

中性子の安全性

柴田 徳思

Tokushi Shibata

J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

Tokushi.shibata@kek.jp

1. はじめに

中性子イメージングの利用に際して、放射線の発生の観点から安全性について検討する。中性子の遮へい、中性子による放射化、インターロックについて示す。また、発生装置を移動使用するときの法令上の規制についても示した。

2. 中性子の安全性

2.1 中性子に対する遮へい

中性子の実効線量透過率について、水、コンクリート、鉄について参考文献¹⁾の値を図1から図5に示した。

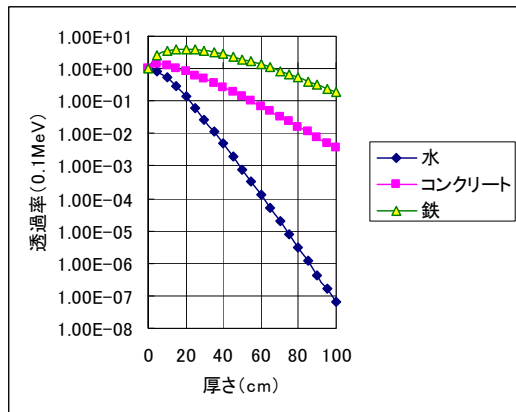


図1 中性子（0.1MeV）の実効線量透過率

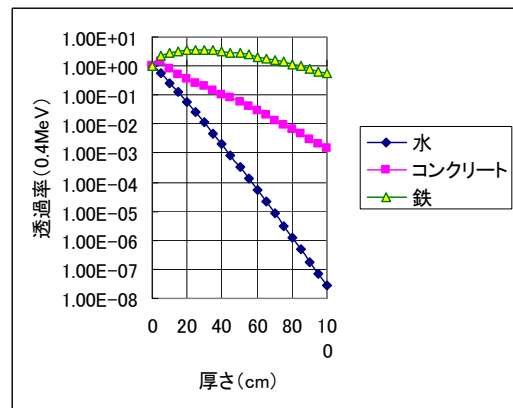


図2 中性子（0.4MeV）の実効線量透過率

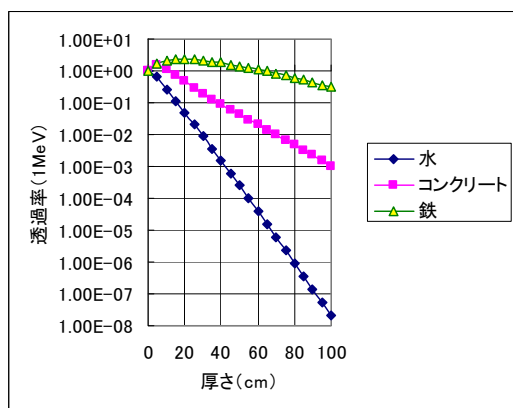


図3 中性子（1MeV）の実効線量透過率

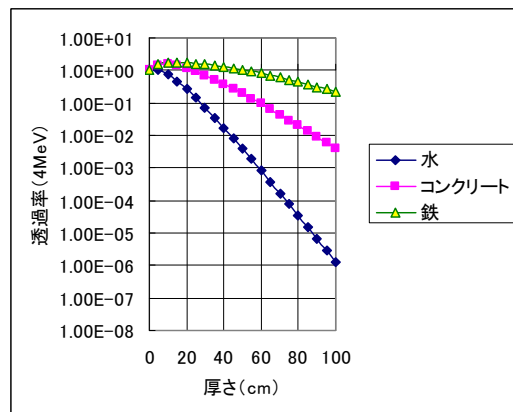


図4 中性子（4MeV）の実効線量透過率

橋梁や橋脚の構造について中性子イメージングで明瞭な図を得るにはコンクリートと鉄の透過率の違いの大きなエネルギーが望ましい。これらの図は、中性子の透過率ではなく、実効線量の透過率であるので、中性子の透過率で検討すべきであるが、これらの図からコンクリートと鉄の透過率の違いの大きなエネルギーは0.4MeVあたりであると思われる。また、遮へい能力としては中性子のエネ

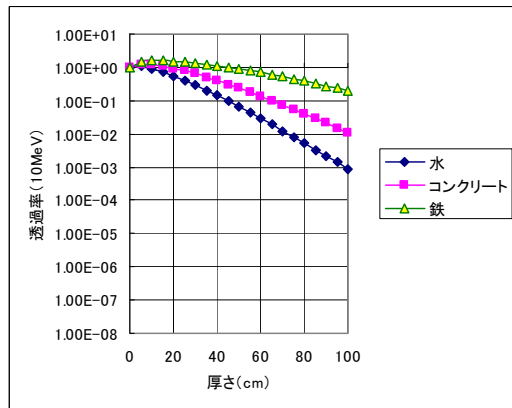


図5 中性子 (10MeV) の実効線量透過率

ルギーが低いほど効率よく遮へいされることが分かる。このようなことから、測定系のシステムとして、1) ターゲットを水で囲む、2) その外側をコンクリートで囲む体系がよさそうである。測定系を移動使用するためには大型のトレーラに乗せる大きさや重さとする必要がある。また、橋梁の上から床部を透視するために、低床タイプのトレーラに乗せるのがよい。以上の条件から測定系の概略を図6に示した。

加速器を垂直にして、ターゲットの周辺を水とコンクリートで遮へいする構造とし、ターゲットと床の間には中性子のエネルギーを最適にするような減

速材を挿入する。

2.2 測定系の概略と放射線の評価

図6に示した体系で大雑把に放射線量率を評価して見る。遮へい体の中央は直径10cmの円筒状の空間があるとし、水遮へいの厚さは25cm、コンクリートの厚さは100cmとする。コンクリートの重量は約35tである。トレーラの床と道路面の間隔は50cm、トレーラの床とターゲットの間隔は50cmつまり道路面からターゲットまでは100cmとした。

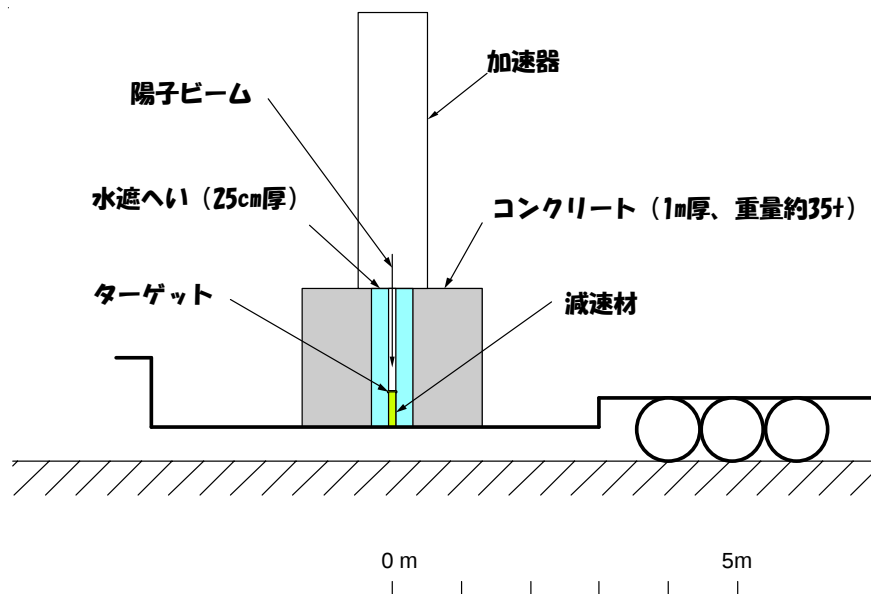


図6 測定系の概略

陽子エネルギーは、現在の法令で橋梁の非破壊検査が認められている最大のエネルギー4MeVとし、ビーム電流は1 μ Aとした。ターゲットはBeで4MeV陽子の飛程より厚いものを用いる。P+Be反応で生成される中性子生成量を図7に示した²⁾。陽子エネルギー4MeVのデータはないので外挿し、中性子生成量は10¹⁰n/sとした。線量評価については簡単のために平均エネルギーを用いた。P+Be反応で生成される中性子スペクトルを用いて、あるエネルギーより上の中性子ベクトルから平均エネルギーが求められている²⁾。これを図8に示した。この図から平均エネルギーは陽子エネルギーのおよそ1/5であることが分かる。したがって、陽子エネルギー4MeVとしたので、中性子の平均エネルギーは0.8MeVとなる。

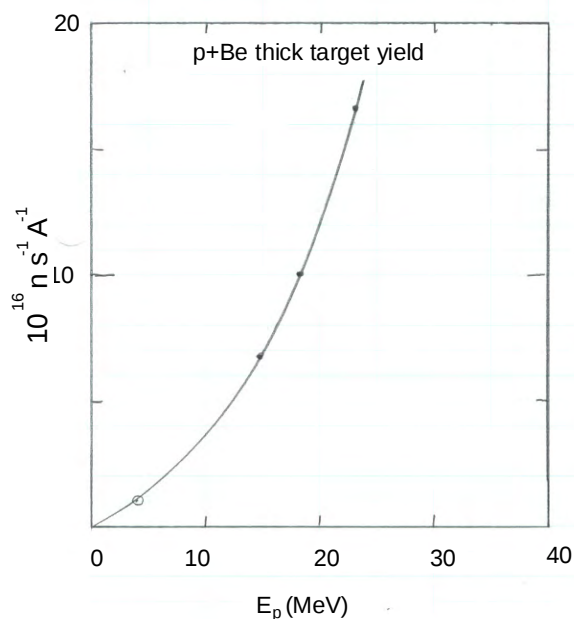


図7 中性子生成量の陽子エネルギー依存性
(参考文献2より)

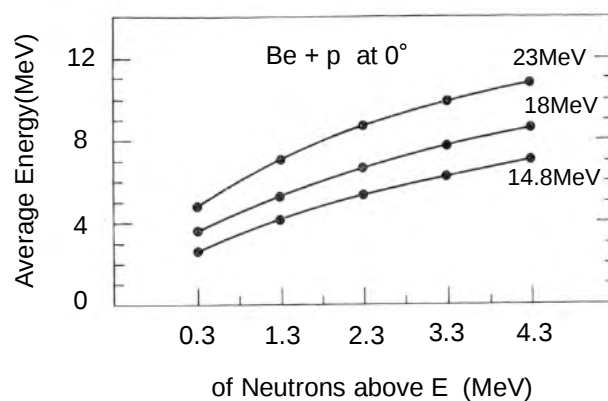


図8 あるエネルギーより上の中性子スペクトルの平均エネルギー(参考文献2より)

計算に用いた諸条件を表1に示した。評価の体系は0.8MeVの中性子がターゲットから 10^{10}n/s で放出され、水遮へい及びコンクリート遮へいを透過して遮へい外へ漏れるとした。水遮へいとコンクリート遮へいの実効線量透過率は参考文献2に与えられている。

表1 評価の諸条件

項 目	用いた値
陽子エネルギー	4MeV
陽子ビーム電流	1 μ A
ターゲット	Be
中性子生成量	10^{10}n/s
中性子平均エネルギー	0.8MeV
水遮へい厚	25cm
コンクリート遮へい厚	100cm
ターゲットより路面までの距離	100cm
ターゲットよりコンクリート遮へいの外表面までの距離	130cm
0.8MeVの中性子の実効線量換算係数 ²⁾	249pSv cm ²

評価結果を表2に示した。

表2 評価結果

項目	結果
路面上での中性子束密度	$8 \times 10^4 / (\text{n cm}^2 \text{ s})$
コンクリート外表面での線量率	0.9 μ Sv/h

道路面上での中性子束密度が $8 \times 10^4 \text{n}/(\text{cm}^2 \text{ s})$ であり、この値はJRR-3の中性子ラジオグラフィー

で中性子束密度が $10^5 \text{n}/(\text{cm}^2 \text{ s})$ なら数秒の時間分解能が得られるとされているので、利用できると思われる。ただし、中性子エネルギーが異なるので、検討する必要がある。管理区域境界にかかる線量率は $1.3 \text{mSv}/3 \text{月}$ であり、3 月は 500 時間とするので、線量率は $2.6 \mu\text{Sv}/\text{h}$ となる。したがって、管理機区域とする必要はない。ここに示した評価は簡単な仮定をして行っているので、詳細計算が必要である。

2.3 放射化

加速器による放射化については、現在の法令では扱っていないが、法令改正が行われ、汚染された物として取り入れられた。まだ政令や規則が定まっていないので、それによって必要な対策が定まる。

2.3.1 固体の放射化

放射化した機器などについて、保管する場所などを準備する必要がある。ここでは固体の放射化物の評価はしていないが、加速管、ターゲット等の放射化及び遮へい物の放射化を検討し保管場所の対策を定める必要がある。

2.3.2 気体の放射化

中性子エネルギーが低いので熱中性子による空気中の Ar の放射化を検討する。水遮へい体の中央部（直径 10cm で高さ 200cm）が空気で満たされているとする。熱中性子束密度は $n_{\text{th}}=4Q/S$ で与えられるとした。ここで、 Q は中性子発生率で S は空気のある領域の表面積である。これより熱中性子束密度は $6.3 \times 10^6 \text{n}/(\text{cm}^2 \text{ s})$ で、捕獲断面積は 0.66b、空気 1cm^3 中の Ar の数は 2.5×10^{17} 個であるので、飽和放射能は $1.0 \text{Bq}/\text{cm}^3$ となり、排気濃度限度 $5 \times 10^{-4} \text{Bq}/\text{cm}^3$ を上回るなので、換気をする必要がある。 1cm^3 の空気ですべて 1 分あたりに生成される ^{41}Ar の量は $6.3 \times 10^3 \text{Bq}$ なので、13 倍に薄めればよく、 $0.3 \text{m}^3/\text{min}$ 程度の換気でよい。

2.3.3 冷却水の放射化

中性子エネルギーが低いので冷却水が放射化する恐れはない。

2.4 インターロック

放射線発生装置室への扉などにはインターロックを設ける必要があるが、今の場合、加速器の遮へいの外側で管理区域境界の線量限度以下なので、設ける必要はない。

3. 発生装置にかかる法令による規制

中性子の発生には、放射性同位元素を用いる方法と放射線発生装置を用いる方法があるが、ここでは放射線発生装置を利用して発生させる中性子を想定しているので、関連する法令と発生装置の移動使用に関するものを挙げる

3.1 放射線を規制する法律

発生装置の使用に対する規制は労働基本法と原子力基本法の下で法律があり、以下の法律が定められている。

- ・労働基本法の下で法律

労働安全衛生法

労働基準法と相まって、労働者の安全と健康を確保するとともに快適な職場環境の形成を促進することを目的とする法律で、労働安全衛生法、労働安全衛生法施行令、労働安全衛生規則、電離放射線障害防止規則（電離則）が定められている。

- ・原子力基本法の下で法律

原子力の研究、開発及び利用を推進し、エネルギー資源の確保・学問の進歩と産業の振興を図り、人類社会の福祉と国民生活の向上を目的とする法律で、放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律（障防法）、障防法施行令、障防法施行規則が定められている。

3.2 発生装置の移動使用に係る法令

発生装置の移動使用に係る法令は放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律（障防法）、障防法施行令、障防法施行規則で定められている。

法律第 10 条の 6 では、「許可使用者は、使用の目的、密封の有無等に応じて政令で定める数量以下

の放射性同位元素又は政令で定める放射線発生装置を、非破壊検査その他政令で定める目的のため一時的に使用する場合において、第3条第2項第4号に掲げる事項（使用の場所のこと）を変更しようとするときは、文部科学省例で定めるところにより、あらかじめ、その旨を文部科学大臣に届けなければならない。」とされている。

関係する政令は法律施行令第9条第2項で「法第10条第6項に規定する政令で定める放射線発生装置は、次の各号に掲げるものとし、同項に規定する政令で定める放射線発生装置の使用の目的は、それぞれ当該各号に定めるものとする。

(1) 直線加速装置（文部科学大臣が定めるエネルギーを超えるエネルギーを有する放射線を発生しないものに限る。）橋梁または橋脚の非破壊検査

(2) ベータトロン（文部科学大臣が定めるエネルギーを超えるエネルギーを有する放射線を発生しないものに限る。）非破壊検査のうち文部科学大臣が定めるもの（但し、エネルギーと目的が定められていない）

(3) コッククロフト・ワルトン型加速装置（文部科学大臣が定めるエネルギーを超えるエネルギーを有する放射線を発生しないものに限る。）地下検層」と発生装置と目的が定められている。

また、エネルギーに対しては数量告示第3条で「令第9条第2項第1号の文部科学大臣が定めるエネルギーは4メガ電子ボルトとし、同項第3号の文部科学大臣が定めるエネルギーは15メガ電子ボルトとする。」と定められているが、同項第2号についての記載がないのでベータトロンは移動使用ができない。

つまり、直線加速装置で4MeV以下のもので、橋梁や橋脚の非破壊検査は可能である。

4. まとめ

これまで、非破壊検査を行う上での大雑把な評価をしてきたが、今後さらに詰める必要がある。それらは、

- 1) 中性子による透過像で、どのエネルギーが一番明瞭か検出器の効率を入れて定める。
- 2.) 陽子エネルギーは4MeVとして最適減速材を定める。（もっと高いエネルギーが必要だと告示の改正が必要となる。）
- 3.) 測定にかけられる時間から必要な中性子束密度を定める。
- 4) 陽子ビーム電流を定める。
- 5.) 必要な遮へい厚を求める。
- 6) 電源、冷却系等を入れた全体設計を行う。

であり、早い時期に加速器中性子を用いて鉄筋コンクリート試料の透過画像を測定し、最適中性子エネルギーを定めることが最重要課題である

参考文献

[1] 放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル, 2007, (財) 原子力安全技術センター

[2] M.A.Lone, et.al., Nucl. Instr. Meth. 143(1977)331