

加速器学会
平成26年8月9日
リンクステーションホール青森(青森市)

放射化物の管理について



高エネルギー加速器研究機構
梶本 和義

アウトライン

- 放射化物の規制
- 放射化のメカニズム
- 固体の放射化物管理
- 構造体の放射化
- 空気水の放射化
- まとめ

放射化物の規制

- 課長通達(平成10年)
 - 意図せずして放射能を持つに至ったもの
 - 対象 → 機器
- 法令(平成22年)
 - 放射線発生装置から発生した放射線によって汚染された物(放射性汚染物) → 機器, 遮へい体
 - 空気, 水
 - 構造体
 - 規則14条(7)2:放射線発生装置から発生した放射線により生じた放射線を放出する同位元素によって汚染されたもの(以下放射化物という)

放射線発生装置の法令上の分類

放射線障害防止法では表面から10cmで $0.6\mu\text{Sv/h}$ を超えるもので、**加速の原理**を基に以下のように分類されている。

(1) 電子加速器

直線加速装置、マイクロトロン、ベータトロン、シンクロトロン

(2) 粒子加速器

直線加速装置、コッククロフト・ワルトン型、ファン・デ・グラーフ型、変圧器型、シンクロトロン、シンクロサイクロトロン、プラズマ発生装置

目的・粒子・エネルギーと放射化レベル

- 放射線発生装置を放射化により区分する必要あり
- 使用目的
 - 医療、非破壊検査、分析、放射光利用; 低放射化
 - RI製造、核物理研究; 高放射化
- 加速粒子
 - 電子; 低放射化
 - 陽子、重陽子; 高放射化
 - 重イオン; 低放射化
- 加速エネルギー(出力)
 - 6MeV以下 (1W以下); 非放射化
 - 数10MeV (数10W) ; 低放射化
 - 数100MeV以上 (数kW以上); 高放射化

加速器の規模による放射化の範囲

加速器本体、遮蔽体、建屋等が放射化する発生装置
30 MeV < 電子
10 MeV < 粒子
中性子発生装置

加速器本体のみ放射化する発生装置
15 MeV < 電子 < 30 MeV
2.5 MeV < 粒子 < 10 MeV
(ベビーサイクロ等)

標的周辺のみ等一部が放射化する発生装置
6 MeV < 電子 < 15 MeV
医療用直線加速装置
及び放射光リング
2.5 MeV < 粒子 < 10 MeV (加速粒子数の少ないもの)

放射化の可能性がない発生装置
電子 < 6 MeV
粒子 < 2.5 MeV
(分析用加速器・年代測定用加速器)

放射線発生装置の設置の状況

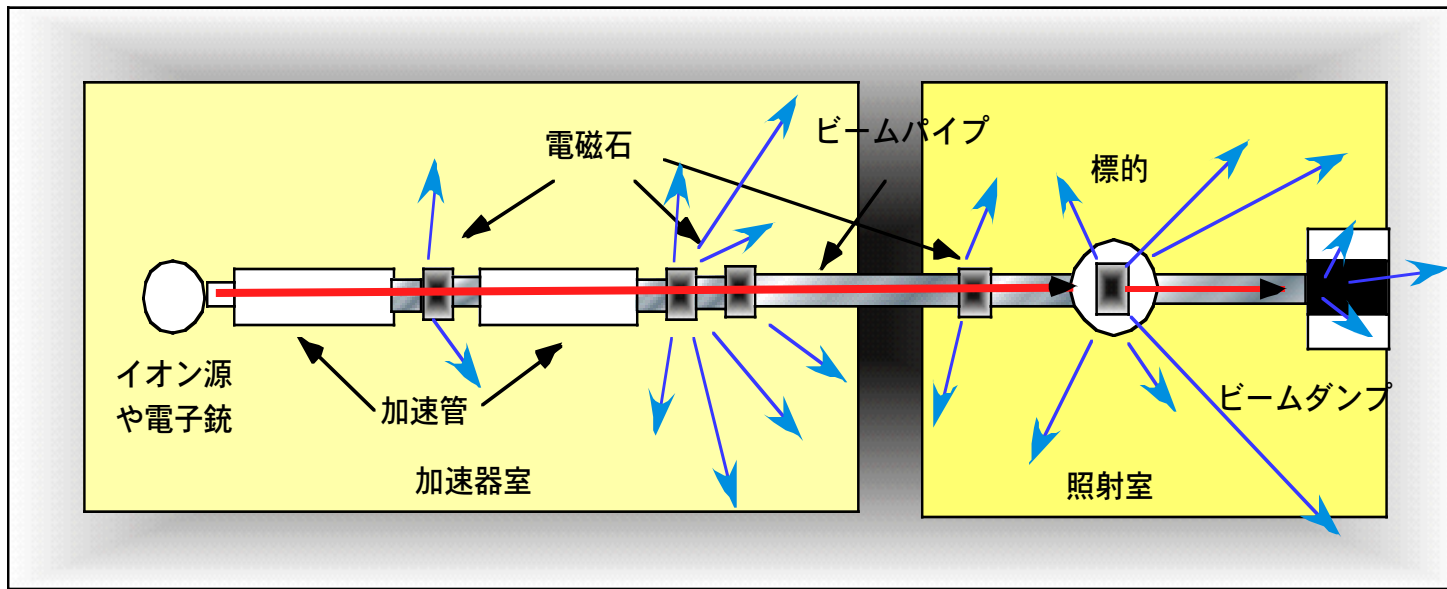
JRIA 2012年RI利用統計

	機関総数	医療機関	教育機関	研究機関	民間企業	その他
総数	1,458	1,066	69	149	136	38
(構成比%)	(100%)	(73.1%)	(4.7%)	(10.2%)	(9.3%)	(2.6%)
サイクロトロン	200	133	4	23	37	3
シンクロトロン	37	7	4	22	3	1
シンクロサイクロトロン	-	-	-	-	-	-
直線加速装置	1,081	922	24	44	57	34
ベータトロン	3	-	1	2	-	-
ファン・デ・グラーフ加速装置	39	-	15	23	1	-
コッククロフト・ワルトン加速装置	70	-	17	23	30	-
変圧器型加速装置	17	-	-	9	8	-
マイクロトロン	10	4	4	2	-	-
プラズマ発生装置	1	-	-	1	-	-

放射化のメカニズム

加速器で粒子を加速し、電磁石(レンズ)でビームサイズを絞ったり、曲げたりして、標的に照射する。残りビームはダンプで止める。その際、加速粒子がビームパイプ、標的などにあたり、放射化される。同時に、中性子などの2次粒子が周辺に放出され、室内に2次的な放射化が発生する。放射化の程度は低レベルであるがその範囲は広い。

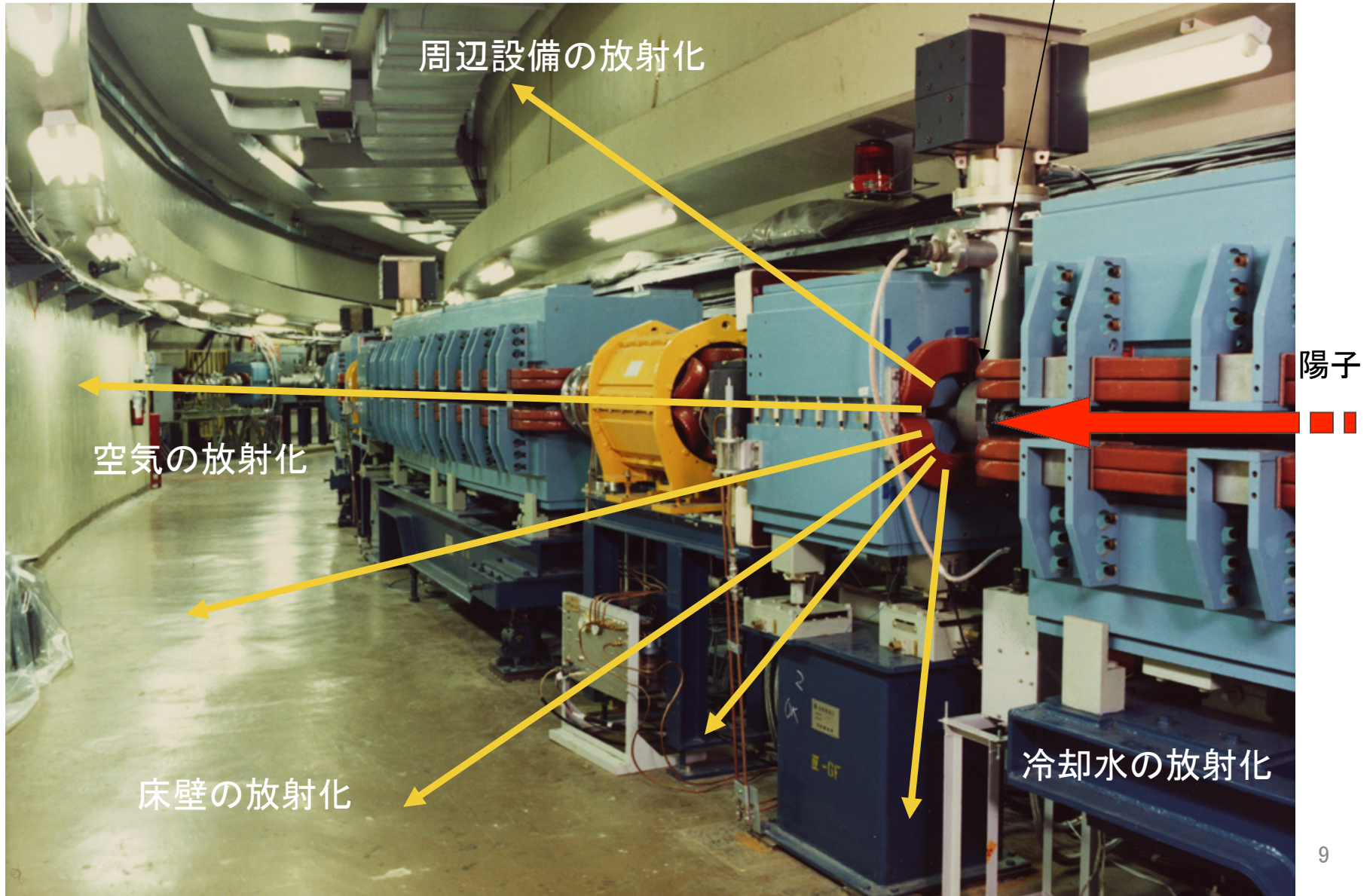
加速器の概念図



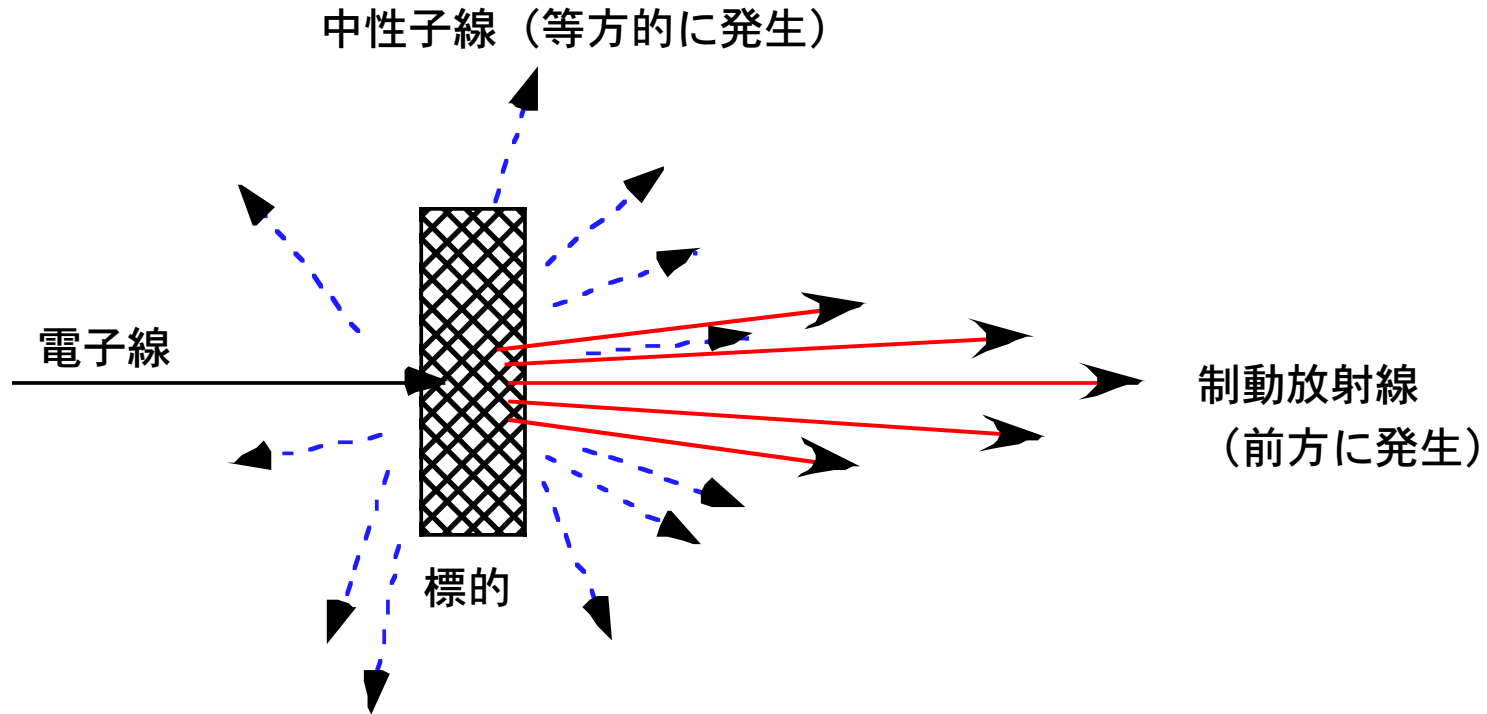
加速粒子 (→) の衝撃による高い放射化の発生部位；ビームパイプ、電磁石、標的、ビームダンプ
2次粒子 (→) の散乱による低い放射化の発生部位；加速器室内、照射室内の床、壁、天井、加速器周辺機器（真空ポンプ、電源） 8

放射化の発生

ビームが当たると二次的に中性子が発生

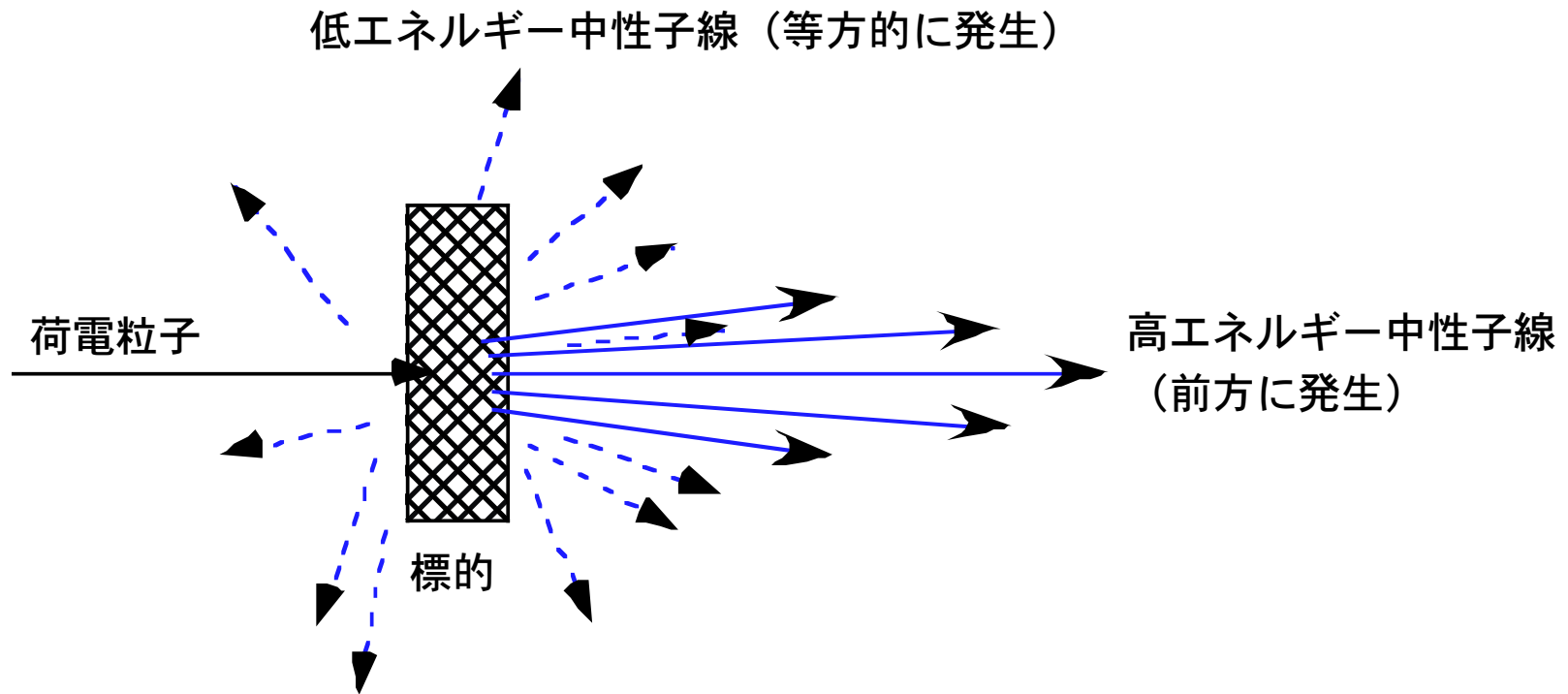


電子加速器の場合



主な放射化の原因 → 制動放射線
周辺部の放射化の原因 → 中性子線

粒子加速器の場合

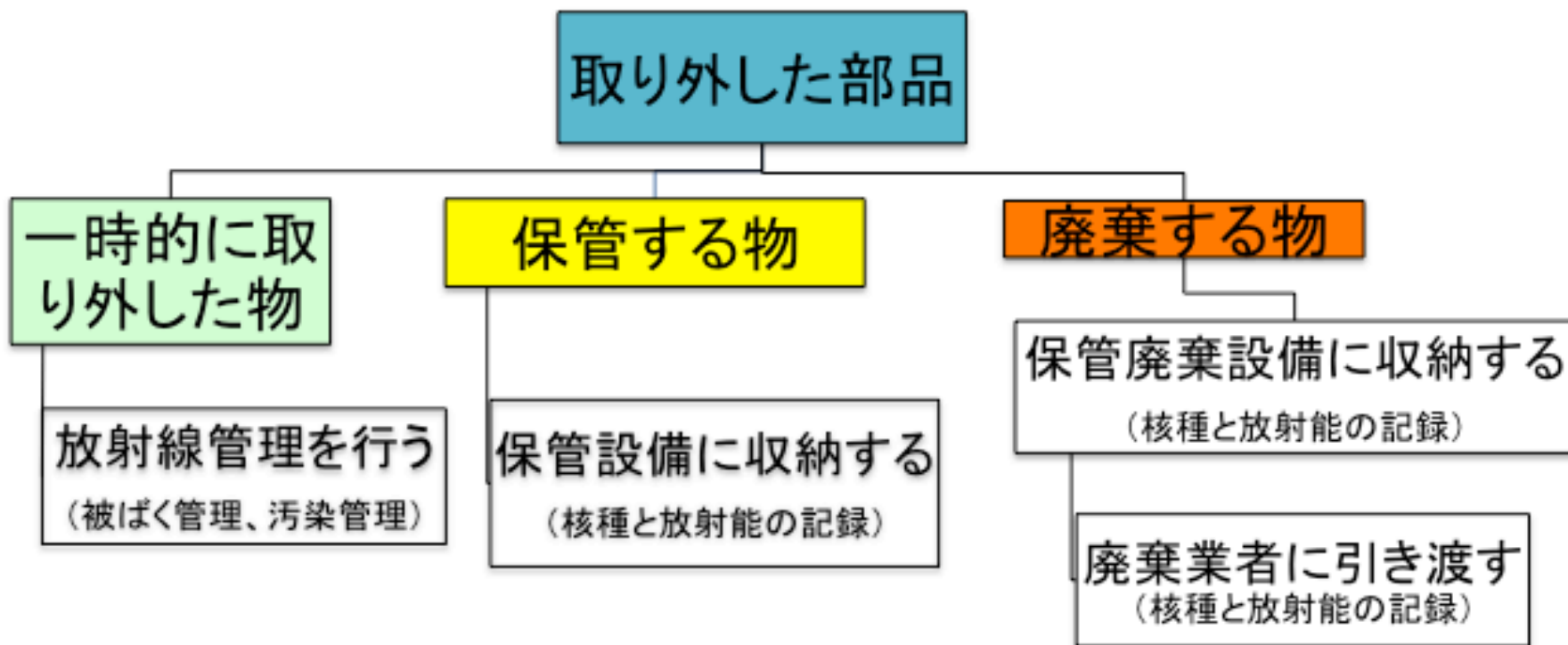


主な放射化の原因 → 荷電粒子
周辺部の放射化の原因 → 中性子線

固体の放射化物の管理

- どこから管理
 - 発生装置から取り外した場合
 - ただし、**一時的に取り外した物を除く**
- 放射化物の保管(**再使用を想定**)の登録(記帳)
 - 保管設備は使用施設内に設置記帳:放射化物の種類と数量、**期間**、方法、場所、従事者の氏名、品名、来歴、責任者、材質、質量
- 放射化物の放射性廃棄物としての登録(記帳)
 - 保管廃棄設備に入れ、廃棄記録(放射化物とRIは区別)
 - 記帳:期間ではなく**廃棄日時**

発生装置から取り外したものの管理





メンテナンス作業中：一時的にとり
はずしたものである
運転中放射化する可能性のある場
所に物を置かないよう注意する
不要な物は廃棄物として集める
使用する物は保管設備にまとめる

放射化物の記帳記録

- 種類と数量
 - 放射化物(電磁石、真空ポンプなど)は線量で管理した方が良く、台数毎の線量の管理は容易
 - しかし、放射性同位元素の管理に合わせて、種類と数量は、核種と放射能として管理する事になった
- 核種
 - 発生装置の性能、使用材質で代表核種を求める
- 数量
 - 線量から放射能を求める手法を検討する必要がある

放射化物の数量管理の課題

発生装置の種類、エネルギー、延べ稼働時間、放射化される材質などによって生じる放射性核種は異なる

それぞれの施設において、どのような核種を代表核種に選定するか検討される事が望まれる。

また、線量率から放射能を出す方法についても施設によって様々になる。数トンから数10トンの電磁石やコンクリートブロックを管理する必要のある場合については、別の評価法がありうる。

一次ビームと中性子のような2次ビームでは生成核種、放射化の範囲、程度も異なる。取り外した時点と、譲渡する時点で時間が経過している場合には再評価をする必要が出てくる

放射線治療用直線加速装置 における放射化物管理

- 放射線治療用直線加速装置(以下「リニアック」と呼ぶ)においては、ターゲット及びその周辺部にわずかな放射化が生じる可能性がある事から、リニアックの廃止時において放射性廃棄物として取り扱うべき部位をあらかじめ指定する。
- 解体の際、放射化部位であるターゲットとその周辺部を個々に管理できるような運用が必要であり、それぞれについて放射性核種及びその放射能を求める換算表を作成する。

規制対象部品

- 規制部品:「ターゲット」、「ターゲット周辺部品」
- 使用されている材質の大部分は合金である
- 高エネルギーX線による光核反応や光核反応で発生する中性子により放射化する

1) バリアン 社製装置

部品名	換算表で選択する主要材質	参考重量
ターゲット	バリアン(ターゲット)	約1.2kg
1次コリメータ、バキュームチェンバ、入射コリメータ (一体、ベンディングマグネット内の遮蔽体を含む)	タングステン合金	約18.5kg
散乱箔	アルミニウム合金	約0.1kg
カルーセル中央部	タングステン合金	約8.5kg
アッパーJAW 2個	タングステン合金	約58kg

2) シーメンス社製装置

部品名	換算表で選択する主要材質	参考重量
ターゲット	シーメンス (Auターゲット) またはシーメンス (Wターゲット)	約0.2kg
ターゲットホルダ、散乱箔 (一体)	タングステン合金	約3.6kg
10MeV 1次コリメータ	タングステン合金	約4.8kg
10MeVフラットニング フィルタ	ステンレス鋼	約0.13kg
1次コリメータ横タングステンシールド	タングステン合金	約4kg
偏向電磁石内の炭素鋼 2個	鉄 (炭素鋼)	約1.2kg
偏向電磁石内シールド	タングステン合金	約23kg
アッパーJAW 2個	タングステン合金	約56.4kg
ローワーJAW 2個 /マルチリーフコリメータ	タングステン合金	約56.4kg /約30kg

核種数量の求め方

- 放射能は以下の式で求める事とする

- $Q_i = H \times K_i \times F$

ここで、

- i (核種): 換算係数表に記載の核種とする(材質毎)

- Q_i : 放射能 [Bq]

- H : 線量率 [$\mu\text{Sv/h}$]

(※バックグラウンドを差し引いた値)

- K_i : 換算係数 [$\text{Bq}/(\mu\text{Sv/h})$]

- F : 重量補正係数

(部品の重量が小さい場合に乗じる補正係数。

材質が既知の場合は既知材質の換算係数を選択し、不明の場合はタングステンの値を選択する。)

放射化物の範囲（H24.3事務連絡）

- 放射線発生装置及びその周辺設備等については、原則として放射化物とする。ただし、信頼できる実測データ、計算結果等により放射化物として取り扱う必要がないことが確認できたものについては、放射化物としないことができる。

* 放射化物として取り扱うか否かの判断は、放射性汚染物の確認制度の導入に伴って告示として規定した放射能濃度及びその設定の考え方が参考となる。

残留する放射能

理研：上蓑氏

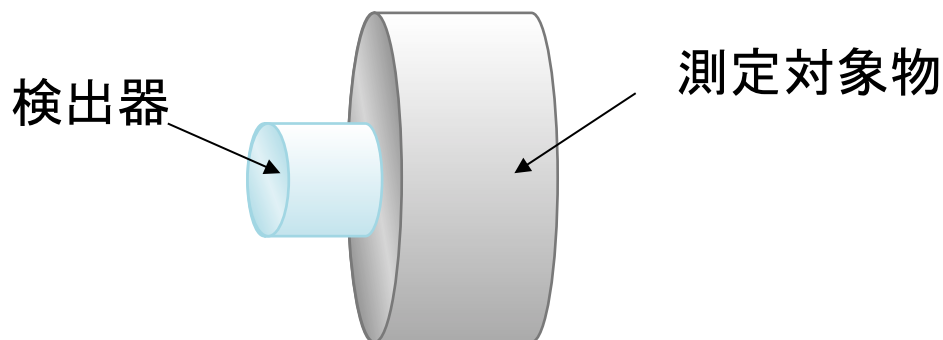
- コンクリート
 - 炭素鋼
 - ステンレス鋼
 - アルミニウム
- 5年間照射、30日冷却(文献1)
- 20年間照射、30日冷却(文献2)

文献：

- 1)放射線安全規制検討会 クリアランス技術検討ワーキンググループ「放射線障害防止法におけるクリアランス制度の整備にかかる技術的検討について(中間報告書)」、文部科学省 科学技術・学術政策局、平成18年6月(2006)。(コンクリート、炭素鋼、ステンレス鋼)
- 2) S. Ban, H. Nakamura and H. Hirayama, “Estimation of amount of residual radioactivity in high-energy electron accelerator component by measuring the gamma-ray dose rate”, Nucl. Sci. Tech., Suppl. 4, 168-171 (2004).

線量率の計算

理研:上蓑氏



測定対象物の形状

物質	密度 (g cm ⁻³)	直径 (cm)	高さ (cm)	質量 (kg)
コンクリート	2.30	24	9.61	10
炭素鋼	7.86	20	4.05	10
ステンレス鋼	7.86	20	4.05	10
アルミニウム	2.69	24	8.22	10

対象物をNaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータを用いて測定することを想定し、線量率をEGS4電磁カスケードモンテカルロコードによって計算

計算の結果

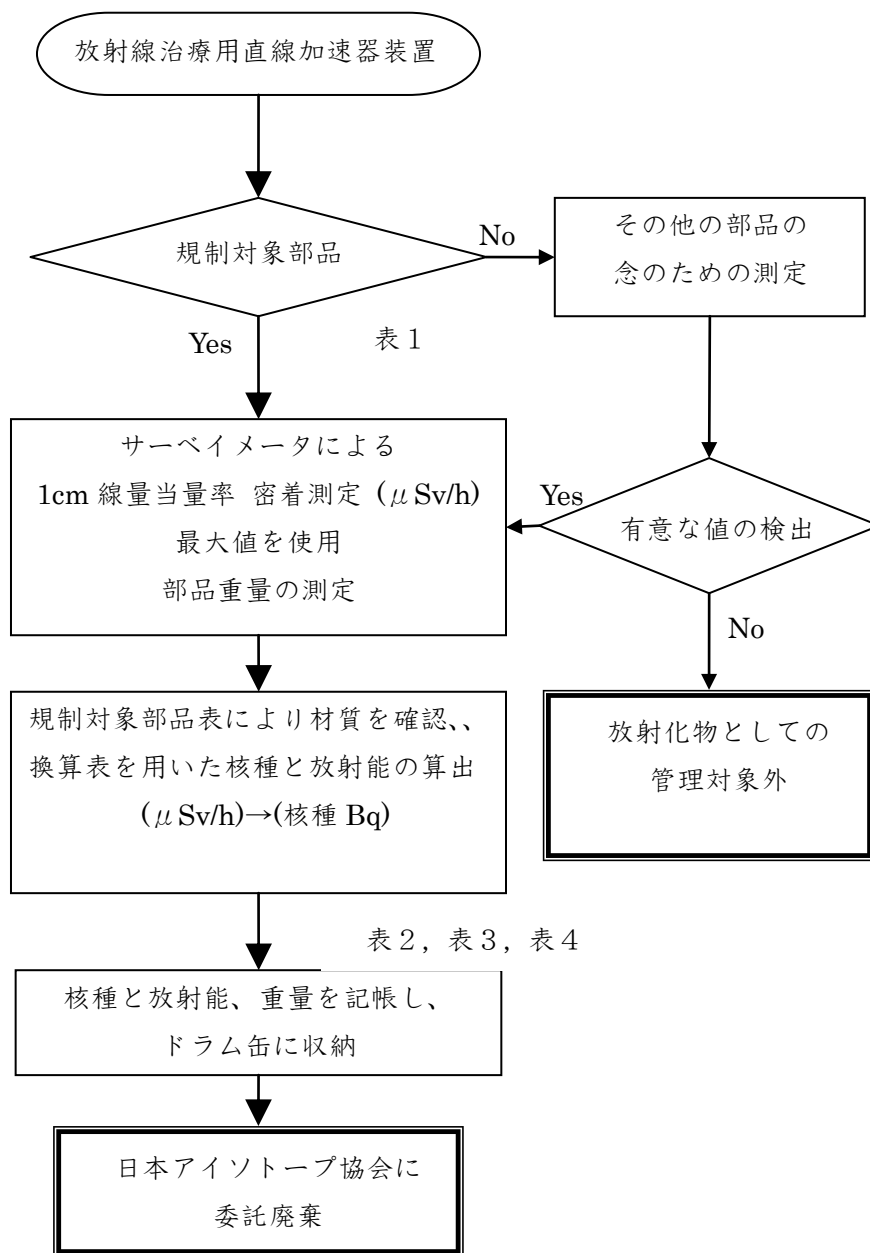
理研：上 蓑氏

物質	照射ビーム	線量率 (nSv/h)
コンクリート	30 MeV陽子	25
コンクリート	30 MeV電子	27
炭素鋼	10 MeV電子	49
炭素鋼	30 MeV電子	38
ステンレス鋼	10 MeV電子	44
ステンレス鋼	30 MeV電子	41
アルミニウム	1から10 GeV電子	30

- 通常 of 自然放射線 (約70 nSv/h)
- NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータ
⇒ 検出限界： 約8 nSv/h (時定数：30秒)
約14 nSv/h (時定数：10秒)

サーベイメータで放射化の有無の判断が可能！
日常の放射線管理の手法として有効

線量率測定値から放射化物の核種と放射能を求める手順の例



保管の考え方(KEKの例)

- 旧ビームラインや使用を停止した発生装置については区画と施錠。→放射化物保管設備にする
- 保管する際には放射化物としての記帳管理を始める
- 放射化物台帳
 - 区域毎
 - 機器を移動する場合

保管の単位: 梱包、容器単位でまとめる

容器: 鉄製コンテナ等

容器に入らないものは養生する

放射化物使用棟



目的: 放射化物の保管

電磁石等



高放射化物の保管



保管設備の例(テントハウス)



TRISTAN加速器(1987年から1995年まで運転)の電磁石等の保管、KEKBの装置の保管
今後、鉄製コンテナに収納したものを入れる。



使用の考え方(KEKの例)

一時的に取り外して機器(電磁石、電源、真空装置等)の調整を行うことが多々ある

- 法令上、使用の概念はない
- 放射化物としての登録(記帳)はない
- 記帳:使用記録はない
- 発生装置室から別室に搬出する場合もある
- 使用中として注意書きをする
- 当該区域管理責任者に届け出る
- 被ばく管理等の放射線管理を実施する

加工作業の環境管理(KEKの例)

- 作業計画書の提出
- 汚染防止 → 更衣、手袋、マスク等
- 被ばく防止 → 線量測定
- 作業管理 → 作業者のマスクの測定、汚染検査、廃棄物管理
- 放射化物加工作業報告書の作成

作業場所の養生



局所排気設備



放射化物加工棟



排気設備

汚染検査室



排水設備



加工室内



構造体の放射化

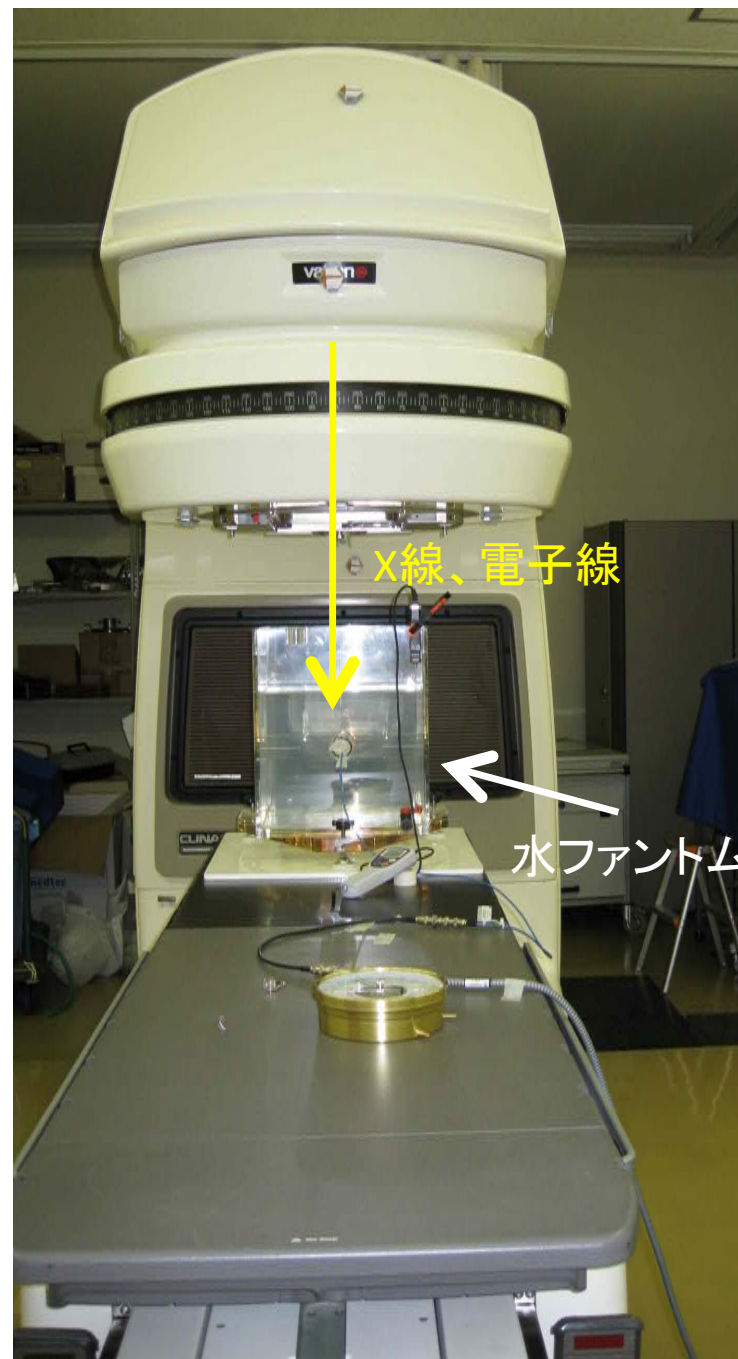
- 通常は放射化物としての管理はない
- 廃止の際に重要になるため、事前評価しておくことが望まれる

治療用電子直線 加速装置の例

Varian Clinac 2300 C/D
加速エネルギー: **18MeV**
照射時間: 1分間

各種運転条件下での中性子線量を測定

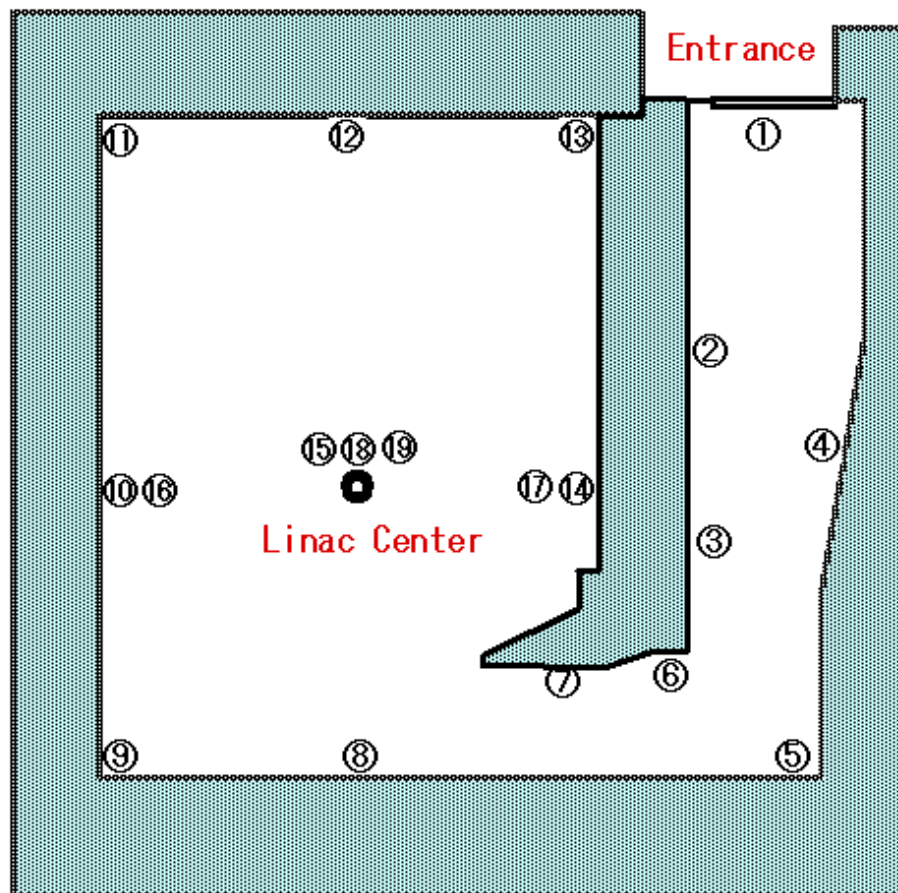
- Run-1: 電子線照射 (ターゲット無)
- Run-2: X線照射 (照射野40cm×40cm)
- Run-3: X線照射 (マルチリーフコリメータ入り)
- Run-4: X線照射 (スチールフィルター入り)
- Run-5: X線照射 (鉛フィルター入り)
- Run-6: X線照射 (照射野0.5cm×0.5cm)



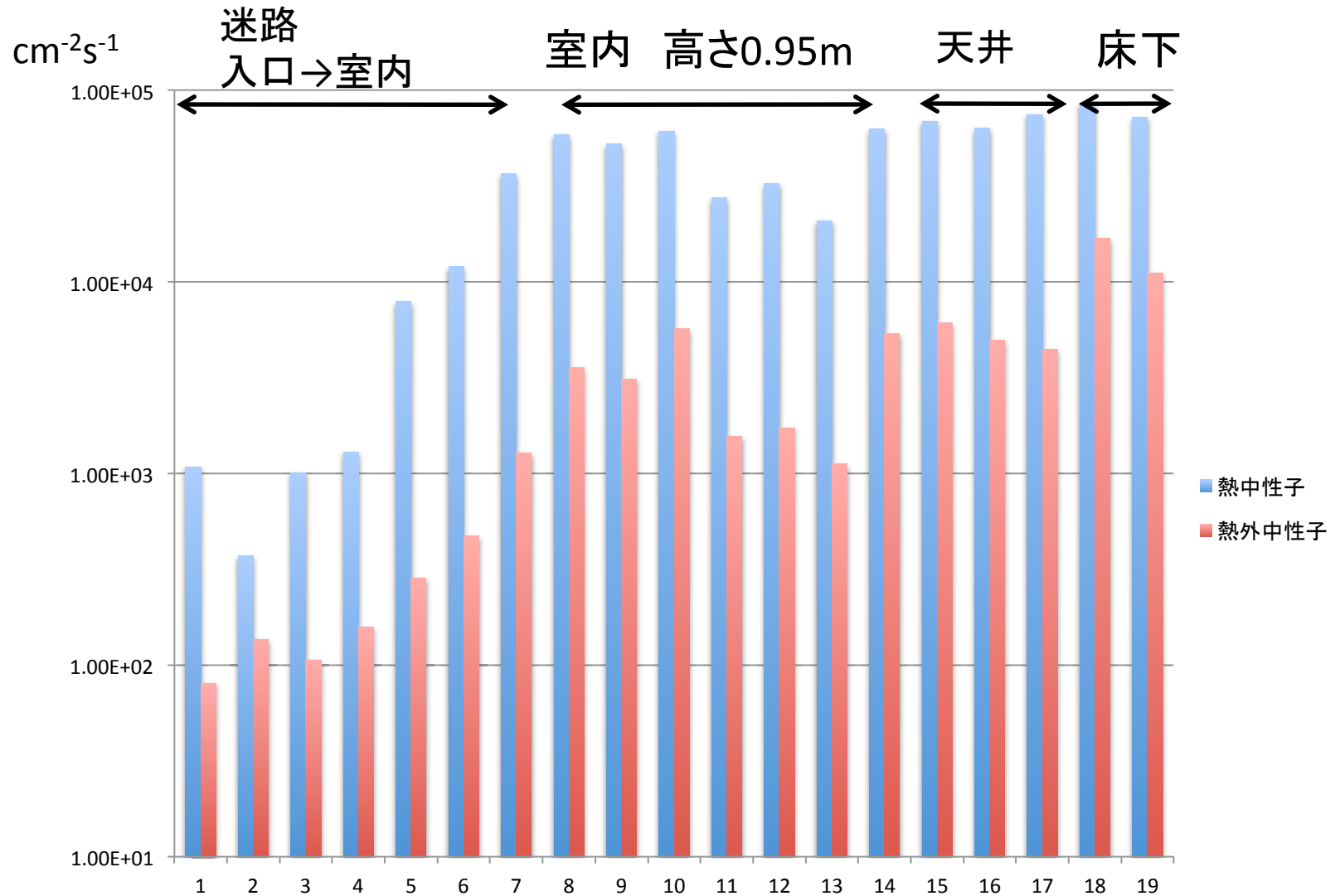
中性子分布測定

1日間、
室内各所に金箔、
TLD、CR-39を配置
して中性子測定

正味運転時間は
11.1分



金箔による熱中性子フラックス測定結果



サイクロトロン of 例

(a) 陽子加速

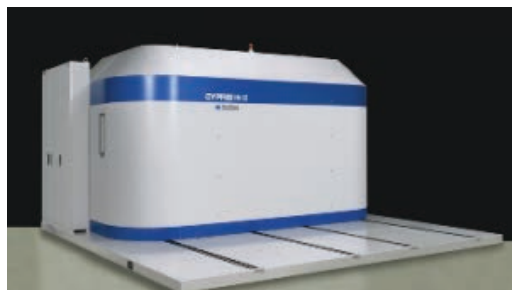


(b) H-イオン加速

自己遮蔽無



自己遮蔽有



サイクロトロン運転中の中性子フラックス をビーム軌道面の高さで測定



国立長寿医療センター HM-18

標的:水(O-18)

製造核種:F-18

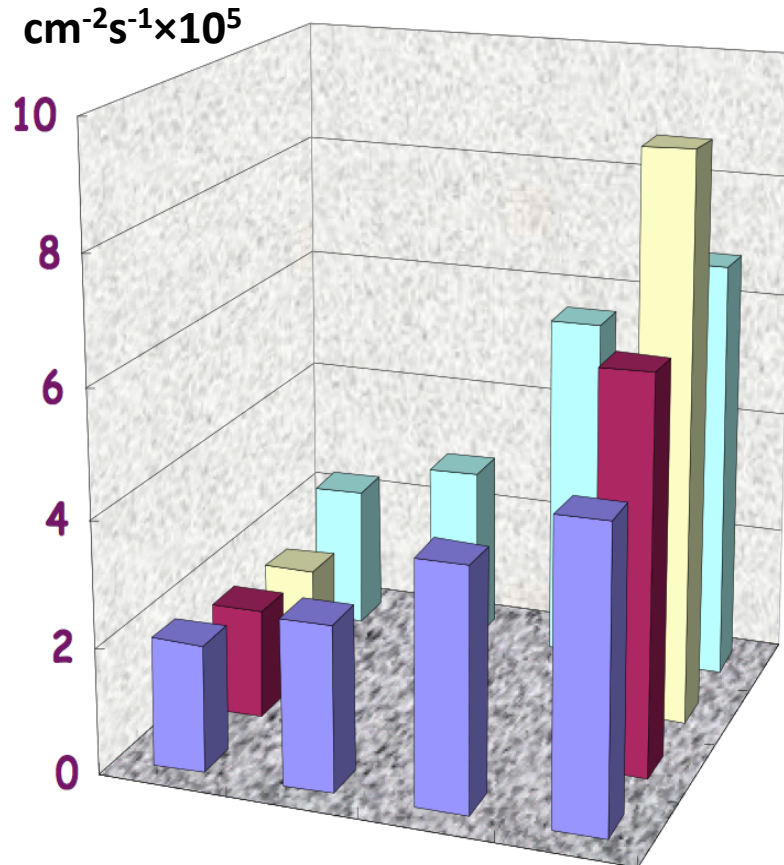
加速粒子:H⁻

加速エネルギー:
18MeV

ビーム電流:21 μ A

運転時間:63分

サイクロトロン廻りの 中性子フラックス



ターゲットボックスの近傍 : $10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
反対側 : $2\times 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
ターゲットボックス内 : $10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

ターゲットボックスの近傍の壁面の
コンセントのビスを採取
蛍光X線分析で Cu:Zn=65:35

Ge検出器による放射能測定
Cu-64 : $4.5\times 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (2日間の履歴)
Zn-65 : $6.3\times 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (2年間の履歴)

自己遮蔽体無しの場合の中性子測定結果

- ターゲット近傍: $10^7 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - 加速のタイプでの差はない
- サイクロトロン室内: $10^{5-6} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- 中性子発生数の見積
 - 10GBqのF-18を1時間の照射で製造時
 - > ターゲットで発生する中性子数は 3×10^{10} 個となる
 - > ターゲットから10cmで $2.5 \times 10^7 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - > ターゲットから100cmで $2.5 \times 10^5 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- 見積は実測と合っており、中性子発生数はRI製造量から概算できる

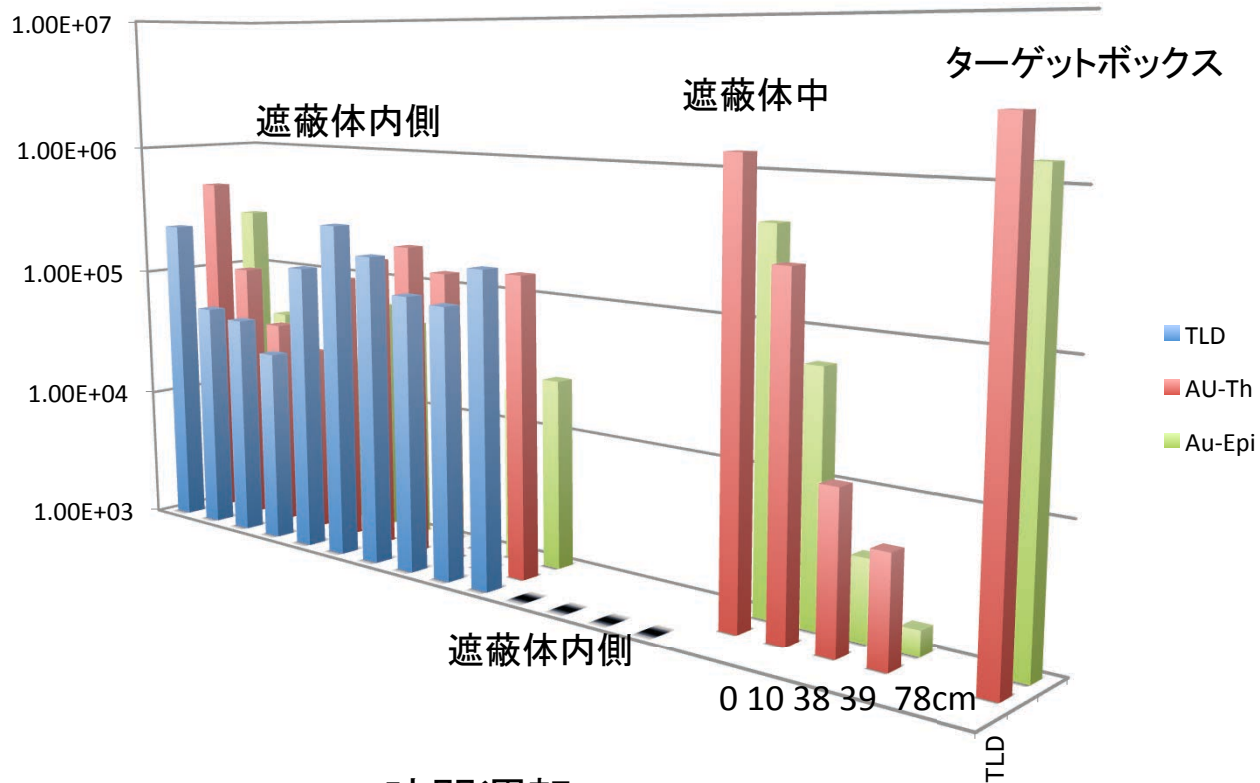
コンクリートの放射化見積

- Co-60がクリアランスレベル生成する条件
 - コンクリート中のCo 濃度:10ppm
 - 年間運転時間:500hで20年運転
 - > 運転時の中性子フラックス= $5 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - 年間運転時間:250hで20年運転
 - > 運転時の中性子フラックス= $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- 現在の多くのサイクロトロン施設における運転時の中性子フラックスに相当する

自己遮蔽体付サイクロトロン

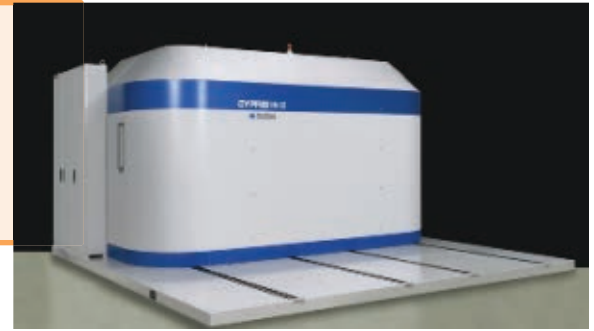


遮蔽体内外の中性子フラックス



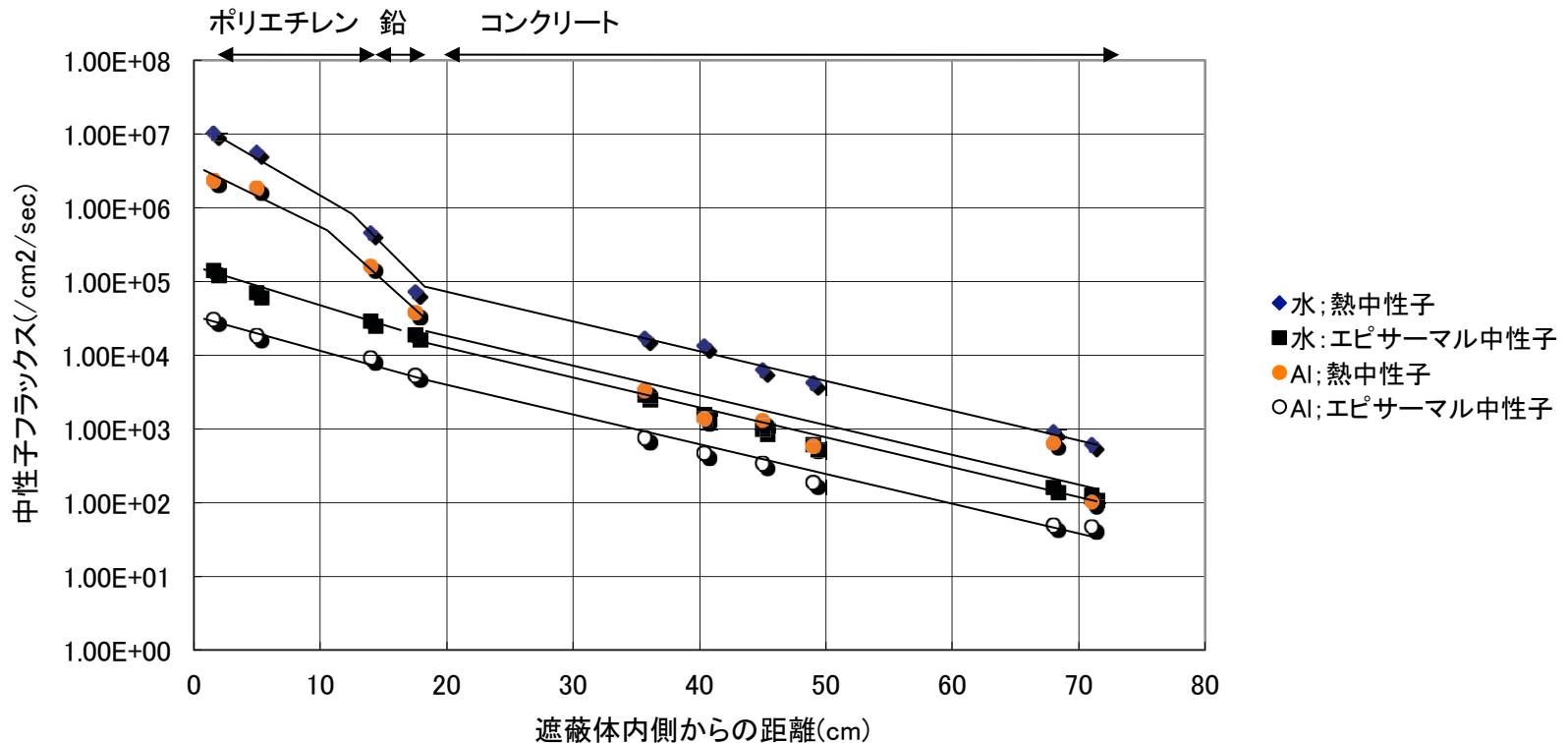
P:10MeV, 40 μ A, 1時間運転

自己遮蔽体(HM-12S)



水及びアルミニウムターゲットでの測定

アルミニウムターゲットの方が中性子発生量が少ないが減衰傾向は同じであった
遮蔽体により熱中性子は4桁減衰する



自己遮蔽体の中性子測定結果

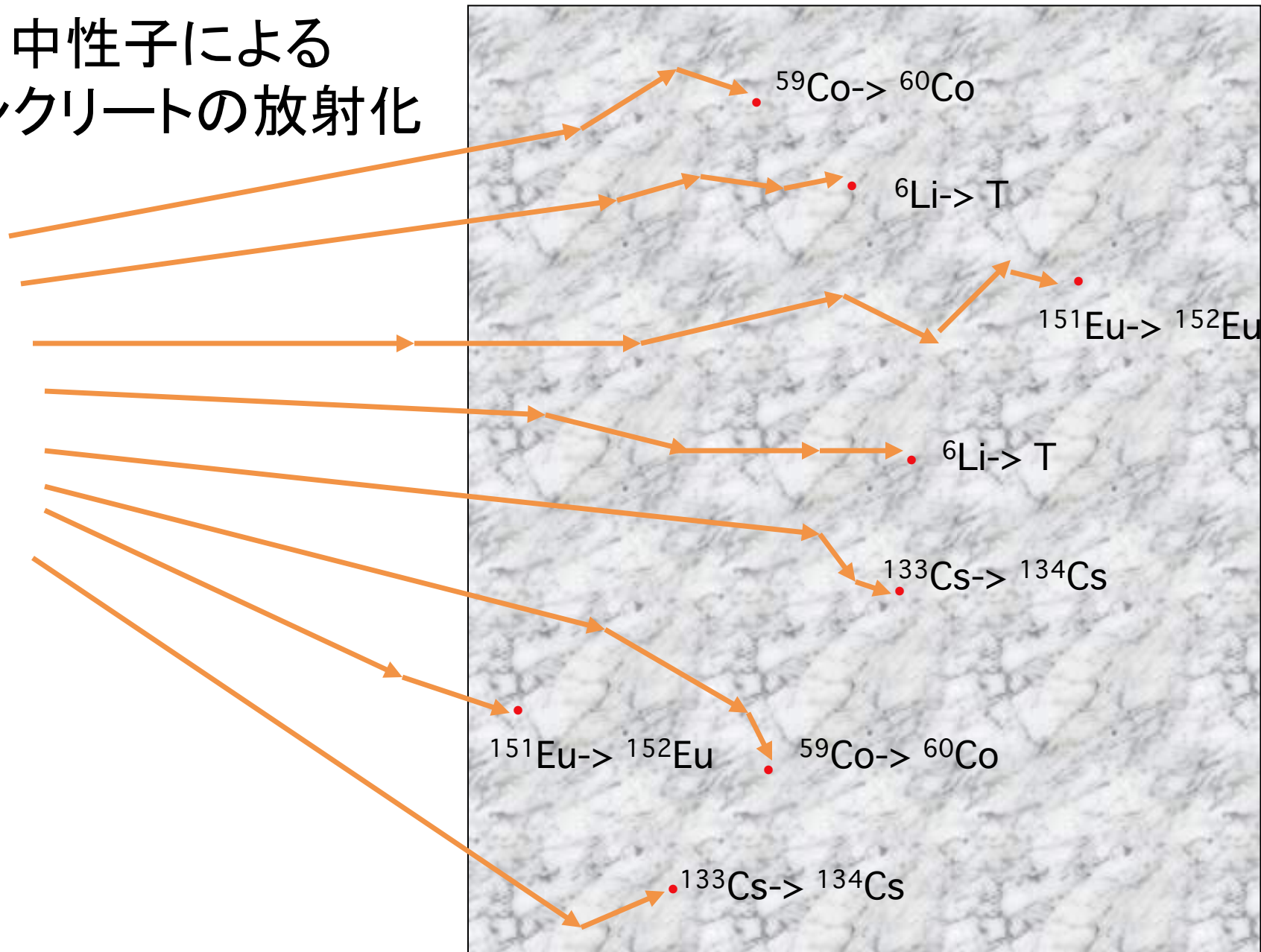
- ターゲット近傍 : $10^{6-7} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - 自己遮蔽体内側 : $10^{5-6} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - 自己遮蔽体外側: 検出できず
-
- 遮蔽体は中性子の遮蔽効果も十分であり、遮蔽体外の放射化は無視できる

放射線発生装置周辺部での放射化の特徴

- (1) 放射化は、加速粒子の種類によらず、2次的に発生する中性子が原因となるため、原子炉の放射化と類似した核種が生成
- (2) 放射化物の発生量は、加速粒子のエネルギー、出力、運転時間による
- (3) 生成核種は材料によって決まる。
- (4) 周辺部の放射化のレベルは非常に低い
- (5) ただし、室内及び床・壁など放射化の範囲は広い

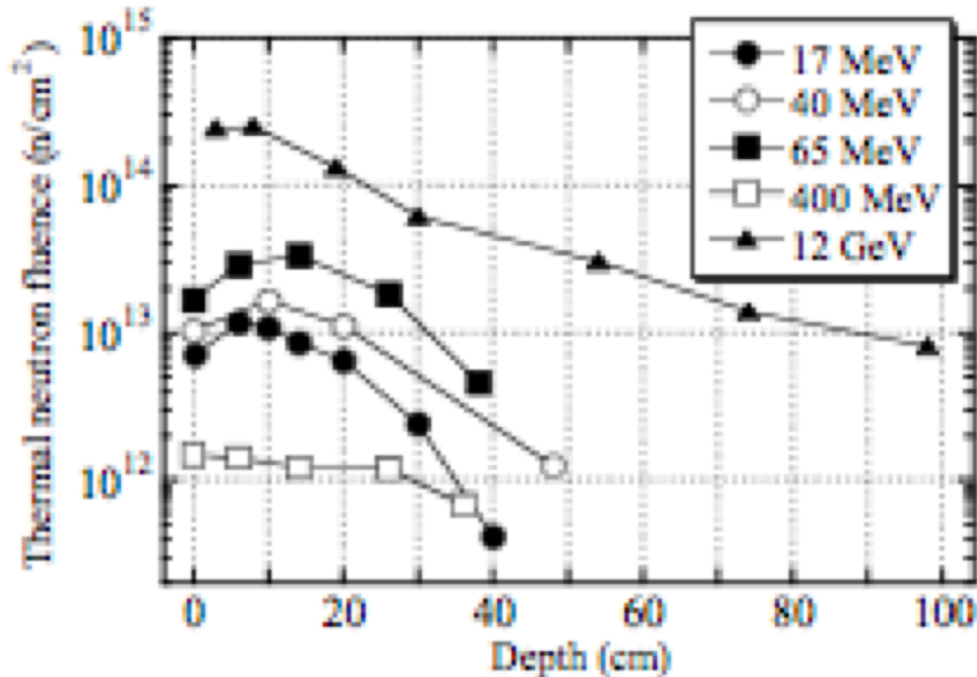
中性子による コンクリートの放射化

ビームロスにより中性子発生

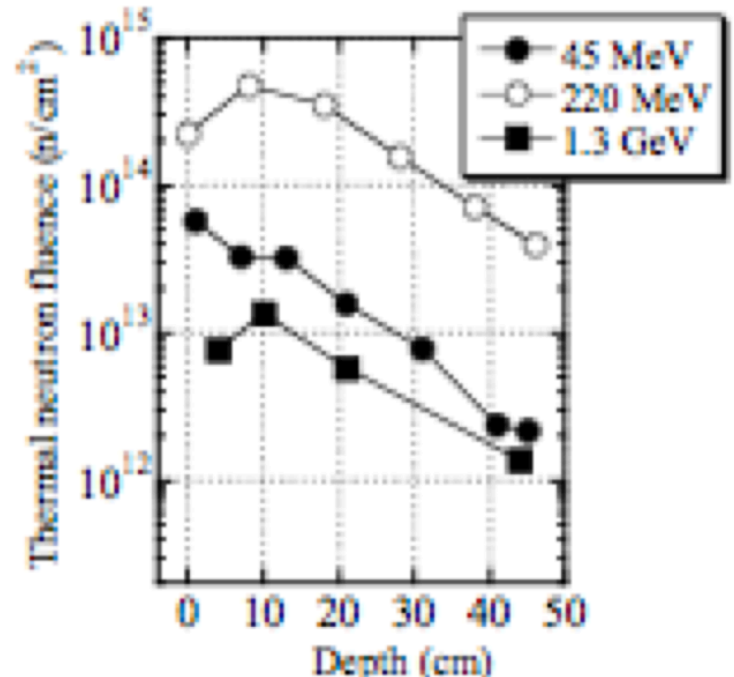


中性子はコンクリート内で減速し、熱中性子となり、中性子捕獲反応を起こす。
鉄の場合は不純物として含まれるコバルトから ^{60}Co が生成する。

国内の中大型加速器施設での 中性子フルエンス



粒子加速器



電子加速器

中性子フルエンス=10¹³cm⁻²(10年間)

→ コンクリート中で、Co-60 0.1Bq/g程度生成

これに対し、10MeV直線加速装置では1000分の1、15MeVでは100分の1

空気、水の放射化

- 排気設備：空气中濃度限度の1/10を超える場合
 - 閉じこめ、循環の場合は、停止後の評価を行う
- 排水設備：水が放射化する場合で排水する場合
 - 放射化しないという評価を行う
 - 循環使用するため排水しないとする

医療用電子直線加速装置のまとめ

- 水、空気共に生成核種は短寿命である。
- 空気の放射化測定結果から、空气中濃度限度を超えていない。また、空气中的ダスト濃度の測定結果からも空气中濃度限度を超えていない。
- また、排気中濃度限度比の和を求めた結果、超えることはないといえる。
- 排気排水設備は必要としない

陽子線、粒子線治療装置のまとめ

- 陽子線及び粒子線治療装置についても、電子直線加速装置と同様、照射室内に生成する主要核種は短寿命の核種である。
- 照射室や迷路での空气中放射能濃度は検出下限以下であった。しかし、グローブボックスに閉じこめた空気には放射化が認められたことから、そのデータをもとに空气中濃度、排気中濃度を求めた結果、濃度限度以下であった。また、照射中のダスト測定の結果は全て空气中濃度限度以下であった。
- 水ファントムの照射では、O-15、C-11などの短寿命核種の生成が見られたが、減衰待ち保管するにより、安全を確保できることが分かった。

その他の放射線発生装置

- 訪問調査の結果、以下の放射線発生装置施設では、施設によっては、排気排水設備を有しているところもあった。また、申請時に放射化計算を行っているところも多い。実際には、放射化は極めて低いレベルであり、空気、水の放射化については考慮する必要はないと考えられる。
- 放射光用電子シンクロトロン(蓄積型)
- ヴァンデグラーフ加速器(分析用)

放射化物管理の原則

- 物がトレースできること
 - 湧き出しを防ぐ、紛失を防ぐ
- 放射線管理が行われること
 - 作業者の被曝、周辺汚染
- 発生装置室内の整理整頓

今後の建設で考慮してほしいこと

- 設備
 - 本体の解体を考慮した設計
 - 発生源の効果的遮蔽設計
 - 自己遮蔽体のブロック化
 - メーカーの理解と協力
- 建屋
 - 低放射化を考慮した建設
 - 除染工法を考慮した建設
 - 建設費とデコミ費

保管設備の例(40ftコンテナ)

