

**平成 29 年度放射線対策委託事業費
(放射線安全規制研究戦略的推進事業費)**

平成 29 年度放射線安全規制研究推進事業成果報告書
「加速器施設の廃止措置に係わる測定、評価手法の確立」

平成 30 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	1
1.1 研究の概要	1
1.2 目的	2
1.3 研究実施体制	3
1.4 研究実施状況	4
第2章 静電加速器施設における放射化範囲の明確化	5
2.1 はじめに	5
2.2 予備調査について	5
2.3 本研究での取り組み	6
第3章	11
3.1 国立循環器病研究センターでの調査	11
3.2 サイクロトロン本体の放射化測定	12
3.3 測定器および遮蔽体の検討と先端医学薬学研究センターでの測定調査	12
3.4 放射線可視化手法の調査結果	12
3.5 検出効率およびイメージングプレートでの放射化状況測定	13
第4章 廃止マニュアル	14
4.1 廃止マニュアルの構成	14
4.2 執筆者分担	14
4.3 編集計画	17
第5章 まとめ	18

第1章

1. 1 研究の概要

放射線発生装置施設の廃止措置を実施する上で、RI 事業所は数が多く多目的、多用途、小規模で、廃止措置の際の発生物量が少ない、放射能の総量が少ない、廃止措置期間が短い等の特徴があり、そのことに配慮した制度設計が最も重要である。本研究では、以下の課題の検討を行い、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成果を得ることを目的とする。

(1) 規制対象施設の明確化、規制対象範囲の明確化のための調査を行う。

(2) RI 事業所では「放射性廃棄物でない廃棄物」として取り扱う手法が一般に用いられており、クリアランスレベルを参考にしつつ、非汚染、非放射化を評価するための測定や評価手順を明らかにする。

(3) 廃止措置の計画から報告書の作成までの一連の進め方について、法的な手続き、安全管理体制構築、測定評価手法、廃棄物の管理等を項目毎に明らかにする。

以上の課題に対し、比較的短期間に取り組むために、各方面の専門家、関係学会、研究会および事業所の協力を得ながら進めてきている。

平成 24 年 3 月の事務連絡「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一部を改正する法律並びに関係政令、省令及び告示の施行について」では、直線加速装置と小型サイクロトロンは放射化物の取扱が通知されているが、その他の放射線発生装置についての検討は十分とはいえないため、規制対象範囲の明確化が望まれている。また、放射線発生装置や構造物中に含まれる放射能の測定評価手法を明確にする必要があり、様々な形状・状態にある放射化物中に含まれている核種とその放射能を正確に求め、サーベイメータの線量値と放射能の関係を明らかにし、放射化物中の放射能の均一性をどのように評価するかを明らかにする必要がある。最近の市販検出器の特性比較、検出器の計数効率算出のためのモンテカルロ手法等の検討、放射能分布を直視するための γ 線イメージング技術についてもその特性を比較検討する。

現在、150 台を超える PET 薬剤製造用の小型のサイクロトロン施設の廃止措置の進め方を検討することはケーススタディとして非常に重要である。加速器本体や機器のような金属材料、更に大量に発生する建屋コンクリートの取扱を明確にすることを予定している。

上記の結果を踏まえて、廃止措置計画の各段階で実施すべき項目をまとめることで、ガイドライン作りに貢献したいと考えている。

1. 2 目的

KEK では平成 13 年から 17 年度において、原子力安全研究の一環として、放射線発生装置使用施設における放射化物の測定評価を進め、平成 18 年度からは、文部科学省の受託研究を行い、クリアランス制度のための様々な測定を進めるとともに、全国の放射線発生装置設置施設にアンケート等を実施してきた。平成 23 年度以降は他の機関が受託研究を実施したが、その主な測定等を KEK が協力して進めてきた実績がある。今回、原子力規制庁となって初めて RI 規制に関する安全研究がスタートすることになり、本研究では、これまでの評価が進んでいない部分、マニュアルとして確立されていない部分に着目して、放射線障害防止法に取り入れられた放射化物規制、クリアランス制度導入、廃止措置手順の改正等について、現実に RI 事業所で実施する上で、欠くべからざる課題を抽出し、その円滑な運用に寄与しようとするものである。

直線加速装置と小型サイクロトロン以外の発生装置の区分の明確化が望まれている。本研究では、静電加速器、放射光専用加速器、粒子線治療用加速器を対象とする。あらかじめ放射化物の規制対象となる領域を明らかにしておくことは、安全管理にとって必要不可欠であり、廃止の際の的確な放射化物の取扱を進める上で重要といえる。RI 事業所や関連学会の協力を得ながら検討を進めることにしている。

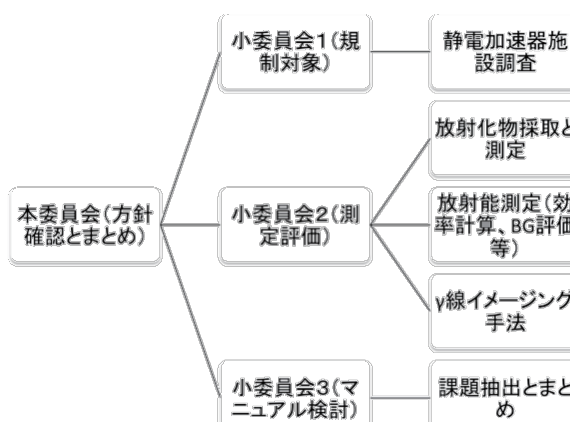
サイクロトロン施設の廃止の際には、建屋コンクリートが発生廃棄物量の大きな割合を占めることになる可能性がある。新たに H イオン加速を行うタイプのサイクロトロン施設のコンクリートの放射化量評価を行い、これまでの結果と比較検討することにより、今後進むと考えられる廃止の際の基礎データとなると期待される。

放射化物は、測定対象物の形状が複雑で、材質も様々である。このため、一部を試料採取して測定するだけでなく、電磁石などの放射化物を直接測定して放射能を求めることも必要である。放射線測定器のメーカーも参加して、非破壊的に放射能を求めるための手順を検討する。また、イメージング手法による放射能分布の均一性の評価も合わせて試みる。

また、廃止マニュアル、測定マニュアル、クリアランス評価手法の検討に関しては、放射線発生装置の安全管理技術に貢献されている専門家や関係学協会において活発に活動を行っている委員会等にも協力をいただくことにしている。このようなネットワークは KEK が長年にわたって築いてきたものであり、それらを十分に活用する。

1. 3 研究実施体制

本研究では、以下のような体制で、研究を進める。本委員会では、研究全体の進め方、まとめ方について検討を行う。小委員会1では静電加速器施設についての調査を進めるための方針、調査結果の検討、まとめを行う。小委員会2では、サイクロトロン施設での測定を進めるとともに、放射化評価法の検討（検出器、遮蔽



体、解析方法)を行う。また、放射化状況を可視化する手法についての検討を進める。小委員会3では、小委員会1, 2, での成果も踏まえて、廃止措置のための、マニュアル作成を進める。

研究参加者および委員会構成は下表の通りである。

現場調査

調査実施者	
松村 宏	高エネルギー加速器研究機構
榎本和義	高エネルギー加速器研究機構
三浦太一	高エネルギー加速器研究機構
別所光太郎	高エネルギー加速器研究機構
吉田 剛	高エネルギー加速器研究機構
豊田晃弘	高エネルギー加速器研究機構
中村 一	高エネルギー加速器研究機構

研究全体

本委員会 方針確認とまとめ	
上義義朋	理化学研究所
渡部浩司	東北大学
大越 実	日本アイソトープ協会

各研究要素

小委員会1 ① 規制対象施設・規制対象範囲の明確化	
笹 公和	筑波大学
松山成男	東北大学
森口哲朗	筑波大学
土田秀次	京都大学大学院

小委員会2 ② 非汚染・非放射化の評価手順の検討	
米内俊祐	量子科学技術研究開発機構
中村哲志	国立がん研究センター中央病院
松田規宏	原子力研究開発機構
藤淵俊王	九州大学大学院

小委員会3 ③ 廃止マニュアルの作成	
林 健一	日本アイソトープ協会
藤淵俊王	九州大学大学院
鈴木智和	大阪大学
上義義朋	理化学研究所
米内俊祐	量子科学技術研究開発機構
群柳 誠	東京ニュークリアサービス(株)
古澤 哲	東京ニュークリアサービス(株)
田中正博	JFEエンジニアリング(株)
片岡昌治	住友重機械工業(株)
山下大地	(株)アトックス
遠藤正志	(株)千代田テクノ
酒井昭宏	(株)千代田テクノ
佐々木博之	富士電機(株)
松村一博	(株)日本環境調査研究所

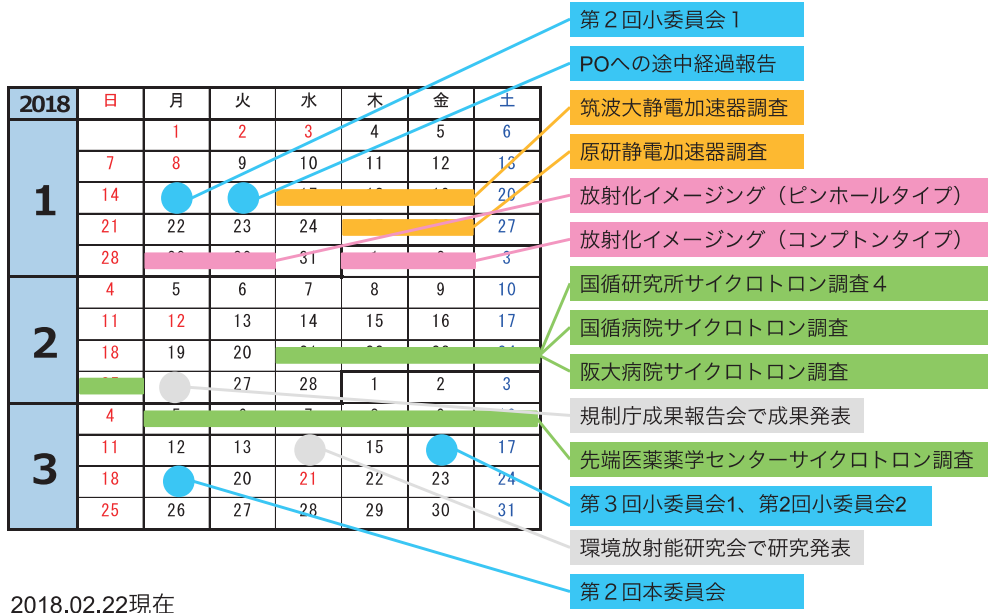
1. 4 研究実施状況

今年度の実施状況は下図の通りである。

2017年度 イベントカレンダー 8



2017年度 イベントカレンダー 9



第2章 静電加速器施設における放射化範囲の明確化

2.1 はじめに

静電加速器等で加速された荷電粒子はそのほとんどがターゲットなどで停止する。このため、荷電粒子が一定エネルギーを越える場合には、照射された箇所限定して放射化が生じる可能性がある。一般に、重イオンのみを加速する場合は、放射化の可能性はほとんどないが、陽子を加速し、しかも標的材質が核反応を起こしやすいようなものであれば放射化が生じることがある。もし、照射部位での放射化が認められる場合には、さらにそこで核反応によって二次的に中性子が発生し、周辺部を放射化する可能性が生じる。中性子の場合、放射化の程度は低い、周辺部に拡がるため、極低レベルではあるが広い範囲に放射化を生じる可能性があるため、施設廃止の際などに注意が必要となってくる。

2.2 予備調査について

2.2.1 調査施設

Table 1. 調査施設一覧

11 施設 14 台の装置について測定を実施することができた。調査対象施設としては、タンデムタイプとして加速電圧それぞれ 2MV、4MV、6MV 以下およびそれ以上の 4 区分を行った。さ

分類	調査協力施設
タンデムタイプ	
加速電圧	
2MV 以下	筑波大、東大、京大、神戸大、奈良女子大
4MV 以下	JAEA-TIARA(2)、住重試験
6MV 以下	筑波大、JAEA 東濃
それ以上	JAEA
シングルエンドタイプ	東北大、広島大、JAEA-TIARA

らに、シングルエンドタイプを1区分とした。11 施設 14 台の加速器を調査対象にした。本調査では、中性子発生量は非常に小さい可能性があることから、中性子検出器としてCR-39 を装着したクイクセルバッジ(長瀬ランダウア)を加速器本体表面などに約 3 ヶ月間をめぐりに設置することにした。速中性子の場合、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、熱中性子ではCR-39 の前面にホウ素入りポリエチレンを置いて、 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ CR-39 は熱中性子(<0.5eV)および速中性子(100keV~10MeV)をそれぞれ中性子核反応で生成する反跳粒子の飛跡を測定し、中性子線量(mSv)を求めることができるものである。今回は、熱中性子線量のみならず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することにした。

各施設では、線量計設置時の運転記録、設置箇所の写真、施設の図面等を提供していただいた。

2.2.2 予備調査結果

(1)中性子非検出の施設

1MV(筑波大)、1.7MV(東大、京大、奈良女子大)、2MV(京大)、2.4MV(住重)、3MV(TIARA)の7施設で中性子は検出されなかった。1施設のみ1.7MVのタンデム加速器でビーム輸送部での中性子発生が大きかった。これはターゲットの材質によるものと考えられる。

(2)中性子が僅かに検出された施設

TIARAのシングルエンドタイプの3MV加速器での出射部および東濃の5MVタンデムのファラディカップ終端域において僅かながら中性子が検出された。いずれも検出下限に近いフルエンスで $3 \times 10^7 \text{cm}^2$ 以下であった。運転時間を考慮すると、これらの値では周辺部の放射化は非検出になると想定される。

(3)中性子発生が検出された施設

(i)東北大シングルエンドタイプ 4.5MV

Li(p,n)反応で中性子発生を行う実験のビームコースよりも、陽子マイクロビームによるビームコース側で一桁高い中性子の発生が認められ、熱中性子フルエンスで最大 $1.1 \times 10^9 \text{cm}^2$ 程度であった。

(ii)筑波大タンデムタイプ 6MV

ファラディカップおよび散乱槽で $1.1 \times 10^9 \text{cm}^2$ 程度の熱中性子フルエンスであった。

(iii)神戸大タンデムタイプ 1.7MV

神戸大では中性子を発生する実験を行ったことから、そのビームラインで 10^9cm^2 を超える中性子発生が生じた。このため、次回詳細な中性子分布の調査を行いたいと考えている。

(iv) 広島大シングルエンドタイプ 2.5MV

スリット部で $3 \times 10^8 \text{cm}^2$ を超える中性子発生が認められた。

(v)JAEA 東海研究所 20MV

この施設は調査施設の中で最も加速エネルギーが高く、施設の規模も大きい。縦置き加速器で、垂直にビーム加速を行い、加速器直下でビームを水平のビームラインに振り分けて輸送するようになっている。このことから、中性子の発生が見込まれる加速器直下の出射ビームラインではCR-39による測定はできなかった。振り分け電磁石室内では 10^8cm^2 を超える中性子が発生した。加速器側面は 10^7cm^2 のオーダーであった。また、ターゲット室は実験目的毎に区画されており、室内は 10^7cm^2 のオーダーであった。

2.3 本研究での取り組み

このように幾つかの施設において、中性子発生が認められたが、長期間の集積値であることから、どのような運転条件の時に中性子が発生するのか、そのような運転は年間どのくらい行われるのか、測定ポイントも増加して、中性子による放射化量を詳細に評価することが必要であると思われた。

2.3.1 評価対象施設の選定と評価方法

(1)対象施設

本研究では、予備検討で中性子発生が認められた、東北大学 4.5MV ダイナミトロン、神戸大学 1.7MV タンデム、筑波大学 6MV タンデム、原子力研究開発機構 20MV タンデムの 4 施設を選定した。それらの施設において、放射化の観点から積極的に中性子を発生させる実験体系での調査を進めることにした。

(2) 調査方法

- ・施設内の放射化状況の測定
運転前後において、サーベイメータ、Ge 検出器を用いて、線量率および放射能の測定を行う。
- ・運転中の中性子発生と分布の詳細測定
中性子検出器として、金箔、TLD、CR-39 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する。
- ・モンテカルロ計算による放射化推定
粒子、エネルギー、標的の違いによる中性子発生量を算出する。筑波大学での実験条件での実験室内の中性子空間分布を求めるとともに、放射化量を推定する。

2.3.2 調査結果

(1) 東北大学 4.5MV ダイナミトロン

東北大学工学部高速中性子実験室に設置された 4.5MV シングルエンドタイプのダイナミトロン加速器からの中性子発生実験を行った。施設では、6本のビームラインが設置され、ion beam 分析、PIXE 分析や材料照射に関する研究が行われており、中性子を発生する実験は減少傾向にある。しかし、放射化に寄与する中性子の発生を見積もるため、2種の照射実験を行った。金属(1)リチウム標的に陽子を照射し、標的からの中性子発生を測定する実験および(2)マイクロビームラインに陽子を送る際に、極小ビームに整形するための銅スリットからの中性子を発生を測定する実験である。照射条件は(1)陽子ビーム、2.5MV、5.5 μ A、8時間、(2)陽子ビーム、3MV、6 μ A、で7時間であった。

いずれの実験においても標的周辺は高速中性子が主で熱中性子は少なかった。熱中性子のフルエンス率は最大でも $10^2 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のオーダーであった。

リチウム標的では主に⁷Be、銅スリットにおいては主に⁶⁵Znが検出された。また、Ge 検出器による床面での測定の結果、ほとんどが天然放射性核種のみであった。

(2) 神戸大学 1.7MV タンデム

神戸大学海事科学部設置の 1.7MV タンデムペレトロン(5SDH2)を用いて、中性子発生

実験を行った。様々な元素を加速することができ、分析、材料研究などに利用されている。ここでは、重陽子をベリリウム標的に照射して中性子を発生させる実験を行った。照射条件は、加速エネルギー3MeV、平均電流 $0.26 \mu\text{A}$ 、6.25 時間であった。標的近傍での熱中性子フルエンス率は $5.7 \times 10^3 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ （金箔での最大値）であり、標的直下の床面、ビームライン下流部の壁面においては $10^2 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のオーダーであった。また、Ge検出器による床面での測定の結果、ほとんどが天然放射性核種のみであったが、照射直後にわずかに ^{24}Na 、 ^{56}Mn が検出され、その放射能から中性子フルエンス率を見積もったところ、ほぼ同じ値が得られた。

(3) 筑波大学 6MV タンデム

筑波大学研究基盤総合センター設置の6MV タンデム加速器による実験を行った。この施設は加速器質量分析等に、利用されており、中性子を積極的に発生させる実験時間は少ない。しかし、本研究では、中性子生成のための照射実験を行うことにした。標的としては、加速器のビームパイプに用いられている SUS304、ファラディカップに使用されている Ta を選んだ。実験は (1)12MV 陽子、 $1 \mu\text{A}$ で 2 時間 SUS 標的を照射、(2)12MV 陽子、 $1 \mu\text{A}$ で 2 時間 Ta 標的を照射、(3)6MV 陽子、 $1.2 \mu\text{A}$ で 2 時間 SUS 標的を照射した。

標的周辺は高速中性子が主であり、最大の熱中性子フルエンス率は 12MeV陽子、SUS 標的照射の場合で、標的下床面で $10^2 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のオーダーであった。同様箇所のGe検出器による床面での測定の結果、 ^{24}Na 、 ^{56}Mn が検出され、その放射能から算出した中性子フルエンス率も同様の値であった。

(4) 原子力研究開発機構 20MV タンデム

原子力研究開発機構東海研究所 20MVペレトロン 20UR型タンデム加速器による照射実験を行った。本装置は国内最大加速エネルギーの静電加速器である。加速エネルギーは陽子で 40MeVであり、加速粒子は 2 本のビームラインにより、5 つの実験室に送られ、様々な実験に利用されている。本実験では、加速器本体室内の中性子発生および放射化状況を調査することにした。30MeV加速陽子（平均電流 $0.25 \mu\text{A}$ ）が照射室に導かれるまでの各所に中性子検出器を設置して中性子フルエンス率を求めた。また、運転前後に、加速器本体、ミームライン、床などの放射化状況を LaBr_3 およびGe検出器を用いて測定した。加速器本体側面での熱中性子フルエンス率は最大で $10^2 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のオーダーであった。エネルギー分析室では最大で $10^3 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のオーダー、照射室ではさらに 1 桁高く $10^4 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のオーダーであった。加速器タンク部分では ^{56}Mn が検出されたが、長寿命の ^{60}Co の生成は認められなかった。エネルギー分析室では床面のGe検出

器による床面での測定の結果、 ^{24}Na 、 ^{56}Mn が検出され、その放射能から算出した中性子フルエンス率も同様の値であった。

(5) モンテカルロ計算による中性子空間分布および放射化計算

モンテカルロ計算では、(i)典型的加速条件での中性子束計算、(ii)筑波大での実験をモデルとした中性子束およびその空間分布計算および(iii)建屋内の放射化計算について行った。(i)では加速粒子として陽子(1~36MeV)、重陽子(0.5~18MeV)、標的としてLi、Be、C、Al、SUS、Cu および Ta の7種について、中性子発生量のエネルギー依存性を求めた。(ii)では筑波大学で行った実験で陽子 12MeV で SUS および TA を標的とした場合の中性子束および実験室内での空間分布を求めた。熱中性子は発生装置室内に拡がっており、建屋コンクリートによって熱化されていることがわかった。得られた結果は、実験結果をよく再現していることが確認された。放射化計算では、コンクリート内での放射化状況を推定することができた。

(6)追加施設

東京大学タンデム加速器研究施設(MALT)設置 5 MVのペレトロン 5UDおよび国立環境研究所NIES-TERRA設置の 5 MVタンデム型加速器(15SDH-2)での追加測定を実施した。2018年12月から2019年1月の2ヶ月間中性子線量計(CR-39)を室内各所に設置し、運転期間中の中性子を測定した。その間、前者はヨウ素、ベリリウムの加速器質量分析、後者は炭素年代測定のための加速器質量分析が行われた。運転中に発生した熱中性子フルエンス率は、前者で最大でも $10\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以下、後者で $20\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度と極めてわずかであった。

2.3.3 まとめ

(1) 中性子発生量の評価法

- ・金箔放射化検出器：静電加速器施設では、高速中性が発生し、室内での散乱により次第に熱化する。このため、Cd比は1に近い場合が多いことがわかった。このような条件では、熱中性子による生成放射能の算出には誤差が多くなる場合がある。
- ・CR-39：速中性子が多い場合、熱中性子成分の飛跡測定の際に、高速中性子による飛跡の影響が大きくなり、非常に誤差が多くなる。
- ・TLD：TLDは熱中性子に感度がある。しかし、 γ 線や速中性子がある場合には、その妨害の程度を考慮することが重要で、Cdで遮蔽したものも同時に設置することによって、求めておくことが有効であった。
- ・Ge検出器やLaBr₃検出器を用いた、 γ 線スペクトロメトリによって、照射後に生成し

た放射性核種の放射能を測定することによって、機器や建屋に発生した短寿命核種の生成放射能からその場での中性子フルエンス率の直接測定が可能であることが示された。

(2) 放射化物の生成

静電加速器のうち、5MVまでの加速器で、中性子の発生を目的とした実験が行われていない施設では放射化の可能性はなかった。また、中性子が発生する実験を行う施設においては、加速粒子が直接照射される標的、スリット、ファラディカップ等が放射化していることが明らかになった。しかし、国内最高エネルギーの20MVタンデム施設を含めて、加速器本体のタンクや建物においては、長寿命の ^{60}Co や ^{152}Eu は検出されなかったことから、廃止の際に放射化物としての管理は不要であることが確認された。

第3章

3. 1 国立循環器病研究センターでの調査

3.1.1 施設の概要

国立循環器病研究センター研究所では、2018年に移転することになっており、現在設置されているサイクロトロン施設においても、廃止措置の準備が進められている。本施設は、住友重機製のHM-18が設置されており、部屋の大きさはおよそ5m×5m×高さ2.5mと、一般的なPET製材用サイクロトロン施設と同程度である。センターではPET診断薬製造のために、 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O および ^{18}F が陽子および重陽子照射によって製造されてきた。このHM-18は1993年から稼働しており、2003年までは重陽子照射が7割、それ以降現在までは陽子照射が7割となっている。とくに、一般の病院で多く製造されている ^{18}F の製造時間は2割だけで、 ^{15}O の製造は5割という特徴があるが、最近では重陽子の照射は行っていない。本研究では、建屋コンクリートの放射化量調査および放射化の原因となる運転中の中性子発生状況を調査することによって、一般の施設との違いの有無を調査することにした。

3.1.2 サイクロトロン室内コアボーリング

コンクリートサンプリングは床2箇所（ターゲットボックス下）、壁5箇所（ビームの高さ）および天井近傍壁1箇所の計8箇所で直径5cm、深さ50cmを採取し、2cm毎に切断、粉末試料とした。Ge検出器で γ 線放出核種、液体シンチレーションカウンタで ^3H と ^{14}C の測定を行った。熱中性子による生成核種は概ね深さ5cmの位置で最大となり、 ^{152}Eu 放射能の最大値は0.04、 ^{60}Co 放射能の最大値は0.01Bq/gでクリアランスレベルに対して十分に低いことが分かった。また、 ^3H 放射能は0.1Bq/g前後であった。

3.1.3 中性子測定

中性子測定ではサイクロトロン本体、および、周囲の壁、床、天井、全74箇所に放射化分析用の金箔を設置し、 $^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$ 反応による ^{18}F 製造および $^{14}\text{O}(\text{p},\alpha)^{11}\text{C}$ 反応による ^{11}C 製造の場合について、サイクロトロン運転中に発生する中性子を求めた。 ^{18}F 製造の場合、室内の熱中性子フルエンス率は $10\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のオーダーであり、ターゲットボックス内では約一桁高かった。また、熱外中性子は約1桁低かった。 ^{11}C 製造の場合は ^{18}F 製造に比べて、中性子フルエンス率は約1/3程度であった。

$^{14}\text{N}(\text{d},\text{n})^{15}\text{O}$ 反応による ^{15}O 製造は同型のサイクロトロンを有する大阪大学附属病院において行った。中性子発生量は ^{18}F 製造と同様であることを確認できた。

3. 2 サイクロトロン本体の放射化測定

サイクロトロン本体の放射化状況を調査するため、三重大学附属病院および国立がん研究センターに設置されていたPET核種製造用サイクロトロンIBA cyclone10/5 本体のセクターマグネット、ヨーク、電磁石コイルから採取した金属試料（平成 27 年度、28 年度放射線対策委託費事業で一部分析したもの）の詳細分析を実施した。金属試料は直径 5cm のコア試料で 1cm 切断したものである。国立がん研究センターのセクターマグネット(下段)試料中の⁵⁴Mnの放射能は深さとともに減衰傾向が見られたが、⁶⁰Coはほぼ一定であった。ヨークでは⁶⁰Coは検出され、深さとともに指数関数的に減衰する傾向が見られた。三重大学の試料も同様の傾向を示した。

3. 3 測定器および遮蔽体の検討と先端医学薬学研究センターでの測定調査

現時点で、施設内の放射化物の生成量を調べる唯一の手段であるコアボーリングによる試料採取の代替として、放射化した壁、床を検出器で直接測定する In-situ 測定法の開発に取り組んだ。本手法の最終目標はサーベイメータの線量値を用いて、壁・床中の放射性核種の生成量を見積もることであるが、そのためには、周囲からの光子を遮り、評価対象部位の線量のみを正確に測定する技術が必要である。我々は、可搬性の良い超小型線量計の開発を行い、専用の遮蔽体を机上計算を基に設計・製作し、部屋の 6 面が均一に放射化している、石川県羽咋市の先端医学薬学研究センターのサイクロトロン室において評価を行った。結果はまだ解析途中であるが、机上検討に比べ、薄い遮蔽体でも、十分に正確な測定ができることが示唆された。

3. 4 放射線可視化手法の調査結果

現在我が国において市販されている放射線イメージングのための装置としては、マスク方式、ピンホール方式およびコンプトン方式がある。放射化物を測定対象としてこれらの装置を利用するには、基礎的検討が必要であり、最適な測定条件を求めるとともに、放射化物測定に適したデザインも必要となってくる。そこで、KEK の放射化物使用棟内に、放射化した電磁石を配置し、各メーカーの協力により、放射化物の放射線イメージ測定を実施し、上記 3 方式を用いた機器による性能を比較検討した。

(1) マスク方式

ミリオンテクノロジースキャンベラ製の iPIX にて測定を行った。チェックソース 9 条件、放射化電磁石 9 条件の全 18 条件の測定を行った。本手法で用いた iPIX は非常に軽量で 50keV 程度の低エネルギーでは検出効率が高いという特徴があるが、加速器の放射化で問題になる 1MeV 以上の光子にはほとんど感度が無かった。

(2) ピンホール方式

日立製作所製 HE-1500 で測定を行った。チェックソース 6 条件、放射化電磁石 26 条件の全 32 条件の測定を行った。本手法で用いた HE-1500 は、検出部周囲に 4cm 厚の鉛遮蔽を搭載しているため、雑音に強く、高エネルギーでも検出効率が低下しにくいという特徴があった。また、非常にシンプルな構造であるため、結果の解釈も容易であった。

(3) コンプトン方式

浜松ホトニクス製ガンマキャッチャーで測定を行った。チェックソース 9 条件、放射化電磁石 25 条件の全 34 件の測定を行った。本手法で用いたガンマキャッチャーは検出効率および角度分解能が良好で、任意の光子エネルギー範囲に ROI を設定できるという特徴があった。本体に遮蔽を搭載していないので、軽量であったが、測定結果より、加速器トンネル内での撮影を行うには適切な遮蔽が必要であることが示された。

3. 5 検出効率およびイメージングプレートでの放射化状況測定

第 3 回小委員会 2 において、委員から以下の報告を受けた。

- (1) GEANT による Ge 検出器の検出効率計算
- (2) MCNP による Ge 検出器の検出効率計算
- (3) IP によるサイクロトロン本体の放射化測定

本研究では主にミリオン社製効率計算ソフト ISOCS を用いている。他の効率計算手法として、モンテカルロ計算手法である GEANT および MCNP を用いる方法について検討した。また、放射線イメージング手法として、カメラによる画像化ではなく、イメージングプレートによる測定の可能性について検討した。

第4章 廃止マニュアル

4.1 廃止マニュアルの構成

廃止マニュアルでは、事業所の廃止を中心に下図の構成を考えており、その手順を紹介することとする。特に、発生装置の廃止では放射化物の評価が重要となってくることから、重点を置いて紹介するが、密封、非密封の施設についても参考となるようにし、法令上の必要事項から、事前対策、安全管理体制、実際の評価方法、工事の施行方法、廃止措置報告までを網羅する。さらに、事業所の一部の施設の廃止の際にも参考となることが望ましいと考えている。

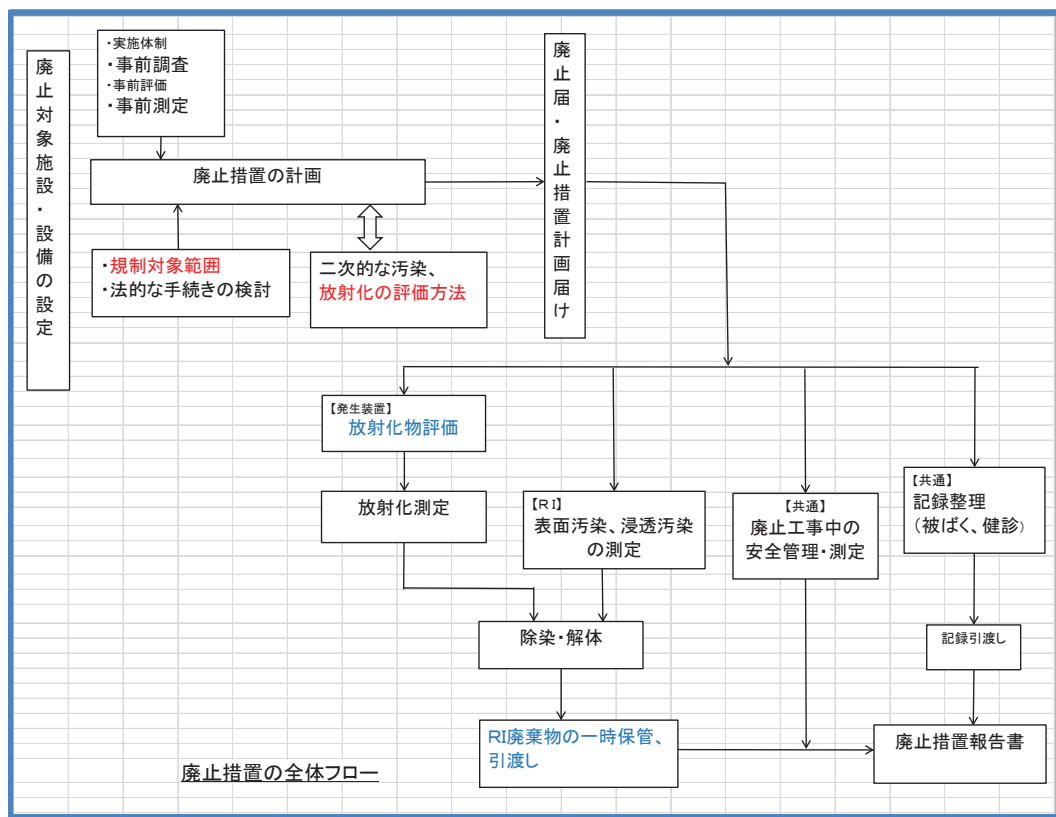


図 4.1 マニュアルの構成概要

4.2 執筆者分担

原稿の執筆に当たっては、日本放射線安全管理学会の全面的な協力を受けて進める。執筆者は、法令、放射線管理、発生装置などの各分野の専門家でもって構成している。

執筆者分担は表 4.1 の通りである。

表 4.1 マニュアル章立てと分担

目次	ポイント	作成：○：主査 ☆：チェック&レビュー
1. 概要	ねらい、概要	○ 梶本
2. 廃止措置の手順 2.1 法的な手続き	法改正に伴い、変更となっている事項の説明を行う。	○酒井、遠藤、鈴木 ☆ 藤淵、鈴木
2.2 廃止計画 2.2.1 事前調査及び打合せ等調整作業 2.2.2 現場での作業 2.2.3 手続きその他(残務処理、補修工事など)	計画立案において、事業所毎に検討すべき事項、必要な作業について、明確にする。	○酒井、遠藤、鈴木
3. 汚染評価の考え方 3.1 汚染範囲の区分の考え方 3.1.1 放射性廃棄物でない廃棄物(NR) 3.1.2 クリアランス 3.2 汚染等の評価手順 3.3 汚染区分の具体例 3.3.1 表面汚染 3.3.2 浸透汚染 3.3.3 放射化	汚染範囲、非汚染の考え方を紹介するとともに、実際の評価手順を明らかにする。	○畔柳
4. 非密封 RI 汚染の評価方法 4.1 二次的な汚染の評価手順 4.1 汚染評価の考え方 4.1.1 内面汚染と外面汚染 4.1.2 書類調査と事前測定 4.1.3 評価対象核種、測定器の選定及び検出限界値	非密封 RI 施設での検討事項を紹介する。	○畔柳

4.2 測定評価方法 4.2.1 表面汚染検査 4.2.2 浸透汚染検査		
5. 放射化物の評価方法 5.1 放射化物の特定方法 5.2 計算	放射線発生装置施設での評価方法について紹介する。	○古澤 ☆ 米内
5.3 放射化物の測定	放射化物の測定法について紹介する。	○松村、佐々木
6. その他の測定 6.1 周辺環境の確認測定 6.2 天然核種の影響 6.3 最終サーベイ	バックグラウンドの考え方、評価方法について、紹介する。	○山下
7. 測定機器の選定 7.1 放射線(能)測定 7.2 汚染測定 7.3 線量率測定 7.4 測定器の点検校正 7.5 測定器の選定と特性 7.5 まとめ	測定器の特徴を明らかにし、その取扱を紹介する。	○佐々木、上叢
8. 汚染除去、解体撤去 8.1 除染・解体の考え方 8.2 除染方法 8.3 除染作業の付帯項目 8.4 工事工法 8.5 一時保管、廃棄物容器 8.6 工事期間中の放射線管理	汚染除去のための広報や注意事項について紹介する。	○佐々木、酒井 ☆ 阿部、片岡(加速器本体)
9. RI 廃棄物、RI 線源 9.1 RI 廃棄物 9.1.1 制限値 9.1.2 分類 9.2 RI 線源 9.2.1 密封線源(チェックソース) 9.2.2 放射線源装備機器	RI 線源および廃棄物の引き渡しについて、分類毎に整理する。	○林

9.2.3 表示付認証機器、表示付特定認証機器など 9.3 日本アイソトープ協会の集荷対象外の廃棄物		
-------------------------------------------------------	--	--

4.3 編集計画

上記の執筆分担にしたがって、来年度までにマニュアルの作成を進める予定である。

第5章 まとめ

規制範囲の明確化については、静電加速器について調査を進めた。多くの施設においては放射化の可能性はなかった。中性子発生を伴う実験を行う施設や、6MV を超える施設では標的、スリット、ファラディカップ等に放射化が認められた。しかし、加速器本体のタンク部分の放射化や、建屋の放射化は認められなかった。

In-situ測定による放射化量評価手法として、放射能の測定法としてはLaBr₃検出器が、Ge検出器に比べて迅速性の点で優れ、放射化の代表核種である⁶⁰Coや¹⁵²Eu等の定量について遜色ない結果が得られることが示された。また、線量測定法としては、様々な固体シンチレータの利用を試みた。ホトマルの代わりに、MPPCを採用し、シンチレータと切り離すことで、検出器本体を非常に小型化できた。その結果として、遮蔽体はコンパクトで軽量化でき、稼働性が向上させることに成功した。

イメージング技術は3方式を検討したが、放射化物測定性能としてはまだ未完成であるといえる。今後、実際の加速器本体室での測定を通して、検出法の最適化を図るための調査を継続したいと考えている。

