

201522041A

厚生労働科学研究費補助金
(食品の安全確保推進研究事業)

食品中の放射性物質濃度の基準値に関する
影響に関する研究

平成 24-26 年度 総合研究報告書

研究代表者 明石 真言

放射線医学総合研究所

平成 27(2015)年 3 月

目次

| | |
|--|----|
| I. 総括研究報告 | |
| 食品中の放射性物質濃度の基準値に関する影響に関する研究 | 3 |
| II. 分担研究報告 | |
| 1. 食品加工や調理に伴う食品中の放射性物質の濃度変化に関する研究 | 13 |
| 青野 辰雄(放射線医学総合研究所 福島復興支援本部) | |
| 2. 農畜産物中放射性核種の測定及び低減化に関する研究 | 29 |
| 塚田 祥文(福島大学 環境放射能研究所兼うつくしまふくしま未来支援センター) | |
| 3. 食品中放射性セシウム濃度基準値の妥当性検証 | 41 |
| 高橋 知之(京都大学 原子炉実験所) | |
| III. 研究成果の刊行に関する一覧 | 59 |

I. 総括研究報告

厚生労働科学研究費補助金 (食品の安全確保推進研究事業)

食品中の放射性物質濃度の基準値に関する影響に関する研究 主任研究報告書

研究代表者 明石 真言 (放射線医学総合研究所)

研究要旨

平成 23 年 3 月の東京電力(株)福島第一原子力発電所(FD1NPS)事故により食品の摂取による内部被ばくが懸念された。厚生労働省は平成 24 年 4 月以降、介入線量を年間 1mSv として、新たな基準値を適用している。これは放射性セシウム(Cs)濃度について基準値を設定し、その他の核種については、原子力安全・保安院(当時)が公表した放出量試算値のリストに掲載された核種のうち、半減期が1年以上であるストロンチウム-90 (^{90}Sr)、ルテニウム-106 (^{106}Ru)、プルトニウム-238 (^{238}Pu)、プルトニウム-239 (^{239}Pu)、プルトニウム-240 (^{240}Pu)及びプルトニウム-241 (^{241}Pu)を評価対象核種として、放射性 Cs との濃度比を推定することにより、その線量への寄与を考慮している。また、その他の評価対象外の核種は、モニタリング結果や核分裂収率、物理的半減期等から、放射性 Cs に比べて線量寄与が無視し得る程十分に小さいと考えられ、評価対象核種には含まれていない。つまり、濃度基準値の妥当性を評価するためには、食品について、内部被ばくに対する核種の寄与率の状況を把握する必要がある。

本研究では食品(農畜水産物等)中の放射性 Cs とその他の長半減期放射性核種濃度及び調理加工に伴う濃度変化について調査を行い、基準値作成に用いられた濃度比との比較や食品の摂取に起因する内部被ばく線量に対する放射性 Cs の寄与率の推定から、食品中の放射性 Cs 濃度基準値の妥当性の検証を行うこととした。そこで食品中の放射性物質濃度の基準値に対する影響に関する研究を行うために、食品加工や調理に伴う食品中の放射性物質の濃度変化に関する研究及び環境中における放射性物質動態の実態把握に関する研究を実施した。

FD1NPS の水素爆発や高濃度汚染水流出の事故由来の放射性物質だけでなく、その後 FD1NPS から流出した放射性核種の影響を確認する必要もある。市場に流通する福島産水産物及び水産加工物の入手及び FD1NPS から 30km 圏内の海域の魚介類の採取を行い、これらの可食部の放射性核種の測定を行ったところ、食品中の基準値を超えた試料は、平成 25 年に檜葉町沖合で採取したコモンカスベのみで、その放射性 Cs 濃度は 109 Bq/kg-生重量であった。平成 25 年度に比べて平成 26 年度の魚介類中の放射性 Cs 濃度は約 1 割までに減少する傾向にあった。平成 26 年度の魚介類中の ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ 濃度

は検出下限値未満であった。また水産加工物については、生試料を乾燥して干物にしてもカリウム-40 (^{40}K)濃度は増加したが放射性 Cs は検出されなかった。生試料を煮だし実験を行った結果、放射性 Cs と ^{40}K 濃度が調理加工前に比べ調理加工後では 25-77%に低減した。つまり水産物については基準値導出における推定方法が妥当であることが示唆された。また試験栽培のシイタケを用いた実験室レベルで乾燥キノコの加工実験では放射性 Cs が 9 倍ほど高くなった。

福島県産品の食品(農畜産物)の放射性 Cs 濃度は、平成 24 年度に 7.2 ($<0.1\sim 40$) Bq/kg-生重量、平成 25 年度に 2.0 ($<0.1\sim 14$) Bq/kg-生重量と経時的に減少し、一般食品の基準値である 100 Bq/kg を超えた試料はなかった。また、 ^{90}Sr 濃度は、事故の影響が明確に見られた試料はなく、基準値の導出の考え方による $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ 濃度比よりも低いか、大気圏内核実験由来の濃度レベルにあり、基準値導出における推定方法が妥当であることが示唆された。事故由来の Pu は検出しなかった。安定元素濃度を利用して放射性 Cs 及び ^{90}Sr による内部線量評価を試みた結果、いずれについても介入線量レベルとして設定された年間 1mSv よりも極めて低い値であり、本基準値による規制が十分妥当であることが示された。

研究分担者

高橋 知之 京都大学原子炉実験所
青野 辰雄 放射線医学総合研究所
塚田 祥文 福島大学環境放射能研究所兼
うつくしま福島未来支援センター

研究協力者

福谷 哲 京都大学原子炉実験所
吉田 聡 放射線医学総合研究所

A.研究目的

平成 23 年 3 月の東京電力(株) (TEPCO) 福島第一原子力発電所(FD1NPS)事故により食品の摂取による内部被ばくが懸念された。厚生労働省は平成 24 年 4 月以降、介入線量を年間 1 mSv とし導出された新たな基準値を適用した。新たな基準値の導出においては、放射性セシウム(Cs)濃度について基準値を設定し、その他の核種につ

いては、原子力安全・保安院(当時)が 2011 年 6 月に公表した放出量試算値のリストに掲載された核種のうち、半減期が1年以上であるストロンチウム-90 (^{90}Sr)、ルテニウム-106 (^{106}Ru)、プルトニウム-238 (^{238}Pu)、プルトニウム-239 (^{239}Pu)、プルトニウム-240 (^{240}Pu)及びプルトニウム-241 (^{241}Pu)を評価対象核種として、放射性 Cs との濃度比を推定することにより、その線量への寄与を考慮している。また、これらの評価対象以外の核種は、モニタリング結果や核分裂収率、物理的半減期等から、放射性 Cs に比べて線量の寄与が無視し得る程十分に小さいと考えられ、評価対象核種には含まれていない。

内部被ばく線量に対する放射性 Cs 及びその他の核種の寄与率は、環境モニタリングによる土壤中放射性核種濃度や、これまでの環境移行パラメータによって推定されており、その評価は十分安全側と考えられるが、実際に食品中濃度を測

定した結果に基づくものではない。そのため、食品について測定・評価を行い、内部被ばくに対する主要核種の寄与率の状況を把握する必要がある。

本研究では食品（農畜水産物等）中の放射性 Cs 及びその他の長半減期放射性核種濃度及び調理加工に伴う濃度変化について調査を行い、基準値作成に用いられた濃度比との比較や食品の摂取に起因する内部被ばく線量に対する放射性 Cs の寄与率の推定から、介入線量を年間 1 mSv とした食品中の放射性 Cs 濃度基準値の妥当性の検証を行うことを目的とした。

B. 研究方法

1. 食品加工や調理に伴う食品中の放射性物質の濃度変化に関する研究

FD1NPS から 30 km 圏内の海域の魚介類の採取を行い、これらの可食部の放射性核種濃度の測定を行った。また市場に流通する福島産水産物及び水産加工物入手し、原材料及び加工品と放射性核種濃度の比較や調理加工に伴う放射性核種濃度の低減割合について調査を行った。また農産物ではシイタケについて、乾燥シイタケを作り、原材料との濃度比較を行った。

2. 農畜産物中放射性核種の測定及び低減化に関する研究

福島県内の JA 農作物直売所等で、福島県産品であることを確認した上で一般流通食品（農畜産物）試料を購入して、放射性 Cs、⁹⁰Sr 及びプルトニウム（Pu）を測定した。また、過去の大気圏内核実験によるフォールアウトに起因する農作物中放射性核種濃度の調査を行い、その濃度レベルや、規格基準値導出に用いられた濃度比と比較

検討した。また山菜や野獣肉も地域の季節食材として流通することから、それらの放射性 Cs 濃度と調理加工による低減割合について求めた。

3. 食品中放射性 Cs 濃度基準値の妥当性検証

平成 24～25 年度の食品試料中安定元素濃度を測定し、基準値導出に用いられた濃度比や、過去の大気圏内核実験によるフォールアウトに起因する農作物中放射性核種の濃度レベルと比較検討した。また安定カリウム（K）及び安定カルシウム（Ca）の摂取量を用いて、農畜産物の経口摂取による放射性 Cs 及び ⁹⁰Sr に起因する内部被ばく線量を評価し、⁹⁰Sr を考慮した内部被ばく線量と介入線量レベルを比較検討した。

C. 研究成果

1. 食品加工や調理に伴う食品中の放射性物質の濃度変化に関する研究

水産加工物については、生試料を乾燥して干物にしてもカリウム-40 (⁴⁰K) 濃度は増加したが放射性 Cs は検出されなかった。生試料を煮だし実験を行った結果、放射性 Cs と ⁴⁰K が 40-90% 減少し、調理加工に伴い放射性核種濃度の低減が確認された。食品中の基準値を超えた試料は、平成 25 年に檜葉町沖合で採取したコモンカスベのみで、その放射性 Cs 濃度は 109 Bq/kg-生重量であった。同海域では平成 25 年度に比べて平成 26 年度の魚介類中の放射性 Cs 濃度は約 1 割までに減少する傾向にあった。平成 26 年度の魚介類可食部中の ⁹⁰Sr 及び ²³⁹⁺²⁴⁰Pu 濃度は検出下限値未満であった。また、シイタケは商業的に生産される過程に準じた方法で乾燥を行ったところ、実験室レベルでは乾燥キノコへの加工に伴い製品

当たりの放射性 Cs 濃度が平均で9倍程高くなった。

2. 農畜産物中放射性核種の測定及び低減化に関する研究

平成 25 年度に一部試料について供試量を約 10 kg に増量し、 ^{90}Sr 濃度を定量することを試みた。(測定は平成 25 年度～26 年度に実施)。その結果、帰還困難区域外の農作物中 ^{90}Sr 濃度は、0.0047～0.30 Bq/kg-生重量の値であった。また、帰還困難区域内から採取した作物中濃度は、0.21 及び 0.31 Bq/kg-生重量であった。これらの値は、平成25年に福島県を除く国内から採取された作物中濃度(検出限界値以下～0.91 Bq/kg-生重量)と比較しても、範囲内にあることが確認された。農作物中 Pu 濃度は、きわめて低濃度であり、検出限界値以下～0.000085 Bq/kg-生重量であった。山菜、野獣肉の調理加工による放射性 Cs 濃度を求めた結果、多くの試料が低下した。特に、イノシシ肉の血抜き処理により放射性 Cs 濃度は約 5 分の一に低下した。

3. 食品中放射性 Cs 濃度基準値の妥当性検証

平成 24 年度に福島県内産で一般流通食品(農畜産物)試料を 40 試料購入して測定した結果、放射性 Cs 濃度は検出下限値未満から 40.2 Bq/kg-生重量であり、一般食品の基準値である 100 Bq/kg を超える農畜産物はなかった。また、食品中 ^{137}Cs 濃度は検出下限値未満から 25.2 Bq/kg-生重量であった。 ^{90}Sr 濃度はすべて検出下限値未満であった。

平成 25 年度の放射性 Cs 濃度は検出下限値未満から 14.0 Bq/kg-生重量であり一般食品の基準値である 100 Bq/kg を超える農畜産物はなかった。

また平成 24～25 年度の食品試料中安定ストロンチウム (Sr)濃度は 16～6600 $\mu\text{g}/\text{kg}$ -生重量と、その範囲は二桁にわたっていた。また安定 Ca 濃度も 16～3900 mg/kg-生重量とその範囲は二桁にわたっていた。安定 Cs 及び安定 K 濃度は平成 25 年度の試料のみ測定を行った。安定 Cs 濃度は検出下限値未満の試料が多く、濃度の範囲は検出下限値未満～5.7 $\mu\text{g}/\text{kg}$ -生重量であった。安定 K 濃度は比較的変動範囲が小さく、1.2～7.5g/kg-生重量であった。

D. 考察

1. 食品加工や調理に伴う食品中の放射性物質の濃度変化に関する研究

水産加工物については、原材料(生魚の状態)からすべて内臓等が取り除かれ、機械乾燥や外干しが行われており、水分量の減少による濃縮よりも、加工工程における内臓部等の除去や洗いによって放射性物質が流出したと考えられた。また煮だし調理加工に伴い、体液と共に放射性物質が流出したと考えられる。FD1NPS から 30km 圏内の海域の魚介類中の放射性 Cs 濃度の低下は、海水や餌となるプランクトン類中の放射性 Cs 濃度が事故前のレベルまで下がっていることや堆積物中の濃度も年々低下していることが要因と考えられる。中層魚に比べて、底層魚は底生生物を捕食する影響で放射性 Cs 濃度が高い傾向になることが考えられる。平成 26 年度に採取した魚介類可食部中の ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ は検出されなかったことから、福島県沖の魚介類についてもフォールアウトによる ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ が含まれている可能性を考慮しても、 ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ 濃度は基準値の導出の考え方による $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ 及び $^{239+240}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$ 濃度比よりも低いか、大気圏内核実験由来

の濃度レベルにあり、基準値導出における推定方法が妥当であることが示唆された。

シイタケは Cs を吸収・蓄積するのに対してストロンチウム(Sr)濃度は低いことから、食品として、放射性 Cs に対する放射性 Sr の寄与率は基準値導出における推定方法よりも低いと考えられる。

2. 農畜産物中放射性核種の測定及び低減化に関する研究

FDINPS から西 5 km の帰還困難区域内で採取したカボチャとキャベツについては、実測値が評価値を下回り評価が妥当であったことが示された。一方、帰還困難区域外で採取した試料についても、3 試料(コマツナ、キュウリ、食用菊)を除く評価値が実測値を下回り妥当性が示された。一方、評価値が実測値を上回った 3 試料については、土壤中 ^{90}Sr 濃度に事故の寄与が見られないこと、作物中 ^{90}Sr が福島県外で採取された作物中濃度と同様であったことから、大気圏核実験由来であったと考えられた。

また、農作物中 Pu については、濃度が極めて低かったために、事故由来の判断基準となる $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比を確定することができなかった。本事故由来による $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比は 0.323~0.330 と報告されているが、本研究で求めた土壤中 $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比はその値とは異なり、帰還困難区域内から採取した土壤試料も含め、0.171~0.197 と大気圏核実験由来 (0.180 ± 0.007) の値と一致した。また調理加工により山菜や野獣肉中放射性 Cs 濃度は減少し、特にイノシシ肉は血抜きによって大きく減少した。これは、植物細胞(細胞壁)と動物細胞(細胞膜)の構造上の違いがあると推測される。

3. 食品中放射性 Cs 濃度基準値の妥当性検証

本研究で検出された ^{137}Cs 濃度及び ^{90}Sr 濃度検出下限値と、過去のフォールアウトの影響、及び評価に用いられた核種濃度比の比較検討を行った。その結果、 ^{90}Sr 濃度は過去の大気圏内核実験由来の濃度レベル以下と推定されたが、葉菜類、豆類、果菜類については、フォールアウトによる ^{90}Sr が含まれている可能性を考慮しても、 ^{90}Sr 濃度は基準値の導出の考え方による $^{90}\text{Sr} / ^{137}\text{Cs}$ 濃度比よりも低く、基準値導出における推定方法が妥当であることが示唆された。

本研究によって得られた ^{137}Cs 濃度から農畜産物摂取による被ばく線量を試算した結果、極めて保守的な仮定であっても年間 1 mSv を大幅に下回っており、なおかつ平成 25 年度は平成 24 年度に比べて減少していることが明らかとなった。

また、安定元素濃度を利用して、平成 25 年度採取試料の濃度から推定した内部被ばく線量の評価結果は、フォールアウトによる ^{90}Sr の寄与を含めても、介入線量レベルである年間 1 mSv を大幅に下回っていた。ただし、 ^{90}Sr に関する今回の推定結果については不確実性が大きく、より精度の高い推定を行うためには、試料数を増やすなどのより詳細な検討が必要と考えられる。

帰還困難地域における試料においても事故由来の Pu は検出されなかったこと、本研究も含めこれまでの食品試料の測定において ^{106}Ru が検出された事例がないことから、これらの核種による影響はほとんど無いと考えられる。

E. 結論

1. 食品加工や調理に伴う食品中の放射性物質の濃度変化に関する研究

魚類については丸干しや開きの加工処理を行うことによって放射性 Cs の濃度が増加することはなく、煮だし調理加工によってその濃度が減少することが明らかとなった。

福島沖の試験操業海域で採取した魚介類について、年々放射性 Cs 濃度は減少していることが明らかとなった。魚類可食部に本事故由来の ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ は検出されなかった。つまり本事故による影響は確認できなかったことから、水産物に対する基準値導出における推定方法も妥当であることが示唆された。またシイタケは実験室レベルで試験用の乾燥キノコに加工することで放射性 Cs が 9 倍ほど高くなった。

2. 農畜産物中放射性核種の測定及び低減化に関する研究

本研究では、福島県において福島県産農畜産物に限定し、一部帰還困難区域内の試験圃場で栽培された作物についても測定を行うことにより、基準値策定時の妥当性について検証した。FD1NPS から西 5 km の帰還困難区域内にある大熊町の試験圃場の土壌で栽培された農作物中 $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ 濃度比は、評価値よりも低く、その妥当性を検証した。大気圏核実験由来の ^{90}Sr と考えられる一部試料で評価値を上回ったが、多くは評価値より低い $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ 濃度比であった。

Pu については作物中濃度がきわめて低濃度のため、大気圏核実験か事故由来の Pu かの由来を判定することができなかった。しかしながら、作物中 Pu は土壌から移行するため、精度良く測定することができる土壌中 $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子数比について確認した。その結果、土壌中 Pu は事故由来ではなく大気圏核実験由来であった。よって、作物中 Pu も大気圏核実験由来であると考えられる。

山菜や野獣肉は、調理加工により放射性 Cs 濃度が低減化するため、それら食品中濃度を直接測定した結果より調理加工後の値は、低くなる。そのため、食品中濃度から評価される被ばく線量より、調理加工された食品を摂取することによる被ばく線量は小さな値になると考えられる。

調理加工により山菜や野獣肉中放射性 Cs 濃度は減少し、特にイノシシ肉は血抜きによって大きく減少した。これは、植物細胞(細胞壁)と動物細胞(細胞膜)の構造上の違いがあると推測される。

3. 食品中放射性 Cs 濃度基準値の妥当性検証

本研究では、福島県内において福島県産品の食品(農畜産物)を平成 24 年度及び平成 25 年度にそれぞれ 40 個及び 42 個購入し、放射性 Cs 濃度、 ^{90}Sr 濃度及び安定元素濃度を測定した。その結果、一般食品の基準値である 100 Bq/kg を超える農畜産物はなかった。なお、 ^{90}Sr 濃度は、測定を実施した平成 24 年度の試料において、全て検出下限値未満であった。

本研究において測定された ^{137}Cs 濃度及び ^{90}Sr 濃度の検出下限値を、過去の大気圏内核実験によるフォールアウトに起因する、平成 12 年～平成 22 年における農作物中 ^{137}Cs 及び ^{90}Sr の濃度の範囲、及び食品中放射性 Cs 基準値の導出の際に評価した核種濃度比と比較検討した。その結果、葉菜類・豆類・果菜類については、 ^{137}Cs 濃度が比較的高い試料においても ^{90}Sr 濃度は検出下限値未満であり、基準値導出における推定方法が妥当であることが示唆された。

本研究によって得られた測定結果から推定した内部被ばく線量の評価結果は、フォールアウトによる ^{90}Sr の寄与等他の核種の影響を含めても、介入線量レベルである年間 1 mSv を大幅に下回っ

ていた。これらの結果から、事故に起因する放射性 Cs 以外の核種の影響は極めて小さく、⁹⁰Sr 等の他の放射性核種の寄与を安全側に考慮した放射性 Cs に対する基準値の算定値は、妥当であったと考えられる。

F.研究業績

論文発表

1. T. Aono, Y. Ito, T. Sohtome, T. Mizuno, T. Igarashi, J. Kanda, T. Ishimaru: Observation of radionuclides in marine biota off the coast of Fukushima prefecture after TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, Proceedings of the International Symposium on Environmental Monitoring and Dose Estimation of Residents After Accident of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Stations, p.62-65, 2012.
2. 青野辰雄、鄭建、府馬正一、久保田善久、渡辺嘉人、久保田正秀、溝口雅彦、尾崎和久、早乙女忠弘、五十嵐敏、伊藤友加里、神田穰太、石丸隆、吉田聡: 福島沿岸における海洋生物中の放射性核種について, Proceedings of the Workshop on Environmental Radioactivity (KEK Proceedings), 203-205, 2012.
3. 塚田祥文: 環境中放射性物質の農作物への移行と飲食物の新しい基準値について, 土づくりとエコ農法, 44, 2-11, 2012.
4. 高橋知之: 食品中放射性核種濃度の新たな規格基準, 日本原子力学会誌, 54, 602-605, 2012.
5. 国分牧衛、南條正巳、日塔明広、塚田祥文、根本圭介、Peter Slavich、島田和彦、近藤始彦、井上眞理: 東日本大震災からの農業再生と作物生産技術, 日本作物学会紀事, 82, 86-95, 2013.
6. 高橋知之: 食品中放射性核種濃度基準値の設定, 食品衛生学雑誌, 54(2), 97-101, 2013.
7. 青野辰雄、石丸隆、神田穰太、伊藤友加里、早乙女忠弘、五十嵐敏、吉田聡: 福島沿岸における海洋生物中の放射性核種について, Proceedings of the Workshop on Environmental Radioactivity (KEK Proceedings), 261 -264, 2013.
8. T. Aono, Y. Ito, T. Sohtome, T. Mizuno, S. Igarashi, J. Kanda, and T. Ishimaru: Observation of Radionuclides in Marine Biota off the Coast of Fukushima Prefecture After TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident, Radiation Monitoring and Dose Estimation of the Fukushima Nuclear Accident, S. Takahashi (ed.), 115 - 123, 2014-01, DOI: 10.1007/978-4-431-54583-5_11, Springer, 2014.
9. 青野辰雄、福田美保、山崎慎之介、吉田聡、伊藤友加里、石丸隆、神田穰太、早乙女忠弘: 福島沿岸域における海水とプランクトン試料中の放射性 Cs の濃度変動 について, Proceedings of the 15th Workshop on Environmental Radioactivity (KEK proceedings), 2014-7, 206-209, 2014.
10. 塚田祥文: 土壌中放射性セシウムの経時的な変化, 日本土壌肥料学雑誌 85, 77-79, 2014.

11. 山口克彦, 河津賢澄, 塚田祥文: 福島大学における震災復興への取り組みー住民の視点からの放射線問題への取り組みー, 土木学会誌 99, 50-53, 2014.

12. 塚田祥文, 小山良太: なすびのギモン(食品編), 1-33, 環境省, http://josen-plaza.env.go.jp/nasubinogimon/pdf/nasu-gimo_vol3_2pver.pdf, 2014.

H. 知的財産権の出願・登録状況

なし

I. 健康危険情報

なし

II. 分担研究報告

厚生労働科学研究費補助金 (食品の安全確保推進研究事業)

食品加工や調理に伴う食品中の放射性物質の濃度変化に関する研究 分担研究報告

分担研究者 青野 辰雄 放射線医学総合研究所
研究協力者 吉田 聡 放射線医学総合研究所

研究要旨

平成 23 年 3 月に発生した東日本大震災に起因する東京電力(株)福島第一原子力発電所(FD1NPS)事故によって大量の放射性物質が施設外の環境へ放出されたことにより、食品の摂取による内部被ばくが懸念された。このため、厚生労働省は、平成 24 年 4 月以降は、介入線量を年間 1 mSv とし、新たな基準値を適用した。放射性セシウム(Cs)濃度について基準値を設定し、原子力安全・保安院(当時)が公表した放出量試算値のリストに掲載された核種のうち、半減期が1年以上であるストロンチウム-90 (^{90}Sr)、ルテニウム-106 (^{106}Ru)、プルトニウム-238 (^{238}Pu)、プルトニウム-239 (^{239}Pu)、プルトニウム-240 (^{240}Pu)及びプルトニウム-241 (^{241}Pu)を評価対象核種として、放射性 Cs との濃度比を推定することにより、その線量への寄与を考慮している。その寄与率は、環境モニタリングや環境移行パラメータにより推定されており、食品を測定した結果に基づくものではない。食品中の放射性核種濃度を測定することにより、安全が担保されていることを検証することが必要不可欠である。さらに調理加工等に伴う放射性核種濃度比の変化を把握することは、この妥当性を検証の上でも重要である。そこで、食品加工や調理に伴う食品中の放射性物質の濃度変化に関する研究を実施した。

市場に流通する福島産水産物、水産加工物の入手及びFD1NPS から 30km 圏内の海域の魚介類の採取を行い、これらの可食部の放射性核種の測定を行ったところ、食品中の基準値を超えた試料は、楡葉町沖合で平成 25 年に採取したコモンカスベの 109 Bq/kg-生重量のみであった。平成 25 年度に比べて平成 26 年度の魚介類中の放射性 Cs 濃度は約 1 割までに減少する傾向にあった。平成 26 年度の魚介類中のストロンチウム-90 (^{90}Sr)及びプルトニウム-239+240 ($^{239+240}\text{Pu}$)は検出下限値未満であった。また水産加工物については、生試料を乾燥して干物にしてもカリウム-40(^{40}K)濃度は増加したが放射性 Cs は検出されなかった。生試料を煮だし実験を行った結果、放射性 Cs と ^{40}K 濃度の 25-77%低減が確認された。つまり水産物については基準値導出における推定方法が妥当であることが示唆され

た。また試験栽培のシイタケを用いた実験室レベルで乾燥キノコの加工実験では放射性 Cs が 9 倍ほど高くなった。

A. 研究目的

新たな基準は、放射性セシウム(Cs)濃度について基準値を設定し、その他の核種については原子力安全・保安院(当時)が公表した放出量試算値のリストに掲載された核種のうち、半減期が1年以上であるストロンチウム-90 (^{90}Sr)、ルテニウム-106 (^{106}Ru)、プルトニウム-238 (^{238}Pu)、プルトニウム-239 (^{239}Pu)、プルトニウム-240 (^{240}Pu)及びプルトニウム-241 (^{241}Pu)を評価対象核種として、放射性 Cs との比からその濃度を推定し、放射性 Cs に比べて目標とする線量への影響は無視し得る程十分に小さいと判断している。食品の摂取に起因する内部被ばく線量に対する放射性 Cs の寄与を精度良く評価するためには、食品加工や調理における放射性核種濃度比の変化についても把握する必要がある。福島県を含め国内で流通している魚介類は放射性 Cs が 100 Bq/kg-生重量以下であり、放射性 Cs に対する他の核種の寄与率を比較することが非常に難しい状況にある。一方で、東京電力(株)(TEPCO)福島第一原発発電所(FD1NPS)内では、タンク等に貯蔵した汚染水等の漏洩に関する報告が続いた。処理された汚染水は、90%以上の放射性 Cs が除去されるが、放射性ストロンチウム(Sr)等については処理水に残存した状態でタンク等に保管されている。平成 23 年 3 月の水素爆発等で大気に放出されたものや FD1NPS の 2 号機サブドレインからの高濃度汚染水の海洋への直接流出時における放射性核種の比に対して、放射性 Cs を除去した高濃度の放射性 Sr を含む汚染水が海洋へ流出した可能性が指摘されている。さらに放射性ストロンチウム(Sr)は

水産生物のカルシウム(Ca)を多く含む骨に濃縮されることが知られている。そこで食品中の放射性核種濃度の基準値を策定する際に推定された放射性 Cs の線量への寄与率について、その妥当性を確認するために「調理加工に伴う水産物中の放射性物質の濃度変動に関する研究」、「調理加工に伴うキノコ類等の放射性物質濃度変動に関する研究」及び「水産物中の放射性物質の濃度測定」を実施した。

B. 研究方法

1. 水産物中の放射性物質の濃度測定に関する研究

1.1. 調査協力と試料採取

本研究で対象とする水産物は、FD1NPS から 20km 圏内で採取される魚類とした。福島県水産試験場の協力を得て情報収集¹⁾を行い、TEPCO による水産物モニタリングで、多くの種類の魚類が採取できるモニタリング測点²⁾を選択し、平成 25 年 11 月に FD1NPS 北側の小高区村上(南相馬郡)沖合(北緯 37 度 33 分、東経 141 度 03 分)で相馬双葉漁業協同組合の漁船で刺し網により、また FD1NPS 南側の木戸川(檜葉町)沖合(北緯 37 度 15 分、東経 141 度 02 分)でいわき市漁業協同組合の漁船で刺し網により魚介類を採取した。また平成 26 年 11 月に FD1NPS 北側の南相馬沖合を、また平成 26 年 11 月と平成 27 年 1 月に FD1NPS 南側の木戸川(檜葉町)沖合(北緯 37 度 15 分、東経 141 度 02 分)でいわき市漁業協同組合の漁船で刺し網により魚介類を採取した。採取した魚類を表 1 に示す。

1.2. γ 核種の濃度の測定

試料となる魚介類は、できる限り体液等のドリップによる損失が少ないように半解凍の状態、可食部とアラ部(内臓、骨、鰓、頭、尾等の可食部以外)に分離し、乾燥、灰化後に、U8 容器に詰めて、Canberra 社製低バックグラウンド Ge 半導体検出器(GX2019)を用いて、24 時間の γ 核種の測定を行った。Ge 半導体検出器は、日本アイソトープ協会製の標準体積線源(5~50mm、9.5~95g、アルミナ)を用いて効率曲線を作成したものを用了。セシウム-134 (^{134}Cs)(604.7 keV)、セシウム-137 (^{137}Cs)(661.7 keV)、カリウム-40 (^{40}K)(1460 keV)の定量結果を記録した。これ以外の事故由来の γ 核種は計測されなかった。 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の検出下限値は、それぞれ 0.05 Bq/kg-生重量であった。

1.3. ^{90}Sr 及びプルトニウム-239+240 ($^{239+240}\text{Pu}$) 濃度の測定

水産物中の ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ 濃度は、FD1NPS 事故以前においてはそれぞれで、検出下限値以下~0.26 Bq/kg-生重量と検出下限値以下~0.07 Bq/kg-生重量の範囲であった。これらの分析には生重量として約 0.5~1kg の試料が必要であるため、同一種の個体の灰試料を合わせて分析試料とした。魚種はコモンカスベ、サバ、アイナメ及びサンマで、部位は可食部とした。灰試料を硝酸と過塩素酸により有機物の分解を行い、溶液試料とし、Sr 分析用とプルトニウム (Pu)分析用の試料に二分割した。Sr 分析用試料は、Sr レジンを用いて Sr の分離・精製を行い、炭酸 Sr 沈殿を作製し、Eurisis 社製低バックグラウンドベーターカウンターを用いて測定を行った。Pu 分析用試料は、

陰イオン交換樹脂法によりPuの分離・精製を行い、電着試料を作製し、Canberra 社製アルファスペクトロメーターで測定を行った。

2. 調理加工に伴う水産物中の放射性物質の濃度変動に関する研究

2.1. 調査協力と試料採取

本研究で対象とする水産物は、福島県と茨城県の海域で採取され各県内の港で水揚げされた魚を加工したもので、現在市販品として流通しているものとした。福島県は福島県水産試験場の協力を得て、情報収集を行い、福島沖で採取した水産物を地元で加工販売している地域を調査し、協力を要請した。研究の主旨を説明し、協力が得られたところは、福島県小名浜水産加工協同組合であり、3 社が対応した。また茨城県では那珂湊漁業協同組合は、理解が得られ、協力を得られることになった。そしてその地域で採取し、加工し、販売しているものについて購入した。また、加工品の原材料についても合わせて購入を行った。

2.2. 調理加工に関する影響

福島沖で採取した魚類の可食部について、一定重量を充填した調理用パックに生重量と同じ状態になるように純水を加えた。これをビーカーに入れ、魚類の煮物を想定し、150 mLの純水をパックが入ったビーカーに加え、これを 80~90 °Cの湯浴で 30 分加温した。加温後パックをビーカーから取り出し、軽く絞り、一度冷却した。このパックより取り出した試料は真空乾燥を行い、ミキサー等で粉碎後に乾燥試料とした。

2.3. γ 核種の濃度の測定

試料は、1.水産物中の放射性物質の濃度測定

の 1.2. γ 核種の濃度の測定と同様に測定を行った。

3. 調理加工に伴うキノコの放射性物質濃度変動に関する研究

3.1. 試料の入手と分類

福島県内の出荷制限地域で研究用に生産されたシイタケを入手し、乾燥シイタケの製造工程を研究室で行い、加工に伴うシイタケの濃度変動を調査した。生シイタケは、1回につき5 kg 程度を購入した。シイタケは個体によるばらつきが大きいと予測されるため、1個体ずつを試料とするのではなく、300 g ずつに取り分けた合計 15 個のバッチを分析試料とした。

また福島沖で採取した魚類の可食部について、一定重量を充填した調理用パックに生重量と同じ状態になるように純水を加えた。これをビーカーに入れ、魚類の煮物を想定し、150 mL の純水をパックが入ったビーカーに加え、これを 80～90 °C の湯浴で 30 分加温した。加温後パックをビーカーから取り出し、軽く絞り、一度冷却した。このパックより取り出した試料は真空乾燥を行い、ミキサー等で粉碎後に乾燥試料とした

3.2. 乾燥シイタケの加工

取り分けた 15 個のバッチから 6 個のバッチは生のまま冷凍した。また、冷凍しなかった残りの 9 個のバッチは乾燥しいたけに加工した。今回は、流通状態での濃度を把握するため、これらのうち、それぞれ 3 バッチについて放射性 Cs の測定を実施した。シイタケの乾燥は、商業的に生産される際の以下の条件を参照した。まず、シイタケをステンレス製の網上に広げて乾燥機の中に入れ、室温から 50°C まで 8 時間掛けて昇温し、その後

50°C の定温で 3 時間、55°C の定温で 8 時間、さらに、60°C の定温で 1 時間乾燥を行った。ただし、用いた乾燥機と商業的に利用される乾燥機の性能の違いから、乾燥には、より長時間かかり、十分に乾燥するまで、55°C の乾燥時間は合計で 72 時間まで延長した。乾燥したシイタケはミキサーで粉碎し、粉末試料とした。また生試料はそのままミキサーで粉碎したものを生試料とした。生シイタケのうち 1 つのバッチは、3 つの U8 容器に分けてそれぞれ分析した。

3.3. γ 核種の濃度の測定

粉末試料と生試料はそれぞれ U8 容器に詰めて、Canberra 社製低バックグラウンド Ge 半導体検出器(GX2019)を用いて、4 時間の γ 核種の測定を行った。Ge 半導体検出器は、日本アイントープ協会製の標準体積線源(5～50 mm、9.5～95 g、アルミナ)を用いて効率曲線を作成したものをを用いた。

C. 研究結果

1. 水産物中の放射性物質の濃度

平成 25 年と平成 26 年の測定結果を表 2～3 に示す。平成 25 年 11 月に採取した魚介類は、FD1NPS 北側の小高区村上(南相馬郡)沖合で、ヒラメ、イシガレイ、コモンカスベ、ケムシカジカとガザミ(甲殻類)の 5 種類と FD1NPS 南側の木戸川(檜葉町)沖合でヒラメ、アイナメ、コモンカスベ、ブリ、ニベとトラザメであった。いずれの魚介類も複数の試料を用いて、分析を行った。南相馬沖合では、魚介類可食部中の放射性 Cs 濃度(Bq/kg-生重量)は、高い順にコモンカスベ(68)、ヒラメ(66)、ケムシカジカ(34)とイシガレイ(14)であった。檜葉町沖合では、魚介類可食部中の放

放射性 Cs 濃度 (Bq/kg-生重量)は、高い順にコモンカスベ(109)、ヒラメ(66)、アイナメ(39)、ニベ(11)、ブリ(7)であった。コモンカスベは可食部で基準値の 100 Bq/kg-生重量を超えた。アラ部中の放射性 Cs 濃度は、南相馬沖合のコモンカスベ以外は可食部中の放射性 Cs 濃度の半分以下であった。コモンカスベのアラ部濃度は、可食部濃度の半分以上であった。これはコモンカスベの可食部重量は総重量の 30 %しかなく、60 %以上がアラ部であるためと考えられる。天然放射性核種の ^{40}K 濃度(Bq/kg-生重量)については、アラ部では 53~85 と魚種による違いは認められなかった。可食部の ^{40}K 濃度は檜葉町沖合ヒラメで 417 が最も高く、他は 86~160 の範囲にあった。

また平成 26 年 11 月に FD1NPS の北側で採取したサバ(n=7)の可食部及びアラ部の ^{134}Cs 濃度(Bq/kg-生重量)は、0.05 (検出下限値)以下で、サバの可食部の ^{137}Cs 濃度(Bq/kg-生重量)は 0.08 であった。平成 26 年 11 月に FD1NPS の南側で採取した魚介類の可食部中の放射性 Cs 濃度(Bq/kg-生重量)は、コモンカスベ(9)、ガザミ(<1)とカツオ(1)であった。平成 27 年 1 月では、ババカレイ(18)、マコカレイ(6)、コモンカスベ(6)、アイナメ(3)及びヒラメ(2)であった。平成 25 年度の調査に比べて、同一魚種の可食部濃度は約 90 %も減少していることが明らかとなった。同一魚種の試料間の濃度差を比較するために、個体毎に測定を行い、その結果を図 1 に示した。 ^{137}Cs よりも濃度の高い ^{40}K は平均値に対する標準偏差の割合は 25 %以下であった。 ^{137}Cs 濃度については平均値に対する標準偏差の割合は甲殻類と中層魚では 30 %以下であったが、底生魚のコモンカスベは 40 %以上であった。

コモンカスベ、サバ、アイナメ及びサンマ可食

部中の ^{90}Sr 濃度は検出下限値(0.2 Bq/kg-生重量)未満であった。また同試料中の $^{239+240}\text{Pu}$ 濃度も検出下限値(0.01 Bq/kg-生重量)未満であった。つまり FD1NPS 事故による影響は認められなかった。

2. 調理加工に伴う水産物中の放射性物質の濃度変動に関する研究

2.1. 加工食品に関する影響

協力が得られた福島県小名浜水産加工協同組合と茨城県那珂湊漁業協同組合から入手した試料について得られた結果を表 4 に示す。原材料(生魚の状態)の放射性 Cs 濃度は、 ^{134}Cs は検出されず、 ^{137}Cs が 1~3 Bq/kg-wet 以下の検出下限値以下であった。加工品は 110 °Cで乾燥し恒量になった際の乾燥試料濃度を示した。こちらも水分がほとんどない状態でも放射性 Cs 濃度は、 ^{134}Cs と ^{137}Cs 共に 1~3 Bq/kg-dry 以下の検出下限値以下であった。 ^{40}K については、原材料、加工食品共に検出できた。FD1NPS により放出された放射性核種が検出されなかったこと、Cs とカリウム(K)は化学的性質が類似し、生体内で特異的な部位に濃縮することがないことから、 ^{40}K を用いて濃度変化の検証を行った。まず ^{40}K の原材料から加工品(販売時)への放射性物質の濃度残存率を求めたところ、16~48 %であった。今回調査した加工食品は、原材料からすべて内臓等が取り除かれ、機械乾燥や外干しで行われており、水分量の減少による濃縮よりも、加工工程における内臓部等の除去や洗いによる流出による影響が大きいことが考えられる。

2.2. 調理加工に関する影響

調理加工に伴う魚類可食部中の放射性 Cs と ^{40}K 濃度の変動を表 5~6 に示す。今回は乾燥試料を乾燥率から生重量と同じ状態になるように戻し、その試料を用いて、煮物を想定して実験を行った。一部の魚類(檜葉町沖合のヒラメおよびコモンカスベ)では濃度の減少が確認できなかったが、残りのほとんどの試料で調理前の濃度に対して、調理後の濃度は放射性 Cs と ^{40}K は共に 25-77% 低減した。

3. シイタケ中の放射性物質の濃度

生シイタケと乾燥シイタケ中の放射性物質の定量結果を表 7 に示す。今回の試料は市場に流通するものではないが、放射性 Cs の値は食品の規制値(100 Bq/kg)を超えていた。バッチごとのバラツキは大きく、試料の調整方法等に十分な検討が必要であることが明らかである。 ^{40}K は、生シイタケでは検出限界値以下であり、乾燥シイタケの一部で平均 693 Bq/kg の値が得られた。野生キノコを含めたキノコ中の ^{40}K は、種類によらず 1000 Bq/kg-dry 程度であることが知られており³⁾、乾燥シイタケで得られた値は、妥当であるといえる。乾燥シイタケへの加工に伴う放射性 Cs の濃縮は、平均 8.7 ± 3.2 (範囲 5.0~10.9) 倍高くなることが明らかとなった。(表 8)。

D. 考察

1. 水産物中の放射性物質の濃度

平成 25 年に採取された魚介類のうち、食品中の基準値を超えた試料は、檜葉町沖合のコモンカスベだけであった。しかし平成 26 年に採取した魚介類から、食品中の基準値を超えた試料はなかった。TEPCO のモニタリング結果でも、FD1NPS の港湾外では高い放射性 Cs 濃度の魚

介類は検出され難い状態にある⁴⁾。これはサンプリングを行った海域での海水中の放射性 Cs 濃度は数~数十 mBq/L で、これは事故前の海水中の放射性 Cs 濃度の約 2 mBq/L に対して数倍から十倍程度のレベルまで海水中の放射性 Cs 濃度が下がっていること、また平成 25 年には同海域におけるプランクトン試料中の濃度が、事故前の濃度レベルまで下がっていること⁵⁾や海底堆積物中の濃度は底質組成により海域によって濃度差が大きいこと⁶⁾があげられる。そのため回遊魚に比べて、底層に生息し、底生生物⁷⁾を捕食するヒラメやコモンカスベのような底層魚では放射性 Cs 濃度は高い傾向にあることが考えられる。水産総合研究センターによる水産物 Sr 等調査結果⁸⁾では、平成 26 年度の分析試料から ^{90}Sr は検出下限値未満(0.001 Bq/kg-生重量)で、 $^{239+240}\text{Pu}$ は検出下限値未満(0.001 Bq/kg-生重量)~0.0022 Bq/kg-生重量であった。今回、平成 26 年度に採取した魚介類可食部中の ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ は検出されなかったことから、福島県沖の魚介類についてもフォールアウトによる ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ が含まれている可能性を考慮しても、 ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ 濃度は基準値の導出の考え方による $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ 濃度比及び $^{239+240}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$ 濃度比よりも低いあるいは、大気圏内核実験由来の濃度レベルにあることが考えられる。

2. 調理加工に伴う水産物中の放射性物質の濃度変動に関する研究

2.1. 加工食品に関する影響

魚類については、丸干しや開きの加工を行うことで、放射性核種の濃度が減少した。原材料(生魚の状態)からすべて内臓等が取り除かれ、機械乾燥や外干しが行われており、水分量の減少による濃

縮よりも、加工工程における内臓部等の除去や洗いによって放射性物質が流出したと考えられる。

2.2. 調理加工に関する影響

調理加工に伴う魚介類の溶出実験を行ったところ、ほとんどの試料で調理加工後に放射性 Cs と ^{40}K 濃度が 25-77%程低減する結果が得られた。魚種毎の両核種濃度の低減率がほぼ同じであり、加工に伴い体液等の流出した結果、放射性 Cs と ^{40}K 濃度が減少したことが考えられる。

3. シイタケ中の放射性物質の濃度

シイタケの加工については、生シイタケから乾燥シイタケへの加工に伴って、製品重量当たりの放射性 Cs 濃度は平均 8.7 ± 3.2 (範囲 5.0~10.9)倍高くなることが明らかとなった。「食品中の放射性物質の試験法の取扱いについて」⁹⁾では、乾燥シイタケの重量変化率を 5.7としている。今回は、試験的試料を実験室レベルで作製したものであり、放射性 Cs の濃縮率は、重量変化率と同じであり、得られた結果は概ね妥当と考えられる。また土壌-作物間の Sr の移行は、作物種類、土壌の性質によって大きく異なることが報告されている¹⁰⁾。シイタケを始めとするキノコは、放射性 Cs が菌糸を通して吸収・蓄積することが知られている。また、本事故前に実施された野生キノコ中の安定元素の分析結果では、キノコは植物に比べて、Cs やルビジウム (Rb)濃度が高く、反対に Sr や Ca 濃度が低いことが明らかになっている¹¹⁾。これらの傾向は土壌との間の移行係数についても同様である。すなわち、基質(原木)からシイタケへの放射性 Sr の移行が放射性 Cs より大きくなることは考え難く、乾燥に伴い乾燥シイタケ中の放射性 Cs 濃度が 10 倍程高くなっても、放射性 Sr 濃度が規格基準値の導入に影響を与えるほど、高くなる可能性

はないと考えられる。

E. 結論

1. 水産物中の放射性物質の濃度

FD1NPS 30km 圏内の海域において刺し網で採取した魚介類中の放射性 Cs、 ^{40}K 、 ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ 濃度を測定した。採取された魚介類の可食部で食品中の基準値を超えた試料は、平成 25 年は、檜葉町沖合のコモンカスベだけ、平成 26 年はなかった。また魚介類可食部中の ^{90}Sr 及び $^{239+240}\text{Pu}$ は検出下限値以下であり、本事故による影響は確認できなかった。つまり水産物に対する基準値導出における推定方法も妥当であることが示唆された。

2. 調理加工に伴う水産物中の放射性物質の濃度変動に関する研究

魚類については、丸干しや開きの加工を行うことで、放射性核種の濃度が減少した。さらに調理加工に伴い、可食部の放射性 Cs と ^{40}K 濃度が 25~77%程低減することが明らかとなった。

3. シイタケ中の放射性物質の濃度

シイタケは乾燥シイタケへの加工に伴い放射性 Cs 濃度が約 9 倍高くなった。シイタケは Cs を吸収・蓄積するのに対して Sr 濃度は低いことから、食品として、放射性 Cs に対する放射性 Sr の寄与率は基準値導出における推定方法よりも低いと考えられる。

F. 引用文献

- 1) 福島県水産試験場、基準値(100 Bq/kg)を超えた海産魚介類(月別海域別), 2014 年 5 月 22 日, <https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/65869.pdf>.

- 2) TEPCO, 魚介類の核種分析結果<福島第一原子力発電所 20km 圏内海域>,2013 年 10 月 18 日 ,http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/fl/smp/2013/images/fish02_131018-j.pdf.
- 3) Yoshida and Muramatsu: Environ. Sci. 7, 63-70, 1994.
- 4) TEPCO, 魚介類の核種分析結果<福島第一原子力発電所 20km 圏内海域>,2013 年 10 月 18 日 ,http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/fl/smp/2013/images/fish02_131018-j.pdf
- 5) 青野辰雄, 福田美保, 山崎慎之介, 吉田聡, 伊藤友加里, 石丸隆, 神田穰太, 早乙女忠弘: 福島沿岸域における海水とプランクトン試料中の放射性 Cs の濃度変動 について, Proceedings of the 15th Workshop on Environmental Radioactivity (KEK proceedings), 2014-7, 206-209, 2014.
- 6) S. Otsaka, T. Nakanishi, T. Suzuki, Y. Satoh, and H. Narita: Vertical and lateral transport of particulate radiocesium off Fukushima, Environ. Sci. Technol., 48, 12595–12602, 2014.
- 7) 福島県水産試験場:魚介類の餌料生物等の放射性セシウム濃度検査結果、2012 年 12 月 28 日 ,<https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/37752.pdf>
- 8) 水産庁、水産総合研究センターによる水産物ストロンチウム等調査結果(平成 27 年 3 月 30 日)、http://www.jfa.maff.go.jp/j/housyanou/pdf/strontium_2.pdf
- 9) 食品中の放射性物質の試験法の取扱いについて、食安基発 0315 第 7 号、厚生労働省医薬食品局食品安全部基準審査課、2012.
- 10) Uchida et al.: Journal of Nuclear Science and Technology 44, 628-640, 1994.
- 11) Yoshida and Muramatsu: J. Environ. Radioactivity, 41, 183-205, 1998.

G.研究業績

1. T. Aono, Y. Ito, T. Saotome, T. Mizuno, T. Igarashi, J. Kanda, T. Ishimaru: Observation of radionuclides in marine biota off the coast of Fukushima prefecture after TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, Proceedings of the International Symposium on Environmental Monitoring and Dose Estimation of Residents After Accident of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Stations, p.62-65, 2012.
2. 青野辰雄、鄭建、府馬正一、久保田善久、渡辺嘉人、久保田正秀、溝口雅彦、尾崎和久、早乙女忠弘、五十嵐敏、伊藤友加里、神田穰太、石丸隆、吉田聡: 福島沿岸における海洋生物中の放射性核種について, Proceedings of the Workshop on Environmental Radioactivity (KEK Proceedings), 203-205, 2012.
3. T. Aono, Y. Ito, T. Sohtome, T. Mizuno, S. Igarashi, J. Kanda, and T. Ishimaru: Observation of Radionuclides in Marine Biota off the Coast of Fukushima Prefecture After TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident, Radiation Monitoring and Dose Estimation of the Fukushima Nuclear Accident, S. Takahashi (ed.), 115 - 123, 2014-01, DOI: 10.1007/978-4-431-54583-5_11, Springer
4. 青野辰雄、石丸隆、神田穰太、伊藤友加里、早乙女忠弘、五十嵐敏、吉田聡: 福島沿岸に