

# 開発成果の内容

平成24年3月16日

財団法人 原子力研究バックエンド推進センター

室井 正行

## 説明内容

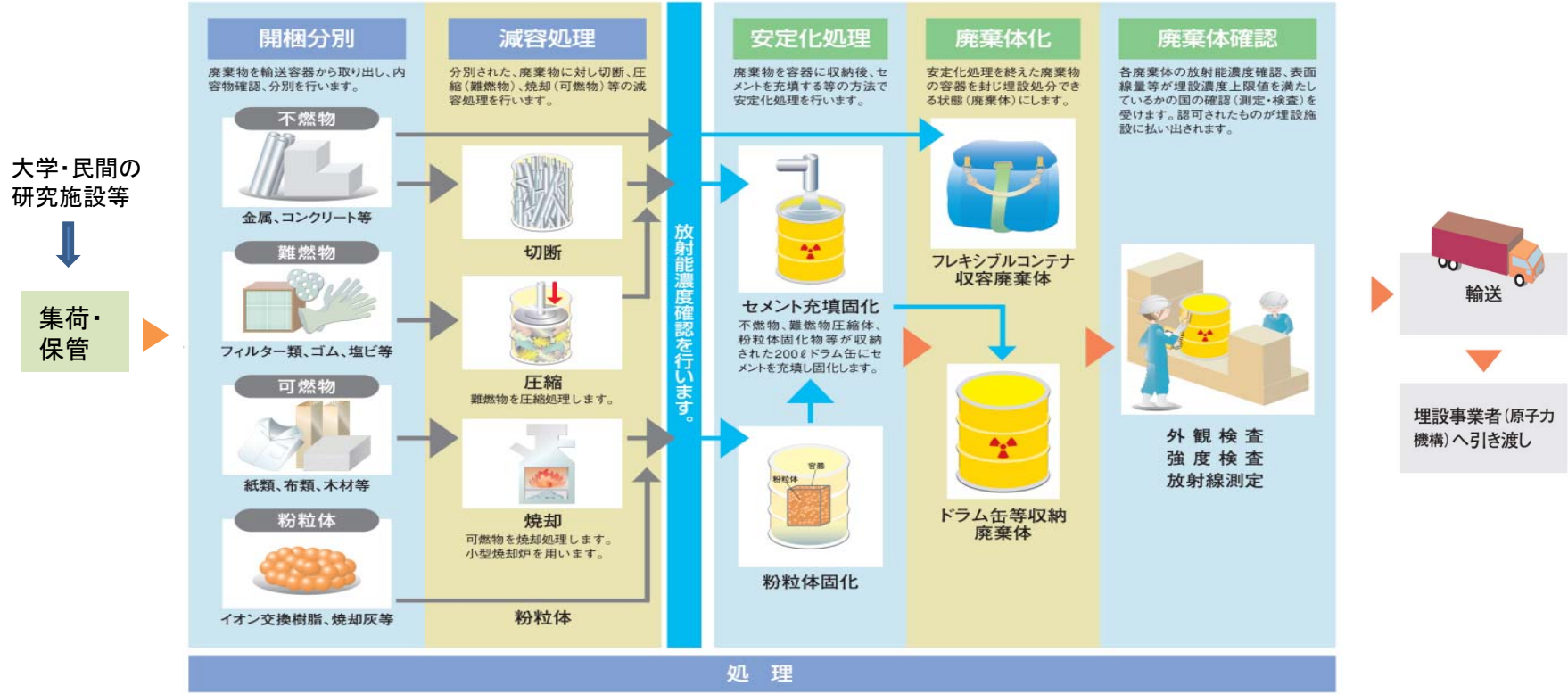
1. 開発の背景(大学・民間の廃棄物の視点から)
2. 開発目標・課題
3. 開発の進め方
4. 開発成果

# 1. 開発の背景(大学・民間の廃棄物の視点から)

## 1.1 物流システム事業

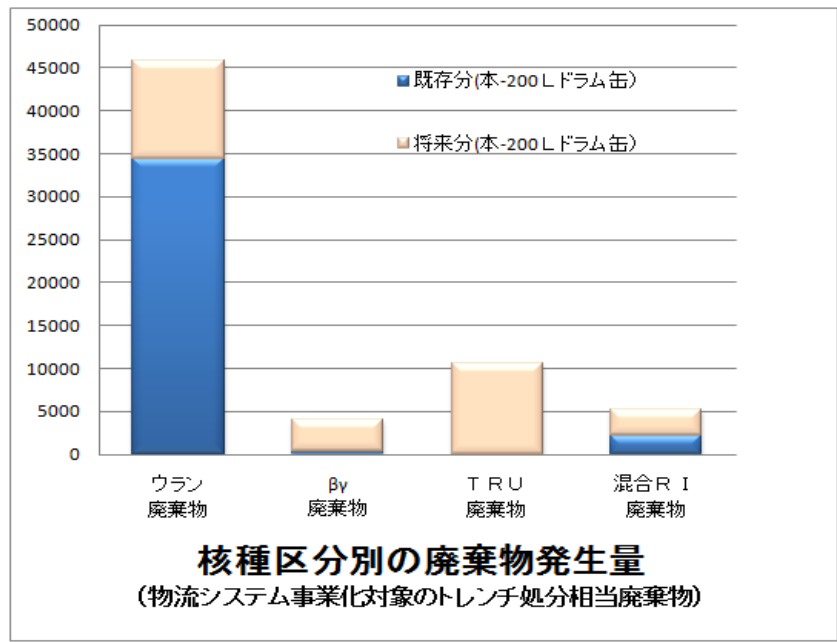
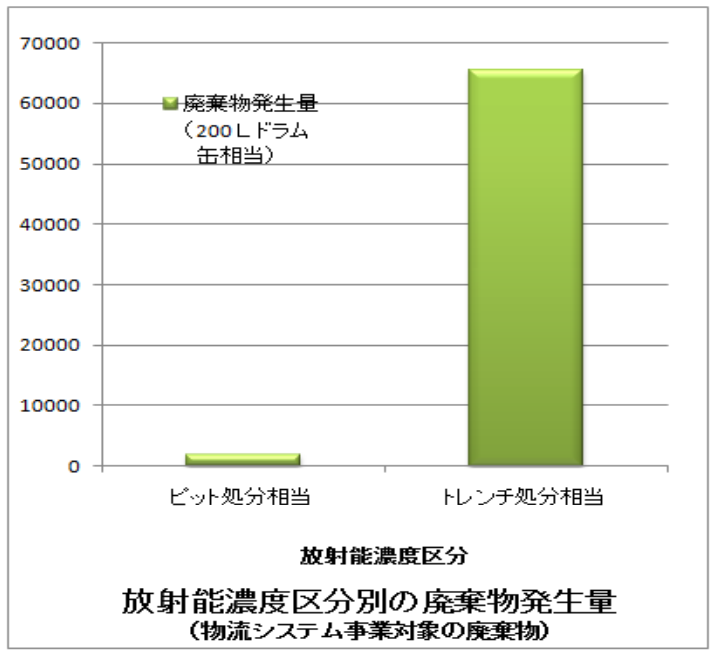
## 1.2 大学・民間のウラン廃棄物

# 1.1 物流システム事業



放射能濃度分布データ ⇒ 最大放射能濃度 ⇒ 処理事業(及び埋設事業)の事業許可申請 4

# 1.2 大学・民間のウラン廃棄物



- ・物流システム事業対象廃棄物は、約6万7千本と予想 (H60年度まで。200Lドラム缶換算)
- ・ウラン廃棄物はそのうちの7割程度
- ・200Lドラム缶で保管されている廃棄物が多い

昨年度アンケート調査でも容器毎にウラン量を評価している発生者は少なく、濃度分布データの整備を早急に行うことが必要

## 2. 開発目標・課題

トレンチ処分の受入濃度(10 Bq/gを想定)を満足するかを判断できるもので、以下の要件を満たす評価手法の開発を目標とした。ただし、ハードは開発対象とせず市販品の使用方法を工夫。

- ①容器(200Lドラム缶優先)に収納された状態で測定可能
- ②幅広い種類の廃棄物(内容物)に適用可能
- ③装置が簡易、測定が簡便、測定時間はドラム缶1本あたり数時間程度

⇒パッシブγのバルク測定法を選定

課題： 収納物の密度不均一性、ウランの偏在に起因する評価誤差の低減

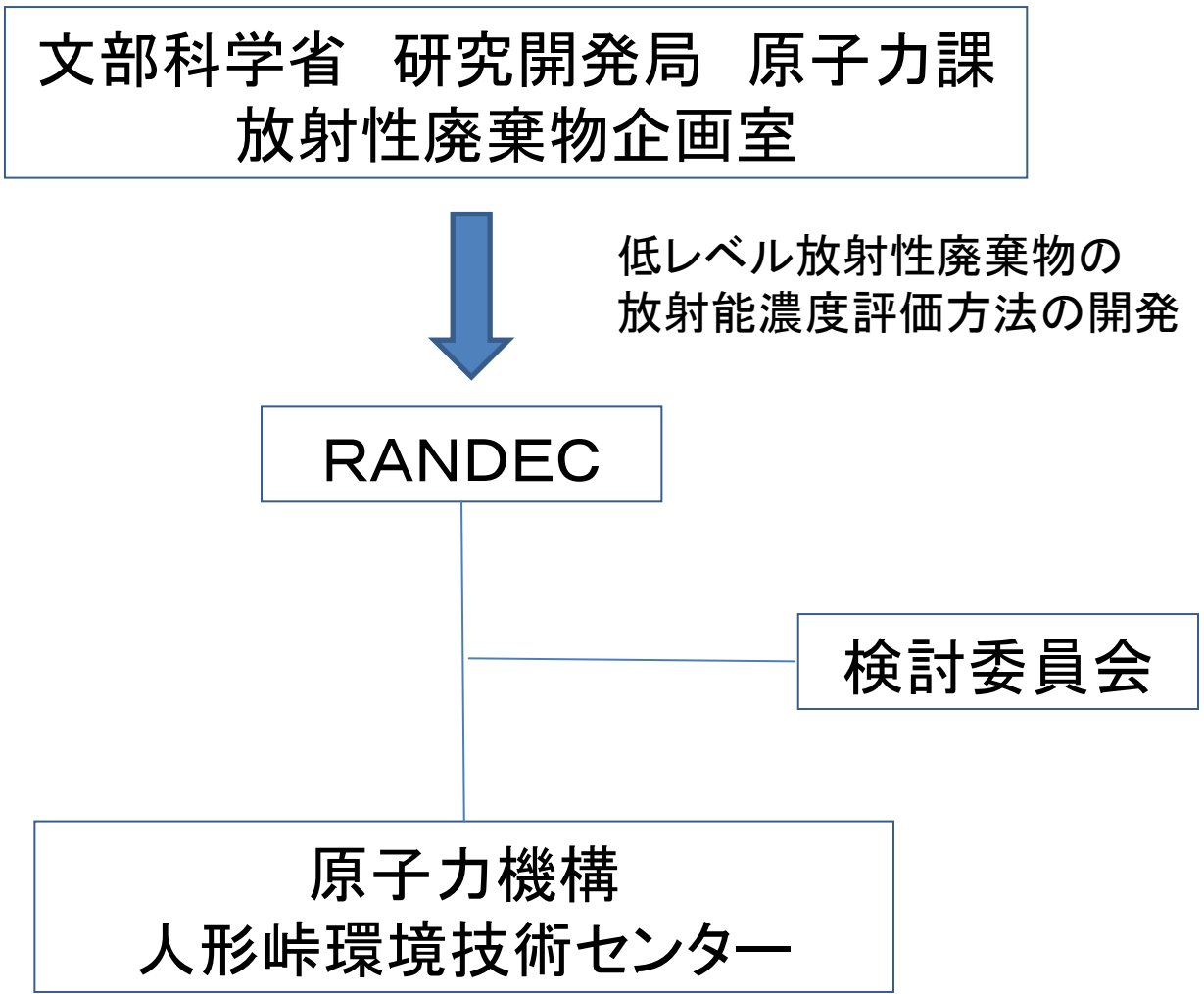
原子力機構人形峠環境技術センター考案の“等価モデル”に着目

## 3. 開発の進め方

### 3.1 体制

### 3.2 開発計画

### 3.1 体制





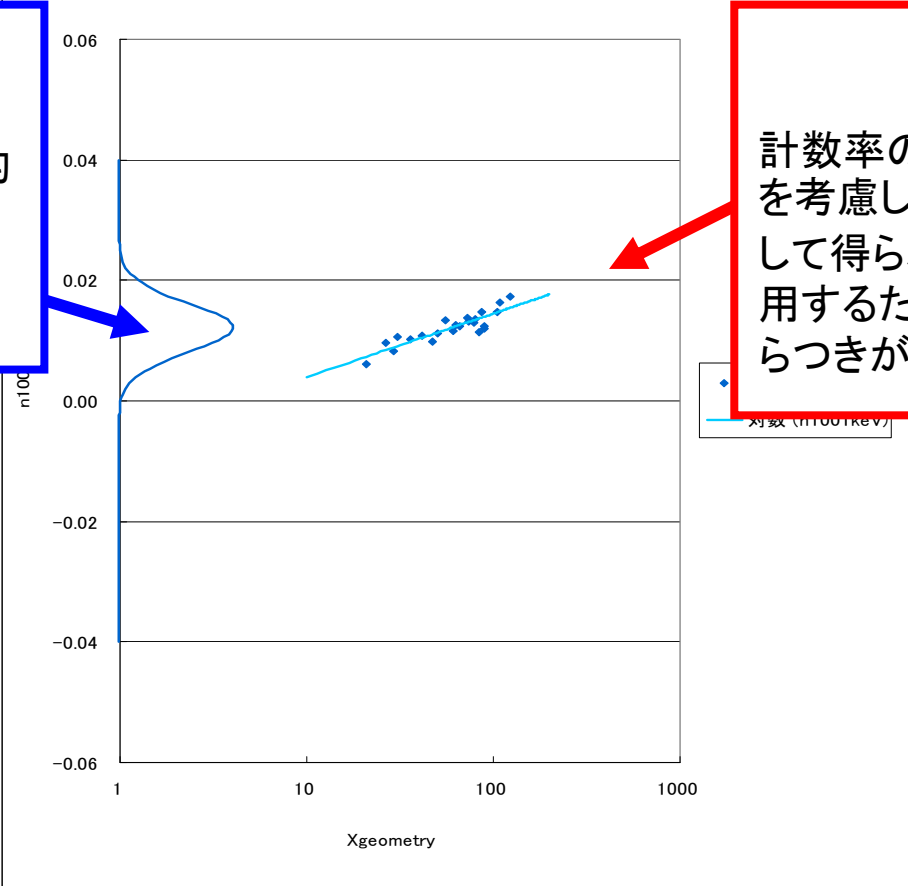


## 4. 開発成果

- 4.1 等価モデルの概念
- 4.2 等価モデルの定式化
- 4.3 測定装置
- 4.4 評価手順
- 4.5 検量線の作成
- 4.6 模擬廃棄物の測定
- 4.7 誤差評価
- 4.8 検出限界濃度
- 4.9 適用できる廃棄物条件
- 4.10 まとめ

# 4.1 等価モデルの概念

**従来の手法**  
計数率の算術平均のばらつきがそのまま評価に反映される。



**等価モデル**  
計数率の幾何平均を遮蔽効果を考慮した軸 ( $X_{geometry}$ ) に展開して得られる一義的関係を利用するため、直線のまわりのばらつきが評価誤差になる。

計数率と遮蔽効果との間に相関関係があることを利用して、計数率のみを考慮する従来の評価に比べ、ばらつきを低減する。

計数率 : U-238と平衡のPa-234mからの1001KeV

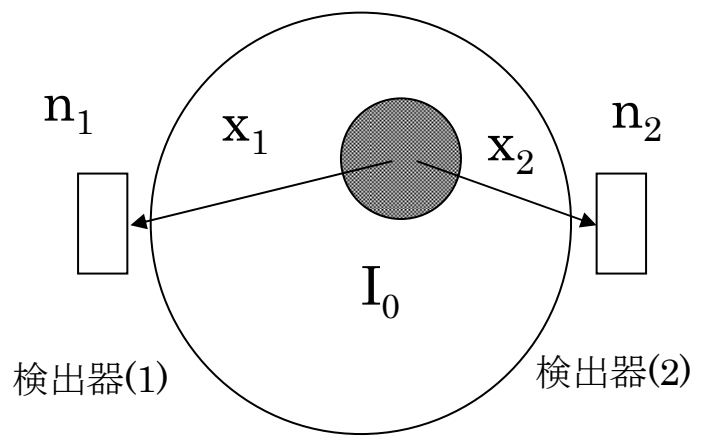
遮蔽効果 : Pa-234mの1001KeVと766KeVの計数率比の関数 ( $X_{geometry}$ と呼ぶ)

## 4.2 等価モデルの定式化

### γ線強度の関係

$$\begin{aligned}
 n_1^a &= I_0^a \times \frac{\varepsilon \exp(-\mu_a x_1)}{4\pi x_1^2}, n_1^b = I_0^b \times \frac{\varepsilon \exp(-\mu_b x_1)}{4\pi x_1^2} \\
 n_2^a &= I_0^a \times \frac{\varepsilon \exp(-\mu_a x_2)}{4\pi x_2^2}, n_2^b = I_0^b \times \frac{\varepsilon \exp(-\mu_b x_2)}{4\pi x_2^2}
 \end{aligned}$$

(a:1001keV, b:766keV)



### ピーク比の関係

$$\begin{aligned}
 R(1) &= \frac{n_1^a}{n_1^b} = \frac{I_0^a}{I_0^b} \times \exp(-(\mu_a - \mu_b)x_1) & \frac{I_0^a}{I_0^b} &= k = \frac{0.837}{0.294} = 2.847 \\
 R(2) &= \frac{n_2^a}{n_2^b} = \frac{I_0^a}{I_0^b} \times \exp(-(\mu_a - \mu_b)x_2)
 \end{aligned}$$

### 線源位置とガンマ線強度の関係 (均一密度・対向測定の場合)

横軸  $\equiv \frac{1}{\left[ \ln \left( \frac{k}{\sqrt{R(1)R(2)}} \right) \right]^2} = \frac{4}{(\mu_a - \mu_b)^2 (x_1 + x_2)^2}$   
 (Xgeometry)

縦軸  $\equiv \sqrt{n_1^a \times n_2^a}$

計数率の平均値  
(ウラン量に比例)

規格化したピーク比で表した遮蔽に関する指標

## 多点測定でのピーク比の性質

廃棄物容器を中心から等しい距離の全方位位置で測定した1001keVと766keVの $\gamma$ 線計数率の比率の幾何平均( $\bar{R}$ )を計算する。 $\bar{R}$ は $\delta(i) \ll 1$ と見なせる場合に廃棄物の平均的な減弱係数 $\bar{\mu}$ で与えられる。

$\mu_a, \mu_b$  : 線源からi番目の測定点までの平均的な減弱係数[ $\text{cm}^{-1}$ ]  
 $\Delta\mu_a(i), \Delta\mu_b(i)$  : 線源からi番目の測定点までの平均的な減弱係数からの変位[ $\text{cm}^{-1}$ ]

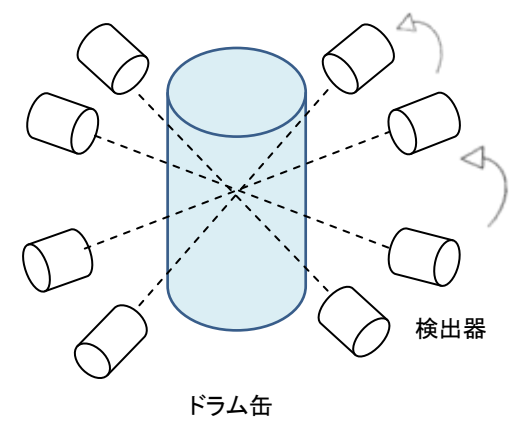
$$\bar{R} = \left( \prod_{i=1}^N \frac{n^a(i)}{n^b(i)} \right)^{\frac{1}{N}} = k \times \frac{\epsilon_a}{\epsilon_b} \times \exp \left( -\bar{\mu} \times \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 + \delta(i)) \times x_i \right)$$

$$\delta(i) = \frac{\Delta\mu_a(i) - \Delta\mu_b(i)}{\mu_a - \mu_b} \quad \bar{\mu} = \bar{\mu}_a - \bar{\mu}_b$$

$$\mu_a(i) = \bar{\mu}_a + \Delta\mu_a(i)$$

$$\mu_b(i) = \bar{\mu}_b + \Delta\mu_b(i)$$

➡ 測定データの幾何平均をとることで、密度不均一の放射性廃棄物から密度均一の状態を近似的に作り出せる。



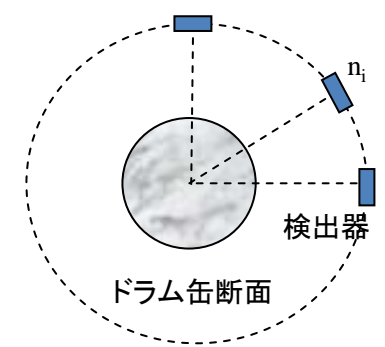
## 多点測定での評価座標

$$\text{横軸} \equiv \frac{1}{\left( \ln \left( \frac{k}{\bar{R}} \right) \right)^2} = \frac{1}{\left( \ln \left[ k / \left( \prod_{i=1}^N \frac{n^a(i)}{n^b(i)} \right)^{\frac{1}{N}} \right] \right)^2}$$

(Xgeometry)

$$\text{縦軸} \equiv \left( \prod_{i=1}^N n^a(i) \right)^{\frac{1}{N}}$$

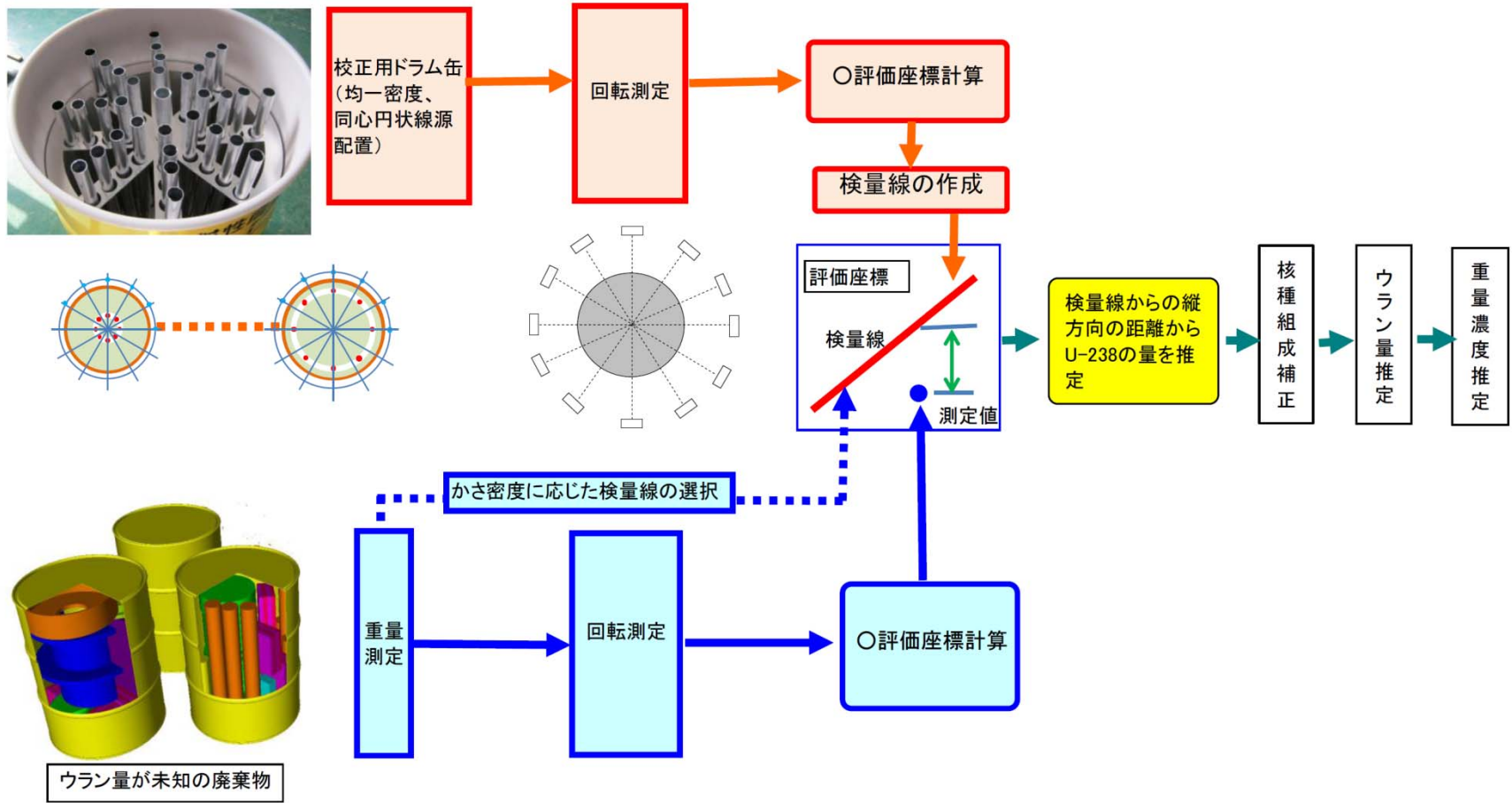
(計数率の幾何平均)



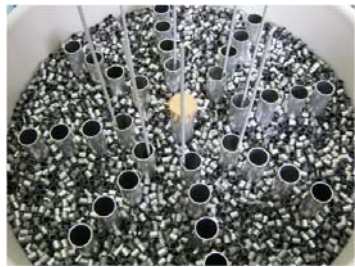
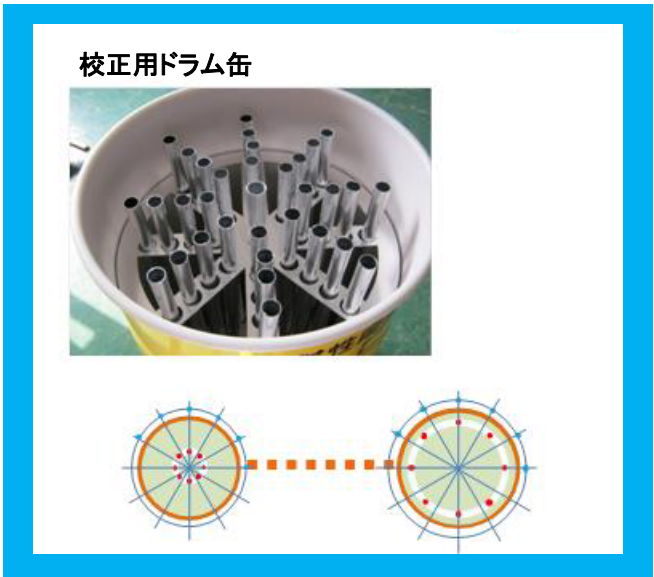
### 4.3 測定装置



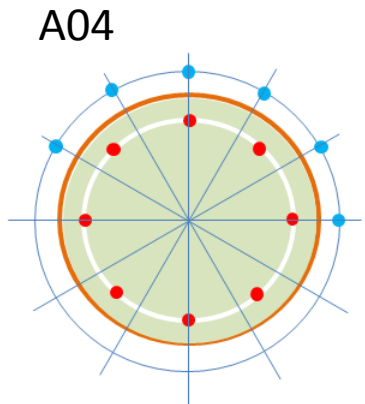
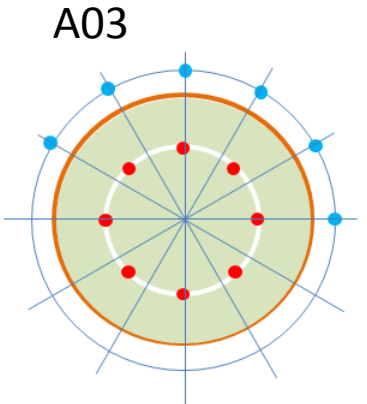
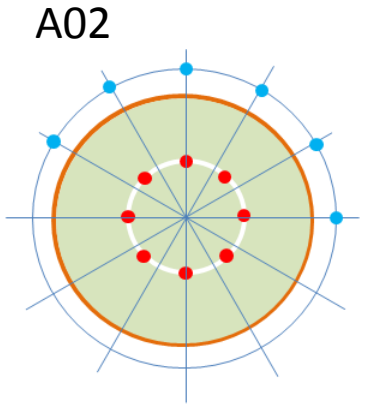
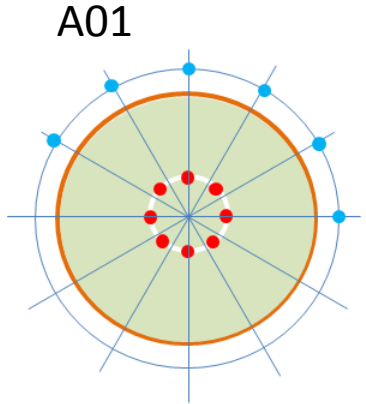
# 4.4 評価手順



# 4.5 検量線の作成

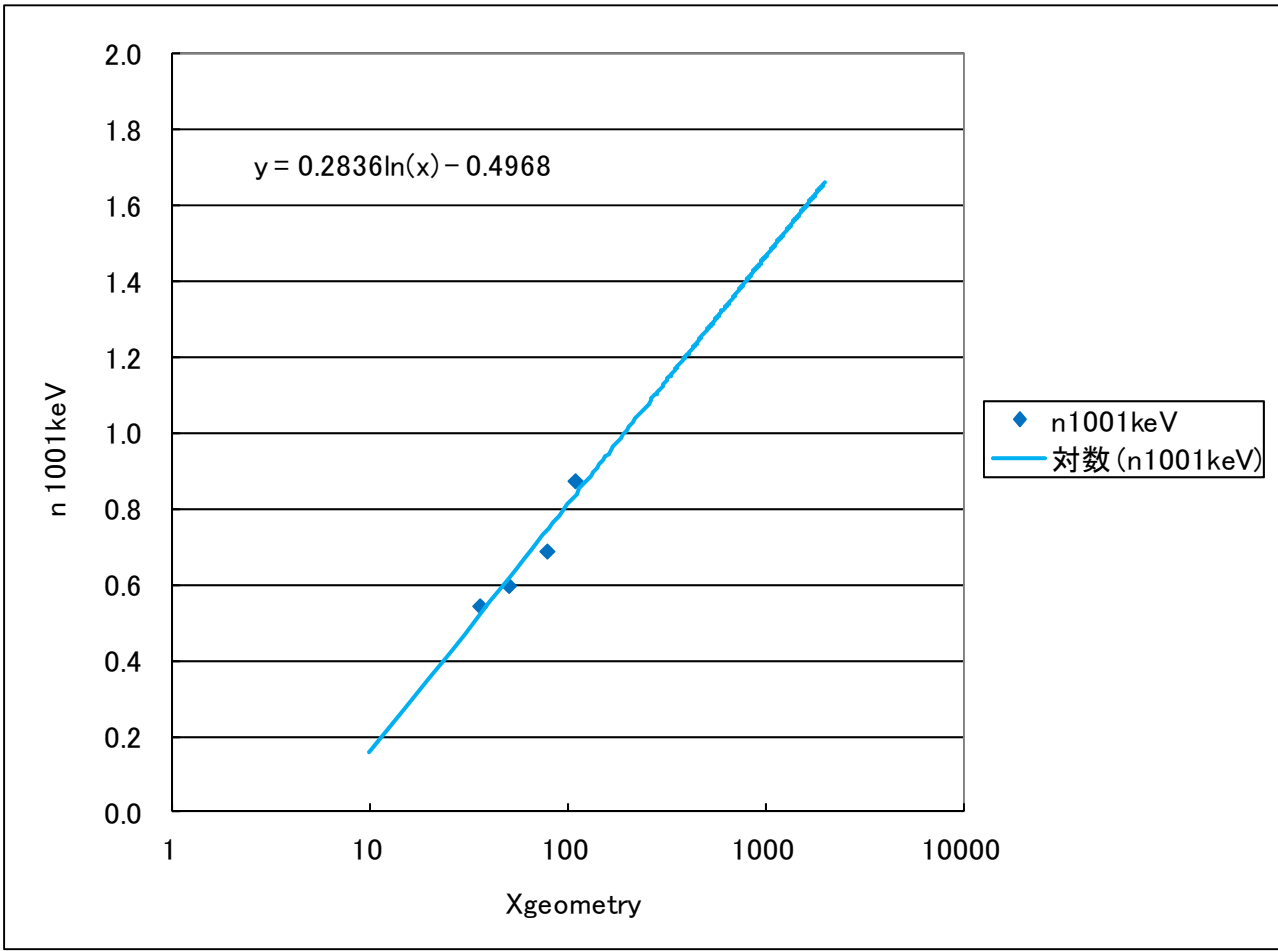


ラシヒリングを充填して、線源を同心円状に配置したドラム缶を準備。





# 検量線



ラシヒリングを充填し、線源を同心円状に配置したドラム缶を測定して検量線を求めた。  
各模擬廃棄物について測定を実施して検量線との位置関係(=検量線による定量可能性)について評価する。

## 4.6 模擬廃棄物の測定

### 模擬廃棄物でのパラメータ

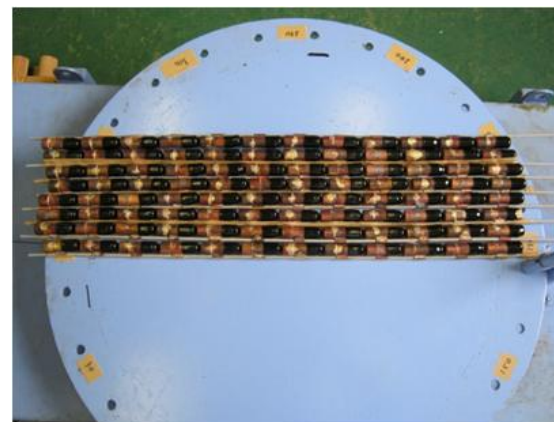
- 密度不均一性: ラシヒリング、小口径配管、大口径配管それぞれをドラム缶に収納
- 材料 : 上記鉄系に加えコンクリートブロック
- 線源分布 : 上記媒体中で種々の線源配置

### ウラン線源

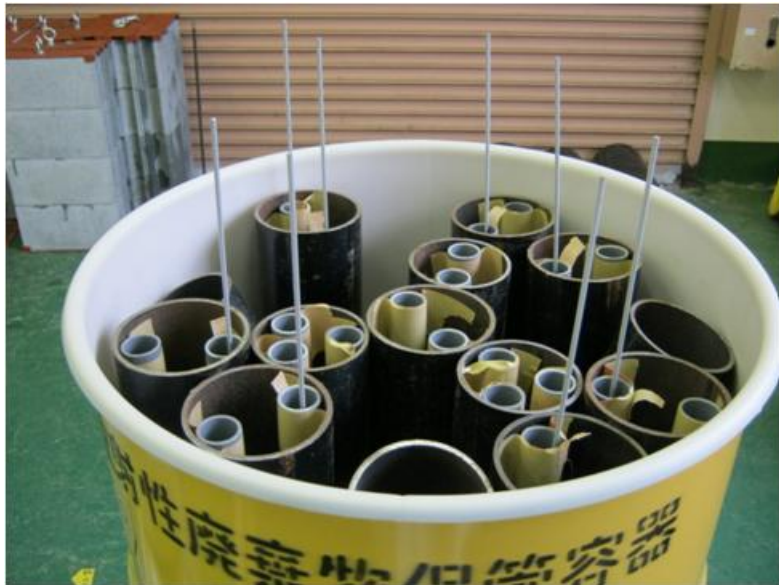
検量線作成と同様、192g-U (2g/容器 × 12容器/本 × 8本)

### 測定点数

12点測定 (30° ピッチ)

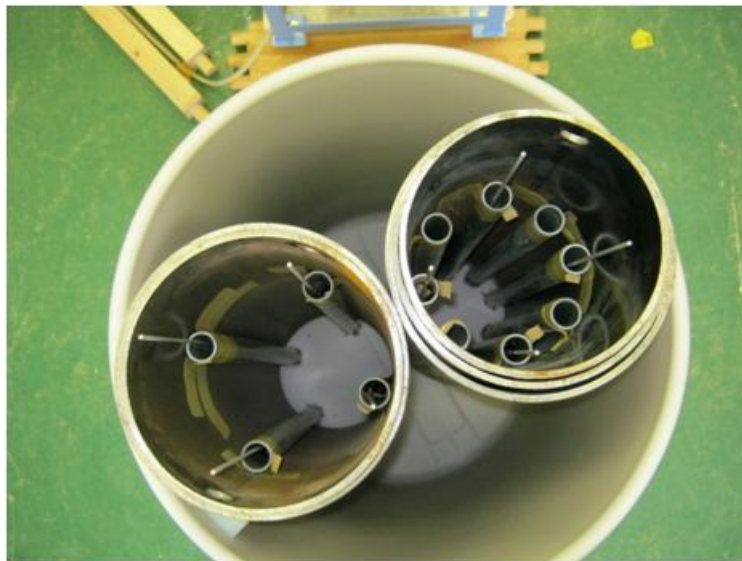


# 小口径配管設置状況

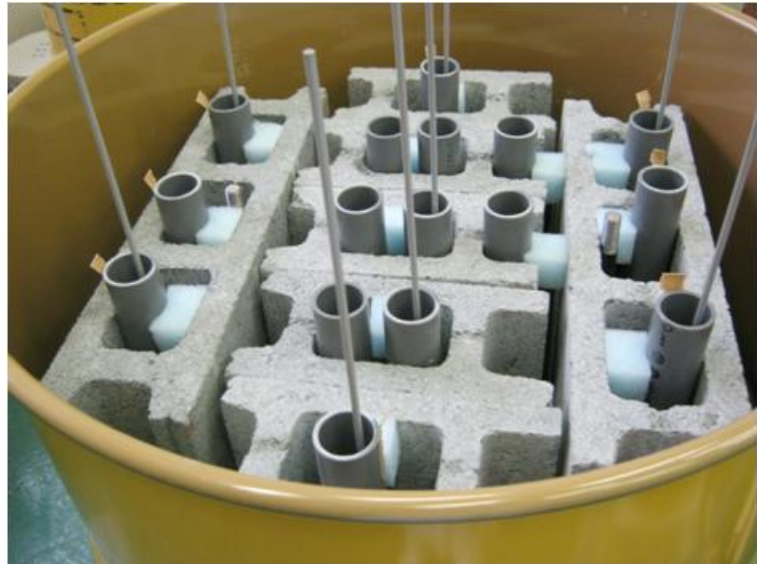




# 大口徑配管設置狀況

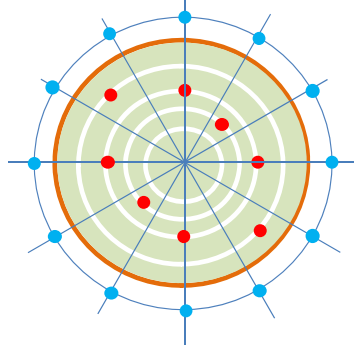


# コンクリートブロック設置状況

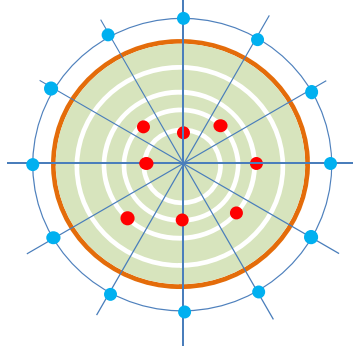


# ラシヒリング

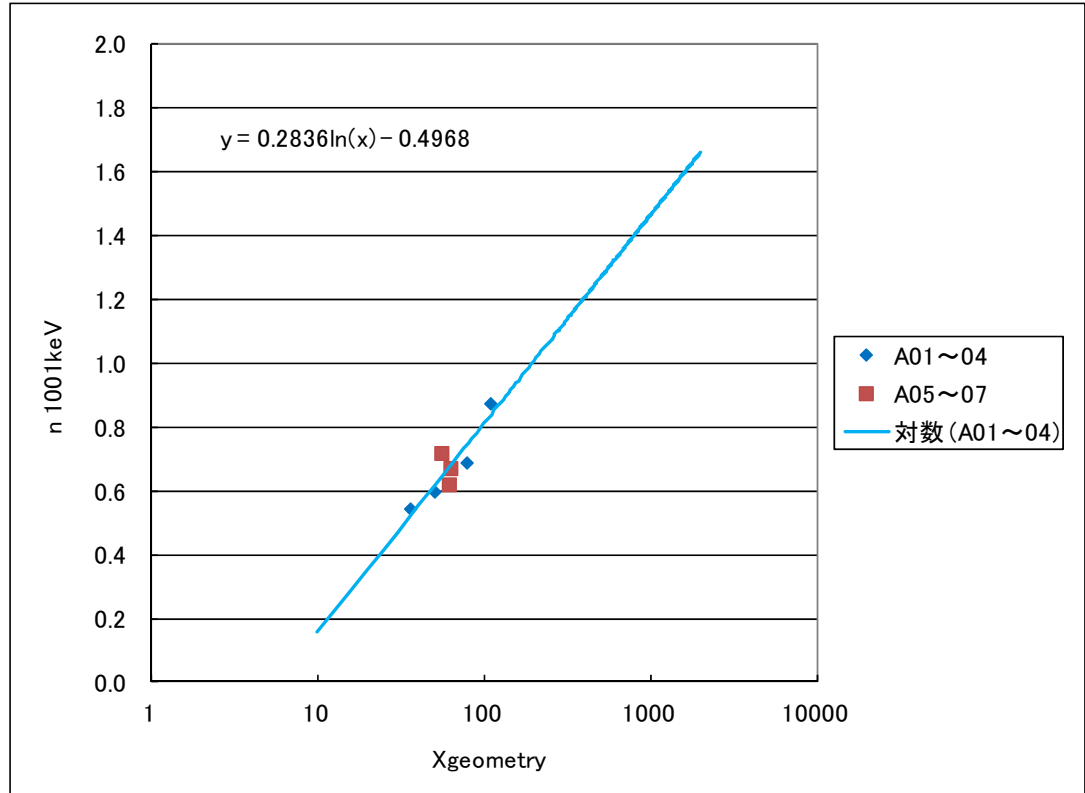
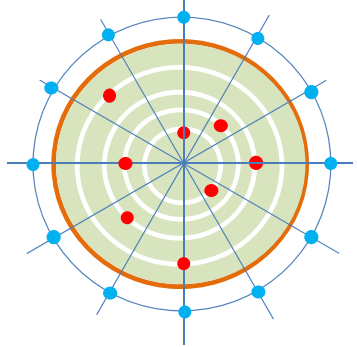
A05



A06



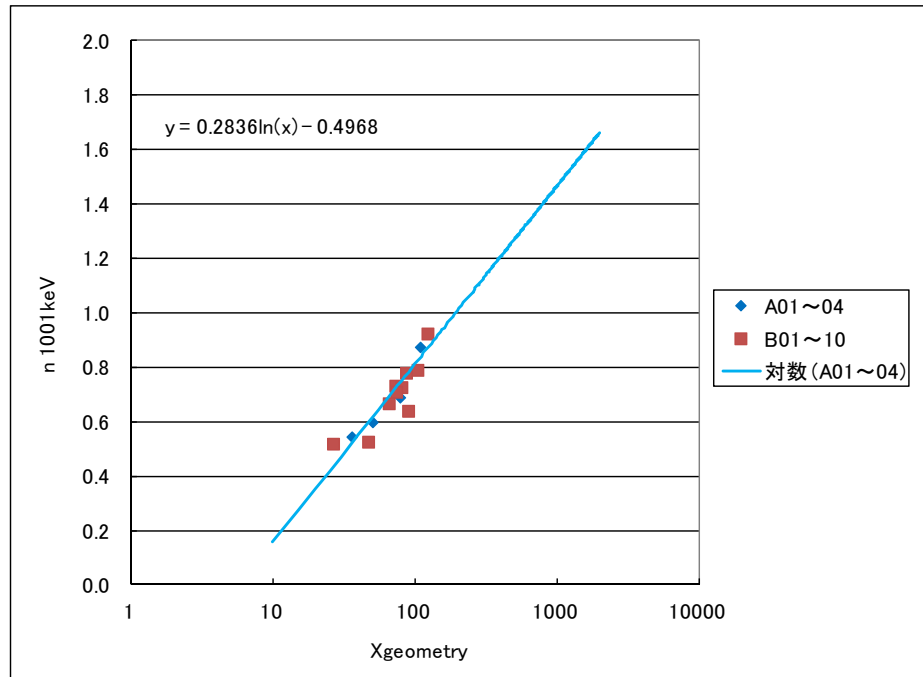
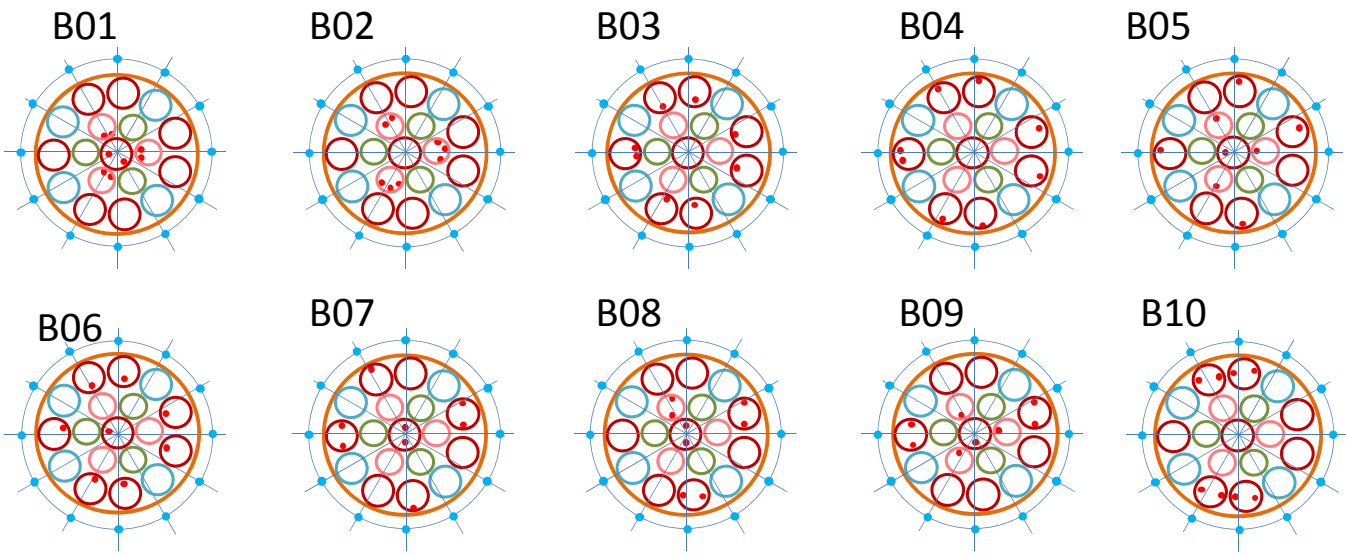
A07



試験パターンA05~A07については  
JAEA人形峠環境技術センターが独  
自に行った試験のデータをご提供い  
ただいた。



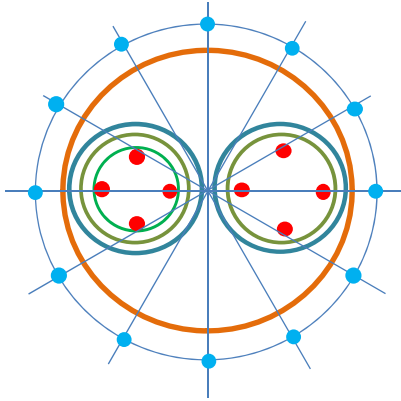
# 小口径配管



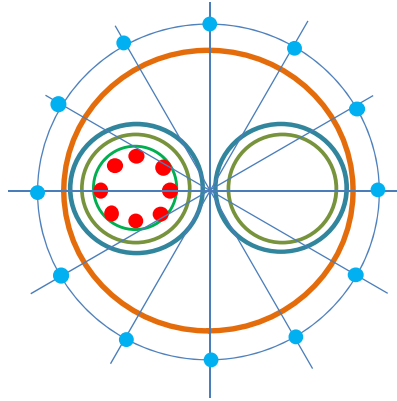
試験パターンB04~B10についてはJAEA人形峠環境技術センターが独自に行った試験のデータをご提供いただいた。

# 大口徑配管

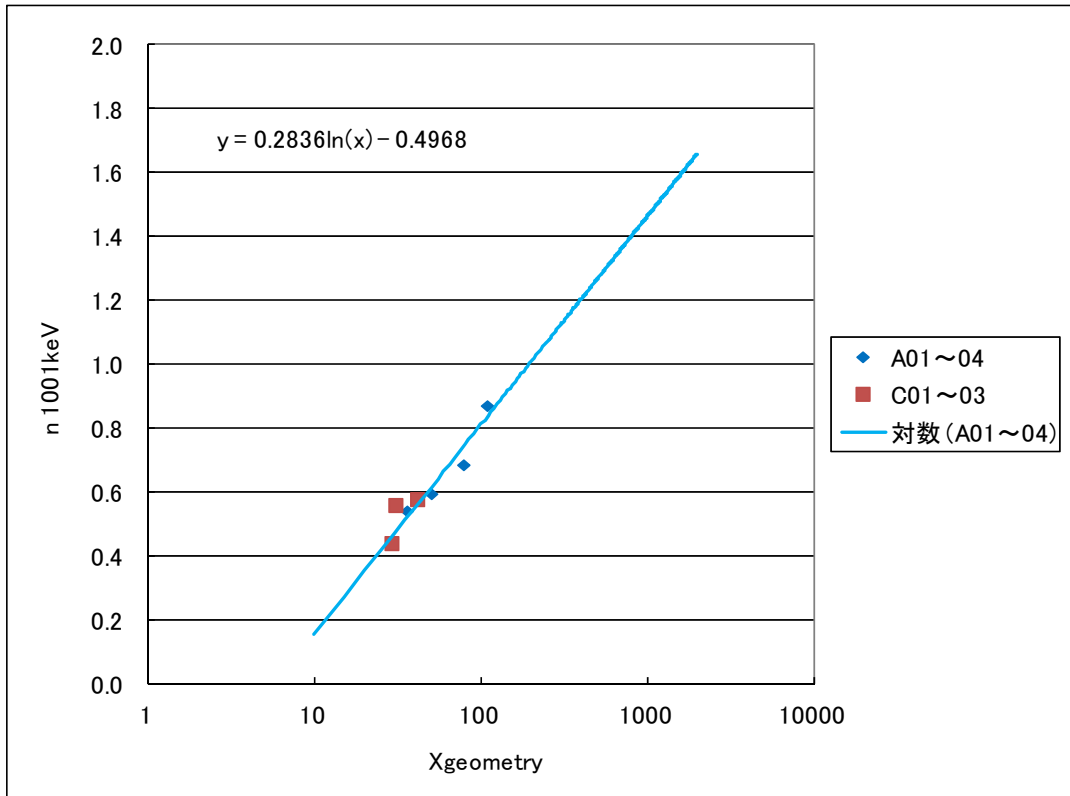
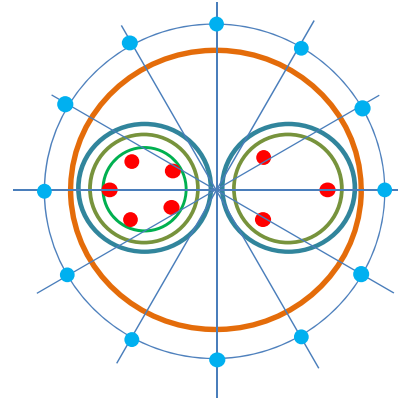
C01



C02



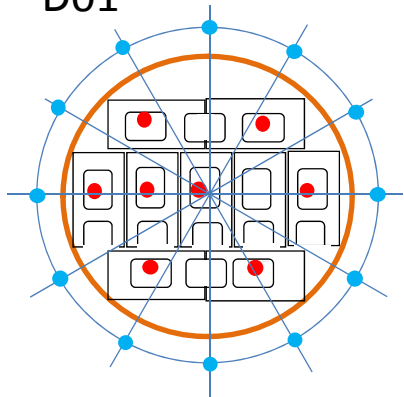
C03



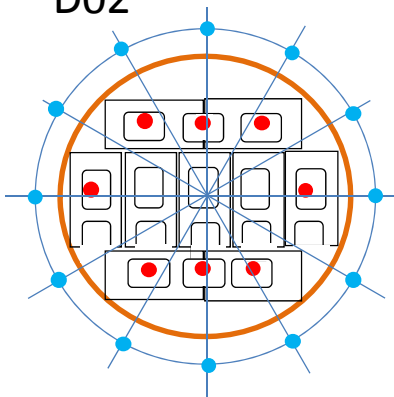


# コンクリートブロック

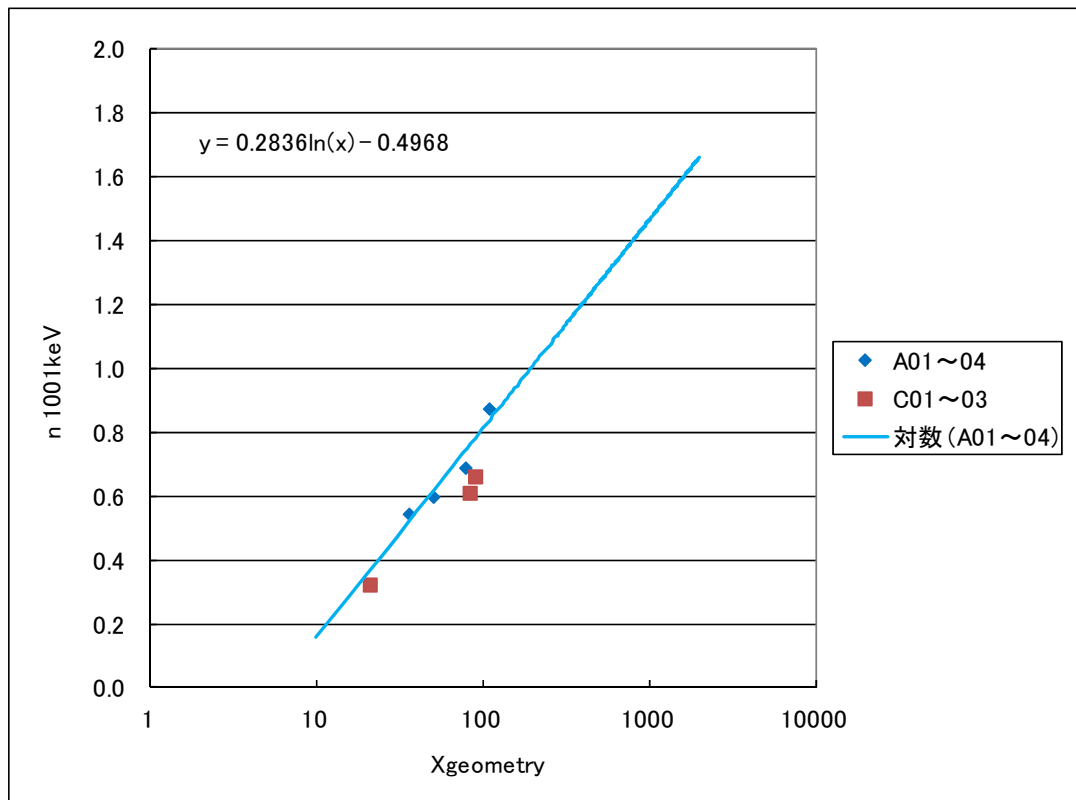
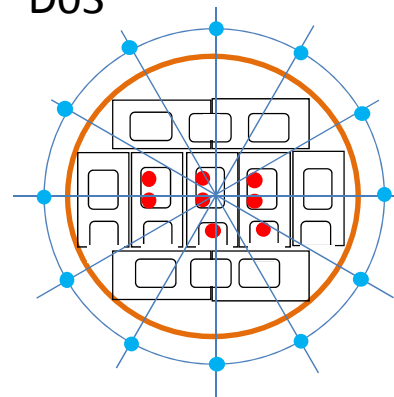
D01



D02

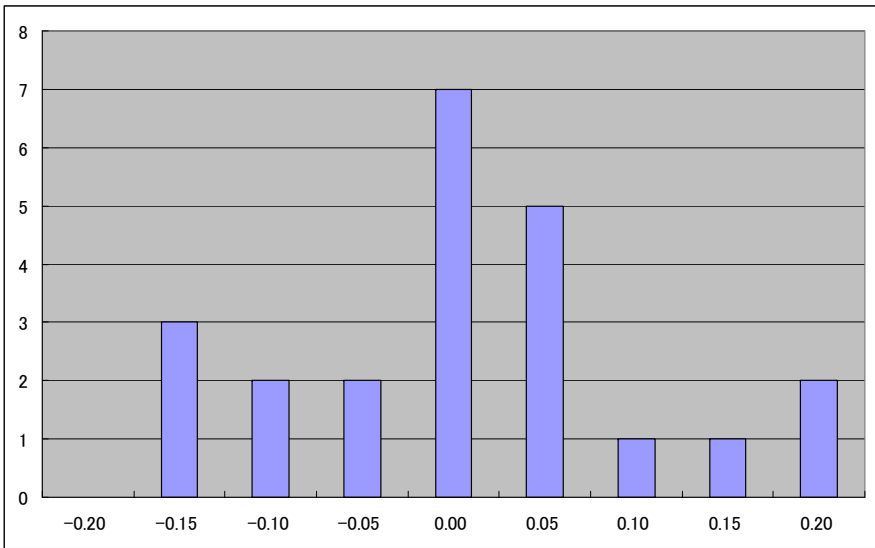
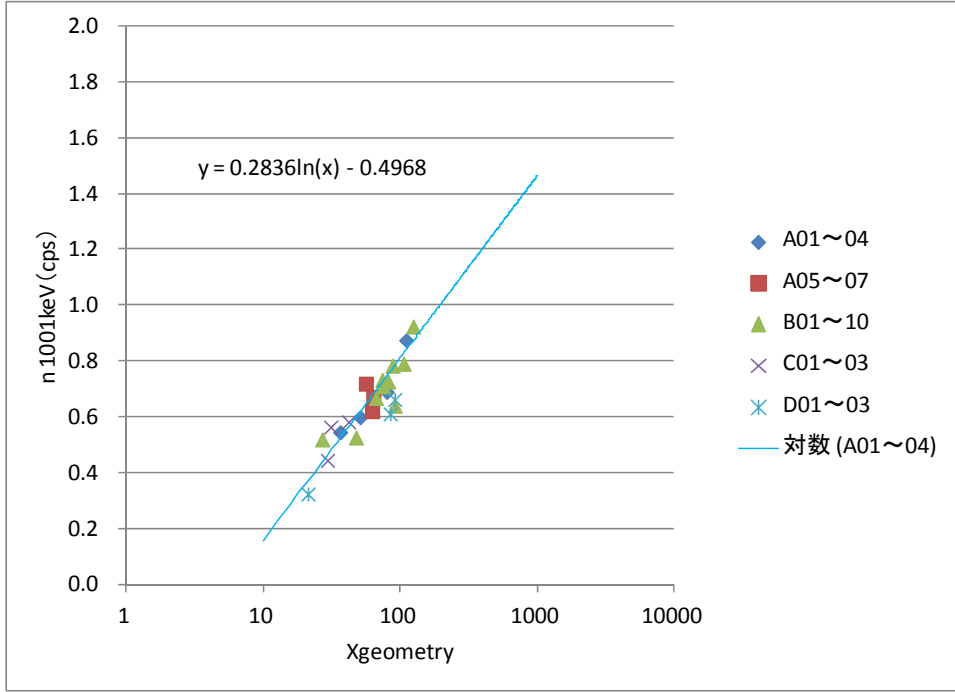


D03

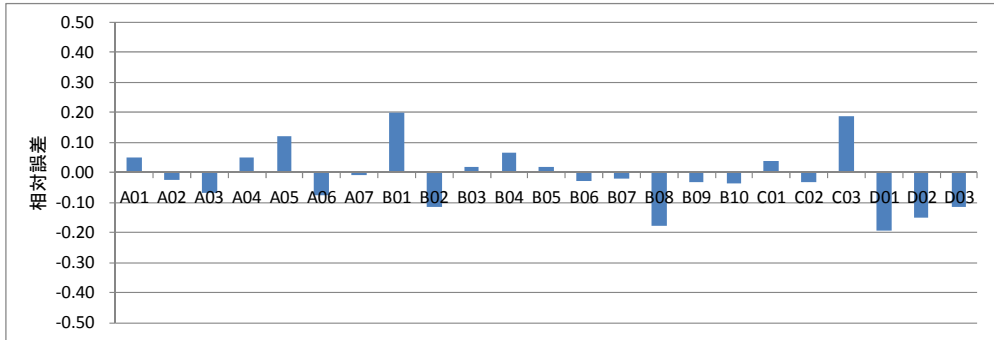


# 全パターンの評価座標プロット

ラシリング、小口径配管、大口径配管、コンクリートブロックに線源を配置した場合の全パターンのプロット



**↓ 相対誤差の評価**

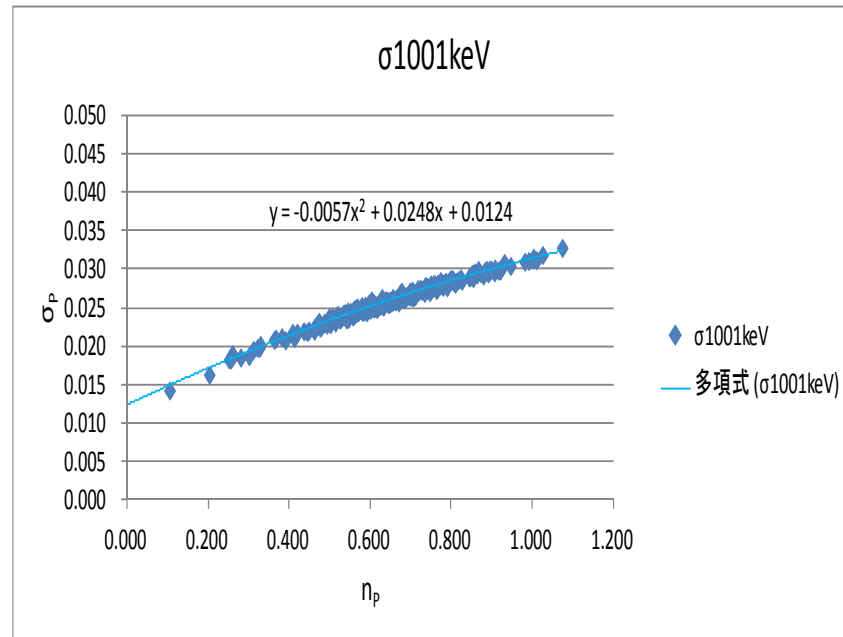


ウラン192g(32Bq/g)での検量線による定量は相対誤差20%以内となった。

## 4.7 誤差評価

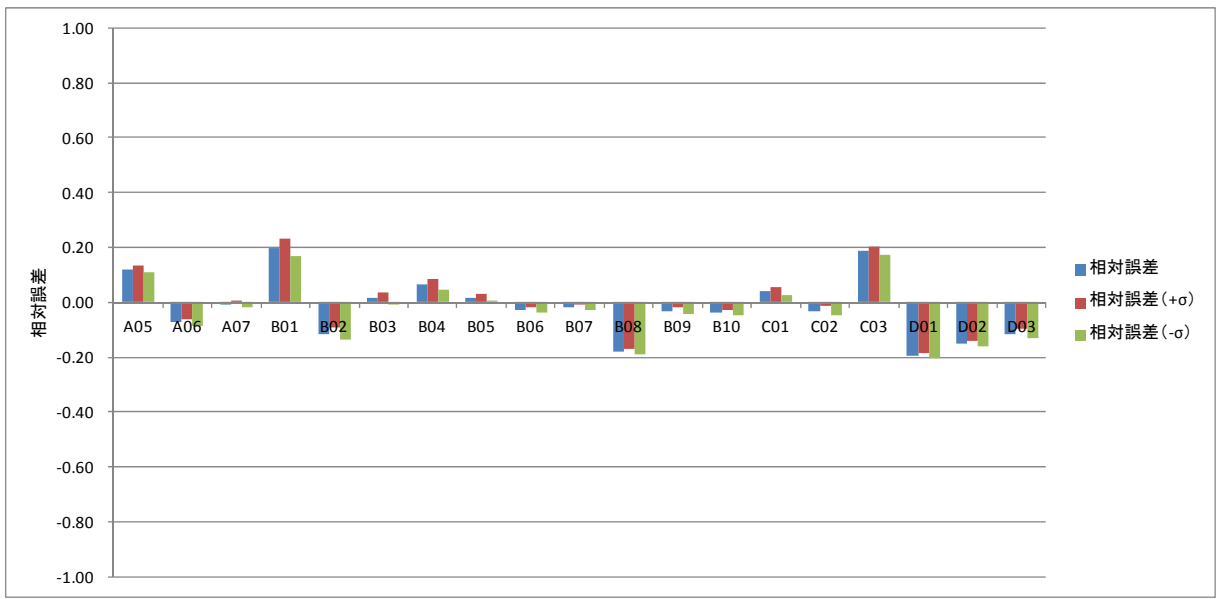
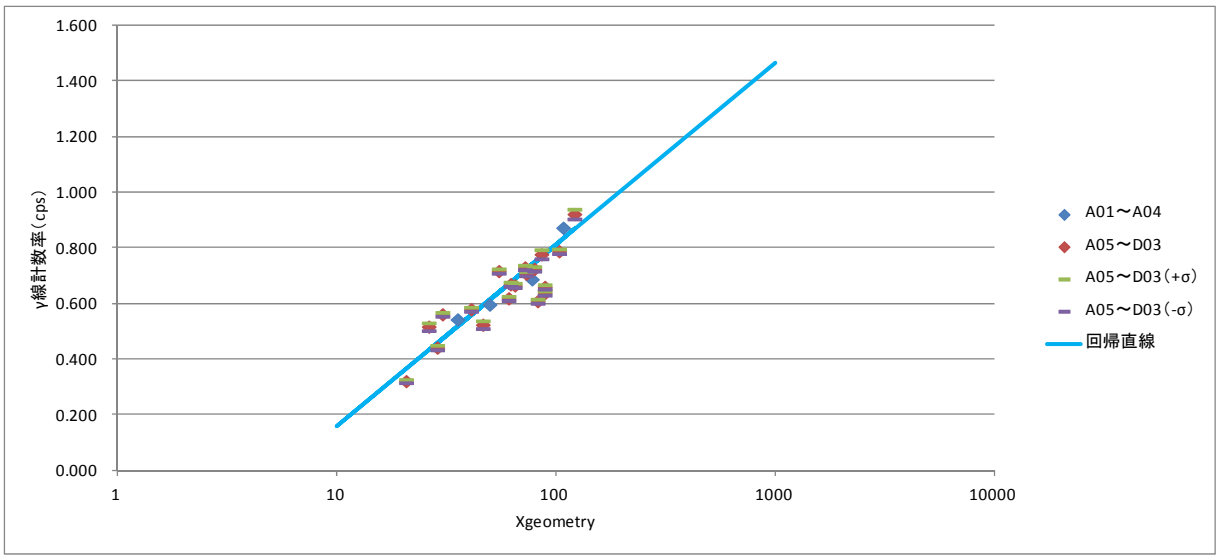
放射能濃度が10Bq/g、5Bq/gのときの $\sigma$ を評価

- ①192gウランの場合の1001keVの計数率と $\sigma$ の関係(12点測定の間々のデータを多項式で近似(下図))
- ②ウラン量を変えたときの12点測定の間々のデータ推定値(比例計算)から1001KeV計数率の幾何平均の $\sigma$ を誤差伝搬で計算



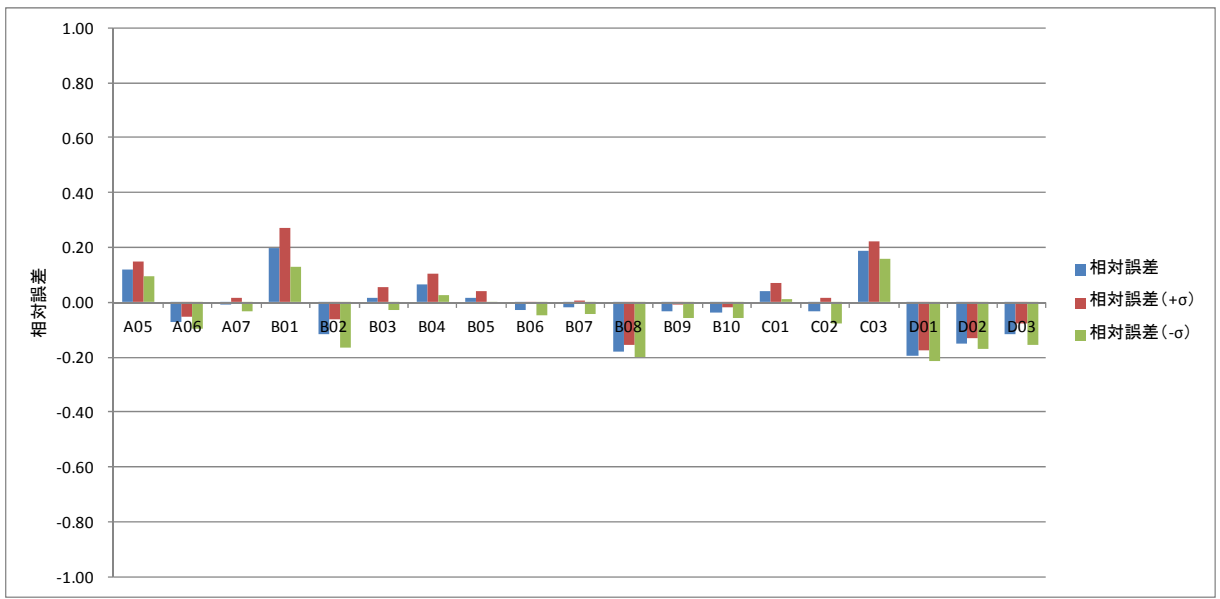
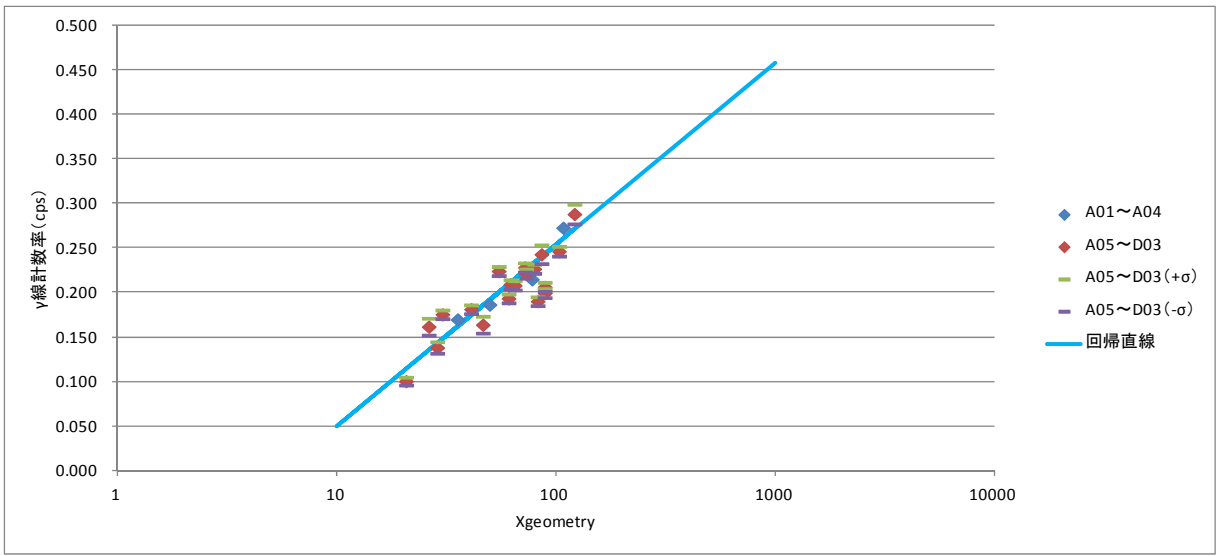
# 実測データ(放射能濃度32Bq/g)での相対誤差評価結果

ウラン量(g)	192.0
放射能濃度(Bq/g)	32.0



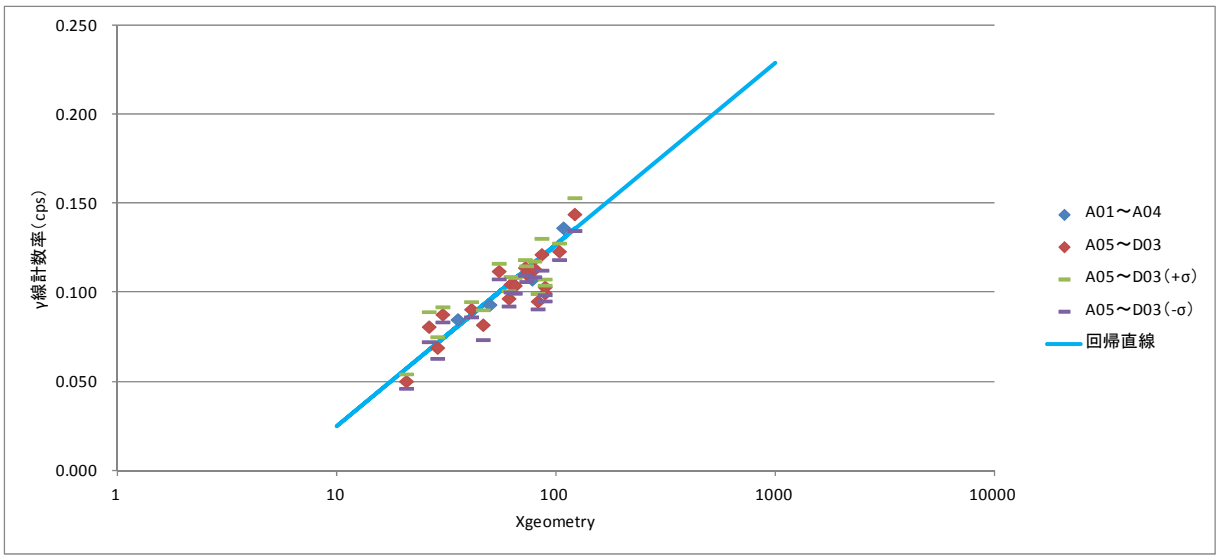
# 放射能濃度10Bq/gでの相対誤差推定結果

ウラン量 (g)	60.0
放射能濃度 (Bq/g)	10.0

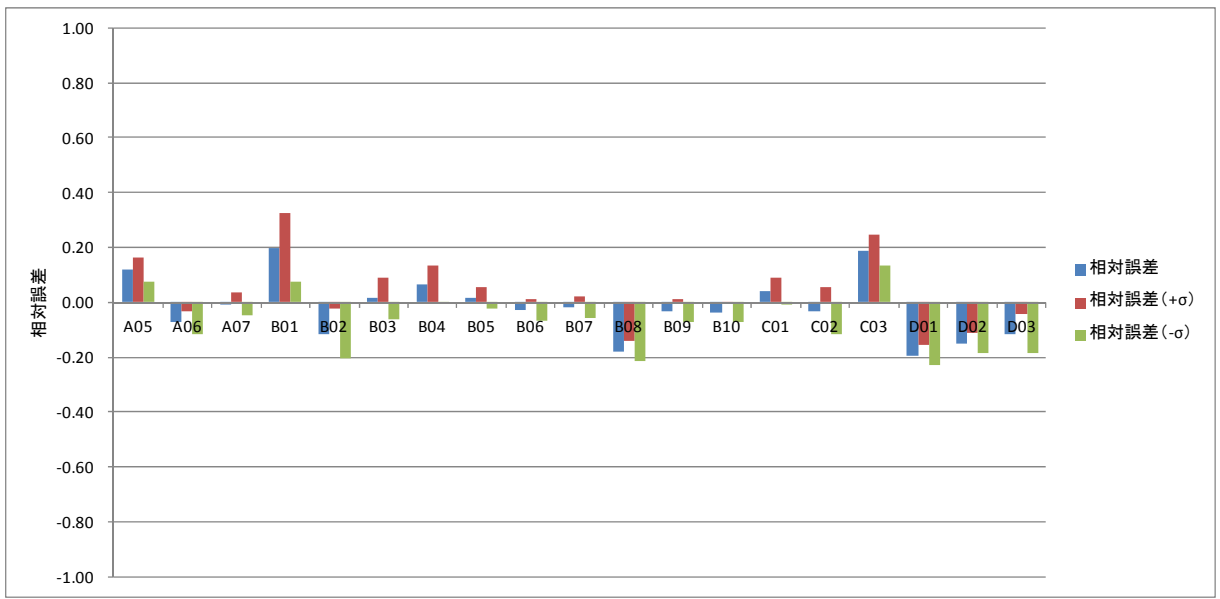


# 放射能濃度5Bq/gでの相対誤差推定結果

ウラン量 (g)	30.0
放射能濃度 (Bq/g)	5.0



ウラン量が変化しても放射能濃度5Bq/g程度までは相対誤差にあまり変化がない(1点1200秒測定)

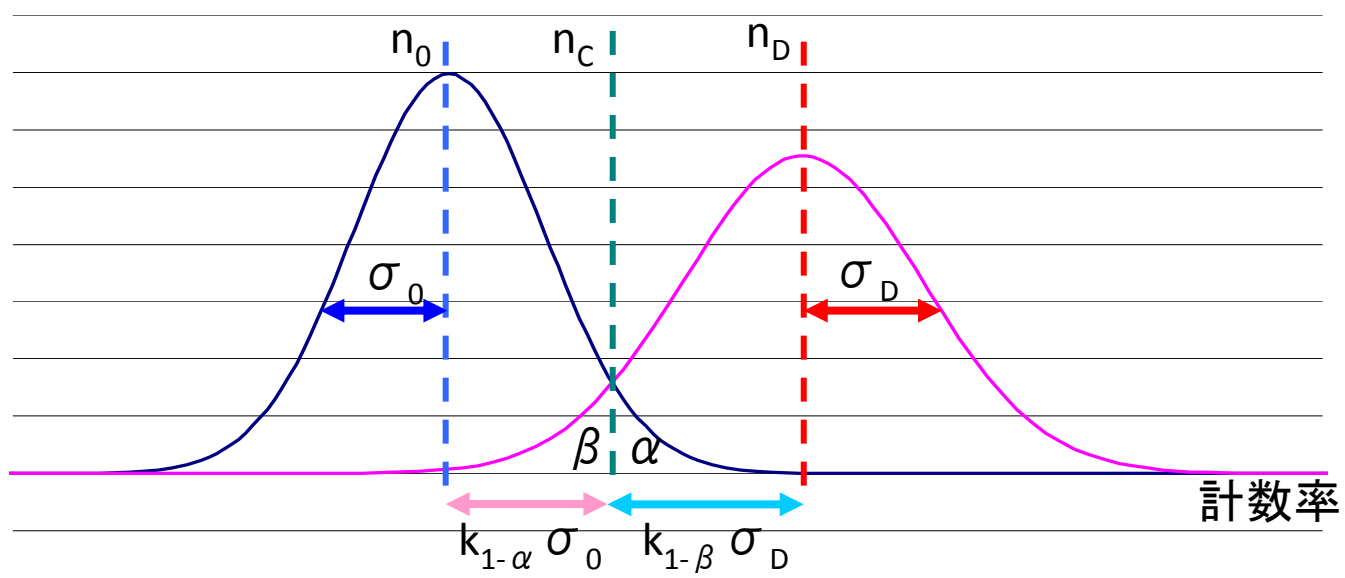


## 4.8 検出限界濃度

Currie法を適用し、放射能がないときのバックグラウンドの計数率分布と検出限界の放射能の場合の計数率分布の裾の重なり(5%)から検出限界濃度を判断。

バックグラウンドと検出限界の計数率の平均値、標準偏差をそれぞれ $n_0, \sigma_0, n_D, \sigma_D$ としたときに、 $n_D = n_0 + k_{1-\alpha} \sigma_0 + k_{1-\beta} \sigma_D$ となる。ここで、 $k_{1-\alpha}$ はバックグラウンドを差し引いた計数率が有意となる限界の係数、 $k_{1-\beta}$ は検出限界の測定計数率が有意となる限界の係数(ここでは $\alpha = \beta = 0.05$  (95%信頼度)で1.645)である。

(日本原子力学会標準より)



## $n_D$ の評価

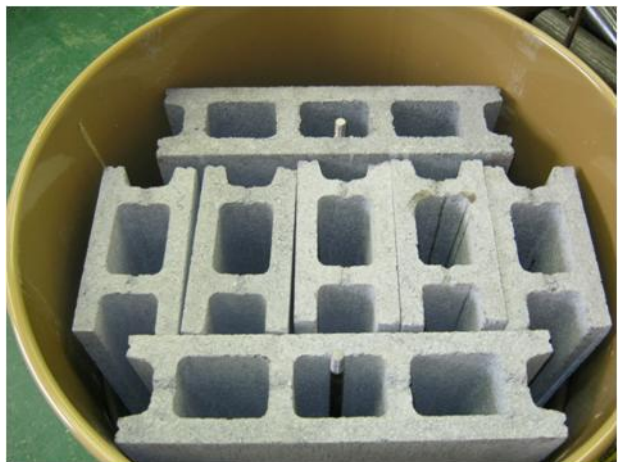
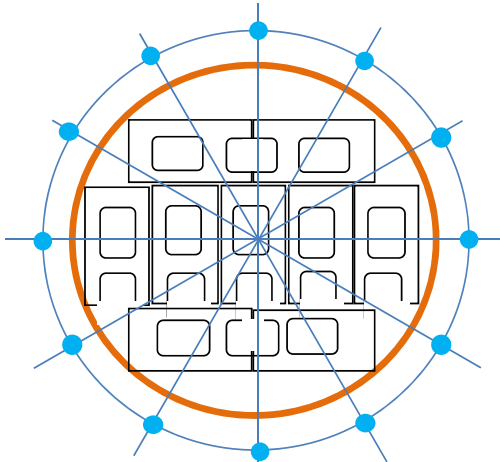
- ① ブランク(線源を配置しない場合)での $n_0$ 、 $\sigma_0$ はB.G.の $\gamma$ 線測定データから計算する。
- ② 検出限界計数率の $\sigma_D$ は、4.7と同じ方法(模擬廃棄物の12点測定の個々の計数率と $\sigma$ の関係式と誤差伝搬)でウラン量を変化させ、 $\alpha = \beta = 0.05$ となる $\sigma_D$ を求める。
- ③  $n_0$ 、 $\sigma_0$ 、 $\sigma_D$ から、次式で $n_D$ を求める。

$$n_D = n_0 + k_{1-\alpha} \sigma_0 + k_{1-\beta} \sigma_D \quad (k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = 1.645)$$

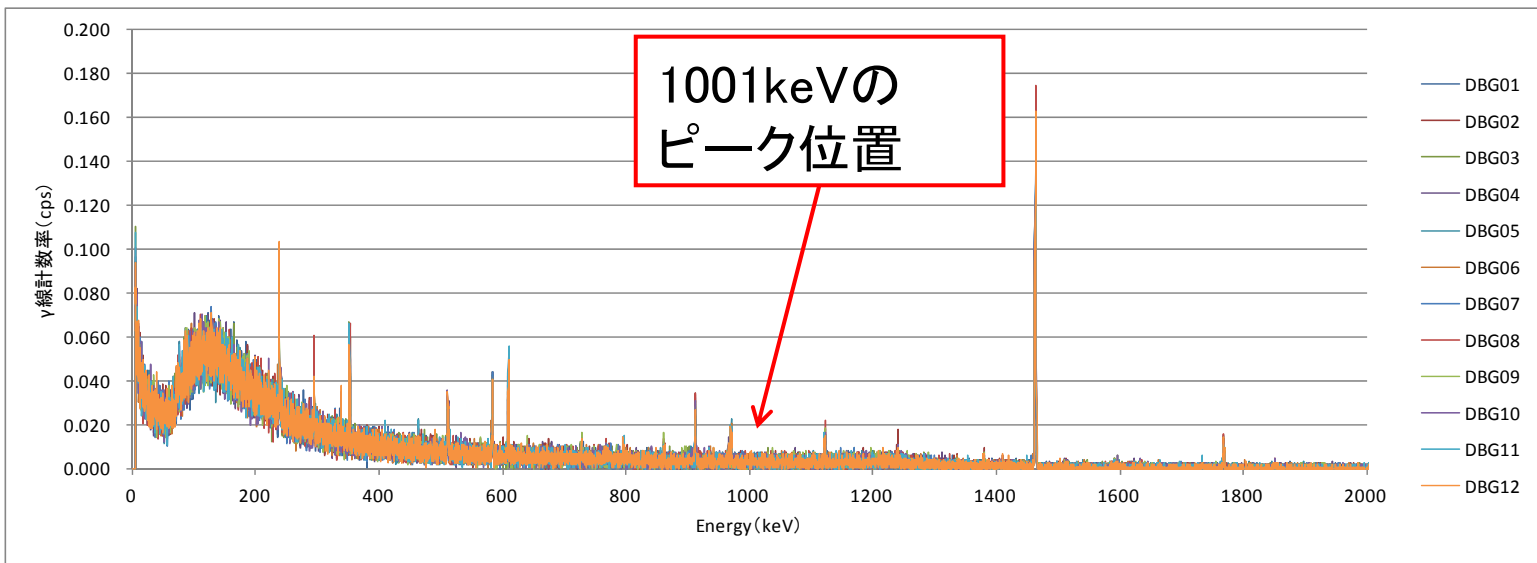


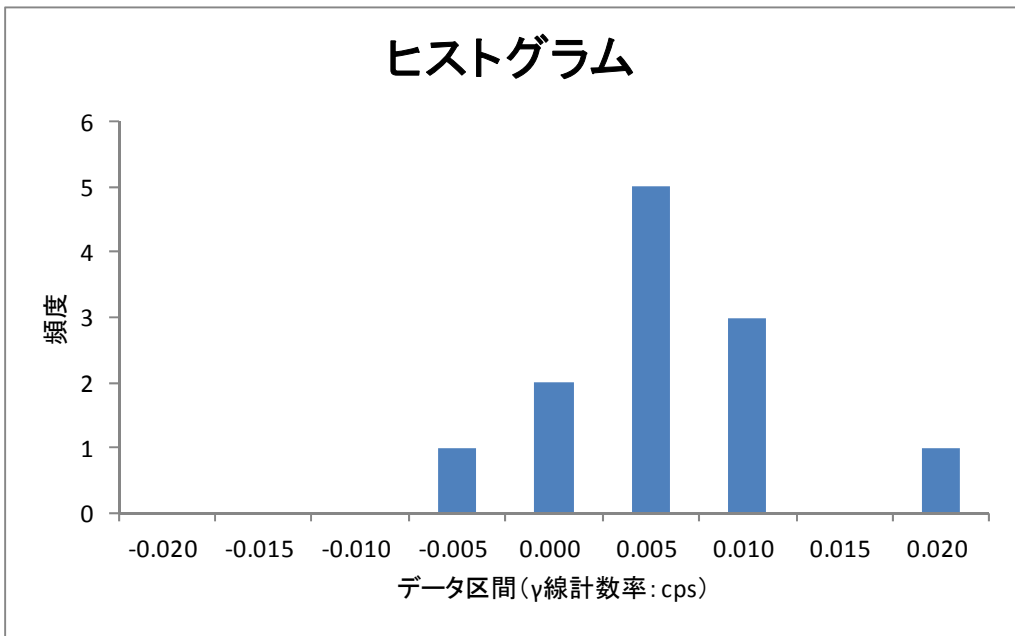
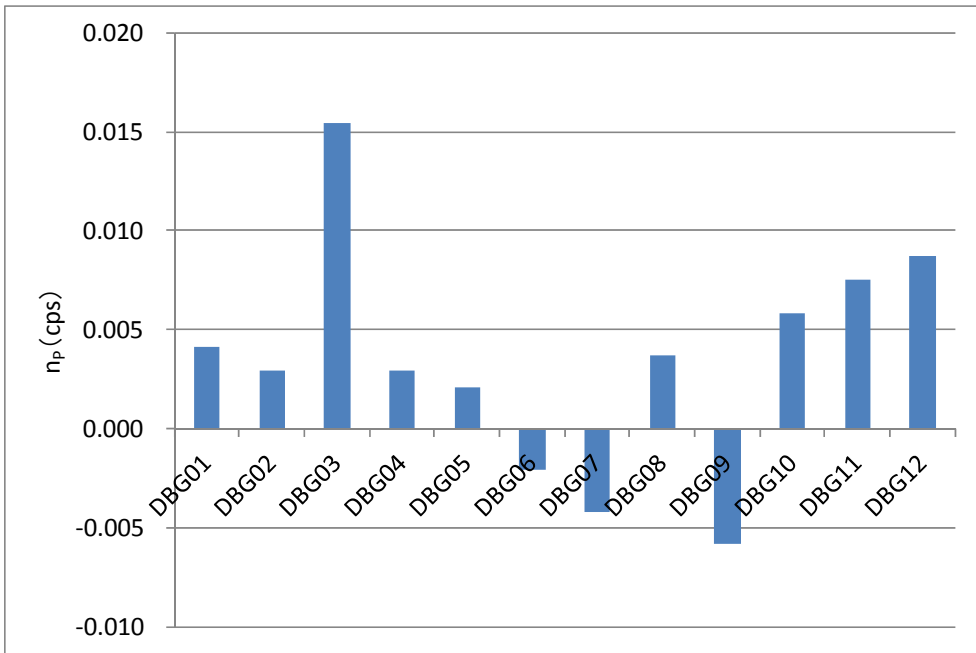
# バックグラウンドの測定

線源を配置しない模擬廃棄物ドラム缶について12点位相を変えて測定した。



γ線スペクトル





12点の測定結果から、平均 ( $n_0$ ) と  $\sigma_0$  を評価した。

平均 ( $n_0$ )	0.0034 cps
$\sigma_0$	0.0058 cps

## $n_D$ の評価結果

- Currie法により推定した結果、検出限界ウラン量は7.26gUとなった。
- ドラム缶のかさ密度を $0.75\text{g/cm}^3$ 、ウランの比放射能を $25000\text{Bq/g}$  とすると、検出下限の放射能濃度は $1.2\text{Bq/g}$ 程度となった。

## 4.9 適用できる廃棄物条件

今回の模擬廃棄物による試験結果から、以下の条件で等価モデルが適用可能であることが示された。

- ①かさ密度が $1\text{g}/\text{cm}^3$ 程度
- ② $X_{\text{geometry}}$ が20～120程度

この条件①、②を満たしていれば、以下の誤差範囲で測定可能である。

評価座標のばらつきの相対誤差(系統誤差)は20%程度

典型的な実廃棄物を元に実廃棄物に近い条件での模擬廃棄物を用いたため、多くの実際の廃棄物がこの条件を満たしていると考えられる。

## 4.10 まとめ

- 密度分布・線源分布によらず等価モデルにより精度よくウラン量の評価が可能であることが分かった。
- 実際のウラン廃棄物について、数時間程度で、10Bq/gの放射能濃度を誤差20%程度で評価ができる見通しがついていた。

### 今後の取組事項

- 装置設計、評価手法の学会標準化に必要なデータ収集及び検討

ご清聴ありがとうございました