

# Radiation Monitoring for Decontamination and Decommissioning after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident

# **Tatsuo TORII**

Remote System and Sensing Technology Division Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science Fukushima R&D Department Japan Atomic Energy Agency (JAEA)



- Great East Japan Earthquake, Tsunami, and the Fukushima NPS Accident
- Remote Radiation Monitoring in Fukushima Area
- Challenges for New Radiation Measurement Research to the Decommissioning of FDNPS

# (JAEA)

# **Great East Japan Earthquake**

- ➤ Time: 2:46pm on Friday, March 11, 2011.
- Epicenter : Offshore Sanriku coast (38°N, 142.9°E, 24km depth)
- > Magnitude: 9.0 (maximum registered JMA intensity level was 7 at Kurihara, Miyagi prefecture)





NPS

3





Nuclide	Half life	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Total
Xe-133	5.2 d	3. 4 × 10 <sup>18</sup>	3. 5 × 10 <sup>18</sup>	4. 4 × 10 <sup>18</sup>	1. 1 × 10 <sup>19</sup>
Cs-134	2.1 y	7. 1 × 10 <sup>14</sup>	1. 6 × 10 <sup>16</sup>	8. 2 × 10 <sup>14</sup>	1. 8 × 10 <sup>16</sup>
Cs-137	30 y	5. 9 × 10 <sup>14</sup>	1. 4 × 10 <sup>16</sup>	7. 1 × 10 <sup>14</sup>	1. 5 × 10 <sup>16</sup>
Sr-89	50.5 d	8. 2 × 10 <sup>13</sup>	6. 8 × 10 <sup>14</sup>	1. 2 × 10 <sup>15</sup>	2. 0 × 10 <sup>15</sup>
Sr-90	29.1 y	6. 1 × 10 <sup>12</sup>	4. 8 × 10 <sup>13</sup>	8. 5 × 10 <sup>13</sup>	1. 4 × 10 <sup>14</sup>
Te-129m	33.6 d	7. 2 × 10 <sup>14</sup>	2. 4 × 10 <sup>15</sup>	2. 1 × 10 <sup>14</sup>	3. 3 × 10 <sup>15</sup>
Pu-238	87.7 у	5. 8 × 10 <sup>08</sup>	1. 8 × 10 <sup>10</sup>	2. 5 × 10 <sup>08</sup>	1. 9 × 10 <sup>10</sup>
Pu-239	24065 у	8. 6 × 10 <sup>07</sup>	3. 1 × 10 <sup>09</sup>	4. 0 × 10 <sup>07</sup>	3. 2 × 10 <sup>09</sup>
Pu-240	6537 у	8. 8 × 10 <sup>07</sup>	3. 0 × 10 <sup>09</sup>	4. 0 × 10 <sup>07</sup>	3. 2 × 10 <sup>09</sup>
Pu-241	14.4 y	3. 5 × 10 <sup>10</sup>	1. 2 × 10 <sup>12</sup>	1. 6 × 10 <sup>10</sup>	1. 2 × 10 <sup>12</sup>
I-131	8 d	1. 2 × 10 <sup>16</sup>	1. 4 × 10 <sup>17</sup>	7. 0 × 10 <sup>15</sup>	1. 6 × 10 <sup>17</sup>

#### Nuclear Industry Safety Agency (June 6, 2011)

# Remote Monitoring Systems of JAEA

Range	Large Area 100 km >	Semi Large 10 km >	Mid Area 1 km >	Small Area ∽100m
Aircraft	Helicopter	UAV w/ FW	AUH	microUAV
Alt.	~ 300m	~ 150m	~ 50m	<u>&lt;</u> 10m

**Aerial Monitoring** 

Nuclear Emergency / Forest Fire Monitoring above Forests and Rice Fields/Along Rivers

Residential area / Inside Forests



# **Aerial Radiation Monitoring**

- Count rates are obtained by Nal(TI) detector installed in a helicopter
- Altitude above the ground : about 300 m (150 – 450 m)
- After fly-over, aerial count rates are converted to estimate the air dose rates at 1-m AGL and the surface contamination level.







#### **Aerial Radiation Monitoring**

## Radiation monitoring system with manned helicopter



- (a) Manned helicopter
- (b) Radiation monitoring system

(b1)



RSX-3: Detector unit RS701, RS501: Data processing unit PDU (Power Distribution Unit): Input 28VDC, 115VDC RadAssist: Dedicated software

(c) System diagram of radiation monitoring system for manned helicopter

## Radiation monitoring system with unmanned helicopter



(d) Unmanned helicopter (e) Radiation monitoring system



PMT: Photomultiplier tube Pre AMP: Preamplifier

(f) System diagram of radiation monitoring system for unmanned helicopter

**Overview of Airborne Radiation Monitoring** 

*(JAEA* 





#### Dose rate variation (Manned helicopter)



9

# Remote Monitoring Systems of JAEA

Range	Large Area 100 km >	Semi Large 10 km >	Mid Area 1 km >	Small Area ~100m
Aircraft	Helicopter	UAV w/ FW	AUH	microUAV
Alt.	~ 300m	~ 150m	~ 50m	<u>&lt;</u> 10m

Aerial Monitoring

Nuclear Emergency / Forest Fire Monitoring above Forests and Rice Fields/Along Rivers

Residential area / Inside Forests

# DEVELOPMENT OF <u>A</u>UTONOMOUS <u>UNMANNED HELICOPTER (AUH) RADIATION</u> SURVEY SYSTEM



#### **《Feature》**

- Measurement at the places (high dose rate areas, forests, rice fields, etc.) which people cannot come into easily.
- 2. A ground base can be installed in a safe place (< several kilometers)
- 3. The image of a measurement place can also be grasped in real time.
- 4. Position information (GPS, video cam)
- 5. Programming flight.
- 6. Observation at a low altitude (below min. safety alt. of manned aircraft)
- 7. Hovering
  - \* Flight in the area where a person is not below



For monitoring around the site of the FDNPP

- Mapping of dose-rate distribution
- $\cdot$  Reduction of the operator' exposure
- Small man-power
- For decontamination evaluation
- $\boldsymbol{\cdot}$  It can measure repeatedly the same place by programing flight.

# AUH Monitoring System

#### Unmanned areal vehicle RMAX G1

- Length : Under 4m
- Maximum speed : 70 km/h
- Flight time : Maximum 90 min.
- Major devices : CCD Camera /DGPS/Gyroscope
- Weight : 94kg
- Payload : 10kg
- Data transfer in real time
- Flight duration : 1.5 hour (in a filled-up fuels)

#### LaBr3:Ce detector

- Scintillator size : 1.5"Φ×1.5"×3 set
- $\boldsymbol{\cdot}$  Spectrum per second
- Superior energy resolution (FWHM 1.8keV-2.0keV@662keV)

#### Measurement conditions

- Flight speed is 8m/sec (= under 30km/h)
- Line spacing is 80m
- Flight altitude is at 80m as the standard (for safety and data reliability)







#### **Aerial Radiation Monitoring**

#### Radiation monitoring system with manned helicopter



- (a) Manned helicopter
- (b) Radiation monitoring system

(b1)



RSX-3: Detector unit RS701, RS501: Data processing unit PDU (Power Distribution Unit): Input 28VDC, 115VDC RadAssist: Dedicated software

(c) System diagram of radiation monitoring system for manned helicopter

## Radiation monitoring system with unmanned helicopter



(d) Unmanned helicopter (e) Radiation monitoring system



(f) System diagram of radiation monitoring system for unmanned helicopter

Comparison the AUH with Manned Helicopter System



JAEA

Manned Helicopter



Dose rate

19.0 <

9.5 - 19.0

 $(\mu Sv/h)$ 

Superposition

Dose rate

19.0 <

9.5 - 19.0

3.8 - 9.5

1.9 - 3.8

1.0 - 1.9

0.5 - 1.0

0.2 - 0.5

0.1 - 0.2

≤ 0.1

 $(\mu Sv/h)$ 



0 0.4 0.8 1.6 2.4 km



#### Dose rate variation (Unmanned helicopter)





# **Decommissioning of the FDNPS**

~ Main Purpose ~

 3D Mapping of Contamination inside the buildings



# Photo right after the FDNPS accident



#### **TEPCO** (1) Overview of Fuel Removal from the Spent Fuel Pools

After the completion of removal at Unit 4 in December 2014, preparation at Units 1 through 3 is underway



A. Ono (TEPCO), 3<sup>rd</sup> Int'l Forum on the Decommissioning of the FDNPS

16

(JAEA) Our Mission – Radiation Imaging





One of Our Goal



#### Remote radiation monitoring by using a drone





# **Compact Compton Camera**



**Compact Compton camera** (by JAEA) Gamma-rays Total weight: less than 1 kg Power consumption < 5 W</li>  $\Rightarrow$  Operated by USB bus power **Compact size !!** 

# (JAEA) Imaging demonstration inside the FDNPS

#### **Experimental condition**



# (JAEA) Imaging demonstration inside the FDNPS

![](_page_23_Figure_1.jpeg)

#### Hotspots are clearly visualized inside the FDNPS

![](_page_24_Figure_0.jpeg)

![](_page_25_Picture_0.jpeg)

# **3D Radiation distribution map**

![](_page_25_Figure_2.jpeg)

# Measurement at the R/B #1 of FDNPS

JAEA

![](_page_26_Figure_1.jpeg)

TEPCO's Packbot

![](_page_27_Picture_0.jpeg)

![](_page_27_Picture_1.jpeg)

Radiation Image inside the R/B of Unit 1

(JAEA)

![](_page_28_Picture_1.jpeg)

測定時間:26秒 撮影実施地点の空間線量率:4~5mSv/h

# **Radiation Image and 3-D Model**

3D modeling inside the building using photogrammetry technology, and projection of radiation images of hot spot.

![](_page_29_Picture_2.jpeg)

![](_page_30_Picture_0.jpeg)

## Radiation image display on a FDNPS building model

(JAEA

![](_page_31_Figure_1.jpeg)

#### VR model is developed using Unity.

(game development platform for 3D and 2D games, VR/AR, and so on…)

![](_page_32_Picture_3.jpeg)

- The developed VR may be experienced using a head mounted display. (The cheapest solution is <u>a smartphone and a cardboard goggle</u>)
- The viewpoint of the worker in the virtual space can be set arbitrarily.
- The height of the eye position and the field of view can be also arbitrarily changed.

![](_page_33_Picture_0.jpeg)

![](_page_33_Picture_2.jpeg)

# Measurement of radiation distribution using a drone

![](_page_33_Picture_4.jpeg)

![](_page_33_Picture_5.jpeg)

![](_page_33_Picture_6.jpeg)

#### during flight measurement

![](_page_34_Figure_0.jpeg)

![](_page_35_Picture_0.jpeg)

#### 3D terrain model

![](_page_35_Picture_2.jpeg)

![](_page_35_Picture_3.jpeg)

![](_page_36_Picture_0.jpeg)

![](_page_36_Picture_2.jpeg)

![](_page_36_Picture_3.jpeg)

![](_page_37_Picture_0.jpeg)

![](_page_38_Picture_0.jpeg)

![](_page_38_Picture_1.jpeg)

![](_page_39_Picture_0.jpeg)

![](_page_40_Picture_0.jpeg)

![](_page_40_Figure_1.jpeg)

#### 

![](_page_41_Picture_0.jpeg)

#### The world's major nuclear accident

![](_page_41_Figure_2.jpeg)

![](_page_42_Picture_0.jpeg)

![](_page_42_Figure_1.jpeg)

福島第一原子力発電所構内の線量状況について

#### Radiation Map (Dose map)

TEPCO

2016年10月27日

#### TEPCO

#### 【参考】構内全域の線量分布(地表面[コリメート])

![](_page_43_Figure_5.jpeg)

©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved.

無断複裂・転載禁止 東京電力ホールディングス株式会社

![](_page_44_Picture_0.jpeg)

Radiation Map (Dose map) - announcement for workers

#### 福島第一構内 サーベイマップ 400 建屋内(※)は高線量箇所が多数あり 100 µ Sv/hLLE 50 u Sv/h以上100 u Sv/h未满 主す 30 u Sv/h以上50 u Sv/h未満 内に入る場合の線量当量率到 20 u Sv/h以上30 u Sv/h未满 (射線管理Gまでお願いします) 10 u Sv/h以上20 u Sv/h未満 ※汚染のおそれのない管理対象区域は除く 双藻町 大禹街 0µSv/h以上10µSv/h未満 30 20 25 120 300 1 1 12 / 3 2 23 23 ヤシウム 50 設備装置 45788 6印稿 5司税 15 15 40 15 10 共同プール 第二セシウム 10 / 6 电转转35 12 11 免费重要核 4 地下水バイパス 使用透磁载运 一級貯留タンク 31 144 一時保管施設 地下貯水槽 波水化澄解 1 进下野: 1\_ 2 測定日:平成29年3月8、13日 9:30~11:30 単位:uSv/h 測定器:F1-ICW-351 測定部位:地表1m

![](_page_45_Picture_0.jpeg)

Radiation Map (Dose map)announcement for workersinside the reactor buildings

#### 福島第一サーベイマップ(平成29年3月分)

![](_page_45_Figure_3.jpeg)

1F ● R ALL JAPAN 廃炉のいま、あした

# Clothing / Equipment

![](_page_46_Figure_2.jpeg)

## **GIZMODO** Inside the container (Reactor No.2)

福島第一原発2号機の放射線量が過去最悪 を記録か。人なら数十秒で死に至る毎時

530シーベルトと推定

東京電力は、福島第一原発2号機の格納容器内部の放射線量が、毎時530シーベ ルトと推定されると発表しました。これは人間が被ばくすれば数十秒で死に至る ほどの高線量となります。

東京電力の発表によれば、今回530シーベルトを記録したのは**圧力容器**のすぐ下 にある空間部分。カメラで撮影された画像の電子ノイズを分析し、線量を解析し ました。同所で**これまでに測定された最大値は毎時73シーベルト**ですので、はる かに上回ってしまったことになります。

放射線量がなぜこれほど急激に上昇したのか、正確な理由はわかっていません。 以前の測定値が不十分だったのか、誤っていたのか、または原子炉内の状況が急 激に変化したのか…。どちらにしろ問題なのは、内部の状況がいまだによくわか っていないことでしょう。調査では、格納容器から漏れ出た燃料の一部が近くに 残っている可能性も示唆されていますが、もしこれが事実であれば、事故以来初 めて、原子炉内で汚染された破片が発見されたことになります。どちらにしろ現 時点では、そのあまりに高い放射線量のため、事実を確認することができませ

ん。

![](_page_48_Picture_0.jpeg)

#### image by 東京電力

また今回の報告では、原子炉の格納容器内の圧力容器の下部分に**縦横1m程度の** 穴があることも判明しました。東京電力は「この穴は、津波が福島第一原発の冷 却システムを破壊した後、溶け落ちた核燃料によってできたものだと推測されま す。しかし、現時点では仮説に過ぎません」として、「撮影された画像は非常に 有用ですが、内部の状態を知るためには、**さらなる詳細な調査が必要**です」と AFPに語っています。

これまで同社は、新しく開発された調査ロボットを原発2号機に送る計画をして いました。しかし、このロボットが耐えられるのは最大1,000シーベルト程度。 毎時73シーベルトであれば約10時間稼働できますが、530シーベルトならせいぜ い2時間で壊れてしまいます。福島第一原発の解体は2021年から開始される予定 でしたが、変更を余儀なくされるかもしれません。

![](_page_49_Picture_0.jpeg)

Japan Timesによると東京電力は2月9日、福島第一原発2号機の格納容器内部の 本格的な調査に向け、内部の堆積物を除去する掃除用ロボットを投入しました が、およそ2時間で作業を断念し、ロボットを回収したと発表しました。映像か ら推定した空間放射線量は前回を上回る毎時650シーベルトにのぼり、強い放射 線量でカメラが耐えきれなかったことが原因とみられています。

今回東電が除去を試みたのは、圧力容器真下のスペースに通じるレールの一部に 付着した堆積物。厚さは最大で2cmほどとみられています。東電は、2月中にも サソリ型の自走式ロボットを投入し、溶け落ちた核燃料の程度を調査する予定が あり、今回の掃除用ロボットはその調査の前段階となるものでした。長さにして 5m分を除去する予定でしたが、1mしか除去できなかったとのことです。

推定放射線量は、あくまで画像を解析したものとなりますが、**1,000シーベルト** まで耐えられるロボットをわずか2時間で引きあげたということは、やはりかな り高い放射線量であることは間違いないようです。

![](_page_49_Figure_4.jpeg)

Investigation area inside the pedestal

Expected environment for radiation monitoring

OHigh dose rate  $\sim 1000 \text{ Sv/h}$ OHigh temperature  $\sim 100^{\circ}$ OHigh humidity (in water)

# What we need?

 $O\beta/\gamma$  and Neutron dose  $\rightarrow$  Identification of nuclides ODose mapping (3D)

Utilization of passive dosimeter

# Passive radiation monitor

OCombination of CR-39 with luminescence detector

- •CR-39 ••• Neutron dose
- ·luminescence detector  $\cdots \beta/\gamma$  dose

![](_page_51_Figure_4.jpeg)

# **Possible Solutions**

# CR-39×High dose rate

- •No response on  $\beta$  and  $\gamma$
- µSv mSv (optical microscopy)
- •Sv (Atomic force microscopy)

![](_page_52_Picture_5.jpeg)

![](_page_52_Figure_6.jpeg)

Figure 3. Etch pit density as a function of neutron fluence and dose.

Figure 1. AFM image of the CR-39 surface after the etching in 5N NaOH at 70°C from 30 to 180 min. Exposed neutron fluence (dose) was  $1.4 \times 10^{10}$  cm<sup>-2</sup> (6.6 Sv) for each detector.

Radiation Protection Dosimetry (2006), Vol. 120, No. 1–4, pp. 470–474 doi:10.1093/rpd/nci672 Advance Access published on April 5, 2006

#### EXTREMELY HIGH DOSE NEUTRON DOSIMETRY USING CR-39 AND ATOMIC FORCE MICROSCOPY

N. Yasuda<sup>1,\*</sup>, Y. Koguchi<sup>2,4</sup>, M. Tsubomatsu<sup>3</sup>, T. Takagi<sup>3</sup>, I. Kobayashi<sup>3</sup>, T. Tsuruta<sup>2</sup> and H. Morishima<sup>2</sup>

CR-39×hight humidity (in water)

Sensitivity analysis
※etchpit size ~ sensitivity

![](_page_53_Figure_1.jpeg)

 luminescence detector × high dose rate

# •Readout by laser ( $\beta \cdot \gamma$ dose) ~ 100 Sv or more ; now on testing

#### luminescence detector×high temperature

In our recent study [9,14] it was shown that radiation induced fluorescence is thermally <u>stable up to 600 °C.</u> Erasing of fluorescent tracks from the irradiated detector can be achieved by thermal annealing of the detector material at approximately 680 °C for 10–15 min. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C,Mg crystals store information in deep traps having a delocalization temperature between 600 and 700 °C. This delocalization temperature was found from the optical absorption and fluorescence measurements following the step-annealing of the detector photo-ionized with pulsed 430 nm laser light. A sequential two-photon absorption of pulsed laser

A novel Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fluorescent nuclear track detector for heavy charged particles and neutrons

G.M. Akselrod<sup>a</sup>, M.S. Akselrod<sup>a,\*</sup>, E.R. Benton<sup>b</sup>, N. Yasuda<sup>c</sup>

# luminescence detector(FNTD)

×high humidity (in water)

#### 🖸 蛍光飛跡検出器を用 いたイオントラック計測技術とその応用

2017-03-10

▶ 内容記述

固体中に荷電粒子が通過した痕跡をイオントラックとして観測する検出器の中でも、Mgをドープした酸化アルミニウム単結 晶内に捕捉された蛍光中心を共焦点顕微鏡系で蛍光トラックとして読み出す、蛍光飛跡検出器(FNTD)を用いたイオント ラック計測技術に ついて発表する。蛍光トラックはLET(線エネルギー付与)の情報を反映しており、予めその応答関数を 較正しておけば、未知の場で計測したトラックのLET(線エネルギー付与)を知ることができる。従って、各トラックの LETスペクトルの積算から吸収線量を評価することができ、線質の評価も可能である。LETスペクトロスコピーによって、 重粒子線とその核破砕二次粒子や、宇宙放射線のような混在場において、定量的な線量評価が可能となる。また、トラック は位置情報を有しているので、FNTD上のトラック分布をマクロに可視化すれば、オートラジオグラフィが可能である。位 置分解能は顕微鏡精度(サブミクロン)で決まるため、マクロオートラジオグラフィ像の中にトラックが局在していれば、 その局所的な線量評価が可能である。例えば、RI内用療法やBNCTにおいて、そのa線トラックや電子でさえも、その線量分 布を臓器レベルやシングルセルオーダーで可視化できる。FNTD自身は電気回路やバイアス電源を必要としない「ただの板 切れ」であるので、FNTD上に細胞を培養するような系を生物実験に持ち込むことも可能である。本発表では、FNTDを用い た計測技術とその応用について紹介する。

#### Combined use with cell culture is now on testing

Dose mapping (Multipoint measurement)

![](_page_56_Figure_1.jpeg)

直径:40m CR-39:50個

装置(HIMAC)の加速リング上に設置されているシートビ ームプロファイルモニタ(SBPM)の CCD カメラの放射線損 傷を減らすことを目的として,加速器本体室内における 中性子発生源の位置と中性子スペクトルの推定,及びエ ポナイト等の遮蔽性能の測定を試みた。

![](_page_56_Figure_4.jpeg)

図-2 炭素 400 MeV/u 治療条件における中性子線分布

#### HIMAC加速器本体室内(B2)における 樹脂系中性子遮蔽材の遮蔽性能

奥野功一\*·藤澤高志\*\*·高田栄一\*\*·安田仲宏\*\*·野田耕司\*\*·川嶋 元\*\*·小林育夫\*\*\*

#### (AEA) Technology to realize multipoint measurement

www.elsevier.com/locate/radmeas

![](_page_57_Figure_1.jpeg)

Fig. 1. Difference of imaging method using line sensor (left) and traditional imaging method (right).

ELSEVIER

Radiation Measurements 40 (2005) 311-315

Development of a high speed imaging microscope and new software for nuclear track detector analysis

N. Yasuda<sup>a,\*</sup>, K. Namiki<sup>b</sup>, Y. Honma<sup>c</sup>, Y. Umeshima<sup>c</sup>, Y. Marumo<sup>c</sup>, H. Ishii<sup>d</sup>, E.R. Benton<sup>e</sup>

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 593 (2008) 475-480

![](_page_57_Picture_8.jpeg)

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A

Contents lists available at ScienceDirect

journal homepage: www.elsevier.com/locate/nima

Development of an automated multisample scanning system for nuclear track etched detectors

H. Tawara<sup>a,\*</sup>, K. Eda<sup>a</sup>, K. Takahashi<sup>a</sup>, T. Doke<sup>b</sup>, N. Hasebe<sup>b</sup>, S. Kodaira<sup>b</sup>, S. Ota<sup>b</sup>, M. Kurano<sup>c</sup>, N. Yasuda<sup>c</sup>

![](_page_57_Picture_13.jpeg)

b

![](_page_57_Picture_15.jpeg)

Fig. 1. (a) Structure of the automated multisample scanning system for nuclear track etched detectors. The left-hand part is the modified HSP-1000 system and the right-hand part is the robotic sample loader. (b) Picture of the upper part of the automated multisample scanning system.

![](_page_58_Picture_0.jpeg)

![](_page_58_Picture_1.jpeg)

# Thank you for your attention.

![](_page_58_Picture_3.jpeg)