

Appendix D.

External Monitoring, Internal Monitoring Scans, and Urine Bioassays

This appendix summarizes the external monitoring, internal monitoring (IM) by whole body and thyroid scans, and urine bioassays that were used to monitor people.

D-1. Introduction

There are two basic sources of radiation exposure to people, external and internal. Radiation that is generated outside the body can give an individual an external dose and radioactive materials that are deposited in the body and undergo radioactive decay while inside the body can give an individual an internal dose.

Dosimeters were used to measure external dose. Some individuals already had dosimeters in their possession because of their normal job function (for example some hospital, shipyard, and shipboard individuals normally wear dosimeters), and others were issued dosimeters because of their operational assignments. For this report, preliminary dosimeter results were compared with calculated values as a validity check, i.e., no individual dosimeter measurement should be greater than the calculated value for external dose, under the assumed circumstances of exposure and radiation environments. Final dosimeter results and the placement (location) of individuals during the OTR period are pending.

IM scans and urine bioassays were performed to determine internal doses.

For this report, preliminary IM results were compared with calculated values as a validity check, i.e., no individual IM measurement should be greater than the calculated value for internal dose. Final IM results and the locations of individuals during the OTR period are pending.

For this report, there were no urine bioassay data available. About 180 urine bioassay samples that were collected are pending analysis and evaluation.

Most people who were issued personal dosimeters also went through IM scans. A number of individuals that did not have dosimeters also went through IM scans to help determine more accurate estimates of total radiation dose for the PEPs. Criteria for dosimeter issue and IM selection of individuals are discussed later in this appendix.

Dosimeters, IM scans, and bioassays are direct measurements of an individual's dose and therefore are the best measurements to use in the calculation of an individual's dose.

Use of environmental measurements to calculate an individual's dose requires knowing where the individual was throughout the exposure period, estimating how long the individual was in a particular environment, and of course having all of the environmental radiological data as a function of time and location. The use of environmental data to estimate external and internal doses requires a greater number of measurements and assumptions to be made and generally results in a greater uncertainty than the direct measurement of dose through dosimetry or IM scans. For this report, environmental measurements were used to estimate a dose for each PEP described in Section 3. At a later date, if a more detailed dose estimate is needed for an individual, direct dosimeter and IM measurements will be considered in the dose reconstruction

process. The future calculation of an individual's dose would be expected to produce a dose that is less than the dose estimated for the PEPs defined in this report.

In the absence of individual and environmental measurements the next best approach for determining an individual's external and internal dose is by the modeling of the sources of radiation and radioactive materials. In this case the source of radiation and radioactive material was the result of releases from the FDNPS. It can be difficult to accurately model environmental releases resulting from damage to reactor cores or fuel storage pools due to the large number of variables that can affect the predicted outcome. In this report, it was not necessary to use reactor core or fuel pool release models because there were sufficient radiological environmental measurements available to calculate estimates for the PEPs defined.

Figure D-1 illustrates the hierarchy of all the different types of data potentially available for use in a dose reconstruction. Preliminary estimates indicate that there were approximately 70,000 people (shore-based, aircrew, and shipboard individuals) who could be included in the POI for dose reconstruction for the OTR. Preliminary figures show that about 4,000 persons (about 6 percent) wore dosimeters during at least part of the 60-day period and about 8,400 (12 percent) had IM that was usually done once between March 12 and August 31, 2011. These measurements are labeled "Best Dose Data" because they are direct measurements of dose with the smallest uncertainty. The "Next Best Data" are environmental measurements that require additional assumptions and calculations for dose reconstruction and will have a larger uncertainty. The "Helpful Data" measurements or results, which may involve modeling, assessment of meteorology, or estimates of reactor core depletion, tend to exhibit higher uncertainty than the other data types and are only used in the absence of the other types of data, or for confirmation of the results obtained with the other types.

D-2. External Monitoring

The USA, USN, and USAF all have large, well-established, nationally-accredited dosimetry centers in CONUS.

- The USN and USAF provided electronic personal dosimeters (EPDs) that allow for real time, or active, measurements of external dose while they are being worn by the individual.
- The USN and USAF also provided thermoluminescent dosimeters (TLDs). These are passive devices that are read at the end of the monitoring period for each individual.
- The USA provided optically stimulated luminescent (OSL) dosimeters that had the potential to be read in the field but were not because of concerns that the readers would become contaminated in the operational setting. Therefore, OSL dosimeters were used as passive devices and were read at the end of the monitoring period for each individual.

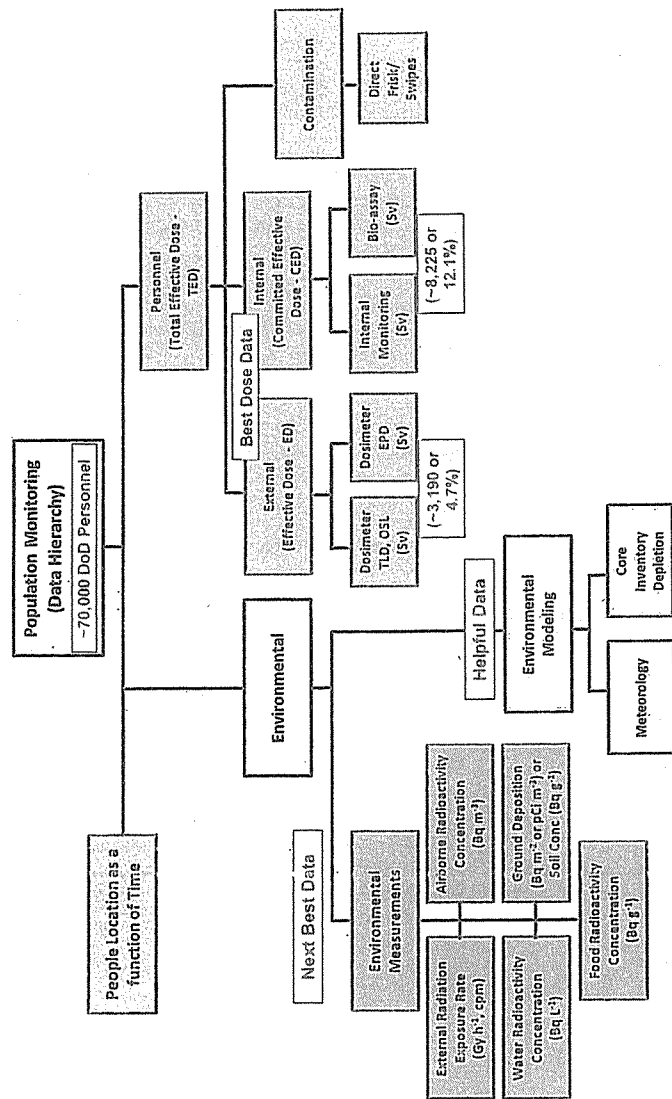


Figure D-1. Hierarchy of data

Individual monitoring periods for people issued TLDs and OSL dosimeters could be on the order of days to weeks to months, depending on the circumstances of the individual's duties and locations. Further information on the dosimetry equipment used by each of the services can be found in Appendix A.

The groups of individuals who were specifically issued dosimeters as part of their OT participation were as follows (USPACOM, 2011a).

- Those persons who entered warm and hot zones.
 - Warm Zone: Initially defined as the area between 25 and 125 nautical miles of FDNPS or an area in which general area radiation levels were between 0.1 and 10 mrem h⁻¹ (USFJ, 2011a) and later revised to an area between 40 and 80 km from FDNPS or an area in which general area radiation levels were between 0.1 and 10 mrem h⁻¹ (USFJ, 2011b).
 - Hot Zone: Initially defined as the area within 25 nautical miles of FDNPS or an area in which general area radiation levels were in excess of 10 mrem h⁻¹ (USFJ, 2011a) and later revised to an area within 40 km of FDNPS or an area in which general area radiation levels were in excess of 10 mrem h⁻¹ (USFJ, 2011b).
- Persons who could come into contact with loose surface contamination such as those involved with equipment decontamination.
- Persons who were part of an aircrew, which flew through an identified plume.
- Persons who were likely to exceed a TED control level of 0.3 rem as predicted from exposure models and environmental measurements.

Some individuals who already had a dosimeter in their possession as part of their normal job function included the following:

- Nuclear-trained individuals who were at Yokosuka Shipyard or on aircraft carriers.
- Medical individuals who were working around radiation sources.

Each person in the POI may have none, one, or several individual dosimeter measurements during the 60-day OTR period. Also, a single dosimeter issued to an individual could include some dates prior to or after the 60-day OTR period, depending on issue and collection dates. Also, there were cases when an individual was issued more than one dosimeter at a time. These details will need to be considered in the future when dosimeter data are used as part of an individual's dose reconstruction.

The persons who entered the warm or hot zones are not considered as specific PEPs in this assessment. The activities that warranted the wearing of dosimeters could involve doses that are in addition to any PEP dose that might be assigned.

Table D-1 provides a summary of the numbers of dosimeters reported, and Table D-2 provides a summary of reported results.

Table D-1. Personnel dosimeter use by DOD-affiliated individuals

Service	Sent	Type	Number Reported
USA	2,000	OSL	326
USN	685	EPD	126
USN	14,000	TLD	1,669
USAF	1,400	EPD	711
USAF	6,500	TLD	364
Total	24,585		3,196

Table D-2. External monitoring results

Service (Type)	Total Number of Dosimeters	Number of Dosimeters per Dose Range (mrem)					
		0	1-25	26-50	51-100	101-500	>501
USA (OSL)	326	77	247	0	1	1	0
USN (TLD)	1669	1349	310	7	3	0	0
USN (EPD)	126	16	110	0	0	0	0
USAF (EPD)	711	90	620	1	0	0	0
USAF (TLD)	364	361	3	0	0	0	0
Grand Total	3196	1893	1290	8	4	1	0
Percent of Total	100%	59.2%	40.4%	0.3%	0.1%	0.0%	0.0%

An initial review of external monitoring data shown in Table D-2 indicates that 99.6 percent of the reported doses are 25 mrem (0.25 mSv) or less and are consistent with the calculated estimates of external radiation doses (see Section 5.2.1). Thirteen (13, 0.4 percent of 3,196 reported) dosimeter results are larger than the estimates of external radiation dose for adults. These anomalous results are undergoing investigation to determine the circumstances of the exposure.

The doses reported in Table D-2 are undergoing follow-on review by the DARWG to:

- (1) differentiate occupational and OT dose, (2) validate background and transit doses, (3) consider wearing periods, locations, duty assignments, and other personal information, and (4) investigate sources of anomalous doses.

D-3. Internal Monitoring Scans

IM measurements were made to assess whether individuals had an intake of radioactive material released from the FDNPS. The equipment used for IM was of two types, i.e., fixed scanners purposefully designed for IM and portable instruments adapted for IM (both whole body and thyroid).

Portable instruments were used to increase the number of individuals who could be monitored and to bring monitoring to ships and remote locations. The portable instruments were used as screening devices to identify those individuals with the potential for some measurable intake of radioactive material who were then sent for a confirmation by fixed scan, where the internally deposited radionuclides could be positively identified through spectrometric analysis.

Fixed scanners included Canberra ACCUSCAN and FASTSCAN systems. Both of these systems measure the whole body and thyroid regions and provide full spectroscopic identification of nuclides. FASTSCAN systems were established at the Kadena AB on the island of Okinawa Japan, and at the Yokosuka NB. One ACCUSCAN system was established at Atsugi NAF. None of these systems had been set up in Japan prior to the March 11, 2011 earthquake. Existing FASTSCAN systems setup in CONUS at the Puget Sound Naval Shipyard, WA, San Diego NB, CA and at the Intermediate Maintenance Facility in Bremerton, WA were used to monitor about 1,013 individuals prior to the establishment of the fixed scanners in Japan.

The FASTSCAN systems used two 3" x 5" x 16" fixed NaI(Tl) detectors, while the ACCUSCAN system used two germanium moveable detectors. Both systems used several thousand pounds of shielding to lower the influence of background radiation and to provide a lower minimum detectable activity. Figure D-2 illustrates an ACCUSCAN in operation.

Twenty-five (25) multi-purpose survey meters (E-600) with attached SPA-3 (2" diameter x 2" thick NaI(Tl) smart probe system) scintillation probes were used for portable systems. The portable systems were used in gross count, open window mode and provided no spectrum or nuclide identification. Portable IM instruments were also used at the locations where fixed IM scanners were located and at other sites as needed including on ships. Figure D-2 illustrates several individuals undergoing IM screening. Further information about the IM equipment used can be found in Appendix A.



Figure D-2. Individuals undergoing IM screening

About 8,380 individuals had IM in two phases as follows:

1. Phase 1: Individuals with Higher Potential for Exposure
 - a. In CONUS on individuals working in Yokosuka NB between March 11 and April 13, 2011. There were 1,013 individuals internally monitored from March 16 through April 13 (29 Days) using fixed scanners in San Diego, CA, and Bremerton, WA.
 - b. In Japan from April 14 through August 31, 2011 for about 7,212 individuals falling in the following categories:
 - i. Active duty personnel operating within the Sendai area.
 - ii. Aviators, i.e. helicopter pilots and aircrews who flew through known plumes.
 - iii. Personnel supporting aviation operations and aircraft/ship decontamination.
 - iv. Supporting ship crew, including nuclear trained individuals.
 - v. Supporting shore activity personnel.
 - vi. Naval Nuclear Propulsion personnel.
 - vii. Ten percent selected randomly from other groups.
 - viii. Additionally, each service component was asked to provide lists of individuals who had a higher potential for internal exposure who were then internally monitored.
2. Phase 2: Voluntary Open Availability. In Japan from July 26 through August 31, 2011. During this period, IM was voluntary for military, civilian employees, contractors, and beneficiaries; including infants and children. One hundred fifty-five (155) people (51 dependent children, 46 dependent adults, 38 DOD civilian employees/contractors, and 20 active duty military) were monitored, and all of these measurements were below the minimum detectable activity (MDA).

IM results for individuals in the two phases are shown in Table D-3.

With regard to the stated doses in Table D-1, there have been numerous assumptions made (such as particle size, inhalation class, concentrations of radioactive nuclides in the air, etc.), and literature values used (such as Dose Coefficients [DCs] from ICRP Report 71 and Intake Retention Factors from ICRP Report 68, etc.). A technical report, DTRA-TR-12-004, *Radiation Internal Monitoring by In Vivo Scanning in Operation Tomodachi*, will be completed by the end of 2012.

The concept of “unmeasured” or “missed” intake activity (or corresponding dose) is important for an appreciation of the stated doses and for implications of “less than MDA” or “greater than MDA.” For a given MDA, the missed intake is the potential unmeasured intake activity that results because of the effective elimination of the radionuclide from the body with time. Thus, a reading at the MDA of the instrument immediately after intake may result in measuring 70 percent of the intake with a missed activity of 30 percent of the intake. However, if the same intake measurement is delayed for one effective half-life, then it is possible that only 35 percent of the intake would be measured and that the missed activity would represent 65 percent of the intake. Thus, for a given MDA, the longer the time that elapses between intake and measurement, the greater the missed intake activity and corresponding dose. This presents the

possibility that the unmeasured dose for those monitored during the “Open Availability Phase” could exceed the doses estimated for persons who were found to contain radionuclides when measured at earlier times.

Table D-3. Summary of internal monitoring scan results

Phase 1: Higher Potential for Internal Exposure	
Personnel Monitored with <MDA	8042 (98%)
Personnel Monitored with ≥MDA	183 (2%)
Total Persons Monitored	8225
Average Committed Effective Dose (rem)	0.004
Highest Committed Effective Dose (rem)	0.025
Phase 2: Open Availability Phase (Voluntary)	
All scan results <MDA	
Dependent Children/Infants Monitored	51 (32%)
Dependent Adults Monitored	46 (30%)
DOD Civilian Employees/Contractors	38 (24%)
Active Duty Military	20 (13%)
Total Persons Monitored	155
Total Persons Monitored for Both Phases	8380

D-4. Urine Bioassay

Some individuals with higher potential for exposure from internal contamination were monitored for intake of radioactive material by the collection of 24-hour, pre-deployment (baseline) and post-deployment urine samples for the purpose of performing in-vitro radioanalysis. These 24-h urine samples were collected using standard DOD procedures and were processed in the USAFSAM Radioanalysis Laboratory at Wright-Patterson AFB, OH. Due to the short half-lives of the radioiodines, which contribute major portions to dose and the longer than normal processing times at USAFSAM caused by personnel deployments to support OT response operations, urine bioassays were not an effective assay technique for assessment of intake and dose.

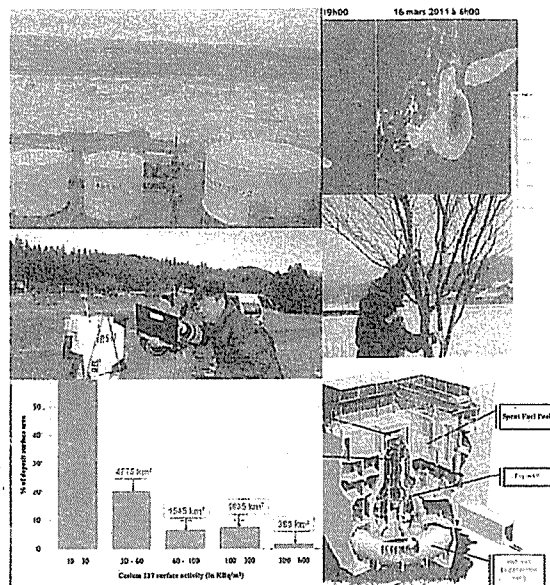
IRSN
INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Enhancing nuclear safety

Fukushima, one year later

Initial analyses of the accident and its consequences

Report IRSN/DG/2012-003 of March 12, 2012



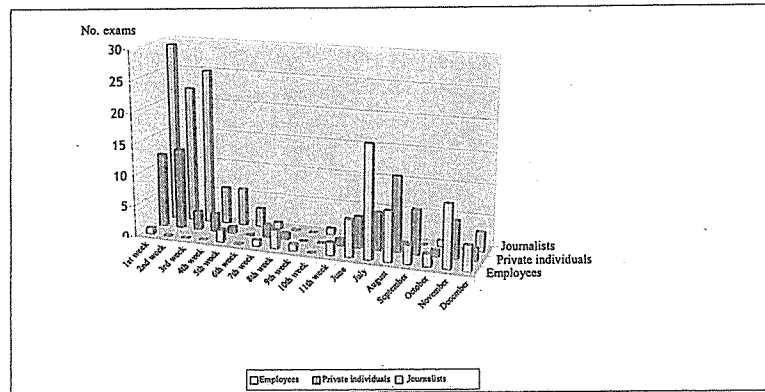


Figure 8-12 - Trends in the number of in vivo gamma-ray spectrometries performed on journalists, private individuals and company employees between March 11, 2011 and December 19, 2011

The effective dose and the equivalent dose to the thyroid were calculated for each person who tested positive for the presence of radioactive elements. Iodine-131 was the isotope most frequently detected, though iodine-132 and tellurium-132, and much more rarely caesium-137, were detected in a few people.

Figure 8-13 and Figure 8-14 respectively show the distribution of effective doses and equivalent doses to the thyroid calculated for people who tested positive in their in vivo gamma-ray spectrometry.

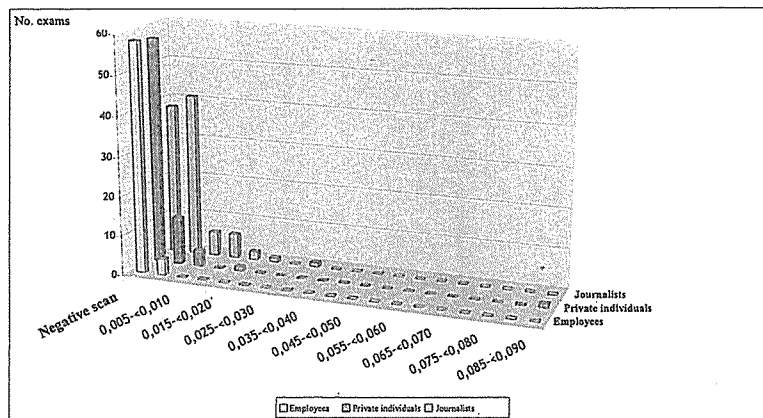


Figure 8-13 - Distribution of the effective doses received by the different categories of people measured (in mSv)

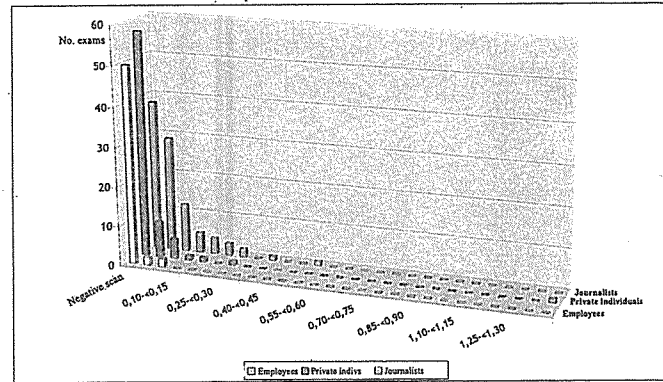


Figure 8-14 - Distribution of the equivalent doses to the thyroid received by the different categories of people measured (in mSv)

For the most exposed person, the effective dose is less than 0.1 mSv, and the equivalent dose to the thyroid less than 1.4 mSv. For the purposes of comparison, the regulatory dose limit for the public is an effective dose of 1 mSv/year (compared with the calculated maximum dose of 0.1 mSv for the French nationals measured) and the equivalent dose to the thyroid that triggers the process of administering stable iodine is 50 mSv (compared with the calculated maximum dose of 1.4 mSv for the French nationals measured). At these levels of exposure, the French nationals measured have no cause for concern in terms of health effects.

Figure 8-15 shows the geographical distribution of private individuals staying in Japan, in the cities of Sendai, Iwaki, Koriyama, or Fukushima, during the most significant release events, i.e. between March 15 and 16, or in Tokyo (March 15 and 16 and between the afternoon of March 20 and March 23), who had a positive result in the in vivo gamma-ray spectrometry performed upon their return to France.

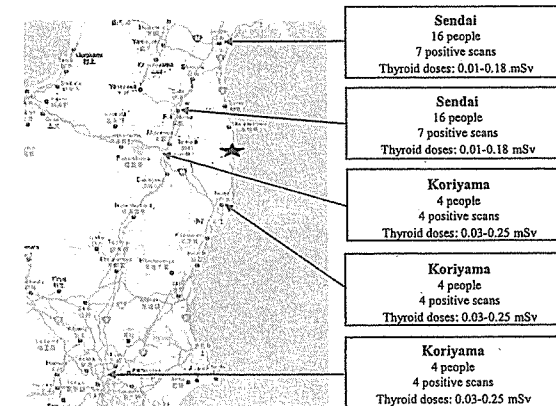


Figure 8-16 shows the geographical distribution of journalists present in Tokyo, Soma, or Sendai during the most significant release event, i.e. between March 15 and 16, who had a positive result in the in vivo γ -ray spectrometry performed a few days later upon their return to France.

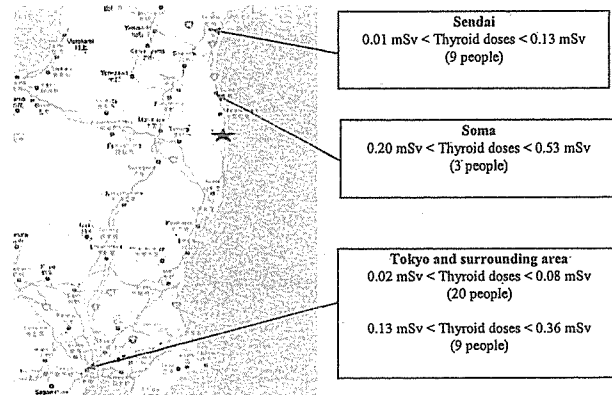


Figure 8-16 - Geographical distribution of journalists present in Sendai, Soma, or Tokyo during the releases on March 15-16, whose in vivo γ -ray spectrometry produced a positive result

These results show that the contamination of people at the time of the releases and in the days that followed essentially depended on their behavior (especially the time they spent outdoors) and their precise location while they were in the contaminated areas, the influence of local weather conditions being the dominant factor. These results cannot be generalized to everyone staying in a given city, but do give an indication of the possible dose range to which people may have been exposed on those dates and in those locations.

8.5. HEALTH EFFECTS AND MEDICAL MONITORING OF EXPOSED WORKERS

8.5.1. HEALTH EFFECTS

According to the information provided by the Japanese authorities, no health effect attributable to exposure to ionizing radiation has been observed to date in the workers involved in operations conducted at the Fukushima nuclear power plant. However, according to statements made by physicians at the National Institute of Radiological Sciences (NIRS), in view of the nature of the operations remaining to be carried out, the appearance in the coming months of effects on workers' health directly related to radiation exposure cannot be ruled out.



Thyroid measurements of the Russian citizens living in Japan following the Fukushima accident

*Sergey Shinkarev, Vladimir Uyba,
Konstantin Kotenko, Yuri Abramov,
Vladimir Klochkov, Valeri Krasnyuk*

2-nd NIRS Symposium, Chiba, January 27, 2013

Justification and the purpose of the business trips

- A request by the Russian Ambassador to Japan to the Ministry of Foreign Affairs of Russia (March 2011).
- An order of Ministry of Health and Social Development of Russia.
- A six-person team of experts from Federal Medical Biological Agency was directed to the Russian Embassy in Tokyo with purposes:
 - 1) to assess doses to external and internal exposure and
 - 2) to elaborate recommendations regarding:
 - ❖ *lifestyle of the Russian citizens living in Japan and*
 - ❖ *possibility to visit Japan by the Russian citizens for tourism, business and other private goals.*

2-nd NIRS Symposium, Chiba, January 27, 2013

Characteristics of the main measurements

Type of measurement	Measured value	Device
¹³¹ I thyroidal content	Spectrum of gamma radiation	Scintillation spectrometer InSpector 1000
¹³⁷ Cs and ¹³⁴ Cs content in the body	Spectrum of gamma radiation	Scintillation spectrometer InSpector 1000
¹³⁷ Cs and ¹³⁴ Cs content in the foodstuffs	Spectrum of gamma radiation	Scintillation spectrometer "Progress"
Exposure rate	Ambient dose equivalent rate	Dosimeter MKS-05

2-nd NIRS Symposium, Chiba, January 27, 2013

Radiation monitoring

- Three business trips to Japan:
 - ❑ April 8-20, 2011
(268 people were monitored - ¹³¹I in the thyroid and ¹³⁷Cs and ¹³⁴Cs in the body)
 - ❑ September 10-23, 2011
(289 people were monitored - ¹³⁷Cs and ¹³⁴Cs in the body)
 - ❑ September 15-22, 2012
(227 people were monitored - ¹³⁷Cs and ¹³⁴Cs in the body)
- Place of measurement – territory of the Russian Embassy in Tokyo
- Personal interviewing regarding residence history and dietary habits from March 11 to the date of measurement

2-nd NIRS Symposium, Chiba, January 27, 2013

Protocol of thyroid measurements and personal interviewing

- Purpose of interview: to determine realistic intake of radionuclides to the measured people.
- Questionnaire includes:
 - 1) Identification part (name, date of birth, occupation, place of residence and of work)
 - 2) Characteristics of location and conditions of measurements (date, background radiation level inside and outside, devices used)
 - 3) Results of measurements:
 - surface contamination of the body and clothes
 - ^{131}I in the thyroid
 - ^{137}Cs and ^{134}Cs in the body
 - 4) Results of interviewing:
 - residence history since March 11, 2011
 - dietary habits (consumption of leafy vegetables, sea food, etc.)
 - use of KI pills

2-nd NIRS Symposium, Chiba, January 27, 2013

Results of radiation monitoring in April 2011

- Dates of thyroid measurements: April 8-20, 2011
- Number of measured people: 268
- ^{131}I in the thyroid:

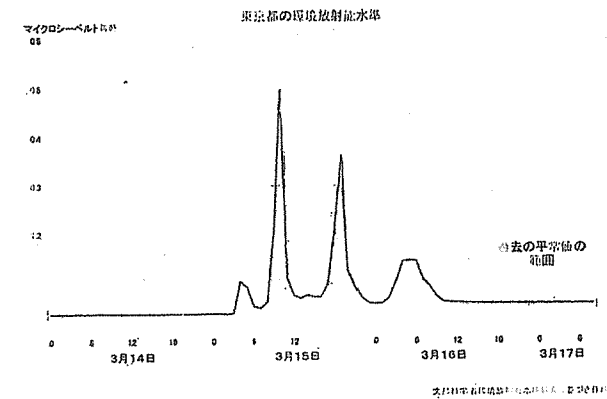
April 8-20, 2011

Only for 3 people measurements exceeded MDA (100 Bq of ^{131}I) -- up to 130 Bq of ^{131}I
- ^{137}Cs and ^{134}Cs in the body:

Nobody was revealed with measurements exceeded MDA for ^{137}Cs and ^{134}Cs in the body (1800 Bq of ^{137}Cs)

2-nd NIRS Symposium, Chiba, January 27, 2013

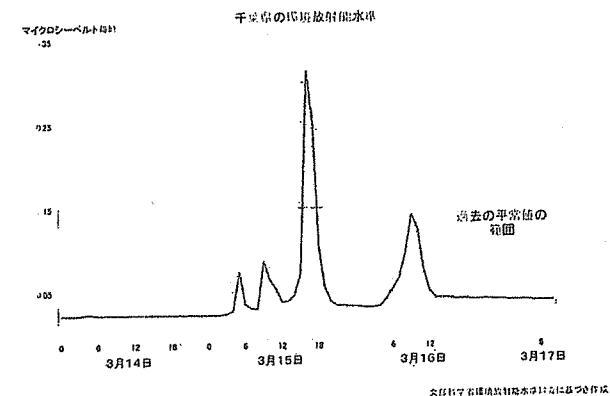
Exposure rate profile in Tokyo



Y-axis: Ambient dose equivalent rate in $\mu\text{Sv h}^{-1}$

2-nd NIRS Symposium, Chiba, January 27, 2013

Exposure rate profile in Chiba



Y-axis: Ambient dose equivalent rate in $\mu\text{Sv h}^{-1}$

2-nd NIRS Symposium, Chiba, January 27, 2013

Doses to the thyroid from ^{131}I (direct thyroid measurements)

- Absorbed dose to the thyroid for Russian citizens living in Tokyo:

maximum dose:

an adult – 2 mGy

1y child – 4 mGy

average dose (assuming a lognormal distribution of individual doses):

an adult – 0.2 mGy

1y child – 0.4 mGy

2-nd NIRS Symposium, Chiba, January 27, 2013

Doses to the thyroid from ^{131}I (Chernobyl vs Fukushima)

Type of dose	Age-group	Absorbed dose to the thyroid from ^{131}I , mGy	
		Minsk	Tokyo
average	adult	17	0.2
	1y child	170	0.4
maximum	adult	230	2
	1y child	1600	4

2-nd NIRS Symposium, Chiba, January 27, 2013

Whole-body dose from $^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$ (direct measurements)

- Effective dose of 1 mSv per year from ^{137}Cs – in case of permanent content of 24000 Bq of ^{137}Cs in the body of an adult during a whole year.
- Results of all 784 measurements did not exceed the value of 1800 Bq of ^{137}Cs in the body in April, September 2011 and in September 2012.
- Chernobyl experience – lognormal distribution of radioactive isotopes of cesium in the body of the residents of a given settlement. Maximum value exceeds average value by a factor of about 10.
- ❖ Thus, an average effective dose to the measured people from ($^{137}\text{Cs}+^{134}\text{Cs}$) does not exceed 10 μSv per year.

2-nd NIRS Symposium, Chiba, January 27, 2013

Chiba: daily fallout

Date	March 14-15	March 15-16	March 16-17
^{131}I , Bq m^{-2}	1100	2400	460
^{137}Cs , Bq m^{-2}	76	160	18
^{134}Cs , Bq m^{-2}	69	150	16

2-nd NIRS Symposium, Chiba, January 27, 2013

Chiba: averaged air concentration

Date	March 14-15	March 15-16	March 16-17	March 17-18
^{131}I , Bq m ⁻³	6.8	33	7.4	0.61
^{137}Cs , Bq m ⁻³	0.53	1.4	0.20	0.0084
^{134}Cs , Bq m ⁻³	0.46	1.1	0.16	0.0085

2-nd NIRS Symposium, Chiba, January 27, 2013

Chiba: deposition velocity

- ^{137}Cs – $(1.0 - 1.7) \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$
- ^{134}Cs – $(1.2 - 1.7) \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$
- Such values of deposition velocity are typical for fallout particles with AMAD of about 1 μm .
- No information is available regarding filters used for air sampling
- ^{131}I – $(0.7 - 1.9) \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ assuming all ^{131}I is in aerosol form

2-nd NIRS Symposium, Chiba, January 27, 2013

Internal irradiation in Tokyo (radioactive cloud passage)

Inhalation intake (model calculations)

- **Total fallout**
 - ^{131}I – (4000-5000) Bq m⁻²
 - ^{137}Cs (^{134}Cs) – (400-500) Bq m⁻²
- **Average absorbed dose to the thyroid:**
 - an adult – (0.15-0.2) mGy
 - 1y child – (0.3-0.4) mGy
- **Average committed effective dose from (^{137}Cs + ^{134}Cs) in the body:**
 - an adult – (1.2-1.4) μSv
 - 1y child – (0.3-0.4) μSv

2-nd NIRS Symposium, Chiba, January 27, 2013

External irradiation in Tokyo

- Before the accident - an ambient dose equivalent rate in Tokyo:
(0.03-0.05) $\mu\text{Sv h}^{-1}$
- After the accident (April 2011) - an ambient dose equivalent rate in Tokyo:
(0.08-0.11) $\mu\text{Sv h}^{-1}$
- An ambient dose equivalent rate in Moscow:
(0.12-0.20) $\mu\text{Sv h}^{-1}$
- External exposure to the residents in Tokyo (natural background + emergency) is less than external exposure to the residents in Moscow (natural background).

2-nd NIRS Symposium, Chiba, January 27, 2013

Conclusions (1/2)

1. No radiation factors were revealed that required imposing any restrictions on lifestyle and dietary habits of the Russian citizens living in Japan.
2. We recommended the Russian Ministry of Foreign Affairs to remove restrictions on visiting Japan by the Russian citizens excepting the areas that Japan authorities prohibited to visit (as of April 2011).
3. The highest absorbed dose to the thyroid from ^{131}I for the Tokyo residents is within a few mGy, at least two orders of magnitude less than that for the Minsk residents following the Chernobyl accident. No iodine prophylaxis was required for the Tokyo residents after the Fukushima accident.

2-nd NIRS Symposium, Chiba, January 27, 2013

Conclusions (2/2)

4. Estimates of thyroid doses derived from deposition model for the residents of Tokyo city are consistent with those derived from thyroid measurements.
5. Average effective dose to the residents of Tokyo city from radioactive isotopes of cesium (^{137}Cs & ^{134}Cs) does not exceed 10 μSv per year.
6. External exposure to the residents of Tokyo city from natural background radiation per year plus from the releases of Fukushima-1 NPP is less than that from natural background radiation per year for the residents of Moscow city.

2-nd NIRS Symposium, Chiba, January 27, 2013

どうも ありがとう
ございました

2-nd NIRS Symposium, Chiba, January 27, 2013

平成 24 年度受託事業

「大気拡散シミュレーションによる時系列大気中放射性物質濃度

マップの整備」

成果報告書

平成 25 年 1 月

独立行政法人
日本原子力研究開発機構

本報告書は、独立行政法人放射線医学総合研究所からの平成 24 年度受託事業として、独立行政法人日本原子力研究開発機構が実施した「大気拡散シミュレーションによる時系列大気中放射性物質濃度マップの整備」の成果を取りまとめたものです。
従って、本報告書の著作権は、独立行政法人放射線医学総合研究所に帰属しており、本報告書の全部又は一部の無断複製等の行為は、法律で認められたときを除き、著作権の侵害にあたるので、これらの行為を行うときは、独立行政法人放射線医学総合研究所の承認手続きが必要です。

目 次

1. はじめに	1
2. 事業の概要	2
3. 計算モデル	5
3.1 気象モデルMMS	6
3.2 拡散モデルGEARN	7
4. 実施内容および結果	9
4.1 放出源条件などの計算入力データの整備	9
4.2 大気拡散シミュレーション計算	16
4.3 大気拡散シミュレーション結果の評価	30
4.4 時系列大気中放射性物質濃度マップの構築	49
5. まとめ	56
付録：拡散計算データベースの使用方法	57

1. はじめに

本報告書は、独立行政法人放射線医学総合研究所（以下、「放医研」という。）からの平成 24 年度受託事業「大気拡散シミュレーションによる時系列大気中放射性物質濃度マップの整備」の成果をまとめたものである。

東京電力福島第一原子力発電所の事故に伴い、環境中に放出された放射性物質による福島県等の住民の健康リスク評価を行うための基礎データとして、住民の被ばく線量の把握は重要である。このうち、ヨウ素等の短半減期核種による事故初期段階における内部被ばく線量については、現時点では実測に基づく評価が困難であり、大気拡散シミュレーションにより得られる時系列大気中放射性物質濃度マップと行動パターンを組み合わせた推計が現実的である。

独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という。）では、原子力緊急時対応システムとして開発した緊急時環境線量情報予測システム SPEEDI (System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information)、およびその世界版 WSPEEDI (Worldwide version of SPEEDI) を適用して、事故により放出された放射性物質の環境中移行の詳細解析を進めている。

本受託事業は、上記 WSPEEDI を東京電力福島第一原子力発電所の事故に伴い環境中に放出された放射性物質の詳細な大気拡散解析に適用し、線量推計に必要な大気中放射性物質濃度の時空間分布データベースを、大気拡散シミュレーションにより構築することを目的としている。

2. 事業の概要

(1) 目的

東京電力福島第一原子力発電所の事故時（以下「事故時」という。）に放出された放射性物質による福島県等の住民の健康リスク評価を行うための基礎データとして、住民の被ばく線量の把握は重要である。このうち、ヨウ素等の短半減期核種による事故初期段階における内部被ばく線量については、現時点では実測に基づく評価が困難であり、大気拡散シミュレーションにより得られる時系列大気中放射性物質濃度マップと行動パターンを組み合わせた推計が現実的である。本件では、この線量推計に必要な、時系列された大気中放射性物質濃度マップを、大気拡散シミュレーションにより構築することを目的とする。

(2) 実施内容

上記目的を達成するために、以下の項目を実施する。

① 放出源条件などの計算入力データの整備

大気拡散シミュレーション計算を実施するため、事故時におけるヨウ素等の短半減期核種の放出率の時系列変化、放出高さ等の放出源条件について、これまでに公表されている情報や文献に基づき調査・整理し、シミュレーション計算の入力条件として整備する。

② 大気拡散シミュレーション計算

大気拡散シミュレーションでは、三次元気象モデルによる事故時の気象場再現計算と、これに引き続き大気拡散モデルにより、先に整備した放出源条件を用いて放射性物質の移流、拡散、沈着に関する計算を実施する。この計算に用いる気象モデルおよび大気拡散モデルについてはシミュレーションの精度が十分に検証されているものを用いる。

③ 大気拡散シミュレーション結果の評価

大気拡散シミュレーションで計算した核種別の大気中濃度、核種別の地表沈着量、および合計核種による空間線量率と実地に得られているモニタリングデータを比較することにより、計算結果の妥当性確認および誤差評価を行う。

④ 時系列大気中放射性物質濃度マップの構築

大気拡散シミュレーションで計算した地上付近の核種毎の大気中濃度分布を、水平方向（東西・南北それぞれ）の所定の間隔、毎時刻（正時～正時の1時間における平均値）で出力し、時系列大気中放射性物質濃度マップを作成する。

(3) 結果の概要

① 放出源条件などの計算入力データの整備

事故時におけるヨウ素等の短半減期核種の放出源条件について、これまでに公表されている情報や文献に基づき調査・整理し、大気拡散計算の入力条件として整備した。計算対象核種は、放医研が設置した「拡散シミュレーション検討委員会」の検討結果に基づき、放出量推計に基づく内部被ばく線量への寄与率を考慮して、 ^{131}I 、 ^{133}I 、 ^{132}Te 、 ^{137}Cs とし、 ^{137}Cs については、沈着量データとの比較に利用することとした。放出率の時間変化は、原子力機構による ^{131}I 、 ^{137}Cs の推定結果を用い、他の短半減期核種 (^{133}I 、 ^{132}Te) は、数少ない環境モニタリングデータと、減衰係数や推定インベントリから、 ^{131}I 、 ^{137}Cs との放射能比率を推定した。これにより設定した各核種の放出率の時間変化を基本放出源条件とし、この放出率がファクター3程度の幅を持つとして、放出源情報の不確実性の影響評価を行った。

② 大気拡散シミュレーション計算

大気拡散シミュレーションでは、原子力機構で開発した「緊急時環境線量情報予測システム（世界版）WSPEEDI 第2版（寺田他，2008）」を用いた。WSPEEDIの大気拡散シミュレーションは、非静力大気力学モデルMM5（米国大気研究センター（NCAR）とペンシルバニア州立大学（PSU）開発）による事故時の気象場再現計算と、これに引き続き粒子拡散モデル GEARN（原子力機構開発）により、上記の放出源条件を用いた放射性物質の移流、拡散、沈着計算を実施する。被ばく線量評価の対象範囲は、放出源を中心とした半径250kmの陸上であるため、大気中濃度等を計算する領域を、東西690km×南北960km、水平方向の空間分解能を、3kmとした。対象期間は、平成23年3月11日00時から4月30日24時までとした。

③ 大気拡散シミュレーション結果の評価

WSPEEDIで計算した空間線量率、空気中核種濃度、および ^{137}Cs 沈着量分布と測定値を比較することにより、予測精度を評価した。空間線量率の時系列の比較においては、東日本の各地点での時間変化は概ね再現できているが、期間や地域によっては、ブルーム通過時刻に2、3時間程度のずれがあるケースや、通過位置が数メッシュずれているケースが見られた。空気中核種濃度の時系列についても時間変化の再現性は同様な傾向であったが、定量的には過小評価となっているケースもあり、放出源条件の不確実性の影響も示唆される。航空機モニタリングによる ^{137}Cs 沈着量分布との比較においては、WSPEEDIのオリジナル版では宮城県における過大評価と群馬県および栃木県における過小評価があったが、今回の解析で湿性沈着過程の氷相と液相の洗浄率設定を変えることによって再現性の向上

が見られた。また、大気中核種の存在形態による乾性沈着速度と洗浄率の違いも考慮した解析を行い、その影響評価を行った。

④ 時系列大気中放射性物質濃度マップの構築

WSPEEDIの大気拡散シミュレーションで計算した地上付近の核種毎の大気中濃度分布および地表沈着量分布を、水平方向（東西・南北それぞれ）の3km間隔、毎時刻（正時～正時の1時間における平均値）で出力し、時系列大気中放射性物質濃度マップを作成した。この際に、大気拡散計算は単位放出条件により実行し、後から放出源条件を設定可能なデータベース形式の出力とした。また、主要な大気拡散プロセスである沈着過程について、ガス状や粒子状の物質に対するパラメータを設定したケース毎にデータベースを作成し、各ケースの結合により、任意のガス・粒子割合を対象とした拡散解析結果を作成可能とした。

参考文献（第2章）

寺田宏明, 永井晴康, 古野朗子, 掛札豊和, 原山卓也, 茅野政道: 緊急時環境線量情報予測システム（世界版）WSPEEDI 第2版の開発, 日本原子力学会和文論文誌, 7, 257-267 (2008).

3. 計算モデル

本受託事業で使用した大気拡散モデル WSPEDI について述べる。図 3-1 にモデル全体構成および計算フローを示す。プログラムのうち TERRAIN から INTERPF までは気象予測モデル MM5 の入力データを作成するための前処理プログラムである。また、図 3-1 の「前処理」は後述の FDDA や客観解析機能において気象観測値データを利用する際に必要となるデータ処理を示す。これについては第 4 章において述べる。

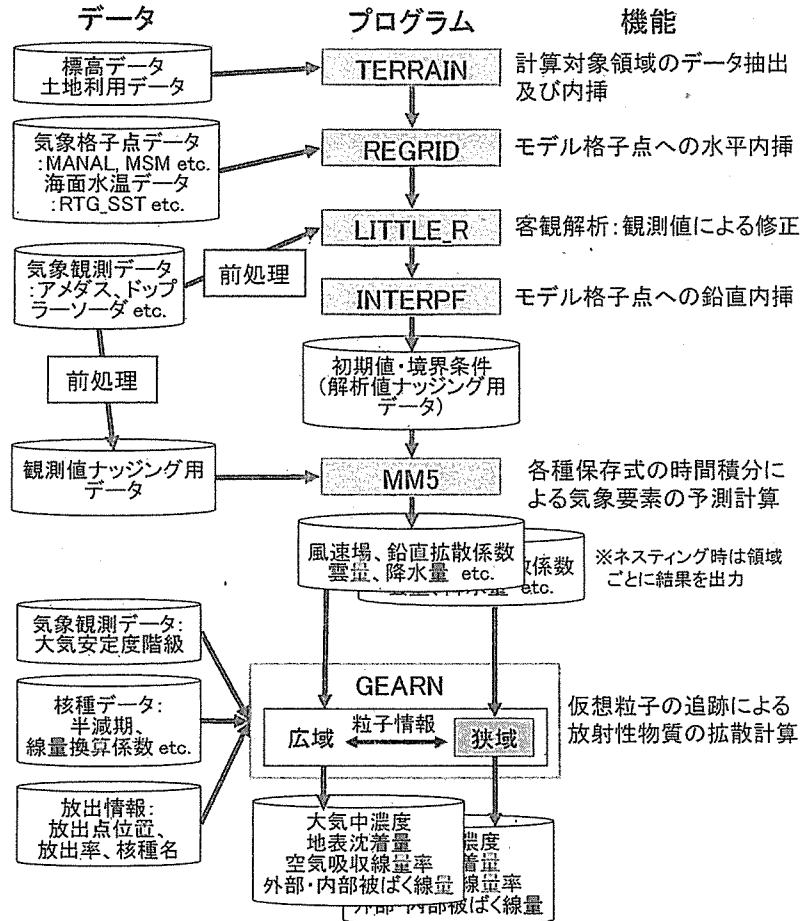


図3-1 大気拡散モデルWSPEDIの全体構成と計算フロー

以下では、2つの計算モデル MM5 と GEARN について、その概要と主な機能について説明する。

3.1 気象モデル MM5

気象場の予測計算は、NCAR と PSU により開発された3次元非静力大気力学モデル MM5 (Grell et al., 1994) を用いて行う。MM5 は運動量3成分、熱エネルギー、水蒸気量、雲水量等についての保存式を解くことにより、対応する風速3成分、温位、降水量等の気象要素を計算する。また、降水、放射、地表面過程、大気境界層乱流などの各種物理過程を考慮することが可能である。座標系は、水平方向は地図投影空間での距離座標系であり、鉛直方向は気圧による地形準拠座標系 (σ 座標系) を用いている。MM5 には、予測精度の向上に役立つネスティング、4次元データ同化 (FDDA: Four Dimensional Data Assimilation)、および客観解析などの各種機能が備えられている。以下でそれらの機能について述べる。

(1) ネスティング機能

局地部分を効率的に高解像度で計算する機能であり、粗い格子の広域計算領域の中に詳細格子の局地計算領域を設定して、広域の予測値を狭域の境界条件とした計算を行う。その後、狭域から広域への計算値のフィードバックにより両領域で整合性のある気象場を計算する。これを2-wayネスティングといい、解像度の異なる複数の領域について同時に計算することが可能である。また、広域から狭域へと各領域の計算を段階的に実施する1-wayネスティング (NESTDOWN) も可能である。

(2) FDDA機能

予測結果が客観解析データや観測データから乖離しないように、計算値を修正しながら予測計算を進めるデータ同化機能の一種である。客観解析データ等の格子状のデータによる修正を行う「解析値ナッジング」と、空間的にランダムに配置された観測地点における気象観測データを用いる「観測値ナッジング」があり、後者は連続的に測定された時間解像度の高い観測データの利用により、解析値ナッジングよりも短い時間間隔での修正が可能である。

(3) 客観解析機能 (プログラム: LITTLE_R)

MM5が初期・境界条件として用いる気象予報の現業により提供された客観解析値や予報格子点値等の気象格子点データを、観測データを用いて修正する機能である。現業の客観解析や気象予報計算が行われる際に利用される観測値以外の特別観測等によるデータを入力可能な場合に、初期値や境界条件の向上が期待できる。

3.2 拡散モデル GEARN

放射性物質の大気中における拡散は、原子力機構開発のラグランジュ型粒子拡散モデルGEARN (Terada and Chino, 2008) により計算する。GEARNは、大気中に放出された放射性物質を多数の仮想粒子で模擬し、MMSで計算した3次元の気象場に基づいて、平均流による移流と乱流による拡散に伴う粒子の移動を追跡することにより、放射性物質の大気拡散を計算する。モデル座標系は、水平方向はMMSと同じ地図投影空間での距離座標であり、鉛直方向は地形準拠座標系 (Z*座標系) を用いている。MMSは、3次元風速場に加えて、鉛直拡散係数、降水量、雲量等を予測可能なため、GEARNは大気の乱流状態や降雨、雲量の空間・時間的変動を考慮して、鉛直混合や湿性沈着を予測できる。地表面への沈着については、乱流による乾性沈着と降雨による湿性沈着を考慮可能である。GEARNの主な特徴を以下に挙げる。

(1) 拡散パラメータ

計算格子よりも小さなスケール (サブグリッドスケール) の大気の乱れに起因する拡散過程による粒子の輸送を計算する際の水平拡散パラメータは、本受託解析においてはパスキル・ギフォード線図を用いている。実際のモデル計算では、大気安定度と風下距離に依存する近似関数を用いている。鉛直拡散係数はMMSの出力を用いている。

(2) 放出形態

同時に15核種までの任意地点 (緯度経度により指定) からの点状放出を扱うことができる。各核種について時間変動する放出率および放出高度を設定可能である。

(3) ネスティング機能

GEARNにおいても、MMSで設定する領域に対応した大気拡散の2領域ネスティング計算が可能である。ネスティング計算では、放出点を含む狭域を高分解能格子で形成するネスト領域として、粗い格子で形成する広域内に設定し、両領域間での放射性物質を模擬する仮想粒子の流入・流出を考慮する大気拡散計算を行う。この時、狭域と広域の大気拡散計算は、並列計算機の2プロセッサを用いて同時に実行し、領域間の粒子の移動に伴う粒子の放射線量や位置情報等の受け渡しを並列計算通信機能Message Passing Interface (MPI) で行う。これにより、放出点周辺の局地域から広域まで一貫した予測精度の向上が可能になる。空間分解能については、1領域計算時は任意に設定可能であるが、2領域ネスティング計算時の格子間隔比 (広域: 狭域) はMMSのプログラム上の制約により、3:1とする必要がある。

(4) 出力

GEARNの計算出力は、大気中濃度(Bq/m³)、地表沈着量(Bq/m²)と、それらから計算される空間放射線量率(μGy/h)、外部被ばく線量(mSv)、呼吸による内部被ばく線量(mSv)である。

各計算格子セルにおける大気中濃度および地表沈着量は、対象格子セル内に存在または沈着する粒子の持つ放射線量を積分して求める。被ばく線量については、サブマージョンモデルにより、計算セル平均の大気中濃度および地表沈着量に線量換算係数を乗じて計算する。出力時間間隔については任意に設定できる。

参考文献 (第3章)

- Grell, G. A., J. Dudhia and D. R. Stauffer: A Description of the Fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR Tech. Note, NCAR/TN-398+STR, National Center for Atmospheric Research (1994).
- Terada, H. and M. Chino: Development of an atmospheric dispersion model for accidental discharge of radionuclides with the function of simultaneous prediction for multiple domains and its evaluation by application to the Chernobyl Nuclear Accident, J. Nucl. Sci. Technol., 45, 9, 920-931 (2008).

4. 実施内容および結果

4.1 放出源条件などの計算入力データの整備

(1) 放出率時間変化の設定

事故時におけるヨウ素等の短半減期核種の放出源条件について、これまでに公表されている情報や文献に基づき調査・整理し、大気拡散計算の入力条件として整備した。計算対象核種は、放医研が設置した「拡散シミュレーション検討委員会」の検討結果に基づき、放出量推計に基づく内部被ばく線量への寄与率（放医研の解析による）を考慮して、 ^{131}I 、 ^{133}I 、 ^{132}Te 、 ^{137}Cs とし、 ^{137}Cs については、沈着量データとの比較に利用することとした。

放出率の時間変化は、原子力機構による推定結果が学術誌に掲載されており（Chino et al., 2011, Katata et al., 2012a,b, Terada et al., 2012）、その最終結果（Terada et al., 2012）が、大気拡散解析による環境モニタリングの再現性を考慮すれば、現時点で最も妥当と考えられる。原子力機構による ^{131}I 、 ^{137}Cs の放出率時間変化推定結果を図 4.1-1 に示す。 ^{131}I 、 ^{137}Cs の放出率時間変化についてはこの推定結果を用い、他の短半減期核種（ ^{133}I 、 ^{132}Te ）は、数少ない環境モニタリングデータと、減衰係数や推定インベントリから ^{131}I 、 ^{137}Cs との放射能比率を求め、それを ^{131}I 、 ^{137}Cs の放出率に乗じることにより、放出率の時間変化を設定することが有効である。この検討を行う上で、各核種の特性と福島第一原子力発電所 1 から 3 号機の総インベントリ（西原他, 2012）を表 4.1-1 にまとめた。

核種 n の ^{131}I または ^{137}Cs に対するインベントリの放射能比率 R_n は、放出時刻ごとに次式によって計算できる。

$$R_n = \frac{I_n \exp(-\lambda_n t)}{I_{^{131}\text{I}, ^{137}\text{Cs}} \exp(-\lambda_{^{131}\text{I}, ^{137}\text{Cs}} t)}$$

ここで、 I はインベントリ、 λ は減衰係数、 t はシャットダウン時刻からの経過時間である。これにより計算された放出時刻ごとの放射能比率を、原子力機構の大気中濃度測定データの放射能比率と比較した結果を図 4.1-2 に示す。表 4.1-1 の核種特性から、 ^{132}Te の大気中での状態は ^{131}I と類似していると思われるが、ダストサンプルの ^{132}Te と ^{131}I の放射能比率は、放出時のインベントリの放射能比率とは相関が低い。これは、 ^{132}Te の沸点が高いことから、 ^{131}I と同様に気化されなかったためと考えられる。一方、 ^{132}Te と ^{137}Cs の放射能比率は、ダストサンプルと放出時のインベントリで相関が高く、ほぼ同等に減衰している。初期インベントリの放射能比率について、表 4.1-1 の値より大きい値（ $^{132}\text{Te}/^{137}\text{Cs}=20$ ）を用いると、放出時のインベントリの放射能比率でダストサンプルの放射能比率を良好に近似できる。そこで、 ^{132}Te の放出率は、 ^{137}Cs の放出率時間変化と上記放射能比率から設定することとした。

^{133}I については、放出および大気拡散過程ともに ^{131}I と同等なふるまいを考えると考えられ、図 4.1-2 に示す放射能比率の変化傾向は、ダストサンプルとインベントリではほぼ一致している。このことから、 ^{133}I と ^{131}I の放射能比率は、放出時のインベントリの放射能比率をそのまま使用できると考えられるが、ダストサンプルの放射能比率がインベントリの放射能比率より小さい傾向も見られることから、初期インベントリの放射能比率を 1/2 としたケースも設定し、両ケースの範囲で評価することとした。

以上により設定した核種ごとの放出率時間変化を表 4.1-2 および図 4.1-3 に示す。

(2) 放出源条件の不確実性

上記により設定した各核種の放出率の時間変化を基本放出源条件とし、この放出率が持つ不確実性の幅、およびそれによる濃度計算への影響の検討を行った。 ^{131}I 、 ^{137}Cs の放出率時間変化設定に用いた原子力機構の放出量推定結果は、大気拡散シミュレーションによる環境モニタリングデータの再現試験や、国内外の研究機関による放出率推定結果と比較して、その妥当性を確認している（Chino et al., 2012）。このうち、名古屋大学による推定結果（平尾他, 2012）との比較では、図 4.1-4 に示すように、ほぼ同様な時間変化を示している。名古屋大学では、推定した放出率の不確実性評価も実施しており、推定値はファクター 3 程度の幅を持つとしている（Hirao et al., 2012）。原子力機構と名古屋大学の放出率推定手法は、どちらも大気拡散シミュレーションにより環境モニタリングデータを再現する放出率を求めるものであり、同等な大気拡散モデルを用いていることから、原子力機構の放出率推定値もファクター 3 程度の幅を持つと考えて、放出源情報の不確実性の影響評価を行うこととした。

名古屋大学の放出率推定では、陸上のモニタリングデータを用いており、使用可能なデータの制限により、ブルームが海上に流れていた期間の推定値およびその不確実性の幅は得られていない。この期間の不確実性の影響については、仮に放出率の不確実性の幅をファクター 10 として、被ばく線量評価上の影響、つまり、対象領域の陸上での核種濃度計算値への影響の有無を確認した。ここでは、原子力機構の放出率時間変化（図 4.1-1）について、放出率一定となっている 1 区分ごとに、その期間だけ放出率を 10 倍にした計算を実施し、全解析期間で積算した地上大気濃度が基本放出率の計算値の何倍になっているかを求め、分布図を作成した。このうち、ブルームが海上に流れていた期間について図 4.1-5 に示した。この結果より、これらの期間の放出率の不確実性は、陸上への影響がほとんどないと考えられる。これより、放出源条件の不確実性は、ブルームが陸上に流れた期間の放出率を上記のファクター 3 程度の幅で変えた計算によりその影響を評価することとした。

また、放出源条件の不確実性の影響を評価する上での参考として、地球規模の大気拡散解析と測定データを用いた放出源推定結果（Stohl et al., 2012）および過酷事故解析コードを用いた放出源推定結果（Hoshi and Hirano, 2012）による解析も実施した。

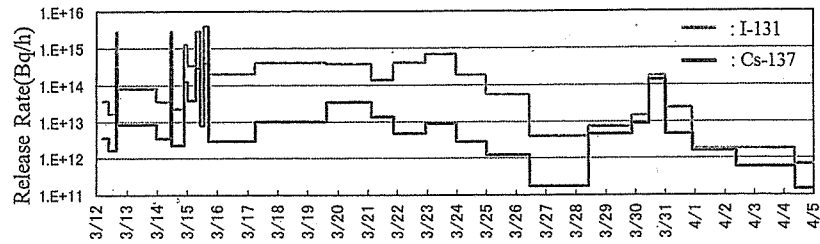


図 4.1-1 原子力機構による ^{131}I 、 ^{137}Cs の放出率時間変化推定結果 (Terada et al., 2012)

表 4.1-1 放射性核種の特徴とインベントリ

Radionuclide	State in atmosphere	Half-life	Boiling point (°C)	Inventory (PBq)*	Environmental data source
I-131	Gas/aerosol	8.0 day	180	6.02E+6	Large
I-132	Gas/aerosol	2.3 hour	180	8.85E+6	Limited
Te-132	Gas/aerosol	3.2 day	1400	8.68E+6	Limited
I-133	Gas/aerosol	21.0 hour	180	1.26E+7	Limited
Cs-137	Aerosol	30.0 year	670	6.98E+5	Large
Cs-134	Aerosol	2.1 year	670	7.18E+5	Large

*福島第一原子力発電所の燃料組成評価 (西原他, 2012)

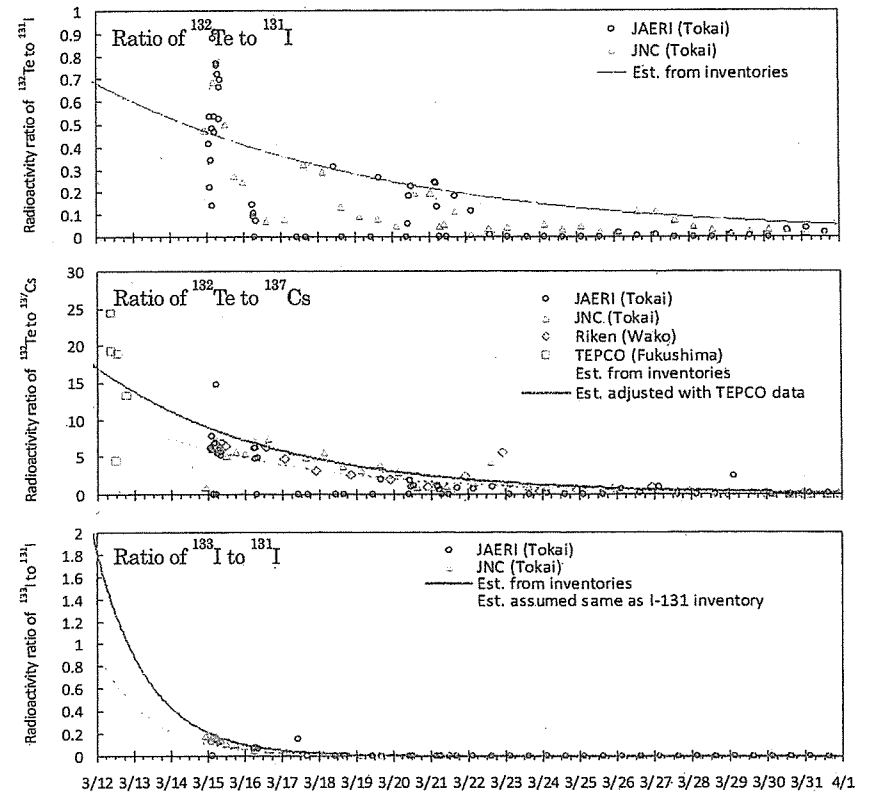


図 4.1-2 ^{133}I および ^{132}Te の ^{131}I または ^{137}Cs に対する放射能比率時間変化の比較