



大阪大学  
OSAKA UNIVERSITY



OPEN 2021

平成30年度  
放射性同位元素等取扱に関する安全講習会  
【新規登録者対象】

# 放射線発生装置の安全取扱い

大阪大学 放射線科学基盤機構 助教  
核物理研究センター 放射線取扱主任者  
鈴木 智和

平成30年4月9日（月）  
大阪大学会館 講堂

# 放射線発生装置とは

・・・一般的に**加速器**と呼ばれている。

法令では以下のように定められている。

令第二条【放射線発生装置】法第2条第4項に規定する政令で定める放射線発生装置は、次に掲げる装置（その表面から10センチメートル離れた位置における最大線量当量率が**原子力規制委員会**が定める**線量当量率以下**であるものを除く。）とする。

1. サイクロトロン
2. シンクロトロン
3. シンクロサイクロトロン
4. 直線加速装置
5. ベータトロン
6. ファン・デ・グラーフ型加速装置
7. コッククロフト・ワルトン型加速装置
8. その他荷電粒子を加速することにより放射線を発生させる装置で、放射線障害の防止のため必要と認めて原子力規制委員会が指定するもの

1cm線量等量率について  
600nSv/h以下のものを除く  
(数量告示第2条)

荷電粒子を加速することにより放射線を発生させる装置として指定する件

(昭和39年4月9日科学技術庁告示第4号) 最終改正 平成元年4月17日 科学技術庁告示第3号

放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律施行令(昭和35年政令第259号)第2条第8号の規定に基づき、荷電粒子を加速することにより放射線を発生させる装置として次のものを指定する。

**変圧器型加速装置**、**マイクロトロン**及び**プラズマ発生装置**(重水素とトリチウムとの核反応における臨界プラズマ条件を達成する能力をもつ装置であって、専ら重水素と重水素との核反応を行うものに限る。)

# 放射線発生装置使用施設の安全の特徴

- 一般的にビーム発生中に使用室への立ち入りができない
- エネルギーの高い粒子が加速された場合、核反応により放射化する。
- 放射化物を加工しない限り表面汚染は発生しない。



- ビーム発生時に実験室に取り残されないこと
- 放射化物を管理区域外に持ち出さないこと
- ビーム照射直後に実験室に立ち入るときはどこが放射化しているかをサーベイすること

非密封RIも使用する施設では、それによる汚染も想定されるので管理区域入退域は非密封RIの場合に準ずる



大阪大学  
OSAKA UNIVERSITY



OPEN 2021

# 加速器と加速原理

2018/4/9

放射性同位元素等取扱に関する講習会  
(豊中)

# 加速器発明前の核反応実験

- ラザフォードによる人類初の原子核の人工変換(1919)

- 天然ラジウムからのアルファ線を利用



- チャドウィックによる中性子の発見(1932)

- ポロニウムからのアルファ線を利用

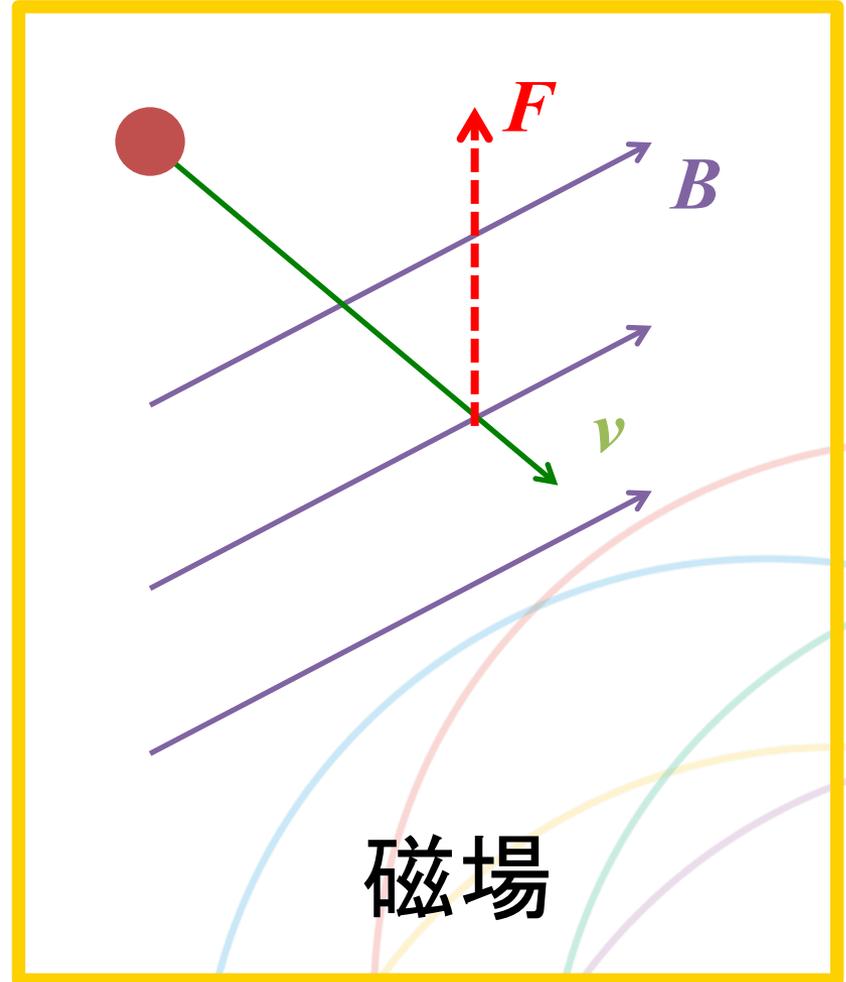
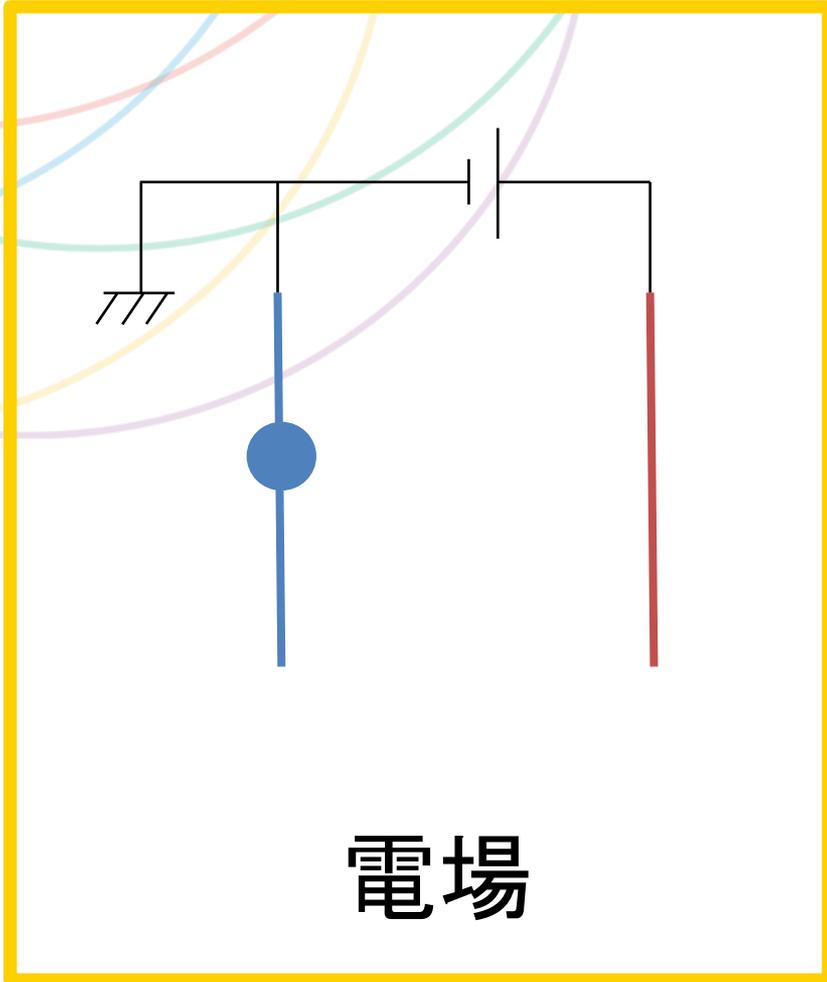


この反応は現代でも $^{241}\text{Am}$ などを利用して中性子源として使われる( $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ )。

## 線源を用いた実験の欠点

- ビームエネルギーが決まっている
- 高いエネルギーのビームを作れない
- ビームの種類が限られる

# 電場中、磁場中の荷電粒子



# 静電場のみを利用した加速器

## コッククロフト・ウォルトン加速器

- 直流高圧回路を利用
- 加速電圧は1 MV程度
- 大電流を得られる

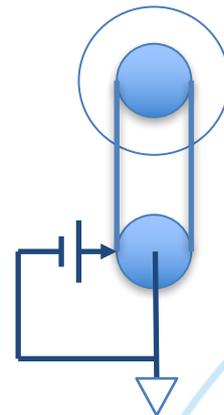
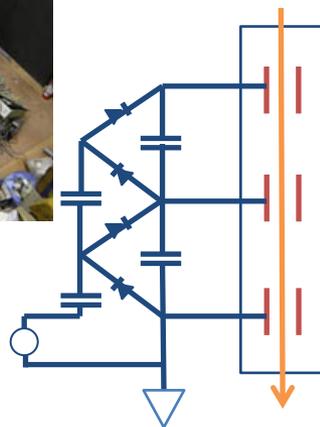


阪大・工 オクタビアン



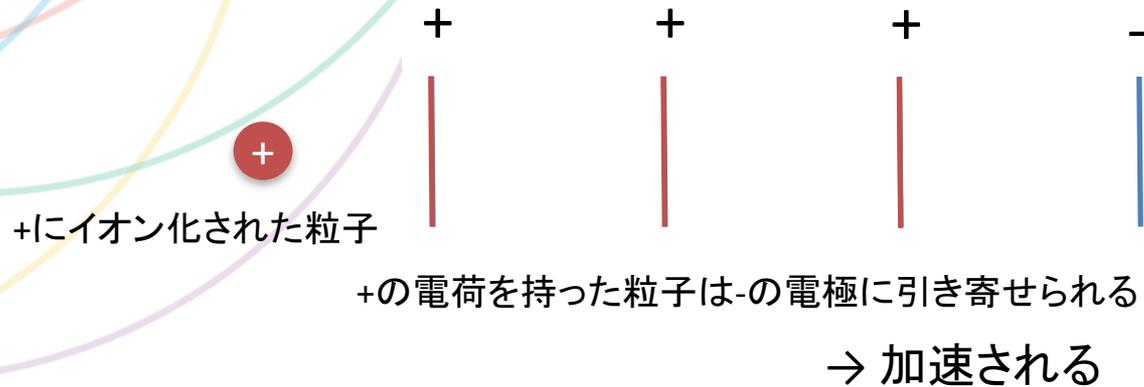
## バンデグラフ型加速器・タンデム

- ベルトで電荷を運ぶことで高電圧を得る
- 現在ではVDGを2台組み合わせたタンデムが主流
- タンデムでは15MV程度の物もある



阪大・理 4.8MV VDG

# 直線加速器



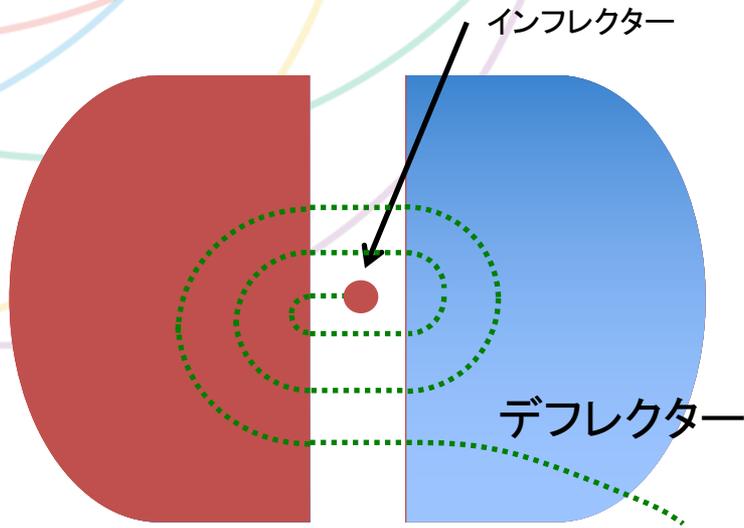
## 電極を直前状に並べた加速器 … 直線加速器 (Linac)

欠点: 加速エネルギーを高くしようとすると長くなる  
小型化 → 円形加速器  
(例) サイクロトロン、シンクロトロン



東北大学電子光物理学研究センター  
電子線形加速器

# サイクロトロンでの粒子の加速



一様磁場 $H$ 中を円運動する粒子

$$\omega = \frac{He}{Mc} = \text{const.}$$

サイクロトロン  
の  
等時性の原理

陽子で20 MeVを超えると相対論の効果で  
等時性原理が成り立たなくなる

$$\omega = \frac{Hec}{Mc^2} = \frac{Hec}{M_0c^2 + E}$$

等時性を成り立たせるために外側の磁場を強く  
する

→AVF(azimuthally varying field)サイクロトロン

# 研究用大型サイクロトロン

阪大・リングサイクロトロン



2018/4/9

放射性同位元素等取扱いに関する講習会  
(豊中)



東北大・930型サイクロトロン



大阪大学  
OSAKA UNIVERSITY



OPEN 2021

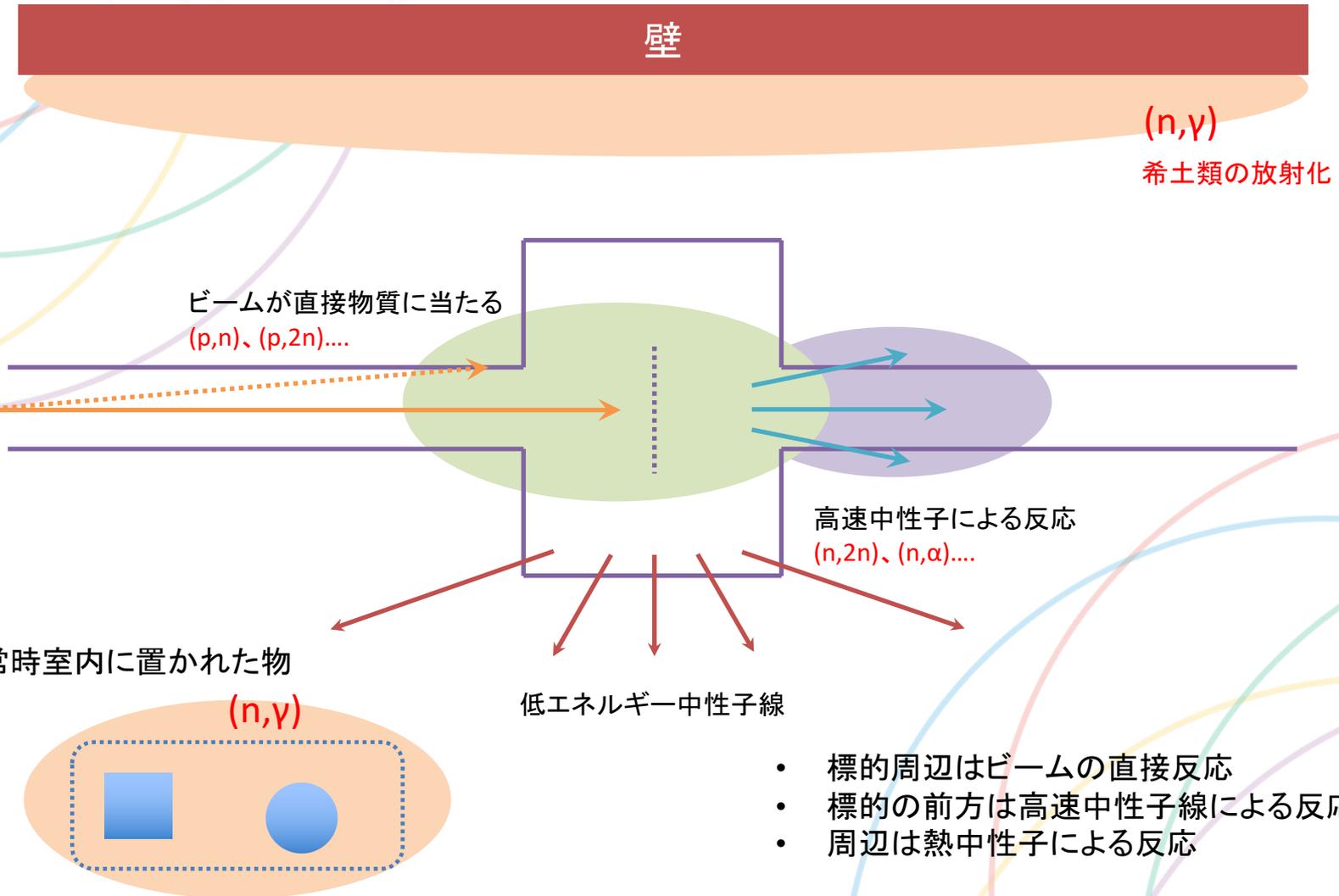
# 放射線発生装置と放射化物

2018/4/9

放射性同位元素等取扱に関する講習会  
(豊中)

11

# 加速器による放射化



# 規制される放射化物

- 法令上の用語の定義
  - 放射性同位元素等・・・放射性同位元素又は放射性汚染物（規則第1条第3号）
  - 放射性汚染物・・・放射性同位元素若しくは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物（規則第1条第2号）
  - 放射化物・・・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物（規則第14条の7第1項第7号の2）
- 放射化物の範囲（平成24年3月事務連絡 文部科学省科学技術・学術政策局原子力安全課放射線規制室）
  - 放射化物については放射線発生装置から取り外した地点からその管理が必要
  - 上記②～⑥以外の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物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よって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。
    - 放射能濃度の基準・・・放射性汚染物の確認制度に係わる放射能濃度に基準は、数量告示第27条に定める放射能濃度とする。なお、この放射能濃度の基準は、放射性汚染物の確認制度の適用後の再利用適正処分の経路を想定して年間10マイクロシーベルトをベースに設定したものである。（年間10マイクロシーベルト=0.001 $\mu$ Sv/h）
- クリアランス制度
  - きわめて低レベルの放射性廃棄物については障害防止法の規制から免除し、産廃として処分できるようにする
    - 登録濃度確認機関による濃度確認対象物に含まれる放射性同位元素の濃度の測定及び評価が申請通りの方法で行われ、クリアランスレベルを超えていないことを認定が必要（手数料20トンまで515,900+1,430,100円）
    - 一度放射化物になると、クリアランスされるまで放射化物

# 「放射化物」と「放射化していない物」

- 「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**汚染された物**」は放射化物
  - 放射線発生装置から**取り外した地点**からその管理が必要
  - 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**
  - 放射化物として取り扱う必要がないことが確認できた物については**放射化物としないことができる**
- 放射化物は**放射性汚染物**の一種（閾値がない）
  - クリアランス制度の濃度基準は、放射化物であるかどうかを判断するための閾値ではない
  - **検出されたら放射化物**
- 放射化していれば記帳管理していなくても放射化物
- 一度放射化物になった物は**クリアランスしない限り放射化物**
- 測定で「放射化していない」事を示すためには、**クリアランスの濃度基準を十分下回る検出感度が必要**

# 放射化によって生成される核種

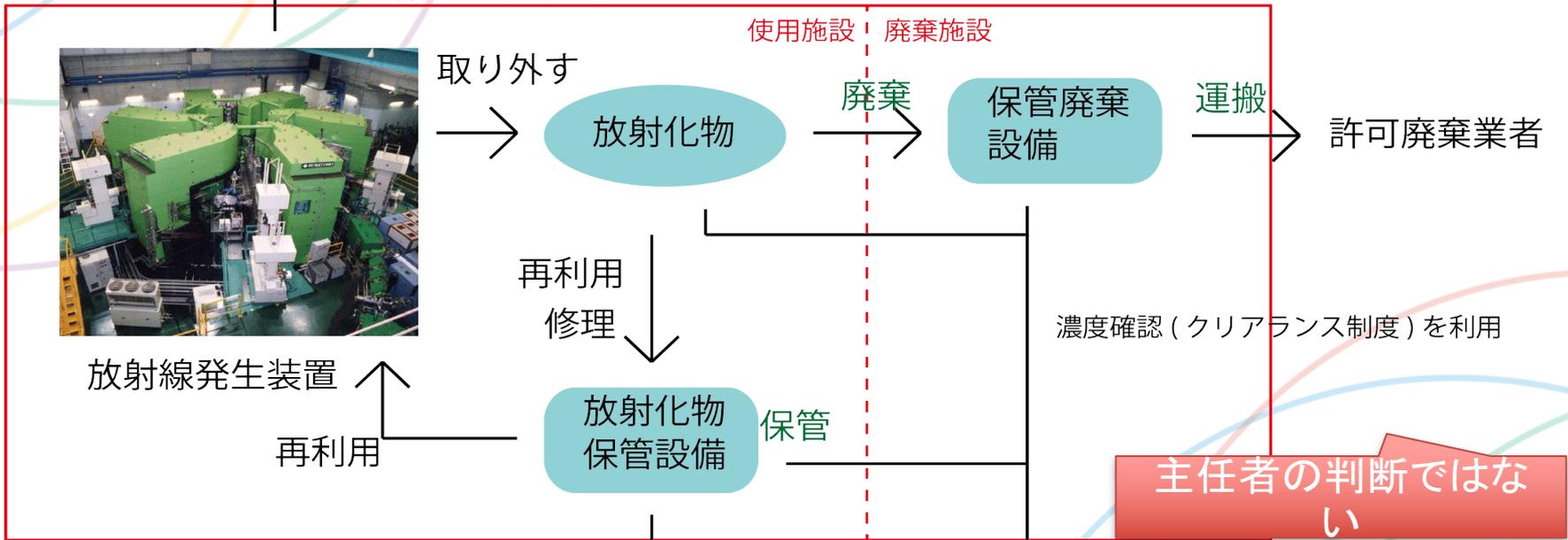
- 半減期が特に短い核種は考えない（特殊な場合を除く）
- 半減期が長い核種を管理する。結果的に不純物起因の核種の場合も多い。
  - 材質が鉄、銅、SUSの場合
    - Co-60(5.3y)、Co-56(77d)、Mn-54(312d)、Ti-44(59y)、Zn-65(244d)など
  - 材質がアルミニウムの場合
    - Na-22(2.6y)
- 熱中性子の吸収反応断面積が特に大きい核種に対しては、微量元素が放射化することがある。
  - Eu-152(13y) コンクリートなど
  - Ar-41(1.8h) 空気（作業者が吸うので、この程度の半減期でも管理が必要）
- アルミニウムでは主たる核種が測定時期によって変わってくる。
  - Na-24(15h) → Na-22 (2.6y) → Co-60 (5.3y)
- コンクリート(Co濃度10ppm)では、 $10^{13}$ 個程度の中性子が照射されるとクリアランスレベルを超えるCo-60が生成される。(KEK榎本氏の研究による)

# 放射化物の流れ

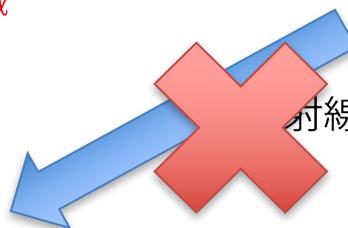
注:放射能濃度基準(クリアランスレベル)は放射化物か否かを判断する基準値ではない。放射化していないことを示すためには、クリアランスレベルを十分下回る検出限界値を保証した検出器を用いて、検出限界以下であることが必要。

一般物として修理・廃棄

測定 ↑ 数量告示で定められた放射能濃度基準により放射化物でないと判断された場合



放射線管理区域



放射化物としての輸出は不可

2018/4/9

譲渡された施設に放射化物保管設備がない場合、速やかに放射線発生装置に組み込む(相手方の責任)  
放射性同位元素等取扱に関する講習会  
(豊中)

# 放射化物の加工

- 敷物、受け皿その他の器具を用いることにより、放射線を放出する同位元素による汚染の広がりを防止すること。
  - 通常、放射線発生装置使用施設は汚染のリスクを想定しておらず、定期的な汚染検査は行われ~~ない~~。簡易ビニルハウスのようなものの中で作業を行う。
  - 放射化物の加工は放射線業務従事に当たる可能性がある。作業内容に応じては一時立入者としての作業は認められない。放射線発生装置自体の加工も放射化物の加工に準じる
  - 内部被ばくに注意（一時立入者の内部被ばくは法令報告対象）
- 作業終了後、当概作業により生じた汚染を除去すること。
  - 汚染除去が終了していることを放射線測定器により確認する必要がある。
    - 表面汚染の測定方法
  - 記帳義務はないが、記録が必要
  - 作業者は管理区域から出るときに、汚染検査を行う

RCNP予防規程第13条第3項第5号

退出する時は、汚染検査室において身体、衣服及び履物等の汚染の有無を調べ、汚染のあるときは、除染を行い、もし除染が出来ない場合は主任者の指示に従うこと。

# 表面汚染と放射化

# 表面汚染密度限度とクリアランスレベル

- 表面汚染密度限度(規則第1条第13項)
  - 放射線施設内の人が常時立ち入る場所において人が触れる物の表面の放射性同位元素の密度
  - アルファ線を放出する放射性同位元素:4Bq/cm<sup>2</sup>;アルファ線を放出しない放射性同位元素:40Bq/cm<sup>2</sup>(数量告示第8条、別表第4)
  - 放射性汚染物で、その表面の放射性同位元素の密度が表面汚染密度限度の1/10を超える物は**管理区域から持ち出してはいけない**(規則第15条第10項、数量告示第16条)
- 放射能濃度についての確認(クリアランス制度)
  - 放射能の影響が無視できるような極めて低い放射性汚染物について、その濃度が原子力規制委員会が定めた基準を超えないことを登録濃度確認機関により確認できた物を**障害防止法の規制から外すことができる**(法第33条の2)
  - 核種ごと、RIによって汚染されたか、放射線発生装置によって汚染されたかの違いにより定められている(数量告示第27条、別表第7)

表面汚染密度限度を超えない汚染物は、管理区域外を経由して他の管理区域へ運ぶことが可能。一般物にするためにはクリアランス制度を適用しなければならない。

# 表面汚染と放射化

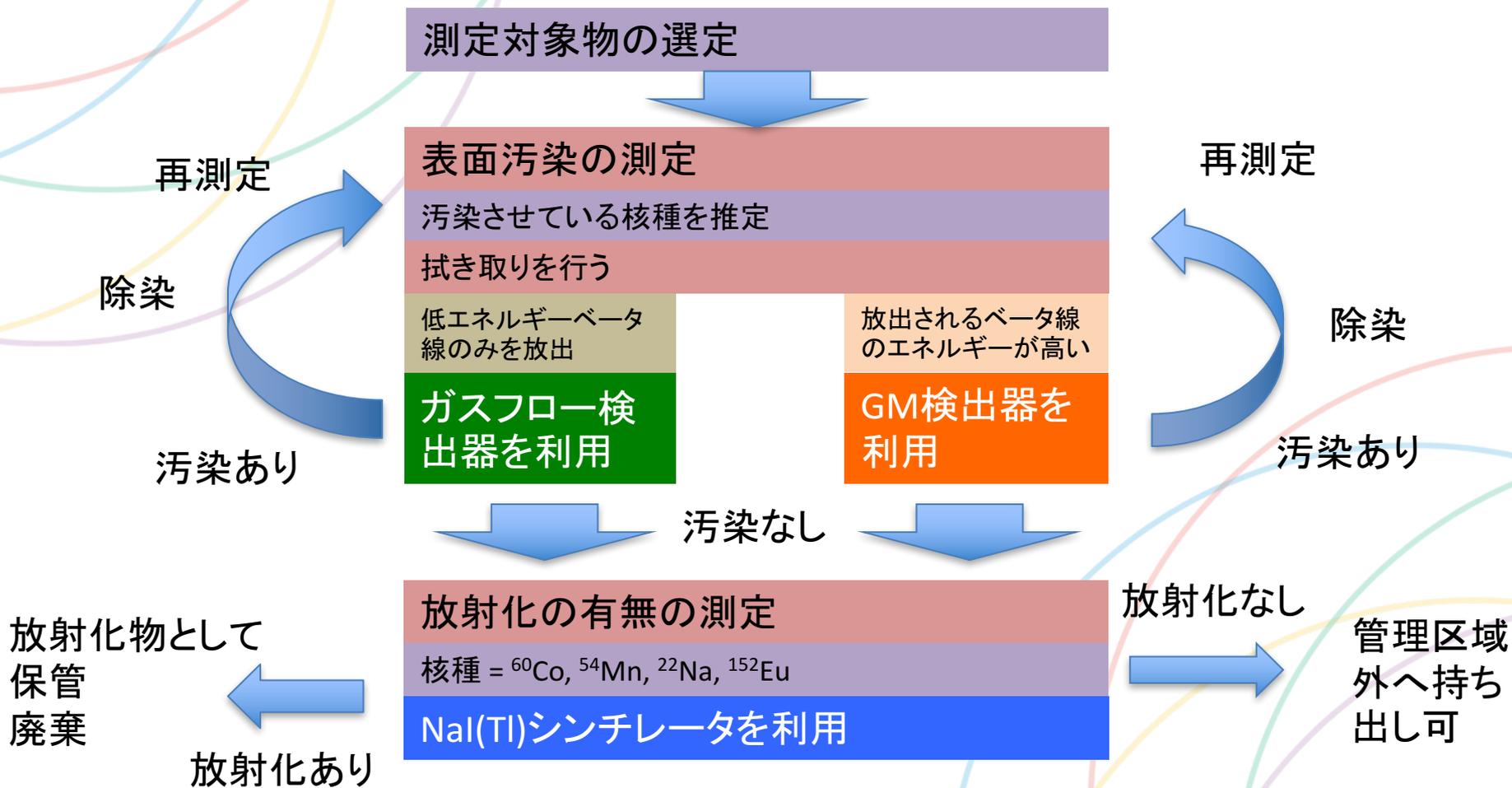
表面線量(率)



- 表面汚染は主に非密封RIの使用に伴う
  - 拭き取り検査可能
  - ベータ線が多い
  - 核種によっては低エネルギーベータ線のみを放出
  - サーベイメータでは放射化も同時に測定してしまう(表面線量率)
- 放射化は主に加速器の使用に伴う
  - 拭き取り検査不可能
  - ベータ線が少ない
  - ガンマ線を測定



# 表面汚染と放射化の測定手順



# 危険予知と汚染検査・放射化検査

- 放射線発生装置使用室に持ち込んでいないものは放射化しない
- ビーム照射中に放射線発生装置使用室に持ち込んでいないものは放射化しない
  - 放射化検査は不要
  - 放射化物を含んだオイルなどで床が汚染していると、床に置いたものが表面汚染する可能性がある
  - 汚染検査が必要
- ビーム使用中に放射線発生装置使用室内に持ち込んだもの、その履歴が不明なもの、実験室に持ち込んでいないことに対して確実性がないものは放射化している可能性がある。
  - 放射化の検査が必要
- 非密封RIのみの実験のために持ち込んだもの
  - 放射化の検査は不要
- 上記の判断が困難な場合
  - 放射化の検査、汚染検査の両方を行う。



大阪大学  
OSAKA UNIVERSITY



OPEN 2021

# インターロックと自動表示灯

2018/4/9

放射性同位元素等取扱に関する講習会  
(豊中)

23

# インターロック

## 放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律施行規則

第14条の7 [使用の基準]法第六条第一号の規定による使用施設の位置、構造及び設備の技術上の基準は、次のとおりとする。

(1)~(5) 省略

(6) 原子力規制委員会が定める数量以上の密封された放射性同位元素又は放射線発生装置の使用をする室の出入口で人が通常出入りするものには、放射性同位元素又は放射線発生装置の使用をする場合にその旨を自動的に表示する装置を設けること。

(7) 原子力規制委員会が定める数量以上の密封された放射性同位元素又は放射線発生装置の使用をする室の出入口で人が通常出入りするものには、放射性同位元素又は放射線発生装置の使用をする場合にその室に人がみだりに入ることを防止するインターロックを設けること。

(7)の2~(9) 省略

- 放射線発生装置と400 TBq以上（数量告示第11条）の密封線源には自動表示装置が必要
- 放射線発生装置と100 TBq以上（数量告示第12条）の密封線源にはインターロックが必要

自動表示装置、インターロックは使用承認条件に含まれており、不完全な状態で放射性同位元素・放射線発生装置を使用する事はできない

# インターロック・自動表示装置の例

## リミットスイッチ

扉が完全に閉まっているかどうかを検知している。扉が少しでも開いているとビームを出せない。最近では電気錠を併用して、ビーム発生時には自動的に施錠する場合が多い。



## 安全キー・パーソナルキー

入室時に引き抜き、退室時に戻す。キーが全て返却されないとビームが出せないようになっている。実験室に入るときは1人1本ずつ抜く。



## 安全スイッチ

このスイッチを作動させるとビームを発生させることができない。



## 自動表示灯

室内にビームが出ていることを表示する。古い施設では蛍光灯の点灯式、新しい施設では電光板などが使われる。



**入室時にはインターロックを故障や不十分な確認を想定して、可能な限り全て作動させる**

# トラブル例・安全キーの紛失

## 発生日時、場所

平成28年 5月26日 20時頃、西実験室

## 発生内容

サイクロトロンインターロックである安全キーを紛失した。RCNPの放射線発生装置使用室では、実験室に入るときに安全キーを抜くことで人が在室中にビーム(放射線)が発生しないようなインターロックが設置されている。逆に、ビームを出すときは20本用意されている全ての安全キーが返却されなければビームを出すことができない。

ビームを出そうとしたところ、安全キーが1本不足していた。3時間程度搜索したところ、実験者1名の上腕に付いていた。

## 対応

慣れてくると安全キーを抜かなくなる方が多いので、きちんと抜いたことは褒められるべき事。注意喚起などをしてキーを持たなくなる方がリスクのため、特に対応しない。



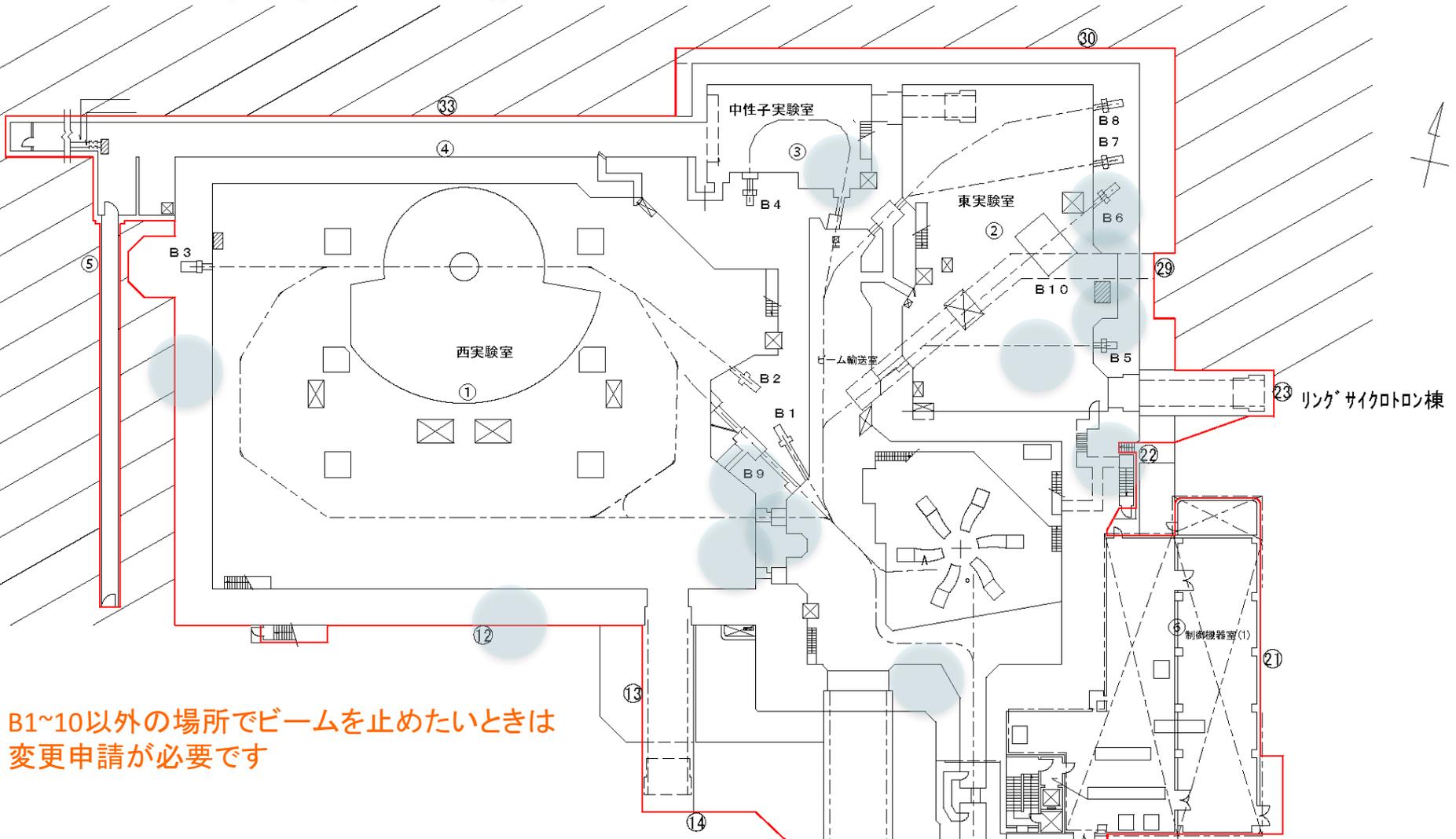
# 放射線発生装置使用の承認内容のポイント(1)

種類	AVFサイクロトロン	リングサイクロトロン
台数	1台	1台
性能	陽子: $66 \text{ MeV} < E_p \leq 90 \text{ MeV}$ 3.0粒子 $\mu\text{A}$ 重陽子: $E_d \leq 57 \text{ MeV}$ 6.0粒子 $\mu\text{A}$ 重イオン: 35 MeV/核子 6.0粒子 $\mu\text{A}$ 重陽子: $57 \text{ MeV} < E_p \leq 75 \text{ MeV}$ 3.0粒子 $\mu\text{A}$ ヘリウム3: 170 MeV 6.0粒子 $\mu\text{A}$ 陽子: $E_p \leq 66 \text{ MeV}$ 6.0粒子 $\mu\text{A}$ $\alpha$ 粒子: 140 MeV 6.0粒子 $\mu\text{A}$	陽子: 440 MeV ヘリウム3: 560 MeV 重陽子: 220 MeV アルファ粒子: 440 MeV 重イオン: 110 MeV/核子 <div style="display: inline-block; vertical-align: middle; margin-left: 10px;">                         } ビーム電流                          : 1.1粒子<math>\mu\text{A}</math> </div>
使用の目的	原子物理学の研究、及び加速ビームを用いた基礎科学の研究 放射性同位元素の製造及び販売を伴わない譲渡に係わる放射性同位元素の製造	原子物理学の研究、及び加速ビームを用いた基礎科学の研究 放射性同位元素の製造及び販売を伴わない譲渡に係わる放射性同位元素の製造
使用の方法	加速ビームの物質、又は生物学試料への照射(218 4時間/3ヶ月) リングサイクロトロンの入射器として使用	加速ビームの物質、又は生物学試料への照射(218 4時間/3ヶ月)
使用の場所	AVFサイクロトロン本体室、核分光学・エネルギー高分解能・核構造・核反応実験室 リングサイクロトロン本体室(ビーム輸送室を含む)、 西実験室、東実験室、中性子実験室	リングサイクロトロン本体室(ビーム輸送室を含む)、 西実験室、東実験室、中性子実験室

## 遮蔽計算: 放射線の発生点とビーム損失量

- ターゲットにあてられたビームは、ターゲットを貫通し、ターゲット後方にあるビームダンプでビームの全てを失う。
- ビームを失う箇所が放射線発生点となる
- 薄いターゲットを使用するときはターゲットで失われるビームは極めて少ない。
- それに加えて、ビーム引き出し用ディフレクターで0.03粒子 $\mu\text{A}$ のビーム損失があるものとする
- 実験室内の空気の放射化の評価は、ビームダンプで発生した中性子により評価されている

# 放射線発生装置使用の承認内容のポイント(2)



B1~10以外の場所でビームを止めたいときは  
変更申請が必要です

# 放射線発生装置使用上の安全・まとめ

## 実験中の実験室の入室時に注意

- インターロックを全て作動させる
- 放射化している場所を確認する。
- 放射化が強い場合はRI使用におけるコールドランに相当する練習を行う等、作業時間が短くなるような努力を行う
- ビームがでているときの入室は一般的には行われない。

## 管理区域からの持ち出し物に関する注意

- 放射化物はRI汚染物。下限数量は適用されない。
- ビームに直接触れない物も放射化している可能性がある。
- 放射線発生装置のみの管理区域出口には汚染検査室が設置されていないが、作業内容に応じて汚染検査を行う。

## 放射化物の加工に関する注意

- 放射化物を加工する行為は、濃度の薄い非密封RIを使用しているのと同じ。汚染の拡大防止や内部被ばくの防止に努める必要がある。

## 使用の方法（使用承認）に関する注意

- 放射線発生装置の遮蔽計算には様々な仮定が含まれている。その仮定を著しく逸脱しない範囲で使用が可能である。