

平成 30 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 30 年度放射線安全規制研究戦略的推進事業成果報告書

平成 31 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 目的	1
1.2 研究成果の概要	1
1.3 研究実施体制	3
1.4 研究実施状況	4
第2章	6
2.1 はじめに	6
2.2 調査方法	6
2.3 静電加速器施設	6
2.4 粒子線治療施設	6
(1) 筑波大学附属病院陽子線医学利用研究センター	7
(2) 国立がん研究センター東病院	10
(3) 群馬大学医学部附属病院重粒子線医学研究センター	15
2.5 放射光施設	17
(1) SPring-8	18
(2) KEK-PF	20
(3) UVSOR	24
(4) HiSOR	28
(5) 立命館大 SR センター	30
第3章	32
3.1 PET 薬剤製造用サイクロtron施設での建屋コンクリートの放射化調査	32
(1) 施設の概要	32
(2) 中性子発生量	32
3.2 PET 薬剤製造用サイクロtron施設での建屋コンクリートの放射化判定法の開発	33
(1) 目的	33
(2) 検出器と遮蔽体	33
(3) γ 線スペクトロメータの性能の比較検討	35
3.3 放射線可視化手法の検討	37
(1) 放射化物可視化の課題	37
(2) 2017 年度検討結果	37
(3) 2018 年度調査結果	38

第4章	40
4.1 廃止マニュアルの作成のための活動	40
4.2 廃止マニュアル作成の基本方針	40
4.3 廃止マニュアルの構成	41
第5章	47
5.1 国内会議発表	47
5.2 国際会議発表	49
第6章 まとめ	50

第 1 章

1. 1 目的

大学共同利用機関高エネルギー加速器研究機構(以下「KEK」という)では 2001 年度から 2005 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、2006 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。2011 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。

本研究では、2 カ年において、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し、廃止の際の的確な放射化物の取り扱いを進める上で不可欠な放射化する領域をあらかじめ明らかにしておくことにした。評価には、運転中の中性子発生量の測定、運転終了後の放射化測定、およびその検証のための計算によって検討することにし、研究を進めるに当たっては RI 事業所や関連学会の協力を得ながら実施することにした。

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。今後進むと考えられる廃止の際の基礎データを取得するため、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うことを目的として、陽電子断層撮影(以下「PET」という)用の代表的核種を製造する際の中性子発生量をそれぞれ求め、廃止時に生成するコンクリート中の放射性核種の濃度の推定可能性を検討することとした。

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。放射線測定器メーカーの協力を得て、非破壊的に放射能を求めるための手順を検討し、放射化物のイメージング技術として必要な要素を明らかにすることにした。

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た。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こととした。

1. 2 研究成果の概要

放射線発生装置施設の廃止措置を実施する上で、それらの事業所数が多く、しかも多目的、多

用途、小規模のものが多く、さらに、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事業所が多い等の特徴があり、そのことを配慮した制度設計が最も重要である。本研究では、比較的短期間に取り組むために、本委員会と3つの小委員会を設けて、各方面の専門家、関係学会、研究会および関係事業所の協力を得ながら以下の検討を進めてきた。

- (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として、静電加速器施設、粒子線治療施設、放射光利用施設を対象に進め、放射線発生装置や建屋等の放射化の程度を明らかにすることができた。
- (2) 放射化物について、クリアランスレベルを参考にしつつ、非放射化を判定、評価するための測定手法の開発や評価手順を明らかにした。PET 薬剤製造用のサイクロtron施設の建屋の放射化について、製造核種毎の中性子発生量を求め、サイクロtronの運転履歴からコンクリートの放射化を推定できることを明らかにした。
- (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した。

2012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tronは放射化物の取り扱い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ことから、現行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を進めるとともに、放射能分布を可視化するためのγ線イメージング技術についてもその特性を比較検討した。

現在、150台を超えるPET薬剤製造用の小型のサイクロtron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ことから、PET用の4核種を製造する際の、サイクロtron運転中の中性子発生量を比較し、運転記録をもとに建屋コンクリートの放射化を推定できることを示した。また、コンクリート構造体の放射化を評価するため、コアボーリングによる核種分析、Ge半導体検出器を用いたIn-situ測定、サーベイメータによる測定結果を比較検討し、表面線量率の測定結果によって、コンクリートの放射化量を求めることができることを示すことができた。

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、廃止の際のマニュアルを作成することができた。

1.3 研究実施体制

本研究では、図1-1のような体制で、研究を進めてきた。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った。小委員会1では 2017 年度は静電加速器施設について、2018 年度は粒子線治療施設、放射光利用施設調査を進めるための方針、調査結果の検討を行った。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)を行った。また、放射化状況を可視化する手法についての検討を行った。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行った。

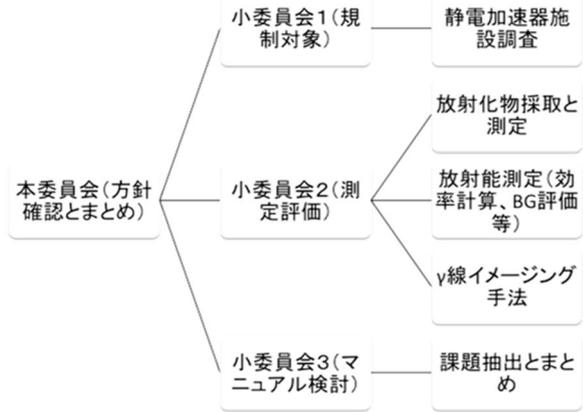


図 1-1. 研究体制

とともに、放射化評価法の検討(検出器、遮蔽体、解析方法)を行った。また、放射化状況を可視化する手法についての検討を行った。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行った。

現場調査		各研究要素	
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		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 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 藤瀬俊王 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 畔柳 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
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		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 藤瀬俊王 九州大学大学院	

図1-2. 2017 年度研究参加者

各年度の研究参加者および委員会構成は図1-2、3の通りである。

現場調査		各研究要素	
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 西川功一 高エネルギー加速器研究機構		小委員会 1 ① 規制対象施設・規制対象範囲の明確化 林 憲志 自然科学研究機構 花木博文 高輝度光科学研究センター 石岡 純 理化学研究所 米内俊祐 量子科学技術研究開発機構 栗 武二 筑波大学 想田 光 群馬大学	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 藤瀬俊王 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 畔柳 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
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		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 藤瀬俊王 九州大学大学院	

図1-3. 2018 年度研究参加者

1.4 研究実施状況

2017年度および2018年度の実施状況をそれぞれ図1-4、5に示した。

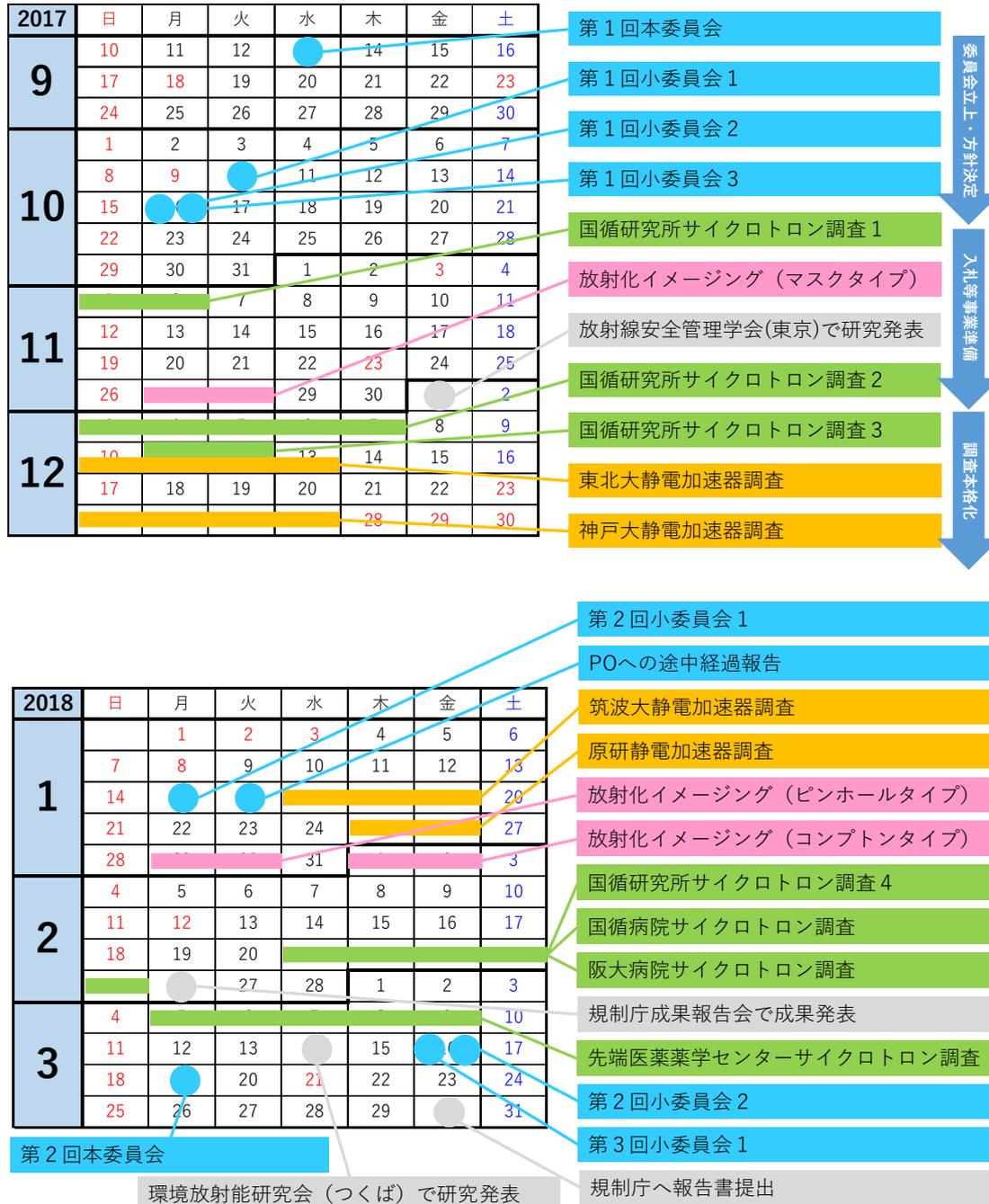


図1-4. 2017年度 活動記録

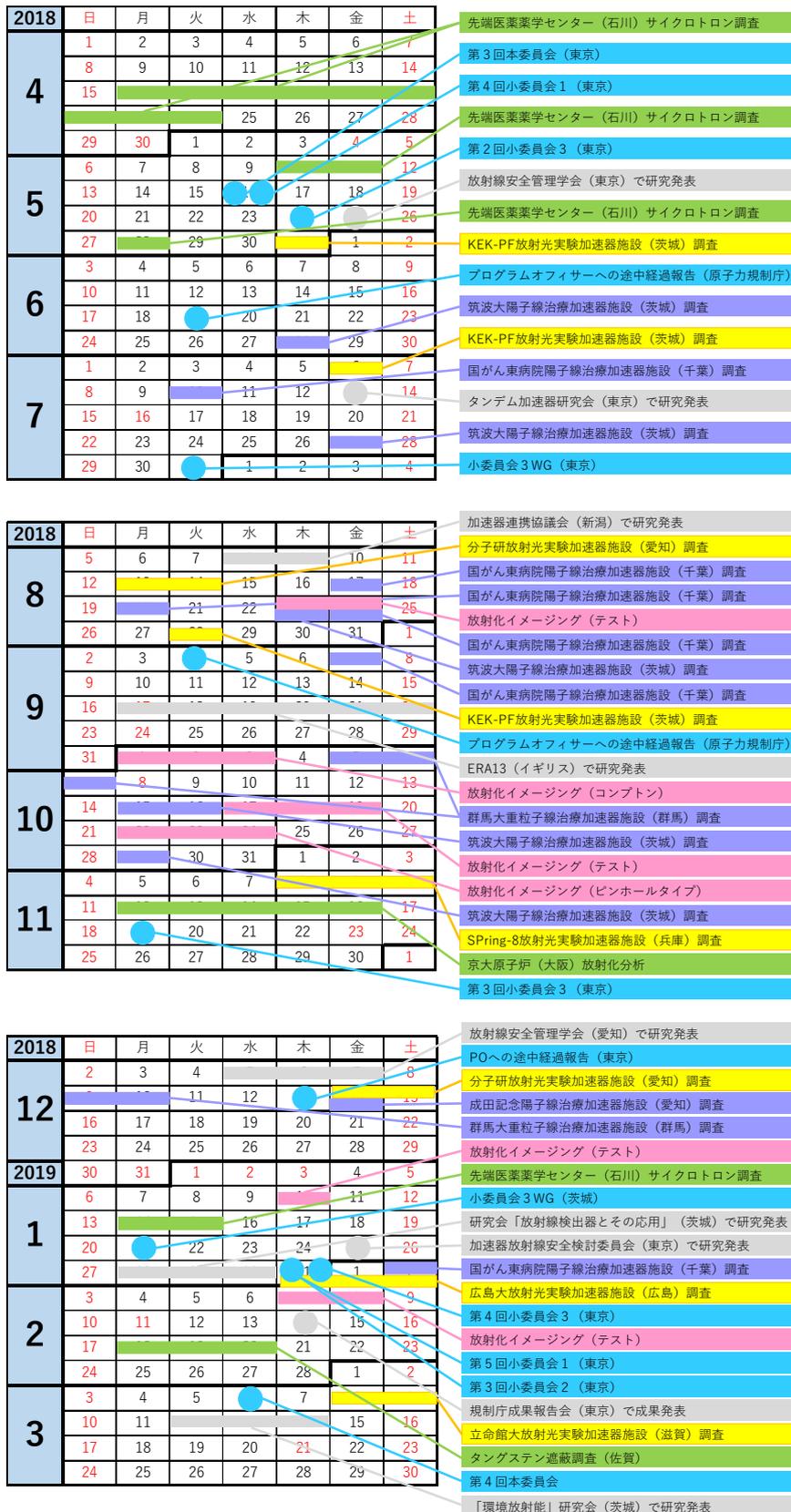


図1-5. 2018年度 活動記録

第2章

2.1 はじめに

本章では、静電加速器施設、粒子線治療施設および放射光利用施設を対象として、それぞれの放射化状況を調査し、施設廃止時の生成放射能を推定することで、放射化物として取り扱うべき範囲をあらかじめ明らかにすることを目的として進めた研究成果を報告する。

2.2 調査方法

調査項目では、(1)運転条件の確認、(2)運転中の中性子測定、(3)運転後の放射化部位の測定、核種分析、(4)モンテカルロ法による中性子発生量の計算を主な内容としている。

2.3 静電加速器施設

静電加速器施設については 2017 年度に調査を実施し、報告書でまとめていることから、ここでは簡単に紹介する。11 施設 14 台の装置の予備調査の結果から、2017 年度は(1)神戸大タンデムタイプ・バンデグラフ 1.7 MV、(2)東北大シングルエンドタイプ・コッククロフトワルトン 4.5 MV、(3)筑波大タンデムタイプ・バンデグラフ 6 MV および (4)JAEA 東海研究所タンデムタイプ・バンデグラフ 20 MV の 4 施設を選定し、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た。MV は加速電圧である。

静電加速器のうち、5 MV 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、中性子発生を伴う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、ファラデー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、国内最高加速電圧の 20 MV の施設を含めて、加速器本体のタンクや建物では、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。

2.4 粒子線治療施設

粒子線治療施設では陽子線、重粒子線による治療が行われている。重粒子線治療に利用される加速器はシンクロトロン方式が一般的であるが、陽子線治療に利用される加速器にはシンクロトロンとサイクロトロンが利用されている。重粒子線は炭素イオンを加速しており、核子あたり 400 MeV のものが多く、陽子線の加速エネルギーは最大 250 MeV までである。表2-1に国内の粒子線治療施設を示した。本研究では、陽子線施設としては、シンクロトロンを利用している筑波大学とサイクロトロンを利用している国立がん研究センター東病院の協力を得た。重粒子線の施設としては群馬大学附属病院の協力を得た。

表2-1 国内の粒子線治療施設

重粒子線	陽子線	都道府県	施設名称
	●	北海道	北海道大学病院陽子線治療センター
	●	北海道	札幌禎心会病院陽子線治療センター
	●	北海道	北海道大野記念病院 札幌高機能放射線治療センター
	●	福島県	南東北がん陽子線治療センター
●		群馬県	群馬大学医学部附属病院 重粒子線医学研究センター
	●	茨城県	筑波大学附属病院 陽子線医学利用研究センター
	●	千葉県	国立がん研究センター東病院
●		千葉県	量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所
●		神奈川県	神奈川県立がんセンター 重粒子線治療施設
	●	長野県	相澤病院 陽子線治療センター
	●	静岡県	静岡県立静岡がんセンター
	●	愛知県	社会医療法人明陽会 成田記念陽子線センター
	●	愛知県	名古屋陽子線治療センター
●		大阪府	大阪重粒子線センター
	●	大阪府	大阪陽子線クリニック
	●	奈良県	高清会陽子線治療センター
	●	福井県	福井県立病院 陽子線がん治療センター
●	●	兵庫県	兵庫県立粒子線医療センター
	●	兵庫県	兵庫県立粒子線医療センター附属神戸陽子線センター
	●	岡山県	岡山大学・津山中央病院がん陽子線治療センター
●		佐賀県	九州国際重粒子線がん治療センター
	●	鹿児島県	メディポリス国際陽子線治療センター

(1) 筑波大学附属病院陽子線医学利用研究センター

入射器の陽子リニアックからシンクロトロンに入射された陽子は最大 250 MeV まで加速され、2 台の回転ガントリーを通して、それぞれの治療室に導かれる。1 日約 60 人の患者の治療が実施されている。レイアウトを図2-1に示した。実験室は現在使われていない。

運転中の中性子測定のための線量計として、中性子検出器 CR-39 をつけたルミネスバッジ(以下「CR-39」という)(24 箇所)、金箔(21 箇所)、TLD(14 箇所)を加速器本体室内のリニアック、シンクロトロン、回転ガントリーおよび照射室に設置した。設置箇所は、Appendix B.2 App-92～

App-98 に示した。設置期間は 2018 年 7 月 27 日から 8 月 23 日までの 28 日間(運転日は 24 日)であった。CR-39 は 10 月 17 日の 1 日間設置し、再測定した。表 2-2 に結果を示す。TLD と金箔の結果は良く合っているが、CR-39 では速中性子による影響を受け高めの結果が出た。金箔の結果では、最大で $10^2 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ のオーダーであり、加速器室、ガントリー室、照射室も含めて概ね $10^1 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ のオーダーであった。モンテカルロ計算の結果は、実測結果と同様、建屋の放射化は問題なかった。(Appendix B.4 App-140~App143)

Ge 検出器を用いて、運転終了直後に直接床面を測定すると、短寿命の ^{24}Na が検出された。コンクリート中のナトリウムからの熱中性子捕獲核反応によって生成したものである。この放射能から、運転中に発生する中性子フルエンス率の推定が可能であることが分かった。表 2-3 に結果を示す。Ge 検出器によって得られた値は、線量計による測定結果とも合っていることから、中性子検出の有効な手段となることが分かった。この値から、30 年間の運転後にコンクリート中に生成していると予想される ^{60}Co と ^{152}Eu の放射能の合計を求めてみると、加速空洞のある最も高い地点でも 10^{-3} Bq/g を超えないという結果が得られ、建物の放射化は無視できることが確認された。

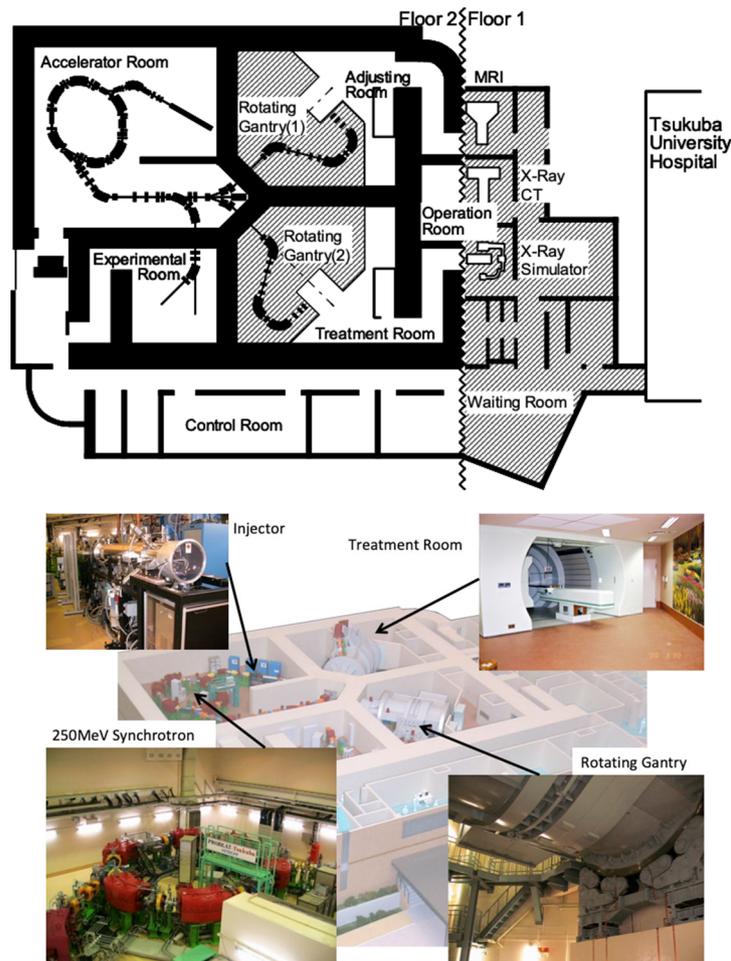


図 2-1 筑波大学病院のレイアウト

表2-2 筑波大学での中性子フルエンス率測定結果($\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)

No.	設置場所	場所詳細	CR-39-28d	CR-39-1d	TLD	Au
1	リニアック	終端 LSCRП モニタ	1.73E+02	3.53E+01	5.30E+00	8.85E+00
2	リニアック	終端 LQM7	6.61E+01	5.36E+01	1.16E+01	1.60E+01
3	リング	入射 ESI 上流	X	3.11E+03	-	1.69E+01
4	リング	入射 ESI 下流	6.38E+02	4.80E+02	7.72E+00	7.22E+00
5	リング	ESD 上流	X	5.62E+03	4.29E+01	3.07E+01
6	リング	ESD 下流	9.17E+02	2.37E+03	2.22E+01	4.53E+01
7	リング	出射部 QD3-SM2	1.13E+03	3.34E+03	1.59E+01	9.73E+01
8	リング	戻り BMP12 下流	5.12E+02	3.58E+02	2.41E+01	測定できず
9	輸送	HSTH2	X	3.26E+03	6.75E+00	7.60E+00
10	床	ESI	8.45E+01	5.00E+01	-	2.28E+01
11	壁	ESI	5.58E+01	4.89E+01	-	1.84E+01
12	床	ESD	3.48E+02	5.87E+02	-	1.11E+02
13	壁	ESD	3.38E+02	8.49E+02	-	1.10E+02
14	床	出射	1.39E+02	1.66E+02	-	4.26E+01
15	壁	出射	9.53E+01	1.01E+02	-	3.34E+01
16	床	戻り	1.22E+02	1.20E+02	-	2.96E+01
17	床	中心部	1.64E+02	1.53E+02	3.13E+01	3.97E+01
18	出射ライン壁 平行部	偏向電磁石入り口	4.86E+01	1.78E+02	-	4.71E+01
19	ガントリー2	散乱体	X	4.14E+03	-	-
20	ガントリー2	治療室ベッド支持台	4.36E+02	7.08E+02	4.68E+01	4.33E+01
21	ガントリー2	対向部鉄枠	3.58E+01	3.22E+01	-	-
22	ガントリー1	散乱体	X	5.49E+03	1.49E+02	4.09E+01
23	ガントリー1	治療室ベッド支持台	4.42E+02	1.07E+03	4.82E+01	5.76E+01
24	ガントリー1	対向部鉄枠	5.45E+01	3.44E+01	-	-

-は、線量計を設置しなかったもの、Xはトラック数が多く、計数できなかったものを示す。

表2-3 Ge 検出器測定結果から求めた中性子フルエンス率

測定室	測定場所 番号 (At_rep030)	測定場所	治療時間中の 中性子フラックス (ビームON/OFF 両方含めた平均) [n/cm2/s] (hm_Rep070, Na-24測定値)	治療時間中の 1時間当たりの 中性子フルエンス [n/cm2/h]	1日当たりの 運転時間[h] (hm_Rep071 の実績値)	治療日の 1日当たりの 中性子フルエンス [n/cm2/d]	一週間当たりの 運転日数 (月火水木金)	一週間当たりの 中性子フルエンス [n/cm2/week]
ガントリー室1	①	北照射室ベッド 横	9.0E+01	3.2E+05	8.9	2.9E+06	5	1.4E+07
加速器室	②	取り出し上流	6.5E+01	2.3E+05	10.3	2.4E+06	5	1.2E+07
	③	取り出し下流	5.9E+01	2.1E+05	10.3	2.2E+06	5	1.1E+07
	④	空洞横	2.0E+02	7.1E+05	10.3	7.3E+06	5	3.7E+07

運転直後に、室内の線量及びスペクトロメータを用いた核種分析を実施した。直線加速器入射部、加速空洞、シンクロtron出射部、ガントリー出口などで放射化が認められた。生成核種は陽子による核反応によって生じる短寿命核種が主であり、 ^{60}Co のような長寿命核種は検出できなかった。

(2) 国立がん研究センター東病院

国立がん研究センター東病院は、サイクロtronを用いた施設として我が国では最も古く、1996年に設置され、1998年から臨床利用が始められた。施設概要を図2-2に示す。陽子加速エネルギー

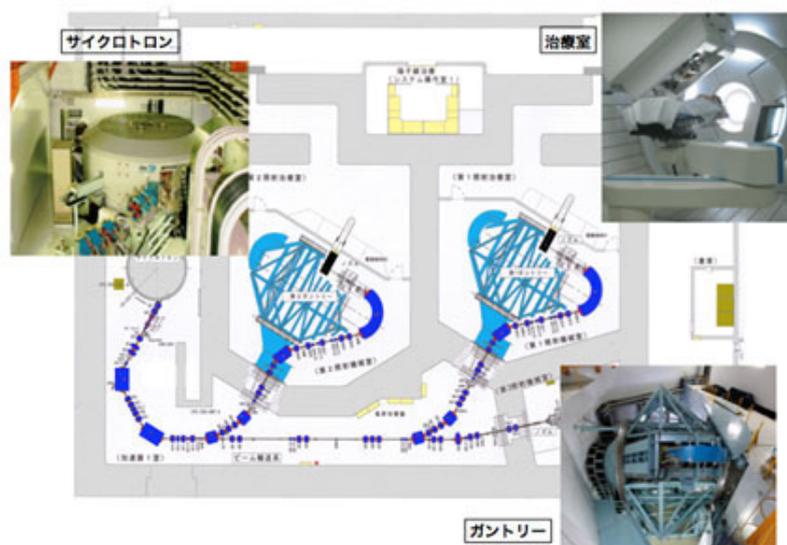


図2-2 国立がん研究センター東病院の施設概要図

ギーは 235 MeV 固定であり、陽子はデフレクタによって出射される。出射直後にデグレーダによって 150、190 MeV に減速される。ビーム電流は、サイクロロン出射時約 150 nA、デグレーダ後 10 nA、照射室 0.5～1 nA 程度となる。2 照射室ともに、治療およびビーム調整で 1 日 30 回程度の照射が行われている。このことから、ビーム損失の大部分がデグレーダによって生じることになる。

運転中の中性子測定のための線量計として、CR-39(59 箇所)、金箔(19 箇所)、TLD(6 箇所)を加速器本体室内のサイクロロン、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。設置期間は 2018 年 8 月 17 日から 8 月 24 日までで、運転日は 5 日であった。また、1 日の状況を見るため、金箔 2 個を 1 日で回収した。CR-39 は多くの箇所では測定できなかった。表 2-4 に金箔から求めた熱中性子フルエンス率を高い順に並べた結果を示した。最も高いのはデグ

表2-4 金箔の結果から求めた熱中性子フルエンス率($\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)

設置場所	熱中性子フルエンス率
デグレーダの床面	1.10E+05
デグレーダの下流側にある鉛の上流側の表面 短期設置	5.60E+04
サイクロロンの地下の床面	2.80E+04
サイクロロン取り出し口近くの北壁 高さ125cm 取り出し口	2.60E+04
デグレーダの遮蔽体の内側(北側) QE4とQE5の間	2.40E+04
サイクロロン取り出し口ビームライン	2.10E+04
サイクロロン取り出し口近くの南壁 短期設置	1.70E+04
サイクロロン取り出し口近くの南壁 長期設置	1.50E+04
デグレーダの上流側の遮蔽体 ビームラインから 33cm	9.60E+03
ダンプの下流側の表面	8.40E+03
QE1とQE2の架台上 ビームラインから 47cm	8.00E+03
遮蔽扉の内側 高さ 125 cm	7.50E+03
ダンプ延長上の南壁 ダンプの下流から 120cm	6.90E+03
BSL2の通路側の側面	5.60E+03
サイクロロンデフレクター近くの本体表面	3.90E+03
BB4の上流側ビームライン表面	1.80E+03
BB1下流の東壁	1.50E+03
BB1上流のビームライン表面	1.40E+03
サイクロロン本体開口部	6.80E+02
BB1下流のビームライン表面	3.50E+02
BPM5の東壁	8.40E+01
第1ガントリー室へのビームライン QB15とQB16の間	4.90E+01

レーダ直下で $10^5 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ となっている。また、デグレーダやサイクロトロン周辺は $10^4 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ のオーダーである。回転ガントリーへはビーム輸送系を経由して送られるが、そこでは $10^3 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ に減衰し、最も奥の第 1 ガントリー室への入射ライン近傍では $10^2 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下となることが分かった。以上のことから、デグレーダおよびサイクロトロン周辺部は筑波大に比べて概ね 2 桁程度高いと思われる。

LaBr₃ γ 線スペクトロメータでの測定結果から、サイクロトロンの直下では ⁶⁰Co が検出された。デグレーダからは、グラファイトに起因する ⁷Be、アルミニウム合金に起因すると思われる ²²Na、²⁴Na および鉄からの ⁵⁶Mn が検出された。ビームラインではステンレス鋼(以下「SUS」という)中のクロムに起因する ⁵²Mn が検出された。

コンクリート表面からは、²⁴Na 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%として中性子フルエンス率を求めた。デグレーダ直下で $4 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、近傍の壁面で $10^3 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、ビームライン下流部や照射室では $10^2 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度であった。

陽子の取出(効率 50%)、デグレーダ照射による 150 MeV への減速(損失 90%)、スリットでの 10%の損失を仮定して、中性子発生状況を求めるため、粒子輸送計算として PHITS(v3.02)モンテカルロ計算コード、放射化計算を DCHAIN-SP(v.2014)を用いて計算した。計算体系を図2-3に示す。

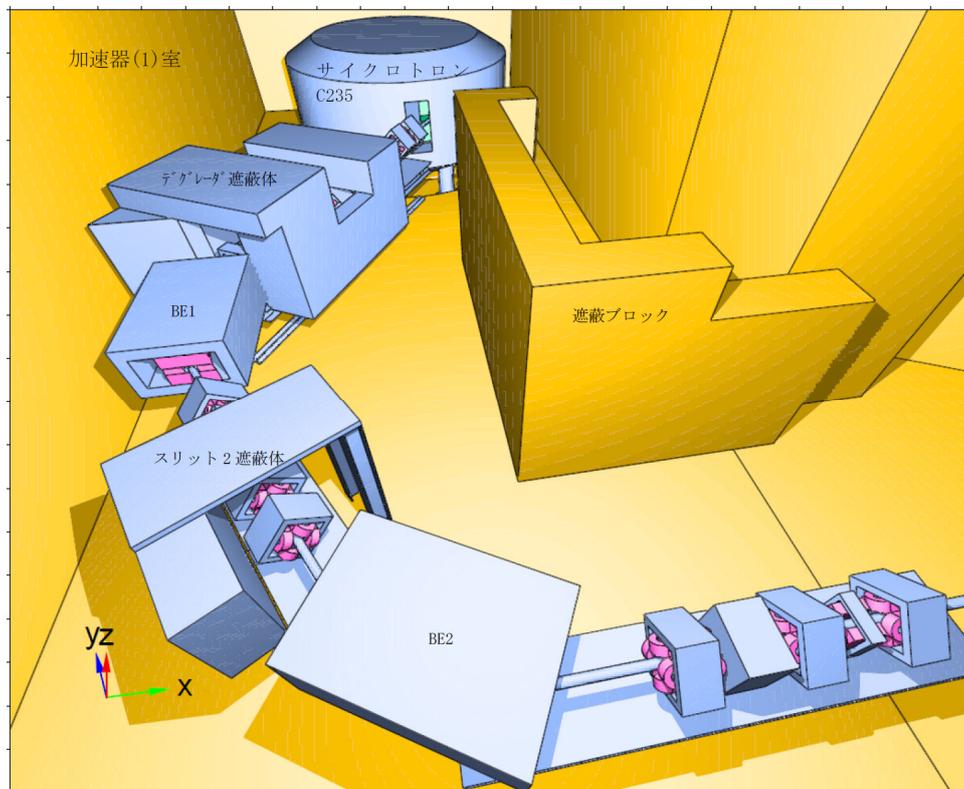


図2-3 加速器室内の PHITS 計算体系図

熱中性子の空間分布の計算結果を図2-4に示す。また、ビームラインに添った熱中性子の垂直方向の分布を図2-5に示す。サイクロトロンからビームが出てからデグレーダまでの間で熱中性子が拡がっており、デグレーダ下部に熱中性子が拡がり、床コンクリートにまで達していることが分かる。

表2-5に金箔での測定結果とモンテカルロ計算結果を比較した。計算値の実測値との比は最大で3.7倍の開きがあったが、概ね再現できているといえる。

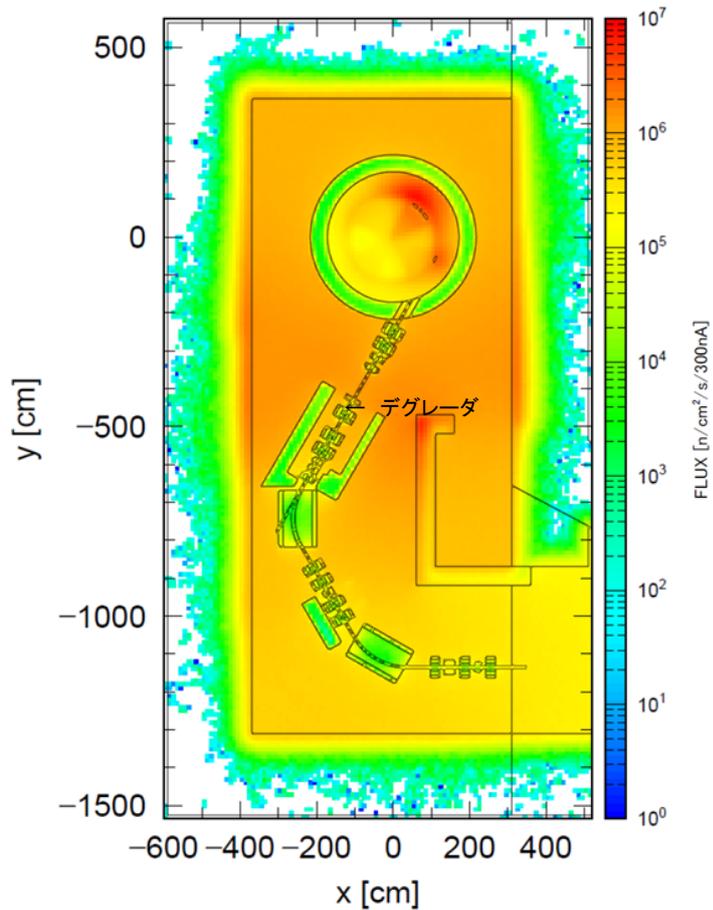


図2-4 サイクロトロン室周辺の熱中性子の水平空間分布

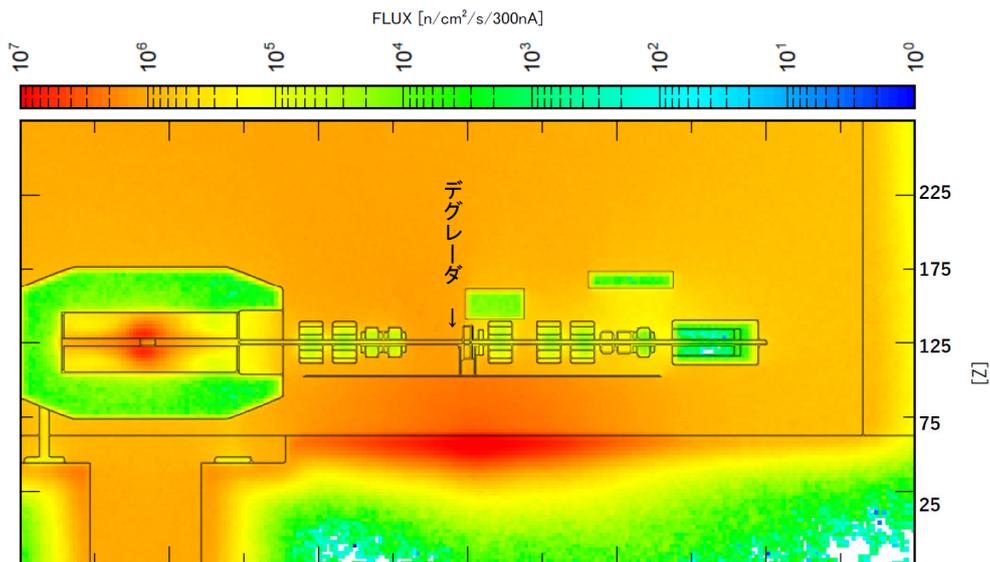


図2-5ビームラインに沿った熱中性子の垂直分布

表2-5 熱中性子フルエンス率の金箔での測定結果と計算結果

金箔 No.	設置位置	PHITS 計算値 熱中性子 flux n/cm ² /s	金箔測定値 熱中性子 flux n/cm ² /s	C/M*
64	遮蔽屏の内側 高さ 125 cm	2.79E+04	7.52E+03	3.7
66	サイクロトロンデフレクター近くの本体表面	1.44E+04	3.86E+03	3.7
67	サイクロトロン取り出し口近くの北壁	4.11E+04	2.62E+04	1.6
69	サイクロトロン取り出し口近くの南壁 短期設置	4.61E+04	1.71E+04	2.7
73	QE1 と QE2 の架台上 ビームラインから 47cm	2.92E+04	8.02E+03	3.6
74	デグレーダ上流側の遮蔽体 ビームラインから 33cm	1.61E+04	9.55E+03	1.7
75	デグレーダの床面	1.99E+05	1.08E+05	1.8
78	ダンプ延長上の南壁 ダンプの下流から 120cm	2.09E+04	6.86E+03	3.0
83	サイクロトロン取り出し口 ビームライン	2.13E+04	2.11E+04	1.0
84	デグレーダ遮蔽体の内側(北側)Q4 と Q5 の間	2.40E+04	2.45E+04	1.0
86	BSL2 の通路側の側面	1.42E+04	5.61E+03	2.5

* C/M: 計算値/測定値

30年運転後にコンクリートに生成している⁶⁰Coと¹⁵²Euの放射能濃度の合算値(Bq/g)を実測結果をもとに計算して図2-6に示した。

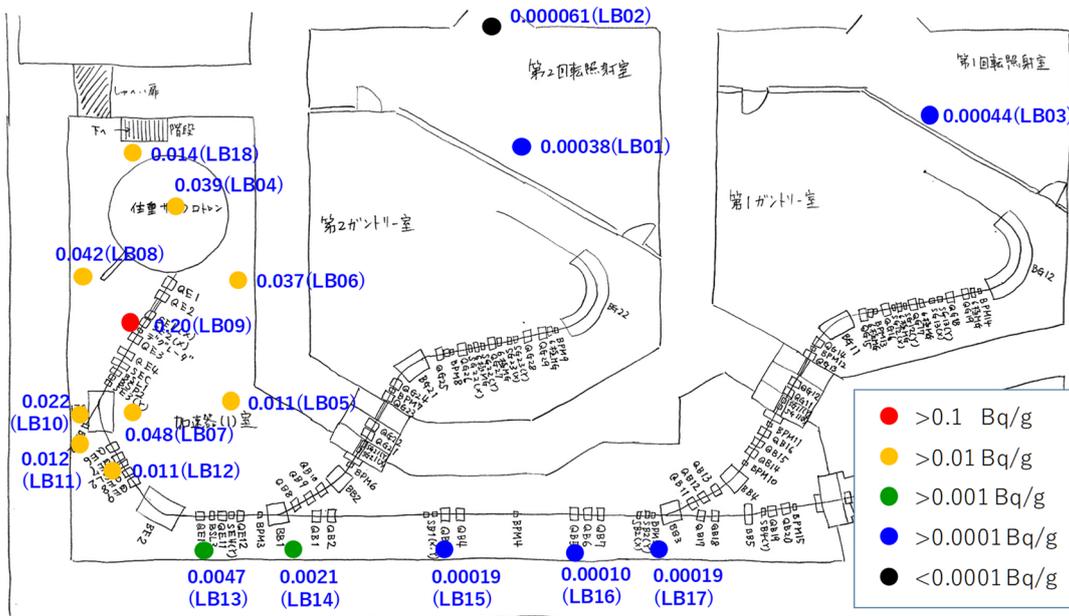


図2-6 30年運転後のコンクリート中の⁶⁰Coと¹⁵²Euの放射能濃度の合算値

サイクロトロン本体からデグレーダ周辺部は、0.02～0.04 Bq/g 程度になっており、デグレーダ直下部ではクリアランスレベルを超える可能性があることが分かった。ビームラインの下流部から照射室でのコンクリートの放射化は非常に低い結果となった。

(3) 群馬大学医学部附属病院重粒子線医学研究センター

群馬大学では2010年に重粒子線治療が開始された。炭素イオン線を加速粒子としている。リニアック(加速エネルギー核子あたり4 MeV)、からシンクロトロンに入射され核子あたり400 MeVに加速される。照射室は3室有り、回転ガントリーはなく、2門の水平及び1門の垂直照射が行われている。群馬大学重粒子線医学研究センターの配置図を図2-7に示す。

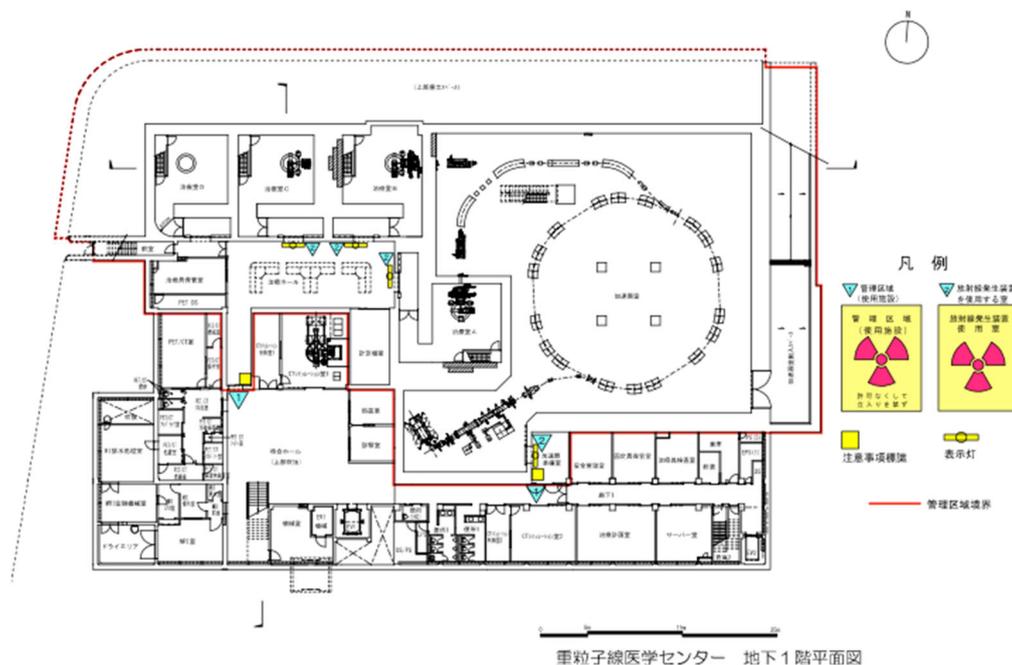


図2-7 群馬大学重粒子線医学研究センターの配置図

中性子のモニタリングを実施するため、線量計として、CR-39を40箇所、TLDを4箇所、2018年8月6日から9月3日までの期間設置した。線量計の設置位置を図2-8に、得られた熱中性子フルエンス率を表2-6に示す。28日間の平均フルエンス率として求めている。熱中性子フルエンス率は最大でも $10^3 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ に達することはなかった。速中性子の多い加速室内において、CR-39で得られる熱中性子の値は高めにしている傾向にあることを考えると、筑波大の場合に比べて更に一桁低い傾向にあった。TLDでは、 γ 線の影響などによって、今回の加速器室内の測定はできなかった。実際に、Ge検出器やLaBr₃検出器で測定した²⁴Naの放射能濃度から求めた熱中性子フルエンス率は $10^1 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ のオーダーであった。このことから、建屋の放射化は考慮する必要はないといえる。モンテカルロ計算の結果は、実測結果と同様、建屋の放射化はなかった。(Appendix B.4 App-144 から App148)

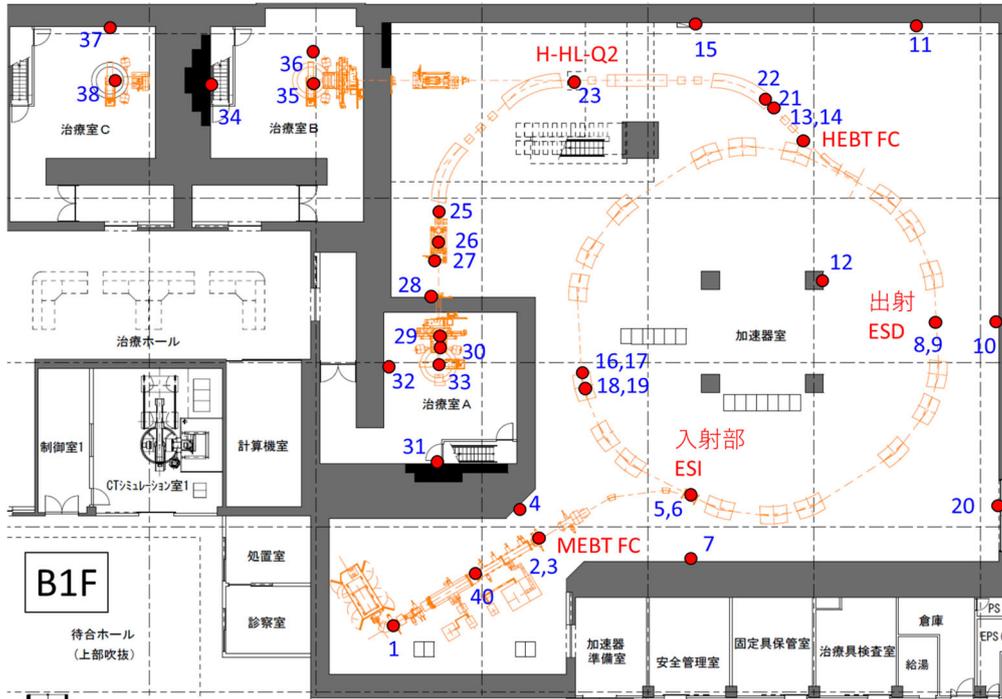


図2-8 群馬大重粒子線医学研究センター線量計設置図

表2-6 熱中性子フルエンス率

No.	設置場所	フルエンス率	No.	設置場所	フルエンス率
1	L-FC1(LEBTファラデーカップ1)チェンバー	5.73E-01	21	H-CL-B1(HEBT共通ライン偏向電磁石1)ダクト側面	7.43E+01
2	M-CFS(荷電変換膜)とM-FC1(MEBTファラデーカップ1)チェンバー	5.45E+00	22	H-CL-B1(HEBT共通ライン偏向電磁石1)下流側コイル上面	1.75E+01
3	M-CFS(荷電変換膜)とM-FC1(MEBTファラデーカップ1)直下床面	3.98E+00	23	H-HL-Q2(HEBT水平ライン四重極電磁石1)上流側ダクト側面	ND
4	M-CFS(荷電変換膜)とM-FC1(MEBTファラデーカップ1)直近壁面	5.24E+00	24	H-VL2-Q2(HEBT垂直ライン2四重極電磁石2)ダクト側面	8.39E+02
5	S-ESI(入射静電セプタム)チェンバー	4.27E+02	25	A室水平コース真空窓側面	1.29E+02
6	S-ESI(入射静電セプタム)直下床面	9.55E+01	26	A室水平コース主線量モニタ(SEM)側面	3.82E+02
7	S-ESI(入射静電セプタム)直近壁面	5.09E+01	27	A室水平コース散乱体架台	2.03E+02
8	S-ESD2(出射静電セプタム)チェンバー側面	ND	28	A室水平コースビーム通過穴横	6.12E+02
9	S-ESD2(出射静電セプタム)チェンバー直下床面	4.75E+02	29	A室水平コース平坦度モニタ・X線管架台	7.75E+02
10	S-ESD2(出射静電セプタム)チェンバー直近壁面	2.12E+02	30	A室水平コースMLC(多葉コリメータ側面)	2.69E+03
11	S-ESD2(出射静電セプタム)チェンバー進行方向壁面	3.12E+01	31	A室水平コース進行方向壁面	ND
12	S-ESD2(出射静電セプタム)チェンバー付近の柱	1.01E+02	32	A室水平コース側方壁面	2.00E+02
13	H-CL-FC1(HEBT共通ラインファラデーカップ1)チェンバー側面	ND	33	A室水平コース治療台付近床面	4.01E+02
14	H-CL-FC1(HEBT共通ラインファラデーカップ1)チェンバー側面	2.10E+02	34	B室水平コース進行方向壁面	ND
15	H-CL-FC1(HEBT共通ラインファラデーカップ1)進行方向壁面	1.79E+01	35	B室治療台付近床面	2.47E+02
16	RF cavity直後 ビームダクト上面	4.87E+01	36	B室CT側面	1.47E+02
17	RF cavity直後 ビームダクト側面	2.33E+01	37	C室垂直コース側方壁面	7.78E+01
18	S-B16入射面コイル上部	3.63E+01	38	C室治療台付近床面	2.99E+02
19	S-B16側面コイル合わせ面	9.58E+00	39	H-VL1-Q2上流ダクト側面	3.52E+00
20	加速器室搬入口扉	1.42E+01	40	RFQ下流フランジ上寄り	1.41E+00

加速器のビームラインの測定の結果は Appendix B.11 App-277 に詳細を示したが、静電セプトムで放射化が認められ、表面線量率は 13 $\mu\text{Sv/h}$ と最も高く、次にファラデーカップで 13 $\mu\text{Sv/h}$ となり、SUS 由来と思われる ^{56}Mn の他 ^{52}Mn 、 ^{46}Sc 、 ^{48}V とと思われるピークが検出された。照射室に導くラインや照射室 A ダンプ部では Al 由来と思われる ^7Be 、 ^{22}Na 、 ^{24}Na 等が検出された。電磁石、架台の放射化の可能性はほとんどなかった。照射室 A ではマルチリーフコリメータで 10 $\mu\text{Sv/h}$ と最も高かった。

2.5 放射光施設

高エネルギー電子線が周回する際に発生する放射光を利用するための専用加速器は、1974 年に東京大学原子核研究所に附属して物性研究所の INS-SOR として、世界で初めて建設された。その後、高エネルギー物理学研究所において、1983 年にフォトンファクトリー (PF) が建設され、世界中に普及していった。現在、国内では 8 施設が稼働している。

国内の放射光施設を表2-7に示す。加速器は入射用電子直線加速装置(L)、加速用ブースターシンクロトロン(B)、蓄積リング(MR)で基本構成されるが、施設によってはブースターがないものもある。立命館と広島大はマイクロトロンを入射器としている。SPring-8 からビームの供給を受けている兵庫県 NewSUBARU は MR のみである。超高真空のビームパイプの中を長時間光速に近い電子が周回しつづけることから、実際の蓄積リング内の電子数は極めて少ない。古いタイプは、1 日 2 回程度、蓄積リングに電子を入射してきたが、最近ではわずかに減少した電子を定期的に補い、電子数を一定に保つ Top-up 方式での運転が行われるようになってきた。

表2-7 国内の放射光施設

施設	エネルギー	タイプ
高エネルギー加速器研究機構 放射光科学研究施設	2.5 GeV(PF)	L-MR
Photon Factory	6.5 GeV(AR)	L-MR
分子科学研究所 極端紫外光研究施設 UVSOR	750 MeV	L-B-MR
あいちシンクロトロン光センター	1.2 GeV	L-B-MR
立命館大学 SR センター	575 MeV	MR
理化学研究所播磨研究所 大型放射光 SPring-8	8 GeV	L-B-MR
兵庫県立大学高度産業科学技術研究所 NewSUBARU	1, 1.5 GeV	MR
広島大学 放射光科学研究センター HiSOR	700 MeV	MR
佐賀県立 九州シンクロトロン光研究センター	1.4 GeV	L-MR

調査は放射光専用に使われている放射線発生装置のみを対象とした。このため、入射器が多目的に利用されているKEKでは入射器は調査対象から外した。まず、(1)施設の状況を把握するため、あらかじめ線量計を施設内に一定期間配置して結果をみる。その上で、(2)実際に施設を訪問し、線量計の結果を参考にしながら放射化状況を測定する。さらに(3)最もビームロスが生じている箇所については、放射化の状況をモンテカルロ計算でも行い、測定結果と比較検討する。という手順で行うこととした。調査協力施設は、SPring-8、KEK-PF、UVSOR、HiSOR、立命館大SRセンターの5施設であった。

(1) SPring-8

SPring-8の加速器構成を図2-9に示す。全長140mの電子リニアックにより電子は1 GeVに加速され、ブースターシンクロトロンに電子を供給するとともに、兵庫県の施設であるNew-SUBARUにも入射されている。ブースターシンクロトロンは周長396mで、ここで8 GeVまで加速され、1秒ごとに入射、加速、取出が繰り返されている。加速された電子は蓄積リングに送られる。この際の取出効率は約60%である。蓄積リングは周長1436mで、57のビームラインから放射光を取り出している。

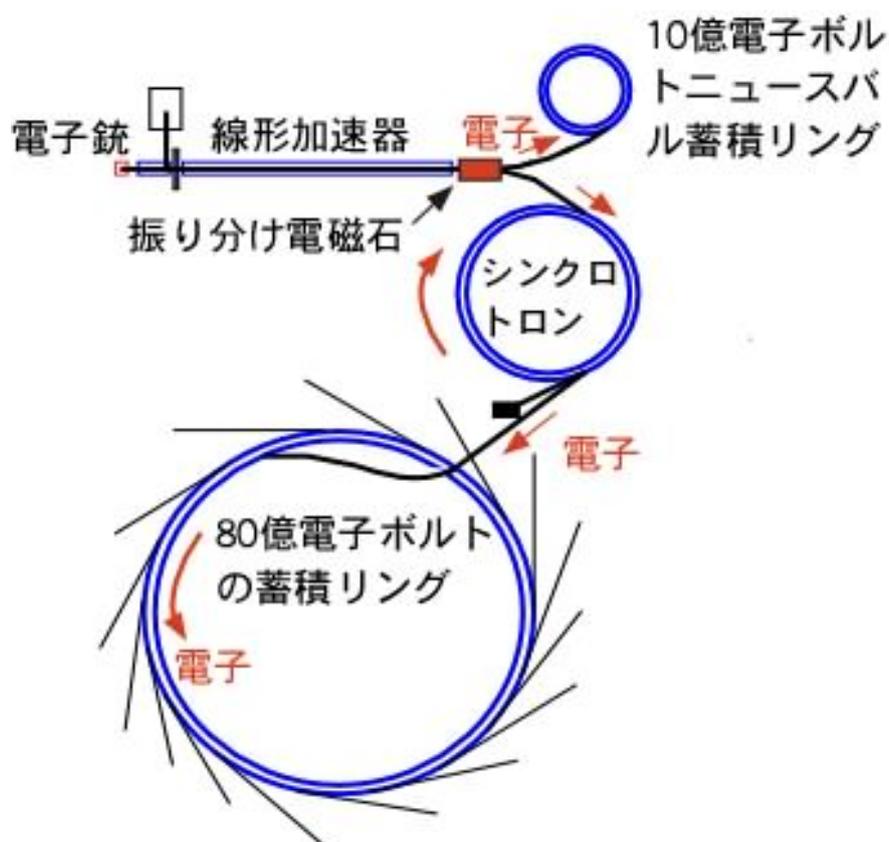


図2-9 SPring-8の加速器構成図

表2-8 床コンクリートでの熱中性子フルエンス率の推定結果

核種と ガンマ線 エネルギー	測定室	測定 場所 番号	測定場所	放射能濃度 [Bq/g]	飽和係数 SFm	放射能生成速度 [Bq/g]	2200m/sec 中性子に 対する (n,γ) 断面積[b]	標的核	コンクリート中の 標的核の 濃度推定値[%] (hm_Rep042)	平均電流での 中性子 フラックス [n/cm2/s]
Na-24 1368keV	線形加速器	Li1	偏向電磁石#1と#2の間 (90° 方向, 100cm距離)	< 0.00094	1.000	< 0.00094	0.53	Na- 23	2.1	< 3.2
	SR	SR1	試験片挿入チェンバー付近 (45° 方向下流, 70cm距離)	0.0134 ± 0.0015	1.000	0.0134 ± 0.0015	0.53	Na- 23	2.1	46
	SR	SR2	試験片挿入チェンバー付近 (90° 方向, 100cm距離)	0.0091 ± 0.0012	1.000	0.0091 ± 0.0012	0.53	Na- 23	2.1	31
	SR	SR3	BL07SID4号機付近 (90° 方向, 100cm距離)	< 0.00069	1.000	< 0.00069	0.53	Na- 23	2.1	< 2.4
	シンクロトロン	Sy1	q-xsbt-05 (旧QF2) 下流付近 (90° 方向, 100cm距離)	0.0107 ± 0.0011	1.000	0.0107 ± 0.0011	0.53	Na- 23	2.1	37
	シンクロトロン	Sy2	SL1B上流付近 (90° 方向, 100cm距離)	0.00789 ± 0.00090	1.000	0.00789 ± 0.00090	0.53	Na- 23	2.1	27
	シンクロトロン	Sy3	QF1上流付近 (90° 方向, 100cm距離)	0.00106 ± 0.00039	1.000	0.00106 ± 0.00039	0.53	Na- 23	2.1	3.6

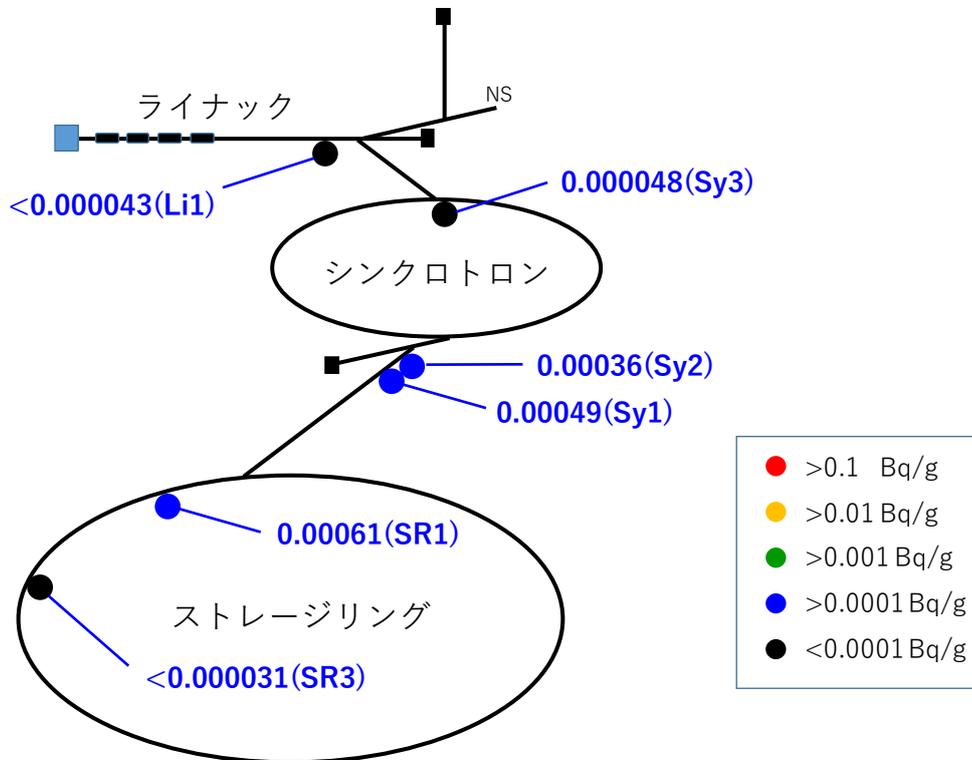


図2-10 30年運転後のコンクリート中の¹⁵²Eu+⁶⁰Co放射能濃度(Bq/g)

まず、2018年6月1日から7月6日の約1ヶ月間、130個のCR-39の設置を行った。内訳は、リニアック24個、ブースターシンクロトロン48個、蓄積リング58個である。(詳細は Appendix B.6 App-186)

リニアックでは、エネルギー圧縮システムのみで中性子の発生が認められたが、熱中性子フルエンス率は最大で $6 \times 10^1 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度であった。この場所のビームパイプの表面線量率が $4 \mu\text{Sv/h}$ と最も高かった。(詳細は Appendix B.6 App-190)

ブースターシンクロトロンでは、入射セプタムおよび出射電磁石で $2 \times 10^2 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度、出射直後の電磁石では更に高く測定できなかつたが、この電磁石の近接する下流部側壁では $1 \times 10^2 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度であることが分かった。ここでは、出射部電磁石のビームパイプの表面線量率が $13 \mu\text{Sv/h}$ と最も高かった。

蓄積リングでは、1ヶ所試験片挿入チェンバーでのビーム損失があり、熱中性子フルエンス率 $1 \times 10^2 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度が観測されたが、他は極めて低いことが分かった。試験片挿入チェンバーのビームパイプの表面線量率が $11 \mu\text{Sv/h}$ と最も高かった。実験ホールでは熱中性子は検出されなかつた。以上の結果から、加速器の運転制御は精密に行われていることが中性子測定および運転終了後の線量率測定によって確認された。電子のロス、ブースターリングから蓄積リングへ送る際のリングから出て最初の電磁石で最も多く生じていることが確認できた。その次は、ブースターリングへの入射部、リニアックの電子圧縮部、蓄積リング内の試験片挿入位置であった。

LaBr₃ スペクトロメータによるビームラインの核種分析の結果、SUS 由来の核種が検出された。とくに、⁵⁷Ni は表面線量率との相関があり、ビームロスの評価に有効な核種であることが分かった。また、ビームロスが認められた電磁石下部の床コンクリートの放射能を、Ge 検出器を用いて測定した。その結果非常にわずかであるが検出された ²⁴Na によって、コンクリートに入射された熱中性子のフルエンス率を求めることができた。結果を 表2-8に示す。このことから、床コンクリート部分では、熱中性子のフルエンス率は $10^2 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ を十分に下回っていることが確認できた。

Ge 検出器での測定結果をもとに、30年運転後のコンクリート中の ¹⁵²Eu+⁶⁰Co の合計放射能濃度(Bq/g)を計算により推定した結果を図2-10に示す。コンクリートの放射化は極めて低く、クリアランスレベルを2桁以上下回っていることが分かった。モンテカルロ計算でも、同様の結果が得られた。(Appendix. B.10 App-265)

(2) KEK-PF

KEKには現在、放射光専用の蓄積リングとして PhotonFactory (PF) と Advanced Ring (AR) がある。前者は 2.5 GeV、後者は 6.5 GeV の装置である。入射器は、それらへの入射の他、Super-KEKB の電子、陽電子の入射器としても利用されている。今回は PF を調査対象施設とした。PF は 1982 年に放射光発生を行って以来、これまで改造を行いながら利用されてきた。平面図を図2-11に示す。周長 187 m の楕円形で、450 mA の電子蓄積を行っており、入射は Top

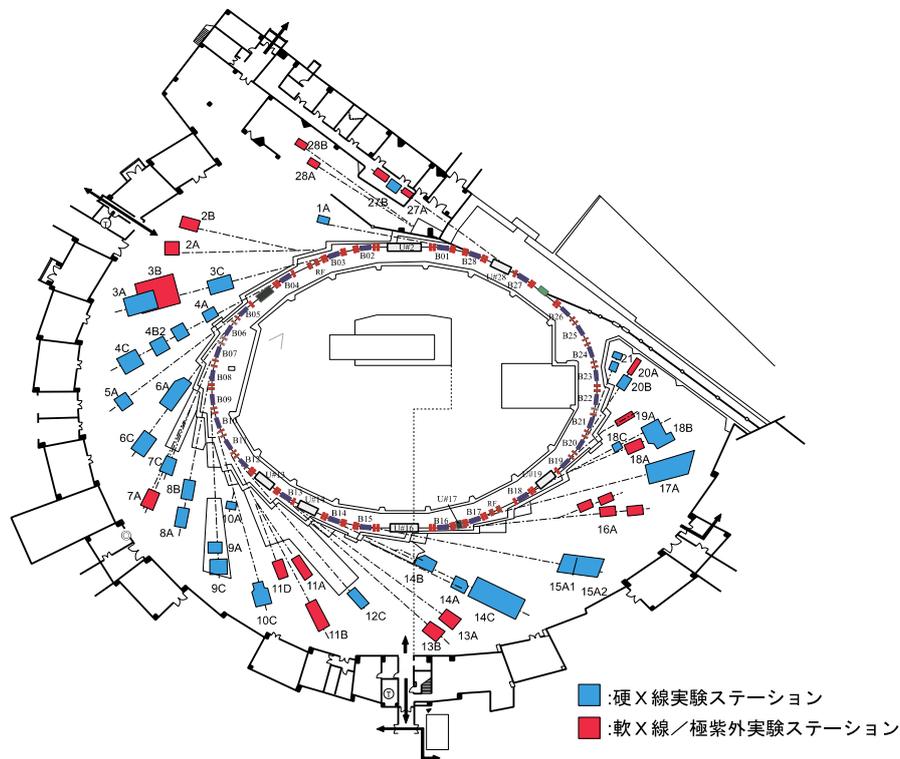


図2-11 KEK-PF 平面図

-up 方式で運転されることが多い。全国共同利用施設として、年間約 220 日運転されている。

運転中の中性子発生量を測定するため、CR-39 を 24 個、TLD3 セット、金箔 2 セットをビーム輸送ラインおよび蓄積リング室内に設置した(詳細は Appendix B.5 App-152~App-155)。設置期間は 2018 年 5 月 31 日~7 月 6 日であった。測定結果を表 2-9 に示す。TLD は X 線、 γ 線の影響を受け、中性子の測定が困難であった。輸送ラインに設置した金箔は回収までに時間がかかり、放射能が減衰して測定できなかった。CR-39 および金箔での測定結果を表 2-9 に示す。CR-39 での熱中性子線量はトラック数が多くて測定できないものがあった。そこで、中性子フルエンス、フルエンス率は、あえて参考値として求めたトラック数から換算したものである。金箔の結果に比べ大きな値となっているが、それでも $10^2 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ のオーダーを超えることはなかった。

地下の入射器から地上の PF へのビーム輸送ラインでは、偏向電磁石入口付近のビームパイプで最大 $7 \mu\text{Sv/h}$ であり、放射化が認められたが、蓄積リングでは入射点近傍においても $1 \mu\text{Sv/h}$ を超えるようなところはなかった。LaBr₃ スペクトロメータで核種分析を行った結果、SUS に起因すると思われる、⁴⁶Sc、⁴⁸V、⁵¹Cr、⁵²Mn、⁵⁴Mn、⁵⁶Co、⁵⁷Ni が検出された。

建屋コンクリートの放射化を確認するため行ったボーリング箇所を図 2-12 に示す。入射点近傍など床面 1 ヶ所(A 地点)、壁面 5 ヶ所でコアボーリングにより試料採取し、2 cm ごとに切断、粉末化した後、Ge 検出器による核種分析を実施した。試料量は約 70 g、測定時間は 10000 秒であっ

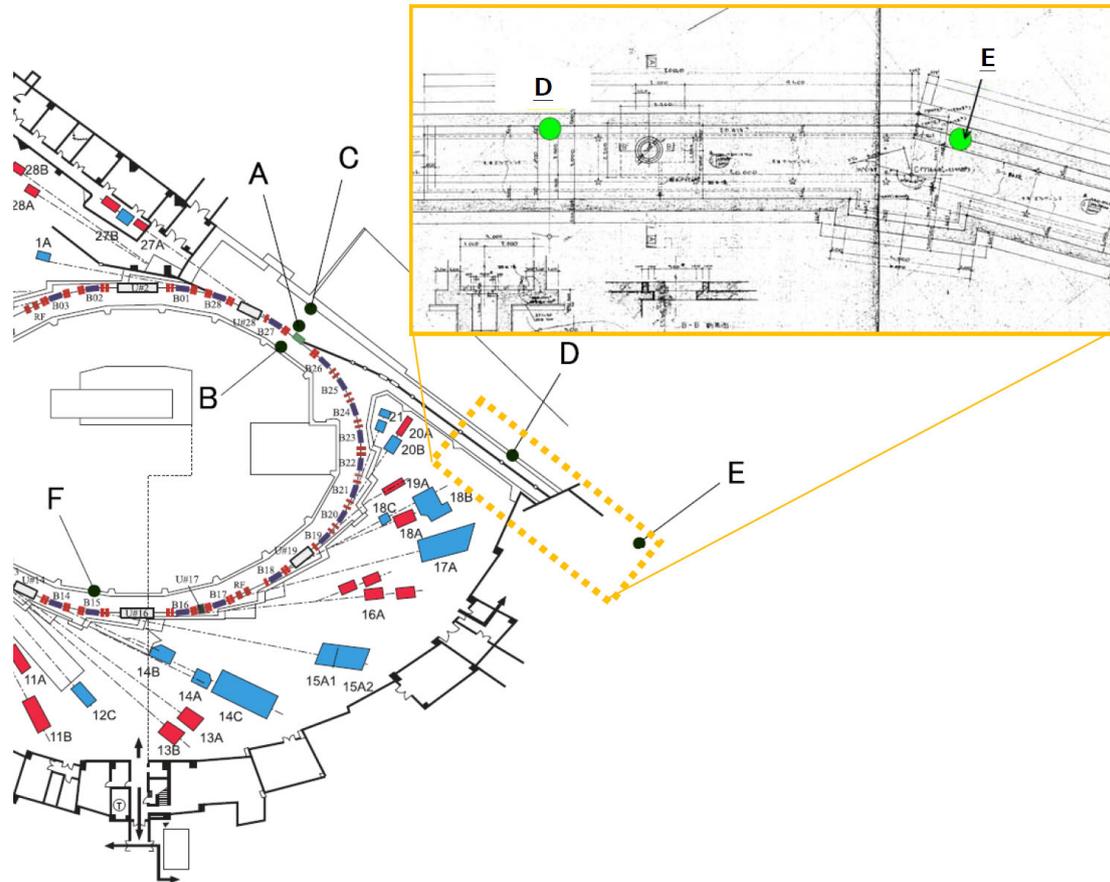


図2-12 KEK-PF のコンクリートコアボーリング箇所

た。また、 ^3H 、 ^{14}C は電気炉で燃焼法により回収し、液体シンチレーションカウンタで測定した。核種分析の結果、どの試料においても ^{40}K 、 ^{208}Tl 、 ^{212}Pb 、 ^{214}Pb 等の天然核種以外検出されなかった。(詳細は Appendix B.11 App-298～302) また、モンテカルロ計算では入射部分の計算を実施したが、コアボーリングによる実測では放射化は認められなかったが、計算結果では、クリアランスレベルを下回る程度の放射化が生じるとの評価となった。高エネルギー電子からの中性子発生の計算を行うには、高エネルギー領域の光核反応からの中性子発生挙動に関する実験データが不足しており、高エネルギー領域での放射化に関するベンチマークテストが望まれる。(Appendix B.10 App-265)

表2-9 KEK-PF での熱中性子線量(mSv)、フルエンス(cm^{-2})、フルエンス率($\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)の測定結果と金箔で求めたフルエンス率($\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

No.	設置場所	mSv	cm^{-2}	$\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	Au-foil data
131	BH21-入口	X	6.10E+08	1.96E+02	
132	BH21-入口(床)	0.9	1.14E+08	3.65E+01	
133	ステアリング(QD1-QD4 間)入口	1.3	1.71E+08	5.50E+01	
134	ステアリング(QD1-QD4 間)入口床	0.1	1.34E+07	4.32E+00	
135	BV1 入口	X	5.96E+08	1.92E+02	
36	BV1 入口(床)	0.2	2.33E+07	7.49E+00	
137	ベローズ(QE1-QE2 間)	X	1.53E+09	4.91E+02	
138	ベローズ(QE1-QE2 間)(床)	X	1.17E+08	3.76E+01	
139	入射点	X	1.69E+09	5.43E+02	1.78E+01
140	入射点(床)	X	3.01E+08	9.68E+01	2.02E+01
141	入射点(内壁)	1.9	2.44E+08	7.86E+01	
142	入射点(外壁)	1.0	1.26E+08	4.04E+01	
143	Q013 上流	X	7.37E+08	2.37E+02	
144	Q013 上流(床)	1.0	1.25E+08	4.03E+01	
145	K1 上流	X	4.78E+08	1.54E+02	
146	K1 上流(床)	X	2.13E+08	6.86E+01	
147	合流点直下(床)	0.1	6.87E+06	2.21E+00	
148	合流点直下(貫通孔)	0.3	3.74E+07	1.20E+01	
149	BL15 直下(床)	M	9.39E+05	3.02E-01	
150	BL18 出口	M	0.00E+00	0.00E+00	
151	BL17 根元	M	7.74E+05	2.49E-01	
152	BL15 根元	M	1.93E+05	6.22E-02	
153	BL14 根元	M	2.76E+05	8.88E-02	
154	BL1 根元	M	1.38E+04	4.44E-03	

X はトラック数が多く、計数できなかったものを示す。したがって、その行の、フルエンス(cm^{-2})、フルエンス率は、参考値として求めたものである。

M はトラックが検出できなかったものを示す。

(3) UVSOR

自然科学研究機構分子科学研究所極端紫外光施設(UVSOR)は1983年に建設された全国共同利用施設である。その後、2003年、2014年に改造を加えて現在に至っている。15 MeV 電子リニアックからブースターシンクロトロンに入射され、シンクロトロンで750 MeVまで加速され、蓄積リングに供給される。周長は53.2 mで、14本の放射光用ビームラインが設置されている。加速器配置図を図2-13に示す。

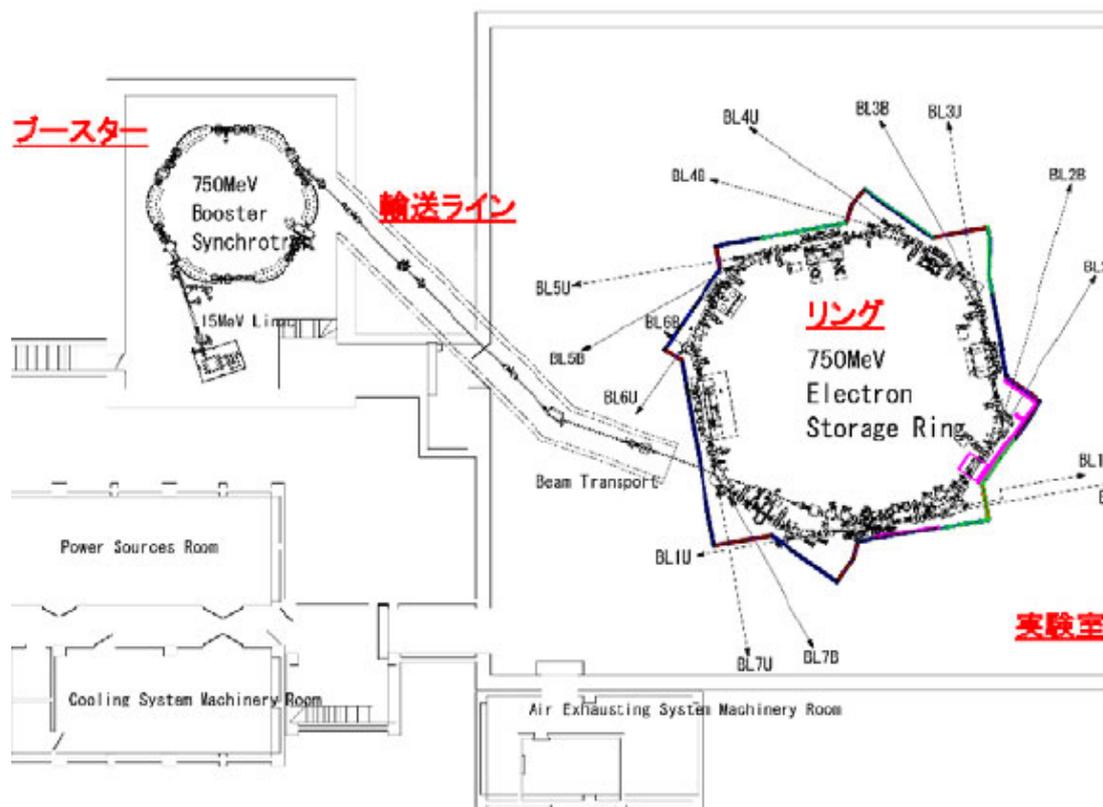


図2-13 UVSOR 加速器配置図

運転中の中性子発生量を測定するため、2018年8月20日から9月28日までCR-39を31個、TLD3セット、金箔2セットを設置した。CR-39での測定結果を表2-10に示す。中性子フルエンス率で比較すると、ブースターリング室内のファーストキッカー(表面線量率 1.3 $\mu\text{Sv/h}$)、デフレクタ(表面線量率 6.3 $\mu\text{Sv/h}$)、ビーム取出後のQ電磁石(表面線量率 3.4 $\mu\text{Sv/h}$)、のところで高く、全体としても $10^2 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ のオーダーであった。リング室ではインフレクタとB3下流で $2 \times 10^2 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度で、他は $10^1 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ のオーダーであった。

LaBr₃ スペクトロメータによる測定では、SUS に起因すると思われる、⁴⁶Sc、⁴⁸V、⁵¹Cr、⁵⁴Mn、⁵⁷Co、⁵⁷Ni 等が検出された。しかし、⁶⁰Co のような長寿命核種は検出されなかった。

ブースターリングおよび蓄積リングの床面を Ge 検出器で測定した。その結果、 ^{24}Na がごくわずかに検出された。これから、 ^{24}Na の放射能を求め、熱中性子フルエンス率を計算した。ブースターリングデフレクタからの出射点近傍の床が最大値となり熱中性子フルエンス率は $10^2 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ のオーダーであった。この地点でのモンテカルロ計算による熱中性子の空間分布の結果を図2-14示す。実測と同様、リング室のデフレクタ周辺部の熱中性子が多いという様子が再現できている。計算で求めた床面での熱中性子フルエンス率 $7.3 \times 10^1 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ となり、計算においても概ね再現できた。この結果から、30年運転後のコンクリート中の $^{152}\text{Eu}+^{60}\text{Co}$ の合計放射能濃度 (Bq/g) を計算したところ、図2-15に示すとおり、クリアランスレベルの 1/1000 と極めて低いことが分かった。

表2-10 UVSOR での熱中性子線量(mSv)、フルエンス(cm⁻²)、
フルエンス率(cm⁻²・s⁻¹)の測定結果

No	区域	名称	mSv	cm ⁻²	cm ⁻² ・s ⁻¹
1	リニアック	リニアック終端	1.52E-01	2.00E+07	9.62E+00
2	ブースター	B1 入り口	X	X	X
3	ブースター	ファーストキッカー側面	4.96E+00	6.52E+08	3.15E+02
4	ブースター	B3 入口	X	X	X
5	ブースター	B3 上流Q架台	2.26E+00	2.98E+08	1.43E+02
6	ブースター	デフレクタ	X	X	X
7	ブースター	デフレクタ架台	3.49E+00	4.60E+08	2.22E+02
8	ブースター	デフレクタ床	1.87E+00	2.46E+08	1.19E+02
9	ブースター	デフレクタ壁	1.57E+00	2.07E+08	9.97E+01
10	ブースター	BTQ2 上流	6.32E+00	8.32E+08	4.01E+02
11	ブースター	B4Q 上流	1.07E+01	1.41E+09	6.78E+02
12	ブースター	B5 上流	2.08E+00	2.73E+08	1.32E+02
13	ブースター	S1 延長上壁	4.97E+00	6.53E+08	3.15E+02
14	ブースター	S4 延長壁	5.50E+00	7.24E+08	3.49E+02
15	輸送路	10 の床	4.57E-01	6.02E+07	2.90E+01
16	輸送路	B ダクト 15 偏向	3.13E-02	4.12E+06	1.99E+00
17	リング	BTB3 下流ベロース上	7.40E-01	9.74E+07	4.70E+01
18	リング	BTB7 下流ベロース外側	2.88E-02	3.79E+06	1.83E+00
19	リング	インフレクタ	3.84E+00	5.06E+08	2.44E+02
20	リング	インフレクタ壁側	2.83E-01	3.73E+07	1.80E+01
21	リング	開口部下側	4.41E-02	5.80E+06	2.80E+00
22	リング	インフレクタ架台 93H	7.98E-01	1.05E+08	5.06E+01
23	リング	インフレクタ床	2.00E-01	2.63E+07	1.27E+01
24	リング	アンジュレータ	1.28E+00	1.68E+08	8.12E+01
25	リング	B3 下流	3.40E+00	4.48E+08	2.16E+02
26	リング	B3 下流 Q 架台	3.79E-01	4.99E+07	2.40E+01
27	リング	B3 下流床	2.81E-01	3.69E+07	1.78E+01
28	リング	BL3B 壁	2.30E-01	3.02E+07	1.46E+01
29	ブースター	ブースター中心部	3.23E-01	4.25E+07	2.05E+01
30	実験室	入射点下流	1.71E-02	2.25E+06	1.09E+00
31	実験室	エアコン	2.93E-02	3.85E+06	1.86E+00
32	リング	放射光リング中心部	1.17E-02	1.53E+06	7.40E-01

X はトラック数が多く、計数できなかったものを示す。

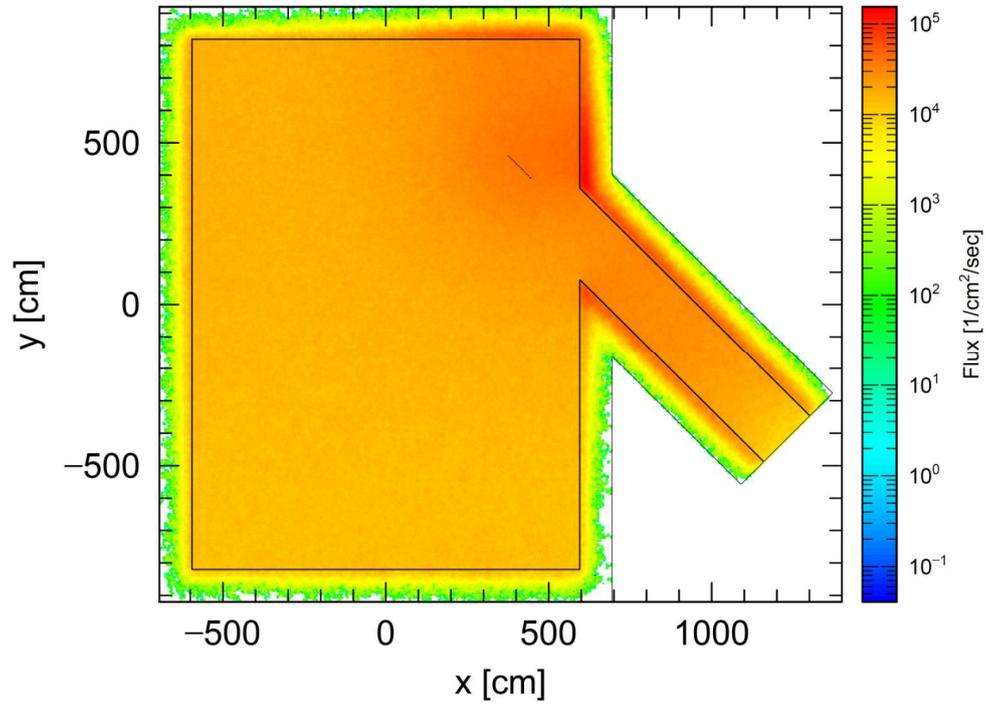


図2-14 ブースターリング室内の熱中性子空間分布

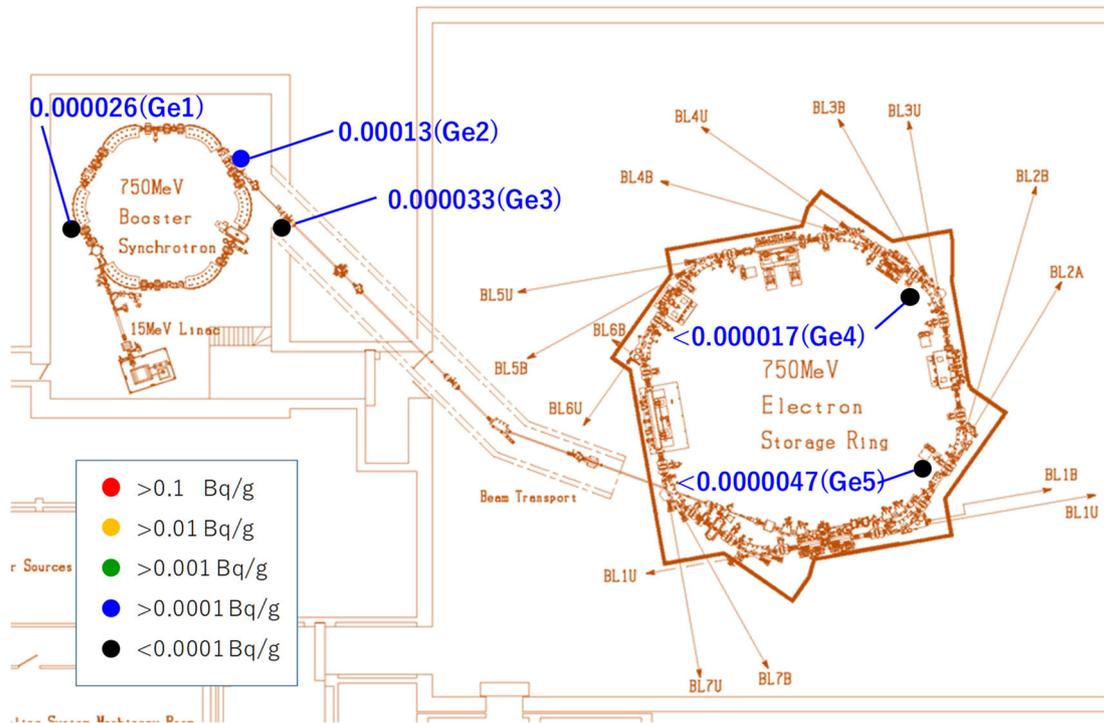


図2-15 30年運転後のコンクリート中の $^{152}\text{Eu}+^{60}\text{Co}$ 放射能濃度(Bq/g)

(4) HiSOR

広島大学附置の放射光実験施設で、1996年に設置され、2002年からは全国共同利用が可能となっている。入射器は150 MeVのマイクロロンを用いている。蓄積リングへの入射は1日2回行われる。蓄積リングはレーストラックタイプで、周長は21.95 mである。電子エネルギーは700 MeV、蓄積電流は350 mAである。放射光用ビームラインは15本設置されている。年間約2000



図2-16 HiSOR 実験室の俯瞰写真

時間利用されている。実験室の俯瞰写真を図2-16に示す。

運転中の中性子発生量を測定するため、2018年11月9日から12月14日までCR-39を蓄積リング周辺部及び床面等に32個設置した。運転時間は204時間であった。CR-39での測定結果を表2-11に示す。中性子フルエンス率で比較すると、運転時に発生する熱中性子フルエンス率は極めて低く、最も高かった直線部アクリル遮蔽面で $1.5 \times 10^1 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ であった。他の地点では全て $10^1 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ を超えることはなかった。

運転終了直後のサーベイの結果、最大値はRFキャビティ下流フランジにおいて $0.23 \mu\text{Sv/h}$ であり、極めて低い線量率であった。線量があった箇所の γ 線スペクトロメリーの結果で、他の施設と同様、 ^{57}Ni ピーク高さと線量率は良い相関を示した。他に、SUS由来の ^{51}Cr 、 ^{54}Mn 、 ^{56}Mn 、 ^{57}Co が認められた。

Ge検出器を用いて、コンクリート床面の放射能を測定した結果、実験室では検出限界以下であった。マイクロロン室の入射器直下の床面で $(3.9 \pm 1.7) \times 10^{-3} \text{ Bq/g}$ の ^{24}Na が検出された。この結果から、30年運転後のコンクリート中の $^{152}\text{Eu}+^{60}\text{Co}$ の合計放射能濃度(Bq/g)を計算により推定した結果、 $1.2 \times 10^{-6} \text{ Bq/g}$ となった。

表2-11 HiSOR での熱中性子線量(mSv)、フルエンス(cm^{-2})、
フルエンス率($\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)の測定結果(204 時間運転)

Name	設置場所	mSv	cm^{-2}	$\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
テスト 249	光源室壁面	3.99E-03	5.25E+05	7.15E-01
テスト 250	光源室壁面	9.45E-03	1.24E+06	1.69E+00
テスト 251	光源室壁面	1.26E-03	1.66E+05	2.26E-01
テスト 252	光源室壁面	9.45E-04	1.24E+05	1.69E-01
テスト 253	光源室壁面	1.89E-03	2.49E+05	3.39E-01
テスト 254	光源室壁面	5.25E-03	6.91E+05	9.41E-01
テスト 255	BL7	3.78E-03	4.97E+05	6.77E-01
テスト 256	BL9	1.58E-03	2.07E+05	2.82E-01
テスト 257	BL14	2.63E-03	3.45E+05	4.70E-01
テスト 258	BL1	2.52E-03	3.32E+05	4.51E-01
テスト 259	偏向電磁石ビーム高さ	7.98E-03	1.05E+06	1.43E+00
テスト 260	加速器偏向電磁石ビーム高さ	1.16E-03	1.52E+05	2.07E-01
テスト 261	加速器偏向電磁石ビーム高さ	1.17E-02	1.53E+06	2.09E+00
テスト 262	加速器偏向電磁石ビーム高さ	5.25E-03	6.91E+05	9.41E-01
テスト 263	加速器偏向電磁石ビーム高さ	7.67E-03	1.01E+06	1.37E+00
テスト 264	加速器偏向電磁石ビーム高さ	1.58E-03	2.07E+05	2.82E-01
テスト 265	加速器偏向電磁石床	3.31E-02	4.35E+06	5.93E+00
テスト 266	加速器偏向電磁石床	8.72E-03	1.15E+06	1.56E+00
テスト 267	加速器偏向電磁石床	2.24E-02	2.94E+06	4.01E+00
テスト 268	加速器偏向電磁石床	7.14E-03	9.39E+05	1.28E+00
テスト 269	加速器偏向電磁石床	3.15E-04	4.14E+04	5.64E-02
テスト 270	加速器偏向電磁石床	6.20E-03	8.15E+05	1.11E+00
テスト 271	ステアラ電磁石床	4.83E-02	6.36E+06	8.65E+00
テスト 272	ステアラ電磁石床	3.14E-02	4.13E+06	5.62E+00
テスト 273	ステアラ電磁石床	4.59E-02	6.04E+06	8.22E+00
テスト 274	ステアラ電磁石床	3.71E-02	4.88E+06	6.64E+00
テスト 275	直線部アクリル壁ビーム高さ	1.02E-01	1.35E+07	1.84E+01
テスト 276	直線部アクリル壁ビーム高さ	5.43E-02	7.14E+06	9.73E+00
テスト 277	直線部アクリル壁ビーム高さ	4.29E-02	5.65E+06	7.69E+00
テスト 278	直線部アクリル壁ビーム高さ	1.28E-01	1.69E+07	2.30E+01
テスト 279	直線部アクリル壁ビーム高さ	1.85E-02	2.43E+06	3.31E+00
テスト 280	直線部アクリル壁ビーム高さ	1.68E-02	2.21E+06	3.01E+00
テスト 293	直線部アクリル壁ビーム高さ	3.42E-02	4.50E+06	6.13E+00
テスト 294	直線部アクリル壁ビーム高さ	8.94E-02	1.18E+07	1.60E+01
テスト 295	参照用	3.57E-03	4.70E+05	6.40E-01
テスト 295	参照用	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

(5) 立命館大 SR センター

立命館大 SR センターは 1996 年に設置された。広島大学同様 150 MeV のマイクロトロンを入射器として用いている。超小型蓄積リングは軌道直径が 1 m で、周長 3.4 m となっている。その周りには 14 本の放射光用ポートが設置されている。電子加速エネルギーは 575 MeV、蓄積電流は 200 mA 程度である。年間 1500 時間程度の運転を行っている。蓄積リングは、鉄ヨークで囲まれ

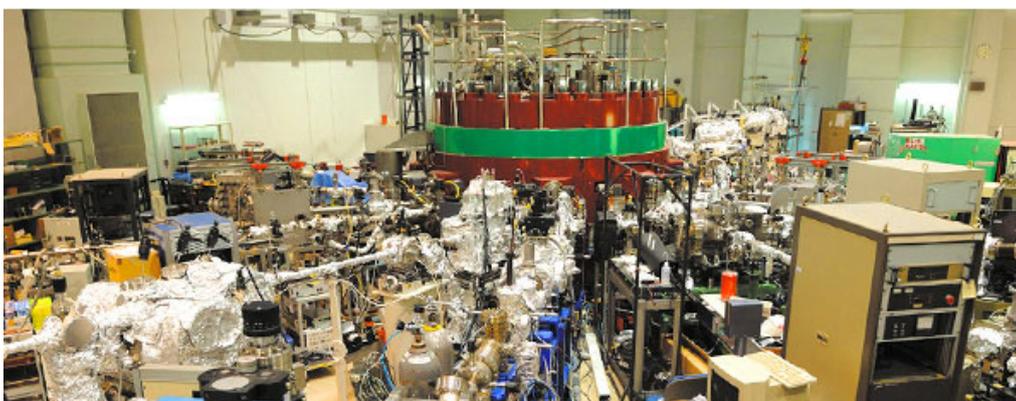


図2-17 立命館大 SR センターの実験室俯瞰写真

た状態になっており、遮蔽体の役割も果たしている。実験室の俯瞰写真を図2-17に示す。

運転中の中性子発生量を測定するため、図2-18に示すように、マイクロトロン、蓄積リング周辺部及び壁面等に 2018 年 12 月 14 日から 19 日まで、CR-39 を 16 個設置した。運転時間は 30.4 時間であった。CR-39 での測定結果を表2-12に示す。マイクロトロン床(2ヶ所)で $1 \times 10^1 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、シンクロトロン床(1ヶ所)で $2 \times 10^1 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の熱中性子フルエンス率があった。その他の場所は極めて低かった。

運転終了直後の空間線量率は、全ての地点でバックグラウンドレベルであった。γ線スペクトロメリーの結果では、入射路の

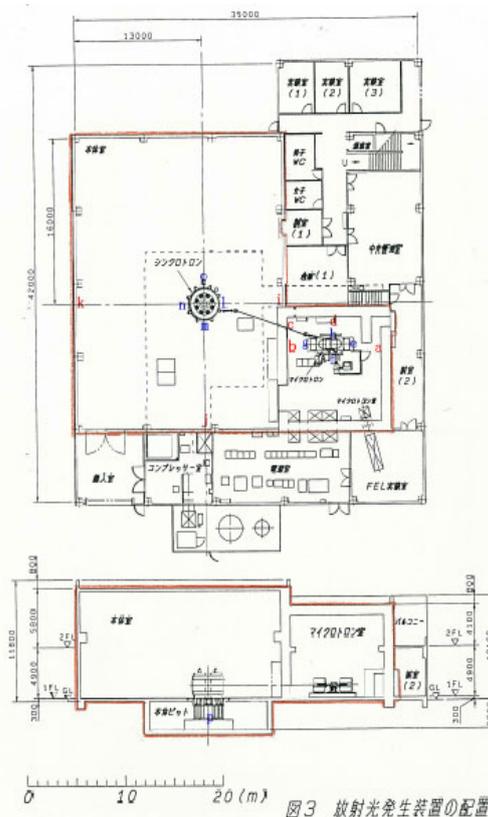


図2-18 線量計設置位置

偏向電磁石入口でわずかに ^{57}Co 、 ^{54}Mn が検出されたのみで、放射化はほとんど認められなかった。

表2-12 立命館大 SR センターでの運転中の熱中性子線量(mSv)、フルエンス(cm^{-2})、フルエンス率($\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)の測定結果(30.4 時間運転)

ナガセ	図中番号: 色	部屋	設置位 置	mSv	cm^{-2}	$\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
281	a 赤	マイクロトン	壁	0.00042	5.53E+04	5.05E-01
282	b 赤	マイクロトン	壁	0.00063	8.29E+04	7.57E-01
283	c 赤	マイクロトン	壁	0.00441	5.80E+05	5.30E+00
284	d 赤	マイクロトン	壁	0.00189	2.49E+05	2.27E+00
285	e 青	マイクロトン	床	0.00462	6.08E+05	5.55E+00
286	f 青	マイクロトン	床	0.008505	1.12E+06	1.02E+01
287	g 青	マイクロトン	床	0.006615	8.70E+05	7.95E+00
288	h 青	マイクロトン	床	0.00945	1.24E+06	1.14E+01
289	i 赤	シンクロトン	壁	0.002415	3.18E+05	2.90E+00
290	j 赤	シンクロトン	壁	-0.00021	-2.76E+04	-2.52E-01
291	k 赤	シンクロトン	壁	0.000315	4.14E+04	3.79E-01
292	l 青	シンクロトン	床	0.000525	6.91E+04	6.31E-01
297	m 青	シンクロトン	床	0.00021	2.76E+04	2.52E-01
298	n 青	シンクロトン	床	0	0.00E+00	0.00E+00
299	o 青	シンクロトン	床	0.0189	2.49E+06	2.27E+01
300	p 青	シンクロトン地下	床	0	0.00E+00	0.00E+00

第3章

3.1 PET 薬剤製造用サイクロtron施設での建屋コンクリートの放射化調査

(1) 施設の概要

2017 年度調査を実施した、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tron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 5 m×5 m×高さ 2.5 m と、一般的な PET 薬剤製造用サイクロtron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。そこで、2018 年度は、同型のサイクロtronで、現在も ^{15}O の製造を行っている大阪大学附属病院の協力を得て、調査を継続した。

(2) 中性子発生量

国内の一般の施設では ^{18}F の利用がほとんどであるが、国立循環器病研究センターのように、他の核種も頻繁に製造する場合には、陽子と重陽子照射でそれぞれ発生する中性子の発生比を求めておくことが必要である。表3-1に、 ^{18}F 、 ^{11}C および ^{15}O の製造時に発生する熱中性子フルエンス率を求めた結果を示す。 ^{15}O の製造時に発生する熱中性子は阪大病院(国循研究センターと同じ機種、ターゲット、照射条件、測定位置)で求めたものである。これまで、 ^{18}F 、 ^{11}C および ^{15}O の製造の通常運転は、それぞれ電流値 15 μA 、20 μA および 10 μA で行われてきた。

表3-1 ターゲットボックス直下の床面での熱中性子フルエンス率 ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

製造核種	μA あたり	通常運転	通常運転での中性子発生割合
^{18}F	3.89×10^4	5.84×10^5	1
^{11}C	9.33×10^3	1.87×10^5	0.32
^{15}O	2.18×10^4	2.18×10^5	0.37

過去 24 年間において、陽子による ^{18}F の製造が 905 時間、陽子による ^{11}C の製造が 1115 時間、および重陽子による ^{15}O の製造が 2210 時間であった。また、初期に陽子による ^{13}N 製造が

16 時間、重陽子による ^{18}F の製造が 307 時間行われた記録があるが、中性子発生の実験はできなかったことから、これらは安全側に評価するため、中性子発生数が最も大きい陽子による ^{18}F の製造と見なして計算することにした。その結果、約 24 年間の総熱中性子フルエンスとして $6.7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ が求められた。放射化計算の結果と実測値との比較を表3-2に示す。コンクリートの成分分析値がないために、放射化計算ではコンクリート中のコバルトとユウロピウム濃度をこれまで一般的に見られる濃度として、それぞれ 10 ppm、0.5 ppm とした。計算結果は、実測値と 2 倍以内で一致しており、実測値の方が低い結果となった。分析が実測値は 2017 年度のコアボーリング調査結果の値である。このように、モンテカルロ計算をしなくても、運転中の中性子発生量を測定し、運転記録をまとめておけば、コンクリート中に生成する放射能が予測できることを示している。

表3-2 ターゲットボックス直下のコンクリートの放射化計算と実測との比較

生成核種	計算 (Bq/g)	実測 (Bq/g)	C/M
^{60}Co	0.017	0.011	1.5
^{152}Eu	0.035	0.019	1.7

3. 2 PET 薬剤製造用サイクロtron施設での建屋コンクリートの放射化判定法の開発

(1) 目的

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。したがって、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tron室において評価を行うことにした。

(2) 検出器と遮蔽体

開発したサーベイメータを図3-1に示す。ホトマルの代わりに、マルチピクセルフォトンカウンター(以下「MPPC」という)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。また、検出部を分離できたことで、小型、軽量になっている。この装置を用いて、実際に線量率とコンクリート中の $^{152}\text{Eu} + ^{60}\text{Co}$ 濃度 (Bq/g) の関係を求めることにした。その際、コンクリート表面を周りからの放射線の影響をカットして測定するための遮蔽体も同時に製作した。図3-2に遮蔽

体に検出器を収納した例を示す。2017 年度に行ったシミュレーション計算に基づき、遮蔽体の厚みを1、2.5、4.5、6.5 cm まで変えたものを製作し、その効果を実測したところ、厚さ4.5 cm でほぼ外部放射線をカットできることが確認できた。(Appendix C.3 App-353～App-354 参照)

この装置を用いて、実際に線量率とコンクリート中の $^{152}\text{Eu} + ^{60}\text{Co}$ 濃度(Bq/g)の関係を求めることにした。結果を図3-3に示す。図から明らかなように、線量率とコンクリート中の $^{152}\text{Eu} + ^{60}\text{Co}$ 濃度(Bq/g)は非常に良い直線関係を示し、線量率から放射能が求められることを示すことができた。以上のように、本法は取扱が容易な標準的な測定法として提案することができ、実際の施設の廃止の際の測定作業に活用された。

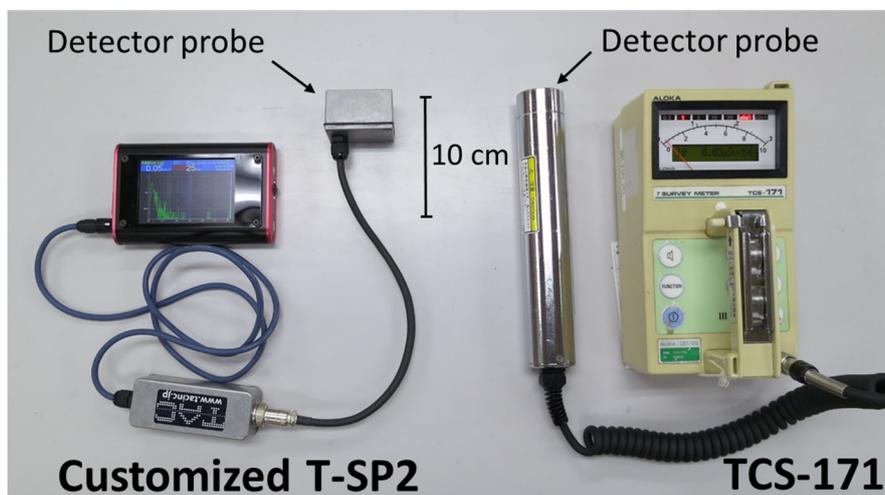


図3-1 小型サーベイメータと市販品



図3-2 製作した小型遮蔽体(鉛厚さ4.5 cm)

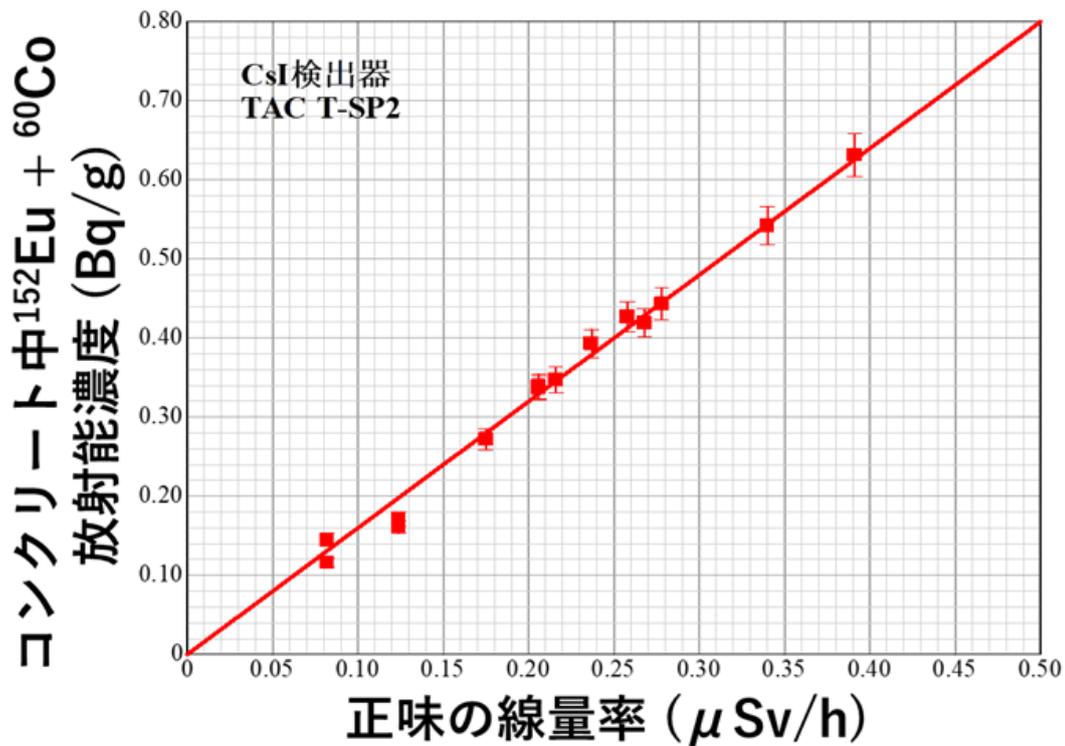


図3-3 コンクリート表面線量率と放射能濃度

(3) γ 線スペクトロメータの性能の比較検討

放射能濃度を求めるには、当初 Ge 検出器を用いた。Ge 検出器は液体窒素冷却が不可欠であり、測定の遮蔽が大掛かりとなることから、ハンディなスペクトロメータの利用ができることになれば、放射能測定も容易になる。そこで、図3-4に示した市販の γ 線スペクトロメータの性能比較も実施した。いずれも、検出効率、分解能に遜色は無かった。LaBr₃ は自己放射能があること、SrI₂ は高い放射線場には向かない、CeBr₃ は放射能への換算が現状ではサポートされていないなどの難点がある。LaBr₃ 検出器で図3-3と同様の検量線を求めた。結果を図3-5に Ge 検出器の結果と合わせて示す。図から明らかのように、LaBr₃ 検出器を用いても、Ge 検出器と遜色ない定量が可能であることを示すことができた。

	LaBr ₃	CeBr ₃	SrI ₂
外観	Million Technologies InSpector1000	EMF Japan EMF211	RMD SRI-38-PHI-38-P
スペクトル例			
結晶サイズ	Φ 1.5 in. × L 1.5 in.	Φ 2 in. × L 2 in.	Φ 1.5 in. × L 1.5 in.
検出効率(LaBr ₃ 比)	1.000 @ 1.33 MeV	1.837 @ 1.33 MeV	0.960 @ 1.33 MeV
分解能	1.15 % @ 1.33 MeV	1.76 % @ 1.33 MeV	1.20 % @ 1.33 MeV
放射能定量性	優 (ISOCS)	難	良
飽和線量率(見込)	>10 μSv/h	>10 μSv/h	1 μSv/h
温度補正	有	有	無
自己放射能	有 (¹³⁸ La: 1438keV)	無	無

図3-4 比較評価を行った市販のγ線スペクトロメータ

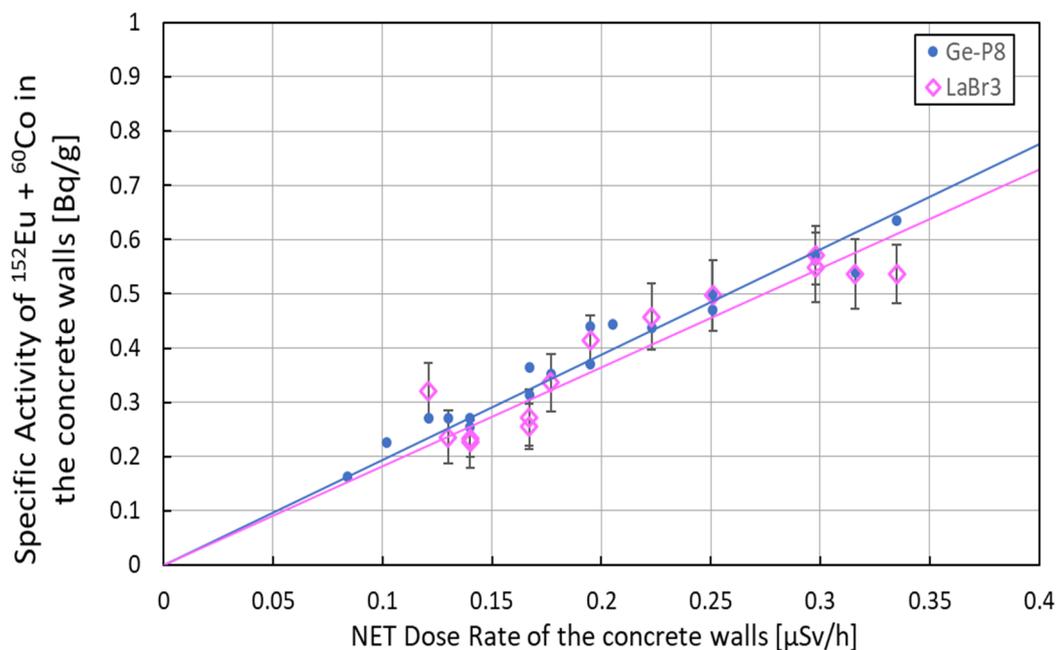


図3-5 LaBr₃ 検出器と Ge 検出器で求めたコンクリート表面線量率から放射能濃度を求める検量線

3.3 放射線可視化手法の検討

(1) 放射化物可視化の課題

福島第一原子力発電所の事故以降、急速に普及した放射線イメージング技術を用いた、加速器電磁石の放射化部位可視化の基礎的検討について結果を報告する。放射線イメージング技術とは、可視光のカメラと、 γ 線検出器を搭載した装置で、可視光画像に対応する部位の相対的な γ 線強弱をカラーコンタと呼ばれる色調を変えて表す技術のことである。特徴として、測定の現場において放射線の強弱を可視化でき、広範囲の情報を一度に得ることができる。スペクトロメリーにより核種同定ができるモデルも存在する。国内においても、コンプトン式やピンホール式などの撮像方式の違い、検出部結晶の種類違いなど、多種多様な機材が存在する。ただし、これらの多くは、震災後に普及したということもあり、 ^{137}Cs のホットスポットの検出に特化したものが多く、加速器施設での主要核種で、金属やコンクリートで問題となる ^{60}Co 、 ^{152}Eu のような1 MeV以上の透過力の強い γ 線を放出する核種に対しては十分な評価がされていない。また、加速器本体のみならず、壁、床、天井といった4 π 方向すべてが放射化することもあり、ホットスポットのようなシャープな分布ではなく、ブロードな放射能分布を示すことも加速器施設では十分に考えられる。このような背景より、加速器の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性能を持つ検出器のデザインも必要となってくる。

(2) 2017年度検討結果

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装置は、ピンホール方式、コンプトン方式、およびマスク方式の3つに分類できる。3方式の代表として、日立製作所製 HGD-E1500、千

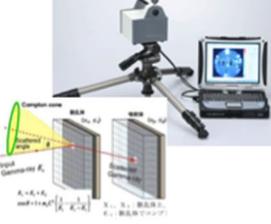
ピンホール方式	コンプトン方式	マスク方式
HGD-E1500 ／日立製作所	ガンマキャッチャー ／千代田テクノル	iPIX ／ミリオンテクノロジース キャンベラ
		
外寸: 193 × 327 × 295mm 重量: 32 kg 検出部: CdTe Pb4cm相当の遮蔽付き スペクトル取得可	外寸: 138 × 150 × 150mm 重量: 2 kg 検出部: GAGG, t5+10mm 小さく軽い ROIが設定できる	外寸: 188 × 90 × 90mm 重量: 2 kg 検出部: CdTe, t1mm 小さく軽い

図3-6 調査に用いた装置

代田テクノ製ガンマキャッチャー、ミリオンテクノロジーシステム製*iPIX*を用いて、高エネルギー加速器研究機構 12 GeV 陽子シンクロトン(以下「KEK-PS」という)施設内の放射化電磁石を対象に、KEK の放射化物使用棟にてベンチマークテストを行った。測定装置を図3-6に示す。

また、実際に電磁石を測定した一例を図3-7に示す。ピンホール方式とコンプトン方式については、主要核種である ^{60}Co のピークを γ 線スペクトル上検出できなかったものの、散乱光子を捉えることで高線量部位を特定することができた。マスク方式については、高線量部位の特定ができなかったが、方式の違いよりも結晶部の厚みが 1 mm と非常に薄いことによる影響の方が大きいと考えられた。

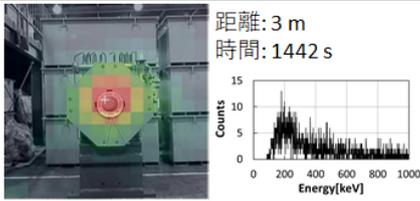
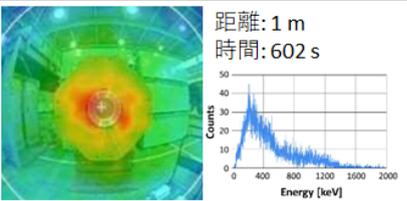
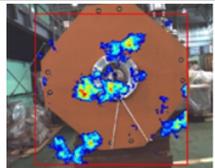
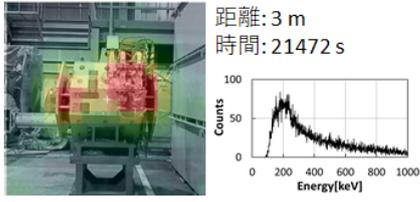
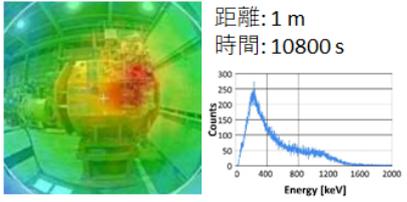
HGD-E1500 (ピンホール)	ガンマキャッチャー (コンプトン)	iPIX (マスク)
 <p>距離: 3 m 時間: 1442 s</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高線量部位を捉えた ・ピークなし 	 <p>距離: 1 m 時間: 602 s</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高線量部位を捉えた ・ピークなし 	 <p>距離: 1.2 m 時間: 3004 s</p> <p>像が収束しない</p>
 <p>距離: 3 m 時間: 21472 s</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高線量部位を捉えた ・ピークなし 	 <p>距離: 1 m 時間: 10800 s</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高線量部位を捉えた ・ピークなし 	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; text-align: center;"> <p>撮影せず</p> </div>

図3-7 電磁石の測定結果の1例

(3) 2018年度調査結果

2018年度は、実際に KEK-PS の室内にイメージング装置を持ち込み、ビームラインに設置されている電磁石の放射化状況を撮影することを試みた。撮影場所として、セプタム電磁石由来のビームロスの影響が大きく、北カウンターホールへ出射するところであった EP1 分岐部を選定した。この近辺の電磁石の表面線量率は、10~500 $\mu\text{Sv/h}$ 、空間線量率は、3~10 $\mu\text{Sv/h}$ と放射化物使用棟よりも1桁高い線量率であった。2017年度の評価で放射化電磁石の高線量部位の可視化に成功した HGD-E1500 とガンマキャッチャーの2機種を用いて評価を行った。

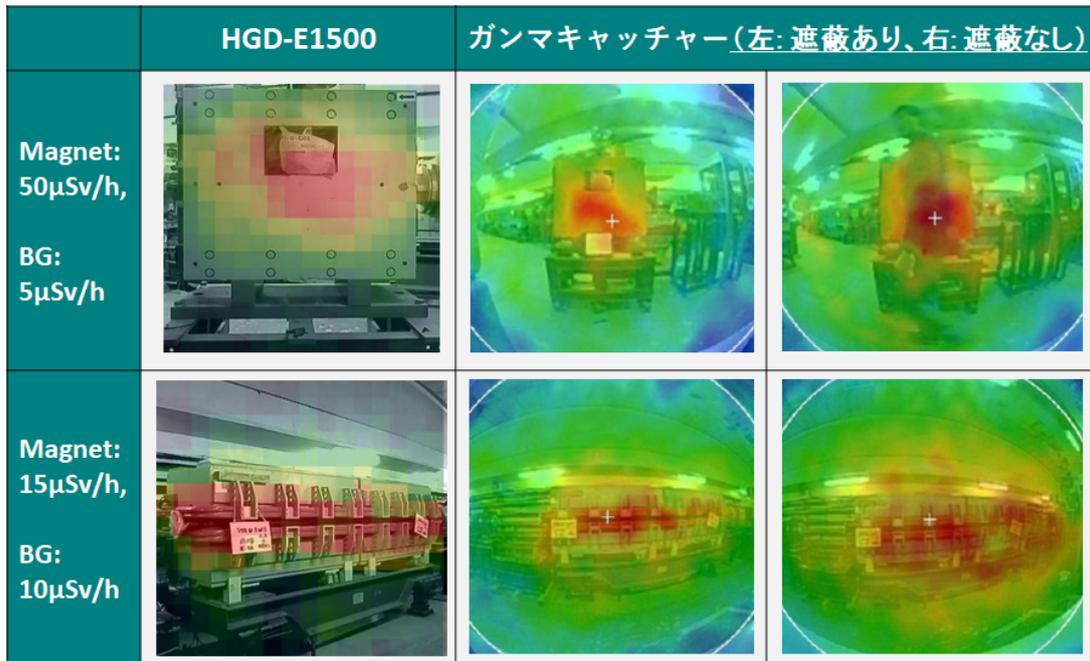


図3-8 KEK-PS EP1 分岐部周辺における放射化電磁石のイメージング結果

ガンマキャッチャーについては、装置自身に遮蔽体を持たないため、鉛ブロックで躯体を囲んだ条件でも撮影を行い、バックグラウンド放射線(以下「BG」という)の影響についても調査を行った。実際の測定では、電磁石や配管類、放射化物保管棚や空間全体など様々な条件で撮影を行った。図3-8に一例として示す。(1)被写体電磁石が高線量でBGが比較的低線量の場合、(2)被写体電磁石が低線量でBGが被写体と同程度の線量の場合の2つについて結果を紹介する。まず、(1)の条件は、HGD-E1500、ガンマキャッチャー共に、カラーコンタ上で磁石中央の高線量部にコンタの収束が確認された。遮蔽の有無による違いはなかった。(2)の条件では、両機種とも、偏向電磁石の高線量部であるダクト部への収束が見られた。ガンマキャッチャーの遮蔽が無い条件では、ある条件に比べ、明らかに像がぼやけたが、ダクト周囲に収束するという結果については再現した。

以上の結果より、市販の放射線イメージング装置である HGD-E1500、ガンマキャッチャーを用いて、加速器ビームラインのような高 BG 空間における電磁石の放射化部位の特定ができることがわかった。BGが可視化結果へ与える影響も、大きくないことが鉛遮蔽を用いた実験により確かめられた。一方で、今回の全測定条件において、スペクトル上に ^{60}Co のピークは検出できなかった。核種同定などより発展的な調査を行う場合には、より検出効率の大きな機種を選定する必要があると考える。

第4章

4.1 廃止マニュアルの作成のための活動

廃止マニュアルの検討のための委員会として小委員会3を設置した。小委員会3は、放射線管理に係わる研究者、業者および国内の発生装置メーカーの担当者から構成されており、日本放射線安全管理学会(以下「JRSM」という)の全面協力を受けながら検討を進め、JRSM 学術大会やシンポジウムで検討状況を逐次報告してきた。また、委員会活動では、本安全研究の結果を紹介し、成果を取り入れられるようにした。

この2年間の活動は以下のように進めてきた。

第1回安全研究小委員会3(2017年1月19日) → 作業分担確認

2017年12月 JRSM シンポジウム →安全研究での進め方を報告

第2回安全研究小委員会3(2018年5月24日) → ドラフト検討

2018年6月 JRSM シンポジウム

→安全研究成果紹介:加速器調査、測定評価手法、イメージング結果成果を報告

第3回安全研究小委員会3(2018年11月19日) → 全体編集、レビュー

2018年12月 JRSM 学術大会

→安全研究成果紹介:発生装置区分、評価、廃棄物管理を報告

第4回安全研究小委員会3(2019年1月31日) → 校正

4.2 廃止マニュアル作成の基本方針

安全研究では放射線発生装置について重点的に検討を進めることになるが、マニュアルをまとめるに当たっては、放射線障害防止法に係わる放射線事業所を検討対象とし、原子力施設は含めないこととした。また、2010年の法令改正によって取り入れられた放射化物の取扱を重点的に検討する。

放射化物の測定、評価の考え方としては、採用する測定法の検出下限値がクリアランスレベルを十分に下回っていることを確認できるものであることが必要である。事業所廃止に当たっては、廃止届に加えて廃止措置計画書の提出が必要であり、廃止措置完了後は廃止措置報告書の提出が求められる。また、発生廃棄物量の見積もりと、実際に放射化物の除染のための測定、評価手法や除染工法が必要となってくる。このような、流れを理解できるような構成とする。

現在、事業所廃止に際して、クリアランス制度の運用手順が必ずしも十分に整備されていないことから、本マニュアルではクリアランスレベルを参考にしながら、汚染や放射化が認められないという判定を行うための評価手法を明確にすることとした。

多くの放射線施設では、全部または一部の作業については、専門業者へ依頼することが想定されるが、許可届出使用者等としてどのような考え方で廃止措置を行うかについて、責任を持って主

体的に取り組むことが重要であり、廃止措置作業の中身についても担当者の理解を得るために、詳細な内容についても情報として提供する。このため、事業所を廃止することになってから、事前評価、計画立案、測定並びに除染作業、廃棄物引き渡し、廃止措置報告書までの廃止措置の全体スキームと留意すべき事柄について網羅することとした。

放射線施設の安全管理の実務を行うものにとって、安全管理体制、作業期間そして経費については、事業主の理解が必要であることから、その際の参考にできるようにした。さらには、自治体や住民への情報公開も大切となってくることもあり、その際の参考資料としての利用を期待する。

なお、マニュアルをそのまま適用できない、施設固有の課題も出てくるのが想定される。マニュアルは事業所の廃止措置を縛るものでなく、個々の事業所で廃止措置の進めるうえでの考え方の参考となるものとする。

4.3 廃止マニュアルの構成

廃止マニュアルの構成は表4-1のようになる。

ここで、主に放射線発生装置使用施設の放射化に係わるのは、

第2章では事前準備のうち、2.2.1(3)、2.2.2

第3章では汚染等の評価のうち、3.1

第5章では放射化物の評価法全部

第7章の測定うち、7.3等

第8章の汚染除去のうち8.2等

第9章の廃棄物引き渡しのうち9.2

等となり、第5章を除いては、放射線発生装置の箇所は一部となっている。

Appendix では、特に放射化物評価のことを記載している第5章のみを添付することにした。全体的内容については、放射線障害防止法の対象となるすべての事業所に係わっており、今後さらに関係学会等で精査していく。

表4-1 廃止マニュアルの構成

- | |
|-------------------------|
| 1. 概要 |
| 2. 廃止措置の手順 |
| 2.1 法的な手続き |
| 2.1.1 廃止措置の手続き |
| (1) 許可届出使用者の放射線施設全廃止の場合 |
| (2) 放射線施設の一部廃止の場合 |
| 2.2 廃止のための事前準備 |

- 2.2.1 事前準備及び調査
 - (1) 非密封 RI の事前準備
 - (2) 密封 RI の事前準備
 - (3) 発生装置
- 2.2.2 現場での作業
 - (1) 廃止措置第一段階での作業
 - (2) 廃止措置第二段階での作業
- 3. 汚染等の測定、評価
 - 3.1 汚染の考え方
 - 3.1.1 汚染の形態
 - (1) 非密封 RI による汚染
 - (2) 放射化による汚染
 - 3.1.2 「クリアランス物」と「放射性廃棄物でない廃棄物」
 - 3.1.3 「汚染がない」ことの考え方
 - (1) 非密封 RI 施設
 - (2) 放射性発生装置等の放射化を考慮する施設
 - 3.2 汚染の評価手順
 - 3.2.1 非密封 RI による汚染
 - 3.2.2 放射化
 - 3.2.3 評価対象核種の決定、測定器の選定、判定基準
 - (1) 評価対象核種の決定
 - (2) 測定器の選定
- 4. 非密封 RI 汚染の評価方法
 - 4.1 汚染評価の考え方
 - (1) 汚染区分の設定
 - (2) 汚染区分の合理化
 - 4.1.1 内面汚染と外面汚染
 - (1) 内面汚染
 - (2) 外面汚染
 - (3) 浸透汚染
 - 4.1.2 書類調査と事前測定
 - 4.2 評価測定方法
 - (1) 汚染分布

- (2) 汚染評価の考え方
- 4.3 表面汚染検査
 - (1) 表面汚染検査
 - (2) 測定対象
 - (3) 測定ポイントの選定
- 4.4 浸透汚染検査
 - (1) 浸透汚染検査
 - (2) 測定対象
 - (3) 測定ポイントの設定
- 5. 放射化物の評価方法
 - 5.1 放射化範囲の特定方法
 - (1) 放射化物の定義
 - (2) 加速器種類による分類
 - (3) 放射化範囲の評価方法
 - 5.2 放射化物の計算
 - (1) 計算条件
 - (2) 中性子束計算
 - (3) 放射化計算
 - (4) 計算結果の検証
 - 5.3 放射化物の測定
 - 5.3.1 加速器施設の放射化量評価
 - 5.3.2 試料の採取
 - (1) 試料採取箇所の選定
 - (2) 試料採取方法
 - 5.3.3 試料の測定
 - (1) 試料の前処理
 - (2) 試料測定
 - 5.3.4 測定評価
 - 5.3.5 放射化物の測定事例
 - (1) コンクリート中の放射能濃度
 - (2) セクターマグネット及びヨークの放射能濃度
 - 5.3.6 補足 その他の測定対象核種
- 6. その他の測定

- 6.1 周辺環境の確認測定
 - (1) 測定目的
 - (2) 試料採取と測定項目
 - (3) 汚染が検出された時の対処
- 6.2 天然核種の影響
- 6.3 最終サーベイ
 - (1) 最終サーベイの目的
 - (2) 測定手順
- 7. 測定機器の選定
 - 7.1 はじめに
 - 7.2 表面汚染の測定
 - 7.2.1 直接測定法
 - 7.2.2 ふき取り法
 - 7.3 放射化の測定
 - 7.3.1 測定対象核種
 - 7.3.2 作業環境の測定
 - 7.3.3 廃棄物の測定
 - 7.3.4 建造物の測定
 - 7.4 空気汚染の測定
 - 7.5 排水・廃油・土壌の測定
 - 7.6 空間線量率の測定
 - 7.6.1 γ (X)線の測定
 - 7.6.2 β 線及び極低エネルギーX 線の測定
 - 7.7 測定器の選定と特性
 - 7.8 検出限界
 - 7.8.1 検出限界値の算出方法
 - 7.8.2 測定時間
 - 7.8.3 有意な汚染の判定
 - 7.9 測定器の点検校正
 - 7.9.1 サーベイメータの日常点検
 - 7.9.2 サーベイメータの定期校正
 - 7.9.3 測定器の定期点検
- 8. 汚染除去、解体撤去

- 8.1 除染・解体の考え方
 - (1) 設備解体手順
 - (2) 除染方法の選定
 - (3) 除染と測定の手順
- 8.2 除染方法
 - (1) 床面等
 - (2) 排水管
 - (3) 貯留槽及び連結枡
 - (4) 排気ダクト及びフィルタユニット
 - (5) 実験機器類
 - (6) 放射化物
 - (7) 除染を適用しない例
- 8.3 除染作業の付帯項目
 - (1) ユーティリティの確保
 - (2) 安全対策
 - (3) 仮設設備の設営
- 8.4 工事工法
 - (1) 排気系統ダクト及び排水管撤去工事
 - (2) 建屋構造物及び排水貯留槽表層のはつり工事
 - (3) サイクロトン
- 9. RI 廃棄物及び RI 線源の引渡し
 - 9.1 RI 汚染物
 - 9.1.1 制限値
 - 9.1.2 分類と収納方法
 - 9.2 放射化物
 - 9.2.1 放射化物の収納方法
 - 9.3 RI 線源
 - 9.3.1 密封線源
 - 9.3.2 表示付認証機器、表示付特定認証機器など
 - 9.3.3 線源登録制度対象線源
 - 9.3.4 放射線源装備機器
 - 9.4 廃止措置に係るアイソトープ協会との事前調整
 - 9.5 アイソトープ協会への廃棄依頼時の注意

10. その他の管理

10.1 安全管理

10.1.1 安全管理の考え方

10.1.2 責任・連絡体制

- (1) 作業の管理体制
- (2) 異常時の連絡体制
- (3) 連絡先リスト

10.1.3 有資格作業

10.1.4 想定事例

10.1.5 機能維持設備

- (1) 火災報知機、消火設備
- (2) 防犯設備

10.2 外注作業員の管理

10.2.1 従事者登録、教育訓練、健康診断

10.2.2 被ばく管理(PD, 積算型)、入域管理

10.3 書類の引渡し、保管

10.3.1 RI管理記録等の整理

- (1) 記録の引渡し手順
- (2) 引渡しの対象となる書類
- (3) 記録の引渡し方法

10.4 産業廃棄物

10.5 その他

- (1) 評価対象物質
- (2) 土壌汚染状況調査
- (3) 要措置区域、形質変更時要届け出区域への指定
- (4) 汚染土壌の搬出時の届け出
- (5) 指定調査機関
- (6) 指定支援法人
- (7) 指定基準

10.6 その他

第5章

研究期間中に行った国内会議、国際会議での研究報告のリストを以下に示す。

5.1 国内会議発表

1. 吉田剛ら, 「加速器施設廃止時における放射線イメージング技術適用の検討」, 高エネルギー加速器研究機構, 茨城県つくば市, 第20回「環境放射能」研究会, 2019年3月12日～14日
2. 吉田剛ら, 「シンチレーション式スペクトロメーターを用いた PET サイクロトロン施設コンクリートの放射化判定法の開発」, 高エネルギー加速器研究機構, 茨城県つくば市, 第33回研究会「放射線検出器とその応用」, 2019年1月28日～30日
3. 吉田剛ら, 「加速器施設廃止時における非破壊でのコンクリート放射化判定手法の開発」, 京都大学複合原子力科学研究所, 大阪府泉南郡, 京都大学複合原子力科学研究所 専門研究会「放射化分析及び中性子を用いた地球化学的研究-2-」, 2019年1月25日
4. 松村宏, 「原子力規制庁の放射線安全規制研究推進事業 加速器施設の廃止措置に関わる放射化物の測定・評価手法の研究」, 大学等放射線施設協議会・加速器放射線安全検討委員会, 東北大学東京サイト, 東京都中央区, 2019年1月25日
5. 松村宏, 「放射線施設廃止措置マニュアルの改定 ー放射化物の測定ー」, 日本放射線安全管理学会 第17回 学術大会, 名古屋大学 野依学術記念交流館, 愛知県名古屋市, 2018年12月5日～7日
6. 松村宏, 「加速器施設の廃止措置に関わる放射化物の測定・評価手法の研究」, 第2回大学加速器連携協議会, まちなかキャンパス長岡, 新潟県長岡市, 2018年8月8日
7. 榎本和義ら, 企画講演「静電加速器施設の放射化に関する調査報告」, 第31回 タンデム加速器及びその周辺技術の研究会, 東京都市大学 二子玉川夢キャンパス, 東京都世田谷区, 2018年7月13日～14日
8. 榎本和義ら, 「放射線施設廃止の確認手順と放射能測定マニュアルの改訂-放射線施設廃止の確認手順と放射能測定マニュアルの改定に向けて 5-1. 静電加速器施設の放射化調査」, 第15回 日本放射線安全管理学会 6月シンポジウム, 東京大学農学部弥生講堂, 東京都文京区, 2018年5月24日～25日
9. 延原文祥ら, 「放射線施設廃止の確認手順と放射能測定マニュアルの改訂-放射線施設廃止の確認手順と放射能測定マニュアルの改定に向けて 5-2. 静電加速器施設におけるモンテカルロ計算」, 第15回 日本放射線安全管理学会 6月シンポジウム, 東京大学農学部弥生講堂, 東京都文京区, 2018年5月24日～25日
10. 豊田晃弘ら, 「放射線施設廃止の確認手順と放射能測定マニュアルの改訂-放射線施設廃

- 止の確認手順と放射能測定マニュアルの改定に向けて 5-3. 国立循環器病研究センター研究所における PET サイクロtron施設の放射化調査」, 第 15 回 日本放射線安全管理学会 6 月シンポジウム, 東京大学農学部弥生講堂, 東京都文京区, 2018 年 5 月 24 日～25 日
11. 松村宏ら, 「放射線施設廃止の確認手順と放射能測定マニュアルの改訂-放射線施設廃止の確認手順と放射能測定マニュアルの改定に向けて 5-4. 放射化物の線量および放射能測定評価手法の開発」, 第 15 回 日本放射線安全管理学会 6 月シンポジウム, 東京大学農学部弥生講堂, 東京都文京区, 2018 年 5 月 24 日～25 日
 12. 吉田剛ら, 「放射線施設廃止の確認手順と放射能測定マニュアルの改訂-放射線施設廃止の確認手順と放射能測定マニュアルの改定に向けて 5-5. 放射化物の放射線イメージング技術の検討」, 第 15 回 日本放射線安全管理学会 6 月シンポジウム, 東京大学農学部弥生講堂, 東京都文京区, 2018 年 5 月 24 日～25 日
 13. 松村宏, 「放射線施設廃止の確認手順と放射能測定マニュアルの改訂-放射線施設廃止の確認手順と放射能測定マニュアルの改定に向けて 5-6. 2018 年度安全研究計画について」, 第 15 回 日本放射線安全管理学会 6 月シンポジウム, 東京大学農学部弥生講堂, 東京都文京区, 2018 年 5 月 24 日～25 日
 14. 吉田剛ら, 「放射線安全規制研究推進事業「加速器施設の廃止措置に係わる放射化物の測定, 評価手法の確立」の活動について」, 第19回「環境放射能」研究会, 高エネルギー加速器研究機構, 茨城県つくば市, 2018 年 3 月 13 日～3 月 15 日
 15. 松村宏, 「2.非汚染・非放射化の評価手順の検討」, 日本放射線安全管理学会 12 月シンポジウム, 東京大学農学部弥生講堂一条ホール, 東京都文京区, 2017 年 11 月 30 日～12 月 1 日
 16. 豊田晃弘ら, 「加速器室放射化コンクリート壁中の放射性核種の非破壊放射能濃度測定法の検討(1)ーサイクロtron室の廃止措置のためにー」, 日本保健物理学会第 50 回研究発表会/日本放射線安全管理学会第 16 回学術大会合同大会, ホルトホール大分, 大分県大分市, 2017 年 6 月 28 日～30 日
 17. 中林貴之ら, 「加速器室放射化コンクリート壁中の放射性核種の非破壊放射能濃度測定法の検討(2)ーサイクロtron室の廃止措置のためにー」, 日本保健物理学会第 50 回研究発表会/日本放射線安全管理学会第 16 回学術大会合同大会, ホルトホール大分, 大分県大分市, 2017 年 6 月 28 日～30 日

5. 2 国際会議発表

1. H. Matsumura et al., “Simplified determination method of residual specific activity in activated concrete of a PET-cyclotron room using a survey meter,” 13th International Symposium on Nuclear and Environmental Radiochemical Analysis: ERA13, Cambridge, United Kingdom, September 17-20, 2018.
2. G. Yoshida et al., “Comparison of different gamma-ray imaging techniques for visualization of the induced activity in accelerator magnets,” 13th International Symposium on Nuclear and Environmental Radiochemical Analysis: ERA13, Cambridge, United Kingdom, September 17-20, 2018.
3. H. Nakamura et al., “Examination of neutron fluence measuring methods to estimate the activity induced by neutrons in an accelerator room,” 13th International Symposium on Nuclear and Environmental Radiochemical Analysis: ERA13, Cambridge, United Kingdom, September 17-20, 2018.
4. A. Toyoda et al., “Quantitative evaluation of the radioactivity in the concrete at PET cyclotron facility with simple and non-destructive measurement,” 13th International Symposium on Nuclear and Environmental Radiochemical Analysis: ERA13, Cambridge, United Kingdom, September 17-20, 2018.

第6章 まとめ

規制範囲の明確化を目的として、静電加速器、粒子線治療施設、放射光利用施設について調査を進めた。静電加速器施設においては建屋の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、加速電圧 6 MV を超えるタンデム加速器施設では標的、スリット、ファラデー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は認められなかった。粒子線治療施設では、サイクロトロンによる陽子線治療施設、シンクロトロンによる陽子線治療施設、炭素イオン線による治療施設の順に、中性子発生量は 1 桁ずつ小さくなる傾向が見られた。サイクロトロン施設のデグレータ直下では、床コンクリートの放射化に注意すべきであることが分かった。しかし、治療技術の高度化が進んでおり、国内の他の施設での継続調査が望まれるところである。サイクロトロンによる陽子線治療施設以外では、建屋の放射化は考慮する必要はなかった。また、加速器そのものの放射化はビーム取出部、モニター等に限定されていた。施設で最も重量物となる回転ガントリーはビーム成形、治療施設への出射部を除いて放射化は認められなかった。放射光施設では、調査した全ての施設で建屋の放射化の可能性は極めて低いことが確認できた。発生装置自体の放射化も、ビーム取出部や入射部等非常に限定されていた。小型の放射光施設では、発生装置室の空間線量は入射時やビームダンプ時に線量が上昇することがあるが、通常はバックグラウンドレベルであった。

加速器周辺部では中性子の発生が放射化の主要因となる。このため、発生装置運転中の中性子発生量の測定を金箔、TLD、CR-39 を用いて試みたが、それぞれ測定できる線量の範囲、他の放射線の影響が異なっていることから、組み合わせで比較検討することが重要であった。さらに、Ge 検出器で直接室内の床面を測定することで、非常に高感度に熱中性子フルエンスを求めることができることも示すことができた。これは、新たな評価手法として有効であると考えている。また、モンテカルロ計算による、中性子の発生と空間分布および金箔の放射化計算は概ね再現できることが確認できた。しかし、加速粒子数と輸送中のビーム損失割合を運転記録等から読み取ることが難しいことから、相対的な中性子の強度分布はかなり再現できるといえるが、絶対的な放射化量を求めるために必要な取得をどうするかが今後の課題といえる。とくに、高エネルギーの電子加速器での放射化計算では、電子線からの制動放射線の発生、さらには中性子発生が入射電子のビームロスポイントのみならず、わずかながら制動放射線の衝突ポイントでも生じる可能性が見られており、今後の検討課題といえる。

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短寿命核種である ²⁴Na、⁵²Mn、⁵⁷Ni の検出や廃止の際に問題となる核種である ⁶⁰Co、¹⁵²Eu 等の検出、定量が Ge 検出器と遜色なく行えることが示された。線量率の測定のためのサーベイメータの開発では、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。サイクロtron施設での測定を行い、サーベイメータによる表面線量の測定結果から、表面線量率とコンクリートの放射化量(Bq/g)に良好な直線関係を見いだすことができ、線量率から放射能濃度を算定することができることを示すことができた。次の課題としては、電磁石の評価など金属についての評価法の検討が望まれる。

イメージング技術はピンホール方式、マスク方式、コンプトン方式の3方式を検討したが、放射化物を測定する性能としてはまだ未完成であるといえる。とくに、加速器施設では高いエネルギーのγ線を放出する⁶⁰Coを効率良く測定できることが不可欠である。このための技術要素としては、測定方式というよりも、検出器そのものの検出効率を上げなければならないことが確認できた。また、加速器施設では、様々な核種が生成していることから、核種の同定、核種毎の分布測定等もできるようにすべきである。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、イメージから放射線の分布のみならず、核種の同定、線量率の推定、放射能の推定ができるようなものに改善していく必要がある。

施設廃止のマニュアルは完成することができたが、今後のさらに新たな研究成果も引き続き取り入れ、関係各方面からのご意見もいただきながら、引き続きブラッシュアップしていきたいと考えている。