

放射線遮蔽・環境調和性コーティング技術



神野 晃宏
Kanno Akihiro
(トーカロ(株)溶射技術開発研究所)



伊藤 義康
Ito Yoshiyasu



阿部 弘亨
Abe Hiroaki
(東北大学 金属材料研究所)

1 背景

2011年3月の東日本大震災の影響による東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故発生に伴い、大気中に拡散された多量の放射性物質が深刻な問題となっており、土壌や草木、建屋に降り積もった放射性セシウム (^{137}Cs , ^{134}Cs) など放射性物質の除染作業が実施されつつある。しかしながら大量に発生した事故由来放射性物質により汚染された廃棄物の処理・処分の方針はいまだ有効な策が決定していない。現在ほとんどの廃棄物が減容化されることなく簡易な袋や防水シート等を利用して集積場で一時的に保管された状態にあり、保管容器への収納や中間貯蔵施設等での保管管理などはこれからの課題である。

保管容器には以下の点が要求される。すなわち、有効な放射線遮蔽により容器外への放射線漏洩が軽減され安全性の向上と作業者の被曝低減につながることで、雨水や地下水に対して十分な耐食性を有すること等、である。処理量の多さを考えれば、一般材よりも高い遮蔽性能を有する容器を使用することで保管用地の制限を大幅に低減する効果も期待される。さらに、生体親和性の高い物質を用いることによって、容器の表面物質が万一環境中に放出されるような事

態に至ったとしても、環境や人体に対する影響を最小限に抑えることも可能となる。

また、被加工材の形状やサイズなどの制約が少なく、かつ可搬式のコーティング技術により、被覆表面に凹凸形状が存在する製品や円筒体又は箱形状の容器内や建屋内外壁などへも比較的容易に均一かつ均質なコーティングを被覆することができれば、更なる被曝低減につながる。

現状では、放射線遮蔽材として金属の中では比較的比重が大きい鉛を使用した鉛ガラスや鉛シートなどが広く用いられている。しかしながら鉛の毒性^{*1}や最近の欧米における規制強化の傾向^{*2}を考慮すると、毒性の小さい物質によるコーティングは今後の技術的發展の中で最低限必要なものと考えられる。

^{*1} 厚生労働省医薬食品局審査管理課化学物質安全対策室：第一回鉛含有金属製アクセサリー類等の安全対策に関する検討会，配布資料12「鉛の毒性に関する知見について」(2006)によると、鉛は一旦体内に摂取されると鉛そのものとしても排泄されにくいばかりか、化合物を形成しても排泄しやすい物質になりにくく、結果的に体内に蓄積されやすい元素とされている。鉛中毒による健康被害の事例も数多く報告されている。

これらの背景を踏まえ、我々は、表面処理の技術を利用して効率的な放射線遮蔽と人や自然に優しい放射線遮蔽・環境調和性コーティング技術の開発に着手し、放射線遮蔽機能を有し、鉛など環境や人体へ悪影響を及ぼす有害金属の代替材料となり得るタングステンを使用した放射線遮蔽・環境調和性コーティング技術を開発した。なお、本コーティング開発は当初、前述のように保管容器などへの放射線（主にγ線）遮蔽効果の付与を主な目的としたが、X線遮蔽が必要な医療機器、放射線滅菌装置、異物検査装置などへ応用することも可能であり、機器装置の小型化や高安全化が期待される。

2 コーティング技術

本コーティングはプラズマ溶射により形成される。以下にプラズマ溶射の原理・特徴について述べる。プラズマ溶射ガンは、水冷されたノズル形状の銅製陽極（アノード）とタングステン製電極の陰極（カソード）から構成されている。アルゴン、窒素などの不活性ガスを流した状態で、高周波・高電圧を極間に印加すると、アーク電流が発生し不活性ガスが高温に加熱される。加熱された不活性ガスは電離し、イオンと電子からなるプラズマ状態が形成される。プラズマガスは約 10,000~20,000℃の高温ガスであり、ノズルから放出されることで急激な断熱膨張が起き、ノズル出口付近のガス速度は約 1,500~3,000 m/sec に達する。このノズル出口付近の高温・高速ガス領域に粉末状の溶射材料を投入することにより、溶射材料は高温で溶融され、プラズマガスの運動エネルギーにより加

速される。溶融された溶射材料は、200~500 m/sec の高速で、あらかじめ粗面化された基材に衝突し、圧潰、急冷による収縮などのプロセスを経て積層されていく（図1参照）。プラズマ溶射法は高温の熱源を利用しているため、セラミックスやタングステンなどの高融点材料を容易に溶融させることができ、多種・多様のコーティング材料から目的に合った材質を選定することができることを特徴としている。

3 結果と考察

3.1 本コーティングの諸物性と微細組織

まず、放射線遮蔽部材として高比重金属のタングステン元素を高密度で含む溶射皮膜の鉛代替材料としての適用可能性を検討した。図2のコーティング実施例に示すように、溶射の特徴としては被加工材の被覆表面に凹凸形状が存在する場合においても表面形状に沿った成膜が可

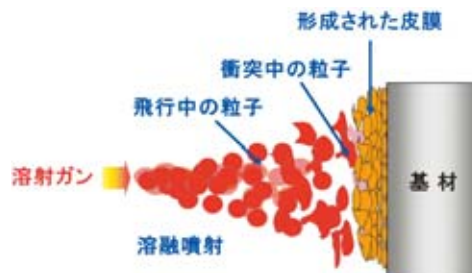


図1 溶融粒子堆積の模式図



図2 放射線遮蔽・環境調和性コーティングの実施例

*2 Official Journal of the European Union, L251, 28-34 (2010) ; L254, 48 (2010) によると、欧州連合 (EU) では、RoHS 指令に基づき、2006年7月以降は、EU加盟国内において高温溶融はんだや医療機器などの例外を除き、電気・電子製品への鉛の使用が原則として禁止されている（鉛含有量が1,000 ppm以下を超えてはならない）。このため、日本国内メーカーでも鉛を含有しない部材の使用を原則としつつある。

能であり、均一な膜質、膜厚のコーティングの形成を確認した。また各種形状、材質の素材表面に本コーティングを施工した例を図3に示す。このように本コーティングは平板、円筒体、直方体など様々な形状の被加工材の全面又は部分的に施工することができた。更には被加工材の材質に関する制約も少なく、炭素鋼、ステンレス鋼、コンクリートなどコーティング材料とは異なる物性の被加工材表面に対しても皮膜剥離や割れなどを発生させることなく容易に施工することができた。

次に図4に本コーティングの断面マイクロ組織



図3 放射線遮蔽・環境調和性コーティングを施工したコンクリートブロック、炭素鋼平板とステンレス円筒管

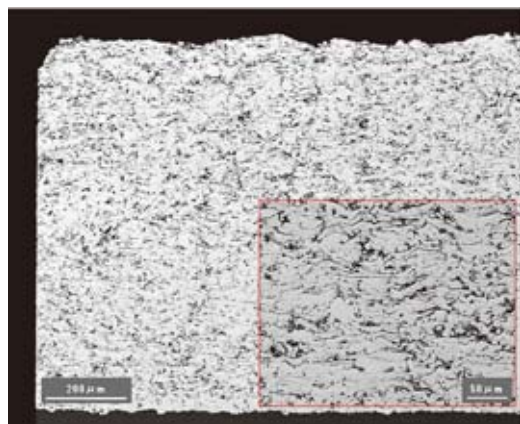


図4 放射線遮蔽・環境調和性コーティングの断面組織

を示す。高温・高速のプラズマガスなどの溶射熱源により熔融された粒子が基材に衝突、圧潰し堆積した様子が観察された。一般的なタングステン焼結材は、溶射皮膜と比べて緻密構造を有し、より効率的な放射線遮蔽効果があるため、遮蔽体厚さを薄肉化できる利点がある反面、基材の熱変形に追従しにくい構造である。一方、溶射皮膜の特徴である扁平粒子の積層構造は、基材の熱変形にもある程度追従可能で柔軟な構造であるといえる。放射線遮蔽に影響するコーティング（遮蔽体）厚さをより厚みのある設計とした場合においても、図4のように数mm厚さのコーティング内部には機械的強度に明らかな悪影響を及ぼすような大きな割れや剥離等は確認されず、健全なコーティングが形成される。

3.2 放射線遮蔽性能

次に、本コーティングが鉛などと比較してどの程度の放射線遮蔽効果が得られるのか調査した（図5参照）。放射線遮蔽材として利用されることの多い鉛、SS400鋼、コンクリートを比較材として用い、コーティング厚さの異なる本コーティングサンプルによりγ線の遮蔽実験を行った。実験結果を図6に示す。⁶⁰Coを線源としたγ線遮蔽実験により、同じ厚さの鉛よりも効率よく放射線を遮蔽可能であることが確認できた。6mm厚さの炭素鋼基材上に一般的な厚



図5 γ線透過率の測定状況

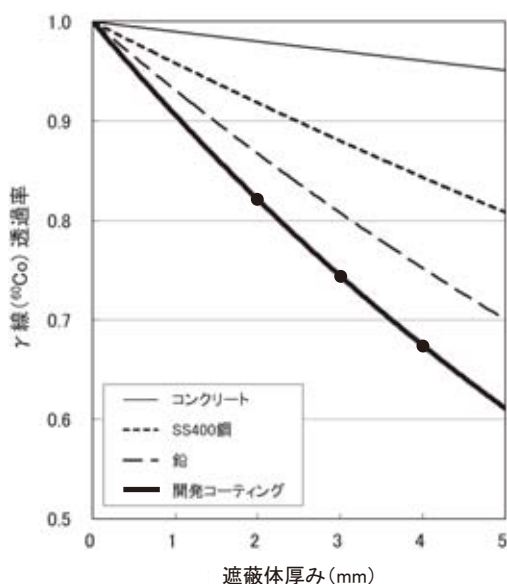
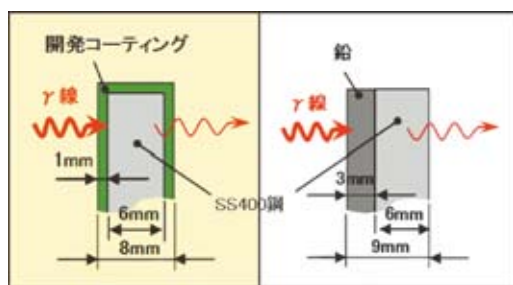


図6 各種材料の放射線遮蔽効果の測定結果



(a) 開発コーティング (b) 鉛遮蔽体

図7 遮蔽体構造の模式図

さである2mm厚さのコーティングを施工すると、約37%のγ線遮蔽効果を示した。

一般的に鉛が表面に露出する構造は機械装置として好まれないため、多層構造化される場合が多い。鉛を使用しないことにより構造の簡素化が図れるため、ダウンサイジングや総重量を減少できる可能性がある(図7参照)。

以上の結果より、本コーティングは、鉛などの有害な金属を使用しておらず、鉛よりも効率的な放射線遮蔽効果を示すため薄肉設計が可能である。更には、被加工材形状に沿った均質かつ均一な成膜が特徴であるという利点があり、

放射線遮蔽体としては鉛の代替材料として有効な手段となり得る。

4 耐食性の付与について

事故由来放射性物質により汚染された廃棄物はドラム缶などの保管容器に入れ地中に埋設されるが、容器内外からの腐食に対する備えが必要である。例えば、高濃度汚染水の浄化により発生した使用済みゼオライトを減容又はガラス固化し容器に封入した場合、水分が含有されていることも想定される。また、水分を含んだ土壌などを容器に保管する場合も考えられる。さらに、廃棄物保管建屋のコンクリート壁の内側に侵入してきた地下水等による腐食の懸念もある。腐食反応により貫通孔が形成された場合には放射性物質が容器外へ浸出、漏洩する危険性があるため、長期保管が必要な容器には腐食を抑制するために容器内外面への防食処理が必須となる。

本コーティングは耐食性の高い材料を使用しているため、想定される実際の使用条件ではコーティングそのものがイオン化して溶出することはない。しかしながら溶射皮膜は溶融粒子の積層構造であるため少なからず貫通気孔や微細クラックを内在しており、溶射皮膜のみでは水溶液の侵入を阻止することはできない。溶射皮膜内部の気孔やクラック(ひび割れ)を通じて侵入してきた水溶液が基材に達し基材が腐食することで皮膜剥離の原因となり得る。防食方法としては溶射皮膜にエポキシ樹脂など有機系の封孔処理を施工し、皮膜の気孔やクラックなどに充填することにより水溶液の侵入を防ぐ¹⁾と同時に、腐食におけるカソード電極面積を低減し基材の腐食速度を遅らせる方法が一般的である。しかしながら有機系高分子材料は、γ線やX線照射環境下では、放射線照射による分子鎖切断反応や架橋反応のため、比較的低線量照射で劣化することが知られており²⁾、長期保管が必要な容器の耐食性付与と目的として使用される場合、有機系封孔処理は不適切であると言え

る。そこで、現在我々は本コーティングと γ 線劣化の少ない無機系封孔処理を組み合わせた高耐食グレードの開発を進めている。

5 放射線遮蔽・環境調和性コーティングの適用先、応用例

放射線は工業、農業、食品、医療、環境保全、工業計測など、世界的に幅広い分野において研究開発が行われるとともに、既に多くの放射線利用が実用化され、産業界において重要な役割を担っている³⁾。また、近年その利用形態はますます高度化、多様化している。アイソトープ・放射線を利用する施設・設備では必ず放射線遮蔽に何らかの策が講じられている。特に鉛代替材としての本コーティングは、表1に示

表1 放射線遮蔽・環境調和性コーティングの適用先・応用例

分野	適用先・応用例
医学系	<ul style="list-style-type: none"> ・ X線撮像装置の放射線遮蔽 ・ X線照射、γナイフなどによる腫瘍治療装置の遮蔽 ・ 医療機器の滅菌に使用する放射線発生装置の遮蔽
工業系	<ul style="list-style-type: none"> ・ X線、γ線による非破壊検査装置の遮蔽 ・ 同検査装置センサー部の遮蔽 ・ 放射化分析、蛍光X線分析などの遮蔽 ・ 排煙浄化処理、汚泥処理などで使用する放射線発生装置の遮蔽 ・ 廃棄物保管容器の放射線遮蔽 ・ 除染廃棄物等の中間貯蔵施設建屋などの放射線遮蔽
農水産業系	<ul style="list-style-type: none"> ・ 農作物の品種改良で使用する放射線発生装置の遮蔽 ・ 食品の滅菌、発芽防止で使用する放射線発生装置の遮蔽 ・ 異物のX線検査装置の遮蔽 ・ 家畜用飼料の滅菌で使用する放射線発生装置の遮蔽

すような幅広い分野において適用される可能性を秘めており、今後の化学物質規制などにも対応した表面改質として期待される。

6 まとめ

放射線遮蔽・環境調和性コーティング技術の特徴を以下にまとめる。

①放射線遮蔽性

同じ厚みの鉛よりも優れた放射線遮蔽効果を有する。

②施工性

様々な形状、範囲への施工対応が可能。複雑形状の基材に追従したコーティング形成が可能。被加工材の材質に関する制約も少なく、炭素鋼をはじめとする金属、セラミックス、プラスチック、コンクリートなどへの施工も可能である。移送が困難な建屋や大型構造物等に対しては現地でのコーティング施工も可能である。

③安全性

有毒な鉛を使わず、有害金属の溶出が無い長期保管が実現できる。

④コンパクト化

鉛不使用により構造の簡素化が図れるため、ダウンサイジングや総重量を減少できる可能性がある。

参考文献

- 1) 中部経済産業局、「一液無溶剤型高機能無機系封孔剤の開発とその技術の他用途への展開」成果報告書 H23.9, pp.4-5 (2011)
- 2) 一般財団法人 高度情報科学技術研究機構 (RIST), 原子力百科事典 ATOMICA, 高分子材料の放射線劣化と改質 I (2008)
- 3) 日本原子力文化振興財団 (編), アイソトープ・放射線の利用, 原子力の基礎講座 7 (1996)