

放射線発生装置の解体等に伴って発生する RI 汚染物の種類と物量について

平成 21 年 7 月 24 日
高エネルギー加速器研究機構
梶本 和義

放射線発生装置使用施設の解体等に伴って発生する RI 汚染物の種類・物量については、発生装置の種類、使用方法、加速粒子の種類やエネルギー等に応じた分類を行い、全国に設置されている放射線発生装置使用施設全体を対象とした調査を行った結果をもとに表記 RI 汚染物の種類と物量についてまとめた。

1. 放射線発生装置の設置状況

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（以下、「放射線障害防止法」という。）では、加速の原理や形状から以下のように定義されている。

(1) 電子加速器

直線加速装置、マイクロトロン、ベータトロン、シンクロトロン

(2) 粒子加速器

直線加速装置、コッククロフト・ワルトン型、ファン・デ・グラーフ型、変圧器型、シンクロトロン、シンクロサイクロトロン、プラズマ発生装置

表 1 に上記分類にしたがった日本アイソトープ協会発行の放射線利用統計(2008 年)によるまとめを示した。我が国に設置されている放射線発生装置総数は 1433 台となっている。

放射線発生装置について業種・機関別に見てみると、約 70%が医療機関に設置されており、教育機関は 5%、民間企業、研究機関はそれぞれ約 10%となっている。医療機関で最も多いのが直線加速装置(電子リニアック)であり、次にサイクロトロンである。前者は主に照射治療に用いられており、後者は PET 診断薬の放射性同位元素の製造に利用されている。医療機関では 2000 年に比べてサイクロトロン 100 台、電子リニアック 200 台、合計 300 台の装置が増加しており、医療機関での放射線発生装置の利用が進んでいる。

次に、発生装置の種類毎にみてみると、直線加速装置が約 70%を占めている。そのほとんどが電子リニアックであり、医療機関では放射線治療、民間企業では非破壊検査等の目的に使用されている。この他、電子リニアックは研究機関などで放射光用の電子シンクロトロンの入射器として利用されている。直線加

速装置には、陽子や重イオンを加速するものもあり、医療機関では粒子線治療用の陽子シンクロトロンなどの入射器として使用されている。次に多いのがサイクロトロンであり、放射性同位元素製造や物理学研究用に利用されている。ファン・デ・グラーフ加速装置、コッククロフト・ワルトン加速装置は加速エネルギーが低く、小型の装置が多い。ファン・デ・グラーフ加速装置は、イオン注入、加速器質量分析、元素分析などに利用されている。

2. 評価範囲

上記のことを考慮し、国内に設置されている主な放射線発生装置について、以下のようにして、放射化によって発生する RI 汚染物を見積った。

今回の調査では最も台数の多い医療機関については（1）電子を加速する治療用リニアックおよびマイクロトロン、（2）PET 薬剤製造用小型サイクロトロン、および（3）陽子線および重粒子線を用いる粒子線治療用シンクロトロンを調査した。（1）および（2）は非常に台数が多いことから、物量調査には、日本画像医療システム工業会の協力により、メーカーから提供されたデータを用いることにした。（3）は粒子を加速する放射線発生装置として、以下のその他の機関の調査に含めて行った。

その他の機関については、放射化が発生すると想定される施設について、（1）電子を加速する放射線発生装置および（2）粒子を加速する放射線発生装置に分けて物量を算定した。ファン・デ・グラーフ加速装置、コッククロフト・ワルトン加速装置は加速エネルギーが低く、放射化の可能性は低く、放射化があったとしてもその領域は極めて限られていると想定されるため、クリアランスレベル計算では含めないこととした。

1) 物量計算範囲

今回の見積範囲は「放射線発生装置使用室」（本体室、ビームライン、実験室等）とし、管理区域内にある隣接する付帯設備、機械室、制御室、RI 実験室等は含めない。

2) 評価対象設備

設備、機器としては、電磁石、加速管、ビームパイプ、冷却・真空装置、電源・制御機器、ダクト、配管、ケーブル等について、廃止の際に発生する台数、重量などをリストアップした。

また、放射線発生装置室の建屋については面積、壁厚を出し、コンクリート

量を算出した。

3) 材料区分

評価対象設備から、金属（鉄、SUS、銅、アルミニウム、鉛）、コンクリートに区分した物量を算定した。なお、プラスチック、ガラス、ゴム製品等は日常的に日本アイソトープ協会へ引き渡す廃棄物とし、放射線発生装置で計算する物量に含めない。

4) 放射能レベル区分

低レベル廃棄物、クリアランスレベル廃棄物、非放射性廃棄物に分けて、物量を求める。

3. 医療機関

3. 1 治療用電子リニアック

現在設置されているリニアックのX線最大エネルギーは 10MeV が最も多く、次に 6 及び 4MeV である。10MeV を超えるものは 5% に満たない。

更新は 10 年に 1 回の頻度で行われていると推定され、約 100 台が毎年更新されている。10MeV 未満では放射化の可能性はなく、10MeV ではターゲットおよびその周辺部の放射化の可能性はある。10MeV を超えるとターゲットおよびその周辺部は放射化する。放射化する材料は鉄、銅及びタングステンである。医療用のマイクロトロン(現有 13 台)も 10MeV を超えており、10MeV を超えるリニアックに含めることができる。

一方、建屋はリニアックが更新されてもそのままであり、解体は建て替え、移転、廃止などの際に発生する。建屋では 10MeV を超えると中性子による放射化が認められるが、クリアランスレベルの 1/10 以下である。

3. 2 PET 薬剤製造用小型サイクロトロン

小型サイクロトロンは 2003 年以降に急速に増加しており、古い機種は少ない。また、デリバリシステムの普及もあり、今後サイクロトロンの増加傾向は鈍化すると想定される。サイクロトロンの廃止は病院の建て替え、移転、廃止などの際に発生すると見込まれる。30 年周期での建て替えなどを想定すると、年 5 台程度の廃止が見込まれる。

サイクロトロン本体は 10MeV で約 10 トン、12MeV で約 15 トン、18MeV で約 30 トンである。表層 5cm が低レベル放射化物として計算すると、20% を低レベル、80% をクリアランスレベルとして扱うことになるが、平均濃度で表した場合に

は、鉄ヨークはクリアランスレベル以下になると推定される。材料は鉄、銅、アルミニウムである。

現在、自己遮蔽体付のサイクロトロンを設置も進んでいる。遮蔽体がない場合は、屋内全体に中性子が拡がり、放射化を引き起こす。このため、遮蔽体がない場合、建屋面積 25m²、遮蔽厚 1.5m の場合、低レベル廃棄物 70 トン、クリアランスレベル以下の廃棄物 250 トン、非放射性廃棄物 300 トン程度が発生する。また、自己遮蔽体がある場合、低レベル廃棄物 2 トン、クリアランスレベル以下の廃棄物 6 トンに減少する。また、自己遮蔽体自体は低レベル廃棄物 5 トン、クリアランスレベル以下の廃棄物 38 トンとなる。

4. その他の施設

教育、研究機関および民間施設については、大学等放射線施設協議会加速器安全検討委員会の協力を得て調査を実施した。

粒子加速器施設では加速器本体(ターゲット、コリメータ、ビームパイプ、ビームモニタなど)では加速粒子による放射化が発生しており、低レベル放射化物となる。プラズマ発生装置における放射化の状況や材料も粒子加速器と同様である。クリアランス検討対象物は2次粒子により放射化生じると推定される部位(電磁石、架台、ケーブル、電源、真空ポンプ、冷却水配管、建屋など)となる。また、建屋、遮蔽ブロックの放射化も生じる。

電子加速器施設では、粒子加速器施設に比べ発生廃棄物量は少ない。とくに、放射光施設では、入射器で全廃棄物に対する低レベル廃棄物は 5%以下であり、蓄積リングでは入射部を除き放射化は生じないため、低レベル廃棄物は 1%以下である。また、建屋の放射化はない。

5. アンケート集計結果

医療、教育、研究機関および民間企業の調査結果から、それぞれ機関ごとに最も放射化物発生量の大きい施設についてまとめたのが表 2 である。医療機関の物量は国内に普及している発生装置の機種の中から、最も発生量の大きいものを示した。医療機関以外の施設は複数の放射線発生装置を組み合わせで使用しているため、ここでは最も加速エネルギーの高い放射線発生装置の種別とエネルギーを示している。

表 2 では、発生すると推定される廃棄物を、その材料毎に低レベル廃棄物、クリアランスレベル以下の廃棄物、非放射性廃棄物に分けて集計した結果を示

している。

表3は、クリアランス対象推定物量のみを抽出したものである。表から、SUS、銅及びコンクリートについてはF施設が、鉄及びアルミニウムについてはG施設が最も多くなっている。また、鉛については、治療用電子リニアックが多くなっている。

大型の施設の場合、金属類は、鉄が最も多く、銅、SUSの順となっており、アルミニウム、鉛の物量は少ない。民間企業の場合は、コンクリートはクリアランス対象としているが、金属類は全て低レベルとして扱うことにしているため、物量がゼロになっている。

6. 放射化物中のクリアランス対象物とその評価経路

表4に放射化物（RI 汚染物）のうちクリアランス対象物とその評価経路についての概要を示す。評価経路については、通常埋設処分と再利用が考えられるが、再使用についても検討が必要な経路と考えられる。放射線発生装置の放射化物の特徴は有価物として再利用が行われることである。このため、埋設されるのは、老朽化したり、腐食が進んだりして、分別が困難になったもの等に限定される。また、再使用においては、材料ごとに分類することはなく、そのまま使用されることになる。

7. 放射化物中に生成が予想される核種

クリアランス対象物として、鉄、SUS、銅、アルミニウム、鉛及びコンクリートとした。それぞれの対象物中の生成核種を検討するにあたり、中間報告書に示された考え方をもとに、解体時の放射化物の評価過程を考慮して冷却期間は1年、半減期は1月を超える核種とした。表5に対象物中の生成核種を示した。

各材料で上段に示した核種が主要核種である。中段は核種の生成量(D)及び現在使用されているRS-G-1.7に示されている放射能濃度値(C)をもとに、主要核種のD/Cに対し、その核種のD/C値が1%を超える可能性のあるものを示した。下段はD/C値が1%以下の核種であり、高エネルギー粒子で照射された場合に検出される可能性がある核種である。

表1 放射線発生装置の台数（『放射線利用統計 2008 』）

	機関総数	医療機関	教育機関	研究機関	民間企業	その他
総数 (構成比%)	1,433 (100%)	1,039 (72.5%)	66 (4.6%)	141 (9.8%)	146 (10.2%)	41 (2.9%)
サイクロトロン	198	131	2	22	39	4
シンクロトロン	28	3	3	17	4	1
シンクロサイクロトロン	2	1	-	-	1	-
直線加速装置	1,042	890	22	39	55	36
ベータトロン	4	1	1	2	-	-
ファン・デ・グラーフ加速装置	40	-	16	23	1	-
コッククロフト・ワルトン加速装置	82	-	20	26	36	-
変圧器型加速装置	17	-	-	10	7	-
マイクロトロン	19	13	2	1	3	-
プラズマ発生装置	1	-	-	1	-	-

表2 代表的な機関における放射線発生施設の放射化廃棄物に関するアンケート集計結果

	種類別発生量(トン)	物量(トン)												種類別発生量(トン)					建屋物量(トン)				
		低レベル廃棄物						クリアランスレベル以下の廃棄物						非放射性廃棄物					コンクリート量				
		鉄	SUS	アルミ	銅	鉛		鉄	SUS	アルミ	銅	鉛	鉛	鉄	SUS	アルミ	銅	鉛	低レベル廃棄物	クリアランスレベル以下の廃棄物	非放射性廃棄物		
医療機関	A施設 6MeV 加速粒子:電子 重量(トン)	7.49	0	0	0.49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.49	0	0	0	0	0	0	
	B施設 10MeV 加速粒子:電子 重量(トン)	4.205	0.001	0.2	0.671	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.665	0.4	0	0	0	0	0	
	C施設 15MeV 加速粒子:電子 重量(トン)	4.205	0.001	0.2	0.67	0.4	0.35	0.001	0	0.005	0	0.3855	0	0.2	0.665	0.4	0	0	0	0	0	0	0
	D施設 7.5MeV~18MeV 加速粒子:粒子 重量(トン)	8.7	0.01	0.3	1.75	0	0.7	0	0.2	0.65	0	8	0.01	0.1	1.1	0	1.2	0	0	0	70	250	300
研究機関	E施設 8Gev 加速粒子:電子 重量(トン)	4166	54.2	0	162.1	13	658.4	0.12	0	0.21	0	3166.6	2.08	0	61.89	0	52	100	13	0	0	145788	
	F施設 12Gev 加速粒子:粒子 重量(トン)	12298.5	555.3	0	1288.5	1.3	6799	221	0	496	0	4140	314	0	729	0	1359.5	5.3	3.5	1.3	13774	73283	52359
	G施設 400MeV 加速粒子:粒子 重量(トン)	17997	1450	4.2	825	0	7940	1240	0.5	293	0	8577	87	1.5	361	0	1480	123	2.2	171	0	4340	6182
教育機関	H施設 400MeV 加速粒子:粒子 重量(トン)	2451	0.99	0	20	0	500	0.3	0	2	0	1500	0.4	0	5	0	451	0.28	13	0	1380	47400	601795
	I施設 90MeV 加速粒子:粒子 重量(トン)	1077.65	8.071	0.4	2.379	0	217.6	3.3	0.08	0.9	0	79.57	3.73	0.32	1.47	0	20	1	0	0	556.7	2003.5	6825.5
	J施設 30MeV 加速粒子:粒子 重量(トン)	147	0.9	8	26	4	147	0.9	8	26	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1322	2046	6796
民間企業																							

表3 放射化物のクリアランス対象物量

クリアランス対象物[推定] (ton)											
区分	クリアランスの対象となる主な物品名	医療機関			研究機関			教育機関		民間企業	
		リニアック			シンクロトロン		サイクロトロン	サイクロトロン	サイクロトロン	サイクロトロン	
		A施設 6MeV 電子加速	B施設 10MeV 電子加速	C施設 15MeV 電子加速	D施設 7.5~18MeV 粒子加速	E施設 8GeV 電子加速	F施設 12GeV 粒子加速	G施設 400MeV 粒子加速	H施設 400MeV 粒子加速	I施設 90MeV 粒子加速	J施設 30MeV 粒子加速
金 属	鉄	0	0	3.9	8	3200	4100	8600	1500	80	0
	SUS	0	0.001	0	0.01	2.1	310	87	0.4	3.7	0
	7Mn	0	0	0.2	0.1	0	0	1.5	0	0.32	0
	銅	0	0.006	0.67	1.1	62	730	360	5	1.5	0
	鉛	0	0	0.4	0	0	0	0	0	0	0
コンクリート		0	0	0	0	0	73000	6200	73000	6200	2000

* 集計結果からクリアランス対象物の推定が最も大きい施設は、鉄及びアルミニウムについてはG施設、鉛については、医療機関の電子リニアックが、またSUS、銅及びコンクリートについてはF施設でそれぞれ包含される。

表 4 放射化物のクリアランス対象物とその評価経路

クリアランス対象物		評価経路			
区分	クリアランスの対象となる主な物品名	物量* (ton)	埋設処分	再利用	再使用
金 属	鉄	8600	—	○	○
	SUS	310	○ (真空ダクト、冷却水配管の一部)	○	○
	アルミ	1.5	○ (配管の一部)	○	○
	銅	730	○ (ケーブルの一部)	○	○ (電磁石コイル)
	鉛	0.4	—	○	○
	コンクリート	73000	○ (一部)	○	○

* : 代表的な機関における放射線発生装置使用施設の最大推定量 (アンケート回答結果)

表5 放射化物中に生成する核種

材料		生成核種
金 属	鉄	^{60}Co , ^{59}Fe
		^{54}Mn
		^{46}Sc , ^{44}Ti , ^{55}Fe , ^{56}Co
	SUS	^{60}Co , ^{59}Fe
		^{54}Mn , ^{57}Co , ^{58}Co ,
		^{55}Fe , ^{56}Co , ^{44}Ti , ^{46}Sc
	銅	^{60}Co
		^{63}Ni , ^{58}Co , ^{65}Zn
		^{57}Co , ^{56}Co
	アルミニ ウム	^{22}Na
		^{60}Co
		^{26}Al , ^{46}Sc , ^{54}Mn , ^{65}Zn , ^7Be
	鉛	^{124}Sb
		^{125}Sb
		^{195}Au
コンクリート	^{60}Co , ^{46}Sc , ^{134}Cs , ^{152}Eu , ^{22}Na , ^{54}Mn ,	
	^3H , ^{45}Ca , ^{55}Fe , ^{59}Fe , ^{65}Zn	
	^{14}C , ^7Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{154}Eu , ^{125}Sb , ^{133}Ba	