

# 「放射線発生装置の使用に伴い生じる放射化物 の安全規制に係る技術基準等に関する調査」

気体状・液体状の放射化物の取扱いに関する調査

平成22年8月11日



高エネルギー加速器研究機構

# 気体の調査方法1

- ビームの出射口にグローブボックス (1m × 0.5m × 0.5m) を設置して照射
- 照射終了後、空気を1.5ℓ電離箱に採取
- 同時に、室内と迷路からも採取
- 直ちに振動容量電位計で測定



# 気体の調査方法2

- ろ過捕集法:ポータブルエアサンプラを照射室および迷路に設置
- フィルターにはろ紙(HE-40T:捕集効率は、粒子径 $0.09\sim 0.80\ \mu\text{m}$ 、面速度 $55\sim 135\text{cm/s}$ の範囲内において99.6%)と活性炭ろ紙(CP-20)を重ねて用いた。



- 照射後、回収したフィルターを端窓式GMサーベイメータで測定  
更に、Ge検出器で測定

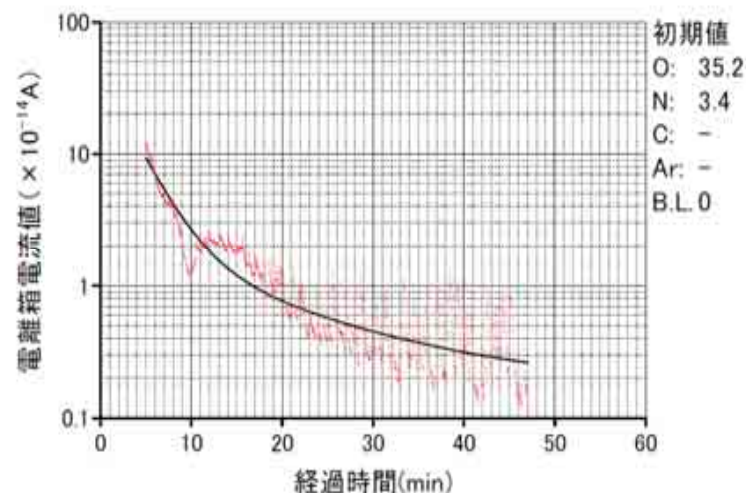
# 液体の調査方法

- 水ファントムを直接照射
- または、20ℓの角形ポリエチレン製タンクを2個重ねて照射
- 照射後、水試料の線量および $\gamma$ 線スペクトルを測定
- 更に、Ge検出器および液体シンチレーションカウンタでその放射能を測定



# 10MeV照射での測定結果

- ICで10分照射(40Gy)
- 空気の放射化
  - 照射室、迷路ではバックグラウンドレベル
  - グローブボックス内のみバックグラウンドレベルより高くなった
  - 照射室内容積を考慮すると、空气中濃度限度以下であり、排気中濃度限度を超えていない
- ダストの放射化: 検出されず
- 水ファントムの放射化: 検出されず
- 加速器冷却水の放射化: 検出されず



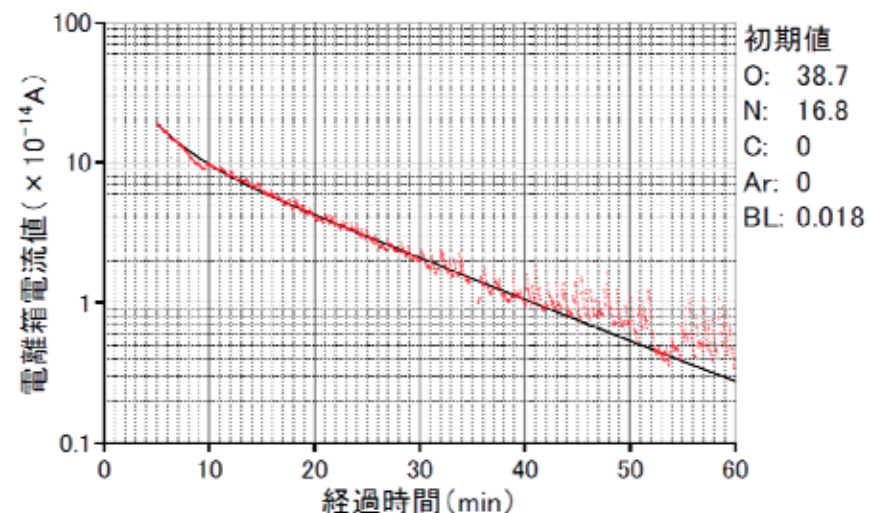
グローブボックス内の空気では照射後約20分で $1 \times 10^{-14} \text{A}$ のレベルに低下し、総放射能として $0.06 \text{Bq} \cdot \text{cm}^{-3}$ 程度

# 15MeV照射での測定結果(1)

ICで10分照射(60Gy)

空気の放射化測定の結果

- 照射室、迷路ではバックグラウンドレベル
- グローブボックス内の空気では 最小二乗フィッティングによる生成核種の放射能計算結果では
- O-15:  $2.4\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-3}$
- N-13:  $0.87\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-3}$
- 室内容積を考慮すると数100分の1となり、空气中濃度限度 $0.2\text{Bq}/\text{cm}^3$ を超えない

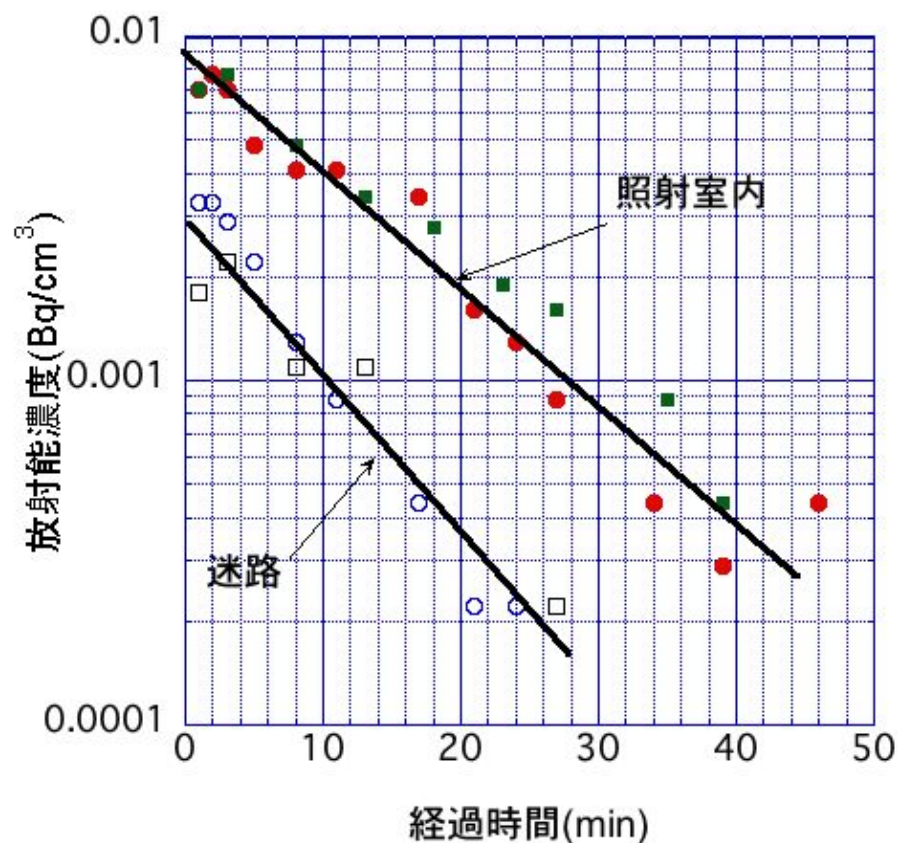


グローブボックス内の空気では照射後約40分で $1 \times 10^{-14}\text{A}$ のレベルに低下し、総放射能として $0.06\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-3}$ 程度

# 15MeV照射での測定結果(2)

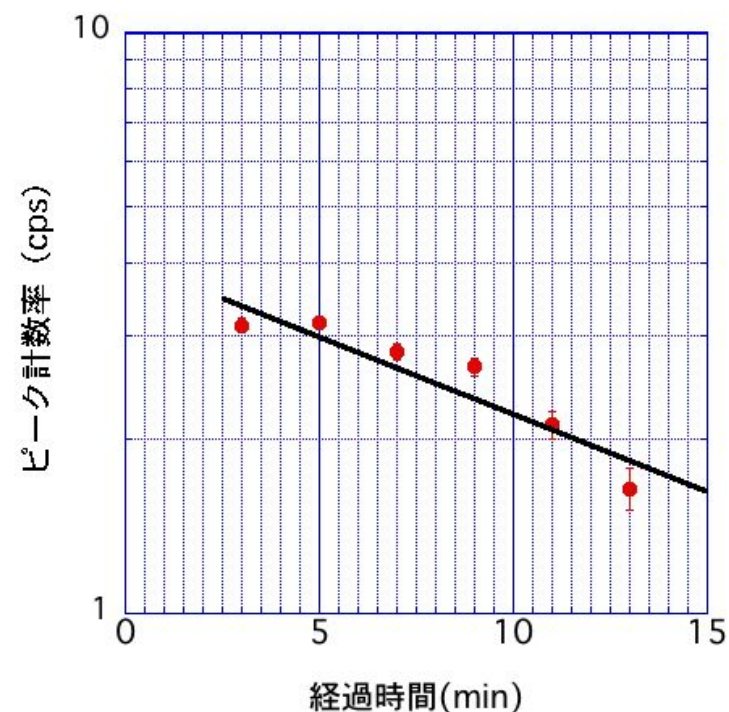
## 空气中ダストの測定

- 空気照射、水照射の際にそれぞれ測定した結果はほぼ同じ傾向
- 照射室の場合、半減期10分程度で減衰しており、N-13が生成し、NO<sub>x</sub>としてフィルターに捕集されたのではないかと推定された。
- 迷路では照射室の1/3の放射能
- 照射中採取したダストの放射能も、空气中濃度限度0.2Bq/cm<sup>3</sup>を下回っている。



# 15MeV照射での測定結果(3)

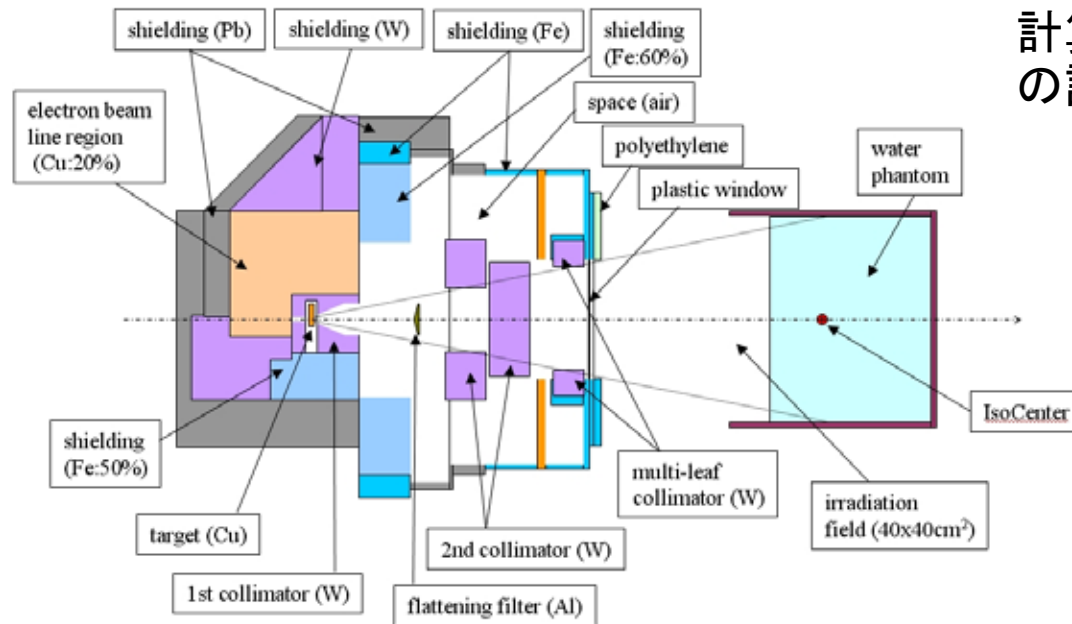
- 水ファントムの放射化測定
- 線量はバックグラウンドレベルであった
- LaBrシンチレーションサーベイメータで $\gamma$ 線スペクトルの測定
- 照射後13分間までは511keVのピークが観測された
- その後、水ファントムをGe検出器、液体シンチレーションカウンタで測定した結果、放射性核種は検出されなかった
- また、加速器冷却水を採取し、測定した結果、放射化は検出されなかった



水ファントムのLaBrシンチレーションサーベイメータ測定した際の511keVピーク計数率の経時変化



# 電子直線加速装置での計算



計算に使用したリニアックガントリーの  
の詳細モデル(実測に基づいて作成)

図は水ファントムへの照射を示している。ターゲットは銅、コリメータはタングステンであり、ガントリーヘッドはタングステンおよび鉛で遮蔽されている。

放射化計算  
空気の主要成分はN:75.51%、  
O:23.01%、Ar:1.286%として、  
水は水道水の分析結果を用いて計算

# 空気、水成分に関係する 光核反応断面積(文献値)

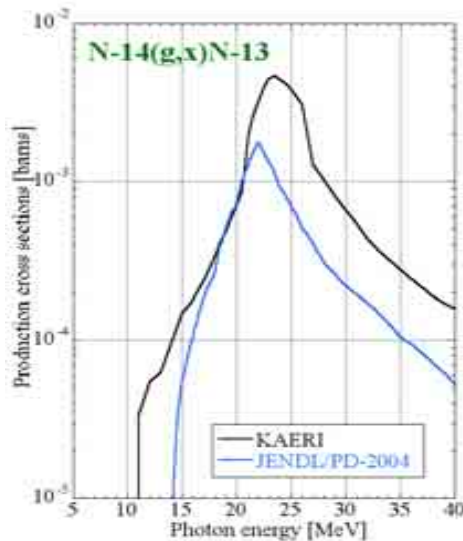


Fig. A-1 Production cross sections of  $N-14(g,x)N-13$  reaction from the photoneuclear evaluation file

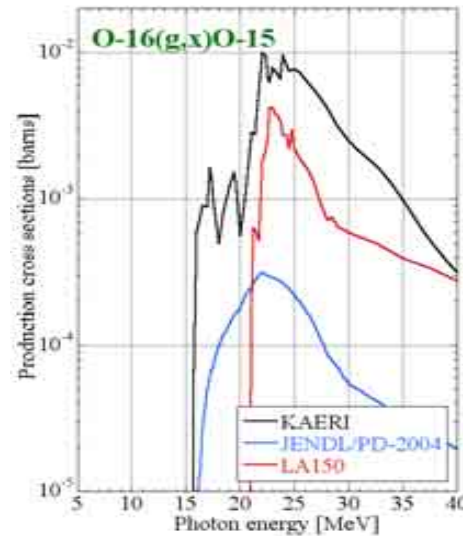


Fig. A-2 Production cross sections of  $O-16(g,x)O-15$  reaction from the photoneuclear evaluation file

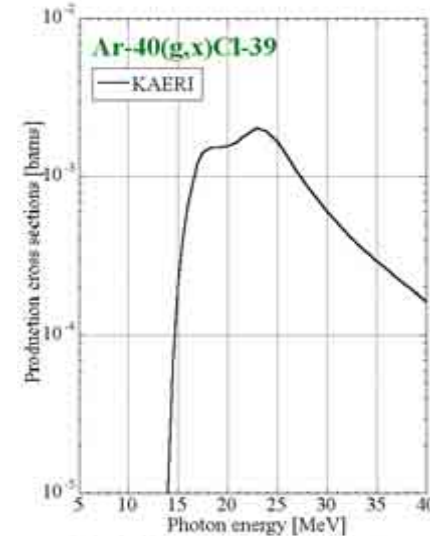


Fig. A-3 Production cross sections of  $Ar-40(g,x)Cl-39$  reaction from the photoneuclear evaluation file

(1)  $^{14}N(\gamma, n)^{13}N$   
反応断面積

(2)  $^{16}O(\gamma, n)^{15}O$   
反応断面積

(3)  $^{40}Ar(\gamma, p)^{39}Cl$   
反応断面積

10MeVでは上記いずれの反応も起こらない。15 MeV以下では $^{13}N$ と $^{39}Cl$ が生成する。 $^{15}O$ を生成するためには16 MeV以上の入射光子エネルギーが必要である。

# 入射エネルギーの違いによる生成核種の空中濃度の計算 (Bq/cm<sup>3</sup>)

	15MeV	16MeV	17MeV	18MeV
O-15	0.0E+00	4.1E-09	4.9E-08	2.2E-04
N-13	9.3E-03	7.2E-02	2.5E-01	6.3E-01

アイソセンター位置での局所的な空気の放射化計算を行った結果、18MeVまで、O-15は十分低い濃度であることを確認した。  
N-13では17MeVを超えると空气中濃度限度を超えることになる。  
照射室内容積は平均して $8.5 \times 7 \times 3(H) = 178\text{m}^3$ 程度であるから、数百倍に希釈される。  
このため、照射室全体では十分低い濃度となる。

# 排気中濃度限度との比較

- 1回あたり1分、1日あたり15MeV、6Gyの照射を30回
- 換気回数の設計値:3回/1時間
- 照射室内容積: $8.5 \times 7 \times 3(H) = 178\text{m}^3$
- X線の照射領域: $0.5 \times 0.5 \times 4(L) = 1\text{m}^3$ (実験は $0.25\text{m}^3$ )
- 病院全体での換気量としてその10倍を仮定
- 生成放射能は実測からの推定放射能を用いる
- 排気中濃度(排気口までの減衰を考慮しない)
  - O-15: $0.00051 \text{ Bq/cm}^3$ 、N-13: $0.00008 \text{ Bq/cm}^3$
- 排気中濃度限度比の和:0.84
  - 濃度限度O-15、N-13: $0.0007 \text{ Bq/cm}^3$
  - 1回の換気に平均して20分かかっており、20分後にはO-15は1000分の1、窒素は1/4に減衰している

# 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、空气中の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と考えられる

# 陽子線治療施設

- 筑波大学陽子線医学利用研究センター
- 7MeV リニアック+250MeV 陽子シンクロトロン
- 加速した陽子を2 台の回転ガントリーを通して照射室に導いている
- 加速エネルギーは250MeV、平均電流は10nA ( $6.1 \times 10^{10}$ pps)
- 加速器室内でのビームロスはほとんどなく、ビーム出射部のビームプロファイルモニターで最大 $6 \mu\text{Sv/h}$  程度であり、それ以外の加速器本体部分で $1 \mu\text{Sv/h}$  を超えるところはない
- 加速器室内の空間線量率はバックグラウンドレベルである
- 施設には排水および排気設備を有している
- 照射される陽子のエネルギーはデグレーダで減速されると共に、レンジシフタでエネルギー幅を広げ、コリメータでビーム形状を患部に合わせて照射される。このことから、照射の際のビームロスは主にコリメータ周辺で生じる
- そこで、照射室での放射化測定を行った

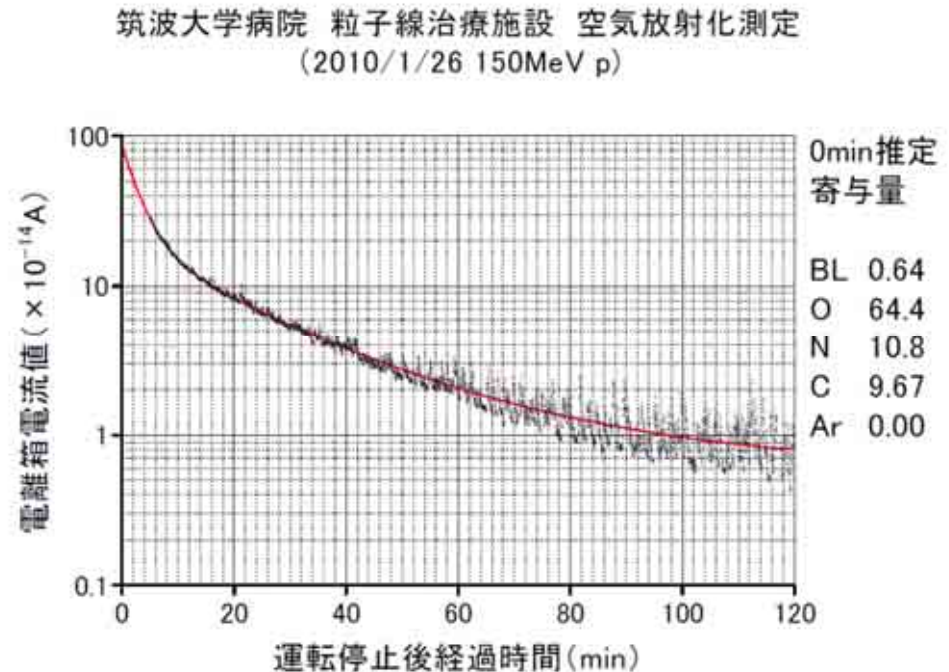
# 照射実験

陽子ビームは水平方向に出射させ、長さ1mの空気照射チェンバーを透過後、2個のポリタンク(水ファントム)で停止させた。  
照射条件としては10Gy(照射粒子数: $5 \times 10^{12}$ )、照射時間は3分10秒であった。アイソセンターで $15 \times 15\text{cm}^2$ の照射となるようにした。



# 測定結果

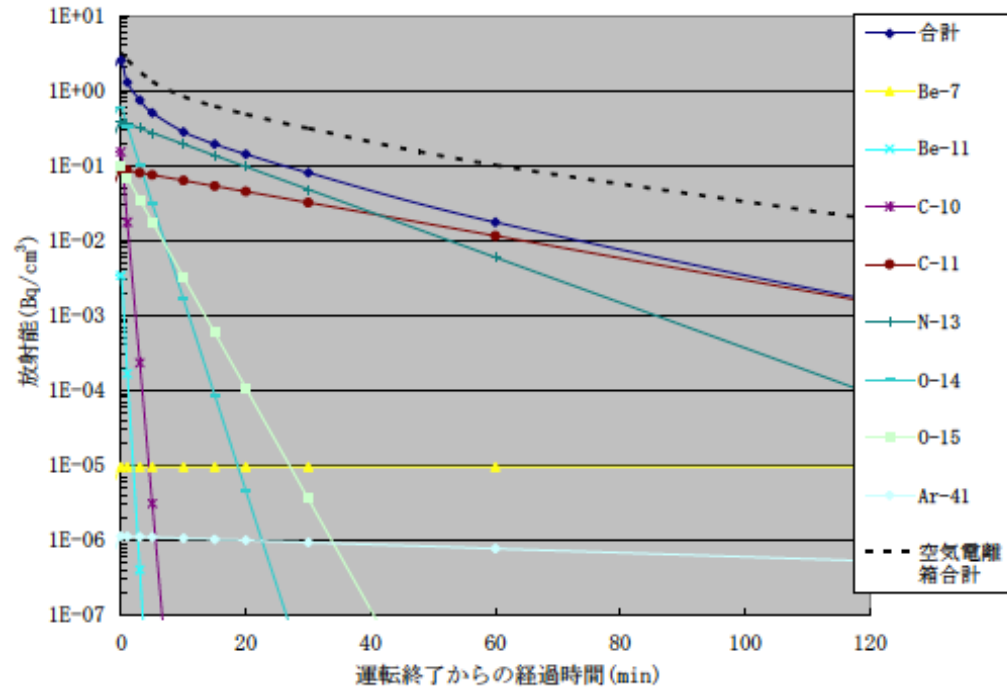
- グローブボックス内の空気のみ放射能を検出
- 空気の放射化
  - O-15 (1.9Bq/cm<sup>3</sup>)
  - N-13、C-11 (0.6Bq/cm<sup>3</sup>)
- 回転ガントリー室容積 3000m<sup>3</sup>
- 空気中濃度は3桁低くなり、空気中濃度限度を下回る





# 空気の放射化計算結果

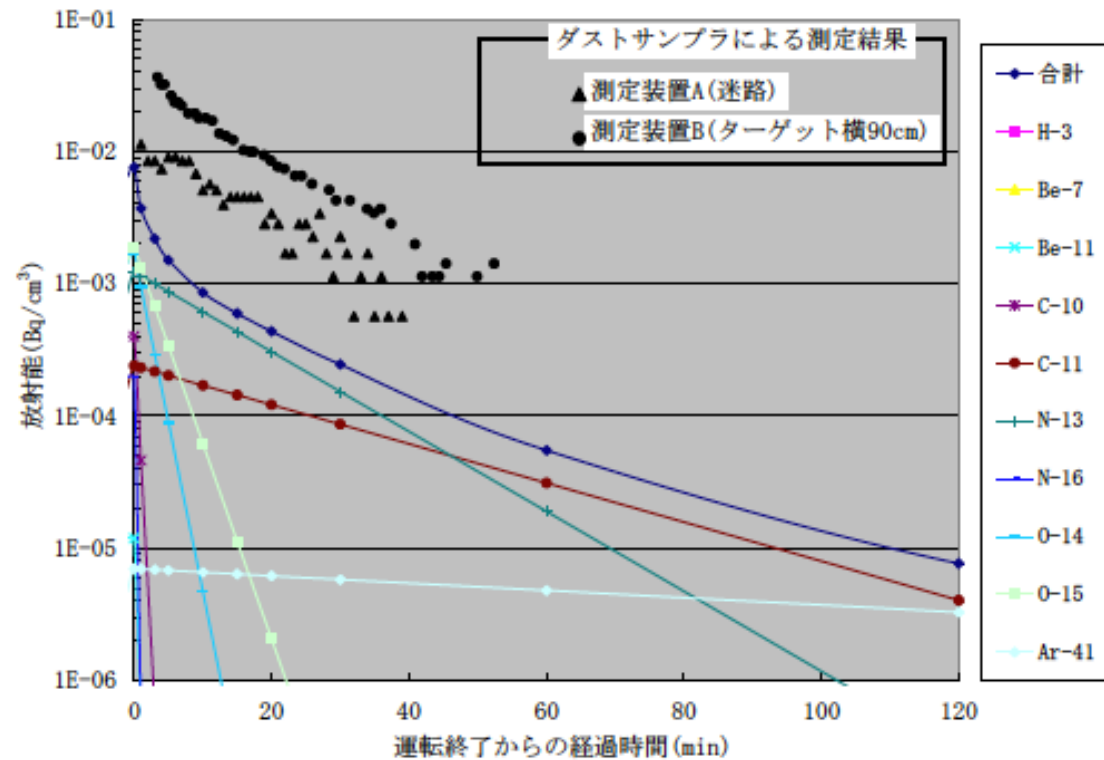
- 減衰傾向は実測結果を再現
- 計算結果
  - O-15 ( $0.7\text{Bq}/\text{cm}^3$ )
  - N-13 ( $0.4\text{Bq}/\text{cm}^3$ )
  - C-11 ( $0.09\text{Bq}/\text{cm}^3$ )
- 実測の方が計算値のより数倍高い
- 照射後10分以降はN-13とC-11が支配的



破線は電離箱での実測結果を示す

# 空気中ダスト

- 照射室の場合、半減期10分程度で減衰しており、N-13が生成し、NO<sub>x</sub>としてフィルターに捕集されたのではないかと推定された。
- 迷路は1/3程度
- 計算値にくらべ実測の方が数倍高い
- 照射中採取したダストの放射能も、空气中濃度限度0.2Bq/cm<sup>3</sup>を下回っている。



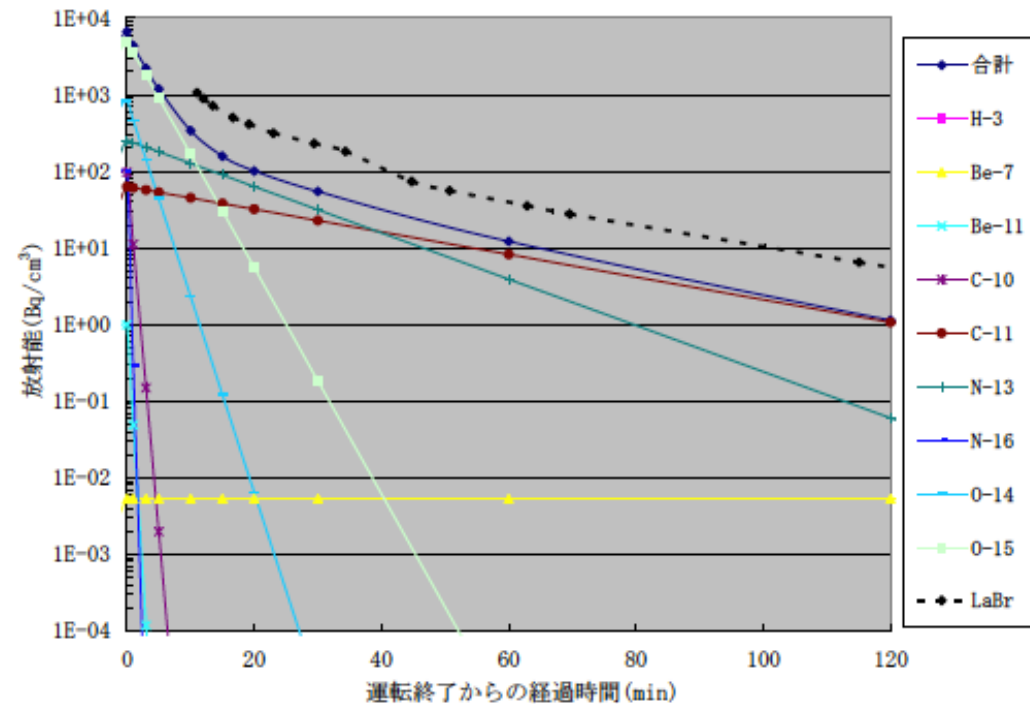
プロットはGMサーベイメータでの実測結果を示す

# 排気中濃度限度との比較

- 照射時間: 3分間、10Gy照射
- 空気の照射領域:  $0.5 \times 0.5 \times 1(L) = 0.25\text{m}^3$
- 照射回数: 1時間2回、2室合計30回
- 照射室の換気回数0.5回/h
- 総排気量:  $17910\text{m}^3/\text{h} \times 8\text{h}$
- 生成放射能は実測から求めた放射能を用いる
- 排気中濃度(排気口までの減衰を考慮しない)
  - O-15:  $0.00010 \text{ Bq}/\text{cm}^3$ 、N-13、C-11:  $0.00003 \text{ Bq}/\text{cm}^3$
- 排気中濃度限度との比: 0.23
  - 濃度限度O-15、N-13、C-11:  $0.0007 \text{ Bq}/\text{cm}^3$

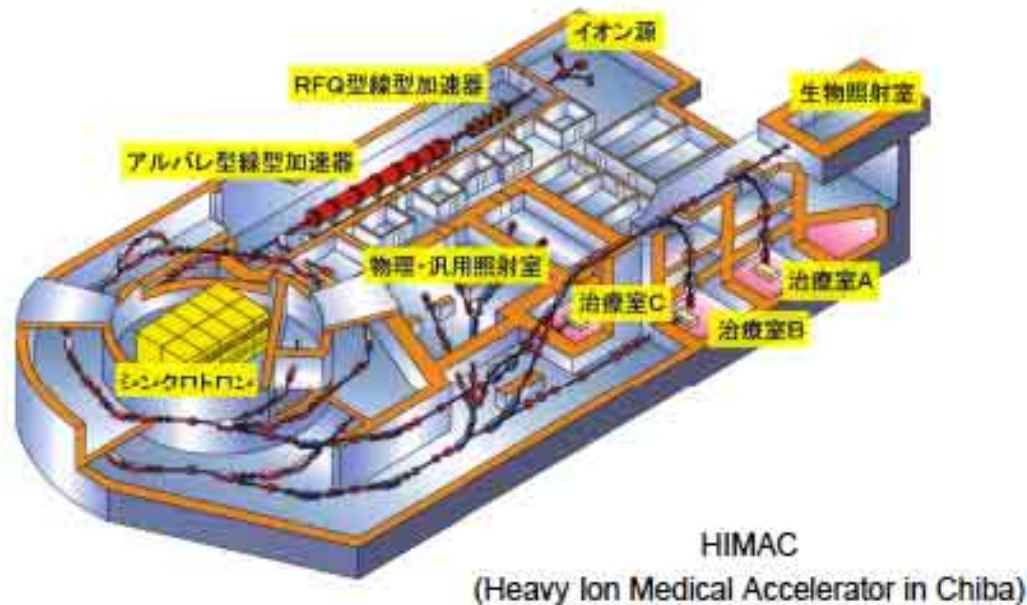
# 水ファントム照射

- 右図は1本目のポリタンクの実測と計算結果
- 計算値の方が実測に比べて低い結果となったが、減衰傾向は実測結果と同様である
- 短寿命核種は2時間保管すれば $10\text{Bq}/\text{cm}^3$ を下回る
- 2本目のポリタンクの表面線量は1本目の $1/100$ 程度であり、1本目のポリタンクで陽子線はほぼ止まっている
- トリチウムは検出せず
- Be-7は $0.039\text{Bq}/\text{cm}^3$ 【排水中の濃度限度 $30\text{Bq}/\text{cm}^3$ 】に比べて十分低い濃度である



# 粒子線治療施設

- 放射線医学総合研究所重粒子加速器HIMAC
- 核子あたりの最大加速エネルギーが800MeV
- 医療照射には400MeV/核子で加速したC-12が利用できる。照射室A(垂直照射)、B(水平垂直照射)、C(水平照射)がある。



# 照射実験

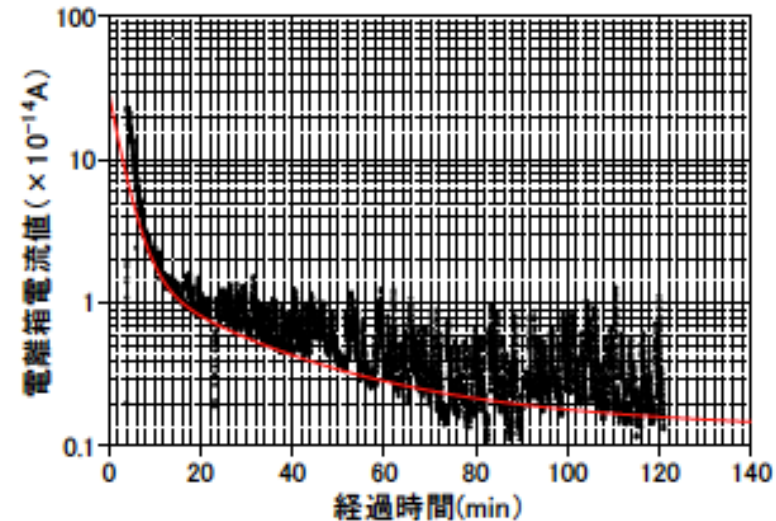
- 照射室Bの水平照射コース
- 照射エネルギーは290MeV/核子
- 10Gyの照射(粒子数は $2.7 \times 10^{10}$ 、照射時間は約2分)
- ボーラス、コリメータは使用せず、リッジフィルターでブラッグピーク幅のみを60mmに広げた。



照射の方法

# 空気中の放射能濃度測定

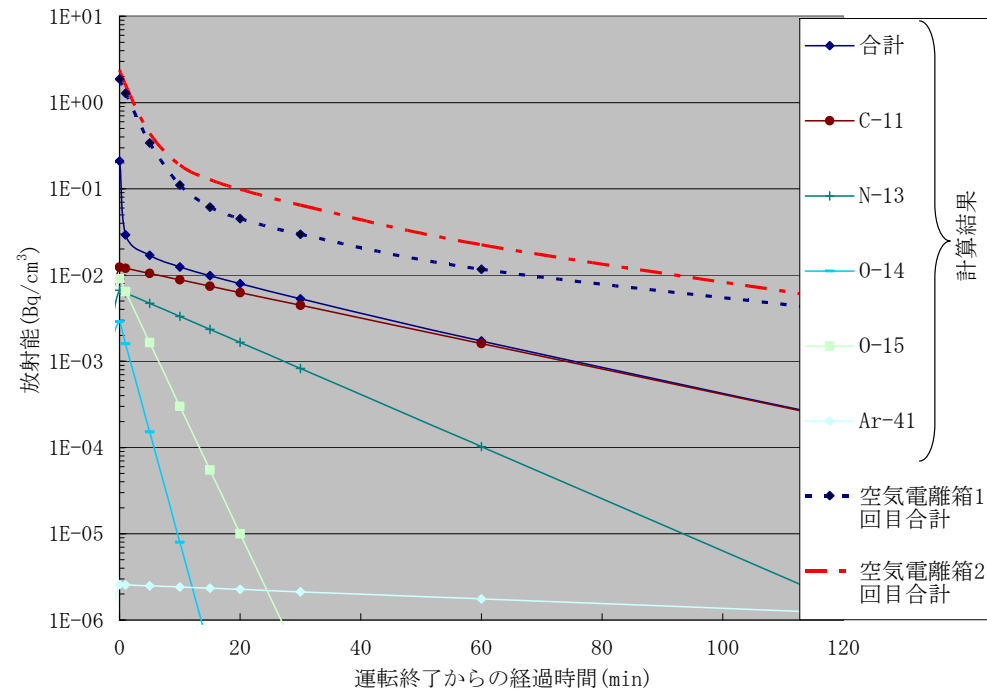
- 半減期2分のO-15、半減期70秒のO-14が最も生成
  - N-13、C-11が約1桁、Ar-41は約2桁低くなっている。
    - O-15 ( $1.1\text{Bq}/\text{cm}^3$ )
    - O-14 ( $0.8\text{Bq}/\text{cm}^3$ )
    - N-13 ( $0.08\text{Bq}/\text{cm}^3$ )
    - C-11 ( $0.09\text{Bq}/\text{cm}^3$ )
    - Ar-41 ( $0.006\text{Bq}/\text{cm}^3$ )
- 値は2回照射の平均値
- O-15, O-14のみ空气中濃度限度を超えているが、照射室の容積を考慮すると空气中濃度限度以下となる



空気照射チェンバー内から採取した  
空気の電離箱電流の経時変化

# 空気の放射化計算結果

- 減衰傾向は実測結果を再現
- 計算結果 (Bq/cm<sup>3</sup>)
  - O-15 (0.009)
  - N-13 (0.007)
  - C-11 (0.012)
- 計算値は実測値に比べて一桁低い
- 照射後10分以降はC-11が支配的である



空気照射チェンバー内の放射能の減衰プロットは実測結果を示している



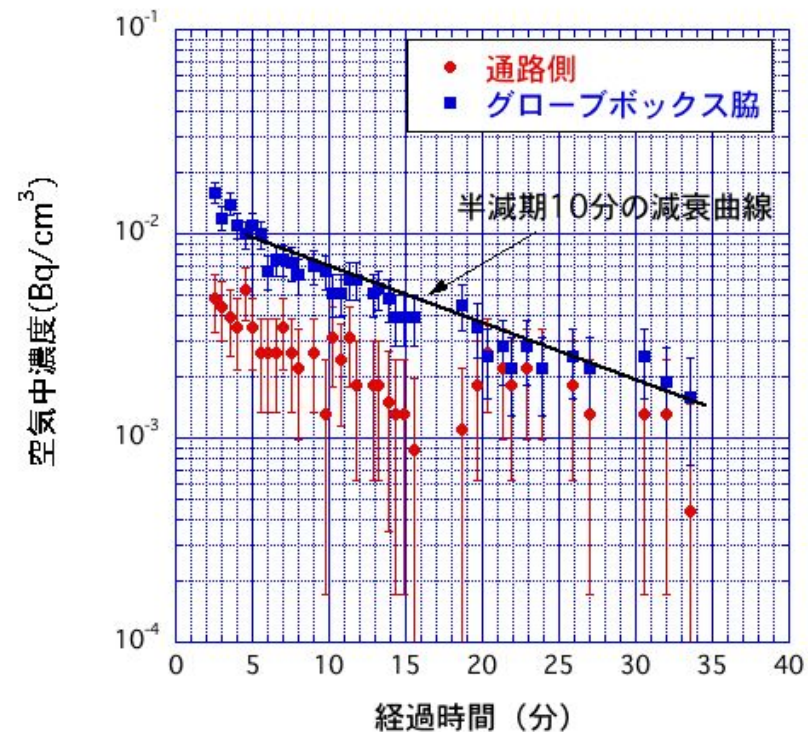
# 空気中及び排気中濃度限度との比較

- 照射時間:2分間、10Gy照射
- 空気の照射領域: $0.5 \times 0.5 \times 1(L) = 0.25m^3$
- 照射回数:3室合計30回、照射室内容積: $200m^3$
- 総排気量: $5800m^3/h \times 8h$
- 生成放射能は実測から求めた放射能を用いる
- 空気中濃度限度および排気中濃度(排気口までの減衰を考慮しない)を超えない(中性子捕獲反応で生成するAr-41も同じ条件で計算した)

	O-14	O-15	N-13	C-11	Ar-41	
室内濃度	2.7E-04	3.7E-04	4.5E-04	3.0E-05	2.0E-06	
空気中濃度限度	4.0E-02	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	1.0E-01	
空気中濃度限度との比	6.7E-03	1.8E-03	2.2E-03	1.5E-04	2.0E-05	1.1E-02
排気中濃度	1.3E-04	1.8E-04	1.3E-05	1.5E-05	9.7E-07	
排気中濃度限度	2.0E-04	7.0E-04	7.0E-04	7.0E-04	5.0E-04	
排気中濃度限度との比	6.5E-01	2.5E-01	1.8E-02	2.1E-02	1.9E-03	9.4E-01

# 空气中ダストの測定

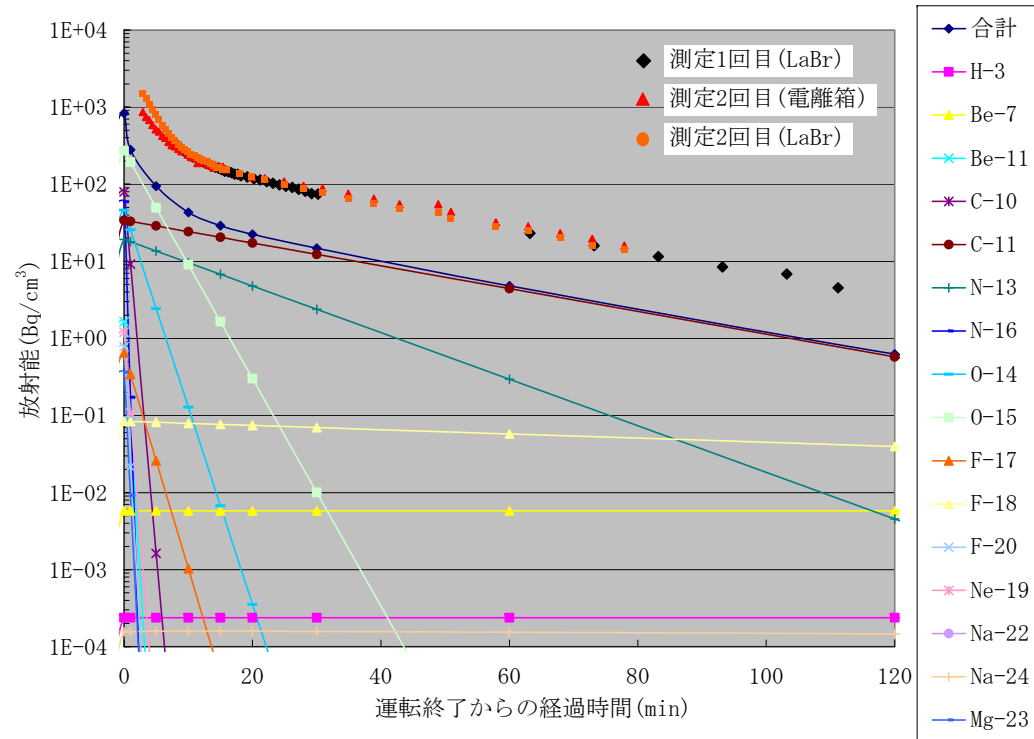
- ダストの放射能は半減期10分で減衰
- 空気照射チェンバー側で、5分経過後で $10^{-2}$  Bq/cm<sup>3</sup>以下
- 照射中採取したダストの放射能も、空气中濃度限度 $0.2$  Bq/cm<sup>3</sup>を下回っている。



プロットはGMサーベイメータでの実測結果を示す

# 水ファントムの照射結果

- 照射後10分まではO-15、その後はC-11が主要核種である
- 減衰傾向は実測と計算でほぼ一致
- 計算結果の方が実測結果よりも低い濃度となった



水ファントム中の放射能の減衰曲線  
プロットは実測結果を示している

# 水中に生成した核種

検出された核種の濃度(2回の照射の平均値)と排水中濃度限度

- トリチウム:  $0.28\text{Bq/cm}^3$  ( $60\text{Bq/cm}^3$ )
- Be-7 :  $0.4\text{Bq/cm}^3$  ( $30\text{Bq/cm}^3$ )
- Na-22 :  $0.0004\text{Bq/cm}^3$  ( $0.3\text{Bq/cm}^3$ )
- いずれの核種も排水中濃度限度に比べて十分に低い濃度であった

# 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。

# PET薬剤製造用サイクロトロン施設

- ターゲットは気体、液体が多く、密閉容器で照射している
- 加速器室は非密封放射性同位元素取扱施設になっており、排気排水設備がある
- 空気、水の放射化は二次的に発生する中性子によっている
- このため、重要核種は空気ではAr-41(半減期1.8時間)、水ではN-16(半減期7秒)である
- 50  $\mu$ Aで1時間照射、換気なしの場合空气中濃度限度との比で0.7、換気回数16回/時間で8時間平均での濃度は排気中濃度限度の0.04
- ただし、N-16の生成は、12MeVを超えるサイクロトロン施設に限られる

# 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。これらのデータについては、今後報告する。
- 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)