輸送容器に対するスミア拭取り効率の実験的評価

伊知地 猛^{*1}, 萩野 晴之^{*1}

(2010 年 7 月 16 日受理)

(2010 年 12 月 13 日再受理)

Experimental Evaluation of Removal Factor in Smear Method for Surveying Radioactive Surface Contamination of Transport Cask

Takeshi ICHIJ^{*1} and Haruyuki OGINO^{*1}

The removal factor in the smear method was measured experimentally for materials that are used in transport casks for spent fuel, storage casks and ships for transporting them. We used ^{60}Co for fabricating contaminated tested materials, because ^{60}Co is the key radioactive nuclide contaminant at nuclear power stations. For the tested metallic materials, the removal factors obtained experimentally ranged from 0.7 to 0.8. The removal factors obtained experimentally were 0.4 for the surface of a transport stand and hatch, 0.5 for the surface of the upper deck and 0.3 for the surface of the storage cask. These values can be used to survey radioactive surface contamination. The removal factor was measured with varying pH of a radioactive standardized solution. The removal factor of SUS304 buff polishing (#300) did not change even when the pH of the radioactive standardized solution was changed. For painted materials, there was the tendency that the higher the pH of the radioactive standardized solution, the smaller the removal factor. However, at a pH greater than 3, the removal factor reached a saturation point. It is concluded that pH of the radioactive standardized solution is ineffective for determining the removal factor when the pH exceeds 3. The removal factor was also measured with varying direction of wiping the surface of the tested materials treated by mechanical cutting. No differences among the cases of the various directions of wiping the surface of the tested materials were observed.

KEY WORDS: removal factor, smear method, radioactive surface contamination, transport cask, surface condition, experimental evaluation.

I 緒 言

放射性物質に汚染された物品等の表面汚染密度を評価する方法としては、放射性表面汚染サーベイメータ等を用いて固定性及び遊離性表面汚染を直接的に測定する“直接測定法”と、拭取りろ紙（スミアろ紙）等を用いて遊離性表面汚染を間接的に測定する“間接測定法”がある。

放射性表面汚染の測定及び評価に関しては、日本工業

規格（JIS）により発行されている規格、放射性表面汚染の測定方法（JIS Z 4504）¹⁾、放射性表面汚染サーベイメータ（JIS Z 4329）²⁾、据置型 β 線用物品表面汚染モニタ（JIS Z 4337）³⁾、 β 線用体表面汚染モニタ（JIS Z 4338）⁴⁾、等にしたがって実施されている。

スミアろ紙を用いた間接測定法（以下スミア法という）では、スミアろ紙による拭取り効率が重要なパラメータとなるが、放射性表面汚染の測定方法¹⁾によれば、拭取り効率は実験的評価がある場合にはその値を、実験的評価がない場合には安全を考慮して 0.1 を用いなければならないとなっている。本 JIS 文書は 2008 年に改正され、改正される前は、輸送用キャスクなどの物品等の表面状態が平滑なものに対しては拭取り効率は 0.5 とすることとしていたが、国際標準化機構（ISO）の定めた文書

^{*1}（財）電力中央研究所原子力技術研究所放射線安全研究センター：東京都狛江市岩戸北 2-11-1（〒201-8511）
Radiation Safety Research Center, Nuclear Technology Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry; 2-11-1, Iwado Kita, Komae, Tokyo 201-8511, Japan.
E-mail: ichiji@criepi.denken.or.jp

ISO 7503-1⁵⁾ との国際整合性を考慮して実験的評価がない場合は 0.1 を用いることと改正された。

スミア法では、使用済燃料輸送容器のように内容物に高い放射能があり直接法で表面汚染の測定ができないような場合でも、スミアろ紙をバックグラウンドの低い別の場所で測定することで表面汚染の測定が可能である。このため、使用済燃料輸送容器の表面汚染検査には通常スミア法が使われている。

拭取り効率に及ぼす要因を検討し一般的な材料に関して拭取り効率を実験的に評価した例は、吉田ら⁶⁾や杉浦ら⁷⁾の報告があるが、ステンレスなら 1 種類というように一般的な材質での結果であり、輸送容器の材質及び表面状態を模擬した材料についての報告はない。本研究では、実際に使用している輸送容器の材質、表面状態等を同じ条件にした模擬試験試料を用いて、スミアろ紙への拭取り効率を実験的に評価することを目的とする。

II 方 法

1. 模擬汚染試料の作製

試料の作製に用いた材料は、日本で主に流通している NFT 型輸送キャスク及び貯蔵用キャスクを対象とし、輸送容器の発送前検査時測定箇所、積付検査時測定箇所、核燃料輸送物運搬確認で実施されているスミア測定箇所の材質とした。なお、発送前検査時測定は搬出する側の電力会社等による測定で、輸送物の確認として規制側（原子力安全基盤機構：JNES など）の確認を受けるもので

ある。積付検査時測定はキャスクを海上で運送する運送会社による測定で、船積み時の地方運輸局の確認である。核燃料輸送物運搬確認は海上から陸上輸送になった際の車上積載時の確認であり、国土交通省自動車交通局の積み付け検査時に実施され輸送会社である原燃輸送等が測定を実施する。これらの検査・確認でスミア測定が実施される箇所は、キャスク本体フィン、キャスク本体トランニオン、キャスク緩衝体、輸送架台と積載した船の船倉及び上甲板である。各測定箇所の材質や表面の処理状態を踏まえて選定した試験用材料を **Table 1** に示す。実際にキャスクで使われている材質及び表面状態を同じにした模擬試験試料 9 種類とした。表中の Rz は表面粗さを表すパラメータであり、表面の最も高い山の高さと最も低い谷の深さの和を求め表したものである。また、バフ研磨とは皮や毛、樹脂などの柔軟剤を回転させながら加工物の表面に押しつける研磨方法である。なお、SUS、SUSF、SM はそれぞれ、クロム・ニッケル系ステンレス鋼材、析出硬化系圧力容器用ステンレス鋼鍛造品、溶接構造用圧延鋼材のことである。

模擬汚染試料を作製するために使用した RI の核種は、原子力発電所における主要な汚染核種である ⁶⁰Co とした。線源は（社）日本アイソトープ協会より購入した 0.1N-HCl 中に CoCl₂ 0.5 mg/g を含む放射能標準溶液で、放射能濃度は 200 kBq/ml であった。使用済燃料プールは中性から弱酸性の状態であり、Co は析出せずイオンとして存在している⁸⁻¹⁰⁾と考えられるため、Co がイオ

Table 1 List of tested materials and surface conditions.

Position of wiping of smear-test filter paper	Material	Surface condition
Fin of transport cask body	SUS* ¹ 304	Buff polishing* ² (#300)
Shock absorber of transport cask	SUS304	Rz* ³ : less than 12.5 μm
	SUS304	Buff polishing (#150)
Trunnion of transport cask body	SUSF630* ⁴	Rz: less than 3.2 μm
	SUSF630	Buff polishing (#300)
Surface of transport stand	SM* ⁵ 490	EPOMARINE painting (epoxy resin paint) produced by KANSAI PAINT CO., LTD.
Surface of hatch	Carbon steel	EPICON MARINE HB painting (GREY CS-611BASE): (epoxy resin paint) produced by CHUGOKU MARINE PAINT, LTD.
Surface of upper deck	Carbon steel	RAVAX painting R13-545 (Chlorinated rubber paint) produced by CHUGOKU MARINE PAINT, LTD.
Storage cask	Carbon steel	EPONICS #20 (epoxy resin paint) produced by DAI NIPPON TORYO CO., LTD.

*¹: SUS means rolled Cr-Ni stainless steel.

*²: Buff polishing is a type polishing that buff, using leather, wool or resin, rotates and presses the surface of the materials.

*³: Rz is the parameter of surface roughness and denotes the summation of the heights of the highest and the lowest points of the surface.

*⁴: SUSF630 means precipitation hardening stainless steel forging for pressure vessels.

*⁵: SM means rolled steel for welded structure.

ンとして存在する CoCl_2 溶液を滴下して用いた。

15 cm × 15 cm の大きさの各材料を用意し、汚染面積が 100 cm² となるように、10 cm × 10 cm の区画を明示した。この区画内に前述の放射能標準溶液を純水で希釈し、マイクロピペット（一回の滴下は 2 μl）を用い等間隔に滴下し、フード付きドラフトチェンバー内で 24 時間以上乾燥させた。放射能標準溶液の希釈度、滴下ポイント数および模擬汚染試料の表面汚染密度を Table 2 に示す。

2. 試料のスミア測定及び拭取り効率の算出

スミアろ紙による拭取り方法は杉浦ら⁷⁾による報告を参考にした。原子力発電所で主に使用されている 50 mm φ の三ツ矢型スミアろ紙を使用した。拭取る際には、50 mm φ のアクリル製ディスクを使用し、ろ紙全体に汚染が均一に拭取れるようにした。10 cm × 10 cm の枠内を、平行に 1 方向で拭取り残しがないようにスミアろ紙の半径分 2.5 cm ずつずらし、1 枚のスミアろ紙で 3 回拭取りを実施し、第 1 枚目分の拭取りろ紙とした。拭取り圧力は、試料を電子天秤に乗せ拭取り圧力を表示値で確認しながら、約 1.5 kg になるよう⁷⁾に拭取った。

汚染の付着した各スミアろ紙の放射線測定は、アロカ株式会社製 GM 計数管 TGS-146B 及び測定台 PS-202D を用いて実施した。測定時間は各スミアろ紙につき 5 分とした。バックグラウンドの測定時間も 5 分とした。

拭取り効率の算出方法は、第 1 枚目のスミアろ紙の放射線計数率を全遊離性汚染の計数率で除することにより求めた。拭取りごとに新しいスミアろ紙を用い、第 1 枚目と同じ方法で拭取りを繰り返し、当該回の計数率が検出限界未満になるまで拭取りを実施した。各回の計数率の合計を全遊離性汚染の計数率とした。拭取り効率算出方法を (1) 式に示す。

$$F = \frac{C_1}{\sum_{i=1}^n C_i} \quad (1)$$

F : 拭取り効率

C_i : 第 i 枚目の拭取りのスミアろ紙の計数率

n : 検出限界になる前までの拭取り回数

拭取り効率は同一条件の試料を 3 つ作製し、各測定値の平均として求めた。なお、検出限界値は以下の (2) 式により 3σ 法¹¹⁾により求めた。

$$\text{検出限界値} = \frac{k}{2} \left\{ \frac{k}{t_s} + \sqrt{\left(\frac{k}{t_s} \right)^2 + 4n_b \left(\frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_b} \right)} \right\} \quad (2)$$

k : 標準偏差 σ の倍数 (=3)

Table 2 Surface contamination densities, pHs of radioactive standardized solution, and numbers of dispensing points to the tested materials.

Dilution	pH of standardized solution	Number of dispensing points	Surface contamination density
1/20	2.3	8 × 8 = 64	13 Bq/cm ²
1/50	2.7	12 × 12 = 144	12 Bq/cm ²
1/100	3.0	17 × 17 = 289	12 Bq/cm ²
1/200	3.3	17 × 17 = 289	5.8 Bq/cm ²
1/500	3.7	17 × 17 = 289	2.3 Bq/cm ²

t_s : 試料測定時間 (分)

t_b : バックグラウンド試料の測定時間 (分)

n_b : バックグラウンド試料の計数率 (cpm)

また専用架台を使用し、拭取り前と検出限界値未満になるまで拭取った後で試料からの放射線を測定し、試料に滴下した放射能とスミアろ紙で拭取った後に試料に固着して残った放射能の割合から、滴下した総放射能のうち遊離性汚染の割合を評価した。

データの不確かさとしては、測定した放射線の計数に起因する統計変動による不確かさと、同一種類の試料で得られた複数（本試験では 3 つ）の結果のばらつきによる不確かさがあり、本報告の試験結果の誤差棒は、(3) 式で示す両者の合成標準不確かさ¹²⁾を表す。

$$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2} \quad (3)$$

σ_{total} : 合成標準不確かさ

σ_a : 計数による統計的誤差の標準偏差

σ_b : 結果のばらつきによる標準偏差

3. 放射能標準溶液の酸性度（希釈度）の影響

輸送容器を運搬する船舶の汚染検査対象個所である輸送架台及び船倉表面はエポキシ系樹脂塗料で塗装され、上甲板表面は塩化ゴム系塗料で塗装されている。試験で使用了放射能標準溶液は、塩酸溶液を溶媒としており酸性の溶液である。塩化ゴム系塗料はエポキシ樹脂系塗料と比べ耐食性及び耐酸性が良くないという性質があるため、塗装試料（輸送架台、船倉表面、上甲板表面および貯蔵用キャスク）に関しては酸性度（希釈度）を変えて試験を実施した。また、金属試料は代表して SUS304 #300 のバフ研磨仕上げの試料を用いて試験を実施した。Table 2 に示した放射能標準溶液の希釈処理や滴下状況の試料を作成し、2. 節で示した方法で拭取り効率を求めた。

4. 研磨面に対する拭取り方向の違いの影響

金属試料の表面はバフ研磨もしくは機械加工処理をしている。バフ研磨は柔軟剤を回転させながら研磨する方法であるため、拭取り方向の違いはないと考えられる。一方、機械加工では研磨面の目に平行に拭取った場合と、垂直に拭取った場合とで結果が変わる可能性があるため、SUS304 Rz = 12.5 μm 以下の機械加工試料、SUSF630 Rz = 3.2 μm 以下の機械加工試料について、研磨面に対する拭取り方向の違いによる拭取り効率への影響を調べた。各試料に対して、研磨面に平行に拭取った場合と、垂直に拭取った場合をそれぞれ3試料で拭取りを実施し、2.節で示した方法で拭取り効率を求めた。

III 結果及び考察

1. 試料の拭取り効率

放射能標準溶液の pH が 3.0 の全試料の拭取り効率の結果を Fig. 1 に示す。拭取り効率は金属試料ではすべて

Fig. 1 Removal factors and ratios of removable surface contaminations of all tested materials.

0.5 以上の値が得られたが、塗装試料では 0.5 以下の値が得られた。遊離性汚染の割合は、SUS304 Rz = 12.5 μm 以下の機械加工試料と SUSF630 の試料では低く、特に SUSF630 の試料ではほとんどが固定性汚染であった。

スミアろ紙の拭取りは GM 計数管の検出限界値未満になった時点で終了したが、全遊離性汚染の計数率に対して、検出限界計数率の分過大評価になる可能性があるため、どの程度の過大評価か調べた結果を Table 3 にまとめる。遊離性汚染の割合が少ない一部の試料を除いて、全遊離性汚染計数率に対する検出限界計数率は 5% 未満であり、ほとんどは 1% 未満であったため問題がないことがわかった。遊離性汚染の割合が少ない SUSF630 の試料では、全遊離性汚染計数率に対する検出限界計数率が 20% 近くまであり、この分拭取り効率が過大評価される可能性がある。しかし、SUSF630 の試料では拭取り効率は 0.8 以上という大きい値が得られているため、検出限界計数率分の過大評価を差し引いても、拭取り効率は 0.5 を十分上回る。

2. 放射能標準溶液の酸性度の影響

放射能標準溶液の酸性度と拭取り効率について、SUS304 #300 のバフ研磨仕上げ、輸送架台、船倉表面、上甲板表面、貯蔵用キャスクの各試料の試験結果を Fig. 2 の (a)～(e) にそれぞれ示す。

(a) の SUS304 #300 のバフ研磨仕上げの試料では、拭取り効率は酸性度の違いによって変化はなく、0.5 以上の値が得られた。(b) の輸送架台の試料では、拭取り効率は一部のデータを除くと pH の増加とともに低くなる傾向があるが、拭取り効率は pH3 以上で一定になった。(c) の船倉表面の試料では、拭取り効率は pH2.7 より pH が大きい場合に变化はなく、pH2.3 では最も拭取り効率が大きい結果となった。(d) の上甲板表面の試料では、拭取り効率は、pH の増加とともに低くなる傾向があるが、pH3 以上で一定となった。(e) の貯蔵用キャスクの試料では、拭取り効率は pH の違いによって変化はなく、どの pH でも 0.5 未満であり 0.3 前後であった。

使用済燃料プール水の pH は BWR では 5.3–7.5¹³⁾、PWR では 4–6^{8–10, 13)} と中性から弱酸性の領域にある。今回使用した線源は 0.1N-HCl 中に CoCl₂ 0.5 mg/g を含む放射能標準溶液であり、純水で薄めることにより pH を変えて試験を実施した。本試験の条件は実際の使用済燃料プール水の pH より低い、pH3 以上で拭取り効率が一定になる結果が得られたため、弱酸性である実際の使用済燃料プール水の状況でも本試験で得られた拭取り効率の結果が適用できると考える。

Table 3 Experimental evaluation of removal factors in smear method for radioactive surface contamination of transport cask.

Position of wiping using smear-test filter paper	Material	Surface condition	Ratio of detection limit count rate of GM counter to total removal surface contamination count rate	Removal factor
Fin of transport cask body	SUS304	Buff polishing (#300)	0.007	0.7 ± 0.1
Shock absorber of transport cask	SUS304	Rz: less than $12.5 \mu\text{m}$	0.04	0.7 ± 0.1
	SUS304	Buff polishing (#150)	0.02	0.8 ± 0.2
Trunnion of transport cask body	SUSF630	Rz: less than $3.2 \mu\text{m}$	0.2	0.8 ± 0.05
	SUSF630	Buff polishing (#300)	0.2	0.8 ± 0.05
Surface of transport stand	SM490	EPOMARINE painting (epoxy resin paint) produced by KANSAI PAINT CO., LTD.	0.005	0.4 ± 0.07
Surface of hatch	Carbon steel	EPICON MARINE HB painting (GREY CS-611BASE): (epoxy resin paint) produced by CHUGOKU MARINE PAINT, LTD.	0.005	0.4 ± 0.07
Surface of upper deck	Carbon steel	RAVAX painting R13-545 (Chlorinated rubber paint) produced by CHUGOKU MARINE PAINT, LTD.	0.004	0.5 ± 0.04
Storage cask	Carbon steel	EPONICS #20 (epoxy resin paint) produced by DAI NIPPON TORYO CO., LTD.	0.004	0.3 ± 0.08

以上の結果をまとめる。金属試料の SUS304 #300 のバフ研磨仕上げおよび貯蔵用キャスクでは拭取り効率は、酸性度の違いで変化は見られなかった。塗装試料では、貯蔵用キャスクを除くと、塩化ゴム系塗料、エポキシ樹脂系塗料ともに pH が小さい放射能標準溶液を滴下した試料よりも pH が大きい方が拭取り効率が低くなる傾向があったが、おおむね pH3 以上では酸による影響は見られなかった。実験で得られた拭取り効率は、SUS304 #300 のバフ研磨仕上げでは 0.5 以上であり、貯蔵用キャスクは酸性度にかかわらず 0.3 前後であった。その他の塗装試料において、pH3 以上で拭取り効率が 0.5 以下のケースがいくつか見られた。

3. 研磨面に対する拭取り方向の違いの影響

SUS304 Rz = $12.5 \mu\text{m}$ 以下の機械加工試料、SUSF630 Rz = $3.2 \mu\text{m}$ 以下の機械加工試料について、研磨面に対して拭取り方向を変えて拭取り効率を求めた試験結果を **Fig. 3 (a), (b)** に示す。SUS304 Rz = $12.5 \mu\text{m}$ 以下の機械加工試料、SUSF630 Rz = $3.2 \mu\text{m}$ 以下の機械加工試料ともに、研磨面に対して拭取り方向を変えても拭取り効率は不確かさの範囲内で違いは見られなかった。

4. 拭取り効率結果まとめ

$\beta \cdot \gamma$ 核種における物品持ち出し基準の表面汚染密度限度 4Bq/cm^2 は、1962 年の DUNSTER の報告¹⁴⁾ に基づけば、

当時の公衆の線量限度であった 5mSv/y を線量規準として誘導されたと理解できる。導出モデルの特徴としては、代表性及びシナリオが持つ保守性が挙げられる。代表性が持つ保守性とは、線量寄与の高い核種から誘導される表面汚染密度をその他全ての同一線種に対して一律に適用していることを指す。また、シナリオが持つ保守性とは、表面汚染の全てが遊離性汚染であり、全汚染面から浮遊した核種を換気が無い状態で年間 2,000 時間連続して吸入摂取するという仮定を指す。これらの代表性及びシナリオが持つ保守性について、安全係数は、少なく見積もっても 100 から 1,000 以上あることが、我が国における放射線審議会において池沢により報告¹⁵⁾ されている。

本研究における試験結果は、同一条件で 3 回実施した試験の算術平均値及び標準偏差であらわされている。本研究で得られた実験的評価に基づいて、拭取り効率に用いる値を選定する際には、表面汚染密度限度 4Bq/cm^2 が有する安全裕度（上述の池沢の報告¹⁵⁾ では安全係数は 100 から 1,000 以上）と本実験で得られた標準偏差の大きさを考慮すれば、実験的評価の算術平均値を拭取り効率として使用することは、放射線安全上の評価において問題はないと考える。

本章の 1. 節でも述べたが、スミアろ紙の拭取りは

Fig. 2 Relationships between pH of radioactive standardized solution and removal factors.

Fig. 3 Removable factors for various directions of wiping
(a) SUS340 Rz: less than 12.5 μm and (b) SUSF630 Rz: less than 3.2 μm .

GM 計数管の検出限界値未満になった時点で終了するため、全遊離性汚染の計数率に対して、検出限界計数率を考慮すると過大評価になる可能性がある。この過大評価になる可能性を考慮し、実験で得られた結果から GM 計数管の検出限界計数率分を差し引いた値を **Table 3** に示す。また、SUS304 #300 のバフ研磨仕上げ及び塗装試料では、pH を変えた試験結果の中で安全側となる最小値を採用した。今回試験した金属試料では、拭取り効率は JIS 改定以前に与えられていた値である 0.5 を上回り 0.7 から 0.8 という結果となった。また、輸送架台及び船倉表面では 0.4、上甲板表面では 0.5、貯蔵用キャスクでは 0.3 という試験結果となった。

IV 結 言

NFT 型輸送容器及び貯蔵用キャスクの材質及び表面状態を模擬した材料、輸送容器用の架台、輸送容器を積載する船の船倉及び上甲板を模擬した材料に関して、原子力発電所における主要な汚染核種である ^{60}Co を用いたスミア拭取り効率を実験的に評価した結果、以下の知見が得られた。

- ・ 今回試験した金属試料では、拭取り効率は JIS 改定以前に与えられていた値である 0.5 を上回り 0.7 から 0.8 という結果となった。塗装試料では放射能標準溶液の pH を変えた試験結果の中で安全側となる最小値を採用し、輸送架台及び船倉表面では 0.4、上甲板表面では 0.5、貯蔵用キャスクでは 0.3 が、拭取り効率として得られた。拭取り効率の実験的評価として、本試験で得られた結果を用いることができると考えられる。
- ・ 放射能標準溶液の酸性度を変えて拭取り試験を実施した結果、pH3 以上では酸による影響は見られなかった。
- ・ 機械加工処理した試料では、研磨面に対する拭取り方向の違いによる拭取り効率への影響を調べたが、拭取り効率に違いは見られなかった。

参 考 文 献

- 1) Japanese Industrial Standard Committee; Evaluation of surface contamination — Beta-emitters (maximum beta energy greater than 0.15 MeV) and alpha-emitters JIS Z 4504, JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD (2008).
- 2) Japanese Industrial Standard Committee; Portable radiation surface contamination meters and monitors JIS Z 4329, JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD (2004).
- 3) Japanese Industrial Standard Committee; Installed articles surface contamination monitoring assemblies for beta emitters JIS Z 4337, JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD (1997).
- 4) Japanese Industrial Standard Committee; Installed personnel surface contamination monitoring assemblies for beta emitters JIS Z 4338, JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD (1997).
- 5) International Organization for Standardization; ISO 7503-1 Evaluation of Surface Contamination-Part1; Beta-emitters (maximum beta energy greater than 0.15 MeV) and alpha-emitters (1988).
- 6) Y. YOSHIDA, Y. SASAKI, M. MURATA, S. IZAWA and Y. IKEZAWA; Experimental study of smear survey, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **6**, 77–81 (1964).
- 7) N. SUGIURA, J. TAIRA, K. TAKENAKA, K. YAMANAKA, K. SUGAI and T. KOSAKO; Experimental analysis on removal factor of smear method in measurement of surface contamination, *Jpn. J. Health Phys.*, **42** (3), 214–220 (2007).
- 8) W. B. CHAMBERS, D. H. DOUGHTY, H. D. JONES, S. L. MARTINEZ and P. C. BENETT; Contamination weeping; A chemical ion exchange model, *Advances in Regulation and Package Design for Transportation or Storage of Radioactive Material ASME 1991*, PVP-Vol. 212, 61–65 (1991).
- 9) W. B. CHAMBERS, D. H. DOUGHTY, H. D. JONES, S. L. MARTINEZ and P. C. BENETT; Application of a chemical ion exchange model to transport cask surface decontamination, *RAMTRANS*, Vol. 2, No. 1/3 145–149 (1991).
- 10) P. C. BENETT, D. H. DOUGHTY and W. B. CHAMBERS; Transportation cask contamination weeping; A program leading to prevention, *Proc. 10th International Symposium on the Packing and Transportation of Radioactive Materials*, Vol. 1, 398–405 (1992).
- 11) T. HAMADA; “Radiation monitoring for working environment -from making plan to estimation-”, 108–110 (1978), Japan Radioisotope Association, Tokyo.
- 12) K. IIZUKA; “Guide to the expression of uncertainty in measurement”, 50–58 (1996), Japanese Standards Association, Tokyo.
- 13) A. B. JOHNSON, Jr.; Spent fuel storage experience, *Nucl. Technol.*, **43** (1979).
- 14) H. J. DUNSTER; Surface contamination measurements as an index of control of radioactive materials, *Health Phys.*, **8**,

353–356 (1962).

- 15) Y. IKEZAWA; About the limit for surface contamination, The 90th Japanese Radiation Council, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology-Japan (2004).

伊知地 猛（いちぢ たけし）

早稲田大学大学院物理学及び応用物理学専攻修士課程修了後、（財）電力中央研究所に入所。現在の所属は原子力技術研究所放射線安全研究センター。環境放射能研究（特にラドン及び壊変生成物の挙動に関する研究）、放射線計測、放射線防護に関する研究に従事。

E-mail: ichiji@criepi.denken.or.jp