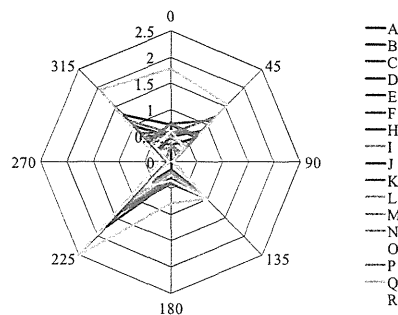


3. 結果

3-1 測定線量

測定された線量, 測定された線量をアイソセンタから 1 m の距離の線量に換算した線量および距離を表 2 に示す.

次に, 測定された線量をアイソセンタから 1 m の距離の線量に換算し, 135 ° の線量を 1 とした相対的な線量比を図 2 に示す. 測定された線量 (バックグラウンドを減算) は 0.00 (Not Detected:ND) から 25.15 mSv の範囲で, ND となった評価ポイントは 2 つ (2/144, 1.4 %) であった. 同様にアイソセンタから 1 m の位置における線量は ND から 170.7 mSv の範囲であった. また, アイソセンタから測定ポイントまでの距離は 158~494 cm であった. なお, 装置 D の 45 ° および 225 ° は測定線量が ND であったため 1 m 換算値は算定していない. また, 装置 G の 45 ° および 315 ° はガントリーの遮蔽の影響を受けたことが明らかのため除外した.



*装置Gは45° および315° の測定値を除外したため掲載していない.

図2 方向別測定線量比(135° の線量を1とした場合)

3-2 算定値と測定値の比較

各施設の評価点における DLP 法および第 188 号法による算定値ならびに測定値に対する比等を表 3-1~4 に示す. また, 表 4 に DLP 法および第 188 号法の方向別の測定値に対する比の比較を示す.

DLP 法は方向別の算定値と測定値の比の平均は 1.7 ± 0.6 (135 °) ~ 57 ± 25 (90 °) の範囲で全体の平均は 15 となり, 方向別の平均では 1 を下回らなかった. しかし, それぞれのポイントでは 140 ポイント中 3 ポイントが 1 を下回り過小評価した (2.1 %). 過小評価の最大は 0.6 であった. 第 188 号法は方向別の算定値と測定値の比が 12 ± 8 (135 °) から 393 ± 306 (90 °) の範囲で全体平均は 102 となり, 方向別の平均では 1 を下回らず過小評価したポイントはなかった. それぞれのポイントでは 2.9 から 1354 の範囲となった.

算定値と測定値の比の方向別の平均ではすべての方向で第 188 号法が DLP 法より高くなり 5.9~6.9 倍 (平均 6.6 倍) であった.

ガントリーや被検者自身の身体による遮蔽割合が少ない方向 (45 °, 135 °, 225 °, 315 °) だけに限定した場合, DLP 法は 1.7~4.1 の範囲であったが, 第 188 号法は 12~25 で DLP 法の方が測定値に近くなった. ただし, DLP 法が過小評価した 3 つのポイントのうち 2 つはこの方向であった. 残りの過小評価したポイントは 0 ° 方向であった.

ガントリー方向 (90 °, 270 °) では, DLP 法がそれぞれ 57 と 44 であったが, 第 188 号法では 393 と 284 でそれぞれ第 188 号法が約 7, 6 倍高くなった.

表3-1 各CT装置のDLP法および第188号法による算定値ならびに測定値に対する比等(A~E)

Code	メーカー名	検出器 列数	Point	mSv/3月			DLP/測定値	188/測定値	188/DLP
				DLP	188	測定値			
A	東芝	64	0	415.3	2141.7	117.9	3.5	18.2	5.2
			45	422.7	2184.9	211.6	2.0	10.3	5.2
			90	422.7	2273.9	9.0	47.1	253.5	5.4
			135	145.9	751.8	86.4	1.7	8.7	5.2
			180	113.1	583.2	14.6	7.7	39.9	5.2
			225	274.9	1439.4	161.3	1.7	8.9	5.2
			270	237.7	1283.1	5.1	46.3	249.9	5.4
			315	545.8	2812.7	312.5	1.7	9.0	5.2
B	東芝	64	0	529.6	2599.8	148.5	3.6	17.5	4.9
			45	440.2	2169.7	245.1	1.8	8.9	4.9
			90	544.5	2787.0	13.7	39.9	204.2	5.1
			135	146.9	734.6	127.7	1.2	5.8	5.0
			180	143.4	704.0	17.9	8.0	39.4	4.9
			225	436.6	2142.6	207.2	2.1	10.3	4.9
			270	277.1	1423.4	8.5	32.5	167.2	5.1
			315	565.4	2775.4	316.9	1.8	8.8	4.9
C	東芝	64	0	179.7	615.0	57.9	3.1	10.6	3.4
			45	72.1	247.7	18.5	3.9	13.4	3.4
			90	85.8	306.8	3.1	27.5	98.3	3.6
			135	44.2	152.2	43.0	1.0	3.5	3.4
			180	26.6	91.0	4.6	5.8	19.7	3.4
			225	119.5	409.4	63.4	1.9	6.5	3.4
			270	103.8	370.9	3.2	32.6	116.4	3.6
			315	72.1	247.7	8.1	8.9	30.7	3.4
D	東芝	80	0	15.8	74.5	19.6	0.8	3.8	4.7
			45	15.8	74.5	0.0	—	—	—
			90	15.5	75.6	0.3	59.4	290.6	4.9
			135	7.1	33.6	11.4	0.6	2.9	4.7
			180	5.8	27.4	1.8	3.2	15.1	4.7
			225	8.4	39.8	0.0	—	—	—
			270	19.9	97.4	1.2	16.1	78.9	4.9
			315	20.4	96.3	17.6	1.2	5.5	4.7
E	東芝	64	0	295.3	1114.3	71.6	4.1	15.6	3.8
			45	322.5	1221.8	61.4	5.3	19.9	3.8
			90	330.4	1300.1	5.8	57.1	224.7	3.9
			135	147.2	560.9	72.2	2.0	7.8	3.8
			180	57.8	218.4	8.9	6.5	24.5	3.8
			225	204.7	779.5	112.8	1.8	6.9	3.8
			270	396.8	1559.8	8.1	49.2	193.5	3.9
			315	261.7	994.4	43.8	6.0	22.7	3.8

* 装置Dの45°および225°は測定値が検出限界以下のため比は算定していない。

表3-2 各CT装置のDLP法および第188号法による算定値ならびに測定値に対する比等(F~J)

Code	メーカー名	検出器列数	Point	mSv/3月			DLP/測定値	188/測定値	188/DLP
				DLP	188	測定値			
F	日立	64	0	187.8	884.2	60.1	3.1	14.7	4.7
			45	124.5	588.5	137.3	0.9	4.3	4.7
			90	270.5	1312.7	2.7	99.1	480.8	4.9
			135	113.6	537.7	37.7	3.0	14.3	4.7
			180	54.5	256.4	6.7	8.1	38.3	4.7
			225	98.5	465.0	47.4	2.1	9.8	4.7
			270	179.2	871.6	3.0	59.9	291.5	4.9
			315	255.7	1203.8	73.9	3.5	16.3	4.7
G	GE	64	0	376.6	1219.2	103.4	3.6	11.8	3.2
			45	551.4	1784.1	—	—	—	—
			90	250.0	839.1	7.2	34.7	116.3	3.4
			135	170.2	552.0	127.3	1.3	4.3	3.2
			180	168.3	544.9	15.5	10.9	35.2	3.2
			225	256.9	833.8	68.2	3.8	12.2	3.2
			270	406.2	1360.2	3.4	117.9	394.8	3.3
			315	562.6	1821.8	—	—	—	—
H	日立	64	0	214.7	1239.3	78.1	2.8	15.9	5.8
			45	343.0	1982.3	116.6	2.9	17.0	5.8
			90	332.8	1983.5	7.7	43.4	258.6	6.0
			135	410.8	2373.2	212.5	1.9	11.2	5.8
			180	99.4	573.6	18.3	5.4	31.3	5.8
			225	115.2	665.0	104.5	1.1	6.4	5.8
			270	109.9	658.6	4.9	22.5	135.1	6.0
			315	204.7	1181.1	134.5	1.5	8.8	5.8
I	日立	16	0	12.2	108.3	4.4	2.8	24.5	8.9
			45	17.3	155.2	2.5	7.0	62.9	9.0
			90	32.1	295.5	1.4	23.5	216.5	9.2
			135	14.7	132.5	13.3	1.1	10.0	9.0
			180	5.5	49.1	1.3	4.3	37.8	8.9
			225	7.0	63.4	5.8	1.2	11.0	9.0
			270	23.4	215.9	0.9	25.7	237.2	9.2
			315	10.2	91.6	0.9	11.2	100.7	9.0
J	GE	64	0	228.6	1133.5	75.3	3.0	15.0	5.0
			45	165.1	822.0	45.8	3.6	17.9	5.0
			90	314.2	1609.0	8.6	36.3	186.1	5.1
			135	183.0	910.3	122.1	1.5	7.5	5.0
			180	116.1	575.5	25.5	4.5	22.5	5.0
			225	374.2	1858.9	327.0	1.1	5.7	5.0
			270	399.6	2043.9	6.9	58.0	296.6	5.1
			315	358.6	1781.7	69.8	5.1	25.5	5.0

* 装置Gの45°および315°はガントリーの遮蔽の影響を受けたことが明らかなため除外した。

表3-3 各CT装置のDLP法および第188号法による算定値ならびに測定値に対する比等(K~N)

Code	メーカー名	検出器列数	Point	mSv/3月			DLP/測定値	188/測定値	188/DLP
				DLP	188	測定値			
K	GE	64	0	400.7	2358.3	108.6	3.7	21.7	5.9
			45	480.9	2829.0	174.9	2.7	16.2	5.9
			90	255.2	1559.4	3.6	71.4	436.2	6.1
			135	158.7	936.2	75.6	2.1	12.4	5.9
			180	133.8	787.7	26.7	5.0	29.6	5.9
			225	169.1	999.0	106.4	1.6	9.4	5.9
			270	326.5	1992.7	11.1	29.5	180.3	6.1
			315	344.3	2026.8	128.6	2.7	15.8	5.9
L	シーメンス	128	0	551.9	2515.3	118.8	4.6	21.2	4.6
			45	330.4	1507.1	65.3	5.1	23.1	4.6
			90	592.6	2791.5	14.9	39.8	187.5	4.7
			135	380.0	1736.2	291.3	1.3	6.0	4.6
			180	150.2	684.4	20.7	7.3	33.1	4.6
			225	227.1	1036.8	150.9	1.5	6.9	4.6
			270	330.4	1560.5	6.9	47.9	226.5	4.7
			315	339.5	1548.6	80.1	4.2	19.3	4.6
M	東芝	320	0	283.7	4819.2	73.6	3.9	65.5	17.0
			45	205.9	3497.8	119.9	1.7	29.2	17.0
			90	375.2	6426.3	4.7	79.1	1354.3	17.1
			135	151.3	2574.5	72.2	2.1	35.6	17.0
			180	98.7	1676.1	10.8	9.1	155.3	17.0
			225	93.8	1596.0	46.0	2.0	34.7	17.0
			270	230.8	3955.4	5.8	39.9	683.7	17.1
			315	205.9	3497.8	111.2	1.9	31.5	17.0
N	東芝	320	0	107.5	1617.6	32.7	3.3	49.5	15.1
			45	100.9	2068.0	43.0	2.3	48.1	20.5
			90	222.8	3380.8	4.5	49.7	753.8	15.2
			135	109.2	1646.2	68.9	1.6	23.9	15.1
			180	43.7	658.4	6.4	6.8	102.3	15.1
			225	25.7	389.2	15.7	1.6	24.7	15.1
			270	154.7	2348.8	3.1	49.6	752.8	15.2
			315	67.9	1022.5	30.9	2.2	33.0	15.1

表3-4 各CT装置のDLP法および第188号法による算定値ならびに測定値に対する比等(O~R)

Code	メーカー名	検出器列数	Point	mSv/3月			DLP/測定値	188/測定値	188/DLP
				DLP	188	測定値			
O	シーメンス	64	0	218.9	1633.3	82.6	2.7	19.8	7.5
			45	307.6	2292.0	101.2	3.0	22.6	7.5
			90	253.4	1960.2	3.3	78.0	603.1	7.7
			135	133.9	1009.9	65.8	2.0	15.3	7.5
			180	75.7	564.7	12.7	5.9	44.3	7.5
			225	71.1	530.6	38.1	1.9	13.9	7.5
			270	200.1	1549.7	8.8	22.6	175.3	7.7
			315	231.0	1726.8	95.6	2.4	18.1	7.5
P	シーメンス	128	0	307.5	1795.8	94.4	3.3	19.0	5.8
			45	150.7	880.0	46.6	3.2	18.9	5.8
			90	208.5	1254.7	4.7	43.9	264.4	6.0
			135	104.6	608.3	44.5	2.3	13.7	5.8
			180	89.2	519.1	11.2	7.9	46.2	5.8
			225	62.7	365.9	29.6	2.1	12.3	5.8
			270	119.0	720.6	4.2	28.6	173.2	6.1
			315	150.7	880.0	35.6	4.2	24.7	5.8
Q	シーメンス	128	0	199.0	1231.0	54.3	3.7	22.7	6.2
			45	101.6	633.6	25.4	4.0	25.0	6.2
			90	130.9	836.7	1.2	111.8	715.2	6.4
			135	63.8	397.7	36.4	1.8	10.9	6.2
			180	63.8	395.8	9.9	6.5	40.1	6.2
			225	66.2	414.0	30.4	2.2	13.6	6.2
			270	112.0	720.6	3.2	35.2	226.2	6.4
			315	96.9	602.0	30.8	3.1	19.5	6.2
R	GE	64	0	161.0	510.8	65.845	2.4	7.8	3.2
			45	248.9	789.9	64.35	3.9	12.3	3.2
			90	193.2	632.9	4.095	47.2	154.5	3.3
			135	131.0	416.3	90.35	1.4	4.6	3.2
			180	48.3	153.2	11.83	4.1	12.9	3.2
			225	65.7	209.5	30.355	2.2	6.9	3.2
			270	193.2	632.9	4.29	45.0	147.5	3.3
			315	236.0	748.9	67.73	3.5	11.1	3.2

表4 方向別の算定値と測定値の比の平均等

Point [°]	算定値/測定値				
	DLP		188		188/DLP
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	
0	3.4	1.6	22	14	6.5
45	3.6	1.9	23	14	6.4
90	57	25	393	306	6.9
135	1.7	0.6	12	7.8	6.7
180	6.8	3.0	45	34	6.7
225	2.1	1.2	13	7.4	6.0
270	44	24	284	190	6.4
315	4.1	2.9	25	21	5.9
平均	15		102		6.6

4. 考察

4-1 方向別の線量分布

散乱線の分布が砂時計型ではなく人が手足を伸ばしている形になることを確認できた。これは円柱形ファントム測定の際に存在しない被検者自身の身体の遮蔽効果によるものである。

4-2 ガントリーによる遮蔽の割合

表5 ガントリー方向の線量低下の程度

Point[°]	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	平均	標準偏差
90	0.036	0.029	0.037	0.023	0.032	0.044	0.024	0.025	0.047	0.031	0.022	0.033	0.022	0.033	0.024	0.047	0.016	0.031	0.031	0.009
270	0.036	0.035	0.032	0.039	0.037	0.030	0.017	0.049	0.043	0.020	0.054	0.027	0.052	0.031	0.082	0.073	0.050	0.032	0.041	0.017

* 線量が最も高かった方向に対するガントリー方向の線量比

測定された線量が最も大きかった方向に対するガントリー方向の線量の比を求めた値を表5に示す。90° および 270° 方向のガントリーによる遮蔽割合はそれぞれ平均で 0.031 ± 0.009 , 0.041 ± 0.017 であった。装置による遮蔽割合の違いはあるものの最小 0.082 の遮蔽効果があることを確認できた。メーカーや装置によって内部構造が異なる可能性があり遮蔽割合も変わる可能性があるが4メーカー18台のデータからは最低でも0.1の遮蔽割合を見込むことが可能ではないかと考えられた。また、DLP法は散乱線を主体とした算定法であるため、この遮蔽割合を導入することでガントリー方向の算定値を測定値により近づけることができると考えられた。最小の算定値/測定値は16.1であるが遮蔽割合0.1を考慮すると1.61となり過小評価せずに算定値を測定値に近づけることができる。

4-3 DLP法の課題

DLP法は第188号法に比べ測定線量により一致する結果となった。ただし、ガントリーおよび被検者自身の遮蔽効果の少ない方向では過小評価したポイントが2.9% (2/68) で全方向では2.1% (3/142) であり、最小では測定値に対する算定値の割合が0.6になった。DLP法はその根拠が不明確^{3,4)}で、なおかつLarsonら⁵⁾が過小評価している可能性を指摘している。遮蔽計算ではCT室の画壁等の遮蔽体の透過率のファクターもあり、これがそのまま管理区域境界の線量を過小に評価することになるわけではないが、散乱線量の評価の観点からは課題となる。

4-4 第188号法の課題

NCRPは多列のCT装置の放射線安全評価において、ビームサイズの影響が大きくなることから、実効稼働負荷をそのまま使って算定することを推奨していない。本研究結果から本邦の実効稼働負荷を用いた算定法である第188号法が安全側に評価することは確認できたが方向別の平均であっても12~393倍で過大に評価していると考えられる。すべてのポイントで過小評価せず安全側に評価することは重要であるが、過大過ぎると遮蔽資源を浪費することにつながるた

め、より算定値を測定値に近づける方策の併用と CT の検出器列数（ビームサイズ）を考慮すべきかどうかならびに実効稼働負荷評価方法の確立が課題として残った。

4-5 実効稼働負荷および DLP に関する課題

本研究において実効稼働負荷の算出に使用する管電流値は平均管電流を調査、使用した。管電流は、被検者線量を最適化するために体型に合わせ管電流を変調する CT 自動露出機構を使用することが主流であるため、1 検査内でも値が変動する。装置メーカーや被検者の体型、撮影条件により異なるが、今回の調査で使用した CT 装置における設定最大管電流に対する平均管電流の比は 63.1 %～75.2 %であった。第 188 号法での遮蔽評価では実効稼働負荷の評価が重要である。しかし、管電流値が変動する現在の CT 装置では実効稼働負荷を正確に評価することは困難である。装置メーカーの対応協力が必要であり今後の課題である。

DLP の表示は International Electrotechnical Commission (IEC) 60601-2-44 ed3.0⁶⁾で義務付けられており、本研究で調査した DLP は検査毎に CT 装置に表示される値を採用した。また、CT 装置に表示されている DLP は平均管電流から算出されていることを確認した。しかし、本研究の調査により、CT 装置に表示されている CT Dose Index (CTDI) vol の算出にはスキャン時に設定した最大管電流を使用する方法と実際に照射された管電流の平均値を使用する方法があり、装置メーカーにより異なることが明らかとなった。本邦で現在普及している CT 装置はこの 2 種類の方法が混在している。これは一つ前の IEC60601-2-44 ed2.1⁷⁾では CTDIvol 表示は最大値を表示するように勧告されていたため、装置の製造年により混在することになったと推察している。つまり、DLP を遮蔽評価に使用するためには管電流の扱いによる影響を小さくするため CTDIvol から求めるのではなく、CT 装置に表示された値を使用することが斉一した方策となる。IEC は 2010 年に IEC60613⁸⁾によって管電流は平均値で表すことを採用している。これは 2013 年に日本工業規格においても JIST60613⁹⁾によって採用されている。ただし、CT 自動露出機構に基づいた DLP 算定は実効稼働負荷の場合と同様に正確に把握することが難しく、また、メーカー間差の検証が十分なされていない上に、CT 装置の製造年によっても異なる可能性もあると考えられる。現在、CTDIvol ならびに DLP の表示が平均値を提示する流れになっている中で遮蔽計算に使用する場合、DLP の CT 装置ごとの差を十分に把握するかあるいはそれらの影響分を考慮した安全側の設計にすべきではないかと考えられた。

つまり、CT 装置は CT 自動露出機構の利用が多い現状を踏まえると、ファントムによる遮蔽計算方法の研究はあくまで一定の条件下あるいは理論上成り立っているだけと言えるかもしれない。また、メーカーや製造年の違いや患者の体型ならびに患者の部位や方法の違いによっても安全側で、なおかつ過大に評価し過ぎないことを確認することが望ましい。

これまで欧米を中心に実施されてきた CT 装置の遮蔽計算研究³⁻⁵⁾は、メーカーおよび装置数ならびに被検者(ファントムを含む)数が限られており検証が不十分である可能性がある。しかし、本研究では 4 メーカー 18 台の CT 装置の実使用に基づいた評価であり、後述するようにそれらの影響を織り込みつつ安全側に評価できることを確認できた。

4-6 DLP法と第188号法のどちらを使うべきか？

現時点では課題が少ないDLP法が最も合理的に使用できると考えられる。ただし、NCRPの提案している散乱係数では過小評価する可能性があるため、散乱係数は頭部、体幹部でそれぞれ2倍 (k_{head} ($1.8 \times 10^{-4}[\text{cm}^{-1}]$) と k_{body} ($6 \times 10^{-4}[\text{cm}^{-1}]$)) にして使用し、ガントリー方向ではガントリーの遮蔽割合0.1を取り入れるなど、対抗板での遮蔽効果をより適切に考慮すべきであるとする (Japanese DLP法とする)。散乱係数を倍にしてガントリー方向に遮蔽割合0.1を考慮した場合の各方向の平均値は3.4~11の範囲となる。NCRPが提案したDLP法の課題であったガントリー方向を除いた方向の過小評価とガントリー方向の過大評価の課題を本研究による提案によって解決できた。ただし、第188号法も4-4および4-5に記した課題を解決することで使用できる可能性がある。また、本研究は4メーカ18装置のデータであり、これまで世界的に行われてきたCT装置の遮蔽計算研究において実際の臨床利用時の規模が最大であることから、本研究を進めることによって欧米人ではなくアジア人の体型に合わせた1検査あたりの散乱係数を求めること等、従来の方法以外の方法を開発することも可能ではないかと考えている。さらに、今回の報告書では検討出来なかった線量分布図法についても検討が必要である。また、回転時間の短縮により装置のスループットの向上が図られていることから、従来の想定を超える患者数の増加の影響に関しても検討が必要であろう。

5. 結論

われわれは、CT装置の遮蔽計算法としてNCRPが提案しているDLP法の課題を改良した放射線事前安全の合理的評価法 (Japanese DLP法) を開発することができた。

また、現在使用されているCT装置の実効稼働負荷およびDLPの評価方法に課題があることを明確にできた。

6. 謝辞

本研究は日本放射線技術学会学术交流委員会関係法令等検討小委員会の支援を受けて実施した。

研究に協力していただいた本邦の医療機関の方々ならびに線量計測に関してご教示いただいた小林育夫氏 (長瀬ランダウア株式会社) に深謝申し上げます。

7. 参考文献

- 1) National Council on Radiation Protection and Measurements. Structural shielding design and medical x-ray imaging facilities, MD: NCRP; NCRP Report 147. 2004.
- 2) 厚生労働省医薬局長通知, 医薬発第188号. 医療法施行規則の一部を改正する省令の施行について, 平成13年3月12日

- 3) J A Cole and D J Platten. A comparison of shielding calculation methods for multi-slice computed tomography (CT) systems. *J. Radiol. Prot.* 2008; 28: 511-523.
- 4) H Wallace, C J Martin, D G Sutton, D Peet and J R Williams. Establishment of scatter factors for use in shielding calculations and risk assessment for computed tomography facilities. *J. Radiol. Prot.* 2012; 32: 39–50.
- 5) Larson SC, Goodsitt MM, Christodoulou EG, et al. Comparison of the CT scatter fractions provided in NCRP Report No.147 to scanner-specific scatter fractions and the consequences for calculated barrier thickness. *Health Phys.* 2007; 93(2): 165-170.
- 6) IEC 60601-2-44, Edition 3.0. Medical electrical equipment- Part 2-44: Particular requirements for the basic safety and essential performance of X-ray equipment for computed tomography. 2009.
- 7) IEC 60601-2-44, Edition 2.1. Medical electrical equipment- Part 2-44: Particular requirements for the safety of X-ray equipment for computed tomography. 2002.
- 8) IEC 60613, Edition 3.0. Electrical and loading characteristics of X-ray tube assemblies for medical diagnosis. 2010.
- 9) JIST 60613 診断用 X線管装置の負荷特性. 2013.

厚生労働科学研究費補助金 地域医療基盤開発推進研究事業
「医療放射線防護に関する研究」(H24-医療-一般-017) (研究代表者：細野眞)

平成 25 年度 分担研究報告書
「放射線診療部門での災害への備えに関する検討」

研究分担者 山口 一郎 国立保健医療科学院生活環境研究部 上席主任研究官

研究協力者

小高 喜久雄	東京ベイ先端医療・幕張クリニック
佐藤 幸光	純真学園大学保健医療学部放射線技術科学科
奥山 康男	駒澤大学大学院医療健康科学研究科
平出 博一	日本画像医療システム工業会 (J I R A)
遠山 尚紀	東京ベイ先端医療・幕張クリニック

研究要旨

【目的】

医療機関の放射線部門の特性に配慮した災害時対応として、放射線障害の防止も念頭に置いた災害に備えた訓練の質の向上策と、災害後に医療機関として最低限の放射線診療が提供できるように可能な範囲で準備する方策を明らかにすることを目的とする。

【方法】

昨年度の研究に加え医療機関内の放射線施設での震災への備えについて、水害に関しても検討範囲を広げると共に、院内の対応を考えるための机上訓練を実施し、問題点を把握する。

【結果及び考察】

災害時の放射性物質の影響に関して危惧されるのは、比較的大きな数量の線源である。災害対応だけではなく、セキュリティ確保の面からも、カテゴリー1 や 2 の線源で診療に使用しなくなったものは回収措置を講じることが望まれる。

災害時の対応を考える医療機関での机上訓練は、職員からアイデアが出され、医療機関として対応を策定していく上で有用であると考えられる。それぞれの医療機関の災害対応からの特性を考慮し、特に災害時の BCP が求められる医療機関では、自治体のハザードマップを活用した対策の検討が推奨される。

【結論】

災害時の医療機関の放射線源がもたらす脅威とその低減策を検討した。カテゴリー1 や 2 の線源で診療に使用しなくなったものは回収措置を講じることが望まれる。災害時の医療機関の対応力を高めるには、自治体のハザードマップを活用した災害対応を考える訓練の実施が有用であると考えられる。

目次

A. 目的.....	17
B. 方法.....	17
C & D. 結果及び考察.....	18
1. 水害の種類と医療機関が受けうる被害	18
1. 1 津波	18
1. 2 広域大水害.....	18
1. 3 都市型洪水（内水氾濫）	18
1. 4 高潮被害	18
1. 5 水害等の被害予測.....	18
2. 核医学施設のハザードマップによる対象施設の潜在リスクの把握	20
3. 震災被害への対応のための訓練シナリオの検討.....	20
3. 1 自施設の構造を知る	21
3. 2 患者を守る.....	22
3. 3 震災時の損傷を最小限にする	23
3. 4 訓練の設定.....	24
3. 5 訓練参加者からのフィードバック	26
4. 災害時の特殊な放射線診療機材対応.....	28
E. 結論.....	28
参考資料.....	29
F. 研究発表.....	29
G. 知的財産権の出願・登録状況	30

A. 目的

今後、発生すると予測される首都直下型地震、東海・東南海・南海地震などの震災など災害の発生時に医療機関が機能停止に陥らないためには、災害時に何が起きるのかを知って、どこまで被害を軽減できるかを考えることが重要である。また、災害時に医療機関内の放射線源が脅威となり得ることから、そのような事態に備え医療機関や行政機関は準備しておくことが必要である。火災も伴う震災や水害（広域大水害や都市型洪水）時などの災害時を想定し、医療用放射線源の災害時における管理の脆弱性を評価し、医療機関職員や患者だけではなく、公衆の放射線防護も念頭に置き、初動のあり方を提示し、医療機関や行政機関が活用できる訓練シナリオをまとめる。昨年度は“震災発生時の医療機関の対応について（震災時の放射線部門の事業継続計画策定のために）”として研究を報告した。これら昨年度に得られた成果は今年度に検討を進めた事項を合わせ、法令で定める放射線取扱主任者の定期講習会（原子力安全技術センター主催の場合）の「放射線の安全取扱」の科目の講義や自衛隊中央病院における放射線業務従事者研修会に反映されている。

多くの自治体が、震災対策を策定しており、それらの被害予測は、東海・東南海・南海連動型地震という3つの巨大地震のうち2つ以上の地震が同時発生する連動型巨大地震（3連動型地震）や、南海地震の震源域の南隣にある日向灘地震など、3連動型地震に限らず南海トラフにおける連動型地震全般が想定されている。例えば、「南海トラフ」を震源域とするマグニチュード（M）9.1の最大級の地震が起きた際の大阪市内の津波の浸水被害を想定した対策が検討されている。この被害予測に関する報告には、防潮堤の強度などを精査した結果が記述されており、京橋駅周辺など都島区や城東区が浸水することが示されている。地震発生から最短2時間弱で大阪市の湾岸部に津波が押し寄せ、新築され乗降客の多いJR大阪駅周辺は最大2メートルの浸水が想定されている。

今年度の我々の研究としては、昨年度の研究に加え医療機関内の放射線施設での震災への備えについて、身近な部分の具体的な取り組みを報告する。

B. 方法

昨年度、検討した災害時のダメージ例の分析に追加し、水害時の被害予測に基づき、今何をすべきか、医療機関としてできることは何かをより具体的に示すことで、多くの医療機関が震災対策として取り組むことができるように示すものである。また、具体的には「病院設備設計ガイドライン（BCP編）」（BCP（事業継続計画）：Business Continuity Plan）を基に自施設の建築構造を知り、地震発生時に患者さんを守る。そのためには、震災による損傷をいかに最小限に止めるかであり、そのための訓練はどのように行うかを検討する。

C & D. 結果及び考察

1. 水害の種類と医療機関が受けうる被害

1. 1 津波

南海トラフを震源とするM9.1の地震が起きた際の大阪市内の津波の浸水被害に関して、防潮堤の強度などを精査した結果、京橋駅周辺など都島区や城東区までも浸水することが示され、地震発生から最短2時間弱で大阪市の湾岸部に津波が押し寄せ、JR大阪駅周辺は最大2メートルの浸水を予測し、大阪府では1万1千ヘクタールの浸水と想定されている。

1. 2 広域大水害

平成24年7月12日熊本広域大水害では、9つの病院と診療所が床上浸水した。昭和57年7月の長崎大水害では、市民病院の地下にあった電気室が浸水し、医療機関の機能が停止した（都市型洪水）。同様の事例は昭和大学病院（昭和24年8月24日）、大阪大学医学部附属病院（昭和36年9月16日）、山口大学医学部附属病院（平成11年9月24日）でも発生した。

1. 3 都市型洪水（内水氾濫）

三鷹市浸水ハザードマップでは内水氾濫も想定されている。

1. 4 高潮被害

湾岸部で広範囲な被害をもたらす可能性がある。

1. 5 水害等の被害予測

東京都では、洪水ハザードマップを作成し、津波高及び津波浸水の分布を示している。これらの災害で放射性物質が散逸した場合のリスクとしては、密封線源や放射性医薬品の散逸が考えられる。放射性医薬品の散逸によるリスクは限定的であると考えられるが、例外的なものとして、I-131の治療用カプセルでは無視できないリスクをもたらさるので手で拾わないなどの注意が求められる。密封線源としては、密封性を保ったままの環境放出や密封性が破壊された場合の環境への散逸に対する考慮が求められる。密封性を保ったまま環境に出ると、その線源に近づく生物や放射線に脆弱な機器に影響を与えうる。数量の高い線源は遮蔽容器が重く、そのことにより環境への散逸を防ぐことが期待されるが、耐火性の規格がないために、通常の火災の想定を超えて熱を長時間受けると密封性を損ね、環境に散逸する可能性がある。また、密封性の規格に災害対応が十分に盛り込まれていないために、災害による物理的な作用により密封性が損なわれることが考えられる。これまでのところ災害例では確認されていないが、盗難や予期せぬ行為により医療機関に保管されていた線源が持ち出されて散逸し、比較的大きな塊から大量の放射線を受けたり、細かく環境中に散逸することで、周辺環境に汚染が広がる事例が海外で確認されている。このため、特に数量が大きいカテゴリー1の線源で、現在使われておらず医療機関がその扱いに困惑している線源の適切な処理・処分を進める必要があり、カテゴリー2の比較的数量が大きな線源も含めて、診療活動に利用されていないまま保管されているものは、線源の回収を促進することが望まれる。これらの線源は輸出元の国で引き取ることが可能なものもあるが、船便の利用は寄港国の理解を得ることのハードルが高く、航空便の利用では費用負担だけでなく総数量の制限がある。これらのハードルは線源の安全とセキュリティの確保のための国際的なルールを遵守することでは解決ができず、金銭面で

は解決がつかない事態となっている。その他の解決策も考えられるが、Ra-226の線源の有効活用のように、その具体的な目途が立っておらず、関係者の総力を結集させる必要があると考えられる。

環境に放出された放射性医薬品が集積する可能性があるのは、下水処理場、その物質に対して濃縮係数が高い生物、化学的な特性による環境中の捕捉が考えられる。放射性医薬品の利用は大半が外来診療で用いられており、環境負荷量としては、全体としてみると災害時に大きくなるとは考えがたいが、局所的に集中するとリスクを大きくしうる。

この他、医療機関では放射性医薬品や密封線源を含む臓器を保存していることがあるが、これらはその問題を解決しないと保管場所スペースがなくなるという問題はあるものの、災害時の公衆への放射線リスクの観点からは、医療行為により体内に放射性物質を持つ患者による影響と比べると相対的には小さいと考えられる。災害の犠牲者の体内から刺入後1年以上経過していないI-125シード線源を取り出すことは、これまでの災害でもなされているが、放射線防護上のインパクトは小さいと考えられる。災害の状況によっては、平常時のルールをそのまま適用せず臨機応変に対応することが求められるとも考えられる。

医療技術の進歩に伴い発生することを想定すべき課題としては放射化物への対応が考えられる。放射化物への対応は計画被ばく状況での規制整備が進みつつあるが、災害時の対応が未知数である。放射化物のうち、日本で100箇所程度ある医療用サイクロトロン設置施設では、建屋のコンクリートの一部はクリアランスレベルを超える程度放射化していると考えられる。サイクロトロン施設での中性子フラックスは $10E+5 \sim 10E+6$ n/cm²/sであり、累積中性子フルエンスが $10E+21$ n/cm²を超えることから、一定程度運転した場合には、自己遮蔽体の有無に関係なく、もっとも濃度が高い領域ではRS-G-1.7を超えるのが確実である。平均濃度としては、クリアランスレベルを超えないので規制対象外にすることも考えられるが、日本では、諸外国とは異なり、廃棄物関連業界の心情を考慮すべきとの現場の意見に基づき、一定の範囲は放射化物として対応する（＝コストをかける）ことが想定されている。このような（施設がダメージを受けた際の）解体作業時を想定した保険商品は、いまだに提供されていないので、有事の際に混乱が拡大するかもしれない。また、放射性の建屋の解体などにあたっては作業員だけでなく、近隣住民や周辺企業などとの合意形成も必要になると考えられる。

これらを廃棄物として扱うことを考えると、特殊な自己遮蔽体で放射化したものはその組成が廃棄物としての制限を超えると（例えば、ポロンが溶出するコンクリートは放射性廃棄物として扱う場合であっても）、許可廃棄業者の日本アイソトープ協会が受け入れるのは困難な状況であることから課題になると考えられる。

そうではなく日本アイソトープ協会が引き取り可能である場合には、非圧縮の放射性不燃物の引き取り費用は50リットルドラム缶で一本116,500円（消費税抜き）で50kgで12万円程度になることから、5トンのサイクロトロン本体だと1千2百万円程度になりそうである。放射化の判断基準としてRS-G-1.7を使用し、コンクリートは40立方メートル程度と想定した場合には、放射性廃棄物としての引き取り費用だけで2億円程度となり、それに加え放射性物質を含む壁を解体する費用も必要になる。

これらの課題は災害発生と関係なく、将来的に生じ得るので、その対策を検討する必要がある。

2. 核医学施設のハザードマップによる対象施設の潜在リスクの把握

核医学施設（主に PET 施設）を保有する医療機関を対象に、洪水及び津波等による被害の危険性の有無を、ハザードマップを用いて判定した。施設所在地等の資料は日本核医学会 PET 核医学分科会ホームページの PET 施設一覧を用い、ハザードマップは国交省が提示しているものを用いた。

【日本核医学会 PET 核医学分科会の PET 施設一覧より抜粋】

国内 PET 施設数（推定）

1) 326 施設（2013 年 7 月 23 日現在）

サイクロ施設 : 144 施設

デリバリー施設 : 182 施設

2) 日本核医学会 PET 核医学分科会登録施設数

212 施設（2013 年 7 月 23 日現在）

サイクロ施設 : 144 施設

デリバリー施設 : 68 施設

上記「2）日本核医学会 PET 核医学分科会登録施設」のうち、ハザードマップの洪水・津波予測範囲内にある施設は 23 箇所であった。行政機関（地域保健所）等が、このような施設一覧に、各地区のハザードマップを参考にして放射性同位元素の年間使用予定数量を追加したり、保有する診療用放射線照射器具等を追加することで災害時の危険性を予測することに役立つと考えられる。

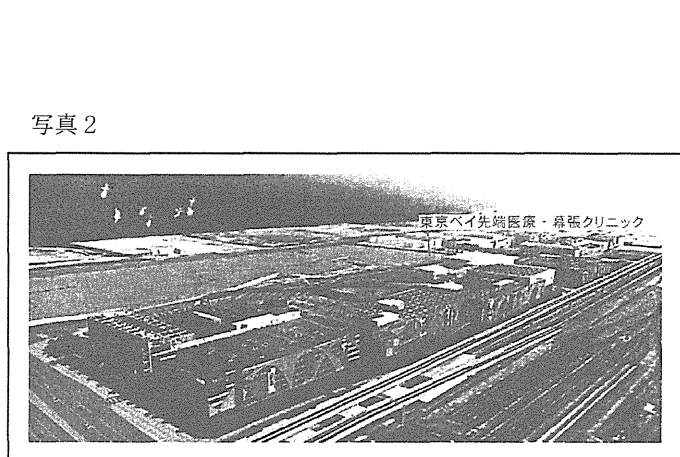
3. 震災被害への対応のための訓練シナリオの検討

建築中の東京ベイ先端医療・幕張クリニック（研究協力者が所属する、放射線科のみを標榜しているクリニック。）を対象にケーススタディを行った。この施設は、南方800mに東京湾、東方600mに幕張メッセ、北方や西方に大規模な商業施設やイベント施設が存在する商業地域に位置する。

阪神大震災における被害状況を検証すると、病院建物の倒壊については兵庫県内の 342 病院のうち、13 病院が全半壊焼失。さらに、診療所を加えると、2,926 のうち、全壊 239、半壊 270、全半壊 13 となる。インフラ停止により診療機能が停止した医療機関は 973 であり、半数近くが医療機能を停止した状況であった。この現状を教訓として、医療機関は震災に耐えうる構造を備えるべく動き出している。「病院設備設計ガイドライン（BCP 編）」によると、病院建屋の構造は平成 23 年のデータでは全国の医療機関（病院）のうち、全ての建物または一部の建物において新耐震基準を採用している施設が 80%以上になり、平成 17 年の調査報告に比べ 11.4%増加している。ということは、地震に強い医療施設が多くなったと言える。掛川市・袋井市病院企業団立中東遠総合医療センターは震災時に自立して医療が実施できるように計画された新しい医療施設として動き出している。

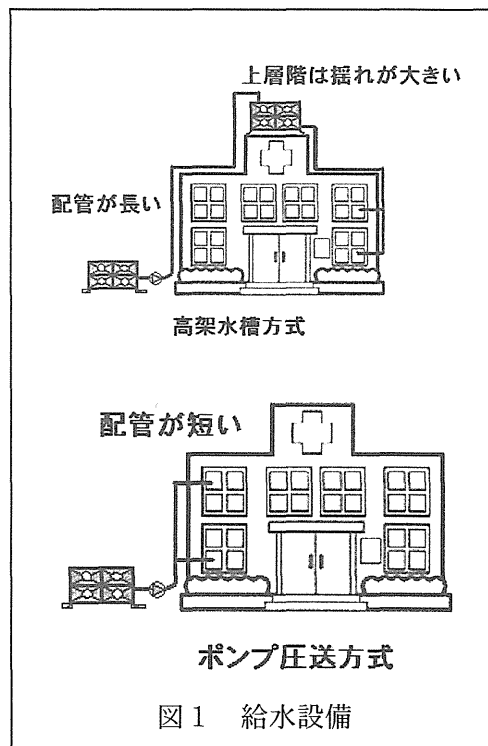
3. 1 自施設の構造を知る

写真1、2に示す建築中の東京ベイ先端医療・幕張クリニックは、南方800mに東京湾、東方600mに幕張メッセ、北方に隣接して幕張イオンモール、西方にも幕張イオンモール、コストコと大規模なイベント施設が存在する商業地域に位置する。



当該クリニックは海拔5mという土地に建築されているため、さらに1mの高さにまで1階床面を嵩上げしている。耐震構造として震度7に耐えうる設計である。地下1階、地上2階で、屋上には電源設備、空調設備が配置されており、給水設備（図1）に関しては耐震性を持たせるため、高架水槽方式ではない。高架水槽の場合、貯水量は満水時で通常時の使用水量の1時間程度を貯めることができる。水道水を衛生的に保つため残留塩素の濃度が水道法で定められており、長時間水槽内に貯水することはできない。水槽の水は多ければ多いほどよいと思うが、衛生面から困難である。水槽内の水位は常に変動（減ってから補給される）していることを知っておくことも重要である。高架水槽方式給水システムでは、断水や停電があっても30分～1時間程度は給水を継続できるということは大きなメリットである。しかし、地震時の建物の揺れの大きさに比例して屋上に設置された水槽の被害が大きく、阪神淡路大震災、東日本大震災共に高架水槽自体の損傷で給水システムが停止した事例が多く報告された。よって、当該クリニックでは、ポンプ圧送方式を採用し、給水システムの損傷を最小限にするように設置している。

また、南面800mが東京湾であることから、千葉県ハザードマップを参考に高潮・津波を想定し、施設入口には90cmの防潮堤（写真3、4）を設け、屋上には電気設備の防壁として1.7m～2mのコンクリート壁（写真5、6）を設置している。患者の安全確保と避難誘導が可能になるような



設計、設備の観点から、避難時に避難経路を示す誘導灯を設けた。また、医療機器の購入・更新時に耐震性についても考慮し構造物に確実に固定している。

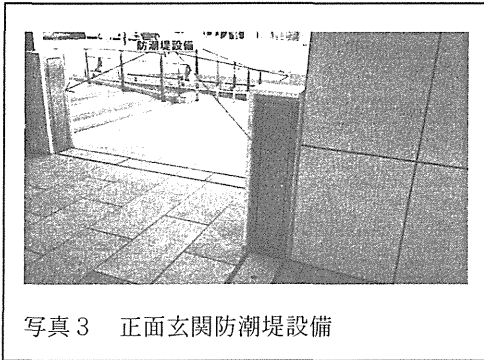


写真3 正面玄関防潮堤設備

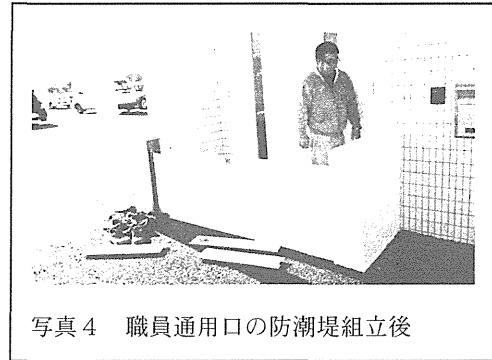


写真4 職員通用口の防潮堤組立後

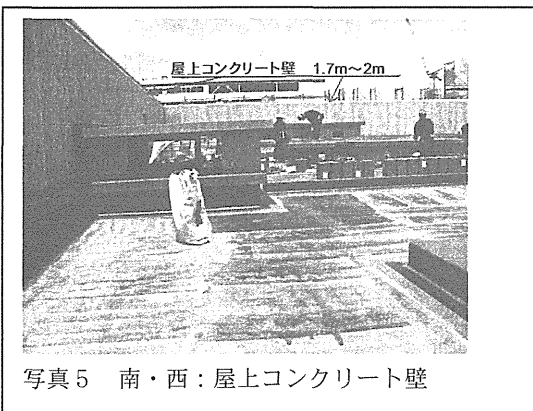


写真5 南・西：屋上コンクリート壁

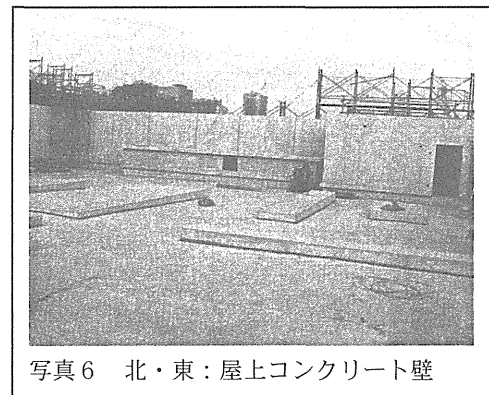


写真6 北・東：屋上コンクリート壁

3. 2 患者を守る

揺れが大きな震度 6 以上になると、経験を超えている（経験をしたことがない）状況なので何をしたらよいのか解らなくなり戸惑うだけになるため、事前の備えが重要となる。

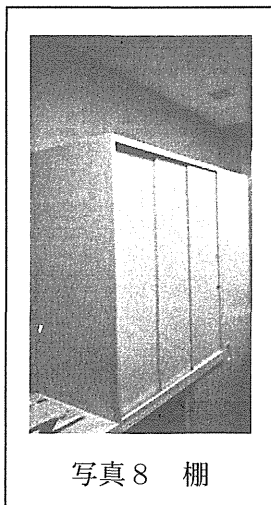


写真8 棚

リスクの洗い出しを行って、より安全側の設備システムを計画し、いざという時のためにも速やかに患者誘導、避難するための設備や空間を確保する機能設計が必須である。この観点では、患者の安全確保と避難誘導がメインになるので、そのための設計、設備が重要である。設計段階で、可能な限り棚は作り付け

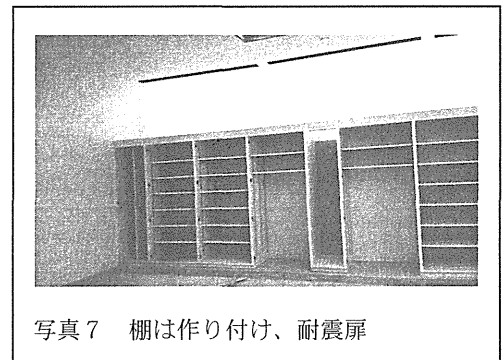


写真7 棚は作り付け、耐震扉

より安全側の設備システムを計画し、いざという時のためにも速やかに患者誘導、避難するための設備や空間を確保する機能設計が必須である。この観点では、患者の安全確保と避難誘導がメインになるので、そのための設計、設備が重要である。設計段階で、可能な限り棚は作り付け（写真7）で扉は耐震扉を使用するなど、棚から物の落下を防ぐことも重要である。また、作り付けができない場合は、棚自体を構造物に固定（写真8、9）するなど、棚の転倒を防止することで、患者・スタッフの安全と避難経路の確保を最優先する。

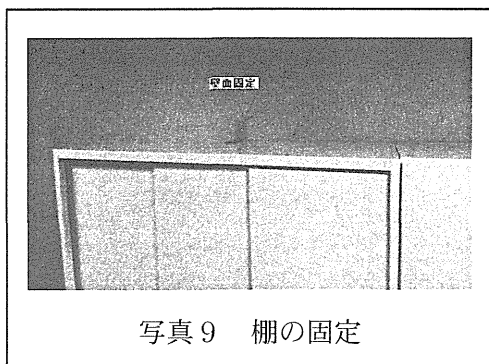


写真9 棚の固定

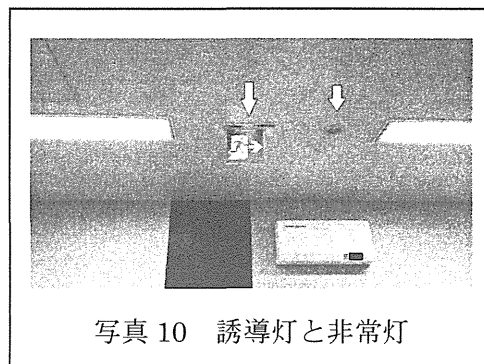


写真10 誘導灯と非常灯

また、避難時に避難経路を示す誘導灯が適切に点灯していること、さらに非常灯も隣接して設置されているので、これらが非常事態時に点灯するかのテストも行わなければならない。

3. 3 震災時の損傷を最小限にする

震災時に医療機能の損傷を最小限にするためには、医療機器（大型装置：放射線発生装置等）の耐震性の強化と震災発生後の応急対策を考えておくべきである。

医療機器については購入・更新時に耐震性について考慮し、構造物への確実な固定（写真11、12）が最も重要である。また、震災発生直後に行う点検、修理、代替品の調達など、考えられる策を検討しておくことも必要である。

大型医療機器であっても震災時に5cm以上移動したという報告もあることから、装置の重量に見合ったアンカー固定が必須である。現在は外国製品の大型医療機器も震災対策として装置に最適な固定方法を提示しており、震度6~7に対しても固定ボルトが耐えうる構造を持っているようである。天井から吊り下げる医療装置に対しては、その位置を正確に把握し、建屋構造物を造る時点で施工図面に書き込み、構造物一体型のアンカー（写真13）を埋め込んでおくことが落下防止策として最も適した方法である。

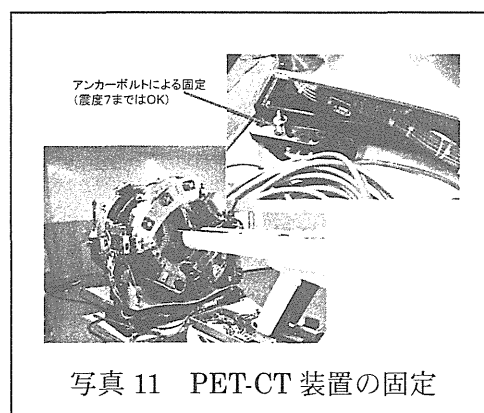


写真11 PET-CT装置の固定

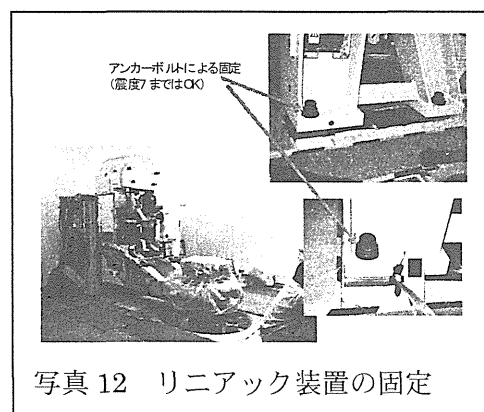


写真12 リニアック装置の固定

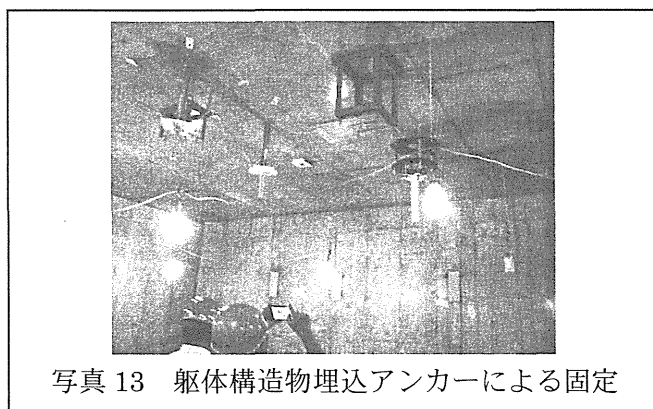


写真13 躯体構造物埋込アンカーによる固定

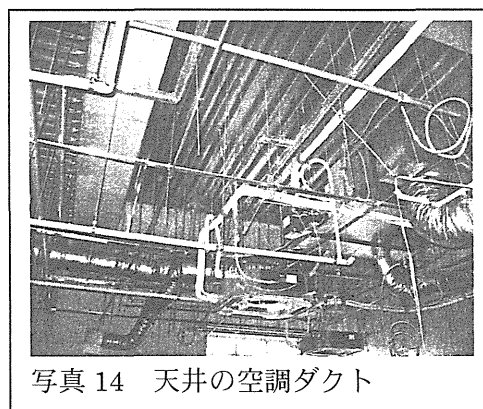


写真14 天井の空調ダクト

3. 4 訓練の設定

訓練には机上訓練と実地訓練がある。机上訓練で重要なことは想定されるあらゆることにどのように対応するかをスタッフ全員で議論することである。実施訓練では、実際に身体で覚えることで体験できるあらゆることを盛り込んだ想定が望まれる。どちらの訓練でもまず初めに考えなくてはならないことは、「自分の病院は自分たちで守る」ということで、そのような気持ちで防災マニュアルを作り、訓練しなくてはならない。“3. 1 自施設の構造を知る”で示したとおり、自施設の耐震化が強化されているとは言え、地震による被害を想定することは難しいが、以下の項目について検討することが重要である。

(1) 地震発生時の被害

地震発生後直ぐにおこる被害として、建物の倒壊、機器の損傷、電力・ガス・水供給の停止、通信回線の遮断などがある。また、地震に伴う被害として、火災の発生、ガス漏れの発生、室内空調の停止、エレベーターの使用不能などがあることは、昨年の本班研究の報告でも記してはいるが、その被害状況をどのレベルに想定するかによって机上訓練での対応が大きく異なってくる。できれば最悪な状況を想定し机上訓練を行うべきである。

(2) 地震発生時の行動

地震発生時は自分自身と患者の安全確保が第一であり、揺れがある程度収まってから院内の被害状況確認を行うこと。

院内確認手順は、各部署共通の手順書と部署毎の手順書に従って手際よく行うことが重要である。これら手順書は机上訓練時に見直しを行い、全員への周知が必須である。

(3) 地震後取るべき行動

患者・職員の避難経路、外来患者・入院患者・来院者、ライフライン、院内設備、医療機器の被害状況及び地震に伴う火災発生の有無などを確認する。最も重要なのは火気使用の厳禁である。医療機関（病院）は、構造的に考えた場合、廊下・階段等の煙突効果（1972年の千日デパート火災では階段部分）による火災被害が拡大する可能性が高く、耐火構造であっても過信してはならない。火災発生時に被害を最小限にとどめる方策を定めること。スタッフ全員が自ら行動できる体制作りが必要である。震災直後に発生する火災には、消防機関も対応に苦慮することは予測されることから、机上訓練時には消火・通報手順についても検討すること。

(4) 閉鎖された空間での被災

昨年の本班研究の報告からも分かるとおり、地震発生時エレベーターは地震を感知して緊急停止する。近年のエレベーターは近接階に停止し扉が開くように設計されてはいるものの、エレベーター内で揺れを感じたら全ての階のボタンを押し、最初に止まった階で降りるということを周知しておくことも必要である。もし、エレベーター内に閉じこめられた場合は外部に状況を知らせる手順などをエレベーター内に分かりやすく明示しておくことも必要である。

以上の4点に基づき、震災を想定し、事務・看護・放射線・医師部門に別れ、部門毎に机上にて震災時の対応を検討し、さらに各部門からの報告を受け机上訓練参加者全員で最良の方法を議論した。当該施設は入院病床を持たないクリニックであり、昨年12月に開院したばかりであるので、基本的な災害対応マニュアルから、当院に最適な災害対応マニュアルの作成を視野に入れて机上訓練

を行った。今回の訓練シナリオは、勤務中で職員が職場内にいる場合を想定し、特に以下の6点を課題とした。

- ①職員自身の安全確保
- ②患者の安全確保に必要な処置や対策を講ずるとともに患者のパニック防止につとめる
- ③必要があれば、避難通路を確保し、患者を誘導避難させる
- ④被害状況の確認と調査を行い、災害対策本部へ報告する
- ⑤二次災害、特に火災の防止につとめ、必要に応じて消火と通報を行う
医療機関であれば、自衛消防隊の編成と任務について地元消防署へ届出していることから、この自衛消防隊の組織体制が使用できる。
- ⑥災害対策本部の指示をうけ、被災患者受け入れ体制の可否確認、及び必要部門への応援と待機

今回の机上訓練のシナリオ

平日の診療時間（患者が多い木曜日を想定）

13:50 受付事務所にて、事務長がテレビ報道及びスマートホンにて、地震速報を入手。

「数分後に震度6強の最も強い地震が来る」と情報を入手。

各部門の検討結果の報告は以下のとおりである。

事務部

- ・院内放送の検討
(院内放送の検討の必要性を確認した。地震への対応の準備を職員に促す)
- ・患者用・診療従事者用ヘルメットの着用を促す
(診療従事者がヘルメットをして、患者はヘルメットなしでの避難とはおかしな構図である。よって、患者用ヘルメットの必要性の検討)
- ・非常用出口の確保
- ・患者人数（外来患者人数と付き添い）の把握
(受診者記録から、院内に滞在している患者人数を把握する)
- ・非常時連絡用器材及び食料等の備蓄庫からの運び出し準備
- ・事務所内の転倒・落下のおそれのある器材類への処置

看護部

- ・救急備品・応急用資器材の持ち出し準備
(マニュアルに記載のある薬剤、応急処置物品等)
- ・来院患者の一時避難場所への誘導
- ・地震の揺れに備えた体勢、及び毛布等クッション材となる備品の確保
- ・津波の可能性を考慮し、使用済み医療廃棄物収納箱はテープにて封をする
- ・患者人数（外来患者人数と付き添い）の把握