

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO – MATEMATIČKI FAKULTET
BIOLOŠKI ODSJEK

**UTJECAJ IZLIJEVANJA RADIOAKTIVNOG MATERIJALA IZ NUKLEARNE
ELEKTRANE FUKUSHIMA DAIICHI NA MORSKI OKOLIŠ**

EFFECTS OF THE SPILLING OF THE RADIOACTIVE MATERIAL FROM THE
NUCLEAR POWER PLANT FUKUSHIMA DAIICHI ON MARINE ENVIRONMENT

SEMINARSKI RAD

Nela Tadić

Preddiplomski studij znanosti o okolišu

(Undergraduate Study of Environmental Sciences)

Mentor: prof.dr.sc. Petar Kružić

Zagreb, 2020.

Sadržaj

Uvod	2
Tijek nesreće.....	2
Lokacija nuklearne elektrane	4
Radioaktivnost prije i odmah nakon nesreće	5
Kontaminacija u organizmima	6
Zaključak	11
Literatura	12
Sažetak	14
Summary	14

Uvod

U ožujku 2011. godine nakon snažnog potresa uslijedio je tsunami koji je pogodio Fukushimu. Tsunami je dosegnuo i nuklearnu elektranu u Fukushimi, Fukushima Daiichi NPP (Nuclear Power Plant), te je tako započet domino efekt velike nesreće u Fukushimi. Bila je to najveća nuklearna nesreća nakon Chernobila, prožeta i sa kontinuiranim curenjem radioaktivnog materijala u ocean. Zbog čega je nesreća u Fukushimi ujedno i najveći ikada slučajni ispušt radioaktivnog materijala u ocean. (Zofia Baumann, 2019.) No, ne samo slučajni, u danima koji su uslijedili nakon nesreće, u pokušajima da se saniraju reaktori dio se materijala ispuštio i namjerno, kao i radioaktivna voda koja se koristila za hlađenje pogođenih reaktora. Posljedice su na kopnu i u moru bile ogromne, no možda ipak manje problematične nego što se prognoziralo?

Tijek nesreće

U ožujku 2011. godine snažan potres, jačine 9 prema Richterovoj ljestvici uzrokovao je tsunami u gradu Okuma na japanskom otoku Honshu. U prefekturi Fukushima se nalazila nuklearna elektrana Fukushima 1 koja je pretrpjela veliku štetu zbog tsunamija te je bila razlog evakuacije svih stanovnika u blizini elektrane. Tsunami je uslijedio nakon potresa, „tsunami je morski val velikih amplituda uzrokovan potresom, erupcijom vulkana ili atmosferskim poremećajem. Deformacije morskog dna u blizini žarišta potresa prenose se do površine, gdje uzrokuju potresne valove koji se šire po površini na sve strane.¹“

Sam potres „samo“ je zaustavio rad aktivnih reaktora, dok je tsunami sat vremena kasnije potopio spremnike s gorivom, ali i dizelske agregate koji su služili kao izvor energije u slučaju nesreće. Tako je cijela elektrana ostala bez ikakve električne energije. Bez električne energije prestalo je hlađenje reaktora i hlađenje bazena sa iskorištenim gorivom. Prvo otpuštanje radioaktivnog materijala odvijalo se kroz otpuštanje pritiska, a zatim kroz nekontrolirano ispuštanje radioaktivne pare, požare, eksplozije i curenje, te izlivanje stotina tisuća litara kontaminirane vode.

¹ Tsunami: Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020. <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=62588>

Odmah nakon potresa izmjerene su veće količine radioaktivnih plinova (posebice ksenona) te je bilo jasno da reaktor negdje curi. Unutar par sati gorivo se u potpunosti otopilo i nakupilo se na dnu spremnika za tlak u reaktoru, što uzrokuje otapanje dna reaktora. Para iz isparene vode tvori kisik i vodik, vrlo promjenjivu smjesu koja je reagirala sa cirkonijevom legurom na šipkama za gorivo. Takve eksplozivne reakcije i visoki tlakovi u reaktorima uzrokovale su razornu eksploziju u reaktoru 1. U pokušaju da se riješi problem, u reaktore su kroz svakih sat vremena pumpali 8000 litara vode, ali ta voda je u potpunosti istjecala ili isparavala. Kroz par dana više od 10 000 litara vode se kroz sat vremena pumpalo u reaktor 2. Mjesecima nakon nesreće u reaktore 1, 2 i 3 se pumpalo vodu kako bi se zaustavilo otapanje. Unatoč tome svaki je reaktor imao barem jednu eksploziju i vjetar je nosio radioaktivne produkte fizije sjeverozapadno. Čak i reaktor 4 koji nije bio u funkciji za vrijeme nesreće pretrpio je eksploziju krova. (M. Baba, 2013.)

Uz raznošenje radioaktivnog materijala vjetrom i zagađenje kopna i kopnenih voda, radioaktivna voda je nekontrolirano curila u ocean. Razina radijacije bila je 1000 mSv/h. (TEPCO, 2011.) Dakle, jedan sat izloženosti ovoj razini radijacije bio bi dovoljan za razvitak teške radioaktivne bolesti. Za usporedbu, radnicima u nuklearnoj industriji prosječni je godišnji limit izloženosti radijaciji 20 mSv godišnje.

Intenzivno izlivanje zaustavljeno je 6. travnja 2011., ali voda je tu i tamo curila u Tihom ocean. No, tu problemi nisu stali, Japanska kompanija u čijem vlasništvu je bila nuklearna elektrana u Fukushima, TEPCO, željela je napraviti mjesta za još radioaktivne vode i bacili su 11 500 000 litara vode, koja je sadržavala 150 milijardi bekerela ², direktno u ocean. Nakon osude od susjednih zemalja, TEPCO je instalirao filtere zraka i vode u uništene reaktore jer zbog brojnih oštećenja više ni nije imalo smisla ulijevati vodu.

Japanska vlada je izmjerila da je u prvih 6 tjedana od nesreće ispušteno 42% količine cezija koja je bila ispuštena u Chernobilu. Povrh toga ispuštena je i najveća ikada količina radioaktivnog plemenitog plina ksenona. Također su izmjerene visoke količine joda, stroncija i plutonija. Razine radioaktivnosti spuštale su se sakupljanjem visoko radioaktivnog materijala. No, velike količine su odnesene prema Tihom oceanu vjetrom, a nakon promjene smjera vjetera i

² Bekerel (Bequerel) je mjerna jedinica za aktivnost radioaktivnoga izvora. 1 Bq odgovara jednom raspadu atomske jezgre u sekundi. (<https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/becquerel-bq.html>)

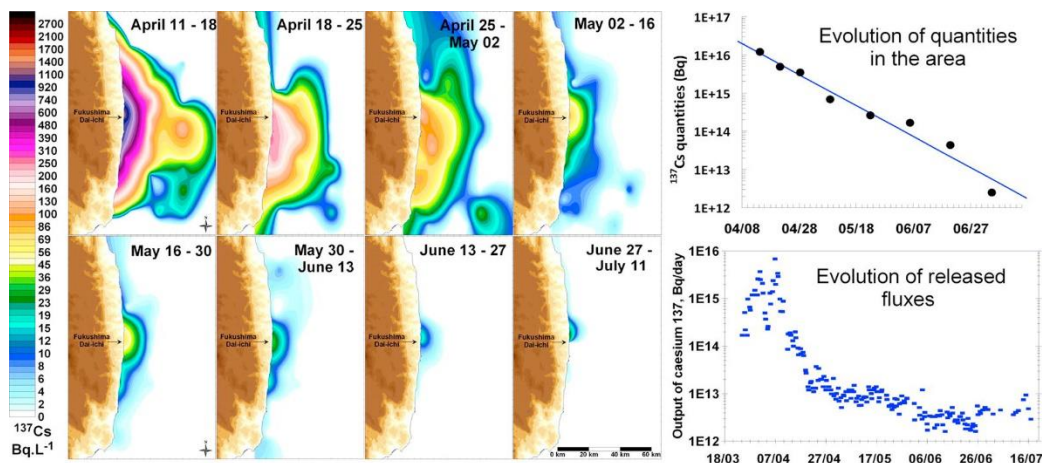
sve regije sjeverozapadno su bile zahvaćene kontaminacijom. Zagađenje je zabilježeno globalno, no razrijeđeno.

U nuklearnoj elektrani nalazili su se umjetno napravljeni radionuklidi cezija³ ^{134}Cs i ^{137}Cs , nastali su u procesu izrade energije. Radioaktivni cezij ^{134}Cs ima poluraspad 2.06 godina, dok cezij, ^{137}Cs , ima poluraspad 30.1 godina. Oni su bili glavni sastav radioaktivne kontaminacije uz izotop joda ^{131}I . U okruženju od 500 metara od nuklearne elektrane u Fukushimi u travnju 2011. godine koncentracije u moru za ^{134}Cs i ^{137}Cs dosegnule su 68 000 Bq/L, a za ^{131}I i do 100 000 Bq/L. (Bois i sur., 2012.) Zbog činjenica da je nesreća bila slučajna ne može se točno znati koliko se ukupno radionuklida nalazilo u morskoj vodi oko elektrane. ^{137}Cs je topiv u morskoj vodi i nošen je vrlo daleko morskim strujama i raširen po oceanima. Značajan dio cezija i ostalih radionuklida će se vezati na suspendirane čestice u moru i uzrokovati kontaminaciju sedimenata na dnu mora. (Lee i sur. 2005.)

Lokacija nuklearne elektrane

Nuklearna elektrana Fukiiushima Daiichi nalazi se na istočnoj obali otoka Honshu, 200km sjeveroistočno od Tokija. Obala se proteže od sjevera prema jugu i dio je obale Tihog oceana. Dubina se povećava od obale, doseže dubinu 200 m na 50 km od obale, a zatim na 100 km od obale doseže 500 m. Struje su na tom području uglavnom generirane morskim mjenama, vjetrom i cirkulacijom vodenih masa u Tihom oceanu. Kratkoročno najveći utjecaj imaju morske mjene, pomiču more u brzinama od jednog metra po sekundi i to svakih 12 sati. Vjetar utječe na cirkulaciju uglavnom površinske vode. Glavna cirkulacija rezultat je interakcije snažne Kuroshio oceanske struje koja dolazi s juga i kreće se uz obale Japana i Oyashio koja dolazi sa sjevera. Obalne vode u blizini Fukushima Daiichi nuklearne elektrane nalaze se upravo na mjestu gdje se te struje sastaju. Tako će Kuroshio struja imati glavnu ulogu raspršivanja radioaktivnih čestica i odnijeti kontaminaciju istočno, prema sredini Tihog oceana. Prikaz predviđanja rasprostranjenja kontaminacije prikazan je na slici 1. (Jayne i sur., 2009.)

³ U ovom seminaru cezij koji se u tekstu spominje je radioaktivan, ako nije drugačije naznačeno.



Slika 1: Prikaz procjene rasprostriranja kontaminacije u obalnim vodama oko Fukushime 1 (izvor: Bailly du Bois i sur., Estimation of marine source-term following Fukushima Dai-ichi accident. Journal of Environmental Radioactivity)

Radioaktivnost prije i odmah nakon nesreće

Prije nesreće koncentracije radionuklida u površinskim vodama Tihog oceana bile su porijeklom od testiranja nuklearnog oružja u atmosferi. Za ^{137}Cs te su vrijednosti bile u rasponu od 1 – 4 Bq/m³. Te vrijednosti bile su u skladu s koncentracijama u površinskim vodama u ostalim oceanima. (Nakanishi i sur., 2011.) Nakon nesreće te su vrijednosti u radijusu od 30 kilometara prelazile 10 Bq/L (10 000 Bq/m³) i dosezale čak 68 000 Bq/L blizu same nuklearne elektrane.

Radionuklidi s kratkim radioaktivnim poluraspadom (manje od 10 dana, poput ^{131}I) prestali su biti mjerljivi nakon nekoliko mjeseci i smatra se da ne bi trebali imati nikakve velike posljedice dugoročno. Ostali poput ^{134}Cs i ^{106}Ru ostati će u morskom okolišu nekoliko godina. Njihov opstanak u vodenom stupcu ovisi o vezanju za suspendirane čestice pri površini mora koje će ih kasnije spustiti na dno.

Nakon eksplozija između 12. i 23. ožujka 2011. godine u roku od 15 dana je zabilježeno da se dio radionuklida u atmosferskom oblaku spusti na površinu oceana. Kada je dosegla more ta se kontaminacija teško mogla zaustaviti, velike su površine u pitanju i čestice su se brzo raspršile. Također je teško odrediti koje su koncentracije radionuklida došle u ocean iz taloženja

iz atmosfere, a koje iz ispuštanja radioaktivne vode. Prije 24. ožujka dok je još bilo samo malo radioaktivne vode ispuštene, koncentracije su se mogle pripisati taloženju iz atmosfere, te su brojke bile u rasponu od 9 – 13 Bq/L za ^{137}Cs i ^{131}I . 10 kilometara južnije zabilježene su vrijednosti u rasponu od 20 – 100 Bq/L i to sa 10 puta većom aktivnošću nego na prvoj lokaciji. Te su razlike potvrdile da je postojalo nekoliko puteva kontaminacije do oceana. Zatim je 25. ožujka zabilježeno smanjenje koncentracija u površinskim vodama na udaljenosti od 10 km od obale. Uzrok tomu je vrlo vjerojatno bilo raspršivanje i razrjeđivanje kontaminacije u moru uz pomoć morskih struja.

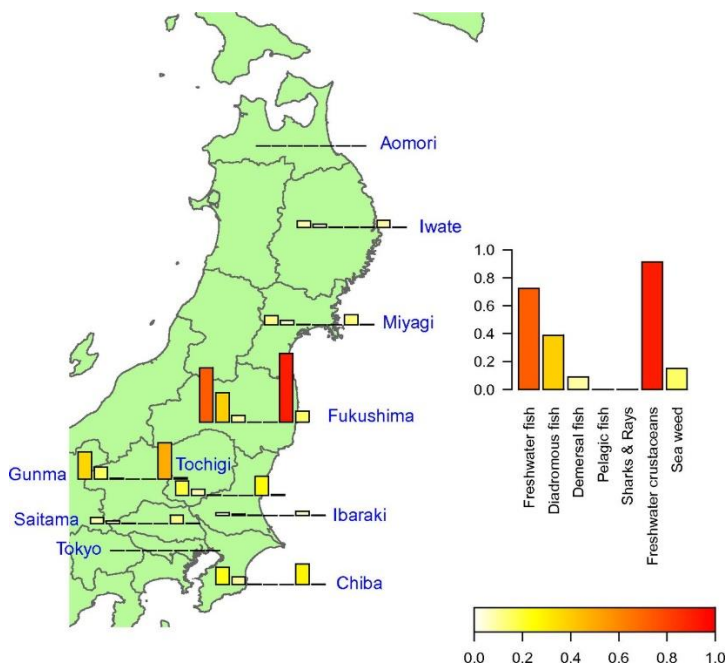
U oceanu su organizmi odmah bili pod utjecajem kontaminacije. Najviše su stradali organizmi uz obalu te je zabranjen lov. Najproblematičniji su bili organizmi u samoj luci, ali zbog masivnih morskih struja na tom području radioaktivni materijal se brzo raspršio. Brzo raspršivanje olakšalo je problem konkretno u ekosustavu uz obale Fukushime, ali je i raširilo kontaminaciju. Širenje kontaminacije djelomično su usporili sedimenti na dnu te radioaktivne supstance nisu daleko od Japana napravile veliku štetu.

Kontaminacija u organizmima

Predviđano je da će radioaktivnim česticama biti potrebno 5 godina do obala Amerike te dok dosegnu Američke vode imati će vrijednosti manje od 3 Bq. No, kontaminirani organizmi su i ranije došli do američke obale. Prije nesreće u Fukushimi visoko migratorna plavoperajna tuna, ulovljena uz obale San Diega, imala je nemjerljive razine ^{134}Cs i vrlo niske pozadinske razine ^{137}Cs . Slična je situacija bila i kod žutoperajne tune na istom području. U kolovozu 2011. godine žutoperajna tuna imala je jednako niske razine, dok je plavoperajna tuna je imala povišene razine oba izotopa cezija u mišićnom tkivu. Te su razine prema japanskom standardu za hranu bile dozvoljene (ispod 100 Bq/kg mokre težine i ispod 400 Bq/kg suhe težine), prirodno postojeća radioaktivnost puno je viša i ribe su bile sigurne za konzumaciju, no ipak je bilo očito da su povišene razine upravo zbog nesreće u Fukushimi. Prema razinama kontaminacije plavoperajne tune izračunato je da su jedinke bile kontaminirane 1-2 mjeseca prije nego su krenule na put do obale Kalifornije, a da su putovale 3-4 mjeseca. Iako su zabilježene sigurne razine cezija u tkivima tih organizama ipak se mogu koristiti za praćenje ruta migracija velikih

životinja (pelagičkih riba, morskih kornjača, sisavaca i ptica) kroz zapadni dio Tihog oceana. (Fisher i sur., 2013.)

Ipak, zbog kontaminacije, pozicije pojedinih vrsta riba u hranidbenom lancu, ali i lokacija gdje žive u vodenom stupcu i uzorci migracija su se promijenili. Bentičke odnosno demerzalne ribe, one koje žive na dnu oceana, više su bile izložene kontaminiranom sedimentu od pelagičkih riba koje žive višlje u vodenom stupcu. Slika 2 prikazuje rizik od kontaminacije u pojedinim skupinama organizama ovisno o lokaciji. U početku je bilo mnogo jedinki sa preko 100 Bq/kg cezija, ali se brojnost tih jedinki drastično smanjila kroz 2011. i 2012. godinu. Kroz 2015.godinu uzoraka s preko 100 Bq/kg gotovo da više nije ni bilo. 100 Bq/kg važna je granica dozvoljene razine radioaktivnog cezija za ribe u ribarnicama koju je postavila Japanska vlada u travnju 2012.



Slika 2: Prikaz rizika od kontaminacije pojedinih skupina organizama ovisno od lokacije na kojoj žive (izvor: Okamura i sur., Risk assessment of radioisotope contamination for aquatic living resources in and around Japan)

Važno je napomenuti da su i prije nesreće različite vrste imale drugačije razine cezija u organizmu. Prema IAEA-inom izvješću iz 2004. godine morske ribe ne akumuliraju cezij na tako visokoj razini kao slatkovodne ribe. Razlikuje ih mehanizam osmoze, u slatkoj vodi, osmotski pritisak tekućina u ribljem organizmu veći je nego onaj vode koja ga okružuje zbog čega riba aktivno izbacuje vodu iz organizma, uz očuvanje minerala i održavanje normalnih razina osmotskog tlaka. Kroz taj proces cezij se akumulira uz sakupljene soli i minerale. S druge strane morske ribe imaju niži osmotski tlak od morske vode koja ih okružuje te one moraju spriječiti gubitak vode iz organizma. Zato morske ribe aktivno izbacuju soli i minerale, zajedno sa cezijem, van iz svojeg organizma. Također Furakawa i sur. su u svojem istraživanju zaključili da je cezij biokemijski analogan kaliju te se kroz iste puteve izbacuje van iz tijela preko škrge.

Količina cezija u ribama i ribarskim proizvodima opadala je pravilno kroz godine, iako su koncentracije cezija varirale ovisno o vrsti ribe, okolišu u kojem živi i prostornoj distribuciji. Više su koncentracije zabilježene u plićim vodama, a najbrže su se spustile razine cezija kod pelagičkih riba i nekih beskralježnjaka. Usporedno sa time, kod demerzalnih riba opadanje koncentracije cezija bilo je puno sporije i odvijalo se postepeno. Demerzalne ribe su ribe koje žive pri dnu mora, te su jedinke u vodama oko Fukushime pokazivale kontinuirane koncentracije cezija u bentičkoj hranidbenoj mreži.

Razlog viših koncentracija radioaktivnog cezija u bentičkim organizmima je dostupnost cezija tim organizmima u sedimentu. Laboratorijsko istraživanje na institutu u Tokiju pokazalo je da je efektivnost asimilacije ^{137}Cs kod mnogočetinaša koji ingestiraju sediment na dnu mora blizu obale Fukushime 16%, rakovi koji konzumiraju te mnogočetinaše imaju efektivnost asimilacije do 55%, a ribe koje se hrane mnogočetinašima i do 80%. Također, kod gotovo svih jedinki većina cezija u tkivu je došla u organizam kroz prehranu, naime kada su uklonili izvor cezija iz vode cezij u tkivima mnogočetinaša se spustio za 20%, rakova 10%, a riba 6%. Kod uklanjanja cezija u sedimentu, dakle izvoru prehrane za te organizme, smanjenje cezija u tkivima bilo za 45% kod mnogočetinaša, 14% kod rakova i 5% kod riba. Zaključili su da je faktor prenošenja cezija preko trofičkih razina 1 te je to razlog zašto se duže zadržava u organizmima koji žive pri dnu. (Wang, Baumann, Madigan, Fisher; 2016.)

U istraživanju iz 2014. godine Kikkawa i sur. su uzeli u obzir sve analize iz 2011. i 2012. godine, ukupno 8683 uzoraka iz mora uz obale Fukushime. Osmislili su 4 skupine prema koncentraciji radioaktivnog cezija (^{134}Cs i ^{137}Cs):

1. Jedinke imaju niske razine cezija u 2011. i 2012. godini
2. Jedinke imaju zabilježeno opadanje koncentracije u 2012. godini, ali je ono i dalje visoko
3. Jedinke imaju visoke početne koncentracije cezija, ali su se one spustile do gotovo nemjerljivih razina u 2012. godini
4. Jedinke imaju visoke koncentracije cezija u organizmu i u 2011. i u 2012. godini.

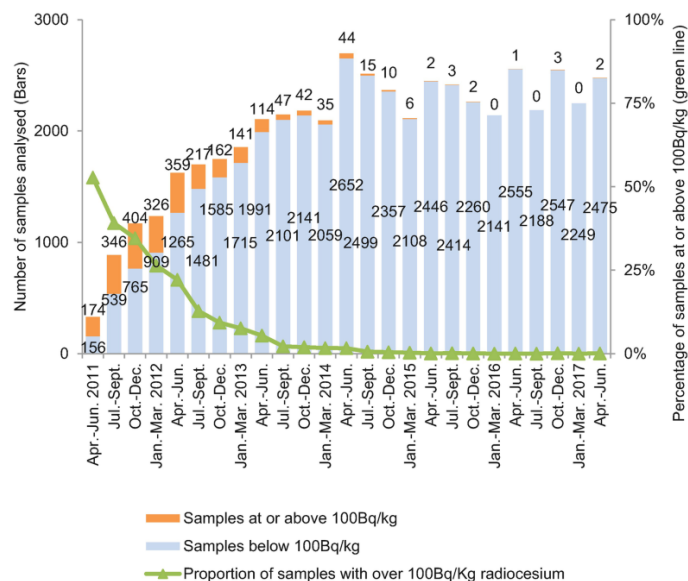
Od 97 vrsta, 60 ih je spadalo u prvu skupinu sa niskom koncentracijom te su to većinom bili pelagički organizmi. Druga skupina imala je 21 vrstu, dakle visoke koncentracije, i to su uglavnom bile demerzalne ribe. Treća skupina imala je samo jednu vrstu, *Ammodytes hexagrammos otakii*. Četvrta skupina imala je 15 vrsta i većina su bili obalni demerzalni kralješnjaci poput *Hexagrammos otakii*. Gotovo sve vrste iz skupina 1 i 3 su u 2012. zadovoljavale novu Japansku regulativu za koncentracije radioaktivnog cezija u ribama u ribarnicama, dok su jedinke iz skupina 2 i 4 ostale pod promatranjem.

U istraživanju Takagi i sur. malenih epipelagičkih riba, poput sardina i japanskog incuna otkriveno je da su jedinke ulovljene na komercijalnim ribarskim brodovima na području Kashima-Boso, 100km udaljenosti od Fukushime, imale koncentracije cezija 31 Bq/kg mokre težine u srpnju 2011. godine. To je ujedno bio i maksimum na tom području za te promatrane jedinke. Koncentracija se nakon toga postepeno smanjivala te je u 2012. i 2013. godini koncentracija radioaktivnog cezija u mišićima tih riba bila vrlo niska, 0,58 – 0,68 Bq/kg mokre težine.

Nakon brojnih istraživanja zaključeno je da koncentracija radioaktivnog cezija u organizmu svakako ovisi o veličini i starosti jedinke. Primjerice Narimatsu i sur. su mjerili koncentracije cezija u *Gadus macrocephalusu* – Pacifički bakalar, od travnja 2011. do ožujka 2014. u blizini Fukushime te su primijetili da su razine cezija bile više kod jedinki rođenih 2009. godine nego kod jedinki rođenih 2010. godine. Posebice je interesantno da su razine cezija u jedinki rođenih 2011. godine bile gotovo zanemarive. Procijenjeno je da je ekološki poluraspad cezija u pacifičkom bakalaru 258 do 309 dana, ta se brojka poklapa i sa poluraspadom kod

demerzalnih riba ulovljenih blizu obala Fukushime. Također je zamijećeno da je ekološki poluraspad puno duži kod starijih i većih jedinki nego kod mlađih i manjih jedinki. Razlog tomu je vrlo vjerojatno različita brzina metabolizma i razina među starosnim i veličinskim kategorijama. To potvrđuju i niske razine cezija u jedinkama koje su rođene 2011. godine, kod njih se koncentracija raspršila u tijelu kroz rast.

U mjerenjima iz rujna 2015. godine visoko kontaminiranih⁴ jedinki, kao što je prikazano na slici 3, bilo je samo 3% kroz sve vrste i područja u obalama prefekture Fukushima i okolici, ne ubrajajući vrste s ekstremno malenim uzorcima. Vrste *Salvelinus leucomaenis leucomaenis* – istočnoazijska pastrvka i *Anguilla japonica* – japanska jegulja i u 2015. visoko su kontaminirane diadromne vrste, posebice u usporedbi s demerzalnim vrstama *Sebastes cheni* – japanski plavi morski brijez i *Hexadrammos otakii*, koje su visoko kontaminirane, ali spadaju unutar kriterija od 100 Bq. Jedinke su uspoređivane sa *Trachurus japonicus* – japanska skušom pelagičkom vrstom koja je imala nisku kontaminaciju. Osim ovih vrsta riba, visoko kontaminirana je bila i morska smeđa alga *Eisenia bicyclis* – morski hrast, Arame. (Yagi N., 2017.)



Slika 3: Prikaz uzorkovanih organizama sa preko 100 Bq/kg u periodu od travnja 2011. – srpnja 2017. godine (izvor: Yagi N., The State of Fisheries and Marine Species in Fukushima: Six Years After the 2011 Disaster)

⁴ Prema modelu: visoko kontaminirane jedinke imaju zbroj cezijeve izotopa veći od 100 Bequerela po kilogramu mokre težine organizma.

Sukladno s ovim analizama zakonska se zabrana lova u moru oko Fukushime periodično revizirala. Od prosinca 2013. godine zabranjeno je bilo loviti 40 morskih vrsta, a od siječnja 2015. ta brojka smanjena je na 35 vrsta. U listopadu 2017. godine broj vrsta koje je zabranjeno loviti te prodavati na ribarnici je 10 vrsta. Iz tog razloga populacije ključnih ribolovnih vrsta, posebice pacifičkog bakalara, pokazale su značajan porast nakon nesreće 2011. godine.

Zaključak

Nesreća u Fukushimi 1, nuklearnoj elektrani, uzrokovana je snažnim potresom i tsunamijem u ožujku 2011. godine. Smatra se da je nesreća sama po sebi bila vrlo ozbiljna, ali je njen utjecaj na okoliš pojačan s nekim od načina sanacije, poput izlivanja radioaktivne otpadne vode direktno u ocean. Zaista je sada kasno za donositi pametnija rješenja, tada su zaposlenici firme TEPCO donosili odluke brzo i sve kako bi spriječili još veću katastrofu. Iako je u samoj nesreći elektrana uništena, njeni reaktori nisu mogli biti samo tako ostavljeni, do prosinca 2011. godine trajalo je hlađenje reaktora.

Za sada je stanje u Fukushimi 1 stabilno i smatra se da je vrlo nizak rizik ponovne emisije radioaktivnosti. Ipak još se ulažu napor za potpunu dekomisiju nuklearne elektrane, dok se okoliš možda nikada neće vratiti na početno stanje. Dugotrajan učinak kontaminacije je još nepoznat, a informacije koliko se radijacije čuva u sedimentima i koliko bi moglo izaći iz naknadnih izvora, poput kopnenih voda, još nisu poznate. Ipak, mišljenje je brojnih znanstvenika da s obzirom na vrstu nesreće šteta do sada i nije bila tolika kao što se očekivalo. Zaključujem da je ipak morski okoliš sa svojim pripadajućim organizmima prošao puno bolje od kopnenog okoliša u okruženju nuklearne elektrane, djelomično zbog raspršivanja u oceanu, djelomično zbog posebne osmotske regulacije. Sada, gotovo 10 godina nakon nesreće, većina je hrane iz mora oko Fukushime sigurna za ljudsku prehranu. No, kao i svaka nesreća, i ova bi morala poslužiti kao lekcija kod buduće izgradnje nuklearnih elektrana i protokola u slučaju nesreće.

Literatura

- Baba M. (2013.): Fukushima accident: What happened? Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan
- Bailly du Bois P., Laguionie P., Boust D., Korsakissok I., Didier D., Fievet B. (2012.): Estimation of marine source-term following Fukushima Dai-ichi accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, vol 114
- Doi H., Takahara T., Tanaka K. (2012.): Trophic position and metabolic rate predict the long-term decay process of radiocesium in fish: a meta-analysis.
- Fisher N.S., Madigan D.J., Baumann Z. (2013.): Radioactive Cesium from Fukushima Japan Detected in Bluefin Tuna off California: Implications for Public Health and for Tracking Migration.
(https://www.researchgate.net/publication/273810901_Radioactive_Cesium_from_Fukushima_Japan_Detected_in_Bluefin_Tuna_off_California_Implications_for_Public_Health_and_for_Tracking_Migration)
- Furukawa F., Watanabe S., Kaneko T. (2012.): Excretion of cesium and rubidium via the branchial potassium-transporting pathway in Mozambique tilapia. *Fish Scientific*
- Kikkawa T, Yagi N, Kurokura H (2014) The state of concentration of radioactive cesium in marine organisms collected from the Fukushima coastal area: a species by species evaluation. *Bull Jpn Soc Fish Sci* 80:27–33
- Okamura H., Ikeda S., Morita T., Eguchi S. (2016.): Risk assessment of radioisotope contamination for aquatic living resources in and around Japan.
(<https://www.pnas.org/content/early/2016/02/23/1519792113>)
- Wada T., Konoplev A., Wakiyama Y., Nanba K. (2019.): Strong contrast of cesium radioactivity between marine and freshwater fish in Fukushima. *Journal of Environmental Radioactivity* 204
- Wang C., Baumann Z., Madigan D.J., Fisher N.S. (2016.): Contaminated Marine Sediments As a Source of Cesium Radioisotopes for Benthic Fauna near Fukushima. *Environmental Science Technologies* (<https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02984>)
- Yagi N. (2016): Impacts of the nuclear power plant accident and the start of trial operations in Fukushima fisheries.

- Yagi N. (2017.): The State of Fisheries and Marine Species in Fukushima: Six Years After the 2011 Disaster
- www.phys.org/news/2019-08-fukushima-disaster-key-takeaways-years.html
- www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/245220.pdf (Miyagi Prefecture (2014) Restricted items for marketing and distributions as of February 18, 2014.)
- wiseinternational.org/campaign/fukushima-disaster?gclid=Cj0KCQjw7Nj5BRCZARIsABwxDKJNXQNINMCtqdDtoKBeksVxBVl-AbBupntNaTZbARTQp5JERAm5dFYaAs5kEALw_wcB

Sažetak

Nakon razornog potresa i tsunamija u ožujku 2011. godine, u japanskoj prefekturi Fukushima, bespovratno je bila oštećena Nuklearna elektrana Fukushima Daiichi. Zbog oštećenih zgrada elektrane i eksplozija, radioaktivni materijal izašao je u okoliš. U ovom seminaru ću iznijeti tijek nesreće, te utjecaj radioaktivnih čestica na organizme i sedimente u oceanu. Nakon same nesreće u organizmima su zabilježene vrlo visoke vrijednosti radioaktivnosti, te brojke su se spustile ovisno o staništu, vrsti, veličini, pa čak i starosti jedinke u vrijeme nesreće.

Summary

After a devastating earthquake and tsunami in March of 2011., in the Japanese prefecture Fukushima, the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant was destroyed. Because of the damaged buildings and explosions, the radioactive material started affecting the environment. In this seminar I will write about the course of the accident and the effects of radioactive particles on organisms and sediments in the ocean. After the accident radioactivity levels in organisms were very high, and they got lower during time depending on the habitat, species, size, and even on age of the individual in time of the accident.