



キャンベラISOCS技術の現場への適用と フレコンバック除染廃棄物の放射能精密定量

**第186委員会 フォーラム福島
平成28年7月5日**

キャンベラジャパン株式会社
カスタムソリューション事業部
ソリューションマネージャー

鈴木敦雄（博士(工学)）



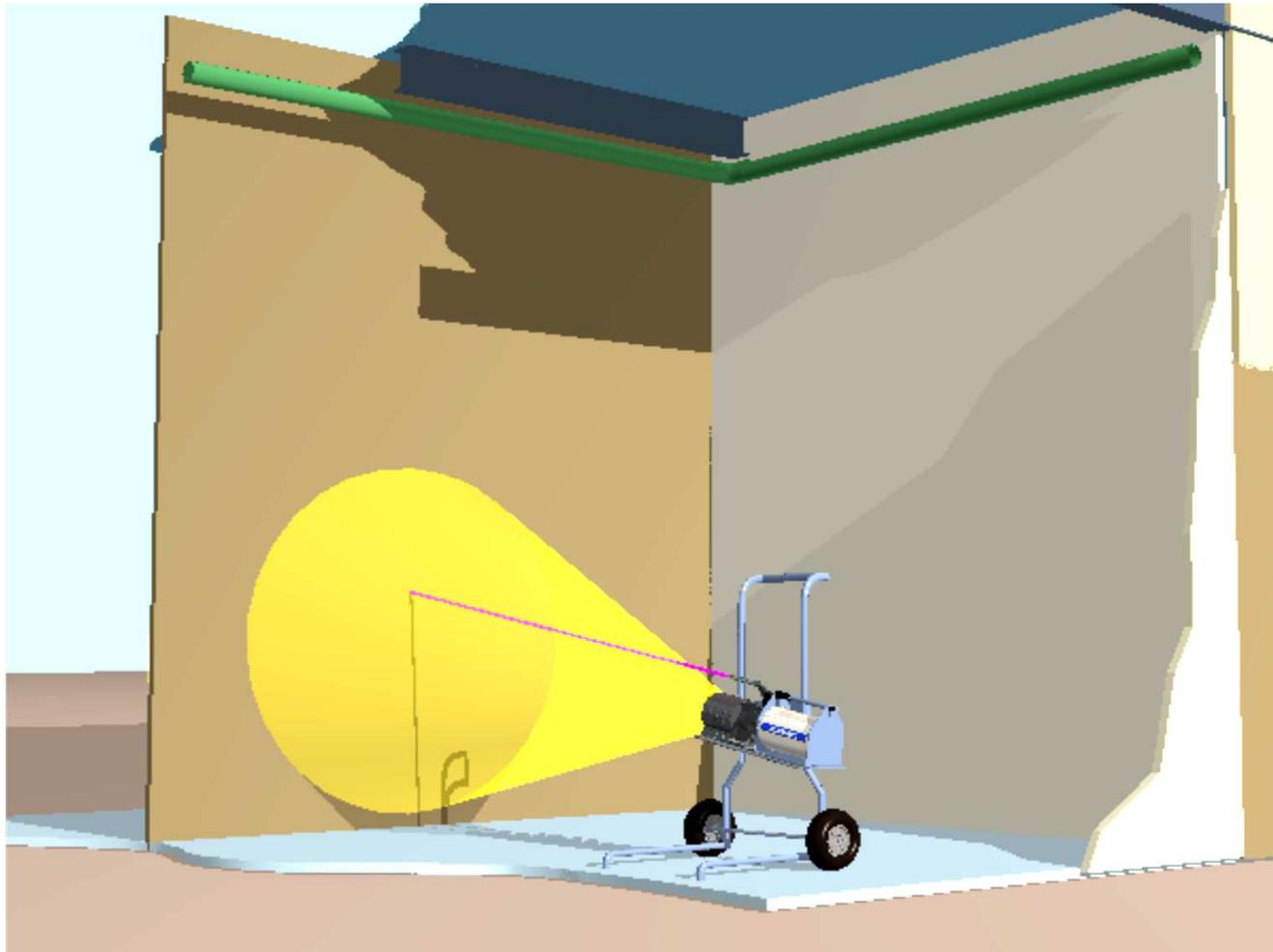
講演の構成

- ▶ ISOCSとは
- ▶ ISOCSの適用例
 - ◆ 海外での適用例
 - ◆ 国内での適用例(福島原発事故以降)
- ▶ フレコンバック除染廃棄物の精密定量
 - ◆ 実証試験の方法
 - ◆ 実証試験の結果
 - ◆ 考察
- ▶ まとめと今後の課題



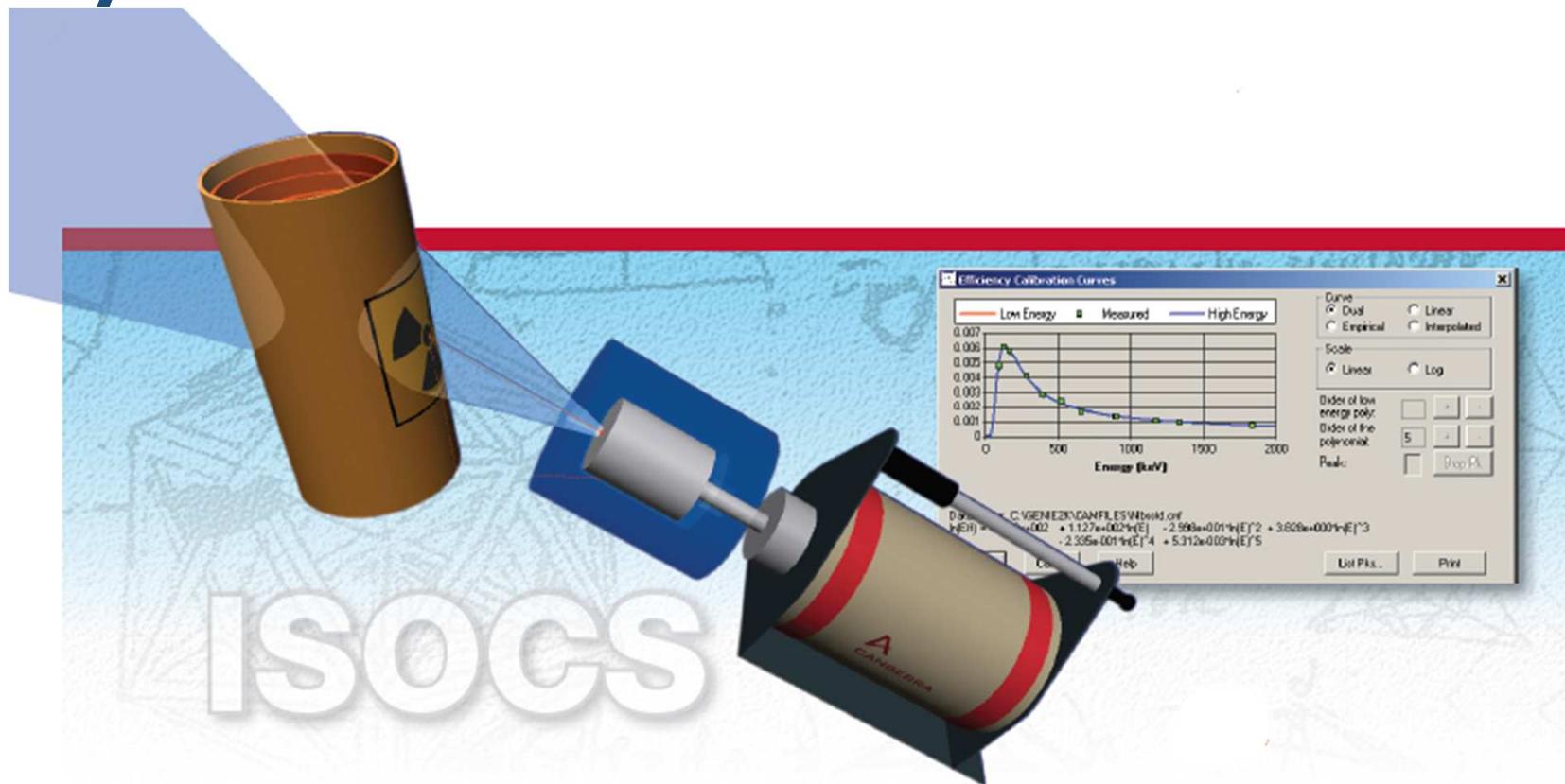
ISOCSとは

線源不要の効率校正ソフトウェア





ISOCS™ *In Situ* Object Counting System





ISOCS/LabSOCSの特徴

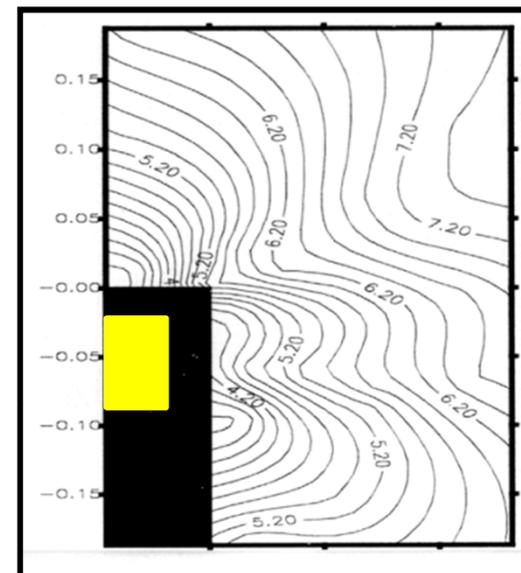
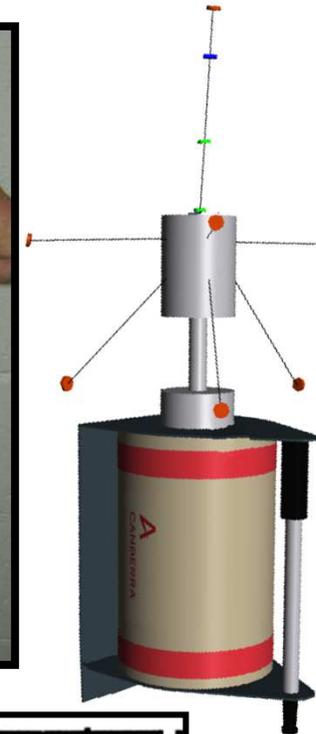
(数値計算で測定器の効率校正を実施)

- ▶ **ISOCS** : In-**S**itu **O**bject **C**alibration **S**oftware
- ▶ **LabSOCS** : **L**aboratory **S**ource-less **C**alibration **S**oftware
- ▶ **検出器の特性化** : (検出器周辺の空間を効率校正)
 - ◆ 検出器の周辺に標準線源を設置
 - ◆ 標準線源の実測に基づき、MCNP効率シミュレーション
 - ◆ 検出器周辺の空間効率マップを作成
- ▶ **測定試料の効率** :
 - ◆ 空間効率マップ上に、ISOCSテンプレートに沿って被測定試料を配置
 - ◆ 被測定試料を数十～数万の微小体積(ボクセル)に分割(自動計算)
 - ◆ 個々のボクセルから検出器に入射する放射線の効率を積算(自動計算)
 - ◆ 数秒～数十秒で任意の形状・サイズの効率作成が完了



検出器特性化

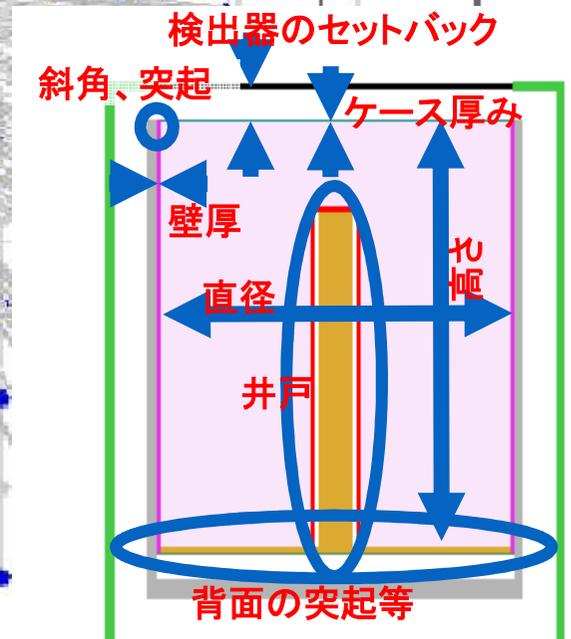
- ▶ 各検出器に対して行われる
- ▶ NIST(米国国立標準研究所) 混合線源を使用
- ▶ 7ヶ所で測定
- ▶ 線源測定に基づき、検出器の MCNPモデルを作成し検証
- ▶ 検証されたMCNPモデルを空間効率に拡大
 - ◆ 0から500mの距離
 - ◆ 全方向
 - ◆ 10keV-7000keV
- ▶ NIST標準線源とのトレーサビリティ
- ▶ 試料効率を作成するための検出器特性化ファイル作成



生 さらなる水準へ

特性化の作業

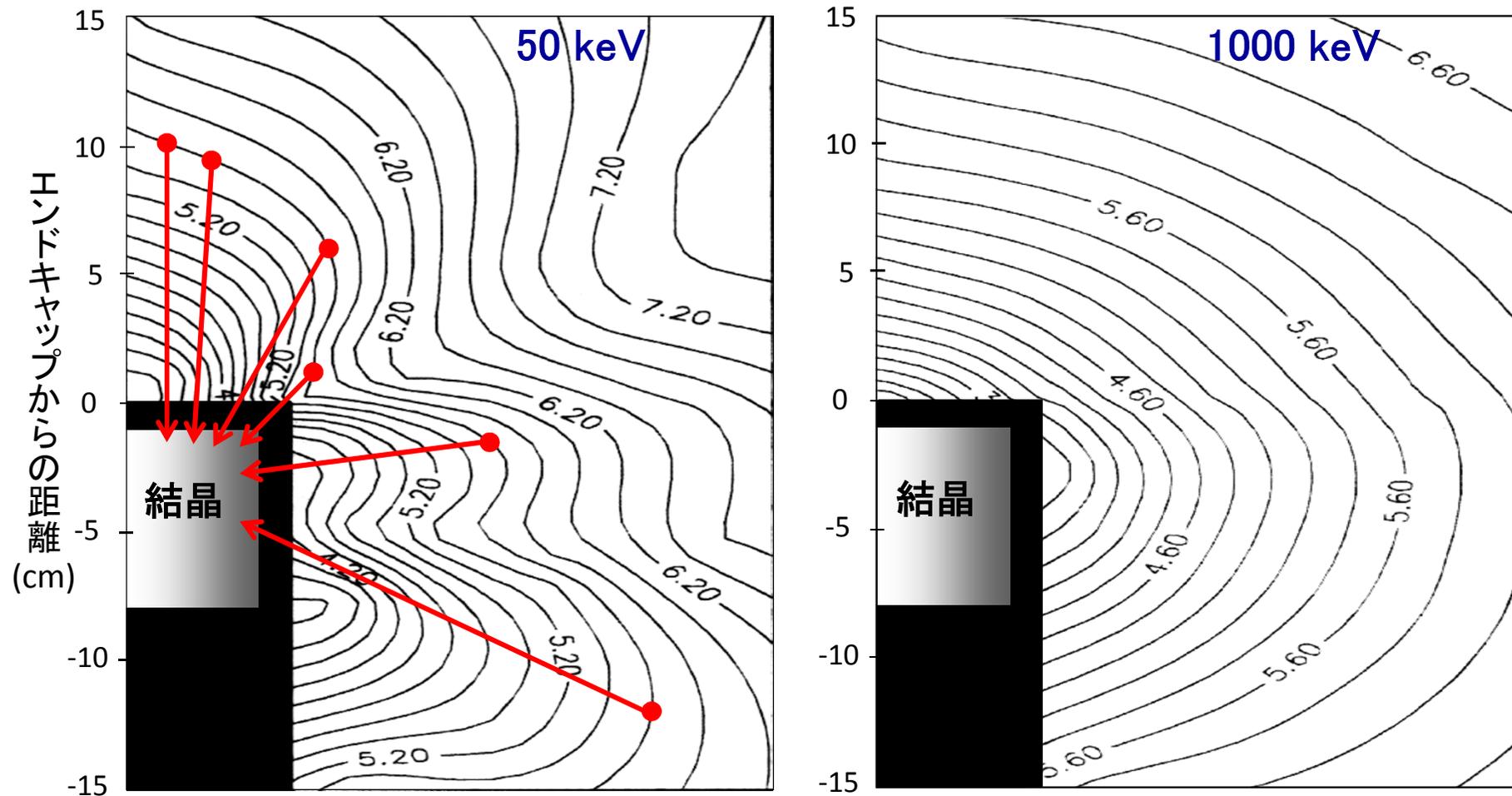
NIST線源



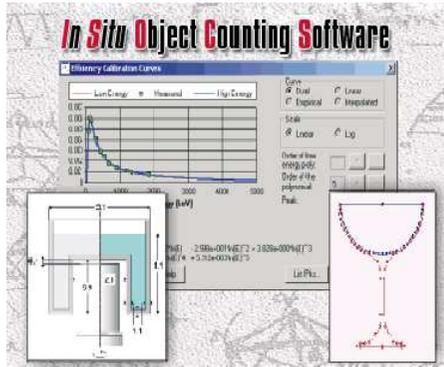


検出器の特性化

- ▶ 各々の結晶についてMCNPを用いて効率レスポンス関数を導出し特性化する。

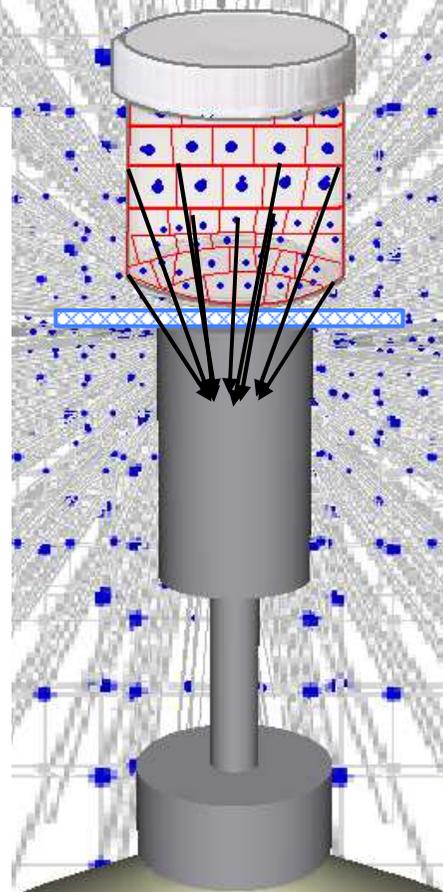


8 図中の数値(x)は効率(e^{-x})を表す。



ISOCs/LabSOCS ソフトウェア アルゴリズム (数値計算のプロセス)

- ① 線源を数十～数万個 のボクセル (voxel、体積要素) に分割
- ② 各点に対してピーク効率を計算
 - ・ 検出器までの距離
 - ・ 線源内での自己吸収
 - ・ 容器の壁
 - ・ 吸収体、線源-検出器間の空気層
 - ・ ガンマ線のエネルギーなど
- ③ これらを考慮して全てのボクセルについて上記の計算が行われ、効率決定



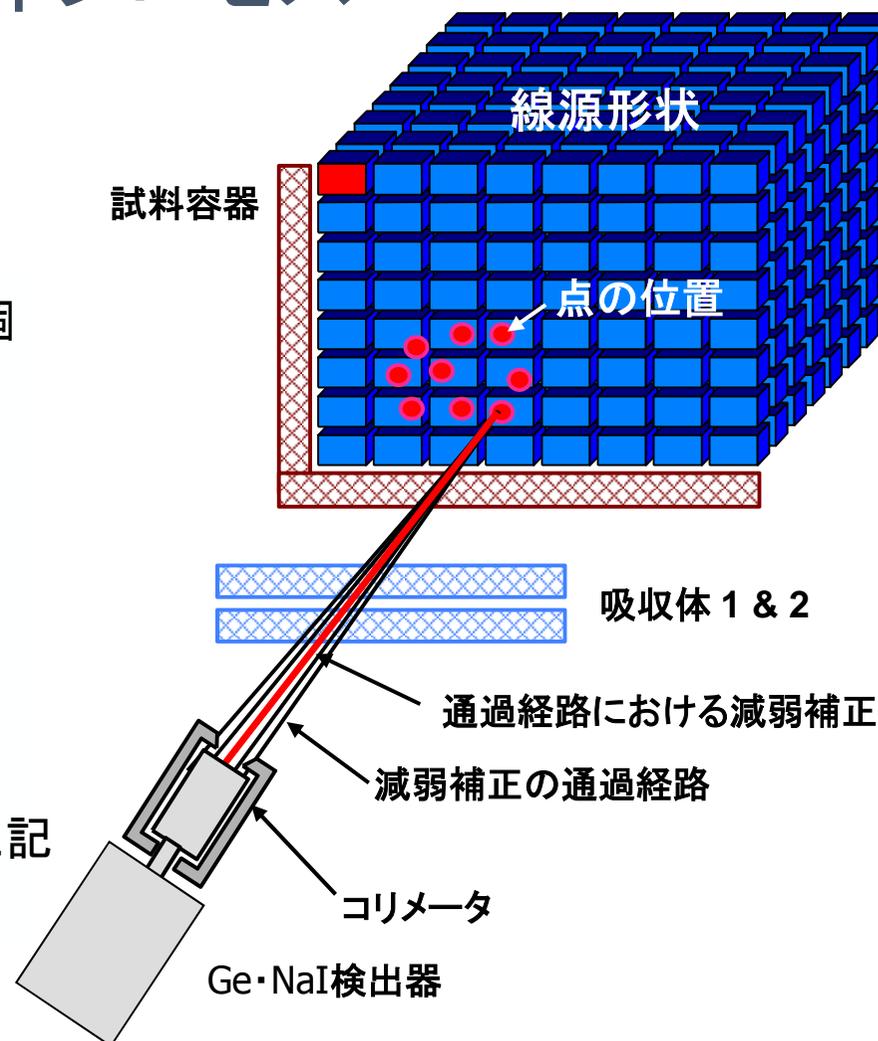
吸収体

ISOCsの場合は、コリメータ等の設計も可能

数値計算における効率計算プロセス

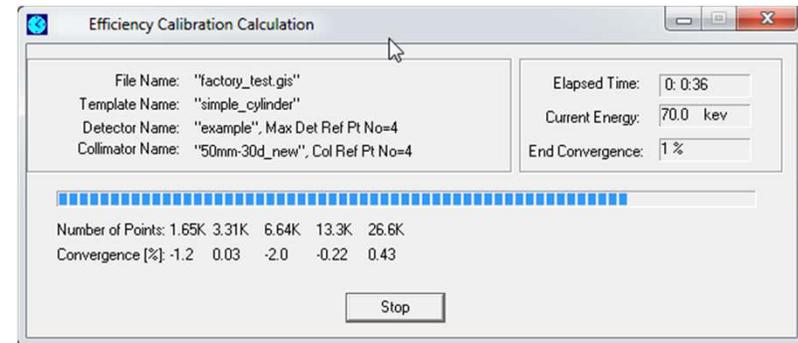
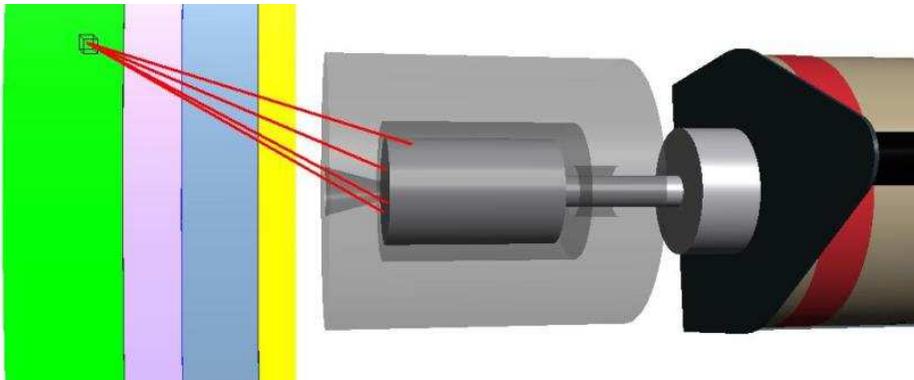
----- 効率計算のプロセス -----

- ① 線源を形状とサイズに応じて数十～数万個のボクセル (voxel、体積要素) に分割
- ② その点に対してピーク効率を計算
 - ・ 検出器までの距離
 - ・ 線源内での自己吸収
 - ・ 容器の壁
 - ・ 他の吸収体、線源-検出器間の空気層
 - ・ ガンマ線のエネルギーなど
- ③ これらを考慮して全てのボクセルについて上記の計算が行われ、効率決定。





ISOCS 効率計算ソフトウェア

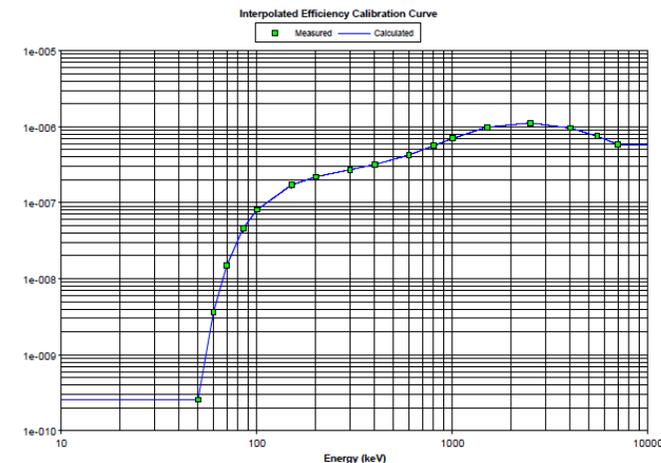


$$\epsilon = \sum_i^{voxels} N_i \epsilon_i^{vac} \sum_j^{paths} W_{ij} e^{-\sum_k^{abs} \mu_{ijk} T_{ijk}}$$

↑
各ボクセル

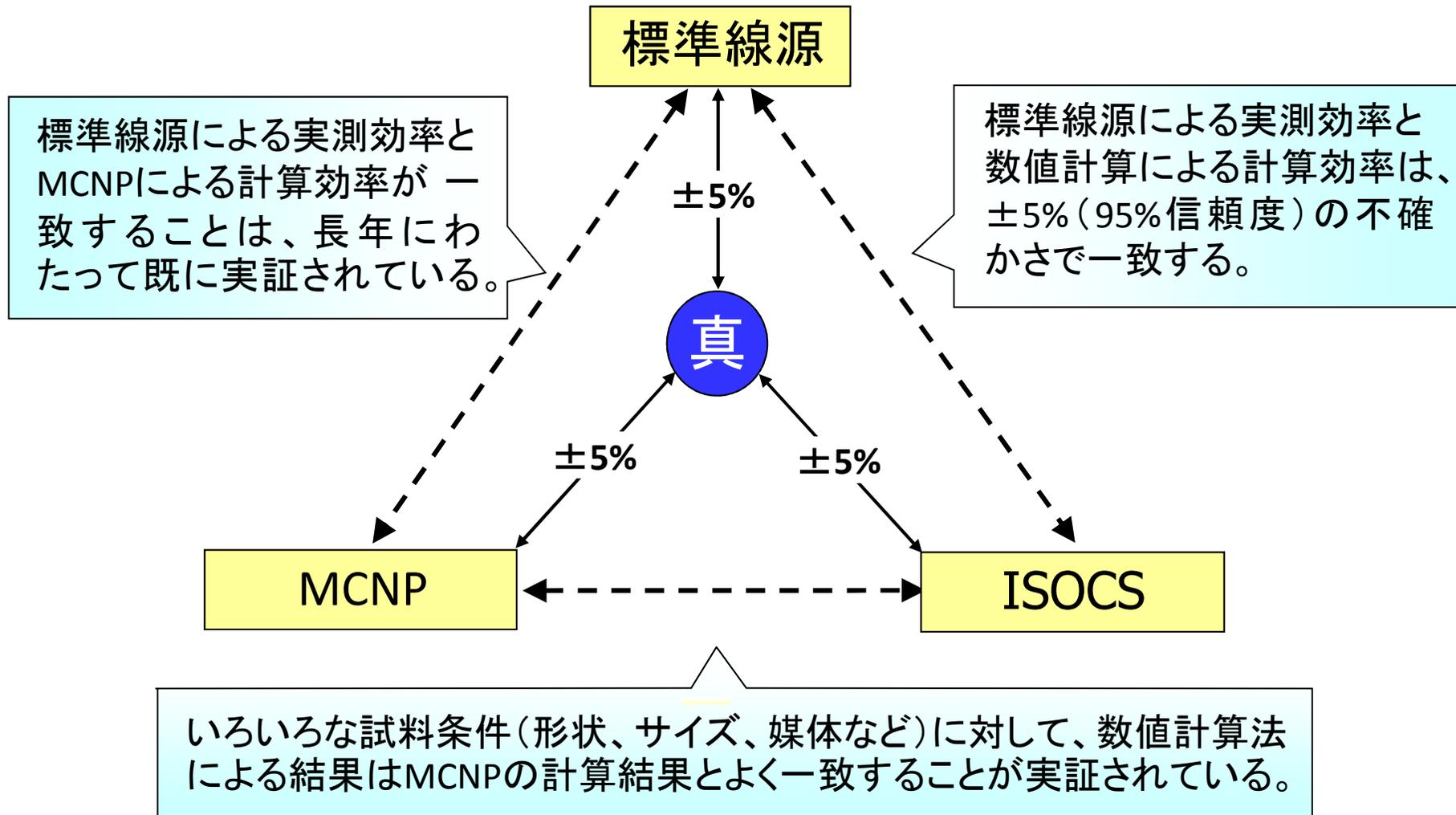
↑
エネルギー
経路、媒質

N ボクセル、 ϵ^{vac} 減弱効率、W 加重係数、 μ 減弱係数、T 吸収体の厚み、i ボクセル数、j エネルギー、k 経路中の物質の種類





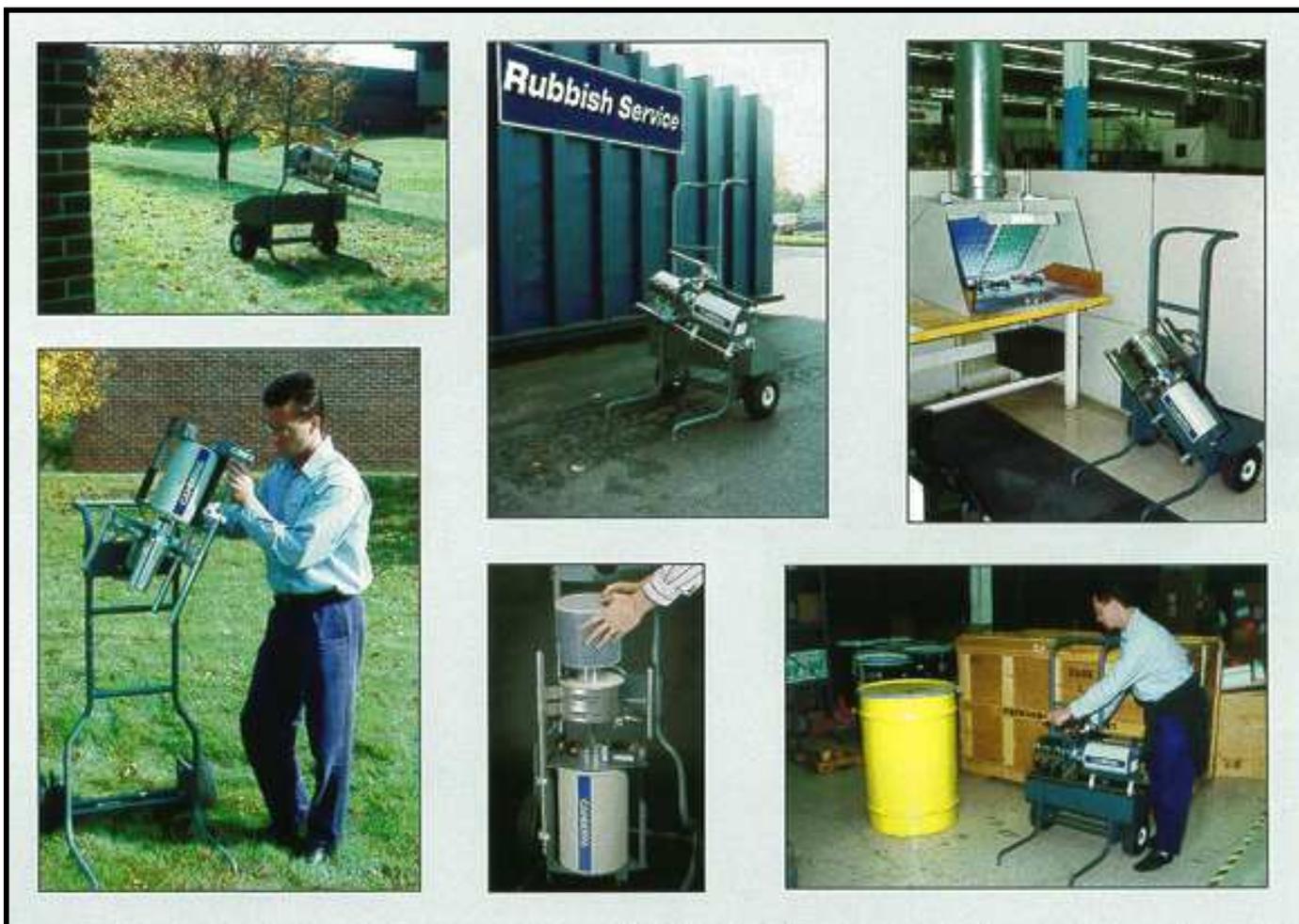
数値計算法(ISOCS)、MCNP、標準線源法による 効率の比較・不確かさ





ISOCS の世界での適用①

様々なin-situ測定





ISOCSの世界での適用②

世界中のD&Dの現場

▶ 特性評価の例

- ◆ マルクール地区での換気ダクトの測定 (CEA - フランス)



- ◆ ティアンジュ3発電所におけるSG取替での測定サービス(ベルギー)



- ◆ シーブルック発電所での熱交換器のフリーリリース(米国)





ISOCS の日本での適用①

福島原子力発電所事故以降

▶ フードセーフ

30kgの米袋のスクリーニングに使用

ホールボディカウンタと同じ超大型NaI検出器を使用し、迅速なスクリーニングが可能



測定対象	30kg米袋
検出器	3×5×16インチ超大型NaI
効率校正	ISOCSによる数値計算と標準線源による校正確認
測定時間	10秒以内(100Bq/kg仕分け)
検出限界	25Bq/kg以下
測定精度	スクリーニングレベル60Bq/kg以上
遮蔽体	鉄10センチ厚
重量等	100H×320L×140Wcm 約2500kg



ISOCSの日本での適用②

福島原子力発電所事故以降

▶ あんぽ柿セーフ

あんぽ柿のスクリーニングに使用

あんぽ柿トレーに対し、専用設計の直方体NaI結晶を用いて最適な検出効率



- あんぽ柿をトレーごと非破壊検査が可能

測定対象	あんぽ柿(蜂屋柿、平核無柿トレー)
検出器	3×4×2インチNaI32個(1トレーあたり4個)
効率校正	ISOCSによる数値計算と標準線源による校正確認
測定時間	80秒程度
検出限界	25Bq/kg以下
測定精度	スクリーニングレベル70Bq/kg以上
遮蔽体	鉄10センチ厚
重量等	143H×90L×110Wcm 約4500kg

ISOCSの日本での適用③

福島原子力発電所事故以降

- ▶ フレコン濃度測定車
ラップサイレージやフレコンバックの測定



測定対象	ラップサイレージ、フレコンバックに詰めた除染廃棄物、米、木材チップ等
検出器	3×5×16インチ超大型NaI(LED温度補償タイプ)
効率校正	ISOCSによる数値計算と標準線源による校正確認
測定時間	30～60秒(30Bq/kg仕分け) 2～3秒(8000Bq/kg仕分け)
検出限界目安	15Bq/kg以下(30秒測定)
測定精度	1σ: 約20%(実証試験)
遮蔽体	鉄15センチ厚以上

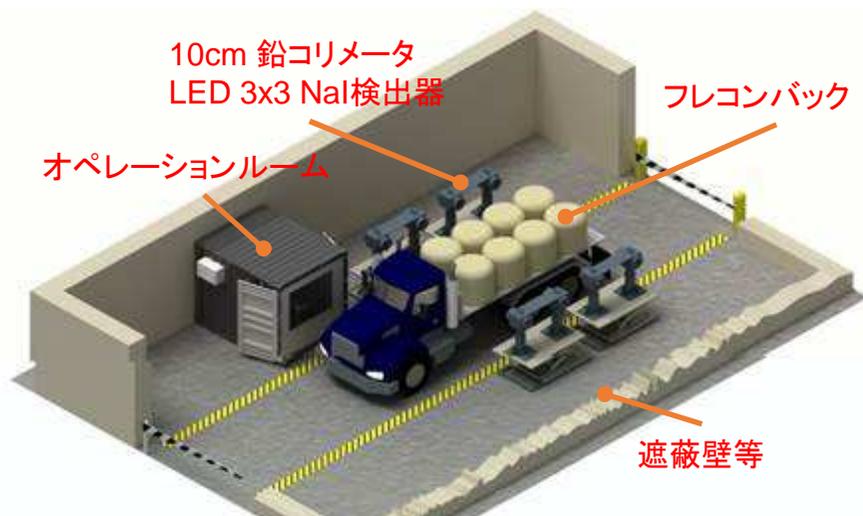


ISOCSの日本での適用④

福島原子力発電所事故以降

▶ TRUCKSCAN

フレコンバック等の測定 (特許番号:5926362号)



測定対象	トラック荷台に積載されたフレコンバック除染廃棄物等
検出器	コリメータ付3×3インチNaI検出器8個(LED温度補償タイプ)
効率校正	SuperISOCSによる数値計算と標準線源による校正確認 <u>(フレコンの積載状況により測定前にその都度校正)</u>
測定時間	30秒(8000Bq/kg仕分け)
検出限界目安	数百Bq/kg(30秒測定)
測定精度	1σ:20%以内(実証試験)

ISOCS の日本での適用⑤

福島原子力発電所事故以降

▶ 池底モニター
防火水槽やため池底土の測定



▶ フレコンバック単体測定装置
フレコンバックの非破袋測定





フレコンバック除染廃棄物の精密定量

▶ フレコンバック除染廃棄物の濃度測定法

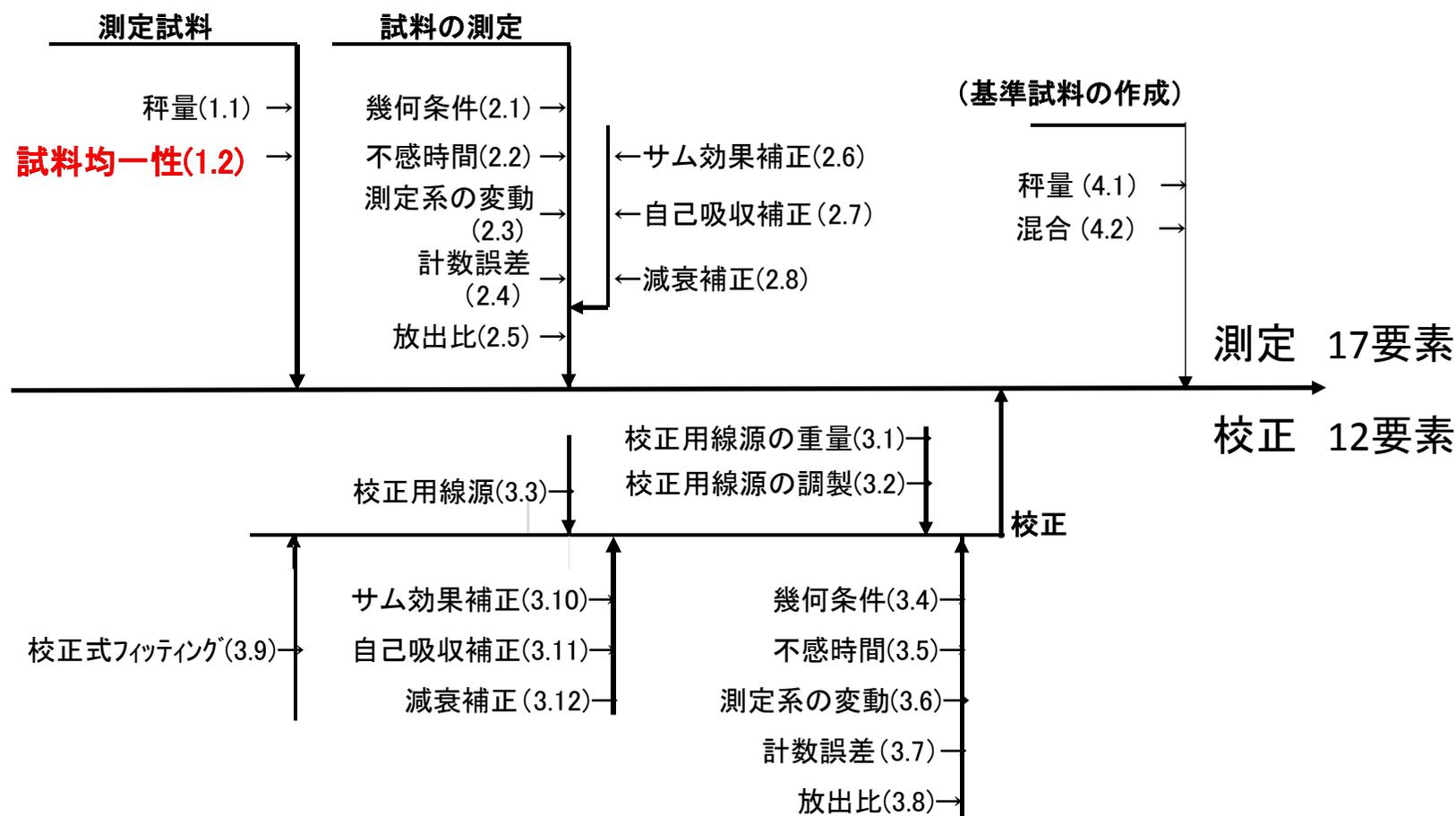
- ◆ サーベイメータ法（除染ガイドライン）
- ◆ サンプリング法
- ◆ In-situ法（現場測定法）
などがある

▶ 精密測定のために

- ◆ それぞれの測定法における測定に必要な誤差要素の把握
なかでも
- ◆ フレコンバックの特性（不均一性等）の把握が極めて重要

フレコンバック除染廃棄物の精密定量

▶ 相対合成標準不確かさを構成する要素



フレコンバック除染廃棄物の精密定量

▶ サーベイメータ法

表面線量を測定し、換算係数を使用して濃度換算

▶ 利点

◆ 簡便、機動性大

▶ 欠点

◆ 測定場所によってばらつき大（内容物が不均一の影響大）

◆ 簡便だが過大評価（2～12倍の実績もあり）

◆ 測定者の被ばく

◆ 周囲（バックグラウンド）の影響大

◆ 自然放射性核種
（カリウム、U系列、Th系列核種）の影響



フレコンバック除染廃棄物の精密定量

▶ サンプルング法

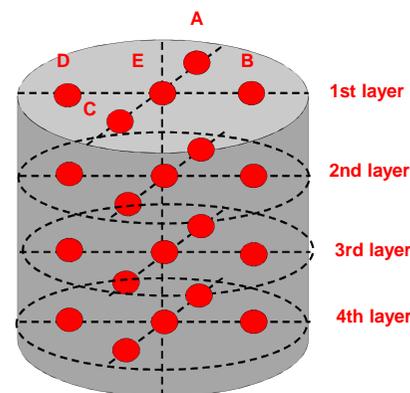
フレコンバックからコア抜き等でサンプルングし、ラボでGe等を用いて測定

▶ 利点

- ◆ 個々のサンプルングの測定は非常に精度が高い

▶ 欠点

- ◆ 内部不均一の影響が甚大（試料採取誤差が極めて大きい）
- ◆ 測定に時間がかかる
- ◆ 精度を向上させるためには、大量のサンプルングが必要



● サンプル採取点

放射線 安全性 さらなる水準へ



フレコンバック除染廃棄物の精密定量

▶ In-situ法

Ge検出器等を用いて現場で測定

▶ 利点

- ◆ 基本的に精度の高い測定が可能
- ◆ 測定時間が短い

▶ 欠点

- ◆ 標準線源を使用した通常の効率校正が困難

→ ISOCSで克服可能





フレコンバック除染廃棄物の精密定量

▶ 測定精度検証

- ◆ 複数のサイトで、複数のフレコンバックを選定
- ◆ 必要に応じ人工フレコンを作成(均一、不均一等)
- ◆ それぞれの測定法で測定し、結果を相互比較

▶ フレコンバック除染廃棄物の物理的特性の把握

- ◆ 相対合成標準不確かさを構成する誤差要素を確認

▶ 最適な測定方法

- ◆ 相対合成標準不確かさを最適化
- ◆ 適正な処理量を担保



フレコンバック除染廃棄物の精密定量

▶ サンプルング法の測定手法

- ◆ 複数のサイトで、複数のフレコンバックを選定
- ◆ サンプル数: 10~20個サンプル/1フレコン
- ◆ サンプル量: 1個当たり、500g程度
- ◆ 検出器: Ge検出器
- ◆ 効率校正: ISOCS及び標準線源
- ◆ 測定時間: 数分(計数誤差が概ね5%以内になる時間)
- ◆ 平均値と標準偏差を確認
- ◆ 相対合成標準不確かさを確認



フレコンバック除染廃棄物の精密定量

▶ サンプルング法の測定結果(一例)

◆ 複数のサイトで、複数のフレコンバックを選定(自然状態:20試料採取)

	Total-Cs			ばらつき1σ	
	平均	最小	最大	数値	%
サンプル1	15100	12200	17400	1500	9.9%
サンプル2	4520	2790	9740	1740	38.5%
その他10サンプル	2700-11000				3.9 - 30.7%
平均					16.6%

▶ 個々の測定は高精度だが、ばらつきは非常に大きい



フレコンバック除染廃棄物の精密定量

▶ In-situ法の結果

- ◆ 測定器: コリメータ付Ge検出器
- ◆ 効率校正: キャンベラ製ISOCS
- ◆ 複数のサイトで、複数のフレコンバックを選定
- ◆ フレコン1袋あたり、1方向、2方向、4方向、回転測定
- ◆ フレコンー検出器間は適度な距離を取る
- ◆ 測定時間は、計数誤差が十分小さくなる時間(目安5%以内)
- ◆ Ge検出器で測定
- ◆ 平均値と標準偏差を確認
- ◆ 相対合成標準不確かさを確認



フレコンバック除染廃棄物の精密定量

▶ In-situ法の結果(一例: サイトA)

	Total-Cs			ばらつき1σ	
	平均	最小	最大	数値	%
サンプル1	13400	12900	14300	800	6.0%
サンプル2	4130	3270	5060	760	18.5%
その他12サンプル	2100-12800				2.4 – 13.1%
平均					6.9%

▶ ばらつき1σ: 4方向測定 of 標準偏差



フレコンバック除染廃棄物の精密定量

▶ In-situ法の結果(一例: サイトB)

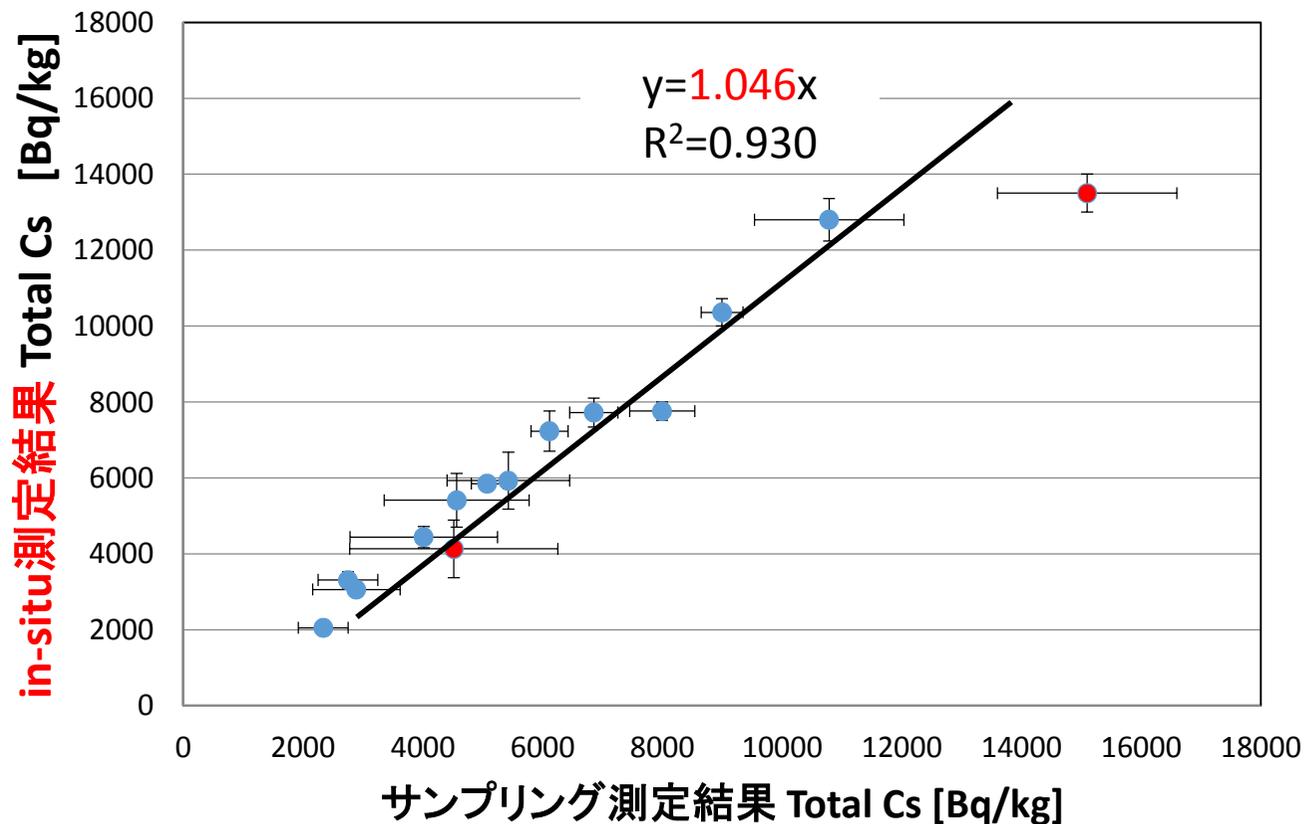
	サンプル数	Total-Cs		ばらつき1σ	
		最小～最大	平均	%(範囲)	%(平均)
土壌	51	2590-24400	19200	1.4-18.5	6.0
可燃物	16	330-4030	1920	2.7-20.0	9.6
高濃度汚染物	2	142000-228000	185000	5.5-13.2	9.4

▶ ばらつき1σ: 4方向測定 of 標準偏差



フレコンバック除染廃棄物の精密定量

▶ サンプルング法とIn-situ法の結果比較(14フレコン)



ばらつき1σ : 2.9 – 18.5% 平均6.9% (in-situ)

: 3.9 – 38.5% 平均16.6%(Sampling)

放射線 安全性 **さらなる水準へ**



フレコンバック除染廃棄物の精密定量

▶ サンプルング法 VS In-situ法(まとめ)

- ◆ 測定値の平均: 同等 (相関式 $y=1.046x$, $R^2=0.930$)
- ◆ 濃度偏在の影響
 - サンプルング法 : 約20%^{※1}
 - in-situ測定 : 7%程度
- ◆ 相対合成標準不確かさ
 - サンプルング法 : 20%以上 (25%程度が多い)
 - in-situ測定 : 10 %程度^{※2}

※1 サンプルング数が10~20体の場合
(サンプルング数が数体の場合は更に大きい)

※2 効率校正を適切に行った場合



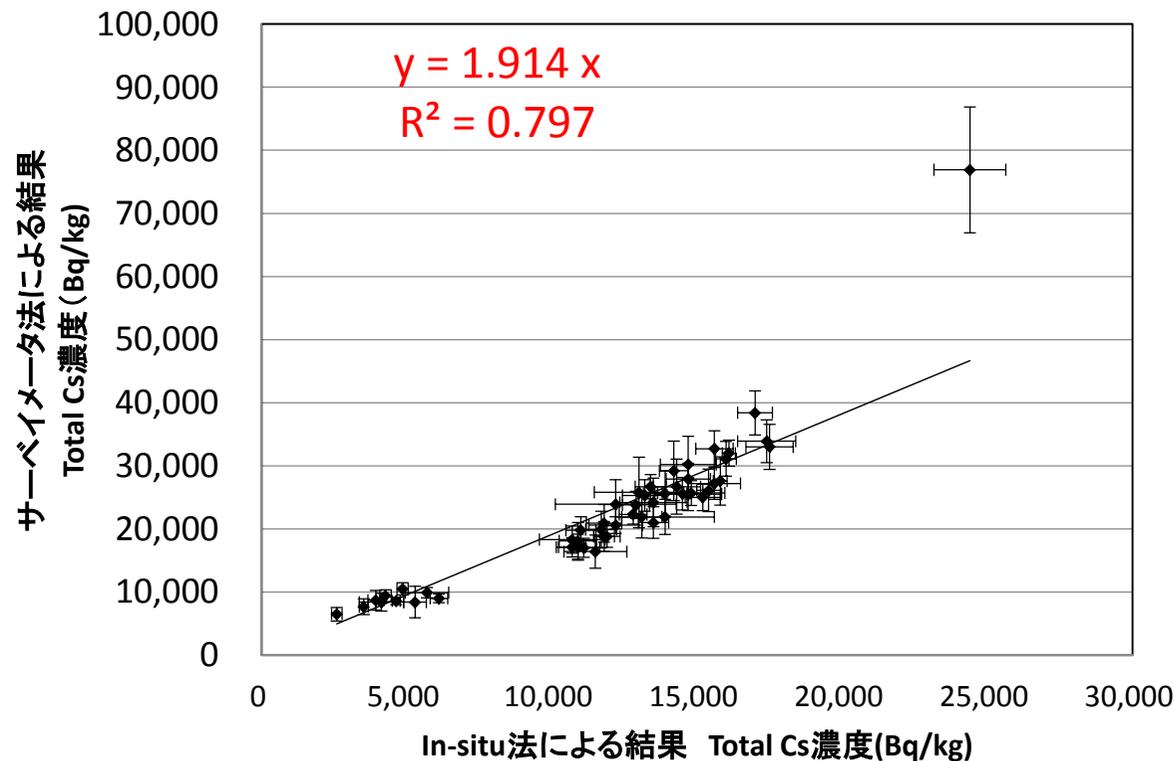
フレコンバック除染廃棄物の精密定量

▶ サーベイメータ法の結果（一例：サイトB）

- ◆ 測定器：日立アロカ製 NaIサーベイメータ（コリメータ使用）
- ◆ 測定場：遮蔽土のう積み上げ、遮蔽鉄板敷設、低BG化
可能な限り理想的な測定場とする
- ◆ 測定時間：1箇所当たり、値が安定するまで2分程度待機
- ◆ 濃度換算：5箇所の測定結果を平均し、除染ガイドラインに記載の方法で係数を乗じて算出
- ◆ 試料数：51試料
- ◆ In-situ測定の結果と比較

フレコンバック除染廃棄物の精密定量

▶ サーベイメータ法の結果 (in-situ測定結果と比較: 51試料)



ばらつき 1σ

: 2.9 – 18.5% 平均6.9% (in-situ)

: 6.4 – 29.8% 平均9.4% (サーベイメータ)

放射線 安全性 **さらなる水準へ**

フレコンバック除染廃棄物の精密定量

▶ 各測定手法の精度比較

相対合成標準不確かさの算出(単位%)

不確かさの要素	In-situ法	サンプリング法		サーベイメータ法	
		10-20試料	3試料	5箇所平均	1箇所
フレコン内の濃度偏在	7.6	16.6	25	9.4	20
効率校正	5	5	5	10	10
測定(計数誤差)	3	5	5	10	10
バイアス	なし	なし	なし	2倍以上	2倍以上
相対合成標準不確かさ	9.6	18	26	17	25

※1 in-situ法は4方向測定の1 σ

サンプリング法は、採取数(12又は20)の各測定の1 σ

サーベイメータ法は、測定(4回又は5回)の各測定1 σ

▶ まとめ

◆ フレコン測定では、In-situ法が最もばらつきが小さく、精度良く測定が可能



考察

▶ In-situ法の測定の最適化

- ◆ 測定時間
- ◆ 4方向、2方向、1方向、回転法による測定結果のばらつき(サイトAにおける事例紹介)
- ◆ En数で判定(サンプリング法との比較)

測定法	評価試料数	En数 1σ ※1	
		(範囲)	(平均)
1方向測定	14	0.01-0.98	0.41
2方向測定	14	0.06-0.74	0.41
4方向測定	14	0.10-0.61	0.37
回転測定	14	0.14-0.60	0.35

- ◆ 測定時間[8000(3000)Bq/kgのスクリーニング]

NaI(1個):5秒程度(15秒程度)

Ge(1個):20秒程度(40秒程度)

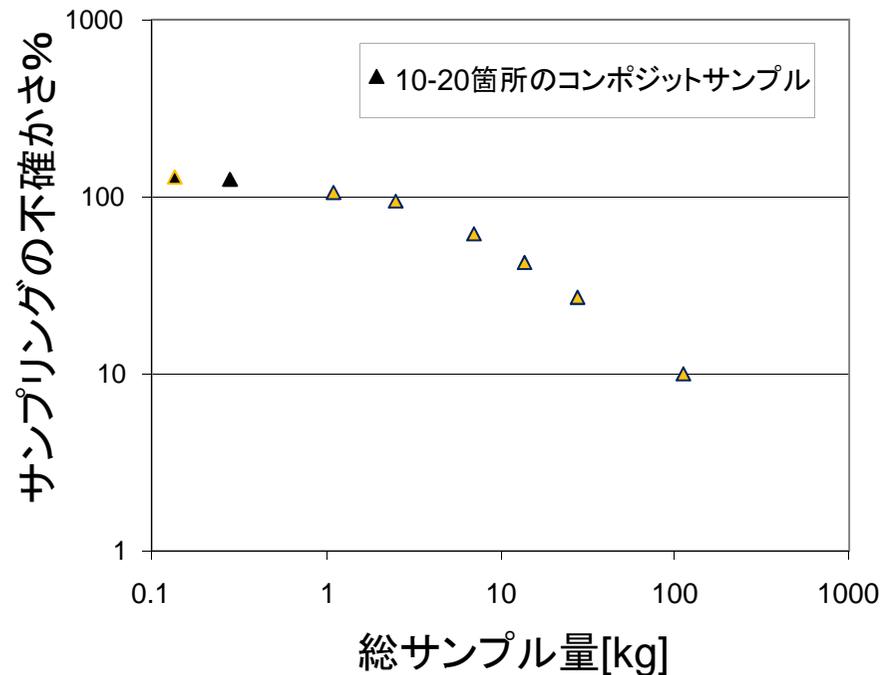
※ 周辺BG等の影響により値は変動する

考察

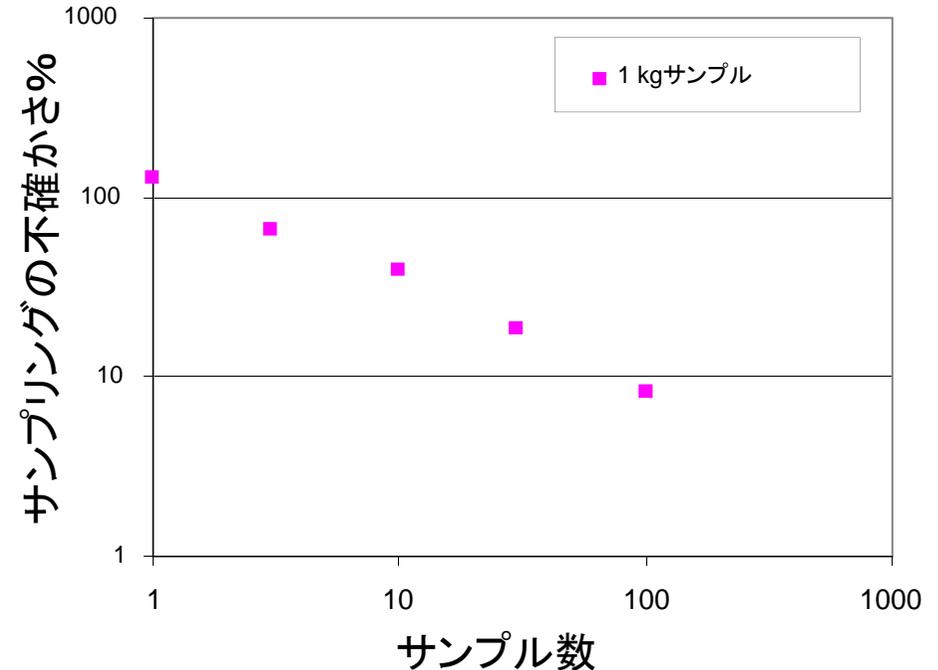
▶ サンプルング法の測定の最適化(1tフレコンの場合)

- ◆ フレコン内の不均一の影響を最小限にする
→ 採取量、採取場所を最適化する必要あり

サンプルング誤差評価1



サンプルング誤差評価2



- ◆ サンプルング法でin-situ法の精度を出すためには
コンポジットサンプルを合計100kg採取する
1kgサンプルを100個採取する等が必要



考察

- ▶ サーベイメータ法の最適化
 - ◆ 測定場のBGを低減
 - ◆ コリメータを使用
 - ◆ 測定時間を長く取る
 - ◆ 測定場所を増やす
- ▶ それでも限界はある



まとめと今後の課題

▶ フレコンバックの精密定量

- ◆ In-situ測定が最適

但し

- ◆ 適切な測定時間
- ◆ 測定器－測定試料間距離
- ◆ 回転や複数方向測定
- ◆ 適切な効率校正
が必須
- ◆ 相対合成不確かさ:概ね10%程度

▶ サンプル測定

- ◆ サンプル誤差の影響が甚大
- ◆ 濃度決定に注意が必要
- ◆ 相対合成不確かさ:20%程度(サンプル数10個程度の時)



ご静聴ありがとうございました