

AI技術の活用による 除去汚染土壌モニタリングシステムの開発

(JPMEERF20191R01)

**【1RF-1901】 委託・革新（若手）
2019年度～2021年度**

重点課題④：災害・事故に伴う環境問題への対応に貢献する研究・技術開発



TOKYO METROPOLITAN UNIVERSITY

東京都立大学

井上 一雅

研究協力機関：徳島大学、香川大学

環境研究総合推進費 事後評価ヒアリング
Web会議システム（Zoom）による開催
令和4年7月21日（木）

研究の背景

福島第一原子力発電所事故により生じた汚染土壌に対する「**除染作業の合理化**」と「**仮置場・中間貯蔵施設・埋立て処分場での適正管理**」が求められている。

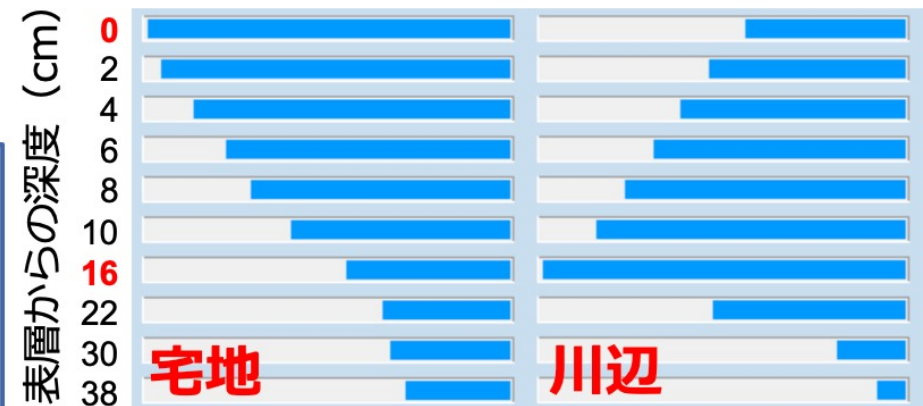
除染作業の合理化

- 土壌種や地形に依存して深度分布が異なる
- 深度分布調査により剥ぎ取り厚の最適化が必要

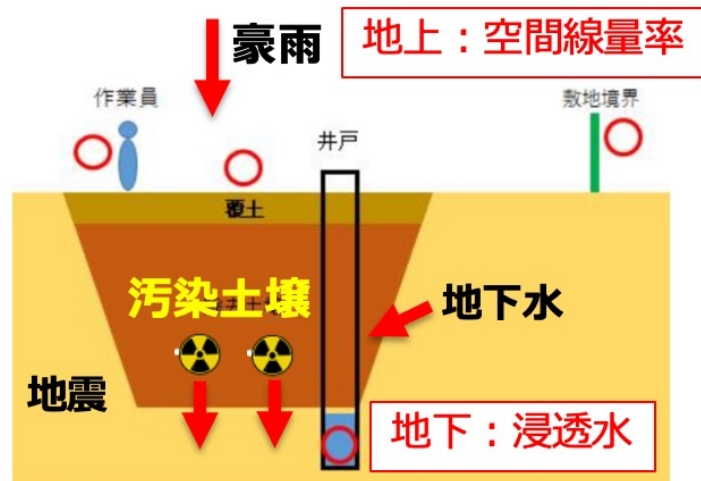


- 正確な調査が可能
- 結果を得るまでに**1週間を要する**
- 現場で結果が得られず**非効率**
- 調査地点が**平坦な場所に限定**

放射性セシウムの深度分布（放射能濃度）



除去汚染土壌の適正管理



栃木県那須町HP 埋立て処分場所（実証実験）

汚染土壌：約1400万m³、仮置場等総数：約1300箇所

- 定期的な計測(月1回)にとどまる
- 想定すべき豪雨災害および地震、地下水の浸水等による放射性セシウムの沈降を長期的にモニタリングすることが必要
- **汚染土壌中の放射能濃度を直接計測する方法が必要**
(環境省内 除去土壌の処分に関する検討チーム会合議事録)

任意の現場で深度分布調査を完結できる「可搬型深度分布測定器」と「除去汚染土壌用のモニタリングシステム」の開発が求められている

環境研究総合推進費 革新的研究開発 (若手)

【実施済：2016~2018年度】

検出器

CsI(Tl)
1cm³, 20個



計測時間: 10分 ← 作業時間: 1週間

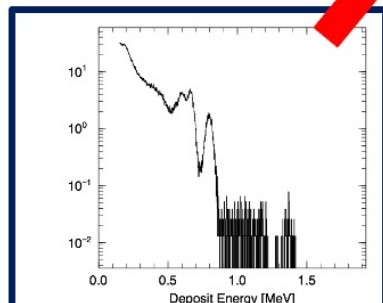
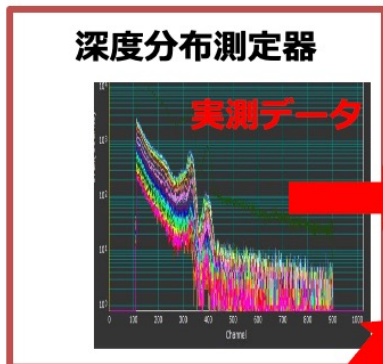
各深度の放射能濃度の算出方法

実測データの取得 (帰還困難区域)

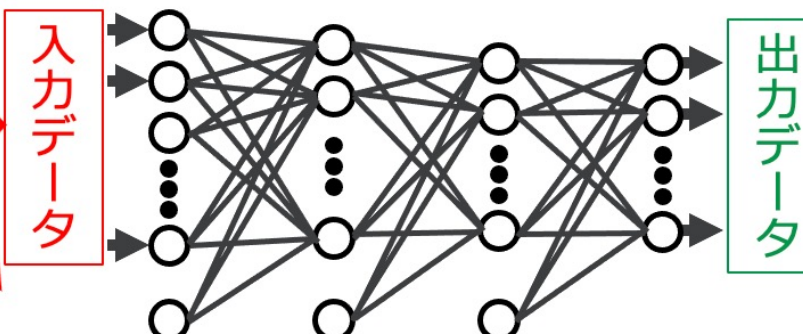
実測データを模擬可能なシミュレーション体系の構築

AI学習に必要な大量のデータを実測のみで取得することは困難なため

40 cm



20480個 1024個 256個 20個

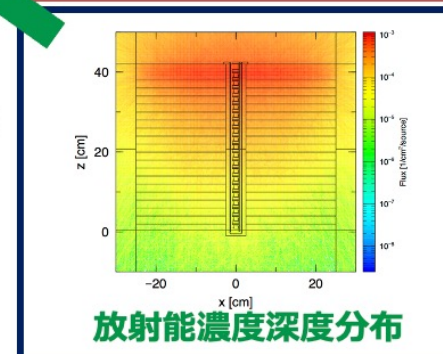


階層型ニューラルネットワーク

入力データ数: 20,480個 (=1024ch × 20シンチレータ)

「人工知能の機械学習」

未知の入力 (計測) データ
各層において正確な放射能濃度を算出



本研究に関連する研究

大阪大学	JAEA	JST 富士電機	東京都立大学
<p>サンプリング法 (In-Situ測定ではない)</p>	<p>サンプリング法 (In-Situ測定ではない)</p>	<p>In-Situ測定 (ただし、サンプリング必要)</p>	<p>In-Situ測定 (サンプリング不要)</p>
<p>鉄パイプで土壌をサンプリング、<u>コリメータ付Ge</u>で測定</p>	<p>ジオスライサーでサンプリング、イメージングプレートで測定</p>	<p>In-Situ測定ではあるが、土壌のサンプリングは必要。車に100kgの測定器を搭載。</p>	<p>小型軽量 (12 kg)</p>
<p>定量せず (カウント評価)</p>	<p>定量せず (カウント評価)</p>	<p>定量可 (スペクトル解析可)</p>	<p>定量可 (スペクトル解析可)</p>
<p>平成24年3月発表</p>	<p>平成24年3月発表</p>	<p>平成25年3月発表</p>	<p>～令和3年度末</p>
<ul style="list-style-type: none"> 測定時間がかかる。 土壌を測定室に持ち帰る必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 測定時間がかかる。 土壌を測定室に持ち帰る必要がある。 測定場所が限定される。 大型重機が必要である。 	<ul style="list-style-type: none"> 測定場所が限定される。 専用の車が必要である。 	<ul style="list-style-type: none"> 効率的な測定（測定時間が30分以内）、現場で結果確認が可能 防水加工による水中測定が可能



一般市民レベルで取り扱いが容易な「**可搬型深度分布測定器**」および中間貯蔵施設向けの「**除去汚染土壤モニタリングシステム**」の開発

研究目標 1 : 測定器の開発

設置型除去汚染土壤モニタリングシステム（仮置場等向け）

可搬型汚染土壤計測システム（除染作業者・行政機関向け）



完全防水化、電源装置およびデータ転送部の搭載

研究目標 2 : シミュレーションおよびAI学習精度の向上

ニューラルネットワークの構造の改良と学習データの収集
測定精度 : $\pm 10\%$ 以下

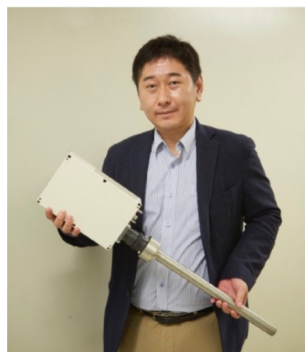
研究目標 3 : 実証実験の結果を踏まえた装置改良

小型化(装置容積 従来比1/2)、重量(5kg以下、従来比1/2)

可搬型深度分布測定器



**小型・軽量
無線・防水化**

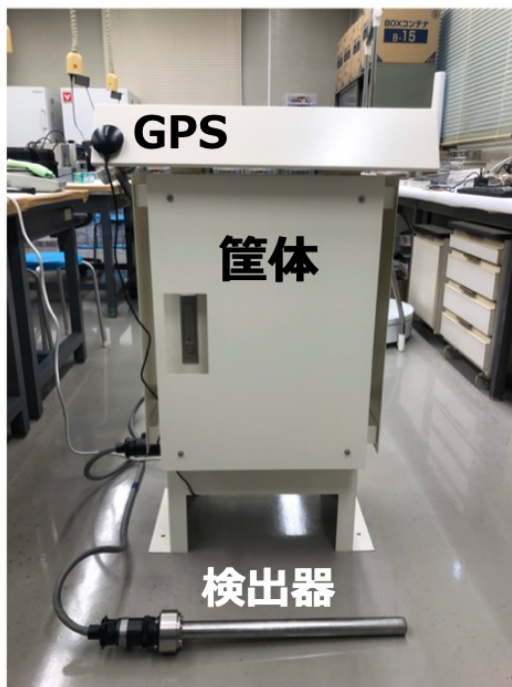


大きさ : 270×170×146 mm
検出器重量 : 1.8 kg
本体 : 10 kg (計11.8 kg)

大きさ : 240×160×90 mm
検出器重量 : 1.8 kg
本体※ : 2.6 kg (計4.4 kg)
※バッテリー重量含む

部位	可搬型
波形整形アンプ	アクティブフィルタ型波形整形 (波形整形時定数 : 2 μ s) 増幅率 2.0 keV/ch 測定可能レンジ 150 keV-1800 keV 入出力チャンネル 20 ch
パルス波高分析	ピークセンシングADC コンバージョン分解能 1024 ch
性能	エネルギー分解能 8.0% (Cs-137 662 keV) エネルギー校正 2.0 keV/ch (\pm 5%)
制御プロセッサ	ステック型PC (BLKSTK2M364CC BLKSTK2M364CC) CPU: Intel® Core m3-6y30プロセッサ 64 GB eMMC OS: Windows10
表示部	Wi-Fiにて外部パソコンから制御・表示可能
電源	大容量モバイルバッテリー: USB出力1 +5.0 V 2.1 A (max) (制御プロセッサ用) USB出力2 +5.0 V 1 A (max) 容量 23000 mAh 外部電源 AC電源アダプタ
データ記録	USBメモリ
インターフェイス	無
GPS受信器	Bluetooth対応GPS (HOLUX社M-241)
接続ケーブル	JIS-B-6015に準拠した防水丸型ワンタッチ ロックコネクタ ケーブル長 2 m

設置型除去汚染土壤モニタリング装置



部位	モニタリング型
波形整形アンプ	アクティブフィルタ型波形整形 (波形整形時定数: 2 μ s) 増幅率 2.0 keV/ch 測定可能レンジ 150 keV-1800 keV 入出力チャンネル 20 ch
パルス波高分析	ピークセンシングADC コンバージョン分解能 1024 ch
性能	エネルギー分解能 8.0% (Cs-137 662 keV) エネルギー校正 2.0 keV/ch (\pm 5%)
制御プロセッサ	産業用コンパクトPC (uIBX-250-BW-N3-R20) CPU: Intel® Celeron® N3160 (up to 2.24 GHz, quad-core, 2 MB cache, TDP=6W) OS: Windows10
表示部	8インチHDMIマルチ モニター (LCD-8000VH2B)
電源	AC100 V 外部蓄電池&ソーラー発電システム接続可能
データ記録	内部HDD保存
インターフェイス	LAN、USB
GPS受信器	GlobalSet社 (BU-353S4)
接続ケーブル	JIS-B-6015に準拠した防水丸型ワンタッチロックコネクタ ケーブル長 2 m

無線・防水化



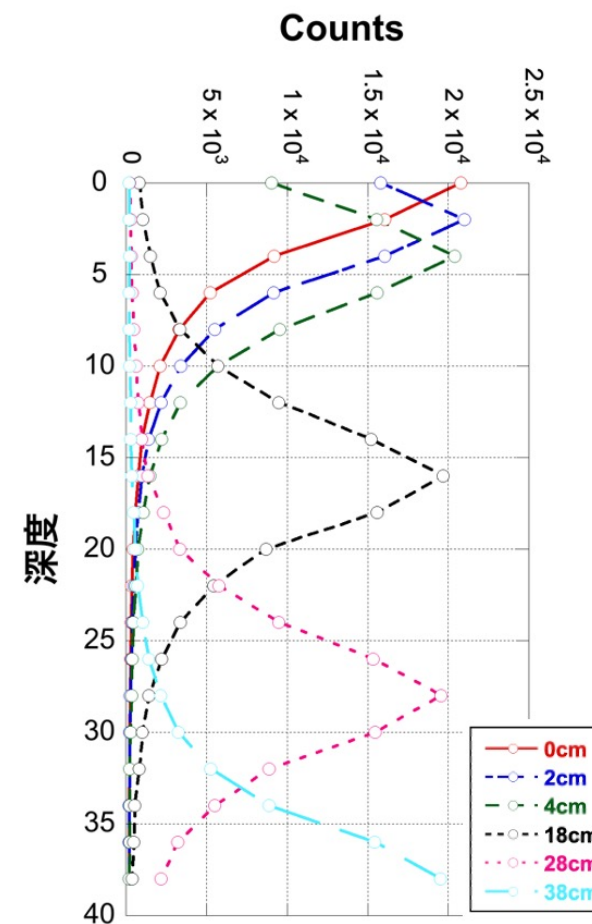
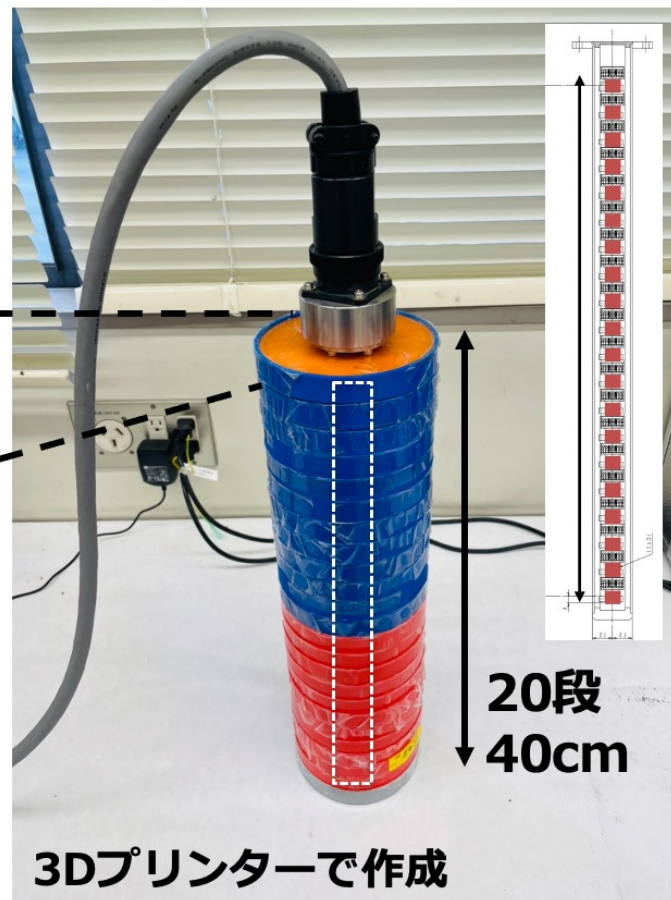
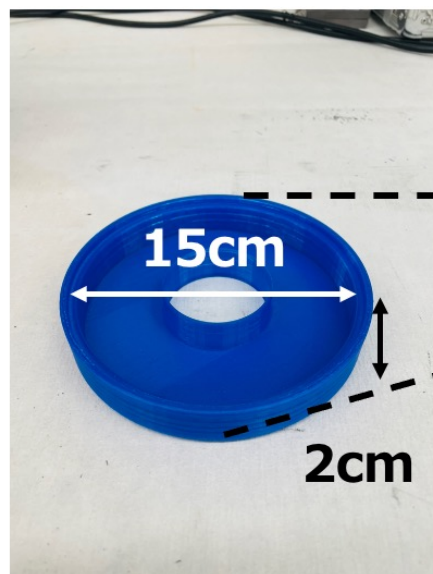
新たに開発



大きさ : 583×941×473 mm
検出器重量 : 1.8 kg
本体 : 40 kg (計41.8 kg)

校正場の設置と学習データの収集

放射性セシウム面線源 (線源強度 : 693, 468, 332 kBq/kg)
任意の層に設置



学習データの取得 390パターン (1層 : 60パターン、2層 : 114パターン、3層 : 108パターン)

DLNNの正解率向上

現地調査例（可搬型測定器）

穴掘り(40cm)

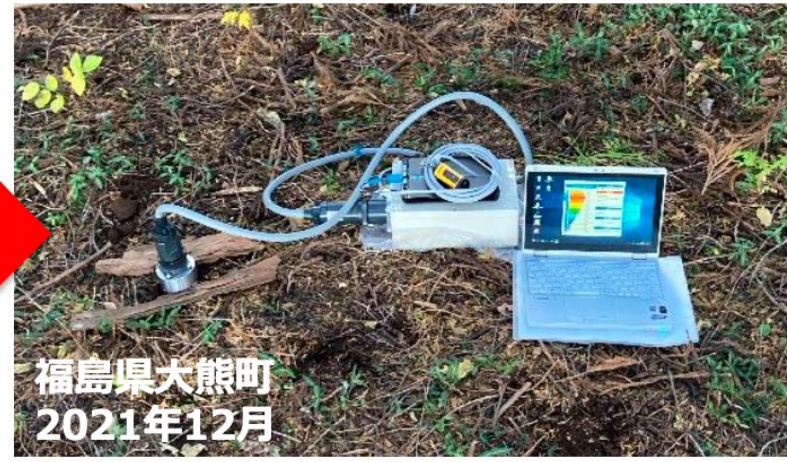


DDS設置



15.75 μ Sv/h

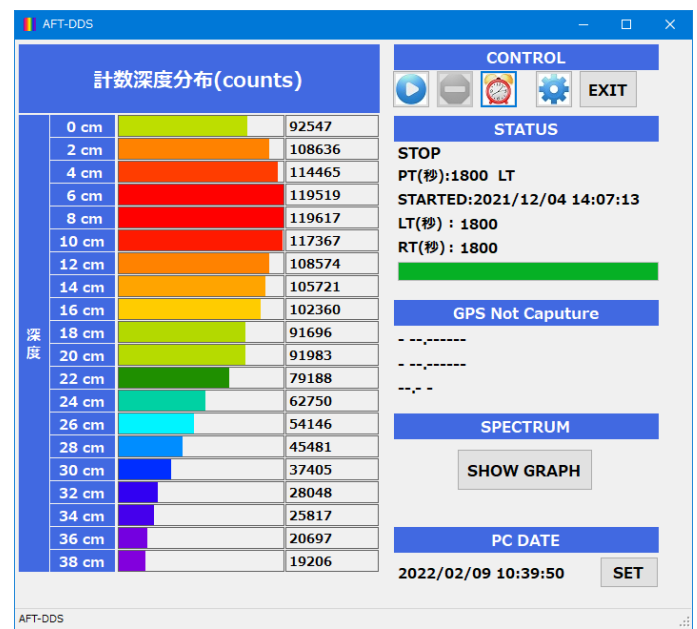
計測(30分)



福島県大熊町
2021年12月

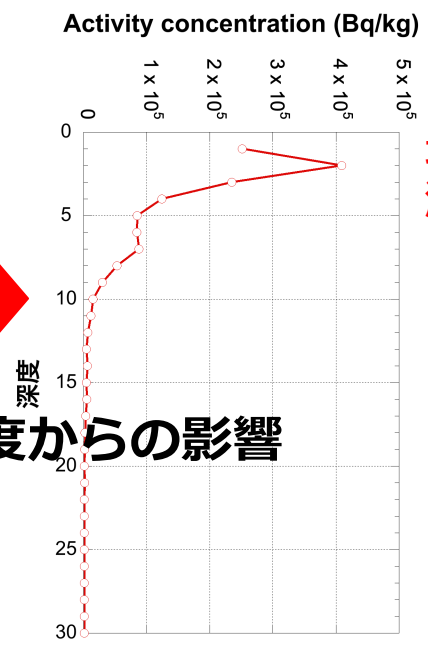
計測結果の代表例

DDS生データ

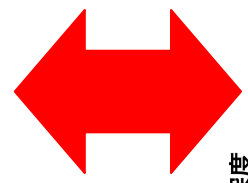


最大放射能
濃度 : 8cm

HPGe計測結果



最大放射能
濃度 : 2cm

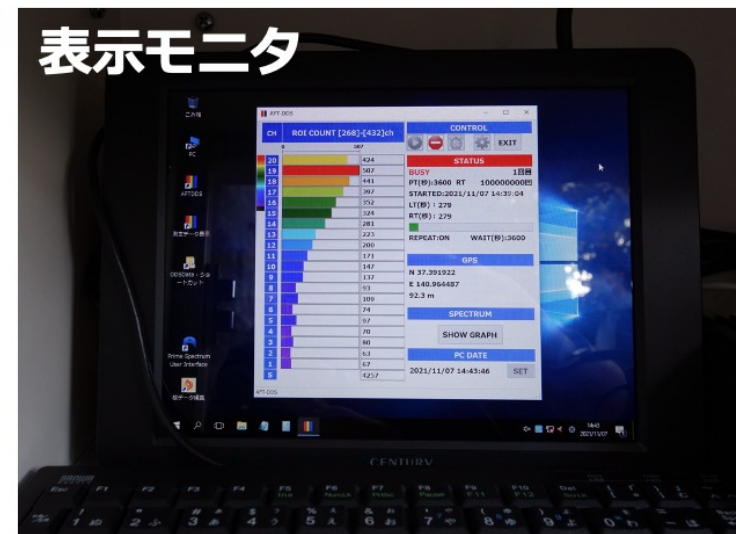
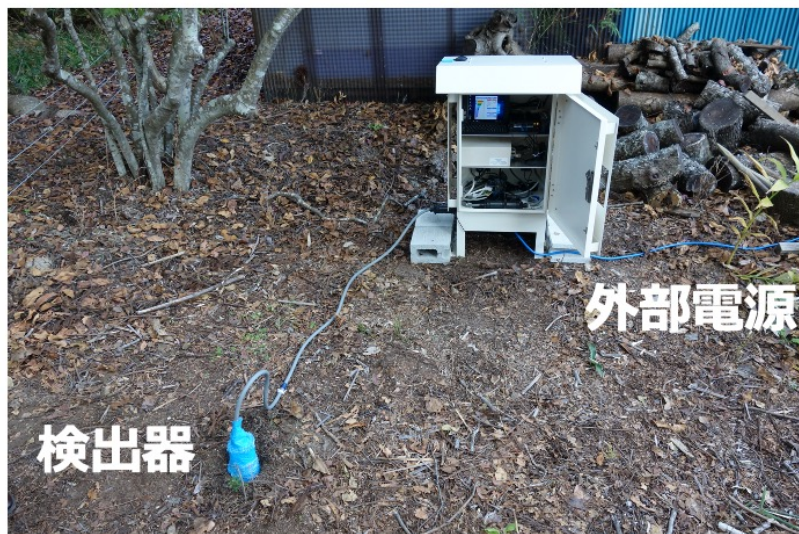


周辺深度からの影響

現地調査例（設置型測定器）

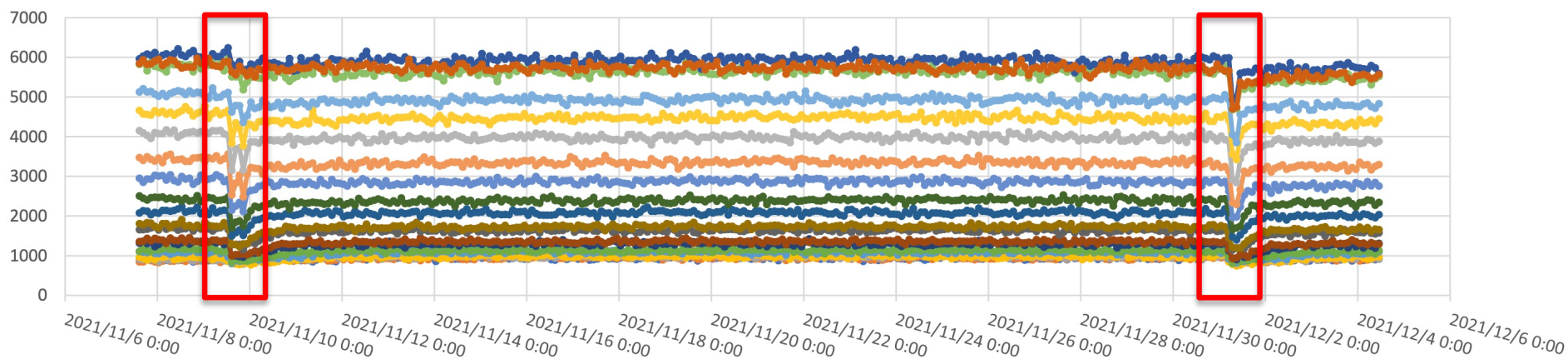
設置場所：福島県大熊町 民家裏山

設置期間：2021年11月～12月（1ヶ月）



経時的変化

CH1 CH2 CH3 CH4 CH5 CH6 CH7 CH8 CH9 CH10
CH11 CH12 CH13 CH14 CH15 CH16 CH17 CH18 CH19 CH20

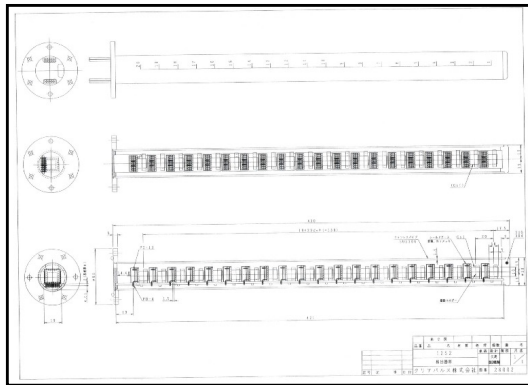


シミュレーション計算体系の構築

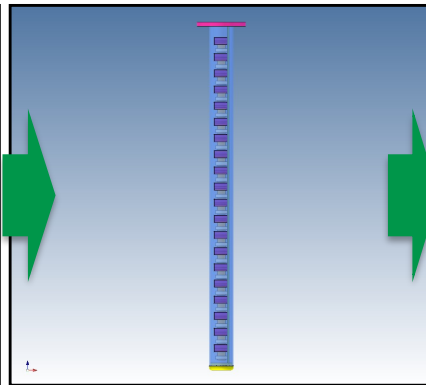
シミュレーション体系の構築

任意の位置に線源を配置して実測データの収集を再現可能な計算体系

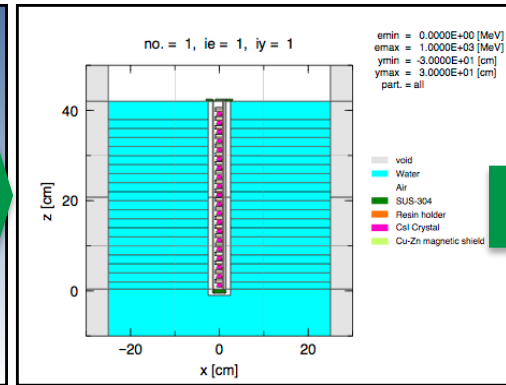
設計図



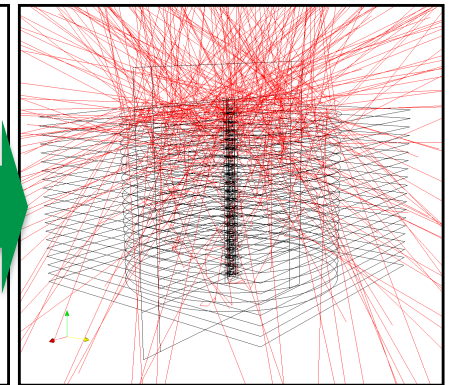
3D CAD



シミュレーション体系



3D出力データ

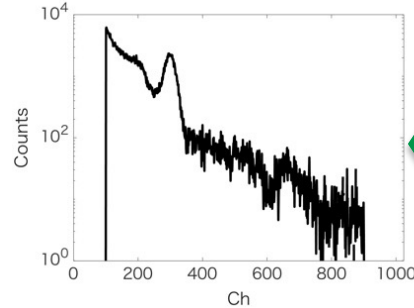
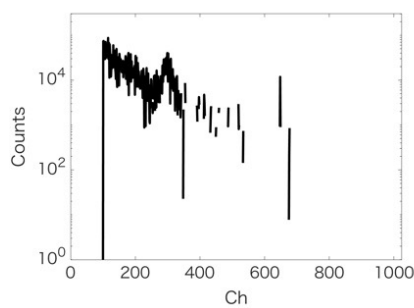


総光子数（ヒストリー数）の最適化

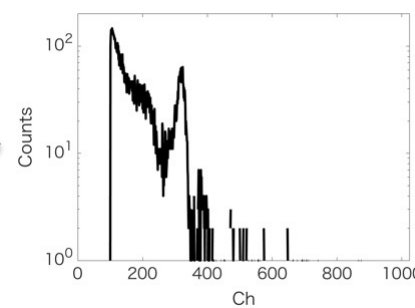
シミュレーション結果（入力データ）

総光子数：1千万

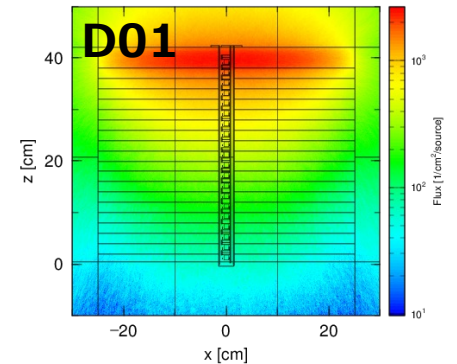
総光子数：1億



実測結果（入力データ）



D01に線源を設置（出力データ）



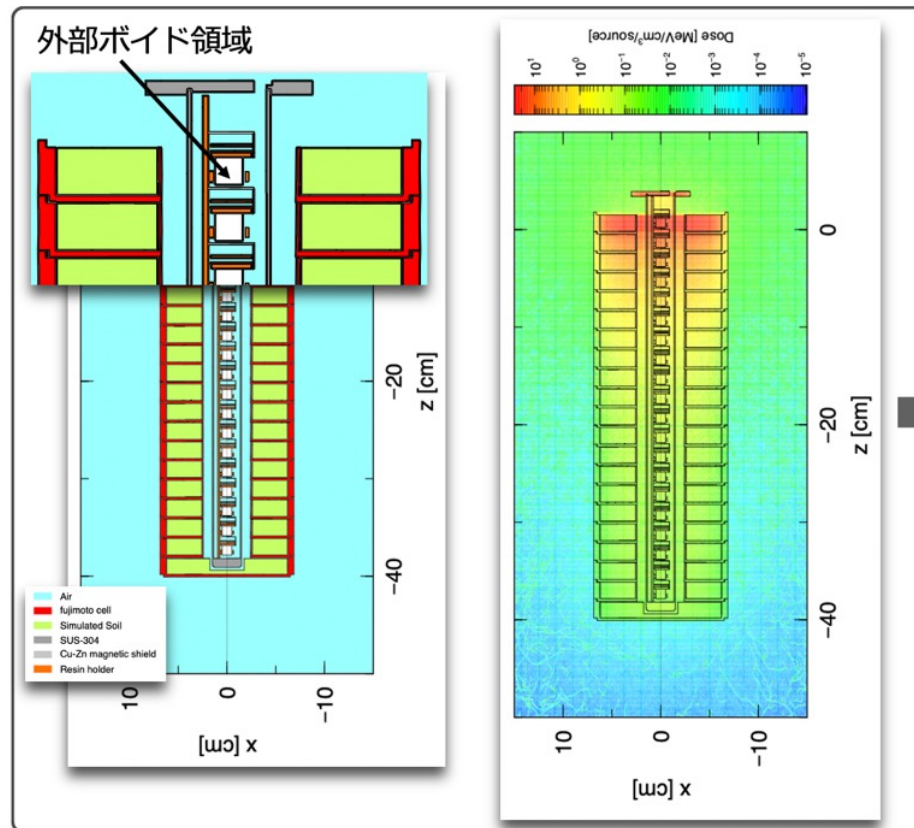
類似度評価 ⇒ 総光子数 1 億

1 データセットあたりの計算時間 50 時間

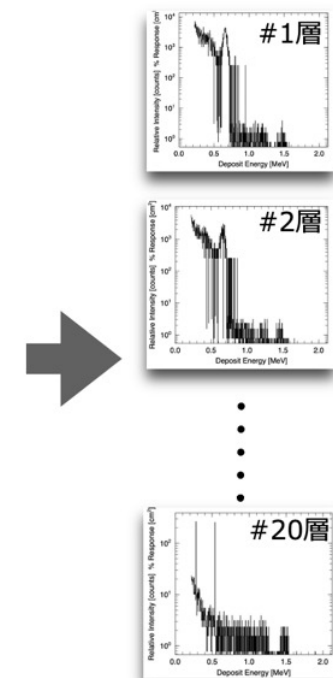
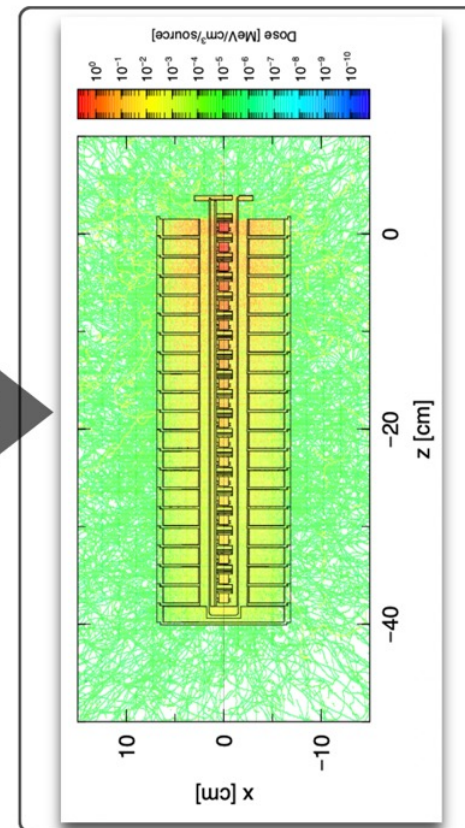
Dumpデータベース化

- Dump①：検出器（20個）自体を外部ボイドとして、それらの中に入るまでの情報を生成
Dump②：放射線のランダム性は維持しつつ、20個の検出器内だけで計算

Dump①段目の計算



Dump②段目の計算

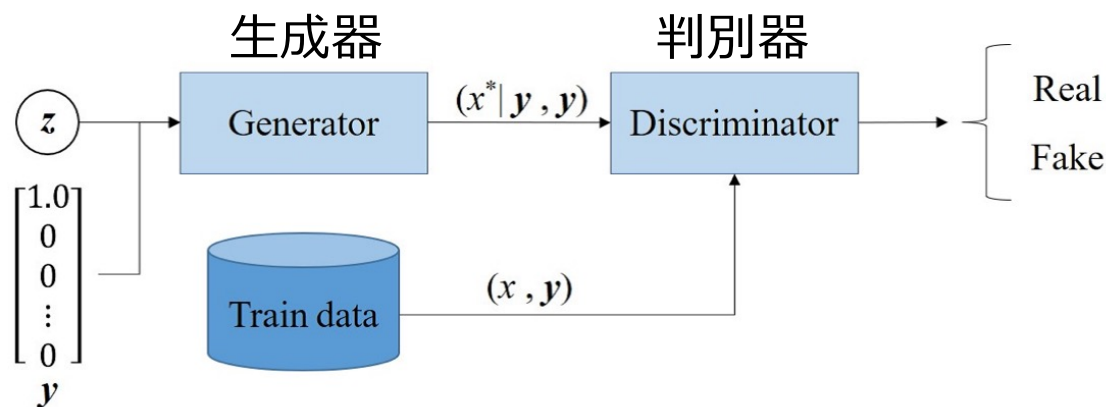


計算時間：従来の50時間から1.5時間に短縮

ヒストリー数を1億と設定して400個（20層×20セット）作成

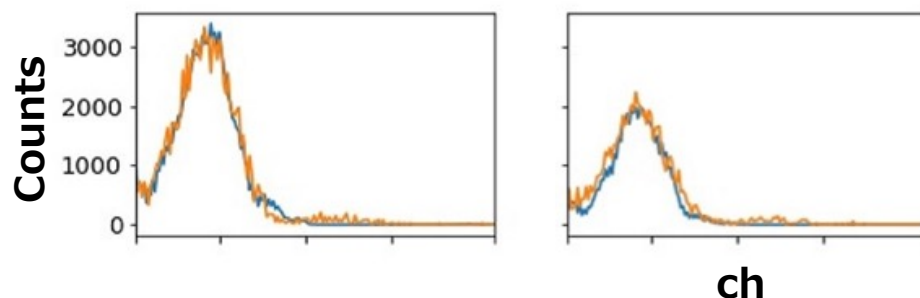
条件付き敵対的生成ネットワークを用いたデータ拡張

シミュレーションで作成したデータセットをベースとして大量の学習用データを用意するためにデータ拡張（データの水増し）



生成器：ノイズ z と放射線源の位置と強度を表す条件ベクトル y から擬似スペクトルデータを生成

判別器：正解とするシミュレーションデータと生成器から出力された擬似データとを比較することで擬似データの真贋を判定



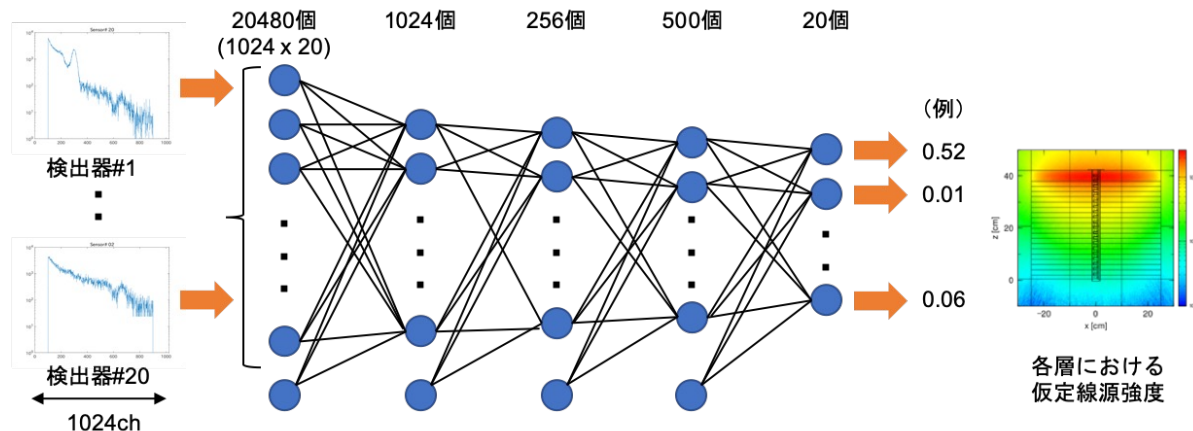
敵対的生成ネットワーク（青）
シミュレーション結果（橙）

単一層に強度1.0の放射線源が存在する条件ラベルを条件付き敵対的生成ネットワークに与え、1層ごとに6,000個、**計120,000個の疑似データ**

深層ニューラルネットワークの最適化

5層階層ニューラルネットワーク

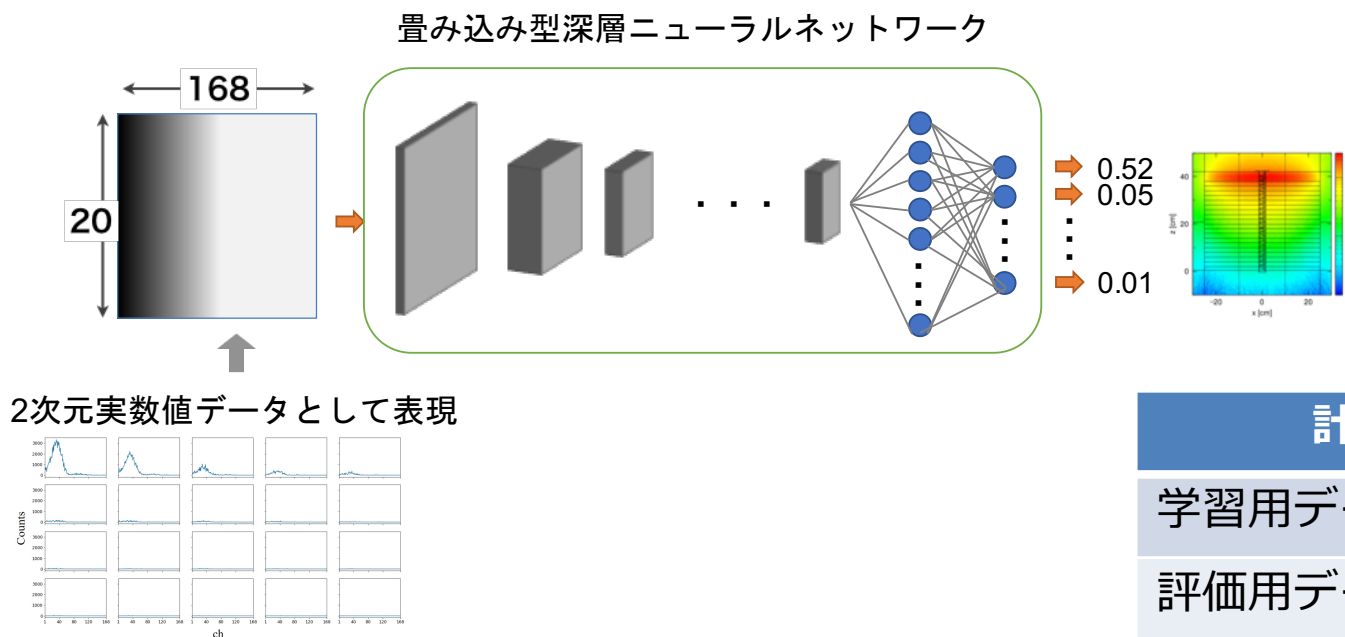
以前のモデル



計測精度	±10%
学習用データ	59.0%
評価用データ	17.7%

畳み込み型深層ニューラルネットワーク

新たに構築したモデル



計測精度	±10%
学習用データ($n=10$ 万)	100%
評価用データ($n=2$ 万)	100%

ニューラルネットワークを用いた実測結果の一例

福島県大熊町での実測結果

DDS計測生データ

AFT-DDS

計数深度分布(counts)

0 cm		92547
2 cm		108636
4 cm		114465
6 cm		119519
8 cm		119617
10 cm		117367
12 cm		108574
14 cm		105721
16 cm		102360
18 cm		91696
20 cm		91983
22 cm		79188
24 cm		62750
26 cm		54146
28 cm		45481
30 cm		37405
32 cm		28048
34 cm		25817
36 cm		20697
38 cm		19206

AFT-DDS

DLNN学習後のデータ

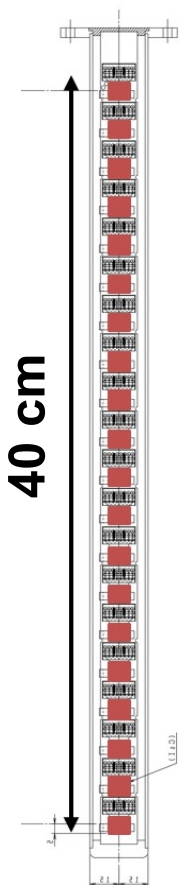
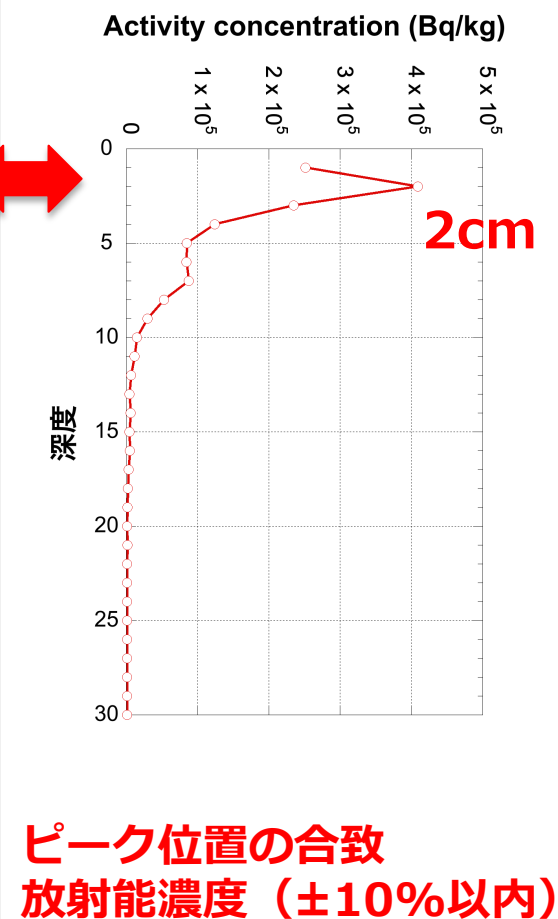
AFT-DDS

放射能濃度深度分布(Bq/kg)

0 cm		0
2 cm		433751
4 cm		0
6 cm		0
8 cm		0
10 cm		0
12 cm		0
14 cm		0
16 cm		0
18 cm		0
20 cm		0
22 cm		0
24 cm		0
26 cm		0
28 cm		0
30 cm		0
32 cm		0
34 cm		0
36 cm		0
38 cm		0

AFT-DDS

HPGe計測結果



環境政策等への貢献

統合領域（④重点課題） 別添資料1 P6-7

災害・事故に伴う環境問題への対応に貢献する研究・技術開発

【貯蔵】 仮置場・中間貯蔵施設（福島県内）

減容化の後、30年以内に県外最終処分場へ搬出

科学的な知見（データ）に基づいた管理

【処分】 埋立て処分場（福島県外：7県56市町村）（環境省内 除去土壌の処分に関する検討チーム）

国が定める処分方法に従って処分（未策定）

実証実験（栃木県那須町、茨城県東海村）

- どのようなデータを、どの頻度で、いつまで記録する？
- 福島県内の方々と比較して意識・理解が乏しい可能性
- 各市町村のニーズが異なる可能性



- 通常時の他に想定すべき豪雨・地震・地下水位上昇時のデータ提供 → **新たな科学的知見を提供**
- 市町村が独自に戦略を立てる場合の**材料を提供**
- 住民理解の深化 → **不安解消**
- 調査効率の向上 → **人材確保、経費削減**
労働者の負担軽減
面的な深度分布調査
- 新たな知見（見直し材料）を提供 → **管理の適正化**

特許

発明の名称：放射線測定装置 特許番号：特許6889476号
発明者：井上一雅、福土政広、阪間稔、藤本憲市
出願者：東京都公立大学法人

誌上発表(計3件)

M. SAKAMA, K. FUJIMOTO, K. INOUE, M. FUKUSHI, et al. : Radiation Protection Dosimetry, 184(1-3), 328-333 (2019) (IF:0.831) Feasibility study on the fusion of PHITS simulations and the DLNN algorithm for a new quantitative method of in-situ multiple-channel depth distribution spectrometer.

口頭発表(計3件)

阪間稔、藤本憲市、井上一雅、福土政広、今城裕介、福原隆宏、遠藤倫崇、川口絵里佳、濱邊大、神谷慶和、森本真壽：日本放射線安全管理学会第18回学術大会(2019)

「AI技術活用によるIn-situ多チャンネル放射能濃度深度分布スペクトロメトリーの放射能濃度弁別処理技術開発の進展」

国民との対話

東京都立大学オープンキャンパス（令和元年8月6日、参加者約250名）にて成果紹介