

特殊医療施設 PET センターの設計と施工

Report of Planning and Production for Building on The Positron Emission Tomography

平栗 次夫*	森田 直弘***
Tsugio Hiraguri	Naohiro Morita
加藤 俊一**	鷹野 文英*
Shunichi Katoh	Fumihide Takano
白鳥 智之**	仲川 常勝*
Tomoyuki Shiratori	Tsunekatsu Nakagawa

要 約

本報告は、PET (Positron Emission Tomography) カメラ、X 線 CT 診断装置、X 線胸部撮影装置を備えた「ガン検診センター」を建設するにあたり、設計から施工までの概要をまとめたものである。設計については設計主旨および設計段階における検討事項を述べている。施工については、遮蔽性能を有した鉄筋コンクリート躯体の使用材料から施工までの留意点と、電気・給排水・空調換気における貫通部処理の考え方や放射性同位元素を含んだ空気や水の処理について述べている。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 設計の概要
- § 3. 施工について
- § 4. まとめ

§ 1. はじめに

ここ十数年、心臓病・脳卒中に代わり、ガンが日本人の死因のトップになっている。ガンは早期発見こそが最善の治療と言われている中で、厚生仙台クリニックはポジトロン断層撮影法 (PET) を主軸とした最先端のガン検診センターとして計画された。

従来、ガンの発見には形態学的診断である X 線 CT 撮影や MRI などの機器が用いられてきた。しかし、近年、血液の代謝や血流量、酸素消費量などの生態的機能の情報が定量できる PET 装置を使用して、ガンの早期発見が可能となってきている。今回の「ガン検診センター」には、サイクロトロン発生装置をはじめ、PET カメラ、X 線 CT 診断装置、X 線胸部撮影装置などを備えている。これらの機器は放射線を発生したり、放射性薬剤を施した検診者が使用するので、その放射能が医療関係者や第三者に影響を与えないために、建物自体に遮

蔽機能が求められる。当建物は、躯体を成すコンクリートで放射能を遮蔽する設計となっている。

本報告では、遮蔽性能を要求されたコンクリートと放射性を取り巻く電気設備、排水設備、空調換気設備について述べる。

§ 2. 設計の概要

PET 装置や、その装置で使用する放射性同位元素を発生させるサイクロトロンは、放射性同位元素を扱うことから、文部科学省大臣の「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の規定」により、放射性同位元素の使用と放射線発生装置の使用許可を得なければならない。許可条件として、施設内での放射線被曝の防止と施設外への放射線漏洩の防止の 2 点が挙げられる。

施設内での被曝対策については、放射線使用施設または使用室とその他のエリアの防護区画のみならず、内部にいる人に対する配慮が必要となる。施設の職員は、放射線を扱う部屋がどこであるか、自分がどの程度の放射線を扱っているのか自覚しているため、マニュアルの整備等でも対応が行えるが、検診者に対しては、設計上での対応を図る事が必要となる。そこで、この建物では検診者が待機する場所を、各々の PET 検査室の近傍に設定し、放射線溶液を注射した検診者から医療関係者および第三者への被曝の低減を図るなどの配慮を行った。

また、施設外への放射線漏洩防止については、遮蔽区画の形成と、放射性同位元素を含んだ、排水、排気の処

* 東北 (支) 仙台 (出)

** 東北 (支) 建築部設計課

*** 東北 (支) 建築部設備課

理が必要となる。

遮蔽区画の形成については、区画内に存すると想定され、放射線量と区画壁の質量により区画の仕様が決定される。本施設においては、区画壁は鉄筋コンクリート造とし、区画壁に設ける建具には、鉛による放射線防護を施す事として設計を行った。区画壁を切れ目無く構築するために、構造上、耐震壁をバランス良く配置し、建物総高さを 20m 以下とする事で、躯体に構造スリットを設けない設計とした。さらに区画を形成している壁や床には、温度応力や乾燥収縮によるクラックの発生を抑制するために、ひびわれ防止鉄筋で補強した。中でも、区画を構成するコンクリートは、文部科学省の施設検査において、遮蔽計算上必要とされた質量を確保されている事が重要な審査項目であることから、今回は、気乾質量で管理する計画とした。

区画壁に対する設備貫通や電気関係の打込みについては、その位置と区画処理に十分な配慮と対策を施した。

排気に関しては、放射線の漏洩防止を目的に、放射線防護区画内を常に負圧とするエアバランスの実現と区画内の汚染濃度を高めない処置及び最終排気の漏洩防止処理が要求され、オールフレッシュエアによる空調と、放射能除去フィルターの設置を行った。

排水に関しては、放射性同位元素を含んだ汚水がそのまま外部に流出することを防ぐため、今回施設内で使用される放射性同位元素の半減期が約 2 時間と短いことを考慮し、一時貯留槽により滞留させてから排水するシステムを採用した。

§ 3. 施工について

3-1 コンクリートの品質について

(1) 要求性能について

今回の建物はコンクリート躯体に遮蔽性能が要求されている。そのためコンクリートに期待される要求性能としては、①コンクリートの気乾比重が 2.1t/m³ 以上、②放射能を漏洩させないためにひび割れを防止すること、の 2 点が挙げられた。これらの要求性能を満たすために以下に掲げる項目に着目して検討を行ったので、これらについて報告する。

i. コンクリートの調合計画について

- ii. 品質の管理方法について
- iii. 補強鉄筋について
- iv. 施工について

(2) コンクリート調合計画について

当工事の設計基準強度は 24N/mm² であり、温度補正などを考慮した呼び強度は 27~33N/mm² である。コンクリートに使用した材料を表-1 に、調合を表-2 に示す。AE 減水剤混入の場合は、単位水量が 176~180kg/m³、単位セメント量も 400kg/m³ を越す調合となることから、コンクリートの比重を極力高くすることおよびひび割れの発生防止のために高性能 AE 減水剤を使用して単位水量および単位セメント量を低減させた。高性能 AE 減水剤を使用することにより単位水量を 166~170 kg/m³ に、単位セメント量を 400kg/m³ 以下に低減することができた。以上のことから実施工には④~⑥の調合したコンクリートを使用した。なお、表中の※印は呼び強度 33N/mm²、単位水量を 160kg/m³ の条件で試験練りを実施したが、ワーカビリティが現場に適していないと判断したため、現場での適用は行わなかった。

また、気乾比重が 2.1t/m³ 以上必要であることから、特殊混和材の検討も行ったが、今回試験練りした試験体の気乾比重を測定すると 2.1t/m³ 以上あったので、施工性を考慮し、今回調合した普通コンクリートを用いることとした。今回使用したプラントでは、2 種類の細骨材を混合して粒度調整しており、粗骨材は川砂利を用いていた。骨材の種類、骨材の単位容積質量がコンクリートの比重に大きく影響を与えるので骨材の試験は打設前に実施し、確認を行った。

(3) 現場における品質管理について

現場におけるコンクリートの品質管理としては、JASS 5²⁾ に準じた試験内容の他にフレッシュ時の単位水量の測定および試験体を用いての単位容積質量の測定を行っ

表-1 コンクリートの使用材料

項目	種類
セメント	普通ポルトランドセメント 比重 3.16
細骨材	白石産川砂 比重 2.62
	大和産山砂 比重 2.54
粗骨材	白石産川砂利 比重 2.64
混和剤	AE 減水剤 / 高性能 AE 減水剤

表-2 コンクリートの調合表

番号	呼び強度	W (kg/m ³)	W/C (%)	s/a (%)	混和剤使用量 (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤の種類
						セメント C	川砂 S1	山砂 S2	陸砂利 G	混和剤	
1	27	176	49.5	45.1	1.2	356	393	384	967	4.27	AE 減水剤
2	30	176	46.5	44.5	1.2	379	386	374	967	4.55	
3	33	180	43.5	44.3	1.3	414	373	364	948	5.38	
4	27	166	49.5	47.9	1.0	336	428	417	940	3.36	高性能 AE 減水剤
5	30	166	46.5	47.4	1.0	357	420	409	940	3.57	
6	33	170	43.5	46.2	1.0	391	401	389	940	3.91	
※	33	160	43.5	46.2	1.3	368	411	399	964	5.15	

た。

① 単位水量推定試験

コンクリートの単位水量を現場で簡易に測定する方法として、高周波加熱乾燥法³⁾が挙げられる。今回、この試験方法を参考にし、単位水量を計算し品質の管理に努めた。試験は、現場に搬入されたフレッシュコンクリートをウェットスクリーニングして質量測定し、ウェットスクリーニングしたモルタルを20分間高周波乾燥させて質量を測定した。以下に当工事で行った計算方法を式-1に示す。なお、計算式はプラント独自の補正値を用いたものである。

$$W = \frac{(M1 - M2 - W1) \times M0}{M1} \dots\dots\dots\text{式-1}$$

- W：単位推定質量 (kg/m³)
- M1：ウェットスクリーニングしたモルタル質量 (kg)
- M2：乾燥させたモルタル質量 (kg)
- M0：モルタル単位質量 (kg)
- W1：補正水量 (kg)

ここで用いている補正水量とは、セメントの初期水和についてはセメントの初期水和率、細骨材については細骨材の吸水率、混和剤については固形分率を考慮して求めている。現場における管理値として、170±5kg/m³を基準にし、これを外れるものは打設しないこととした。

測定計算結果については表-3に示す。基準値(170±5kg/m³)を外れるものは無かった。今回の測定値は170+5kg/m³と調合の単位水量より上回る結果となったが、これは、アジテータ車の洗いの影響や骨材の吸水率の影響だと考えられる。

② 乾燥単位容積質量促進試験

今回打設したコンクリートは気乾比重2.1t/m³以上であることを実証しなければならない。そこで、現場で採取した試験体(100φ×200)を用い、JASS 5N T602⁴⁾に準拠した試験を行った。また、試し練り時にフレッシュ時の単位容積質量と乾燥単位容積質量を測定し、フレッシュ時の単位容積質量から乾燥単位容積質量の推定を行った。

その推定式を式-2に示す。

$$Y = 1.1544 \times M - 0.5195 \dots\dots\dots\text{式-2}$$

- Y：単位容積質量推定値
- M：フレッシュコンクリートの単位容積質量

推定および測定結果を表-4に示す。フレッシュ時に測定し、推定した単位容積質量は2.1t/m³以上であった。乾燥単位容積質量促進試験の結果は、ほとんど推定値より上回っている。乾燥単位容積質量促進試験の結果が2.1t/m³以上であったので、問題無く検査を受けることができた。今回用いた推定式は、数少ないデータからの推定式なので、信頼性は劣るものの、現場における管理の一助となった。

(4) ひび割れ補強筋について

当建物は設計段階からひび割れに対して誘発目地を設

表-3 コンクリートの単位水量測定結果

呼び強度 (N/mm ²)	単位水量 (kg/m ³)		調合と計算値の差
	調査水量	計算値	
33	170	173	3
33	170	170	0
33	170	175	5
33	170	173	3
33	170	174	4
33	170	172	2

表-4 コンクリートの単位容積質量

打設日	推定値	乾燥単位容積質量促進試験結果			
		No. 1	No. 2	No. 3	平均値
12/6	2.144	2.196	2.182	2.183	2.187
12/9	2.146	2.210	2.206	2.215	2.210
12/26	2.155	2.118	2.184	2.179	2.160
12/27	2.138	2.184	2.171	2.172	2.176
1/21	2.140	2.174	2.166	2.185	2.175
1/22	2.144	2.122	2.131	2.143	2.132

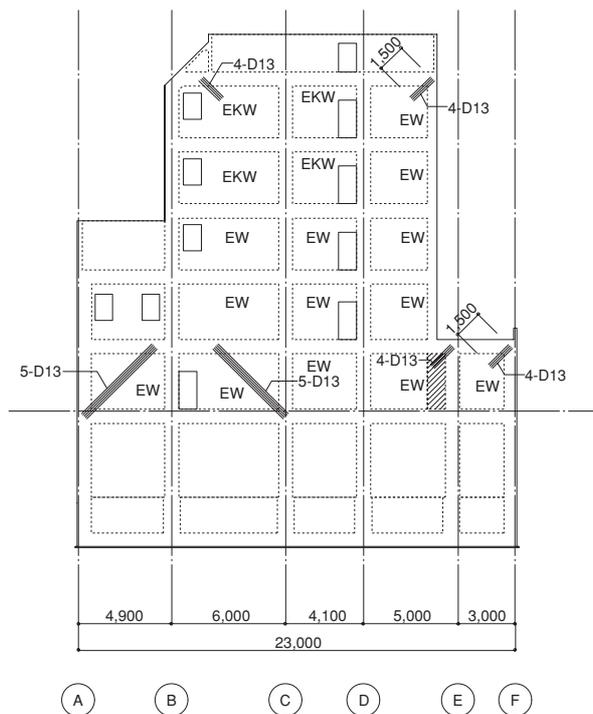


図-1 ひび割れ補強鉄筋の配置例

けない設計となっている。また、コンクリートに遮蔽性能を持たせることから壁、スラブの部材厚さは300~400mmとなっている。これらの部材に対してひび割れを防止するには、前項目で述べたコンクリートの単位水量・セメント量を低減させることの他に、ひび割れの発生しやすい部分に鉄筋による補強¹⁾を行うこととした。壁のひび割れ補強筋の配筋例を図-1に示す。

ひび割れ防止のための補強筋の効果として、打設後の初期の乾燥収縮によるひび割れの発生は見られず、また、その後、震度5前後の地震を2回経験しているがその後

の点検の際にもひび割れは発見されていない。今後、継続して観察を行っていく予定である。

(5) コンクリートの施工について

コンクリートの打設に関しては、前項にも述べたように普通コンクリートとしたことにより、通常の打設方法で実施した。しかし、打ち継ぎ部に関しては、以下の項目に注意し、打設計画を行った。

- ① 遮蔽区画の壁内で打ち継ぎを設けない。
- ② 打ち継ぎは遮蔽に影響の少ない水平部での打ち継ぎとする。(スラブ下)
- ③ 打ち継ぎ面は、凹凸をつける。

打ち継ぎ面での凹凸に関しては、打設直後に高圧洗浄により目粗しや凹凸状の部材に型枠作成するなどして、万一ひび割れが生じても放射能が漏洩しないように配慮した。

3-2 電気設備における留意点

(1) 放射線漏洩防止区画壁への配管について

各区画壁へのスイッチ・コンセント及び配管の漏洩防止については露出とすることで対応した。しかし、一部遮蔽処理を行った部分があり、その内容については3-4(4) 図-3 で説明する。

(2) 医療機器への電源について

医療設備への電源対応については、各医療機器の電気使用状況を確認した。3φ-415V/420Vの医療機器用トランスについては、断続的に100kVAを使用するX線CTと、長時間に渡り90kVAを使用するMRIに分かれる。採用するメーカーにより電源の条件が変わるが、心臓まで撮影出来る今回のMRIでは、非常に電圧の変動に敏感であることから最終的に別トランスとすることとした。着工時に医療機器のメーカーが決定されている場合は問題ないが、施工中にメーカーが変更になると、電圧・容量のほかに、電圧変動等の条件が発生するので十分注意が必要だと思われる。

(3) 高調波対策について

空調機器や設備機器等については、高調波対策済みの機器を納入することで対応した。また、医療機器についても、高調波対策済みの機器納入を前提で進め、当初使用頻度の少ないMRIは40kVAで問題が発生しなかったが、機種が90kVAへと変更となり、計算結果より5次と7次に対策が必要となった。高い確率で高調波を防ぐことが出来る低圧側にアクティブフィルターを設置した。

(4) 医療用電源設備の考え方について

医療機器については、日進月歩で高性能化が進んでいるため、設備機器と違い、新製品＝高性能＝使用電気の増加となる。着工時に決定していた機器も工期が長いと、搬入時に変更となる可能性がある。使用する電圧もメーカーにより異なるため、受変電設備の計画は、特に注意が必要で、将来対応可能な様に計画することが大切であ

ると思われる。

(5) 医療機器の電気容量について

設置した大型医療機器については以下の通りである。

サイクロトロン：3φ-200V-50kVA×1台

PETカメラ：3φ-200V-7kVA×2台

MRI：3φ-420V-90kVA×1台

X線CT：3φ-415V-100kVA×1台

アクティブフィルターについては以下の通りである。

420V-3P-50Hz-100A

最終のトランス容量は以下の通りである。

医療用電灯：1φ-150kVA-210/105V

医療用動力：3φ-100kVA-210V

医療用動力：3φ-300kVA-415V

医療用動力：3φ-150kVA-420V

一般用電灯：1φ-150kVA-210/105V

一般用動力：3φ-500kVA-210V

一般用自動力率調整装置については以下の通りである。

220V-3P-50Hz-150kvar-種別II-6%SR付

3-3 給排水衛生設備における留意点

(1) 放射線漏洩防止区画壁への配管貫通について

各区画壁に給水管・排水管が貫通する場合、各場所により放射線の進入方向が異なるので、場所毎に検討を行った。以下の図-2の通り、配管貫通部は天井内なの

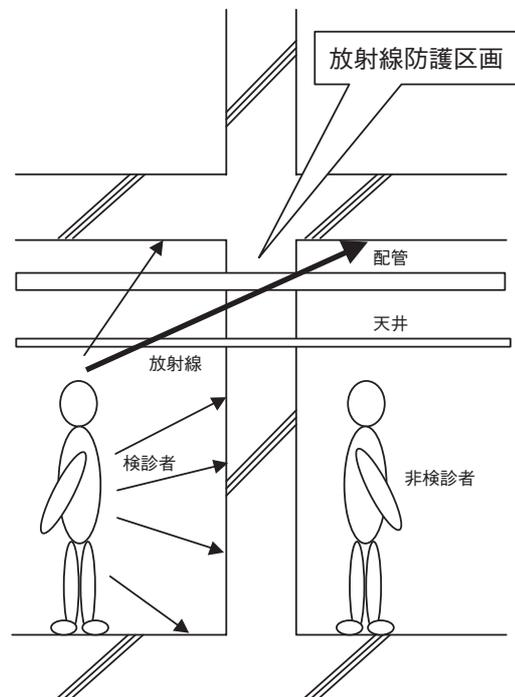


図-2 放射線の放射概要図

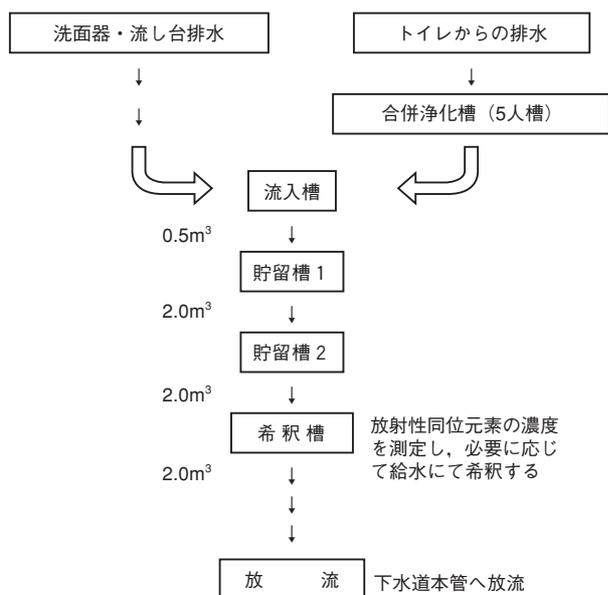
で、放射線を浴びることはなく、このため、特に遮蔽については配慮しなかった。また、放射線は、固定された物の他に、検査者から放射されるので、個々に検討を行った。放射線の固定場所としては、サイクロトロン室・ホットラボ室・廃棄物保管庫、検査者が長く定位置にいる、

投与室・安静室・PET カメラ室について検討を行った。また、その他の躯体貫通については3-4(4)で説明する。

(2) 排水処理施設について

今回対象となる処理水は、放射能同位元素を含んだ排水となり、PET 検診者に使用する薬剤（液体）を製造する地下部分、検診者が使用するトイレ・洗面関係の1階が対象となる。薬剤は注射後、検診者の体内に拡散するが、頭部と膀胱に貯まり、そのままPET カメラにて撮影すると膀胱が強く反応してしまうため、撮影前にトイレに行き排水を行う。この時の排水が一番放射性同位元素を含んでいる。以上の事より、処理が必要な排水は、雑排水と汚水の二種類となる。処理方法は、放射性同位元素は半減期が2時間と非常に短いので、貯留しておけば自然消滅する。このため、放射性同位元素の処理方法は、貯留しているだけとなる。しかし、排水に放射性同位元素が含まれていない事の確認に特殊な検出装置を設置し、24時間排水を管理する必要がある。この装置が日本国内では、2社しか製作していないので、メーカー選定には注意が必要だと思われる。

排水処理のフローとしては以下に示す通りである。



配管材料は、耐火二層管を使用しているが、「ぶついたりして、安易に壊れないこと」との規定があるので、屋内露出部や機械室の低い部分（手で触れられる部分）は、耐衝撃性硬質塩化ビニール管を使用している。また、汚染した排水を流す配管には全て指定のシールを見易い所に貼る事が規定されている。

3-4 空調換気設備における留意点

(1) 放射線防護区画内の空調換気設備について

放射線は薬剤及び注射後の検診者から出ているので、区画内の空気が汚染される事は原則的に考えにくい。しかし、事故が発生した場合に、室内が放射性同位元素で汚染される可能性が有る。この時の事故とは、薬剤を床

に溢す事による汚染、患者の体液が飛び散り床・壁に付着する汚染が考えられる。床・壁の汚染は拭取る事で除去出来るが、室内の粉塵に付着した場合は除去しにくい。このため、空調・換気については、室内の空気を循環させる場合は、区画内から出さないようにし、また、汚染された空気が区画外に出ないように常に負圧にする必要が有ると考えられる。

(2) 放射線防護区画内の空調設備について

空調方式としては、オールフレッシュ型エアハンドリングユニット（AHU）4管式にて外気を空調し区画内に吹き出す。この時に、計画通りの風量を確保するために、定風量ダンパー（CAV）を各室内毎に設置した。また、今回のPET カメラは温湿度の変化により故障する事が考えられるので、床置型の恒温恒湿パッケージを各室に設置し高精度の温湿度管理を行うこととした。

AHUはサイクロロン系統・ホットラボ（薬剤製造室）系統・1階（検査）系統の3台を設置している。

(3) 放射線防護区画内の換気設備について

換気方式としては、AHUで吹き出した空気を室内が負圧になるようにCAVを設置し排気している。しかし、このまま排気すると汚染された空気が外部に排気されてしまうので、HEPAフィルターを介して汚染された粉塵をろ過し、排気するようにした。一般には、放射能除去フィルターと誤解されるが、汚染された粉塵を吸着するだけの簡単な原理の装置である。汚染事故が発生した場合、汚染した粉塵を吸着するが、吸着後2時間で放射性同位元素は半減するので、特に目詰まりを起していなければフィルターの交換の必要はない。交換したフィルターの処理方法は焼却処分となる。

この建物では排水処理と同様に排気される空気が汚染されていないか、フィルター通過後の空気を24時間監視している。また、外部にも放射性同位元素が漏洩していないか24時間監視する装置を設置した。

また、排水管と同様に排気ダクトには全て見易い所に指定のシールを貼った。

(4) 放射線漏洩防止区画壁へのダクト貫通について

衛生配管と同様の検討を行ったが、1ヶ所のみ遮蔽したので、図-3で説明する。

サイクロロン室については、放射性同位元素を発生させる装置なので、他の区画と異なり40cmの遮蔽コンクリートで覆われている。図-3の様に、ドライエリアに設置した給気用チャンバーを通して、①②の角度の放射線が貫通することが分かった。

遮蔽方法としては、一般的に使用されている鉛を採用した。遮蔽量の換算として、厚さ1mmで今回使用したコンクリート10cmに相当するので、遮蔽コンクリート40cm相当である4mmの鉛板にて遮蔽した。③については放射線が40cm以上コンクリートの中を通るので、外部へ漏れる事は無いものと判断した。

前記の電気設備のコンセント・スイッチ関係について

と給排水配管のスラブ貫通部について図-4にて説明する。

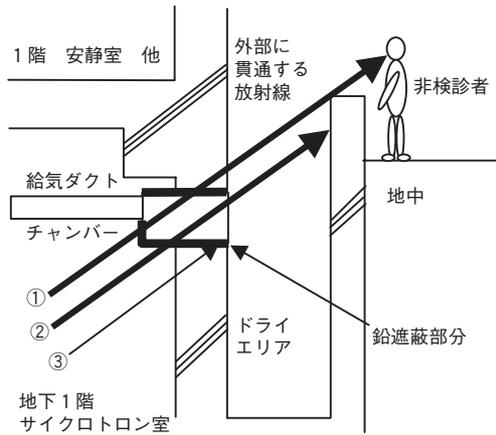


図-3 ダクト貫通部の遮蔽状況

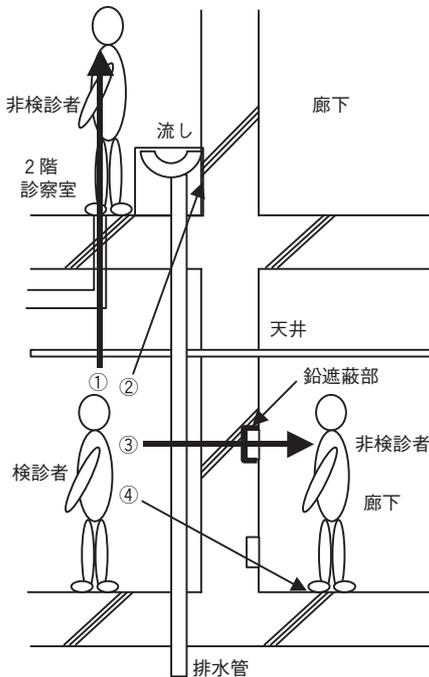


図-4 給排水配管及びスイッチボックスの遮蔽状況

非検診者の放射線対策の考え方について①～④で説明する。

①については、床上掃除口より被曝するので遮蔽が必要となるが、今回は、このような配管を行わずに計画した。

②については、縦配管を放射線が貫通したが、洗し台の上に長時間乗っていないと被曝しないので、遮蔽は不要となる。

③については、スイッチボックスの位置が非検診者の体に当たるので遮蔽が必要となる。打ち込みボックスの5面にコンクリート 30cm 相当の 3mm の鉛を貼った。

④については、壁面近くに長時間立っていないと被曝しないので、遮蔽は不要と判断した。

この様に、同じ遮蔽区画壁を貫通する場合でも、場所により対応が変わるので、事前に十分協議をし、施工方法を決定する必要があると思われる。

以上のことより、放射線の強さ・方向性等を考慮しない場合は、貫通部は全て鉛による遮蔽を行う事になり、過剰施工となる。施工前に設置する医療設備の内容をよく理解し、十分な施工計画を立てた上での施工図を作成・施工を行う事が大切だと思われる。

§ 4. まとめ

今回、放射能を遮蔽するという観点から、医療施設の建設を行ったが、留意した点について以下にまとめる。

- ① 遮蔽性能を満たすコンクリートには、使用材料・調合を十分に検討する必要がある。
- ② コンクリートの品質管理には、単位水量および単位容積質量の試験を行い、確認する必要がある。
- ③ コンクリートにひび割れを生じさせないように、材料及び鉄筋の検討を行う必要がある。
- ④ 電気設備においては、スイッチ・コンセントや配管は露出として計画する。また、医療機器により供給電力が大幅に異なるので、将来性も見込んで供給電力を決定する必要がある。
- ⑤ 給排水衛生設備においては、配管の貫通位置に注意する必要がある。また、放射性同位元素を含んだ排水は、特殊な検出装置を設置した貯留槽が必要である。
- ⑥ 空調換気設備においては、ヘパフィルターを介して汚染された粉塵をろ過し、排気する必要がある。

謝辞：当工事を施工するにあたっては(株)縁設計に、医療関係について、医療法人(社)脳建会および(株)厚生にご指導いただきました。コンクリートの品質管理に関して、当社技術研究所 小林主任および(有)タイセイ産業 南城氏に、コンクリートの性能値および放射性同位元素に関して住友重機械工業(株)安藤氏、野中氏にご協力をいただきました。ここに謝辞を申し上げます。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造のひび割れ対策(設計・施工)指針・同解説, 2000.3.1.
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 2002.
- 3) 友沢史紀, 榊田佳寛, 棚野博之：高周波加熱装置を用いたフレッシュコンクリートの単位水量簡易迅速試験方法の開発, 日本建築学会構造系論文報告集, 第400号, p.1-7, 1989.6.
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書 JASS 5N.