

図-A.16 補償遮蔽付き屈曲ダクト第1脚部周辺の一次ガンマ線量当量率分布

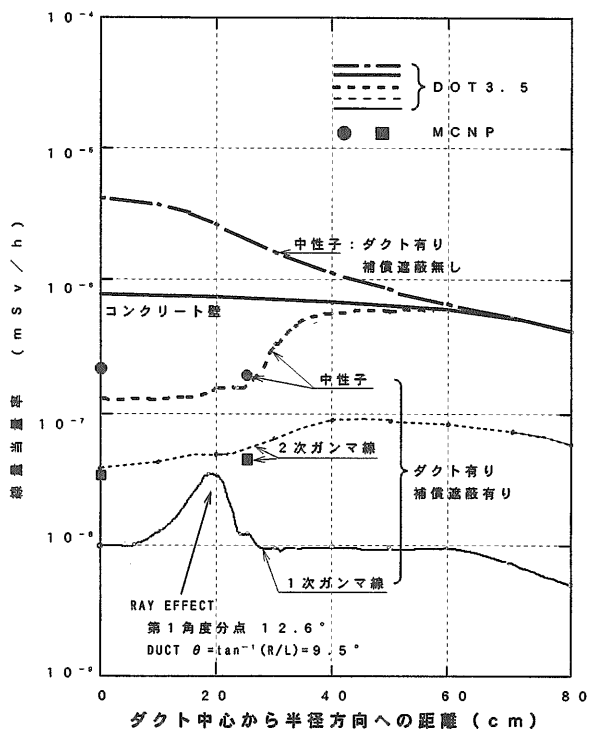


図-A.17 第1脚部遮蔽壁後部での半径方向線量当量率分布の比較

ト壁の場合、ダクトのある壁で補償遮蔽を施さない場合、及びダクトのある壁で補償遮蔽を施した場合である。また、二次ガンマ線と一次ガンマ線の線量当量率に関しては補償遮蔽を施した場合について示してある。補償遮蔽を施した場合について中性子と二次ガンマ線線量当量率に関してはモンテカルロ計算の結果を示した。第1脚部のダクトについては補償遮蔽が無い場合遮蔽壁後部の線量当量率はダクトの無いコンクリート壁の場合と比較して最大5倍程度増加し、また半径方向にはダクト軸から50~60cmまで影響がある。しかし、第1脚ダクトに補償遮蔽を施すとダクトがない壁だけの場合の線量当量率の1/6程度になる。二次ガンマ線の線量当量率はダクトの無いところでは中性子の約1/7、ダクトの後部では約1/3と少ない。一次ガンマ線の場合は今回の補償遮蔽によってはダクトの効果を完全には打ち消すことはできなかったが、その絶対量は二次ガンマ線よりも少ない。すなわち、一次、二次ガンマ線を合わせてもガンマ線の寄与は中性子に比べて少なく、問題とはならない程度である。以上から、第1脚部に対しては補償遮蔽効果は十分あることが明らかとなった。なお、モンテカルロ計算とDOTの結果はダクト軸上で中性子の結果に多少の差が見られるが、その他の場合は良く一致している。一方、ダクトの第3脚軸方向の遮蔽条件は第1脚軸方向より厳しくなる。まず、ダクトを通して第1脚目後部の遮蔽体へ入射する中性子は局所的であり、遮蔽体の中での広がりによる減衰効果が期待できるが、第3脚部前部の遮蔽体中ではこのような減衰効果はない。また、第1脚と第3脚ダクト中での中性子の減衰はダクトに入射する中性子角度束の前方性が第3脚の方が高いと考えられるので、第3脚ダクト中の減衰の方が少ないといえる。さらに、第3脚部では第1脚部、第2脚部を通してのストリーミング放射線も加わってくる。従って、第3脚部後部の線量当量率は第1脚部後部より大きくなる。第3脚ダクトの場合の結果をまとめたものを図-A.18に示すが、以上のような理由によりダクトがあるとダクトが無い場合に比べ20倍程度線量当量率が高くなり、半径方向への影響も大きい。従って、第3脚ダクトの前に40cmの補償遮蔽を付けると線量当量率を約1/8にするが、それでも壁のみの場合に比べ線量当量率は、ダクトの切り口面積程度の領域においてではあるが、約2.5倍大きな結果となった。しかし、図-A.19の中性子線量当量率等高線より明らかなように第3脚の場合、補償遮蔽体の外側を回り込み配管に入射する成分があることがわかるので、配管の側壁の周囲に補償遮蔽を施すことにより、このような中性子を遮蔽し、さらに線量を下げることが可能であるといえる。図-A.18には中性子に関するモンテカルロ計算結果も示してある。モンテカルロ計算には第1脚から第3脚の配管に沿ったストリーミング成分が含まれているが、その

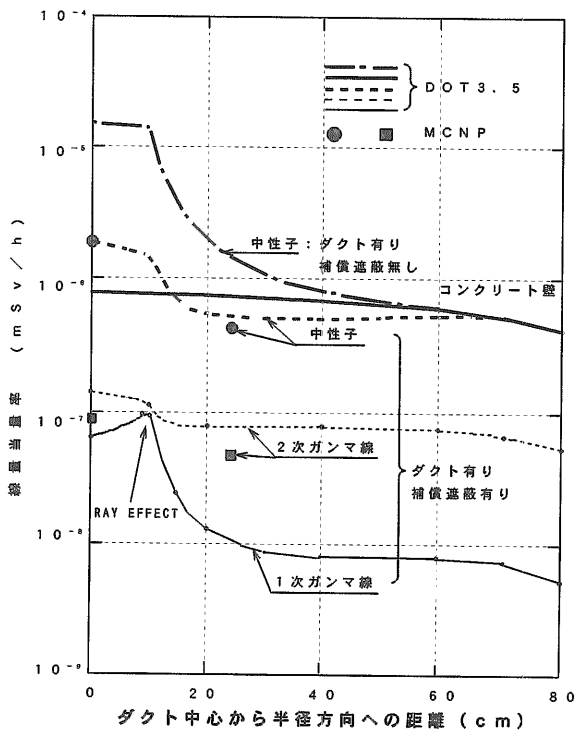


図-A.18 第3脚部遮蔽壁後部での半径方向線量当量率分布の比較

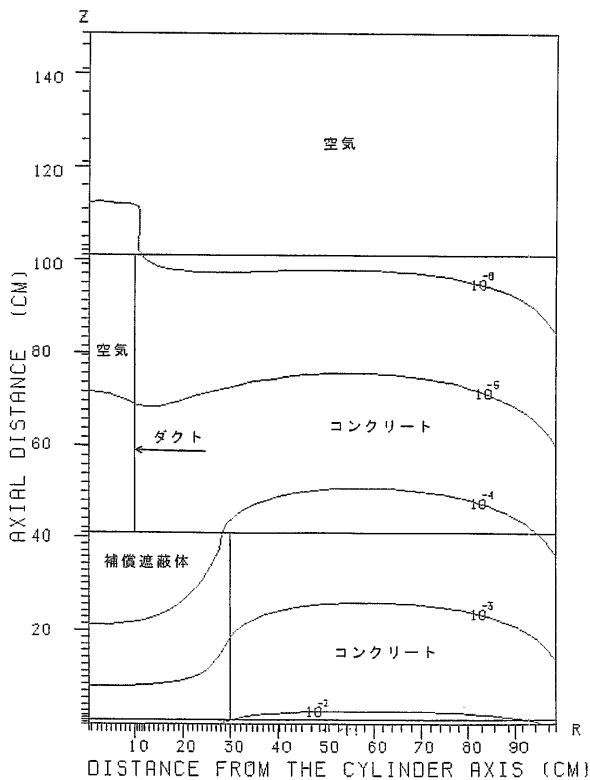


図-A.19 補償遮蔽付き屈曲ダクト第3脚部周辺の中性子線量当量率分布

成分が含まれないDOTの結果とほぼ一致している。従って、ストリーミング成分は極少ないといえる。図-A.20には遮蔽壁背面に沿ったモンテカルロ計算の結果を示す。計算点は図に①から⑦で示した壁直後の点で

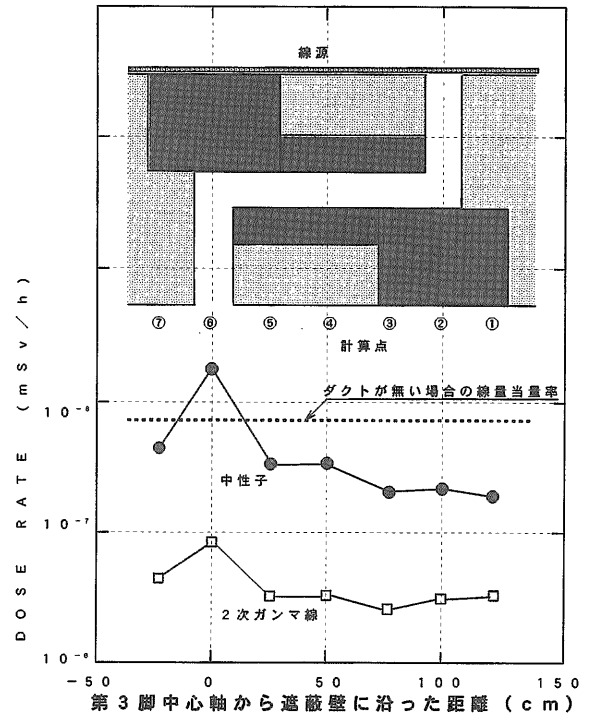


図-A.20 補償遮蔽付き屈曲円筒ダクト遮蔽壁背面での線量当量率分布

ある。第3脚部の出口を除くとダクトによる遮蔽欠損効果は補償遮蔽により打ち消されていることがわかる。またこれらの点に関しては補償遮蔽をもう少し減らすことが可能である。第3脚目については補償遮蔽が少し足りない結果となっているが、第1脚目の補償遮蔽は少し削れるので、第1脚を例えば数cm長くし、その分第3脚を短くすることにより前部の補償遮蔽体を厚くする方法も考えられる。

### A.2 オフセット状円環ギャップ

ここで扱う遮蔽欠損は段付きプラグ等の周囲に存在するようなオフセット状円環ギャップである。ギャップ幅は3cm、内側と外側の円環の内径はそれぞれ25cm及び38cm、長さはともに50cmとした。図-A.21に円環ギャップの体系を示す。これに対して補償遮蔽体を配置した体系を図-A.22に示す。本体系は二次元円筒座標で正確に表示できるのでDOTによる計算のみを実施した。計算条件等は屈曲円筒ダクトの場合と同じである。結果を図-A.23に示す。中性子の場合、ギャップがないコンクリート壁の場合に比べ中心部で線量当量率が1/10近くまで下がっている。半径が38cmから41cm

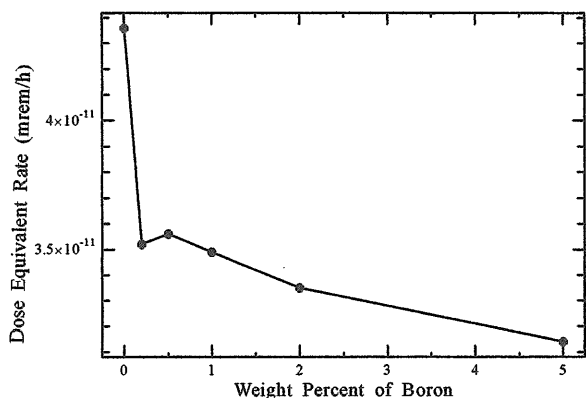


図-A.21 オフセット状円環ギャップ体系

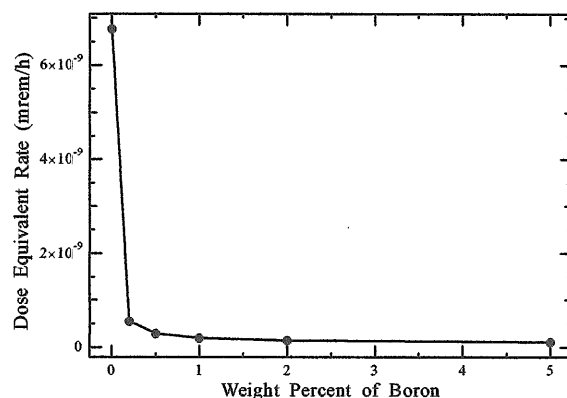


図-A.24 補償遮蔽付きフセット状円環ギャップ周辺の中性子線量当量率分布

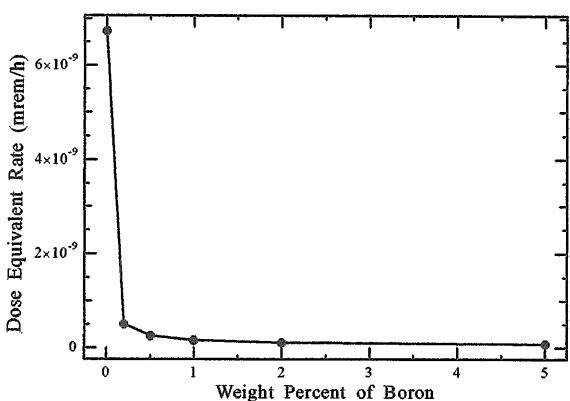


図-A.22 オフセット状円環ギャップ補償遮蔽体配置と寸法

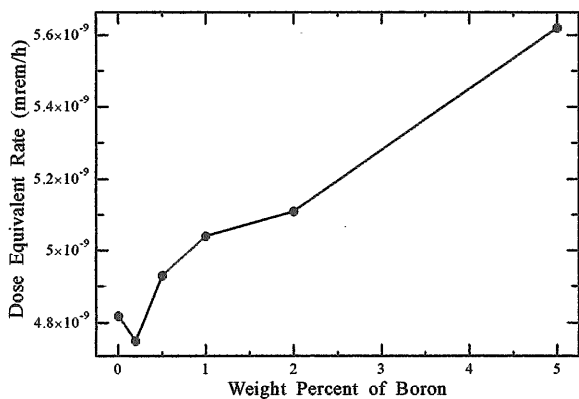


図-A.23 遮蔽壁後部での半径方向線量当量率分布の比較

までのところに外側のギャップが存在するが、そこで線量当量率分布に小さなピークがあるがその外側に向かってほぼ平坦な分布をしている。一方、中性子が物質と反応することにより発生する二次ガンマ線の線量当量率分布は中性子と同様な分布をしている。一次ガンマ線も二次ガンマ線とほぼ同様な分布で絶対値も近い。図-A.24、図-A.25、及び図-A.26に中性子、二次ガン

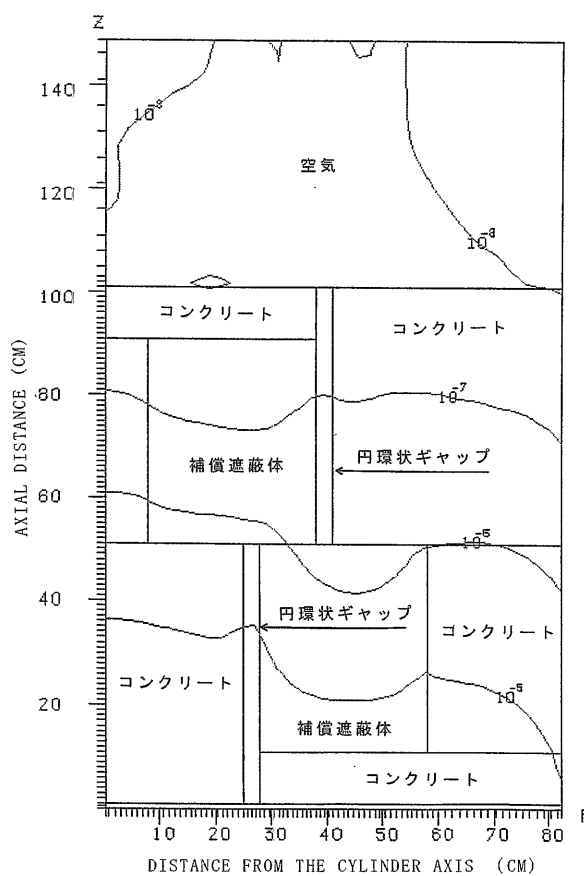


図-A.25 補償遮蔽付きフセット状円環ギャップ周辺の二次ガンマ線量当量率分布

マ線、及び一次ガンマ線の線量当量率の等高線をそれぞれ示す。中性子と二次ガンマ線の場合、二段目のギャップの前にある補償遮蔽材の中での線量率が周囲より減衰している。このため、二段目のギャップに入射する放射線量が少なく、ギャップに沿ったストリーミングと相殺していることがわかる。一次ガンマ線の場合はこのような効果は小さく従って二段目のギャップ

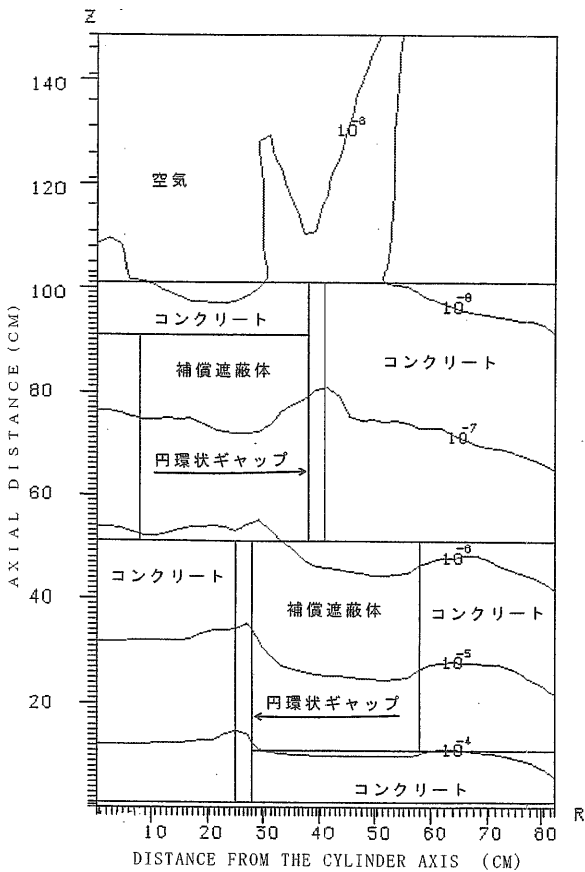


図-A.26 補償遮蔽付きフセット状円環ギャップ周辺の一次ガンマ線量当量率分布

からのストリーミングがはっきりと見える。しかし、絶対量は少ない。以上のように円環ギャップの場合は十分過ぎる補償遮蔽が施されていることが確認できた。最適な補償遮蔽については今後検討する必要がある。

付録B 硼素含有割合の遮蔽性能への影響

2章の「元素の選択と元素比率の決定」で述べたように本研究においては低エネルギーから高エネルギーの中性子に対し高含水素物質を、高エネルギー中性子及びガンマ線に対する重い物質として鉛化合物、低エネルギー吸収材として天然硼素化合物を選んだ。そして、これらの物質の混合割合は材料の密度を2.2とすること及び硼素の含有量を5重量%とすることから決定した。密度を2.2とすると鉛の割合はほぼ決定される。しかし、硼素の5重量%という量が適切な量かどうかは明らかではない。そこで、輸送計算コードANISNを用いて硼素の含有量の遮蔽性能に及ぼす影響を計算した。体系は一次元で厚さ2mの遮蔽体とし、遮蔽体の前面に核分裂面線源を置いた。硼素の重量%は0.0、0.2、0.5、1.0、2.0、5.0%と変化させた。遮蔽材の密度は2.2と一定値である。遮蔽材の元素密度は表-B.1に示す通

表-B・1 硼素濃度を変化させた材料の元素密度 (/cm<sup>3</sup>)

元素	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
H	$5.04 \times 10^{22}$	$5.04 \times 10^{22}$	$5.02 \times 10^{22}$	$5.00 \times 10^{22}$	$4.95 \times 10^{22}$	$4.80 \times 10^{22}$
P b	$3.42 \times 10^{21}$	$3.42 \times 10^{21}$	$3.40 \times 10^{21}$	$3.38 \times 10^{21}$	$3.35 \times 10^{21}$	$3.25 \times 10^{21}$
C	$1.68 \times 10^{22}$	$1.68 \times 10^{22}$	$1.67 \times 10^{22}$	$1.66 \times 10^{22}$	$1.65 \times 10^{22}$	$1.60 \times 10^{22}$
O	$2.27 \times 10^{22}$	$2.27 \times 10^{22}$	$2.26 \times 10^{22}$	$2.25 \times 10^{22}$	$2.23 \times 10^{22}$	$2.16 \times 10^{22}$
B	0.00	$2.45 \times 10^{20}$	$6.12 \times 10^{20}$	$1.22 \times 10^{21}$	$2.46 \times 10^{21}$	$6.13 \times 10^{21}$
Bの重量%	0.0	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0

りである。それぞれの遮蔽材をNo.1からNo.6で表す。当然のことではあるが、硼素の濃度が増すとともにその他の元素の濃度は小さくなる。計算における角度分点等のパラメータの取り方は本文の5章に示したものと同じである。なお、本計算においては線量はmrem/h単位で表されている。これは旧単位であり、使用したANISNに組み込まれている線量への換算係数による。しかし、硼素濃度の最適値を調べる上では特に支障はないのでこのまま用いた。図-B.1に中性子の線量率の遮蔽体中での減衰曲線を示す。硼素の含まれない材料No.1の場合が他の場合に比べて多少高い線量当量率を示すが、硼素が含まれている場合はいずれもほぼ同じ線量当量率を示す。すなわち、硼素が全くないと低エネルギー中性子が増加し、そのため線量当量率が増す。しかし、硼素が0.2重量%以上では硼素量に変化してもその効果はあまり変化しない。図-B.2に二次ガンマ線の線量率の遮蔽体中での減衰曲線を示す。硼素量の変化に伴い線量当量率の明らかな変化が見られる。特に、硼素の重量%が0と0.2の間で大きな変化をしている。図-B.3に一次ガンマ線の線量率の遮蔽体中での減衰曲線を示す。この場合は、図からは変化がほとんど見られない。すなわち、線量当量率は比重によって決められている。図-B.4に中性子と二次ガンマ線の線量率の和を示す。これは線源が中性子のみの場合の線量当量率分布に対応する。図-B.5に中性子と一次、二次ガンマ線の線量率の和を示す。これは線源が核分裂線源の場合の線量当量率分布に対応する。これらについての詳細を以下に示す。図-B.6から図-B.10に遮蔽体前面から1cmの位置における中性子、二次ガンマ線、一次ガンマ線、中性子と二次ガンマ線の和、及び中性子と一次、二次ガンマ線の和に対応する線量当量率を硼素の重量%の関数としてそれぞれ示す。図-B.11から図-B.30には遮蔽体前面から50、100、150、200cmの各位置における同様の図を示す。また表-B.1に以上の結果を数値で示す。これらの図表は今後硼素の量の最適値を決定する上で有用であると考えられるので示した。以上のデータから結論されるのは硼素含有量の最適値は線源条件と遮蔽体の厚さで異なるということである。例えば、核分裂線源の場合遮蔽体が薄い中性子が支配的で、従って図-B.6に示されるように最適値は0.2から1%の間の任意の値となる。厚さが

表-B 2 硼素濃度を变化させた遮蔽材料中における中性子、二次ガンマ線、及び一次ガンマ線線量当量率計算値 (mrem/h)

	Distance from the Source (cm)				
	1	50	100	150	200
Weight Percent of Boron = 0.0					
Neutron	$2.53 \times 10^0$	$5.05 \times 10^{-05}$	$1.88 \times 10^{-08}$	$4.36 \times 10^{-11}$	$1.10 \times 10^{-13}$
Secondary Gamma Rays	$9.25 \times 10^{-03}$	$9.00 \times 10^{-05}$	$6.88 \times 10^{-07}$	$6.73 \times 10^{-09}$	$7.42 \times 10^{-11}$
Primary Gamma Rays	$4.10 \times 10^{-02}$	$2.62 \times 10^{-05}$	$3.12 \times 10^{-07}$	$4.82 \times 10^{-09}$	$7.56 \times 10^{-11}$
Weight Percent of Boron = 0.2					
Neutron	$2.43 \times 10^0$	$1.74 \times 10^{-05}$	$1.35 \times 10^{-08}$	$3.52 \times 10^{-11}$	$9.86 \times 10^{-14}$
Secondary Gamma Rays	$3.50 \times 10^{-03}$	$6.52 \times 10^{-06}$	$4.97 \times 10^{-08}$	$5.15 \times 10^{-10}$	$6.12 \times 10^{-12}$
Primary Gamma Rays	$4.10 \times 10^{-02}$	$2.60 \times 10^{-05}$	$3.09 \times 10^{-07}$	$4.75 \times 10^{-09}$	$7.38 \times 10^{-11}$
Weight Percent of Boron = 0.5					
Neutron	$2.42 \times 10^0$	$1.74 \times 10^{-05}$	$1.36 \times 10^{-08}$	$3.56 \times 10^{-11}$	$1.00 \times 10^{-13}$
Secondary Gamma Rays	$3.18 \times 10^{-03}$	$3.21 \times 10^{-06}$	$2.34 \times 10^{-08}$	$2.59 \times 10^{-10}$	$3.33 \times 10^{-12}$
Primary Gamma Rays	$4.10 \times 10^{-02}$	$2.64 \times 10^{-05}$	$3.17 \times 10^{-07}$	$4.93 \times 10^{-09}$	$7.78 \times 10^{-11}$
Weight Percent of Boron = 1.0					
Neutron	$2.42 \times 10^0$	$1.73 \times 10^{-05}$	$1.35 \times 10^{-08}$	$3.49 \times 10^{-11}$	$9.76 \times 10^{-14}$
Secondary Gamma Rays	$3.10 \times 10^{-03}$	$2.04 \times 10^{-06}$	$1.39 \times 10^{-08}$	$1.65 \times 10^{-10}$	$2.28 \times 10^{-12}$
Primary Gamma Rays	$4.10 \times 10^{-02}$	$2.66 \times 10^{-05}$	$3.21 \times 10^{-07}$	$5.04 \times 10^{-09}$	$7.99 \times 10^{-11}$
Weight Percent of Boron = 2.0					
Neutron	$2.42 \times 10^0$	$1.72 \times 10^{-05}$	$1.32 \times 10^{-08}$	$3.35 \times 10^{-11}$	$9.18 \times 10^{-14}$
Secondary Gamma Rays	$3.10 \times 10^{-03}$	$1.40 \times 10^{-06}$	$8.64 \times 10^{-09}$	$1.10 \times 10^{-10}$	$1.66 \times 10^{-12}$
Primary Gamma Rays	$4.10 \times 10^{-02}$	$2.67 \times 10^{-05}$	$3.24 \times 10^{-07}$	$5.11 \times 10^{-09}$	$8.14 \times 10^{-11}$
Weight Percent of Boron = 5.0					
Neutron	$2.43 \times 10^0$	$1.76 \times 10^{-05}$	$1.29 \times 10^{-08}$	$3.14 \times 10^{-11}$	$8.21 \times 10^{-14}$
Secondary Gamma Rays	$3.21 \times 10^{-03}$	$1.06 \times 10^{-06}$	$5.72 \times 10^{-09}$	$8.39 \times 10^{-11}$	$1.41 \times 10^{-12}$
Primary Gamma Rays	$4.10 \times 10^{-02}$	$2.76 \times 10^{-05}$	$3.44 \times 10^{-07}$	$5.62 \times 10^{-09}$	$9.25 \times 10^{-11}$

50cm以上になると一次ガンマ線が最もきいてくる。一次ガンマ線のみならば最適値は0.2%である。しかし、遮蔽体の厚さが50cm程度ならば中性子による線量も無視できないので結局全体としては図-B.15のように0.2%以上で線量率の変化はほとんどないという結果となる。遮蔽体の厚さが100cm以上となると一次ガンマ線が支配的となる。従って最適値は0.2%となる。ただし、硼素含有量が変化しても密度が一定に保たれているので一次ガンマ線の変化自体あまり大きくはない。以上から、核分裂線源の場合、遮蔽体が150cm以下であれば硼素含有量が0.2から5%の間で変化しても線量当量率の変化は小さい。すなわち、硼素は0.2重量%程度含まれれば十分である。線源が中性子のみならば0.5重量%程度必要であろう。

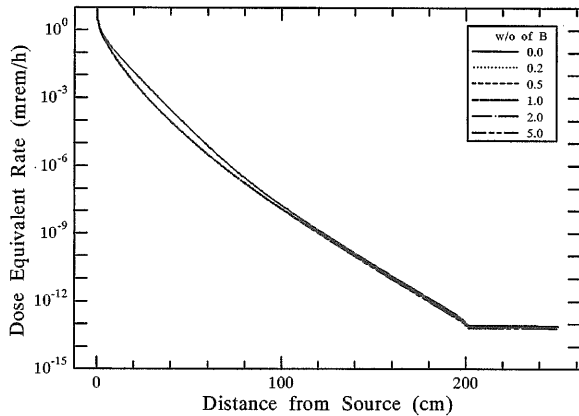


図-B.1 中性子線量当量率分布の比較

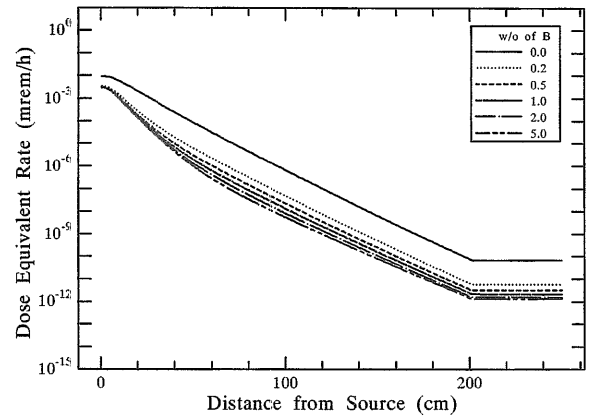


図-B.2 二次ガンマ線線量当量率分布の比較

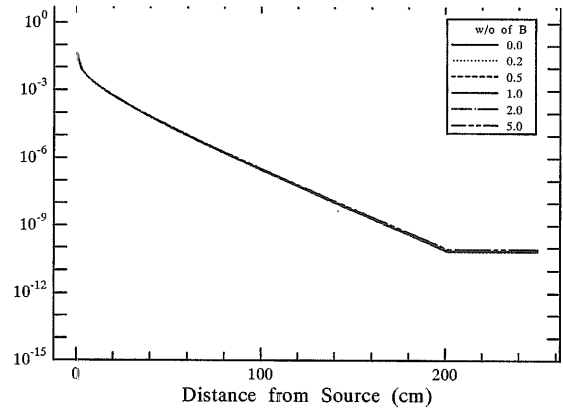


図-B.3 一次ガンマ線線量当量率分布の比較

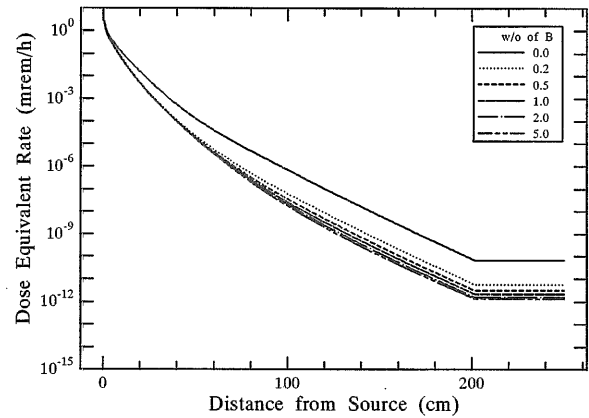


図-B.4 中性子と二次ガンマ線合計の線量当量率分布の比較

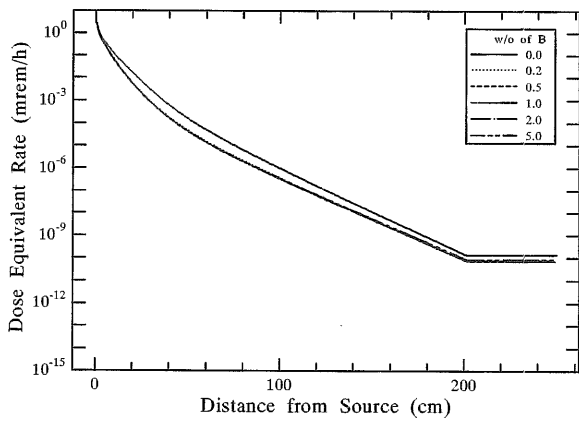


図-B.5 中性子と一次、二次ガンマ線合計の線量当量率分布の比較

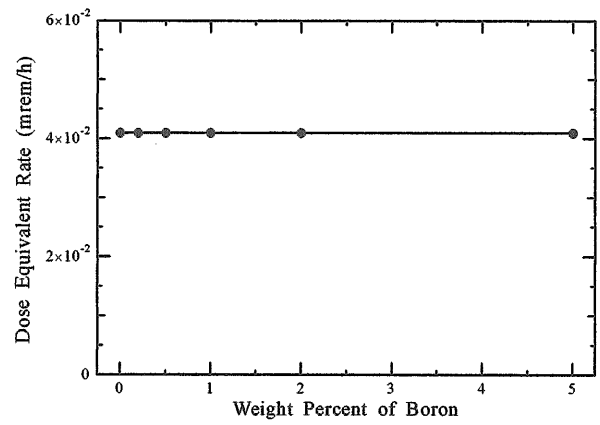


図-B.8 厚さ1cmでの一次ガンマ線線量当量率の硼素濃度依存性

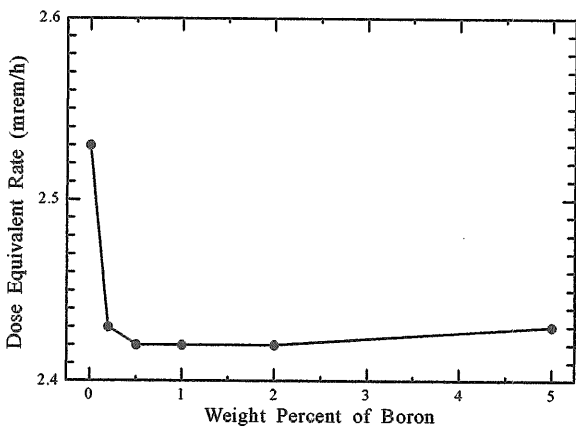


図-B.6 厚さ1cmでの中性子線量当量率の硼素濃度依存性

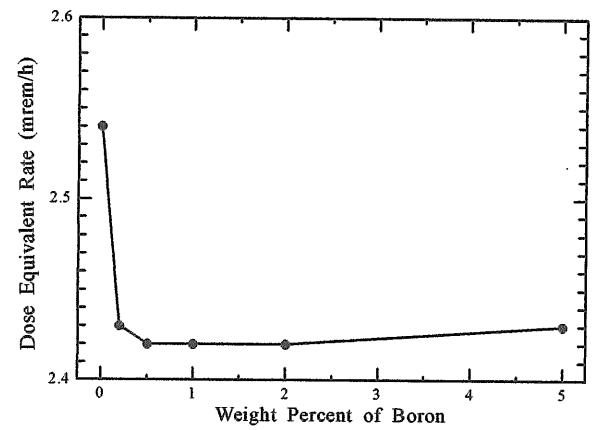


図-B.9 厚さ1cmでの中性子と二次ガンマ線合計線量当量率の硼素濃度依存性

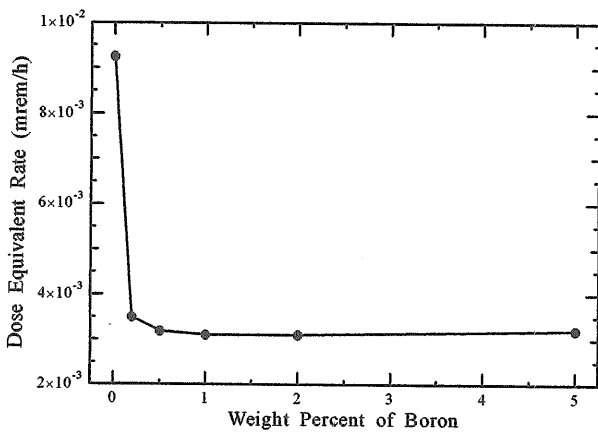


図-B.7 厚さ1cmでの二次ガンマ線線量当量率の硼素濃度依存性

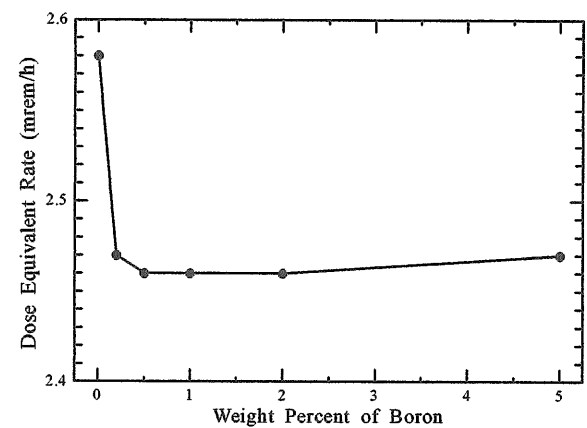


図-B.10 厚さ1cmでの中性子と一次、二次ガンマ線合計線量当量率の硼素濃度依存性

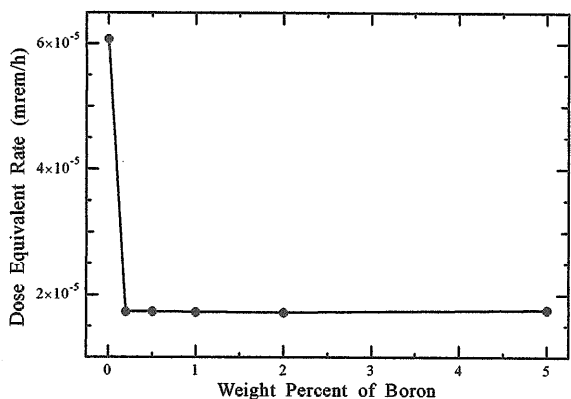


図-B.11 厚さ50cmでの中性子線量当量率の硼素濃度依存性

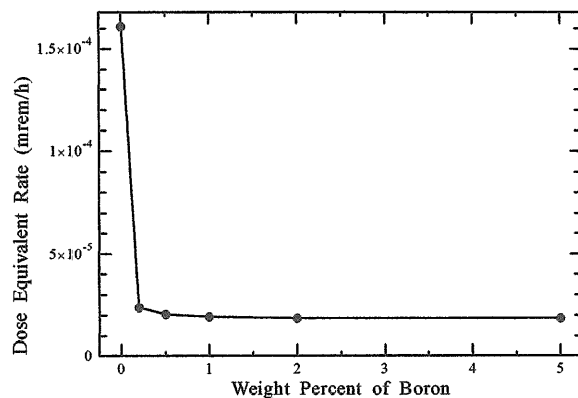


図-B.14 厚さ50cmでの中性子と二次ガンマ線合計線量当量率の硼素濃度依存性

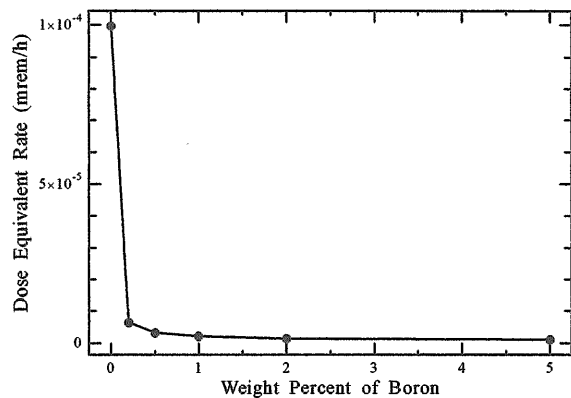


図-B.12 厚さ50cmでの二次ガンマ線線量当量率の硼素濃度依存性

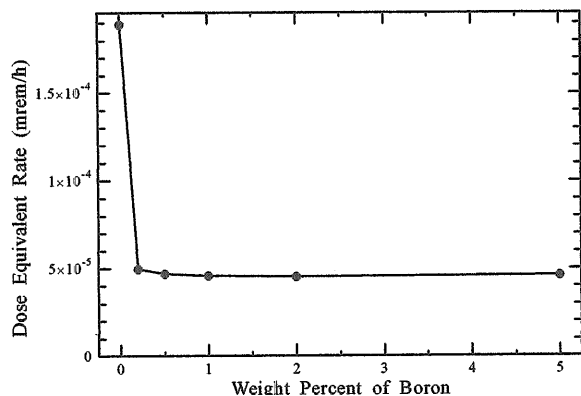


図-B.15 厚さ50cmでの中性子と一次、二次ガンマ線合計線量当量率の硼素濃度依存性

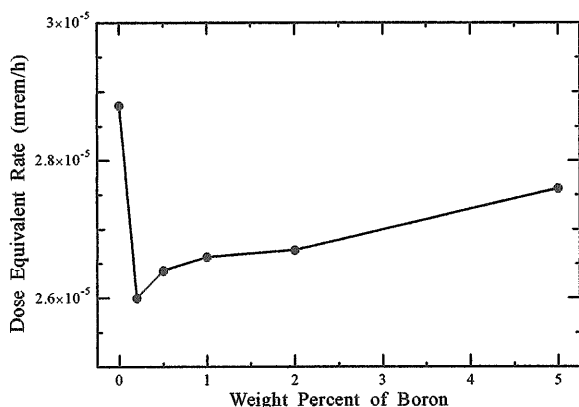


図-B.13 厚さ50cmでの一次ガンマ線線量当量率の硼素濃度依存性

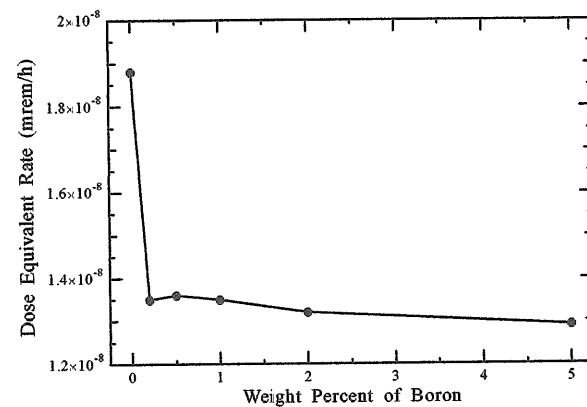


図-B.16 厚さ100cmでの中性子線量当量率の硼素濃度依存性

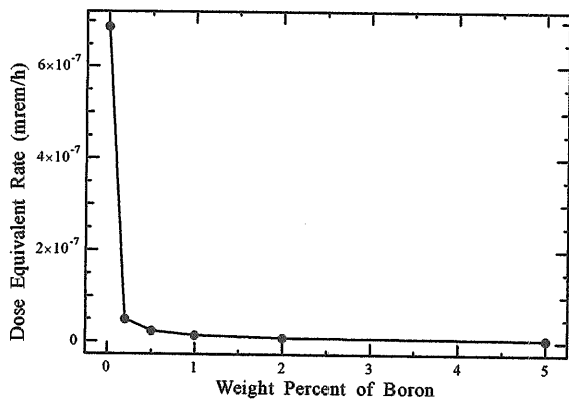


図-B.17 厚さ100cmでの二次ガンマ線線量当量率の硼素濃度依存性

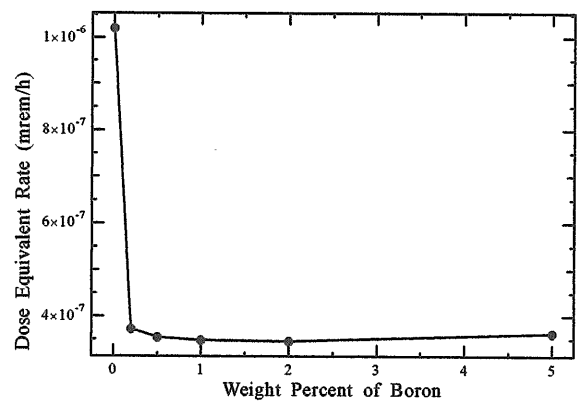


図-B.20 厚さ100cmでの中性子と一次、二次ガンマ線合計線量当量率の硼素濃度依存性

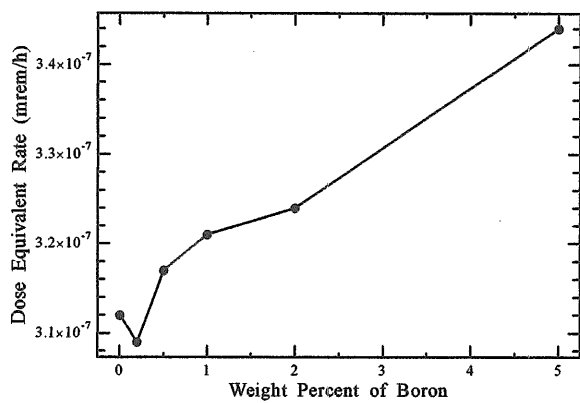


図-B.18 厚さ100cmでの一次ガンマ線線量当量率の硼素濃度依存性

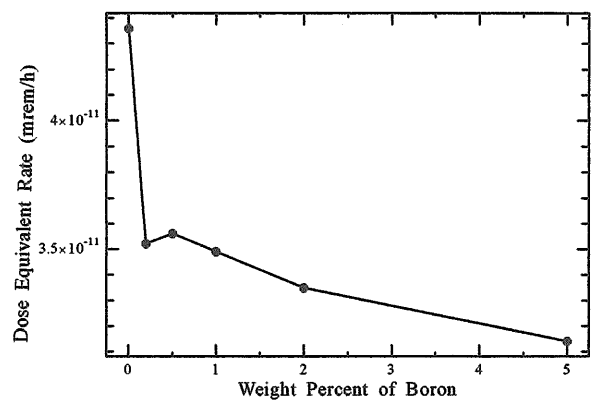


図-B.21 厚さ150cmでの中性子線量当量率の硼素濃度依存性

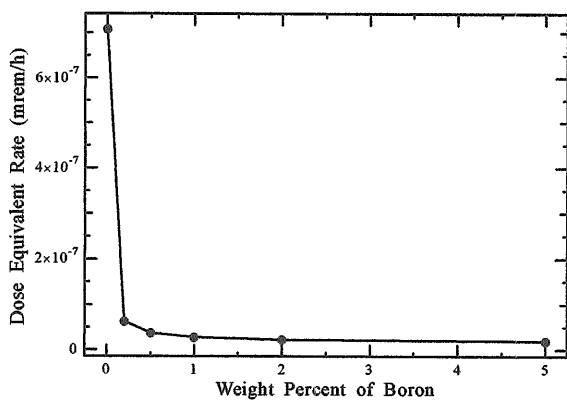


図-B.19 厚さ100cmでの中性子と二次ガンマ線合計線量当量率の硼素濃度依存性

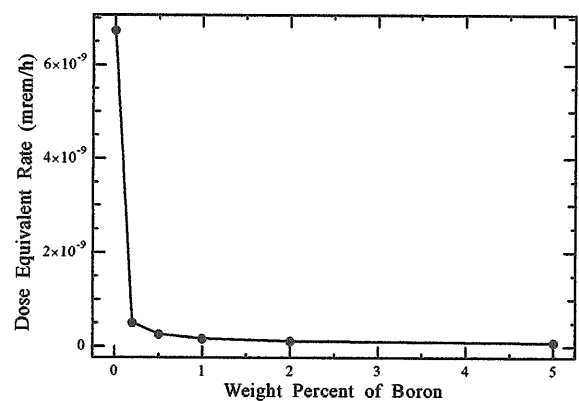


図-B.22 厚さ150cmでの二次ガンマ線線量当量率の硼素濃度依存性



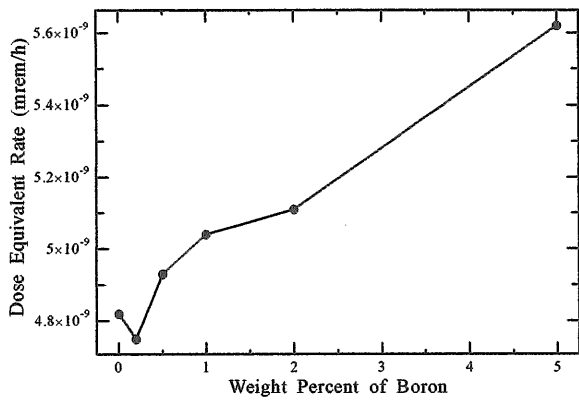


図-B.23 厚さ150cmでの一次ガンマ線線量当量率の硼素濃度依存性

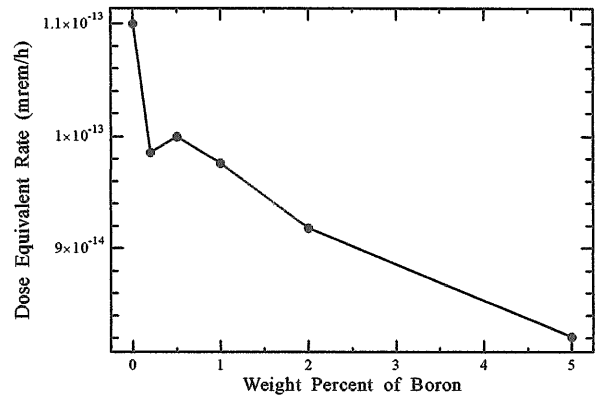


図-B.26 厚さ200cmでの中性子線量当量率の硼素濃度依存性

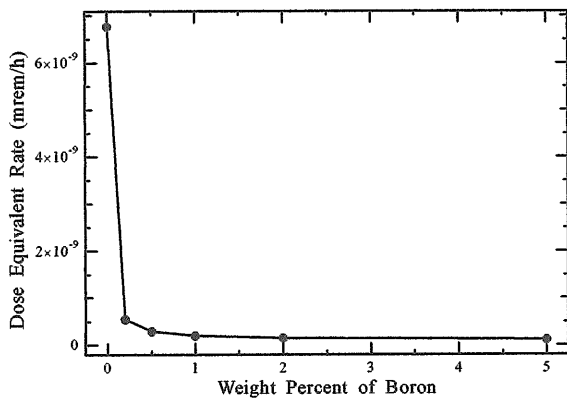


図-B.24 厚さ150cmでの中性子と二次ガンマ線合計線量当量率の硼素濃度依存性

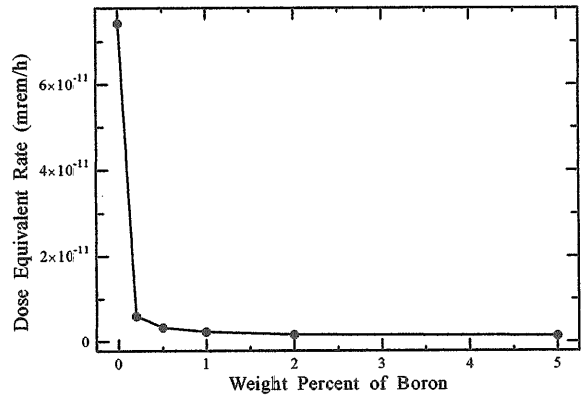


図-B.27 厚さ200cmでの二次ガンマ線線量当量率の硼素濃度依存性

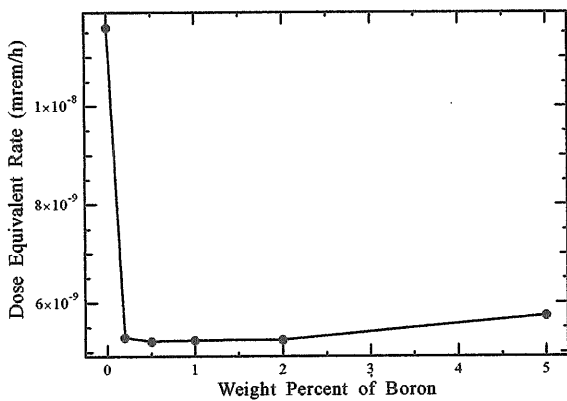


図-B.25 厚さ150cmでの中性子と一次、二次ガンマ線合計線量当量率の硼素濃度依存性

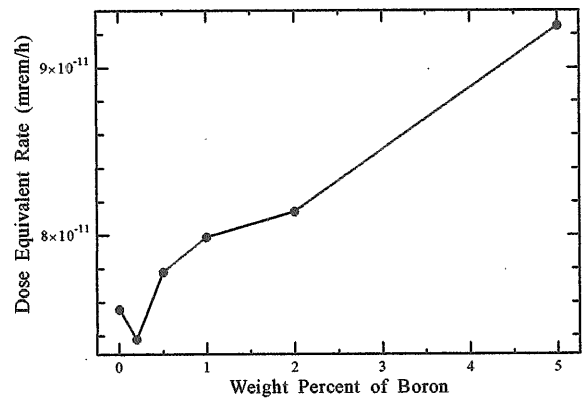


図-B.28 厚さ200cmでの一次ガンマ線線量当量率の硼素濃度依存性

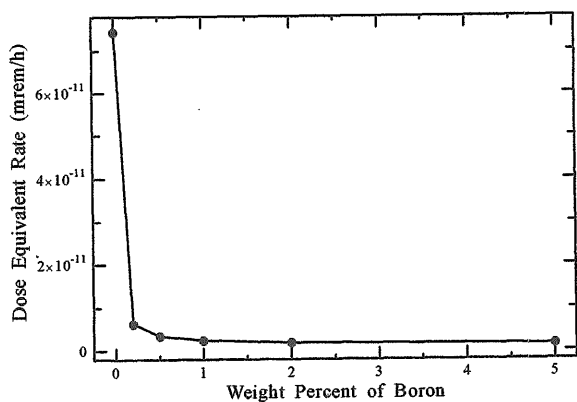


図-B.29 厚さ200cmでの中性子と二次ガンマ線合計線量当量率の硼素濃度依存性

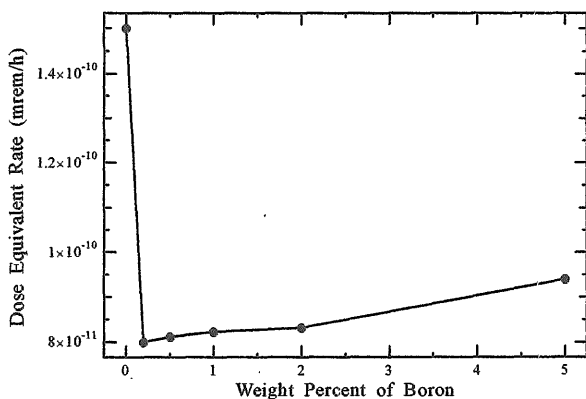


図-B.30 厚さ200cmでの中性子と一次、二次ガンマ線合計線量当量率の硼素濃度依存性

#### 参考文献

1. 三浦 俊正、頼経 勉、平尾 好弘、「複雑形状部遮蔽設計法における放射線ストリーミング簡易計算法」JEARI-Tech 97-052 (1997).
2. Rhodes W. A. and Mynatt F. R., "The DOT-III Two-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code," ORNL-TM-4280, (1973).
3. Briesmeister J. F., Ed., "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A," LA-12625, (1993).