

電子ライナック施設における加速器室内のエアロゾル環境

沖 雄一、長田直之¹、森 達哉²、柴田誠一、世良耕一郎³

京都大学原子炉実験所
590-0494 大阪府泉南郡熊取町朝代西 2 丁目 1010

¹ 京都大学大学院工学研究科
615-8530 京都市西京区京都大学桂

² 京都大学工学部
606-8501 京都市左京区吉田本町

³ 岩手医科大学サイクロトンセンター
020-0173 岩手県岩手郡滝沢村滝沢字留が森 348-58

1 はじめに

近年の加速器の進歩は目覚しく、多くの大強度、高エネルギーの加速器が稼動するようになった。これらの加速器では従来と異なり、放射線管理上、強い放射化や多種類の放射性核種の生成に特に注意を払う必要がある。放射線安全の確保は、外部被曝のみならず内部被曝の防護の観点からも重要である。最近は中性子源などとして使用される加速器に、小型ながらも原子炉に匹敵するような中性子発生量を有するものが可能となっており、従来ほとんど無視できた加速器室内に存在するエアロゾル(ダスト)の放射化も、作業者の内部被曝管理や排気浄化装置の設計および維持の観点から再評価する必要があると思われる。

一方、加速器運転中には、加速器室内の空気が放射化して放射性ガスや放射性エアロゾルが発生している。放射性エアロゾルは、加速器室内の高線量場において空気分子の電離により開始する放射線化学反応によりエアロゾル粒子が発生し、その生成の過程などで放射性核種を取り込む(付着や溶解など)ことにより生成すると考えられている。これまで加速器室内で生成する放射性エアロゾルについて、近藤ら¹⁾による⁷Be エアロゾルの粒径分布測定などが報告されている。

このように運転中の加速器室内には起源の異なる種々の大気浮遊放射性核種が存在しているが、それらを総合的に議論した報文はあまりない。本報では、内部被曝線量の評価や排気浄化設備の設計に必要な情報である、放射性エアロゾル粒子の粒径と放射能濃度を考察するための基礎データとして、加速器室に常時存在するエアロゾル(主に放射化により放射性エアロゾルとなる)と、加速器運転中に生成するエアロゾル(放射性核種を取り込み放射性エアロゾルとなる)の双方について、粒径分布と濃度の測定を行った。常時存在するエアロゾルについては、PIXE 分析により元素別の粒径分布を測定した。以下では未だ予備的な段階ではあるが、電子ライナック施設においてこれらのエアロゾルを測定した結果を述べる。

2 実験

2.1 加速器室内に常時存在するエアロゾル

実験は京都大学原子炉実験所 46 MeV 電子ライナックで行った。加速器室内空気に常時存在するエアロゾルの分析のために、加速器が運転を停止している期間中に、エアロゾルを含む加速器室内空気を数日間カスケードインパクターを用いて吸引し、粒径別にエアロゾルを捕集した。用いたカスケードインパクターはジャッキアップ型(引出し方式)のもの(東京ダイレック社製、LP2015J型)で、吸引流量は 23.1 L/min、56 nm から 14 μm までを 14 段階に分級できる。インパクターは、あらかじめ行った京都大学原子炉実験所内の臨界集合体棟の大容積の空間を利用した較正実験により、各ステージのノズルと捕集板の間隔を最適化してから用いた。また、各粒径ステージの捕集材としては、PIXE 分析に影響を与えないポリカーボネートフィルターを用いた。

カスケードインパクターを用いた試料採取では、各ステージの試料はポリカーボネートフィルター上に直径 1~2 mm 程度のスポット状に捕集される。そのスポットのあるフィルター部分を切り取りサンプルホルダーに貼付した後、日本アイソトープ協会仁科記念サイクロトロンセンターにて陽子線を照射し、PIXE 分析を行った。基本的にスポット状試料の分析法を用いて、多元素の同時定量を行った。それぞれのステージ毎に複数の試料を測定し、定量されたスポットの個数と各ステージの全スポットの個数より、各粒径範囲の元素重量の平均値を算出した。

2.2 加速器運転中に生成するエアロゾル

加速器運転中に生成するエアロゾルを、上記の常時存在するエアロゾルと分離して観測するために、加速器のビームライン終端のタンタルターゲット後方に、空気照射用のステンレス鋼のフレキ管をビームラインに直交するように配置して管内で空気照射を行った。HEPA フィルター等によりエアロゾルを除去した空気を加速器室外の実験室からフレキ管に導入して照射し、照射された空気を加速器室外に再び導き、エアロゾル測定に供した。エアロゾル測定では、Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS、TSI 社製 Model 3936A)、またはスクリーン型の拡散バッテリーと Condensation Particle Counter (CPC、TSI 社製 Model 3025A)を組み合わせたシステムによりエアロゾルの粒径分布および個数濃度を測定した。なお、実験時の代表的なビーム条件は、加速電子エネルギー: 30 MeV、電流値: 約 90 μA であった。実験は電子線をタンタルターゲットに衝突させ、フレキ管は主に制動放射線により照射される条件で行った。

3 結果および考察

3.1 常時存在するエアロゾルの PIXE 分析

PIXE 分析の結果、Al、Si、S、Ca、Fe、K、Mo、Zn、Ni、Pb、Cu、Br、Rb の粒径分布を得ることができた。濃度の上位 6 元素の質量基準粒径分布を図 1 に、3.2 で説明する加速器運転中に生成するエアロゾルの粒径分布とともに示した。横軸は空気力学的粒径であり、縦軸はインパクターの各ステージに捕集された元素の空气中質量濃度(ng/cm^3)を各ステージの粒径範囲で除算して得られる質量基準の粒径分布である。加速器室内においても一般の環境と同様の元素が検出されているが、今回の測定では検出された元素のうちアルミニウムの濃度が最も高かった。

粒径は基本的に約 1 μm を中央値とする分布となった。本ライナック施設においては加速器室の換気は加速器運転停止中のみ行われ、加速器運転中は停止されている。給気側には粗塵フィルターが設置されているのみであり、人の出入口にも外気の侵入を防ぐ機構はないため、加速器室内のエアロゾルは基本的には外気に近い組成や粒径を有すると考えられる。定量された元素のうち外気と同様に、1 μm 程度の比較的大きな中央径をもつ Si、Ca は砂塵、Fe や Zn は自動車の走行など人間活動に伴い生成する粒子、それらよりも小さな中央径の S、Pb、Br 等は大気中で太陽光により起こる光化学反応で生成した微粒子と考えられる²⁾。

加速器室内では、照射時に空気中で生成する硝酸などにより金属機器の腐食が問題となる。この傾向は電子系加速器において顕著であって、一般にアルミニウム素材の被覆や機器類の腐食は激しい。本実験を行った電子ライナックは、運転開始から44年を経て、近年むしろ年間運転時間が増加傾向にある(年間運転時間: 約2500時間)高稼働率の施設であって、加速器の維持、安全の確保にとり腐食の問題は極めて重要である。今回、空気中のAl濃度が他の元素と比較して大きかった事例は、加速器室内のAlの腐食が関係している可能性がある。

3.2 加速器運転中に生成するエアロゾル

加速器の運転で生成するエアロゾルをSMPSで測定した。この測定結果については一部をすでに発表しており³⁾、以下ではそのデータをもとに常時存在するエアロゾルと比較する。運転中に生成するエアロゾルは、対数正規で表すことのできる粒径分布を持ち開始10分後の時点で幾何中央径が25 nm、幾何標準偏差が2、個数濃度は 2.3×10^5 個/cm³と測定された。このエアロゾル粒子を、水の微小液滴であるとして、得られた個数基準粒径分布を質量基準粒径分布に変換し、図1に上述の常時存在するエアロゾルの粒径とともに示した。

加速器で生成したエアロゾルは常時存在するエアロゾルよりも個数濃度では圧倒的に多く、常時存在するエアロゾルは1 cm³あたり数千個に留まったのに対し、加速器生成エアロゾルは数百万個に達した。質量を基準として考えると、加速器生成エアロゾルは 1.5×10^2 ng/cm³となった。常時存在するエアロゾル成分のうち、最も多いAlは 8×10^3 ng/cm³であった。この加速器生成エアロゾルは照射時間の経過につれて次第に粒径が増大していき、個数基準分布で100~200 nm程度の粒径を持つものが多くなる。運転を停止すると、再び微小粒径の加速器エアロゾルが高濃度で生成し成長する過程が開始する。

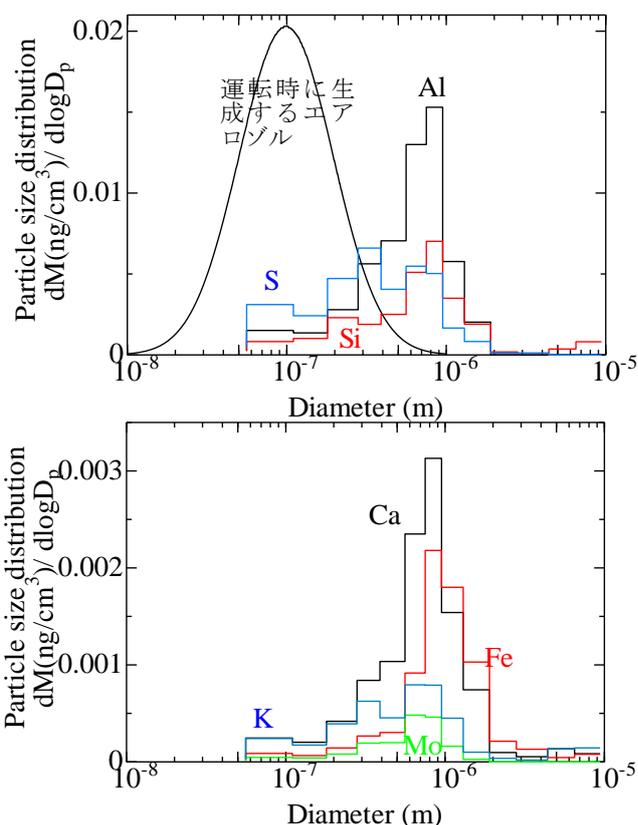


図1 加速器室内で検出された主なエアロゾル成分の粒径分布

4 まとめ

運転時の加速器室内に存在するエアロゾルの粒径と濃度を、電子ライナック施設で測定し予備的な検討を行った。加速器室内空气中に常時存在するエアロゾルと加速器運転時に生成するエアロゾルとは、中央径を異にすることが改めて示された。本データは加速器室内での放射性エアロゾルの生成機構、生長機構、放射性核種の輸送機構などの理解にとり有益であり、作業者の内部被曝評価や排気浄化設備の設計等に役立つと期待される。

参考文献

- 1) K. Kondo, H. Muramatsu, Y. Kanda and S. Takahara, Int. J. Appl. Radiat. Isot., **35**, (10), 1984, 939-944
- 2) K. R. Spurny (ed.), Analytical chemistry of Aerosols, Chapter 6, Lewis Publishers, 1999
- 3) S. Yokoyama, K. Yamasaki, Y. Oki and N. Osada, 保健物理, **43** (4), 2008, 333-340

Aerosol environment in accelerator rooms of electron linac facilities

Y. Oki, N. Osada¹, T. Mori², S. Shibata and K. Sera³

Research Reactor Institute, Kyoto University
Kumatori, Osaka 590-0494, Japan

¹Graduate School of Engineering, Kyoto University
Kyoto daigaku-Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8530, Japan

²Faculty of Engineering, Kyoto University
Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan

³Cyclotron Research Center, Iwate Medical University
348-58 Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0173, Japan

Abstract

In accelerator facilities, there are two kinds of aerosols in air of accelerator rooms during machine operation. One is aerosols (dusts) brought from outside, the other is nano-particles produced through radiation-induced chemical reactions from air in high radiation areas in the accelerator rooms. Their particle size and concentration are basic information on evaluation of airborne radioactivity and internal radiation exposure. In this report, the particle size and concentration were measured for both of the two kinds of aerosols in an electron linear accelerator (Linac) facility.