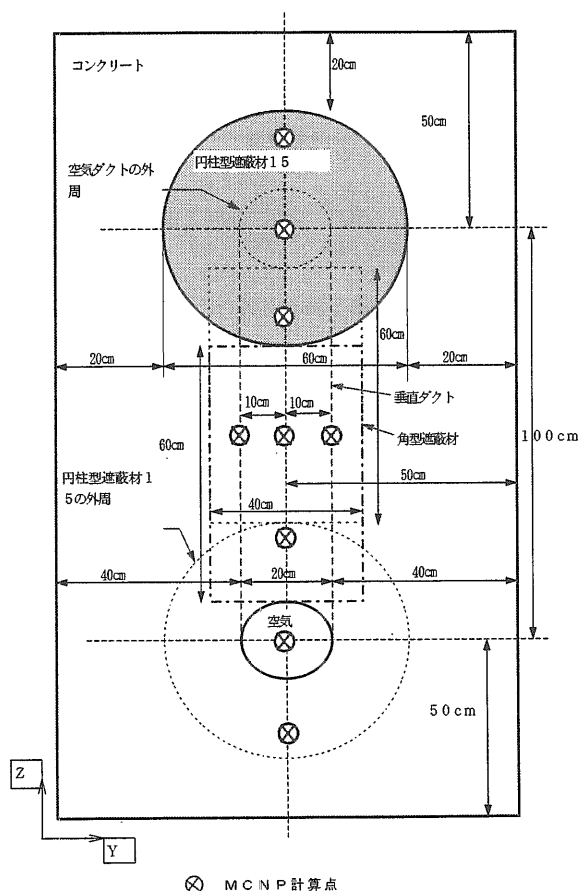


図-A.12 補償遮蔽体付き2回屈曲円筒ダクトに対するMCNP計算体系とコンクリート壁背面上の計算点

イントディテクターを選んだ。分散低減のためにウェイトウインドも使用した。核定数ライブラリーは公開

コードに添付のMCNP用ライブラリーである。

(4) 計算結果

以下に第1脚部に関するDOTの結果を示す。図-A.13に補償遮蔽体がある場合の中心軸上の線量率分布をダクトのないコンクリート壁中の減衰と比較して示す。

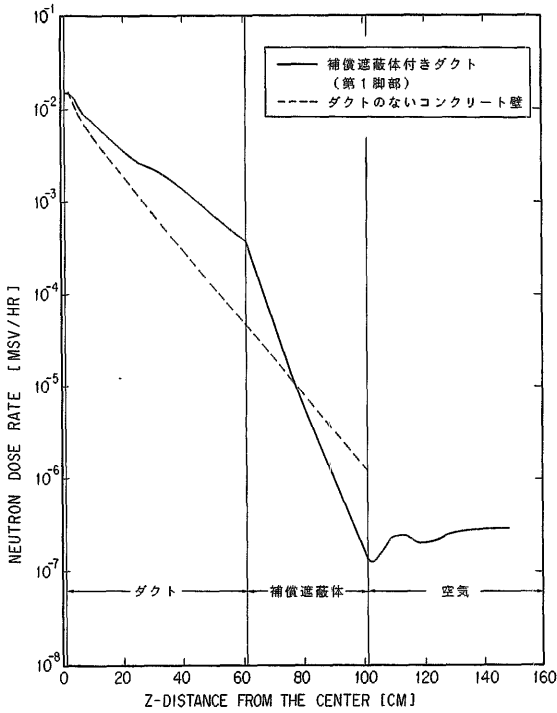


図-A.13 屈曲ダクト第1脚後部に配置した高性能遮蔽材E-01の効果

中性子線量率はダクトの終端部においてダクトのない場合より約1桁高くなっているが補償遮蔽遮蔽材の中で急激に減衰し、壁の外側では逆に1桁位低くなっている。図-A.14には中心軸付近よりダクト後部の補償遮蔽体の外側の方が線量率が高くなっていく様子が線量率の等高線により示されている。図-A.15、図-A.16にそれぞれ二次ガンマ線及び一次ガンマ線の線量率等高線を示す。二次ガンマ線の場合は中性子が線源となっているので中性子の場合と同様に中心軸付近の減衰より外側の減衰がややゆるやかに、すなわちダクト後部では外側で線量率が高くなっている。しかし、一次ガンマ線の場合は中心軸の付近の透過量が多いことが示されている。ただし、その絶対量は中性子や二次ガンマ線より小さい。一次ガンマ線の計算では第一角度分点の方向にレイ・エフェクト (Ray-effect) が見られる。しかし、その影響は小さく計算全体の信頼性の点では問題はないと考えられる。図-A.17に以上のDOTの結果並びにモンテカルロ計算の結果を遮蔽壁の後部でのR方向の分布として示す。同図に示してあるデータは中性子線量当量率に関しては欠損部のないコンクリー

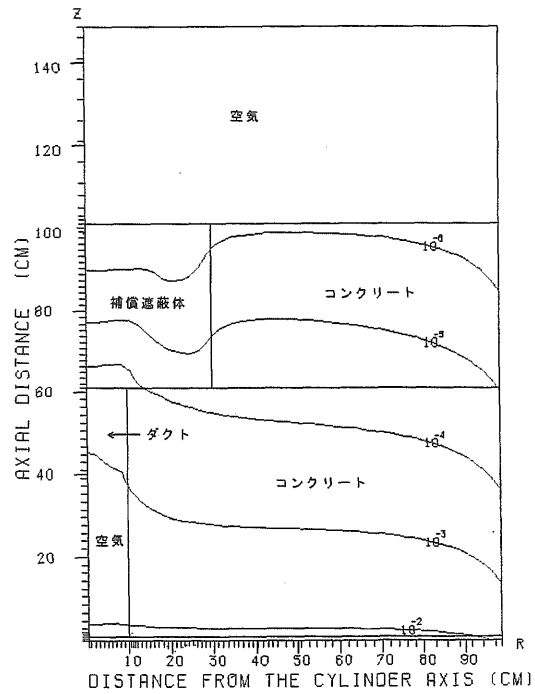


図-A.14 補償遮蔽付き屈曲ダクト第1脚部周辺の中性子線量当量率分布

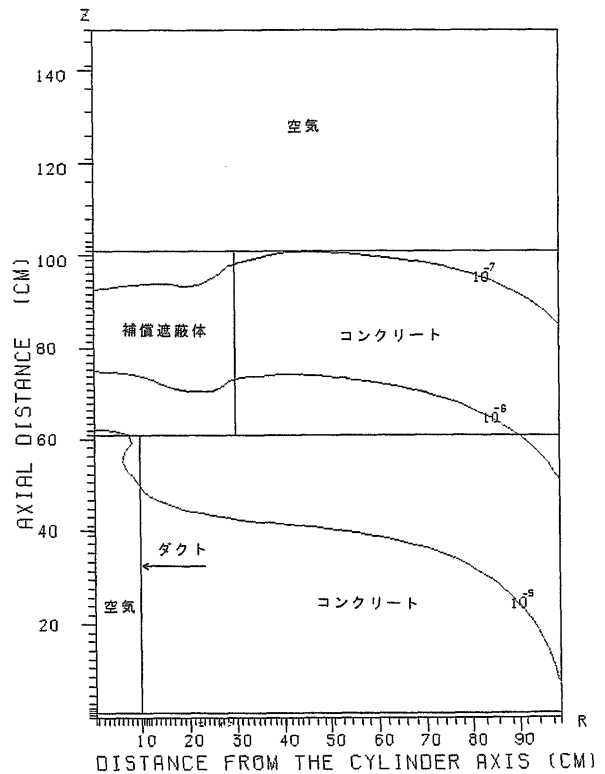


図-A.15 補償遮蔽付き屈曲ダクト第1脚部周辺の二次ガンマ線量当量率分布