

加速器周辺の放射化とその放射線管理

(自然科学研究機構 核融合科学研究所 放射線業務従事者に対する教育訓練)

大阪大学 核物理研究センター
放射線管理室・放射線取扱主任者
鈴木智和

放射線管理関連の最近の出来事と自己紹介

2010年4月 RCNPの放射線管理室員になる
2011年3月 東日本大震災、福島第一原発事故（東北大学出張中でした）
2011年11月 RCNPの放射線取扱主任者に選任される
2012年4月 改正RI法施行、放射化物の管理が始まる
2012年5月 J-PARCハドロンホール事故
2014年3月 東京医科歯科大RI漏洩事故
2015年12月 原子力規制委員会がIRRSのレビューを受ける
2017年2月 改正RI法閣議決定。防護措置、危険時の措置、自主的・継続的な安全の取り組みが導入される。

2012/4 - 大学等放射線施設協議会加速器放射線安全検討委員会

2012/12 - 2017/3 J-PARC放射線安全評価委員会

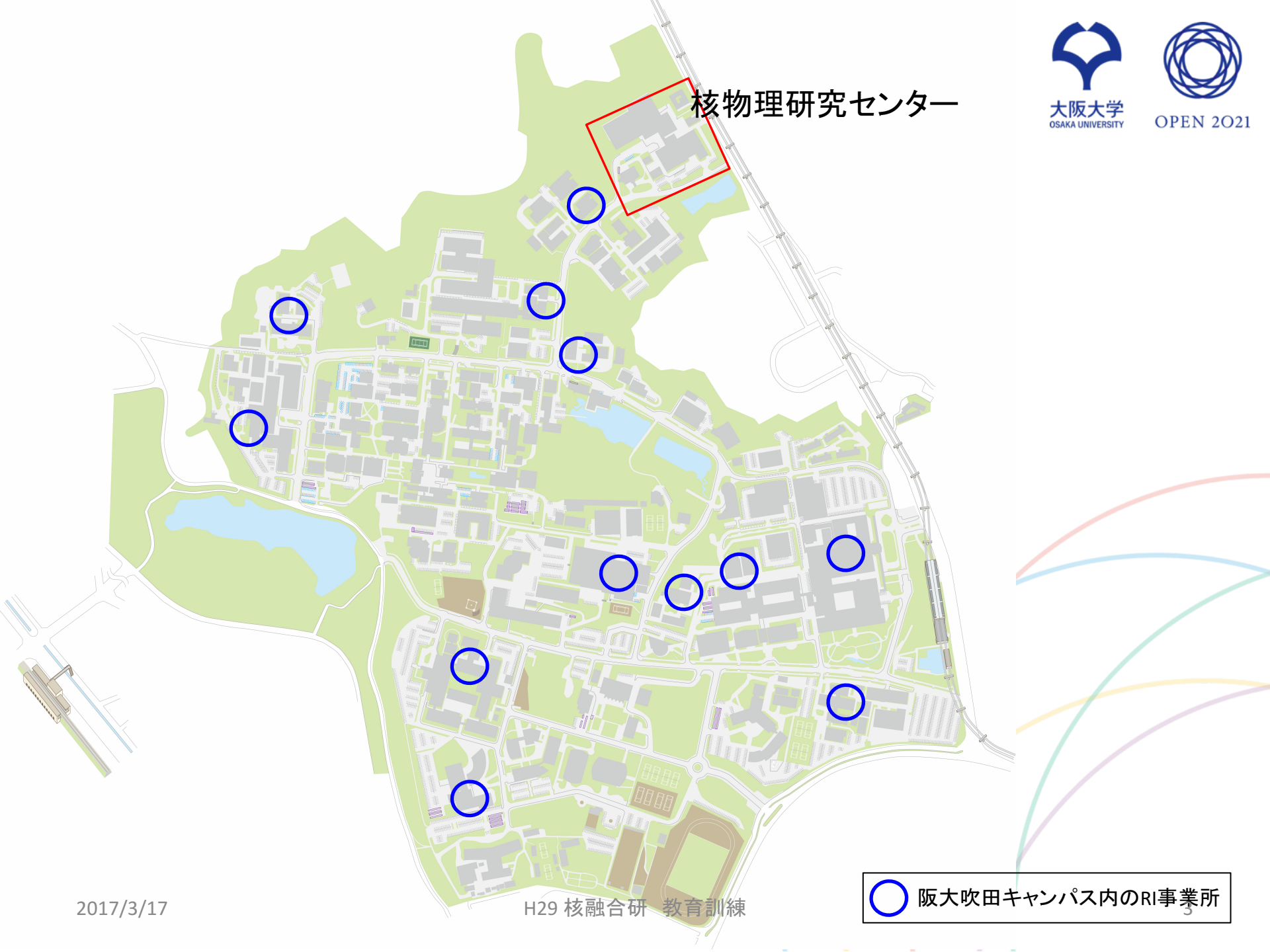
2015/11 - 日本放射線安全管理学会 「放射線施設廃止の確認手順と放射能測定マニュアル」改訂専門委員会

2016/5 - 2017/3日本アイソトープ協会放射線対策委託費（品質保証制度の導入に向けた規制制度のあり方に関する調査）事業委託業務に係わる委員

研究テーマ

- ・放射化物の管理と加速器施設の廃止
- ・RI使用施設における安全文化の醸成（品質保証、自主的・継続的な安全の取り組み）

核物理研究センター



2017/3/17

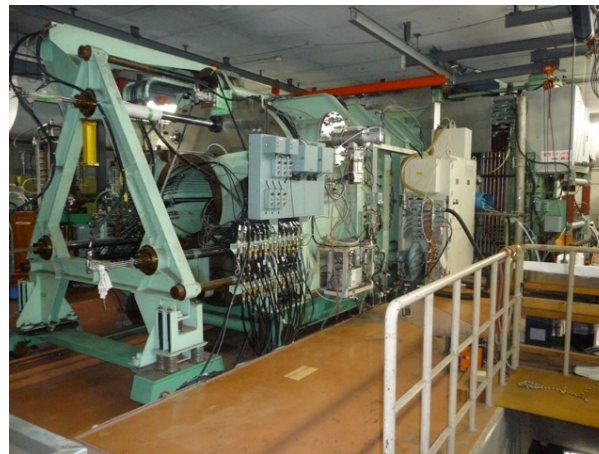
H29 核融合研 教育訓練

○ 阪大吹田キャンパス内のRI事業所



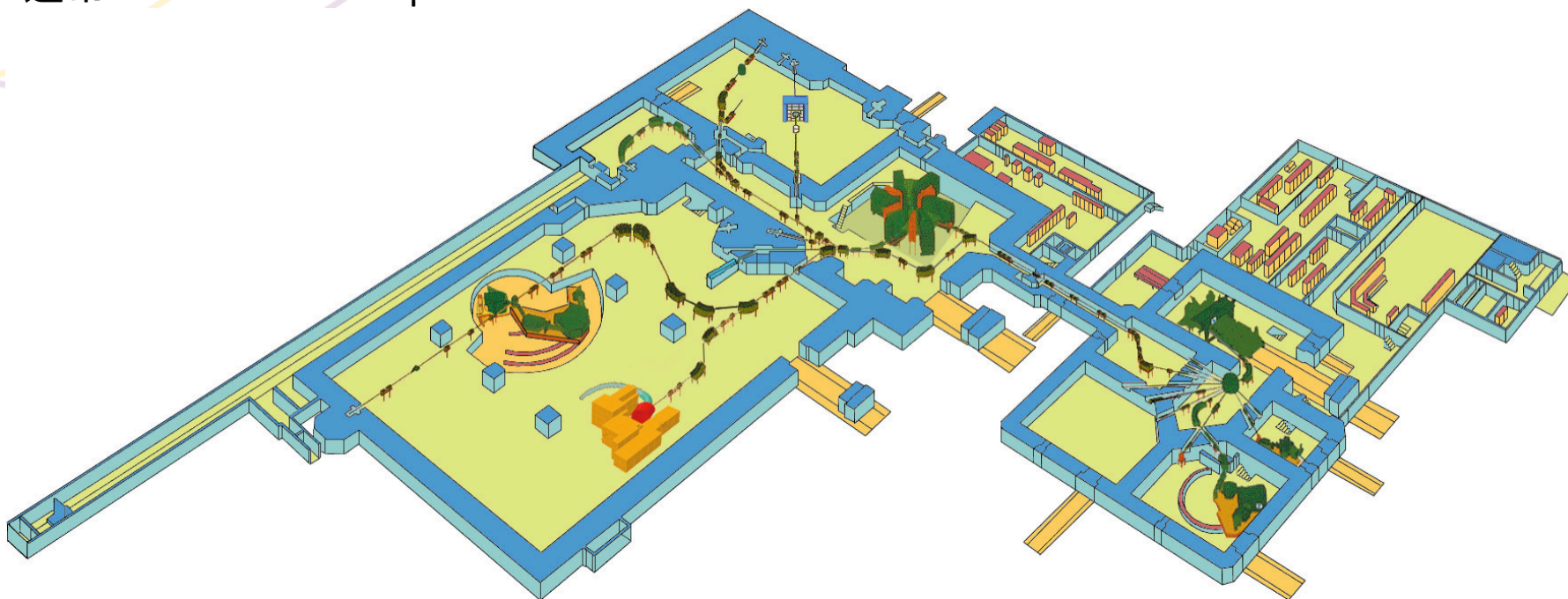
リングサイクロトン

通常: $392 \text{ MeV} \times 1.1 \mu\text{A} \approx 430\text{W}$



AVFサイクロトン K=130

通常: $65 \text{ MeV} \times 3 \mu\text{A} \approx 200\text{W}$



本日の講演内容

- 放射線障害防止法における放射化物と法解釈
 - 法令上の「放射化物」の定義
 - 「放射化物」と「放射化しない物」
 - 放射化物の管理
 - 放射化物の加工
 - 放射化物の輸出
- なぜ放射化するのか？
- 表面汚染と放射化
- 「発生装置から取り外した部品」以外の放射化
- 放射化物に関するトラブル事例
- 現行法下におけるバンデグラフ施設の廃止例

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 μ 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

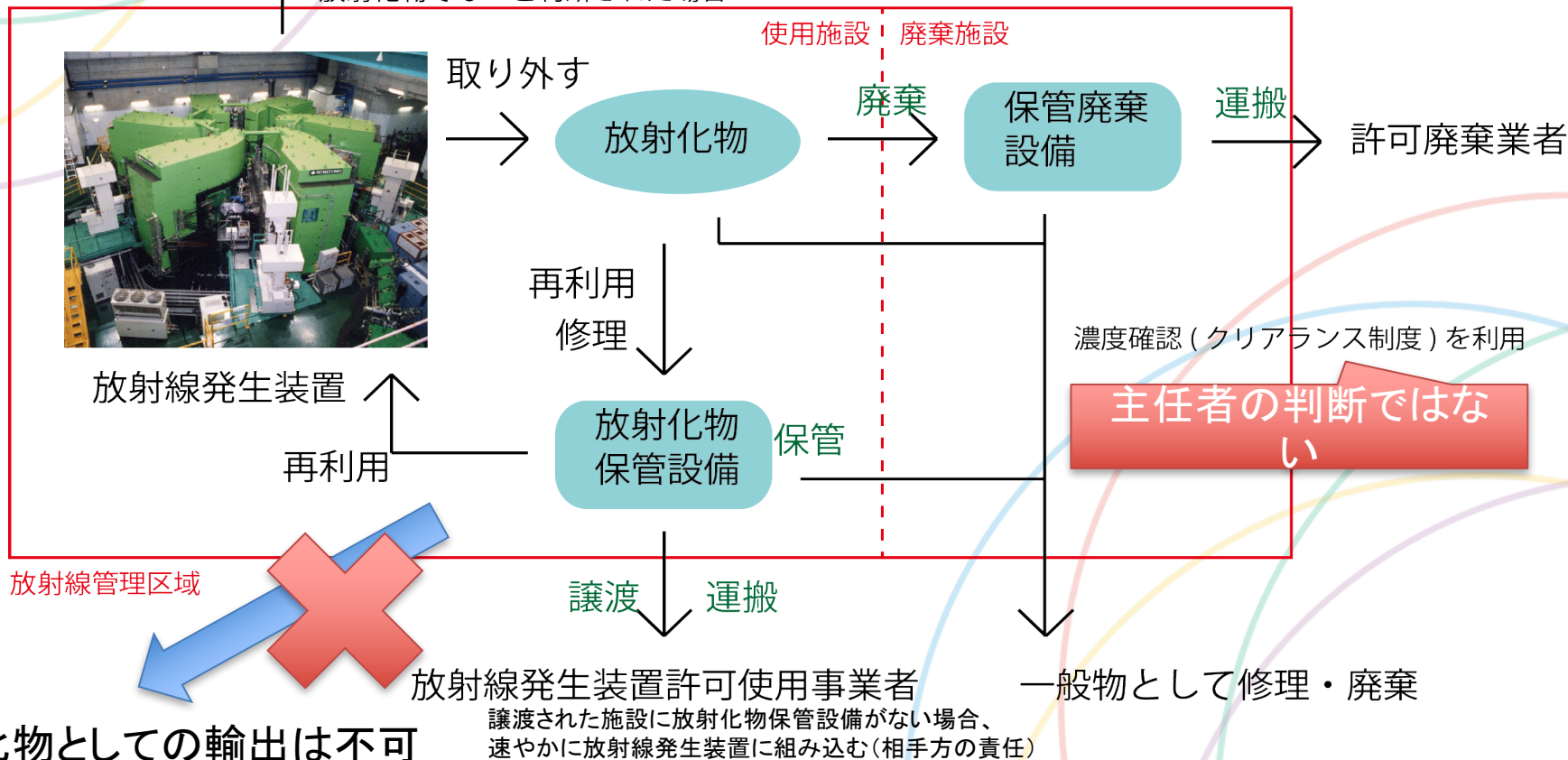
放射化物の流れ

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

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。



放射化物としての輸出は不可

2017/3/17

H29 核融合研 教育訓練

ユーザーが関わる法定帳簿

密封されていない放射性同位元素	放射線発生装置	
	～ H24.3.31	H24.4.1 ～
<u>受入れ・使用・保管・払出し</u> 核種、数量、受入れの年月日、受入れの相手方の氏名または名称、使用の年月日、使用の目的、使用の方法、使用の場所、使用に従事する者の氏名、保管の期間、保管の方法、保管の場所、保管に従事する者の氏名、払出しの年月日、払出しの相手方の氏名または名称 <u>廃棄</u> 核種、数量、廃棄の年月日、廃棄の方法、廃棄の場所、廃棄に従事する者の氏名 <u>運搬</u> 核種、数量、運搬の年月日、運搬の方法、荷受人又は荷送人の氏名又は名称、運搬に従事する者の氏名若しくは運搬を委託先の氏名若しくは名称 (汚染の測定、記録)	<u>使用</u> 放射線発生装置の種類、使用の年月日、使用の目的、使用の方法、使用の場所、使用に従事する者の氏名 <u>放射化物の受入れ・保管・払出し</u> 核種、数量、受入れ年月日、受入れの相手方の氏名または名称、保管の期間、保管の方法、保管の場所、保管に従事する者の氏名、払出しの年月日、払出しの相手方の氏名または名称、 <u>放射化物の廃棄</u> 核種、数量、廃棄の年月日、廃棄の方法、廃棄の場所、廃棄に従事する者の氏名 <u>放射化物の運搬</u> 核種、数量、運搬の年月日、運搬の方法、荷受人又は荷送人の氏名又は名称、運搬に従事する者の氏名若しくは運搬を委託先の氏名若しくは名称 (放射化物の加工後の汚染検査の記録)	

放射化物管理の難しさ

- 改正法令の理解・習慣
 - 放射化物の定義
 - 放射化物が放射性汚染物の一種
 - 下限数量が適用されない
 - 放射化物か否かの判断、クリアランスとの関係
 - 従事者が関わる法定帳簿の増加
 - 放射線発生装置の使用に関わる記帳はもともとわずか
 - 理解し難い用語
 - 「表面汚染」、「汚染が拡大しない措置」
- 放射化物の放射能管理
 - 表面線量率は測定可能。放射能の導出は困難。

現状では現実と乖離している部分もあるが、法令である以上守らなければならない。
放射線取扱主任者とよく相談して、違法状態にならないようにすることが大切。

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

核融合科学研究所放射線障害予防規程（最終改正：平成28年9月28日）

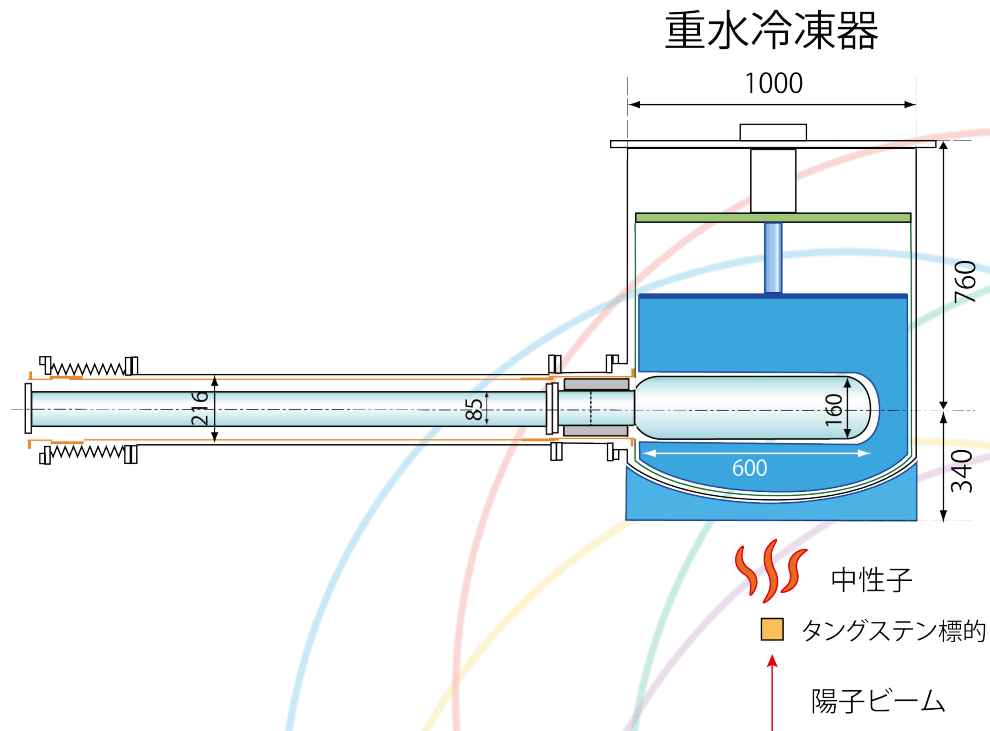
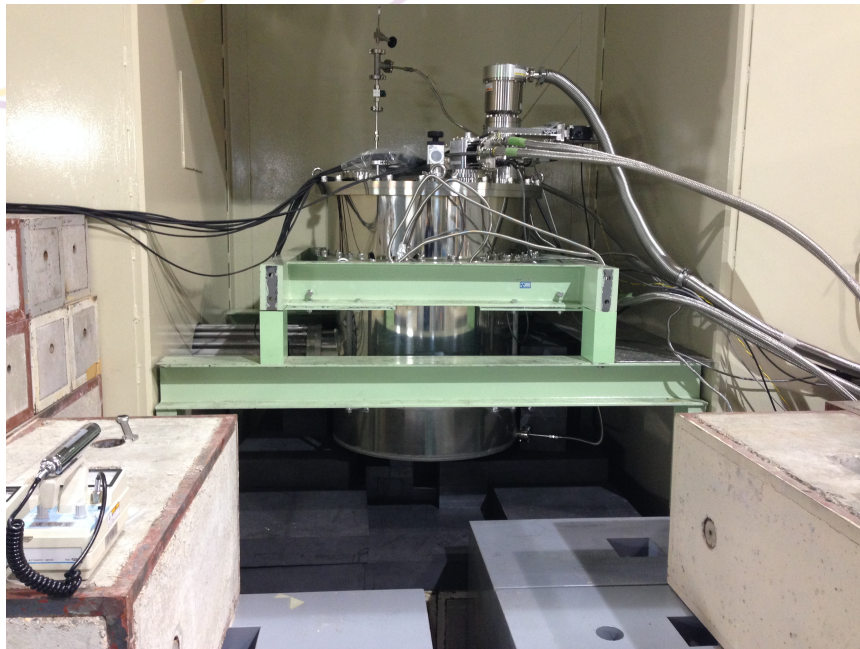
第20条（管理区域への立入りと遵守事項）

2 **放射性物質等による汚染のおそれのある管理区域**に立ち入る使用者は、次の各号に掲げる事項を遵守しなければならない。

- 備え付けの**専用の作業衣及び履物**を着用しなければならない。
- 管理区域から退出する際は、備え付けの放射線測定用具又は放射線測定器により、汚染検査室において**汚染検査**を行い、汚染があったときは、直ちに**除染**を行わなければならない。
- 内部被ばくのおそれのあるときは、必ず備え付けの内部被ばく用放射線測定用具又は放射線測定器により、汚染検査を行わなければならない。
- 前2号の汚染検査の結果を所定の**帳簿に記録**しなければならない。

放射化物の輸出

- ・ カナダTRIUMFとの国際共同実験のため、これまでRCNPで使用してきた実験装置を今後はTRIUMFで使用したい。
- ・ 放射化している。放射化物としての管理が必要な装置。
- ・ 法令上、「汚染物の輸出」は規定されていないが、そもそも許可廃棄業者にしか引き渡せない。



放射化物をRIとして輸出する

- 「放射化物」というカテゴリーは日本独自のカテゴリーなので、「放射化物」として輸出することは不可能
 - 現行国内法と国際法の両方を満たさないといけない
 - 国際的な輸送にはBSSを超えているかBSS以下しかない
 - BSSを超えているならばRIとして輸出するしかない
- RIとして放射化物を輸出する
 - 放射化物を「密封されていない放射性同位元素」として管理するため、放射化物に含まれるすべての核種の非密封の許可が必要。まったく非密封の許可がない施設では許可を得るのがかなり困難。
 - BSSを超えるか超えないかの判断は放射化物管理上の代表的な核種だけでなくすべての核種のBSSとの比の和で評価する必要がある。
 - RIとして輸出したら持ち帰ってもRI。
 - RIを通関できるかどうかは相手国の法律による。事前にチェックが必要。
- BSSを超えているかいないか
 - BSSを超えていなければ障防法の輸出の許可は不要
 - 法的には放射性輸送物にする必要はない

表面汚染と放射化



予防規程と機器等の管理区域外への持ち出し

核融合科学研究所放射線障害予防規程（最終改正：平成28年9月28日）

第27条（放射性物質等の使用）

1～7 省略

8 使用者は、取扱作業に使用した機器及び器具を施設管理区域外に搬出する場合は、管理区域責任者の立ち会いの下に、これらの汚染検査を行い、その結果が、関係法令で定められた表面密度限度の10分の1以下となるようにしなければならない。

大阪大学核物理研究センター放射線障害予防規程（最終改正：平成26年3月4日）

第18条（放射性同位元素及び放射線発生装置の使用）

（1）～（4）省略

（5）管理区域で使用した機器は、みだりに当該区域から持ち出してはならない。やむを得ず持ち出す場合は、汚染の状態を検査して、表面密度限度の1/10以下であり、放射化していないことを確認すること。

（6）省略

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（昭和32年法律第167号）

第15条（使用の基準）

（1）～（9）省略

（10）放射性汚染物で、その表面の放射性同位元素の密度が原子力規制委員会が定める密度を超えているものは、みだりに管理区域から持ち出さないこと。

（10）の2～（14）省略

注：第10号は、「原子力規制委員会が定める密度以下の放射性汚染物を一般物にすることができる」という意味ではない → クリアランス制度

表面汚染と放射化



表面汚染

拭き取り検査可能

放射化

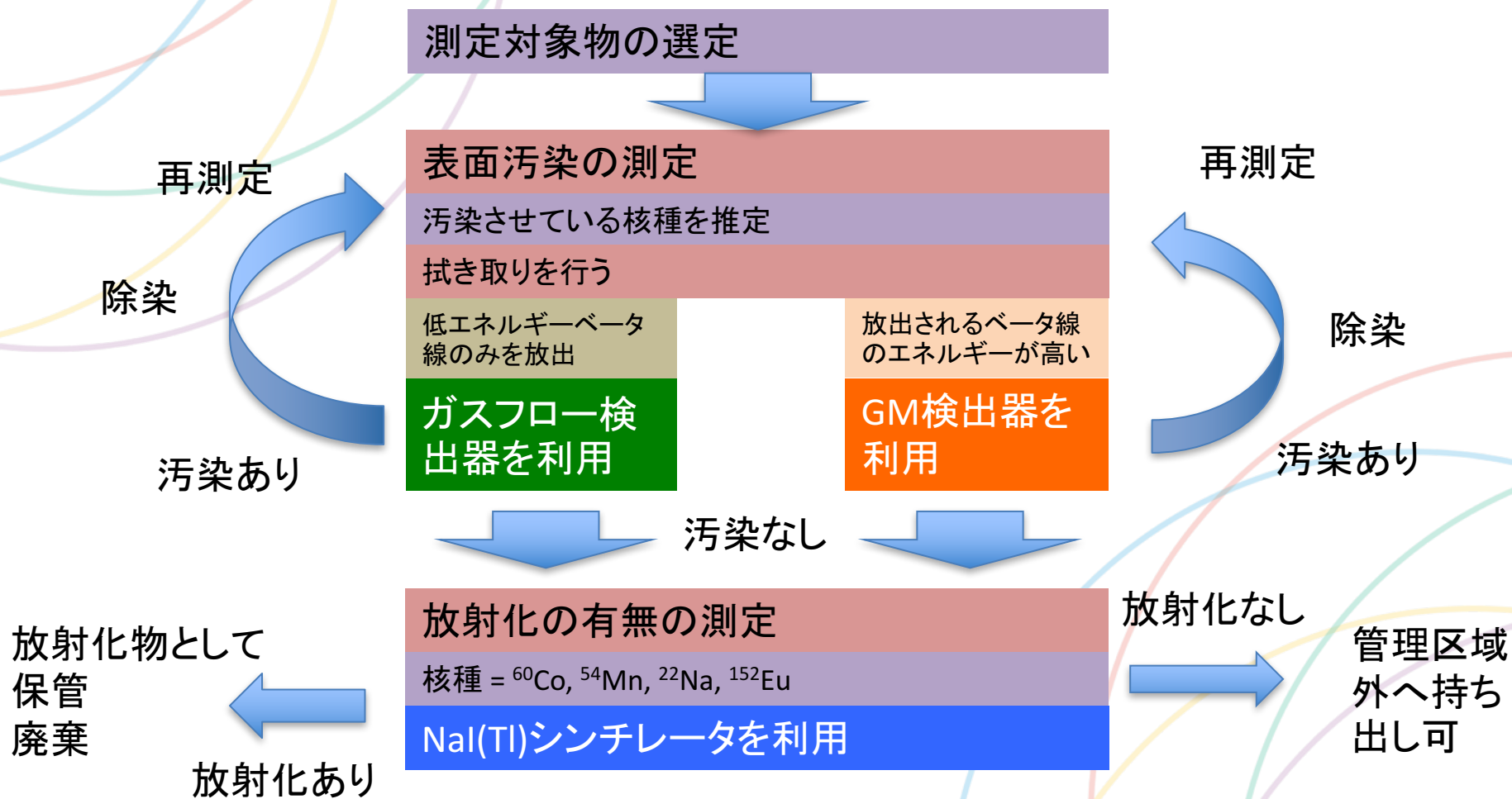
拭き取り検査不可能

実験で使した機器



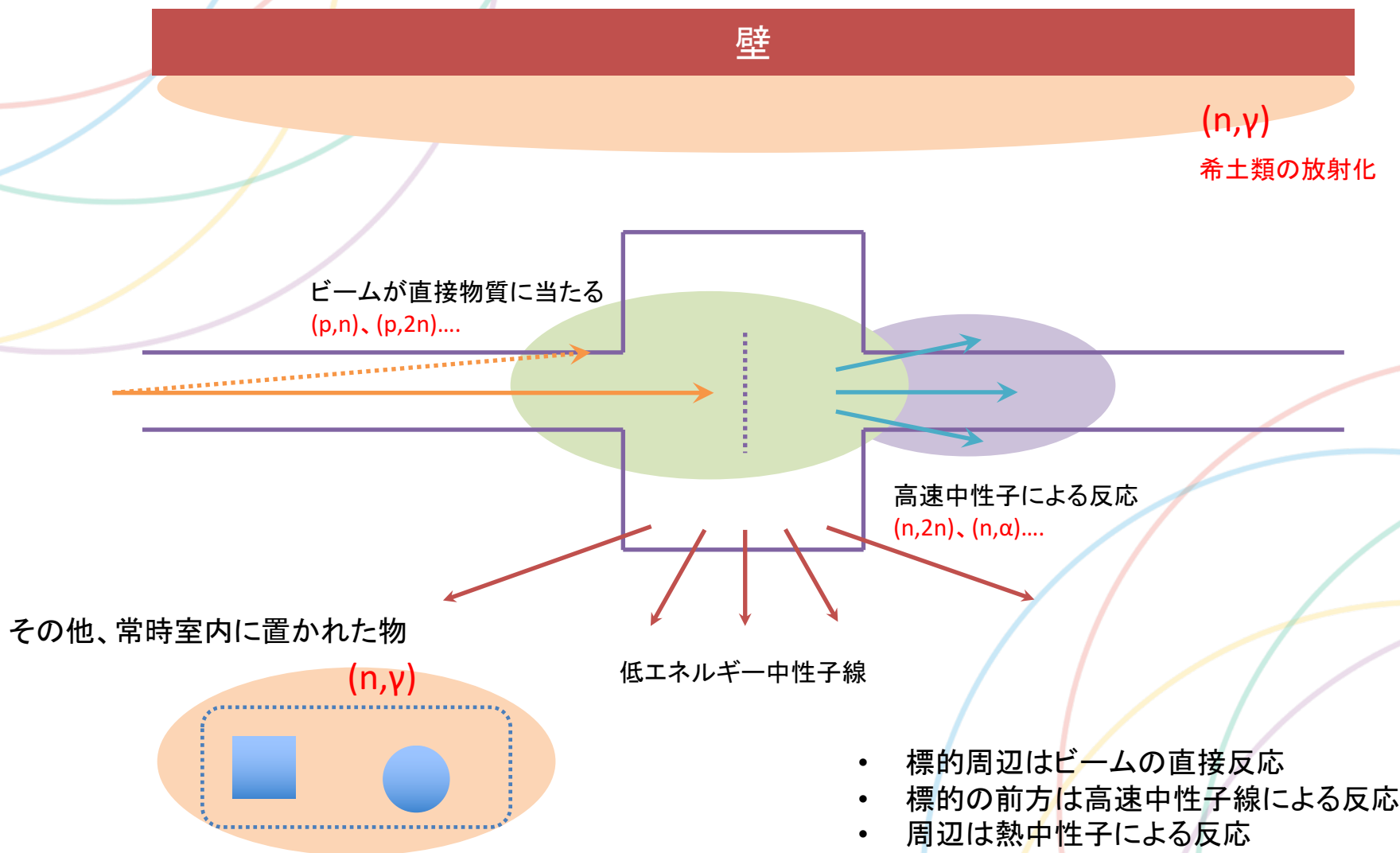
- 表面汚染は主に非密封RIの使用に伴う
 - 拭き取り検査可能
 - ベータ線が多い
 - 核種によっては低エネルギーベータ線のみを放出
 - サーベイメータでは放射化も同時に測定してしまう(表面線量率)
- 放射化は主に加速器の使用に伴う
 - 拭き取り検査不可能
 - ベータ線が少ない
 - ガンマ線を測定

表面汚染と放射化の測定手順



放射線発生装置の部品以外の放射化

加速器による放射化



放射化によって生成される核種

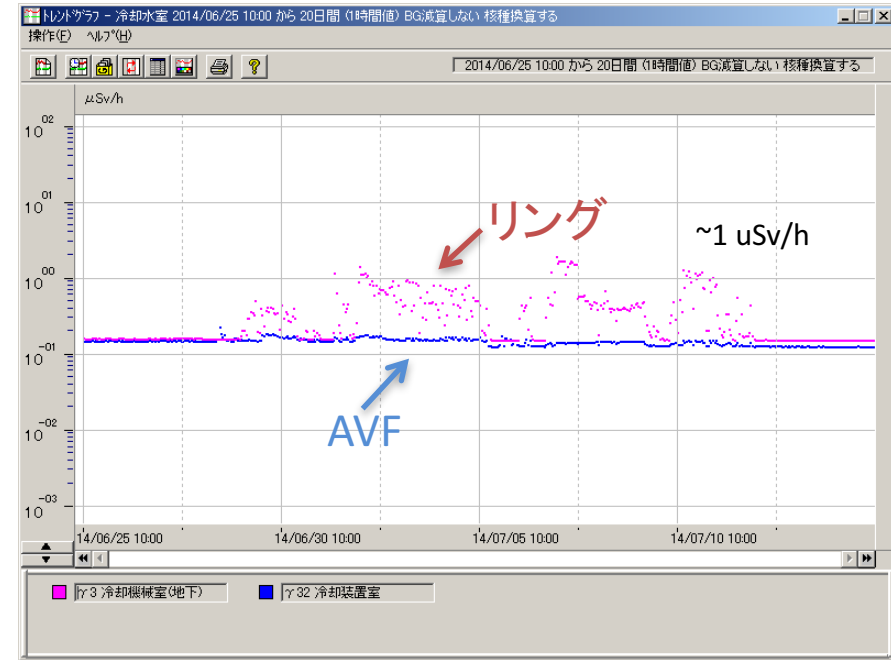
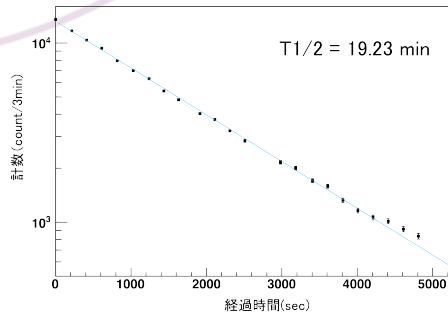
- 半減期が特に短い核種は考えない（特殊な場合を除く）
- 半減期が長い核種を管理する。結果的に不純物起因の核種の場合も多い。
 - 材質が鉄、銅、SUSの場合
 - Co-60(5.3y)、Co-56(77d)、Mn-54(312d)、Ti-44(59y)、Zn-65(244d)など
 - 材質がアルミニウムの場合
 - Na-22(2.6y)
- 熱中性子の吸収反応断面積が特に大きい核種に対しては、微量元素が放射化することがある。
 - Eu-152(13y) コンクリートなど
 - Ar-41(1.8h) 空気（作業者が吸うので、この程度の半減期でも管理が必要）
- アルミニウムでは主た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梶本氏の研究による)

リングサイクロトロン冷却水の放射化 (運転終了数日後)

- 放射化により生成される核種・・・H-3
- 液体シンチレータで測定
 - 5.3 Bq/cc
- H-3/C-14サーベイメータでは検出できない。
- 密封されていない放射性同位元素としてH-3の排水中濃度限度は60 Bq/cc
- H-3によって汚染されたもののクリアランスレベルは100 Bq/g

リングサイクロトロン冷却水の放射化 (運転中)

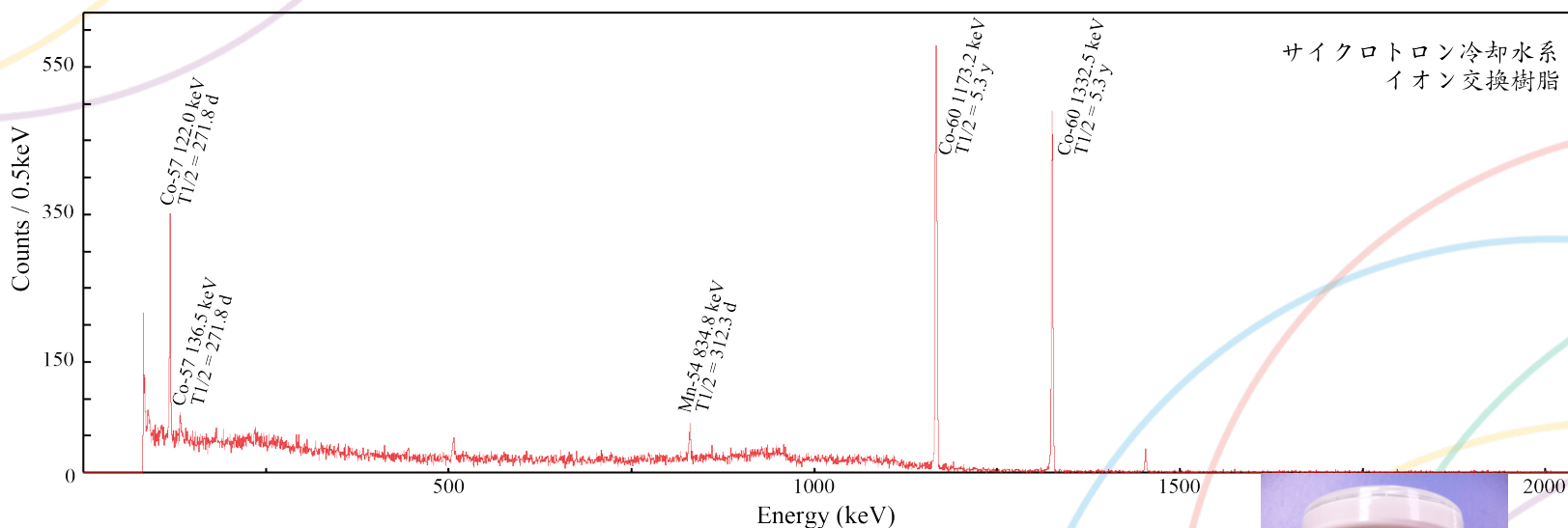
リングサイクロトロンで大電流運転すると冷却水室の空間線量率が上昇する。
運転後1日経過すれば線量率は元に戻る



C-11が生成されている。

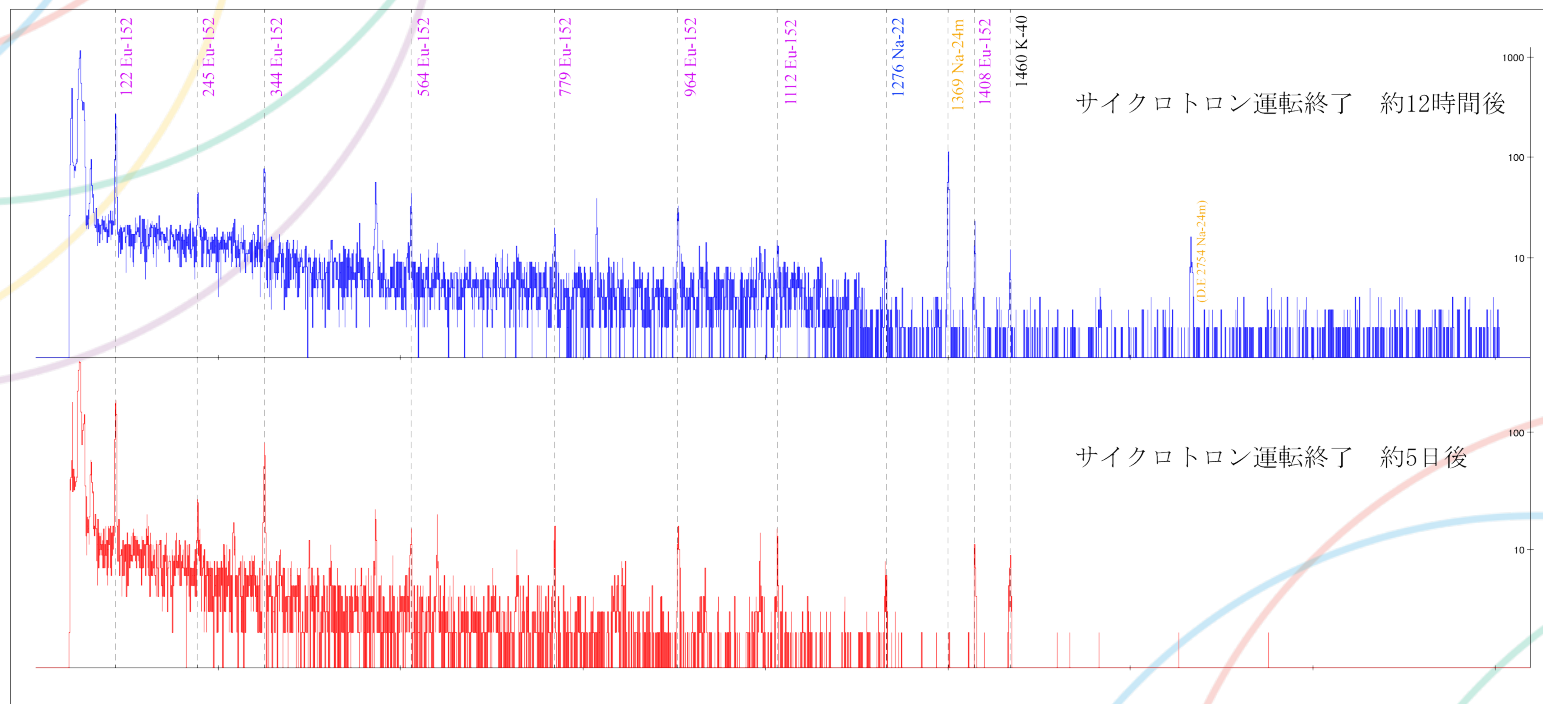
冷却水系イオン交換樹脂

- サイクロトロンの冷却水はイオン交換樹脂で金属を取り除きながら循環させて使用している。
- そのため、冷却水中からはH-3、C-11のみが検出されたと考えられる。
- 表面線量率は0.3 $\mu\text{Sv/h}$ 程度



蛍光灯の放射化

AVF本体室 0コース蛍光灯



- 蛍光灯は大阪大学で一括購入されている
- 3波長型昼白色 FLR40SEX-N/M/36-HG
- 蛍光材にユーロピウムが使われている

放射化した3波長型昼白色蛍光灯

- 核種：Eu-152 (運転終了直後はNa-24も)
- 表面線量率：0～0.07 $\mu\text{Sv/h}$ (BGの2倍程度)
- 数量：？
 - NaI(Tl)サーベイメータの測定値と放射能の関係を調査
 - 放射化していない蛍光灯を砕いて、1 kBqのEuCl₃溶液5ccとともにU8容器に入れ校正用線源とした
 - 放射化した蛍光灯は砕いてすべてをU8容器に入れた
 - ゲルマニウム検出器で測定
 - 162 ± 10 [(Bq/g)/($\mu\text{Sv/h}$)]
 - 表面線量率が0.03 $\mu\text{Sv/h}$ 、直径36mm、長さ120cmの蛍光灯1本あたりでは1kBq/本



放射化した蛍光灯の廃棄

- 日本アイソトープ協会のドラム缶
 - 内径390mm、高さ454mm
- 蛍光灯の長さ 1200mm
- 日本アイソトープ協会環境整備課に相談
 - 割って入れてください
 - 割らない場合（短いもの）は不燃物
 - 割ったものは非圧縮性不燃物



蛍光管内は負圧なので端を割って空気を入れる(強めにたたく)



軽くたたくとどんどん割れる

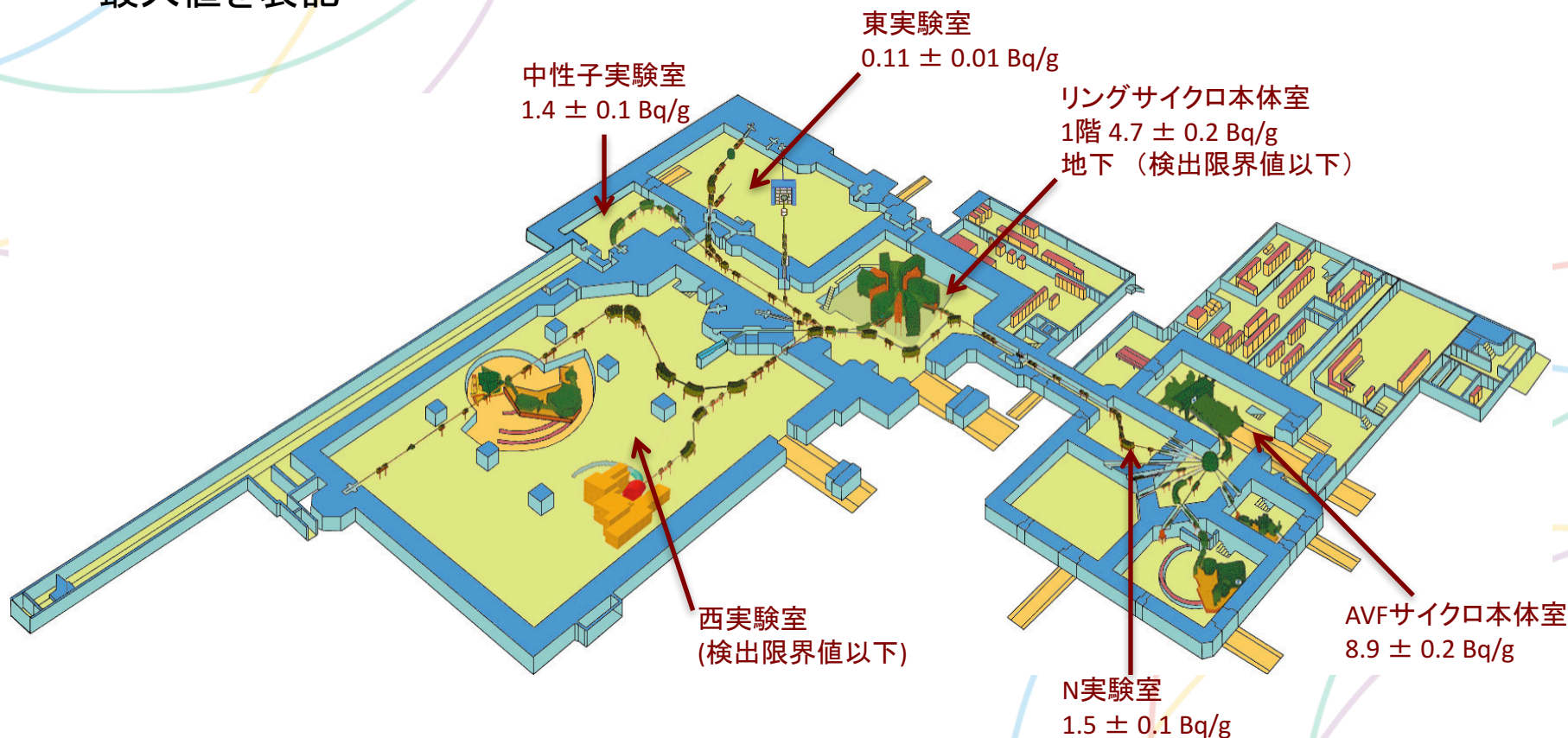


協会の廃棄物用内容器に入れ、非圧縮性不燃物ドラム缶へ

核種・数量がわかっている

実験室毎の蛍光灯の放射化の状況

最大値を表記



Eu-152のクリアランスレベルは 0.1 Bq/g

その他の放射化の例

- 消火器
 - 容器が放射化 (約 $0.05 \mu\text{Sv/h}$ 、Na-22、Zn-65、Co-60)
 - 室内すべての消火器が放射化しているわけではない。
 - 粉末消化剤（リン酸アンモニウム）は放射化していない
 - 粉末消火剤は消火器業者に引き取ってもらい、容器は非圧縮性不燃物で廃棄

阪大RCNPにおける放射化物の トラブル事例

非公開スライド



非公開スライド



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。

バンデグラフ施設の廃止

大阪大学大学院理学研究科 放射線科学実験室バンデグラフ施設



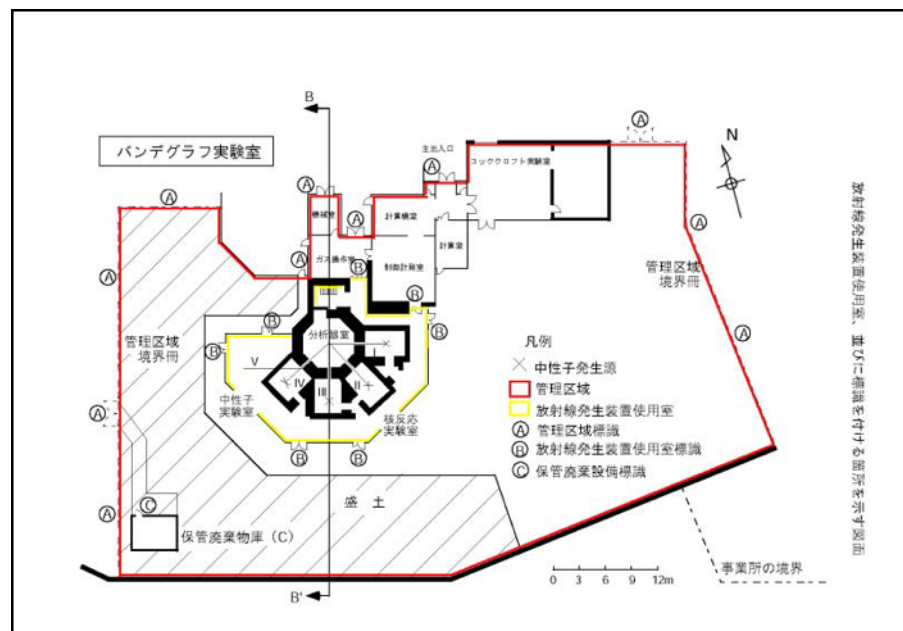
種類 バンデグラフ型加速装置
加速粒子 陽子、重陽子、 ^3He 、 α 、他
加速電圧 4.8 MV
電流 max100 μA

離れた位置に非密封RI施設があり、あわせて1つの事業所になっている。



ここ数年の運転時間：
500-600時間/年

2016年6月に廃止決定
2017年2月に変電設備解体
→ 廃止作業のうち、電気が
必要なもの作業を半年で終了
させる



加速器施設廃止時の放射化物

- 医療用加速器以外は、放射化する部位が一律には確定されていないので、加速器本体のみならず、周辺機器、遮蔽体が原則として放射化物になる。
- 計算と測定により「放射化しない部分(NR)」を示すことができる。
 - 運転履歴、中性子束測定により放射能を推定
 - 床や壁は放射化の平面分布、深度分布
- 放射化の範囲が決まると、廃止措置計画を立てられる。
 - 測定、除染、放射化物譲渡、廃棄のスケジュール
 - 放射化物は日本アイソトープ協会の指定容器(2t)に入れる。
- 現時点でクリアランス制度の利用は現実的でなく、費用面のメリットもあまりない。

バンデグラフ施設廃止作業の方針

- 放射化の範囲が明確でなく、廃止措置計画書を作成することができないため、いきなり施設を廃止せずに、当面変更申請により廃止作業をおこなう。
 - 放射化物保管設備は放射線発生装置に付随するものなので、放射線発生装置使用承認を残しておかないと設置できない。
 - 放射線発生装置を使用できる使用承認条件にしておく、6月に一回の放射線の量の測定、施設やインターロック点検の義務が残ってしまう。
 - 放射線発生装置の「使用の方法」を「使用休止」にして変更申請を行った。
 - 放射化物保管設備、放射化物専用の保管廃棄設備を設置した。
 - 放射化の評価が終わり次第、廃止措置計画書に準じた内容で放射線発生装置使用施設を廃止する変更申請をおこなう。
- 放射化の評価をしている時間がないので移動可能な遮蔽体コンクリートブロックはRCNPに譲渡する。
- 明らかに放射化している実験装置や電磁石は、譲渡先を探し、譲渡先が見つからないものは放射化物保管設備で保管し、引き続き譲渡先を探す。
- ビームダクトとその周辺物は部品が小さく、量も少ないため放射化物とし、保管廃棄する。
- バンデグラフ本体は、計算または測定により放射化の評価を行うこととし、当面触らない。
- バンデグラフ本体室の壁の放射化の評価は、これからPHITSも用いて計算評価を行う。また、一部コア抜きをし、ゲルマニウム検出器を用いて深さ方向の測定評価を行う。
- 最終的に残った放射化物は、日本アイソトープ協会に引き渡す。
- 2~3年以内に、放射化物の処分、除去を行って、管理区域を解除する。

バンデグラフ施設の廃止スケジュール

- 2016年6月 施設廃止決定
- 2016年8月 変更申請
 - 放射線発生装置使用室の減少
 - 放射化物保管設備、保管排気設備の設置
 - 放射線発生装置の使用の方法 使用時間0時間
- 2016年10月 ビームコースを囲うコンクリートブロックをRCNPに譲渡
 - 大型のコンクリートブロックは日本放射線安全学会誌Vol.12 No.1 (2013) 36-40.によりNaI(Tl)サーベイメータを用いて放射化物であるか否かの判断が可能
 - 50 x 50 x 100 cmのコンクリート約500個を一般物としてピストン輸送
- 2016年11月ビームラインの解体
 - 測定計算を行わず、ビームラインとその周辺は全て放射化物とした。
 - 測定費用と廃棄物量の費用バランス
- 2017年12月 原子力規制委員会による立入検査
- 2017年1月 バンデグラフ直下の分析磁石をRCNPへ放射化物として譲渡
- 2017年2月 電源遮断
- 2017年3月から建屋の放射化評価
 - 計算 (PHITSコードによるシミュレーション)
 - 測定 (壁のコア抜き)

法的にはまだ廃止措置が始まっておらず、
放射線発生装置使用中



まとめと提案



- 平成22年4月から放射化物管理が法令に盛り込まれたが、その法的位置づけは「放射性汚染物」である。
 - 研究用加速器施設では、放射化物も財産なため、法律の枠組と実態が異なることにより取扱いや管理を難しくしている。
 - 放射化物をRIと同じように考える（特に数量、濃度について）と、知らず知らずに法令違反になってしまう可能性がある。
 - 輸出は非常に難しい。持ち帰らないならばRIとして輸出する方法がある。
- 放射化は、表面汚染とは異なる概念。測定方法も異なる。
- 放射化は、ビームが直接当たる場所を除いて中性子線によって起こる。
 - 生成される核種はビームの種類ほとんど依存しない。
 - 熱中性子吸収断面積が大きな元素を含む物質は、それが微量であっても放射化する。
- 実際に放射化物を勝手に持ち出しているトラブルが起きている。
 - 細口GMサーベイメータ(TGS-121)は検出効率が低い。
- 加速器施設の廃止は、多大な時間、労力、費用が必要。
- 放射線発生装置周辺の部品は原則放射化物
 - 長く使える設計をする
 - 放射性廃棄物として廃棄しやすい設計を
 - 通常、日本アイソトープ協会が使用する廃棄物容器は50Lドラム缶。50Lドラム缶に入れられるように分解できる構造にする
 - ビーム輸送を適正化することで、予期せぬ場所の放射化を防いだり小さくすることができる
- 不要なものを放射線発生装置使用室内に放置しない
 - 中性子にさらされる時間が長くなり、放射化する可能性がある。
 - 使用履歴がわからなくなり、放射化物であるか否かの判断が難しくなる