

中型シンクロtron光施設と放射線管理

公益財団法人科学技術交流財団あいちシンクロtron光センター 岡島 敏浩

要 旨

シンクロtron光の利用は、1947年に電子シンクロtronで観測されて以来、目覚ましい発展を遂げている。現在国内には8か所の施設でシンクロtron光の利用が可能である。8か所ある施設の多くは小型・中型のシンクロtron光施設であるが、産業応用を目的に建設されたあいちSRとSAGA-LSは効率的に短波長のX線を発生するために特徴的な電子加速装置になっている。本報では、これら2つの施設の特徴を説明するとともに、この電子加速装置を放射線発生装置として取扱う上での放射線管理の現状や安全管理システム、並びに放射線発生装置として取り扱う上での課題について考察した。

1. はじめに

国内には、シンクロtron光を利用できるシンクロtron光施設が8か所に設置され(図1)り、多くの大学や企業等の研究者や技術者により利用されている。シンクロtron光の利用を目的とした施設は、国内では1975年の東京大学物性研究所のSOR-RING(東京都田無市、1997年に閉鎖)を皮切りに、1980年代にはPhoton Factory(茨城県つくば市)やUVSOR(愛知県岡崎市)が建設された。1990年には半導体の微細加工に必要なリソグラフィ技術の開発のために官民共同でSORTEC(茨城県つくば市)の運用が始まっている²⁾(1996年に閉鎖。その後、タイ・シンクロtron光研究所³⁾に移設)。ちょうど同じ頃に、全国各地で多くのシンクロtron光施設の建設計画がたてられ、民間企業でも小型のシンクロtron光施設の建設が行われた⁴⁾。民間企業のシンクロtron光施設は主にリソグラフィのためのものである。1990年代後半になると世界を代表する大型のシンクロtron光施設のSPring-8が兵庫県東播磨地区に建設され、利用が開始された。その後、HiSOR(1997年)、Rits-SR(1999年)、NewSUBARU(2000年)など中・小型のシンクロ

tron光施設の利用が開始されている。2006年2月には九州地区で初めてのシンクロtron光施設のSAGA-LSが九州地区の交通の要所である佐賀県鳥栖市で運用が始まった。SAGA-LSは産業利用を目的として地方自治体が建設し、運営する全国で初めてのシンクロtron光施設である⁵⁾。2013年3月には愛知県瀬戸市に付加価値の高いモノづくり支援することを目的にあいちSRの運用が始まった⁶⁾。施設の整備や運営は公益財団法人科学技術交流財団が行っている。あいちSRにおいては、利用開始と同時にトップアップ運転を導入し、また、世界初の超伝導偏向電磁石による硬X線の発生に成功し、利用者に提供するなど運用開始当初から、同

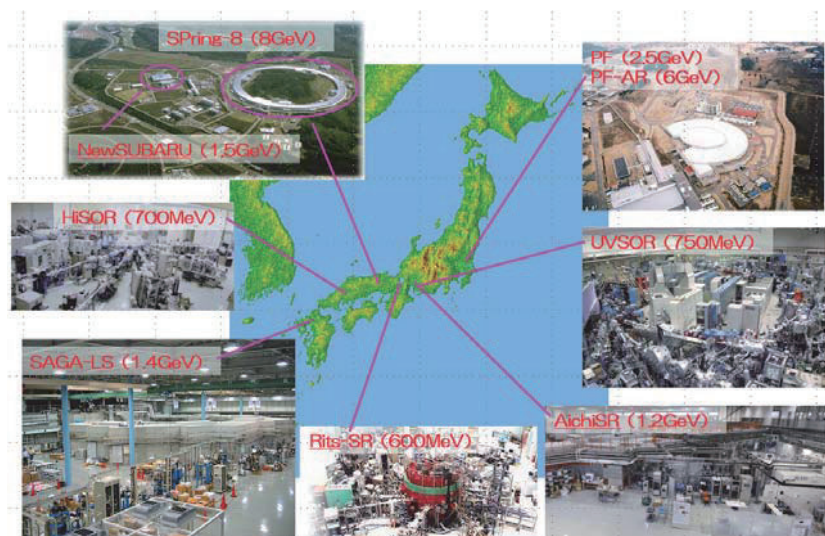


図1 日本国内で稼働中のシンクロtron光施設

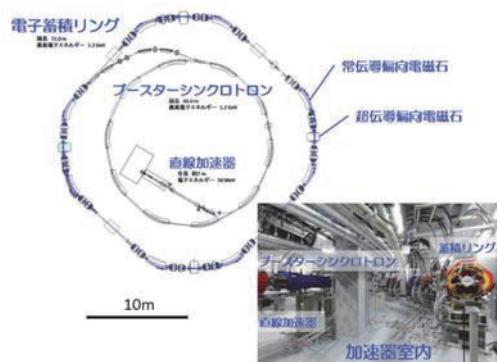


図2 あいちSRの放射線発生装置(加速器)

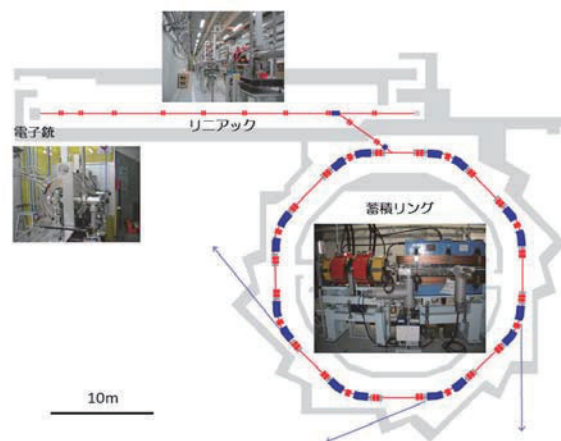


図3 SAGA-LSの放射線発生装置(加速器)

規模の施設では類を見ない特徴的な取り組みを行っている。あいちSRとSAGA-LSはそれまでの学術利用中心のシンクロトロン光施設とは異なり、産業界による利用が行いやすいシンクロトロン光施設には様々な制度が提供されており、今後ますますの利用者の増加が見込まれる。

シンクロトロン光を効率よく発生するためには高エネルギーの電子蓄積リング、すなわち電子加速器が必要になる。電子のエネルギーはあいちSRで1.2GeVで、SAGA-LSで1.4GeVある。この程度のエネルギーの電子を扱う施設を中型(又は、中規模)シンクロトロン光施設、これより大きいものを大型(同、大規模)、小さいもの

を小型(同、小規模)シンクロトロン光施設と呼んでいる。このような高エネルギーの電子を扱う施設の運用には、当然のことながら放射線施設としての管理が必要になる。以後、中型シンクロトロン光施設の利用の概要や放射線管理の状況についてまとめる。

2. 中型シンクロトロン光施設の状況

図2に示したように、あいちSRでは電子を50MeVまで加速するための直線加速器、さらに電子を1.2GeVまで加速するためのブースターシンクロトロン、そして、電子を蓄積し、シンクロトロン光を発生するための電子蓄

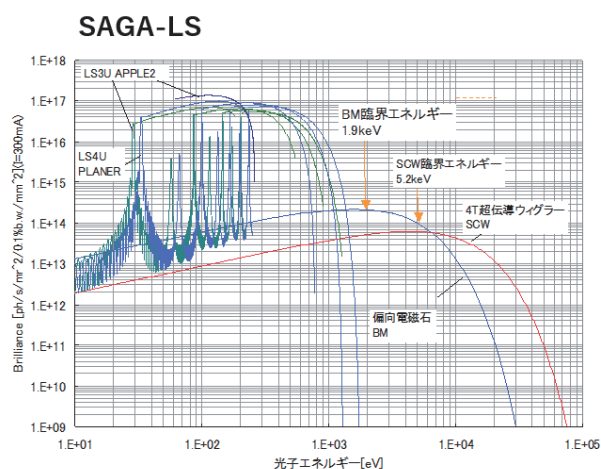
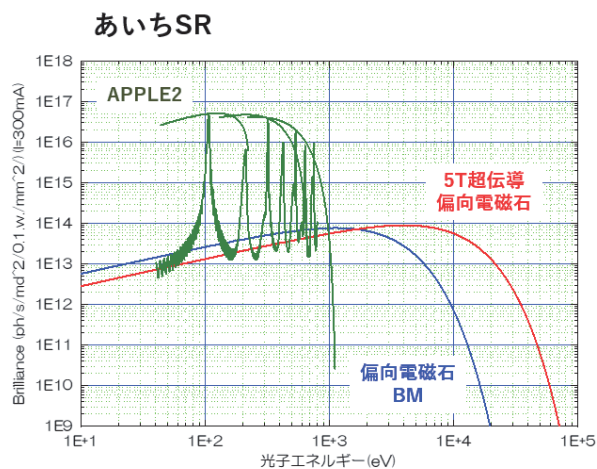


図4 あいちSR(左)とSAGA-LS(右)との電子蓄積リングから放出されるシンクロトロン光の分布

表 1 中型シンクロtron光施設(あいち SR および SAGA-LS)で稼働中のビームライン及び実験手法一覧

あいち SR

ビームライン	光源	単色器	光子エネルギー	主な実験手法	設置者
BL1N2	BM	VLS-PGM	150eV-2keV	軟 X 線 XAFS、光電子分光	ASTF
BL2S1	SCBM	SCM	7keV-17keV	単結晶 X 線回折	名古屋大
BL2S2	SCBM	DCM	5keV-23keV	XAFS、X 線回折、X 線 CT	DENSO
BL5S1	SCBM	DCM	5keV-22keV	硬 X 線 XAFS、蛍光 X 線	ASTF
BL5S2	SCBM	DCM	5keV-23keV	粉末 X 線回折	ASTF
BL6N1	BM	DCM	1.75keV-6keV	軟 X 線 XAFS、光電子分光	ASTF
BL7U	U	VLS-PGM	30eV-850eV	超軟 X 線 XAFS、光電子分光	ASTF
BL8S1	SCBM	SCM	9.1keV、14.3keV、22.7keV	X 線反射率、薄膜表面 X 線回折	ASTF
BL8S2	SCBM	DCM	7keV-24keV	X 線トポグラフィ、X 線 CT	愛知県
BL8S3	SCBM	SCM	8.2keV、13.5keV	広角・小角 X 線散乱	ASTF
BL11S2	SCBM	DCM	5keV-26keV	硬 X 線 XAFS	ASTF

SAGA-LS

ビームライン	光源	単色器	光子エネルギー	主な実験手法	設置者
BL06	BM	DCM	2.1keV-23keV	XAFS、X 線小角散乱	九州大
BL07	W	DCM、白色	5keV-35keV、白色(8keV)	X 線回折、XAFS、X 線 CT	佐賀県
BL09	BM	白色、CCM	白色(5keV)、5keV-20keV	X 線トポグラフィ、照射	佐賀県
BL10	U	VLS-PGM	40eV-900eV	PEEM、ARPES、XAFS	佐賀県
BL11	BM	DCM	2.1keV-23keV	XAFS、X 線小角散乱	佐賀県
BL12	BM	VLS-PGM	40eV-1500eV	X 線光電子分光、XAFS	佐賀県
BL13	U	VLS-PGM	34eV-800eV	X 線光電子分光	佐賀大
BL15	BM	DCM	3.5keV-23keV	XAFS、X 線回折、X 線トポグラフィ	佐賀県
BL16	W	DCM	2keV-35keV	XAFS、X 線回折	SEI
BL17	BM	VLS-PGM	50eV-2000eV	X 線光電子分光、XAFS	SEI

BM: 偏向電磁石、SCBM: 超伝導偏向電磁石、U: アンジュレータ、W: 超伝導ウイグラー、VLS-PGM: 不等間隔平面回折格子、SCM: 一結晶分光器、DCM: 二結晶分光器、CCM: チャンネルカット型分光器。

DENSO: 株式会社デンソー、SEI: 住友電気工業株式会社、ASTF: 公益財団法人科学技術交流財団

積リングの 3 台の電子加速器が設置されている。一方、**図 3** に示したように、SAGA-LS には最大 270MeV まで電子を加速することができる直線加速器と直線加速器から入射された電子を 1.4GeV まで加速、蓄積するための電子蓄積リングの 2 台の電子加速器が設置されている。

図 4 はこれらの電子蓄積リングで発生するシンクロtron光の分布を示す。エネルギーの低い X 線から、エネ

ルギーの高い X 線まで、幅広いエネルギーの X 線を利用者に供給することができる。高エネルギー側の X 線の限度は電子のエネルギーで決まる。産業界では、材料の構造評価など様々な材料分析で、高エネルギーの X 線を利用していることから、あいち SR や SAGA-LS の蓄積リングで、電子のエネルギーが 1GeV を超える非常に大きなエネルギーを持つようにしたのは、このことからである。シンクロtron光は、蓄積リングに設置された偏向

電磁石で電子の進行方向を変えたときに、その接線方向に放出される。一方、シンクロtron光の発生に蓄積リングの長直線部に設置されたアンジュレータやウィグラーといった挿入光源も用いられている。加速器の運転は、月曜日から金曜日まで行われ、火曜日から金曜日まで、1日あたり10時間程度がシンクロtron光の利用に使われている。

放射線発生装置から発生したシンクロtron光を利用者の目的に応じて、エネルギー(波長)を選別したり、形を整えたりする装置をビームラインと呼んでいる。二つのシンクロtron光施設に設置されたビームラインを表1にまとめて示す。エネルギーの選別には結晶や回折格子を利用した分光器が用いられる。高エネルギー(短波長)のX線を単色化するには結晶分光器が用いられる。一方、低エネルギー(長波長)のX線を単色化するには回折格子分光器が用いられる。この他に、X線を集光したり、高エネルギーのX線を除去したりする目的でミラーが用いられる⁷⁾。ビームラインはこのような目的の他に、蓄積リングで発生した制動放射線、すなわち高エネルギーのX線から、利用者の被ばくを防いだり、蓄積リングの真空の悪化を防いだりする役目も担っている⁷⁾。ビームラインに設置された機器の稼働状況はビームラインインターロックシステムで常時監視しており、加速器の運転と連動した運用が行われている⁷⁾。

3. 中型シンクロtron光施設の放射線管理

法令等で定められている放射線発生装置(ここで言う加速器)を設置し、使用するためには、原子力規制委員会の使用許可が必要である。これらの放射線発生装置から発生する放射線は、シンクロtron光はもちろんのこと、高エネルギーの電子ビームがビームダクトや残留ガスとの衝突で発生する制動放射線や μ 粒子線、発生した高エネルギーの制動放射線がビームダクト等に衝突し、原子核との光核反応(γ, n 反応)により発生する中性子線などがある⁸⁾。利用者が安全にシンクロtron光を取り扱う作業を行うために、通常放射線発生装置は厚いコンクリートの遮蔽に覆われた部屋の中に設置される⁸⁾。発生した高エネルギーの放射線の一部は、

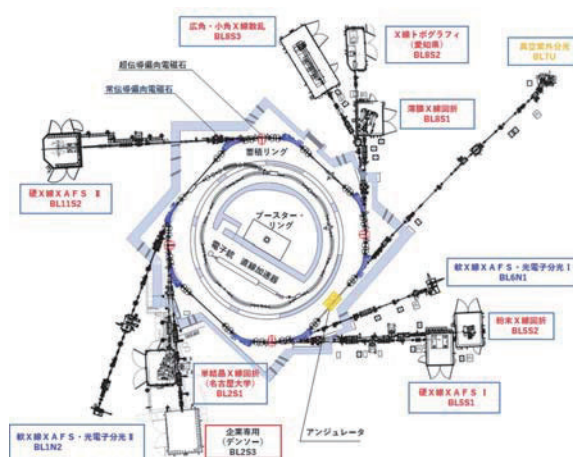


図5 電子蓄積リングの周りに設置されたビームライン(あいちSR)。

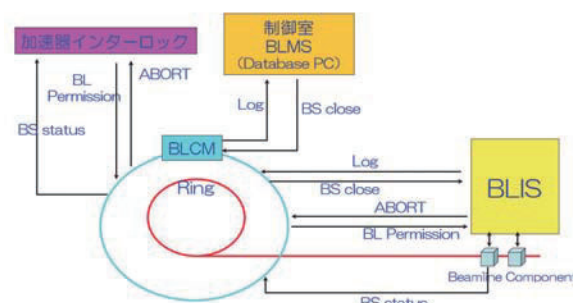


図6 SAGA-LSビームラインインターロックシステムと加速器インターロックシステムとの連携の概念図。

コンクリートの遮蔽を突き抜け、大気中の原子などで散乱されながら広がっていく(グランドシャイン、スカイシャイン)。また一部は、出入口のために設けた迷路や配線や配管のためのダクトを何回も散乱を繰り返しながら広がっていく(迷路ストリーミング、ダクトストリーミング)⁸⁾。シンクロtron光の利用施設では、このような複雑な散乱の効果も考慮した放射線の遮蔽や運転計画を考える必要がある。放射線発生装置が設置された部屋は、運転中に立ち入ることをできなくしたり、人が部屋の中の間は運転ができなくしたりといったインターロックシステムが構築されている。利用者は放射線発生装置が設置された部屋の周りに広がる実験ホールの中で、各施設で設置された様々なビームラインを利用することができる。図5は、あいちSRに設置されたビームラインの様子である。電子ビームの回転方向と同じ、反時計回りにいくつものビームラインが設置されている。使用するX線

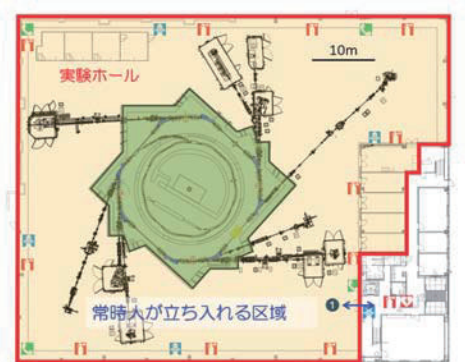


図7 電子蓄積リングの周りに設置されたビームライン(あいち SR)。赤い太線で囲ったエリアが管理区域である。

のエネルギー(波長)によって、ビームラインの構成が異なっている。また、図6はSAGA-LSで採用されたビームラインインターロックシステムと加速器インターロックシステムとの連携を概念的に示したものである。加速器の運転状況によってビームラインの運転許可が与えられたり、また、ビームラインの状況に応じて加速器の運転条件が制限されたりしている。ビームラインの各機器の動作状況は、データベースに保存され、トラブル発生時に過去にさかのぼって原因究明等に役立っている。このように、ビームラインと加速器の双方が利用者や機器の安全を確認しながらシンクロtron光の利用を行っている。

シンクロtron光施設の実験ホールは放射線管理区域に指定されている。図7と図8はあいちSRおよびSAGA-LSの実験ホール1Fの管理区域を示している。管理区域に出入する場合には、所定の出入口から出入する必要がある。所定の出入口にはカードリーダーが設置され、各人に貸与されたIDカードを読み取ることで、入退室時間が記録され、それと同時に出入口の施錠が解放され、入室又は退室が可能になる。管理区域内の出入口が複数ある場合、どの出入口から入室、退室しても構わない。

放射線管理区域である実験ホール内で実験を行うためには放射線業務従事者としての登録が必要である。中型のシンクロtron光施設における放射線業務従事者の登録者数は、年間500名を超え、登録者の大多数は外部からの利用者である。放射線業務従事者として

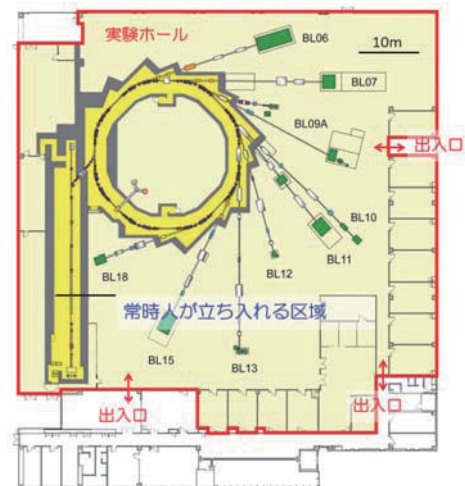


図8 電子蓄積リングの周りに設置されたビームライン(SAGA-LS)。赤い太線で囲ったエリアが管理区域である。

登録するためには、教育・訓練、健康診断の受診、そして被ばく線量の測定が必要である。これらの実施は施設者の義務であるが、外部からの利用者においては、各所属において教育・訓練や健康診断が所属機関で適切に行われていることを確認して、放射線業務従事者の登録を実施している。

放射線発生装置の運転時間は利用許可条件により制限を受けている。あいちSRでは入射した電子数、SAGA-LSでは運転時間で制限される。これらの基準は、常時人が出入り可能な区域、すなわち実験ホールでの線量が規制値を超えないレベルで設定されている。

4. 中型シンクロtron光施設における放射線管理の課題

筆者は、SAGA-LSの放射線発生装置を取り扱う施設の放射線取扱主任者として2019年9月までの約12年間、放射線取扱の管理業務を行ってきた。また、あいちSRでもこの2020年4月から主任者の業務を行っている。ここでは、これまで中型のシンクロtron光施設で行ってきた主任者の経験から感じてきた以下に示した3つの放射線管理の課題について紹介する。

- (1) 放射線管理業務の人材不足
- (2) 放射化物の管理
- (3) 管理区域と放射線業務従事者

(1) 放射線管理業務の人材不足

放射線発生装置の使用では、法令で定められた 6 か月を超えない毎に行う施設点検や日常の点検などの施設の管理や、放射線業務従事者の教育・訓練や登録そして被ばく線量の積算などの管理を行う必要がある。中型及び小型のシンクロtron光施設では、大型のシンクロtron光施設と異なり、放射線管理に専任する職員はまずいない。あいち SR や SAGA-LS 同様に、ほとんどの施設において職員は兼務である。主となる業務の合間に放射線の管理業務を行っており、かなりの負荷となっている。そのような中、2018 年 4 月の法令改正で、業務の改善活動の義務化など新たな管理業務が追加になった。中型のシンクロtron光施設に限ったことではないが、各事業所の活動を陰で支えている放射線の安全管理などを行う間接部門の縮小が進む一方で管理業務が増加すると、事業所の本来の目的が達成できなくなる可能性もでてくる。

(2) 放射化物の管理

シンクロtron光を発生するために建設された電子加速器であっても、電子の加速エネルギーが約 10MeV 以上になると光核反応による放射化の問題が生じる。ここでの放射化はラジオアイソトープの製造を目的とせず副次的に生成した場合を指している。

電子線の場合、衝撃で発生する制動放射線が放射化の原因となる。このため、電子ビームの進行方向に沿って放射化が生じる。偏向電磁石、4 極電磁石や電子ビームスリット下流部に位置する加速管、真空ダクトなどが放射化する。

光核反応で発生した中性子は二次的な放射化を発生させる。中性子は透過力が強く、加速器周辺の機器や建屋にも放射化を引き起こす場合がある。加速器をコンクリートで遮蔽しているが、極微量であるが存在する Eu や Co の中性子捕獲断面積が大きいため、半減期が数年にもわたる Eu-152、Co-60 が検出されることがある。また、加速器の真空ダクトを

構成する SUS においても、Co-60 や Fe-55 のような半減期の長い核種の生成が観測されている⁹⁾。

このような放射化物の取扱いは、以前より問題となっていた。1998 年 10 月 30 日、当時の科学技術庁から「放射線発生装置使用施設における放射化物の取扱いに係るガイドライン」(科学技術庁原子力安全局放射線安全課長通知) が示され、放射化物の取扱いや管理の徹底が求められるようになった¹⁰⁾。さらに、2012 年の法令改正によって、放射化物は放射性同位元素で汚染された物と同等な管理をする義務が課せられた。

放射化物の管理は、それを放射線発生装置から取り外した時点から必要になる。今後、放射線発生装置の老朽化などに伴う装置や遮蔽構造の更新時には、各事業所に多量の放射化物が発生することは容易に想像できる。

放射化物として取扱うか、取扱わないかの基準は、例えば「計算結果により放射化の程度及び部位を評価し、その計算結果の妥当性を測定結果にて確認することにより、放射化物として管理する部位と不要な部位に区分することが可能と考える」(公益財団法人原子力安全技術センター2015 年度放射化物研修会、原子力規制委員会講演資料より)とあるように、それぞれの放射線発生装置使用施設でその基準の検討を行うことが求められている。一方、医療用の線形加速器等の放射線発生装置については、対象となる装置の数が発生装置全体の 9 割を超え、的確な対応を怠れば、社会的な問題が生じる。そのため、文部科学省(当時)が主導して、主要メーカーの装置に対して、放射化物の取扱い上の基準を定めている。しかし、大学等の研究機関が所有する放射線発生装置に対する基準は、放射線発生装置の規模の大小にかかわらず、法令に則して各施設がその状況に応じて決めることが求められている。

放射化物の廃棄にあたっては、例えば、国のクリアランス制度を利用するにおいても、放射性核種や濃度等を独自に求める必要があり、核種を決定するための検出器の準備やかかる時間、そして費用等、単一の施設で抱えるには相当な負担が生じる。シン

クロトロン光施設に限らず、全国には老朽化した加速器がたくさんあり、使われなくなったものや取り外されたもののほとんどはそのまま保管されている。

2000年代初めの大学等研究機関の独法化により、放射化物のような直接事業の発展に貢献しないような物はあまり見向きがされなくなった。一つの事業所での放射化物のような負の遺産への対応は今後ますます難しくなってくることが予想される。現実的な取扱いについて、全国的な協力体制を構築し、解決を図る必要がある。

(3) 管理区域と放射線業務従事者

現在、国内いずれのシンクロトロン光施設においても、シンクロトロン光を利用するためには、放射線業務従事者として登録する必要がある。このことは以前より、多くの利用者から施設側に投げかけられている疑問である。

シンクロトロン光施設のユーザーは加速器を取り扱っているという意識はほとんど無い。単にシンクロトロン光という X 線を利用するだけなのに、何故、放射線業務従事者としての登録や管理をしないといけなくはないのか？という疑問である。実際のところ図 4 にあるように中型シンクロトロン光施設の場合、加速器から放出される X 線のエネルギーは高々 100keV であり、また、表 1 にあるように、利用している X 線のエネルギーは数 10keV がせいぜいである。RI 規制法⁹⁾で放射線として定義される 1MeV を超えることはない。海外では、シンクロトロン光の利用に放射線業務従事者としての登録が必須でない国も多い。

国内で放射線業務従事者の登録を行うためには、施設者側に教育・訓練等様々な義務が生じる。シンクロトロン光施設での放射線業務従事者の登録は、外部からの利用者が大多数であることも特徴である。所属の事情により登録ができず、シンクロトロン光の利用による研究ができないケースも、稀ではあるが年に数例あるのが現状である。良い内容の利用課題であっても、本質ではないところで利用ができな

いのは残念である。

放射線管理区域の設定は、RI 規制法でも電離則¹⁰⁾でも、実効線量が 3 か月で 1.3mSv を超える恐れのある場所は管理区域に設定しなくてはならない。そして、その区域の中で作業を行う者は放射線業務従事者として登録を行う必要がある。一方、シンクロトロン光施設においてこれまでに、筆者の知る限りにおいてこの数値を超えて、もしくは多少であっても被ばくをした例はない。

X 線発生装置の取扱いでは、2001 年 3 月 30 日付け基発第 253 号「労働安全衛生規則及び電離放射線障害防止規則の一部を改正する省令の施行等について」において、「放射線の照射中に労働者の身体の一部又は一部がその内部に入ることのないように遮蔽された構造の放射線装置等を使用する場合であって、放射線装置等の外側のいずれの箇所においても、実効線量が 3 ヶ月につき 1.3mSv を超えないもの」については、当該装置の外側には管理区域が存在しないものとして取り扱って差し支えないこと。ただし、その場合であっても、装置の内部には管理区域が存在するので、「標識によって明示」することは必要であること。」と、示された。

また、電離則第 4 条で「放射線業務従事者」は「管理区域内において放射線業務に従事する労働者」と規定されている。実効線量が 3 ヶ月につき 1.3mSv を超えないように X 線発生装置を適切な遮蔽で覆い、また、インターロックシステムにより、扉開閉と X 線の照射とを連動させ、すなわち扉が開いている時には放射線業務を行わないように X 線の発生を止めることができれば、X 線発生装置において X 線作業主任者の選任や放射線業務従事者としての登録の必要がなくなった。

放射線業務従事者として登録しないのであれば、特別教育(同 52 条)は必要だが、被ばくによる線量管理(同 8 条)や特別健康診断(同 56 条)は不要になり、管理が容易になる。

シンクロトロン光施設の使用では、原子力規制委員会の使用許可をもらうことになる。この時、放射線発生装置の運転条件等を設定し、管理区域内の線量評価を行っている。初期の申請では、実物としての放射線発生装置がまだないことから、線量評価は

計算を用いて行うことが多い。そして、この計算では万が一の確率でしか起こり得ないような運転状況を設定する。このことにより、明らかに過剰な評価をしているところもある。一方、あいち SR にしても、SAGA-LS にしても運用が始まって数年以上が経過し、実際の運転条件での線量評価が可能になっている。実際の放射線発生装置を用いて、適切な線量評価と遮蔽構造の構築、そして放射線発生装置と連動したインターロックシステムを構築することで、利用者の立ち入ることのできる実験ホールを放射線管理区域から外すことができるはずである。

5. おわりに

現在、全国 8 か所でシンクロtron光施設が運用されている。シンクロtron光の利用は、以前は限られた研究者しか利用ができない状況であった。しかし、今は利用したいという意思があれば、適切な手続きを経たのちに大学、研究機関、民間企業等、誰もが利用できる施設になっている。利用者の拡大により、様々な目的を持った利用者による利用が行われ、施設者側が予想もしなかった利用分野からの要望も数多く寄せられている。このような要望は施設の今後の発展に欠かすことはできないものである。

利用者に気軽に施設に足を運んでもらい、利用してもらうためには、利用制度の分かり易さ、施設への信頼、煩雑な手続きの簡素化など、技術的な側面以外の充実も必要である。利用者や利用分野の裾野を広げるために、あいち SR を始めとする国内シンクロtron光施設において、このような取り組みの幾つかは既に行っている。利用者だけではなく社会の安全を担保したうえで、利用者の利便性を妨げる種々の課題については、常に解決に向けた努力が必要である。

今後も、利用者の利便性を高める取り組みを継続的にを行いながら、あいち SR を始め国内のシンクロtron光施設においても、持続可能な施設として発展を目指していきたいと考えている。

謝辞:ビームラインの利用や放射線管理において、これまで多くの協力や助言をいただいたあいち SR および SAGA-LS の職員の皆様に感謝いたします。また、加速器施設の放射線管理の実務において、九州大学の百島則幸先生(現、九環協理事長)、杉原真司先生には多くのご助言をいただきました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) 国内のシンクロtron光施設の詳細は、それぞれの施設が公開している Web ページを参考にされたい。
Photon Factory: <https://www2.kek.jp/imss/pf/>,
UVSOR: <https://www.uvsor.ims.ac.jp/>, あいち SR: <http://www.astf-kha.jp/synchrotron/>, Rits-SR: <http://www.ritsumei.ac.jp/acd/re/src/index.htm>,
SPring-8: <http://www.spring8.or.jp/ja/>,
NewSUBARU: <http://www.lasti.u-hyogo.ac.jp/NS/>,
HiSOR: <http://www.hsrc.hiroshima-u.ac.jp/>,
SAGA-LS: <http://www.saga-ls.jp/main/>.
- 2) 中村史朗, 岡田浩一: ソルテック 1GeV 放射光源施設, 放射光, 3(2), 127-142(1990).
- 3) 石井武比古: タイ放射光施設の建設, 加速器, 2(1), 54-57 (2005). 磯山悟朗: タイ放射光施設の顛末, 加速器, 2(4), 523-535 (2005).
- 4) 上坪宏道: わが国の放射光科学の歩み(1), 放射光, 20(1), 3-17 (2007).
- 5) 平井康晴: 九州シンクロtron光研究センターの利用展開について, 放射光, 20(6), 375-382 (2007). 岩崎能尊, et. al., : SAGA Light Source の現状, 加速器, 10(3), 155-165 (2013).
- 6) 高嶋圭史, et. al., : 中部シンクロtron光施設(仮称)計画, 放射光, 21(1), 10-19 (2008). 保坂将人, et. al., : あいちシンクロtron光センターの現状, 加速器, 13(1), 18-24 (2016).
- 7) 大橋治彦, 平野馨一編 (2019): 改訂版・放射光ビームライン光学技術入門～はじめて放射光を使う利用者のために 日本放射光学会.
- 8) 中村尚司(2001): 放射線物理と加速器安全の工学 地人書館.

- 9) 柴田徳思:使用を停止した加速器の放射化の問題, RADIOISOTOPS, 48, 208-215 (1999). 上叢義朋:放射化と表面線量率の関係, 日本放射線管理学会誌, 12(1), 36-40 (2013).
- 10) <https://www.nsr.go.jp/data/000045571.pdf>
- 11) 放射性同位元素等の規制に関する法律。2019 年 8 月 31 日までは、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.
- 12) 電離放射線障害防止規則.