

TCVN

TIÊU CHUẨN QUỐC GIA

**TCVN 12020:2017
ISO/ASTM 51608:2015**

Xuất bản lần 1

**BẢO VỆ BỨC XẠ - THỰC HÀNH ĐO LIỀU TRONG MỘT SỐ
CƠ SỞ XỬ LÝ BỨC XẠ BẰNG TIA X (BỨC XẠ HÃM) VỚI
NĂNG LƯỢNG TRONG KHOẢNG TỪ 50 KEV ĐẾN 7,5 MEV**

*Practice for dosimetry in an X-ray (bremsstrahlung) facility for radiation processing at energies
between 50 keV and 7.5 MeV*

HÀ NỘI - 2017

Lời nói đầu

TCVN 12020:2017 hoàn toàn tương đương với ISO/ASTM 51608:2015.

TCVN 12020:2017 do Tiểu Ban kỹ thuật tiêu chuẩn quốc gia TCVN/TC 85/SC2 *Bảo vệ bức xạ* biên soạn, Tổng cục Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng đề nghị, Bộ Khoa học và Công nghệ công bố

Bảo vệ bức xạ – Thực hành đo liều trong một cơ sở xử lý bức xạ bằng tia X (bức xạ hãm) với năng lượng trong khoảng từ 50 keV đến 7,5 MeV

Practice for dosimetry in an X-ray (Bremsstrahlung) facility for radiation processing at energies between 50 KeV and 7,5 MeV

1 Phạm vi áp dụng

1.1 Tiêu chuẩn thực hành này đưa ra các quy trình đo liều phải tuân theo trong quá trình chứng nhận chất lượng việc lắp đặt, chứng nhận chất lượng vận hành, chứng nhận chất lượng làm việc và công việc xử lý thường quy tại một cơ sở chiếu xạ bằng tia X (bức xạ hãm). Các quy trình khác liên quan đến chứng nhận chất lượng vận hành, chứng nhận chất lượng làm việc và hoạt động xử lý thường quy mà có thể ảnh hưởng đến liều hấp thụ trong sản phẩm cũng được đề cập.

CHÚ THÍCH 1: Đo liều chỉ là một thành phần của một chương trình đảm bảo chất lượng tổng thể gắn với các thực hành sản xuất tốt được sử dụng trong các ứng dụng xử lý bức xạ.

CHÚ THÍCH 2: Các thực hành ISO/ASTM 51649, TCVN 8769 (ISO/ASTM 51818) và TCVN 11435 (ISO/ASTM 51702) mô tả các quy trình đo liều cho các cơ sở xử lý bức xạ bằng chùm tia điện tử và thiết bị gamma.

1.2 Để tiết trùng các sản phẩm y tế, xem TCVN 7393-1 (ISO 11137-1) *Tiệt khuẩn sản phẩm chăm sóc sức khỏe - Bức xạ - Phần 1: Yêu cầu triển khai, đánh giá xác nhận và kiểm soát thường quy quá trình tiệt khuẩn đối với thiết bị y tế*. Trong những nội dung được đề cập bởi TCVN 7393-1 (ISO 11137-1), tiêu chuẩn đó sẽ được ưu tiên.

1.3 Đối với chiếu xạ thực phẩm, xem ISO 14470, *Chiếu xạ thực phẩm - Các yêu cầu về xây dựng, xác nhận và kiểm soát thường quy quá trình chiếu xạ sử dụng bức xạ ion hoá để xử lý thực phẩm*. Trong những nội dung được đề cập bởi ISO 14470, tiêu chuẩn đó sẽ được ưu tiên.

1.4 Tiêu chuẩn này là một phần của bộ tiêu chuẩn đưa ra các khuyến nghị để thực hiện và sử dụng một cách phù hợp việc đo liều trong quá trình xử lý bức xạ. Tiêu chuẩn này được áp dụng cùng với ISO/ASTM 52628, "*Thực hành đo liều trong xử lý bức xạ*".

TCVN 12020:2017

1.5 Trái ngược với bức xạ gamma đơn năng, phổ tia X trải dài từ các giá trị thấp (khoảng 35 keV) đến năng lượng cực đại của các điện tử tới đập vào bia tia X (xem Điều 5 và Phụ lục A1).

1.6 Thông tin về giới hạn liều hiệu dụng hoặc giới hạn liều pháp quy và giới hạn năng lượng đối với các ứng dụng tia X không nằm trong phạm vi của tiêu chuẩn này.

1.7 Tiêu chuẩn này không đề cập đến các quy tắc an toàn liên quan đến việc áp dụng tiêu chuẩn. Người sử dụng tiêu chuẩn này phải có trách nhiệm lập ra các quy định thích hợp về an toàn và sức khỏe, đồng thời phải xác định khả năng áp dụng các giới hạn quy định trước khi sử dụng.

2 Tài liệu viện dẫn

Các tài liệu viện dẫn sau rất cần thiết cho việc áp dụng tiêu chuẩn này. Đối với các tài liệu viện dẫn ghi năm công bố thì áp dụng phiên bản được nêu. Đối với các tài liệu viện dẫn không ghi năm công bố thì áp dụng phiên bản mới nhất, bao gồm cả các sửa đổi, bổ sung (nếu có).

TCVN 7393-1 (ISO 11137-1) *Tiệt khuẩn sản phẩm chăm sóc sức khỏe - Bức xạ - Phần 1: Yêu cầu triển khai, đánh giá xác nhận và kiểm soát thường quy quá trình tiệt khuẩn đối với thiết bị y tế*

TCVN 8230 (ISO/ASTM 51539) *Tiêu chuẩn hướng dẫn sử dụng dụng cụ chỉ thị bức xạ;*

TCVN 8234 (ISO/ASTM 51702) *Tiêu chuẩn thực hành đo liều áp dụng cho thiết bị chiếu xạ gamma dùng để xử lý bằng bức xạ;*

TCVN 8769 (ISO/ASTM 51818) *Tiêu chuẩn thực hành đo liều áp dụng cho thiết bị xử lý chiếu xạ bằng chùm tia điện tử có năng lượng từ 80 keV đến 300 keV;*

TCVN 9595-3:2013 (ISO/IEC Guide 98-3:2008)¹⁾, *Độ không đảm bảo đo - Phần 3: Hướng dẫn trình bày độ không đảm bảo đo (GUM:1995);*

TCVN 11435 (ISO/ASTM 52701) *Hướng dẫn xác định đặc trưng làm việc các liều kế và hệ đo liều sử dụng trong xử lý bức xạ*

TCVN 12019 (ISO/ASTM 51261) *Bảo vệ bức xạ - Thực hành hiệu chuẩn hệ đo liều thường quy cho xử lý bức xạ*

TCVN 12021 (ISO/ASTM 51707) *Bảo vệ bức xạ - Hướng dẫn đánh giá độ không đảm bảo đo trong đo liều xử lý bức xạ*

ASTM E170 *Terminology relating to radiation measurements and dosimetry (Thuật ngữ liên quan đến đo bức xạ và đo liều)*

ASTM E2232 *Guide for selection and use of mathematical methods for calculating absorbed dose in radiation processing applications (Hướng dẫn lựa chọn và sử dụng các phương pháp toán học để tính liều hấp thụ trong các ứng dụng xử lý bức xạ)*

¹⁾ TCVN 9595-3:2013 (ISO/IEC Guide 98-3:2008) hoàn toàn tương đương với JCGM 100:2008, GUM 1995.

ASTM E2303 *Guide for absorbed-dose mapping in radiation processing facilities* (Hướng dẫn lập bản đồ liều hấp thụ trong các cơ sở xử lý bức xạ)

ISO/ASTM 51649 *Practice for dosimetry in an electron beam facility for radiation processing at energies between 300 keV and 25 MeV* (Thực hành cho đo liều trong một cơ sở xử lý bức xạ bằng chùm điện tử với năng lượng từ 300 keV đến 25 MeV)

ISO/ASTM 52628 *Practice for dosimetry in radiation processing* (Thực hành đo liều trong xử lý bức xạ)

ISO 14470 *Food irradiation -- Requirements for the development, validation and routine control of the process of irradiation using ionizing radiation for the treatment of food* (Chiếu xạ thực phẩm - Các yêu cầu về xây dựng, xác nhận và kiểm soát thường quy quá trình chiếu xạ sử dụng bức xạ ion hoá để xử lý thực phẩm);

ICRU Report 14 *Radiation Dosimetry: X Rays and Gamma Rays with Maximum Photon Energies Between 0,6 and 50 MeV* (Đo liều bức xạ: Tia X và Tia Gamma với năng lượng photon lớn nhất từ 0,6 đến 50 MeV)

ICRU Report 34 *The Dosimetry of Pulsed Radiation* (Đo liều đối với bức xạ xung);

ICRU Report 35 *Radiation Dosimetry: Electron Beams with Energies Between 1 and 50 MeV* (Đo liều bức xạ: Chùm điện tử với năng lượng từ 1 đến 50 MeV);

ICRU Report 37 *Stopping Powers for Electrons and Positrons* (Năng lượng hãm các điện tử và positron);

ICRU Report 80 *Dosimetry systems for use in Radiation processing* (Hệ đo liều sử dụng trong xử lý bức xạ);

ICRU Report 85a *Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation* (Các đại lượng và đơn vị cơ bản cho bức xạ ion hóa);

3 Thuật ngữ

3.1 Định nghĩa

3.1.1

Liều hấp thụ (D) (absorbed dose)

Năng lượng bức xạ ion hoá truyền cho một đơn vị khối lượng của một khối vật chất xác định. Trong hệ đơn vị SI của liều hấp thụ là gray (Gy), trong đó 1 gray tương đương với sự hấp thụ 1 jun trên kg khối chất đó (1Gy = 1 J/kg). Mối quan hệ toán học là thương số của $d\epsilon$ trên dm , trong đó $d\epsilon$ là giá trị năng lượng trung bình truyền bởi bức xạ ion cho khối vật chất có khối lượng dm (xem ICRU Report 85a).

$$D = d\epsilon/dm \quad (1)$$

3.1.2

Độ dài chùm tia (beam length)

Kích thước của vùng chiếu xạ dọc theo hướng chuyển động của sản phẩm, tại một khoảng cách nhất định từ cửa sổ máy gia tốc.

CHÚ THÍCH: Chiều dài chùm tia vuông góc với độ rộng chùm và trục chùm tia điện từ. Trong trường hợp sản phẩm đứng yên trong quá trình chiếu xạ, 'chiều dài chùm tia' và 'chiều rộng chùm tia' có thể hoán đổi cho nhau.

3.1.3

Độ rộng chùm tia (beam width)

Kích thước của vùng chiếu xạ vuông góc với hướng chuyển động của sản phẩm, tại một khoảng cách nhất định từ cửa sổ máy gia tốc.

Giải thích Xem minh họa hình ảnh tại ISO/ASTM 51649. Thuật ngữ này thường áp dụng cho chiếu xạ chùm tia điện từ.

3.1.4

Bức xạ hãm (beamsstrahlung)

Bức xạ điện từ phổ rộng phát ra khi một hạt tích điện mang năng lượng bị tác động bởi một điện trường hoặc từ trường mạnh, như trường trong vùng lân cận của một hạt nhân nguyên tử.

Giải thích Trong xử lý bức xạ, các photon bức xạ hãm có năng lượng đủ để gây ra ion hóa được tạo ra bởi sự giảm tốc hoặc lệch hướng của điện tử mang năng lượng trong vật liệu bia. Khi một điện tử đi gần qua một hạt nhân nguyên tử, trường Coulomb mạnh sẽ làm cho điện tử đi lệch khỏi hướng chuyển động ban đầu của nó. Tương tác này dẫn đến việc mất động năng do phát xạ bức xạ điện từ. Các tương tác như vậy không thể kiểm soát được và chúng tạo ra phân bố năng lượng photon liên tục trải dài đến động năng cực đại của điện tử tới. Phổ năng lượng bức xạ hãm phụ thuộc vào năng lượng điện tử, thành phần và độ dày của bia tia X và hướng phát xạ của góc photon phát xạ ứng với điện tử tới.

3.1.5

Trạng thái cân bằng hạt tích điện (charged-particle equilibrium) (được xem là trạng thái cân bằng điện từ trong trường hợp các điện tử sinh ra do chiếu xạ một vật liệu bằng chùm photon)

Điều kiện trong đó động năng của các hạt tích điện (hoặc các điện tử), không bao gồm khối lượng nghỉ, đi vào một thể tích rất nhỏ của vật liệu bị chiếu xạ bằng với động năng của các hạt tích điện (hoặc các điện tử) thoát ra từ nó.

3.1.6

Tỷ số đồng nhất liều (dose uniformity ratio)

Tỉ số của liều hấp thụ lớn nhất trên liều hấp thụ nhỏ nhất trong sản phẩm bị chiếu xạ.

Giải thích Khái niệm này còn được gọi là tỉ số liều max/min.

3.1.7**Liều kế (dosimeter)**

Vật dụng khi bị chiếu xạ sẽ chỉ thị sự thay đổi có thể định lượng liên quan đến liều hấp thụ trong vật liệu cho trước bằng các dụng cụ đo và quy trình đo thích hợp.

3.1.8**Đáp ứng liều kế (dosimeter response)**

Hiệu ứng có thể định lượng và tái lập được tạo ra trong liều kế bởi bức xạ ion hoá.

3.1.9**Hệ đo liều (dosimetry system)**

Hệ thống được sử dụng để đo liều hấp thụ, bao gồm liều kế, dụng cụ đo và các chuẩn quy chiếu liên quan của chúng và các quy trình sử dụng hệ.

3.1.10**Năng lượng hạt điện tử (electron energy)**

Động năng của một điện tử.

Giải thích Đơn vị thường sử dụng là electronvôn (eV), kiloelectronvôn (keV), hoặc megaelectronvôn (MeV). 1 eV là động năng thu được bởi một điện tử gia tốc qua một hiệu điện thế 1 V. 1 eV bằng năng lượng $1,602 \cdot 10^{-19}$ jun.

3.1.11**Phổ năng lượng điện tử (electron energy spectrum)**

Phân bố thông lượng hạt của các hạt điện tử như là một hàm của năng lượng.

3.1.12**Chứng nhận chất lượng lắp đặt (IQ) (installation qualification)**

Quá trình thu thập và lập hồ sơ chứng tỏ rằng thiết bị đã được cung cấp và lắp đặt phù hợp với các yêu cầu kỹ thuật của nó.

3.1.13**Thùng chiếu xạ (irradiation container)**

Cơ cấu dùng để đặt sản phẩm vào trong quá trình chiếu xạ.

Giải thích "Thùng chiếu xạ" thường được gọi đơn giản là "Thùng" và có thể là thùng chuyên chở, xe đẩy, khay đựng, thùng cactông đựng hàng, pallet, thùng đựng hàng hoặc vật chứa khác.

3.1.14**Hệ thống quản lý đo (measurement management system)**

Tập hợp các yếu tố có liên quan lẫn nhau hoặc tác động lẫn nhau để đạt được sự khẳng định về đo lường và kiểm soát liên tục của các quá trình đo.

3.1.15

Chứng nhận chất lượng vận hành (OQ) (operational qualification)

Quá trình thu thập và lập hồ sơ chứng tỏ thiết bị đã được lắp đặt hoạt động trong giới hạn đã định trước khi được sử dụng theo đúng các quy trình vận hành của nó.

3.1.16

Chứng nhận chất lượng làm việc (PQ) (performance qualification)

Quá trình thu thập và lập hồ sơ chứng tỏ thiết bị lắp đặt và vận hành theo đúng các quy trình vận hành luôn bảo đảm tính năng làm việc phù hợp với các tiêu chuẩn đã được xác định trước và tạo ra sản phẩm đáp ứng với yêu cầu kỹ thuật của nó.

3.1.17

Khối xử lý (process load)

Khối vật liệu với một cấu hình tải quy định được chiếu xạ như một thực thể duy nhất.

3.1.18

Nhóm xử lý (processing category)

Nhóm của sản phẩm khác nhau có thể được xử lý cùng nhau.

Giải thích Ví dụ, nhóm xử lý có thể dựa theo thành phần, mật độ hoặc yêu cầu về liều.

3.1.19

Vật liệu quy chiếu (reference material)

Vật liệu đồng nhất có đặc tính hấp thụ và tán xạ đã biết được sử dụng để xác định các đặc tính của quá trình chiếu xạ, như độ đồng nhất của việc quét, phân bố liều theo chiều sâu, suất thông lượng và khả năng tái lập liều đưa vào.

3.1.20

Sản phẩm mô phỏng (simulated product)

Vật liệu với đặc tính tán xạ và làm suy giảm bức xạ tương tự như các đặc tính của sản phẩm, vật liệu hoặc chất được chiếu xạ.

Giải thích Sản phẩm mô phỏng được sử dụng trong quá trình mô tả đặc tính của thiết bị chiếu xạ như một vật thay thế cho sản phẩm, vật liệu hoặc chất được chiếu xạ thực tế. Khi được sử dụng trong các đợt sản xuất thường xuyên để bù đắp cho sự không có mặt của sản phẩm, sản phẩm mô phỏng đôi khi được xem như tài giả bù trừ. Khi được sử dụng để lập bản đồ liều hấp thụ, sản phẩm mô phỏng đôi khi được xem là vật liệu phantom.

1.3.2 Định nghĩa các thuật ngữ riêng cho tiêu chuẩn này

3.2.1

Bức xạ tia X (X-radiation)

Bức xạ điện từ ion hóa, bao gồm cả bức xạ hãm và bức xạ đặc trưng phát ra khi các điện tử nguyên tử chuyển tiếp sang các trạng thái liên kết bền chặt. Xem bức xạ hãm.

Giải thích Trong các ứng dụng xử lý bức xạ, bức xạ tia X chủ yếu là bức xạ hãm.

3.2.2

Tia X (X-ray)

Là hoặc liên quan đến bức xạ tia X.

Giải thích Tia X được sử dụng như một tính từ khi bức xạ tia X được sử dụng như một danh từ.

3.2.3

Bộ chuyển đổi tia X (X-ray target)

Thiết bị để tạo ra bức xạ tia X (bức xạ hãm) từ một chùm tia điện tử, bao gồm bia, biện pháp làm mát bia và cơ cấu hỗ trợ.

3.2.4

Bia tia X (X-ray target)

Bộ phận của bộ chuyển đổi tia X mà chùm điện tử đập vào và tạo ra bức xạ tia X.

Giải thích Bia tia X thường được làm bằng kim loại có số nguyên tử cao (như tantal), nhiệt độ nóng chảy cao và tính dẫn nhiệt cao.

3.3 Các định nghĩa khác sử dụng trong tiêu chuẩn này liên quan đến đo bức xạ và đo liều bức xạ có thể tham khảo trong ASTM E170. Các định nghĩa trong ASTM E170 tương thích với ICRU Report 85a và có thể được sử dụng làm tài liệu tham khảo thay thế.

4 Ý nghĩa và sử dụng

4.1 Nhiều loại sản phẩm và vật liệu được chiếu xạ bằng bức xạ tia X để thay đổi các đặc tính của chúng và cải thiện giá trị kinh tế hoặc để giảm quần thể vi sinh vật của chúng cho các mục đích liên quan đến sức khỏe. Các yêu cầu về liều lượng có thể khác nhau tùy thuộc vào loại và mục đích sử dụng của sản phẩm. Một số ví dụ về các ứng dụng chiếu xạ mà việc đo liều lượng cần sử dụng là:

4.1.1 Tiệt khuẩn các sản phẩm y tế;

4.1.2 Xử lý thực phẩm nhằm mục đích kiểm soát ký sinh trùng và mầm gây bệnh, diệt côn trùng và kéo dài thời hạn sử dụng;

4.1.3 Khử khuẩn các sản phẩm tiêu dùng;

4.1.4 Liên kết ngang hoặc phân hủy polyme và chất dẻo;

TCVN 12020:2017

4.1.5 Xử lý vật liệu composit;

4.1.6 Polyme hóa các đơn phân (monome) và oligome; ghép đơn phân (monome) vào polyme;

4.1.7 Tăng cường màu sắc trong đá quý và các vật liệu khác;

4.1.8 Thay đổi đặc tính của thiết bị bán dẫn;

4.1.9 Nghiên cứu ảnh hưởng chiếu xạ cho vật liệu.

CHÚ THÍCH 3 Đo liều với khả năng liên kết chuẩn và với độ không đảm bảo đo được biết được yêu cầu cho các quá trình chiếu xạ được kiểm soát pháp quy như tiệt khuẩn các sản phẩm y tế và xử lý thực phẩm. Việc đo liều có thể ít quan trọng hơn đối với các quá trình công nghiệp khác, ví dụ như đối với biến đổi polyme có thể được đánh giá bằng sự thay đổi tính chất vật lý của vật liệu được chiếu xạ. Tuy nhiên, đo liều thường xuyên có thể được sử dụng để giám sát độ tái lập của xử lý bức xạ.

4.2 Thông số kỹ thuật xử lý bức xạ thường bao gồm một cặp giới hạn liều hấp thụ. Giá trị tối thiểu để đảm bảo hiệu ứng đem lại lợi ích mong muốn và giá trị tối đa mà sản phẩm có thể chịu được mà vẫn đáp ứng các yêu cầu về chức năng hoặc yêu cầu về quản lý pháp quy. Đối với một ứng dụng nhất định, có thể quy định một hoặc cả hai giá trị này theo yêu cầu kỹ thuật của quy trình xử lý hoặc theo các quy định pháp luật. Kiến thức về phân bố liều trong vật liệu chiếu xạ là quan trọng để bảo đảm tuân thủ các yêu cầu này. Đo liều là yếu tố quan trọng cho xử lý bức xạ vì nó được sử dụng để xác định cả hai giới hạn này và để xác nhận rằng sản phẩm được chiếu xạ trong các giới hạn này.

4.3 Một số thông số quan trọng phải được kiểm soát để có được phân bố liều tái lập trong quy trình xử lý. Phân bố liều hấp thụ trong sản phẩm phụ thuộc vào kích thước và khối lượng tổng thể của sản phẩm và điều kiện hình học chiếu xạ. Tốc độ xử lý và phân bố liều phụ thuộc vào cường độ tia X, phổ năng lượng photon, phân bố không gian của trường bức xạ và tốc độ băng tải.

4.4 Trước khi thiết bị chiếu xạ được sử dụng, phải bảo đảm các tiêu chuẩn về IQ, OQ để xác định hiệu quả của nó trong việc tái lập được các liều hấp thụ có thể kiểm soát đã biết. Điều này bao gồm việc thử nghiệm thiết bị xử lý, hiệu chuẩn thiết bị và hệ đo liều và xác định đặc tính độ lớn, phân bố và khả năng tái lập của liều hấp thụ được đưa ra bởi thiết bị chiếu xạ trong một dải mật độ sản phẩm.

4.5 Để đảm bảo việc đưa liều nhất quán trong một quá trình chiếu xạ đã được xác nhận về chất lượng, việc kiểm soát thường quy quá trình đòi hỏi phải có các quy trình để đo liều sản phẩm thường quy và để xử lý sản phẩm trước và sau khi chiếu xạ, cấu hình nạp sản phẩm nhất quán, kiểm soát và giám sát các thông số quy trình quan trọng và lập hồ sơ về các hoạt động và chức năng được yêu cầu.

5 Đặc tính nguồn bức xạ

5.1 Tia X (bức xạ hãm) là một dạng bức xạ điện từ, tương tự như bức xạ gamma. Mặc dù các hiệu ứng của nó đối với các vật liệu chiếu xạ nói chung là giống nhau, nhưng khác về phổ năng lượng, phân bố góc và suất liều.

5.2 Các đặc tính vật lý của trường tia X phụ thuộc vào thiết kế của bộ chuyển đổi tia X và các thông số của chùm điện tử đập vào bia, gồm phổ năng lượng điện tử, dòng chùm hạt điện tử trung bình và phân bố dòng chùm tia trên bia.

5.3 Các khía cạnh này của bức xạ tia X và tính phù hợp của nó đối với việc xử lý bức xạ được xem xét chi tiết hơn trong Phụ lục A1.

6 Các dạng cơ sở

6.1 Thiết kế của thiết bị chiếu xạ ảnh hưởng đến phân phối liều hấp thụ trong sản phẩm. Vì vậy, thiết kế thiết bị chiếu xạ cần được xem xét khi thực hiện các phép đo liều hấp thụ được mô tả trong các điều từ Điều 9 đến Điều 11.

6.2 Dải năng lượng chùm điện tử được sử dụng để tạo ra bức xạ tia X được đề cập trong tiêu chuẩn này từ 50 keV đến 7,5 MeV. Giới hạn trên được xác định để tránh sinh ra hoạt độ phóng xạ trong bia tantalum và/hoặc sản phẩm (Xem Tài liệu tham khảo [1], [2]).

6.3 **Các bộ phận của thiết bị chiếu xạ:** Một thiết bị chiếu xạ tia X thường bao gồm máy gia tốc điện tử với bộ chuyển đổi tia X, hệ thống băng chuyền sản phẩm, che chắn bức xạ với hệ thống an toàn cá nhân, các khu chứa và nạp dỡ hàng, thiết bị phụ trợ để cung cấp điện, làm mát, thông gió ..., phòng thiết bị, phòng thí nghiệm để đo liều lượng và kiểm tra sản phẩm và các văn phòng làm việc cho nhân viên. Thiết kế thiết bị chiếu xạ phải tuân thủ với các quy định pháp luật và hướng dẫn hiện hành. (Xem Tài liệu tham khảo [3] đến [7]) để có thông tin về một số cơ sở công nghiệp.

Giải thích: Cấu hình của bộ chuyển đổi tia X, sự phân bố chùm điện tử trên bia tia X, đặc tính đâm xuyên của bức xạ và kích thước, hình dạng và mật độ nạp sản phẩm ảnh hưởng đến tỷ số đồng đều của liều (Xem Tài liệu tham khảo [3], [4], [8] đến [10]). Trong một số trường hợp, tỷ số đồng đều liều có thể được cải thiện bằng cách sử dụng các bộ chuẩn trực chùm tia giữa bộ chuyển đổi tia X và sản phẩm⁽¹¹⁾ hoặc bằng cách sử dụng một nam châm ở phía trước bộ chuyển đổi tia X để kiểm soát sự phân kỳ của chùm tia.

6.4 **Hệ thống thao tác với sản phẩm.** Kích cỡ khối xử lý cho việc sử dụng tối ưu năng lượng photon và bảo đảm sự đồng đều liều phụ thuộc vào năng lượng cực đại của photon và mật độ sản phẩm. Độ rộng của trường tia X hẹp sẽ tốt hơn cho việc sử dụng với sự chuyển dịch liên tục của các sản phẩm so với các hệ thống dạng dừng-xoay vòng để cải thiện tính đồng nhất liều.

7 Lựa chọn và hiệu chuẩn hệ đo liều

7.1 **Lựa chọn hệ đo liều.** Các hệ đo liều phù hợp cho các ứng dụng xử lý bức xạ mong muốn tại một thiết bị chiếu xạ phải được lựa chọn phù hợp với các tiêu chí lựa chọn được nêu trong ISO/ASTM 52628. Trong quá trình lựa chọn, đối với mỗi hệ đo liều, cách thức xử lý liên quan đến các đại lượng ảnh hưởng và độ không đảm bảo đo liều phải được xem xét.

CHÚ THÍCH 4 Hầu hết các hệ đo liều phù hợp với bức xạ gamma (như các thiết bị dùng ^{60}Co) cũng có thể thích hợp cho bức xạ tia X.

7.2 Hệ đo liều phải được hiệu chuẩn theo TCVN 12019 (ISO/ASTM 51261) và các quy trình của người sử dụng quy định chi tiết về quy trình hiệu chuẩn và các yêu cầu đảm bảo chất lượng.

7.3 Hiệu chuẩn hệ đo liều là một phần của hệ thống quản lý đo.

8 Các thông số xử lý

8.11 Liều hấp thụ trong một sản phẩm được xác định và kiểm soát bởi một số đặc tính của thiết bị chiếu xạ cũng như của sản phẩm. Do đó, tất cả các thông số mô tả các thành phần của thiết bị chiếu xạ, khối xử lý và các điều kiện chiếu xạ có ảnh hưởng đến liều hấp thụ được gọi là "các thông số xử lý". Do đó, các thông số này cần được xem xét khi thực hiện các phép đo liều hấp thụ được yêu cầu trong Điều 10 đến Điều 12.

8.2 Đối với các cơ sở sử dụng tia X, các thông số xử lý bao gồm:

8.2.1 Các đặc tính của chùm tia (ví dụ năng lượng chùm điện tử, dòng phát tia, tần số xung);

8.2.2 Độ phân tán chùm tia (ví dụ chiều rộng quét, tần số quét, khẩu độ của bộ chuẩn trực chùm tia, nam châm song song),

8.2.3 Đặc tính thao tác với sản phẩm (ví dụ tốc độ băng tải),

8.2.4 Đặc tính tải sản phẩm (ví dụ, kích thước của khối xử lý, mật độ khối, hướng của sản phẩm) và

8.2.5 Điều kiện hình học chiếu xạ (ví dụ đi qua nhiều lần, xoay vòng, sự gối lên nhau của sản phẩm hoặc nguồn).

8.3 Các thông số trong 8.2.1, 8.2.2 và 8.2.3 đặc trưng cho thiết bị chiếu xạ không quy chiếu đến sản phẩm hoặc việc xử lý. Những tập con này của thông số được gọi là "thông số vận hành".

8.4 Các quy trình trong chứng nhận chất lượng vận hành (OQ) liên quan đến các thông số vận hành.

8.5 Mục tiêu của chứng nhận chất lượng làm việc (PQ) là để xác lập các giá trị của tất cả các thông số xử lý cho xử lý bức xạ đang được xem xét.

8.6 Trong quá trình xử lý sản phẩm thường nhật, các thông số vận hành được kiểm soát liên tục và giám sát để kiểm soát quá trình xử lý.

9 Chất lượng lắp đặt

9.1 Mục tiêu. Mục đích của một chương trình chứng nhận chất lượng lắp đặt là để thu thập và lập thành hồ sơ các chứng cứ khẳng định rằng thiết bị chiếu xạ với thiết bị xử lý và thiết bị đo kèm theo của nó đã được cung cấp và lắp đặt phù hợp với các yêu cầu kỹ thuật của chúng. Nội dung chất lượng lắp đặt bao gồm tài liệu của thiết bị chiếu xạ và các thiết bị xử lý, thiết bị đo đi kèm, việc kiểm tra, các quy trình vận hành và hiệu chuẩn để sử dụng của các thiết bị và kết quả xác nhận chúng hoạt động theo đúng các thông số kỹ thuật.

9.2 Tài liệu thiết bị. Bản mô tả thiết bị chiếu xạ và các thiết bị xử lý và thiết bị đo kèm theo được lắp đặt trong thiết bị chiếu xạ. Tài liệu này sẽ được lưu giữ trong toàn bộ vòng đời của thiết bị chiếu xạ. Tối thiểu, tài liệu phải bao gồm:

9.2.1 Mô tả vị trí của thiết bị chiếu xạ (máy gia tốc) trong cơ sở của người vận hành so với các khu vực đã được phân định và biện pháp được thiết lập để đảm bảo việc tách biệt các sản phẩm chưa chiếu xạ khỏi các sản phẩm đã chiếu xạ,

9.2.2 Đặc điểm và đặc trưng kỹ thuật của máy gia tốc.

9.2.3 Quy trình vận hành của thiết bị chiếu xạ.

9.2.4 Mô tả việc xây dựng và vận hành của thiết bị thao tác với sản phẩm,

9.2.5 Mô tả vật liệu và việc chế tạo của các thùng chiếu xạ dùng để chứa sản phẩm trong quá trình chiếu xạ.

9.2.6 Mô tả hệ thống kiểm soát quá trình xử lý.

9.2.7 Mô tả mọi thay đổi được thực hiện trong và sau khi lắp đặt thiết bị bức xạ.

9.2.8 Mô tả đặc điểm của bộ chuyển đổi tia X (kích thước, vật liệu và bản chất của việc chế tạo).

9.3 Các quy trình kiểm tra, vận hành và hiệu chuẩn. Các quy trình thao tác chuẩn cho việc kiểm tra, vận hành và hiệu chuẩn (nếu cần) của thiết bị chiếu xạ đã được lắp đặt và các thiết bị xử lý và thiết bị đo đi kèm phải được thiết lập.

9.3.1 Quy trình kiểm tra. Các quy trình này mô tả phương pháp kiểm tra được sử dụng để đảm bảo rằng thiết bị chiếu xạ đã lắp đặt và các thiết bị xử lý và thiết bị đo liên quan hoạt động theo đúng các đặc trưng kỹ thuật.

9.3.2 Quy trình vận hành. Các quy trình này mô tả cách vận hành thiết bị chiếu xạ và các thiết bị xử lý và thiết bị đo liên quan trong quá trình hoạt động thông thường.

9.3.3 Quy trình hiệu chuẩn. Các quy trình này mô tả các phương pháp hiệu chuẩn và xác nhận định kỳ nhằm đảm bảo rằng thiết bị chiếu xạ đã lắp đặt và các thiết bị xử lý và thiết bị đo liên quan hoạt động trong giới hạn các đặc trưng kỹ thuật. Tần suất hiệu chuẩn đối với một số thiết bị và dụng cụ đo

có thể sẽ được cơ quan quản lý quy định. Việc hiệu chuẩn một số thiết bị và dụng cụ đo phải được liên kết chuẩn theo một chuẩn quốc gia hoặc quốc tế.

9.4 Kiểm tra thiết bị xử lý và các dụng cụ đo. Phải kiểm tra để xác nhận thiết bị xử lý và dụng cụ đo được lắp đặt hoạt động đúng với các tiêu chuẩn thiết kế của chúng thông qua các quy trình kiểm tra được đề cập trong 9.3.1. Thiết bị và dụng cụ đo này phải được hiệu chuẩn theo quy trình hiệu chuẩn

9.4.1 Tất cả các thiết bị liên quan đến việc vận hành thiết bị chiếu xạ phải được kiểm tra để xác nhận rằng thiết bị chiếu xạ hoạt động phù hợp với các yêu cầu kỹ thuật và thiết kế. Tất cả kết quả kiểm tra phải được lập thành hồ sơ.

9.4.2 Tính năng làm việc của các thiết bị đo phải được xác nhận hoặc hiệu chuẩn (nếu yêu cầu) để bảo đảm rằng các thiết bị đo này hoạt động phù hợp với các đặc trưng kỹ thuật và thiết kế. Tất cả kết quả kiểm tra phải được lập thành hồ sơ.

9.4.3 Nếu có bất kỳ sự điều chỉnh hoặc thay đổi nào đối với thiết bị xử lý hoặc dụng cụ đo lường trong quá trình lắp đặt, thì cần phải kiểm tra lại.

9.4.4 Các đặc tính của chùm điện tử (như dòng phát tia trung bình, năng lượng) và trường tia X (như kích thước và tính đồng nhất) phải được xác định và ghi lại. Chúng thường bao gồm như sau:

9.4.4.1 Đánh giá năng lượng của chùm tia điện tử với phép đo trực tiếp (xem ISO/ASTM 51649). Khi có thể tiếp cận được chùm điện tử, phân bố liều sâu sẽ được đo bằng cách chiếu xạ các liều kế đặt trong một chồng các lớp vật liệu đồng nhất hoặc bằng cách đặt các liều kế hay một dây liều kế tại một góc qua một chất hấp thụ đồng nhất. Năng lượng tia điện tử có thể được xác định từ các thông số phân bố liều sâu dựa trên sự tương quan đã được thiết lập.

9.4.4.2 **Đánh giá năng lượng của chùm tia điện tử với phép đo gián tiếp.** Khi chùm điện tử không thể tiếp cận được, ví dụ khi bộ chuyển đổi tia X được gắn vào cuối máy quét và chùm điện tử không được truyền qua không khí trước khi đập vào bia tia X, sự suy giảm của bức xạ tia X trong một chất quy chiếu thích hợp có thể được sử dụng để gián tiếp đánh giá năng lượng chùm electron.

CHÚ THÍCH 5: Quy trình thích hợp cho các quá trình chiếu xạ công nghiệp điển hình, được dựa theo ứng dụng phổ biến trong lĩnh vực xạ trị bằng tia X, đã được công bố trong [14]. Ngoài ra, có thể sử dụng đo hoạt độ phóng xạ sinh ra trong một số nguyên tố nào đó với giá trị ngưỡng dưới 8 MeV để xác định năng lượng^{[15], [16]}.

9.4.4.3 **Đặc tính trường tia X (độ rộng, độ dài và độ sâu).** Hệ thống làm mát bia và hình học bia có ảnh hưởng đáng kể đến trường tia X và do đó trường tia X phải được đặc trưng trước khi OQ được bắt đầu (xem các Hình A1.1 đến A1.3). Độ rộng và độ dài của chùm điện tử được đo bằng cách đặt một dây liều kế hoặc các liều kế riêng lẻ tại các khoảng cách được lựa chọn trên toàn bộ dải chiều rộng và chiều dài của chùm tia và tháo bỏ bộ chuyển đổi chùm tia, hoặc nếu trong trường hợp không thể thì đặt trực tiếp trên bộ chuyển đổi. Bất cứ khi nào có thể, liều kế cần được đặt ra ngoài kích thước chùm tia dự tính để xác định giới hạn của kích thước toàn bộ chùm tia. Trường tia X có thể được đặc

trung bằng cách đặt một dây liều kế hoặc các liều kế rời rạc ở những khoảng cách được lựa chọn trên toàn bộ chiều rộng chùm tia X và dải chiều dài với các khoảng cách khác nhau từ bia tại X.

10 Chứng nhận chất lượng vận hành

10.1 Mục tiêu. Mục tiêu của chứng nhận chất lượng vận hành (OQ) của một thiết bị chiếu xạ tia X là nhằm thu thập và lập hồ sơ bằng chứng cho thấy thiết bị chiếu xạ đã lắp đặt và các thiết bị đo đi kèm hoạt động trong giới hạn định trước khi sử dụng phù hợp với quy trình vận hành. Mục đích của đo liều trong chứng nhận chất lượng vận hành là xác định các giới hạn hoạt động lấy làm chuẩn và kỳ vọng về đặc tính làm việc cho việc xử lý thông thường và theo đó đánh giá các đặc tính sau:

10.1.1 Khả năng để dự đoán liều được đưa cho dải điều kiện hoạt động với các thông số vận hành chủ yếu mà có thể ảnh hưởng đến liều hấp thụ trong sản phẩm.

10.1.2 Khả năng của thiết bị chiếu xạ để có thể đưa mức liều tái lập cho dải điều kiện hoạt động với các thông số vận hành chủ yếu mà có thể làm ảnh hưởng đến liều hấp thụ trong sản phẩm¹⁷⁾.

10.1.3 Phân bố liều hấp thụ trong khối xử lý

CHÚ THÍCH 6: Liều hấp thụ nhận được từ bất kỳ phần nào của sản phẩm trong khối xử lý phụ thuộc vào thiết kế băng tải, thiết kế bộ chuyển đổi, hình học và đặc điểm của trường tia X, đặc tính và cấu hình khối xử lý, hình học xử lý.

10.1.4 Việc kiểm tra đo liều được thực hiện trong IQ (xem 9.4.4) cần được lặp lại như là một phần của OQ đối với thiết bị chiếu xạ.

10.2 Lập bản đồ liều hấp thụ. Bản đồ liều hấp thụ được lập để mô tả đặc tính của thiết bị chiếu xạ về phân bố liều và khả năng tái lập việc đưa liều hấp thụ. Lập bản đồ phân bố liều hấp thụ được thực hiện bằng cách đặt bộ liều kế theo một bố trí ba chiều trong một khối xử lý có chứa vật liệu quy chiếu chuẩn. Xem ASTM E2303 về hướng dẫn thực hiện lập bản đồ liều hấp thụ.

10.2.1 Số lượng vật liệu quy chiếu chuẩn trong mỗi thùng chiếu xạ phải là lượng dự kiến trong quá trình sản xuất điển hình hoặc phải là lượng thiết kế lớn nhất cho thùng chiếu xạ.

10.2.2 Kiểu đặt liều kế cần được lựa chọn để xác định được vị trí lớn nhất và nhỏ nhất của liều hấp thụ. Có thể cần phải đặt nhiều liều kế ở các vị trí này và ít liều kế hơn ở các vị trí có thể nhận được liều hấp thụ trung bình để xác định được chính xác các điểm có liều hấp thụ lớn nhất và nhỏ nhất. Số liệu đo liều từ thiết bị chiếu xạ đã được xác nhận về chất lượng trước đây có cùng thiết kế hoặc các kết quả tính toán sử dụng các mô hình toán học (xem ASTM E2232) có thể cung cấp thông tin hữu ích để xác định số lượng và vị trí của liều kế cho quá trình chứng nhận chất lượng.

CHÚ THÍCH 7: Trường hợp việc sử dụng các liều kế đơn là không phù hợp thì các dây hoặc tám liều kế có thể được sử dụng để tăng độ phân giải không gian của bản đồ liều hấp thụ.

10.2.3 Cần lập bản đồ liều cho một số lượng đủ của khối xử lý (nhỏ nhất 3) có mật độ đồng nhất để đánh giá độ biến thiên của độ lớn và phân bố liều hấp thụ trong khối xử lý. Số liệu đo liều từ thiết bị

chiếu xạ đã được xác nhận về chất lượng trước đây có cùng thiết kế có thể cung cấp thông tin hữu ích để xác định số lượng khối xử lý cho chứng nhận chất lượng này.

10.2.4 Số lượng khối xử lý trước và sau quá trình lập bản đồ liều phải đủ để mô phỏng một cách chính xác thiết bị chiếu xạ có nạp sản phẩm.

10.2.5 Việc lập bản đồ liều hấp thụ phải được thực hiện tại và giữa khoảng mật độ cho các sản phẩm xem là thường xuyên được chiếu xạ.

10.2.6 Việc lập bản đồ liều hấp thụ phải được thực hiện cho mỗi hành trình khác nhau của thiết bị chiếu xạ thường được sử dụng cho xử lý sản phẩm.

10.2.7 Các quy trình cho lập bản đồ liều hấp thụ nêu trong điều này có thể không khả thi đối với một số loại thiết bị chiếu xạ với lượng xử lý lớn. Trong những trường hợp như vậy, liều hấp thụ tối thiểu và tối đa phải được đánh giá bằng cách sử dụng một số lượng thích hợp các liều kế được trộn ngẫu nhiên với sản phẩm và vận chuyển cùng sản phẩm qua vùng chiếu xạ. Nên sử dụng một mô hình thống kê để ước tính số lượng liều kế cần sử dụng. Việc tính toán liều hấp thụ tối thiểu và tối đa có thể là một giải pháp thay thế phù hợp.

CHÚ THÍCH 8: Tính toán lý thuyết có thể được thực hiện bằng phương pháp Monte Carlo ^[18] và được áp dụng cho xử lý bức xạ công nghiệp ^[19]. Việc sử dụng phương pháp tâm - điểm có thể sử dụng cho cơ sở chiếu xạ tia X^[20]. Cả hai phương pháp đòi hỏi phải biết chính xác tiết diện tương tác bức xạ cho tất cả các vật liệu nằm giữa và xung quanh điểm đặt nguồn và điểm xác định liều. Các phần mềm cho mục đích sử dụng chung là có sẵn cho các tính toán này (xem ASTM E2232). Các mô hình tính được xây dựng bằng cách sử dụng các phần mềm này cần phải được kiểm chứng theo số liệu đo liều để xác nhận các kết quả tính toán là chấp nhận được. Các mô hình dựa vào thực nghiệm được xây dựng trực tiếp từ số liệu đo liều có thể đáp ứng tốt nhưng chỉ nên giới trong điều kiện biên của các thử nghiệm tại một máy chiếu xạ cụ thể.

CHÚ THÍCH 9: Đối với thiết bị chiếu xạ tia X, phân bố liều sâu trong một vật liệu đồng nhất có số nguyên tử thấp gần đúng là hàm mũ và sự đâm xuyên của bức xạ tia X năng lượng 5 MeV là lớn hơn một chút so với bức xạ gamma của nguồn cobalt-60 (xem Hình A1.7).

10.3 Liều hấp thụ và các thông số vận hành

10.3.1 Mục tiêu. Liều hấp thụ trong sản phẩm phụ thuộc vào một số thông số vận hành. Trong dải dự kiến của các thông số này, sử dụng một hệ đo liều thích hợp để xác định các đặc trưng liều hấp thụ trong vật liệu quy chiếu chuẩn.

Phân bố liều trong một khối xử lý phụ thuộc vào phổ năng lượng photon, hình học trường photon, khoảng cách tới bia tia X và các đặc tính vật liệu quy chiếu chuẩn.

CHÚ THÍCH 10: Đối với thiết bị chiếu xạ tia X, phổ năng lượng photon và phân bố góc phụ thuộc vào thiết kế và thành phần của bộ chuyển đổi tia X và phổ năng lượng của chùm điện tử. Các điện tử năng lượng cao sẽ tăng sự đóng góp trong phần đỉnh của phân bố photon và do đó tăng khả năng đâm xuyên trong sản phẩm ^[9], ^[21], ^[22].

10.3.2 Mỗi quan hệ giữa liều lớn nhất và liều nhỏ nhất đối với một thùng chiếu xạ chứa đầy vật liệu quy chiếu chuẩn có mật độ đã biết với tốc độ sản phẩm (hoặc thời gian chiếu xạ), đặc trưng của chùm

tia và các thông số kiểm soát trường photon trong khoảng dự kiến của các thông số này cần phải được thiết lập. Mỗi quan hệ này cần được thiết lập cho mỗi mật độ (10.2.5) và mỗi hành trình của thiết bị chiếu xạ (10.2.6).

Xác định dải liều hấp thụ có thể chiếu, dải mật độ có thể được xử lý và số hành trình của thiết bị chiếu xạ có thể được sử dụng trong quá trình xử lý hàng ngày. Điều này sẽ xác lập các giới hạn làm việc cho thiết bị chiếu xạ.

CHÚ THÍCH 11 Tốc độ băng tải và dòng chùm tia có thể được liên kết với nhau trong quá trình xử lý sản phẩm để sự thay đổi của một thông số sẽ dẫn đến sự thay đổi tương ứng của thông số kia để duy trì liều chiếu ổn định.

10.4 Sự biến đổi liều

10.4.1 Độ lớn của thay đổi liều trong một vật liệu quy chiếu chuẩn phải được ước tính bằng cách, ví dụ, cho các liều kế trong điều kiện hình học chuẩn đi qua vùng chiếu xạ trên băng chuyền sản phẩm với các khoảng thời gian thích hợp với tần suất dao động của các thông số.

CHÚ THÍCH 12: Rất khó để tách biệt ảnh hưởng của sự biến thiên của thông số hoạt động và độ không đảm bảo đo của hệ đo liều; Do đó, độ biến thiên được đo thường là sự kết hợp của hai ảnh hưởng này.

10.4.2 Vị trí giám sát thường quy. Nếu các vị trí lớn nhất và nhỏ nhất của liều hấp thụ đã xác định trong quá trình lập bản đồ liều là không thể tiếp cận được trong hành trình chiếu thực tế thì các vị trí thay thế (bên trong hoặc bên ngoài khối xử lý) có thể được sử dụng trong đo liều xử lý sản phẩm thông thường. Các vị trí này có thể ở trên thùng chiếu xạ hoặc trên khối xử lý. Sự thay đổi liều ở vị trí giám sát hàng ngày phải được đánh giá.

10.5 Ảnh hưởng của khối xử lý với mật độ sản phẩm khác nhau đặt liền kề nhau. Đối với một hành trình xử lý với khối xử lý có mật độ khác nhau được đặt cạnh nhau, phân bố liều trong các khối xử lý đặt kề nhau có thể sẽ khác nhau. Các ảnh hưởng này có thể là do sự tán xạ của bức xạ tia X từ tải quá trình ở phía trước của bia và chúng có thể được xác định bằng cách lập bản đồ liều của tải quá trình ở phía trước của nguồn cũng như khối xử lý đặt cạnh nhau cho các cho các điều kiện hình học này để xác nhận rằng các giá trị liều lớn nhất và nhỏ nhất là có thể chấp nhận được. Nhiều tổ hợp của các mật độ khác nhau đặt cạnh nhau cần phải được đánh giá để xác định mức độ ảnh hưởng nếu có và để thiết lập các giới hạn hoạt động được chấp nhận cho ảnh hưởng này.

10.6 Thùng chiếu xạ nạp một phần. Phân bố liều hấp thụ và cường độ của liều hấp thụ nhỏ nhất và lớn nhất trong thùng chiếu xạ nạp một phần trong một hành trình chiếu xạ có thể bị ảnh hưởng hoặc ảnh hưởng đến các thùng chiếu xạ lân cận trong hành trình chiếu xạ hoặc trong các hành trình chiếu sản phẩm liền kề. Các hiệu ứng này là do sự khác nhau giữa các đặc tính tán xạ bức xạ và các khoảng trống trong thùng chiếu xạ của hành trình chiếu xạ đã biết với các đặc tính đó của sản phẩm trong các hành trình chiếu xạ liền kề. Nghiên cứu phân bố liều hấp thụ phải được thực hiện với các thùng chiếu xạ nạp một phần với các mức nạp khác nhau để đánh giá mức độ của ảnh hưởng này nếu có và để thiết lập các giới hạn hoạt động được chấp nhận đối với ảnh hưởng này.

10.7 Gián đoạn/khởi động lại quá trình xử lý. Trong trường hợp việc xử lý bị gián đoạn, tác động của việc khởi động lại đến việc tạo liều (ví dụ, sự đồng đều của liều trong một mặt phẳng quy chiếu) phải được điều tra.

10.7.1 Điều này có thể đạt được bằng cách phơi một dải phim đo độ phóng xạ trong một mặt phẳng quy chiếu thông qua một chuỗi dừng/bắt đầu của hệ thống băng tải.

10.7.2 Ảnh hưởng của quá trình gián đoạn/khởi động lại nên được đánh giá cho giá trị giới hạn của các thông số hoạt động.

10.7.3 Nếu có bất kỳ ảnh hưởng nào đối với việc đưa liều vào sản phẩm trong khi quá trình gián đoạn, thì mức độ của nó sẽ được xác định để xác định các giới hạn hoạt động cho phép.

10.8 Lập hồ sơ và duy trì OQ. Các quy trình cho bảo đảm chất lượng vận hành phải được lập lại trong một khoảng thời gian xác định. Khoảng này phải được luận chứng và tính hợp lý được lập thành hồ sơ để khẳng định rằng thiết bị chiếu xạ hoạt động đúng với các đặc trưng kỹ thuật.

10.9 Các thay đổi của thiết bị chiếu xạ. Nếu có sự thay đổi của thiết bị chiếu xạ có thể ảnh hưởng đến phân bố liều (ví dụ như đặc tính của chùm tia, bộ chuyển đổi tia X, băng tải) hoặc phương thức vận hành thì việc chứng nhận chất lượng vận hành cần phải lập lại đến một mức cần thiết để xác định ảnh hưởng đến quá trình xử lý. Ví dụ về các thay đổi như vậy gồm:

10.9.1 Các thay đổi đối với băng tải,

10.9.2 Các thay đổi đối với thùng chiếu xạ,

10.9.3 Sửa chữa hoặc thay thế nam châm quét,

10.9.4 Sửa chữa hoặc thay thế nam châm lái chùm tia,

10.9.5 Thay đổi thành phần của thiết bị chiếu xạ tạo ra hiệu ứng tán xạ, và

10.9.6 Thay đổi bia tạo tia X (bao gồm cả hệ thống làm mát).

11 Chứng nhận chất lượng làm việc

11.1 Mục tiêu. Mục tiêu của việc chứng nhận chất lượng là để thu thập và lập thành hồ sơ các bằng chứng xác nhận thiết bị chiếu xạ và các thiết bị đo khi được lắp đặt và vận hành phù hợp với các quy trình vận hành có thể xử lý sản phẩm một cách ổn định trong giới hạn liều hấp thụ quy định. Việc đo liều được sử dụng để có được các bằng chứng này và để xác định các giá trị thích hợp của tất cả các thông số xử lý chính. Giới hạn liều hấp thụ lớn nhất và nhỏ nhất gần như luôn luôn được gắn với các ứng dụng chiếu xạ. Đối với một ứng dụng nhất định, một hoặc cả hai giới hạn này có thể được quy định bởi văn bản quy phạm pháp luật. Đo liều được sử dụng trong chứng nhận chất lượng xử lý để xác định các thông số xử lý thích hợp, bao gồm thời gian xử lý, dòng chùm tia, tốc độ băng tải và cấu hình tải sản phẩm, để đảm bảo rằng yêu cầu liều hấp thụ cho một quá trình xử lý cụ thể được đáp ứng.

Điều này được thực hiện bằng cách lập bản đồ liều hấp thụ của các thùng chiếu xạ với sản phẩm và cấu hình tải sản phẩm cụ thể. Mục đích của việc lập bản đồ là để xác định độ lớn và vị trí của liều hấp thụ nhỏ nhất và lớn nhất cùng mối quan hệ của chúng với liều hấp thụ tại các vị trí được sử dụng để quan trắc trong quá trình xử lý sản phẩm hàng ngày.

11.2 Cấu hình tải sản phẩm. Cấu hình khối xử lý phải được thiết lập cho mỗi sản phẩm. Hồ sơ cho cấu hình tải này phải bao gồm các đặc trưng kỹ thuật cho các thông số gây ảnh hưởng đến phân bố liều hấp thụ. Ví dụ của các thông số này bao gồm kích thước sản phẩm, khối lượng sản phẩm, thành phần vật liệu, mật độ sản phẩm/mật độ khối sản phẩm và hướng chuyển động của sản phẩm.

11.3 Loại xử lý. Nếu khái niệm kiểu loại xử lý được sử dụng cho mục đích xử lý hàng ngày, sản phẩm sẽ được đánh giá dựa trên các tiêu chuẩn đã được lập thành hồ sơ xem rằng nó có thuộc một kiểu loại xử lý nào không. Việc đánh giá phải bao gồm việc xem xét các biến số liên quan đến sản phẩm có thể làm ảnh hưởng đến liều cho sản phẩm và đặc trưng quá trình xử lý. Kết quả đánh giá phải được thẩm định lại và lập thành hồ sơ.

Giới hạn ứng với loại xử lý phải được xác định và chứng nhận chất lượng xử lý phải được thực hiện ở các giới hạn cực trị của loại xử lý.

11.4 Lập bản đồ liều hấp thụ (xem ASTM E2303).

11.4.1 Vị trí liều nhỏ nhất và lớn nhất

11.4.1.1 Vị trí của các vùng liều hấp thụ lớn nhất và nhỏ nhất cho cấu hình tải được chọn phải được thiết lập. Điều này được thực hiện bằng cách đặt các liều kế trong thể tích quan tâm cho ba khối xử lý hoặc nhiều hơn. Các kiểu đặt phải được chọn để xác định được vị trí của các điểm cực trị của liều hấp thụ bằng cách sử dụng dữ liệu thu được từ các nghiên cứu lập bản đồ liều hấp thụ trong chứng nhận chất lượng vận hành kết hợp với tính toán lý thuyết (xem ASTM E2232). Các liều kế phải được tập trung ở các vùng dự đoán có liều hấp thụ nhỏ nhất và lớn nhất và một số lượng nhỏ hơn được đặt ở các khu vực có thể có liều hấp thụ trung bình.

11.4.1.2 Cần đặc biệt chú ý đến các khối xử lý chứa các sản phẩm không đồng nhất và có các hốc trống. Cần phải sử dụng nhiều liều kế hơn tại các vị trí không liên tục trong thành phần hay trong mật độ để đánh giá gradien liều có thể có.

11.4.2 Biến thiên của liều hấp thụ

11.4.2.1 Khi lập bản đồ liều cho một cấu hình tải sản phẩm cụ thể, cần xem xét biến thiên có thể xảy ra của liều hấp thụ được đo tại các vị trí tương tự trong các khối xử lý khác nhau.

11.4.2.2 Để đánh giá mức độ biến thiên liều này, các lô liều kế phải được đặt trong các vùng dự đoán có liều hấp thụ nhỏ nhất và lớn nhất trong vài (ít nhất ba) khối xử lý và chiếu xạ chúng trong cùng điều kiện giống nhau. Các biến thiên được đo của giá trị liều hấp thụ phản ánh, ví dụ, sự thay đổi của cấu hình tải sản phẩm (do sự trôi của các thành phần của khối xử lý trong quá trình di chuyển qua thiết bị

chiếu xạ), sự khác biệt nhỏ về mật độ lô hàng trong khối xử lý, sự thăng giáng của các giá trị thông số vận hành và độ không đảm bảo đo của hệ đo liều thường quy.

11.4.3 Tài một phần. Đối với tài một phần, các yêu cầu về chứng nhận chất lượng làm việc như đối với tài nạp đầy phải được thực hiện. Việc lập bản đồ liều phải đảm bảo rằng phân bố liều hấp thụ được mô tả đầy đủ và có thể chấp nhận được. Các biến đổi của phân bố liều đối với việc nạp tài một phần trong một số trường hợp có thể được giảm thiểu bằng việc sử dụng vật liệu giả đặt ở vị trí thích hợp trong khối xử lý. Ảnh hưởng của thùng chiếu xạ nạp tài một phần và các thùng kề cạnh phải được đánh giá.

11.4.4 Liều kế được sử dụng để lập bản đồ liều cần phải có khả năng đo liều và gradient liều có thể xảy ra trong các sản phẩm được chiếu xạ.

11.4.5 Xử lý ở nhiệt độ thấp hoặc cao. Đáp ứng của hầu hết tất cả các liều kế phụ thuộc vào nhiệt độ chiếu xạ và thường sự phụ thuộc thay đổi theo liều hấp thụ. Do đó, đối với các ứng dụng xử lý nhiệt độ cao hoặc thấp (ví dụ như các sản phẩm thực phẩm ướp lạnh hoặc đông lạnh), việc đo liều có thể được thực hiện theo một trong hai cách sau:

11.4.5.1 Việc lập bản đồ liều hấp thụ có thể được thực hiện với sản phẩm thực hoặc sản phẩm mô phỏng ở nhiệt độ phòng. Điều này đòi hỏi không có thay đổi trong bất kỳ thông số nào có thể ảnh hưởng đến liều hấp thụ trong quá trình xử lý sản phẩm. Lập bản đồ liều lượng ở nhiệt độ phòng bao gồm đặt một hoặc nhiều liều kế ở một vị trí kiểm soát thường quy mà vị trí đó được cách ly khỏi gradient nhiệt độ trong sản phẩm thực tế trong quá trình xử lý thường quy. Các liều kế đo thường quy nên được đặt ở vị trí kiểm soát thường quy này trong xử lý thường quy của sản phẩm.

11.4.5.2 Lập bản đồ liều hấp thụ có thể được thực hiện ở nhiệt độ mà tại đó sản phẩm sẽ được ướp lạnh hoặc đông lạnh trong xử lý sản phẩm thực bằng cách sử dụng một hệ đo liều có thể xác định đặc tính của nó ở nhiệt độ xử lý dự kiến hoặc đáp ứng của nó không bị ảnh hưởng đáng kể bởi nhiệt độ.

11.4.6 Thiết bị chiếu xạ liên tục. Việc lập bản đồ liều hấp thụ có thể không khả thi đối với các sản phẩm chạy qua vùng chiếu xạ với lượng lớn. Trong trường hợp này, liều hấp thụ nhỏ nhất và lớn nhất nên được đánh giá bằng cách sử dụng một số lượng thích hợp liều kế được trộn ngẫu nhiên với sản phẩm và được cho chạy cùng sản phẩm qua vùng chiếu xạ^[23]. Cần phải sử dụng số lượng đủ liều kế để đạt được kết quả có ý nghĩa thống kê.

11.4.7 Vị trí kiểm soát thường quy. Thiết lập các vị trí kiểm soát thường quy dựa trên phân tích dữ liệu bản đồ liều. Nếu các vị trí cực trị của liều hấp thụ được xác định trong quy trình lập bản đồ liều khó tiếp cận được trong chu trình sản xuất, các vị trí thay thế (bên ngoài hoặc bên trong so với khối xử lý) có thể được sử dụng cho việc đo liều xử lý sản phẩm thường quy. Mối quan hệ giữa liều hấp thụ ở các vị trí kiểm soát thay thế thường quy này và các điểm cực trị liều hấp thụ phải được thiết lập, được chứng tỏ có thể tái lập và lập thành hồ sơ.

11.4.8 Giá trị liều mục tiêu. Do bản chất thống kê của phép đo liều hấp thụ và các biến thiên cố hữu trong xử lý bức xạ, cần thiết lập các thông số vận hành để cung cấp trung bình một liều hấp thụ lớn

hơn mọi giá trị liều nhỏ nhất được quy định và nhỏ hơn mọi giá trị liều lớn nhất được quy định^{[24], [25]}. Các giá trị liều này được gọi là “Giá trị liều mục tiêu”. Nói chung, giá trị liều mục tiêu này cần được chọn sao cho sẽ xảy ra với xác suất thấp việc chiếu xạ sản phẩm hoặc một phần của sản phẩm với liều thấp hơn so với giá trị liều được yêu cầu nhỏ nhất hoặc cao hơn so với giá trị liều cho phép lớn nhất. Để thảo luận thêm về xác định các giá trị liều mục tiêu, xem Tài liệu tham khảo [26], [27].

11.4.9 Tỷ số đồng đều liều không chấp nhận được

11.4.9.1 Nếu bản đồ liều cho thấy các yêu cầu về liều sản phẩm là không đáp ứng được với yêu cầu, cần phải thay đổi các thông số vận hành hoặc cấu hình lại khối xử lý. Trong cả hai trường hợp, việc lập bản đồ liều sản phẩm phải được làm lại.

11.4.9.2 Các thông số vận hành. Thay đổi đặc tính của chùm tia hoặc độ phân tán chùm tia bằng cách sử dụng các cơ cấu suy giảm chùm tia, tán xạ, phản xạ và chuẩn trực chùm tia có thể làm giảm tỷ số đồng đều liều^{[11], [28], [29]}.

11.4.9.3 Nếu bất kỳ thông số xử lý nào có ảnh hưởng đến độ lớn hoặc vị trí của liều hấp thụ lớn nhất hoặc nhỏ nhất mà bị thay đổi thì phải lập lại bản đồ liều đến mức cần thiết để đặc trưng cho các ảnh hưởng này. Thông tin thu thập được trong chứng nhận chất lượng vận hành (Điều 10) có thể sử dụng như một hướng dẫn để xác định mức độ của các nghiên cứu lập bản đồ liều hấp thụ này.

12 Xử lý sản phẩm thường quy

12.1 Các thông số xử lý

12.1.1 Yêu cầu chung. Trước khi bắt đầu xử lý sản phẩm thường quy, tất cả các thông số xử lý phải được đặt như đã được thiết lập trong quá trình chứng nhận chất lượng làm việc.

12.1.2 Đảm bảo rằng cấu hình tài sản phẩm vẫn giữ nguyên cho tất cả các khối xử lý. Đối với một thiết bị chiếu xạ liên tục đảm bảo rằng các đặc tính liên tục của sản phẩm vẫn giữ nguyên.

12.2 Kiểm soát quy trình. Cần phải chứng minh rằng việc xử lý chiếu xạ là liên tục được kiểm soát. Điều này được thực hiện thông qua các yếu tố kiểm soát xử lý sau: (1) liên tục quan trắc và kiểm soát và quan trắc trong quá trình xử lý sản phẩm đối với tất cả các thông số vận hành ảnh hưởng đến liều và (2) sử dụng hệ đo liều xử lý thường quy.

12.3 Các thông số vận hành. Các thông số vận hành liên quan phải được kiểm soát, quan trắc và lập thành hồ sơ làm bằng chứng cho việc kiểm soát liên tục quá trình xử lý, và qua đó đảm bảo rằng mỗi khối xử lý được xử lý theo đúng yêu cầu.

12.4 Đo liều xử lý thường quy. Cần phải đảm bảo rằng sản phẩm nhận được liều hấp thụ như yêu cầu bằng cách sử dụng các quy trình đo liều phù hợp, kiểm soát thống kê thích hợp và lập thành hồ sơ một cách thích hợp.

12.4.1 Vị trí liều kế. Các lô liều kế nên được đặt trong hoặc trên các khối xử lý đã chọn ở các vị trí của liều hấp thụ lớn nhất hoặc nhỏ nhất đã được xác định trước (xem 11.3), hoặc ở các vị trí quan trắc thường quy.

12.4.2 Tần suất quan trắc. Tùy thuộc vào dạng thiết bị chiếu xạ, có thể không cần thiết phải có liều kế đo trên mỗi khối xử lý. Chọn một số lượng hợp lý khối xử lý để đặt liều kế để xác nhận rằng liều hấp thụ cho toàn bộ đợt chạy xử lý nằm trong giới hạn quy định. Tần suất đặt liều kế phải được lựa chọn để chứng minh rằng việc xử lý là được kiểm soát. Tính hợp lý của tần suất quan trắc phải được lập thành hồ sơ.

CHÚ THÍCH 13: Phân bố liều hấp thụ trong khối xử lý đã được biết từ quá trình lập bản đồ liều được mô tả trong Điều 11. Tuy nhiên, việc sử dụng một số lượng đủ liều kế được đặt một cách có tính toán là nhằm để xác nhận rằng liều hấp thụ là thực sự đạt được trong dải quy định. Việc đặt nhiều liều kế hơn trong đợt chạy xử lý sẽ cung cấp thêm thông tin về liều và do vậy sẽ giúp cho việc loại bỏ sản phẩm ít hơn nếu một số trục trặc hoặc không ổn định của quá trình xử lý xảy ra (như sai hỏng của thiết bị đo tốc độ băng tải).

12.4.3 Chiếu xạ liên tục. Đối với một số thiết bị chiếu xạ liên tục (ví dụ, trong đó chất lỏng hoặc hạt chày liên tục trong quá trình chiếu xạ), thì có thể sẽ là không khả thi trong quá trình xử lý để đặt các liều kế vị tại các vị trí có liều hấp thụ nhỏ nhất và lớn nhất. Trong trường hợp này, khi bắt đầu đợt chạy xử lý, đưa một vài liều kế trộn ngẫu nhiên với sản phẩm và cho chạy cùng sản phẩm qua vùng chiếu xạ. Đối với một đợt chiếu xạ dài, phải đưa thêm liều kế ở giữa và gần cuối đợt chạy xử lý hoặc theo yêu cầu của quy định pháp quy. Mỗi bộ kết quả đo liều hấp thụ cần sử dụng một vài liều kế để đảm bảo với một mức độ tin cậy nhất định rằng liều hấp thụ nhỏ nhất và lớn nhất được biết. Quy trình này đòi hỏi thời gian chiếu xạ tổng cộng và cấu hình dòng chảy của các liều kế là tương tự như của sản phẩm ^{[23], [30]}.

12.4.4 Các sản phẩm được gia nhiệt hoặc được làm mát. Một hệ đo liều đã được xác định các đặc trưng ở nhiệt độ xử lý hoặc hệ thống có sự phụ thuộc nhiệt độ không đáng kể sẽ được sử dụng để đo. Nếu hệ đo liều được sử dụng phụ thuộc đáng kể vào nhiệt độ, đặt liều kế tại các vị trí quan trắc thường quy được cách ly khỏi gradien nhiệt độ. Xem Phụ lục A1 của ISO/ASTM 52628 và TCVN 11435 (ISO/ASTM 52701).

12.4.5 Ảnh hưởng môi trường. Thay đổi môi trường (ví dụ nhiệt độ, độ ẩm) của liều kế trong quá trình chiếu xạ có thể ảnh hưởng đến đáp ứng của nó. Cần phải tính đến sự thay đổi tiềm ẩn của các ảnh hưởng môi trường khi thiết lập các thông số quy trình để đạt được liều mục tiêu xử lý phù hợp. Nếu có thể, điều chỉnh giá trị đo được của đáp ứng liều kế cho các ảnh hưởng đó. Cũng cần chú ý đến việc vận chuyển và bảo quản các liều kế trước và sau khi chiếu xạ. [Xem TCVN 11435 (ISO/ASTM 52701) và Phụ lục A1 của ISO/ASTM 52628]

12.5 Gián đoạn quá trình xử lý

12.5.1 Nếu có trục trặc trong quá trình xử lý, ví dụ do mất điện, sự tác động của nó đối với quá trình xử lý và sản phẩm phải được đánh giá trước khi khởi động lại việc xử lý. Quy trình đã được thiết lập trong OQ cho việc ra quyết định khi có sự gián đoạn xử lý cần được thực hiện.

12.5.2 Nếu sản phẩm được chiếu xạ dưới nhiệt độ được kiểm soát, cần phải cẩn thận để duy trì các điều kiện này trong suốt thời gian gián đoạn.

12.5.3 Độ đồng đều liều của sản phẩm trong trường hợp gián đoạn xử lý được làm rõ tính đặc trưng trong chứng nhận chất lượng vận hành.

13 Chứng nhận

13.1 Yêu cầu về lập hồ sơ

13.1.1 Hồ sơ thiết bị. Hồ sơ hoặc tài liệu quy chiếu việc hiệu chuẩn và bảo trì thiết bị và thiết bị đo được sử dụng để đo liều hấp thụ đưa vào sản phẩm.

13.1.2 Thông số xử lý. Ghi lại giá trị của các thông số xử lý ảnh hưởng đến liều hấp thụ cùng với thông tin đầy đủ để xác định các thông số này đối với các lô sản phẩm cụ thể hoặc các đợt chạy xử lý.

13.1.3 Đo liều. Ghi lại và lập thành hồ sơ tất cả các dữ liệu đo liều đối với quá trình chứng nhận chất lượng làm việc và đối với xử lý sản phẩm thường quy. Ghi rõ tên của người vận hành, ngày tháng, thời gian, loại sản phẩm, sơ đồ tài, và liều hấp thụ cho tất cả các sản phẩm được xử lý. Ghi lại thời gian thực hiện phân tích liều kế nếu độ ổn định sau chiếu xạ của các liều kế dưới các điều kiện sử dụng đòi hỏi có các hiệu chỉnh sự phụ thuộc vào thời gian cho đáp ứng liều kế.

13.1.4 Độ không đảm bảo đo trong đo liều. Ghi lại ước lượng độ không đảm bảo đo của đo liều hấp thụ trong hồ sơ và các báo cáo, khi thích hợp.

13.1.5 Nhật ký thiết bị chiếu xạ. Ghi lại ngày tháng sản phẩm được xử lý và thời gian bắt đầu và kết thúc chiếu xạ. Ghi lại mọi điều kiện đặc biệt của thiết bị chiếu xạ hoặc thiết bị chiếu xạ có thể ảnh hưởng đến liều hấp thụ vào sản phẩm.

13.1.6 Nhận dạng sản phẩm. Đảm bảo rằng mỗi lô sản phẩm được xử lý mang một dấu hiệu nhận dạng để phân biệt nó với tất cả các lô khác trong thiết bị chiếu xạ. Dấu hiệu nhận dạng này sẽ được sử dụng cho tất cả các tài liệu liên quan đến lô hàng đó.

13.2 Rà soát và chứng nhận

13.2.1 Trước khi đưa sản phẩm ra để sử dụng, rà soát lại các kết quả đo liều và các giá trị được ghi lại của các thông số vận hành để xác nhận sự tuân thủ các yêu cầu kỹ thuật.

TCVN 12020:2017

13.2.2 Phê duyệt và xác nhận liều hấp thụ vào sản phẩm cho từng đợt xử lý phù hợp với chương trình đảm bảo chất lượng của thiết bị chiếu xạ. Việc chứng nhận sẽ được thực hiện bởi các nhân viên được ủy quyền, như đã quy định trong chương trình bảo đảm chất lượng thiết bị chiếu xạ.

13.2.3 Thực hiện việc thanh, kiểm tra tất cả tài liệu theo khoảng thời gian quy định trong chương trình đảm bảo chất lượng để đảm bảo rằng hồ sơ là chính xác và đầy đủ. Nếu phát hiện thấy thiếu sót, phải đảm bảo có hành động khắc phục.

13.3 Lưu giữ hồ sơ. Lập thành bộ hồ sơ quản lý tất cả các thông tin liên quan đến từng đợt sản xuất (ví dụ như bản sao của tài liệu chuyển hàng, giấy chứng nhận chiếu xạ, và hồ sơ kiểm soát chiếu xạ). Lưu giữ hồ sơ trong khoảng thời gian quy định nêu trong chương trình đảm bảo chất lượng và chuẩn bị sẵn sàng cho việc thanh, kiểm tra khi được yêu cầu.

14 Độ không đảm bảo của liều đo và độ biến thiên trong quá trình xử lý

14.1 Tất cả các phép đo liều cần phải đi kèm với ước lượng về độ không đảm bảo. Xem TCVN 12021 (ISO/ASTM 51707) TCVN 12019 (ISO/ASTM 51261) và TCVN 9595-3 (ISO/IEC Guide 98-3).

Tất cả các thành phần của độ không đảm bảo cần được nêu trong ước lượng, bao gồm các thành phần phát sinh từ hiệu chuẩn, tính biến thiên của liều kế, độ tái lập của dụng cụ, và ảnh hưởng của đại lượng tác động. Một phân tích định lượng đầy đủ các thành phần của độ không đảm bảo đo được gọi là bảng thành phần độ không đảm bảo đo, và sau đó thường được trình bày dưới dạng một bảng. Thông thường, bảng thành phần này sẽ xác định tất cả các thành phần có ý nghĩa của của độ không đảm bảo, cùng với các phương pháp ước lượng, phân bố thống kê và độ lớn của chúng.

Phụ lục A (Tham khảo)

Tia X (bức xạ hãm)

A1 Đặc tính tia X (bức xạ hãm)

A1.1 Xử lý tia X. Các tính chất vật lý của tia X (bức xạ hãm) đã được biết rất rõ và việc sử dụng loại tia này để xử lý vật liệu đã được nghiên cứu rộng rãi [31]. Một số đặc tính quan trọng của công nghệ này được mô tả dưới đây và có thể tìm hiểu thêm thông tin chi tiết từ các tài liệu tham khảo đã chọn được liệt kê trong Thư mục tài liệu tham khảo. Một số thông tin trong số đó có được bằng cách đo lường nhưng phần lớn là dựa trên các phân tích lý thuyết sử dụng phương pháp tính toán Monte Carlo được nêu trong Tài liệu tham khảo [32] và các nguồn dữ liệu trong Tài liệu tham khảo [33] đến [37]. Vì bức xạ X được tạo ra nhờ các điện tử mang năng lượng, máy gia tốc điện tử là cần thiết để tạo ra loại tia này.

A1.2 Máy gia tốc điện tử

A1.2.1 Các dạng khác nhau của máy gia tốc điện tử có thể được sử dụng, bao gồm cả máy tác động trực tiếp và tác động gián tiếp. Các công nghệ năng lượng cao, công suất cao thích hợp cho việc xử lý tia X công nghiệp đã được tổng hợp trong Tài liệu tham khảo [7], [10], [38] đến [58].

A1.2.2 Máy gia tốc tác động trực tiếp. Máy loại này sử dụng máy phát xung hoặc DC điện áp cao áp để tạo ra các điện trường mạnh. Các điện tử được gia tốc nhờ các trường này qua các ống lái chùm tia chân không, một điểm ngoặt hoặc nhiều điểm ngoặt từ catot đốt nóng có điện thế âm cao so với anot được nối đất. Các hệ thống mạnh nhất sử dụng các mạch chỉnh lưu nhiều tầng để chuyển đổi điện áp AC thấp thành điện áp DC cao. Máy gia tốc tác động trực tiếp hiện nay có thể tạo ra năng lượng điện tử tới 5 MeV và công suất chùm điện tử lên tới 300 kW [10], [39], [41], [45] [46] [47], [53].

A1.2.3 Máy gia tốc tác động gián tiếp. Máy loại này sử dụng vi sóng hoặc nguồn AC tần số rất cao (VHF) để gia tốc các điện tử trong các ống dẫn sóng kim loại hút chân không hoặc các hốc cộng hưởng có điện thế đất. Các điện tử nhận năng lượng nhờ chuyển động cùng pha với sóng điện từ. Năng lượng cuối cùng được xác định bởi cường độ trường và chiều dài quỹ đạo của chùm tia. Máy gia tốc VHF và máy gia tốc vi sóng hiện nay có thể tạo ra năng lượng điện tử trong khoảng 5 MeV đến 25 MeV với công suất chùm tia trung bình lên đến 700 kW tại 7 MeV [7], [43], [44], [48] đến [55]. Máy gia tốc cảm ứng tuyến tính có thể được áp dụng trong tương lai [38], [40], [56] đến [58].

CHÚ THÍCH A1.1: Xem ISO/ASTM 51649 để biết thêm chi tiết về máy gia tốc điện tử.

A1.3 Thiết kế bộ chuyển đổi

A1.3.1 Hiệu suất chuyển đổi tia X (Công suất tia X phát ra theo hướng đi về phía trước chia cho công suất điện tử điện tử tới trên bia) tăng theo năng lượng điện tử và số nguyên tử của vật liệu bia. Các kim loại nặng, như tantal, vonfram và vàng là những vật liệu thích hợp vì chúng có số nguyên tử cao và nhiệt độ nóng chảy cao. Các phân tích lý thuyết với chương trình tính Monte Carlo đã chỉ ra rằng

hiệu suất chuyển đổi khoảng 7 % đến 8 % ở 5 MeV và 14 % đến 16 % ở 10 MeV có thể đạt được với độ dày tối ưu của các bia tantalum hoặc vonfram (bằng khoảng 40 % dài điện tử lớn nhất) được hỗ trợ với một mảng đồng hoặc thép không gỉ làm nguội bằng nước [3], [21], [59] đến [65].

A1.3.2 Hầu hết năng lượng tia điện tử được tiêu tán dưới dạng nhiệt trong bộ chuyển đổi và phải được loại bỏ bằng hệ thống làm mát [3], [61]. Độ dày tổng cộng của cơ cấu bia cộng với mảng làm mát nên lớn hơn một chút so với dài điện tử lớn nhất để tránh chiếu xạ các sản phẩm với các điện tử sơ cấp.

A1.4 Cấu hình bộ chuyển đổi và chùm tia

A1.4.1 Trái ngược với thiết bị chụp X quang và thiết bị xạ trị tia X chúng sử dụng chùm tia điện tử đường kính nhỏ để tạo ra chùm tia X được chuẩn trực tốt, các thiết bị xử lý bức xạ phải sử dụng chùm điện tử với tiết diện ngang lớn và các bia có diện tích lớn để tán công suất chùm điện tử. Chùm điện tử có thể được làm phân tán bằng các nam châm quét, thấu kính từ phân kỳ hoặc các lá tán xạ.

A1.4.2 Đối với chiếu xạ sản phẩm trên băng tải chuyển động, sẽ là thuận lợi để sử dụng quét chùm tia để bao phủ một cách đồng đều trên một vùng mục tiêu kéo dài hướng dọc theo băng tải. Cấu hình này làm tăng chiều rộng của trường bức xạ và tạo điều kiện xử lý lượng lớn vật liệu (xem hình A1.1) [3], [42], [52], [60] đến [62], [66] đến [72].

A1.5 Các đặc tính của tia bức xạ hãm

A1.5.1 Trong dải năng lượng điện tử từ 5 đến 10 MeV, công suất tia X (P_x) phát ra theo hướng về phía trước bởi một bộ chuyển đổi tối ưu là tỷ lệ với dòng điện phát chùm điện tử/nhân với bình phương của năng lượng điện tử E [9], [21], [42], [59], [61], [64], [65], [69], [73]. Với công suất chùm điện tử không thay đổi $P_e = I E$, công suất chùm tia X phát ra tăng tuyến tính với năng lượng điện tử

$$P_x = [f] I E^2 = [f] P_e E \tag{A1.1}$$

$$\eta = P_x / P_e = [f] E \tag{A1.2}$$

Trong đó

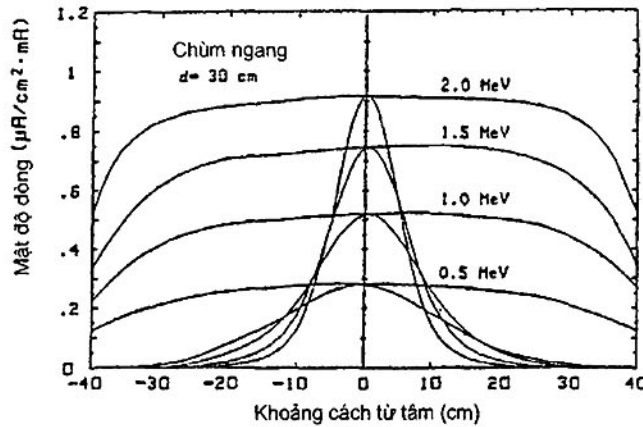
f là hệ số tỷ lệ, và

n là hiệu quả chuyển đổi tia X.

A1.5.2 Không giống như bức xạ gamma từ các đồng vị phóng xạ, bức xạ tia X năng lượng cao không phát ra đẳng hướng mà tập trung theo hướng chùm điện tử (xem các Hình A1.2 và A1.3) [21], [22], [61], [71] đến [76]. Phân tán theo góc giảm dần khi năng lượng của các điện tử tăng lên. Ví dụ, tỷ lệ cường độ bức xạ X ở hướng về phía trước so với hướng lệch bên (lệch nhẹ về phía sau) với chùm điện tử có đường kính nhỏ trên bia dày, mật độ cao là khoảng 4/1 ở 3 MeV, 10/1 ở 5 MeV và 40/1 ở 10 MeV (xem Hình A1.4) [76].

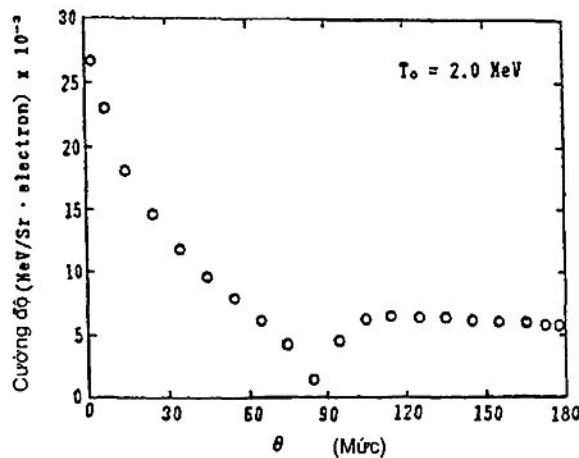
A1.5.3 Sự tập trung hướng về phía trước làm tăng cường độ bức xạ và làm giảm kích thước của trường bức xạ so với nguồn phát gamma diện tích lớn có mức phát ra và năng lượng. Các hiệu ứng

này làm giảm thời gian xử lý và thể tích sản phẩm trong trường bức xạ. Điều này tạo thuận lợi cho việc chuyển đổi từ một loại sản phẩm này sang sản phẩm khác trong quá trình chiếu xạ liên tục.



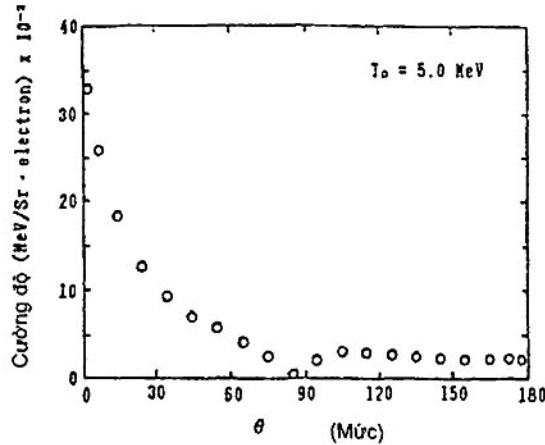
Hình A1.1 - Phân bố mật độ dòng chùm tia dọc theo hướng quét (đường cong rộng) và vuông góc với hướng quét (đường cong hẹp) của máy gia tốc số 1 của JAERI Takasaki

(Hình 2.1 trong Tài liệu tham khảo [61])



Hình A1.2 - Cường độ tia X trên điện tử 2 MeV tới vuông góc trên bia tantali có chiều dày của một dài điện tử CSDA như một hàm của góc phát xạ được tính bằng chương trình tính ETRAN

(Hình 3.3 trong Tài liệu tham khảo [61])

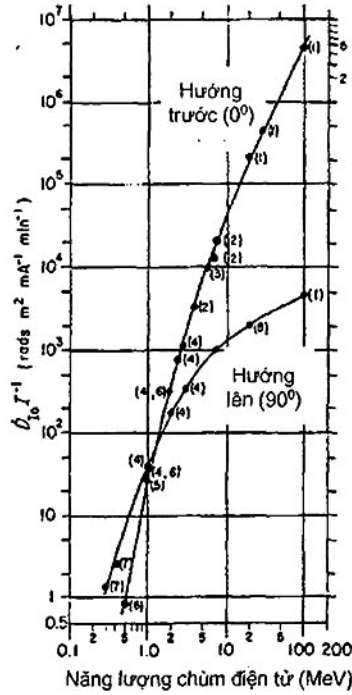


Hình A1.3 - Cường độ tia X trên điện tử 5 MeV tới vuông góc trên bia tantali có chiều dày của một dải điện tử CSDA như một hàm của góc phát xạ được tính bằng chương trình tính ETRAN

(Hình 3.4 trong Tài liệu tham khảo [61])

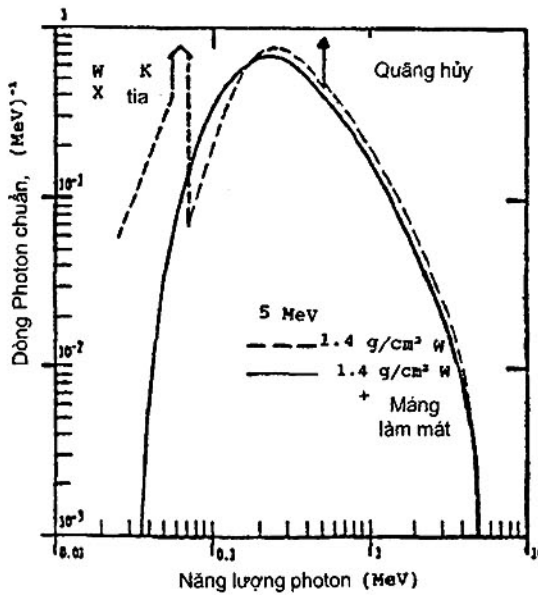
A1.5.4 Phổ năng lượng liên tục của bức xạ hãm phát ra từ cơ cấu bia trải dài từ khoảng 35 keV đến năng lượng cực đại của các điện tử tới trên bộ biến đổi. Đối với các năng lượng photon lớn hơn 0,3 MeV, số photon phát ra trên mỗi đơn vị năng lượng giảm xuống khi năng lượng photon tăng lên (xem các Hình A1.5 và A1.6) [21], [22], [60], [73], [74], [75], [77]. Năng lượng photon trung bình được tạo ra bởi các điện tử 5 MeV trong bia tantali hoặc vonfram có độ dày tối ưu là khoảng 0,75 MeV và năng lượng photon có xác suất cao nhất là khoảng 0,3 MeV.

A1.5.5 Mặc dù năng lượng photon trung bình thấp so với năng lượng cực đại nhưng sự đâm xuyên của bức xạ tia X chùm rộng 5 MeV trong các chất hấp thụ có số nguyên tử thấp vẫn lớn hơn bức xạ gamma từ Cobalt 60 có năng lượng trung bình 1,25 MeV (xem Hình A1.7). Hiệu ứng này là do các thành phần năng lượng cao hơn và tập trung về hướng phía trước của bức xạ tia X ngược với sự phát xạ đẳng hướng của bức xạ gamma từ các nguồn có diện tích lớn [3], [9], [38], [57], [62], [64], [65], [71], [72].



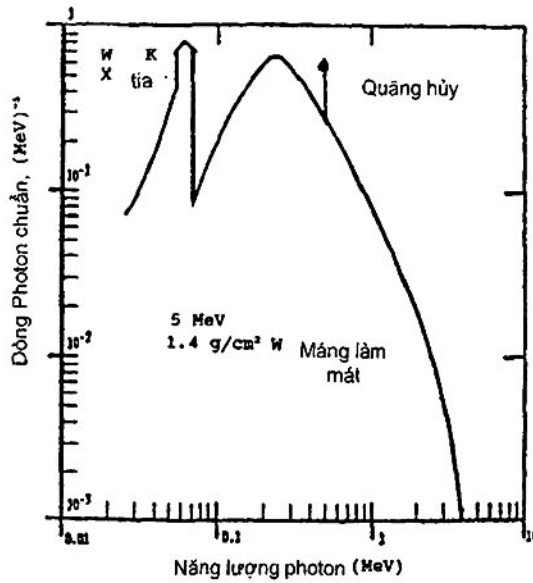
CHÚ THÍCH 1: Các số nằm dọc theo đường cong được trích dẫn từ Tài liệu tham khảo [76].

Hình A1.4 - Suất phát xạ tia X từ các bia có số Z cao (Hình E.1 trong Tài liệu tham khảo [76])



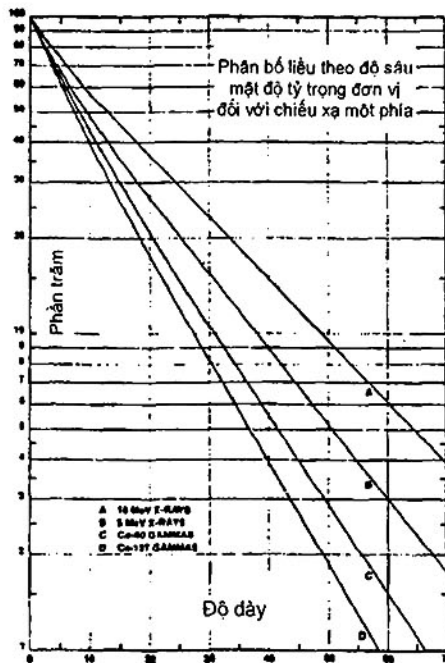
CHÚ THÍCH 1: Kết quả được cho đối với phát ra cho cả hai trường hợp: chỉ duy nhất bởi đĩa bộ chuyển đổi và bởi đĩa chuyển đổi cùng với máng làm mát. Kết quả là cho năng lượng chùm điện tử tới 5 MeV và bao gồm tất cả photon không kể góc đi ra.

Hình A1.5 - Phổ của các photon phát ra (Hình 2a trong Tài liệu tham khảo [21])



CHÚ THÍCH 1: Kết quả ứng với sự phân xạ bởi toàn bộ bia. Phổ của các photon phát ra từ bia có bộ chuyển đổi 1,4 g/cm² W. Kết quả là cho năng lượng chùm điện từ tới 5 MeV và bao gồm tất cả photon không kể góc đi ra.

Hình A1.6 - Phổ các photon phản xạ (Hình 2b trong Tài liệu tham khảo [21])



CHÚ THÍCH 1: Phân bố liều theo độ sâu theo phần trăm trong nước hoặc vật liệu có tỉ trọng đơn vị đối với chiếu xạ một phía: (A) tia X 10 MeV; (B) tia X 5 MeV; (C) tia gamma nguồn Co-60 và (D) tia Gamma nguồn Cs-137

Hình A1.7 - Phân bố liều theo độ sâu (Hình 1 trong Tài liệu tham khảo [9])

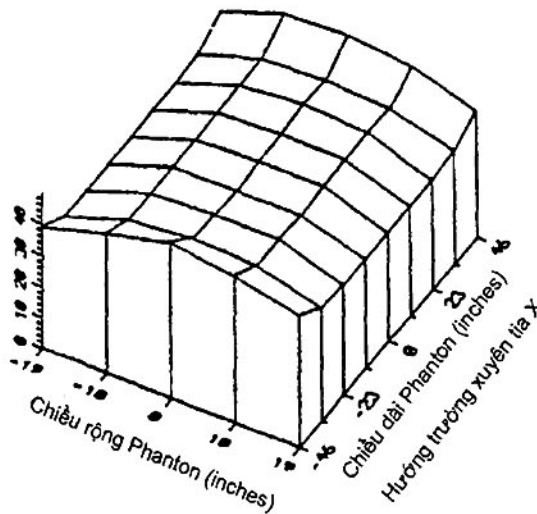
A1.6 Phân bố liều hấp thụ

A1.6.1 Với bộ hấp thụ thể tích lớn và một băng tải đơn hướng, phân bố liều theo chiều dọc (song song với hướng chuyển động băng tải) là gần như đồng nhất, ngoại trừ sự tăng nhẹ trên các điểm biên ở đoạn đầu và cuối của chất hấp thụ. Mặt khác, sự phân bố liều ngang (vuông góc với hướng chuyển động băng tải) giảm ở cả hai mặt của chất hấp thụ, ngay cả khi nguồn tia X rộng hơn chất hấp thụ (xem Hình A1.8) [3], [4], [62], [72].

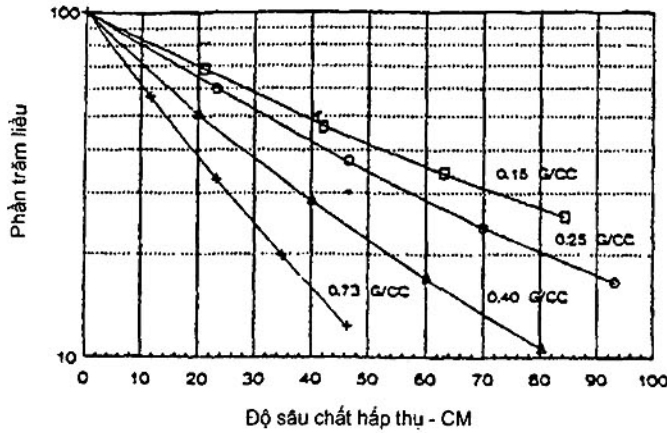
A1.6.2 Sự phân bố liều theo độ sâu (các đường cong suy giảm liều) thu được bằng cách chiếu xạ các vật liệu số nguyên tử thấp (ví dụ như nước, plastic, hoặc bia cứng) với 5 tia X MeV về cơ bản là hàm mũ. Tuy nhiên, độ dốc của các đường cong có xu hướng giảm nhẹ khi độ dày tăng, do việc làm cứng của phổ tia X (đó là sự suy giảm của các photon là lớn hơn đối với năng lượng thấp hơn) (xem Hình A1.9) [3], [4], [21], [62], [71], [72].

A1.6.3 Với các bia được làm dài, chất hấp thụ có diện tích rộng và băng tải sản phẩm di chuyển, liều bề mặt ở mặt đối diện với bia là khá gần điểm ở đỉnh của đường cong hàm mũ của liều theo độ sâu (xem Hình A1.10) [3], [4], [71], [72]. Do đó, hiệu ứng tích lũy liều gần bề mặt (được quan sát thấy đối với bức xạ gamma hoặc chùm tia X được chuẩn trực và chất hấp thụ đứng yên [78] [79] [80]) là không đáng kể trong quá trình chiếu xạ bằng tia X chùm rộng.

Đơn vị tính theo hệ SI

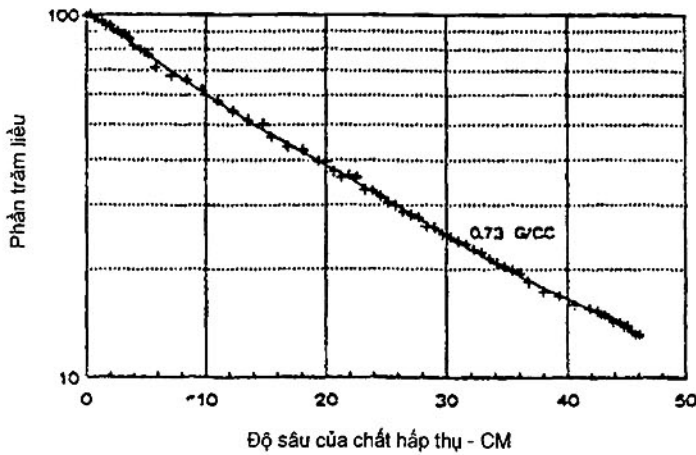


Hình A1.8 - Bản đồ đường đẳng liều, phơi xạ động (Hình 3 trong Tài liệu tham khảo [62])



Hình A1.9 - Đường cong suy giảm liều được đo đối với tia X 5 MeV trong các chất hấp thụ có mật độ khác nhau với băng tải chuyển động và chùm tia quét

(Hình 5 trong Tài liệu tham khảo [3])



Hình A1.10 - Đo của một đường cong suy giảm liều được đo đối với tia X 5 MeV trong chất hấp thụ nặng nhất (ván ép) với băng tải chuyển động và chùm tia quét

(Hình 6 trong Tài liệu tham khảo [3])

A1.6.4 Tỷ số liều max/liều min và mức sử dụng năng lượng photon phụ thuộc vào kích cỡ và mật độ của vật liệu chiếu xạ cũng như phương pháp vận chuyển vật liệu qua trường bức xạ^{[3], [59], [68], [69], [72]}. Bằng cách sử dụng các hệ thống băng tải hai chiều với chiếu xạ hai mặt và bằng cách sắp xếp lại các lớp vật liệu, về mặt lý thuyết có thể đạt được tỷ số liều max/min thấp (ví dụ, 1,1 đến 1,2) và mức sử dụng năng lượng photon cao (ví dụ, 50 % đến 60 %) với khối lượng lớn vật liệu hấp thụ có số nguyên tử thấp và mật độ thấp (ví dụ 0,3 g/cm³)^{[8], [81], [82]}.

Thư mục tài liệu tham khảo

- [1] CFR-2012-title21-vol3-sec 179-26.
- [2] IAEA-TECDOC_1287.
- [3] Cleland, M. R., Thompson, C. C., Kato, H., Odera, M., Morrissey, R. F., Herring, C. M., O'Neill, M. T., Wilcott, T. R., Masefield, J., Hansen, J. M., Saylor, M. C., and Sloan, D. P., "Evaluation of a New X-Ray Processing Facility," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B56/57, 1991, pp. 1242-1245.
- [4] Takehisa, M., Saito, T., Takahashi, T., Sato, Y., and Sato, T., "Characteristics of a Contract Electron Beam and Bremsstrahlung (X-Ray) Irradiation Facility of Radia Industry," *Radiation Physics and Chemistry*, Vo142, Nos. 1-3, 1993, pp. 495-498.
- [5] Aikawa, Y., "A new facility for X-ray irradiation and its application," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 57, Nos. 3-6, 2000, pp. 609-612.
- [6] Watanabe, T., "Best use of high-voltage, high-powered electron beams: a new approach to contract irradiation services," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 57, Nos. 3-6, 2000, pp. 635-639.
- [7] Miller, R. B., "A Description of SureBeam Food Irradiation Facilities," *Proceedings of the 17th International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry. AIP Conference Proceedings*, 2003, American Institute of Physics.
- [8] Tanaka, S., Agernstsu, K., Sunaga, H., Tanaka, R., Taniguchi, S., and Kashiwagi, M., "High-Power X-Ray Irradiation Facility for Industrial Application. (I) Irradiation Method," *Proceedings 23rd Annual Meeting on Radioisotopes in the Physical Sciences and Industry. 1986*, p. 36.
- [9] Cleland, M. R., and Pageau, G. M., "Comparisons of X-Ray and Gamma-Ray Sources for Industrial Irradiation Processes," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B24/25, 1987, pp. 967-972.
- [10] Thompson, C. C., and Cleland, M. R., "High-Power Dynamitron Accelerators for X-Ray Processing," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 840/41, 1989, pp. 1137-1141.
- [11] Jongen, Y., and Stichelbaut, F., "The Palletron: An X-Ray High Dose Uniformity Pallet Irradiator," *Proceedings of the 17th International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry. AIP Conference Proceedings*, 2003, American Institute of Physics.
- [12] Sunaga, H., Tachibana, H., Tanaka, R., Okamoto, J., Terai, H., and Saito, T., "Study on Dosimetry of Bremsstrahlung Radiation Processing," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 42, Nos. 4-6, 1993, pp. 749-752.
- [13] Mehta, K., "Applicability study on existing dosimetry systems to high-power bremsstrahlung irradiation," *Radial. Phys. Chem*, 68, 2003, pp. 959-962.
- [14] Cleland, M. R., Gregoire, O., Stichelbaut, F., Gomola, I., Galloway, R. A., and Schlecht, J., "Energy determination in industrial X-ray processing facilities," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B 241, 2005, pp. 850-853.

- [15] Gregoire, O., Cleland, M. R., Mittendorfer, J., Dababneh, S., Ehlermann, D. A. E., Fan, X., Kappeler, F., Logar, J., Meissner, J., Mullier, B., Stichelbaut, F., and Thayer, D. W., "Radiologica Safety of Food Irradiation with High Energy X-Rays: Theoretical Expectations and Experimental Evidence," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 67, 2003, pp. 169-183.
- [16] Gregoire, O., Cleland, M. R., Mittendorfer, J., Vander Donckt, M. and Meissner, J., "Radiologica Safety of Medical Devices Sterilized with X-Rays at 7.5 MeV," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol67, 2003, pp. 149-167.
- [17] Mehta, K., Kovacs, A., and Miller, A., "Dosimetry for Quality Assurance in Electron Beam Sterilization of Medical Devices," *Med. Device Technol.*, 4, 1993, pp. 24-29.
- [18] *Monte Carlo Transport of Electrons and Photons*, Jenkins, T. M., Nelson, W. R., and Rindi, A., eds., Plenum Press, New York, 1988.
- [19] Saylor, M. C. and Jordan, T. M., "Application of Mathematical Modeling Technologies to Industrial Radiation Processing," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 57, 2000, p. 697.
- [20] Chilton, A. B., Shultis, J. K., and Faw, R. E., *Principles of Radiation Shielding*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1984.
- [21] Seltzer, S. M., Farrell, J. P., and Silverman, J., "Bremsstrahlung Beams from High-Power Electron Accelerators for Use in Radiation Processing," *IEEE Transactins on Nuclear Science*, NS-30, No. 2, 1983, pp. 1629-1633.
- [22] Meissner, J., Abs, M., Cleland, M. R., Herer, A. S., Jongen, Y., Kuntz, F., and Strasser, A., "X-Ray treatment at 5 MeV and above," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 57, Nos. 3-6, 2000, pp. 647-651.
- [23] Ehlermann, D. A. E., "Dose Distribution and Methods for its Determination in Bulk Particulate Food Materials," *Health Impact, identification, and Dosimetry of Irradiated Food*, BOgl, K. W., Regulla, D. F., and Suess, M. J., eds., A World Health Organization Report, Institut flir Strahlenhygiene des Bundesgesundheitsamtes, Munchen, 1988, pp. 415-419.
- [24] McLaughlin, W. L., Jarrett, Sr., R. D., and Olejnik, T. A., "Dosimetry," *Preservation of Food by Ionizing Radiation*, Vol I, CRC Press, Boca Raton, FL, 1983, Chap. 8.
- [25] Vas, K., Beck, E. R. A., McLaughlin, W. L., Ehlermann, D. A. E., and Chadwick, K. H., "Dose Limits Versus Dose Range," *Acta Alimentaria*, Vol 7, No. 2, 1978, p. 343.
- [26] *Dosimetry for Food Irradiation*, Technical Reports Series No. 409, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2002. Available from IAEA, Wagramerstrasse 5, P.O. Box 100, A-1400, Vienna, Austria.
- [27] Mehta, Kishor, "Process Qualification for Electron-Beam Sterilization," *Medical Device & Diagnostic Industry*, June 1992, pp. 122-134.
- [28] Strelczyk, M., Lopez, E. J., Thompson, C. C. and Cleland, M. R., "Modification of Electron Beam Dose Distributions for Complex Product Configurations," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 35, 1990, Nos. 4-6, pp. 803-810.
- [29] Thompson, C. C., Cleland, M. R. and Lopez, E. J., "Apparatus and Method for Promoting Uniform Dosage of Ionizing Radiation in Targets," U. S. Patent No. 4,983,849, Jan, 8, 1991.

- [30] Stenger, V., Sipos, T., Laszlo, L., Hargittai, P., Kovacs, A., and Horvath, I., "Experiences with a High Capacity Industrial Scale Pilot Onion Irradiator," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 22, 1983, pp. 717-732.
- [31] Cleland, M. R., "X-Ray Processing: A Review of the Status and Prospects," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 42, Nos. 1-3, 1993, pp. 499-503.
- [32] Methods for Calculating Bremsstrahlung Properties and Dose Distributions in Absorbing Materials and Products; Monte Carlo Codes: CCC-107/ETRAN, CCC-200/MCNP, CCC-331/EGS4, and CCC-467/ITS, Available from Radiation Safety Information Computational Center, Oak Ridge National Laboratory, P.O. Box 2008, Oak Ridge, TN 37831. Also GEANT: Detector Description and Simulation Tool, CERN Program Library W5013.
- [33] Storm, E., and Israel, H., *Photon Cross-Sections from 0.001 to 100 MeV for Elements 1 through 100*, LASL-3753, available from NTIS, 1967.
- [34] Evans, R. D., "X-Ray and Gamma-Ray Interactions," *Radiation Dosimetry*, Vol 1, F. H. Attix and W. C. Roesch, Eds., Academic Press, New York, NY, 1968.
- [35] Hubbell, J. H., "Photon Mass Attenuation and Energy Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV," *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, Vol 33, 1982, pp. 1269-1290.
- [36] Attix, F. H., *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*, John Wiley & Sons, New York, 1986.
- [37] *NIST Standard Reference Data Products*, 1991 Catalogue, p. 13, NIST X-Ray and Gamma-Ray Attenuation Coefficients and Cross Sections and NIST Electron and Positron Stopping Powers and Ranges.
- [38] Humphries, S., Jr., and Farrell, J. P., "Machine Sources for Food Irradiation," *USDOE Contract No. DE-AC04-87AL37515*, National Technical Information Service, 5285 Port Royal Road, Springfield, VA 22161, 1988.
- [39] Cleland, M. R., "High Power Electron Accelerators for Industrial Irradiation Processing," *Radiation Processing of Polymers*, A. Singh and J. Silvennan, Eds., Carl Hanser Verlag, Munich, 1992.
- [40] Humphries, S., Jr., *Principles of Charged Particle Acceleration*, John Wiley & Sons, New York, NY, 1986.
- [41] Hoshi, Y., and Mizusawa, K., "5 MV, 30 mA Industrial Electron Processing System," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 856157, 1991, pp. 1236-1238.
- [42] Koch, H. W., and Eisenhower, E. H., "Electron Accelerators for Food Processing," *Radiation Preservation of Foods*, NAS-NRC Publication 1273, 1965.
- [43] Van Lancker, M., Herer, A., Cleland, M. R., Jongen, Y., Abs, M., "The IBA Rhodotron: An Industrial High-Voltage High-Powered Electron Beam Accelerator for Polymers Radiation Processing," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B151, 1999, pp. 242-246.
- [44] Jongen, Y., Abs, M., Poncelet, E., and Herer, A., "The IBA Rhodotron TTIOOO: A very high-powered electron beam accelerator," *Proceedings of IMRP 2003, Radiation Physics and Chemistry* (in press, 2004).
- [45] Yotsumoto, K., Sunaga, H., Tanaka, S., Kanazawa, T., Agernatsu, T., Tanaka, R., Yoshida, K.,

- Taniguchi, S., Sakamoto, I., and Tamura, N., "High-Power Bremsstrahlung X-Ray Source for Radiation Processing," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 31, Nos. 1-3, 1988, pp. 363-368.
- [46] Odera, M., Nagakura, K., and Tanaka, Y., "Tsuburaba Electron Irradiation Facility," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 35, Nos. 4-6, 1990, pp. 534-538.
- [47] Uehara, S., Taniguchi, S., Kashiwagi, M., Mizusawa, K., Sakamoto, I., Hoshi, Y., and Tomita, K., "A 1 MV, 30 mA EB/X-Ray Processing System," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 42, Nos. 1-3, 1993, pp. 515-518.
- [48] McKeown, I., "Radiation Processing Using Electron Linacs," *IEEE Transactions on Nuclear Science* NS-32, No. 5, 1985, pp. 3292-3296.
- [49] McKeown, I., and Sherman, N. K., "Linac Based Irradiators" *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 25, Nos. 1-3, 1985, pp. 103-109.
- [50] McKeown, J., Labrie, J. P., and Funk, L. W., "An Intense Radiation Source," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B10/11, 1985, pp. 846-850.
- [51] Sadat, T., "Progress Report on Linear Accelerators," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 35, Nos. 4-6, 1990, pp. 616-618.
- [52] Smittle, B. J., Rhodes, M. E., and Brown, R. E., "A New Linear Accelerator Facility for the Treatment of Agricultural Commodities," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 856/57, 1991, pp. 1229-1231.
- [53] Abramyan, E. A., "Industrial Electron Accelerators and Applications," Hemisphere Publ. Corp., Harper & Row, New York, 1988.
- [54] Longen, Y., Abs, M., Genin, F., Nguyen, A., Capdevillat, J.M. and Defrise, D., "The Rhodotron, a new 10 MeV, 100 kW, cw metric wave electron accelerator," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B79, 1993, pp. 865-870.
- [55] Auslender, V. L., Bryazgin, A.A., Faktorovich, B. L., Gorbunov, V. A., Kokin, E. N., Korobeinikov, M. V., Krainov, G. S., Lukin, A. N., Maximov, S. A., Nekbaev, V. E., Panfilov, A. D., Radchenko, V. N., Tkachenko, V. O., Tuvik, A. A., and Voronin, L.A., "Accelerators for E-beam and X-ray Processing," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 63, Nos. 3-6, 2002, pp. 613-615.
- [56] Mathews, S. M., "Food Processing with Electrically Generated Photon Radiation," *Radiation Disinfection of Food and Agricultural Products*, J. H. Moy, Ed. University of Hawaii, 1985, pp. 283-294.
- [57] Lagunas-Solar, M. C., and Mathews, S. M., "Radionuclide and Electric Accelerator Sources for Food Irradiation," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 25, Nos. 4-6, 1985, pp. 691-702.
- [58] Goodman, D. L., Bix, D. L., and Dave, V. R., "High energy electron beam processing experiments with induction accelerators," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B99, 1995, pp. 775-779.
- [59] Farrell, I. P., Seltzer, S. M., and Silvennan, J., "Bremsstrahlung Generators for Radiation Processing," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 22, Nos. 3-5, 1983, pp. 469-478.
- [60] Tanaka, S., Tanaka, R., Tabata, T., Ito, R., Nakai, Y., and Ozawa, K., "Data on Thick Target

- Bremsstrahlung Produced by Electrons, "JAERI-M83-019, Japan Atomic Energy Research Institute, 1983.
- [61] Sunaga, H., Tanaka, S., Kanazawa, T., Agernatsu, T., Yotsumoto, K., Tanaka, R., Yoshida, K., Taniguchi, S., Mizusawa, K., Suzuki, M., and Sakamoto, I., "Development of High-Power X-ray Generation Target for Radiation Processing," *JAERI-M 89-182*, Japan Atomic Energy Research Institute, 1989.
- [62] Cleland, M. R., Thompson, C. C., and Strelczyk, M., "Advances in X-Ray Processing Technology," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 35, Nos. 4-6, 1990, pp. 632-637.
- [63] Seltzer, S. M., Hubbell, J. H., and Berger, J. J., "Some Theoretical Aspects of Electron and Photon Dosimetry," *Proceedings of the IAEA Symposium on National and International Standardization of Radiation Dosimetry*, IAEA-SM-222105, Vol II, 1978.
- [64] Seltzer, S. M., and Berger, M. J., "Energy Deposition by Electron, Bremsstrahlung and ^{60}Co Gamma-Ray Beams in Multi-Layer Media," *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, Vol 1138, No.5, 1987, pp. 349-364.
- [65] Seltzer, S.M., "Applications of ETRAN Monte Carlo Codes," *Monte Carlo Transport of Electrons & Photons*, T. M. Jenkins, W. R. Nelson, and A. Rindi, Eds. Plenum Press, New York, NY, 1988.
- [66] Morganstern, K. H., "X-Ray Radiation Sources," *Proceedings Seminar on the Radiation Processing Industry, Its Prospects and Problems*, American Nuclear Society, 1964.
- [67] Farrell, J. P., "The Bremsstrahlung Radiation Field of a Scanned Monoenergetic Electron Beam," *Proceedings NUCLEX 66*, International Nuclear Industries Fair, Basle, Switzerland, 1966.
- [68] Farrell, J. P., "High-Power Bremsstrahlung Sources for Radiation Sterilization," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 14, Nos. 3-6, 1979, pp. 377-387.
- [69] Farrell, J. P., "Examination of Product Throughput Obtained from High-Power Bremsstrahlung Sources," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, NS-28, No. 2, 1981, pp. 1786-1793.
- [70] Sunaga, H., Agernatsu, K., Tanaka, S., and Tanaka, R., "Preliminary Studies of X-Ray Irradiation Using Industrial Electron Accelerator for Radiation Processing," *Proceedings 20th Annual Meeting on Radioisotopes in the Physical Sciences and Industry*, 1983, p. 144.
- [71] Saylor, M. C., "Developments in Radiation Equipment Including the Application of Machine-Generated X-Rays to Medical Product Sterilization," *Sterilization of Medical Products*, Polyscience Publications, Morin Heights, Canada, Vol V, pp. 327-344, 1991.
- [72] Takehisa, M., Saito, T., Takahashi, T., Sato, T., Tanaka, S., Agematsu, T., Taniguchi, S., and Sakamoto, I., "Present Status of Industrial X-Ray (Bremsstrahlung) Technology and the Benefit as a Food Processing Radiation Source" *Proceedings of the International Symposium on Cost-Benefit Aspects of Food Irradiation Processing*, IAEA-SM-328/22, 1993.
- [73] Koch, H. W., and Motz, J. W., "Bremsstrahlung Cross-Section Formulas and Related Data," *Reviews of Modern Physics*, Vol 31, No.4, 1959, pp. 920-955.
- [74] Cleland, M. R., Herer, A. S., Meissner, J., Abs, M., Jongen, Y., Kuntz, F., and Strasser, A., "X-Ray Technology for Food Processing," *Proceedings of the Intertech Conference, Food Irradiation 99*, 1999,

Intertech Corporation, Portland, Maine 04105.

- [75] Cleland, M. R., Meissner, J., Herer, A. S., and Beers, E. W., "Treatment of Foods with High-Energy X-Rays," *Proceedings of the Sixteenth International Conference on Applications of Accelerators In Research and Industry. AIP Conference Proceedings 576*, 2001, American Institute of Physics.
- [76] Radiation Protection Design Guidelines for 0.1-100 MeV Particle Accelerator Facilities," *NCRP Report No. 51*, National Council on Radiation Protection and Measurements, Washington, DC, 1977.
- [77] Berger, M. J., and Seltzer, S. M., "Bremsstrahlung and Photoneutrons from Thick Tungsten and Tantalum Targets," *Physical Review c*, 2, 1970, p. 621.
- [78] Johns, H. E., "The Physics of Radiation Therapy," *Publication No.116*, American Lecture Series, Charles C. Thomas, Springfield, IL, 1953.
- [79] Laughlin, J. S., "Physical Aspects of Betatron Therapy," *Publication No. 196*, American Lecture Series, Charles C. Thomas, Springfield, IL, 1954.
- [80] Johns, H. E., "X Rays and Teleisotope Gamma Rays," *Radiation Dosimetry*, Vol III, F. H. Attix and E. Tochilin, Eds., Academic Press, New York, NY, 1969.
- [81] Tanaka, S., Agematsu, K., Sunaga, H., and Tanaka, R., "Dose Analysis Program of Bremsstrahlung for Radiation Processing," *Proceedings 22nd Annual Meeting on Radioisotopes in the Physical Sciences and Industry*, 1985, p. 48.
- [82] Taniguchi, S., Kashiwagi, M., Suzuki, M., Sakamoto, 1., Sunaga, H., Kanazawa, T., Yotsumoto, K., Tanaka, S., Tanaka, R, and Yoshida, K., "High-Power X-Ray Irradiation Facility for Industrial Application. (II) Conceptual Design of Facility," *Proceedings 23rd Annual Meeting on Radioisotopes in the Physical Sciences and Ind.*, 1986, p. 37.
-