

平成 31 年度

放射線安全規制研究戦略的推進事業

「加速器施設の廃止措置に係わる放射化物の
測定、評価の手法の確立」

平成 31 年度放射線安全規制研究戦略的推進事業成果報告書

令和 2 年 3 月

大学共同利用機関法人
高エネルギー加速器研究機構

研究代表者

松村 宏

目次

第1章 はじめに.....	1
1-1 目的.....	1
1-2 2019年度研究成果の概要.....	2
(1)加速器施設の放射化／非放射化区分の明確化.....	2
(2)非汚染・非放射化の評価手順の検討.....	2
(3)測定評価マニュアルの作成.....	3
1-3 研究実施体制.....	3
(1)研究体制.....	3
(2)研究検討委員会.....	3
(3)研究参加者.....	4
(4)若手人材育成.....	5
1-4 研究実施状況.....	5
第2章 加速器施設の放射化／非放射化の明確化—陽子線治療用加速器施設調査.....	7
2-1 調査目的.....	7
2-2 今年度調査施設.....	7
(1)相澤病院陽子線治療センター.....	7
(2)メディポリス国際陽子線治療センター.....	8
(3)北海道大野記念病院札幌高機能放射線治療センター.....	9
2-3 調査方法.....	10
(1)事前調査.....	10
(2)運転中の中性子フルエンスの測定.....	10
(3)運転終了後サーベイ.....	12
(4)スペクトロメータによる放射化核種分析.....	12
(5)放射化の将来予測.....	12
2-4 調査結果.....	13
(1)相澤病院陽子線治療センター.....	13
(2)メディポリス国際陽子線治療センター.....	18
(3)北海道大野記念病院.....	21

2-5	まとめ	22
第3章	非汚染・非放射化の評価手順の検討(大型電磁石等の放射化調査)	24
3-1	はじめに	24
3-2	電磁石金属部内の生成核種と放射能深度分布調査	24
	(1) 目的	24
	(2) 調査した電磁石の概要	25
	(3) 金属部品からのコア試料採取	25
	(4) コア試料採取地点における存在核種の同定と放射能深度分布の導出	26
3-3	電磁石内の生成核種放射能と表面線量率の関連性	28
	(1) 目的	28
	(2) 調査方法	28
	(3) ^{60}Co を均一に含む鉄ブロックを標準とした検出器の校正	29
	(4) コア抜き箇所の表面線量率と放射能定量結果の比較	29
3-4	まとめ	30
第4章	非汚染・非放射化の評価手順の検討(放射化分布のイメージングの検討)	31
4-1	はじめに	31
4-2	加速器放射化評価に適したイメージング技術の選定	31
4-3	運用中の加速器施設における核種同定と線量分布	32
	(1) 目的	32
	(2) メディポリス国際陽子線治療センター	32
	(3) 相澤病院陽子線治療センター	33
4-4	イメージング技術による放射化電磁石の核種同定と放射能定量の可能性	34
	(1) 目的	34
	(2) 放射化電磁石部品からの可視化像取得	34
4-5	まとめ	35
第5章	測定評価マニュアルの作成	37
5-1	検討体制	37
5-2	編集方針	37
5-3	放射線発生装置廃止のための放射化評価マニュアル(構成案)	38
	5-3-1 前提条件	38
	5-3-2 運転時における測定と評価手法	38
	5-3-3 廃止措置時の測定と評価手法	39

5-3-4 クリアランス制度への取り組みに対する課題.....	39
第6章 研究発表	41
6-1 論文発表.....	41
6-2 国内会議発表	41
6-3 国際会議発表	43

第1章 はじめに

1-1 目的

本研究は、放射線発生装置の放射化をキーワードとして、これまでの評価が進んでいない放射線発生装置に着目して、放射性同位元素等規制法に従って、実際に廃止措置を進めるうえで欠くべからざる課題を抽出し、放射化物の評価手法の開発を行うことを目的としている。

2017-18年度においては、静電加速器施設、放射光施設、粒子線治療施設において、長期間の運転に伴って発生する放射化の状況を明らかにすることを目的として、調査を進め、とくに長期間の利用に伴って建屋のどこに放射化が発生するのかを明らかにしてきた。さらに、PET 薬剤製造用のサイクロترون施設を対象として、施設の廃止の際に発生廃棄物量として大きな割合を占める建屋コンクリートの放射化評価について、測定手法の検討を進めた。また、加速器の放射化分布を画像化するための技術要素の検討も進めた。

次に廃棄物量として大きい金属の放射化の評価手法の検討に入る。検討対象は発生装置の中で最も重量が大きく、非常に重要な検討対象となる大型電磁石とする。電磁石は、鉄や銅等で構成される。研究では実際の施設に設置された電磁石各部品などを測定することによって、本課題の研究期間である2年以内で放射化の評価手法を確立する。放射線規制を進める上でのガイドライン作成などに資するにはどのような測定や計算による評価を行う必要があるかという観点から研究を進めてきた。

上記研究を踏まえて、2019-2020年度においては、新たに以下の4つの課題をあげて、申請を行い、採択された。

(1)加速器施設の放射化／非放射化区分の明確化

国内において施設が増加しており、技術革新の目覚ましい多様化した医療用の粒子線治療加速器施設について、調査対象施設を増やして放射化の実態の調査(放射能測定、発生中性子量測定等)を行うことで、放射化／非放射化の領域を明確化する。廃止措置時に大きな重量を占めることになる大型電磁石を中心として、稼働中の加速器の放射化状況の調査結果から、廃止時における放射化量の推定を行えるようにする。

(2)大型電磁石等の放射化調査

使用を終えた大型電磁石金属のコアボーリング調査により内部の放射能分布の特徴を明らかにした上

で、最終的には、これまでにコンクリートと同様にサーベイメータ等を用いた廃止時の簡便な定量評価方法の確立を行う。

(3)放射化分布のイメージングの検討

放射化物測定のための技術要素が明確になったことから、放射化評価の妥当性を補足するイメージング手法による放射能分布の計測・確認の評価も実施する。とくに、放射化物表面の線量率のマッピングを行うとともに、共存する放射性核種毎の分布も明らかにするための技術的検討を進める。

加速器施設の廃止措置において、加速器電磁石等の金属部の測定評価を効率化するために、放射線イメージング技術による放射化分布のイメージング手法の確立を行う。実際の放射化電磁石を用いて、核種毎の分布や放射能定量等を実施する。核種毎の分布や放射能定量等を実施する。

(4)測定評価マニュアルの作成

実際に廃止を行う際に、加速器施設の放射化／非放射化の領域分け(これまでの調査分を含む)及び放射化測定・評価手法についての結果をもとに、測定評価マニュアルを作成するうえでの、項目を整理する。

本研究では、以上(1)から(4)の課題に取り組むことによって、放射化物の測定評価技術を一段と向上させ、放射線安全管理の高度化に貢献することを目的としている。

1-2 2019年度研究成果の概要

(1) 加速器施設の放射化／非放射化区分の明確化

陽子線治療施設の放射化調査による放射化／非放射化区分の明確化を行う。調査対象として選んだ陽子線治療施設3施設のうち、2施設の調査を完了した。残りの1施設は加速器トラブルのため今年度内の調査が不可となったが、重要施設であるため、2020年度に調査を継続することとした。

(2) 非汚染・非放射化の評価手順の検討

金属の評価手順の検討のための電磁石等の放射化調査と放射化イメージングの研究を行う。実際の放射化電磁石等を試料として、放射能分布やサーベイメータの線量率指示値と放射能の関係を調べ、評価手順の検討のための基礎データとする。放射能分析のための試料採取、測定試料化を完了し、現在分析中である。また、放射化イメージングによる測定評価の効率化を検討するための撮影を使用中の2加速器に対して実施した。年度内に、放射能分布の測定に用いた電磁石のイメージングも行った。

(3) 測定評価マニュアルの作成

研究評価委員会で方針と内容を確認した。2017-2018年度の成果も含め4ヶ年の研究成果をもとに、加速器施設の廃止措置時の放射化の評価方法や取り扱いなどを中心にまとめることとなった。

以下の各章では、上記研究の成果を紹介している。

1-3 研究実施体制

(1) 研究体制

2019年度の研究体制を図1-1に示す。

(2) 研究検討委員会

研究検討委員会の構成を表1-1に示す。

委員は8名からなり、委員長は上菘義朋氏が選任された。第1回は2019年7月22日に自然科学研究機構本部事務棟2階会議室で開催され、今年度研究方針を決定した。第2回は2020年1月27日に日本アイソトープ協会第3会議室において開催され、研究報告並びに次年度作成予定の測定評価マニュアルの編集方針、内容について審議した。両委員会とも、原子力規制委員会およびPOの出席もいただき、指導助言を受けた。

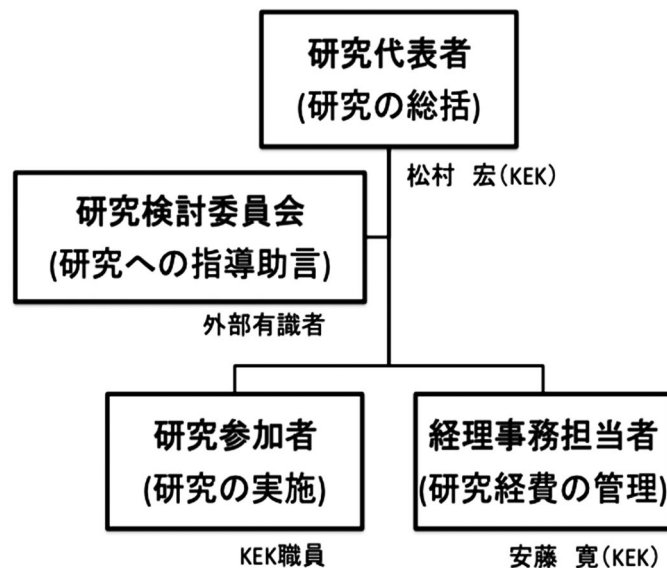


図1-1 2019年度研究体制

表 1 研究検討委員会委員

氏名	協力内容	所属機関及び現在の専門	職名
上叢義朋	研究計画、成果報告等助言	理化学研究所	室長
渡部浩司	研究計画、成果報告等助言	東北大学	教授
大越 実	研究計画、成果報告等助言	日本アイントープ協会	プロジェクトチーム 主査
米内俊祐	研究計画、成果報告等助言	量子科学技術研究開発機構	チームリーダー
榮 武二	研究計画、成果報告等助言	筑波大学	教授
想田 光	研究計画、成果報告等助言	山形大学	准教授
松田規宏	研究計画、成果報告等助言	原子力研究開発機構	研究員
藤淵俊王	研究計画、成果報告等助言	九州大学	准教授

(3) 研究参加者

表1-2に研究参加者を示す。

表1-2 研究参加者

氏名	参加内容	所属機関及び 現在の専門	所属機関で の職名
三浦 太一	研究全般(特に放射化測定)	高エネルギー加速器研究機構 核・放射化学	特別教授
吉田 剛	研究全般(特にイメージング)	高エネルギー加速器研究機構 核・放射化学	助教
豊田 晃弘	研究全般(特に中性子・ γ 線測定)	高エネルギー加速器研究機構 核・放射化学	技師
別所光太郎	研究全般(特に放射化測定)	高エネルギー加速器研究機構 放射・分析化学	准教授
中村 一	研究全般(特に中性子・ γ 線測定)	高エネルギー加速器研究機構 放射線計測	前任技師
西川 功一	研究全般(特に放射化測定)	高エネルギー加速器研究機構 放射線計測	特別技術職
榎本和義	研究全般(特に中性子・ γ 線測定)	高エネルギー加速器研究機構 核・放射・分析化学	研究員

(4) 若手人材育成

若手人材育成として、本研究機構助教 吉田 剛をあて、放射化調査やイメージング技術の開発等研究の重点課題に取り組み、研究推進のリーダーシップを発揮することになっている。

1-4 研究実施状況

2019年度の研究実施状況を図 1-2に示した。

7月の研究検討委員会の承認を受け、仕様作成、入札等を経て、施設調査は8月初めから開始した。放射化金属の調査は9月から開始した。陽子線治療加速器施設は、概ね2019年内に完了したが、1施設は加速器の故障のため本調査を完了できなかった、金属試料の測定では、電磁石の解体、コア抜き、切断、測定を進めた。放射化イメージング測定は、施設調査及び電磁石調査の際に同時並行して行った。また、国内学会および国際学会での研究報告並びに意見交換を進めた。

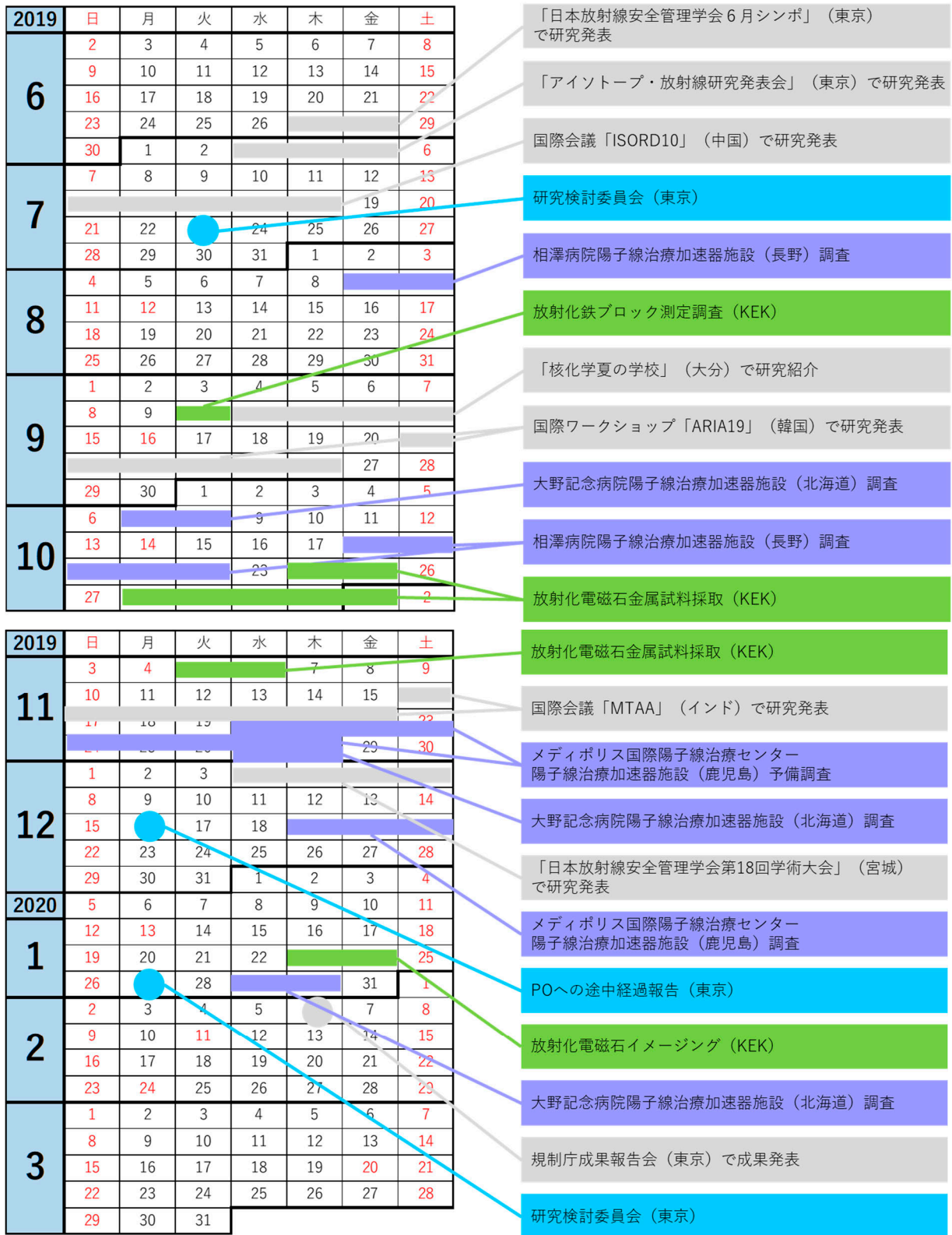


図 1—2 研究実施状況

第2章 加速器施設の放射化／非放射化の明確化－陽子線治療用加速器施設調査

2-1 調査目的

国内において施設が増加しており、技術革新の目覚ましい多様化した医療用の粒子線治療加速器施設について、調査対象施設を増やして放射化の実態の調査(放射能測定, 発生中性子量測定等)を行うことで、放射化／非放射化の領域を明確化する。このための調査方針として、粒子線治療施設について、施設の協力のもとに行う。施設規模や加速器の種類による違いを明らかにできるように対象施設を選択した。運転中に設置した中性子検出器により、発生中性子のフルエンスを測定する。運転終了後には、 γ 線スペクトロメータによる放射性核種の定量を行う。また、加速器周りの放射化状況をサーベイメータによって測定するとともに、イメージング装置による実測も試みる。測定結果をまとめ、放射化／非放射化の判定条件を明らかにする。

2-2 今年度調査施設

調査の主旨を理解し、協力をいただいた施設は以下の3つであり、その施設の概要を紹介する。

(1) 相澤病院陽子線治療センター

所在地:長野県松本市本庄 2-5-1

設置:2014年9月30日より治療開始

利用数:2019年9月30日時点、延べ420例

加速器:サイクロトロン(住友重機械工業製)

加速エネルギー:230MeV(固定)

施設概要:図2-1に施設断面図を示した。地下2階にサイクロトロン本体が設置されている。サイクロトロン室は12m×13mで、高さは4mとなっている。サイクロトロンの直径は4m、重さ200トンである。サイクロトロンから出射された陽子はデグレータで連続的にエネルギーを変えられ、垂直方向に輸送、ガントリー(360度回転可能)を経て、地上1階の治療室に導かれる。治療に用いられる陽子エネルギーは150か

ら 200MeV までが多用されている。照射室は 1 室で、照射はワブラー法及びラインスキャン法が併用されている。利用割合は 3:7 となっている。1 日あたり 10 数人の治療が行われている。



図2-1施設概要

(引用:http://w3.ai-hosp.or.jp/ptc/proton_therapy_center.html)

(2) メディポリス国際陽子線治療センター

所在地:鹿児島県指宿市東方 4423 番地

設置:2011 年 1 月治療開始

利用数:2020 年 1 月末まで治療患者数 3567 名

加速器:シンクロトロン(三菱電機製)

加速エネルギー:シンクロトロン最大加速エネルギーは 235MeV。

施設概要:図2-2に施設レイアウトを示した。図右端のリニアックで 7MeV に加速した陽子を 4 つの偏向電磁石からなるシンクロトロンに入射し、最大 235MeV まで加速し、取り出される。電流値は 11nA である。照射室は3室あり、ワブラー法での照射が行われている。呼吸同期照射が行われている。治療室3は 2015 年からの利用となっている。これまで全部で、1 日あたり 60 件以上の治療照射が行われている。照射エネルギーとしては 120、150、210 および 230MeV が利用されている。

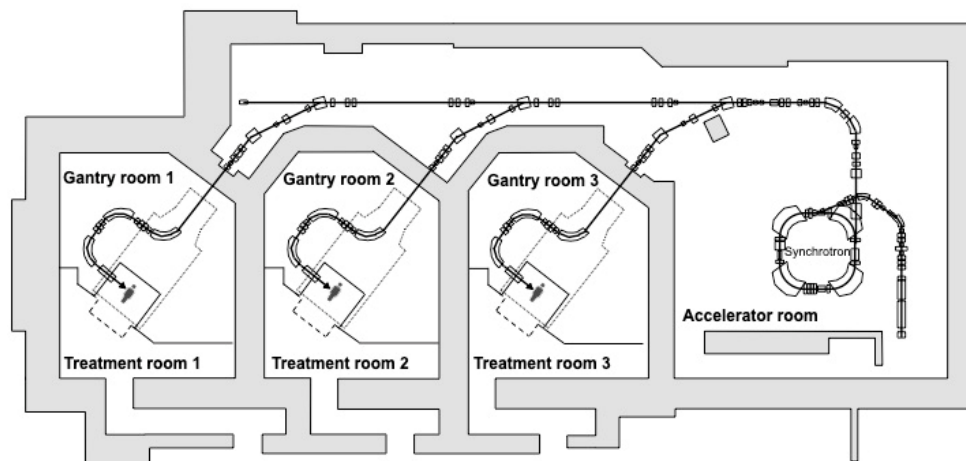


図2-2 施設レイアウト

(3) 北海道大野記念病院札幌高機能放射線治療センター

所在地:北海道札幌市西区宮の沢2条1丁目16番1号

設置:2019年11月治療開始、12月保険診療開始

加速器:超電導シンクロサイクロロン(IBA製 Proteus®One S2C2)

施設概要:図2-3に施設概念図を示した。テニスコート程度の面積に加速器、回転ガントリー、照射室等が1列に配置されている。サイクロロン室は6m×5m、高さは4m弱と非常に狭い。シンクロサイクロロンの加速エネルギーは230MeVで、通常135nAで運転されている。シンクロサイクロロンから出射された陽子はデグレータで連続的にエネルギーを変え、隣のガントリー室に導かれる。ガントリーは220度の回転が可能である。現在、治療が開始されたばかりである。

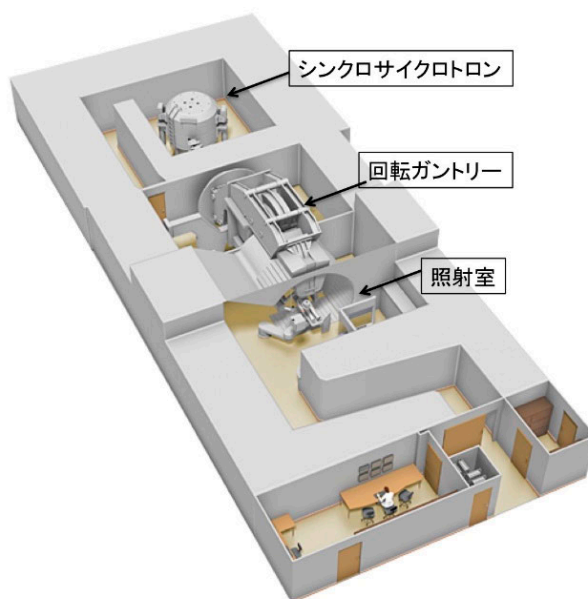


図2-3 施設概念図(引用:https://jp.medical.canon/products/rt/protetus_one)

2-3 調査方法

(1) 事前調査

運用中の加速器施設は、過去の運転時のビームロスで発生した中性子により、ビームラインやコンクリートの建屋などの構成部材が放射化している可能性がある。今回、調査対象とした施設のどの箇所でビームロスが発生しているかを把握するために、事前に施設側に協力を依頼し、代表点数か所における線量計による中性子発生量の見積もりを行った。事前に施設から、利用状況、使用許可内容、運転状況、モニターの設置状況等の情報収集を行った。相澤病院陽子線治療センターと北海道大野記念病院については、加速器施設内の放射線サーベイによる放射化状況の把握、線量計設置、本格的測定作業のための測量、動線の確認を行い。調査日程、機材の搬出入等のスケジュール調整を行った。

(2) 運転中の中性子フルエンスの測定

廃止時において、加速器室内の放射化として最も考慮すべきことは、建屋や周辺部の熱中性子による放射化である。そこで、運転中の中性子発生量を以下の3種類の線量計、すなわち(1) 金箔を用いる放射化検出器、(2) 中性子検出用 TLD、(3) CR-39 を用いた固体飛跡検出器を用いた。これらの線量計をターゲット周辺や発生装置室内に設置し、運転中の中性子フルエンスを測定した。

(A) 金箔を用いる放射化検出器

検出器セット: 1ヶ所につき3枚の金箔(直径6mm、厚さ20 μ m、質量約10mg)を用いた。熱中性子フルエンス率の算出のため、2枚の金箔のうち1枚はカドミウム箔(1mm厚、10mm角)で挟み込んだ。

設置方法: ポリ袋(0.04mm厚)をシーラーで2つ区分けして、それぞれに裸の金箔とカドミウム板で挟んだ金箔を入れる。それを、壁、床、本体等にテープで貼りつける。

測定方法: 基準となる金箔中に生成した ^{198}Au 放射能はGe検出器(GC2518、ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ)を用い、検出効率は効率計算ソフトウェア ISOCS 4.2(ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ)を使用して、放射能を求めた。基準とする金箔とともに、全ての金箔は同時にイメージングプレート(BAS-MS 2025、富士写真フイルム)に密着したのち、イメージリーダー(Typhoon FLA7000、GEヘルスケア)を用いて個々の発光強度を求め、 ^{198}Au の放射能に換算した。解析ソフトウェアはImageQuantTL V7.0(GE製)を用いた。

(B) 固体飛跡検出器 CR-39

固体飛跡検出器 CR-39: 長瀬ランダウアのルミネスバッジ(中性子検出器付)を使用した。

測定原理:速中性子(100keV~10MeV)は、CR-39 の前面にポリエチレン板を置き、H(n,p)反応で生成する反跳陽子が CR-39 で飛跡をつくることを利用して検出する。一方、熱中性子(<0.5eV)は CR-39 の前面にホウ素入りポリエチレンを置いて、 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ で発生した α 粒子の飛跡から求める。中性子線量(mSv)を求めることができるものである。通常は、線量での評価が行われるが、今回は、飛跡数の情報を提供してもらい、熱中性子フルエンスに換算した。また、一方にカドミウム箔(厚さ 0.5mm)で包装して、熱中性子による飛跡に速中性子等の放射線が与える影響を求める方法も試みた。図2-4は線量計を示している。線量計の右部分に CR-39 の素子が入っている。

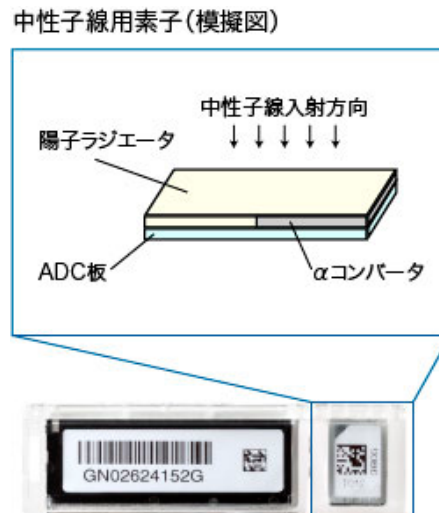


図2-4 ルミネスバッジ(引用: <https://www.nagase-landauer.co.jp/luminess/others.html>)

(C) 中性子検出用熱蛍光ルミネッセンス(TLD)

検出素子は UD813PQ4(Panasonic)を TLD リーダーは UD-7900M を使用した。この TLD は γ 線と中性子に感度のある蛍光 $^6\text{Li}_2^{10}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ と γ 線に感度があり中性子に感度のない蛍光体 $^7\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ をそれぞれ2個ずつ組み合わせてあり、図2-5は素子を引き出した状態の TLD である。測定点に 0.5mm 厚のカドミウム箔で覆った TLD と裸の TLD を設置し、二つの TLD の読取値の差を取ることによって γ 線と熱外中性子の影響を取り除き、熱中性子の寄与を求める。読み取った値と熱中性子フルエンスの関係は高エネルギー加速器研究機構の熱中性子標準場で校正して求めている。



図2-5 TLD

(3) 運転終了後サーベイ

加速器運転に伴うビームロス量および、その発生箇所は、ビームライン構成物中に生成する放射性核種の放射能および線量率として顕在化する。ここでは、加速器の運転直後にビームライン全体の表面線量率を測定することで、ビームロス箇所と大きさを迅速かつ簡便に調べる手法について説明する。表面線量率の測定には、管理区域における汚染サーベイに用いられているのと同じ、市販のヨウ化ナトリウムシンチレーション式サーベイメータ(以下「NaI サーベイメータ」という)を用いる。検出器のプローブを測定対象物に接触させ、時定数: τ の3倍時間経過後の線量率指示値を読み取り記録する。迅速さを優先する場合は短い時定数に設定し、値の正確さを優先する場合は長い時定数に設定することが望ましいが、通常は、10秒、もしくは3秒に設定する。

(4) スペクトロメータによる放射化核種分析

前項のNaIサーベイメータによる調査では、ビームライン全体の放射化状況を迅速かつ簡便に把握する手法について紹介した。ここでは、運転終了後のサーベイで高線量を示した地点を中心に、臭化ランタンシンチレーションスペクトロメータ(LaBr₃ 検出器)の測定による γ 線スペクトルの取得を行い、ビームロスにより生成した核種の同定手法について述べる。各測定地点の γ 線スペクトル中に現れたピークのエネルギーや、加速粒子の種類とエネルギー、ビームロス地点の構成材料等の情報より、生成核種の種類を推定する。加速器の放射化で生成する代表的な核種としては、ステンレス鋼(以下「SUS」という)中のクロムに起因する⁵²Mnや鉄に起因する⁵⁶Coが挙げられる。

2017~2018年度に行った我々の研究成果の一つに、コンクリート床の測定による中性子発生量を推定する新規手法の開発がある。これは、コンクリートの床を、前項で紹介した放射化検出器に見立て、運転中に発生した中性子によりコンクリート中に生成した²⁴Na放射能を、厚み6.5cmの鉛遮蔽体で囲ったGe検出器、もしくは臭化セリウムシンチレーションスペクトロメータ(CeBr₃ 検出器)により定量するものである。放射能の定量にあたっては、金箔と同様に、対象となる期間の運転履歴の解析を行い、飽和係数を求めて値を決定する。導出した放射能と運転履歴、そしてコンクリート中のナトリウムの濃度、熱中性子吸収断面積の情報により、運転期間中の熱中性子の発生量を見積もる。

(5) 放射化の将来予測

線量計や放射化検出器、コンクリート床の測定等により求めた運転時の平均中性子発生量より、30年運転後にコンクリート中に生成する⁶⁰Coと¹⁵²Euの放射能濃度を推定することができる。運転中の平均熱中性子フルエンス率、コンクリート中のコバルトとユウロピウムの濃度と熱中性子吸収断面積の情報により、加速器の寿命の目安である30年間の運転を行ったと仮定して、それぞれの核種について累積の放

射エネルギーを見積もる。運転条件は加速器の設置されている施設や使用目的毎に異なるので、一律ではなく、実際の運転を再現するような条件を設定することが望ましい。30年後の放射能生成量が、クリアランスレベルを十分に下回っているのであれば、その施設については、通常の運転を続ける限り、廃止措置時における施設の放射化は皆無に等しいと予想される。今回の調査対象施設においても、本手法により放射化の程度を、評価地点毎に詳細に見積もった。

2-4 調査結果

(1) 相澤病院陽子線治療センター

(A) 運転中の中性子フルエンス率の測定

運転中の中性子測定のための線量計として、CR-39(42箇所)、金箔(40箇所)、TLD(26箇所)を加速器本体室内のサイクロトロン、デグレーダ、ビームライン、回転ガントリーおよび照射室に設置した。設置箇所一覧を図2-6-1~2-6-3に示す。設置期間中の加速器運転は2019年10月21日7:43から21:31までの約14時間であった。各設置箇所における熱中性子フルエンス率を表2-1に示す。TLDと金箔は $10^3 \sim 10^4 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ のオーダーで、両者で取得した熱中性子フルエンス率の値は多くの測定地点でよい一致を示した。CR-39が他の検出器よりやや高く検出されるが、理由は研究中である。

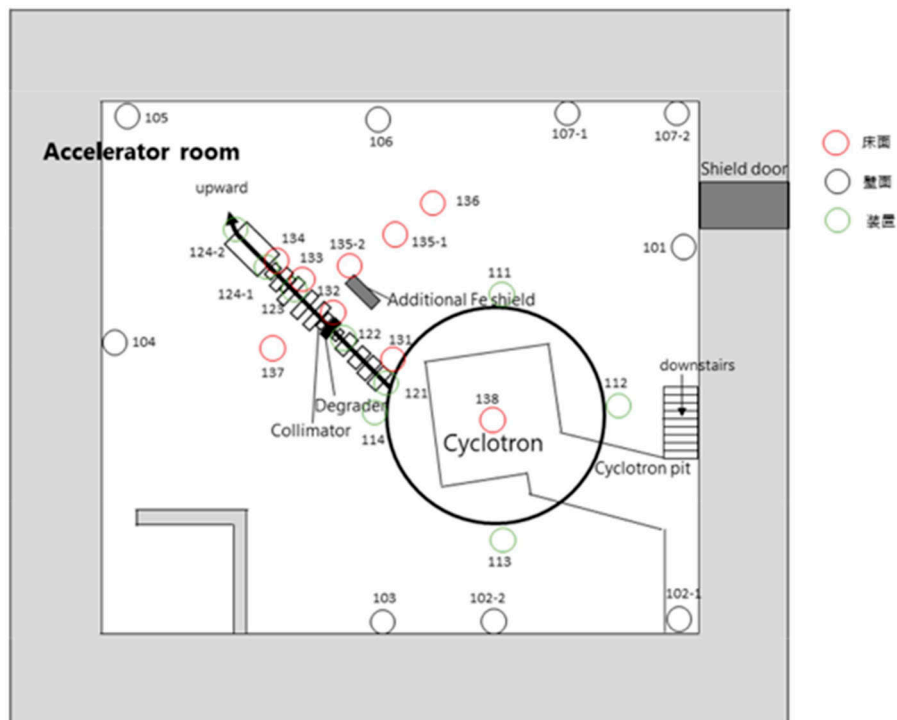


図2-6-1 相澤病院陽子線治療センター調査での線量計設置箇所一覧(加速器室)

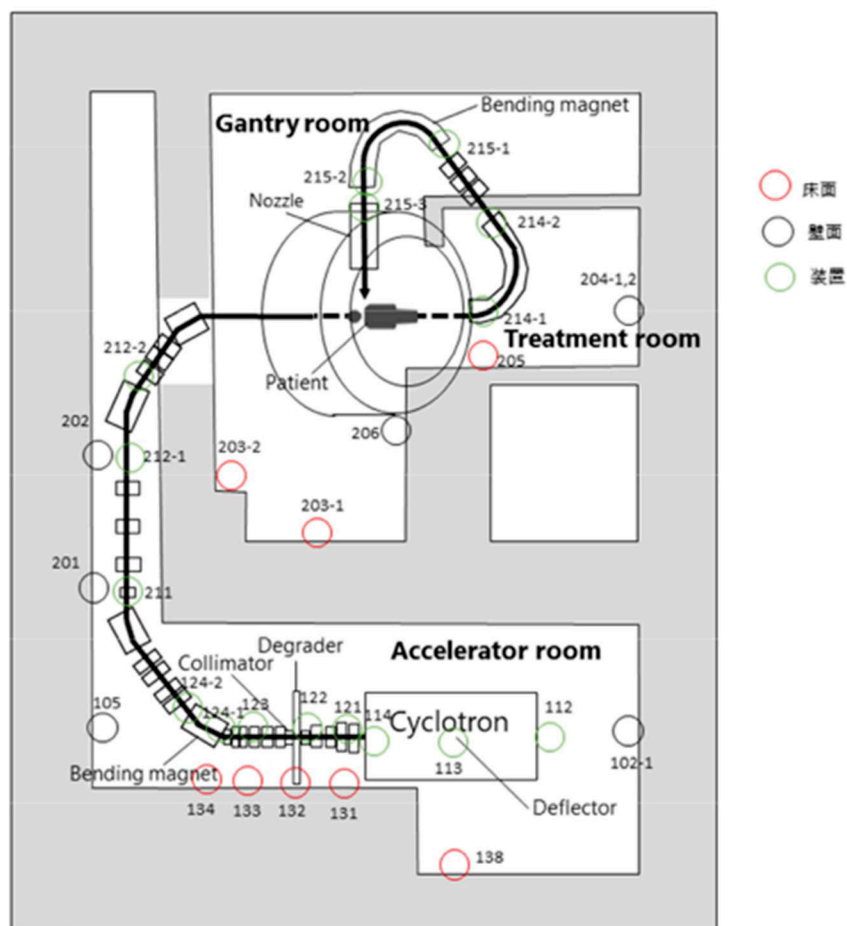


図2-6-2 相澤病院陽子線治療センター調査での線量計設置箇所一覧(ビームライン縦断面)

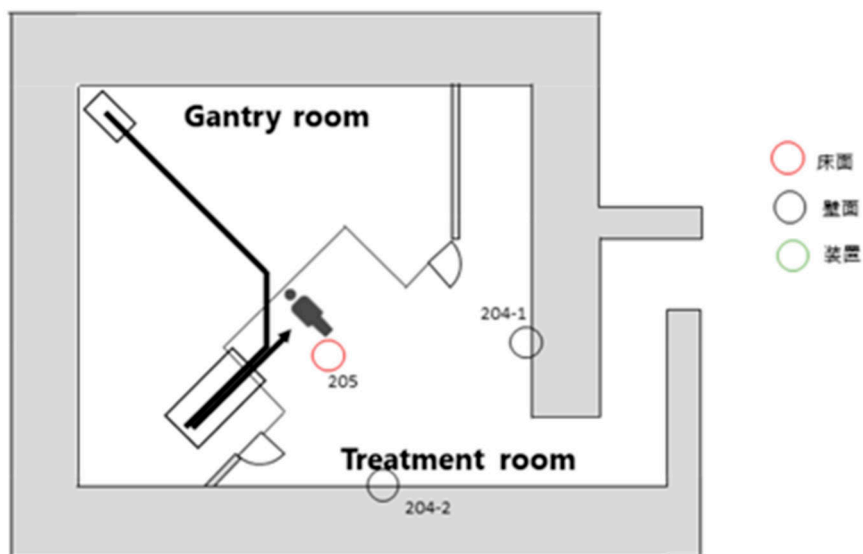


図2-6-3 相澤病院陽子線治療センター調査での線量計設置箇所一覧(治療室)

表2-1 相澤病院陽子線治療センター調査での熱中性子フルエンス率導出結果

No.	設置場所	熱中性子フルエンス率 (neutrons/cm ² /s)		
		TLD	CR-39	金箔
101	サイクロtron室の入り口側壁、入って左側、高さ125cm	1.73E+03	4.23E+03	2.24E+03
102-1	サイクロtron室の入口から見て左壁。部屋の角から水平に40cm、高さ125cm	1.02E+03	2.88E+03	1.49E+03
102-2	サイクロtron室の入口から見て左壁。部屋の角から水平に415cm、高さ125cm	1.54E+03	3.99E+03	1.89E+03
103	サイクロtron室の入口から見て左壁。放射化物の部屋の角から水平に220cm、高さ125cmサイクロtronの出射口が見える位置	2.24E+03	7.07E+03	3.04E+03
104	サイクロtron室の入口から見て向かい壁。デグレダから475cm、高さ125cm	3.22E+03	9.86E+03	4.09E+03
105	サイクロtron室の入口から見て右壁。部屋の角から100cm、高さ125cm	1.24E+03	3.15E+03	1.57E+03
106	サイクロtron室の入口から見て右壁の真ん中あたり。高さ125cm、デグレダから490cm	3.26E+03	9.15E+03	3.68E+03
107-1	サイクロtron室の入口から見て右壁。部屋の入口側の角から315cm、高さ125cm。デグレダを挟んだ測定点137と136の延長と壁が交差するあたり。	1.99E+03	4.69E+03	2.78E+03
107-2	サイクロtron室の入口から見て右壁。部屋の入口側の角から60cm、高さ125cm。	1.69E+03	3.97E+03	2.29E+03
111	サイクロtron本体表面、入口から見て右壁に向き合っている面、高さ125cm	9.02E+02	4.02E+03	1.68E+03
112	サイクロtron本体表面、入口側壁に向き合っている面の穴、高さ135cm	6.75E+02	3.81E+03	1.42E+03
113	サイクロtron本体表面、デフレクターの位置、高さ125cm	8.21E+02	7.13E+03	1.52E+03

114	サイクロロン本体表面、下流側から見て出射口の右側	2.09E+03	1.14E+04	3.13E+03
121	電磁石 QE01(サイクロロンに 1 番近い)の上流ビームライン	—	1.62E+04	2.74E+03
122	デグレーダの上流側フランジ	—	OD	7.03E+03
123	電磁石 QE03(コリメータ下流)の下流側ビームライン	—	OD	3.68E+03
124-1	電磁石 BE01(ビームを上曲げる)の上流側ビームライン	—	2.62E+04	3.71E+03
124-2	電磁石 BE01(ビームを上曲げる)の下流側ビームライン	—	7.27E+03	2.18E+03
131	電磁石 QE01 の上流側ビームラインの床面	3.24E+03	1.35E+04	4.15E+03
132	デグレーダの床面	1.22E+04	3.83E+04	1.52E+04
133	電磁石 QE03(コリメータ下流)の下流側ビームラインの床面	6.16E+03	2.80E+04	1.11E+04
134	電磁石 BE01(ビームを上曲げる)の上流側ビームラインの床面	2.95E+03	1.13E+04	4.70E+03
135-1	デグレーダからビームラインに直角方向で上流から右に 195cm の床面	3.43E+03	1.12E+04	5.04E+03
135-2	デグレーダからビームラインに直角方向で上流から右直ぐの床面、スペクトル測定点1と同じ場所	6.21E+03	2.23E+04	9.54E+03
136	デグレーダからビームラインに直角方向で上流から右に 395cm の床面	2.99E+03	6.88E+03	4.02E+03
137	デグレーダからビームラインに直角方向で上流から左に 195cm の床面	4.47E+03	1.49E+04	7.40E+03
138	サイクロロン本体真下の地下床面	2.46E+03	5.90E+03	3.97E+03
201	立ち上がりビームライン偏向電磁石 BE02 の下流側ビームラインと同じ高さの壁、床から 4.57m	4.32E+02	1.50E+03	6.60E+02
202	立ち上がりビームライン偏向電磁石 BB01 の上流側ビームラインと同じ高さの壁	7.06E+01	1.44E+02	8.57E+01

211	立ち上がりビームライン偏向電磁石 BE02 の下流側ビームライン	—	1.63E+03	3.35E+02
212-1	立ち上がりビームライン偏向電磁石 BB01 の上流側ビームライン	—	2.78E+02	8.25E+01
212-2	立ち上がりビームライン偏向電磁石 BB02 の下流側ビームライン	—	5.93E+01	—
203-1	ガントリー室。ガントリーが入る溝の床面	1.20E+01	3.86E+00	1.24E+01
203-2	ガントリー室。ガントリーが入る溝の横の床面	7.98E+00	1.16E+01	1.10E+01
204-1	治療室。治療台から正面の壁。高さ 82cm。CT の穴から見える場所。	9.31E+00	3.51E+00	—
204-2	治療室。治療台から右側の壁。高さ 95cm。	1.70E+01	8.77E+00	—
205	治療室。治療台の支柱近くの床面	1.70E+01	1.37E+02	2.99E+01
206	ガントリー室。ガントリー室に降りて、一番奥のライトのスイッチの下。高さ 100cm。	6.40E+00	1.75E+00	9.74E+00
214-1	ガントリー偏向電磁石 BG103 の上流	—	2.52E+01	8.12E+00
214-2	ガントリー偏向電磁石 BG103 の下流	—	6.86E+02	3.59E+00
215-1	ガントリー偏向電磁石 BG104 の上流	—	7.28E+03	1.99E+01
215-2	ガントリー偏向電磁石 BG104 の下流の最初のアンゲル脇	—	6.91E+01	1.02E+01
215-3	ガントリー偏向電磁石 BG104 の下流の 2 番目のアンゲル脇	—	3.15E+02	3.06E+01

※ 「—」:検出器を設置していない。「OD」:過剰検出により定量不可。

(B) 運転終了後の線量測定

サイクロトロン本体およびその周囲は残留磁場の影響によりサーベイメータが動作不良を起こし、測定ができなかった。NaI サーベイメータによる測定では、ガントリーの偏向電磁石 BG104 が 14 μ Sv/h で最大値を示した。

(C) 運転終了後のスペクトロメータ測定

LaBr₃ 検出器での測定結果では、ビームラインの構成物より、SUS 中のクロムに起因する ⁵²Mn や鉄に起因する ⁵⁶Co が検出された。デグレーダからは、⁷Be や、アルミ合金製の支持棒に起因すると思われる

る ^{22}Na 、 ^{24}Na が検出された。

(D) 運転終了後のコンクリートの放射化測定

加速器室では室全体で、治療室では治療ベッド付近でコンクリート中に生成した ^{24}Na が検出された。そこで、コンクリート中のナトリウム濃度を 2.1%として熱中性子フルエンス率を求めたところ、加速器室で $10^1 \sim 10^2 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ のオーダーであり、TLDと金箔の解析値を再現する結果が得られた。コンクリート中の ^{24}Na 放射能生成から得られた熱中性子フルエンス率から求めた 30 年運転後のコンクリート中の ^{152}Eu と ^{60}Co の放射能濃度推定値において、クリアランスレベルの 0.1Bq/g を超える測定値はなかったが、ビームロス大きなデグレーダの周辺はクリアランスレベルに近い値が得られた。建屋コンクリートについては非放射化として取り扱える可能性があることがわかった。

(2) メディポリス国際陽子線治療センター

(A) 運転中の中性子フルエンス率の測定

運転中の中性子測定のための線量計として、CR-39(42 箇所)、金箔(40 箇所)、TLD(26 箇所)を加速器本体室内のビームライン、回転ガントリーおよび照射室に設置した。設置箇所一覧を図2-7に示す。設置期間中の加速器運転は 2019 年 12 月 20 日 6:45 から 17:05 までの約 10 時間であった。各設置箇所における熱中性子フルエンス率を表2-2に示す。TLDと金箔は $10^1 \sim 10^2 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ のオーダーで、両者で取得した熱中性子フルエンス率の値は多くの測定地点でよい一致を示した。出射用セプタムで最高値を示したが、全体的に著しく高い地点はなく、運転中の中性子はフラットに分布をしていることがわかった。CR-39 は TLD、金箔に比べ1桁高い値を示す傾向にあった。同じ現象は、筑波大学陽子線治療施設等でも確認されている。

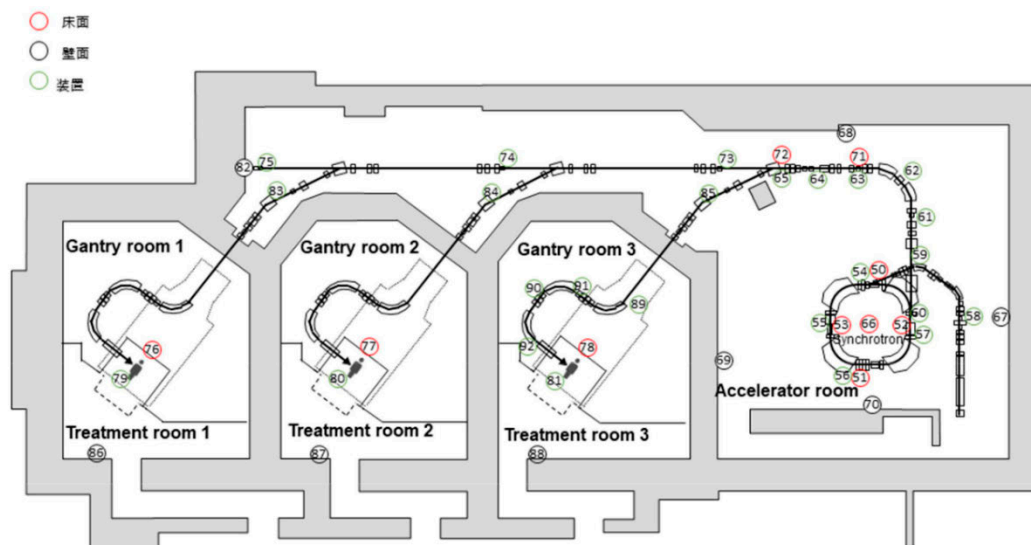


図2-7 メディポリス国際陽子線治療センター調査での線量計設置箇所一覧

表2-2 メディポリス国際陽子線治療センター調査での熱中性子フルエンス率導出結果

No.	設置場所	熱中性子フルエンス率 (neutrons/cm ² /s)		
		TLD	CR-39	金箔
50	入射用セプタム電極 床	2.18E+02	3.50E+02	1.35E+02
51	出射用セプタム電極 床	6.08E+02	2.52E+03	4.88E+02
52	出射用セプタム電磁石 床	3.60E+02	2.81E+03	3.71E+02
53	ノックアウト電極 床	2.87E+02	5.59E+02	1.73E+02
54	入射用セプタム電極入口 金網	9.37E+01	5.97E+02	6.75E+01
55	ノックアウト電極入口	9.89E+01	7.87E+02	7.48E+01
56	出射用セプタム電極入口 金網	5.86E+02	3.12E+03	5.97E+02
57	出射用セプタム電磁石入口	—	3.94E+04	—
58	リニアックデバンチャ出口側	—	2.92E+02	6.26E+01
59	シンクロ山越えビームパイプ	—	4.67E+03	8.22E+01
60	STX01K 入口側	—	4.59E+03	1.88E+02
61	SC01K 出口側	—	1.01E+03	6.19E+01
62	QM03K 出口側	9.15E+01	4.07E+02	4.81E+01
63	SC02K 入口側	1.16E+02	3.57E+02	1.10E+02
64	SC03K 入口側	—	2.72E+04	1.20E+02
65	QM09K 出口側	2.30E+02	1.78E+03	1.05E+02
66	リング中心部 床	3.43E+02	1.02E+03	2.12E+02
67	リニアックデバンチャ側側面 東壁	1.85E+02	3.50E+02	1.55E+02
68	入射用セプタム電極側面 北壁	1.84E+02	3.73E+02	1.48E+02
69	出射用セプタム電極側面 西壁	8.61E+01	3.54E+02	1.21E+02
70	出射用セプタム電極側面 南壁	3.66E+02	1.52E+03	5.25E+02
71	SC02K 入口側 床	1.04E+02	3.16E+02	1.32E+02
72	QM09K 出口側 床	1.31E+02	8.49E+02	1.99E+02
73	SC04 入口	—	2.46E+03	7.11E+01
74	SC06 入口	—	7.37E+01	5.49E+00
75	FCK	—	—	9.10E+01
76	G1 ガントリー室 床	2.60E+01	8.32E+01	1.98E+01
77	G2 ガントリー室 床	7.43E+01	2.97E+02	1.00E+02

78	G3 ガントリー室 床	7.25E+01	2.19E+02	6.93E+01
79	G1 照射室ベッド側面	1.07E+01	1.13E+03	1.21E+01
80	G2 照射室ベッド側面	4.42E+01	1.65E+03	1.10E+02
81	G3 照射室ベッド側面	2.35E+01	1.24E+03	7.40E+01
85	G3 ガントリー-BM02G3 上流	—	1.88E+04	1.06E+02
84	G2 ガントリー-BM02G2 上流	—	2.15E+04	3.45E+01
83	G1 ガントリー-BM02G1上流	—	5.64E+03	9.42E+01
82	ダンプ下流 壁	—	4.60E+03	1.70E+02
86	G3 治療室の壁	3.31E+01	2.16E+02	2.06E+01
87	G2 治療室の壁	1.06E+02	2.24E+02	1.04E+02
88	G1 治療室の壁	7.27E+01	8.32E+01	1.03E+02
89	G3 ガントリー振り上げ Bmagj 上流	—	8.80E+01	—
90	G3 ガントリーヘッド出口	—	1.12E+02	—
91	G3 ガントリーベンド入口	—	9.04E+01	—
92	G3 ガントリーリッジフィルター近傍	—	1.53E+03	—

※「—」:検出器を設置していない。

(B) 運転終了後の線量測定

NaI サーベイメータによる測定で、ビームストップ等の一部構成部材が測定限界値である $30 \mu \text{ Sv/h}$ 以上を示したため、改めて電離箱による測定を行った。表面線量率の最大値はビームストップの $172 \mu \text{ Sv/h}$ であった。

(C) 運転終了後のスペクトロメータ測定

LaBr₃ 検出器での測定結果では、ビームラインの構成物より、SUS 中のクロムに起因する ⁵²Mn や鉄に起因する ⁵⁶Co が検出された。ビームストッパーからは、アルミニウム合金に起因すると思われる ²²Na、²⁴Na が検出された。

Ge 検出器によるコンクリート中の ²⁴Na 測定により、中性子フルエンス率を求めたところ、加速器室で $10^1 \sim 10^2 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ のオーダーであり、TLD と金箔の解析値を再現する結果が得られた。

(D) 運転終了後のコンクリートの放射化測定

ビームロスポイント付近のコンクリート床で ^{24}Na が検出された。コンクリート中の ^{24}Na 放射能生成から得られた熱中性子フルエンス率から求めた 30 年運転後のコンクリート中の ^{152}Eu と ^{60}Co の放射能濃度推定値において、最も高いところで 0.0016Bq/g であり、クリアランスレベルの 0.1Bq/g より十分低く、建屋コンクリートについては非放射化として取り扱えると結論付けた。

(3) 北海道大野記念病院

超電導シンクロサイクロtron方式の加速器の調査は初めてであるため、本格的な調査を行う前に、予備調査として、施設の見学および、残留放射能、残留磁場の測定を行った。予備調査において、加速器室内の磁場が強く、サーベイメータを含むほぼ全ての電子機器が使用できない環境下であることがわかった。また、施設関係者への聞き取り調査により、装置の励磁を停止し、磁場が軽減される機会は、ほとんどなく、あったとしても、メンテナンスの機会に充当されるため、立ち入り制限がかかるということが判明した。当初、本施設においても、放射線イメージング技術による評価を行う予定であったが、上記を鑑みると、磁場の影響で電子機器である装置が使用不可となることが十分に予想できたため、イメージング技術による評価を中止する決断をした。

予備調査の結果を踏まえて、2019 年 11 月 29 日～30 日に、線量計等による本調査を行う予定であったが、調査前日に、施設側より加速器重故障の連絡を受け、次年度に延期するに至った。

延期された本調査に先立ち、2020 年 1 月 29 日～30 日に、線量計と金箔による、加速器室の中性子発生量の測定を行った。設置個所を図2-8に、導出した熱中性子フルエンス率を表2-3に示す。熱中性子フルエンス率は $10^3\sim 10^4\text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ のオーダーであった。絶対量の小さい No.5 治療室の床を除いて、各種線量計より求めた熱中性子フルエンス率の値は、非常によい一致を示した。他施設の加速器と運転中の中性子発生量を比較すると、相澤病院陽子線治療センターと同程度であることがわかった。

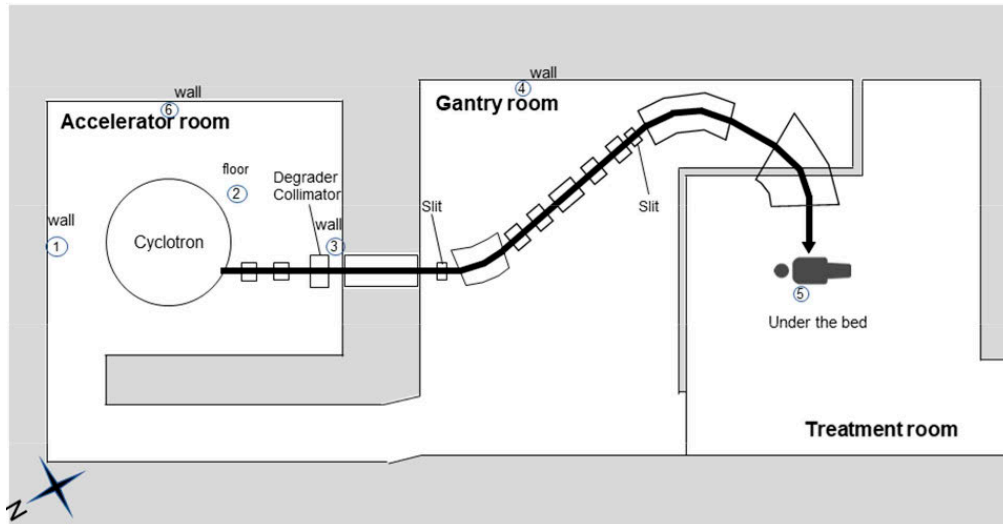


図2-9 北海道大野記念病院陽子線治療施設予備調査での線量計設置箇所一覧

表2-3 北海道大野記念病院陽子線治療施設予備調査での熱中性子フルエンス率導出結果

No.	設置場所	熱中性子フルエンス率 (neutrons/cm ² /s)		
		TLD	CR-39	金箔
1	加速器室 北東壁	8.93E+03	6.60E+03	1.07E+04
2	加速器室 床	1.61E+04	1.30E+04	1.68E+04
3	加速器室 南西壁	1.66E+04	1.71E+04	2.01E+04
4	ガントリー室 壁	1.40E+01	2.48E+00	—
5	治療室 床	4.03E-01	2.75E+02	—
6	加速器室 南東壁	8.49E+03	7.38E+03	—

※ 「—」: 検出器を設置していない。「ND」: 生成放射能が低く、検出できなかった。

2-5 まとめ

今年度の調査を通して、中性子の測定法、加速器室内の放射化調査のためのサーベイ法、スペクトロメータでの放射化核種測定手法の検討が進んだ。サイクロトン、シンクロトンおよびシンクロサイクロトンの3つの加速器タイプの陽子線治療施設の調査を行った。サイクロトン、シンクロサイクロトンの引き出しビームが約 100nA に対して、シンクロトンは約 10nA で 1/10 であった。実際に照射室で治療に利用される場合には数 nA となっていることから、その差が輸送途中でのビームロスとなり、主要なロスエネルギー低減に用いられるデグレータで発生していると想定される。今回測定した熱中性子フルエンス

率を比べるとシンクロトロンの方が約 1 桁小さい値となっていた。また、熱中性子フルエンス率はデグレータ近傍で高く、そこを発生源として加速器室内に拡がっていることが確認された。シンクロトロンでは、ビーム引き出し部やビームダンプ等の周辺部で熱中性子フルエンス率が若干高くなっている。また、ビームスキニング法とワブラー法では 1 回の治療で照射される陽子数が異なっていると同時に、照射時間も異なっていると想定される。サイクロトロン施設では、ビームスキニング法とワブラー法、シンクロトロン施設ではワブラー法、シンクロトロンサイクロトロン施設ではビームスキニング法のみとなっている。シンクロトロンサイクロトロン故障で調査が完了できていないが、次年度にそれらの比較検討をすることにしたいと考えている。

加速器室内の放射化について施設廃止の際のシミュレーションを行った結果サイクロトロン施設のデグレータ近傍などについては床コンクリートの放射化の評価が必要となってくる可能性があるが、それ以外では全く放射化は無視できる。ガントリー室や照射室も建屋の放射化の可能性はない。次に、金属の放射化については、回転ガントリーの出口のビーム引き出し部で放射化が認められたが、ガントリー本体そのものは放射化が無視できるといえる。ビームライン等直接陽子ビームが輸送された箇所の放射化は生じている可能性があるが、周辺の電源や、ケーブル、冷却水パイプ、架台等の放射化の可能性は極めて低いと想定される。詳細な判定のためには、デグレータやダンプ等を取り外した上で、サーベイする必要がある。

第3章 非汚染・非放射化の評価手順の検討（大型電磁石等の放射化調査）

3-1 はじめに

本章では、放射化した電磁石の金属部分の放射化を調査するために、コア抜きによる試料採取調整後、核種組成分析、均一性評価のための深度分布測定を行ったので、その結果について報告する。また、コア試料採取部位の表面線量率をサーベイメータで測定し、線量率と放射能の関連性を調査することで、線量率測定から放射能濃度を算定するための基礎的検討を行ったので、結果を報告する。

3-2 電磁石金属部内の生成核種と放射能深度分布調査

（1）目的

2017年度から継続している本研究の成果より、これまで、施設の廃止の際に発生廃棄物量として大きな割合を占める建屋コンクリートの放射化評価について、測定手法の検討を進め、実際の施設廃止の際の活用について道筋を示すことができた。次の課題として、同様に廃棄物量として大きい金属の放射化の評価手法の検討に入る。検討対象は、鉄や銅で構成されており、発生装置本体の中で最も大きな重量を占める大型電磁石とする。大型加速器施設において、実際に使用された電磁石の各部品を測定することにより、金属放射化の評価手法の確立を目指す。

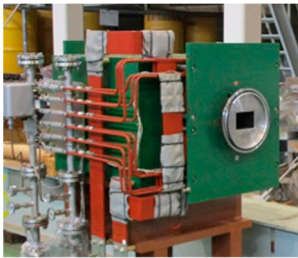
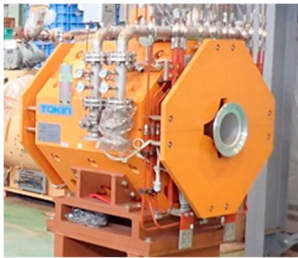
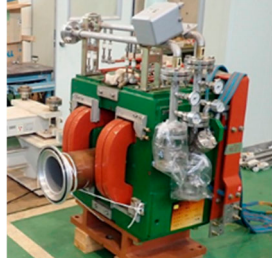
具体的には、大型電磁石を構成する部品に対して、コアボーリング法で金属試料の採取を行い、放射性核種毎の深度分布を求める。測定結果をもとに、代表核種とそれ以外の核種について、生成放射能比をあらかじめ明らかにし、代表核種から全放射能を推定できるようにする。そして、金属試料採取部位およびその周辺部の表面線量率をサーベイメータで取得し、線量率と放射能の関係を明らかにすることができれば、金属放射化物の安全取扱に大いに資すると期待される。

上記の条件を満たす調査対象として、2006年3月より運転を停止している高エネルギー加速器研究機構 12 GeV 陽子シンクロトロン（以下「KEK-PS」という）の電磁石を選定し、ヨークやコイル、ダクト等の金属部品のコアボーリング調査により、電磁石内部の生成核種と放射能分布の特徴を明らかにした。

(2) 調査した電磁石の概要

今回対象とした電磁石は、2006年3月までKEK-PSやその関連施設であるカウンターホール、ニュートリノラインに設置されており、実際に使用されていた。2017年10月にイメージングによる調査を行うため、放射化物使用棟内に移設を行った。概要を表3-1にまとめる。これらの電磁石は、2017年度の研究で、放射線イメージング技術による評価(製品状態での放射化部位および核種の特定評価)を行っている。

表3-1 調査対象電磁石

	4D214	Q416	WS
外観			
表面線量率 ^{※1}	110 μSv/h	15 μSv/h	40 μSv/h
検出核種 ^{※2}	⁶⁰ Co, ²² Na	⁶⁰ Co, ²² Na	⁶⁰ Co, ²² Na
設置場所	北カウンターホール	ニュートリノライン	ニュートリノライン
運転期間	1990~2005.12	1999~2004.11	1999~2004.11

※1 : 2018年1月に電離箱サーベイメータ(日立製作所製)で測定

※2 : 2018年1月にCZT検出器(Kromek製GR1)で測定

(3) 金属部品からのコア試料採取

コア試料採取を行うに先立って、調査対象電磁石を個別の構成部品毎に分解した。その後、放射化物使用棟内に仮設のクリーンハウスを設置し、その中でヨークやコイル、ダクトといった金属部品からのコア試料採取を行った。図3-1にコア試料採取時の様子を、図3-2に取り出したコア試料を示す。合計、18部品からコア試料を採取し、採取したコアの総延長は4.6mであった。



図3-1 電磁石部品からのコア試料採取の様子

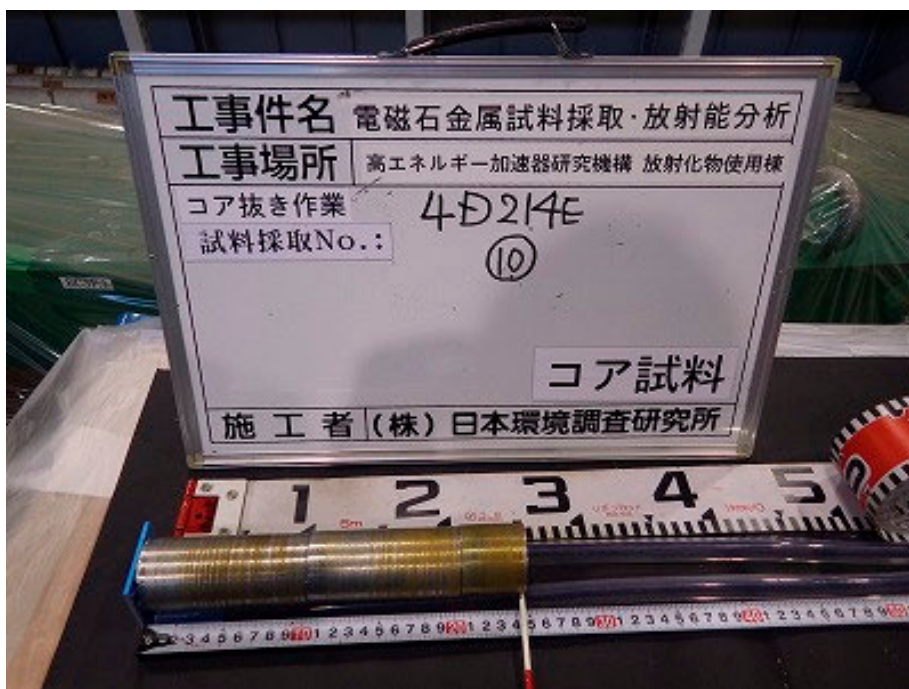


図3-2 電磁石部品から採取したコア試料(4D214-E)

(4) コア試料採取地点における存在核種の同定と放射能深度分布の導出

採取したコア試料は、長さ 1 cm 毎に切断され、Ge 検出器での γ 線測定検体として調整された。取り代不足等の理由により、1 cm が確保できなかった場合は、切断せずに測定検体とした。測定検体は全部で 400 個作成され、各コア試料につき、表層と最深部の 2 箇所の γ 線スペクトロメトリーを Ge 検出器に

て行い、スペクトルより存在核種の同定および、放射能の定量を行った。解析を進めるうちに、当初予想していた熱中性子反応で生成する ^{60}Co の他に、より高いエネルギー領域の核破碎反応由来の核種生成が確認された。金属部品内に入射した粒子は、深部に行くにつれ急激にエネルギーを落とすので、特に表層付近の浅い部分の核種分布を緻密に調べる必要が出てきた。ゆえに、追加で 25 検体の測定を行い、核種分布データを補完することを決定した。

図3-3に 4D214-G(下部ヨーク)の上流部より採取したコア試料の放射能深度分布を示す。ビームダクトに接していた面が表面側である。 ^{60}Co 、 ^{44}Ti とその娘核種の ^{44}Sc 、 ^{54}Mn 、 ^{22}Na 、そして、 ^{42}K の 6 核種が検出された。 ^{60}Co と ^{54}Mn は深さ方向の放射能の減衰が緩やかであり、熱中性子や低エネルギー領域の核反応由来であることを表している。一方で、 ^{44}Ti 、 ^{44}Sc 、 ^{42}K 、 ^{22}Na は、深さ方向の放射能の減衰が急激であり、核破碎反応などの高エネルギー核反応由来であることを表している。ヨーク全体に高線量部位が分布していることが示された。図3-4は、同じ 4D214-G の下流部より採取したコア試料の放射能深度分布である。 ^{60}Co に着目すると、放射能の絶対値も深さ方向の減衰率も上流と下流で変化がないことが示されたが、 ^{44}Ti 、 ^{44}Sc 、 ^{42}K 、 ^{22}Na については、下流部の方が、上流部よりも減衰率が大きいたことが示された。核子を十数個も放出する反応は、エネルギーが高い方が起こりやすく、ゆえに、上流側に偏って分布していると考えられる。

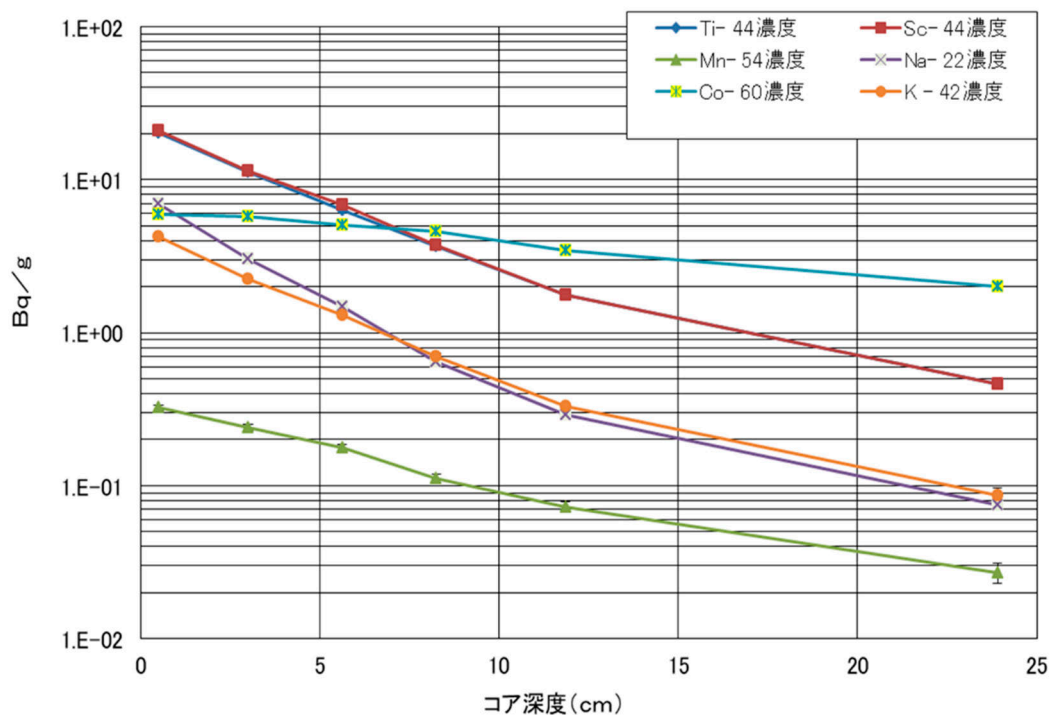


図2. 11 コアNo.12の γ 核種濃度分布

図3-3 コア試料の放射能深度分布(4D214-G, 上流部より採取)

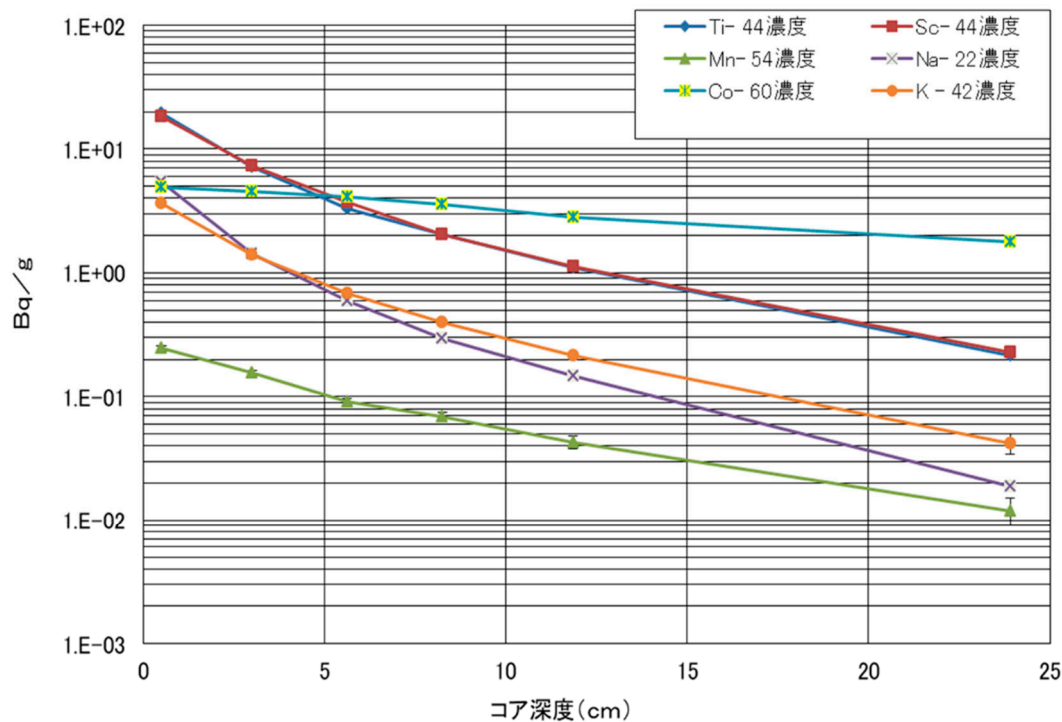


図2. 13 コアNo.14の γ 核種濃度分布

図3-4 コア試料の放射能深度分布(4D214-G, 下流部より採取)

3-3 電磁石内の生成核種放射能と表面線量率の関連性

(1) 目的

大型電磁石等の大型機器に対してコアボーリング法で金属をサンプリングして、放射性核種毎の深度分布を求める。測定結果をもとに、代表核種とそれ以外の核種について、生成放射能比をあらかじめ明らかにし、代表核種から全放射能を推定できるようにするとともに、サーベイメータで得られる線量率と代表核種の濃度との関係を求めることができれば、金属放射化物の安全取扱に大いに資することになると期待される。

(2) 調査方法

2018年度の安全研究で我々が開発した小型 CsI サーベイメータと専用遮蔽体を用いて、3-3(3)節において、分解した電磁石の表面を測定した。測定箇所はコア試料採取箇所および、その周辺部位とし、合計 84 箇所であった。そのうち、代表箇所について、線量率から放射能濃度を推定する手法開発のための予備的検討として、表面線量率と同定核種の放射能の関係を明らかにすることを試みる。

(3) ^{60}Co を均一に含む鉄ブロックを標準とした検出器の校正

電磁石での評価を行う前に、 ^{60}Co を均一に含む Duratek 製の原子炉材再利用鉄ブロックを標準試料とした検出器の校正を行った。標準試料とした鉄ブロックは 1.3 m×1.3 m×0.65 m であり、6面の線量率測定を行った。図3-5に示すように様々な種類のサーベイメータとスペクトロメータを厚み 6.5 cm の鉛遮蔽体で囲い表面線量率と放射能の測定を行った。検出効率は事前のシミュレーションにより、鉄製の電磁石ヨーク表面に γ 線検出器を密着させて測定を行った時、検出可能な領域がどの程度であるのか見積もった。検出器を中心に、直径 20 cm 深さ 7 cm までの領域より、検出器に到達する γ 線の 95 % が飛来することがわかった(^{60}Co 1333 keV の場合)。



図3-5 Duratek 鉄の測定の様子

(4) コア抜き箇所の表面線量率と放射能定量結果の比較

コア試料より求めた放射能の値と CsI サーベイメータで測定した表面線量率より、核種毎に検量線を作成し、全 84 箇所について放射能の推定値を見積もった。次年度、金属放射化物の放射能評価手法確立に向け、さらに検討を重ね、 CeBr_3 検出器での放射能測定の数値とも整合を取り、表面線量率と放射能の関係をより明確にする。

3-4 まとめ

今年度の調査において、金属の測定手法について検討を進めた。放射化した電磁石を部品毎に分解後、コア抜きにより試料採取、測定検体へと調整、放射能測定という過程を経て、放射性核種の同定と、放射能の深度分布を測定することができた。

さらに、金属試料のサーベイメータによる濃度評価法の検討を行った。昨年度の研究の成果として開発した超小型 CsI サーベイメータと専用遮蔽体を用いて微弱の ^{60}Co を含む鉄ブロックに対して、線量率測定を行い、濃度と線量率の関係を求めることができた。次年度の課題として、代表核種と他の測定核種の生成放射能比の関係、および、表面線量率と生成核種放射能の関係を明らかにし、サーベイメータによる表面線量率測定による放射能定量手法の確立に取り組む。

第4章 非汚染・非放射化の評価手順の検討（放射化分布のイメージングの検討）


4-1 はじめに

本章では、放射線イメージング技術による加速器電磁石等、金属部の放射化評価を効率化するための基礎的検討について報告する。運用中の粒子線治療加速器施設において、電磁石等の金属部品中に生成した放射性核種の同定と、強度毎のマッピング(分布状況の把握)の可能性について評価した。また、3章において、コア試料採取を行った電磁石金属部品の測定を行い、 γ 線の可視化像(以後「可視化像」という)から線量率や放射能の定量に向けたデータ取得を行った。

4-2 加速器放射化評価に適したイメージング技術の選定

2017年度より、我々は、 γ 線を可視化することのできる放射線イメージング技術および、それを用いた装置による、加速器放射化の効率的評価手法確立の可能性について検討を重ねてきた。これまでの研究成果により、加速器施設のように複数の核種が存在するような条件では、核種と放射能分布が同時に把握できることが重要であることが分かってきた。これを達成するためには、結晶部の厚み、つまり、検出効率が最も重要であることがわかってきた。国内外の様々な装置を用いた実機評価の結果より、他機種を凌駕する検出効率を持つH3D製H420が、イメージング技術による加速器放射化評価手法確立を達成できる見込みのある装置として選定された。表4-1にH420の概要を示す。

表4-1 H3D 製 H420 の概要

製品名	H420
製造元	H3D, Inc.
外観	 <p>(写真はプラケン商品カタログから引用)</p>
外形寸法	W: 24 cm, H: 18 cm, D: 9 cm
重量	3.3 kg
検出部	CZT(テルル化亜鉛カドミウム)
結晶サイズ	1 個当たり 2 cm×2 cm×t1.5 cm の結晶を 4 つ搭載
可視化方式	コンプトン方式
γ 線スペクトル取得	可能(任意の範囲を選択し可視化像への反映可能)
電源	AC100V 外部電源および内蔵バッテリー

4-3 運用中の加速器施設における核種同定と線量分布

(1) 目的

H420 による実際の現場での画像化を行い、運転中のビームロスにより電磁石等の金属部品中に生成した放射性核種の同定と、強度毎に分布状況の把握を試みる。調査対象として、2 章の放射化調査で訪れた相澤病院陽子線治療センター、およびメディポリス国際陽子線治療センターを選定し、加速器運転直後のビームラインを、H420 により測定する。

(2) メディポリス国際陽子線治療センター

シンクロトロンタイプの加速器を有する施設であり、事前のサーベイ結果により、高線量部位は、ビームライン全体に分散していることがわかった。スクリーンモニター、ビームキッカー、ストッパー、偏曲電磁石

入口といった、ビームの運動に大きく変化が生じる部位で、ビームロスによる放射化が起こっており、 ^{48}V や、 ^{52}Mn 、 ^{56}Co といった半減期 1 年未満の短寿命核種が LaBr_3 検出器での測定により検出された。図 4-1 に示すように、H420 による測定においても、 γ 線スペクトル上にこれらの核種由来のピークが確認され、関心領域のピークのみから可視化像を再構成することで、核種毎の線量分布を得ることができた。

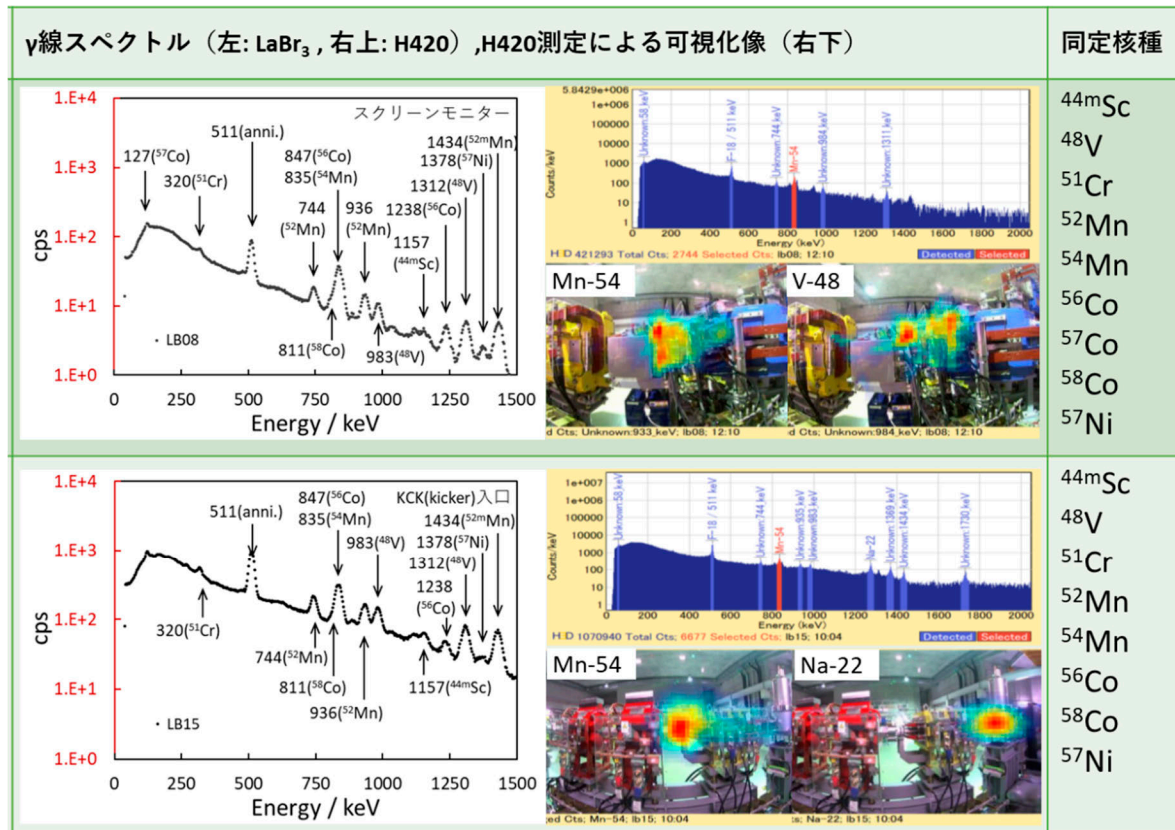


図4-1 LaBr_3 検出器と H420 の結果比較(メディポリス国際陽子線治療センター)

(3) 相澤病院陽子線治療センター

サイクロトロンタイプの加速器を有する施設であり、デグレーダの放射化が最も顕著であった。 LaBr_3 検出器による γ 線スペクトロメリーの結果では、 ^7Be 、 ^{22}Na といったアルミ由来の放射性核種が検出され、図4-2に示すように、H420 による測定においても、可視化像にデグレーダの放射化の様子が捉えられた。核種毎の線量分布の結果より細部について評価したところ、 ^7Be がデグレーダの下部に分布していたのに対し、 ^{24}Na はデグレーダを保持するアルミフレーム全体にわたって上下に分布していることが示唆された。

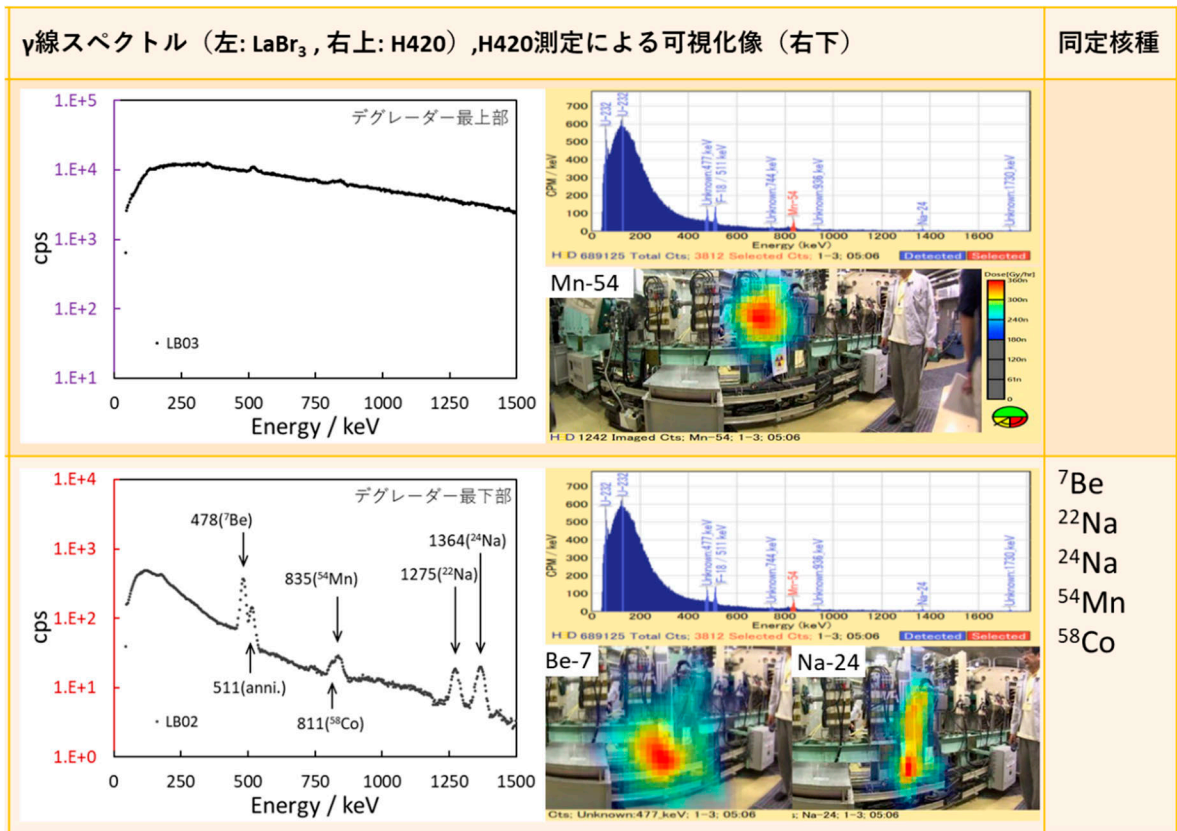


図4-2 LaBr₃ 検出器と H420 の結果比較 (相澤病院陽子線治療センター)

4-4 イメージング技術による放射化電磁石の核種同定と放射能定量の可能性

(1) 目的

放射線イメージング技術による加速器電磁石等の金属部の放射化評価手法の確立に向けて、可視化像からの線量率推定、放射能定量に向けた検討を行う。コア試料採取および表面線量率測定を行った電磁石部品の測定を H420 でも行うことで、可視化像と線量率、存在核種の放射能といった情報との関連性を見出し、イメージング技術を用いた核種と放射能それぞれを同時に評価する手法の開発を試みる。

(2) 放射化電磁石部品からの可視化像取得

3章でコア試料採取と表面線量率測定を行った 4D214、Q416、WS の電磁石部品について、H420 による測定を行い、合計 41 の可視化像を取得した。図4-3に 4D214-G(下部ヨーク)を上側方向(ビーム軸側)から測定した結果を示す。上図はスペクトル上で ⁶⁰Co のエネルギー領域のみを取り出し可視化像に反映させた結果である。⁶⁰Co は、部品全体に均一に分布し、可視化像にも反映されている。一方で、

下図はスペクトル上で ^{44}Sc のエネルギー領域のみを取り出し可視化像に反映させた結果である。図の左側に高線量部位が集中していることが示された。図中で陽子ビームは左から右方向に進むので、上流方向に ^{44}Sc が多く分布していることを表している。 ^{60}Co と ^{44}Sc は 3 章のコア試料採取による放射能定量でも検出されており、可視化像においてもそれら核種分布の傾向と一致するような結果が得られた。今後、可視化像から表面線量率、放射能の定量に結びつける議論を展開していく予定である。

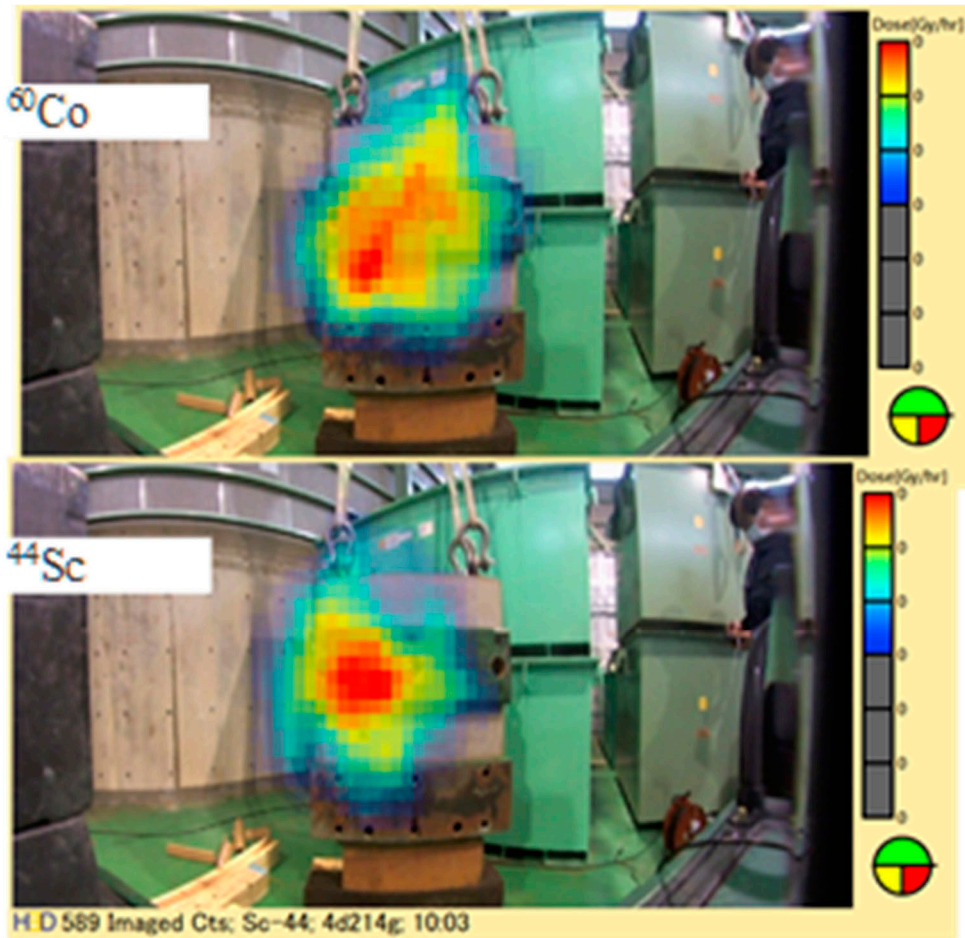


図4-3 放射化電磁石より取得した可視化像(4D214-G,ビーム軸方向から)

4-5 まとめ

今年度の調査において、放射線イメージング技術による加速器電磁石等、金属部の放射化評価を効率化するための基礎的検討に取り組んだ。具体的には、運用中の粒子線治療加速器施設において、運転後の放射化サーベイに同行する形で、ビームライン電磁石やその他構成物を、イメージング技術を用

いた装置で測定し、 γ 線の可視化像を取得した。可視化像より、どこに、どの放射性核種が、どの程度の数量(相対的な線量率)存在するのかという核種の分布状況を示すマッピングデータを作成することができた。また、第3章において、コア試料採取と表面線量率測定を行った電磁石金属部品からも可視化像を取得した。引き続き、次年度においても、可視化像、表面線量率、存在核種の放射能の3種の情報をもとに、イメージング技術を用いた核種と放射能、それぞれを同時に評価する手法について検討をすすめる。

第5章 測定評価マニュアルの作成

5-1 検討体制

本安全研究の第2回研究検討委員会において測定マニュアルの検討の進め方について意見交換し、検討体制は以下のようにすることになった。

研究検討委員会委員は、加速器、廃止、放射線計測のエキスパートであり、指導助言が大いに期待できる。また、各委員は関係学協会として放射線安全管理学会、放射線技術学会、医学物理学会、核医学会、原子力学会、放射化学会、放射線施設協議会、日本アイソトープ協会等、また組織として原子力研究開発機構、量研機構放医研、理研、高エネルギー加速器研究機構等加速器を用いる研究機関や大学の医療機関等に所属して活躍おり、学会とも情報の交換や共有が期待できる。

以上のことを踏まえ、事務局により作成した原案について、各委員に分担、指導を受けるとともに、各学会のフィードバックを受けながらマニュアルとして整えていく。

2020年度開催の研究検討委員会において、委員の中から、各章のコメント案の具体的内容、コメントを行う分担者を決定する。

5-2 編集方針

マニュアルをまとめるにあたっては、既に規制庁で令和元年9月に決定された「放射能濃度についての確認を受けようとする物に含まれる放射性物質の放射能濃度の測定及び評価の方法に係る審査基準」を考慮することにする。

上記の基準はクリアランスを実施する際のものであるが、本マニュアルでは、安全研究の成果を踏まえて、放射性廃棄物とはしないための測定手法について提案することとする。また、最近の国内外の事例を紹介する。

5-3 放射線発生装置廃止のための放射化評価マニュアル（構成案）

5-3-1 前提条件

- (1) 廃止時において放射性廃棄物でないことを確認するための測定評価手法について記述する。
- (2) 発生装置使用施設の評価を行う際には、これまでの運転実績が廃止時まで継続されるものとして推定する。
- (3) 評価の際の測定条件としては、現行のクリアランスレベルを参考にし、検出下限値はそのレベルを十分下回る条件を担保できる方法とする。
- (4) 廃止時の測定については、廃棄対象物の材質ごとに代表核種を決定する手法、評価単位の決定と濃度確認手順について記述する。

5-3-2 運転時における測定と評価手法

発生装置の性能、使用目的、使用方法を考慮して放射化物が発生する施設と発生領域を明らかにするための評価手法および廃止時に考慮すべき、放射化物の発生領域、発生量、代表核種と数量の推定のための測定についてまとめる。

(1) 放射化の観点による、放射線発生装置の区分

(2) 放射線発生装置の使用に伴う放射化発生要因の解析

(3) 測定手法

- i) 線量計による測定手法
- ii) 運転直後の測定手法（線量率、スペクトロメトリー）

(4) 計算手法（モンテカルロ計算、簡易計算）

- i) 運転記録
- ii) 放射化物の組成分析
- iii) 放射化計算手順

(5) 放射化評価手法

- i) 測定時までの運転履歴（+将来の運転予測）
- ii) 代表核種と放射化量推定

(6) 施設評価結果

- i) 静電加速器施設
- ii) 放射光施設
- iii) 粒子線治療施設

5-3-3 廃止措置時の測定と評価手法

ここでは、サイクロロン施設等の事例を基に、放射線発生装置本体、周辺機器および建屋構造体に分けて評価の進め方をまとめる。

(1) 建屋、構造物の放射化評価

- i) 線量率測定とスペクトロメトリ
- ii) コア試料採取、分析
- iii) 代表核種の決定と線量率-放射能濃度相関の確認
- iv) コンクリートはつり領域と深さの決定
- v) 除染確認測定

(2) 放射線発生装置、機器類の放射化評価

- i) 測定器の選定
- ii) 線量率測定とスペクトロメトリ
- iii) コア試料採取、分析
- iv) 難測定核種の測定と推定手法
- v) 代表核種の決定と線量率-放射能濃度相関の確認
- vi) 除染領域の決定

5-3-4 クリアランス制度への取り組みに対する課題

(1) 事前評価の進め方

- i) 運転履歴
- ii) 対象範囲での放射化物とクリアランス対象物の推定
- iii) 評価単位の決定
- iv) 米国 SLAC、欧州 CERN での先行事例紹介

(2) 検認制度のあり方

- i) 除染後の建物すべてをクリアランス対象物および非放射化物とする廃止手順の提言。
- ii) 検認のためのガイドライン作成

(3) クリアランス対象物、放射化物の取扱に対する現状と課題

- i) 現状の無条件クリアランス制度の理解を得ることの必要性
- ii) 機器の再使用(海外も含めた再使用のための譲渡譲受、条件付きクリアランスのシナリオと計算評価)
- iii) 原子力発電所廃止措置調査検討委員会技術レポートシリーズ Vol.1 (エネルギー総合工学研究所、2018/11)に対する放射線発生装置廃止措置での対応について

第6章 研究発表

6-1 論文発表

- 1) Hiroshi Matsumura, Go Yoshida, Akihiro Toyoda, Kazuyoshi Masumoto, Koichi Nishikawa, Takayuki Nakabayashi, Yoshiharu Miyazaki, Taichi Miura, Hajime Nakamura and Kotaro Bessho, "Simplified method for determining residual specific activity in activated concrete of a PET-cyclotron room using a survey meter," Environmental Radiochemical Analysis VI, Royal Society of Chemistry, 135-147 (2019).
- 2) Hajime Nakamura, Hiroshi Matsumura, Go Yoshida, Akihiro Toyoda, Kazuyoshi Masumoto, Taichi Miura, Kimikazu Sasa and Tetsuaki Moriguchi, "Investigation of Neutron-fluence Measurement Methods for Estimating Neutron-induced Activity from an Electrostatic Accelerator Source," Environmental Radiochemical Analysis VI, Royal Society of Chemistry, 152-160 (2019).
- 3) Akihiro Toyoda, Hiroshi Matsumura, Kazuyoshi Masumoto, Go Yoshida, Taichi Miura, Hajime Nakamura, Kotaro Bessho, Takayuki Nakabayashi and Genki Horitsugi, "Quantitative Evaluation of Radioactivity in Concrete at PET Cyclotron Facility with Simple and Non-destructive Measurement," Environmental Radiochemical Analysis VI, Royal Society of Chemistry, 178-183 (2019).
- 4) Go Yoshida, Akihiro Toyoda, Hiroshi Matsumura, Kazuyoshi Masumoto, Taichi Miura, Hajime Nakamura and Kotaro Bessho, "Evaluation of Different Gamma-ray Imaging Techniques for Visualisation of Induced Activity in Accelerator Magnets," Environmental Radiochemical Analysis VI, Royal Society of Chemistry, 191-203 (2019).

6-2 国内会議発表

- 1) 豊田 晃弘, 松村 宏, 吉田 剛, 榎本 和義, 中村 一, 西川 功一, 三浦 太一, 別所 光太郎, 「粒

子線治療用加速器の運転時の中性子発生量と放射化調査」, 第2回日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会, 東北大学, 2019年12月4日～7日

- 2) 中村 一, 松村 宏, 吉田 剛, 豊田 晃弘, 榎本 和義, 西川 功一, 三浦 太一, 別所 光太郎, 「放射光施設の廃止措置に係わる放射化調査」, 第2回日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会, 東北大学, 2019年12月4日～7日
- 3) 松村 宏, 吉田 剛, 豊田 晃弘, 榎本 和義, 中村 一, 西川 功一, 三浦 太一, 別所 光太郎, 土田 秀次, 松田 誠, 谷池 晃, 石岡 純, 花木 博文, 林 憲志, 沢田 正博, 「加速器施設のコンクリート床に対する高感度測定法による放射化調査」, 第2回日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会, 東北大学, 2019年12月4日～7日
- 4) 吉田 剛, 松村 宏, 榎本 和義, 豊田 晃弘, 三浦 太一, 中村 一, 西川 功一, 別所 光太郎, 「放射線イメージングによる加速器廃止措置時の電磁石放射化判定についての基礎的検討」, 第2回日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会, 東北大学, 2019年12月4日～7日
- 5) 松村 宏, 榎本 和義, 吉田 剛, 豊田 晃弘, 中村 一, 西川 功一, 三浦 太一, 別所 光太郎, 「加速器廃止措置に関する研究(1) -放射線安全規制研究-」, 第56回アイントープ・放射線研究発表会, 東京大学, 2019年7月3日～5日
- 6) 西川 功一, 松村 宏, 榎本 和義, 吉田 剛, 中村 一, 豊田 晃弘, 三浦 太一, 別所 光太郎, 「加速器廃止措置に関する研究(2)-加速器ビームラインの放射化調査-」, 第56回アイントープ・放射線研究発表会, 東京大学, 2019年7月3日～5日
- 7) 豊田 晃弘, 松村 宏, 吉田 剛, 榎本 和義, 中村 一, 西川 功一, 三浦 太一, 別所 光太郎, 「加速器廃止措置に関する研究(3)-加速器コンクリートの放射化調査-」, 第56回アイントープ・放射線研究発表会, 東京大学, 2019年7月3日～5日
- 8) 吉田 剛, 松村 宏, 西川 功一, 榎本 和義, 豊田 晃弘, 中村 一, 三浦 太一, 別所 光太郎, 「加速器廃止措置に関する研究(4) -放射化測定評価方法の検討-」, 第56回アイントープ・放射線研究発表会, 東京大学, 2019年7月3日～5日
- 9) 松村 宏, 榎本和義, 吉田 剛, 豊田晃弘, 中村 一, 西川功一, 三浦太一, 別所光太郎, 「発生装

置の放射化調査の概要－規制庁安全研究－」, , 第16回 日本放射線安全管理学会 6月シンポジウム, 東京大学, 2019年6月27日(木)～28日

- 10) 松村 宏, 榎本和義, 吉田 剛, 豊田晃弘, 中村 一, 西川功一, 三浦太一, 別所光太郎, 「2019年度の活動計画－規制庁安全研究－」, 第16回 日本放射線安全管理学会 6月シンポジウム, 東京大学, 2019年6月27日(木)～28日

6-3 国際会議発表

- 1) G. Yoshida, K. Nishikawa, H. Nakamura, H. Yashima, S. Sekimoto, T. Miura, K. Masumoto, A. Toyoda, H. Matsumura, Y. Miyazaki, "Systematic investigation of trace elements in the concrete of accelerator room by neutron activation analysis," 15th International Conference on Modern Trends in Activation Analysis (MTAA-15), Bhabha Atomic Research Centre, Trombay, Mumbai, India, November 17-22, 2019.
- 2) K. Masumoto, H. Matsumura, G. Yoshida, A. Toyoda, H. Nakamura, K. Nishikawa, T. Miura, K. Bessho, T. Nakabayashi, F. Nobuhara, S. Yonai, T. Sakai, H. Souda, "Evaluation of Activated Areas in the Particle Radiotherapy Facilities," 5th International Workshop on Accelerator Radiation Induced Activation (ARIA19), Daejeon, Korea, September 23-25, 2019.
- 3) H. Matsumura, G. Yoshida, A. Toyoda, K. Masumoto, H. Nakamura, K. Nishikawa, T. Miura, K. Bessho, H. Tsuchida, M. Matsuda, A. Taniike, J. Ishioka, H. Hanaki, K. Hayashi, M. Sawada, "Prediction of specific activity in concrete of accelerator facilities for long-term operation using the Na-24 measurement method," 5th International Workshop on Accelerator Radiation Induced Activation (ARIA19), Daejeon, Korea, September 23-25, 2019.
- 4) G. Yoshida, A. Toyoda, H. Matsumura, K. Masumoto, T. Miura, H. Nakamura, K. Nishikawa, and K. Bessho, "Verification of applying the current gamma-ray imaging techniques for discrimination of accelerator magnet activation," 5th International Workshop on Accelerator Radiation Induced Activation (ARIA19), Daejeon, Korea,

September 23-25, 2019.

- 5) K. Masumoto, H. Matsumura, T. Miura, G. Yoshida, A. Toyoda, H. Nakamura, K. Bessho, T. Nakabayashi, F. Nobuhara, K. Sasa, T. Moriguchi, H. Tsuchida, S. Matsuyama, M. Matsuda, A. Taniike, "Evaluation of Activated Area in the Electrostatic Accelerator Facilities," 5th International Workshop on Accelerator Radiation Induced Activation (ARIA19), Daejeon, Korea, September 23-25, 2019.
- 6) H. Matsumura, G. Yoshida, A. Toyoda, K. Masumoto, H. Nakamura, T. Miura, K. Nishikawa, K. Bessho, K. Sasa, T. Moriguchi, F. Nobuhara, Y. Nagashima, "Nondestructive High-Sensitivity Measurement Method for Activation Estimation in Accelerator Room Concrete," 10th International Symposium on Radiation Safety and Detection Technology (ISORD-10) , Taiyuan, China, July 16-19, 2019.
- 7) G. Yoshida, H. Matsumura, K. Nishikawa, A. Toyoda, Y. Miyazaki, K. Masumoto, H. Nakamura, and T. Miura, "In-situ evaluation for activated concrete in the accelerator facility with scintillation type gamma-ray spectrometer," 10th International Symposium on Radiation Safety and Detection Technology (ISORD-10) , Taiyuan, China, July 16-19, 2019.
- 8) K. Masumoto, H. Matsumura, T. Miura, G. Yoshida, A. Toyoda, H. Nakamura, K. Bessho, T. Nakabayashi, F. Nobuhara, K. Sasa, T. Moriguchi, H. Tsuchida, S. Matsuyama, M. Matsuda, A. Taniike, "Evaluation of Activated Area in the Electrostatic Accelerator Facilities," 10th International Symposium on Radiation Safety and Detection Technology (ISORD-10) , Taiyuan, China, July 16-19, 2019.
- 9) G. Yoshida, H. Matsumura, K. Masumoto, H. Nakamura, A. Toyoda, T. Miura, K. Hayashi, J. Ishioka, and H. Hanaki, "Investigation for activation of accelerators at various synchrotron radiation facilities in Japan," 10th International Workshop on Radiation Safety at Synchrotron Radiation Sources (RadSynch19), Kulturen and MAX IV Laboratory, Lund, Sweden, 22-24 May 2019.