

放射線遮蔽せっこうボードの開発

鈴木 正樹^{*1}, 岡本 肇^{*1}, 櫛部 淳道^{*1}, 池尾 陽作^{*1}
乗物 丈巳^{*1}, 小田川雅信^{*1}, 佐藤 洋介^{*2}, 米澤 宗晴^{*2}
*1 株式会社竹中工務店, *2 吉野石膏株式会社

1. はじめに

近年、日本における放射線治療が適用される患者数はこの 20 年間で増え続け、国内外の診療ガイドラインで放射線治療は多くのがんの標準治療のひとつとして推奨されてきた。今後の超高齢化社会の中で、身体に優しい放射線治療の適用患者数は欧米諸国並みに増加することが予想され(図 1)¹⁾, これに伴い放射線関連施設の新築工事や既存施設の増改築工事の増加も見込まれている。従来、放射線治療施設やその周辺施設における放射線の遮蔽には、鉛板や鉄板などと併用してコンクリートが多く利用されている。特に PET 薬剤製造施設をはじめ高エネルギー加速器を有する施設においては、厚いコンクリートの壁で囲われているため、レイアウトの可変性、拡張性に乏しく、患者数の拡大への施設的な対応は困難である。今後、高齢化に伴う放射線治療室は益々増大し、特に施設運用しながら工期・レイアウト変更の制約がある医療施設(病院)などの増改築工事においては乾式放射線遮蔽技術が求められている(図 2)。

本稿では、このような放射線遮蔽のニーズに対応するための新技術として、筆者らがこれまでに取り組んできた“乾式放射線遮蔽壁技術”²⁾からボード技術へ発展させた“放射線遮蔽せっこうボード”³⁾について報告する。

2. 放射線遮蔽せっこうボードの開発

2.1 開発目標の設定

本ボードの開発目的は、 γ 線や X 線の遮蔽で一般的に多用される鉛付せっこうボードに代替可能な人と環境に安全な素材から構成される鉛フリーボードを開発することである。特に、医療施設においては、新築工事における簡便に且つ短工期、さらには増改築工事においては、既存診療への影響を最小限とし乾式で施工できる放射線遮蔽ボードのニーズは極めて高い。本ボードは、 γ 線と X 線に対して効果的に遮蔽し、人と環境にも安全性が高く、そしてリサイクル性のある遮蔽材料を目指す。以下に開発目標を示す。

- ① 量産製造に最適化した材料構成の検討とボードとしての必要強度の確保
- ② 材料の均一性も含み、乾燥密度が 1.8 g/cm^3 以上を確保
- ③ 管電圧 100 kV の X 線に対して 1.5 cm 厚で鉛当量 1.5 mm 以上を確保
- ④ 鉛を使用しない人と環境に配慮した安全性の高い素材から構成(リサイクルも可能)

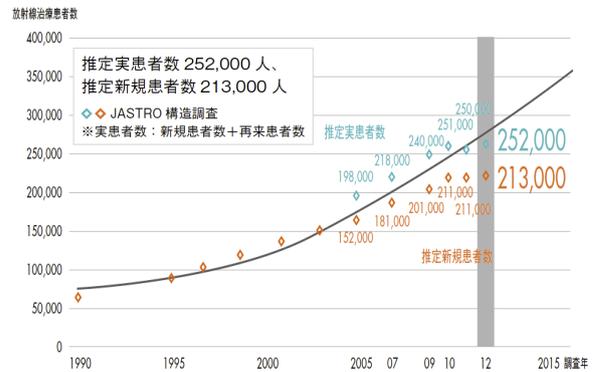


図 1. 放射線治療患者の推移¹⁾

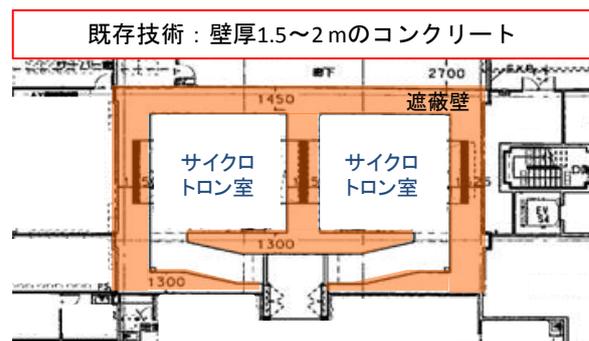


図 2. 放射線治療施設の課題

2.2 材料構成の諸検討および検証

本ボードが対象とする放射線は γ 線とX線であり、 γ 線やX線の効果的な遮蔽には、一般的に光子と物質との相互作用(主に、光電効果、コンプトン散乱、電子対生成)の関係から、鉛、タンゲステン、鉄に代表される原子番号Zの大きい元素、つまり高密度な素材が要求される⁴⁾。また、ボード製造は量産機による製造がベースとなるため、量産製造における材料のミキシング制御をはじめ、硬化時間や乾燥プロセスの最適化など様々な要素検討が必要とされる。

我々は、人体や環境への安全性とリサイクル性も考慮しながら素材ベースから検討した結果、図3(a)に示すように構成材料には、 β 型半水せっこう($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$)と重晶石(硫酸バリウム: BaSO_4)を選定した。特に、高比重化と密度のバラつきを抑制し、ボード製造時の量産ライン上の諸条件を十分検討した結果、ミクロンオーダーの粒径を有する天然素材の重晶石を選定した。

一方、ボード材としての構造面(強度)については、一般のせっこうボードで使用される紙の代わりに図3(b)の断面模式図に示すようにガラス繊維不織布を選定し、サンドイッチ構造を採用した。この構造とすることで、最終切断工程における寸法精度の高いスクエアエッジの縁部形状を実現し、張り合せ目地部の隙間を最小限に抑える形状とした。

これら材料構成をベースに、目標達成に三次元モンテカルロ輸送計算コード(PHITS)⁵⁾による解析技術を取り入れ、遮蔽性能の予測を繰り返し行いながら配合量の最適化を行った。その結果、材料の粒径制御をはじめ製造技術の最適化により、乾燥密度が 1.8 g/cm^3 以上の遮蔽せっこうボードが達成された。部材内部の素材の分布評価は、図4に示すように電子顕微鏡による形状観察や元素マッピング分析を行い、遮蔽に極めて重要となる重晶石の面内均一性も確保された。開発した遮蔽せっこうボードの外観および仕様を図5と表1に示す。表1の遮蔽ボードの仕様に示されるように、曲げ破壊荷重は、長手方向900 N程度、幅方向500 N程度の力学性能が確保され、一般の紙付せっこうボードと比べて格段の柔剛性と粘り強さを有していることが明らかとなり、開発目標①、②は達成された。

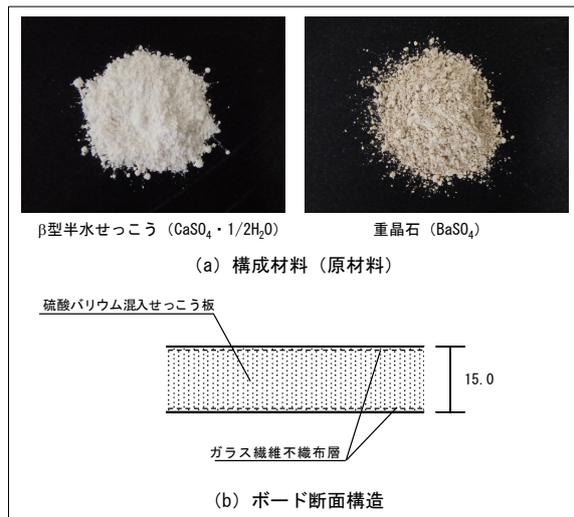


図 3. 材料構成³⁾

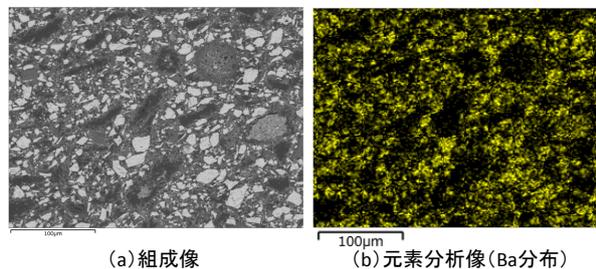


図 4. 素材の均一性評価(電子顕微鏡像)

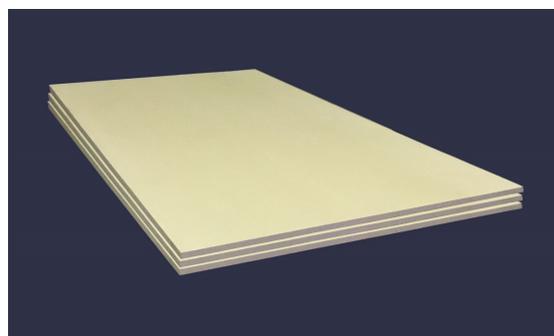


図 5. 放射線遮蔽せっこうボードの外観³⁾

表 1. 放射線遮蔽せっこうボードの仕様³⁾

寸法	T15 mm × W910 mm × H1820 mm	
縁部の形状	スクエアエッジ	
重量(比重)	44.7 kg/枚以上(1.8 以上)	
含水率	3%以下	
曲げ破壊荷重	長さ方向	650 N以上(900 N程度) ^{※1}
	幅方向	220 N以上(500 N程度) ^{※1}
防火性能	不燃材料 NM-4604	
ホルムアルデヒド放射量	0.1 mg/L未満	
鉛当量(X線管電圧100 kV)	1.5 mm ^{※2}	

※1 試験方法 JIS A 6901 () : 実測値。 ※2 公設試験所による測定 (JIS Z 4501準拠)

2.3 放射線遮蔽性能の検証

2.3.1 試験体準備と試験機関の選定

開発した遮蔽せつこうボードのγ線およびX線に対する遮蔽性能を評価するために、生産ラインで製造されたT15×W910×H1820 mmをベースに試験体を準備した。遮蔽試験時の試験体サイズの影響を除外するために、試験体サイズはT15×200×200 mmとした(図6)。γ線およびX線に対する遮蔽性能試験は、ともに成績証明書を発行できる公設試験所にて実施した。

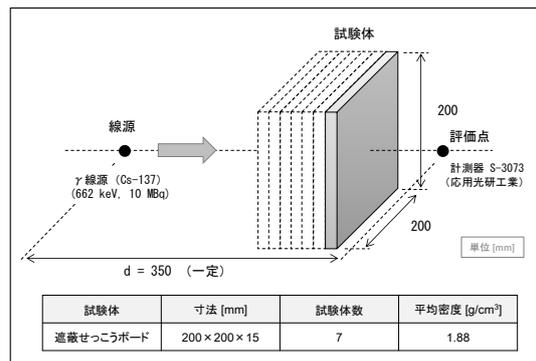


図6. γ線遮蔽性能試験の概要³⁾

2.3.2 γ線に対する遮蔽性能の検証

γ線に対する遮蔽性能試験は、図6に示すように鉛コリメータでビーム化されたγ線源と測定器(検出器の測定中心)までの距離を一定とし、その間に試験体がない場合とある場合について、空間線量率(1 cm線量率当量⁶⁾)をそれぞれ10回測定し、その平均値から透過率を算出した。γ線源はCs-137線源(光子エネルギー 662 keV, 10 MBq)を使用し、測定器は応用光研工業製S-3073(1インチφ NaIシンチレーション検出器)を用いた。計測は、材料厚が1.5, 3, 4.5, 10.5 cmについて行った(図7)。さらに、遮蔽性能を規格化するために厚さの異なる鉛板を用いて同様に遮蔽率を求め、鉛当量を算出した。

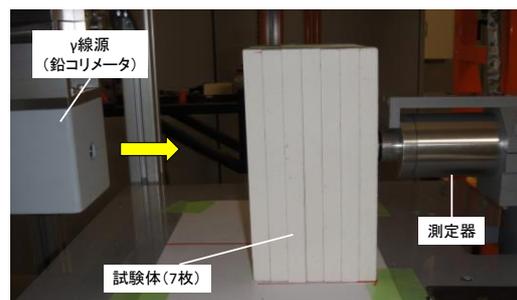


図7. γ線遮蔽性能試験の様子

表2. γ線に対する透過率と鉛当量³⁾

材料厚 [cm] (枚数)	1.5 (1枚)	3.0 (2枚)	4.5 (3枚)	10.5 (7枚)
透過率	0.879	0.755	0.636	0.295
鉛当量 [mm]	1.4	3.1	4.9	13.1

γ線(662 keV)に対する試験結果を表2に示す。各材料厚に対する透過率と鉛当量が明らかとなった。図8に示すように、γ線遮蔽試験結果から3.0 cm厚で透過率が約0.76となり、鉛当量3 mmを超える優れた遮蔽性能があることが明らかとなった。

この結果から、医療施設などで対象となる消滅放射線(511 keV)など比較的高エネルギーのγ線遮蔽が必要となるPET検査室等への適用が考えられ、幅広い応用展開が期待される。

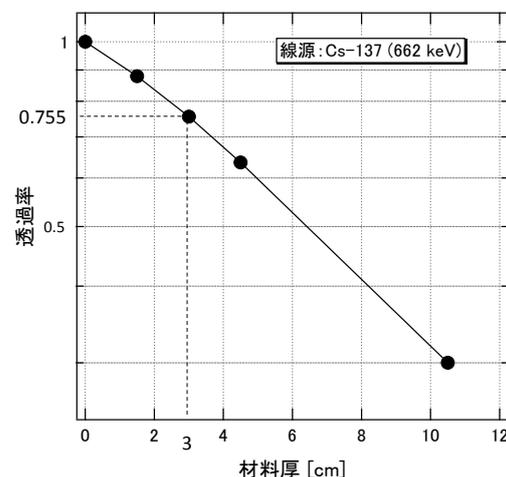


図8. γ線に対する透過特性³⁾

2.3.3 X線に対する遮蔽性能の検証

X線に対する遮蔽性能試験は、JIS Z 4501「X線防護用品の鉛当量試験方法」に準じて実施した。図9に示すように、X線装置はMG-452型(エクスロン・インターナショナル社)を使用し、測定器は電箱照射線量率計RAMTEC-Solo型A-4プローブ(東洋メディック社)を使用して行った。試験体は、T15×200×200 mmを2枚準備した。所定のX線管電圧に対し、透過X線量(空気カーマ)を2回測定し、その平均値から鉛当量を算出した。計測は、1.5, 3.0 cmについて行い、遮蔽性能比較基準の鉛当

量の算出は、標準鉛板の透過 X 線量の減弱率から二次補間で求めた。

X 線遮蔽性能試験の様子を図 10 に示す。X 線管電圧 100, 150 kV に対する遮蔽性能試験結果を表 3 に示す。試験結果から、放射線遮蔽せっこうボードは、X 線管電圧 100 kV に対して材料厚 1.5, 3.0 cm において、それぞれ、鉛当量 1.63, 3.05 mm の遮蔽性能があることが明らかとなった。また、X 線管電圧 150 kV に対して材料厚 1.5, 3.0 cm において、それぞれ、鉛当量 0.70, 1.30 mm の結果が得られた。

この結果から、管電圧 100 kV の X 線に対して、鉛 1.5 mm 厚と同等の遮蔽性能が確保でき、ボード 1 枚 (15 mm 厚) で置き換えが可能となった。目標水準とした X 線管電圧 100 kV に対して、材料厚 1.5 cm で鉛当量 1.5 mm 以上の遮蔽性能が確認され、開発目標③は達成された。今後、病院施設をはじめ、様々な X 線検査装置が利用される検査室等への展開が期待される。

2. 4 施工性およびリサイクル性の検証

本製品による遮蔽壁の構築には、一般せっこうボードと同様に下地には内装工事で使用される軽量鉄骨 (LGS) がベースとなり、タッピングねじによる留め付けを基本に施工検討した。また、遮蔽仕様によって重ね張り施工も必要となるため、2 枚以上の張り付けは一般的なせっこうボードで標準化されている接着剤とステープルの併用による施工方法の検討も行った。

施工検証を繰り返し実施した結果、図 11 に示すような留め付け工法が確立された。具体的な施工方法については、図 12 にクロス張りを含めた施工事例を示す。まず、1 枚目の留め付けは、横張りを基本とし、遮蔽せっこうボードに下穴処理を施すことにより、タッピングねじによる留め付け時のボードの浮き上がりの抑制と留め付け時のホード端部のクラックを防止し、留め付けねじ間隔も含め確実な留め付け方法を確立した。2 枚目の留め付けは、遮蔽性能の低下を抑制した目地部をずらした縦張りを基本とし、接着材の塗布量とステープル間隔の最適化を行った。ボード施工時に基準値を超える隙間 (0.5 mm 以上) が発生した時やクロス張り仕上げ時の V カット目地部処理の際には、開発した専用充填材 (遮蔽パテ材) を充填することで補修・調整できることも確認した。これら施工検証の結果から、従来鉛ボードの施工で課題となっていた接合部や端部の鉛テープ処理に熟練技術者の対応を必要とせず、一般の内装用ボードと同様に乾式で簡便に施工できる工法を確立することができた。

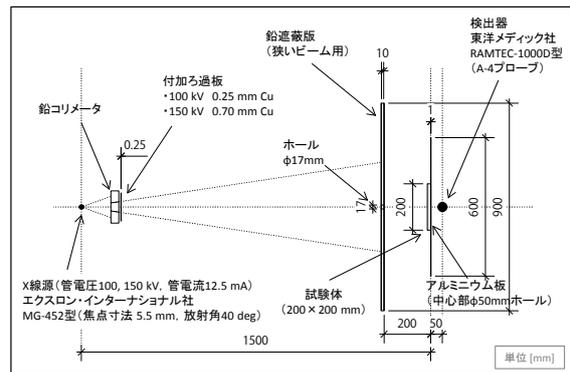


図 9. X 線遮蔽性能試験の模式図 (平面図)³⁾

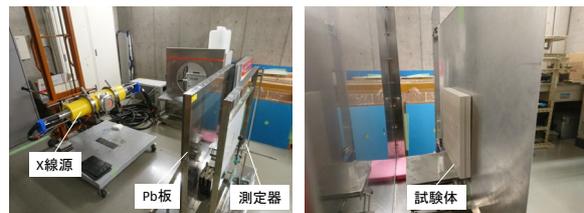


図 10. X 線遮蔽性能試験の様子

表 3. X 線に対する鉛当量³⁾

X線管電圧	材料厚 [cm]	
	1.5	3.0
100 kV	1.63 mmPb	3.05 mmPb
150 kV	0.70 mmPb	1.30 mmPb

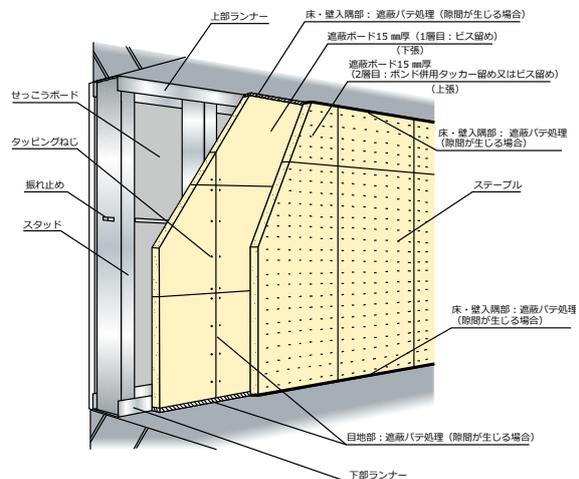


図 11. 放射線遮蔽せっこうボードの留め付け工法



図 12. 放射線遮蔽せっこうボードの施工事例（クロス張り仕上げ）

製造から施工、さらに解体に至るまでのリサイクル性については、本開発品には欧州 RoHS 指令など各種法令で規制されている鉛などの有害重金属を一切使用していないため、各工程で発生する廃材は一般のせっこうボードと同様にメーカー指定のリサイクルが可能となった。さらに、従来鉛ボードで課題であった施工時に発生する鉛廃材や鉛切削ゴミの発生を完全に抑制することが可能となり、開発目標④は達成された。本ボードの製造から廃材処理までのプロセス管理により、施工者にとっても安全であり、地球環境にも安全で且つ優しいリサイクル性の高い遮蔽空間を提供することが可能となった。

3. 品質管理と適用範囲

3.1 品質管理手法の確立

本開発品の技術適用に対して、製品の製造から施工に至るまでの品質管理基準の策定とチェック体制を構築した。図 13 に代表的な製造から出荷前までの製品検査、荷受けから施工完了までの施工管理の流れを示す。開発した放射線遮蔽せっこうボードは、ISO9001 取得製造工場で製造され、JIS A 6901 に基づき厳格に品質管理され施工現場に出荷される。本開発品は、製造メーカーの自主検査に加え、条件に応じて製作要領書を基準とした品質管理を実施し、原子力施設やその周辺施設への対応も可能としている。また、施工管理については、図 14 に示す遮蔽ボードの納まり詳細図と施工試験結果に基づき整備した施工要領書を基準に、一般的な内装業者へ技術指導を実施することにより安定した施工を可能とした。さらに、本開発品は、防火材料として不燃材料 (NM-4604) の大臣認定を取得し (表 1)、内装制限にも幅広く対応でき、ボード 2 枚以上の重ね張り工法により様々な遮蔽仕様にも対応することが可能となった。



図 13. 製造から施工までの品質管理

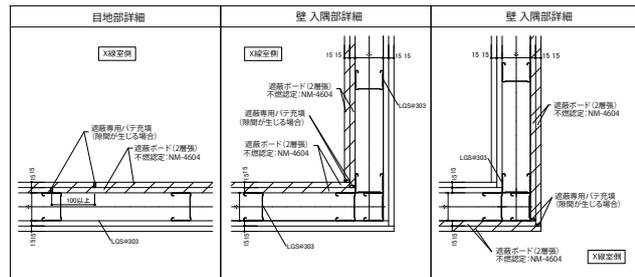


図 14. 遮蔽ボードの納まり詳細(接合部・入隅・出隅)

3.2 適用範囲

開発した遮蔽せつこうボードの適用範囲は、放射線の中でも γ 線と X 線を対象とする機器やそれらを利用する様々な施設に対して、新築工事から増改築工事まで幅広く適用することが可能である。特に、医療施設では、一般 X 線撮影装置、X 線 CT 装置、一般 X 線透視撮影装置、循環器用 X 線透視撮影装置(アンギオ)、乳房用 X 線撮影装置(マンモグラフィ)、歯科用 X 線撮影装置等が該当し、これらを設置する X 線診療室が対象となる。これまでに、図 15 に示される適用事例を含め、 γ 線や X 線の遮蔽を必要とする複数のプロジェクトに本開発品が適用されている。さらに、今後、新たに需要拡大が見込まれる小型衛星工場をはじめとする航空宇宙産業への展開も期待される。



図 15. 医療施設への適用事例(CT 室)

さらに、今後、新たに需要拡大が見込まれる小型衛星工場をはじめとする航空宇宙産業への展開も期待される。

4. まとめ

本稿では、開発した放射線遮蔽せつこうボードについて、主にボードに必要とされる材料構成の検証、 γ 線・X 線遮蔽性能の検証、施工方法の検証を中心に、その概要を報告した。本開発によって目標水準をすべてクリアし、鉛フリーの放射線遮蔽せつこうボードによる遮蔽空間を提供できる工法も確立された。今後は、病院内の一般 X 線撮影室、CT 室、マンモグラフィ検査室をはじめ、様々な放射線診断・治療施設において適用が可能となり、特に需要が見込まれる医療分野をターゲットに普及・展開が期待される。

【参考文献】

- 1) 日本放射線腫瘍学会:「放射線腫瘍医になろう」, (2017).
- 2) 鈴木ら:放射線遮蔽ブロック技術に関する研究(その 1 γ 線遮蔽ブロック), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp. 1107-1108, 2018 年 9 月.
- 3) 鈴木ら:放射線遮蔽ホード技術に関する研究(その 1 γ 線遮蔽ボード), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp. 655-656, 2019 年 9 月.
- 4) 中村尚司:「放射線物理と加速器安全の工学」, 地人書館(2001).
- 5) T. Sato, et al.: Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52. J. Nucl. Sci. Technol. 50: 913-923, 2013.
- 6) The International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 74, Pergamon (1996).